

# Dedektör Fiziđine Giriş

**Sertaç ÖZTÜRK**

**İstinye Üniversitesi**

[sertac.ozturk@istinye.edu.tr](mailto:sertac.ozturk@istinye.edu.tr)

# İçerik

- ☑ Dedektör Nedir?
- ☑ Yüklü Parçacıkların Enerji Kaybı, Durdurma Gücü
- ☑ Bethe-Bloch, Bragg Tepesi, Bremsstrahlung
- ☑ Cherenkov ve Geçiş Işınması
- ☑ Foton, Nötron ve Nötrino Etkileşimleri
- ☑ Sintilatörler ve uygulamaları
- ☑ Fotoçoğaltıcılar
- ☑ Parçacık Etiketleme

# Dedektör Nedir?

dedektör  Algıç

*isim, Fransızca détecteur*

+ atom altı parçacıklar

Gaz, mayın, radyoaktif mineral, manyetik dalga vb.ni bulmaya, tanımaya yarayan cihaz, algılayıcı.

Yüklü parçacıkları belirlemeli

◆ Yüklü leptonlar, yüklü hadronlar

Yüksüz parçacıkları belirlemeli

◆ Foton, yüksüz hadronlar, nötrinolar

Parçacık kimliklendirme yapabilmeli

◆ gama/nötron ayrımı, hadron

Herbir parçacığın enerji momentum ölçümünü çok hassas bir şekilde yapabilmeli

◆ 4-vektör  $(E, p_x, p_y, p_z)$  ,  $(t, x, y, z)$

Olay yapılandırma oranı yüksek olmalı

## Mükemmel Dedektör

# Dedektör Yapısı

☑ Dedektörler atomlardan meydana gelir.

◆ Çekirdek + elektron

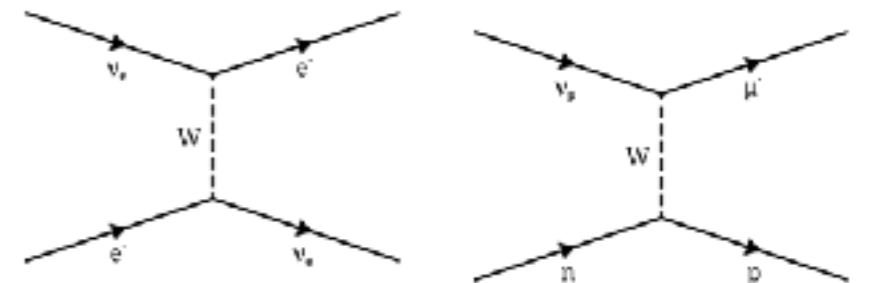
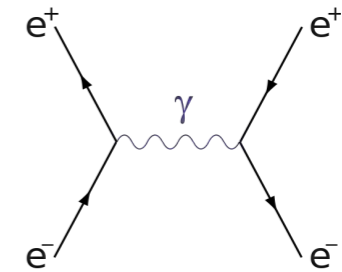
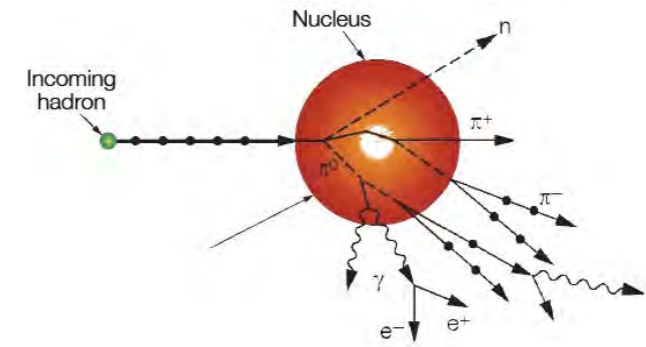
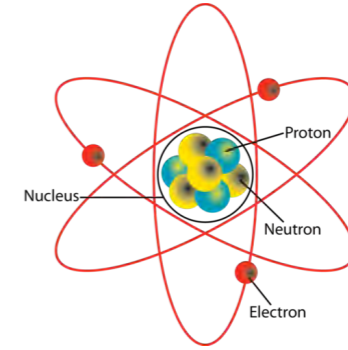
◆ Etkileşim parçacık türüne bağlıdır

