

Yüz Yıllık Yolculuk Radyoaktivite

19. yüzyılın son çeyreği, yalnızca x-ışınlarının ve elektronun keşfi nedeniyle değil, fizikte çok daha devrimci bir dönüşüme yol açacak olan radyoaktivitenin keşfinden ötürü de fizik alanında bir dönüm noktasıdır. Bundan tam 100 yıl önce, 1 Mart 1896'da, Henri Becquerel'in keşfettiği radyoaktif ışımaya, peşinden gelecek bir çok araştırmacının önünü açmış ve bugün yaşadığımızla iç içe geçmiş teknolojik aygıtların temellerini atmıştı...

RÖNTGEN, "x-ışınları" ile ilgili makalesinin kopyalarını 1895 yılının sonlarında meslektaşlarına gönderdiğinde onun bu keşfi, aslen matematikçi olduğu halde fizik araştırmalarına da büyük ilgi gösteren Poincaré'yi makaleyi okuyan diğer bilim adamlarından daha çok heyecanlandırmıştı. Paris Bilimler Akademisi üyesi olan Poincaré, haftalık oturumlara katılmayı pek ihmal etmezdi. 20 Ocak 1896 tarihindeki oturumda, Röntgen'in gönderdiği ilk x-ışını fotoğraflarını gösteren Poincaré'yi dikkatle izleyen meslektaşlarından biri,

Henri Becquerel, ışınların tüpün hangi bölümünde ortaya çıktığını sormuştu. Poincaré, ışınların katot karşısındaki, camın floresanslandığı bölgeden salıveriliyormuş gibi görüldüğü karşılığını vermişti. Daha önce fosforesans ve floresans üzerine araştırmalar yapmış olan Becquerel o anda, x-ışınları ile floresanslama arasında bir ilişki olup olmadığını düşündü ve hemen ertesi gün bunu araştırmak üzere labora-

tuvarına koştu; Becquerel'in floresans nesnelerin x-ışınları salıp salmadığını sınımasıyla başlayan araştırması, birkaç hafta içinde onu "Radyoaktivite"yi (Radyoaktiflik=Radyoaktif Işıma) keşfine götüren bir dizi deneyin ilk adımları oldu.

Henri Antoine Becquerel (1852-1908), fizikçi bir ailenin üçüncü kuşak üyesiydi; Büyük baba Antonie Cesar Becquerel (1788-1878), baba Alexandre Edmond Becquerel (1820-1891), Henri Becquerel ve oğul Jean Becquerel (1878-1953); ailedeki dört kuşağın temsilcisi olan bu insanların hepsi, seçkin fizikçilerdi. 1828'den 1908'e dek, 80 yıl boyunca Paris Bilimler Akademisi'nde her zaman en az bir, bazen de iki Becquerel vardı ve neredeyse tüm ailede temel ilgi alanı floresanslama üzerine idi. Antoine Cesar Becquerel; Arago, Ampere, Poisson, Fourier, Cauchy, Fresnel ve daha birçok ünlü bilim adamını yetiştirmiş ya da konuk etmiş olan Politeknik Okulu'nun ilk mezunlarından ve önemli katkıların bulunduğu elektrik ve elektrokimya çalışmalarıyla tanınan iyi bir fizikçi idi. Bu konularda yayımlanmış 529 makalesinin yanı sıra, biri yedi ciltlik olmak üzere, altı adet ders kitabı bulu-

nuyordu. Edmond Becquerel de babasının izinden gitmişti. Işığın kimyasal etkisi üzerine çalışmalar yapan Edmond Becquerel, güneş tayfını ilk kez fotoğraflayan kişi oldu. Floresans konusunda da uzmandı ve özellikle uranyum elementi üzerinde çalışmıştı; bir floreskop (bazı maddelerin ışıkla aydınlatılmasından sonra da ışımaların sürmesi olgusunun ölçümlerinde kullanılan bir aygıt) yaparak değişik ışıklar altında uranyum floresansının süresini ve şiddetini ölçmüştü.

Fizikle içili dışlı yetişen Henri Becquerel de, 1872 yılında Politeknik Okulu'nda öğrenime başladı. 1876 yılında akademik yaşamına aynı okulda asistan olarak başlayan Henri Becquerel, 1895'te fizik profesörü oldu.

19. yüzyılın gözde fiziksel çalışma alanları, elektrik, manyetizma ve optik olaylarıydı. Becquerel'in ilk çalışmaları, Michael Faraday'ın gündeme getirdiği ve babası Edmond'un da katkıda bulunduğu, ışığın kutuplanması ve kutuplanma düzleminin manyetik alanların etkisi altında dönmesi üzerine idi. Daha sonra kızılötesi ışınlarla uyarılan çeşitli fosforesans kristallerin tayflarını incelemeye yöneldi. Babasının bu



Henri Becquerel

alandaki çalışmalarını genişleterek, bazı uranyum bileşiklerinin ışığı soğurmasını ile fosforesans yaymaları arasındaki ilişki üzerine araştırmalar yaptı.

1889 yılında Paris Bilimler Akademisi üyeliğine kabul edilen Becquerel, 1896 yılına gelindiğinde, artık başarılı ve saygın bir fizikçi olarak anılıyordu. Ancak o sıralar, henüz, gerçekleştirdiği çalışmalardan çok, fosforesans maddeler üzerindeki uzmanlığı, uranyum bileşiklerini iyi tanınması ve fotoğrafçılığı da içermek üzere, bütün laboratuvar tekniklerindeki genel yetkinliğiyle tanınıyordu.

Aslında bu öykü, Henri Becquerel'in Poincaré'den x-ışınlarının keşfini öğrendiğinde, neden bu kadar heyecanlandığını ve x-ışınları ile floresanslanma olgularının birbirleriyle ilişkisini düşündüğünü açıklıyor.

x-ışınlarının üzerlerine bir katot ışın demeti düşürüldüğünde, floresans ışına yayılıyordu. Becquerel'in aklına hemen şu soru gelmişti: x-ışını adı verilen bu görünmeyen ışınla, görünür ışık arasında temelde bir ilişki var mıydı ve ısıldayan bir madde, uyarılma sonucu x-ışını yayabilir miydi? Bunun üzerine, bir fotoğraf filmini ışık geçirmeyen siyah kağıtlara sarıp, üzerine floresans niteliği olan kristaller yerleştirerek uyarılmalarını gözlemek için birkaç gün güneş ışığında bıraktı. Ancak, Becquerel'in ilk deneyleri olumsuz sonuç verdi: Denediği floresanslı maddeler x-ışınları yaymamıştı. Bu arada Poincaré'nin bir makalesinde, floresansı yeterince şiddetli (yeşil) olan tüm cisimlerin görünür ışık ve x-ışınlarının ikisini birden yayıp yaymayacağını sorması Becquerel'e yeni bir fikir verdi ve deneylerine yeniden başladı. Bu kez, daha önce ba-

bası tarafından çalışılmış olan bir uranyum tuzunu, uranil potasyum sülfatı denedi ve buluşunu Bilimler Akademisi'nin 24 Şubat 1896 tarihli oturumunda rapor etti:

