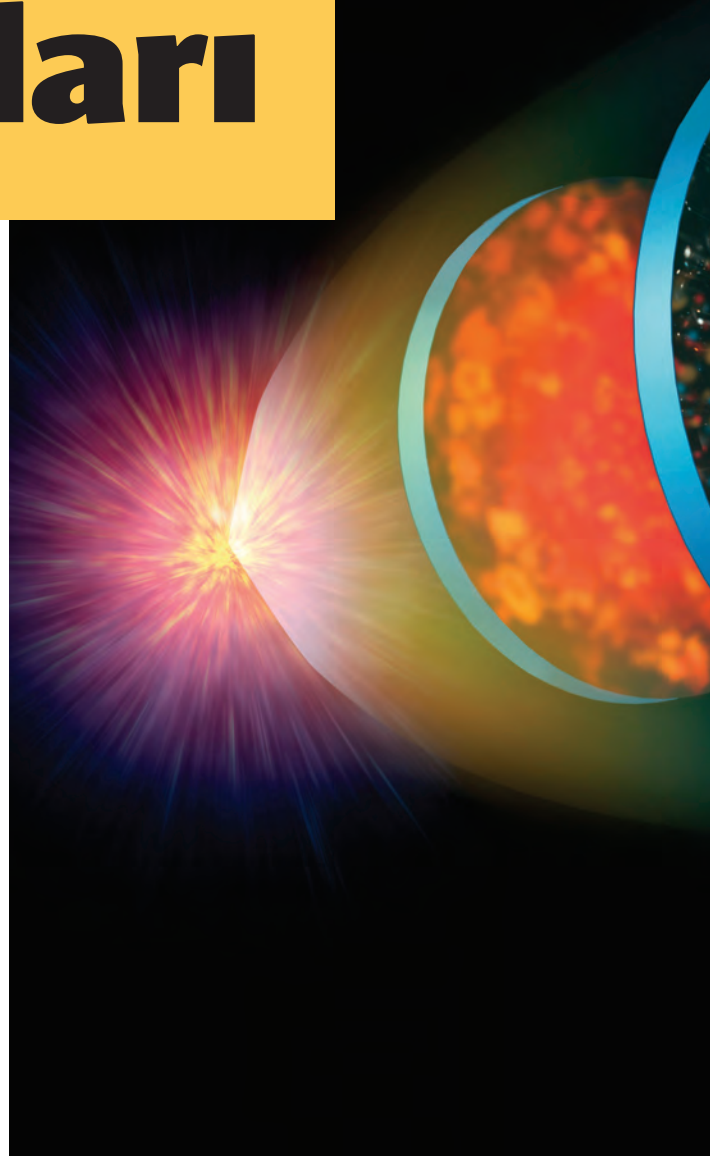
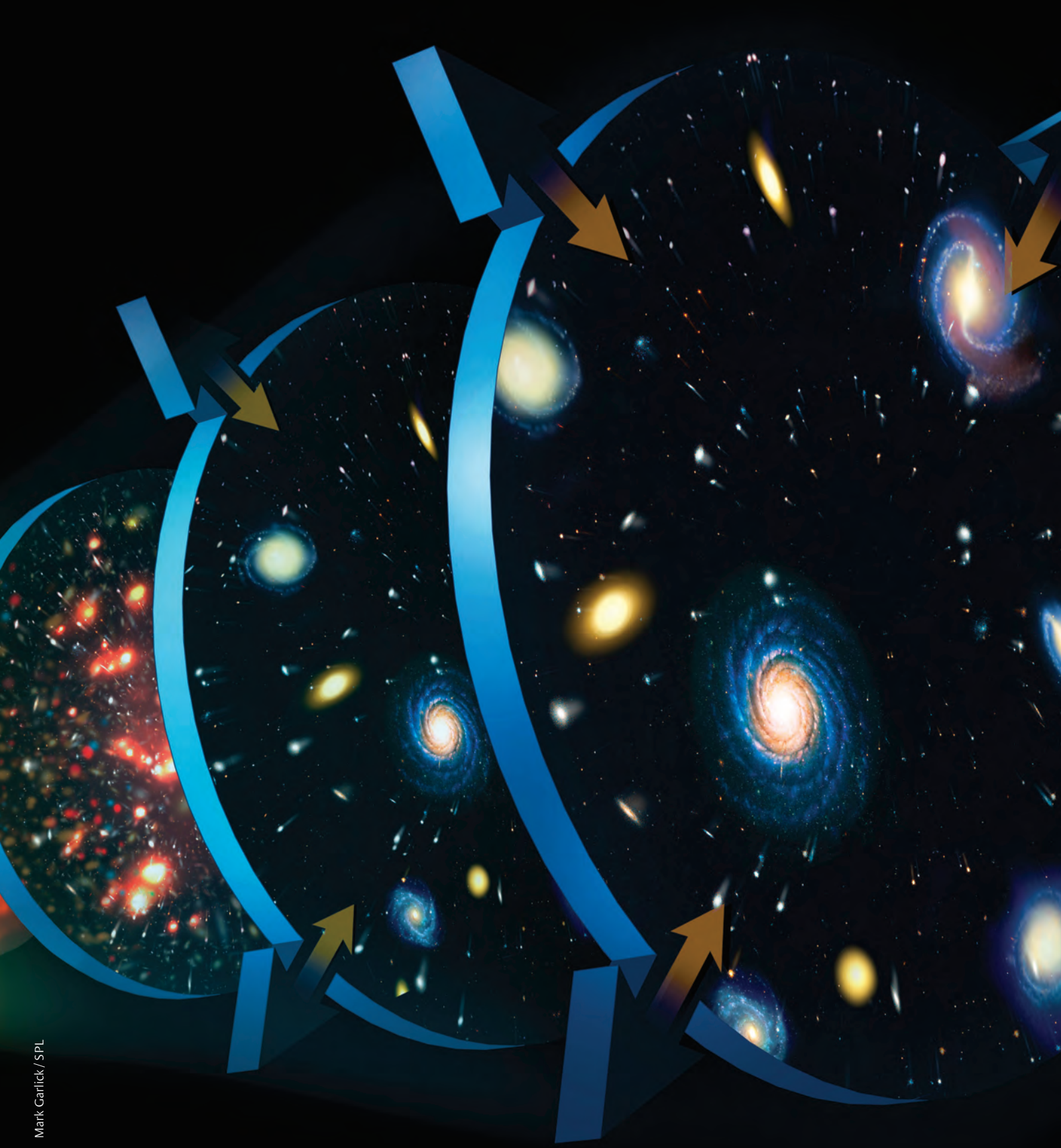