◆ Enerji kaybı enerjiye bağlıdır

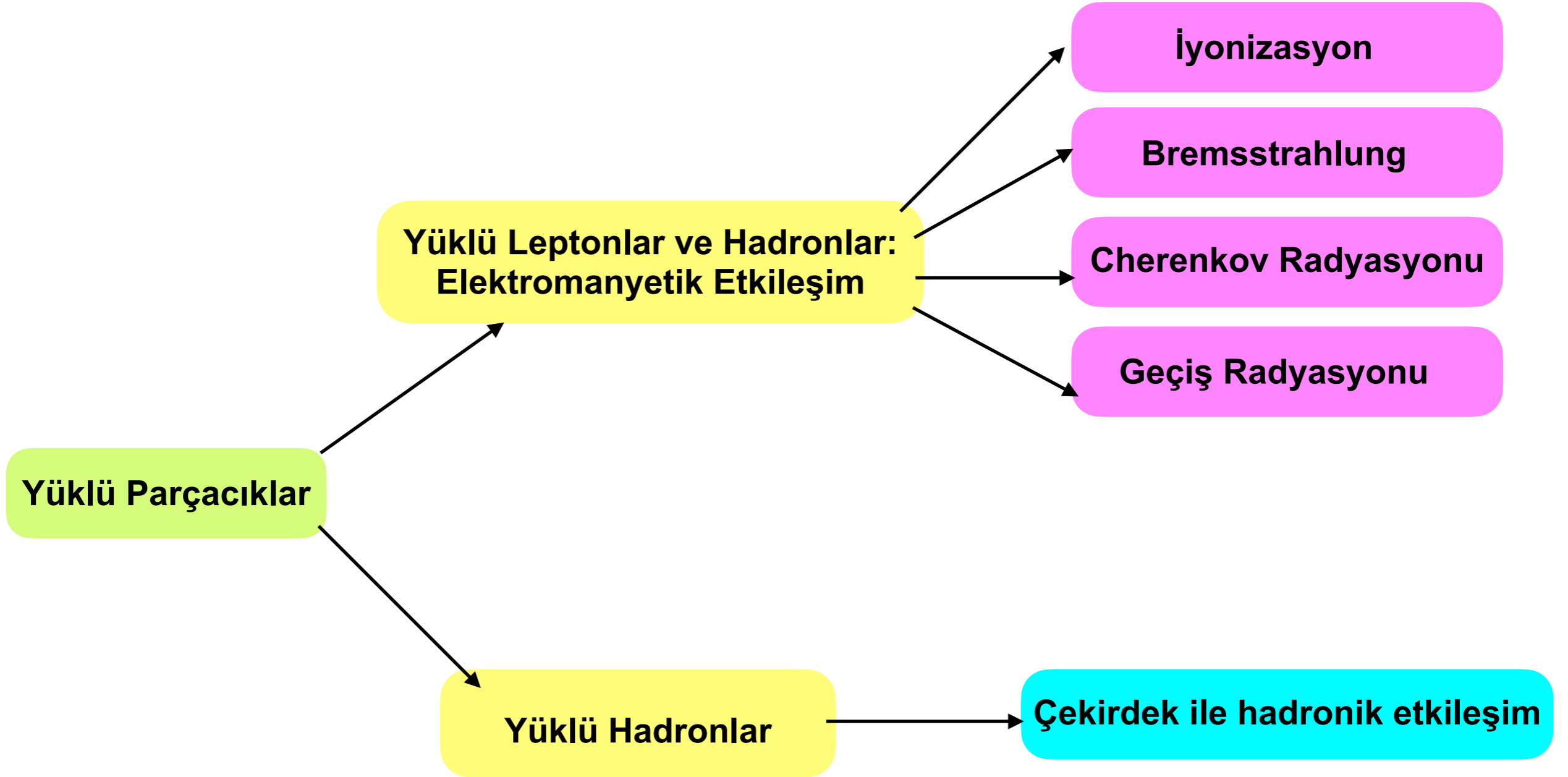
☑ Hadronlar → Güçlü etkileşim → Çekirdek

