NÖTRİNO

Frank Close



NÖTRİNO

1985 yılında çalışmalarına başlayan ***Elginkan Vakfı****, Elginkan Ailesi'nin kurmuş olduğu sanayi kuruluşlarını ebedileştirmek ve ülkemizin özellikle kültür, eğitim, bilim ve teknoloji alanlarında ilerlemesine destek olmak amacıyla kurulmuştur.*

Elginkan Vakfının amaçları:

- *Kültür değerlerimizi, tarihimizde bizi büyüten örf, adet ve manevi değerlerimizi ve Türkçemizi araştırmak, araştırmaları desteklemek, korumak, yaşatmak ve tanıtmak,*
- *Bilim, teknoloji ve eğitim alanındaki faaliyetleri teşvik etmek,*
- *Ülke sanayinin ihtiyaç duyduğu vasıflı işgücünün yetiştirilmesine ve bu suretle ülkenin istihdam imkânlarını artırıcı eğitim çalışmalarına katkıda bulunmak için okullar, eğitim kurumları açmak, işletmektir.*

Eğitimi geleceğin yatırımı olarak gören Elginkan Vakfı, ülke sanayinin ihtiyaç duyduğu vasıflı işgücünün yetiştirilmesine katkıda bulunmak üzere 1994 yılında Manisa Ümmehan Elginkan Mesleki ve Teknik Eğitim Merkezi'ni, 2003 yılında Elginkan Vakfı Bolu Mesleki ve Teknik Eğitim Merkezini ve 2006 yılında İzmit Ahmet Elginkan Mesleki ve Teknik Eğitim Merkezini Türk halkının hizmetine sunmuştur. Bu üç Eğitim Merkezinde bugüne kadar yaklaşık 300.000 kişi ücretsiz eğitim almıştır.

Elginkan Vakfı eğitime katkı faaliyetleri kapsamında; Cahit Elginkan Anadolu Lisesi, İTÜ Ekrem Elginkan Lisesi, Ümraniye Elginkan Vakfı Anasınıfları Binası, E.C.A. Elginkan Anadolu Lisesi, E.C.A. Elginkan İlköğretim Okulu, Ümmehan Elginkan Kız Öğrenci Yurdu ve Yemekhane Binası ve E.C.A. Elginkan Anadolu Lisesi bahçesine Hüseyin Cahit Elginkan Spor Salonunu yaptırarak eğitim camiasına bağışlamıştır.

Elginkan Vakfının *başarılı ve maddi imkânları yetersiz lisans düzeyinde öğrenim gören üniversite öğrencilerine yönelik burs programının yanında Türk Dili ve Edebiyatı alanındaki çalışmaları desteklemek amacıyla, Türk Dil Kurumu ile işbirliği içerisinde yürüttüğü Lisansüstü Burs programı da mevcuttur. Geleceğe yatırımın bir diğer bileşeni ise bilimdir. Vakfın 2006 yılında uygulamaya koyduğu Elginkan Vakfı Türk Kültürü ve Teknoloji Ödülleri Programı ile bu alanlardaki çalışmalara katkıda bulunmayı hedeflemektedir.*

Elginkan Vakfı, Boğaziçi Üniversitesi Yayınevi'nin yayımladığı bu ve benzeri bilimsel kitaplara destek olmakta ve bu eserlerin gençlerimiz tarafından da ilgi görmesini amaçlamaktadır.

Elginkan Vakfı

Zeynep Alpar (1982), lisans eğitimini 2004 yılında sosyal antropoloji alanında, yüksek lisans eğitimini ise 2009 yılında sosyoloji alanında tamamladı. Sosyal araştırmalar ve sivil toplum kuruluşlarında çalışmanın yanı sıra, İngilizce ve Türkçe dillerinde çift yönlü çeviri yapıyor.

NÖTRİNO

Frank Close

Çeviren: Zeynep Alpar

BOĞAZİÇİ
ÜNİVERSİTESİ
YAYINEVİ

Frank Close
Neutrino
© Frank Close 2010

Nötrino
© BÜTEK A.Ş. 2015. Tüm hakları saklıdır.

ISBN 978-605-4787-55-5

BÜTEK Boğaziçi Eğitim Turizm Teknopark Uygulama
ve Dan. Hiz. San. Tic. A.Ş.
Boğaziçi Üniversitesi Güney Kampüs, 7. Lojman,
3. Kat, P.K. 34342, Bebek-Beşiktaş/İstanbul
Telefon: (0212) 359 46 30

Yönetim Yeri:
Boğaziçi Üniversitesi Yayınevi
Boğaziçi Üniversitesi Uçaksavar Kampüsü
Garanti Kültür Merkezi, Arka Giriş
Etiler/İstanbul

bupress@boun.edu.tr
www.bupress.org
Telefon ve faks: (212) 257 87 27
Sertifika No: 10821

Genel Yayın Yönetmeni: Murat Gülsoy
Yönetici Editör: Ergun Kocabıyık
Baskıya Hazırlayan: Meltem Aravi
Kapak Tasarımı: Kerem Yeğin
Baskı: Acar Basım ve Cilt Sanayi Ticaret A.Ş.
Beysan San. Sitesi Birlik Cad., No: 26
Acar Binası, Haramidere, İstanbul
Telefon: (0212) 422 18 00
Sertifika No: 11957

Birinci Basım: Temmuz 2015 (2.000 adet)

İçindekiler

Ray Davis, ix

Önsöz, xi

1. ÇARESİZLİĞİN ÇARESİ, 13
Radyoaktivite, 15 ❖ Alfa Beta Gama, 17 ❖ $E = mc^2$, 22
❖ Pauli ve Nötrino, 25.

2. GÖRÜNMEYENİ GÖRMEK, 31
Fermi'nin Teorisi, 33 ❖ Nötrino Gerçek
Olmaya Başlıyor, 37.

3. PİYANGOYU KAZANMAK, 41
Bruno Pontecorvo, 41 ❖ Karşınızda Ray Davis, 46
❖ Poltergeist Projesi, 49.

4. GÜNEŞ HÂLÂ PARLIYOR MU?, 54
Kocaman Alev Topu, 55 ❖ Yeni Bir Enerji Kaynağı, 58
❖ Nükleer Güneş, 60.

5. GÜNEŞ'TEN KAÇ NÖTRİNO GELİR?, 69
İlk Fikirler, 69 ❖ Umudun Pırıltısı, 72
❖ Karşınızda John Bahcall, 75

6. YERİN ALTINDA BİLİM, 81
Çalışma Başlıyor, 85 ❖ Kaç SNU?, 86
❖ "Yüzme Havuzu Gelişmesi", 91

7. BİR, İKİ, ÜÇ, 95
Bunu Kim Ismarladı?, 96 ❖ Jack Steinberger, 99 ❖ İki Nötrinonun Hikâyesi, 103 ❖ Leon Lederman ve Mel Schwartz, 107 ❖ Ek: Üç Nötrino, 112.

8. YİNE YENİ KAYIP NÖTRİNOLAR, 114
Dünyanın Bütün Galyumları, 114 ❖ Güneş'in Nötrinoğrafı, 119 ❖ Nötrinolar Her Yerde Eksik, 124.

9. "ÖYLE SEVİNDİM Kİ, DANS EDESİM VAR", 126
Atmosfer Nötrinoları, 126 ❖ Osilasyon Yapan Nötrinolar, 129 ❖ SNO, 135.

10. GALAKSİNİN DIŞINDAN NÖTRİNOLAR, 140
Süpernova, 140 ❖ Osilasyon Yapan Nötrinolar, 146 ❖ MINOS, 149 ❖ "Gelecekten Dönen" Nötrinolar, 152.

11. YENİDEN, 157
Reines'in "Daha"sı, 158 ❖ Japonya'dan Koşiba, 159 ❖ Davis ve Bahcall, 163 ❖ Bruno Pontecorvo, 164 ❖ Güneşin Batışı, 167.

Dizin, 171

Ray Davis

Sıradan ışıktan çok daha derinlere işleyen X ışınlarıyla elinizin içini görebilirsiniz. X ışınlarından da daha derinlere işleyen nötrinolarla Güneş'in içini görebilirsiniz.

(Nobel Ödül Töreni, 2002)

Ray Davis, bir yıldızın içini gören ilk kişiydi. Güneş'in kalbinde üretilen ve uzaya yayılan hayalet parçacıkları, nötrinoları yakalayarak yaptı bunu. Siz bunları okurken milyarlarca nötrino gözlerinizin içinden, hiç görülmeden, neredeyse ışık hızıyla geçip gidiyor.

Nötrinolar, bildiğimiz her şey içinde, hiç ol(ma)maya en yakın olanlardır, öyle ele avuca gelmez şeylerdir ki, görünmez sayılırlar. Davis 1960'ta güneş nötrinolarını aramaya başladığında, çoğu kişi onun imkânsız bir şey peşinde olduğunu düşünmüştü. Az daha, sahiden de imkânsız olacaktı: Davis'in haklı olduğu ancak 40 yıl sonra anlaşıldı; bunun üzerine 2002'de Nobel Fizik Ödülü'nü aldığında Ray Davis 87 yaşındaydı.

Nötrinoyla ilgili işlerde uzun soluklu olmak kıymetlidir. Herkes bu kadar talihli olamaz.

ÖNSÖZ

Haziran 2006'da *The Guardian* gazetesi, Ray Davis'in ölümü ardından onun hakkında bir yazı istedi benden. Bu yazım ertesi sene "bilim dışı bağlamda en iyi bilim yazısı" ödülü aldığında hem şaşırdım, hem şeref duydum. Eminim ki bunun bir nedeni, Davis'in olağanüstü kariyerinin kendi kendisini yazmasıdır.

Davis'in ardından yazdığım yazı elbette tek kişiye odaklanmıştı, ama güneş nötrinoları destanı birkaç kişinin daha hayatına değiyordu. Bütün kariyerlerini bu uçar kaçar avın peşinde geçiren o bilim insanları Nobel Ödülü'nü şaka gibi tesadüflerle, şans eseri ya da daha trajik olarak, ölüp gittikleri için alamadılar. Çünkü bu arayış yarım yüzyılı devirdi; Davis Nobel'ini 87 yaşındayken aldı. Hepsi arasında en trajik hikâye de Bruno Pontecorvo'nunkidir herhalde. *Nötrino*'yu yazmaya başlarken bunun Ray Davis'in hikâyesi olacağını düşünüyordum, ama sahne arkasında Pontecorvo'nun varlığı o kadar hissediliyordu ki, onun da hikâyesi oldu bu kitap; ve Davis'in ömür boyu birlikte çalıştığı ama çoğu insanın beklemediği şekilde, Nobel Ödülü'ne dahil edilmeyen John Bahcall'ın da. İşte bu yüzden, ömürleri bilimin ne olduğunu anlatan, Thomas Edison'ın dehanın "yüzde 1'i ilham, yüzde 99'u terdir" sözünü doğrulayan o üç büyük bilim insanının anısına adıyorum bu kitabı.

Kariyerleri nötrinolara odaklanan dört meslektaşıma, yaşadıklarını bana anlatan ve bazı yanlış anlamalarımı düzelten Nick Jelley, Peter Litchfield, Don Perkins ve Jack Steinberger'a özellikle müteşekkirim. Eğer başarılı olamadıysam hata onlara değil bana aittir.

Oxford, Ekim 2009
Frank Close

1

ÇARESİZLİĞİN ÇARESİ

Evreni oluşturan her şey içinde en çok bulunanı ve en tuhafı, nötrinodur. Sisin içinden geçen kurşun misali dünyanın içinden geçip gidebilen nötrinolar öyle çekingen ki keşfedileli yarım asır olmasına rağmen, onları şimdiye dek görülen diğer bütün maddelerden daha az biliyoruz.

Bu hayal gibi varlıkların bir kısmı bastığımız yerden geliyor, kayaların doğal radyoaktivitesinden yayılıyor, bir kısmı da kendi bedenlerimizin radyoaktivitesinden kaynaklanıyor; ama bu civarlarda gezinen nötrinoların çoğu, on dakikadan kısa süre önce, Güneş'in kalbinde doğdu. Güneş'in birkaç saniyede yaydığı nötrinoların sayısı, dünyanın bütün sahillerinde ve çöllerindeki kum tanelerinden, hatta gelmiş geçmiş bütün insanların bedenlerindeki atomların sayısından daha fazla. Nötrinoların bir zararı yok: hayat zaten bu nötrino fırtınasının içinde evrimleşti.

Nötrinolar neredeyse Dünya'nın içinden geçtikleri kolaylıkla Güneş'in içinden de geçiyorlar. Güneş'in kalbinde doğduktan birkaç saniye sonra nötrino kalabalıkları yüzeyden kaçmış, uzaya akmış oluyor. Nötrinoların gözüyle görseydik eğer, geceler gündüz gibi aydınlık olurdu: Güneş'ten gelen nötrinolar gündüzleri başımızdan aşağı, geceleri yataklarımızdan içeri pırıl pırıl, hiç kararmadan akıyor.

Sadece Güneş değil, çıplak gözle görebildiğimiz her yıldız ve yalnızca en güçlü teleskoplarla görülebilen bütün diğer yıldızlar, boşluğu nötrinolarla dolduruyorlar. Uzayın

derinlikleri, Güneş'ten ve yıldızlardan uzak yerler, her yer nötrino kaynıyor.

Siz bile nötrino üretiyorsunuz. Kemikleriniz ve dişlerinizdeki potasyum ve kalsiyumun azıcık radyoaktivitesi nötrino üretiyor. Yani siz şimdi bunları okurken bir yandan da evreni aydınlatmaktasınız.

Her şey hesaplandığında, nötrinoların toplam sayısı bildiğimiz diğer bütün parçacıklardan daha fazla, hele hele yıldızları, sizi bizi, görünen maddeleri oluşturan elektron ve protonların sayısından çok çok daha fazla. Eskiden nötrinoların kütlesi olmadığı ve ışık hızıyla yol aldıkları düşünülüyordu; bugün biliyoruz ki kütleleri var, fakat o kadar küçük ki şimdiye kadar ölçebilen olmadı. Tek bildiğimiz, eğer elimizde atomaltı boyutlar için terazimiz olsaydı, bir tanecik elektronu dengelemek için karşısına en az yüz bin nötrino koymamız gerekecekti. Buna rağmen, sayılarının bu kadar fazla olması sayesinde nötrinoların toplamı evrendeki görünür maddelerin tamamından daha ağır basıyor.

Güneş'ten gelen ve siz bunları okumaya başladığınızdan beri içinizden geçip gitmiş olan nötrinolar Mars'ı çoktan geride bıraktı bile. Birkaç saat içinde Güneş Sistemi'nin bizden çok uzaktaki sınırlarını aşıp, sınırsız evrende devam edecekler yollarına. Eğer nötrino olsaydınız belki de ölümsüz olacak, milyarlarca yıl boyunca atomlarla hiç çarpışmayacaktınız.

Uzayın derinliklerindeki bir nötrinoya tarihini sorabilseniz, kuvvetle muhtemeldir ki o nötrinonun evrenin kendisiyle yaşıt olduğunu öğrenirsiniz. Güneş'te ve yıldızlarda doğan, sayılamayacak kadar çok nötrino, buralarda nispeten yeni sayılır. Nötrinoların çoğu Büyük Patlama'nın fosil kalıntılarıdır; 13 milyardır kimselere görünmeden uzayda dolaşıp duruyorlar.

Nötrinolar evrenimizde sadece birer seyirci gibi geziniyorlar, sanki biz burada yokuz. O kadar çekingenler ki, onların varlıklarından haberdar olmamız bile olağanüstü aslında. Bu hayalet gibi, görünmeyen 'hiçlik parçaları' na-

sıl oldu da kendilerini ele verdiler? Doğanın onlara neden ihtiyacı var? Ne işe yarar bunlar?

Doğa sırlarını iyi saklar, ama ipuçları vardır; mesele o ipuçlarını fark etmeye ve takip etmeye hazır olmaktır. Beş milyar yıl önce, süpernovanın birinden gelen elementler kokteyli yeni doğmuş Dünya'nın kayaları üzerinde katılaşırken radyoaktif atomlar da orada sıkışıp kaldı. Radyoaktivite, atomların çekirdekleri kendiliklerinden şekil değiştirdikleri zaman gerçekleşir: granit sonsuza kadar aynı kalmaz. Çünkü Dünya var olduğundan beri, onun kabuğundaki minerallerin içinde donmuş uranyum ve toryum atomları aşınıyor, daha hafif elementlere dönüşüyor ve periyodik cetvelde adım adım aşağı inerek kararlı kurşun atomları haline geliyorlar. İşte nötrinolar, radyoaktivitenin doğal kronometresinde, bu akış içinde doğuyorlar. Hikâyemiz de burada başlıyor.

RADYOAKTİVİTE

Bilimde şans başrollerden birini oynar, ama pırıltılı ödülleri almak için doğru zamanda doğru yerde olmak yetmez; mutlu tesadüflerin size sunduğu hediyeyi tanıyabilmeniz de gerekir. Eğer Röntgen, Kasım 1895'te karanlık laboratuvarının kapısını kapatırken göz ucuyla içeri bakmasaydı ya da bir an dikkatini çeken o hafif ışıltının hiç üstünde durmasaydı, X ışınlarını [röntgeni] keşfedemezdi. Röntgen, elektron akımının cama çarptığında, deri gibi katı maddelerin içinden geçebilen gizemli ışınlar üretebildiğini keşfetti. Kırık kemikleri fotoğrafik emulsiyon üstüne düşen gölgeler olarak gösterebilen bu garip olgu modern atom bilimlerinin başlangıcı oldu ve radyoaktivitenin keşfiyle sonuçlanan çalışmalara ilham verdi.

Şans burada da devredeydi. X ışınlarına dair haberler büyük etki yarattı, Fransa Bilimler Akademisi'nin 20 Ocak 1896 tarihli toplantısının gündemine oturdu. O toplantıda bulunanlardan biri olan Henri Becquerel, babası gibi

fosforesansla, yani bazı maddelerin ışığa maruz kaldıktan sonra ışık vermesiyle (aslında, radyasyon biriktirmesiyle) ilgileniyordu. X ışınlarının tam olarak ne olduğuna dair kimsenin net bir fikri yoktu ama acaba Röntgen'in kullandığı cihazdaki camın fosforlanmasıyla ilgili olabilirler mi diye bolca tartışma dönüyordu. Becquerel burada tam kendisine göre bir bulmaca olduğunu hemen anladı. Yıllar önce babasıyla beraber hazırladığı bazı fosforesan kristaller vardı, Becquerel bunlardan bazılarının X ışını yayıp yaymadığına baktı. Potasyum, sülfür ve uranyum içeren bir örnekti elindeki.

Bu Becquerel'in başına konan ilk talih kuşuydu. Uranyumun bu işte çok önemli bir element olduğu anlaşılacaktı.

Fosforesans maddeyi, ışıktan korunmak için kağıda sarılmış fotoğrafik bir levha üzerine yerleştirip, bunları güneşte bıraktı. Güneş ışığı fosforesan maddeleri harekete geçirecek, ama levhaları etkilemeyecekti; bu yüzden, filmi banyo ettiğinde puslu bir görüntü alınca heyecanlandı Becquerel. Maddeyle levha arasına metal bir parça yerleştirdiğinde levhanın hatları da açıkça görülüyordu. Becquerel'in ilk aklına gelen, güneş ışığının X ışınlarının yayılmasına yol açtığıydı; X ışınları kağıttan geçebiliyor ama metalden geçemiyor, böylece metalin gölgesi çıkıyordu.

Biraz daha şans, hikâyeye işte bu noktada girdi. Tipik kış havası bastırdı ve şubat ayının ikinci yarısında Paris'te hava birkaç gün boyunca kapalıydı. Güneş ışığı olmadan Becquerel elindeki örneği harekete geçiremezdi; fosforesansı, dolayısıyla X ışınlarını tetiklemek mümkün olmayacaktı, Becquerel'in düşüncesine göre. Örneği dolaba koyup bol ışıklı bir gün bekledi, ama o gün bir türlü gelmedi. Becquerel sonunda beklemekten sıkılıp vazgeçti ve 1 Mart'ta levhayı yine de banyo etmeye karar verdi. Oğlu, silüet görüntülerinin o ayın başında güneş ışığı altında elde edilenlerden daha da yoğun olduğunu gören

Henri'nin "hayretler içinde kaldığını" yazdı.[1]

O ışıma (radyasyon) her neydiyse, günışığına ihtiyacı yoktu. Kendiliğinden oluyordu, tetikleyici bir şeye gerek duymaksızın. Bu büsbütün yeni bir şeydi. Röntgen'in gördüğü X ışınları, önce elektrik akımının cama enerji vermesinin sonucuydu; fosforesans günışığının maddelere enerji vermesinin sonucuydu; Becquerel'in radyasyonuysa bedavadan oluyor gibiydi.

Becquerel'e iki talih kuşu konmuştu: tetiklenmeye ihtiyaç duymaksızın radyasyon yayan uranyumu kullanıyordu ve karanlık günler mecazi anlamda bunu aydınlatmıştı. Bir diğer talih kuşu da, gördüğü sislenmenin kalitesiz levhalar kullanmaktan olduğunu varsayma hatasına düşmemesiydi. Bu da elbette mümkündü, hatta kuvvetle muhtemeldi, Becquerel'in metali kullanması bu yüzden kritikti; metalin net gölgesi yukarıdan gelen gerçek ışınlar olduğunu, fotoğrafta görülen görüntünün levhayla ilgili bir kararına olmadığını gösteriyordu. En azından bu şans değil, bilimin dikkatle uygulanmasının örneğiydi ve bunun sonucunda Henri Becquerel radyasyonu keşfetti.

Fakat ona bu ismi vermedi (isim daha sonra Marie ve Pierre Curie tarafından verilecekti), ne olduğuna dair bir ipucu da yoktu. Hakikaten de pek çok kişi Becquerel'i görmezden geldi. Son birkaç senede floresans ve X ışınları gibi yeni ve tuhaf birkaç olgu görülmüştü zaten, dolayısıyla yeni bir ışıma türü çok da özel görünmüyordu. Ama bu seferki, çok önemli olduğunu gösterecekti.

ALFA BETA GAMA

Dedektif hikâyelerinde, mükemmelen işlendiği zannedilen suç, olay yerinde bırakılan çok küçük bir ipucunun izi sürülerek çözülür. Becquerel de bir fotoğrafik levhada basit bir leke görmüştü, öyle belli belirsizdi ki bu, rahat-

[1] Aktaran: A. Pais, *Inward Bound*, Oxford University Press, Oxford, 1986.

lıkla gözardı edilebilirdi. Fakat doğanın, radyasyonun bu belli belirsiz izinde, evrenin başlangıcının sırlarına giden yolu gösterdiği ortaya çıkacaktı. Elbette o sırada bunu ne Becquerel biliyordu, hatta aklının ucundan geçirebiliyordu, ne de bir başkası. Elindeki tek şey sisli bir görüntüydü ve hemen bulması gereken şey de bunun neden olduğuydu.

Marie ve Pierre Curie, radyasyonun kaynağını bulmak için uraninitteki (radyoaktif bir madde) elementleri ayrıştırdılar; hangi maddelerin daha radyoaktif olduğunu bulup, radyasyon konsantrasyonu artana kadar onları seçmeli olarak rafine ediyorlardı. Böylece Marie son derece radyoaktif yeni bir element olan polonyumu buldu. Ondan da iyisi, radyumu buldu. Eğer o zaman kadar radyoaktivitenin gerçek olduğuna dair herhangi bir anlaşmazlık kaldıysa, radyumun keşfiyle bütün şüpheler dağıldı. Radyum o kadar radyoaktiftir ki elinizde tuttuğunuzda sıcaklığını hissedersiniz. Bu ısı radyoaktivitenin maddeden kendiliğinden, sürekli olarak enerji açığa çıkardığını gösterir. Marie Curie bu gücün ne demek olduğundan habersizdi; radyasyonun vücut üzerindeki etkisi anlaşılana kadar daha birkaç sene geçecek ve o zaman Marie Curie için çok geç olacaktı: Curie radyasyon zehirlenmesinin belirtilerini göstermeye başlamıştı bile.

Radyumun keşfinin iki önemli sonucu oldu. Öncelikle, Curielerin verdiği isimle radyoaktivitenin, uranyumunkinden ibaret bir etki olmadığını ortaya koydu; radyoaktivite doğanın bir özelliğidir ve bazı elementlerin bir uyarı olmaksızın kendiliğinden enerji yayabilmesi anlamına gelir. İkincisi, bilim artık fotoğrafik levha üstündeki bulanık izlerle sınırlı değildi; radyumun radyoaktivitesi o kadar kuvvetliydi ki etkileri hissedilebiliyor, ölçülebiliyor ve analiz edilebiliyordu. Bilim artık kendi inceleme yöntemleriyle ilerleyebilirdi.

Radyasyonun doğasını saptayan ve neredeyse tek başına açıklayan kişi Ernest Rutherford'dur. Memleketi Yeni Zelanda'da öğrenciyken, 1895'te, Marconi'den çok önce,

radyo dalgalarının nasıl tespit edileceğini buldu.[2] 1851 Fuarı'nın adıyla anılan ve yeni mezunların eğitimlerini yurtdışında devam ettirebilmelerine imkân veren burs için açılan yarışmada Rutherford ikinci oldu. Rutherford'un şansına, bilim tarihindeki önemi sonradan anlaşılacak bir olay oldu ve o yılın birincisi olan J. C. Maclaurin ailevi nedenlerle Yeni Zelanda'da kalmaya karar verdi. Böylece bursu Rutherford aldı ve Eylül 1895'te, radyo üstüne çalışmak niyetiyle Cambridge'e tam zamanında vardı. Rutherford'un planı böyleydi ama Röntgen de tam o dönemde X ışınlarını keşfetmiş, ardından Becquerel radyoaktiviteyi bulmuştu. Cambridge'deki grubun başkanı olan ve elektronu keşfetmek üzere olan J. J. Thomson, Rutherford'a bu yeni ışımalar üstüne çalışması teklifinde bulundu. Dönemin önde gelen bilim insanı olan Lord Kelvin'in de sonradan meşhur olan "radyoda gelecek yok" görüşünü bildirmesi üzerine Rutherford'un yolu çizilmiş oldu.

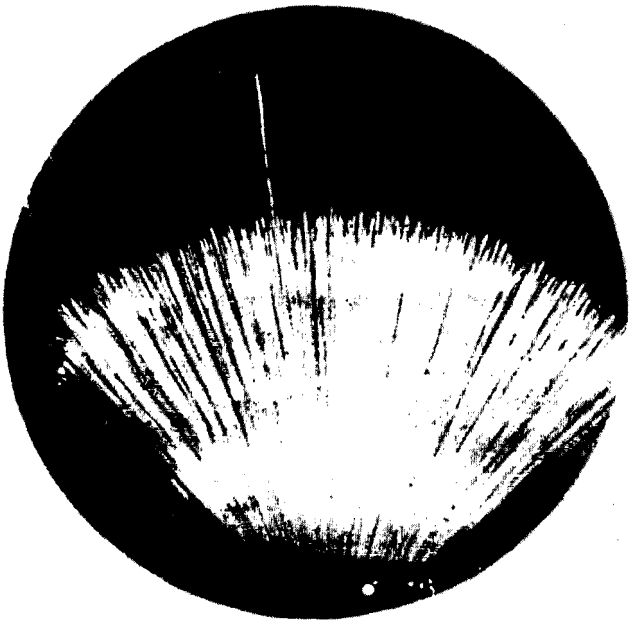
Böylece Rutherford atomun iç labirentlerinde yol aramaya koyularak Lord Kelvin'in yanıldığını ispat etme işini Marconi'ye bıraktı. Eğer radyonun tarihinde Marconi'nin yerini Rutherford alacak olsaydı, radyoaktivitenin doğası, atom çekirdeği, elementlerin birbirine dönüşmesi ve atomun içindeki güç üzerine, hepsi de Rutherford'un adıyla anılan keşifler herhalde başkalarına kalacaktı. Rutherford'un bilimin bu yeni alanına ilk katkısı, radyoaktivitenin herkesin sandığından daha fazla sürpriz sunduğunu kanıtlamak oldu. İlk olarak, radyoaktivitenin üç farklı biçimi vardı.

[2] Bu arada Oliver Lodge'dan da söz etmem gerek. Lodge 1888'de elektromanyetik dalgaları Hertz'den önce üretti ve tespit etti, fakat bu buluşunu yayımlamak yerine tatile gitti. Bu konuda ilk yayını Hertz yaptı ve elektromanyetik dalgalarla anılan isim onunki oldu. 1894'te İngiltere Bilim Derneği'nin Oxford'daki toplantısında Lodge sinyallerin (Mors alfabesinden biraz daha ileri seviyedeydiler) 50 metreden uzun mesafeye iletilebileceğini gösterdi. Bu olgunun işe yarar bir uygulamasını göremediğini daha sonra itiraf etti, Lodge kablosuz iletişimdeki potansiyeli fark edememişti.

Radyasyonun bir kısmını neredeyse anında kesmek için ince bir kağıt yeterlidir. "Bir kısmını" diyorum çünkü daha derine işleyen bir miktar radyasyon kalıyor ve bu ancak zamanla sona eriyordu. Rutherford uranyumu ince alüminyum folyolarla sarıp folyoların sayısını artırarak, bu biçimleri şaşırtıcı bir sadelikle ortaya çıkardı. İlk üç folyoda, radyasyonun gücünün giderek azaldığını gördü: alüminyum tabakası kalınlaştıkça, onu aşan radyasyon azalıyordu. Fakat folyo katlarını artırdığında radyasyon yoğunluğunu koruyor gibiydi, ancak birkaç kat daha folyo sarılmasıyla, yavaş yavaş azalıyordu. Anladı ki "en az iki farklı radyasyon türü olmalıdır –çok kolaylıkla emilen ve anlama kolaylığı açısından alfa radyasyonu adı verilecek olan tür ile, daha derine işleyen özellikteki, beta radyasyonu adı verilecek olan tür." Daha sonra üçüncü bir tür daha tanımlayıp ona da gama adını verdi.

Bugün bu üç radyasyon türüne üç farklı kuvvetin neden olduğunu biliyoruz. Bunlar sırasıyla güçlü, zayıf ve elektromanyetik kuvvetler. Bunlar kütleçekimi kuvvetiyle birlikte doğanın dört temel kuvvetini oluşturuyor, atomları ve toplu haldeki maddeyi inşa ediyor ve evrenin işleyişini kontrol ediyor. Rutherford'un yaptığı ilk atom deneylerinde bunları birbirinden ayırt etmesi olağanüstü bir işti.

Bir şeylere isim takmak onları anlıyormuşuz gibi bir yanılsama yaratıyor; ama aslında tek yaptığımız sınıflandırmak. Yine de önemli bir ilk adım bu; farklı isimlerle anılan farklı özelliklere neyin neden olduğu gibi sorulara yol açıyor. O farklar, Charles Wilson'ın radyoaktif bir kaynağı "sis odası"nın içine koymasıyla kelimenin tam anlamıyla gözle görülür hale geldi. Odanın aşırı doygun buharı içinde hareket eden elektrik yüklü parçacıklar gelip geçici buhar izleri bırakır. Wilson bunları "küçük bulut saçları ve iplikleri" diye tarif etmişti. Alfa radyasyonu belirgin, kalın izler bırakırken betanın izleri daha ince, daha saç gibiydi, gama ışınlarıysa hiçbir iz bırakmıyor ama atomlardaki elektronlara çarpıp bunları harekete geçirmekle varlıklarını gösteriyorlardı. Manyetik alanlar bu izleri eğip büküyor ve



Şekil 1: Sis Odasındaki izler. © N. Feather / Science Photo Library.

böylece alfa radyasyonunun pozitif, beta radyasyonunun negatif yüklü parçacıklardan oluştuğunu ortaya koyuyordu; gama ışınlarının izi olmamasının nedeni de elektrik yüklerinin olmamasıydı. Rutherford heyecanla "nihayet atomun içine bakacak bir teleskopumuz oldu" dedi.

Alfa parçacıklarının görece daha ağır olduğu anlaşılıyordu; zira şimdi bildiğimiz üzere, atom çekirdeğinin parçacıklarıdır bunlar. Atom çekirdeğini birarada tutan güçlü kuvvetin kesilmesiyle yayılan, iki proton ve iki nötrondan oluşan sıkı topaklardır. Bu olay olduğunda, ağır bir elementin büyük çekirdeği, o sıkı topağı yani alfa "parçacığını" dışarı atmakla, daha küçük ve azıcık daha hafif bir elemente kendiliğinden dönüşmüş olur. Pozitif yüklü olan alfa parçacığı negatif yüklü iki tane elektronu kendine çekebilir ve böylece bir helyum atomu oluşur. Dünyada bazı kayaların içinde bulunan helyum gazının, bu

şekilde gerçekleşen nükleer dönüşümler sonucu oluşmuş olduğunu biliyoruz bugün.

Rutherford daha sonra atom çekirdeğini keşfederek meşhur oldu ve bu keşfinde alfa parçacıklarını atomun uyduları olarak kullandı.[3] Beta radyasyonu elektronlardan oluşur, atomda önceden var olan elektronlar değil, çekirdeğin dönüşümü (simya!) sırasında açığa çıkan enerjiyle oluşan[4] elektronlardır bunlar. Gama ışınları gökkuşağının çok ötesinden ışık parçacıklarıdır, dalga boyları gözle görülen ışığınkinden çok daha kısadır. Radyasyonun üç çeşidi böylece tanımlandı ama beta radyoaktivitesinin içinde bir hayaletin saklandığı kimsenin aklına gelmedi.

$E = mc^2$

17. yüzyılda Isaac Newton enerjinin önemini anlamıştı. Bir şeyi itersiniz, sürtünme yoksa o şey hareket etmeye başlar. İtmeye devam ederseniz hızlanır. Newton hareketin enerjisini, yani kinetik enerjiyi, iterken verdiğiniz güçle ve cismi itmeye devam ettiğiniz mesafeyle orantılı olarak tanımladı. Enerjinin kendini göstermesinin başka yolları da olduğunun farkındaydı Newton. Bir uçurumun kenarında duran cismin potansiyel enerjisi vardır: uçurumdan aşağı düşmesi halinde kinetik enerji kazanma potansiyeli. Potansiyel enerji yer seviyesinin üzerindeki yükseklikle orantılıdır: Ne kadar yüksekteyseniz potansiyel enerjiniz o kadar fazladır. Siz yere doğru düşerken kütleçekimi kuvveti sizi hızlandırır (ivme kazandırır). Potansiyel enerjinizi kaybettiğiniz oranda kinetik enerji kazanırsınız; enerjinin toplamı değişmez. Enerjinin korunumunun ve bir enerji çeşidinin diğerine dönüşmesinin basit bir örneğidir bu;

[3] Bu hikâye *Lucifer's Legacy* kitabımda anlatılmıştır, Oxford University Press, Oxford, 2000.

[4] İlk olarak Dmitrij İvanenko, tıpkı fotonların atomdaki geçişler sırasında oluşması gibi, elektronların da beta bozunması sırasında oluştuğunu, dolayısıyla atomun içinde "önceden var olmadıklarını" ortaya attı.

bu örnekte potansiyel enerji kinetik enerjiye dönüşür.

Enerjinin yeniden paylaşımının pek çok yolu vardır. 19. yüzyılda termodinamik (ısı ve hareketin bilimi) gelişti. Isı biçimindeki enerji kinetik enerjiye dönüşebilir. Buhar makinesi bu ilkeyle çalışır. Su kaynadığında su buharına dönüşür ve genleşir. Eğer bu genleşme, ucu hareket edebilen kapalı bir silindirin içinde gerçekleşiyorsa, buharın gücü pistonu hareket ettirebilir. Hareket eden uca bir çubuk takın, çubuğun diğer ucu da bir tekerleğin merkezden uzak kısmına takılı olsun, o zaman buharın genleşmesiyle tekerlek dönecektir. İşte bu yöntemle buhar makinesi, yüzlerce ton ağırlığındaki trenlerin saatte yüz kilometreden hızlı yol almasını sağlıyordu.

Buhar makinesinde ve sayılamayacak kadar çok örnekte, enerji bir biçimden öbür biçime geçmekte, ama toplamda korunmaktadır. Bu, termodinamiğin birinci kuralıdır ve koskoca sanayi kolları bunun üstüne kuruludur. Doğanın en temel, en etkili kanunlarından biridir.

Radyoaktiviteyle ilgili bunca heyecan verici şey oladursun, onlardan bağımsız olarak, 1905'te Albert Einstein, Özel Görelilik Teorisi'nin açıkladı. Teorinin en meşhur denklemi, $E = mc^2$, enerji ve kütle arasında çok önemli bir bağlantı olduğunu söyler: kütle [*mass*] (m) ile enerji (E) birbirine dönüşebilir ve değişim oranı da ışık hızına (c) göre belirlenir. Einstein'ın denklemi enerjiyi depolamanın ve transfer etmenin yeni ve çok önemli bir ifadesiydi ama burada da toplam enerji korunur.

Radyoaktivite, $E = mc^2$'nin nasıl işlediğine örnektir. Atomun çekirdeğindeki madde kendi kendini yeniden düzenlediğinde, az önce kütle içinde hapsedilmiş halde olan enerji aniden açığa çıkar. Işık –gama ışınları– olarak ışıyabilir; alfa bozunmasında olduğu gibi bir önceki çekirdeğin parçalarının savrulmasında kinetik enerjiye dönüşebilir; veya beta bozunmasında olduğu gibi yeni madde biçimlerinde katılaşabilir.

Alfa ve gama bozunmalarında enerji hesapları düzgündü, ama beta bozunmasında hesaplar tutmaz gibiydi.

Radyoaktif bir çekirdeğin bozunduğu her seferde tek bir parçacık yayılıyorsa, enerjinin korunumu gereği bunun enerjisinin tek bir değeri vardır. Alfa ve gama bozunmalarında görünen de budur, fakat 1914'te James Chadwick'in keşfettiği üzere, beta radyasyonun enerjisi bir ölçümden diğerine değişiyordu. Elektronlar, her zaman aynı enerjiye sahip olacaklarına, enerji değerlerinden oluşan kesintisiz bir aralık içinde ortaya çıkıyorlardı; kimi zaman hiç enerjileri olmuyor, kimi zaman da enerjileri maksimum değerlere çıkıyordu.

Rutherford'un merkezdeki çekirdeğinin etrafında, "yörüngeler üstünde dönen" elektronlar modelinin babası Niels Bohr, bu otoritesiyle radikal bir öneri ortaya attı: beta bozunmasında enerji korunmaz.

Önerme yüzyılların tecrübesine ters düşüyordu, çaresizlikten ortaya atılmıştı. Avusturyalı teorisyen Wolfgang Pauli bunu kabul etmedi ve olaya başka bir açıklama getirdi. Beta parçacığının yanında "yeni nötr parçacıklardan oluşan, çok nüfuz edici başka bir radyasyon" bulunduğunu ortaya attı. Böyle bir durumda, enerji korunacak ama tek bir parçacık tarafından taşınmak yerine iki parçacık arasında paylaşılıyor olacaktır. Pauli'nin teorisine göre, görünen parçacık, yani beta, bazen oradaki enerjinin tamamını taşıyarak görünmez nötr partnerine hiçbir şey bırakmıyor, bazen de görünmez olanı enerjinin bir kısmını alarak beta parçacığına daha azını bırakıyordu. Sonuç olarak, görünen beta parçacığıyla taşınan enerji, belli bir aralığın her yerinde olabilirdi, tek bir değerle sınırlandırılamazdı.

Kaideleri muhafaza eden ve verilerle de uyumlu olan bu görüş, ortaya atıldığı dönemde Bohr'un önerisinden daha fazla ilgi görmedi. Çünkü atomların doğasına dair yaygın görüşlere ters düşüyordu. O günlerde doğanın çeşit çeşit kumaşının hepsi sadece iki parçacıktan oluşuyor sanılıyordu: elektronlar ve de protonlar. Bu temel sadelik, maddenin kalbinde güzel bir birleşme olduğunu vaat ediyordu, sırf istisnai bir bulmacayı çözmek için ortaya

yeni bir parçacık çeşidi çıkarmak çoğu kişinin gözünde geçersizdi.

PAULI VE NÖTRİNO

Pauli 1900'de Viyana'da doğdu. Olağanüstü berrak bir zihni vardı; 19 yaşındayken özel göreliliğe dair en iyi açıklayıcı kitabı yazdı, yaklaşık yüz sene sonra bu kitap hâlâ klasiktir. Pauli, 22 yaşındayken doktorasını yapmış, kuantum mekaniğinin yeni kurulmakta olan temelleri üstüne çalışıyordu; daha sonra Nobel Ödülü'nü aldı.

Diğer bilim insanlarının çalışmaları hakkında yaptığı can yakıcı yorumlarıyla da meşhurdu Pauli, bir keresinde, çok belirsiz olduğu için test edilemeyen, dolayısıyla bilimde işe yaramayacak olan bir kavramı eleştirirken "yanlış bile değil" ifadesini kullanmıştı. İroniktir ki aynı eleştiri kendisinin, beta bozunması sırasında kaybolan enerjinin esrarına getirdiği çözüm için de pekâlâ yöneltilebilirdi: görünmez bir parçacık olduğunu iddia etmekle kalmayıp, bu varlığı kimsenin bulamayacağına dair bir kasa şampanyasına bahse bile girdi.

Rutherford'un deneylerinin atom çekirdeğinin bileşen parçacıklardan oluştuğunu göstermesinin ardından, dünyadaki genel görüş o parçacıkların protonlarla elektronlar olduğuydu. Rutherford'un kendi de öyle düşünüyordu. Proton, en basit atom olan hidrojenin ortasındaki kocaman merkezdi; ama Rutherford, daha ağır elementlerin çekirdeklerinin kütlelerinin ancak kütlesi protona yakın olan nötr parçacıkların da işe katılmasıyla açıklanabileceğini anladı. Bu parçacıklara "nötron" dedi. Onun tasvirine göre nötron; proton ve elektronun sıkıca bağlı bir birleşimiydi.

Bu fikir 1927'de çöktü. Elektron ve protonun ikisinin de spin [dönü] yaptığı ve spin hızlarının da hep aynı olduğu bulundu. Kısa süre içinde bu konu matematikçi Paul Dirac tarafından, kuantum mekaniğinin ve göreliliğin bir

sonucu olarak, teoride açıklandı.[5] Açıklık kazanan bir başka şey de, nötronun elektronla protonun kombinasyonu olamayacağıydı. Bunun nedeni, "azot anomalisi" diye bilinen durumla ilgilidir.

Çeşitli atomların çekirdeklerinin spin yapma hızları ölçülmüş ve azotun çekirdeğinin spin yapan çift sayıda bileşen içermesi gerektiği gösterilmişti. Kimya, azot atomunun yedi elektron içerdiğini ortaya koymuştu; dolayısıyla elektrik yükünün dengelenmesi için atomun çekirdeğinde yedi proton bulunması gerekiyordu. Fakat hikâye bundan ibaret olsaydı eğer, azot atomu gerçekte olduğunun ancak yarısı ağırlığında olurdu. Bu yüzden işe yedi tane de nötron katıldı. Eğer nötronlar da protonlar gibi tekil varlıklar olurlarsa bu 7 + 7 = 14, çift sayı kuralını da sağlardı. Ama her nötron aslında bir çift olsa, bileşenlerin toplam sayısı 21, yani tek bir sayı çıkıyordu. Rutherford'un proton-elektron kombinasyonu tasviri gerçeklerle uyuşmuyordu demek ki.

Wolfgang Pauli hikâyeye bu noktadan dahil oldu; yeni bir nötr parçacık keşfediyor ve başlangıçta bunun bir taşla iki problemi çözdüğünü düşünüyordu.

Pauli bu fikrini 4 Aralık 1930 tarihli bir mektupta ortaya attı, mektubun asıl amacı Tübingen'de yapılan, radyoaktiviteyle ilgili bir toplantıya katılamayacağını bildirip özür dilemekti, "6/7 Aralık gecesi yapılacak bir balodan dolayı burada, Zürih'te olmam elzemdir" diyordu Pauli. Kısa ve öz olan sosyal yönü dışında mektup hem Pauli'nin fikrinin ne derece radikal olduğunu, hem de dönemin bilgi seviyesini ortaya koyuyor. Geriye bakıldığında, bilimin nasıl da deha ve kafa karışıklığının karmaşası içinde ilerleyebileceğini gösteriyor.

[5] Bunun açıklaması için *Antimadde* kitabıma bakın [Çeviren: Zeynep Alpar, Boğaziçi Üniversitesi Yayınevi, 2015 —*çev. notu*]. Dirac'ın hayat hikâyesi için bkz. G. Farmelo'nun *Paul Dirac* [*The Strangest Man*] kitabı [Türkçesi: Paul Dirac, çev. Zeynep Alpar, İş Bankası Kültür Yayınları, 2014 —*çev. notu*].

Pauli işe nükleer fizikteki meselenin ne olduğunu ele alarak başlıyordu: Azot çekirdeğinin özellikleri, çekirdeklerin sadece protonlardan ibaret olduğu fikrine uymuyordu. (Bu sorun sadece azotta görülmüyordu; lityumda da benzer bir anomali tespit edildi.) Pauli, Rutherford'un proton-elektron kombinasyonu modelinden vazgeçilip, nötr varlığın tek bir parçacık olarak kabul edilmesi ve elektrik bakımdan nötr olması dışında protonla bire bir aynı özellikleri taşıması durumunda taşların yerli yerine oturacağını fark etti. "Çekirdekte elektrik bakımından nötr olan parçacıklar vardır ki bunlara nötron demek isterim" diyerek ortaya koydu görüşünü. Parçacıkları protona benzeyen, ama elektrik yükü taşımayan şeyler olarak tanımladı ve "bunların ışık kuantumlarından farkı, ışık hızıyla yol almamalarıdır" diye ekledi. Protonun elektrik olarak nötr partneri olan iriyarı nötron kısa süre içinde, beta bozunmalarının anormal enerji davranışını 1914'te keşfeden kişi olan James Chadwick tarafından, 1932'de bulundu. Nötron bütün çekirdeklerin temel bileşenlerinden biridir (genellikle tek bir protondan oluşan hidrojeninki hariç). Bir atomun çekirdeğinde kaç tane proton olduğu, o atomun hangi elementin atomu olduğunu belirler. İzotop dediğimiz şeyse, belli bir sayıda protona sahip çekirdeğin, farklı sayıda nötrona sahip olmasıdır. Yani uranyum 235 de, uranyum 238 de izotoptur ve ikisi de 92 proton içerir (zaten 92 tane protonları olduğu için uranyumdur bunlar), fakat bu izotopların sırasıyla 143 ve 146 tane nötronları vardır, böylece atom çekirdekleri sırasıyla 235 ve 238 bileşenden oluşur. Nötron bugün nükleer fiziğin[6] en önemli parçacıklarından biridir.

Çekirdek için buraya kadar durum fena değil. Gelgelelim Pauli aynı nötronun beta bozunmasında da elektronla birlikte üretildiğini iddia etmişti. Bugün tanıdığımız nötron, Pauli'nin ilk önerdiğiyle (atom çekirdeğinin bir bileşeni olarak nötron) bire bir uyuşuyor, ama beta bo-

[6] "Çekirdek fiziği" anlamına gelir —*çev. notu.*

zunmasında karşımızda olan gizemli misafirle bu aynı şey değil; o parçacığa biz bugün nötrino diyoruz. Ama 1930'da Pauli bunların hiçbirini bilmiyordu. Aşağıdaki alıntıda görüldüğü gibi, oyuncuların ikisinden de nötron diye bahsediyordu[7] (onun ifadelerini aynen aktarıyorum ama daha sonra nötrino olarak anlaşılan şeyden bahsettiği yerde "nötron" kelimesini [...] içine aldım):

> Süreklilik arz eden beta tayfı böylelikle, beta bozunmasında elektrona ek olarak bir [nötron] yayıldığının ve [nötronla] elektronun toplam enerjisinin sabit olduğunun farz edilmesiyle anlaşılır hale gelecektir... Önerdiğim çarenin inanılmaz göründüğüne ben de katılıyorum, zira bu [nötronlar] gerçekten var olsaydı onları şimdiye kadar görürdük. Fakat ancak cüret eden kazanabilir... meseleye dair her çözüm önerisi tartışılmalıdır. O halde, sevgili radyoaktif insanlar, bakın ve karar verin.

Atom çekirdeğinin keşfinde Rutherford'la beraber çalışmış olan Hans Geiger de toplantıda bulunuyordu. Pauli'nin beta bozunmasındaki enerji hesaplarına dair çözümünün doğru olabileceğini fark etti ve ona bir mektup yazdı. Yıllar sonra Pauli, bu mektubu aldığında nasıl da heyecanlandığını anlattı, ama belki de bunun önemini o dönemde anlamamıştı; çünkü Geiger'ın mektubunun elimize ulaşan hiçbir nüshası yok.[8] Pauli'nin heyecanı, beta bozunmasındaki nötr parçacıkların, hipotezindeki çekirdek bileşeniyle, yani nötronla aynı olamayacağını artık anlamış olduğu için sönmüştü belki de. Çekirdek kütleleri, kütlesi protona eşit ya da en azından çok yakın olan nötr bir parçacığa ihtiyaç duyuyordu; Chadwick'in keşfetmek üzere

[7] Pauli'nin mektubu ve konunun tarihçesine dair kişisel görüşleri *Nötrino Physics*'teki teknik makalesinde yer alıyor, editör Klaus Winter, Cambridge University Press.

[8] W. Pauli, *Neutrino Physics*, ed. K. Winter, "Cambridge Monographs on Particle Physics and Cosmology" (1998), s. 14'te Pauli, "bu mektubun bir nüshasını saklayıp bana bıraktığı için Mrs. Meitner'a teşekkür ederim" diyor.

olduğu şey de buydu. Fakat Pauli'nin beta bozunması için sunduğu açıklama, hiç kütlesi olmayan, veya olsa olsa çok azıcık kütlesi olan bir nötr parçacık istiyordu.

Pauli başka bilim insanlarının buna nasıl tepki vereceğini görmek için fikrinden bahsetmeye devam etti. Fikri beğenen hemen hemen kimse yoktu, bu konudaki görüşler "sadece yanlış" ile "delice" arasında değişiyordu.[9] Taşların yerli yerine oturması, Pauli'nin Ekim 1931'de Roma'da bir toplantıda Enrico Fermi'yle konuşmasıyla başladı.