Kozmik Artalan Nötrinoları

Dr. Mahir E. Ocak [TÜBİTAK Bilim ve Teknik Dergisi

Kuramsal tahminler evrenin Büyük Patlama'dan arta kalmış nötrinolarla dolu olduğunu gösteriyor. Bugüne kadar bu nötrinoları gözlemlemek mümkün olmadı. Ancak Büyük Patlama'nın doğasını daha iyi anlamaya çalışan araştırmacılar, kozmik artalan nötrinolarını tespit etmek için çalışmaya devam ediyor.





Bilimsel çalışmalar bugün gözlemlediğimiz evrenin yaklaşık 13,8 milyar yıl önceki bir Büyük Patlama'nın sonucu olduğunu gösteriyor.

Evren büyük ölçekte gözlemlendiğinde aralarında büyük mesafeler bulunan gök adaların istisnasız bir biçimde birbirinden uzaklaşmakta olduğu görülür. İlk kez 1930'larda Edwin Hubble'ın çalışmalarıyla doğrulanan bu genişleme genel görelilik kuramıyla açıklanır.

Kuramsal hesaplar bugün gözlemlediğimiz evrenin yaklaşık 13,8 milyar yıl önce meydana gelmiş bir Büyük Patlama'nın sonucu olduğunu gösterir. Büyük Patlama kuramına göre evrenin gelişimi özetle şöyle olmuştur: İlk anlarda evren aşırı derecede sıcaktı. Yüksek enerjili fotonlar $E=mc^2$ eşitliği uyarınca madde-antimadde çiftleri oluşturuyor, madde-anti madde çiftleri de birbirlerini yok ederek enerjiye dönüşüyordu. Zaman ilerledikçe genişlemeye beraber evrenin sıcaklığı ve fotonların enerjisi azaldı. Büyük Patlama'dan yaklaşık 10^{-6} saniye sonra sıcaklık, fotonların enerjisinin proton-antiproton çiftleri oluşturmasına imkân vermeyeceği kadar düştü. Elektron-pozitron çiftlerinin oluşumu ise bir süre daha devam etti.

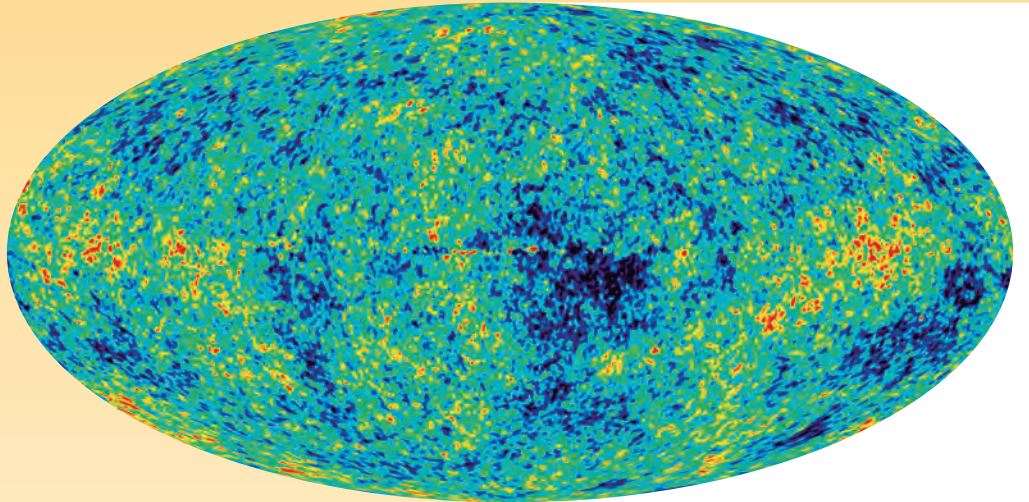
Büyük Patlama'dan birkaç dakika sonra ilk atom çekirdekleri oluşmaya başladı. Elektronların bu atom çekirdeklerine bağlanıp kararlı atomları oluşturması ise ancak 379.000 yıl sonra evrenin sıcaklığı yeteri kadar düştüğünde mümkün oldu. Büyük patlamanın ortaya çıkardığı atomların büyük çoğunluğu hidrojen ve helyumdur. Az miktarda lityum da oluşmuştu. Geriye kalan elementler ise uzaya dağılan maddenin kütle çekimi etkisiyle bir araya gelip yıldızları oluşturmasından sonra yıldızların çekirdeklerinde ya da süpernova patlamalarında sentezlendi.

