DİJİTAL KÜTÜPHANE KANALI

Keyifli Okumalar Dileriz

Binlerce kategoride milyonlarca PDF e-kitap, ders kitapları, dergiler ve romanlara platformumuz üzerinden ücretsiz ulaşabilirsiniz.

RESMİ WEB SİTEMİZ

https://rantey.org

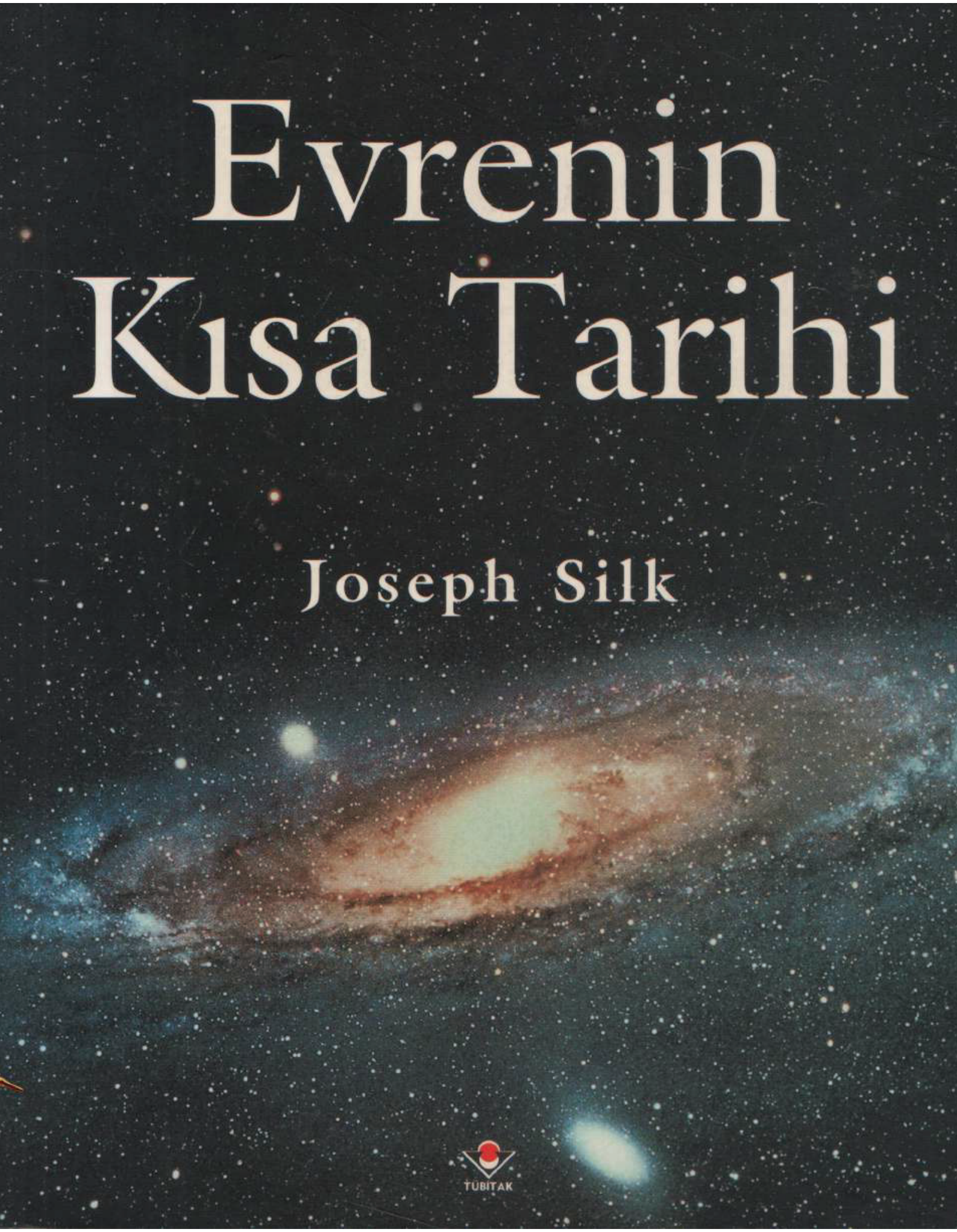
Yedek ve Duyuru Kanallarımız
Sitemize erişim engeli gelmesi veya adres değişikliği durumunda aşağıdaki kanallardan güncel giriş adresine erişebilirsiniz:

• Telegram: https://t.me/birkitapbir

• WhatsApp Kanalımız : https://whatsapp.com/channel/0029VbDHv8uE50Us4IvMoc0Y

Evrenin Kısa Tarihi

Joseph Silk



TÜBİTAK

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

TÜBİTAK Popüler Bilim Kitapları 46

Evrenin Kısa Tarihi - A Short History of the Universe
Joseph Silk
Çeviri: Murat Alev

First published in the United States
by
W.H. FREEMAN AND COMPANY, New York, New York and Basingstoke
Copyright 1994, 1997 by Scientific American Library All Rights Reserved

İlk olarak ABD'de W.H. FREEMAN AND COMPANY
(New York, New York ve Basingstoke) tarafından
(1994, 1997 - bütün hakları saklı olarak) basılmıştır.

© Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu, 1997
Tübitak Yayın Komisyonu Kararı ile Yayımlanmıştır

ISBN 975 - 403 - 073 - 1

1. Basım Mayıs 1997 (2500 adet)

Yayın Yönetmeni: Zafer Karaca
Yayın Koordinatörü: Sedat Sezgen
Teknik Yönetmen: Duran Akca
Sanat Yönetmeni: Ödül Evren Töngür
Uygulama: İnci Karakul

TÜBİTAK
Atatürk Bulvarı No: 221 Kavaklıdere-Ankara
Tel: 0.312. 427 33 21 Fax: 0.312. 427 13 36
e-mail: bteknik@tubitak.gov.tr
İnternet: www.bteknik.tubitak.gov.tr

Şelale Matbaacılık - Ankara

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

Evrenin Kısa Tarihi

Joseph Silk

ÇEVİRİ
Murat Alev

TÜBİTAK POPÜLER BİLİM KİTAPLARI

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

Çevirenin Notu

Kozmoloji ya da henüz yaygınlaşmamış olan Türkçe karşılığıyla evrenbilim, bilimlerin -deyim yerindeyse- en büyük ölçeklisi ve en geniş kapsamlısıdır. Bildiğimiz her şeyi içine aldığından kozmolojiyi *her şeyin bilimi* olarak tanımlamak yanlış olmaz. Kozmolojinin cevaplandırmaya çalıştığı temel sorular evrenin geçmişine, geleceğine ve yapısına ilişkin sorulardır. Basite indirgersek *evren nasıl başladı, evrenin bir sonu olacak mı, madde nasıl ortaya çıktı* gibi sorular tümüyle kozmolojinin ilgi alanına girer. Parçacık fiziği ile astronomiyi bir noktada buluşturan kozmoloji aynı zamanda maddenin temel taşları olan atom altı parçacıkların doğasını ortaya çıkarmak için çok yüksek enerjili ortamlara gereksinme duyan parçacık fiziğine de son derece doğal bir ortam sunar.

Kozmolojiyi gereğince anlayabilmek için alışageldiğimiz klasik kavramları veya düşünce biçimimizi kökten bir biçimde değiştirerek işe başlamamız gerekebilir. Hiçbir metafizik kavram içermeyen kozmolojinin cevaplandırmayı reddettiği sorular *büyük patlamadan önce ne vardı* türündeki sorulardır. Uzayın ve zamanın büyük patlama ile başladığı öngörüldüğünden bu sorulara cevap arayışı da soruların kendisi kadar anlamsızdır.

Teorik kozmolojinin öngördüğü etkiler deneysel olarak tek tek bulunmakta ve doğrulanmaktadır. Bu konudaki tek engel, deneylerin duyarlılık düzeylerinin teknik nedenlerle henüz oldukça düşük olması ve bu nedenle de sonuçlarının belirleyici olmamasıdır. Deneysel çalışmalardaki duyarlılık düzeyi yükseldikçe, ulaşılabilen bölgelerin ve zamanların sınırları genişledikçe içinde yaşadığımız evren konusundaki bilgilerimiz daha netleşecektir.

Elinizdeki kitap kendi alanında bir anlamda öncü niteliğindedir. Gerçekten de üniversitelerin astronomi bölümlerinde verilen kozmoloji derslerinin teknik düzeyi yüksek ders kitapları ve ders notları dışında Türkçemizde kozmoloji ile ilgili, herkesin anlayabileceği düzeyde kendi içinde bütünlüğü olan bir kaynak bulunmamaktadır. Genel astronomi ile ilgili kitaplarda da kozmolojiye ayrılan alan, bir bölümden, pek çok durumda ise birkaç sayfadan öteye gitmemektedir.

Neredeyse tüm ömrünü kozmolojiye adamış olan, bu konuda pek çok kitabı bulunan ve kozmolojinin önde gelen isimlerinden olduğu herkesçe kabul edilen Joseph Silk'in bu değerli kitabının çevirisini konuya uzaktan yakından ilgi duyan herkese yararlı olması umut ve dileği ile sunuyoruz. En büyük dileğimiz, ülkemizde de pek çok bilim adamının da üzerinde çalıştığı ve azımsanamayacak katkılar yaptığı kozmoloji alanında özgün telif eserlerin de yayınlanmaya başlamasıdır.

Murat Alev

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

İçindekiler

Önsöz	*I*
Giriş	*1*
1. Evrenin Yapı Taşları	*5*
2. Evrenin Genişlemesi	*31*
3. Kozmik Mikrodalga Fon Işınımı	*61*
4. İlk 10^{-33} Saniye	*77*
5. Baryonların ve Helyumun Oluşumu	*99*
6. Genişleyen Evren Modelleri	*115*
7. Karanlık Madde	*133*
8. Baryon Kökenli Karanlık Madde	*153*
9. Galaksilerarası Madde	*183*
10. Madde Yapısının Kaynağı	*197*
11. Büyük Ölçekli Yapı	*221*
12. Galaksilerin Oluşumu	*243*
Çemberin Kapanışı	*269*
Ek Okumalar	*272*

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

Önsöz

Şimşekler karanlık gökyüzünü aydınlatır. Birbiri ardısıra ateştopları gökkuşağı renkleri saçarak parlar ve yok olurlar. Çok geçmeden Pasifik'ten gelen sis, San Francisco Körfezi'ni gri bir battaniye gibi sararak bütün ışık ve sesleri yutar. Evrenin ilk dönemleri, belki de yıldızların ve ilk galaksilerin ortaya çıkışına tanıklık eden, çok daha büyük boyutlu böyle bir havai fişek gösterisine benziyordu. Astronomlar, ıssız dağ doruklarından ve yerkürenin çevresindeki yörüngelerden, en büyük teleskopların yardımıyla, yıldızlararası bulanıklığın ötesine, uzaklara ve eski zamanlara doğru bakarak evrenin oluşumu ve tarihiyle ilgili ipuçları yakalamaya çalışıyorlar. Fizikçiler yer altındaki mağaralarda kendi karmaşık teleskoplarını kurarak zamanın başlangıcından gizler taşıması beklenen egzotik parçacıkların izlerini araştırıyorlar.

Kozmik evrenin araştırılması birçok disiplinin ortak çalışmasını gerektirir. Bu devasa işte görev bölümü yapanlar arasında gökyüzünü araştıran astronomlar, uzay ve maddenin doğasına ilişkin karmaşık teoriler geliştiren matemetikçiler, temel parçacıkların en temel yapısını ortaya çıkarmak üzere deneyler tasarlayan fizikçiler ve en son cevapları -ya da en son soruları- araştıran bilim felsefecileri bulunur. Evrenin başlangıç destanını anlatırken daha bütün ve tutarlı bir çerçeve çizebilmek için birbirinin içine geçmiş olan bütün bu disiplinleri kullandım. Tüm bu alanların karışımı olarak yeni yeni gelişmekte olan ve evreni anlayabilmek için pek çok değişik yaklaşımın özünü yakalayan bu yeni disiplinin adı, parçacık astrofiziğidir. Bu yolu izlerken başarılı olup olamayacağımızın tahminini riske atamayız. Ama elde edeceğimiz sonuç ne olursa olsun, bu keşif süreci, yalnızca bu işte görev alan bilimadamları için değil, geceleri gökyüzüne bakan ve bu dev evrende kendi varlıklarının anlamını sorgulayan tüm insanlar için bir aydınlanma, zevk alma, zenginleşme, tutku, büyüme, akıl ve görüş kaynağı olacaktır.

Kozmolojinin çekiciliğini ilk kez Cambridge Üniversitesi'nde öğrenciyken derslerin baskısından bunaldığımda hissettim ve Dennis Sciama'nın derslerini izledim. Sciama'nın derslerindeki tutku karşısında şaşkınlıktan donakaldım ve geleceğimin yıldızlarda olduğunu anladım. Daha sonra Manchester laboratuvarında çalışırken, radyo astronom ve uzay fizikçisi Roger Jennison beni Harvard'da doktora çalışmasına yönlendirdi. Burada David Layzer'in büyüsüne kapıldım. Çok değişik ilgi alanları bulunan, kural dışı bir kozmoloji uzmanı olan Layzer, bana perspektif ve hangi alanda olursa olsun problemleri çözebilmem

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

için bir görüş kazandırdı. Woods Hole'da yaşadığım olağanüstü bir yaz sırasında George Field, kozmik yapının evrimini inceleyebilmem için gereken ilk hızı sağladı. Gizlerle dolu bu yolculuk hiç bitmedi ve beni hâlâ şaşırtıyor. Bunlar, kariyerimin başlangıcında beni etkileyen ve derinden teşekkür borçlu olduğum insanlardır. Fred Hoyle'un kurmuş olduğu, o zamanki adıyla Teorik Astronomi Enstitüsü'nde geçirdiğim bir yıllık doktora sonrası çalışma döneminde Martin Rees, Hubert Reeves, Gary Steigman ve Michael Warner'ın katıldığı yoğun tartışmalar ve düşünce alışverişleri, ufkumun genişlemesine yardım etti. Sonraki yıllarda tek tek adını sayamayacağım kadar çok sayıda meslekdaşım araştırmalarıma konu olan ilgi alanlarımı benimle paylaştılar. Onlara da çok teşekkür borçluyum.

Bu kitap, Berkeley'de vermekte olduğum bir dersin notlarından şekillendi. Sordukları sorularla burada tanımladığım fikirleri daha kesin bir biçimde ifade etmemi sağlayan ve kozmik konulardaki heyecanımı aktarabildiğimi umduğum pek çok öğrencime de teşekkürü bir borç bilirim. Orijinal metinler konusunda eleştirel tavsiye ve yorumlarda bulunan pek çok meslekdaşımın adını teşekkürlerimle burada anmak istiyorum: William Kaufmann, Jay Pasachoff, Martin Rees ve Douglas Scott. Scientific American Kütüphanesi'ndeki editörüm Susan Moran'a da bu projenin yönetimindeki çabalarından dolayı teşekkür ve saygılarımı sunuyorum. Fotoğrafların düzenlenmesindeki çabalarından dolayı Travis Amor'a, teşekkür ediyorum. Bu kitabın yazılmasının gerekliliğine beni ikna eden Scientific American Kütüphanesi'nden Jerry Lyons ve Jonathan Cobb'a da teşekkür borçluyum. Aralarında Ed Bertschinger, Roger Blandford, Francois Bouchet, Ted Bunn, Jack Burns, Avishai Dekel, Alan Dressler, George Efstathiou, Gus Evrard, Carlos Frenk, Margaret Geller, Richard Griffiths, Lars Hernquist, John Huchra, Nick Kaiser, Anthony Lasenby, David Malin, Don Mathewson, Yannick Mellier, Chris Mihos, Mike Norman, John Peacock, Jim Peebles, Bruce Peterson, George Smoot, Gordon Squires, Albert Stebbins, Michael Strauss, Frank Summers, Alex Szalay, Brent Tully, Martin White ve Simon White'ın da bulunduğu çok sayıda meslekdaşıma da görsel ve yazılı bilgi katkılarından dolayı, hatta bazen doğrudan doğruya kendi bilgisayarlarından ve teleskoplarından bilgi ve görüntü aktardıkları için kendimi borçlu hissediyorum. Umarım bu kitap, benim yardımlarından yararlanma onuruna eriştiğim doktora öğrencilerinin ve doktora sonrası çalışmaları yapan genç bilimadamlarının sınırsız heyecanını yansıtabilmeyi başarır.

Joseph Silk
Berkeley, Kaliforniya
1 Temmuz 1994

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

Giriş

Evren 15 milyar yıl önce gerçekleşen şiddetli bir patlamayla başladı. Klasik Yunan ve R
ma, eski Çin ve Hint efsanelerinin yerini alan modern hipotez budur. Teorilerimizin, atal
rımızın inanışlarına göre daha fazla gerçek içerdiği konusunda herhangi bir kuşkumuz yo
ama acaba biz onlardan daha mı zekiyiz? Belki bin yıl sonra büyük patlama da bir yirmin
yüzyıl efsanesi olarak anılacak.

Ben bu konuda iyimserim. Şu andaki paradigmalarımızı oldukça zorlayıcı buluyor v
gelecekte sahip oldukları ana özellikleri kaybetmeden daha büyük bir teori içinde yer al
caklarını düşünüyorum. Bu düşünce evrenin arkeolojisinin tanımlamasını haklı çıkarıyo
Bir yandan madde dağılımındaki en eski dalgalanmalara, diğer yandan tam oluşmuş gala
silere bakarak en eski yıldızlar ve en büyük yapıların ya da hemen hemen tüm kozmik evr
min tarihi yeniden inşa edilebilir.

Bu öykü daha önce de anlatılmıştı ama yeni bir yaklaşımda bulunmak için iki iyi nede
nimiz var. Daha sonra yapıların kaynaklandığı tohum dalgalanmaların keşfi, evrenin incel
mesine yeni bir soluk getirdi. Bu, büyük patlama teorisini çevremizde gördüğümüz büyük ö
çekli madde dağılımı ile uzlaştırmak için gerekli olan ve yaşamsal önemi olan zincirin eksi
halkasıydı. Bu halka kozmoloji bilimine bir gerçeklik duygusu kazandırdı. Kozmik perspe
tiften bakıldığında, çok eski geçmişteki bir başlangıç konusunda duyarlı ipuçları ortaya çık
ran galaksi öncesi maddelerin keşfedildiği söylenebilir.

Bunun kadar zorlayıcı bir başka neden de, temel parçacıklar fiziği ve astronomi alan
larından kaynaklanan pek çok dallanmalarıyla birlikte büyük patlama teorisinin çağdaş b
tanımının bulunmamasıdır.

Kozmoloji biliminin her zaman büyüleyici yanlarından biri, insanların, kozmolojiyl
amatör olsun profesyonel olsun ilgilenen herkesin, evrendeki yerimiz, evrenin yaratılışı v
varlığı ve hatta Tanrının varlığı gibi konulardaki soruları yanıtlama potansiyeline sahip oldu
ğunu düşünmesidir. Büyük patlama destanının astronomlar, matematikçiler ve fizikçiler ka
dar teologların ve felsefecilerin de ilgilerini uyandırması hiçbir şekilde raslantısal değildir.

Bu düşünürlerin bazıları teorinin, yaratılışın dinsel öyküsünü doğrulayacağını beklemi
lerdir. Bilim tarihçisi ve matematiksel fizikçi E.T. Whitaker 1942 yılında şöyle diyordu: "Mac

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

de evreninin gelişimini saf bilimsel yöntemlerle zaman içinde geriye doğru izlediğimizde şu anda bildiğimiz biçimleriyle doğa yasalarının uygulanmış olamayacağı kritik bir duruma ula-şırız: bu, 'yaratılışın' kendisidir. Fizik ve astronomi bizi her şeyin başlangıcına giden yolda yönlendirebilirler ve bir 'yaratılışın' olması gerektiğini gösterirler." 1951 yılında Whitaker'ın fikirlerinin etkisi altındaki Papa XII. Pius bir adım daha ileri gitti. Pontifical Bilimler Akademisi'nde yaptığı bir konuşmada topluluğa şöyle hitap etti: "ve bu nedenle fiziksel bilimlerdeki ispatların karakteristiği olan sağlamlıkla evrenin, o dönemlerde (yani beş milyar yıl kadar önce bir Yaratıcının ellerinden çıktığı doğrulanmıştır. Dolayısıyla Yaratılışın bir zamanı vardır. Bu nedenle bir Yaratıcı vardır. Tanrı vardır."

Bu sözleri duyan biri, Pontifical Akademisi Başkanı, ünlü kozmoloji uzmanı, büyük patlama teorisinin kurucularından biri olan Abbe Georges Lemaitre'in oturduğu yerde nasıl rahatsız olduğunu göz önüne getirebilir. Evrenin içinden çıktığı büyük patlamanın yaratılış mucizesiyle karşılaştırılması, büyük patlamadan önceki ilkel Atom evresini kilise doktrinlerine aykırı ve muğlak bir konumda bırakmıştı. Lemaitre, evrenin başlangıcını tanımlamak için fiziğin yeterli olacağı konusunda ısrar etti: "Kozmogoni, büyük ölçekteki atom fiziğidir."

Büyük patlama, hem bilimadamları hem de teologlar için yutulması zor bir ilaçtır. Bilimi popüler hale getiren ünlü astrofizikçi Arthur Eddington "Tanrısal doğanın ima edilen kesikliliğini kabul etmeye istekli değildi." Başkaları daha da ileri gittiler. Kozmolojinin öncülerinden E.A. Milne 1935 yılında basılan başyapıtı olan *Görelilik, Kütleçekimi ve Evrenin Yapısı* adlı kitabında şöyle bir sonuca varıyordu: "Evreni benzettiğimiz sistem, anlaşılabilir bir sistemdir. Yaratılış adını verdiğimiz yüce mantıksızlıktan başka hiç bir mantıksızlık içermez. Yaratılış da aslında fiziğe göre mantıksızlık olabilir ama metafiziğe göre değildir.... Teorik kozmoloji daha derin felsefi bir araştırmanın başlangıç noktasıdır."

Bazı bilimadamları, teologlara göre evrenin başlangıcının nasıl olduğunu anlamak için savaşı kabul ettiler. Astronom Robert Jastrow, kozmoloji uzmanlarının ikilemini, teologlarca da çok sevilen şu sözlerle tanımladı: "Sanki bilim, yaratılışın üzerindeki giz perdesini kaldırmayı hiçbir zaman başaramayacakmış gibi görünüyor. Mantığın gücüne inanan bilimadamı için öykü, kötü bir rüya gibi bitiyor. Cehalet dağlarına tırmanmıştır; tam en yüksek tepeyi fethetmek üzere yolunun üzerindeki son kayayı aştığı sırada yüzyıllardır orada oturan teologlar tarafından karşılanmıştır."

Bunun tersine bazı önde gelen kozmoloji uzmanları kozmoloji teorisini kurarken herhangi bir ilahi varlığın yardımına ihtiyaç duymamışlardır. Bunun için uygun olan yollardan biri zama-

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

nın kendisinin de büyük patlamayla birlikte yaratıldığını öne sürmektir. Bu, aslında çok köktenci bir fikir değildir. Aziz Augustine beşinci yüzyılda şöyle yazmıştır: "Dünya ve zamanın tek bir başlangıcı vardır. Dünya, zamanın içinde yaratılmadı, zamanla aynı anda yaratıldılar." Fizikçi Steven Weinberg'e göre bu, oldukça erken farkedilmiş bir kavramdı: "Bir başlangıcın olması en azından mantıksal açıdan mümkündür. Bu andan önce ise zamanın da herhangi bir anlamı yoktur."

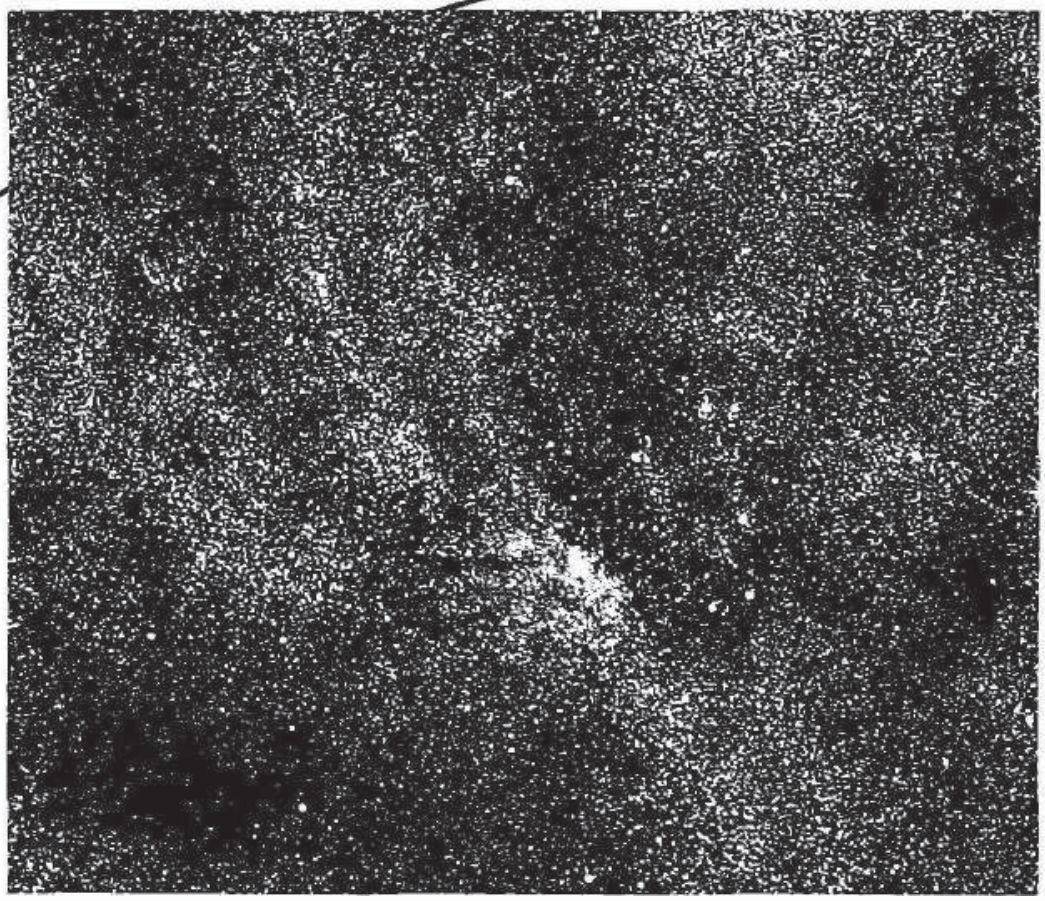
Bununla birlikte matematiksel fizikçi Stephen Hawking'in işaret ettiği gibi, zamanın ve uzayın başlangıcı gibi kavramların, gelişmekte olan Kuantum kütleçekimi teorisinden sonra tanımlanması daha uygun olur. Bu durumda, "Uzay-zamanın herhangi bir sınırı yoktur ve bu nedenle sınırdaki davranışları incelemek gereksizdir. Bilim yasalarının çöktüğü hiçbir tekillik yoktur, bu nedenle de sınır şartlarını koymak için Tanrının yardımına ya da yeni yasalara gerek duyulacak, uzay-zamanın hiçbir sınırı bulunmaz. Şöyle de denebilir: "Evrenin sınır şartı, hiçbir sınır bulunmamasıdır." Evren kendini içerir ve kendi dışındaki hiçbir şeyden etkilenmez. Yaratılamaz ve yok edilemez. Yalnızca olur". Bir başka deyişle, her zaman böyle olduğu için şu anda da böyledir.

Kozmik agnostisizmin (bilinemezcilik) en güzel ifadesi 1920 yılında gene Arthur Eddington'dan gelmiştir: "Bilim gidebildiği yere kadar ilerlediğinde, aklın doğaya vermesi gerektiğinden fazlasını doğadan aldığını anladık. Bilinmeyenin kıyılarında acayip ayak izleri bulduk. Bu ayak izlerinin kökenini açıklayabilmek için birbiri ardı sıra sağlam teoriler kurduk. Ve sonunda bu ayak izini bırakan canlıyı yeniden üretmeyi başardık. O da ne? Bu iz bize aitti!"

Kozmolojideki keşifler ve hamleler nefes kesici bir hızla sürmektedir. Teologların bu yarışı kopmadan sürdürmeleri gittiçe daha zor hale gelmektedir. Aynı zamanda kozmoloji uzmanları ara sıra ortaya çıkan teoloji metaforlarıyla uğraşmaktan da vazgeçmiyorlar. Görüntü yağmuru, 1992 yılında kozmik mikrodalga fonundaki minik dalgalanmalar keşfedildiğinde en yüksek düzeyine ulaştı. Bilimadamlarından daha az seçici davranan tüm dünya gazeteleri, bu kozmik bağlantının üzerine atladılar. Papa XII. Pius'un yeni kozmolojiyi onaylamasından 40 yıl sonra en çok sözü edilen örnekler, uzun süredir aranmakta olan dalgalanmaları Tanrıya atfedenlerdi. Bunlar arasında "Onun yüzü", "Onun elyazısı", "Onun aklı" sayılabilir.

Böyle cümlelerin önemini anlayabilmek için, modern kozmolojinin yaptığı işlerden birini anlaşılabilir düzeyde ele almak yardımcı olabilir. İşte bu kitap, böyle bir amaca adanmıştır. Kitabın bölümlerinin, böylesi bağlantıların bütün önemiyle anlaşılması -ve eklemekte tereddüt ediyorum, doğrulanması değil- amacıyla aramızda bulunan ve kozmolojiyle amatör düzeyde ilgilenen insanlar için anlaşılabilir olduğunu umuyorum.

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org



Yay (Sagittarius) Takımyıldızı yönündeki Samanyolu'nun merkez bölgesinin 2 mikrometre dalgaboyundaki kızılötesi görüntüsü

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

Evrenin Yapı Taşları

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

Çağlar boyunca kozmologlar evrene bakış açılarını, evrenin temel doğasına kabul ettirmeye çalıştılar. Çağdaş astronomlar da bu konuda bir istisna değil. Yirminci yüzyılda galaksi dışı evren keşfedilmeye başlandığında, kozmologlar kendilerini evrenin nasıl olması gerektiği konusundaki görüşlerini birleştirmek zorunda hissettiler. 1931 yılında bir matematikçi ve teolog, aynı zamanda da Birmingham'ın Anglikan Piskoposu olan Ernest Barnes başka şeylerin yanısıra, doğanın sonsuz evrenden nefret ettiğini öne sürdü. Yıllar sonra, kara delik kavramının babası olan fizikçi John Archibald Wheeler, sonlu evren kavramını tartışarak bu görüşü yeniden gündeme getirdi. Albert Einstein'le başlayan diğerleri de Platon'un evrenin bir merkezi olmaması ve evrende tercihli bir yön bulunmaması gerektiği yönündeki fikirlerini kabul ettiler. Bu varsayımlar ancak, kozmolojinin en temel konularının modern astronomi verileri kullanılarak yeniden tayin edildiği son yıllarda sınanabilmiştir.

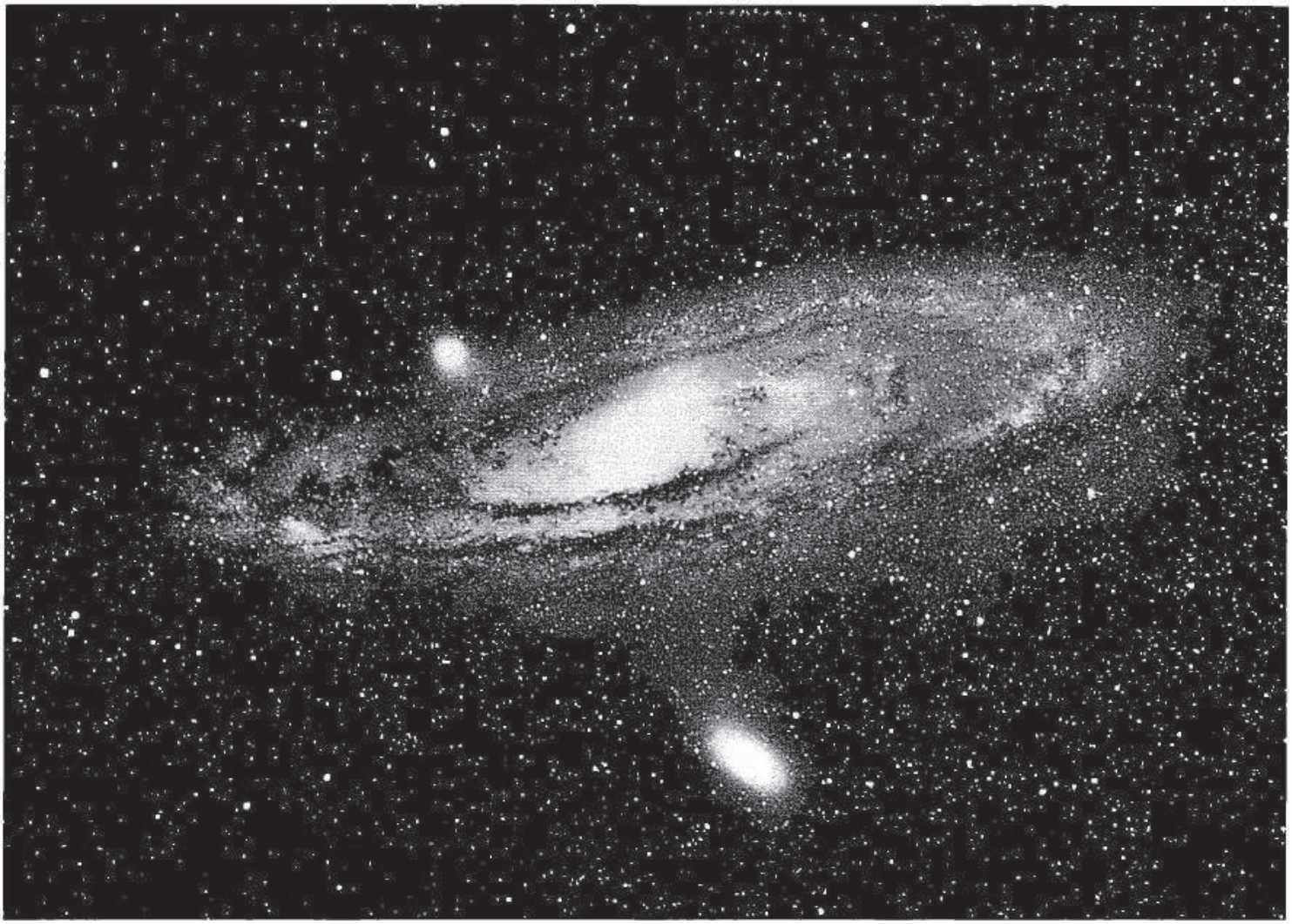
Kozmolojinin İlkeleri

Bir astronomun hem uzayda, hem de zamanda uzak olan cisimleri incelemesi kaçınılmazdır. Işık bir saniyede 300 000 kilometre, bir yılda ise on bin milyar kilometre kat eder. En yakın yıldız olan Proxima Centauri 4.2 ışık yılı uzaktadır, bu nedenle biz onun yaklaşık dört yıl önceki halini görürüz. Samanyolu Galaksimizle karşılaştırılabilecek büyüklükteki en yakın galaksi olan Andromeda Galaksisi ise iki milyon ışık yılı uzaklıktadır. Biz, karanlık bir gecede çıplak gözle görülebilen bu galaksinin, henüz yeryüzünde Homo sapiens'in ortaya çıkmadığı dönemlerdeki halini görüyoruz. Büyük bir teleskop bizi yaratılışa doğru götüren bir zaman makinesidir. Modern bir teleskopla, ışığın Güneşimizin bile henüz yaratılmamış olduğu beş milyar yıl önce çıktığı bölgeleri inceleyebiliriz. Bir kozmolog için yaratılış konusu kaçınılmazdır.

Evrenin yaratılışının, zihnimizde canlandırabileceğimiz üç olasılığı vardır.

1. Başlangıç, fiziksel bilimlerce açıklanamayacak tekil bir durumdu. Kuşkucu biri, Tanrının evreni yaratmadan önce ne yaptığını sorabilir. Bu soruya, "Tanrı o zamanlar bu tür soruları sorabilecek insanlar için cehennemi hazırlamakla meşgul dü" gibi düzmece bir cevap verilebilir (Bu cevap Aziz Augustine'e atfedilmektedir).
2. Başlangıç, düşünülebilecek en basit ve kalıcı durum olup, gelecekteki evrimin tohumlarını kendi içinde barındırıyordu. Modern görüş budur.

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org



En yakın komşu galaksimiz olan Andromeda'nın boyutları Samanyolu'na yakındır.

3. Yaratılış yoktu. Evren sonsuz yaşlıydı ve değişmiyordu.

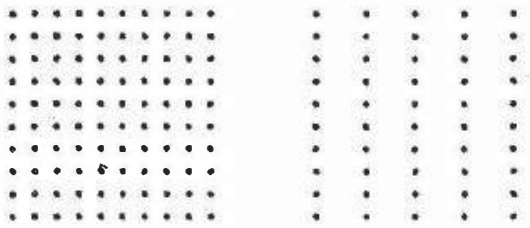
Bilimsel araçların sınayabileceği seçenekler olan son iki olasılığı birbirinden ayırmaya çalışabiliriz. Kozmolojiye yaklaşımı sınayabilmek için, evrenin başlangıçtaki durumunu tanımlayan doğru fizik yasalarına gereksinmemiz vardır.

Bir bilimadamı, evreni incelemeye başlarken, yerel olarak laboratuvarda sınadığı fizik yasalarının tüm evrende geçerli olduğunu varsayar. Bu anlamda evreni inceleme bilimi olan kozmoloji, yerel olarak ispatlanmış olan fizik yasalarının uzay ve zamanın uzak bölgeleri için genelleştirilmesi sonucu ortaya çıkmıştır. Bu bölgelerdeki cisimler ve olaylar, çağdaş astronomi teknikleri kullanılarak incelenebilir. Beklentilerimizin tersine, eğer bu teknikler, lisede öğrendiğimiz fiziğin evrensel olarak uygulanamadığını ispatlarsa, o zaman bilimadamları yerel olarak bildiğimiz fiziğe dönüşebilen daha karmaşık bir

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

fizik keşfetmeye çalışacaklar. Bir evren teorisinde aranan en önemli özelliklerden biri, yeterince büyük ölçeklerde basit olmasıdır. Fizik ve matematikteki en başarılı teoriler her zaman en basit olanlardır. Gökyüzünü Atlas'ın sırtında taşıdığı iddiası bile (nereden geldi? neden canı sıkılmıyor? neden yorulmuyor? neden uykusu gelmiyor?) çağdaş gökküre kavramından daha fazla sayıda varsayım gerektiriyor. Bu kavram, tabii ki, Güneş'in kütle çekimi alanında dolanan gezegenlerin yörüngelerinin, pek çok meteorda olduğu gibi Dünya yüzeyine düşmelerini engellemeye yeterli olduğu kavramıdır.

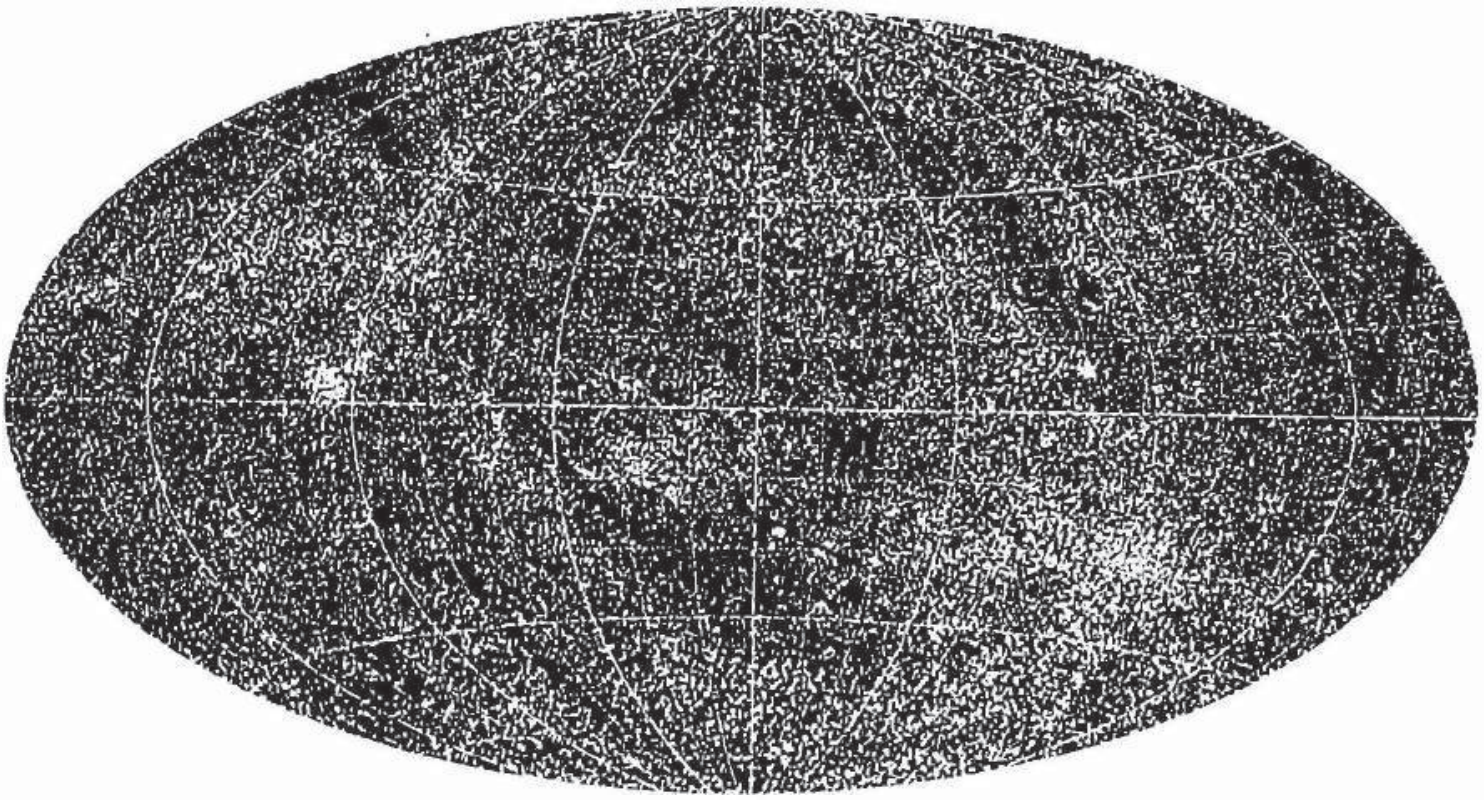
Başarılı bir teorinin basitliği hakkındaki bu düşünceler, evrenin bir modelini yapabilmemiz için bir rehber görevi üstlenecek basit bir ilkede odaklaşır. Bu kozmoloji ilkesi evrenin ortalama olarak her yerden aynı göründüğünü yani izotropik olduğunu anlatır. Bu ilke, Dünya'nın evrenin merkezi, ya da tercihli bir konumda olmadığı yönündeki Copernicus görüşünden kaynaklanmıştır. Eğer evren herhangi bir noktadan bakıldığında yerel olarak izotropik ise, uzay bakımından da tek biçimli (uniform) olmalıdır. Bu nedenle kozmoloji ilkesi, sabit olarak durmakta olan bir gözlemciye göre evrenin yaklaşık olarak izotropik ve homojen olduğunu ifade eder. Çağdaş kozmolojinin temeli sayılabilecek olan kozmoloji ilkesinin bu özel biçimi gözlemlerce de desteklenmektedir.



Eğer evren homojense, karşılaştırılabilir hacimlerde eşit sayıda galaksi bulunur. Eğer evren yönden bağımsız (izotropik) ise, galaksilerin sayısı her yönde aynı olur. Soldaki şekilde evren homojen ve izotropiktir. Sağdaki şekilde ise homojen olmasına karşın izotropik değildir.

Kusursuz kozmoloji ilkesi adı verilen daha kuvvetli bir uyarlama, daha da ileri gidiyor: evren, bütün noktalardan ve her zaman aynı görünür. Başka bir deyişle, hiçbir şekilde evrim gerçekleşmiş olamaz: evren, en azından yeterince uzun zaman üzerinden ortalama alındığında her zaman aynı durumda görünmüş olmalıdır. Bu anlamda, kusursuz kozmoloji ilkesi ,evrende çok farklı geçmiş ve gelecek durumlarını olasılık içinde sayan,daha zayıf olan uyarlamasıyla bir çelişki içindedir. Kusursuz kozmoloji ilkesi, daha ileride tanımlayacağımız durağan evren teorisinin tohumlarını atmıştır.

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org



ROSAT Uydusu'nda bulunan x-ışın teleskobunun gördüğü gökyüzü, hemen hemen izotropiktir. Haritada yaklaşık 50.000 x-ışın kaynağı gösterilmiştir. Teleskop detektörünün 0.1-3 keV enerji aralığına göre mavi renk yüksek, kırmızı renk düşük enerji kaynaklarını göstermektedir. İzotropi, kaynaklardan çoğunun çok uzak galaksiler veya kuasarlar olduğu sonucunu vermektedir.

Diğer bilim dallarından farklı olarak, incelenebilecek yalnızca tek bir evren olduğundan kozmoloji eşsizdir. Parametrelerden birini eğip bükerek, bir diğerini hokkabazlıkla değiştirerek üzerinde deney yapabileceğimiz bir başka sistem elde edemeyiz. Karşılaştırma yapacak bir başka evren olmadığından, evrenimizin ne kadar eşsiz olduğunu bilemeyiz. Evren, gözlenen ve gözlenebilecek her şeyi temsil ettiğinden başka bir evreni çok az bir süreyle de olsa görebilme umudumuz yoktur.

Bununla birlikte, başka olası evrenleri düşleyebiliriz. Birisinin, içinde hiç galaksi, yıldız ve gezegen olmayan bir evreni olabilir. Böyle bir evrende insanın da bulunamayacağını söylemeye tabii ki gerek yok. Dünya adlı gezegende bir tür olarak bizim gelişmiş olmamız, evrenin olası evrim yollarını ciddi bir biçimde sınırlandırıyor. Aslında bazı kozmologlar bu insancı yaklaşımın, uzayın neden üç boyutlu olduğu, protonun kütlesinin elektronunkinden neden çok daha büyük olduğu (tam olarak 1836 kez büyük), ya da nötronun kütlesinin neden protonunkinden yüzde 0.14 fazla oluğu gibi sorulara yanıt bulabilmenin tek yolu olduğunu düşünüyorlar. Eğer bunlar olmasaydı, biz de burada olmazdık.

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

Bu tartışma daha da ileri götürülebilir. Belki de gerçekten varoluşumuz, evrenin üç boyutlu olmasını, protonun kütlesinin de elektronunkinin 1836 katı olmasını gerektiriyordur. Bu sonuç, insancı kozmoloji ilkesi olarak bilinir: yani evren zeki yaratıkların doğup evrim geçirmesine elverişli olmalıdır. Doğal olarak bu bir açıklama değildir, bu nedenle de insancı ilkenin herhangi bir fiziksel anlamı yoktur. Bu ilke yalnızca olasılıkları sınırlar. Üzerinde kafa yormamıza gerek olmayan, kökten farklı evrenler olabilir.

İnsancı kozmoloji ilkesi evrenin, zekanın gelişmesi için uygun koşullar taşıyacak biçimde yapılanmış olduğunu iddia eder. Kozmoloji ilkesinin bu uyarlaması, uygun rastgele başlangıç koşullarından gözlenebilir evrenin ve yaşamın gelişmesi olasılığının ne kadar olduğu sorusunu yanıtlanmış varsayar. En azından ilkesel olarak, bu konu dayatma ile değil, fizikle çözümlenebilecek bir konudur. Beşinci bölümde anlatılan şişen evren kozmolojisi bunu göstermeyi amaçlıyor.

Kozmoloji, çok büyük ve çok küçüğü aynı anda kapsar. Astronomik evrenin bileşenlerini ölçerken astronomlar insanın hayal gücünü zorlayan hatta zaman zaman aşan sayılarla karşılaşırlar. Birlikte keşfedeceğimiz kozmik dramın sahnesini hazırlamak amacıyla önce bu büyüklüklere bir göz atacağız.

Büyüklük Mertebeleri

Astronomların kendilerine özgü bir dilleri vardır ve bu dili meslekten olmayan bir insan anlamakta zaman zaman güçlük çekebilir. Bu dil özel terimler içerir: bir astronomdan başka kim uzaklık ölçmek için 3.26 ışık yılına eşit olan parsek birimini kullanır? Buna ek olarak astronomi dili sayılara bilim alanında yararlı olacak bir yaklaşım sergiler. Çoğu zaman sayıları virgülden sonra iki hatta bir basamaklı olarak vermek yeterlidir. 10 çarpanları çoğu zaman "büyüklük mertebeleri" olarak adlandırılır: doğru "büyüklük mertebesi" vermek önemlidir ve genellikle yeterlidir de.

10 çarpanı astronomide çok kullanılır. Güneş'in kütlesinin 2×10^{33} gram olduğunu biliyoruz. Bu, ton cinsinden ifade edildiğinde bile çok büyük bir sayıdır (2×10^{27}). Böylesine büyük üsler anlamsız gelebilir, ama eğer "büyüklük mertebesi" konusunda yanılırsak, bir yıldızın cüce veya dev olduğunu söyleyebiliriz ki bu ikisi son derece farklı gözlemsel özelliklere sahiptir. Üssün büyüklüğünü azaltmak için astronomide kütle birimi

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

olarak genellikle güneş kütlesi $M_\odot$ kullanılır. Samanyolu Galaksimizin kütlesi, görünür madde olarak 100 milyar ya da 10^{11} $M_\odot$ civarındadır. Artı veya eksi yönde 10 milyar $M_\odot$ kadar yanılmış olabiliriz; ama bunun için yüzde on duyarlılık üzerinde anlaşmış olmamız gerekir. Sayıları virgülden sonra bir, bazen de iki basamağa yuvarlamak astronomide normaldir.

Doğal olarak, astronomi verilerinin olağandışı duyarlılıkta olduğu bazı örnekler vardır. Evrenimiz soğuk bir mikrodalga ışınımı denizinde yüzüyor: bu kozmik fon ışınımının sıcaklığı, 2.73 Kelvin veya -270.43 santigrat olarak ölçülmüştür. Ama bu sıcaklık genelde 3 Kelvin olarak bilinir. Genellikle karşılaşılan bir problem şöyle özetlenebilir: uzak yıldız ve galaksilerden kaynaklanıp bizim teleskoplarımıza ulaşan foton sayısı o kadar azdır ki, elimize geçen bilgi çoğu zaman yetersizdir. Yeni teleskoplardan ve uydulardan elde edilen devasa miktarlardaki veriye karşın astronomlar hâlâ veri açlığı çekiyorlar. Bunun nedeni de incelenen cisimlerin genelde son derece sönük olmasıdır.

Fiziksel evreni tanımlamak için kullanılması gereken sayı aralığı çok büyüktür. Örneğin, fiziksel anlamı olan, düşünülebilecek en büyük sayı ne olabilir? Büyüklük mertebesinin basit bir gösterimi için gözlenebilir evrendeki atomların sayısını ele alalım. Evrende en çok bulunan madde olan hidrojenin bir gramı yaklaşık olarak 10^{24} atom içerir (büyüklük mertebesi olarak). Bu nedenle kütlesi 2×10^{33} gram olan Güneş 10^{57} atom (büyüklük mertebesi olarak), yaklaşık 100 milyar Güneş benzeri yıldızı barındıran Samanyolu ise 10^{68} atom içerir (büyüklük mertebesi olarak). Yalnızca çok karanlık gecelerde dikkatli bir gözlemci içerdiği yıldız sayısı bakımından Samanyolu'na çok benzer bir galaksi olan Andromeda'yı çıplak gözle görebilir. Büyük teleskoplarla bakıldığında gökyüzünün galaksilerle dolu olduğu gözlendi. Bir derece kare içinde 200 000 galaksi sayılabilir (Karşılaştırma yapabilmek için bir örnek vermek gerekirse, Güneş'in kapladığı alan bir derece karenin dörtte biridir). Tüm gökyüzü 41 000 derece kare kapsadığından, sonuç olarak, gözlenebilir evrende yaklaşık olarak 10 milyar galaksi ve gene yaklaşık olarak 10^{78} atom vardır (büyüklük mertebesi olarak). Bu, bir anlamı olan, evrendeki en büyük sayıdır.

Evrendeki en küçük sayıyı bulmak için en küçük cismi aramamız gerekir. Karakteristik olarak 1 santimetrenin yüz milyonda biri boyutlarında olan atom, evrendeki en küçük cisim olmaktan çok uzaktır. Bir hidrojen atomunun çekirdeğinin çapı yaklaşık olarak 10^{-13} cm'dir. Ama hidrojen çekirdeğini oluşturan tek bir protonun da bileşik bir ya-

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

pıya sahip olduğu, kuarklardan oluştuğu biliniyor. Kuarklar gibi gerçek temel parçacıkların noktasal etkileşimleri vardır. Noktasal bir parçacığın ölçülebilir bir çapı yoktur; bunun yerine kuantum teorisinin parçacığın konumuna ilişkin belirsizlik olarak tanımladığı etkili boyut ölçüsü vardır. Kimse bir parçacığın konumunu tam olarak saptayamaz. Bir parçacığın kütlesi büyüdükçe Compton dalgaboyu adı verilen, konumundaki kuantum belirsizliğinin miktarı azalır. En küçük Compton dalgaboyuna sahip cisim, teorik olarak bir karadeliğe dönüşmeden var olabilen en büyük kütleli cisimdir. Böyle bir cismin kütlesi 10^{19} proton kütlesine eşit olup Compton dalgaboyu da yaklaşık 10^{-32} cm'dir. Bu da bir kimsenin evrende bulunduğunu iddia edebileceği (eğer böyle parçacıklar varsa) en küçük uzunluk ölçüsüdür.

Astronomların sevgili evreni, temel olarak yıldız ve galaksileri kapsar. Bu ışık saçan cisimler evren için bir ölçü sistemi sağlar ve gene evrenin gizlerinin çözülmesi için vazgeçilmezdirler. Örneğin, çok büyük uzaklıklardan kozmik deniz fenerleri gibi gözüken parlak yıldızların galaksi dışı uzaklıkların ölçülmesinde yaşamsal önemi vardır. Benzer biçimde, karanlık gaz ve toz bulutları da evrendeki madde miktarına ve yıldız oluşumunun gizlerine ışık tutar. Kozmologların bu cisimler hakkında bilgi sahibi olmadan evreni nasıl incelediklerini anlayabilmek olanaksızdır.

Uzaydaki Bulutlar

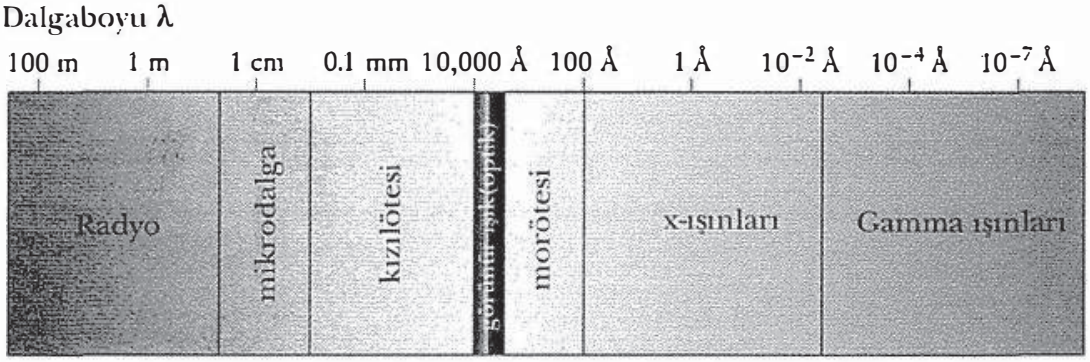
Bir yıldız yaşamına yıldızlararası bir gaz ve toz bulutu olarak başlar. Yıldızlararası gaz, galaksimizi kaplayan daha soğuk gaz tabakasının içine gömülü durumda bulunan çeşitli büyüklüklerdeki bulutları kapsar. Büyüklükleri bir parsekten yüzlerce parseke kadar değişen bu bulutlar birkaç Güneş kütlesinden birkaç milyon Güneş kütlesine kadar değişen madde miktarları içerebilirler. Yoğun bulutlar çoğunlukla karanlık molekül biçimindeki hidrojen (H_2) bulutları, daha dağınık olanlar ise atom biçimindeki hidrojen (HI) bulutlarıdır. Hidrojenin iyonlaşmış hidrojen (HII) adı verilen üçüncü bir türü daha vardır ki bu tür, büyük kütleli yıldızların çevresinde ve pırıl pırıl ışıldayan bulutsularda bulunur.

Spektroskopi (tayf ölçümü) gaz bulutlarını ve genelde evreni inceleyen bir astronomun elindeki en önemli araçlardan biridir. Her atomun karakteristik bir tayfsal imza-

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

sı vardır. Her atom ışınımı bir dizi özel dalgaboyunda yayar ve soğurur. Spektrograf adı verilen bir araç astronomların bir gaz bulutu içinde bulunan atomların tayfsal imzalarını elde etmelerine olanak sağlar. Bu araç, ışığı bileşen dalgaboylarına ayırarak spektrum (tayf) oluşturur. Gaz içinde bulunan uyarılmış atomlar uyarılmamış hallerine dönerlerken özel dalgaboylarında parlak "salma çizgileri" oluşturacak biçimde ışınım yayarlar.

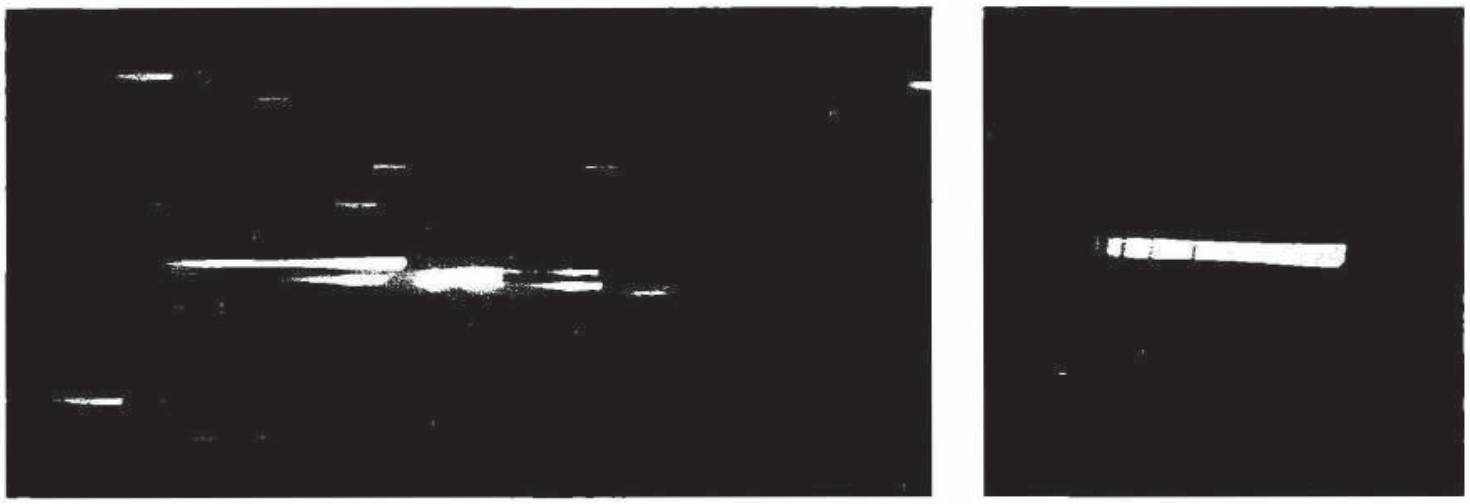
Salma çizgileri yalnızca gözlenen gaz bulutunun arka planında daha parlak bir ışık kaynağı yoksa görülebilir. Eğer gözlenen gaz bulutunun arka planında daha parlak bir ışınım kaynağı varsa, gaz bulutundaki atomlar bu ışınımı kendi karakteristik dalgaboylarında soğurarak gözlenen ışınım tayfında boşluklar biçiminde ortaya çıkan bir "soğurma tayfı" oluştururlar. Sıcak ve ışığa geçirgen olmayan çekirdeklerin dışında bulunan yıldız atmosferlerinin oluşturduğu tayflar yıldızların gizlerini çözmüş ve bu parlak cisimlerin içindeki maddeler konusunda bilgi sahibi olmamızı sağlamıştır. Yıldızın sıcak atmosferinde hızla ileri geri hareket eden atomlar nedeniyle soğurma çizgileri karakteristik olarak genişler.



Işınımın çeşitli dalgaboylarına göre dağılması elektromanyetik tayfı oluşturur. Soldan sağa doğru, radyo dalgalarından mikrodalgalar, kızılötesi ışık, x-ışınları ve gamma ışınları yönünde ilerlerken dalgaboyu küçülür.

Yıldızlararası bulutlar 50 yıl kadar önce yıldız atmosferlerinde ilk kez dar soğurma çizgilerinin saptanması sonucunda keşfedildi. Gözlenen yıldızların bazıları değişen ya da çift yıldızlardı. Bunların tayflarındaki soğurma çizgileri yıldız sönükleşirken veya eş yıldızının arkasına geçerken kayboluyor, ama bazı dar soğurma çizgilerinin hem yeğinliği (şiddeti) hem de dalgaboyu aynı kalıyordu. Bu çizgilerin darlığı, bunların sıcaklığı tipik olarak birkaç bin derece olan yıldız atmosferlerinden çok daha soğuk olan, yıldızla bizim aramızda bulunan, sıcaklığı da 100 Kelvinden az olan soğuk gazlardan kaynaklandığını göstermektedir. Geleneksel spektrograflar yalnızca görünür ışığı analiz edebil-

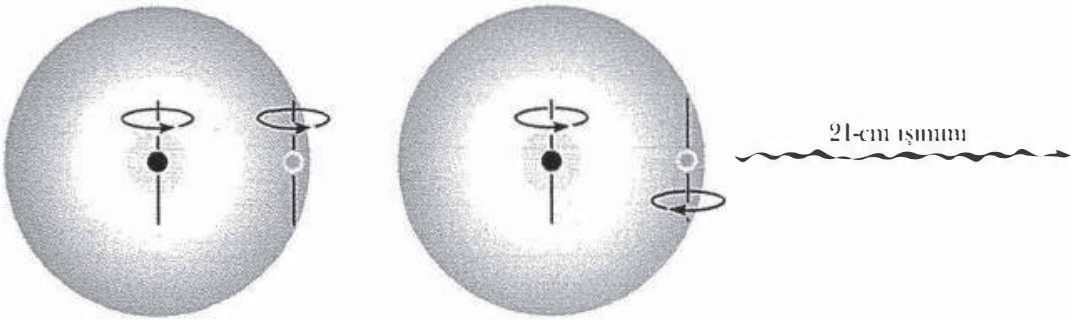
Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org



Solda: Orion Bulutsusu'nun, ışığının prizmadan geçirilerek elde edilen salma spektrumu (tayfı) sağda: Sirius yıldızının objektif prizma tayfında soğurma çizgileri açıkça görülüyor.

diklerinden, görülen çizgiler sodyum, kalsiyum ve tayfın görünür bölgesinde çizgileri olan bazı ender bulunan elementlere ait çizgilerdi. Bu keşfin ardından atom biçimindeki hidrojen bulutlarının içinde bu elementlerin eser miktarlarda bulunduğu anlaşıldı.

Bu bulutların içindeki atom biçimindeki hidrojen 1950'lerde radyo astronominin gelişmesiyle keşfedildi. Bir hidrojen atomu, biri elektronu, diğeri ise protonu simgeleyen iki minik mıknatıs olarak düşünülebilir. Mıknatıslar ya zıt yönleri ya da aynı yönü gösterebilirler. Bu iki durum hafifçe farklı enerjilere sahip olduklarından, atomun bir durumdan diğerine geçişi sonucu 21 cm dalgaboyuna sahip olduğu için tayfın radyo dalgaları bölümüne düşen salma veya soğurma çizgileri oluşur. Bu geçişin olasılığının son derece düşük olmasına karşın (mıknatısların dönmeleri için gereken zaman 10 milyon yıldır)

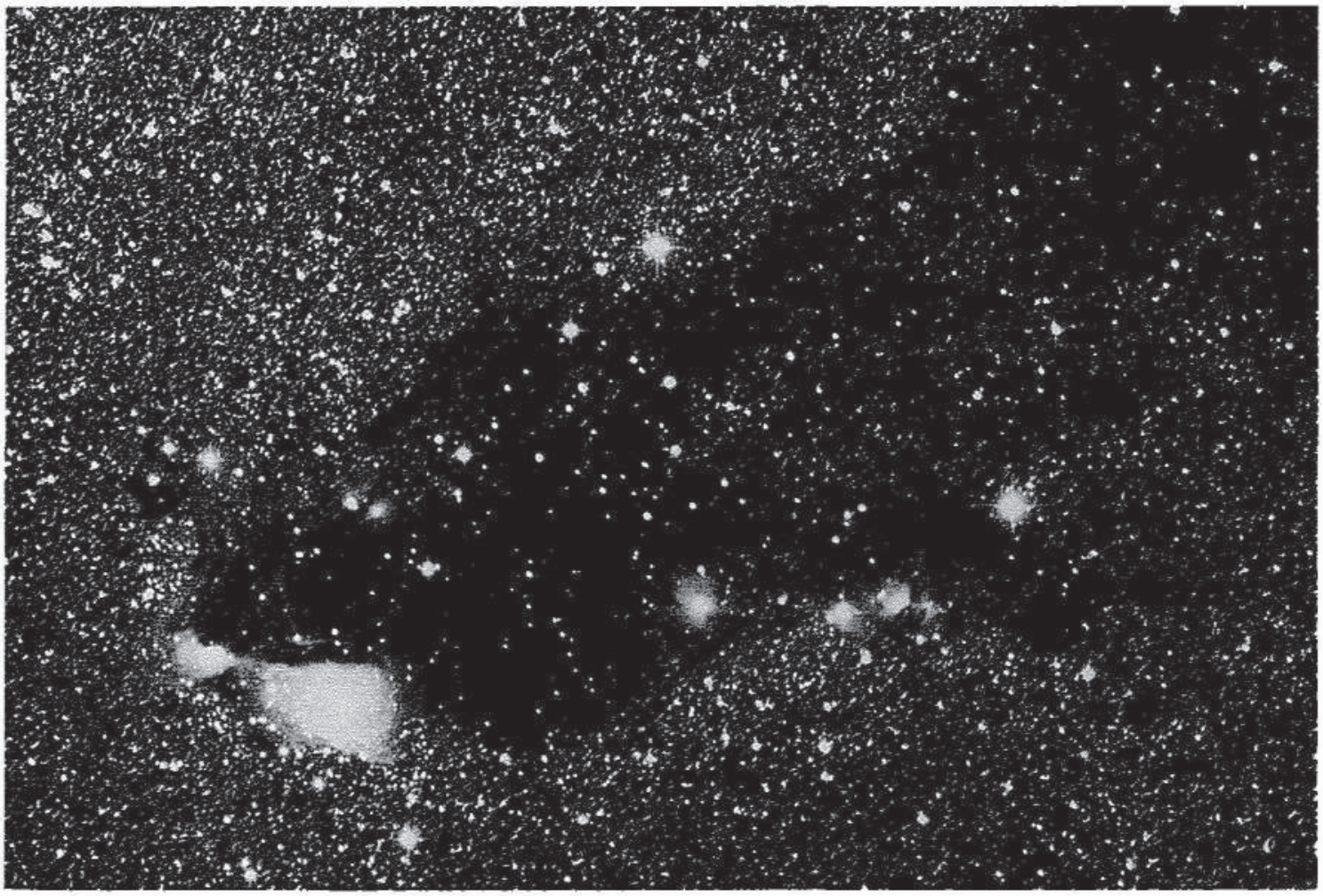


21 cm hidrojen çizgisi hidrojen atomlarının spin değişimleri sonucunda ortaya çıkar. Protonla aynı yönde spine sahip olan elektron kendiliğinden spin yönünü değiştirerek daha düşük bir enerji seviyesine sıçrar ve bu sırada 21 cm dalgaboyunda ışınım yayar. Atom, aynı dalgaboyunda ışınım soğurduğu zaman ters yöndeki sıçrama ortaya çıkar.

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

yıldızlararası bulutlardaki hidrojen atomu sayısı öylesine çoktur ki, bu atomlar radyo teleskoplarca algılanabilecek sayıda foton üretirler. 1960'larda morötesi tayfı analiz edebilecek araçların geliştirilmesiyle birlikte yıldızlararası bulutlarda karbon, azot ve oksijen gibi ağır elementler de keşfedildi.

Galaksimiz, tipik çapları 10 parsek, sıcaklıkları 100 Kelvin ve yoğunlukları santimetreküpte on atom olan bulutlarda atom halindeki hidrojen biçiminde (HI) yaklaşık $2x10^9$ $M_\odot$ civarında kütle içermektedir. Atom halindeki hidrojenin ürettiği en önemli soğurma çizgisi tayfın uzak morötesi bölgesinde, 1216 angström dalgaboyunda yer alır. (1 angström, 10^{-8} cm'dir). Lyman alfa adı verilen bu soğurma çizgisi, morötesi astronominin gelişmesinden sonra, ilk kez roketlerle atmosferin üst katmanlarına gönderilen teleskoplar kullanılarak uzaydan gelen morötesi ışınım incelenirken keşfedildi.



İçinde yıldızların oluşmakta olduğu bir gaz ve toz bulutu. Yeni oluşan yıldızlardan kaynaklanan ışınım, gazı uyarmakta ve bulutun kenarının hidrojen alfa ışınımı yaymasına neden olmaktadır.

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

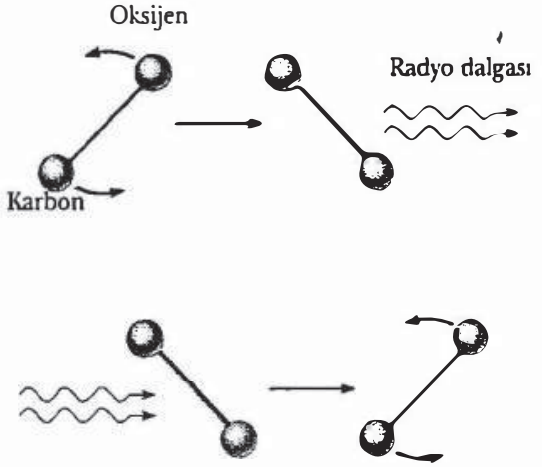
Atom halindeki hidrojen bulutlarının toz da içerdiği bilindiğinden, yeterince yoğun bulutlardaki tozun bulut merkezine morötesi ışınların girmesini engelleyeceği düşünüldü. Bu dalgaboylarındaki enerjik ışık molekül bağlarını parçalar; bu ışıktan korunduğu zaman iki hidrojen atomu biraraya gelerek hidrojen molekülünü oluştururlar (H_2). Bu nedenle yoğun bulutların içinde çoğunlukla molekül halindeki hidrojen bulunmalıdır. Bu düşünce, morötesi soğurma çizgileri yardımıyla ilk H_2 molekülleri saptandığında doğrulanmış oldu.

Bununla birlikte, yıldızlararası moleküllerin çoğunluğu morötesi değil de mikrodalga frekansları kullanılarak algılanabilir. Hidrojen molekülü bulutları, uzayın tüm soğukluğuna karşın, gene de su ve amonyak gibi çok rastlanan molekülleri daha yüksek dönme enerjilerine ulaştırabilecek ölçüde sıcaktırlar (yirmi-otuz Kelvin). Küçük moleküllerin dönme enerjilerinin alabileceği değerler sürekli değil, kesiklidir. Bunlar, tıpkı atomların enerji seviyelerine benzer ama değerleri onlardan çok daha küçüktür. Yüksek enerji seviyelerine kadar uyarılan bu moleküller, en düşük enerji seviyelerine düşerken mikrodalga frekanslarında enerji yayarlar. Bu düşük enerjili dönme geçişleri, atomlardaki elektronun enerji geçişlerinden (görünür ve morötesi dalgaboyları) çok daha düşük frekanslı fotonlar üretirler (radyo ve mikrodalga frekansları). Yoğun yıldızlararası bulutların incelenebilmesi ve olağanüstü çeşitlilikte moleküller içerdiğinin gösterilebilmesi için 1970'lere kadar, mikrodalga astronomisinin gelişmesini beklemek gerekti.

Mikrodalga frekanslarındaki tayf çizgilerini araştıran astronomlar metil alkol, amonyak, su, formaldehit ve göreceli olarak daha karmaşık bazı diğer moleküller başta olmak üzere yüzlerce farklı molekül buldular. Hidrojen molekülünden sonra en bol bulunan molekül , 2.6 mm dalgaboyunda kuvvetli bir tayf çizgisi oluşturan karbon monoksittir (CO). H_2, yalnızca santimetreküpte 100 atomdan daha büyük yoğunluklarda hidrojenin çoğunluktaki biçimidir. Moleküllerin çoğunlukta olması için bulutların toz tarafından yıldızlararası dağınık ışınımdan korunmuş ve dolayısıyla olağanüstü karanlık olması gerekir. Bu molekül bulutlarında tipik yoğunluk santimetreküpte 1000 atom ve tipik sıcaklık 30 Kelvin civarındadır.

Sıcaklıklar düşük olmakla birlikte, atomların ısıl enerjileri buluttaki atomlara yeterince kinetik enerji sağlayarak onları sürekli hareket halinde tutarlar. Bu ısıl hareketler bir basınç oluşturarak bulutu genleştirir ve bulutun kendi kütle çekimi altında büzülme eğilimini dengelerler. Yıldızlararası bir bulutun yaşamı ısıl basıncın oluşturduğu

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org



Bir karbonmonoksit molekülü dönmekte iken bir alt açısal momentum düzeyine sıçrayınca 2.6 milimetre dalgaboyunda ışınım yayar. Ters süreçte, dönme hızlanırken aynı dalgaboyundaki ışınım soğurulur.

kuvvetle bulutu büzülmeye zorlayan kütleçekim kuvvetinin sürekli bir savaşımıdır. Bulutlar galaksi çevresinde dönerlerken üzerlerine düşen madde nedeniyle kütleleri artar. Aynı zamanda ışınım yaptıklarından soğurlar. Bu nedenle, savaşı sonunda kütleçekim kuvveti kazanır. Isıl enerji kütleçekim kuvvetine dayanamayınca, bulut çekimsel olarak büzülmeye başlar. Bunun ardından çekimsel çökme gelir ve sonunda bulut öylesine yoğun ve molekül ışınımlarına geçirimsiz hale gelir ki, merkezi ısınmaya başlar. Böylece, kütleçekiminden kuvvet alan bir ilkel yıldız ya da çoğunlukla bir ilkel yıldız kümesi ortaya çıkar. Güneş'in ilkel yıldız evresi, Güneş sisteminin oluşum sınırlarını belirler. Bununla birlikte, kütleçekimi ancak sınırlı bir süre için yıldıza güç sağlayabilir. İlkel yıldız evresi, Güneş'ten daha küçük kütleye sahip yıldızlarda oldukça uzun (30 milyon yıldan çok) ama büyük kütleli yıldızlarda göreceli olarak kısadır.

Yıldızların Güç Kaynakları

Bir an için kütleçekiminin Güneş'in tek güç kaynağı olduğunu düşünelim. Oluşum sürecindeki ilkel Güneş'in dağınık yıldızlararası gaz bulutu halinden başlayarak çökmesi sırasında merkezdeki sıkışma arttıkça sıcaklık da artar. Güneş'in sahip olduğu toplam kütle çekimi enerjisi $E=GM^2/R$ olarak gösterilebilir. Burada G Newton'un kütle çekim sabiti, M Güneş'in kütlesi, R ise yarıçapıdır. $M=2x10^{33}$ gram ve $R=7x10^{10}$ cm alınırsa Güneş'in sahip olduğu toplam kütleçekimi enerjisi $4x10^{48}$ erg olarak bulunur. L ile gösterilen Güneş'in ışıma gücü -yani enerjisini yayma hızı- ise saniyede $4x10^{33}$ erg civarındadır. Dolayısıyla gücünü yalnızca kütleçekimi enerjisinden alsaydı, Güneş'in E/L oranından hesaplanabilecek yaşam süresinin yaklaşık 30 milyon yıl olması gerekirdi. Bu ise Güneş sistemindeki en eski kayaların yaşı olan beş milyar yıldan çok daha kısa bir süredir. Bu çok açık çelişkinin çözümü, nükleer enerjidedir.

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

Modern simya olarak adlandırabileceğimiz nükleer füzyon yoluyla elementlerin birbirine dönüşmesi yıldızlara gücünü veren enerji kaynağıdır. Evrende en bol bulunan element olan hidrojen, Güneş'in merkezindeki yoğun sıcaklık ve basınç altında yavaş yavaş helyuma dönüşmektedir. Bir helyum atomunun kütlesi, dört hidrojen atomunun toplam kütlesinden yüzde 0.7 daha küçüktür. Bu kütle farkı hemen hemen saf enerji biçiminde gamma ışınları, nötrino, pozitron ve bu parçacıkların kinetik enerjileri olarak ortaya çıkar. Güneş'in merkezinde serbest kalan bu radyoaktif enerji yüzeye yaklaşırken yumuşar ve Güneş atmosferini terkederken hemen hemen tümüyle zararsız sarı ışığa dönüşür. Bununla birlikte, yıldızların nükleer yakıtları eninde sonunda tükenir.

Güneşimizin yaşam süresini hesaplayabilmek amacıyla, tüm çekirdeğini (ki bu, kütlesinin yaklaşık olarak yüzde onudur) nükleer yakıt olarak kullanabileceğini varsayalım. Einstein'ın meşhur formülüne göre, ilke olarak madde, gram başına c^2 erg enerjiye dönüştürülebilir. Burada c ışık hızıdır. Bu mantık, ancak madde-karşı madde yokolması sırasında sağlanabilecek yüzde yüz dönüşüm verimliliği varsaymaktadır. Yıldızlarda ise kesinlikle karşı-madde bulunmaz. Yıldızların enerji kaynağı, verimliliği yalnızca yüzde 0.7 olan nükleer füzyondur. Bu da yıldızların enerji deposunun, eğer tümüyle helyuma dönüşebilirse, çekirdeklerinin kütlesinin yüzde 0.7'si kadar olduğu anlamına gelir. Nükleer reaksiyonların oluşabileceği ölçüde sıcak olan Güneş'in çekirdeği, toplam kütlesinin onda biri kadardır. Bu nedenle de Güneş'in enerji deposunun $0.0007\ Mc^2$ olduğu söylenebilir. Burada $0.1\ M_\odot = 2 \times 10^{32}$ gram, çekirdeğin kütlesi olup, eşdeğer enerjiyi hesaplayabilmek için bu sayıyı $0.007c^2$ ile çarpıyoruz. Bu hesap bize Güneş'in enerji deposunun 1.4×10^{51} erg olduğunu söylüyor. Bu yakıt, saniyede 4×10^{33} erg oranında tüketildiğinde yaklaşık 10 milyar yıl yetecek ölçüde çoktur. Buradan da Güneş'in, hidrojen yakıtının henüz yalnızca yarısını tüketmiş olduğu sonucuna varıyoruz.

Güneş'in çekirdeğinde sürüp giden nükleer reaksiyonların sonuçlarından biri de nötrino adı verilen zayıf etkileşimli parçacıkların üretilmesidir. Bütün termonükleer reaktörler nötrino üretirler. Nötrinolar bu reaksiyonların kaçınılamaz ürünleridir. Güneş'in enerjisini nükleer füzyonla açıklayan teori, nötrinoların Güneş'in merkezinde çok büyük miktarlarda üretildiğini öngörür. Çevresiyle etkileşimi son derece zayıf olan bu parçacıklar ışık hızıyla hareket eder ve Güneş'in yüzeyinden doğrudan doğruya dışarıya kaçarlar.

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

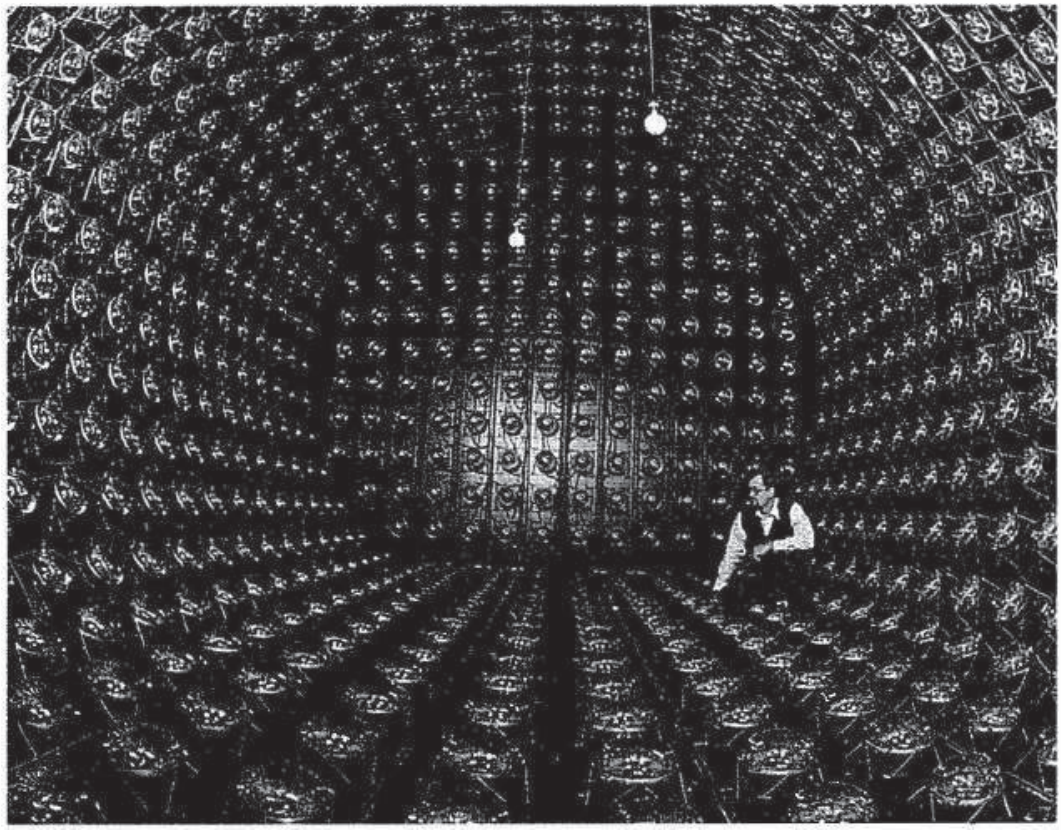
Güneş'ten kaynaklanan nötrinolar Güney Dakota'da yeryüzünün yaklaşık iki kilometre altında bulunan Homestake altın madeninde yaklaşık 300 000 litre karbon tetraklorür (Ccl_4) sıvısının gözlendiği büyük ve önemli bir deney sistemi sayesinde algılanabiliyor. Yeraltı madeni, kozmik ışınların girişimini önlemek üzere özel olarak seçilmiştir. Normal klor izotopu bir nötrino soğurarak radyoaktif bir argon izotopuna dönüşür:

Cl^{37} + Nötrino → Ar^{37} + Elektron.

Her iki ayda bir karbon tetraklorür sıvısı boşaltılmakta, filtre edilmekte ve çok küçük miktarlarda da olsa radyoaktif argon içerip içermediği büyük bir titizlikle araştırılmaktadır. Güneş kaynaklı nötrinoların soğurulması nedeniyle her gün bir tane radyoaktif argon oluşacağı öngörülmektedir. İki aylık inceleme sonucunda genellikle birkaç tane argon atomuna rastlanmakta, bu yolla da Güneş'te nötrino üretildiği kanıtlanmaktadır. Bununla birlikte, deney sonucunda saptanan nötrinolar, teorik olarak öngörülen parçacıkların üçte biri kadardır. Ya Güneş'in içindeki sıcaklıkla ilgili teorilerimiz tam doğru değil, ya da nötrinolara ilişkin yeni fizik keşfedilmeyi bekliyor.

Güneş'in merkezinde üretilen nötrinoların gerçekten algılanabiliyor olması son derece şaşırtıcı bir sonuçtur. Dünyamızdan yüz elli milyon kilometre uzakta çalışan ve Güneş'e enerjisini sağlayan nükleer reaktörün kesin kanıtıdır. Bununla birlikte, yaklaşık 20 yıldan bu yana devam eden klor deneyi, yalnızca Güneş'ten kaynaklanan çok yüksek enerjili nötrinolara karşı duyarlıdır. Her tür enerjiye sahip Güneş nötrinolarını algılayabilecek deneyler cle yoldadır. Bunlardan ikisinde (İtalya ve Rusya'da olanlar) bir nötrino galyum atomuna çarptığında ortaya çıkan germanyum izotopunun radyoaktif çekirdeğini inceleyebilmek amacıyla detektör sıvısı olarak galyum kullanılmaktadır. Japonya'da hazırlanan bir üçüncü deneyde sudan saçılan nötrinoların neden olduğu hızlı elektronların saçtığı ışık algılanmaktadır. Tüm bu deneyler Güneş kaynaklı nötrinoları saymakta ve kozmik ışınlar tarafından üretilen fazladan nötrinolardan korunmak amacıyla bir dağın altında veya yerin yaklaşık bir kilometre altındaki maden ocaklarında konumlandırılmaktadır.

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org



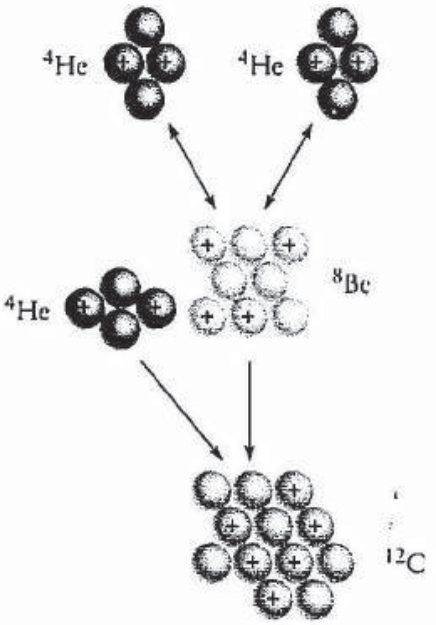
New Mexico'daki yeraltı nötrino "teleskobu". Teleskop, 1200 fototüple çevrelenmiş olan 200 ton ağırlığında sıvı detektörden (sintilatör: ışıma detektörü) oluşmaktadır. Bu deneyde detektör sıvısıyla etkileşen nötrinoların yaydığı ışınım araştırılmaktadır.

Yıldızların Yaşlanması

İlkel yıldız yavaş bir biçimde büzülerek ısınmaya başlar. Merkez bölgelerdeki sıcaklık bir milyon Kelvin'in üzerine çıktığında nükleer reaksiyonlar başlar ve bir yıldız oluşmuş olur. Bu aşamada merkeze doğru etki yapan kütle çekim kuvveti, merkezdeki basınçtan doğan ve dışarıya doğru etki yapan kuvvet tarafından dengelendiğinden, yıldız hidrostatik dengededir. Sıcaklık ve basınç öylesine yüksektir ki, hidrojen atomları tümüyle iyonlaşarak serbest proton ve elektronlara dönüşmüştür. Nükleer füzyon yoluyla enerji üretebilmek için protonlar arasındaki karşılıklı itme kuvvetinin yenilmesi gerekir. Nükleer reaksiyonlar yıldıza dengeli ve kalıcı bir ısı kaynağı sağlar.

Yıldız hidrojen yakıt deposunu tükettiğinde merkezi yeniden büzülür ve sıcaklık daha yüksek değerlere ulaşır. Bu yüksek sıcaklıklarda helyum çekirdekleri (her birinin elekt-

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org



Üç helyum çekirdeği birleşerek Berilyum-8 oluşturduktan sonra sonunda bir karbon çekirdeğine dönüşüyorlar. Helyum çekirdekleri, alfa parçacıkları olarak adlandırıldıklarından, yaşlanan yıldızların merkezlerinde ortaya çıkan bu reaksiyona üçlü alfa süreci adı verilmiştir.

rik yükü hidrojen çekirdeğinin elektrik yükünün iki katıdır) arasındaki itme kuvveti yenilerek helyum füzyonu başlar. Ne yazık ki iki helyum atomunun füzyonu $2He_4 \rightarrow Be_8$ sonucunda çok çabuk bozunan, dengesiz bir berilyum izotopu ortaya çıkar (Berilyumun dengeli izotopu Be_9 biçiminde gösterilir). Füzyon yoluyla helyumun nasıl daha ağır elementlere dönüşebileceği, iki teorisyen tarafından bulundu. Önce, 1953 yılında Edwin Salpeter He_4 ile Be_8 elementlerinin ortak bir özelliği bulunduğuna (çekirdekler uyarıldığında benzer enerji seviyelerine sahip olurlar) bu nedenle de iki helyum çekirdeğinin füzyon sonucu kaynaşarak Be_8 çekirdeği oluşturma olasılığının çok yüksek olduğuna dikkat çekti. Sonuçta, her ne kadar berilyum kendi kendine bozunsa da aynı hızda üretilebileceği ortaya çıktı. Ama berilyumun daha ağır olan karbon elementine dönüşmesi için bu yeterli değildi. Bununla birlikte hemen hemen aynı yıl Fred Hoyle, berilyumla karbonun en yaygın izotopu olan C_{12}'nin de çekirdekleri uyarıldığında en azından bir ortak enerji seviyesine sahip olmaları gerektiğini ileri sürdü. Bu ortak enerji seviyesi berilyumun bir helyum çekirdeği daha yakalayarak bir başka reaksiyona daha girme olasılığını arttırıyordu(bu reaksiyona üçlü alfa süreci adı veriliyor). Bu reaksiyon sonucunda üç helyum çekirdeği kaynaşarak bir karbon çekirdeği oluştururlar. Bu durumda berilyum bir ara evre olarak reaksiyon dışı kalır. Yakalama olasılığındaki bu artışlar, bir beyzbol oyuncusuna beyzbol eldiveni vererek onun topu yakalama olasılığını arttırmaya benzer. Hoyle'un öngörüsünden yalnızca bir yıl sonra C_{12}'nin uyarılmış enerji seviyesinin varlığı bir deneyle doğrulandı. Yıldızlardaki karbon üretimi yaşamın sırrıdır: vücutlarımızda bulunan karbon, milyarlarca yıl önce, şu anda çoktan ölmüş bulunan kırmızı dev yıldızların içinde üçlü alfa süreciyle oluşmuştur.

Çekirdekte helyum yanmaya başlayınca yıldızın ışıma gücü çarpıcı bir biçimde artar. Yıldızın dış katmanları balon gibi şişer ve yıldız bir kırmızı deve dönüşür. Örneğin, Güneşimiz yaklaşık beş milyar yıl sonra bir kırmızı dev haline gelmeye mahkûmdur. Dünyamız da bu durumda Güneş'in yakıcı atmosferinin içinde kalacaktır. Helyum yak-

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

laşık 100 milyon derecede yanarak karbona dönüşür ve büyük kütleli yıldızların içinde, geç evrim aşamalarında daha da ağır elementler oluşur. Aslında tüm ağır elementler yıldızların içinde çekirdek sentezi yoluyla ortaya çıkar.

En Yakın Yıldızlar

Güneş sıradan bir yıldızdır. Kütle ve ışıma gücü bakımından ortalamanın biraz üzerinde olmakla birlikte parlak, büyük kütleli yıldızların yanında biraz sönük benizli kalır. Bazı yıldızların kütlesi Güneş'in kütlesinin birkaç katı, bazılarınınki ise 100 katı olabilir ama yakınımızdaki yıldızların tipik kütlesi Güneş'in kütlesinin üçte biri civarındadır. Yıldızlar kimi zaman çiftler halinde bulunur. Bu durumda yıldızların yörünge hareketlerini birbirlerine uyguladıkları karşılıklı kütle çekim kuvvetleri belirler. Bu karşılıklı dans astronomlara çift yıldızların kütlelerini doğrudan ölçme olanağı sağlar.

Tek başına bulunan yıldızların kütleleri, ışıma güçleri ve renkleri gözlenerek, dolaylı bir yoldan ölçülür. Bir yıldızın ışıma gücü kütlesine çok duyarlı bir biçimde bağlıdır: kütle ikiye katlandığında ışıma gücü 10 kat artar. Yıldızın ışıma gücü arttıkça sıcaklığı da artar. Yıldız hemen hemen mükemmel bir fırına ya da kara cisme benzer. Kara cismin sıcaklığı arttıkça yaydığı karakteristik ışınımın dalgaboyu kısalır, sıcaklık azaldıkça dalgaboyu uzar. Bu nedenle sıcak kara cisimler mavi, soğuk kara cisimler ise kırmızı renklidir. Genelde, yaydığı ışınımın dalgaboyu kara cismin sıcaklığının bir ölçüsüdür. Astronomlar bir yıldızın sıcaklığını renginden, ya da başka bir deyişle ışığının tayfını elde ederek ölçerler. Yıldızlar bir dereceye kadar ideal ışınım yayıcılar olduklarından, yıldızın büyüklüğünü rengine ve ışıma gücüne bakarak anlayabiliriz: ışıma gücü yüksek, sıcak ve mavi olanlar dev; sönük, serin ve kırmızı olanlar cücedir.

Yakın yıldızlar arasında her renkten ve parlaklık sınıfından örnekler vardır. Yıldızlar hakkında bildiklerimizin çoğunu bu yakın yıldızları inceleyerek elde ederiz. Yakın yıldızlar göreceli olarak parlak olduklarından astronomlar bunların kimyasal yapıları ve hatta kimi zaman büyüklükleri ve kütleleri konusunda ayrıntılı bilgiler elde edebilirler. Yakın yıldızlar derken Güneşimize ek olarak birkaç yüz başka yıldızdan söz ediyoruz. Bu yıldızlardan bazıları boyut olarak Güneş'ten birkaç bin kat büyük kırmızı dev yıldızlar, diğerleri gene boyut olarak Güneş'ten birkaç bin kat küçük beyaz cücelerdir. Tüm bu

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

yıldızların kütleleri Güneş'in kütlesine yakındır. Bu yıldızların çoğunluğu ise ne dev ne de cücedir. Büyük ölçüde şişmiş ya da büzülmüş yıldızlar Güneş'le karşılaştırıldığında büyük bir olasılıkla evrimlerinin ileri aşamalarında olan yıldızlardır.

Buradan bir model çıkıyor: yıldızların yüzey sıcaklığına karşı ışıma güçlerinin çizildiği diyagramda yıldızların çoğunluğu ana kol adı verilen düz bir çizgi üzerinde yer alırlar. Bu diyagram astronomlar için öylesine önemli ve vazgeçilmezdir ki özel bir adı bile vardır: Ejnar Hertzsprung ve Henry Norris Russell'in adlarına izafeten bu diyagrama Hertzsprung-Russel diyagramı adı verilir. Ana kol üzerinde yıldızların ışıma güçleri arttıkça sıcaklıkları da artar. Ana kolu farklı kütlelerde oldukları halde tümü de hidrojen yakan yıldızların geometrik yeri olarak yorumlayabiliriz. Hidrojen tükeninceye kadar çok uzun zaman geçer. Bu süre örneğin Güneş için 10 milyar yıldır. Bu nedenle hidrojen yakan ana kolda yıldızların yeri tüm hidrojen tükeninceye kadar çok az değişir. Güneş sarı renkli bir ana kol yıldızıdır. Çok değil, eğer bizden yalnızca 10 parsek uzakta olsaydı, çıplak gözle zar zor görülebilen bir ışık noktası halinde olurdu.

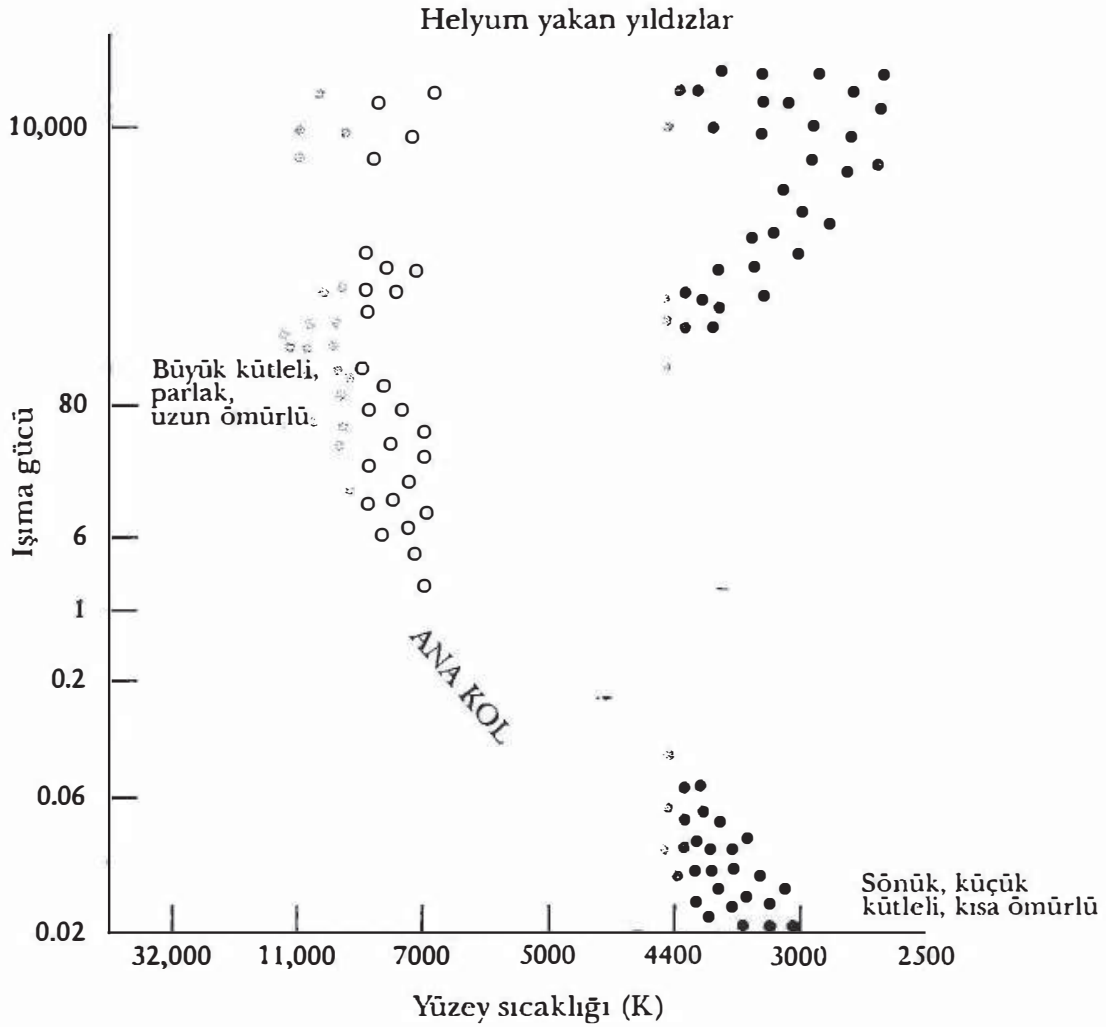
Buna ek olarak ana koldan uzakta yer alan yıldızlar da vardır. Bu yıldızların ışıma güçleri uç değerler alır, çok küçük ya da çok büyük. Yıldızlar da buna göre cüce veya dev olarak sınıflandırılırlar. Kırmızı devler ve mavi devler, kırmızı cüceler ve beyaz cüceler vardır. Güneş gibi bir yıldız helyum yakarken dev olmaya mahkûmdur. Yalnızca yüz milyon yıl veya biraz daha fazla zaman alan bu evre göreceli olarak kısa ömürlü olduğundan, kırmızı devler ana kol yıldızlarına oranla daha ender rastlanan yıldızlardır. Beyaz cüce, tüm yakıtını bitiren Güneş türü bir yıldızın geçireceği son evredir.

Galaksiler

Yıldızların tek başlarına bulundukları çok enderdir. Çoğunlukla galaksileri oluşturan kümeler ve gevşek gruplar halinde bulunurlar. Galaksilerin kendileri de çoğunluğu sarmal ya da elips biçiminde olan değişik şekillerde olurlar. Sarmal galaksiler evrendeki çoğu yıldızın doğum yerleridir.

Sarmal galaksiler, içlerindeki yıldızlar farkedilmeyip yalnızca bulanık ışık lekeleri olarak görüldüklerinden, önceleri bulutsu olarak biliniyorlardı. Yüzyılımızın başında Edwin Hubble, en yakın sarmal galaksilerin bile bizden çok uzakta olduğu sonucuna

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org



Herzsprung-Russel diyagramında yıldızların ışıma güçlerine (dikey eksen) karşı yüzey sıcaklıkları (yatay eksen) çizilmektedir. Hidrojen yakan yıldızlar, büyük kütleli, parlak ve uzun ömürlü yıldızlardan; küçük kütleli, sönük ve kısa ömürlü yıldızlara uzanan bir "ana kol" oluştururlar.

vardı. En yakın sarmal galaksi, Walter Baade'nin 750 kiloparsek ya da iki milyon ışık yılı uzakta olduğunu hesaplayabildiği Andromeda Galaksisi'dir. Sarmal galaksilerin "ada evrenler", boyutları Samanyolu ile karşılaştırılabilecek yıldız sistemleri olduğu açık bir biçimde anlaşıldı.

Yirminci yüzyılın ilk çeyreğinde galaksilerin biçimlerine göre sınıflandırılabileceği ortaya çıktı. Bazıları sarmal bir yapı gösterirken diğerleri görünüş olarak belirgin bir biçim sergilemekten uzaktı. Hubble galaksilerin yapılarını temel alan ve günümüzde hâlâ kullanılan bir sınıflandırma yöntemi geliştirdi. Tümü de sarmal kollara sahip olan sarmal galaksiler, kolların görünüşüne ve merkezdeki çekirdeğin büyüklüğüne göre sınıflandırılır. Sa türünün çekirdeği büyük olup kollar çekirdeğe sıkıca sarılmış gibidir. Sb türünün kol-

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

ları daha gevşek, çekirdeği daha küçüktür. Sc türünün kolları çok daha gevşek ve çekirdeği çok küçüktür. Sa türünden Sc türüne doğru gidildiğinde daha fazla miktarlarda yıldızlararası gaz ve toz bulunur, bu nedenle de yıldız oluşumu daha yoğundur. Parlak galaksilerin çoğunluğu sarmaldır. Samanyolu'nun da Andromeda gibi Sb türü olduğu düşünülüyor. Her ikisinin de ışıma güçleri yaklaşık olarak 10 milyar Güneş'e eşittir.

Birçok sarmal galaksinin, uçları kolların başladığı yere rastlayan çubuk biçiminde çekirdekleri vardır. Bu galaksiler de sarmal kolların sıkılığına ve çekirdeklerinin büyüklüğüne göre a,b ve c sınıflarına ayrılırlar ve çubuklu galaksi olduklarının gösterilebilmesi için SBa, SBb ve SBc biçiminde gösterilirler. Bütün sarmalların dönmekte oldukları saptanmıştır.

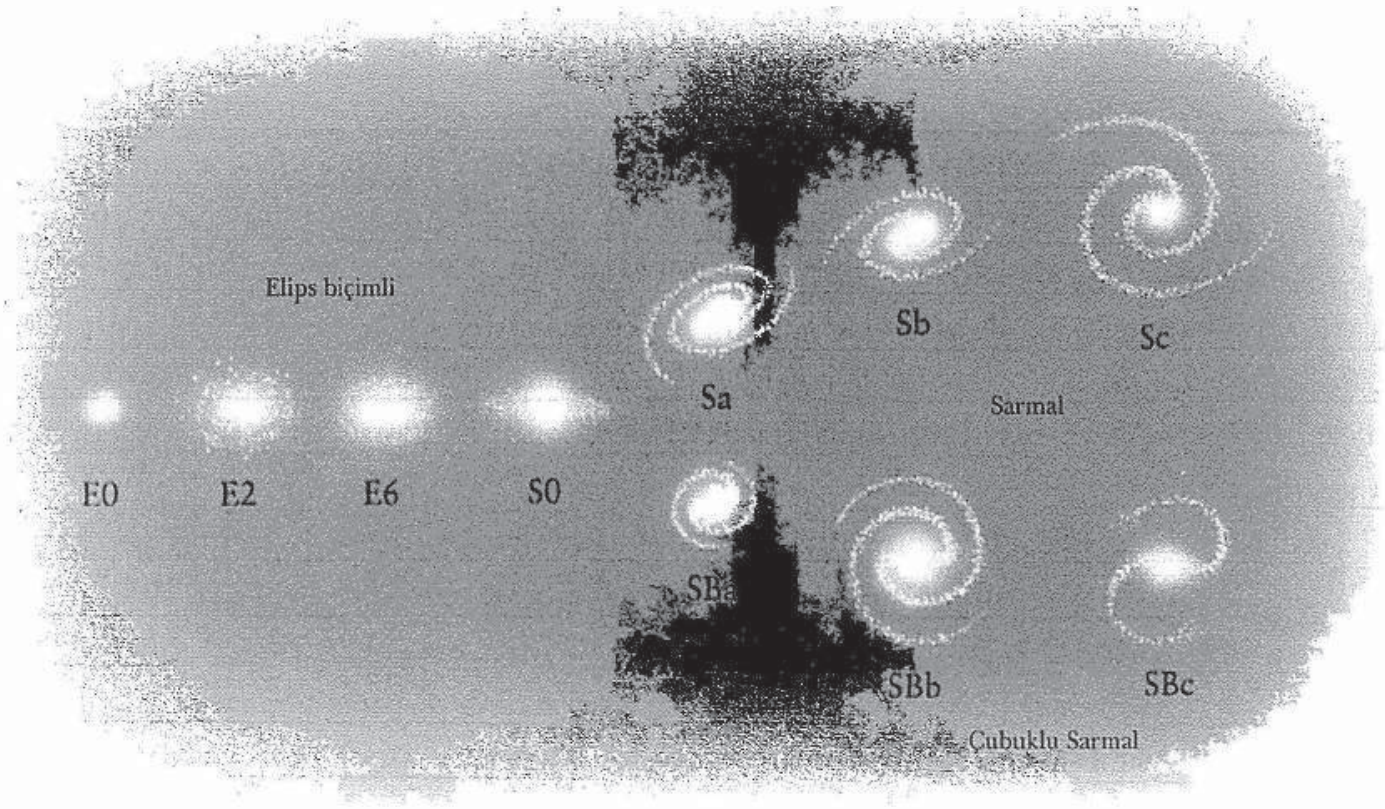
Elips biçimindeki galaksilerin ise ne sarmal kolları ne de disk biçimli yapıları vardır. Bu galaksilerde önemli miktarda yıldızlararası gaz ve toz da bulunmaz. Bu galaksiler biçimlerine göre sınıflandırılırlar. E0 türü galaksilerin dairesel (küresel) bir görünüşü vardır. E1'den E6'ya gidildikçe bu galaksiler gittiçe elipse dönüşürler (yassılaşırlar). Bu galaksilerin yalnızca kütlesi Güneşinkine yakın ya da ondan küçük olan yaşlı yıldızlardan oluştuğu bulunmuştur.

Bilinen en büyük galaksiler elips biçiminde olanlardır. Messier 87 gibi dev elips galaksilerin hem kütleleri hem de ışıma güçleri Samanyolu'ndan yaklaşık 10 kat fazladır. Çoğu galaksi cüce sınıfına girer. Bu cücelerin çoğunluğu ise elips biçimindeki galaksilerdir. Işıma güçleri Güneşinkinin yalnızca 10^7 veya 10^8 katı kadar olan en yakın komşu galaksilerimiz de bu türün örneklerindendir. Yüksek ışıma güçlü elips biçimindeki galaksilerin önemli miktarlarda dönmedikleri bulunmuştur. Büyük elips galaksilerin çoğu, zengin galaksi kümelerinin merkez bölgelerinde yer alırlar.

Mercek biçimli de denilen S0 türü galaksiler, çekirdeği ve diski olan ama yıldızlararası gaz ve toz barındırmayan ara bir türün örnekleridir. Sonuç olarak S0 türü galaksilerde genç yıldızlar ve sarmal kollar bulunmaz. Yıldız sınıflandırmalarına göre elips biçimli galaksilerle özdeştirler. S0 türü galaksiler çoğunlukla galaksi kümelerinde bulunurlar.

Düzensiz galaksiler ise elips biçimli, sarmal ya da S0 türü olarak sınıflandırılmayan her şeyi kapsar. Bu galaksilerde tipik olarak oldukça önemli miktarlarda gaz ve toz bulunduğu gibi şiddetle süregelen bir yıldız oluşum süreci de yer alır. Büyük ve Küçük Magellan Bulutları, yakınımızda bulunan düzensiz galaksi örnekleridir. Düzensiz galaksilerin ışıma güçleri düşük olup tipik olarak Samanyolu'nun onda biri ölçüsündedir. Düzensiz

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org



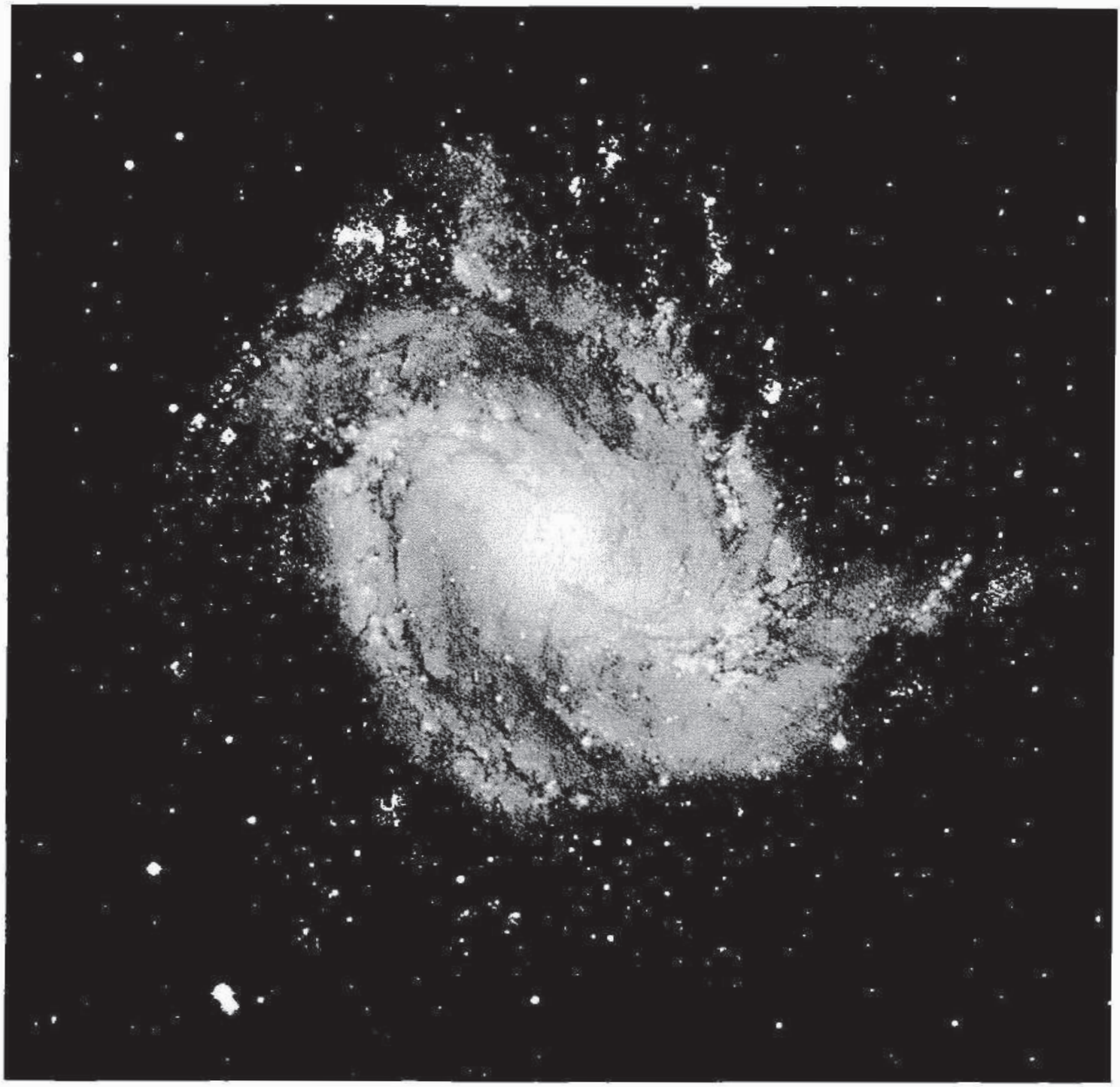
Çatal biçimindeki bu diyagramda çeşitli galaksi biçimleri tanımlanmakta ve karşılaştırılmaktadır.

galaksiler toplam galaksilerin yüzde birkaçını oluştururlar. Sarmal, elips biçimli ya da düzensiz olarak sınıflandırılmayan galaksiler ise özellikle olağandışı bir görünümleri ya da acayip herhangi bir özellikleri varsa kendine özgü olarak sınıflandırılırlar. Böyle galaksilerde halka-biçiminde sistemler, birden fazla sayıda çekirdek, yer fıstığı biçiminde sistemler veya çok parlak, yıldıza benzer çekirdekler ve kuyruklar bulunabilir.

Gece Gökyüzünün Karanlığı

En basit gözlemlerde bile kozmolojinin bilmecelerini çözme yolunda kritik ipuçları elde edilmiştir. Zamanın başlangıcından günümüze değin yapılan en çarpıcı gözlem belki de geceleyin gökyüzüne bakan herkesin doğal olarak yaptığı şeydir. "Geceleyin gökyüzü neden karanlıktır?" sorusu Olbers Paradoksu olarak bilinir. Bu soruyu Alman astronom Heinrich Olbers (ondan önce başkaları da) 1823 yılında ortaya attı.

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org



Çubuklu sarmal galaksi Messier 83

Olbers, uzaydaki yıldızların (ve galaksilerin) ortalama sıklığının ve bunların ortalama ışıma güçlerinin uzay ve zamanda sabit olduğu varsayımını yaptı. Şimdi merkezine yerküremizin bulunduğu, belirlenmiş bir Δr kalınlığındaki herhangi büyük bir madde kabuğunu ele alalım. Bu kabuğun hacmi yüzey alanıyla kalınlığının çarpımına

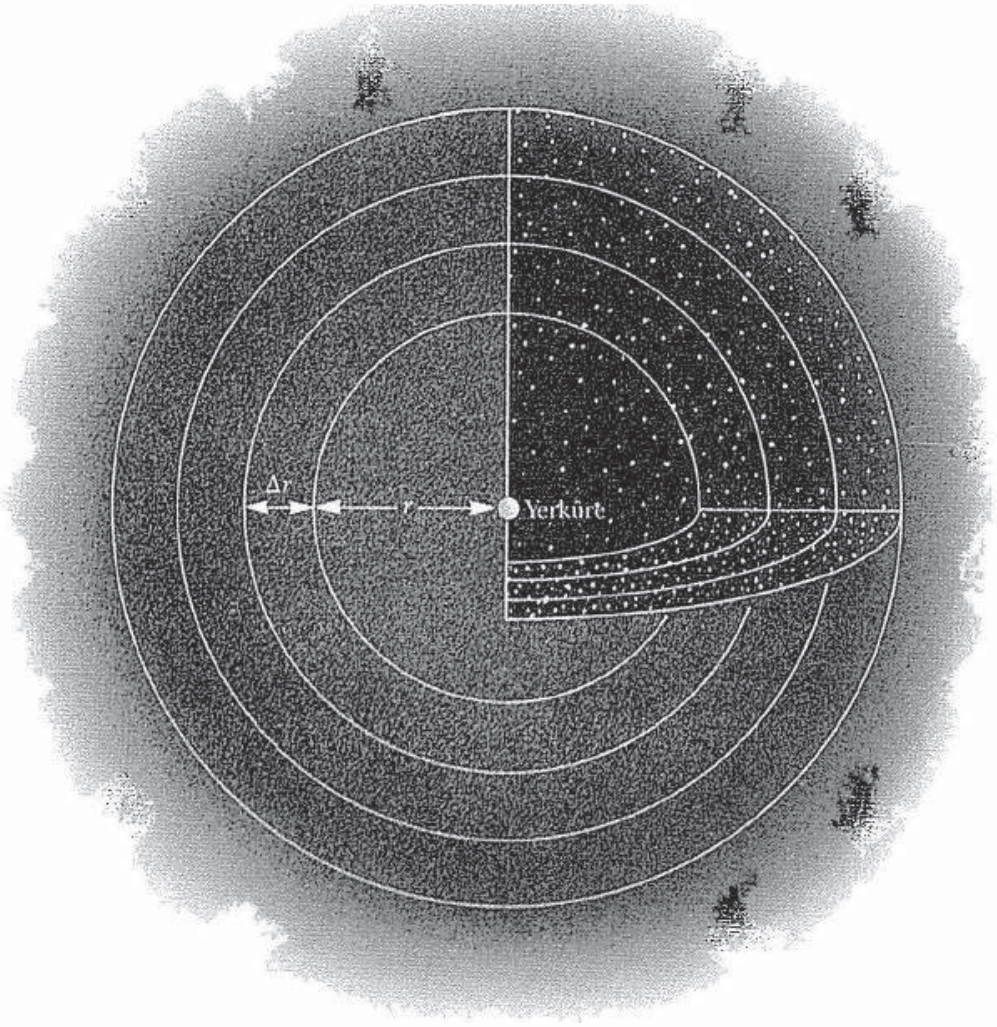
Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

eşittir. Kabuğun yaydığı ışıksa, kabuğun hacmi, kabuktaki birim hacim başına düşen yıldız sayısı n_* ve yıldızın ışıma gücü olan L sayılarının çarpımına eşittir. Böyle bir kabuktan Dünyamıza ulaşan ışık , kabuğun yaydığı ışığın $4\pi r^2$ olarak gösterilen yüzey alanına bölünmesiyle bulunur ki bu da $n_*L\Delta r$ çarpımına eşittir. Bu ışık miktarının kabuğun Dünya'dan uzaklığına değil, yalnızca kalınlığına bağlı olduğu bulunmuştur. Gittikçe daha uzakta yer alan eşmerkezli kabukların katkılarını hesaplarken (her birinin kalınlığı eşit olmak üzere) merkezde ölçülen ışık sınırsız bir biçimde artıyormuş gibi görünür. Uzak yıldızlardan gelen ışık yakındaki yıldızlar tarafından kesileceğinden bu tam doğru değildir. Ama yine de her bakış yönünde eninde sonunda bir yıldız bulunacağından, gökyüzünün bir yıldız yüzeyi kadar parlak olması beklenir. Bu sonuç herhangi bir noktaya uygulanabileceğinden her yerde uygulanabilir olmalıdır.

Bu tartışmanın zorlayıcı mantığına rağmen kendi galaksimizin bir parçası olan Samanyolu dışında geceleyin gökyüzünün oldukça karanlık olduğu son derece açıktır. Edebi yaratıcılık ve bilimsel usa vurmanın (muhakeme) doruklarında dolaşan Edgar Allan Poe 1848 yılında "eğer yıldızlar sonsuz sayıda olsaydı, gökyüzünün her noktasının aynı parlaklıkta olması gerekirdi" diye yazdığında bu paradoksun tümüyle farkındaydı. Poe sonlu evreni kabul ediyordu. Savunduğu fikirler eksik olmakla birlikte yirminci yüzyıldaki kozmoloji uzmanlarının tartıştığı fikirleri andırıyordu. Gene 1848 yılında İngiliz astronomu John Herschel'e göre Olbers Paradoksu yıldız ışığının yıldızlararası toz tarafından engellenmesi yoluyla çözülemezdi. Çünkü bu toz enerjiyi soğurduğu kadar da yaymak zorundaydı.

Olası çözümler şöyledir: (1) evren gençtir ve yıldızlar henüz yalnızca 10 milyar yıldır ışık saçmaktadırlar, ya da (2) evrenin yaşı sonsuz olmakla birlikte termodinamik dengeden kaçınacak biçimde genişlemektedir. Eğer yıldızlar belirli bir zamandan beri parlıyorlarsa ışıkları henüz sonsuz uzaklıklardan ya da daha kesin söylemek gerekirse 10 milyar ışık yılından daha uzaklardan gelmek için yeterli zamanı bulamamışlardır. Diğer yandan eğer evren sonsuz yaşta olup genişlemekteyse, bu genişleme Doppler kayması nedeniyle (Bölüm 2) evreni soğutuyor olmalıdır. Dolayısıyla uzaklaşan bir kaynaktan yayılan fotonların enerjisi azalmaktadır. Doğal olarak evren hem genç hem de genişliyor olabilir ama yalnızca ikinci önerme genişlemeyi gerektirmektedir. Her iki olasılık da evrenin uzanımının sonsuz olmasına olanak sağlamaktadır. Sonlu yaş, evrenin sonlu olmasını gerektirmez, sonlu evren üçüncü seçenek olabilirdi.

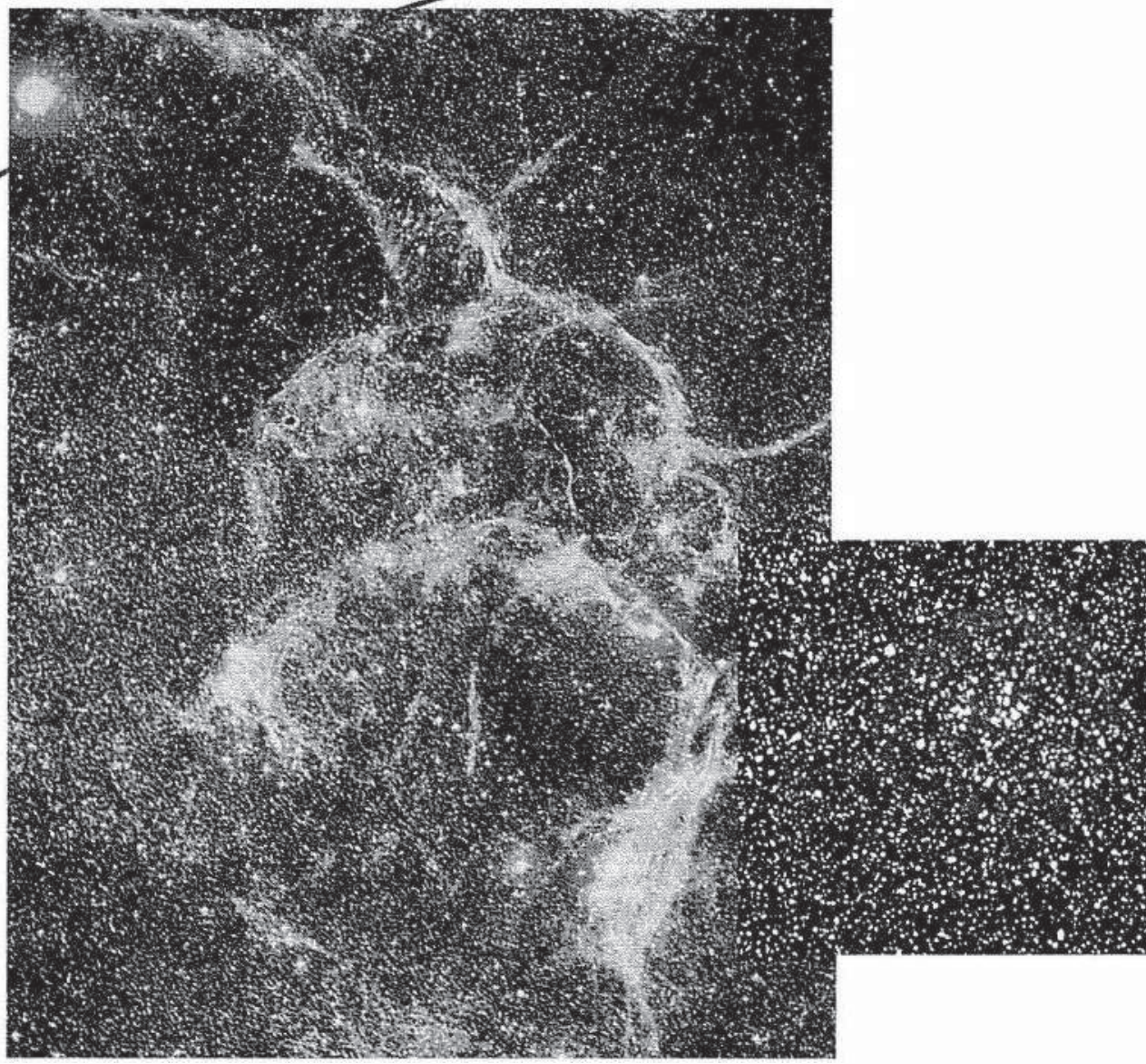
Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org



Geceleyin gökyüzü, evreni hayali olarak böldüğümüz ardışık küresel kabuklardaki yıldızlardan kaynaklanan ışınımı kapsamalıdır. Sonsuz bir evrende gökyüzü, Güneş kadar parlak olmak zorundadır. Merkezinde Dünyamızın bulunduğu, belirli bir Δr kalınlığındaki bir madde kabuğun ele alalım. Bu kabuktan Dünya'ya ulaşan ışığın miktarı, kabuğun uzaklığına değil, yalnızca kalınlığına bağlıdır. Gittikçe daha uzak kabukların katkılarını toplarken, bize ulaşan ışık miktarının sınırsız bir biçimde artması gerekir.

