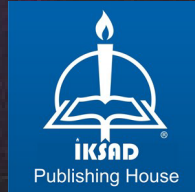


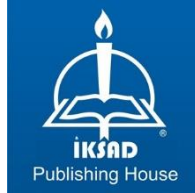
# Nükleer Kimya

Prof. Dr. Nazife ASLAN



# Nükleer Kimya

*Prof. Dr. Nazife ASLAN*



Copyright © 2022 by iksad publishing house  
All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, distributed or  
transmitted in any form or by  
any means, including photocopying, recording or other electronic or mechanical  
methods, without the prior written permission of the publisher, except in the case of  
brief quotations embodied in critical reviews and certain other noncommercial uses  
permitted by copyright law. Institution of Economic Development and Social  
Researches Publications®

(The Licence Number of Publicator: 2014/31220)

TURKEY TR: +90 342 606 06 75

USA: +1 631 685 0 853

E mail: iksadyayinevi@gmail.com

www.iksadyayinevi.com

It is responsibility of the author to abide by the publishing ethics rules.

Iksad Publications – 2022©

**ISBN: 978-625-8405-84-2**

Cover Design: İbrahim KAYA

March / 2022

Ankara / Turkey

Size = 16x24 cm

## ÖNSÖZ

Pek çok kaynakta “*kimyasal olay*” kavramı tanımlanırken, genellikle aralarında elektron alış-verişi olan atom veya atom gruplarının etkileşmesi şeklinde ifadelerle karşılaşırız. Ancak bu tanımlamadan, herhangi bir kimyasal olayın oluşmasında atom çekirdeklerinin bir etkisinin olmadığı düşünülmemelidir. Çünkü atom, elektronları ve çekirdeği ile bir bütündür ve atom çekirdeğinde meydana gelen bazı olaylar, çok çeşitli kimyasal olayların oluşmasına neden olabilmektedir. Bu kitapta, atomun çekirdeğinde meydana gelen olayların doğrudan veya dolaylı olarak neden olduğu kimyasal olayların incelendiği bilim dalı olan Nükleer Kimya hakkında bazı temel bilgiler ve kavramlar üzerinde durulacaktır.

Bilindiği üzere, modern kimya bilimi 17. ve 18. yy.’larda yapılmaya başlanan pozitif bilimsel çalışmalarla başlamış ve Organik Kimya, Anorganik Kimya, Analitik Kimya, Fizikokimya gibi Kimya bilim dalları o yıllarda yapılan çalışmalarla şekillenmiştir ve aşağı yukarı 250 yıllık bir geçmişi vardır. Oysa radyoaktif madde ve nükleer radyasyonun ortaya çıkması geçtiğimiz yüzyılın başlarında Alman Fizikçisi W. K. Roentgen (1895) tarafından X-ışınlarının keşfi ile olmuştur. Nükleer Kimyanın ilgi alanına Radyoaktif Maddeler ve Nükleer Radyasyonlarla ilgili olarak ortaya çıkan kimyasal olayların incelenmesi girmektedir. Radyoaktif maddelerle ve nükleer radyasyonla çalışmak özel ölçüm ve değerlendirme tekniklerinin kullanılmasını gerektirdiği için diğer klasik kimya bilim dallarından farklılık gösterir. Bu nedenle Nükleer Kimya diğer kimya bilim dallarından çok daha yeni

ve son yıllarda gelişen bir bilim dalıdır. Bugün tüm dünyada bilim ve teknoloji alanında yaşanan baş döndürücü gelişmeler içinde Nükleer Kimyanın oldukça önemli uygulama alanlarına sahip olması, bu bilim dalının gelişimine de büyük bir ivme kazandırmıştır.

Bu çalışmanın amacı, lisans seviyesinde öğrenim gören Kimya öğrencilerine *Nükleer Kimya*'yı en basit tanımlamalar, şekiller ve tablolarla anlatmaktır.

Öğrencilerime faydalı olması dileklerle.....

**Prof. Dr. Nazife ASLAN**

## İÇİNDEKİLER

|                      |      |
|----------------------|------|
| ÖNSÖZ.....           | i    |
| İÇİNDEKİLER.....     | iii  |
| TABLolar DİZİNİ..... | vii  |
| ŞEKİLLER DİZİNİ..... | viii |

### BÖLÜM 1

#### NÜKLEER BİLİMİN BAŞLANGICI

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| Radyoaktif Elementler ..... | 11 |
| Radyoaktif Bozunma .....    | 13 |
| İzotopların Keşfi .....     | 14 |
| Atomik Modeller.....        | 22 |

### BÖLÜM 2

#### TEMEL PARÇACIKLAR

|   |    |
|---|----|
| Bazı Temel Parçacıkların Oluşumu ve Standart Model..... | 23 |
| Fermiyonlar.....  | 23 |
| Hadronlar .....   | 25 |
| Bozonlar.....   | 28 |
| Güçlü Nükleer Kuvvetler.....                            | 29 |
| Zayıf Nükleer Kuvvetler.....                            | 29 |
| Kütle Çekim Kuvveti.....                                | 30 |
| Elektromanyetik Kuvvet .....                            | 30 |
| Nükleonları Birarada Tutan Bağ Enerjisi .....           | 31 |
| Madde-Karşıt (Anti) Madde Çarpışmaları.....             | 34 |

### BÖLÜM 3

#### ÇEKİRDEKLER, İZOTOPLAR

|  |    |
|--|----|
| Atom Çekirdeğinin Yapısı.....                      | 35 |
| Atom Çekirdeğinin Temel Bileşenleri.....           | 36 |
| <i>İzomer Çekirdekler</i> .....                    | 37 |
| <i>İzobar Çekirdekler</i> .....                    | 38 |
| <i>İzoton Çekirdekler</i> .....                    | 38 |
| Atom Kütleleri ve Atom Ağırlıkları.....            | 39 |
| İzotopik Kütle ve İzotopik Bollukların Tayini..... | 41 |

### BÖLÜM 4

#### NÜKLEER KÜTLE KARARLILIĞI

|                          |    |
|--------------------------|----|
| Nükleer Kararlılık.....  | 44 |
| Nötron/Proton Oranı..... | 46 |
| Kararlılık Kuşağı.....   | 49 |

### BÖLÜM 5

#### KARARSIZ ÇEKİRDEKLER VE RADYOAKTİF BOZUNMA

|  |    |
|--|----|
| Radyoaktif Bozunma.....                                | 52 |
| <i>Alfa (<math>\alpha</math>-) Bozunması</i> .....     | 53 |
| <i>Negatron (<math>\beta^-</math>) Bozunması</i> ..... | 55 |
| <i>Pozitron (<math>\beta^+</math>) Bozunması</i> ..... | 58 |
| <i>Elektron Yakalanması (EC)</i> .....                 | 59 |
| <i>Auger Olayı ve Auger Elektronları</i> .....         | 60 |
| <i>İzomerik Geçiş</i> .....                            | 62 |
| <i>İç Dönüşüm (Internal Conversion)</i> .....          | 63 |

|  |    |
|--|----|
| <i>Kendi Kendine Fisyon (Fisyon Spontane (FS))</i> ..... | 64 |
| Radyoaktif Bozunma Kinetiği .....                        | 65 |
| Bozunma Hızı.....  | 65 |
| Yarı Ömür .....  | 68 |
| Radyoaktivite Birimleri .....                            | 70 |
| Curie (Ci) (Özel birim).....                             | 70 |
| Becquerel (Bq) (SI Birimi).....                          | 70 |

## BÖLÜM 6

### NÜKLEER RADYASYONUN MADDE İLE ETKİLEŞİMİ

|   |    |
|---|----|
| Parçacık Niteliğinde Olan Nükleer Radyasyonlar .....              | 72 |
| Alfa ( $\alpha$ ) Işınlarnın Madde İle Etkileşmesi .....          | 72 |
| Negatron ( $\beta^-$ ) Işınlarnın Madde İle Etkileşmesi .....     | 74 |
| <i>Yörünge elektronları ile etkileşme</i> .....                   | 74 |
| <i>Çekirdekle etkileşme</i> .....                                 | 75 |
| Pozitron ( $\beta^+$ ) Işınlarnın Madde İle Etkileşmesi.....      | 75 |
| Auger Elektronlarının Madde İle Etkileşimi.....                   | 76 |
| Elektromagnetik Dalga Niteliğinde Olan Nükleer Radyasyonlar ..... | 77 |
| Gama Işınlarnın Yörünge Elektronları ile Etkileşmesi .....        | 77 |
| <i>Coherent (Etkisiz) Saçılma</i> .....                           | 78 |
| <i>Compton Olayı</i> .....  | 78 |
| <i>Fotoelektrik Olayı</i> .....                                   | 80 |
| Gama Işınlarnın Atomun Çekirdeği ile Etkileşmesi .....            | 81 |



## BÖLÜM 7

### NÜKLEER FİSYON VE NÜKLEER FÜZYON REAKSİYONLARI

|  |    |
|--|----|
| Nükleer Filyon (Çekirdek Parçalanması) ..... | 83 |
| Nükleer Füzyon (Çekirdek Birleşmesi) .....   | 85 |

## BÖLÜM 8

### NÜKLEER REAKTÖRLER

|  |    |
|--|----|
| Nükleer Reaktörlerin Sınıflandırılması ..... | 87 |
| Nükleer Yakıtlar .....                       | 89 |
| Nükleer Atıklar .....                        | 89 |
| <b>KAYNAKLAR</b> .....                       | 91 |

## TABLolar DİZİNİ

|  |    |
|--|----|
| <b>Tablo 1.</b> Nükleer bilimin tarihi serüveni.....                     | 18 |
| <b>Tablo 2.</b> Kuarklar ve özellikleri.....                             | 32 |
| <b>Tablo 3.</b> Hadronlar ve özellikleri.....                            | 26 |
| <b>Tablo 4.</b> Leptonlar ve özellikleri.....                            | 27 |
| <b>Tablo 5.</b> Bozonlar ve genel özellikleri.....                       | 29 |
| <b>Tablo 6.</b> Bazı yörünge elektronlarına ait bağ enerjileri.....      | 33 |
| <b>Tablo 7.</b> Bazı moleküllerdeki kimyasal bağ enerjileri.....         | 33 |
| <b>Tablo 8.</b> Bazı izotopların atom kütleleri ve bağlı bollukları..... | 43 |
| <b>Tablo 9.</b> Bazı radyonüklitlerin yarı ömürleri.....                 | 69 |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|   |    |
|---|----|
| <b>Şekil 1.</b> Periyodik Tablo.....  | 10 |
| <b>Şekil 2.</b> 1896 yılında Wilhelm Röntgen tarafından oluşturulan ve eşi Anna Bertha'nın eline ait X ışını görüntüsü .....  | 11 |
| <b>Şekil 3.</b> Karbonat çökeleği ve süpernatant uranyum çözeltisinin zamana bağlı olarak radyoaktivitesinde ölçülen değişiklik. ....   | 14 |
| <b>Şekil 4.</b> Standart modele göre nötron ve protonu oluşturan kuarklar. ....   | 25 |
| <b>Şekil 5.</b> Atomdan atom altı parçacıklara geçiş .....  | 31 |
| <b>Şekil 6.</b> Çekirdek kararlılığının nötron/proton oranına bağlılığı. ....   | 45 |
| <b>Şekil 7.</b> Kütle numarası 12 olan izobar atomların içinde varsayılan enerji seviyelerinde nükleonların ayrılması ve eşleştirilmesi (Kararsız $^{12}\text{B}$ için yarı ömür 0.02 s ve $^{12}\text{N}$ için 0.01 s'dir). .... | 49 |
| <b>Şekil 9.</b> Fotoelektrik olay. ....   | 80 |
| <b>Şekil 10.</b> Nükleer fisyon reaksiyonunun şematik gösterimi.....  | 84 |

## BÖLÜM 1

### NÜKLEER BİLİMİN BAŞLANGICI

#### **Radyoaktif Elementler**

Yaklaşık 300 yıllık bir geçmişe sahip olan ve 19. yüzyılın sonuna doğru bilimsel nitelik kazanan kimya, maddenin yapısını, özelliklerini, bileşimini, diğer maddelerle olan etkileşimlerini ve tepkimelerini araştıran bir bilim dalıdır.

Bugün periyodik tabloda bilinen 118 elementin yanı sıra, doğada olmayan yeni elementlerin keşfi ile ilgili çalışmalar halen devam etmektedir. İşte bu elementlerin ve oluşturdukları milyonlarca bileşiğin yapılarının ve aralarındaki reaksiyonların incelenmesi kimyanın konusudur.

Günümüzde ilaç, gübre, arıtım, petrolün işlenmesi, boya-tekstil işlemleri, gıda gibi hayatın her alanında yerini almıştır.

Kimya bilimi daha sonra “Analitik Kimya”, “Anorganik Kimya”, “Biyokimya” “Organik Kimya” ve “Fizikokimya” gibi birbiri ile yakından ilişkili birçok alt dala ayrılarak şekillenmiştir. Kimyanın radyoaktif elementler ve radyoaktivite ile ilgilenen dalı ise bu temel alt dallara kıyasla oldukça yenidir.

| Grup →      | 1               | 2        | 3                      | 4         | 5          | 6         | 7         | 8         | 9         | 10        | 11            | 12        | 13              | 14        | 15         | 16        | 17         | 18         |
|-------------|-----------------|----------|------------------------|-----------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------------|-----------|-----------------|-----------|------------|-----------|------------|------------|
| Periyot ↓   | 1A              | 2A       | 3B                     | 4B        | 5B         | 6B        | 7B        | 8B        | 8B        | 8B        | 1B            | 2B        | 3A              | 4A        | 5A         | 6A        | 7A         | 8A         |
| 1           | 1<br>H          |          |                        |           |            |           |           |           |           |           |               |           |                 |           |            |           |            | 2<br>He    |
| 2           | 3<br>Li         | 4<br>Be  |                        |           |            |           |           |           |           |           |               |           | 5<br>B          | 6<br>C    | 7<br>N     | 8<br>O    | 9<br>F     | 10<br>Ne   |
| 3           | 11<br>Na        | 12<br>Mg |                        |           |            |           |           |           |           |           |               |           | 13<br>Al        | 14<br>Si  | 15<br>P    | 16<br>S   | 17<br>Cl   | 18<br>Ar   |
| 4           | 19<br>K         | 20<br>Ca | 21<br>Sc               | 22<br>Ti  | 23<br>V    | 24<br>Cr  | 25<br>Mn  | 26<br>Fe  | 27<br>Co  | 28<br>Ni  | 29<br>Cu      | 30<br>Zn  | 31<br>Ga        | 32<br>Ge  | 33<br>As   | 34<br>Se  | 35<br>Br   | 36<br>Kr   |
| 5           | 37<br>Rb        | 38<br>Sr | 39<br>Y                | 40<br>Zr  | 41<br>Nb   | 42<br>Mo  | 43<br>Tc  | 44<br>Ru  | 45<br>Rh  | 46<br>Pd  | 47<br>Ag      | 48<br>Cd  | 49<br>In        | 50<br>Sn  | 51<br>Sb   | 52<br>Te  | 53<br>I    | 54<br>Xe   |
| 6           | 55<br>Cs        | 56<br>Ba |                        | 72<br>Hf  | 73<br>Ta   | 74<br>W   | 75<br>Re  | 76<br>Os  | 77<br>Ir  | 78<br>Pt  | 79<br>Au      | 80<br>Hg  | 81<br>Tl        | 82<br>Pb  | 83<br>Bi   | 84<br>Po  | 85<br>At   | 86<br>Rn   |
| 7           | 87<br>Fr        | 88<br>Ra |                        | 104<br>Rf | 105<br>Db  | 106<br>Sg | 107<br>Bh | 108<br>Hs | 109<br>Mt | 110<br>Ds | 111<br>Rg     | 112<br>Cn | 113<br>Nh       | 114<br>Fl | 115<br>Uup | 116<br>Lv | 117<br>Uus | 118<br>Uuo |
| Lantanidler | 57<br>La        | 58<br>Ce | 59<br>Pr               | 60<br>Nd  | 61<br>Pm   | 62<br>Sm  | 63<br>Eu  | 64<br>Gd  | 65<br>Tb  | 66<br>Dy  | 67<br>Ho      | 68<br>Er  | 69<br>Tm        | 70<br>Yb  | 71<br>Lu   |           |            |            |
| Aktinidler  | 89<br>Ac        | 90<br>Th | 91<br>Pa               | 92<br>U   | 93<br>Np   | 94<br>Pu  | 95<br>Am  | 96<br>Cm  | 97<br>Bk  | 98<br>Cf  | 99<br>Es      | 100<br>Fm | 101<br>Md       | 102<br>No | 103<br>Lr  |           |            |            |
|             | Alkali Metaller |          | Toprak Alkali Metaller |           | Halogenler |           | Soygazlar |           | Metaller  |           | Yarı metaller |           | Geçiş metalleri |           | Ametaller  |           |            |            |

Şekil 1. Periyodik Tablo

1895 yılında Alman Fizikçi Wilhelm Conrad Röntgen'in X-ışınlarını buluşu çoğu bilim insanı tarafından modern fiziğin başlangıcı sayılsa da aynı zamanda nükleer kimyanın gelişiminin de başlangıcı olmuştur. Röntgen, katot ışın tüplerinde oluşan lüminesans olayını incelemek için, "Crookes tüpü" adı verilen içi boş bir cam tüpün içine yerleştirilen anot ve katottan oluşan bir deney düzeneği ile çalışıyordu. Katottan kopan elektronların anoda ulaşmadan cama çarparak floresan adı verilen ışık parlamalarını meydana getirdiğini buldu. Cam tüpün ışık geçirgenliğini anlayabilmek için odayı karartıp deney tüpünü siyah bir karton ile kapladı ve deneyi tekrarlardı. Deney tüpünden yaklaşık iki metre uzaklıkta bulunan ve baryum platinosiyanit sarılı olan kâğıtta bir parlamanın olduğunu fark etti. Deneyi birkaç defa tekrarlardı ve her defasında aynı olayı gözlemledi. Katot, ışın tüpünden uzaklaştıktan sonra bile parlama devam etmekteydi. Ayrıca, Röntgen'in eli ekranı kısmen kapattığında, eldeki kemiklerin ekranda görüldüğü fark edildi. Bunu, mat yüzeyden geçebilen yeni, uzun menzilli, çarptığı maddeye nüfuz edebilen bir ışın olarak tanımladı ve matematikte bilinmeyen

simgeleyen X harfini kullanarak "X ışını" ismini verdi. Daha sonraları bu ışınlar, "Röntgen ışınları" olarak anılmaya başlanmıştır.



**Şekil 2.** 1896 yılında Wilhelm Röntgen tarafından oluşturulan ve eşi Anna Bertha'nın eline ait X ışını görüntüsü

Minerallerin floresans özelliklerinin incelenmesi ile ilgili araştırmalar yapan Henry Becquerel, X-ışınlarının varlığını öğrendikten hemen sonra, güneş ışığına maruz kaldıkları zaman floresans özellik gösteren bazı tuzların X-ışınları yayma olasılığını araştırmaya karar verdi. Bunun için siyah kağıda sarılmış fotoğraf plakalarının üzerine *potasyum uranil sülfat kristalleri* yerleştirerek güneş ışığına maruz bıraktı. Becquerel, fotoğraf plakalarında gözlemlediği siyah noktaların varlığının, floresans özelliğe sahip bu kristallerin güneş ışığına maruz kaldıktan sonra ambalaj kağıdına nüfuz edebilen X-ışınları yaymasının yol açtığı

sonucuna vardı. Ancak Becquerel kısa süre sonra kararmaya neden olan radyasyonun “güneş enerjisinin neden olduğu floresans özellikten” olmadığını, çünkü güneş ışığına maruz kalmamış ve *potasyum uranil sülfat kristalleri* sarılı fotoğraf plakalarının üzerinde de aynı lekelerin oluştuğunu gözlemledi. Bu sonuç uranil tuzunun açıkça kendiliğinden radyasyon ürettiğini göstermekteydi. İlk olarak uranyum ışınları (veya Becquerel) olarak adlandırılan bu radyasyon ışınları, daha sonra radyoaktif radyasyon veya basitçe radyoaktivite olarak adlandırıldı. Bu radyasyon ışınları da elektroskopların boşalmasıyla gözlemlenen X-ışınlarına havayı iyonize etmesi açısından benziyordu.

