

Nötrinoların Kütlesi Bulundu

Bu makalede Paris (Denis Diderot) Üniversitesi Atom ve Yüksek Enerji Fiziği fizikçilerinden François Vannucci'nin nötrinoların güncel durumu üzerinde verdiği bilgileri okuyacağız. Nötrinoların kütlesi var mı? Bir Amerikan-Japon ortak deneyi (Süperkamiokande) bu soruya kesin bir yanıt verdi; nötrinolar da bir kuantum olayı olan salınım kanıtlandı. Bu olgu, nötrinoların kütlesinin sıfır olmadığını gösterir. Bu sonuç fizikçileri ilgilendirir; çünkü standart nötrino modelinde nötrino kütlesi sıfırdır. Bu sonuç astronomları da ilgilendirir; onlar da nötrinoların Evren'in madde yoğunluğuna katkısını öğrenmek istemektedirler.

Nötrino maddenin temel yapıtaşları arasında çok önemli bir rol oynar. Üç tip nötrino vardır: elektron, müon ve tau nötrinoları. Hepsisi elektrik olarak nötrdür ve yalnız "zayıf etkileşimle" etkileşirler (zayıf etkileşim: dört temel etkileşimden biridir. Kısa mesafelerde beta bozunumundan sorumludur). Bu özellik, onların sanki bir hayalet gibi maddenin içinden geçip gidişini açıklar. Bir nötrino soğurulmadan Dünya'nın içinden geçip gidebilir. Bu özelliği kanıtlanmıştır. Fakat acaba kütlesi, ünlü standart modelde kuramı, var saydığı gibi, sıfır mıdır? [1970'lerde

doğmuş olan standart model kuramı, kütleçekim parçacığı (graviton) hariç, bütün temel parçacıkları ve onların etkileşimlerini tanımlamaktadır ve deneysel verilerle uyum hâlinindedir.] Nötrinoların (ve antinötrinoların) kütleleri çok küçük olmalıdır; aksi halde etkileri çok daha önce hissedilirdi. Bütün bunlar günümüzde çok yoğun araştırmaların konusudur.

Nötrinolar maddeyle çok az etkileşirler; kütleleri olsa bile bu ancak akademik bir önem taşır. Fakat nötrinolar uzayda çok boldur. Olağan maddeyi oluşturan her bir proton veya nötron

için milyarlarca nötrino vardır. Nötrinoların kütlesi sıfıra yakın olsa bile, Evren'in kütleçekimsel dengesini bozabilir; çünkü sayıları çok fazla olan nötrinoların toplam kütlesi halen bilinen madde kütlesini aşabilir. Bu problem gökadalardan karanlık kütle veya daha genel olarak Evren'in eksik kütlesiyle ilgilidir. Evren'in eksik kütlesinin anlamı şudur: Gök cisimlerinin hareketlerine (dinamiğine) bakılarak anlaşılmıştır ki Evren'in gerçek kütlesi, yıldızların ve diğer ışyan gök cisimlerinin gözlemlenmesiyle elde edilen kütleden çok daha büyüktür. Bu nedenle astronomlar, Evren'in eksik kütlesinin (ışınmadığı için kütlesi ölçülemeyen karanlık maddenin) kütlesi çok küçük nötrinoların oluştuğunu düşünmektedir. Bunun için nötrino kütlesinin çok küçük (birkaç elektron volt) olması bile yeterlidir. [parçacıkların kütleleri elektron voltla (eV) ifade edilir; örneğin elektronun kütlesi 511 keV ve protonun 938 MeV'tur. 1 elektronvolt, 1 elektronun 1 volt potansiyel farkıyla kazandığı enerjidir. Bunun ışık hızının karesine bölünmesi kütleyle verir ($m=E/c^2$).]