Olbers paradoksunun öyküsü, kozmolojinin zaman sınavından geçmiş sonuçlarına ulaşabilmek için teleskobun gerekli olmadığını gösteriyor. Geceleyin gökyüzünün karanlık olması, evren konusundaki fikirlerimiz için önemini korumaya devam ediyor, çünkü Olbers Paradoksunu çözen kurguların gerçekleri kapsadığı anlaşılmıştır. Şimdi göreceğimiz gibi, modern gözlemlerin sonuçlarına göre evren hem gençtir hem de genişlemektedir.

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org



Üstteki şekil: Vela Süpernova kalıntısı, 11.000 yıl önce patlayan bir yıldızdan arta kalanlar. Alttaki şekil: Büyük Magellan Bulutu'ndaki büyük kütleli yıldızların rüzgârlarının üflediği sıcak bir gaz bulutu. Hidrojen atomları, hidrojen alfa tayf çizgisinin kırmızı rengiyle ışıldıyorlar.

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

Evrenin Genişlemesi

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

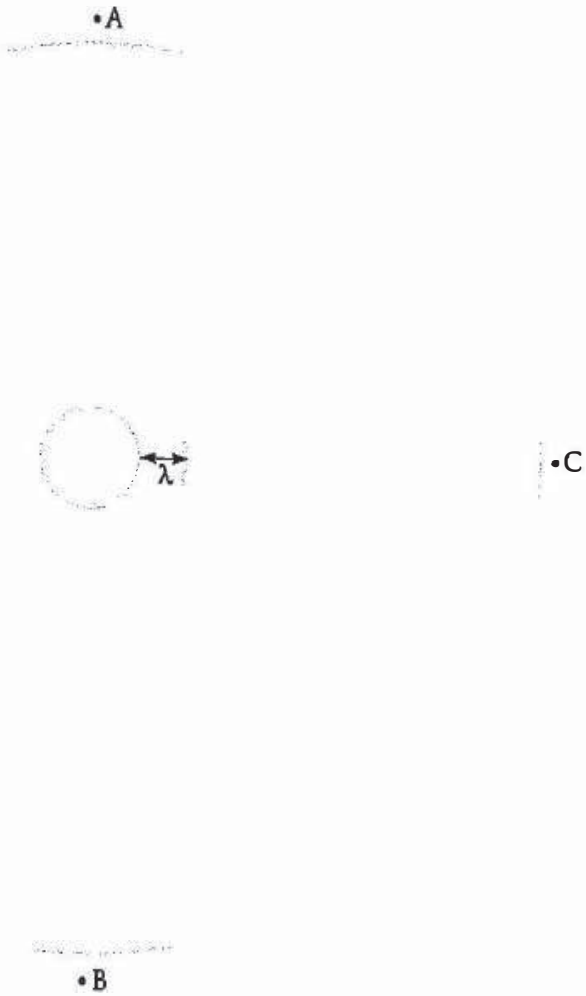
Kozmolojide yirminci yüzyılın devrimi evrenin genişlediğinin keşfi olmuştur. 1920'lerden önce hemen hemen her yerde evrenin durağan olduğuna ve merkezinin de bizim Samanyolu galaksimiz olduğuna inanılıyordu. Bu dünya görüşü sarmal bulutsuların sistematik uzaklaşma hareketleri ölçüldüğünde bir sarsıntı geçirdi, sonunda da 1929 yılında Edwin Hubble şu anda evrenin genişlemesi olarak yorumlanan kırmızıya kayma-uzaklık yasasını bulduğunda tümüyle tepetaklak oldu. Bu tek sonuçtan da modern kozmoloji doğdu.

Doppler Kayması

Evrenin genişlemesi Doppler etkisinin bir sonucu olarak keşfedildi. Bu, hızla otomobil süren bir sürücünün trafik radarına yakalanmasına neden olan etkiyle aynıdır. Basit olarak ilke şudur: bir ışık ya da herhangi bir elektromanyetik ışınım kaynağı bir gözlemciye göre hareket halinde ise ardışık dalga tepeleri arasındaki uzaklık (ya da ışığın dalgaboyu), ışık kaynağı gözlemciye göre sabit durmakta iken ölçülen dalgaboyundan farklı olur. Yaklaşma hareketi sırasında dalgaboyu küçülür ve biz ışık maviye kaymıştır deriz, uzaklaşma hareketi sırasında ise dalgaboyu büyür ve bu kez de kırmızıya kaymadan söz ederiz. Geçen bir otomobilin hızı radar sinyalinin frekansındaki kayma kullanılarak ölçülmektedir.

Saniyede υ ışınım dalga tepesi yayan uzak bir galaksiyi göz önüne alalım. Bu galaksi bizden v hızıyla uzaklaşıyor olsun. Dalga tepeleri arasındaki zaman farkı $1/\upsilon$ olup galaksi bu zaman aralığında v/υ kadar yol almıştır. Gözlemci dalga tepeleri arasındaki zaman aralığını $1/\upsilon$ değil, $1/\upsilon$ artı ışığın v/υ uzaklığını katetmesi için gereken zaman olarak ölçer. Bu zaman ise v/υ uzaklığını c ile gösterilen ışığın hızına bölerek bulunur. Bu nedenle dalgaboyu v/c oranında artar ve biz bu artışın z kadar kırmızıya kaymaya eşit olduğu tanımını yaparız. Geleneksel olarak v gözlemciden uzaklaşma yönünde ölçülür bu nedenle de yaklaşma, eksi v ya da maviye kaymaya (ışınım dalgaboyunun azalması) karşılık gelir. Frekans (υ) ve dalgaboyu (λ) arasındaki ilişki $\upsilon=c/\lambda$ biçiminde olduğundan kırmızıya kayan dalgaboyu arttıkça frekans da bununla orantılı olarak küçülür. Kırmızıya kaymayı veren ifade, ışık hızıyla karşılaştırıldığında küçük olmayan v hızları için (yani $z=(v/c)(1-v^2/c^2)^{-1/2}$ için) genelleştirilmelidir. Bu durumda v gittikçe artarak c'ye yaklaştığında kırmızıya (ya da maviye) kayma miktarı da sonsuza gider.

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

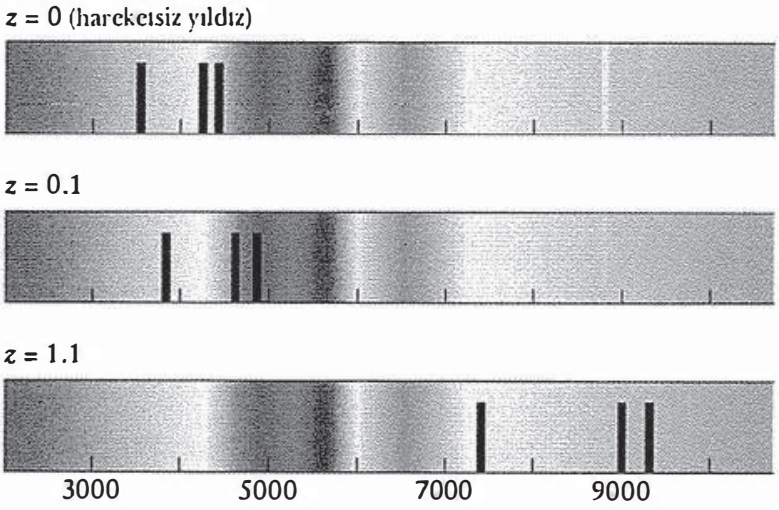


Doppler kayması: Çemberler ve yaylar B'den A'ya doğru hareket eden bir yıldızın yaydığı dalga yüzeylerini gösteriyor. A'daki bir gözlemci dalga tepeleri arasındaki uzaklığı (dalgaboyu) daha kısa olarak ölçerken B'deki bir gözlemci daha uzun olarak ölçer. C noktasındaki bir gözlemci ise hiçbir fark görmez.

Uzak yıldızlardan veya galaksilerden gelen ışık, bu cisimlerin hızlarını ölçebilmemize olanak sağlar. Yıldızların kimyasal yapısı konusunda bilgi veren tayf çizgileri aynı zamanda yıldız ve galaksilerin hareketleri konusunda da bilgi verir. Galaksiler milyarlarca yıldızdan oluşan sistemler oldukları için tayflarında yıldızlardan kaynaklanan belirgin tayf çizgileri görülür. Yıldızların galaksi içindeki ileri-geri hareketleri, tayf çizgilerinin tek yıldızlarınkine oranla daha geniş olmalarına neden olur. Buna ek olarak galaksinin bize doğru veya bizden uzağa doğru hareket etmesine bağlı olarak bütün tayf kırmızıya ya da maviye kayar.

1910 ve 1920 yılları arasında Lowell Laboratuvarı'nda çalışan Vesto Slipher birçok galaksi dışı bulutsunun tayflarını elde etti. Slipher, bugün yakınımızdaki galaksiler oldu-

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org



Hareketsiz bir yıldızdan (kırmızıya kayma=0) elde edilen karakteristik salma çizgileri, yıldız gözlemciden gittikçe daha büyük hızlarla uzaklaşırken sistematik olarak daha uzun dalgaboylarına kayarlar.
Şekildeki örneklerde ortada yüzde on kırmızıya kayma (Z=0.1); altta ise ışık hızının yüzde 75'i kadar büyük bir hızla hareket eden bir yıldızdan elde edilen yüzde yüzon (Z=1.1) kırmızıya kayma görülüyor.

ğunu bildiğimiz pek çok bulutsunun sistematik bir biçimde kırmızıya kaymalar gösterdiğini buldu. Bütün galaksiler kırmızıya kayma göstermiyordu, bu olağandışı cisimlerin en önemlilerinden biri de Andromeda Galaksisi'ydi. Kozmolojide daha büyük ilerleme sağlayabilmek için bu galaksilerin uzaklıklarının ölçülmesinin yaşamsal önemi vardı. Bütün bunlar kendisi stratejik olarak evrenin merkezinde konumlanmış olan Samanyolu'ndan uzaklaşmakta olan cüce galaksiler miydi? Ya da bizim galaksimiz çok daha büyük bir yapılanmanın önemsiz bir parçası mıydı? Bu bulutsuların uzaklıkları tatmin edici bir biçimde hesaplanmadan birbirinden temelden farklı bu seçenekler arasında bir seçim yapmak olanaksızdı.

Galaksilerin içindeki parlak yıldızları ayırt edebilecek teleskopların yapılmasıyla galaksi dışı cisimlerin uzaklıklarının ölçülebilmesi yolunda bir devrim gerçekleşti. Cepheid değişenleri adı verilen kendine özgü yıldız türü, Samanyolu ile yakındaki galaksiler arasında gerekli köprüyü sağladı.

En Yakınlardaki Yıldızların Uzaklıkları

En yakınımızda bulunan yıldız olan Proxima Centauri'nin uzaklığı 4.2 ışık yılıdır. Paralaks (parallax) yöntemiyle bu uzaklığı kesin olarak ölçebiliyoruz. Astronomların paralaks dedikleri şey, Dünya yörüngesi üzerinde bir uçtan öbürüne giderken yıldızın gökyüzünde gösterdiği yer değiştirme miktarıdır. Dünyamız Güneş çevresinde dönerken, altı aylık bir süre içinde Proxima Centauri'nin görünür konumu çok daha uzak yıldızlara göre 1.5 açı saniyesi kadar değişiklik göstermektedir. Bu miktar yıldızın bizden olan

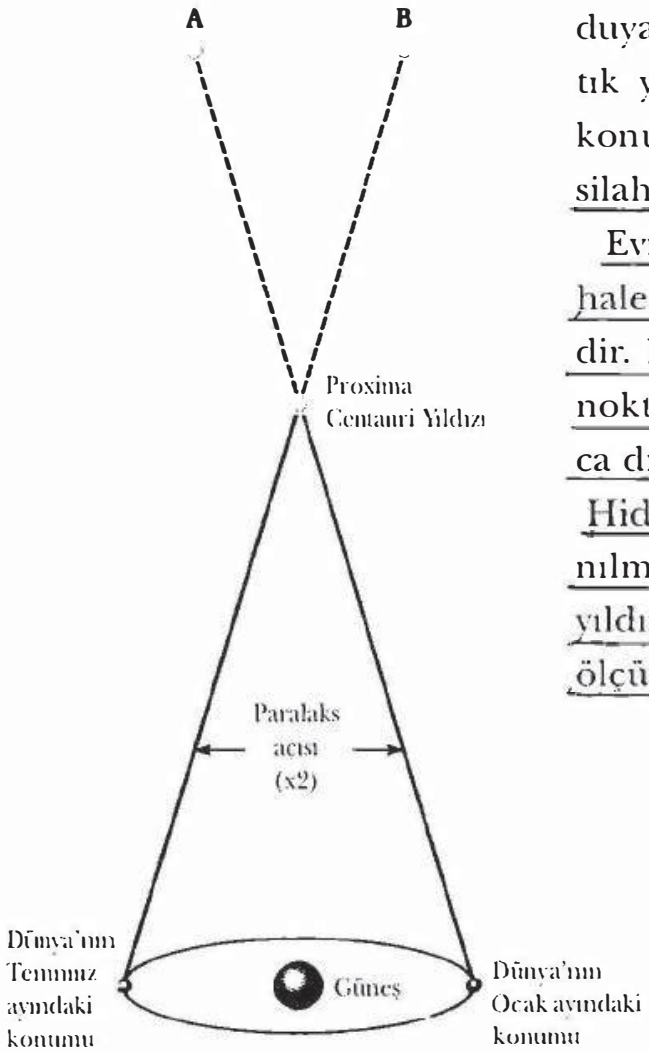
Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

uzaklığı ile ters orantılıdır. Tanım olarak 1 parsek (parsec) 1 açı saniyesi ya da 1/3600 derece yer değişikliğine karşılık gelmektedir. Bu nedenle 1 parsek yaklaşık olarak 3 ışık yılına eşittir.

1838'de ilk paralaks ölçülmeden önce astronomlar arasında yıldızların olağanüstü uzak cisimler mi yoksa yalnızca Güneş sisteminin süsleri mi olduğu yolunda tartışmalar vardı. Paralaks gerçekten astronomiyi Güneş sisteminin dışına çıkarmıştır. Yıldız uzaklaştıkça paralaks açısı küçülür. 0.01 açı saniyesinden daha küçük açısal konumları ölçebilmek için uzay teleskobu kullanmak gerekir. Binlerce parlak yıldızın paralaksını ölçmek üzere tasarlanmış olan Hipparcos Uydusu'nun olağandışı duyarlılığı sayesinde şu anda paralaks uzaklıkları doğrudan ve sistematik olarak bir açı saniyesinin binde biri ya da 1000 parseklik uzaklığa kadar ölçülebilmektedir. Bu uzaklık Samanyolu'nun boyutlarının oldukça büyük bir kesridir. Son derece duyarlı gözlemlerle donanmış olan astronomlar artık yıldızların gizlerini çözmeye başlayabilirler. Bu konuda astronomların cephaneliğindeki en önemli silah ise Cepheid yıldızlarıdır.

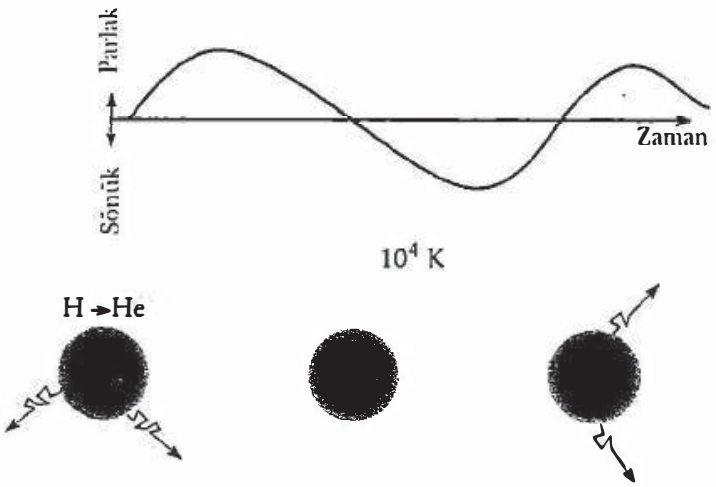
Evrimlerinin belli bir noktasında yıldızlar dengesiz hale gelirler. Bu dengesizlik çoğu zaman yıkıcı değildir. Nükleer yakıtın tümüyle tükendiği evrimin son noktasında olduğu gibi tüm yıldızı kapsamaz, yalnızca dış katmanlarıyla sınırlı kalır.

Hidrojenin tükenmesi helyumun yakıt olarak kullanılmaya başladığı yeni bir evreyi başlatır. Bu evrede yıldızın çekirdeği büzülüp ısınırken atmosferi büyük ölçüde genişler. Bu dev evresinin daha sonraki bir



Yakındaki bir yıldız 6 aylık bir zaman farkıyla iki kez gözlenir. Yıldızın görünür konumunun A'dan B'ye kaymasıyla yıldızın paralaks açısının iki katı bulunur. Yıldızın uzaklığı, Dünya'nın Güneş'e olan ortalama uzaklığı paralaks açısına bölünerek bulunur. Proxima Centauri yıldızının paralaks açısı 0.8 açı saniyesi olduğundan uzaklığı 1.3 parsektir (veya yaklaşık 4 ışık yılıdır).

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org



Zonklayan bir yıldız genişleme ve büzülme evrelerinden geçerken ışığı parlaklaşıp sönükleşir.
Yıldızın dış katmanlarında bulunan kısmen iyonlaşmış hidrojen, ışınımın kaçmasını engeller.
Bu nedenle yıldız sönükleşir ve ışınım basıncı nedeniyle yıldızın dış katmanları şişer.
Işınımın kaçmasıyla yıldız parlaklaşır ve büzülür.

aşamasında yıldızın atmosferinde bulunan helyum atomlarının elektronları bağlı bulundukları atomlardan koparak helyum atomlarının kısmen iyonlaşmalarına neden olurlar. Bu kısmi iyonlaşma geçirimsizlik adı verilen parametredeki büyük artışın sorumlusudur. Yani iyonlaşmış helyum ışınımın yıldızın içinden kolayca kaçmasına engel olur. Yıldızın kütleçekimi nedeniyle en küçük bir büzülme bile yıldızın dış katmanlarının ısınmasına neden olur. Dışarıya serbestçe kaçamayan ışınımın basıncı nedeniyle de dış katmanlar olağanüstü genişler. Yıldız yeniden büzülmek zorundadır, bu da bir dizi salınıma yol açar. Salınımlar yıldız daha çok ısınıncaya ve helyum daha fazla iyonlaşıncaya kadar sürer. Yıldızın dış katmanları "zonklamaya" başlar. Zonklamaların periyodu yıldızın kütlesine ve içinde bulunduğu evrim aşamasına bağlı olarak günler veya aylar mertebesinde olabilir.

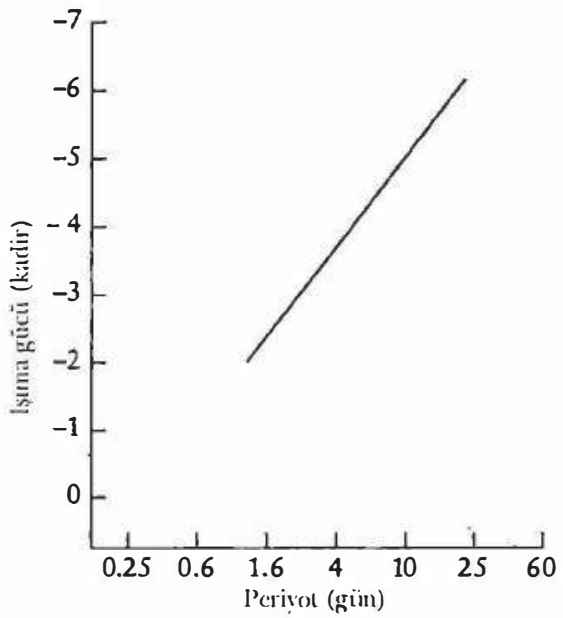
Yaygın olarak rastlanan bir tür değişen yıldız, bilinen ilk örneği olan δ Cephei'nin adıyla Cepheid değişenleri olarak anılır. Her Cepheid yıldızının kesin bir zonklama periyodu ve ortalama ışıma gücü vardır. Işıma gücü arttıkça periyot da uzar. Periyot ve ışıma gücü arasındaki ilişki ilk olarak 1912 yılında Henrietta Leavitt tarafından bulundu. Leavitt Cepheid yıldızlarını incelerken yıldızların görünür ışıma güçlerinin uzaklıkla değiştiğini gördü. O zamanlar ancak en yakın yıldızların uzaklıkları paralaks yöntemiyle bulunabildiğinden Leavitt Cepheid yıldızlarının uzaklıklarını nasıl bulabileceğini düşünmeye başladı. Bu güçlüğü bize en yakın galaksiler olan Magellan Bulutları içindeki Cepheid yıldızlarını incelemeye başlayarak aştı. Bu Cepheid yıldızlarının tümü aynı galaksside yer aldıklarından bize olan uzaklıkları aşağı yukarı aynıydı. Bu nedenle de mutlak ve görünür ışıma güçleri arasındaki oran da aynı olmalıydı. Bu ilişki uzaklıkları doğrudan paralaks yöntemiyle ölçülebilen yakın yıldız kümelerinde bulunan Cepheid yıldızları için doğru sonuç verecek biçimde ayarlandı.

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

1923 yılında Mount Wilson Gözlemevi'nde çalışan Edwin Hubble, bir adı da Messier 31 olan Andromeda Galaksisi'nde Cepheid yıldızları bulduğunda bir sıçrama gerçekleşti. Hubble, Cepheid yıldızlarının periyod ve ışıma güçleri arasında Henrietta Leavitt'in bulduğu ilişkiyi Andromeda Galaksisi'nde bulunan Cepheidlerin uzaklıklarını hesaplamada kullandı. Hesaplamalardan sonra Hubble o zamana kadar 'sarmal bulutsu' olarak bilinen Andromeda'nın tıpkı Samanyolu gibi kendi başına bir galaksi olduğu ve uzaklığının da yaklaşık bir milyon ışık yılı olduğu sonucuna vardı. Aslında Hubble'ın uzaklık hesabı da küçük sonuç veriyordu. Cepheid bilmecesi İkinci Dünya Savaşı sırasında Los Angeles kentinde karartma uygulanmakta iken Mount Wilson'daki 2.5 metrelik teleskobu kullanma olanağı bulan Alman göçmeni Walter Baade tarafından çözüldü. Baade iki tür Cepheid değişeni olduğunu buldu. Leavitt'in kullandıklarına benzeyen daha parlak ve dolayısıyla da daha uzak Cepheid yıldızlarını kullanan Baade, M31'in uzaklığının bugün de kullandığımız değer olan iki milyon ışık yılı olduğunu hesapladı.

Kırmızıya Kayma-Uzaklık İlişkisi

Samanyolu içinde olduklarından uzaklıkları bilinen kümelerdeki Cepheid yıldızlarını bulduktan sonra Hubble, bu değişen yıldızları diğer galaksilerdeki Cepheidlerle karşılaştırmaya başladı. Bu yolla pek çok galaksinin uzaklığını ölçtü ve bu arada galaksilerin ortalama olarak uzaklıklarıyla artan bir v hızıyla bizden uzaklaşmalarına karşın Andromeda'nın saniyede 50 kilometrelik bir hızla bize yaklaşmakta olduğunu buldu. Burada sözü edilen v hızı, R uzaklığını H_0 ile gösterilen tek bir orantı sabiti ile çarparak bulunabilir, yani bağıntı $v = H_0R$ olarak



Belirli periyoda sahip olan Cepheidlerin ışıma güçlerini hesaplayan Harlow Shapley, Cepheid yıldızlarının ışıma gücü-periyot ilişkisini bir eğriye oturtmayı başarmıştır. Şekilde periyotla birlikte ışıma gücünün de arttığı görülüyor. Işıma gücü eksenindeki sayılar küçülürken (daha eksi olurken) ışıma gücünün her aralık için 2.5 kat arttığı görülüyor.

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

yazılabilir. Bu durumda uzaklıkla hız arasında doğrusal(lineer) bir bağıntı vardır denir. Bu denklemde H_0 genellikle hızın uzaklığa oranı olarak verilen Hubble sabitidir. Sabitin günümüzdeki değeri 50 ile 100 kilometre bölü saniye bölü megaparsektir (1 megaparsek= 1 milyon parsek).

Hatalı uzaklık değerlerini kullanmasından ötürü 1929 yılında Hubble, H_0 için çok daha büyük bir değer, 500 kilometre bölü saniye bölü megaparsek bulmuştu. Sonradan bu uzaklıklar Hubble'ın kendisi, Baade ve diğerlerinin çalışmaları sonucu düzeltildi.

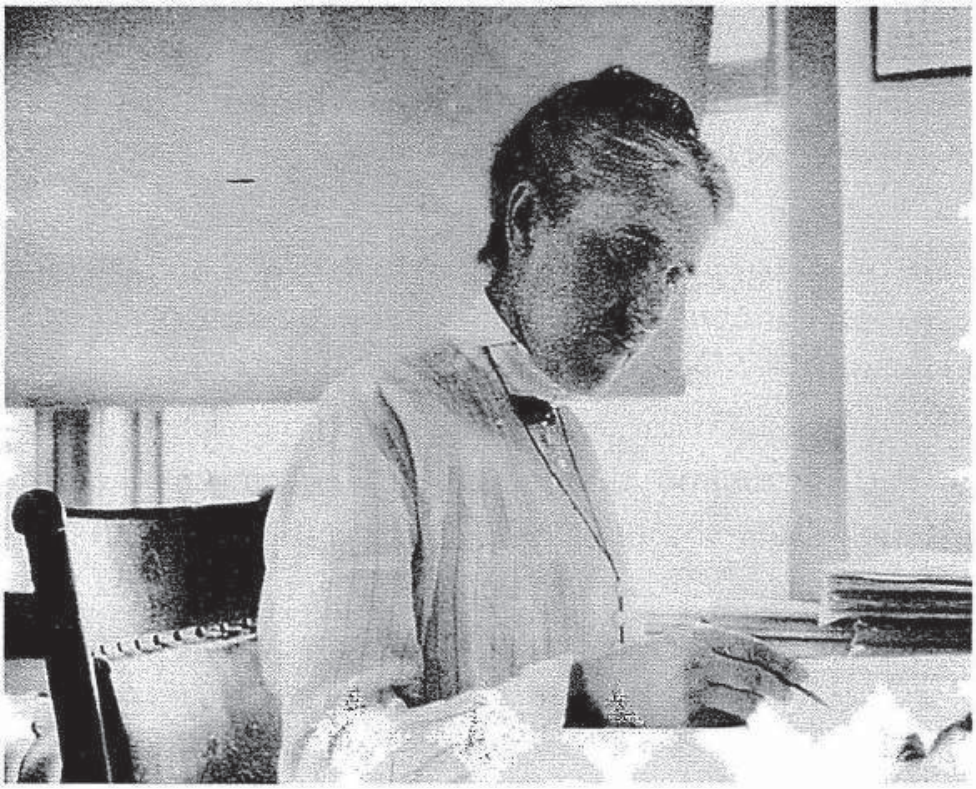
Hubble'ın bulduğu sonuç, kozmoloji ilkesinin geçerli olduğu genişleyen bir evrende tam beklenen sonuçtu. Doğrusal dışındaki herhangi bir genişleme yasası bir yönün başka bir yöne tercih edilmesi sonucunu doğurur. Dolayısıyla da kozmoloji ilkesi ihlal edilmiş olur. Bununla birlikte Hubble yasasının kendisi gözlenebilir evrenin yalnızca küçük bir bölümünde doğrulanabildiğinden evrenin izotropik olduğunu kanıtlayamaz. Uzak galaksilerde gözlenen kırmızıya kaymaların tek yorumu dev bir patlamada olduğu gibi yalnızca Doppler kaymaları değildir. Evrenin genişlemesi uzayın genişlemesi olup cisimlerin uzay içindeki hareketlerini kapsamaz. Bu kavramı Hubble'ın kendisi de tam anlamıyla kabul edememişti.

$1/H_0$ değerini genişleme evresinin süresinin bir ölçüsü olarak kabul edebiliriz. Eğer galaksiler yavaşlamıyorlarsa $1/H_0$ kadar süre önce birbirlerine dokunuyor olmaları gerekirdi. İleride göreceğimiz gibi maddenin varlığı bir miktar yavaşlamayı garanti ettiğinden gerçek yaş $1/H_0$ değerinden bir miktar küçük olmalıdır. Bununla birlikte $1/H_0$ evrenin yaşı için yaklaşık bir maksimum değer verir ki bu da 10 ile 20 milyar yıl arasındadır(Birinci rakam H_0=100, ikinci ise 50 kilometre bölü saniye bölü megaparsek değeri için hesaplanmıştır). 30 yıldan uzun bir zamandan bu yana astronomlar yoğun çabalara karşın H_0 sayısındaki belirsizliği 2 faktörünün altına indiremediler.

Galaksi Dışı Uzaklık Ölçeğinin Anlaşılması

Hubble sabitini kesin olarak ölçebilmenin anahtarı 1-3 megaparsek uzaklığındaki Cepheidlerden 100 megaparsek uzaklığa kadar olan galaksilerde bulunan, uzaklık saptamada kullanılabilecek daha parlak başka cisimlere sıçramaktadır. Böylesi büyük uzaklıklardan tek tek Cepheid yıldızlarını ayırt edebilmek Hubble Uzay Teleskobu için bile

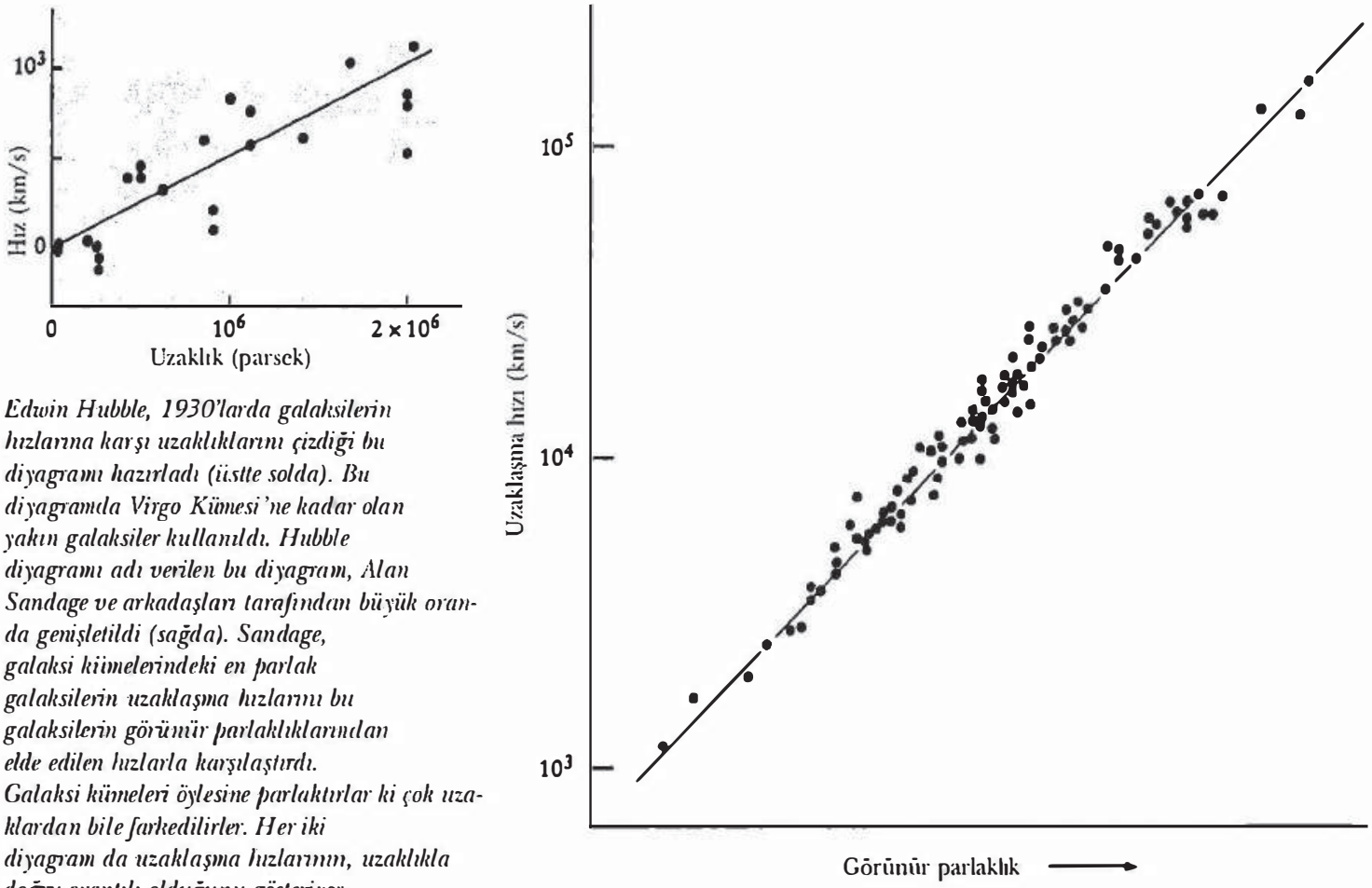
Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org



Henrietta Leavitt, 1912 yılında Samanyolu'nun uydu galaksileri olan Magellan Bulutlarındaki Cepheid değişen yıldızlarının periyotlarıyla ışıma güçleri arasındaki bağıntıyı buldu.

Edwin Hubble, 1929 yılında evrenin genişlediğini keşfetti.

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org



Edwin Hubble, 1930'larda galaksilerin hızlarına karşı uzaklıklarını çizdiği bu diyagramı hazırladı (üstte solda). Bu diyagramda Virgo Kümesi'ne kadar olan yakın galaksiler kullanıldı. Hubble diyagramı adı verilen bu diyagram, Alan Sandage ve arkadaşları tarafından büyük oranda genişletildi (sağda). Sandage, galaksi kümelerindeki en parlak galaksilerin uzaklaşma hızlarını bu galaksilerin görünür parlaklıklarından elde edilen hızlarla karşılaştırdı. Galaksi kümeleri öylesine parlaktırlar ki çok uzaklardan bile farkedilirler. Her iki diyagram da uzaklaşma hızlarının, uzaklıkla doğru orantılı olduğunu gösteriyor.

olanaksızdır. Evrenin içlerine doğru dev bir adım atılarak, bizden saniyede 1100 kilometre hızla uzaklaşmakta olan Virgo Kümesi'ni merkez kabul eden kendi galaksi süperkümemizin kütleçekiminin neden olduğu Hubble yasasındaki yerel sapmalar aşılabilir. Hubble yasasındaki yerel bozulmalardan kurtulup güvenli bir uzaklık ölçümü yapabilmemiz için saniyede birkaç bin kilometrelik hızları kullanmamız gerekiyor.

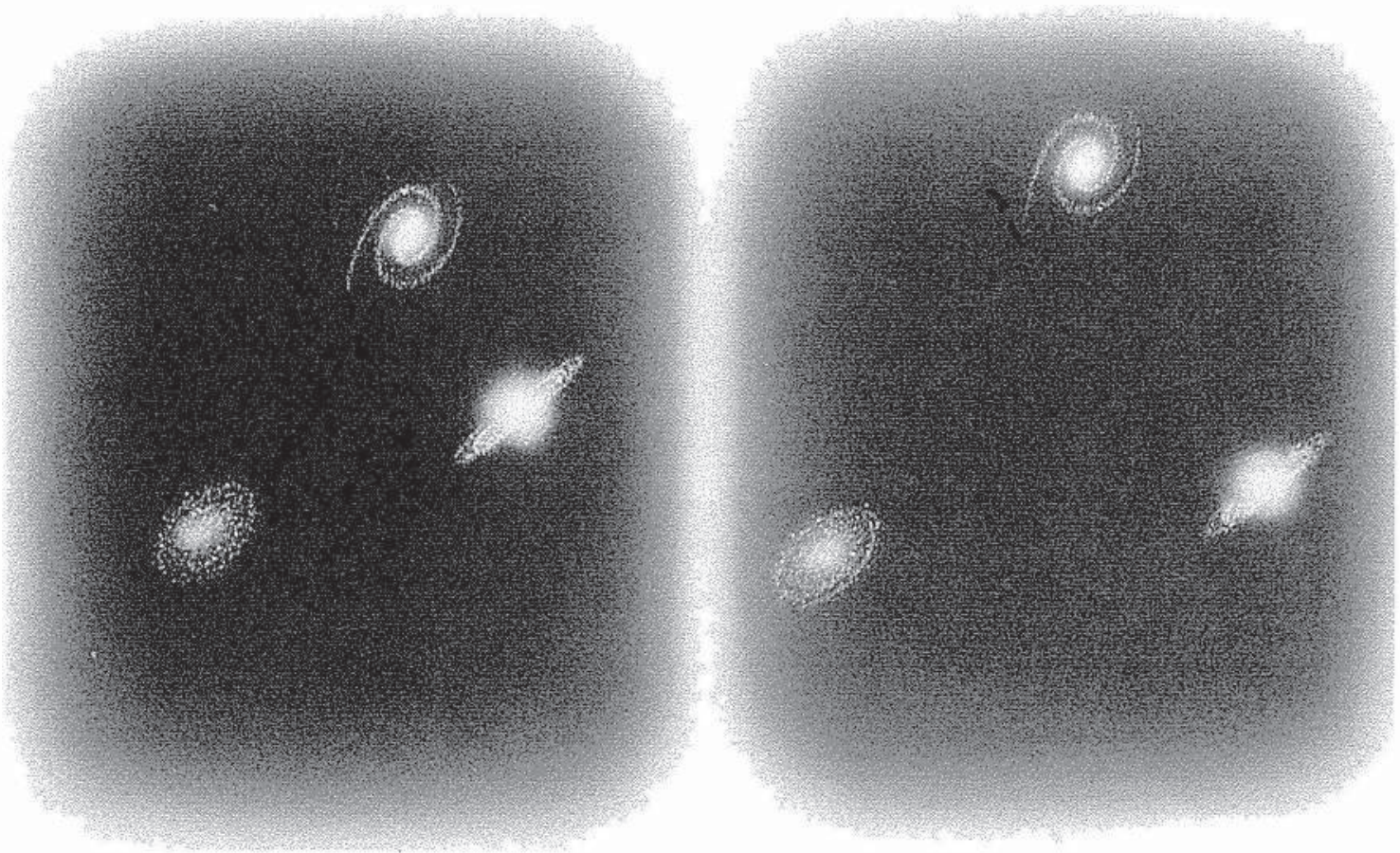
Standart Işık Kaynakları ve Malmquist Tercihi

Temel problem, yakın ve uzak galaksilerde aynı değere sahip olan bir "standart ışık kaynağı" bulabilmektir. Böyle bir cisim uzaklığın metrik ölçüsünü vereceğinden kozmolojinin metre çubuğu görevini yapacaktır. Uzaktaki standart ışık kaynaklarının yakındakilerle özdeş olduğu bilinirse herhangi bir uzaklıktan görülen standart ışık kaynakları hemen kendi uzaklıklarını ele vereceklerdir. Hemen hemen kaçınılmaz olarak ortaya çı-

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

kan bir problem ise evrendeki hiçbir standart ışık kaynağının mükemmel olmamasıdır. Tümü de adını Malmquist tercihinden alan hastalıktan az veya çok etkilenirler. En basit şekliyle söylenirse, uzaktaki ve yakındaki standart ışık kaynaklarının özdeş olduğundan hiçbir şekilde emin olamayız. Standart ışık kaynaklarının özellikleri yapısal olarak bir dağılım gösterir ve doğal olarak daha parlak ve daha uzak standart ışık kaynaklarının kapsanması yönünde bir eğilim olduğundan gözlem yapanın metrik ölçüsünde bir tercihin belirginleşmesine yol açar. Uzaklık ölçmede kullanılan bütün yöntemlerin uygulanmalarındaki kendilerine özgü sorunlar nedeniyle şimdiye kadar Hubble sabitinin kesin değerinin bulunması mümkün olmadı.

İlk uzaklık ölçümlerinde galaksilerde çözümlenebilen en parlak yıldızlar standart ışık kaynağı olarak kullanılıyordu. Bu en parlak yıldızlar helyum yakmakta olan süper devlerdi. Umut edilen, helyum yakan yıldızların ışıma güçlerinin, içinde bulundukları galaksi türünden bağımsız, yalnızca yıldız özelliklerine dayanan değişmez büyüklükler

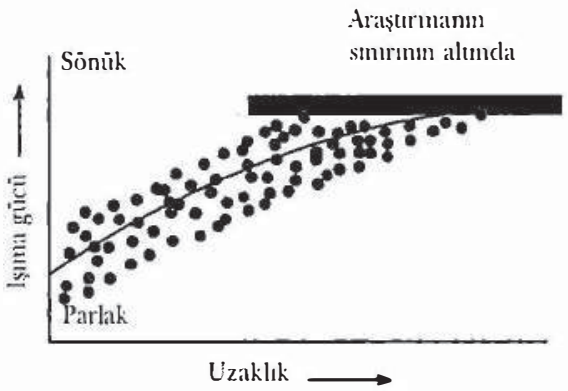


Genişleyen evrenin yönden bağımsızlığı (izotropi): uzay, her yöne eşit bir biçimde genişler; madde genişlemez. Aralarındaki uzaklık artsa da kütleçekimi ile birarada tutulan galaksilerin boyutları aynı kalır.

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

olmasıydı. Bu durumda yıldız sönükleştikçe uzaklığı artıyordu. Bununla birlikte yıldızın yapısında bulunan kimyasal elementlerin yıldızın parlaklığını etkilediği anlaşıldı. Element bollukları yıldızdan yıldıza değiştiğinden yıldızların parlaklığındaki dağılım ciddi bir problem olarak ortaya çıktı. Uzak galaksilerdeki sönük yıldızlar saptanamıyordu. Bu nedenle sürekli olarak yakın galaksilerdeki parlak yıldızları ölçtüğümüzden hesaplanan uzaklıklarda sistematik bir tercih söz konusu olabilirdi.

Sarmal galaksilerde bulunan en büyük iyonlaşmış hidrojen (HII) bölgelerinin çapları standart ışık kaynağı olarak kullanıldığında da benzer bir problem ortaya çıktı. İyi tanımlanmış bu tür cisimlerin çapları, standart ışık kaynaklarının ışıma güçlerine benzer bir biçimde uzaklık ölçmede kullanılabilirdi. Başlangıçta HII bölgeleri uzaklık ölçmede iyi araçlar olarak gözüktü. Büyük kütleli, sıcak yıldızları çevreleyen bu bölgeler yıldızlardan kaynaklanan uzak-morötesi ışınım, gazları iyonlaştırdığı için parlıyor ve bu nedenle de çok büyük uzaklıklardan gözlenebiliyordu. Problem yine özellikle uzak ve sönük galaksilerdeki büyük HII bölgelerinin daha kolay farkediliyor olmasıydı. Sonuç olarak, bu bölgelerin hep en büyükleri ölçüldüğünden sistematik olarak daha uzak galaksilerdeki daha büyük HII bölgeleri saptanacaktır. Bu bizi yine uzaklık hesaplamalarında bir tercihe götürür. Bu, yapısal olarak bir dağılım gösteren herhangi bir standart ışık kaynağı söz konusu olduğunda kaçınılmaz olarak ortaya çıkan Malmquist tercihine bir örnektir. Ne yazık ki kullandığımız tüm standart ışık kaynaklarının yapısal olarak bir dağılımı vardır. Her ne kadar herhangi bir standart ışık kaynağı için yapısal özelliklerde bir dağılım kaçınılmaz ise de dağılımı en az olanı bulmak amaçlanır. Malmquist tercihinin sonucu uzak galaksilerin uzaklıklarının olduğundan daha az hesaplanmaları, dolayısıyla da Hubble sabitinin değerinin olduğundan küçük bulunması sonucunu doğurur.



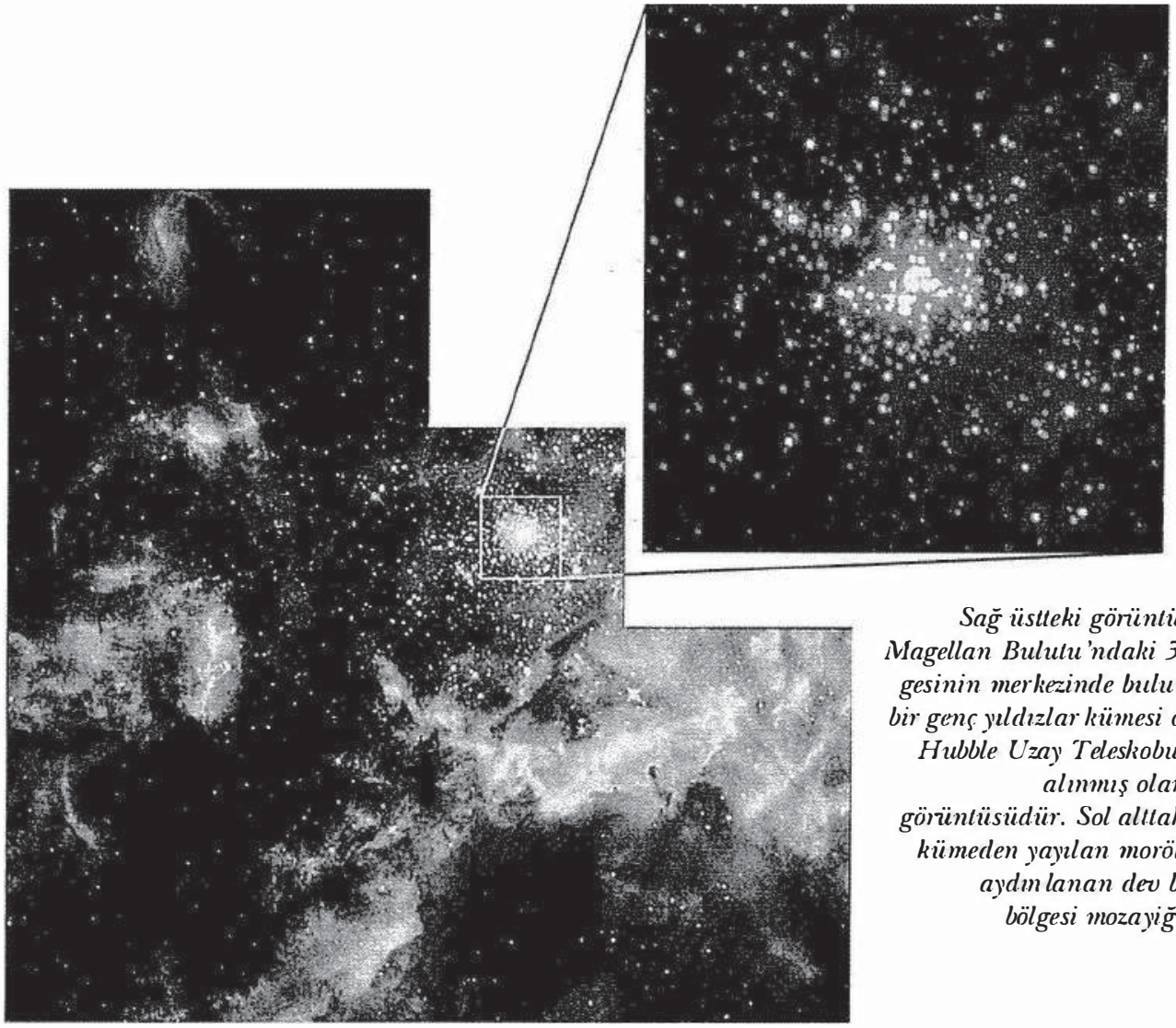
Bizden belli uzaklıktaki galaksilerin parlaklıklarının ölçümlerinde bir dağılım vardır. Bu, kısmen ölçümlerdeki hatalardan, kısmen de galaksilerin yapısal özelliklerindeki dağılımdan kaynaklanır. Standart ışık kaynağı galaksilerden ne kadar iyi bir örnekleme yapıldığı hiç önemli değildir. Bu dağılımın sonucu olarak belirli sınırlardan daha düşük galaksi hızlarının ölçülemediği araştırmalarda, yalnızca uzaklardaki parlak galaksiler araştırma kapsamına girebilecektir. Yakınlarda ise hem parlak hem de sönük galaksilerin parlaklıkları ölçülebilir. Bu dengesizlik, ışıma gücü-uzaklık bağıntısından yanlış eğim hesaplanmasına (ve yanlış Hubble sabiti bulunmasına) neden olur.

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

Gezegenimsi Bulutsular

Başka standart ışık kaynakları bulabilmek amacıyla şimdi de gezegenimsi bulutsulara bakalım. Küçük kütleli bir yıldız nükleer yakıtını tükettiğinde çekirdeği çöker ve yıldız ömrünün son evresine girer. Bu evrede yıldız, çok sıkıştırılmış ve akkor halinde ışık veren bir kömür topağına benzer. Yıldız, karbon ve oksijenden oluşmuş ve yavaşça soğuyan bir beyaz cüce olmuştur. Çekirdek çökerken, dış katmanlardaki gazlar yumuşak bir püskürmeyle dışarıya fırlatılır ve bu da gezegenimsi bulutsu olarak gözlenir. Bulutsu, sıcak beyaz cücenin uyardığı iyonlaşmış hidrojenden oluşan bir HII bölgesidir.

Bu bulutsuları uzaklık ölçmekte kullanırken bulutsunun ışıma gücünü ölçeriz ki bu da her durumda beyaz cücenin kütlesi tarafından belirlenir. Verilen bir galakside



Sağ üstteki görüntü, Büyük Magellan Bulutu'ndaki 30 Doradus bölgesinin merkezinde bulunan ve yoğun bir genç yıldızlar kümesi olan R136'nın Hubble Uzay Teleskobu tarafından alınmış olan görüntüsüdür. Sol alttaki görüntü ise kümeden yayılan morötesi ışınımla aydınlanan dev bir HII bölgesi mozayiğidir.

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

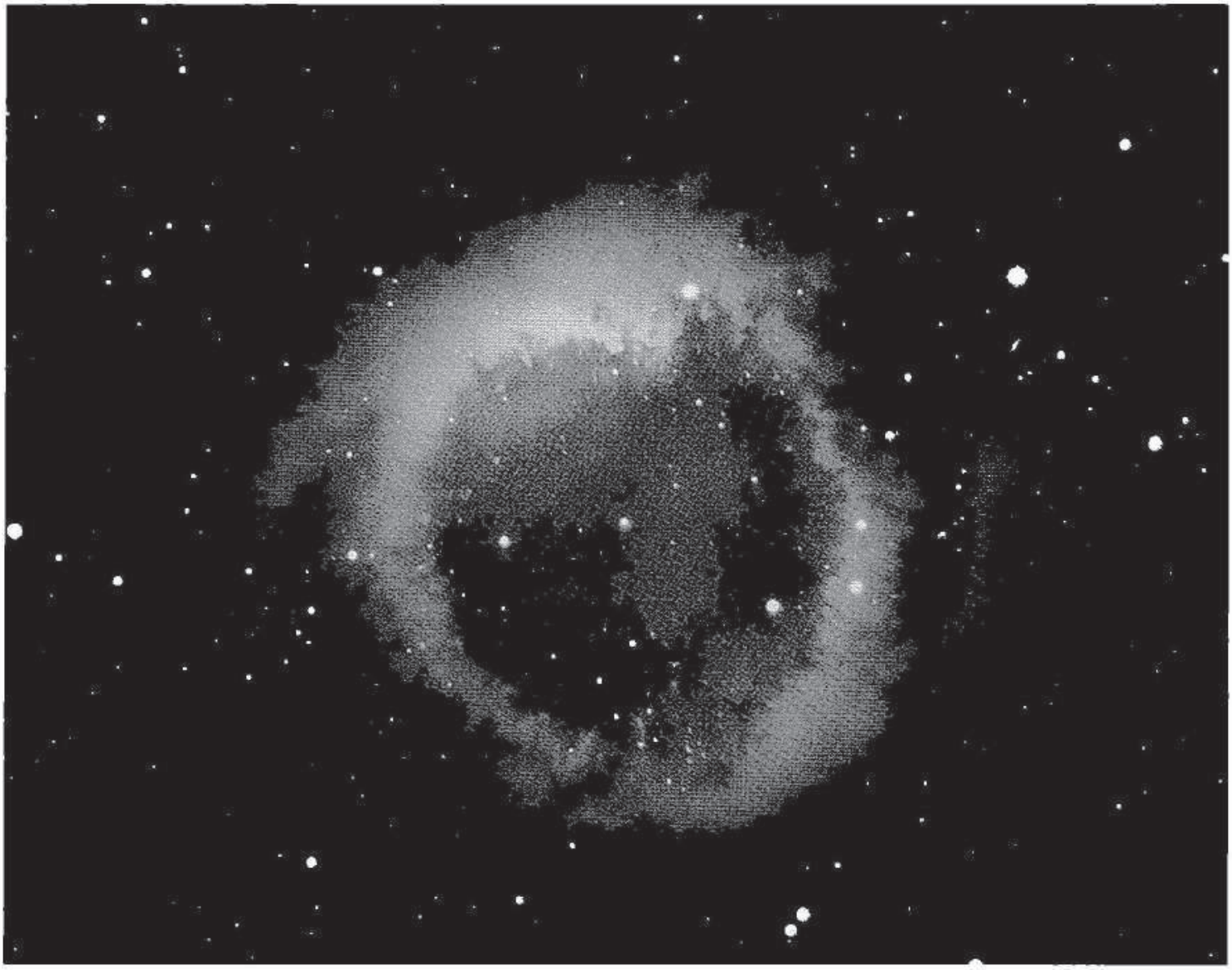
pek çok gezegenimsi bulutsu ölçümlenebilir. En yaşlılarının en parlak olması beklenir çünkü bunların merkezlerindeki beyaz cücelerin kütlesi en büyük olduğundan en çok miktarda ısı enerjisi kapsar. En yaşlı beyaz cücelerin aynı zamanda en büyük kütleli olmalarının iki nedeni vardır. Birincisi, bunları oluşturan yıldızlar ortalama olarak daha genç beyaz cüceleri oluşturan yıldızlardan daha büyük kütlelidir. İkincisi ise yaşlı yıldızların metal bakımından fakir olmalarından dolayı bunların ana kolu terkettikten sonraki evrim aşamalarında kütle kaybının daha az etkili olmasıdır.

Birçok galakside gezegenimsi bulutsular benzer bir dağılım gösterirler. Buradan da, üst sınırı en yaşlı gezegenimsi bulutsular tarafından belirlenen benzer bir beyaz cüce dağılımı olması gerektiği sonucuna varıyoruz. Diğer yandan gezegenimsi bulutsuların yaşı da galaksinin yaşı tarafından belirlenmektedir. Eğer galaksilerin yaşları aşağı yukarı birbirlerine yakınsa, ki bu hiç de mantıksız bir varsayım değil, farklı galaksilerde benzer gezegenimsi bulutsu parlaklık dağılımları bulmayı bekleyebiliriz. Böylece de bir galakside bulunan gezegenimsi bulutsuları standart ışık kaynağı olarak kullanabiliriz. Bilimadamları, uzaklıkları bilinen, yakınlardaki galaksilerde bulunan gezegenimsi bulutsuları kullanarak kütle-ışıma gücü bağıntısını gezegenimsi bulutsular için doğru sonuç verecek biçimde ayarlamışlardır. Bu ilişki kullanılarak içinde gezegenimsi bulutsu gözlenen çok uzaklardaki galaksilerin uzaklıkları hesaplanabilir.

Yüzey Parlaklık Dalgalanmaları

Aslında en ideali bir galaksideki en parlak yıldızları standart ışık kaynağı olarak kullanmaktır, çünkü bunlar ışıma güçleri çekirdek kütleleri tarafından belirlenen ve helyum yakmakta olan dev yıldızlardır. Işıma güçlerinin dağılımı gene evriminin sonundaki yıldızın çekirdek sınır kütlesinin nükleer fiziğine yani beyaz cücenin en büyük kütlesine bağlıdır. Ne yazık ki en yakındakiler dışında galaksilerdeki parlak yıldızları tek tek gözleyemiyoruz ama en parlak yıldızlardan kaynaklanan galaksinin yüzey parlaklığındaki dalgalanmaları ölçmek olarak özetlenebilecek modern bir yöntem var. Bu yöntem, Virgo Kümesi'ne kadar uzak elips biçimli galaksilere uygulanmış durumdadır.

Bu yöntem, standart ışık kaynağı yaklaşımının bir benzeridir. Eğer elinizde uzaklığı bilinen galaksilerde doğru sonuç verecek şekilde ayarlanmış bir standart ışık kaynağı-



Helix Gezegenimsi Bulutsusu, bulutsunun merkezinde çekirdeği sıcak bir beyaz cüce olarak görülen ve ölmekte olan bir yıldızın püskürttüğü gazlardan oluşan, ışıldayan bir kabuktur.

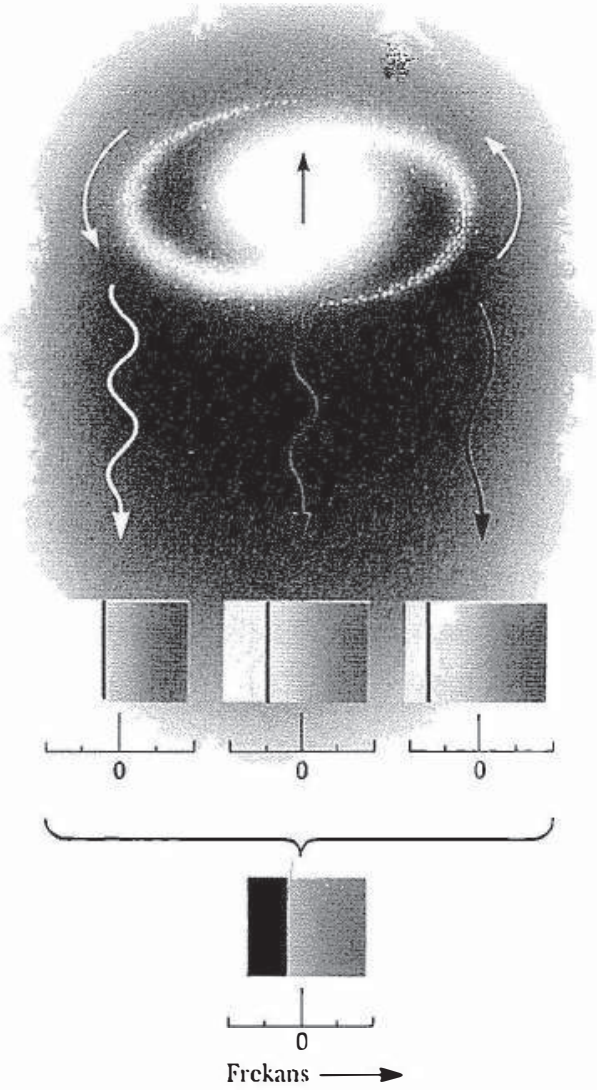
nız varsa, uzaklık hesaplamak için güvenilir bir aracınız var demektir. Ne yazık ki bu yaklaşımdaki yöntemi doğru sonuç verecek biçimde ayarlamakta kullanılan galaksiler, en yakındakilerle sınırlıdır: Andromeda Galaksisi'nin merkez bölümü ve onun uydu galaksisi olan cüce M42. Yalnızca eğer bu iki galaksideki yıldızların özellikleri uzak, elips biçimli galaksilerdeki yıldızların özelliklerine benziyorsa doğru uzaklık hesaplanabilir. Doğal olarak yakındaki Virgo ve ötelerdeki uzak, elips biçimli galaksiler arasında sistematik farklar olabileceğini dikkate almamız gerekir. Ayarlamada kullanılan galaksiler, parlaklıkları karşılaştırılabilir olan elips biçimli galaksiler bile değildir.

Tully-Fisher Bağıntısı

Galaksi uzaklıklarını ölçmekte kullanılan yeni ve alışılmamış bir yöntem ise elektromanyetik tayfın görsel ve radyo dalgaları bölgelerindeki ölçümlerin birleştirilmesiyle elde edilir. Bu yöntem galaksilerin birbirinden farklı iki özelliği arasındaki yapısal ilişkiye dayanır. Bu özelliklerden biri uzaklığa bağlıdır diğeri ise uzaklıktan bağımsızdır.

Sarmal bir galaksinin ilk özelliği olan ve L olarak gösterilen ışıma gücü görsel ya da kızılötesi dalgaboylarında ölçülür. Ölçülen parlaklık galaksinin uzaklığına bağlıdır. İkinci özelliği elde etmek için astronomlar yıldızlararası uzaydaki gaz ortamını incelerler. Bir galaksideki yıldızların arasında bulunan uzay çoğunlukla hidrojen atomlarından oluşur. Bu hidrojen atomları, nötr hidrojenin tayfında gözlenen 21 cm dalgaboyuna sahip olan radyo dalgaları yayarlar. 21 cm dalgaboyundaki bu çizgilerin genişlikleri ise ilgilendiğimiz ikinci özellik olan galaksilerin dönme hızlarının bir ölçüsüdür. Doppler kayması, yıldızlararası gaz bulutlarının dönme hızları nedeniyle çizgi profillerinin genişlemesini sağlar, bu nedenle çizgi genişlikleri galaksinin dönme hızının bir ölçüsüdür. Bir galaksinin dönme hızının genellikle galaksinin yarıçapı ile orantılı bir biçimde artarak bir $V_{dön}$ değerine kadar ulaştığı görülür. Bu iki özelliğin, yani ışıma gücü ve en büyük dönme hızının birbirleri ile bağıntılı olduğu gözlenmiştir. Işıma gücü, en büyük dönme hızının dördüncü kuvvetiyle doğru orantılıdır ($L \propto V^4_{dön}$, burada $\propto$ 'orantılıdır' anlamına geliyor).

$V_{dön}$ olarak yazılan dönme hızı galaksinin uzaklığından bağımsız olmakla birlikte ölçülen ışık akısı doğal olarak uzaklığa bağımlıdır. Eğer bütün sarmal galaksiler için aynı bağıntı geçerliyse, oldukça büyük miktarlarda yıldızlararası ortam kapsayan galaksinin türü, 21 cm çizgi genişliğinden ölçülen $V_{dön}$ ve galaksi parlaklığından galaksinin uzaklığı bulunabilir. Bu bağıntı bir kez yakın galaksilerde doğru sonuç verecek biçimde ayarlandıktan sonra çok daha uzaktaki galaksilerin uzaklıklarını bulmak amacıyla kullanılabilir. Astronomlar bu bağıntıyı, farklı galaksi türlerinden kaynaklanabilecek olası hataları en aza indirmek amacıyla yalnızca sarmal galaksilerin sınırlı bir bölümüne uygulamaktadırlar. Bu yöntem, doğal olarak galaksilerin ışıma gücü ve en büyük dönme hızı arasında Brent Tully ve Richard Fisher tarafından keşfedilen bağıntının verilen tüm sarmal galaksiler için aynı olduğu varsayımını kullanmaktadır.



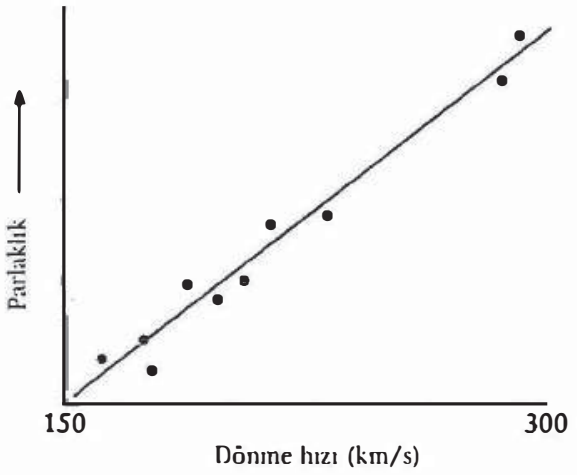
Dünya'dan uzaklaşmakta olan bir galaksinin merkezinin yaydığı ışık kırmızıya kayar. Dönmekte olan galaksinin bir kolunun Dünya'dan uzaklaşma hızı, merkez kadar büyük olmayacağından daha az kırmızıya kayma gösterir. Diğer kolun uzaklaşma hızı daha büyük olacağından kırmızıya kayma miktarı da daha büyük olur. Farklı kırmızıya kayma miktarları birleşerek geniş bir bant oluştururlar. Bu bantın genişliği galaksinin dönme hızına bağlıdır.

Bu arada, Tully-Fisher bağıntısının da Malmquist tercihine yol açan yapısal bir dağılımı vardır. Her ne kadar gözlemciler bu tercihi etkisiz hale getirebiliyorlarsa da yine de bağıntının, galaksilerin gevşek gruplarda, yoğun kümelerde ya da rasgele bölgelerde bulunmalarına göre sistematik olarak değişip değişmediği tartışma konusudur. Astronomların elinde Tully-Fisher bağıntısının dayandığı sağlam bir fiziksel temel olmadığından, bağıntıyı birbirinden çok farklı ortamlara uygularken haklı olarak çok kuşkucu davranırlar. Bu bağıntının ayarlanmasında kullanılan galaksilerin sayısı, henüz belirsizlik kaynağını güvenli bir biçimde sınamaya yetmeyecek kadar azdır.

Standart Işık Kaynağı Olarak Süpernovalar

Büyük kütleli bir yıldız, tıpkı küçük kütleli olanlar gibi, çekirdeğindeki helyum yakıtı tükendiğinde dev hatta süperdev bir yıldıza dönüşür. Bununla birlikte, büyük kütleli yıldızı bekleyen son çok daha dramatiktir. Yüksek kütleçekimi nedeniyle çekirdekteki enerji son damlasına kadar tüketilir. Nükleer füzyon, Güneş kütlesi kadar demir oluştuğunda durur. Demir, eninde sonunda bütün termonükleer reaksiyonların sonucunda biriken evrenin en kararlı elementidir. Demiri sıkıştırarak ve termonükleer füzyon reaksiyonlarına sokarak hiçbir şekilde yeni enerji elde edilemez. Yıldızın çekirdeği çöker ve enerji stokları bir anda tükenir.

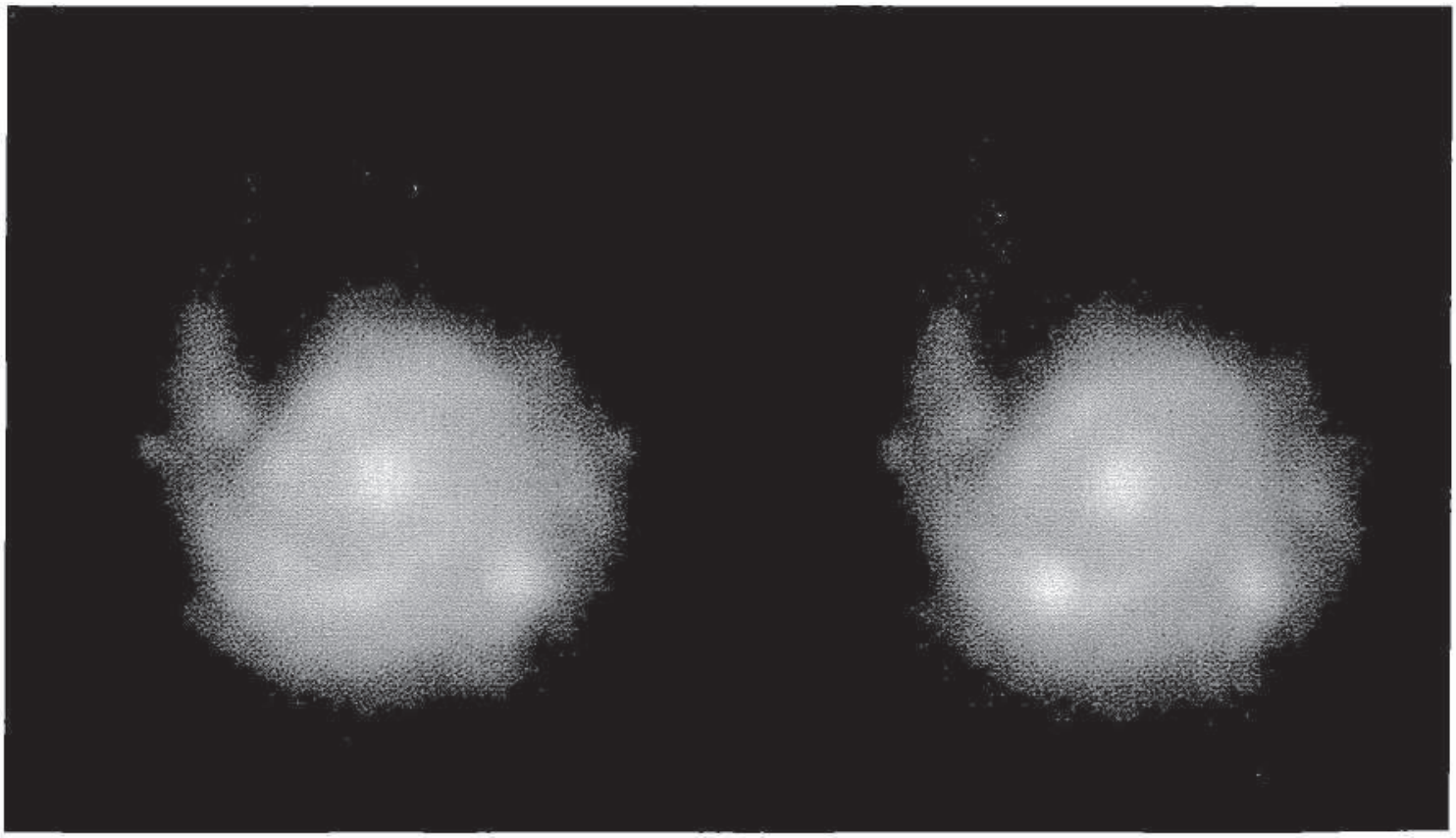
Sonuç, bir nötron yıldızıdır. Demir atomlarının çekirdekleri parçalanarak proton ve elektronlara ayrışır. Bu parçacıklar kendi aralarında kaynaşarak nötronları oluşturur. Bu arada çökme sonucu ortaya çıkan fazla ısı enerjisi nötrinolar tarafından dışarıya taşınır. Bir nötron yıldızı, çekirdek yoğunluğunda nötron içeren dev bir atom çekirdeğidir. Yoğunluk öylesine yüksektir ki, bir çay kaşığı dolusu nötron yıldızı maddesi yaklaşık bir milyar ton gelir. Nötrino salınması çekirdeğin dış katmanlarının uzaya saçılması sonucunu doğurur. Yıldızın büyük bölümü bir süpernova patlamasıyla dağılarak yıldızlararası ortama karbon, oksijen, demir ve başka elementler püskürtür. Bu elementler orada hidrojenle karışarak yeni kuşak yıldızlar için hammadde oluşturur.



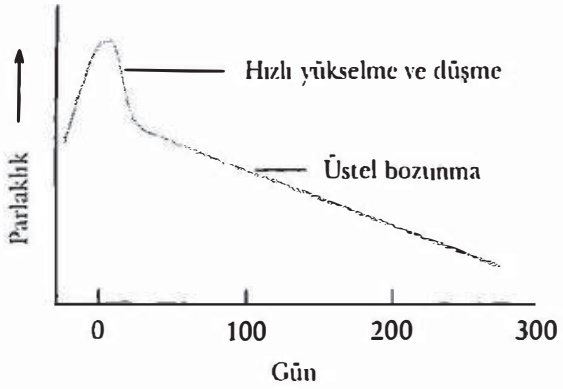
Tully-Fisher bağıntısı: Bir grup galaksinin görünür (ya da kızılötesi) parlaklığına karşı en büyük dönme hızları çizilmiştir. İki büyüklüğün de hızlarının logaritmalarının yaklaşık olarak orantılı olduğu bulunmuştur. Noktalardan her biri bir galaksiyi temsil etmektedir. Bu noktaları birleştiren doğrunun eğiminde, sarmal bir galaksinin parlaklığının, dönme hızının dördüncü kuvvetiyle orantılı olduğu bulunur.

Süpernova, bir milyar Güneş'ten daha parlaktır. Yıldızlar ölürken öylesine parlaklaşırlar ki bu evrede çok uzak galaksilerde bulunan yıldızlar bile tek tek seçilebilir. Buradan da süpernovaların uzaklık hesaplamakta kullanılabilecekleri sonucu çıkıyor. Uzaklık hesaplarken, tek tek görülebilen yıldızların istatistiksel yıldız topluluklarına oranla üstünlükleri vardır. Bunun nedeni de tek bir yıldız gözlenirken bağıntıyı doğru sonuç verecek biçimde ayarlama işleminin çok daha doğrudan yapılabilmesidir.

En açık uzaklık belirteçleri yukarıda anlatıldığı gibi büyük kütleli yıldızların ölümü sırasında ortaya çıkan süpernova patlamalarıdır. Ne yazık ki küçük kütleli yıldızlar çok ender olarak süpernova patlaması verirler. Yakın bir eş yıldıza sahip olan beyaz cüceler bazen eş yıldızdan kütle alarak kararsız duruma geçerler. Daha sonra da çökerek önce merkezlerinde demir çekirdek oluştururlar. Merkezdeki korkunç basınç altında demir çekirdekleri proton, nötron ve nötrinolara ayrışır. Ansızın çok büyük bir enerji salınır. Bu enerjinin büyük bölümü nötrinolar tarafından taşınır. Tüm yıldız süpernova olarak patlar. Genellikle küçük kütleli yıldızların ölümü sırasında ortaya çıkan bu tür süpernovalara, büyük kütleli yıldızların verdiği ve II.Tür süpernova olarak adlandırılan patlamalardan farklarını belirtmek amacıyla I.Tür süpernova adı verilir. Beyaz cücelerin, daha fazlasına sahip olduklarında kararsız duruma geçtikleri kritik kütle 1.4 Güneş kütlesidir. Bu kritik kütle ilk kez Hintli-Amerikalı astrofizikçi Subrahmanyan Chandrasekhar tarafından hesaplanmıştır. Teori, birbirinden farklı I.Tür süpernovalar için çökme sırasında sa-



NGC 3310 Galaksisi'nde bir süpernova. Soldaki resim 1987'de çekilmiştir. Sağdaki resim ise 1991 Nisan ayında 1991 N Süpernovası'nın patlamasından bir hafta sonra çekilmiştir. Sol alttaki süpernova yaklaşık bir milyar yıldız barındıran galaksinin çekirdeğini gölgeleyecek kadar parlaktır.



Özellikle 1. Tür olarak sınıflandırılan süpernovaların ışık eğrisinin biçimi son derece karakteristiktir. Patlayan yıldızın ışığı ilk bir ay içinde hızla artar ve azalır. Sonra da uzun süre üstel bir biçimde azalmaya devam eder. Bu ikinci evrede ışığın iki kat azalması için yaklaşık olarak 60 gün geçmesi gerekir.

lınan enerjinin çok farklı olmaması gerektiğini ileri sürmektedir. Sonuç olarak, bu tür süpernovalar aynı parlaklıkta oluşur ve aynı hız ve oranlarda sönükleşirler.

Uzaklıkları bilinen yakın galaksilerde gözlenen I.Tür süpernovalardan şu sonuç çıkarılmıştır: bunların yalnızca parlaklıkları aynı hız ve oranda sönükleşmekle kalmamakta (ki bu, benzer 'ışık eğrileri'ne sahip olmaları demek) saçtıkları toplam ışık da yaklaşık aynı olmaktadır. Işık, beyaz cüce çekirdeğinin dış katmanlarının çökmesi sırasında büyük miktarlarda oluşan, radyoaktif bir nikel izotopu olan Ni^{56} izotopunun radyoaktif bozunması sonucu ortaya çıkar. Kararsız nikel izotopu demire (Fe^{56}) dönüşür ve nötrinoların son püskürmesiyle çekirdek patlarken demir de dışarıya atılır. Süpernovaların tayflarından anlaşıldığına göre dışarı atılan madde çoğunlukla demir ve diğer ağır elementlerden oluşmaktadır.

I. Tür süpernovalar, 100 megaparsek ya da daha fazla uzaklıktaki galaksilerde kolaylıkla saptanabilmektedir. Eğer uzaktaki süpernovalar yakındakilerle aynı ise, bu durumda galaksilerin uzaklıklarını ölçmek amacıyla kullanılabilirler. Buradaki güçlük, en azından yakın galaksilerde oldukça çok sayıda örnek gözlemeden bütün I. Tür süpernovaların aynı olduğundan hiçbir şekilde emin olunamamasıdır.

Hubble Sabiti Nedir?

Yukarıda söz edilen değişik yöntemler, benzer uzaklık dilimlerini kapsayan H_0 sabitinin birbirinden bağımsız ölçümleri olarak düşünülebilir. Bu ölçümler genellikle birbirlerine yakındır. Aslında Tully-Fisher yöntemi, gezegenimsi bulutsu ışıma gücü ölçümleri ve yüzey parlaklık dalgalanmaları ölçümleri H_0 için hep benzer değeri, 80 kilometre bölü saniye bölü megaparsek değerini vermektedir. Bununla birlikte süpernova yöntemi, özellikle standart ışık kaynağı olarak I. Tür süpernovaların kullanılması H_0 için 50

kilometre bölü saniye bölü megaparseklik değeri öne çıkarmaktadır. Bu yaklaşımların tümünün hata payları H_0'ın iki değeri arasındaki farktan daha küçüktür.

Doğrudan Ölçümler

Standart ışık kaynağı kullanarak dolaylı yoldan ölçmek yerine H_0'ı doğrudan ölçebilen yeni yöntemler geliştirilmiştir. İlk kez Rus kozmoloji uzmanları Rashid Sunyaev ve Yakoov Zel'dovich tarafından önerilen Sunyaev-Zel'dovich yöntemi sıcak, dağınık gazlardan oluşan galaksilerarası uzay bölümlerini kapsayan galaksi kümelerini kullanmaktadır. Bu gaz, ışıma gücü kümenin hacmiyle orantılı olan x-ışınları yayar. Gaz aynı zamanda kozmik mikrodalga fon ışınımının fotonlarını da saçarak radyo dalgalarında mikrodalga fonunda gölge yapar. Aslında, saçılan fon ışınımı fotonları enerji kazanır, bu nedenle de küme mikrodalga fonuna göre daha düşük frekanslarda gözlendiğinde daha sönük, daha yüksek frekanslarda ise daha parlak görünür. Bu etkinin büyüklüğü fotonun küme içinden geçerken kat ettiği yolun uzunluğu ile orantılıdır. X-ışını ışıma gücü ve mikrodalga fonundaki azalma karşılaştırılarak sıcak gazı kapsayan bölgenin büyüklüğü çıkarılır. Kırmızıya kayma bilindiğinden ve H_0 için bir değer kabul edip Hubble yasası kullanılarak büyüklük hesaplanabileceğinden, doğrudan ölçümle Hubble sabiti için bir değer elde edilmiş olur.

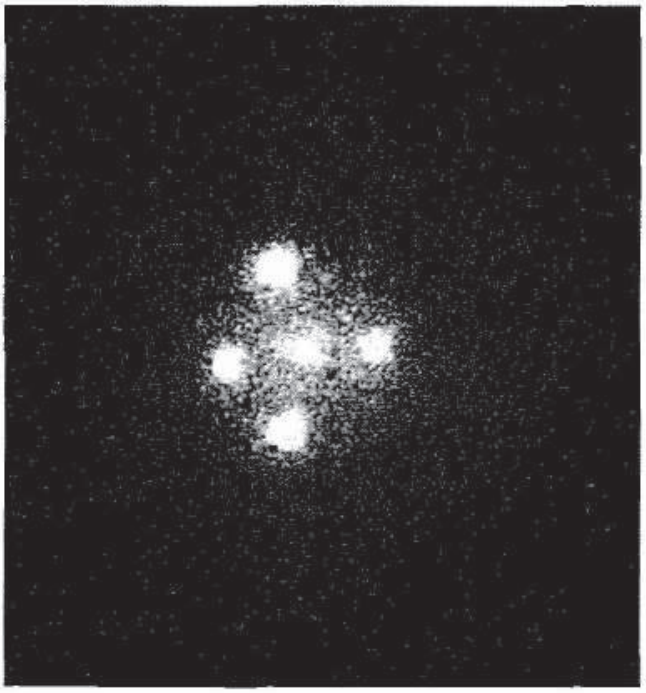
İkinci bir yöntem de araya giren bir galaksinin uzak tarafında kalan değişken kuasarları gözlemektir. Kuasardan gelen ışık galaksinin kütleçekimi alanı tarafından hafifçe saptırılır. Aradaki galaksi, arkadaki kuasarın birden çok görüntüsünü oluşturan bir kütleçekimsel mercek etkisi yapar. Kuasardan gelen ışık azalıp çoğaldıkça görüntülerdeki ışık da azalıp çoğalır ama aralarında farklı görüntülerden gelen ışığın aldığı yolların farklı olması nedeniyle faz farkları meydana gelir. Faz farkları uzaklık ölçeğine bağlı olduğundan Hubble sabitinin doğrudan ölçümüne olanak sağlar.

Bu doğrudan ölçüm yöntemlerinin her ikisinin de ilk sonuçları Hubble sabiti için yaklaşık 40 kilometre bölü saniye bölü megaparseklik düşük sonuçlar veriyor. Bununla birlikte doğrudan ölçüm yöntemleri de tam anlamıyla güvenilir değildir. Örneğin eğer bir küme, bizim bakış doğrultumuz boyunca uzamış bir biçime sahipse, olması gerekenden büyük bir Sunyaev-Zel'dovich azalması ölçülür. Eğer küme içinde bulunan gaz to-

paklanmış bir yapıya sahipse, bu da olduğundan büyük bir x-ışın ışıma gücü ölçülmesine neden olur.

Genişleyen Atmosferler Olarak Süpernovalar

Uzaklık ölçmek için üçüncü bir doğrudan yöntem daha vardır. Büyük kütleli yıldızların ölümü sonucu ortaya çıkan süpernovalar, II. Tür süpernovalar olarak adlandırılır. Her ne kadar bunların parlaklıkları (en yüksek parlaklıktaki kadir) I. Tür süpernovaların parlaklıklarından daha az ve kendi aralarında da birbirlerinden farklı iseler de bir başka özellikleri onları uzaklık ölçümünde çok yararlı kılar: bunlar çok yüksek oranda hidrojenden oluşmuşlardır. Bu nedenle de tayf çizgilerinden Doppler kayması ile patlamanın genişleme hızı ölçülebilir. Genişleme hızı ve patlamadan bu yana geçen zaman kullanılarak da patlayan yıldızın yarıçapı bulunabilir ki bu da genellikle mavi bir süperdev yarıçapına karşılık gelir. Eğer yıldızın ışıma mekanizması ideal olarak kabul edilirse, sıcaklığı hesaplanabilir. Sıcaklık ve yarıçapın bilinmesi, ışıma gücünün hesaplanabilmesi demektir ki buradan da yıldızın uzaklığı hesaplanabilir. Uygulamada, II. Tür bir süpernovanın ışıma mekanizması mükemmel olarak kabul edilemez. Yine de 'genişleyen atmosfer' yöntemi hâlâ bir süpernovanın uzaklığını ölçmekte kullanılmaktadır. Yöntem kırk-elli megaparsek uzaklığına kadar uygulanmıştır. Hubble sabiti için 70 kilometre bölü saniye bölü megaparsek değeri bulunmuştur. Gerçek değerinse daha geliştirilmiş verileri beklediği çok açıktır.



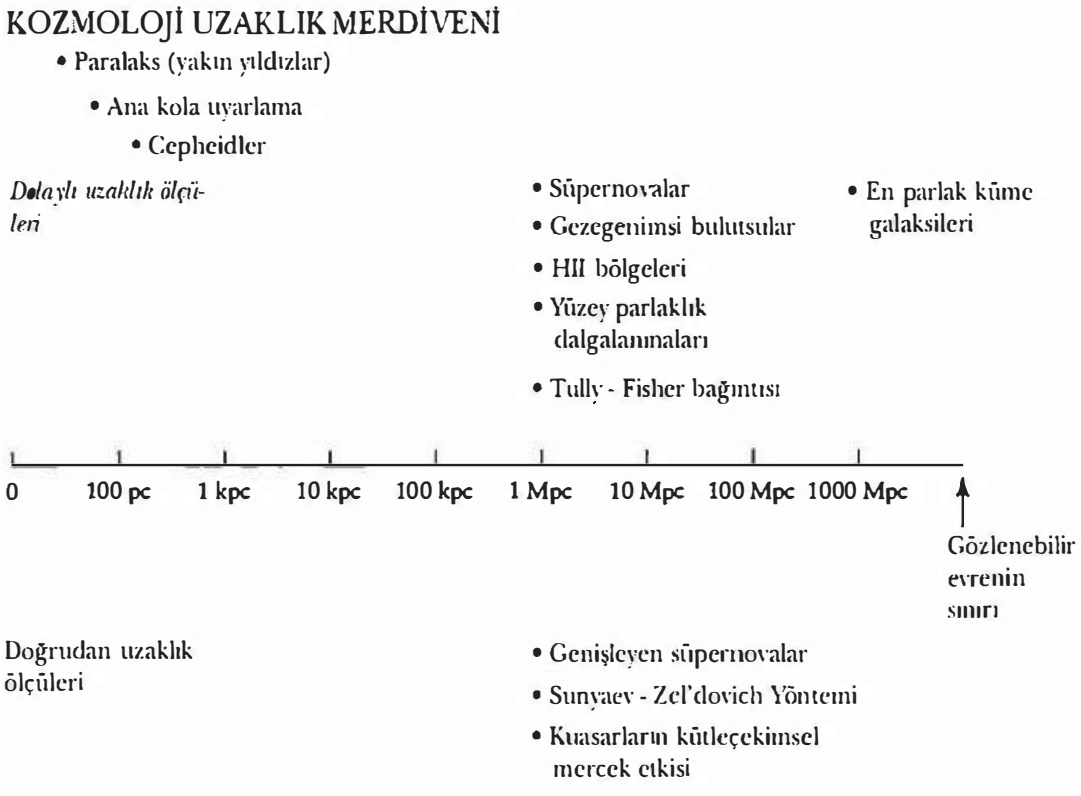
Bu görüntünün merkezindeki galaksi arka plandaki bir kuasara mercek etkisi yapmakta ve ışığını dört görüntü verecek şekilde ayırmaktadır. Her görüntüde ışığın alacağı yol çok az da olsa farklı olacağı için, kuasarın ışığındaki her değişim, görüntülerde farklı ışık salınımlarına neden olur. Böylece astronomlar uzaklık ölçmenin bir yolunu bulmuş olurlar ki buradan da Hubble sabiti, doğrudan ölçülebilir.

Astronomlar, Hubble sabitindeki belirsizliğin çözümüne en büyük katkıyı Hubble Uzay Teles-

kobu'nun yapacağına inanıyorlar. Bunun nedeni de teleskobun geliştirilmiş çözümleme gücü sayesinde 20 megaparsek uzaklığındaki galaksilerde bile Cepheid yıldızlarının gözlenebilecek olması. Uzun vadede yerden gözlem yapan en büyük teleskoplar, atmosferin bulanıklaştırıcı etkilerini giderici aygıtlarla donatılacak ve böylece uzaklık ölçme yöntemleri daha da geliştirilerek çok daha uzaktaki galaksilere uygulanabilecektir. Bununla birlikte şu an Hubble sabitinde 40 ile 80 kilometre bölü saniye bölü megaparsek arasında 2 faktörlük belirsizliği kabul etmek zorundayız.

Durağan Durum Kozmolojisi

Hubble'ın evrenin genişlediği yolundaki keşfinin yaşamsal bir sonucu olmuştur: eğer genişleme hızında bir azalma ya da artma yoksa, R/v ya da $1/H_0$ kadar zaman ön-



Astronomide uzaklıklar değişik yöntemlerle ölçülür. Bu yöntemlerin duyarlılığı, ölçülen uzaklık arttıkça azalır. Kiloparsekten yüzlerce megaparsek ölçeklerine kadar uygulanabilecek pek çok dolaylı ölçü vardır. Dolaylı ölçüler içinde en parlak standart ışık kaynakları parlak küme galaksileri olup en büyük uzaklıklara kadar uygulanır. Doğrudan uzaklık ölçüleri parlaksla başlar ve çok daha büyük uzaklıklara göre geliştirilir.

ce evreni oluşturan tüm maddenin birarada bulunması gerekirdi. H_0 Hubble sabitidir ve Hubble'ın orijinal çalışmasındaki değer H_0=500 kilometre bölü saniye bölü megaparsektir. Bu, Hubble'ın uzaklık ölçeğiyle $1/H_0$=iki milyar yılın galaksinin yaşı için bir üst sınır olarak yorumlanması gerektiği anlamına gelir.

Bu yaş, Güneş sisteminin en eski kayalarının radyoaktif tarihleme tekniği ile ölçülen yaşı ile karşılaştırılabilir. Bu teknikte uzun ömürlü radyoaktif izotopların bozunma sonucunda hangi miktarlarda kaldığı ölçülür. Örneğin, uranyumun en bol bulunan 238 kütleli izotopu (U^{238}) kararsız olup yarı-ömrü dört milyar yıldır. Radyoaktif bozunma ile kütlesi 205 olan bir kurşun izotopuna (Pb^{205}) dönüşür. Kurşunun bu izotopunun tek ortaya çıkış yolu, uranyumun radyoaktif bozunmasıdır. Kayanın yaşı ne kadar eskiyse Pb^{205} izotopunun U^{238} izotopuna oranı o kadar büyük olacaktır. Farklı kaya ve meteorit örneklerinin içerdiği kurşun izotopunun günümüzdeki bolluğu ölçülür ve bu bolluklardan kayanın yaşı hesaplanır. Meteoritlerde ve Ay'dan alınan örneklerde bulunan Güneş sisteminin en eski kayalarının yaşı 4.6 milyar yıl olarak hesaplanmıştır. Güneş sistemi, Hubble'ın evren için hesapladığı yaştan en az iki kat daha yaşlı imiş gibi görünüyor.

Bu rakamları en yaşlı yıldızların yaşlarına bakarak kontrol edebiliriz. Küresel kümeler galaksi düzlemi dışında yer alan antik yıldız topluluklarıdır. Böyle kümelerde yer alan yıldızlar aynı zamanda doğarlar ama en büyük kütleli olandan başlayarak sıra ile ölürler. Eğer yaşayan yıldızlar içinde en büyük kütleye sahip olanın kütlesini bulabilirsek, küresel kümenin, dolayısı ile de galaksimizdeki en yaşlı yıldızların yaşını hesaplayabiliriz. Bulunan yaş 14 milyar yıl civarındadır. Görünüşe bakılırsa bir çelişki var. Evren nasıl içinde bulunan yıldızlardan daha genç olabilir? Hubble zamanında yerküremiz bile evrenden daha yaşlı görünüyordu.

Bu yaş çelişkisi yeni bir kozmoloji teorisinin doğmasına yol açtı. Durağan durum evreni 1949 yılında Herman Bondi, Thomas Gold ve Fred Hoyle tarafından ortaya atılmıştı. Hoyle'un anlatımına göre o akşam üç astrofizikçi Cambridge'de bir dizi hayalet öyküleri anlatan bir filme gitmişler. Bu filmin garip tarafı, en sondaki sahnenin ilk baştaki ile aynı olması imiş. Filmin hiç sonu yokmuş, sürekliymiş. Filmden etkilenen Gold, ilk kez orada evrenin de başı sonu olmayan, sonsuz bir zaman çevrimi içinde olabileceğinden söz etmiş. Böylece de durağan durum kozmolojisi doğmuş. Bu teorinin en belirleyici özelliği, evrenin yoğunluğunu sabit tutabilmek için maddenin boşluktan yaratıldığı-

nı kabul etmesi ve bu nedenle de mükemmel kozmoloji ilkesi ile uyum içinde olmasıdır. Eninde sonunda galaksiler biçiminde biraraya toplanan atomlar, evrenin genişlemesi nedeniyle diğer atomlar uzaklaşınca boş uzaydan ortaya çıkarlar. Bütün fizikçiler tarafından kabul edilen temel bir ilke olan madde ve enerjinin korunumu ilkesi tutarsız bir biçimde gözardı edilmiştir.

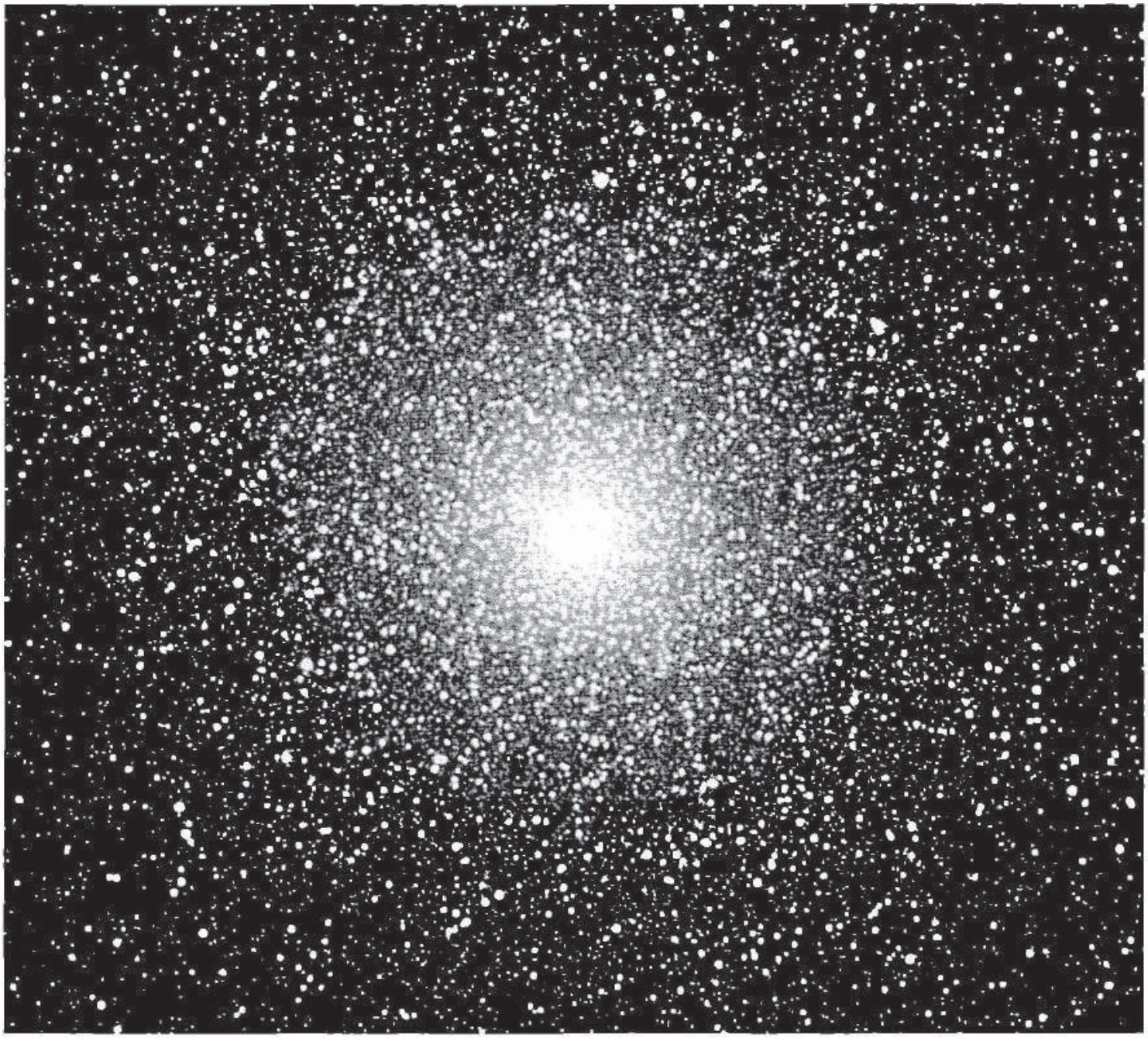
Durağan durum teorisi aslında mutlak bir başlangıca olan gereksinimi ortadan kaldırmayı amaçlıyordu. Bu teori, teoloji ve kozmoloji yazarı Stanley Jaki tarafından "üzerine bilimsel cila çekilen gelmiş geçmiş en büyük hile" olarak adlandırılmıştı. Bununla birlikte teorinin gelişmesinin altında kuvvetli bir bilimsel motivasyon yatmaktaydı. Durağan durum postülası görünürdeki zaman ölçeği problemini çözmek için yapılmış bir girişimdi.

Durağan durum kozmolojisinin birçok önemli öngörüleri olmuştur.

1. Her on milyar yılda bir, metreküp başına bir hidrojen atomu yaratılmıştır ve halen de yaratılmaktadır. Maddenin boşluktan yaratıldığı varsayılmakta, bu nedenle de madde ve enerjinin korunumu yasasını kökten bir biçimde ihlal etmektedir.
2. Uzaklarda hiçbir evrim gerçekleşmiş olamaz. Durağan durum hipotezi, anlam olarak, yakında ve uzakta gözlediğimiz galaksi yoğunluklarının aynı olması gerektiğini ileri sürmektedir. Uzak galaksileri gözleyerek geriye gidebileceğimiz milyarlarca yıl boyunca yoğunlukta bir değişiklik gerçekleşmiş olamaz.

Eğer ilk öngörü doğruysa, hidrojen atomları gerçekten boşluktan yaratılıyorsa, o zaman karşı madde de yaratılmalıydı. Protonlar ve onların karşı madde ikizleri olan karşı protonlar (anti-protonlar), karşılaştıkları her yerde gamma ışınları saçarak birbirlerini yok ederler. Böylesine rastgele yokoluşlar sonucu bulanık bir gamma ışın fonu oluşması gerekirdi. Ama evren, görüldüğü gibi yokoluşlardan kaynaklanan gamma ışınları ile parıldamıyor. Dahası, galaksiler, kozmik bir felakete yol açmadan eşit miktarlarda madde ve karşı maddeden meydana gelmiş olamazlar.

Başka bir çözüm akla geldi. Eğer madde ve enerjinin korunumu yasasının geçerliliğini kaybettiği varsayılsa bile, bir başka temel yasa olan elektrik yükünün korunumu yasasını ihlal etmekten kaçınmak gerekir. Bu nedenle yeni yaratılan maddenin olası biçimi nötronlar olabilir. Bunlar bozunur ve arkalarında evreni kaplayan sıcak ve x-ışınları yayan bir gaz bırakırlar. Bununla birlikte, beklenen gamma ışınları gibi x-ışınları da gözlenmedi. Bu itirazları karşılamak üzere Fred Hoyle ve Jayant Narlikar, teorilerini



Yaklaşık 4 kiloparsek uzaklıktaki 47 Tucanae Küresel Yıldız Kümesi. Böyle kümeler Samanyolu'ndaki en yaşlı yıldızları barındırırlar ve evrenin minimum yaşını hesaplamakta kullanılırlar. Eğer kümelerin oluşması için bir milyar yıl varsayarsak evrenin yaşı yaklaşık 15 milyar yıl olarak bulunur.

maddenin ancak olağandışı yoğunluklardaki bölgelerde yaratılabileceğini öne sürecek biçimde değiştirdiler. Bu bölgeler, galaksilerin çekirdekleri ve evrenin ilk dönemlerinde bulunan, galaksilerin erken dönem evrimleriyle ilişkili olduğu düşünülen, kuasar adı verilen egzotik ve olağanüstü parlak cisimlerdi.

İkinci öngörüyü de çürütmek için yeterli kanıt var mı? Bazı galaksiler kuvvetli birer radyo dalgaları kaynağı olup çok uzaklardan algılanabilirler. Bu radyo dalgaları kaynakları, evren yoğunluğunun zamanla değişmediği hipotezini sınamak üzere sayıldı. Eğer evrenin yoğunluğu, büyük patlama teorisinin öngördüğü gibi, geçmişte daha yüksekse, o zaman ölçülen uzak ve sönük kaynakların sayısında yakın ve parlak olanlara göre büyük bir artış olmalıdır.

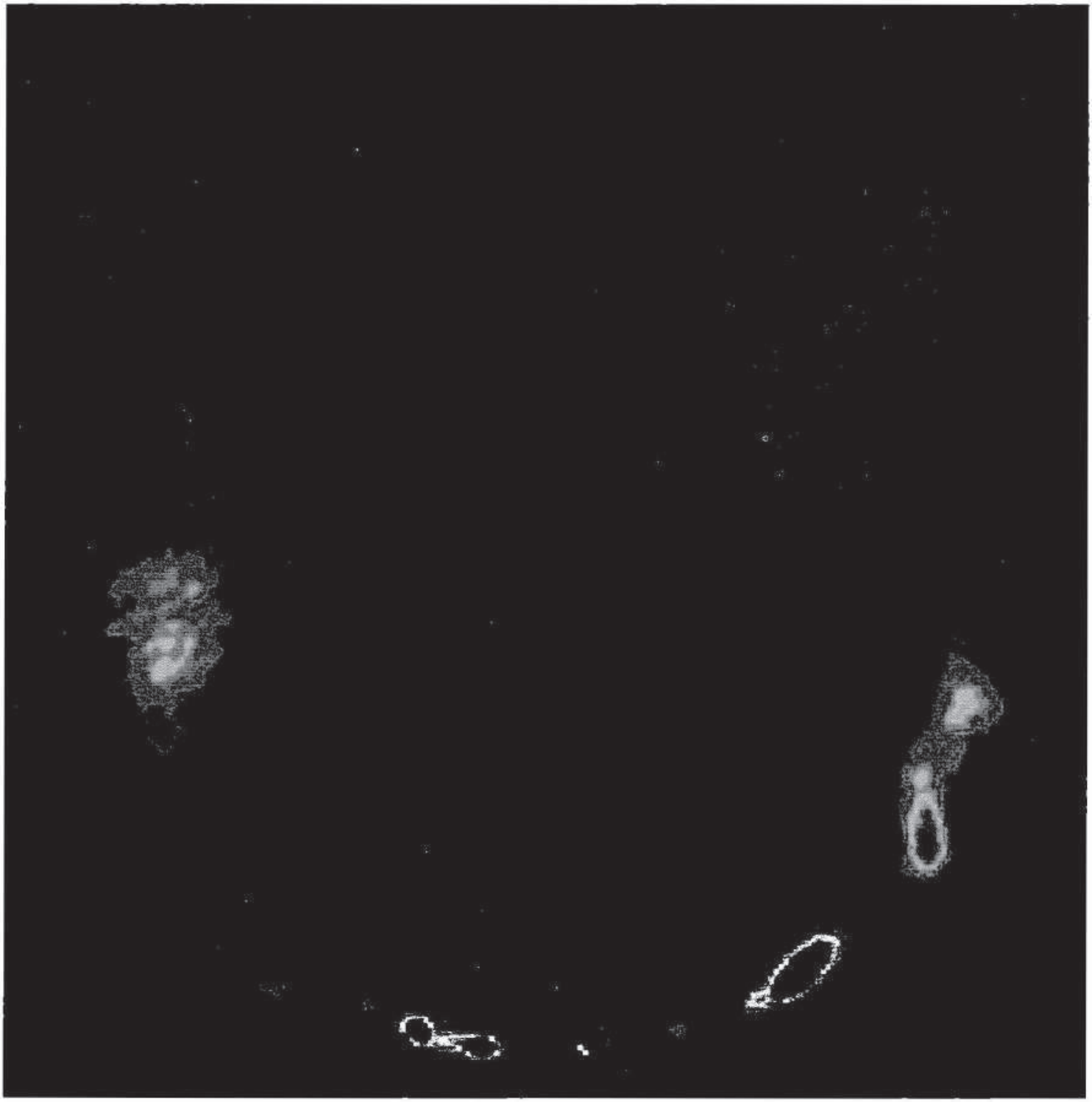
Tipik bir araştırma, radyo parlaklıkları, sınırı radyo teleskobun boyutları, duyarlılığı ve gözlem süresi tarafından belirlenen parlaklığın üzerinde kalan radyo kaynaklarının sayılmasıdır. N(>f) sayısının ölçülen bir f şiddetinden daha parlak olduğu gözlenen radyo galaksilerin sayısı olduğunu varsayalım. Radyo ışıma gücü L ve uzaklığı d olan bir kaynak için bu sayı, ışıma gücünün kabuğun o uzaklıktaki yüzey alanına oranıdır: $f=L/4\pi d^2$. Bu eşitlik d için çözülürse, $d=(L/4\pi f)^{1/2}$ bulunur. Bu nedenle gözlenebilen kaynakların parlaklığının sınırlı olduğu bir araştırmada, eş L parlaklığındaki kaynakların uzaklığı L'nin f'ye oranının karekökü ile orantılıdır.

Şimdi, tüm gökyüzünün tarandığı bir araştırmadaki radyo kaynaklarının toplam sayısı radyo kaynaklarının yoğunluğu ile taranan hacmin çarpımına eşittir. Durağan durum hipotezi radyo kaynaklarının sayısal yoğunluğunun sabit olduğunu ileri sürmektedir. Bu nedenle de parlaklıkları araştırmanın f parlaklık sınırından daha büyük olan kaynakların sayısal yoğunluğu, taranan hacimle ya da d^3 doğru orantılı olmalıdır:

$$N(>f) \propto d^3 \propto (L/f)^{3/2}$$

Burada $\propto$ işareti "doğru orantılıdır" anlamına geliyor.

Bu sonuç, araştırmanın duyarlılığı arttığında, yani f ile gösterilen sınır parlaklığı küçüldükçe saptanabilecek kaynakların sayısının keskin bir biçimde artacağını öngörmektedir. Durağan durum modeline uygun düşecek, evrim geçirmeyen bir evrende bu sayı, kaynak parlaklığının üç bölü ikinci kuvvetinin tersi ile orantılı olmalıdır ($f^{3/2}$). Durağan durum hipotezinin tersine, ilk kez 1950'lerde Martin Ryle ve John Bolton tarafından yapılan gözlemler kaynak sayısının çok daha hızlı arttığını gösterdi. 1950'lerde, bu teoriyi öne sürenler, evrenin radyo kaynakları bakımından eksiklik çekilen bir bölgesinde yaşamakta olabileceğimizi iddia ettiler. Bununla birlikte sonradan radyo kaynaklarının çoğunlukla bizden birkaç bin parsek uzaklıkta olan radyo galaksiler ve kuasarlar olduğu, dolayısıyla da evrimin 10 milyar yıl ölçeğinde yer aldığı gösterildi.

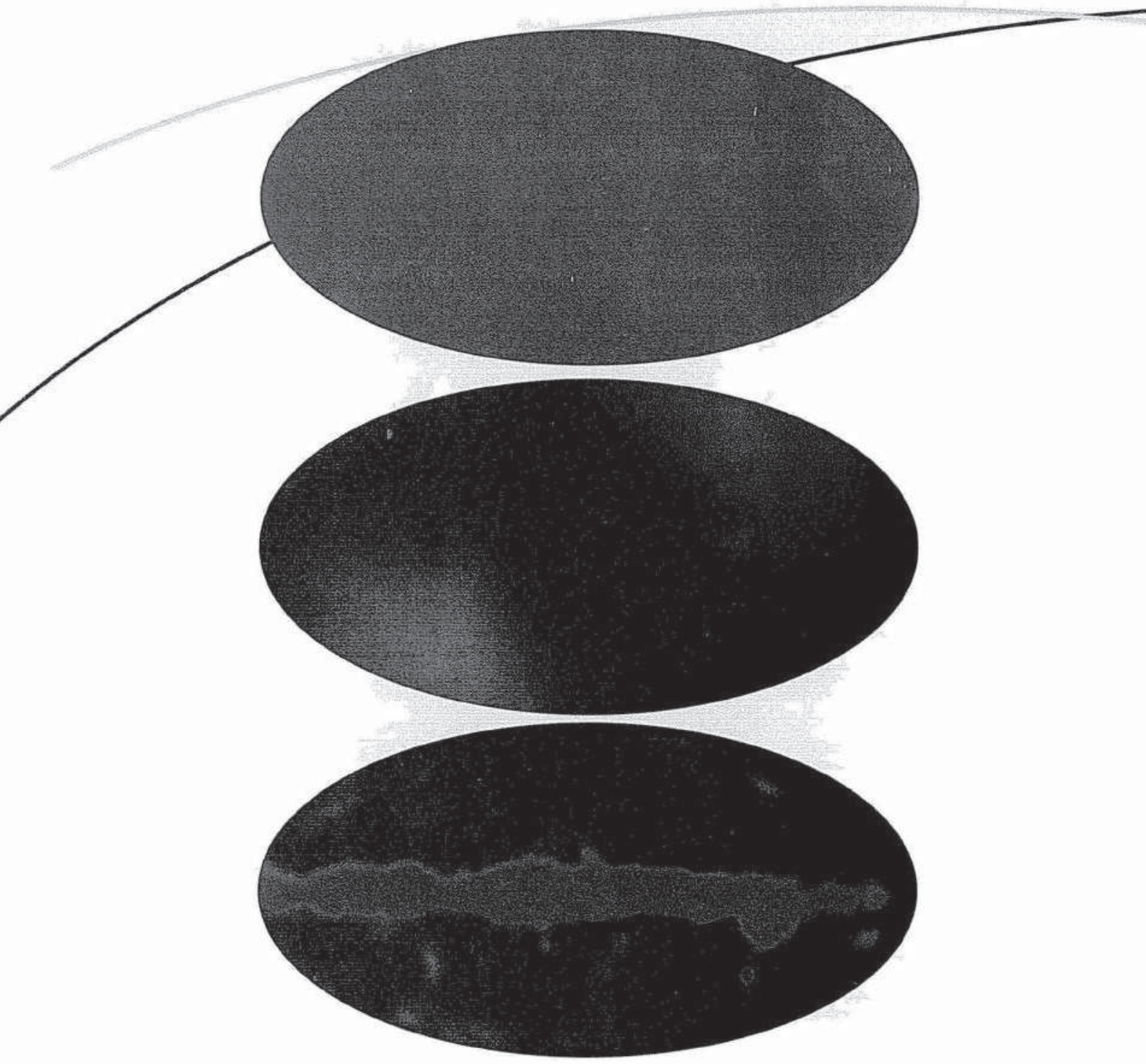


Virgo Kümesi'nde bulunan NGC 1265 elips biçimli galaksisinin New Mexico, Soccoro'da bulunan VLA ile hazırlanmış olan radyo haritası. Radyo fışkırmalarının boyutları yanında galaksinin görünür bileşeni çok küçük kalıyor. Bu fışkırmalar arkada, galaksinin içinde hareket ettiği gazın basıncı nedeniyle dev kuyruklar bırakıyor. Radyo astronominin ilk günlerinde konumları belirsiz ve ayrıntılardan yoksun olmasına karşın çok sayıda radyo galaksi bulundu. Bunların yalnızca sayılması bile kozmolojide önemli sonuçlara varılmasına neden oldu.

Radyo dalgaları yayan parlak galaksilerin geçmişteki sayıları günümüzdekinden çok daha büyüktü.

Bir yandan evrensel genişlemenin yaşı, diğer yandan meteorların ve yıldızların yaşları arasındaki bu çelişki, H_0 için çok daha doğru bir değerin bulunduğu 1950'lerde çözüldü. 75 kilometre bölü saniye bölü megaparsek olarak saptanan en iyi çağdaş değer, evrenin yaşı olarak $1/H_0$= 15 milyar yıl vermektedir.

Durağan durum teorisine son darbe, kozmik mikrodalga fon ışınımının keşfiyle 1964 yılında geldi. Önümüzdeki bölümde açıklanan ve tüm uzayın yıkandığı bu ışınım denizi, büyük patlama teorisinin öngördüğü evrenin yoğun ve sıcak evrelerinden kaynaklanan ışınımın doğrudan bir kanıtıdır. Durağan durum teorisi ile bu ışınımı açıklayabilmek için, pek çok olağanüstü parlak galaksinin yaydığı yoğun ışınım alanını soğuran ve bu ışınımı mikrodalga fotonları olarak yeniden yayan, milimetre boyutlarındaki toz parçacıklarının evrensel olarak var olduğunu kabul etmek gerekir. Kozmik mikrodalga ışınımının bu açıklaması öylesine çok sayıda özel varsayım gerektirir ki, kozmoloji uzmanlarının çoğunluğu tarafından olanaksız olarak kabul edilir.



COBE Uydusu'nın artan duyarlılığı ile kozmik mikrodalga fonunun görünüşü İlk yaklaştırma kadar gökyüzü tek biçimlidir (üstte), ama dalgaboyunda mavi kırmızıya doğru 1000'de 1'lik bir kayma gösterir (ortada). Bu kaymanın nedeni Dünya'nın mikrodalga fonuna göre hareket etmesidir. Bu kayma çıkarılırsa 100.000'de 1 oranındaki dalgalanmalar görünür hale gelir (altta).

3

Kozmik Mikrodalga Fon Işınımı

1922 yılında bir Rus meteorolog ve matematikçisi olan Alexander Friedmann, etkileri yüzyıl boyunca yankılanan bir keşif yaptı. Albert Einstein'ın görmezlikten geldiği ve başlangıçta kabul etmeyi reddettiği bir şeyi farketmişti: evren genişliyor olabilirdi. Einstein, kozmoloji ilkesini uygulayarak kendi geliştirdiği genel görelilik (relativite) teorisindeki evrensel kütle çekimi denklemlerini basitleştirmiş ve görünüşte durağan olan bir evren modeli elde etmişti. Hatta evrenin kendi kütle çekimi ile kendi üzerine çökmesini engellemek için kozmik itme adını verdiği bir kuvvet bile icat etmişti. Friedmann, Einstein'ın basit bir matematiksel hata yaptığını, bu nedenle de Einstein denklemlerinin evrenin genişlemesine olanak sağlayan ve yeni bir kuvvete gereksinim duymayan çözümlerini gözden kaçırdığını farketti. Einstein da sonradan, kozmik itme gibi bir kuvvetin varlığını öngörmenin yaptığı en büyük hatalardan biri olduğunu itiraf etmiştir.

Friedmann'dan bağımsız olarak çalışan Belçikalı kozmoloji uzmanı Georges Lemaitre de 1927 yılında evrenin genişlediğini yeniden keşfetti ve bir adım da ileri gitti. Lemaitre, galaksilerin gösterdiği kırmızıya kaymanın, evrenin genişlemekte olduğunun kanıtları olduğunu iddia etti. Lemaitre'ın kırmızıya kaymanın galaksilerin uzaklığıyla orantılı olması gerektiği yolundaki sezgisi kırmızıya kayma olayına fiziksel bir anlam vermekle birlikte durağan evren modeline fazlaca konsantre olmuş bulunan zamanın meşhur kozmoloji uzmanlarınca pek kabul görmedi. 1929 yılında Edwin Hubble'ın galaksilerin uzaklıklarını gözlemsel destek olarak kullanarak ampirik bir biçimde uzaklık-kırmızıya kayma yasasını nasıl ortaya koyduğunu gördük. İlginçtir, Hubble da kırmızıya kaymanın uzaklıkla lineer bir biçimde artmasının evrenin genişlemesinin kanıtı olduğunu hiçbir zaman tam anlamıyla kabul etmiş görünmedi. Sonraki kozmoloji uzmanları ise hemen hemen tam bir fikir birliği içinde Hubble yasasını genişleyen bir evren modeli geliştirmede temel olarak aldılar.

1922 yılında büyük patlama kozmolojisini öngören Alexander Friedmann.

Genişleyen evren teorisi birçokları için kabul edilmesi çok güç bir teori olmuştur. Bu teori evrenin sınırlı bir zaman kadar önce son derece yoğun bir durumdan kaynaklandığını ima ediyordu. 1950 yılında bir radyo programında, durağan evren modelinin savunucularından Fred Hoyle rakip olarak gördüğü genişleyen

evren teorisinden alaycı bir biçimde "büyük patlama" (big bang) olarak söz etti. Bu deyim bir anda çok tuttu. Büyük patlama teorisi tüm gözlenen evrenin geçmişte, günümüzden 10-20 milyar yıl kadar önce olağanüstü yoğunluktaki bir durumdan ortaya çıktığını ileri sürer. Büyük patlama teorisinin en büyük kanıtı geçmişten, evrenin başlangıcından kalan ışınım alanı olmuştur.

Keşif

1964 yılında iki genç radyo astronom olan Arno Penzias ve Robert Wilson şaşırtıcı bir radyo parazit kaynağı keşfettiler. İki bilimadamı New Jersey'deki Bell Laboratuvarları'nda önceki haberleşme uydularından sinyal almak üzere tasarlanmış çok duyarlı bir radyo teleskop üzerinde çalışıyorlardı. Radyo teleskop yer-ötesi kaynaklı bir radyo paraziti saptadı. Bu parazit yalnızca Güneş'in ve Samanyolu'nun konumlarından bağımsız olmakla kalmıyor, her yönden eşit olarak geliyordu. Yani bu parazit bilimsel bir deyişle izotropikti. Parazit aletin kendisinden kaynaklanmıyordu. Penzias ve Wilson teleskobu böylesi bir parazitin kaynağı olabilecek kuş pisliği gibi kirlerden çok dikkatli bir biçimde temizlediler. Ölçümleri sonucu bu parazitin elektromanyetik tayfın mikrodalga bölümüne giren 7 cm dalgaboylu bir ışınım olduğu ortaya çıktı. Bu ışınım kolayca saptanabiliyordu. Herhangi bir kanala ayarlanmamış televizyon ekranlarındaki parazitin yaklaşık yüzde biri aynı yer - ötesi ışınımdan kaynaklanmaktadır.

1927'de evrenin genişliyor olabileceğini ileri süren Georges Lemaitre.

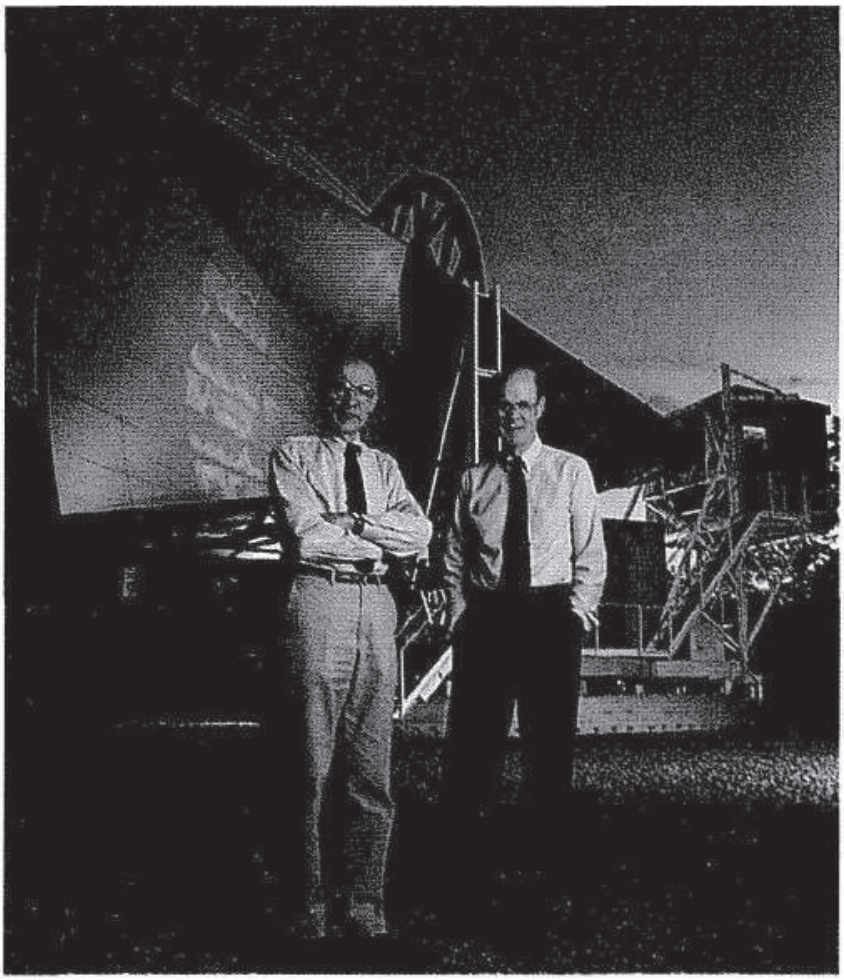
Çok geçmeden bu mikrodalga ışınımının evrenin en uzak bölgelerinden kaynaklandığı ortaya çıktı. Işınımın çok büyük ölçüde izotropik olması onun -örneğin Güneş sistemindeki toz gibi- yakın bölgelerden değil, çok uzaklardan kaynaklandığının kanıtıdır. Hemen hemen aynı zamanlarda Princeton Üniversitesi'nde çalışmalarını yoğunlaştıran bir grup kozmoloji uzmanı, büyük patlamadan kalmış olmasını bekledikleri kozmik mikrodalga ışınımını araştırmaktaydılar. Robert Dicke ve çalışma arkadaşları evrendeki, Güneş ve diğer yıldızlardaki helyumun çoğunluğunun, evrenin başlangıç dönemlerinde termonükleer

füzyon yoluyla ortaya çıkmış olması gerektiğini iddia ediyorlardı. Bunun olabilmesi için başlangıç dönemlerinde evrenin son derece sıcak olması gerekiyordu. Bu durumda evren, sıcak elektron ve protonların yaydığı yüksek enerjili fotonlarla dolu olacaktı. Evren genişledikçe bu ışınım soğuyacak ve günümüzde de elektromanyetik tayfın mikrodalga bölgesinde gözlenebilmesi gerekecekti. Princeton astronomları 20 yıl önce benzer bir düşünce biçiminin George Gamow tarafından ortaya atıldığından ve benzer öngörülere yol açtığından habersizdiler. Gamow'un eski öğrencileri olan Ralph Alpher ve Robert Herman 1949 yılında bu antik ışınım nedeniyle günümüzde evrenin sıcaklığının 5 Kelvin civarında olması gerektiğini hesaplamışlardı. Bununla birlikte mikrodalga ışınımının deneysel olarak araştırılmasını önermemişlerdi. 1963 yılında iki Rus bilimadamı, Andrei Doroskhevich ve Igor Novikov mikrodalga ölçümlerinin kozmik fon ışınımına herhangi bir sınır getirip getirmediğini öğrenmek için Bell Laboratuvarları Teknik Bültenleri'ne başvurdular. 1961 yılından kalma Ed Ohm'un bir araştırmasına rastlayınca altın bulmuş gibi sevindiler. Ohm, bu araştırmada Bell Laboratuvarları'nın 6 metre çapındaki anteni ile gökyüzünü tararken 3 Kelvin civarındaki sıcaklıklarda ışınımda bir fazlalık saptadığını belirtiyordu. Ne yazık ki Ohm aletlerden kaynaklanan gürültüyü bu parazitten ayıramamıştı.

Böylece Princeton araştırmacıları boş yere fazla çalışıp çabalamaktan kurtulmuş oldular. Kozmik mikrodalga tayfını ikinci bir dalgaboyunda ölçmeyi başardıkları zaman da Bell Laboratuvarlarının keşfini sonuçlandırmış oldular. Işınımın da çoğunlukla kara cisim ışınımı biçiminde olması gerektiği sonucuna vardılar.