"Bir fotoğraf levhasını, bütün gün güneşe tutulmuş olmasına karşın lekelenmesine yol açmayacak kadar, kalın iki siyah kağıt ile kapladım. Kağıdın üzerine bir fosforesans katmanı yerleştirip, saatlerce güneşe tuttum. Fotoğraf levhasını banyo ettiğimde fosforesans maddenin silüetini negatif üzerinde siyah olarak gördüm... Aynı deney, güneş ışınlarınınca ısıtıldığında nereden çıkabilecek buharda meydana gelebilecek kimyasal etkilenme olasılığını önlemek amacıyla, fosforesans cisim ile kağıt arasına konmuş ince bir cam



Marie Skłodowska

levhayla da yinelenebilir. Öyleyse bu deneylerden, sözkonusu fosforesan cismin ışık geçirmeyen kağıda işleyen ışınlar yaydığı sonucunu çıkarabiliriz"

Uranyum bileşikleri floresanslandığında gerçekten de x-ışınları yayımlıyormuş gibi görünüyordu. Ancak, bir hafta sonraki (2 Mart 1896) Akademi toplantısına Becquerel daha pek çok şey öğrenmiş olarak gelecekti. Bu yeni gelişmelerin farkına varmasının nedeni, Paris'te havanın kapalı olmasıydı! Önceki deneyleri yinelemeye çalışmıştı ama havanın kapalı olması nedeniyle güneş ışığından pek yararlanamadı. Ancak sonuçlar şaşırtıcıydı:

"Güneş yine günlerce yüzünü göstermediğinden, görüntüleri çok zayıf bulacağımı umarak, Mart'ın 1'inde levhaları banyoladım. Beklenenin tersine, görüntüler oldukça net bir şekilde be-



Becquerel, laboratuvarında

lirdi. Hemen, etkinin karanlıkta da yürüyebileceğini düşündüm."

Becquerel, çok önemli bir şey keşfettiğinin çabucak farkına vardı. Güneş ışınlarının etkisi olmaksızın uranyum tuzu siyah kağıttan geçebilecek ışınlar yaymıştı. İşte rastlantının, şansın ve zekanın çok önemli olduğu tipik bir yaratıcılık anı: Becquerel'in Radyoaktivite'yi keşfinin kısa öyküsü. Ancak hemen söylemek gerekiyor ki, Becquerel, bu keşfin onurunu babası ve büyük babasıyla paylaşmak istemiştir. Henüz buluşunun ismini koymamıştı. O zamanlar yalnızca "Becquerel'in ışınları" olarak biliniyordu.

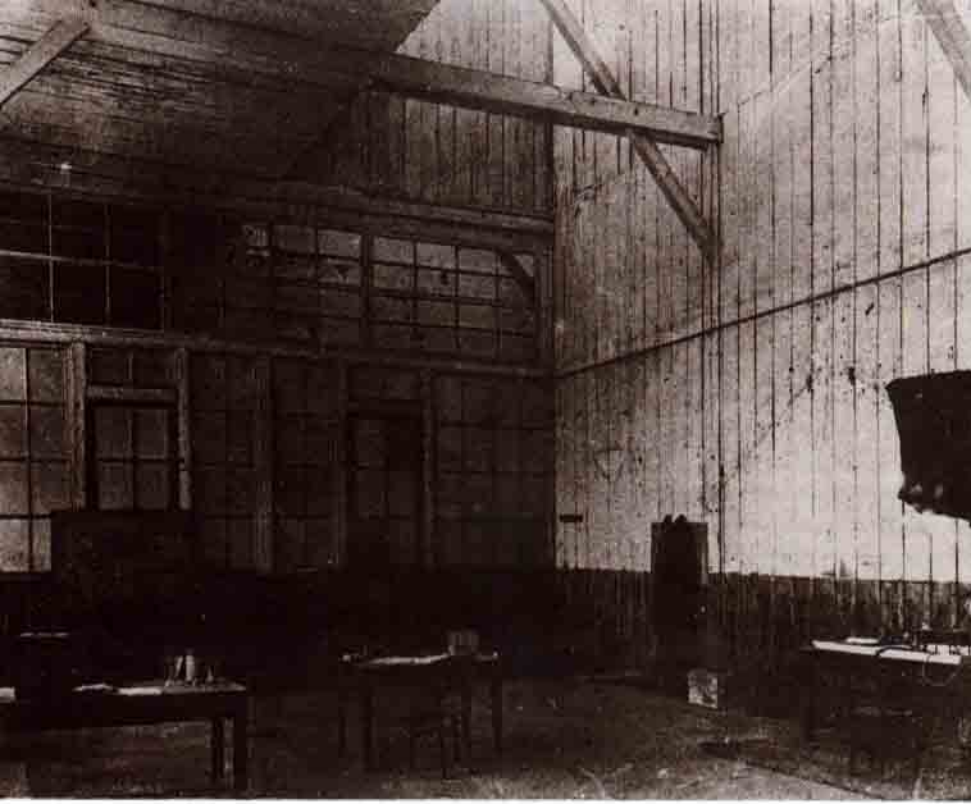
Öykünün bundan sonraki kısmında Pierre ve Maire Curie sahneye çıkar. Becquerel de o sıralar çalışmalarını sürdürmekle birlikte, kendini ışınlarına kaynak olan, en iyi bildiği madde olduğundan olsa gerek, uranyumla kısıtlamış görünmektedir (Yıllar sonra bu hatasını farkına varmış olsa bile!). Böylece ileri doğru büyük bir adımı atan Becquerel değil, Curie'ler olur...

Marie Skłodowska (Curie) (1867-1934), Polonya'nın Varşova kentinde doğmuştu. Annesi bir ilkökul öğretmeni, babası Vladislav Skłodowska ise St. Petersburg'da öğrenim görmüş kültürlü biriydi ve bir lisede matematik-fizik dersleri veriyordu. Marie, parlak öğrenim hayatını 16 yaşındayken tamamladı ve 1891 yılında fizik öğrenimi için Paris'e gitti. Marie'nin, o sıralar yoksul bir yaşam sürdürdüğü biliniyor. Ancak, neredeyse parasız ve aç bir halde olmasına rağmen deliler gibi çalışıyor ve araştırmalarını sürdürüyordu. Bu çalışmaları sayesinde kazandığı bazı burslarla ve özel dersler vererek geçimini sağlıyordu.