☑ Yüklü parçacıklar ve fotonlar → EM etkileşim → Elektron ve çekirdek

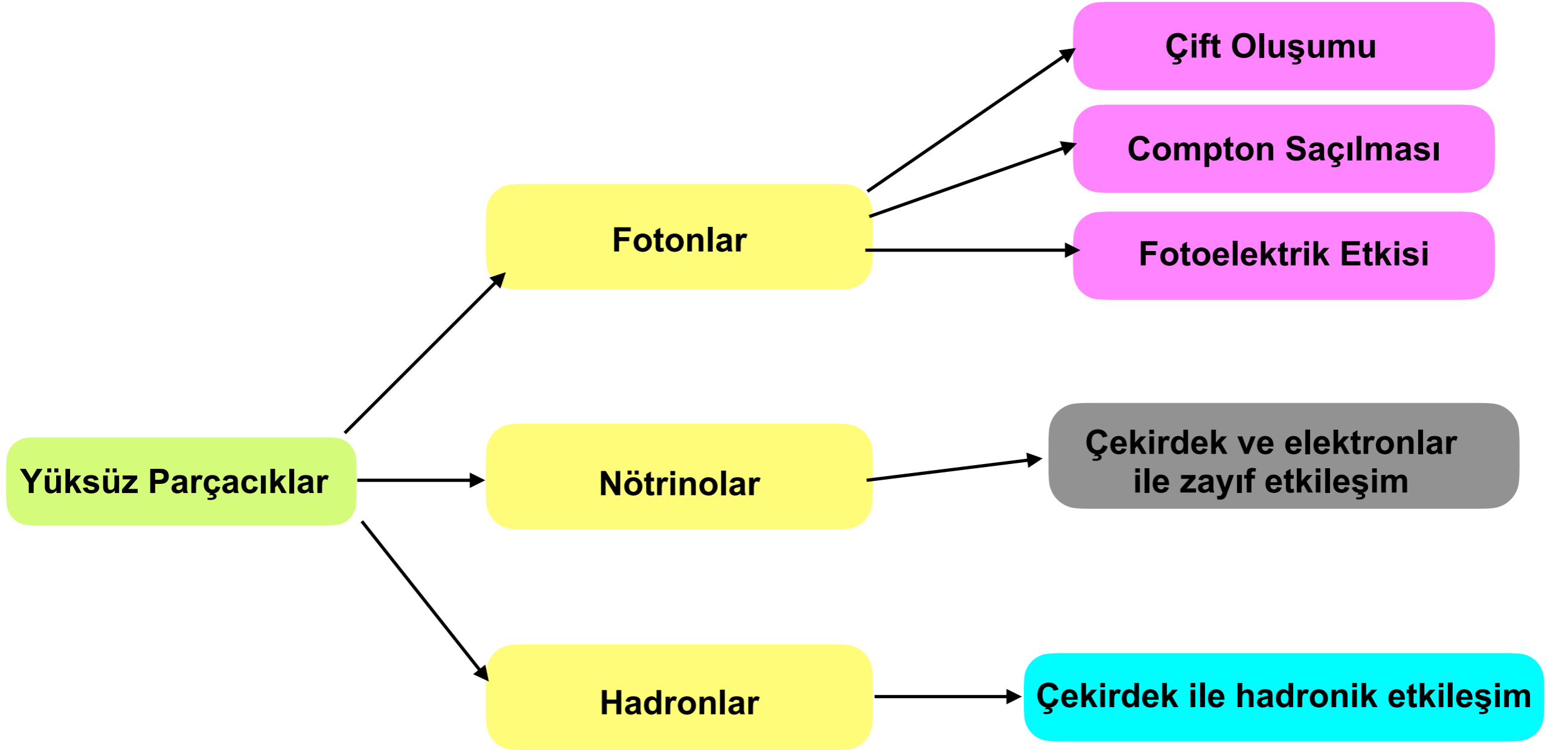
☑ Nötrinolar → Zayıf Etkileşim → Elektron ve çekirdek