Kara Cisim Işınımı

Kara cisim ışınımı, mutlak düzgün sıcaklıktaki çevresinden soyutlanmış bir bölgede var olan ışınıma verilen addır. Özellikleri, bölgenin başka hiçbir özelliğine değil, yalnızca sıcaklığına bağlıdır. Kara cisim ışınımı geniş bir dalgaboyu aralığını kapsamakla birlikte ışınımın şiddeti bazı dalgaboylarında artış gösterir. Bu tür ışınımın şiddeti dalgaboyuna göre Planck dağılımı adı verilen özel bir dağılım gösterir. Her ne kadar bu dağılımın biçimi her zaman aynı ise de, sıcaklık arttıkça ışınım şiddeti en büyük değerine daha kısa dalgaboylarında ulaşır. Bu değişimin Wien yasası olarak bilinen kuralı, ışınım



1964 yılında kozmik mikrodalga fonunu keşfeden, AT&T Bell Laboratuvarında çalışan bilimadamları Robert Wilson ve Arno Penzias, Holmdel, New Jersey'deki antenin önünde görülüyorlar.

şiddetinin en büyük olduğu dalgaboyu ile sıcaklığın çarpımının 0.3 Kelvin olduğunu söyler. Bu nedenle, şiddeti 0.1 cm dalgaboyunda en büyük değerine ulaşan ışınımın sıcaklığı yalnızca 3 Kelvin ya da -270 Celsius'tur.

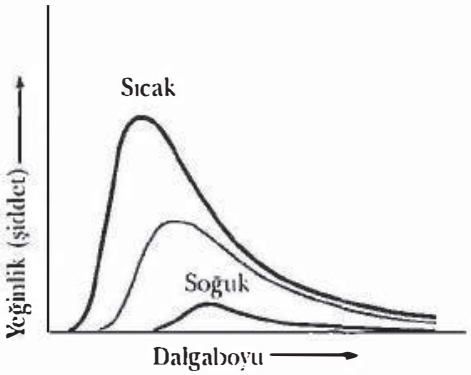
Princeton'daki araştırmacılar, kozmik fon ışınımının kara cisim ışınımı olduğu sonucuna varırken, ışınım şiddetinin en büyük olduğu dalgaboyundan çok farklı yalnızca iki dalgaboyunda ölçüm ile yetinmekle büyük bir riski göze aldılar. Bir kara cisim tayfı yalnızca iki dalgaboyundaki ölçümlerle son derece zayıf bir biçimde tanımlanabilirdi. Akla hemen Enrico Fermi'ye atfedilen şu sözler geliyor: elinde dört veri noktası bulunan uyanık bir deneyci, bunlarla bir fili tanımlayabilir, hele beş veri noktası varsa, filin kuyruğunu sallamasını bile sağlayabilir. Bununla birlikte, büyük patlama teorisi son derece ikna edicidir: kara cisim ışınımının varlığını büyük bir kesinlikle öngörmüştür. Ancak karmaşık bir teknoloji geliştikten ve bu arada pek çok yanlış alarm verildikten son-

1940'ların büyük patlama teorisindeki öncüsü George Gamow aynı zamanda hafif elementlerin kaynağı olarak nükleer sentezi önermişti.

ra ışınımın tepe noktası civarındaki dalgaboylarında başarılı ölçümler yapılabilmiştir.

Aslında 1991 yılına kadar roket ve balon ölçümleri kozmik mikrodalga fon ışınımının tayfının 3 derece Kelvin sıcaklığındaki bir kara cismin tayfına son derece benzediğini tam anlamıyla ortaya koyamamıştır. Dramatik atılım, John Mather tarafından tasarlanan ve 1989 yılının Kasım ayında fırlatılan Kozmik Fon Kaşifi (COBE) uydusuna yerleştirilen bir araçla geldi. Mather'ın geliştirdiği araç, kozmik mikrodalga fonunun sıcaklığını daha önce ulaşılamamış bir duyarlılıkla ölçmeyi başardı. Araç, fon ışınımının sıcaklığının kesin değerini yalnızca 0.005 derece Kelvin belirsizlikle 2.726 derece Kelvin olarak buldu. Başka teleskoplarla 30 cm'den (radyo bandı) 0.05 cm'ye (uzak kızılötesi) kadar çok çeşitli dalgaboylarında da ölçümler yapıldı. Saf kara cisim tayfından olan farkın son derecece küçük olduğu saptandı: kara cisim tayfının tepe noktası yakınlarında binde bir'lik bir fark bulundu. Laboratuvarda bile uzayda yapılandan daha duyarlı bir kara cisim ölçümü yapılamaz.

Kuantum teorisi ışınımın enerjisinin dalgaboyuyla ya da frekansıyla ilişkili olduğunu söyler. Işınım, foton adı verilen tek tek enerji paketçikleri ya da kuantumları biçiminde yayılır. Bir fotonun enerjisi $h\upsilon$ biçiminde yazılabilir. Burada υ frekansı ($c/\upsilon=\lambda$ dalgaboyunu, h ise değeri 6.62×10^{-27} erg saniye olan Planck sabitini göstermektedir. Kara cisim ışınımı, olabildiğince fazla sıkıştırılmış fotonlardan oluşmaktadır. Bu, boyutları λ dalgaboyu kadar olan bir kutuda yaklaşık olarak bir foton bulunduğu anlamına gelir. Bu



Bir kara cismin yaydığı ışığın dağılım biçimi evrensel olup cisimin sıcaklığından bağımsızdır. Kara cismin sıcaklığı azaldıkça yaydığı ışınımın en fazla olduğu dalgaboyu da daha büyük değerler alır. Görünür ışık yayan kara cisimler için

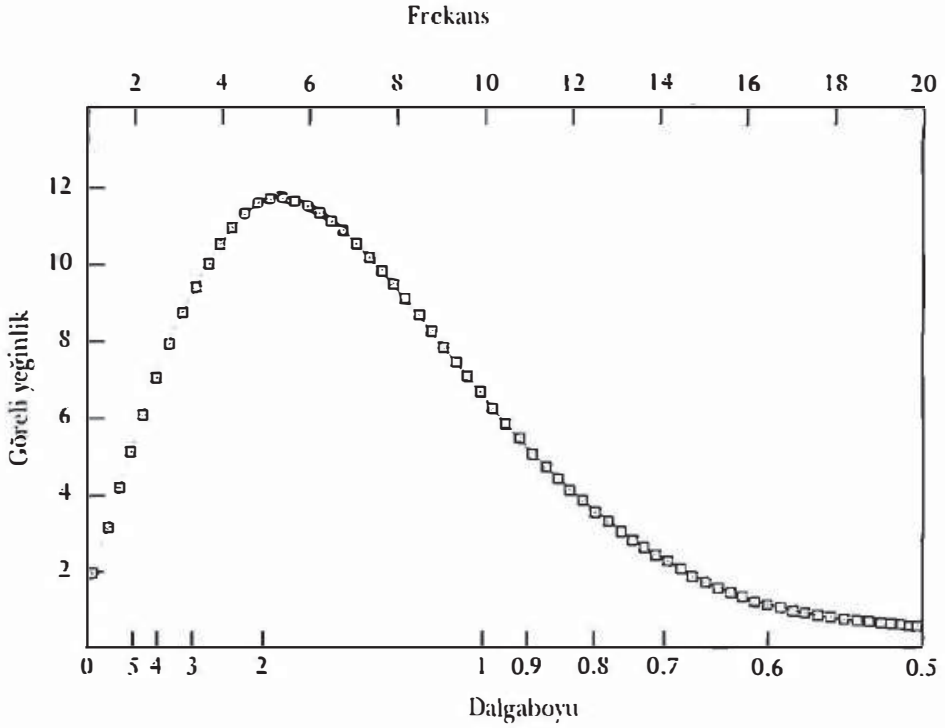
nedenle kara cisim ışınımının yoğunluğu yaklaşık olarak santimetreküpte $1/\lambda^3_{tepe}$ kadardır. Evren genişledikçe bütün uzaklık ölçekleri büyüyeceğinden herhangi bir ışınımın da dalgaboyu artar ya da kırmızıya kayar. Bu nedenle, Wien yasası uyarınca kara cisim sıcaklığı, evrenin genişlemesi oranında azalır. Şu anda bir santimetreküpte yaklaşık olarak 400 kozmik mikrodalga kara cisim fotonu bulunmaktadır. Bu fotonlar doğal olarak ışık hızıyla hareket ederler. Bir santimetrekaredeki akıyı bulmak için bir santimetreküpteki kara cisim fotonlarının sayısını c ışık hızıyla çarparsak, santimetrekare ve saniye başına 1.2×10^{13} foton elde ederiz. Evrenin ilk dönemlerinde bu akı çok daha büyüktü.

Mikrodalga Fonunun Yönden Bağımsızlığı

Kara cisim tayfına ek olarak kozmik mikrodalga ışınımının bir başka önemli özelliği de yönden tam anlamıyla bağımsız olmasıdır. Son ölçümler gökyüzününde değişik yönlere bakıldığında yüz binde bir duyarlılıkla aynı sonucu buluyorlar.

Bununla birlikte bir büyük sapma bekleniyordu ki bu da kozmik fon içinde Dünya'nın hareketinden kaynaklanan Doppler kayması olabilirdi. Yerküremiz Güneş'in çevresinde saniyede 30 kilometre, Güneş galaksi çevresinde saniyede 220 kilometre, Galaksi Yerel Küme çevresinde saniyede 50 kilometre ve Yerel Küme de Virgo Süperkümesi çevresinde kabaca saniyede 200 kilometrelik hızlarla dönmektedir. Tüm bu hareketler birbirine eklendiğinde saniyede 400 kilometrelik bir hareket söz konusu olur ki bu da hareket yönündeki ışınımda maviye kaymaya, bunun ters yönünde ise kırmızıya kaymaya neden olur. Kaymanın büyüklüğü kabaca 400 kilometre bölü saniyenin ışık hızına oranına (300 000 kilometre bölü saniye) eşittir ki bu da ışık hızının yüzde 0.1'ine eşittir. Gökyüzünde birbirinden 180 derece farklı yönlere bakıldığında bu ışınımın düzgün bir maksimumu bir de minimumu gözlendiğinden bu kaymaya dipol (iki kutup) kayması adı verilir. Eğer kozmik mikrodalga fonu gerçekten çok uzaklardan kaynaklanıyorsa bu düzgün değişimin de gözlenmesi öngörülüyordu.

1973 yılında Richard Muller ve George Smoot adlı astrofizikçiler, kozmik kara cisim tayfının tepe noktası civarında çalışacak bir radyo teleskop tasarladılar. Her ne kadar bu dalgaboyunda Dünya kaynaklı su buharı istenmeyen bir bulanıklığa neden ol-



1989 sonlarında COBE Uydusu'nda bulunan FİRAS aracının ilk birkaç dakikalık gözlem sonucunda ölçtüğü kozmik mikrodalga fonunun tayfı. Dalgaboyuna karşı yeğinliğin çizildiği bu grafik bir kara cisim grafiğine benzetilerek sıcaklığı 2.73 Kelvin olarak bulunur.

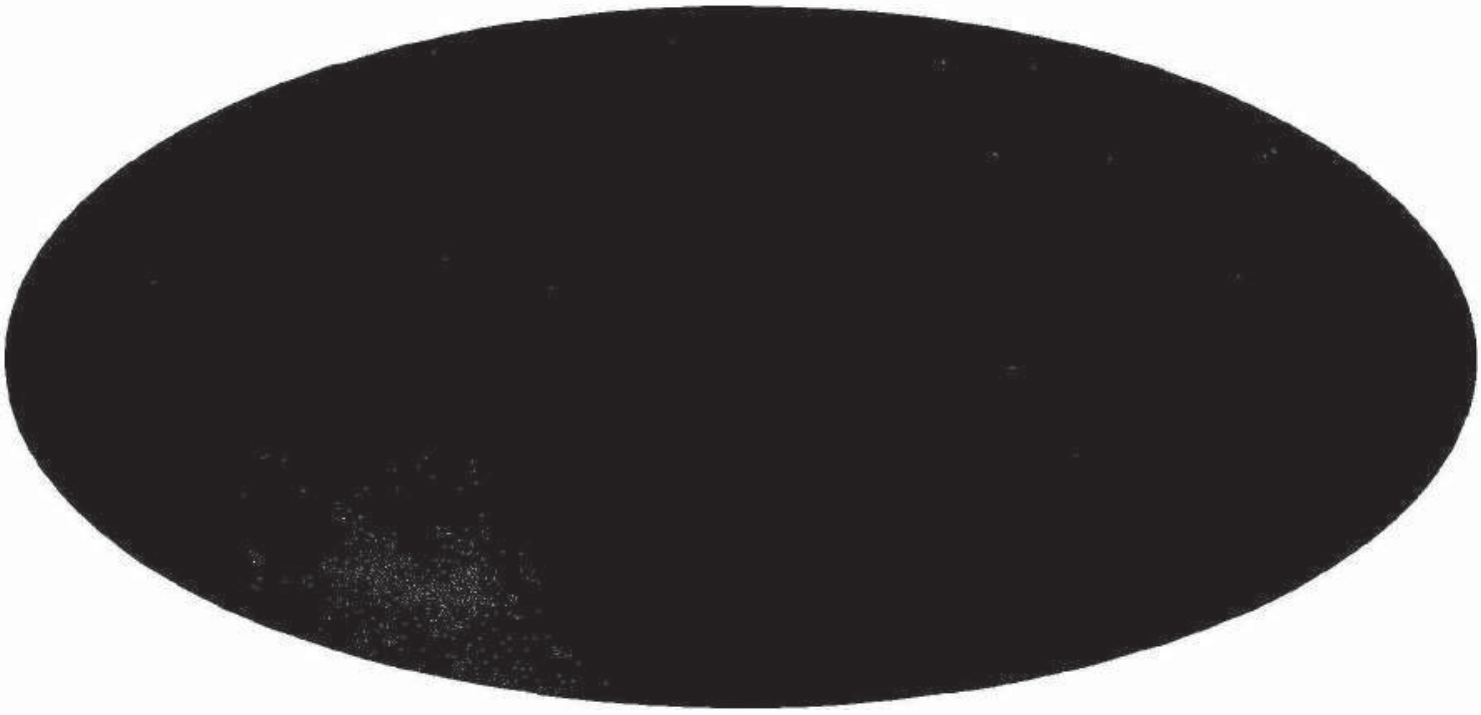
maktaysa da Muller ve Smoot teleskobu bir U-2 casus uçağına yerleştirerek bu güçlüğü aştılar. U-2 uçağı gökyüzünde casusluk yaparak galaksimizin kozmik mikrodalga ışınımına göre hareketini saptayacaktı. Dünya'nın hareketinden kaynaklanan dipol yön bağımlılığı, öngörüldüğü gibi uzayın sıcaklığında binde birlik bir değişime neden olmaktaydı. Güneş'in galaksi çevresindeki hareketi göz önüne alınarak gerekli düzeltme yapıldığında, Yerel Küme'nin Kova Takımyıldızı yönünde saniyede 630 kilometre ya da saatte bir buçuk milyon kilometre hızla hareket etmekte olduğu anlaşıldı. Bu durumda kozmik mikrodalga fonunun büyük patlamanın bir kalıntısı olduğu yönündeki sav, kanıtlanmış oldu.

Termalizasyon Dönemi

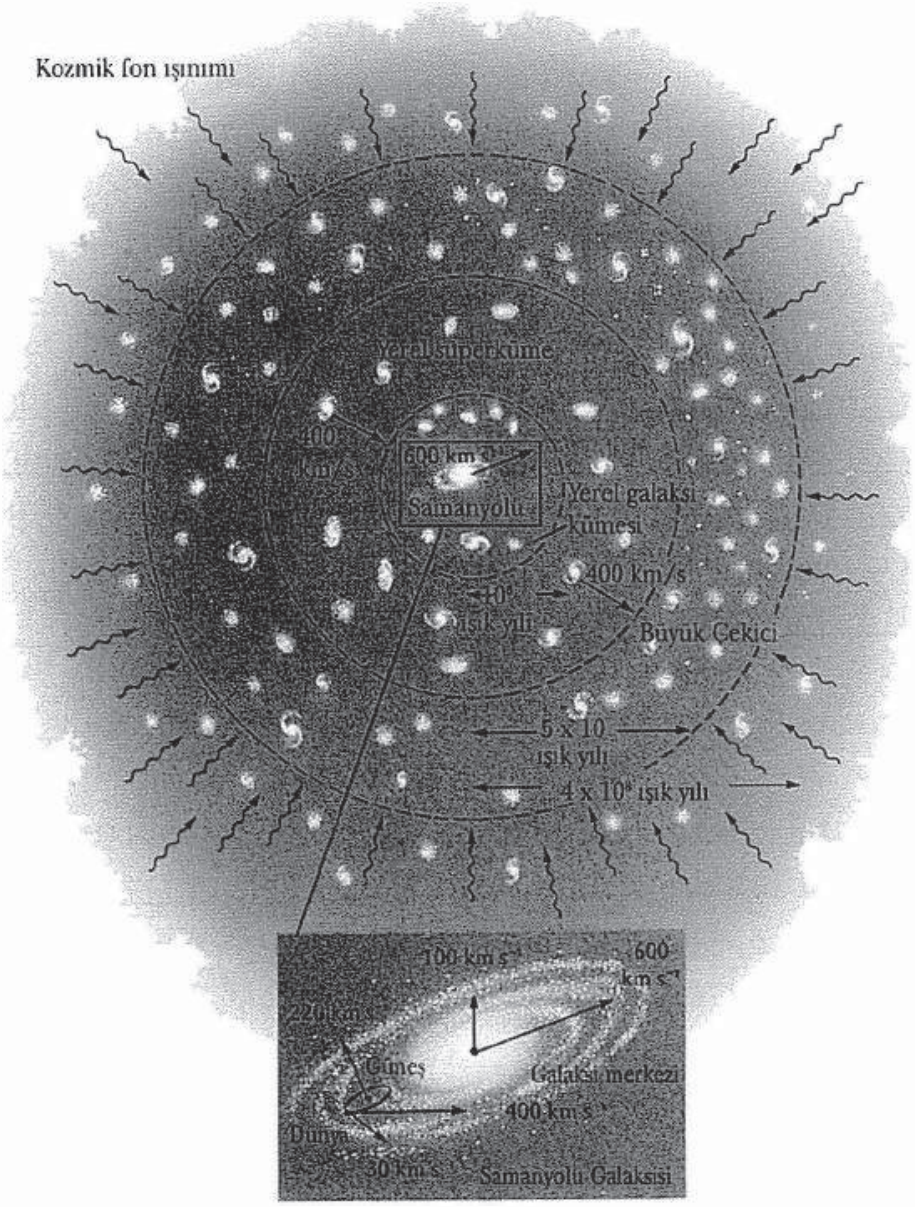
Evrendeki normal maddenin yoğunluğu galaksilerin gözlenen sıklığından, 10 çarpanı hata payıyla hesaplanabilir. Evrenin başlangıç dönemlerinde bu madde çoğunluk-

la hidrojen plazması biçimindeydi, yani bol miktarda proton ve elektron olmasına karşın hiç hidrojen atomu yoktu. Zaman içinde geriye doğru genişlemenin gelişmesini izleyerek galaksiler oluşmadan çok önce, evrenin ilk dönemlerindeki bu plazmanın yoğunluğunu hesaplayabiliriz. Bu yoğunluktan ve ölçülen kara cisim sıcaklığından geçmişin çeşitli dönemlerinde evrenin neye benzediğini çıkarabiliriz.

Bugün, ışınım en uzak galaksilerden bize serbestçe yol alabilmektedir. Yani evren elektromanyetik ışınıma son derece geçirgendir. Bununla birlikte çok önceleri, evrendeki maddenin ortalama yoğunluğu ve sıcaklık yeterince yüksek iken evren sanki yoğun bir sis perdesinin arkasında gibiydi. Herhangi bir ışınım hemen hemen hiç yol alamadan soğuruluyor ve yeniden yayımlanıyordu. Madde ve ışınım, sıcaklıkları aynı olacak biçimde yakın termal (ısıl) temas halindeydiler. Bu koşullar, kara cisim ışınımının yaratılması için ideal olup süreç de termalizasyon olarak bilinir. Işınımın termalizasyonuna aracılık eden süreçlere bir örnek, bremsstrahlung ya da 'frenleme ışınımı' olarak bilinir. Bu süreçte elektronlar başka elektron ya da protonların elektrik alanları içinde yavaşlayarak olaydaki toplam enerjinin korunması için foton yayar ya da soğururlar. Böylesi süreçler büyük patlamadan bir yıl ya da biraz daha uzun bir zaman sonrasına kadar etkili olup yoğunluğun azalmasıyla birlikte hemen hemen tümüyle ortadan kalkmışlardır. Her ne kadar ışınım, serbest elektronlardan saçılma biçimin-



COBE Uydusu tarafından saptanan çift kutup (dipol) yön bağımlılığı



Samanyolu Galaksisi'nin kozmoloji referans çerçevesine göre net hızı yaklaşık saniyede 600 km'dir. Yerkürenin fon ışınımına göre ölçülen gerçek hızı 400 km/sn civarındadır; Galaksimizin hızının daha büyük olmasının nedeni, Dünya'nın Güneş'e göre hızının (30 km/s), Güneş'in galaksi çevresindeki hızının (220 km/s) ve Samanyolu'nun Yerel Grup içinde Andromeda Galaksisi'ne doğru olan hızının (50 km/s) ölçümlere girmesidir. Tüm Virgo Süperkümesi'nin de güney gökküre de yer alan ve "Büyük Çekici" adı verilen dev bir galaksiler topluluğuna doğru yaklaşık 400 km/s hızıyla yol aldığı bulundu.

de madde ile etkileşmeye devam ettiyse de artık yeni foton yaratılmadı ve termalizasyon da görülmedi. Bununla birlikte ilk yıl üretilen ışınım, kara cisim ışınımı olarak kaldı. Hiçbir süreç onu yok edemez. Evrenin genişlemesi ışınım sıcaklığının yavaş yavaş düşmesine yol açmışsa da tayf, kara cisim biçiminde var olmayı sürdürmüştür.

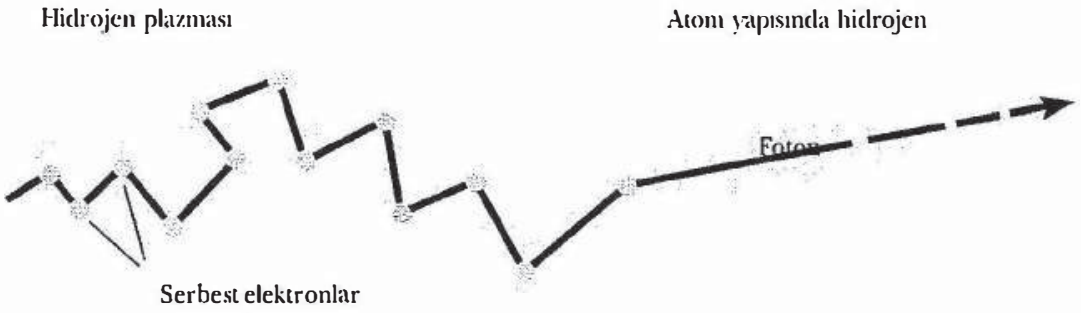
En Son Saçılma Dönemi

Termalizasyon sırasında ışınım, esas olarak x-ışınları biçimindeydi. Evren genişledikçe ve ışınım soğudukça fotonlarının dalgaboyları daha düşük, kızılötesi bölgelerine doğru kaydı. Bugün fon ışınımının sıcaklığı yaklaşık 3 derece Kelvin'dir. Oysa evrenin bugünkünden 1000 kat küçük olduğu ya da bir başka deyişle herhangi bir galaksi çifti arasındaki uzaklığı gösteren genişleme faktörünün bugünkü değerinin binde birine eşit olduğu, büyük patlamadan 300 000 yıl sonra ışınım sıcaklığı 3000 derece Kelvin civarındaydı. Bu sıcaklık, böyle bir ışınımda bulunan morötesi fotonların hidrojeni iyonlaştırmasına yetecek ölçüde yüksektir. İyonlaşma anından hemen önce madde hâlâ plazma durumundadır. Eğer yoğunluğu çok düşük değilse, ışınım hidrojen plazmasının içinden kolaylıkla geçemez. Bunun yerine ışınım birçok kez saçılmaya uğrar. Elektromanyetik dalga geçerken serbest elektronlara küçük itmeler uygular ve sonuçta dalganın yönü değişir.

Büyük patlamadan yaklaşık 300 000 yıl sonra madde yoğunluğu azaldı ve ışınım sıcaklığı, fotonların dalgaboyları optik (görünür) bölgeye inecek kadar azaldı. Işınımın madde içinden kolayca geçebileceği bir an geldi. Fotonların bu yeni özgürlüğü kazanması, maddenin durumunun plazmadan atom durumuna geçmesiyle çakıştı. Sıcaklık azaldıkça serbest elektron ve protonlar biraraya gelmeyi başararak hidrojen atomları oluşturdular ve hidrojen atomu, maddenin en yaygın biçimi haline geldi. Serbest elektronların sayısı yok denecek kadar azaldığından evren ışınıma son derece geçirgen hale geldi. Bugün kozmik mikrodalga fonuna baktığımızda evrenin uzun dönemler önceki, kara cisim ışınımının sıcaklığının 3000 derece Kelvin olduğu durumunu görüyoruz. Mikrodalga fonu, evrenin galaksi ve kuasarlardan çok önceki, henüz herhangi bir cismin oluşmadığı dönemlerine bir göz atmamızı sağlıyor.

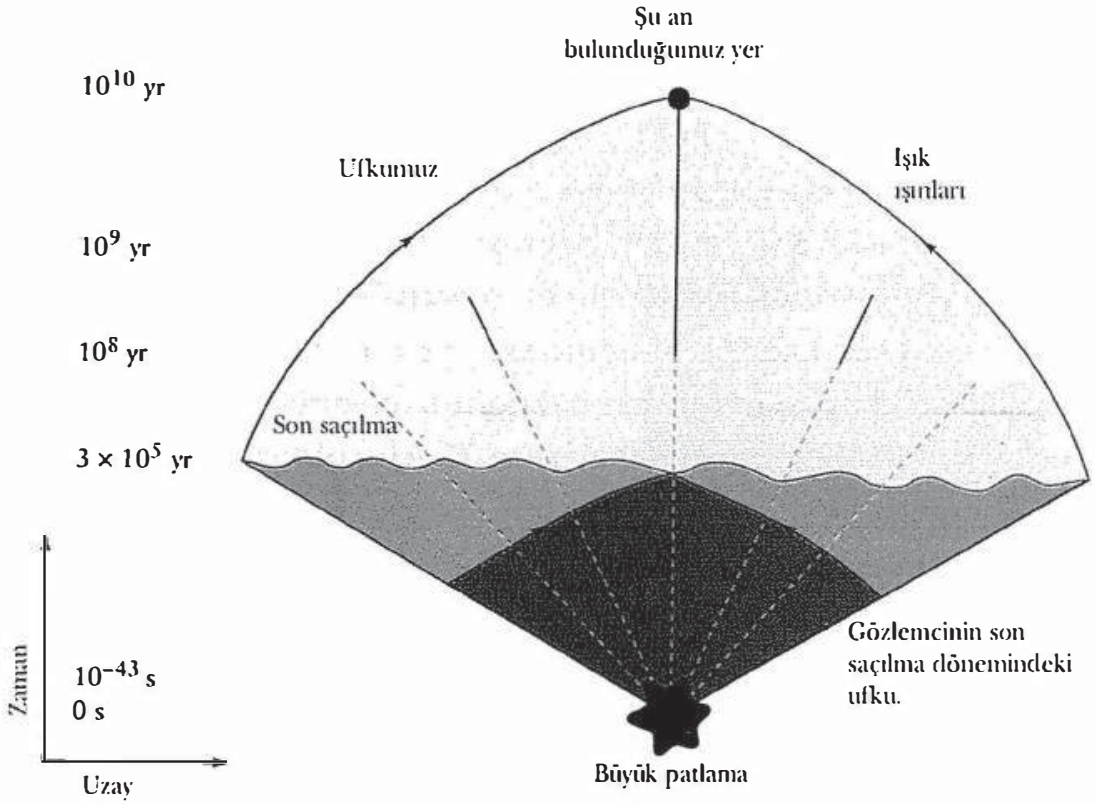
Dalgalanmalar

Bugünkü evrenin büyük ölçekli yapısının tamamı, ilkel yoğunluk dalgalanmalarının evrimi sonucu ortaya çıkmıştır. Bu dalgalanmalar, evrenin çok eski dönemlerinde homojenlikten minik sapmalar olarak ortaya çıkmış ve kütleçekimsel kararsızlıkların etkisiyle günümüzde galaksi ve galaksi kümelerine dönüşecek ölçüde büyümüşlerdir. Büyük ölçekte, kaynaklanma anlarına kadar izlenebilen bu dalgalanmaların galaksi dağılımları-



T≈3000 K

Evrenin iyonlaşmış hidrojen içerdiği ilk 300 000 yılda fotonlar serbest elektronlarla çok sık çarpışıyorlardı. Sıcaklık 3000 derece Kelvin'in altına düştüğünde hidrojen atomları oluştu. Artık elektronlar serbest olmadıklarından fotonlarla çarpışamaz hale geldiler. Kozmik mikrodalga fon fotonlarını gözlediğimizde, evrenin yalnızca birkaç yüz bin yıl yaşında olduğu geçmişe bakıyoruz demektir.



Bir uzay-zaman diyagramında zaman, düşey eksende; uzayın üç boyutu ise yatay eksende yer alır. Başlangıçtan çok küçük dalgalanmaların algılandığı son saçılma dönemine, galaksilerin doğum ve evrimine kadar büyük patlamanın evriminin evreleri gösterilmiştir. Yakındaki bir galaksiye bakarken belki birkaç milyon yıl önceki halini görürüz, ama uzak bir galaksiye bakarken gördüğümüz, onun milyarca yıl önceki halidir. Kara cisim ışınımı bize son saçılma döneminden yani büyük patlamanın 300 000 yıl sonrasından gelmektedir.

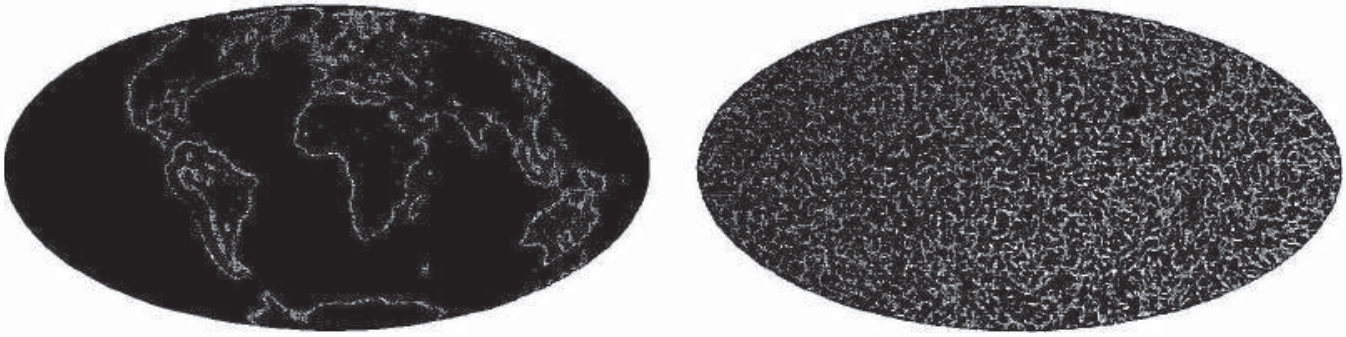
na etkileri hâlâ sezilebilir. Daha büyük ölçeklerde, kozmik mikrodalga fonu homojenlikten ilk sapmalara tanıklık etmektedir.

Son saçılmadan bu yana artık madde tarafından etkilenmeden, serbestçe hareket eden fon ışınımı kozmik genişleme sonucunda soğuyarak, günümüzde kozmik mikrodalga ışınımı biçiminde varlığını sürdürüyor. Bu ışınım, termalizasyon döneminin sonuna kadar, ilk 10 000 yıl evrene hükmeden ateş topunun soluk bir kalıntısıdır. Mikrodalga fonundaki sıcaklık dalgalanmalarının şiddeti, büyük patlamadan şöyle bir 10 000 yıl sonra, dalgalanmaların ciddi olarak başladığı dönemde evrendeki yoğunluk dalgalanmalarının şiddetinin bir ölçüsüdür. Aslında bu dalgalanmaların, büyük patlamadan 300 000 yıl sonra, son saçılma döneminde ortaya çıktığını bulabilmeyi umuyoruz.

Kozmoloji uzmanları bu dalgalanmaları bulmayı kozmik mikrodalga fonunun keşfinden beri bekliyorlardı ama ancak 1992 yılının ilkbaharında uzun zamandan beri aranan yön bağımlılığının bulunduğu duyuruldu. Kozmik mikrodalga fonunda genliği 1 derecenin otuz milyonda biri kadar olan dalgalanmalar COBE Uydusu tarafından saptandı. Açısal dalgalanma ölçeği öylesine büyüktü ki (gökyüzünde 10 deceden 90 dereceye kadar), Friedmann ve Lemaitre tarafından geliştirilen standart kozmolojideki hiçbir şey bunları yaratmış olamazdı.

COBE'de bulunan ve dalgalanmaları saptayan araç, George Smoot tarafından tasarımı yapılan Diferansiyel Mikrodalga Radyometresi (DMR) idi. DMR'nin önemi şuradan kaynaklanıyordu: 1975 yılında dipol yön bağımlılığını ölçmekte kullandığı aynı modası geçmiş teknoloji ile Smoot, kozmolojide yeni bir çığır açmayı başarmıştı. Teorisyenler kozmik mikrodalga fonunda büyük ölçekli yapılanmayı temsil eden yüz binde bir düzeyindeki bozuklukların ölçülebileceğini öngörmekteydiler. Ölçülen dipol yön bağımlılığının yüz katı olan ve bir uydu deneyinde bulunması gereken bu duyarlık artışını sağlamak için Smoot DMR deneyini yenileyip geliştirerek COBE Uydusu için yeniden diriltti. Orijinal olarak uzay mekiği için hazırlanan deney, Challenger faciasından sonra bir delta roketine sığabilecek şekilde yeniden tasarımlandı. NASA'nın kozmolojiye yönelik ilk uydusu olan COBE, 1989'dan 1993 yılına, NASA bütçe kısıtlamaları nedeniyle uydudan vazgeçinceye kadar dört yıl süreyle veri topladı.

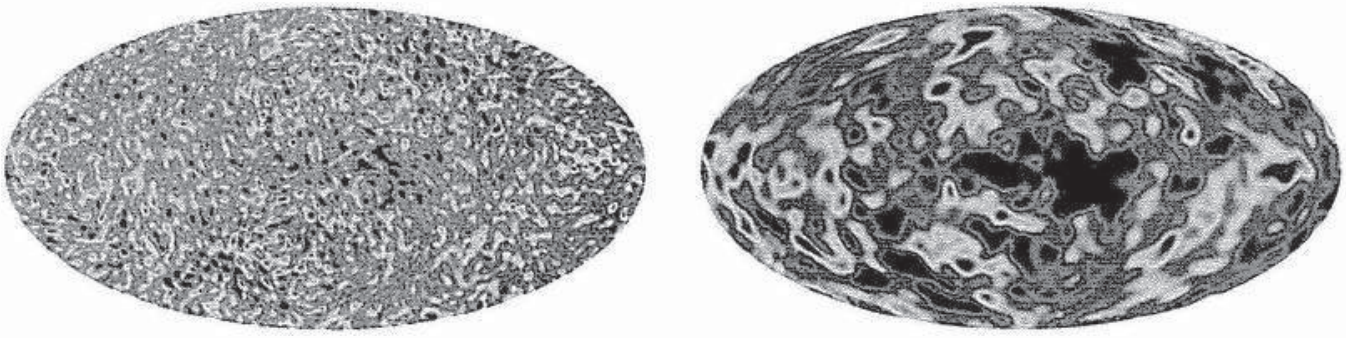
DMR ışınım genliğini hem kozmik mikrodalga fonunun tepe noktası yakınlarında (1 cm, 6 mm ve 3 mm) hem de galaksiden kaynaklanan radyo gürültüsünün en az olduğu, zekice seçilmiş üç noktada ölçüyordu. Böylece evrenden ve galaksiden gelen ışınımlar farklı tayf yapıları nedeniyle birbirinden ayrılabiliyordu. DMR'nin her birinde üç



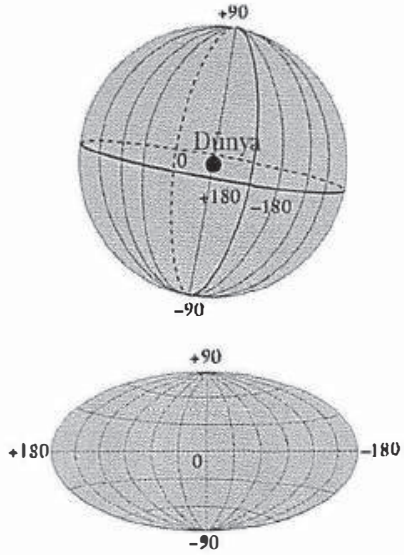
Solda: Eğer yerküremizi COBE DMR deneyinin çözünürlüğü ile görebilseydik ve eğer gürültü yok edilebilseydi, böyle ideale yakın bir görüntü elde edebilecektik. Sağda: Bu haritada COBE'nin elde ettiği yerküre haritasının daha gerçekçi bir görüntüsü veriliyor. İki görüntü arasındaki fark, sağdakine iki yıllık gözleme karşılık gelen "gürültü" eklenmiş olmasıdır. Her ne kadar kıtalar ve okyanuslara karşılık gelen "dalgalanmalar" fark ediliyorsa da bilginin çoğunun kaybolduğu görülüyor. Buradan da COBE Uydusu'nun kozmik mikrodalga fonundaki dalgalanmaları tanımlarken hangi güçlüklerle karşılaştığını görebiliyoruz.

frekans için ikişer detektör bulunan ve gökyüzünde birbirinden 60 derece farklı bölgeleri izleyen iki anteni vardı. Aracın çeşitli veri çıktıları karşılaştırılarak gürültü milyonda birkaç düzeyine indirgenmişti.

DMR tüm gökyüzünü her altı ayda bir taradı. Bir tam yılın verileri incelendiğinde, deneyciler mikrodalga fonundaki yön bağımlılığını hiçbir kuşkuya yer vermeyecek bir biçimde saptadılar. Sıcaklık değişimleri beklenen kara cisim tayfına sahip olduğundan, bilimadamları bu değişimlerin gerçekten kozmik mikrodalga fonunda olduğuna emin oldular. Gökyüzünde açısal ölçekte 10-90 derece arasında ölçülen dalgalanmaların ka-



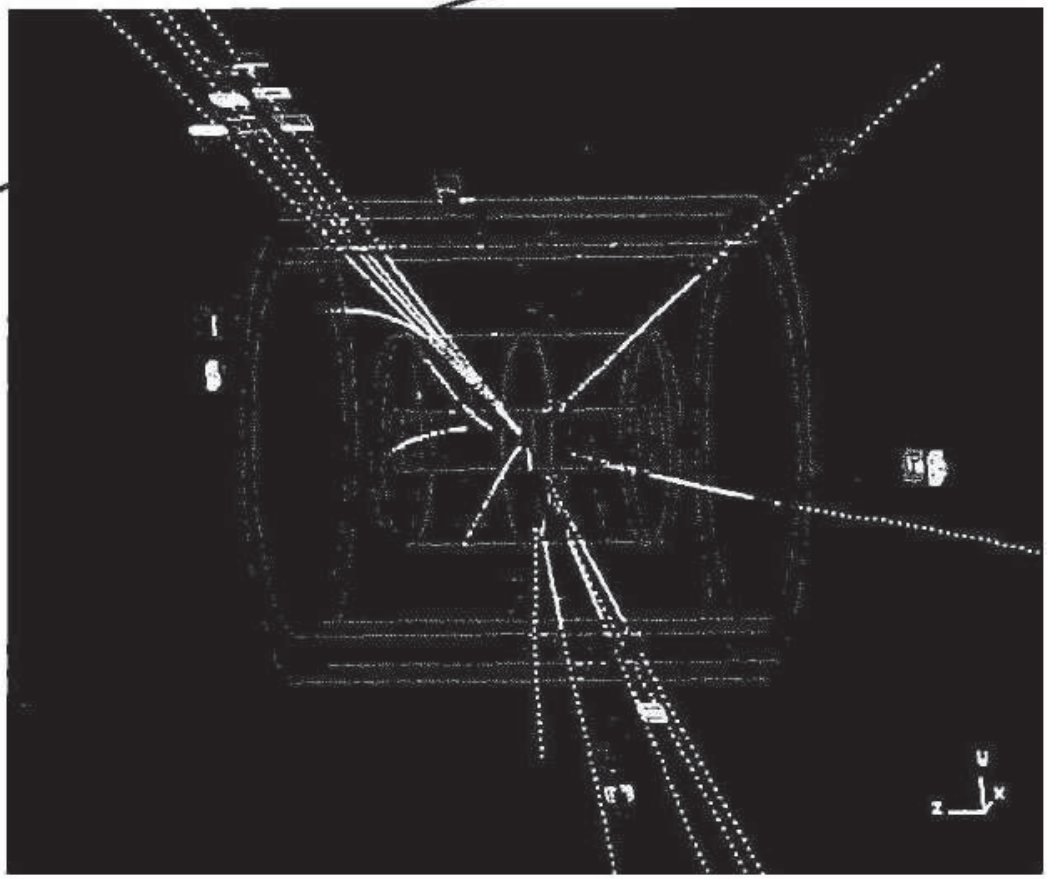
Solda: COBE DMR aracının bir yıllık gözlem sonucunda elde ettiği ham piksel görüntüsü. Sağda: Veriler 10 derece üzerinde düzgünleştirilir ve galaksimizin dalgalanmalara olan katkısı çıkarılabilirse, kalan görüntü çoğunlukla araçlardan kaynaklanan gürültü oluyor. Bununla birlikte, istatistiksel bir analiz sonucunda gerçek bir kozmik dalgalanma sinyali olduğu görülebilir.



Gökyüzünde derece ölçmek için merkezinde Dünya'nın yer aldığı bir küre düşünürüz (üstte). Bu küre kırmızı çizgi boyunca kesilir ve yassılaştırılır (altta).

rakteristik genliği 30 (±5) mikrokelvin civarındaydı. Bu ortalama genlik üzerinde çeşitli boyutlarda sıcak ve soğuk noktalar bulunuyordu. İlk yılın DMR verileri oldukça gürültülüydü. Kozmik sinyalin gürültüye oranı yaklaşık bire eşit olduğundan değişimlerin önemi yalnızca istatistikseldi. Bir kez galaksiden kaynaklanan gürültü çıkartıldığında, genliği 17 (±5) mikrokelvin olan evrensel bir dört kutup (quadrupole, tepeden minimuma 90 derece) kalıyordu. Bu genlik tam da teorisyenlerin öngördüğü gibi milyonda 6 (±2) düzeyindeydi. Bu dalgalanma düzeyi ise yerküremizin kozmik mikrodalga fonu içindeki hareketinden kaynaklanan dipol yön bağımlılığından yüz kat daha küçüktü. 7-90 derece arasındaki kalan kozmik dalgalanmalar, büyük ölçekli yapılanmanın en basit oluşum modellerinin öngörüleri ile uyum içindeydi.

Yapı oluşum teorisi ve gözlenen evren arasındaki bağ sonunda çözülmüştü. 10. Bölüm'de modern kozmolojinin nasıl ilk kez 1992 yılında gözlenen dalgalanmaları öngördüğü açıklanacaktır.



CERN'deki Büyük Hadron çarpıştırıcısında yüksek enerjili bir proton ve bir karşı proton çarpışarak yüksek enerjili ve kısa ömürlü parçacıklar veriyor. Fizikçiler ortaya çıkan parçacıkları dikkatle inceleyerek, zayıf bir biçimde etkileşen ve görünmeyen parçacıkları arıyor. Bu inceleme, çok yüksek enerjilerde parçacık etkileşmelerinin doğasını anlamaya yöneliktir. Büyük patlamanın ilk anlarında böylesi yüksek enerjili parçacıklar ortaya çıktığından, bu koşulları yeniden yaratmaya dönük çabalar, maddenin yaratılışı konusundaki pek çok sorunun yanıtını bulabilmemize yöneliktir.

lk 10^{-33} Saniye

Kozmik mikrodalga fonu bizi evrenin ilk anlarına götürür ama bu fizikçiler için yeterli değildir. Genişleyen evrenin öyküsü daha önceleri, maddenin yoğunluk ve sıcaklığının olağanüstü yüksek olduğu zamanlarda başlar. Evrenin başlangıcını anlamaya çalışmak, parçacık fiziği olsun, uzay ve zamanın fiziği olsun bildiğimiz tüm fiziğe meydan okumak demektir. Ama yine de fizikçiler zamanın başlangıcını çevreleyen giz perdesini aralamayı ve bu gizemli kavramlardan bazılarını açıklamayı başardılar.

Tekillikler

Evren, zamanın başlangıcında (sıfırında), sonsuz yoğunluktaki bir durumdan doğdu. En azından günümüzdeki evreni zaman içinde geriye doğru götürürsek böyle bir tekil durumla karşılaşırız. Doğaldır ki fizikçiler sonsuzluklardan nefret ettikleri için "sonsuz yoğunluktaki bir durum" deyimi evreni fiziksel olarak tanımlamak için, tümüyle kabul edilemez bir deyimdir. Sonsuz yoğunluktaki bir evren, fizik yasalarının, hatta uzay ve zamanın bozulduğu, geçerliliğini yitirdiği bir 'tekillik'tir. İkilemin çözümü, kütle çekim teorimizin bu olağandışı duruma gelmeden önce geçerliliğini yitirmesidir. Şu andaki teorilerimizle ilk 10^{-43} saniyeye ulaşamıyoruz. Planck dönemi adı verilen bu sürenin sonu da yine bu teorilere göre zamanın başlangıcını simgeliyor. Bununla birlikte Einstein'ın kütle çekim yasasına göre doğada tekilliklerin bulunması öngörülmektedir.

Bir tekillikte madde ve enerji üretilebilir, önceden bilinemez bir biçimde evrene püskürtülebilir ve birbirine dönüşebilir. Normal olarak tekillik, bir kara delik tarafından gizlenir ama evrenin ilk dönemlerinden kalma mini kara deliklerin buharlaşmaları ve arkalarında çıplak tekillikler bırakmaları bekleniyor. Eğer gerçekten var iseler, bu mini kara deliklerin buharlaşmaları gözlenebilir. Örneğin kozmik gamma ışını patlamalarının gözlenmesi beklenebilir. Böyle patlamalar gerçekten gözleniyor ama bunlar için en azından yüz tane daha alternatif açıklama var!

Çıplak tekilliklerin varlığı fizik için kötü haber demektir. Tekillik yakınlarında geçmiş ve gelecek birbirine girer ve fiziğin temelinde yatan nedensellik düşünceleri geçerliliğini yitirir. Başka evrenlere, geçmişe, günümüze, geleceğe açılan kapılar olan kurt delikleri ortaya çıkabilir. Bu tür kapıların varlığı garip birtakım ikilemlerin ortaya çıkmasına neden olur: birisi, örneğin daha kendisine hamile bile kalmadığı dönemlerde-

ki annesiyle karşılaşabilir. Öyle görünüyor ki fiziksel evren, en azından bizim çevremizde böyle şeyleri barındırmıyor olmalı. Bereket versin henüz tek bir çıplak tekillik bile bulunmuş değil. Böyle cisimlerin kuasar adı verilen uzak cisimlerin merkezlerinde bulundukları ve bunların verdikleri olağanüstü enerjiyi üretmek için gerekli olan yüksek enerjili, elektrik yüklü parçacıkları sağladıkları tahmin ediliyor. Bir başka görüşe göre ise kuasarların enerji kaynağı süper kütleli kara deliklerdir.

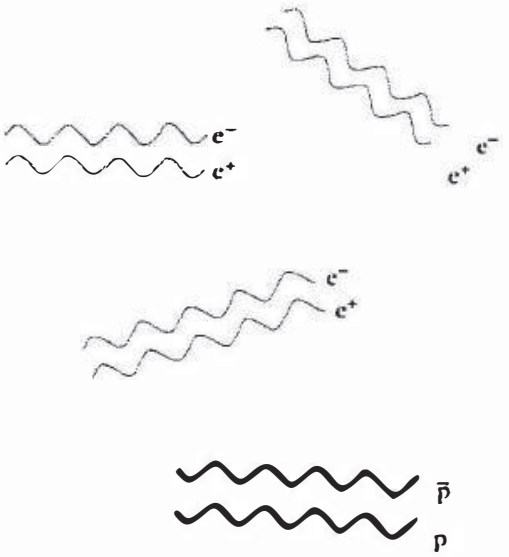
Teori, evrenin bir yerinde en azından bir tane tekillik olması gerektiğini söylüyor. Bu, Stephen Hawking ve Roger Penrose tarafından ispatlanan çok kuvvetli bir teoremin sonucudur. Kozmik kara cisim ışınımını açıklayabilmek için gerekli olan evrenin erken ve yoğun döneminin varlığı, kaçınılmaz olarak tekillikten kaynaklanması olası olan daha erken ve yoğun bir dönemin varlığını öngörüyor. Şu anda elimizden, bizi evrenin herhangi bir köşesinde pusuda bekleyen bu canavardan kurtarmak üzere daha komple bir kütle çekim teorisi geliştirilebileceğini ummaktan başka bir şey gelmiyor.

Kuantum Boşluğu

Büyük patlama bir yaratma hareketiydi. Eşi benzeri olmayan, tekil bir olay mıydı yoksa maddenin yaratılışı doğal bir olgu muydu? Bu olaydan önce ne vardı? Evren, yoktan mı yaratıldı? Bu soruların nasıl cevaplandırılacağını daha iyi anlamak için, yokluktan, ya da daha doğru bir deyişle boşluktan ne kastedildiğini düşünmek gerekir.

Boşlukta, kuantum mekaniğinin temel bir kavramı olan Werner Heisenberg'in belirsizlik ilkesi hüküm sürer. Belirsizlik ilkesi, bir parçacığın hem konumunu hem de hızını aynı anda ölçmenin olanaksız olduğunu söyler. Ya birinde ya da diğerinde mutlaka Planck sabiti h cinsinden ifade edilen bir belirsizlik vardır. Eğer Δp momentumdaki belirsizlik(kütle ve hızın çarpımı), Δx konumdaki belirsizlik ve h Planck sabiti ise, elimizdeki eşitlik $(\Delta x)(\Delta p) \geq h$ biçiminde yazılabilir. Bu eşitlik bize momentum ve konumun çarpımlarında daha küçültülemez ve ortadan kaldırılamaz bir belirsizlik olduğunu söyler.

Örneğin, bir parçacığın konumunu olabileceği kadar duyarlı saptamaya çalışırsak o parçacığın momentumu rasgele fakat yüksek bir değer alır. Konum ve momentum belirsizlikleri çarpımının hemen hemen h sayısına eşit olduğu, ölçümde kuantum sınırına



Boşluk, gerçekten boş değildir. Kuantum teorisine göre boşlukta sürekli bir biçimde yaratılıp yok olan kısa ömürlü parçacık karşı parçacık çiftleri bulunmaktadır.

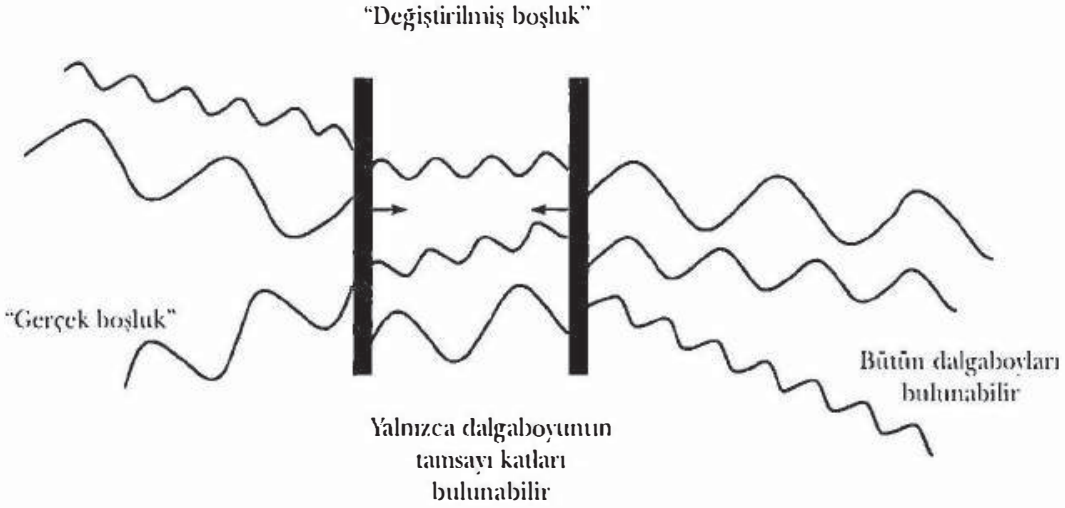
yaklaşırken, bir ölçümün daha duyarlı yapılabilmesi ancak diğerinin duyarlılığından ödün verilmesi ile mümkün olur.

Belirsizlik ilkesinin boşlukla ilgili önemli sonuçları vardır. İlke, kuantum teorisi ile birlikte en mükemmel boşluğun bile, ne kadar maddeden yoksun olursa olsun, gerçekten tam olarak boş olmadığını ileri sürer. Kuantum boşluğu daha çok, sürekli olarak ortaya çıkan ve ortadan kaybolan bir parçacıklar denizine benzetilebilir. Bu parçacıklar, gerçek olanların aksine sanal parçacıklardır. Sanal parçacıklar doğrudan gözlenemez. Belirsizlik ilkesi nedeniyle vardırlar ve herhangi bir gözlem eylemi bunları gerçek parçacıklar haline dönüştürür. Enerji, bu parçacıkları yaratmak için boşluktan "ödünç alınır" ve ve hemen hemen aynı anda geri verilir. Elektrik yükünün korunumu nedeniyle parçacıklar, zıt elektrik yüklü madde ve karşı madde çiftleri olarak yaratılırlar ve bu çiftler sürekli olarak birbirlerini yok ederler. Her an boşluk böyle sanal çiftlerle doludur. Bu çiftler yok olurken, atomların enerji düzeylerini etkileyerek bir anlamda imzalarını bırakırlar. Varlıkları da böylesi enerji düzey farklarının gözlenmeye çalışıldığı laboratuvar deneyleriyle kanıtlanmıştır. Örneğin hidrojen atomları sanal çiftler tarafından titreştirilirler. Sonuçta atomun en düşük enerji düzeyinde hafif kaymalar olur. Adını Willis Lamb'dan alan milyarda bir oranındaki bu kaymalar ölçülmüştür.

Sanal çiftlerin etkileri aynı zamanda Casimir etkisi adı verilen bir olayda da ölçülmüştür. Bir gazı bütün gürültüler ve termal hareketler duruncaya kadar soğutun ve gazın içine iki paralel iletken levha daldırın. Levhaların dışında olası tüm dalgalanmalar ve sanal çiftler bulunabilir ama levhaların arasında yalnızca belirli tür çiftler bulunabilir. Eğer kuantum hareketleri dalgalar tarafından temsil ediliyorsa, levhaların arasında yalnızca belirsizlik ilkesinden beklenen kuantum hareketlerinin dalga boylarının tam sayı katları, bir şekilde levhalar arasındaki uzaklığa eşit olan parçacık çiftleri bulunabilir. Bu nedenle levhalar arasındaki dalgalar levhaların dışındakilerden daha az olmalıdır. Bunun sonucu ise levhaları birbirine doğru çeken net bir basınçtır. Levhaların uzaklığı

10^{-7} cm iken kuantum basıncı atmosfer basıncının 10^{-4} katı kadar olmakta ve bu etki laboratuvar deneyleriyle ölçülebilmektedir. Levhalar arasındaki boşluk değişikliğe uğramakta, levhaların dışında ise aynı kalmaktadır.

Levhalar arasındaki sanal çiftlerin hafifçe düşük enerji yoğunluklarına sahip olmalarının ilginç bir sonucu vardır. Gerçek boşluğun basıncı sıfır olduğundan, değişikliğe uğrayan boşluğun enerji yoğunluğunun negatif olması anlamına gelir. Sonuçta ortaya çıkan basınç gradyanı levhaları birbirine doğru çeker. Levhalar birbirine yaklaşırken "negatif enerji" miktarı artar. Bu durumda iki levha arasına daha az dalgaboyu sığar. Benzer şekilde, eğer levhalar birbirinden uzaklaştırılırsa, "negatif enerji" azalır. Einstein'ın kütle çekim teorisinde pozitif enerji yoğunluğu kütle çekim kaynağı olup çekme kuvveti uygular. Tersine, negatif enerji yoğunluğu itme kuvveti uygulayacaktır. Bu nedenle Casimir etkisi negatif enerji yoğunluğu kavramının gerçekliğini gösterir.



Casimir etkisi, boşluğun tam anlamıyla boş olmadığını gösteriyor. Aralarındaki "değiştirilmiş" boşluk çevredeki boşluktan biraz daha az basınç uyguladığından iki iletken levha, çok küçük miktarlarda birbirlerine yaklaşır.

Tüm bu gerçekler bize negatif enerji yoğunluğu bölgelerinin bulunduğunu ve bu bölgelerde maddenin çekme yerine itme kuvveti uygulayabileceğini gösteriyor. Bu bir kuantum olayıdır ve eğer daha uygun ve doğru bir kütle çekim teorisi olsa aynı etki kütle çekim alanları için de geçerli olurdu. Böyle bir teori olmamasına karşın, göreceğimiz gibi, evrenin ilk dönemlerinde benzer negatif enerji yoğunluğunun doğal olarak ortaya çıkmış olması olasılığı oldukça kuvvetlidir.

Temel Kuvvetler

Doğanın dört temel kuvveti vardır ve bu kuvvetler bir galaksinin doğumundan bir bebeğin doğumuna kadar bilinen tüm olaylardan sorumludur. Her ne kadar bu kuvvetlerin içinde en zayıfı kütle çekim kuvveti ise de bu kuvvet Dünya'nın Güneş çevresindeki hareketini ve havaya fırlatılan bir futbol topunun hareketini kontrol etmektedir. Daha güçlü olan elektromanyetik kuvvet, kütle çekim kuvvetinden 10 sayısının 40. kuvveti kadar daha güçlüdür. Aralarında r kadar uzaklık olan iki elektron düşünelim. Bunların aralarındaki elektriksel itme kuvveti e^2/r^2 biçiminde yazılabilir. Burada e elektronun sahip olduğu elektrik yükünü temsil etmektedir. Bu iki elektron arasındaki kütle çekim kuvveti ise Gm_e^2/r^2 biçimindedir. Burada m_e elektronun kütlesini göstermektedir. Dolayısıyla kütle çekim kuvvetinin elektriksel itme kuvvetine oranı, Gm_e^2/e^2 ya da yaklaşık olarak 10^{-42} olur.

Kütle çekim kuvveti tamamiyle önemsizmiş gibi görünüyor. Bununla birlikte, elektrik yüklü parçacıklar genellikle elektron ve proton gibi çiftler halinde ortaya çıkarlar. Pozitif ve negatif yükler birbirini sadeleştireceğinden büyük ölçeklerde net elektrik yükü bulunmaz. Kütle çekim kuvvetinde ise birbirinin etkisini sadeleştirecek çiftler yoktur. Bunun da ötesinde, diğer iki temel kuvvet yalnızca yakın mesafelerde etkilidir. Bu nedenle büyük ölçeklerde kütle çekimi kaçınılmaz olarak en büyük rolü oynar. Yıldızlar, kütle çekiminin çekici kuvvetiyle buna karşı gelen ve elektromanyetik kuvvetin bir sonucu olan, yıldızın sıcak iç katmanlarının uyguladığı basınç arasındaki duyarlı bir dengede yaşarlar. Galaksileri de kapsayan çok daha büyük ölçeklerde ise kütle çekimi üstün gelir.

Elektromanyetik kuvvetler atomla ilgili tüm özelliklerden sorumludur. Bu kuvvetler kimya yasalarını ve genetik özelliklerimizi biçimlendiren DNA moleküllerinin yapısını yönetirler. Kas gücünden dinamitin patlayıcı kuvvetine, kelebeğin kanat çırpmasından gergedanın saldırmasına kadar bildiğimiz tüm doğal olaylar elektromanyetik kuvvetlerle ilgilidir. Elektromanyetik etkileşmeler, elektromanyetik kuvvetin taşıyıcısı olan foton tarafından kontrol edilir.

Geriye kalan iki temel kuvvet, atom çekirdeklerini birarada tutan nükleer (çekirdeksel) kuvvetlerdir. Bunlar temel kuvvetlerin en güçlü olanlarıdır. Zayıf nükleer kuvvet kendisini ağır, kararsız çekirdeklerin radyoaktif bozunmasında gösterir. Nötrino adı

verilen kütlesiz parçacıkların yayınlanmasından, atom çekirdeği dışında kararsız olan nötronların varlığı ve bozunmalarındanda da zayıf nükleer kuvvet sorumludur. Zayıf etkileşme de zayıf kuvveti taşıyan, fotona benzer bir iş yapan bir parçacık tarafından kontrol edilir. 1985 yılında keşfedilen ve W bozonu adı verilen bu parçacığın kütlesi, protonun kütlesinin 80 katı kadardır. Aslında biri pozitif, diğeri negatif yük taşıyan iki W bozonu ve bunlarla ilişkili yüksüz bir parçacık olan Z bozonu vardır. Bu parçacıklar düşük enerjilerde elektromanyetik kuvvet ve zayıf nükleer kuvvet arasındaki büyük farktan sorumludurlar.

Güçlü nükleer kuvvet ise bir atom çekirdeğindeki protonların birarada bulunmalarını kontrol eder. Mezon adı verilen kısa ömürlü parçacıkların ortaya çıkışları ve yok oluşlarından sorumludur. Mezonlar olmasaydı, atom çekirdeklerinin, içlerinde bulunan protonların karşılıklı elektromanyetik itme kuvvetleri nedeniyle dağılmaları gerekirdi. Bu mezonlar ilk kez, atmosfer içinde çok yükseklere çıkan balon deneyleri sırasında kozmik ışınlarda keşfedildiler ve daha sonra parçacık hızlandırıcılarında üretildiler.

Protonun kendisi temel bir parçacık değildir. Protonun, kuark adı verilen temel parçacıklardan oluştuğu bulunmuştur. Kuarkın elektrik yükü kesirli olup protonun içinde yükleri 2/3, 2/3 ve -1/3 olan üç kuark bulunur. Kuarkları protonun içinde birarada tutan parçacıklar gluon adı verilen ve güçlü nükleer kuvveti taşıyan kütlesiz parçacıklardır. Bu parçacıklar, fotonların elektromanyetik kuvvet, W ve Z bozonlarının zayıf nükleer kuvvet için oynadığı rolü oynarlar. Gluonların fotonlardan bir farkı, bu parçacıkların elektrik yüküne benzetilebilecek, renk adı verilen bir kuantum özelliği taşımalarıdır. Renk kuvveti, güçlü nükleer etkileşmeyi tanımlamanın bir başka yoludur (kuantum renginin ışık rengiyle uzaktan yakından ilişkisi yoktur).

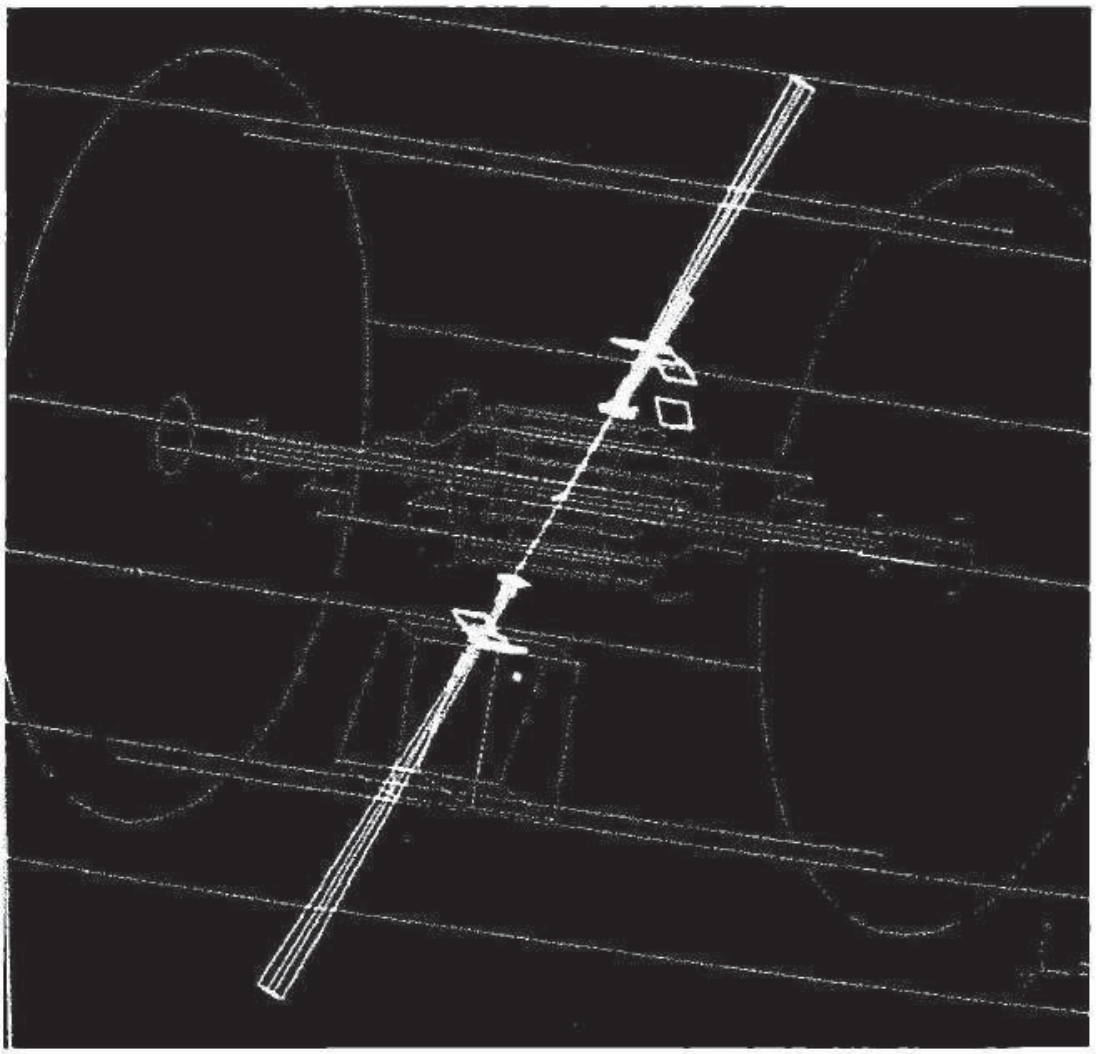
Temel kuvvetlerin üçü, yani elektromanyetik kuvvet ve nükleer kuvvetler kuantum teorisiyle, dördüncü kuvvet olan kütle çekim kuvveti ise genel görelilik (relativite) teorisiyle tanımlanır. Tüm bu kuvvetleri tek bir tanım altında birleştirebilecek olan teori ise şu anda eksik olan kütle çekiminin kuantum teorisidir. Eğer evrenin başlangıcındaki fiziği anlamak istiyorsak, böyle bir teori gereklidir.

Çiftlerin Yaratılması

Eğer yeterince büyük bir elektrik alanı uygulanırsa boşluktaki sanal çiftler birbirlerinden ayrılabilirler. Çiftler birbirlerinden ayrıldığından, yok olma olayı çoğunlukla ortadan kalkar ve gerçek çiftler yaratılmış olur. Bir elektron ve onun pozitif elektrik yüklü arkadaşı pozitrondan oluşan bir çift yaratmak için gereken elektrik ya da manyetik alanın enerji yoğunluğu, bu parçacıkların kütlesini yeniden yaratmak için gerekli olan enerjiden fazladır. Bu enerji, Einstein'ın ünlü $E=mc^2$ formülü kullanılarak hesaplanabilir. Elektron-pozitron çifti için bu enerji 1 milyon elektron volttur. Boşluktan çift yaratılması laboratuvarda, örneğin parçacık hızlandırıcılarında gözlenmiştir.

Evrenin ilk dönemleri, çok uzak olmakla birlikte, parçacıkların yaratılmasını incelemek için ideal bir ortamdır. Bu dönemlerdeki evrenin sıcaklığını tanımlamak için derece biriminden genellikle (eV) olarak gösterilen enerji birimine geçmek gerekir. Bunun nedeni, parçacık kütlelerinin geleneksel olarak, $E=mc^2$ formülüne göre, eşdeğer oldukları enerji cinsinden ifade edilmesidir. Örneğin, elektronun kütlesi 0.5 milyon elektron volttur (MeV). Hem parçacık hızlandırıcılarında hem de evrenin ilk dönemlerinde elektron-pozitron çiftleri 1 MeV sıcaklıkta (10 milyar derece Kelvin'e eşdeğer bir sıcaklık) kendiliklerinden ortaya çıkarlar. Bu sıcaklık evren henüz bir saniye yaşındayken vardı. Evren yaşlandıkça ve sıcaklığı bu eşik değerin altına düşünce parçacık yaratılması süreci kendiliğinden durdu ve o zamana kadar yaratılmış olanlar yok olarak ışınıma dönüştüler. Bugünkü evrende bulunan elektronlar, önümüzdeki bölümde anlatılacağı gibi, hiçbir zaman pozitronlarla çift olarak yaratılmadılar.

Daha ağır olan protonun kütlesi 1 milyar elektron volttur (GeV). Proton-karşı proton çiftleri, 2 GeV'den daha yüksek sıcaklıklarda -ki bu büyük patlamadan yalnızca saniyenin milyonda biri kadar sonra anlamına geliyor- yaratılırlar. Daha yüksek sıcaklıklarda, normal koşullarda çok kısa ömürlü olan daha egzotik parçacıklar yaratılırlar. Evren, ilk dönemlerinde mezon ve karşı mezonlarla, kuark ve karşı kuarklarla kaynıyordu. Gerçekten, büyük patlamadan yalnızca on milyarda bir saniye sonraya karşılık gelen 100 GeV sıcaklığında ışınım alanıyla termal denge içinde olan 100'den fazla parçacık ve karşı parçacık vardı.



Avrupa Parçacık Fiziği Merkezi'ndeki (CERN) Büyük Elektron Pozitron (LEP) çarpıştırıcısının detektörlerinin birinde bir elektron-pozitron çifti yakalanıyor. Çift, bir Z bozonunun bozunması sonucu ortaya çıkmıştır. Z bozonunu veren olaysa LEP ışın demetlerinden birinde bir elektron-pozitron yokolmasıdır.

Parçacıklar ve Dalgalar

Evrenin ilk dönemlerinde parçacıklar hem kuvvetli elektromanyetik alanlar veya yüksek enerjili ışınım, hem de kuvvetli kütle çekim alanları nedeniyle yaratılmış olabilirler. Evrenin başlangıcında her iki türden de yoğun alanlar vardı. Yoğun kütle çekim alanlarında parçacıkların nasıl yaratıldığını anlamak için parçacıkların aynı zamanda dalga gibi davrandığını göz önüne almalıyız. Bu, aynı zamanda elektron mikroskobunun da çalışma ilkesidir: elektron mikroskobunda ışık dalgaları yerine dalga gibi davranan elektronlar kullanılır. Yüksek momentuma ve buna paralel olarak momentumda yüksek

Δp belirsizliğine sahip olan elektronlar, parçacıkların konumlarının normal ışığa oranla çok küçük bir Δx belirsizliği ile saptanmasını sağlarlar.

Santimetrenin on milyarda biri ölçeğinde elektronlar parçacıktan çok dalga gibi davranırlar. Kütlesi m olan ve ışık hızıyla hareket eden bir elektronun dalgaboyu belirsizlik ilkesince belirlenmekte olup $\Delta x=h/mc$ biçiminde yazılabilir. Bu dalgaboyuna Compton dalgaboyu adı verilir. Büyük patlamanın ilk anlarının bazı modellerinde zamanla değişen çok güçlü kütle çekim alanlarında parçacıklara özdeş olan dalgalar yaratılabilir. Evrenin çok erken dönemlerinde enerjiler parçacıkların boşluktan, kendiliklerinden yaratılmasına yetecek ölçüde yüksek olabilir.

Hatta parçacıların yaratılması yeterince erken gerçekleşmişse, evrenin de yoktan yaratıldığı düşünülebilir. Aslında böyle bir boşluk içinde sonsuz uzunlukta bir zaman beklenebilir. Sonunda, kendiliğinden oluşan bir kuantum dalgalanmasının evrenin ortaya çıkmasına yol açtığı teorik olarak düşünülebilir.

Mini Kara Delikler

Günümüz evreninde çift yaratılması adı verilen kuantum olayı, kara deliklerin yakınlarında bulunabilecek yoğun kütle çekim alanları tarafından uyarılabilir. Einstein'dan çok önce, 1799 yılında Pierre de Laplace eğer bir cisimden kurtulma hızı ışık hızını aşarsa, bu cisimden kurtulmanın hiçbir şekilde mümkün olmadığını ileri sürmüştü. İşte bu cisimler, fizikçi John Archibald Wheeler tarafından verilen adlarıyla kara deliklerdir. Bir kara delikte öylesine büyük bir kütle o kadar küçük bir uzay bölgesine sıkışmıştır ki buradaki kütle çekim kuvveti ışığı bile hapsedecek ölçüde güçlüdür.

Günümüz evrenindeki kara delikler, kütleleri Güneş'in kütlesinin 50 katından büyük yıldızların ölümü sonucunda, Güneş'in kütlesinin 10^6-10^9 katı madde içeren daha büyük kütleli kara deliklerse galaksilerin merkezlerinde oluşurlar. Bu olağanüstü büyük kütleli kara deliklerin kuasarların gücünü sağlayan enerji kaynakları olduğu tahmin ediliyor. Kütleleri Güneşinkinden çok daha küçük olan kara deliklere mini kara delikler adı veriliyor. Eğer böyle kara delikler gerçekten var iseler evrenin başlangıç dönemlerinden kalmış olmalılar, çünkü günümüzdekü astrofiziksel süreçler yalnızca kütleleri Güneşinkinden çok daha büyük olanların gaz bulutlarının çökmesi sonucu oluşabileceğini gösteriyor.

Kütlesi M ve yarıçapı R olan bir cisimden kurtulma hızı nedir? Bir uçurumdan aşağıya fırlatılan bir taş örneğinde olduğu gibi kütle çekim alanı içinde düşen bir parçacık enerji kazanır ve gittikçe hızlanır. Kütle çekim alanından kurtulabilmek için parçacığın kinetik enerji adı verilen ilk hareket enerjisinin kütle çekim potansiyel enerjisi adı verilen , parçacığın kütle çekim alanı içinde düşerken kazanacağı enerjiden büyük olması gerekir. Kurtulma hızını bulmak için, birim kütleye sahip olan parçacığın GM/R olarak ifade edilen kütle çekim potansiyel enerjisini $v^2/2$ olarak yazılabilen kinetik enerjisine eşitleriz. Eğer kinetik enerji potansiyel enerjiden büyükse parçacık kütle çekim alanından kurtulur. Bu durumda kurtulma hızı $(2GM/R)^{1/2}$ olur. Eğer kurtulma hızı ışık hızına eşitse, buradan kara deliğin yarıçapı $R_{kd}=2GM/c^2$ olarak hesaplanır. İçinden hiçbir şeyin kaçamayacağı yarıçap işte budur. Küresel bir kara delik durumunda buna Schwarzschild yarıçapı denir. Güneş kütlesine sahip bir cisim için bu yarıçap yaklaşık bir buçuk kilometreye ya da Güneş yarıçapının yaklaşık yüz binde birinden daha küçük bir sayıya eşittir.

Kara deliklerin güçlü kütle çekim alanları, boşluğun kendi kendisini yok etmesi olarak yorumlanabilecek bir olaya neden olur: olay ufku olarak adlandırılan, ışığın bile hapsedildiği yüzeyin yakınlarında parçacık yağmurları ortaya çıkar. Boşluk, parçacık çiftleri üretir. Bu çiftlerden biri kara deliğe düşerken diğeri kurtulur. Kara deliklerden kütle çalınması anlamına gelen bu olay Stephen Hawking'in kara deliklerin sonsuza kadar varlıklarını sürdüremeyeceklerini, özet olarak kara deliklerin buharlaşabileceklerini öngörmesine neden olmuştur. Kara deliğin sınırlarının eğriliği ne kadar fazla ise, bu etki o kadar güçlüdür, yani parçacık yağmurları yeterince küçük kara deliklerden çok etkili bir biçimde kütle çalarlar. Kara deliğin yarıçapı kütlesi ile orantılı olacağından, küçük kara delikler çabucak buharlaşır. Gerçekten, yeterince küçük bir kara delik için buharlaşma zamanı bir milisaniyeden (saniyenin binde biri) daha azdır. Çok daha büyük kara deliklerin bu süreçten etkilenmemeleri gerekir.

Planck Ölçeği

Eğer mini kara delikler gerçekten varsa, bunlar maddenin ilk tekillik sırasındaki veya ondan hemen sonraki durumunu temsil etmektedirler. Ne yazık ki böyle uç koşulları tanımlayan bir kuantum kütle çekim teorisi yoktur, dolayısıyla bu olası kalıntılarla il-

gili olarak yalnızca birtakım tahminlerde bulunabiliriz. Bununla birlikte bu uç duruma yaklaşım için bir yol bulabiliriz ki bu yol, kütle çekim teorimizde kuantum etkilerini kapsayacak, çok temel değişikliklerin yapılmasını gerektirir. Madde, bir temel parçacık, örneğin proton, kara delik olma sınırına gelecek ölçüde sıkıştırıldığında en son biçimini almış olur. Bu durumdaki bir parçacığın Compton dalgaboyu, Schwarzschild yarıçapına eşittir. Eğer böyle bir parçacığı teorik olarak yapabilirsek, evrenin en yüksek yoğunluğa sahip olduğu, maddenin varlığının en eski durumunu elde edebiliriz.

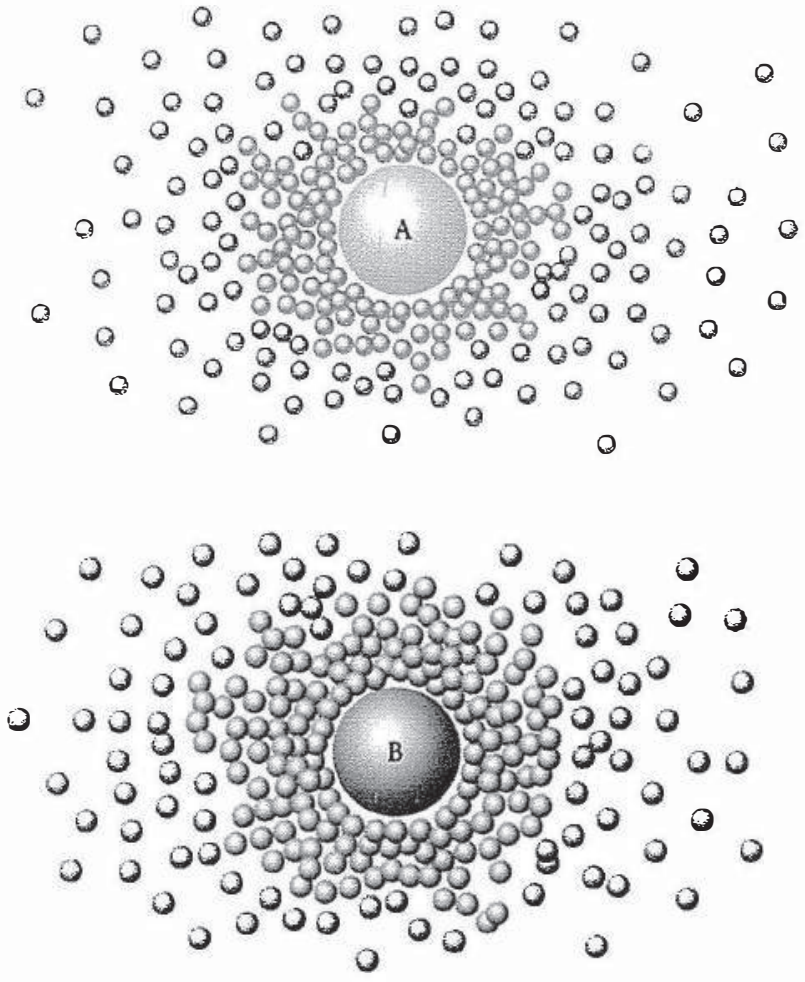
Modern parçacık kavramı etkileşmelerin noktasal olduğunu varsaydığından, çok küçük ölçeklerden söz edebiliriz. En son parçacığı yapabilmek için, kuantum teorisinden bildiğimiz en küçük uzunluk ölçeğini, yani Compton dalgaboyunu (h/mc) seçer ve bunu kütle çekim teorisinde tanımlanan belirli bir kütlenin en küçük uzunluk ölçeğine, yani Schwarzschild yarıçapına ($2Gm/c^2$) eşitleriz. Bu karşılaştırma, Planck kütlesi (m_p) olarak bilinen ve $m=(hc/2G)^{1/2}$ şeklinde tanımlanan kütle ölçeğini tanımlar ki bunun da değeri yaklaşık 10^{-5} gramdır. Planck kütlesi, klasik kütle çekim teorisinin uygulanabildiği en küçük ölçek ve en yüksek yoğunluklardaki parçacığa eşdeğerdir. Kozmolojimiz de aşağıdakilerin her birine ve hepsine varan bu ölçekte başlar: 10^{19} GeV'lik bir enerji ölçeği, $l_{pl}=2Gm_{pl}/c^2$ (veya $h/m_{pl}c$) şeklinde verilen ve 10^{-33} cm değerinde bir uzunluk ölçeği, ya da Gm_{pl}/c^3 veya $(Gh/c^5)^{1/2}$ şeklinde verilen ve yaklaşık 10^{-43} saniye değerinde bir zaman ölçeği. Bu çok küçük zaman diliminde madde, m_{pl}/l_{pl}^3 şeklinde verilen 10^{94}gram/cm^3'lük inanılmaz yoğunluğa ulaşır.

Daha yüksek yoğunluklara, daha kısa ölçeklere, kozmik zamanın daha eski anlarına ulaşabilmek için bir kuantum kütle çekim teorisi gereklidir. Her ne kadar geliştirilme aşamasında iseler de böyle kuantum kütle çekimi teorileri henüz erişimimizden uzaktadır. Böyle bir tür teori süpersicim (superstring) adıyla anılmaktadır. Bu teori, her biri atom altı parçacıkları ya da onların etkileşimlerinin tüm kombinasyonlarını temsil eden 10 ya da 26 boyutlu bir uzay varsayar. Bu uzay yalnızca Planck ölçeğinde vardır. Yalnızca şu anda var olan üç uzay boyutunu ve bir zaman boyutunu elde etmek üzere uzay daha yoğunlaştırıldığında ya da fazladan boyutlar çöktüğünde şu anki evrenin gerçekten varolmaya başladığı söylenebilir. İşte kozmik saatin tik-taklarına başladığı bu an, Planck zamanıdır. Bu ilk anın öncesinde evren belirsiz bir zaman süresince, sürekli olarak yaratılan ve yok olan Planck kütleli kara deliklerden oluşan bir kuantum köpüğü olarak betimlenebilir. Er geç ortaya çıkması kaçınılmaz olan rasgele bir dalgalanmanın büyük patlamaya yol açan genişlemeyi tetiklediğine inanılıyor.

Büyük Birleşme

Planck zamanı teorisi kaçınılmaz olarak tümüyle spekülasyondu. Kuantum kütle çekimi ile atom altı parçacıkların gerçek dünyası arasında hiçbir bağlantı yoktu. Süpersicim teorisyenleri sonunda parçacıkların tüm bilinen özelliklerinin çıkarılabileceği "her şeyin teorisi"ni bulmanın düşünü görüyorlardı. Ama onlar daha Planck ölçekli süpersicimler ve gözlenebilir herhangi bir olay arasındaki kuantum engelini aşmanın bile çok uzağındalar.

Bununla birlikte, evrenin sıcaklığı Planck ölçeğinin altına düştüğünde evren, fiziğin daha yumuşak ve uysal olduğu bir rejime girmiştir. Bu dönem, kütle çekimi dışındaki diğer temel kuvvetlerin aynı olduğu büyük birleşme dönemidir. Çok yüksek enerjilerde elektromanyetik kuvvet güçlenir, iki nükleer kuvvet zayıflar ve üçü birbirinden ayrılamaz hale gelir. Elektromanyetik kuvvetin güçlenmesinin nedeni şöyledir. Boşluk, parçacık ve karşı parçacık çiftlerinden oluşmuş bir deniz olarak düşünülebilir. Yüklü bir parçacığın varlığı nedeniyle bunlar birbirinden hafifçe ayrılır ve proton, bir sanal elektron bulutunca çevrelenir. Yüksek enerjilerde yakınlardan geçen herhangi bir yüklü parçacık bu bulutun içine girebilir. Böylece de protonla düşük enerjide olduğundan çok daha kuvvetli bir etkileşmeye girebilir.



Boşlukta, sanal A elektronu (üstte), zıt elektrik yüküne sahip sanal parçacıklar tarafından çevreleniyor, sanal bir kuark ise (altta) aynı renge sahip sanal kuarklar ve gluonlar tarafından sarılıyor.

Kuarkta ise bunun tam tersi olur. Kuarklar aynı renkten olan sanal kuark ve gluonlarla çevrelenmek

eğilimindedirler. Dolayısıyla yüksek enerji ortamında, geçen kuark daha derine girer, daha az renk görür ve daha zayıf bir kuvvet hisseder. Bir kuark çifti birbirinden ayrıldıkça daha büyük kuvvetlerle birbirlerine doğru çekileceklerinden, doğada serbest olarak kuark gözlemeyi beklememek gerekir.

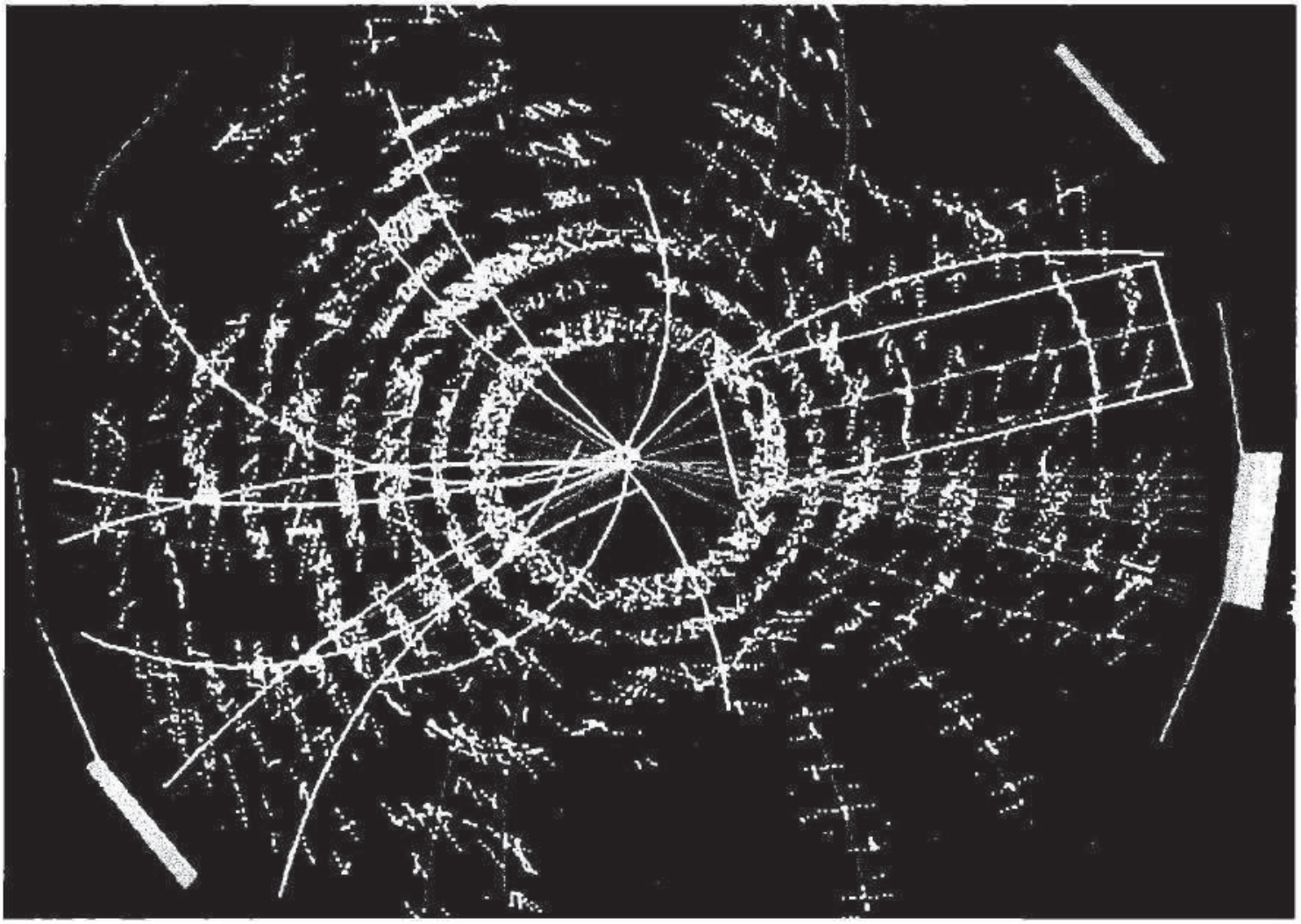
Büyük patlamanın ilk anlarında düşünülebilecek en yüksek enerjiler ortaya çıktı. Sonunda, yaklaşık olarak 10^{15} GeV, ya da protonun durağan kütlesine karşılık gelen enerjinin 10^{15} katı aşıldığında nükleer ve elektromanyetik kuvvetlerin gücü eşitlenir. Bu enerjide bu kuvvetlerin büyük birleşmesinin gerçekleştiğinden söz ederiz. Bu noktada kütle çekimi diğerleriyle birleşmez, o hâlâ en zayıf kuvvettir. Bilinen dört temel kuvvetin de birleşmesi için enerji birimleriyle 10^{19} GeV anlamına gelen Planck ölçeğine kadar gidilmesi gerekir. Elimizde hâlâ bu dört temel kuvvetin birleşmesini tanımlayan bir kuantum kütle çekimi teorisi yok.

Büyük patlamanın ilk anları bilimsel deneylerle sınanamaz. Ama sonunda kozmoloji uzmanları, hemen sonra gelen bir evreye, dolaylı bir biçimde de olsa parçacık teorisi yardımıyla ulaşılabileceğini anladılar. Bu anlayış, meyvesini kozmolojide 1920'lerden beri ilk kökten gelişme olarak verdi. 1981 yılında şişen evren doğdu.

Simetri Kırılması ve Şişme

Büyük birleşmenin bir sonucu, elektromanyetik ve nükleer kuvvetlerin ayırt edilemez olmasıdır. Parçacık fiziği diliyle bu kuvvetler arasında simetri vardır, deriz. Evren genişledikçe ve sıcaklığı birleşme için gereken kritik sıcaklığın altına düşünce bu simetri kırılmak zorundadır. Evrendeki kuvvet dengesi bu kuvvetlerden biri, yani güçlü nükleer kuvvet lehine bozulur. Yaygın bir bakış açısına göre simetri kırılması ani ve şiddetli bir biçimde gerçekleşir. Bu geçişte, su buz durumundan sıvı durumuna geçerken açığa çıkan ve gizli ısı adı verilen ısıya benzer bir enerji salıverilir. Buzu eritmek için verilmesi gereken ısı işte budur. Aslında göllerin donmuş yüzeylerinin altında balıklar, buzun oluşması sırasında salıverilen bu gizli ısı ve buz katmanının oluşturduğu ısı yalıtımı sayesine yaşamlarını sürdürürler.

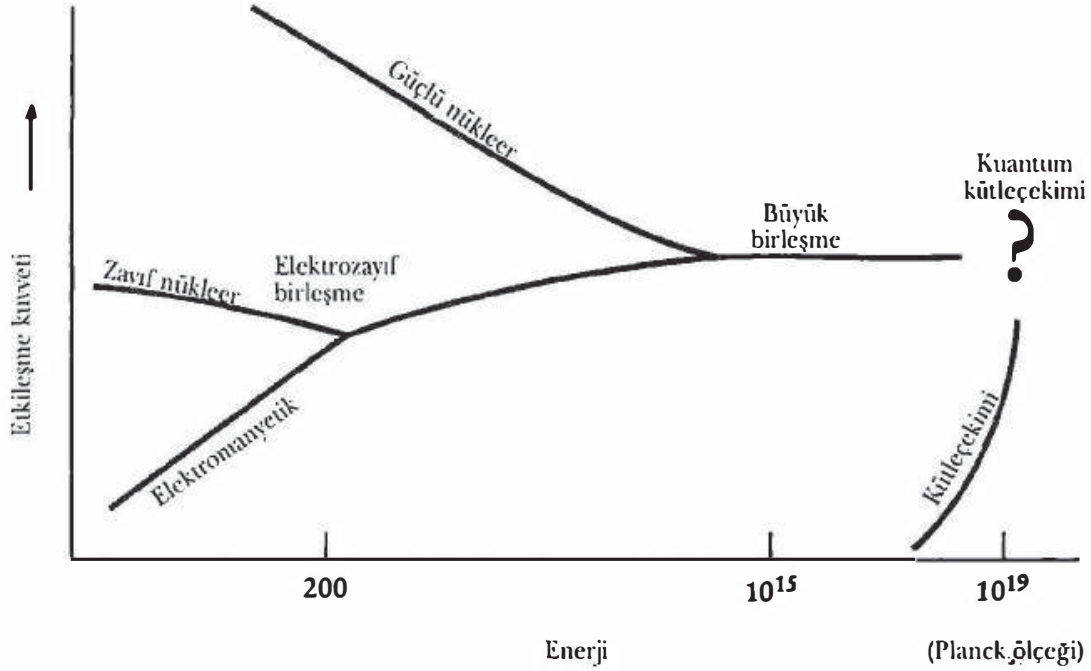
Simetri kırılması sırasında enerji salıverilmesi kuantum boşluğundaki bir değişime karşılık gelir. Simetrik durumdaki boşluk, Casimir etkisinde görülen "negatif enerji"



Fermilab'daki çarpışan ışın-demeti detektörleri bu proton-karşı proton çarpışmasını kaydetmiş. Çarpışmadan sonra ortaya çıkan parçacıkların arasında bir üst (top) kuarkın bulunduğu düşünülüyor. Bozunma ürünleri arasında bir de müon bulunuyor (sarı dikdörtgenin içinde).

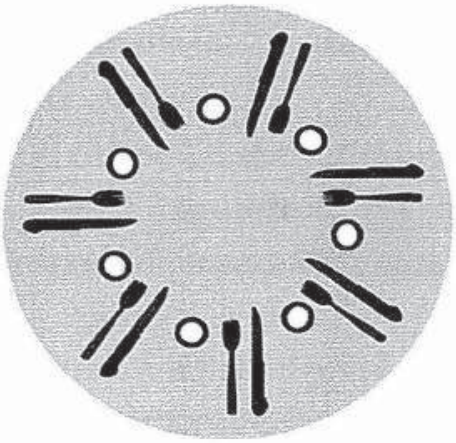
boşluğuna eşdeğer olup sahte boşluk adını alır. Simetri kırılması sırasında bu boşluk, günümüz evreninin çok farklı kuvvetleri ile birarada bulunan gerçek boşluğa dönüşür. Enerji salıverilmesi evrenin genişleme hızını arttırır. Aslında, gerçek boşluğa geçiş tamamlanıncaya kadar evrenin genişleme hızı üstel olarak artar.

Normal olarak, evrenin genişleme hızı, maddenin yoğunluğuyla ilişkili olan kütle çekimi tarafından dengelenir. Evren genişledikçe yoğunluk azalır ve buna tepki olarak da genişleme hızı düşer. Bununla birlikte, simetri kırılması geçişi sırasında sahte boşluktan kaynaklanan enerji evrenin genişleme hızını geçici olarak sabit tutar. Bu, tanımlanması zor bir etki olup Einstein'ın söylediği gibi en azından kütle çekimi perspektifinden bakıldığında madde ve enerjinin eşdeğer olduğu gerçeğinin bir sonucu



Elemanter parçacıklar arasındaki temel etkileşmeler teorisi yeterince yüksek enerjilerde etkileşmelerin birbirinden ayrılamayacağını –yani birleşmelerini öngörür. Parçacık çarpıştırıcılarında zayıf ve elektromanyetik kuvvetlerin birleşmeleri ölçülmüştür. Bu deneylerde elde edilen ipuçları, çok daha yüksek enerjilerde güçlü nükleer kuvvetinde eninde sonunda daha zayıf olan iki kuvvetle birleşeceğini gösteriyor. Kuantum kütleçekimi teorisi ise kütleçekimi kuvvetinin de Planck ölçeğinde bu birleşmeye katılacağını öne sürüyor.

olarak ortaya çıkar. Kısa bir zaman süresince evrenin enerji yoğunluğu sabit olduğundan genişleme hızı da sabit olur. Evrenin bir patlamada olduğu gibi gittikçe yavaşlayan bir hızla değil de sabit bir hızla genişleyebilmesi için herhangi iki nokta arasındaki uzaklık üstel bir biçimde artmalıdır. Şişme kavramıyla kastettiğimiz, ölçekteki bu üstel artıştır.



Sizin bardağınız soldaki mi yoksa sağdaki mi? Komuklardan biri bir bardağa uzanana kadar servis takımları simetrik olup, sol sağdan farksızdır. Bu anda simetri kırılır.

Şişmeyi anlamanın fiziksel bir yolu, Casimir etkisinde ölçtüğümüz gibi sahte boşluğun, gerçek boşlukta bulunan sanal çiftlerden yoksun olduğunu, bunun sonucu olarak da sabit bir negatif basınca sahip olduğunu kavramaktır. Aslında Casimir etkisinde, levhaların arasındaki boşluk dışındaki boşluğa oranla bazı sanal çiftlerden yoksun olduğundan iki levhanın birbirlerine yaklaşmasına neden olan negatif basınç ölçülüyordu. Gerçek boşlukta, doğal olarak basınç sıfırdır.

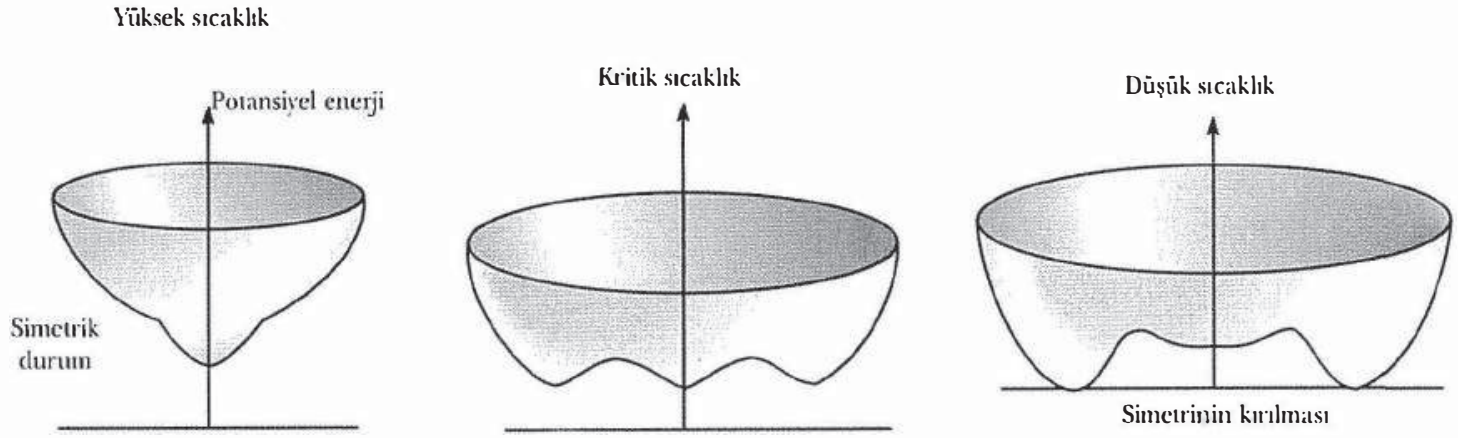
Başlangıçta sahte boşluğun negatif basıncının evrenin genişleme hızı üzerinde etkisi yoktur. Pozitif ve daha kuvvetli bir başka basınç etkindir. Bu da çok sıcak olan foton gazının normal termal basıncından başka bir şey değildir. Evren erken dönemlerinde yüksek enerjili fotonlar bakımından çok zengindi. Bu ışınım denizi, hem büyük patlamadan sonraki ilk bin yıl boyunca toplam yoğunluğa en önemli katkıyı sağlayan bir yoğunluğa sahipti, hem de var olan parçacıklar üzerine basınç uyguluyordu. Sıcaklık, ışınım basıncı sahte boşluğun negatif basıncı ile karşılaştırılabilecek kadar düştüğünde üstel genişlemeye neden olan negatif bir basınç kuvveti ortaya çıktı. Kütle çekiminin uyguladığı çekici kuvvetin tersine, negatif basınç iticidir. Bu basınç, kozmoloji ölçeğinde hiçbir yeri olmayan, basınç farklarından doğan kuvvetle karıştırılmamalıdır. Şişmeden sorumlu olan işte bu itici etkidir.

Şişme, büyük patlamadan yalnızca 10^{-35} saniye sonra başladı. Üstel genişleme hızı, evren ölçeğinin izleyen her 10^{-35} saniyede iki katına çıktığı anlamına geliyordu. Gerçek boşluğa geçiş tamamlandığında, genişleme normal bir biçimde gittikçe azalan enerji yoğunluğuyla ve azalmakla birlikte pozitif olan bir basınçla sürdü. Şişme durduğunda, yavaş ve düşen madde yoğunluğuna bağlı olarak sürekli yavaşlayan bir genişleme yeniden başladı. Bu zayıflamış kütle çekim kuvveti, gittikçe yavaşlayan bir genişlemeye neden olmaya devam ediyor.

Her ne kadar şişme büyük patlamadan 10^{-35} saniye sonra başladıysa da 10^{-33} saniye sonra da durmuştur. Bu noktadan sonra evren genişlemesini, ölçeğini iki katına çıkarmak için gereken zaman sürekli olarak artacak biçimde sürdürdü. Şişme sırasında iki kat genişleme için gereken zaman 10^{-35} saniye idi. Bugün ise iki kat genişleme için gereken zaman $3x10^{17}$ saniye, yani 10 milyar yıldır.

Evren Neden Böylesine Tekbiçimlidir?

Genç bir fizikçi olan Alan Guth 1981 yılında şişen evren modelini ortaya attığında, ana ilgi alanlarından birisi, evrenin neden böylesine tekbiçimli (uniform) olduğu sorusuna, geçmişte de öyle olduğu için cevabını veren totolojiden başka mantıklı bir açıklama bulabilmekti. Şişme, bu sorunu çözmektedir, çünkü şişme bitmeden önce ışığın katettiği uzaklık üstel bir biçimde artarak en azından günümüzdeki evrenin ölçeğine ulaşmaktadır.



Simetrik durumda (solda) enerjinin minimum olduğu tek bir nokta vardır. Evren soğurken artık tercihli bir minimum enerji değil, birçok olasılık bulunur (sağda). Evrenin asmetrik bir durumda olduğu böyle bir zamanda örneğin, karşı maddeden çok daha fazla miktarda madde bulunabilir.

Burada büyüye başvurulmuyor. Evrenin boyutlarının her τ anında iki katına çıktığını düşünelim. Eğer ışığın bu arada aldığı yol ölçeğiyle yani $c\tau$ ile başlarsa, kısa zamanda, yani $N\tau$ saniyede gerçekleşen N sayıda iki katına çıkmadan sonra boyutları $2^N c\tau$ olacaktır. Her iki katına çıkmadan sonra genişlemiş evren, tüm uzanımı boyunca madde ve ışınım içermektedir. N, büyük bir sayı, varsayalım 100 olsun. Bu durumda evrenin boyutları, ışığın büyük patlamadan bu yana aldığı yol olan $Nc\tau$ değerinden çok daha büyük olacaktır. Büyüklük olarak iki katına çıkma, kanser hücrelerinin çoğalmasına benzer. Hasta bir hücrede gözden kaçabilen bir başlangıç, üstel çoğalma nedeniyle tüm bir organın hatta tüm vücudun tükenmesiyle sonuçlanır.

Bu tanımı okuyunca bir cismin, evrenin yarıçapının iki katına çıkmasına eşdeğer bir uzaklığı katetmek için ışıktan daha hızlı hareket etmesi gerektiğini düşünebilirsiniz. Ama boyutların iki katına çıkması ışıktan daha hızlı giden herhangi bir cisim olmasını gerektirmiyor. Genişleyen uzayın kendisidir. Görünüşteki ışıktan hızlı hareket bir yanılsamadır. Bu, gökyüzüne bir lazer ışınıyla çizilen bir şeklin hızından daha gerçek değildir. Fotonlar, lazer ışını boyunca hareket ettiklerinden fiziksel olarak enlemesine hız söz konusu değildir. Benzer biçimde uzayın yerel olarak şişmesi sonucu evrenin boyutları üstel olarak şişmektedir. Evren her 10^{-35} saniyede iki katına çıkmakta, bunu da 100 kez veya daha fazla tekrarlamaktadır.

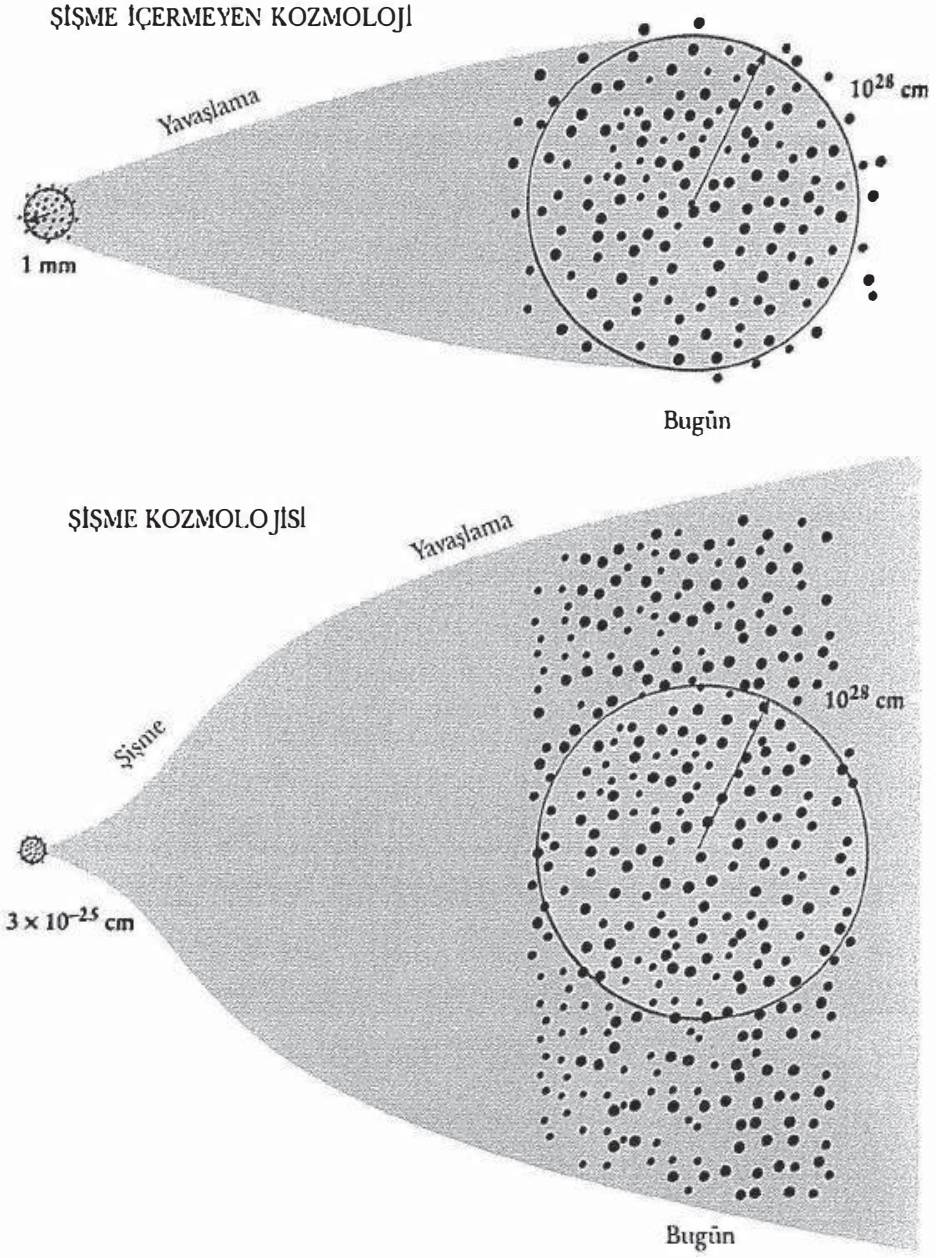
Şişme öncesinde gözlenebilir evrenin boyutları 10^{-35} saniye ile ışık hızının çarpılması sonucunda 3×10^{-25} cm olarak bulunur. Bununla birlikte günümüzdeki gözlenen

evreni alır ve şişmeyi gözardı ederek zaman içinde geriye gidersek, aynı dönemde evrenin çok küçük olduğunu ama gene de boyutunun 20 cm civarında olduğunu görürüz. Şişme, ışığın aldığı yolu $3x10^{-25}$ cm'den birkaç metreye çıkarmış ve gözlenen evrenin boyutlarını şu anda gördüğümüz hatta göremediğimiz tüm maddeyi kapsayacak ölçüde genişletmiştir.

Bununla birlikte 1981 yılında orijinal olarak ortaya atıldığı biçimiyle şişmenin önemli bir kusuru vardı. Evren gerçekten şişmişti ama aslında durmamış ve sonsuza dek şişmeye devam etmişti. Guth'un orijinal şişme teorisi, evrenin şimdi büyük patlama olarak yorumladığımız, daha sakin genişlemeye başlamasına hiçbir olanak bırakmamıştı. Bu problem de çok geçmeden Amerikan fizikçileri Andreas Albrecht ve Paul Steinhardt ile Rus kozmoloji uzmanı Andrei Linde'nin birbirinden bağımsız çalışmalarıyla çözüldü. Bu bilimadamları evrenin yeniden ısınmayla şişme evresinden sakin bir biçimde çıkması için bir yol buldular: sahte boşluğun negatif enerjisi, bildiğimiz madde ve ışınımın termal enerjisi tarafından emiliyor ve şişme kısa zamanda duruyordu. Şişmenin büyük patlamadan 10^{-35} saniye sonra başlaması ve 10^{-33} saniye sonra bitmesi arasındaki zaman, boyutta dev bir artış için yeterliydi: belki 100 e-katlaması gerçekleşti yani evren e^{100} faktörüyle, başka bir deyişle boyut olarak $3x10^{43}$ faktörüyle genişledi (e sembolü yaklaşık olarak 2.71828 değerine sahip olan matematiksel bir sabittir). O zamandan günümüze kadar da evrenin boyutları 10^{26} kat arttı. Eğer şişme olmasaydı boyut artışı bu 10^{26} sayısıyla sınırlı kalacaktı. Evren şimdi görebildiğimizden çok çok büyük; 10 - 20 milyar ışık yılı boyutlarında. Aslında 100 e-katlaması, günümüzdeki boyutlarının en azından 10 milyon milyar ışık yılına eşit olması anlamına geliyor.

Düzlük Problemi

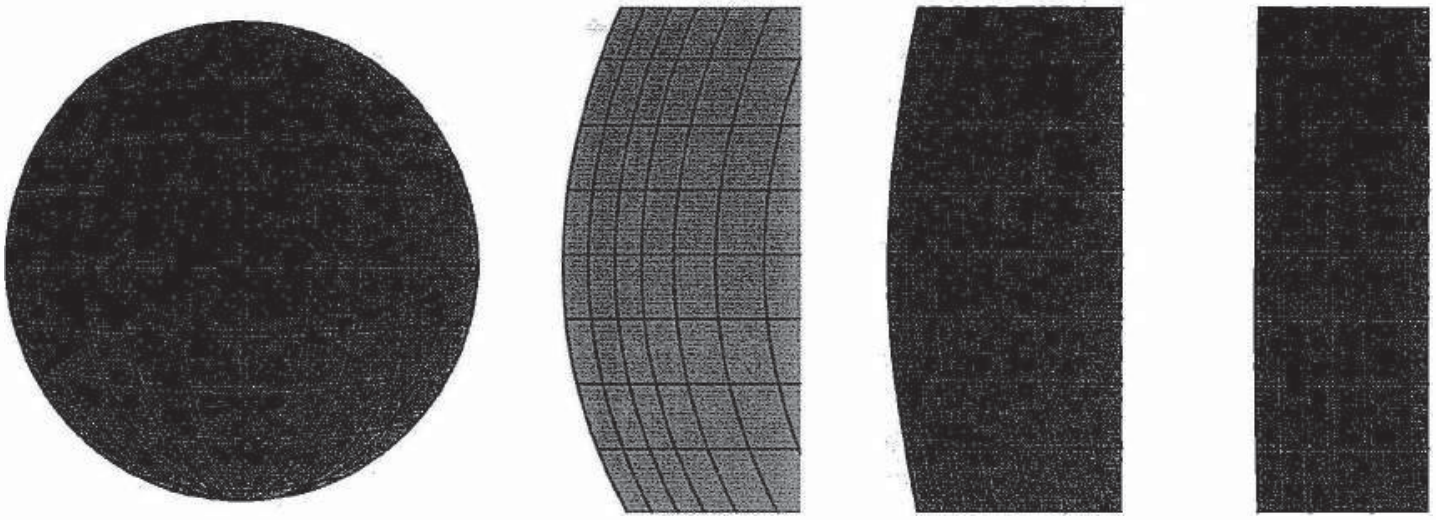
Nasıl bir balonun şişirilmesi başlangıçta yüzeyinde bulunabilecek kırışıklıkları giderirse şişen evrenin de düzgün ve tekbiçimli görünmesi beklenir. Yalnızca düzgün değil, aynı zamanda boyut olarak da gözlenemeyecek kadar büyüdüğünden evrenin geometrisi de yaklaşık olarak çok büyük bir balonun çok küçük bir parçası yani düzlem olmalıdır. Einstein'ın genel görelilik teorisi maddenin varlığının uzayı bükmesini öngörmektedir. Bununla birlikte çok yaklaşık olarak şişme, gözlenebilen evrenin geometrisinin



Eski şişme içermeyen komozolojide (üstte) günümüzde gözlenen evren büyük patlamadan 10^{-35} saniye sonra 1 mm boyutlarında bir bölgeden başlayarak genişlemiştir. Bu boyutlar her ne kadar çok küçükse de ışığın o anda aldığı yoldan - ki bu yaklaşık $3x10^{-25}$ cm'dir çok büyüktür. Şişen evrende (altta) uzay, şişme süresince genişleyerek büyük patlamadan itibaren ışığın aldığı yolu gösteren sarı çemberden daha büyük hale gelmiştir. Sonuç olarak, evren, gözleyebileceğimizden çok daha büyüktür.

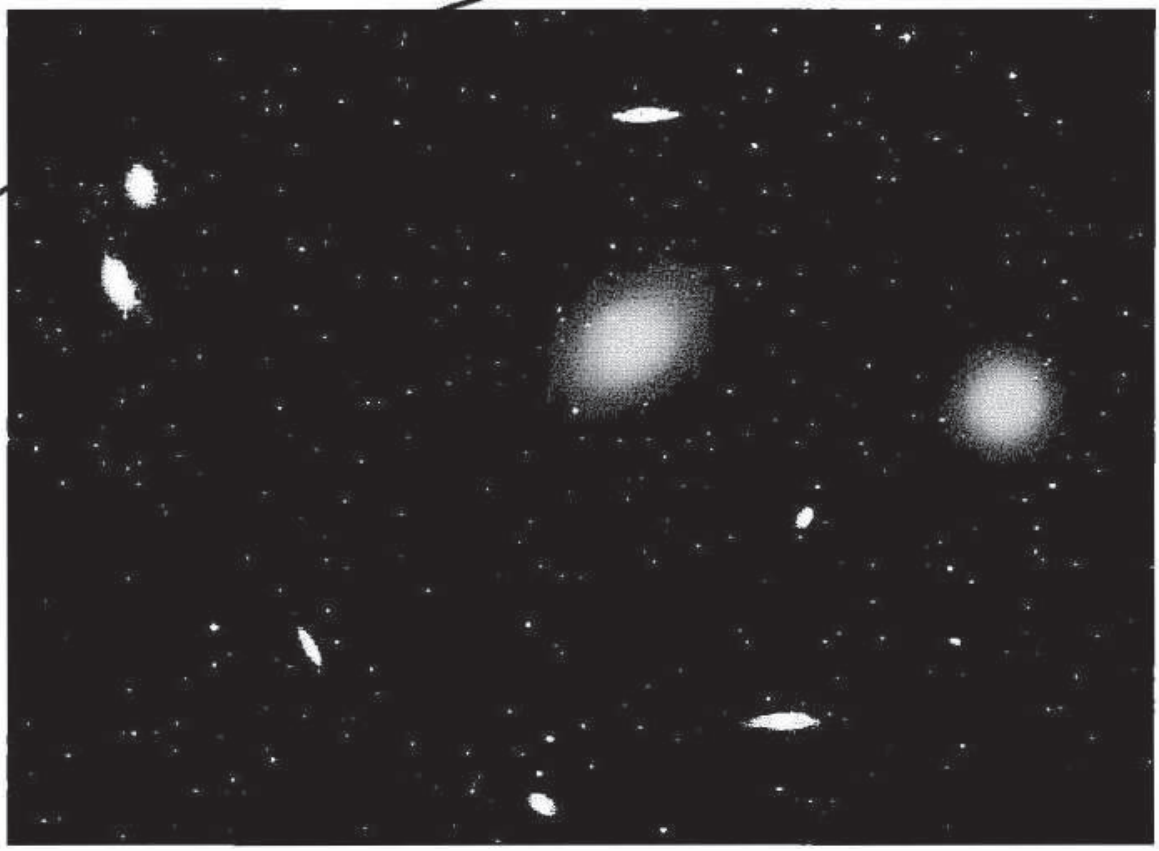
Eukleides (Öklit) uzayına benzemesini öngörür. Eukleides uzayı düz bir uzaydır: iki boyutta sonsuz bir düzlem olur.

Evrenin geometrisi başlangıçta eğri olabilirdi. Bununla birlikte şişme, görevini yaptıktan sonra evren, en azından ilgilendiğimiz bölümü, şu andaki düzlük derecesini açık-



Bir kürenin şişmesi sonucu yüzeyinin düzleşmesi gibi evrenin şişmesi de uzayı düzleştirir.

layabilecek kadar düz olmalıdır. Ne yazık ki başlangıçtaki geometrilerden bir bölümü yeterince şişmeye olanak vermediğinden bu, başlangıçtaki tüm eğrilikler için geçerli değildir. Aslında homojen olmayan, yöne bağımlı ve eğri pek çok başlangıç alternatifi; tekbiçimli, yönden bağımsız, büyük ve düz bir evrenle sonuçlanmaktadır. Evrenin başlangıç koşullarının çok hassas ayarlamak zorunda olmamak, şişen evren modelinin en temel zaferidir.



15 Megaparsek uzaklıktaki Virgo Kümesi, en parlak olanları boyutları yaklaşık 1 milyon parsek olan bu fotoğrafta açıkça görünen binlerce galaksi içerir. Virgo gibi kümeler, galaksiler ve x-ışını yayan dağınık, sıcak gaz biçiminde bilinen en büyük madde topaklanmalarını kapsarlar.

Baryonların ve Helyumun Oluşumu

Büyük patlama teorisinin özü yaratılıştır. Uzay ve zamanın yaratılışı ile ilgili olarak metafizik, teoloji ve hatta kuantum kütle çekimi uzmanlarını görevlendirebiliriz. Bütün sonuçlar deneysel olarak kanıtlanabilir, hatta tümüyle kendi içinde tutarlı fiziğin erişiminden uzakta olduğu için gerçeği kurgudan, sadakati fanteziden ayırt etmek zordur. Daha ivedi ve konumuzla ilgili olan sorun maddenin yaratılışıdır. Evrenin ilk dönemleriyle ilgilenen kozmoloji yaratılış konusunu, Dünyamızı ve yıldızları oluşturan maddenin fiziksel tanımını açık ve kesin bir biçimde ifade ederek, dürüstçe ele alır.

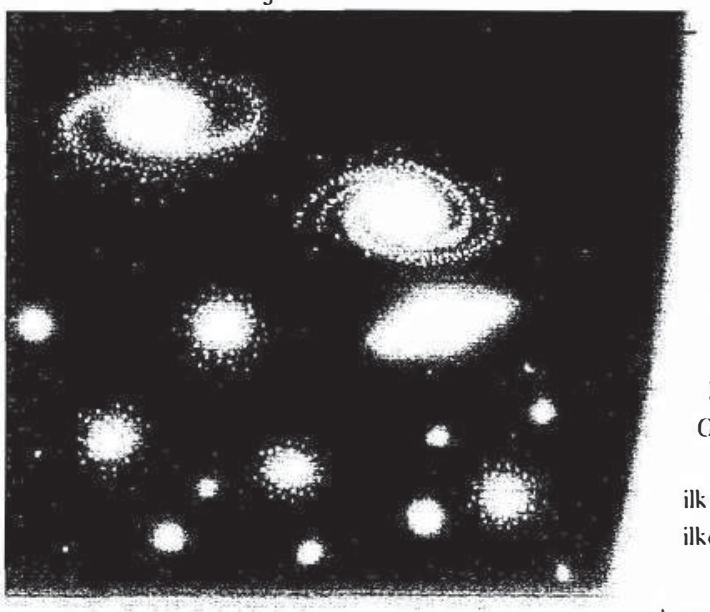
Evren genişledikçe, hızla kuantum boşluğu durumundan bir plazma çorbasına dönüşür. Sıcaklık bir kez 200 GeV değerinin altına düştüğünde elektromanyetik kuvvet, zayıf nükleer kuvvetten farklılaşır. Bu dönemde evrende en bol bulunan parçacıkların arasında fotonlar, nötrinolar ve elektronlar ile proton ve nötronların yapı taşları olan kuarklar sayılabilir. 300 MeV civarındaki yeni bir faz geçişi sonrasında ise bu kuark çorbası yoğunlaşarak proton ve nötron adını verdiğimiz bileşik parçacıklara dönüşür.

Gittikçe daha geç dönemlere gelindiğinde evrenin erken dönemlerine ilişkin bilgilerimiz daha tam hale gelir. Evrenin sıcaklığı 1 MeV değerinin de altına düştüğünde nihayet yıldız ve galaksi gözlemlerimizle doğrudan bağların olduğu bir rejime gireriz. Hafif elementlerin bolluğu çok duyarlı bir biçimde büyük patlamanın ilk saniyelerindeki koşullara bağlı olduğundan bu bollukların gözlenmesi çok güçlü bir sonda görevi yapar. Bunun öncesinde kozmoloji tümüyle spekülasyondur. Bu bölümde büyük patlamada bildiğimiz maddenin proton ve elektronlardan hafif elementleri oluşturmak üzere nasıl sentezlendiği anlatılacaktır.