1894 yılında, o sıralar Paris'te bulunan Polonya'lı fizikçi Kovalsky aracılı-



Henri Poincaré



Yanda, Marie Curie'nin doktoraasına başladığı ve radyoaktivite ile ilgili deneylerini ilk gerçekleştirdiği, nemli ve kötü ısınan laboratuvarı görülüyor. Üstte ise, Marie Curie, çalışmalarında ona hep yardımcı olan eşi Pierre ile bir çalışma sırasında birlikte görülüyor.

ğıyla tanıştığı Pierre Curie (1859-1906) O'nun hayatını önemli ölçüde etkileyecektir. Hekim bir babanın ikinci oğlu Pierre'i kardeşi ile birlikte Piezo-elektrik etkiyi keşiflerinden tanıyoruz. Ancak Pierre Curie'nin fiziğe belki de en önemli katkılarında birisi, grup kavramını getirmesidir. Genel olarak Curie'nin ilk makaleleri Eugene Wigner'in daha sonraki çalışmalarına kaynaklık edecektir. 1894'ün başlarında Marie Sklodowska'yı tanıdığına, çoktan iyi bir bilimsel kariyere sahip olmuştur bile. 1895'de Pierre ve Marie evlendiler. Marie Curie, 1897 yılındaki doktora tezi olarak eşi Pierre'in önerisiyle "Becquerel Işınları" nı seçti. Marie, önce Becquerel'in deneylerini baştan alarak yineledi. Ancak bu deneyleri, Becquerel'in elektroskobu yerine, Pierre Curie'nin yaptığı elektrometre adlı aygıtı kullandı. Elektrometrenin en dikkate değer özelliği, temel parçalarından birinin Pierre ve Jacques Curie'nin keşfettikleri piezoelektrik bir kristal olan kuvars kristali dengeleme birimidir.

Uranyum tuzunun saldığı ışınlar, yalnızca fotoğraf filmini etkilemekle kalmıyor, havayı da iyonlaştırıyordu. Yani havayı oluşturan atomların bir kısmını "elektron-pozitif iyon" çifti haline getiriyordu. Curie, bu olguyu şöyle sezmişti: Hava normalde yalıtıcıdır, ancak içinde elektrik yüklü parçacıklar olduğunda, yani iyonlaştığında bir ölçüde iletken hale gelir. Örneğin, elektrik yüklü bir cisim normal havanın içinde elektrik yükünü, kaybetmeden

çok uzun süre saklar, ancak çevresindeki hava iyonlaşırsa cisim yükünü çabucak kaybedecektir ve cismin yükü de elektrometre ile ölçülebilir.

Marie Curie, elektrometreyi kullanarak Becquerel'in, uranyumun ışın şiddetinin bileşiklerdeki uranyum miktarıyla orantılı olup, kimyasal biçiminden

bağımsız olduğu bulgusunu doğruladı. Marie Curie, sonuç olarak Becquerel'in ışınlarının uranyum atomunun bir özelliği olduğu bulgusunu da onayladı. Daha sonra da, bilinen diğer elementleri denemeye karar verdi ve uranyum dışında yalnızca bir elementin, toryumun da benzer ışınları yaydığını buldu.

Radyasyonun Dünü Bugünü

Osman Kemal Kadiroğlu
Prof. Dr. H.Ü. Nükleer Enerji Mühendisliği Bölümü

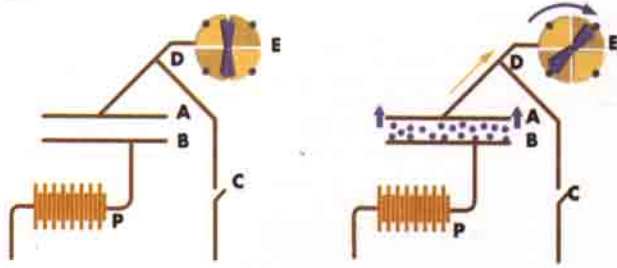
Bir asır önce bulunan radyoaktivite insan yaşamına o devirlerde epey kontrolsüz bir şekilde girmişti. Bulunuşundan kısa bir süre sonra tipta ve endüstride kullanılmaya başlanan radyumun etkileri kısa süre sonra ortaya çıkmaya başladı. İlk olarak saat kadrantlarına radyum süren işçi kızlarda böbrek sorunları ortaya çıktı, dişleri döküldü ve bir çoğu genç yaşta bilinmeyen nedenlerle öldüler. Daha sonraları bunun nedeninin akrep, yelkovan ve sayılar üzerine radyumlu boyayı sürülebilme için fırçaları dudakları ile ısıtıp düzeltmeleri olduğu bulundu. Ağız yolu ile alınan radyoaktif madde sindirim sisteminden kana geçmekte, oradan da kemiklere yerleşip kansere neden olmaktadır. Radyumlu boya kullanan işçilerin yanı sıra birçok kişi isteyerek veya doktor önerisi ile radyum veya radyumlu ilaçlar almışlardır. Bunun en ilginç, öğretici ve acıklı örneği belki de Eben M. Byers'dir.

Yale mezunu, zengin, yakışıklı ve spormen Byers, 1927 yılında yataktan düşme sonucu omuzunda ortaya çıkan bir ağrının geçmemesi üzerine, Pittsburgh'lu Charles Clinton Moyer adlı bir doktor tarafından önerilen Radithor adlı ilacı almaya başladı. Bu ilaç New Jersey'deki Bailey Radyum Laboratuvarında imal ediliyordu. Byers 1927 yılının Aralık ayından başlamak üzere günde birkaç şişe Radithor içerek dört yıl içinde 1000 ile 1500 şişe tüketti. Bu süre içinde yaklaşık binlerce röntgen filmi çekirmiş ve bir kezde alınabilecek ölümcül dozun üç mislinden fazlası kadar doz almış oldu.

Byers, Radithor'dan çok memnun kaldığını, gençleştiğini ve enerji dolduğunu birçok arkadaşına anlatmış, hatta yakın arkadaşlarına, sosyete güzellerine hediye şişeler verdiği gibi, pahalı yarış atlarına da bu ilaçtan içirmişti. 1930 yılında Byers'in üst çene kemiği geçirdiği birkaç ameliyat sonucu alınmış, atletik yapılı bu adamın kemikleri kibrit çöpü gibi kırılmaya başlamıştı. Aşırı kilo kaybı ile kırık kiloya düşmüş ve sonunda tanınmayacak bir halde 1931 yılında ölmüştü. Byers'in otopsisinde kemiklerinin eridiği ve radyum kullanan saat boya işçilerinkine benzer bir görünümü olduğu belirlenip ölüm nedeni radyum zehirlenmesi olarak saptanmıştı. Karanlık bir odada bir film üzerine konulan kemikleri, filmi etkileyecek ve resimlerini çıkartacak kadar aktifti.