Superkamiokande ekibinin üç çeşit nötrinodan birinin mutlaka kütlesi olması gerektiğini bulmasından sonra herşey değişti. Bulunan kütle, Evren'in genişlemesini etkilemek için çok küçüktü. Kütlesi bulunan nötrinonun üç nötrinodan hangisi olduğu bilinemediği için kuramsal olarak kütle bakımından tau nötrinusu > müon nötrinusu > elektron nötrinusu olması gereken eşitsizlik de doğrulanamazdı.

Superkamiokande deneyi Japonya'da küçük Kamioka şehri yakınında bir dağın 1 km altındaki bir çinko ma-



Nötrino kütlesini bulanlar: Hawaii Üniversitesi'nden J. Learned, D. Takemori ve S. Matsuno. Süperkamiokande'nin bir fotomultiplikatorünü gösteriyorlar.

denince yapıldı. Cihaz 130 Amerikan ve Japon fizikçisi tarafından tasarlanmış boyutları 35x35x40 m olan bir sarnıçtı; içi arı su doluydu. Sarnıç en ufak bir ışığı kaydetmek üzere 13 000 foto-müliplikatör tüp içeriyordu. Bu nötrino detektörünün fiyatı birkaç yüz milyon dolardır.

Su molekülüyle etkileşen bir nötrino, elektrik yüklü parçacıklar oluşturur. Bu parçacıklar, yeterince enerji yüklüyse, suyun içinden geçerken "Çerenkov ışması" denen bir ışımaya yaratılırlar. Çerenkov ışması, bulunduğu ortamda ışık hızından daha hızlı gitmeye zorlanan bir parçacığın yarattığı fotonlara bağlı ışımadır. Rus fizikçisi Çerenkov tarafından bulunmuştur. Müon nötrinolarının etkileşiminden doğan müonlar ve elektron nötrinolarının etkileşiminden doğan elektronlar, müon ve elektron nötrino akılarının ayrı ayrı izlenmesine olanak sağlar.

Bu nötrinolar uzayın neresinden geliyor? Sözümlü ettiğimiz son buluştaki nötrinolar, atmosferden gelir; bunlar protonlardan oluşmuş kozmik ışınların, atmosferin 10 km yükseklikteki üst katmanlarına çarpmasıyla oluşurlar. Atmosferde oluşan nötrinolar elektron ve müon nötrinolarıdır; atmosferde her 2 nötrino için 1 elektron nötrinosu oluşur. Süperkamiokande hesaplanan sayıda elektron nötrinosu bulunmuştur. Fakat müon nötrinoları beklendiğinden az çıkmıştır. Pratikte müon nötrinosu, elektron nötrinosu oranına bakılır; daha kesindir. Biri İtalya, biri ABD'de yapılan iki deney de Süperkamiokande'yi doğrulamıştır. Süperkamiokande daha önceki deneylere üstünlüğü, Dünya'yı baştan başa geçerek gelen nötrinoların



Fransız Arden'lerinde Chooz nükleer santrali astronomik sayıda elektron antinötrinosu üretir. Resimde içi görülen bir detektör, 1 km boyunca bu parçacıkların geçişini sayar. Bulunan sayı beklenen sayının aynısıdır. Deme ki bu mesafede antinötrinolar salınım yapmamıştır.

Nötrinoların Kütleleri Ne olabilir?

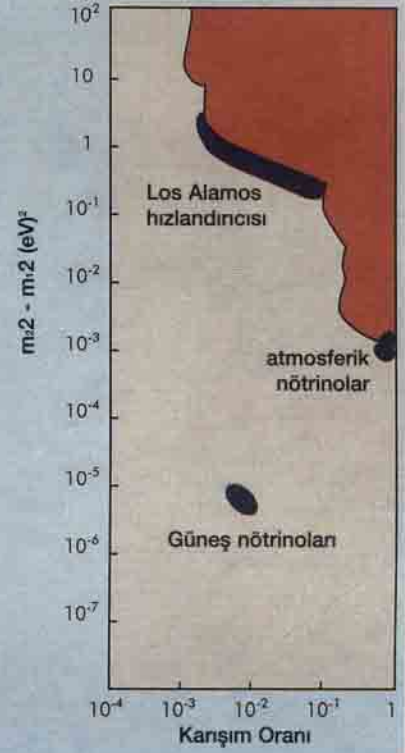
Nötrinoların salınımı bir parametre ortaya koyar: Dalga boyu veya (periyot): Bu, salınımda rol oynayan iki tip nötrininin kütlelerinin karelerinin farkına bağlıdır.