Pauli daha sonra Fermi için "fikrime derhal, canlı bir ilgi ifade etti" dedi. Niels Bohr pek o kadar etkilenmemişti. Temel sorunlara çözüm bulmak için yeni parçacıklar icat etmek onun tarzı değildi. Bohr atom fiziğinde enerji hesaplarının nasıl incelikli bir şekilde birbirlerinden borç alıp verebileceğini görmüştü; dolayısıyla atom çekirdeğinin atomunkinden de tuhaf dünyasında enerjinin korunumunun geçerli olması için bir sebep göremiyordu. Fermi ile Pauli bu alternatifi de tartıştılar ama beğenmediler. Bohr atom çekirdeğiyle ilgili süreçlerde elektrik yükünün korunuyor olmasını memnuniyetle kabul ediyorken enerji neden korunmasındı ki? Fermi, Pauli'nin fikrini daha makul buldu.

1932'de James Chadwick'in çekirdekte gerçekten de nötron olduğunu, ama bunun ağır bir şey olduğunu keşfetmesi, Pauli açısından karışık bir teşvik oldu. İyi haber, Pauli'nin haklı olmasıydı –en azından çekirdeki nötron konusunda. İşin kötü tarafıysa bunun aynı zamanda Pauli'nin beta bozunmasını açıklamak için istediği hafif parçacık olamamasıydı. Fakat nötronun ortaya çıkmasıyla atom parçacıklarının sayısı yüzde 50 artmış, bir parçacık daha ortaya atmak artık o kadar sapkınlık gibi görülmez olmuştu.

Chadwick'in çekirdekteki bileşeni bulmasıyla Pauli beta bozunması bilmecesinin çözümü olarak ortaya attığı

[9] G. Farmelo, *The Strangest Man* [*Paul Dirac*], s. 195.

parçacığa nötron demeyi bıraktı. Beta bozunması gerçekten de Pauli'nin düşündüğü gibi hafif bir nötr parçacık içeriyor, ama çekirdekte önceden bulunan bir parçacık değil bu. Bu parçacık için nötron adını kullanmayı hemen bırakan Pauli'nin buna alternatif başka bir isim önerisi yoktu. Ama Fermi'nin vardı. Pauli'nin önerdiği hafif nötr parçacığı iriyarı nötrondan ayırmak için ona "nötroncuk" lakabını taktı, İtalyanca olarak: *neutrino*.

2

GÖRÜNMEYENİ GÖRMEK

Belçikalı sanayici Ernest Solvay 1911'de dünyanın önde gelen yirmi kadar fizikçisini Brüksel'de bir konferansa davet etti. 20. yüzyıl boyunca bilimin akışını kaydetmekteki eşsiz rolüyle meşhur olacak "Solvay Konferansları"nın ilkiydi bu. 1927'de ve 1930'da konu kuantum mekaniğiydi; sahneye yeni fırlamış olan kuantum mekaniği, atomlardaki elektronların davranışını açıklamak için nicedir aranan denklemleri sunuyordu. 1933'teki konferansın konusunun kuantum mekaniğinin kimyadaki uygulaması olması planlanıyordu. Fakat beklenmedik keşiflerin art arda gelmesiyle plan son dakikada değişti. Pauli nötrinoyu 1930'da bulmuştu. 1932'de hem nötron, hem de antimaddenin ilk örneği (pozitron diye bilinen, elektronun pozitif dengi) bulundu. İlk "atom atıcı" ile yapılan deneyler atom çekirdeğinin kalabalık ve karmaşık bir yapısı olduğunu ortaya koydu; bu yapı hem insanların müdahalesiyle hem de kendiliğinden olan radyasyonla değişebiliyordu. 1933'te, Marie Curie'nin kızı Irene Joliot-Curie ile onun eşi Frédéric Joliot, bu gibi "yapay radyoaktivite" örneklerinde beta bozunmalarında pozitif yüklü pozitronun, tanıdık negatif yüklü elektronla aynı kolaylıkla üretilebildiğini gösterdiler. Bunun sonucu olarak, 22-29 Ekim 1933 haftasında dünyanın önde gelen fizikçilerinden yirmi dördü Solvay Konferansı'nda kuantum kimyasını değil, yeni bir bilimi konuşmak üzere toplandılar: nükleer fizik. Katılım-

cılar listesinde, tabii ki Einstein, nükleer fiziğin babası Rutherford ve radyasyondan hastalanmış, ölmek üzere olan Marie Curie vardı. Pauli, Fermi ve Bohr da oradaydı. Nötrino fikrinin olgunlaşıp "müspet ilme" dönüşmeye başlaması, bu üçü arasında o kongrede konuşulanların ardından oldu. O hafta öğrendikleri sayesinde sis perdesini aralayan kişi asıl olarak Fermi'ydi. İlhamını bulmaya, Frédéric Joliot'nun beta bozunmasının iki farklı şekilde gerçekleştiğini keşfettiğini anlatmasıyla başladı. İyi tanınan elektronlardan oluşan negatif ışınların yayımı o güne kadar herkesin uğraştığı meseleydi, ama şimdi Joliot yeni çıkan pozitronların yayıldığı örnekler de bulduğunu gösteriyordu. Negatif elektron yerine pozitif pozitronun ortaya çıkması dışındaki her şey aynı görünüyordu.

Fermi meseleleri zihninde mükemmel canlandırabiliyordu ve Joliot ona, protonlar ve nötronlardan oluşan çekirdekleri görsel olarak düşünmenin ilhamını vermişti; bu çekirdekler beta bozunmasıyla tabiatlarını değiştiriyorlardı. Fermi bu olayın ardında büyük bir simetri yattığını fark etti. Eğer nötron protona dönüşüyorsa, toplam elektrik yükü negatif yüklü bir elektronun yayılmasıyla dengelenirdi, bu da bildiğimiz beta parçacığıydı; peki ya, uygun şartlarda, protonun da nötrona dönüşebileceği düşünülemez miydi? Öyle bir durumda, gerçekleşen değişim pozitif yüklü bir beta parçacığıyla dengelenecekti: Pozitronla. Fermi'ye göre, nötron, proton ve beta parçacıkları (ister elektron olsun ister pozitron, önemli olan elektrik yüküydü sadece), bu nükleer sürecin asıl oyuncularıydı.

Fermi'nin aklına gelenlerin ilkiydi bu sadece. Yeni gelen haberlerle her şey yerli yerine oturdu.

Pauli, hafif bir nötrinonun elektrik yüklü bir beta parçacığının yayımına eşlik edip etmediğini anlamanın bir yolu olabileceğini fark etmişti. Eğer beta ışınlarının enerji tayfı çok hassas bir şekilde ölçülebilirse, enerjileri bir maksimum değere kadar devam edip ondan sonra duruyor mu, yoksa sonsuz enerjiye doğru devam mı ediyor, bulunabilirdi. Bohr enerjinin korunumunun sadece

çok sayıda olayın ortalaması için geçerli olduğunu, tekil olay bazında bunun ihlal edildiğini düşünüyordu; buna göre beta parçacıklarının enerjileri sonsuza kadar artabilirdi.[1] Fakat eğer enerji tayfı sonlu bir değerde pat diye kesiliyorsa, Pauli'nin dediğinin doğru olduğu anlaşılacaktı. Pauli'nin, fizikçilerin enerji tayfının yüksek ucunu dikkatle ölçüp, yükselmeye kesintisiz devam mı ediyor yoksa birdenbire kesiliyor mu diye bakmaları önerisi kabul görmüştü. Bu incelemenin sonucu konferansta açıklandı: gerçekten de tayfın gayet net bir üst sınırı vardı.

Bu tam Pauli'nin istediği cevaptı, Pauli böylece partide görünmeyen bir üçüncü misafir olduğu yönündeki fikrinin doğruluğuna ikna oldu. Açıklamanın ardından tartışma sırasında ayağa kalktı ve nötrino hakkındaki fikrini beyan etti:

> kütleleri elektronun kütlesinden çok daha fazla olamaz. ●nları ağır nötronlardan ayırmak için Bay Fermi bunlara "nötrino" adını vermeyi teklif etmişti. Nötrinoların gerçek kütlesinin sıfır olması muhtemeldir... Bana nötrinonun spininin ½ olması makul görünüyor... Nötrinoların diğer madde parçacıklarıyla veya fotonlarla etkileşimine dair hiçbir şey bilmiyoruz.

Fermi'nin, Pauli'nin nötrinosunun başrolde olduğu beta bozunması teorisini kurması için artık her şey yerli yerindeydi.

FERMI'NİN TEORİSİ

Fermi bunun üstünde çalışmaya Solvay Konferansı'nın hemen ardından başladı. Fikrini geliştirirken Pauli'nin önerdiği her şeyi alıp, bunların üstüne konferansta öğrendiklerini, yani nötron ve protonun rolünü, beta bozunmasında gerçekten de bir nötrino olduğu görüşünü ve yeni

[1] Pauli, Bohr'un hipotezinin, istatistik olarak "Poisson" dağılımına işaret ettiğini anlamıştı.

oluşmakta olan kuantum elektrodinamiği teorisini ekledi. Beta bozunmasında enerjinin ve momentumun korunduğunu varsaydı, dönme (açısal momentum veya spin) de yine korunuyordu.

Parçacıkların kendi içlerinden gelen açısal momentumları vardır; bu spindir. Kuantum teorisi spinin ancak belirli özel değerleri alabileceğini söyler, temel bir birimin tek veya çift katları olmalıdır bu değerler. Tarihle ilgili nedenlerden dolayı bu temel birim ½ diye kabul ediliyor, böylece bunun tek sayılarla çarpımıyla elde edilen katları buçuklu sayılar, çift sayılı katlarıysa tam sayılar oluyor. Bugün, tek sayılı katlarda spin yapan parçacıklara, Enrico Fermi'nin adından gelen "fermion"; çift sayılı katlarda spin yapanlaraysa Hint kuramcı Satyendra Bose'un adından gelen "bozon" deniyor. Bizim hikâyemizin ana karakterleri, fermionlar.

Proton, spini ½ olan bir fermiondur. Pauli'nin nötron fikrini üretmesine yol açan, azotun çekirdeğinin spiniyle ilgili anomaliydi; nötronun spinin de ½ olmasıyla çekirdeğin toplam spini doğru çıkacaktı. Elektronun spini de ½'dir; atom tayfından ve atomların manyetik alanlara verdiği tepkiden anlaşılmıştı bu.

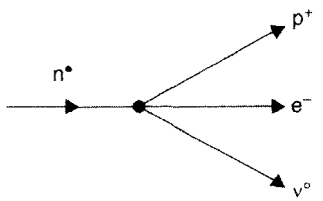
Kuantum mekaniğindeki spin kuralları, iki yarımdan bir tam yapılabildiğini söyler. Ama bir tane yarım spin yapmak için üç tane yarımı bir araya getirmeniz gerekir. Dolayısıyla hikâye, nötronun beta bozunmasında bir proton ile bir elektronu ortaya çıkarmasından ibaret olamaz: ilk baştaki nötronun spini ½'dir, bu yüzden onun bozunmasıyla ortaya çıkacak ½ spinli parçacıkların sayısı tek sayı olmalıdır. Yani proton ve elektronun yanında üçüncü bir parçacık daha olmalı, onun da spini ½ olmalı ve parça hiç elektrik yükü taşımamalıdır: Nötrino işte budur.

Fermi oyuncuları tespit etmişti. Şimdi olay örgüsünü kurmak için ilk adımı atıyordu. Düşüncesini geliştirirken nötronun, elektrik yükü alınmış bir proton gibi olduğu şeklindeki gözlemi de hesaba katıyor ve nötrinonun da elektronla buna benzer bir ilişkisi olduğunu tahmin edi-

yordu. Elektronla nötrino, ve protonla nötron arasındaki bu paralleliği, elektrik yüklü parçacıkların ve ışığın yeni ve başarılı teorisiyle, yani kuantum elektrodinamiğiyle bir arada kullanarak, kendi beta bozunması teorisinin temelini kurdu. Bu dört parçacığın bir an için zamanın ve mekanın aynı noktasında bulunabileceğini varsaydı. Bu düzende nötron kendiliğinden proton biçimini alırken bir elektron (beta parçacığı) ve bir nötrino (hayalet) yayıyordu.

Bugün olayın bundan ibaret olmadığını biliyoruz; nötronun protona dönüştüğü yerle, açığa çıkan enerjinin elektron ve nötrino olarak yeniden maddeleşmesi arasında küçücük bir aralık var. Fakat bu aralık nötronun boyutundan daha küçük ve Fermi'nin zamanında tek tek nötron ve protonun boyutlarını bırakın, bütün bir çekirdeğin boyutunu tespit etmek bile mümkün değildi. Aslında Fermi'nin modeli o kadar iyi ki, fizik lisans öğrencilerine beta radyasyonu teorisi öğretilirken standart giriş olarak hâlâ bu model kullanılıyor (Şekil 2).

Bu teoriden yola çıkarak beta bozunmasında üretilen elektronların enerji tayfının nasıl olması gerektiğini hesap etti Fermi. Hesabı, enerjinin yüksek ucunda değerlerin kesilmesi de dahil olmak üzere, deneyde bulunanlarla aynı değerleri verdi. Tüm bilgilerin bir araya getirilmesi, nötrinonun kütlesinin elektronun ancak küçük bir parça-



Şekil 2: Fermi'nin beta bozunması modeli. Fermi'nin modelinde, n^0 diye gösterilen bir nötron, uzayda aynı noktada bir protona (p^+), bir elektrona (e^-) ve bir nötrinoya (ν^0) dönüşür. [nötrinonun simgesi "ν", Yunanca "ni" harfidir, çev.]. Üst karakterler, her parçacığın protonunkine kıyasla sahip olduğu yük miktarını, işaret de bu yükün negatif mi pozitif mi olduğunu gösteriyor.

sı kadar olabileceğini, hatta belki de hiç kütlesi olmadığını söylüyordu. Daha da hassas ölçümler yapıldı ve Fermi'nin teorisiyle karşılaştırılan bu deneyler de nötrinonun, nötron, proton ve elektronla aynı spine sahip olduğunu gösteriyordu. Fermi'nin varsaydığı her şeyin doğru olduğu ortaya çıkıyordu.

Bu başarılara rağmen birçok fizikçi nötrinonun gerçek olmadığını düşünüyordu. Bir şeyin etkisi altına giren, önceden var olan maddeye çarpıp onu etkileyen ve bir şeyleri değiştiren, böylece de kendi varlığını gösteren serbest bir nötrino yoktu. O dönemin nötrinoya dair genel heyecansızlığı, Fermi'nin 1934'te makalesini yazmasıyla su yüzüne çıktı.

"Beta Işınlarının Taslak Teorisi" başlıklı makale, İngilizce yayımlanan önde gelen bilim dergisi *Nature*'a gönderildi. Editör, Fermi'nin en parlak teorik fizik ürünlerinden birini, yazının "gerçeklikten okuyucu için ilgi çekici olamayacak kadar çok uzaklaşan spekülasyonlar içerdiği" yönünde aldığı görüş üzerine reddetti. Yarım asır sonra editörler, bunun yaptıkları en büyük hata olduğunu itiraf ettiler. Makale sonunda İtalyanca olarak *Nuovo Cimento*'da, kısa süre sonra da Almanca olarak *Zeitschrift fur Physik*'te yayımlandı, ama İngilizce olarak hiç basılmadı.

Fermi'nin bu teoride yaptığı, nötrino fikrini ciddiye almak, yeni keşfedilen nötronun ve kuantum mekaniği kanunlarının, çekirdekteki nötronun bir elektron (beta parçacığı) ve bir nötrinoyu açığa çıkararak kendiliğinden protona dönüşmesine nasıl olanak verdiğini göstermeye çalışmaktı. Muhakkak ki spekülatifti; muhtemelen, Pauli'nin de ortaya attığı üzere, test edilebilir değildi; fakat "gerçeklikten çok uzak" mıydı, "ilgi çekici değil" miydi? Elbette hayır.

Bu macera Fermi'yi öyle bitap düşürdü ki "kısa bir süre için"[2] teoriden deneye kaymaya karar verdi. Fakat de-

[2] Aktaran: Laura Fermi, *Atoms In The Family* ("Aileden Atomlar"). Fermi hem deney hem de teori alanında olağanüstü yetenekliydi. İlk atom

neyler yıllar boyunca Fermi'nin tüm zamanını alan bir projeye dönüştü; sonunda da Alman bilim insanları Otto Hahn ve Fritz Strasseman ile Avusturya doğumlu Lise Meitner'ın uranyum fisyonunu ve bunun gidebileceği yerleri keşfetmelerine yol açtı. Ama Fermi'nin teorisi unutulmadı ve sonradan anlaşılacağı üzere, Pauli'nin nötrino hipotezinin bilimsel olarak test edilmesine imkân veren yolu açtı.

NÖTRİNO GERÇEK OLMAYA BAŞLIYOR

Fermi'nin dört oyuncunun bir noktada biraraya gelip kimlikleri değiştokuş edebileceğini söyleyen hipotezi, beta bozunmasını tarif etmenin ötesinde bir şey yaptı: bir nötrinonun gidip bir nötrona çarpabileceğini ve onu bir protonla bir elektrona dönüştürebileceğini söylüyordu bu teori. Beta bozunmasının tersi gibi bir şey bu. Birdenbire, Fermi'nin teorisi sayesinde nötrino "kaybolan enerji"nin kısaltmasından ibaret olmaktan çıktı; bu noktaya kadar Pauli'nin fikrinin verdiği tek şey buydu aslında. Eğer nötrino sahiden varsa, bir şeye çarpana kadar o enerjiyi taşıyacaktır. Fermi'nin teorisi, nötrinonun bulunması için bir imkân veriyordu.

H. G. Wells'in *Görünmez Adam* kitabının kahramanı nasıl kalabalığın içinde itişip kakışınca tespit ediliyorsa, Fermi'nin teorisinde de hayaletvari nötrino atom çekirdeğiyle çarpışabilir, elektrik yükünü alabilir ve böylece görünen elektrona dönüşebilirdi. Eğer nötrinonun çarpmak üzere olduğu şeye bakabiliyor olsanız, nötrinodan da ha-

bombasının New Mexico çölünde patlatılması sırasında yaptığı şey buna bir örnektir. Fermi, dönemin önde gelen bilim insanlarıyla beraber patlamanın olduğu yerden kilometrelerce uzaktaki bir sığınakta saklanıyordu. Herkes gördüklerini hayretle izler ve Robert Oppenheimer *Gita* isimli kitabından yaptığı meşhur alıntıyla "ben şimdi ölüme dönüştüm, dünyaları yok edenim" derken, Fermi havaya kağıt parçaları attı ve darbe dalgası bu parçaları uzaklara uçururken, parçaların kat ettiği mesafe üzerinden bombanın şiddetini ölçtü. Elde ettiği sonuç, teknik hesaplarla daha sonra bulunan sonuçtan pek de uzak değildi.

bersiz olsanız, vurulan hedefin birden hareket etmesini ya da yüksek hızlı bir elektronun ortaya çıkıvermesini, enerjinin çok şaşırtıcı bir şekilde kendi kendine ortaya çıkması olarak yorumlayabilirsiniz; beta bozunmasında enerjinin kafa karıştırıcı şekilde kaybolmasının tam tersidir bu. Beta bozunmasının hesaplarında eksik çıkan enerji miktarı, hedefte ortaya çıkan enerjiyle bire bir uyuşsaydı, durumun doğal açıklaması Pauli'nin ve Fermi'nin doğru söylediği olurdu: beta bozunması sırasında oluşan görünmez bir ajan enerjiyi uzayın başka bir yerine taşımıştı, ta ki taşıyan yok olup enerjisi de atomaltındaki bir bayrak yarışının bayrağı misali başka birine transfer olana kadar.

Buraya kadar fena değil. Gelgelelim, ne iyi fikirler çıkmıştır ki ayrıntılara geçildiği anda dağılıp giderler. Fermi'nin teorisi nötrinonun elektrik yükünü alabileceğini ve maddeyle çarpıştığında kendini gösterebileceğini söylemekle kalmıyor, hangi şartlar altında ve ne ihtimalle böyle yapacağını da öngörüyordu. Zorluklar işte burada başlıyordu.

1934'te, bir dizi elementin beta bozunması hakkında, Fermi'nin teorisinin nötrino, elektron, nötron ve protonun tek noktada kimlik değiştirme ihtimalini genel olarak bildirmesine yetecek kadar veri vardı. Bu ihtimal yok denecek kadar az çıktı.[3] Önde gelen genç kuramcılardan Hans Bethe ve Rudolf Peierls, bu bilgiyi ve Fermi'nin teorisini kullanarak nötrinolarla madde arasında etkileşim olma ihtimalini hesaplayabileceklerini ve böylece olay yerinden kaçan nötrinoyu gösterebileceklerini fark ettiler.[4]

[3] Bu ihtimali özet olarak "Fermi sabiti"nde ifade etmek adettir; bu da protonun kütlesi cinsinden, yüzde birin binde biri kadardır.

[4] H. Bethe ve R. Peierls, *Nature* cilt 133, s. 532 (1934). Bethe ve Peierls önce Fermi'nin teorisinden bu olasılığı hesapladılar ve çok düşük olduğunu buldular. Sonra Bethe ve Peierls genel ilkeleri kullanarak beta bozunması olasılığını bir nötrinonun maddeyle etkileşme ihtimaliyle ilişkilendirdiler. Buldukları sonuçlara göre bu ihtimal enerjiye göre değişiyordu ama o dönemde merak edilen süreçlerde geçerli olan enerjiler için her zaman çok çok düşüktü.

Fermi'nin öngörülerinin nötrinonun keşfine yol açacağı umudunun ömrü kısa oldu. Bethe ve Peierls nötrinoların kendini bu şekilde ele verme ihtimalinin çok ama çok düşük olduğunu buldular. Yaptıkları hesaplar, beta bozunmasmda üretilen bir nötrinonun, yolu kesilmeden Dünya'yı boydan boya kat edebileceğini söylüyordu, "sisin içinden geçen kurşun misali" giderdi nötrino.

Nötrinonun bir şeyle etkileşime girme ihtimalinin yok denecek kadar az olduğunun anlaşılmasıyla, nötrino ve madde arasındaki etkileşime "zayıf kuvvet" denir oldu. Nötrino elektrik bakımdan nötr olduğundan, molekülleri birarada tutan elektromanyetik kuvvete tepki vermez. Atom çekirdeklerini bağlayan güçlü kuvvetleri de hissetmez. Nötrino sadece kütle çekiminden ve zayıf kuvvetten etkilenir. Nötrinonun bir malzeme içindeki çekirdeğe çarparak kendini ele verme ihtimali öylesine düşüktür ki, genel görüş Bethe'yle Peierls'ın vardığı sonuçla uyum içindeydi: "Nötrinoyu gözlemlemenin uygulamada mümkün olan hiçbir yolu yoktur."

Fiilen görünmez olan, kendini sadece esrarengiz bir nükleer süreçte enerjinin korunumunun ihlal edilir "görünmesinde" ele veren bir parçacığın var olduğunu söyleyen kişi Pauli'den başka kim olsa, Pauli bunun için o meşhur eleştirisindeki gibi "yanlış bile değil" derdi. Belki de, bu tarz eleştirilerin ona yöneltilmesine, nötrinoyu tespit edene bir kasa şampanya vereceğini vaat ederek kendi kendini alaya aldığı yaklaşımı engel oldu. Pauli'nin, hiç kimse fark etmeden, ardında iz bırakmadan ortadan kaybolan bir 'hiçlik parçası' icat etmiş olduğu fikri gitgide daha gerçekçi görünüyordu, olay yerini bir ışık yılı kalınlığında kurşundan hapishane duvarlarıyla da çevreleseniz, nötrinoların kaçıp gitme ihtimali epey kuvvetliydi. Nötrino kuramcılar için kabus olabilecek bir şeydi: deneyde asla bilinememeye yazgılı bir güzel fikir. Zaten günün birinde bir nötrinoyu doğrudan kışkırtıp gerçek olduğunu ispat edip edemeyeceğimiz sorusu da unutuldu gitti; zira fizikçiler II. Dünya Savaşı'nın keşmekeşinde dağılmaya

başladılar. Makalesini *Nature*'da yayınlatma girişiminin başarısız olmasının ardından Fermi'nin düştüğü umutsuzluğun meyvesi olan nükleer fisyon, fizikçilerin mecazi radar ekranlarını dolduruyordu. Çeyrek yüzyıl boyunca Pauli'nin bahsine tutuşan çıkmayacaktı.

3

PİYANGOYU KAZANMAK

BRUNO PONTECORVO

Enrico Fermi 1934'te nötrinolar hakkında teorik çalışma yapmaktan vazgeçip nötronlarla deney yapmaya başladığında, onunla birlikte çalışanlardan biri, Bruno Pontecorvo adında genç bir adamdı. Fermi, çeşitli elementlerin atom çekirdeklerini nötronlarla bombardımana tutarak yeni çekirdek çeşitleri hatta elementler üretmeyi ümit ediyordu. Oluşan ürünlerin tamamı radyoaktifti ve Fermi de bu radyasyonu ölçerek yeni ürünleri bilinen, tanıdık elementlerden ayırt etmeyi umuyordu. İşte bu sırada, üniversiteden yeni mezun olmuş ve ilk ciddi araştırma işini yapmakta olan Pontecorvo, örneği kutusunda hareket ettirdiğinde radyoaktivite miktarının değişir gibi olduğunu fark etti, konu Fermi'nin ilgisini çekti, Fermi bir gün boyunca bunun üstüne düşünüp, nötronların uygun şartlar altında ağır elementlerin çekirdeğini parçalayıp muazzam miktarda enerji açığa çıkarabilmesi anlamına gelen nükleer fisyonu sağlayan fikirleri üretti.[1] On sene

[1] Bunun nasıl olduğu hikâyemizin konusu dışında kalıyor ama, merak ediyorsanız anlatayım. Yavaş hareket eden nötronların etkileşime girme ihtimalinin, hızlı gidenlerden çok daha fazla olduğu anlaşıldı. Eğer Fermi'nin elindeki kaynaktan çıkan nötronlar görev yerlerine giderken başka maddelere çarpıp yavaşlarlarsa, ardından yol açtıkları radyoaktivite daha fazla oluyordu. İçinde çokça hidrojen atomu bulunan su ve parafin gibi malzemeler nötronları yavaşlatma konusunda en etkili olanlardandır (bu da nötronlarla protonların aynı kütleye sahip olmasının sonucudur). Nötronları yavaşlatıp güçlerini artırmak, nükleer re-

içinde bu fikirler atom bombasının üretimi için vazgeçilmez oldu, 20 yıl içinde de nükleer enerjinin temeli haline geldiler. Fermi Nobel Ödülü'nü aldı, Pontecorvo işin patentindeki payını satarak servet kazandı.

Eşinin biyografisini yazan Laura Fermi'nin eseri, bu genç İtalyan bilim insanlarının dehasını ortaya koymuyor sadece, Mussolini'nin derebeyliğinde, onlar üzerindeki toplumsal ve siyasi baskıyı da gösteriyor. Nobel Ödülü'nü almak için Stokholm'e gitmek üzere İtalya'dan ayrılmasına izin verilen Fermi bir daha geri dönmedi. ABD'ye gitti ve atom bombasının geliştirilmesinde önemli bir rol oynadı. Laura Fermi onun biyografisini 1954'te yazdı. 20 sene sonra bunu okurken, Bruno Pontecorvo'nun ortadan kayboluşu beni derinden etkilemişti.

Joliot-Curie'lerle beraber çalışmak için 1936'da Paris'e taşınan Pontecorvo, Yahudi olması nedeniyle bir daha İtalya'ya dönemedi. Paris'te kalıp, Naziler kenti işgal ettiğinde ABD'ye kaçtı. Belki de sosyalizme duyduğu güçlü bağlılık nedeniyle, Manhattan Projesi'ne[2] katılmaya davet edilmedi, 1943'te Kanada'ya yerleşip, Ontario'daki Chalk River Laboratuvarı'nda çalışmaya başladı. 20. yüzyılın sonuna kadar nötrino hikâyesinin devamını oluşturacak olan fikir, Chalk River'dayken aklına geldi. Buna birazdan döneceğiz; hikâyenin ona özel kısmı asıl bundan sonra yaşananlardı.

Pontecorvo 1948'de İngiliz vatandaşı oldu ve İngiltere'deki Harwell Laboratuvarı'na gitti. Savaş sonrası İngiltere'de atom üzerine çalışan bilim insanları hidrojen bombasını geliştiriyorlardı. "Demir Perde" gölgesini Avrupa'ya düşürmüş, Harwell'de çalışan Klaus Fuchs "atom casusu" diye deşifre olmuştu. 1930'larda faşizmin yükselmesine tepki gösteren pek çok aydın sosyalist olmuştu; Fuchs da bunlardan biriydi. Büyük çoğunluğu için sosyalist olmak, çalışmalarının sonuçlarını Sovyet

aksiyonların işleyişinin en önemli kısımlarından biri oldu.

[2] ABD'nin atom bombası yapma projesi —*çev. notu.*

rejimiyle paylaşmaya varan bir şey değildi, ama Fuchs bunu yaptı.

ABD'de, Müttefiklerin ilk atom bombasını üretmesine çok özel bir şekilde liderlik etmiş olan J. Robert Oppenheimer, siyasi görüşleri nedeniyle görevinden uzaklaştırıldı; Senatör Joe McCarthy "içimizdeki kızıllar"a[3] karşı korkunç bir cadı avı başlattı. Fuchs'un deşifre olması İngiltere'de de paranoyayı artırdı. İşte böyle gergin bir iklimde Bruno Pontecorvo ortadan kayboldu.

21 Ekim 1950'de gazetelere taşınan haberlerde, Pontecorvo'nun polis izini bulduğu için Demir Perde'nin ardına kaçtığı yönünde spekülasyon yapılıyordu. 6 Kasım'da İngiltere Avam Kamarası'nda Tedarik Bakanı Bay Strauss, Pontecorvo'nun "nerede olduğuna dair kesin bir kanıt olmamakla beraber, Rusya'da olduğuna hiçbir şüphe yoktur" diye bir açıklama yaptı. Fakat ortada buna dair bir delil yoktu. Üç sene sonra, Pontecorvo'nun en eski arkadaşlarından Laura Fermi şöyle yazdı: "Pontecorvoların ortadan kayboluşunun üstünden üç yıldan fazla zaman geçti. Onlardan hâlâ hiç haber yok. Pontecorvoları gören olmadı."

Ben bunları kitabın 1969 baskısında okuduğumda, bu durum 20 yıldır değişmemiş gibi görünüyordu. Bunu okuduktan birkaç gün sonra *Physics Letters* adlı bilim dergisinde nötrinolar hakkında, Bruno Pontecorvo diye biri tarafından yazılmış bir makale gördüğümde düştüğüm şaşkınlığı varın siz düşünün. Yazarın adresi: Nükleer Araştırmalar Enstitüsü, JINR, Dubna, Moskova yakınları. "Bunu fark eden oldu mu?" diye düşündüm. Elbette fark edilmişti, hem de uzun zaman önce. Pontecorvo 1953'te Stalin Ödülü'nü kazanmış ve 1955'te bir basın açıklaması yaparak İngiltere'den ayrılma nedenlerini belirtmişti.

Stalin Ödülü'nü aldı ama Nobel Ödülü'nü alamadı Bruno Pontecorvo. 1993'te öldüğünden, hiçbir zaman

[3] Kullandığı "reds under the bed" tabiri aslında "yatağın altındaki kızıllar" demek —*çev. notu.*

da alamayacak. Ama onun fikirleri sayesinde dokuz kişi Nobel aldı ve daha başkaları da alabilir. Hikâyemiz akıp ilerlerken, sahne arkasında her zaman Pontecorvo olacak, çoğu zaman çok önemli rol oynasa da, ölümsüzlerin tapınağına asla ulaş(tırıl)mayacak. Göreceğimiz üzere, kendini mecbur hissederek SSCB'ye sürgün gitmesi, bazı fikirlerinin hak ettikleri önceliği alamamasına yol açacak. Pontecorvo ilk sahnesinde, Fermi'nin nötrinoyu beta bozunmasının parçası olarak ele aldığı teorisinin hemen ardından, yardımcı roldeydi. Nötrino hikâyesine kişisel ilk katkısını 1946'da, nötrinoyu yakalayıp varlığını fiziksel olarak kanıtlamakla yaptı.

Bethe ve Peierls'ın Fermi'nin teorisinden çıkardığı, beta bozunmasıyla üretilen tekil nötrino hakkındaki her şey doğruydu: Onu tespit etme ihtimali son derece düşüktü. Fakat burada bir ihtimal bildiriliyor, Pontecorvo da ihtimalin son derece düşük olmasının hiç olmaması anlamına gelmediğini anlıyordu. Bu konuda çığır açıcı raporunu 1946'da Kanada'da Chalk River Laboratuvarı'nda çalışırken hazırladı. Pontecorvo'nun bu makalesinden önce genel kanı, nötrinoyu tespit etmenin imkânsız olduğu yönündeydi. Pontecorvo'ya göre bu "çok sert"ti. O, "modern deney tesisleriyle" bunun mümkün olabileceğini düşünüyordu. İşin nasıl yapılacağına dair görüşlerini ana hatlarıyla sundu. Tek bir nötrino olarak kendinizi düşünün, "son derece düşük" olan da, piyangoda büyük ikramiyeyi kazanma ihtimaliniz olsun. Ben büyük ikramiyeyi hiç kazanmadım, büyük ihtimalle siz de kazanmamışsınızdır. Bu kitabı yeterince fazla sayıda insan okursa, büyük ikramiyeyi kazanmış talihlilerden biri de okurlar arasında bulunabilir; ama piyangoyu kazanan kişinin bu kitabı okuma ihtimalinin anlamlı olması için kitabın çok satanlar listesinin başında haftalar boyunca kalması gerekir ki tüm bunların gerçekleşmesi malesef pek mümkün değil. Fakat mesaj net: Piyangonun büyük ikramiyesini sizin ya da benim kazanma ihtimalimiz pek olmasa da, yeterince fazla sayıda insan bilet aldığından, ikramiyeyi kazanan birisi oluyor.

Nötrino için de aynı şey geçerli: Beta bozunması sırasında üretilen tek bir nötrino, bir engelle karşılaşmadan uçtan uca tüm evreni kat edebilir, fakat her saniye milyarlarca nötrino üreten bir kaynağın yakınlarında, arada bir bir-iki nötrino atomların ağına takılabilir.

Radyum, bilinen en güçlü beta bozunması kaynağıydı, fakat büyük miktarda radyum kullanarak bile ortaya çıkacak nötrinoların sayısı o kadar az olacaktı ki, içlerinden birini yakalama umudu yoktu. Bolca nötrino üretip bir tanesini tespit etmek için gereken, bundan çok ama çok daha büyük bir nötrino kaynağıydı.

Fermi'yi nükleer güç üretmek üzere yola çıkaranın, şimdi bir nükleer laboratuvarda çalışan Pontecorvo olduğu düşünülürse, bu kişinin uranyum reaktöründe nükleer güç üretmenin, saniyede on milyon milyar nötrino üretmek demek olduğunu fark etmesine şaşmamalı. Pontecorvo, ortalığa bu kadar büyük miktarda nötrino saçılıyorken, doğru dedektör ve biraz sabırla birkaç nötrinoyu yakalamanın mümkün olduğunu anladı. Ardından bunun nasıl yapılacağına dair görüşünü açıkladı.

Nötrino bir çekirdeğe çarptığında, Fermi'nin teorisine göre iki şey olmalıdır. Birincisi, nötrino elektrik yükünü alır ve elektrona dönüşür. Fakat bu elektronu saptamak umutsuz bir çabadır, zira her yer elektron kaynadığından, atomdan fırlamış elektronla, nötrinonun dönüştüğü elektronu birbirinden ayırmak zor olacaktır. Pontecorvo'nun dikkatini odakladığı nokta, Fermi'nin teorisinden çıkan ikinci sonuçtu: nötrino maddeye çarptığında, negatif yüklü elektronun oluşumu, nötrinonun çarptığı atom çekirdeğinde pozitif yükün artmasıyla dengelenir.

Çekirdeğin yükü bir pozitif katkıyla arttığında, çekirdeğin negatif yüklü bir elektronu daha bağlaması mümkün olacaktır. Bunun sonucu, bir başka elementin atomunun meydana gelmesidir; elementlerin periyodik cetvelinde bir basamak yana geçilir. Pontecorvo'nun düşündüğü şuydu: eğer bu radyoaktif bir atomsa, varlığı bozunmasından anlaşılabilir.

Ardından, gereken şeyleri belirledi. Nötrinoları tespit etmek için kullanılacak malzeme çok pahalı olmamalı, çünkü bundan bol miktarda kullanılacak. Çarpışmayla meydana gelecek atom çekirdeği radyoaktif olmalı, ama çok da radyoaktif olmasın ki, mecazen, samanlıktaki iğne bulunmadan bozunup gitmesin bu çekirdek. Ayrıca, birazcık başarı şansı olması için o iğneyi samanlıktan çıkarmak da kolay olmalı.

Bu şartlar en iyi sonucun neyle alınacağını gösteriyordu. Pontecorvo anladı ki eğer hedef sıvı olursa ve nötrinonun çarpmasıyla oluşacak element de helyum, kripton ve argon gibi kimyasal olarak asal bir element olursa, meydana gelen elementin kimyasal reaksiyona girme riski olmaz ve dolayısıyla sıvıyı kaynatmak gibi kolay bir işlemle onun içinden ayıklanmış olur. Asal ürün olmaya uygun aday argondu, periyodik cetvelde ondan bir sonraki elementse klor.

Pontecorvo'nun fikri koskoca bir fıçı kloru, kuru temizleme sıvısı gibi kolaylıkla bulunan, ucuz bir malzemeyi kullanmaktı. Nötrino klor atomunun çekirdeğine çarparsa, klor atomu argon atomuna dönüşür. Bu argon atomu radyoaktiftir ve bozunur, bozunurken yaydığı radyasyon da uygun malzemeler kullanılarak saptanabilir. Eğer fıçıda yeterince klor varsa (çözüm, yüzlerce ton kuru temizleme sıvısı olabilir), piyangoyu kazanma ihtimali de vardır: birkaç nötrino çarpar ve radyoaktif argon meydana gelir. Argon atomlarından çıkan radyasyon, buraya nötrinoların çarptığını ilan eden bir radyo işareti gibi olacaktır. Pontecorvo'nun aklındaki buydu. Tek ihtiyacı, bu işe inanan birini bulmaktı.

KARŞINIZDA RAY DAVIS

Ray Davis 1914'te Washington DC'de doğdu ve babasının ona bodrumda deney yapsın diye kimyasallar almasıyla kimyaya ilgi duydu. Kimyasallarla çalışırken kendini ke-

limenin tam anlamıyla evindeymişçesine rahat hisseden Davis, üniversitede bu alanda okudu ve 1942'de Yale'den doktorasını aldı. Ardından üç sene boyunca seferberliğe katılarak kimyasal silahları test etti; ateşkes olunca Atom Enerjisi Komisyonu'na katılarak radyokimya (radyoaktif maddelerin kimyası) üzerine çalıştı. Tesadüfler, yakında kaderinin ağlarını örecek olan tecrübeleri kazandırmaktaydı ona.

1948'de New York'ta, atom enerjisinin barışçı amaçlarla kullanımına adanmış Brookhaven Ulusal Laboratuvarı'nda çalışmaya başladı. Gelir gelmez ilk işi, ne yapabileceğini öğrenmek üzere kimya bölümünün başkanıyla görüşmek oldu. Yıllar sonra, Nobel Ödülü'nü aldığı törende, o görüşmeyi şöyle anlattı: "Bana kütüphaneye gidip okuma yapmam, beğendiğim konuyu seçip kendi projemi kurmam önerilince hem şaşırdım hem de sevindim." İşte böylece "tam istediği şeyi yapıp üstüne de para aldığı" uzun bir kariyer başlamış oldu.

Kütüphanede karşısına, nötrinolar hakkında yeni bir değerlendirme makalesi çıktı.[4] Hemen göze çarpan bazı şeyler vardı: bu konuda çok az şey biliniyordu; alan tamamen bakirdi ve problemden yana zengindi. O büyük an, Davis'in aydınlanma ânı, Pontecorvo'nun makalesindeki tanımı okuduğu andı. Nötrinonun tespit edilmesi için burada önerilen yol, tam radyokimya alanında çalışmış birine göreydi. Davis'in ömrünün geri kalanının nasıl geçeceği o anda belli oldu.

Pontecorvo, klorun argona dönüşmesinin nötrinonun işareti olacağını söylüyordu. Davis argonun asal bir gaz olduğunu, bolca klor çözeltisinden bunu kimyasal olarak ayrıştırmanın kolay olacağını biliyordu. Bu şekilde üretilen argon atomları radyoaktif olacak, 35 günlük yarı ömrün ardından bozunarak tekrar klora dönüşeceklerdi. Radyasyonu, gaz moleküllerini iyonlaştırma özelliğiyle vereceği elektrik sinyalleri kullanarak nasıl tespit edeceğini

[4] H. R. Crane, *Reviews of Modern Physics*, 1948.

de biliyordu Davis.[5]

Davis'e bu biraz fazla kolay göründü. Gerçekten de bu kadar kolay olamayacağı ortaya çıkacaktı, fakat hata ne onun ne de Pontecorvo'nundu.

Brookhaven'ın halihazırda kendi mütevazı test reaktörü vardı ve araştırmalar için kullanılıyordu. Davis bunun yanına 4000 litrelik bir tank içinde karbon tetraklorür koyup, yeterince argonun birikmesini bekledi. Sonra gereken işlemleri yaptı, ama kozmik ışınların etkisinden başka bir sonuç elde edemedi. Sinyal olarak görünen şeyler reaktör çalışmazken nasılsa, çalışırken de aynı oluyordu. Bunun üzerine Davis 1955'te daha büyük bir dedektör yapıp Güney Carolina'daki Savannah River nükleer reaktörüne götürdü.

Sonuç burada da aynıydı: hiçbir şey çıkmadı. Çünkü hiçkimsenin o dönemde bilmediği bir şey vardı: nükleer reaksiyonlar nötrino değil *anti*nötrino üretir.[6] Tıpkı elektronun bir antimadde denginin, yani pozitronun olması, protonun da antiproton diye bir ayna aksi olması gibi, maddenin tüm çeşitlerinin bir antimadde eşi vardır. Nötrinolar ve antinötrinolar birbirlerine tıpatıp benzerler; klor nötrinoları tespit etmek için uygundur ama antinötrinoları tespit etmek istiyorsanız size tanklar dolusu antiklor gerekir. Davis'in başarısızlığa uğramasının aslında büyük bir başarı olduğu daha sonra anlaşılacaktı: Davis bu denemeyle, nötrinolarla antinötrinoların farklı olduğunu ispat etmişti. Fakat o sırada daha nötrinonun var olduğu ispatlanmış olmadığından gördüğü şey, daha doğrusu hiçbir şey görmemek, Davis'in moralini bozdu.

Pontecorvo'nun fikri doğruydu. Bir tank dolusu klor, nötrinoları yakalamak için ideal bir yol *olurdu*. Eğer reak-

[5] Gayger sayacının modern versiyonu olan gazla dolu oranlı sayacın çalışma ilkesi budur.

[6] $n \rightarrow pe^-$ bozunmasının başlangıcında bir tane, sonunda ise iki tane madde parçacığı vardır; bu hesabın tutması için bozunma ürünleri arasında bir antinötrino olması gerekir.

törler çok sayıda nötrino üretiyor olsaydı; Davis 1955'te nötrinoyu muhakkak bulmuş olurdu. Elindeki tank klorla değil antiklorla dolu olsaydı Davis antinötrinoyu bulmuş olacaktı diye düşünebiliriz, ama antimaddenin herhangi bir çeşidinin toplu halde olması ancak bilimkurguda mümkündür.[7] Neyse ki antinötrinoyu yakalamanın başka yolları da var. Ama Davis'in, klor dedektörüne gereken nötrino kaynağının gelip onu bulmasını beklemesi gerekecek.

POLTERGEIST PROJESİ

II. Dünya Savaşı'nın sonuna doğru, Los Alamos'ta yürütülen Manhattan Projesi'ne Fred Reines de katıldı. 1944'te laboratuvardaki teorik fizik grubunun lideri oldu, ardından da Atom Enerjisi Komisyonu'nun Eniwetok mercanadasında yapılacak bir dizi deneyinden oluşan Greenhouse Operasyonu'nun başına geçti. Orada, Bikini mercanadasında ve Nevada'daki deneme sahalarında yapılan bomba testlerinin sonuçları üzerine çalıştı. Asıl olarak, nükleer patlamaların etkilerini anlamaya uğraşıyordu.

1947'de Pontecorvo'nun makalesini okuduğunda nötrino için kanıt aramak onun da aklına düşmüştü; ama eline böyle bir fırsat geçmemiş, o da bununla uğraşmamıştı. 1951'de, izin yılı[8] sırasında gelecek yıllarda fizikte hangi konu üstüne çalışabileceğini düşünürken bu fikri hatırladı. İleride bu günleri "çıplak, bomboş bir ofise yerleştim, birkaç ay boyunca boş kağıtlara bakarak, üzerine ömür boyu çalışmaya değecek bir konu, anlamlı bir soru aradım" diye anlatacaktı.[9] O biricik ilhamı, atomik patlamalar konusundaki çalışmalarından buldu. Atom bombaları bolca nötron açığa çıkarır ve bunların bozun-

[7] Gerçeği ve kurgusuyla antimadde, *Antimadde* kitabımın konusudur.

[8] Belli bir süre çalışmış olan üniversite öğretim üyelerine verilen ücretli izin, *sabbatical*. Genellikle bir yıl sürer ve başka bir yerde araştırma yaparak değerlendirilmesi beklenir —*çev. notu*.

[9] F. Reines, Nobel Konuşması.

masıyla nötrinolar (veya artık bildiğimiz üzere, antinötrinolar) meydana gelir. Demek ki bu kalabalığın içinden bazı "nötrinoların" kendilerini ele vermesi, ender olsa da, mümkündür.

Reines kabaca birkaç hesap yaptıktan sonra ona gereken tek şeyin, aşağı yukarı bir metreküp boyutunda küçük bir dedektör olduğuna karar verdi. Gerçekten ihtiyaç duyduğu şeyse, danışabileceği bir uzmandı.

1951 yazında Enrico Fermi misafir olarak Los Alamos'ta çalışmaya geldi. Tam da bu işin adamı olan kişinin, onunkinden birkaç oda ileride çalışıyor olmasının kaçırılamayacak kadar iyi bir fırsat olduğunu anlayan Reines cesaretini toplayıp Fermi'yle nötrinoların tespit edilmesi hakkında konuşmaya gitti. Nötrino kaynağı olarak bombayı kullanmanın en iyisi olacağına Fermi de katıldı. Reines "şimdilik fena değil" diye düşünerek, problemini itiraf etti: uygun bir dedektörü nasıl yapacağına dair hiçbir fikri yoktu. Fermi bunun üstüne bir süre düşündükten sonra kendisinin de bir fikri olmadığını açıkladı. Reines'in morali bozuldu, bu konuyu kapattı, ta ki Clyde Cowan'la tesadüfen gelişen bir konuşmaya kadar.

Reines ve Cowan uçakla Princeton'a giderken pilot, motor arızası yüzünden Kansas City'ye iniş yaptı. Havaalanında boş boş dolaşan Cowan'la Reines, fizikteki en zor deneyin ne olabileceği üzerine konuşmaya başladılar. Cowan'ın aklına atom fiziğindeki bir problem geldi,[10] ama bunun hakkında çalışan başkaları olduğunu düşündüler. Ardından Reines nötrino üstüne çalışmayı teklif etti. Cowan ânında "harika bir fikir!" diye cevap verdi.

Nükleer patlama çok güçlü bir nötrino kaynağı olsa da, bazı sorunlar taşıyordu. İnsan yapımı en şiddetli patlamanın yüz metre yakınına hassas bir dedektör yerleştirme

[10] Bu problem, bir elektronun bir pozitrona bağlandığı pozitronyumun özelliklerini ölçmekti. Biri madde, diğeri de antimadde olan elektronla pozitron birbirlerini öyle çabuk yok ederler ki pozitronyumun ömrü saniyenin milyonda birinden azdır. Bkz. Frank Close, *Antimadde*.

fikrinde bir tuhaflık vardı. Ama Cowan da Reines de bombalar üstüne çalışmıştı ve dedektörü yeraltına koyarak onu koruyabilecekleri konusunda kendilerine güveniyorlardı. Los Alamos'un yöneticisi onlara bunu deneme iznini verdi.

Atom bombası patlatmak bir kere yapılabilecek bir iş olduğundan, her şeyin iyi düşünülmüş ve kontrol altında olduğuna emin olmak gerekir. Özellikle Hans Bethe, gerçek bir nötrinoyu bombanın yayacağı diğer radyasyonlardan, mesela gama ışınlarından ve nötronlardan kesin olarak ayırt edip edemeyeceklerini sordu onlara. İşte buna cevap arama sürecinde, 1952'nin Eylül ayında bu deneyi yapmanın daha iyi bir yolu olduğunu fark ettiler. Nükleer reaktör biçiminde, kontrol altındaki nükleer güç, nötrino kaynağı olarak gayet uygun olacaktı.

Nükleer reaktör tipik olarak, santimetrekare başına saniyede on trilyon nötrino yayar ki bu yeterli olması gereken bir sayıdır. Reines daha sonra, "şimdi çok bariz görünen bu çözüme" ulaşmalarının neden bu kadar uzun sürdüğünü ve nasıl olup da "başkalarının bunu fark etmediğine" hayret ettiğini söyledi. Başkalarının onları geçeceğine dair hiçbir endişeleri yoktu, zira "nötrino yakalamak 1952'de popüler bir faaliyet değildi". 4 Ekim'de Enrico Fermi'ye yazarak "nihayet geçen hafta, [deneyi] bir nükleer reaktörde yapabileceğimizi idrak edebildik" dediler ve onun görüşünü sordular. Fermi belli ki bundan heyecanlanmıştı, hemen cevap verip böylesinin çok daha kolay olacağı fikrine katıldığını belirtti ve reaktörde yapılacak bir deneyin "ölçümlerin istendiği kadar tekrarlanabilmesi gibi önemli bir avantajı olacaktır" diye, onları destekleyen bir eklemede bulundu.