Asrın başında radyum tedavide sık kullanılmaktaydı. Doğal maddelerden az miktarın vücuda verilmesi, güneş ışığı ve biraz sporun her hastalığa iyi geleceği düşünülüyordu. Avrupa'daki birçok kaplıca, radyoaktif suları olduğunu ilan ediyor ve insanlar akın akın şifa bulmaya bu kaplıcalara gidiyordu. Radyumlu ilaçlar kapışılıyordu. Radithor'un eski boş şişelerinin bugün bile tehlikeli düzeyde radyoaktif olduğu ölçülmüştür.

Radithor'un yapımcısı Boston'lu bir dolandıcıdır. Harvard Üniversitesi'nden ayrılmış fakat kendisini Harvard mezunu ve Viyana Üniversitesi'nden doktora olarak tanıtan bu kişi, biraz kovboy filmlerindeki gezici eczacılara benzemektedir. Bailey seksüel uyancılar ve afrodisyaklarla çok ilgilenmiş ve iktidarsızlık için ilaç patentleri almıştır. O devirlerde doğada bulunan maddelerden yapılanları ilaç sayılmaması nedeni ile tıbbi denetim dışında imalat ve satış yapabilmişti. 1920'lerde New York kentinde kurduğu Radyum Kimyagerleri firması, Dax adlı öksürük, Clax adlı grip ve Arium adlı ya-



Elektrometrenin şematik çizimi. B plakasının üzerine havayı iletken hale getiren bir madde konduğunda A plakası yüklenir ve E elektrometresi, kondansatörün içinden geçen elektrik miktarını ölçer.



Ernst Rutherford (sağda) ve Hans Geiger, 1908'de Manchester Üniversite'sindeki laboratuvarlarında α -parçacıkları ile deneyleri sırasında α ve β parçacıklarının sezilmesinde kullanılan Geiger Sayacı görülmüyor.

Uranyumun kendiliğinden ışın yayarak tek element olmadığını keşfinden sonra Madam Curie, bu olgu için yeni bir isim önerdi: Radyoaktivite! Marie'yi büyük buluşuna götürecek deha kıvılcımı işte bu noktada belirdi.

Deneylerini uranyum ve toryumla sınırlı tutmak yerine, çeşitli maden filizlerini de ele almaya karar verdi. Müze koleksiyonundaki birçok mineralden edinip işe girişti. Beklediği gibi uranyum ve toryum içeren mineraller radyoaktifti. Ancak deneylerden şaşırtıcı sonuçlar çıktı: Bazı filizler, içlerindeki uranyum ya da toryum miktarına göre olmaları gerekenden çok daha fazla radyoaktif idiler. "Bunun nedeni ne olabilir?"

sorusuna doğru yanıtı bulmakta gecikmedi. Bu filizlerde uranyum ya da toryumdan çok daha güçlü ve o zamana dek bilinmeyen başka bir elementin var olması gerekiyordu. Marie ve Pierre bu elementi bulmak üzere uzun ve yorucu günler geçirdiler. Sonunda 1898 Temmuzunda bu elementi bulduklarını açıkladılar. Bu yeni elementte, Marie'nin anayurdunun ismi vardı: Polonyum. Bu elementin adı, sadece ilginç bir gözlem değil, aynı zamanda bir polonyum, zamanla kimyasal olarak ayrışarak yok oluyor. Bu süreçte, madde tabii ki yok olmaz; sadece (Rutherford'un dediği gibi) başka bir elemente dönüşüyordu. Bu süreçte, polonyum, zamanla kimyasal olarak ayrışarak yok oluyor. Bu süreçte, madde tabii ki yok olmaz; sadece (Rutherford'un dediği gibi) başka bir elemente dönüşüyordu. Bu süreçte, polonyum, zamanla kimyasal olarak ayrışarak yok oluyor. Bu süreçte, madde tabii ki yok olmaz; sadece (Rutherford'un dediği gibi) başka bir elemente dönüşüyordu. Bu süreçte, polonyum, zamanla kimyasal olarak ayrışarak yok oluyor. Bu süreçte, madde tabii ki yok olmaz; sadece (Rutherford'un dediği gibi) başka bir elemente dönüşüyordu.



vaş metabolizmalar için radyoaktif ilaçları piyasaya sürmüş ve hatırı sayılır bir servet sahibi olmuştu. Bailey, bu konularda yalnız değildi. Amerikan Endokrin Laboratuvarı tiroid bezini canlandıracak, radyoendokranatör adını verdiği altın kaplanmış radyum içeren boyun askıları imal edip, bunları 1000 dolara, daha sonra da piyasanın doyması üzerine 150 dolara satmıştı.

Bailey, 1925 yılında kurduğu şirketle Radithor'u kapı komşusu Amerikan Radyum Laboratuvarı'ndan toptan satın alıp, arı suda çözüp şişeleyerek %500 kâr ile piyasaya sürdü. İlaç reçetelerine yazan doktorlara %17 gibi bir komisyon vermedi de ihmal etmedi, 1925 ile 1930 arasında 15 gramlık 400 000 şişe satarak bir servet sahibi oldu. Byers'in ölümü ile yasaklanan ilaçlar yerine, bu kez de Bioray adını verdiği "minyatür güneş" olarak tanımladığı radyoaktif kağıt ağırlığı, Adrenoray adlı radyoaktif pantolon kemeri tokası ve Thoronator adını verdiği yeniden doldurulabilir ev veya işyeri için radyoaktif kaplıca suyu üretici imal edip sattı. Daha sonra savaşa katıldı ve İtalyan orduda kullanıldı. Bir süre IBM'de çalışan Bailey, 1949 yılında 64 yaşında kanserden ölene dek radyasyonun zararlı olmadığına inandı. Öldüğünde geriye 4000 dolartık bir miras bıraktı.

Bir asır önce ortaya çıkan radyum ve sorunlarına yarım asır önce çözümler bulunmuş ve toplum radyasyona karşı güven altına alınmıştır. Bugün, bu tür uygulamalara rastlamak olanak dışıdır. İlk kez 1925 yılında Birinci Uluslararası Radyolojik Kongresi toplanmış ve Radyasyon Birimleri ve Ölçümleri Komitesi oluşturulmuştur. Bu komite radyasyon birimlerini incelemekle görevlendirilmiştir.

1928'de ikinci kez toplanan Kongrede Uluslararası Radyolojik Korunma Komitesi (IRPC) doğmuştur. 1929 yılında ABD'de x-ışınları ve Radyum Korunması Danışma Komitesi kurulmuştur. 1934 yılında radyasyon standartları kabul edilmiş ve 1946 yılında ABD'de Radyasyon Korunması ve Ölçüm Ulusal Komitesi (NCRP) kurulmuştur.

