

FİZ444 RADYASYON FİZİĞİ

DERS NOTLARI

Bu ders notları, 2009 yılından beri BEÜ Fizik Bölümü web sayfasında güncellenmekte olup başkaları tarafından değiştirilemez, bir kısmı veya tamamı kopyalanıp internet ortamında veya başka bir yayın organında yayınlanamaz!

Prof. Dr. Hüseyin AYTEKİN
Bülent Ecevit Üniversitesi
Fen-Ed. Fak. Fizik Bölümü

İÇERİK

- TEMEL KAVRAMLAR
- RADYOAKTİVİTE
- RADYASYONUN MADDE İLE ETKİLEŞİMİ
- NÜKLEER RADYASYON ÖLÇÜMÜ

BÖLÜM I

TEMEL KAVRAMLAR

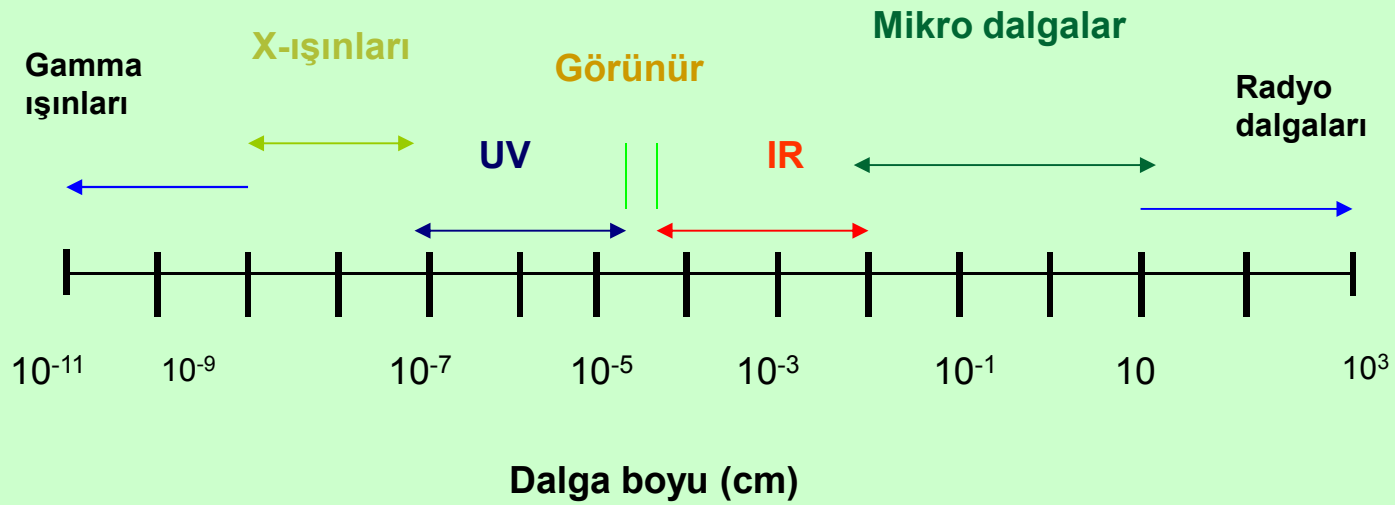
- Radyasyon, yüksek hızdaki parçacıkların veya elektromanyetik dalgaların enerjisi olarak tanımlanır. Radyasyon, bir kaynaktan çıkar ve dalga ya da parçacık şeklinde yayılır.
- Radyasyon, genelde, yayılım için maddesel ortam gerektirmeyen elektromanyetik dalgalar için kullanılır. Ses ve su dalgaları gibi yayılım için ortam gerektiren dalgalar radyasyon formunda dikkate alınmaz.
- Radyasyon, bir kaynaktan çıkan ve dışa doğru her doğrultuda yayılan dalgaların bir fenomendir.
- Radyasyon boşlukta yayılırken enerjisi korunur, nokta bir kaynaktan yayılan radyasyonun şiddeti ters kare kanununa uyar. Işık ampulü flamanı, lazer ışını veya mikro dalga anteni gibi noktasal olmayan kaynaklar durumunda ters kare yasası bozulabilir.

Elektromanyetik Radyasyon (Işın)

- Elektromanyetik radyasyon (EMR), atomlardan çeşitli şekillerde ortaya çıkan enerjilerin yayılma şekilleridir. EMR, elektrik ve manyetik dalgaların birleşimi olup yayılmak için maddesel ortam gerektirmezler. Boşlukta ışık hızı ile yayılırlar. Maddesel ortamdan geçerken ortama enerji aktarırlar ve hızları azalır.
- EM dalgalar, kuantum mekaniğinde dalga yapısında olduğu gibi parçacık yapısına da sahiptirler. Bu parçacıklar foton olarak adlandırılırlar. Foton enerjisi $E = h\nu$ ile verilir. Burada ν frekans olup $\nu = c / \lambda$ dır.
- EMR, radyo ve mikrodalga sinyalleri, infrared (termal radyasyon-oda sıcaklığındaki kaynaklardan yayılan), görünür ve ultraviyole, ve X-ışınları ve gamma ışınlarını içerir. Bunlar şekil 1.1 de de görüleceği üzere birinden diğerine geçildiğinde frekans açısından fark ederler.

E.M DALGA SPEKTRUMU

- E.M. Dalga Spektrumumu Şekil 1.1 de görülmektedir.



Şekil 1.1 Elektromagnetik dalga spektrumu

İYONİZE VE İYONİZE OLMAYAN RADYASYONLAR

- Radyasyon enerjisi dikkate alındığında, atomu iyonlaştırıp iyonlaştırmadığına göre, iyonize ve iyonize olmayan radyasyonlar olarak sınıflandırılırlar. İyonizasyon, elektronların atomdan uzaklaştırılması olayı olup genellikle dış yörüngelerdeki elektronlar atomdan uzaklaştırılır.
- Atomik kaynaklı X-ışınları ve çekirdek kaynaklı gamma ışınları, ve parçacık tipindeki alfa , beta, nötron ve protonlar iyonize radyasyonu oluştururlar.
- Hem iyonize ve hem de iyonize olmayan radyasyonlar organizmalar için zararlı olabilirler ve doğal çevrede değişikliğe neden olurlar.
- Genel olarak, iyonize radyasyon, depoladığı birim enerji başına, iyonize olmayan radyasyona nazaran canlı organizmalar için daha zararlıdır.

İYONİZE VE İYONİZE OLMAYAN RADYASYONLAR

- Radyasyonun meydana getirdiği fiziksel etki iyonlaşma ve uyarılma şeklinde olabilir. İyonlaşma neticesinde kimyasal yapısı bozulan atom ve moleküller diğer hücresel yapılarla reaksiyona girerek serbest radikallerin ortaya çıkmasına neden olurlar. Böylece biyolojik yapıda değişme olur ve genetik yapı olan kromozomlarda hasarlar olur. Bu da hücreyi ölüme götüren süreci başlatır. Bu etki nedeniyle, iyonize radyasyonlar sürekli hücre çoğalması ile kendini gösteren kanser hastalığının tedavisinde kullanılmaktadır
- İyonize olmayan radyasyonlar da, organizmalar içinde termal enerji depoladıkları için zararlıdır. Örnek olarak mikrodalga fırınları verilebilir.
- Ultraviyole radyasyon, bazı bakımlardan iyonize ve iyonize olmayan radyasyon özelliği taşır. Bu radyasyon, biyolojik sistem moleküllerine güneş yanıkları gibi ısı etkileri dışında fazla zarar vermezler. Bunlar kimyasal bağların değişmesinden ileri gelir.

İyonize radyasyonun tıbbi teşhis ve tedavide kullanımı

- İyonize radyasyon, tıbbi uygulamalarda, görüntü elde etmede (radyoloji) ve radyasyonla hücre ve tümörleri yok etmede (radyoloji) kullanılmaktadır. Bu iki özelliği dolayısıyla radyasyon teşhis ve tedavide önemli rol oynar.
- İyonlaştırıcı radyasyonların meydana getirdikleri iyonizasyon, yaşayan organizmalarda çok önemli hasarlar meydana getirdiklerinden **tıpta** da çok yaygın bir şekilde **hastalıkların teşhis ve tedavisinde** kullanılmaktadır.
- ^{131}I izotopu (ağız ve damar yoluyla) tiroit görüntülemeye ve böbrek izlemeye kullanılır. $^{99\text{m}}\text{Tc}$ izotopu ise beyin taramada kullanılır; beyinde tümör varsa bu element orada yoğunlaşır, yani orada aktivite artar.
- X-ışını ya da vücuda zerk edilen radyoizotopla bilgisayarlı görüntüleme **CAT** ve **PET** teknikleri kullanılmaktadır.

İyonize radyasyonun tıbbi teşhis ve tedavide kullanımı

- Tıbbi tedavide nükleer radyasyonların kullanılmasının amacı, kanser tümörü veya süper aktif tiroit bezi gibi vücuttaki istenmeyen veya iyi çalışmayan dokuların yok edilmesidir. Bu etki, nükleer radyasyonların iyonlaştırma yeteneğinden kaynaklanmaktadır. Bu da şu şekilde olur:
- i. Gelen radyasyonlar madde moleküllerindeki atomları iyonlaştırırlar (10^{-16} s de). Bu daha çok su moleküllerini (**duyarlı moleküller**) iyonlaştırma şeklinde olur (Çünkü insan vücudunun \sim %80 i sudur):
 - $H_2O \rightarrow H_2O^{++} + e^-$
 - ii. İyonlaşmış moleküller de kimyasal reaksiyonlarla diğer uyarılmış molekülleri veya serbest kökleri meydana getirirler (10^{-15} ile 10^{-3} s aralığında): $H_2O^{++} + e^- \rightarrow H_2O^+$
 - $H_2O^+ \rightarrow H^+ + OH$ ve $H_2O^- \rightarrow OH^- + H$
 - OH ve H serbest kökleri hidrojen içeren organik maddelerde su ve hidrojen gazı çıkışıyla birlikte R serbest kökünü açığa çıkarır.
 - iii. Bu serbest kökler birleşerek moleküler düzeyde karmaşık biyolojik yapılar oluşturabilirler ve onların biyolojik fonksiyonlarını değiştirirler.

Radyasyonun endüstri ve tarımda kullanımı

- **Endüstriyel uygulamalar:** X ve gamma ışınlarından yararlanarak röntgenleri çekilen endüstriyel ürünlerin (borular, buhar kazanları, her türlü makine aksamları v.s) herhangi bir hata içerip içermediğinin saptanması. X ve gamma ışınları ile yapılan bu iki çalışmandan her ikisine birden radyografi adı verilir.
- Bazı endüstriyel uygulamalarda nötron da kullanılır. Örneğin gama yayınlayıcısı olan Co-60 izotopu, maden aramaları, sondajlar, sebze ve meyvelerin sterilizasyonu gibi alanlarda kullanılır.
- Radyasyonun, akarsularda debi ölçümü (radyoaktif gaz izleyici ile), barajlarda su kaçaklarının tespiti gibi endüstriyel uygulamaları da vardır.
- **Tarımdaki uygulamalar:** Radyasyondan yararlanarak mutasyona uğratılan tohumlar daha verimli olmaktadır. Tohumda meydana gelen mutasyon soya geçmektedir.

Radyasyonun zararlı etkileri

- Radyasyonun insan sağlığı üzerindeki zararlı etkileri, radyasyon yanıkları, radyasyon hastalıkları, doğal ömür süresinin kısalması, kanser ve kalıtsal bozukluklar şeklinde sıralanabilir.
- Çok yüksek miktardaki radyasyon dozuna maruz kalınmada ise ölümler bile olabilir.
- *Becquerel* ve *Curieler* radyoaktif maddelerle çalıştıklarından ciddi şekilde radyasyondan zarar görmüşlerdir.
- 1905 yılında aşırı derecede radyasyona maruz kalmanın kansere neden olduğu bilimsel olarak ispatlanmıştır.

Genetik bozukluk: 1920 de böcekler üzerinde yapılan çalışmalar radyasyonun genetik bozukluklara neden olduğunu göstermiştir. Bu gerçeği ortaya çıkaran *Herman Müler* Nobel barış ödülü kazanmıştır.

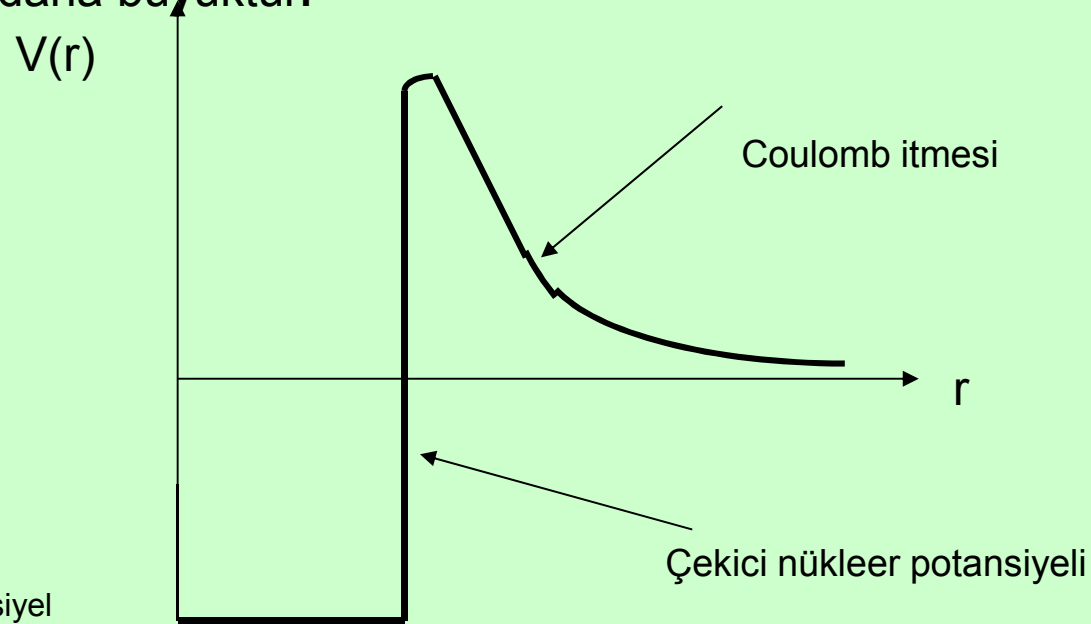
Radyasyonun fiziksel etkileri: **Uyarılma ve iyonlaşma**

- Yörüngesel bir elektrona transfer edilen enerji, elektronun enerji seviyesini aşarsa, elektron daha yüksek enerjili bir düzeye çıkar. Bu durumda elektron *uyarılmıştır* denir.
- Eğer, elektrona yeteri kadar enerji transferi yapılırsa elektron tamamen çekirdek etkisinden kurtulur ve uzaklaşır. Bu durumda atom *iyonlaşmıştır* denir.
- Atomun yörüngesel elektronları için enerji seviyesi değişiminin olduğu bazı olaylar görünür ve UV bölgesinde EMR yayınlanmasına neden olur. İyonizasyona yetecek kadar enerji olursa bu X-ışınlarına atfedilir.
- Atomdaki elektronların sahip olduğu kesikli enerji düzeyleri, çekirdekteki nükleonlar için de söz konusudur. Bu bakımdan çekirdeğin yapısından kısaca bahsedelim.

ÇEKİRDEK KUVVETLERİ

Proton ve nötronlar çekirdek içinde, Coulomb itmesinin üstesinden gelen nükleer kuvvetlerle bağlanırlar. Bu kuvvetler yaklaşık 10^{-15} m mesafede etkilidirler.

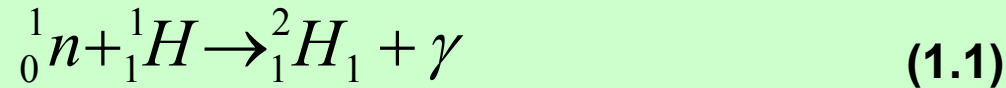
- Nükleonların çekirdeğe bağlanma enerjisi MeV mertebesinde olup bu da elektronların atoma bağlanma enerjisinin 1000 katı büyüklüğündedir. Buna göre çekirdek reaksiyonlarında gerekli enerji kimyasal reaksiyonlara nazaran 10^6 kat daha büyüktür.



Şekil 1.2 Nükleer potansiyel

NÜKLEER BAĞLANMA ENERJİSİ

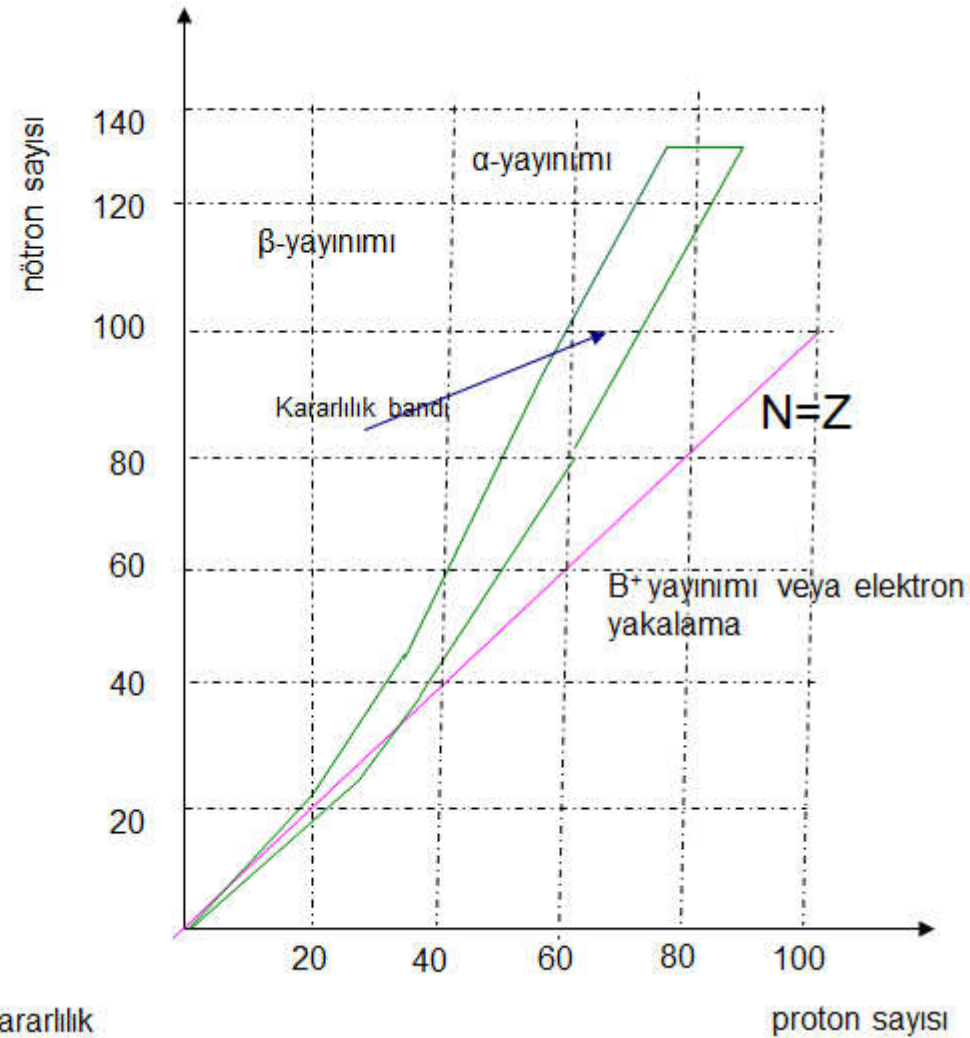
- Çekirdekdeki bireysel nükleonların kütlelerinin toplamı çekirdek kütesinden küçüktür. Kütle farkı $E=mc^2$ bağıntısı gereğince bağlanma enerjisine dönüşmektedir.
- ^{12}C atomunun kütesinin 12 de biri atomik kütle birimi (u) olarak tanımlanır. Bir atomik kütle birimi de 931.5 MeV'lik enerjiye karşılık gelir.
- Nükleer reaksiyonlarda kütle kaybı nükleer enerji olarak açığa çıkar. Dolayısıyla meydana gelen ürünlerin bağlanma enerjisi artmaktadır.
- Tipik bir nükleer reaksiyon ve açığa çıkan nükleer enerji aşağıda görülmektedir:



NÜKLEER KARARLILIK

- Bu reaksiyonda açığa çıkan enerji reaksiyon sonucu yayınlanan foton tarafından taşınmakta olup 2.224 MeV değerindedir. Bu değer de ürünün (*döteronun*) bağlanma enerjisidir.
- Çekici özellikteki nükleer kuvvetler p-p, n-n, veya n-p arasında aynı özelliktedir.
- Bir çekirdekte, bu kuvvetler nükleonları birbirine çekerken protonlar da bir birbirlerini Coulomb kuvvetiyle iterler. Bir çekirdekte Coulomb itmesi nükleer kuvveti aşarsa bu çekirdek *kararlıdır*.
- Hafif çekirdekler $N=Z$ (kararlılık doğrusu) olduğunda daha kararlıdırlar. Ağır çekirdekler $N>Z$ olduğunda daha kararlıdırlar. İlave Coulomb itmesine karşı koyabilmek için daha çok sayıda nötrona ihtiyaç vardır. $Z>83$ olan çekirdekler kararsızdırlar.