Madde-Karşı Madde Bilmecesi

Maddeyi oluşturan temel parçacıklar proton, elektron ve nötronlardır. Proton ve nötronların ortak adı baryon olup bildiğimiz maddeyi oluştururlar. Bir proton ve bir elektron birleşerek tek bir hidrojen atomunu meydana getirirler. Evrende gördüğümüz maddenin kütlece yaklaşık yüzde 73'ü bu elementtir. Gene kütlece yüzde 25 kadarı çekirdeğinde iki proton ve iki nötron bulunan helyumdur. Galaksimizde kütlece yüzde 2 oranında da çoğunluğu karbon, oksijen, azot, silikon ve demir olan ağır elementler bulunur. Dağınık yıldızlararası bulutlarda bulunan ağır elementlerin kütlelerinin çoğu kü-

EVRENİN KRONOLOJİSİ



Yaşam — Bugün

Galaksi diskleri — 5 milyar yıl

Kuasarlar
Galaksi haleleri — 3 milyar yıl

ilk yıldızlar
ilkel galaksiler — 1 milyar yıl

Ayrışma — 300.000 yıl

Madde egemenliği — 10.000 yıl

Hidrojen Plazması

Nükleer sentez — 3 dakika

Elektronlar-pozitron yokoluyor — 1

Protonlar ve nötronlar yaratılıyor — 1

q q

Elektron-kuark çorbası

Zayıf ve elektromanyetik kuvvetler ayrılıyor — 1

Z W

q — 1

Baryon yaratılması

+ −

Şişme — 1

Büyük birleşme — 1

Planck dönemi (kuantum kütleçekimi)

Büyük patlama

Evrenin yarıçapı

çük, mikrometre altı boyutlarda olivin ya da grafit gibi mineral tanecikleri biçimindedir. Bu tanecikler ışığı soğurur ve saçarlar, bu nedenle de ışık hem kırmızıya kayar hem de polarize olur. Ağır elementler yıldızların sıcak iç bölgelerinde sentezlendiklerinden yıldızları oluşturan ilkel gaz bulutları ağır elementler bakımından oldukça fakirdir. Kütleye ek olarak pek çok uzak galaksiden gelen dağınık elektromanyetik ışınım vardır; bu ışınım çoğunlukla kozmik mikrodalga fotonlarından ve yıldız ışığı biçiminde optik ışınımdan oluşmaktadır. Son olarak hem büyük patlamadan artakalan, hem de yıldızların yaydığı nötrinolar vardır.

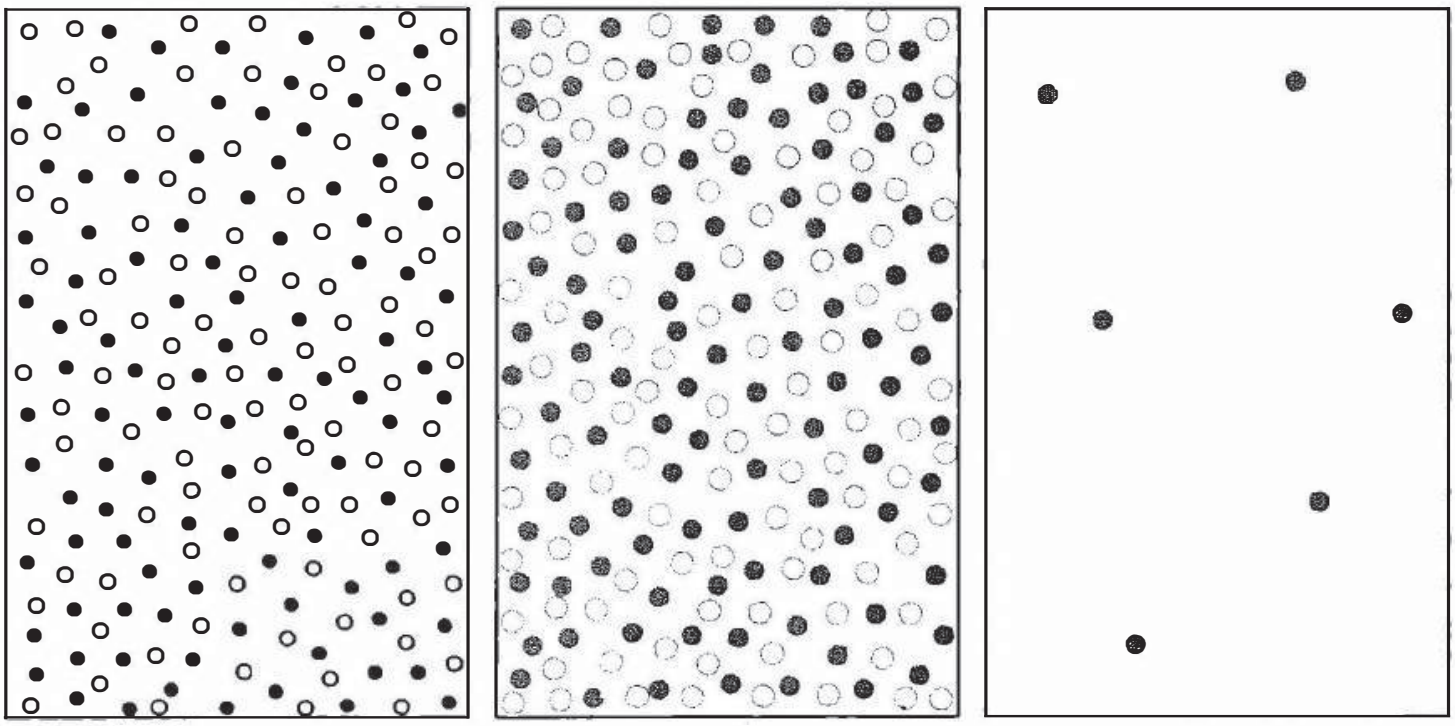
Pratikte çevremizdeki maddenin tamamı karşı madde değil, bildiğimiz maddedir. Bunu şu nedenle biliyoruz. Bir proton, bir karşı protona rastladığında parçacıkların her ikisi de saf bir enerji patlaması vererek yok olurlar. Açığa çıkan enerji protonun durağan kütlesinin iki katı, yani 2 GeV olup gamma ışınları biçimindedir. Bu gamma ışın fotonlarının delip geçici özelliği vardır ve gözlenmeleri çok kolaydır. Ama yerkürenin atmosferi dışında kozmik gamma ışınlarını gözlemek amacıyla yapılan deneylerde (çok şükür atmosfer x-ışınlarını, gamma ışınlarını ve morötesi fotonları soğurmaktadır) çok az gamma ışını fotonu gözlenmiştir. Buradan da evrendeki maddenin en çok milyonda birinin karşı madde biçiminde olduğu sonucu çıkmaktadır.

Karşı madde doğrudan uzayda, her 10 000 parçacıktan birinin karşı proton olduğu yüksek enerjili kozmik ışınlarda gözlenmiştir. Bununla birlikte, bu yüksek enerjili karşı protonlar büyük bir olasılıkla yıldızlararası karbon ve oksijen atomlarıyla çarpışarak parçacık yağmurları içinde rasgele karşı protonlar ortaya çıkaran kozmik ışın parçacıklarının eseridir. Kozmik ışının enerjisi birkaç giga elektron voltun (GeV) üzerinde olduğu sürece, böyle bir çarpışmada bir proton-karşı proton çiftinin ortaya çıkma olasılığı oldukça yüksektir.

Uzun zaman önce evrenin çok daha fazla miktarda karşı madde içerdiği yolunda ilginç bir ipucu vardır. Aslında bir zamanlar eşit oranlarda madde ve karşı madde vardı. Günümüzde kozmik kara cisim fotonlarının enerjileri ortalama olarak 3×10^{-4} eV civarındadır. Bir zamanlar, evren daha yoğunken enerjileri daha fazlaydı ama evren genişlerken fotonlar enerjilerini Doppler kayması yoluyla kaybettiler. Diyelim 10^{10} değerinde bir genişleme faktörü için fotonların frekans ve enerjileri tam bu faktörle azalmış ya da dalgaboyları tam bu faktörle uzamıştır. Dolayısıyla evren 10^{10} kat daha küçükken ya da maddenin yoğunluğu günümüzdekinden 10^{30} kat daha düşükken enerjileri 3 MeV civa-

rındaydı. Ama 3 MeV, elektron-pozitron çiftinin durağan kütlesinden büyüktür, dolayısıyla böylesine yüksek enerjili fotonlar parçacık-karşı parçacık çiftleri yaratabilirler. Bunlar, kuantum boşluğunda yaratılan geçici sanal parçacık çiftlerinin tersine, gerçek parçacıklardır. Biraz daha geriye gidilirse, proton-karşı proton çiftleri bile yaratılır. Bu parçacıklar aynı zamanda birbirlerini yok ederler ve yaratılışla yok oluş arasında bir denge vardır. Hemen hemen eşit miktarlarda ışınım ve parçacığa ya da karşı parçacığa yol açan bu dengeye termal denge adını veriyoruz. Daha sonra evren genişler, bu arada fotonların enerjisi yaratılış için gerekli eşik değerin altına düşer ve hemen hemen bütün parçacık çiftleri yok olurlar. Bugün, kozmik kara cisim ışınımındaki her foton için yalnızca $3x10^{-10}$ proton kalmıştır.

Bu, şöyle bir bilmeceye yol açıyor: şimdi biz burada, maddenin üstün geldiği bir evrendeyiz. Eğer evrenin ilk dönemleri madde ve karşı madde açısından tamamen simetrik olsaydı, her şey ya da hemen hemen her şey yok olacağından, burada bulunma-

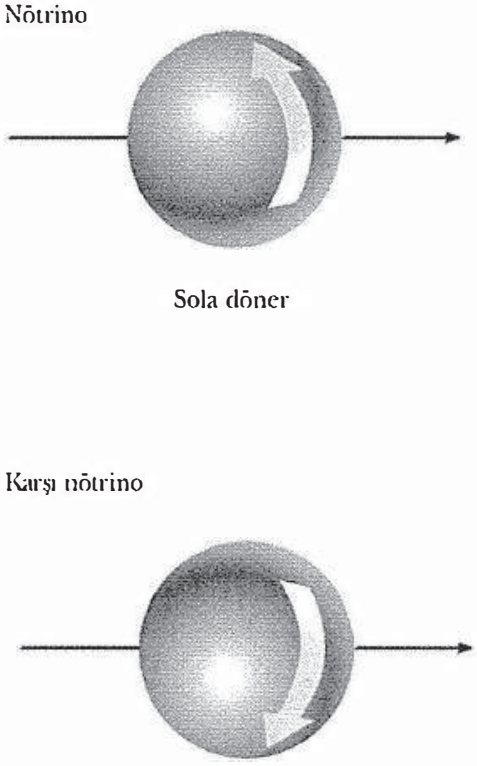


10^{-35} saniye

10^{-32} den 10^{-1} saniyeye kadar

10^{-3} saniyeden şimdiye kadar

Büyük patlamadan 10^{-35} saniye sonra (solda) eşit miktarlarda parçacık (dolu noktalar) ve karşı parçacık (boş noktalar) vardır. 10^{-4} saniyede (ortada) bütün parçacıkların bozunmuş olmasına karşın protonların karşı protonlar üzerinde küçük bir üstünlüğü kalmıştır. Parçacık ve karşı parçacık çiftleri birbirlerini yok etmişler ve geride fazla protonları bırakmıştır (sağda).



Bütün elemanter parçacıkların dönme (spin) özellikleri vardır. Örneğin nötrinolar gidiş yönüne göre sola, karşı nötrinolar ise sağa dönerler.

mamız gerekirdi. Hesaplamalara göre, simetrik bir büyük patlamada kozmik kara cisim ışınımındaki her foton için yalnızca 10^{-20} protonun kalması gerekirdi. Bu bir felaket olurdu! Bununla birlikte, bu bulmacayı çözmenin bir yolu vardır. Şu anda madde ile karşı madde arasında dev bir asimetri vardır. Bu asimetri geçmişte de daha küçük olmakla birlikte hiçbir şekilde sınırlı değildi. Bu ilk asimetrinin büyüklüğü ne kadardı? Bugün kara cisim ışınımındaki her foton için evrenin ilk ve sıcak dönemlerinde bir parçacık-karşı parçacık çifti yaratılmış olmalı. Öyleyse evrende gördüğümüz her proton için 3 derece Kelvindeki fotonları sayalım. Her bir proton için yaklaşık bir milyar foton olduğunu görürüz, öyleyse başlangıçtaki asimetri, milyarda bir oranında olmalı. Parçacık çiftleri yok olmuşlar ve geride fotonlarla birlikte, her şey yok olduktan sonra karşı maddeye göre biraz fazla olan madde kalmıştır. Acaba varlığımızın temeli bu minik fazlalık mıdır? Gerçekten, nereden geliyoruz?

Baryon Numarasının Üretilmesi

Proton gibi parçacıklar anlamına gelen baryon sayısının kozmik kara cisim ışınımındaki fotonların sayısına oranı evrenin baryon numarası olarak bilinir. Fotonlar ya da baryonlar yaratılıp yok olmadıkça-ki günümüz evreninde durum böyledir- baryon numarası sabittir. Doğaldır ki yıldızlarda foton üretilir. Ama yıldız ışığındaki fotonların kozmik kara cisim ışınımındaki fotonlara oranı çok küçük, yaklaşık yüzde bir civarındadır.

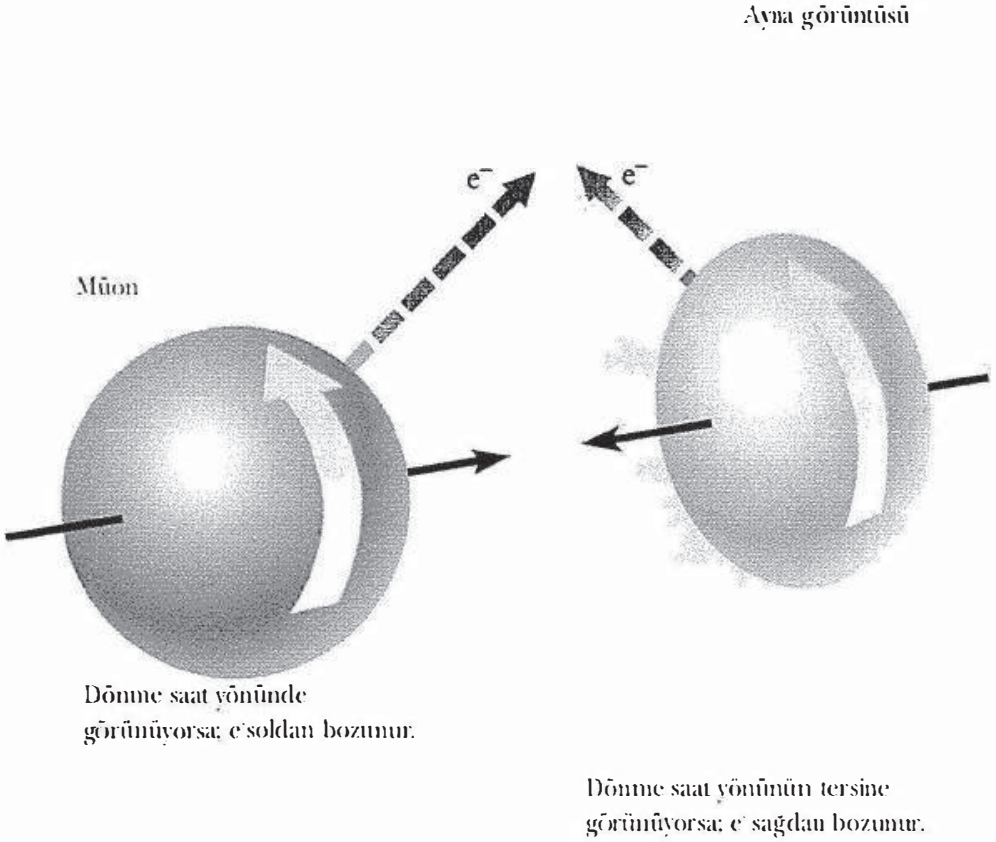
Fizikçiler, evrenin baryon numarası olarak 3×10^{-10} gibi küçük bir sayının, evrenin ilk dönemlerinin başlangıç koşulu olduğu varsayımını hiç sevmezler. Üç doğal sayı vardır: 0, 1 ve sonsuz. Fizikçilere göre bunların dışındaki her şeyin bir açıklaması olası ge-

rekir. Her durumda, böyle bir varsayım gerekli değildir: daha önce, büyük birleşme durumunun büyük olasılıkla mükemmel bir simetriye sahip olduğunu, ve o durumda evrenin baryon numarasının simetrinin bozulduğu geçişten sonra üretildiğini gördük. Bunun da nasıl olduğunu açıklayan basit bir teori var.

Büyük birleşme döneminde ağır parçacıklar(proton gibi) hafif parçacıklarla (elektron ya da foton gibi) aynı davranışı görüyordu. Bu, büyük birleşme döneminde, yani büyük patlamadan şöyle bir 10^{-35} saniye sonra baryon numarasının ille de korunan bir büyüklük olmadığı anlamına gelir. Protonlar bozunur ya da yaratılırken beraberlerinde ille de bozunan ya da yaratılan bir karşı proton olması gerekmiyordu. Her süreç mutlak bir biçimde karşı süreçle benzer olmak zorunda değildi. Büyük birleşme döneminin sonunda, karşı proton vermeden yalnızca proton vererek bozunan egzotik parçacıklar vardır. Büyük birleşme simetrisi bozulduğunda tersinir bozunmalar olası hale geldi. Geride egzotik parçacıklardan yalnızca birkaçı kaldı. Bunlar da karşı protonlara (daha kesin bir dille söylemek gerekirse karşı kuarklara) oranla hafifçe proton (ya da kuark) fazlası vererek bozunurlar. Tam olarak kaç kuark kaldığını hesaplamak zordur ama teorinin, evrenin baryon numarasının mantıklı bir açıklamasını verdiği gösterilmiştir.

Son zamanlarda Rus fizikçisi Andrei Sakharov baryon yaratılması için üç koşulun gerekli olduğuna işaret etti. Birincisi, evrenin dengesi bozulmuş olmalı. Bu, evrenin genişlemesinin doğal bir sonucudur. İkincisi, baryon numarasının korunumu ihlal edilmiş olmalı. Bu da 10^{15} GeV değerini aşan enerjilerde, temel kuvvetlerin büyük birleşme döneminde kaçınılmazdır. Üçüncü ve en önemli koşul, anlaşılması en zor olanıdır: 'elektrik yükü konjügasyonu' ve 'parite' adı verilen iki özelliğin korunumu ihlal edilmiş olmalıdır.

Bu parçacık fiziği argosu aslında göründüğü kadar anlaşılmaz değildir. Elektrik yükü konjügasyonu, karşı parçacıkların zıt elektrik yüklü eş parçacıklarıyla aynı etkileşimlere girme özelliğidir. Böylece, girdikleri etkileşmelere bakıldığında madde ve karşı madde birbirinden ayırt edilemez olmaktadır. Maddeden yapılmış bir yıldız karşı maddeden yapılmış yıldızla aynı görünür. Bununla birlikte zayıf etkileşmeleri inceleyen deneylerden, parçacık ve karşı parçacıkların aynı etkileşmelere girmelerinin gerekmediği bilinir: Başka bir deyişle, elektrik yükü konjügasyonu ihlal edilmektedir.



Bozunan bir müonun serbest bıraktığı elektron sol-sağ simetrisini (ya da pariteyi) ihlal eder: Gerçekten bozunan bir müon dönme yönünün soluna doğru bir elektron serbest bırakırken, gerçek ayna görüntüsü elektronu dönme yönünün sağına doğru serbest bırakmalıdır. Oysa o da elektronu sola doğru serbest bırakır.

Parite, maddenin soldan sağa ya da sağdan sola dönme miktarının ölçüsüdür; bu nicelik korunduğunda parçacıkların ayna görüntüleri simetrik olur. Atom altı parçacıkların spin(dönme) özelliği vardır. Bu özellik, tıpkı bir tirbuşon gibi ileri doğru hareket eden parçacığın sağa mı yoksa sola mı döndüğünü belirler. Bazı atom altı parçacık etkileşmelerinde parçacıkların ayna görüntülerinin dönme açısından asimetrik olduğu bulunmuştur. Bu nedenle parite de değişmez değildir. Bununla birlikte parçacık fizikçileri boş yere yük konjügasyonu (C) ve paritenin (P) bir bileşiminin-ki bu bileşime CP deniyor-atom altı parçacıkların etkileşmelerinde değişmez olacağını umdular. 1960'ların ortalarında, James Cronin ve Val Fitch adlı fizikçiler, kısa ömürlü bir mezon olan kaonun bozunmasını incelerken, umulanın tersine, binde bir oranında da olsa CP ihlali

ortaya çıktı. Buradan çıkarılan sonuç, en azından bazı atom altı parçacık etkileşmelerinde CP ihlalinin doğal bir özellik olduğu idi.

Evren için çıkarılacak sonuç ise, evrenin başlangıç dönemlerinde CP'nin ihlal edilmiş olduğudur. Parçacık yaratılmaları, yokolmaları ve bozunmalarının karmaşık çorbasında baryon sayısında net bir artış olmuştur. Baryonların kaçınılmaz olarak üretilmeleri için bir milyon bozunmanın yalnızca birinde CP ihlali olması yetiyordu. Bu olayın tam olarak ne zaman gerçekleştiği teorisyenler arasında tartışma konusudur. Baryon yaratılmasının, evrenin çok erken dönemlerindeki madde içeriğini yeniden düzenleyen asimetri-kırıcı geçişin sonucunda gerçekleştiği kesindir. Bu, büyük birleşmenin çöktüğü dönemde, yani büyük patlamadan 10^{-35} saniye sonra ya da elektromanyetik ve zayıf etkileşmelerin yollarının ayrıldığı zaman, yani büyük patlamadan 10^{-10} saniye sonra gerçekleşmiş olabilir.

Proton Bozunma Deneyleri

Baryon yaratılması teorisinin günümüz fiziğini ilgilendiren ilginç sonuçları vardır. Birincisi, hafif, olağanüstü zayıf asimetrilerin (CP ihlallerinin) bazı nükleer bozunmalarda da gözlenmesi gerektiğidir. Bu etki, ender görülen parçacıklar olan kaonlarda gözlenmiştir. Şimdi beklenen, yeni kuşak parçacık hızlandırıcıları sayesinde, daha sık rastlanan yüksek enerjili parçacık bozunmalarında da CP ihlallerinin kanıtlarının bulunmasıdır. Bu aynı etkinin kuvvetlendirilmiş biçimi büyük birleşmedeki baryon yaratılmasına yol açan egzotik parçacık bozunmalarından da sorumludur. İma edilen başka bir şey de şudur: protonlar günümüzde de çok ama çok yavaş bir biçimde bozunuyor olmalılar. Öyle anlaşılıyor ki günümüzün düşük enerjili evreninde protonun yaşam süresi, en basit büyük birleşme planına göre yaklaşık 10^{30} yıl olmalıdır.

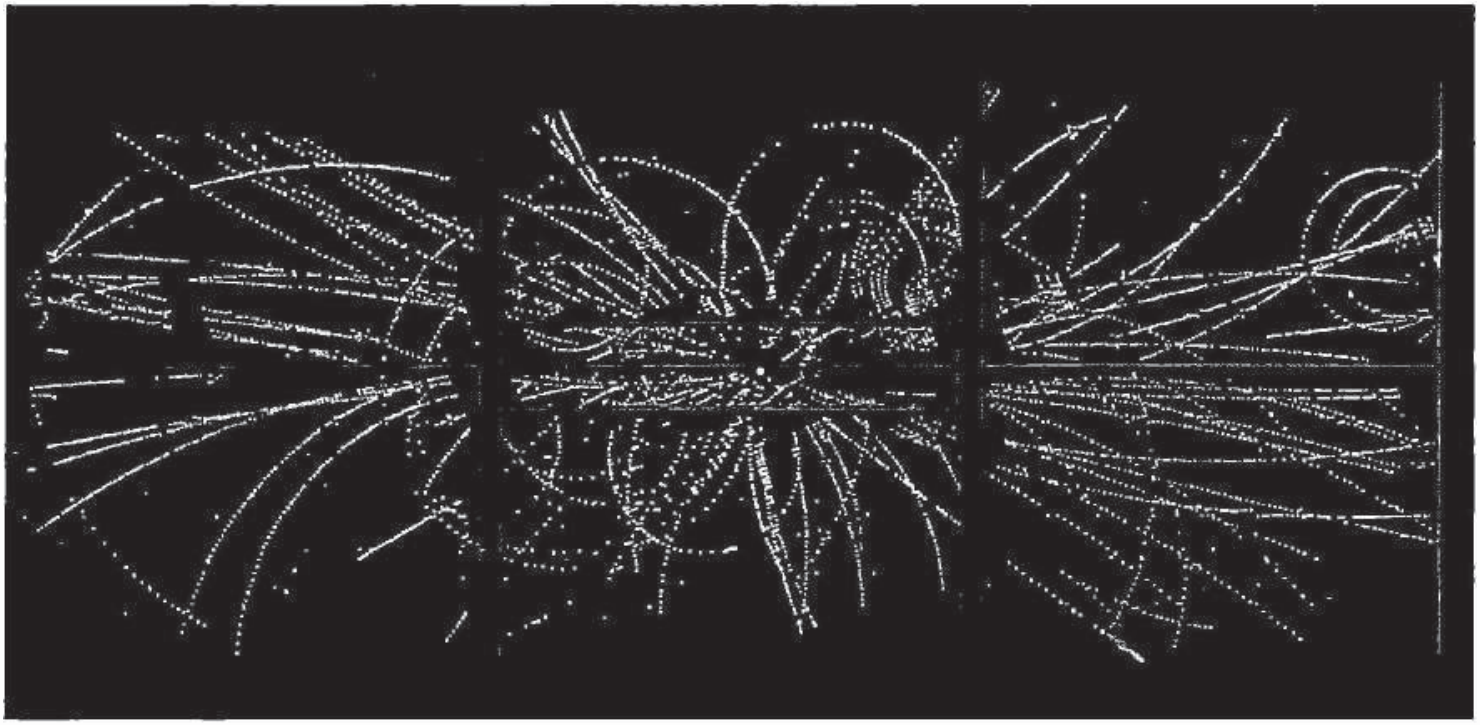
Evren yalnızca 10^{10} yıl yaşında olduğundan bizim için henüz bir tehlike yok. Şurası da ilginçtir ki 100 kg gelen bir insan vücudunda bulunan 10^{29} protondan yaklaşık her on yılda bir ancak bir tanesi bozunacaktır. Ortaya çıkan gamma ışınlarının akısı herhangi bir kanser tehlikesi oluşturamayacak kadar küçüktür. Şöyle bir düşünce ileri sürmek yanlış olmaz: eğer protonun ömrü 10^{14} yıl olsaydı, hepimiz kanserden ölmüş olurduk.

Her ne kadar yavaş olsa da büyük birleşmenin öngördüğü proton bozunma hızı ölçülebilir. Eğer 10^{32} tane proton içeren 100 ton suyunuz varsa, ortalama olarak her yıl 100 proton bozunur. Protonun bozunması sırasında çok miktarda enerji açığa çıktığından (yüksek enerjili müonlar ve gamma ışınları biçiminde) bu etki en azından ilke olarak saptanabilir. Bunun için bu deneyi, yerküre atmosferinde müon yağmurlarına neden olan kozmik ışınlardan yalıtmak gerekir.

Dünya'da birçok yerde proton bozunmalarını saptayacak olan deneyler kurulma aşamasındadır. Bu deneylerin her birinde yer altında dev fıçılar içinde bulunan binlerce ton su kullanılmaktadır. Fıçıların çevresine ender olarak ortaya çıkan proton bozunmalarının yaptığı ışımaları saptayabilmek amacıyla ışıma detektörleri yerleştirilmiştir. Bununla birlikte, günümüze kadar hiç proton bozunması gözlenememiştir. Buradan da protonun ömrünün 10^{32} yılı geçtiği sonucu çıkarılmıştır. Eğer bu bir teselli olursa, elmaslar ebedi olabilir. Atom altı parçacık teorisi için şu anda çıkarılacak sonuç, büyük birleşmenin en basit modellerinin yanlış olduğudur. Ama bu, parçacık fizikçileri için bir sorun oluşturmaz. Fizikçiler zekidir. Hemen protonun yaşını 10^{32} yıl olarak veren biraz daha karmaşık teoriler uydururlar.

Zayıf Etkileşim Donuyor

Artık büyük birleşme döneminden sonuçtaki simetri kırılmasına kadar, baryon yaratılmasının tüm gelişme evrelerini izleyebiliriz. Yüksek sıcaklık nedeniyle, büyük patlamadaki madde, yalnızca en basit bileşenlerinden, proton ve elektronların yapı taşları olan kuark gibi parçacıklardan oluşmaktaydı. 10^{15} GeV değerinden daha yüksek sıcaklıklarda kuark ve nötrino gibi zayıf ya da kuvvetli etkileşen parçacıklar arasında herhangi bir ayrım yoktu. Kuvvetli, zayıf ve elektromanyetik kuvvetler arasındaki simetri ilk kez, sıcaklık 10^{15} GeV değerinin altına düştüğü zaman kırıldı. Sıcaklık bu enerjinin altında düşmeye devam ederken zayıf nükleer kuvvet ve elektromanyetik kuvvet 200 GeV değerine kadar ayırt edilemez olarak kaldılar. Bu enerjide çok sayıda W ve Z bozonu vardır. Hatırlayacak olursanız fotonun elektrik ve manyetizmayı tek bir kuvvet olarak birleştirmesine benzer biçimde bu parçacıklar da zayıf ve elektromanyetik etkileşmeleri birleştirmektedirler. Enerji, durağan kütlelerinin altına düştüğünde bu parçacıklar bozunurlar

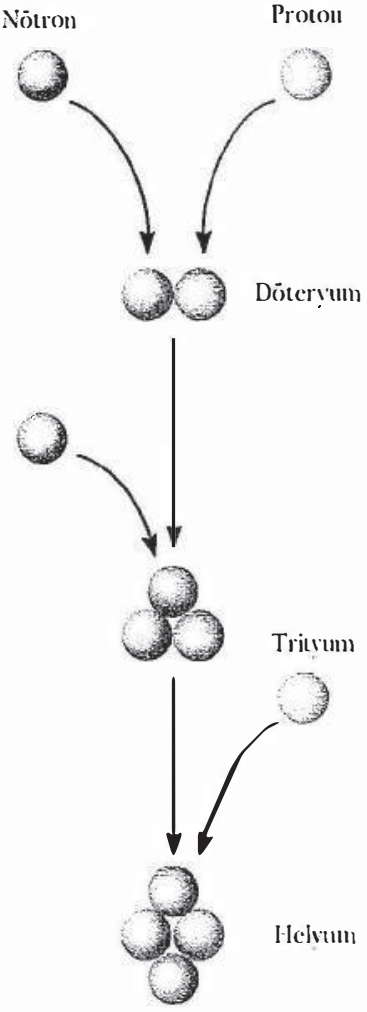


W bozonu, CERN'deki LEP proton-karşı proton çarpıştırıcısının 1982 Ekim-Aralık ayları arasında çalıştırılması sırasında bulundu. Her ne kadar W bozonları doğrudan görülemediyse de onun bozunma ürünleri olan elektron ve nötrino görüldü. Çarpışma, pembe okla gösterilen, yüksek enerjili bir elektronun ortaya çıkmasına neden oldu. Elektronun enerjisinin beklenenden az olması görülemeyen bir nötrinonun salındığının kanıtıdır.

ve yeniden yaratılmaları da enerji açısından oldukça zordur. Sonuç olarak, 200 GeV değerinin altında, günümüzün düşük enerjili evreninde de olduğu gibi zayıf nükleer kuvvet, elektromanyetik kuvvetten tümüyle ayrıdır.

Baryon yaratılması döneminin hemen ertesinde hâlâ atom çekirdeğini oluşturan, proton ve nötron gibi tanıdığımız parçacıklar ortada yoktur. Hadron adını alan bu parçacıklar bileşik olup, ilk kez, sıcaklık 300 MeV değerinin altına düştüğünde oluşurlar. Bundan önce var olan bir çeşit kuark çorbasıdır. Bundan sonra, yani büyük patlamadan 10^{-5} saniye sonra ise, suyun sıvı halden donarak katı hale geçmesine benzeyen ve bildiğimiz nükleer parçacıkların (ya da hadronların) maddenin tercihli biçimi olmasına neden olan bir faz geçişi vardır. Daha ağır çekirdekler yüksek sıcaklıklarda varlıklarını sürdüremeyecekleri için, bunlar zorunlu olarak proton ve nötronlardır.

Hadronlara ek olarak elektron, nötrino ve foton gibi, lepton adı verilen hafif parçacıklar vardır. Hadronlar ve leptonlar birlikte bildiğimiz maddenin parçacıklarını oluştururlar. Nötron ve nötrinolar, elektron ve protonlarla zayıf nükleer kuvvet aracı-



Büyük patlamayı izleyen ilk birkaç dakikadaki gibi yüksek sıcaklıklarda nötronlar protonlarca yakalanarak döteryum oluşturulur. Döteryum bir nötron daha yakalayarak trityuma, o da bir proton daha yakalayarak helyum çekirdeğine dönüşür.

lığıyla etkileşirler. Evrenin sıcaklığı 1 MeV değerinin (ya da 10 milyar derece Kelvin) altına düştüğünde, zayıf etkileşmenin hızı evrenin genişleme hızından daha yavaş kaldığından, zayıf etkileşmeler durur. Bu aşamada büyük patlamadan sonra kozmik zamanda yaklaşık 1 saniye geçmiştir. Zayıf etkileşmeler durduğunda kalan nötronların (ve nötrinoların) sayıları sabitlenir. Yaklaşık olarak her 10 proton başına 1 nötron kalmıştır.

Başlangıçtaki Nükleer Sentez

Serbest bir nötronun bozunmadan önceki ömrü on buçuk dakika kadardır. Bununla birlikte ortalama olarak yalnızca üç buçuk dakika sonra başlarına başka bir şey geldiğinden, nötronların çoğunluğu bozunmaya zaman bulamaz. Protonlarla etkileşmeye girerek ağır hidrojen de denilen döteryum çekirdeklerini oluştururlar. Hemen sonra, döteryum bir nötron daha alarak trityumu, o da bir proton alarak iki proton ve iki nötron içeren, kütlesi 4 olan helyum çekirdeğini meydana getirir. Kütlesi 5 ya da 8 olan kararlı bir element yoktur. Bu nedenle helyum çekirdeğinin başka bir protonla ya da helyum çekirdeğinin bir başka helyum çekirdeğiyle birleşmesi genellikle mümkün değildir. Eser miktarlarda daha ağır bir, iki element-çoğunlukla da lityum-oluşur.

Pratik olarak bütün nötronlar eninde sonunda kendilerini bir helyum çekirdeğinde bulurlar. Bu nedenle büyük patlama teorisi, her 10 proton başına genişlemenin ilk 3 dakikasında yaratılmış olan bir helyum çekirdeği olmasını öngörür. Büyük patlamadan kalan helyum mirasının yıldızların içinde oluşan helyumla az miktarda zenginleştiğini sanıyoruz. Ve aslında şu anda genç yıldızlardaki maddenin kütlece yüzde 27'si helyum çekirdekleri biçiminde olup kalanı protonlardan oluşur. Hel-

yum bolluğu büyük patlamanın sağlıklı bir öngörüsüdür. Evrenin ilk anlarında, yıldızların içlerinde yer alan, çok sıcak ve çok yoğun bir evreden geçtiği gerçeği üzerinde temellenir.

Helyum Sentezi

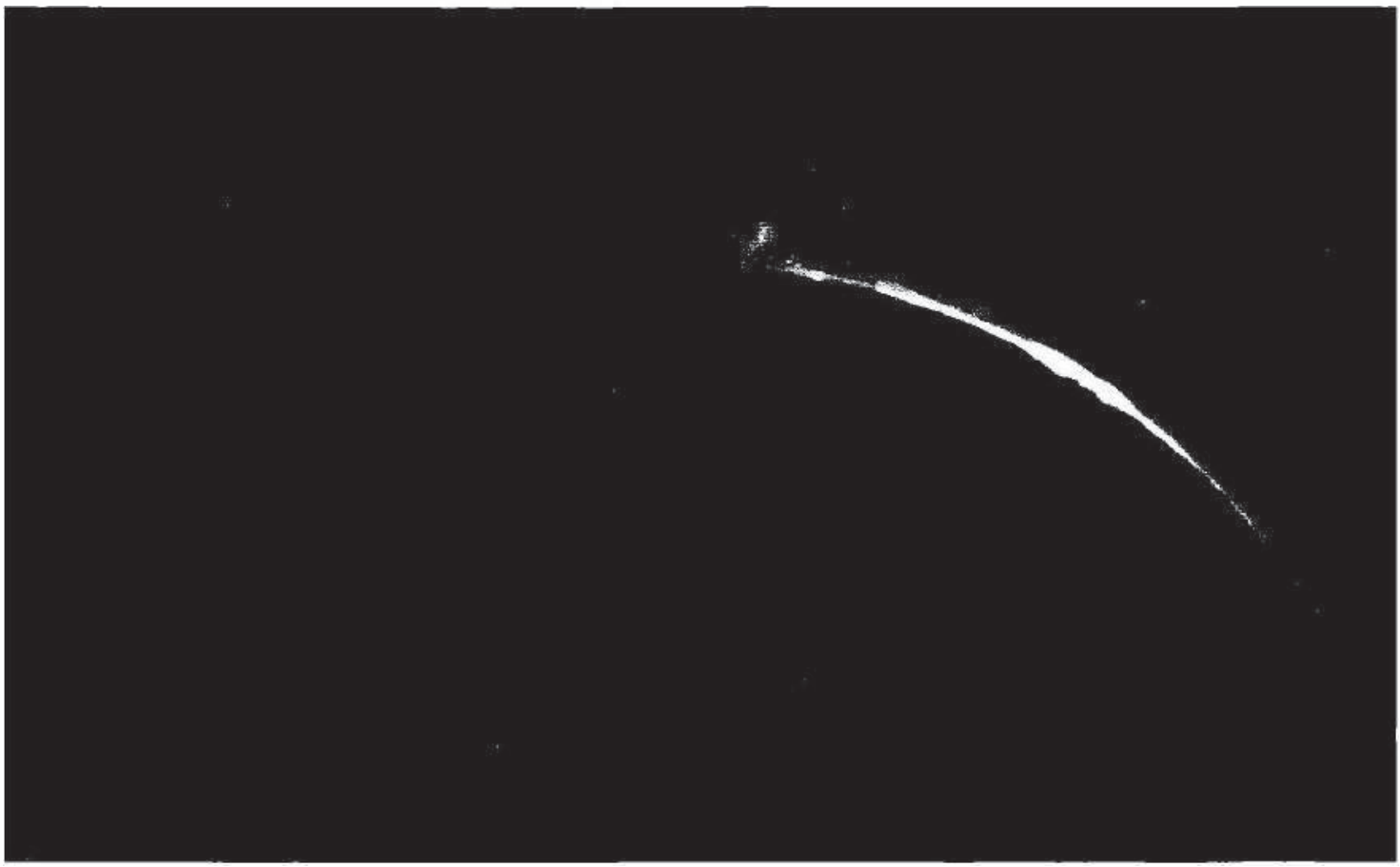
Helyum, yıldızların içinde termonükleer füzyon (kaynaşma) yoluyla sentezlenir. Ama Güneş'e benzer yıldızların çoğunluğu hâlâ hidrojen yakmakta olduklarından çok az miktarlarda helyum sentezlemiş ve bunu da dışarıya saçmamışlardır. Helyumun üretildiği yer hâlâ yıldızların içidir. Ama evrende her 10 ya da 11 hidrojen atomu başına bir helyum atomu bulunduğu gözleniyor ki bu da kütlece yaklaşık yüzde 27 demektir.

Örneğin, Güneş'te bu yüzde civarında helyum olduğu biliniyor. Güneş'in yüzeyi helyum atomlarını uyaracak ölçüde sıcak olmadığından, tayfında helyuma ait soğurma çizgileri gözlenmez. Ama gene de helyum Dünya'dan önce Güneş'te keşfedilmiştir. Normal olarak Güneş'in Dünya'dan gördüğümüz yüzeyini çevreleyen sıcak bir gaz tabakası olan kromosferin(renkküre) tayfında bu elemente ait parlak salma çizgileri gözlenmiştir. Yalnızca Güneş tutulmaları sırasında Ay, Güneş'in ana gövdesini örttüğünde kromosfer zayıf bir parlamayla kendisini gösterir.

Güneş'teki helyum bolluğu Güneş'ten gelen kozmik ışınlardan ve Güneş rüzgârından da bulunabilir. Güneş kaynaklı kozmik ışınlar, Güneş'in an gövdesini saran daha da sıcak ve son derece seyreltilmiş bir plazma olarak tanımlayabileceğimiz korona (taç) bölgesinde hızlandırılan yüksek enerjili ve elektrik yüklü parçacıklardır. Koronanın kendisinden kaynaklanan düşük enerjili parçacıklar da dışarı doğru akarak Güneş rüzgârını oluşturur. Güneş kaynaklı kozmik ışınlarda ve Güneş rüzgârında her 10 protona karşılık bir helyum çekirdeği bulunur. Bu ölçümler, Güneş'te bulunan helyum miktarının en doğru şekilde hesaplanmasını sağlar. Yıldızlararası iyonlaşmış hidrojen gazı (HII) bölgelerinde ve sıcak yıldızlarda da helyum bolluğu yaklaşık yüzde 27 oranındadır. HII bölgelerinde helyum iyonları elektronlarla yeniden birleşirken helyum salma çizgileri üretirler. Sıcak yıldızlarda ise helyum, soğurma çizgileri üretecek ölçüde uyarılmıştır. Yüzde birkaç oranında küçük farklarla helyum bolluğu her yerde aynıdır. Bolluklardaki farklılıklar galaksideki yıldızların yerel katkıları olarak yorumlanır.

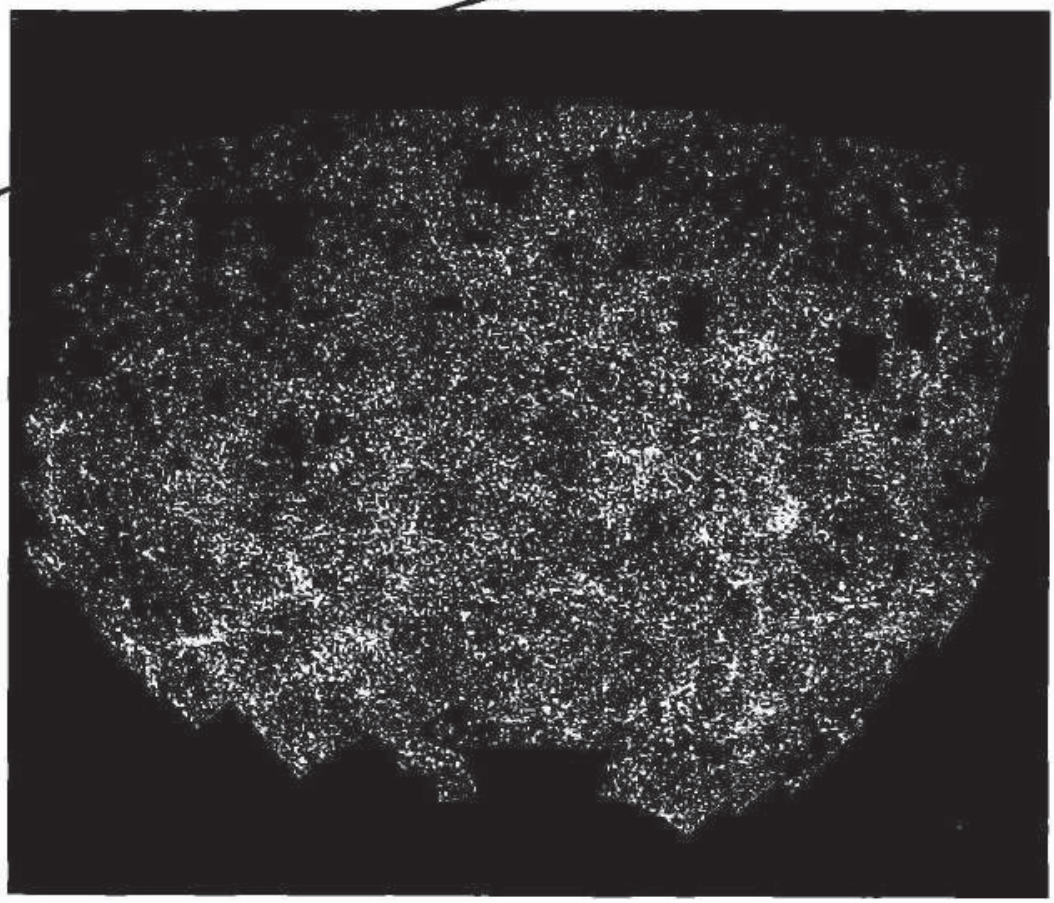
Göreceli olarak sabit helyum bolluğunun kanıtı yaşlı ve metalce fakir yıldızların, genç ve metalce zengin yıldızlarla karşılaştırılması ile bulunur. Metalce fakir yıldızlardaki helyum bolluğu Güneş'ten yüzde 2-3 oranında daha düşük olarak bulunur. Yüzde 2-3 farkla Güneş'le aynı helyum bolluğuna sahip olup gene Güneş'in sahip olduğu ağır element bolluğunun yalnızca yüzde 10'una hatta yüzde 3'üne sahip olan metal yoksunu galaksiler vardır. Bu da helyumun metal gibi diğer ağır elementlerle birlikte yıldızlarda değil, yıldızlar oluşmadan çok önce sentezlendiğini kanıtlıyor. Öngörülen ve gerçekten gözlenen helyum bollukları arasındaki uyum, büyük patlama teorisi lehindeki en büyük kanıtlardan biridir. Bu uyum, şu anda, büyük patlamadan 10 milyar yıl sonraki bir anda büyük patlamadan yalnızca bir saniye sonrası için yaptığımız hesaplamanın doğruluğunu gösteriyor.

Diğer önemli öngörüler, küçük döteryum ve lityum miktarlarını kapsar. Bu elementlerin, özellikle döteryumun son bollukları, bildiğimiz maddeyi oluşturan baryonların



Bir tam tutulma sırasında Güneş'in kromosferi, Ay'ın kenarı üzerinden görünüyor. Kırmızı renk, hidrojen alfa çizgisi dalgaboyundaki saçılma sonucu oluşur.

günümüzdeki yoğunluklarının kesin değerine bağlıdır. Eğer maddenin yoğunluğu yüksekse, ilk nükleer sentez verimlidir. Bu durumda evrenin ilk dönemlerinde hemen hemen hiç döteryum üretilmemiştir. Öte yandan, eğer baryon yoğunluğu düşükse, evrenin ilk anlarında, astronomların gözlediğiyle karşılaştırılabilecek miktarlarda döteryum üretilmiştir. 'Düşük' ve 'yüksek' yoğunluk kavramlarından ne kastedildiği, evrenin gelecekteki evrimi açısından çok önemli olup önümüzdeki bölümde tanımlanacaktır.



Güney gökküredeki yaklaşık 4000 derece karezi kapsayan bu araştırmada hemen hemen iki milyon galaksi gösterilmiştir.

6

Genişleyen Evren Modelleri

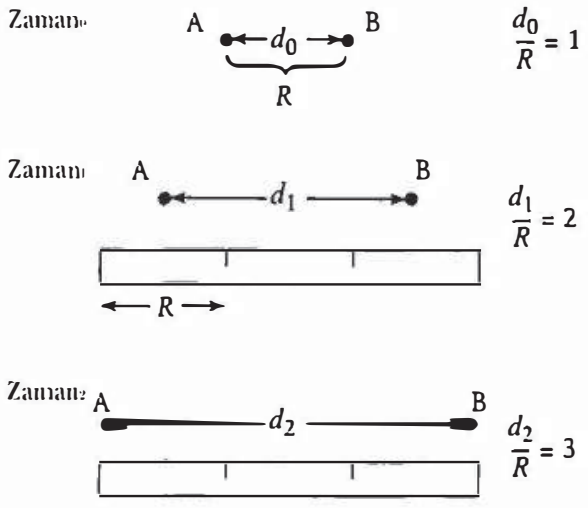
Sıcak ve yoğun bir ateş topundan doğan evren, dağınık ve soğuk bir geleceğe doğru olanca hızıyla koşuyor. Acaba genişlemesini sonsuza kadar sürdürecek mi yoksa genişleme duraksayıp çökmeye dönüşerek ateşten geçmişi uzak bir gelecekte yeniden mi yaratacak? Bu soruların cevapları, onu ilk keşfeden Alexander Friedmann ve Georges Lemaitre'in adıyla anılan ve evrenin genişleme teorisini tanımlayan bir denklemde gizlidir. Bir kez bu denklemin evreni bekleyen olası geleceklere ilişkin ne söylediğini anladıktan sonra, bizi gerçekten neyin beklediğini görmek için birtakım kozmoloji testleri geliştirebiliriz.

Evrenin Yoğunluğu

Friedmann-Lemaitre denkleminin en önemli parametrelerinden biri evrenin ortalama yoğunluğudur. Evrenin sonsuza kadar genişleyeceğini ya da bir gün çökeceğini anlamamızı sağlayan evrenin kütlesini ölçen kavram yoğunluktur. Ama evrenin yoğunluğunun ne olduğunu nasıl söyleyebiliriz?

Evrenin ortalama yoğunluğu, yeterince büyük bir hacim göz önüne alınarak ve gözlenen kütle ölçülerek bulunur. Bu kütleyi bulabilmek için, bu hacim içinde gözlenen parlak galaksiler sayılır ve bu sayı ortalama bir galaksinin kütlesiyle çarpılır. Bir galaksinin kütlesinin, sarmal ya da elips biçiminde olduğu verildiğinde ortalama olarak türünü temsil ettiği varsayılır. Bu ortalama kütle de yakın galaksilerin ayrıntılı olarak incelenmesiyle elde edilir. Bu yöntemlerden birinde, örneğin, galaksi merkezi çevresinde dönen gaz bulutlarının yaydığı 21 cm hidrojen çizgisi ölçülür ve galaksi merkezinden olan çeşitli uzaklıklar için dönme hızı, çizgi genişliklerinden çıkarılır. Buradan da merkezcil ve kütle çekim kuvvetlerinin eşit olduğu bilindiğinden, kütle hesaplanabilir.

Ne büyüklükte bir hacmin taranması gerektiği ise hâlâ tartışma konusudur. Doğal olarak, evreni temsil edebilmesi için bu hacmin boyutlarının en azından 100 megaparsek olması gerekir. 100 megaparsek küpte, ortalama olarak bir tane parlak galaksi bulunur. En yakındaki parlak komşu galaksimiz olan Andromeda, bize 0.75 megaparsek uzaktadır. Andromeda-Samanyolu uzaklığının ortalama uzaklıktan küçük olması, her iki galaksinin de Yerel Küme'de yer almalarından kaynaklanır. Ortalama olarak her galaksi, Güneş'in kütlesinin 100 milyar katı kadar madde içerir ve ışıma gücü, Güneş'in ışıma gücünün 10 milyar katıdır. Bu da megaparsek küp başına 1 milyar Güneş kütlesi ve 100 milyon Güneş



Evren genişledikçe iki nokta arasındaki anlık d uzaklığı sürekli olarak değişir, ama eş-hareketli R uzaklığı, değişmez, d'nin R'ye oranı, alt ölçek çarpanıdır.

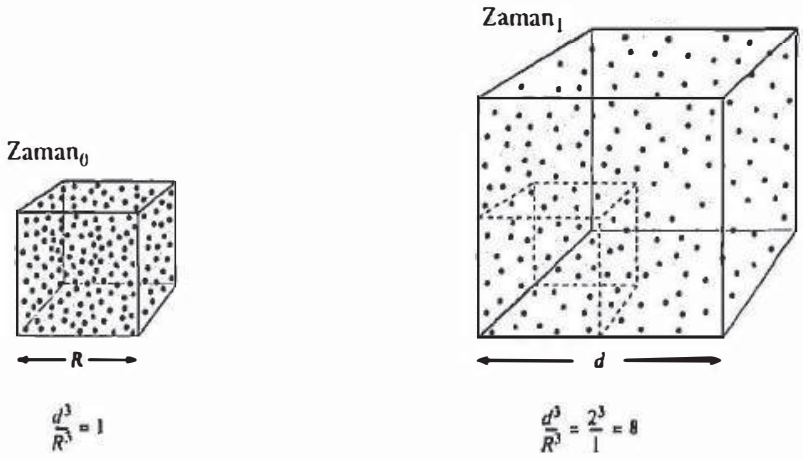
ışıma gücü demektir. Buradan da ρ ile gösterilen, ışıyan maddenin ortalama yoğunluğu, santimetre küpte 10^{-31} gram ya da santimetreküpte 10^{-7} atom olarak bulunur.

Işıyan maddenin ortalama yoğunluğunu yani ρ değerini bulduktan sonra artık büyük patlamanın temel teorisini kurmaya başlayabiliriz. İlk olarak teori, evrenin boyutları büyüdükçe iki nokta kütle arasındaki uzaklığın artmasına bakarak, evrenin genişlemesiyle yoğunluğun nasıl azaldığını tanımlamalıdır.

Genişleyen bir evrende herhangi iki nokta arasındaki uzaklık sürekli olarak artar. Herhangi bir anda iki nokta arasındaki uzaklık demek olan, iki nokta arasındaki anlık uzaklığı tanımlamanın bir yolunu bulmak zorundayız. Bunu yapmamıza yardımcı olmak için bir koordinat uzaklığı, R tanımlar ve bunu d uzaklığındaki değişmeleri ölçmek için kullanırız. Herhangi iki nokta arasında sürekli aynı kaldığından R'ye eş hareketli uzaklık adını veririz. Herhangi bir andaki genişlemeyi ölçmek için, genişleyen bir evrende herhangi iki nokta arasındaki d uzaklığının genişlemeyen bir sistemdeki R uzaklığının oranına bakarız. Bu oran, a(t) adı verilen ölçek çarpanıdır. a(t) ölçek çarpanı d/R olduğundan, d=Ra(t) bu iki nokta arasındaki gerçek uzaklığı verir. Ölçek çarpanının her t zamanı için farklı olduğunu göstermek için (t) şeklinde yazılmıştır.

Evren, doğal olarak uzayda üç boyutludur. Genişleyen üç boyutlu bir hacim d^3 hacmiyle tanımlanabilir. Bu da genişlemeyen, eş hareketli R^3 hacmi ile karşılaştırılabilir ve buradan da $d^3=R^3a(t)^3$ ifadesi bulunur.

Evren genişlerken belirli bir bölgedeki kütlenin sabit kalması için yoğunluğun azalması gerekir. Belirli bir hacimdeki maddenin yaratılmayacağı ve yok olmayacağı demek olan kütlenin korunumu, ρ yoğunluğunun ρ x(hacim)= sabit koşulunu sağlaması gerekir. Bölgenin hacmi d^3 olduğundan, evren genişlerken ρd^3 ifadesinin sabit olduğu sonucuna varıyoruz. Aslında ρd^3 ifadesi koordinat boyutları R olan hacmin içindeki kütleye eşittir. R sabit olduğundan, yoğunluğun $a(t)^{-3}$ ile orantılı olması gerektiği sonucu-



Belirli bir kütle içeren bir küp, evren genişlerken büyür. Yoğunluk, ölçek çarpanının tersiyle orantılı olarak azalır. Bu nedenle evren 2 kat genişlerse yoğunluk 8 kat azalır.

nu çıkarıyoruz. Bunu hesaplamak için $d^3=R^3a(t)^3$ ifadesinde d^3 yerine ρd^3 yazmak gerekir. Bu sonuca göre evren 2 kat genişlediğinde yoğunluk 8 kat azalır.

Diğer yandan kozmoloji ilkesi, evren genişlerken iki nokta arasındaki genişleme hızının $v=Hd$ denklemini sağlamasını gerektirir. Burada H, zamanın bir fonksiyonudur (ama uzaklığın değil). Belirlenen herhangi bir zamanda bu ifade, evrenin genişlemesini veren Hubble yasasına dönüşür. Özel olarak, eğer belirlenen zaman 'bugün' ise, H'yi Hubble 'sabiti' H_0 değerine eşitleriz. Bir zamanlar, $1/H_0$ kadar önce, eğer herhangi bir yavaşlama söz konusu değilse, Hubble yasasına göre evren sonsuz yoğunluktaydı. Tabii daha önce böyle tekil bir başlangıçtan kaçınmanın tek yolunun kuantum kütle çekimine uygun fizik konusundaki bilgisizliğimiz olduğunu görmüştük. Hubble yasası bize, daha uzak noktalar arasındaki uzaklaşma hızının daha büyük olduğunu gösteriyor.

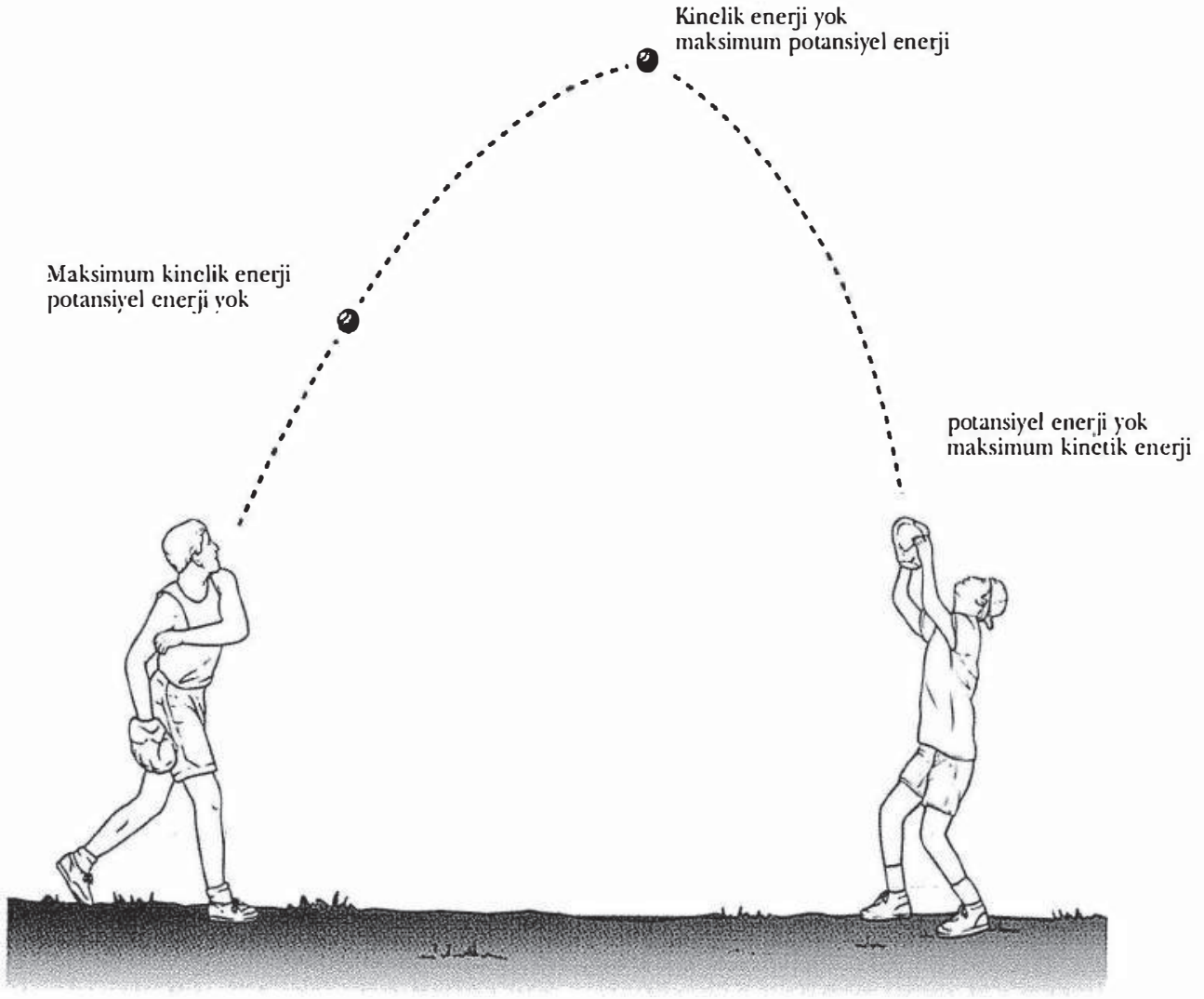
Şimdi, evrende rasgele bir hacim alalım. Bu hacmi iç içe küresel kabuklara ayıralım. Her kabuğa ilişkin iki tür enerji vardır: kinetik enerji adı verilen hareket enerjisi ve kütle çekimsel potansiyel enerji denilen, kabuğun hissettiği kütle çekimsel alan içinde düşerken kazanılan enerji. Herhangi bir kabuk içindeki hareket, enerjinin korunumu ilkesine uymak zorundadır:

kinetik enerji + kütle çekimsel potansiyel enerji = kabuğun toplam enerjisi

Burada, kabuğun kinetik enerjisi $m_kv^2/2$ olup m_k kabuğun kütlesidir. Kabuğun kütle çekimsel potansiyel enerjisi ise $-Gmmk/d$ olarak yazılabilir ki burada kabukla sınırlandırılan küresel hacim içindeki bütün kütle ρ yoğunluğu ile $4/3\pi d^3$ olarak yazılabilen kabuğun hacminin çarpımına eşittir, yani $m=4/3\rho\pi\ d^3$) olur. Buradan da kabuğun toplam enerjisi

$$m_kv^2/2 - Gmm_k/d$$

ya da



Yukarıya doğru atılan bir top, enerjinin korunumunu gösterir. Top, havada yukarıya doğru çıkarken kinetik enerjisi potansiyel enerjiye dönüşür. Tepe noktasında topun enerisinin tümü kütleçekimsel potansiyel enerji biçimindedir. Üzerine kütleçekim kuvveti etkiyen topun enerjisi yeniden kinetik enerjiye dönüşür. Topun tüm hareketi boyunca iki tür enerjinin toplamı sabit kalır.

$$m_k[H^2d^2/2 - [G(4/3\pi\ \rho\ d^{3)}/d]$$

yazılabilir.

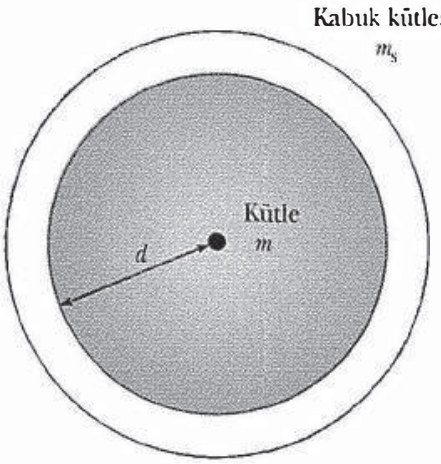
Doğal olarak kabuğun toplam enerjisi ve kütlesi sabittir. Bu demektir ki m_k ve R sabitlerini bölerek, ya da d/a(t) ile

$$H^2 - (8\pi G\ \rho/3) = \text{kabuğun toplam enerjisi x } 2/m_k d^2$$

elde edilebilir.

Kabuğun toplam enerjisinin iki katının, kütlesi ve R^2 ile bölümüne k dersek,

$$H^2 - (8\pi G\ \rho/3) = k/a^2$$

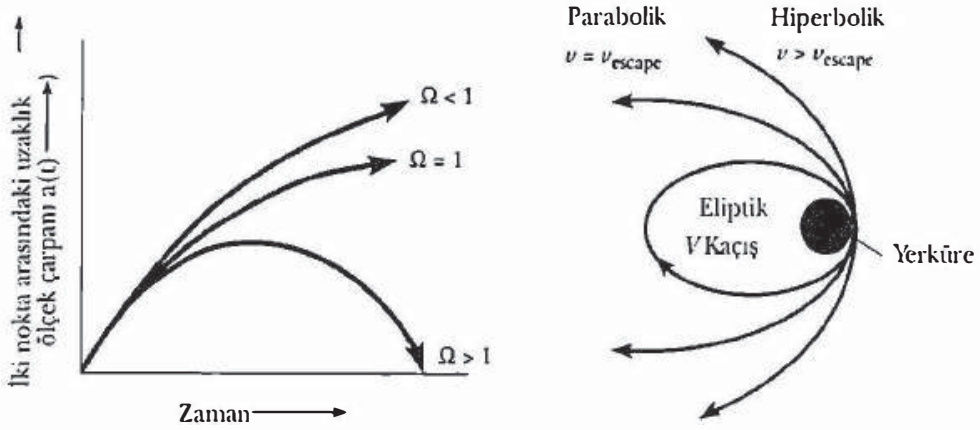


Evren, bir gözlemcinin çevresinde yer alan ve genişleyen iç içe kabuklar biçiminde yorumlanabilir.

buluruz. Bu denklem yaygın olarak Friedmann denklemi olarak bilinir. Denklemi ilk keşfeden kişi olan Rus kozmoloji uzmanı Alexander Friedmann, bulduğu sonuçları 1922 yılında yayınlamıştır. Belçikalı kozmoloji uzmanı Georges Lemaitre 1927 yılında, bağımsız olarak benzer bir keşif yaptığından, denkleme aynı zamanda Friedmann-Lemaitre denklemi adı da verilir.

Evrenin evrimi, kinetik ve potansiyel enerjiler arasındaki duyarlı denge tarafından yönetilir. Kinetik enerji üstün gelirse, evren sonsuza kadar genişler; potansiyel enerji üstün gelirse tekrar çökmeye mahkumdur. Her şey, yoğunluğun kritik bir değerden küçük olup olmamasına bağlıdır ki eğer durum böyle ise savaşı kinetik enerji; tersinin geçerli olması durumunda ise potansiyel enerji kazanır. Burada yerkürenin kurtulma hızı ile ilgili çok yararlı bir benzetme yapabiliriz. Eğer yeryüzünden, hızı saniyede 11 kilometrenin üzerinde olan bir roket fırlatırsanız, yerkürenin kütle çekim alanından kurtulur ve sonsuza kadar yoluna devam eder. Eğer hızı bu değerden küçükse, gerisin geriye yeryüzüne düşer. Dünya'nın kütlesini biliyoruz ve roketin hızını ayarlama özgürlüğüne sahibiz. Evrenin durumunda ise genişleme hızını ölçebiliyoruz ama evrenin kütlesini bilmiyoruz. Aslında burada, maddenin ortalama yoğunluğu Dünya'nın kütlesine benzer rol oynar. Eğer evrendeki maddenin ortalama yoğunluğunu bilirsek, evrenin sonsuza kadar genişlemesi için yeterli 'kurtulma hızı'na sahip olup olmadığını anlayabiliriz.

Kinetik enerjinin tam olarak potansiyel enerjiye eşit olduğunu varsayalım; bu durumda k ile gösterdiğimiz toplam enerji sıfır olur. Friedmann-Lemaitre denklemi de $\rho=3H^2/8\pi G$ biçimine dönüşür. Bu ifade, verilen bir zamandaki kritik yoğunluğu tanımlar. Genel olarak H terimi 1/(büyük patlamadan bu yana geçen zaman)'a eşittir. Günümüzde, H_0 olarak tanımladığımız H'nin değeri, yaklaşık olarak 1/(15 milyar yıl)'dır; ama evrenin ilk dönemlerinde büyük patlamadan o zamana kadar geçen süre çok daha kısa olduğundan, H'nin değeri çok daha büyüktü. Bu nedenle de büyük patlama yakınlarında yoğunluk çok daha fazlaydı. Yoğunluğun, çok yaklaşık olarak H^2 ile doğru orantılı, ya da evrenin yaşıyla ters orantılı olduğunu görüyoruz ($\rho \propto H^2 \propto t^{-2}$). Bunun



Yeryüzünden fırlatılan bir roketin geleceği nasıl fırlatma hızına bağlıysa, evrenin geleceği de gerçek yoğunluğun kritik yoğunluğa oranını gösteren Ω sayısına bağlıdır.

nedeni de ρ ifadesindeki terimin (a^{-3} ile orantılı), k=0 olsun olmasın, ka^{-2} teriminden çok daha büyük olmasıdır.

Evrenin yoğunluğunun büyük patlama sırasında daha büyük olması bizim için sürpriz değildir, ama k enerji sabitine baktığımızda yorumun daha ilginç bir hal aldığını görürüz. Bu enerji sabiti pozitif veya negatif olabilir. Eğer pozitifse, sonraki zamanlarda (büyük a) H^2, k/a^2 ile orantılı olduğundan H'nin her zaman iyi-tanımlı bir değeri vardır. Evrenin sonsuza kadar genişleyeceği sonucunu çıkarırız. Ama eğer k negatifse, sonraki zamanlarda H genişleme hızının gerçek değerler aldığı bir çözüm yoktur. Bu durumda da evrenin bir maksimum yarıçapa kadar genişleyeceği, sonra büzülmeye başlayacağı sonucunu çıkarırız.

k olarak gösterilen enerji sabiti tarafından belirlenen evrenin kaderi, evrenin gerçek yoğunluğunun kritik yoğunluğa göre değerine dayanır. Ölçüm birimlerinde serbest bir seçimi yansıtan a ölçek çarpanına günümüzde an basit olarak 1 değeri verilebilir. Bu durumda Friedmann-Lemaitre denklemi, günümüzde gözlenebilen büyüklükler arasındaki ilişkiyi gösteren basit bir denkleme dönüşür:

$$H_0^2 - 8\pi G\rho_0/3 = k$$

Burada H ve ρ harflerinin altındaki sıfırlar, bunların günümüzdeki değerler olduğu anlamına gelir. Açıktır ki, günümüzdeki kritik yoğunluk

$$\rho_{krit} = 3H_{02}/8\pi G$$

biçiminde yazılabilir.

Genellikle kozmolojideki Ω yoğunluk parametresini gerçek ρ yoğunluğunun, ρ_{krit} yoğunluğuna bölümü olarak, $\Omega = \rho/\rho_{krit}$ biçiminde yazıyoruz. Eğer günümüzdeki yoğunluk kritik yoğunluktan küçükse, yani $\Omega_0 < 1$ ise k pozitiftir ve evren sonsuza kadar genişleyecektir. Eğer günümüzdeki yoğunluk kritik yoğunluktan büyükse, yani $\Omega_0 > 1$ ise, k negatiftir ve evren eninde sonunda çökmeye mahkumdur. Hubble sabitinin H_0=100 kilometre bölü saniye bölü megaparsek değeri için günümüzdeki kritik yoğunluk, yaklaşık 10^{-29} gm/cm^3 civarındadır.

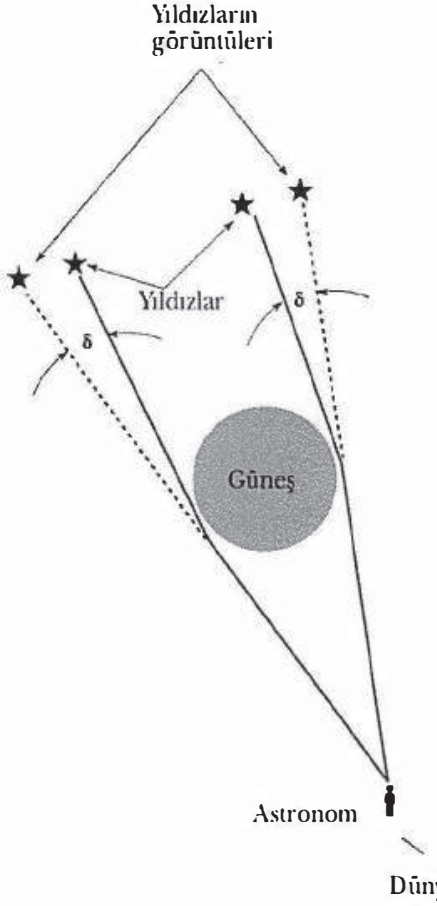
Işıyan madde kolayca saptanabildiğinden, yoğunluğunu gözleyebilir ve ışıyan madde için Ω değerinin yaklaşık 0.01 olduğunu hesaplayabiliriz ki bu da evrenin çökmesi için gereken değerin çok altındadır. Bununla birlikte buradan evrenin sonsuza kadar genişlemesini sürdüreceği sonucuna da varamayız. Evrendeki maddenin büyük çoğunluğunun gözlenemeyen 'karanlık madde' olduğuna inanmak için çok neden var. Karanlık maddenin katkısı ışıyan maddeye oranla çok daha fazla olabileceğinden, güvenli bir biçimde $\Omega < 1$ ya da $\Omega > 1$ diyemiyoruz.

Eğer $\Omega < 1$ ise evren sonsuza kadar genişleyecektir. Galaksiler yeni yıldızlar üretmek için gerekli olan gaz stoklarını tüketecekler ve yıldızlar da sonunda söneceklerdir. Otuz-kırk milyar yıl sonra evren son derece soğuk ve dondurucu bir yer olacaktır. Buna karşılık, eğer $\Omega > 1$ ise, evrenin genişlemesi yavaşlayacak ve günümüzden birkaç milyar yıl sonra büzülme evresi başlayacaktır. Maddenin yoğunluğu arttıkça evren giderek daha fazla ısındıkça galaksiler ve yıldızlar yavaş yavaş yok olacaklardır. Evren, ateşten bir karmaşayla son bulacaktır. Büyük patlamanın tersine son bir ufalanma, yok olma anı olacaktır.

Acaba evrenin sonu ateşle mi yoksa buzla mı gelecek? Büyük patlamanın sonu, büyük ufalanma ya da büyük donma olabilir. Her şey evrenin yoğunluğunun kritik yoğunluktan büyük mü yoksa küçük mü olduğuna bağlı. Maddenin yalnızca ışıyan bölümünü görebildiğimizden yoğunluğu ölçmek son derece zordur. Bununla birlikte, evrenin geleceğini tahmin edebilmenin bir yolu daha vardır: geometrisini gözlemek.

Eğri Uzay ve Genel Görelilik

Einstein'ın kütle çekim teorisi, k enerji sabitini uzayın eğriliği cinsinden yeniden değerlendirir. Einstein'ın genel görelilik teorisinin en önemli kavramlarından biri de uza-



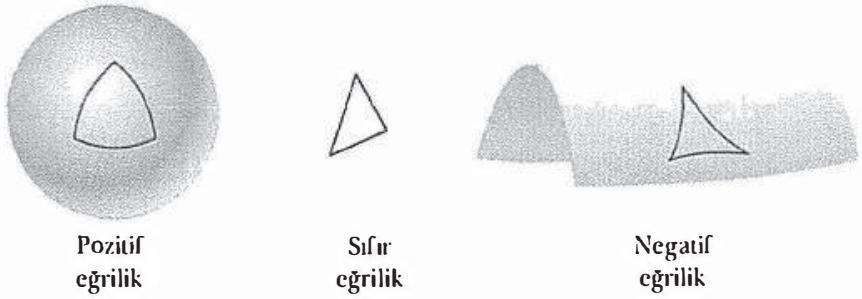
Güneş'in kütleçekimi, başka yıldızlardan gelen ışığı bükerek görüntülerinin farklı yerlerde gözlenmesine neden olur. δ sapması yaklaşık olarak 0.0005 derecedir.

yın kütle çekimi tarafından eğilmesidir. Aslında uzay ve kütle çekiminin karşılıklı etkileri vardır: kütle çekimi uzayı eğer ve uzay kütle çekimine neden olur. Eintein'a göre, maddenin kütle çekiminin etkisi altında hareket etmesine uzayın eğriliği neden olur.

Kütle çekimi uzayı eğdiğinden, ışık artık doğrusal olarak yayılmaz. Bu etki ilk kez 1919 yılında, Einstein'ın teorisinin yayınlanmasından üç yıl sonra, bir tam Güneş tutulması sırasında uzaklardaki yıldızların ışıklarının Güneş'in yakınından geçerken nasıl yollarından saptıkları incelenirken ölçüldü. Güneş'in yanından geçerken ışığın doğrusal bir yol izlemediği görüldü. Aslında ışık, enerjiye sahip olduğundan, Newton'un kütle çekimi teorisi bile ışığın sapmasını öngörmektedir. Bununla birlikte Einstein'ın teorisinde uzay eğri olduğundan ışığın sapması Newton'un teorisindekinin iki katıdır.

Eğer bir yerde madde varsa, artık 'düz çizgiler' yoktur. İki nokta arasındaki en kısa uzaklık, bir eğridir. Eukleides (Öklit) geometrisinin bildiğimiz teoremleri artık uygulanmaz. Paralel çizgiler kesişebilir. Üçgenlerin iç açıları toplamı artık180 dereceye eşit değildir. Güneş yakınlarında bu etki küçüktür. Eğer Güneş'in yakınında bir üçgen çizersek iç açıları toplamı 180 dereceden milyonda bir oranında büyük olur.

Uzayın doğası hakkındaki düşüncelerimizdeki bu devrimin ima ettiği şey, 'kütle çekimi uzayı eğer, uzay maddeyi hareket ettirir' biçiminde özetlenebilir ki bu da evrenin geometrisini yorumlamamızda yeni bir paradigma sağlar. Kütle çekiminin kuvvetini gösterdiğinden, uzayın eğriliği büyük patlamada önemli rol oynar. Önce, k sabitini yeniden yorumlamalıyız. O artık enerjinin değil, Einstein'ın dilinde uzayın eğriliğinin bir ölçüsüdür. Genel görelilik teorisi k sabitine olası üç değer verir: +1, 0, -1. Bunlar, klasik olarak evrenin enerjisinin negatif, sıfır ya da pozitif olması kavramları ile aynıdır. Bu değerler, eğriliği pozitif (bir kürenin yüzeyi), düz (düzlem) ve negatif (eyer biçimli ya da hi-



Uzayın üç boyutlu geometrisi, buradaki iki boyutlu şekillere karşılık gelen küresel, düz ya da eyer biçimli olabilir. Eğrilik sabiti olan k, Newton'un terminolojisine göre -k ile gösterilen enerjidir.

perboloid yüzey) olan uzaylara karşılık gelir. Bunlar, toplam enerji cinsinden, sırasıyla negatif toplam enerji (kütle çekimsel potansiyel enerji üstün gelir), sıfır toplam enerji (potansiyel ve kinetik enerjiler birbirlerini tam olarak dengelerler) ve pozitif toplam enerji (genişlemenin kinetik enerjisi üstün gelir) durumlarına karşılık gelir. Evren için pozitif enerji, eğriliği negatif olan uzaya karşılık gelir. Toplam enerjisi negatif olan ve maksimum bir boyuta kadar genişleyen evrenin eğriliği pozitiftir. Negatif enerjili evren, kapalı ve sonlu bir uzay, pozitif enerjili ve sonsuza kadar genişleyen evren ise açık ve sonsuz bir uzay anlamına gelir. İlk durumda bir üçgenin iç açıları toplamı 180 dereceden büyük, ikinci durumda ise küçüktür.

Açık bir evren bugün sonsuz olduğu gibi geçmişte de sonsuzdu. Sonsuzdur çünkü açık bir geometride bir kenarın varlığı homojenliği, ya da bir başka deyişle lehinde çok miktarda gözlemsel kanıt biriken kozmoloji ilkesini ihlal eder. Bu, sonsuz bir evrendeki galaksi dağılımının bir kenarı olmaması gerektiği anlamına gelmez. Böyle bir kenarın varlığı galaksilerin, öncesinde hiç galaksi olmayan, geçmiş bir zamanda ortaya çıktığı anlamına gelir

Sonsuza bir sınır olmadığından, sonsuz bir evren daima daha fazla genişleyebilir. Sonsuz sayıda odası olup hepsi de dolu olan bir otel düşünelim. Bu otelde sonsuz sayıda müşteri ağırlanabilir. Her müşteriye yandaki odaya geçmesini rica ederiz, böylece ilk oda boşalır. Otelin oda sayısı sonsuz olduğundan, her müşterinin geçebileceği bir yan oda bulunacaktır. Belli yoğunlukta maddeyi için sonsuz hacimde barındırdığından, açık evrenin kütlesi sonsuzdur.

Eğer evren şimdi açıksa, genel görelilik teorisiyle ulaşılamayan fakat hakkında spekülasyon yapılabilecek olan, zamanın başlangıcındaki t=0 anında da açıktı. O anda evre-

nin hacmi sonsuzdu ama maddenin yoğunluğu da sonsuzdu. Açık evrenin, yoğunluğu sonsuz olan bir tekillikle başladığını söyleriz ki bu durumda fizik çöker. Daha gerçekçi olarak, açık evrenin tarihine, yoğunluğunun sonlu fakat hacminin sonsuz olduğu Planck döneminden, 10^{-45} saniyeden başlayabiliriz. Buna karşıt olarak, kapalı evren gene yoğunluğu sonsuz olan ama bu kez hacmi sıfır olan bir tekillikle başlar. Daha gerçekçi olarak, kapalı evrenin tarihine yoğunluğun sonlu olduğu Planck zamanından başlanabilir. Kapalı evrenin hacmi her zaman sonlu olmuştur.

Bugünkü evrenin yoğunluğu, kritik yoğunluğa, geometrisi de önemli ölçüde düze yakındır. Bunun doğru olması için uzay eğriliğinin geometrik karşılığı bize, kütle çekimi potansiyel enerjisi ile genişleyen evrendeki maddenin kinetik enerjisi arasında bir denge olması gerektiğini söyler. Böyle iyi ayarlanmış bir dengenin varlığı, bir ikilem yaratır. Erken dönemlerde bu iki tür enerji birbirlerine daha yakın olduğundan, evren gençken, dengesizliğin çok ince ayarlanmış olması gerekir. Günümüzde biri diğerinden 10 kat farklı olabilir ama Planck döneminde 10^{60}'ta 1 hatayla birbirlerine eşittiler. Neden bu iki enerji türü böylesine yakın dengelenmiş olsun?

İkilem, şişme yardımıyla çözülmüştür. Şişme, en azından iyimser biçimiyle, kinetik ve potansiyel enerjiler arasındaki dengesizlikle başlar. Şişme olmasaydı, evrenin kinetik ve potansiyel enerjileri arasında dengesizlik olurdu. Oysa şişme nedeniyle herhangi bir enerji türündeki fazlalık, çok küçük değerlere indirgenmiştir. Bunun nedenini görmek için, Einstein'ın deyişiyle böyle bir dengesizliğin uzayın eğriliğine eşit olduğunu düşünelim. Şişme sırasında evrenin boyutlarındaki büyük artış, tıpkı şişen bir balonun yüzeyindeki kırışıkların düzelmesi gibi evrenin eğriliğini azaltır. Herhangi eğri bir yüzeyin yeterince küçük bir parçası çok yaklaşık olarak düz kabul edilebilir. Düz geometriye sahip bir evren aslında kinetik ve potansiyel enerji biçimleri arasında hemen hemen mükemmel bir dengenin olduğu bir evrendir.

Kozmoloji Testleri

Büyük ufalanma evreni küresel uzayla, büyük donma evreni ise hiperboloid uzayla bağlantılıdır. Bu iki seçeneğin geometrileri birbirinden çok farklıdır. Evrenin geometrisini, uzaklara, çok uzaktaki galaksilere bakıp evrenin yönden bağımsızlığını ve homojen-

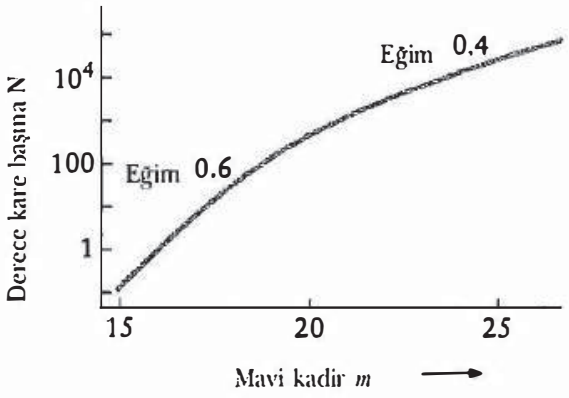
liğini sınayarak anlayabiliriz. Doğaldır ki evreni ilginç kılan, idealleştirilmiş, tekbiçimli ve her yönde aynı olan kozmoloji modelinden sapmalar göstermesidir. İşte mükemmellikten bu sapmalar evrenin geometrisini araştırmak için kullanılabilir. Ne yazık ki henüz sağlam sonuçlar çıkarmaktan çok uzağız.Bununla birlikte bu keşif sırasında evren hakkında çok şey öğrendik.

Galaksi Sayılarından Homojenlik

Modern kozmolojinin çıkış noktası, kaba çözümlemeyle bakıldığında evrenin tekbiçimli olduğunu varsayan kozmoloji ilkesidir. Sanki odak ayarı bozuk bir dürbünle bakılıyormuşçasına galaksi ve galaksi kümelerinin oluşturduğu topaklanmalar ve birikmeler bulanık siluetler halinde görülmektedir. Evrenin tekbiçimliliği ve homojenliğinin sınanması, gittikçe daha sönük galaksilerin sayılmasıdır. Eğer evrenin yoğunluğu, hemen hemen düz olan bir evren için beklenebileceği gibi, her yerde aynı ve zamanla değişmez ise, sayılabilen galaksilerin sayısı ele alınan hacmin büyüklüğü ile doğru orantılı olarak artmalıdır. Gerçekten de yaklaşık 1000 megaparsek uzaklığa kadar böyle bir orantı gözlenmiş olup, bu da bu ölçeklere kadar evrenin büyük ölçeklerde tekbiçimli olduğunu göstermektedir.

Oysa daha büyük uzaklıklarda yoğunluk sabit kalmamalıdır. Önceden belirlenen bir grup galaksiyi kapsayacak biçimde evrende yerel bir hacim tanımlayabiliriz. Daha büyük uzaklıklarda, evrenin daha küçük olduğu geçmiş zamanlara bakıldığında bu yerel hacim küçülür. Evrenin genişlemesinden üstünkörü söz ederken genişleyen madde değil, evrenin dokusunun kendisi olduğundan, daha küçük bir hacim içinde aynı sayıda galaksi sayılır. Kapalı bir evrenin genişleme hızı azalmakta olduğundan, uzak hacim elemanları, artan kırmızıya kayma ile, açık evrende olduğundan çok daha hızlı bir biçimde büzüleceklerdir.

Pek çok uzak galaksi alanının derin görüntüleri alınmış ve galaksiler sayılmıştır. Uzaktaki galaksilerin özellikleri görünüşe göre yakındaki akrabalarınkinden farklı olduğundan, araştırma elle tutulur sonuçlara ulaşmamıştır. Uzak galaksiler daha genç olduklarından, parlaklık gibi gençlik göstergeleri, her zaman sabit bir parlaklığa kadar yapılan sayım işlemlerini etkiliyor olmalıdır.



Belli bir m kadirden daha parlak olan galaksilerin sayısı kadir azaldıkça artar ama eğri sonunda düzleşir.

Kozmoloji ilkesinin bir başka iddiası da evrende tecihli bir yön olmadığıdır ki bu da evrenin yönden bağımsız olduğunu söylemenin bir başka yoludur. Eğer bu herhangi bir gözlemci için doğru olsaydı, evrenin tekbiçimliliği kaçınılmaz bir sonuç olurdu. Evrenin yönden bağımsızlığı, gökyüzünü eşit alanlara sahip küçük parçalara bölmek ve sayımları her parça için tekralamak yoluyla sınanabilir. Belki de en fazla 2 çarpanı kadar farkla aynı sonuçlar bulunmuştur.

Yönden bağımsızlığın en ciddi sınavı mikrodalga fonunun incelenmesidir. Her yönde kesinlikle aynı sıcaklık, 2.73 derece Kelvin ölçülmektedir. Galaksimizin hareketinden kaynaklanan bir dipol yön bağımlılığı dışında binde birkaçtan büyük fark gözlenmemektedir. Mikrodalga fonu kırmızıya kaymanın 1000 olduğu, büyük patlamadan 300 000 yıl sonra evrenin çok uzak noktalarından kaynaklandığından, buradan evrenin homojen olduğu ve bu duyarlılıkla düzgün bir biçimde genişlediği sonucu çıkar. Günümüze kadar kozmoloji ilkesinin en sağlam doğrulaması budur.

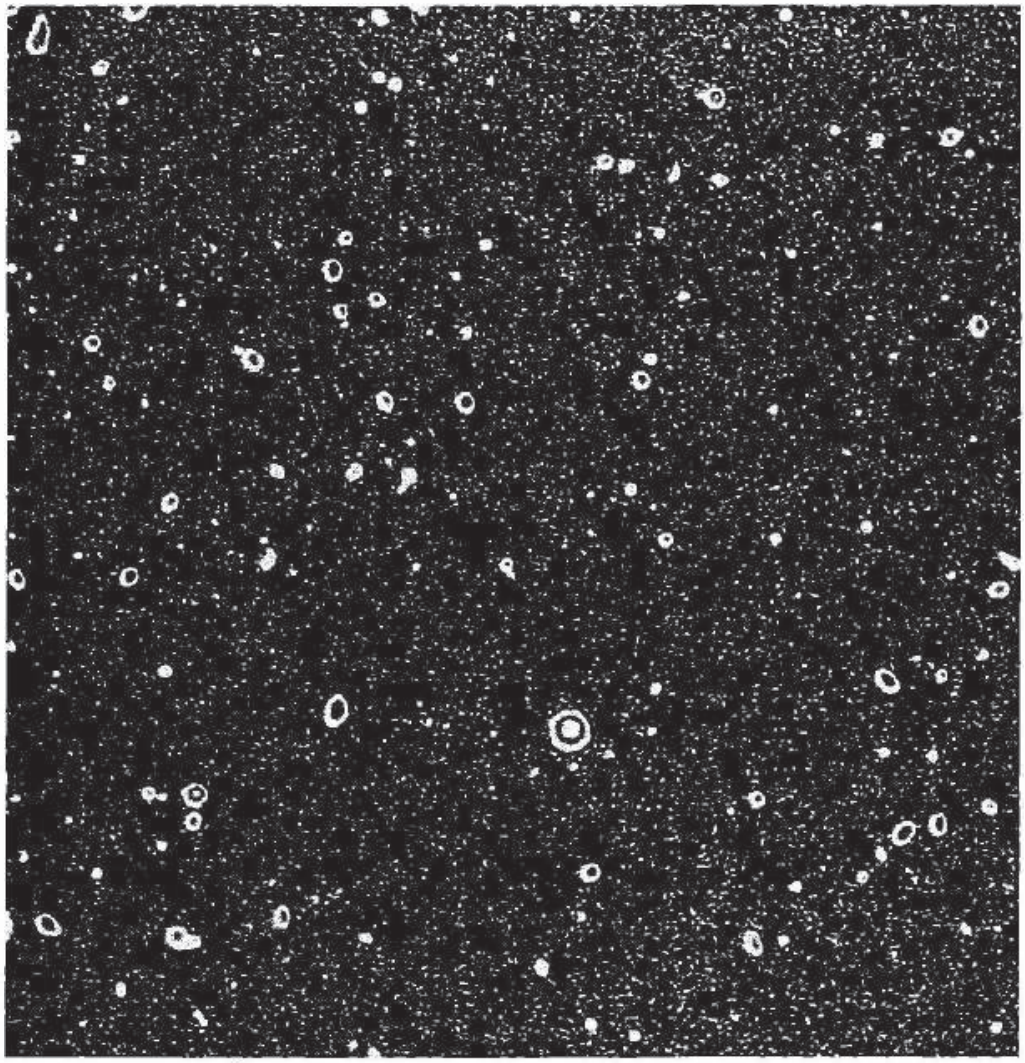
Son zamanlarda çok düşük düzeyde, 100 00'de 1-2 düzeyinde sıcaklık dalgalanmaları saptandığına ilişkin bilgiler geliyor. Daha sonraki bir bölümde tanımlanacak olan bu ölçümler, evrenin büyük ölçekli yapısının kaynaklandığı ilk zayıf homojenlik bozulmalarının önemini anlatmaktadır.

Evrenin Eğriliğinin Ölçülmesi

Evrenin eğriliğinin derecesini uzak cismleri incelemek yoluyla ölçebiliriz. Önemli bir test, uzak galaksilerin kırmızıya kaymalarının ve kadirlerinin ölçülmesidir. Bu galaksilerin mutlak parlaklıklarını bildiğimizi ve kapalı bir evrende yaşamakta olduğumuzu varsayalım. Böyle bir evrenin genişlemesi, ışığın uzak galaksilerden bize ulaşması için gereken zamanda önemli ölçüde yavaşlamış olur. Bu durumda, bu galaksilerin, yavaşlamanın daha az ve bu nedenle de uzaklıkların daha büyük olduğu açık evrene oranla daha parlak olarak görülmeleri beklenir. Kırmızıya kayma, uzaklığın bir ölçüsü olduğundan,

verilen bir kırmızıya kayma miktarı için açık evrendeki galaksiler, kapalı bir evrendeki galaksilerden daha sönük görünürler.

Uzak cisimlerle ilgili bir başka test de, maddenin varlığı kaçınılmaz olarak uzayı eğeceğinden, ışığın eğri bir yol üzerinde yol alacağı gerçeğini kullanır. Bir küre yüzeyinin, üç boyutlu eğri bir uzayın iki boyutlu bir benzeri olduğu durumu ele alalım. Küre yüzeyindeki bir gözlemcinin gördüğü iki komşu noktayı göz önüne alalım. Gözlemci, bu noktaları, onlardan çıkarak gözüne ulaşan ışık ışınları yardımıyla görmektedir. Bu ışık ışınları yalnızca küre yüzeyinde ilerlerler. Gözlemci bu iki sabit noktadan uzaklaştıkça, bunların birbirlerinden olan görünür uzaklığı ya da açısal uzaklıkları küçülür. Kürenin



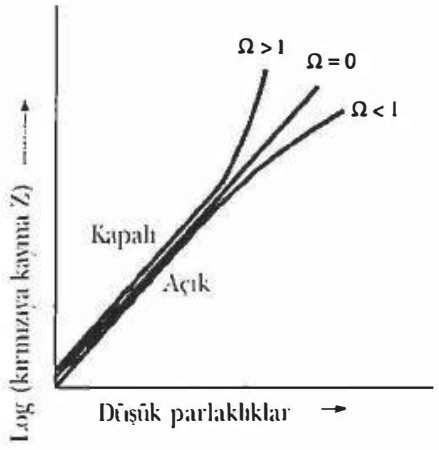
Şili'deki Avrupa Güney Gözlemevi'ndeki 4 metrelik NTT teleskobu ile çok uzun poz süresiyle (10 saat) çekilmiş uzak bir galaksi alanının fotoğrafı. Galaksilerin yoğunluğu derece karede 100.00 olup fotoğrafın boyutları 5 açı dakikasıdır.

çevresinde yarım tur atıldığında eğri yüzeyin etkisinin önemli olduğu ve bu etkinin ışık ışınlarının birbirinden uzaklaşmasına neden olduğu bir an gelir. Sonuçta açısal uzaklık bir minimum değere kadar azaldıktan sonra yeniden artmaya başlar. Eğer galaksilerin yapısal boyutları ya da bir galaksi kümesinde galaksilerin arasındaki ortalama uzaklık bilinirse, bu test, uzayın eğriliğini ölçmek amacıyla çok uzak galaksilere uygulanabilir. Açık bir evren ışığı kapalı bir evrenden daha az eğer.

Son olarak uzayın hacmini, en azından ilke olarak, sonlu fakat derin bir hacimdeki galaksileri sayarak ve bunların kırmızıya kaymalarını ölçerek bulabiliriz. Bu, evrenin geometrisini ölçmenin en ideal yolu olmalıdır. Bütün testler son derece çekici görünmekle birlikte galaksi evriminin etkileri uygulamada zorluklar çıkarmaktadır.

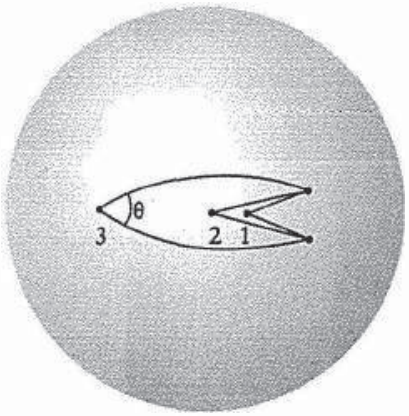
Testlerin Uygulanmasındaki Engeller

Bir galaksiden çıkan ve kırmızıya kayması bir olan ışığın bize ulaşması yedi milyar yıl alır. Biz bu galaksiyi yalnızca 4.6 milyar yıl önce biçimlenen Güneş sistemimizin oluşmasından çok önceki, evrenin yaşı henüz şimdikinin üçte biri ikenki haliyle görürüz. Bütün bu süre boyunca bu galaksinin ışıma gücünün ve boyutlarının aynı kaldığına ilişkin hiçbir garantimiz yoktur. Örneğin, uzak geçmişlerinde galaksiler, bugün barındırmakta olduklarından çok daha fazla sayıda parlak yıldız barınclırdıkları için çok büyük ışıma güçlerine sahip olmuş olabilirler. İlk yıldızların taç bölgesinde ya da merkezde oluşmasına dayanarak galaksiler büyük ya da küçük gözükebilir. Uzak geçmişte galaksiler birbirleri ile kaynaşmış olabilir. Bu durumda uzak galaksiler yakındakilere oranla hem boyut, hem de kütle olarak daha küçük demektir.



Kırmızıya kayma arttıkça galaksilerin parlaklıkları azalır. Kapalı bir evrede, belli bir kırmızıya kayma miktarına sahip olan galaksiler birbirine daha yakın ve daha parlak iken açık bir evrende birbirlerinden daha uzak ve sönük olurlar.

Uzak geçmişe bakıldığında, galaksileri ölçüm araçları olarak kullanma çabalarını daha da karıştıran, çok daha dramatik bir etki söz konusudur. Uzayın ve bu nedenle de zamanın derinliklerinde gördüğümüz galaksilerin yakınlarımızda algılanabilecek benzerleri bulunmayabilir. Eğer

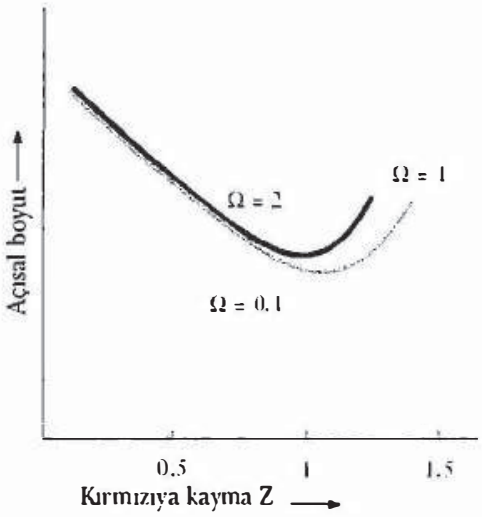


Bir kürenin üzerinden iki sabit noktaya gittikçe daha uzaktan bakıldığında (1'den 3'e kadar olan konumlar) bu noktalar arasındaki görünür uzaklık önce azalır, sonra artar. Bu, birbirlerine yakınsayan iki ışık ışını arasındaki θ açısının değişmesinin bir sonucudur. Bu açı, ışık ışınlarının kürenin eğri yüzeyi üzerinde bükülmesinden etkilenir.

galaksileri yalnızca saymaktan bir adım öteye gidersek, bu sonuca ulaşırız. Bir galaksinin tayfından kırmızıya kayması elde edilir. Galaksileri 27'nci kadire kadar sayabiliyorken -ki bu Ay yüzeyinde yanan bir mum alevinin ışığının Dünya'dan görülen parlaklığı anlamına gelir- galaksi kırmızıya kaymaları ancak 24'üncü kadire, yani kırmızıya kayma değerinin yarım olduğu, bir başka deyişle, evrenin beş milyar yıl öncesine gidebilmektedir. Evrenin derinliklerinde, yerel olarak gördüklerimizden çok daha fazla sayıda galaksi bulunduğunu öğrendik. Uzayın genişlemesinin etkilerini göz önüne alsak bile, gene de kırmızıya kayma değerinin bir olduğu zaman, yani yedi milyar yıl önce, yakınlarımızda gördüklerimizden üç hatta beş kat fazla galaksi vardı. Bu fazla galaksiler özellikle parlak olmamakla birlikte mavi renklidir. Galakside mavi renk, büyük kütleli yıldızların ve gençliğin göstergesidir. Yaşlı galaksilerin büyük çoğunluğu evrenin gençliğinde görülmüyordu. Bu, galaksi oluşumunun büyük bir olasılıkla göreceli olarak yeni bir olgu olduğunu ve oluşumun büyük bir bölümünün geçmiş son beş milyar yıl içinde yer aldığını gösteriyor. En azından galaksi sayımlarında hep önde giden sarmal galaksiler için durum böyle imiş gibi gözüküyor.

Uzayın eğriliğini ölçme çabalarımızdaki bu tür etkileri tümüyle gideremeyiz, çünkü bu etkilerin büyüklüğünü tam olarak hesaplayamıyoruz. Bu belirsizlik yüzünden yakın gelecekte evrenin geometrisini doğrudan ölçebilmek pratik değil gibi gözüküyor.

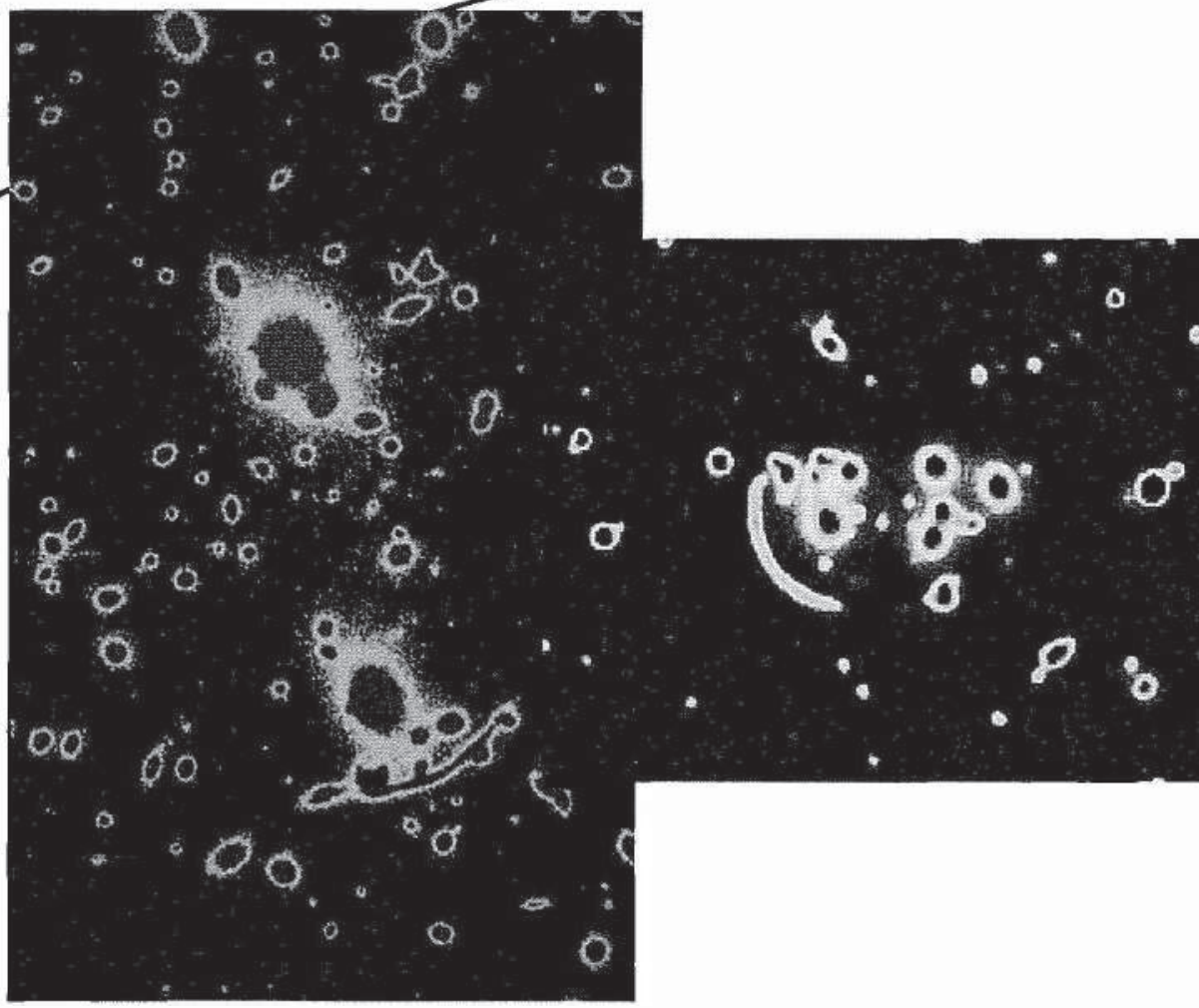
Yeterince büyük teleskoplar kullanılırsa bu güçlüklerin er geç aşılacağı düşünülebilir. Örneğin, uzak bir galakside yer alan yıldızların tayf türleri konusunda yeterince bilgi elde edilebilirse, bu galaksinin yakınımızdaki az evrimleşmiş bir galaksiden ne kadar parlak olduğu hesaplanabilir. Şu anda geleceği en parlak görünen yöntem, çok sayıda galaksinin incelenmesi ve birçok galaksiden ölçülen kırmızıya kaymanın, evrenin uzak bir bölgesindeki bir hacim elemanının büzülmesinin ölçülmesi gibi görünüyor. Uzaklıkla hacmin değişmesi uzayın eğriliğine dayanır. Buradaki problem, çok sönük galaksilerin kırmızıya kaymalarının gerekli olmasıdır. Bu kırmızıya kaymaların



Bir cismin açısal boyutu, kırmızıya kaymayla önce küçülür ama sonra büyür. Yoğunluğu kritik yoğunluktan daha büyük olan bir evrenin eğriliği daha büyük olacağından, bu boyut çok daha hızla büyür.

toplanması, sırf bu işe adanmış teleskoplar ve bir kerede yüzlerce galaksinin kırmızıya kaymalarını ölçebilecek nitelikte araçlar gerektiren ve çok zaman alan bir uğraştır.

Evrenin geleceğini öğrenmeye çalışırken uzaklara bakan astronomlar düş kırıklığına uğrarken buna alternatif bir strateji ise yakında olup bitenleri incelemektir. Evrenin yoğunluğu, doğrudan yerel ölçümlerle çıkarılabilir. Madde evrenin eğriliğini belirlediğinden, evrenin yoğunluğunu oluşturan maddenin olası biçimleri tahmin edilebilir. Başka bir deyişle amaç, karanlık maddenin saptanmasıdır.



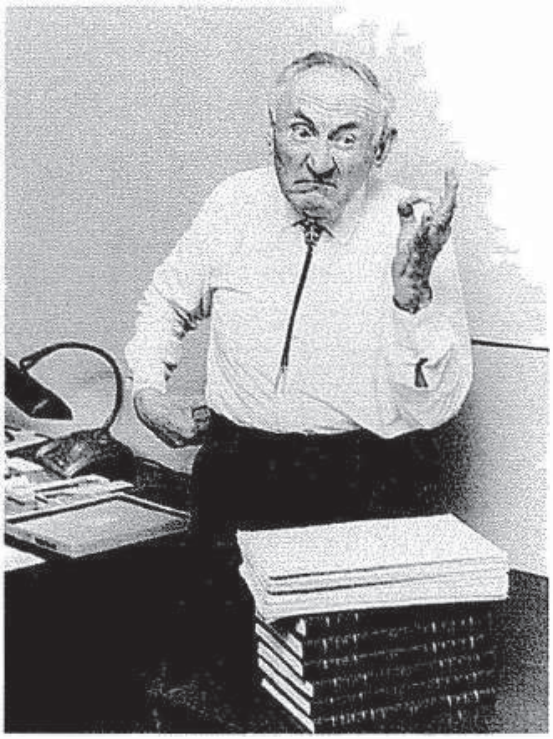
Solda: Abell 370 Galaksi Kümesi 6 milyar ışık yılı uzakta olup kırmızıya kayması 0.374'tür. Küme, kütleçekimsel bir mercek gibi davranarak, görüntüde yer alan ya oluşturur. Yay, yaklaşık 10 milyar ışık yılı uzaklıkta ve 0.721 kırmızıya kayması uzak bir galaksinin bozulmuş görüntüsüdür. Yayın eğriliği kümenin kütlesinin bi olup kütlenin ne kadarının görünmeyen karanlık madde olduğunu ortaya çıkarır. Burada görülen dev yay da CI 2244-02 Galaksi Kümesi tarafından merceklenen galaksinin büyütülmüş ve çarpıtılmış bir görüntüsüdür.

7

Karanlık Madde

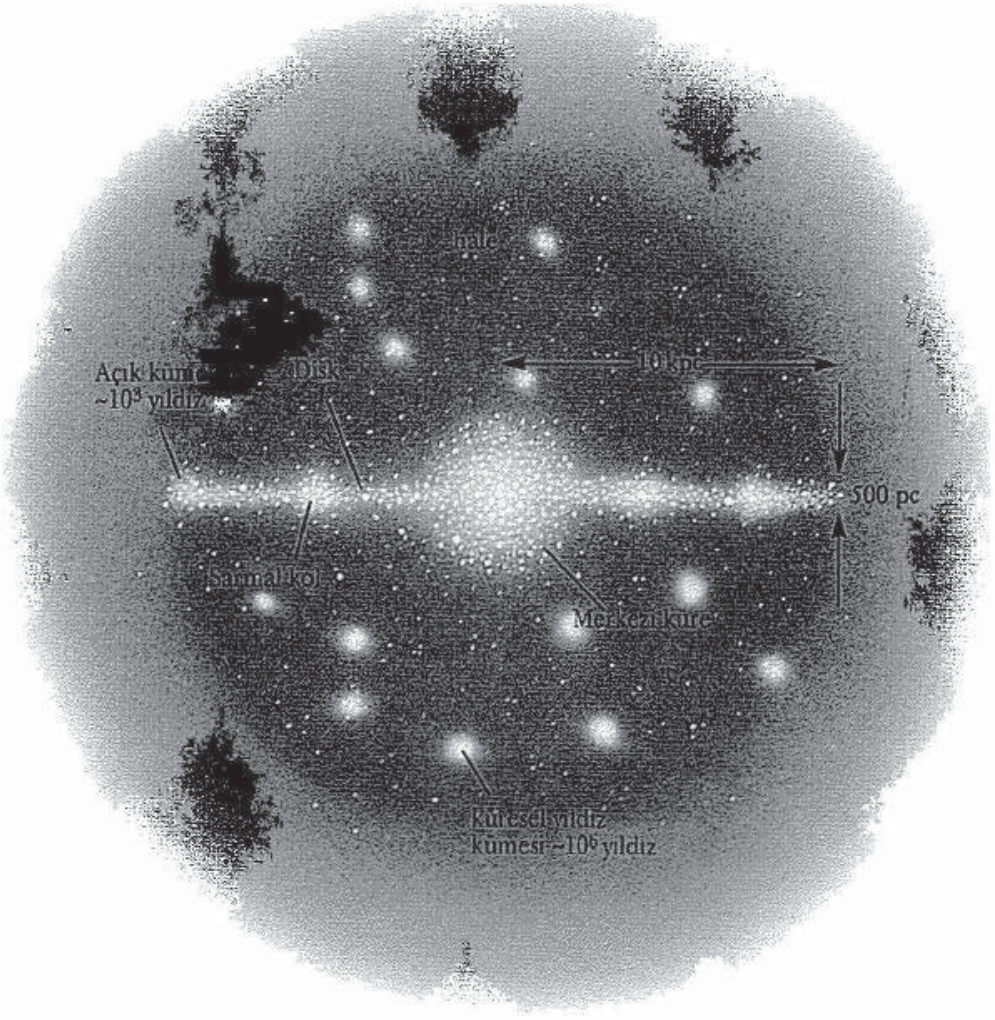
Hemen hemen 50 yıl önce Fritz Zwicky, galaksi kümelerinin çoğunlukla ışık vermeyen bir madde türünden oluştuğunu farketti. Karanlık maddenin araştırılması, 50 yıl boyunca kozmolojinin en önde gelen uğraşlarından oldu. Kesin ölçümlerin ilk kez elde edildiği 20 yıl kadar önce, galaksi halelerindeki karanlık maddenin haritası çıkarıldı. Karanlık maddenin galaksi kümelerinden çok daha büyük ölçeklerdeki varlığının kanıtlanması ise çok yenidir.

Galaksilerin nasıl oluştuğu hakkında hiçbir şey bilmeden karanlık maddenin nasıl araştırıldığını anlamak mümkün değildir. Galaksimiz, 10 kiloparsek yarıçapında (1 kiloparsek= 1000 parsek) ve 500 parsek kalınlığında, yıldızlardan oluşan, disk biçiminde bir yapıya sahiptir. Popülasyon I adı verilen ve diskte yer alan bu yıldızlar, galaksideki genç yıldızlardır. Bu yıldızlar, galaksi merkezi çevresinde çembersel yörüngeler çizen ve yıldız toplanmaları adı verilen gevşek yıldız topluluklarının yer aldığı yıldız oluşum bölgelerinde ve gençlerle birlikte yaşlı yıldızların da yer aldığı daha yüksek sayıdaki açık küme adı verilen gruplanmalarda bulunurlar. Diskteki dağılım, galaksinin ışık saçtığı için görülen yıldızlarının yaklaşık yüzde 5'ine eşit olan yıldızlararası gaz ve tozun hemen hemen tamamını kapsar. Aslında moleküler yapıdaki gaz ve en genç yıldızlar yalnızca 100 parsek kalınlığında bir disk oluştururlar.



Karanlık madde ve nötron yıldızı gibi fikirlerin öncülüğünü yapan astrofizikçi Fritz Zwicky aynı zamanda parlak galaksi ve süpernovaların kataloglanmasını da yapmıştır.

Popülasyon II adı verilen, galaksideki en yaşlı yıldızlar, hemen hemen küresel biçimli merkez bölgesinde bulunurlar. Bu yıldızlar merkezdeki 1 kiloparsek yarıçaplı küreyi oluşturmakla birlikte üyelerin bazıları merkezden 50 kiloparsek uzaklıkta da bulunabilir. Popülasyon II yıldızları yoğun ve kalabalık küresel kümeleri oluştururlar. Bu yıldızların Hertzsprung-Russel diyagramından, yaşlı olduklarını ve galaksinin hale bölgesine saçılmış durumda bulunduklarını biliyoruz. Metalce fakir olan Popülasyon II yıldızları kimyasal yapı olarak Popülasyon I yıldızlarından farklıdır. Tayflarından öğrendiğimize göre bu yıldızlardaki ağır elementlerin bolluğu, Güneştekinden 10 kat



Yandan görünen bir sarmal galaksinin yapısı.

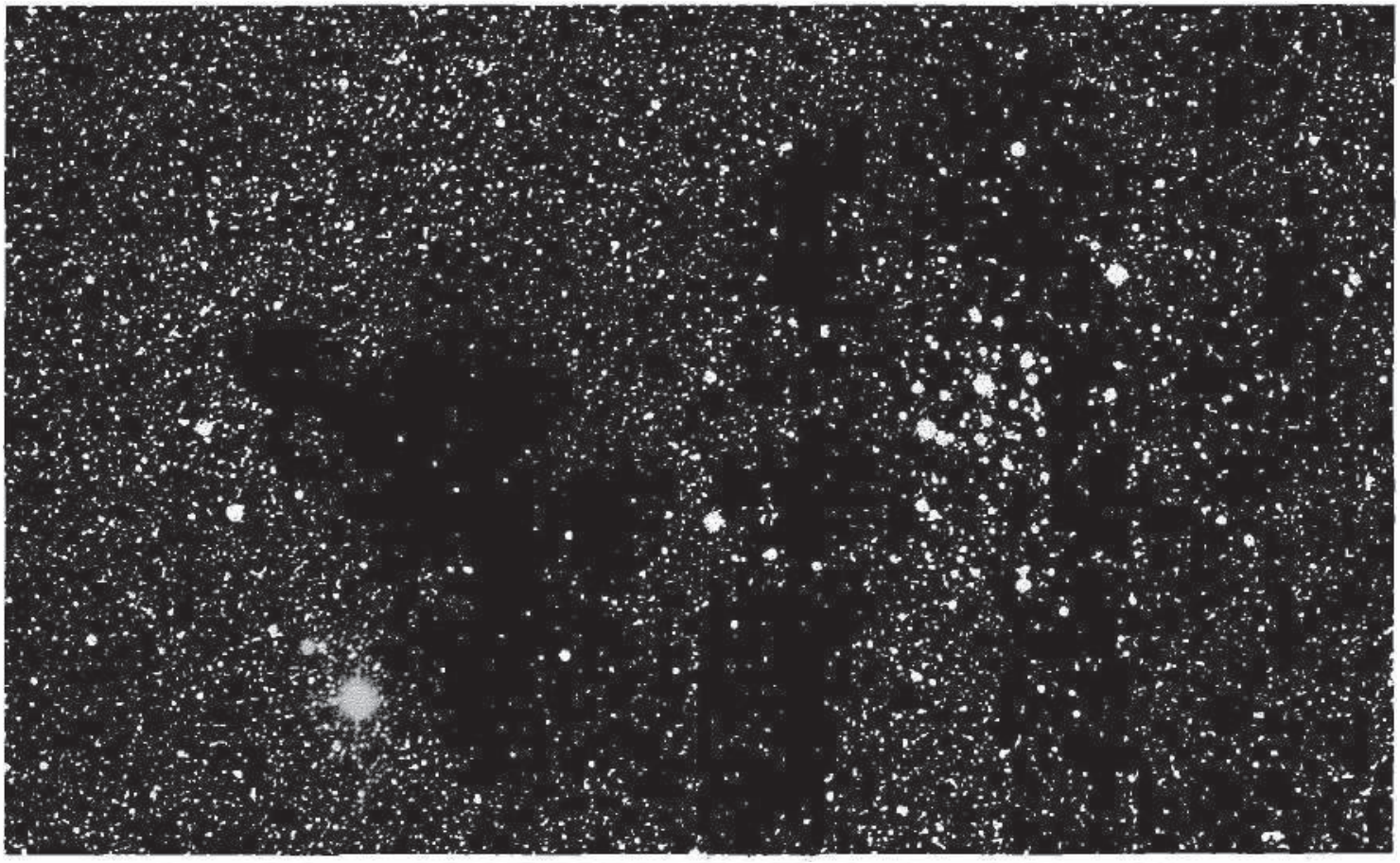
daha azdır. Eğer Popülasyon II yıldızları yaşlı ise beklenen de budur, çünkü galaksinin tarihine bakıldığında da geçmişteki ağır element bolluğu, günümüzdekinden düşüktür. Galaksinin halesi, merkezden her yöne 100 kiloparsek kadar uzayan, en dış bölümüdür. Eğer hale bazı yıldızları ve yıldız kümelerini barındırmasa, tümüyle görünmez olurdu. Hale yıldızları galaksi düzleminin dışında bulunmakta olup elips biçiminde yörüngelere sahiptirler.

Sonuç olarak Güneş civarındaki Popülasyon I yıldızları, Güneş'le hemen hemen benzer yörüngelerde olduklarından hızları düşüktür. Popülasyon II yıldızlarının ise yörüngeleri çok farklı ve hızları yüksektir.

Karanlık Maddenin Yerel Göstergeleri

Güneş civarındaki madde yoğunluğu, diskin oldukça dışına taşan, ışıma gücü yüksek yıldızların düzgün bir biçimde örneklenmesi yoluyla ölçülür. Bu yıldızların ortalama hızları ve bunların diskten dik olarak kat ettikleri uzaklıklar, bu yıldızları diskin içinde tutan kütle çekimi kuvvetinin bir ölçüsüdür. Bu kuvvetin büyüklüğünden, bu kadar kütle çekimi uygulayan maddenin yoğunluğu hesaplanabilir. Bu yoğunluk gözlenen yıldız sayısıyla karşılaştırıldığında, yıldızların sayısının, hemen hemen olması gerekenin yarısı olduğu bulunur. İşte bu, Güneş çevresindeki karanlık maddenin varlığı konusundaki ilk ipucudur.

Şurası da belirtilmeli ki diski oluşturan maddenin miktarının azlığı tartışma konusudur. Diskteki karanlık maddenin miktarı en fazla ışıyan madde kadar olabilir. Daha tutucu bir hesaplama ile, karanlık madde miktarının ışıyan maddenin yüzde 25'i kadar olduğu sonucuna varılır. Aslında maddenin bu yeni bileşeni, çok egzotik bir şey olmamalıdır.



Samanyolu fonunun önünde NGC 650 Açık Yıldız Kümesi ve Barnard 86 Karanlık Bulutu

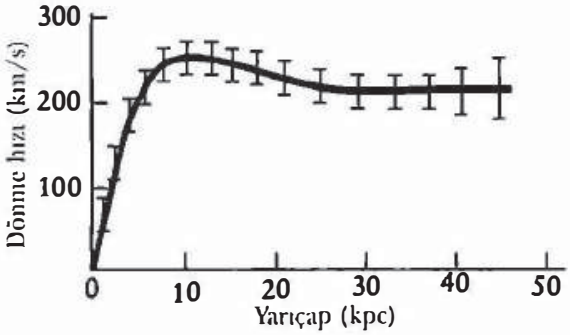
Karanlık madde ne olabilir? Diskteki karanlık madde büyük olasılıkla beyaz ve hatta siyah cüce gibi sönük yıldızlardan oluşmaktadır. Beyaz cüce, nükleer yakıt stokları biten Güneş türü yıldızların kaderidir. Tipik bir beyaz cücenin kütlesi 0.6 $M_\odot$ civarında, boyutları ise yerküreden küçüktür. Bir kırmızı dev, merkezindeki nükleer yakıtın son kırıntılarını tüketirken dış katmanlarını göreceli olarak sakin bir biçimde uzaya püskürterek yıldızın son ışıklı evresi olan Gezegenimsi Bulutsu'yu oluşturur. Gezegenimsi Bulutsu'nun sıcak merkezinde de beyaz cüce yer alır. Bir beyaz cüce soğudukça sönükleşir, bir siyah cüceye dönüşür ve unutulup gider.

Güneş'in birkaç yüz parsek yakınındaki bütün yıldızların kütlelerinin ışıma güçlerine oranı alınarak yararlı bir kütle ölçüsü elde edilir. Işıma gücü, kütlenin yüksek mertebeden bir fonksiyonu olduğu için, (M^4) Güneş'ten küçük kütleli yıldızlar çok sönük, büyük kütleli yıldızlar ise çok daha parlaktır. Güneş civarındaki bir yıldızın kütlesi eğer Güneş kütlesine eşitse bu oran bire eşit, Güneş'ten büyükse bu oran birden küçük, Güneş'ten küçükse bu oran birden büyüktür. Yakındaki yıldızlar için bu $M_\odot/L_\odot$ oranı, Güneş birimleri cinsinden, 2 olarak bulunduğundan, Güneş yakınlarındaki ortalama yıldızın Güneş'ten daha küçük kütleli olduğu sonucunu çıkarıyoruz. Güneş civarında bildiğimiz yıldızlar ve onların karanlık cüce kalıntılarının ötesinde herhangi bir karanlık maddeye gerek yoktur.

Galaksilerin Parlak Bölgeleri

Samanyolu gibi galaksilerin parlak bölgelerine karşılık gelen daha büyük ölçeklerde, karanlık madde bulunduğuna ilişkin hemen hemen hiç ipucu yoktur. Bir galaksinin parlak bölgesinin yarıçapı yaklaşık 10 kiloparsektir. Örneğin Samanyolu'nun dış kesimlerinde yer alan Güneş'in galaksi merkezinden uzaklığı 8 kiloparsek civarındadır. Galaksinin dönüş hızı bölgenin kütlesini hesaplayabilmemize olanak sağlar.

Galaksinin dairesel dönme hareketine hem yıldızlar hem de yıldızlararası gaz bulutları katılır. Tüm Samanyolu içinde yer alan HI bulutları, 21 cm dalgaboyundaki soğurma çizgilerinin gözlenmesi yoluyla saptanırlar. Disk içindeki bulutların hemen hemen dairesel yörüngeler üzerinde hareket ettiği bulundu. 21 cm çizgilerinin genişliğine bakılarak, galaksinin merkezden çeşitli uzaklıklardaki dönme hızı hesaplanabilir. Bu



DDO 154 Cüce Sarmal Galaksisi'nin dönme eğrisinde düşey eksende dönme hızı, yatay eksende ise merkezden olan uzaklık yer alır. Merkezden uzaklarda dönme hızı sabittir.

hesaplamalar sonunda, galaksi merkezinden başlayarak 3 kiloparsekten 8 kiloparsek uzaklığa kadar hızın yaklaşık olarak sabit olduğu görüldü. Bu sonuç, diskin iç bölgelerinin daha kısa dönme periyotlarına sahip olduğu anlamına gelmektedir.