Kütlelerin farkı ne kadar küçükse, dalga boyu o kadar uzundur. Bu nedenledir ki nötrino gibi kütleleri çok küçük parçacıklarla yapılan deneyler çok uzun mesafeler gerektirir. CERN, Roma yakınlarındaki Gran Sasso tüneline bir parçacık huzmesi göndererek nötrinoların 730 km boyunca salınım yapmasını sağlamayı düşünmektedir.

Bütün negatif sonuçlar, bu parametrenin karşım oranı ve kütlelerin karelerinin farkı düzleminde dışlanmış bölgeler olarak belirir. Üç nötrino çeşidi olduğuna göre üç salınım kanalı olasıdır ve üç düzlemde incelenmelidir.

Pozitif bir sonuç dışlanmamış bir bölgede bellirecektir; sonuçlar kesinleşince bu bölge nokta hâlini alır.

Şekilde mor bölgeler Los Alamos akseleratörü, atmosfer nötrinosu ve Güneş nötrinolarını temsil eder. Negatif sonuçlarla dışlanmış bölgeler aşı boyası rengindedir. Farklı salınım kanalları aynı düzlemde gösterilmiştir.



sayısının en fazla azaldığını göstermiş olmasıdır.

Bu deneyin yorumu şöyledir: Müon nötrinoları salınım yaparak detektörün tanıyamadığı bir başka nötrino tipine dönüşmektedirler. Cihaz doğadaki üçüncü nötrino olan tau nötrinolarını tanıyamamaktadır; çünkü tau kararsız bir parçacık olup varlığını kanıtlamak zordur. Dünya'nın içinde 13 000 km yol geçerken müon nötrinoları tau nötrinolarına dönüşmektedir.

Nötrinoların salınımı kütleleriyle yakından ilgilidir. Salınıma katılan iki çeşit nötrininin kütleleri m_1 ve m_2 ise, $m_2^2 - m_1^2 = 2 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$ 'dir. Görüldüğü

gibi salınımlar çok küçük kütleleri ölçebilmektedir.

En güvenilir sonuçlar Güneş nötrinolarıyla alınmaktadır. Güneş, her saniye Dünya yüzeyinin cm^2 'si başına 60 milyardan fazla nötrino gönderir. Bu, fizikçilerin tahminidir. Bu konuda üç deney yapılmıştır. Birinci deney 25 yıldır yeraltında dev mağaralarda Güneş nötrinolarının etkisiyle klorun radyoaktif argona dönüşmesini ölçmektedir; bu yöntem nötrino akısının ancak küçük bir bölümünü ($1/3-1/2$ 'sini) ölçebilir. İkinci bir deney, Güneş'in içinde oluşan elektron nötrinolarının salınım yapmasını, örneğin müon nötrinolarına dönüşmesini ölçmektedir. Süperkamiokande de Güneş nötrinolarını incelemiştir; fakat bunların enerjileri çok zayıf olduğundan yalnız elektron nötrinoları bulunabilmiştir. Burada şu bağıntı geçerlidir: $m_2^2 - m_1^2 = 10^{-5} \text{ eV}^2$.

Üçüncü bir deney ABD'de Los Alamos parçacık hızlandırıcısında yapılmıştır. 800 MeV protonların etkileşmesiyle müon ve elektron nötrinoları ve müonik antinötrinosu oluşmuştur; fakat elektron antinötrinosu oluşmamıştır. Akseleratör yeniden elektron antinötrinosunun etkileşimleri için ayarlanmış ve bu kez bir sinyal alınmıştır. Böylece 3. formül bulunmuştur; $m_2^2 - m_1^2 = 1 \text{ eV}^2$.