KARARLILIK EĞRİSİ



PERYODİK CETVEL VE RADYOAKTİF BOZUNUM

- Periyodik tablo, elementleri fiziksel ve kimyasal özelliklerine göre düzenler ve gruplara ayırır. Çekirdeklerin haritası, belli bir çekirdeğin nükleer özelliklerini gösterecek şekilde düzenlenebilmektedir. Bir çekirdek kütle ve atom numarasıyla belirtilir.
- *Radyoaktif bozunum*, bir çekirdeğin daha kararlı olabilmek amacıyla kütle ve enerjisini kaybetmesi olayıdır. *Radyonüklit* kelimesi de bir atomun radyoaktif olduğunu belirtmede kullanılır.
- Yaygın bozunum tipleri aşağıdaki şekilde sıralanabilir:
 - – Alfa bozunumu
 - – Beta bozunumu
 - – Pozitron bozunumu
 - – Elektron yakalama
 - – Gama yayını

Radyasyon Kaynakları

- Radyasyon kaynakları, doğal ve yapay olmak üzere, iki sınıfa ayrılabilir. Doğal radyasyon kaynaklarına örnek olarak, yerkabuğunda bulunan **Th-232**, **U-238** ve **K-40** gibi radyoaktif elementlerle **H-3** ve **C-14** gibi kozmik kökenli dış radyonüklitler ve insan vücudunda doğuştan bulunan **C-14** , **K-40** ve **Ra-226** gibi iç radyoaktif elementler verilebilir.
- Yapay radyasyon, insan aktiviteleri sonucu çevremize ilave olan ^{90}Sr , ^{99}Tc , ^{131}I , ^{134}Cs , ^{137}Cs gibi radyoaktif elementlerden ileri gelir. Nükleer silah testleri ve nükleer santral kazaları gibi aktivitelerle doğal radyasyon düzeylerinde artışlar olmuştur.
- Doğal kaynaklı radyasyonlar herkesi etkilediği halde, yapay kaynaklı radyasyonlar belli zamanlarda ve sınırlı sayıdaki kişileri etkiler.

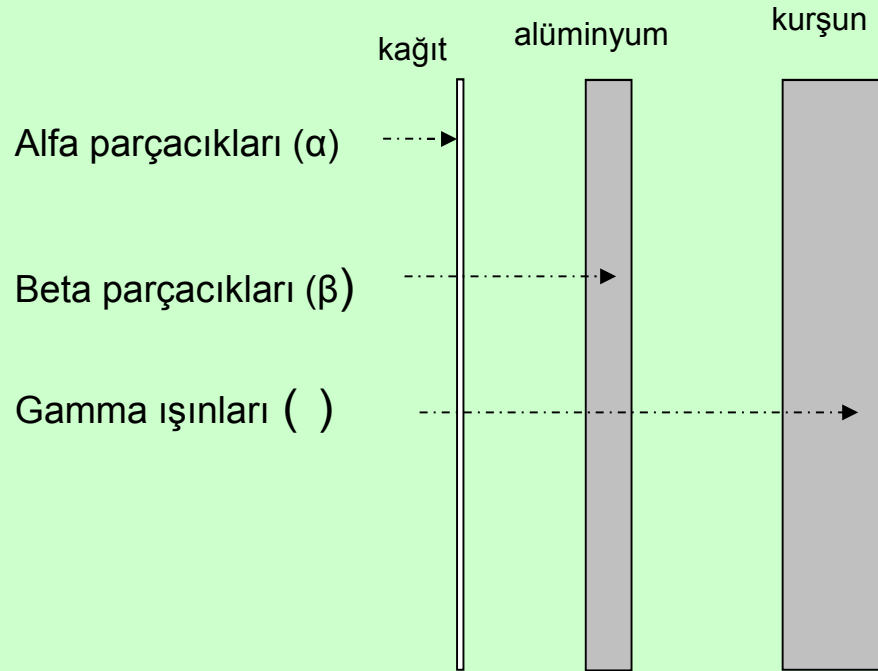
BÖLÜM 2

RADYOAKTİVİTE

2.1 GİRİŞ

- Radyoaktiflikten yayınlanan ışınlar, alfa (α) beta (β) ve gamma (γ) olmak üzere üç ayrı tipte sınıflandırılabilir.
- α -parçacıkları, büyük kütleleri nedeniyle kısa mesafeler kat edebilirler fakat durdurulmadan önce birçok iyonlaşmaya neden olurlar. Ölü derilerden geçemezler ince bir kağıt levha ile durdurulabilirler. Bu yüzden harici radyasyon hasarı yapamazlar.
- β -parçacıkları, enerjilerine bağlı olarak farklı maddelerde farklı derinliklere nüfuz ederler. Örneğin, alüminyumdan 3 mm kadar ilerleyebilirler. Bunların çoğu deriyi geçemezler fakat yüksek enerjili olanları geçebilir.
- γ -ışınları ise bir kurşun levhaya birkaç santimetre nüfuz edebilmektedir

RADYOAKTİF İŞINLARIN MADDEYE NÜFUZU

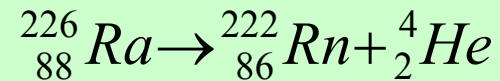


Şekil 2.1. α , β ve γ 'ların maddeye nüfuz yeteneklerinin temsili gösterimi

RADYOAKTİF BOZUNUM TÜRLERİ

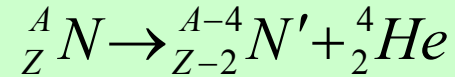
2.2.1. Alfa Bozunumu

- Bir çekirdek, α -parçacığı (${}^4_2\text{He}$ çekirdeği) yayınladığında kalan çekirdek aslından farklıdır. Bu durumda çekirdek iki proton ve iki nötronunu kaybeder.
- Örneğin, ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ bir alfa yayımlayıcısıdır. $Z=82-2=86$ ve $A=226-4=222$ olan bir çekirdeğe dönüşür. $Z=86$ olan çekirdek radondur (${}^{222}\text{Rn}$). Böylece radyum bir alfa parçacığı yayınlayarak radona dönüşür:



ALFA BOZUNUMU

- Alfa bozunumu ile açığa çıkan ${}_{88}^{226}\text{Ra}$ ana çekirdeği ${}_{86}^{222}\text{Rn}$ dan farklıdır. Bir elementin bu şekilde diğerine dönüşmesi olayına transmutasyon denir. Buna göre alfa bozunumu sembolik olarak şu şekilde gösterilir:



- Burada N ana, N' ürün, Z ve A ana çekirdeğin atom ve kütle numarasını temsil etmektedir.
- Alfa bozunumu, güçlü kuvvetlerin büyük çekirdekleri bir arada tutmasından ileri gelmektedir. α -parçacığı çekirdeğin bozunumu esnasında çekirdek içinde yaratılmaktadır.

ALFA BOZUNUMU

- Büyük çekirdekler için büyük Z değeri, itici kuvvetin daha büyük olacağı anlamına gelir (Coulomb Kuvveti) ve bu kuvvet bütün protonlar arasında etkilidir. Güçlü nükleer kuvvet sadece komşu nükleonlar arasında etkin olduğundan nükleonları bir arada tutmak bakımından zayıf kalır. $Z > 82$ çekirdekleri alfa bozunmaya meyillidir.
- Kararsızlığı kütle terimleriyle anlayabiliriz. Ana çekirdeğin kütlesi, ürün çekirdeğin kütlesi ile α parçacığının kütlesi toplamından daha küçüktür. Kütle farkı, kinetik enerji olarak ortaya çıkar ve bu kinetik enerji α -parçacığı ve geri tepen çekirdek tarafından taşınır.

ALFA BOZUNUMU

- Toplam enerji, bozunma enerjisi olarak bilinen Q ile ifade edilir. Enerjinin korunumundan aşağıdaki ifadeler yazılabilir:

$$M_A c^2 = M_{\bar{U}} c^2 + m_{\alpha} c^2 + Q$$

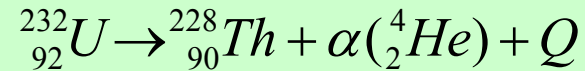
$$Q = M_A c^2 - (M_{\bar{U}} + m_{\alpha}) c^2$$

- Burada M_A , $M_{\bar{U}}$ ve m_{α} sırasıyla ana, ürün ve α -parçacıklarının kütesidir. Eğer ana çekirdek, ürün çekirdek ile α -parçacığının kütleleri toplamından küçükse ($Q < 0$) enerji korunamayacağı için bozunma olmaz.
- Aşağıda ^{232}U çekirdeğinin alfa bozunumuna ilişkin olarak bir örnek verilmektedir.

ALFA BOZUNUMU ENERJİSİ

Örnek 2-1: ^{232}U çekirdeğinin α -bozunumunda açığa çıkan enerjiyi bulunuz.

Çözüm:



- $M_i = 232.031334\text{u}$
 $M_s = 228.02873\text{u} + 4.002603\text{u} = 232.031334\text{u}.$
- Kütle kaybı,
 $\Delta m = 232.037146\text{u} - 232.031334\text{u} = 0.005812\text{u}.$

$1\text{u} = 931.5\text{ MeV}$ olup açığa çıkan enerji,

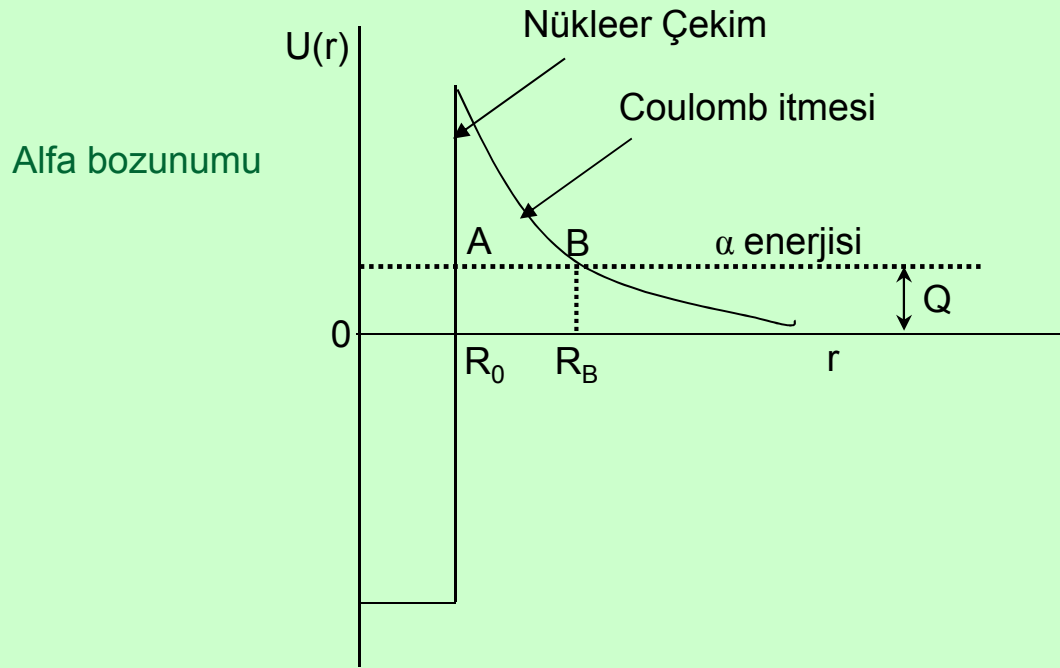
$$Q = (0.005812\text{u})(931.5\text{MeV/u}) = 5.4\text{ MeV dir.}$$

GERİ TEPME ENERJİSİ

- Bu problemde açığa çıkan enerji, ürün çekirdek ve α -parçacığının kinetik enerjisi olarak görünür. Momentumun korunumundan α -parçacığının kinetik enerjisi yaklaşık olarak 5.3 MeV olarak elde edilir. Buna göre, ürün çekirdeğin geri tepmesi, yayınlanan α -parçacığınıniki ile zıt yönlüdür ve geri tepme enerjisi 0.1 MeV' dir.

ALFA BOZUNUMU MEKANİZMASI

- Evrenin ilk oluşmasından hemen sonra oluşan radyoaktif çekirdekler çok önceden bozunmuş olduğundan ana çekirdek bulunmaz. Bozunmayı, içinde belli bir süre α -parçacığının var olduğu ve etrafında hareket ettiği düşünülen bir çekirdek modeli ile anlayabiliriz.
- Alfa parçacığı tarafından görülen potansiyel enerji, Şekil 2.2 de görüldüğü gibidir. Potansiyel enerji kuyusu (yaklaşık kare kuyu) kısa menzilli nükleer kuvveti temsil eder.



Şekil 2.2 alfa parçacığı ve ürün çekirdek için potansiyel enerji ve alfa parçacığının tünelleme ile Coulomb bariyerinden kaçışı.

Nükleer yarıçap R_0 ötesinde, Coulomb itmesi baskın olur (çünkü nükleer kuvvet sıfıra düşer) ve Coulomb potansiyelinin karakteristik $1/r$ bağımlılığını görürüz. Çekirdek içinde tuzaklanan α -parçacığının potansiyel kuyusu duvarları arasında ileri geri gidip geldiği düşünülebilir.

ALFA BOZUNUMU MEKANİZMASI

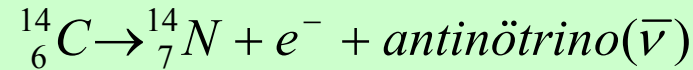
- Eğer parçacığı klasik fizik tarafından yönetiliyorsa çekirdekten çıkamaz (Şekil 2.2 de noktalı çizgi). Fakat kuantum mekaniğine göre, α -parçacığının Coulomb bariyerini A dan B ye tünelleme olasılığı vardır.
- Bariyerin yükseklik ve genişliği çekirdeğin bozunma hızını etkiler. Bu bariyerden dolayı kararsız çekirdeğin yarı-ömrü mikro saniyeden 10^{10} yıla kadar uzar. Şekil 2.2 de Q-değeri, α -parçacığı çekirdekten çok uzak olduğu zamanki toplam kinetik enerjiyi temsil eder.
- Çekirdeklerinin neden bu dört bileşenli α -parçacığını yaydığı ve neden dört ayrı bileşeni yaymadığı düşünülebilir. Bunun yanıtı, α -parçacığının çok sıkı bağlı olması ve bunun için de kütlesinin dört ayrı parçacığın kütleleri toplamından küçük olmasıdır.

DUMAN DEDEKTÖRÜ

- Nükleer fiziğin geniş bir uygulaması, evlerde, bayağı bir duman dedektörünün kullanılmasıdır. Dedektörün en yaygın tipi yaklaşık olarak 0.2 mg AmO_2 formunda radyoaktif Amerikanyum izotopu olan içerenidir.
- Radyasyonun azot ve oksijen moleküllerini havada iki zıt plaka arasında iyonlaştırması iletkenliğe ve kararlı bir akıma neden olur.
- Eğer duman içeri girerse, radyasyon, hava moleküllerinden çok duman molekülleri tarafından soğurulur ve böylece akım azalır. Akım düşmesi elektronik olarak dedekte edilir ve alarm çalar.
- Bozulmamış bir Amerikanyum duman dedektöründen kaçan radyasyon dozu, doğal geri plandaki radyoaktiviteden daha küçük olup bu da zararsızdır.

BETA BOZUNUMU

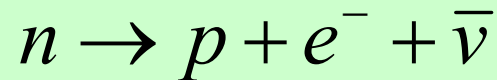
- Elementlerin transmutasyonu β -bozunumu ile de görülür. Yani, bir elektron ya da β -parçacığı yayınımları ile olur. Örneğin, çekirdek bozduğunda bir elektron yayınlanır:



- e^{-} sembolü elektron içindir. $\bar{\nu}$ sembolü antinötrino için, ν sembolü ise nötrino için kullanılır.
- Nötrinonun kütlesi sıfır veya sıfıra yakındır, yükü ise sıfırdır. Önceleri gözlenmemiş sadece var olduğu ortaya atılmıştı.
- Bir elektron yayınlandığında hiçbir nükleon kaybolmamakta, toplam nükleon sayısı, A , ürün çekirdekte de aynı olmaktadır.

BETA BOZUNUMU

- Beta bozunumunda yayımlanan elektronun bir yörünge elektronu olmadığına dikkat edilmelidir. Bunun yerine elektron çekirdek içinde yaratılmalıdır. β -bozunumunda nötronlardan biri protona dönüşürken çekirdekten bir e^- yayımlanmaktadır.
- Nötron bozunumu çekirdek içinde olduğu gibi, serbest bir nötron da ~ 11 dk yarı-ömürle protona bozunur:



- Beta bozunumunda yayınlanan elektronların çekirdek kaynaklı olmalarından dolayı bunlar daha çok beta parçacıkları olarak adlandırılırlar.

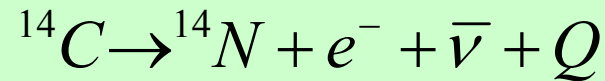
BETA BOZUMUNU Q-DEĞERİ

Örnek 2-2:

$^{14}_6\text{C}$ 'ün β -bozunumunda açığa çıkan enerji,

■ **Çözüm:**

- Atomik kütleler tablosunda verilen kütleler nötr atom kütleleridir. Bunlar kullanılarak ve aşağıdaki eşitlik dikkate alınarak açığa çıkan enerji bulunabilir:



$$Q = (M_i - M_s) \times 931.5 \text{ MeV/u}$$

- Atomik kütle tablosundan bakıldığında bu kütle 14.003074u kadardır. Bozunumdan önce kütle 14.003242 idi. Böylece kütle farkı 0.000168u dur. Bu da 0.156 MeV veya 156 keV'e karşılık gelir.

BETA BOZUNUMU SPEKTRUMU

- Yukarıdaki örneğe göre, yayımlanan elektronun 156 keV kinetik enerjiye sahip olmasını bekleriz. (Ürün çekirdek kütlesi elektronlarıkinden çok küçük olduğundan çok küçük bir hızla geri teper ve böylece küçük bir kinetik enerjiye sahip olur.
- Aslında, dikkatli ölçümler yayımlanan birkaç elektronun kinetik enerjilerinin hesaplananlarıne çok yakın olduğunu göstermektedir. Fakat çoğunlukla yayınlanan elektronlar biraz daha düşük enerjilidir.
- Gerçekte yayımlanan elektronlar sıfır enerjiden maksimum enerjiye kadar olabilmektedir (*sürekli spektrum*). Elektronun kinetik enerjisindeki bu değişim β -bozunumu için kinetik enerji sanki korunmuyormuş gibi bir anlam verir.

NÖTRİNO

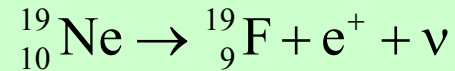
- Dikkatli deneylerde β -bozunumunda enerji ve momentumun korunmadığının görülemediği ilk zamanlarda fizikçilerin korunum kanunları hakkında şüpheye düşmesine neden olmuştu.
- 1930 da W. Pauli alternatif bir çözüm önerdi. Buna göre, bozunumda belki de elektrona ilave olarak dedekte edilmesi zor bir parçacık yayımlanmaktaydı ve bu parçacık enerji, momentum ve açısal momentum taşımalıydı.
- 1934 E. Fermi, bu yeni parçacığa küçük nötron anlamında *nötrino* adını vermiştir. Beta bozunumunda yayınlanan nötrinoya *elektron nötrinosu* adı verilmektedir. Fermi, teorisinde, doğada dördüncü kuvvetin varlığını ortaya attı ve buna *zayıf etkileşme* adını verdi.
- Elektron nötrinosu, sıfır yüklü, $1/2$ spinli ve sıfır kütleli bir parçacık olarak görünmektedir. (Her ne kadar çok küçük bir durgun kütlesi olabileceği kurala bağlanmamış olsa da.)

POZİTRON BOZUNUMU

- Birçok izotop elektron yayınımları ile bozunurlar. Bunlar proton sayıları ile kıyaslandığında daha çok nötron sayısına sahiptirler. Buna göre, bu izotoplar şekil 1.3 ile verilen kararlılık eğrisinin üzerinde yer alırlar.
- Fakat nötron sayısına göre az miktarda proton fazlalığına sahip izotoplar kararlılık eğrisinin altında yer alırlar ve elektron yerine pozitron yayınlamaya kararlı hale geçerler. Bir pozitron (e^+ parçacığı) elektron ile aynı kütleye sahiptir.
- Pozitron, yükü hariç tamamen elektrona benzer. Pozitron aynı zamanda elektronun anti parçacığı olarak adlandırılır.