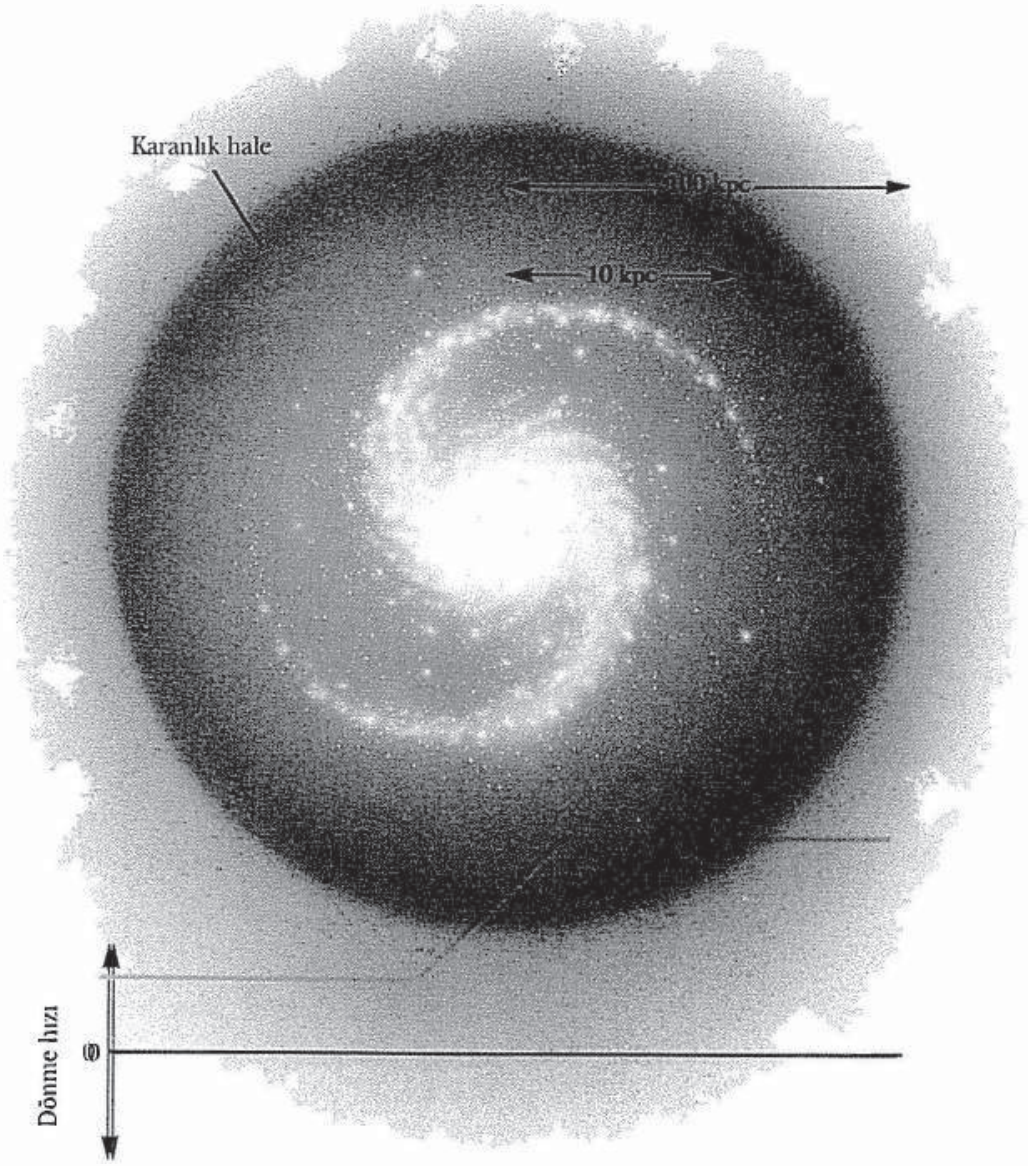
Galaksinin parlak bölgesinin kütlesini hesaplayabilmek için, önce Güneş civarındaki dönme hızını göz önüne alırız. Güneş'in dönme hızı yaklaşık saniyede 250 kilometredir. Bu nedenle Güneş'in galaksi merkezi çevresindeki bir tam turu 200 milyon yıl alır. Başka bir deyişle oluşumundan bu yana Güneş, galaksi çevresinde 25 tam tur atmıştır. Güneş yörüngesinin içinde kalan toplam kütle, Güneş'in galaksi çevresindeki hızı ve galaksi merkezine olan uzaklığı kullanılarak hesaplanır. Buradan, merkezcil kuvvet bulunur. Bu kuvvetin, Güneş'in yörüngesinin içinde kalan kütlenin uyguladığı kütle çekim kuvvetiyle dengelenmesi gerekir. Eğer diskin yıldızca zengin dış bölgelerinin dönme hızını göz önüne alırsak(disk, yaklaşık 15 kiloparseklere kadar uzanmaktadır), galaksinin kütlesinin yarıçapla $10^{11} M_{\odot}$ değerine çıktığını görürüz. Buna karşıt olarak, Samanyolu'ndaki tüm yıldızların toplam ışıma gücü yaklaşık $10^{10} L_{\odot}$ kadardır. Bu nedenle kütlenin ışıma gücüne oranı 10'dur. Bununla birlikte bu oran, karanlık maddenin varlığını göstermez. Bunun yerine buradan, ortalama yıldızın kütlesinin Güneş'in kütlesinin yarısı olduğu (ve bu nedenle de çok daha az parlak olduğu) sonucu çıkar. Bu, büyük bir sürpriz değildir. Neresinden bakılırsa bakılsın, Güneş civarı ve galaksinin diğer sarmal kolları genç, göreceli olarak yüksek kütleli ve parlak yıldızları barındırmaktadır.

Galaksi Haleleri

İlk gerçek sürpriz, galaksi haleleri olarak bilinen, galaksilerin en dış bölümlerinde karşımıza çıkar. Burada ışıma gücü ihmal edilebilir düzeydedir. Ama gene de uzaklıkların ve dönme hızlarının ölçülmesine olanak veren, hem atom halinde hem de iyonlaşmış gaz bulutları vardır. Dönme hızının galaksi merkezinden olan uzaklıkla azalmadığı

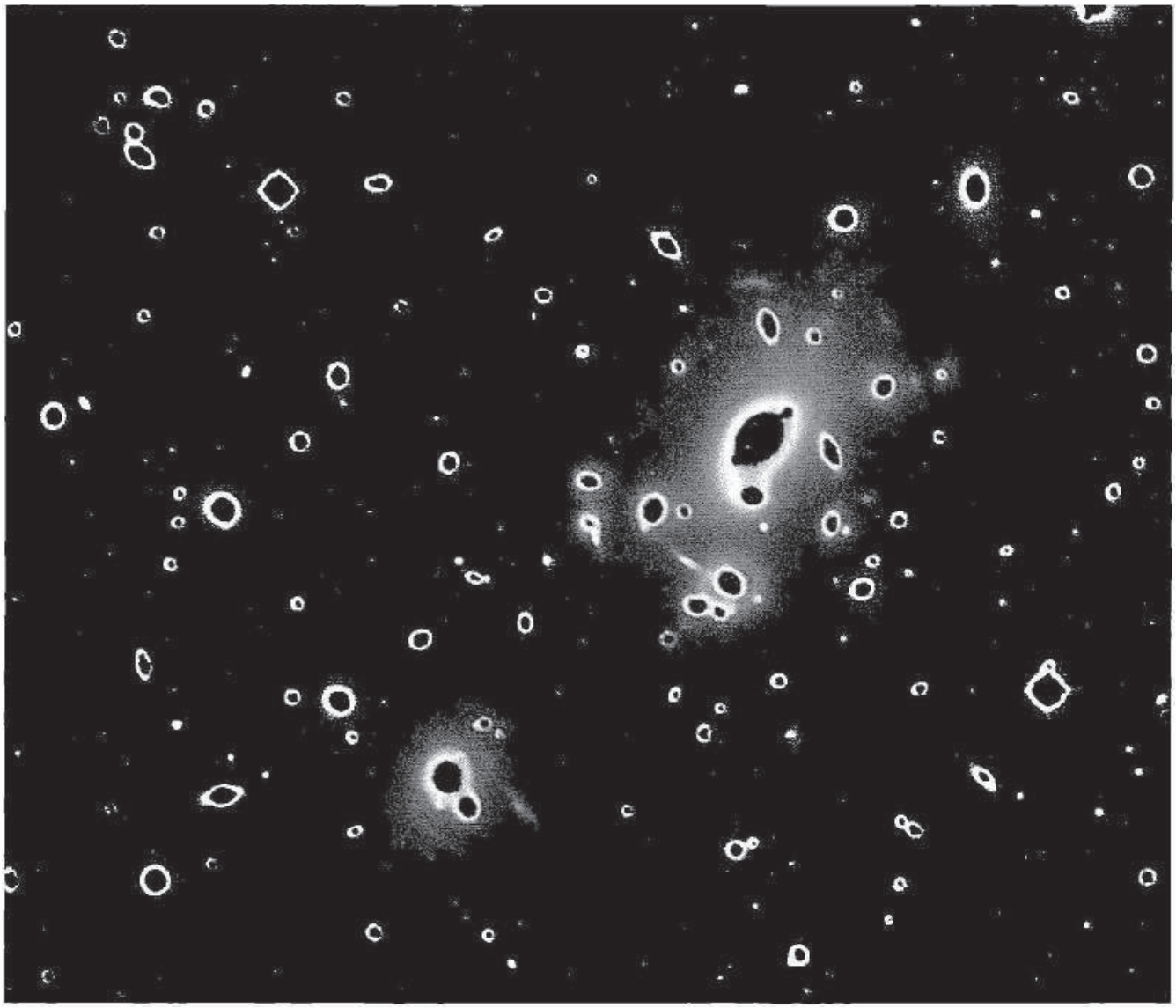
görülür. Eğer kütle dağılımı, ışığın dağılımı ile benzeşiyorsa, galaksinin ışıklı bölgelerinin uzağında kütle çekim alanı da zayıf olacaktır. Bu nedenle de bu uzaklıkta dairesel hareketi sürdürmek için daha düşük hızlar yeterli olacaktır. Hızdaki bu sabitlik, galaksinin kütle dağılımının ışık dağılımı ile benzer olmadığı anlamına gelir. Galaksi merkezinden uzaklaşırken toplam ışık bir yerde sabitleşmekte ise de toplam kütle artmaya devam etmektedir.

Halede tam olarak ne kadar ek kütle vardır? Dönme hızı $v^2=GM/r$ denklemini sağladığından (burada M, r uzaklığına kadar olan toplam kütledir) M'nin r ile doğru oran-



Burada üstten görülen bir sarmal galaksinin, merkezden uzaklardaki dönme hızı sabittir. Buradan da galaksinin, karanlık maddeden oluşmakta olan bir hale içinde bulunduğu ortaya çıkar.

tılı olarak arttığı sonucunu çıkarıyoruz. Bu artış, en azından Samanyolu için, halenin sınırı olan 50 kiloparsek yakınlarında kesilmektedir. Buradan, karanlık haleyi de kapsayacak şekilde tüm galaksi için hesaplanan kütlenin ışıma gücüne oranının, parlak iç kısım için hesaplananın beş katı yani elli olduğu sonucuna varıyoruz. İşte bu, karanlık maddenin ilk sağlam ve su götürmez kanıtıdır. Birçok sarmal galakside dönme hızları ölçülmüş ve hepsinde de karanlık maddenin baskın çıktığı bulunmuştur.

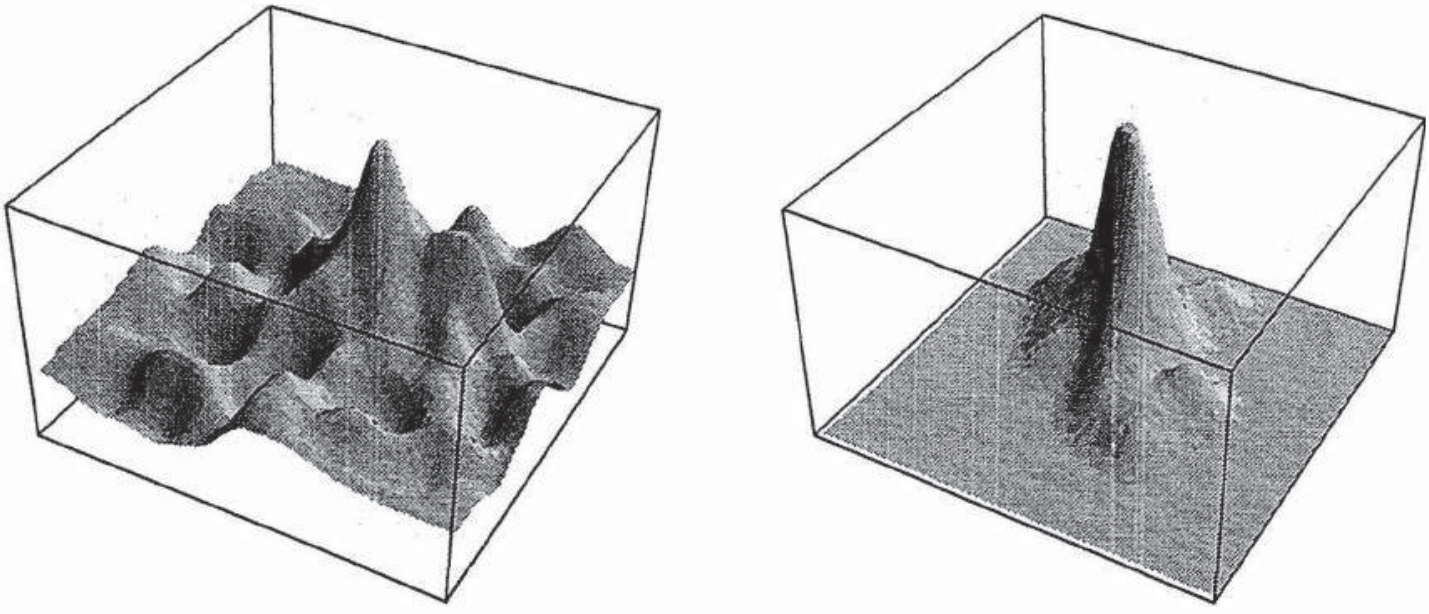


Abell 2218 Galaksi Kümesi'nde uzak, fon galaksilerinin kütleçekimsel mercek etkisi altındaki görüntüleri olan yaylar görülür. Bu yaylar, galaksilerin ışığının kümenin kütlesi tarafından bükülmesi sonucu oluşurlar. Yayların dağılımına bakılarak kümedeki karanlık madde dağılımının bir haritası çıkarılabilir.

Galaksi Grupları, Kümeleri ve Süperkümeleri

Daha uzaklara gidildiğinde, kütle-ışıma gücü oranı, galaksi çiftleri, grupları ve kümelerinin incelenmesiyle bulunur. Her durumda hızlar ve uzaklıklar ölçülür ve buradan sistemin dağılmasını önleyebilecek toplam kütle hesaplanır. Tipik olarak 100 kiloparsek uzaklıkları olan galaksi çiftleri için bulunan kütle-ışıma gücü oranı 100 $M_{\odot}/L_{\odot}$ civarındadır. 1 megaparsek ve daha büyük ölçeklerdeki galaksi grupları ve kümeleri için kütle-ışıma gücü oranı 300'e yükselir. Bu ölçeğin üzerinde saptanan maddenin yüzde 95'i karanlık maddedir.

Kütle yoğunluklarının bir dereceye kadar ölçülmüş olduğu en büyük ölçek süperkümelerdir. Bir süperküme, çeşitli galaksi kümelerinin biraraya gelmesiyle ortaya çıkar ve boyutları 20 megaparsekten de büyük olabilir. Yerel Süperkümemiz, şöyle bir 10-20 megaparsek uzaklıktaki Virgo Kümesi çevresinde toplanmış olan uzun biçimli bir galaksi topluluğudur. Andromeda ve Samanyolu, Yerel Grup adı verilen küçük bir grup oluştururlar ve Virgo Süperkümesi'nin dış bölgelerinde yer alırlar. Bizimle Virgo arasında bulunan kütle, Virgo'dan uzaklaşma hızımızı Hubble yasasından hesaplanan değere göre yüzde 10 oranında yavaşlatma eğilimindedir. Bu bölgedeki galaksiler için düzgün biçimli Hubble genişlemesinden olan sapmaların haritası çıkarılabilirse, bura-



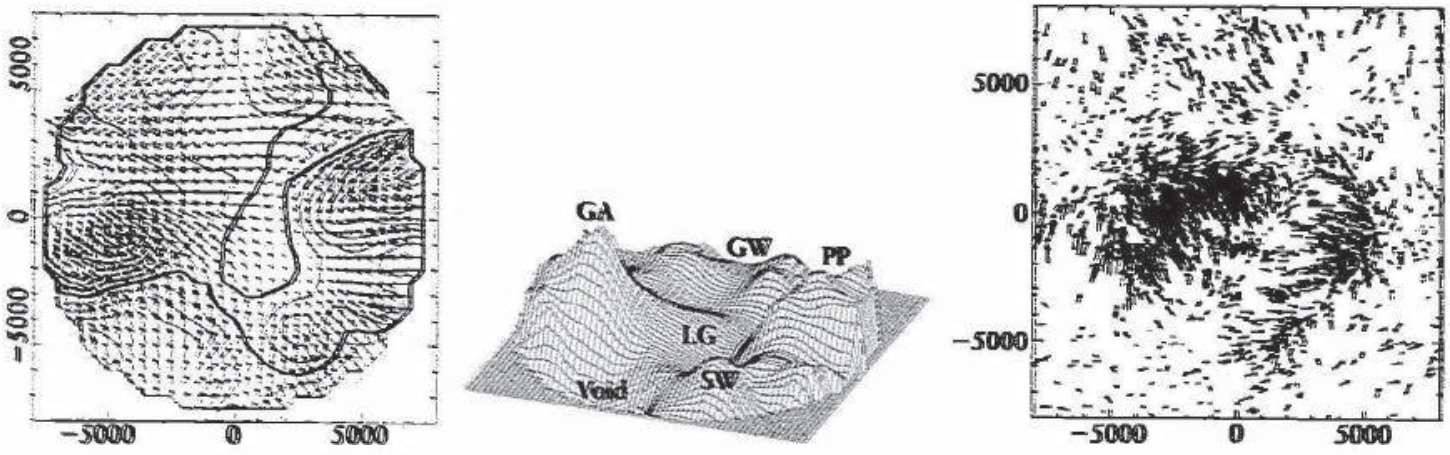
Kütleçekimsel mercek etkisiyle uzak galaksi görüntülerindeki biçim bozulmalarından çıkarılan uzak bir galaksi kümesindeki karanlık madde dağılımı (solda), ışık saçan maddenin dağılımına oran (sağda) daha yaygındır. Kutuların yatay ölçekleri yaklaşık olarak derecenin dörtte biridir.

dan Virgo Süperkümesi içindeki ortalama yoğunluk bulunabilir. Yerel Süperküme boyunca, yani 20 megaparsek ölçeklerinde bulunan kütle-ışıma gücü oranı gene yaklaşık 300 civarındadır.

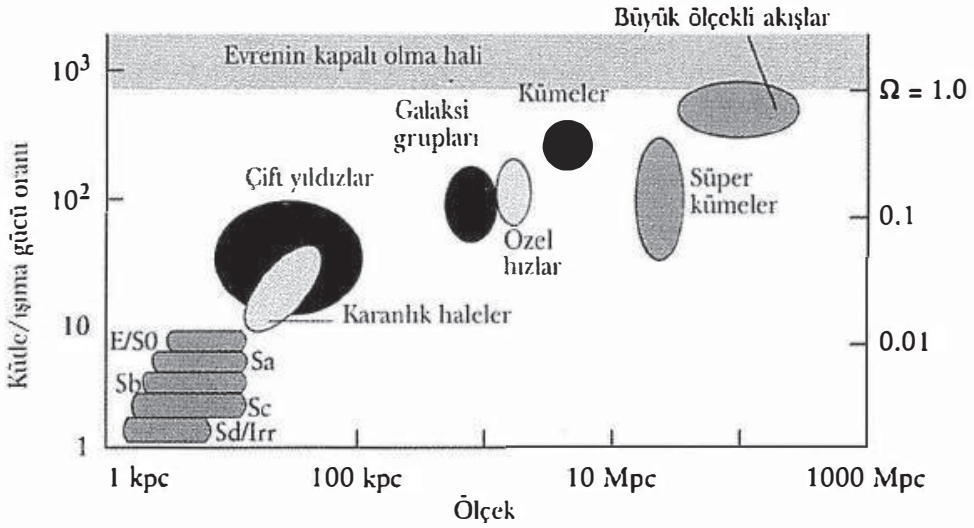
Büyük Ölçekli Akışlar ve Karanlık Madde

En büyük ölçeklerde artık kütle çekimine bağımlı cisimler yoktur. Ama galaksilerin dağılımı da tam anlamıyla düzgün değildir. Evrenin ilk dönemlerinden beri küçük de olsa birtakım yoğunluk dalgalanmaları varlıklarını sürdürmüştür. Kritik yoğunluğa neden olan karanlık madde, galaksi kümeleri ve süperkümelerinin üzerindeki ölçeklerde pekâlâ düzgün dağılmış olabilir. Bununla birlikte, en azından karanlık maddenin bazı türlerinin, daha büyük ölçeklerdeki yoğunluk dalgalanmalarında bir rolü olmalıdır. Yalnızca galaksileri sayarak ışıma gücü yoğunluğunu ölçmek karanlık maddenin katkısını gözardı etmek demektir. Oysa 10 ya da 100 megaparsekten daha büyük ölçeklerde evrendeki karanlık maddeyi ölçmenin yöntemleri vardır.

Minik dalgalanmalar nedeniyle yoğunluğun fazlalık gösterdiği yerlerde çevredeki madde üzerinde hafif bir çekme etkisi, yoğunluğun az olduğu bölgelerde ise çevredeki



Solda: Optik olarak gözlenen galaksilerin hızlarının ölçülmesi sonucu derlenen bu büyük ölçekli hız alanı grafiği, solda yer alan Büyük Çekici'ye doğru büyük çaplı kütle akışının olduğunun gösteriyor. Uzaklık ölçeği, kilometre/saniye'yle ölçülmektedir; Her 75 kilometre/saniye, 1 megaparsek uzaklığa eşittir. Ortada: Aynı galaksi grubunun büyük ölçekli yoğunluk alanı. Eğer iki şekil karşılaştırılırsa, galaksilerin özel hızlarının yüksek yoğunluklu bölgelere doğru olduğu görülüyor. Sağda: Galaksilerin kızılötesi dalgaboylarındaki salma ölçümlerinden çıkarılan büyük ölçekli hız alanı. Projeksiyon, Virgo Süperkümesi'nin orta düzlemi üzerine alınmıştır. Samanyolu, (0,0) noktasındadır.



Kütlenin ışıma gücüne oranı, bir sistemdeki karanlık madde miktarının bir göstergesidir. Burada birkaç kiloparsekten 200 megaparsek ölçeğine kadar değişik sistemler için kütle, ışıma gücü oranı gösterilmiştir. Ölçek büyüdükçe daha fazla miktarda karanlık madde varmış gibi gözüküyor.

madde üzerinde hafif bir itme etkisi olur. Bu etki, kendisini çevremizdeki galaksiler üzerinde düzgün Hubble genişlemesinden küçük sapmalar şeklinde gösterir. Eğer galaksilerin normal Hubble akışından farklı olan bu "özel" hızları ölçülebilirse, karanlık maddenin dalgalanan bileşeninin izi bulunmuş demektir. Bu anlamda Tully-Fisher bağıntısının özel bir önemi vardır. $L \propto \upsilon_{rot}^4$ olarak ifade edilen, galaksinin ışıma gücü ve dönme hızı arasındaki bu bağıntı, galaksinin uzaklığının bir ölçüsünü verir. Hubble yasasına göre kırmızıya kaymadan da bir uzaklık bulunur. Bununla birlikte, kırmızıya kayma yoluyla hesaplanan uzaklık, galaksinin özel hızının Hubble hızına eklendiğine mi yoksa çıkarıldığına mı dayanarak gerçek uzaklıktan büyük ya da küçük olabilir. Binlerce galaksi için bu iki uzaklık karşılaştırılarak, 100 megaparsek uzaklığa kadar özel hız dağılımının bir haritası çıkarılabilir.

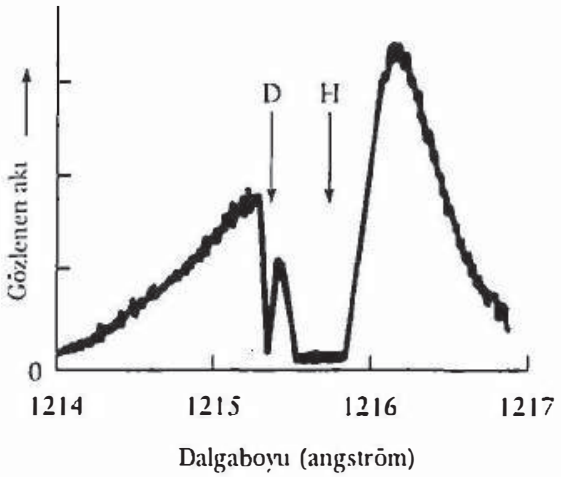
Elde edilen haritalar, Hubble genişleme hızının yüzde 10'una ulaşan ve 30 megaparsekten daha büyük değerlere kadar tutarlı olan büyük ölçekli kütle hareketleri olduğunu ortaya koyuyor. Bu hareketlere var olan tüm madde neden olduğundan, ışıyan ya da karanlık tüm maddeyi ortaya çıkarmak mümkün oluyor. İlk sonuçlar, gözlenen hızda kütle hareketleri için yaklaşık olarak kritik yoğunluğa eşit miktarda bir karanlık madde olması gerektiğini gösteriyor. Bu hareketlerden sorumlu dev madde yoğunlaşmaları olduğu için, bu kütle akışlarının kaynakları, oldukça duyarlı bir biçimde bulunabilir. Bizden yaklaşık 40 megaparsek uzaklıkta bulunan en yakın yoğunlaşmaya 'Büyük Çekici' adı verilmiştir. Eğer gerçekse, Büyük Çekici'nin bir düzine zengin galaksi kümesinin içerdiğinden daha fazla sayıda galaksi içermesi gerekir. Galaksi düzlemimiz Büyük Çekici'nin büyük bir bölümünü görmemizi engellediğinden galaksileri doğru-

dan doğruya sayamıyoruz. Kütle akışlarına yol açan başka galaksi komplekslerinin bulunma olasılığı da oldukça yüksektir.

Kritik Yoğunlukta Bir Evren mi?

Şişme teorisi, Ω yoğunluk parametresinin bire eşit olduğu, düz bir evrende yaşamakta olduğumuzu öngörür. Yani evrendeki maddenin yoğunluğu, tam olarak evrenin kapalı olmasına yetecek kritik yoğunluğa eşit olmalıdır. Şişme döneminde kritik yoğunluktan her sapmaya, gene şişme dönemindeki evrenin hızlı genişlemesi sırasında düzelmiş olan uzayın hafif bir eğriliği olarak bakılabilir. Acaba gözlenen karanlık maddenin miktarına bakarak evrenin, şişme teorisinin öngördüğü gibi, kritik yoğunlukta olup olmadığını anlayabilir miyiz?

$3H_0^2/8\pi G$ biçiminde yazılabilen ve kritik değer cinsinden evrenin kütle yoğunluğunu ölçen Ω parametresini, kütlenin ışıma gücüne oranına çevirmek mümkündür. Bu, evrenin ortalama ve büyük bir hacminde kritik yoğunluğun gözlenen ışıma gücü yoğunluğuna oranı alınarak yapılabilir. Sonuçta kütlenin ışıma gücüne oranı 1500 Ω olarak bulunur. Bir başka deyişle, eğer Ω = 1 ise, evrenin kapalı olması için kütle-ışıma gücü oranının 1500 olması gerekir. Bu kütle miktarı ise gözlenenden çok çok büyüktür. Başka bir biçimde söylemek gerekirse, eğer büyük ölçekler için kabul ettiğimiz kütle-ışıma gücü oranı olan 300 sayısının tüm evren için geçerli olduğunu kabul edersek, Ω = 0.2 buluruz ki bu da şişme teorisinin öngördüğü değerden çok çok küçüktür. Şişme teorisinin gözlemle uzlaşması ancak karanlık maddenin önemli bölümünün 10 megaparsek değerine kadar olan ölçeklerde düzgün dağılmış olmasıyla mümkündür. Bu durumda maddenin yalnızca yığın biçimindeki bileşeni öl-



Yakın bir yıldız olan Capella'nın Hubble Uzay Teleskobu ile alınan tayfı, soğuk yıldızlararası hidrojen (geniş çukur) ve az miktarda döteryumun varlığını (dar çukur) açıkça gösteriyor. Hidrojenden iki kat daha ağır olan döteryum atomları, maviye doğru 80 kilometre/saniye kadar kaymış Lyman alfa soğurma çizgileri üretirler. Bu kayma, döteryumu hidrojenden ayırabilmemizi sağlar.

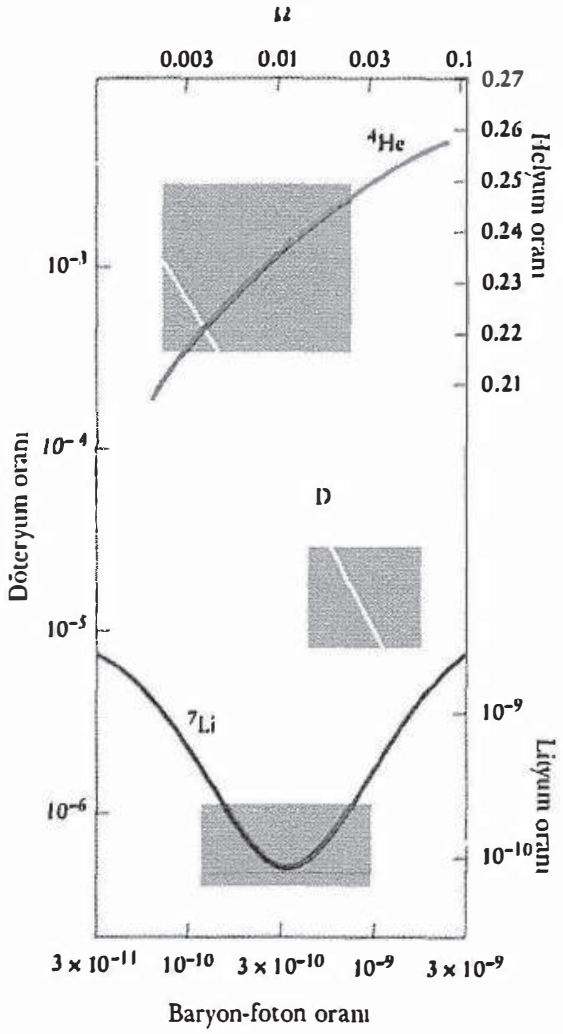
çülmüş olduğundan, karanlık madde kendini göstermeyecektir. Gerçekte kritik yoğunluk yalnızca örneğin 10 megaparsek ya da daha büyük ölçeklerde kütle akışlarından ölçülen yoğunlukla bağdaşır.

Şişme teorisi tarafından öngörülen karanlık maddenin doğası derin ve henüz çözülmemiş bir bilmecedir. İki seçeneğimiz var. Karanlık madde ya bildiğimiz baryon maddesinden oluşuyor, ya da daha egzotik bir madde biçiminden. Evrenin ilk birkaç dakikalık tarihi, bu bilmecenin çözülmesine yardım edebilecek olan, evrendeki toplam baryon maddesinin ilginç bir ölçüsünü vermektedir.

Döteryum ve Baryon Yoğunluğu

Karanlık maddenin yapısı hakkında dikkate değer bir ipucu olarak, büyük patlama sırasında yaratılan, hidrojenin iki katı kütleye sahip olan ve döteryum adı verilen hidrojen izotopunun bolluğuna bakarız. Helyumun tersine, döteryum çok kırılgan bir elementtir. Güneş'in içindeki sıcaklığın çok altında olan bir milyon derece Kelvinde "yanar". Şimdiye kadar, galaksinin oluşumundan arta kalan ilkel döteryumun önemli bir kısmı yıldızların içinde başka elementlere dönüşmüştür. Bu, gözlemle de doğrulanmaktadır: yıldızlararası bulutlar ve nükleer yanmayı başlatacak kadar sıcak bir çekirdekleri olmayıp güçlerini kütle çekiminden alan yıldızlarda döteryum vardır, ama evrimlerinin ileri evrelerindeki yıldızlarda hiç döteryum bulunmaz

Büyük patlamada ne kadar döteryum yaratıldığını hesaplayabilmek için, o zamandan günümüze kadar ne kadar döteryumun yok olduğunu tahmin etmek gerekir. Büyük patlamadan beri izotopun yüzde kaçının yok olduğunu hesaplayabilmek için Jüpiter'in atmosferinde bulunan 'döterlenmiş' moleküllerin bolluğuyla yıldızlararası bulutlarda bulunan döteryum bolluğunu karşılaştırarak izotopun yok olma hızı bulunur. 'Döterlenmiş' molekül, bir hidrojen atomunun döteryum atomuyla yer değiştirdiği moleküle verilen addır. Örneğin, döterlenmiş ya da ağır su HDO biçiminde yazılabilir. Jüpiter'de saptanan dötereyum, 4.6 milyar yıl önce, Güneş sisteminin oluşumu sırasındaki yıldızlararası gazın yapısını örneklemektedir. Jüpiter'de 100 000'de 2 olarak saptanan döteryum bolluğu, galaksinin geçmişteki yaşamı boyunca doğan ve ölen yıldızların içinde işlenen gazlardan oluşan yıldızlararası bulutlardaki bolluğunun yaklaşık iki katıdır.



Helyum, döteryum ve lityum-7'nin günümüzdeki bollukları, burada baryon-foton oranı (alt eksen) ve yoğunluk parametresi (üst eksen) ile ölçülen, evrenin bu elementlerin yaratıldığı zamanki yoğunluğuna bağlıdır. Döteryumun helyuma dönüşmesi, yoğunluğu yüksek olan bir evrende daha etkili olduğundan, yaratılan döteryum miktarı çok az, helyum miktarı daha fazladır. Gölgeli alanlar, gözlenen bolluklardaki belirsizlikleri gösteriyor.

Hubble Uzay Teleskobu ile yapılan gözlemler ve geçmişteki uydu deneyleri, yıldızlararası bulutlarda bulunan atom halindeki döteryum bolluğunun Jüpiter'de saptanandan, bir başka deyişle 6.6 milyar yıl önce galaksimizde bulunandan daha düşük olduğunu gösteriyor.

Döteryumun net eğilimi konusunda yanılmamız olanaksız: döteryum zamanla azalıyor. Yıldızlar yeni enerji kaynağı üretmeyip döteryum yaktıklarından, bu beklenen bir şey. Ama yıldızlararası gazların tümü yıldızların sıcak çekirdeklerinden geçmedikleri için büyük patlamada yaratılan döteryumun bir bölümü hâlâ varlığını sürdürüyor. Döteryumun yıldızlar tarafından yok edildiği göz önüne alındığında, galaksi öncesi döteryumun hidrojene göre bolluğu yüzde 0.01 olarak bulunuyor.

Acaba bu rakam büyük patlama teorisi tarafından öngörülen döteryum bolluğuyla karşılaştırılabilir mi? Ne yazık ki bu soruyu, baryon kökenli maddenin günümüzdeki yoğunluğunu bilmeden cevaplayamayız. Baryon kökenli maddenin yoğunluğu da 10 çarpanı içinde söylenemez. Bunun yerine problemi tersine çevirerek, ölçülen döteryum bolluğundan evrendeki baryonların yoğunluğunu hesaplamaya çalışıyoruz.

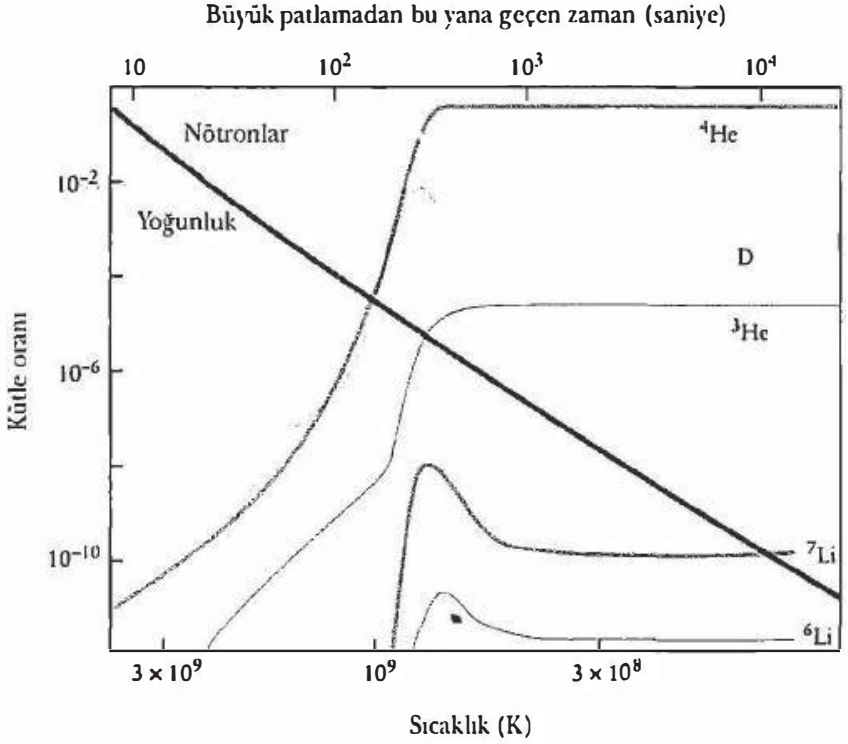
Hidrojenin kütlece yaklaşık yüzde 25'i ilk üç dakikada helyuma dönüşmüştür. Döteryum, zincirleme reaksiyonda bir ara ürün olarak ortaya çıkmıştır. Bu döteryumun küçük bir yüzdesi varlığını sürdürmektedir. Eğer bildiğimiz maddenin yoğunluğu yüksekse, evrenin ilk dönemlerinde helyum öylesine yüksek verimlilikle sentezlenmiştir ki hemen hemen hiç döteryum oluşmamış demektir. Evrenin kapalı olması için baryonların yoğunluğu kritik yoğunluğun onda bi-

rini aşmamalıdır yoksa çok az ilkel döteryum sentezlenmiş olacaktır. Tersine, baryonların yoğunluğu, kritik yoğunluğun yüzde 2 ya da 3'ünden düşük olamaz, yoksa evrenin ilk dönemlerinde çok fazla döteryum sentezlenmiş olacaktır. Eğer evren kritik yoğunluktaysa, şu an evrende bulunan maddenin yüzde 90'ı baryon dışı kökenli olmalıdır. Yani, karanlık maddenin çoğunluğu, döteryum üretimi ile sonuçlanan nükleer reaksiyonlara katılmayan, zayıf etkileşmeli yüksüz parçacıklardan oluşmaktadır.

Lityum Bilmecesi

Büyük patlamada üretilen hafif elementler yalnızca helyum ve döteryum değildir. Lityum çok daha enderdir ve döteryum gibi o da yıldızlar tarafından yok edilir. Lityum aslında T-Tauri yıldızlarında ölçülür. Adını Taurus (Boğa) Takımyıldızı'ndaki bir ilk örnekten alan bu yıldızlar çok genç, enerjisini kütle çekiminden alan ve genellikle yoğun yıldızlararası gaz bulutları içine gömülü olarak bulunan yıldızlardır. Böyle yıldızların gaz hareketlerinin yoğun olduğu çalkantılı atmosferlerinde lityum bolluğu yüksektir. Yalnızca yıldızlar tarafından yok edilen bu element yıldızların gençliğinin kesin bir göstergesidir. Yıldız yaşlandıkça lityum yok olur. Evrimin erken dönemlerinde atmosferdeki kütlesel gaz hareketleri sonucunda yıldızın daha sıcak iç bölgelerine taşınan lityum, burada sistematik olarak yanar. Güneş gibi orta yaşlı bir yıldızın atmosferinde saptanabilecek ölçüde lityum bulunmaz.

Lityum hem büyük patlama, hem de yıldızlararası bulutlara giren kozmik ışınlarca üretilmiştir. Kozmik ışınlar, yıldızlararası karbon, azot ve oksijen molekülleri ile rasgele çarpıştıklarında nükleer reaksiyon başlatan yüksek enerjili parçacıklardır. Bu ağır atomlar parçalanır ve çevreye lityum çekirdekleri saçılır. Bu sürecin habercisi, yaratılan iki lityum izotopudur. Bunlardan birinin kütlesi 6, normal lityum izotopu olan diğerinin kütlesi ise 7'dir. Popülasyon II'deki en yaşlı yıldızlar, hidrojene göre on milyonda bir oranında lityum bolluğu gösterirler. Bu bolluk, demir gibi diğer elementlerin bolluklarından bağımsız gibi gözüküyor. Dahası, lityumun çoğunluğu 7 kütleli izotoptur. 6 kütleli lityum çok enderdir. Bunun tersine, genç Popülasyon I yıldızlarında 10 kat daha fazla lityum ölçülüyor. Bu genç yıldızlardaki lityumun kozmik ışın kaynaklı olduğuna inanılıyor. En büyük olasılık, lityumun, bu yıldızların içinden doğduğu yıldızlararası bulutta



İlk üç dakikadaki element sentezinin tarihi. Örneğin helyum bolluğu yavaş yavaş artarak kütlece yüzde 25'e ulaşırken, döteryum bolluğu yüzde 1'lik bir maksimuma ulaşmakta, helyumun sentezlenmeye başlamasıyla birlikte çok küçük değerlere inmektedir.

kozmik ışınlar tarafından üretilmiş olması. Lityumun yaratılışı ve yok oluşu ile ilgili olarak tutarlı bir tablo oluşmuştur. Oldukça güvenli bir biçimde, hale yıldızlarında gördüğümüz lityumun büyük patlama sırasında üretilmiş olduğunu söyleyebiliriz.

Büyük bir olasılıkla baryon dışı kökenli karanlık maddenin üstün olduğu sonucunu çıkarabiliyor olmamıza karşın, lityum, döteryum ve helyum bollukları minimum bir miktar baryon kökenli maddenin varlığını gerektirmektedir. Bu miktar galaksilerde doğrudan ölçülenden çoktur. Buradan da, kritik yoğunluğun yüzde birkaçlık bölümünün baryon kökenli olması gerektiği sonucunu çıkarıyoruz.

WIMP'ler: Egzotik Parçacıklardan Oluşan Karanlık Madde

Kritik yoğunluktaki bir evrende karanlık maddenin çoğunluğu baryon kökenli olamaz. Peki, başka ne biçimlerde olabilir? İlkel evrenin olası kalıntıları kararsız, zayıf etki-

leşimli parçacıklardır. Bir örnek, eğer varsa bile çok küçük bir kütleye sahip olan nötrinodur. Normal olarak nötrinonun kütlesiz olduğu varsayılsa bile sınırlı bir kütleye sahip olması da akla yakındır. Büyük patlamadan artakalan o kadar çok sayıda nötrino vardır ki, 50 eV'lik, yani elektronun on binde biri kadar bir kütle evrenin kapalı olmasını sağlamaya yeter. Birçok ülkede nötrinonun kütlesini saptamaya yarayan deneyler yürütülmekteyse de şu anda bu deneyler sonuçsuzdur. Trityum bozunma deneylerinden elde edilen elektron nötrinosunun kütlesinin üst sınırı için şu anki değer yaklaşık 10 eV civarındadır. Diğer nötrino türlerinin kütleleri daha büyük olabilir.

Zayıf bir biçimde etkileşen, kütlesi, diyelim ki protonunkinden de büyük olan parçacığa özel bir ad verildi: 'zayıf etkileşimli büyük kütleli parçacık' anlamına gelen İngilizce 'weakly interacting massive particle' sözcüklerinin baş harflerinden oluşan WIMP. Evrenin kapalı olması için, yeterli sayıda 'fotino' gibi egzotik WIMP'lerin bulunması gerektiği öne sürüldü. Bu parçacıkların var olduklarının hiçbir garantisi olmaması bir problem oluşturmaktadır. Bu belirsizliği göz önüne almazsak, büyük patlama teorisi, gerçekten var ve evrenin yaşı süresince kararlı olmaları koşuluyla bu parçacıkların yoğunluklarının hesaplanmasına olanak vermektedir.

Fotinonun varlığı, süpersimetri adı verilen bir teori tarafından öngörülmektedir. Bu teori -ino ekiyle gösterdiği kardeş parçacıkların varlığını öne sürerek bilinen parçacıkların sayısını iki katına çıkarmaktadır. Bu parçacıkların hemen hepsi kısa ömürlü olup, sıcaklığın kısaca SUSY adı verilen süpersimetrinin karakteristik enerji ölçeğinden büyük olduğu evrenin ilk dönemlerinde sayıları çok fazlaydı. Evren soğurken süpersimetri kırılmıştır. Bununla ilgili enerji ölçeği teoriden bilinmiyor ama parçacık deneyleriyle ters düşmemek için 100 GeV değerinden büyük olmak zorundadır. Günümüzün düşük enerjili evreninde en hafif süpersimetri parçacığının hâlâ yaşıyor olması gerekir. Ters spine sahip olması anlamında fotonun eşi olduğundan fotino adını almıştır. Kütlesinin protonun kütlesinin 10-100 katı olması beklenmektedir. Fotino yüksüz olup maddeyle çok zayıf bir biçimde etkileşmektedir.

Nükleer etkileşmelerin gücünü ölçen CERN deneylerinde süpersimetriyi destekleyen, güçlü kanıtlar bulundu. Yeterince yüksek enerjilerde, her ne kadar böyle yapacaklarına dair bir garanti yoksa da, zayıf ve güçlü nükleer kuvvetlerin güçlerinin aynı enerjiye yakınsaması beklenir. Bunların yüksek enerjide yakınsaması, evrenin ilk anlarında çökmesi şişmeye yol açan temel kuvvetlerin büyük birleşmesinin tezidir. Bu enerji-yakla-

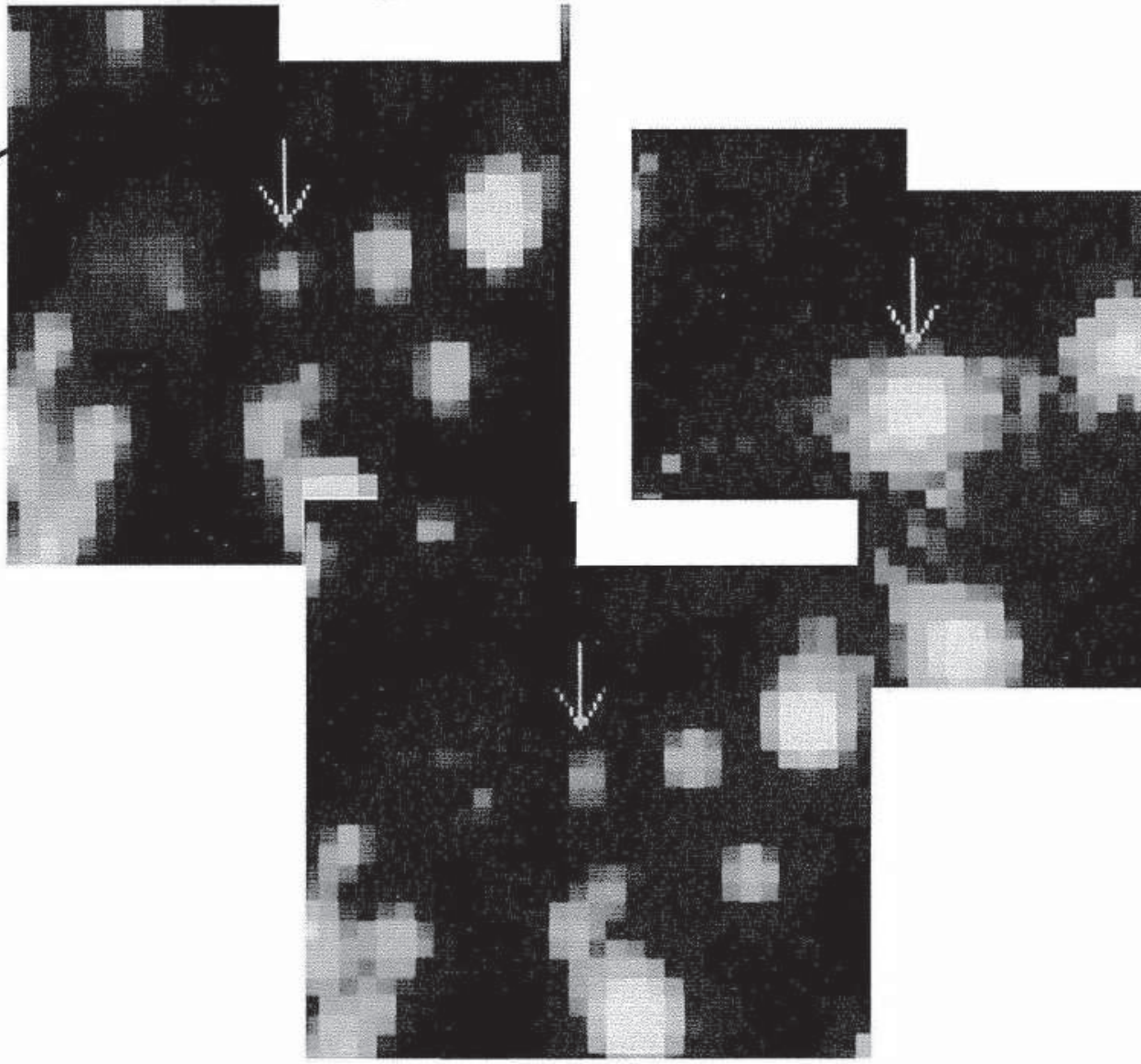
şık 10^{15} GeV- doğrudan deneyle ulaşılabilecek değerin çok üzerinde olmasına karşın, yakınsama eğilimi oldukça belirgindir. Yalnızca eğer yüksek enerji dünyası süpersimetri tarafından tanımlanıyorsa, bu iki temel kuvvet, tek bir enerjide birbirlerinden ayırt edilemez olur. Bu nedenle, yalnızca süpersimetri ile büyük birleşmenin kaçınılmaz olduğu bir durum yaratılabilir.

Fotinonun etkileşmelerinin zayıflığına rağmen, bu parçacığı araştırmak üzere pek çok deney tasarımlanmaktadır. Bu deneyler dört türdür. Birincisinde, parçacığın varlığını kanıtlamak için parçacık hızlandırıcıları denilen atom parçalayıcı makineler kullanılır. Bu makinelerdeki yüksek enerjili çarpışmalar sırasında çevreye, aralarında parçacık ve karşı parçacıkların bulunduğu yüksek enerjili hadronlar saçılır. Momentum korunduğundan, hadron fışkırmaları, çarpışma yönüne dik ve birbirine ters olan iki yönde gözlenir. Her ne kadar zayıf bir biçimde etkileşen fotino gözlenemez ise de momentum taşıdığından, ters yönde bir fışkırma ile dengelenmek zorundadır. Bu nedenle ,tek yönlü bir fışkırma, bir süpersimetri parçacığının varlığına bir kanıt oluşturacaktır. Başka bir tür deneyde, duyarlı laboratuvar araçları, doğrudan doğruya Güneş galaksi çevresinde dönerken Dünya ya da Güneş'in galaksi halesini kapattığı durumlarda haledeki fotinoları gözlemeye çalışmaktadır. Güneş tarafından tutulan fotinolar aslında Güneş'in çekirdeğinde yok edilirler. Bunların ürettiği ısı hafifçe, belki de hissedilir bir biçimde Güneş'in evrimini etkileyecektir. Fotino yok oluşları sırasında ortaya yan ürün olarak Güneş'in çekirdeğindeki termonükleer füzyon sırasında üretilenlerden farklı, yüksek enerjili nötrinolar çıkacaktır. Bu yüksek enerjili nötrinolar ve yeryüzündeki fotino etkileşmeleri sırasında üretilen nötrinolar, yer altında Güneş ve süpernova kaynaklı nötrinoları araştıran detektörler tarafından saptanabilir.

Haledeki fotino etkileşmeleri birbirinden çok farklı yöntemlerle araştırılmaktadır. Uzayda yörüngeye ya da balonlara yerleştirilen teleskoplar, yerkürenin soğurucu atmosferinin üzerinde, halede fotino etkileşmeleri sonucu ortaya çıkan kozmik ışın karşı protonu ve pozitronu gibi parçacıkları araştırmaktadırlar. Bununla birlikte ağır yıldızlararası atomlarla etkileşen kozmik ışın protonları da göreceli olarak düşük enerjili karşı proton ve pozitronlar üretirler. Bu iki olayı birbirinden ayırmanın bir yolunun olması gerekir. Doğaldır ki yalnız bir karşı çekirdeğin, hatta karşı helyumun, saptanması olağanüstü bir keşif olacak ve karşı yıldızların hatta karşı galaksilerin varlığını gündeme getirecektir. Henüz böyle parçacıkların saptanmadığını söylemeye gerek

yok. Benzer bir strateji de fotino etkileşmelerinin bir başka kalıntısını araştırmaktır. Bunlar fotonlardır, özellikle haledeki fotinoların yok olmaları sonucunda üretilen gamma ışın fotonları.

Eğer karanlık maddenin bolluğu evrenin ortalama yoğunluğuna büyük bir katkı yapacak ölçüde yüksekse önemli kütle çekimsel sonuçları olacaktır. Hafif nötrinolar olsun, ağır fotinolar olsun, kütleli parçacıklar kaçınılmaz olarak evrenin ilk dönemlerindeki evrimi ve yapısı hakkında önemli rol oynarlar. Ama egzotik karanlık maddenin kütle çekimsel etkilerine bakmadan önce girebileceği daha bildik, ve çok daha büyük kütleli biçimlerini inceleyeceğiz.



Bir MACHO olayı, karanlık maddenin kanıtıdır. Galaksimizdeki görünmez bir "büyük kütleli hale cismi (ya da MACHO) Büyük Magellan Bulutu'ndaki bir yıldıza bakış doğrultusunun önünden geçerken yıldızın görüntüsü parlaklaşır.

8

Baryon Kökenli Karanlık Madde

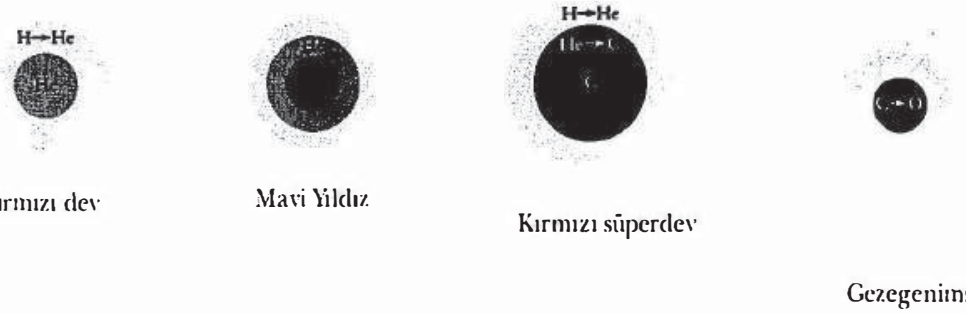
Karanlık maddenin en doğal biçimi var olduğunu bildiğimiz madde, yani baryonlardır. Hafif element bolluklarının büyük patlamayla açıklanması bir miktar baryon kökenli maddenin varlığını gerektirir. Her ne kadar aynı bolluklar karanlık maddenin çoğunluğunun baryon kökenli olmadığını ima ediyorsa da, baryon kökenli karanlık maddenin miktarı hâlâ büyük olasılıkla ışıyan maddede gördüğümüzün birkaç katı, ya da evrenin kapalı olması için gereken kritik yoğunluğun yüzde 3'ü kadardır. Ama acaba baryon kökenli karanlık maddeyi nerede aramamız gerekiyor?

İlk beklenti, baryon kökenli karanlık maddenin galaksinin halesindeki yanıp bitmiş yıldızları oluşturmasıdır. Bunun yanısıra gezegenler ve kara delikler de olanaklıdır. Baryon kökenli karanlık maddenin var olduğu kesindir. Galaksi halelerindeki, galaksi kümelerinde ve süperkümelerindeki, hatta evrenin kapalı olmasını sağlayacak tüm karanlık maddeyi oluşturacak miktarda olup olmadığı ise daha belirsizdir. Baryon kökenli karanlık madde en azından galaksi halelerindeki karanlık madde için ciddi bir adaydır. Diğer yandan, evrenin kapalı olmasını sağlayacak yoğunluk için WIMP'lere ya da başka zayıf etkileşimli parçacıklara başvurmak gerekir. Karanlık maddenin bu iki rakip biçimine atfen baryon kökenli karanlık maddenin ciddi adayları 'büyük kütleli, sıkı hale cisimleri' anlamına gelen 'massive compact halo objects' sözcüklerinin baş harflerinde oluşan MACHO adı verilmiştir.

Ana Koldan Sonraki Yaşam: Beyaz Cüceler

Güneş'e benzeyen yıldızlar, parlaklıklarında büyük bir artış göstererek ölmeye mahkumdurlar. Yıldızın çekirdeğinde hidrojen kalmadığında, nükleer yakıtı da geçici olarak tükenmiş demektir. Çekirdekteki nükleer reaksiyonlar durursa da çekirdek çevresindeki bir kabukta hidrojen yanması devam eder. Bu arada hidrojen yakan kabuğun sıcaklığı artar, bu nedenle de helyum üretimi hızlanarak sürer. Kabuğun fazla ısınması nedeniyle yıldızın zarfı genişlemeye başlar. Yarıçapı 100 kat artan yıldız, bir kırmızı dev haline gelir.

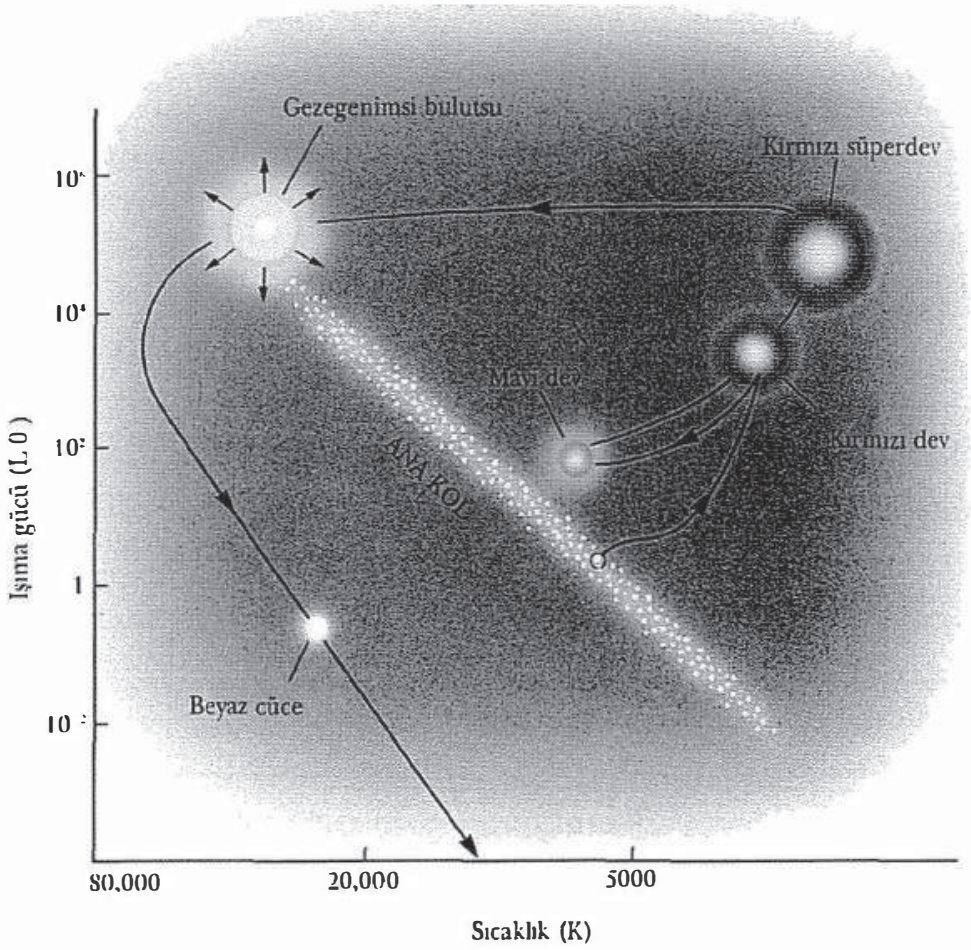
Zarf genişlerken aynı zamanda da soğur. Yıldızın dış katmanlarını oluşturan gazlardaki bu soğuma, ışıma gücü denilen bir özellikle açıklanır. Bir yıldızın ışıma gücü yüzey sıcaklığının (T) dördüncü kuvvetiyle ve yarıçapının karesiyle doğru orantılıdır. Yıldızın yüzeyi büyürken toplam enerjisi ve bu nedenle de ışıma gücü sabit kaldığından, etkili sıcaklığı azalmak zorundadır.



Küçük kütleli bir yıldızın evriminin ileri evreleri.

Zarf soğurken, yıldızın kütlesinin yüzde onunu oluşturan helyum çekirdek büzülür ve ısınır. Sıcaklığı 10 kat artarak yaklaşık 100 milyon derece Kelvini bulduğunda helyum ateşlenir. Üçlü alfa süreci adı verilen bir reaksiyonla üç helyum çekirdeği kaynaşarak bir karbon çekirdeğine dönüşür ve füzyon enerjisi açığa çıkar. Yaklaşık 100 milyon yıl süren helyum-yanması evresinde yıldız, Hertzsprung-Russel diyagramının yatay kolu üzerinde hareket eder.

Hidrojen yakan kabuk, sonunda yakıtını bitirerek zayıfladığında yıldız büzülür ve mavileşir. Çekirdeğindeki helyum tükendiğinde yıldızın yatay dal üzerindeki yaşamı da son bulur. Şimdi çekirdek tümüyle karbona dönüşmüştür ama karbon çekirdeğin sıcaklığı yeni füzyon reksiyonlarının başlamasına yetecek ölçüde yüksek olmadığından çekirdek büzülür. Bu arada karbon çekirdeğin dışındaki helyum, füzyon reaksiyonlarını başlatacak kadar ısınmıştır. Bu helyum son derece şiddetli bir biçimde yanar ve açığa çıkan ısı, daha dış bir kabukta hidrojen yanmasını başlatır. Yanmakta olan her iki kabuktan yayılan ısı kırmızı dev yıldızın dış yüzeyinin daha da fazla şişmesine neden olur. Yıldız, ışıma gücü bin Güneş'e eşit olan bir kırmızı süperdeve dönüşmüştür. Şimdi karbon çekirdeğin sıcaklığı yükselerek karbon füzyonuyla enerji üretmeye başlar. Atom kütlesi 12 olan karbon, atom kütlesi 4 olan helyumla kaynaşarak gene atom kütlesi 16 olan oksijen çekirdeğini meydana getirir. Öylesine çok miktarlarda enerji açığa çıkar ki yıldız kararsız hale gelir ve dış katmanlarını yıldız rüzgârıyla uzaya püskürtür. Sonunda geriye, yıldızın orijinal kütlesinin yüzde onunu oluşturan ve genişlemekte olan iyonlaşmış bir gaz kabukla çevrelenmiş karbon bir çekirdek kalır. Önceki süperdev, bir gezegenimsi bulutsu haline gelmiştir. Genişlemekte olan gaz kabuk, yıldızın yaşamı boyunca meydana gelen nükleer reaksiyonlar tarafından ortaya çıkarılan maddelerce kimyasal olarak zenginleşmiştir. Gezegenimsi bulutsunun merkezinde sıcak olmakla birlikte hızla soğuyan bir yıldız kalıntısı vardır.



5 $M_\odot$ kütlesindeki bir yıldızın ana kolu terketmesinden beyaz cüce oluşuna kadar geçirdiği evrimin Hertzprung-Russell diyagramında gösterilmesi.

Gezegenimsi bulutsunun merkezindeki yıldız bir beyaz cücedir. Sıcaklığı ise genellikle karbon ve oksijenden (ya da küçük kütleli beyaz cüceler için helyum) oluşan yakıtı ateşleyemeyecek ölçüde düşüktür. Her ne kadar yıldız, kütle çekimi nedeniyle içeri doğru etki yapan büyük kuvveti dengeleyebilecek ışınım basıncı üretemiyorsa da dejenere (yoz) elektron basıncı yıldızın daha fazla çökmesini engeller. Bu kuantum mekaniksel etki, dördüncü bölümde anlatılan ve parçacıkların özelliklerinde kuantum belirsizlikleri olduğunu ileri süren belirsizlik ilkesinin sonucudur. Bu belirsizlik çok küçük hareketlere eşdeğerdir ve bu hareketler bir basınç uygulanmasına neden olur. Yıldız çökerken atomları birbirlerinin içine girinceye kadar sıkıştırdığından, bir beyaz cücede bu basınç, biraraya gelip sıkışan elektronlar tarafından oluşturulur. Beyaz cüceyi kütle çekim kuvveti karşısında daha fazla çökmekten alıkoyan, işte bu 'dejenere' elektronların basıncıdır. Bir beyaz cücenin kütlesi ne kadar büyükse boyutları o kadar küçük olur. Bir beyaz cücenin sahip olabilece-

ği en büyük kütle, Chandrasekhar kütlesi olarak bilinen, 1.4 $M_\odot$'dir. Bundan daha büyük kütleli bir cismin çökmesi dejenere elektron basıncı tarafından engellenemez.

Atom çekirdekleri elektronlardan çok daha küçük hacim kaplamasına karşın bu yoğunluklarda dejenere değillerdir. O zamana kadar biriktirdiği ısı kaynağını kullandığı için parlayan bir beyaz cücede daha ileri düzeyde nükleer reaksiyonların başlaması mümkün değildir. Yaklaşık 10 milyar yılda bütün enerjisini uzaya yayan beyaz cüce, bir siyah cüceye dönüşür. Bu, yaklaşık yerküre boyutlarında, sıkı bir yıldız olup sıcaklığı ve ışıma gücü çok düşüktür. Böyle cisimler, karanlık maddenin olası biçimleridir.

Yaklaşık 8 $M_\odot$'nden daha küçük kütleli bir yıldız, sonunda kütlesi 1.4 $M_\odot$'nden daha küçük bir beyaz cüceye dönüşür ki bu, bu tür bir yıldız için bir üst sınırdır. 6 $M_\odot$'nden daha küçük kütleli yıldızların hâlâ hidrojen yakılan ana kol evresinde oldukları Hyades kümesinde beyaz cüceler olduğunu biliyoruz. Hyades'teki beyaz cücelerin atalarının kütleleri 6 $M_\odot$'nden büyük olmalı.

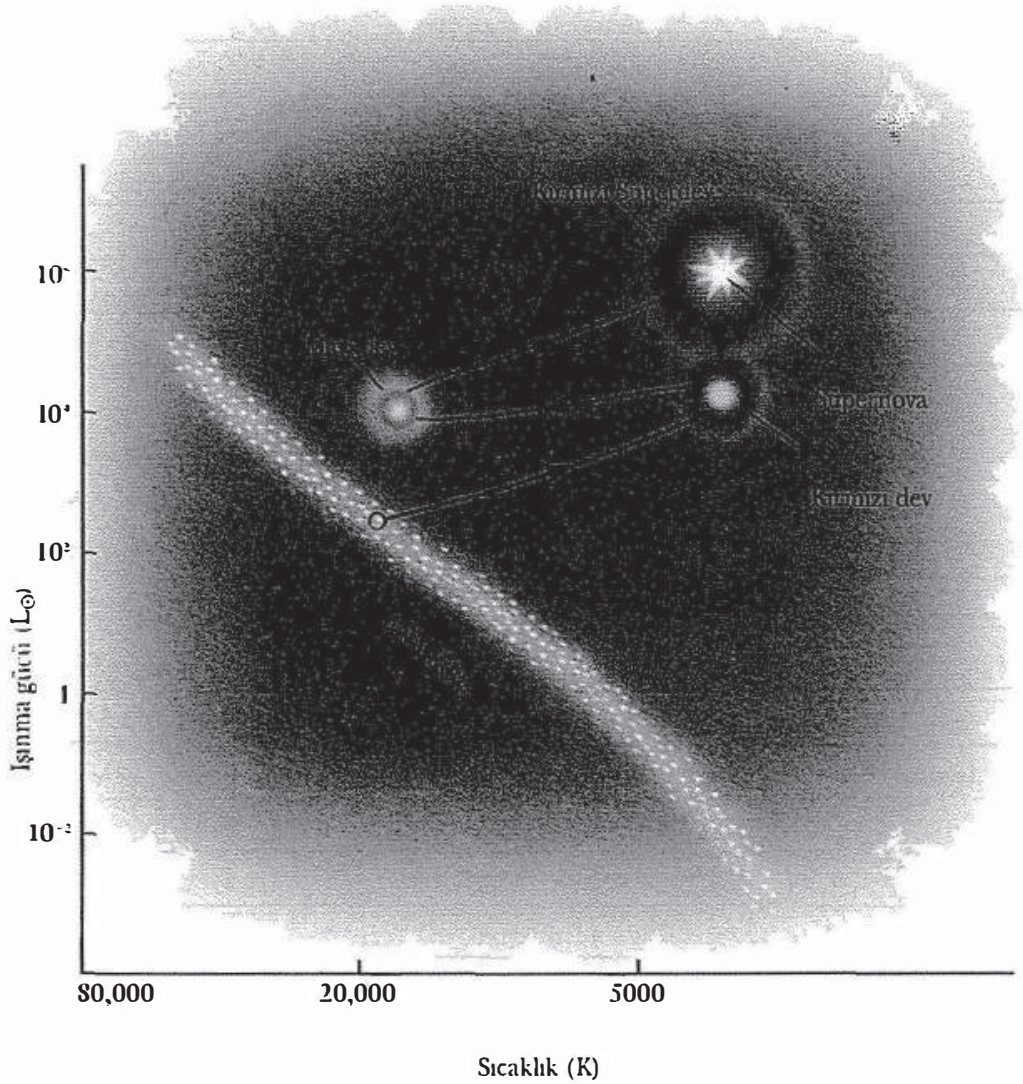
İlk kütlesi 8 $M_\odot$'nden daha büyük olan yıldızlar, yıldız rüzgârı ile yeterince madde kaybedemediklerinden dolayı beyaz cüce olamazlar. Aslında tanım olarak büyük kütleli yıldız demek, yaşamını beyaz cüce olarak sona erdiremeyecek kadar büyük kütleli yıldız demektir. Bu tür yıldızların yaşamı daha değişik bir biçimde sona erer. Bu da baryon kökenli maddenin bir başka biçimidir.

Bir Nötron Yıldızının Oluşumu

Büyük kütleli yıldızlar, ana kol üzerinde göreceli olarak az zaman harcarlar. Kütlesi 15 $M_\odot$ kadar olan bir yıldız ana kol üzerinde 10 milyon yıl, kütlesi 30 $M_\odot$ kadar olan bir yıldız ise yalnızca bir milyon yıl geçirir. Büyük kütleli yıldızların evrimleri hızlı olduğundan, helyum çekirdek çökerek yeniden nükleer reaksiyonları başlatıp yıldız bir kırmızı deve dönüşürken, dış kabukta hidrojen yanması için çok az zaman kalır. Helyum tüketildiğinde çekirdek yeniden çöker ve üç helyum çekirdeğinin kaynaşarak bir karbon çekirdeğine dönüştüğü üçlü alfa sürecini başlatır. Sonunda çekirdek, karbonun da yakarak oksijene dönüştürecek kadar ısınır; bu arada çevrede helyum yakan bir kabuk da vardır ve yıldızın dış katmanları genişleyerek bir kırmızı süperdev oluşturmuştur. Çekirdek, sıcaklığı 1 milyar derece Kelvin'e ulaşıncaya kadar yanmaya devem eder. Füzyon re-

aksiyonları sonucunda gittikçe daha ağır elementler üretilir ve sonunda çekirdek tümüyle demire dönüşür. Demir, füzyon reaksiyonlarının son halkasıdır; demirden daha ağır elementlerin sentezi sonucunda dışarıya enerji verilmez, tam tersine ortamdan enerji alınır. Demir çekirdek tüm füzyon (kaynaşma) ve fisyon (parçalanma) reksiyonlarında endotermiktir (dışarıdan enerji alır). Bu noktadan sonra, dışarıdan enerji sağlanmadıkça hiçbir nükleer süreç oluşamaz.

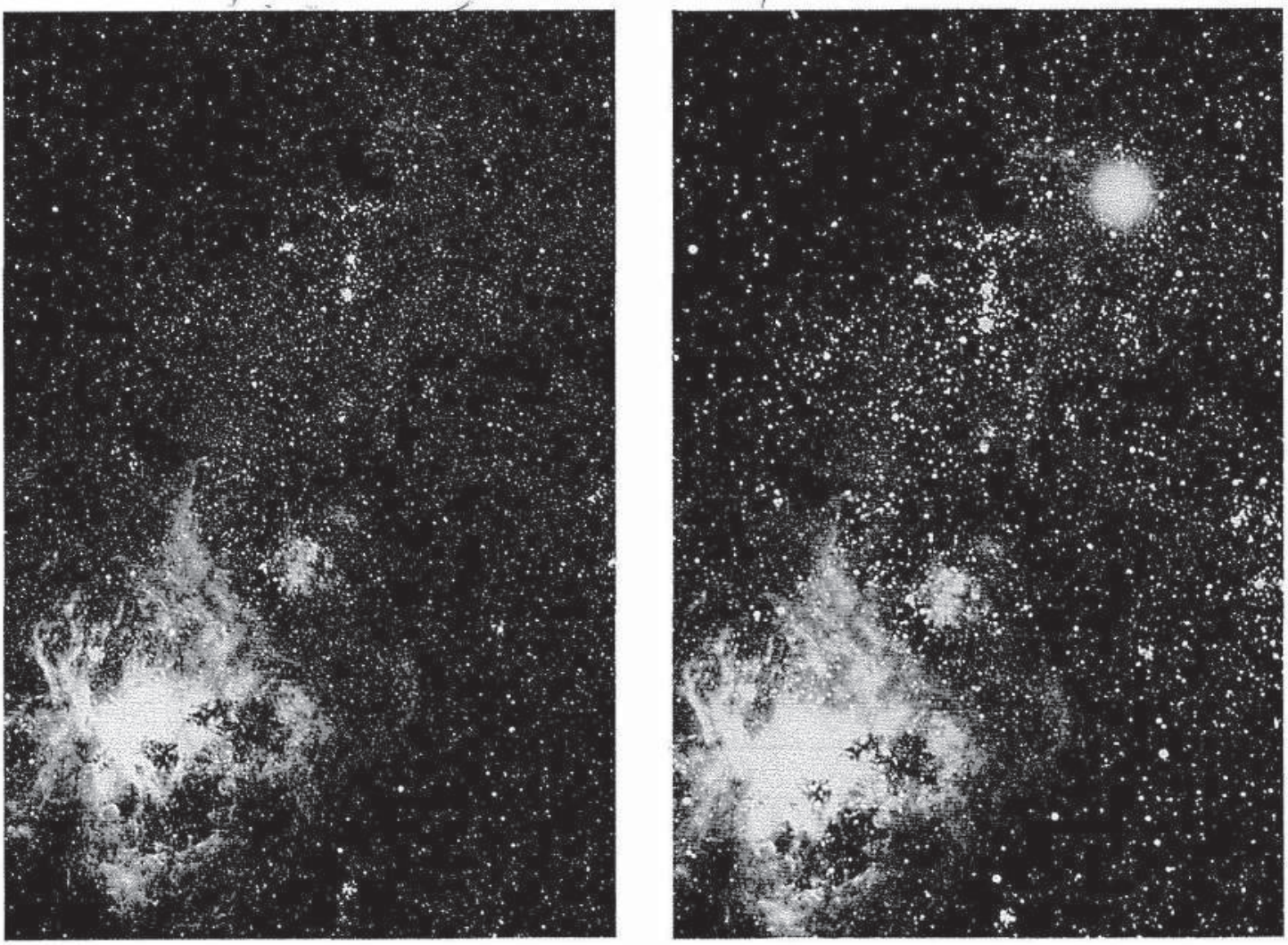
Isı kaçarken çekirdek büzülür ve sıcaklık 1 milyar derece Kelvin'i aşar. Çekirdeğin kütlesi 1.4 $M_{\odot}$ 'ni aştığı an, artık dejenere elektron basıncı da çökmeyi önleyemez. Çekirdek çöker ve atomların ötesinde atom çekirdeklerinin sıkıştırıldığı, maddenin çok daha yoğun olduğu bir durumuna girer. Bu durumda protonlar, elektron yakalayarak nötronlara dönüşür-



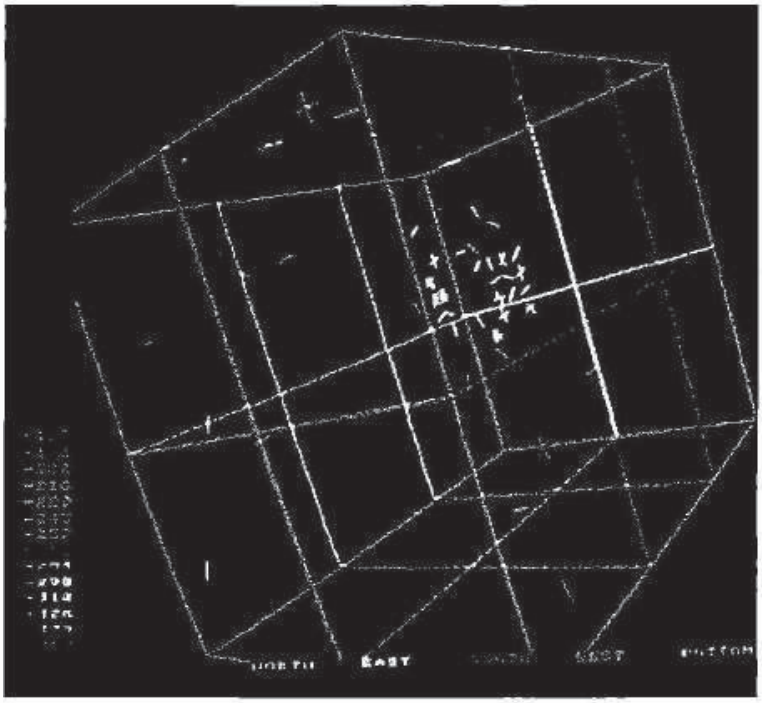
Büyük kütleli bir yıldızın ana kolu terketmesinden süpernova oluşuna kadar geçirdiği evrimin Hertzsprung-Russell diyagramında gösterilmesi

ler. Aynı zamanda, maddeyle çok zayıf bir biçimde etkileşen ve bu nedenle de yıldızdan hemen hiç engellenmeden kaçabilen karşı nötrinolar biçiminde enerji yayınlanır. Enerji kaybı, yalnızca nötronlardan meydana gelen dev bir atom çekirdeğinin oluşumunu hızlandırır. Nötron yıldızı çekirdek yoğunluğuna kadar sıkıştırılmış olup dejenere nötron basıncı tarafından daha fazla çökmesi önlenen bir gaz küresidir. Dejenere nötron basıncı, nötronlar birbirlerine değecek kadar sıkıştırıldığında ortaya çıkan kuantum mekaniksel bir basınçtır.

Ortaya çıkan nötron yıldızının yarıçapı yaklaşık 1 kilometre ve yoğunluğu da yaklaşık santimetreküpte 1 milyar tondur. Yıldız çekirdeğinin çökmesi, kırmızı süperdev evresindeki yıldızın dış katmanlarını büyük bir hızla dışarıya fırlatan bir şok dalgası oluşturur. Bu bir süpernovadır. Kalıntı nötron yıldızı çok sıcak olup x-ışınları yayar. Sıcaklı-



Sağdaki fotoğrafta görülen SN 1987 A Süpernovası, soldaki fotoğrafta hiçbir belirtisi olmayan parlak bir nokta olarak ortaya çıkıyor. Süpernova 23 Şubat 1987 günü, Tarantula Nebulası'nın yanında, Büyük Magellan Bulutu'nda bulunan 20 $M_\odot$ kütleli mavi dev bir yıldızın patlamasıyla oluştu.



23 Şubat 1987 günü SN 1987 A Süpernovası'nın patlamasından yaklaşık 3 saat önce, Tokyo yakınlarındaki Kamioka çinko madeninde bulunan 8000 tonluk sıvı detektörde 12, Cleveland yakınlarındaki Morton tuz madeninde ise 8 nötrino saptandı. Bu fotoğraf ikinci deneyin kaydıdır.

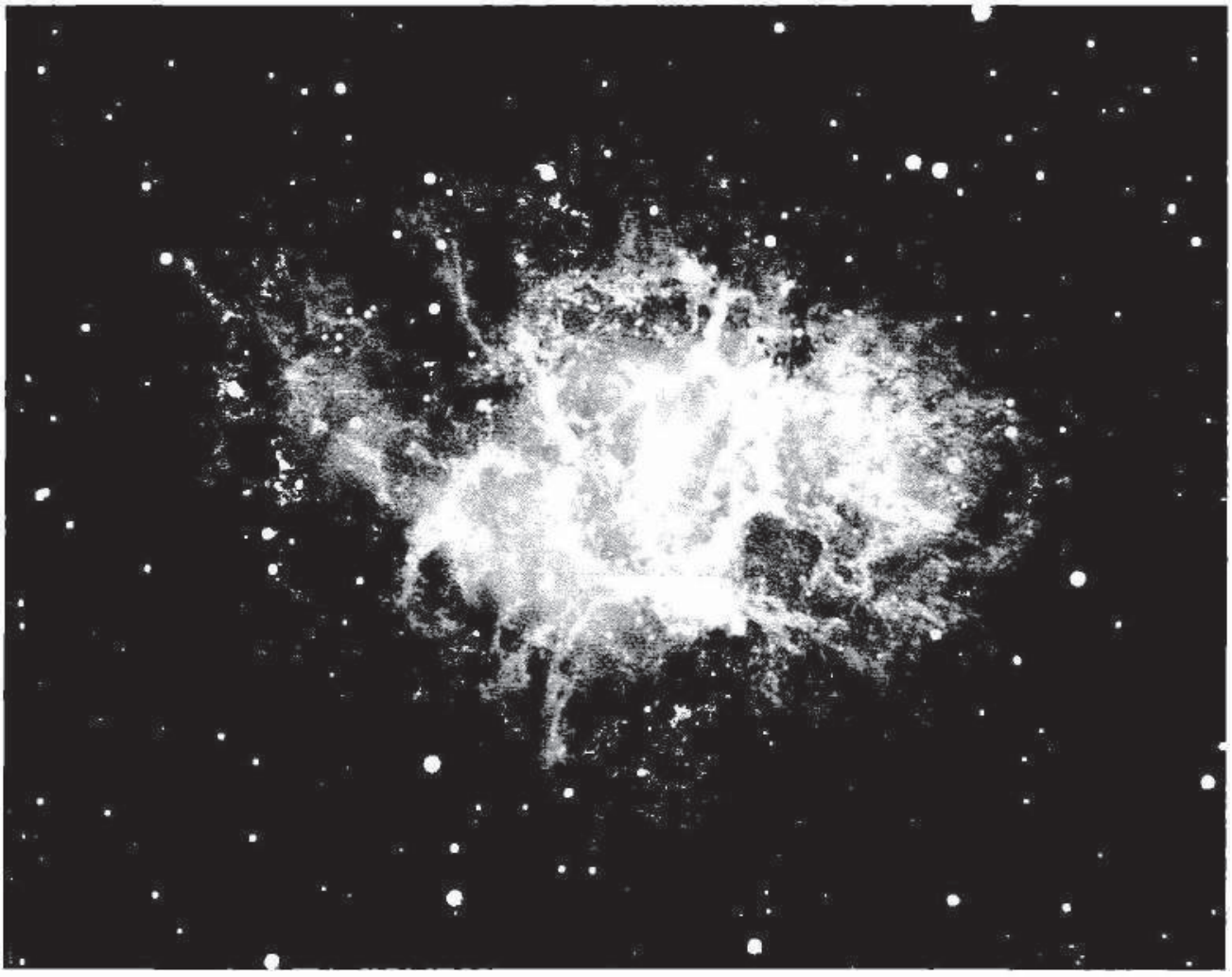
ğını koruyacak bir enerji kaynağı olmadığından yavaş yavaş soğur. Birkaç milyon yıl sonra en azından termal enerji bakımından gözden kaybolur. Karanlık maddeye dönüşür.

Süpernovalar çok verimli nötrino kaynaklarıdır. Bu parçacıklar ise, bir nötron yıldızının oluştuğunun açık kanıtlarıdırlar. Patlamadaki enerjinin yüzde 99'u nötrinolar ve karşı nötrinolar biçiminde yayınlanır. Maddeyle çok zayıf bir biçimde etkileşen bu parçacıkların zor saptanabilirliği dillere destandır. 23 Şubat 1987 günü 1987A adı verilen süpernova patladığında, raslantı eseri iki nötrino 'teleskobu' çalışmaktaydı. Aslında, süpernovadan gelen nötrinolar Dünya'ya ışık sinyalinden saatlerce önce ulaştılar. Doğaldır ki süpernova gerçekte 50 000 yıl önce patlamıştı ama 1987A'nın içinde bulunduğu Büyük Magellan Bulutu'nun Güneşimizden uzaklığı 50 000 ışık yılıdır.

Nötrino yakalama denevleri, yer altında dev bir fototüpler sistemi tarafından sürekli gözlenen ve binlerce ton su barındıran kaplardan meydana gelmiştir. Bu nötrino ve karşı nötrinolar yeraltı kaplarındaki suya ulaştıklarında nötrinolar, su moleküllerindeki elektronlar tarafından saçılırlar, karşı nötrinolar ise aynı molekülerdeki protonlar tarafından soğurulurlar ve protonlarla birlikte rasgele yönlerde hareket eden pozitronlar üretirler. Hızla hareket eden elektron ve pozitronlar suda yavaşlatıldıklarında bir ışık parlamasına (Çerenkov ışıması) yol açarlar. 23 Şubat 1987 günü, Şili'den gelen ilk optik(görsel) süpernova raporundan yaklaşık dört saat önce, Büyük Magellen Bulutu yönünde, 13 saniyelik bir süre içinde, nötrinolar tarafından tetiklenen 20 saçılma saptandı. Nötrinoların ve karşı nötrinoların yakalanması, bir nötron yıldızının ortaya çıktığına ilişkin kanıtlardı. Bu bir avuç saçılma, nötron yıldızı oluşurken saniyede 10^{57} nötrino ve karşı nötrino yayıldığını söylüyordu.

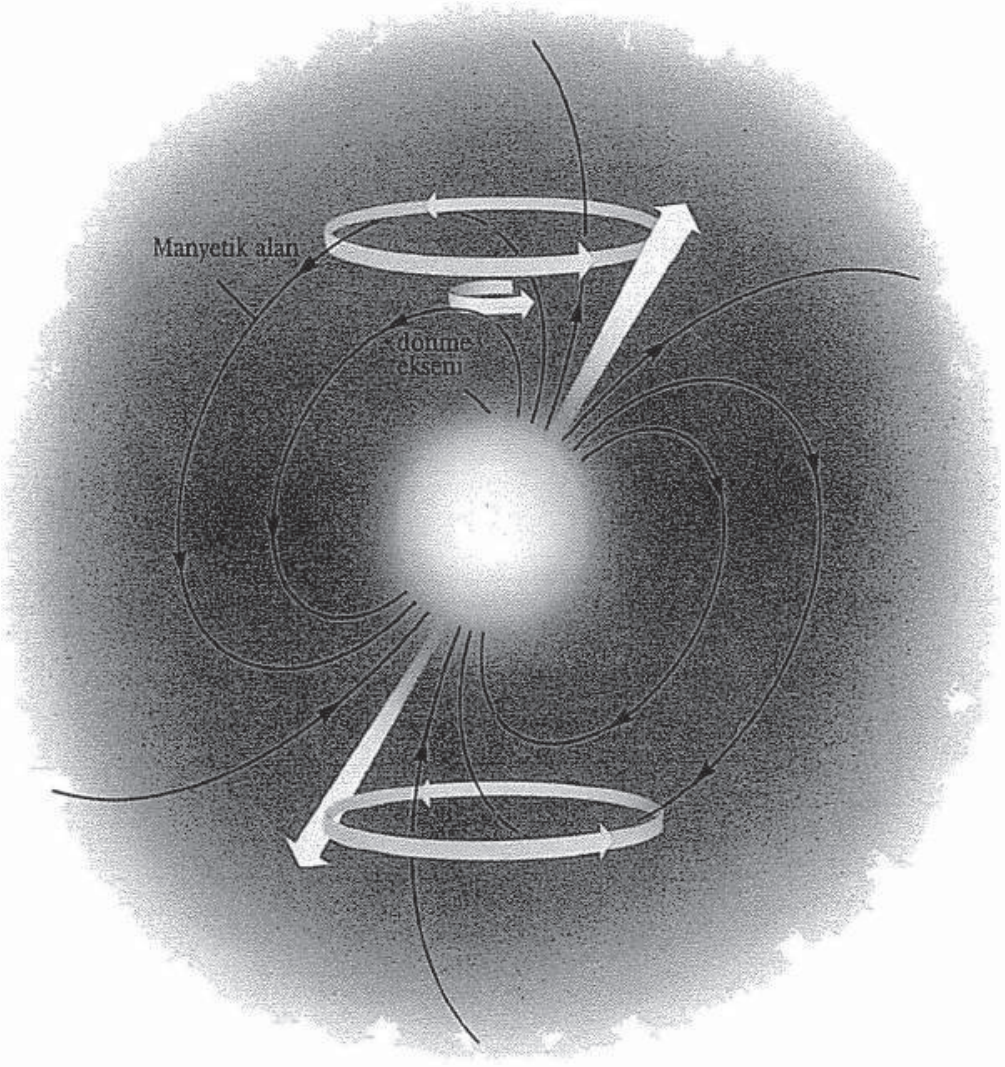
Nötron Yıldızlarının Gözlenmesi

Milattan sonra 1054 yılında Çin'de hüküm süren Sung hanedanının tarihçileri, Boğa Takımyıldızı'nda, bugün bir süpernova olduğu anlaşılmış olan yeni bir yıldızın ortaya çıktığını kaydettiler. Her ne kadar bu yıldız, ertesi yıl içinde yavaş yavaş ortadan kaybolduysa da, süpernova kalıntısının yeri, tarihsel kayıtlardan saptandı. Bu kalıntı, saniyede 1000 kilometreye varan hızlarda genişlemekte olan gaz sütunları içeren Crab (Yengeç) Bulutsusu'dur. Bu gaz sütunlarının hareket yön ve hızlarından patlamanın tarihi milattan sonra 1054 olarak bulunmuştur. Crab Bulutsusu yoğun bir radyo dalgaları, optik ışın ve x-ışınları kaynağıdır. Çok geçmeden bu ışınımı açıklayabilmek için bir enerji kaynağının gerekli olduğu anlaşıldı.

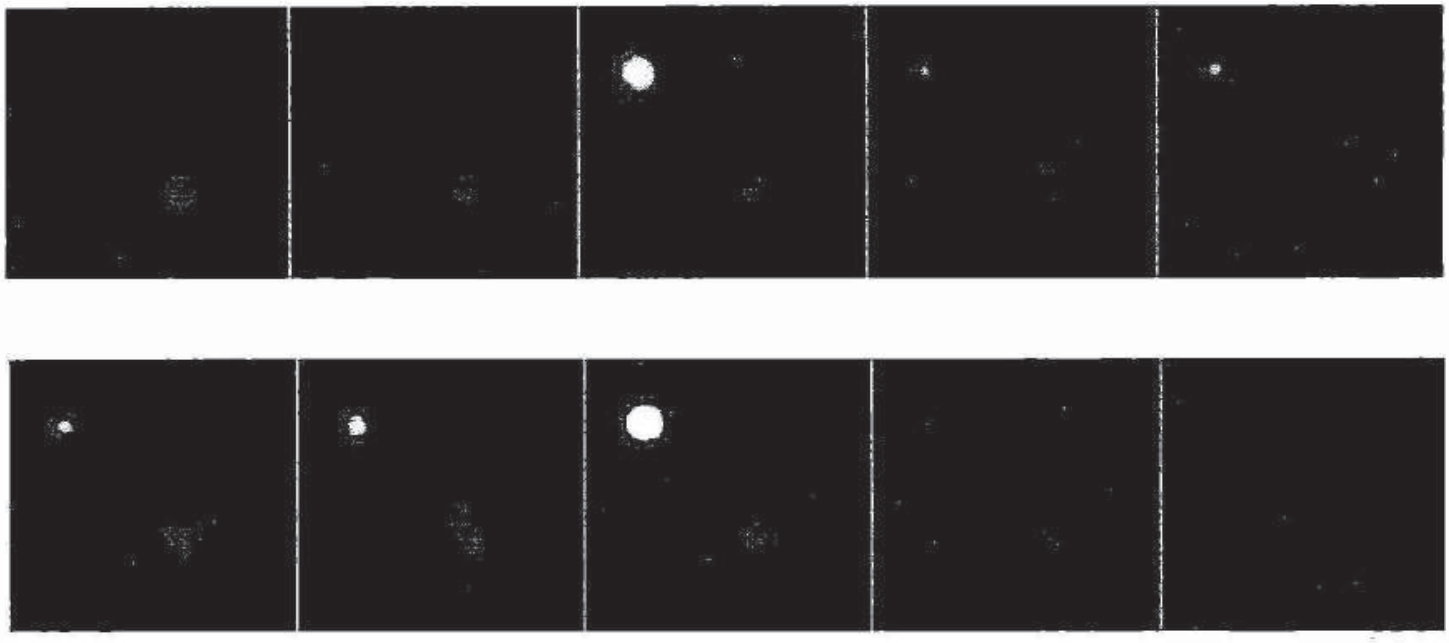


Crab Bulutsusu, 1054 yılında patlayan bir yıldızın, halen genişlemekte olan kalıntısıdır.

Bu bilmece, 1968 yılında Crab Bulutsusu'nun merkezinde bir nötron yıldızı keşfedildiğinde çözülmüş oldu. Bulutsunun içinde bir cismin çok düzenli bir biçimde her 0.033 saniyede bir ışık atmaları (puls) yaptığı gözlendi. Bu atmaların frekansı belli belirsiz bir biçimde azalıyordu. Pulsların yavaşlaması dönmekte olan yıldızın dönme hızının azalması olarak yorumlandı. Pulsar adı verilen yıldız elektromanyetik ışıma yoluyla enerji yaydığından, yavaşlıyordu. Hesaplamalara göre bu pulsların kaynağı, dönen ya da atma yapan bir beyaz cüceden daha sıkı ve küçük olmalıydı. Bu koşulları ancak nötron yıl-



Dönen bir pulsarın hareket eden manyetik alanı, yıldızın kuzey ve güney manyetik kutuplarından dışarıya yönelen, sıkı bir elektromanyetik ışınım demeti oluşturur. Yıldızn döndükçe demet de uzayı tarar. Eğer yerküremiz ışın demetinin yolu üzerindeyse bir ışık parlaması görürüz.



Geminga, kendi ekseni çevresinde dönerken tıpkı bir deniz feneri gibi kutuplarından gamma ışın demetleri saçan bir nötron yıldızı yani bir gamma ışın pulsarıdır. Geminga yaklaşık 100 parseklik uzaklığıyla en yakın pulsar olup her saniye dört kez gamma ışın ışıması yapmaktadır.

dızı sağlıyordu. Işık pulsları, ambulansların dönen lambalarına benzer şekilde, yüksek manyetik alana sahip nötron yıldızının dönme ekseninin kuzey ve güney kutuplarından demet halinde çıkarlar. Yavaşlama hızından nötron yıldızının oluştuğu tarih, beklendiği gibi, süpernovanın patlama tarihi olan 1054 olarak bulundu.

Aslında pulsarların varlığı 1967 yılında farkedilmişti ama ilk pulsarlar, düzensiz periyotları olan, yıldız benzeri radyo dalgaları kaynakları olarak biliniyorlardı. Crab Bulutsusu'nda bir pulsarın keşfiyle birlikte pulsarların, süpernova patlamaları sonucu ortaya çıkan nötron yıldızları oldukları doğrulanmış oldu. Şimdiye kadar periyotları milisaniyeden saniyelere kadar değişen yüzlerce pulsar gözlenmiştir. Pulsarların çoğunluğu Samanyolu içinde ve galaksi düzlemi üzerinde yer almaktadırlar. Biri Crab Süpernova kalıntısında, diğeri Vela Süpernova kalıntısında yer alan iki pulsar, günümüzden 1000 ve 10 000 yıl önce gerçekleşen süpernova patlamaları sonucunda sıcak nötron yıldızları olarak ortaya çıktılar. Genç süpernova kalıntıları içinde gözlenen pulsarların ilk oluştuklarında 10-20 milisaniye civarında, şaşırtıcı derecede kısa periyotlara sahip oldukları görülüyor.

Bilinen en hızlı pulsarların periyotları milisaniyeler mertebesindedir. Periyotların düzgünlüğü insan eliyle yapılmış en duyarlı zaman ölçme araçlarının duyarlılığının da

Karl Schwarzshild, Einstein'ın genel görelilik teorisinden yararlanarak, bir karadelik çevresindeki kütleçekim alanının matematiksel ifadesini bulan astrofizikçidir.

ötesindedir. Pulsarlar, bir yıl veya daha uzun bir zaman diliminde zamanı 10^{14}'de bir duyarlılıkla ölçerler ki bu da yeryüzünde bulunan en iyi atom saatleri ile karşılaştırılabilir. Genç süpernova kalıntılarında bulunanlara ek olarak, en az 10 milyar yaşında olan, en yaşlı yıldız toplulukları olarak bildiğimiz küresel kümelerde de milisaniye periyotlu birçok pulsar bulunmuştur. Bu milisaniyelik pulsarların, kırmızı dev evresine giren eş yıldızlarından kütle aktarılması sonucunda daha da hızlı dönmeye başladıklarına inanılıyor.

Pulsarlar, dönmekte olan mıknatıslara benzerler. Zamanla elektromanyetik ışıma sonucunda enerji kaybettiklerinden radyo frekanslarında bile görünmez olurlar. Galaksimiz uzun zaman önce ölmüş olan pulsarlardan başka bir şey olmayan nötron yıldızlarıyla doludur.

Kahverengi Cüceler

Eğer baryon kökenli maddenin bir bölümü ölü yıldızlar biçimindeyse, diğer bölümü de hiçbir zaman yıldız olmayı başaramamış cisimler biçimindedir. Kahverengi cüce adı verilen cisimlerin kütleleri öylesine küçüktür ki, merkezlerindeki sıcaklık hiçbir zaman nükleer reaksiyonları başlatacak ölçüde yükselemez. Kütleleri 0.08 $M_{\odot}$'nden küçük olan cisimler -ki bunun içinde dev gezegenler de vardır- nükleer enerji üretmedikleri için ışık vermezler. Bununla birlikte yavaş yavaş büzülmekte olduklarından az miktarda kütle çekim enerjisi üretirler. Örneğin, Jüpiter'in çekirdek bölgesi her yıl birkaç milimetre büzülmektedir. Gerçekte bu gezegen kızılötesinde ışımakta ve Güneş'ten almakta olduğundan yüzde elli oranında daha fazla enerji yaymaktadır.

Astronomlar kahverengi cüceleri iki tür yerde ararlar. Bir çift yıldız sisteminde küçük kütleli bir eşin varlığı büyük kütleli yıldızın, sistemin kütle merkezi çevresinde bir yörünge çizerek dolanmasına neden olur. Yakın sistemlere bu hareket, ya saniyede

birkaç metrelik bir Doppler kayması biçiminde, ya da ışık kaynağının bir açı saniyesinden daha küçük bir hareketi biçiminde saptanır. Bununla birlikte, yakın yıldızların hem tafysal hem de astrometri ölçümlerinden henüz hiç kahverengi cüce saptanamadı.

Diğer bir yaklaşım, hâlâ kızılötesi kaynak olarak görülebilir olan serbest kahverengi cüceleri yakındaki, göreceli olarak genç yıldız topluluklarında aramak olabilir. Yüzey sıcaklığının düşük olmasından dolayı kahverengi cücenin ürettiği enerji ancak kızılötesinde görülebilir. Kızılötesinde ışınım yapan başka tür yıldızlar da vardır. Bu nedenle kızılötesinde ışınım yapan bir cismin kahverengi cüce olup olmadığını anlamanın yolu, cismin Hertzsprung-Russel diyagramındaki yerine bakmaktır. Eğer bu cismin yeri hidrojen yakılan ana kolun alt ucundaysa, o zaman kahverengi cücedir. Bugüne kadar Güneş sisteminin dışında, pulsarların çevresinde dönmekte olan gezegen-kütleli iki cisim hariç, güçlü bir yıldız-altı kütleli cisim adayına rastlanmamıştır. Ama eğer teoriye biraz olsun inanıyorsak, bütün gözlem çabalarının boş çıkmasına karşın, kahverengi cücelerin sayısının oldukça yüksek olması gerekir. Neden parçalanan yıldızlararası bir bulutun en küçük parçası hidrojen yakan bir yıldız büyüklüğünde olsun?

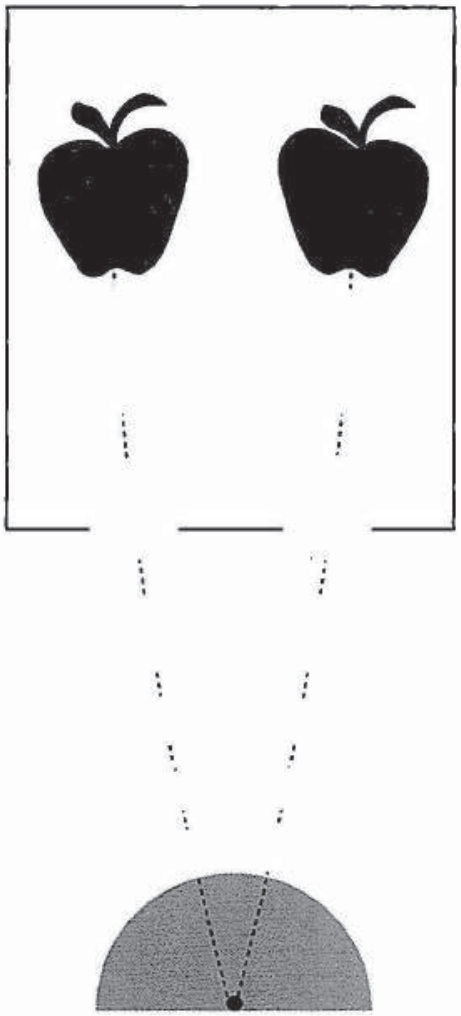
Kara Delikler

Kara delikler, karanlık maddenin düşünülebilecek en karanlık biçimidir. Her ne kadar doğrudan gözlenmeleri olanaksızsa da kara delikleri gözleyebilmek için astronomların dolaylı yöntemleri vardır. Görülemedikleri için karanlık maddenin mantık yoluyla bulunmuş adaylarıdırlar. Karanlık madde problemini çözebilecek sayıda kara delik olup olmadığı ise bilinmiyor.

Kara Delik Nedir?

Kara delikler, Albert Einstein tarafından yaratılmış olan görelilik teorilerinden biri olan genel görelilik teorisi tarafından öngörülmüş cisimlerdir. Özel görelilik teorisi uzay ve zamanın yapısını açıklarken genel görelilik teorisi ise uzay, zaman ve kütle çekimini tanımlar. Bu teorilerden birincisi bize, uzay ve zamanın dört boyutlu uzayzama-

nın değişik görünüşleri olduğunu söyler. Bu nedenle uzayda bir noktanın genellikle bir geçmişi, bir de geleceği vardır. Uzayzamanda bir noktaya örnek olarak bir patlamayı gösterebiliriz: patlama hem uzayda hem de zamanda özel bir noktadır. Herhangi bir gözlemci ya da herhangi bir ışık sinyalinin geleceğe doğru hareket ettiği söylenebilir. Eğer yeterince uzağa ve yeterince uzun zaman gidebilirse, teorik olarak, bir gözlemci ya da ışık sinyali sonunda gelecek zamanda bir başka noktaya ulaşabilir. Bu kuralın bir istisnası kara delik civarında ortaya çıkar. Kara delik civarında uzayzamanda öyle bir bölge vardır ki, bu bölgedeki olaylardan hiçbir şey -ışık bile- kaçamaz. Kara delik bir tuzak yüzeydir: bu yüzeyden içeriye bir kez girerseniz, geriye dönüş yoktur!



Einstein'ın düşünce deneyi. Bir asansör kabininin içinde bulunan ve yere doğru düşmekte olan iki elma. Asansör kabininde bulunan bir gözlemciye göre elmaların düşmekte olduklarının tek işareti, elmalar yeryüzüne yaklaştıkça aralarındaki uzaklığı azalmasıdır.

Kara deliğin, adını astronom Karl Schwarzschild'den alan yarıçapı, kütlesiyle doğru orantılıdır. Güneş kadar kütleye sahip olan bir kara delik için Schwarzschild yarıçapı 3 kilometre olarak bulunur. Bir milyar Güneş kütlesine kadar kütle içerdiği düşünülen süper kütleli kara deliklerin Schwarzschild yarıçapı bir parsek'in on binde biri kadardır ki bu, astronomi standartlarına göre çok küçük bir uzunluktur. Gezegenler kara deliğe doğru emilmezler. Eğer Güneş'in yerinde aynı kütleli bir kara delik olsaydı, kütle çekimi aynı olacağından Dünyamız yörüngesi üzerindeki hareketini aynı şekilde sürdürürdü. Bir kara deliğin yakınlarına giden bir uzay gemisi, bir yıldızın yakınlarında hissettiğinden daha büyük bir kütle çekimi hissetmez. Ne zaman ki gemi kara deliğin Schwarzschild yarıçapının birkaç katı kadar yakınına gelir, o zaman kütle çekim kuvveti uzay gemisi üzerinde etkisini göstermeye başlar.

Gel-git etkilerinin gözlenmesi yoluyla ölçülen kütle çekimi, büyük boyutlu cisimlerin her noktasına birbirinden farklı büyüklük ve yönlerde kuvvetler uygulayarak cisimlerin içinde gerilimlerin ortaya çıkmasına neden

olur. Derin bir sıvı su tabakasıyla kaplı olarak dönen yerkürede ise Güneş ve Ay'dan kaynaklanan kütle çekim kuvvetleri nedeniyle okyanuslarda gel-gitler ortaya çıkar. Bununla birlikte bir kütle çekim alanındaki bütün maddeler bükülme eğilimi göstererek bir anlamda gel-git dalgaları gibi davranırlar. Gel-git kuvvetleri konusunda işte böyle bir incelik vardır: bunlar, kütle çekiminin uzayda bir nokta gibi değil de bir hacim dağılımı olarak etki ettiğini gösterir.

Einstein tarafından önerilen ünlü bir düşünce deneyi, kütle çekiminin nasıl idealleştirilmiş tek bir nokta kütle dışında herhangi bir cisim üzerine etki ettiğinde kaçınılmaz olarak ortaya çıkan kuvvet gradyanı ile ölçülebileceğini gösterir. Dünya yakınlarında uzayda serbest düşme halinde bir asansör düşünelim. Asansörün ortasına idealleştirilmiş nokta kütlemizi temsil etmek üzere bir elma yerleştirelim. Elmanın asansöre göre hiçbir hareketi olmadığından, asansörün içinden bakıldığında elmanın yere doğru düşmekte mi olduğu, yoksa herhangi bir kütle çekim alanından uzakta, uzayın derinliklerinde sabit bir halde durmakta mı olduğunu söyleyebilmenin hiçbir yolu yoktur. Ama bu elmanın biraz uzağına ikinci bir elma yerleştirirsek, kütle çekiminin etkileri ortaya çıkar. Her iki elma da yerkürenin merkezine doğru düştüklerinden yavaşça birbirlerine doğru yaklaşırlar. Bir kara deliğin yakınlarında gel-git kuvvetleri çok büyüktür. Bildiğimiz maddeden yapılmış hiçbir cisim bunlara dayanamaz, dağılır.

Genel görelilik teorisinin en dramatik testlerinden biri, güçlü bir kütle çekim alanındaki gel-git kuvvetlerinin etkisiyle gerçekleştirilir. Birbirinin çevresinde dönen ve bir 'çift pulsar' olarak gözlenen iki nötron yıldızını ele alalım. Eğer teori doğruysa, gel-git kuvvetleri pulsar çiftinin yörünge enerjisinin kütle çekim dalgaları biçiminde çevreye yayılmasına neden olmalıdır. Bunun sonucu olarak aralarındaki uzaklık başlangıçta 1 milyon kilometre olan pulsarlar, sarmal bir hareketle yılda birkaç santimetre hızla birbirlerine yaklaşmalıdırlar. Çok kararlı bir biçimde dönen pulsarlar, süper duyarlıklı saatler gibi davrandıklarından, yörüngelerinin zamanlaması da çok büyük bir kesinlikle yapılabilir. Einstein'ın öngörüleri en azından yüzde 99.7'lik bir duyarlılıkla doğrulandı.

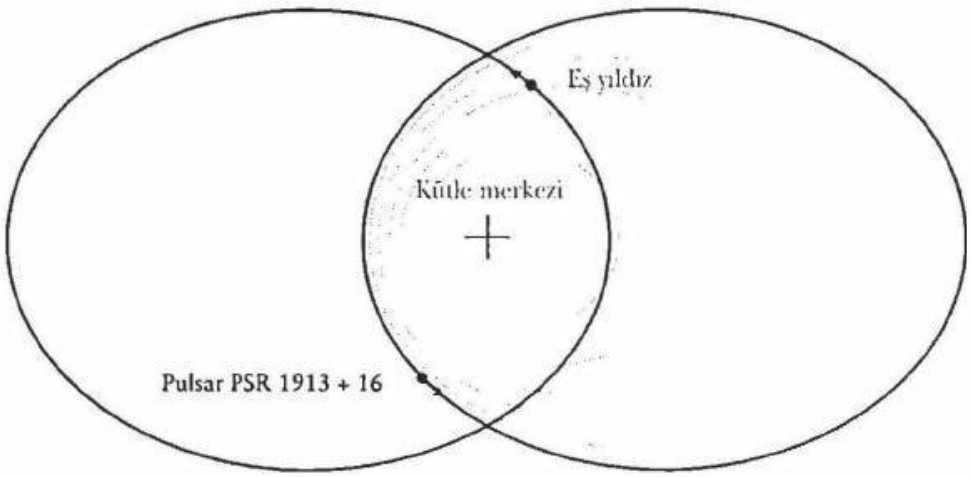
Altıncı bölümde uzayın kütle çekimi nedeniyle eğildiğini görmüştük. Genel görelilik, zamanın da, ya da daha genel olarak uzayzamanın da kütle çekimi tarafından büküldüğünü öngörür. Saatlerin tik-takları güçlü kütle çekimi tarafından yavaşlatılır. Bu etki yeryüzündeki laboratuvarlarda atom kristallerinde ölçülmüştür. Bazı kristal türleri uyarıldıklarında son derece düzenli salınımlar yaparlar. Bu salınımların frekanslarının,

kristalin yeryüzünden olan yüksekliğine bağlı olduğu bulunmuştur. Bu yükseklik değiştirildiğinde frekansta milyarda bir oranında bir kayma olur. Net etkisi güçlü kütle çekim alanından kaçan ışıkta kırmızıya kayma olarak ortaya çıktığından kütle çekimine bağlı olarak zamandaki bu yavaşlamaya kütle çekim kırmızıya kayması adı verilir.

Kütle çekim kırmızıya kaymaları beyaz cücelerde saptanmıştır. Bu yıldızlar, Güneş'ten yaklaşık 100 kat daha küçük olduklarından, kütle çekimi potansiyel enerjileri 100 kat daha büyüktür. Bu da bir beyaz cüce yakınlarındaki kütle çekim kırmızıya kaymasının Güneş yakınlarındaki kütle çekim kırmızıya kaymasından 100 kat ya da 10 000'de1 oranında daha güçlü olması demektir. Bununla birlikte bir kara deliğin yakınlarında zamandaki yavaşlama çok daha etkilidir. Gerçekte, kara deliğe doğru düşmekte olan bir cisme dışarıdan bakan bir gözlemci, Schwarzschild yarıçapına yaklaşırken cisimde bulunan saatin tik-taklarının gittikçe yavaşladığını görecektir. Cismin yaydığı herhangi bir ışının gittikçe daha büyük oranlarda kırmızıya kayma gösterecek, sonunda da gözden kaybolacaktır.

Kara Delikler Nereden Geliyorlar?

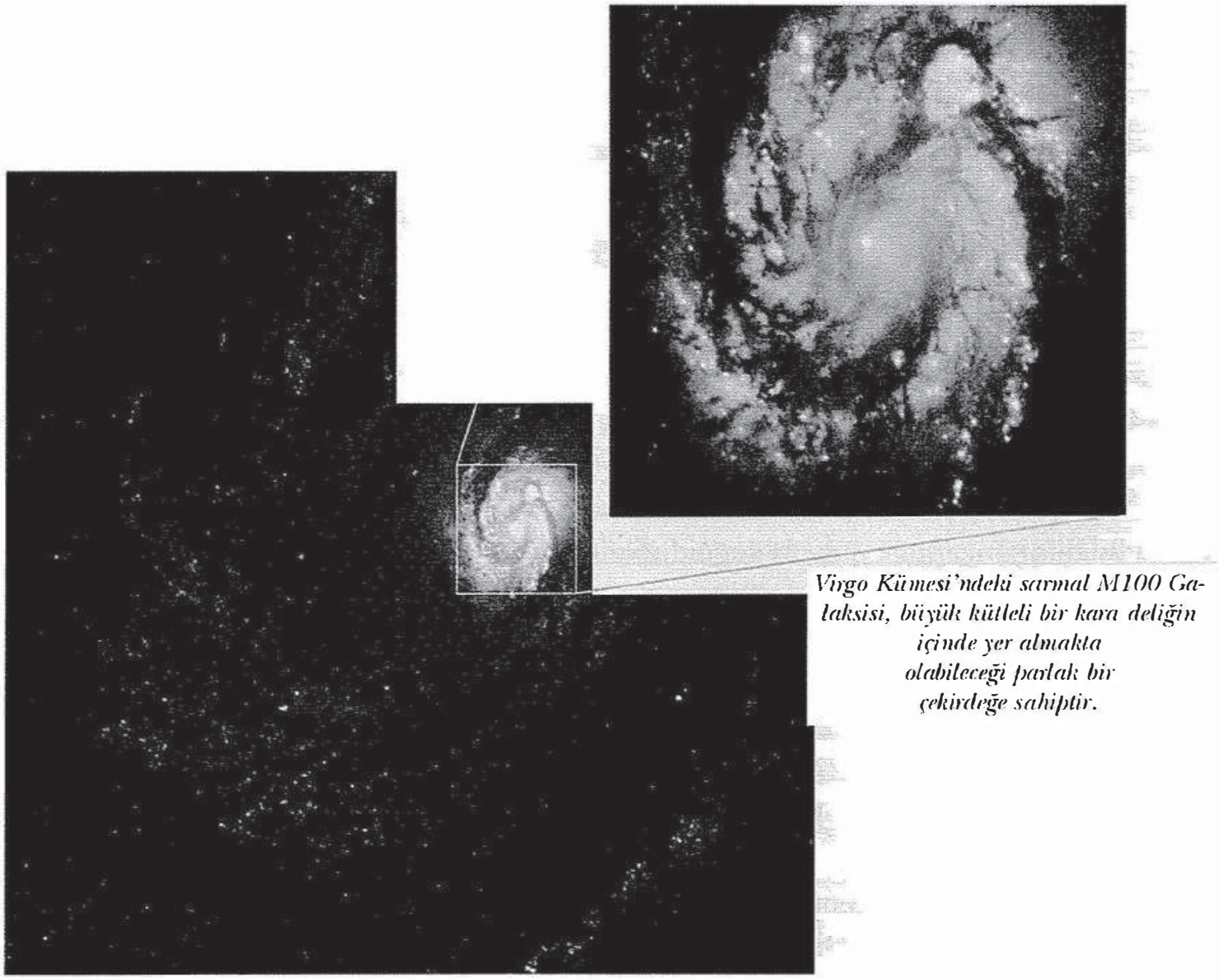
Kara delikler büyük kütleli yıldızların son durumudurlar. Belki de ilk kütleleri 50 $M_{\odot}$'den büyük olan yıldızların kaderi kara delik olmaktır. Eğer bir yıldız çekirdeğinin



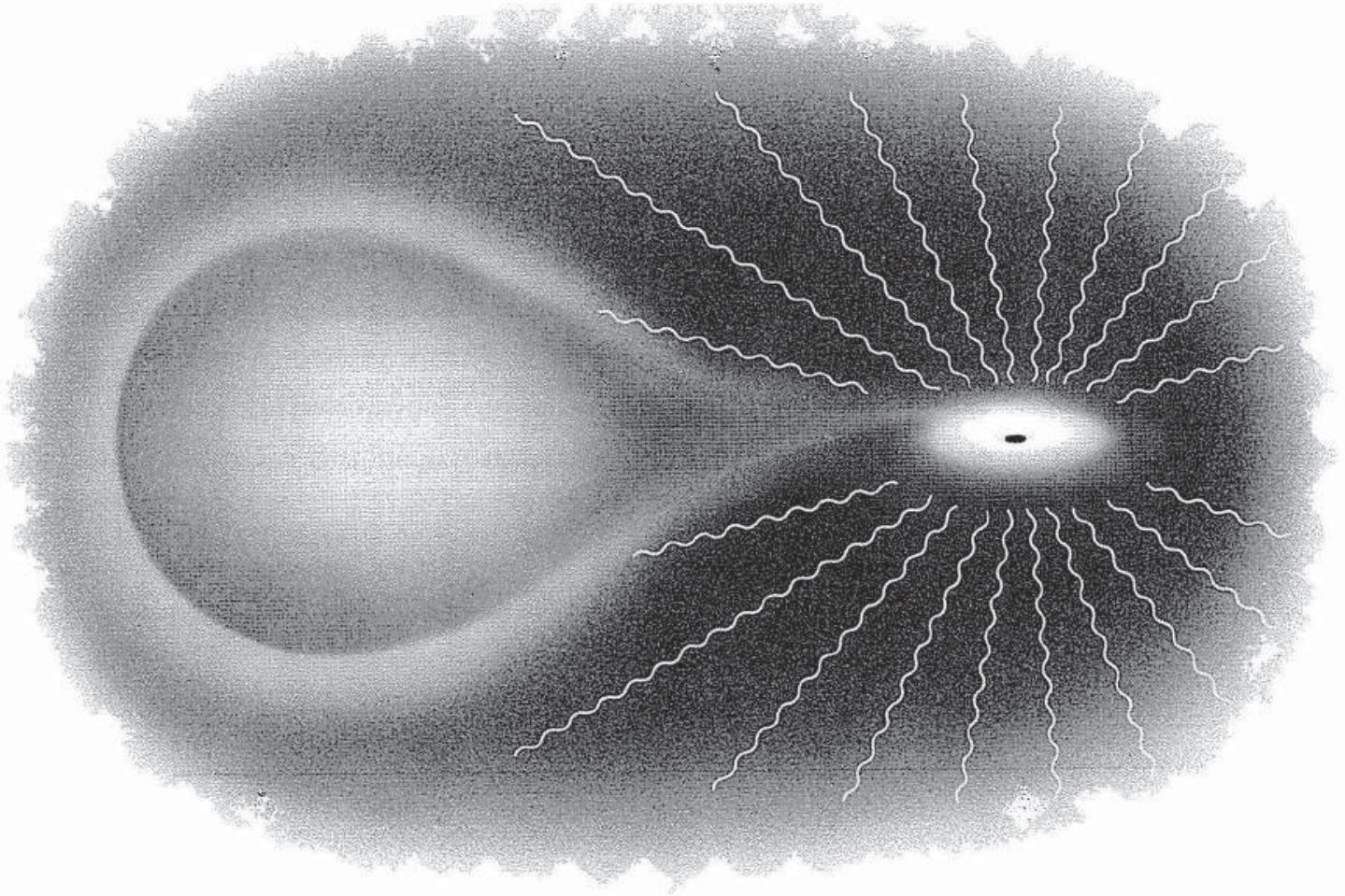
PSR 1913 + 16 pulsarının yörüngesi, pulsar bir sarmal çizerek eş yıldıza yaklaştıkça küçülecektir. Yörüngelerin zamanlaması, Einstein'ın kütleçekimi teorisinin de bir sınanmasıdır.

kütlesi birkaç Güneş kütlesinden büyükse, bu çekirdeğin çökmesini engelleyecek dejenere elektron ya da nötron basıncına benzeyen hiçbir kuvvet yoktur.

Bir yıldız kümesi ya da galaksi çekirdeğinin kararsız hale gelerek çökmesi durumunda kütleleri Güneş kütlesinin binlerce, milyonlarca ya da milyarlarca katı olan çok büyük kütleli kara deliklerin ortaya çıkabileceğine inanılıyor. Yıldızlar, yeterince büyük yoğunluklarda biraraya geldiklerinde, kimi zaman birbirleriyle çarpışırlar ve teorik spekülasyonlara göre, enkazlar dev bir kara delikte birikir. Böyle süper kütleli bir kara delik oluştuğunda, maddenin yoğunluğu çok büyük olmak zorunda değildir. Bunun nedeni, yoğunluğun kütle bölü hacimle, yani M/R^3 ile orantılı, kara deliğin Schwarzschild yarıçapının ise $R=2GM/c^2$ olmasından ötürü yoğunluğun $1/M^2$ ile orantılı olmasıdır. Bu da kütlesi Gü-



Virgo Kümesi'ndeki sarmal M100 Galaksisi, büyük kütleli bir kara deliğin içinde yer almakta olabileceği parlak bir çekirdeğe sahiptir.



Normal bir yıldızdan eşi olan kara delik üzerine akmakta olan madde, kara delik çevresinde bir kütle aktarım diski oluşturur. Gaz, diskin merkezine yaklaştıkça ışınır ve tamamen yutulmadan önce çok miktarda x-ışını yayar.

neş'in kütlesinin bir milyon katı olan bir kara deliğin, oluşumu sırasındaki (yarıçapı Schwarzschild yarıçapına eşitken) yoğunluğunun göreceli olarak düşük, yaklaşık olarak havanın yoğunluğuna eşit olduğu anlamına gelir. Öylesine küçük bir hacimde öyle çok madde bulunmaktadır ki, bu maddenin kütle çekimi bölgeden ışığın bile kurtulmasını engellemektedir. Küçük kütleli bir kara delikte, doğal olarak yoğunluk çok daha yüksektir.

Kara Deliklerin Özellikleri

En basit kara delik yalnızca kütlesi tarafından belirlenir. Bu verildiğinde kara delik, dışarıdan bakıldığında tektir. Aslında basit kara delikler için kütle (ki kara deliğin

Schwarzschild yarıçapını belirler), ölçülebilir tek büyüklüktür. Varolabilecek en karmaşık kara delikler ise kütleye ek olarak iki özellik tarafından belirlenirler: açısal momentum ve elektrik yükü. Bu büyüklükler, kara deliğin çevresinde dönen parçacıkların yörüngelerinin incelenmesi yoluyla ölçülebilir. Kimyasal yapının ise konuyla hiç ilgisi yoktur. Kara deliği oluşturmak üzere nasıl bir maddenin çöktüğü hiç önemli değildir, çünkü dışarıdan bakan bir gözlemci ayrıntılı kimyasal yapı konusundaki tüm bilgileri yitirir. Bu sonuç olmayan saç teoremiyle ifade edilir: "Kara deliklerin saçı yoktur." Daha doğrusu, üç büyüklük, yani kütle, açısal momentum ve elektrik yükü, kara deliğin tam bir tanımını verir.