Büyük Patlama kuramı, evrenin büyük ölçekteki yapısı da dâhil olmak üzere pek çok fiziksel olguyu başarıyla

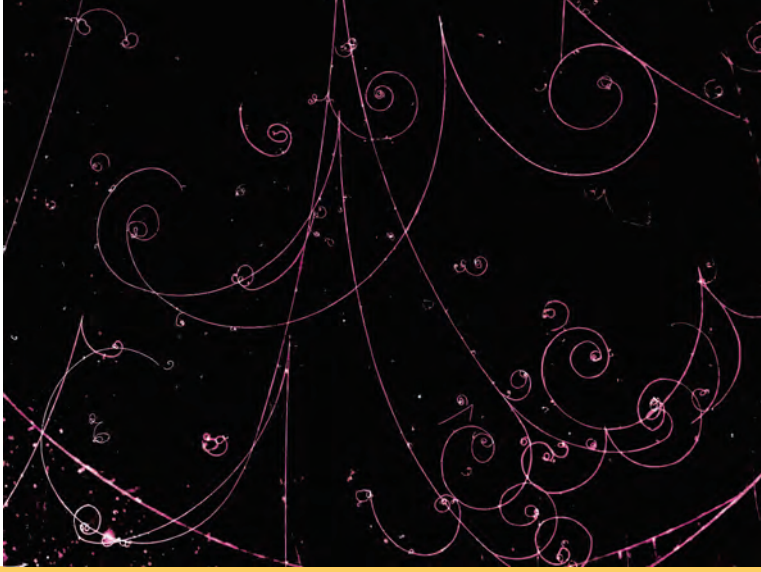
açıklıyor. Ancak hâlâ eksiklikleri var. İlk olarak klasik fizik kullanılarak yapılan hesaplar Büyük Patlama'nın başlangıcında yoğunluğu ve sıcaklığı sonsuz olan bir teklik olduğunu söylüyor ancak bu durum fiziksel olarak imkânsız. Ayrıca bugün doğru olarak kabul gören fizik kuramlarının hiçbirisi evrenin ilk anlarındaki koşullar altında geçerli değil. Bu da özellikle evrenin oluşumunun ilk aşamaları ile ilgili bilgilerin spekülâtif kalmasına neden oluyor.

Büyük Patlama'nın doğasını ve evrenin oluşumunun ilk aşamalarını daha iyi anlamamızın bir yolu, o zamanlardan arta kalan maddeyi ve ışınımı incelemek olabilir. Uzun yıllardır bu kapsamda üzerine çalışmalar

yapılan olgulardan biri kozmik artalan ışıması. İlk kararlı atomlar oluşmaya başladıktan sonra Büyük Patlama'dan arta kalan fotonlar serbestçe uzayı dolaşmaya başladı. Bugün sıcaklığı 2,7 Kelvin'e kadar düşmüş olan bu ışıma radyo teleskoplarla gözlemlenebiliyor. Mikrodalgalara duyarlı bir teleskobu uzayın hangi bölgesine doğrultarsanız doğrultun kozmik artalan ışımasından gelen fotonları algılar. Tüm uzayı neredeyse homojen bir biçimde dolduran bu ışıma, Büyük Patlama kuramını doğrulayan en önemli kanıtlardan biridir. Kozmik artalan ışımasındaki ufak düzensizlikler ise evrenin Büyük Patlama'dan 379.000 yıl sonraki (kozmetik artalan ışımasının serbestçe uzayı dolaşmaya başladığı zamandaki) yapısı hakkında bilgi verir.



Yüksek enerjili fotonların ürettiği elektron-pozitron çiftlerinin bir manyetik alan içerisindeki hareketleri. Fermilab'daki (ABD) bir hidrojen-neon baloncuk haznesinde elde edilmiş bu görüntüde pozitronlar saat yönünde, elektronlarsa saat yönünün tersinde dönerek spiral çiziyor.