POZİTRON BOZUNUMU

- β^+ -bozunumuna örnek olarak ${}_{10}^{19}\text{Ne}$ izotopunun bozunumu verilebilir:



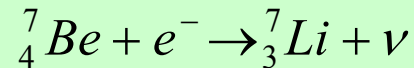
- Burada e^+ pozitrondur ve ν nötrinodur. Böylece bir anti elektron (=pozitron) nötrino ile birlikte yayınlanır.
- Böylece β^- ve β^+ bozunumu en genel şekilde,



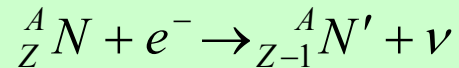
Burada N ana çekirdek ve N' de ürünü temsil etmektedir.

ELEKTRON YAKALAMA

- β^- ve β^+ -bozunumu yanında, bir de üçüncü bir ilgili proses vardır. Bu, elektron yakalaması olup (kısaca **EC** ile temsil edilir) ve bir çekirdek yörünge elektronlarından birini yakaladığında ortaya çıkar.
- Örneğin, ${}^7_4\text{Be}$, bir yörünge elektronu (genellikle K tabakasından) yakalar. Bu süreçte elektron yok olur ve bir proton çekirdek içinde bir nötrona dönüşür ve bir nötrino yayınlanır:



- En genel olarak **EC** olayı şu şekilde gösterilebilir:



- Bu süreç deneysel olarak uygun enerjide X-ışını dedeksiyonu ile gözlemlenebilir.

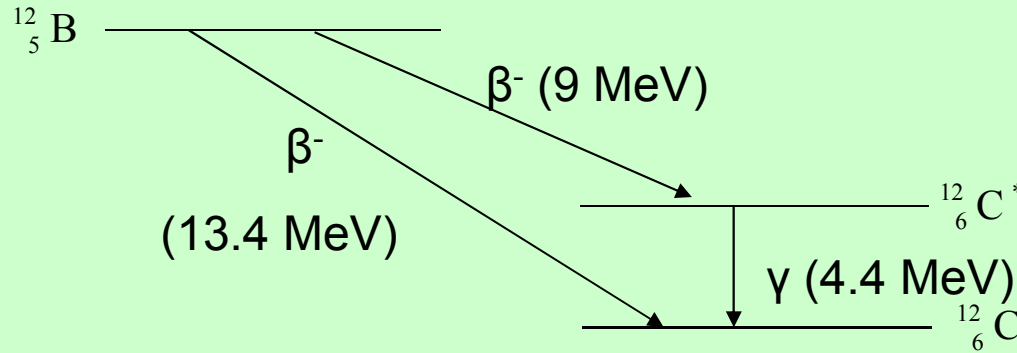
RADYOAKTİVİTE-DEVAM

■ GAMA BOZUNUMU

- Gama ışınları yüksek enerjili fotonlardır. Uyarılmış atomlardan fotonların yayınlanmasına çok benzer olarak çekirdek bozunumu kaynaklıdır.
- Bir çekirdek, bir atom gibi, uyarılmış düzeyde olabilir ve bir foton yayınlanır, buna da γ -ışını adı verilir.
- Bir çekirdeğin mümkün enerji seviyeleri, bir atomunkinden çok daha fazla aralıktır.
- Bir atomdaki elektronlar için olan birkaç eV ile karşılaştırıldığına mertebesi keV veya MeV dir. Böylece, yayınlanan fotonların enerjileri birkaç keV' den birkaç MeV'e kadar değişir. Bir γ -ışını hiçbir yük taşımadığından γ -bozunumu sonucu olarak elementte herhangi bir değişiklik olmaz.

GAMA BOZUNUMU

- Bir çekirdek, başka bir parçacıkla şiddetli bir çarpışma yapması sonucu uyarılmış düzeye geçebilir. Ayrıca, çok yaygın olarak da bir çekirdek önceki bir radyoaktif bozunmadan sonra uyarılmış durumda kalabilir. Tipik bir örnek, Şekil 2.3 ile verilen enerji seviye diyagramında görülmektedir.



Şekil 2-3 $^{12}_5\text{B}$ çekirdeğinin β -bozunması ile $^{12}_6\text{C}$ çekirdeğinin uyarılmış durumuna geçişi ve bunun yerine β -bozunması ile uyarılmış durumda kalan $^{12}_6\text{C}$ çekirdeğinin 4.4 MeV'lik gamma ışını ile taban duruma geçişi

İÇ DÖNÜŞÜM OLAYI

- Genel olarak gamma bozunumu,



şeklinde ifade edilebilir. Burada * işareti çekirdeğin uyarılmış olduğunu gösterir.

- Birçok durumlarda, bir çekirdek bir γ -ışınını yaymadan evvel uyarılmış durumda kalır. Bu durumda çekirdek ara kararlı düzeydedir denir bu bir izomer olarak adlandırılır.
- Uyarılmış bir çekirdek bazen **iç dönüşüm** olarak bilinen bir olay yoluyla γ -ışınını yaymadan taban duruma geçebilir. Bu olayda, uyarılmış çekirdek yörünge elektronlarından biriyle etkileşir ve bu elektronu atomdan, γ -yayınlanmasında olduğu gibi, aynı kinetik enerjiyle çıkarır (elektronun bağlanma enerjisinden eksik bir enerjiyle).

NÜKLEON SAYISI KORUNUMU VE DİĞER KORUNUM KANUNLARI

- Radyoaktif bozunmanın her üç tipinde de, klasik korunum kanunları geçerlidir. Enerji, çizgisel momentum ve elektrik yükü hep korunur. Bu büyüklükler, bozunmadan sonraki ile aynıdır. Fakat, burada yeni bir korunum kanunu açığa çıkar ve bu da nükleon sayısının korunumudur. Bu korunum kanununa göre, bir tip nükleon başka bir tip nükleona dönüşebilse de toplam nükleon sayısı (A) herhangi bir proseste sabit kalır. Bu kanun her üç tip bozunmada da geçerlidir. Tablo 2.1, α , β ve γ -bozunumunun bir özeti verilmektedir.

Tablo 2.1 Radyoaktif bozunumun üç tipi

A-Bozunumu	${}^A_Z N \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2} N' + {}^4_2 He$
B-Bozunumu	${}^A_Z N \rightarrow {}^A_{Z+1} N' + e^- + \bar{\nu}$
	${}^A_Z N \rightarrow {}^A_{Z-1} N' + e^+ + \nu$
	${}^A_Z N + e^- \rightarrow {}^A_{Z-1} N' + \nu$
γ -Bozunumu	${}^A_Z N^* \rightarrow {}^A_Z N + \gamma$

YARI-ÖMÜR VE BOZUNMA HIZI

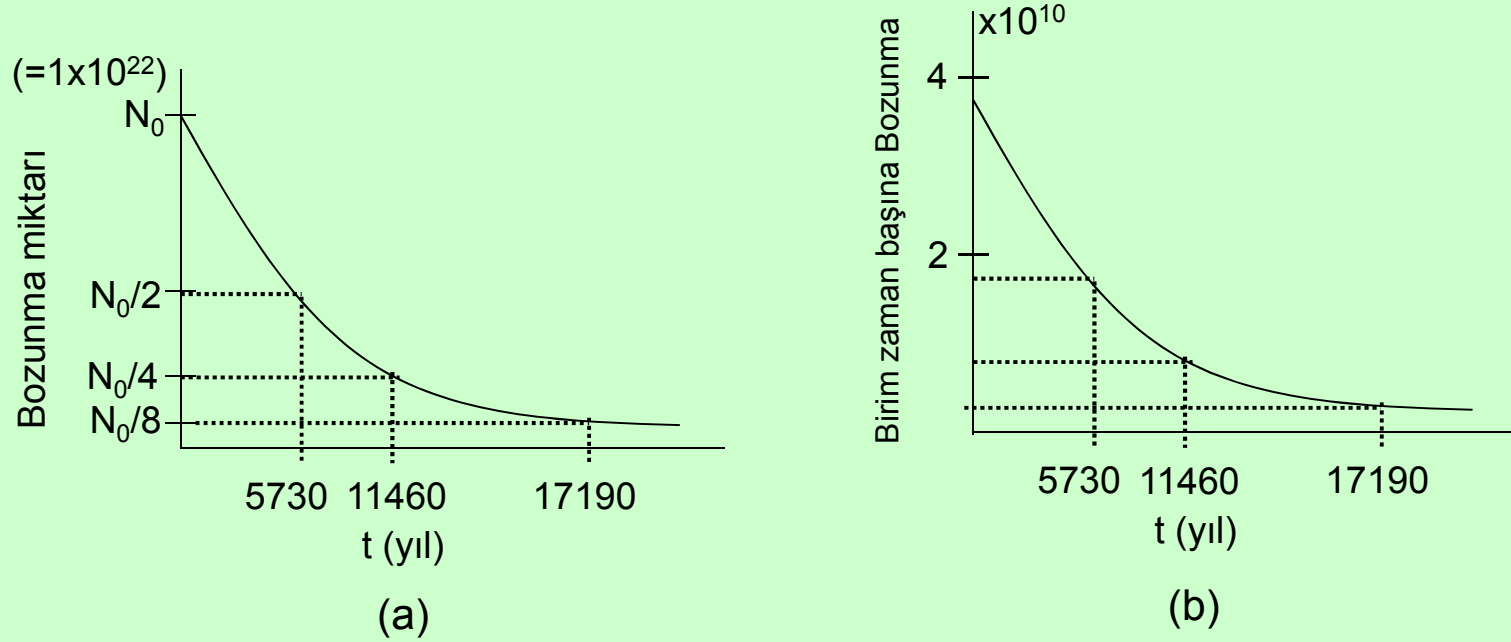
- Herhangi bir radyoaktif izotopun makroskopik bir örneği çok sayıda radyoaktif çekirdek içerir. Bu çekirdeklerin hepsi aynı anda bozunmaz. Bu bir rastgele olaydır ve verilen bir numunenin ne zaman bozunacağını tam olarak göstermez.
- Fakat, bir olasılık dahilinde yaklaşık olarak bir örnekte verilen bir zaman boyunca kaç tane çekirdeğin bozunacağını ve her çekirdeğin bulunduğu her saniyede aynı olasılıkla bozunacağını söyleyebiliriz.
- Çok kısa bir t zaman aralığında olan bozunmaların sayısı ΔN , başlangıçtaki mevcut radyoaktif çekirdeklerin sayısı ile orantılıdır:

$$\Delta N = -\lambda N \Delta t \quad (2.1)$$

- Bu eşitlikte λ bozunma sabiti olarak bilinen bir orantı sabiti olup farklı izotoplar için farklıdır. (2.1) eşitliğindeki $-$ işareti N deki azalmayı gösterir.

ÜSTEL BOZUNUM

- ^{14}C çekirdeğinin üstel bozunumu



Şekil 2.4 a) C-14 çekirdeğinin üstel bozunumu b) aynı çekirdeğin birim zamandaki bozunmasının üstel azalması.

ÜSTEL BOZUNUM

- Eğer eşitlik (2.1) de, $\Delta t \rightarrow 0$ limitini alırsak ΔN , N ile kıyaslandığında küçük kalır ve eşitliği sonsuz küçük formda gösterebiliriz:

$$dN = -\lambda N dt \quad (2.2)$$

- Eşitliği t nin bir fonksiyonu olarak düzenlersek N yi elde edebiliriz,

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\int_0^t \lambda dt \quad (2.3)$$

- Burada N_0 , $t=0$ anında mevcut olan çekirdeklerin sayısı ve N ise t anında kalan çekirdeklerin sayısıdır. İntegral,

$$\ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t \quad (2.4)$$

veya,

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2.5)$$

AKTİFLİK YA DA BOZUNUM HIZI

- Bozunma hızı veya saniyedeki bozunmaların sayısı basit bir örnekte dN/dt olup bu da verilen bir örneğin *aktivitesi* olarak tanımlanır:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N = -\lambda N_0 e^{-\lambda t}$$

Buna göre t anındaki aktivite,

$$\frac{dN}{dt} = \left(\frac{dN}{dt} \right)_0 e^{-\lambda t} \quad (2.6)$$

ile $t=0$ anındaki aktivite ise

$$\left(\frac{dN}{dt} \right)_0 = -\lambda N_0 \quad (2.7)$$

ile verilir. SI birim sisteminde aktivite birimi Becquerel (Bq) olup $1\text{Bq}=1$ bozunum/s olarak tanımlanır.

YARI-ÖMÜR

- Böylece, (2.6) eşitliğinden,

$$\frac{dN}{dt} = \left(\frac{dN}{dt} \right)_0 e^{-\lambda t} \Rightarrow A = A_0 e^{-\lambda t} \quad (2.8)$$

elde edilir. Buna göre aktiflik, zamanla aynı hızda üstel olarak azalır (şekil 2-4 b).

- Herhangi bir izotopun bozunma hızı λ bozunma hızından çok **yarı-ömrü** ile belirlenir. Bir izotopun **yarı-ömrü** verilen örnekteki bozunmaya maruz izotopun başlangıçtaki miktarının yarıya düşmesi için geçen zaman olarak tanımlanır.
- Bilinen radyoaktif izotopların yarı-ömürleri 10^{-22} s kadar kısa süreden yaklaşık 10^{28} s ($\approx 10^{21}$ yıl) kadar uzun bir süreye kadar değişir.
- Yarı ömür ($t_{1/2}$) başlangıçtaki radyoaktif çekirdeğin yarıya düşmesi için geçen süredir. (2.5) eşitliğinde $N=N_0/2$ yazarak yarı-ömür bağıntısı elde edilir:

- $$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda} \quad (2.9)$$

Örnek 3-3:

Radyoaktif bir örnek $1.49 \mu\text{g}$ saf ${}^{13}_7\text{N}$ içermektedir ve bu da 10 dk (600 s) lık bir yarı-ömre sahiptir.

- Başlangıçta kaç adet çekirdek vardır?
- Başlangıçtaki aktivite ne kadardır?
- Yaklaşık ne kadar zaman sonra aktivite 1 s^{-1} değerine düşer?

Çözüm:

- Atomik kütle 13 g olduğundan, 13 g ${}^{13}_7\text{N}$, 6.02×10^{23} (Avagadro sayısı) adet çekirdek içerir. Sadece 1.49×10^{-6} g çekirdeğimiz olduğundan, başlangıçtaki N_0 değeri elde edilir:*

$$\frac{N_0}{1.49 \times 10^{-6} \text{ g}} = \frac{6.02 \times 10^{23}}{13 \text{ g}} \text{ ve } N_0 = 6.9 \times 10^{16} \text{ çekirdek}$$

b) $\lambda = (0.693)/(600s) = 1.16 \times 10^{-3} s^{-1}$

$$\left(\frac{dN}{dt}\right)_0 = |-\lambda N_0| = (1.16 \times 10^{-3} s^{-1}) \times (6.90 \times 10^{16}) = 8 \times 10^{13} s^{-1}.$$

c) $\frac{dN}{dt} = 1 s^{-1}$

$$e^{-\lambda t} = \frac{dN/dt}{(dN/dt)_0} = \frac{1.00 s^{-1}}{8.00 \times 10^{13} s^{-1}} = 1.25 \times 10^{-14}$$

$$t = -\frac{\ln(1.25 \times 10^{-14})}{\lambda} = \frac{32}{1.16 \times 10^{-3}} = 2.76 \times 10^{12} s$$

RADYOAKTİVİTE

■ PEŞ PEŞE PARÇALANMA KANUNU

- Gerek doğal olarak bulunan radyoaktif izotoplarda ve gerekse suni olarak meydana getirilen radyoaktif izotoplarda bozunma, şayet ürün çekirdekte radyoaktifse peş peşe parçalanmalar şeklinde meydana gelebilir.
- Birçok durumda peş peşe bozunma, ana çekirdeğin ürüne ve ürünün de kararlı bir izotopa bozunumuyla sınırlıdır.
- Herhangi bir t anında λ_1 bozunma sabiti ile ürüne bozunacak ana elementin atomlarının sayısı N olsun, ürün atomlarının sayısı da N_2 olsun ve ürün atomları da λ_2 bozunma sabitiyle sayısı N_3 olan kararlı bir elemente bozunsun. Başlangıçta (t=0 da) $N_1=N_{10}$; $N_2=N_{20}$ ve $N_3=N_{30}=0$ olduğunu varsayalım. Buna göre aşağıdaki eşitlikler yazılabilir.:

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1 \quad (2.10)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \quad (2.11)$$

PEŞ PEŞE PARÇALANMA KANUNU

- Son ifadeye göre N_2 tipindeki atomlar $\lambda_1 N_1$ hızıyla üretilirler ve $\lambda_2 N_2$ hızıyla gözden kaybolurlar. N_2 tipindeki atomlar da radyoaktif olduklarından N_3 atomlarının üretilme hızı,

$$\frac{dN_3}{dt} = \lambda_2 N_2 = N_3 \quad (2.12)$$

şeklinde ifade edilebilir. (2.11) ile verilen eşitliğin her iki tarafı $e^{\lambda_2 t}$ ile çarpıp integral alalım:

$$\frac{dN_2}{dt} + \lambda_2 N_2 = \lambda_1 N_{10} e^{-\lambda_1 t} \quad (2.13)$$

$$N_2 e^{\lambda_2 t} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{10} e^{(\lambda_2 - \lambda_1)t} + C$$

$t=0$ da $N_2=N_{20}$ alarak, $C = -\frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{10}$ bulunur.

PEŞ PEŞE PARÇALANMA KANUNU

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{10} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \quad (2.14)$$

elde edilir. Herhangi bir t anında N_2 atomlarının sayısını veren ifade bulunur. Şimdi, (2.12) ve (2.14) yardımıyla,

$$\frac{dN_3}{dt} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{10} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \lambda_2 \quad (2.15)$$

elde edilir. Şimdi, bu son ifadenin de integrali alınıp $t=0$ da $N_3=N_{30}=0$ şartı kullanılırsa, herhangi bir t anındaki N_3 atomlarının sayısı elde edilir:

$$N_3 = N_{10} \left\{ 1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_2 t} - \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_1 t} \right\} \quad (2.16)$$

RADYOAKTİF DENGE

- GEÇİCİ DENGE
- Bir ana çekirdeğin λ_1 bozunma sabitiyle birinci ürüne, onun da λ_2 sabitiyle ikinci ürüne bozunduğunu kabul edelim. Bu iki çekirdek için $\lambda_1 \approx \lambda_2$ olduğunu varsayalım. Buna göre, (2.14) ifadesinin zamana göre türevi alınıp sıfıra eşitlenmesiyle N_2 'nin maksimuma ulaştığı süre,

$$t_m = \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \ln \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \quad (2.17)$$

bulunur. Bu t_m süresinden sonra birinci ürünün bozunma hızına dN_2/dt 'ye λ_1 ve λ_2 den hangisi büyükse o etkili olacaktır. Buna göre:

i. $\lambda_1 < \lambda_2$ ise

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} (N_{10} e^{-\lambda_1 t}) \quad (2.18)$$

Aktiviteler oranı ise:

$$\frac{dN_2 / dt}{dN_1 / dt} = \frac{\lambda_2 N_2}{\lambda_1 N_1} = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \quad (2.19)$$

RADYOAKTİF DENGE

Bu durumda ana çekirdek ürünle geçici olarak dengededir denir. Buradan, (2.18) ifadesine göre N_2 , λ_1 ile bozunacak ve (2.20) ifadesine göre de N_2/N_1 ifadesi sabit kalacaktır.

ii. $\lambda_1 > \lambda_2$ ise, (2.14) eşitliğinde birinci terim daha hızlı sıfıra gideceğinden,

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} (N_{10} e^{-\lambda_2 t}) \quad (2.20)$$

yazılabilir. Bu ise belli bir zaman sonra birinci ürün elementin λ_2 ile bozunacağını gösterir. Belli bir süre sonra ana element bitecek ve birinci üründe kendi hızıyla bozunmasına devam edecektir.