Kara deliklerin bazı egzotik ve ilginç özellikleri vardır. Dönen bir disk üzerinde bir topu zıplatmaya benzer bir yöntemle dönen bir kara delikten enerji elde etmek mümkündür. Bir kara deliğin merkezi uzayzamanda bir tekil noktadır. Genel görelilik teorisine göre, kurt deliği adı verilen böyle noktalardan başka uzayzamanlara köprüler olması olasılığı vardır. Genel görelilik teorisinin kara deliklerin ebedi (sonsuz) olduğunu söylemesine karşın (bir kez yakalanırsanız, sonsuza kadar kurtulamazsınız), kuantum kütle çekimi teorisi mini kara delikler için fantezi bir kader öngörmektedir: yeterince küçük kütleli ise bir kara delik buharlaşabilir. Daha önce bir kara deliğin sınırında uzayzamandan enerjinin etkili olarak serbest bırakılacağını ve hızlı parçacıklar biçiminde nasıl dışarı verileceğini görmüştük. Kuantum teorisine göre parçacık çiftleri çok kısa bir süre için boşluktan bile yaratılabilir. Böyle bir çift yaratıldığında kara deliğin uyguladığı kütle çekim kuvveti bu çifti birbirinden ayırabilir. Parçacıklardan biri kara delik tarafından yutulur, diğeri ise kaçar ve böylece enerji serbest kalır.

Bu nedenle büyük patlama sırasında yaratılan madde proton ve elektron gibi bildiğimiz biçimlere ek olarak minik kara delikler biçiminde de ortaya çıkmış olabilir. Kütlesi küçük bir dağ kadar (10^{15} gram) olan bir kara delik 10 milyar yılda, daha küçük kütleli kara delikler ise çok daha kısa sürede buharlaşırlar. Bu küçük kara delikler şimdiye kadar buharlaşmış olabilirler ama evrenin ilk dönemlerinden miras olarak her biri bir dağ kütlesinde ama bir proton boyutlarında olan çok sayıda minik kara delik kalmış olabilir. Eğer bir mini-kara delik keşfedilecek olursa, mutlaka büyük patlamadan kalmış olacaktır, çünkü yıldızlar 3 $M_{\odot}$ 'nden daha küçük kütleli kara delik üretemezler.

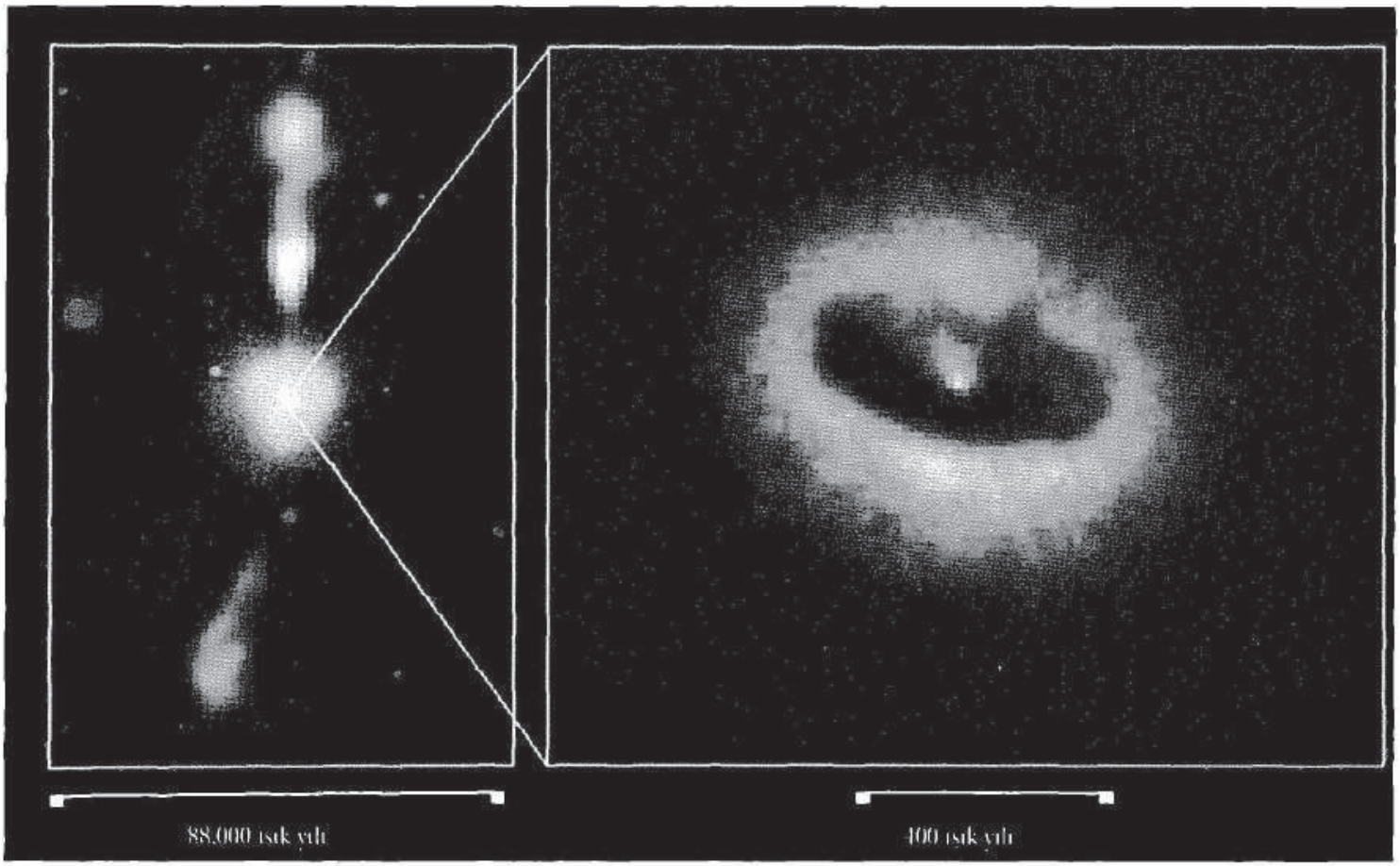
Kara Deliklerin Gözlenmesi

Şu anda mini kara delikler tümüyle buharlaştığında, milisaniyeden daha kısa süreli parçacık ve foton patlamaları yapabilirler. Gamma-ışın patlamaları saptanmıştır. Kaynakları bilinmemekle birlikte bunların evrenin ilk dönemlerinde yaratılmış olan mini kara deliklerin ölüm çığlıkları olması olasılığı vardır.

Her ne kadar yıldızların ölümü sonucunda ortaya çıkan kara delikler görünmez ise de, eğer bir başka yıldızla bir çift yıldız sistemi oluşturmakta ise etkileri farkedilebilir, çünkü bu durumda şiddetli x-ışınları yayarlar. Eğer kara delik eş yıldızına yeterince yakınsa, evrimi sonucunda kırmızı dev haline gelen eş yıldızın atmosferindeki gazların bir bölümü kara delik tarafından çekilebilir. Bu gazlar önce kara deliğin çevresinde sarmal hareketler sonucunda bir disk oluştururlar, sonra da kara deliğin yüzeyine düşerler. Gaz düşerken çok ısınır ve x-ışınları yayar.

En çok bilinen kara delik adayı, HDE 226868 adlı mavi dev bir yıldızın çevresinde yörüngede dolanan, görünmez bir x-ışınları kaynağı olan Cygnus X-1'dir (Kuğu). Yörünge periyodu 5,6 gün olup görünmeyen bileşenin kütlesi $3 M_{\odot}$'nin üzerindedir. Cygnus X-1'in x-ışın frekanslarındaki parlaklığı optik frekanslardaki parlaklığının beş katıdır, yani Cygnus X-1 temel olarak bir x-ışın üreticisidir. Görünmeyen cismin x-ışınlarındaki ışıma gücü yaklaşık 5000 $L_{\odot}$, mavi dev eş yıldızın optik ışıma gücü ise 1000 $L_{\odot}$ kadardır. Dahası, x-ışını yayını her birkaç milisaniyede bir değişim göstermektedir. Bu, tam olarak bir kara delik çevresinde bulunan kütle aktarım diskinden beklenen bir davranış biçimidir. Kütle aktarım diskinden parçalar koparak kara deliğin üzerine düşerken x-ışınları üretilmektedir. Hızlı değişim ise (yaklaşık 10^{-4} saniye), madde topaklarının Schwarzschild yarıçapına ulaşmalarının çok kısa zaman almasıyla açıklanabilir. Kara deliklerin bulunduğuna inanılan birçok büyük kütleli x-ışın çift yıldız sistemi bulunmuştur.

Bazı galaksilerin merkezlerinden yayılan yüksek enerjili olayların güç kaynaklarının teorik olarak kara delikler olduğu tahmin ediliyor. Adlarını astronom Carl Seyfert'ten alan Seyfert Galaksileri, tüm sarmal galaksilerin yüzde birini oluşturmakta olup etkin galaksi çekirdeği adı verilen son derece parlak bir galaksi çekirdeğine sahiptirler. Etkin çekirdeklerin, başka tüm özellikleri normal olan galaksilerin yalnızca yüzde birinde görülmesi, etkin fazın çok kısa, belki de evrenin bugünkü yaşının yalnızca yüzde biri kadar olması gerektiğini akla getiriyor. Çoğu galaksi geçmişte etkin bir aşamadan geç-



NGC 4261, yoğun radyo salma fışkırmaları kaynağı olduğu bilinen etkin bir galaksidir (solda). Hubble Uzay Teleskobu ile alınan galaksi çekirdeğinin yüksek çözünürlüklü görüntüsü, büyük kütleli bir kara delik olduğu düşünülen enerji kaynağı çevresindeki kütle aktarım diskini açıkça gösteriyor

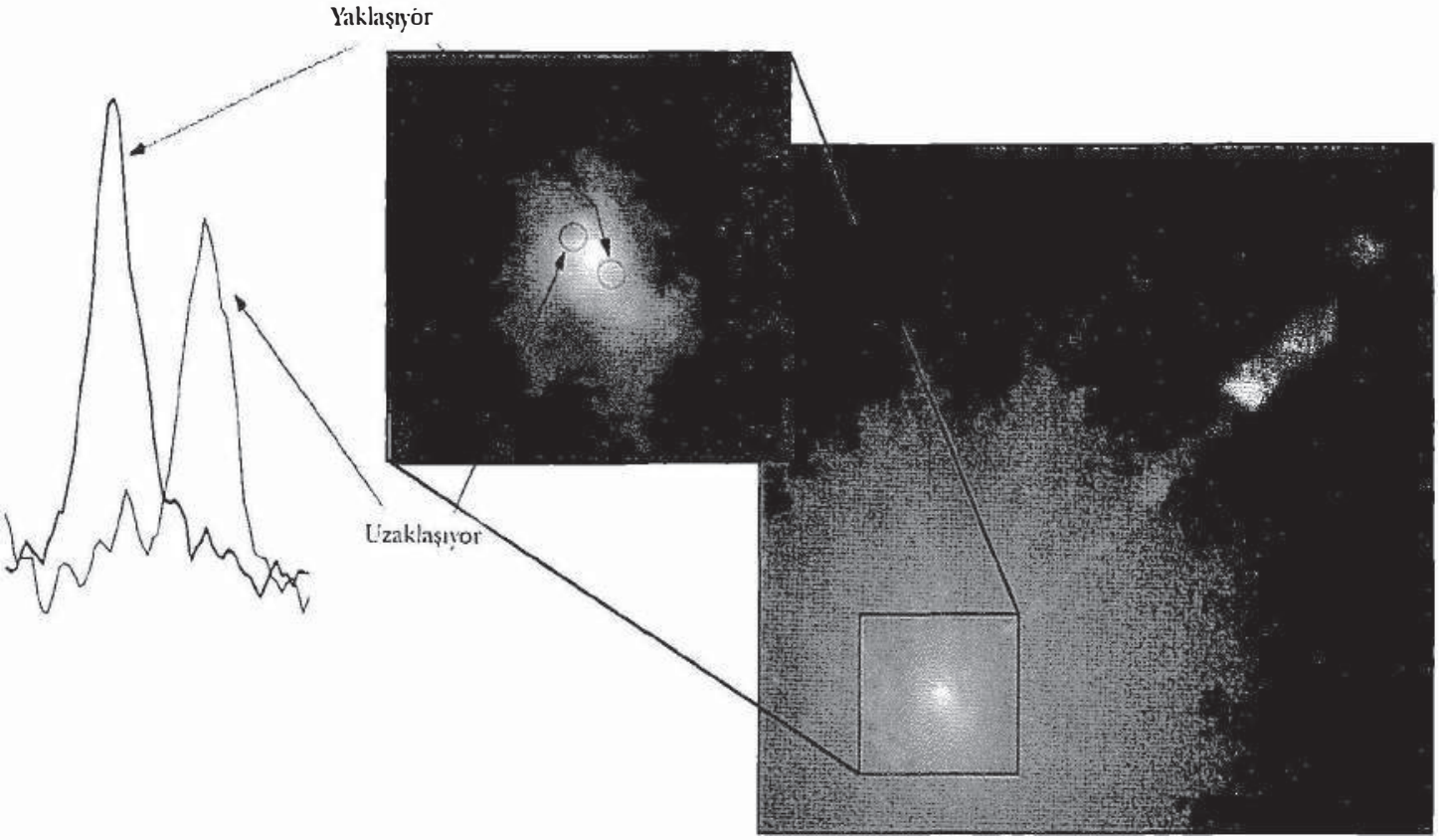
miş oldukları halde çekirdeklerinde büyük kütleli ama etkisiz kara delikler saklıyor olabilirler. Merkezdeki canavar artık beslenmediğinde, çevresindeki kütle aktarım diski de yavaş yavaş kaybolur ve süper kütleli bir kara delik bile galaksideki varlığına ilişkin hemen hiç iz bırakmaz.

Bazı durumlarda etkin galaksi çekirdeğinin tayf analizleri, bir uçtan diğerine bir ışık yılından daha küçük olan, galaksi boyutlarıyla karşılaştırıldığında göreceli olarak küçük bir bölgede ışık hızının otuzda birine varan yüksek kütle akış hızları olduğunu göstermektedir. Bölgenin çapını, buradan kaynaklanan ışığın değişiminden anlıyoruz: eğer bir cismin ışıma gücü, diyelim bir yıllık bir zaman ölçeğinde değişim gösteriyorsa, bu ışığın kaynaklandığı bölgenin boyutları bir ışık yılından daha büyük olamaz. Galaksilerin merkezinde bulunduğu düşünülen büyük kütleli kara delikler, iç bölgelerde ve evrimlerinin ileri aşamalarında bulunan yıldızların saçtığı gazlarla beslenmektedir. Eğer kara

deliğe doğru düşen madde yarıçap yönünde bir yörünge izliyorsa, Schwarzschild yarıçapına varmadan, hemen hemen ışık hızına kadar ivmelenir. Galaksi dönmekte olduğu için gazın bir açısal momentumu vardır, bu nedenle de düşmekte olan gaz çoğu zaman boyutları yıldızların evrimi sonucunda oluşan kara deliklerin çevresinde bulunan disklerden çok daha büyük bir kütle aktarım diski oluşturur. Madde de olay ufkunun arkasına geçip kaybolmadan önce çok yüksek sıcaklıklara kadar ısınır. Eğer düşmekte olan madde stoğu yeterliyse, hızla hareket eden gaz atomları arasındaki çarpışmalar sonucunda çok büyük miktarlarda enerji açığa çıkar. Galaksi çekirdeklerinde birbirlerine çok yakın konumlarda bulunan yıldızların çarpışarak parçalanmaları sonucunda ortaya çıkan enkazlar, kara delik için iyi bir yakıt kaynağı olurlar.

Evrende ışıma güçleri en yüksek olan cisimler, kuasarlar ya da başka bir deyişle yarıyıldızsal radyo kaynaklarıdır. Bu yıldıza benzer cisimlerin, yakında bulunan birkaç örnek dışında, çekirdeklerinin çevrelerindeki galaksiyi gölgede bırakacak kadar parlak olduğuna inanılıyor. Kuasarlar genelde kuvvetli radyo, kızılötesi, x-ışını ve gamma ışını kaynaklarıdır; x-ışınlarında yayılan enerji diğer hepsinden büyüktür. Kuasarların enerji kaynağı olduklarına inanılan süper kütleli kara deliklere yakıt olarak her yıl onlarca Güneş kütlesi gereklidir. Böylesine büyük bir gaz stoğunun galaksinin ilk dönemlerinde, birçok yıldız daha oluşmadan önce bulunma olasılığı vardır. Aslında yakındaki kuasarların sayısı azdır. Bu sayı büyük kırmızıya kayma değerlerine doğru hızla artar. Çoğu kuasarın kırmızıya kayması 2 ile 3 arasındadır ki bu da zaman olarak büyük patlamadan günümüze kadar geçen zamanın yaklaşık üçte birlik bölümüne karşılık gelir. Bu dönemin aynı zamanda gördüğümüz galaksilerden çoğunun oluşma dönemi olması belki de raslantı değildir.

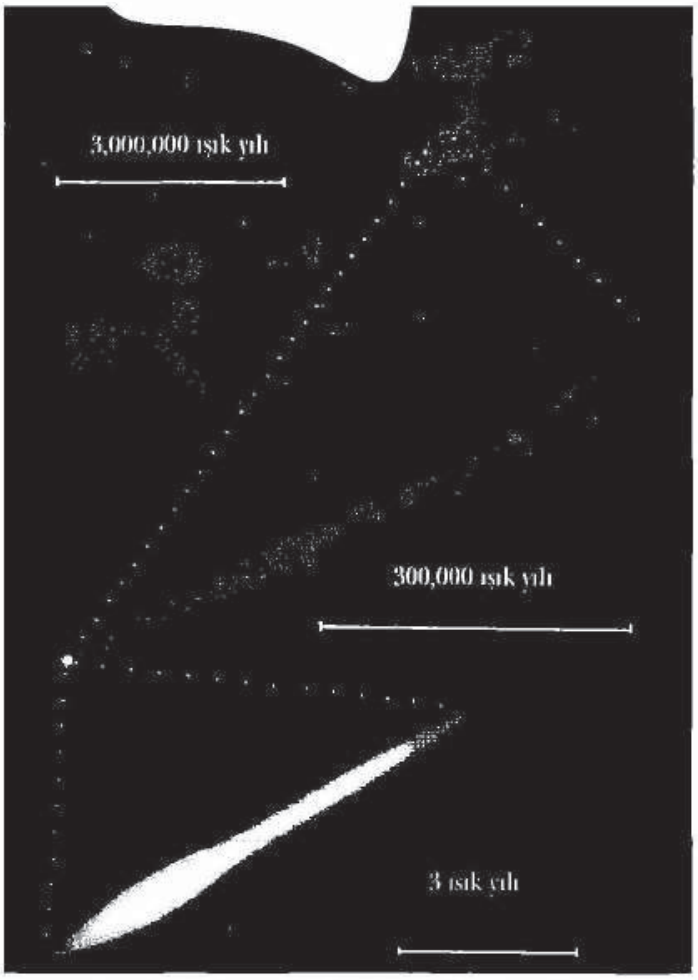
Bu nedenlerle süper kütleli kara delikleri aramak için en uygun yerler yakın galaksilerin çekirdekleridir. En iyi incelenmiş adaylar kendi galaksimiz, Andromeda ve yakındaki ultra-parlak elips biçimli bir galaksi olan Messier 87'dir. Astronomlar, bir galaksinin çekirdeğine yakın olan kütle çekimi alanlarını iki yolla incelerler. Galaksinin ışık profilinin ortasında, merkezde olağandışı bir kütle yığılması anlamına gelen bir tepe ararlar. Veya merkez çevresindeki birkaç parseklik bölgede gaz bulutlarının ve yıldızların hız dağılımlarına bakarlar. Eğer ortada büyük kütleli bir kara delik varsa çok yoğun olan kütle çekim alanı bu hızların çok yüksek olmasına neden olacaktır. Kendi galaksimizde merkez bölgesi, bakış doğrultusu boyunca birikmiş olan yıldızlararası toz nedeniyle iyi görülememesine karşın, burada bir kara delik bulunduğuna ilişkin bazı ipuçla-



Hubble Uzay Teleskobu, elips biçimli dev bir radyo galaksisi olan M 87'nin çekirdeğinde dönmekte olan sıcak bir gaz diskinin fotoğrafını çekti. Diskten kaynaklanan ışığın kırmızıya kayma ve maviye kayma tayfı, diskin yaklaşık 550 km/sn hızla döndüğünü gösteriyor. Bu yüksek hızın olası nedeni, yaklaşık 1 milyar Güneş kütlesine sahip olan süper kütleli kara delikten kaynaklanan basınçtır.

rı vardır. Kütle tahminleri 10 000 - 1 milyon $M_{\odot}$ arasında değişmektedir. Samanyolu için durumun biraz kuşkulu olmasına karşın, Andromeda'nın merkezinde 30 milyon Güneş kütleli, M87'nin merkezinde ise 100 milyon- 1milyar Güneş kütleli kara delikler bulunduğu yolunda kuvvetli kanıtlar elde edilmiştir. Bununla birlikte, süperkütleli kara deliklerin varlığı konusunda gerçekten ikna edici kanıtların elde edilebilmesi için, en kuvvetli adayların daha yüksek çözünürlüklü gözlemlerine gereksinim vardır.

Etkin galaksi çekirdeklerinin güç kaynaklarının kara delikler olması durumu güçlü bir olasılık olmakla birlikte büyük ölçüde ayrıntıdır. Gözlenen olayların tümü, başka hiçbir mekanizma tarafından bu kadar güzel açıklanamıyor. Merkezdeki etkinliğin en yakın görüntüsü, astronomların merkezdeki çekirdekten çıktığını gördükleri radyo yayını fışkırmalarıdır. Fışkırmaların kaynağını en kolay biçimde merkezde süperkütleli bir kara deliğin varlığını varsayarak açıklayabiliriz. Kütle aktarım diski merkezdeki kaynaktan yayılan enerjinin diske dik ve dar ışınlar biçiminde yönlendirilmesi için doğal bir mekanizma sağlar.

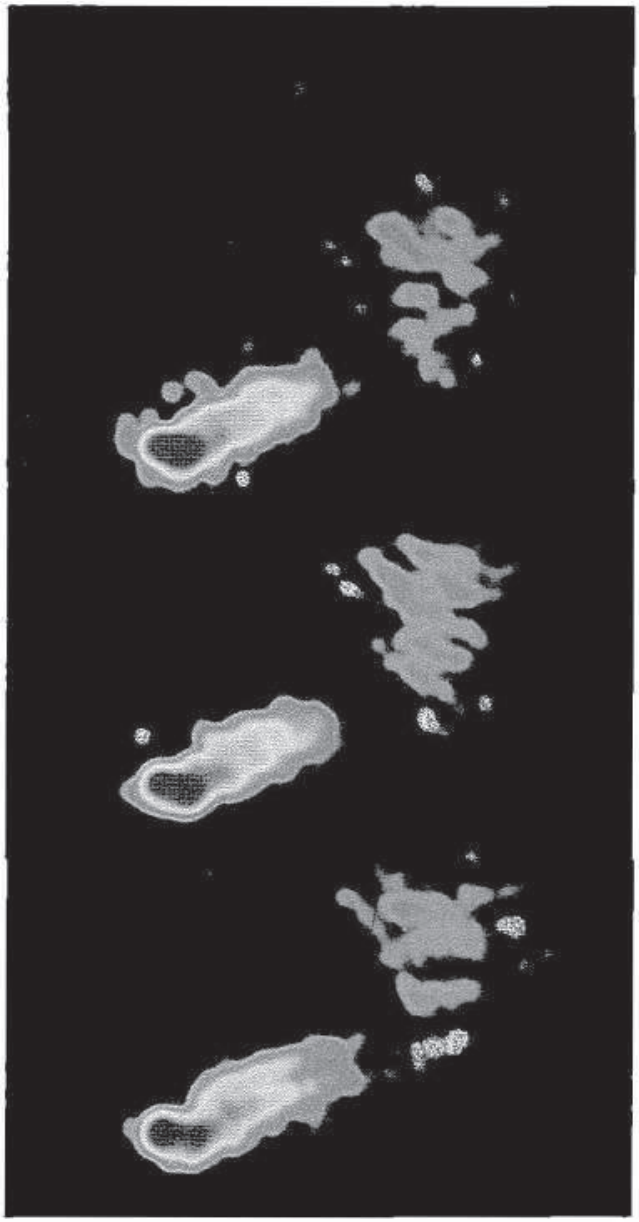


Gittikçe daha yüksek çözünürlükle gözlenen bir galaksi 3 milyon ışık yılı ölçeğinde yaygın radyosalmalarından oluşan dev yumrular gözleniyor. Radyo yumruları bu ölçeğin onda birinin altında ortaya çıkan radyo fışkırmaları tarafından besleniyor. Merkezi çekirdeğin yakın çekimi 3 ışık yılı ölçeğinde, daha büyük fışkırma ve yumruları besleyen merkezi bir fışkırmayı ortaya çıkarıyor. Bu fışkırmaların süperkütleli bir kara delikten kaynaklandığı düşünülüyor.

Fışkırmaları daha yakından incelemek için astronomlar, biraraya geldiklerinde tek bir teleskoptan çok daha yüksek çözümleme gücüne sahip olan radyo teleskop dizileri oluşturmaya başladılar. Aralarındaki uzaklık yüzlerce kilometre olan, hatta farklı kıtalarda bulunan birçok radyo teleskop eş zamanlı gözlem yaptığında, çapı antenler arasındaki en büyük uzaklık olan dev bir radyo teleskop etkisi ortaya çıkar. Bu yolla radyo dalgaboylarında, optikte Hubble Uzay Teleskobu ile elde edilenden bile bin kattan daha yüksek çözünürlük elde edilebilir. Birbirinden çok uzaklarda yer alan bu radyo teleskop dizileri, etkin galaksi çekirdeklerinden ışık hızına yakın hızlarla fırlatılan ve radyo dalgaları yayan madde düğümlerini bile ortaya çıkarabiliyor. Süperkütleli bir kara delikten başka bir şeyin tüm bu enerjiyi sağladığını düşünebilmek oldukça güçtür.

Bununla birlikte süperkütleli hatta büyük kütleli kara deliklerin haledeki karanlık madde olması pek mümkün değildir. Eğer kara delikler hale çevresinde dönüyor olsalardı, sık sık küresel yıldız kümeleriyle etkileşecekler ve uyguladıkları yüksek kütle çekimi nedeniyle galaksinin yaşamı boyunca pek çok küresel kümenin dağılmasına neden olacaklardı. Halede yer alacak bir kara deliğin en büyük kütlesinin 1000 $M_{\odot}$ olduğu bulunabilir. Kara delikler olmasa bile, haledeki karanlık madde büyük kütleli ve süperkütleli yıldız kalıntıları bulundurduğundan, halelerin baryon kökenli olmaları olasılığı hâlâ var gibi gözüküyor.

Karanlık madde problemini genel olarak çözebilecek sayıda kara delik bulunup bulunmadığı bilinmiyor. Yıldız kütlelerine sahip olan kara delikler, aynı zamanda ağır ele-



3 C 345 Kuasarı'nın üç değişik tarihte, 6 cm dalgaboyundaki gözlemleri: Nisan 1989, Mart 1990 ve Eylül 1991. Görüntülerde solda, kuasarın çekirdeğinde bir fışkırma gözleniyor. Fışkırmadaki iki kırmızı küre görünüşe göre ışık hızının birkaç katı hızlarla birbirlerine yaklaşıp uzaklaşıyorlar. Gerçekte, bakış doğrultusuyla küçük bir açı yapmaları nedeniyle fışkırmaların ışık hızına yakın hızları, bir yanılsama nedeniyle ışık hızını aşıyormuş gibi görünmektedir.

mentlerin de kaynağı olduğunu bildiğimiz süpernova patlamaları sonucunda ortaya çıkarlar. Eğer karanlık madde kara delikleri de kapsıyorsa, galaksinin geçmişinde, günümüzde gözlediğimiz ağır element bolluğunun çok üzerinde bir bolluk verecek kadar çok sayıda süpernova patlamasının yer almış olması gerekir. Sonuçta halede, galaksinin ilk dönemlerinde oluşmuş metalce fakir yıldızlar var. Bunlar yaşamlarını daha önce tamamlamış kısa ömürlü yıldızlardan artakalanları içlerine alacak kadar da eski yıldızlar değildir.

Daha büyük bir olasılık, her biri binlerce Güneş kütleli kara deliklerin varlığıdır. Bunlar da çok büyük kütleli yıldızların ölümü sonucunda ortaya çıkarlar ama kara delikler çok büyük kütle olduklarından kütle çekim alanları öylesine güçlüdür ki herhangi bir patlama oluşmadan önce büyük kütleli yıldızların ağır kimyasal elementlerce zenginleştirdiği gazların tümünü emerler. Bunun ilginç bir sonucu, bu cisimlerin evrenin başlangıç dönemlerinde oluşmalarından kalan parlak bir kozmik havai fişek gösterisidir. Her ne kadar çok büyük uzaklıklarından dolayı tek tek cisimleri seçemesek de toplam ışınım, kızılötesi bölgesinde görülen oldukça büyük miktarlarda kırmızıya kaymış, bulanık bir galaksi-dışı fon ışınımı olarak ortaya çıkar. Astronomlar henüz böyle bulanık fon ışınımını deneysel olarak yeterince araştırmadıklarından, bu hipotez henüz bir sınavdan geçmemiştir.

Ama gördüğümüz gibi kara delikler, baryon kökenli karanlık madde için tek aday olmaktan çok uzaktırlar.

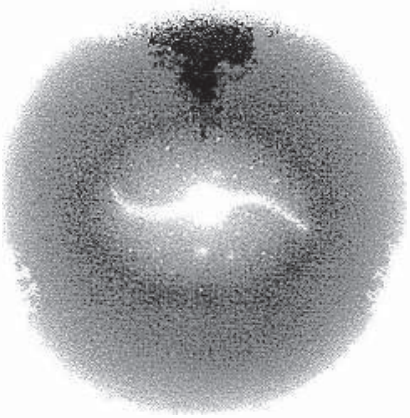
Haleler Baryon Kökenli mi?

Eğer gerçekten çok büyük miktarlarda varsa, baryon kökenli karanlık maddeyi aramak için en uygun yerler galaksilerin karanlık haleleridir. Bunun nedeni de ister yıldız enkazlarından, isterse gezegen benzeri cisimlerden oluşmuş olsun, karanlık baryon kökenli maddenin gözlenen baryon kökenli madde yakınlarında bulunmasını beklememizdir. Bu yüzden haleler, galaksilerarası uzayın derinliklerinden çok daha uygun yerlerdir. Galaksi kümelerindeki karanlık madde bile mantıksal olarak baryon kökenli olmalıdır.

Bazı kışkırtıcı ipuçları galaksi halelerinin çoğunlukla baryon kökenli olduğunu ileri sürüyor. Karanlık hale maddesini bulmanın anahtarı, hale bölgesinde galaksinin dönme hızını ölçmektir. Görmüş olduğumuz gibi, ışıyan maddenin bulunduğu bölge dışında bu dönme hızı sabit olup, bu sabitlik galaksilerde büyük miktarlarda karanlık maddenin varlığının doğrudan kanıtıdır. Galaksi çevresinde dönmekte olan yıldız ve gaz bulutlarının dönme hızları arttıkça ve ölçümler gittikçe daha uzak bölgelere uzandıkça yıldızların yörüngelerinin kapalı olmasını sağlayabilecek karanlık madde miktarı artmaktadır. İlginç olan şudur ki dönme eğrisinin biçimi (galaksi merkezinden dışarı doğru dönme hızlarının dağılımı) ve en yüksek dönme hızı, hemen hemen tümüyle yıldızlardan oluşan diskteki madde miktarına bağlıymış gibi gözüküyor. Eğer haleler baryon kökenli madde yerine egzotik parçacıklardan oluşuyorsa, bu bir kozmik komplo olabilir.

Bazı karanlık halelerin biçimleri, bunların baryon kökenli maddeden yapılmış olduklarının bir göstergesidir. Her ne kadar karanlık halelerin biçimleri doğrudan gözlenemiyorsa da kimi zaman gözlenebilen yıldızların dağılımından halenin biçimini çıkarmak mümkün olmaktadır. Böyle bir durum, kutup halkalı galaksilerin incelenmesinde söz konusudur. Bu sistemler, iki galaksinin etkileşmesi sonucu büyük galaksinin küçük ekseni çevresinde yıldızlardan oluşan bir halkanın ortaya çıktığı sistemlerdir. Yıldızlardan oluşan halka nedeniyle galaksinin hem büyük ekseni hem de küçük ekseni çevresindeki yıldızların yörüngeleri incelenebilir, böylece de karanlık madde dağılımı anlaşılabilir. Galaksi haleleri genellikle iki yönden sıkıştırılmış, basık biçimlerde gözlenirler.

Basık karanlık halenin en sık görülen bir başka karakteristik imzası, çarpılmış bir disktir. Tıpkı rüzgârda dalgalanan bir bayrak gibi galaksi diski salınımlar sırasında çarpılmış olabilir. Disk ya yassılaşmış ya da uzamış bir hale içinde olmalıdır, aksi takdirde salınımlar çabucak sönümlenecektir. Her ne kadar biçimleri tam olarak belli değilse de



Çarpılmış bir galaksi diski düzleşmiş karanlık bir halenin çevrede yer aldığının bir habercisidir.

elips biçimli galaksiler de yassılaşmış olabilir. Bakış doğrultusuna izdüşüm nedeniyle uzamış galaksiler de yassılaşmış gibi görünebilir.

Eğer haleler baryon kökenli ise yassılaşmayı anlamak kolaydır. Gaz soğudukça ısı enerjisini kaybeder ama açısal momentumunu korur. Bu nedenle de dönmekte ve büzülmekte olan bir gaz bulutunun varabileceği en doğal nokta, iki yandan yassılaşmış bir küredir. Bunun tersine eğer baryon kökenli madde topaklanmaları diskin oluşumundan önce ortaya çıkmışsa tek yönden yassılaşmış küreler de mümkündür. Buysa tam olarak baryon kökenli olmayan maddenin halelerde birikme biçimidir. Bu konunun daha derinlemesine araştırılabilmesi için karanlık halelerin uzanımları ve biçimlerinin daha iyi haritalarının çıkarılması gerekir.

MACHO'lar: Astrofiziksel Karanlık Madde

Halelerde yer alan olası astrofiziksel cisimler arasında yıldız enkazları, nötron yıldızları, beyaz cüce gibi sönük yıldızlar, hatta kara delikler ve küçük kütlelerinden dolayı hiç bir zaman yıldız olmayı başaramamış cisimler bulunur. Bu cisimler hemen hemen ya da tümüyle görünmez olduklarından karanlık madde için mükemmel adaylardır. Dahası, varlıkları kesin olarak bilindiğinden, MACHO'lar haledeki karanlık madde adayı olarak WIMP'lerden daha uygundurlar.

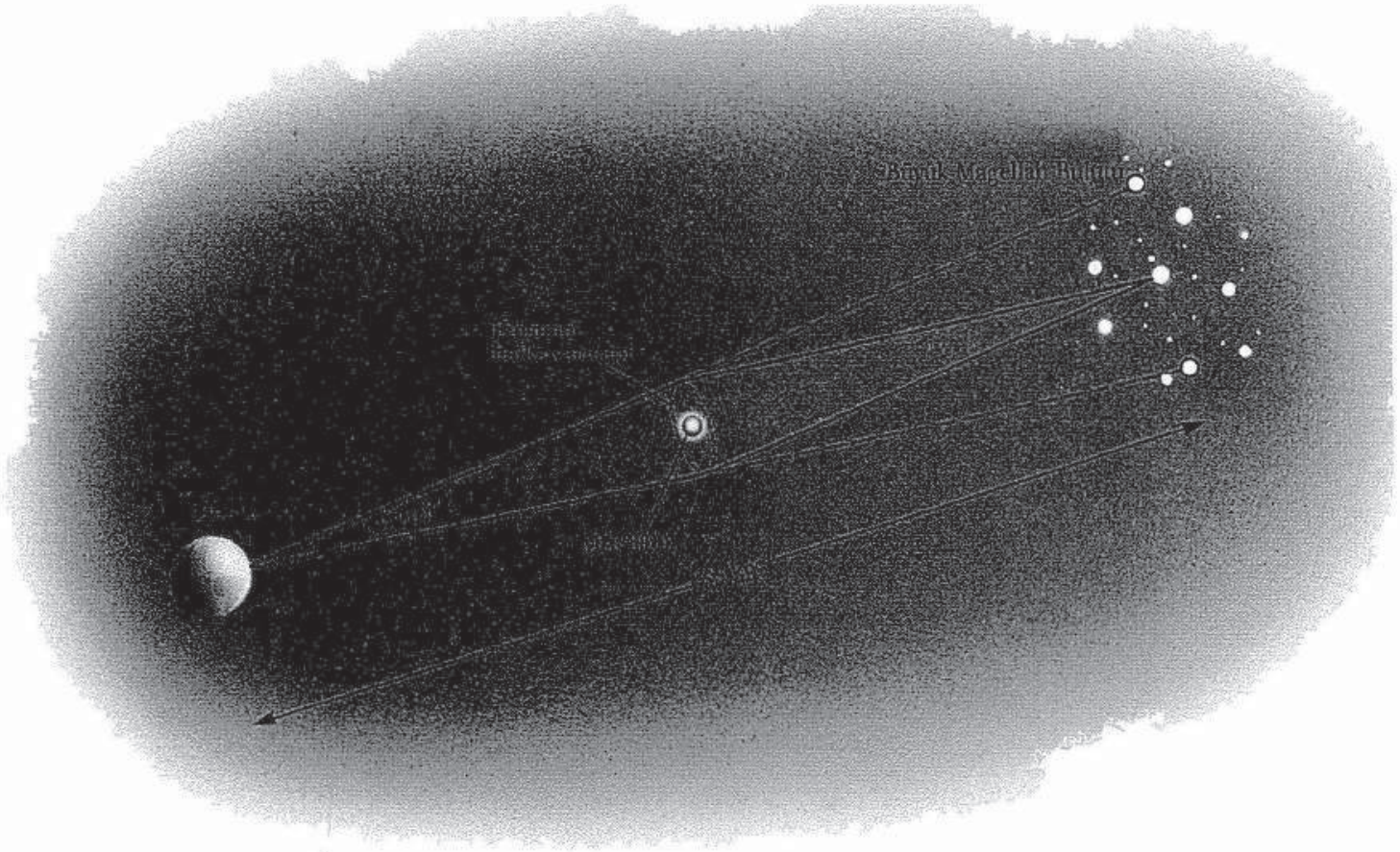
1993 yılında yapılan iki deneyde MACHO'ların varlığı konusunda güçlü kanıtlar elde edilmiştir. Bu deneylerde kullanılan yöntem, kütleçekimsel mikro mercek etkisidir. Eğer bir MACHO, Dünya ile uzak bir yıldızı birleştiren doğrultuya çok yaklaşırsa, başka türlü görünmez olan MACHO'nun kütle çekimi, yıldızın ışığını büken bir mercek gibi davranır. Yıldızın, birbirinden bir açı saniyesinin binde biri kadar uzaklıkta olan birçok görüntüsü oluşur ki bunu yeryüzünden gözlemek hemen hemen olanaksızdır. Bununla birlikte, Samanyolu halesi çevresindeki yörüngesindeki hareketi sırasında MACHO bu doğrultuyu keserken arkadaki yıldız geçici olarak parlaklaşır.

Buradaki düşünce arka plandaki yıldızlardaki parlaklaşma etkilerini ölçmektir. Burada iki temel güçlük söz konusudur. Birincisi, mikro mercek etkisine oldukça ender rastlanır. Herhangi bir anda arka plandaki her iki milyon yıldızdan yalnızca birinde mikro mercek etkisi gözlenir. İkincisi, yıldızların pek çoğu yapısal olarak değişken olduklarından, zaman zaman geçici parlaklık değişmeleri gösterirler. Bereket versin mikro mercek olayının değişen yıldızlardan farklı ve kendine has özellikleri vardır. Bunlardan bazıları olayın zamanda simetrik, dalgaboyuna bağlı olması ve bir yıldız için yalnızca bir kez ortaya çıkmasıdır.

Mikro mercek olayının düşük gözlenme olasılığını aşabilmek için Büyük Magellan Bulutu'ndaki birkaç milyon yıldızı gözlemek üzere deneyler tasarlandı. Her yıldız bir yıl boyunca yüzlerce kez gözlendi. Kırmızı ve mavi filtre kullanılarak alınan verilerin ön incelenmesi sırasında birçok karakteristik mikro mercek olayına rastlandı. Olay süreleri 30 ile 50 gün arasındaydı.

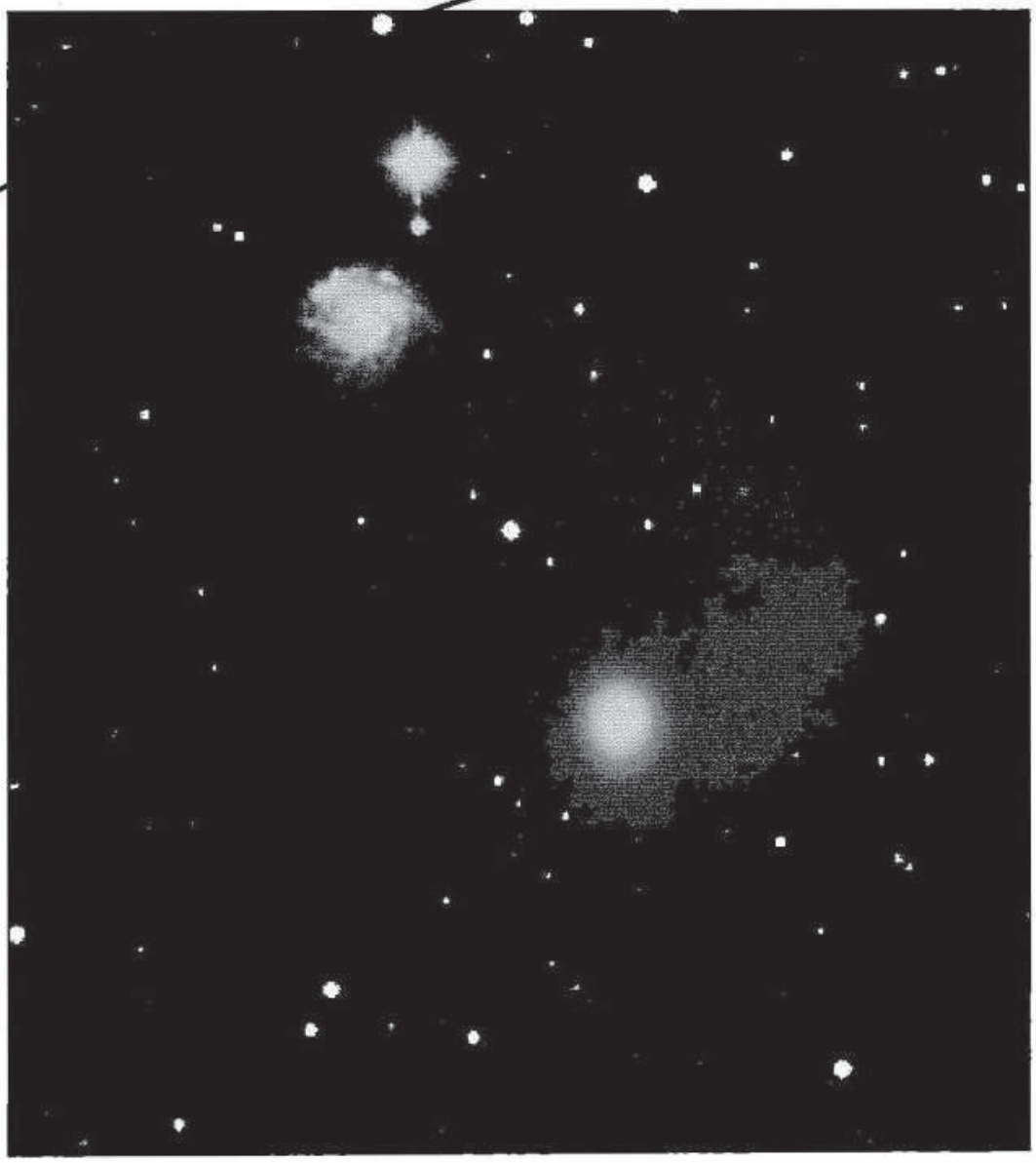
Her ne kadar bilinmeyen uzaklık ve MACHO'nun bakış doğrultusuna yaklaşırken sahip olduğu hız gibi konularda belirsizlikler varsa da mikro mercek olayının süresi MACHO'nun kütlesinin bir ölçüsüdür. Olayın süresi, MACHO'nun Einstein halka yarıçapı adı verilen kütleçekimsel merceğin etkili boyutunu katetmesi için gereken zamandır. Einstein halkasının yarıçapı, yaklaşık olarak MACHO'nun Schwarzschild yarıçapı ile uzaklığının geometrik ortalamasıdır. Büyük Magellan Bulutu'nun yarı uzaklığında olan bir MACHO için bu uzaklık 55 kiloparseklik değerin yarısıdır. Einstein halka yarıçapı da yaklaşık olarak Dünya-Güneş uzaklığı kadar, yani 1 astronomi birimine eşittir. Mercek etkisi yaratabilmek için MACHO'ların mercekten daha küçük boyutlu olmaları gerekir, yani MACHO'ların boyutları 1 astronomi birimi ya da kabaca bir kırmızı devin yarıçapı kadar olmalıdır. Gözlenen olaylar,yüzde bir kaçlık yanılma payı ile karanlık maddenin MACHO modelinin öngördüğü kadardır. Olay süreleri tipik kütle olarak 0.1 $M_{\odot}$ değerini vermekle birlikte bunun üç katı kadar bir belirsizlik de söz konusudur.

Mikro mercek çalışmaları sürüyor ve eğer doğruysa, MACHO yorumları belli sonuçları öngörüyor. Daha kısa süreli çok daha fazla sayıda olay meydana gelmeli ve daha zayıf olaylar da gözlenmelidir. Mikro mercek olayı gösteren yıldızlar rasgele seçilmektedir, bu nedenle de yapısal olarak değişken olan özel yıldızlar tercihli olarak gözlenip astronomların kafalarının karışmasına yol açmamış olmalıdır. Daha fazla veri toplandıkça bunların tümü açıklığa kavuşacaktır. Şimdilik, tüm söyleyebileceğimiz, bu sonuçların



Büyük Magellan Bulutu'nda bulunan bir yıldızın ışığının bir karanlık madde topağı (MACHO) tarafından mercek etkisine uğratılması. Işık, Einstein halka yarıçapından geçerken bükülür ve parlak cismin çift görüntüsünü verir. Görüntü parçalanması gözlenemeyecek kadar küçük olmakla birlikte, arkadaki yıldızın ışığının artması etkisi saptanmıştır.

karanlık maddenin saptanmasına yönelik çok kuvvetli ipuçları olduğudur. Eğer bilmediğimiz, kötü huylu, ender görülen bir değişen yıldız türü söz konusu değilse, MACHO'ların olasılıkla karanlık halenin oldukça önemli, en azından yüzde 10'luk bir bölümünü oluşturduğunu söyleyebiliriz. Halede baryon kökenli karanlık madde var olsa bile, hâlâ bunun yüzde kaçının baryon kökenli olmayan WIMP'ler biçiminde olduğu pek açık değildir.



Bir galaksi grubundaki sıcak gaz. 50 megaparsek uzaklığındaki MGC 2300 Galaksi Grubunun optik fotoğrafı üzerine bindirilen x-ışını gaz kütlesini açıkça gösteriyor.

Galaksilerarası Madde

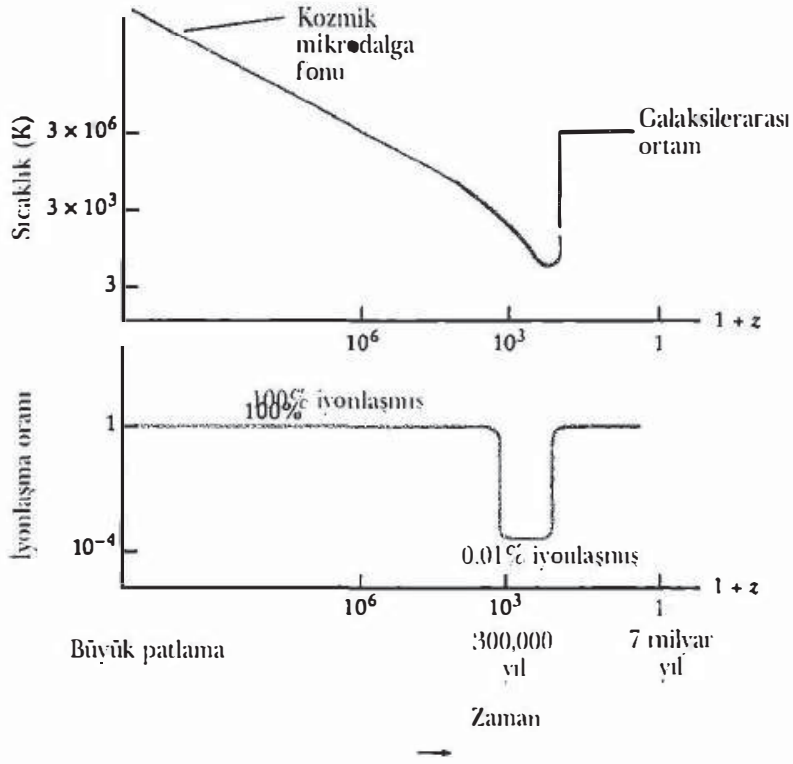
Evrenin evrimini anlatan kozmik destanımızın bir sonraki adımı galaksilerin oluşumudur. Bu adım bizi galaksilerin parlak bölgelerini oluşturan hammadde olan yıldızlararası dağınık gaz bulutlarının yaratılmasına götürür. Galaksilerarası gazın ikili bir rolü vardır: yalnızca galaksilerin atası olmakla kalmaz, aynı zamanda karanlık maddeye önemli bir katkıda da bulunur.

Yeniden Birleşme ve Çiftlerin Ayrılması

İlk birkaç yüz bin yılda evrendeki madde büyük oranda iyonlaşmış hidrojen atomları, protonlar, elektronlar ve yüzde on oranında helyum karışımından oluşmaktaydı. Çok sıcak ortamlarda yüksek enerjili fotonlar, çarpıştıkları elektronları protonlardan uzaklaştırırlar ve bu parçacıkların birleşerek kararlı bir hidrojen atomu oluşturmasına engel olurlar. Bu nedenle hidrojen gazının doğal biçimi plazma ya da iyonlardan meydana gelir. İyonlaştırıcı fotonların sayısı öylesine yüksektir ki bir atom oluşur oluşmaz yeniden iyonlaşır. Bununla birlikte evren genişleyip soğudukça fotonların ortalama enerjisi azaldı, sonunda ise hidrojen atomları varlıklarını sürdürebilir hale geldiler. Bu, hidrojen gazının 'yeniden birleşme' dönemidir (Sanırım 'birleşme' daha uygun bir terim olurdu). O zamandan beri evren hemen hemen tümüyle atomlardan oluşmaktadır.

Evren plazma halinden atomsal hale geçtiğinde boyutları şimdikinin binde biri kadardı. O zamanlar kozmik kara cisim ışınımının sıcaklığı, bugünkü 2.73 derece Kelvin olarak ölçülen mikrodalga fonu sıcaklığının bin katıydı. Yeniden birleşme döneminden önce, serbest elektronlardan saçılan ışınım maddeyle yakın etkileşimde kaldığından ışınım sıcaklığı gaz sıcaklığına eşitti. Oysa madde atomsal bir yapıya dönüştüğünde, bütün elektronlar atomlara bağlandılar. O andan itibaren ışınım serbestçe hareket etmeye başladı ve günümüze kadar da saçılmadan, doğrusal çizgiler üzerinde yayılmasını sürdürdü. Bu durumda madde ve ışınımın birbirinden ayrıldığını söylüyoruz. Artık madde ve ışınım sıcaklıkları hiçbir zaman tam olarak birbirlerine eşit olmayacaktır.

Işınım günümüzde eninde sonunda 2.73 dereceye kadar soğumuştur ama maddenin tümüyle farklı bir tarihsel gelişim geçirdiğini düşünüyoruz. Işınıma, yayılma hızı saatte 170 000 kilometre ya da ışık hızının yüzde 60'ı olduğu için görelilik etkilerinin gözlendiği, genişleyen bir foton gazı olarak bakabiliriz. Böyle bir gaz hidrojen atomlarından



Sürekli olarak soğuyan galaksilerarası ortam, son saçılma döneminden sonra plazma ya da iyonlaşmış bir duruma geçecek ölçüde soğumuş olur. Eğer hâlâ varsa yeniden ısıtılmış ve iyonlaştırılmış olmalıdır.

oluşan ve görelilik etkilerinin gözlenmediği bir gaza oranla daha yavaş soğur. Görelilik etkilerinin gözlenmediği gazdaki atomların hızı, ortalama olarak ses hızı kadar olup yeniden birleşmeden sonra saniyede birkaç kilometre civarındadır. Yeniden birleşme ve günümüz arasında ışınım sıcaklığı 1000 kat azalmışken madde sıcaklığı çok daha fazla, hemen hemen 1 milyon kat azalmıştır. Sonuç olarak galaksilerarası gazın günümüzdeki sıcaklığı mutlak sıfırın yalnızca binde bir derece kadar üzerindedir.

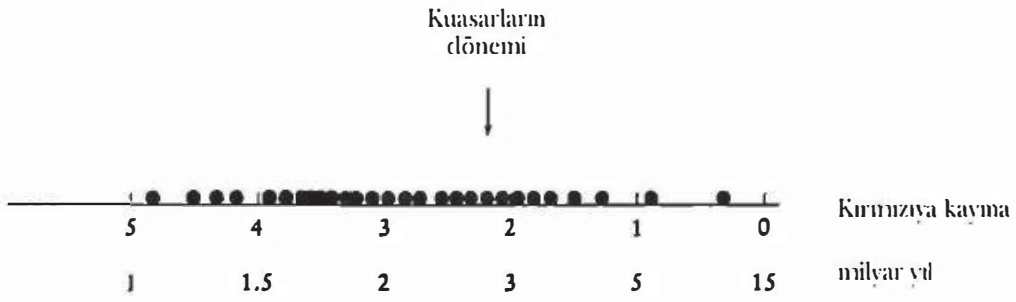
Acaba bizim galaksimizin çevresinde de böyle soğuk bir galaksilerarası gaz var mı? Eğer yetersiz miktarlarda varsa, böyle bir galaksilerarası ortamın katkısı, varlığı ilk dönemlerdeki helyum, döteryum ve lityumun nükleer sentezleri tarafından öngörülen baryon kökenli karanlık maddenin tamamını karşılayacak ölçüde olabilir. Hatta bu katkı, evrenin kapalı olmasını sağlayacak ölçüde büyük olabilir. Bununla birlikte halen varlığını sürdürmekte olan galaksilerarası gazın yeniden ısınmış olma olasılığı üzerinde şiddetli tartışmalar vardır. Her ne kadar yıldızlararası gaz, az miktarda optik ışık vermesi anlamında 'karanlık' ise de varlığı diğer dalgaboylarındaki salmalardan ve uzak kuasarlardan gelen ışığın soğurulmasından anlaşılabilir.

Galaksilerarası Ortamın Araştırılması

Evrenin ilk dönemlerinde yaratılan hidrojen gazının çoğu yoğunlaşarak yıldızlara dönüşmüş ve galaksilerin oluşumu sırasında kullanılmıştır. Galaksiler ortaya çıktıktan sonra ne kadar galaksilerarası madde kaldığını hesaplamak mümkün değildir. Bunun yerine verilen bir bakış doğrultusu için gözleme başvururuz. Uzaya yayılmış durumda bulunan ve soğuk, atom yapısında hidrojenden oluşan galaksilerarası bir ortamın gözlenebilmesi, atom yapısındaki hidrojen gazı radyo dalgalarında çok özel bir dalgaboyu olan 21 cm'de salma ve soğurma yaptığından mümkün olmaktadır. Bununla birlikte, tayfsal çalışmalar galaksilerarası uzayda fazla hidrojen atomu olmadığını gösteriyor. Dağınık gazın hiçbir noktada evrenin kapalı olması için gereken, santimetreküpte 10^{-5} atomluk yoğunlukta olmadığı gözlendi. Daha ciddi bir sınırlama ise tayfın bir başka bölgesinden, uzak kuasarların gözlenen ışıklarından geldi.

Kuasarların ışığı bize ulaşıncaya kadar galaksilerarası uzayda milyarlarca ışık yılı yol alır. Eğer bu ışığın yolu üzerinde yer alan hidrojen atom yapısında olsaydı, uzak morötesi tayf bölgesinde yer alan 1216 angström dalgaboyundaki ışığı soğuracak ve Lyman alfa adı verilen soğurma profili ortaya çıkacaktı. En düşük enerji düzeyindeki hidrojen atomu bu dalgaboyundaki fotonu soğurarak elektronunu birinci uyarılmış enerji düzeyine çıkarır. Eğer kuasarın kırmızıya kayma miktarı büyükse, uzak morötesi tayf bölgesi daha uzun dalgaboylarına, yeryüzündeki teleskoplarla kolayca gözlenebilecek görsel (optik) bölgeye kadar kayar. Düzgün dağılmış bir galaksilerarası ortamdan kaynaklanan hiçbir Lyman alfa soğurma çizgisi gözlenmemiştir. Buradan da, kırmızıya kaymanın 4 olduğu durumda nötr (yüksüz) atomların yoğunluğunun santimetreküpte 10^{-11}'den daha az olduğu sonucuna varıyoruz ki bu da evrenin kapalı olmasını sağlayacak yoğunluğun on milyonda biridir. Düzgün dağılmış galaksilerarası madde olarak yalnızca ihmal edilebilir miktarda hidrojen vardır.

Eğer galaksiler arasında gaz bir ortam varsa, bu gaz iyonlaşmış olmalıdır ki bunun için de yeniden ısıtılmış olması gerekir. Yeni oluşan galaksilerdeki sıcak yıldızlardan kaynaklanan iyonlaştırıcı ışınımla radyo galaksileri ve süpernovalardan kaynaklanan kozmik ışın parçacıkları, bu gazların ısıtılması için gerekli enerjiyi sağlarlar. Bununla birlikte iyonlaşmış durumda, her yeri kaplayan ve düzgün biçimde dağılmış bir galaksilerarası ortamın varlığına ilişkin net ve açık bir kanıt yoktur. Eğer bu gazın sıcaklığı bir milyon derece Kelvin'in üzerinde olsaydı, ölçülebilecek miktarlarda x-ışınları yayması gerekirdi.



Büyük kırmızıya kaymalara gidildikçe gözlenen kuasarların sayısı da artar.

Eğer galaksilerarası gazın sıcaklığı 10 000 - 100 000 derece Kelvin arasında ise, ışınımın çoğunu tayfın şu anda yeterince gözlenemeyecek bölgesinde yayar.

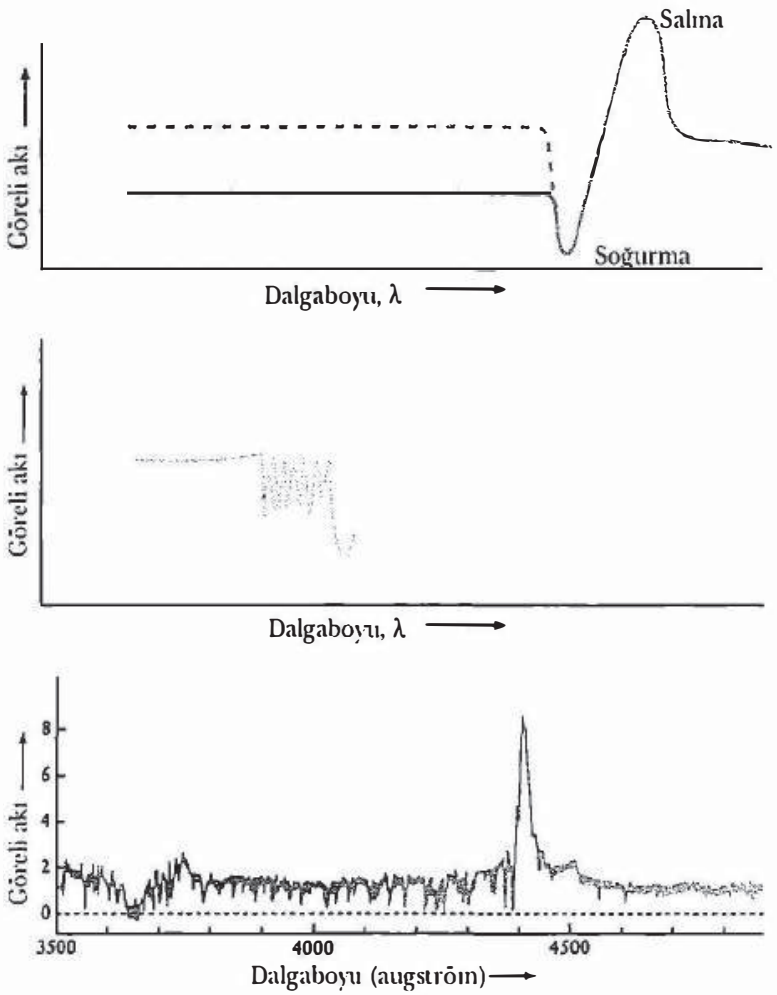
Galaksilerarası Bulutlar

Düzgün dağılmış bir galaksilerarası ortam keşfedilmemiş olmakla birlikte galaksilerarası ortamda gaz bulunmuştur. Galaksilerarası gaz ortamını incelemek için en uygun araçlar kuasarlardır. Herhangi bir dağınık galaksilerarası ortam kuasarla bizim galaksimiz arasındaki uzayın tamamını doldurur. Kuasarın yakınlarında gazın soğurma çizgileri kuvvetli bir biçimde kırmızıya kayacak, galaksimize yaklaştıkça, gazın soğurma çizgilerindeki kırmızıya kayma miktarı gittikçe azalacaktır. Bunun sonucunda sürekli bir soğurma bandı ortaya çıkar. Bunun tersine, atom halindeki hidrojenden oluşan ayrı ayrı bulutlar dar soğurma çizgilerine sahiptirler. Uzaklardaki bazı kuasarların tayflarının Lyman alfa dalgaboylarında böyle dar çizgiler bulunmuştur. Bu çizgiler kuasarla bizim aramızdaki sayısız hidrojen bulutları tarafından üretilmiştir. Daha ağır elementlere ilişkin soğurma çizgileri de gözlenmekle birlikte Lyman alfanın avantajı, evrende en bol bulunan element olan hidrojen tarafından üretilmekte olmasıdır.

Kuasarlar, Lyman alfa dalgaboylarında ışıma yapan iyonlaşmış gazlar içerirler. Sıcak, büyük kütleli yıldızların ya da etkin bir galaksi çekirdeğinin varlığı durumunda, bu cisimler iyonlaştırıcı foton kaynağı olduklarından, ışınım şiddeti daha da artar. Bu fotonlar hidrojeni iyonlaştırır ve hidrojen atomları yeniden oluşurken yoğun Lyman alfa ışınımı verir. Bizim galaksimizdeki yıldızlararası ortam bu ışınımı çok kuvvetli bir biçimde soğurduğundan, yakın galaksilerden kaynaklanan Lyman alfa ışınımını saptamak oldukça zordur. Bununla birlikte, uzak galaksilerden kaynaklanan Lyman alfa çizgisini tayfın daha saydam bölgelerine

taşıdığından, kırmızıya kaymanın yararlı katkıları olur. Sonuç olarak, hem salma ve hem de soğurma sonucunda morötesi bölgede oluşan Lyman alfa çizgileri 3 veya 4 faktörüyle kırmızıya kayarak görsel bölgeye gelmiş olarak da olsa incelenebilir. Bu durumda gaz bulutlarının kırmızıya kaymaları 2 ya da 3'tür denir (z harfiyle gösterilen kırmızıya kayma, $\Delta\lambda/\lambda$ değerine eşit olduğu için $(\lambda+\Delta\lambda)/\lambda$ ifadesiyle gösterilen toplam kaymanın 1+z olarak verildiğini hatırlayalım). Kırmızıya kayma değeri 2 ise, bu, büyük patlamadan günümüze kadar geçen zamanın 3/4'ü kadar, yani 10 milyar yıl geriye bakmak demektir.

Astronomların yüksek oranda kırmızıya kaymış bir Lyman alfa çizgisi aramalarının özel bir nedeni vardır; o da böyle bir çizginin varlığının henüz bir galaksilerarası bulut-



Bir kuasarın ışığını soğuran tektüre, düzgün bir galaksilerarası ortam, sürekli bir soğurma bandı üretir (üstte). Bu durumda, kuasardan geniş bir dalgaboyu aralığında alınan ışığın akışı, arada hiçbir ortam bulunmamasına göre daha az olur (noktalı çizgi). Tersine, tek tek bulutlardan oluşmuş bir galaksilerarası ortam, pek çok sayıda dar soğurma çizgisi üretir (ortada). Yüksek oranda kırmızıya kayan bir kuasarın gerçek tayfı (altta).

tan yeni yeni oluşma sürecindeki bir galaksinin ipuçlarını bulmayı ümit etmeleridir. Her ne kadar bu yöndeki çabalar şu ana kadar pek bir sonuç vermediyse de Lyman alfa soğurma çizgileri, bazıları evrimlerinin çok erken evrelerinde olabilecek, doğrudan gözlenebilmek için çok uzak olan galaksilerin gaz içerikleri konusunda bazı ilginç ipuçları verebilmektedir. Neden kuasarlara doğru olan Lyman alfa soğurma çizgilerinin geçmişte, galaksilerin gaz içeriklerinin günümüzdeki tipik bir galaksiden kat kat fazla olduğu dönemlerdeki durumları konusunda bilgi verebileceklerini düşünüyoruz? Bir kuasara doğru olan bakış doğrultusu üzerinde bir galaksiye rastlama olasılığı oldukça küçük, yalnızca yüzde bir kadardır. Bu nedenle, eğer sayıları galaksiler kadar çoksa, soğurucu bulutların yakınlardaki tipik galaksilerden çok daha büyük boyutlu olmaları gerekir. Ya da sayıca galaksilerden fazla olabilirler. İlginçtir ki farklı bulut türlerinde her iki olasılık da doğru gibi görünüyor. Her iki durumda da günümüzde rastlanan sistemlerden gaz bakımından çok daha zengin sistemler üzerinde çalışılması gerekiyor.

Soğurucu bulutların tipik yıldızlararası gaz bulutlarından daha az evrim geçirmiş olduklarına ilişkin kuvvetli bir ipucu daha var: Lyman alfa soğurma çizgisi veren birçok bulut ya çok az miktarda ağır element içerir ya da hiç içermez. Hidrojenin yanısıra karbon, azot, oksijen, demir, silikon ve hatta çinko ve krom içeren başka bulutlar bulunduysa da bunlardaki ağır element bolluğunun -diyelim- Güneştekinden daha düşük olduğu konusunda hiçbir kuşkuya yer yoktur. Ağır elementlerin kesin yokluğu ise bu cisimlerin galaksinin çok erken dönemlerinde biçimlendiğinin bir göstergesidir. Gerçekte birbirinden oldukça farklı üç sınıf soğurucu bulut saptanmıştır.

Hiç ağır element içermeyen en eski döneme ait Lyman alfa bulutlarında çizgi şiddeti zayıftır. Soğurma çizgisinin şiddeti, bulut içindeki atom sayısının bir ölçüsüdür. Bu nedenle çizgi zayıflığı bize,bu bulutlardaki atom halinde bulunan hidrojen oranının düşük olduğunu anlatır. Atomların sayısı, herhangi bir yıldızlararası bulutta gözlenenin çok altındadır. Bu da en eski Lyman alfa bulutlarının çok düşük yoğunlukta, iyonlaşmış hidrojenden meydana gelmesi demektir.

Bulutun boyutları Lyman alfa 'ormanından' hesaplanabilir. Sayıları aradaki çok sayıdaki buluttan geliyormuşçasına yüksek olan zayıf çizgilere bu nedenle 'orman' adı verilmiştir. Astronomlar Lyman alfa ormanını hemen yanlarında bulunan kütleçekimsel mercek etkisi altındaki kuasar çizgileriyle karşılaştırırlar. Kütleçekimsel mercek etkisi altındaki kuasar, çift görüntü veren gerçekte tek bir kuasardır: kuasardan gelen ışınlar aradaki bir ga-

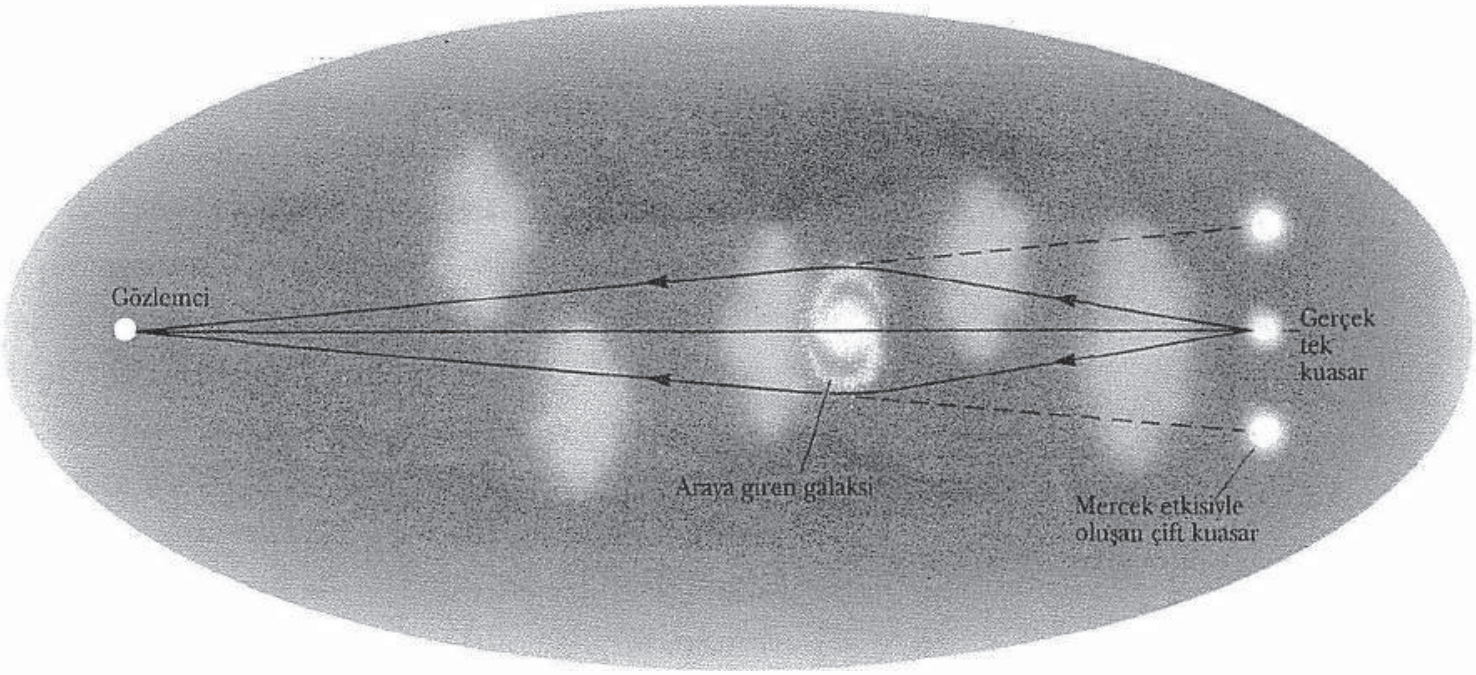
laksi tarafından bükülerek kuasarın birbirinden birkaç açı saniyesi uzaklıkta iki görüntüsü oluşturulur. İki kuasar görüntüsü birbirlerinden, soğurucu bulutların kırmızıya kaymalarında yalnızca 30 kiloparsek kadar ayrılırlar. İki kuasar görüntüsü bütün bulutlardan kaynaklanan çizgilerin her iki kuasarda da bulunmaması dışında birbirinin tıpatıp aynıdır. Buradan da bulutların çapının 30 kiloparsekten küçük olması gerektiğini, 10-20 kiloparsek civarında olduğu sonucunu çıkarıyoruz. Belli bir bakış doğrultusundaki bulutların sayısı, Samanyolu gibi galaksilerin sayısından çok daha fazladır. Bu bulutların, sonraları çökerek çok sık rastlanan cüce galaksileri oluşturduğu düşünülüyor.

Öte yandan metalce zengin olan soğurucu bulutlar büyük olasılıkla uzak galaksilerdeki yıldızlararası bulutlardır. Bu galaksiler öylesine uzak ve sönüktürler ki, göreceli olarak parlak olan kuasarın ışığı altında boğuldukları için görülmeleri oldukça zordur. Ama gene de yakında bulunanlardan bazıları görülebilir: düşük miktarda kırmızıya kayma gösteren bazı soğurucu bulutların uzun poz süreleriyle alınmış duyarlı görüntülerinde genellikle aynı miktarda kırmızıya kayma gösteren ve daha yakında bulunan bir galaksinin varlığı da ortaya çıkar. Buradan, soğurucu bulutların galaksinin halesinde yer aldıklarını ve tipik bir hale gibi galaksi merkezinden 100 kiloparsek uzaklıklara kadar yayıldıkları sonucunu çıkarıyoruz.

En büyük kütleli bulutlar çok kuvvetli Lyman alfa çizgilerinden tanınırlar. Böyle tek bir buluttaki hidrojen atomu sayısı, rasgele bir açıdan bakıldığında gaz bakımından zengin olan disk biçimli galaksilerdeki hidrojen atomu sayısıyla karşılaştırılabilir. Böyle bir bulut Samanyolu'nun yıldızlarının henüz oluşmadığı, gaz bakımından zengin olduğu ilk dönemlerine karşılık gelir. Bu büyük kütleli bulutların tayflarında, her ne kadar bollukları Güneştekilerin yüzde biri ile onu arasına olsa da ağır elementlerin varlıklarına rastlanır. Buradan, bu bulutların henüz oluşma aşamasındaki galaksi diskleri olduğunu düşünüyoruz. Bunların kırmızıya kayma miktarlarının, evrenin yaşının şimdikinin henüz üçte birinden az olduğu dönemleri simgeleyen 2 ile 3 arasında olduğunu görüyoruz.

Küme İçi Gazlar

Galaksi grupları ile birlikte daha büyük ve daha yüksek kütleli kümelerde galaksilerarası gazın çok daha sıcak bir biçimine rastlanır. Bu kümeler birbirlerine kendilerinin

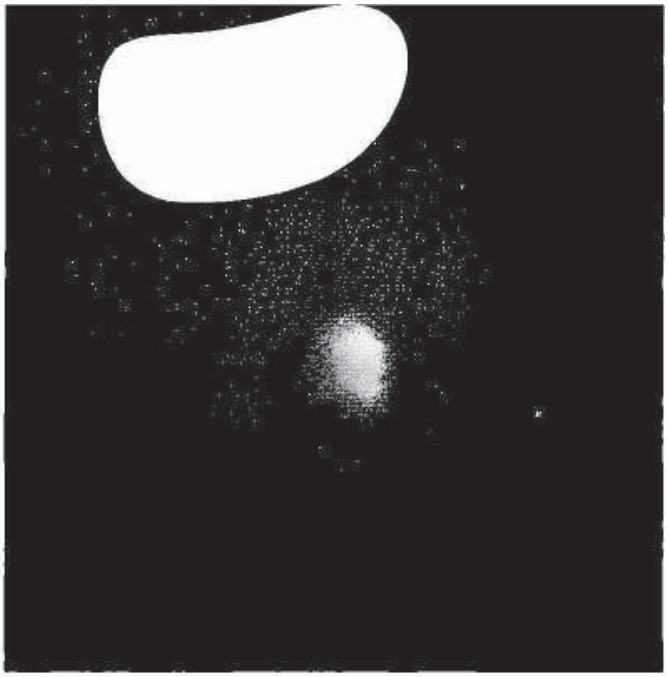


Uzak bir kuasara bakış doğrultusunda genellikle hidrojen bulutları bulunur. Araya giren bir galaksi kütleçekimsel mercek etkisi yaratarak kuasardan gelen ışığı büker ve çift görüntü oluşmasına neden olur. Hidrojen bulutları kuasarın tayfında soğurma çizgileri yaratırlar. Bununla birlikte soğurma çizgilerinin örüntüleri iki görüntüde birbirinin aynı değildir. Bazı bulutlar, bir görüntüden gelen ışığı bazıları ise diğer galaksiden gelen ışığı soğururlar. Buradan da bu bulutların her iki görüntüde soğurma çizgisi yaratacak kadar büyük olmadıklarını anlarız.

ve karanlık maddenin kütle çekim gücüyle bağlı olan ve yüzlerce, hatta binlerce galaksi barındıran büyük galaksi topluluklarıdır. Bu galaksi topluluklarının kararlı bir biçimde varlıklarını sürdürmeleri için karanlık maddenin var olması gerektiğini biliyoruz.

Bir galaksi kümesinin büyük kütlesi, tipik bir galaksinin küme çevresinde saniyede 1000 kilometrelik bir hızla döndüğü anlamına gelir. Bu küme içindeki hidrojen atomları da benzer hızlarla hareket edeceklerdir. Yalnızca atom hareketlerinin büyük enerjisi bile böyle iyonlaşmış bir gazın sıcaklığının çok yüksek olması için yeterlidir. Gerçekten, gaz sıcaklığının 100 milyon derece Kelvin civarında olması gerekir. Bu sıcaklıktaki bir gazda bulunan elektron ve protonların hızlı hareketleri, çok miktarda x- ışını yayılmasına neden olmalıdır.

Gerçekten galaksi kümelerinin kuvvetli x-ışın kaynakları olduğu bulunmuştur. Yerküremizin atmosferi x-ışınlarını ve uzak morötesi ışınımı-şanslıyız ki- soğurduğundan, bu x-ışını sinyallerinin atmosfer dışından gözlenmesi gerekir. Bu nedenle, roket ve yapay uydulara yerleştirilmiş özel teleskoplarca haritası çıkarılan küme kaynaklı x-ışınları-



Coma Galaksi Kümesi'nin x-ışın haritası. 1 megaparsekten büyük boyutlu ve 50 milyon derecelik sıcak bir gaz, Coma Galaksi Kümesi'ni çevreler. Çeşitli galaksilerde kaynaklanan x-ışın salmaları da görülebilir. Sağ alttaki bulanık küre, Coma Kümesi üzerine düşmekte olan bir galaksi grubunun ürettiği bulanık x-ışınlarıdır.

nın tüm kümeyi kapsadığı görülmüştür. Bu incelemelerden çıkardığımız sonuç, galaksi kümelerinin kütlelerinin yüzde 10'unun galaksilerarası gaz, yüzde 10 veya daha fazlasının da bildiğimiz yıldızlar biçiminde olduğudur. Kalan yüzde 80 ise karanlık madde biçiminde olup, bu maddenin doğası konusunda yalnızca spekülasyonlarda bulunabiliriz.

Önemli ve beklenmedik bir keşif de galaksilerarası gazda iyonlaşmış demire rastlanmasıdır. 100 milyon derece Kelvin sıcaklığında bile demir bir veya iki elektronunu korur. Bu elektronlar çevrede bulunan gazdaki hızlı elektronlar ve protonlarla yaptıkları çarpışmalar sonucu uyarılır ve x-ışın enerjilerinde Lyman alfa çizgisine benzeyen tayf çizgileri oluştururlar. Görülen demir miktarı oldukça fazladır: demir bolluğunun hidrojene oranı Güneş'te gözlenenin üçte biri kadardır. Buradan ise, küme içi gazların önce yıldızlar tarafından işlendiği, daha sonra da galaksilerden dışarıya atıldığı sonucu çıkmaktadır. Dışarı atılan gaz hızını yıldızlararası gazı ısıtan ve bir galaksi rüzgârı oluşturan süpernova patlamalarından almaktadır.

Baryon Miktarı Bilmecesi

Galaksi kümeleri sıcak, x-ışını üreten küme içi gaz biçiminde şaşılacak miktarda çok baryon barındırmaktadır. Sıcak gaz, galaksinin en az yüzde 10'unu meydana getirir. Birkaç kümenin oldukça büyük derinliklere kadar haritası çıkarılmış ve bunlarda gazın, kümenin optik yarıçapının dışına kadar yayıldığı gözlenmiştir. Aslında, küme kütlesindeki sıcak gaz oranının yarıçapla arttığı ve yüzde 30'lara hatta 50'lere ulaştığı düşünülüyor. Bu sonucu en eski nükleer sentezlerde oluştuğu öngörülen ve evrenin kapalı olma-

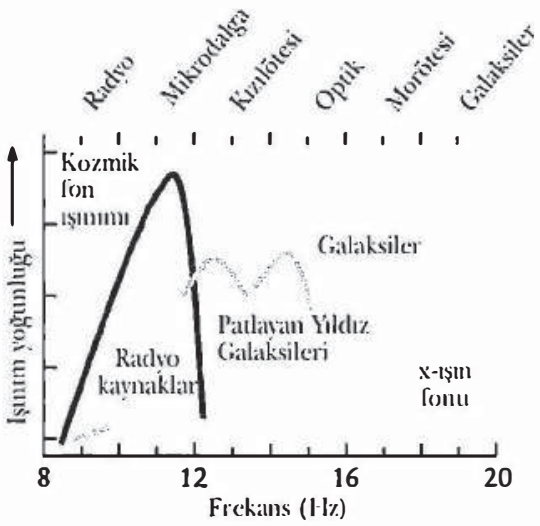
sı için yaklaşık yüzde 3 olarak hesaplanan baryon oranı ile karşılaştırın. Bunun en basit yorumu, kritik yoğunlukta bir evrende yaşamıyor olduğumuzdur. Bununla birlikte eğer evrenin ortalama yoğunluğu kritik yoğunluğun yüzde 10'u kadar olsaydı, gaz oranını en eski nükleer sentez ile uzlaştırmak mümkün olabilirdi.

Acaba hesaplanan gaz kütlesinde bir hata olabilir mi? Ya da galaksi kümeleri evrenin baryonlar bakımından olağanüstü, 10 kat zengin bir bölümünün temsilcileri olabilirler mi? Eğer durum böyleyse, hâlâ evrenin kapalı olması için yeterli yoğunlukta ve karanlık maddenin baskın olduğu bir evrende yaşıyor olabiliriz. Bu sorular ancak kümeleri x-ışın frekanslarında daha iyi gözleyebildiğimiz ve küme oluşumu konusunda daha gelişmiş teoriler ortaya koyabildiğimiz zaman yanıtlanabilir.

Galaksilerarası bulutlarda dağınık biçimde, kümelerin içinde veya dışında bulunan gaz miktarı evrenin kapalı olması için gereken yoğunluğun gözardı edilebilecek kadar küçük bir oranını oluşturur. Lyman alfa soğurma çizgileri gösteren bulutlar için, gökyüzünün değişik bölgelerinde bulunan farklı kuasarlara bakış doğrultuları boyunca gözlenen gaz miktarı hesaplanabilir. Bu gaz bulutlarındaki baryon oranı evrenin kapalı olması için gereken değerin yüzde 1'i kadardır. Kümeler için bu rakamlar daha belirsiz olmasına karşın bu değeri aşması çok güçtür. Galaksi grupları, gözlemin daha zor olduğu düşük enerjilerde x-ışını yaydıklarından gaz miktarı hemen hemen hiç bilinmemektedir.

Galaksilerarası ortamın iyonlaşmış olmaması ve evrenin kapalı olmasına yetecek ölçüde yoğun olmaması için başlıca iki neden vardır. Bu nedenlerden birincisi, böyle bir baryon ağırlıklı evrende büyük patlamanın gözardı edilebilecek miktarlarda döteryum üretebilmiş olması gerekliliğidir. Baryon yoğunluğu ve buna bağlı olarak da galaksilerarası ortamın en büyük yoğunluğu, evrenin kapalı olması için gereken kritik yoğunluğun yüzde 10 ya da 20'sini aşmadıkça gözlenen döteryum yoğunluğu açıklanamaz. Ama belki de ilk üç dakikada nelerin olmuş olabileceği konusunda büyük bir indirim yapmalı ve gerçekten saptamış olmamız gereken yoğun bir galaksilerarası ortam olup olmadığını sorgulamalıyız.

Aslında yoğun bir galaksilerarası ortam büyük olasılıkla saptanabilirdi. Eğer sıcaklığı 1 milyon derece Kelvin'den yüksek olsaydı, dağınık ve her yönden gelen bir parlama biçiminde x-ışınları yayması gerekirdi. Böyle dağınık bir x-ışın fonu gerçekten de görülmüştür. Ama dağınık x-ışın fonunun en azından dörtte üçlük bir bölümünün sıcak ve dağınık bir galaksilerarası ortamdan değil, tek tek çözümlenemeyecek ölçüde uzak olduklarından gözlenemeyen kuasar ve etkin galaksilerden kaynaklandığı düşünülüyor.

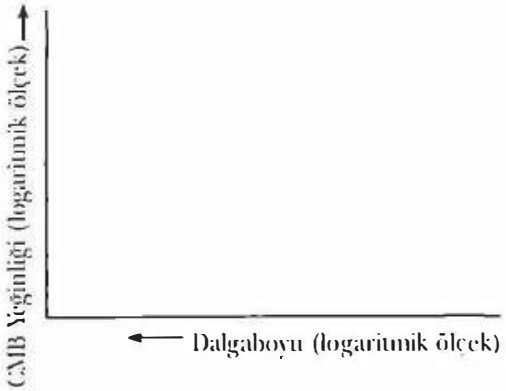


Samanyolu düzleminden dışarıya, galaksinin kutuplarına doğru bakan bir gözlemci, radyo dalgalarından x-ışınlarına kadar değişen bir frekans aralığında bulanık bir fon ışınımı ölçer. Bu ışınım yoğunluğuna en büyük katkı, kozmik mikrodalga fonundan kaynaklanır.

Ama gene de kaynağı bilinmeyen ve miktarı,dağınık x-ışın fonunun yüzde 25'ine varan kalıntı bir x-ışın akısı vardır. Bazı astronomlar bu kalıntı akıyı kritik yoğunluğun dörtte biri kadar yoğunlukta (eğer ortamda topaklanmalar varsa yoğunluk daha da az olabilir) ve çok yüksek sıcaklıktaki galaksilerarası bir ortamın varlığıyla açıklamaya çalıştılar. Eğer kalıntı x-ışın fonu sıcak bir galaksilerarası gazdan kaynaklanıyorsa, bunun x-ışın tayfı gaz sıcaklığının, x-ışın şiddeti de ortalama gaz yoğunluğunun bir ölçüsü olmalıdır. Bu gazın sıcaklığı yaklaşık olarak 400 milyon derece Kelvin olmalıdır.

Bununla birlikte bu gazın miktarı, evrenin kapalı olmasını sağlayacak ölçüde yüksek olamaz, aksi halde gözlenenden çok daha fazla x-ışınının üretilmesi gerekirdi. Dahası, 400 milyon derece Kelvin sıcaklığındaki bir gaz kendisini yalnızca x-ışınlarında değil, başka tür ışınımlarla da belli ederdi. Kozmik mikrodalga fonundaki fotonlar, böyle sıcak bir gazda bulunan elektronlar tarafından saçılırlar. Her foton saçılması sırasında gazdan ışınıma küçük bir miktarda enerji aktarılır. Her ne kadar galaksilerarası ortamın düşük yoğunluğunda saçılma olasılığı küçük de olsa, bunun sonucunda ışınım şiddetinin en büyük olduğu bölgede kara cisim ışınımının biçimi bozulur. Bununla birlikte COBE Uydusu böyle herhangi bir bozulma ölçmemiştir, bu nedenle de eğer varsa bu bozulmanın şiddeti COBE Uydusu'nun ölçme sınırının altındadır. Compton olayı adı verilen bu elektron saçılma etkisinden kaynaklanan bozulmanın 100 000'de 2'nin altında olduğu sonucuna varıyoruz. Aslında zengin, x-ışınları yayan galaksi kümelerinin doğrultularındaki mikrodalga fonu incelendiğinde Compton olayından kaynaklanan bozulmalar ölçülmüştür ama bunların kaynağı küme içi sıcak gazlardan saçılan fon fotonlarıdır. Galaksi kümeleri doğrultusunda ölçülen bozulma miktarı 10 000'de 1 civarındadır.

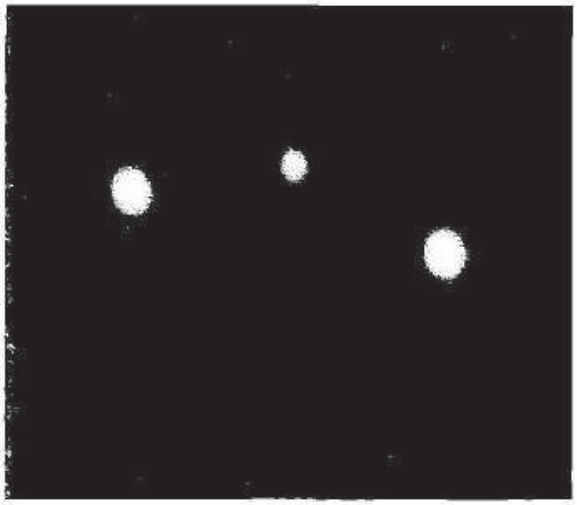
Sonuç olarak, büyük galaksi gruplarının dışında, evrenin yakınımızdaki bölgesinde, sıcaklığı yüz milyonlarca derece Kelvin olan, kritik yoğunlukta bir galaksilerarası ortam varsa, bu ortam x-ışını yayması gerektiğinden saptanabilir. Evrenin erken dönem-



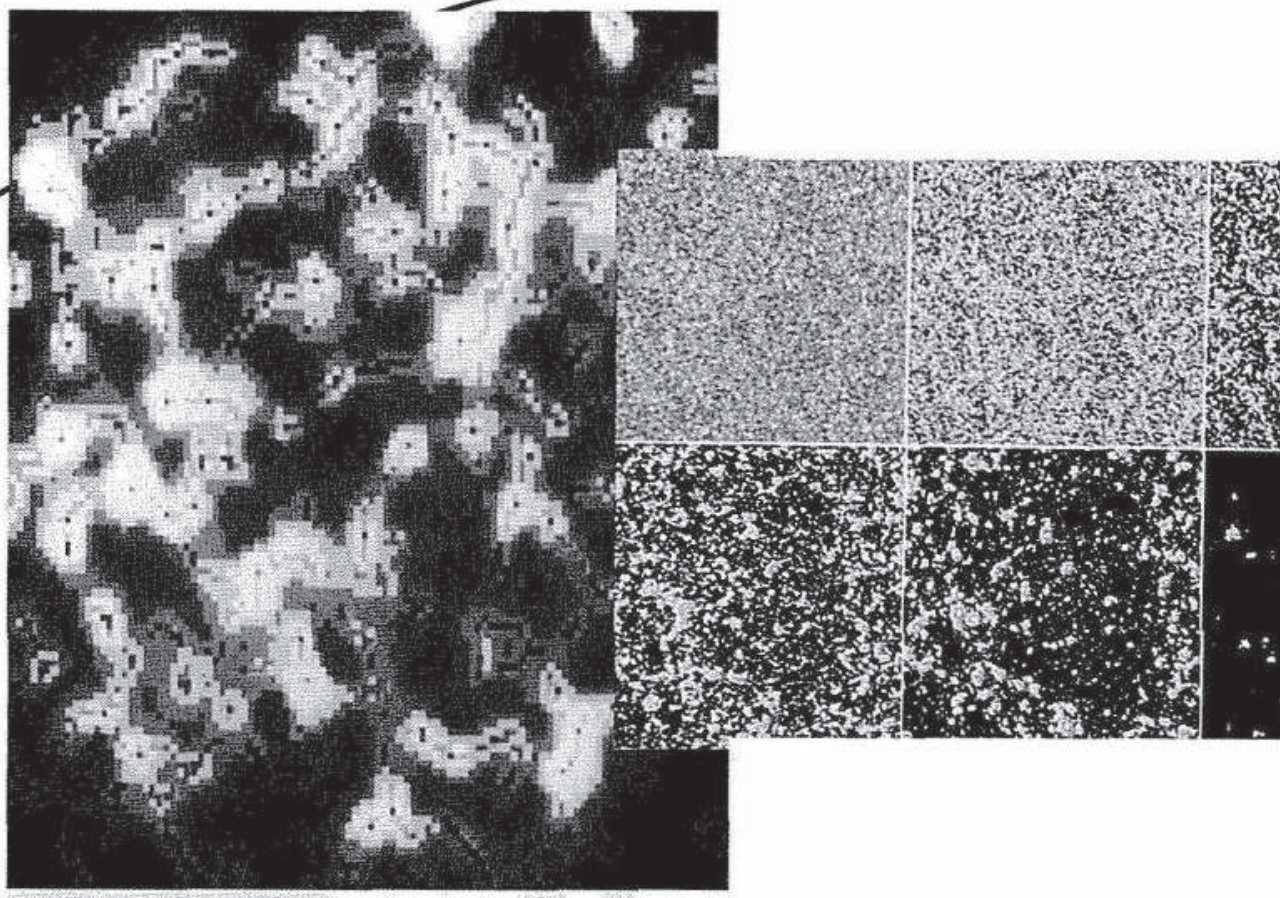
Ara sıra sıcak gaz bulutlarının içinden geçen kozmik mikrodalga fon fotonları ısınırlar ve kara cisim eğrisinin uzun dalgaboyu ucundan kısa dalgaboyu ucuna kayarlar.

lerinde- diyelim galaksilerin oluşum çağında- böyle sıcak bir galaksilerarası ortam bulunamazdı. Her ne kadar böyle bir ortamdan kaynaklanan x-ışını yayımı kırmızıya kayarak saptanmayı güçleştirirse de, gene de kozmik mikrodalga fonunun tayfını çok büyük oranda bozması gerekirdi.

Gene de kaçamak bir nokta kalıyor. Düzgün dağılmış ve küçük bir sıcaklık aralığında bulunduğundan saptanmaktan kurtulmuş galaksilerarası bir ortamın varlığı söz konusu olabilir. Galaksilerarası gaz hâlâ ısıtılmış olmalı ve soğumasının, galaksilere dönüşerek yoğunlaşmasının önüne geçilmiş olmalıdır. Bununla birlikte bol miktarda x-ışını yaymamak ve mikrodalga fonunu bozmamak için sıcaklığı yeterince düşük, bir milyon derecenin altında olmalıdır. Bu senaryo boş yere kurulmuş olup eski Güneş sistemi teorilerini anımsatmaktadır. Böylesi bir bileşimde, galaksilerarası ortamı soğumanın hızlı, gazın parçalara bölünmesinin mümkün olduğu 'tam gerekli olan' sıcaklıkta tutabilmek için çok büyük miktarlarda enerji girdisine gereksinme vardır.



Abell 2218 Galaksi Kümesi'nin bu radyo haritası kozmik mikrodalga fonunda bir "delik" olduğunu gösteriyor. Kümedeki sıcak gaz, kozmik kara cisim ışınımının tepesinin uzun dalgaboyu tarafındaki fotonların enerjisini arttırır. Sonuç olarak, küme yönündeki radyo fotonlarında sıcak gaz dağılımının göstergesi olan bir eksiklik oluşur. Üç sarı leke, arka planda yer alan radyo kaynaklarıdır.



Solda: İpliksi yapıyı ortaya çıkarmak üzere geliştirilen bir bilgisayar programı tarafından hazırlanan bu haritada, gökyüzündeki 100 derecelik bir alanda 400.000 galaksinin dağılımını gösteren, gözlenen evrenin büyük ölçekli yapısı görülüyor. Siyah pikseller, en düşük sayıda galaksi içeren bölgeleri, yeşil ve kırmızı pikseller ise dağılımdaki yerel maksimumları gösteriyor. Yeşil iplikçikler uzaydaki galaksi süperkümelerine karşılık geliyor olabilir.
Sağda: Minik dalgalanmalardan kütleçekimsel kararsızlıklar nedeniyle galaksi ve galaksi kümelerinin kaçınılmaz bir biçimde nasıl geliştiğini gösteren bir bilgisayar simülasyonu. Bu simülasyonda, rasgele konumlandırılan bir milyon parçacık t leniyor. Sol üstten itibaren genişleme çarpanı, simülasyonun başlangıcından sonra 8, 23, 66, 125 ve 250 değerlerini almaktadır. Yanındaki panelin 10 kat büyütülmüşü olan en sağ alttaki panel, yaklaşık 20 megaparsek boyutlarında, günümüzdeki evreni gösteriyor.

10

Madde Yapısının Kaynağı

Zaman içinde şişme, baryon oluşumu, nükleer sentez, ve ışınım ayrışması dönemlerinden geçtik. Geldiğimiz en son nokta ise madde yapısının oluşumudur. Yoğunluktaki minik değişmelerden nasıl olup da madde yapısının kaynaklandığı, kozmolojinin en can alıcı sorularından biridir.

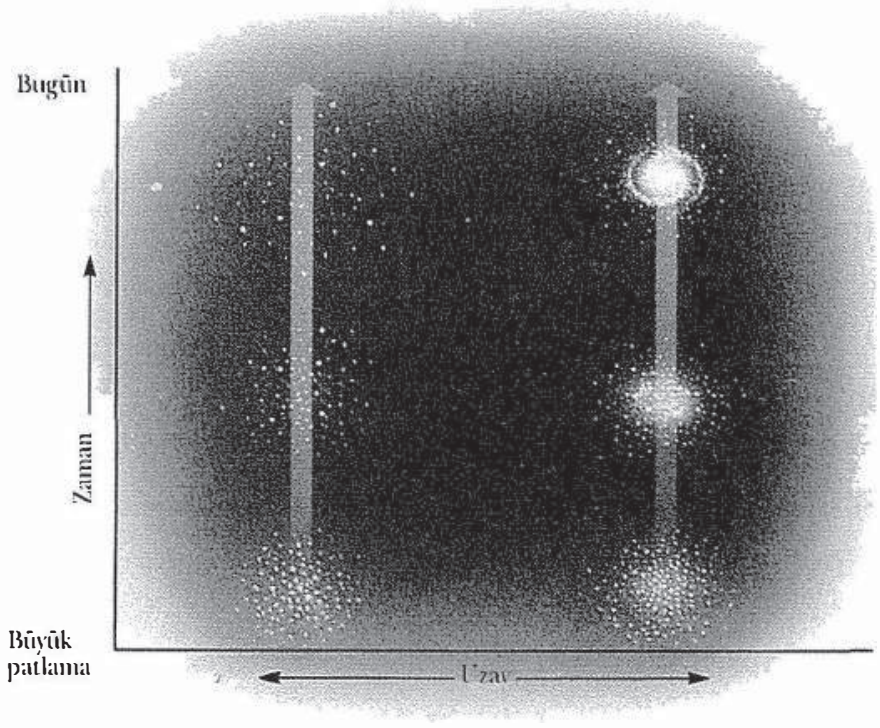
Büyük patlama teorisine göre evrendeki tüm yapılar zamanın başlangıcında ortaya çıkan çok küçük yoğunluk dalgalanmalarından başlamıştır. Bu dalgalanmalar galaksilerin, galaksi gruplarının, hatta daha büyük yapıların tohumlarıydı. Bugün evrenin yakın bölgelerinde 100 megaparsek'e kadar ölçeklerde yapılar gözlüyoruz. Ama bu yapının kaynağının yoğunluk dalgalanmaları olduğunu kanıtlamak oldukça zordur. Bunun nedeni de geçmişteki yapılarla şimdikiler arasındaki bağın çok zayıf olmasıdır.

Küçük Dalgalanmalar

Kozmik mikrodalga fonunun yüzde birin binde birkaçı oranında düzgün olması, bize evrenin 300 000 yaşın dayken ve kırmızıya kayma değeri 1000 iken son derece homojen olduğunu söylüyor. Bununla birlikte tam anlamıyla homojen olamazdı, aksi takdirde galaksiler hiçbir zaman ortaya çıkmazdı. Bu nedenle yoğunlukta küçük dalgalanmaların olması gerekliydi.

Dalgalanmalar, fon düzeyine göre yoğunluktaki yerel değişimlerdir: bu değişimlerin yönü azalma ya da çoğalma yönüne doğru olabilir. Yoğunluk fazlalığının derecesi dalgalanmanın gücünü ya da şiddetini tanımlar. Bu dalgalanmalar başlangıçta son derece küçük olmakla birlikte, zamanla, kütleçekimsel kararsızlık süreciyle güçlerini arttırırlar. Dalgalanmada çoğalma yönündeki bir artış, yerel kütle çekimindeki küçük bir artışı simgeler ve ortalama yoğunluktaki yakın bölgelerdeki maddeyi çekme eğilimi gösterir. Her ne kadar madde her yerde genişlemekteyse de, çoğalma yönünde dalgalanmanın olduğu yerin yakınlarında genişlemenin hızı biraz daha yavaştır. Etki yavaş olmakla birlikte kaçınılmaz bir biçimde ilerler ve başlangıçtaki yoğunluk dalgalanmasının kuvveti gittikçe artar. Bir kere yerel yoğunluk ortalama değerin iki katını aştıktan sonra, kütle çekimi, evrensel genişlemenin etkilerini yenebilecek ölçüde güçlenir. Madde bulutu çökmeye başlar. Bu bulut, bir galaksi ya da kütlesi yeterince büyükse, bir galaksi kümesi oluşturacaktır.

Durağan bir evrende çok küçük dalgalanmalar üstel bir hızla büyürler. Böyle bir evrenin kütleçekimsel olarak kararsız olduğunu söyleriz. Aslında eğer durağan olsaydı, tüm evren ya kendiliğinden genişler ya da çökerdi. Bu, durağan evrene karşı yapılan teorik itirazlardan biriydi. Einstein'ın, en azından evrenin çökmesine karşı koyacak ve onu dengeleyecek hayali bir kozmik itme kuvveti ortaya atmasına neden olan da buydu. Oysa sürekli olarak genişleyen bir evrende çoğalma yönündeki dalgalanma bölgesindeki madde, özellikle ışınımdan kaynaklanan basınç tarafından dağıtılırken kütle çekimi tarafından birarada tutulmaya çalışılır. Azalan yoğunluk nedeniyle dalgalanmaların büyüme hızı yavaşlar. Böyle bir evrende, madde yapılarının gelişmesi zaman alır, bu nedenle başlangıçtan itibaren tohum görevi yapacak küçük dalgalanmaların bulunması gereklidir. Eğer bu dalgalanmalar çok küçükse, yapılar hemen ortaya çıkmayacaktır. Eğer çok büyükse, evren şu anda galaksilerin dağılımında gözlediğimizden çok daha topaklı bir yapıda olacaktır. Teori, şu anda gözlenen galaksi kümelenmesinin gelişmesi için, başlangıçtaki 100 000'de 1 oranındaki bir yoğunluk dalgalanmasının gerekli olduğunu öngörmektedir.



Göreli olarak düşük kütleli, küçük ölçekli yoğunluk dalgalanmaları zamanla dağılır (solda). Ama en büyük dalgalanmalarda kütleçekim kuvveti, basıncın dağıtıcı kuvvetine üstün gelir. Galaksi-kütleli dalgalanmalar, yavaş yavaş daha da yoğunlaşıp çökerek galaksi oluştururlar (sağda).

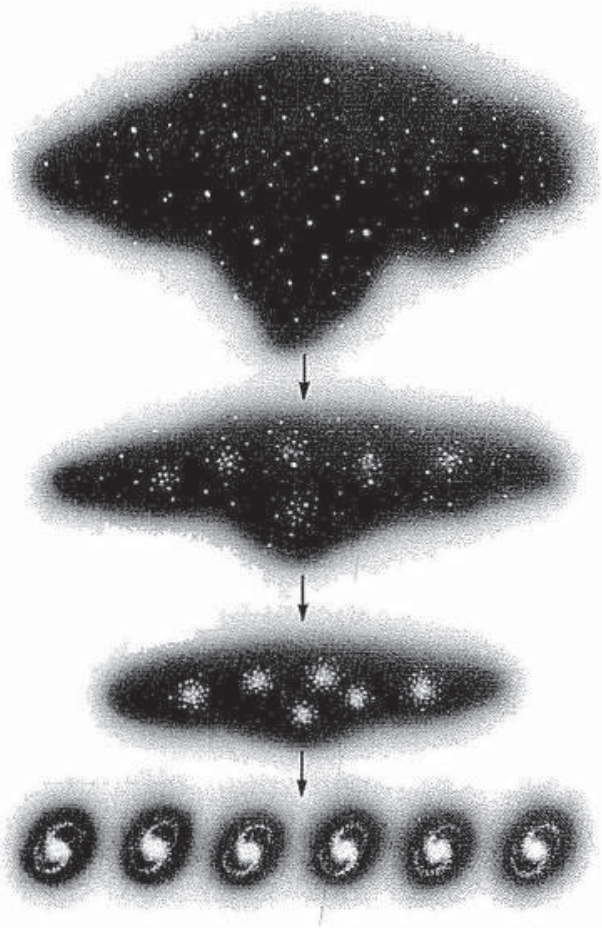
Işınım dışarıya "sızarken" maddeyi de beraberinde taşıyarak, madde yoğunluğundaki dalgalanmaların sönümlenmesine neden olur.

İlkel yoğunluk dalgalanmalarının büyümeleri büyük bir oranda evrende var olan ışınım tarafından kontrol edilmektedir. Her proton için yaklaşık 3 milyar foton vardır. Evrenin ilk dönemlerinde ışınımın enerji yoğunluğu, protonların eşdeğer kütle yoğunluğundan daha büyüktü. Işınımın baskın olduğu bu evre büyük patlamadan sonraki ilk 10 000 yıl boyunca sürdü ve bu sırada yoğunluk dalgalanmalarının büyümesi önlendi. Ne zaman ki bildiğimiz madde evrendeki madde yoğunluğunun başlıca kaynağı oldu, o zaman kütle çekimi etkili hale gelerek şişme döneminde ortaya çıkmayan dalgalanmaların büyümesini hızlandırdı ve birbirinden farklı kozmik yapıların ortaya çıkmasını ve gelişmesini sağladı.

Yapılar birbirinden tümüyle farklı iki ayrı sırada ortaya çıkmış olabilirler. Ya galaksi kümeleri gibi büyük yapılar önce oluşmuş, sonra da bu büyük kütleli yapıların parçalanmasıyla galaksiler ortaya çıkmış olabilir; ya da önce cüce galaksiler oluşmuş, bunların birleşmesiyle gittikçe büyük çaplı yapılar ortaya çıkmış ve sonunda bunlar galaksi kümelerine dönüşmüş olabilir. Bu iki senaryo da sırasıyla incelenecektir.

Yukarıdan-Aşağıya Senaryosu ve Kozmik Pancake'ler

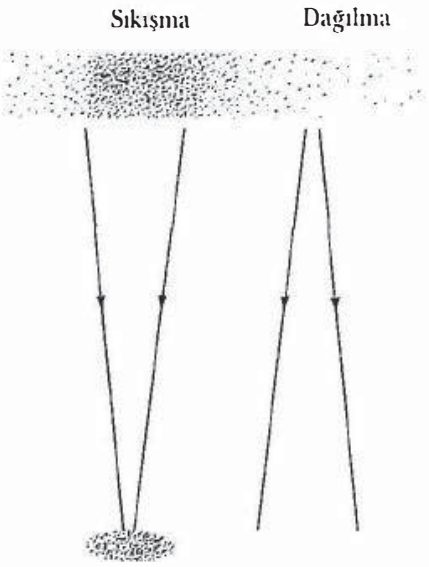
Önce maddenin baskın biçiminin bildiğimiz baryonlar olduğu bir evreni göz önüne alalım. Böyle bir durumda yoğunluk dalgalanmalarının tümü, evrenin bu düşman görünümlü, sıcak ortamında varlıklarını sürdüremezler. Aslında evrende ışınımın baskın olduğu ilk 10 000 yıl boyunca dalgalanmalar hiç büyümemiştir. O dönemde, dalgalanmalar birbirine karışmış durumdaki madde ve ışınımın her ikisini de içermekteydi; böyle dalgalanmalara, yalnızca maddenin düzgün dağılmış olmadığı izotermal dalgalanmaların tersine, adiyabatik dalgalanmalar adı verilir.



Yukarıdan-aşağıya senaryosunda büyük yapılar küçüklerden önce gelişir. Büyük bir madde bulutu tipik bir biçimde iki eksen boyunca çökerek yassı bir şekil oluşturur. Bu düzlemsel şekilde ilkel galaksiler oluşmaya başlar ve düzlemsel şekil dağılırken galaksiler evrimlerini sürdürürler.

Işınımı 'şişelemek' çok zordur: dışarı 'sızmaya' eğilim gösterir ve beraberinde maddeyi de sürükler. Madde ve ışınım sızarak kaçarken adiyabatik dalgalanmalar da sönümlenir. Bu homojenleştirme sürecinde ortadan yok olmaları için daha uzun zaman gerektiğinden yalnızca en büyük ölçekli dalgalanmalar varlıklarını sürdürebilirler. Dalgalanmalar büyüdükçe bildiğimiz baryon kökenli maddeden oluşan evrenin bu dalgalanmaları yok etme süresi de uzar. Işınım serbest elektronlardan saçıldığı sürece dalgalanmaların sönümlendirilme süreci ilk 10 000 yıldan sonra da devam eder. Ayrışma döneminde, yaklaşık 300 000 yıl sonra, evren ışınıma geçirgen hale geldiğinde ise tüm sönümlendirme süreci durur. Varlığını sürdüren dalgalanmalar en azından kümenin kütlesi kadar yani 10^{15} kütleye sahip olanlardır. Yalnızca kütlesi bu kadar ve daha büyük olan dalgalanmalar madde dönemine kadar varlıklarını sürdürebilirler.

Bu galaksi kümesi boyutundaki dalgalanmalar çevreden madde alarak büyür ve sonuçta çöküp parçalanarak galaksileri oluştururlar. Büyük yapıların küçük yapılardan önce geliştiği böyle senaryolar 'yukarıdan aşağıya' tanımıyla nitelendirilirler. Büyük bir bulutun yassı, 'pancake' biçimli bir tabaka şeklinde çöktüğü görülür. Bulutun her üç eksende de eş zamanlı olarak çöküp bir küre oluşturması, hatta iki eksende eş zamanlı olarak çöküp bir silindir oluşturması olanaksızdır. Başlangıçtaki dalgalanma tam anlamıyla simetrik olmadığı sürece- ki bu çok küçük bir olasılıktır- bir yöndeki çökme diğer iki yöndekinden hızlı olur. Sonuç, yoğunluğu yüksek olan yassı bir 'pancake' olur ki bu da sonradan galaksilerin genellikle bir düzlemde yer aldığı büyük yapıları oluşturmak üzere galaksi boyutundaki parçalara ayrılarak dağılır. Galaksi düzlemlerinin kesiştiği ve bu bölgelerde bulutların çökmesi sonu-



Eğer sıcak karanlık madde modelinde olduğu gibi galaksi ölçeğindeki ilk dalgalanmalar sönümlendirilirse, yoğunluktaki sıkışmalar yassı şekiller, dağılmalar ise boşlukları oluştururlar.

cunda büyük boşlukların oluştuğu dev kümeler vardır. Bölüm 11'de göreceğimiz gibi, büyük olasılıkla bulutların yassı biçimlerde çökmesi sonucunda oluşan büyük ölçekli galaksi dağılımlarında büyük boşluklar, galaksilerden meydana gelmiş düzlemler ve ipliksi yapılar bulunur.

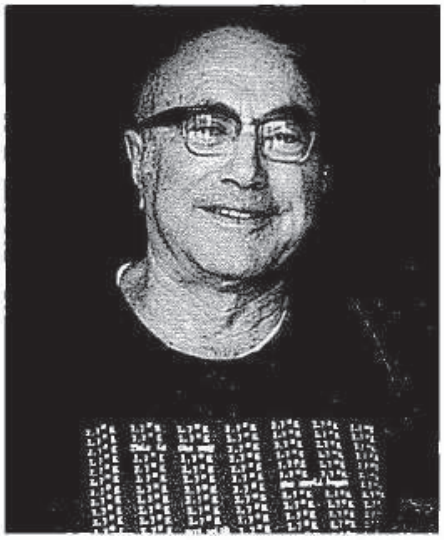
Böyle bir evren, kapalı olmasını sağlayabilecek kritik yoğunlukta ve baryonların üstünlüğünde olamaz. Eğer baryonlar evrenin kapalı olmasını sağlayabilecek kritik yoğunluğu sağlayabilirse, en eski nükleer sentez öngörülerinin ihlal edilmiş olacağını daha önce görmüştük. Dahası, baryonların hakim olduğu bir evrende, ileride açıklanan nedenlerden dolayı kozmik mikrodalga fonunda da büyük dalgalanmalar olmalıdır. Bu yukarıdan-aşağıya modelini kurtarmak için baryon kökenli olmayan bir karanlık madde adayı bulmak zorundayız.

Yukarıdan-aşağıya modelinin en başarılı sürümü, yaklaşık 10 ya da 30 eV'lik küçük kütleli nötrinolar biçiminde karanlık maddenin varlığını kabul eder. Bu kütleye kolayca ulaşılır: mikrodalga fonunun sıcaklığı kullanılarak büyük patlamadan kalmış nötrinoların sayısı hesaplanabilir, bu sayı verildiğinde de evrenin kapalı olmasını sağlayacak nötrino kütlesi hesaplanabilir.

Evrende madde üstünlüğünü sağladığı zaman ışık hızında ya da ona yakın bir hızda hareket eden büyük kütleli nötrinolar bulunacaktır. Bu hızla hareket eden nötrinonun tipik enerjisi, kütlesiyle karşılaştırılabilir bir miktar olan 10 eV civarında olur. Yalnızca çok daha ağır parçacıklar daha yavaş hareket eder. Başlangıçta, yüksek hızlı nötrinolar rasgele her yöne hareket ettiklerinden bunun sonucu olarak hızlarında bir dağılım ortaya çıkar. Parçacıklar yoğunluğun fazla olduğu yerel bir bölgeden uzaklaşırken nötrinoların bütün küçük ölçekli dalgalanmaları sönümlendirmesine neden olan, işte bu hız dağılımıdır. Yalnızca en büyük dalgalanmalar, yani 10^{15} $M_{\odot}$'nin üzerinde olanlar, sonunda ancak nötrinolar yavaşladığında duran bu sönümlendirme etkisinden varlıklarını sürdürerek çıkabilirler. Kalan küme kütleli bulutlar galaksileri oluşturmak üzere parçalanır ve yapının oluşumu için bir başka yukarıdan-aşağıya senaryosu yaratırlar.

Soğuk Karanlık Madde ve Aşağıdan-Yukarıya Yapı

Yukarıdan-aşağıya senaryolarının önemli bir kusuru vardır: galaksilerin galaksi kümelerinden önce oluştuğuna ilişkin pek çok kanıt vardır. En uzak galaksilerin tümü değilse bile çoğunluğu, barındırdıkları yıldızların yaş yelpazesine göre oldukça yaşlı gibi dururken, pek çok küme de yeni yeni oluşuyor gibi gözükmektedir. Değişik bir yaklaşım, küçük galaksilerin kümeleşip kaynaşarak gittikçe daha büyük kütleli sistemler oluşturduğu 'aşağıdan yukarıya' senaryosunu gündeme getirir. Küçük yapıların büyüklerden önce geldiği, gözlediğimiz evreni en iyi temsil eden işte böyle bir sıralamadır. Eğer evrende, genellikle zayıf bir biçimde etkileşen büyük kütleli parçacıklardan (WIMP'ler) oluştuğu varsayılan soğuk karanlık madde baskın ise aşağıdan-yukarıya senaryosu geçerli olabilir. Ama evren, galaksilerin oluşmasından çok önce ortaya çıkan yoğunlaşmış, baryon kökenli topaklanmalardan da (MACHO'lar) meydana gelmiş olabilir. Yukarıdan-aşağıya senaryosunda olduğu gibi dalgalanmalar büyümeye ancak evrende ışınım değil maddenin baskın olduğu, büyük patlamadan 100 000 yıl sonraki dönemde başlamışlardır. Daha sonraları ışınım serbest elektronlardan saçılmaya devam etmiş ve büyük patlamadan 300 000 yıl sonraki bir dönemde hidrojen atomları ortaya çıkıncaya kadar baryonlara sıkıca bağlı kalmıştır. Bununla birlikte, bu senaryoya göre baryonlar kütle çekimini kontrol etmezler. Soğuk karanlık madde baskındır ve kütle çekimi bir yana ışınımla da etkileşmez. Bu nedenle dışarıya 'sızan' ışınımın beraberinde madde taşıması sonucunda yoğunluk dalgalanmaları sönümlenmekten kurtulur. Dahası, karanlık madde soğuk olduğundan kütle çekimine karşı koyacak termal bir basınç uygulamaz ve kütle çekimsel kararsızlıklar nedeniyle yoğunluk dalgalarının büyümesine direnç gösteremez.



Parlak Sovyet kozmoloji uzmanı Yaakov Zel'dovich kozmik yassı cisimleri keşfetti. Aynı zamanda büyük ölçekli yapıyı oluşturan yukarıdan-aşağıya senaryosunu ortaya atmıştır.

Bunun tersine, baryon veya nötrinoların baskın olduğu evrenle ilgili bir önceki örnekte küçük dalgalanmalar, hızla hareket eden yüksek enerjili parçacıklar tarafından sönümlendirilir. Çok ağır ve fotonlarla etkileşim olasılığı çok düşük olan soğuk karanlık madde parçacıklarının tersine, 'şişelenmiş' ışınımın, baryon kökenli ya da nötrino maddesinin 'sıcak' olduğunu düşünebiliriz.

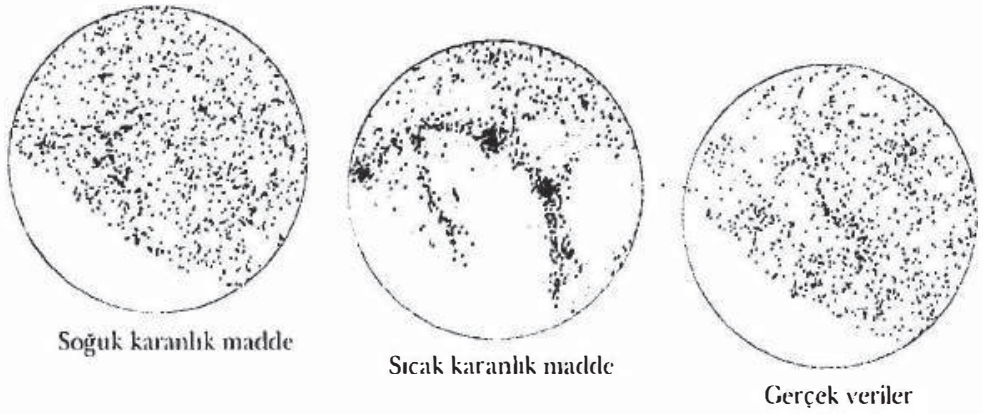
Son zamanlara kadar araçlarımız, mikrodalga fonundaki dalgalanmaları saptayamıyorlardı. Bildiğimiz tek şey, eğer varsa bu dalgalanmaların, araçlarımızın algılayabileceğinden daha zayıf olmaları gerektiğiydi. Bu nedenle çok düşük bir dalgalanma genliği üst sınırımız vardı. Bu da bugün gördüğümüz yapının çok zayıf dalgalanmalardan kaynaklandığı anlamına geliyordu. Bu sınır, düşünelerimizi galaksilerin yalnızca baryon kökenli yani bildiğimiz maddeden oluştuğu modellerle ciddi bir biçimde sınırlamamız için yeterliydi.

Soğuk karanlık madde kozmolojileri için kuvvetli bir neden ortaya çıktı. Soğuk karanlık madde dağılımındaki dalgalanmalar baryon kökenli madde dalgalanmaları ile başlıyordu: baryon kökenli madde hâlâ ışınım tarafından tutulmakta iken büyümeye başlıyorlardı. Oysa çökme yalnızca madde ve ışınım birbirinden ayrıldıktan sonra ortaya çıkmaktadır. Sonunda baryonlar kurtuldukları zaman soğuk karanlık madde tarafından yaratılan kütleçekimsel potansiyel kuyularına düşerler. Büyük ölçekli yapılar, soğuk karanlık maddedeki çok daha küçük dalgalanmalardan kaynaklanırlar. Buna paralel olarak da mikrodalga fonunda daha küçük dalgalanmalar ortaya çıkar.

Başlangıçtaki yoğunluk dalgalanmalarının ortaya çıktığı en küçük bölgelerde dalgalanma şiddetinin en kuvvetli olması beklenir. Bunun anlamı şudur: küçük ölçekli dalgalanmalar en önce ortaya çıktıklarından büyüyüp gelişmek için çok zamanları vardır. Bu nedenle, zaman geçtikçe giderek daha büyük bölgelerde dalgalanmalar ortaya çıkmaya başlar. Daha küçük dalgalanmalar kümeleşirken bunların da genlikleri artar. Dalgalanmalar küçükten büyüğe doğru bir hiyerarşi içinde gelişir. Bu nedenle, gelişip güçlenmeleri için en uzun zamana sahip olduklarından, küçük dalgalanmalar en önce çökerler.

Soğuk karanlık maddenin baskın olduğu bir evrende ilk olarak ortaya çıkan cisimler, cüce galaksilere karşılık gelen küçük kütleli cisimlerdir. Bildiğimiz galaksiler, evrenin boyutlarının şimdikinin onda biri, yaşının da yaklaşık on milyar yıl olduğu döneme kadar ortaya çıkmazlar. Oluşan galaksiler, içlerinde baryonların barınabildiği soğuk karanlık maddeden yapılmış olan haleleri de kapsarlar. Baryonlar enerji yayar ve soğurlar, böylelikle de karanlık maddeden daha yoğun bir duruma geçerler. Ancak kütleçekimi termal basıncı altettiği zaman madde bulutu çökerek galaksileri oluşturabilir.