1955 yılında ABD'de Atomik İşinlerin Biyolojik Etkileri Komitesi (BEAR) ve Birleşmiş Milletler'de Atomik İşinlerin Etkileri Bilimsel Komitesi (UNSCEAR) ve Sağlık Fiziyi Cemiyeti kurulmuştur. 1957 yılında ABD Atom Enerjisi Komisyonu Radyasyon Korunma standartlarını (10CFR20) yayınlamış, iki yıl sonra da Federal Radyasyon Konseyi (FRC) kurulmuştur. 1964 yılında Sağlık Fiziyi Cemiyetleri Uluslararası Radyasyon Korunma Birliği kuruldu. 1970 yılında ABD'de Çevre Bakanlığı FRC'nin görevlerini yüklenmiş ve Ulusal Bilimler Akademisi ve Ulusal Araştırma Konseyi ortaklaşa İyonlaştırıcı Işınının Biyolojik Etkileri Komitesi (BEIR) kuruldu.

Sürekli çalışan bu topluluklar, toplum için tehlikeli olmayacak radyasyon dozları için standartlar ve sınırlamalar getirdiler. 1934 yılında günde 0.1 R (Röntgen) ve haftalık ortalama 0.5 R olan tüm vücut dozu 1949'da 0.3 rem'e ve 1958'de 0.1 rem'e indirildi. Yıllık alınabilecek doz ise N kişinin yaşı olarak 5(N-18) rem olarak belirlendi. Halk için yıllık müsaade edilebilen doz ise, 170 mrem olarak saptandı. Bugün, İyonlaştırıcı ışınım ile çalışan kişilerin gerçekte aldıkları dozların müsaade edilebilen dozların kesirleri olduğu rahatlıkla söylenebilir. 1 mrem doz alan bir kişinin aldığı risk, bir sigaradan üç nefes çekmek veya sokağı üç kez karşıdan karşıya geçmekte aldığı risk kadardır.

diğer elementin hızı, her radyoaktif element için farklıdır. Belirli bir element için bu hızı ifade edebilmek amacıyla Rutherford 1904'de "yarı-ömür" kavramını ortaya atacaktır.

Yarı-ömür, bir radyoaktif elementin başka elementlere dönüşerek, yarısının yok olması için gerekli süre olarak tanımlanır. Örneğin, bir radyoaktif elementin yarı-ömürü 30 yıl ise, bu elementin 100 gramı 30 yıl sonunda 50 grama, ikinci 30 yılın sonunda 25 grama, üçüncü 30 yılın sonunda 12.5 grama düşecek ve böyle sürüp gidecektir. Radyoaktif elementlerin yarı-ömürleri çok farklı değerlerde olabilir. Bilinen radyoaktif elementlerin yarı-ömürleri 10^{-7} saniye ile 10^{16} yıl arasında değişir. Örneğin, 238 atom ağırlıklı uranyumun (Uranyum-238) yarı-ömürü 4.5 milyar yıl iken, Radon-222'inki 4 gün, Plonyum-212'inki ise saniyenin on milyonda üçü kadardır. Bugün doğada rastlayabildiğimiz radyoaktif elementler ya yarı-ömürleri çok uzun olan ve bu nedenle de sürekli azalmakla birlikte hâlâ varlıklarını koruyan elementlerdir, ya da radyoaktif elementlerin dönüşmesi ile oluşan ve bir yandan ortaya çıkıp bir yandan yok olmakta olan elementlerdir. Uranyum ve toryum içeren doğal radyoaktif elementlerin bozunum süreçleri, nükleer fizik çalışmalarının doğuşunda önemli yer tutar. Bu bozunumların yarı-ömürlerinin dünyanın yaşı mertebesinde olması bu elementlerin, maddenin ortaya çıkışının ilk dönemlerinden kaldıklarını gösterir. Daha uzun ömürlü çekirdekler çok



Temel Uranyum ve Radyum kaynağı olması nedeniyle çok değerli olan pekli minerali.

Bazı Önemli Radyoaktif Elementler

Element	Yarı-ömür	Özellikleri ve kullanım alanları
Uranyum-238	4.5 Milyar yıl	Plutonyum üretimi için kaynak element
Uranyum-235	0.7 Milyar yıl	Nükleer yakıt olarak ve atom enerjisi için kullanılan bölünebilir izotop
Plutonyum-239	24 000 yıl	Uranyum-235'e benzer özellikler taşıyan ve yapay olarak üretilen element. Atom bombası yapımında ve hızlı nükleer reaktör yakıtı olarak kullanılıyor.
Radyum-226	1622 yıl	Kötü huylu tümörlerin ışın tedavisinde kullanılıyor
Kobalt-60	5.3 yıl	İşin tedavisinde radyumun yerine kullanılabilen element. Kalınlık ayarı ve besin sterilizasyonunda kullanılıyor
Demir-55	2.9 yıl	Demir içeren minerallerin korozyon çalışmaları
Karbon-14	5500 yıl	Kimyasal-biyolojik araştırmalar ve radyoaktif yaş belirleme
Fosfor-32	14.3 gün	Tıpta ve ziraat araştırmalarında kullanılıyor

uzun zaman bozunup kayboldukları için bugün, doğada sadece geriye kalan uzun ömürlü bozunumları gözlüyoruz. Uranyum-235 ve Uranyum-238 çekirdeklerinin yarı-ömürleri çok uzun olmasaydı, ne nükleer reaktörler ne de nükleer silahlar olacaktı!

Curie'ler radyoaktif elementlerin saldırdığı ışınların üç çeşit olduğunu da gözlemişlerdi. Birinci tür ışınım, artı yüklü parçacıklardan oluşuyordu (buna Rutherford sonradan alfa (α) ışınını adını verecektir. Alfa parçacığının kütlesi 4 ve elektrik yükü artı 2 olan helyum çekirdeği olduğunu da Rutherford 1909'da gösterecektir). Yine Rutherford tarafından beta (β) ışınları adı verilecek olan ikinci tür ışınım, eksi yüklü parçacıklardan oluşuyordu (bu parçacıkların da elektronlar olduğu sonradan anlaşılacaktır). Fransız fizikçisi Paul Villard tarafından incelenecek ve gama (γ) ışınları adını alacak olan üçüncü tür ışınımın ise elektromanyetik dalgalar olduğu 1914'de be-

lirlenecektir. Gama (γ) ışınlarının x ışınlarından tek farkı dalga boylarının daha kısa olmasıdır.

Curie'ler, polonyum elementini keşiflerinden sonra, kimyasal özelliklerine bakılarak periyodik tabloda, kalisyum, stronsiyum ve baryumun bulunduğu grupta olması gerektiği anlaşılan ve çok daha güçlü bir radyoaktif öge (belki de onları bugünkü ünlerine kavuşturacak) olan yeni bir element daha buldular ve elemente "radyum" adını verdiler. Böylece bilinen radyoaktif elementlerin sayısı dörde yükseldi: uranyum, toryum, polonyum ve radyum. Bir yıl sonra, 1899'da, kimyacı Andre Debierne beşinci olarak "Aktinyum"u bulacaktır.