KALICI VEYA SÜREKLİ DENGE

- Birinci ürünün herhangi bir t anındaki sayısını veren (2.18) ifadesini göz önüne alalım. $\lambda_1 \ll \lambda_2$ olsun. Buna göre, $\lambda_2 - \lambda_1 \approx \lambda_2$ ve $e^{-\lambda_1 t} \approx 1$ alınabilir ve,

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} N_{10} (1 - e^{-\lambda_2 t}) \quad (2.21)$$

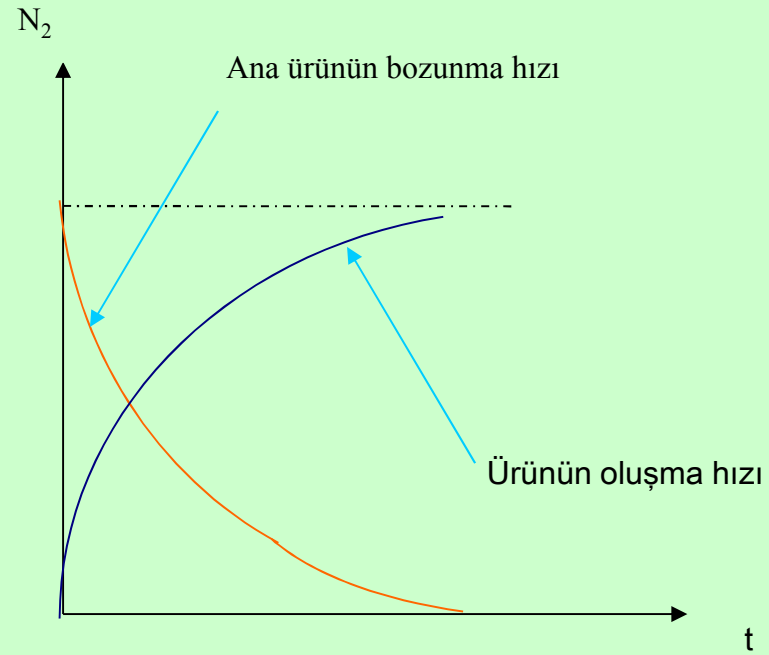
ifadesi yazılabilir. Burada $\lambda_2 t \gg 1$ olup $e^{-\lambda_2 t} \approx 0$ dır. Bu sonuç, birinci ürünün (N_2 'nin) sabit olduğunu söyler. Bu durumda birinci ürünün ana ürünle sürekli dengede olduğu söylenebilir. N_1 için $N_1 \approx N_{10}$ yazılabilir. Buna göre de,

$$\lambda_2 N_2 \approx \lambda_1 N_1 \quad (2.22)$$

- ifadesi elde edilir. Bu ifade *kalıcı denge şartı* olarak adlandırılır.

KALICI DENGE

- Kalıcı denge



Şekil 2.5 Kalıcı radyoaktif denge

RADYOAKTİF DENGE

Örnek 3-5:

Radyoaktif ^{226}Ra izotopunun yine radyoaktif olan ^{222}Rn izotopuna bozunmasının yarı-ömrü 1620 yıldır. ^{222}Rn elementinin yarı-ömrü 3.82 gün olup $3.82 \text{ gün} \ll 1620 \text{ yıl}$ dir. Ne kadar zaman sonra radon denge konsantrasyonunun %99.5' na ulaşılır? Radyoaktif ^{226}Ra izotopunun yine radyoaktif olan ^{222}Rn izotopuna bozunmasının yarı-ömrü 1620 yıldır. ^{222}Rn elementinin yarı-ömrü 3.82 gün olup $3.82 \text{ gün} \ll 1620 \text{ yıl}$ dir. Ne kadar zaman sonra radyon denge konsantrasyonunun %99.5' na ulaşılır?

Çözüm:

Sonsuz zaman sonra N_2 denge değerine ulaşır.(2.18) ile verilen ifadeden, N_2 ifadesi elde edilir:

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{10} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})$$
$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} N_{10} (1 - e^{-\lambda_2 t})$$

RADYOAKTİF DENGE

Sonsuz zaman sonra N_2 denge değerine erişir ($N_1=N_{10}$).

$$N_2(\infty) = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} N_1,$$

$$\frac{N_2(t)}{N_2(\infty)} = 1 - e^{-\lambda_2 t} = 0.995$$

$$t = \frac{\ln 5 \times 10^{-3}}{-\lambda_2} = \frac{-5.298}{-0.692 / 3.82} \approx 29 \text{ gün}$$

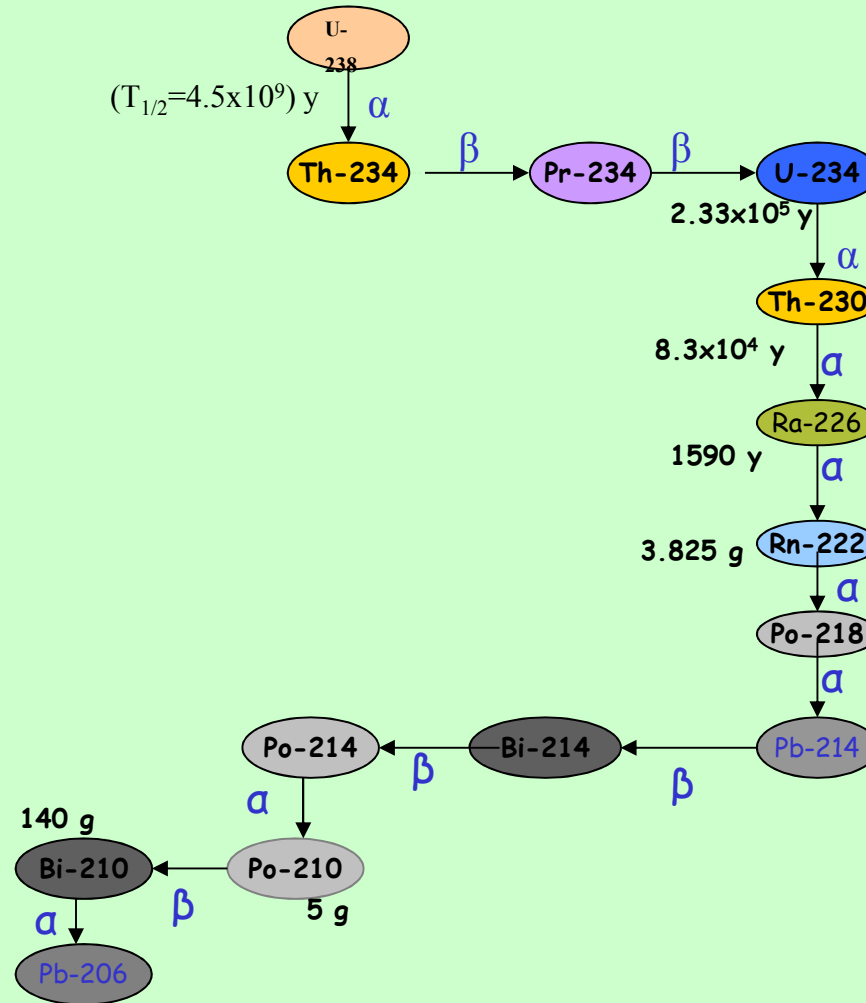
sonrunda %99.5 denge konsantrasyonuna ulaşır.

RADYOAKTİVİTE

■ BOZUNMA SERİLERİ

- Bazen bir radyoaktif izotop, radyoaktif olan başka bir izotopa dönüşür. Bazen bu ürün de yine radyoaktif olan üçüncü bir ürüne bozunabilir.
- Böyle peş peşe olan bozunmalara bozunma serisi denir. Önemli bir örnek, şekil 2.5 te görülmektedir.
- Burada, ^{238}U çekirdeği α -bozunumu ile ^{234}Th 'a dönüşür. Seriler şekilde görüldüğü gibi birkaç dallanma il devam eder.
- Örneğin, ^{218}Po , ya α -bozunumu ile ^{214}Pb ' e veya β^- bozunumu ile ^{218}At 'e bozunur ve sonunda kararlı izotop ^{208}Pb de son bulur. Aynı şekilde, başka bozunum şekilleri de vardır.
- Böyle bozunum serilerinden dolayı, doğada çeşitli radyoaktif elementler bulunmaktadır. Aksi takdirde bulunmazlardı. Güneş sistemi 5 milyar yıl önce oluştuğundan yaklaşık olarak bütün çekirdekler füzyon yoluyla oluşmuşlardır. Kısa yarı-ömürlü bir çok izotop, çok çabuk bozunduklarından ve bugün bunlar doğada yoktur.

RADYOAKTİF BOZUNUM SERİSİ



Şekil 2.6 $^{238}_{92}\text{U}$ ile başlayan bozunum serisi.

RADYOAKTİF YAŞ TAYİNİ

- Radyoaktif bozunumun çok ilginç uygulamaları vardır. Bunlardan biri radyoaktif yaş tayini olup bu metotla eski materyallerin yaşı tayin edilebilmektedir.
- Ağaç gibi, canlı maddeden yapılan objenin yaşı doğal radyoaktif ^{14}C kullanılarak yapılabilir. Yaşayan tüm canlılar havadan CO_2 'i soğurur ve onu organik maddelerde sentezde kullanır.
- Bu karbon atomlarının büyük bir çoğunluğu ^{12}C izotopundan oluşur. Atmosferde ^{14}C 'ün ^{12}C 'ye oranı, ^{14}C 'ün 5730 yıl yarı-ömürle bozunmasına rağmen, yüzyıllar boyunca kabaca sabit kalmaktadır. Bunun nedeni, kozmik radyasyondaki enerjik çekirdekler olup dış uzaydan Dünya'ya çarparak atmosferde atom çekirdeklerinin parçalanmasına ve serbest nötronların açığa çıkmasına neden olurlar.

RADYOAKTİF YAŞ TAYİNİ

- Serbest nötronlar da $n + {}^{14}_7N \rightarrow {}^{14}_6C + p$ reaksiyonunu gerçekleştirirler.
- Yani, ${}^{14}N$ bir nötron soğurur, bir proton yayınlanır ve kalan çekirdek ${}^{14}C$ tür. Bir bitki veya bir ağaç yaşadığı sürece sürekli olarak havadaki karbondioksitten karbonu, eskisi yenine yeni bitki dokusunu oluşturmak için, sürekli kullanır.
- Hayvanlar bitkileri yer ve sürekli olarak kendi dokuları için taze karbon kaynağı alırlar.
- Böylece, iki izotopun oranı yaşayan canlılarda sabit kalır. ${}^{14}C$ izotopu radyoaktif olarak bozduğundan ${}^{14}C$ 'ün ${}^{12}C$ 'ye oranı, ölü organizmalarda, zamanla azalır.
- ${}^{14}C$ 'ün yarı-ömrü yaklaşık olarak 5730 yıl olup ${}^{14}C/{}^{12}C$ oranı yaşayan bir ağacının yarısı kadar ise aletin yapıldığı ağaç 5730 yıl önce kesilmiştir denilebilir.

Örnek 3-7: Radyoaktif Yaş Tayini

Bir arkeolojik sitede bulunan bir hayvan kemiği parçası 200 g karbon içermektedir. Kaydedilen aktivite 16 bozunum/s dir. Kemiğin yaşı nedir?

Çözüm:

Hayvan canlıyken 200g kemik parçasından $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ oranı 1.3×10^{-12} idi. ^{12}C çekirdeklerinin o andaki sayısı,

$$N_0 = \left(\frac{6.02 \times 10^{23} \text{ atom}}{12 \text{ g}} \right) (200 \text{ g}) (1.3 \times 10^{-12}) = 1.3 \times 10^{13}.$$

Eşitlik 2.7 den:

$$\left(\frac{dN}{dt} \right)_0 = \lambda N_0 \text{ burada } \lambda = 3.83 \times 10^{-12} \text{ s}^{-1}$$

$$\left(\frac{dN}{dt} \right)_0 = (3.83 \times 10^{-12} \text{ s}^{-1}) \times (1.3 \times 10^{13}) = 50 \text{ s}^{-1}.$$

RADYOAKTİF YAŞ TAYİNİ

$$\frac{dN}{dt} = \left(\frac{dN}{dt} \right)_0 e^{-\lambda t} \text{ ve } e^{-\lambda t} = \frac{(dN/dt)_0}{(dN/dt)}$$

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \left[\frac{(dN/dt)_0}{(dN/dt)} \right] = \frac{1}{3.83 \times 10^{-12} \text{ s}^{-1}} \ln \left[\frac{50 \text{ s}^{-1}}{16 \text{ s}^{-1}} \right]$$
$$= 2.98 \times 10^{11} \text{ s} = 9400 \text{ yıl.}$$

- Karbon yaş tayini metodu, sadece yaşı 60.000 yıldan daha küçük olan örneklerin yaşını tayin etmede kullanışlıdır.
- Eski objelerde ^{14}C miktarı oldukça azdır. Yaş tayininde daha geriye gitmek amacıyla eski örneklerde ^{14}C miktarını tespit için yeni yöntemler olsa da, çok eski objelerde çok az miktarda olması nedeniyle yaş tayininin doğru olarak yapılması oldukça zordur.

BÖLÜM III

RADYASYONUN MADDE İLE ETKİLEŞMESİ

- Birçok atom elektriksel bakımdan nötrdür. İyonize radyasyonun belli başlı karakteri, atomları iyonlaştırmasıdır.
- İyonize radyasyon, dolaylı ya da dolaysız olarak elektronları atomdan uzaklaştırma yeteneğine sahiptir.
- Bu durumda bir çift yüklü parçacık oluşur. Bunlardan biri negatif elektron diğeri ise pozitif yüklü atomdur. Bu olay *iyonizasyon* olarak bilinir.
- α , β ve γ nükleer radyasyonlar olup madde ile etkileşirler. Nötron yüksüz olduğundan madde ile etkileşimi zayıftır.

RADYASYONUN MADDE İLE ETKİLEŞMESİ

- Radyasyonun maddeyle etkileşimi dedektörlerle anlaşılır. Yüklü parçacıklar (α ve β) maddeyle Coulomb etkileşmesi yoluyla etkileşirlerken, γ -ışınları ise Compton, fotoelektrik ve çift oluşumu yoluyla etkileşir.
- Dedektör seçimi radyasyon tipine bağlıdır. α , β ve γ radyasyonları için dedektör kalınlıkları aşağıdaki gibidir:

α : Çok ince pencereleli dedektörler (Erişme menzili $100\mu\text{m}$).

β : Dedektör kalınlığı $0,1 - 1\text{mm}$

γ : Dedektör kalınlığı 5 cm .

ELEKTROMANYETİK IŞININ (FOTON) MADDE İLE REAKSİYONU

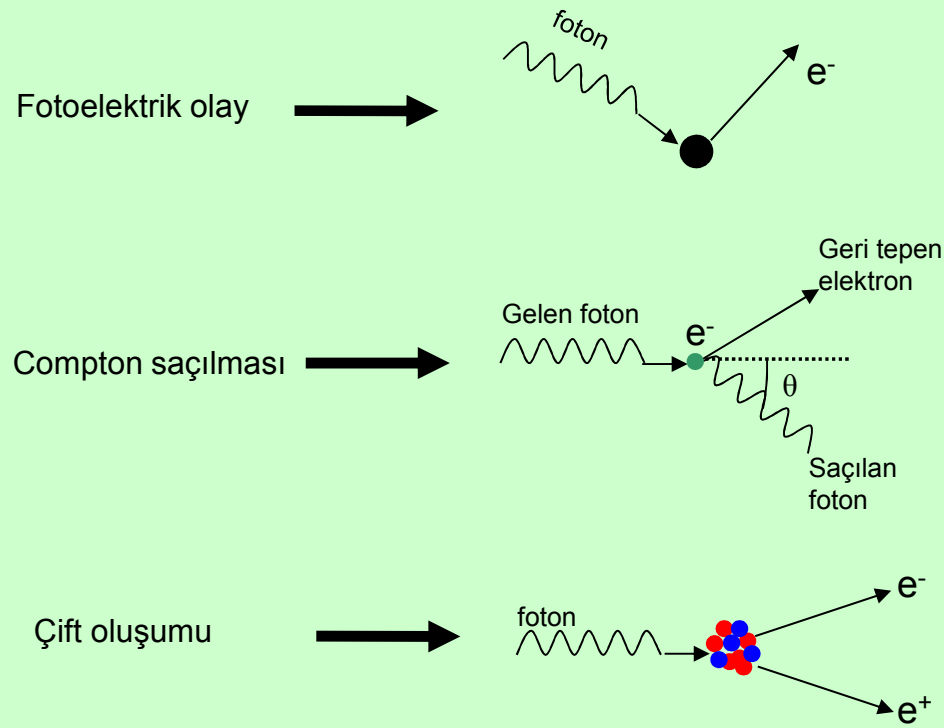
- Elektromanyetik ışın (foton) madde içerisinde ya soğurulur ya da sapar. Bu nedenle de fotonun şiddeti azalır.
- Ağırıklı olarak foton frenlemeyi yapan atomun elektronları ile reaksiyona girer.

Olabilecek reaksiyon tipleri şu şekildedir:

1. Fotoelektrik Olay,
2. Compton Saçılması,
3. Çift oluşumu.

ELEKTROMANYETİK IŞININ (FOTON) MADDE İLE ETKİLEŞİMİ

- Gamma ışınının madde ile etkileşimi



Şekil 3.1 Fotonun madde ile etkileşimi

ELEKTROMANYETİK IŞININ (FOTON) MADDE İLE ETKİLEŞİMİ

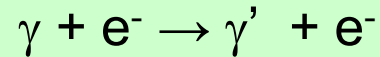
- Bu olaylar oluşunca madde içerisinde bir x yolu boyunca fotonun şiddeti azalır.
- Bu fiziksel olay soğurma kanunu ile açıklanır:

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

Burada I_0 gelen şiddet, μ ise soğurma katsayısıdır.

COMPTON SAÇILMASI

- Compton etkileşimi, atoma zayıf bağlı olan dış yörünge elektronları (yaklaşık olarak serbest sayılabilen elektronlarla) ile olur. Elektronun bağlanma enerjisi fotonun enerjisine göre çok küçüktür. Foton enerjisi 100 eV üzerinde olunca (orta enerjili) Compton saçılması öne çıkar:

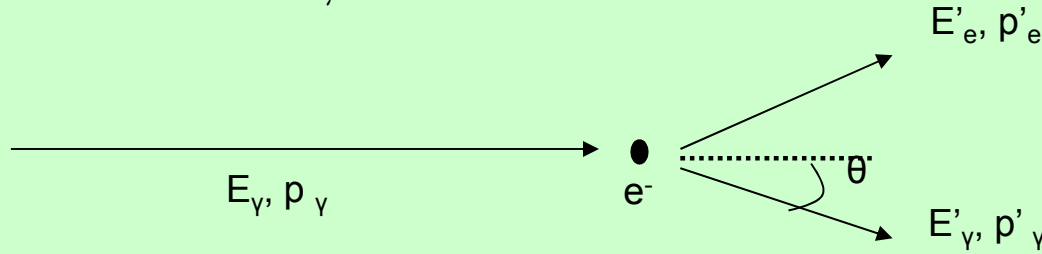


- Foton enerjisi $E_\gamma = h\nu$, momentumu $E_\gamma/c = h/\lambda$ ve elektronun durgun kütle enerjisi $E = m_e c^2$ dir.
- Compton saçılma olasılığının maddenin atom numarasıyla ilişkisi yoktur, fakat maddenin yoğunluğu ve fotonun enerjisi ile ilişkilidir.
- Yoğunluk artınca Compton saçılması da artar. Saçılma fotonun enerjisi ile ters orantılıdır.

COMPTON SAÇILMASI

- Fotonun maximum enerji transferi 180 derece saçılma açısında maksimumdur. Saçılan fotonun enerjisi aşağıdaki şekilde elde edilir:

$$E'_\gamma = \frac{E_\gamma}{1 + (E_\gamma / mc^2)(1 - \cos \theta)}$$



Şekil 3.2 Compton Saçılması

Compton etkisi tanısal radyolojide önemlidir. Saçılan X-ışını filmde kararmaya neden olur.

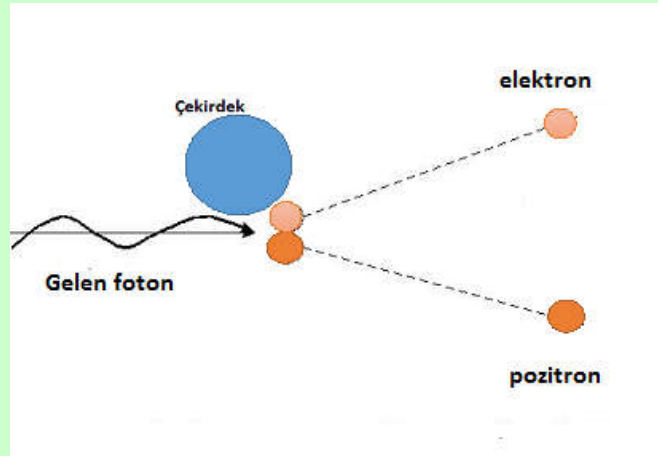
FOTOELEKTRİK OLAY

- 100 KeV üzerindeki enerjilerde fotoelektrik olay öne çıkar. Bu etki, soğurucu atomun atom numarasının 3. kuvveti ile artar (Z^3) ve artan foton enerjisi ile E^{-3} şeklinde hızla azalır. Yani, bağlanma enerjisi ne kadar yüksekse fotoelektrik etki olasılığı o kadar büyük olur.
- Örneğin, kurşunda (Pb) K-kabuğu bağlanma enerjisi 88 keV dir. Bu enerjiden düşük enerjilerde K-kabuğundan elektron salınması olmaz. Buna K-sınırı denir.
- Bu olayda, foton enerjisini iç yörünge elektrona aktarır (özellikle K yörüngesinde soğurma önemlidir) ve foton kaybolur. Elektron, gelen fotonun enerjisi ile bağlanma enerjisinin farkına eşit enerjiyle atomdan uzaklaştırılır. Bu elektrona foto-elektron denir.