Nötrino bir kuarkla etkileşince mavi bir ışık konisi oluşur. Bu resim Sudburg'daki Kanada detektöründen alınmış bir bilgisayar simülasyonudur.

Üç salınım şekli ve üç kütle denklemi. Bu senaryo 1989'da CERN'de LEP akseleratöründe yapılan deneylerle uyumludur. Bu deneyler sâdece üç "normal" nötrino olduğunu göstermiştir. Fakat bu üç denklemle elde edilen kütle farkları, kendi aralarında uyumlu değildir. Ya deneyde bir yanlışlık veya yanlış yorum vardır ya da dördüncü nötrino varolmalıdır; bu dördüncü nötrino "kısır"dır, yani etkileşim yapmamaktadır, dolayısıyla görülemez.

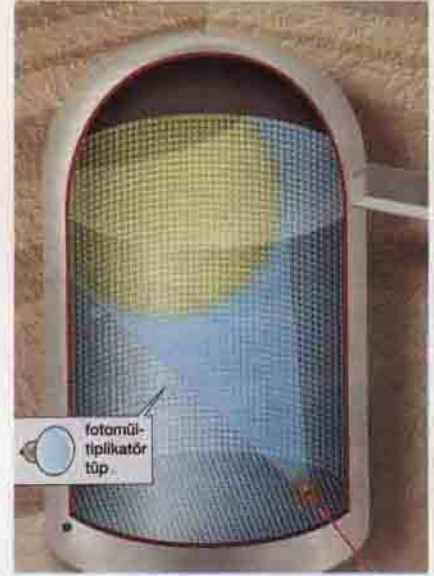
İsviçre'de CERN'de kozmik önemi olan nötrinoları, özellikle tau nötrinoları, yakalamak için yaptırılan Chorus ve Nomad detektörleri hiçbir tau nötrino bulamadı; yüksek enerjili parçacık hüzmesinde, müon nötrinolarının tau nötrinolarına salınım yaptığı gösterilemedi. Deneysel koşulları, astronomların isteğine uyularak, tau nötrinolarının kütlesi birkaç eV'ü geçmeyecek şekilde ayarlanmıştı. Fransız Arden'lerinde Chooz nükleer reaktörü çevreye zarar vermeden çok fazla sayıda elektron antinötrino parçacıkları oluşturmaktadır. Bu cihaz nötrinoları, daha önceki benzer deneylere göre, 10 kat daha fazla salınım mesafesi (1 km) bırakmıştır. Beş tonluk bir sarnıçta fotomultiplikator tüpler günde 25 anti-nötrino sayarlar. Bu beklenen miktara uygundur. Bu şekilde nükleer santralde oluşmuş elektron antinötrinolarının kaybolduğu varsayımı çürütülmüş oldu.

Nötrinoların bir kütlelerinin varolduğunu ispat etmekle, 20 yıldır değişmeden devam eden standart modelde ilk değişiklik yapılmıştır. Nötrinoların Evren'in kütleçekimsel dengesinde ve genişlemesinde oynadıkları rol çok küçüktür; bunun olabilmesi için kütlelerinin 0,05 elektronvolt yerine birkaç eV olması gerekirdi. Üç nötrinonun kütleleri birbirine yakın ve herbiri birkaç elektronvolt değilse, nötrinolar Evren'in genişlemesinde bir rol oynayamazlar. Kuramların karşı çıkmasına rağmen bu çözüm olasıdır, çünkü salınım

kütlelerin farkını belirler. Bir değer varsayım: Süperkamioakande'nin ölçtüğü salınım, müon nötrinosu ile dördüncü bir nötrino (kısır nötrino) arasında olabilir. Nihayet son bir olasılıkla nötrinonun parçalanarak bir başka nötrinoyu da içeren daha hafif parçalara ayrılmasıdır. Nötrino ile ilgili daha bir çok soru işareti vardır ve nötrinolar bizi şaşırtmaya devam edeceklerdir.