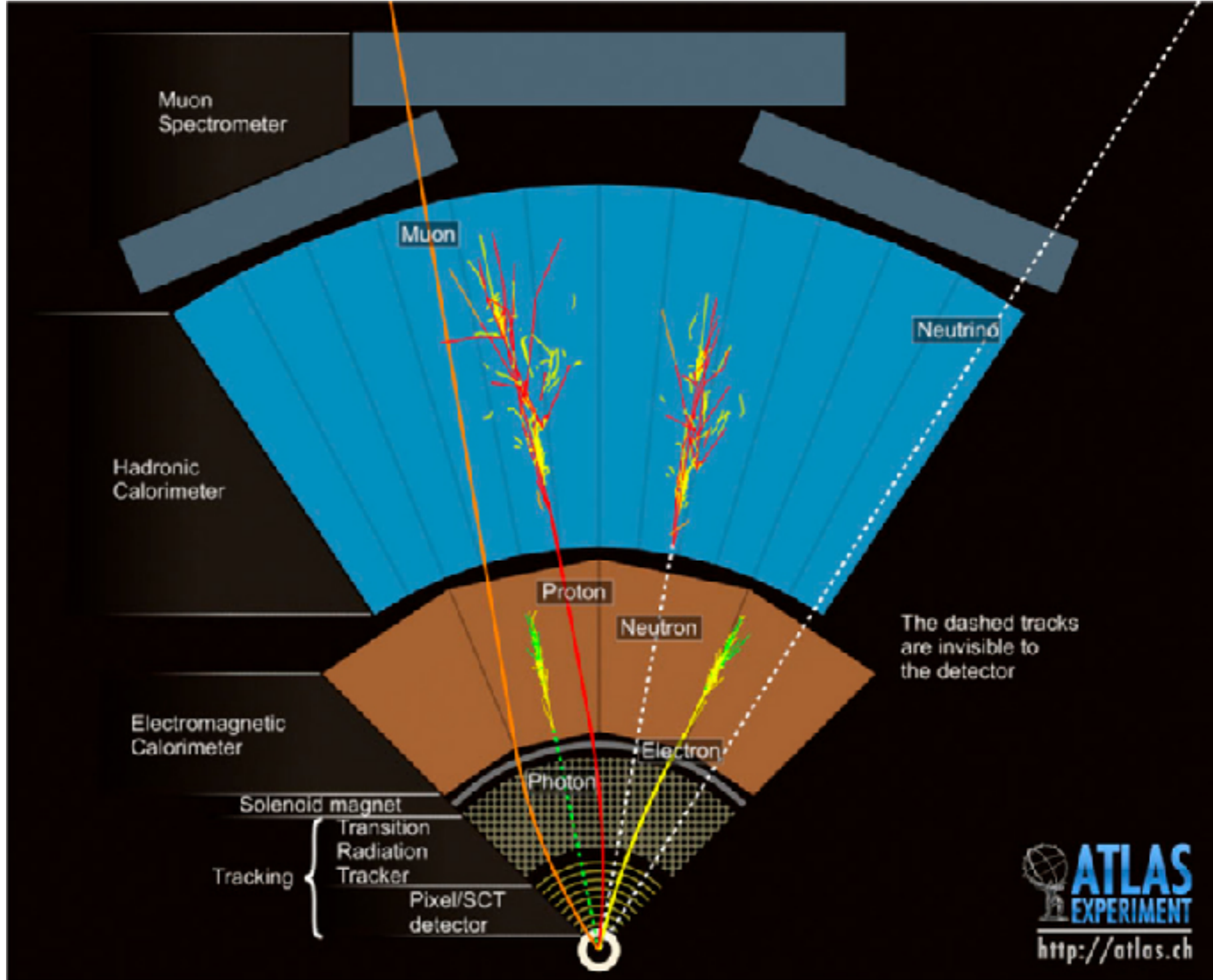
# Yüklü Parçacıklar için Enerji Kaybı



# Yüksüz Parçacıklar İçin Enerji Kaybı



# Çözüm: Çok katmanlı dedektör



# Yüklü Ağır Parçacıklar için Enerji Kaybı

☑ Müon gibi yüklü ağır bir parçacığın soğurucu bir matelyalden geçtiğini düşünelim