- Foto-elektron diğer atomları iyonize ve kısa mesafede soğurular ve soğurulan doza katkıda bulunur. K-yörüngesinden sökülen elektron boşluğu dış yörünge elektronlarınca doldurulur ve karakteristik X-ışını yayınlanır. Geri tepkime enerjisi yaklaşık olarak birkaç eV düzeyinde olup atom tarafından soğurular. Fotoelektrik etkinin iyi tarafı, saçılan foton olmadığından doğal doku konsantrasyonu artar. Fotoelektrik etki, Z^3 ile orantılı olduğundan dokular arasındaki yapı farkını ortaya koyar.

ÇİFT OLUŞUMU

- Bu olay, γ -fotonunun çekirdekle etkileşimi ile olur (Şekil 3.4).
- $\gamma + \text{çekirdek} \rightarrow \text{çekirdek} + e^- + e^+$ $E_\gamma \geq 2mc^2$
- $\gamma + e^- \rightarrow e^- + e^- + e^+$ $E_\gamma \geq 4mc^2$
- Buradaki olasılık ancak çekirdeğin Coulomb çekim alanı varken ve $E_\gamma \geq 2M_0c^2 = 1.02 \text{ MeV}$ iken mümkündür. Burada açığa çıkan pozitron serbest kalmaz ve bir elektronla birleşerek her biri 511 keV olan zıt yönlü iki gama fotonu oluşur. Tanısal radyolojide böyle yüksek enerjili radyasyon kullanılmadığından bu etkileşim önem kazanmaz.



Şekil 3.3 Çift oluşumu

YÜKLÜ PARÇACIKLARIN MADDEYLE ETKİLEŞİMİ

- Kütleleri 1 atomik kütle birimi (u) büyüklüğünde veya daha büyük olan parçacıklar *ağır yüklü parçacık* olarak adlandırılırlar. Bu sınıf, *alfa parçacıkları*, *protonlar*, *döteronlar*, *fisyon parçacıkları* ve hızlandırıcılarla üretilen parçacıkları kapsar.
- Bu pozitif yüklü parçacıklar, soğurulan madde atomlarının elektronlarıyla *Coulomb etkileşmesi* yoluyla etkileşir.
- Coulomb çarpışmasını düşünürsek; çarpışma sonunda gelen tanecik enerjisinin bir kısmını ortama aktarır. Yani çarpışma sonrası enerji kaybı olur. Buna göre, $(-dE/dx)$ kinetik enerjinin birim uzunluk başına enerji kaybını temsil eder.
- Ağır yüklü parçacıkların enerji kaybı, $\Delta T = T (4m/M)$ ile verilir. Burada, m elektronun kütlesi, M ise ağır parçacığın kütlesidir.

YÜKLÜ PARÇACIKLARIN MADDEYLE ETKİLEŞİMİ

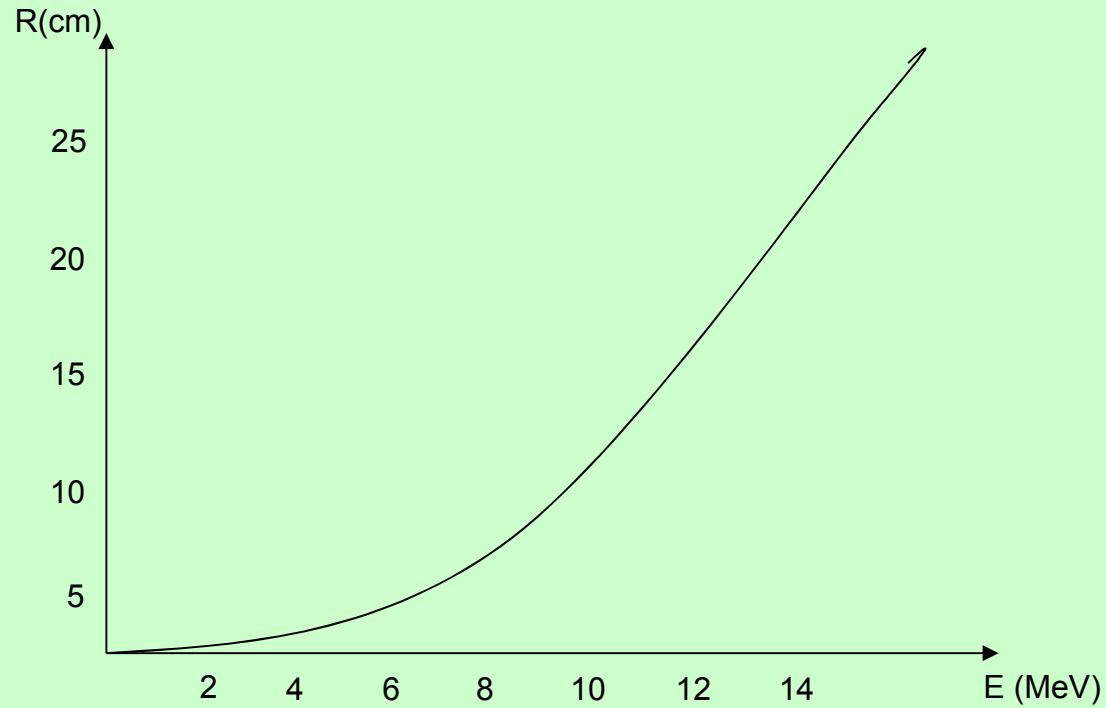
- Eğer yüklü bir parçacık atomun elektronları ile etkileşirse şu sonuçlar olabilir:
 1. Enerjisinin tümünü elektronlara aktarabilir. (yani parçacık soğurulur)
 2. Tanecik elastik saçılır ve (ihmal edilecek bir açıyla saparsa) çok az enerji kaybı ile yoluna devam edebilir.
 3. Coulomb kuvveti sonsuz menzile sahip olduğu için aynı anda birkaç elektronla reaksiyona girebilir. Örneğin alfanın sis odasındaki izleri gibi.
 4. Atomun iyonlaşması olabilir.

AĞIR YÜKLÜ PARÇACIKLARIN MADDEYLE ETKİLEŞİMİ

- Ağır yüklü parçacıkların kütleleri elektron kütlelerinden çok büyük olduğundan elektronlarla olan çarpışmalarda yollarından sapmazlar.
- Verilen bir anda yüklü parçacık, eş zamanlı olarak, birçok elektronla etkileşebilir. Etkileşmeler sonucu, parçacık sürekli yavaşlar ve durur. Parçacık duruncaya kadar katı ve *sıvılarda* birkaç *pikosaniye*, *gazlarda* ise birkaç *nanosaniye* yol alır. Bu süre oldukça kısa olup birçok soğurucu madde için de bu böyledir.
- Parçacık yavaşlama sürecinin çeşitli karakterleri, radyasyon dedektörlerinin davranışını anlamada oldukça önemlidir.
 - i) Birkaç MeV enerjili bir parçacığın ortalama menzili *sıvı* ve *katılarda* *1-10 mikrometre*, *gazlarda* ise normal şartlarda *birkaç cm* dir.
 - ii) İkinci önemli bir özellik ise, parçacık yolu boyunca, verilen bir noktada belli başlı enerji kaybıdır.
- Yüklü parçacıkların enerji-menzil ifadeleri Şekil 3.5 te verilmiştir.

YÜKLÜ PARÇACIKLARIN MADDE İLE ETKİLEŞİMİ

- Yüklü parçacıklar



Şekil 3.5 Yüklü parçacıklar için enerji-menzil grafiği

HIZLI ELEKTRONLARIN MADDEYLE ETKİLEŞİMİ

- *Hızlı elektronların*, atomik elektronlarla etkileşmesinde, alfa parçacıkları ile karşılaştırıldığında, kat edilen mesafeden oldukça fazladır.
- 1 MeV enerjili bir parçacığının *tipik katılarda* kat ettiği mesafe *1* veya *2 mm*, *gazlarda* ise normal şartlarda *birkaç m* dir.
- Diğer önemli bir fark da *hızlı elektronların enerji kaybının ağır yüklü parçacıklara nazaran oldukça fazla olmasıdır*. Büyük açılı sapmalarından dolayı *hızlı elektronlar enerjilerini elektromanyetik radyasyon yayınlamaya veya çarpışmalarla kaybederler*.

ELEKTRONLARIN MADDEYLE ETKİLEŞİMİ

- Elektronlar, tıpkı ağır yüklü parçacıklar gibi atomik elektronlarla Coulomb saçılması ile etkileşirler.

Özellikle β bozunumlarından yayımlanan elektronlar göreceli hızlarla hareket ederler.

Elektron-elektron çarpışmasında sonra e^- 'lar sapmalara uğrarlar ve düzensiz yörüngeler çizerler.

Elektron-elektron çarpışmasında enerji aktarımı olur. Çarpışma sonrasında gelen elektronların hangisi, çıkan e^- 'ların hangisi olduğunu bilmek zordur.

Çarpışma sonrasında e^- 'lar büyük ivme kazanabilirler.
Bremsstrahlung (*frenleme ışını*)

ELEKTRONLARIN MADDE İLE ETKİLEŞİMİ

- Frenleme radyasyonu (*bremstrahlung*) normal olarak x-ışını bölgesindedir. Bremsstrahlung ile enerji kaybı hafif materyallerde düşük enerjili elektronlar için %1 den az fakat yüksek enerjili elektronlar için büyük atom numaralı materyallerde çok daha fazla olmaktadır.
- Diğer önemli bir farkın da hızlı elektronların enerji kaybının ağır yüklü parçacıklara nazaran oldukça fazla olmasıdır. Büyük açılı sapmalarından dolayı hızlı elektronlar enerjilerini elektromanyetik radyasyon yayınlamaya veya çarpışmalarla kaybederler.
- ,

YÜKSÜZ PARÇACIKLARIN MADDEYLE ETKİLEŞMESİ

- Başlangıçta yüklü olmayan radyasyonun özellikleri üretilen yüklü parçacığın çalışılmasıyla anlaşılır. Bu etkileşmeler nadiren görülür.
- Yüksüz radyasyon katılarda *birçok cm* yol kat ederler. O halde yüksüz kuantayı dedekte etmek için tasarlanan aygıtlar *dedektör* içinde böyle bir çarpışma olasılığını elde edecek kadar *büyük kalınlıklı* seçilirler.
- *İyonize radyasyon elektromanyetik radyasyon şeklinde de olabilir.* Uyarılan atomdan yayıldığında ismi *X-ışını* olup quanta enerjisi 1-100 keV, uyarılmış çekirdekte yayımlandığında ismi *gama ışını* olup karakteristik enerjisi MeV'dir.
- EM radyasyon, yüksüz olduğundan Coulomb etkileşmesi yapamaz ve maddede önemli etkileşme yapmadan uzun mesafeler alır.

NÖTRONLARIN MADDEYLE ETKİLEŞMESİ

- Nötronlar, soğurucunun çekirdekleri ile etkileşirler. Nötronun yok olması veya enerji ve doğrultusunun değişmesi şeklindeki etkileşmesi dedekte edilmesinde önemlidir.
- Gama kuantumu durumunda esas etkileşme elektron üretimi idi. Tersine, önemli nötron etkileşmeleri, enerjik ağır yüklü parçacıkların oluşmasıyla sonuçlanır.
- Dolayısıyla nötronların dedekte edilmesi ikincil yüklü parçacıkların dedektörde depo ettikleri enerjiyle ölçülür.
- Nötron dedeksiyonunda kullanışlı olan etkileşme tipleri farklı enerjilerdeki nötronlar için farklı olduğundan tartışmayı yavaş ve hızlı nötron etkileşme mekanizmaları şeklinde ayırmak uygundur.

YAVAŞ NÖTRONLARIN MADDEYLE ETKİLEŞMESİ

- *Yavaş nötronlar* kinetik enerjisi *1 eV'un altında* olan nötronlardır. Yavaş nötronlar çekirdeklerle olan etkileşimlerinde sıklıkla *elastik saçılma* yaparlar ve enerjilerinin bir kısmını çekirdeğe transfer edebilirler.

Nötronun kinetik enerjisi çok küçük olduğundan yavaş nötron dedeksiyonu için geri tepen çekirdek iyonize parçacık olacak kadar enerjiye sahip değildir.

Bunun yerine, yavaş nötron dedeksiyonu için nötronun çekirdek tarafından soğurulduğu ve yüklü parçacığın olduğu nükleer reaksiyon gerektirir. Yüklü parçacık, nükleer reaksiyon tarafından sağlanan büyük miktarda kinetik enerjiyle üretilirler.

Bundan dolayı, bu reaksiyonların ürünleri iyonize parçacıklardır ve bunların maddeyle etkileşmeleri daha önceden açıklandığı gibi ağır yüklü parçacıkları içeren direkt radyasyonların maddeyle etkileşmeleri gibidir.

HIZLI NÖTRONLARIN MADDEYLE ETKİLEŞMESİ

- Kinetik enerjisi 1 KeV üzerinde olan nötronlar genellikle *hızlı nötronlar* olarak tanımlanırlar.
- Hızlı nötronla olan reaksiyonlar yavaş nötronlarla olanlara nazaran düşük olasılıklıdır. Dolayısıyla bu reaksiyonlara dayalı dedektörler yavaş nötronlar için yüksek verimli olduğu halde hızlı nötronlar için düşük verimlidirler.
- Bu bakımdan, hızlı nötronlar yaygın olarak çekirdeklerden elastik saçılmaya uğrarlar. Diğer taraftan nötron kinetik enerjisinin önemli bir kısmının çekirdeğe transfer edildiği ve geri tepen enerjik çekirdeğin olacağı reaksiyonlar da olabilir.
- Geri tepen çekirdeğin maddeyle etkileşmesi ağır yüklü parçacıklarınıninki ile aynıdır.
- Nötron tarafından transfer edilen enerji nötronun sıyrarak geçtiği durumda sifıra yakın ve kafa kafaya yaptığı çarpışma durumunda maksimumdur. Hidrojen genellikle hızlı nötronlar için hedef çekirdektir ve geri tepen protonlar hızlı nötron dedektörleri için hizmet verirler.

BÖLÜM IV

NÜKLEER RASDYASYON ÖLÇÜMÜ

- **RADYASYON DOZU BİRİMLERİ**
- Radyasyon tarafından maddeye aktarılan enerjiden dolayı madde üzerinde yaptığı etkiyi açıklamada radyasyon dozu kavramları kullanılır.
- **İŞİNLAMA DOZ BİRİMİ (RÖNTGEN)**
- Havanın verilen bir **m** kütlesinde oluşan iyonlardaki toplam **Q** yükü işınlama ya da **poz (X)** olarak tanımlanır. Buna göre poz, **$X=Q/m$** ile ifade edilir. Birimi Röntgendir.
- **Bir röntgen**, bir kg havada **2.58×10^{-4} Coulomb** yük üreten elektromanyetik radyasyon olarak tanımlanır.

Bu özel birim, havadaki fotonlara uygulanır; bu bakımdan ne başka radyasyonlar için kullanılır ve ne de başka ortam için

RADYASYON DOZU BİRİMLERİ

- Eşdeğer doz (etkin eşdeğer doz), bütün bu faktörleri içine alan radyasyon dozu için kullanılmaktadır.
- Eşdeğer doz, doz ile kalite faktörünün çarpımına eşittir.
- **Soğurulan Doz Birimi**
- **Gray (Gy):** Herhangi bir maddenin bir kg'ı başına bir joule'lük enerji soğurulması meydana getiren herhangi bir radyasyon miktarıdır.
-
- $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$
- **Eşdeğer Doz Birimi: (Sievert)(Sv)**
- $1 \text{ Sv} = \text{Gy} \times \text{QF} = 1 \text{ J/kg}$
- $1 \text{ mSv} = 10^{-3} \text{ Sv}$

RADYASYON DOZU BİRİMLERİ

- **Eşdeğer Doz**
- Radyasyona maruz kalan bir insanda meydana gelebilecek zararlı biyolojik etkileri de ölçebilen bir birime ihtiyaç vardır.
- Vücudun kilogramı başına soğurduğu enerjinin meydana getirdiği biyolojik etki, maruz kalınan radyasyonun cinsine ve enerjisine göre farklılık gösterir.
- Örneğin, alfa tanecikleri beta taneciklerine göre daha ağır ve yüksek enerjili olduklarından, vücut içinde kat ettikleri birim yol başına çok daha fazla enerji bıraktıkları için geçtikleri bölgenin daha fazla tahrip olmasına neden olurlar.
- Ayrıca bazı organların diğer organlar göre radyasyon hassasiyeti farklıdır ve aynı doza karşı oluşan biyolojik etkide farklıdır.

RADYASYON DOZU BİRİMLERİ

- İnsanların radyasyondan korunmaları için, standartların tanımlanmasında farklı tipteki radyasyonların biyolojik etkilerinin ölçümü gereklidir.
- **Kalite faktörü:** Birim mesafede aktarılan enerjiye göre belirli bir radyasyon tipi ve enerjisi için kalite faktörü (**QF**) kullanılır.
- Birim uzunluk başına nispeten az enerji aktaran beta ve gammalar için **QF**'ler **1** civarındadır. Birim uzunluk başına daha fazla enerji aktaran α 'lar için **QF**'ler **20** ye kadar değişir. Buna göre eşdeğer doz aşağıdaki gibi ifade edilir:
- Eşdeğer doz (ED) = soğurulan doz (D)x kalite faktörü (QF)

NÜKLEER RADYASYON ÖLÇÜMÜ

- Alfa, beta, gamma veya nötron gibi iyonize radyasyonun şiddet ve karakterlerini elde etmede kullanılan teknik, radyasyon ölçümünün konusudur.
- İyonizasyon olayı, bir elektronu nötral atom veya molekülden uzaklaştırılmasıdır.
- Birçok materyal için bu olayda gerekli minimum enerji 10 eV olup bu değer iyonize radyasyonlar için minimum limittir.
- İyonize radyasyonun yaygın tipleri, keV veya MeV büyüklükte enerjiye sahip olan parçacık veya kuantalarla karakterize edilir. .

NÜKLEER RADYASYON ÖLÇÜMÜ

- Mevcut tartışma, enerji ölçeğinin üst sınırında enerjileri yaklaşık 20 MeV den küçük radyasyonlarla sınırlıdır.
- Bu enerji aralığı, radyoaktif bozunma, fisyon ve füzyon sistemleri ve medikal ve radyoizotopların endüstriyel uygulamaları ile sınırlıdır. Kuantum enerjileri milyar ve trilyon elektronvolta ulaşan yüksek enerjili parçacıklar bunların dışındadır
- Bu yüksek enerjili radyasyonların ölçümünde düşük enerjili radyasyonlarınkine nazaran daha büyük kütleli ve özelleştirilmiş dedektörler gereklidir.
- Radyasyona maruz kalmadan kaynaklanan birçok fiziksel etki vardır ve bunlar radyasyon ölçmeyi konu edinen *dozimetrinin* esasını oluştururlar.

NÜKLEER RADYASYON ÖLÇÜMÜ

- Radyasyon ölçüm aygıtlarının bir sınıfı, radyasyona maruz kalmadan sonra iyonize radyasyonun varlığını göstermesidir.
- Radyasyon tarafından fiziksel ve kimyasal bir değişme olur ve bu bazı işlemler boyunca ölçülür.
- Bunlar pasif dedektörler olarak adlandırılırlar ve iyonize radyasyona maruz kalmada geniş çaplı olarak kullanılırlar. Tersine, aktif dedektörlerde radyasyonun varlığını gösterecek şekilde gerçek bir zamanda bir sinyal üretilir.
- Bu dedektörler de puls modu, akım modu ve integre mod gibi modlarda çalışır.

PASİF DEDEKTÖRLER

FOTOĞRAFİK EMÜLSİYON

- İyonize radyasyonu kaydetmede fotoğrafik tekniklerin kullanımı Röntgen'in X-ışınlarını keşfettiği 1980 lere dayanır, fakat benzer teknikler günümüzde de önemli olmaktadır.
- Bir fotoğrafik emülsiyon, gümüş halidi taneciklerini (Gümüş ile halojen bileşiği AgBr, AgCl gibi) içeren bir süspansiyondan ibarettir.
- Eğer yüklü bir parçacık veya hızlı elektron emülsiyon boyunca geçerse gümüş halidi molekülleri ile olan etkileşmeler görünebilir ışığa maruz kalmada olduğu gibi benzer etkiler üretir.

FOTOĞRAFİK EMÜLSİYON

- Bazı moleküller uyarılır ve belirsiz bir süre bu durumda kalırlar. Işınlanma tamamlandıktan sonra biriken ışınlanmadan gelen gizli kayıt kimyasal proseslerle açığa çıkar.
- Uyarılmış her bir molekül metalik gümüşe dönüşür. Etkilenen moleküllerin sayısını artırarak geliştirilen taneciğin görünmesi sağlanır.
- Radyasyon dedeksiyonunda kullanılan fotoğrafik emülsiyon radyografik film ve nükleer emülsiyon olmak üzere iki sınıfa ayrılır.
- Radyografik filimler verilen bir alanda birçok radyasyon etkileşmesinin kümülatif etkisinden ileri gelen kararmayı kaydeder. Nükleer emülsiyon ise tek bir yüklü parçacığın bireysel izlerini kaydetmede kullanılır.