Nötrino Kütlelerinin Önemi

Nötrinoları yakalamak o kadar zor ki 26 yıl nötrinolar kuramsal olarak kaldılar. Nötrino 1930'da Avusturyalı fizikçi Wolfgang Pauli tarafından nötron bozunmasıyla ilgili bir problem sırasında bulunmuştu. $n \rightarrow p+e$ (n =nötron, p =proton, e = elektron) tepkimesinde elektron her keresinde farklı bir enerjiyle fırlıyordu; oysa bu enerjinin değişmez olması gerekirdi; bir enerji spektrumu söz konusuydu. Pauli bunun yeni bir parçacığa bağlı olduğunu düşündü. Enrico Fermi ona nötrino (İtalyanca küçük nötr) adını verdi ve onu zayıf etkileşimde (beta ışınları) kullandı. Nötrinolar yalnız zayıf etkileşime duyarlı olduklarından maddeyle çok nadiren etkileşirler. 1956'da Amerikan fizikçileri Fred Reines ve Clyde Cowan, Savannah River nükleer reaktöründe nötrinolar göstermeyi başardılar. Nötrino kaynakları çeşitlidir: Nükleer santral-



Yerin 1 km altındaki eski bir madende 50 000 ton arı su içeren silindirik bir sarnıçta, herbiri 40 cm çapında, 13 000 fotomultiplikator tüp, nötrino bir H veya O kuarkına çarpınca oluşacak Çerenkov ışımalarını kaydetmeye hazırdır. Şekilde sağ alttan sarnıçta giren bir nötrinonun oluşturduğu mavi ışık konisi görünüyor.

ler, doğal radyoaktif maddeler ve yıldızlardaki ve Güneş'teki nükleer reaksiyonlar. Güneş, bize saniyede cm^2 başına 60 milyar nötrino gönderir; bunlar Dünya'nın içinden geçip giderler; bize bir zararları olmaz. Büyük Patlama'dan kalma fosil nötrinolar çok düşük enerjili olduklarından asla gösterilemez; bunların sayıları cm^3 'de yüzler dolayındadır. 1962'de muon nötrinoları bulundu. 1949'da keşfedilmiş olan müon, elekt-

Nötrinolar ve Süpernovalar

Nötrinolar şu tip reaksiyonlarla oluşabilir: elektron + proton \rightarrow nötron + nötrino. Buna nötronizasyon denilir (nötrino artışı yaptığı için). Nötrino oluşturan tepkimeler "zayıf etkileşim" grubuna girer. Nötrinonun etkileşim hızı fotonun 10^{11} kere daha azdır. Nötrino hiçbir etkileşim yapmadan gidilebileceği ortalama yol (ortalama serbest yol), Güneş yoğunluğundaki bir madde için 1 milyar Güneş yarıçapıdır. Böylece bir yıldızda oluşan nötrinolar uzaya kaçarlar ve yukarıdaki tepkime endotermik (çevreden ısı alan) olduğundan, nötrino kaçışı sıcak ve yoğun yıldızlar soğutur. Bir süpernova olayında (yıldızların ölmeye başlamadan önce uzaya madde püskürtmeleri ve daha parlakları) yıldız korunun çökmesi 10^{11} K sıcaklık oluşturur. Nötrino emisyonu sonucu kor nötron yıldızına dönüşürken sıcaklık hızla 10^9 K'ya düşer. Bir nötron yıldızının ilk birkaç bin yılında nötrino soğutması vardır. Bir nötron yıldızının ilk bir kaç bin yılında nötrino soğutması vardır. Nötrinolar nasıl oluşuyor? Nötrino üreten tepkimelerin en önemlilerin-

den birisi biraz değiştirilmiş Urca tepkimesidir: $n+n \rightarrow n+p+e$ antinötrino ve $n+p+e \rightarrow n+n+nötrino$. Bu iki tepkime birbirinin karşıtıdır ve aynı hızla oluşurlarsa ortamdaki nötron (n), proton (p) ve elektron (e) miktarı değişmez; sürekli nötrino üretilir. Urca, Rio de Janeiro'da bir gazinonun adıdır; ilk nötrino fizikçileri doğanın bir yıldızdan enerji çekmesini, bu gazinonun müşterilerinden para çekmesine benzetmişlerdir. Sonuç olarak iki nötron, proton, nötron, elektron ve nötrino oluşmaktadır.