Marie Curie daha sonra tüm uranyum ve toryum bileşiklerinin kimyasal bileşimlerinden bağımsız olarak iyonlaştırıcı radyasyon ürettiğini gösterdi. Bu, radyasyonun uranyum veya toryum elementinin bir özelliği olduğuna dair ikna edici bir kanıttı. Ancak daha sonra devam eden çalışmalarında, pitchblend gibi bazı uranyum minerallerinin saf uranyum bileşiklerinden daha fazla iyonlaştırıcı radyasyon ürettiğini gözlemledi ve bu sonucu *"Bu olgu bu minerallerin uranyumdan daha aktif elementler içerdiği varsayımına yol açıyor"* ifadesi ile yorumladı. Marie Curie ve kocası Pierre Curie, her çöktürme ve ayırma basamağından sonra çözeltideki ve çökeltideki radyasyon miktarını ölçerek, pitchblend mineralini dikkatli bir şekilde saflaştırmaya başladılar. Bu ilk radyokimyasal ayırma ve saflaştırma çalışması son derece başarılıydı: Araştırmanın sonuçlarını yayımladıkları ve **Radyoaktif** kelimesinin ilk kez kullanıldığı 1898'de polonyumun keşfini bildiren makalelerinde Curie'lerin kendi ifadeleri şu şekildedir. *"Bu işlemler yapılırken daha aktif ürünler elde ediliyor. Son olarak, etkinliği uranyumunkinden 400*

*kat daha büyük olan bir madde elde ettik. Bu nedenle, pitchblendten izole ettiğimiz maddenin şimdiye kadar bilinmeyen bir metal olduğuna inanıyoruz. Bu metalin varlığı teyit edilebiliyorsa, polonyum adını öneriyoruz."*

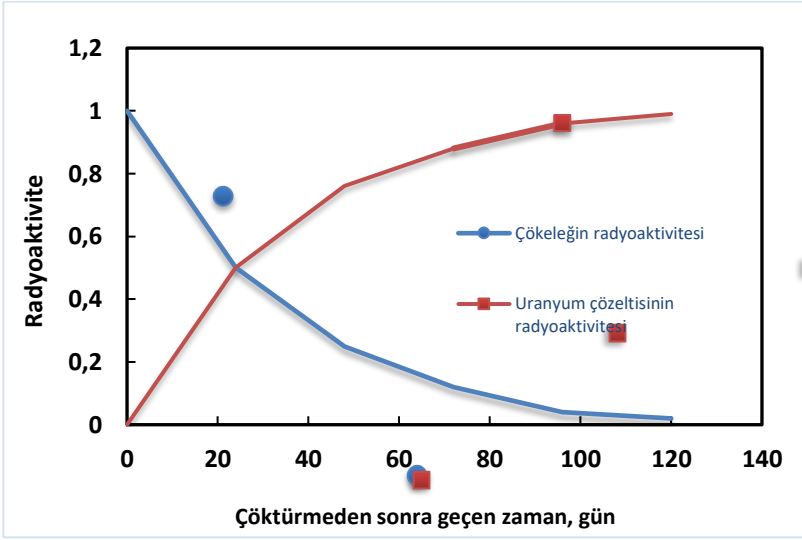
Polonyum elementinin, onu "**radytellurium**" olarak adlandıran W. Marckwald tarafından eşzamanlı ve bağımsız olarak keşfedildiği de bildirilmektedir.

Aynı yıl Curie'ler, G. Bemont ile birlikte radyum adını önerdikleri başka bir radyoaktif maddeyi izole ettiler. Polonyum ve radyumun aslında iki yeni element olduğunu kanıtlamak için de büyük miktarlarda pitchblend'i işlediler. 1902'de M. Curie, yaklaşık 0,1 g saf radyum klorürü bir tondan fazla pitchblendten izole edebildiğini açıkladı. Radyumun atom ağırlığının belirlenmesi ve emisyon spektrumunun ölçülmesi de yeni bir elementin izole edildiğinin son kanıtı olmuştur.

### **Radyoaktif Bozunma**

W. Crookes ve Becquerel, uranyumun radyokimyasal özelliklerini araştırırken önemli bir keşif yaptılar. Uranil iyonları içeren bir çözeltiden karbonat tuzlarını çöktürerek ayırdıklarında, uranyumun suda çözünür karbonat kompleksi halinde sıvı fazda kaldığını, ancak başlangıçta uranyumdan kaynaklanan radyoaktivitenin artık uranyum içermeyen çökeltide mevcut olduğunu keşfettiler. Üstelik çökeltinin radyoaktivitesi zamanla yavaş yavaş azalırken, süpernatant sıvının aynı periyotta radyoaktivitesinin arttığını gözlemlediler (Şekil 3).





Şekil 3. Karbonat çökeleği ve süpernatant uranyum çözeltisinin zamana bağlı olarak radyoaktivitesinde ölçülen değişiklik.

### İzotopların Keşfi

1910 yılına gelindiğinde, kimyasal yapıları, yaydıkları ışınların özellikleri ve karakteristik yarı ömürleri aydınlatılmış yaklaşık 40 farklı kimyasal tür tanımlanmıştır.

Radyoaktif türlerin bozunmaları sırasındaki ilişkiler incelendiğinde, sözkonusu elementlerin üç ayrı bozunma serisine ayrıldığını, ve bunlardan ikisinin uranyumdan üçüncüsünün ise toryumdan kaynaklandığı gösterilmiştir. B. Boltwood ise daha sonra serilerin üçünün de kararlı kurşun elementi ile sona erdiğini bulmuştur.

Ancak o zamanlar bilim insanları için açıklanması gereken durum, Periyodik Tabloda kurşun ve uranyum arasında yalnızca 11 element için yer olduğu halde, uranyumdan başlayıp kurşunla sonlanan bozunma serisinde yaklaşık 40 radyoaktif elementin biliniyor olmasıydı. Ayrıca

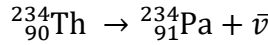
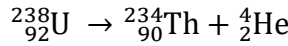
çoğu durumda, radyoaktif elementlerin bazılarını normal kimyasal yollarla birbirinden ayırmanın mümkün olmaması da ayrı bir karışıklık nedeniydi. Örneğin, radyoaktif radyum elementi kimyasal olarak kurşunla aynı özelliklere sahiptir.

1913'te K. Fajans ve Soddy, görünüşte çelişki olarak görünen bu durumu birbirlerinden habersiz olarak açıklamışlardır. Buna göre, Periyodik Tabloda aynı yerde bulunan radyoaktif elementler kimyasal olarak aynıdır. Soddy, aynı kimyasal kimliğe sahip farklı radyoaktif türleri tanımlamak için *izotoplar* terimini önermiştir.

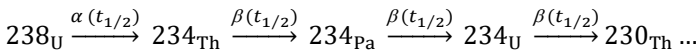
Kısa süre sonra J. J. Thomson tarafından yapılan araştırmalar da izotopların varlığı için kesin destek sağlamıştır. Pozitif yüklü gaz iyonlarından oluşan bir iyon demeti, elektrik veya manyetik alandan geçirilirse, iyonlar, kütlelerine ve yüklerine bağlı olarak hiperbolik yollar izlemektedirler. Bu iyon demetleri fotografik plakalara çarptığında, plakaya çarpan iyonların sayısı ile orantılı olarak plaka yüzeyinde kararmalar meydana gelmektedir. Thomson, bu tekniği neon gazında kullanmış ve neonun, farklı atom kütlelerine sahip iki tür atomdan oluştuğunu bulmuştur. Bu iki izotopun kütle numaraları 20 ve 22'dir. Thomson, fotoğraf plakasının kararma seviyesinden neonun, kütle numarası 20 olan atomların yaklaşık % 90'ını ve kütle numarası 22 olan atomların % 10'unu oluşturduğunu da hesaplamıştır. Dolayısıyla bir kimyasal elementin, kütleleri farklı ancak kimyasal özellikleri aynı birkaç tür atomdan oluştuğunu söylemek mümkündür. Gerçekte bilinen 40 radyoaktif element, 40 farklı element değil, kurşundan uranyuma kadar olan 11 farklı kimyasal elementin izotoplarıdır.

Bir elementin izotopunu belirtmek için, atom numarası kimyasal sembolün soluna bir alt simge olarak ve kütle numarası üst simge olarak yazılır. Örneğin, kütle numarası 238 olan uranyum izotopu  ${}_{92}^{238}\text{U}$  şeklinde gösterilir.

Bir alfa parçacığı için ya Yunanca  $\alpha$  harfi veya  ${}^4_2\text{He}$  sembolü kullanılır, benzer şekilde, beta parçacığı Yunanca  $\beta$  harfi ile ya da  ${}_{-1}^0e$  sembolü ile gösterilir. Radyoaktif bozunmada hem kütle numarası hem de atom numarası korunur. Böylece ilk iki adımın bozunma zinciri aşağıdaki gibi yazılır.



Genellikle, böyle bir bozunma zincirinde, radyoaktif bozunmanın yarı ömrü ( $t_{1/2}$ ) okun üstünde veya altında gösterilir. Daha kısa bir gösterim şekli olarak;



yaygın olarak kullanılmaktadır.

### Atomik Modeller

Ne radyoaktif bozunma ne de izotopların keşfi atomların iç yapısı hakkında yeterli bilgi sağlamamıştır. Bu tür bilgiler, ince metal folyolarla yapılan saçılma deneylerinden elde edilmiştir. Bu deneylerde metal folyo, bir ışın demeti ile ışınlanmış ve farklı açılarda saçılan parçacıkların yoğunluğu, sintilasyon sayımı ile ölçülmüştür. Parçacıkların sapmasına, ışınlanmış malzemenin atomları ile

çarpışmaların neden olduğu öne sürülmüştür. Alfa parçacıklarının yaklaşık 8000'de biri, 90°'den büyük açılarla güçlü bir şekilde sapmıştır. Bu deneysel sonuçlar, Rutherford'u bir atomun tüm pozitif yükünün, çapı yaklaşık  $10^{-14}$  m olan çok küçük bir hacimde yoğunlaşmış olması gerektiği sonucuna götürmüştür. Atomun bu küçük kısmını **çekirdek** olarak adlandırmıştır. Kütlesi çok daha küçük olan elektronların ise çekirdeğin etrafını çevrelediği varsayılmıştır.

Bir atomun yarıçapının  $10^{-8}$  ila  $10^{-9}$  cm civarında, çekirdeğinin yarıçapının ise  $10^{-12}$  - $10^{-13}$  cm olduğu bilinmektedir. Bu değerlere baktığımızda atomun çekirdeğinin, atomun yapısı içinde son derece küçük bir hacmi kapladığı ve atomun iç yapısının büyük bir boşluktan ibaret olduğunu söylemek mümkündür. Öte yandan protonun, nötronun ve elektronun kütlelerini karşılaştırdığımız zaman atomun sahip olduğu kütlelerin tamamına yakınının çekirdekte bulunduğu görülmektedir. Çünkü en küçük atomun kütlesi, elektronların toplam kütlelerinin 1835 katı iken, bu değer en büyük atom için 4600 kat olarak hesaplanmıştır. Bu nedenle atomun tüm kütlelerinin çekirdeğinde toplandığını kabul etmek doğru bir yaklaşım olacaktır. Bir atomun kütle numarası, çekirdeğindeki proton ve nötron sayılarının toplamı olarak ifade edilir.

Kısa süre sonra da atom çekirdeğinin pozitif yükünün Mendeleev'in periyodik sistemindeki bir elemente verilen atom numarasıyla aynı olduğu gösterildi. 1913'te N. Bohr, kuantum mekaniği kavramlarını kullanarak, modern atom teorisinin temeli olarak kabul edilen bir atom modeli önermiştir. Nükleer bilimin gelişme sürecine de öncülük eden önemli adımlardan bazıları Tablo 1 de listelenmiştir.

**Tablo 1.** Nükleer bilimin tarihi serüveni

### **MODERN BİLİMİN GELİŞİMİNDE TEMEL ADIMLAR**

- ~ 490-430 B.C. *Empedokles*, her şeyin dört elementten oluştuğunu öne sürüyor: hava, toprak, su ve ateş. Her madde, bunlar arasında dönüşüm ile oluşturulabilir. (Bu, temelde, dört elementin maddenin gaz, katı ve sıvı halleri olarak yorumlanması ve ateşin enerji olarak yorumlanması durumunda doğrudur.)
- ~ 460-370 B.C. *Democritos*, tüm maddelerin niteliksel olarak benzer ancak boyut, şekil ve kütle bakımından farklı olan ebedi, hareket eden ve yok edilemez atomlardan oluştuğunu öne sürer.
- 1661 *Boyle*, doğanın daha basit olanlara ayrılamayacak sınırlı sayıda maddeden (elementlerden) oluştuğunu yazıyor.
- 1808 *Dalton*, Tüm kimyasal bileşikler (moleküller) sabit oranlarda atom kombinasyonlarıdır.

### **NÜKLEER BİLİMİN GELİŞİMİNDE ÖNEMLİ ADIMLAR**

- 1896 Becquerel uranyumdan gelen radyasyonu (radyoaktivite) keşfetti. Radyasyonun yoğunluğu, ya havanın iyonlaşması yoluyla ya da radyasyon bir flüoresan ekrana çarptığında gözlemlenen parıldama yoluyla ölçülür.
- 1896-1905 Crookes, Becquerel, Rutherford, Soddy, Dorn, Boltwood vd. Radyoaktif bozunmanın, radyoaktif bozunma serilerinde genetik olarak bağlı olan farklı radyoelementlere yol açan atomların dönüşümü olduğu bulunmuştur.
- 1898 P. ve M. Curie polonyum ve radyumu keşfetti; ilk radyokimyasal yöntemler.
- 1898-1902 P. Curie, Debierne, Becquerel, Danilos vd. Radyasyonun kimyasal maddeleri etkilediğini ve biyolojik hasara neden olduğunu keşfeder.

- 1900 Villard ve Becquerel, radyasyonun elektromanyetik nitelikte olduğunu öne sürüyor; nihayet 1914'te Rutherford ve Andrade tarafından kanıtlandı.
- 1900 Becquerel: b-ışınları elektron olarak tanımlandı.
- 1902 M. ve P. Curie ve Debiere, bir radyoaktif elementin (radyum) ilk makroskopik miktarlarını izole etti.
- 1903 Rutherford, a-radyasyonun iyonize helyum atomları olduğunu gösterdi.
- 1905 Einstein, kütle ve enerji arasındaki eşdeğerlik yasasını formüle etti.
- 1907 Stenbeck radyumla ilk terapötik tedaviyi yaptı ve cilt kanserini iyileştirdi.
- 1911 Rutherford, Geiger ve Marsden, atomların çok küçük bir pozitif çekirdek içerdiği ince folyolara karşı a-radyasyon saçılımının ölçülmesinden yola çıkarak sonuca vardılar.
- 1913 Hess kozmik radyasyonu keşfetti
- 1913 Fajans ve Soddy, izotopların varlığını varsayarak radyoaktif bozunma serisini açıklarlar. Bu, elektromanyetik alanlarda neon iyonlarının sapması yoluyla J. J. Thomson tarafından kanıtlanmıştır. Aston, neon izotoplarını gaz difüzyonu ile ayırır.
- 1913 N. Bohr, atom çekirdeğinin sabit orbitallerdeki elektronlarla çevrili olduğunu gösterdi.
- 1919 Rutherford: laboratuvarındaki ilk nükleer dönüşümü gerçekleştirdi.
- 1919 Aston, ilk pratik kütle spektrometresini inşa etti ve izotopik ağırlıkların tam sayı olmadığını keşfetti.
- 1921 Hahn nükleer izomerleri keşfetti:
- 1924 de Broglie, tüm hareketli parçacıkların dalga özelliklerine sahip olduğu hipotezini ileri sürüyor.

- 1924 Lacassagne ve Lattes biyolojik araştırmada radyoaktif iz elementleri (Po) kullanır.
- 1925-1927 Bohr atom modelinin önemli iyileřtirmeleri: Pauli dıřlama ilkesi, Schrodinger dalga mekaniği, Heisenberg belirsizlik iliřkisi
- 1928 Geiger ve Mller, tek nükleer paracak ölçümleri için ilk GM tüpünü yaptı.
- 1931 Van de Graaff, atomik iyonları yüksek enerjilere hızlandırmak için elektrostatik bir yüksek voltaj jeneratörü geliştirdi.
- 1932 Lawrence ve Livingston ilk siklotronu yaptı.
- 1932 Urey dteryumu keşfetti ve sıvı hidrojenin buharlaşmasıyla izotopik zenginleşme elde etti.
- 1932 Chadwick nötronu keşfetti.
- 1932 Andersson, bir bulut odasında kozmik ışınları araştırarak,  $e^+$  veya  $\beta^+$  pozitronu keşfetti.
- 1933 Urey ve Rittenberg, kimyasal reaksiyonlarda izotopik etkileri gösterdi.
- 1934 Joliot ve I. Curie yapay radyoaktiviteyi keşfetti.
- 1935 DeHevesy, nötron aktivasyon analizini geliştirdi.
- 1935 Yukawa, mezonların varlığını ne sürdü.
- 1935 Weizsacker, yarı deneysel kütle formüllerini tretti.
- 1937 Neddermeyer ve Andersson, fotografik plakalar kullanarak kozmik radyasyondaki m-mezonları keşfetti.
- 1938 Bethe ve Weizsacker, nükleer füzyon yoluyla yıldızlardan enerji üretimi için ilk teoriyi önerdi.
- 1938 Hahn ve Strassman, uranyumun nötronlarla ışınlanmasının ardından fisyon ürünlerini keşfetti.

- 1942 Fermi ve arkadaşları ilk nükleer reaktörü kurdular.
- 1940-1945 Oppenheimer ve arkadaşları, çok büyük miktarlarda enerji açığa çıkaran hızlı ve kontrolsüz zincir reaksiyonları üretmek için bir cihaz geliştirdi. 16 Temmuz 1945'te, ABD'de (Alamogordo, New Mexico) yapılan ilk denemede, 20.000 ton TNT'ye karşılık gelen bir enerji üretildiği bildirildi; bunu Hiroşima'da (6 Ağustos 1945) ve Nagazaki'de (9 Ağustos 1945) atom bombalarının kullanılması izlemiştir.
- 1946 İlk Sovyet nükleer reaktörü faaliyete geçti.
- 1951 Elektrik üreten ilk Breeder reaktörü ABD Argonne Ulusal Laboratuvarı tarafından geliştirildi ve Idaho'da inşa edildi.
- 1955 İlk nükleer enerjili denizaltı (Nautilus).
- 1954-1956 1954'te SSCB'nin Obninsk kentinde 5 MWe'lik bir nükleer enerji santrali faaliyete geçti. 1954 te ilk sivil nükleer güç istasyonu (45 MWe), İngiltere'deki Calder Hall'da başladı.
- 1956 Reines ve Cowan nötrinoların varlığını kanıtladı.
- ~1960 Lederman, Schwarz ve Steinberger müon nötrinoyu keşfetti.
- 1961 Bir uyduda güç kaynağı olarak bir  $^{238}\text{Pu}$  radyonüklidi kullanıldı (Transit-4 A).
- 1961 Yarı iletken dedektörler geliştirildi.
- 1963 Nükleer silahların atmosferik testleri sonlandırıldı.
- ~1970 Kuark teorisi geliştirildi (Gell-Mann); nükleer saçılma deneylerinde kanıtlanmış kuarklar (Friedman, Kendall ve Taylor).
- 1972 Fransız bilim insanları Gabon, Oklo'da eski doğal nükleer reaktör keşfetti.