RADYOGRAFİK FİLMLER

- Radyografik filmler tıbbi X-ışını görüntüleme uygulamalarıyla bilinirler. Görünür ışığı kaydeden normal fotoğraf filmlerinden özellik bakımından köklü bir fark yoktur. Sadece yüksek konsantrasyonda gümüş halidi vardır.
- Emülsiyon kalınlığı 10 ile 20 mikrometre arasında değişir ve birkaç mikrometre çapında gümüş halidi içerir.
- Gelen tipik bir X-ışınının emülsiyondaki etkileşmesi yüzde birkaç olasılıktadır ve böylece bu metotlar görünebilir bir görüntü üretmede ihtiyaç hissedilen X ışınlarının şiddetinin azaltmasındaki duyarlılığı artırmada uygulanır.

NÜKLEER EMÜLSİYONLAR

- Tek parçacık izlerini görüntülemeye kullanılan nükleer emülsiyonlar genellikle normal fotoğrafik emülsiyonlardan daha kalın yapıları (500 mikrometreye kadar) ve hatta daha yüksek konsantrasyonda gümüş halidi içeriğine sahiptirler.
- Özel geliştirilmiş işlemler bireysel yüklü parçacıkların veya hızlı elektronların izlerini mikroskop altında görülebilecek şekilde işlem gören gümüş halidi tanecikleri üzerinde sürekli bir kuyruk şeklinde orta çıkarırlar.
- Parçacık emülsiyonda durduğunda, iz uzunluğu parçacık menziline verecek şekilde ölçülebilir ve böylece parçacık enerjisi tahmin edilebilir. Gümüş halidi taneciklerinin iz boyunca olan yoğunluğu, gelen parçacık için (dE/dx) durdurma gücü ile orantılıdır ve böylece farklı tip parçacıklar için de bir ayırım yapılabilmektedir.

FİLM DOZİMETRELERİ

- Film dozimetreleri X-ışını, gama ışınları yayan cihaz veya radyoaktif madde içeren (beta aktif) cihazlarla çalışan personelin maruz kaldığı dozu görüntüleme için kullanılan küçük paketlerdir. İşlem gören film yoğunluğu bilinen radyasyona maruz kalan özdeş filmdekiyle karşılaştırılarak maruz kalınan radyasyon hakkında bilgi edinilir.
- Bunlar, düşük enerjili X veya gama radyasyonunu görüntüleme için kullanıldığında, emülsiyon gümüşün fotoelektrik tesir kesitindeki yükselmesine bağlı olarak yanıt verme eğilimindedir.
- Bu sapmayı azaltmak için film düşük enerjili fotonların bir kısmını soğuracak şekilde ince bir metal tabaka içine gömülür.

TERMOLÜMİNESANS MATERYALLER

- Kişisel görüntülemelerde yaygın olarak kullanılan bir teknik termolüminesans dozimetreleridir (TLDs). Bu teknik, iyonize radyasyonun içinde elektron-deşik çiftlerinin yaratılacağı kristal materyallerin kullanılmasına dayanır.
- Bu durumda, bu yükler için tuzaklar safsızlık ilavesi bilerek yaratılır. Burada mesele, gelen radyasyon tarafından içinde birçok elektron ve deşiklerin oluşacağı ve bunların çabucak yakalanıp hareketsiz durumların yaratılmasıdır.
- Radyasyona maruz kalma süresinde madde içinde tuzaklanan yük sayısı artar. Tuzak derinliği bir yükü serbest bırakmak için gerekli minimum enerjidir. Radyasyona maruz kalmadan sonra tuzaklanan yük, kristalin ısıtılmasıyla yayınlanan ışığın ölçülmesiyle belirlenir.

TERMOLÜMİNESANS MATERYALLER

- Serbest kalan elektron ışık yayınlayarak kalan deşikle yeniden birleşir. TLD materyallerinde bu enerji elektromanyetik spektrumun görünür bölgesindedir.
- Alternatif olarak tuzaklanan deşik de benzer foton üreterek kalan elektronla birleşebilir. Yayınlanan toplam ışık şiddeti foto çoğaltıcı tüp kullanılarak ölçülebilir.
- Ölçülen ışık şiddeti tuzaklanan yük sayısı ile orantılıdır. Bu da maruz kalma süresince alınan dozla orantılıdır.

NÜKLEER İZ DEDEKTÖRLERİ

- Yüklü bir parçacık bir katı içinde yavaşlayıp durduğunda, izi boyunca depolanan enerji madde içinde daimi kalan hasara neden olur. Mikroskopla dikkatli bir inceleme olmazsa bu hasarı gözlemlemek zordur.
- Belli dielektrik maddelerde, baz veya asit solüsyonu kullanılarak yapılan kimyasal işlemlerle (*etching*) hasar izi açığa çıkabilir. Eğer yüklü parçacık geçmişte bir zaman içinde yüzeyi ışınlamışsa hasarlı maddede kalan iz yüzeyden başlayarak materyalde, parçacığın menziline eşit bir derinlik kazanır.
- Bu iz boyunca kimyasal etching oranı hasar görmemiş yüzeye nazaran daha büyüktür. Böylece, etching geliştikçe her iz pozisyonunda bir kazıntı olur. Birkaç saat içinde, bu kazıntılar mikroskop altında görülebilecek kadar büyür. Birim alanda ölçülen kazıntıların sayısı yüzeyin ışınlandığı radyasyon akısıyla orantılıdır.

PASİF DEDEKTÖRLER (Devam)

■ NÜKLEER İZ DEDEKTÖRLERİ

- Etching işleminden önce bir kazıntı oluşturmak için iz boyunca olan hasarın bir minimum yoğunluğu gereklidir.
- Hasar yoğunluğu, gelen parçacık için dE/dx durdurma gücü ile ilişkili olduğundan bu değer ağır yüklü parçacıklar için maksimumdur. Verilen bir materyal için kazıntının (çukurun) işlem görmesinden önce dE/dx in minimum değeri önemlidir.
- Örneğin, mikada çukurlar sadece kütle numarası 10-20 veya daha büyük olan enerjik ağır iyonlar için gözlenebilir. Birçok bilinen plastikler düşük enerjili alfa parçacıkları için çukurların gelişimine daha duyarlıdır.
- Özellikle bazı plastikler örneğin selüloz nitrat protonlar için kazıntı oluşumuna uygundur. Hızlı elektronlar için düşük dE/dx izleri için kazıntı gelişim oluşturabilecek materyal bulunamamıştır. Eşik davranışı iz dedektörlerini beta ve gamalar için tamamen duyarsız yapar.

NÜKLEER İZ DEDEKTÖRLERİ

- Radon gazı ve ürünlerinin bozunumuyla oluşan üretilen alfa parçacıklarının çevresel ölçümleri plastik-iz dedektörleri ile yapılır.
- Etching özellikleri potansiyel olarak ışık ve yüksek sıcaklığa maruz kalmadan etkilenir ve bu nedenle uzun süreli bekletilmelerde bazı tedbirler alınmalıdır.
- İz yoğunluklarını ölçmede mikroskopla birlikte optiksel analize uygun bilgisayar yazılımı içeren bilgisayar kullanan otomatik metotlar geliştirilmektedir.
- Bu sistemler çizikler gibi suni olarak yapılan hataları azaltmaya imkan verir ve birim alandaki izlerin doğru ölçümünü sağlar.

NÖTRON AKTİVASYON DEDEKTÖRLERİ

- Enerjileri birkaç MeV ve daha az olan yüklü parçacıklar ve hızlı elektronlar soğurucu maddelerde nükleer reaksiyon oluşturmazlar. Aynı şekilde enerjileri birkaç MeV'in altında olan gamma ışınları da nükleer reaksiyonlara meyilli değildir.
- Dolayısıyla bu tür radyasyonlarla bombardıman edilen çekirdekler etkilenmez ve ışınlanan maddede radyoaktiflik olmaz. Nötronlar bu davranışın dışındadır.
- Nötronlar yüksüz olduklarından düşük enerjili olsalar bile çekirdeklerle etkileşmeye meyillidirler nükleer reaksiyonları geniş bir kısmını oluştururlar. Bu reaksiyonların birçoğu radyoaktif radyoaktif ürünler oluşturur bunların varlığı ürettikleri radyasyona duyarlı uygun dedektörlerle ölçülebilir.

NÖTRON AKTİVASYON DEDEKTÖRLERİ

- Örneğin, çekirdeklerin birçok tipi radyoaktif çekirdek oluşturacak şekilde bir nötron soğurur. Bu tür bir örnek belli bir süre boyunca nötron radyasyonuna maruz bırakılırsa bir radyoaktif çekirdek nüfusu oluşur.
- Örnek, nötron ışınlamasından uzaklaştırılırsa radyoaktif çekirdekler belli bir yarı-ömürlü olarak bozunurlar. Bu bozunmada bazı tip radyasyonlar yayınlanır, bazen beta parçacıkları veya gammalar veya her ikisi birlikte yayınlanır ve bunlar aşağıda açıklanacak olan aktif dedeksiyon metotlarıyla sayılırlar.
- Bu radyasyonlar, oluşturulan radyoaktiviteyle orantılı olduklarından örneğin ışınlandığı nötron akısı şiddeti radyoaktivite ölçümünden elde edilebilir.

NÖTRON AKTİVASYON DEDEKTÖRLERİ

- Doğru ölçüme izin verecek şekilde yeterli radyoaktivite oluşturmada bağıl olarak şiddetli nötron akıları gereklidir. Böylece aktivasyon levhaları sıklıkla reaktörler, hızlandırıcılar veya diğer şiddetli nötron kaynakları civarındaki nötron alanlarını ölçmede bir teknik olarak kullanılırlar.
- Yavaş nötronlar için gümüş, iridyum ve altın yaygın olarak kullanıldığı halde hızlı nötronlar için demir, magnezyum ve alüminyum kullanılır.
- Bu durumlarda, indüklenene aktivite yarı ömrü birkaç dakika ile birkaç gün arasındadır.

AKTİF DEDEKTÖRLER

- Birçok uygulamada, iyonize radyasyonun varlığını gösteren gerçek bir zamanda bir sinyal üretmek önemlidir.
- Böyle dedektörlere aktif dedektörler denir. Aktif dedektörlerin birçok tipi bireysel radyasyon kuantumu (tek bir parçacığı veya X-ışını fotonu gibi) için bir sinyal üretebilir.
- Diğer tipleri de, dedektör materyalinde etkileşen birçok kuantumun kollektif etkisine yanıt süresinde bir sinyal sağlayabilir.

İŞLEM MODLARI

- Birçok dedektör tiplerinde, tek bir parçacık veya radyasyon kuantumu dedektör materyalinde depo ettiği enerjinin bir sonucu olarak belli bir miktarda Q yükü açığa çıkarır.
- Örneğin, Q yükü bir gaz içinde parçacığın izi boyunca birçok pozitif iyonun taşıdığı toplam yükü temsil eder eşit miktarda yük de serbest elektronlar tarafından üretilir).
- Bu yük kısa bir süre boyunca yaratılır. Bu süre tipik olarak nanosaniyeden kısadır. Bir gaz içinde veya yarı iletken dedektör içinde kurulan elektrik alanda bireysel yük taşıyıcılarının hareketi boyunca toplanır.
- Bu hareket eden yükler elektrik akımını temsil ettiğinden radyasyonun bir tek kuantuma yanıtı, yük taşıyıcılarının toplanması ile son bulan bir akım atması ile modellenebilir.

İŞLEM MODLARI

- Bizim basitleştirilmiş modelimizde, $t=0$ dan başlayan bir sürede Q yükünün açığa çıkmasıdır. Bundan sonraki aşama bu yükün uygulanan elektrik alanla temel bir elektrik sinyali oluşturacak şekilde toplanmasıdır.
- Yüklerin toplanması dedektörden dedektöre değişir. Örneğin, bu süre iyon odasında birkaç mikro saniye ile yarıiletken dedektörlerde birkaç nano saniyedir.
- O halde tipik bir dedektör modelimiz, tek bir radyasyon parçacığı veya kuantumuna cevabı belli bir yük depolanmasına karşı gelen akım olmalıdır.
- Mevcut tartışmamız çerçevesinde, her bir bireysel etkileşmenin vereceği akımın birbirinden ayırt edilebileceği kadar düşük hızdaki (birim zamanda dedektöre giren radyasyon sayısı) radyasyonu dikkate alacağız.

İŞLEM MODLARI

- Her bir akımın şiddeti ve süresi radyasyonun etkileşme tipine bağlı olarak değişir. Poisson istatistiğine göre radyasyonun ulaşma süresi rast gele olduğundan pulslar arasındaki zaman aralıkları da rast gelelidir.
 - i. **Akım modu:** Bir dedektörden elektrik sinyali almak için dedektör çıkışına yavaş yanıt süreli bir akım ölçer bağlamaktır. Eğer ölçüm yapan cihazımızın sabit bir T yanıt süresi varsa, peş peşe gelen iki olay arasında kaydedilen sinyal zamana bağlı bir akım oluşturur.

$$I(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t i(t') dt'$$

İŞLEM MODLARI

T yanıt süresi bireysel akım pulsları arasındaki ortalama zamandan uzun olduğundan akım ölçer birçok radyasyon kuantumu tarafından oluşturulan yüklerle orantılı ortalama bir akım ölçer:

$$I_0 = rQ = r \frac{E}{W} q$$

Burada r olay sayısı, W bir iyon çifti oluşturmak için gerekli enerji, E her bir olayda depolanan enerji ve $q=1.6 \times 10^{-19}$ C. Bu mod, akım modu olarak bilinir ve birçok dedektör bu prensibe göre çalışır.

İŞLEM MODLARI

- ii. **İntegre mod:** Öyle durumlar vardır ki dedektörde ışınlanma esnasında oluşan akımlar toplanır ve biriken toplam yük ölçülür.

Bu işlem modu, toplam ışınlanma ile ilgili bilgi üretir fakat ışınlanma esnasında şiddet değişimleri hakkında detaylı bilgi sağlamaz. Bu anlamda pasif dedektörlerin işlemine benzer.

Portatif iyonlaşma odası bazen bu anlamda kullanılır; toplam iyonizasyon yükü oda boyunca olan voltajdaki düşmeyi kaydederek ölçülür.

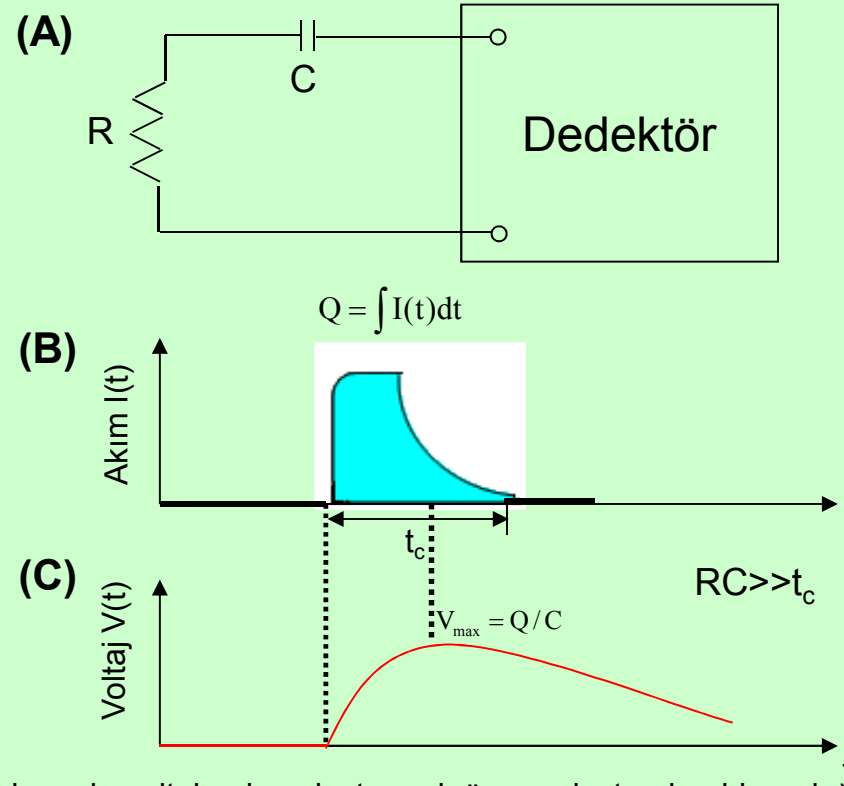
Bu mod, küçük sinyal akımlarının direkt ölçümünün zor olduğu veya pratik olmadığı durumlarda yararlıdır.

İŞLEM MODLARI

- **iii. Puls modu:** Birçok uygulamada, bireysel radyasyon kuantumunun özellikleri hakkında bilgi edinilir.
- Böyle durumlarda, dedektör işlem modu puls modu olarak bilinen moda çalıştırılır.
- Bu moda, dedektörle etkileşen her bir bireysel radyasyon kuantumu için elektriksel puls üretilir. Dedektör çıkışı Şekil 4.1 de görülen bir ölçme devresine bağlanır.

İŞLEM MODLARI

■ Aktif dedektörler



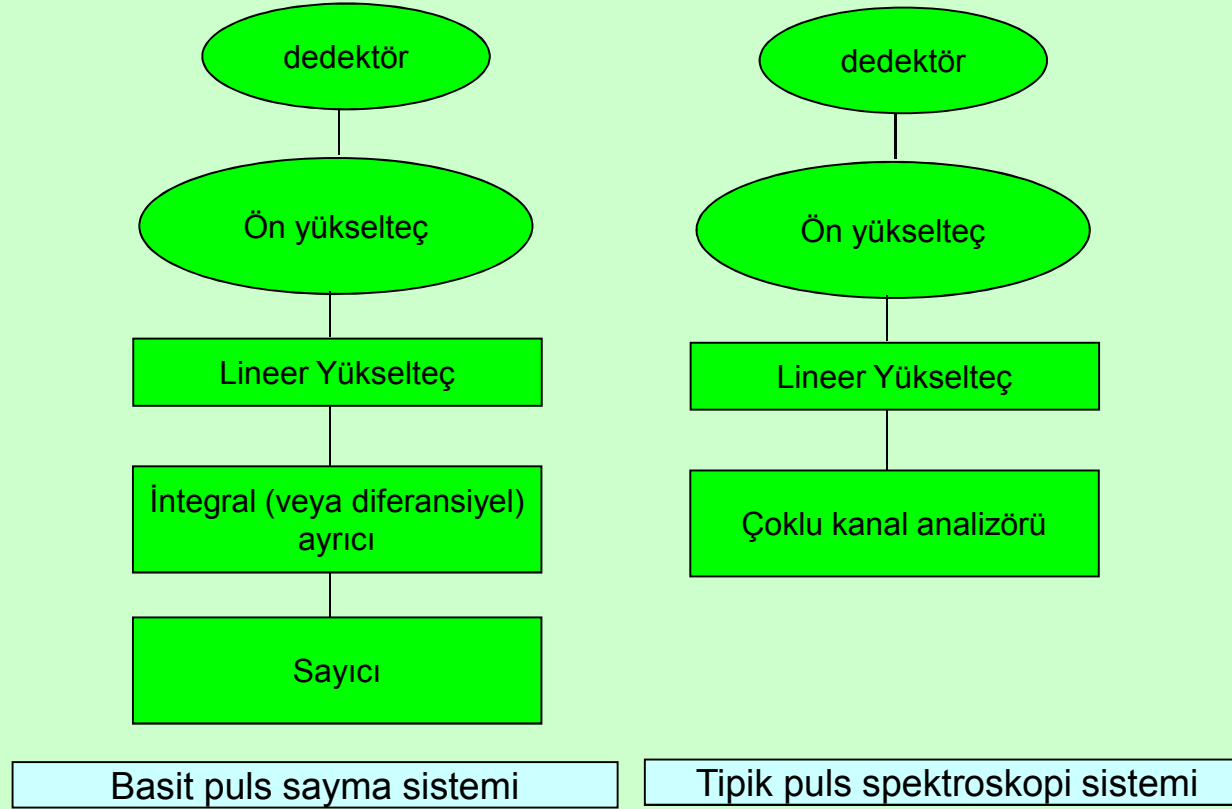
Şekil 4.1 (A) Dedektör çıkışında voltaj pulsu oluşturmak üzere oluşturulan bir eşdeğer devre. (B) Tek bir kuantumun dedektörde etkileşmesiyle oluşan temsili akım pulsu. Akımın sınırlandırdığı alan toplanarak Toplam Q yükü elde edilir. (C) . $V(t)$ zamana bağlı olarak üretilen voltaj (A) daki devre boyunca geliştirilen voltaj pulsu.