Reaktörden çıkan (anti)nötrinolar "tersine beta bozunması" denen bir süreci başlatabilir: Antinötrino protona çarpar, onu nötrona dönüştürür, protonun elektrik yükünü de, elektronun antimadde versiyonu olan pozitron alıp götürür. Cowan ve Reines, nötrinoyla antinötrino arasındaki ince ayrımdan habersizdiler (bu henüz anlaşılmamıştı) ama biliyorlardı ki eğer "nötrinolar" varsa,

elektrik yükünün korunumu gereği bunların ürünü bir nötron ve bir pozitron olacaktı. Planlarının işlemesi için bu yeterliydi; Davis'e kıyasla onlar ya daha şanslıydılar ya da ilhamları daha kuvvetliydi, artık hangisini tercih ederseniz.

1953'te Washington eyaletinde bulunan Hanford Mühendislik'teki nükleer reaktörde küçük bir dedektör prototipi yaptılar. Avlamaya çalıştıkları şeyin hayaletimsi doğasına ithafen, yaptıkları dedektöre Poltergeist[11] Projesi adını verdiler ve o yıl bir sinyalin ilk ipuçlarını gördüler.[12] Fakat hevesleri kursaklarında kaldı, çünkü aynı sinyaller reaktör kapalıyken de ölçülüyordu! Onlar da Davis'le aynı hayal kırıklığını yaşıyorlardı, fakat iki tarafın da birbirlerinin çalışmasından henüz haberi yoktu.

Cowan ile Reines, Hanford'da deneylerinin kozmik ışınlardan yalıtılmasının mümkün olmadığını, bu ışınlarla dedektördeki atomlar arasındaki çarpışmaların onların aradığına çok benzeyen sinyaller verdiğini fark ettiler. Serbest nötrinoyu tespit edebildiklerini düşünüyor, ama daha kesin bir sonuca varabilmek için daha iyi bir deney yapmaya ihtiyaç duyuyorlardı. Hikâyeleri bu noktada, Davis'inkiyle acayip bir paralellik gösteriyor; tıpkı Davis gibi Cowan ve Reines de dedektörün daha büyük bir versiyonunu yaptılar ve 1955'te Savannah River'a götürdüler. Orada dedektörü yerin 12 metre altına yerleştirerek kozmik ışınlardan korurken, bir yandan da reaktörün merkezine 11 metreden daha yakın bir mesafeye koymuş oluyorlardı.

Poltergeist'taki fikir, iki ayrı gama ışını patlamasını saptamaktı. Görünen ışıma tayfının çok ötesinde kalan bu iki patlama arasında, eğer (anti)nötrino yakalandıysa,

[11] Alm. gürültü yapmak veya eşyaların yerini değiştirmek gibi hareketleriyle kendini belli eden hayalet. Yerinden oynayan, özellikle havalanan nesnelerin, tavanarasından gelen tuhaf gürültülerin, durduk yerde kapanan kapıların Poltergeist işi olduğuna inanılır —*çev. notu.*

[12] F. Reines ve C. L. Cowan Jr., *Physical Review,* cilt 90, s. 492 ve cilt 92, s. 830 (1953).

5 mikrosaniye olmalıydı. Böyle bir olayın hemen gerçekleşecek sonucu, bir pozitron ve bir nötronun ortaya çıkması olacaktı. Pozitron, denizdeki kum gibi her yerde, her şeyde bulunan elektronlardan biriyle neredeyse doğduğu anda imha olacaktı. Böylece ortaya iki gama ışını çıkacaktı. İkinci patlama ise, nötronun, kadmiyumklorürle dolu tanktaki kadmiyum atomlarından birinin çekirdeğine yakalanmasıyla olacaktı. Nötronun bir çekirdek tarafından yakalanabilmesi için önce, bir çarpışmalar silsilesiyle yavaşlatılmış olması gerekir, bu da yaklaşık 5 mikrosaniye sürecektir. İki ayrı gama ışını patlaması beklenmesi işte bundan dolayıdır.

Her şey aynen böyle oldu. Arkaplandaki kozmik ışın varlığı asgari düzeydeydi; reaktörden gelen radyasyon baskındı. 1956 yazında "Poltergeist" 5,5 milisaniye arayla gerçekleşen gama ışını patlamaları tespit etti. 14 Haziran'da Cowan ve Reines Pauli'ye bir telgraf göndererek çeyrek yüzyıl önce keşfettiği nötrinoyu nihayet saptadıklarını bildirdiler. Haber tüm dünyada duyuruldu. Fizikle ilgili ilk hatıralarımdan biri, o yıl radyodan "nötrino tespit edildi" haberini duymamdı.

Yıllar sonra, Reines Bethe'ye, 1934'te Peierls'la beraber "nötrinoyu gözlemlemenin uygulamada mümkün olan hiçbir yolu yoktur" diye ilan ettiklerini hatırlattı. Bethe gülümseyerek "Ee, kitaplarda okuduğun her şeye inanmayacaksın" diye cevap verdi.[13]

Keşiften sonra Reines bütün kariyerini nötrinoların özelliklerini ve etkileşimlerini anlamaya adadı. 1995'te, o kırk yıllık kariyer boyunca yaptığı keşiflerden birkaçının hakkının teslim edilmesiyle, Nobel Ödülü'nü aldı. Fakat Cowan 1974'te ölmüştü ve çoğu kişiye göre, bu keşfin hakkının yıllar önce teslim edilmiş olması gerekiyordu. Cowan ve Reines hiç olmazsa Pauli'den, onun yıllar önce ortaya attığı iddiadan, bir kasa şampanya kazandılar. Ray Davis ve Pontecorvo daha bekleyecekti.

[13] F. Reines'in Nobel Konuşması'ndaki aktarımı.

4

GÜNEŞ HÂLÂ PARLIYOR MU?

En karanlık, kapalı havalarda bile Güneş'in hâlâ var olduğundan şüphe etmez hiçkimse. "Güneş hâlâ parlıyor mu?" sorusu, bulutların arasından Güneş'in hâlâ görünüp görünmediğine dair bir sorudur, tümden paydos etmesiyle ilgisi yoktur. Gelgelelim 1970'lerde kısa bir süre, bazı bilim insanları, Güneş'in yakıtının bitmiş, görünen parlak kürenin sönmeye yüz tutmuş közden ibaret olduğunu ve nihai enerji krizinin patlak verdiğini düşündüler.

Güneş ışığının Dünya'ya varması sadece sekiz dakika sürüyor, dolayısıyla Güneş'in yüzeyinin parlak görünmesi en azından dış katmanlarının çok yakın zamana kadar parlamaya devam ettiğini gösteriyor. Güneş'in görünür parlak bölgesindeki sıcaklık 6000 derece, yani kızgın bir endüstriyel fırından daha sıcak, ama şaşırtıcı değil öyle olması. Başdöndürücü yoğunluğu, Güneş'in içini gözlerden saklıyor.

Bu ışığın kökeni, derinlerde yatıyor. Güneş'in merkezindeki enerji yüzeye çıkmadan önce binlerce yüzyıl boyunca içeride dolaşıyor; sizin bugün gördüğünüz şey, yüz bin yıldan uzun zaman önce gerçekleşen reaksiyonların son ürünü. Eğer Güneş'in merkezi çoktan yandı bittiyse, onun sönmesini görmemiz yine de zaman alacak. İşte 30-40 yıl önce bilim insanlarının zihnini meşgul eden de buydu.

Ortaya atılan bazı fikirleri görelim. 1973'te Andrew Prentice Güneş'in yanıp bittiğini, geride helyumdan bir kor

kaldığını söyledi, Fred Hoyle 1975'te Güneş'in merkezinde Büyük Patlama'dan kalma bol miktarda ağır element bulunduğunu, beş milyar yıl önce Güneş Sistemi oluşurken bu ağır elementlerin hidrojenden oluşan bir haleyi kendi çevrelerine topladığını iddia etti; aynı yıl başka kuramcıların meydana getirdiği bir grup da Güneş'in merkezinde bir kara delik olduğunu öne sürdü.[1] 1980'de *Nature*'a bu konuda, "Güneş hâlâ parlıyor mu?" sorusunu başlık olarak kullandığım bir makale yazdım.[2] Bunun, BBC'nin o dönemdeki en iyi bilim programı olan *Tomorrow's World*'ü ["Yarının Dünyası"] hazırlayanların dikkatini çekmesiyle, hikâye bütün dünyaya yayıldı.

Bunca gürültü patırtı ne içindi? Güneş neden parlıyor ki zaten? Hem nötrinoların ne alâkası var bunlarla?

KOCAMAN ALEV TOPU

Güneş'in, Dünya var olduğundan beri hiç sektirmeden her gün bu kadar enerjiyi nasıl olup da ürettiği, bilimin en eski sorularından biridir. Hatta Charles Darwin, 150 yıl önceki fizik ve kimya Güneş ve Dünya'nın, jeolojinin ve evrim teorisinin gerektirdiği kadar uzun zaman boyunca nasıl olup da var olabileceğini açıklayamadığı için, *Türlerin Kökeni* eserinden şüpheye düşmüştü. Bunun cevabı ancak 21. yüzyılda ispatlanabildi.

Eski Mısırlılar Güneş'in ateşten bir top olduğunu düşünüyorlardı. Sınırlı tecrübelerinin ötesine uzanan, doğal bir tahmindi bu; Güneş'in yakıtının neden oluştuğuna dair bir fikirleri muhtemelen yoktu. Bu konuda bir teori üreten ilk kişi, 5. yüzyılda, Yunan filozof Anaksagoras oldu.

Gördüğümüzde "yıldız kaydı" dediğimiz akanyıldızlar, her saniye kilometrelerce yol kat eden, Dünya'nın atmos-

[1] A. Prentice, *Mon. Not. Royal Astronomical Society*, cilt 163, s. 331, 1973; F. Hoyle, *Astrophy J Letters*, cilt 197, s. L127; D. Clayton ve diğ. *Astrophy J*, 1975, cilt 201, s. 489.

[2] *Nature*, cilt 284, s. 507.

ferine büyük bir hızla çarpan kaya parçalarıdır. Dünya'ya doğru düşerken sürtünmeden dolayı ısınıp kızarlar. Bazıları, kalıntılarının, yani meteoritlerin yeryüzüne ulaşacağı kadar büyüktür. İki bin beş yüz yıl önce Anaksagoras Dünya'ya henüz düşmüş bir meteorit buldu. Bir metal yığınıydı bu ve hâlâ o kadar sıcaktı ki Anaksagoras bunun Güneş'ten gelmiş olsa gerektiğini düşündü. Böylece aniden ilham geldi ona: Güneş, kıpkırmızı, sıcak demirden olmalıydı. Neredeyse iki bin yıl boyunca yaygınlıkla inanılan görüş bu oldu.

Güneş'in bu basit tasviriyle ilgili ilk sorunlar ortaya çıkmaya başlayalı daha iki yüz yıl bile olmadı.

Sanayi devrimi devam ediyor, onunla beraber termodinamik ve enerjinin korunumunun önemi giderek daha iyi anlaşılıyordu. Maden eritme fırınlarının yanmaya devam etmesi için onları yakıtla sürekli beslemek gerekiyordu. Çelikhanelerde, ergimiş demir kendi haline bırakıldığında hızla soğuyordu, bilim insanları anladılar ki Güneş bile sonsuza dek sıcak kalamazdı. İşte bu dönemde, jeolojide yapılan keşifler ve Darwin'in evrim teorisi, birbirlerinden bağımsız olarak aynı mesajı verdiler: Dünya binlerce yıl değil, yüzlerce milyon yıl yaşında olmalıydı. Ama bilinen fizik kuralları, Güneş'in nasıl olup da bu kadar zaman yanabildiğini açıklayamıyordu.

1850'lerde, öğretmen John Waterstone, kimyasal enerjinin Güneş'in yakıtını ancak taş devrine, on bin yıl kadar önceye götürmeye yeteceğini gösterdi. Güneş bundan çok daha eskiden beri var olduğuna göre devrede başka bir güç kaynağı olmalıydı. O sırada bilinen yegâne diğer aday, kütleçekimi (yerçekimi) kuvvetiydi. Kayalar gibi çeşitli maddeler Güneş'in kütleçekim kuvvetinin etkisiyle düşerken hız kazanırlar. Güneş'e çarpıp durduklarında bu enerji ısıya dönüşür; ilke olarak, bir araba birdenbire durdurulduğunda frenlerinin ve tekerleklerinin ısınmasıyla benzer bir durumdur bu. Waterstone uzaydan düşen meteorların Güneş'e çarptığını ve böylece Güneş'in fırınına gücünü veren ısıya neden olduğunu öne sürdü.

Bu zekice düşünceyi ürettikten sonra oturup hesap yaptı ve buna yetmeyecek kadar az meteor olduğunu gördü. Bunun üzerine fikrini işledi ve Güneş'in kendisinin, kendi ağırlığı altında içeri doğru düşmekte olduğunu ve bunun da ısı ürettiğini düşündü. Bunları İngiltere Bilim Derneği'nin 1853'teki yıllık toplantısında anlattı. Dinleyenler arasında bulunan William Thomson bundan çok etkilendi. Bu fikri geliştirip açık hale getiren Thomson hesapların bu durumda bile tutmadığını buldu. Güneş'in tek tek gezegenleri yutma ihtimalini de ele aldı; ama bu da bir çözüm olmadı. Güneş, Merkür'ü ve Venüs'ü yutacak olsa bunlar ona ancak bir yüzyıl yetecek kadar güç vereceklerdi, gezegenlerin hepsini tüketse ancak 3000 yıl ömrü olurdu Güneş'in.

1860'ta Thomson Güneş'in kendi içine çökmesi fikrini bir kez daha ele aldı; olabildiğince uzun süre ısı üreterek nasıl çökebileceği üstüne düşündü.[3] 1862'de *Macmillan's Journal*'da yayımlanan bir makalesinde Thomson, Güneş'in yaşı için, büyük ihtimalle "100 milyon yıldan fazla olamaz" diye bir sonuca vardı.

Güneş'in sonlu bir ömrü olması demek, hem gelecekte kıyamet kopması, hem de tarihin bir sınırı olması demekti ve bu, Güneş'e daha uzun bir ömür arayan jeologlar ve Darwin için de anlamlıydı. Darwin, *Türlerin Kökeni* kitabının sonraki baskılarından zamanlamalara dair bütün ifadeleri kaldırdı. Daha 1869'da, Thomson'ın analizi onu o kadar sarsmıştı ki, doğal seçilimi kendisiyle birlikte bulmuş olan Alfred Russel Wallace'a, Thomson'ın çalışmalarının dünyanın yaşı bakımından taşıdığı anlamın, "bir vakittir en acı verici sıkıntıları" olduğunu yazdı.

Yıllar sonra, 1897'de Thomson (artık Lord Kelvin olmuştu) hesaplarını geliştirdi ve Güneş'le Dünya'nın yaşının en büyük ihtimalle 25 milyon yıl olduğunu ilan

[3] Waterstone çöküş üstüne çoktan düşünmüştü zaten. Hikâyenin tamamını, John Gribbin'in *Blinded by the Light* ["Işıktan Görememek"] kitabından okuyabilirsiniz.

etti, böylece aradaki çelişki daha da keskinleşti. Böylece, evrim, jeoloji ve fizik birbiriyle çelişiyordu; tabii eğer, Thomson'ın da kehanet eder gibi eklediği üzere, "yaratılışın muazzam deposunda bizim şu an bilmediğimiz başka kaynaklar yoksa."

Thomson bu hesapları yaparken Güneş ve Dünya'da maddenin birbirine benzer olduğunu farz ediyordu. İşte bu yüzden, 1897'de bir başka Thomson'ın, J. J. Thomson'ın (akrabalıkları yok) atomların da bir iç yapısı olduğunu, içlerinde elektronlar bulunduğunu keşfetmesi ironik oldu. Güneş'in kavurucu sıcağındaki atomların Dünya'dakilerden farklı olabileceği anlamına geliyordu bu. Demek ki bunlar birbirinden farklı kurallara tabi de olabilirlerdi. Bunlara ek olarak, daha bir sene önce Becquerel'in keşfettiği radyoaktivite, doğanın, henüz belirlenemeyen yollarla, ışıma enerjisini kendi kendine üretebildiğini gösteriyordu. Gelgelelim ne Lord Kelvin ne de bir başkası, çelişkileri uzlaştırmak üzere bu imkânları bir araya getirdi o dönemde.

YENİ BİR ENERJİ KAYNAĞI

Becquerel radyoaktiviteyi keşfetmişti ama kimse bunu özellikle önemli bir konu olarak görmedi. 19. yüzyılın son dönemlerinde floresans ve X ışınları gibi çok sayıda tuhaf ışıma şekli ortaya çıkmıştı, dolayısıyla "Becquerel ışınları" da listeye bir madde daha eklenmesinden ibaret görülüyordu. Radyoaktivitenin sadece bir kısmını gösterdiği, atomun içinde saklı o güç ancak Rutherford'un onun üstüne çalışmaya başlamasıyla bilinebilecekti. Rutherford'un adı daima, atom yapısının çözülmesiyle birlikte anılacak. Bundan sonraki 30 sene içinde Rutherford'un söylediği hemen her şey arasından, yanlış çıkan tek şey, atom çekirdeğinin içinde işe yarayacak bir enerji olduğunu zannedenlerin boş konuştuğuydu. Aslında güneş ışığının kaynağı, atomu içindeki enerjidir (nükleer enerji).

Rutherford'un bütün keşifleri farklı yollardan nötri-

noya çıkıyordu. İçlerinden hikâyemizi en doğrudan ilgilendireni, Rutherford'un vardığı ilk sonuç: radyoaktivitenin doğasını anlamak.

Gördüğümüz üzere, Rutherford radyoaktivitenin farklı biçimlerini tespit etmişti. Alfa biçimi, helyum atomlarının çekirdekleri olduğu anlaşılan parçacıklardan oluşuyordu. Kafa karıştırıcı bir gözlem böylece açıklanmış oldu: uranyum içeren minerallerde, eser miktarda helyum gazı bulunmuştu.

Radyoaktivite, maden ocaklarının karanlık derinliklerinde de günışığında olduğu kadar güçlüydü; bu da enerjinin atomların kendi içlerinden geldiğini gösteriyordu. Rutherford ayrıca radyoaktiviteyle elementlerin birbirlerine dönüştüğünü de bulmuştu. Bunları bir araya getirerek asıl fikre vardı: radyoaktivitedeki sürekli enerji yayımı, atomların iç yapısındaki değişmeden kaynaklanır. Rutherford önce, daha çok alfa parçacığı ışıdığında daha fazla enerji yayıldığını gösterdi. Doğal radyoaktivite havada, ayaklarımızın altındaki taşlarda vardı. Her yerde vardı. Radyumun keşfedilmesiyle, radyoaktivitenin dünyayı ısıtabileceği fikri tutulmaya başladı. Radyum doğal olarak ılıktır ve sıcaklığı çevresinin sıcaklığına inmeksizin devamlı olarak ısı yayar. İşte burada, olayın dünyanın yaşı konusunda Lord Kelvin'in termodinamiğe dayanarak yaptığı hesaplardan ibaret olmadığının ilk işaretleri vardı.

Rutherford, radyumun sürekli olarak ısı vermesinin başka bir enerji kaynağının kanıtı olduğunu ve Kelvin'in çelişkisinin aşılabileceğini fark etti. Mayıs 1904'te Kraliyet Enstitüsü'nde yaptığı konuşmayla bunu ilan etti. Loş odada, dinleyiciler arasında Lord Kelvin'i gördü. Konuşmasının, dünyanın yaşını konu alan son bölümünde Kelvin'le başının belaya girebileceğini düşündü; zira bu konuda taban tabana zıt görüşteydiler. Rutherford'un şansına, Lord Kelvin o kritik âna kadar uyudu ve tam o anda, Rutherford'un anlatımıyla, "baktım ki koca kurt doğruldu, tek gözünü açtı ve bana nefret dolu bir bakış attı." Fakat bir çıkış yolu bulmak için ilham tam zamanın-

da geldi ve Rutherford, Kelvin'in dünyanın yaşını "yeni bir enerji kaynağının *keşfedilmemesi kaydıyla"* sınırlandığını söyledi; "bu kehanetli söz tam da bu akşam konuştuğumuz konuya işaret eder: radyuma! Eski toprağın bana dönük yüzü sevinçle parladı."[4]

Kelvin gezegeni soğumakta olan bir cisim gibi ele almıştı, Rutherford ise radyoaktivitenin dünya içinde sürekli bir ısı kaynağı olduğuna işaret ediyordu. Bu gezegende böyle bir iç güç kaynağı varken, yaşı Kelvin'in hesap ettiğinden çok çok daha büyük olabilirdi. Bugün uranyum gibi elementlerin radyoaktiviteyle bozunma hızı dikkatle ölçülmüş durumda. Ölçümler, bir uranyum örneğinin yarısının 4,5 milyar yıl gibi bir zaman ölçeği içinde bozunduğunu gösteriyor.[5] Diğer elementlerin de bozunma hızlarının ölçülmesi ve birbirlerine oranla minerallerde bulunma miktarlarının karşılaştırılmasıyla, ilk örneğin oluşmasından itibaren ne kadar zaman geçtiğini tespit etmek mümkün. Bu hesapla dünya, jeolojinin ve evrimin sunduğu kanıtlarla uyumlu olarak 4,5 milyar yaşında çıkıyor. Yaşları beş milyar yıl civarında olan meteoritler de bulundu. Bunların hepsi Güneş Sistemi'nin yaklaşık beş milyar yıl önce oluştuğu ve Güneş'in bunca zamandır yanıyor olduğu fikrini destekliyor.

Radyoaktivitenin ısısıyla Dünya'nın yaşı açıklansa ve bu yeni enerji kaynağı, Güneş'in gücünün nereden geldiğine dair fikir verse de, şu aşamada Güneş'in o gücü nasıl kazandığını açıklamaktan henüz uzak.

NÜKLEER GÜNEŞ

Radyoaktif elementler sürekli olarak enerji yayabildiklerinden, ilk tahmin doğal olarak Güneş'in de radyoaktif ele-

[4] D. Wilson, *Rutherford – Simple Genius,* s. 206, Hodder and Stoughton, Londra, 1983.

[5] Uranyumun iki temel izotopu olan U-238 ve U-235'in yarı ömürleri sırasıyla 4,5 milyar yıl ve 700 milyon yıldır.

mentlerden oluştuğu oldu. 1903'te İngiliz astronom William Wilson Güneş'te metreküp başına birkaç gram radyum olmasının, onun gücünü açıklamaya yeteceğini hesapladı. İhtiyaç duyulan yakıtın makul düzeyde olmasından dolayı güneş enerjisiyle radyoaktivite arasında bir ilişki olabileceğinin ilk kanıtıydı bu. Fakat bu fikrin üstü hemen çizildi çünkü güneş tayfında radyumdan hiçbir iz yoktu. Güneşin gücü her neden geliyorsa, bu radyum değildi.

Güneş ışığıyla ilişkisi bakımından en çok tanınan element, helyumdur. Helyumun adı güneş tanrısı Helios'tan gelir; çünkü helyum güneş atmosferinin tayfında bulunmuştur ve Güneş'te de bulunduğu açıktır. Gelgelelim helyum, radyoaktiviteyle üretilmekle ve alfa parçacıkları helyum atomlarının çekirdeklerini oluşturmakla beraber, radyoaktif değildir. Helyumun, Güneş'teki ilk güç üretiminin kalıntısı veya külü olabileceği fikri buradan çıktı. Ama burada bir problem vardı: güneş tayflarında, alfa parçacığı ürettiği bilinen ağır radyoaktif elementlerin hiçbirinden iz yoktu. Güneş'teki helyumun kökeni her ne idiyse, Dünya'da olduğu gibi radyoaktivite değildi.

Alanın büyük sıçraması, iki sene sonra, Einstein'ın görelilik teorisinin çıkması ve meşhur $E = mc^2$ denklemiyle maddenin bütün biçimlerinin içinde enerjinin saklı olduğunu söylemesiyle yaşandı. Einstein, bir cismin E miktarda enerji açığa çıkarmasının, kütlesi m'nin E/c^2 (c ışık hızıdır) kadar azalması demek olduğuna işaret ediyordu. 1913'te, her atomda bulunan çekirdeği artık keşfetmiş olan Rutherford, Dünya'da kararlı görünen elementlerin Güneş'teki muazzam sıcaklıklarda çok daha farklı davranabileceği, bir çeşitten ötekine geçebilecekleri yorumunu yaptı. Bunu yaparken kütlelerinin bir bölümü ışıma enerjisine dönüşebilir, böylece çok uzun zaman zarfında Güneş'in kütlesi azalırdı. Göründüğü kadar hayret verici bir tez değil bu. Nükleer transmutasyonla [dönüşüm] çok önemsiz miktarda kütle çok fazla enerji verebilir; çünkü ışık hızı, yani $E = mc^2$'deki c çok büyüktür. Güneş'in kütlesinin sadece yüzde 1'i enerjiye dönüşecek olsa, Güneş

bir trilyon yıl yanardı. Güneş'in nükleer bir fırın olduğu fikri böylece doğdu ama sürecin nasıl işlediğinin açıklanması daha birkaç yıl alacaktı.

Modern güneş ışığı teorisi 1920'de, Cambridge'de Astronomi Profesörü olan Sir Arthur Eddington'ın bir fikrinden çıktı. Gördüğümüz gibi, çok yüksek sıcaklıklarda, Dünya'da kararlı kabul ettiğimiz elementler arasında dönüşümler gerçekleşebileceğini Rutherford zaten söylemişti. O bunu açıkça belirtmediyse de, Güneş'teki helyumun Dünya'da bilinmeyen bir çekirdek değişimiyle üretilmiş olma ihtimalinin kapılarını açıyordu. İşte şimdi Eddington'ın ortaya attığı şey buydu: Güneş, hidrojeni yakıp helyuma dönüştürerek ısı ve ışık üretiyor.

Fikir Eddington'ın aklına, meslektaşı Francis Aston'ın üniversitenin Cavendish Laboratuvarı'nda yaptığı bir keşiften gelmişti. Aston, bir helyum atomunun, dört hidrojen atomunun kütlesinden 120'de bir eksik olduğunu bulmuştu. Eddington ipucunu işte buradan yakaladı. Güneş atmosferinde bulunan helyum, elementlerin en basiti olan hidrojenden oluşmuş bir Güneş'in, hidrojeni helyuma dönüştürmesinden artakalan kül olabilir miydi? Her seferinde dört proton –hidrojen atomlarının çekirdekleri– Güneş'in göbeğinde birleşiyor olsa, tek bir helyum atomunu meydana getirir, ve "120'de 1" kütle kaybı da ışıma enerjisine dönüşmüş olur. Einstein'ın $E = mc^2$'sinin uygulamadaki halidir bu.

Ortadaki bariz soru, bu neden Dünya'da olmuyor, Güneş'in ne özelliği var?

Elektriğin temel özelliklerinden biri, aynı elektrik yüküne sahip parçacıkların birbirini itmesidir. Bütün protonlar pozitif elektrik yükü taşır; dolayısıyla bir araya gelmeye direnirler. İki protonu bir araya gelmeye zorlamak ve helyumun tohumlarını oluşturmaya başlamak için bu itme kuvvetinin aşılması gerekir. Dünya'daki sıcaklıklarda protonlar fiilen kararlıdır ve birbirleriyle çarpışma ihtimalleri yoktur; bunun sonucu olarak hidrojen soğukta doğal olarak füzyona girip helyum üretmez.

Yıldızlar, mesela Güneş, Dünya'dan çok farklıdır. Onların kararlılığı (sabitliği), yıldızın kendi ağırlığı altında çökmesiyle, merkezinde hiç durmadan artan ısının şiddeti arasında bir dengeleme işidir. Güneş'in kararlılığının, boyutunun, kütlesinin ve parlaklığının açıklanabilmesi için merkezindeki sıcaklığın 14 milyon derece olması gerektiği hesaplanmıştır. Böyle bir sıcaklıkta protonlar hızla hareket eder ve birbirlerini itme yönündeki elektrik kuvvetinin onları yavaşlatıp reddetmesine kalmadan birbirlerine yaklaşıp birleşebilir; yani füzyon yapabilirler. Bunun sonucu, Güneş'in merkezinde protonların birbirine yapışıp helyuma dönüşebilmesidir.

Eddington Güneş'in nasıl enerji ürettiğini söylemişti ama bunun nasıl gerçekleştiğinin ayrıntılarını açıklamamıştı. Teorinin tamamı ancak 1939'da, Hans Bethe'nin "*Energy Production in Stars*" ("Yıldızlarda Enerji Üretimi") başlıklı makalesini yayımlamasıyla ortaya çıktı.[6]

Efsaneye göre, Bethe problemi tren yolculuğu sırasında, Washington DC'den New York Eyaleti'nin kuzeyindeki Cornell'e giderken çözmüş. Astronomlar ve fizikçiler, yıldızların nasıl enerji ürettiğini konuşmak üzere Washington'da toplanmıştı. Genç bir nükleer fizikçi olan Bethe nükleer transmutasyon konusunda şimdiden uzmandı ama o konferansa gidene kadar yıldızların enerjisine duyulan ilgiden de, burada nükleer süreçlerin işlediğine dair genel kanıdan da haberi yoktu. Mesele, Güneş'in enerji çıktısını sürdürecek kadar yüksek enerji veren, ama Güneş'in kendi kendini yok edeceği kadar da hızlı olmayan nükleer transmutasyon örnekleri bulmaktı. Yani amaç "Altın" reaksiyonlarını bulmaktı: ne çok sıcak, ne de

[6] 1920'de Eddington'ın bu fikri ortaya atması ile 1939'da Bethe'nin çalışmasını yayımlaması arasında Galli bilim insanı Robert Atkinson ve Hollandalı Fritz Houtermans 1929'da daha hafif elementlerin kütlelerini $E = mc^2$'yi dikkate alarak ölçmüş ve hafif elementlerin çekirdeklerinin füzyonuyla yüksek miktarda enerji açığa çıkabileceğini öngörmüşlerdi.

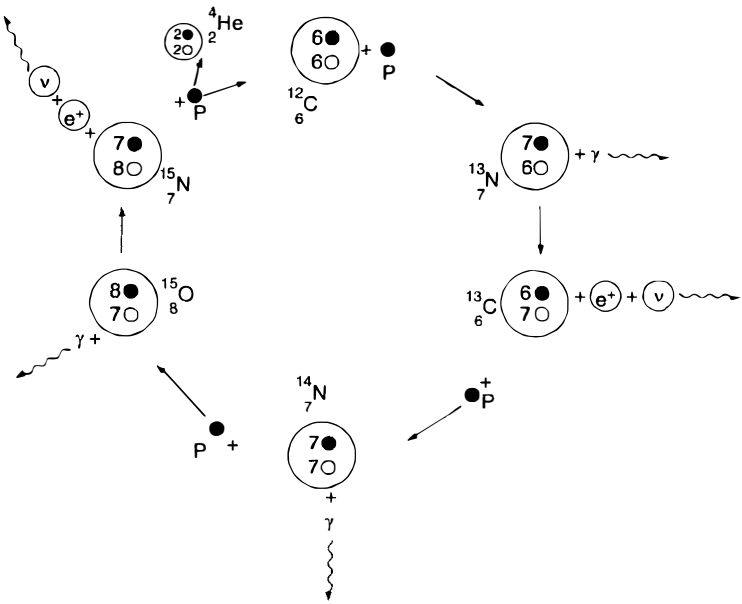
çok soğuk, tamı tamına fırının 14 milyon derecede istikrarla yanmasına yetecek kadar.

Gençliğinden gelen özgüvenle, nükleer bilim alanında tecrübesi de olduğuna göre bunun kendisi için kolaylıkla çözülecek bir problem olduğunu düşündü Bethe. İşi zorlaştırmak için meseleyi trenle eve dönüş yolculuğu bitmeden, hatta tercihen garsonlar yolcuları akşam yemeğine davet etmeden çözmeyi denemeye karar verdi. CNO döngüsünü[7] çözmeyi başardı; durum Eddington'ın düşündüğünden epey farklıydı. "CNO" harfleri, karbon, azot (nitrojen) ve oksijeni temsil eder ve döngü, bir miktar karbon içeren yıldızdaki protonlar karbonu önce azota, sonra oksijene, ardından tekrar karbona çevirirken helyum yaymasıyla gerçekleşir (Şekil 3). Çok güzel bir teoriydi bu, hem enerji hem de helyum üretiyordu: Helyum –Helios'ta, yani Güneş'te keşfedilen element. Mükemmel.

Bethe trende giderken, sadece kâğıt ve kalem kullanarak yıldızların nasıl işlediği bilmecesinin önemli bir bölümünü çözdü. Yıldızda bu süreci başlatacak bir miktar karbon olduğu sürece, boşta kalan her proton helyuma ve güce dönüştürülebilir; geride kalan karbon bu gibi füzyonları yeniden başlatabilir. Bu tamam da, peki karbon nereden geldi? Bethe'nin teorisi Güneş'ten daha sıcak ve ondan yarım Güneş kadar daha büyük yıldızların nasıl olup da parladığını açıklıyordu ya, kısa süre içinde anladı ki nispeten daha küçük ve daha soğuk olan, ve artık bildiğimiz üzere karbonun ender bulunduğu Güneş için işlemiyordu bu teori. İşin içinde başka bir iş vardı.

Cornell Üniversitesi'ne varan Bethe, problemi sistematik olarak ele almaya, gerekirse periyodik cetvelin bütün elementlerini taramaya karar verdi. Neyse ki hepsini taramasına gerek kalmadı, çünkü çözümü en başta, elementlerin en basitinde, hidrojende buldu. Böylece

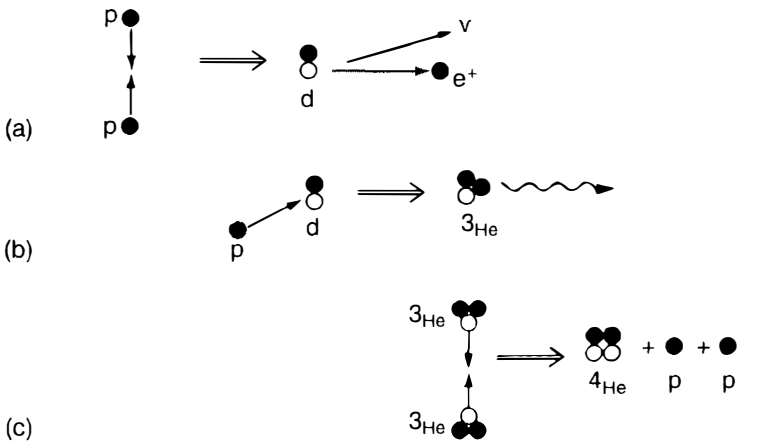
[7] Bethe'nin 1939'da yayımlanan makalesi (*Physical Review*, cilt 55, s. 434) editöre Eylül 1938'de ulaştı. Aynı yıl, Alman Carl von Weisacker da CNO döngüsü ihtimalini ondan bağımsız olarak anlamıştı.



Şekil 3: CNO döngüsü. CNO (Karbon Azot Oksijen) döngüsü, Güneş'ten daha ağır yıldızların temel enerji kaynağıdır. Bunun sonucunda dört hidrojen çekirdeği (proton) füzyonla tek bir helyum (simgesi He'dir) çekirdeği oluştururlar. Buradaki elementlerin çekirdekleri, H, He, C, N, O simgeleriyle gösteriliyor; yukarıda yazılmış sayılar çekirdekteki bileşenlerin (proton ve nötronların) toplam sayısını, alttaki sayılarsa protonların sayısını ifade ediyor. *γ* (gama) fotonun, *ν* ise nötrinonun işareti. Bu işlem sadece, nispeten düşük enerjili nötrinolar üretir. Dalgalı çizgiler, foton ve nötrino olarak yıldızdan yayılan enerjiyi anlatıyor. Protonlar siyah, içi dolu dairelerle, nötronlar beyaz, boş dairelerle gösteriliyor.

Eddington'ın fikrini yeniden keşfetmişti fakat bu kez fikrin nasıl işlediğini ortaya koymuş, böylece onu bilimsel olarak sınanabilecek niceliksel bir tanımlamaya dönüştürmüştü.

Milyonlarca derece sıcaklıkta, Güneş gibi yıldızların merkezinde, hidrojen atomları dağılıp bileşenlerine ayrılır: elektronlar ve protonlar. Protonlar birbirine çarptığında nükleer reaksiyonlar –füzyon– olma ihtimali vardır. "*pp* zinciri" (*pp,* proton-proton anlamında) dediğimiz olay, iki



Şekil 4: Güneş'teki pp proton-proton zincirleme reaksiyonu. *p* ile gösterilen iki proton füzyonla bir döteron (beyaz daireyle gösterilen bir nötron ve siyah daireyle gösterilen bir protondan oluşuyor) ile bir pozitron (e+) ve bir nötrino haline geliyor. (b)'de döterona başka bir proton çarpıp, onu helyum-3 ve bir fotona dönüştürüyor. (c)'de bu işlemlerden ikisinin toplu sonucunu görüyoruz: İki helyum-3 çekirdeği birleşerek bir tane helyum-4 ve iki proton oluşturuyor.

protonun birbirine çarpmasıyla başlar, bunlar füzyonla birleşerek bir döteron (bir protonun bir nötrona gevşekçe bağlı olduğu sistem), bir pozitron ve bir nötrino oluştururlar.[8] Döteron kendini bir proton kalabalığında bulur ve neredeyse aynı anda o protonlardan birini kapıverir; sonuçta ortaya çıkan üçlü, iki proton ve bir nötrondan oluşan helyum-3'ün çekirdeğidir. Son olarak iki tane helyum-3 çekirdeğinin çarpışmasıyla, helyumun kararlı biçimi olan helyum-4 oluşur, iki tane proton çekirdekten dışarı atılır. Bunun net sonucu, başlangıçtaki dört protonun sonunda tek bir helyum-4 tohumu olması ve pozitron, foton ve nötrino formunda enerji yaymasıdır (Şekil 4). CNO döngüsünün işlemesi için 20 milyon derecenin üzerinde sıcaklık

[8] Protonlardan biri, Joliot'nun keşfettiği (s. 32) beta bozunması biçiminde ve Fermi'nin teorisinin öngördüğü şekilde nötron, pozitron ve nötrinoya dönüşmüştür.

gerekirken, *pp* zinciri 15 milyon derecede gerçekleşir, tıpkı Güneş'in merkezinde olduğu gibi.

Pozitronlar elektronlarla beraber imha olup, gama ışını üretiyorlar –görülebilen tayfın çok ötesindeki ışık parçacıkları. Elektrik yükü fotonlar için bir engel gibi; onları yakalıyor, enerjilerinin bir kısmını çekiyor ve fotonları geri atıyor. Bu fotonların oraya buraya çarpıp sekerek yüzeye kadar yol almaları binlerce asır sürüyor, yüzeyden gözümüzle gördüğümüz ışık olarak dışarı çıkıyorlar. Nötrinolar ise engelsiz akıp gidiyor, sekiz dakikayı azıcık aşan sürede dünyaya varıyorlar bile. Yani en azından, eğer Bethe'nin yıldız ışığı teorisi doğruysa böyle olması lazımdı. Sayılar tutuyordu, ortaya konan fizik anlamlıydı, ama bunun gerçekten doğru olup olmadığını ancak deney söyleyebilirdi.

Dünya'da yapılan deneyler protonların nasıl davrandığını bize göstermişti. İki proton, 14 milyon derece sıcaklıktaki bir gazda bulunan parçacıklarınkine benzer bir hızla çarpıştığında, füzyon yapabilecek kadar ileri gidebiliyorlardı. Olabilse de, çok küçük bir ihtimaldi bu: İki protonun bir araya gelip füzyona girip bir döteron oluşturması ve böylece *pp* zincirini başlatması, on milyar trilyon tane karşılaşmadan ancak birinde mümkün oluyordu. Başka şekilde ifade edersek, eğer siz Güneş'te bir proton olsaydınız, beş milyar yıl içinde, kendinize bir eş bulup füzyona girme ihtimaliniz kabaca yarı yarıya olacaktı. Bu ender bulunacak bir şanstır tabii, ama Güneş'i oluşturan çok fazla proton var. Her saniye, proton biçimindeki beş milyon ton kütle helyuma dönüşüyor ve açığa çıkan enerji dünyayı ısıtıp, yıldızlararası uzaydan görülebilen ışık veriyor. Bu yavaşlık iyi bir haber, çünkü Güneş'in zeki yaşamın burada ortaya çıkmasını sağlayan evrim sürecine yetecek kadar uzun zaman yanmasına elveriyor. Güneş'in bunca zaman nasıl parladığı bilmecesini çözdüğü gibi, Dünya'nın ve Güneş Sistemi'nin beş milyar yıl yaşında olmasıyla da uyuşuyor.

Böylece, Bethe'nin dehası, hem gördüğümüz haliyle Güneş'i açıklamak için doğru hızda ısı üreten, hem de

külü helyum olan nükleer süreçleri sonunda bulmuştu. Güneş'in boyutlarını ve kütlesini biliyoruz, ışığını görüyoruz. Hesaplar tutuyor. Bethe'nin açıklaması bilinen gerçeklere uygun, ki kritik olan ilk şart budur, fakat şu soru yine de cevaplanmaya muhtaç: Güneş'te *fiilen* böyle mi oluyor? Çok önemli olarak, bu hipotezin henüz kimsenin denemediği ek anlamları vardı: Bethe'nin *pp* zincirinde nükleer füzyon teorisi, nötrinoların ortaya çıktığını söylüyordu.

Fakat 1939'da Bethe bu fikri ortaya attığında, nötrinonun kendisi bile kuramcıların zihninde canlanan bir hayal ürününden ibaretti. Fermi'nin teorisine verilen tepki (s. 36) nötrinonun "gerçeklikten uzak", hatta "ilgi çekici olmayan" bir şey sayıldığını göstermişti. Bizzat Bethe'nin, 1934'te Peierls'la beraber yaptığı hesaplar nötrinonun eğer varsa bile bir şeye çarpma ihtimalinin, gözlemlenmesini muhtemelen imkânsız kılacak kadar düşük olduğunu ortaya koyuyordu. Pontecorvo'nun 1946'daki makalesine kadar, genelgeçer bilgi buydu.

Belki de bu yüzden, Bethe'nin makalesinde teoriyi Güneş'ten gelen nötrinoları saptayarak test etme imkânından hiç söz edilmiyordu. Güneş nötrinolarını arayarak Bethe'nin fikrini sınama imkânı ancak Pontecorvo görüşünü ortaya attıktan ve 1956'da nötrino[9] keşfedildikten sonra söz konusu oldu.

[9] Aslında antinötrino, bkz. s. 48.

5

GÜNEŞ'TEN KAÇ NÖTRİNO GELİR?

İLK FİKİRLER

Güneş'i ancak üstünkörü olarak görebiliyoruz, çünkü yüzeyin yüz binlerce kilometre altında, nükleer fırının ortasında olan bitenlerin ışığı gözümüzü kamaştırıyor. Fakat eğer Bethe haklıysa, nötrinolar hiçbir engelle karşılaşmadan oradan dışarı akıyor olmalı. Güneş'ten gelen nötrinoları yakalayabilirsek, bir yıldızın kalbini görüyor olacağız. Ray Davis'e ilham veren bu oldu.

Bir şeyi bulmak istiyorsanız, önce ne aradığınızı bilmeniz iyi olur. Tek bir nötrinonun ne kadar enerjisi var? Bunu bilmek bize, nötrinoyu bulmakta işimize en çok hangi dedektörün yarayacağını gösterir. Güneş, nötrinolardan yana aydınlık mı, loş mu? Cihazın ne kadar güçlü, ne kadar büyük olması gerektiğini bu belirleyecek.

Güneş nötrinolarının, tespit edilmeleri gerçekten imkânsız olacak kadar sönük olması mümkün mü? Bu gibi sorulara cevap vermek elzemdi. Bunu size anlatma şeklimden dolayı, Bethe'nin Güneş teorisinden, bir dedektör tasarlamak ve nihayet güneş nötrinolarını görmek için açık bir çalışma planının kendiliğinden çıktığını sanabilirsiniz. Fakat iş hiç de öyle değildi. Bilakis, bunun üzerine düşünen hemen hiçkimse yoktu.

Bethe'nin, yıldızlarda enerji üretiminin temelinde nükleer füzyon olduğu fikri ilk olarak 1938-39'da, Pauli

ile Fermi'nin nötrinoyu içeren, beta bozunmasına dair teorilerini sunmasından beş sene sonra ortaya çıktı. Bethe'nin teorisi Güneş'in sadece ısı değil, çok sayıda nötrino da ürettiği anlamına gelmekle beraber, yıldızlardaki nükleer füzyona dair ilk makalelerin hiçbirinde bu fikri nötrinoları tespit ederek test etmekten bahsedilmiyordu. Bruno Pontecorvo'nun 1946'da yayınlanan, Ray Davis'in reaktörden çıkan nötrinoları yakalamak amaçlı başarısız girişimine ilham veren makalesinde Güneş'ten sadece iki cümlede bahsediliyordu. Hatırlarsanız, işaret edilen asıl nokta klorun nötrinolar için iyi bir dedektör olacağıydı, yeter ki çok sayıda nötrino ve yeterli miktarda klor olsun.

Pontecorvo Güneş'ten sadece laf arasında söz etse, ve Davis'in ilgisini ilk uyandıran değerlendirme yazısında bu fikir çok kısaca geçse de, konu Davis'in dikkatini çekmişti. Daha Brookhaven'daki reaktörden nötrinoları yakalamak için ilk girişiminde bile, cihazının, eğer CNO döngüsü önemliyse, güneş nötrinolarını da yakalayabileceğinin farkındaydı.

Klor, ancak nötrinonun klor atomlarını argona dönüştürerek o kritik kanıtı sunacak reaksiyonu[1] başlatacak enerjisi varsa, etkili bir dedektör olabilir. Bethe'nin teorisine göre *pp* zincirinin en önemli olduğu yer Güneş'tir; CNO döngüsü ise ancak daha büyük yıldızlarda baskın olabilir. Maalesef, *pp* füzyon süreciyle üretilen nötrinoların enerjisi, kloru etkilemek için gereken enerjinin yarısından azdır; dolayısıyla klor tankı bu nötrinoları göremez. Fakat Ray Davis bu zor meseleyle ilgilenmeye başladığında

[1] Enerjiler genellikle elektron-volt (eV) cinsinden yazılır. Bir elektronun, bir voltluk bir pille ivmelendirildiğinde kazanacağı enerji miktarıdır bu. Bir kimyasal reaksiyonda tek bir atomun açığa çıkardığı enerji genelde bundan biraz daha azdır. Nükleer süreçlerde, binlerce (keV) veya milyonlarca (MeV) elektron-volt alınıp verilir. Bir nötrinonun, bir klor atomunu harekete geçirip, argonun Davis'in saptayabileceği radyoaktif biçimine dönüştürmesi için en az 860 keV'a ihtiyacı vardır. Güneş'ten gelen on bin nötrinodan ancak bir tanesinde bu kadar enerji bulunur.

astrofizikçiler henüz, CNO döngüsünün Güneş'te bir rolü olup olmadığını tartışmaya devam ediyorlardı. Bu döngüde oluşan azot-13 ve oksijen-15, klor dedektörü harekete geçirmeye yetecek enerjiye sahip nötrinolar üretiyorlardı.

Davis arkaplandan, yani kloru nötrinolara benzer şekilde etkileyebilecek ve yanlış alarm verebilecek rasgele etkenler olmasından da endişe ediyordu: Hırsız alarmları her çaldığında kötü niyetli biri içeri girmeye çalışıyor demek değildir. Bu nedenle, Davis 1955'te kozmik ışınların oluşturacağı arkaplanı en aza indirmek için 4000 litrelik dedektörünü yerin altı metre altına indirdi. Daha önce gördüğümüz üzere (s. 48), reaktörden gelen nötrinoları yakalama girişiminde başarılı olma ihtimali yoktu; çünkü reaktör bol miktarda antinötrino üretir. Fakat sonunda, Güneş'in gerçekten aranan şeyi üretiyor olduğu öngörülüyordu, yani bu kez başarılı olması için umut vardı.

Ne yazık ki burada da şansı yaver gitmedi. Güneş'ten gelen nötrinolardan hiçbir iz bulamadığı, birkaç hafta içinde gayet açık görülüyordu. Yazdığı raporda Davis, eğer Güneş'in gücü CNO döngüsüyle üretiliyorsa, hiçbir nötrino göremeyişinin üretim hızının oldukça düşük rakamlarda kalması anlamına geldiğini bildirdi. Demek ki ya güneş nötrinoları fikri yanlıştı, ya da CNO döngüsü önemli değildi.

Davis'in deneysel alanda CNO döngüsünden vazgeçmesi pek ilginç bulunmadı; çünkü o sırada astrofizikçiler Güneş'in öncelikle *pp* zincirinden güç bulduğuna, gücün kaynağının CNO döngüsü *olmadığına* ikna olmuşlardı artık. Makalesini değerlendirenlerden biri, bunu birkaç bakımdan eleştirdi. Öncelikle, o dönemde (1955) nötrinonun var olduğuna dair bile kanıt yokken, Davis'in hiç nötrino saptayamaması Güneş'le ilgili pek bir şey anlatamazdı. İkincisi, bu şekilde nötrino üretiliyor olsa bile, Davis'in deneyi bunları tespit edecek hassasiyete sahip değildi, çünkü CNO döngüsü zaten Güneş'te de çok önemsiz ölçüdeydi. Davis'in girişimi, bir kişinin dağın tepesine çıkıp Ay'a uzanmasına ve ona dokunamayınca Ay'ın dağın tepesinden üç metreden daha uzakta olduğu sonucuna

varmasına benzetildi.[2] Tek kelimeyle: etkisiz.

UMUDUN PIRILTISI

1958'de, Bethe'nin Güneş'in güç kaynağı olduğunu düşündüğü nükleer süreçlere dair çok önemli bir şey keşfedildi.

Helyumu üreten *pp* zincirinin son aşamasında, iki tane helyum-3 çekirdeğinin çarpışmasıyla helyum-4 ortaya çıkar. Eğer Güneş'te ilk etapta protondan başka bir şey olmasaydı hikâye bundan ibaret olurdu. Ama Güneş'te bu süreçler beş milyar yıldır cereyan ediyor, dolayısıyla orada zaten bir sürü helyum-4 var. Tam bu son anda, *pp* döngüsü helyum-3'ü üretiyor ve bunun yeni üretilmiş bir diğer helyum-3'le karşılaşmak yerine eskiden kalma helyum-4'lerden birine toslama ihtimali de var. Böyle bir şey olduğunda helyum-3'le helyum-4 birleşip yedi bileşenli bir çekirdek oluşturur: dört proton ve üç nötrondan meydana gelen, berilyum-7 çekirdeğini.