- 1979 ABD, Harrisburg yakınlarındaki Three Mile Island nükleer güç santralının PWR reaktöründe çekirdek erimesi; çevre kirliliğine yol açmadı.
- 1986 Ukrayna, SSCB, Pripyat'taki Çernobil-4 reaktör ünitesinde patlama ve yangın, geniş çevresel kirlenme.
- 2011 Japonya'daki Fukushima Daichi nükleer santrali, çok büyük bir tsunami tarafından vuruldu ve ağır hasar gördü.
- 2013 Higgs bozonu CERN'de keşfedildi

### **RADYASYON VE NÜKLEER ENERJİ İLE İLGİLİ ULUSLARARASI KURUM VE KURULUŞLAR**

- 1955 Birleşmiş Milletler Atomik Radyasyonun Etkileri Bilimsel Komitesi'nin (UNSCEAR) kuruldu.
- 1957 Merkezi Viyana'da bulunan Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı'nın (IAEA) kuruldu.
- 1963 Kısmi Test Yasağı Anlaşması; atmosferde, uzayda ve su altında nükleer testleri yasakladı.
- 1968 Nükleer Silahların Yayılmasının Önlenmesine İlişkin Antlaşma (NPT), “üç emanetçi hükümet” (SSCB, İngiltere ve ABD), tüm nükleer silah ülkeleri (NWC) ve diğer 40 imzacı, nükleer silah olmayan ülke ( NNWC).
- 1971 IAEA, nükleer silah sahibi olmayan ülkelerde bölünebilir malzemenin kontrolüne yönelik bir koruma sistemi sorumluluğunu üstlendi.
- 1991 140 ülke NPT anlaşmasını imzaladı.
- 2011 Almanya birkaç yıl içinde nükleer enerji üretimini bırakmaya karar verdi

## BÖLÜM 2

### TEMEL PARÇACIKLAR

#### **Bazı Temel Parçacıkların Oluşumu ve Standart Model**

20. yüzyılın sonlarına doğru yapılan yüksek enerjili çarpışma deneylerinin sonunda maddeyi oluşturan temel öge olan atomdan bile daha küçük yapıların var olduğu anlaşılmış ve bu yapılar atom altı parçacıklar diye adlandırılmıştır. Şu ana kadar belirlenen parçacık sayısı 300'den fazladır. Atomaltı parçacıklar bağımsız olarak ömürleri çok kısa olduğu için normal şartlar altında gözlemlenemezler. Bu amaçla oluşturulan parçacık hızlandırıcısı denilen dev düzeneklerde elektromanyetik alan içinde hızlandırılır ve yönlendirilirler. Hızlandırılan taneciklerin çarpışmaları sonucu yeni tanecikler açığa çıkar. Bu taneciklerin de çoğu son derece kısa ömürlüdür ve çok kısa sürede bozunurlar.

Yapılan bu çalışmalar sonucunda Standart Model olarak adlandırılan yeni bir tanecik modeli ortaya konmuştur. Bu model maddenin temel yapı taşlarını ve bunların etkileşimlerine aracılık yapan temel kuvvetleri tanımlayan bir teori olup içerisinde fermiyonlar, bozonlar, madde-karşıt madde ve bunların etkileri hakkında bilgiler yer almaktadır.

#### ***Fermiyonlar***

Standart modele göre fermiyonlar; 6 eşit lepton, 6 çeşit kuark ve bunların karşıt parçacıklarından oluşur. Kuarklar ve özellikleri Tablo 2'de verilmiştir (Bouchiat ve ark. (1972); Shupe (1979)).

**Tablo 2.** Kuarklar ve özellikleri

| Sembol | Çeşni            | Kütle (GeV/c <sup>2</sup> ) | Elektrik Yükü |
|--------|------------------|-----------------------------|---------------|
| u      | Üst (up)         | 0,003                       | +2/3          |
| d      | Alt (down)       | 0,006                       | -1/3          |
| c      | Tılsımlı (charm) | 1,3                         | +2/3          |
| s      | Acayip (strange) | 0,1                         | -1/3          |
| t      | Tepe (top)       | 173                         | +2/3          |
| b      | Taban (bottom)   | 4,5                         | -1/3          |

Kuarklar spinleri 1/2 ve elektrik yükleri +2/3 veya -1/3 olan parçacıklardır. Şimdilik bilinen 6 çeşit kuark ve 6 çeşit anti kuark vardır. Atom çekirdeğinde kuarklar grup halinde bulunur. Örneğin proton iki yukarı bir aşağı (u, u, d) kuarktan oluşur. Buna bağlı olarak protonun yükü;

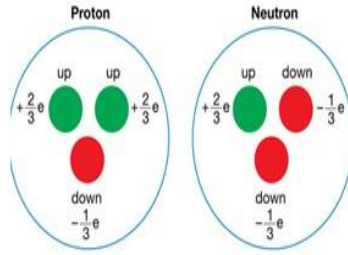
$$[(+2/3) + (+2/3) + (-1/3) = 3/3 = +1]$$

olur. Proton, parçacığın fiziksel ve kimyasal değişime uğramadan özelliklerini uzun süre koruduğu hal olarak tanımlanan **kararlı** haldedir.

Nötron ise bir yukarı iki aşağı (u, d, d) kuarktan oluşur. Buna bağlı olarak nötronun yükü;

$$[(+2/3) + (-1/3) + (-1/3) = 0]$$

olur. Bu nedenle nötronun yükü sıfırdır. Nötron parçacığın fiziksel ve kimyasal değişime uğramadan özelliklerini uzun süre koruyamadığı **kararsız** haldedir.



**Şekil 4.** Standart modele göre nötron ve protonu oluşturan kuarklar.

### ***Hadronlar***

Kuarklar hadronların temel parçacıklarıdır. Yani kuarklar birleşerek hadronları oluşturur. En geniş hadron grubu olan baryonlar, üç kuarktan oluşur. Proton ve nötron baryon grubundadır. Bir kuark ve bir anti kuarktan oluşan hadron grubuna mezon denir. Hadronlar güçlü çekirdek kuvvetleri, çekimsel kuvvetler ve yüklü elektromanyetik kuvvetler aracılığıyla etkileşime girerler. En kararlı baryonlar protonlardır. Baryonlar çok hızlı (1 saniyeden az zamanda) bozunurlar. Bozunma geçiren baryonlar kararlı halde olan protona dönüşürler. Bozunma veya reaksiyon sonrasında baryon oluşuyorsa anti baryonda oluşur. Buna Baryon Sayılarının Korunumu Yasası denir. Bu yasaya göre bozunma öncesindeki baryon sayısı, bozunma sonrasındaki baryon sayısına eşittir (Bouchiat ve ark. (1972); Shupe (1979); Terazawa (1982); Weinberg (1990); Jadach ve ark. (1991); Zuchelli (2002); Das ve Ferber (2003); Griffiths (2004); Lichtenberg (2007). Hadronların genel özellikleri Tablo 3’de verilmiştir.

**Tablo 3.** Hadronlar ve özellikleri

| Hadron adı | Hadron grubu | Sembol      | Elektrik yükü | Kütlesi (MeV) | Spini |
|------------|--------------|-------------|---------------|---------------|-------|
| Pion       | Mezon        | $\pi^0$     | +1            | 139,6         | 0     |
| Kaon       | Mezon        | $K^+$       | +1            | 493,7         | 0     |
| Proton     | Baryon       | P           | +1            | 938,3         | 1/2   |
| Nötron     | Baryon       | N           | 0             | 939,6         | 1/2   |
| Lambda     | Baryon       | $\Lambda^0$ | 0             | 1115,6        | 1/2   |
| Sigma      | Baryon       | $\Sigma^+$  | +1            | 1189,4        | 1/2   |
|            |              | $\Sigma^0$  | 0             | 1192,5        |       |
|            |              | $\Sigma^-$  | -1            | 1197,3        |       |
| Ksi        | Baryon       | $\Xi^0$     | 0             | 1315          | 1/2   |
|            |              | $\Xi^-$     | -1            | 1321          |       |
| Omega      | Baryon       | $\Omega^-$  | -1            | 1672          | 3/2   |

Çekirdek kuvvetlerinin nasıl etkili olduğuna dair ilk öneri 1935 yılında Yukawa tarafından ortaya konmuştur. Yukawa'ya göre çekirdeği bir arada tutan kuvvetler; proton ve nötron arasında bir kütleyle sahip parçacıklar tarafından gerçekleştirilmekteydi. Bu parçacıklar proton ve nötronun kütleleri arasında bir kütleyle sahip olduklarından İngilizcede ara değer anlamına gelen mezon ile adlandırılmıştır. Bu parçacıkların 1947 yılında deneysel ortamda gözlemlenmesi sonucunda Yukawa aynı yıl Nobel Ödülü almıştır.

Fermiyonların diğer bir türü olan Leptonların da kütleleri, spinleri ve elektriksel yükleri vardır (Tablo 4).

**Tablo 4.** Leptonlar ve özellikleri

| Lepton adı       | Sembol     | Elektrik yükü | Kütlesi (MeV) | Spini |
|------------------|------------|---------------|---------------|-------|
| Elektron         | e          | -1            | 0,511         | 1/2   |
| Muon             | $\mu$      | -1            | 105,6         | 1/2   |
| Tau              | $\tau$     | -1            | 1777          | 1/2   |
| Elektron nötrino | $\nu_e$    | 0             | 0             | 1/2   |
| Muon nötrino     | $\nu_\mu$  | 0             | < 000,27      | 1/2   |
| Tau nötrino      | $\nu_\tau$ | 0             | < 0,35        | 1/2   |

Leptonlar içerisinde sadece elektronlar kararlıdır. Elektron nötrino, leptonların en hafif olanıdır ve saniyede milyonlarcası vücudumuzdan geçmekte olup kararsız haldedirler. Muon, elektrondan daha ağır ancak kararsız haldedir. Muon'un ömrü saniyenin 2 milyonda biri kadardır. Muon nötrinosü bazı parçacıkların bozunması sonucu muonlarla beraber ortaya çıkmaktadır. Tau, elektron ve muondan daha ağırdır ancak kararsız haldedir. Tau nötrinosu bazı parçacıkların bozunması sonucu taularla beraber ortaya çıkmaktadır. Anti (karşıt) parçacık, kütlesi, spini ve diğer birçok özellikleri parçacık ile aynı olan maddelerdir. Anti parçacığın, parçacıktan farkı yüklerinin işaretinin zıt olmasıdır. Örneğin (+) yüklü protonun anti parçacığı olan anti proton (-) yüklüdür. (-) yüklü olan elektronun anti parçacığı (+) yüklü olan pozitrondur. Evrende birçok maddenin anti (karşıt) maddesi vardır. Ağır bir leptonun bozunma ürünü daima ona karşılık gelen nötrinosu olacaktır. Diğer ürün bir kuark ve onun antikuarkı, veya daha hafif bir lepton ve onun anti nötrinosu olacaktır (Çek, 2016)

Yakalanmaları ve gözlemlenmeleri çok zor olan nötrinolar da lepton grubundadırlar. Nötrinolar, CERN ve SLAC laboratuvarlarında bulunan

büyük hızlandırıcılarla yapılan deneylerde yakalanarak elde edilmektedir. Nötrinolar elektrik yükleri olmayan, kütleleri sıfıra yakın temel parçacıklardır. Nötrinoların elektrik yükleri olmadığından elektromanyetik etkileşim yapamazlar, ışık hızına yakın hızda hareket ederler ve maddenin içerisinden hiçbir etki yapmadan geçebilirler. Nötrinoların, evrende temel kaynağı yıldızlardır. Bu nedenle nötrinolar düşünülenin aksine evrende fazladır. Nötrinoların karşıt parçacığı olan anti nötrinolar beta bozunumu sırasında açığa çıkan yüksüz parçacıklardır. Nötrino ve anti nötrinoların özelliklerinin aynı olması gerçekte aynı parçacıklar olduğunun kanıtıdır. Nötrino ile anti nötrino arasındaki fark; nötrinoların evrende temel kaynağı yıldızlar, anti nötrinoların temel kaynağı beta bozunumu olmasıdır (Bouchiat ve ark. (1972); Shupe (1979); Terazawa (1982); Weinberg (1990); Jadach ve ark. (1991); Zuchelli (2002); Das ve Ferber (2003); Griffiths (2004); Lichtenberg (2007).

### ***Bozonlar***

Bozon kuvvet anlamına gelmektedir. Fermiyonlar, bozonlar sayesinde birbirleriyle etkileşim kurmaktadır. Aynı yükler birbirlerini iter zıt yükler birbirlerini çeker. Örneğin, bir atomda birden fazla proton olduğu zaman bu protonlar aynı yüklü oldukları için birbirlerini iterler ve buna bağlı olarak atomun parçalanması gerekirken atom parçalanmamaktadır. Atomun parçalanmamasının nedeni protonlar arasında bozonların bulunmasıdır. Günümüze kadar Foton, Gluon, Graviton, W, Z ve Higgs bozonlarından söz edilmiştir. Bozonlar ve özellikleri Tablo 5'te verilmiştir.

**Tablo 5.** Bozonlar ve genel özellikleri

| Bozon adı | Sembol   | Elektrik yükü | Kütlesi (MeV) | Spini |
|-----------|----------|---------------|---------------|-------|
| Foton     | $\gamma$ | 0             | 0             | 1     |
| Gluon     | g        | 0             | 0             | 1     |
| Graviton  | G        | 0             | 91200         | 2     |
| W         | W        | -1, +1        | 80400         | 1     |
| Z         | Z        | 0             | 91187         | 1     |
| Higgs     | H        | 0             | 126000        | 0     |

Bozonlar, Güçlü Nükleer Kuvvet, Zayıf Nükleer Kuvvet, Kütle Çekim Kuvveti, Elektromanyetik Kuvvet olmak üzere dört temel kuvvete etki etmektedirler.

### ***Güçlü Nükleer Kuvvetler***

Doğadaki en güçlü kuvvetlerdir. Bu kuvvetler sayesinde proton ve nötrondaki kuarklar bir arada tutulurlar. Ancak kuarklar arasındaki mesafe çok küçülmedikçe bu kuvvetler etkili olmaz. Kuarkların çok yakın mesafelerde birbirini çekme veya itme özellikleri vardır. İki u kuark birbirini iterken u ve d kuarklar birbirini çeker. Bu çekme ve itmeler kuarkların renk özelliği ile ilişkilidir. Standart modele göre bu çekme veya itme kuvvetleri gluon adı verilen çok küçük parçacıkların alışverişi sayesinde olur.

### ***Zayıf Nükleer Kuvvetler***

Proton ve nötronların yapılarında bulunan u ve d kuarklar simetrik dağılmadığından bunlarda renk dipolleri vardır. Bu dipol karakter proton ve nötronlar arasında bir dipol çekim etkileşimi sağlar. Dolayısıyla



çekirdek içinde proton - proton, nötron - nötron ve proton – nötron çekim kuvvetleri oluşur.

Zayıf nükleer kuvvetler, çekirdek içinde protonlar arasındaki elektriksel itme kuvvetlerini dengelerse çekirdek kararlı olur. Protonlar arası elektriksel itme kuvvetleri daha kuvvetli olursa çekirdek kararsızlaşır ve parçalanır.

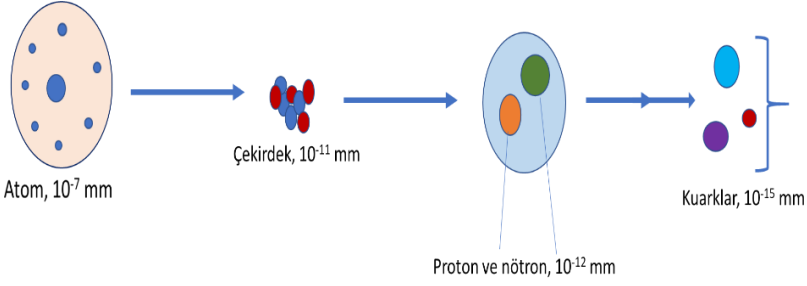
### ***Kütle Çekim Kuvveti***

Kütlesel tüm parçacıkların birbirini çekmesini sağlayan kuvvettir. Graviton bozonu kütle çekim kuvveti oluşmasını sağlar. Bütün parçacıklar arasında etki eder. Güneş sistemini bir arada tutan kuvvet budur.

### ***Elektromanyetik Kuvvet***

Elektromanyetizma, elektriksel, manyetik ve kimyasal olayların oluşmasını sağlayan kuvvettir. Foton bozonu elektromanyetik kuvvet oluşmasını sağlar. Elektromanyetik kuvvetler fotonlar tarafından oluşturulduğu için kuarklar ve leptonlara etki ederler.

Sonuç olarak; kuarklar proton ve nötronu oluşturur. Proton ve nötronlar da atom çekirdeğini yapılandırır. Çekirdeğin etrafındaki uzaya yerleşen lepton ailesine ait elektron bulutlarıyla atom meydana gelir. Atomlar da bir araya gelerek molekülleri oluştururken moleküller de bir araya gelerek maddeyi oluşturur.



**Şekil 5.** Atomdan atom altı parçacıklara geçiş

### Nükleonları Bir Arada Tutan Bağ Enerjisi

Çekirdeğin yoğunluğunun çok büyük olması demek çekirdeği oluşturan parçacıkların çok sıkı bir şekilde birbirlerine bağlı olduğu anlamına gelir. Bu da çekirdeği oluşturan nükleonların birbirlerine çok güçlü bağlarla bağlanmış ve birbirlerine en yakın mesafede bulunuyor olmaları gerektiğini gösterir.

${}^4\text{He}$  çekirdeğinden bir nükleonu koparıp alabilmek için verilmesi gereken enerjiyi yani  ${}^4\text{He}$  çekirdeğindeki herhangi bir nükleonun bağ enerjisini hesaplayalım.

Kütle spektrometresi ile çeşitli atomların çekirdeklerinin kütlesi ölçülebilmektedir. Buna göre helyum çekirdeğinin kütlesi ölçülmüş ve;

$$m_{\text{He-deneyssel}} = 6,6443228 \times 10^{-24} \text{ g}$$

$$m_{\text{He-hesap}} = 2m_p + 2m_n = 2 \times 1,6729898 \times 10^{-24} + 2 \times 1,6743845 \times 10^{-24}$$

$$m_{\text{He-hesap}} = 6,6947486 \times 10^{-24} \text{ g}$$

$$m_{He-deneysel} < m_{He-hesap} \quad (\Delta = 0,05042582 \times 10^{-24} \text{ g})$$

Sonuç olarak; 4 adet serbest nükleonun bir araya gelerek  ${}^4\text{He}$  çekirdeğini oluşturmaları sırasında toplam  $0,05042582 \times 10^{-24}$  gramlık bir kütle kaybı olduğu görülüyor. Bu kaybolan kütle, enerjiye dönüşmüştür ve oluşan bu enerji 4 nükleonu birbirine bağlamak için kullanılmıştır.

$$E = m \cdot C^2$$

$$E = 0,05042582 \cdot 10^{-24} \times (2,998 \cdot 10^{10})^2 = 4,5322747 \cdot 10^{-5} \text{ erg}$$

Bu değer, 4 adet nükleonun kendi aralarındaki toplam bağ enerjisidir. Bir nükleonun bağlanma enerjisi;

$$E_b = \frac{4,5322747 \times 10^{-5}}{4} = 1,1330687 \times 10^{-5} \text{ erg kadardır.}$$

Makro skalada kullanılan **Erg** enerji birimini, çok küçük madde miktarlarının söz konusu olduğu mikro skalada kullanabilmek için **elektron volt** birimine dönüştürelim.

$$4,5322747 \times 10^{-5} \text{ erg} \times \frac{6,2421973 \times 10^{11} \text{ eV}}{1 \text{ erg}} = 28,3 \text{ MeV} \quad E_b = \frac{28,3}{4} = 7 \text{ MeV}$$

Helyumdan başka diğer atom çekirdekleri için de yapılan benzer hesaplamalarda bir nükleonun bağ enerjisi için 7-9 MeV arasında değerler elde edilmiştir.

Şimdi de bazı atomların yörünge elektronlarına ait bağ enerjileri ile bazı moleküllerdeki kimyasal bağ enerjileri değerlerinin verildiği Tablo 6 ve Tablo 7'deki değerleri inceleyelim. Tablolardan da görüldüğü gibi, nükleonlar arasındaki milyon elektronvolt (MeV) mertebesindeki bağ enerjisinin, gerek bir atomun en dış yörünge elektronunu koparmak için gerekse de moleküllerdeki kimyasal bağları koparmak için verilmesi gereken enerji değerlerinden milyon kez daha büyük olduğu görülmektedir.