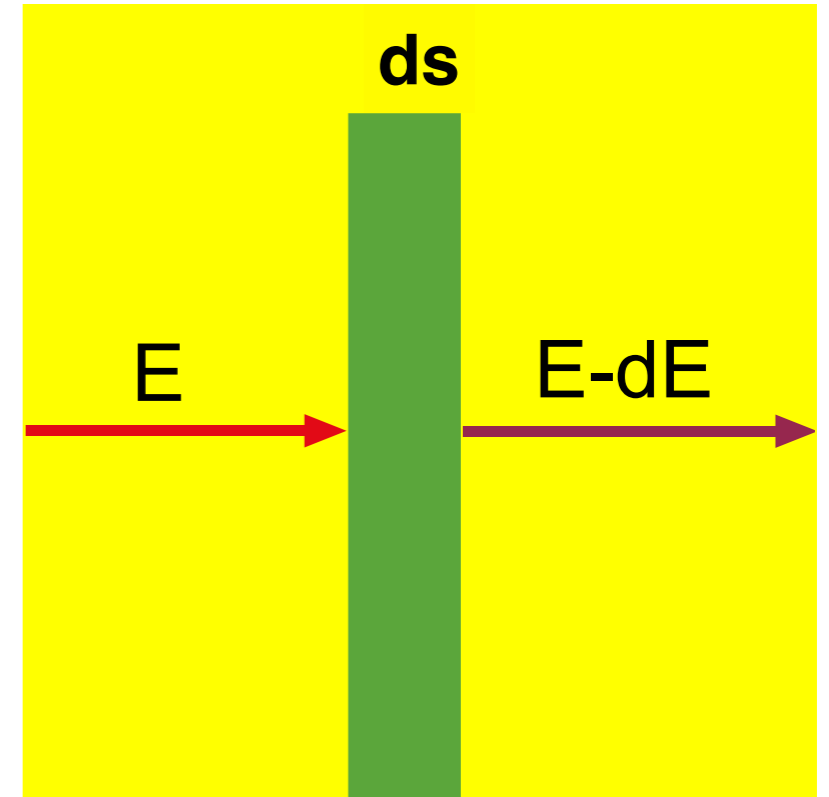
◆ Soğurucunun kalınlığı ve yoğunluğu

☑ Soğurucu matelyalden geçtiğinde enerji kaybı  $dE$

☑ Birim uzunluktaki enerji kaybı  $dE/dx$  durdurma gücü olarak adlandırılır.

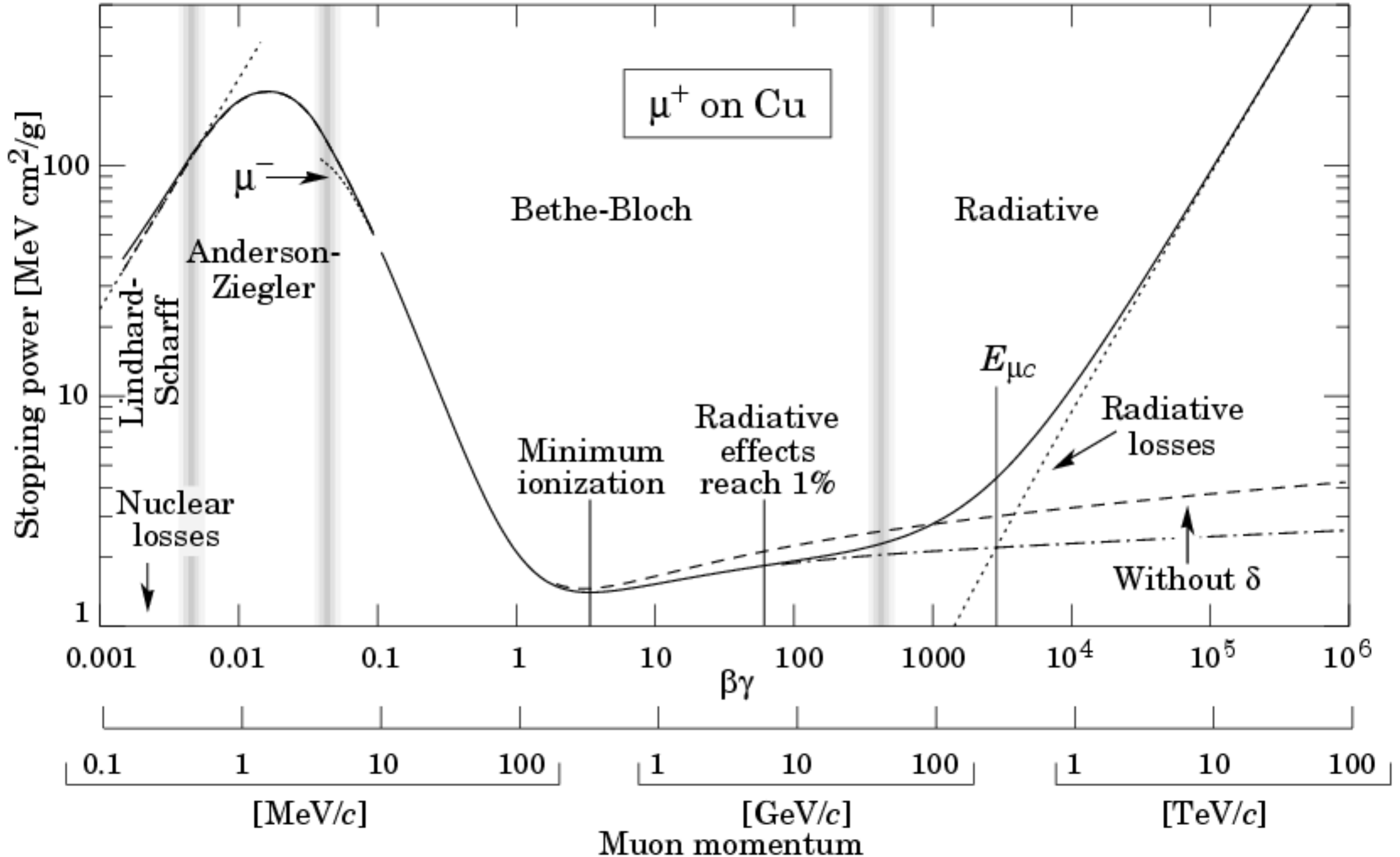
◆  $x = \text{yoğunluk} \times \text{kalınlık} \text{ (g/cm}^2\text{)}$