Bethe bu şekilde berilyum üretimi gerçekleşebileceğini anlamıştı, fakat bunun çok ender olacağını düşünüyordu. Ama Amerikan Fizik Derneği'nin New York'taki yıllık toplantısında, Donanma Araştırma Laboratuvarı'nda bilim insanlarının bu iki çekirdeği, helyum-3 ve helyum-4'ü füzyonla birleştirmeyi başardığı ve bunun herkesin sandığından bin kat daha kolay olduğunu tespit ettikleri haberi geldi. Bu demekti ki Güneş'te bunların füzyonu daha önce düşünülenden bin kat daha sık gerçekleşiyordu.

Önde gelen astrofizikçilerden Willy Fowler da Los Angeles'taki Caltech'ten [California Teknoloji Enstitüsü] kalkıp toplantıya gelmişti. Verilen haber, Bethe'nin daha önce ona söylediği bir şeyi hatırlattı Fowler'a. Bethe, berilyum-7 üretildiğinde bunun da gidip Güneş'teki pro-

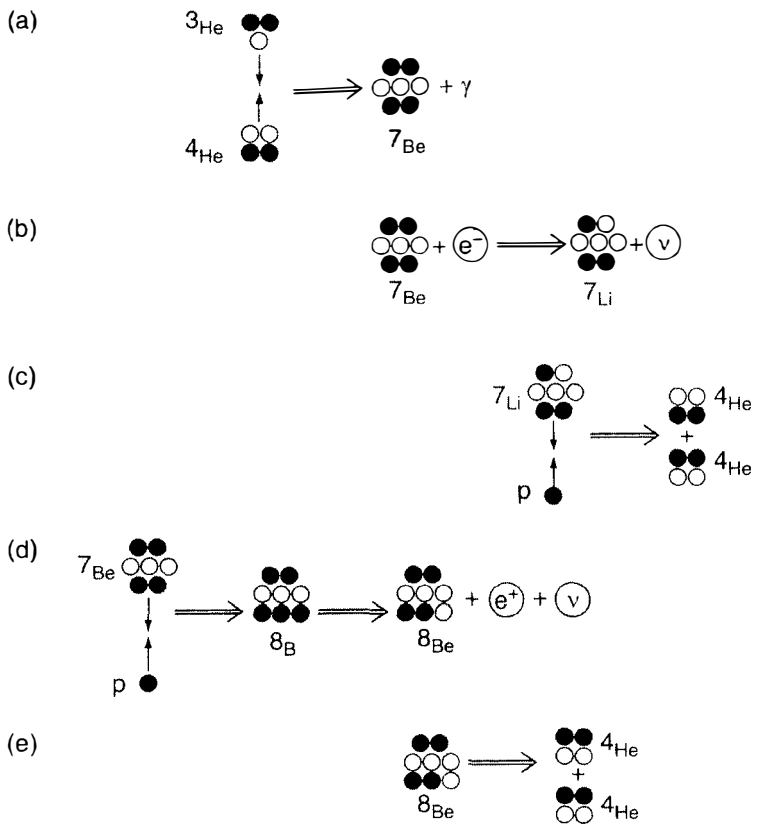
[2] Aktaran: J. N. Bahcall ve R. Davis, "The Evolution of Nötrino Astronomy", *Essays in Nuclear Astrophysics*, Cambridge University Press, 1982, s. 243-285.

tonlardan birine çarpabileceğini ve böylece bir sekizlinin, boron-8'in oluşağını söylemişti. Burada heyecan verici olan, bu işlem sırasında, klor dedektörünü tetiklemek için gerekenden çok daha fazla enerjiye sahip bir nötrinonun da yayılmasıydı. Donanmadaki ekibin elde ettiği sonuç, berilyum-7'nin Bethe'nin sandığından çok daha sık üretilmesi ve Fowler'ın anladığı üzere, nötrinoların da daha çok olması demekti. Birdenbire, güneş nötrinolarını üretmenin çok şaşırtıcı bir yolu kendiliğinden ortaya çıkıvermişti. Fowler derhal Davis'e, Güneş'in hakikaten de klor dedektörünün saptayabileceği kadar çok sayıda nötrino üretiyor olabileceğini yazdı.

Davis haberi aldığında, Savannah Reaktörü'ndeki deneyine başlamıştı bile. Argon atomlarının, yani nötrinoların işaretinin üretildiğine şüphe yoktu, fakat bunların miktarı, kozmik ışınların etkileşiminden gelmesi beklenen miktarla ısrarla örtüşüyordu. Deney, güneş nötrinolarını bu istenmeyen arkaplandan ayırt edecek hassasiyette değildi. Davis sanki bir şelalenin altında durmuş, yağmurun yağıp yağmadığını anlamaya çalışıyordu: arada yağmur damlaları gibi güneş nötrinoları varsa bile, kozmik çağlayanın içinde kayboluyorlardı. 1955'teki başarısızlığını aşıp daha iyisini yapmak istiyorsa, kozmik ışınların etkisini azaltmak zorundaydı. Bir bilim insanının bu konudaki etkileyici özetinde söylediği gibi,[3] astronomlar nasıl şehir ışıklarının parıltısından kaçmak için dağların tepelerine çıkıyorsa, Davis'in deney düzeneğinin de öyle, Kuzey Işıklarının etkilerinden kaçmak için yerin altında inmesi gerekiyordu.

Ohio'daki Barberton kireçtaşı madeni, yerin 700 metre altına uzanır. Berilyum-7 üretim miktarının fazla olduğu haberinden ilham alan Davis ve melektaşı John Calvin,1959'un sonunda, Savannah deneyinde kullandıkları tankı madene yerleştirdiler ve ölçüm yapmaya baş-

[3] SNO ortaklığının lideri (9. Bölüm) Art McDonald, 2001'de bir basın toplantısında bu benzerliği kurdu.



Şekil 5: Berilyum, boron ve nötrinolarla helyum yapımı. İşlemlerin yüzde 85'i Şekil 4'te gördüğümüz şekilde olur. Kalan yüzde 15'in neredeyse tamamı, helyum-3'le helyum-4'ün birleşerek bir tane berilyum-7 çekirdeği ile bir foton üretmesidir (a). Berilyum-7'nin 4 protonu, 3 nötronu var. (b)'de, berilyum-7 bir elektron alıp, lityum-7'ye (3 proton ve 4 nötron) ve bir nötrinoya (enerjisi 0,9 MeV'tan az) dönüşüyor. (c)'de, lityum sonunda bir protonla birleşerek iki tane helyum-4 çekirdeği oluşturuyor. Çok küçük bir ihtimalle (yaklaşık % 0,01 yani 10.000'de 1), berilyum-7 bir protonla füzyona girerek boron-8'i (5 proton ve 3 nötron) ortaya çıkarabilir; bu da bozunup berilyum-8'e dönüşür ve bir pozitronla bir nötrinoyu dışarı verir (d). Bu nötrinonun enerjisi 15 MeV kadar olabilir ve Davis'in deneyinin saptayabildikleri de işte bu, nispeten yüksek enerjili nötrinolardır. Son olarak (e), berilyum-8 bölünerek iki tane helyum-4 çekirdeği olur. Protonlar içi dolu, siyah dairelerle, nötronlar boş, beyaz dairelerle gösteriliyor.

ladılar. Berilyum-7'nin bir protonla birleşip berilyum-8'i oluşturması sırasında üretilen nötrinoların peşindeydiler. Daha yolun başındalardı ki kötü bir haber geldi: Nükleer fizik deneyleri berilyum-7 üretiminin kolay olduğunu göstermişti ama, kritik olan sonraki adımın, bir protonla birleşip berilyum-8'i üretme aşamasının, zor olduğu ortaya çıktı. Bu haberin yarattığı karamsarlık, Ray Davis'in güneş nötrinolarına dair ikna edici bir kanıta ulaşmakta bir kez daha başarısız olmasıyla pekişti.

Dünya'daki nükleer reaktörlerde üretilen nötrinoları bulmak zaten zordu; 1960'ta, güneş nötrinolarını aramanın da eğer imkânsız değilse, en iyi ihtimalle çetin bir iş olduğu yeterince açıktı. Clyde, Cowan'la beraber, nükleer reaktörlerde üretilen nötrinoları ilk tespit eden kişi olan Fred Reines, o yıl yazdığı değerlendirme makalesinde,[4] güneş nötrinolarının saptanmasının "binlerce, hatta yüzbinlerce litrelik C_2Cl_4 (tetrakloroetilen, yani kuru temizleme sıvısı) dedektörleriyle bile" muhtemelen başarılamayacağı ve bu zorlu mücadelenin "deneycileri buna girişmekten caydırabileceği" sonucuna vardı.

Bu noktada Davis, arayışından vazgeçmediği gibi, kelimenin her anlamıyla, boğazına kadar batmıştı bu işe: 700 metre yeterince derin değildi belki de, ve 4000 litre muhakkak ki çok azdı. Reines haklıysa, Davis bir hayaletin peşindeydi. İşte bu moral bozukluğu döneminde, Willy Fowler'a, hakemlik etmesi için, John Bahcall adında genç bir kuramcının makalesi gönderildi. Bu tesadüfi karşılaşma sayesinde Bahcall ile Davis, ömürlerinin sonuna kadar devam edecek bir yola beraberce koyulmuş oldular.

KARŞINIZDA JOHN BAHCALL

John Bahcall bilim insanı olmayı hiç düşünmemişti. 1934'te Louisiana'da doğan Bahcall'ın okul yıllarında en

[4] F. Reines, *Ann. Rev. Nucl. Science*, cilt 10, s. 25.

çok ilgilendiği şey tenis oynamaktı, ta ki son sınıfta, akademiyle ilişkili bir yeteneği olduğunu anlayana kadar. Yeteneği, münazara konusundaydı. O ve okuldan bir arkadaşı, 1952'de ABD ulusal münazara yarışmasını kazandılar; bunun üzerine felsefe okumak için eyalet üniversitesine kaydoldu Bahcall. O sıralar amacı haham olmaktı.

Üniversitedeki ilk senesinin sonunda, Berkeley'deki California Üniversitesi'nde bir yaz okuluna katıldı ve okulu çok sevdi. Ardından tam zamanlı öğrenci olarak Berkeley'e kaydolmayı başardı. İlgi alanı hâlâ felsefeydi ama mezun olmak için bir fen dersi alması gerekiyordu. Bahcall fiziğe işte böyle âşık oldu.

Felsefe derslerinde Bertrand Russell'ı okumuştu. Russell'ın insanların koca evrende ne kadar önemsiz oldukları şeklindeki görüşü, Bahcall'un astronomiye ilgi duymasına neden oldu. Fakat kariyerinin bu alanda olmasına yine bir dizi tesadüf sebep oldu.

1960'ta Bahcall Indiana Üniversitesi'nde zayıf etkileşim teorisi[5] üzerine ders almaktaydı. Beta bozunmasını ve nötrinoların davranışlarını kontrol eden bu kuvvete dair teori, Fermi'nin 1934'te yazdığı kadersiz makaleyle başlamıştı. Beta bozunmasını daha iyi anlamak isteyen Bahcall kendi kendine problemler üretip çözmeye başladı. Problemler arasında, beta bozunmasının tersi, yani nötrino serbest kalırken elektronun yakalandığı aşama da vardı. Standart dersler elektronların, atomun içindeki yörüngelerinden kapılmasını konu alıyordu; Bahcall, ilkeleri anlayıp anlamadığına dair bir egzersiz olarak, elektronlar atomun içinde hapsedilmiş olmak yerine en baştan serbest olsalar ne olacağını hesapladı.

Günlerden bir gün, astronom Marshall Wrubel'la yemek yerken Wrubel, Bahcall'a ne yaptığını sordu. Bahcall ona yaptığı hesapları anlattı, hayal kırıklığıyla görüyordu ki, çıkardığı denklemlere sayıları koyduğunda, hesap

[5] 7. Bölümde göreceğimiz üzere, 1960'ta zayıf etkileşim fizik sahnelerinin yıldızı olmaya başlamıştı.

ettiği şeylerin hiçbiri asla ölçülemeyecek gibi duruyordu. Nötrinoların meselesi buydu işte, teorik olarak harikaydılar ama iş deneye geldiğinde, gösterdikleri etki tespit edilirliğin sınırlarında, hatta o sınırların az ötesindeydi.

Bunun üzerine Wrubel, Bahcall'ın ömrünün geri kalanın belirleyecek şeyi, elektronların serbest gezerken yakalanmasının yıldızların içinde gerçekleşebilecek bir olay olduğunu söyledi. Bahcall'ın fikirlerinin meyve vereceği yer belki de burasıydı, diye önerdi Wrubel. En uygun başlangıç yerinin, Margaret ve Geoffrey Burbridge, Fred Hoyle ve Willy Fowler'ın yazdığı, yıldızların içinde elementlerin nasıl oluştuğunu açıklayan ve nükleer fiziğin kutsal kitabı sayılan makale olduğunu ekledi.

Bahcall makaleyi okurken, sonda verilen tabloda Fowler'ın ağır elementlerin oluşumuna katılan atom çekirdeklerinin karakteristik özelliklerini sıralamış olduğunu gördü. Bunların çoğu beta bozunmasıyla ilgiliydi, beta bozunmasıysa en yavaş bozunma şekli olarak, hafif elementlerin ağırları meydana getirmesi için gereken zamanı belirledikleri için önemliydi. Fowler bu hızların laboratuvarda ölçülenlerle aynı olacağını farz etmişti, ama Bahcall'ın yaptığı hesaplar, serbest gezerken (yıldızlardaki gibi) yakalanan elektronların hızlarının, hapsoldukları yörüngeden alınan (Dünya'daki) elektronların hızından farklı olduğunu gösteriyordu. Kısacası, bu çok önemli makalenin temel varsayımlarından biri hatalıydı.

Yani, elektronların Dünya'daki serin laboratuvar koşullarında yakalanma ihtimaliyle, bir yıldızın plazmasındayken yakalanma ihtimali aynı olmak zorunda değildi. Güneş'in muazzam ısısından kaynaklanan etkiler, laboratuvarda söz konusu atom çekirdeklerinin bu sıcaklıklara denk enerjilerle çarpıştırılmasıyla bir ölçüde canlandırılabilirdi, ama Güneş'in merkezinin, kurşununkinden on dört kat fazla olan muazzam yoğunluğu burada simüle edilemiyordu. Fakat bu etkiyi hesaplamak için kuantum mekaniğinden faydalanılabilirdi. Bahcall'un yaptığı da buydu.

Kısa bir yazı yazıp, yıldızlarda gerçekleşen beta bozunması sürecindeki bozunma hızının astrofizikçiler tarafından kullanılan bozunma hızından farklı olacağına dikkat çekti. Yayınlanmak üzere *Physical Review*'a gönderdiği yazı çok geçmeden okurlara sunuldu.[6] Fakat Bahcall'ı şaşırtan bir şey oldu: makale hakkında, o daha yayımlanmadan, bizzat Willy Fowler'dan bir mektup aldı. Bahcall hiçbir yere, editöre sunduğundan başka bir nüsha göndermediğine göre bunun tek anlamı Fowler'dan bu makale için hakemlik etmesi istenmesi olabilirdi. Bu iş için Fowler'a başvurulması şaşırtıcı değildi, ne de olsa Bahcall bu konuya, onun yaptığı tablodan dolayı girmişti. Mektubun sürprizi, Fowler'ın ona kendisiyle beraber Caltech'te çalışmayı teklif etmesiydi.

Fowler kararlı davranmıştı. Bahcall'ı Caltech'e davet etmenin yanı sora, bir mektup da Ray Davis'e yazdı.

Hatırlarsanız, güneş nötrinolarının peşindekilerin, berilyum-7 yapmanın önceden sanılandan bin kat daha kolay olduğu ortaya çıkınca duydukları heyecan, bir sonraki adımın, protonun berilyum-7'ye çarpıp onu berilyum-8'e çevirirken nötrino üretmesinin zor olacağı anlaşıldığında sönmüştü. Fakat Bahcall'ın makalesiyle beraber, laboratuvardaki berilyum ve protonlarla yapılan deneylerdeki ölçümlerin aynı kötü haberi Güneş'te nötrino üretimi için de verebileceğinden şüphe duyulabilirdi artık. Ama Bahcall'ın hesaplarında bu özel örnek yoktu.

Fowler, Bahcall'ın makalesini görüp önemini anladığında Davis'e mektup yazıp "Indianalı bir adam"ın nükleer fiziğin Güneş'te nasıl işlediğini hesaplamayı bildiğini söyledi. İşte böylece, 1962'nin Şubat'ında Davis, Bahcall'a tarihi bir mektup yazarak ona bu özel süreç hakkında sorular sordu. Bahcall başladı hesaplamaya.

İlk çalışmasını 1963'te tamamladı. Sonuç pek teşvik edici değildi. Bahcall'ın bulduğu sayılar Dünya'da yapılan ölçümlerle Güneş'te olup bitenler arasında bir fark olması

[6] J. Bahcall, *Physical Review*, cilt 126, s. 1143, 1962.

gerektiğini gösteriyordu, ama bu dikkate alındığında dahi 4000 litrelik bir tankla ancak yüz günde bir tane nötrino yakalanabilirdi, yılda sadece birkaç nötrino bulmak demekti bu. Sayılar daha büyük bir deney kurmayı da teşvik etmiyordu, çünkü 400.000 litrelik tankla bile ancak günde bir nötrino yakalanacaktı. Astronomların büyük bölümü, zaten pahalı bir deney olarak gördükleri bu meseleyle ilgilenmiyordu, hele de güneş nötrinolarını gerçekten saptaması pek mümkün görünmüyorken.

Davis farklıydı, 400.000 litrelik deney düzeneğini kurmakta kararlıydı. Öncelikle, Barberton maden ocağındaki 4000 litrelik deneyle birlikte, nötrino sayısında yüz kat artışın anlamlı olacağına ikna olmuştu. Bu boyutta bir tankın etkin olacağını da düşünüyordu: Davis kimya öğrenimi görmüştü, güneş nötrinolarının somut delili olacak birkaç tanecik argon atomunu bile tanktan alabileceğinden emindi. Dahası, havadan ve çevreden gelebilecek argonun içeri girmesine karşı tanka gereği gibi sızdırmazlık özelliği kazandırabileceğine inanıyordu. Pek az miktarda olacak argon atomlarının gerçekten de bu cihazın içinde üretilmiş olduğundan emin olmak için bu koruma kritik önemdeydi.

Asıl problem büyük ihtimalle, kozmik ışınların deneye sızması, çarpışıp argon üretmesi ve böylece nötrinolarla karışmasıydı.

Davis ve Bahcall bunu aşmak için girişimin yerin en az 1220 metre altında yapılması gerektiği sonucuna vardılar. Bu iş için yeterince derin ve büyük bir mağarayı nerede bulacaklardı? Böyle bir mağara varsa bile, bilimsel bir deney yapmaya pratik olarak uygun olacak mıydı? 1963 itibarıyla bu macera büyük bir risk olarak görülüyordu; başarılı olacağını düşünen hemen hiçkimse de yoktu.

Her şeye rağmen Davis ve arkadaşı Blair Munhofen, Amerika Birleşik Devletleri'ndeki derin mağaraları araştırmaya başladılar. Google öncesi devirde böyle bir araştırma nasıl yapılırdı? Cevap: Madenler Dairesi'ne başvurarak. Bu birim onlara, taleplerine uygun görünen iki

yer tavsiye etti: Montana'da, Butte'teki Anaconda bakır madeni ve Güney Dakota'da, Lead'deki Homestake altın madeni.

Davis'le Munhofen ortamı bizzat görmek için madenlere gittiklerinde hem iyi hem kötü haberler aldılar. Anaconda madeninin sahipleri kendi yerlerinin kullanmasına istekliydiler ve 1280 metre aşağıya inen beton kaplamalı silindirik bir kuyu hazırlamak için ucuz bir fiyat çıkardılar. Ne yazık ki mağara çok küçüktü. Homestake madeni daha umut verici olabilirdi. Burada mesele boyut değildi. 400.000 litrelik, yani olimpik yüzme havuzu kadar bir dedektörün sığacağı kadar büyük bir oyuk, yerin 1480 metre altında açılabiliyordu. Buraya kadar iyi. Gelgelelim Homestake'te bu yeri açmanın maliyeti çok yüksekti, bunun üzerine uygun yer arayışına devam etmeye karar verdiler.

Idaho, Kellogg'daki Sunshine [güneş ışığı] madenini buldular. 1640 metre derinlikteki bu gümüş madeninde kayalar kazılmaya uygun sertlikteydi ve nihayet, maliyet de makul görünüyordu. Niyetlendikleri iş için hiç para yoksa da, hatta herhangi bir ajansın bunu karşılayacağına dair resmî bir taahhüt olmasa da, en azından artık, 400.000 litreyle deney yapabilecekleri bir yer olduğunu biliyorlardı.

6

YERİN ALTINDA BİLİM

1960'larda, Kopenhag'daki Niels Bohr Enstitüsü dünyanın en iyi nükleer fizik merkezlerinden biriydi. Burada çalışanlardan Aage Bohr (Niels Bohr'un oğlu) ve Ben Mottelson yaratıcı güçlerinin doruklarındaydılar ve 1975'te kendilerine (ABD'li James Rainwater'la paylaştıkları) Nobel Ödülü'nü kazandıracak olan nükleer yapı teorileri üstüne çalışıyorlardı. Bahcall kendi hesapları hakkında bir konuşma yapmak üzere Enstitü'ye geldiğinde 1963 yazıydı. O sırada olacaklar, her şeyi değiştirecekti.

Konuşmasına güneşteki füzyona dair nükleer fiziğin durumunu anlatarak başladı ve bu füzyon sırasında üretilecek nötrinoların sayısına ait hesaplarını gösterdi. Dinleyiciler arasındaki uzmanlar, duyduklarına katılıyorlardı. Bahcall bu nötrinoların nasıl tespit edileceği konusuna geçerek, klorun onları emerek argona dönüşeceğini anlattı. İşte tam burada Ben Mottelson'un dikkatini çeken bir şey oldu.

Mottelson, Bahcall'un hızı hesaplarken nötrinonun kloru doğrudan doğruya argona çevirdiğini varsaydığını fark etti. Böyle de olabilirdi tabii ki, fakat Mottelson'un gördüğü, güneş nötrinolarının enerjisinin, argon çekirdeğini normalde "temel" durumda (taban durumunda) sahip olduğundan daha fazla iç enerjiyle meydana getirecek kadar çok olduğuydu; bu da klordaki bir nötronun, temel durumu oluştururken gereken düzenlenme olmaksızın

protona dönüşebildiği "uyarılmış" durumda olmak demekti. Uyarılmış durum bunun üzerine rahatlayıp normal haline dönebilir, fazla enerjiyi de gama ışını olarak yayardı. Mottelson'a bu sürecin gerçekleşmesi, Bahcall'ın odaklandığı diğer sürecinkinden daha kolay olabilir gibi geliyordu.

"Buna baktınız mı?" diye sordu Mottelson. Bahcall bu ihtimalin aklına gelmediğini söyledi.

İlginç bir fikirdi bu. Bahcall öyle olsa nasıl olur diye bakmak üzere işe koyuldu ve aradığı her şeyi bu cevapta buldu: Klorun nötrinoları bu şekile yakalaması yirmi kat daha kolaydı. Demek ki Davis'in dedektörü nötrinoları önceden düşünülenden yirmi kat daha hızlı yakalayabilirdi. Bahcall'ın önceki hesapları Davis'in ancak haftada bir tanecik nötrino yakalayabileceğini gösterirken, şimdi her gün birkaç tane yakalama ihtimali doğmuştu. Yine de küçük bir sayıydı ama başarı umudu vermesi pek cazipti. İyimserlik geri döndü.

Bahcall ve Davis Kasım 1963'te, New York'taki Uzay Çalışmaları Merkezi'nde yıldızların evrimine dair uluslararası bir konferansta, güneş nötrinosunun tespiti için 400.000 litrelik klor dedektörü kullanmanın olabilirliği üzerine görüşlerini sundular. Verilen tepki öyle sönüktü ki konferansı özetleyen kapanış konuşmasında buna hiç değinilmedi. Gerçekçi bir deney düzeneği tasarladıklarından emin Bahcall ve Davis yılmayarak Brookhaven Ulusal Laboratuvarı'na, yönetici Maurice Goldhaber'ı laboratuvarın bilim bütçesinin bir bölümünü bu girişimin desteklenmesine ayırması için ikna etmeye gittiler. Astrofizik camiasının bu konudaki hevessizliği ortadayken, olumlu bir cevap alma ihtimallerini artırmak adına, önerilerini Goldhaber'in ilgisini çekecek şekle uyarladılar.

Davis, önemli bir nükleer fizikçi olan Goldhaber'ın astronomların "ilginç bir şey hakkında doğru bir şey"[1] söyleyebileceğinden şüphe ettiğini biliyordu, dolayısıyla

[1] Bahcall ve Davis, 1982, *a.g.e.*

deneyin Güneş'le ilgili kısmını vurgulamanın bir faydası olmayacağını da. Bahcall ise gençti, heyecanlıydı ve "Güneş hakkındaki hesaplar[ıy]la dolu"ydu. Davis Bahcall'a Goldhaber'ın astrofizikçilere güvenmediğini açıklayıp, izleyecekleri taktik konusunda anlaşmaları gerektiğini söyledi. Davis, Bahcall'ın ona güvenmesi, sözlerini nötrinonun yakalanma oranının çok yükseldiği nükleer fizik kısmı ve bu fikrin Brookhaven'da nasıl denenebileceğiyle sınırlı tutup, deney hakkında konuşma kısmını kendisine bırakması konusunda ısrar etti. Bahcall isteksizce kabul etti.

Davis'in umduğu gibi, Goldhaber onların nükleer fiziğe dair fikirleriyle çok ilgilendi, ve şans eseri, güneş nötrinosu deneyini de onayladı. Davis ve Bahcall sonunda bu niyetlerini de açmaya cesaret etmişlerdi. Söyledikleri şuydu: Eğer deney, güneş nötrinolarının yakalanma oranının teoride öngörülenden farklı olduğunu gösterirse, Goldhaber'ın düşündüğü gibi "astrofizikçilerin neden bahsettiklerini bilmediği" doğrulanmış olacaktı.

Deneyin tüm gerekleriyle yapılması adına kendi tezlerini güçlendirmek için ikisi de birer makale yazdı: Davis'inki önerilen deney, Bahcall'ınkiyse bu deneyin ardındaki teori hakkındaydı. Bu yazılar *Physical Review Letters*'ın 16 Mart 1964 sayısında aynı sayfanın iki yüzünde yayımlandı. Davis'in makalesi, 4.000 litrelik dedektörle, Ohio Barberton'da yerin 700 metre altındaki kireç ocağında, 500 galonluk[2] iki ayrı tankta gerçekleştirilen denemelerin sonuçlarını bildiriyordu. Gösterdikleri özen çok etkileyiciydi. Güneş nötrinolarının işareti, çok çok birkaç tane argon atomu olacağından ve havanın kendisi de bu elementi içerdiğinden, deneye başlamadan önce tankları helyum gazıyla tertemiz etmiş, içeride argondan iz kalmamasını sağlamışlardı.

Deney 18 gün devam ettikten sonra, radyoaktif argona dair herhangi bir işaret olup olmadığını kontrol ettiler. İyi haber, bir miktar argon vardı; fakat işaretlerin güneş

[2] 1.892 litre —*çev. notu.*

nötrinolarından mı, arkaplandaki başka faaliyetlerden mi kaynaklandığını, yoksa tankları temizledikleri zaman havadan kalan artıklar mı olduğunu söyleyemeyecekleri kadar azdı. Buna rağmen, sinyalle arkaplanı ayırt edebilmenin tam sınırına gelmiş olan böylesine küçük miktarları ölçebilmiş olmaları, fikrin ilkede yapılabilir olduğunu gösterdi. 400.000 litre sıvının, sinyali arkaplandaki veri kirliliğine kıyasla güçlendirmeye yeteceğini hesapladılar. Gelgelelim pratikte deneyin işlemesi için çok daha derinde, yerin belki 1.370 metre altında yapılması gerekiyordu; o zaman, hesaplarına göre, on radyoaktif argon atomundan dokuzunun güneş nötrinolarından kaynaklanıyor olacaktı.

En azından uygun bir yer olduğunu biliyorlardı: Sunshine madeni. Şimdi ihtiyaçları olan, maddi kaynaktı. Ayrıca bu işi gerçekten başarabileceklerine başkalarını ikna edebilmeleri de gerekiyordu.

Bruno Pontecorvo, Davis ve Bahcall'ın makalelerini anlatmak için Leningrad'da özel bir seminer verdi. İlgi yoğundu ama Pontecorvo'nun daha sonra söylediği üzere orada deneyin başarılı olacağına inanan yegâne kişi kendisiydi. Herkesçe takdir edilmese de, *Time* dergisinde çıkan bir yazı dolayısıyla konu genel kamuoyunda da duyuldu. Bugün bilim medyada çokça yer alsa ve bilim insanları çalışmalarını kamuoyuna aktarmaya her daim hazır olsalar da, 1964'te bu o kadar tasvip edilmiyordu. Ama konunun *Time*'da yayımlanmasının uygun maden aradıklarını duyurmak ve dedektörleri için yeterince büyük bir tank edinmelerini sağlamak gibi beklenmedik faydaları oldu. Davis sonradan "bu tankçılar *Time*'da yayımlanan makaleden sonra bizi daha çok ciddiye aldılar" diyecekti.[3]

Goldhaber ikna olmuş olsa gerek, zira deneyin parası Brookhaven'ın kimya bütçesinden çıktı. Devletin fon kuruluşlarına hiçbir resmî başvuru yapılmadı.[4]

[3] Aktaran: Bahcall ve Davis, 1982, *a.g.e.*

[4] Bahcall ve Davis, 1982, *a.g.e.*

ÇALIŞMA BAŞLIYOR

Nihayet ellerinde para vardı, fakat bu kez de ortada maden yoktu. Deneyi Sunshine maden ocağında kurma planları bozuldu; Homestake madeni müsaitti fakat çok pahalıya geliyordu. *Time*'daki yazının getirdiği bilinirlik bu noktada yardımlarına koştu. Homestake maden ocağının yöneticilerinden projeyi yeniden değerlendirmeleri rica edildi ve tahmini rakamlar gereği gibi azaltıldı: Kazı 125.000 dolara yapılabilir, çalışma 1965 ilkbaharında başlayabilirdi. Burada, Sunshine maden ocağındakinden daha büyük bir alanın bulunması gibi bir ek avantaj da vardı.

Kayaların kazılmasına Mayıs 1965'te başlandı, Ağustos'ta mağara hazırdı. Davis ve maden ocağıyla pazarlık işlerinin büyük bölümünü yürüten meslektaşı Blair Munhofen, ev sahipleriyle beraber şaftı indirdiler; karanlığı bölen tek şey baretlerinin üzerindeki madenci fenerlerinin ışığıydı. Ev sahiplerinin rehberliğinde mağaraya indiler; bu fenerlerle etrafa bakınırken birden ışıklar yanıp dünyayı aydınlattı. On metre eninde, yirmi metre boyunda, on metrelik tavanlarıyla koskocaman odaya baktılar; zincir baklası kaplanmış duvarlar, tankı taşımak üzere beton döşenmiş yerler, tavanda da kaldıracın işleyeceği monoray vardı. Homestake çalışanları da bilim insanları da çok sevindiler. Şimdi mesele tankı inşa etmek ve delikten aşağı indirmekti.

Chicago Bridge and Iron Company (CBI; Chicago Köprü ve Demir Şirketi) tankı imal etti. O günlerde normal olan deney boyutlarıyla, bilim insanlarına göre bu büyük bir işti. Onların aksine, CBI'dakiler işi pek küçük buldu; sonradan söylediklerine göre sıradan küçük bir depo olarak gördükleri bu tankı yapmakla normalde ilgilenmezlerdi ama "projenin amacı ve alışılmadık yeri ilgilerini çekmişti."[5] Tankın bir özelliği de havanın ve dolayısıyla argonun içeri sızmaması için tamamen yalıtılmış olması gereğiydi. CBI

[5] Bahcall ve Davis, 1982, *a.g.e.*, s. 10.

bu işin ustasıydı: NASA'ya uzay test odası yapmışlıkları vardı. Araç 1966'da tamamlandı, basınçlı kumla içi iyice temizlendi ve çözücülerle ovalandı. Düzeneğin doğal radyasyonuyla ne miktarda argona dönüşme olayı olacağını kestirmek için radyoaktivitesi test edildi. Nihayet tankın doldurulması için her şey hazırdı.

400.000 litre kuru temizleme sıvısının satın alınması, deney yerine getirilmesi ve yerin 1,5 kilometre altına indirilmesi lazımdı. Bununla dolu on vagon, Kansas, Wichita'daki Frontier Kimya Şirketi'nden Dakota'daki maden ocağına geldi. Ardından sıvı özel tasarlanmış depolara dolduruldu; her biri 2500 litre alan bu depolar şafta sığıyor, kaldıraca ve madenin yeraltı ray sistemine uyuyordu. Her bir depoyu doldurmak, taşımak ve boşaltmak birkaç saat sürüyordu; bu iş 150 gidiş gelişte, Homestake'teki vinç operatörleri ve beş bilim insanının çalışmasıyla beş haftada tamamlandı. Burası bittikten sonra tankın içindeki bütün havanın temizlenmesi için bir dizi temizleme işlemi yapıldı; sadece tankın içinde zaten bulunan hava değildi bu, klorun içinde çözünmüş olan hava da temizlendi.

1966 yazının sonunda deneye başlanması için her şey hazırdı. İşin toplam maliyeti 600.000 dolar, ya da Davis'in bir konferansta sorulan soru üzerine söylediği şekilde, "televizyonda on dakikalık yayın kadar"dı. Pontecorvo klorun nötrinoları saptamakta kullanılabileceğini söyleyeli yirmi yıl olmuş, Davis'in başarısız olan ilk denemesinin üstünden yedi yıl geçmişti bile. Yapmak üzere oldukları şeyin öneminin tam anlamıyla kavranmasının daha otuz yıl süreceğini kimse bilemezdi.

KAÇ SNU?

Deney düzeneği yerli yerinde ve başlanmaya hazırdı; şimdi soru kaç tane nötrino bulmayı bekledikleriydi. Bahcall kendini bu arayışa adayalı geçen dört senede hesaplarının

kesinliğini istikrarlı şekilde artırmıştı. Hesapları, Güneş'te neler olduğuna ve ona gücünü verdiği düşünülen nükleer reaksiyonlara dair bildiği her şeyi kapsıyordu. Tüm bunlara bakarak Güneş'in her saniye yaydığı enerji miktarını ve nötrinoların sayısını hesapladı.

Nötrinolar uzayın her yanına öyle bir yayılırlar ki Dünya sürekli olarak bu ışıma sağanağına maruz kalır. Bahcall bu bilgileri biraraya getirerek bir santimetrekareden (gözünüz kadar bir alandan) her saniye 66 milyar tane güneş nötrinosu geçtiği sonucuna vardı. Toplam sayı budur ama bu nötrinoların doğmasının birkaç farklı yolu olabilir. Dolayısıyla bütün nötrinoların enerjisi aynı değildir. Davis'in deneyi bakımından kritik olan, klor kullanılan dedektörün bu nötrinolardan kaç tanesine karşı hassasiyet göstereceğiydi. Bahcall'ın hesaplarına göre, o milyarlarca nötrinodan altmış tanesi, hidrojen çekirdeklerinin (yani protonların) bir dizi adımla helyum-4'ü oluşturmak üzere girdiği birincil füzyon reaksiyonlarından doğar. Bunların çok büyük bölümünün teker teker enerjileri, Davis'in dedektöründeki kloru aktifleştiremeyecek kadar azdı. Fakat nötrinolar başka işlemlerde de üretilir, zira nükleer reaksiyonların hepsinin de sonucunda helyum-4 çıkmaz ortaya. Şekil 5'te (s. 74) gördüğümüz gibi, helyum-4'ü meydana getirmenin birkaç adımı vardır ve bu arada, daha başka son ürünler meydana getirebilecek çarpışmalar olabilir. Faraza, ara aşamalardan birinde helyum-3 oluşmuştur. Daha önce gördüğümüz üzere, bir helyum-3 çekirdeğinin, önceden oluşmuş bir helyum-4 çekirdeğine toslaması mümkündür.

Helyum-3'le helyum-4'ün füzyonu berilyum-7'yi meydana getirirken bir de nötrino oluşturur. Bahcall her saniye gözünüzün içinden geçip giden 66 milyar nötrinodan beş milyarının bu şekilde oluştuğunu tahmin ediyordu. Üstelik olay bundan ibaret değil. Güneş'in yarısı hâlâ serbest protonlardan oluşuyor ve berilyum-7 de bunlardan biriyle birleşerek boron-8 yapabilir. Burada yine bir nötrino yayılır ve dahası bu nötrinonun, Davis'in dedektörün-

deki bir klor atomuna çarpması halinde kayda geçecek kadar çok miktarda enerjisi vardır.

Bu iyi haberdi. Malesef bu kritik reaksiyon ender görülür: Daha önce de belirttiğimiz gibi, her on milyar güneş nötrinosundan sadece bir milyonu, yani toplamın on binde biri, bu ileri aşamadan gelmektedir. Yani Davis'in dedektörü ancak nispeten az olan bu türden nötrinoları yakalayabilecek, diğerlerini görmeyecektir.

Demek ki Davis en iyi ihtimalle, bütün güneş nötrinosu yelpazesi içinde ancak en soluk ışığı seçebilecektir. Daha da kötüsü, onların da hemen hemen hepsi, bırakın Davis'in dedektörünü, bütün dünyayı hiçbir etkide bulunmadan kat edebilir. Davis kaç tane güneş nötrinosu yakalamayı umut edebilirdi? Bahcall nihai cevabı bulmak için formülünde bunları da hesaba kattı. Sayıyı *solar-nötrino-unit*, yani güneş nötrinosu birimi anlamındaki "SNU" [İngilizce okunuşu "*snew*"] cinsinden ifade etti. Bu kelime modern fiziğin standart sözlüğünde yerini almış olduğundan, biraz durup bunun ne anlama geldiğini ve Bahcall'ın bunu neden icat ettiğini konuşalım.

Fermi'nin beta bozunması teorisinden beri, bir nötrinonun tekil bir atoma çarparak kendini gösterme ihtimalini hesaplamak mümkün. Dediğimiz gibi, bu öyle minnacık bir sayıdır ki yok sayılmıştır. Bahcall bu teoriyi[6] kullanarak, boron-8'le birlikte oluşan bir nötrinonun tek bir klor-37 atomuna çarpma ihtimalinin, ancak saniyede 10...(35 tane sıfır)'da bir, yani 10^{36}'da bir olduğunu hesapladı. Başka şekilde söylersek, bir klor-37 atomunun, bu nötrinolardan bir tanesini yakalama ihtimalinin yarı yarıya olması için, 1... 36 tane sıfır... saniye beklemesi gerekir, bu da Büyük Patlama'dan bu yana geçen zamanın on milyar katıdır. Böyle bir durumda sayıları saymak için

[6] Ayna simetrisinin, "parite"nin, nötrinolarla ilgili işlemlerde görülmediğinin keşfedilmesinin ardından Fermi'nin teorisi buna göre düzeltildi; konu 7. Bölüm'de anlatılıyor. Bahcall doğru olarak, hesaplarında teorinin bu daha incelikli versiyonunu kullandı.

daha dostane bir yöntem bulma gereği açık. "Saniyede on üzeri eksi otuz altı" diye bir araba laf etmek yerine, bu yakalama oranına 1 SNU demek adet oldu.

Hakikaten de küçük bir sayı bu, ama neyse ki doğa bize bu sayıyı geliştirecek bazı büyük sayılar da sunuyor. Toplu haldeki maddelerde trilyon kere trilyonca atom var, bunlardan her biri de bu minnacık şansa sahip. "Çok küçük", "çok sayıda"yla çarpıldığında ölçülebilir olabilir; 400.000 litre kuru temizleme sıvısında da çok sayıda klor-37 atomu var: 2, ardından da 30 tane sıfır, yani 2×10^{30} tane filan. Böylece, tankın bir yerlerinde rasgele bir atomun bir tek nötrinoyu yakalaması için beklemek gereken süre, eğer yakalama oranı 1 SNU ise, sadece yarım milyon saniyedir, bu da altı gün eder. Böylece Bahcall'ın öngördüğü SNU sayısını kullandığınızda, altı gündeki yakalama sayısını bulursunuz.

Bahcall bu sayıyı hesaplamak için Güneş'in içine dair en ileri modellemeleri kullandı; çeşitli nükleer reaksiyonlara dair, Dünya'daki deneylerde yapılan ölçümleri ve Mottelson'un önerdiği klor yakalama mekanizmasını da hesaba kattı. Hepsini bir araya getirerek cevabı duyurdu: Yakalanma sıklığı 7,5 SNU'ydu, rakamın en çok 3 SNU fazla veya eksik olacağı kadar hata payıyla söyleyebiliyordu bunu.[7] Beklenen hızın yaklaşık yüzde 80'i radyoaktif boron-8'in bozunması sırasında oluşacaktı ki Bethe, berilyum-7'nin Güneş'in ilk yakıtı içinden bir protonu yakalamasıyla gelişen işlemde bunun ortaya çıkacağını çok önce öngörmüştü ve Davis'in deneyinde tespit edilmesi umut edilen de işte bu nötrinoydu.

1968'de, deneyin başlamasından iki sene sonra Davis ilk sonuçlarını açıklamaya hazırdı: Gördükleri eğer güneş

[7] Epey sağlam bir sonuçtu bu, zira açıklanmasının ardından geçen yirmi yılda Bahcall ve diğerlerinin yaptığı daha incelikli hesaplarda öngörüler hiç bu aralığın dışına çıkmadı. 1980'de bu değer 7,5 SNU olarak yerleşmiş, hata payıysa çok daha azalarak 1,5 SNU'ya düşmüştü, 8. Bölüme bakın.

nötrinolarıysa bile, sayıları çok çok azdı. Deney düzeneğinin düzgün çalıştığı farz edildiğinde, bulduğu değer en fazla 3 SNU'ydu. Eğer Bahcall'un hesapları da doğruysa, bir yerlerde bir problem vardı.

Bir yandan, güneş nötrinolarının görüldüğü söylenen tek yer, Davis'in deneyiydi. Eşsiz bir başarıydı bu, fakat sayının az olması bu araştırmanın tamamının güvenirliğine gölge düşürdüğünden, manşetlerden verilecek bir haber olamadı bu keşif. Gördüklerinin Güneş'ten gelen nötrinolar olduğundan bile ne kadar emin olabilirdi ki Davis?

Dedektörü gerçekten de iyi yalıtılmış mıydı? Argon dışarıdan içeri girmiş veya başka bir şekilde üretilmiş olabilir miydi; Davis böyle koskocaman bir düzenek içinde bu kadar az sayıda atomu gerçekten ölçebildiği konusunda şüphecileri ikna edebilecek miydi?

Willy Fowler, Davis'i kendini göstermeye davet etti: Tanka 500 tane radyoaktif argon-37 atomu enjekte et, karıştır ve sonra hepsini tanktan geri ayıkla bakalım. Davis denileni yaptı ve her bir atomu tanktan geri çıkardı.

Bir de, deneyde iddia edilen şeyin aynen yapıldığından emin olan, fakat bunun taşıdığı anlam konusunda aynı görüşte olmayanlar vardı. Astrofizikçi olmayanlar, Davis'in elindeki veri gerçekten de Güneş'in, standart Güneş modelinde öngörülenden daha az nötrino ürettiğini gösteriyorsa, o zaman bunun güneş modelinin çöküşü demek olduğuna karar verdiler. Birçok kişi, sonunda deneyi desteklemeye razı gelmiş olan Goldhaber'la aynı görüşteydi, astrofizikçilerin genellikle ne dediklerini bilmeden konuştuklarını düşünüyorlardı. Astrofizikçilerse kendi namlarına, neden bahsettiklerini elbette bildiklerini ve yanlışın başka bir yerde olduğunu savunuyorlardı. Belki de az miktardaki bu veriler bizi yanıltıyordu; birkaç defa yazı-tura atsanız sırf şans eseri olarak her seferinde tura gelebilir ama tekrar tekrar denediğinizde hâlâ sadece tura geliyorsa muhtemelen paranın iki yüzünde de tura vardır. Bu güçlüğü aşmak için dedektörün etkinliğini geliştirmek ve veri toplamaya devam etmek gerekiyordu.

Cihazın büyüklüğü zaten sabitti, argonun tanktan toplanması ve kimyasal analiz kısmı ise neredeyse mükemmeldi, dolayısıyla burada pek bir manevra alanı yoktu. Kozmik ışınların yarattığı arkaplan etkisinin az olduğu biliniyordu ama güneş nötrinolarından gelen sinyalin de az olduğu anlaşılmıştı, dolayısıyla buna nazaran arkaplanın etkisi aslında daha büyük oluyordu. Şartları iyileştirmenin en iyi yolu arkaplandaki kirliliği, bir şekilde, daha da azaltmaktı. Yerin 1,5 kilometre altında dahi, kozmik ışınlar tankın içinde her hafta iki tane argon-37 atomu oluşturuyor ve deneyin ikna edici olabilmesi için bu sayının ayda en fazla 1'e düşürülmesi gerekiyordu. Cevap buydu ama, asıl soru, bunun nasıl yapılacağıydı.

"YÜZME HAVUZU GELİŞMESİ"

Hedefin hem yanıbaşında, hem de çok uzağındaydılar sanki: Potansiyel olarak, bir yıldızın içine bakan ilk insanlardı onlar, fakat bunu başarmış olduklarına kimseyi ikna edemiyorlardı. Ellerindeki "Fotoğraf makinesi" yeteri kadar iyi değildi; arkaplanı bir şekilde yok etmeliydiler ki o belirsiz sinyal görünür olsun.

Kahve aralarında, öğle yemeklerinde ve işten sonra Caltech'in yüzme havuzunda beyin fırtınası yapıyorlardı. Bir öğle üzeri orada dinlenirken şans yüzlerine güldü. Astronom Gordon Garmine onları görüp konuşmaya geldi. Klor deneyini ve arkaplan problemini duyduğunu, kendi alanında kullanılan bir numara acaba burada da işe yarar mı diye merak ettiğini söyledi. Elekronik uzmanlarının "darbe yükselme süresi ayrıştırması" dediği bir şeye dayanıyordu bu numara. Bu laf kulağa bürokrasiye ait gibi gelse de, kelimeler tam da o olayı tanımlıyor.

Bazı dedektör türlerinde elektrik sinyallerinin (darbelerin) zirveyi bulması zaman alır. Nötrinoların tetiklediği olaylarda olduğu gibi elektronlar yakalandığında, sinyal hızla maksimuma yükselir; bu da arkaplandaki kozmik

ışınların neden olduğu yavaş yavaş yükselen darbelerden epey farklıdır. İstenmeyen arkaplan olaylarını filtrelemek için ideal bir yol olabilirdi bu. Ama acaba uygulaması mümkün müydü?

Davis'in konuyu danıştığı Brookhaven'daki teknisyenler, bu fikrin pek çok durumda işe yaradığını, hızlı ile yavaşı birbirinden ayırdığını, ama Davis'in ilgilendiği özel durumun biraz daha karışık olduğunu söylediler. Nötrinolarla ilgili olaylardan gelecek sinyal hızlı yükselecek, arkaplandaki olaylarsa o kadar hızlı olmayacak, fakat uygulamada birbirlerinden ayrılabilecekleri kadar yavaş da kalmayacaktı. Ya da en azından o zamanki amplifikatörler açısından durum buydu. Brookhaven'daki elektronik uzmanları bir sene içinde, bu işi görecek kadar hızlı çalışan cihazlar geliştirdiler. 1970'te bu yeni amplifikatörlerin yerleştirilmesiyle Davis arkaplandaki olayları ayda 1'e indirebilidi. Bu kritik adımdan da her zaman "yüzme havuzu gelişmesi" diye söz etti.

Bu gelişme, kısa süren hafif bir panik dönemi geçmesine neden oldu. Kasım 1971'de Davis, Bahcall'u arayıp yeni, hassas cihazlarla yapılan son deneylerde iki aydır tek bir nötrino sinyali bile kaydedilemediğini söyledi, yani belki de deney, buraya hiç nötrino gelmediği sonucuna varmak üzereydi! Bunun da istatistiğin cilvelerinden biri olduğu anlaşıldı; rulette siz siyaha oynarken üst üste hep kırmızı gelmesi gibi bir şey. Güneş nötrinoları gelmeye devam ettiler, yine çok azlardı, ama varlardı.

Teoride de gelişmeler oldu. Güneş'e gücünü veren çeşitli nükleer reaksiyonlar laboratuvarlarda eskisinden daha kesin olarak ölçülüyor, daha iyi olan bu veriler Bahcall'un hesaplamalarında girdi olarak kullanıldıkça öngörülerine duyulan güven artıyordu. 1972'de, Davis giderek geliştirilen dedektörle dört yıl daha veri toplamışken, Bruno Pontecorvo Bahcall'a şöyle yazdı: "Hakikaten ilgi çekici olmaya başladı! Her şey [nötrinoların] bakış açısından beklenmedik bir şeyle bitse pek hoş olur. Ne yazık ki, doğa o şekilde işlese bile bunu göstermek kolay

olmayacak."

1968'den 1988'e kadar, güneş nötrinoları üstüne çalışan çok az kişi vardı. Yirmi yıl boyunca, Davis'in klor deneyi veri kaydeden tek şey oldu. Bahcall, Ray Davis için kaleme aldığı bir yazıda durumu kısa ve öz anlattı: "Güneş nötrinoları üstüne çalışan kuramcı, deneyci kim varsa, Ray Davis'in arabasının ön koltuğuna rahatça sığabilirdi (sığmışlardır da)."[8]

Bahcall hesaplarını güncelledi, ilerletti, ve bulduğu sayıların arkasında durdu. Davis deneyini geliştirmeye devam etti. 1978'de, Davis'in deney sonuçlarının Güneş'in standart modeliyle çelişmesiyle geçen on senin sonunda bir çıkmaza gelinmişti. O sene bilim insanları şimdi ne yapacaklarına karar vermek üzere Brookhaven'da bir konferansta bir araya geldiler. Yeni bir deneye ihtiyaç olduğu açıktı, ideal olarak bu deney, Davis'in zaten tespit ettiği, boron-8 kaynaklı nispeten az sayıdaki nötrino yerine, birincil proton-proton füzyonunda oluşan nötrinoları doğrudan saptayabilmeliydi.