**Tablo 6.** Bazı yörünge elektronlarına ait bağ enerjileri

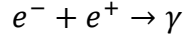
| Atom | En dış yörüngedeki elektronun bağ enerjisi, eV |
|------|--|
| H    | 13,6   |
| He   | 24,6*  |
| Cu   | 7,6  |
| Mo   | 7,1  |
| U    | 7,4  |

**Tablo 7.** Bazı moleküllerdeki kimyasal bağ enerjileri

| Kimyasal bağ | En dış yörüngedeki elektronun bağ enerjisi, eV | Kimyasal bağ | En dış yörüngedeki elektronun bağ enerjisi, eV |
|--------------|--|--------------|--|
| H - H        | 4,52   | C - C        | 3,10   |
| H - C        | 4,29   | C = C        | 6,33   |
| H - N        | 4,03   | N = N        | 9,80   |
| H - Cl       | 4,67   | N - N        | 1,64   |
| H - I        | 3,08   | F - F        | 1,69   |

## Madde-Karşıt (Anti) Madde Çarpışmaları

Bir madde ile karşıt madde çarpıştıkları zaman parçacıklar ile karşıt parçacıkları birbirlerini yok edebilir ve bu esnada büyük miktarlarda enerji açığa çıkarabilirler. Çarpışma sırasında açığa çıkan enerji değişik formlara dönüşebilir. Örneğin, elektron ( $e^-$ ) ve pozitron ( $e^+$ ) aynı kütle ve yüke sahiptir, ancak yüklerinin işareti zıttır. Bu parçacıklar çarpıştıklarında birbirlerini yok eder ve "gama ışını" olarak enerjiye dönüşür (Beskidt ve ark. (2013)).



## BÖLÜM 3

### ÇEKİRDEKLER, İZOTOPLAR

#### Atom Çekirdeğinin Yapısı

Farklı elementlere ait atomların kendi aralarında farklı büyüklüklere sahip olduğunu biliyoruz. Atomun sahip olduğu kütlelerin hemen hemen tamamı çekirdeğindedir, bu da çekirdeğin çok yoğun bir kütleye sahip olduğu anlamına gelir.

Basit bir hesap yaparak çekirdeğin yoğunluğunu bulmak mümkündür. Bunun için hacim ve kütle arasındaki aşağıda verilen eşitliği kullanmak yeterli olacaktır.

$$d = \frac{m}{v}$$

Örnek;  $^{127}\text{I}$  atomunun yoğunluğunu hesaplayalım.

$m$  yerine  $^{127}\text{I}$ 'nin  $2,1257291 \times 10^{-22}$  g olarak hesaplanan yaklaşık kütlelerini ve  $v$  yerine de yarıçapı yaklaşık  $10^{-12}$  cm olan kürenin hacmini koymak suretiyle çekirdeğin yoğunluğu;

Atomun yarıçapı;  $r = 10^{-12}$  cm (Küre gibi düşünersek)

$$V = \frac{4}{3}\pi r^3 = \frac{4}{3} \times 3,14 \times (10^{-12})^3 = 4,1866666 \times 10^{-36} \text{ cm}^3$$

$$d = \frac{m}{v} = \frac{2,1257291 \times 10^{-22}}{4,1866666 \times 10^{-36}} \cong 1,6 \times 10^{14} \text{ g cm}^{-3}$$

Korkunç bir yoğunluk  $1,6 \times 10^8 \text{ ton.cm}^{-3}$  ????????????

Eğer yalnızca atom çekirdeğinden oluşan  $1 \text{ cm}^3$  lük bir madde oluşturulabilmiş olsa bunun kütlelerinin  $\sim 160$  milyon ton olacağı anlamına gelmektedir. Bu kadar küçük hacimdeki bir maddenin bu kadar büyük bir yoğunluğa sahip olması, atom çekirdeğinin bizim algılayıp

gözlemleyebildiğimiz madde yapısından son derece farklı ve karmaşık bir yapıya sahip olduğu anlamını taşımaktadır.

### **Atom Çekirdeğinin Temel Bileşenleri**

Bilindiği gibi atom, merkezinde bir çekirdek ile çekirdeğin etrafında yörüngelerden meydana gelmiş hareketli bir sistemdir. Atomun çekirdeğinde proton ve nötronlar bulunmaktadır ki bunların ikisine birden nükleon denilmektedir. Çekirdeğin etrafındaki yörüngelerde proton sayısına eşit sayıda elektronlar yer alır. Bir atomun kütle numarası “A” sembolü ile gösterilir ve toplam nükleon sayısına eşittir. Böylece;

$$A = N + Z \text{ 'dir.}$$

burada Z, proton sayısıdır, yani atom numarası ve N, nötron sayısıdır. Kimyasal etkileşimlerin çoğu, atomu çevreleyen elektron bulutunun etkileşimleri yoluyla gerçekleşse bile, atomun temel ve kimyasal özellikleri atom numarası tarafından belirlenir. Daha önce de bahsedildiği gibi bir element, çekirdekte aynı sayıda protona sahipken, farklı kütle numaralarına ve dolayısıyla farklı nötron sayılarına sahip atomlardan oluşabilir. Örneğin neon elementinin, atom numarası 10'dur, bu da tüm neon atomlarının çekirdeklerindeki proton sayısının 10 olduğu anlamına gelir; ancak doğadaki neon atomlarının % 90'ının çekirdeklerinde 10 nötron bulunurken, atomların % 10'unda 12 nötron bulunur.

Proton sayıları aynı nötron sayıları farklı dolayısıyla kütle numaraları da farklı olan atomlara izotop atom, çekirdeği kararlı olmayan izotoplara da radyoizotop denir. Elementlerin birçoğunun kararlı izotoplarının

yanında, kararsız izotopları da mevcuttur. Örneğin, hidrojen atomunun kütle numarası 1 ve 2 olan izotopları kararlı izotoplarken ( $^1\text{H}$ ,  $^2\text{H}$ ), kütle numarası 3 olan izotopunun ( $^3\text{H}$ ) kararsız olduğu bilinmektedir. Bir atomun kararlı izotopları kendiliğinden bozunma göstermeyen izotoplardır. Radyoaktif izotoplar ise, kendiliğinden parçalanarak kararlı izotoplara dönüşürler.

Bazı elementler doğada bir tek izotopu halinde bulunmakta, bazıları ise iki veya daha fazla sayıda izotopunun karışımından oluşmaktadır. En fazla doğal izotopa sahip olan element ise, kalaydır ve 10 değişik izotopun karışımı şeklinde doğada bulunmaktadır.

Bugün için doğada bulunan izotopların sayısından çok daha fazla izotop insanlar tarafından üretilmektedir. Örneğin  $^{127}\text{I}$ 'nin doğada bulunma oranı %100 olmasına rağmen insanlar tarafından üretilen iyot izotoplarının sayısı 25 kadardır.

### ***İzomer Çekirdekler***

İnsanlar tarafından yapay olarak üretilen çekirdekler arasında bazen öyle iki çekirdeğe rastlanır ki bu iki çekirdekten biri dışarıya bir tür radyasyon (ışınım) yayarken, diğerinin böyle bir özelliği yoktur.

Atom numaraları ve kütle numaraları aynı ancak bazı nükleer özellikleri farklı olan çekirdeklere *izomer çekirdekler* ya da *izomer atomlar* denir. İzomer çekirdeklerden radyasyon yaymanı diğer atomdan ayırabilmek için radyasyon yaymanın kütle numarasının yanına “*metastable*” yani Türkçesi “*arakararlı*” anlamına gelen “*m*” harfi yazılır. İkidenden fazla



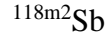
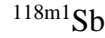
izomeri olan atomlarda  $m_1$  ve  $m_2$  şeklinde gösterilmektedir. Doğal atomlar arasında izomeri olanlar yoktur.

Örnek;

**Radyasyon yaymayan şekli**



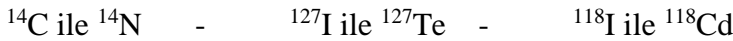
**Radyasyon yayan şekli**



***İzobar Çekirdekler***

İzomer atomlardaki durumun tam tersi atom numaraları farklı kütle numaraları aynı olan atomlar birbirinin ***izobar***'ıdır. Tanımdan da anlaşılacağı gibi, izobar atomların çekirdeklerinde hem proton sayıları hem de nötron sayıları birbirinden farklıdır ancak bunların toplamları olan kütle numaraları aynıdır.

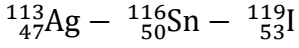
Örnek;



***İzoton Çekirdekler***

Bazı atomların hem atom numaraları hemde kütle numaraları farklı olmasına rağmen nötron sayıları aynı olabilmektedir. Böyle atomlara ***izoton çekirdekler*** veya ***izoton atomlar*** denir. Bu atomların hem atom numaraları hem de kütle numaraları farklı olduğu halde nötron sayıları aynıdır.

Örnek;



Bu üç izoton çekirdeğin nötron sayısı eşittir.

$$[(113-47) = (116-50) = (119-53) = 66]$$

### Atom Kütleleri Ve Atom Ağırlıkları

Atomik kütle birimi, (**akb** veya kısaltılmış hali **u**)  $12u$  olarak tanımlanan  ${}^{12}\text{C}$  atomunun kütesinin on ikide biri olarak tanımlanan evrensel kütle birimidir.  ${}^{12}\text{C}$  atomunun mutlak kütle, 12 değerinin Avogadro sayısına ( $NA = 6,022137 \times 10^{23}$ ) bölünmesiyle elde edilir.

$${}^{12}\text{C} \text{ atomunun kütle} = \text{Çekirdeğin kütle} + 6 \text{ elektronun kütle} = 1.992648 \times 10^{23} \text{ g.}$$

Periyodik tabloda yer alan diğer elementlerin atomik kütleleri,  ${}^{12}\text{C}$  standardına göre **u** birimleri cinsinden ifade edilir.

$$\text{Bir nötronun kütle} = 1,6743845 \times 10^{-24} \text{ g}$$

$$\text{Bir protonun kütle} = 1,6729898 \times 10^{-24} \text{ g}$$

Buna göre çekirdeğinde; 53 protonu ve 74 nötronu olan bir atomun mol kütle yaklaşık 127 gramdır. Atomun ölçülen gerçek kütle ise bu değerden biraz daha küçüktür.

$$\text{elektronun kütle} = 0,0005486 \times 10^{-24} \text{ g}$$

$$(\text{nötral bir atomda proton sayısı} = \text{elektron sayısı})$$

$$53 \times 0,0005486 \times 10^{-24} = 2,90758 \times 10^{-26} \text{ g}$$

Görüldüğü gibi atomun toplam kütle içinde, elektronların kütle etkisi ihmal edilebilecek seviyededir.

$$\text{En küçük atom için;} \quad \frac{m_e}{m_t} = \sim \frac{1}{1835}$$

$$\text{En büyük atom için;} \quad \frac{m_e}{m_t} = \sim \frac{1}{4600}$$

Bu nedenle pratikte bir atomun kütlesi denildiği zaman çekirdeğindeki protonların ve nötronların toplam sayısının tam katları ile ifade edilir.

1960'ların sonlarına kadar, atom kütlesi iki farklı birimle ifade edilmekteydi. Kimyagerler, oksijenin doğal bileşimini temel alan bir ölçek kullanarak 16 u'luk bir kütleyle sahip olduğunu kabul ederlerken, fizikçiler aynı kütle birimini oksijenin en yaygın izotopu olan  $^{16}\text{O}$  için temel aldılar.

Ancak bu ölçek, doğal oksijenin hem  $^{17}\text{O}$  hem de  $^{18}\text{O}$  izotoplarını içerdiği düşünüldüğünde, iki farklı atomik kütle tablosunun kullanılması gerekliliğine yol açmıştır ki bu hiç uygun bir kullanım şekli değildir.

Nükleer bilimde, atom çekirdeğinin kütesinden ziyade atomik kütleleri kullanmanın daha uygun olduğu düşünülmektedir. Çünkü bir nükleer reaksiyonda elektron sayısı her zaman dengelenir ve farklı atomlardaki elektronların bağlanma enerjisindeki değişiklikler, kütle hesaplamalarında önemli bir hataya neden olmaz. Bu nedenle, bir nükleer reaksiyondaki reaktiflerin ve ürünlerin atomik kütlelerindeki fark, ilgili çekirdeklerin kütlelerindeki farka eşittir ve tüm nükleer reaksiyonlara nükleer kütlelerdeki değişiklikler eşlik eder.

Çekirdeğin kütlesi, elektronların kütlelerinin toplamının atom kütesinden çıkarılmasıyla yaklaşık olarak tahmin edilebilir. Bir elektronun kütlesi,  $9.1094 \times 10^{-31}$  kg'a eşdeğer olan 0.000549 u'dur. Nötral bir karbon atomu 6 elektrona sahip olduğundan, çekirdeğin yaklaşık kütlesi;

$$1.992648 \times 10^{26} - 6 \times (9.1094 \times 10^{-31}) = 1.992101 \times 10^{26} \text{ kg.}$$

Bu hesaplamada, bu 6 elektronun bağlanma enerjisinden kaynaklanan kütle farkı hesaba katılmamıştır. Çünkü bağlanma enerjisi, hesaplamadaki en az anlamlı rakamdan daha küçük olan bir kütle eşdeğerine sahiptir.

Bir nötronun kütlesi 1,008665 u iken hidrojen atomunun kütlesi 1,007825 u'dur. Bu da, nötronun bir protona ve bir elektrona bozduğunu gösterir. Hem nötronlar hem de protonlar neredeyse aynı atomik kütlelere sahip olduklarından, bir çekirdeğin atomik kütlesi nükleon sayısına, yani kütle sayısına yakın olmalıdır.

### **İzotopik Kütle ve İzotopik Bollukların Tayini**

Periyodik tablo incelendiğinde, birçok elementin, teorik olarak hesaplanan değerlerden daha farklı kütlelere sahip olduğu görülmektedir. Örneğin klor, 35,453 u'luk bir atomik kütle değerine sahipken, bakırın 63,54 u'luk bir atomik kütle değeri vardır. Bu dağılım, elementlerin hesaplanan net kütlelerine katkıda bulunan kararlı izotoplarının bağlı bolluklarının etkisiyle açıklanabilir.

Eğer bir elementin iki izotopu varsa ve izotop 1  $n_1$  atomdan, izotop 2 ise  $n_2$  atomlarından oluşuyorsa, izotop 1 için atomik bolluk şu şekilde tanımlanır:

$$x_1 = n_1 / (n_1 + n_2 + \dots) = n_1 / \sum n_i$$

İzotopik oran, izotopların atomik bollukları arasındaki orandır. İzotop 1 ve 2 için izotopik oran;

$$\xi_1 = x_1 / x_2 = n_1 / n_2$$

$$\xi_2 = x_2 / x_1 = n_2 / n_1$$

Bir elementin atomik kütlesi (veya atom ağırlığı)  $M$ , izotopik kütlelerin ortalaması olarak tanımlanır.

$$M = x_1 M_1 + x_2 M_2 + \dots = \sum x_i M_i$$

### Örneğin;

Klor atomunun, biri % 75,77 bağıl bolluğa ve 34,9689 u atomik kütle ve ikincisi % 24,23 bağıl bolluğa ve 36,9659 u kütleyle sahip iki izotopu vardır ve elementin ortalama atomik kütlesi 35,453 u'dur.

Bakırın 63,546 u olan atomik kütlesi ise, 62,9296 u'luk bir kütle ve % 69,17 bolluktaki izotopu ile % 30,83 bolluk ve 64,9278 u'luk kütledeki izotoplarının varlığı ile hesaplanmıştır. Bazı izotopların atom kütleleri ve bağıl bollukları Tablo 8'de verilmiştir.

**Tablo 8.** Bazı izotopların atom kütleleri ve bağıl bollukları.

|          | Z           | N            | A              | Atomik kütle, u                     | Bağıl bolluk, %          | Atom ağırlığı | Sembol   |
|----------|-------------|--------------|----------------|-------------------------------------|--------------------------|---------------|--|
| Hidrojen | 1           | 0            | 1              | 1,007825                            | 99,985<br>0,0155<br>0    | 1,00797       | <sup>1</sup> H<br><sup>2</sup> H (D)<br><sup>3</sup> H (T) |
| Helyum   | 2<br>2      | 1<br>2       | 3<br>4         | 3,016030<br>4,002603                | 0,0001<br>100,00         | 4,0026        | <sup>3</sup> He<br><sup>4</sup> He                         |
| Lityum   | 3<br>3      | 3<br>4       | 6<br>7         | 6,015121<br>7,016003                | 7,42<br>92,58            | 6,939         | <sup>6</sup> Li<br><sup>7</sup> Li                         |
| Berilyum | 4           | 5            | 9              | 9,012182                            | 100,00                   | 9,0122        | <sup>9</sup> Be  |
| Karbon   | 6<br>6      | 6<br>7       | 12<br>13       | 12,00000<br>13,003355               | 98,892<br>1,108          | 12,0112       | <sup>12</sup> C<br><sup>13</sup> C                         |
| Azot     | 7<br>7      | 7<br>8       | 14<br>15       | 14,003074<br>15,000109              | 99,635<br>0,365          | 14,007        | <sup>14</sup> N<br><sup>15</sup> N                         |
| Oksijen  | 8<br>8<br>8 | 8<br>9<br>10 | 16<br>17<br>18 | 15,994915<br>16,999131<br>17,999160 | 99,759<br>0,037<br>0,204 | 15,999        | <sup>15</sup> O<br><sup>16</sup> O<br><sup>17</sup> O      |
| Uranyum  | 92<br>92    | 143<br>146   | 235<br>238     | 235,043924<br>238,050785            | 0,724<br>99,266          | 238,029       | <sup>235</sup> U<br><sup>238</sup> U                       |

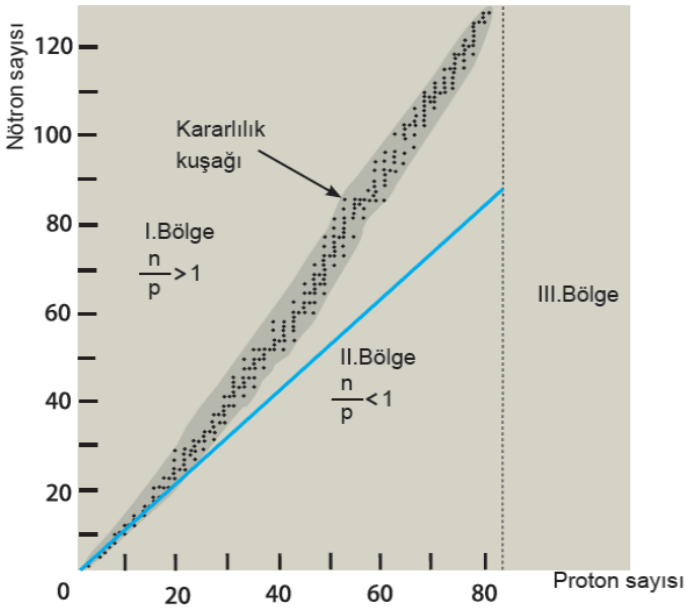
## BÖLÜM 4

### NÜKLEER KÜTLE KARARLILIĞI

#### Nükleer Kararlılık

Bugün, radyoaktif bozunma özelliği göstermeyen ve dolayısıyla radyoaktif bozunma açısından kararlı olduğu söylenen 255 farklı çekirdek vardır. Bu ise, bu çekirdeklerin, eğer yarı ömürleri varsa, bu tarihe kadar ölçülen en uzun yarı ömür olan  $\sim 10^{20}$  yıldan daha büyük olduğu anlamına gelir. Bu çekirdekler, proton ve nötron sayıları açısından karşılaştırıldığında, yaklaşık % 60'ının hem çift sayıda proton hem de çift sayıda nötron içerdiği ve kalan % 40'ın ise çift sayıda proton-tek sayıda nötron içerenler (çift-tek çekirdekler) ve tek sayıda proton-çift sayıda nötron içerenler (tek-çift çekirdekler) arasında yaklaşık eşit olarak bölündüğü bilinmektedir. Şu anda hem tek sayıda proton hem de tek sayıda nötron içerdiği (tek-tek çekirdekler) bilinen yalnızca 4 kararlı çekirdek vardır. Bunlar;  ${}^2_1\text{H}$ ,  ${}^6_3\text{Li}$ ,  ${}^{10}_5\text{B}$  ve  ${}^{14}_7\text{N}$ 'dur. Bu kararlı ve tek-tek çekirdeklerin çok hafif elementlerde bol miktarda bulunması oldukça önemlidir.

Bu modeli göz önünde bulundurduğumuz zaman, kararlı çekirdekler için, nükleer kararlılığın çift sayıda proton ve nötron tarafından desteklendiği sonucuna varabiliriz. Bu sonucun geçerliliği, herhangi bir elementin kararlı izotoplarının sayısı ve türleri dikkate alınarak daha da doğrulanabilir.