İŞLEM MODLARI

- Bu devre ön yükselteç biriminin giriş aşamasını oluşturur. Temel sinyal R yük direnci ve C kapasitansını içeren devre boyunca ölçülen voltajdır.
- Bu tip konfigürasyon RC zaman sabitine sahiptir. Basitlik olsun diye, zaman sabitinin, dedektördeki yük toplama süresi ile kıyaslandığında uzun, fakat iki bireysel parçacığın dedektördeki etkileşme süreleri arasındaki farka nazaran kısa olduğu varsayılır.
- Buna göre her bir kuantum Şekil 4.1 (c) de görülen voltajı verir. Voltaj pulsu yük toplama süresince oluşur tüm yük toplandığında maksimum değere ulaşır ve sonra üstel olarak zaman sabiti ile belirlenen bir karakteristikle sifıra gider. Bu tip puls bir kuyruk puls olarak bilinir ve ön yükselteçten gözlenir.
- Kuyruk pulsunun en önemli özelliği onun maksimum boyu yada genliğidir. Açıklanan bu şartlar altında, genlik $V_{max}=Q/C$ ile verilir ve Q bireysel radyasyon kuantumu tarafından dedektörde üretilen yüküdür ve C devrenin kapasitansdır. Bu kuyruk puls ikinci bir birim olan lineer yükselteç ile yükseltilir şekillenir. Tabii ki bu elde edilen puls dedektörde radyasyon kuantumu tarafından açığa çıkarılan yükü orantılıdır.

AKTİF DEDEKTÖRLER

Sayma sistemleri



Şekil 4.2 (Solda) Bir puls sayma sisteminde yaygın olarak kullanılan puls geliştirme birimleri. (Sağda) Bir spektroskopi sistemini oluşturan birimler.

SAYMA SİSTEMLERİ

- Basit sayma sistemlerinde amaç, verilen bir zamanda oluşan puls sayısını kaydetmek veya alternatif olarak, pulsların oluşma hızını göstermektir.
- Yaygın bir metot integral diskriminatörü denilen ve önceden ayarlanan bir genlikten daha büyük olan pulsları saymaya yarayan bir elektronik birim işletilir.
- Bu uygulamada önemi olmayan küçük pulsları elemek için kullanılır. Alternatif olarak, bir diferansiyel diskriminatör (tek-kanal analizörü) verilen bir minimum ile maksimum arasındaki pulsları seçmek için kullanılır.

SAYMA SİSTEMLERİ

- Sayma sistemlerinde önemli bir kavram ölü zamandır.
- Dedektördeki her bir olayı takip eden öyle bir zaman periyodu vardır ki bu süre olayın geliştiği ve diğer olaylara duyarsız kalınan süredir.
- Radyasyon olayları zaman içinde rastgele bir dağılım gösterdiklerinden daima gerçek bir olayın oluşması ve biraz sonra da önceki olayın kaybolması daima bir şans dâhilindedir.
- Sonuç olarak ölçülen sayımların sayısı daima gerçek değerinin altında olur. Ölü zaman kayıpları için düzeltmeler yapılabilir.

SPEKTROSKOPİ SİSTEMLERİ

- Yukarıda açıklanan puls-modu sayım sistemleri kabul edilen pulsları genlikleri hakkında bir bilgi vermez.
- Birçok dedektör tipinde, Q yükü ve böylece sinyal genliği gelen radyasyon tarafından dedektörde depo edilen enerji ile orantılıdır.
- Bu bakımdan, önemli bir sayma sistemi seti pulsların sayısını ve genliğini kaydetmeye dayanır. Bunlar spektroskopi sistemleri olarak bilinir ve bunların esas uygulaması dedektöre giren radyasyonun enerji dağılımını elde etmektir.
- Spektroskopi sistemlerinde amaç her pulsu genliğine göre seçmektir. Her puls lineer yükselteçten türüne göre çok sayıdaki kanallardan biri içine yerleştirilir.

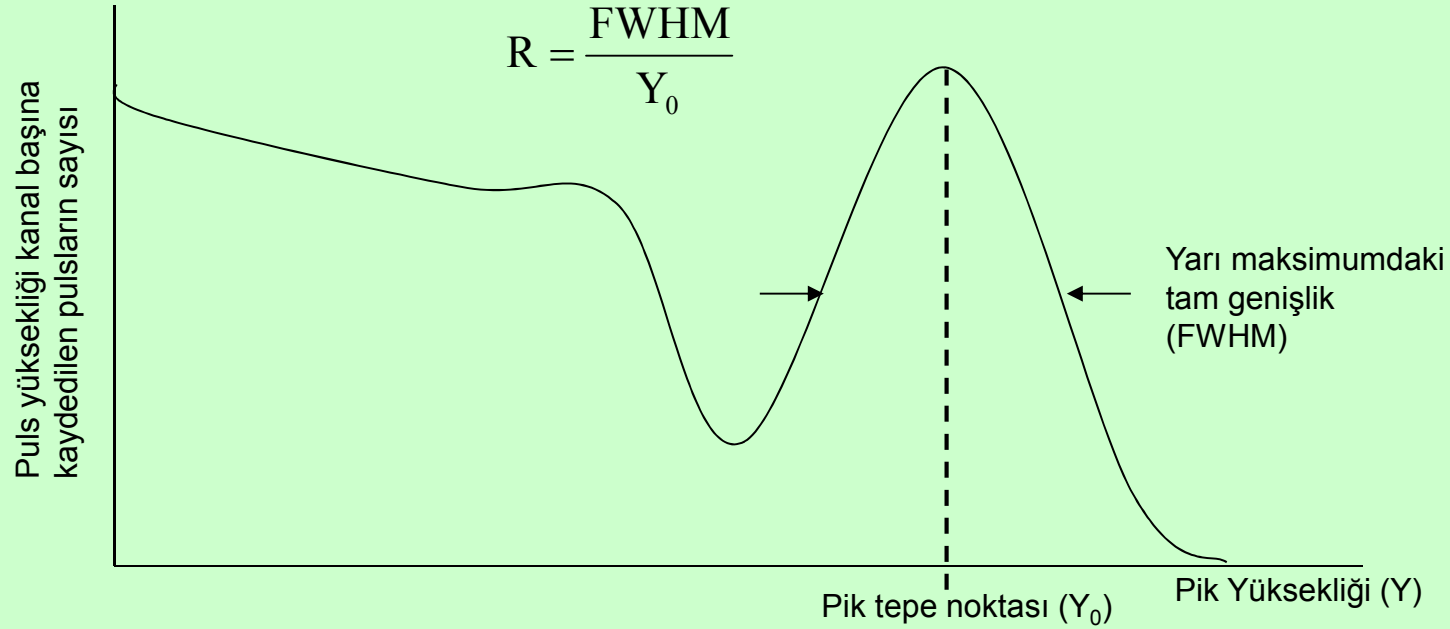
SPEKTROSKOPİ SİSTEMLERİ

- Bu spektrumda, gerçekleşen birçok olayın puls genliklerine karşı gelen pikler görülmektedir. Puls genliği depo edilen enerjiyle orantılı olduğundan, böyle pikler sıklıkla dedektör tarafından kaydedilen sabit enerjili radyasyona karşılık gelir.
- Puls yüksekliği spektrumunda kaydedilen pulsların konum ve şiddeti dikkate alındığında, spektroskopi ölçümlerini gelen radyasyonun enerji ve şiddet terimleriyle spektroskopi yorumlamak mümkün olmaktadır.
- Puls yüksekliği spektrumu, pulsları çok kanallı analizöre göndererek kaydedilir. Burada pulslar genliklerine göre ayrılırlar.
- İdeal olarak her gelen puls çok kanallı analizörün kanallarından birinde toplanır. Böylece, ölçme tamamlandığında, kanallarda toplanan sayımların toplamı ölçme periyodu boyunca kanallarda kaydedilen dedektör tarafından üretilen puls sayısına eşit olur.
- Her kanal belli genlik ve darlıktaki sinyal pulsuna karşılık gelir. Pulslar genliklerine göre kanallarda toplandığında, bir puls yüksekliği spektrumu verilen bir zaman sonra elde edilir.

SPEKTROSKOPİ SİSTEMLERİ

- Spektroskopinin önemli bir özelliği enerji çözünürlüğüdür. Bu kavram dedektörün, sabit enerjili bir radyasyon kuantumuna maruz kaldığını varsayarak kolayca anlaşılabilir. (Tek bir gamma-enerjili yayınlayan bir radyoizotopun bozunmasında ideale yaklaşılr.).
- Birçok radyasyon kuantumu dedektörde aynı enerjiyi depolar ve dolayısıyla özdeş Q yükü açığa çıkarır. Böylece, tam olarak aynı genlikteki pulslar çok kanallı analizörün aynı kanalında depolanır.
- Gerçek sistemlerde bazı dalgalanmalar olabilir ve bunlar birçok kanal boyunca yayılabilir (Şekil 4.3).

SPEKTROSKOPİ SİSTEMLERİ



Şekil 4.3. R enerji çözünürlüğünü gösteren bir puls yüksekliği spektrumu (böyle bir spektrum, tek enerjili gamma kaynağı için bir sintilatör dedektörü tarafından kaydedilmiş olabilir.)

Enerji çözünürlüğünün tanımı şekilde görülmektedir. Küçük R değerleri dar piklere ve iyi enerji çözünürlüğüne karşı gelmektedir.

DEDEKSİYON VERİMLİLİĞİ

- Puls modunda çalıştırılan herhangi öz dedeksiyon verimi, gelen bir radyasyon kuantumunun dedektörde bir puls üretme olasılığı olarak tanımlanır.
- Özellikle düşük şiddetteki radyasyonlar için, ölçümdeki iyi istatistiksel doğruluk için, yeterli puls kaydetmede gerekli toplam zamanı minimize etmek için yüksek bir dedeksiyon verimliliği önemlidir.
- Dedeksiyon verimi iki alt gruba ayrılır: toplam verim ve pik verimi. Toplam verimlilik, gelen bir radyasyon kuantumunun dedektörden bir puls üretme olasılığını verir. Pik verimliliği ise kuantumun tüm enerjisini dedektörde depolama olasılığı olarak tanımlanır. Kuantumun, enerjisinin sadece bir kısmını dedektörde depolaması ve dedektörden kaçma olasılığı her zaman olması mümkün olduğundan toplam verimlilik pik verimliliğinden daha büyüktür.

DEDEKSİYON VERİMLİLİĞİ

- Verilen bir dedektör için, verim değeri gelen radyasyonun enerji ve tipine bağlıdır. Gelen alfa ve beta gibi yüklü parçacıklar için toplam verim birçok dedektör için hemen %100 dür.
- Bu parçacıklar aktif girmeleriyle birlikte, hemen enerjilerini depolamaya başlayacakları için aktif dedektör hacmine ulaşırlarsa belli genlikte bir puls üretilir.
- Gelen gamma ışınları için, durum biraz farklıdır. Düşük enerjili fotonlar dışında, gelen bir gamma ışınının etkileşmeden dedektörü tamamen terk etmesi mümkündür. Böyle durumlarda, toplam verim, %100 den oldukça küçük olacaktır. Dahası, birçok gamma ışını enerjilerinin sadece bir kısmını dedektörde depolar.
- Bu olaylar, pulslar üretseler de, genlikleri ilk gamma ışını enerjisini gösterecek şekilde pik verimine katkıda bulunmazlar. Bu nedenle, pik verimi değerleri bir veya birkaç kez dedektörde etkileşen ve sonunda tüm enerjilerini dedektörde depolayan gamma ışını fotonlarını birleştirir.

DEDEKSİYON VERİMLİLİĞİ

- Gammalar için toplam verim, gelen gamma-ışını akısı doğrultusunda dedektör kalınlığını artırarak artırılabilir. Verilen bir kalınlık için pik verimi, orijinal fotonun tüm enerjisini fotoelektriksel olarak soğuracak şekilde büyük atom numaralı bir materyal seçerek artırılabilir.
- Tüm enerji soğurumu tek bir fotoelektrik etkileşmesiyle olabilir fakat daha çok bu olay, gelen foton dedektör içinde bir yerlerde bir veya birkaç kez Compton saçılması yaptıktan sonra olur.
- Alternatif olarak, tam soğurma, eğer çift üretimini yok olma fotonlarının tam soğurulması takip edecek şekilde de olabilir. Bu çoklu etkileşmeler dedektörün aktif hacminde artırıldığından, gamma ışını dedektörleri için pik verimi, artan boyutla birlikte önemli ölçüde geliştirilir.

ZAMANLAMA KARAKTERİSTİKLERİ

- Puls modu işleminin ilave faydalarından biri, bireysel radyasyon kuantumunun ulaşma süresinin dedektör çıkışında bir pulsun görünme süresiyle yakından ilgili olduğu gerçektir.
- Birçok nükleer ölçümlerde, aynı nükleer olayda yayınlanan iki ayrı kuantumun belirlenebilmesi bir avantajdır ve bundan dolayı zaman uyumlu iki ayrı dedektör ile algılanabilir.
- Zamanlama bilgisinin belirlenmesinde uygulamasına başka bir örnek, başlangıç noktası ile dedektördeki mesafe arasındaki uçuş süresini ölçerek, bir parçacığın hızını veya enerjisini belirlenmesidir.

Aktif Dedektörler (Devam)

Burada aktif dedektör olarak gazlı dedektörler ile katı hal dedektörü olarak ta sintilasyon dedektörleri incelenecektir

GAZLI DOLU DEDEKTÖRLER

- Yüklü bir parçacığın bir gaz içinden geçişi normal atomik yapıdaki gazın elektronlara enerji transferi ile sonuçlanır. Yüklü parçacık bir atoma yeteri kadar yakın geçerse, uyarma veya iyonizasyon için enerji transferi yeterli olabilir.
- Uyarılma olayında, bir elektron orijinal durumundan daha zayıf bağlı bir duruma geçer. Tipik bir gaz atomunda enerji seviyeleri birkaç elektronvolt aralıklıdır ve dolayısıyla uyarılma için tipik bir radyasyon kuantumunun küçük bir kesri yeterlidir.
- Uyarılmış durum, taban duruma geçmeden önce belli bir süreyle o düzeyde kalır. Bu süre ortalama olarak (ortalama ömür) gazlarda sadece birkaç nanosaniye kadardır.

GAZ DOLU DEDEKTÖRLER (Devam)

- Atom aniden taban duruma geçtiğinde, uyarılma enerjisi serbest kalır ve genellikle bir elektromanyetik radyasyon yayınlanır. Bu radyasyonun dalga boyu tipik gazlar için spektrumun ultraviyole bölgesindedir.
- Böylece, gaz atomlarının uyarılması ultraviyole fotonunun gözlenmesiyle sonuçlanır. Tipik bir yüklü parçacık izi boyunca, ultraviyole fotonlarının gözlenmesiyle sonuçlanan, binlerce uyarılmış atom yaratır.
- Bazı dedektörler, direkt olarak ultraviyole ışığa duyarlı olup olan gaz sintilatörleri olarak bilinirler. Ultraviyole fotonları, biraz sonra anlatılacak olan, Geiger-Müller tüpünde yaratılan pulsta da önemli rol oynarlar.

GAZ DOLU DEDEKTÖRLER (Devam)

- Bir gaz atomuyla gelen yüklü parçacığın yakın karşılaşmasında, elektronu atomdan uzaklaştırmak için yeterli enerji transferi yapılabilir.
- İyonize atom bir elektron-boşluğu içerdiğinden, net bir pozitif yük taşır ve pozitif iyon olarak bilinir. İyon çiftinin diğer parçası elektron atoma o kadar sıkı bağlı olmayıp serbest elektron olarak bilinir.
- Birçok serbest elektron düşük kinetik enerjili olup basitçe gaz boyunca diffüze olur. Bu elektronların hareketleri, gelen yüklü parçacığın izi boyunca yaratılan ilk iyonlaşma ve uyarılmadan uzaklaşan kısa yollardır.

GAZ DOLU DEDEKTÖRLER (Devam)

- İyonlaşma potansiyeli veya elektronu uzaklaştırmak için gerekli minimum enerji, tipik gazlar kullanan radyasyon dedektörleri için yaklaşık 10 eV kadardır.
- Gelen parçacığın, bir iyon çifti yaratması için, yaklaşık olarak 30 eV enerji kaybetmesi gereklidir. Geri kalan enerji, çeşitli uyarma süreçleri için gereklidir.
- Enerjisini gaza transfer eden 1 MeV enerjili bir parçacığın izi boyunca yaklaşık olarak 30,000 iyon çifti oluşur. Hem pozitif iyonlar ve hem de serbest elektronlar, uygulanan bir dış elektrik alanla tercih edilen bir yönde sürüklenebilir.
- Bu yüklerin hareketi, iyon odaları, orantılı sayaçlar ve Geiger-Müller dedektörleri gibi gaz-dolu dedektörler tarafından elektrik sinyal pulsu oluşturmaya hizmet ederler.

AKTİF DEDEKTÖRLER -Devam

■ İYON ODALARI

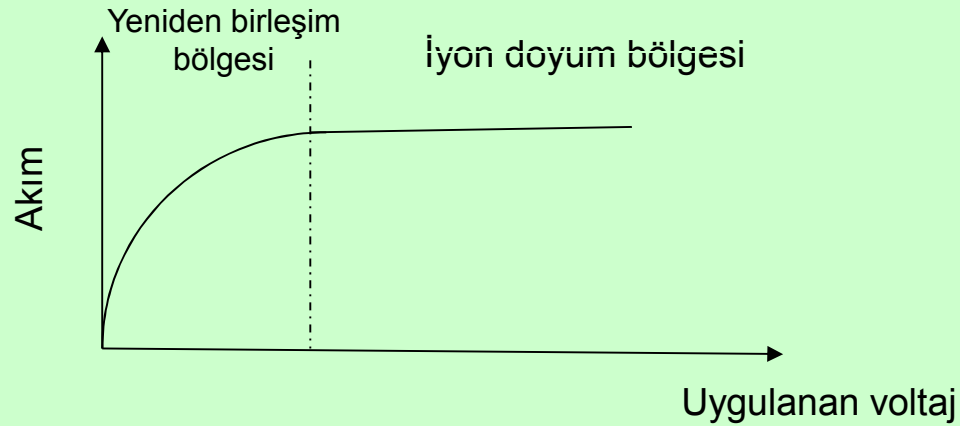
■ Bir iyon odası, gaz dolu bir hacimde zıt kenarları arasında yer alan iki elektrot içeren bir aygıttır. İki elektrot arasına bir voltaj uygulayarak bir elektrik alan yaratılabilir.

■ Gelen radyasyon tarafından oluşturulan iyon çiftleri, pozitif iyonların katoda ve elektronların da anoda sürüklenmesi şeklinde sürüklenecek şekilde, bu elektrik alan tarafından bir kuvvet etkisinde kalırlar. Bu yüklerin hareketi, dış devrede ölçülebilen, bir elektrik akımı oluştururlar.

■ İyon odaları sıklıkla akım-modu aygıtı olarak çalıştırılırlar. Tipik bir iyon odasının, sabit radyasyonla ışınlanması durumunda, akım-voltaj karakteristikleri Şekil 5 teki gibidir.

İYON ODALARI (Devam)

- İyon odası



Şekil 4.4 İyonlaşma odası akım-voltaj karakteristiği

Uygulanan düşük voltajlarda, pozitif ve negatif yükler birbirlerini nötrleyip ölçülebilen bir akım oluşmasını engelleyecek şekilde birleşme eğilimindedirler.

İYON ODALARI (devam)

- Voltajın artırılmasıyla, daha kuvvetli elektrik alanı yükleri daha çabuk ayırır ve yeniden birleşme uygulanan yeterli voltajla engellenir. Bu nokta, iyon-doyum bölgesinin başlangıcı olup akım uygulanan voltaja bağlı değildir.
- Bu bölge, normal olarak iyon odaları olarak seçilen işlem bölgesidir. Bu şartlar altında dış devrede ölçülen akım basitçe gelen radyasyonun yük oluşturma hızına eşittir.
- Hava dolu odalar akım modunda çalıştırılan portatif tip ölçme aygıtı olup potansiyel olarak kişisel gamma ışınlarına maruz kalmayı görüntülemeye kullanılır.
- Bunun bir nedeni, tarihsel bir birim olan ve havanın birim kütlesindeki iyonizasyon yük miktarı röntgen'den (R) dolaydır. Bir iyon odasında üretilen sinyalin bu tanımla olan yakın ilişkisinden dolayı, iyon akımının uygun koşullar altında ölçümü, gelen gamma-ışını enerjilerinin geniş bir aralık üzerinden gamma ışını poz hızının doğru ölçüsünü verebilir.

İYON ODALARI (Devam)

- Orta düzeydeki bir gamma-ışınına poz hızı için tipik bir iyon odasından gözlenen akımın büyüklüğü oldukça küçüktür.
- Örneğin, saat başına 3-10 röntgenlik bir gamma pozunu için (bu küçük bir değer fakat kişisel görüntüleme bakımından önemli bir seviyedir), atmosfer basıncındaki 1 litrelik bir odadan beklenen iyon akımı yaklaşık 0,1 pikoamperdir (pA). Bu düşük akımların doğru ölçülebilmeleri için duyarlı elektrometreler kullanılmalıdır.
- İyon odaları, bazen integre modda pasif dedektör olarak da çalıştırabilirler. Bunun için sabit bir V_0 voltajında tutulur, odanın doğal sığası C ise ilk yükleme adımında CV_0 yükü depolanır.
- Daha sonra oda voltaj kaynağından ve radyasyon pozundan ayrılır. Daha sonra odada ölçülen V voltaj düşmesinden ışınlama esansındaki CV iyonizasyon yükünü verir. Küçük iyon odaları, kişisel ışınlamayı görüntüleme sıklıkla kullanılırlar.