Fizikçilerin çoğu bu durumdan güneş nötrinosu problemi diye söz ediyordu ve mecazi anlamda onu bir çekmeceye koymuşlar, biri çıkıp burada ne hata yapıldığını bulsa da bu macerada yanlış bilimler çöp kutusunu boylasa diye bekliyorlardı. Fakat giderek daha fazla bilim insanı Bahcall ile Davis'in çalışmasını inceledikçe, düzeneğin gerektiği gibi çalıştığı ve hesapların da sağlam olduğu yönündeki fikir birliği kuvvetleniyordu.

Şüpheli bir tek yer varsa, o da Bahcall'ın bulduğu rakamların Güneş'in merkezinin sıcaklığı olarak kabul edilen değer konusunda son derece hassas olmasıydı. Değer, bu sıcaklığın kendi kendisiyle tekrar tekrar, 25 defa çarpılmasıyla orantılıydı. Sıcaklığın yüzde 1 oranında değişmesi, sayının yüzde 30 oranında değişmesine neden olurdu. Sıcaklığın yüzde 10 azalması, saptanan nötrino

[8] J. Bahcall, "Ray Davis: The scientist and the man", *Nuclear Physics*, cilt B (Proc. Suppl.) 48, 1996, s. 281-283.

sayısının az olmasını açıklamaya yeterdi ve "Güneş hâlâ parlıyor mu?" teranesi de buradan çıkmıştı. 55. sayfada gördüğümüz gibi, belki de Güneş'in artık parlamayı kestiği ve gerçek bir enerji krizinin kapıda olduğu yolunda pek çok yeni fikir ortaya atılıyordu.[9]

Güneş'in belki de masum olup, asıl suçun nötrinolarda olma ihtimaline görece daha az dikkat ediliyordu. Nötrinolar yolda kayboluyor olabilir miydi? Uçuk fikirlerden birine göre, uzayın bizim algıladığımız üç boyutun ötesinde boyutları da vardı ve bu yüzden, 150 milyon kilometrelik yolculukları sırasında nötrinolar bir nevi paralel evrene kaçıyor, böylece görüş alanımızdan çıkıyorlardı. Bu gibi tezlerin ortaya atılması 20 yıl devam etti. Bruno Pontecorvo'nun çözümü 1968'de, Davis'in ilk sonuçları açıklanır açıklanmaz ortaya atması bu bakımdan ironiktir. Pontecorvo'nun asıl ilgi alanı Güneş değildi. Onun yerine nötrinolara odaklanmıştı. Cowan ve Reines'in nötrinonun var olduğunu ispatlamalarının hemen ardından başkaları da nötrinoya dair olmadık şeyler fark etmeye başlamıştı. Pontecorvo, nötrino hikâyesinde çığır açan bir sonraki katkısını, işte bunlar üzerinden kuracaktı.

[9] A. Prentice, aktaran Bahcall ve Davis, 1982, *a.g.e.*

7
BİR, İKİ, ÜÇ

Ray Davis güneş nötrinolarını bulmak için çabalayadursun, dünyadaki nötrinolarla yapılan deneyler dikkat çekici başarılara ulaşmaya başladı. Fermi'nin teorisinde nötrinolar her zaman çekingen değildir. Nötrinoların "sisin içinden geçen kurşun gibi kolayca" dünyayı boydan boya kat etmesi, beta bozunması sırasında veya Güneş'te üretildiklerinde olduğu gibi az miktarda enerjiye sahiplerse doğrudur. Çok yüksek enerjiye sahip olduklarında ise maddeyle çarpışıp kendilerini ele vermeleri çok daha muhtemeldir. Bu kavrayış sayesinde nötrinolar bilimde genel kabul görmek üzereydi.

Nötrinonun etkileşimde bulunma ihtimalinin enerjisiyle birlikte arttığı fikri, Bethe ve Peierls'ın 1934'te yazdığı makalede saklıydı ve bunun ne anlama geldiği ABD'li Mel Schwartz tarafından 1960'ta belirtildi. Pontecorvo'nun yazdığı, yüksek enerjili nötrino demetleri kullanmanın ne gibi potansiyeller taşıdığını da bildiren çığır açıcı bir makaleden bir sene sonraya denk geliyor. Bu potansiyel önemli olmakla beraber, Pontecorvo'nun makalesinin bu kadar önemli olmasının asıl nedeni değildi. Makalenin sunduğu başka bir anlama şekli o kadar derindi ki nötrinoların kavranma şeklini değiştirdi ve parçacıklarla kuvvetlerin modern "standart model"inin doğuşuna vesile oldu. Pontecorvo birçok alanda etkileri olan büyük bir gerçeği yakalamıştı: Bütün nötrinolar eşit değildir; bazıları diğerlerinden daha eşittir.

Pontecorvo'nun o dönemde Sovyetler Birliği'ne yerleşmiş olduğunu söylemiştik. Dolayısıyla makalesi bir Sovyet dergisinden çıktı ve Rusça olduğundan, İngilizce çevirisi çıkana kadar Batıda bilinmedi. Bunun getirdiklerine daha sonra geleceğiz. Önce 1959'da durum neydi bakalım, Pontecorvo'nun zaferlerinin ve trajedisinin sahnesini kuralım.

BUNU KİM ISMARLADI?

1940'larda atomların temel yapıtaşları elektron, proton ve nötron olarak tespit edilmişti. Doğrudan gözlenmesine henüz yıllar olan nötrino elektrik yükü ve kütlesi olmayan, kimliği şüpheli bir elektrona benzetiliyordu. Genel olarak, madde iyi düzenlenmiş, bu birkaç parçacıktan oluşmuş görünüyordu; parçacıkların davranışlarını belirleyen kurallar halen yazılmakta olsa da. Sonra durduk yerde kozmik radyasyon ortaya yeni parçacıklar çıkardı.

Bunlardan biri pion, π'ydi. Pion, en azından, onu oluşturan protonlar elektrik olarak birbirlerini ittikleri halde atom çekirdeğinin var olabilmesi çelişkisine bir çözüm olarak öngörülmüştü. Çekirdeğin sabit olmasının sebebi, nükleonlar (nötronlarla protonlar) birbirlerine çok yaklaştıklarında, her tür elektrik itmeyi aşacak kadar güçlü bir çekim kuvveti hissetmeleridir. Kuantum teorisine göre, protonlar veya nötronlar yüksek enerjilerde birbirlerine çarptıklarında, bu nükleer kuvvetin etkilerinden biri, enerjilerinin bir bölümünü kısa ömürlü bir parçacığa dönüştürmektir ki bu da pion, π'dir.

Buraya kadar tamam. Fakat kozmik ışınlar doğanın fiziğinde bir üye daha olduğunu ortaya koydu. Bu da μ[1] ile gösterilen muondur ve görünüşe göre elektronun daha ağır versiyonundan başka bir şey değildir –bu görüşü de

[1] Yunanca "mi" harfi —*çev. notu.*

ilk dile getirenlerden biri Pontecorvo'dur.[2] Fizikçi Isadore Rabi, meşhur olan ifadesiyle "bunu kim ısmarladı?" diye sormuştu; sorusuna cevap almak şöyle dursun, cevabın başlangıcının oluşması dahi otuz yıldan fazla sürecekti. Dünya'da tanınan madde elementleri içinde açık bir yeri yoktu muonun. Hem muon hem de pion bozunurken nötrino üretirler, ama keşfedilmelerinin üstünden epeyce yıl geçene kadar bu bilinmiyordu.

Önce muonun keşfedilmesi (1937'de) ve bunun ilk olarak, ne zamandır aranan pion zannedilmesi ironiktir. Muon aslında pionun yavrusudur.

Parçacığın pion olmadığının ilk ipucu, atom çekirdeğine bağlanmakla hiç de kuvvetli bir ilgisi olmamasıydı. Pionun öngörülmesinin ardındaki bütün mantık onun atom çekirdeğini birlikte tutan ajan olması olduğundan, aday parçacığın bu konudaki bariz ilgisizliği makul değildi; belki de pion değildi bu. Aslında ortada iki parçacık olması ihtimali (halihazırda keşfedilmiş olan, bizim şimdi muon dediğimiz parçacıkla, o esnada bulunmamış olan nükleer pion), pionun 1947'de nihayet keşfedilmesine doğru giden süreçte Japonya'da ve ABD'deki kuramcılar tarafından öne sürülmüştü. Aynı yıl Pontecorvo, muonun aslında o nükleer ajan değil de, elektronun ağır versiyonu olduğuna dair ikna edici tezler ortaya attı.

Parçacığın atomlar ve çekirdeklerin içinde ve çevresinde gösterdiği davranışların, çekirdeğe ait (nükleer) bir şeyden ziyade, elektronun davranışlarına benzediğini göstererek yaptı bunu. Bu şeyin beta bozunmasına benzeyen reaksiyonlarda üretildiğini öne sürdü. Muonun beklenen nükleer pion olmadığının, elektronun ağır hali gibi olduğunun ilk ipuçları buradaydı.

Kozmik ışınların yukarı atmosferdeki atomlara çarpmasıyla pion sağanakları oluştuğunu biliyoruz bugün. Zaten Bristol Üniversitesi'nden Cecil Powell Şubat 1947'de pionu, kozmik ışınlar üstüne çalışırken keşfetmişti. Bu

[2] B. Pontecorvo, *Physical Review*, cilt 72, s. 246, 1947.

çarpışmalarda oluşan artıklar arasında pion ilk parçacıktır (adının pi'den, Yunanca "p" harfinden gelmesinin nedeni de bu "ilk" [İngilizce "primary"] olma özelliğidir) ve muonu üreten de, pionun mikrosaniyenin yaklaşık yüzde biri içinde bozunmasıdır.

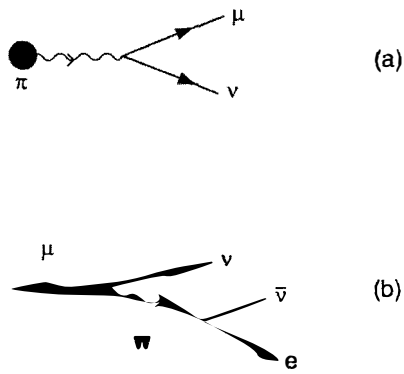
Pionu yok eden ve bozunmasına neden olan kuvvet, "zayıf" kuvvettir. Adı, bu kuvvetin elektronları atomun içindeki düzenlerinde tutan elektromanyetik kuvvetten de, atom çekirdeğinde protonlarla nötronları bir arada tutan güçlü kuvvetten de daha zayıf olduğunu anlatır. Temel kuvvetlerin dördüncüsü olan kütleçekimi (yerçekimi) hariç, zayıf kuvvet içlerinde en hafifidir.[3] Çalışılması en zor olanı da budur.

Elektrik yüklü bir pionun bozunması çoğu zaman bir nötrino ile, kaynak pionla aynı elektrik simgesine sahip bir muon ortaya çıkarır. Muon da kararsızdır, bozunup, bir elektronu[4] ve nötr radyasyon tarafından taşınıp götürülen enerjiyi ortaya çıkarır.

Pionu ve muonu laboratuvarda üretmek ve çalışmak nispeten kolaydı. Muonun kendinden gelen bir döngüsel hareketi, yani "spini" vardı ve tıpkı elektron ve nötrino gibi onun spin değeri de bir buçuktu, pionunsa spini yoktu. Bu durum, pion bozunurken muonun buçuklu spininin, yine buçuklu spine sahip nötrinonun ters yönlü dönüşüyle dengelenmesi fikrine uygundur. Gelgelim muonun bozunmasında spinde hiçbir değişiklik olmaz: Muonun yarım spini vardır, dönüştüğü elektronun da. Muon her bakımdan, elektronun daha ağır bir haliymiş de enerjisinin bir kısmını ışıyarak vermiş ve çöküp elektron olmuş gibi görünüyordu. Hikâye bundan ibaret olsaydı muonun

[3] İki parçacık arasında, kütleçekiminden kaynaklı kuvvet çok hafiftir. Elmaların düşmesi ve gezegenlerin yörüngelerinde kalması gibi, büyük maddeler arasında geçen olaylarda kütleçekiminin baskın olması, büyük bir cismin bütün atomları arasındaki kütleçekimi kuvvetlerinin biraraya gelmesinden kaynaklıdır.

[4] Negatif yüklüyse budur durum. Pozitif yüklü muonsa pozitron üretir.



Şekil 6 pion ve muonların bozunmasıyla nötrinoların oluşumu. (a) Pion bozunup bir muon ve tek bir nötrinoya dönüşüyor, (b) Bir muon (μ ile gösterilir) bozunup elektron olurken, iki (b) nötrino çıkıyor (aslında bunların biri nötrino, ν, diğeri de antinötrino, $\bar{\nu}$).

bozunmasıyla bir elektron ve bir ışık fotonu üretilirdi: $\mu \rightarrow e+\gamma$. Gelgelelim, Jack Steinberger adındaki genç bir fizikçi durumun öyle olmadığını göstermek ve böylelikle büyük bir esrarı aydınlatmak üzereydi.

JACK STEINBERGER

Jack Steinberger 1921'de Bad Kissingen'de (Frankonya) doğdu. Babası Ludwig, kırsalda bir hayvan tüccarının sekiz[5] çocuğundan biriydi ve Yahudilerin küçük cemaati içinde din öğretmenliği yapıyordu. Annesi üniversitede okuyabilmişti, ki o dönem için sıradışı bir durumdu bu. Bu sayede, İngilizce ve Fransızca dersleri vererek evin dar gelirine katkıda buluyordu; öğrencilerinin çoğu da, buradaki kaplıcalara gelerek yöre ekonomisini döndüren tu-

[5] J. Steinberger'in özel anlatımı. Nobel websitesinde yer alan ve aşağıdaki bağlantıdan erişilebilen otobiyografisinden farklıdır: http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/ laureates/ 1988 /steinberger-autobio.html accessed 28.3.2010.

ristlerdi. Almanya savaş sonrasının ekonomik bunalımı içindeydi.

Nazilerin iktidara gelmesi üzerine, Amerikan Yahudi yardım dernekleri, 300 Alman mülteci çocuğa kalacak yer imkânı sundu. Steinberger'in babasının Jack ve ağabeyi için yaptığı başvurular kabul edildi. 1934 Noel'inde New York'a vardılar. Chicago Ticaret Odası'na bağlı bir tahıl komisyoncusu Jack'i evine aldı, lise eğitimini üstlendi, ayrıca Jack'in anne-babasıyla erkek kardeşinin de 1938'de oraya gelmesi, böylece Nazilerin soykırımından kurtulmalarını sağladı.

Jack Steinberger Armour Teknoloji Enstitüsü'nde (şimdiki Illinois Teknoloji Enstitüsü) iki sene kimya mühendisliği okudu, fakat ekonomik bunalımın zor zamanıydı, bursu sona erdi. Aile bütçesine destek olmak üzere çalışması lazımdı, yani artık ancak Chicago Üniversitesi'nin akşam derslerinde kimya okuyabilirdi. Ertesi sene üniversitenin verdiği bir burs sayesinde yeniden gündüz derslerine katılma imkânı buldu, 1942'de kimya lisans öğrenimini tamamladı.

Artık savaş başlamıştı, orduya katıldı ve orada ilk kez yoğun olarak fizik dersi gördü. Chicago Üniversitesi'nde ordu mensuplarına verilen özel bir kursta birkaç ay elektromanyetik dalga teorisi üstüne çalıştıktan sonra MIT'nin [Massachusetts Teknoloji Enstitüsü] radyasyon laboratuvarına gönderildi. Radyasyon laboratuvarında, bombaların radarla tespitinin geliştirilmesine çalışılıyordu; Steinberger anten grubunda görevlendirildi. Orada geçirdiği iki sene içinde bazı temel fizik dersleri alma imkânı buldu.

Japonya'nın teslim olmasının ardından Chicago Üniversitesi'nde çalışmalarını sürdürdü Steinberger. Burada Enrico Fermi'nin dersleri ona ilham veriyordu; bu dersleri "sadelik ve açıklık mücevherleri" diye anacaktı. Sınıf arkadaşları arasında gelecekte Nobel Ödülü alacak olan C. N. Yang ve T. D. Lee, ayrıca alana büyük katkılar yapan başka çok sayıda fizikçi vardı. "Harikulade bir işbirliği vardı, hocalarımdan öğrendiğim kadar [onlardan da]

öğrendim", dedi Steinberger kendi Nobel konuşmasında.

Teorik fizik alanında tez yazmak istiyordu; Fermi onu tez öğrencisi olarak aldı. Bunlar pionun varlığının öngörüldüğü ama henüz keşfedilmediği ara dönemde oluyordu; muonsa bulunmuştu ama öngörülmemişti, muonun aslında pion olduğu fikri de yıkılmaya başlamıştı. Pontecorvo bugün muon dediğimiz o parçacığın elektronun biraz daha kütleli hali, dolayısıyla çok daha fazla enerjisi olan bir elektron gibi göründüğü fikrini henüz ortaya atmıştı. Deneyler muonun bozunup elektron olduğunu ve görünmeyen bir biçimde enerji verdiğini göstermişti. Eğer muonun ağır bir elektron olduğu doğru olsaydı, bu enerjiyi ışık formunda, gama ışını olarak verebilmesi gerekirdi. Fakat böyle bir şey olmuyor gibi görünüyordu; olsaydı eğer, muonlarm maddede durmasını ve bozunmasını inceleyen deneyler, görünenlerden dört-beş kat fazla elektron bulurdu. Burada yanlış bir şey vardı.

Fermi bunu Steinberger'a anlattı ve elektronların az görünmesinin elektronun kimi zaman, deneyin hassas olduğu miktardan daha az enerji taşımasından kaynaklanabileceğini söyledi. Öyle bir durumda bozunma, miktarlara yansımamış olacaktı. Eğer muon bozunup elektrona ve tek bir fotona dönüşüyorsa, bu elektronun enerjisi sabittir. Steinberger'la Fermi, eğer elektronun yanında iki parça varsa, yani hepsi toplamda üç ediyorlarsa, elektronun enerjisinin bir dizi değer alabileceğini anladılar; bu değerlerin bazıları ilk deneyde yakalanamamış olabilirdi. Dahası, Steinberger'ın bu fikrin deneyde nasıl test edileceğine dair bir önerisi de vardı.

Mesele Fermi'ye pek ilginç geldi, kimse bu deneyi yapmaya hazır görünmediğinden, Steinberger'a bunu bizzat kendisinin denemesini önerdi. O da denedi. Fikrin oluşumundan, 1948 yazında deneyin sonucunu almasına kadar bir yıldan az zamanda halletti işi. Deney, tahminlerinin doğru olduğunu gösterdi: Muon bozunup bir elektron ve onun yanında bir değil iki ayrı parçacık oluşturur.

Böylece görüldü ki, muon bozunduğunda, bozundu-

ğu şey her neyse, sadece bir elektronla bir fotondan ibaret değildi.[6] İki kayıp parçacık da, elektrik yükü taşımayan, kütleleri varsa bile çok çok az olan ve spinleri bir araya geldiğinde birbirini götüren cinsten olmalıydı. Foton olabilirdi bunlar, fakat foton olsa tek bir tane olması yeterli, hatta daha kolay olacakken iki tane olmaları için bir sebep yoktu. Muonun, foton biçiminde enerji vererek basit bir şekilde elektrona dönüşmesine engel olan bir kural olsa gerekti; o görünmez radyasyon foton değil başka bir şey olmalıydı. O radyasyonun, tespit edilemeyen iki nötrino olduğu fikri her bakımdan tutarlıydı.

Pauli'nin nötrinoyu ilk kez, beta bozunmasındaki "kayıp" enerjiyi alıp götüren ajan olarak ortaya atışının tekerrürüydü bu bir bakıma. Bugün size muonun bozunmasında iki nötrinonun ortaya çıkması çok bariz görünebilir, ama 1948'de, nötrino diye bir şeyin sahiden var olduğunun kanıtlanmasına daha sekiz yıl varken, hiç de bariz değildi bu.

1956'da, kuramcılar T. D. Lee ve C. N. Yang, zayıf etkileşimin idaresindeki süreçlerin, ayna akislerinden ayrı olabileceğine işaret ettiler –bu özelliğe parite ihlali deniyor. Beta bozunması (kobalt çekirdeklerinde) ve muon bozunması deneyleriyle hemen doğrulanan bu fikir, Lee'yle Yang'ın 1957'de Nobel Ödülü almasını sağladı. Yüklü pionların bozunmasına da zayıf kuvvet sebep oluyordu. Eğer parite ihlali burada da varsa, bozunup bir muon ve bir nötrino üreten her 9.999 piondan bir tanesi, bir elektrona (ya da pozitrona) ve bir nötrinoya dönüşmeli, yani "geleneksel" beta bozunması gerçekleşmeliydi. 1958'de Steinberger ve arkadaşları, bir hızlandırıcıdan çıkan pozitif yüklü pionlar sıvı hidrojenle dolu bir tanktaki protonlar tarafından durdurulduğunda, ortaya çıkan köpük izleriyle, pionun muona dönüştüğü bozunmaları, pozitrona dö-

[6] Veya, eğer o şekilde bozunuyorsa bile bu o kadar ender oluyor ki gözlenemiyor. Yüz milyardan fazla muon bozunmasının kaydedilmiş olduğu günümüzde dahi, bir tane bile $\mu \rightarrow e + \gamma$ olayı görülmüş değil.

nüştüğü bozunmalardan ayırt edilebileceğini gösterdiler. 50 binden fazla muona dönüşme vakası tespit ettiler; altı tane de, net, pozitrona dönüşme vakası buldular. Bu oran, parite ihlal ediliyorsa olması gereken durumla tutarlıydı.

Böylece "beta" bozunma menüsü çeşitlenmeye başladı. Nükleer parçacıkların geleneksel bozunmalarında elektronlar (veya pozitronlar) ve nötrinolar ortaya çıkıyordu. On binde bir kere pion da ortaya çıkıyordu ama çoğunlukla bozunup muona ve nötrinoya dönüşüyordu. Bruno Pontecorvo şunu merak etti: Pionun bozunup muon olması sırasında üretilen nötrinolar, alışılagelmiş beta bozunmalarında yayılanlarla aynı mıydı acaba? Pontecorvo esrarengiz sezgileriyle bir kez daha, doğru soruyu soruyordu.

İKİ NÖTRİNONUN HİKÂYESİ

1958'de Fermi'nin beta bozunması teorisi artık bir noktaya kadar yerleşmişti. Nötrino bulunmuştu, Cowan'la Reines'in deneyindeki nötrino bulma hızı da Fermi'nin öngörüsüne epey uyuyordu. Parite ihlali olgusu bazı matematik ayrıntılarının düzeltilmesini gerektiriyordu ama temel fikirler olduğu gibi kaldı. Fermi'nin teorisi, nötrinoların etkileşimde bulunma ihtimalinin, enerjileri arttıkça arttığını söylüyordu. Yeni hızlandırıcılarda yapılacak deneyler bakımından iyi bir haber olabilirdi bu, fakat birtakım saçma anlamlar da taşıyordu. Eğer giderek artan enerjilerde, 1958 teknolojisini aşan ama ilke olarak bir gün mümkün olabilecek deneyler yaptığınızı hayal edersek, bu teori bazı şeylerin gerçekleşme ihtimalinin yüzde 100'den daha fazla olacağını söylüyordu.

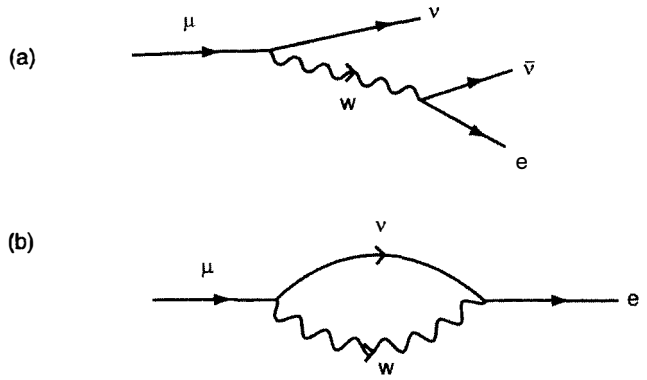
Akla mantığa aykırıydı bu. Çözüm, Fermi'nin bu işe katılan tüm parçacıkların tek noktada buluşacağı görüşünden vazgeçmekte bulundu. Elektromanyetik kuvvetler, ajanlarla, yani fotonlarla taşınıyordu, belki zayıf kuvvetin de böyle bir taşıyıcısı, bir *W* (zayıf anlamındaki

"*weak*" kelimesinden) bozonu olduğu fikri böylece yerleşmeye başladı.[7] Bu fikir o saçma durumun bertaraf edilmesini sağlıyordu sağlamasına, ama G. Feinberg bunun muonun bozunması açısından da bir anlam taşıdığına işaret etti. Muon, bir *W* bozonunun aracılığıyla, bir elektron ve iki nötrinoya dönüşür; kuantum mekaniği kanunları, on binde bir defa, muonu nötrino yerine elektron ve fotona dönüştürebileceğinizi söyler. Gelgelelim, o güne kadar kaydedilen yüz milyon muon bozunması örneğinden bir tekinde bile bir elektronla bir foton çıkmamıştı ortaya.

Ama Feinberg, bu tezinde muonun yanında gelen nötrinoyla elektronun eşi olan nötrinonun (Şekil 7) birbiriyle aynı olduğunu farz ettiğini de vurguluyordu. İki nötrinonun aslında birbirinden farklı olabileceğinin ilk düşünüldüğü yer burasıydı. Bu düşünceyi, Feinberg'den bağımsız olarak geliştiren ve incelikli haliyle dile getiren, bütün kanıtları değerlendiren, deneyle nasıl test edilebileceğine dair öneriler getiren ve hızlandırıcıların gittikçe daha fazla enerji verebilmesiyle, nötrino demetleri kullanılarak yapılacak deneylerin yakın gelecekte mümkün olabileceğine işaret eden, Pontecorvo oldu. Daha önce de söylediğimiz gibi, Pontecorvo Moskova'da yaşadığından bu makaleyi Rusça yazdı ve yazısı 1959'da *Soviet Journal of Physics*'te (Sovyet Fizik Dergisi) yayımlandı; bu çalışması Batıda, 1960'ta İngilizce çevirisi çıkana kadar duyulmadı.

Muonun bir elektronla bir fotona dönüşmüyor oluşuna hayran kalmıştı Pontecorvo. On binde bir defa oluyor mu olmuyor mu meselesini bir yana bırakın, Pontecorvo'ya göre burada çok daha belirgin bir çelişki vardı: neden hemen hemen her zaman olmuyordu ki bu? Bir foton atmak, zayıf kuvvet tarafından yok edilmekten çok daha kolay değil miydi? Eğer bu olmuyorsa, onu alıkoyan bir şey ol-

[7] Bu fikir 1983'te CERN'de *W* bozonunun bulunmasıyla doğrulandı. Bu hikâye *The Particle Odyssey*'de (Frank Close, Michael Marten ve Christine Sutton, OUP 2002) ve *Particle Physics A Very Short Introduction*'da (Frank Close, OUP 2004) anlatılıyor.



Şekil 7: W bozonu ve muon bozunmaları. *W* bozonu, *μ* yani muonun bozunarak bir elektron ve bir çift nötrinoya, *ν* ve *ν̄*'ye dönüşmesindeki aracı ajandır (çizim (a)). Eğer bu iki nötrino aynı çeşniden olsaydı, muonun bir elektron ve bir fotona dönüşmesi, *W* ve nötrinonun bir ara aşamada belirip kaybolması sayesinde mümkün olurdu, (b)'de gördüğümüz gibi.

malıydı. Muonun elektronla akraba olduğunu ilk söyleyen kişi Pontecorvo, şimdi de muonun ağır bir elektrondan ibaret olmadığını söyleyen ilk kişi olacaktı: muonun özel bir "muon-luğu" vardı. Bugün bu özelliğe "çeşni" (*flavour*) diyoruz (tam ne demek olduğu hâlâ muamma).

Pontecorvo bu fikri ele alıp, daha geniş anlamlarını araştırmaya başladı: eğer muonla elektron çeşni bakımından farklıysa, nötrinolar neden öyle olmasın? Bunun parçacıklar arasında hoş bir simetri oluşturduğunu fark etti: elektronla onun nötrino kardeşi bir ikili, muon ile onun kardeşi olan nötrino da bir başka ikili. Bunlar "elektron-nötrinolar" ve "muon-nötrinolar" diye adlandırıldılar. Parçacık fiziği kısaltmalarında "ν_e" ve "ν_μ" diye gösterilirler, o işaret kenarı hafiften kıvrık bir "v" değil, Yunanca "ni" harfidir.

Önce, eğer "elektronluk" ve "muonluk" doğada korunuyorsa, bu durumun muonun bozunup elektron ve protona dönüşmesine izin vermeyeceğini gösterdi. Ardından bu fikri sınamanın yollarını sıraladı. En önemlisi,

nötrinonun enerji taşımakla kalmayıp, bir şekilde, kendi kökenine dair bir hafızayı da taşımasıydı. Dolayısıyla, elektronla (ν_e) ya da muonla (ν_μ) beraber oluşmuş bir nötrino, ardından maddeyle çarpışıp elektrik yükü aldığında, enerjisi onun geldiği yere göre elektron veya muon olarak cisimleşmelidir.

Açık bir fikirdi bu, fakat nötrinoların en özel niteliği kendilerini biraz olsun belli etmekten imtina etmeleri olduğundan, bunların elektrona mı muona mı dönüştüğüne bakan ince ayrıntılı ölçümler, uygulamada yapılabilir olmanın çok ötesinde kalıyordu. Pontecorvo'nun önemli ikinci ifadesi buna dairdi: nötrinoların etkileşime girme oranları enerjileriyle beraber artar, demek ki daha yüksek enerjili nötrinolar elde etmenin bir yolunu bulduğunuzda nötrinoları daha görünür kılmış olursunuz. Bu da Pontecorvo'yu şu fikre götürdü: nötrino deneyinin yapılması gereken yer, yeni, yüksek hızlı parçacık hızlandırıcılarının olduğu yerdir.

Yüksek enerjili protonları bir hedefe çarparak yüksek enerjili çoksayıda pion elde etmeyi düşündü Pontecorvo. Pionlar bozunup muon ve nötrinolara dönüşür, bunlar da ilk demetin gittiği yönde uçmaya devam ederler. Çelik bir kalkan muonları emecek, nötrinolar içinse geçirgen olacaktır. Birkaç metre sonra, dedektör olarak kullanmak üzere bir başka büyük hedefe ihtiyacınız var. Nötrinoların yüksek enerjisi olacak, dolayısıyla ara sıra bir nötrinonun dedektördeki bir atoma çarpma, elektrik yük alma ve kendisini gösterme ihtimali makul olacaktır. Eğer bütün nötrinolar birbirinin aynıysa, üretilen elektron ve muon sayısı birbirine yakın olur. Ama eğer sadece muonlar görülecek olursa, o zaman nötrinoların bir kimliği var demektir: elektron-nötrinolar muon-nötrinolardan farklıdır.

Pontecorvo Sovyetler Birliği'nde olduğu için deney olanaklarını kaçırıyordu, çünkü SSCB'de o zamanın tesisleri Batıdakiler kadar iyi değildi. 1960 civarında, onun söylediklerini denemek ABD'de Brookhaven'da ve Cenevre'deki CERN'de mümkün hale gelecek, Moskova yakınlarındaki

Dubna'da ise bu imkân olmayacaktı. Pontecorvo'ya Demir Perde'yi aşma izni 1980'lerin sonuna kadar verilmedi. Ödülü başkaları alacaktı.

LEON LEDERMAN VE MEL SCHWARTZ

1950'lerde Columbia Üniversitesi Fizik Bölümü'nde cuma günleri öğlen Çin yemeği yenir ve bu arada fizikteki güncel problemler konuşulurdu. 4 Ocak 1957 Cuma günü T. D. Lee önce menüyü istedi, sonra da kobalt çekirdekleriyle yapılan deneylerin, zayıf etkileşimde paritenin ihlal edildiğini göstermeye başladığını duyuracaktı. Yemeğin sondan bir önceki servisi sırasında Leon Lederman'ın aklında bir fikir oluşmaya başladı.[8]

Lederman New York'ta doğup büyümüştü, şimdi de Columbia Üniversitesi'nde öğretim görevlisiydi. Yakınlarda, Irvington-on-Hudson'daki Nevis Laboratuvarı'nda ne zamandır pionlarla ve muonlarla deneyler yapıyor, özellikle de yüklü bir pionun bir muon ve bir nötrinoya dönüştüğü bozunmayı ölçüyordu. Bunun sebebi zayıf etkileşimdi, Lederman bir anda anladı ki parite ihlalini aramanın halihazırda devam eden yavaş, nükleer beta bozunmasını incelemekten çok daha kolay bir yolu vardı.

Nevis'te bir proton demeti hedefe çarpıyor ve yoğun pion demetleri üretiyordu. Pionlar salonun diğer ucuna akarken yaklaşık yüzde 20'si bozunup birer muon ve birer nötrinoya dönüşecek, bunlar da ebeveynleriyle aynı yönde gitmeye devam edeceklerdi. Pionun spini yoktur, bundan dolayı, açısal momentum hesaplarının tutması bakımından nötrino ve muonun birbirine ters yönde spin yapması gerekir. Fakat eğer parite ihlal ediliyorsa, kütlesiz nötrino tek bir tarafa doğru döner (buna solak spin denmesi yerleşmiştir), bu durum muonun spinini de tek

[8] Hikâyenin tamamı şuradadır: *The God Particle,* L. Lederman ve D. Teresi, Houghton 1993, s. 256-273.

yönle sınırlandırır. Şimdi soru, spin yapan bu muonun dönme yönünün nasıl tespit edileceğidir.

Tabiatın bir nimeti olarak, muon da zayıf etkileşimle bozunur ve bir elektronla iki nötrino üretir. Tek gereken, muonları durdurup, elektronların hangi yöne doğru ortaya çıktıklarına bakmaktı. Parite ihlal ediliyorsa muonların tek bir tarafa spin yapma eğilimi, muonların zaten gitmekte olduğu yönde (ileri doğru) ortaya çıkan elektronların, bunun tersine, geriye doğru giden elektronlardan daha çok sayıda olmasına yol açacaktı. Üniversitede öğleden sonraki işleri biter bitmez Nevis Laboratuvarı'na koşan Lederman, öğrencisine yapmakta olduğu deneyi, bu fikrin doğru olup olmadığını görebileceği şekilde değiştirmesini söyledi. Akşam yemeğini çabucak yerken, iş arkadaşı Dick Garwin'i arayıp onu da kendilerine katılıp yardım etmeye davet etti. Akşam 8'de deneyi yeniden tasarlama işine koyulmuşlardı bile. Gece yarısını geçerken ölçümleri yapmaya başladılar; doğru yolda olduklarını gösteren cazip ipuçları buluyorlardı. Hızlandırıcı maalesef başka deneylere ayrılmıştı, ara verip ertesi günü düzeneği test edip geliştirmekle geçirdiler. Pazartesi günü işe başlamaya hazırdılar, fakat hızlandıcı bakım ekipleriyle ilgili sorunlar çıktı. Tüm çabalarıyla işe girişmeleri pazartesi gecesini buldu. Gece nöbetini Garwin üstlendi. Salı günü sabaha karşı 3'te Lederman'ın telefonu çaldı: "Gelmen lazım. Başardık. "Sabahın 6'sında hiçbir şüpheleri kalmamıştı; muazzam bir etki görüyorlardı: ileri doğru giden elektronların sayısı geri gidenlerin iki katından fazlaydı. Parite ihlal edilmekle kalmamış, darmadağın olmuştu. Şimdi birini uyandırma sırası Lederman'daydı: T. D. Lee'yi aradı. Saat 7 olduğunda, Columbia'da haberi alan arkadaşlarından telefonlar gelmekteydi; aynı günün sonunda, dünyanın çeşitli yerlerinde fizikçiler, Cenevre'de, Moskova'da, bu deneyi tekrar ediyor, onlar da doğruluyorlardı. Lederman Amerikan Fizik Derneği'nin yıllık toplantısında, 6 Şubat 1957'de New York'ta bu sonucu iki bin kişiye ilan etti.

Daha önce gördüğümüz gibi, ertesi sene Steinberger

bir pionun bir nötrino ve bir elektrona dönüştüğü ender bozunmayı, yani "normal" beta bozunmasını ölçtü. Bu bozunmalarda zayıf etkileşimin rol oynadığına ve hayaletvâri kayıp parçacıkların da nötrinolar olduğuna artık hiç şüphe kalmamıştı. Nötrino sözlüğünü yeniden yazan o işbirliğinde Lederman ve Steinberger'a, Steinberger'ın eski öğrencisi ve o sırada Columbia'da yardımcı doçent olan Mel Schwartz da katılacaktı pek yakında. Bu hikâye de yine Columbia'nın meşhur öğle yemeklerinden birinde başlıyor. Kasım 1959'da, T. D. Lee, Fermi'nin teorisinin yüksek enerjide gerçekleşen zayıf etkileşimler için söylediklerindeki çelişkiye takılmış, bunun deneyde nasıl test edilebileceği üstüne bir tartışma yürütüyordu. Bu konuyu çalışmak zordu çünkü parçacıklar yüksek enerjide çarpışırken elektromanyetik ve güçlü kuvvetlerin etkileri zayıf kuvvetinkileri gölgede bırakabilirdi.

Mel Schwartz sonra şöyle anlattı: "O gece yatağımda yatarken aklıma geldi. İnanılmayacak kadar basitti. Nötrinoları kullanmak yeterdi."[9] Fikir, pionların üretilmesinin ve ardından bozunmasının, deneylerde kullanılabilecek kadar çok sayıda nötrino üretebileceğiydi.

Kısa bir makalede fikrin anahatlarını anlattı, bu yazısı 1960'da yayımlandı. Pontecorvo'nun makalesinin İngilizce çevirisi de ancak şimdi çıkıyordu. Schwartz makalesinin sonunda Pontcorvo'nun yazdığı "konuyla ilgili yeni çıkan makaleye" işaret etti ve yüksek enerjili nötrino etkileşimlerine dikkat çektikleri için Lee ve Yang'e teşekkür etti.

"İlgili makale"den kastı, Pontecorvo'nun yüksek enerjili nötrinoları doğru yön olarak göstermesiydi. Pontecorvo'nun, nötrinonun iki ayrı "çeşni"sine dair daha önemli fikirleri Schwartz'un makalesinde yer almıyordu. Fakat bu arada Lee ve Yang de bu deneylerden neler çıkabileceği üstüne düşünüyorlardı. 1960 yazında onlar da, kendileri bilmese bile Pontecorvo'nun çoktan ulaşmış olduğu sonuca vardılar: muonun elektron ve fotona dö-

[9] M. Schwartz, Nobel Ödül Töreni'nde anlattığı hatıra, 1988.

nüştüğü bir bozunmanın görülmemesi, muon-nötrino ile elektron-nötrinonun birbirinden farklı olduğunu kanıtlayan işaret olabilirdi. Peşine düşülen şey bu oldu.

Ama mesele bu işin nasıl yapılacağıydı. Var olan hızlandırıcıların hiçbiri bu deneyler için gereken yoğunlukta bir nötrino demeti üretecek kadar güçlü değildi, ama Brookhaven'da yeni AGS (*Alternating Gradient Synchrotron*, Alternatif Kademeli Senkrotron) bitmek üzereydi. Leon Lederman deneyin orada yapılabileceğini hesap etti ve Schwartz'u bunun gerçekten de işleyebileceğine ikna etti.[10] Yedi kişilik bir ekip işe koyuldu: Schwartz, Steinberger, Lederman, ve öğrencilerle doktora sonrası araştırmacılardan dört kişi.

Brookhaven'daki hızlandırıcıyı kullandılar ve yoğun proton demetlerini berilyumdan oluşan hedeflere gönderdiler. Böylece bol miktarda pion oluştu, bunlar da hızla bozunup muon ve nötrino oldular. Eski bir savaş gemisinden alınan levhalarla yapılmış 13 metre kalınlığında çelik bir bariyer muonları filtreledi. Nötrinolar engelin içinden rahatça geçip on ton alüminyumla karşılaştılar. On günü aşkın süre içinde 100 milyondan fazla nötrinonun geçtiği parkurda hepi topu 51 tane nötrino, alüminyuma çarptığında elektrik yükü alarak kendini ele verdi. Fakat bu 51 çarpışmanın her biri, muonun ortaya çıkışıyla sonuçlan-

[10] Bu konuda hatıralar farklıdır. Schwartz Nobel konuşmasında bunu biraz belirsiz yazmış: "O akşam kilit mesele aklıma geldi: belki de [yeterli sayıda] nötrino bir deneyde [kullanılmak üzere] üretilebilirdi. Hızlıca yaptığım yuvarlak hesap, bunun yapılmakta olan veya o sıralarda planlanan şu veya bu hızlandırıcıdan birinde yapılmasının mümkün olduğunu gösteriyordu. Haberi vermek için T. D. Lee'yi evinden aradım... Deneylerin planlanmasına ertesi gün hemen başlandı." Lederman ise *The God Particle* ["Tanrı Parçacığı"], s. 290'da şöyle demiş: "Schwartz var olan hızlandırıcıların hiçbirinin yeterince yoğun bir nötrino demeti üretecek güçte olmadığına kendi kendisini bir şekilde ikna etmişti, ama ben aynı fikirde değildim... Hesapları yaptım ve önce kendimi sonra Schwartz'ı deneyin aslında yapılabilir olduğuna ikna ettim."

dı; bir tanesinde bile elektron çıkmadı ortaya. Bu üç bilim insanı muon-nötrinolarla elektron-nötrinolarm birbirinden farklı olduğunu kanıtlamıştı.[11]

Otuz yıl sonra, 1988'de Lederman, Steinberger ve Schwartz Nobel Fizik Ödülü'nü paylaştılar. Çalışmalarıyla, yüksek enerjili nötrino demetlerinin yapılabildiği ve zayıf etkileşimleri derinlemesine araştırmakta kullanılabileceği görülmüş oldu ve aradan geçen zamanda bu teknikleri çeşitli şekillerde kullanarak zayıf etkileşimleri tanıdılar. Muon-nötrinoların elektron-nötrinodan farklı olduğunun keşfi, parçacık fiziğinin modern standart modelinin temellerinden birini oluşturdu.

Schwartz ikinci bir Nobel Ödülü kazanma fırsatını kaçırmış da olabilir. 1971'de California'da Stanford Lineer Hızlandırıcı Merkezi'nde (*Stanford Linear Accelerator Center*, SLAC) buna benzer bir deney düzeneği kullanmaktaydı. Bulduğu sıradışı beş vakada, nötrinolar hedefle etkileşime girmiş gibi görünüyordu ama etkileşimden hiç muon çıkmamıştı. Geriye dönüp bakıldığında onun muhtemelen "nötr akım" etkileşimlerini ilk gören kişi olduğunu söyleyebiliyoruz, burada nötrino elektrik yük almadan hedeften seker.

1971'de SLAC yönetiminin başka öncelikleri vardı. Orada yapılan deneylerde, protonla nötronun noktasal parçacıklar olmadığına, daha sonra kuark adını alacak olan daha temel parçacıklardan oluştuğuna dair kanıtlar henüz bulunmuştu. Öyle olması kuvvetle muhtemeldi ama daha tam olarak anlaşılmamıştı ve SLAC da asıl çabayı bu alanda gösteriyordu. Buradan da Nobel Ödülleri geldi. Schwartz Ulusal Bilim Vakfı'ndan deneyleri için fon almak için umutsuzca çabaladı ama başaramadı. O dönemde ben de SLAC'teydim, Schwartz'un defalarca, ısrarla, yepyeni bir şey keşfettiğini söylediğini ve bunun peşine düşemediği için sinirlerinin çok bozulduğunu hatırlıyorum. Bundan kısa süre sonra parçacık fiziğini bıraktı ve

[11] G. Danby ve diğ. *Physical Review Letters*, 1962, cilt 9, s. 36.

Digital Pathways diye bir bilgisayar şirketi kurdu.

"Nötr akımlar" sonunda 1973'te CERN'de "Gargamelle" Ortaklığı tarafından bulundu. Bu, elektromanyetik kuvvetlerle zayıf kuvvetleri birleştiren teorileri doğruladı, ki bunlar da kısmen, iki ayrı nötrino olduğunun bulunmasından ilham almıştı. Schwartz Nobel konuşmasında, Pontecorvo'nun, Schwartz, Steinberger ve Lederman'ın düşündüğü pek çok şeyi onlardan bağımsız olarak bulduğunu zarafetle ifade ederek, "nötrino fiziği alanında onun toplam katkısı hiç şüphesiz çok büyüktür" dedi.[12]

EK: ÜÇ NÖTRİNO

1976'da elektronun daha da ağır bir hali olan tau (τ) keşfedildi. Parçacık fiziğinin "standart modeli" artık oluşmuştu ve her türlü yüklü lepton parçacığının (elektron benzeri parçacık) nötr bir eşi (nötrino) olduğunu öngörüyordu. Dolayısıyla hikâyeyi tamamlamak için tauyla ilişkili üçüncü bir nötrino çeşidi gerekiyordu.

Eğer ν_e ve ν_μ'yu bulmak zorsa, ν_τ'yu bulmak daha da zordu. Tau-nötrino yük alır ve tau parçacığına dönüşür ama bu kütlesi fazla olan bir parçacıktır; kütlesi protonun iki katından daha fazladır, dolayısıyla işe yüksek enerjili nötrinolardan başlamak gerekir. Tau kararsızdır, saniyenin milyarda birinden kısa sürede bozunarak muona veya elektrona ve bunlara eşlik eden başka parçacıklara dönüşür. Tüm bunlar onu, orada olduğu zaman bile tespit etmeyi zorlaştırır. Parçacığın varlığında dair dolaylı kanıt, CERN'de bulunan LEP'te (*large elektron-positron collider*), yani büyük elektron-pozitron çarpıştırıcısında, 1990'larda elde edildiyse de, doğrudan gözlenmesi ancak 2000'de Chicago'da, Fermilab'da yapılan DONUT (*Direct Observation of "Nu-Tau"*; "Ni-Tau"nun Doğrudan

[12] M. Schwartz, Nobel Ödülü konuşması, 1988.

Gözlemi)[13] deneyiyle mümkün oldu.

1976'da tau parçacığının keşfi hiç beklenmeyen bir şeydi ve Martin Perl'e Nobel Ödülü'nü kazandırdı. Tau parçacığı, nötrino eşine giden yolu gösteriyordu, dolayısıyla, bunun bulunması çok zor olsa da sonunda gözlemlenmesi beklenen bir şeydi. Bunun taşıdığı en büyük anlam muhtemelen, taunun keşfinden 30 yıl sonra burada, Pontecorvo'nun "çeşni"nin özel olduğunu belirttiği ve nötrinoların birer kimlik taşıdığını söylediği 1.959 makalesinin bir kez daha doğru çıkmasıydı.

LEP'te yürütülen deneyler bu hafif nötrinoların toplam çeşit sayısının üç olduğunu da gösterdi. Bunların elektrik yüklü eşlerinin, elektron, muon ve taudan ibaret olduğu anlamına gelir bu. Parçacık fiziğinin standart modelinde proton, nötron ve pion "kuark"lardan oluşur, altı leptonun eşleri de altı kuark çeşididir (çeşnisidir). Yarım yüzyıla yayılan deneylerde bunlar da tespit edilmiştir. Yani o mahcup, gizemli nötrino, üç tane çeşidiyle, doğanın kullandığı madde çeşitlerinin sınırını bilmemizi sağladı. Temel parçacık sayısının sınırı, tarihte ilk kez biliniyordu.

Nötrinonun neden üç çeşnisi var? Henüz kimse bilmiyor bunu. Ama Pontecorvo yine çığır açıcı bir sezgiyle, birden fazla nötrino çeşidi olmasının güneş nötrinoları bilmecesinde kilit rol oynadığını göstermek üzereydi.

[13] Nötrinonun simgesi olan Yunanca "ni" harfi, "nu" diye yazılır —*çev. notu.*

8

YİNE YENİ KAYIP NÖTRİNOLAR

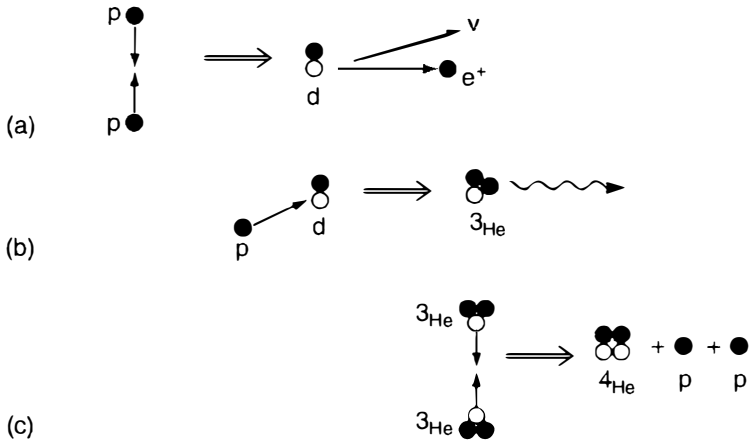
DÜNYANIN BÜTÜN GALYUMLARI

1978 yılında Davis'in Homestake maden ocağındaki deneyden daha iyi ve daha kesin veriler elde edebiliyordu. Ölçülenle beklenen arasındaki çelişki artıyordu.

Tespit edebildiği o ender süreçte güneş nötrino üretim hızı 2,2 SNU seviyesindeydi ve her iki yönde 0,4 SNU hata payı vardı: Bu değer 2,6'ya kadar çıkabilir veya 1,8'e kadar düşebilirdi tesadüfler sonucu, bu aralığın dışında olma olasılığı ise çok daha azdı. Bahcall'un bu sayı için yaptığı teorik hesaplar da keskinleşmişti; 1980'de onun öngörüsü 7,5 SNU, hata payı ise 1,5'ti. Temel teori pek de değişmemişti; Bahcall'un bulduğu sayılara duyduğu güveni artıran, teoriden ziyade, temel nükleer süreçlerle ilgili daha iyi veri elde edilebilmesiydi.

Homestake'te yapılan ölçümü 2,6 SNU diye en yüksekten değerlendirseniz, Bahcall'un burada bulunması gereken sonuca dair beklentisini de alabileceği en düşük değerle 6 SNU olarak kabul etseniz bile, Davis'in, beklenen sayının yarısından az nötrino tespit ettiğini teslim etmek zorunda olursunuz.