**Şekil 6.** Çekirdek kararlılığının nötron/proton oranına bağlılığı.

Atom numarası çift olan elementlerin (yani çift sayıda protonu bulunan), genellikle 3 veya daha fazla kararlı izotopa sahip oldukları bilinmektedir. Örneğin, atom numarası 50 olan kalay elementinin 10 kararlı izotopu varken, kadmiyum ( $Z = 48$ ) ve tellürün ( $Z = 52$ ) her birinin kararlı izotop sayısı 8'dir. Buna karşılık gümüş ( $Z = 47$ ) ve antimonun ( $Z = 51$ ) her birinin yalnızca 2 kararlı izotopu vardır ve rodyum ( $Z = 45$ ), indiyum ( $Z = 49$ ) ve iyot ise ( $Z = 53$ ) yalnızca 1 kararlı izotopa sahiptirler.

Atom numarası tek olan elementlerin ya hiç kararlı izotopları yoktur ya da bir veya iki kararlı izotopu vardır ve bunlar, yukarıda bahsedilen 4 tek-tek çekirdek dışında hepsi çift sayıda nötron içerir.

Çift sayıda proton ve nötron içeren çekirdeklerin kararlılığı, protonlar ile protonlar ve nötronlarla nötronların çift oluşturmak için kombinasyonu



ile kazanılan enerji kararlılığı ile açıklanabilir. Örneğin bir çekirdekte çift sayıda proton varsa, tüm bu protonlar çiftler halinde bulunabilir. Bununla birlikte, çekirdekte tek sayıda proton varsa, bu protonlardan en az birinin eşleşmemiş durumda olması gerekir.

Elementlerde nükleonların tam eşleşmesinden kaynaklanan çekirdek kararlılığındaki artıştan, hatta kütle numaraları bile sorumludur. Örneğin; Germanium'un ( $^{32}\text{Ge}$ ), 5 kararlı izotopu varken, galyumun ( $^{31}\text{Ga}$ ) 2 kararlı izotopu ve arseniğin ( $^{33}\text{As}$ ) 1 kararlı izotopu vardır.

Aynı eşleşme kararlılığı nötronlar için de geçerlidir. Öyle ki, hem nötron hem de proton olmak üzere tüm nükleonları çift ve eşit bir çekirdek, oldukça kararlı bir durumu temsil eder. Atom numarasının çift olduğu elementlerde, nötron sayısı çift olmasa bile, yine de proton-proton eşleşmesiyle sağlanan bir miktar kararlılık vardır. Atom numarası tek olan elementlerin çekirdekleri, çift nötron sayısı ile sağlanan kararlılık olmadığı sürece, istisnalar dışında radyoaktifdir. Ayrıca kararlı nükleer türlerin sayısının, çift-tek ve tek-çift durumları için yaklaşık olarak aynı olduğunu da unutmamalıyız. Çünkü protonların protonlarla ve nötronların nötronlarla eşleşmesi, çekirdeğe yaklaşık olarak eşit derecelerde kararlılık sağlamaktadır ki bu durum, eşleşmiş elektronların daha fazla kararlılık sağladığı atomların elektronik yapısı ile de oldukça benzerdir.

### **Nötron/Proton Oranı**

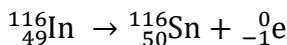
Atom çekirdekleri parçalanmaya ve bozunmaya karşı dayanıklıdır ve buna **Nükleer Kararlılık** denir. Nükleer kararlılıkta en büyük etken, atom

çekirdeklerinin içinde yer alan nötron ve protonların birbirlerine oranıdır (n/p).

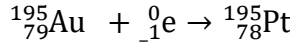
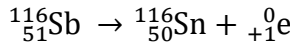
Nötron sayısına karşı kararlı çekirdeklerdeki proton sayısının değişimini veren grafik (Şekil 6) incelendiğinde, hafif elementlerde kararlılığın nötron ve proton sayısı yaklaşık olarak eşit olduğunda sağlandığını gözlemleriz ( $n=p$ ). Bununla birlikte, elementin artan atom numarası ile birlikte, nükleer kararlılık için sağlanması gereken nötronların protonlara oranı ( $n/p$ ), kurşun elementine doğru gidildikçe 1'den yaklaşık 1,52'ye yükselir. Bu nedenle, nükleonların eşleşmesi, kararlılık için yeterli bir kriter değildir ve belirli bir n/p oranının da sağlanması gerekir. Bununla birlikte, bu koşul bile kararlılık için yeterli değildir, çünkü yüksek atom numaralarında, yeni bir radyoaktif bozunma şekli olan alfa ışıması ortaya çıkar. Bizmutun üzerindeki çekirdeklerin tümü, alfa ışıması yapmaya uygun bir radyoaktif kararsızlık gösterirken, bazıları da beta-ışımasına uygun radyoaktif kararsızdır.

Bir çekirdek çok yüksek bir n / p oranına sahipse, nötron açısından zengin olduğu söylenir. Bu durumda çekirdek, nötron/proton oranını kararlı değere daha fazla yaklaştırmak için nötron sayısını azaltmalı ve proton sayısını artırmalıdır ki bu da, bir nötronun protona dönüştürülmesiyle sağlanabilir.

Çekirdekte böyle bir dönüşüm gerçekleştiğinde, bir anti-nötrino ile birlikte,  $\beta^-$  veya  ${}_{-1}^0e$  ile gösterilen negatif bir beta parçacığının (veya negatron) yayılması sözkonusudur. Örneğin;



Eger n/p oranı kararlılık için çok düşük bir değere sahipse, bir protonun nötrona dönüşümü ile p'yi küçültecek ve n'yi artıracak şekilde radyoaktif bozunma meydana gelir. Bu da, pozitron emisyonu  $\beta^+$  ( ${}_{+1}^0e$ ), yani bir pozitronun oluşturulması yoluyla veya bir yörünge elektronunun çekirdek tarafından yakalanmasıyla (elektron yakalama, EC) gerçekleştirilebilir. Örneğin:

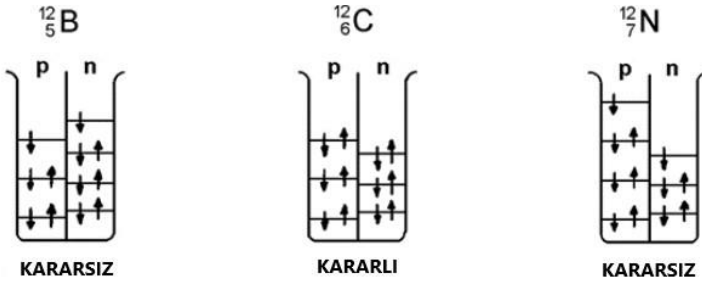


Kararlı çekirdeklerin var olması demek, nötronları ve protonları bir arada tutan çekici bir kuvvetin olması gerektiği anlamına gelir. Kararlı çekirdeklerde bu çekici nükleer kuvvet, yıkıcı Coulomb kuvvetinin üstesinden gelebilmek için yeterince büyük olmalıdır. Tersine, kararsız çekirdeklerde çekici nükleer kuvvet ile yıkıcı Coulomb kuvveti arasında net bir dengesizlik vardır ve proton sayısı arttıkça, toplam itici Coulomb kuvveti artar. Bu nedenle, nükleer kararlılık için gerekli çekim kuvvetini sağlamak için nötronların sayısı protonların sayısından daha hızlı artar.

Elektronların atomlardaki elektron yörüngelerinde olduğu gibi çekirdeklerdeki nötron ve protonların da ayrı ayrı nükleon orbitallerinde buldukları varsayılır.

Eğer atomun çekirdeğinde nötronların sayısı protonların sayısından çok daha fazla ise, doldurulan nötron yörüngelerinin enerjisi, proton yörüngesinden daha yüksek enerji seviyesine çıkar.

$n/p$  arttıkça, en yüksek enerjili nötron yörüngesi ile son proton yörüngesi arasında önemli bir enerji farkı meydana gelir. Çekirdeğin kararlılığı, en yüksek enerji seviyesindeki eşleşmemiş bir nötronun, boş ve düşük enerjili proton yörüngesinde uygun bir protona dönüştüğü zaman artabilir; kütle numarası 12 olan  $^{12}_5\text{B}$ ,  $^{12}_6\text{C}$  ve  $^{12}_7\text{N}$  atomlarının çekirdeklerinin kararlılığı Şekil 6'da örnek olarak gösterilmiştir.



**Şekil 7.** Kütle numarası 12 olan izobar atomların içinde varsayılan enerji seviyelerinde nükleonların ayrılması ve eşleştirilmesi (Kararsız  $^{12}\text{B}$  için yarı ömür 0.02 s ve  $^{12}\text{N}$  için 0.01 s'dir).

### Kararlılık Kuşağı

Bir atomun kararlılığı çekirdeğindeki itme ve çekme kuvvetlerine bağlıdır. Atom numarası arttıkça çekirdekteki proton sayısı da artar ve bu da aynı yüklü protonlar arasındaki itme kuvvetlerinin de artacağı anlamına gelir. İtme kuvvetlerinin büyüklüğü çekme kuvvetlerine oranla arttığı zaman itme kuvvetleri gittikçe daha belirgin hale gelmekte ve bir

noktadan sonra ön plana geçebilmektedir. Bu durum ise çekirdeklerin kararlılığının azalmasına neden olmaktadır.

Bir atomun kararlılığı çekirdek içindeki nötron ve proton sayıları ile ilişkilidir. Nötron/proton oranı 1'e ne kadar yakınsa çekirdek aynı oranda kararlıdır. Şekil 6'de verilen ve eksenler ile  $45^\circ$  açı yaparak uzanan koyu düz çizgi kararlılık çizgisi olarak bilinir. Bu çizgi üzerindeki çekirdeklerin nötron sayısı proton sayısına eşittir. Periyodik tabloda atom numarası 20, kütle numarası 40 olan kalsiyum atomunun dışında nötron ve proton sayıları birbirine eşit çekirdekler yoktur.

Atomun çekirdeğinde nötron sayısı ne kadar çok olursa olsun, kararlı bir çekirdekte bulunan proton sayısı sınırlıdır. Bu nedenle atom numarası en büyük olan kararlı çekirdek  $^{209}_{83}Bi$ 'dur. Bizmattan daha yüksek atom numarasına sahip çekirdekler radyoaktiftir.

Elementlerde n/p oranı 1-1,5 arasında iken kararlılık görülür, n/p oranı 1,5 – 2,5 arasındaki elementler doğal radyoaktif, n/p oranı 2,5'dan büyük olan elementler ise doğada bulunmazlar.

Doğada kararlı çekirdek sayısı oldukça azdır. Kararsız çekirdeklerin radyoaktif ışınlar yaparak kararlı hale geçmelerine radyoaktivite denir. Radyoaktif maddelerin ve radyoaktif maddeden yayılan ışınların etkileştiği maddelerde meydana getirdiği kimyasal olaylar nükleer kimyanın ilgi alanına girmektedir.

Radyasyonu madde ile etkileşmelerine bağlı olarak iki gruba ayırmak mümkündür. Bunlardan ilki çok yüksek enerjiye sahip olmaları sebebiyle karşılaştıkları herhangi bir atom ya da molekülden elektron kopartabilme, dolayısıyla atomu ya da molekülü iyonlaştırabilme

özelliğine sahip olan radyasyon grubudur. *İyonlaştırıcı Radyasyon* diye bilinir. İyonlaştırıcı radyasyonlardan nükleer radyasyonlar diye söz edilmesi de mümkündür.

Diğer gruba girenler ise, sahip oldukları enerji yeterince yüksek olmadığı için karşılaştıkları atom veya moleküllerde iyonlaşmaya neden olmayan ancak atom veya molekülün çeşitli enerji seviyelerinde uyarılmalarına neden radyasyon grubudur, *İyonlaştırıcı Olmayan Radyasyon* olarak bilinir.

Nükleer radyasyon karakteri taşımayan radyasyon türlerinin madde üzerinde neden olduğu kimyasal olayların incelenmesi Fotokimyanın ilgi alanını girmektedir.

## BÖLÜM 5

### KARARSIZ ÇEKİRDEKLER VE RADYOAKTİF BOZUNMA

Doğadaki olaylar fiziksel, kimyasal ve radyoaktif olmak üzere üç grupta incelenir.

**Fiziksel Olaylar;** Maddenin atom yapısını, proton, nötron ve elektron sayısını değiştirmeyen, tanecikler arası uzaklığı ve çekim kuvvetini değiştiren olaylardır.

Örneğin; hal değişimleri, genleşme...

**Kimyasal Olaylar;** Elektron alışverişi veya elektron ortaklaşması sonucu gerçekleşen, maddenin moleküler yapısını değiştiren atomun çekirdek yapısını, proton ve nötron sayısını değiştirmeyen olaylardır.

Örneğin; bileşik oluşumu, elektroliz, yanma...

**Radyoaktif Olaylar;** Atomun çekirdek yapısını, proton veya nötron sayısını değiştiren olaylardır.

Örneğin; atomların ışıma yapması, füzyon, fisyon...

Fiziksel, kimyasal ve radyoaktif olaylardan; en fazla enerji değişimiyle gerçekleşenler radyoaktif olaylar en az enerji değişimiyle gerçekleşenler ise fiziksel olaylardır.

#### **Radyoaktif Bozunma**

Nükleer bozunma olarak da bilinen radyoaktivite, atom çekirdeğinin tanecik veya elektromanyetik ışıma yaparak kendiliğinden parçalandığı

bir enerji türüdür. Çekirdek tepkimeleri sırasında açığa çıkan radyoaktiflik, hepimizin bildiği radyasyonu meydana getirir.

Yapısı yeterince sağlam olmayan yani kararsız bir çekirdek kendiliğinden bir radyoaktif bozunmaya uğrayacak demektir. Bu bozunma sırasında çekirdekte ortaya çıkan olaylar “Radyoaktif Bozunma” olayları olarak bilinir ve söz konusu maddenin kimyasal yapısında son derece önemli ve kalıcı değişikliklere neden olur.

Bu değişiklik bütün radyoaktif çekirdeklerde aynı değildir. Çekirdeğin büyüklüğüne, n/p oranının hangi tarafın aleyhine bozuk olduğuna bağlıdır.

Bu nedenle radyoaktif bozunma olayını kendi içinde gruplara ayırarak incelemek mümkündür.

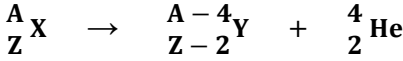
- Alfa ( $\alpha$ -) Bozunması
- Negatron ( $\beta^-$ ) Bozunması
- Pozitron ( $\beta^+$ ) Bozunması
- Elektron Yakalanması (Electron Capture, EC)
- İzomerik Geçiş (Isomeric Transition, IT)
- Kendi Kendine Olan Fisyon (Fisyon Spontane, FS)

### ***Alfa ( $\alpha$ -) Bozunması***

Alfa bozunması, kararsız çekirdeğin bozunma sırasında yapısından dışarıya bir  $\alpha$ -parçacığı yani bir helyum atomu ( ${}^4_2\text{He}$ ) fırlatıyor demektir. Radyoaktif atomun, çekirdeğinden 2 proton ve 2 nötron fırlatması son derece önemli bir olaydır ve bu olay nedeniyle çekirdeğin yapısında çok önemli değişiklikler meydana gelir.

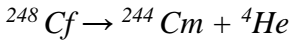
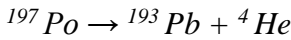
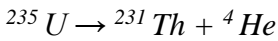


Her şeyden önce kütle numarası 4 birim, atom numarası ise 2 birim azalır ve başka bir atoma dönüşür. Alfa bozunmasına uğrayan bir atomda gözlenen değişikliği aşağıda verilen genel reaksiyonla gösterebiliriz.



Burada radyoaktif bozunmaya uğrayan çekirdeğe ( ${}^A_Z X$ ) **ana çekirdek**, oluşan yeni çekirdeğe de ( ${}^{A-4}_{Z-2} Y$ ) **ürün veya yavru çekirdek** denilmektedir.

Alfa bozunması sırasında çekirdekten dışarıya helyum gibi çok büyük bir çekirdek parçasının uzaklaşması nedeniyle kararsız yapıya sahip her çekirdekten  $\alpha$ -parçacığının salınabilmesi pek mümkün değildir. Örneğin azot atomunun kütle numarası 13 olan izotopunun alfa bozunması yapması demek kütlelerinin neredeyse dörtte birinin koparak uzaklaşması anlamına gelir ki hiçbir çekirdek böylesine büyük bir parçayı kopararak dışarıya atmayı göze alamaz. Bu nedenle alfa bozunması daha çok, kütle numarası 140'dan büyük atomlarda gözlenen bir radyoaktif bozunma şeklidir. Alfa bozunması yapan çekirdeklere bazı örnekler aşağıda verilmiştir.



Alfa bozunmasını takiben çekirdekte geriye kalan nükleonların düzeni bozulur ve nükleonlar kendi aralarında yeniden daha sağlam bir çekirdek oluşturmak üzere yeni bir düzen kurmaya çalışırlar. Ancak bu esnada

birçok nükleon bulunması gereken normal enerji düzeyinden daha yüksek bir enerji düzeyine geçmiş olabilir. Uyarılmış enerji düzeylerinde bulunan nükleonların burada uzun süre kalabilmeleri genellikle pek mümkün olmaz. Çoğunlukla  $10^{-9}$  s gibi çok kısa süreler sonunda bu nükleonlar daha düşük enerji düzeylerinde ki boşluklara inerler. Bu geçiş sırasında iki enerji düzeyi arasındaki enerji farkı çekirdek dışına elektromagnetik ışımaya şeklinde salınır. Atom çekirdeğinden dışarıya salınan bu elektromagnetik dalga şeklindeki ışınlar gama ( $\gamma$ -) ışınlarıdır. Bu nedenle birçok çekirdekte  $\alpha$ -bozunmasını takiben yeni oluşan çekirdeğin nükleonlarının yeniden düzenlenmesi sırasında çekirdekten dışarıya  $\gamma$ - ışınları salınır.

$\gamma$ - ışınları  $\alpha$ -ışımından aşağı yukarı  $10^{-9}$ s sonra gerçekleştiği için pratikte bunlar  $\alpha$ -ışını ile beraber salınmış olarak algılanır. Fakat unutulmamalıdır ki  $\alpha$ -ışını ana çekirdekten salınan bir ışın olmasına karşın  $\gamma$ - ışını ürün çekirdekten salınan ışınlardır.

$\alpha$ -bozunmasını takiben bazen ürün çekirdeğin bütün nükleonları normal enerji düzeyindedir ve herhangi bir  $\gamma$ - ışınması söz konusu olmaz, bu durumda %100  $\alpha$ -ışınması gözlenir.  $^{197}\text{Po}$ ,  $^{213}\text{At}$ ,  $^{230}\text{U}$ ,  $^{224}\text{Th}$  ve  $^{244}\text{Cf}$  atomları saf alfa ışınması yapan radyonüklitlere örnek verilebilir.

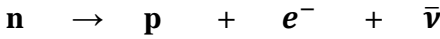
### ***Negatron ( $\beta^-$ ) Bozunması***

$\beta^-$  bozunması atomun çekirdeğinden dışarıya bir elektron salınması olayıdır ki bu da çekirdeğin yapısı içinde elektronların da bulunduğu bir ispattır. Ancak bu elektronlar çekirdek içinde serbest halde değil özellikle nötronun yapısı içinde bulunurlar. Eğer bir çekirdek kararlılık

kuşağının üstünde yani nötron fazlalığı olan bölgede bulunuyorsa nötron sayısını azaltarak ya da proton sayısını artırarak kendini kararlı bölgeye çekmeye çalışır.

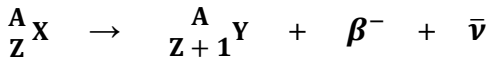
Proton sayısını artırarak kararlı hale geçebilmesi için bulunduğu ortamda pozitif yüklü bir parçacığı (pozitron) çekirdeğinin yapısına katması gerekir ki bu da mümkün değildir. Bu nedenle tek seçenek yapısındaki nötronu azaltmasıdır. Bu da aşağıda verilen reaksiyonda da görüldüğü gibi nötronun proton, elektron ve anti-nötrino vererek bozunması ile gerçekleşir. Burada atomun çekirdeğinden yayılan elektrona beta parçacığı da denilmektedir.

**Nötron** → **Proton** + **Elektron** + **Anti-nötrino**



Nötronun protona dönüşmesi sırasında elektronla birlikte çekirdekten ayrılan anti-nötrinonun pratikçe kütesinin çok küçük olduğu ve çekirdeğin kütesinde önemli bir değişiklik meydana getirmediği de bilinmektedir.