Bir kozmik artalan ışımasının var olduğu ilk kez 1948 yılında Ralph Alpher ve Robert Herman tarafından tahmin edilmişti. Kozmik artalan ışımasının doğrudan gözlemlenmesi ise 1968 yılında gerçekleşti. Bell Telefon Laboratuvarları'nda çalışan Arno Penzias ve Robert Wilson, radyo astronomi ve uydu iletişimi üzerine çalışmalar yapmak için tasarladıkları bir radyometre ile ölçümler yaparken, cihazın kaynağını bilmedikleri mikrodalgalar tespit ettiğini fark ettiler. Üstelik ölçümler bu ışımanın her yönden hemen hemen aynı miktarda geldiğini gösteriyordu. İlerleyen zamanlarda yapılan çalışmalar, Penzias ve Wilson'un kazara tespit

ettikleri mikrodalgaların kozmik artalan ışıması olduğunu doğruladı. Aradan geçen zamanda kozmik artalan ışıması pek çok araştırmaya konu oldu.

Evrenin oluşumunu ve gelişimini incelemek için kullanılabilecek bir diğer olgu ise kozmik artalan nötrinoları. Tüm uzayı nerdeyse homojen bir biçimde doldurduğu düşünülen bu nötrinoların varlığı da Büyük Patlama kuramının tahminleri arasında yer alır. Üstelik kozmik artalan nötrinoları kozmik artalan ışımasından daha eski. Bu nötrinolar, Büyük Patlama'dan sadece bir saniye sonra elektron-pozitron üretimi durduğundan beri uzayı dolaşmaya devam ediyor. Dolayısıyla

kozmetik artalan nötrinoları üzerine yapılacak çalışmalar, kozmik artalan çalışmalarına kıyasla, evrenin çok daha erken dönemlerdeki yapısı hakkında önemli bilgiler verebilir. Nötrinoların fotonlar karşısındaki önemli bir avantajı da farklı kütlelere sahip, farklı türde nötrinolar olması. Fotonlar uzayı ışık hızıyla dolaşırken kütle çekimi alanlarından etkilenerek yön değiştirir. Fotonlar tek türdür, bu kütleli parçacıkların tamamı belirli bir anda belirli bir ortamdan aynı hızlarla geçer. Dolayısıyla kozmik artalan ışımasındaki fotonlar, uzayın belirli bir bölgesinin "belirli bir andaki" yapısı hakkında bilgi verir. Kozmik artalan nötrinoları da

benzer biçimde uzayın yapısı hakkında bilgi verebilir. Ancak farklı kütlelere sahip farklı tür nötrinolar uzayı farklı hızlarla dolaşır. Dolayısıyla kozmik artalan nötrinoları üzerine yapılacak ölçümler uzayın belirli bir bölgesinin "farklı zamanlardaki" yapısı hakkında bilgi sağlayabilir.

Her ne kadar varlıklarından kuşku duyulmasa da bugüne kadar kozmik artalan nötrinolarını tespit etmek mümkün olmadı. Günümüzde pek çok araştırmacı bu parçacıkları tespit edebilecek yöntemler geliştirmeye çalışıyor.

Nötrinolar

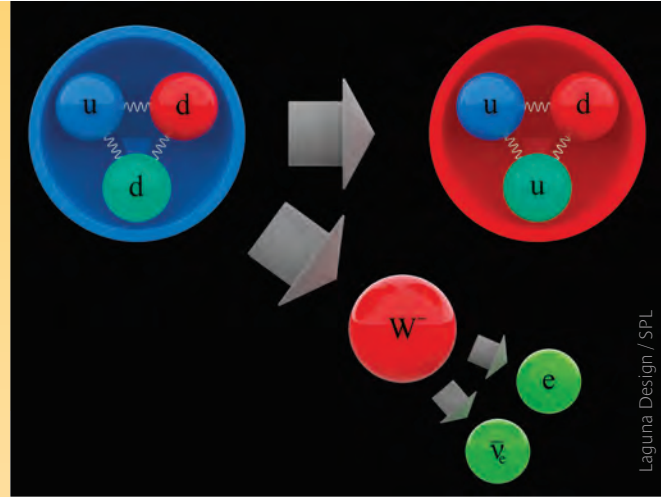
1900'lerin başlarında beta ışıması ile ilgili çalışmalarda bir sorunla karşılaşmıştı. Atom çekirdeklerinden elektronların dışarı atıldığı bu ışıma ile ilgili deneyler, süreçte enerjinin korunmadığını gösteriyordu. Ya enerjinin korunumu beta ışıması için geçerli değildi ya da beta ışıması ile ilgili bilinenlerde bir eksiklik vardı. Wolfgang Pauli,