Nötrino oluşturan veya tüketen diğer tepkimelerden bazıları şunlardır: $n+n \rightarrow n+n+nötrino$ antinötrino; $n+p+nötrino$ antinötrino; $e+e+nötrino$ antinötrino; $e+t$ (ışınlar) $\rightarrow e$ nötrino antinötrino. $e+(Z, A) \rightarrow (Z, A)+e+nötrino$ antinötrino (Z = atom numarası, A = kütle numarası); $e+(Z, A) \rightarrow (Z-1, A)+nötrino$; nötrino $n \rightarrow p+e$; nötrino $(Z, A) \rightarrow (Z+1, A)+e$. Nötrinolar kuarklarla da etkileşirler; yoğun kuark maddeleri nötrino soğutabilir veya verebilir.

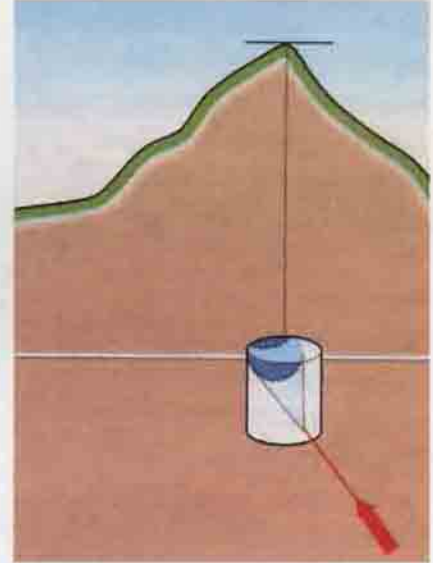
rona çok benzer, fakat kütlesi daha büyüktür. Daha sonra elektronun bir kardeşi daha bulundu: tau. Bu muondan da ağırdı. Bunun nötrinosa tau nötrino dendi. Hesaplar elektron nötrinosaunun kütlesinin en fazla 4 eV olabileceğini gösterdi. Bu, elektron kütlesinin yüzbinde biridir. Muonsu nötrino 160 keV ve tau nötrino 24 MeV olmalıdır. Kuantum fiziğinde bir parçacık dalga veya madde halinde olabilir. Nötrinoların üç kuantum durumu vardır; bunlara "tat hâlleri" denir (elektron, muon ve tau nötrinoları); üç de kütle hâlleri vardır: m_1 , m_2 , m_3 . Tat durumları kütle durumlarıyla çakışabilir. Bir diğer deyişle bir elektronik nötrinonun kütlesi kesin değildir; m_1 , m_2 ve m_3 karışımıdır. Bunun karşısı da doğrudur: kütlesi m_1 olan bir nötrino, üç tat içeren bir kokteyldir. Nötrinolar etkileşirken tat, hareket ederken kütle önem kazanır. Elektron tadında bir nötrino, uzayda bir çok kütle durumunda, yani farklı fazlardaki dalgaların üst üste binmesi hâlinde, yol alır. Bundan bir faz farkı doğar ve bu fark uzaklıkla salınım yapar; burada elektron ve muon nötrinolarının oranları sürekli değişen bir karışımı söz konusudur. Nötrino arandığında asla bir karışım değil, tek bir tat bulunur. Öyle ki elektron nötrinosa yakalama olasılığı da uzaklıkla salınım yapar.