Bu uyumsuzluğun ne derece önemli olduğundan şüphe edenler yine vardı. Hata payının bunca yüksek olmasının nedeni Davis'in yalnızca, on bin *pp* füzyonundan ancak bir veya ikisinde son ürün olarak ortaya çı-



Şekil 8: Güneş'te *pp* proton-proton füzyon reaksiyonu.

kan nötrinolara bakmasıydı. Bu çok belirli nötrinoların üretilme hızı, *pp* döngüsündeki çeşitli nükleer süreçlerin teker teker hızlarına hassasiyetle bağlıdır. Davis'in arayışının tetiklemesi sonucunda, bu süreçlere dair verilerde dikkat çekici bir gelişme vardı ve Bahcall'un öngörülerini keskinleştirmesi böylece mümkün olmuştu; fakat sorunun güneş teorisinde mi yoksa nötrinolarda mı olduğunu bulmak üzere yeni bir deneye gerek olduğu apaçıktı.

Nötrinolar hakkında 1974'te Macaristan'da yapılan bir konferansta konuşulan konulardan biri bu oldu. Bruno Pontecorvo, üç arkadaşıyla birlikte Kafkasya'da dört kilometrelik bir tünel açtırıp nötrino laboratuvarı kurmayı planladıklarını duyurdu. Burada, neredeyse iki milyon litre sıvı alabilecek bir klor dedektörü de bulunacaktı ve Homestake'tekini beşe katlayan bu deney düzeneğiyle hem Davis'in yaptıklarını doğrulamayı hem de hassasiyeti artırmayı umuyorlardı.

Bu girişim yararlı olabilirdi ama konunun can alıcı noktasına temas etmiyordu; onun için temel ve en yaygın *pp* füzyon sürecinde oluşan nötrinoların tespit edilmesi

gerekiyordu. Mesele, bu birincil reaksiyonda oluşan nötrinoların enerjisinin, klorun reaksiyon göstermesine yetmeyecek kadar az olmasıydı. Davis'in başarısız olan ilk girişimini de göz önünde bulunduran Bahcall ta 1964'te, eğer Davis'in yeni deneyinde de nötrinolar görülemezse birincil *pp* zincirinden gelen daha düşük enerjili nötrinoların saptanmasına yönelik araştırmaların kararlılıkla yapılması gerekeceğini söylemişti.[1] Davis nötrinoları gördü ama sayıları bir türlü yetmiyordu.

Teorik açıdan bu tür verinin avantajı, birincil nötrinoların sayısını sadece Güneş'in görünen parlaklığına bakarak öngörmenin mümkün olmasıydı; şimdiye kadar yapılan çalışmalarda başa bela olan nükleer reaksiyon hızlarına dair ayrıntılı bilgiye burada gerek yoktu. İyi haber buydu. Sorun ise, düşük enerjili nötrinoların tespiti için deneyde klor değil galyum kullanmak gerekmesiydi. Galyum kullanılarak yapılacak bir deney müthiş pahalı olacaktı ve bunun yegâne sebebi de böyle bir deneyin yapılabilmesi için dünyanın yıllık galyum üretiminin üç katına ihtiyaç duyulması değildi.

Davis'le Bahcall zaten son yirmi yılın çoğunu güneş nötrinolarının peşinde geçirmişlerdi, dolayısıyla bu meseleyi çözmek için ne gerekiyorsa yapmaya hazırlardı. Bunun için dünyanın bütün galyumunu içinde taşıyan bir galyum dedektörü yapmaları gerekiyorsa, bunu en azından denemek zorundalardı.

Bir şansları olabilmesi için destek toplamaları şarttı. *Physical Review Letters*'ta yayımlanan, deneyci meslektaşlarından birkaçının da imzacı olduğu bir mektupla galyum dedektörünün avantajlarını anlatarak, bunun temel *pp* reaksiyonunda oluşan nötrinolara duyarlı olacağını ve güneş nötrinosu meselesine dair çeşitli açıklamaları birbirinden ayırt edebileceğini iddia ettiler. Galyum dedektörünü yapabilirlerse, şimdiye kadar yaptıklarına kıyasla ulaşabilecekleri hassasiyet çok önemli sonuçlar vaat edi-

[1] J. Bahcall, *Physics Letters*, 1964, cilt 13, s. 332.

yordu. Bahcall, Davis'in dedektörü için güneş nötrinolarının yakalanma hızının 8 SNU olacağını, bunun 1,2'si berilyum-7'den, 6,2'si boron-8'den, kalanının da diğer nükleer süreçlerin "açık büfesinden" geleceğini hesaplıyordu, galyum dedektöründense 132 SNU gibi muazzam bir miktarı yakalaması beklenebilirdi. Bunun temel nedeni, galyum dedektörünün, klorun yakalayamadığı çok daha düşük enerjili nötrinolara karşı hassas olmasıydı. Bunlar arasında temel *pp* füzyon sürecinde doğan, ve daha da önemlisi, baskın nötrinolar da vardı ki toplamın 74 SNU'sunu oluşturuyorlardı ve galyum kullanılmasının asıl nedeni de buydu; ama galyum kullanmak Güneş'teki reaksiyon zincirinin diğer aşamalarında üretilen nötrinoların yakalanma oranını da artırıyordu. Davis'in dedektöründe berilyum-7 ve boron-8 nötrinolarına karşı hassasiyet ancak 7,5 SNU'yken, Bahcall galyum deneyinin bu oranı 50 SNU'ya çıkaracağını hesaplıyordu. Galyumla nötrinoların tüm tayfına ulaşabilirlerdi, hem de iyi bir yoğunlukla. Eğer galyum deneyi yapılabilirse cevaplar muhakkak bulunacaktı.

Bunun ardından beş sene boyunca teklif, Brookhaven Laboratuvarı'nın ve fizikteki araştırmaların büyük bölümünün kaynağını sağlayan ABD Enerji Bakanlığı adına yetkili çeşitli komisyonlarca incelendi. Raporların tamamı olumluyken, siyaset böyle değildi.

Fizikçiler bu deneyin Güneş'in en temel doğasını anlamak için müthiş bir potansiyeli olduğunu ve muhakkak kaynak sağlanması gerektiğini söylüyorlardı; iyi başlayan hikâyenin kötü bitmesinin sebebi paranın fiziğe değil astronomiye ayrılan bütçeden verilmesinin istenmesiydi. Astronomlar da bunu üstün bir fizik deneyi olarak görüyorlardı, ama parası fizikçilerden çıkmalıydı! Enerji Bakanlığı'nın nükleer fizik ve parçacık fiziği bölümleri, kendi kurullarını finansal sorumluluğu üstlenmek konusunda uzlaşmaya ikna edemedi.

Enerji Bakanlığı çeke imza atacak birini çıkaramayınca Davis ile Bahcall Ulusal Bilim Vakfı'na yöneldi.

Kendilerini içinden çıkılmaz bir durumda buluverdiler: Davis, Brookhaven Ulusal Laboratuvarı'nda çalışıyordu, Bilim Vakfı'nınsa halihazırda Enerji Bakanlığı tarafından desteklenen Brookhaven gibi laboratuvarlardan gelen araştırma önerilerini desteklememek şeklinde bir politikası vardı. Çaresizlikten dolayı, Princeton'daki İleri Araştırmalar Enstitüsü'nde çalışan Bahcall baş araştırmacı konumuna yükseltildi, böylece üniversite adresi, Ulusal Bilim Vakfı'na başvuru yapılmasına imkân sağlayacaktı. Başvuru burada da, hibenin altına kimin imza atacağı anlaşmazlığına takıldı.

Uzun bir hikâyenin sonunda, ABD'de hiçbir büyük galyum deneyine kaynak verilmedi. Bir ton kadar galyumla bir pilot deneme yapmayı başardılar; bu da tekniğin uygunluğunu ortaya koydu. Bu ilk çalışmada geliştirilen kavrayış ve ekipmanların bir bölümü daha sonra büyük ölçekte yapılan "*GALLium EXperiment*" ("Galyum Deneyi") GALLEX'te kullanıldı; Avrupalı bilim insanlarının katıldığı bu deney İtalya'nın ortalarında yer alan Gran Sasso dağının altında gerçekleştirildi.

Sovyetler Birliği'nde konuya yaklaşım bambaşkaydı. Rusya Bilimler Akademisi'nin nükleer fizik kısmının başkanı Moisey Markov bu konuda öyle heyecanlıydı ki Rusya'da Kafkasların altında Baksan Nötrino Gözlemevi'ni kurarak Pontecorvo'nun 1974'teki planını destekledi. En önemlisi, Markov başarılı bir pazarlıkla 60 ton galyumun Sovyet fizikçiler tarafından deneyleri süresince ücretsiz olarak kullanılmasını sağladı. Bu sayede Sovyetlerle ABD arasında *Soviet American Gallium Experiment*'ın (Sovyet-Amerikan Galyum Deneyi) kısaltması olan SAGE[2] adıyla bir işbirliği kuruldu. Fakat deney başladığında Sovyetler Birliği dağılmıştı, dolayısıyla deneyin adı Rus-Amerikan Galyum Deneyi olarak değiştirildi, ama SAGE kısaltmasının olduğu gibi kalması daha münasip bulundu.[3]

[2] "Adaçayı" ve "bilge, bilgelik" anlamına gelir ---*çev. notu.*

[3] Rus-Amerikan Galyum Deneyi, yani *Russian American Gallium Experi-*

SAGE'e gönderilen o 60 ton galyum, o dönemde bu elementin dünyadaki varlığının tamamıydı. 30 ton daha galyum üretmek iki sene daha alacak, bu da GALLEX'te kullanılacaktı. Böylece, 1990'larda Güneş'in temel yakıtı olan *pp* zincirinde oluşan birincil nötrinoların ilk görüntülerinin aranacağı, galyum dedektörlerinin kullanılacağı iki deney için zemin hazırdı. Fakat daha hazırlıklar başlarken, güneş nötrinolarını tespit etmenin yeni bir yolu oluşuyordu bile; bu yöntem alanda devrim yaratacak ve yeni bir bilim dalı kurulmasına neden olacaktı: nötrino astronomisi.

GÜNEŞ'İN NÖTRİNOĞRAFI

1980'lerin başında Davis'in klor kullanarak Homestake maden ocağında sürdürdüğü deney güneş nötrinolarını arayan tek deneydi hâlâ. Deneyin zorluğundan ve radyokimyasal tekniğe dayanmasından dolayı, durumdan memnun olmayan birçok fizikçi vardı. 20 yıldır hiçkimse deneyde de hesaplarda da hata bulamamıştı (Bahcall bunu hep çok pozitif buldu) ama hesaplar karmaşıktı, upuzun bilgisayar kodlamaları içeriyordu ve her ne kadar Bahcall kendisine yöneltilen her soruyu tam olarak cevaplasa da, programlarda bir şeylerin yanlış olabileceğinden duyulan huzursuz endişe baki kalıyordu. Birçok kişi Bahcall'u "Güneş'ten gelen nötrino akısını yanlış hesaplayan adam" olarak görüyordu.[4]

Nötrinoları, Davis'in radyokimyasal dedektöründeki gibi biriktirip olaydan sonra aylık olarak çıkarımda bulunarak değil de, meydana geldikleri sırada, teker teker yakalamanın bir yolunu bulmak gerekiyordu. Japonya'daki

ment'ın başharfleri, İngilizcede "hiddet; öfkeden köpürmek" anlamına gelen "RAGE" kelimesini oluşturuyor —*çev. notu.*

[4] J. Bahcall, PBS televizyonunun Nova programında aktarılmıştır. *Interview Dancing with Nötrinos* programına www.pbs.org /wgbh / no va/ nötrino /dancing. html adresinden ulaşılabilir.

Kamioka maden ocağında çalışan bilim insanlarının yapabileceklerini fark ettikleri şey tam da buydu; Erie gölünün[5] altında IMB deneyini[6] yürüten bilim insanları da tesadüfen, bunu yapabildiklerini fark ettiler.

Her iki deneyde de protonların bozunduğuna dair işaretler aranmaktaydı; zira tabiat kuvvetlerini birleştirmeye çalışan bazı teorilere göre bunun arada sırada görülüyor olması gerekiyordu. Maddenin kararlılığı, böyle bir şey gerçekten oluyorsa bile son derece ender gerçekleştiğini ortaya koyuyor; protonun yarı ömrü gözlemlenebilen evrenin ömründen kat be kat fazla. Bunu yakalama ihtimalleri olabilmesi adına, bilim insanları devasa su tankları inşa etmiş, ultra-saf suyla dolu bu tankların çevresini, protonlar bozunurken üretilecek parçacıkları tespit etmek üzere binlerce fotoçoğaltıcı tüple (*photo-multiplier tube*, PMT) donatmışlardı. Fotoçoğaltıcı tüp ampulün tersi gibi çalışır. Elektrik akımı ampule girince ışık verir; ışık fotoçoğaltıcı tübe girdiğinde ise enerjisi elektrik akımına dönüşür, bu da olayı kaydedecek olan bilgisayara iletilir. Peki ama yerin dibindeki bu su tanklarına ışık nereden girecekti? Cevabın, suyun içinde ışık hızından da hızlı uçuşan parçacıklar olması umuluyordu.

Hani hiçbir şey ışıktan hızlı yol alamazdı? Burada bir dakika durup açıklama yapalım. Bu cümle vakum için geçerlidir; ama ışık su veya cam gibi malzemelerin içinden geçerken yavaşlar. O halde elektron gibi yüklü parçacıkların suyun içinde ışıktan daha hızlı gitmesi mümkündür (bunlar yine de doğanın azami hız sınırı olan, vakumdaki ışığın hızından daha hızlı değillerdir tabii ki). Böyle bir şey olduğunda, sesteki gümlemenin ışıktaki karşılığıyla, merkezi parçacığın uçuş yolu olan açık mavi renkli bir koni şeklinde ışık ışır. Bu, çalışmalarıyla olayın anlaşılmasını

[5] Erie Gölü, ABD ile Kanada'nın sınırındadır —*çev. notu.*

[6] IMB kısaltması, işbirliği yapan üç kurum olan Irvine (California) ve Michigan üniversiteleri ile Brookhaven Ulusal Laboratuvarı'nın baş harflerinden oluşuyor. Irvine ekibinin lideri Fred Reines'ti.

sağlayan Rus bilim insanı Pavel Çerenkov'un adıyla, Çerenkov radyasyonu diye anılır.[7] Koni biçimli ışık su tankının duvarlarını bulduğunda tüpler onu tespit eder. Ardından bilgisayar halkanın şeklini ve boyutunu yeniden kurar, buradan hem özgün parçacığın enerjisini hem de hareket yönünü çıkarmak mümkündür.

Proton bozunmasına duyulan ilgi, insanların bir kiloton madde içinde her gün bir protonun bozunabileceğini sanmalarına neden olan hatalı bir deneyden kaynaklanıyordu. Doğru olsaydı bu, arkaplandaki kozmik ışınlar bertaraf edilirse protonun bozunması tespit edilebilirdi. Bu yüzden madenlerin derinliklerinde ve dağların altındaki tünellerde deney yapmak için bir telaştır başladı.

Her şey beklendiği gibi olsa bile, kozmik ışınların üst atmosferdeki atomlara çarpıp etrafa nötrinolar saçması, kayaların içinden geçebilen nötrinoların da bozunan protonlardan geleceği umulana benzer bir hızla dedektörleri uyarabilmesi sorunu vardı. Nobel Ödülü sahibi ve protonların bozunduğunu hararetle savunan heyecanlı bir kuramcı olan Abdus Salam, bir makalede, atmosfer nötrinolarının oluşturduğu istenmeyen arkaplanın, deneyi Ay'da yapmak suretiyle bertaraf edilebileceğini öne sürdü. Önde gelen nötrino deneycilerinden olan ve kuramcıları hiç takmayan Don Perkins, Salam'ın makalesini değerlendirirken, Ay'a eğer Salam ve başka kuramcılar kendileri gitmek isterlerse buyurabileceklerini yazdı; neden olmasındı, "nerede hareket orada bereket."[8]

Protonlar sahiden de bozunuyorsa bile bunun görünmez sayılacak kadar nadir olacağı ancak daha sonra anlaşıldı. Yerin yedi kat dibine yapılmış o devasa dedektörleri asıl amaçları bakımından gereksiz kılan bu talihsiz geliş-

[7] Çerenkov radyasyonu ilk olarak 1900'lerin başlarında Curieler tarafından görüldü ve ilk olarak Fransız bilim insanı L. Mallet, 1926'da bunun üstüne çalıştı. Fakat Mallet olayın doğasını anlayamadı ve hem tarih hem de Nobel Ödül komiteleri bu şerefi Çerenkov'a verdi.

[8] Don Perkins, Frank Close'a mektup, 19 Mayıs 2009.

me üzerine, deneyci ekipler o zamana kadar istenmeyen arkaplan olan nötrinolar üstüne çalışmaya başladılar. İlham üzerine yapılmış bir tercih değildi bu; o koskocoman, pahalı düzeneklerle yapılabilecek başka hiçbir şey yoktu.

Su dedektörü tekniği nötrinoları saptamakta kullanılabilirdi ama bazı değişiklikler gerekiyordu. Deneyler aslında proton bozunmasını bulma amacına göre tasarlanmıştı ve bozunmakta olan bir protondan gelebilecek her parçacığın bir güneş nötrinosundan daha fazla enerjisi olurdu. Bozunan nötrinolardan hiçbir iz bulamayan ve güneş nötrinosu meselesi etrafında giderek artan gerilimin farkında olan Kamioka ekibi, dedektörlerini daha az enerjili nötrinolara hassas olacak şekilde yeniden donattı.

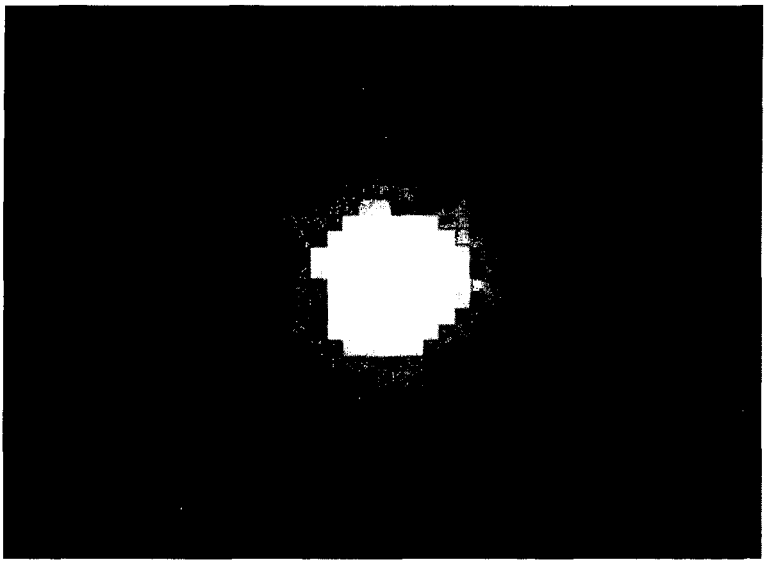
Tesadüfler bilim insanlarını gerçek keşiflerin olduğu yere taşımaktaydı.

Güneş'teki boron-8 reaksiyonundan gelen nötrinolar, yani Davis'in çalıştıkları, sudaki bir elektrona çarptıklarında, bir bilardo topu diğerine tam karşıdan çarptığında olduğu gibi, yüklü parçacığın nötrinonun geldiği yönde yola devam edeceği kadar enerjiye sahiptir.

Çerenkov radyasyonunun, elektronun suyun içinden ışıktan da hızlı geçmesiyle oluşan konik şekli tankın çevresindeki fotoçoğaltıcı tüplerce tespit edilir. Halkanın boyutu elektronun hızına göre değişir, hızsa süreci başlatan nötrinonun elektrona verdiği enerji miktarına bağlıdır. Yani bu "su Çerenkovu" dedektörlerinin sadece nötrinoları saptamaktan ibaret olmayan, enerjilerini ölçmeyi ve geldikleri yönü tayin etmeyi de kapsayan imkânları var. Son olarak, olayın gerçekleştiği zaman da kaydediliyor.

Bu dedektörün güçlü yönü, nötrinoya dair tüm bilgileri vermesiydi: enerjisi, ne zaman çarptığı, nereden geldiği. Güneş'in olduğu yönden mi geliyor, yoksa çevredeki radyoaktivite sonucunda başka bir kaynaktan mı çıktı, söyleyebilirsiniz. Yani bu ekiplerin yaptığı şey aslında bir nötrino teleskobudur, evrene açılan yeni bir penceredir.

Böylece Güneş'in "nötrinoğrafını" çekmeleri mümkün oldu. Bu görüntüde Güneş bizim gözlerimizle gördü-



Şekil 9: Güneş'in nötrinoğrafı. Nötrinolarının saptanmasıyla görüldüğü şekliyle Güneş. *Robert Svoboda'nın izniyle, California Üniversitesi, Davis.*

ğümüzden çok daha büyük görünüyor. Nedeni, nötrino gözleminin yön tayini konusundaki hassasiyetinin optik olarak yapılan kadar iyi olmaması. Nötrino astrofiziği hâlâ emekleme çağında; Güneş'in ve astronominin ilgilendiği diğer cisimlerin görüntüleri gelecekte çok daha net olacak.

Kamioka maden ocağındaki ekip Kamiokande[9] dedektöründeki düzenlemeleri 1986'nın sonunda tamamladı. Şans yüzlerine gülüverdi. 23 Şubat 1987'de, önceden hiç ama hiç bir uyarı olmadan, güney göğünde Samanyolu'nun uydu galaksilerinden biri olan Büyük Macellan Bulutu'nda bir süpernovanın patlamış olduğu görüldü. Bu patlamayla oluşan nötrino dalgası 170.000 yıldır uzayda yol alıyordu ve o gün 15 saniye boyunca

[9] Kamiokande, *Kamioka Nucleon Decay Experiment*'ın [Kamioka Nükleon Bozunması Deneyi] kısa adıydı.

Dünya'nın içinden geçtiler. Bunun hikâyesi 10. Bölüm'de anlatılacak; şimdilik, hem Kamiokande hem de IMB deneylerinin süpernovadan gelen bir avuç nötrinoyu tespit ettiğini söyleyelim yeter. Öyle bir olayda oluşmuş nötrinoların tespit edildiği ilk ve şimdiye kadar tek vaka budur. Bir süpernovadan, hem de bizim galaksimizin dışındaki bir süpernovadan gelme nötrinoların, güneş nötrinolarının esrarı hâlâ tartışılırken görülmüş ve tanınmış olması ironiktir. Bu benzersiz olayın ardından IMB bozunan protonlara dair kanıt aramaya devam ederken, Kamiokande yepyeni nötrino astronomisi alanına yelken açtı.

NÖTRİNOLAR HER YERDE EKSİK

1987'den 1995'e kadar Kamiokande'de güneş nötrinoları saptandı. Çerenkov ışığı ancak, elektronlar Davis'in dedektörünün kaydedebildiği enerji miktarını en az beşe katladığında temiz şekilde ölçülebiliyordu. Yani onlar da ancak boron-8 reaksiyonunda oluşan nispeten yüksek enerjili güneş nötrinolarını tespit edebiliyorlardı, ama Davis'in başarabildiğinden çok daha ayrıntılı bilgi ediniyorlardı. Özellikle, her bir nötrinonun enerji miktarını ölçebiliyorlardı. Sonuçlar, Güneş'ten kalkıp buraya gelebilen nötrinoların sayısının, enerjileri arttıkça azaldığını gösteriyordu; bunların boron-8 nötrinoları olması durumunda da olacak olan buydu ve Bahcall da öyle öngörmüştü. Nihayet, Güneş modelinde söylenen bir şey, yapılan gözlemle uyumluydu. Gelgelelim toplam sayı uyum göstermemekte direniyor, öngörülenin yarısında kalmakta ısrar ediyordu.

Önce Davis, şimdi de Kamiokande: *pp* döngüsünün sonunda üretilen ender nötrinoların sayısı çok azdı. Bu kadarı kesindi artık. Aynı durumun baskın nötrinolar için, yani Güneş'in füzyon döngüsünün ilk aşamasında üretilen en düşük enerjili nötrinolar için de geçerli olup olmadığı sorusu hâlâ cevaplanmamıştı. Galyum dedek-

törlerinin kullanılacağı SAGE ve GALLEX deneyleri şimdi bunu araştırmaya hazırdı.

Dünya'nın bütün galyumunu elinde toplayan SAGE önce başladı, GALLEX de 1991'de işe koyuldu. 2000'de, SAGE on yıllık dönemde güneş nötrinosu akısının yaklaşık yüz tane ölçümünü yapmıştı. Güneş modelleri muazzam sayıda, aşağı yukarı 130 SNU nötrino göreceklerini öngörüyordu. Tüm veriler bir araya geldiğinde SAGE de GALLEX de aynı cevabı veriyordu: sayı ancak 70-80 SNU'ydu. Güneş nötrinoları yine yarı yarıya az geliyordu işte. Sonuç, Davis'in doğru söylediğinin kanıtıydı: tüm enerjilerde, tespit edilen nötrino sayısı Güneş modellerinin öngördüğünün ancak yarısı kadar ediyordu.

Sebep ne olursa olsun, Davis'in ekibiyle ilgili herhangi bir başarısızlıktan kaynaklanmıyordu; birbirinden bağımsız deneylerin hepsinin mesajı aynıydı. Suç Güneş'te gibi de görünmüyordu. Bugüne dek astronomlar Güneş'in yüzeyine dair, Güneş'in nasıl titreştiğini gösteren çok sayıda ölçüm yapmış, bu sayede Güneş'in içine dair hassas bilgilere ulaşılmıştı. Bu "heliosismoloji" (Güneş depremleri) verileri, Bahcall'un Güneş'in iç işleyişine dair varsayımlarının doğru olduğunu giderek daha fazla destekliyordu. Bir numaralı şüphelinin nötrino olduğuna dair kanıtlar arttıkça artmaktaydı.

Bir senelik düzenlemenin ardından 1996'da Kamiokande yeni çalışmalara hazırdı. Eskisinden on kat fazla su ve fotoçoğaltıcı tüple, dedektörün adı artık SüperKamiokande, kısaca SüperK'ydı. Bulmacanın anahtarının nötrino olduğundan hâlâ şüphe eden varsa, SüperK o şüpheleri dağıtmak üzereydi. Nötrino astronomisi sadece Güneş'te ya da bir süpernovadan gelenleri değil, atmosferde oluşan nötrinoları da tespit edebiliyordu. Üst atmosfere çarpan kozmik ışınlar nötrino yağmurları üretir. SüperK bunları saptamaya başladı. Güneş nötrinolarının ölçümleri sürpriz olmuştu ya, SüperK'nın atmosfer nötrinolarını gözlemlemeye başlamasıyla bulacaklarının yanında bu hiçbir şeydi.

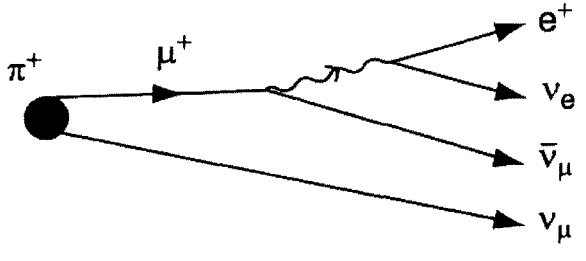
9

"ÖYLE SEVİNDİM Kİ, DANS EDESİM VAR"

ATMOSFER NÖTRİNOLARI

Nötrinoların üretildiği pek çok durum var; buralardakilerin çoğu Güneş'te veya ayağımızın altındaki taşın içinden doğmuş olanlar. Buna ek olarak çok sayıda nötrino da kozmik ışınlardan geliyor. Bizden çok yukarılarda, atomdan küçük parçacıklar gökyüzünden aşağı yağıyor. Çok uzun zaman önce patlamış yıldızlardan kalanlar bunlar. Elektrik ve manyetik alanlar yıldızlararası uzayın içine işlemiş, artıkları kamçılayıp sürekli hareket ettiriyor. O parçacıklardan kimilerinin, Dünya'daki deneylerde yeniden üretebileceğimiz miktarların çok ötesinde yüksek enerjileri var. Kainatta yol alırken bu kozmik ışınlar mütemadiyen bize çarpıyor.

Çarpışmaların şiddetiyle havadaki atomlar minicik parçalara ayrılıyor, böylece neredeyse ışık hızıyla, ebeveynlerinin gittiği yönde yol almaya devam eden ikincil parçacıklar sel olup akıyor. Bu kozmik ışınların büyük çoğunluğunu hava veya toprak emiyor, yerin derinliklerinde nötrino dedektörlerinin beklediği mağaralara ulaşamıyorlar. Ama ışınlarda pionlar ve muonlar da var ve bunların birçoğu emilmeye kalmadan bozunuyor. Bozunma



Şekil 10: İki muon-nötrinoya bir elektron-nötrino. Ayrıca bakın, Şekil 6. Pozitif yüklü bir pion (π^+) bozunup pozitif yüklü bir muona (μ^+) ve tek bir nötrinoya dönüşüyor. ν_μ diye gösterilen bir muon-nötrino bu. Muonsa bir pozitrona, $\bar{\nu}_\mu$ diye gösterilen bir muon-antinötrinoya ve ν_e şeklinde gösterilen bir elektron-nötrinoya dönüşüyor. Böylece pion bozunmasının son ürünleri olarak, elektron tipinden her nötrinoya karşı muon türünden iki nötrino ortaya çıkıyor.

sonucunda nötrino üretiyorlar ve o nötrinolar dedektörlere ulaşabiliyor çünkü aradaki taşlar onlar için de güneş nötrinoları için olduğu gibi saydam.

Atmosfere çarpan kozmik ışınlardan olma nötrinolarla Güneş'ten gelme nötrinolar arasında iki büyük fark var. Birincisi, "atmosfer nötrinolarının" enerjisi güneşli kuzenlerinin onlarca, yüzlerce katı. İkincisi, Güneş "elektron-nötrino" (ν_e) üretirken, kozmik ışınların artıkları ağırlıklı olarak "muon-nötrino" (ν_μ) çeşidini üretiyor. CERN gibi laboratuvarlarda yıllardır yapılan deneyler kozmik ışınların nasıl davrandığını göstermişti; bunlardan açıkça belli oluyordu ki artıkların nötrino içeriği, her iki muon-nötrino için bir tane elektron-nötrino oranındaydı, muon cinsinden olanlar bir ν_μ, bir de $\bar{\nu}_{\mu^+}$ diye gösterilen bir anti-nötrinoydu.[1]

[1] İlk artıkta bolca pion (π) olur, pozitif yüklü olanlar (π^+) biraz daha fazladır, bu yük onları saçan pozitif yüklü çekirdekten "hatıra"dır. π^+ bozunduğunda hemen hemen her zaman pozitif yüklü bir muonla bir muon-nötrino üretir. Muon da bozunarak bir pozitron, bir νe ve bir $\bar{\nu}_\mu$ 'ya dönüşür.

Su dedektörlerinin çok önemli bir özelliği, nötrinonun enerjisini ve nereden geldiğini kaydetmeye ek olarak, yakaladıkları nötrinonun çeşidini de bildirebilmeleriydi. Nötrino atoma çarptığında elektrik yük alır, ya pozitif ya negatif yüklü bir muon veya bir elektron olur. 121. sayfada görüldüğü gibi bu yüklü parçacık suyun içinden uçarcasına geçer, geçerken Çerenkov ışığını ışır, fotoçoğaltıcı tüpler de bunu görür. Muonlar elektronlardan 200 kat kadar daha ağırdır ve dümdüz bir hat üzerinden giderek kirişi daha kolay kırarlar; hafifçecik elektronlarsa yollarından atılır. Bu sırada enerji ışırlar, bundan da biraz daha elektron ve pozitron saçılır. Böylece tek bir elektron bir yüklü parçacık yağmuru başlatır, bu da dağınık olarak, atası olan nötrinonun yönünde yayılır. Sonuçta oluşan Çerenkov ışığının, elektron ve muonların farklı desenleri olur. Muonların keskin bir halkası olur, oraya buraya saçılmış elektronlarınsa halkası daha bulanıktır. Halkanın şekli ve halkanın çevresindeki tüplere Çerenkov ışığının tam varış zamanı, o nötrinonun hem yönünü ve enerjisini, hem de çeşidini bildirir.

1980'lerin ortasında hem IMB hem Kamiokande, atmosferdeki çarpışmalardan gelen muon-nötrinoların elektron-nötrinolara oranının, beklendiği değer 2'dense 1'e daha yakın olduğuna dair ipuçları vermeye başladı. Buna atmosfer nötrinosu anomalisi ismi verildi. Davis'in deneyindeki anomalinin nedeninin güneş astrofiziği değil de nötrinolar olduğuna dair spekülasyonlar artıyordu. Atmosfer nötrinosu anomalisi ν_e'nun fazla olmasından mı, ν_μ'nun az olmasından mı yoksa tespit yöntemine ait bir özellikten mi kaynaklanıyordu, bundan kimse emin değildi. Kamioka'daki yeni düzenlemenin, Kamiokande'nin SüperK'ya dönüşmesinin ardında bu vardı.

SüperK öncelinden daha büyüktü; yüzeyindeki fotoçoğaltıcı tüpler tastamam dört dönümü kaplıyordu. Elektronik yapısı nötrinolar hakkında azami bilgiyi toplamak üzere özel olarak ayarlanmıştı. Nötrinolar gökten, Japonya'nın 20 kilometre yukarısından mı gelmiş, yok-

sa Dünya'nın öbür ucundan gelip, gezegeni boydan boya 13.000 kilometre kat ederek su tankının dibinden mi içeri girmişler, bilinebiliyordu. Bilim insanları nötrinoların yönünü, dünyanın neresinden geldiklerini belirtebilecek kadar iyi tayin edebiliyordu.

Yeni dedektör eskisinden çok daha fazla muon-nötrino yakaladı. Artan veriler, muon-nötrinolarla elektron-nötrinoların sayısının yakın çıkmasının, muon-nötrinoların ortadan kaybolmasından kaynaklandığını gösterdi. Bu ilginçti, ama veriler bundan da önemli bir gerçeği ortaya çıkardı: Dünya'dan geçip gelen nötrinolar için bu açık, yukarıdan gelenlere göre daha büyüktü. SüperK daha çok veri ürettikçe mesaj daha da açıklık kazandı. Her şey, kozmik ışınların gerçekten de muon ve elektron çeşitlerini ikiye bir oranında ürettiği, fakat muon çeşidi yol aldıkça bu çeşit nötrinoların daha fazla ortadan kaybolduğu fikriyle uyumluydu.

Herkesin aklına hemen Davis'in Güneş'ten gelen elektron-nötrinolarla yaşadığı sorun geldi. Acaba nötrinolar yolda kayboluyor olabilir miydi; sadece atmosfer anomalisinin muon-nötrinolarının değil, elektron-nötrinoların da başına aynı şey geliyor olabilir miydi? Nihayetinde Güneş'ten bu tarafa 150 milyon kilometre yol geliyorlardı, eğer atmosfer nötrinolarının ortadan kaybolması mümkünse, güneş nötrinolarının da aynını yapmaya bol bol fırsatı vardı. İlk defa, şüpheciler bile Davis'in sonuçlarının belki de doğru olabileceği fikrine katılmaya başladılar. Güneş doğru davranıyordu; tuhaf davranan nötrinolardı. Şimdi soru şuydu: nötrinolar ortadan kayboluyorsa, onlara ne oluyor?

OSİLASYON YAPAN NÖTRİNOLAR

Pauli'nin "çaresizlikten doğan çare"yi ortaya atmasından yarım yüzyıl sonra, deneyler nötrinonun var olduğunu kanıtlamakla kalmayıp, üç ayrı çeşidi olduğunu da gös-

termişti. Nötrinolara yönelik bu yoğun ve sürekli arayış güneş nötrinosu problemiyle paralel gitmiş, problemse çözülmemekte direnmek ne kelime, yeni yaşam alanları bulmuştu. Davis'in deneyi daha çok hassasiyet kazandı ve veriler güneş nötrinolarının, en azından bu düzenekteki tespitlerde, sayıca az geldiğini daha bir ısrarla gösterdi.

Bu işe ayrılan bunca vakit ve nakit, 1990'lara kadar bulmacayı çözmek için ter dökmüş bunca bilim insanı varken, ironiktir ki yirmi sene önce, Davis'in geçici ilk sonuçlarını açıklamasını izleyen bir sene içinde cevap bulunmuş ve gözardı edilmiştir. 1962'de elektron-nötrinoyla muon-nötrinonun birbirinden farklı olduğunun deneyde gösterilmesinin sıcağı sıcağına, Rusya'da Bruno Pontecorvo ve arkadaşı Vladimir Gribov, Japonya'da Maki, Nakagawa ve Sakata,[2] birden fazla nötrinonun varlığının, belki de güneş nötrinosu problemine bir çözüm sunabileceğini fark etmişlerdi.

Güneş, elektron türünden nötrinolar, yani ν_e üretir; klor dedektörü de sadece bu türden nötrinoların varışını kaydeder. Eğer, yolculuk sırasında ν_e'yu başka bir şeye dönüştürecek hiçbir şey olmazsa, Davis'in dedektörünün dünyada yaptığı hesap size Güneş'te on dakikadan az zaman önce kaç tane ν_e üretilmiş olduğunu bildirir. Fakat 1962'de nötrinonun bir çeşidi daha olduğu ve bunun da muonla ilintili olduğu (ν_μ) artık kesinlik kazanmıştı. Bu durum enteresan bir soruyu beraberinde getirdi.

Schwartz, Steinberger ve Lederman, nötrinoların kendi kökenlerini onlarca metre öteden hatırladığını göstermişti, ama ya bu hafıza daha uzun zaman ölçeğinde kayboluyorsa? Laboratuvarı kat ederken geçen birkaç nanosaniye, zamandan bile sayılmaz neredeyse; Güneş'ten gelen nötrinolar on dakikaya yakın yol alıyorlar ve bu, o nanosaniyelerden bir milyar kat kadar daha uzun bir zaman. Güneş doğumlu bir ν_e bir şekilde huy değiştirip, uzaydaki yolculuğu sırasında bir ν_μ'ya dönüşüyor ola-

[2] Maki, Nakagawa ve Sakata, *Prog. Theor. Phys.*, 1962, cilt 28, s. 870.

bilir miydi?

Eğer elektron-nötrino bu şekilde kimlik değiştiriyorsa, Davis'in dedektöründen hiçbir şey yokmuş gibi geçip giderdi. Böylece iz bırakmadan ortadan kaybolmuş olacaktı.[3] Ancak yolculuğu değişmeden atlatabilen elektron-nötrinolar Davis'in kapanına takılıp sayılabilirdi. İşte bu durum, Bahcall 6 SNU olması gerektiğini söylerken Davis'in neden ancak 2-3 SNU kaydedebildiğini açıklayabilirdi.

Nötrinoların sanki bir nevi kişilik bozukluğuyla Güneş'te bir halde üretildikten sonra yolculuk esnasında kimlik değiştirmeleri fikri, kitaplarda yazan her şeye tersti. Parçacık fiziğinin standart teorisine göre imkânsızdı bu. Yahut en azından, nötrinolar eğer herkesin düşündüğü gibi kütlesiz parçacıklarsa ve ışık hızıyla yol alıyorlarsa, imkânsızdı. Davis güneş nötrinolarının sayıca azlığını fark etmezden çok önce, Pontecorvo kuantum mekaniği kurallarının nötrinoların bir halden diğerine gidip gelmelerine (osilasyon yapmalarına) imkân verdiğini, ama bunun ancak, bir miktar kütleleri varsa olabileceğini fark etmişti. Büyük bir kütleye gerek yoktu, aslında bu yok denecek kadar az, elektronun kütlesinden bile binlerce kat küçük bir kütle olabilirdi ve muhtemelen öyle de. Davis'in 1968'deki açıklamasının ardından, ertesi sene Gribov ve Pontecorvo, nötrinoların iki çeşidi bulunduğu ve bunların birbirinden farklı kütleleri olduğu hipotezine dayanan teorilerini yayımladılar.[4]

Kuantum mekaniğinde kesinliğin yerini olasılık alır ve bu olasılık da bir dalga gibi yükselip düşer. Dalgaboyu parçacığın hızına ve kütlesine bağlıdır. Dolayısıyla aynı enerjiye ama birbirinden biraz farklı kütlelere sahip par-

[3] Muon-nötrinolar ancak yeterince enerjileri varsa muona dönüşürler. Yüksek enerjili kozmik ışınların ürettiği nötrinolar için olabilir bu; ama Güneş'ten gelenlerin çok az enerjisi var. Dolayısıyla dönüşüme uğrayıp muon çeşidi haline gelen güneş nötrinoları fiilen görünmez oluyorlar.

[4] O dönemde yalnız iki çeşit biliniyordu. Gribov ve Pontecorvo'nun fikri kolaylıkla üç çeşide genelleştirilebilir.

çacıkların, birbirinden azıcık farklı dalgaboyları olacaktır. Kuantum dünyasının tuhaflığı daha da derine inerek, Güneş'in ürettiği elektron-nötrinonun, iki farklı kütleye sahip nötrinoların karışımı olmasına imkân tanır. Bu parçacık uzayı hızla kat ederken, bunun iki farklı halinin kuantum dalgaları farklı hızlar arasında bocalar.

Yani buradaki iki dalga, iki farklı dalgaboyu var; bunlar yanyana yol alıyor, yol alırken de birbirlerinin işine karışıyorlar. Tıpkı birbirinden azıcık farklı frekanslardaki iki ses dalgasının birbirine karışıp olağan tonda nabız gibi atan bir ses vermeleri gibi, birbirinden azıcık farklı dalgaboylarına sahip iki nötrinonun kuantum dalgalarının yoğunluğu da artıp azalabiliyor. Sonuç olarak, bu yolculuktaki iki dalga ancak arada sırada, tam başladıkları şekilde tekrar birleşebiliyor. Ancak bu noktalarda yeniden yapılanıp elektron-nötrinoyu temsil ediyorlar. O noktalar hariç her yerde, dalganın şekli inceden gidip geliyor; öyle ki, etki itibarıyla orada elektron-nötrinoyla muon-nötrinonun bir karışımı var. Dakota'daki tepelerin 1.400 metre altında bir tankın içindeki bir klor atomu gibi bir şey önlerine çıkıp akışı bozduğunda, kuantum dalgası mucize gibi ya bir υ_e'ya ya da bir υ_μ'ya dönüşüyor. Hangisi olacağını bilmek imkânsız. Kuantum teorisinden çıka çıka, şunu veya bunu bulma ihtimaliniz çıkar. Bu da demektir ki eğer bu deneyi yeterince fazla defa tekrar ederseniz, elektron-nötrino veya muon-nötrino gelme olasılığı ortalama olarak yarı yarıyadır.

Olay Escher'in, çizimin bir ucundan diğer ucuna doğru ilerlerken bir hayvanın diğerine dönüştüğünü gördüğünüz "metamorfoz" resimleri gibi birşeydir. Örnek olarak, kediyle köpek arasında dönüşebilen tuhaf bir melez düşünün. Köpek evinden çıkıp sokakta gezmeye başlıyor ve yürürken bir yandan kediye dönüşüyor. Sokağın yarısında dönüşüm tamamlanıyor. Eskinin köpeği (şimdinin kedisi) yürümeye ve dönüşmeye devam ediyor. Sokağın sonunda yine köpek olmuş. Siz bu köpek-kediye baktığınızda ne göreceğiniz, sokağın neresinde olduğunuza bağlı.

Farz edin ki siz köpek-kedileri algılayamıyorsunuz, sadece ya biri ya diğeri olan şeyleri seçebiliyorsunuz; ya köpek olacak ya kedi. Sokağın başına ya da sonuna yakınsanız büyük olasılıkla bunu bir kedi olarak yorumlayacaksınız. Sokağın ortasında bir yerlerdeyseniz, onu kedi olarak görme ihtimaliniz daha yüksek. Eğer gözleriniz sadece köpekleri görüyor, kedileri göremiyorsa, köpek olma halinde başlangıca kıyasla bir kayıp olduğu sonucuna varabilirsiniz.

Dolayısıyla mesele nötrinolarda. Bu benzetmede köpek elektron-nötrino, kedi de muon-nötrino. Güneş bir köpek yayıyordu ve Davis'in dedektörü de köpekleri yakalayabiliyordu. Bu teoride Güneş'te olan biten bir terslik yoktu; suç nötrinolardaydı. Davis'in güneş nötrinosu ölçümlerinin eksik çıkıyor gibi görünmesi anlaşılabilirdi. Tek gereken, parçacık fiziğinin, nötrinoların kütlesiz olup ışık hızıyla yol aldığını varsayan standart modelinden vazgeçmekti. Hiç de şaşırtıcı olmayarak, bu modelden vazgeçmeyi kabul edecek pek az kişi vardı ve çoğunluk için bu, matematiksel olarak ilginç bir fikirden ibaretti.

Gelgelelim herkes de nötrino osilasyonunu gözardı etmedi. Osilasyon olabilmesi için, nötrinoların tümü de kütlesiz olamazdı. Bunun kutsal bir kanunu ihlal ettiği yoktu ve yirminci yüzyılın en etkin teorik fizikçilerinden olan Murray Gell-Mann, doğanın yasak etmediği ne varsa gerçekleşebileceği görüşündeydi. Atmosfer nötrinosu anomalisinin ortaya çıkmasıyla ve Davis'in güneş nötrinolarına dair giderek güçlenen verileriyle insanlar, nötrinoların, diğer tüm maddi parçacıklara kıyasla yok sayılacak kadar küçük de olsa, bir kütlesi var mıdır acaba diye düşünmeye başladılar.

Pontecorvo'nun ilk teorisine göre Güneş'in merkezinde oluşan elektron-nötrinolar, Davis'in deneyi açısından görünmez olan muon-nötrinolara, hatta tau-nötrinolara dönüşebiliyordu. Ama eğer güneş modelleri de, Davis'in deneyi de doğruysa, o zaman elektron-nötrinoların büyük bölümünün osilasyon yaparak diğer biçimlerden birine

dönüşmüş olması gerekiyordu. Bunun olabilmesi için de nötrinolar o kadar kimliksiz olmalıydı ki, bunları elektron-nötrino ve muon-nötrino diye adlandırmak sapkınlık sayılırdı. Pontecorvo'nun fikrinin çoğunluk tarafından görmezden gelinmesinin sebeplerinden biri buydu.

Görüşler, üç kuramcının osilasyon fikrinin yeni bir anlamını keşfetmesiyle değişmeye başladı. Buna, o üç kuramcının soyadlarının baş harfleriyle MSW etkisi dendi. 1978'de ABD'li Lincoln Wolfenstein, ve 1985'te Rus Stanislav Miheyev ve Aleksey Smirnov, nötrinoların Güneş'in katmanlarından geçerken, maddenin varlığının, kütleleri belli bir aralıkta olan nötrinoların osilasyon yapma ihtimalini katlayabileceğini fark ettiler. Bu olasılığın yükselmesi sonucunda, nötrinoların yolun başında kimlikleri hakkında birazcık kafa karışıklığı içinde olması [osilasyon yapmalarına] yetiyordu. Güneş'in yüzeyine yolculukları sırasında kişiliklerine dair en ufak bir şüphe içinde olmaları, maddenin orada olması sayesinde büyük bir kimlik krizine dönüşebiliyordu.

1990 döneminde fizikçiler, büyük oranda teorinin zarafetinden ötürü, nötrino osilasyonları fikrini ciddiye almaya başladılar. Atmosfer nötrinosu anomalisinin keşfi 1985'ten itibaren başlamıştı ama bunun oturması ancak 1993'te, SüperK'dan alınan sonuçların, muon-nötrinolar ne kadar yol alırsa ortadan kaybolmaya da o kadar yatkın olduğunu göstermesiyle oldu.

1998'de SüperK sonuçlarıyla, nötrino sayısındaki eksikliğin sadece mesafeye göre değil, atmosfer nötrinolarının enerji miktarına göre de değiştiği ilan edildi. Eğer nötrinolar ileri geri osilasyon yaparak kimlik değiştirebiliyorlarsa, o zaman görelilik teorisine göre bu osilasyon enerjisi düşük nötrinolar için, yüksek enerjili olanlara kıyasla daha hızlı olmalıydı ve veriler de aynen bunu gösteriyordu. Her şey nötrinoların osilasyon yaptığı hipotezine uyuyordu.

Anlaşılması 30 yıl sürse de Pontecorvo haklı çıkmıştı. Peki bu güneş nötrinosu problemini de çözecek miydi? Davis'le Bahcall'un ikisi birden haklı mıydı yoksa?

SNO

SNO, yani Kanada Ontario'da bulunan Sudbury Nötrino Gözlemevi (*Sudbury Nötrino Observatory*) şu güneş nötrinosu problemini toptan çözmek için tasarlanmıştı. Tıpkı Davis'in yaptığı gibi, nötrinoların yüksek enerjili belli bir bölümü incelenecekti. Bunlar bütün nötrinoların yüzde birinin yüzde birini oluştursa da, enerjilerinin daha yüksek olması reaksiyona girme ihtimallerini de yükseltiyordu. Üstelik SNO yepyeni bir imkân yaratacaktı: Sadece elektron tipi nötrinolar değil, her tiptekiler ölçülecekti. Bunun için ilk önce, SNO sonuçlarıyla SüperK sonuçları karşılaştırılacaktı. Güneş'in nötrinoları sahiden de Dünya'ya varana kadar muon ya da tau tiplerine dönüştüyse SNO bunu kanıtlayabilecekti.

Deneyin gerektiği gibi işleyebilmesi için SNO dedektörünün on katlı bir bina kadar büyük olması lazımdı. Dedektörün benzersiz özelliği, bin ton "ağır su" içermesiydi ki bu, hidrojenin yerine, tek bir proton ve bir nötrondan oluşan bir çekirdeğe sahip döteryumun kullanılması demekti. Malzeme, Kanada Atom Enerjisi Ltd. tarafından, bilim insanlarının kurduğu ortaklığa ödünç verildi ve 12 metre çapındaki akrilik plastik bir konteynır bununla dolduruldu. Ardından bunun etrafı 18 metre çapında bir jeodezik küreyle çevrildi, yüzey on bin ışık sensörüyle kaplıydı. Bu koca aygıt, 34 metre yüksekliğinde, 22 metre eninde, içi ultra-saf normal suyla dolu bir haznede duruyordu ve hazne de Ontario'da, Sudbury'deki eski bir nikel madeninde, yerin iki kilometre altına yerleştirildi. Bütün bu teşkilatın içine bir çay kaşığı kadar toz karışsa, her şey boşa giderdi.