Massimo Brega / SPL

İtalya'daki Gran Sasso Dağı'nın içinde nötrino araştırmaları için kurulmuş LVD (Large Volume Detector) dedektörü

beta ışıması sırasında daha önceleri bilinmeyen ve deneyler sırasında tespit edilemeyen bir parçacığın daha çekirdekten dışarı atıldığını öne sürdü. Süreçte elektrik yükü korunduğuna göre bu bilinmeyen parçacık elektriksel olarak yüksüz olmalıydı. O zamanlar atom çekirdeklerinin ana bileşenlerinden olan ve bugün nötron dediğimiz yüksüz parçacıklar henüz keşfedilmemişti. Pauli de var olduğunu iddia ettiği nötr parçacıklara elektron ve protonun adından esinlenerek “nötron”



Laguna Design / SPL

Serbest nötronların bozunması. İki aşağı (d), bir yukarı (u) kuarktan oluşan bir nötron bozunurken bir yukarı, iki aşağı kuarktan oluşan bir proton oluşuyor. Süreçte bir elektron (e) ve bir antinötrino ($\bar{\nu}_e$) çekirdekten dışarı atılıyor. Bozunma sürecine W^- bozonları aracılık ediyor.

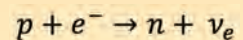
adını verdi. James Chadwick'in 1932'de protonlarla hemen hemen aynı kütleye sahip yüksüz parçacıkları

keşfetmesinden sonra, Enrico Fermi, Pauli'nin öne sürdüğü, o sıralar henüz deneylerle varlıkları

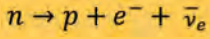
doğrulanamamış parçacıklara İtalyancada “ufak nötron” anlamına gelen nötrino adını verdi. Nötrinoların varlığının deneylerle doğrulanması 1956 yılında Clyde Cowan ve Frederick Reines'in yaptığı çalışmalar sonucunda gerçekleşti.

Nötrinoların keşfinden sonra geçen zamanda parçacık fiziğinde önemli gelişmeler yaşandı. Bugün parçacık fiziğinin standart modelinde üç ayrı tür nötrino ve bu nötrinoların antiparçacıkları yer alıyor. Bu parçacıklar şunlardır: elektron nötrinosu (ν_e), müon nötrinosu (ν_μ), tau nötrinosu (ν_τ) ve bu nötrinoların antiparçacıkları. Bu nötrinolar adlarının ilişkilendirildiği parçacıklarla beraber temel etkileşimlerde yer alır.

Nötrinoların yer aldığı süreçlerden biri elektron yakalamadır. Bu süreçte atom çekirdeği etrafında dolanan elektronlardan biri çekirdeğe “düşer”. Sonuçta, bu elektron ve çekirdekteki bir proton yok olurken bir nötron ve bir elektron nötrinosu oluşur:



Bu süreç atom çekirdeğindeki proton sayısını bir azaltırken nötron sayısını bir artırır. Elektronların atom çekirdeklerinden dışarı atıldığı beta ışımlarında ise elektron antinötrinoları yer alır:



Bu süreç atom çekirdeğindeki proton sayısını bir artırırken nötron sayısını bir azaltır.

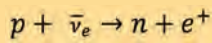
Bugüne kadar nötrinoların kütlelerinin ne olduğu hassas bir biçimde tespit edilemedi. Ancak protonların ve nötronların milyarda birinden bile daha düşük oldukları biliniyor.

Nötrinolar nadiren etkileşime giren parçacıklardır. Bu yüzden tespit edilmeleri zordur. Örneğin her saniye 100 trilyondan fazla nötrino siz farkında olmadan vücudunuzdan geçiyor. Kozmik artalan nötrinolarını tespit etmeyi zorlaştıran bir etkense bu parçacıkların bugün itibarıyla aşırı derecede düşük enerjili olmalarıdır. Kuramsal tahminlere göre kozmik artalan nötrinolarının sıcaklığı bugün 1,95 Kelvin civarında olmalı.

Nötrinoları Tespit Etmek

Günümüzde nötrinolar çeşitli yöntemlerle tespit edilebiliyor. Ancak bu yöntemlerden hiçbirisi düşük enerjili kozmik artalan nötrinolarını da tespit etmeyi başaramıyor.

1956 yılında nötrinoların varlığını doğrulayan ilk çalışmaya imza atan Cowan ve Reines protonların nötronlara bozunumu üzerine deneyler yapmıştı. Protonların kütlesi, nötronlardan daha büyüktür. Dolayısıyla bir proton “kendiliğinden” bir nötrona bozunamaz. Ancak yüksek enerjili bir antinötrino bu dönüşümü tetikleyebilir:

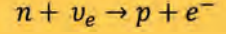


Bu sürecin ortaya çıkardığı pozitronlar kısa süre içinde ortamdaki elektronlarla etkileşir, elektronlar ve pozitronlar yok olurken yüksek enerjili gama ışınları ortaya çıkar. Ortaya çıkan nötronlar da yine “uygun” atom çekirdekleri tarafından yakalanabilir ve bu süreçte gama ışınları ortaya çıkarır. Cowan