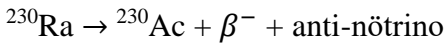
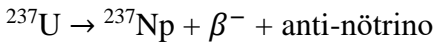
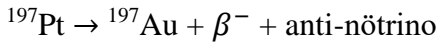
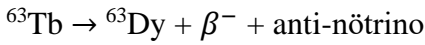
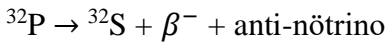
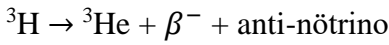
Elektronun yani beta parçacığının kütesi atomun çekirdeğinin kütesine oranla son derece küçüktür ve beta bozunması sonunda atomun kütle numarasında bir değişiklik olmazken proton sayısı 1 arttığı için atom numarası da bir birim artar.



Beta ışıması sonucu oluşan ürün çekirdek ile ana çekirdek birbirinin izobarıdır.

Çekirdeğinde nötron fazlalığı olan radyoaktif çekirdeğin beta ışınması yaparak bozunması çekirdeğin kütleinde pratikçe bir değişiklik meydana getirmediği için, çekirdeğin büyük ya da küçük kütleli olması gibi bir sınırlama yoktur. Bu nedenle trityum ( $^3\text{H}$ ) gibi en hafif çekirdek ya da  $^{197}\text{Pt}$  gibi ağır bir çekirdek de beta bozunmasına uğrayabilir.

Aşağıda beta bozunması yapan çekirdeklere bazı örnekler verilmiştir;



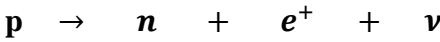
Alfa bozunması esnasında olduğu gibi beta bozunması sırasında da ürün çekirdeğin bazı nükleonları yüksek enerji seviyesine çıkabilirler ve temel enerji seviyelerine inerlerken iki enerji seviyesi arasındaki enerji farkı dışarıya gama ışınması olarak salınır. Bazen de ürün çekirdeğin nükleonlarının tamamı başlangıçta temel enerji seviyesine yerleştikleri için herhangi bir gama ışınması salınmaz. Böyle çekirdeklere saf beta ışınması yapan çekirdekler denir.  $^{14}\text{C}$ ,  $^{42}\text{K}$ ,  $^{45}\text{Ca}$ ,  $^{51}\text{Na}$  saf beta ışınması yapan çekirdeklere örnek verilebilir.

### **Pozitron ( $\beta^+$ ) Bozunması**

Kararlılık kuşağının altında kalan yani proton sayısı nötron sayısından fazla olan çekirdekler kararlı hale gelebilmek için ya proton sayısını azaltmak ya da nötron sayısını artırmak durumundadır.

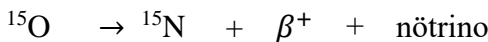
$\beta^-$  de olduğu gibi çekirdeğin bulunduğu ortamdan bir nötronu yakalayıp yapısına katması söz konusu olamayacağı için tek seçeneği proton sayısını azaltmak olacaktır. Bunu da protonunu bozarak nötrona dönüştürmesi ile gerçekleştirir.

**Proton  $\rightarrow$  Nötron + Pozitron + Nötrino**



Protonun bozunması ile birlikte çekirdeğin proton sayısı 1 azalır, nötron sayısı 1 artar,  $\beta^+$  ve nötrino çekirdekten dışarı salınır. Çekirdekten dışarıya salınan  $\beta^+$  ve nötrinin kütleleri çekirdeğin kütlesi yanında ihmal edilecek kadar küçük olduğu için  $\beta^+$  bozunması sonunda oluşan ürün çekirdeğin kütle numarası değişmez ancak atom numarası bir birim artar. Ana çekirdek ve oluşan ürün çekirdek birbirlerinin izobarı çekirdeklerdir.  $\beta^+$  bozunması yapan atomların  $\beta^-$  den farkı  $\beta^+$  ışınması yapanların genellikle hafif çekirdekler olduğudur. Ağır çekirdeklerin genellikle  $\alpha$ -bozunması yapmayı tercih ettiğini daha önce söylemiştik. Ancak nadiren de olsa  $\beta^+$  bozunması yapan ağır çekirdeklere de rastlanabilmektedir.

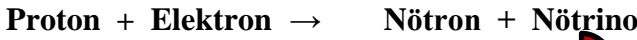
Aşağıda  $\beta^+$  bozunması yapan çekirdeklere bazı örnekler verilmiştir.





### ***Elektron Yakalanması (EC)***

$\beta^+$  bozunmasında proton fazlalığı olan çekirdeğin fazla protonlarından birini bozarak nötrona dönüştüğünü belirtmiştik. Ancak, bazen bu çekirdekler proton fazlalığını gidermek için dışarıya  $\beta^+$  salmak yerine, çekirdek dışından (-) yüklü bir parçacığı, yani bir elektronu çekirdek içine çekmek suretiyle proton sayısını 1 azaltıp, buna karşılık nötron sayısını 1 artırmaktadır.



**(çekirdekten dışarıya salınır)**

Böylece çekirdek proton fazlalığını dışarıya  $\beta^+$  ışınması salmaksızın gidermiş olur. Ancak her iki durumda da çekirdekten dışarıya nötrino salınmaktadır.

Çekirdek bu elektronu kendisine en yakın K veya L yörüngelerinde bulunan elektronlardan birini çekmek suretiyle çekirdeğin içine alır. Böylece elektron yakalamak suretiyle proton fazlalığını gideren çekirdeğin gerçekleştirdiği radyoaktif bozunma olayına ***Elektron Yakalanması (Electron Capture (EC))*** denir.

### ***Auger Olayı ve Auger Elektronları***

Bütün dinamik sistemlerin, bulunabilecekleri en düşük enerji düzeyinde bulunma eğiliminde olmak istemeleri evrensel bir kuraldır.

Buna göre atomun bir elektronunu çekirdeğin içine katması sonucu oluşan elektron boşluğu uzun süre varlığını koruyamaz ve bir üst enerji seviyesindeki bir elektronun inmesiyle bu boşluk doldurulur. Bu arada söz konusu olayın iki ayrı sonucu ile karşılaşılır. Birincisi bir alt enerji seviyesine inen elektronun da yeri boşalmıştır ve o boşluğun da bir üst enerji seviyesindeki elektron tarafından doldurulması söz konusudur. İkincisi ise üst enerji seviyesi ile alt enerji seviyesi arasındaki enerji farkı x-ışını olarak da bilinen elektromagnetik ışınma şeklinde dışarıya salınır.

Oluşan bu x-ışınının atomun dışına ulaşabilmesi için, her şeyden önce atomun yörünge elektronlarının arasından geçip gitmesi gerekir. Atomun çok sayıda yörüngesinin olduğu düşünüldüğünde bu x-ışınının herhangi bir yörünge elektronuyla karşılaşma ihtimali oldukça yüksektir.

Eğer x-ışını bir yörünge elektronu ile karşılaşırsa enerjisinin tümünü bu elektrona aktarır ve x-ışını dışarıya çıkma fırsatı bulamadan yok olur. Ancak bu defa da x-ışınının enerjisini alan yörünge elektronu, aldığı enerjinin bir kısmını yörüngedeki bağı koparmak için kullanır, geriye kalan enerjiyi de kinetik enerji olarak üstlenerek büyük bir hızla atomu terk eder.

Atomun yörünge elektronlarından birinin daha düşük enerji düzeyine inmesi sonucu salınan x-ışınının atomun dışına çıkmaya fırsat bulamadan enerjisini bir yörünge elektronuna aktararak yok olması

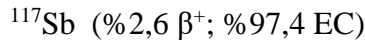
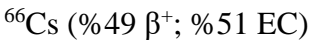
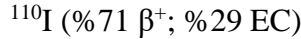
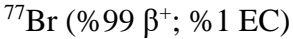
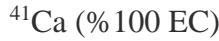
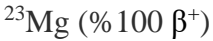
olayına, “Auger Olayı”, x-ışınından aldığı enerji ile yörüngedeki bağı kopararak atom dışına fırlayan elektrona da “Auger Elektronu” adı verilmektedir.

Böylece atomun yörüngelerindeki elektron boşlukları katlanarak artacaktır. Bu olay yörüngedeki elektron boşlukları atomun en dış yörüngelerine ulaşmasına kadar devam eder ve sonuçta atom çok fazla sayıda yörünge elektronu kaybetmiş duruma gelir. Anca oluşan her x-ışınının bir yörünge elektronu ile karşılaşması bir olasılıktır. Eğer x-ışını herhangi bir yörünge elektronuna rastlamadan atomun dışına çıkarsa yeni elektron boşluğu oluşması yönünde gerçekleşen zincir kesilmiş olur ve atomdan salınan Auger elektronlarının sayısı da azalır.

Atomdan dışarıya salınan Auger elektronlarının enerjileri birbirlerinden farklı olmasına karşın oldukça yüksektir. Bu nedenle Auger elektronlarını düşük enerjili  $\beta^-$  ışınları olarak kabul etmek mümkündür.



Aşağıda  $\beta^+$  bozunması ve elektron yakalanması (EC) yapan çekirdeklere bazı örnekler verilmiştir.



Örneklerden de görüldüğü gibi bazı çekirdekler yalnızca  $\beta^+$ , bazıları ise yalnızca EC olayı ile bozunurken bazı çekirdeklerin de  $\beta^+$  bozunması yanında elektron yakalanması (EC) ile de bozunmaya uğradıkları



görülmektedir. Örneğin,  $^{66}\text{Cs}$  için %49  $\beta^+$  bozunması, %51 EC şeklinde gerçekleşmektedir.

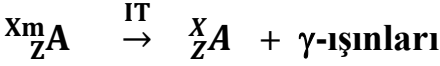
### ***İzomerik Geçiş***

İnsanlar tarafından üretilen yapay çekirdekler arasında bazen öyle iki çekirdeğe rastlanır ki, bu çekirdeklerin hem proton hem de nötron sayıları aynı olduğu halde bu iki çekirdekten biri dışarıya bir tür radyasyon salarken diğzerinin ise hiç böyle bir özelliğe sahip olmadığı gözlenir. Böyle çekirdeklere izomer çekirdekler denir.

Nükleonlar çekirdek içinde belli enerji düzeylerinde bulunur ve radyoaktif bozunma sonucu bozulan nükleon düzeninin yeniden kurulması sırasında uyarılmış enerji düzeylerine yerleşmiş olan nükleonlar bu enerji düzeylerinde  $\sim 10^{-9}$  s kalabilmektedirler. Nükleonlar normal enerji düzeylerine inerken iki enerji düzeyi arasındaki farka eşdeğer miktardaki enerjii  $\gamma$ - ışını yada ışınları şeklinde dışarıya salarlar ki bu olaya “İzomerik Geçiş” denir.

Bazı çekirdeklerde uyarılmış enerji seviyesindeki kalış süresi zaman zaman dakika, saat, gün, hafta, ay, yıl mertebesinde olabilmektedir ki buna yaşama süresi (life-time) denir. Bu süre içinde izomer çekirdekler kendilerine özgü farklı çekirdek özelliği taşırlar. İzomer çekirdeklerden normal enerji seviyesinde bulunanlar sadece kütle numaraları yazılarak, uyarılmış enerji seviyesinde bulunanlar (radyoaktif özellik gösterenler) ise kütle numarasının yanına arakararlı (metastable) anlamına gelen “m” harfi yazılarak gösterilir. İzomer çekirdeğin birden fazla arakararlı hali varsa  $m_1$  ve  $m_2$  şeklinde yazılır.

Ara kararlı enerji düzeyinde bulunan bir izomer çekirdeğin, yaşama süresi sonunda normal enerji düzeyine inerken bazen bir tane bazen de birkaç  $\gamma$ -ışını salması olayına “İzomerik Geçiş” (Isomeric Transition, IT) denilmektedir.



${}^{99}\text{Tc}$  ve  ${}^{99m}\text{Tc}$ ;  ${}^{118}\text{Sb}$ ,  ${}^{118m1}\text{Sb}$ ,  ${}^{118m2}\text{Sb}$  izomerik geçiş özelliği gösteren çekirdeklere örnek verilebilir.

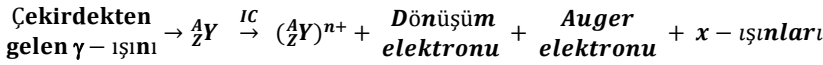
### ***İç Dönüşüm (Internal Conversion)***

Çekirdekten salınan  $\gamma$ -ışınlarının atomun dışına ulaşabilmesi için yörünge elektronlarının arasından geçip gitmesi gerekir. Ancak bazı durumlarda bu gama ışınının yörünge elektronları arasından geçişi sırasında elektronla çarpışması mümkündür. Çekirdekten salınan gama ışınının enerjisi düşükse, karşılaşma sırasında enerjisinin tümünü elektrona aktarır ve atomun dışına ulaşmadan yok olur. Elektron ise gama ışınından aldığı enerjinin bir kısmını orbitaldeki bağını kopartmak için kullanır ve büyük bir hızla atomu terkeder.

Düşük enerjili bir gama ışınının genellikle bir iç yörünge elektronu ile karşılaşması sonucu enerjisini kaybederek yok olmasına bununla birlikte atomun iç yörünge elektronlarından birinin atomun dışına çıkmasına İç Dönüşüm (Internal Conversion) denir. Bu olay sonucu çekirdekten salınan elektrona ise iç dönüşüm elektronu ya da dönüşüm elektronu denir.

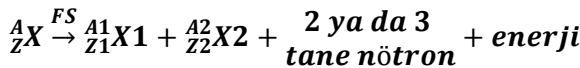
Atomun iç yörüngesinden bir elektronun bu şekilde uzaklaşması aslında Auger olayının da başlangıcı olacaktır. Ancak burada özellikle belirtmek gerekir ki iç dönüşüm olayının gerçekleşebilmesi için çekirdekten salınan düşük enerjili gama ışınının enerjisinin iç yörünge elektronunun bağ enerjisinden daha büyük olması gerekir. Aksi halde iç dönüşüm olayının oluşması sözkonusu değildir.

IC olayı, gama ışınması yapan ağır çekirdeklerde zaman zaman görülen bir bozunma şeklidir. Özellikle izomerik geçiş olayı sırasında salınan  $\gamma$ -ışınlarının oldukça düşük enerjilere sahip olması nedeniyle, izomerik geçiş olayı ile olan radyoaktif bozunmalar sırasında sık sık iç dönüşüm olayına da rastlanabilmektedir.



### ***Kendi Kendine Filyon (Filyon Spontane, FS)***

1940 yılında K. Petrzak ve G. Flerov,  ${}^{238}\text{U}$ 'un  $\alpha$ -bozunmasına ek olarak, filyon olarak adlandırılan ve kendiliğinden gerçekleşen bir radyoaktif bozunma şekline sahip olduğunu bulmuşlardır. Bu radyoaktif bozunma şeklinde birkaç tane nötronla birlikte iki ağır parçalanma (filyon) ürünleri oluşmuştur.



Fisyon, kelime anlamı bölünme, parçalanma olan bir kavramdır. Radyoaktif bozunma olayları arasında yer alan **kendi kendine fisyon (FS)** ise bazı ağır çekirdeklerin dışarıdan hiçbir etki olmaksızın kendiliğinden iki büyük parçaya ayrılmasıdır.

Genellikle atom numarası 90'dan, kütle numarası 230'dan büyük ve alfa ışıması yaparak bozulan atomlarda gözlenen bir radyoaktif bozunma şeklidir. Ancak  $^{239}\text{Np}$  ve  $^{249}\text{Bk}$  gibi esas olarak  $\beta^-$  ışıması yaparak bozulan çekirdekler bunun yanında fisyon spontane yaparak da bozunmaktadırlar.

$^{231}\text{Pa}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{254}\text{Es}$ ,  $^{249}\text{Cf}$ ,  $^{233}\text{U}$ ,  $^{255}\text{Fm}$  çekirdekleri alfa ve beta ışıması yanında FS yaparak bozulan bazı çekirdeklere örnek olarak verilebilir.

## **Radyoaktif Bozunma Kinetiği**

### **Bozunma Hızı**

Bugün için bilinen elementlerin radyoizotoplarının dünya var olduğundan beri var olduğu düşünülecek olursa, atom numarası 92'den büyük olan elementlerin doğada bulunmaması, bu elementlerin tüm izotoplarının yaşam sürelerinin dünyanın yaşından çok daha kısa olmasıyla açıklanabilir.

Radyoaktif maddeyi oluşturan çekirdeklerin bozunması hiçbir zaman aynı anda olan yani hepsinin beraberce maruz kaldıkları bir olay değildir. 1. dakikada bozunmaya uğrayan çekirdek sayısı ile ikinci 1 dakikalık sürede bozunmaya uğrayan çekirdek sayısı aynı değildir. Bununla birlikte radyoaktif bir atomun ne zaman parçalanacağını önceden kestirmek de mümkün değildir. Parçalanma sonucu atomun hangi yolu

izleyeceği de ayrıca belirsizdir ve yalnızca olasılıklardan sözedebilir. Örneğin, hidrojenin radyoaktif izotopu olan trityum ( $^3\text{H}$ ) için bir yıl süresindeki parçalanma olasılığı %7 olarak hesaplanmıştır.

Herhangi bir radyoaktif maddenin belli bir zaman aralığı içinde bozunmaya uğrayan çekirdeklerinin sayısına o radyoaktif maddenin **Bozunma Hızı (A)** denir. Bozunma hızı, radyoaktif atomların sayısı ile orantılıdır ve aşağıda verilen eşitlik kullanılarak hesaplanır.

$$\text{Bozunma hızı} = -\frac{dN}{dt}$$

Eşitlikte;

(-) işareti, bozunma ile radyoaktif maddenin miktarının azalmakta olduğu anlamına gelir.  $dN$ ; bozunmaya uğrayan çekirdek sayısını,  $dt$  ise birim zamanı ifade etmektedir.

Bir radyoaktif maddenin bozunma hızı radyoaktif maddenin miktarı ile doğru orantılıdır. Örneğin  $10^5$  adet radyoaktif çekirdekten bir dakika içinde 500 tanesi bozuluyorsa bozunma hızı 500 çekirdek/dakika'dır.

Eğer aynı radyoaktif maddenin başlangıçtaki çekirdek sayısı  $10^6$  ise 1 dakikadaki bozunma hızı; 5000 çekirdek/dakika olur.

Bozunma hızı, radyoaktif maddenin miktarı, yani başlangıçta mevcut atom sayısı  $N$  ile doğru orantılıdır.

$$-\frac{dN}{dt} \approx N$$

Bu bağıntıda eşitliğin sağlanabilmesi için  $N$ 'nin bir sabit ile çarpılması gerekmektedir.

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N$$

$\lambda$ 'ya sözkonusu radyoaktif maddenin bozunma hız sabiti denir. Bir radyoaktif maddenin bozunma hız sabiti yalnızca o radyoaktif maddeye özgü olup onun en önemli karakteristiklerinden biridir ve birimi çekirdek/zamandır.

Bozunma hız sabitini veren eşitliği yeniden düzenleyecek olursak;

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N$$

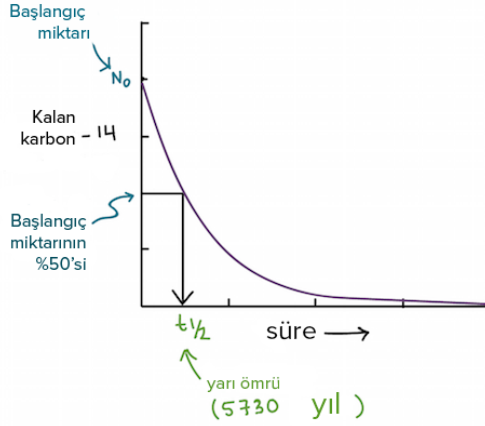
$$-\frac{dN}{N} = \lambda dt \quad \rightarrow \quad \int_{N_0}^{N_t} -\frac{dN}{N} = \int_0^t \lambda dt$$

$$\ln N_t - \ln N_0 = -\lambda t$$

$$\frac{N_t}{N_0} = e^{-\lambda t}$$

$$N_t = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

Bu eşitlik bize radyoaktif bir çekirdeğin atom sayısının zamanla üstel olarak azaldığını göstermektedir (Şekil 8).