Buraya kadar anlatılan, radyoaktivitenin bulunuşunun kısa bir öyküsü olarak düşünülebilir. Fizik dünyası artık günümüze dek pek çok yeni araştırmaya kaynak olacak, yepyeni teknolojileri insanlığa sunacak ve neredeyse hayatımızın önemli bir bölümüne im-

zasını atacak devrimsel bir gelişmeyi elde etmiştir.

Öykünün devamı çok uzun süreceğinden, yalnızca birkaç önemli adımı anlatmak yeterli olacaktır. Curie'ler, çalışmalarını daha sonra radyoaktivite üzerine yoğunlaştırdılar ve yıllarca sürececek çalışmaları boyunca 8 ton maden filizini elden geçirdiler. Başlangıçta, radyoaktif ışınların canlılar üzerindeki etkileri hakkında hiç bir şey bilinmiyordu. Deneyler ilerledikçe Marie ve Pierre'nin ellerinde yanıklar belirmeye ve parmak derileri dökülmeye başladı. Pierre bu etkiyi incelemek amacıyla, kendi kolunda bir noktaya güçlü radyoaktif ışınım uyguladı ve bulgularını bilim dünyasına açıkladı. Hekimlerle birlikte çalışarak, bu ışınların tümörlerin yok edilmesinde kullanılmasının yolunu açtı. (Günümüzde ışın tedavisi ya da Curie tedavi olarak bilinir.)

Radyoaktiviteğin tıpta uygulama olanağının ortaya çıkması üzerine, radyum birden büyük değer kazandı. Curie'ler radyumun elde edilmesinin patentini almaları ve bir anda milyon olmaları önerilerini sürekli olarak geri çevirdiler. Bunu bilimsel anlayışa tümüyle aykırı buluyorlardı. Onlara göre, bir bilim adamının buluşlarından maddi çıkar sağlamaya hakkı olamazdı. Çünkü, bilim ve onun sağladığı olanaklar bütün insanlığın malıydı.

Marie Curie, yılların çabası ile elde edebildikleri 1 gram radyumu da Radyum Enstitüsü'ne bağışlamıştı. Daha sonraları, kendisiyle görüşebilmeyi başaran Amerikalı bir gazetecinin "En çok istediğiniz şey nedir?" sorusuna Marie Curie'nin yanıtı şu olmuştur: "Araştırmalarımı yürütmek için 1 gram radyumun olsun isterdim. Ama bunu alamam. Radyum benim keseme göre değil, çok pahalı bir şey!"

1903 Nobel Fizik Ödülü, radyoaktiviteğin bulucuları olarak Henri Becquerel ile Pierre ve Marie Curie'ye veril-

Radyoaktivite: Işınım, Aktivite, Yarı-ömür

Maddeyi oluşturan atomların çoğu kararlıdır ve milyarlarca yıl boyunca hiç değişmeden kalabilirler. Öte yandan az sayıda atom, çekirdeklerindeki eşit sayıda olması gereken proton ya da nötronlarından birinin fazla sayıda olması nedeniyle kararsız yapıdadır. Kendiliklerinden farklı ışınlar yayarak başka atomlara dönüşme eğilimi gösteren bu atomlara radyoaktif atom adı verilir.

Radyoaktif atomların yaydığı ışınlar temelde üç çeşittir: Aslında helyum çekirdekleri olan alfa ışını, hızlı elektronlar oldukları sonradan



Doğal radyoaktif ışınların doğrultulana dik bir elektrik ya da manyetik alan uygulanırsa, α ve β ışınları saparken, γ ışınları etkilenmez. Bundan da, α ışınlarının artı, β ışınlarının eksi yüklü ve γ ışınlarının yüksüz olduğu ortaya çıkar.

dan anlaşılan beta ışınları ve x-ışınlarına benzeyen ama daha yüksek enerjiye sahip elektromanyetik ışınlar olan gama ışınları.

Bütün bu ışınlar, canlı organizmalara nüfuz ettiklerinde yıkıcı etki yaparlar. Canlı organizmadaki molekülleri, özellikle de DNA'ları parçalara ayırırlar. Karşı karşıya kalınan dozun çok güçlü ya da çok uzun süreli olması, bu yıpranmanın kansere dönüşmesine yol açabilir. Diğer yandan, yeryüzünden ve uzaydan kaynaklanan zayıf doğal radyoaktivitenin canlılar üzerinde zararlı bir etkisi olmadığı söylenebilir.

Bir elementin radyoaktivitesi, üç değişkene bağlı olarak ifade edilir: Işınımın türü (alfa, beta ve gama); aktivitesi, yani bir saniyede bozulan çekirdek sayısı; yarı ömrü, yani radyoaktif çekirdeklerin yansının bozunduğu süre. Örneğin plutonyum-239'un yarı ömrü 24 100 yıldır: bunun anlamı 24 100 yılda radyoaktivitesinin yarı yarıya azalmış olacağıdır. Radyoaktif yarı-ömürler, çekirdeklere göre farklılık gösterir; bu süre bir saniye de olabilir, bir milyar yıl da.

di. Stockholm Bilimler Akademisi'nde yaptığı ödül konuşmasında Pierre Curie, radyumun bulunuşunun fizikte temel ilkeleri değiştirdiğini, radyoaktif ışınlarla ortaya çıkan büyük enerjinin kaynağı konusunda yeni kuramların ortaya atılmasının kaçınılmaz olduğunu belirtiyor ve büyük bir ileri görüşlülük olduğunu, bütün dünyanın 1945'te ilk atom bombası atıldığında çok iyi anlayacağı şu sözlerle bitiriyor: "Radyumun canı ellerde çok tehlikeli olabileceğini düşünebiliriz. 'Doğanın sırlarını çözmek insanlığın yararına mıdır, acaba bu sırlardan yararlanabilecek kadar olgun muyuz, edindiğimiz bilgiler insanlık için zararlı olmayacak mı?' diye sormak hakkımızdır. Nobel'in, kendi buluşları bu bakımdan örnek olarak anılabilir. Yüksek güçlü patlayıcılar insanlığa çok önemli işler başarma olanağı vermiştir. Ama aynı zamanda bunlar, halkları savaşa sürükleyen caniler elinde korkunç birer yok etme aracıdır.

Ben, Nobel gibi, yeni buluşların insanlığa kötülükten çok, iyilik getireceğine inananlardanım."