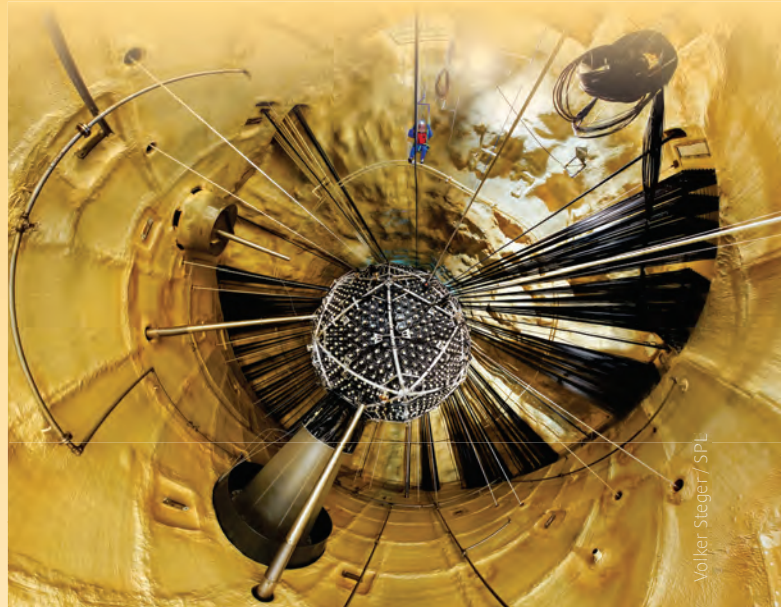
ve Reines, bir nükleer reaktörde meydana gelen beta ışıması ürünlerini protonlarla tepkimeye sokmuş ve sonuçta elektron-pozitron annihilasyonu ve nötron yakalaması sonucu ortaya çıkan gama ışınlarını tespit etmişlerdi. Elde edilen sonuçlar kuramsal tahminleri doğrulamıştı. Araştırmacılar bu başarıları için 1995 yılında Nobel Fizik Ödülü ile onurlandırıldılar.

Güneş’ten yayılan nötrinoları tespit etmek için de benzer bir yöntem kullanıldı. Raymond Davis ve John Bahcall 1970 yılında bir tankı 380.000 litre klor ile doldurdular. Güneş’ten

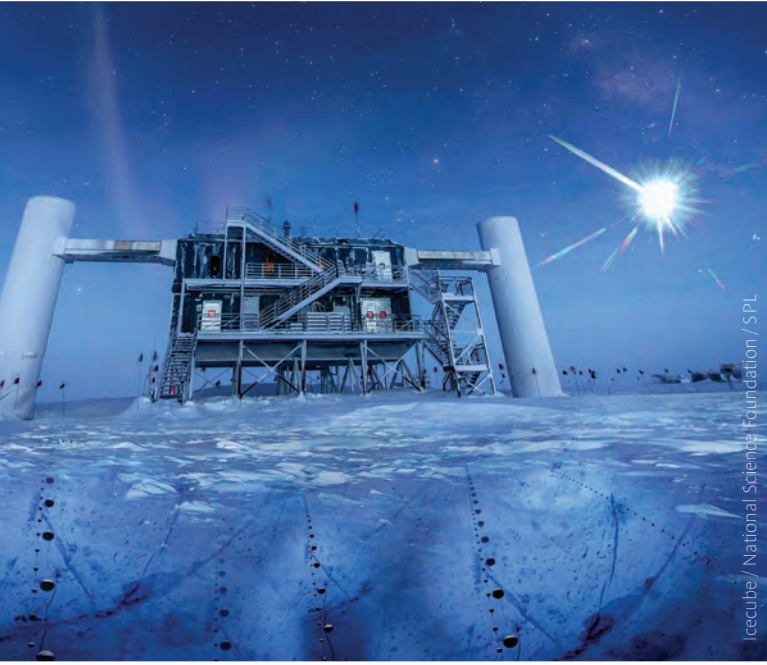
gelen nötrinoların bu atomlardaki nötronları protonlara dönüştürmesi bekleniyordu:



Bu sürecin net sonucu klor atomlarının argon atomlarına dönüşmesi olacaktı. Böylece ortaya çıkan argon atomlarının varlığı tespit edilerek Güneş’ten gelen nötrinoların varlığı doğrulanabilecekti. Bu deneyle ilgili önemli bir sorun, klor atomlarının argon atomlarına dönüşümünün uzaydan gelen kozmik ışınlar tarafından da tetiklenebilmesiydi. Araştırmacılar yapacakları deneyin kozmik ışınlardan etkilenmemesi



Kanada’danın Ontario eyaletinde bulunan, Güneş’ten gelen nötrinoları tespit etmek için tasarlanmış Sudbury Nötrino Gözlemevi’ndeki dedektör



Icecube / National Science Foundation / SPL

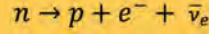
Antarktika'daki IceCube Nötrino Gözlemevi. Nötrinoları tespit eden dedektörler buzun altında, 1.450-2.450 metre derinlikteki kuyularda yer alıyor.

için klor dolu tankı yerin 1.500 metre altındaki eski bir altın madenine yerleştirdiler. Elde edilen sonuçlar kuramsal tahminleri doğrulamıyordu. İlerleyen yıllarda bu durumun zannedilenin aksine nötrinoların kütleli olmasından ve bu nedenle uzayda yol alırken farklı nötrino türlerinin birbirine dönüşebilmesinden kaynaklandığı öne sürüldü. Bilimsel çalışmalar da bu düşüncüyü doğruladı. Güneş'ten gelen nötrinoları tespit eden ve nötrinoların birbirine dönüşümünü doğrulayan çalışmalara iki ayrı Nobel Ödülü verildi.