Çöken ilk bulutların boyutları, kısmen bulutların kendi kütle çekimi ile ona karşı koyma eğilimi gösteren, bulutun merkezi ve yüzeyi arasındaki termal basınç farkı arasındaki rekabet sonucunda belirlenir. Bulutun boyutları, bulutun bu dönemdeki kütleçe-



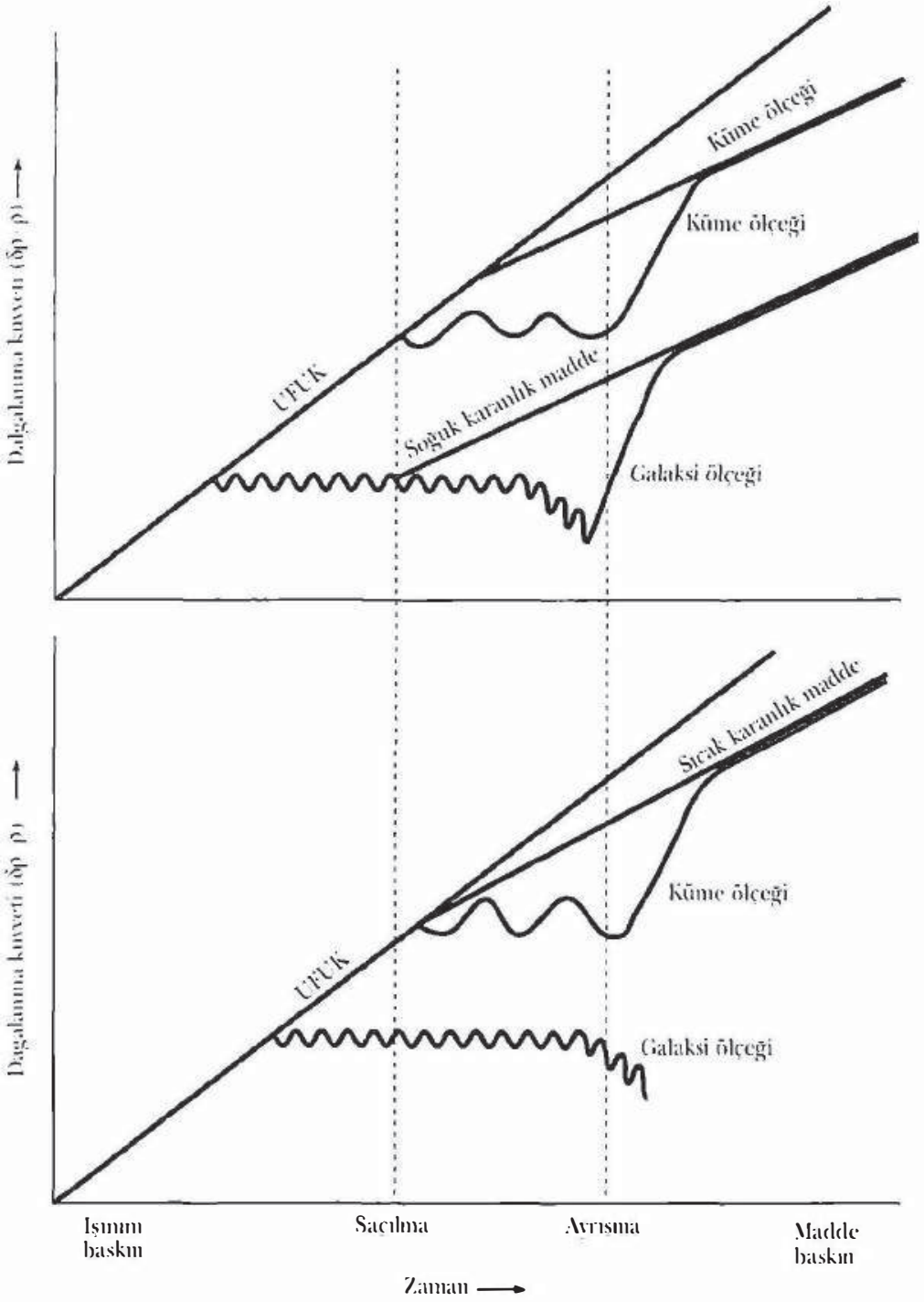
Soldaki ve ortadaki şekiller soğuk karanlık maddenin ve sıcak karanlık maddenin dağılımını gösteren bilgisayar simülasyonlarıdır. Şekillerde Samanyolu çevrenin dışında, kuzey galaksi kutbu merkezdedir. Sıcak karanlık madde modelinde yapılar yukarıdan aşağıya doğru geliştiğinden bu modelde çok daha güçlü, büyük yapılar ortaya çıkıyor. Sağda, gözlenen evreni tanımlayan gerçek veriler, soğuk karanlık madde modelinin öngörülerine daha yakındır.

kimsel potansiyel enerjisi ile termal enerjisininin, yani gaz atomlarının kütleçekimsel çökmeye karşı koyma eğilimindeki rasgele hareketlerinin (V_s) karşılaştırılması yoluyla hesaplanabilir. Kütlesi M ve yarıçapı R olan bir bulutun kütleçekimsel potansiyel enerjisi, şimdiki boyutlarına doğru çökerken yaptığı kütleçekimsel serbest düşme sonucu yaydığı enerji olup değeri de GM^2/R olur. Termal enerji ise bütün atomların kinetik enerjisi olup değeri $MV^2/2$'dir. Eğer kütle yeterince büyükse ya da başka bir deyişle

$$M_{Jeans}=V^3_s/G^{3/2}\rho^{1/2}$$

sınırını aşıyorsa, kütleçekimi termal basınca üstünlük sağlar. Yukarıdaki denklemde ρ gaz yoğunluğu olup $M \approx \rho R^3$ yazılmış ve 2 çarpanı ihmal edilmiştir. Bu denklem ilk olarak İngiliz astrofizikçi James Jeans tarafından çıkarılmıştır.

Şimdi Jeans kütlesi adı verilen, çökmek için gerekli olan en küçük kütle ölçeğini hesaplayabiliriz. Ayrışma döneminde, evrenin boyutları şu andaki boyutlarının binde biriydi ve sonuç olarak yoğunluğu bugünkünden bir milyon kat fazlaydı. Benzer biçimde, fon ışınımının sıcaklığı, günümüzdeki değerinden 1000 kat büyüktü. Sıcaklıktan V_s termal hızı bulunur. Bir kez bu sıcaklık ve yoğunluk bulundu mu, 1 milyon $M_\odot$ olduğu bulunan Jeans kütlesi hesaplanır ki bu da en küçük galaksilerin boyutudur. Bu nedenle, aşağıdan yukarıya senaryosunda böyle cüce galaksiler, en önce çöken en küçük yapılardır. Sonra gittikçe daha büyük yapılar, en sonunda da galaksi kümeleri oluşur.



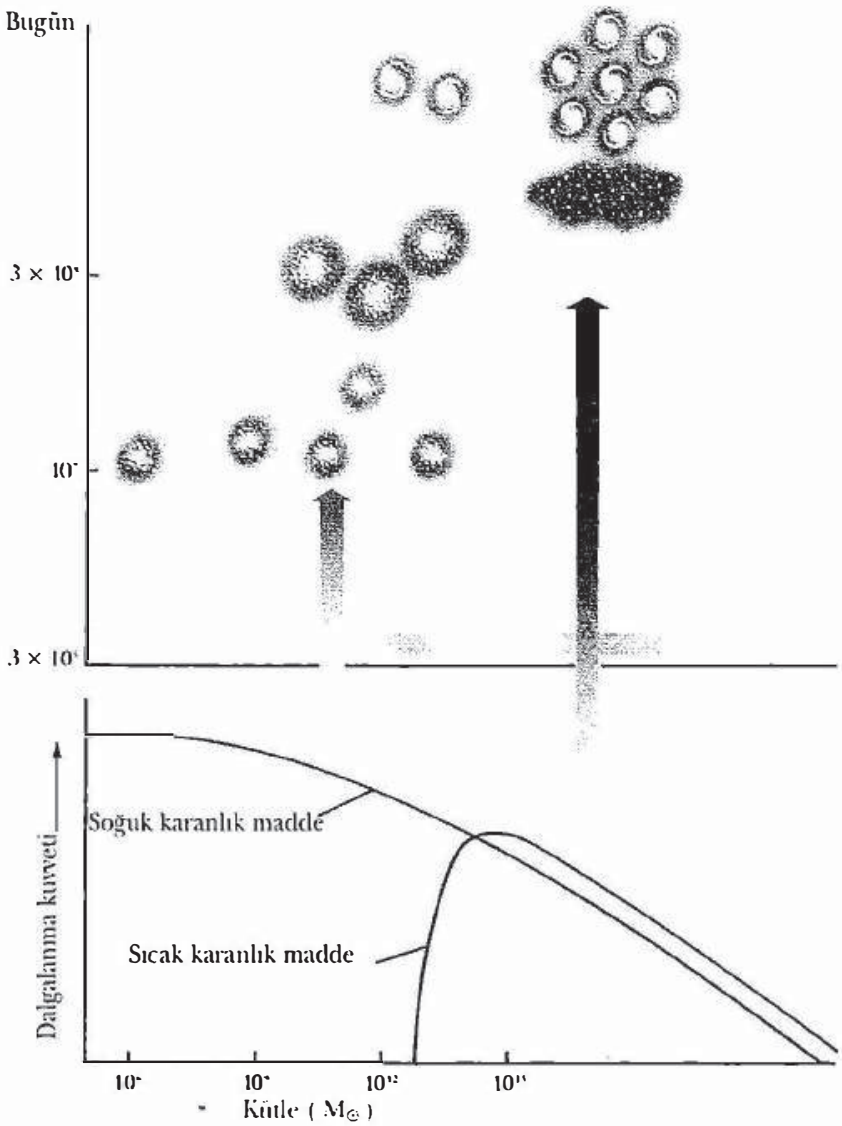
Soğuk karanlık maddenin egemenliğindeki bir evrende (üstte), evrende madde baskın hale gelir gelmez soğuk karanlık maddede küme ve galaksi ölçeklerinde galaksi dalgalanmaları gelişmeye başlar. Ayrışmadan sonra baryon yoğunluk dalgalanmaları, karanlık madde dalgalanmalarına yetişir. Ama sıcak karanlık maddenin egemenliğindeki bu evrende (altta), yalnızca küme ölçekli dalgalanmalar, maddenin egemen olduğu döneme kadar varlıklarını sürdürebilirler.

Dalgalanmaların Kaynağı

Kozmik yapıdan sorumlu olan yoğunluk dalgalanmaları ışınım ve maddenin ayrışmasından önce de vardı ama acaba bu dalgalanmaların kaynağı nedir? Şişen kozmoloji teorisinin icadıyla birlikte bu dalgalanmaların yapısını anlama çabalarımızda bir devrim gerçekleşti. Daha önce görmüş olduğumuz gibi, kuantum boşluğu çok küçük boyut ölçeklerinde de olsa kaçınılmaz olarak bu dalgalanmaları içerir. Bu dalgalanmaları yakalayan şişme, bunların şiddetlerini galaksi, ve galaksi kümelerinin boyutlarına kadar arttırır. Bunların tümü evrenin ilk 10^{-35} saniyesinde gerçekleşir. Genişleme sürdükçe ve ufuk genişledikçe, tanım olarak ışık hızıyla yayılan gittikçe daha büyük dalgalanmalar ortaya çıkar. Dalgalanmaların şiddetinin artması ise çok sonraya, evrende maddenin üstünlük kurduğu döneme rastlar. Şişme sırasında gerçekleşen dalgalanmaların başlıca iki temel özelliği vardır. İlki, yoğunluk dalgalanmaları adiyabatiktir. İkincisi ise örneklenme ölçeği ne olursa olsun, hepsinin şiddeti aynıdır.

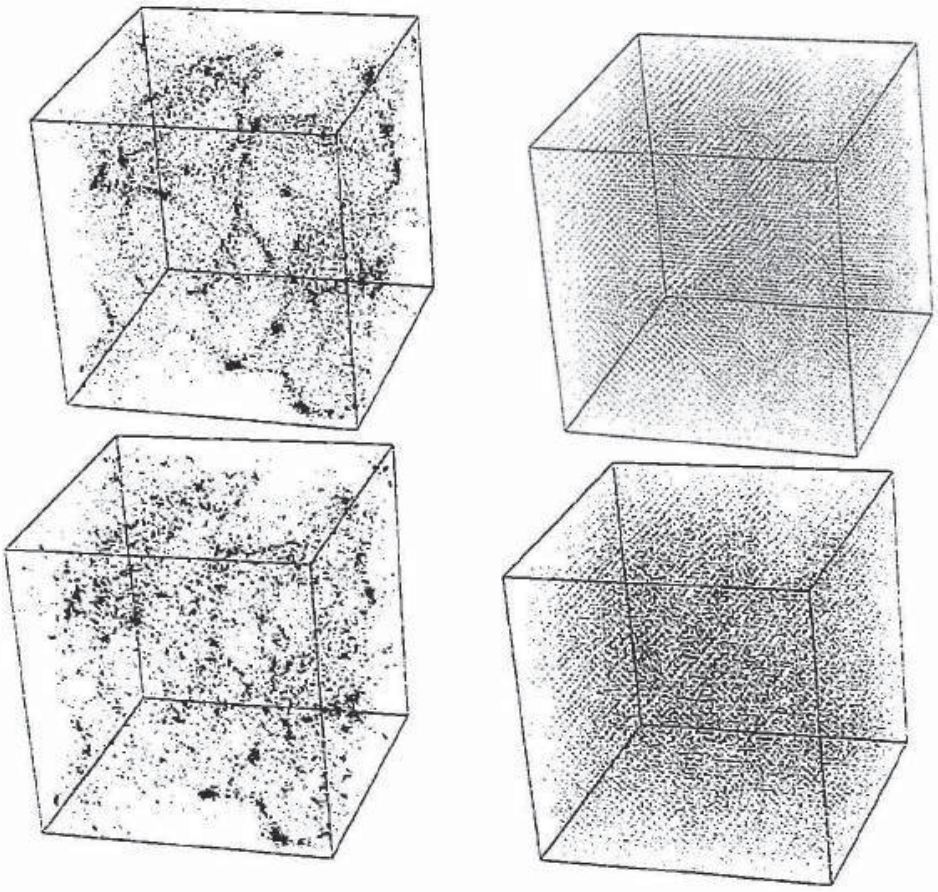
Şişme mucizesi olmasaydı, dalgalanmaların fiziksel kaynağı konusundaki bütün araştırmalar boşa çıkardı. Herhangi bir gazda rasgele dalgalanmalar beklenebilir ama evrenin ilk dönemlerinde ve galaksi ölçeklerinde böylesi dalgalanmalar büyük olasılıkla gözardı edilebilecek düzeydeydi. İçinde aynı gaz bulunan, birbirinin eşi iki kutu alalım: bu iki kutuda bulunan moleküllerin sayısı arasında her zaman kutularda bulunan ortalama molekül sayısının karekökü kadar fark olacaktır. Şimdi bunu Samanyolu'na uygulayalım: Samanyolu'nda yaklaşık olarak $N=10^{68}$ proton bulunmakta olup rasgele dalgalanmaların şiddeti $\sqrt{N}$ olarak alınabilir. Buradan dalgalanmadaki madde oranının $\sqrt{N}/N$ ya da $1/\sqrt{N}$ yani 10^{-34} olduğunu buluruz.

Aslında bu dalgalanma şiddeti son derece küçüktür, acaba zamanla neden artmıyor? Galaksi ölçeğindeki böylesi dalgalanmaları yalnızca evren en azından henüz bir aylıkken göz önüne almak anlamlıdır. Bu ölçekteki dalgalanmalar bir aydan önce de ortaya çıkabilir ama hiçbir şekilde büyüyemez. Yalnızca bir ay sonra, büyük patlamadan itibaren ışığın aldığı yol, sonuç olarak bir galaksiye dönüşecek olan bölgenin boyutlarını aşmış olur. Daha önceleri, bu dalgalanmalar henüz ufuktan büyük iken dalgalanmaların farklı bölgeleri büyük patlamanın değişik parçaları gibi evrim geçirir ve bu nedenle de uyumlu bir büyüme gerçekleşemez. Her ne kadar galaksi ölçeğindeki dalgalanmalar eninde sonunda kuvvetlenmeye başlasalar da önlerindeki başlıca engel, ilk bir aydan günümüze kadar kuvvetlenmek için yeterli zamanı bulamamalarıdır.



Soğuk karanlık madde senaryosunda galaksi ölçeğindeki dalgalanmalar çok güçlü olduğundan, erken evrim geçiren bulutlardan galaksiler oluşur. Sıcak karanlık madde senaryosunda geç zamanlarda önce dev madde bulutları oluşur.

Şişmenin bu problemi çözebilmesi de çok küçük ve kütleçekimi alanındaki dalgalanmaların büyük olmasını sağlayacak kadar az sayıda parçacıkla işe başlamasıyla mümkün olmaktadır. Bu dalgalanmaların kaynağı, göz önüne alınan çok küçük ölçeklerde kaçınılmaz olarak önemli bir rol oynayan kuantum belirsizliğidir. Şişme sonucunda kütleçekimi alanındaki minik dalgalanmalar günümüzde gözlenen makroskopik ölçeklere kadar büyürler. Şişme durduktan sonra evreni oluşturan en büyük ölçekli dalgalanmaya kadar her ölçekten dalgalanmalar kalmıştır.



Soğuk karanlık madde evreninin (solda) ve sıcak karanlık madde evreninin (sağda) evrimini gösteren üç boyutlu bilgisayar simülasyonları. Simülasyonlar belirli ilk koşullardan (üst) evrenin 10 kat genişlediği günümüze doğru gelişim göstermektedir. Her kutu, bir kenarı 64 megaparsek olan eş-hareketli bir kübü temsil etmektedir (evrenin genişlemesi çıkarılmıştır). Sıcak karanlık madde modeli soğuk karanlık madde modeline göre çok daha belirgin ipliksi yapılar, düzlemler, düğümler ve süperkümelerin ortaya çıkmasına neden olmaktadır.

Dalgalanmaların bir başka önemli özelliği de oluştukları tüm ölçeklerdeki şiddetlerinin aynı olmasıdır. Dalgalanmaların ölçekten bağımsız olarak aynı şiddete sahip olmalarını sağlayan bu ölçek değişmezliği şişme teorisinin önemli öngörülerinden biridir. Bununla birlikte teori, dalgalanma şiddetinin gerçek değeriyle ilgili bir öngörüde bulunamaz. Günümüzde gördüğümüz yapının, küçük dalgalanmaların kütleçekimsel kararsızlığından kaynaklanmış olmaları için ilk dalgalanma düzeyinin 10^{-5} civarında olması gerekir. Aşağıda göreceğimiz gibi bu düzeye yakın sıcaklık dalgalanmaları COBE Uydu-

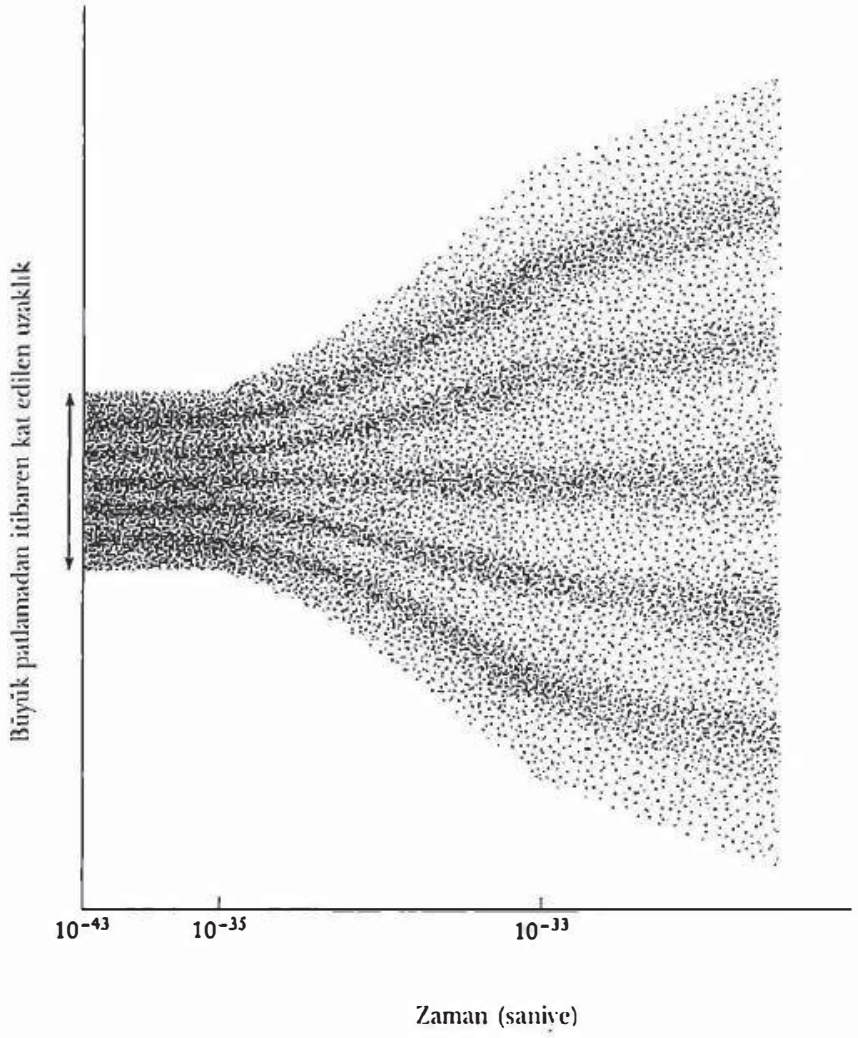
su tarafından ölçülmüş olduğundan, şişme döneminin başlangıcındaki dalgalanmaların şiddetinin bu kadar olabileceğini biliyoruz. Aslında ölçülen dalgalanma düzeyinin gereksinme duyulana bu kadar yakın olması dikkat çekicidir. Bu raslantı şişme fikrini desteklemektedir. Bu nedenle de soğuk karanlık maddenin gerçekliğinden kuşku duymamamız gerekir.

Gerçekten de bu sonuç, şişme modeline giren ve değerlerinden pek emin olmadığımız parametrelerin sınır değerlerini bulmak için kullanılabilir. Şişme modeli, tek bir çözüm önermekten çok uzaktır: şişmenin süresi, ivmelenmenin derecesi ve dalgalanmaların ortaya çıkması gibi örneklerde görünüşe göre rasgele seçimler yapılmaktadır. Şişmenin enerji ölçeği her gün kullandığımız fizikten çıkarılabildiği için standart parçacık fiziği teorisinin yol gösterici etkisi çok azdır.

Parametreler, başlangıçta 10^{-5} düzeyinde bir dalgalanma yaratacak şekilde seçildiği zaman şişmenin gerçekten uygulanabilir bir teori olduğunu anlıyoruz. Kabul etmek gerekir ki parametrelerin, özellikle de şişmeyi yaratan enerji kaynakların büyük bir dikkatle seçilmesi gerekir. Şişme önceden öngörülemez. Bunun yerine kozmoloji uzmanları gerçekleşmiş olan şişme ile ilgili olan parametreleri, gözlemlerle şişmenin yoğunluk dalgalanmaları gibi kalıntılarını karşılaştırmak yoluyla elde ederler.

Eğer şişme, başlangıç koşullarından bağımsız olarak gelişmekte olsaydı, bu iyi olurdu ama ne yazık ki durum böyle gibi gözükmüyor. Büyük patlama modelimizde bir zaman sınırı var ki buna, öncesinde hemen hemen hiçbir şey bilmediğimiz Planck zamanı diyoruz. Şişme için bir model kurarken evrenin belli bir biçimde başladığını kabul etmek zorundayız. Bu, genişlemedeki düzensizlikler ve yön bağımlılıkları olabileceği gibi uzayda daha önceden var olan bir eğrilik de olabilir. Hatta çeşitli atom altı parçacıkların varlığını ve bunlar arasındaki ilişkileri de varsaymak gerekir çünkü bunlar, çağdaş teorilerin tanımladığı gibi olmak zorunda değillerdir. Aslında kuantum kütleçekimi teorileri uzayın bile üç değil on ya da daha fazla boyutlu olduğu ve Planck zamanından sonra şu an içinde yaşadığımız uzaya dönüştüğü bir başlangıcı savunurlar. Tüm bu olasılıkların evrenin başlangıç koşulları olduğu düşünülebilir.

Bu kadar çeşitli başlangıç koşulları arasında uzaydaki kırışıklıkların düzelmesinin en başarılı açıklaması şişmeyi içeren modellerden gelmiştir. Oysa eğriliğin çok büyük olduğunu kabul eden ve hiç şişme öngörmeyen modeller vardır. Şişme öngören parçacık fiziğinin ayrıntılarına bakılacak olursa, şişmenin genel bir reçetesini elde etmek müm-



Şişme, maddedeki yoğunluk dalgalanmalarının ölçeğini genişletir. Zaman geçtikçe dalgalanmalar da daha belirgin hale geliyor.

kün görünmemektedir. Şişme için sonsuz sayıda başlangıç koşulu var olup bunların hiç biri bugün gözlediğimiz evrene benzer bir yapı verememektedir.

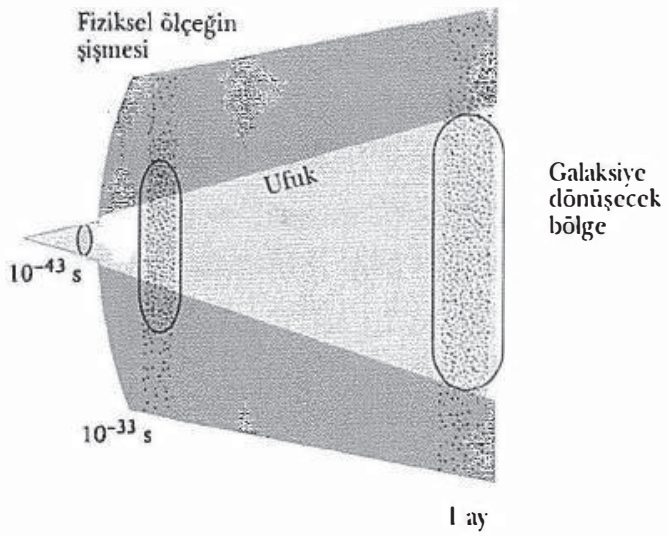
Buradan çıkan sonuç ise anlamamız gereken yalnızca bir evren olduğu gerçeğidir. Doğal gözükmediklerinden, parçacık fiziğinde çok küçük ve çok büyük boyutsuz sayılardan ve dolayısıyla bazı başlangıç koşullarından dikkatle kaçınılır. Kozmoloji uzmanlarının eğilimi ise biraz daha farklıdır: birincisi, incelenebilecek yalnızca bir evren olduğundan 'doğallık' kavramı tartışılabilir. İkincisi ise belki de görünüşe göre var olan 'ince ayar', yutulması o kadar da zor bir ilaç değildir. Sonuç olarak, şişmeye yol açan ve büyük olasılıkla tek olan başlangıç koşullarını verecek bir kuantum kütleçekimi teorisinin ortaya çıkacağını umabiliriz.

Baryon Egemenliğinde Bir Evren

Baryonların, karanlık maddenin en önemli bileşenleri olmadığını iddia etmek için güçlü kanıtlar bulunabilir, ama gene de baryonlar karanlık maddenin var olduğunu bildiğimiz tek adayıdırlar. Karanlık maddenin tümünü açıklayacak miktarda baryon var olup olmadığı bilinemiyor ama baryon egemenliğindeki bir evrende büyük ölçekli yapıların evrimini yeniden incelemek oldukça öğretici olacaktır.

Karanlık maddenin yalnızca baryon kökenli olduğunu varsayalım. Bu durumda nükleer sentez hesaplamalarının doğru olması için yoğunluğun, kritik yoğunluğun en çok yüzde onu kadar olması gerekir. Bu durumda uygulanabilir bir dalga modeli kurabilmek için çok eskiden gerçekleşmiş olan adiyabatik dalgalanmaları kullanamayız. Düşük yoğunluğa sahip olan bir evrende büyük başlangıç genlikleri olmaksızın adiyabatik yoğunluk dalgalanmalarından galaksilerin oluşabilmesi için yeterince zaman yoktur. Sonuç olarak bunlar kozmik mikrodalga fonunda aşırı dalgalanmalara yol açarlar.

Bir başka yaklaşım ise gene çok eskiden gerçekleşen entropi dalgalanmalarına dayanır. Kara cisim fotonları karmaşanın en son aşamasını temsil ederler. Entropi de evrendeki protonların sayısına oranla bu fotonların sayısının bir ölçüsü olarak düşünülebilir. Entropi arttıkça ortam tam bir kara cisim fotonları çorbasına dönüşür. Galakside yaşamlarını sürdüren her yıldızın eninde sonunda gideceği yer olan en büyük kütleli kara delikler bile sonsuz uzak bir gelecekte buharlaşarak tümüyle ışınıma dönüşür. Eğer baryon sayısı nükleer sentezin öngörüleriyle hesaplanırsa, evrendeki her protona karşılık kara cisim ışınımında yaklaşık 3 milyar foton bulunur. Yıldız ışığı kaynaklı fotonların katkısı ihmal edilebilir düzeydedir. Normal olarak foton sayısının baryon sayısına oranı, baryon üretim fiziği tarafından bir kez belirlendikten sonra her zaman sabit olur.



Büyük patlamadan bir ay sonra ufka önce galaksi ölçekli madde yoğunluk dalgalanmaları girer.

Bununla birlikte baryon sayısının kaynağı konusunda belirli bir fikrimiz

yoktur. Belki de önceki bölümlerde tartışıldığı gibi, şişme döneminin bitmesinden kısa bir süre sonra CP ihlalinin bir sonucu olarak ortaya çıkmıştır. Böyle bir evrende baryon sayısı her yerde sabit olur. Oysa şişme indirimi yapıldığında, evrenin erken dönemlerinde bölgeden bölgeye değişen bir baryon sayısı olduğu da pekâlâ düşünülebilir. Bu değişmeler en eski entropi dalgalanmalarına eşdeğerdir. Entropi dalgalanması ışınımın düzgün tutulduğu fakat uzaydaki baryon yoğunluğunun değişmesine izin verildiği dalgalanmaya eşdeğerdir.

Baryon egemenliğindeki evrenin açık olması gerekir. Oysa şişme, açık evrene yol açmaz. Bu nedenle yoğunluk dalgalanmalarının her ölçekte değişmez olduğu yolundaki şişme öngörüsü uygulanamaz. Açık bir evrende entropi dalgalanmalarının genliklerinin dağılımı için hiçbir rehber yoktur. Teorisyenler bu dalgaların dağılımını önceden kestiremez, bunun yerine gözlenen büyük ölçekli yapıyı en iyi üretebilecek olan dağılım seçilir. Yöntem şudur: galaksi kümeleri ve süperkümelerini oluşturan dalgalanmaların ilk genlikleri konusunda farklı tahminler yapılır ve bu kümelerin oluşumunun bir bilgisayarda simülasyonu yapılarak tahminler kontrol edilir. İlk entropi dalgalanmaları her zaman çok eski galaksi oluşumlarına yol açarlar.

Açık bir evrende yapı gene aşağıdan yukarıya doğru biçimlenir. Oysa düşük yoğunluklu bir evrenin geç dönemlerinde kütleçekiminin dalgalanmaların büyümelerine katkısı önemsizdir. Tüm hareket ilk dönemlerde olup biter. Eğer evrenin ortalama yoğunluğu, kapalı olması için gerekli olan yoğunluğun yalnızca yüzde onu kadarsa, büyük yapılar en son 10 kırmızıya kayma değerinde yani günümüzden başlangıca doğru olan zamanın yüzde 90'ı sırasında ortaya çıkar. Bunu izleyen dönemlerde evrenin kinetik enerjisi kütleçekimsel potansiyel enerjisine üstün gelir. Daha önceleri ise bu iki enerji biçimi yaklaşık bir denge durumundadır. Başka bir deyişle, büyük kırmızıya kayma değerlerinde açık ve kapalı evrenler arasında bir fark yokken, küçük kırmızıya kayma değerlerinde bu evrenler farklılaşır.

En iyi simülasyonlar başlangıçta küçük ölçekli dalgalanmaların büyük ölçeklilerden çok daha kuvvetli olması gerektiğini gösterir. Bu nedenle ilk küçük yapılar yeniden birleşme döneminden hemen sonra, kırmızıya kayma değerinin 1000 olduğu zaman, yani büyük patlamadan yalnızca 300 000 yıl sonra ortaya çıkar. Bu yapıların ölçekleri Jeans kütlesine yakın yani 1 milyon Güneş kütlesi civarındadır ki bu da küresel kümelerin ya da en küçük cüce galaksilerin kütlesine yakındır. Evren 10 kat daha genişlediğinde galaksilerin, 100 kat genişlediğinde ise galaksi kümelerinin ortaya çıktığı bir yapı hiyerarşisi gelişir. Bu nedenle,

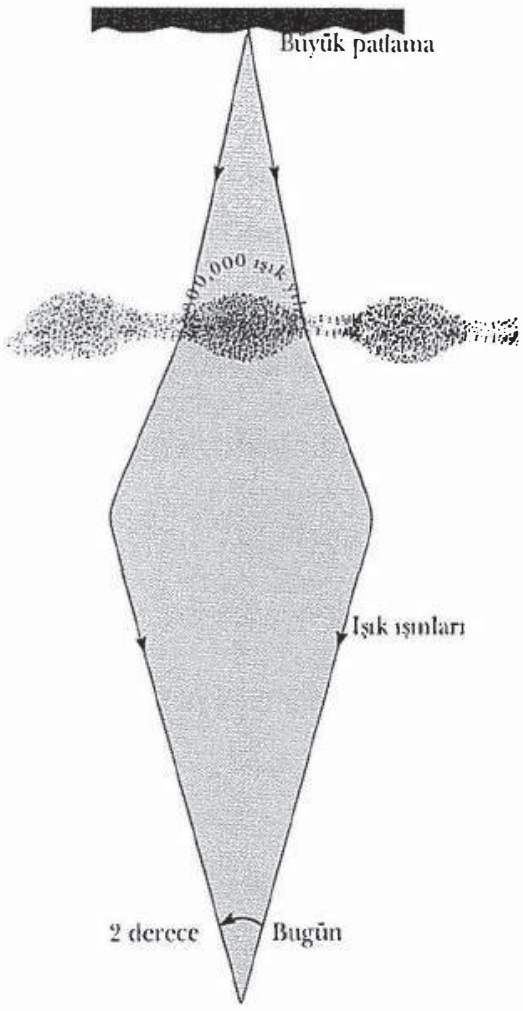
başlangıçtan hemen hemen 1 milyon yıl sonra şu an gözlediğimiz evren yerli yerindedir. Bu ise kritik yoğunluktaki bir kozmoloji modelinin sonucundan çok farklı bir beklentidir.

En uzak galaksileri inceleyen kozmoloji uzmanları en eski geçmişe uzanarak birbirine rakip olan yapı oluşumu teorilerini sınayabilirler. Özellikle oldukça eski dönemlerdeki galaksi kümelerinin gelişimi gözlemleri geçmişe yönelik çok kuvvetli bir kozmoloji yöntemi olarak kullanılabilir.

Dalgalanmaların Saptanması

Şişme kozmolojisinin en zorlayıcı biçimleri bütün ölçeklerde eşit şiddete sahip olan dalgalanmalar öngörür. Daha önceleri de basitliğinden dolayı savunulan bu dağılım yalnızca şişme kozmolojisine özgü değildir. Burada önemli olan şudur: şişme, bu biçimdeki dalgalanmaları öylesine büyük ölçeklerde öngörür ki, ışınımın son kez saçılmasından önce ışık dalgalanmanın bir ucundan diğerine gitmek için yeterli zamanı bulamadığından dalgalanmaların yaratılması ya da yok edilmesi ile ilgili herhangi bir fiziksel süreç için yeterli zaman yoktur. Işık, büyük patlama ile son saçılma zamanı arasında 300 000 ışık yılı yol almıştır ki günümüzde bu uzaklık yaklaşık 300 megaparsek olarak ölçülmektedir. Bu uzaklık gökyüzünün açısal ölçeğinde 2 dereceye karşılık gelmektedir. Eğer kozmik fon ışınımı birkaç derecelik ölçeklerde gözlenirse, doğrudan gökyüzünün şişme döneminde oluşmuş olan çok küçük sıcaklık farklarına bakılıyor demektir.

Teorisyenler bu ateş topu ışınımındaki dalgalanmaların şiddetini 1967 yılından beri hesaplıyorlar. Bu hesaplar sürekli olarak daha duyarlı bir biçimde yenilenmekte ama gene de deneysel üst sınırların hemen altında kalmaktadırlar. Teorisyenler maddenin yoğunluk olarak ışınıma ilk kez üstün geldiği geçiş dönemine kadar dalgalanmaların büyümeye başlayamayacağını biliyorlar. Dahası, dalgalanmalar yalnızca ışığın büyük patlamadan bu yana aldığı yol ufkun içinde kaldığı sürece büyüyebilirler. Yalnızca ufkun içinde kalan dalgalanmalar 'nedensellik bağları' ile birbirlerine bağlıdırlar, ki bu da dalgalanmaların, kütleçekimi gibi fiziksel süreçlerin tüm dalgalanma üzerinde etkili olacağı kadar küçük olmaları anlamına geliyor. Sonuç olarak, ışınımın üstün geldiği dönemde ilk olarak ufka giren küçük ölçekli dalgalanmaların büyüme genliği, maddenin üstün geldiği dönemde ufka giren daha büyük ölçekli dalgalanmalara göre daha küçük olmaktadır.



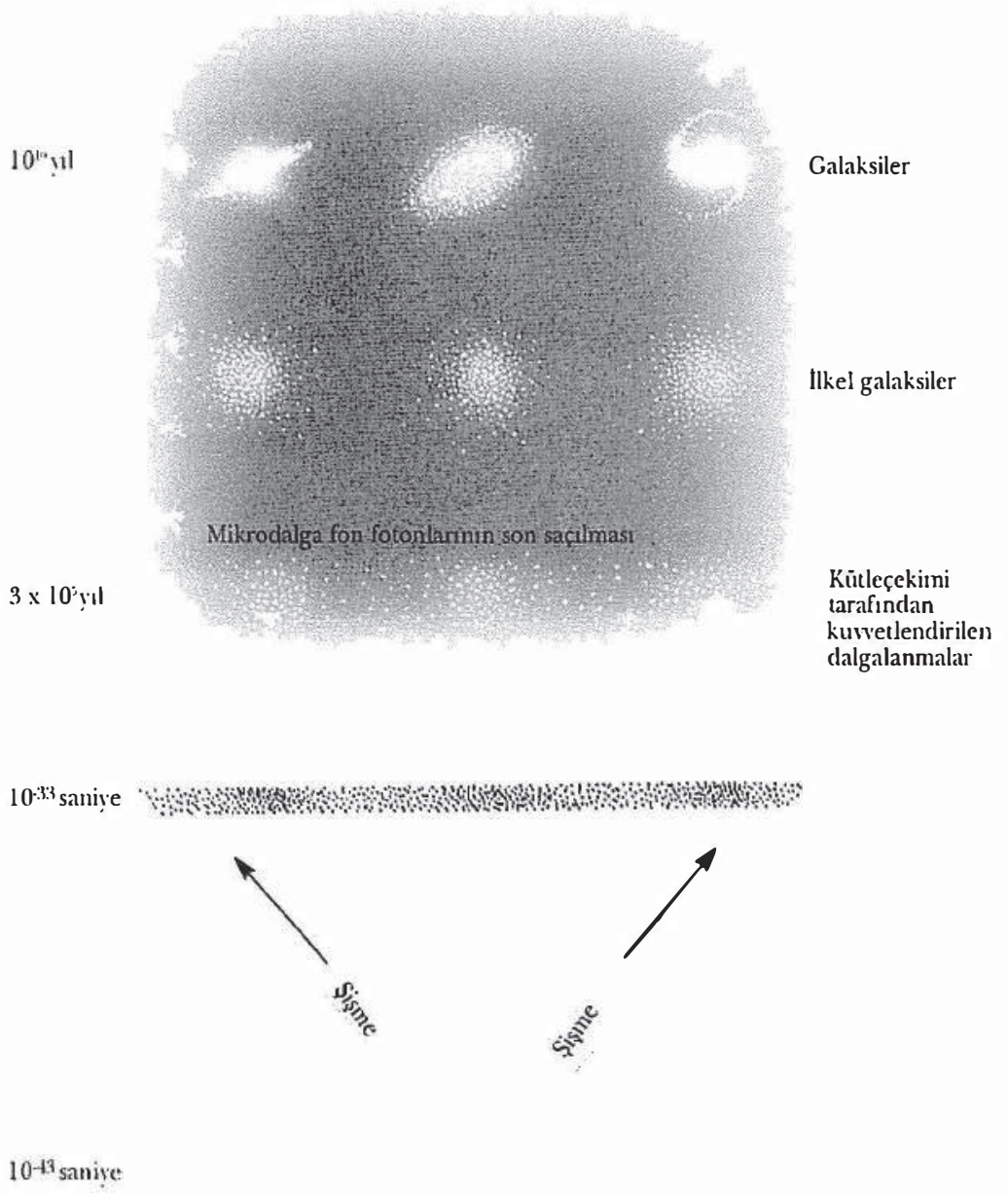
Son saçılmadaki ufuk ölçeği gökyüzünde 2 derecelik bir açı kaplar.

Madde ve ışınım yoğunluğunun eşit olduğu geçiş dönemindeki ufuk ölçeği, günümüzdeki 10 megaparsek uzaklığa karşılık gelir. Yoğunluk dalgalanmalarının dağılımına damgasını vurmuş olan bu ölçek, dalgalanmaların günümüzdeki dağılımını gösterir. Örneğin, birkaç megaparseklik ölçeklerde galaksi kümeleşmeleri yoğun olduğundan bu ölçeklerdeki tek önemli kuvvetin kütleçekimi olduğu düşünülmektedir. Bu da astronomların fiziğin basit olduğunu düşündükleri ölçeklerde teori ve gözlemi güvenli bir biçimde karşılaştırabilecekleri yolunda bir beklentiyi pekiştirmiştir.

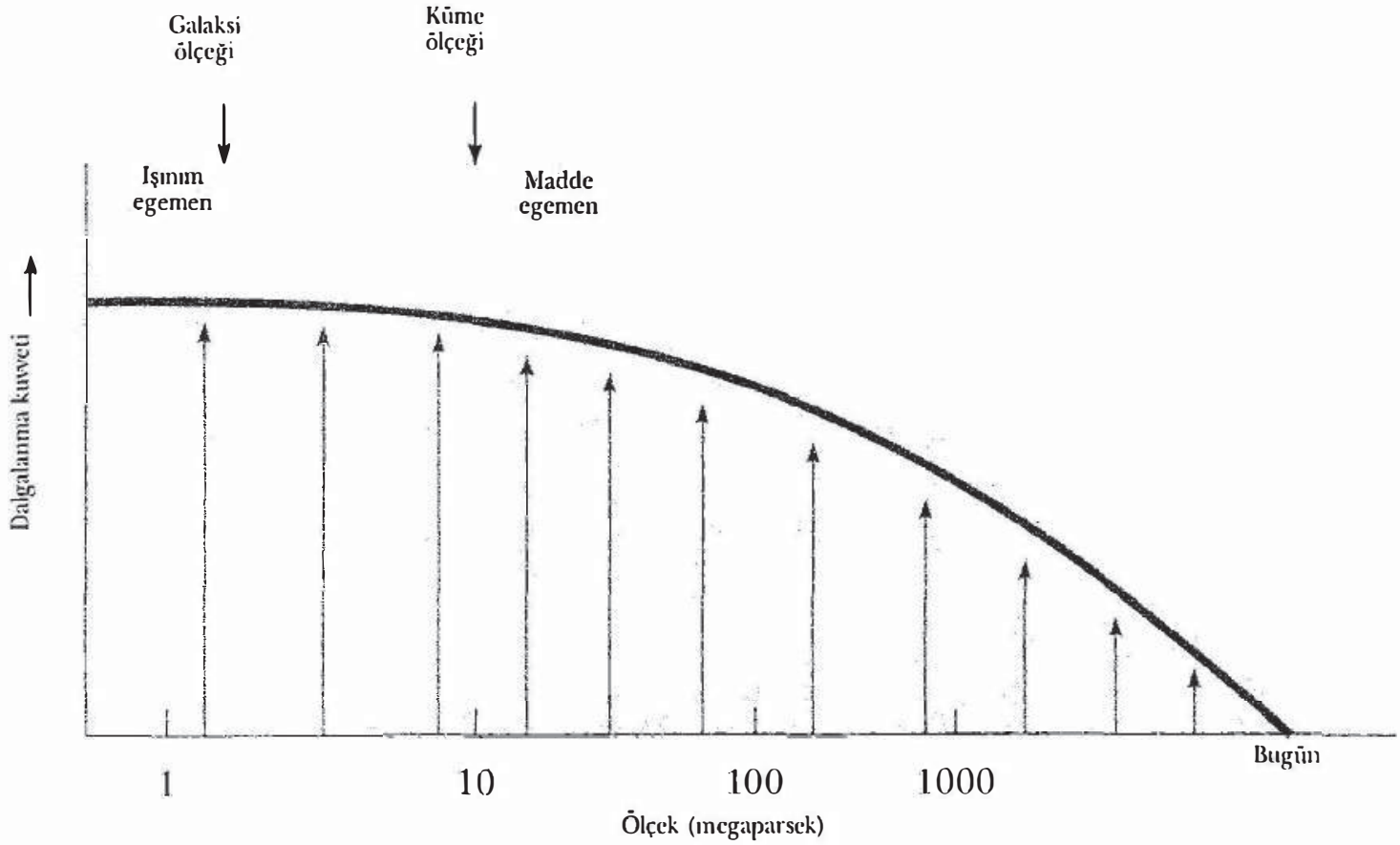
Işınımın son saçılma dönemindeki dalgalanmalar kozmik mikrodalga fonunda kalıcı izler bırakmıştır. Bu dönemde fotonlar kütleçekimi alanının hafifçe daha güçlü olan kütleçekimi alanı içinde saçılmışlar ve kütleçekimi alanından çıkarken enerji kaybetmişlerdir. Enerjilerinde bu yolla küçük miktarlarda kırmızıya kayma olan bu fotonlar kozmik mikrodalga fonunda belli belirsiz soğuk noktalar olarak gözlenirler. Bunun tersine, son saçılma döneminde madde dağılımında boşluklar olan yerlerde, şimdi kozmik mikrodalga fonu üzerinde gene belli belirsiz daha sıcak olan noktalar bulunmalıdır. Bu soğuk ve sıcak noktaların çoğu büyük açısal ölçeklerde küçük sıcaklık dalgalanmaları olarak gözlenebilir olmalıdır. Daha küçük ölçeklerde ise ışınımı saçan maddenin kendisi yoğunluk dalgalarının yarattığı kütleçekimi alanında hareket ettiğinden, durum biraz daha karmaşıktır. Sonuçta ortaya çıkan Doppler kaymaları, sıcaklık dalgalanmalarını daha da güçlendirir.

Soğuk karanlık madde teorisi ile çeşitli açısal ölçeklerde beklenebilecek dalgalanma dağılımlarının biçimi kestirilebilir. Bu kestirimlerin kozmik mikrodalga ışınımında gerçekten gözlenenlerle karşılaştırılmasıyla bu teori sınanabilir. En basit şişme teorisinin, başlangıçta her ölçekte aynı genlikte dalgalanmalar öngördüğünü biliyoruz. Birkaç derecelik açısal ölçeğin üzerinde bu öngörü ile, tarihleri boyunca aralarında nedensel bir iliş-

ki bulunmayan, doğrudan şişme yoluyla bize ulaşan dalgalanmalar kastediliyor. 1 derecelik açısal ölçek civarında dalgalanmalar ile çevremizde gözlediğimiz evrenin yapısı arasında doğrudan bir ilişki kurulabilir; dalgalanmalar, eninde sonunda dönüşecekleri galaksi dağılımının 100 megaparseklik ölçeği üzerine oturtulabilirler. Basit, 'tercihli olmayan ölçek' tayfı, 1'den 90 dereceye kadar olan açısal ölçeklerde yaklaşık 100 000'de 1 oranında yoğunluk dalgalanmaları öngörülmesine yol açar.



Büyük patlamadan 10^{-33} saniye sonraki minik yoğunluk dalgalanmalarından tam oluşmuş galaksilere kadar yoğunluk dalgalanmalarının evrimi.



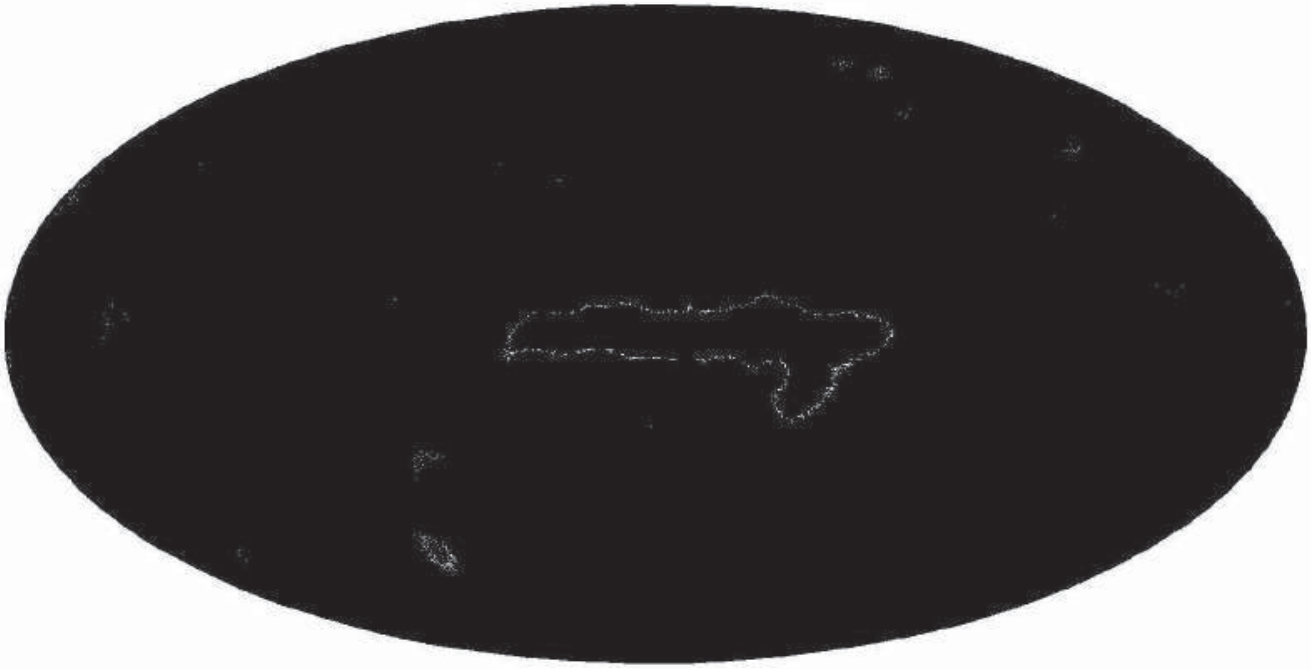
Madde egemenliğinden ışınım egemenliğine geçiş sırasında ufkun boyutları farklı ölçeklerdeki dalgalanmalar arasındaki doğal bölünmeyi işaretler. Daha küçük ölçeklerdeki dalgalanmalar günümüze kadar ufkun içinde aynı güçlenme aşamalarını geçirmişlerdi. Daha büyük ölçeklerdeki dalgalanmalar ise ufkun içinde gittikçe daha az büyümüşlerdir.

Kuşkucu yaklaşılıp şişme ile ilgili bütün kavramlar reddedilse bile galaksi kümelenmeleri, süperkümelenmeleri ve çevremizde gördüğümüz büyük ölçekli madde hareketlerinin açıklanması zorunludur. Eğer bunlar kütleçekimsel kararsızlık teorisine göre minik ve çok eski yoğunluk dalgalanmalarından başlayarak büyüdüyse, bu durumda mikrodalga fonunda kaçınılmaz olarak daha küçük dalgalanmaların olması gerekir.

1992 yılında kozmik mikrodalga fonunda az çok beklenen düzeyde dalgalanmalar bulunduğu duyurulduğunda kozmoloji uzmanları rahat bir nefes aldılar. Gerçekten, gözlenen genlik, büyük ölçekli yapıları doğurması beklenen genliğe oldukça yakındı. Bununla birlikte gelecek bölümde göreceğimiz gibi, en azından soğuk karanlık madde teorisinin en basit biçimi açısından, ayrıntılı bir karşılaştırma pek de başarılı olmuş sayılmaz.

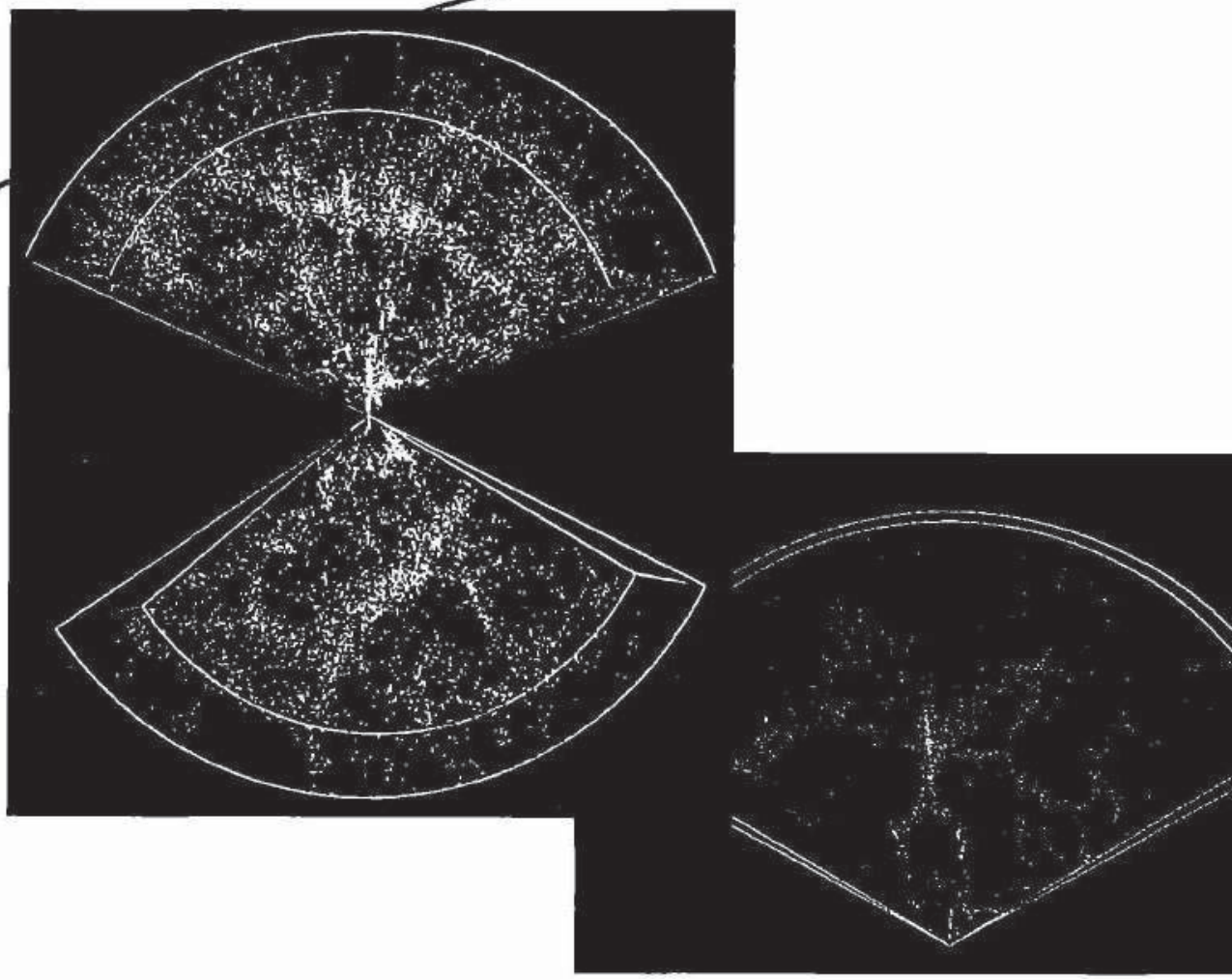
Dalgalanmaların varlığı, COBE'nin duyurusunun üzerinden daha bir yıl geçmeden sıcaklık düzensizliklerini araştıran birçok grup tarafından doğrulandı. Güney Kutbu'nda ve balonlara yerleştirilen teleskoplarla yapılan deneyler, 1/2 dereceden 10 dereceye kadar olan açısal ölçeklerde 100 000'de 1 ile 3 arasındaki oranlarda dalgalanmalar olduğunu ortaya çıkardı. Gerçekten de 1993 yılı, birbirinden bağımsız çalışan gruplarca yapılan en az 8 deneysel dalgalanma saptanması duyurusuna tanıklık etti. Bu dalgalanmalar daha çok COBE'nin hazırladığı gökyüzü haritasının çözünürlüğünden daha küçük açısal ölçeklerde bulundu. Civardaki galaksi dağılımının gözlenen en büyük yapılarının doğrudan ataları, bir derece ya da daha küçük ölçeklerdeki dalgalanmalardır.

Bu konuda dikkatli olunması gerektiği yolunda bir notun da eklenmesi gerekir. Galaksimiz aynı zamanda düşük düzeyde dalgalanmalar içeren bir ışınım da yaymaktadır. Bunun kaynağı da yıldızlararası sinkrotron ışınımı (yıldızlararası manyetik alan çiz-



COBE Uydusu'ndaki DMR deneyi tarafından hazırlanan gökyüzünün 53 gigahertz frekansındaki mikrodalga haritası. Haritada sıcak (mavi) ve soğuk (kırmızı) noktalar mikrodalga fon genliğinin 100.000'de 1'i düzeyindeki bir duyarlılıkla gösterilmiştir. Galaksimizin hareketinden kaynaklanan dipol sinyali ve ön plandaki galaksiye ilişkin salmalar bu haritanın hazırlanması sırasında verilerden çıkarılmıştır. Çıkartma işleminin mükemmel olmadığı merkezdeki mavi çizgide bellidir. Tek tek dalgalanmaların, zamanın yalnızca yüzde ellisinde gerçek olmasına karşın haritanın istatistiksel analizi dalgalanmaların varlığını doğrulamaktadır.

gileri çevresinde sarmallar çizen çok hızlı elektronların yaydığı radyo dalgaları), bremsstrahlung (yıldızlararası elektrik alanlarında ivmelenen elektronların yaydığı ışınım) ve yıldızlararası tozun yaptığı termal ışımadır. Ön plandaki bu gürültü özellikle birkaç derecelik ve daha küçük ölçeklerde ciddi etkiler yapmakta ve çoğunlukla gökyüzünün yalnızca küçük bir bölümünü inceleyen deneyleri olumsuz yönde etkilemektedir. Büyük ölçekli mikrodalga fonundaki dalgalanmalar kesinlikle kozmik kaynaklıdır. Daha küçük ölçekli deneylerden bazılarının gerçektek kozmik mikrodalga fonundaki dalgalanmaları ölçtüğü kesin ise de bazılarında kuşkusuz galaksiden kaynaklanan ışınımın katkıları azımsanamayacak düzeylerdedir. Küçük açısal ölçeklerdeki sıcaklık dalgalanmalarının kozmik fondan ne derece etkilendikleri de henüz tam anlamıyla açıklık kazanmamıştır.



Solda: Gökyüzünün 70 megaparsek derinliğinde ve 20 kiloparsek kalınlığındaki iki dili-
minde yer alan 15.5 kadire kadar parlaklıkları olan yaklaşık 5000
galaksinin konumlarını gösteren, üç boyutlu bir evren haritası. Bu haritada biz merkezd
yer alıyoruz. Kümelerdeki galaksilerin yerel hızlarının düzeltilmemiş olmasından kaynakl
nan etki her ne kadar "tanrının parmağı" etkisine
yorumlansa da gerçek neden zengin galaksi kümelerinin varlığıdır. Dış yayın
yer aldığı bölge uygun biçimde örneklenmemiştir ama içi yayın içinde yer alan bölgede de
boşluklar ve "Büyük Duvar" adı verilen büyük yapılar yer almaktadır. Büyük duvar, üs
dilimdeki parlak yatay yapıdır.
Sağda: Gökyüzünün daha ince olan bu diliminde "çırpı adam"a benzeyen
yapı Coma Galaksi Kümesi ve çevresidir.

11

Büyük Ölçekli Yapı

Belki de kozmolojideki en önemli gözlemsel kanıt evrendeki büyük ölçekli yapıların araştırılması sonucu ortaya çıkmıştır. Büyük teleskopların yardımıyla galaksileri ve onların evren günümüzdeki yaşının daha yarısında olduğu sıralarda uzaydaki dağılımını inceleyebiliriz. Amacımız büyük ölçekli bu yapıların evrimini anlayabilmektir. Teorilerimiz, tek önemli kuvvet kütleçekimi olduğu sürece, büyük ölçeklerde yapıların göreceli olarak basit ve düz bir biçimde geliştiğini öne sürüyor.

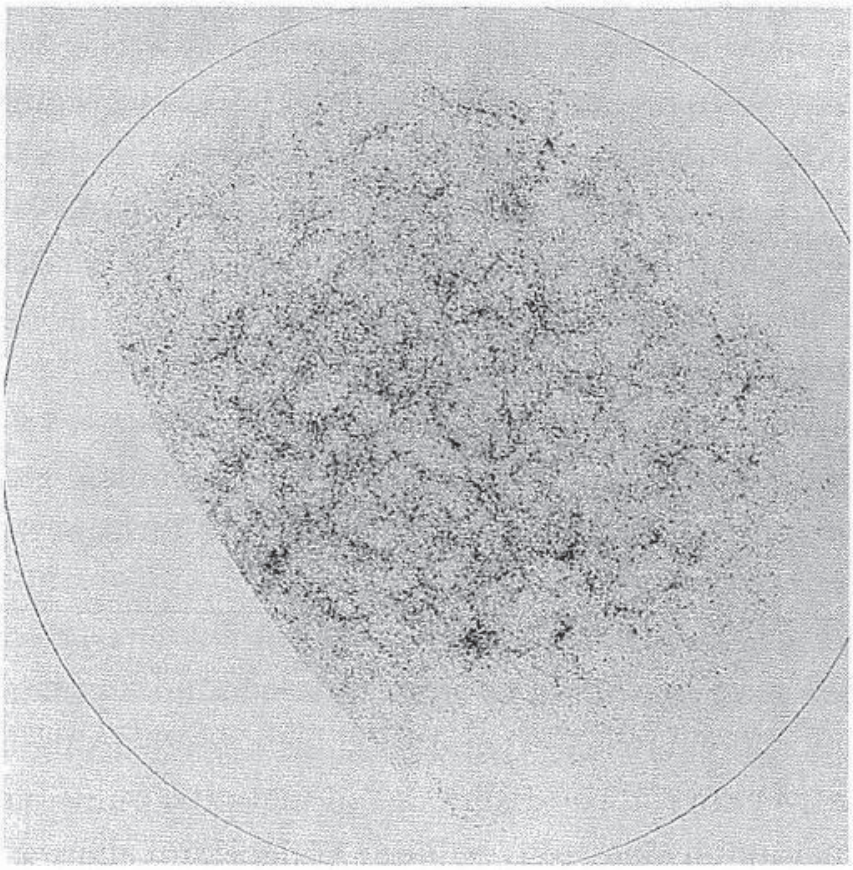
En Büyük Yapılar: Galaksi Kümeleri

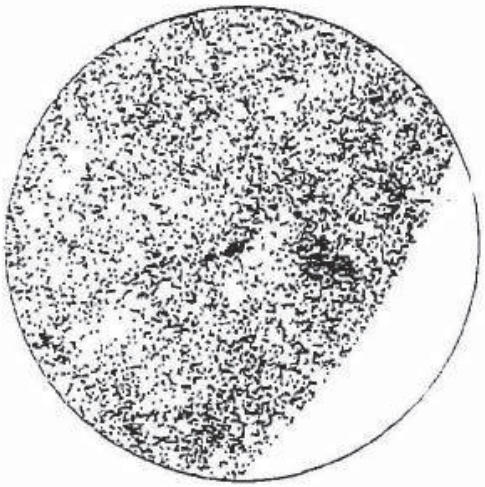
Bir galaksinin boyutları on binlerce parsekle ölçülür. Bir parsek 3.1 ışık yılına eşittir. Galaksilerin birbirlerine olan tipik uzaklıkları ise yaklaşık beş milyon parsek civarındadır. Ama istatistikler nasıl olup da Samanyolu'nun en yakın komşusu ve hemen hemen aynı büyüklükte bir galaksi olan Andromeda ile arasındaki uzaklığın yalnızca iki milyon ışık yılı olduğu sorusuna cevap veremiyor. Aslında galaksimiz, Yerel Küme adı verilen galaksi kümesinin bir üyesidir. Bazı galaksilerin en yakın komşuları ise daha da, belki on kat daha yakındır. Bir galaksi kümesinde durum böyledir.

Galaksi kümeleri, evrende yer alan, kendi kütleçekimlerinin etkisi altında olan en büyük madde birikimleridir. Zengin bir kümede, bir megaparsek küpte,karşılıklı kütleçekim alanlarının etkisi altında birbirlerinin çevresinde dönen binlerce ya da daha fazla galaksi bulunabilir. Aynı zamanda süperkümeler de, yani içlerinde kümelerin yer aldığı daha büyük kümeler de vardır. Örneğin Samanyolu Galaksisi, Virgo Süperkümesi'nin dış bölgelerinde yer almaktadır. Her ne kadar bir galakside bulunan bildiğimiz türden maddenin çoğu yıldızlarda bulunmaktaysa da kümelerde bulunan bu tür maddenin çoğunluğu, dağınık, sıcak x-ışını yayan gaz biçimindedir.

Galaksideki yıldızların olsun, kümedeki galaksilerin olsun yörüngedeki dönme hızları kütleçekimi alanını hesaplamakta kullanılan en önemli bilgilerdir. Bu hızlardan, galaksilerin dağılmadan birarada kalabilmeleri için kümenin kütlesinin yüzde 80'inin karanlık madde biçiminde olduğu sonucuna varıyoruz. Bu da evrendeki maddenin çoğunluğunun herhangi bir dalgaboyunda ışıma yapmayan, bilinmeyen ve görünmez bir madde biçiminde olduğu anlamına geliyor. Yıldızlar ve dağınık yıldızlararası madde biçiminde gözlenen maddeden çok daha fazlası hiçbir şekilde açıklanamıyor ve hesaplara girmiyor.

Hubble Uzay Teleskobu tarafından 0.4 kırmızıya kaymada alınan bir görüntüde sarmal ve elips biçimli galaksilerin yer aldığı, uzak küme görülüyor. Buna ek olarak birleşmenin sancılarını çekiyor gibi gözüken pek çok sistem var.





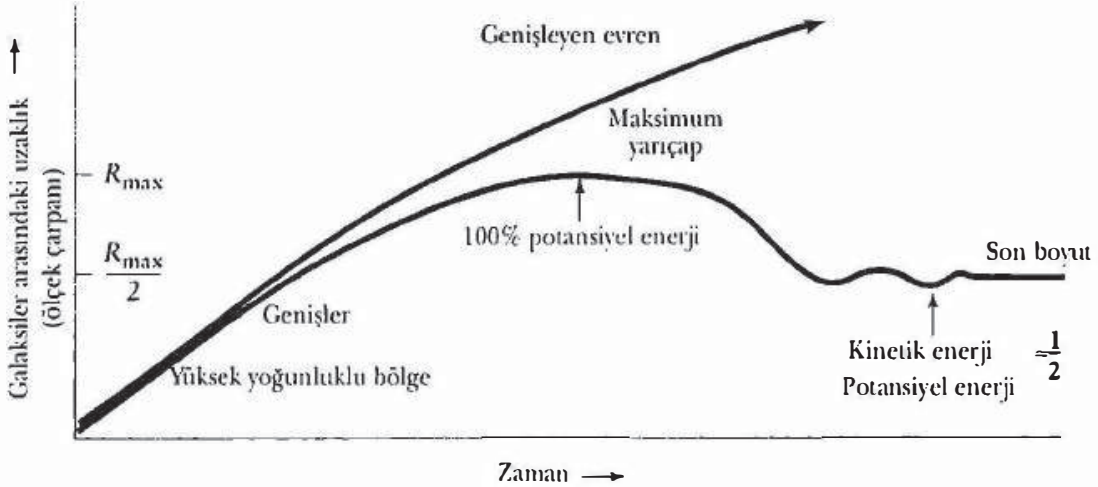
Alt sağda: Kuzey gökküresinin bu eşit alanlı haritasında 15.5 kadirden daha parlak, yaklaşık 10.000 galaksi gösterilmiştir. Galaksinin kuzey kutbu ortada olup Samanyolu, dairenin çevresi dışındadır. Coma Galaksi Kümesi galaksisinin kuzey kutbu yakınlarında görülüyor. Yakındaki Virgo Süperkümesi ise görülen en büyük galaksi yoğunlaşmasıdır. Alt Solda: Kuzey yarı kürede, tümü de 19. kadirden daha parlak olan bir milyon galaksinin haritası hazırlandığında, zenginlik bakımından Coma Kümesi'yle karşılaştırılabilecek olan pek çok başka küme de ortaya çıkıyor.

Her biri yeni oluşmuş olan ya da daha iyisi oluşmakta olan bir galaksiyi temsil eden bir grup madde topaklanması düşünelim. Bunlar büyük patlamadan sonra bir milyar yıl ya da daha fazla süredir birbirlerinden uzaklaşıyorlar. Galaksilerin kendilerinin nasıl oluştuğuna Bölüm 12'de bakacağız ama en büyük ölçeklerde büyük galaksi gruplaşmalarının gelişimini anlamak göreceli olarak daha basittir. İlk zamanlarda, yapı olarak daha basit bir kuvvet olan kütleçekimi sorumlu olduğundan, kümelerin oluşumu göreceli olarak daha az karmaşıktır.

Yapıların ne kadar kolay ortaya çıkabildiğini kavramak için, diyelim, 100 galaksilik bir küme oluşturacak, küçük bir ilkel galaksiler kümesini düşünelim. Böyle bir bölgedeki ilkel galaksilerin yoğunluğu, çevreye göre belki de yüzde on ya da biraz daha büyük bir oranda fazladır. Yaklaşık olarak aynı boyutlara sahip olan bir başka bölgede bulunan galaksilerin sayısı ise daha az ya da daha çok olabilir. Kozmik mikrodalga ışınımını bu kadar pürüzsüz biçimde üretebilmek için ilk dönemlerde son derece düzgün bir yapıya sahip olan evrende bile bu farklar kaçınılmazdır. Son derece düzgün olan bir evrende bile, bir bölgede bulunan galaksilerin ortalama sayısının karekökü kadar dalgalanma olabileceğinden, bir bölgedeki galaksi sayısının 90, diğerindekinin ise 110 olması mümkündür. Galaksi sayısının diğer bölgelere göre biraz fazla olduğu bölge, çevresindeki bölgelere biraz daha büyük bir kütleçekimi kuvveti uygular, dolayısıyla da bölgeye daha fazla sayıda galaksi çeker. Evrenin 10 kat büyüdüğü bir dönemde bölgedeki yoğunluk farkı yüzde on ve galaksi sayısı yüz on iken, yoğunluk farkı yüzde iki yüze ve galaksi sayısı da iki yüze çıkar.

Bu aşamada yerel bölge kendi üzerine evrenin genişlemesini önleyecek kadar büyük bir kütleçekimi kuvveti uyguladığından, bölgenin genişlemesi durur. Yoğunluk, gittikçe azalmakta olan çevre yoğunluğunun beş katını bulduğunda, bölgenin yarıçapı da en büyük değerine ulaşır.

En büyük genişleme yarıçapında, galaksilerden oluşan bulutun kinetik enerjisi sıfır, kütleçekimsel potansiyel enerjisi ise en büyüktür. Çökmeye başlarken bulutun potansiyel enerjisi azalır ve galaksilerin rasgele hareketleri biçimindeki kinetik enerji artmaya başlar. Kinetik enerji, (negatif) potansiyel enerjinin yarısına eşit olduğunda, bulut bir enerji denge durumuna girer. Bu, dinamik bir dengedir: bulutun kütleçekimi alanı artık zamanla değişmez. Rasgele hareket eden galaksilerin kinetik enerjisi, kütleçekimi kuvvetini dengeleyen bir basınç gibi davranır ve sonuç olarak ortaya, dengeli bir galaksi kümesi çıkar. Eğer bulut soğuyarak ve termal enerjisini çevreye yayarak daha fazla enerji kaybetmezse, çökmesi durur. Bu aşamada bulutun yarıçapı 2 kat küçülmüştür.



Evrenin yoğunluğu çok yüksek olan bir bölgesi, bir galaksi kümesi olmaya mahkumdur. Bu bölge yavaş yavaş genişleyen fondan kopar, maksimum bir boyuta ulaşır, kinetik ve potansiyel enerjileri arasında denge kurulduğu zaman ise maksimum yarıçapın yarısında kararlı bir hale gelir.

Her ne kadar yukarıdaki olay zinciri bir bölgenin çökerek bir galaksi yumağı oluşturmasını tanımlıyorsa da, başlangıçtaki fizik zayıf bir biçimde etkileşen ve çökerek bir hale oluşturan karanlık maddenin fiziği ile tıpatıp aynı olup çökerek tek bir galaksi oluşturan gaz bulutunun fiziği ile çok benzerdir. Tek fark şudur: gaz, yıldızları oluşturmak üzere parçalanıp dağılmadan önce gaz atomları termal enerjilerini çevreye yayabildikleri için galaksi çökmeye devam eder.

Samanyolu Galaksisi işte böyle bir dengededir. Galaksimiz ne evrenin geri kalanı gibi genişliyor, ne de çökmekte olan bir yıldızlararası bulut gibi büzülüyor. Bu denge iki şekilde açıklanabilir. Samanyolu'nun yoğunluğu evrenin ortalama yoğunluğunun çok üzerinde olduğundan, kendi kütleçekimi galaksinin genişlemesini engellemektedir. Dahası, Samanyolu'nu oluşturan yıldızlar, aralarında çarpışma olmayan parçacıklar gibi davranmakta, bu nedenle de yörüngelerinde enerjilerini korumaktadırlar. Sonuç olarak, Samanyolu gibi bir galaksi, kendi kütleçekimi ve yıldızların hareketlerinden kaynaklanan kinetik enerji arasındaki eşitlik tarafından belirlenen bir denge durumunda bulunmaktadır.

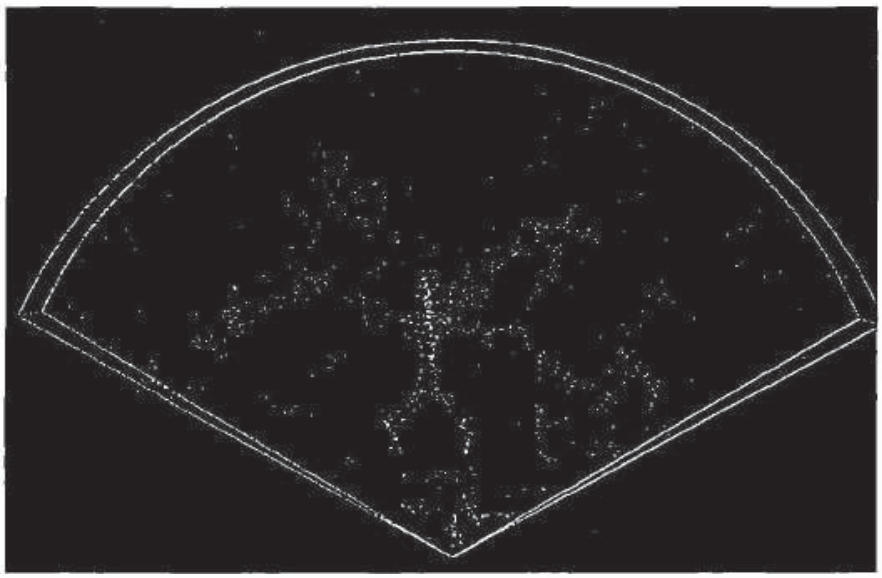
Boşluklar ve Düzlemler

Galaksilerin tam olarak nasıl dağıldığını anlamak için astronomlar evrenin üç boyutlu haritalarını hazırlıyorlar. Gökyüzünün iyi tanımlanmış bölgelerinde binlerce galaksi-

nin kırmızıya kaymaları ölçülüyor. Bu ölçümler, teleskopların ve gözlem zamanlarının izin verdiği ölçüde en düşük sınırlara kadar, belli parlaklıktaki bütün galaksiler için tekrarlanıyor. Kırmızıya kaymalar uzaklığa çevrildikten sonra astronomlar galaksi dağılımının üç boyutlu haritalarını hazırlıyorlar.

İlk galaksi haritaları tam bir sürprizdi. Doğru, beklenen büyük galaksi kümeleri bulundu, ama daha büyük ölçeklerde galaksilerin dağılımı kozmoloji uzmanlarının çok sevdiği düzgün yapıya oturmuyordu. Görünüşe göre megaparsek boyutlarında pek çok delik ya da boşluk vardı. Bu boşlukların ve galaksi kümeleri topaklanmalarının (süperkümeler) arasında galaksilerin oluşturduğu düzlemler ve uzunlukları kimi zaman 10 megaparsek ya da daha uzun olabilen galaksi zincirleri yer alır. Evrenin on megaparsek ölçeklerinde hemen hemen sünger gibi dokulu olduğu görülüyor. 100 megaparsek üstü daha büyük ölçeklerde galaksi dağılımı nihayet düzgünleşmeye başlıyor.

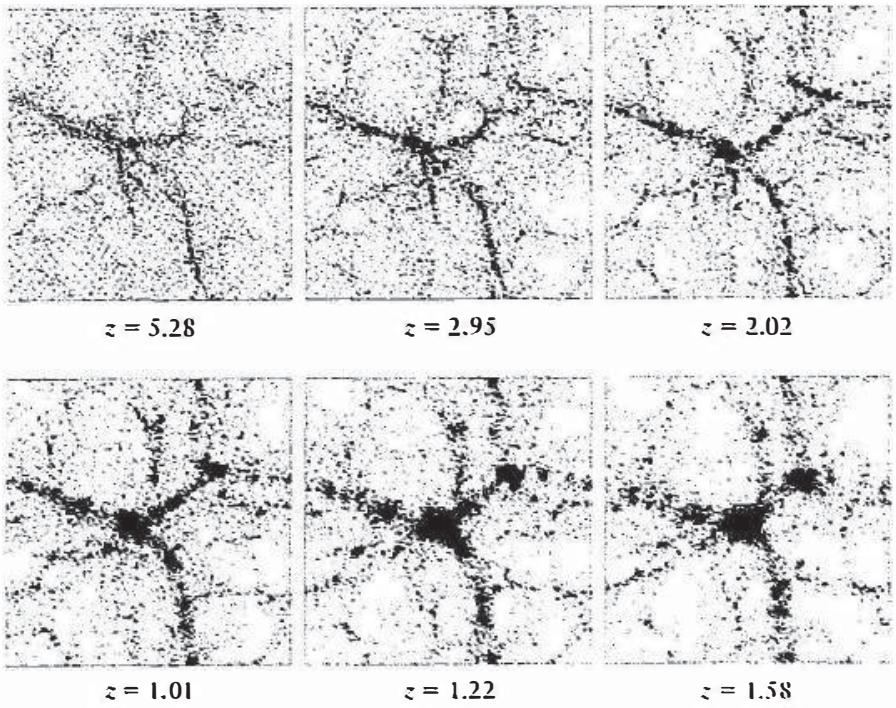
Herhangi bir kozmoloji teorisi, hemen hemen tümüyle düzgün ve tek biçimli evrenden bu kadar çeşitli yapıların nasıl ortaya çıktığını açıklayabilmek zorundadır. Bu konuda diğerlerinden çok daha başarılı bir teori var mı? Birbirleriyle yarışan iki temel açıklama var. Bunlardan biri, tüm ölçeklerde yoğunluk dalgalanmalarının bulunduğu soğuk karanlık madde senaryosu tarafından önerilmektedir. Bu açıklama, galaksilerin ancak çok eski dal-



Astronomlar 15.5 kadire kadar olan tüm galaksilerin kırmızıya kaymalarını ölçerek ve bunları şeklin köşesinde yer alan bizim konumumuzdan olan uzaklıklara çevirerek gökyüzünün 6 derece genişliğinde ve 30 derece boyunda bir dilimini hazırladılar. "Çırpı adam", Coma Galaksi Kümesi ve çevresidir. Kümenin yarıçap yönündeki uzanımı, Coma Galaksilerinin özel hızlarından kaynaklanmaktadır. Bu harita 100 megaparsek derinliklerine kadar uzanmaktadır.

galanma tayfındaki en büyük ve dolayısıyla da en ender gerçekleşen yoğunluk dalgalanmalarıyla ortaya çıktığını ileri sürmektedir. Bu, galaksi oluşumunun ender gerçekleşen yoğunluk tepelerine eğilimli olduğunu öne sürdüğünden eğilim hipotezi olarak bilinir.

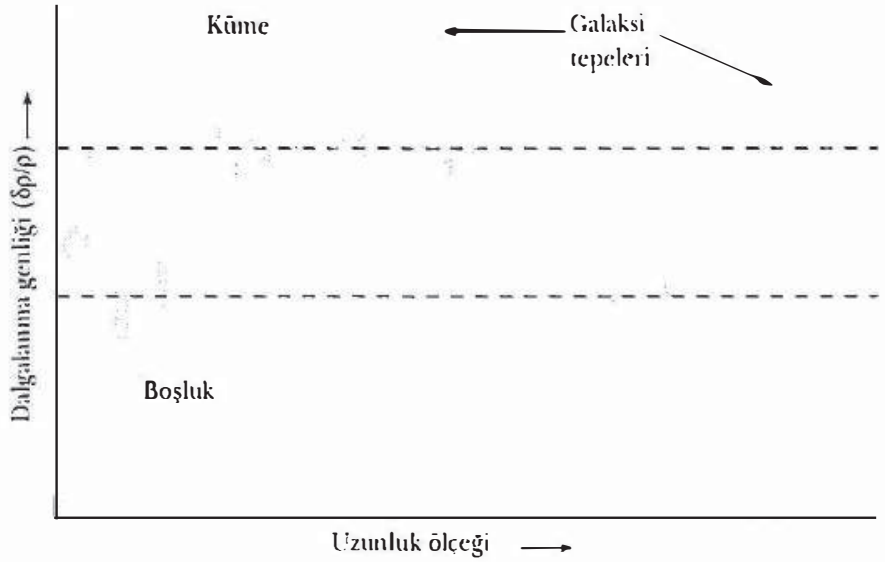
Bu hipotezin iki önemli sonucu vardır. Temellerindeki dalgalanmalar tümüyle rasgele olsa da ender ortaya çıkan yoğunluk tepeleri, Himalayalardaki en yüksek dağların birbirlerine yakın konumlarda ortaya çıkmalarındaki aynı nedenle kümelenme eğilimi göstermektedirler. Dağlardan çok tepelere benzetilebilecek olan ortalama yükseklikteki tepeler, çok daha düzgün dağılmışlardır. Bu nedenle soğuk karanlık maddenin çoğunluğu galaksilerde yoğunlaşmak yerine galaksilerin dışında yoğunlaşmıştır. Bu da galaksi halelerinin, kümelerin ve süperkümelerin incelenmesiyle $\Omega = 0.1$ bulunduğu halde nasıl olup da aslında $\Omega = 1$ olduğunun açıklanmasına yardım etmektedir. İkinci sonuç ise, uzayın çoğunluğunun yalnızca ortalama tepelerle dolu olan ve hiç galaksi barındırmayan geniş bölgeler içerdiğidir. Ara sıra ipliksi ya da düzlemsel yapılarda tepe gruplaşmaları olsa da bunlar göreli olarak enderdir. Gruplaşmaların çoğunluğu, uzamış halde bulunan elips biçimli yapılarda yoğunlaşmıştır.



Bu bilgisayar simülasyonunda, madde iplikçikler boyunca yoğunlaşırken galaksi kümeleri büyüyor. Her kare eşhareketli bir küpün iki boyutlu bir projeksiyonu olup evrenin evrimindeki bir adımı temsil ediyor. İlk karede kırmızıya kayma 5.36 olup büyük patlamadan bir milyar yıl sonrasını, son karede ise kırmızıya kayma 1 olup üç milyar yıl sonrasını gösteriyor.

Farklı bir senaryo olan sıcak karanlık madde senaryosu ise bir dalgalanma dağılımı ortaya çıkmasına yol açar. Bunlardan ölçek olarak en küçüğü, karakteristik olarak kütle bakımından galaksi kümelerine karşılık gelir. Ancak kümelerin sahip olabileceği kadar büyük kütleli olan bulutlar çökerek başlangıçta bir düzlem ya da yassı bir kek biçimindeki yapıları oluşturur. Bunlar da sonradan galaksi kütlesine sahip olan daha küçük parçalara bölünür. Sonuç olarak galaksi düzlemleri ortaya çıkar. Rasgele dağılmış olan yassı cisimlerin birbirlerini kestiği noktalar olan düğümlerde kümeler oluşurken bu cisimlerin arasında yer alan boşluklarda hiç galaksi bulunmaz.

Eğer sıcak karanlık madde senaryosuna göre galaksilerin çoğunluğu kaçınılmaz olarak geç, yani son birkaç milyar yol içinde oluşmamış olsalardı, yukarıda anlatılanlar büyük ölçekli yapıyı iyi tanımlamış sayılabilirdi. Sorun şurada ki, kümeler hâlâ oluşmaktalar gibi gözüküyor. Sıcak karanlık maddenin egemenliğindeki bir evrende ise galaksiler, kümelerden önce oluşamaz. Ama gene de 10 milyar yıldan daha fazla bir zaman önce, evrenin yaşı şimdiki yaşının henüz yüzde yirmisi iken bazı galaksiler oluşumlarını tamamlamış olmalı. Bunu, evrenin yaşının şimdikinin beşte biri olduğu zamana karşılık gelen, kırmızıya kayma değerleri 4 olan galaksilerin ve gene evrenin yaşının şimdikinin altıda biri olduğu zamana karşılık gelen, kırmızıya kayma değerleri 5 olan kuasarların gözlenmesinden anlıyoruz.



Soğuk karanlık maddenin egemen olduğu bir evrende yalnızca belli miktarlardan daha büyük olan dalgalanma genlikleri galaksi oluşturabilirler. Bu nedenle yoğunluk dalgalanması dağılımlarının tepe noktaları galaksiye dönüşür. Bu tepelere, sonradan galaksi kümesi olacak bölgelerde çok rastlanırken, sonradan boşluğa dönüşecek bölgelerde çok ender rastlanır.

Kozmoloji uzmanları, kurtarılmış sıcak karanlık madde gibi bazı ek hipotezlere sığınmak zorunda kalıyorlar. Çıkış yollarından biri, galaksilerin oluşumuna olanak sağlayan, galaksi ölçekli bazı topaklanmalarda başlangıçta yer alan dalgalanmaların yassılaşma döneminden önce yer aldığını öne sürmektir.

Büyük Ölçekli Madde Akışları

Yapıların nasıl bir evrim geçirdiğini sınamanın bir yolu, henüz çökmenin ortaya çıkmadığı çok büyük ölçeklerde çok eski dalgalanmaların doğrudan kanıtlarını aramaktır. Böylesine büyük ölçekli dalgalanmalar kendilerini pek çok değişik şekilde gösterebilirler. Galaksi dağılımlarında, 100 megaparsek ya da daha büyük ölçeklerde doğrudan yoğunluk dalgalanmaları görülmesi beklenebilir. Bununla birlikte, düzgünlükten sapmanın haritasını çıkarmak oldukça zor bir iştir, çünkü bu ölçeklerde galaksi sayısındaki yalnızca yüzde birkaçlık bir değişim aranmaktadır. Astronomlar, binlerce galaksinin kırmızıya kayma miktarlarını ölçmek ve uzaklıklarını duyarlı bir biçimde elde etmek zorundadırlar. Ne yazık ki bu yolda ilerleyebilmek için en büyük teleskoplarda oldukça yüklü miktarlarda gözlem zamanına gereksinme vardır. Büyük bir teleskopta kullanıldığında bir kerede yüzlerce galaksinin kırmızıya kayma miktarlarını ölçebilen araçların geliştirilmesi çok yenidir. Bu alandaki çalışmaların şu anda büyük gelişme ve atılımların sınırında olduğu düşünülüyor.

Her ne kadar daha yüksek kalitede veri gerektirmekteyse de daha az kırmızıya kayma ölçümü kullanılan bir başka yaklaşım daha vardır. Uzak galaksilerin yalnızca bizden uzaklaşmakta oldukları gözlenmiyor; bu galaksiler yerel kütleçekimi alanlarının etkisiyle ileri-geri hareketleri de yapıyorlar. Galaksiler kümelerin içinde hareket ediyorlar, kümeler ise başka bir süperkümenin içinde ve hatta yakınında olmalarından dolayı ek hızlar kazanıyorlar. Okyanus dalgalarının gel-git dalgalarının üzerine binmesi gibi bu ileri-geri hareketler de evrenin genişlemesinin üzerine biniyorlar. Bu özel hızlar, ya da Hubble akışından bu sapmalar, oldukça büyük bir duyarlılıkla ölçülebilir.

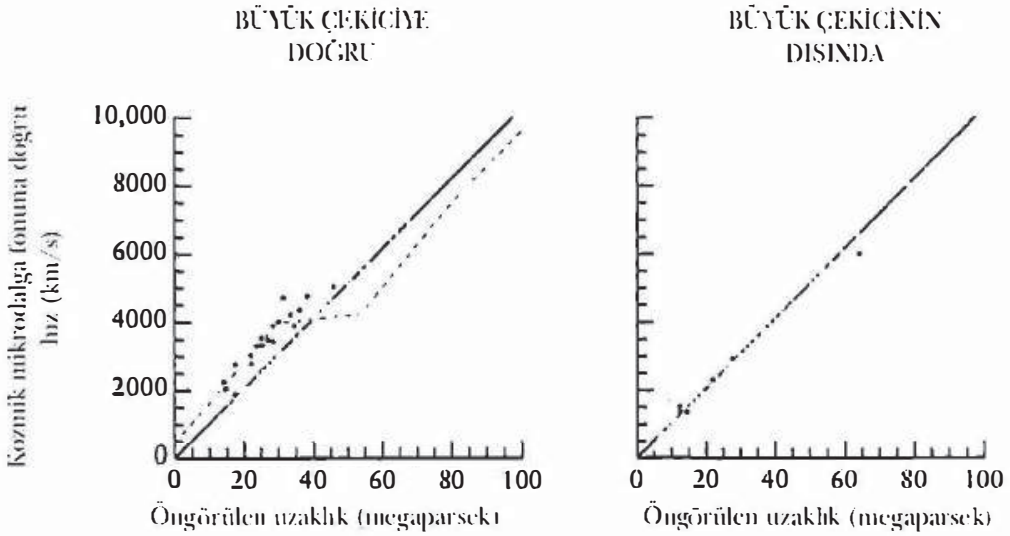
Bu yöntem, galaksilerin iki iç özelliği olan dönme hızı ve parlaklığın birbirleriyle bağıntılı olduğu gerçeğini kullanmamızı gerektiriyor. Tully-Fisher adı verilen bu bağıntı, Bölüm 2'de incelenmiş ve orada Hubble sabitini ölçmekte kullanılmıştı. Dönme hızı ölçülebilirse, galaksinin gerçek parlaklığı bulunabilir. Dönme hızı galaksinin uzaklığına bağlı

değilken parlaklık uzaklığa bağlı olduğundan, iki parlaklığı karşılaştırarak bir uzaklık ölçüsü elde edebiliriz. Hubble yasasına sokulduğunda uzaklık, eğer yoğunluk dalgalanmaları tarafından bozulmuyorsa, beklenen ortalama genişleme hızını verir. Kırmızıya kayma ise gerçek hızı ölçer. Bu iki hızın karşılaştırılmasıyla galaksinin özel hızı bulunur.

Tully-Fisher bağıntısının değişik yönlerde bulunan ve kırmızıya kayma miktarları ölçülen galaksilere uygulanması yoluyla düzgün Hubble akışından sapmalar incelenebilir. Özel hızlar hem gördüğümüz maddeden hem de karanlık maddeden kaynaklanan kütleçekiminin etkilerini bulmakta kullanılabilir. Galaksi hızlarının büyük ölçeklerde ortalaması alındığında bunlardan yararlanılarak büyük ölçekli yoğunluk dalgalanmalarının haritası çıkarılabilir. Hem karanlık maddeyi hem de bildiğimiz ışık saçan maddeyi incelerken özel hızlar yönteminin kırmızıya kayma ölçümü yöntemine karşı büyük üstünlüğü vardır. Galaksilerin yalnızca sayılması, evrendeki maddenin ışık saçan bileşeninin izini sürebilmemizi sağlar.

Tully-Fisher bağıntısının kaynağı henüz tam olarak anlaşılmadığından, bu büyük ölçekli akışların kuvveti ve hatta gerçekliği hâlâ tartışmalıdır. Tüm bildiğimiz, çevreye göre değişebildiğidir. Özel hızların kuşkulu olmayan tek ölçümü farklı bir yönteme dayanır; buradaki düşünce, galaksinin kozmik mikrodalga fonuna göre hızını ölçmektir. Bölüm 3'te söz edilen mikrodalganın dipol yön bağımlılığına bakılacak olursa, galaksimiz kozmik mikrodalga fonuna göre, Virgo Kümesi'nden 45 derece açı yapacak şekilde saniyede 600 kilometrelik bir hızla hareket etmektedir. Samanyolu'nun Andromeda'ya göre hızı saniyede yalnızca 50 kilometre olduğundan aslında bütün Yerel Kümenin bu hızla (600 km/s) hareket ettiği söylenebilir. Galaksilerin özel hızları konusundaki bazı araştırmalar, 10-100 megaparsek boyutlarına kadar uzanan galaksi gruplaşmalarının da benzer hızlarla hareket etmekte olabilecekleri sonucunu vermektedir. Doğal olarak, yeterince büyük uzaklıklar göz önüne alındığında, uzayda bir bölge kozmik mikrodalga fonuna göre hareketsiz olmalıdır. Bu kozmik durağan çerçeveyi bulmak için galaksilerin dağılım haritasının hangi uzaklıklara kadar yapılması gerektiğini saptamak zorundayız.

Özel hareketlerin görünürdeki değerleri kabul edilirse, yapı oluşumu teorilerinin pek çoğunu zor durumda bırakır. Örneğin, açık bir evrende, genişleme enerjisi sistemin kütleçekimsel enerjisine üstün geldiğinden galaksilerin özel hızlarının, şişme tarafından öngörülen kritik yoğunluktaki bir evrene göre daha küçük olması beklenir. Böylesi bir evrende, evren düzgün ve tekbiçimli olduğu sürece genişleme enerjisi ve kütleçekimsel enerji arasında duyarlı bir denge bulunduğunu görmüştük. Bu nedenle ne kadar zayıf



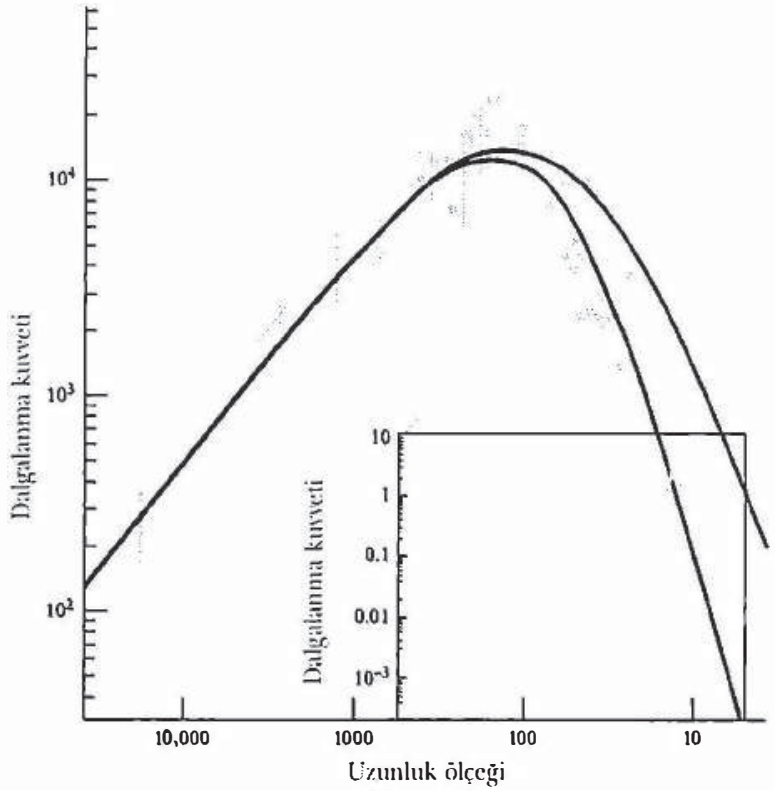
İki tür galaksi örneği için Hubble diyagramları: bu diygramlarda Tully-Fisher bağıntısından öngörülen galaksi uzaklıklarına karşı (kozmik mikrodalga fonuna göre olan) galaksi hızları çiziliyor. Tekbiçimli bir evrendeki düzgün Hubble akışı, kesiksiz çizgiyle gösterilmiştir. Bir yönde (Büyük Çekici'ye doğru) Büyük Çekici'nin kütleçekimi nedeniyle Hubble akışından sapmalar görülmektedir. Kesikli çizgi, beklenen sapmayı gösteriyor: Bütün galaksiler Büyük Çekici'ye doğru düştüklerinden uzak taraftaki Hubble hızları azalmakta, yakın taraftaki Hubble hızları ise artmaktadır.

olurlarsa olsunlar, yeterince büyük ölçekli dalgalanmalar dengenin kütleçekimsel etkiler lehine bozulmasına ve galaksilerin özel hızlarının ortaya çıkmasına yardım ederler. Gözlemleri açıklayabilmek için kritik yoğunluktan daha fazlasına, yoğunlukta gözlenen yeterince büyük dalgalanmalarına gereksinme vardır.

Soğuk Karanlık Madde Teorisinin Başarısızlığı mı?

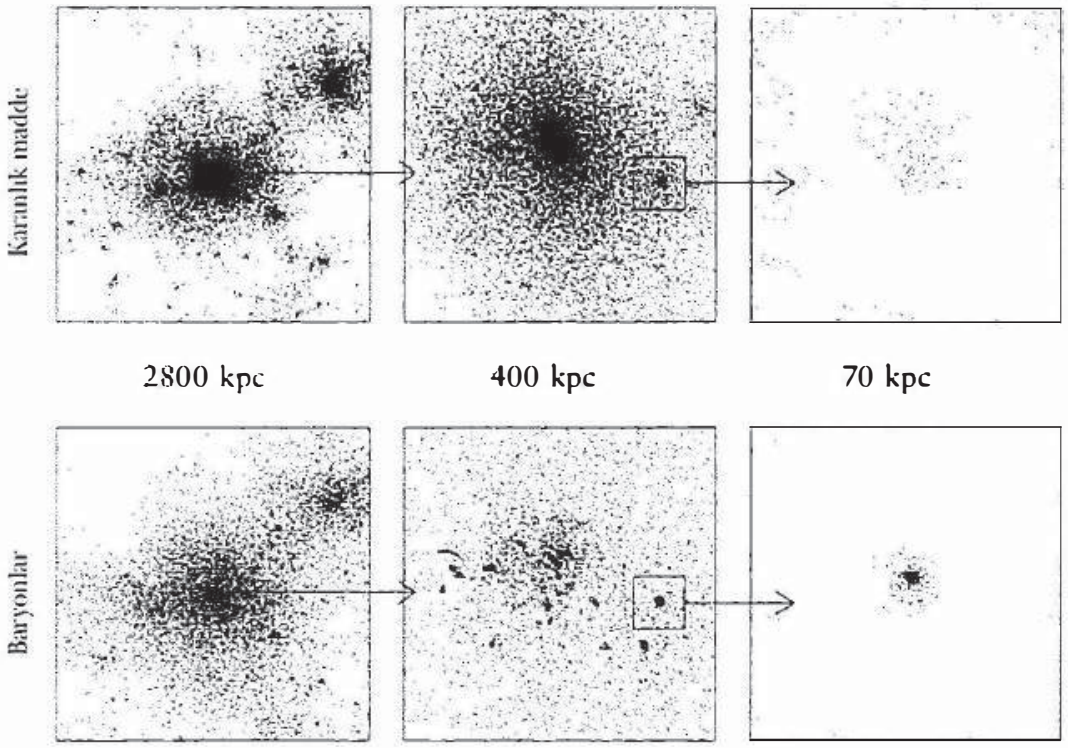
Soğuk karanlık madde senaryosu, evrimleri sonunda galaksi ve galaksi kümelerini oluşturacak olan dalgalanmaların genliğini kesin bir biçimde öngörür. Soğuk karanlık madde, kritik yoğunluktaki bir evrende madde topaklanmalarının gelişmesine direnç gösteremez, bu nedenle de bu sistemlerin sayısının çok fazla olması gerekir. Ne yazık ki teoride çok fazla dalgalanma vardır: gözlenen galaksi ve büyük kütleli galaksi sayısı tahmin edilenden çok daha azdır. Üstelik gözlenen sistemlerin sayısının düşük olması tek sorun da değildir. Teoride, bazı galaksi kümelerinin galaksi çiftleri gibi gözlenenden iki ya da üç kat büyük bir göreli galaksi hız dağılımına sahip olmasını ve bazı büyük kütleli galaksilerin gözlenenden iki ya da üç kat büyük hızlarla dönmekte oldukları hesaplanıyor.

Eğer hangi dalgalanmaların galaksiye dönüşebileceğini doğru tahmin etmişsek, bu hesaplar kesin sonuç verir. Eğer yoğunluk tepeleri sonunda galaksilere dönüşürse, o zaman soğuk karanlık madde senaryosu güçlü kalmaya devam eder. Tam ters yöndeki bakış açısına göre, eğer yalnızca evrenin en sakin bölgelerde bulunan en zayıf dalgalanmalar sonunda galaksilere dönüşüyorsa, o zaman oluşan galaksi ve galaksi kümelerinin sayısı gene yüksek olur, ama ne var ki bunların çoğu gözlenemez. Yüksek hızlara ve büyük hız dağılımlarına sahip cisimler olup optik bileşenleri bulunmayan karanlık galaksiler ve galaksi kümeleri olur. Bu hipotezi sınayabiliriz: bu büyük kütleli ve görünmeyen kümenin üzerine düşen yıldızlararası gaz ısınır ve bu karanlık galaksileri izleyebilmemize olanak sağlayacak x-ışınları yayar.



Burada, uzunluk ölçeğine karşı yoğunluk dalgalanmaların güç tayfı çizilmiştir. Veri noktaları (ve verilerdeki belirsizleri gösteren dikey çizgiler) değişik galaksi gözlemlerinden alınmıştır. Kutular, kozmik mikrodalga fonundaki dalgalanmalara ilişkin çeşitli ölçümlerden bulunan yoğunluk dalgalanma genliklerini göstermektedir. Soldaki en küçük kutu COBE deneyine aittir. Diğer kutular yer gözlemleri ve balon deneylerinden alınmıştır. Sürekli çizgilerin biri karanlık madde egemenliğinde olup şişen bir evrene, diğeri ise üçte ikisi soğuk, üçte biri sıcak karanlık maddeden oluşan evrene ait hesaplanan güç tayflarını göstermektedir. Her iki tür karanlık madde de kozmik mikrodalga fonundaki dalgalanmalarla uyumlu güç tayflarına sahiptir. Ama küçük ölçeklerde soğuk karanlık madde evreninin öngördüğü dalgalanma genlikleri gözlenenlerden büyük olmaktadır.

Bu tartışmalara bakan bir kişi, soğuk karanlık madde teorisinin ciddi bir güçlük içinde olduğu düşünebilir. Burada bir uzlaşma gereklidir. En basit çözümler karanlık maddenin özelliklerini şişmeden kaynaklanan dalgalanmaları değiştirecek şekilde ayarlar. Bunların, örneğin karanlık maddenin yeterince sıcak olup olmadığına bağlı olarak tümü geçerli olmaz. Böyle bir durumda, galaksi ölçeklerinde çok daha az dalgalanma olur. Daha köktenci bir başka yaklaşım şişmenin kendisi ile uğraşır. Gözlemlere uyacak bir dalgalanma tayfı uygun bir biçimde tasarımlanabilir. Ya da şişme döneminden sonra ortaya çıkan geçiş evresinin kalıntısı olan, çok yüksek yoğunlukta bazı tohum cisimler öngörülebilir. Ya da şişme tümüyle bir kenara bile bırakılabilir.



Bu bilgisayar simülasyonunda soğuk karanlık maddenin topaklanma eğilimi galaksi grubu boyutlarında karanlık ve büyük kütleli bir halenin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Yakınlaşma sırası, karanlık madde dağılımının, kırmızıya kaymanın 1 olduğu, büyük patlamadan beri geçen zamanın üçte ikisi civarındaki durumunu gösteriyor (üstte). Her nokta 109 Güneş kütlesi kadar karanlık maddeyi temsil ediyor. Alttaki şekil dizisi ise buna karşılık gelen baryon kökenli madde yapısını gösteriyor. Burada ise her nokta 108 Güneş kütlesi kadar maddeyi temsil ediyor. Baryon kökenli madde soğuyarak enerji kaybettiğinden, her biri galaksi kütleli topaklanmalara ayrılır. Soğuk karanlık maddenin büyük kütleli biçimi (üstte, ortada) 1000 kilometre/saniye'lik galaksi hızlarının ortaya çıkmasına neden olur ki bu da gözlenen hızların yaklaşık iki katıdır.

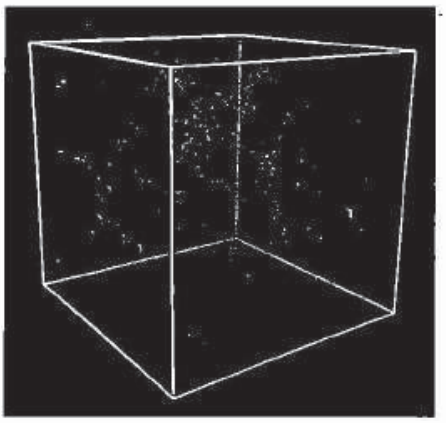
Sıcak ve Soğuk

Eğer sıcak karanlık madde çok az sayıda küçük ölçekli yapı, soğuk karanlık madde de çok fazla küçük ölçekli güç üretiyorsa, mantıklı bir uzlaşma bunların bir karışımıdır. Aslında nötrinoya 8 eV'lik bir kütle verilmesi durumunda kritik yoğunluğun üçte biri sıcak karanlık madde tarafından sağlanmaktadır. Kalan üçte ikinin soğuk, diyelim fotinolar biçiminde olması durumunda hem büyük hem de küçük ölçeklerde gözlemlere uyan bir model ortaya konabilir. Sıcak karanlık madde büyük ölçekli gücü garantiler ve COBE Uydusu tarafından ölçülen dalgalanmalarla uyuşmasını sağlar. Soğuk karanlık maddenin egemen olması ise yapıların, istendiği gibi aşağıdan-yukarıya bir sıralama içinde oluşmasını garantiler. Sıcak karanlık maddenin üçte birlik katkısı, galaksi ve galaksi kümeleri gözlemlerimize tam olarak uyan küçük ölçekli yapıları bastırır. Evren kritik yoğunlukta olduğundan, şişme de etkilidir.

Bu şemada ne yanlış olabilir? Galaksimizdeki en yaşlı yıldızlar en azından 14 milyar yaşındadır. En iyimser belirsizliklerle bu yaş 2 milyar yıl aşağı çekilebilir. Ama eğer birçok astronomun inandığı gibi Hubble sabitinin değeri 75 kilometre bölü saniye bölü megaparsek ise, kritik yoğunluktaki bir evrenin yaşı yalnızca 10 milyar yıldır. Umut, Hubble sabitinin ölçülen en düşük değerlerinin doğru olmasıdır. Yoksa evrenin yaşının içinde barındırdığı yıldızlardan daha küçük olması gibi garip ve depresif bir duruma geri dönmek zorundayız. Hatta daha ciddi bir itiraz var: sıcak karanlık madde karışımı, galaksi ve küme oluşumunu evrenin son dönemlerine kadar geciktirmektedir. Yeterince erken dönemlerde galaksi ve kümelerin oluşup oluşamadığı, karışık karanlık maddenin ufkunda görülen en karanlık buluttur.

Boşluk Egemenliğindeki Evren

Yaklaşık 10 kiloparsek altındaki ölçeklerde gözlenen madde miktarı, kesin bir biçimde $\Omega=0.1$ ya da $\Omega=0.2$ olan düşük yoğunluklu bir evren anlamına gelmektedir. Hem maddeyi hem de maddedeki dalgalanmaları ölçmek için geliştirdiğimiz bütün teknikler, en büyük ölçeklerde giderek daha az güvenilir olmaktadırlar. Eğer büyük ölçeklerdeki Ω değerinin güvenilmez olduğu yönündeki bakış açısını kabul edersek, o zaman, küçük ölçek-



Bu bilgisayar simülasyonunda sıcak ve soğuk karanlık madde karışımından oluşan evrenin baryon kökenli madde topaklanmaları oluşturmak üzere nasıl evrim geçirdiği görülüyor. Bu dağılım, x-ışını uyduları tarafından gözlenen galaksi kümesi dağılımlarıyla uyum içinde gibi gözüküyor. Bir kenarı 200 megaparsek olan bu küpteki yüksek yoğunluklu bölgeler kırmızı, düşük yoğunluklu bölgeler ise mavi renkle göstermiştir.

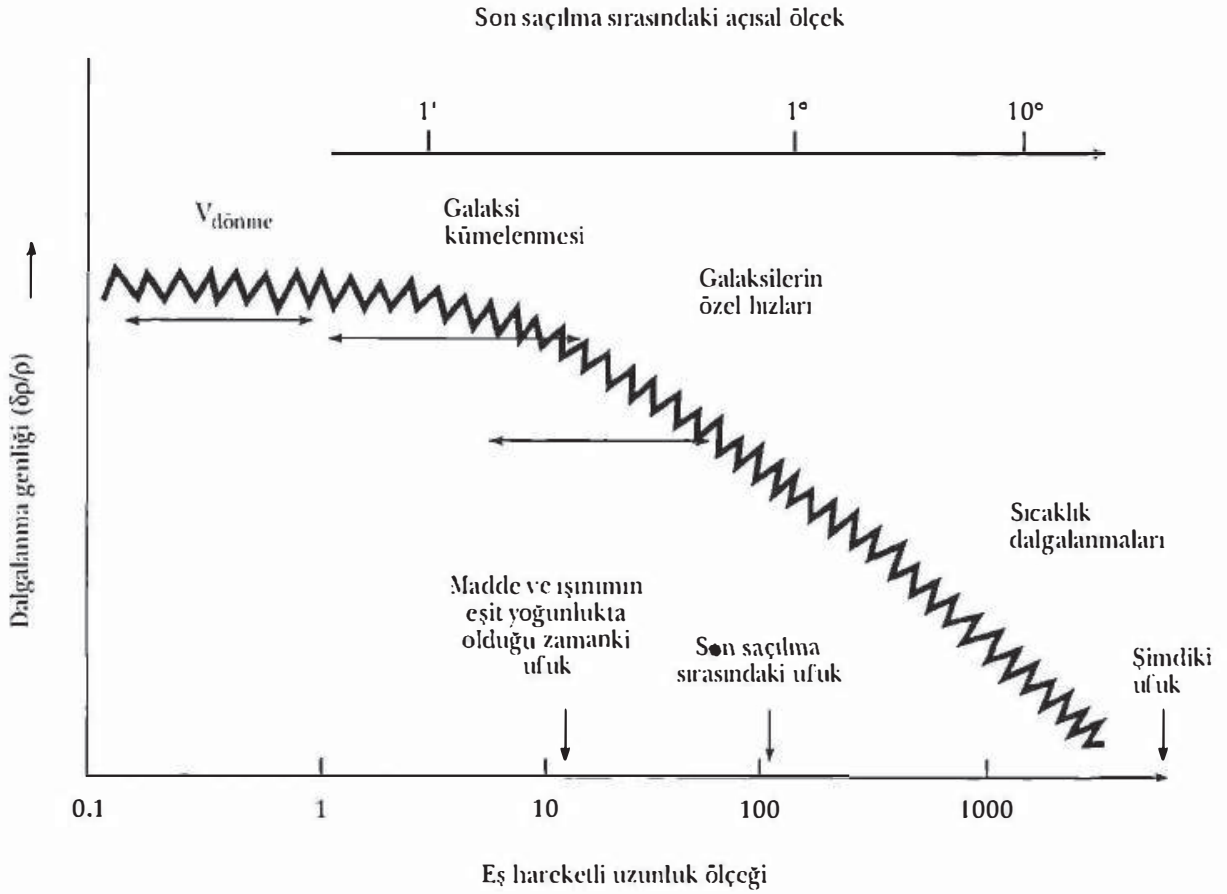
lerdeki gözlemlerle en iyi biçimde uyuştuğundan, tercihimiz açık evren doğrultusunda olacaktır. Açık bir evrende galaksiler, kritik yoğunluktaki bir evrene göre daha küçük miktarlarda yavaşladıklarından, evrenin yaşı hemen hemen yüzde elli kadar daha uzundur. Bu, aynı zamanda Hubble sabitinin değeri 75 kilometre bölü saniye bölü megaparsek olarak kabul edildiğinde de gerekli olan modeldir.

Ama açık model ciddi bir kuşkuya yol açar. Kütleçekimi, büyümekte olan dalgalanmalar üzerinde etkili olmak için daha az zaman bulur, bu nedenle de dalgalanmalar, kozmik mikrodalga fotonlarının maddeden bağımsız hale geldiği son saçılma döneminde daha büyük olmalıdırlar. Buna paralel olarak da günümüzde kozmik mikrodalga fonunda daha büyük sıcaklık dalgalanmaları gözlememiz gerekir. Şişme teorisindeki ölçekten bağımsız olan dalgalanmalarla ilgili beklentilere göre, kozmik mikrodalga gözlemcilerinin değişik açısal ölçeklerde görebildikleri her şeyin kesinlikle hesaplanabilmesi gerekir. Sonuçlar oldukça cesaret kırıcı: gözlenen sıcaklık dalgalanmaları, hesaplananlardan daha küçük. Önceki bölümde incelendiği gibi, çözümlerden biri şişme teorisinden vazgeçmek, soğuk karanlık maddeyi terketmek ve çok eski adiyabatik dalgalanmalar tezini bir kenara bırakmaktır. O zaman baryon egemenliğindeki bir evren, eski nükleer sentez hesaplamaları aleyhine biraz adaletsizlik yapma pahasına da olsa, gerçekleşebilir.

Bu güçlüğü aşmanın bir yolu daha vardır: Einstein'ın 'en büyük gafını' canlandırırcasına kozmoloji sabiti olarak boşluk yoğunluğunu geri getirmek. 1916 yılında Einstein ilk olarak durağan ve genişlemeyen bir evren modeli ortaya attı, ne var ki hemen sonra durağan bir evrenin kararlı olamayacağını ve çökmek zorunda olduğunu gördü. Durağan evren modelini, kendi teorisiyle bağdaştırabilmek için Einstein, kurduğu genel görelilik denklemlerinde kozmoloji sabit terimi olarak kutsal bir varlık gibi gözüken kozmik itme fikrini icat etti. Doğal olarak evrenin durağan olmadığı ortaya çıktı. Bununla birlikte, düşük yoğunluğa sahip olan düz evren modelini kurtarabilmek için kozmoloji sabiti canlandırılmaya çalışılabilir.

Kozmoloji sabitinin modern yorumu, onu Einstein'ın genel görelilik denklemlerinin itici bir kuvvet olarak göründüğü bir yanından, kütleçekimi kaynak terimleri arasında göründüğü karşı yanına almaktadır. Bu terimler evrendeki madde ve enerji yoğunluklarıdır. Bu durumda kozmoloji sabiti, boşluğun hiçbir maddesel yanı olmayan enerji yoğunluğu olarak yeniden yorumlanabilir. Bu sabit son derece basit bir biçimde evrenin enerji yoğunluğuna eklenmektedir. Boşluk yoğunluğunu, yani kozmoloji sabitini soğuk karanlık maddedeki yoğunluğun uygun bir oranıyla birleştirerek sonunda kritik yoğunluğa ulaşılacağından, şişen düz evren modeli hâlâ korunabilir.

Soğuk karanlık maddeden oluşan boşluk egemenliğindeki evrenin başlıca bir büyük avantajı vardır: soğuk karanlık madde modelinde varsayılan, aslında kümelerdeki galaksilerin ve galaksilerdeki yıldızların yörünge hareketlerinin ölçülmesi sırasında gözlenen şeydir. Soğuk karanlık maddeyi gözlerden saklamak için bu maddenin 'eğilimi' gibi



Yoğunluk dalgalanmaları küçük ölçeklerde büyük, büyük ölçeklerde küçük olarak ölçülür. Kozmik mikrodalga fonu ölçümleri, çok çeşitli ölçeklerde yapılır. Bu ölçümler bir derece ya da daha küçük ölçeklerde yapıldığında galaksi kümelenmesi ya da galaksi özel hızı araştırmalarında kullanılan ölçeklere yaklaşırlar.

fikirlerle oynamak zorunda değiliz. Bununla birlikte boşluk egemenliğindeki evrenin üzerine düşen iki büyük gölge vardır. Bunlardan ilki, model tarafından öngörülen 10 - 100 megaparsek boyutlarındaki büyük ölçekli akışların yeterince büyük hızlara erişmiyor gibi görünmeleridir. Onlarca megaparsek ölçeklerindeki bu akışlar tipik olarak saniyede yüzlerce kilometrelik hızlarla hareket ederler. Bu hızlar en kolay yoğunluk dalgalanmalarının etkilerinin genişleme enerjisiyle savaşmaya harcanmayıp, büyük ölçekli akışları desteklediği, kritik yoğunluktaki bir evrende üretilebilirler.

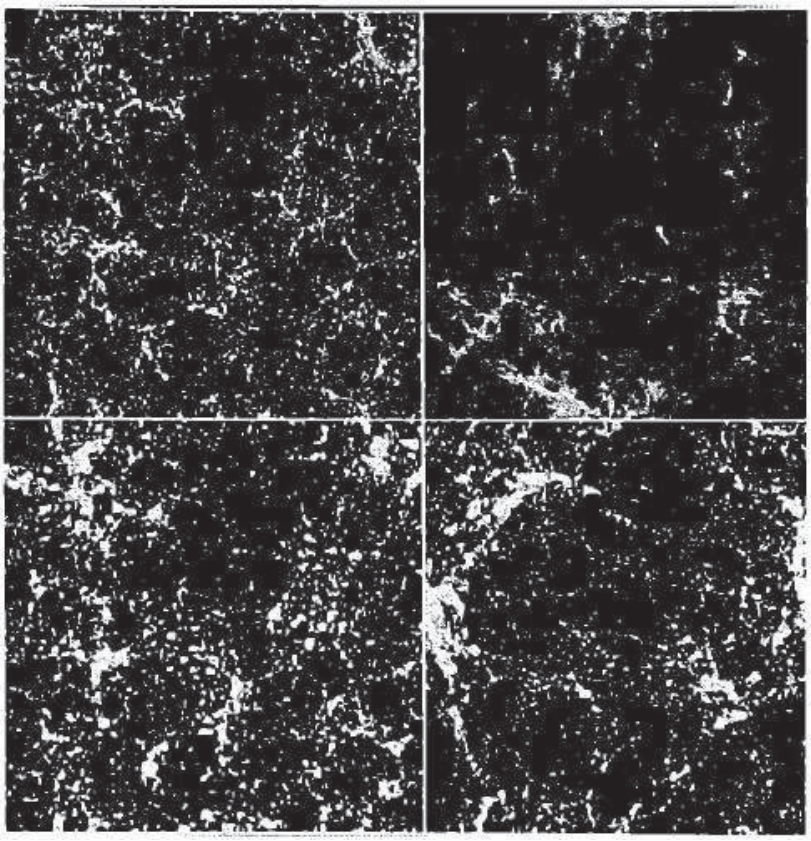
İkinci sorun, galaksi kümelerinin çok erken ortaya çıkabilmeleridir. Düşük yoğunluklu bir evrende, madde egemenliğine ilk giriş dönemi, evrenin genişlemesi nedeniyle 10 kat kadar gecikebilir. Yoğunluk dalgalanmaları yalnızca evren madde egemenliğine girdikten sonra büyümeye başladıkları için, bu gecikme, dalgalanma tayfının biçimi üzerinde etkilidir. Madde egemenliğinin başlangıcındaki ufuk, bu dönemde büyümeye başlayan küçük ölçeklerle, ufka sonradan giren ve büyümek için az zamanları olan daha büyük ölçekler arasındaki doğal geçişi işaretler. Kritik yoğunluktaki bir evrende geçişteki ölçek, yaklaşık olarak kümelerin oluştuğu ölçektir. Daha küçük olan bütün ölçekler benzer genliklere erişirler ve bu nedenle de ilk yapıları aşağı yukarı aynı zamanda oluştururlar. Galaksiler, kümelere göre kırmızıya kayma oranında ya da genişlemede 3 faktörü kadar bir önceliğe sahiptir. Oysa boşluk egemenliğindeki gibi düşük yoğunluklu bir evrende geçiş dönemi gecikir ve artık galaksilerin kümelere göre herhangi bir avantajı söz konusu olmaz. Galaksi ve galaksi kümeleri erken oluşurlar, bu nedenle de şu anda küme oluşumlarını görmememiz gerekir ki bu da x-ışını teleskoplarıyla gördüklerimizle açıkça çelişmektedir. Büyük ölçeklerde yoğunluk dalgalanmaları, soğuk karanlık madde evrenindekilere göre oldukça kuvvetlidir. Aslında, boşluk egemenliğindeki evren, kozmik mikrodalga fonundakilerle uyum içinde olamayacak kadar kuvvetli dalgalanmalar da üretebilir.

Bu soruların yanıtlanabilmesi için hem yakındaki hem de uzaktaki galaksi dağılımları konusunda daha fazla veri gerekiyor.

Yapıda Eskiden Kaynaklanan Eksiklikler

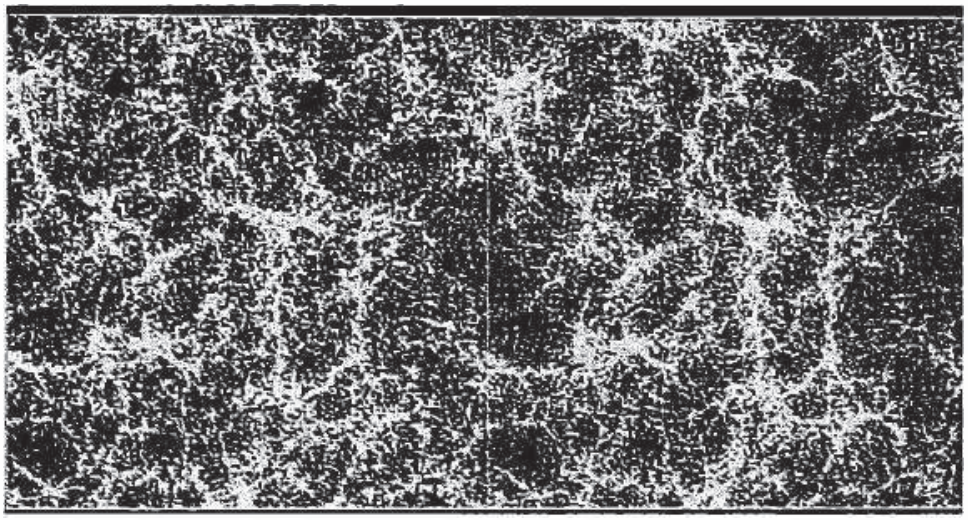
Galaksilerin kökenleri konusundaki teorilerini gözlenen büyük ölçekli yapı ile uzlaştırmaya çalışan kozmoloji uzmanları çok uç önlemlere gitmek zorunda kalıyorlar. Bir

düşünce ekolü, evrenin ilk dönemlerinin belki de şişme teorisinin öngördüğü kadar basit olmayabileceğini ileri sürüyor. Şişme teorisine göre, manyetik monopoller (tek-kutuplu cisimler) gibi zamanın başlangıcından kalan fantezi artıklar çoktan şişip yok olmuş olmalı. Eğer şişme döneminden sonra yeniden yaratılmadılarsa, gözlenebilir her ufuk için böylesi kalıntılardan en fazla bir tane kalmış olması bekleniyor. Bazı teorisyenler, bu kalıntıların, nükleer ve elektromanyetik kuvvetlerin aynı kuvvetin değişik yanları gibi davrandıkları büyük birleşme döneminin sonundaki evre geçişi sırasında ortaya çıkmış olabileceğini ileri sürüyorlar. Isıtılan buzda ya da basınç altında kolay kırılır maddeler üzerinde çatlakların oluşması gibi büyük birleşmenin bir anlamda ölümü de ardında, içinde evrenin eski ve yoğun döneminden kalıntılar barındıran topoloji düğümleri bırakmış olabilir. Bu topoloji eksiklikleri çeşitli biçimlerde olabilirler: nokta, sicim ya da düzlem biçimlerinde olabilirler.



Üç farklı kozmoloji modelindeki kütle yoğunluğunun bir bilgisayar simülasyonuyla hesaplanması. Her kare, evrenin şimdiki yaşının üçte birinde, kırmızıya kaymanın 1 olduğu dönemde bir kenarı 100 megaparsek olan eş hareketli bir küpün iki boyutlu bir projeksiyonunu temsil ediyor. Üst solda soğuk karanlık madde evreni. Alt sağda üçte biri sıcak, üste ikisi soğuk karanlık maddeden oluşan karanlık evren modeli. Kırmızıya kayması 4 olan soğuk karanlık madde evreni sağ üstte görülüyor. Karışık modelde yeterince çok sayıda galaksi kümelenmesi görülmezken, boşluk egemenliğindeki model soğuk karanlık madde modelinden daha fazla büyük ölçekli yapı üretiyor ki bu, gözlemlerle daha çok uyuşuyor.