Ancak, 1906 yılında Curie'lerin bilim açısından önemli birliktelikleri çok acı bir biçimde noktalandı. Pierre Curie 1906 yılının 19 Nisan'ında karısından karşıya geçerken bir at arabasının altında kalarak öldü. O güne kadar birlikte yürüttükleri bilimsel araştırmaları, aynı bitmek bilmez enerjiyle, Marie tek başına yürütmek zorunda kalmış ve 1934 yılına yani ölümüne değin bugünkü hak ettiği yerini dolduracak çalışmalarını başarıyla sürdürmüştür. (Marie Curie, saf metal halinde radyumu elde etmeyi başarması nedeniyle, 1911 Nobel Kimya Ödülü'nü de alarak iki kez Nobel Ödülü alan ilk bilim adamı ünvanını elde etmiştir.

Becquerel ve Curie'lerin buluşları, fizikte atom ve çekirdek fiziği gibi yepyeni ve çok önemli bir dalın ortaya çıkmasının temellerini atmıştı. Ağır elementlerde gözlenen radyoaktifliğin incelenmesi, maddenin yapısına ilişkin görüşlerde köklü değişikliklere yol açtı. 20. yüzyılın başında maddenin atomlardan oluştuğu fikri genel olarak kabul edilmişti, ancak atomla-

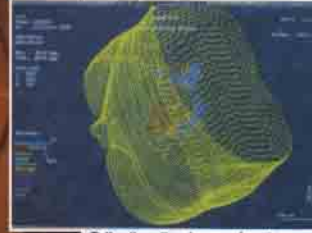


rın iç yapısı hakkındaki bilgiler tahminden öteye gitmiyordu.

Ernst Rutherford 1897'de, Cavendish laboratuvarlarında uranyum tarafından yayılan ışınların iki türünü olduğunu fark etmiş ve bunlar α (alfa) ve β (beta) olarak adlandırmıştı. Rutherford, 1905 yılında bu parçacıkların özelliklerini araştırırken α ışınlarının ince bir metal tabakadan geçerken saptığını gözledi. Rutherford bu sapmanın pozitif yüklü alfa ışınlarının metal tabakadaki atomların içindeki pozitif yüklerden ileri geleceğini düşündü ve bu düşünce atomun içindeki ağır çekirdeğin keşfine yol açtı. Böylece, 1911'de atom kütesinin hemen hemen tümünün, hacimce atomun çok küçük bir bölümünü oluşturan çekirdekte yer aldığı ortaya kondu. Atomlar, atomun hemen hemen tüm kütesinin toplandığı çok küçük bir çekirdek ile bunun çevresinde dolağan elektronlardan oluşuyordu. Atom ağırlığı en küçük element olan hidrojenin çekirdeği en yalın çekirdekti. Bu tür çekirdeğin elektrik yükü elektronunkine eşit ama elektron gibi eksi değil artıydı. Rutherford, hidrojen çekirdeğini oluşturan bu artı yüklü parçacığa proton adını verdi. Elektron ve protonların varlıklarının sezilmesinde kullanılan en önemli aygıt, "Geiger Sayacı"dır. Geiger sayacı, kapılı borudan oluşur. Borunun içine yerleştirilmiş iki elektroda yüksek elektrik gerilimi uygulanır. Boruya bir parçacık girerse, boru içindeki gazın bir atomunu iyonlaştırır, bu iyon elektrik alanının etkisiyle bir elektroda doğru hızla giderken yolu üstündeki başka atomları iyonlaştırır. Bu sayede elektrodlar arasında çok kısa süreli bir elektrik akımı oluşur. Bu akım, uygun aygıtlarla "tıkırdama" biçiminde sese dönüştürülür ve boruya giren her parçacık için bir "tık" sesi duyulur. Radyoaktif ışınının özelliklerinin dikkatli gözlemlerinin bir sonucu olarak nükleer atom ve dolayısıyla nükle-

Radyoaktivite'nin ve atomun yapısının anlaşılmasında önemli tarihler

Araştırmacı	Yıl	Olay
Wilhelm Conrad Röntgen	1895	X-ışınlarının keşfi
Henri Becquerel	1896	Uranyumun radyoaktifliğinin keşfi
Joseph John Thomson	1897	Elektronun keşfi
Marie-Pierre Curie	1898	Radyum ve polonyum elementlerinin radyoaktifliğinin keşfi
Ernst Rutherford	1899	Toryumdan yayılan radyoaktif gazın keşfi
Pierre Curie	1900	Radyumdan yayılan iki tür (alfa ve beta) ışınının sınıflandırılması
Paul Ulrich Villard	1900	Gama ışınının keşfi
André Louis Debierne	1900	Radyoaktif Aktinyum elementinin keşfi
William Crookes	1900	Radyoaktif toryum-234 elementinin keşfi
Max Planck	1901	Elektromanyetik ışının paketçikler halinde yayıldığı önermesi
Alber Einstein	1905	Kütle-enerji eşdeğerliği ($E=mc^2$)
Egon Ritter von Schweidler	1905	Radyoaktif bozunumun istatistik yasalarının formüle edilmesi
Otto Hahn	1905	Radyoaktif toryum-228 elementinin keşfi
Norman Robert Campbell A. Wood	1906	Doğal potasyum ve rubidyumun radyoaktifliğinin keşfi
Johannes Wilhelm Geiger	1908	Alfa parçacıklarının sayılması deneyleri
Frederick Soddy	1910	Radyoaktif izotoplar fikrinin ortaya atılması
Ernst Rutherford	1911	Artı yüklü çekirdek fikrinin ortaya atılması
Niels Bohr	1913	Kuantum mekaniksel atom modelinin geliştirilmesi
Otto Hahn-Lise Meitner	1918	Protaktinyumun keşfi
Ernst Rutherford	1919	İlk yapay çekirdek dönüşümü
Francis William Aston	1919	Kütle spektrometresinin keşfi ve izotopların kütlelerinin ölçümü
Louis Victor de Broglie	1924	Dalga-parçacık ikiliği fikrinin ortaya atılması
Werner Heisenberg Erwin Schrödinger Paul Adrien Maurice Dirac Wolfgang Pauli Max Born ve diğerleri	1924-1927	Kuantum mekaniğinin formülasyonu
Wolfgang Pauli	1931	Beta bozunumunda nötrino varsayımı
Harold Urey	1932	Ağır hidrojenin (döteryum) keşfi
James Chadwick	1932	Nötronun keşfi
Carl David Anderson	1933	Pozitronun keşfi
Friedench-Iréne Joliot Curie	1934	Yapay radyoaktivitenin ve pozitronun beta bozunumunun keşfi
Enrico Fermi	1934	Beta bozunum teorisinin formülasyonu
...



Günümüzde radyoterapi için kullanılan aygıtlar, hassas bölgelerdeki tümörlerin ışınlanmasını olanaklı kılıyorlar.

leer fizik kavramları gelişmeye başlamıştı. Bundan sonra da, gelişmeler bir-biri ardına geldi.