Kısaca eğer nötrinoların bir kütlesi varsa, bunlar değişik tad durumları arasında periyodik bir salınım yapacaklardır. Bu nedenle belli bir taddaki nötri-

Kozmik ışınların parazit yapmasını önlemek için yerin 1 km altında konulmuş bir sarnıç an suyla doludur. Her yüz milyar elektron veya müon nötrinosaundan biri, suyun bir oksijen veya hidrojen kuarkına çarparak Çerenkov ışınısı oluşturur. Bu çarpma sonucu bir elektron veya bir müon, su içinde ışık hızını aşmaya zorlanır ve mavi bir ışık konisi oluşturur. Bu, ses hızını geçen uçakların yarattığı patlamanın görsel benzeridir. Bu ışık sarnıç duvarına çarpınca oradaki fotomultiplikator tüplerce kaydedilir. Bu sinyallerden nötrinonun enerjisi, tadı ve geldiği yön anlaşılır. Süperkamiokande 1996 ile 1998 arasında 4700 nötrino kaydetti ve müon nötrinolarının sayısında önemli bir eksiklik gösterdi. Bu müon nötrinolarının salınım yaparak diğer tip nötrinolarla dönüştüğünün kanıtıdır. Bu ise bütün nötrinoların bir kütlesinin olması demektir.

noların sayısı eksik çıkarsa, bu onların bir diğer etkin hâline geçtiklerini (bu ikinci tat ölçülemez) ve dolayısıyla kütleleri olduğunu gösterir. Süperkamiokande deneyi atmosferik nötrinoların salınım yaptığını ve dolayısıyla kütleli olduğunu kesin olarak kanıtlamıştır. Bu ölçmeler nötrino kütlelerini değil, kütle farklarını vermektedir. Müon ve tau nötrinolarının kütle farkı 0,04 eV kadardır. Bu ölçümler CERN, Fermilab (Clicago) ve Tsukuba (Japonya) tarafından doğrulanacaktır.

Bu salınım Güneş'ten gelen nötrinoların hesaplanandan az olmasını da açıklar. Nötrinolar Evren'in "eksik kütlesi" probleminde rol oynayacaktır. Evren'in kütlesi (veya yoğunluğu) yıldızlarının ve görünür maddelerin kütlesi



hesaplanarak bulunabilir. Fakat gökdalarnın rotasyon hareketi, bunların kütlelerinin gözlemlenenenden çok daha büyük olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak denilebilir ki Evren'in kütlesinin %90'ını göremiyoruz; buna "saklı" madde veya "karanlık madde" denilmektedir; görebildiğimiz Evren maddesinin yalnızca % 10'udur. Acaba karanlık madde nötrinolar mıdır? Son deney nötrinoların, kütleleri çok küçük olduğundan, karanlık maddenin ancak küçük bir bölümünü oluşturabileceğini göstermiştir.

İkinci bir soru Evren'in geleceğidir. Eğer Evren'in yoğunluğu kritik bir değer üstündeyse kütleçekim ağır basarak ısınacak ve Büyük Çökme oluşacaktır; altındaysa Evren genişleyerek ve soğuyarak son bulacaktır. Evren'in yoğunluğu, karanlık madde dikkate alınsa bile, çok düşüktür; kritik düzeyin altındadır. Astronomlar, yoğunluğu tam kritik değerde, büzülmeyle genişleme arasında bir Evren düşünmektedirler. Evren'in yoğunluğunun kritik değerde olması için, üç nötrinonun kütlelerinin toplamı 40 eV civarında olmalıdır.

Üçüncü bir soru 4 temel etkileşimin nasıl birleşeceğidir; yani Büyük Birleşme. Bu kuram nötrinoların kütlelerinin çok küçük olmasını açıklayabilmektedir. Nötrinoların bir kütlesinin olduğunun anlaşılması Büyük Birleşme'ye doğru bir adımdır.

Seçuk Alsan

Kaynaklar
La Recherche, Eylül 1998
Science et Vie, Ağustos 1998
Crozon, M., Vannucci, F., *Les Particules Élémentaires*, PUF, 1994
Tran Thanh Van, *Neutrinos, dark matter and the Universe*, Editions Frontières, 1996
Winter, K., *Neutrino Physics*, Cambridge University Press, 1991.