1999'da ölçümler yapılmaya başlandığında, SNO'nun neredeyse on sene süren yapımı için 73 milyon Kanada Doları harcanmıştı. Buna, ağır suyu ödünç veren Kanada Atom Enerjisi'ne verilen bir dolarlık ücret de dahildi ki, o suyun değeri aslında 300 milyon dolardı!

Nötrino astronomisi "büyük bilim" oluyordu artık.

SNO dedektörü elektron-nötrinoları SüperK'ya benzer şekilde algılıyordu. Elektron-nötrinoların çarpışmasıyla elektronlar üretiliyor, bunlar da sudan geçerken Çerenkov radyasyonunu, o mavi ışığı veriyordu. SüperK'da olduğu gibi, ışığın yoğunluğu elektronun enerjisine bağlı, gelen nötrinoların enerji aralığı da buna bakarak belirleniyordu. SNO günde aşağı yukarı on nötrino yakalıyordu.

İlk sonuçlar 18 Haziran 2001'de açıklandı. "30 yıllık bir sırrın, Güneş'in kayıp nötrinoları bulmacasının çözümü" diye duyuruldu durum.

Elektron tipi nötrinoların akısı, saniyede santimetrede 1,75 milyon çıktı. Bunun üzerine SNO takımının lideri Art McDonald yeni bir şey yaptıklarını ilan etti. Japonya'daki SüperK dedektörü de elektron-nötrinoları benzer bir düzenekte ölçüyordu ama muon ve tau tipi nötrinolara karşı da hassasiyeti vardı. SNO'nun ve SüperK'nın sonuçları birleştirilince sadece Dünya'ya varan elektron-nötrinoların kaç tane olduğunu değil, her nötrino türünden kaçar tane geldiğini de anlamak mümkün oldu. SNO'nun 1,75 milyon elektron-nötrino ölçtüğü aynı birim alan ve zamanda, SüperK toplamda 2,32 milyon nötrino geçtiğini ölçtü. Aradaki fark, SüperK'nın bazı muon ve tau-nötrinolarını da ölçmesinden kaynaklanıyordu.

Bazı elektron-nötrinoların Güneş'ten buraya yolculukları sırasında başka çeşitlere dönüştüğünü göstermeye bu sonuç bile yeterdi. Şimdi mesele SüperK'nın toplam kaç muon-nötrino ve tau-nötrino yakaladığını tespit etmekti. Bütün hesaplar tamamlandığında, SNO ve SüperK'dan alınan sonuçların birleştirilmesi her çeşitten toplam nötrino akısının saniyede santimetrekarede 5,44 milyon tane olduğunu gösterdi; hata payısayının bundan yüzde yirmi eksik veya fazla olacağı kadardı. Sayı Bahcall'un öngörüsüne de uyuyordu.

Böylece, 2001'de güneş nötrinoları sayısında ilk kez Davis'in gözlemlediği eksiklik, başka deneylerle de doğrulanmış oldu. SAGE ve GALLEX daha az enerjili nötrinolarda azalma buluyor, SüperK verilerinin SNO'dan alınan ilk

sonuçlarla birleştirilmesi ise eksikliğin elektron tipinden nötrinoların toplamın ancak üçte birini oluşturmasından kaynaklandığını gösteriyordu. Bu demekti ki elektron-nötrinolar diğer nötrino çeşitlerine dönüşüyorlar, sonra bunlar da bir çeşitten diğerine geçiş yapabiliyordu. Güneş'ten Dünya'ya 150 milyon kilometrelik yol boyunca nötrinolar bu üç çeşit arasında oldukça eşit bir dağılıma ulaşıyorlardı. Yani sayılmayan nötrinolar kayıp filan değildi: yolda, tespiti çok daha zor olan biçimler almışlardı, o kadar.

Bu çok önemli bir sonuçtu, ama zayıf bir yönü vardı: Sonuç, birbirinden epey farklı iki deneyden alınan ayrı ayrı verilerin birleştirilmesine dayanıyordu. İdeal olan, açıklamanın tek bir deneyden gelmesiydi. SNO ekibinin bir sonraki hedefi bu oldu. 2002-2003'te daha fazla veri topladılar, sonuçlarını güçlendirdiler ve hassaslaştırdılar. Ağır suyu, nötrinonun tüm türlerinin SNO dedektörünce tespit edileceği şekilde kullanmak akıllıca oldu; bu gelişme sayesinde diğer deneylerden gelen verilerle kıyaslama yapmaya gerek kalmayacaktı. SNO'nun bir üyesinin alayla söylediği üzere, "bu seferki sugeçirmez olacak"tı.

İlk olarak Herb Chen tarafından ortaya atılan fikirdi bu. Ağır suda hidrojen atomlarının yerini ağır hidrojen, yani döteryum alır; bunun atom çekirdeği, bir nötrona bağlanmış bir protondan oluşur. Nötrinolar döteryum çekirdeğini ikiye bölüp içindeki nötron ve protonu açığa çıkaracak enerjiye sahiplerdi. Buradan ne çıkacağı ise, ne tür bir nötrinonun çarptığına bağlıydı. Bir elektron-nötrino yük alabiliyor, elektrona dönüşüyor ve nötronu da protona çeviriyordu: Bu çarpışmadan ortaya bir elektronla iki proton çıkıyordu. Muon ve tau nötrinolar bunu yapamazdı. Ama proton veya nötrona çarpıp sekebiliyor, böylece onu döteryum çekirdeğinin dışına atıyor fakat proton ya da nötron oluşlarını değiştirmiyorlardı (ve elektron-nötrinoda yapabiliyordu aynı işi). SNO, bu sektirme vakalarının sayısını, iki protonun ortaya çıktığı durumların çetelesiyle karşılaştırmak suretiyle her çeşit nötrinonun akısını ölçebiliyor, üstüne elektron-nötrinoların ne

oranda olduğunu da saptayabiliyordu. Herb Chen ne yazık ki 1987'de, lösemiden öldü ve bu güzel fikrinin sonuca ulaştığını göremedi.

2002 yazında, dedektörün merkezindeki 1000 ton ağır suya iki ton iyice saf sofra tuzu, yani sodyum klorür eklenmesiyle büyük bir gelişme oldu. Tuzun içindeki klor, nötrinoların yakalanma ihtimalini artırarak farklı türlerin birbirinden ayırt edilmesini daha da kolaylaştırdı.

2002'de verilen bir ara raporda bilim insanları, SNO'dan alınan sonuçların, Güneş'ten gelen nötrinoların Dünya'ya varana kadar bir türden ötekine değiştiğini yüzde 99.999 emin olarak söyleyebilecekleri kadar sağlam olduğunu ilan ettiler. Nihayet, 7 Eylül 2003'te kesin sonuçları açıkladılar. Elektron tipindeki nötrinolarm sayısı daha önce bulduklarının aynısıydı: saniyede santimetrekare başına 1,75 milyon tane. Toplam sayı ise 5,21 milyon çıktı. Bu sonuç, SNO ve SüperK ölçümlerinin birleştirilmesiyle elde edilen önceki sonuçla uyumluydu. Hem de daha ayrıntılıydı: elektron-nötrinolar tüm nötrinoların üçte birine yakındır.

Sonuçlar nihayet netti. Birincisi, Davis 30 yıl boyunca, Dünya'ya vardıklarında halen elektron-nötrino halinde olan güneş nötrinolarının sayısını doğru olarak ölçmüştü. İkincisi ve astrofizikçiler için son derece heyecan verici olanı, Bahcall'un Güneş'teki nötrino üretimine dair hesapları doğruydu. Bahcall'un yorumuna göre hesaplarla veriler birbirine "mahcup edecek kadar yakındı."

Ondan 30 yıldır şüphe ediliyordu. Daha önce de aktardığımız gibi, insanların kendisinden "Güneş nötrinolarının akısını yanlış hesap eden adam" diye bahsettiğini söyleyen Bahcall'ın baştan beri haklı olduğu birdenbire anlaşıldı. Sonradan kendi durumunu, haksız olarak iğrenç bir şeyle suçlanan ama suçsuz olduğu sonunda DNA testiyle kanıtlanan birine benzetti: "Ben de aynen öyle hissettim." Haberi aldığında kendiliğinden ağzından dökülen cevapsa şuydu: "Öyle sevindim ki, dans edesim var."

Bahcall'un başarılı hesapları, nötrinoların sayısının

Güneş'in merkezindeki sıcaklığa duyarlı olduğunu gösteriyordu, zira hesapta, bu sıcaklık kendi kendisiyle 25 kere çarpılıyordu. Tüm bunların sonucu olarak, nötrino akısının ölçümü, Güneş'in nükleer füzyon fırınının hassas bir termometresi gibiydi. Bir madenin derinliklerindeki bir ışık çakmasını tespit ederek Güneş'in göbeğindeki sıcaklığı ölçebilmek, gerçekten göz kamaştırıcı.

Bahcall ve Davis'in haklı olduğu anlaşıldı. Yeni bir bilim dalının, "nötrino astronomisi"nin gerçek bir imkân olarak doğduğu andı bu. Güneş nötrinoları bulunmaya çalışılırken doğan nötrino astronomisi, SüperK ve SNO deneyleriyle niceliksel bir bilim dalı oldu. Güneş nötrinolarının esrarı çözüldüğünde, galaksinin ötesinden gelen nötrinolar da tamamen şans eseri olarak on saniyeliğine ünlü olmuşlardı. Nötrino astronomisinde bulunabilecek potansiyel keşif gücünün anlaşılmasını sağlayan da bu oldu.

10

GALAKSİNİN DIŞINDAN NÖTRİNOLAR

SÜPERNOVA

23 Şubat 1987, GMT sabah saat 7.30'da neredeydiniz? Ben kahvaltı ediyordum ki o sıradan haberdar olmadığım bir patlamanın nötrinoları tabağımın içinden geçti. Aslında sürekli olarak güneş nötrino akısının sağanağı altındayız, ama o şubat sabahı olan âni akı hepsinden başkaydı. 170.000 ışık yılı ötede, bizim galaksimizin uydusu ve güney yarıküreden görülebilen bir galaksi olan Büyük Macellan Bulutu'nda ölmekte olan bir yıldızın patlamasından geliyordu. Astrofizikçiler 25 yıldan uzun zamandır, bir süpernovanın kütleçekimiyle çökmesinin bereketli bir nötrino kaynağı olduğunu düşünüyorlardı. Hatta, süpernovanın alışılagelen işareti olan, kısa bir süre için galaksinin tamamının ışığından daha parlak olan o ışık parlamasının, büyük olayın ancak küçük bir parçası olduğunu iddia ediyorlardı. Bu elektromanyetik ışıma yoğun olsa da, görünür ışık, radyo dalgaları, X ışınları ve gama ışınları hep birden, toplamın yüzde birinden az ediyorlar. Süpernovanın ışıdığı enerjinin büyük bölümü nötrinolar tarafından taşınıp götürülüyor.

Bu nötrinolar eskiden olsa görünmezdi, ama artık nötrino teleskoplarımız vardı. Heyecan verici haber şuydu ki bu olayda, ilk defa, galaksimizin dışından gelen nötrinoları tespit ettik ve süpernova teorisinin doğru olduğunu kanıtladık: Yıldızlar çöktüğünde enerjilerini nötrino ola-

rak dışarı atarlar ve bunların sayısı 10^{59}'a kadar çıkabilir, yani yüz milyar milyar trilyon trilyon trilyon tane.

Bu süpernovadan gelen nötrinoların tespit edilebilmesi tamamen tesadüf eseridir, planlanabilecek bir şey değil bu. Çıplak gözle görülmüş son süpernova 1604'te kaydedilmiş ve o zamandan bu zamana, 1987'de patlayan bu süpernovaya dek, üç yüzyıldan fazladır, böyle bir olay hiç görülmemişti.

Söz konusu şiddetli olay aslında 170.000 yıl önce Büyük Macellan Bulutu'nda oldu. Kalıntılardan bir ışık parlamasıyla nötrinolardan oluşan bir darbe dalgası çıktı yola. Dakikada on beş milyon kilometre yol kat ederek olay yerinden hızla uzaklaştılar, Büyük Macellan Bulutu'ndan çıktılar ve galaksilerarası uzaya yayılmaya başladılar. 1987'deki randevularına daha çok vardı.

Önlerinde Samanyolu, Samanyolu'nun bir kolunda Dünya diye küçük bir gezegen, o gezegende de taş devrini yaşayan insanlar vardı. Radyasyon kalkanı 165.000 yıldan fazla, ilerlemeye devam etti. Bu aşamada, 3.000 ışık yılı ötede, Akdeniz çevresindeki insanlar gökyüzünü fark etmeye başlamış, bilimi icat etmektelerdi. Onların soyundan gelenler 1930'larda, radyoaktif süreçler acaba nötrino saçıyor olabilir mi diye düşünmeye başladılar ama günün birinde bir insanın o nötrinolardan birini tespit edebileceği şüpheliydi.

Bu arada, çöken yıldızın dalgası, güney göklerinden Dünya'ya doğru yaklaşmaktaydı. Clyde Cowan ve Fred Reines nötrinoların varlığını akıllıca ispat ettiklerinde, dalganın Dünya'ya varmasına 31 yıl kalmıştı. Ray Davis, Homestake maden ocağında güneş nötrinosu dedektörünü çalıştırdığında, o âna 23 yıl vardı. Bu dedektör Güneş'ten gelen nötrinoları yakalayabiliyordu ama herhangi bir süpernova çeşidini hemen hemen hiç göremezdi. Ama, giderek yaklaşan nötrinolar sadece bir ışık yılı –170.000 yıllık yolculuklarının tek bir yılı– ötedeyken, ABD ve Japonya'daki bilim insanları, yerin altında, protonların bozunduğuna dair işaretleri yakalamak üzere

tasarlanmış, saf su dolu koskocaman tanklar inşa etmeyi yeni bitirmişlerdi.

Japonya'daki Kamiokande dedektörünün, SüperK'nın öncelinin içinde 3.000 ton saf su vardı. ABD'de, Ohio'daki Erie gölünün 600 metre altında da benzer şeyler yaşanıyor, California Üniversitesi'nin Irvine kampüsünden, Michigan Üniversitesi'nden ve Brookhaven Ulusal Laboratuvarı'ndan gelen bilim insanlarının oluşturduğu IMB (Irvine, Michigan, Brookhaven) ekibi de 7.000 ton suyla dolu bir tankta proton bozunmasının izlerini araştırıyordu.

İki deneyde de bozunan protonların tek bir örneği bulunamadı; ama her ikisinin de, Güneş'ten gelenlerden daha fazla enerjiye sahip nötrinolara karşı duyarlı olduğu ortaya çıktı. Bu parçacıklardan oluşan bir kalkanın kendilerine doğru ışık hızıyla[1] gelmekte olduğunu ise o sırada kimse bilmiyordu. 170.000 yıl önce yola çıkmış 10^{59} tane nötrino o sırada, yarıçapı 170.000 ışık yılı olan, bütün galaksiyi kaplayacak kadar büyük bir kürenin yüzeyine yayılmıştı. Bu kalkanın kalınlığı Dünya'yla Ay arasındaki mesafenin yaklaşık on katıydı, bu da yoğunluğu devasa bir atom çekirdeği gibi olan yıldızın çökmesi sırasında nötrinoların dağılmasının birkaç saniye sürmesinden kaynaklanıyordu. Bir kenarından diğer kenarına mesafesi 340.000 ışıkyılı olan bir kalkan üstüne dağılmış 10^{59} tane nötrinonun yoğunluğunu hesaplarsanız, Güneş'ten bize durmaksızın gelen nötrinoların akısına benzer mertebede bir şey olduğunu görürsünüz. Güneş nötrinolarının nasıl bir akıyla geldiğini ve bunların 170.000 ışıkyılı değil daha sadece sekiz ışık dakikası mesafeden geldiğini düşününce, bir süpernova yıldız patlamasının nasıl olağanüstü bir olay olduğunu anlamaya başlıyor insan. Bundan daha da etkileyici olarak, süpernovadan gelen her bir nötrino,

[1] Artık bilindiği üzere nötrinoların ufak da olsa kütlesi olduğundan, ışık hızından birazcık daha yavaş yol alıyorlardı ama bu gözardı edilebilecek kadar küçük bir farktır.

Güneş'in en yaygın nötrinolarından on ila yüz kat daha fazla enerjiye sahip.

En sonunda, 23 Şubat 1987'de nötrinolar Dünya'ya girdiler, içinden geçtiler ve kuzey göğüne doğru yollarına devam ettiler. Birkaç saniye içinde bin trilyon nötrino IMB'den, bir o kadarı da Kamiokande'den ve eminiz ki Homestake maden ocağından ve diğer laboratuvarlardan geçip gitti. Ama sadece IMB ve Kamiokande onları algılayacak hassasiyetteydi. Onca nötrino içinden sadece sekizi IMB'de tespit edilmeye yetecek enerjiye sahipti, Kamiokande'de de 11 tane görüldü.[2] Büyük Macellan Bulutu yalnız güney göklerinde çıplak gözle görülebiliyordu; dedektörlerse Japonya ve ABD'de, yani kuzey yarımküredeydi. Süpernovanın nötrinoları Dünya'nın içinden geçip dedektörlere aşağıdan girdi.

IMB ve Kamiokande'nin büyük avantajlarından biri, nötrinoların hem yönünün hem de enerjilerinin ölçülebilmesiydi. Güneş'ten gelen nötrinoların çoğunun enerjisi parçacık başına 1 MeV'tan[3] azken, Davis'in Homestake'te klorla yaptığı deneyin hassas olduğu en yüksek enerjili olanlarınki olsa olsa 14 MeV, süpernovadan gelenlerin enerjisi ise 10-50 MeV aralığındaydı. Kamiokande'nin gördüğü 11 nötrino, 10-20 MeV aralığındaydı; nispeten "düşük" olan bu enerjilere karşı hassas olmayan IMB ise 20 ile 50 MeV arasında sekiz nötrino kaydetti.

Bu kadar az sayıda vakadan bilim insanlarının elde edebildiği bilgi miktarı şaşırtıcı derecede çoktu. Önce, enerji. Yakalanan azıcık nötrino, dedektörden geçip gitmiş olan trilyonların içinde hiçbir şeydi. Darbe dalgasının o esnada kat etmekte olduğu devasa küre içinde, o dedektörlerin kapladığı alan kumsalda bir kum tanesi kadardı. Bunların hepsini hesaba katarak nötrinoların süpernovadan alıp taşıdıkları toplam enerji miktarını bulabilirsiniz.

[2] Aslında bunlar antinötrinoydu.

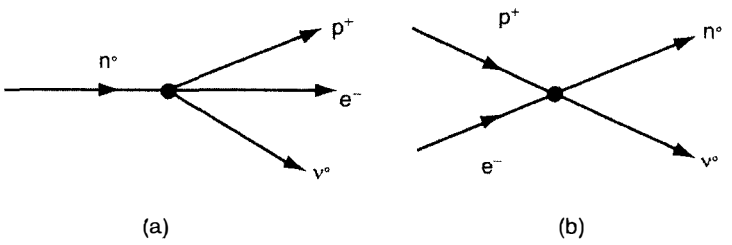
[3] Tekrar söyleyeyim, 1 MeV = bir milyon elektron volt, yani bir julün on trilyonda biridir.

Güneş'in toplam enerjisinin, yani onun mc^2'sinin onda biri olarak bulundu bu miktar ve süpernovapatlaması teorilerinin öngörüleriyle göz kamaştırıcı bir uyum gösteriyordu. Teorilere göre enerji de hem ışık hem de yeni oluşan atomik elementler halinde ışır; buna ek olarak, patlamadan geride kalan kompakt nötron yıldızının mc^2'sinde kısılı kalmış bol miktarda enerji vardır daha. Hepsinin düşündüğünüzde yıldız patlamasının ne mene güçlü birşey olduğunu kavramaya başlarsınız.

Süpernovadan gelen nötrinoların enerjisinin güneş nötrinolarınınkinden çok daha fazla olması hemen, o yıldızın çökmeden önceki sıcaklığının da buna denk olarak daha yüksek olduğunu gösterdi. Yıldız 40 milyar dereceydi, bu da kuramcıların öngörülerine uygundu. Böylece hem enerji, hem toplam nötrino sayısı hem de darbe dalgasının süresi, süpernovanın bir yıldızın kendi ağırlığı altında çökmesi sonucu oluşmasına uyuyordu.

Patlamanın aşağı yukarı on saniyede yayılmış olduğu bilgisi çok önemliydi. Nötrinolar eğer zayıf bir yıldızımsı şeyin ölümünden doğuyor olsaydı her şey saniyenin binde biri zarfında olur biterdi. Çok yoğun bir cisimden yayılmak, böylece yüzeyden kaçışın çok saniye alması, ancak cisim atom çekirdeği kadar yoğunsa gerçekleşebilecek bir şeydi. Tüm bunlar bir nötron yıldızının meydana gelmiş olduğunu düşündürüyordu. Astrofizikçilerin süpernova patlamasıyla olmasını beklediği de buydu ama bunun doğrudan kanıtı ilk defa bulunuyordu.

İnsanlar nötrinoların bu anlık dalgasını tespit etmek suretiyle, bir süpernovanın nasıl işlediğine ilk kez tanıklık ediyorlardı. Böylece, o zamana kadar teoriden ibaret olan her şeyi doğrulamış oldular: süpernova, bir yıldızın çöküp nötron yıldızı oluşturmasının sonucudur. Bu süreçte periyodik cetveldeki elementlerin bir karışımı meydana gelir; buna ileride hayatı oluşturmak için gerekli elementler de dahildir. Gerçekten de yıldız tozundan mamül olduğumuzu doğrulamaya en yaklaştığımız nokta budur; eğer o kadar romantik değilseniz, soyu tükenmiş bir nükleer



Şekil 11: Nötron yıldızları ve nötrinolar birlikte yapılıyor. Hikâye Fermi'nin nötrino bozunması modeliyle başladı (Şekil 2 burada Şekil a olarak tekrar kullanıldı). Nötron yıldızının oluşumunda da aynı temel süreç işliyor. Yoğun bir yıldızdaki elektronlar ile protonlar birbirine öyle sıkışıyor ki bir nötronla bir nötrinoya dönüşüyorlar (Şekil b). Nötronlar nötron yıldızı oluyor, nötrinolar uzaya ışınıyor. Üstkarakterler elektrik yükünün cinsini gösteriyor.

reaktörden geldiğimizi de düşünebilirsiniz.

Gözlemler kuramcıların süpernovalarda üretilen enerjinin büyük bölümünün devasa boyutta nötrino dalgaları biçiminde ışıyarak uzaklaştığı şeklindeki öngörüsünü doğruladığından, dünyanın nötrino laboratuvarları bir sonraki süpernova patlamasını heyecanla bekliyor. Bu sefer amaç sadece sayılarını ve enerjilerini değil, buraya gelen çeşni çeşitliliğini de ölçmek. Yıldız çöktüğünde, merkezindeki yoğunluk 10^{14}g/cm^3'ü, yani her santimetreküpte yüz trilyon gramı buluyor. Bu öyle büyük bir yoğunluk ki, protonlarla elektronlar birleşip nötron oluyor ve bu esnada bir elektron-nötrino açığa çıkarıyorlar.

Süpernovada nötron oluşumunun iki ayrı yolundan birincisi olan bu sürecin sonucunda ortaya çıkan nötronların bulunduğu merkez bölgenin sıcaklığı 100 milyar derecenin üzerinde ve bu ısı enerjisi ikinci mekanizma yoluyla dağılıyor: her çeşniden nötrino-antinötrino çiftlerinin oluşmasıyla. Süpernovalardan gelen nötrinoların en yoğun kaynağının bu ikinci yol olduğu öngörülüyor. Süpernovalardan gelen çeşnilerin oranlarının kesin olarak ölçülebilmesi, elektron-nötrinoların oluştuğu birinci aşamayla, hepsinin birden oluştuğu ikinci aşamanın bir-

birine göre öneminin anlaşılmasını sağlayabilir.

OSİLASYON YAPAN NÖTRİNOLAR

Herkesin ikna olması 30 yıldan uzun sürdüyse de, "nötrino astronomisi" Davis'in güneş nötrinosunu ilk kez saptamasıyla başladı. SüperK'nın yapılması, Güneş'in nötrinoğraflarını çekmesi ve hem atmosferden hem de bir süpernovadan gelen nötrinoları tespit etmesiyle nötrino astronomisi yeni bir bilim dalı olarak kurulmuş oldu. Daha uzaktaki astronomik cisimlerden gelen nötrinoları yakalayarak evrenin bütününü yeni ve benzersiz bir şekilde araştırabilmek gibi heyecan verici bir ihtimal, işte buradan doğdu.

Pragmatik açıdan bakarsak, eğer nötrinoları süpernovalar ve gama ışını patlamaları gibi gökyüzünün daha egzotik cisimlerinin içlerine dair bilgi toplamak için kullanmaksa niyetimiz, önce bu nötrinoların kendilerini anlamak zorundayız; zira nötrinoların Güneş'ten buraya gelirken yapılarını değiştirdikleri yeterince açıklık kazanmış durumda. Elektron-nötrinolar kesinlikle yok oluyorlar ama muon çeşidine mi, tau çeşidine mi yoksa ikisinin karışımına mı dönüşüyorlar? Yeni soru bu oldu. Üstelik, işin en radikal kısmı da, eğer nötrinolar sahiden, Gribov ve Pontecorvo'nun çoktandır söylediği gibi osilasyon yapıyorsa hepsi de kütlesiz olamazdı. Kütleli nötrinolar parçacıkların standart modelinin dışında kalacak, o modelin de düzeltilmesi gerekecekti.

Güneş nötrinosu probleminin nihayet çözülmesiyle yeni yeni büyük sorular ortaya çıkmaya başladı. Osilasyonların hızı ne kadar; bir nötrino çeşidi ortadan kaybolduğunda hangisi ortaya çıkıyor? Nötrino astronomisinin niceliksel bir bilim olabilmesi için önce nötrino osilasyonlarının anlaşılması gerekiyor.

Cowan'la Reines (anti)nötrinoyu ilk kez tespit ettiklerinde bunlardan birkaçını yakalayabilmek için nükleer

reaktöre yakın olmaları gerekiyordu. Bugün yeraltındaki devasa dedektörlerle, kilometrelerce uzaktaki reaktörlerde üretilen antinötrinoları görmek mümkün. Reaktör nötrinoları üstüne çalışmak istiyorsanız bu pek güzel de, asıl derdiniz başka yerden gelen nötrinolarsa reaktörden gelenler sinir bozucu bir arkaplan oluşturabiliyor. 1990'larda yapılan bir deneyde, nötrinolar hassas bir şekilde ölçmek istendiğinde, yakınlardaki nükleer santralden kaç tane nötrino geleceğini de bilmek gerekti. Bunu bulmaksa hiç kolay değildi.

Santralin basın sorumlusu aranıp orada kaç tane antinötrino üretiliyor diye soruldu ama sonuç alınamadı. Belki de antinötrino diye bir şeyin varlığından bile haberdar olmayan görevli, bölgede nükleer santral istemeyen çevrecilerin protestolarının da etkisiyle, şak diye cevabı yapıştırdı: "Hiç!"

Bilim insanları ona, nükleer santrallerde enerji ve antinötrinoların kaçınılmaz olarak birlikte üretildiğini, dolayısıyla eğer antinötrino yoksa santralin enerji üretiyor olamayacağını açıkladılar; madem antinötrino yoktu, neyin karşılığında elektrik faturası kesiyordu bu şirket? Ya şirket halkı dolandırmaktaydı, ya da "hiç" cevabı doğru olamazdı. Basın sorumlusu konuyu araştırıp geri döneceğine söz verdi.

Bir süre sonra bilim insanının ofis telefonu çaldı. Basın sorumlusu arıyordu. "Haklısınız" dedi, "antinötrino üretiyoruz", ardından hemen bir sayı verdi ve üstüne basa basa ekledi: *"ama HİÇBİRİNİ dışarı kaçırmıyoruz!"* O santral her bir nötrinoyu yakalamak için kutsal kabı bulmuş değilse, bu cevap da doğru olamazdı tabii ki, ama en azından bilim insanları aradıkları sayıyı bulmuşlardı. Bu olaydan iyi bir fikir çıktı: reaktörlerden gelen antinötrinoları deney malzemesi olarak kullansak ya –antinötrinoları çalışmak için! Nötrinoları kaynaklarından uzakta tespit ederek ve kaç tanesinin yola çıktığını kaç tanesinin dedektöre vardığıyla karşılaştırarak, yolculuk sırasında bir biçimden diğerine geçip geçmediklerini anlamanın müm-

kün olabileceği düşünülüyordu.

Japonya'daki bilim insanlarının artık yapmış olduğu şey bu. Antinötrinoların enerjilerini ölçmek için Kamioka maden ocağındaki bir dedektörü kullandılar. KamLAND denen Kamioka Sıvı Işıldayıcı Nötrino Dedektörü (*Kamioka Liquid Scintillator Nötrino Detector*) sadece elektron türünden antinötrinolara duyarlı, bu da nükleer santrallerin ürettiği nötrino türü. Her bir nötrinonun geliş yönüne bakarak, bunun Japonya'daki 53 nükleer santralin hangisinden geldiğini tespit edebiliyorlar. Gelen nötrinoların sayısını santralden yola çıkanlarla karşılaştırdıklarında, yoğunluğun kat edilen mesafeye göre düzenli bir şekilde azalmadığını buldular. Bunun yerine yoğunluk hem mesafeye hem enerjiye göre değişiyor ve azalıp artıyordu. Bunun kilit önemde olduğu anlaşıldı.

Bir antinötrinonun enerjisi ne kadar çoksa, ışık hızına o kadar yakın yol alır. Nötrinonun aldığı mesafe, enerjisine bölündüğünde nötrinonun ne kadar zamandır yolda olduğu bulunur. Artıp azalmanın uçuş süresine bağlı olduğu anlaşıldı. Osilasyon yapmanın tüm özel işaretleri mevcuttu.

Reaktörlerin bazılarından 100 kilometreden fazla uzakta olan KamLAND, beklenen nötrinoların ortalama yüzde 40'ının eksik olduğunu buluyor. Bir reaktörün 1 kilometre kadar yakınında gerçekleştirilen birkaç deney var, ama bunların hiçbirinde osilasyon belirtisi bulunmuyor. Ardenlerde[4] ve Arizona'daki Palo Verde'de de sonuçlar aynı: 1 kilometre, bir nötrinonun mizacının, ölçülebilir derecede değiştirmesi için yeterli değil.

KamLAND nötrinoların osilasyon yaptığını gösteriyor ama hangi nötrino çeşnisinin neye dönüştüğünü söyleyebilecek kadar bilgiye hâlâ sahip değiliz.

Ama nötrinoların kütlelerini öğrenmek mümkün olmaya başladı. Osilasyon matematiği, kütlenin karesinde-

[4] Belçika ve Lüksemburg arasında, az bir kısmı da Fransa'da kalan ormanlık alan —*çev. notu.*

ki farklılıkların bir ölçüsünü veriyor. Bu çok küçük bir sayı, eV^2 birimiyle 10^{-5}. Peki bu, nötrinoların gerçek kütleleri bakımından ne demek? Eh, bu da, bir tanesinin ne büyüklükte olduğuna bağlı. Eğer bir tanesi sahiden de kütlesizse, o zaman diğerinin kütlesi sadece 10^{-2} eV kadar olabilir. Karşılaştırma olsun; bir elektronun ağırlığı yaklaşık yarım milyon elektron-volt.[5] Ama eğer nötrinoların ikisi de 1 eV kadarsa, kütleleri arasındaki fark en fazla 10^{-5} eV kadar olabilir.

Her halükârda kesin olan bir şey var: nötrinonun bazı çeşitlerinin kütlesi olmak zorunda. Belki hepsinin kütlesi var, ama değerleri, hafifçecik elektronun ölçeğinde bile son derece ufak. Nötrinoların kütleleri birbirine bu kadar yakın olduğu halde neden bire bir aynı değil? Gelecek nesillerin cevap bulacağını umduğumuz büyük sorulardan biri bu.

MINOS

Kuzey Minnesota'nın dağları ve gölleri arasında, Soudan ilçesi yakınlarında, tarihi 1900'lerin başına uzanan bir demir madeni var; maden yerin 800 metre altına kadar giden son derece saf bir manyetit demir damarını izliyor. 1950'lerde cevheri çıkarmak ekonomik olmamaya başlamış, dolayısıyla madenin sahibi olan US Steel burayı Minnesota eyaletine bağışlamış, böylece maden yer altına yapılan turistik gezilerle devlet tarafından park olarak kullanılır olmuş. 1980'lerin başında Minnesota Üniversitesi'nde çalışan ve proton bozunmasının kanıtlarını arayan fizikçiler, buranın yer altına dedektör kurmak için ideal bir yer olduğunu fark ettiler. Dedektör bonus olarak atmosferdeki kozmik ışınların çarpışmasıyla oluşan nötrinoları da kaydedebilirdi.

[5] Elektron-volt (eV) aslında bir enerji birimidir. Kütle ve enerji terimleri fizikte birbirinin yerine kullanılabilir. İkisi arasındaki ilişki $E = mc^2$, buradaki c de ışık hızıdır.

Bu bilim insanları, ABD ve İngiltere'den çalışma arkadaşlarıyla beraber, madenin en dibinde kazılmış bir mağarada bir deney düzeneği kurdular. Buradaki yenilik, deneyin su dedektörlerinden tamamen farklı bir mekanizmayla işlemesiydi. Nötrino etkileşimleriyle üretilen yüklü parçacıklar, asal gaz argondan açığa çıkardıkları elektronlar sayesinde tespit ediliyordu. Kararsızlar protonlar adına hiç kanıt bulamadılar ama atmosfer nötrinolarına (kozmik ışınların üst atmosfere çarpmasıyla oluşanlara) dair saptamaları, Kamiokande deneyinin burada muon-nötrinolardan yana bir zayıflık olduğu şeklindeki gözlemini doğruladı. Demek ki bu gerçek bir etkiydi, suyla tespit yönteminden kaynaklanan bir özellik değildi.

1980'lerin sonunda Maury Goodman, Chicago'nun dışındaki Fermilab hızlandırıcı kompleksinden 735 km uzakta bulunan Soudan maden ocağının, nötrino osilasyonlarının sistematik olarak ölçülmesi imkânını sunduğunu fark etti. Atmosfer nötrinolarında mesele, fizikçilerin bunların üretimini kontrol edememesi. Ne çıkarsa bahtınıza; burada nötrinoların nasıl üretildiğini kozmik ışınlara ve etkileşim süreçlerine dair daha eski bilgilerinize dayanarak modellemeye çalışırsınız. Ama eğer nötrinolar hızlandırıcıda üretilirse onları şekillendirebilir, muon-nötrino veya elektron-nötrino olarak seçebilir, enerjilerini belirleyebilirsiniz.

Hızlandırıcı önce yüksek enerjili protonlar üretir, bunlar karbon hedefe fırlatılır. Buradan elektrik olarak yüklü çok sayıda pion çıkar meydana; onlar da paralel bir demette odaklanıp boş bir tünele yollanır; orada bozunarak muon-nötrino olurlar. Tünelin sonunda kaya yüzey yüklü parçacıkların hepsini filtreler, geriye sadece bir demet nötrino kalır.

Soudan maden ocağındaki tünele yönelmekle, demet halihazırda orada olan dedektörden geçecek, sahiden de kayıp nötrinolar olup olmadığını anlamak için nötrino etkileşimleri incelebilecekti. Dünya'nın eğriliğinden dolayı demetin 3°'lik bir açıyla aşağıya doğru yönlendirilmesi

gerekiyordu; böylece nötrino demetinin tamamen Dünya yüzeyi içinde olması temin edilecekti.

Kamiokande ve Soudan sonuçlarına dayanılarak, nötrinoların noksanı eğer osilasyondan kaynaklanıyorsa, muon-nötrinoların osilasyonla tau-nötrino olması bekleniyordu. Muon-nötrinolar etkileşimde bulunduğunda muon üretirken, tau-nötrinolar da tau parçacıkları ürettiğinden, muonları seçen bir dedektör muon-nötrinoların kaybolup kaybolmadığını tespit edebilirdi. Güzel bir rastlantı eseri olarak, 735 km, Fermilab'dan beklenen demetin tepe noktasına tam da uygun mesafeydi.

Nötrino deneylerinde her zaman olduğu üzere, problem, nötrinoların hemen hemen hepsinin etkileşimde bulunmaksızın Dünya'nın içinden ve de dedektörden geçip gidecek olmasıydı. O dönemde Fermilab'ın hızlandırıcıları, söz konusu deneye yetecek yoğunlukta bir nötrino demeti yapamıyordu. Ama laboratuvar yeni bir hızlandırıcı yapmaktaydı ve bunun, "ana enjektör" tabir edilen besleyici hattı Soudan'da işe yarayacak bir nötrino demeti üretebilecek kadar kuvvetli olacaktı. 1995'te yeni hızlandırıcının inşaatı başlıyordu ve Soudan'daki yeraltı laboratuvarını ilk kuran ekibin de dahil olduğu fizikçiler işbirliği içinde MINOS deneyini (*Main Injector Nötrino Oscillation Search,* Ana Enjektör Nötrino Osilasyon Araştırması) planlamaktaydı.

Soudan maden ocağında yeni, daha büyük bir mağarada 5000 tonluk devasa bir dedektör kuruldu. Yine yeni bir tespit yöntemi kullanılacaktı. Az miktarda özel kimyasalla yüklenen elektrik yüklü parçacıklar, plastikten geçerken ışıldanmalara yol açar. Bu ışıldanmalar toplanıp, ilke olarak su dedektöründe Çerenkov radyasyonunu tespit etmekte kullanılanlarla aynı olan fototüplere iletilir. Plastiği iki çelik levha konmuş dar bantlar halinde şekillendirmek suretiyle, yüklü parçacıkların dedektörün içinde izlediği yol takip edilebilir, çelik levhalar mıknatıslandırılarak bu yolların ne kadar eğildiği ve dolayısıyla üretilen parçacıkların enerjisi ölçülebilir. Tüm bu bilgilerle nötrino etkileşimlerinin ayrıntıları ve özellikle de nötrino-

nun enerjisi çıkarılabilir. O halde hem kat edilen mesafer (Fermilab'dan 735 km) hem de nötrinonun enerjisi artık bilinebilirdi. Buna çok benzeyen (ama biraz daha küçük) bir dedektör de Fermilab'da kurulmuştu, böylece bilim insanları Fermilab'da ölçülen nötrino enerji dağılımını Soudan'daki ölçümlerle karşılaştırarak, arada olabilecek farklılıkların nötrinoların enerjisiyle nasıl bir ilişkisi olduğunu anlayabileceklerdi. Eğer beklendiği üzere burada bir osilasyon deseni görülürse, üretilen nötrinolarla osilasyon sürecinden geçmiş olanlar arasındaki kütle farkı ölçülmüş olacaktı.

2005'in başında hem hızlandırıcı, hem nötrino demeti ve her iki dedektör tamamlanmıştı, deney başladı. Soudan'da, demetten gelen nötrinolardan haftada iki–üç etkileşim kaydedeiliyordu ve sistem bir sene boyunca çalıştırıldıktan sonra gelen nötrinoların açıkça eksik olduğu gözlemlendi. Deney hâlâ devam ediyor ve giderek daha kesin sonuçlar üretiyor. Deneyin, nihayet, muon-nötrinoların osilasyonla elektron-nötrinolara ve ayrıca tau-nötrinolara dönüşüp dönüşmediğini, bir de antinötrinoların nötrinolarla aynı şekilde mi osilasyon yaptığını göstermesi umuluyor. Nötrinoyla antinötrino arasında temel farklılıklar bulunma ihtimali bile var. Böyle bir keşif gelirse, Büyük Patlama'da oluşan simetrik madde-antimadde evreninin nasıl olup da maddenin baskın olduğu bir âleme dönüştüğünü anlamak bile mümkün olabilir.[6]

"GELECEKTEN DÖNEN" NÖTRİNOLAR

Güneş nötrinoları üstüne araştırmalar, Davis bu yola çıktığından bu yana çok büyük değişiklik göstermişti. 1990'a gelindiğinde temel hedef nötrinoların kendisini anlamaktı artık. Davis arayışa başladığında ekibi bir avuç bilim

[6] Bkz. *Antimatter*, Oxford University Press, Oxford, 2009 [*Antimadde*, çev. Zeynep Alpar, Boğaziçi Üniversitesi Yayınevi, 2015].

insanı ve mühendisten ibaretti. Bugün tipik bir deneyde uluslararası işbirliğiyle 100'den fazla fizikçi çalışıyor. Neredeyse bütün deneyler, radyokimyasal değil elektronik olarak yapılıyor. Davis ortalama haftada bir nötrino buluyordu ve bunun enerjisine dair tek bilgisi de, saptanabilmiş olmasına yetecek miktarda olduğuydu; elektronik deneylerse her sene binlerce vaka kaydediyor, her bir olayda enerjiyi hatta nötrinoların geldiği yönü bile tayin ediyorlar. 123. sayfada gördüğümüz gibi, bugün Güneş'in "nötrino ışığı"yla parladığı bir görüntüsünü sunmak dahi mümkün.

Güneş nötrinosu araştırmalarının en çetin sınırı halen, birincil füzyon reaksiyonlarında üretilen en düşük enerjili nötrinoları tespit etmek. Enerjileri bunca düşük olduğundan, etkileşimde bulunma ihtimali en az olan da onlar, ama Güneş'ten gelen akının yüzde 99'undan fazlasını onlar oluşturuyor. Astrofiziğin güneş nötrinolarına dair öngörülerinin en net olduğu alansa, 1 MeV'un altındaki en düşük enerjiler.

SNO ağır su dedektörü Güneş'i çalışmaya 2006'ya kadar devam etti. Bu tarihte, AECL'nin on yıllık ödünç kullanım süresi doldu. Aygıtın ağır su dışındaki kısmı hâlâ duruyor ve burada ağır suyun yerine, yüklü parçacıkların geçişi sırasında ışık parlamaları yayan organik bir sıvı kullanılacak. Parlamalar ağır suyunkilerden daha parlak olacak. Bunun bir sonucu olarak SNO bu yeni aşamada eskiden saptadıklarından daha az enerjiye sahip nötrinoları yakalayabilecek. Bu bize Güneş'teki temel proton yakıtının baskın birincil üretimi hakkında bilgi verebilir.

Daha çok veri biriktikçe akının gece ile gündüz arasında değişiklik gösterip göstermediğini anlama imkânı olacağı da umut ediliyor. Geceleri nötrinolar [dedektöre ulaşmak için] gündüz olduğu gibi birkaç kilometre değil, Dünya'nın tamamının içinden öteki tarafa geçmek zorunda. Dünya için öngörülen MSW etkisi küçük, dolayısıyla tespiti kolay olmayacak.

Uzayın derinliklerine, boşluğu dolduran çok sayıda

nötrino aracılığıyla bakmak heyecan verici bir hedef. Astrofizikçiler, astronomların anlayamadığı gama ışını patlamalarına sürüsüyle nötrinonun eşlik ettiğini düşünüyor. Patlamaların 100 trilyon elektron-volttan fazla enerjiyle oluştuğu tahmin ediliyor; CERN'de bulunan ve dünyanın en güçlü hızlandırıcısı olan LHC'de birincil demetler için elde edilebilen enerjinin en az on kat fazlası demek bu. Galaksiden, hatta galaksinin dışından gelen bu nötrinoların bazılarını yakalamak için yeraltında devasa dedektörler kurmak gerekiyor.

Nötrino astronomisi kapalı mağaralardaki laboratuvarlardan çıktı, şimdi en ele avuca gelmez parçacıkları yakalamak için dünyanın doğal özelliklerini dedektör olarak kullanıyor. Yeni nesil nötrino teleskopları, Rusya'daki Baykal gölünde ve Akdeniz'de suyun, Antarktika'da buzun altında; alanları bir kilometrekareden fazla ve AMANDA,[7] ICECUBE[8] gibi romantik isimleri var.

Açılımı *Antarctic Muon And Nötrino Detector Array* (Antarktika Muon ve Nötrino Dedektör Dizisi) olan AMANDA, bizim galaksimizden veya diğerlerinden gelen yüksek enerjili kozmik nötrinoları saptamak üzere buzun bir kilometre altına gömülü. Güneş nötrinolarına ek olarak, evrende gezinip duran, Büyük Patlama'dan kalma nötrinolar ve muazzam yıldız paltlamalarından seller gibi akan diğer nötrinolar var.

Oralarda çok sayıda nötrino olduğu muhakkak, ama buralara gelene kadar nispeten zayıflamış oluyorlar. Güneş'in nötrinolarını yakalamak için binlerce tonluk malzeme içeren dedektörler gerekti. Galaksimizin uzak köşelerinden ve ötesinden gelen nötrinolar güneş nötrinolarına kıyasla, yıldızların ışığının günışığına göre sönük kalması gibi olacak muhtemelen. Onları yakalama ihtimalimiz olması için 1 kilometreküpten fazla malzemeye ihtiyacımız var. Böyle bir şeyi laboratuvarda yapmanın imkânsızlığı

[7] "Sevilmeye layık" anlamında bir kadın adı —*çev. notu.*

[8] "Buz küpü" —*çev. notu.*

ortadaydı; dahiyane fikirse Antarktika'daki buzu doğal bir dedektör olarak kullanmak oldu.

Kozmik ışınlardaki nötrino, buzdaki atoma çarptığında muon ortaya çıkabilir. Muon da buzun içinden geçerken Çerenkov radyasyonu, soluk mavi ışık parlamaları yapar. Tek gereken bunu tespit etmektir.

Antarktika'daki buz, soğuk kış günlerinde görmeye alıştığımız buz gibi bir buz değil. Antarktika'da kayda geçmiş tarihten çok daha eskilerden beridir buzun üstüne kar yağıyor. Şimdiki yüzeyin 1000 kilometre altına kar on bin yıl önce, son buzul çağının hemen ardından yağdı. Öyle çok basınç var ki aşağıda hava kabarcıklarının hepsi sıkışıp dışarı çıkmış durumda, kalan buz o kadar saf ki nötrinoların ürettiği ışık parlamaları hiç sönmeden yüzlerce metre yol alabilir. Sıcak su fışkırtarak buzu delen özel sondaların açtığı şaftlardan aşağı, buzun içine, fotoçoğaltıcı tüpler yerleştirildi. Dedektör uzun bir kablonun ucunda buzun içine indirilip, orada donarak sabitlendi. O zamandan beri kesintisiz veri kaydediyor. Dedektör örgüsü, nötrinoyu işaret eden gösterge ışık parlamalarını bekliyor. Düzenek o kadar hassas ki dünyanın her tarafından gelen atmosfer nötrinolarını düzenli olarak kaydediyor, kimisi dosdoğru Antarktika'nın üzerinden gelmiş, kimi ta Kuzey Kutbu'ndan o yana Dünya'yı baştan başa kat etmiş.

Benzer fikirler kuzey yarımkürede de geliştiriliyor, ama buz yerine su kullanılıyor. 1998'den beri, alanı birkaçbin metrekare olan nisbeten küçük bir dedektör, dünyanın en derin tatlısu gölünün, Sibirya'daki Baykal gölünün içinde duruyor. Ama gerçekten hassas ölçümler alabilmek için bundan daha büyük dedektörler lazım. Akdeniz'in doğal derin çukurluklarında büyük bir fototüp dizisi inşa ediliyor. Açılımı *Astronomy with a Neutrino Telescope and Abyss Environmental Research* (Nötrino Teleskobuyla Astronomi ve Derinde Çevre Araştırması) olan ANTARES,[9] Fransa'nın güney kıyısında, Toulon yakınla-

[9] Antares, Akrep takımyıldızında bir ikili yıldızın adıdır, gökyüzünün en parlak

rında yapılmakta olan bir dedektör. Bir diğer dedektör, NESTOR[10] da, Yunanistan'ın Mora yarımadasının güneybatısında, Akdeniz'in en derinlerinde yerini alacak.

Samanyolu Galaksisi'nin merkezi yoğun gaz ve sayısız parlak cisimle tamamen kaplanmış durumda. Ama galaksinin kabinde üretilen nötrinoların Dünya'daki nötrino teleskoplarıyla ölçülmesi gelecek on yıl içinde mümkün olacak.

Amaç, evrende sıradan ışıkla veya her dalgaboyundan elektromanyetik dalgalarla göremediğimiz neler olduğunu öğrenmek. İşin zorluğu, o nötrinoları saptamak için uygun aygıtları geliştirmek, nötrinoların enerjilerini ölçmek ve nereden geldiklerini anlamakta. Gama ışını patlamaları nötrinolarda görülebilirse eğer, milyarlarca yıldır uzayı kat etmekte olan nötrinoları saptayacağız. Güneş nötrinolarının on dakikalık seyahat süresi laboratuvarların nanosaniyelerine göre nasıl uzun bir zamansa, kozmik nötrinoların yolculuk süresi de diğerlerine göre yine öyle upuzun.

Evrenin en uzak uçlarından, böyle muazzam süreler içinde gelen nötrinoların ezgotik özellikleri anlaşılabilir. Bunların Büyük Patlama'nın arkaplan radyasyonuyla etkileşmesi mümkün. Bugüne kadar olup bitmiş her şeyden daha şaşırtıcı sürprizler bizi bekliyor olabilir.

ve en kızıl yıldızlarından olduğu için bir zaman, adını savaş tanrısından alan gezegen Mars'la –tanrının Yunanca adı Ares'tir– karıştırılmış, bu nedenle ona Antares –Ares olmayan– adı verilmiştir —*çev. notu.*

[10] Homeros'un *İlyada* ve *Odysseia* destanlarında sıkça geçen, Truva Savaşı'na katılan Akha'lardan olan Pylos kralının adı —*çev. notu.*

11

YENİDEN

Pauli'nin "feci bir şey" yaptığını söyleyip, "saptanamayacak bir parçacık olduğunu ortaya attım" itirafında bulunmasından seksen yıl sonra, nötrino astronomisi uzak galaksilerin içine bakmamızı, Büyük Patlama'nın yankılarını bulmamızı sağlamanın eşiğinde. Pauli'nin nötrinoyu "icat" ettiği o çığır açıcı andan beri çok şey oldu. Hikâyemizin ilk perdesi, Haziran 1956'da Clyde Cowan ve Fred Reines'in Pauli'ye onu nihayet haklı çıkardıklarını söyleyecek kadar kendinden emin oldukları o güne kadar, 26 yıl sürdü.