**Şekil 8.** Karbon-14 ( $^{14}\text{C}$ ) atomunun bozunma eğrişi

### Yarı Ömür

Radyoaktif bir maddenin belli bir anda mevcut atom sayısının, zamanla azalarak yarıya inmesi için geçen süreye o radyoaktif maddenin yarı-ömürü veya yarılanma süresi denir ve  $t_{1/2}$  sembolü ile gösterilir. Bu süre radyoizotopa göre saniyenin kesiri ile binlerce yıl arasında değişebilir.

$N_0$ 'ın 2,  $N_t$ ' nin de 1 olduğu bir durumu, yani başlangıçtaki radyoaktif madde sayısının yarıya indiği durumu göz önüne alalım. Bu durumda;

$$N_t = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

Eşitliğinde yer alan t zamanı  $t_{1/2}$  olacaktır.

$$\frac{N_t}{N_0} = e^{-\lambda t}$$

$$\frac{1}{2} = e^{-\lambda t_{1/2}}$$

eşitliğin her iki tarafının doğal logaritması alınırsa;

$$\ln \frac{1}{2} = e^{-\lambda t_{1/2}}$$

$$0,693 = \lambda t_{1/2}$$

$$t_{1/2} = \frac{0,693}{\lambda} \quad \text{veya} \quad \lambda = \frac{0,693}{t_{1/2}}$$

Eşitlikten de görüldüğü gibi bir radyoaktif maddenin bozunma hız sabiti ( $\lambda$ ) ile yarı-ömrü, orantı katsayısı 0,693 olmak üzere ters orantılı olarak birbirine bağlıdır.

Radyoaktif maddelerin yarı ömürleri radyoaktif maddeye özgü bir büyüklük olup, son derece geniş bir zaman aralığında değişebilmektedir. Aşağıdaki tabloda bazı radyonüklitlerin yarı ömürleri verilmiştir.

**Tablo 9.** Bazı radyonüklitlerin yarı ömürleri

| <b>Radyonüklit</b> | <b>Yarı-ömrü</b>        |
|--------------------|-------------------------|
| Polonyum-214       | 164 mikrosaniye         |
| Teknesyum-99m      | 6 saat                  |
| İyot-131           | 8 gün                   |
| Radon-222          | 3.8 gün                 |
| İridyum-192        | 74 gün                  |
| Kobalt-60          | 5 yıl                   |
| Kripton-85         | 10,7 yıl                |
| Sezyum-137         | 30 yıl                  |
| Amersiyum-241      | 432 yıl                 |
| Radyum-226         | 1600 yıl                |
| Uranyum-235        | 713x10 <sup>6</sup> yıl |



## Radyoaktivite Birimleri

### Curie (Ci) (Özel birim)

Radyoaktivite miktarını ifade etmek amacıyla kullanılan ilk birim Curie'dir. Bu birim radyoaktivite ile ilgili son derece önemli ça ışımlar yapan Nobel ödüllü Polonyalı Bilim insanları Marie Curie ve Pierre Curie'ye ithafen verilmiştir ve kısaca Ci olarak gösterilmektedir.

1 saniyelik süre içinde bozunmaya uğrayan atom sayısı  $3.7 \times 10^{10}$  tane olan radyoaktif maddenin radyoaktivite miktarına 1 Ci denilmektedir.

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$$

1 Ci'lik aktivite değeri oldukça yüksek radyoaktivite değerine karşılık geldiği için genellikle Curie'nin alt katları kullanılır.

|                        |                       |
|------------------------|-----------------------|
| 1 mCi (miliküri)       | $10^{-3} \text{ Ci}$  |
| 1 $\mu$ Ci (mikroküri) | $10^{-6} \text{ Ci}$  |
| 1 nCi (nanoküri)       | $10^{-9} \text{ Ci}$  |
| 1 pCi (pikoküri)       | $10^{-12} \text{ Ci}$ |

### Becquerel (Bq) (SI Birimi)

Radyoaktivite birimi olarak ilk zamanlarda kabul edilen ve eski kaynaklarda karşılaştığımız Curie yerine, Uluslararası Radyasyon Birimleri Komitesi (ICRU) tüm dünyada kullanılan birimlerin aynı olması düşüncesi ile **Becquerel (Bq)** kullanılmasını önermiştir ve 1986 yılından itibaren de bu radyasyon birimi "Uluslararası Birimler Sisteminde (SI)" yerini almıştır.

Curie çok büyük bir aktivite değerine karşılık geldiği için onun yerine daha küçük aktivite değerini ifade eden Becquerel birimi tanımlanmıştır. Becquerel, yine radyoaktivite ile ilgili çalışmalara çok büyük emeği geçen ve bu alanda önemli çalışmalar yürüten Fransız bilim insanı Henry Becquerel'in ismidir.

1 Becquerel, 1 saniyede yalnızca 1 adet bozunma yapabilen radyoaktif maddenin aktivite değeridir.

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

$$1 \text{ Bq} = 2,7 \times 10^{-11} \text{ Ci}$$

Becquerel küçük bir aktivite değeri olduğu için Curie'nin tersine genellikle üst katları kullanılır.

|                     |                   |
|---------------------|-------------------|
| KBq (kilobecquerel) | $10^3 \text{ Bq}$ |
| MBq (megabecquerel) | $10^6 \text{ Bq}$ |
| GBq (gigabecquerel) | $10^9 \text{ Bq}$ |

## BÖLÜM 6

### NÜKLEER RADYASYONUN MADDE İLE ETKİLEŞİMİ

Herhangi bir radyoaktif maddeden salınan nükleer radyasyonlar, parçacık niteliğinde ve elektromagnetik dalga niteliğinde olanlar olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

#### Parçacık Niteliğinde Olan Nükleer Radyasyonlar

Parçacık niteliğinde olan nükleer radyasyonlar sınıfına esas olarak alfa, negatron, pozitron ışınları ile Auger elektronları, nötronlar ve hızlandırılmış protonlar girmektedir. Bu gruba giren radyasyonların kinetik enerjileri yüksektir, kütleleri vardır ve yüklü veya yüksüz olabilirler.

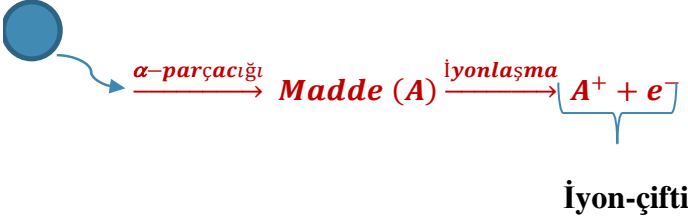
Bu bölümde sözkonusu radyasyon türlerinin madde ile etkileşmesi ve sonuçları üzerinde durulacaktır.

#### Alfa ( $\alpha$ ) Işınlarının Madde İle Etkileşmesi

Alfa ışımasının özellikle kütle numarası büyük radyoaktif çekirdeklerin başvurduğu bir bozunma şekli olduğunu daha önce söylemiştik. Alfa ışıması yapan bir çekirdekten çıkan alfa parçacıklarının kinetik enerjisi ana çekirdeğin enerji düzeyine bağlı olarak 2 MeV ile 11 MeV arasında değişebilmektedir.

Herhangi bir radyoaktif çekirdekten salınan alfa parçacığı boşlukta ise sahip olduğu kinetik enerjisi kaybetmeden büyük bir hızla yoluna devam eder. Ancak maddesel bir ortamda bulunuyorsa, ilerlediği yol üzerinde karşılaştığı atomun dış yörünge elektronları ile çarpışır ve enerjisinin

küçük bir kısmını bu elektrona aktarır. Elektron kendisinden kütlege çok büyük bir parçacığın çarpması sonucu kazandığı bu enerji ile yörüngesindeki bağını koparır ve büyük bir hızla atomu terkeder. Elektronun uzaklaşması ile geriye kalan atom pozitif yüklü bir iyon haline dönüşür.



Oluşan iyonlaşmış madde ile açığa çıkan elektronunun ikisine birden iyon çifti denir.

Bir alfa parçacığı yörünge elektronu ile çarpışması sonunda enerjisinin yaklaşık 1/2000 de birini kaybeder ve toplamda çok ta büyük olmayan bir enerji kaybıyla yoluna devam eder. Bu süreçte karşısına çıkacak diğer yörünge elektronları ile yaptığı ard arda çarpışmalar sonunda enerjisi gittikçe azalır ve pek çok atomu iyonlaştırır. Ancak alfa parçacığının enerjisi hiçbir zaman sıfır olmaz ve 20 - 25°C sıcaklık aralığında **termal enerji** seviyesi olarak bilinen 0,025 eV'luk enerji değerine kadar inebilir.

Sonuç olarak çok yüksek enerjili alfa radyasyonunun termal enerji seviyesine ininceye kadar ilerlediği yol üzerinde karşılaştığı pek çok atomu iyonlaştırdığı ve iyonlaşmaya eşlik eden yüksek enerjili

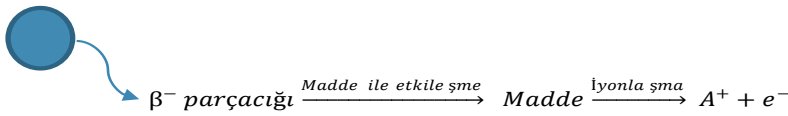
elektronlardan kaynaklanan ikincil radyasyon denilen yeni bir radyasyon türü oluştuğu görülmektedir. Böylece alfa parçacıklarının son derece yüksek olan iyonlaştırma etkisi daha da artmış ve madde üzerinde önemli yapısal değişikliklere neden olmuştur.

### Negatron ( $\beta^-$ ) Işınlmasının Madde İle Etkileşmesi

Radyoaktif bir çekirdekten salınan  $\beta^-$  ışınlarının maddesel ortamda ilerlerken önüne çıkan atomların ya yörünge elektronları ile ya da çekirdekleri ile etkileşebilmeleri sözkonusudur. Her iki etkileşmenin madde üzerinde yarattığı sonuçlar birbirinden farklıdır.

#### *Yörünge Elektronları İle Etkileşme*

$\beta^-$  ışınları, karşılaştığı bir atomun yörünge elektronu ile çarpışması sonunda enerjisinin tamamını çarpıştığı elektrona aktaracak ve kendisi termal enerji seviyesine inerek nükleer özelliğini kaybedecektir. Ancak enerjisini aktardığı elektron, kazandığı bu enerji ile yörüngesiyle olan bağını kopararak atomu terkedecek ve iyonlaşmaya neden olacaktır.

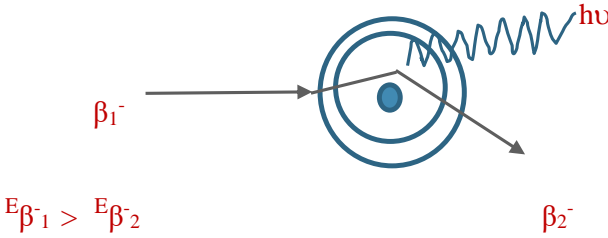


Ancak burada bilinmesi gereken şey,  $\beta^-$  parçacığının ilk çarpışma ile tüm enerjisini kaybederek nükleer özellik taşımayacağıdır ki bu da alfa

parçacığı ile karşılaştırdığımız zaman  $\beta^-$  ışımalarının spesifik iyonlaştırma etkisinin daha az olduğu anlamına gelmektedir.

### **Çekirdekle Etkileşme**

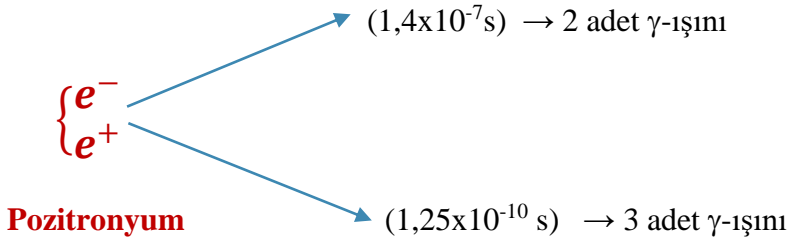
Maddesel ortamda yoluna büyük bir hızla devam eden  $\beta^-$  parçacığının sahip olduğu küçük kütlesi nedeniyle yörünge elektronu ile karşılaşmadan atomun çekirdeğinin etki alanına girmesi her zaman mümkündür. Negatif elektrik yükü taşıyan  $\beta^-$  parçacığının pozitif yük yoğunluğuna sahip çekirdeğin etki alanına girmesiyle hızı, dolayısıyla da enerjisi önemli ölçüde azalır ve daha düşük enerjili bir  $\beta^-$  parçacığı olarak yoluna devam eder. Bu arada kaybedilen enerji ise elektromanyetik dalga niteliğinde bir radyasyon türü olarak gözlemlenir. Bu radyasyona Almanca frenleme anlamına gelen **Bremsstrahlung ışması** veya **Frenleme ışması** denilmektedir.



### **Pozitron ( $\beta^+$ ) Işımlarının Madde İle Etkileşmesi**

Radyoaktif bir kaynaktan çıkan pozitron ( $\beta^+$ ) ışınlarının yörünge elektronu ile karşılaşmasını, kütleleri aynı ancak yükleri farklı iki

maddenin çarpışması şeklinde düşünebiliriz. Böyle zıt yüklü iki parçacığın çarpışması ile parçacıkların yok olması ve enerjiye dönüşmeleri sözkonusudur. Ancak bu yok oluştan hemen önce bu iki zıt yüklü çiftten pozitronyum adı verilen bir tür oluşur. Yapılan deneysel çalışmalar pozitronyum atomlarının  $1,4 \times 10^{-7}$  s ile  $1,25 \times 10^{-10}$  s gibi iki farklı yaşam sürelerine sahip olduklarını göstermiştir. Yaşam süresi kısa olan pozitronyum atomlarının yok oluşu ile 2 adet  $\gamma$ -ışını oluşurken, uzun yaşam süreli pozitronyum atomlarının yok oluşu sonrasında 3 adet  $\gamma$ -ışını açığa çıkmaktadır.



### Auger Elektronlarının Madde İle Etkileşimi

Daha önce de bahsedildiği gibi bir atomun iç yörünge elektronlarından birinin; elektron yakalanması (EC), iç dönüşüm (IT) ya da fotoelektrik olay sonunda boşalması ve bu elektron boşluğunun üst orbitaldeki bir elektron tarafından doldurulması sırasında atomdan dışarıya çok sayıda Auger elektronları salınmaktadır. Auger elektronlarının enerjileri 10 eV ile 40-50 keV arasında değişebilmektedir.

Çok sayıda Auger elektronu salan bir atom bir anda yüksek pozitif yüklü kararsız bir atoma dönüşür ve çevresindeki atomlardan elektronlar kopararak kendi elektron kaybını gidermeye çalışır. Böylece çevresindeki tüm atom ve moleküllerin iyonlaşmasına ve dolayısıyla önemli kimyasal değişmelere uğramalarına neden olur.

### **Elektromagnetik Dalga Niteliğinde Olan Nükleer Radyasyonlar**

Elektromanyetik dalga spektrumunun yüksek enerji bölgesinde yer alan gama ışınları ve x-ışınları dalga özelliği taşıyan nükleer radyasyonlardır. Gama ışınları ya doğrudan atomun çekirdeğinden ya da pozitronyum atomunun bozunması sonucu açığa çıkmaktadır ve enerjileri 10 keV ile 10 MeV arasında değişebilmektedir.

Gama ışınlarının da ilerledikleri maddesel ortamda karşılaştıkları atomların yörünge elektronları ile ya da çekirdeği ile etkileşmesi söz konusu olabilmektedir.

### **Gama Işınlarının Yörünge Elektronları İle Etkileşmesi**

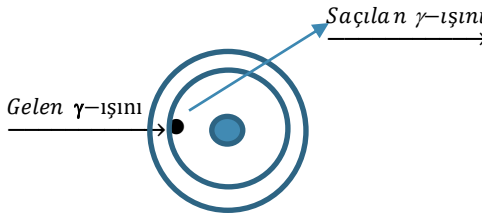
Gama ışınlarının yörünge elektronu ile etkileşmesi;

- sözkonusu gama ışınının enerjisine,
- etkileştiği atomun atom numarasına,
- karşılaştığı yörünge elektronunun iç veya dış yörünge elektronu olmasına bağlı olarak üç farklı olayın oluşmasına neden olur. Bunlar, Coherent saçılma, Compton olayı ve Fotoelektrik olaydır.



### ***Coherent (Etkisiz) Saçılma***

Radyoaktif bir maddeden saçılan  $\gamma$ -ışınının yolu üzerinde bulunan bir atomun iç yörünge elektronu ile karşılaştığı zaman gama ışını çok kısa bir süre bu yörünge elektronu tarafından tutulur ve daha sonra enerjisinde hiçbir değişiklik olmadan sadece yönü değişerek yoluna devam eder. Bu olaya Coherent veya Etkisiz saçılma denir.



$\gamma$ -ışını çok kısa bir süre yörünge elektronu tarafından tutulur ve bırakılır. Farklı bir doğrultuda atomu terk eder.

$\gamma$ -ışınının atoma geliş ve atomdan ayrılış doğrultuları değişmiştir. Enerjisi değişmez.

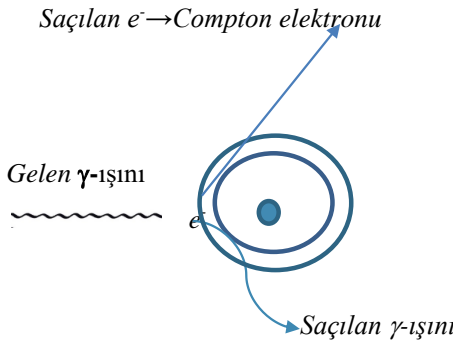
### ***Compton Olayı***

Genellikle yüksek enerjili gama ışınlarının karşılaştığı atomun dış yörünge elektronu ile karşılaşması sonucu gözlenen bir olaydır. Bu karşılaşma esnasında gama ışını sahip olduğu kinetik enerjinin bir kısmını yörünge elektronuna aktarır. Elektron aldığı bu enerji ile yörünge ile olan bağı koparır ve atomu terkeder. Bu etkileşmeden sonra gama ışını enerjisi azalmış bir şekilde ve doğrultusu da değişmiş olarak uzaklaşır. Sonuç olarak Compton olayı olarak bilinen bu olay, gama

ışınının daha düşük enerjili başka bir gama ışını şeklinde yön değiştirerek saçılmasına neden olmuştur.

Compton olayının gerçekleşebilmesi için gama ışınının tüm enerjisinin elektrona aktarılmaması gerekir ki bunun için de elektronun yörünge ile olan bağ enerjisinin mümkün olduğunca küçük olması gerekir.

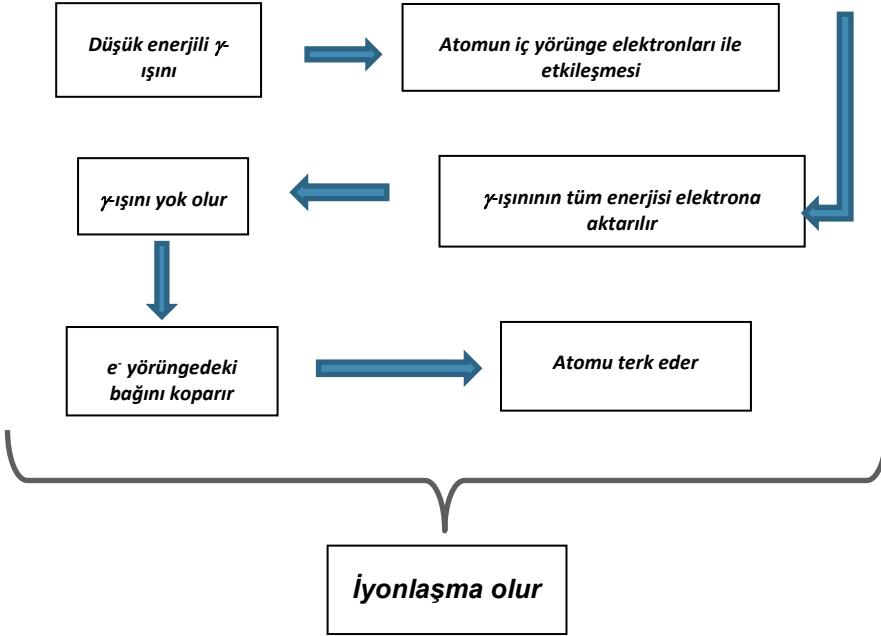
Compton olayı gerçekleşirken sözkonusu atomu terk eden dış yörünge elektronuna Compton elektronu denir ve Compton elektronunun enerjisi,  $\gamma$ -ışınından elektrona aktarılan enerjiye bağlıdır. Bu olay sonunda da elektronun atomu terketmesi ile geride kalan atom iyonlaşmış duruma geçmektedir. Atomdan kopan elektronlar ise buldukları ortamda düşük enerjili  $\beta^-$  ışınları gibi davranarak ikincil iyonlaşmalara neden olurlar.