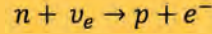
Kozmik artalan

nötrinolarının nasıl tespit edilebileceği ile ilgili ilk düşünce, 1962 yılında Nobel Ödüllü fizikçi Steven Weinberg tarafından ortaya atıldı. Weinberg, Davis ve Bahcall'ın yaptıklarına benzer deneylerle kozmik artalan nötrinolarının tespit edilebileceğini öne sürdü. Ancak düşük enerjili nötrinoların nötronların protonlara bozunumunu tetikleyebilmesi için deneylerin "yeteri derecede kararsız" atom çekirdekleriyle yapılması gerekecekti. Weinberg trityum izotoplarını (^3H) kullanmayı önerdi. Çekirdeklerinde iki nötron bulunan bu hidrojen atomu izotopları doğal olarak beta ışıması yoluyla

^3He izotoplarına dönüşür. Aynı dönüşüm nötrinolar tarafından da tetiklenebilir. Doğal beta ışıması,



ile nötronlar tarafından tetiklenen beta ışıması,



karşılaştırıldığında nötrinolar tarafından tetiklenen tepkimelerin ortaya çıkardığı elektronların enerjisinin iki elektron nötrinosunun kütle enerjisi kadar fazla olması beklenir.

Nötrinoların aşırı derecede küçük kütleleri göz önüne alındığında bu fark çok küçüktür. Ancak elektronların enerjilerini yeteri kadar hassas bir biçimde ölçebilecek dedektörler tasarlanabilirse kozmik artalan nötrinoların etkilerini gözlemlemek mümkün olabilir. 100 gram kütleli bir trityum örneğinde kozmik artalan nötrinolarının her yıl dört adet yüksek enerjili elektron üretmesi beklenir. Aynı örneğin her saniye doğal beta ışıması yoluyla 100 trilyonun üzerinde düşük enerjili elektron ürettiği düşünülürse, bu yöntemle kozmik artalan nötrinolarını tespit etmenin ne kadar zor olduğu daha iyi anlaşılır.

Günümüzde PTOLEMY diye adlandırılan bir proje kapsamında bu deneyleri gerçekleştirerek kozmik artalan nötrinoların varlığını doğrulayabilecek bir dedektör kurulması için çalışmalar devam ediyor.

Kozmik artalan nötrinoların nasıl tespit edilebileceği ile ilgili bir başka düşünce de 1974 yılında Reuven Opher tarafından öne sürüldü. Opher, bir burulma sarkacıyla kozmik artalan nötrinoları tarafından uygulanan basıncın ölçülebileceğini öne sürdü. Ancak nötrinolar tarafından uygulanacak basıncın ölçülebilmesi için günümüzün en gelişmiş cihazlarından bile milyarlarca kat daha duyarlı burulma sarkaçları geliştirilmesi gerekiyor.

Thomas Weiler 1984 yılında kozmik artalan nötrinolarını tespit etmek için bir başka yöntem öne sürdü. Uzaydan gelen yüksek enerjili nötrinolar atmosfere çarptıklarında yeryüzünden tespit edilebilen gama ışınlarının ortaya çıkmasına yol açar. Nadiren de olsa bu yüksek enerjili nötrinoların kozmik artalan ışımasındaki düşük enerjili nötrinolarla da çarpışması

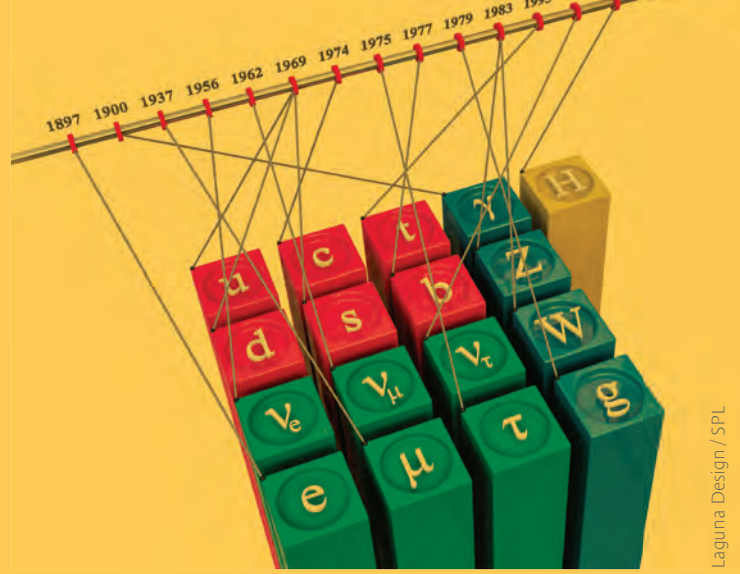
ve bu etkileşimlerin her iki nötrinonun da yok olmasıyla sonuçlanması beklenir. Dolayısıyla artalan nötrinoları ile yüksek enerjili nötrinolar arasındaki bu etkileşimler yeryüzüne yağın gama ışınlarının azalmasına yol açacaktır. Weiler bu azalmaları ölçerek kozmik artalan nötrinolarının varlığının tespit edilebileceğini iddia etti. Ancak bu ölçümleri yapacak bir dedektörün yeryüzüne ulaşan gama ışını miktarında kozmik artalan nötrinolarından kaynaklanan bir azalmayı tespit edebilmesi için hiç durmaksızın yüzyıllarca çalışması gerekebilir.