Büyük birleşme döneminin yaşayan kalıntıları, 'örgü' ve 'kozmik sicimler' gibi bazı egzotik ve ilginç cisimleri de kapsarlar. Örgü, bir yüksek enerji yoğunluğu 'düğümü', sicim ise yüksek enerji yoğunluğunun doğruyu andıran bir kalıntısı olup her ikisi de Higgs alanı adı verilen ve bunların yokluğu durumunda boş kalacak olan bir enerji alanında bulunurlar. Bu alan, kuark ve leptonların kütlele-



Bu bilgisayar simülasyonu, soğuk karanlık madde evreninin yarattığı günümüz büyük ölçekli yapısı ile düşük yoğunluklu, boşluk egemenliğindeki evrenin yarattığı günümüz büyük ölçekli yapısını karşılaştırıyor.

rini açıklayabilmek için tercihan düşük enerjilerde böyle alanların bulunduğunu ilk kez öne süren fizikçi Peter Higgs'in adıyla anılmaktadır. Higgs alanı, büyük patlamadan yalnızca bir nanosaniyenin yüzde biri kadar sonra, yaklaşık 200 GeV enerjide, daha önce birbirinden ayırt edilemeyen zayıf nükleer kuvvet ve elektromanyetik kuvvet arasındaki simetrinin nasıl kendiliğinden kırıldığının anlaşılmasına yardım etmektedir. Kuark ve leptonlar daha sonra büyük kütleli parçacıklar olarak maddeleştiler.

Daha genel olarak, modern temel parçacıklar teorisinde Higgs alanları sık sık karşımıza çıkar. Bir Higgs alanı yalnızca diğer parçacıklarla etkileşir ve bir enerji yoğunluğuna sahiptir ki bu da yalnızca alanın her noktadaki değerine bağlı olan potansiyel enerjidir. Alanın uzaydaki dağılımının düzgün olmaması ve enerji alanındaki zamana bağlı değişiklikler nedeniyle oluşan alan gradyanına bağlı olarak bir kinetik enerjinin de varlığından söz edilebilir.

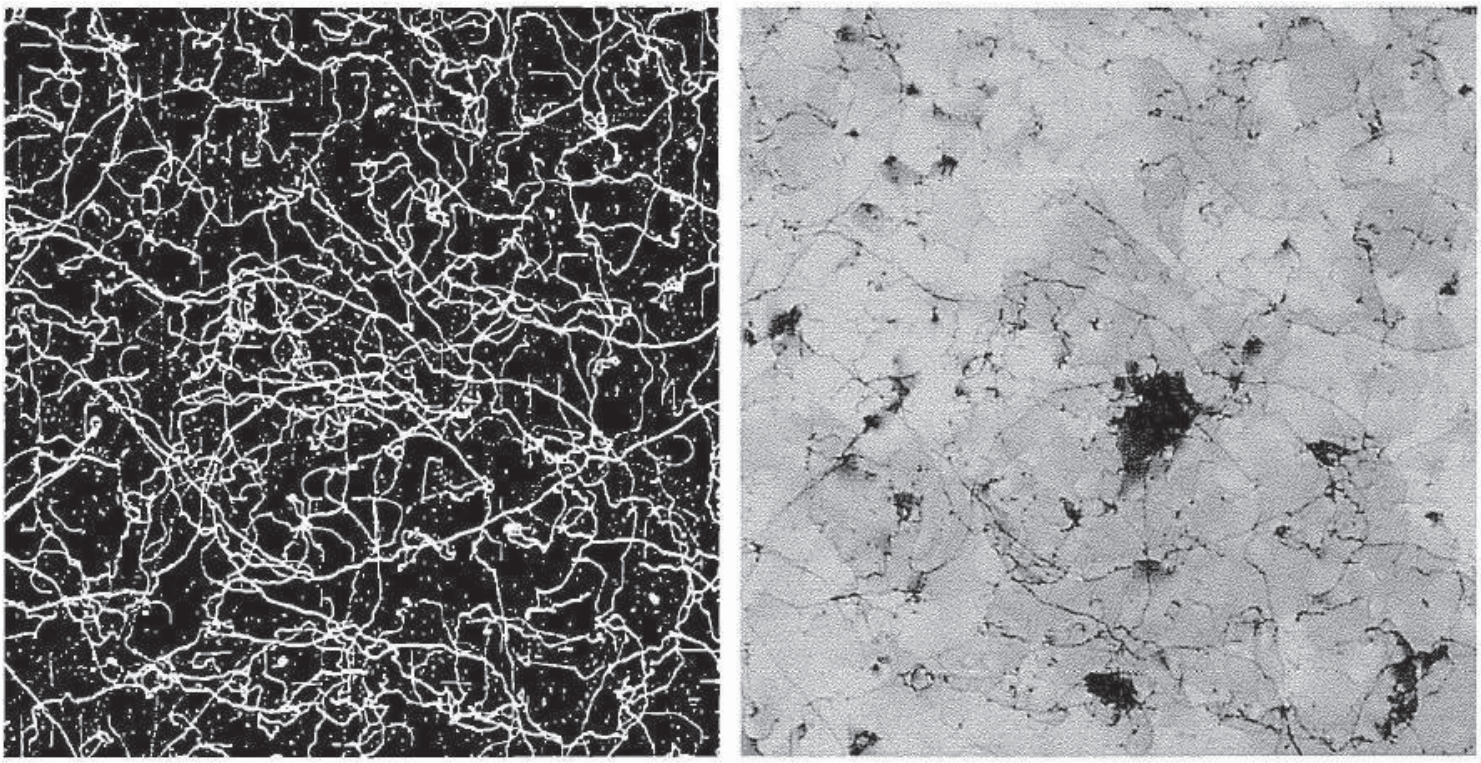
Örgü, düzgün olmayan bir Higgs dağılımıdır. Kolaylık olsun diye küresel olarak simetrik kabul edilen bu dağılımın enerji yoğunluğu, yalnızca alanın kinetik enerjisinden kaynaklanmaktadır. Örgü, üç boyutlu bir topoloji düğümüdür. Sicim, Higgs alan enerjisinden artakalan tek boyutlu bir topoloji bozukluğudur. Daha erken bir evrenin topoloji kalıntısı olması anlamında bir bozukluktur. Her ne kadar uzaydaki hacimlerin hemen hemen tamamı güvenli bir biçimde maddenin düşük enerjili evresi olan yeni evreye geçiş yapmışsa da, eski evreye ait kapalı kalmış bölgeler bu geçişi yapamamıştır. Hem örgüler hem de sicimler, evrenin ilk dönemlerinde ortaya çıkmış olabilecek noktasal alan bozukluklarından (monopoller) ve iki boyutlu bozukluklardan (duvarlar) ayrıdır. Bunların içinden yalnızca sicimler ve örgüler, büyük ölçekli yapı teorilerini oluşturmakta kullanılmışlardır.

Evre geçişi, nedensel olarak birbiriyle ilişkisiz bölgelere başlangıçtaki Higgs alanını rasgele koyar. Higgs alanı ile birlikte kalıntı bozukluklar da gelerek rasgele dağılırlar. Bölgeler nedensel olarak ilişkisiz olduklarından, bozuklukların rasgele dağılması, düzgünlükte giderilemeyen bir bozukluk ortaya çıkarır. Bu yolla, çok daha sonraları evrenin yapısının oluşması için gerek duyulan dalgalanmalar oluşur. Bu kalıntı bozuklukların galaksilerin ortaya çıkmalarında yardımcı olabilmeleri için, evre geçişlerinin, evrenin sıcaklığının 10^{15} GeV olduğu büyük birleşme döneminde ortaya çıkmış olması gerekir.

Örgü durumu özellikle ilginçtir. Büyük patlamadan itibaren ışığın almış olduğu yol örgünün yarıçapıyla karşılaştırılabilir büyüklüğe eriştiğinde, örgü çöker ve tüm enerji yoğunluğunu da beraberinde götürür. 10^{-30} cm boyutlarına ulaştığında düğüm kendi kendini çözer. Bu süreçte düğüm, goldstone bozonu olarak bilinen zayıf etkileşimli ve kütlesiz parçacıklar yayar. Örgüye ilişkin enerji yoğunluğu ve genişlemekte olan küresel bozon kabuğu çevredeki maddeyi iter ve bugün görmekte olduğumuz yapıyı oluşturur. Çevredeki maddenin tepkisi ise yoğunluk dalgalanmaları üretmektir ki bunlar da çökerek galaksi, galaksi kümeleri ve daha büyük ölçekli yapıları oluştururlar. Görünüşe göre geride, saptanması olanaksız bir goldstone bozonu denizi kalmıştır.

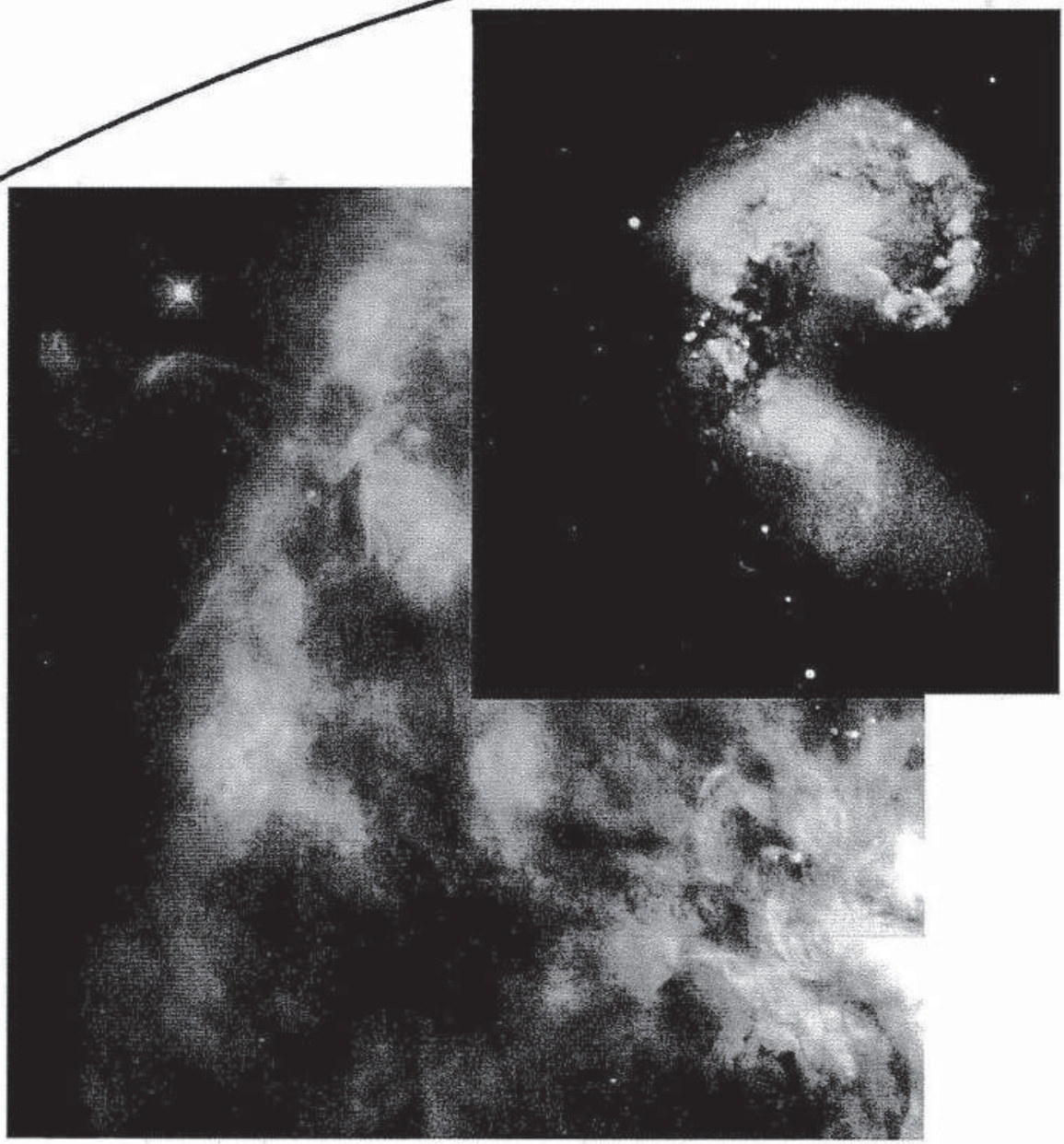
Bunun tersine, sicimler, kalıntı enerjinin karmaşık biçimleridir. Bir sicimin boyu sonsuz, kalınlığı ise yalnızca 10^{-25} cm'dir. Evren genişlerken, çok büyük gerilimler altında kalan sicimler, çevrede ışık hızına yakın hızlarda dolaşırlar. Zaman zaman birbirlerine dolanıp kesişerek halkalar oluştururlar. Bunlar da daha sonra kütleçekimi dalgaları biçiminde ışınım yayarak bozunurlar. Eğer sicimler gerçekten varsa, kütleçekimi dalgalarından oluşan deniz, pulsar zamanlaması üzerindeki etkilerinden dolayı saptanabilmelidir. Pulsar çevresinde gerçekleşen bu hareketlerin etkisi çok küçük de olsa, pulsarın çok duyarlı saatinde bir farka yol açar ki bu da kendini giderilemeyen bir gürültü olarak gösterir. Bununla birlikte hem halkalar, hem de uzun sicimler bozunmadan önce çevresinde madde birikmelerinin başladığı tohumlar olarak davranırlar.

Acaba örgüler ve sicimler varlıklarına ilişkin başka herhangi bir ipucu bırakıyorlar mı? Örgülerin oluşturduğu potansiyel kuyuları, içeri giren ışığı maviye, dışarı çıkan ışığı kırmızıya kaydırırken, sicimler de civardan geçen ışığa da kütleçekimsel mercek etkisi uygularlar. Bu etkilerin her ikisi de örgü ya da sicim yönündeki kozmik mikrodalga fonunda sıcaklık dalgalanmaları yaratır. Modeller bize, eğer örgüler ve sicimler gözlediğimiz büyük ölçekli yapıyı ortaya çıkarıyorsa, bu sıcaklık dalgalanmalarının saptanabilmeleri



Solda: Bir bilgisayar simülasyonu ile kırmızıya kaymaları 1000 olan kozmik sicimlerin gökyüzündeki projeksiyonları. Sicimleri evrenin çok erken dönemlerindeki yüksek yoğunluğun kalıntıları olup yapıların gelişmesi için kütleçekimsel tohum işlevi görürler. Uzun sicimler kesişir, halkalar oluşturur ve kütleçekimsel ışınım vererek bozunurlar. Sağda: Kozmik mikrodalga fonunun 10 derece karelik bir bölgesi kozmik sicimlerin nasıl sıcaklık dalgalanmaları biçiminde izlerini bıraktıklarını gösteriyor.

gerektiğini anlatır. Standart yapı oluşumu teorilerinin tersine, genliklerin hesaplanan dağılımı rasgele değildir. Bunun yerine, dalgalanma genliklerinin gökyüzündeki dağılımının tek olduğu hesaplanmıştır. Kozmoloji uzmanları, kozmik mikrodalga fonundaki sıcaklık dalgalanmalarını analiz ederek eksiklik teorisini tam anlamıyla sınayabilmeli ve büyük patlamadan 10^{-36} saniye sonrasına kadar gidebilmelidirler.



Sağda: Antenler adı verilen, NGC 4038/9 olarak da bilinen ve etkileşim halinde bir çift galaksi
Solda: Hubble Uzay Teleskobu'nun gördüğü biçimiyle zengin bir yıldız oluşum bölgesi olan Orion Bulutsusu.

Galaksilerin Oluşumu

Galaksiler, kozmoloji uzmanlarının evrenin çok daha az farklılaşmış yapıda olduğu, en eski dönemlerine doğru zaman içinde geriye doğru yolculuk yapabilmelerine olanak sağlayan deniz fenerleridir. Galaksilerin, değişmez bir biçimde herhangi bir kozmoloji modelinin sınanmasında kullanılan araçlar ya da kilometre taşları olduğu biliniyor. Gerçekten, evrenin geometrisi ve kaderini ortaya çıkarabilmek için yaptığımız bütün girişimler, galaksilerin nasıl bir evrim geçirdiğini bilmediğimiz için başarısız olmaktadırlar. Galaksiler, karanlık maddenin en iyi incelenmiş kaynakları olup, içlerinde evrenin daha genç ve daha etkin olduğu evrelere ilişkin ipuçlarını fosilleşmiş bir biçimde de olsa barındırmaktadırlar. Her şeyin ötesinde biz, bir galaksinin derinliklerinde yaşadığımızdan, kozmik sahnedeki kaynağımız konusundaki anlayışımız, galaksilerin uzak geçmişteki oluşumunu çevreleyen giz perdesinin aydınlatılmasından ayrı düşünülemez.

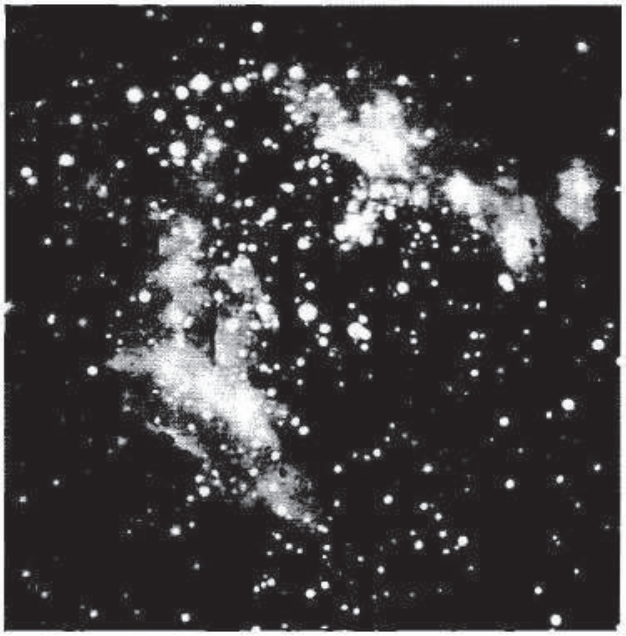
Bu nedenle kozmolojinin temel amaçlarından biri galaksilerin nasıl oluştuğunun ortaya çıkarılmasıdır. Ne yazık ki bu alanda, fizik son derece karmaşık ve zor anlaşılır hale gelmektedir. Şimdi de birbiriyle hiç etkileşmeden evrim geçiren, enerjisini koruyan karanlık maddeyle ve enerjisini harcayarak evrim geçiren gazla uğraşmak zorundayız. Bu uğraşımıza uzak ve oluşmakta olan bir galaksi şöyle dursun, Güneş civarında bile tam anlaşılamamış olan yıldız oluşumunu da katmalıyız. Tam olarak anlaşılamamış olan bir süreci milyarlarca yıl ve milyonlarca ışık yılı ötelere taşımayı öğrenmeliyiz. Bu bölüm, galaksi oluşumuna ilişkin model oluşturma konusundaki girişimleri tanımlamaktadır.

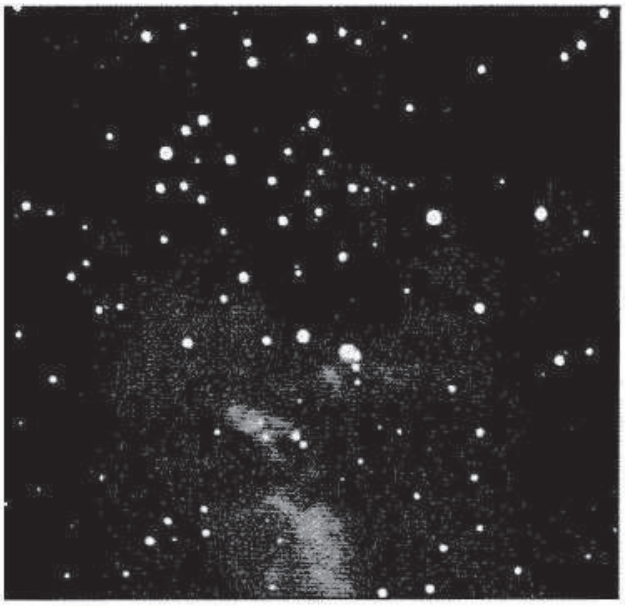
Yıldızların Oluşumu

Yıldızların süregelen oluşum sürecinden oldukça çok şey öğrendik. Örneğin, yıldızlar Samanyolu diskinin içinde kalınlığı 200 parsek ve çapı 20 kiloparsek olan bir bölgede oluşmaktadırlar. Galaksimizdeki yıldız oluşum bölgelerinin, yıldızlararası ortamın en yoğun, en soğuk ve en karanlık bulutları olduğu gözlenmektedir. Bu bulutların kütleleri 10 000 - 1 milyon Güneş kütlesi arasında olup temel olarak molekül yapısındaki hidrojenden oluşmaktadırlar.

Kısa ömürlü, büyük kütleli yıldızlar, oluşum bölgelerini aydınlatmaktadırlar.Yıldız doğumlarının gözlendiği yıldızlararası bulutlar ve genç yıldızların bulunduğu bölgeler, sarmal kollarda yoğunlaşmaktadırlar. Bizim bulunduğumuz kolun adı Orion koludur. Galaksinin

merkezinden dışarı doğru gidildiğinde Samanyolu'nun diğer sarmal kolları,Centaurus, Sagittarius ve Perseus'tur. Her kol galaksiye bir tur ya da daha az sarılmış gibi gözükmektedir. Bu, başlangıçta astronomları çok şaşırtmıştı: galaksinin iç bölgeleri daha hızlı döndüğünden, eğer bu uzun süren bir olay olsaydı, kolların galaksiye daha fazla sarılması beklenirdi.





Zengin bir yıldız oluşum bölgesi olan Omega Bulutsusu'nun (M17), kızılötesi (üstte) ve optik ışıkta (altta) görünüşü. Optik ışık, yıldızların oluştuğu bölgedeki toz ve molekül yapısındaki gaz tarafından şiddetle soğurulduğundan kızılötesinde görülen yıldızların sayısı çok daha fazladır.

Sarmal kolların uzun ömürlülüğü, yoğunluğun birbirinin ardı sıra gelen bölgelerde az ya da çok olması anlamına gelen yoğunluk dalgaları ile açıklanmaktadır. Yıldızlar- arası gaz bulutları, sarmal bir galaksinin diski çevresinde hemen hemen dairesel yörüngelerde dönerler. Diskteki yıldızlar ve gaz bulutları üzerine sürekli olarak etkiyen bir gel-git kuvveti, maddenin yoğunluk dalgaları oluşturacak biçimde sıkışmasına ve biçimleri bozulmuş yörüngelerin ortaya çıkmasına neden olur. Bizim galaksimizdeki gel-git kuvvetinin kaynağı, görünüşe bakılırsa Büyük Magellan Bulutu'dur. Onun yarattığı biçim bozulmaları, hemen hemen trafik sıkışıklığına benzetilebilecek bir biçimde yörüngelerin bazı bölgelerde yığılmasına yol açar. Galaksideki farklı dönme hızları yoğunluk dalgalarını sarmal bir biçime sokar. Bu nedenle sarmal kollar, yörüngelerin kalabalıklaştığı bölgelerden başka bir şey değildir. Bu bölgeler daha parlak olarak gözlenir ve bu süreç sırasında oluşan yapı bizim galaksimiz ve başka galaksilerdeki tanıdık görüntünün ortaya çıkmasını sağlar.

Tıpkı kalabalıktan tıkanmış bir trafikte olduğu gibi, bulutlar gel-git alanının yarattığı yüksek yoğunluk bölgelerinde zaman zaman çarpışırlar.

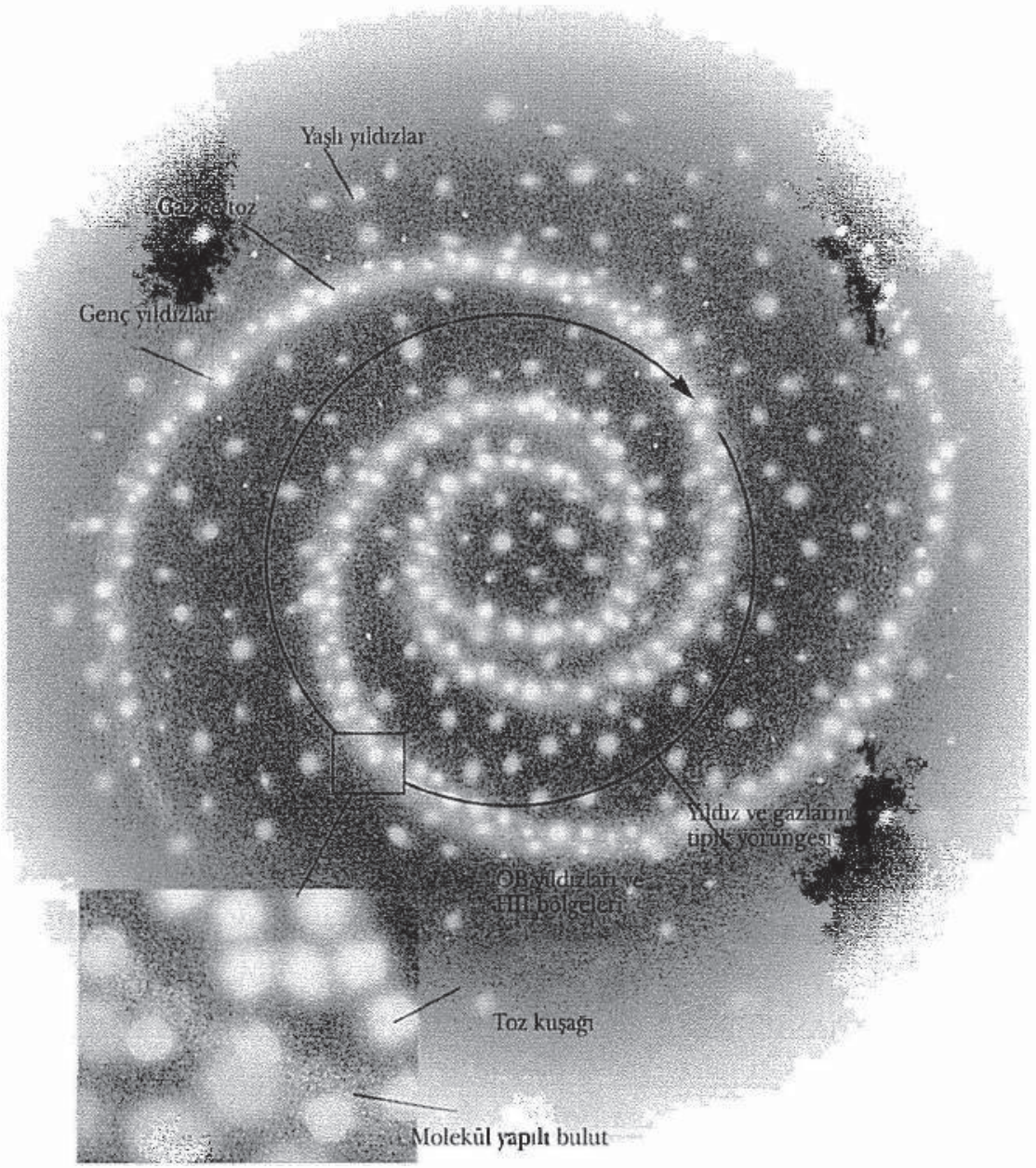
Boyutları bulutlara oranla çok daha küçük olan yıldızlarsa çarpışmazlar. Yıldızlararası bulutlar yapısal olarak esnek değillerdir. Çarpıştıklarında tıpkı iki kartopu gibi kaynaşırlar. Çarpışan bulutlar bir yandan galaksi çevresinde dönerken bir yandan da boyutları yavaş yavaş büyüyen karmaşık topaklanmalar oluştururlar. Bulutların kütleleri arttıkça yoğunlaşırlar ve kütleçekim kuvvetleri de buna paralel olarak artar. Bu yolla bulutlar, artık kararlı olmadıkları boyutlara kadar büyürler. Sarmal kollardaki en büyük kütleli bulutlar, sonunda birçok yıldız-kütleli parçalar halinde kümelere bölünürler. Bunlar ilkel yıldızlardır, zamanla yıldıza dönüşecek olan cisimlerdir.

Bu bulutların yıldız oluşturmak üzere çöküp çökmeyecekleri, galaksi oluşumunu incelediğimiz sırada sözünü ettiğimiz Jeans kriterine bağlıdır. Hangi özelliklerin bulutun yıldız oluşturacak biçimde çökmesini sağladığını anlamak için kütlesi M, yarıçapı R ve yoğunluğu ρ olan bulutun kendi kütleçekim kuvveti, merkezdeki basınç kuvvetine eşitlenir. Bulutun kendi kütleçekim kuvveti, kütlesinin karesiyle orantılıdır ama buna karşı koyan basınç kuvveti yalnızca kütlenin kendisiyle orantılıdır. Eğer kütleçekimi üstün gelirse -ki yeterince büyük kütleli bir bulutta böyledir- bulut çöker.

Daha büyük değerlerde çökmenin gerçekleştiği kritik ölçek, R_{jeans} olarak bilinen ve $V_s/\sqrt{G\rho}$ değerine eşit olan Jeans uzunluğudur. Burada G, Newton'un kütle çekim sabiti ve V_s ise ses hızı olup $(kT/m)^{1/2}$ ye eşittir. Burada da T sıcaklık, k Boltzmann sabiti, m ise proton kütlesidir. Jeans uzunluğu, yoğunluğu ve sıcaklığı belirlenmiş olan bir bulutun kritik boyutudur. Eğer bulut R_{jeans} değerinden büyükse, çöker. Jeans uzunluğunu ifade etmenin daha yararlı bir biçimi $10T^{1/2}n^{-1/2}$ parsek olarak yazmaktır. Burada T Kelvin cinsinden sıcaklık, n ise santimetreküpteki atom yoğunluğudur. Buna karşılık gelen Jeans kütlesi $20T^{3/2}n^{-1/2}\ M_\odot$'dır. Yaklaşık 30 Kelvin sıcaklığına ve santimetreküpte 1000 moleküllük bir yoğunluğa sahip olan tipik bir bulut için Jeans uzunluğu 2 parsek, Jeans kütlesi ise 100 $M_\odot$ 'dır. Bu boyuttaki bir bulut sonunda birçok yıldız oluşturacaktır.

Yakın galaksilerin sarmal kollarında yoğun gaz bulutları ile O ve B yıldızları adı verilen parlak yıldız toplulukları bulunur. Bir bulutun evrimindeki bu üç aşama, içten dışa doğru giden bir sarmal kol dizisinde bulunabilir. Bu yapı, bulutların yoğunluk dalgalarıyla karşılaştıklarında sıkıştıkları ve en yoğun bulutların toz toplulukları ve sonunda oluşan yıldızlar biçiminde görünür hale geldikleri yolundaki fikri desteklemektedir. Bu topluluklardaki parlak O ve B yıldızları bir ipe dizilmiş boncuklar gibi sarmal kollara di-

zilmektedir. Yörüngede dolaşmakta olan sarmal bir bulutun sarmal bir yoğunluk dalgasına girmesi sırasında başlayan yıldız oluşumu bulaşıcı bir salgın hastalığa benzer. Yoğunluk dalgasının sıkışma bölümünde yer alan kısa ömürlü, büyük kütleli yıldızlar yaşamlarını birkaç milyon yıl içinde tamamlarlar. Bu nedenle sarmal kollar düzenli ve belirgin olarak gözükür. Sürekli olarak yeni doğan yıldızlarca beslendiklerinden sarmal kollar kalıcı olarak aynı gibi durur.



Yıldızlararası gaz bulutları bir sarmal yoğunluk dalgasına girdikleri zaman önce sıkışırlar sonra karanlık toz bulutları olarak görünür hale gelirler, en sonunda da parçalanarak genç yıldızları oluştururlar.

Ana bulut dönmekte olduğundan bölünmeden sonraki her parça da dönmeyi sürdürür. Bu nedenle her parça önce dönme momentleri tarafından da desteklenen bir gaz ve toz bulutu biçiminde çöker. İç çekirdek büzülür, ısınır ve bir yıldıza, daha doğrusu başlangıçta tüm gücünü kütleçekiminden alan ilkel bir yıldıza dönüşür. Disk, merkezdeki ana yıldız çevresinde dönen gezegenler oluşturabilir. Merkezdeki yıldızdan kaynaklanan morötesi ışınım ve yıldız rüzgârı çok geçmeden çevredeki gazı iyonlaştırır ve süpürür.

Çöken ilkel yıldız tarafından serbest bırakılan yeterli miktarda kütleçekimsel potansiyel enerjisi olduğu sürece yıldız enerjisini bu yoldan almayı sürdürür. İlkel yıldızın başlangıçtaki enerji deposu, kütlesi M ve yarıçapı R olan bir yıldız için GM^2/R kadardır. Güneş'in günümüzdeki haline benzeyen bir yıldız düşünelim. Böyle bir yıldızın kütleçekimsel potansiyel enerjisi yaklaşık olarak 4×10^{48} erg kadardır. İlkel yıldız parlaklığı 10 $L_\odot$ ya da saniyede 4×10^{34} erg olan böyle bir yıldız yalnızca kütleçekimi enerjisiyle parlamasını 10^{14} saniye ya da 1 milyon yıl sürdürür. Bu da ilkel yıldız evresinin tipik süresidir. Bu evredeki yıldızın çevresinde hâlâ bol miktarda ışınım soğuran (ve yeniden yayan) gazlardan oluşan bir koza bulunduğu için, yıldız bir kızılötesi ışınım kaynağı olarak görülür. Çok geçmeden hidrojenden oluşan çekirdekte nükleer yanma başlar ve hidrojen yakan, kararlı bir yıldız doğmuş olur.

Ölen Yıldızlar

Yıldızlar kütlece 0.1 $M_\odot$ ile 100 $M_\odot$ aralığında bulunabilirler. Kütlesi 20-50 $M_\odot$ arasında olan büyük kütleli bir yıldız, ana kol adını verdiğimiz hidrojen yakma evresinde yalnızca birkaç milyon yıl kalırken, 1 Güneş kütleli bir yıldız, hidrojenini sakin bir biçimde yaklaşık 10 milyar yıl süresince yakabilir. Küçük kütleli yıldızlar çok uzun ömürlü olup Güneş'ten kat kat uzun yaşarlar. Yıldız ölümleri galaksi oluşumunda kritik bir rol oynarlar.

II. Tür süpernova adı verilen ve nötron yıldızlarını oluşturan süpernovalar, kütleleri 8 ile 50 $M_\odot$ arasında olan yıldızların ölümü sırasında ortaya çıkarlar. Hızlı bir evrim geçiren bu büyük kütleli yıldızlar, insan olarak bizim yapımızda da bulunan karbon, oksijen ve silikon gibi ağır elementlerin üretilmesinden sorumludurlar. $8M_\odot$'den daha büyük kütleli yıldızlar nükleer yanmanın tüm aşamalarını sergilerler. Dıştan içe doğru hid-

rojen, helyum, karbon, azot, oksijen ve silikondan oluşan kabuklar demir çekirdeğin çevresinde yer alırlar. Yıldızın yaşamının sonunda, demirin de sentezlenmesinden sonra artık nükleer reaksiyonlardan elde edilebilecek olan tüm enerji de tükenince demir çekirdek çökerek nötron yıldızı oluşturur. Serbest bırakılan enerji de bir süpernova patlamasını ateşler. Patlama ile dev yıldızın çoğunlukla hidrojenden oluşan dış katmanlarına doğru bir patlama dalgası yayılır ve bunun sonucunda bol miktarda ağır element yıldızlararası ortama püskürtülür.

II. Tür bir süpernova, karakteristik olarak kuvvetli hidrojen ve helyum tayf çizgilerine sahiptir. Bu tür süpernova veren hidrojence zengin ve büyük kütleli yıldızların, sarmal kolların bulunduğu, gaz bakımından zengin olan yıldız oluşum bölgelerinde bulunması beklenir. Ve aslında II. Tür süpernovalar günümüzdeki sarmal galaksilerin ve büyük olasılıkla geçmişteki ilkel galaksilerin disk bölgelerinde oluşmaktadır. Astronomide kullanılan terimlerin tersliği, Popülasyon 1 yıldızlarının oluşturduğu süpernovaların II. Tür olarak adlandırılmalarına neden olmaktadır.

Ama, kolayca anımsayabileceğimiz gibi, hemen her tür galakside ve özellikle de büyük kütleli yıldızların bulunmadığı bölgelerde oluşan ve I. Tür olarak adlandırdığımız bir süpernova türü daha vardır. I. Tür süpernovalar, genellikle çift yıldız sistemlerinde yer alan küçük kütleli yıldızların ölümü ile ilişkilidir.

Kütleleri yaklaşık 8 $M_{\odot}$ değerinden küçük olan yıldızlar kütlelerinin büyük bölümünü kırmızı dev ve süperdev evrelerinde kaybederler. Bu yıldızlar, helyum yanmasının başlangıcı sırasında yıldız rüzgârları oluşturur ve eninde sonunda dış katmanlarının büyük bölümünün gezegenimsi bulutsu biçiminde çevreye püskürtürler. Bu nedenle küçük kütleli yıldızlar yaşamlarını 0.6 $M_{\odot}$ kütlesinde beyaz cüceler olarak sona erdirirler. Evrenin ilk dönemlerindeki yıldızların tersine, bu yıldızlar helyumu karbona çevirmeyi başarabildiklerinden, çoğunlukla karbon ya da oksijenden oluşmuşlardır.

Birçok yıldız çift yıldız sistemlerinin üyesidirler ve onları bekleyen son da farklıdır. Eğer bir çift yıldız sisteminde bir beyaz cücenin yakınlarında daha büyük kütleli yıldız varsa, bu yıldızdan beyaz cüceye hidrojen bakımından zengin bir gaz akışı olur. Bu da, bir milyon Güneş parlaklığına sahip olan nova patlamasına yol açan patlayıcı bir karışımdır. Nova, bir ay sonra sönükleşir ama genellikle yıllarca sonra tekrarlar.

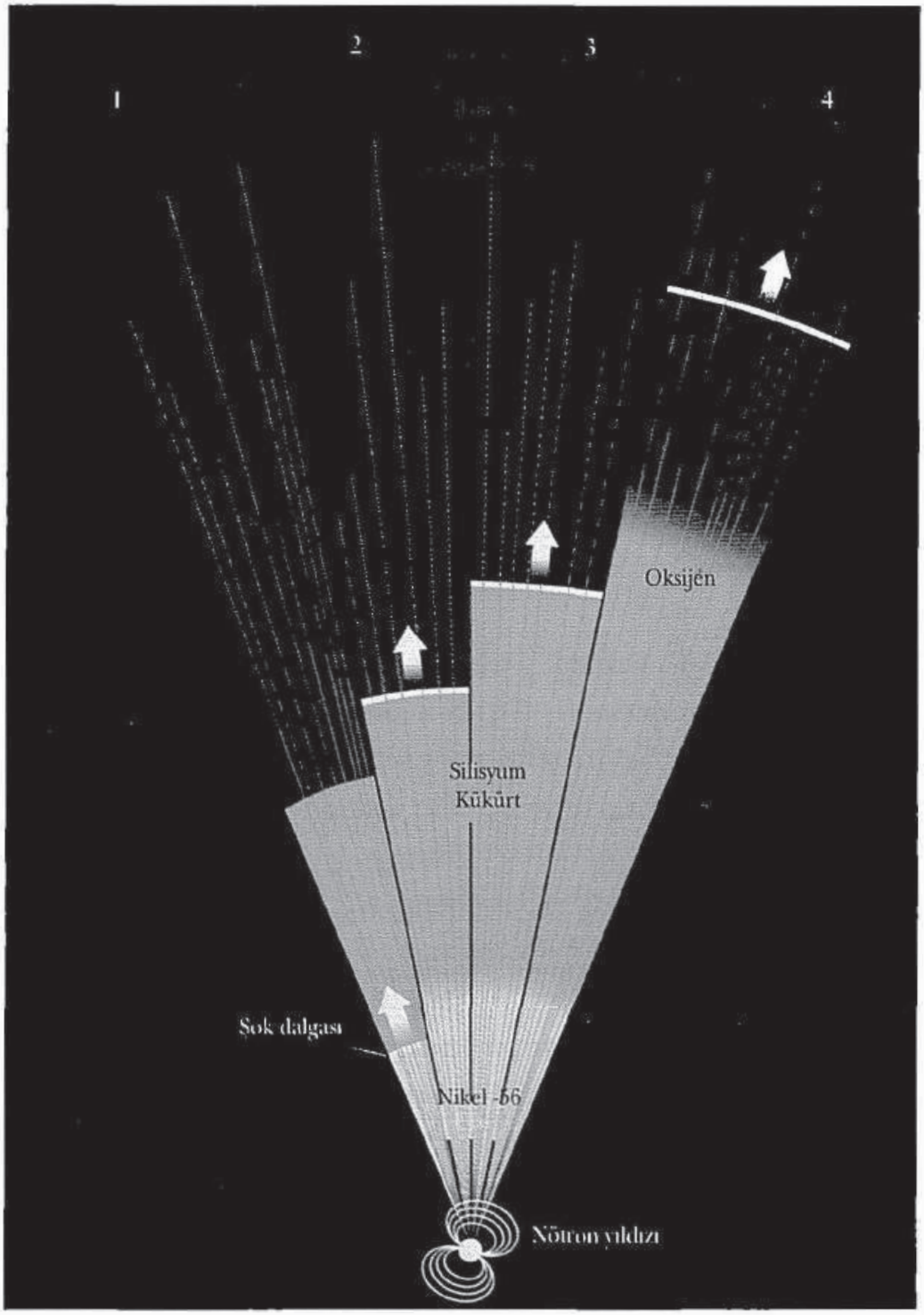
Eğer bir beyaz cücenin üzerine çok miktarda kütle akışı gerçekleşirse, yıldız kararlı olma özelliğini kaybeder. Yakın bir çift yıldız sisteminde iki beyaz cücenin birarada bu-

lunması durumunda olan budur; sistem evrim geçirirken iki yıldız kaynaşarak tek bir yıldız oluştururlar. Beyaz cüce üzerine o kadar çok madde akışı gerçekleşir ki, yıldız, kararlılık sınırı olan 1.4 $M_\odot$ değerini aşar ve kaçınılmaz olarak çöker.

Böyle bir yıldız mükemmel bir bombadır. Her ne kadar başlangıçta ısı enerjisinden kaynaklanan basınçla değil de yoz (dejenere) basınç tarafından dengelenmekteyse de, kısa bir zaman içinde çok hızlı termonükleer reaksiyonlar sonucunda parçalanır. Çökme sırasında ortaya çıkan sıkışma, yıldızın oksijen ve helyumunu ısıtır. Bunlar da mükemmel birer nükleer yakıt kaynağı haline gelirler. Nükleer reaksiyonlar başlar ama yıldız başlangıçta hâlâ dejenere olduğundan gaz genişlemez ve bu nedenle çok daha patlayıcı bir durum ortaya çıkar. Sıcaklık yükselmeye devam ettikçe, eninde sonunda ısı basıncı yoz basınca üstün gelir ve basınçtaki artma sonucunda bir patlama kaçınılmaz hale gelir. Beyaz cüce bir milyar Güneş'ten daha parlak bir patlamayla yok olur. Uzaya dağılan atık maddeler arasında karbon, oksijen ve demir gibi ağır maddeler bulunurken hiç hidrojen bulunmaz. Gerçekten de bu tür süpernovalar II. Tür süpernovalardan tayflarında hiç hidrojen çizgisi bulunmamasıyla ayrılır. I. Tür adı verilen bu süpernovalar, eski yıldız popülasyonlarındaki küçük kütleli yıldızlara özgüdür. Galaksi halelerine ek olarak hemen hemen tümüyle yaşlı yıldızlar barındıran elips biçimli galaksilerde gözlenirler.

Süpernova Kalıntıları ve Uzayın Zenginleşmesi

Her iki tür süpernova da gaz yapılı kalıntılar üretir: ağır elementlerce zengin olan ve genişleyen gaz kabuklar. Çevrede bol miktarda nötron bulunması nedeniyle patlama sırasında demirden daha ağır elementlerin sentezlenmesi de gerçekleşir. Tüm bu kalıntılar, yıldızlararası uzaya püskürtülür. Kalıntıların radyoaktif olduğu gözlenmiştir ve aslında süpernovanın verdiği ışığın önemli bir bölümünün sorumlusunun işte bu radyoaktivite olduğu bilinmektedir. Bir yıl gibi bir zaman süresi sonunda süpernovanın ışığı sönükleşince, ışığın azalma hızının, yarı ömrü aylar mertebesinde olan radyoaktif elementlerin bozunma hızına benzediği görülür. Teori, şöyle bir olasılığın varlığını öngörüyor: demir çekirdek oluştuğunda yaklaşık 0.6 $M_\odot$ kütlesinde radyoaktif nikel (Ni^{56}) üretilir. Nikel, yarı ömrü 6 gün olan bir bozunmayla kobalta (Co^{56}), kobalt da demire (Fe^{56}) dönüşür ki kobaltın demire dönüşmesinin yarı ömrü 79 gündür.



Süpernova sırasında bir şok dalgası patlayan yıldızın iç katmanlarını parçalar, bu bölgenin sıcaklığını 5 milyar derece Kelvin'e kadar yükselterek nükleer sentezi başlatır. Silisyum ve kükürt kısmen bu senteze girerek radyoaktif bir element olan Nikel-56'yı oluştururlar (1. aşama); diğer katmanın tabanındaki oksijenin bir bölümü silisyum ve kükürde dönüşür (2. aşama), katmanın içlerindeki neon ve magnezyum ise oksijene dönüşür (3. aşama). Şok, geri kalan madde içinden başkaca nükleer sentez yaratmadan geçer.

Gamma ışınları ve elektronlar biçiminde radyoaktif enerji salıverilir ve bu da yıldızın zarfı (en dış katmanları) tarafından soğurulur. Ortaya çıkan parlama, gözlenen ışık bozunmasının nedenidir.

Süpernova patlamaları ender rastlanan olaylardır: bir galakside ortalama olarak yüz yılda yalnızca bir kez ortaya çıkarlar. Samanyolu'nda gerçekleşen en son süpernova patlaması 1604 yılında Kepler tarafından kaydedilmişti. Son 400 yıl içinde en yakında ortaya çıkan süpernova patlaması olan SN1987A ise 1987 yılı Şubat ayında Büyük Magellan Bulutu'nda ortaya çıktı ve o tarihten beri de yakından inceleniyor. Patlamayı kızılötesi dalgaboylarında inceleyen astronomlar yeni sentezlenmiş kobalt ve nikel salma çizgileri saptadılar. Dahası, SN 1987A'nın ışığı, radyoaktif kobaltın yarı ömrü olan 79 günde sönümlendi. Bu da, ışınımında kobalttan kaynaklanan gamma ışınları bulunduğu için süpernovanın gücünü radyoaktiviteden aldığına ilişkin senaryonun doğruluğunu kanıtladı.

SN 1987A Süpernovası'nı veren yıldız, fotoğrafı çekilebilecek ve kataloglanabilecek kadar yakındı. Bu patlamanın II. Türden bir süpernova patlaması için biraz olağandışı olduğu ortaya çıktı. Örneğin, süpernovanın parlaklığı yalnızca üç saat içinde artı ki bu hız, bu tür bir süpernova patlaması için beklenenden biraz fazladır. Patlama öncesindeki yıldız, alışılmış olduğu gibi 500 Güneş yarıçapında bir kırmızı dev değil, çok daha küçük, yalnızca 50 Güneş yarıçapında bir mavi devdi. Yıldızın boyutunun küçük olması süpernovanın ışığındaki hızlı artışı ve diğer gariplikleri de açıklıyor. Örneğin, SN 1987A Süpernovası diğer II. Tür süpernovalardan 10 kat daha sönüktü, hemen kırmızıya kaymıştı ve çok hızlı, hemen hemen ışık hızının onda biri kadar bir hızla genişlemekteydi. Küçük ve sıkı bir yıldızın genişlemesi sırasındaki enerji sönümlenmesinin daha hızlı olduğu düşünülecek olursa, yukarıdaki özellikler anlaşılabilir olmaktadır. Bu yıldız 10 000 yıl önce büyük olasılıkla bir kırmızı devdi, ama o zamandan bu yana kütlesinin bir bölümünü kaybederek küçülmüştür.

Süpernovalar ve onların kalıntıları çok verimli kozmik ışın kaynaklarıdır. Çoğunlukla proton ve elektronlardan oluşan ama bazen daha ağır çekirdekler de içeren bu yüksek enerjili parçacıklar, yıldızlararası gazla etkileştiklerinde çıkan gamma ışınlarının doğrudan gözlenmesiyle ya da yüksek hızlı elektronlar yıldızlararası manyetik alanlarda ivmelendikleri zaman üretilen synchrotron radyo dalgalarının gözlenmesiyle saptanırlar. Kozmik ışınlar aynı zamanda yüksek dağ tepelerinde, balon ve uydularla yapılan de-

neylerle de ölçülürler. II. Tür süpernovalar evrendeki oksijen ve diğer ağır elementlerin çoğunu üretirken I. Tür süpernovalarsa demirin çoğunu üretirler. İki tür süpernova birlikte ele alınırsa, bunlar yüz ya da daha fazla yeni sentezlenmiş izotopu çevrelerindeki uzaya yayarlar. Milyarlarca yıl uzunluğundaki galaksi oluşum döneminde eğer kısa ömürlü, büyük kütleli yıldızlar var idiyse -ki bu kaçınılmaz gibi görünüyor- II. Tür süpernova patlamaları gerçekleşmiş olmalıdır. Uzun ömürlü, küçük kütleli yıldızların oluşturduğu I. Tür süpernovalar, yıldızlararası ortamı daha uzun zaman ölçeklerinde zenginleştirmiş olmalılar. Patlayan yıldızların kalıntıları yıldızlararası gazla karışmakta ve bu gaz bulutları yeni yıldızlar oluşturmak üzere çökmeye başladığında bu yıldızların yapılarına girerek yeniden kullanılmaktadır. Kimyasal evrim birçok yıldız kuşağının hayat çevrimi boyunca sürer. Ama acaba her şey nasıl başladı? Acaba ilk yıldızlar günümüzde oluşan yıldızlardan farklı mıydılar?

İlk Yıldızlar

Galaksinin ilk döneminde oluşan yıldızlar pek çok bakımdan günümüzde oluşan yıldızlardan ayrılamaz gibi görünebilir. Bunu, galaksinin ilk dönemlerinde oluşan yıldızlardan bazıları hâlâ yaşadıkları için biliyoruz. Yıldızlarının yüzey sıcaklıklarına karşı ışıma güçlerinin çizildiği Hertzsprung-Russel diyagramı normal, hidrojen yakan yıldızların yaşam sürelerinin saptanabilmesini sağlar. Yıldızın ana koldan ayrıldığı zamanki konumu gözlenen hidrojen yakma döneminin ne kadar sürdüğünü, yatay kol üzerindeki konumu ise ne kadar zamandır helyum yakmakta olduğunu belirler. Bu yöntemle yaşları belirlenen küresel kümelerin yaklaşık 14 milyar yıl önce oluştukları hesaplanmıştır ki bu tarihteki dağılım miktarı 2 milyar yıldır. Bunlar, galaksideki en yaşlı yıldızlardır.

Galaksinin başlangıcında var olan yıldızlar hakkındaki herhangi bir şeyi nasıl bilebiliyoruz? Doğru, bazı yıldızlar çok uzun ömürlüdürler: kütlesi Güneşinkinin yarısı kadar olan bir yıldız en azından galaksinin yaşının iki katı kadar bir süre boyunca hidrojen yakmayı sürdürecektir. Bununla birlikte ilk yıldızların sayıca az olduğu gerçeğine karşın, çok özel yapıları nedeniyle astronomlar bunları kolayca tanıyabildiklerinden, çevrede pek azı galaksinin ilk yoğunlaşma döneminde oluşmuş olan çok sayıda küçük kütleli yıldız bu-

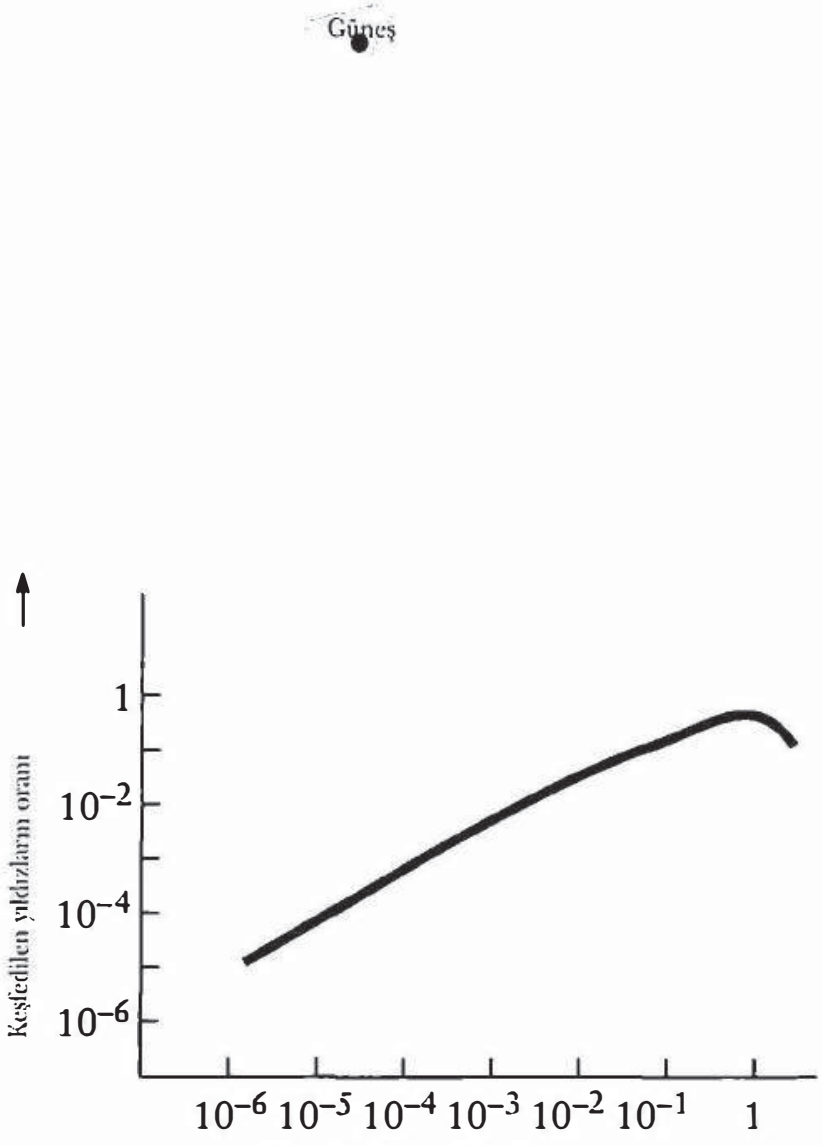
lunduğu bilinmektedir. Galaksinin başlangıcında üretilen ağır element miktarı çok azdır. Bunun sonucu olarak yıldızlarda hemen hemen hiç oksijen ya da demir bulunmaz. Zaman geçtikçe yıldızlararası bulutlar süpernovaların püskürttükleri gazlarla zenginleşir ve yıldızlar bu kirlenmiş ortamda oluşumlarını sürdürürler. Bu nedenle yıldız ne kadar geç oluşursa, o kadar fazla ölçüde hidrojenden daha ağır element içerir.

Gerçekten de göreceli olarak yakın zamanlarda, diyelim 10 milyon yıl önce oluşmuş olan yıldızlar, Güneş'e oranla iki kat daha fazla ağır element içerirler. Bunun tersine, Güneş sisteminin oluşumundan önce, yani 4.6 milyar yıldan daha önce oluşan yıldızlar Güneş'le karşılaştırıldıklarında metalce çok fakirdirler. Tayfsal yöntemlerle saptanan galaksimizdeki en eski yıldızların metal içeriklerinin, Güneşinkinin on binde biri veya yüz binde biri kadar olduğu bulunmuştur. Metalce fakir olan bu yıldızlar galaksi halesindeki yaşlı yıldızları kapsayan 2.Popülasyona ait olan yıldızlardır.

Böylesi yüksek oranda metal fakiri olan yıldızlar bazı küresel kümelerde de yer almaktadır. Her ne kadar Güneş'le karşılaştırıldığında metal eksiklikleri göze çarpmaktaysa da, galaksinin merkezinde yer alan küresel kümeler metal bakımından o kadar da fakir sayılmazlar. Galaksi halesinde yıldızlardan çoğunun metal oranı, Güneşinkinin onda biri civarında, galaksi düzlemindeki yıldızlarda ise bu oran ortalama olarak Güneşinkinin yarısı kadardır. Bu nedenle halenin galaksi düzleminden önce oluştuğu ya da en azından karakteristik yıldızlar açısından durumun böyle olduğu söylenebilir.

Bu kadar düşük oranda metale sahip olmaları nedeniyle Samanyolu Galaksisi'ndeki en yaşlı yıldızların galaksinin ilk oluşum aşamalarında ortaya çıkmış olmaları gerekir. Metal fakiri ama büyük kütleli yıldızlar öleli çok olmuştur. Yaşamlarını sürdüren metal fakiri yıldızlar çok enderdir. Bunun nedenini aşağıda anlatmaya çalışacağım. Bazı astronomlar, uzun süre önce ölmüş olan bu yıldızları 3.Popülasyon olarak adlandırırlar. Daha uygun bir sınıflandırma, her ne kadar saptanmaları oldukça zor ise de kütleleri Güneşinkinden küçük olan üyeleri hâlâ yaşamakta olduklarından, hale yıldızlarını kapsayan 2.Popülasyonun en son ucu olabilir.

İlk yıldızların doğasını anlaşılmasına ilişkin bir başka ipucu, bu yıldızların önce sentezleyip sonra da püskürttükleri metallerin incelenmesi olabilir. Püskürtülen bu maddeler daha sonra galaksi halesindeki yaşlı yıldızlarla birleşmektedir. Yıldız tayflarından saptanan bollukların oranları, yani örneğin oksijenin azot ya da demire oranı, bize bu elementleri sentezleyen yıldızların kütleleri konusunda ipuçları verir. Metal zengini olan en



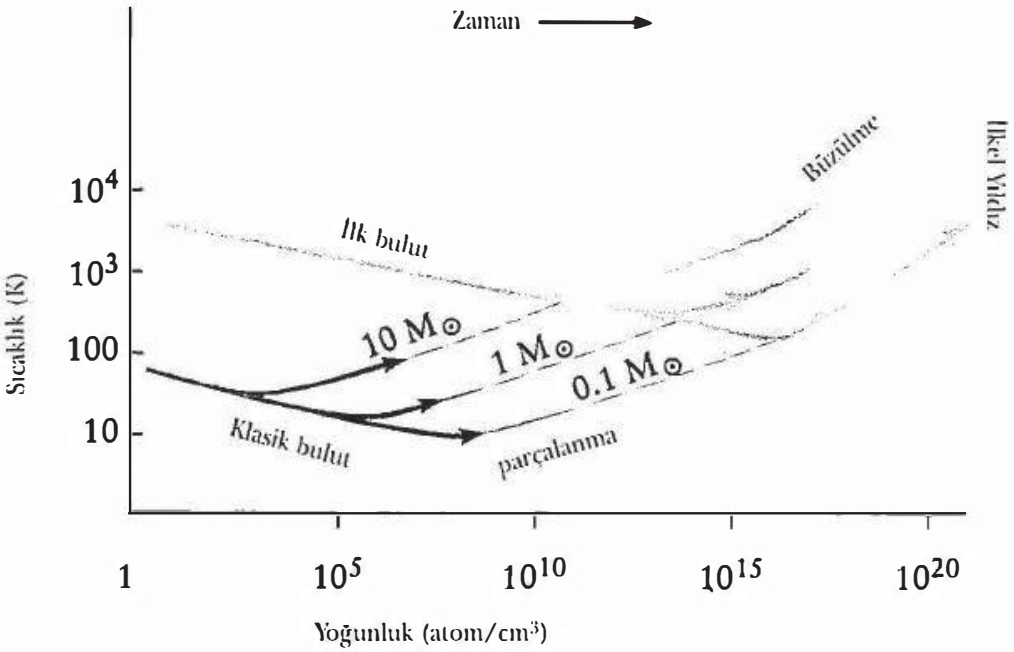
Üstte: Halede bulunan en eski yıldızlar galaksi düzlemiyle rasgele açılar yapan yassı; elips biçimli yörüngelere sahiptir.
Altta: Her ne kadar metalce çok fakir yıldızlar çok enderse de, galaksideki yıldızların çoğunluğu Güneş'e oranla metalce fakirdirler.

yaşlı yıldızlardaki oksijenin demire oranı daha genç yıldızlardaki orandan yaklaşık üç kat büyüktür. Örneğin kütlesi Güneşinkinin 10 katı olan bir yıldız, 30 katı olan bir yıldıza oranla çok daha az oksijen, çok daha fazla karbon ve demir üretir. Kısa ömürlü, büyük kütleli yıldızlar, II.Tür süpernova olarak patlayıp galaksinin ilk dönemlerindeki oksijene katkıda bulunurken daha küçük kütleli yıldızlar daha yavaş bir evrim süreci geçirerek sonraki yıldız kuşaklarını zenginleştirir ve zamanla bolluklarda gözlenen değişimlere neden olurlar. Buradan da yaklaşık olarak 14 milyar yıl önce oluşan ilk yıldızların kütle dağılımlarının günümüzde oluşan yıldızların kütle dağılımlarıyla temel olarak aynı olduğu sonucunu çıkarabiliriz.

Oluşum halindeki galaksinin ilk dönemlerindeki koşullar günümüzün koşullarından çok farklı olduğundan ilk yıldızların bildiğimiz yıldızlara benzemesi gerçek bir sürpriz olmuştur. O zamanlar hemen hemen ağır hiçbir element ve toz yoktu. İlk yıldızları oluşturan bulutlar hidrojen moleküllerinden değil, hidrojen atomlarından oluşmaktaydılar. Neredeyse

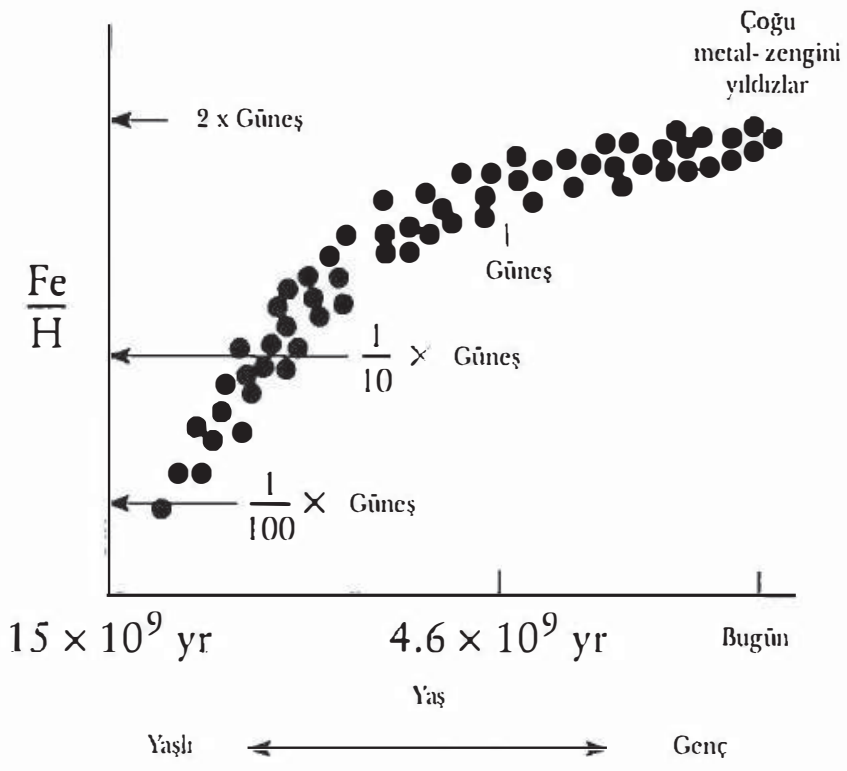
bir soğutucu görevi yapan iz elementlerin molekülleri ve ağır atomlar olmadığından o zamanki bulutların sıcaklıkları günümüzdeki molekül yapılı bulutlardan daha yüksek olmalıdır.

Jeans kütlesinin hesaplanması bize kendi kütleçekimi altında çökmeye başlayabilecek en küçük bulutun boyutlarını verir. Bu hesaplara bakarak ilk bulutların kütlelerinin, Güneş'in kütlesinin 10^6-10^7 katı olması gerektiği sonucunu çıkarıyoruz. Buna ek olarak, atom halindeki hidrojenin temel yapısından gaz sıcaklığını biliyoruz. Atom halindeki hidrojenin enerji düzeyleri birkaç bin derecenin altındaki soğumalara izin vermez. Ama çok az miktarlarda da olsa molekül yapısında hidrojen de bulunduğundan, bulutlar yaklaşık olarak 500 derece Kelvin'e kadar soğurlar. Kütle ve sıcaklığı bilmemiz yoğunluğu da hesaplayabilmemizi sağlar. Yoğunluk da günümüzdeki bulutlara benzer olarak santimetreküpte birkaç bin atom olarak bulunur. O zaman asıl farklılık, en eski bulutların günümüzdekilerden hem daha sıcak hem de daha büyük kütleli olmasıdır. Bu bulutlarda ağır elementler ve toz taneciklerı de yoktu.



Çöken bir gaz bulutunun parçalanması yıldız oluşumlarına yol açar. Bulut çökerken soğur, yoğunlaşır, sonunda gittikçe daha küçük parçalar büzülerek ilkel yıldızları oluşturur. Güneş'in kütlesinin 0.1'i ile 100 katı aralığındaki yıldızlar, bulutun yakın zamanda mı yoksa çok eskiden mi çökmeye başladığından, sıcaklık ve kütlesinin büyük veya küçüklüğünden, çevredeki metal bolluğunun az veya çokluğundan bağımsız olarak ortaya çıkarlar.

Yıldızlararası bulut çökerken ve sonunda da yıldızları oluşturmak üzere parçalanırken bu tipik farklılıkların birbirinin açığını kapatması yönünde bir eğilim vardır. Daha yüksek sıcaklık, gazdan kaynaklanan basınç desteğinin daha önemli olduğu anlamına gelir ve başlangıçta daha büyük kütleli parçalar oluşması demektir. Toz taneciklerinin olmayışı bulutu ışınıma daha geçirgen yapar ki bu da bulut çökerken soğumanın, diğer bulutlara göre

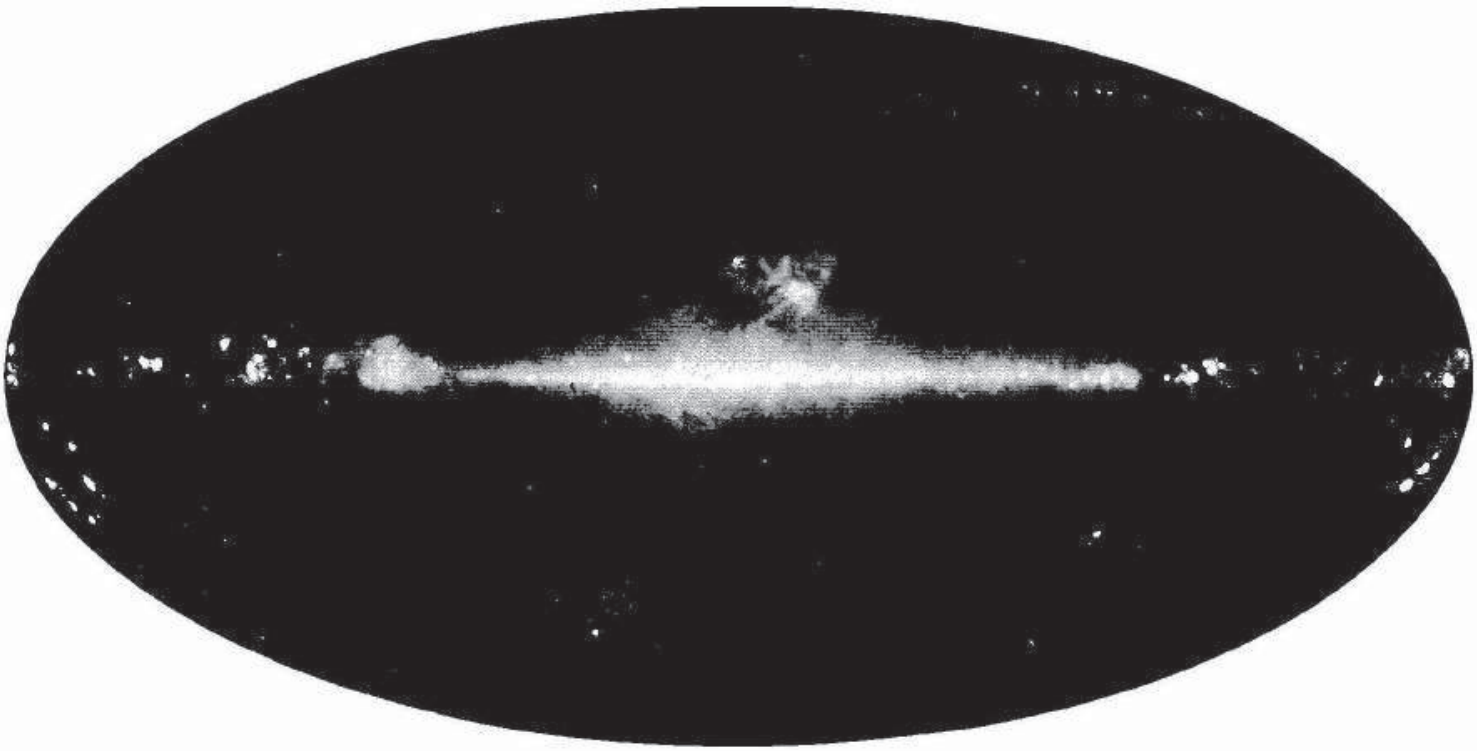


Demirin ya da daha genel olarak metallerin hidrojene göre bolluğu, yıldızın ortalama yaşının bir ölçüsüdür.

daha yüksek yoğunluklara ulaşılıncaya kadar sürmesini sağlar. Süregelen soğuma, bulutun çökmesi sırasında kütleçekimi ile savaşan basınç kuvvetlerinin büyümesini geciktirir. Bu nedenle parçalar da, başka hiçbir biçimde ulaşamayacakları kadar yüksek yoğunluklara erişinceye kadar çöker ve sıcaklıkları da çok yüksek olur. Başka bir deyişle, parçaların kütlesi aynı olmakla birlikte yüksek sıcaklığı telafi etmek için yoğunlukları yüksek olur. Galaksinin başlangıcında mı yoksa günümüzde mi çöktüklerinden bağımsız olarak bulutlar aynı boyutlardaki parçaları üretirler.

Kimyasal Evrim

Bir galaksinin yaşamının geç evrelerinde yıldızlar ağır elementler bakımından gittikçe daha zengin olarak oluşurlar. Yavaş yavaş gerçekleşen bu zenginleşmeye kimyasal evrim adını veriyoruz. 4.6 milyar yıl önce oluşan Güneş sistemi, galaksinin o zamanki kimyasal bileşimini yansıtıyor. Dev dış gezegenler ve özellikle de Jüpiter ve Satürn gibi Güneş'in de kütlesinin yüzde 2 kadarını helyumdan daha ağır elementler oluşturur. Güneş Bulutsusu'ndan aldıkları hidrojen ve helyumu koruyamamış olan iç gezegenler Güneş öncesindeki bulutsunun kimyasal durumunun iyi örnekleri sayılamazlar. Şu anda yıldız oluşumunun sürmekte olduğu Orion Bulutsusu gibi bir bölgede Güneş'e oranla her hidrojen atomu başına iki kat daha fazla ağır element bulunmaktadır. Yıldızlararası ortam aradan geçen 4.6 milyar yılda yakınlarda gerçekleşen süpernova patlamalarının artıklarıyla zenginleşmiş olduğundan, bu aslında beklenen bir farktır.



COBE'de bulunan Bulanık Kızılötesi Fon Deneyi tarafından alınan bu görüntüde Samanyolu düzlemi yatay olarak bir uçtan diğer uca uzanıyor. Bu görüntüde 25, 600 ve 100 mikrometre yani sırasıyla mavi yeşil ve kırmızı ışınım kaydedilmiştir. Bu dalgaboylarında gökyüzünün baskın özelliği, galaksimizin diskindeki dev gaz ve toz bulutlarında bulunan soğuk tozun yaydığı ışınımdır.

Pratikte bir galaksideki tüm gazlar ince bir disk biçimini alır ve yıldızlarla süpernovalardan kaynaklanan artıklar zamanla birikir. Her ne kadar yıldızlarının çoğu Güneş'ten yaşlı ve ortalama olarak daha fazla metal içermekteyse de galaksinin diski, tüm yeni yıldızların oluştuğu yerdir.

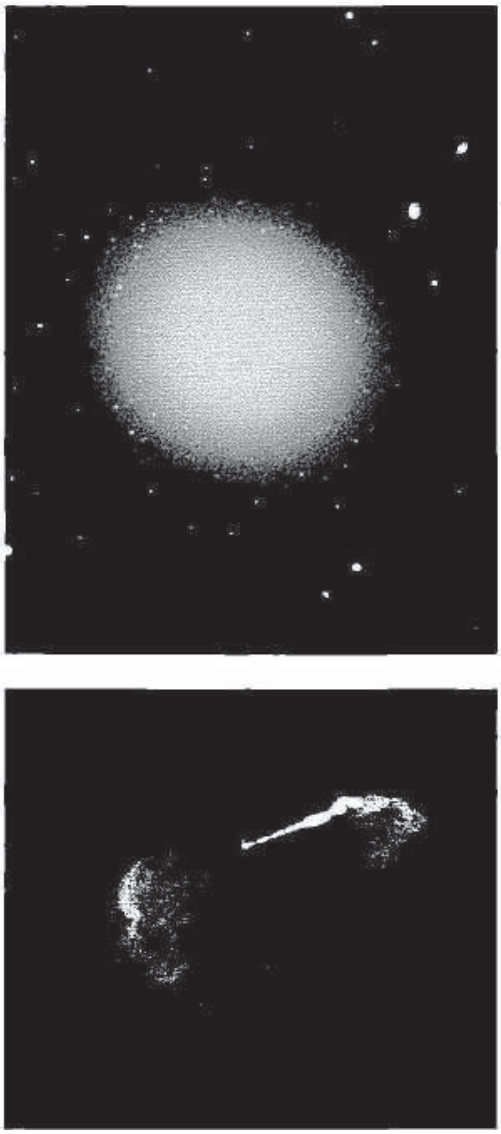
Yıldızlararası gazda bulunan ve uçucu olmayan ağır elementlerin yaklaşık yarısı toz taneciklerinin yapısında bulunur. Bu tanecikler, evrimlerinin ileri evrelerinde bulunan dev yıldızlar tarafından dışarı püskürtülen silikatlar gibi küçük, katı parçacıklardır. Uçucu olmayan tanecikler yıldızlardan püskürtüldükleri sırada yüksek sıcaklıklarda, uçucu olanlar ise düşük sıcaklıklarda yıldızlararası bulutlarda yoğunlaşmışlardır. Sonuç olarak, soğuk molekül bulutları içinde bulunan taneciklerin çevresinde buz biçiminde uçucu gaz yoğunlaşmaları oluşur. Bu bulutların kütleleri parçalanmaya yetecek ölçüde büyüdüğünde, galaksinin ve bulutların dönmesinden dolayı, her yeni yıldızın çevresinde diskler oluşur. Buzla kaplanmış olan tanecikler, oluşum halindeki yıldızın çevresinde çok ince bir orta düzleme yayılırlar. Sonunda da disk parçalanarak gezegen sistemine dönüşür.

Galaksi halesindeki yıldızların çoğunun içerdiği metal miktarı Güneşinkinin yüzde 3'ünden daha azdır. Bunu, haledeki yıldızların, gaz disk biçimini almadan önce oluştuğu şeklinde yorumluyoruz. Acaba en yaşlı yıldızların diskin dışında, galaksi halesinde yer almasının nedeni nedir? Açıklamalardan biri şudur: Yıldızlar oluşumları sırasında sahip oldukları hızlarını korurlar. İlkel galaksinin çöküşü sırasında oluşan yıldızların yörünge hızları büyük olur, bu nedenle de hale yıldızlarının hızları Güneş'e oranla çok fazladır. Gerçekten de bu, 2. Popülasyonun tanımından gelen bir özelliktir. Oysa ilkel galaksiyi oluşturan gaz disk biçimini aldıktan sonra gazın kinetik enerjisinin çoğu dışarıya verilmiş olacağından, geç oluşan yıldızların hızlarının 'düzlem dışı' bileşenleri bulunmaz. Gaz diskinde hareketin yalnızca çembersel bileşeni varlığını sürdürür. Bundan dolayı geç oluşan yıldızlar her zaman aynı yönde ve çembersel yörüngeler üzerinde hareket ederler. Bir başka deyişle, erken doğan yıldızlar haleyi, geç doğanlar ise diski meydana getirir.

Geriye bir sorun kalıyor: haledeki yıldızların arasında çok düşük ya da sıfır metal oranına sahip olanların sayısı neden bu kadar az? Cevap belki de galaksinin oluşumu sırasında kısa ömürlü, büyük kütleli yıldızların daha uzun ömürlü, daha küçük kütleli yıldızlardan günümüze oranla sayıca daha üstün olmasıdır. Eğer gerçekten böyleyse, bu evreden geriye kalan yıldızların sayısı da az olacaktır.

Elips Biçimli ve Sarmal Galaksilerin Oluşumu

Galaksi halesi ve diskinin oluşum senaryosu elips biçimli ve sarmal galaksilerin oluşumu için de geçerlidir. Elips biçimli galaksiler kütle açısından Güneş'e benzeyen yaşlı, 2.Popülasyon yıldızlarını içeren yuvarlak sistemlerdir. Sarmal galaksilerde ise genç ve yaşlı yıldızlarla birlikte gaz da içeren hale ve disk bileşenleri aynı anda bulunur. Bu farkların olası açıklamaları 1 milyar yıldan az süren galaksinin ilk çöküş dönemine kadar uzanır. Elips biçimli galaksilerdeki yıldızlar, galaksinin birkaç milyar yıl önceki ilk çökmesi sırasında gerçekleşen çok şiddetli bir patlama sırasında çok etkin bir biçimde yaratılmışlardır. Sarmal galaksiler ise bu evrede yıldızlarının yalnızca yüzde on kadarını oluşturmuşlardır. Sarmal bir galaksideki yıldızların çoğunluğu, gaz bir disk biçimini aldıktan



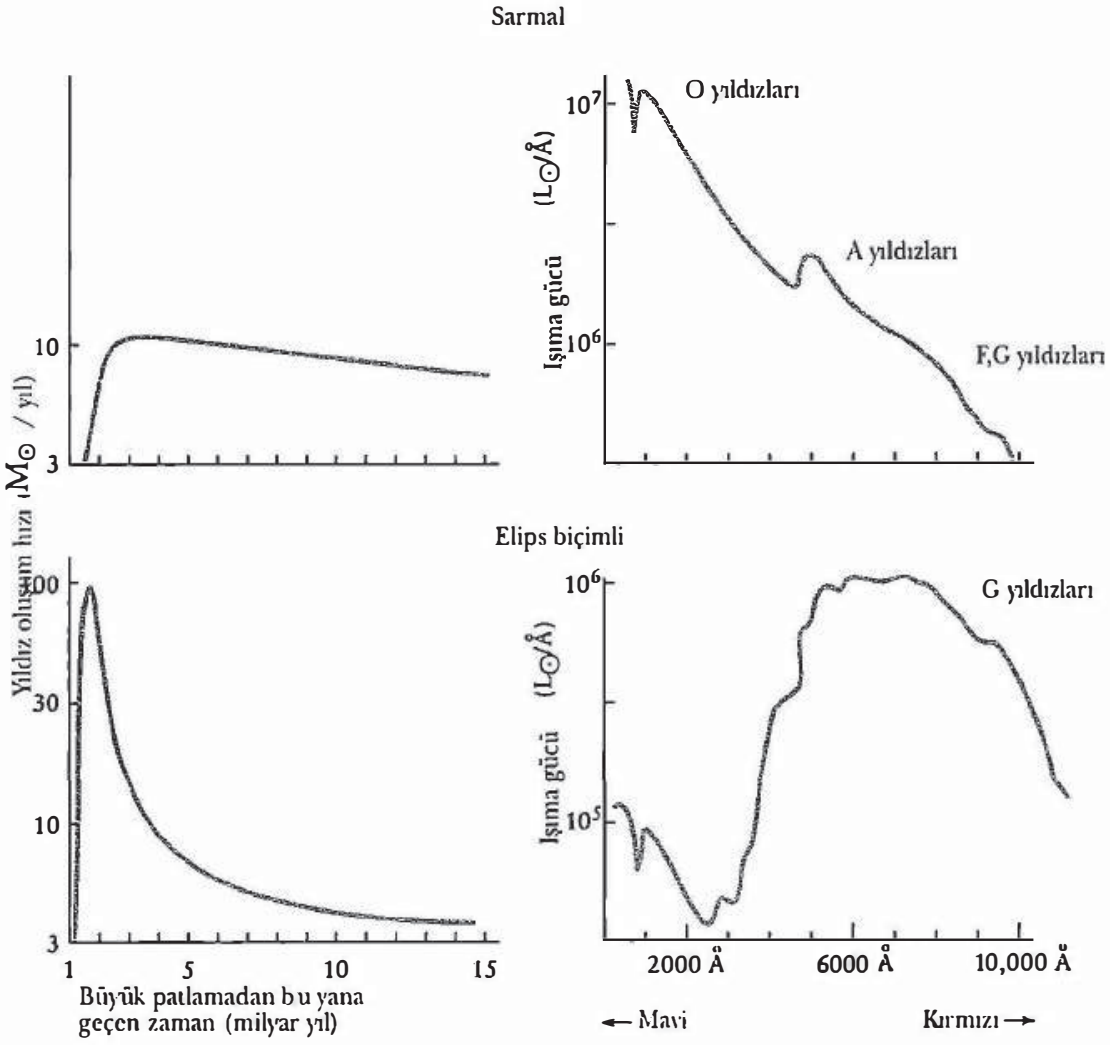
Elips biçiminde dev bir galaksi olan M87'nin optik görüntüsü (üstte) ve radyo dalgalarındaki görüntüsü (altta). Merkezde bulunduğu düşünülen büyük kütleli kara delikten sinkrotron ışınım fışkırmaları gözleniyor. Bu fışkırmalar galaksinin görünür boyutlarının dışına taşan dev radyo ışınım yumruları yaratmaktadır. Kara deliğin, çok eskiden yer alan ve galaksinin de ortaya çıkmasına neden olan etkileşim sırasındaki gaz bulutunun üzerine gazların düşmesi sonucunda ortaya çıktığına inanılıyor.

sonra, aradan geçen 10 milyar yıllık süre içinde yavaş yavaş oluşmuştur. Sarmal galaksiler yıldızlarını az çok sabit bir hızla oluştururlar ve bu oluşum süreci, yıldızların ham maddesi olan yıldızlararası gaz ve toz tükeninceye kadar devam eder. Bu galaksilerin hammaddeleri 10 milyar yıl süren yıldız oluşturma sürecinden sonra, yeni yeni tükenmek üzeredir.

Yıldızların elips biçimli galaksilerde neden bu kadar hızlı bir biçimde oluştuğunu açıklamak üzere ilginç bir öneri ortaya atılmıştır. Çevre koşulları aslında çözümü işaret ediyor. Elips biçimli galaksiler genellikle en yoğun galaksi kümelerinde bulunurken sarmal galaksiler çoğunlukla gevşek gruplarda ve kümelerin düşük yoğunluğa sahip olan dış bölgelerinde yer alırlar. Galaksi kümelenmeleri oluştukça gaz bakımından zengin ilkel galaksilerin kütleçekimsel etkileşmesi çok büyük miktarlarda yıldız oluşum sürecini başlatır. Kütleçekimsel etkilerin önemli olduğu bu küme çekirdeklerinde elips biçimli galaksiler oluşur. Kümelerin dışındaki gaz göreceli olarak daha sakin bir biçimde çökerek 10 milyar yıl ya da daha uzun sürecek olan disk oluşum sürecini başlatır.

Acaba neden elips biçimli galaksiler yuvarlak, sarmal galaksiler ise yassıdır? Yanıt basittir: çünkü sarmal galaksiler dönmektedirler. Gerçekten şekilleri, yıldızların dönme hareketleri nedeniyle böyledir ve merkezcil kuvvetlerin kütleçekimi kuvvetlerini dengelemesi sonucunda biçimlenirler. Dönme, galaksilerin homojen olmayan, çalkantılı gazlardan oluşmuş olmalarının bir sonucudur. Bu gaz kütlelerinin içinde birbirlerine oldukça yakın olan ve sonunda her biri bir galaksiye dönüşecek olan yoğunluk tepeleri bulunur. Örneğin Andromeda, bizim galaksimizle aynı zamanda oluşmuş olan bir galak-

sidir. Kendi kütleçekimi kuvvetlerinin altında çöken ilkel galaksi bulutları ortaya çıkıp merkezlerindeki yoğunluk arttıkça, kaçınılmaz olarak birbirleri üzerine kütleçekimsel dönme momentleri uygularlar. Her ne kadar bölgenin net açısal momentumu sıfır ise ve öyle kalmaktaysa da, galaksiler dönme hareketleri kazanırlar. İlkel galaksi çökmeyi sürdürdükçe açısal momentum korunacağından dönme hızı da artar. Merkezcil kuvvet kütleçekimini dengelediği zaman da çökme durur. Bulut dönme ekseni boyunca çökmeyi sürdürebileceğinden, sonunda yassı biçimli bir gaz diskine dönüşür. Milyarlarca yıl boyunca yörüngesel kinetik enerjilerini kaybeden gaz bulutlarının sarmal hareketlerle merkeze doğru yaklaşmaları sonucu disk ortaya çıkar.



Üstte: Sarmal galaksilerdeki yıldızların oluşum hızları sabittir ama elips biçimli galaksilerdeki yıldızların çoğunluğu, galaksilerin ilk oluşum döneminde ortaya çıkmışlardır. Bunun sonucu olarak sarmal galaksilerin ışıma güçlerine katkıların çoğu genç ve mavi yıldızlardan, elips biçimli galaksilerin ışıma güçlerine katkıların çoğu ise yaşlı, mavi yıldızlardan gelmektedir.

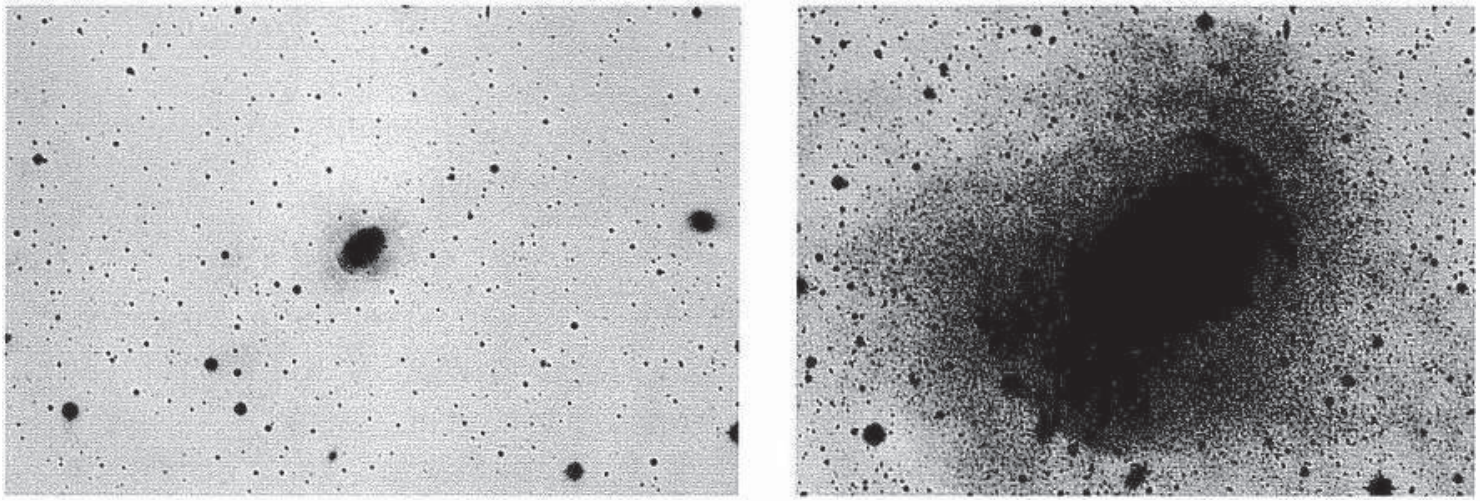
Bunun tersine, elips biçimli galaksiler dönme kuvvetleri tarafından desteklenmezler. Elips biçimli bir galaksinin yıldızlarının hareketleri bir düzlemle sınırlı olmayıp, yörüngeleri elips biçimli ve rasgele konumlanmış olduğundan şekli de yuvarlaktır. Birbirlerine göre konumları rasgele olan galaksi çiftlerinin birleşmeleri durumunda biçimleri mantıklı bir biçimde açıklanabilir.

Galaksi Birleşmeleri

Özellikle ilkel galaksilerin birleşmeleri, galaksilerin birbirlerine göre hızlarının saniyede birkaç yüz kilometre olduğu, evrenin yoğun bölgelerinde gerçekleşir. Eğer hızları daha yüksek olursa, duvardan geçen hayaletler gibi galaksiler de birbirlerinin içinden geçip giderler. Bu nedenle galaksi birleşmelerinin çoğu kümelerde hızlı hareket eden galaksiler arasında değil, yavaş hareket eden galaksiler arasında gerçekleşir. İki disk birleştiğinde ortaya elips biçimli bir galaksi çıkar. Günümüzde tek tük de olsa hâlâ gerçekleşmekte olan birleşme süreci incelenerek galaksilerin oluşumu konusunda çok şey öğrenilebilir. Bugün pek rastlanmayan süreçler galaksilerin oluştuğu ilk dönemlerde çok yaygın olabilirler. Bu ender rastlanan olaylar kozmik evrim konusunda paha biçilemez ipuçları verebilirler.

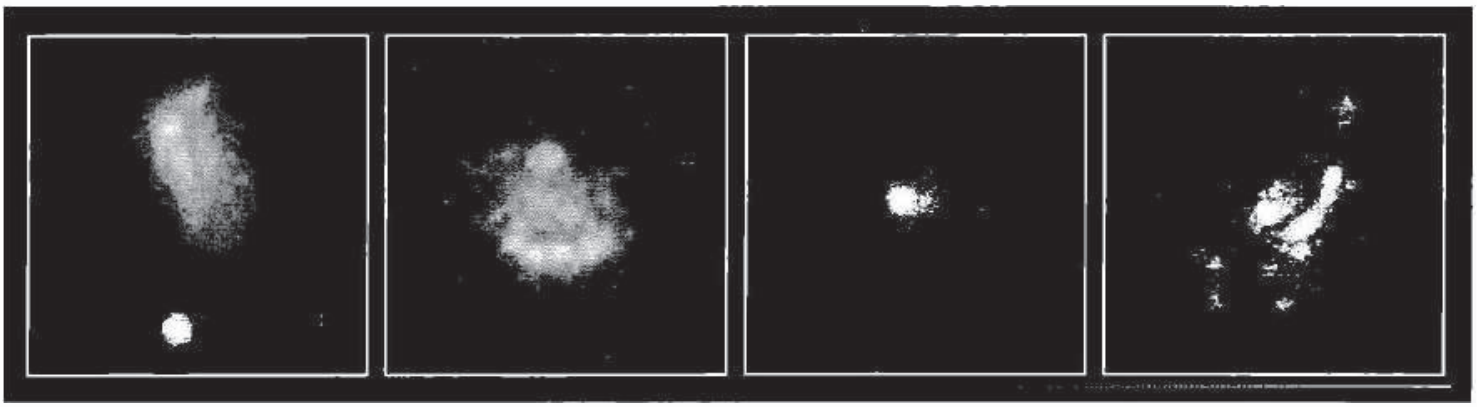
Galaksiler 'yapışkan' sistemlerdir. Galaksiler arasındaki bir etkileşme, özellikle düşük hızlarda gerçekleşmişse, kaçınılmaz olarak birleşmeyle sonuçlanır. Her ne kadar yıldızlar çarpışmazlarsa da galaksilerin içindeki gaz bulutları zaman zaman çarpışırlar ve çarpışan bulutlar yörünge enerjilerini kaybederler. Yörüngeleri merkez doğrultusuna kayar ve yıldız sistemleri birleştikçe kütleçekimi kuvvetleri etkili olmaya başladığından bulut çarpışmalarının sıklığı artar. Sonuçta, birleşen galaksi sisteminin merkezinde yoğun ve büyük kütleli bir bulut ortaya çıkar. Böyle bir bulut kararsızdır. Çökerek birçok yıldıza bölünmek zorundadır. Bu nedenle galaksi birleşmelerinin tıpkı elips biçimli galaksilerdeki yıldızların yıldız patlamalarıyla ortaya çıkmaları gibi, şiddetli yıldız oluşum süreçlerini başlattığı düşünülüyor. Yıldız patlamaları eninde sonunda sönümlenir ve patlayan yıldızların yaydığı enerji yıldızlararası ortamdaki kalıntıları süpürür. Geriye yaşlanmakta olan yıldızlarıyla birlikte bir galaksi kalmıştır.

Böyle yıldız oluşum başlangıçları, kaçınılmaz olarak birleşmenin son evresi olan, yıldız oluşumlarının sürdüğü çok parlak galaksilerde gözlenirler. Süreç kısa ömürlü ol-



Elips biçimli NGC 3923 Galaksisi'nin poz süresi normal olan soldaki negatif fotoğrafında olağandışı hiçbir özellik görülmüyor. Ama uzun süre pozlandırılmış olan sağdaki fotoğrafta 100 kiloparsekten daha uzaklara kadar yayılan birçok eş-merkezli kabuk olduğu görülüyor. Bu kabuklar, yaklaşık 3 milyar yıl önce yer alan bir galaksi birleşmesinin kalıntılardır. İki fotoğrafın aynı ölçekte olduğuna dikkat ediniz.

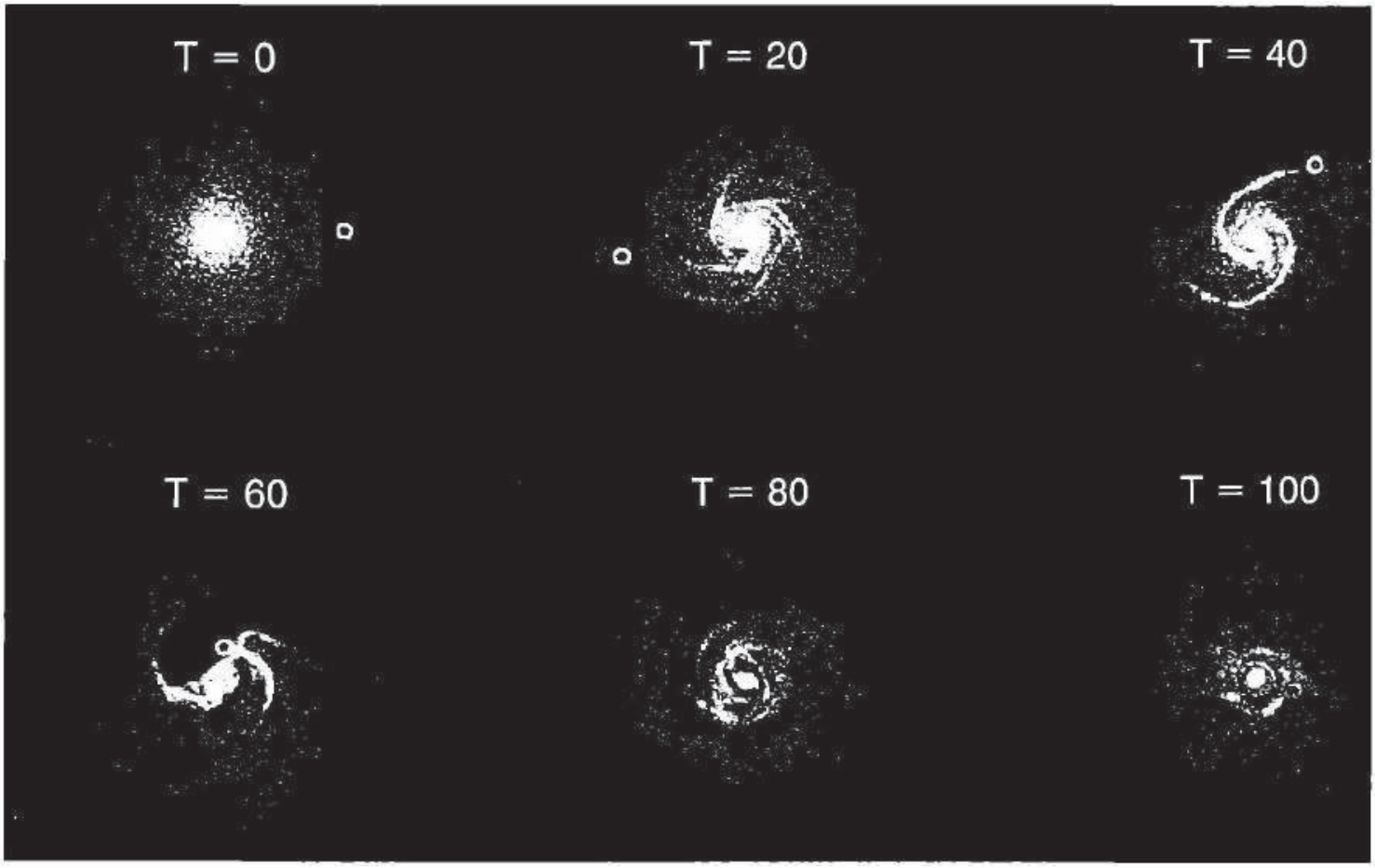
duğu için bu tür cisimler günümüzde çok ender gözlenir. Bununla birlikte bu birleşmelerin ardında bıraktığı etkiler daha yaygındır. Görünüşte normal olan yakın elips biçimli galaksilere biraz daha dikkatli bakıldığında uzak geçmişlerinde bir birleşmenin izleri görülür. Kanıt, bu galaksilerin en dış bölgelerinde çok sönük yıldızlardan oluşmuş kabuklar biçiminde ortaya çıkar. Uzun zaman önce gerçekleşen birleşmeler, tıpkı suya atılan bir taşın yarattığı dalgaların uzun zaman varlıklarını sürdürmesi gibi, kütleçekimi alanında dalgalanmalar yaratırlar. Bunlar da bir havuzdaki dalgalanmalar gibi çok uzun bir zaman sonra sönümlenir. Bununla birlikte, milyonlarca yıl boyunca bu



Hubble Uzay Teleskobu'yla elde edilen uzak galaksi görüntüleri. Yakındaki galaksilerde yalnızca yüzde 1-2 oranında olmasına karşın uzaktaki galaksilerin oldukça büyük bir bölümü, çok büyük biçim bozulmaları gösterirler. Bu biçim bozulmalarının yıldız oluşumunu izleyen dönemlerdeki kuvvetli etkileşmeler ya da eş galaksiler arasındaki birleşmelerden kaynaklandığı düşünülüyor.

dalgalanmaların oluşturduğu kütleçekimi tuzaklarında yıldızlar birikmiştir. Bu yıldızların konumları, yüzeysel bir biçimde bakıldığında normal, elips biçimli bir galaksi olduğu sanılan galaksideki birleşme izlerini gösterebilir. Toz şeritleri ya da genç yıldızlardan oluşan düğümler gibi diğer özellikler, geçmişte yaşanan şiddetli süreçlerin tanıkları olabilirler.

Bilgisayar simülasyonları, evrendeki en yaygın galaksi sistemleri olan gaz bakımından zengin iki sarmal galaksinin birleşerek elips biçimli bir galaksi yarattığını göstermekte başarılı olmuşlardır. Elips biçimli galaksilerin karakteristik özelliği yaşlı ve kırmızı yıldızların merkezde yoğunlaşmış, düzgün ve küresel bir dağılım göstermesidir. Bunların ataları olan disk biçimli galaksilerse parçalı toz şeritleri ve sayısız genç, mavi yıldız kümeleriyle tanınırlar. Birleşme, bulutların biçimlenme, yoğunlaşma ve çökme hızını



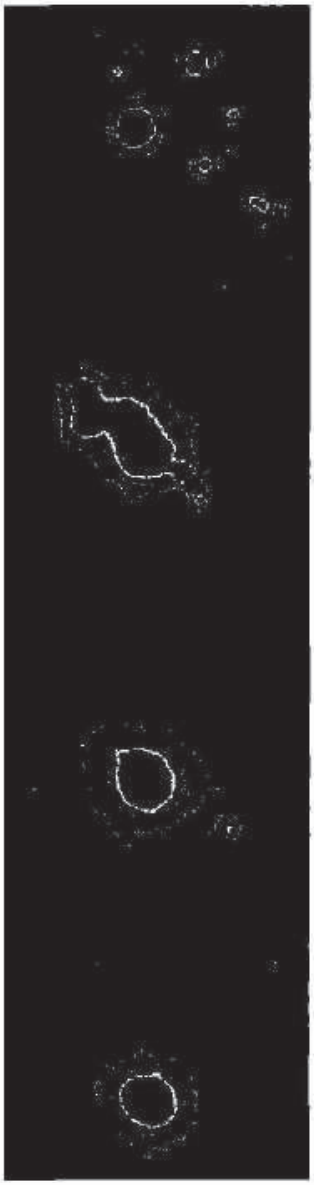
Bu bilgisayar simülasyonunda sarmal bir galaksinin, merkezi küçük beyaz bir çemberle gösterilen cüce bir uydu galaksiyi yutuşu görülüyor. Bu etkileşim güçlü bir yıldız oluşum süreci başlatıyor. Sürecin en yoğun olduğu yerler beyaz bölgelerdir. Ardışık görüntüler arasındaki zaman, 13 milyon yıl birimiyle gösterilmiştir.

Solda: Burada optik görüntüsü verilen elips biçimli Centaurus A Galaksisi'nin gaz bakımından zengin bir galaksiyle etkileşimi görülüyor. Şiddet görüntüleri veren en yakındaki galaksi olan Centaurus A kuvvetli bir x-ışın kaynağıdır.
Sağda: Centaurus A'nın optik bileşeninin çekirdeğinden dev radyo ışınım yumruları fışkırıyor. Birleşen galaksinin sağladığı gaz ile beslenen, merkezdeki süper kütleli kara deliğin, radyo dalgalarının kaynağı olduğu düşünülüyor.

arttırır. Bu nedenle de birleşen galaksilerdeki bütün gaz birikimi şiddetli yıldız oluşum patlamalarıyla tüketilir. Şiddetli yıldız oluşum patlamalarının ortaya çıktığı galaksiler olan parlak, kızılötesi galaksilerin çoğunda benzer bir süreç gözlenir. Pek çok durumda, üstün nitelikli görüntülerin yardımıyla birleşen sistemler tanımlanabilir.

Kozmolojide Hiyerarşi

Günümüzde birleşmeler enderdir. Belki de galaksilerin yalnızca yüzde biri bu tür kuvvetli kütleçekimsel etkileşmelere girmektedir. Bununla birlikte kozmoloji teorisi birleşmelerin geçmişte son derece sık raslanan olaylardan olduğunu çok güçlü bir olasılık olarak öne sürmektedir. Yapılar küçükten büyük ölçeğe doğru bir hiyerarşi içinde oluştuğundan galaksilerin çoğunluğunun, bugün yerli yerinde gördüğümüz galak-



x-ışın teleskobuyla gözlendiği biçimde birgalaksi kümesinin öngörülen evrimi. Sıcak, x-ışını yayan gaz, karanlık madde ve galaksi dağılımlarının izlenebilmesini sağlıyor. Yukarıdan aşağıya doğru, kırmızıya kaymanın 0.7, 0.3, 0.1 olduğu ve günümüzdeki durumlarını görüyoruz. Galaksi kümelerinin günümüzdeki dağılımı, olgun bir kümenin tipik küresel görünümü ile uyumludur.

si kümelerinden önce ortaya çıktığını düşünebiliriz. Evrendeki en büyük kütleli cisimler olan galaksi kümeleri ve süperkümeleri günümüzde henüz oluşum sürecindedirler. İncelemeler, özellikle de kümeler arasındaki sıcak gazın x-ışınları dalgaboyundaki haritaları, pek çok galaksi kümesinin yapısal olarak genç sistemler olduğunu göstermiştir. Gaz, sanki tam dağılıp karışmaya zaman bulamamış gibi topaklı bir dağılım göstermektedir. Sonunda gaz düzgün, küresel olarak simetrik ve merkezde yoğunlaşan bir dağılım gösterecektir. Aslında olgunlaşmış galaksi kümelerinde gözlenen gaz dağılımı da budur.

Bugün megaparsek ölçeklerinde maddenin kütleçekiminin etkisiyle topaklanmasına ve dev galaksi kümeleriyle birleşmesine tanık oluyoruz. Uzak geçmişte, daha küçük ölçeklerde galaksiler de benzer bir süreç sonucunda ortaya çıkmış olmalılar. Evrenin yaşı, günümüzdekinin onda biri iken, yani evren belki de bir milyar yaşındayken kütleleri cüce galaksilerinki kadar olan bulutların sık sık birleşerek, kalıntı cüce galaksilerce çevrelenen büyük kütleli galaksileri oluşturmuş oldukları düşünülüyor. İçinde yer aldığımız Yerel Küme böyle bir topaklanmadır. Yerel kümeyi egemenlikleri altında bulunduranlar, bir avuç cüce galaksi tarafından çevrelenmiş olan Samanyolu ve Andromeda'dır.

Bu mantığa göre cüce galaksiler, dev galaksilerin yapı taşlarıdır. Gerçekten de evrenin ilk dönemlerindeki sönük, mavi galaksi nüfusunun, hemen hemen büyük bir kesinlikle yıldız oluşturma patlamaları veren cüceler olduğu bilinmektedir. En sönük galaksiler arasında sürdürülen kırmızıya kayma taramaları, 0.5 oranında ya da daha fazlasına karşılık gelen büyük uzaklıklarda, yakınlarda benzeri olmayan çok sayıda yıldız oluşturan galaksi olduğunu göstermiştir. Evrenin yakın bölgeleri, bu erken yıldız oluşum dönemlerinden kalan fosilleşmiş artıklarla kirlenmiş olabilir. Geceleyin gökyüzünde belli belirsiz farkedilen çok sönük ve çok yakın galaksiler bulunmuştur. Bunlar, büyük bir olasılıkla günümüzdeki par-

lak galaksilerin başarısız olmuş kuzenleridir. Doğa başarılı olmadan önce, büyük olasılıkla defalarca başarısız olmaktadır. Belki de hem sönük cüceler hem de devler bunun kanıtıdır.

Gerçekten, evrenin uzak köşelerinde birkaç bol bulunan elemente karşılık gelen dalgaboylarında ışığı soğurması nedeniyle saptanabilen, en uzak kuasardan daha uzak olan dev gaz bulutları bulunmuştur. Böyle emici gaz bulutları, saydam bir kozmik duvar kağıdı gibi gökyüzünün yaklaşık yüzde 20 kadarını kaplamaktadır. Bu bulutlar büyük olasılıkla çökerek Samanyolu'na benzer galaksiler ortaya çıkarmak üzere evrim geçiren yıldızları oluşturdular. Her ne kadar ara sıra da olsa, kütleçekiminin şiddetli bir yıldız oluşum süreci başlatacak kadar kuvvetli olmadığı bölgelerde yüzey parlaklığı düşük olan dev, sönük galaksiler de oluşturmuş olabilirler. Yalnızca kozmik hayvanat bahçesindeki türleri inceleyerek galaksi oluşum sürecine yol açan karmaşık süreçleri anlamayı ümit edebiliriz.

Çemberin Kapanışı

Mükemmel düzgünlükte bir büyük patlama kabul edilemez. Dalgalanmalar büyük patlamanın ayrılmaz bir parçasıdır. Yoğunluk dalgalanmaları kozmik zamanın eşiğinde yaratılmışlardır. Aradan geçen milyarlarca yılda modern evrenin yapısına yol açan sapmalar ortaya çıkmış olmalıdır. Evrende gözlediğimiz karmaşık yapıya yol açan evrimi işte bu düzensizliklere borçluyuz.

Gözlenen 2.73 derece Kelvin sıcaklığında hemen hemen mükemmel bir kara cisim tayfı veren kozmik mikrodalga fonu evrenin erken ve sıcak dönemlerine tanıklık etmektedir. Mikrodalga fonunun varlığı kozmoloji uzmanlarını, büyük patlama teorisini ilk tekillikten 10^{-42} saniye sonrasına kadar götürebilmek için cesaretlendiriyor. Bu anda, şimdilik çok az anlaşılan kuantum kütle çekimi teorisi yerine klasik fizik ilk olarak geçerli olmaktadır. Elemanter parçacıkların temel ölçeklerinin Schwarzschild yarıçaplarıyla aynı mertebede olduğu bu dönemde kuantum dalgalanmaları kaçınılmaz olarak vardı. Bu dalgalanmaların ölçeği, büyük patlamadan 10^{-35} saniye sonra gerçekleşen şişme yoluyla genişleme dönemine mikroskopik ölçekten mikroskobik ölçeğe çıkacak şekilde desteklenmiştir. Daha sonra bu dalgalanmalardan bütün yapılar meydana gelmiştir.

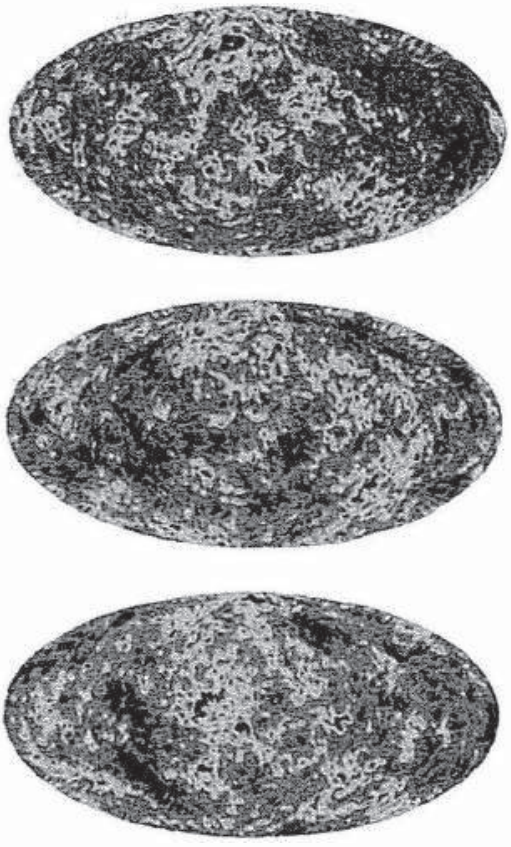
Büyük patlamadan bir milyon yıl sonra ışınım alanı plazma üzerindeki baskısını sona erdirince sis dağıldı. Bu andan sonra dalgalanmalar büyümeye başladı ve zamanla ilkel galaksilere dönüştüler. Sonunda bu ilk plazmanın nötrleşmesi hidrojen atomlarının büyük bulutlar halinde biraraya gelebilmelerine olanak verdi. Bu bulutlar da ilk galaksilerin ataları oldular.

Böyle bir modelin sınamakta kullanılacak en iyi yöntem, modelin kozmik fon ışınımındaki sıcaklık dalgalanmalarını ne kadar sağlıklı öngördüğüne bakmaktır. Sözü edilen model, kozmik fondaki belli belirsiz düzensizliklerle ilgili en son ölçümlere şaşılacak ölçüde yakın öngörülerde bulunmaktadır. Kozmik mikrodalga fon ışınımındaki düzgünlük, evrenin ilk dönemlerindeki homojenliğin göstergesidir. Daha da önemlisi, var olan dalgalanmaların az çok beklenen düzeyde bulunmasıdır. COBE Uydusu, 10 derecelik açısal ölçeklerde ve 30 mikrokelvin, yani kozmik mikrodalga fonunun ortalama düzeyinin yüz binde biri düzeyinde sıcak ve soğuk noktaların varlığını keşfetmiştir. Büyük patlamadan bir milyon yıl sonra evrenin hemen hemen tamamen-ama tam değil -homojen olduğu sonucuna varılmıştır. Evrenin ilk dönemlerinde genlikleri yaklaşık 10^{-5} olan kü-

çük yoğunluk dalgalanmaları vardı. Bu dalgalanmalar, kütleçekimsel kararsızlıkların büyümesi sonucu günümüzde gözlediğimiz galaksileri oluşturmak için (2! hata payı ile) tam olarak yeterli düzeydeydi. Kozmoloji uzmanlarının şu andaki görüşü budur.

Şimdi astronomlar kozmik ateş topundaki dalgalanmaların daha küçük açısal ölçeklerde bir haritasını çıkarıyorlar. Yalnızca birkaç derecelik ya da daha küçük açısal ölçeklerde haritaya çıkarılabilirse, buradan galaksi dağılımlarında gözlenen büyük ölçekli yapıların tohumlarını bulmayı ümit edebiliriz. Önümüzdeki on yılda, ilk dalgalanma genliklerinin ölçekle nasıl değiştiğini bulabilmeliyiz. İlke olarak, soğuk karanlık maddeyi sıcak karanlık maddeden, adiyabatik dalgalanmaları entropi dalgalanmalarından ve açık bir evreni kritik yoğunluktaki bir evrenden ayırabilmeyi ümit edebilmeliyiz. Tüm bu kozmoloji seçenekleri gökyüzünde silinemez izler bırakır.

Eldeki veriler yüksek kaliteli olduğu sürece, bu izlerin farkedilmemesi olanaksızdır. Bununla birlikte çözüm hemen kendini göstermez. Çabalarımız, "kirli cam etkisi" tarafından engellenir. Galaksimiz mikrodalga frekanslarında tam anlamıyla geçirgen değildir. Aradığımız sinyalin yüzde onu düzeylerine ulaşan, tozdan kaynaklanan ışınım,



Buradaki üç elipste, büyük ölçekli yapının üç farklı modeli tarafından öngörüldüğü biçimiyle kozmik mikrodalga fonundaki dalgalanmaları görüyoruz. Modellerin hepsi soğuk karanlık madde modelleri olup yukarıdan aşağıya doğru galaksi kümelerinin oluşum gücünü azaltmak amacıyla ilk dalgalanma genlikleri dağılım değiştirilmiştir. Sıcaklık dalgalanmalarını daha iyi ölçebildiğimiz zaman, büyük ölçekli yapının kaynaklandığı başlangıç koşullarını yeniden oluşturabiliriz.

sinkrotron ışınımı ve yıldızlararası madde kaynaklı "bremsstrahlung" ışınımı ile boğuşmak durumundayız. Galaksimizden kaynaklanan bu bulanıklığın giderilebilmesi için araçların duyarlılıklarının geliştirilmesi, daha geniş frekans bandı kullanımı ve gökyüzünün daha geniş bir bölgesinin gözlenmesi akla ilk gelen yöntemlerdir.

Şu anda evrenin evrimi ve büyük ölçekli yapıların kaynağı konusundaki fikirlerimizin geçerli olup olmadığının kanıtlanabilmesi için bir sınırdayız. Büyük bir hızla, arkeoloji gibi saygın bir bilim olma yolunda yürüyen kozmoloji, şu sıralarda altın çağını yaşıyor. Uzak geçmişin daha iyi anlaşılabilmesi için yeni yeni yöntemler geliştiriyor. Belki de önümüzdeki on yıl içinde ilk yoğunluk dalgalanmalarının genliklerinin ölçeğe göre dağılımının haritasını çıkarabilirsek, önümüzdeki evrim yolunun da şifresini çözmeyi başarabiliriz.

Sonumuzun dondurucu soğuklukta bir sis ya da evren yeniden çökmeye başlarsa kızgın bir pelte, çökmezse sürekli genişleyecek karanlık bir boşluk olacağı söylenmiştir. Ünlü kozmoloji uzmanı Steven Weinberg bu konudaki düşüncesini şöyle dile getiriyor: "Evren ne kadar fazla anlaşılabilir olursa o kadar fazla amaçsız görünüyor". Bütün kozmoloji uzmanları bu depresif görüşü paylaşmıyorlar. Çünkü sonsuz uzaklıktaki bir gelecek için bile sonsuz bilgi beklentisi vardır. Freeman Dyson, hissedebilen varlıkların, günümüzden yaklaşık 10^{32} yıl sonra gerçekleşecek olan proton bozunmasında bile varlıklarını sürdürebileceklerini tartışmaya açıyor. İyimser olmak için nedenlerimiz var. İğne ile kuyu kazar gibi biriktirilen evrenin bilgi içeriği, gelecekteki büyük çökmeden varlığını sürdürerek çıkabilir ve başka bir büyük patlamadan kendi küllerinden yeniden doğan Phoenix gibi yeniden doğabilir.

Bu spekülasyonlar konusunda zekice eleştiriler yapabilmek için şu andaki bilgi birikimimiz yetersiz görünüyor. Şimdi, yeni yeni yerli yerine oturan büyük patlama teorisinin basitliği ve mucizevi güzelliğine şaşırma ve bilgi açığımızı kapatacak olan gelecekteki keşifler için umutla bekleme zamanı.

Ek Okumalar

Modern kozmoloji konulu popüler kitaplar

Barrow, J.D. *Theories of Everything*. New York: Ballantine, 1992

Barrow, J.D. ve J. Silk *The Left Hand of Creation*. New York: Basic Books, 1983; Oxford University Press, 1993.

Bartuski, M. *Through a Universe Darkly*. New York: Harper Collins, 1993.

Carrigan, R.A., ve W.P. Trower. *Particle Physics in the Cosmos*. Readings from Scientific American. New York: W.H. Freeman, 1989.

—. *Particles and Forces*. Readings from Scientific American. New York: W.H. Freeman, 1990.

Davies, P.C.W. *The Edge of Infinity*. Londra: Dent, 1981.

Davies, P.C.W. ve J. Brown. *Superstrings: A Theory of Everything?* Cambridge: Cambridge University Press, 1992.

Ferris, T. Coming of Age in the Milky Way. New York: Morrow, 1988.

—. *The Red Limit: The Search for the Edge of the Universe*. New York: Morrow, 1983.

Gribbin, J. *In Search of the Big Bang*. New York: Bantam, 1986.

—. *In the Beginning*. Boston: Little, Brown, 1993.

Gribbin, J., ve M.J. Rees. *Cosmic Coincidences: Dark Matter, Mankind, and Anthropic Cosmology*. New York: Bantam, 1989.

Hawking, S.W. *A Brief History of Time*. New York: Bantam, 1988.

Kaufmann, W. *The Cosmic Frontiers of General Relativity*. Boston: Little, Brown, 1977.

Krauss, L. *The Fifth Essence: The Search for Dark Matter in the Universe*. New York: Basic Books, 1989.

Lederman, L., ve D.N. Schramm. *From Quarks to the Cosmos*. Scientific American Library. New York: W.H. Freeman, 1989.

Lightman, A. *Ancient Light*. Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 1991.

Riordan, M., ve D. Schramm. *The Shadows of Creation*. Ne York: W.H. Freeman, 1991

Pagels, H. *Perfect Symmetry*. Londra: M. Joseph, 1985.

Silk, J. *The Big Bang*, 2. baskı New York: W.H. Freeman, 1989.

—. *Cosmic Enigmas*. New York. American Institute of Physics, 1994.

Weinberg, S. *Dreams of an Ultimate Theory*. New York: Basic Book, 1993.

Zee, A. *Fearful Symmetry*. New York: Macmillan, 1986.

Kozmoloji tarihi ile ilgili popüler kitaplar

Bertotti, B., et al. *Modern Cosmology in Retrospect*. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.

Charon, J. *Cosmology*. New York: McGraw-Hill, 1977.

North, J. *The Measure of the Universe*. New York: Dover, 1965.

Kozmoloji felsefesi ve teoloji ile ilgili popüler kitaplar

Jaki, S. *Cosmos and Creator.* Edinburgh: Scottish Academic Press, 1980.

Davies, P. *God and the New Physics.* New York: Simon and Schuster, 1985.

—. *The Mind of God.* New York: Simon and Schuster, 1992.

Peters, T. *Cosmos as Creation.* Nashville: Abingdon Press, 1989.

Biraz daha yüksek düzeyde kozmoloji ile ilgili olup matematiksel olmayan kitaplar

Barrow, J.D. *The World Within the World.* Oxford: Oxford University Press, 1988.

Berendzen, R., R. Hart ve D. Seeley. *Man Discovers the Galaxies.* New York: Science History Publications, 1976.

Close, F. *The Cosmic Onion.* Londra: Heinemann, 1983.

Cornel, J., ed. *Bubbles, Voids and Bumps in the New Cosmology.* Cambridge: Cambridge University Press, 1989.

Davies, P.C.W., ed *The New Physics.* Cambridge: Cambridge University Press, 1989.

Drees, W. *Beyond the Big Bang: Quantum Cosmology and God.* La Salle: Open Court, 1990.

Harrison, E. *Cosmology: The Science of thhe Universe.* Cambridge: Cambridge University Press, 1981.

Longair, M. *The Origins of the Universe.* Cambridge: Cambridge University Press, 1990.

Luminet, J-P. *Black Holes.* Cambridge: Cambridge University Press, 1993.

Peat, F.D. *Superstrings and the Search for a Theory of Everything.* Chicago: Contemporary Book, 1988.

Tayler, R.J. *Hidden Matter.* Chichester, England: Ellis Harwood, 1991.

Yüksek düzeyde matematik içeren teknik kozmoloji kitapları

Weinberg, S. *The First Three Minutes.* New York: Basic Books, 1977.

Barrow, J.D., ve F.J. Tipler. *The Anthropic Cosmological Principle.* Oxford: Oxford University Press, 1986.

Kolb, E., ve M.S. Turner. *The Early Universe.* Redwood City, Calif.: Addison-Wesley, 1990.

Linde, A. *Particle Physics and Inflationary Cosmology.* New York: Harwood, 1990.

Narlikar, J.V. *Introduction to Cosmology.* 2. baskı Cambridge: Cambridge University Press, 1993.

Padmanabhan, T. *Structure Formation in the Universe.* Cambridge: Cambridge University Press, 1993.

Peebles, P.J. *Principles o Physical Cosmology.* Princeton, N.J.: Princeton University Press, 1993.

Shu, F. *The Physical Universe.* Mill Valley, Calif.: University Science Books, 1982.

Tryon, E.P. "Cosmic inflation," in *The Encyclopedia of Physical Science and Technology,* c. 3. New York: Academic Press, 1987, s. 709-43.

Vilenkin, A., ve E.P.S. Shellard, *Cosmic Strings and Other Topological Defects.* Cambridge: Cambridge University Press, 1993.

Kozmoloji bir anlamda
bilimlerin en büyük ölçeklisi ve en geniş kapsamlısıdır.
Bildiğimiz her şeyi içine aldığından kozmolojiyi
her şeyin bilimi
olarak tanımlamak yanlış olmaz.
Kozmolojinin cevaplandırmaya çalıştığı temel sorular
evrenin geçmişine, geleceğine ve yapısına ilişkindir.
Evrenin Kısa Tarihi,
kozmolojiyle ilgilenen herkesin anlayabileceği düzeyde olması nedeniyle
kendi alanında öncü niteliğinde bir yapıttır.
Kaliforniya Üniversitesi öğretim üyelerinden ve kozmolojinin
önde gelen isimlerinden olan
Joseph Silk'in
bu önemli kitabını
konuya ilgi duyan herkese yararlı olması umuduyla sunuyoruz.

ISBN 975-403-073-1

9 789754 030730

Ederi: 1.200.000 TL (KDV DAHİL)

Basılı fiyatından farklı satılamaz