Compton olayı düşük olasılıkla da olsa iç yörüngedeki bir elektronun uzaklaşması ile sonuçlanırsa bu defa x-ışınları ile Auger elektronlarının salınması ve atomun oldukça yüksek (+) yük kazanması söz konusu olur.

### **Fotoelektrik Olay**

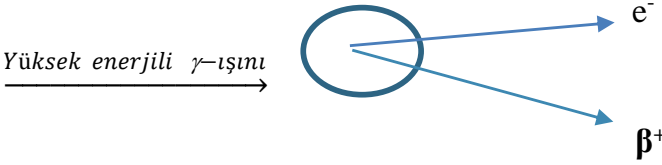
Düşük enerjili bir gama ışınının yolu üzerindeki bir atomun iç yörünge elektronu ile karşılaştığı zaman enerjisinin tamamını elektrona aktardıktan sonra yok olması olayına **Fotoelektrik olay** adı verilir. Fotoelektrik olay sonunda enerjisi artan yörünge elektronunun atomu terketmesi ile oluşan iç yörüngedeki elektron boşluğu aynı zamanda zincirleme Auger elektronlarının salınmasına ve atomun yüksek pozitif yük kazanmasına neden olur.



**Şekil 8.** Fotoelektrik olay.

## Gama Işınının Atomun Çekirdeği İle Etkileşmesi

Yüksek enerjili gama ışınlarının karşılaştığı atomun yörünge elektronları ile karşılaşmadan çekirdeğin etki alanına girmesi her zaman olası bir durumdur. Çekirdeğin etki alanına giren gama ışını **çift oluşumu** adı da verilen elektron ve pozitrona dönüşerek yok olur.



$\gamma$ -ışını, enerjisine ve karşılaştığı atomun atom numarasına bağlı olarak atomlarda doğrudan doğruya, ya da dolaylı yoldan çeşitli iyonlaşmaya neden olmaktadır. Bu nedenle gama ışınları da buldukları maddesel ortmada iyonlaşmaya neden olan nükleer radyasyon çeşididir. Ancak iyonlaştırma güçlerini karşılaştıracak olursak gama ışınlarının iyonlaştırma gücü alfa ve beta ışınlarının iyonlaştırma gücünden daha düşüktür. Örneğin 1 MeV enerjiye sahip  $\gamma$ -ışınlarının havada 1cm'lik bir mesafe içinde oluşturabildikleri iyon çifti sayısı 1 iken; aynı enerjili  $\beta^-$  ışınlarınınki ise 46'dır.

Gama ışınlarının enerjisiyi temsil eden fotonlardan oluşması nedeniyle maddesel ortamda herhangi bir elektrona ya da atom çekirdeğine rastlamadan uzun süre yol olması her zaman yüksek bir olasılıktır. Bu nedenle gama ışınlarının katı ve sıvılarda giriciliği alfa ve beta ışınlarından çok daha fazladır. Özellikle gama ışınları yapan radyoaktif

kaynaklardan çıkan ışınların durdurulması için kurşundan yapılmış malzemeler tercih edilir. Kurşunun doğada bulunan atom numarası en büyük ve en kararlı element olması zırh malzemesi olarak tercih edilmesinin en önemli nedenidir. Ayrıca, kolay işlenebilmesi, ucuz olması ve korozyondan etkilenmemesi de diğer avantajlarıdır. Kurşunun atom numarasının büyük olması fotoelektrik olayın oluşma olasılığını dolayısıyla da gama ışınlarının yok olmasını artıracak için gama ışınlarının engellenmesi açısından son derece elverişli ortam yaratmaktadır.

## BÖLÜM 7

### NÜKLEER FİSYON VE NÜKLEER FÜZYON REAKSİYONLARI

#### **Nükleer Fisyon (Çekirdek Parçalanması)**

Hem fisyon hem de füzyon reaksiyonları enerji oluşturmak için kullanılan nükleer süreçlerdir, ancak ikisi arasındaki fark nedir? Basitçe söylemek gerekirse, fisyon bir atomun ikiye bölünmesidir. Füzyon ise iki hafif atomun nükleer reaksiyonlar sonucu birleşerek daha ağır bir atom oluşturmasıdır. Bu nedenle fisyon ve füzyon birbirinden çok farklı olan karşıt süreçlerdir. Fisyon' nun kelime anlamı “parçalarına ayrılma ya da bölünme” demektir.

Daha önce bazı ağır atomların dışardan hiçbir etki olmaksızın kendiliğinden iki büyük parçaya bölünerek radyoaktif bozunmaya uğradıklarını ve bu olaya kendi kendine bölünme anlamına gelen fisyon spontane denildiğini söylemiştik. Bu kısımda bahsedilen fisyon olayı ise herhangi bir ağır çekirdeğin dışarıdan gelen bir parçacık ya da yüksek enerjili bir gama ışınının etkisiyle iki büyük parçaya bölünmesi olayıdır. Bu fisyon olayı sonunda dışarıya genellikle 2, 3 ya da daha fazla yüksek enerjili nötron salınır ve önemli miktarda enerji açığa çıkar. Açığa çıkan bu enerji bugün bilinen ve kullanılan nükleer enerjinin kaynağıdır.



**Şekil 9.** Nükleer fisyon reaksiyonunun şematik gösterimi

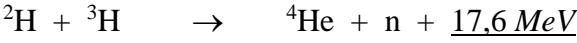
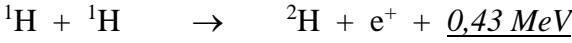
(Kaynak: Eokultv.com Online eğitim portalı - Nükleer Fisyon ve Füzyon Ayt Fizik)

Fisyon reaksiyonunda açığa çıkan nötronlar, ortamdaki diğer çekirdekleri de kararsız hale getirerek onların da bölünmesine ve birbirini takip eden zincirleme reaksiyonların başlamasına sebep olurlar. Fisyon reaksiyonu kontrollü bir şekilde gerçekleştirilmezse büyük bir patlamanın ardından çok büyük enerji açığa çıkar.

1945 yılında ABD tarafından Japonya üzerinde denenen iki atom bombasının yarattığı korkunç tahribat bu enerjinin kontrolsüz ve barışçıl amaçlar dışında kullanılmasının insanlık için çok büyük felakete neden olabileceğini acı bir şekilde göstermiştir. Bu nedenle daha sonraki yıllarda bilim insanlarının çalışmaları bu enerjinin barışçıl amaçlarla ve insanlığın faydasına olacak işlerde kontrollü bir şekilde kullanılması yönünde olmuştur. Günümüzde nükleer santral denilen tesislerde fisyon enerjisi istenildiği zaman istenilen miktarlarda üretilmektedir.

### Nükleer Füzyon (Çekirdek Birleşmesi)

Nükleer füzyon reaksiyonlarında hafif iki çekirdek, daha ağır ve kararlı bir çekirdek oluşturmak için birleşir. Bu hafif çekirdekler genellikle hidrojen ve helyum atomlarının izotoplarıdır. Füzyon reaksiyonu genellikle çok yüksek sıcaklıklarda gerçekleşen bir olay olmakla beraber bazı durumlarda normal oda koşullarında da gerçekleşebilmektedir. Aşağıda verilen proton, döteryum ve trityum arasındaki reaksiyonlar füzyon olaylarının belli başlı reaksiyonlarıdır.



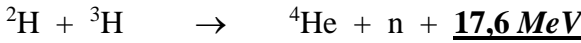
Reaksiyonlardan da görüldüğü gibi füzyon kaynaşması sırasında çok büyük miktarda enerji açığa çıkmaktadır. Bu reaksiyonların normal laboratuvar koşullarında gerçekleşmesi beklenmemektedir. Çünkü pozitif yüklü iki parçacığın Coloumb itme kuvveti nedeniyle kendiliğinden biraraya gelerek kaynaşması mümkün değildir. Bu birleşme olayının gerçekleşebilmesi için atomların çok yüksek kinetik enerjiye sahip olmaları gerekir ki bu da ortamın sıcaklığının milyonlarca °C gibi çok yüksek mertebede olması ile mümkündür. Bu kadar yüksek sıcaklıklarda ise atomlar sadece çekirdeklerinden oluşan ve plazma adı



verilen maddesel yapı halinde bulunurlar. Kısacası füzyon reaksiyonları maddenin plazma halinde bulunduğu çok yüksek sıcaklıklarda gerçekleşen reaksiyonlardır.

Teknolojik olarak laboratuvar koşullarında plazmanın elde edilmesi ve onun sürekli hale getirilmesi füzyon enerjisinin kesintisiz kullanılabilir olması için en önemli bir adım olacaktır.

Hidrojenin döteryum ve trityum izotopları arasında gerçekleşen füzyon reaksiyonu en kolay ve en yüksek enerji verimi ile gerçekleşen reaksiyondur.



Reaksiyon için gerekli olan döteryum izotopu doğada hidrojen ile birlikte bulunmaktadır. Özellikle hidrojen ve döteryum deniz suyu içinde bol miktarda bulunmaktadır ve basit bir elektroliz işlemi ile döteryumun, dötero su (D<sub>2</sub>O) şeklinde elde edilmesi oldukça kolaydır.

Kömür, petrol ve doğalgaz gibi sınırlı enerji kaynaklarının yakın gelecekte tükeneceği düşünüldüğünde nükleer santrallerde üretilen enerjinin önemi daha iyi anlaşılmaktadır. Ancak tüm dünyadaki uranyum kaynaklarının 200 yıl gibi insanlık tarihi için son derece kısa bir süre idare edebileceği söylenmektedir.

Bu noktada döteryum kaynağının neredeyse tükenmeyecek kadar bol olması, füzyon reaksiyonunun ileride insanlık için son derece önemli bir enerji kaynağı olacağı anlamını taşımaktadır.

## BÖLÜM 8

### NÜKLEER REAKTÖRLER

Nükleer reaktörler nükleer enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir. Filyon sonucu açığa çıkan enerji ilk önce ısı enerjisine dönüştürülür. Daha sonra bu ısı enerjisi bir soğutucu yardımıyla ya doğrudan ya da başka bir taşıyıcı sisteme aktarılarak kinetik enerjiye ve oradan da jeneratör sisteminde elektrik enerjisine dönüştürülür.

Uluslararası Atom Enerji Ajansı'nın (IAEA) ve Dünya Nükleer Birliği'nin (WNA) verilerine göre, dünya genelinde bugüne kadar 450 adet nükleer santral aktif olarak çalışmakta ve bunların büyük bir çoğunluğu da 30 yaş üzeri reaktörlerden oluşmaktadır. 177 adet nükleer filyon reaktörü de kapatılmıştır. Bunlara ek olarak, dünya genelinde 2019 yılındaki veriler, inşaat halinde olan 54 nükleer filyon reaktörü olduğunu göstermektedir. 2030 yılına kadar da ülkelerin bünyelerine 330'dan fazla nükleer filyon reaktörünü katması planlanmaktadır.

#### **Nükleer Reaktörlerin Sınıflandırılması**

Fizikçi Enrico Fermi 1934 yılında uranyum atomlarını nötronlarla bombaladıktan sonra ortaya çıkan atomların uranyumdan çok daha küçük atomlar olduğunu gördü. Nükleer bölünme reaksiyonunun potansiyelini farkettiler. 1942 yılında bugünkü nükleer santrallere benzer bir şekilde uranyum ve kontrol çubukları kullanılarak ilk kontrollü, kendi kendine sürdürülebilir nükleer enerji üretim tesisini oluşturdu. Bu yeni teknolojinin gücünün görülmesinin hemen ardından, Amerika Birleşik

Devletleri 1945 yılının Temmuz ayında New Meksiko çöllerinde ilk nükleer silah denemesini gerçekleştirdi.

Bu gelişmelerle beraber nükleer fisyon enerjisinin barışçıl amaçlarla kullanımı ilk kez 1951'de ABD'de EBR-1 (Experimental Breeder Reactor, Deneysel Üretken Reaktörü) tarafından elektrik üretmek için olmuştur. Bu, yakıt olarak zenginleştirilmiş uranyum kullanan ve NaK ötektik eriyiği ile soğutulan hızlı bir üretken reaktördü. Başlangıçta dört adet 200 W ampulü çalıştıracak kadar ve daha sonra da kendi binasına yetecek kadar elektrik üretti. 1955'te EBR-1'de kısmi bir erime yaşandı ve nihayet 1964'te devre dışı bırakıldı.

Ticari nükleer santraller nükleer enerjiden elektrik üretmek için geliştirilmiş tesislerdir. Günümüzde farklı ülkeler tarafından farklı nükleer santral türleri geliştirilmiştir. Nükleer reaktörler genel olarak soğutucu olarak kullanılan malzemeye göre sınıflandırılmaktadırlar. 2015 yılı itibarı ile dünyada kullanılan ticari reaktörlerin yaklaşık %85'i soğutucu olarak suyu kullanmaktadır. Bu tip reaktörlere Hafif Su Reaktörleri (Light Water Reactors, LWR) denilmektedir. Hafif Su Reaktörleri de kendi içinde Basınçlı Su Reaktörleri (Pressurized Water Reactor-PWR) ve Kaynar-Su Reaktörleri (Boiling Water Reactor-BWR) olarak iki farklı türe ayrılmıştır. Ruslar ise kendi teknolojileri ile geliştirdikleri kaynar su reaktörüne RBWK ve basınçlı su reaktörüne ise VVER adını vermişlerdir.

%15 lik bir kısmı oluşturan diğer ticari nükleer reaktörlerde soğutucu olarak ya gaz (GCR) ya da ağır su (PHWR) kullanılmaktadır. Gaz soğutmalı reaktörleri daha çok İngiltere tercih etmiştir. Ancak son

zamanlarda İngiltere bu reaktörleri PWR türü reaktörlerle değiştirmek istemektedirler.

Nükleer Reaktörler ayrıca bölünme tepkimesine neden olan nötronların enerjilerine göre de sınıflandırılmaktadırlar. Eğer bir reaktörde termal nötronlar bölünme tepkimelerinin çoğuna neden oluyorsa, bu tür reaktörlere Termal Reaktörler, hızlı nötronlar bölünme tepkimelerinin çoğuna neden oluyorsa, bu tür reaktörlere de Hızlı Reaktörler adı verilmektedir. Dünyada faaliyet gösteren reaktörlerin %99'dan fazlası termal reaktör sınıfına girmektedir.

### **Nükleer Yakıtlar**

Temel nükleer yakıt hammaddesi uranyumdur. Doğada bulunan uranyum izotopunun %0,71'i  $^{235}\text{U}$ 'dur. Hafif su ile soğutulan reaktörlerde yakıt olarak zenginleştirilmiş uranyum kullanılmaktadır. Zenginleştirilmiş uranyum elde etmek için, doğal uranyum içindeki  $^{235}\text{U}$  oranı artırılır.

Doğal uranyumun kendisi ağır su ile soğutulan reaktörlerde yakıt olarak kullanılmaktadır.

Toryum bölünebilir bir atom olmadığı için tek başına nükleer yakıt olarak kullanılamaz. Bölünebilir bir izotop olan  $^{235}\text{U}$ 'a dönüşebilmesi için  $^{232}\text{Th}$  izotopunun nötronla reaksiyona girmesi gerekir. Bu nedenle  $^{232}\text{Th}$ 'un nükleer yakıt olarak kullanılabilmesi için  $^{235}\text{U}$  veya  $^{239}\text{Pu}$  ile birlikte kullanılması gerekir.

### **Nükleer Atıklar**

İçerdiği  $^{235}\text{U}$  oranındaki azalma nedeniyle zincir fisyon reaksiyonunu gerçekleştiremeyen yani reaktördeki ömrünü tamamlayan yakıt

demetleri reaktörden çıkartılır ve kullanılmış yakıt olarak adlandırılır. 1000 Megavat elektrik gücündeki bir nükleer santralden çıkan kullanılmış yakıtın yaklaşık %95,5'i uranyumdioksit, %3,5'i fisyon ürünü hafif izotoplar, %0,9'u plütonyum ve %0,1'i uranyum dışındaki ağır izotoplardan oluşmaktadır. Ekstraksiyon gibi çeşitli kimyasal yöntemlerle kullanılmış yakıttan uranyumu ve plütonyumu geri kazanmak mümkündür. Bu durumda geriye kalan karışım yüksek aktiviteli nükleer atık olarak adlandırılmaktadır. İçeriğinde fisyon ürünü hafif izotoplar ve uranyum harici ağır izotoplar bulundurmaktadır.

Nükleer atık sadece kullanılmış nükleer yakıt çubukları değildir. Düşük/orta/yüksek seviyelerde olmak üzere; nükleer santralarda kullanılan işçi tulumları, eldivenler, santralda kullanılan ekipman ve malzemeler, vs. nükleer atıktır.

## KAYNAKLAR

- Behrens, J.W. and Carlson, A.D. 1989. 50 Years with Nuclear Fission, Vol. 1 & 2, Am. Nucl. Soc., La Grange Park, Illinois.
- Beskidt, C., Boer W., Kazakov D., 2013. A comparison of the Higgs sectors of the CMSSM and NMSSM for a 126 GeV Higgs boson. Physics Letters B 726(4-5), 758-766.
- Beyer, R.T. Foundations of Nuclear Physics, Dover Publ. Inc., New York 1949.
- Bouchiat, C., Iliopoulos, J. and Meyer, P.H. 1972. An AnomalyFree Version of Weinberg's Model. Physics Letters B 38(7), 519-523.
- Curie, M. Radioactivite', Herrmann, Paris 1935. Nobel Lectures, Chemistry and Nobel Lectures, Physics, Elsevier, Amsterdam 1966 and later.
- Çek, N. Parçacıklar ve Parçacıkların Enerji Kaynakları Üzerinde Etkileri, 2016. European Journal of Science and Technology Vol. 4, No. 7, pp. 1-8..
- Glasstone, S. Source Book on Atomic Energy, 3rd edn., van Nostrand, New York 1967.
- Hahn, O. A Scientific Autobiography, Charles Scribner's Sons, New York 1966.
- Hahn, O. Applied Radiochemistry, Cornell University Press, 1936.
- Jadach, S., Ward, B.F.L., and Was, Z. 1991. The Monte Carlo Program KORALZ, Version 3.8, for the Lepton or Quark Pair Production at

- LEP/SLC Energies. *Computer Physics Communications* 66(2–3), 276-292.
- Lichtenberg, D. 2007. *The Universe and The Atom*. World World Scientific Publishing Company, (1. Baskı), 328 s, Singapore.
- May, J. 1989. *The Greenpeace Book of the Nuclear Age*, Victor Gollancz Ltd., London.
- Radiochemistry and Nuclear Chemistry, Gregory Choppin, Jan-Olov Liljenzin, Jan Rydberg, Christian Ekberg, Academic Press is an imprint of Elsevier, Fourth Edition, 2013.
- Rhodes, R. *The Making of the Atomic Bomb*, Simon & Schuster, 1986.
- Romer, A. *Radiochemistry and the Discovery of Isotopes*, Dover Publ. 1970.
- Rutherford, E.; Chadwick J. and Ellis, C.D. 1930. *Historical reading and classics in nuclear chemistry: Radiations from Radioactive Substances*, Cambridge University, Press, Cambridge (reprinted 1951).
- Seaborg G.T. and Loveland, W.D. 1990. *The Elements Beyond Uranium*, John Wiley & Sons Inc., New York.
- Seaborg, G.T. and Loveland, W.D. 1982. *Nuclear Chemistry*, Hutchinson, Stroudsberg.
- Shupe, M.A. 1979. *A Composite Model of Leptons and Quarks*. *Physics Letters B* 86(1), 87-92.
- Smyth, H.D. 1946. *Atomic Energy for Military Purposes*, Princeton University Press, Princeton.

Terazawa, H., Yasuè, M., Akama, K. and Masaki, Hayashi M., 1982.  
Observable Effects of the Possible Sub-Structure of Leptons and  
Quarks. *Physics Letters B* 112(4-5), 387-392.







**IKSAD**

Publishing House



**ISBN: 978-625-8405-84-2**