Radyoaktivite ile ilgili olarak bir sonraki adım 1913 yılında izotop (yani, aynı elementin farklı atom numarasına sahip elementlerinin olması) kavramının bulunması oldu. Bunu, altı yıl sonra atom çekirdeğinin bir başka çekirdeğe dönüştürülmesi deneyleri izledi.

1934 yılında ise Pierre ve Marie'nin kızı ve damadı olan Irene ile Friederich Joliot Curie "yapay radyoaktivite"yi yani, doğal olarak radyoaktif olmayan bir maddenin radyoaktif bir maddeye dönüştürülebileceğini buldular.

Kısa sürede de çekirdek dönüşümünün, ilk kez 1932 yılında James Chadwick tarafından gözlenen (keşfedilen), nötronlar tarafından gerçekleştirileceği bulundu ve hidrojenin uranyuma kadar bütün bilinen elementlerin radyoaktif izotopları elde edildi.

1939 yılında Otto Hahn'ın çalışmaları sonucu ortaya çıkan nötron etkisiyle çekirdeğin bölünmesinin (filyon) radyoaktif izotoplar elde etmek için en verimli süreç olduğu ortaya çıktı. Bunu 1941'de kendiliğinden çekirdek filyonunun keşfi izledi. Bu süreçte kararsız bazı ağır çekirdekler dışarıda enerjiye gereksinim olmaksızın hemen hemen eşit iki parçaya bölünmektedirler.



Friederich ve Irene Joliot Curie

Atomik çekirdeğin yapısına ilişkin modern kuramların gelişimi, işte bu buluşlar sonucunda mümkün olmuş ve çekirdek enerjisinin büyük ölçeklerde açığa çıkarılması böylece gerçekleştirilmiştir.

Radyoaktivite, bulunışundan bugüne dek süren 100 yıllık yolculuğu boyunca çok önemli keşiflere ve ardından gelen teknolojik gelişmelere tanık oldu. Bugün, hiç kuşku yok ki nükleer fizik, nükleer enerji ve nükleer reaktörlerden söz edebiliyorsak bunu, başta Becquerel ve Curie'ler olmak üzere hayatları pahasına bile olsa çalışmalarını azimle sürdüren bilim adamlarına borçluyuz.

Radyoaktivite, nükleer enerji çalışmalarının en önemli alanlarından biri olmasının yanı sıra bilimin diğer alanlarında, tıpta ve günlük yaşamımızın pek çok alanında uygulama alanına sahip. Örneğin yarı-ömrü 8 gün olan yapay iyot izotopu (iyot-131) tiroid bozukluklarının, tiroid kanserlerinin, böbrek ve karaciğer hastalıklarının tanısında başarıyla kullanılmaktadır. Bunun yanında pek çok yapay izotop da tıpta büyük olanaklar sağlamaktadır.

1923'de Rutherford'un öğrencisi olan Macar fizikçi George von Hevesy radyoaktifliğin biyokimya alanında kullanılmasını başlatmıştı. Canlı organizmada bir radyoaktif elementin varlığını sezmek üzere organizmayı izlemek için verilen ve izleyici (tracer) adı verilen elementlerin kullanımı ortaya çıktı. İzleyiciler, özellikle tarımda, kimyasal gübrelerin en uygun bileşiminin ve kullanım biçiminin bulunmasında büyük önem taşıyor. Örneğin, kimyasal gübredeki fosfora izleyici olarak katılan çok küçük miktardaki radyoaktif fosfor-32 aracılığıyla gübrenin bitki içindeki yayılımı kesin bir biçimde izlenebilmektedir.

İzleyicilerin yanı sıra, radyoaktifliğin ışınım etkilerinden yararlanan uygulamaların başında daha önce söz ettiğimiz ışın (Curie) tedavisi geliyor. Tümörlerin yok edilmesinde bugün en çok kullanılan radyoaktif izotop Kobalt-60'tır. Işıma etkisinin diğer kullanım alanları arasında besin maddelerinin, ilaçların ve aşıların sterilizasyonunu sayabiliriz. Bu sterilizasyon işlemi, insanlar için tehlike doğurmayacak biçimde yapılmaktadır. Işınım etkisi, ayrıca böceklerin ve bitki zararlılarının yok edilmesinde de kullanılıyor.

Radyoaktif ışınımın (özellikle beta ve gama ışınlarının) maddeden geçebilme özelliğinden de pek çok endüstriyel uygulamada yararlanılıyor. Örnek olarak, metal ve plastik levhaların ve parçaların kalınlıklarının ölçülmesi, yoğunluklarının bulunması, iç yapılarının incelenmesi verilebilir. Bununla birlikte, petrol aramalarında açılan kuyu içine önce gama ışını sonra da nötron salınan izotopların indirilmesi ve ışınların uygun noktalardan sezilip sonuçlarının karşılaştırılmasıyla yeraltının jeolojik yapısı tam olarak saptanabilmekte ve su ile petrol birbirinden ayırt edilebilmektedir.

Radyoaktif elementlerin ve izotopların insanlığa sunduğu olanakları yalnızca sıralamak bile sayfalar alır. Bu nedenle, burada ancak birkaç örnek vermekle yetindik. Yine de, son olarak radyoaktif izotopların gelecek vaat eden bir uygulama alanından söz etmekte yarar var. Bu, çok uzun ömürlü küçük elektrik enerjisi kaynakları yapımıdır. Örneğin, Plutonyum-238'in sürekli olarak yaydığı ısı, termoelektrik bir eklem aracılığıyla elektrığe çevrilebilir. Ya da Stronsiyum-90'ın yaydığı beta ışınları bir yarı-iletken eklem yardımıyla elektrığe çevrilebilir.

Yüzyılımıza damgasını vuran radyoaktivitenin geleceği de bir o kadar parlak görünüyor...

İlhami Bugdaycı

Konu danışmanları:

Tekin Dereli

Prof. Dr., ODTÜ Fizik Bölümü

Osman Kadiroğlu

Prof. Dr., İ.Ü. Nükleer Enerji Mühendisliği Bölümü

Kaynaklar:

Comper, G., "Matter", *EyeWitness Science*, The Science Museum, Londra 1992
Göncü, G., *Her Aramızda Olalım*, Friederich Joliot Curie'nin Yaşam Öyküsü
Macklin, R.M., "The Great Radium Scandal", *Scientific American*, Ağustos 1993
"Marie Curie" Özel Sayısı, *Les Chaires de Science @ Vie*, Aralık 1994
Seğdi, E., *Yüksek Enerji Kaynakları*, Çev. Çağrı Tunçay, İstanbul 1995
The New Casson Encyclopedia, Radioactivity, 1993