Kozmik artalan nötrinolarını tespit etmek için yeni bir yöntem de yakın zamanlarda Jack Shergold ve Martin Bauer tarafından öne sürüldü. Araştırmacılara göre, nötrinolar ile atomlar arasındaki etkileşimleri daha enerjik hâle getirmek kozmik artalan nötrinolarını tespit etmenin yolu olabilir. Daha önceleri öne sürülmüş tüm yöntemler, kozmik artalan

nötrinolarının durağan atomlara çarpmasına dayanıyordu. Shergold ve Bauer ise atomları nötrinolarla doğru hareket ettirerek bu etkileşimlerin çok daha enerjik hâle getirilebileceğine dikkat çekiyor. Yüksüz atomları ivmelendirmek zordur.

Araştırmacılar da atomları önce iyonlaştırıp daha sonra elektriksel kuvvetler yardımıyla hızlandırmayı öneriyor.

Her saniye vücudumuzdan trilyonlarca nötrino geçtiği gibi parçacık hızlandırıcıların içinden de kozmik artalan nötrinoları geçiyor olmalıdır. İyonları parçacık hızlandırıcılarda ivmelendirerek kozmik artalan nötrinolarının varlığını kanıtlayacak deneyler yapmak mümkün olabilir. Ancak bu deneyleri gerçekleştirmek de şu anki teknolojilerle imkânsız. Örneğin, söz konusu Davis ve Bachall'ın deneylerindeki gibi klor-argon dönüşümü olduğunda, Büyük Hadron Çarpıştırıcı'dan milyonlarca kat daha güçlü bir parçacık hızlandırıcıya ihtiyaç var. Diğer yandan, daha kolay



Parçacık fiziğinin standart modelindeki parçacıklar ve keşif yılları. Görselde kuarklar pembe, leptonlar yeşil, kuvvet taşıyıcıları mavi, Higgs bozonu ise sarı renkle gösteriliyor. Görseldeki parçacıklar şunlar: u , yukarı kuark; c , tılsım kuark; t , üst kuark; d , aşağı kuark; s , acayip kuark; b alt kuark; ν_e , elektron nötrinosu, ν_μ , müon nötrinosu; ν_τ , tau nötrinosu; e , elektron; μ , müon; τ , tau; γ , foton; Z , Z bozonu; W , W bozonu; g , glüon; H , Higgs bozonu.

gerçekleştirilebilecek alternatif sistemler de bulmak mümkün. Örneğin, helyum iyonlarının trityum iyonlarına dönüştürüleceği bir deney için Büyük Hadron Çarpıştırıcı'dan 100 kat daha güçlü bir parçacık hızlandırıcı yeterli olacaktır. Bu deneylerle ilgili bir başka sorun da hızlandırılması gereken madde miktarının çokluğu. Bu deneylerin gerektirdiği madde yoğunluğu günümüzde parçacık çarpıştırıcılarda kullanılan yoğunluklardan çok daha yüksek olacaktır. Dolayısıyla Shergold ve Bauer'in öne sürdüğü yöntemin en kolay biçimde başarıya ulaşmasının yolu

nötrinolarla mümkün olduğu kadar düşük enerjilerde etkileşime girecek iyonlar bulmaktan geçiyor. Bu sayede parçacık hızlandırıcılarda ulaşılması gereken enerji ve yoğunluk değerleri aşağı çekilebilir.

Sonuç

Kozmik artalan nötrinolarının varlığı Büyük Patlama kuramının sonuçlarından. Bugüne kadar bu parçacıkları tespit etmek mümkün olmadı. Ancak kozmik artalan nötrinolarının varlığının ya da yokluğunun deneylerle doğrulanması kozmolojide çok önemli gelişmelere yol açacaktır. ■

Kaynak

Bauer, Martin, "What was the universe's first second like? These particles can tell us", *New Scientist*, <https://www.newscientist.com/article/mg25834360-100-what-was-the-universes-first-second-like-these-particles-can-tell-us/>, 24 Nisan 2023.