◆  $dE/dX$  birimi  $\text{MeV cm}^2/\text{g}$





# Muonlar için Durdurma Gücü



# Bethe-Bloch Formülü

$$\left\langle -\frac{dE}{dx} \right\rangle = K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[ \frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 W_{\max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right]$$

$$K = 4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 = 0.307 \text{ MeV g}^{-1} \text{ cm}^2$$

$$W_{\max} = \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{1 + 2\gamma m_e/M + (m_e/M)^2}$$

$z$  = parçacığın yükü

$M$  = parçacığın kütlesi

$Z$  = Ortamın yükü numarası

$A$  = Ortamın atom numarası

$I$  = Ortamın ortalama uyarılma enerjisi

$W_{\max}$  = Tek bir çarpışmada mak. enerji transferi

$\beta = v/c$  ,  $\gamma = (1-\beta^2)^{-1/2}$

$\delta$  = density correction

Ağır yüklü parçacıklar için ortalama durdurma gücü ( $M \gg m_e$ )

# Bethe-Bloch Bölgeleri

☑ Bethe-Bloch bağıntısı üç bölgeye ayrılabilir.

☑ 1. Düşük Enerjiler:

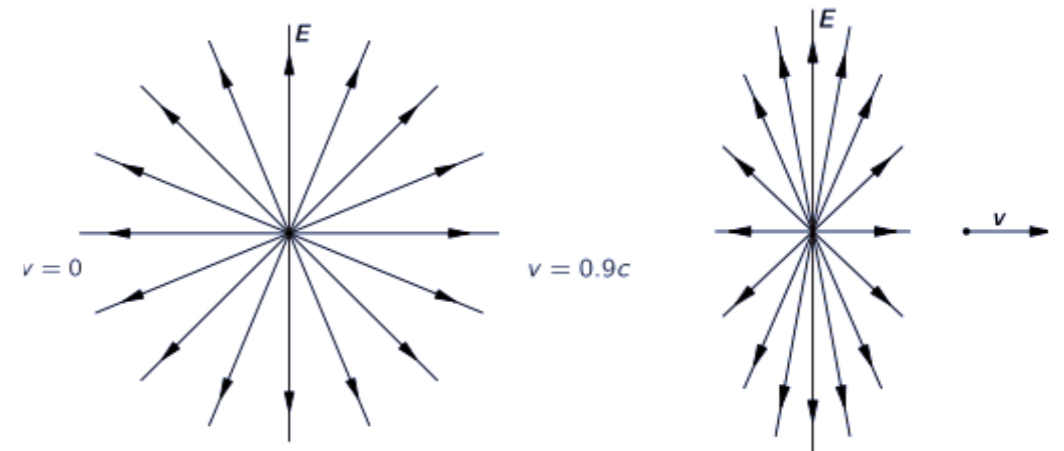
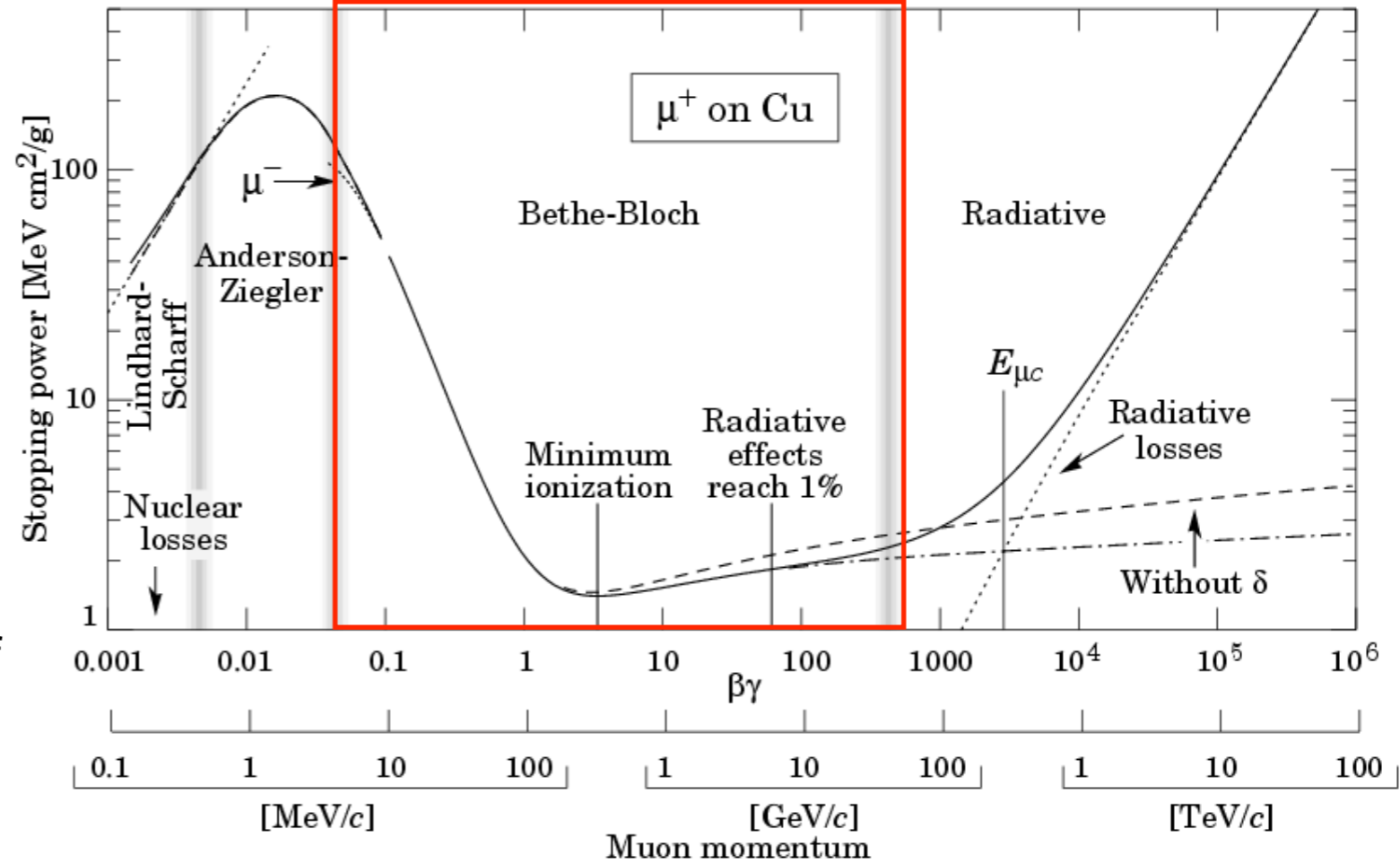
- ◆  $dE/dx$ ,  $\beta\gamma = 3-3,5$  civarında ulaşılan bir minimum değere kadar  $1/\beta^2$  gibi azalır.
- ◆ Bu kinematik aralıktaki parçacıklara "minimum iyonlaştırıcı parçacıklar" denir.
- ◆  $dE/dx$ , emici malzemeye yalnızca zayıf bir şekilde bağlıdır ve tipik olarak yaklaşık  $1-2 \text{ MeV g}^{-1}\text{cm}^2$ 'dir ( $\text{H}_2$  için  $4 \text{ MeV g}^{-1}\text{cm}^2$ )