İYON ODALARI (Devam)

- İyon odaları nadiren de puls modunda çalıştırılırlar ve bu işlem modu sadece sahip gaz içinde yüksek durdurma gücüne sahip ve dolayısıyla büyük miktarda enerji depolayan parçacıklar için dikkate alınır.
- Burada asıl problem tek radyasyon kuantumunun etkileşimiyle üretilen küçük boyutlu voltajın olmasıdır. Tipik olarak 100 pF sızmalı bir iyon odasında 1 MeV'lik enerji depolanması 50 mV genlikli bir voltaj üretir. Uygun tekniklerle bu düşük seviyedeki sinyali ölçmek mümkün olsada gaz dolu dedektörleri orantılı veya Geiger Mülere sayaçlarının puls modunda kullanmak yaygındır.

ORANTILI SAYAÇLAR

- İyon odalarındaki küçük genlikli puls, gaz dolu dedektörün farklı manada kullanılması ile iyileştirilebilir. Bir orantılı sayaç, puls boyutunu yüzlerce veya binlerce kat artırmak için ikincil iyonizasyon olayını kullanır. Bu şekilde orantılı sayaç pulsları mikrovolttan ziyade milivolt mertebesine çıkarılır.
- İkincil iyonizasyon, serbest bir elektronun kuvvetli bir elektrik alanında hareketinin bir sonucudur. Alan cm başına yaklaşık 10.000 volt olduğunda, serbest bir elektron gaz içinde iki çarpışma arasında ikincil iyonlaşmaya sebep olacak kadar yeterli enerji kazanabilir.
- Böyle bir iyonize çarpışmadan sonra, bir orijinal elektron yerine iki serbest elektron ortaya çıkar. Düzgün bir elektrik alanında bu şartlar altına, elektron sayısı uygulanan elektrik alanın zıt yönünde çekilmesiyle üstel olarak artar elektron sayısındaki artış anoda ulaşmalarıyla son bulur. Böyle bir elektron sağanağının üretimi Townsend çığı olarak adlandırılır ve bir tek elektronla tetiklenir.

ORANTILI SAYAÇLAR (Devam)

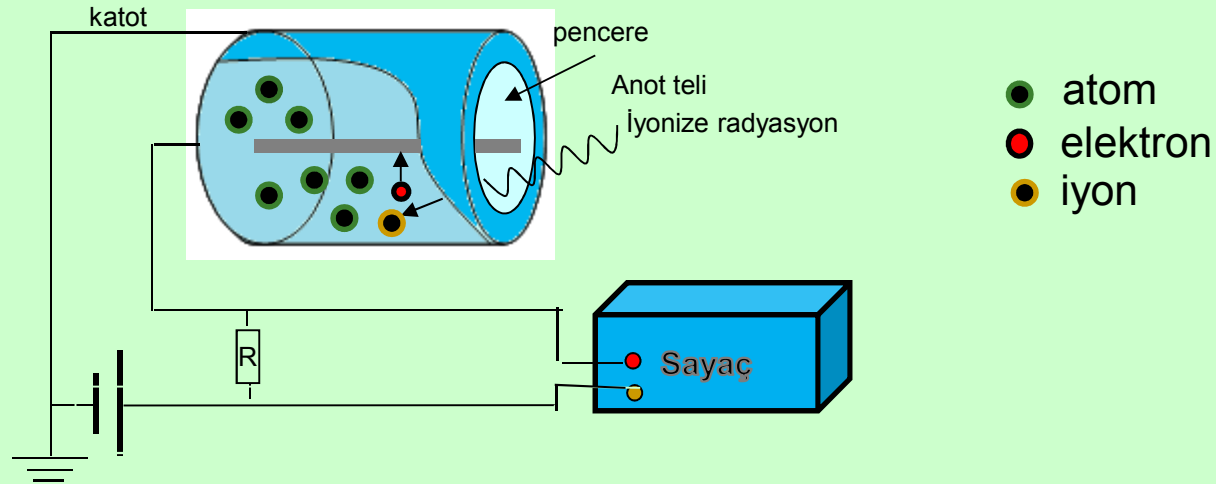
- Bir çığı içindeki toplam elektron sayısı kolaylıkla 1000 veya daha fazla sayıya kolayca ulaşabilir ve dolayısıyla gaz içinde üretilen yk aynı faktör kadar artırılır. Townsend çığı bir mikrosaniyeden daha küçük bir zaman aralığında olur. Böylece, gelen tek bir radyasyon kuantumunun etkileşmesinden kaynaklanan bu ilave yükler normal olarak gözlenen pulsa katkıda bulunurlar.
- Orantılı bir sayaçta amaç, kendi Townsend ığını yaratacak her bir orijinal serbest elektronun gelen parçacığın izi boyunca elde edilmesidir. Dizayn amaçlarından biri, yaratılan toplam yükün parçacığın izi boyunca oluşan orijinal iyon çiftinin sayısı ile orantılı olacak şekilde her çığı aynı boyutta tutmaktır. ıkış pulsunun boyu ile gelen radyasyonun gaz içinde kaybettiği enerji miktarı arasındaki orantılılık orantılı sayaç teriminin esasıdır.

ORANTILI SAYAÇLAR (Devam)

- Hemen hemen bütün orantılı sayaçlar, küçük yarıçaplı bir anot telininin katot olarak da kullanılan ve atmosfer basıncında gaz içeren geniş bir silindir içine yerleştirilmesiyle yapılırlar (Şekil 4.5). Bu şartlar altında, elektrik alan düzgün değildir ve tel yüzeyi yakınında büyük değerler alır.
- Hemen hemen gazın tamamı yüksek alan bölgesi dışında kalır ve gelen radyasyon tarafından oluşturulan elektronlar gaz içinde rast gele konumda olurlar ve ikincil iyonlaşma yapmaksızın tele doğru sürüklenirler. Elektronlar, tele doğru çekilmeleriyle birlikte, sürekli olarak artan elektrik alan etkisinde kalırlar ve sonunda elektrik alan Townsend çığını başlatacak değere ulaşır. Daha sonra çığ, elektronlar tel yüzeyine ulaşınca kadar büyür.
- Hemen hemen bütün çığlar, ilk olarak serbest elektronun gaz içinde oluştuğu konumuna bağlı olarak özdeş elektrik alan altında oluşurlar ve şiddetleri aynı olur. Dahası, çığ oluşumu için gerekli olan yüksek şiddetteki elektrik alan anotla katot arasına birkaç bin voltta fazla olmayan voltaj uygulayarak elde edilir.

ORANTILI SAYAÇLAR (Devam)

- Orantılı sayaç
- Tel yüzeyi yakınında, elektrik alan şiddeti tel merkezinden olan uzaklıkla ters orantılı olarak değişir ve şayet tel yarıçapı küçük tutulursa tel yüzeyinde aşırı yüksek değere ulaşır. Çıkış pulsunun boyu, orantılı tüpe uygulanan voltajla artar, çünkü her çığ elektrik alan şiddetinin artmasıyla daha da büyür.



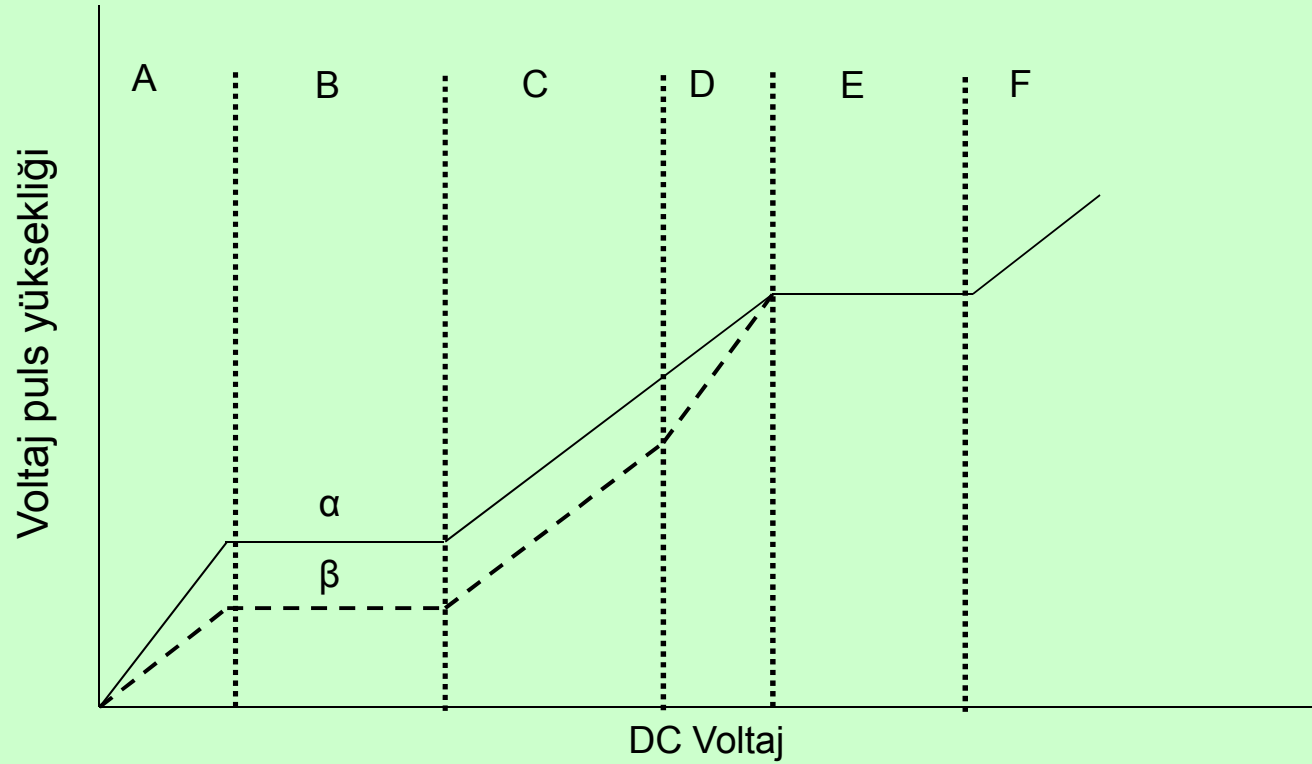
Şekil 4.5 Orantılı sayaç

ORANTILI SAYAÇLAR (Devam)

- Bir Townsend çığı oluşturmak için, iyonizasyonda oluşturulan negatif yükler serbest elektronlar olmalıdır. Bazı gazlarda nötr moleküllerin elektron toplayarak negatif iyon olma eğilimi vardır. Bir negatif iyonun kütlesi serbest bir elektron kütlesinden binlerce kez fazla olduğundan, negatif iyon çarpışmalar arasında ikincil iyonlaşmaya sebep olacak kadar gerekli enerjiyi kazanamaz.
- Elektronlar asal gaz moleküllerine ulaşmaya meyilli değildirler ve argon orantılı sayaçlarda yaygın olarak kullanılan doygun gazlardan biridir. Oksijen elektronlara yaklaşma eğilimindedir, bununla birlikte hava normal şartlarda orantılı sayaçlar için doygun gaz olarak kullanılmaz. Bundan dolayı, orantılı sayaçlar ya hava kaçağına karşı korunmalı veya sürekli gaz akışı olan dedektörler olarak kullanılmalıdır ki herhangi bir hava kirlenmesi sürekli olarak akan doygun gazla aktif hacimden uzaklaştırılmalıdır.
- şekil 7 de gazlı dedektörün farklı voltaj bölgelerinde çalıştırılması görülmektedir. şekilde görülen her bir bölge ile ilgili açıklamalar aşağıdaki gibidir:

ORANTILI SAYAÇLAR (Devam)

■ Gazlı dedektörler



Şekil 4.6 Gazlı dedektörün farklı voltaj bölgelerinde çalıştırılması

ORANTILI SAYAÇLAR (Devam)

- **A bölgesi:** Vdc çok küçük olup elektronlarla pozitif iyonların yeniden birleşme bölgesi olup iyon çiftlerinin hepsi toplanmaz.
- **B bölgesi:** Vdc yeterince yüksek olup ancak küçük miktarda yeniden birleşme olabilir ki bu bölge iyon odası bölgesidir.
- **C bölgesi:** Bu bölgede uygulanan voltaj yeterince büyük olup merkezi tele yaklaşan elektronlar gaz atomları ile olan iki çarpışma arasında yeni iyon üretecek kadar enerji kazanırlar. Sınırlı sağanak oluşur. R boyunca geçen yükler ilk üretilen yüklerin 1000 katı olabilir. Bu bölge orantılı bölgedir.
- **D bölgesi:** Orantılılık kaybolur.
- **E bölgesi:** Bu bölgede çok büyük voltaj pulsu oluşabilir. İyonlaşma olayı tel boyunca yayılır. Bu bölge Geiger bölgesidir.
- **F bölgesi:** Gelen radyasyon enerjisiyle orantılı olmayan bir artış olur.

GEİGER-MÜLLER SAYACI

- Geiger-Müller sayacı, -ışınları gibi iyonize radyasyonun varlığını ve miktarını ölçmeye yarayan bir araçtır. Bir Geiger-Müller sayacı, saniyede 10,000 parçacık sayabilir ve yaygın olarak tıpta ve cevherlerde radyoaktivite beklentilerinde kullanılır.
- Sayacı yapısı Şekil 4.5 de verilen orantılı sayaçta olduğu gibi olup orantılı sayaçtan farklı olarak uygulanan voltaj orantılılık bölgesinin üzerindedir. Dolayısıyla çıkış pulsunun genliği birincil iyonlaşmadan bağımsızdır. Bu yüzden sayaçtaki parçacıklardan her biri, enerjileri ve sebep oldukları birincil iyonlaşma miktarı ile ilgisiz bir şekilde bir sinyal üretir. Bu özellik, Geiger-Müller sayacını tek parçacıkların algılanmasında uygun kılar.
- Geiger tüpü içinde 10 cm Hg basınçta ağırlıkça % 90 argon ve %10 herhangi bir organik gaz (metan olabilir) vardır.

Aktif Dedektörler (devam)

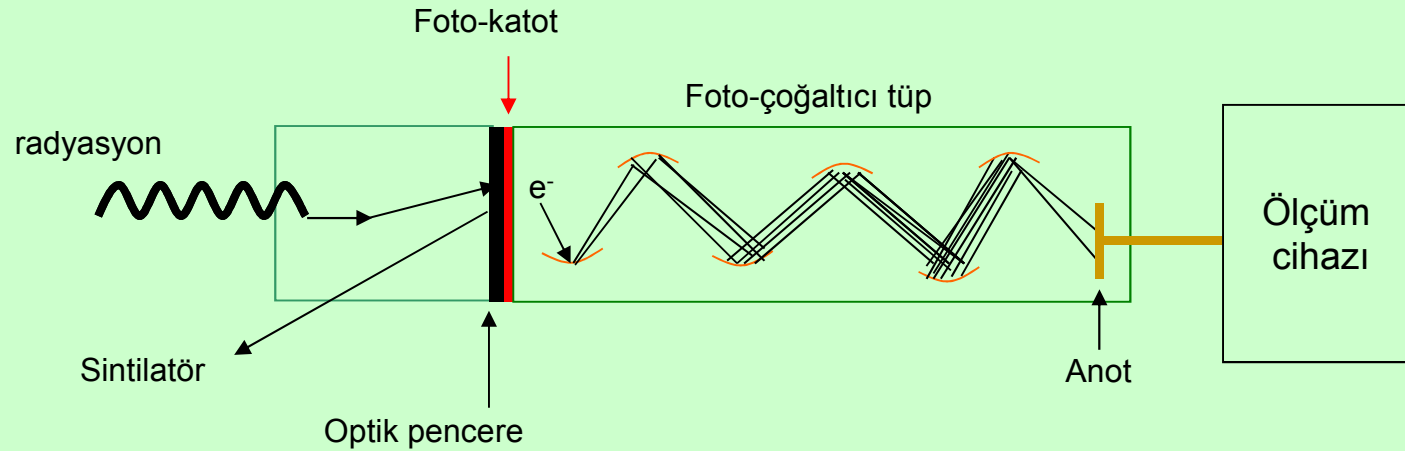
- Gaz dedektörlerinden farklı olarak sintilatör dedektörleri bir hatıhal dedektörü olup bu aracın arkasında yatan temel prensip radyasyonun etkileşmesiyle parıldayan bir materyal kullanmaktır.
- Bu materyal, sodyum iyodür, sezyum iyodür ve naftalin gibi bir maddedir. Böyle maddelere sintilatör adı verilir. Dedeksiyon ve sayma amacıyla kurulan düzeneğe de sintilasyon sayacı adı verilir.
- Sintilasyon sayaçlarının gazlı sayaçlara olan üstünlüğü, hassas hacim katı olduğu için x ve -ışını dedeksiyonundaki verimin oldukça yüksek olmasıdır. Sayacın çözme zamanı mikrosaniye ile nanaosaniye aralığında değişen oldukça kısa bir zamandır. Bu kısa çözme zamanı yüksek hızlı saymaları kayıpsız olarak mümkün kılar. Sintilasyon sayacının çıkış pulsu yüksekliği gelen radyasyonun enerjisiyle orantılı yapılabilir.

Sintilasyon sayacı

- Sintilasyon dedektörleri oldukça hassas radyasyon ölçme araçları olup özel çevresel araştırmalarda laboratuvar araçları olarak kullanılırlar.
- Şimdi, sintilatör olarak TI katkılı NaI kristalini ele alarak sintilasyon sayacının çalışmasını ele alalım. Sintilasyon üzerine radyasyon düştüğünde uyarılma olur ve görünür bölgede ışık üretilir.
- Üretilen fotonlar Şekil 4.7 de görüleceğİ üzere fotokatoda çarparlar ve fotoelektrik yoluyla katottan elektron koparırlar. Koparılan elektronlar foto-çoğaltıcı adı verilen bir pencereye gönderilir. Bu elektronlar daynod adı verilen ve pozitif bir yüksek voltajın uygulandığı bir seri plakalara çekilirler.

Sintilasyon Sayacı

■ Sintilatör sayacı şeması



Şekil.4.7 Sintilasyon sayacı şeması

- Fotokatottan çıkan elektronlar ilk daynod yüzeyine çarptığında, çarpan her bir elektron için birkaç elektron üretilir. Bu elektron demeti, daha çok elektronun üretileceği bir sonraki daynoda çarpar.
- Elektron çoğalması, son daynoda ulaşıncaya kadar devam eder ve başlangıçtaki elektron sayısının milyon katı elektron üretilmiş olur. Bu noktada elektronlar, tüpün sonundaki bir elektronik puls oluşturarak anotta toplanır. Bu puls dedekte edilir ve özel bir araçla gözlenir.

Nal(Tl) Dedektörlü Gama Spektrometresi

- Detektör ve diğer elektronik modüllerin uygun kombinasyonuna gama spektrometresi denir. Gama ışınlarının detektör kristalinde algılanması sonucu ortaya çıkan pulslar detektörün bağlı olduğu elektronik modüllerin uygun bir kombinasyonu yardımıyla analiz edilir ve gama ışınını yayan izotopların nitel ve nicel tanımlanması yapılır.

NaI(Tl) Dedektörlü Gama Spektrometresi (Devam)

- Gama spektrometresi, çeşitli radyoaktif örneklerdeki radyoizotopların tanımlanmasında en çok kullanılan aygıttır, çünkü gama ışınlarının enerjisi her bir çekirdek için kesikli ve karakteristiktir. Aynı örnekte farklı radyoaktif çekirdekleri aynı anda analiz edebilmesi, malzeme, emek ve zaman kaybına neden olan kimyasal ayırma işlemleri gerektirmemesi, örneklerin kolay ve hızlı hazırlanabilmesi ve hassas ölçümlerin yapılabilmesi gama spektrometresinin bazı üstünlüklerindedir.

KAYNAKLAR

- [1] D. C. Giancoli, Physics, Prentical Hall, New Jersey 2000.
- [2] S. K. Krane, Introductory Nuclear Physics, S.K. Krane, John Wiley and Sons, Inc., 1988; Çeviri editörü: *Başar Şarer, Palme Yayıncılık, Ankara, 2001 (I. ve II. Cilt)*
 - [3] Besim Tanyeli, Nükleer Fizik, Ege Üniversitesi Basımevi, 1994, İzmir.
 - [4] Glenn F. Knoll Radiation Detection and Measurements, 2000.
 - [5] Hüseyin Aytekin, Çekirdek Fiziği Ders Notları, Z.K.Ü.,2009.
 - [6] Hüseyin Aytekin, Çevresel Radyoaktivite Ders Notları, Z.K.Ü. 2009.