Gönderdikleri telgrafı CERN'de bir konferanstayken aldı Pauli. Toplanıyı bölerek telgrafı dinleyicilere okudu: "Nötrinoları kesin olarak saptamış olduğumuzu size bildirmenin sevinci içindeyiz. [Bulduğumuz oran] beklenen [oranla] uyum içindedir." Pauli ve arkadaşları bir kasa şampanyayla kutladılar bunu.[1] Pauli yıllar önce bahse koyduğu şampanyaları ısmarladı; haber için onlara teşekkür ettiği, minnet dolu bir de cevap gönderdi, şu ifadeyi ekleyerek: "Her şey, nasıl bekleyeceğini bilene gelir." Bu söz nötrinoların tüm tarihini ve hikâyemizin kahramanlarının çeşitli talihli anlarını içinde taşıyordu aslında.

[1] Aktaran: F. Reines, Nobel Ödülü konuşması, s. 251, *Nobel Lectures 1991-1995* içinde, ed. G Ekspong, World Scientific, Singapur, 1997.

REINES'İN "DAHA"SI

Önemli bir fizkçi olan Luis Alvarez, nötrinoyu bulduktan sonra "üstüne daha ne yaparsın ki?" demişti. Fakat bu keşif için Nobel Ödülü bekleyen varsa, daha çok bekleyecekti. Reines, "olabilecek en zor ölçümü yapma" arayışına devam ederek "dahasını" yaptı. Bir nötrinonun herhangi bir şeyle etkileşime girme ihtimali düşüktür; teori nötrinonun elektronla etkileşime girmesininse ihtimallerin en düşüğü olduğunu söylüyordu. Reines 20 yılını bunu ölçmeye çalışarak geçirdi, yaptığı deneylerin her biri öncekinden hassastı. Sonunda başardı ve kırk yıl sonra Nobel Ödülü'nü alırken yaptığı konuşmada bunu, o güne dek yapılan tüm ölçümlerin en küçük çapraz kesiti diye tarif etti.

Ama 20 yılını sadece buna adamamıştı. 1960'tan itibaren asıl işi kozmik ışınlarda doğal olarak üretilen nötrinoları aramak oldu. Kozmik ışınların atmosfere çarpmasıyla bir sürü pion oluşur, bunlar da bozunup muon ve nötrino olurlar. 1960'ta Steinberger, Schwartz ve Lederman'a ilham veren, hızlandırıcılarda üretilen pionların bu bozunması olmuştu. Konu Reines'in ilgisini çekti, zira kozmik pionların nötrino sağanakları yaratıyor olması gerektiğini anlamıştı. Mesele bunları tespit etmekti.

1950'lerde, ikisi de Savannah River reaktöründeki nötrinoların peşindeyken tesadüfen Davis'le paralel giden Reines'in kariyeri, yine onunkine benzer bir yol izliyordu. Davis güneş nötrinolarını bulmak için Güney Dakota'da yerin bir buçuk kilometre altına inerken, Reines kozmik sağanaklardan gelen nötrinoların izinde Johannesburg'da bir altın madeninde yerin üç kilometre altında bir deney düzeneği kuruyordu. Reines'in ilk "doğal" nötrinoyu yakaladığı günün tarihi 23 Şubat 1965'ti; o güne kadar kaydedilen nötrinolar sadece reaktör veya hızlandırıcılarda üretilenlerdi.

Yeraltındaki deneylerde kozmik nötrinoları tespit etmek Reines'in asıl ilgi alanı oldu. 1987'de bir süpernovadan gelen nötrinolar ilk kez saptanırken IMB işbirliğinin

liderlerinden biri oydu (s. 120). Bu veriler süpernova teorilerimizin iyi olduğunu göstermekle kalmadı, nötrinolara dair bir şeyler de söyledi bize. Sonuçlar nötrinonun sadece üç çeşidi olduğu anlamını taşıyordu: elektron, muon ve tau tipi. 1990'larda CERN'de yapılan, süpernovayla hiç ilgisi olmayan deneyler de sayının üç olduğunu gösterdi.[2] Bu gözlem, evrenin genelinde hafif atomik elementlerin nispeten daha fazla olmasını Büyük Patlama'dan üç ayrı nötrino çeşidinin çıkmış olmasıyla açıklayabilen teorik kozmolojiyle de uyuşuyor. Böylece 1995'te nötrinonun bu üç çeşidi kabul görmüş ve süpernova patlamalarıyla Güneş'i de içine alan nötrino astronomisi başlamış oldu.

O sene, "bir insanın bugüne dek tahayyül ettiği en küçük gerçeklik miktarı"nın var olduğunu kanıtladıktan 39 yıl sonra, 77 yaşındaki Reines'e Nobel Ödülü verildi. Ödül onun ömrü boyunca nötrinolarla yaptığı çalışmayı tanıyordu: bulunması, özelliklerinin tespiti ve nötrino astronomisinin doğumuna ilham vermesi. Reines'in ödülü kabul konuşması,[3] bir zamanlar işbirliği yaptığı arkadaşına övgülerle doluydu: "Clyde Cowan benim, kendime denk ortağımdı. Bu şerefi benimle paylaşmaya ömrü yetmediği için üzgünüm."

JAPONYA'DAN KOŞİBA

Masatoşi Koşiba için bekleyiş başka türdendi. 1926'da Tokyo'da doğan Koşiba orada fizik okudu, 1951'de mezun oldu. ABD'ye gidip Rochester Üniversitesi'nde doktora yaptı, Chicago Üniversitesi'nde araştırma görevlisi olarak üç yıl kaldı (1955-58) ve Japonya'ya döndü. Ömrünü deneysel nükleer fizik ve parçacık fiziği yaparak geçirdi; giderek yükseldi ve 1970'te Tokyo Üniversitesi'nde profesör oldu. Adını duyuracağı projeye ancak 60'ına ve emeklili-

[2] Ayrıntılar *Lucifer's Legacy* kitabımda, *a.g.e.*

[3] F. Reines, Nobel Konuşması http://nobelprize.org/nobel prizes/physics /laureates/1995/reines-lecture.html

ğe yaklaştığı zaman katıldı: Davis'in güneş nötrinolarını tespit girişimlerinden ilham alan Koşiba ilk tam boyutlu güneş nötrinosu gözlemevini kuran ekibin lideri oldu.

Bu deneyin üç farklı uygulaması oldu: Yapmak üzere tasarlandığı iş, tesadüfen olan iş ve hiç beklenmedik bir iş. İlki Güneş'in nötrinoğraflarını çekmek, böylelikle Davis'in sonuçlarını doğrulamak ve SNO'yla beraber güneş nötrinosu problemini çözmekti. İkincisi tamamen talihin güzelliğiydi, deney hazır olduktan sadece iki ay sonra, güney göğünde bir süpernova görüldüğünü duydular. Bir süpernovadan gelen her (anti)nötrinonun enerjisi, güneş nötrinosundan çok daha fazladır, bu da onların tespitini kolaylaştırır. Dedektör zaten güneş nötrinolarına hassas olduğundan, verilerini kontrol ederek süpernova nötrinolarının işaretlerini kolayca buldular.

Üçüncüsü, kozmik ışınlardan gelen nötrinoları tespit etmeleriyle gelen beklenmedik bonustu. Çerenkov radyasyonunun farklı desenleriyle elektronu muondan ayırt etmek mümkün olduğundan, yakaladıkları nötrinoların elektron çeşidinden mi muon çeşidinden mi olduğunu söyleyebiliyorlardı. Elektron tipinden her bir nötrino için muon türünden iki tane görmeyi bekliyorlardı ama bir de baktılar ki muon nötrinoların sayısı beklenenden azdı. Japonya'nın üstünden gelen, yani 20 km'den az yol kat etmiş nötrinoları, yatay olarak gelen, 1000 km kadar yol almış olanlardan ve aşağıdan, Dünya'nın öbür ucundan gelip gezegeni geçerek 13.000 km seyahat etmiş olanlardan ayırt edebiliyorlardı. Nötrinoların geldiği mesafe arttıkça muon çeşidinden olanların oranı azalıyordu. Böylece nötrinoların kütlesi olduğuna dair açık kanıtı ilk bulanlar olduğunu iddia edebilirdi SüperK ekibi.[4] Bu, Davis'in

[4] Muon-nötrinoların "kayboluşu" ya bozunmalarındandı, ya da biçim değiştirmelerinden, yani osilasyon yapmalarından. Bunun açık kanıtını bulmak için, onların neye dönüştüğünü tespit etmek gerekiyordu. Yoğunluğun kaybı iki nedenden de kaynaklanıyor olabilirdi ama iki ihtimal de muon-nötrinonun kütlesi olmasını gerektiriyordu.

neden Bahcall'la beraber beklediklerinden daha az güneş nötrinosu bulduğunu açıklayabilirdi, hem Pontecorvo'nun bir diğer fikriyle, nötrinoların osilasyon yaptığı görüşüyle de tutarlıydı.

Nötrino hikâyesindeki pek çok ironi gibi, atmosfer nötrinosu destanı ve Koşiba'nın katkısı da bir-iki kelâmı hak ediyor.[5] Atmosfer nötrinolarını tespit edebilen ilk deney 1963'te yapıldı; burada nötrinolar, Fred Reines ve diğerleri tarafından kozmik ışınların (asıl olarak muonların) yeraltına nüfuzunun ölçülmesinin beklenmedik yan ürünleriydi. O dönemde nötrino osilasyonunun hem Japon ekibi hem de Pontecorvo ve Gribov tarafından öngörülmesine rağmen, kimse büyük nötrino dedektörlerini yeraltına indirecek kadar ilgilenmiyordu bu işle. Bunun yerine tüm çaba, hızlandırıcılarda üretilmeye başlanan çok daha yoğun nötrino demetlerini kullanan deneyler konusunda gösteriliyordu,[6] ama nötrino osilasyonlarının hızlandırıcılarda aranmasıyla geçen 20 senenin sonu başarısızlık oldu.

O günlerde hızlandırıcıdan birkaç kilometre uzağa dedektörler yerleştirmeyi teklif eden bilim insanları oldu, bu fikir daha sonra uygulamaya konacaktı (10. Bölüm), ama CERN'de yapılan ilk plan, merkezin yönetimi tarafından durduruldu. Jura dağlarının öte yanına bir dedektör yerleştirerek CERN'den gelen nötrinoları tespit etme teklifi, CERN'in yerin 27 kilometre altında yapılacak LEP (*large electron-positron collider*, büyük elektron-pozitron çarpıştırıcısı) için destek aradığı bir dönemde fazla hassas bulundu. İdarenin çekincesi, eğer insanlar nötrinoların dağların içinden geçebildiğini öğrenirse kamuoyunun bunların insana zararı olup olmadığı konusunda endişeye kapılacağındandı. Nötrinoların insana hiçbir şey yapmadığı gerçeğinin anlaşılması, hassas pazarlık sürecinde istenmeyen bir ek "eğitim" gerektirecekti. Siyaset kazandı,

[5] Don Perkins'in yazara yazdığı mektuba dayanarak, 19 Mayıs 2009.
[6] 7. Bölüm'de Schwartz, Steinberger ve Lederman'ın hikâyesine bakın.

CERN'de osilasyonun peşine düşmüş olanlar kaybetti.

Bu arada 1980'lere gelinmişti ve 10. Bölüm'de gördüğümüz üzere, bozunan protonları tespit etmek için yapılan girişimlerin başarısız olması, yeraltında deney düzeneklerine uğraşılacak tek konu olarak atmosfer nötrinolarını bıraktı. Koşiba'yı SüperK'yı önermeye sevk eden de buydu.

1990'da ABD, Avrupa ve Japonya'da yapılan beş ayrı deneyde, atmosfer muon ve elektron-nötrinolarının oranındaki anomali gözleniyordu. İronik olan, kimsenin buna inanmayışıydı. 1992'de Dallas'ta yapılan, parçacık fiziği konusundaki uluslararası büyük konferansta, alanı değerlendiren kişi, varsayılan anomaliden şüphe edilmesi için ne gibi nedenler olduğunu özetledi.[7]

Dünya'da atmosfer nötrinosu osilasyonu gözlenmesi kısmen, gezegenimizin benzersiz yapısından kaynaklanıyor. Dünya'nın manyetik alanı, meydana gelen kozmik ışınların davranışını, dolayısıyla nötrinoların da enerjisini ve yoğunluğunu belirliyor. Dünya'nın yarıçapı, yani nötrinoların bir taraftan ötekine geçerken kat ettikleri mesafe, şans eseri tam da bu enerjilerde ve kütlelerdeki nötrinoların osilasyon oranına uygun bir mesafe. Dahası, Dünya'nın yoğunluğu, merkezinden çapraz geçen 1.000 nötrinodan yaklaşık yalnız 1'inin kaybolacağı kadar küçük. Bunların hepsi iyi şans.

Atmosfer nötrinosu osilasyonları, proton bozunmasını bulma yolunda yapılan araştırmaların başarısız olmasının talihli yan ürünüydü; bir de, saf suyla dolu kocaman dedektörlerin olağanüstü keskin gözlemler sunabilmesinin. İşte bu, Koşiba'nın, ilhamıyla SüperK'yı yaratan insanın eseriydi, ama dedektör kesin delili verdiğinde Koşiba artık emekli olmuştu. 2002'de, "[nötrino] astrofiziğ[in]e çığır açıcı katkılarından dolayı" Davis'le birlikte Nobel Ödülü'nü aldı. 76 yaşındaki Koşiba, diğerleri arasında delikanlı sayılırdı.

[7] Hamish Robertson, *Proceedings of International Conference on High Energy Physics, Dallas, 1992*, American Institute of Physics, 1993.

DAVIS VE BAHCALL

87 yaşına kadar yaşayan Ray Davis, fazlasıyla hak ettiği Nobel Ödülü'nü şükranla kabul etti. Güneş'in içine bakmaya çalışmış ve sonunda elde ettiği başarıya bütün kariyerini adamıştı.

Uzun zaman birlikte çalıştığı John Bahcall da kendini kariyeri boyunca süren bir arayışa vakfetmişti. Bu destanın yazılması, Davis'in ve Bahcall'un 1964'te *Physical Review Letters*'ta aynı sayfanın iki yüzünde çıkan makaleleriyle başlamıştı. Davis ve Koşiba deneysel çalışmalarıyla Nobel Ödülü'nü paylaştıklarında Bahcall ödüle dahil edilmedi. Eğer Bahcall ve Davis ayrı ayrı değil de birlikte makale yazmış olsalardı sonucun başka türlü olabileceğine dair yorumlar yapıldı. Fakat bu pek olası görünmüyor; Nobel Komitesi teknik notlarında hem Davis'in makalesine hem de Bahcall'unkine yer vermiş; dolayısıyla Bahcall'un bir şekilde gözden kaçmış olma ihtimali yok. Ödül, yeni bir bilim alanını, nötrino astronomisini kuran asıl ve belirleyici deneysel çalışmalara verilmişti. Bahcall'un güneş nötrinolarının akısına dair hesapları, ki onlar olmadan deneylerin hiçbiri başlayamazdı, yirminci yüzyılın bilim tarihinde eşsiz bir yer tutuyor ama en azından Nobel Komitesi'nin gözünde bunlar nitelik bakımından ayrı bir düzlemde yer alıyor.

Yine de, ödülün ilan edilmesinden önceki aylarda, artık tüm taşlar yerine oturduğuna göre o yıl Nobel Ödülü'nün nötrino avcılarına verileceğine dair geniş spekülasyonlar vardı. Pek çok fizikçi, adaylar arasında Bahcall'un adının da yer alacağını konuşuyordu ve listede onu görmeyince müthiş şaşırdılar. Ödül kazananların açıklanmasının ardından Bahcall'a tepkisi sorulduğunda, kazananların ödülü fazlasıyla hak ettiğini ve kendisinin de adının "bu özel kişiler arasında anılmasından" memnuniyet duyduğunu söyledi büyük bir incelikle.

Ödül ona asla verilemeyecekti; John Bahcall 2005'te, henüz 70 yaşındayken öldü. Ömrünü verdiği çalışmanın

doğrulandığını görecek kadar yaşadı ve 2001'de SNO deneyinin sonuçları açıklanıp o ve Davis'in haklı olduğu anlaşıldığından ağzından kendiliğinden dökülen sözlerle uzun süre hatırlanacak: "Öyle sevindim ki, dans edesim var."

Nötrinolar osilasyon yapıyor olmasaydı eğer, Davis'in, Bahcall'un bu arayışın ilk yılları içinde hesapladığı SNU sayısını aynen bulması pekala mümkündü. Tarihin akışı bambaşka olabilirdi. Bu işin bu kadar uzun sürmesinin nedeni nötrinoların kimliği olması ve uygun bir fırsat buldukları an çaktırmadan kimlik değiştirivermelerinden kaynaklanıyordu. Bu gerçeklerin ikisini de Bruno Pontecorvo önceden tahmin etmişti. Nötrino fiziğinin bütün akışı, yarım yüzyıldan uzun zaman boyunca Pontecorvo'nun teorik damgasını taşıdı.

BRUNO PONTECORVO

Kitap yazmanın keyifli taraflarından biri, olay örgüsünün her zaman sizin beklediğiniz şekilde ilerlememesi. İlham bulduğum konu asıl olarak, Ray Davis'in güneş nötrinolarını adanmışlıkla aradığı ve sonunda Nobel Ödülü'nü aldığı benzersiz macerasıydı. Olayların ana karakterinin Bruno Pontecorvo olması benim öngördüğüm bir şey değildi. Perdeyi "Nötrino işlerinde uzun soluklu olmak kıymetlidir. Herkes bu kadar talihli olamaz" diyerek açarken aklımda, en az Clyde Cowan ve John Bahcall kadar, Pontecorvo da vardı.

Genç Bruno Pontecorvo Fermi'nin deneyinde radyoaktivitenin tuhaf davrandığını fark ettiğinde yıllardan 1934'tü. Fermi meselenin ucunu bırakmadı ve Nobel Ödülü'nü kazandı. Tüm bunların uzun vadeli sonuçlarından biri nükleer reaktörlerin yapılmasıydı; Cowan'la Reines'in keşiflerinde kullandığı yoğun nötrino kaynağını üretecek olanlar da bunlardı.

Pontecorvo nötrino hikâyesine 1946'da, nötrino dedektörü olarak klor kullanımına dair ilk tartışmayı açа-

rak dahil oldu. Davis'i ömrü boyunca sürecek o yolculuğa çıkaran, işte bu fikirdi.

Pontecorvo'nun, klorun nötrinoları yakalamak için ideal bir yol olduğu önerisi doğruydu; mesele, reaktörlerin nötrino değil *anti*nötrino üretmesi, antinötrinolara da bu tekniğin işlememesiydi. Dolayısıyla Cowan ve Reines nötrinoyu keşfetmelerinde Pontecorvo'ya pek bir şey borçlu değillerdi. Eğer reaktörler antinötrino değil de nötrino üretiyor olsaydı veya nötrinoile antinötrino aynı şekilde davransaydı, o zaman Davis bu keşfi şüphesiz yapacak, o ve Pontecorvo bu başarıyla Nobel Ödülü'nü paylaşacaklardı. Bu, Pontecorvo'nun Nobel Ödülü'nü şans eseri ilk kaçırışıydı.

Pontecorvo'nun bu fikri meyvelerini güneş nötrinoları arayışında verdi. Güneş gerçekten de nötrino üretiyordu, antinötrino değil. Davis bir yıldızın içine bakan ilk insan olacak ve bunu Pontecorvo'nun fikrini kullanarak yapacaktı. Gelgelelim insanların Davis'in haklı olduğunu anlaması neredeyse 30 yıl aldı. Neden o kadar sürdüğünü bugün biliyoruz: elektron-nötrinolar osilasyon yapıyor, böylece Güneş'ten buraya gelirken yolda şekil değiştiriyor ve Davis'in kapanından kaçıyorlardı. Pontecorvo güneş nötrinolarının neden böyle davrandığını bile bilmişti. Önce elektron-nötrinolarla muon-nötrinoların birbirinden farklı olup olmadığı sorusunu sordu ve sorunun deneyle nasıl cevaplanacağını gösterdi, sonra bunların gerçekten de farklı olduğu bulunduğunda, Davis'in güneş nötrinosu deneyinde çıkan açığın osilasyondan kaynaklanıyor olabileceğini dahi söyledi.

Mesele Pontecorvo'nun dediklerinin burada da doğru çıkmasından ibaret değil, onun akıl ettiklerinin hikâyesi ironilerle bezeli. Nötrino osilasyonu diye bir şey olmasa, Pontecorvo bir defa haklı çıkacak (klor dedektörü fikriyle) ve güneş nötrinoları, Davis tarafından, beklenen oranda görülecekti. Buradaki ironi, Pontecorvo'nun birden fazla defa haklı olması. Nötrino osilasyonları Davis'in yakaladığı sinyalleri öyle seyrekleştirdi ki insanlar onun

elde ettiği sonuçlardan neredeyse 30 sene şüphe ettiler. Pontecorvo'nun durumun nötrino osilasyonlarından kaynaklanıyor olabileceği görüşü büyük ölçüde görmezden gelindi. Bu ancak 1998'de çözülmeye başlandı ve nihayet 2001'de taşlar yerine oturdu.

Nötrino osilasyonu hipotezi, Pontecorvo'nun elektronların yanında üretilen nötrinoların, muonlarla birlikte ortaya çıkanlardan bir şekilde farklı olduğunu anlamasının getirdiği bir fikirdi. Lederman, Steinberger ve Schwartz bunu ondan bağımsız olarak, hem de tam onun söylediği şekilde keşfettikleri için Nobel Ödülü'nü alırken Pontecorvo seyirci kaldı. Bu kez ödülü kaçırmasının nedeni, nötrino hikâyesinin kritik bir dönemecinde Demir Perde'nin ötesinde yaşamayı seçmiş olmasıydı. Çok önemli makaleleri ilk olarak Rusça yayımlandı ve Batıda okunmadı. Sovyetler Birliği'ndeki deney imkânları onun hayallerini gerçekleştirmesine elverişli değildi ve yetkililer onun, Moskova'dan aldığı Stalin Ödülü'ne bir de Nobel Ödülü ekleyebileceği Batıya seyahat etmesine izin vermiyordu.

Bütün fikirleri arasında en etkili olanı hiç şüphesiz, 1959'da, muon-nötrinolarla elektron-nötrinoların farklı olduğunu düşünmesiydi. Bu, parçacık fiziğinin modern standart modelini ve elektron-nötrinolarla muon-nötrinoların, biraz kütleleri oldukça, bir o tarafa bir bu tarafa osilasyon yaparak kimliklerini değiştokuş ettikleri hipotezini doğurdu. Bu fikir birkaç sene içinde geliştirilerek, 1967'de, Davis'in güneş nötrinosu anomalisini keşfetmesinden tam bir yıl önce olgunlaştırıldı. Bense bundan yıllar sonra, derginin eski bir sayısını karıştırırken Pontecorvo'nun makalesini görüp onun Moskova'da olduğunu "keşfettim".

Pontecorvo'nun bilim kariyerinin başarısını ve trajedisini içinde barındıran makale, hepsinden çok bu olsa gerek. Güneş'in nötrinolarının klor tankına gelmeden seyrelmesinin sebebi nötrino osilasyonlarıydı. Osilasyon olmasaydı Davis nötrinoyu 1964'te tüm yoğunluğuyla keşfedecek ve Pontecorvo'yla birlikte hak ettiği saygıyı hemen görecekti: İkisinin Nobel Ödülü'nü paylaşması için ikinci

bir fırsat olacaktı bu. Bunun yerine nötrino osilasyonları o dönemde bir lanet gibi oldu. Ray Davis Güneş'ten gelen bunca nötrinonun neden eksik göründüğünü anlamak için 30 yılını harcayacaktı. Mesele yüzyılın başından önce çözülmeyecek, çözülmesi de Davis'e sonunda, 2002'de, 87 yaşına geldiğinde, Nobel Ödülü verilmesini sağlayacaktı. Pontecorvo ise 1993'te, çok büyük gerçekleri kendisinin açığa çıkarmış olduğu haberini alamadan öldü.

Pontecorvo, osilasyon yapan nötrino olgusunun yerleştiğini de, bunun bugün o hayaletvâri varlıkların en incelikli özelliklerinin ölçülmesinde kullanıldığını da göremedi. Günümüzde bu deneyler maddi evrenin şimdiki biçimine nasıl evrildiğini bize göstermeyi vaat ediyor; evrenin bütününde neden maddenin [antimaddeden] fazla olduğunun sırrının nötrinoda olması gerçekten mümkün. Nötrino osilasyonları konusu oturdu ve keşfedilmeyi bekleyen yeni fizik meseleleri olduğunun işaretini veriyor bize, ama, Büyük Patlama'dan beri evrende görünmemiş düzeyde enerjilerle deney yapma şartıyla. CERN'deki LHC, önümüzdeki on yıl içinde bu yeni olgulardan bazılarını ortaya çıkarmaya başlayacak. Fakat bizi bekleyen sürpriz ne olursa olsun, hikâyenin ana kahramanlarından hiçbiri, yeni durumlar üstüne çalışmak üzere aramızda olmayacak.

Bruno Pontecorvo "orijinal fikirleriyle herkesin gözünü açtı".[8] Bu kadar geniş kapsamlı bunca fikir üretip de, kimsenin Nobel Ödülü'nü paylaşmayan pek az bilim insanı vardır.

GÜNEŞİN BATIŞI

Bu hikâye nötrinonun olduğu kadar Güneş'in de hikâyesidir. Davis ve Bahcall yola, nötrinoların Güneş'e ışık tutması niyetiyle çıktılar; onun yerine Güneş, nötrinoya ışık tuttu. Hikâyemiz boyunca insanların yapmaya kalk-

[8] Bahcall ve Davis, 1982, *a.g.e.*

tıkları şey, sonunda bulduklarından farklı oldu hep.

On dokuzuncu yüzyılda, Güneş'in nasıl parladığı meselesi, kısa süre içinde jeoloji ve evrimle uyuşmadığı anlaşılan açıklamalar getirdi. Dönemin en büyük kuramcılarının hepsi her konuda yanlış cevap veriyordu –Güneş'in yakıtına dair, Dünya'nın yaşına dair, bunların bilimin diğer alanları için taşıdığı anlama dair. O gün ellerinde bulunan bilgiyle ellerinden gelenin en iyisini yapıyorlardı. Geriye dönüp bakmanın avantajıyla diyebiliriz ki Güneş'in ısısı ve ömrü, yerde ve gökte onların on dokuzuncu yüzyıl düşüncesinde bildiklerinden çok daha fazla şey olduğunu ortaya çıkardı. Einstein'ın özel görelilik teorisinin ve hidrojenin, helyumun kütlelerinin hassasiyetle ölçülmesinin bununla hiçbir ilgisi yoktu; daha doğrusu, insanlara ilk başta öyle göründü. Ama, yirminci yüzyılın ortalarında, bunların konunun can alıcı noktasında oturduğu apaçık belli oldu.

Astrofizikçilerin yıldızların nasıl yandığını anlamasını mümkün kılan, işte bu teoriler oldu. Görüldü ki yıldızlar, gökteki nükleer füzyon reaktörleridir; gökyüzünde süpernovalar patlayıp nötron yıldızına dönüşür ve bize en yakın yıldız olan Güneş'in gücü de hidrojen füzyonundan gelir. Başta bunların hepsi teorik şeylerdi, dolaylı gözlemlere ve Dünya'daki laboratuvarlarda yapılan deneylerin sonuçlarına dayanıyordu. Yirminci yüzyılın sonunda, nötrino konusu yerleşince, yıldızlardan gelen nötrinoları tespit etmek ve o yıldızların içinde ne olup bittiğini doğrudan öğrenmek mümkün oldu. Süpernovadan gelen, birkaç saniyede geçip giden ve o arada enerjisi yeraltında bir mağaradaki ışık parlamalarıyla ölçülen bir nötrino sürüsü, süpernovanın Güneş'ten çok daha sıcak olduğunu ve sonuçta ortaya yoğun bir nötron yıldızı çıktığını ispat etmeye yetti. Astrofizikçilerin öngördüğü de buydu ve bence bu tespit, temel bilimlerin gelmiş geçmiş en güzel ortak çalışması oldu.

Güneş, nötrinoların onun en derin yeri hakkında kesin ölçümler yapmamıza elvereceği kadar yakın bize.

Burada nötrinolar yine teorinin doğru olduğunu gösterdi; nötrinoların taşıdığı enerji beklenene uygundu, sayıları da beklenenin yarısı veya üçte biri oranında doğru çıkıyordu. Beklenenden birkaç yüz kat yoğun nötrinolar bulmamızın veya hiçbir şey bulamamamızın da mümkün olduğu düşünülürse, bulunan değerin beklenene bu kadar yakın olması büyük bir şeydi. Bugün, osilasyonlar da dikkate alındığında, aradaki uyum çok iyi. Onlarca yıl önce hidrojen ve helyumun kütlelerinin ölçülmesinde olduğu gibi burada da hassas ölçümler yapabilmenin önemi öne çıkıyor.

Araştırmalarla geçen onca yılın sonunda, şundan kesin olarak eminiz ki, nötrinoları meydana çıkaran nükleer reaksiyonlar aynı zamanda Güneş'in de parlamasını sağlamakta. Bu bilgi, Dünya'nın yaşına ve Güneş'te enerjinin üretimine dair, ondokuzuncu yüzyıl ortalarında Darwin ve Lord Kelvin'le başlayan daha genel bilimsel tartışmaya da noktayı koydu. Değerlerin yeterli hassasiyet ve kesinlikle ölçülmüş olması sadece Güneş'te devam eden süreçleri açıklamakla kalmadı, nötrinoların beklenmedik derecede gizemli olduğunu da ortaya çıkardı.

Araştırma aşaması yarım asır sürdü; şimdi nötrinolar kainatın ücra köşelerinde ve zamanın derinliklerinde yaşanan olayların niceliksel olarak araştırılmasında araç olarak kullanılıyor. Uzak yıldızların içine bakmakla kalmıyor iş, yeni girişimler bu hikâyede çemberi tamamlıyor. Dünya'nın yaşının milyonlarca yıl değil, binlerce yıl hiç değil, milyarlarca yıl olduğunu göstermeye yarayan şey, kayalardaki radyoaktiviteydi. Aynı radyoaktivite nötrinoları açığa çıkarıyor. Bugün, "jeonötrinoları" tespit etmek suretiyle, kendi gezegenimizin derinliklerine bakmak mümkün olacak.

Becquerel radyoaktiviteyi keşfettiğinde, Pauli nötrinoyu bulduğunda, hatta Reines ile Cowan nihayet onu yakaladığında bile, bunların hiçbiri hayal dahi edilmiyordu. Güneş nötrinolarının gizemini çözmek için çıkılan uzun yürüyüşte yeni bilim dalları ortaya çıktı: nötrino

astronomisi ve nötrinojeofiziği. Nötrinoların kütlesiz de olmadığı gerçeği, keşfedilmeyi bekleyen fizik teorilerine dair ipuçları sunuyor.

Son sözümüz John Bahcall'dan. Söyledikleri hem bu bilimin tarihini özetliyor, hem de kendisi ve Davis için, Cowan ve Reines için, ve en dokunaklı olarak Pontecorvo için de geçerli: "Bir şeyi yeterince hassas olarak ölçebilirseniz, önemli bir şey keşfetme imkânınız vardır. Astronominin tarihi, bulacağınız şeyin aradığınız şey olmamasının kuvvetle muhtemel olduğunu gösteriyor." Ardından, o tipik tevazuuyla ekliyor: "Talihin de faydası yok değil."

Dizin

1851 Fuarı 19

AGS (Alternating Gradient Synchrotron, Alternatif Kademeli Senkrotron) 110
ağır su 135, 137, 138, 153
alfa bozunması 23
alfa parçacığı 21, 22, 59, 61
alfa radyasyonu 20
Alvarez, Luis 158
AMANDA (Antarctic Muon And Nötrino Detector Array, Antarktika Muon ve Nötrino Dedektör Dizisi) 154
Amerikan Fizik Derneği 72, 108
Anaconda Bakır Madeni 80
Anaksagoras 55, 56
ANTARES (Astronomy with a Neutrino Telescope and Abyss Environmental Research, Nötrino Teleskobuyla Astronomi ve Derinde Çevre Araştırması) 155
antimadde 31, 48, 49, 50, 51, 152
antinötrino 48, 49, 50, 51, 68, 71, 99, 147, 152, 165
antiproton 48
argon 46, 47, 48, 70, 73, 79, 81, 83, 84, 85, 86, 90, 91, 150
argon-37 90, 91
Aston, Francis 62
astronomi 76, 117
Atkinson, Robert 63
Atmosfer nötrinosu anomalisi 133, 134
atom 13, 15, 19, 20, 21, 22, 24, 25, 26, 27, 29, 31, 34, 36, 37, 41, 42, 43, 45, 46, 47, 50, 52, 53, 58, 59, 62, 70, 77, 79, 88, 89, 96, 97, 98, 126, 137, 142, 144
atom bombası 36, 42, 43, 49, 51
atom casusu 42
atom çekirdeği 19, 21, 25, 27, 29, 31, 41, 45, 46, 58, 96, 98, 137, 142, 144
Atom Enerjisi Komisyonu 47, 49
azot anomalisi 26
Bahcall, John xi, 75, 76, 77, 78, 79, 81, 82, 83, 84, 86, 87, 88, 89, 90, 92, 93, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 124, 125, 131, 134, 136, 138, 139, 161, 163, 164, 167, 170
Barberton kireçtaşı madeni 73, 79
Becquerel, Henri 15, 16, 17, 18, 19, 58, 169
Becquerel ışınları 58
berilyum-7 72, 73, 74, 75, 78, 87, 89, 117
berilyum-8 74, 75, 78
beta bozunması 22, 23, 24, 25, 27, 28, 29, 30, 32, 33, 34, 35, 37, 38, 39, 44, 45, 51, 66, 76, 77, 78, 88, 95, 102, 103, 107, 109
beta radyasyonu 20, 35
Bethe, Hans 38, 39, 44, 51, 53, 63, 64, 67, 68, 69, 70, 72, 73, 89, 95
Bohr, Aage 81
Bohr, Niels 24, 29, 32, 33, 81
boron-8 73, 74, 87, 88, 89, 93, 117, 122, 124
Bose, Satyendra 34
Brookhaven Ulusal Laboratuvarı 47, 48, 70, 82, 83, 84, 92, 93, 106, 110, 117, 118, 120, 142
Burbridge, Margaret ve Geoffrey

77
Büyük Macellan Bulutu 123, 140, 141, 143
Büyük Patlama 14, 55, 88, 152, 154, 156, 157, 159, 167

Calvin, John 73
CERN 104, 106, 112, 127, 154, 157, 159, 161, 162, 167
Chadwick, James 24, 27, 28, 29
Chen, Herb 137, 138
CNO döngüsü 64, 65, 66, 70, 71
Cowan, Clyde 50, 51, 52, 53, 75, 94, 103, 141, 146, 157, 159, 164, 165, 169, 170
Curie, Marie 17, 18, 31, 32
Curie, Pierre 17, 18

Çerenkov ışığı 124, 128
Çerenkov, Pavel 121, 122, 124, 128, 136, 151, 155, 160
Çerenkov radyasyonu 121, 122, 136, 151, 155, 160
çeşni 105, 109, 113, 145

Darwin, Charles 55, 56, 57, 169
Davis, Ray ix, xi, 46, 47, 48, 49, 52, 53, 69, 70, 71, 73, 74, 75, 78, 79, 80, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 92, 93, 94, 95, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 122, 123, 124, 125, 128, 129, 130, 131, 133, 134, 135, 136, 138, 139, 141, 143, 146, 152, 153, 158, 160, 162, 163, 164, 165, 166, 167, 170
Demir Perde 42, 43, 107, 166
Dirac, Paul 25
döteron 66, 67
döteryum 137

Eddington, Sir Arthur 62, 63, 64, 65
Edison, Thomas xi
Einstein, Albert 23, 32, 61, 62, 168
elektromanyetik kuvvet 20
elektron 14, 15, 19, 21, 22, 24, 25, 26, 27, 28, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 45, 48, 50, 51, 58, 65, 70, 74, 76, 77, 91, 96, 97, 98, 99, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 120, 122, 124, 127, 128, 129, 130, 131, 132, 133, 134, 135, 136, 137, 138, 143, 145, 146, 148, 149, 150, 154, 158, 159, 160, 161, 162, 165, 166
elektron-nötrino 105, 106, 127, 130, 131, 132, 133, 136, 137, 138, 145, 150, 165
$E = mc^2$ 22, 23, 61, 62, 63, 149
emulsiyon 15
enerjinin korunumu 22, 24, 29, 32, 39, 56
evrim 55, 56, 58, 67

Feinberg, G. 104
Fermi, Enrico 29, 30, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 50, 51, 66, 68, 70, 76, 88, 95, 100, 101, 103, 109, 164
Fermilab 112, 150, 151, 152
fermion 34
Fermi sabiti 38
floresans 17, 58
fosil 14
fotoçoğaltıcı tüp 120, 125, 128, 155
foton 33, 65, 66, 74, 101, 102, 103, 104, 105, 109
Fowler, Willy 72, 73, 75, 77, 78, 90
Fransa Bilimler Akademisi 15
Fuchs, Klaus 42, 43
füzyon 62, 63, 65, 67, 68, 70, 74, 81, 87, 114, 115, 117, 124, 139, 153, 168

GALLEX 118, 119, 125, 136
galyum 116, 117, 118, 119, 124
galyum dedektörü 116
gama ışını 17, 20, 21, 22, 23, 24, 51, 52, 53, 65, 67, 82, 101, 140, 146, 154
Garmine, Gordon 91
Garwin, Dick 108
Geiger, Hans 28
Gell-Mann, Murray 133
Goldhaber, Maurice 82, 83, 84, 90
Goodman, Maury 150
görelilik teorisi 61, 134, 168
Greenhouse Operasyonu 49
Gribov, Vladimir 130, 131, 146, 161
güçlü kuvvet 20, 21, 39, 98, 109
güneş ix, 13, 14, 16, 54, 55, 56, 57, 58, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 77, 78, 83, 87, 89, 90, 92, 93, 94, 95, 115, 116, 117, 119, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 129, 130, 131, 132, 133, 134, 135, 136, 137, 138, 139, 141, 142, 143, 144, 146, 152, 153, 154, 156, 159, 160, 163, 165, 166, 167, 168, 169
güneş nötrinosu ix, xi, 69, 70, 71, 73, 75, 78, 79, 81, 83, 84, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 95, 113, 116, 117, 119, 122, 124, 125, 127, 129, 130, 131, 133, 134, 136, 138, 139, 141, 152, 153, 154, 158, 160, 161, 163, 164, 165, 166
Güneş Sistemi 14, 55, 60, 67

Hahn, Otto 37
Hanford Mühendislik 52
Helios 61, 64
helyum 21, 46, 59, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 72, 74, 83, 87
helyum-3 66, 72, 74, 87
helyum-4 66, 72, 74, 87
helyum atomu 21
Hertz, Heinrich 19
hidrojen 41, 42, 62, 65, 87, 137, 168, 169
hidrojen atomu 41
hidrojen bombası 42
Homestake altın madeni 80, 85, 114, 119, 141, 143
Houtermans, Fritz 63
Hoyle, Fred 55, 77

IMB (Irvine, Michigan, Brookhaven) ekibi 120, 124, 128, 142, 143, 158

İkinci Dünya Savaşı 39, 49
İngiltere Bilim Derneği 19, 57
İvanenko, Dmitrij 22
Japonya 97, 100, 119, 128, 130, 136, 141, 142, 143, 148, 159, 160, 162
jeoloji 58, 168
Joliot-Curie, Irene 31, 42
Joliot, Frédéric 31, 32, 42, 66

Kamioka madeni 120, 122, 123, 128, 148
Kamiokande dedektörü 142
Kamiokande [Kamioka Nükleon Bozunması Deneyi] 123, 124, 125, 128, 142, 143, 150, 151
KamLAND (Kamioka Liquid Scintillator Nötrino Detector, Kamioka Sıvı Işıldayıcı Nötrino Dedektörü) 148
kinetik enerji 22, 23
klor 46, 47, 48, 49, 70, 71, 73, 81, 82, 86, 87, 88, 89, 91, 93, 115, 116, 117, 119, 130, 132, 138, 164, 165, 166
Koşiba, Masatoşi 159, 160, 161, 162, 163
kripton 46

kuantum 25, 31, 34, 35, 36, 77, 96, 104, 131, 132
kuantum elektrodinamiği teorisi 34, 35
kuantum mekaniği 31, 34, 36, 104, 131
kuark 111, 113
Kuzey Işıkları 73
Kuzey Kutbu 155
kütleçekimi 20, 22, 56, 98

Lederman, Leon 107, 108, 109, 110, 111, 112, 130, 158, 161, 166
Lee, T. D. 100, 102, 107, 108, 109, 110
Lodge, Oliver 19

Maclaurin, J. C. 19
Macmillan's Journal 57
Maki, Z. 130
Mallet, L. 121
Manhattan Projesi 42, 49
Marconi, Guglielmo 18, 19
Markov, Moisey 118
Mars 14, 156
McCarthy, Joe 43
McDonald, Art 73, 136
Meitner, Lise 28, 37
Merkür 57
meteor 56, 57
meteorit 56
MINOS (Main Injector Nötrino Oscillation Search, Ana Enjektör Nötrino Osilasyon Araştırması) 149, 151
Miheyev, Stanislav 134
Mottelson, Ben 81, 82, 89
MSW etkisi 134, 153
Munhofen, Blair 79, 80, 85
muon 96, 97, 98, 99, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 126, 127, 128, 129, 130, 131, 132, 133, 134, 135, 136, 137, 146, 150, 151, 152, 154, 155, 158, 159, 160, 161, 162, 165, 166
muon-nötrino 110, 127, 129, 130, 131, 132, 133, 134, 136, 150, 151, 160

Nakagawa 130
NASA 86
Nature 36, 40, 55
NESTOR 156
Newton, Isaac 22
Nobel Fizik Ödülü ix, xi, 25, 42, 43, 44, 47, 53, 81, 100, 101, 102, 110, 111, 112, 113, 121, 158, 159, 162, 163, 164, 165, 166, 167
"nötr akım" 111
nötrino astronomisi 119, 124, 139, 146, 157, 159, 169
nötrino osilasyonu 133, 134, 146, 150, 161, 165, 166, 167
nötron 21, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 41, 49, 51, 52, 53, 65, 66, 72, 74, 81, 96, 98, 111, 113, 135, 137, 144, 145, 168
nükleer enerji 58
nükleer fisyon 40, 41
nükleer fizik 31, 81, 83, 117, 118, 159
nükleer füzyon 68, 69, 70, 139, 168
nükleer reaksiyon 41, 48, 65, 87, 89, 92, 116, 169
nükleer reaktör 144, 146, 164

Oppenheimer, Robert 37, 43

parite ihlali 102, 103, 107
Pauli, Wolfgang 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 36, 37, 38, 39, 40, 53, 69, 102, 129, 157, 169
Peierls, Rudolf 38, 39, 44, 53, 68, 95
Perkins, Don xi, 121, 161

Perl, Martin 113
Physical Review 78, 83, 116, 163
Physics Letters 43
pion 96, 97, 98, 99, 101, 102, 103, 106, 107, 109, 110, 113, 126, 127, 150, 158
polonyum 18
Poltergeist Projesi 52, 53
Pontecorvo, Bruno xi, 41- 49, 53, 68, 70, 84, 86, 92, 94,-97, 101, 103-107, 109, 112, 113, 115, 118, 130, 131, 133, 134, 146, 161, 164, 165, 166, 167, 170
pozitron 31, 32, 48, 50, 51, 52, 53, 66, 67, 98, 102, 103, 112, 127, 128, 161
pozitronyum 50
pp zinciri 65, 67, 70, 72
Prentice, Andrew 54
proton 14, 21, 24, 25, 26, 27, 28, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 41, 48, 51, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 72, 74, 75, 78, 82, 87, 93, 96, 98, 102, 105, 106, 107, 110, 111, 112, 113, 115, 120, 121, 122, 135, 137, 141, 142, 145, 149, 150, 153, 162
proton-elektron kombinasyonu 26, 27

Rabi, Isadore 97
radyasyon 16, 17, 18, 20, 22, 24, 32, 35, 41, 46, 53, 96, 98, 100, 102, 121, 141, 155
radyoaktivite 14, 15, 18, 19, 22, 23, 26, 31, 41, 58, 59, 60, 61, 86, 122, 164, 169
radyokimya 47
radyum 18, 45, 59, 61
reaktör 48, 51, 52, 53, 70, 71, 75, 145, 147, 148, 158, 164, 165
Reines, Fred 49, 50, 51, 52, 53, 75, 94, 103, 120, 141, 146, 157, 158, 159, 161, 164, 165, 169, 170
röntgen 15, 16, 17, 19
Rusya Bilimler Akademisi 118
Rutherford, Ernest 18, 19, 20, 22, 24, 25, 26, 27, 28, 32, 58, 59, 60, 61, 62

SAGE (Soviet American Gallium Experiment) 118, 119, 125, 136
Sakata, S. 130
Salam, Abdus 121
Samanyolu 123, 141, 156
Schwartz, Mel 107, 109, 110, 111, 112, 130, 158, 161, 166
SLAC (Stanford Linear Accelerator Center, Stanford Lineer Hızlandırıcı Merkezi) 111
Smirnov, Aleksey 134
SNO dedektörü 135, 137
SNO deneyi 139, 164
SNO (Sudbury Nötrino Observatory, Sudbury Nötrino Gözlemevi) 73, 135, 136, 137, 138, 139, 153, 160, 164
SNU 86, 88, 89, 90, 114, 117, 125, 131, 164
solak spin 107
Solvay, Ernest 31, 33
Solvay Konferansları 31
Soudan madeni 150, 151
Soviet Journal of Physics 104
Sovyetler Birliği 44, 96, 106, 118, 166
Stalin Ödülü 43, 166
Steinberger, Jack xi, 99, 100, 101, 102, 108, 109, 110, 111, 112, 130, 158, 161, 166
Strasseman, Fritz 37
Sudbury Nötrino Gözlemevi 135
Sunshine madeni 80, 84, 85
SüperK 125, 128, 129, 134, 135, 136, 138, 139, 142, 146, 160, 162
süpernova 15, 123, 124, 125,

140, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 158, 159, 160, 168

tau 112, 113, 133, 135, 136, 137, 146, 151, 152, 159
tau-nötrino 112, 133, 152
tau parçacığı 113
termodinamiğin birinci kuralı 23
termodinamik 23, 56, 59
tersine beta bozunması 51
Thomson, J. J. 19, 58
Thomson, William (Lord Kelvin) 19, 57, 58, 59, 60, 169
Time 84, 85
Tomorrow's World 55
Türlerin Kökeni 55

uraninit 18
uranyum 15, 16, 17, 18, 20, 27, 37, 45, 59, 60
uranyum 235 (U-235) 27, 60
uranyum 238 (U-238) 27, 60
uranyum fisyonu 37
Uzay Çalışmaları Merkezi (New York) 82

Venüs 57
Viyana 25

Wallace, Alfred Russel 57
Waterstone, John 56, 57
W bozonu 104, 105
Weisacker, Carl von 64
Wells, H. G. 37
Wilson, Charles 20, 61
Wrubel, Marshall 76, 77

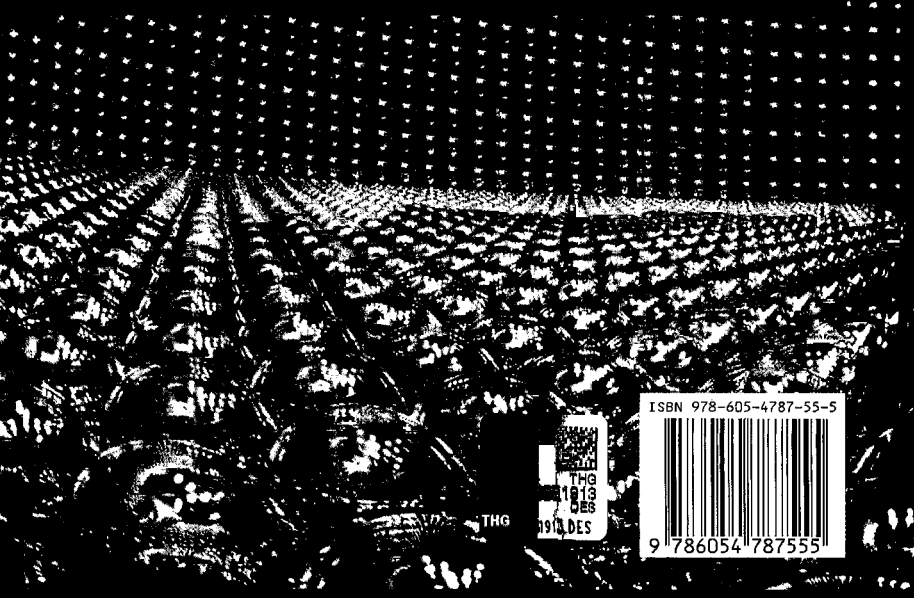
X ışınları 15, 16, 17, 19, 58, 140

Yang, C. N. 100, 102, 109
Yeni Zelanda 18, 19
yerçekimi 56, 98
zayıf etkileşim teorisi 76
zayıf kuvvet 20, 39, 98, 102, 104

Sisin içinden geçen kursun misali dünyanın içinden geçip gi[redacted]n as[redacted]. Nötrino[redacted]ırlar.

Nötrinol[redacted]on gibi dön[redacted] bunun doğru olmadığı anlaşıldı. Klasik radyoaktiviteyle ya da Güneş'in kalbinde cereyan eden füzyon olaylarında yayılan nötrinoların mini minnacık bir kütlesi var. Öyle küçük bir kütle ki bu, ne kadar olduğunu henüz hiç kimse ölçemedi, ama elimizde atomaltı boyutunda bir terazimiz olsaydı, bir elektronu dengelemek için en az on bin nötrino gerekirdi.

FRANK CLOSE (1945-), parçacık fizikçisi ve bilim yazarıdır. Oxford Üniversitesi'nde fizik profesörüdür. Ayrıca Oxford'daki Exeter Kolej'de öğretim üyesidir. Başlıca kitapları arasında şunlar sayılabilir: *Lucifer's Legacy: The Meaning of Asymmetry* (2000); *Particle Physics: A Very Short Introduction* (2004); *The Void* (2007); *Antimadde* (2009; Boğaziçi Üniversitesi Yayınevi, 2015); Nothing: *A Very Short Introduction* (2009); *The Infinity Puzzle* (2011).



ISBN 978-605-4787-55-5