☑ 2. Daha büyük  $\beta\gamma$  değerleri

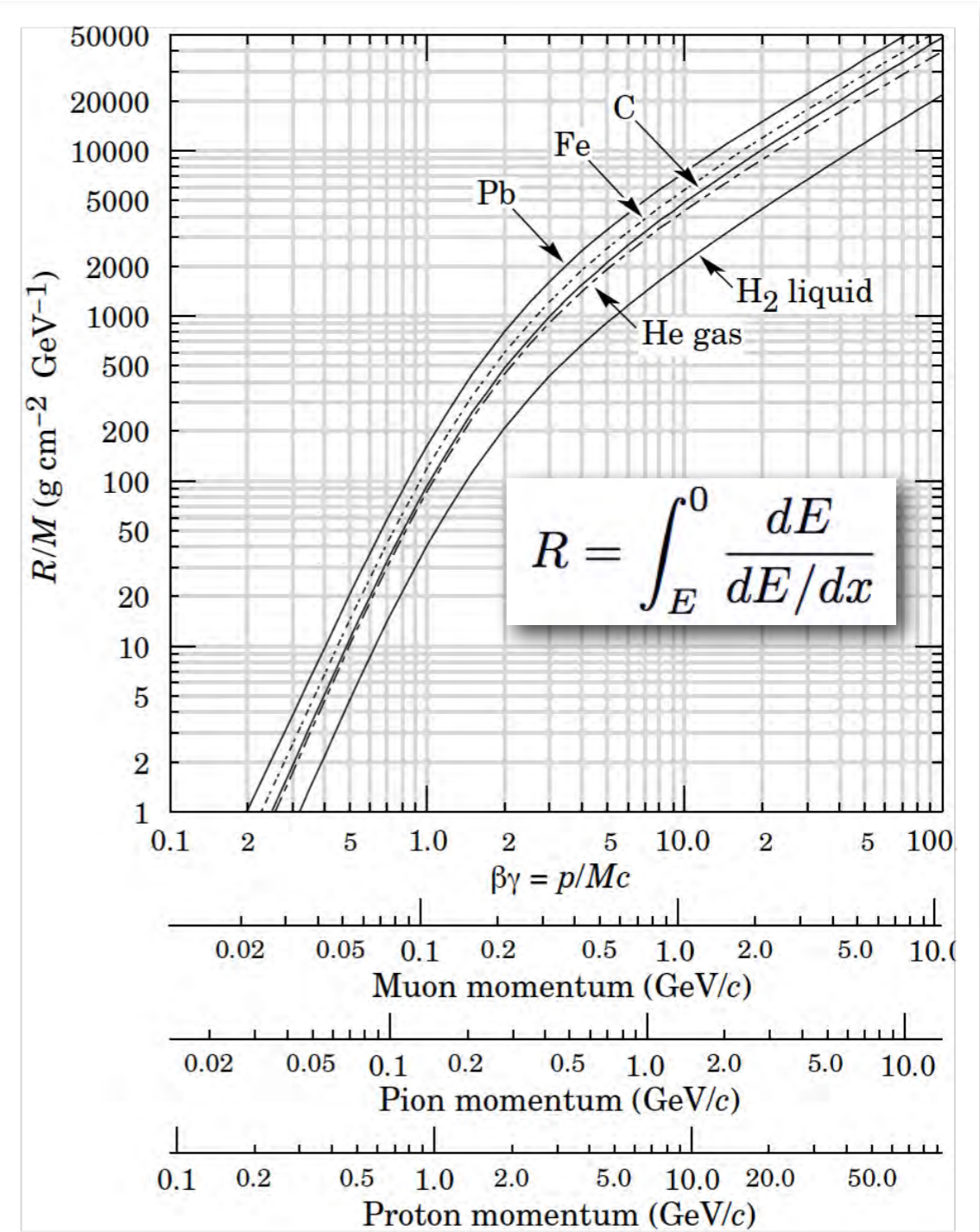
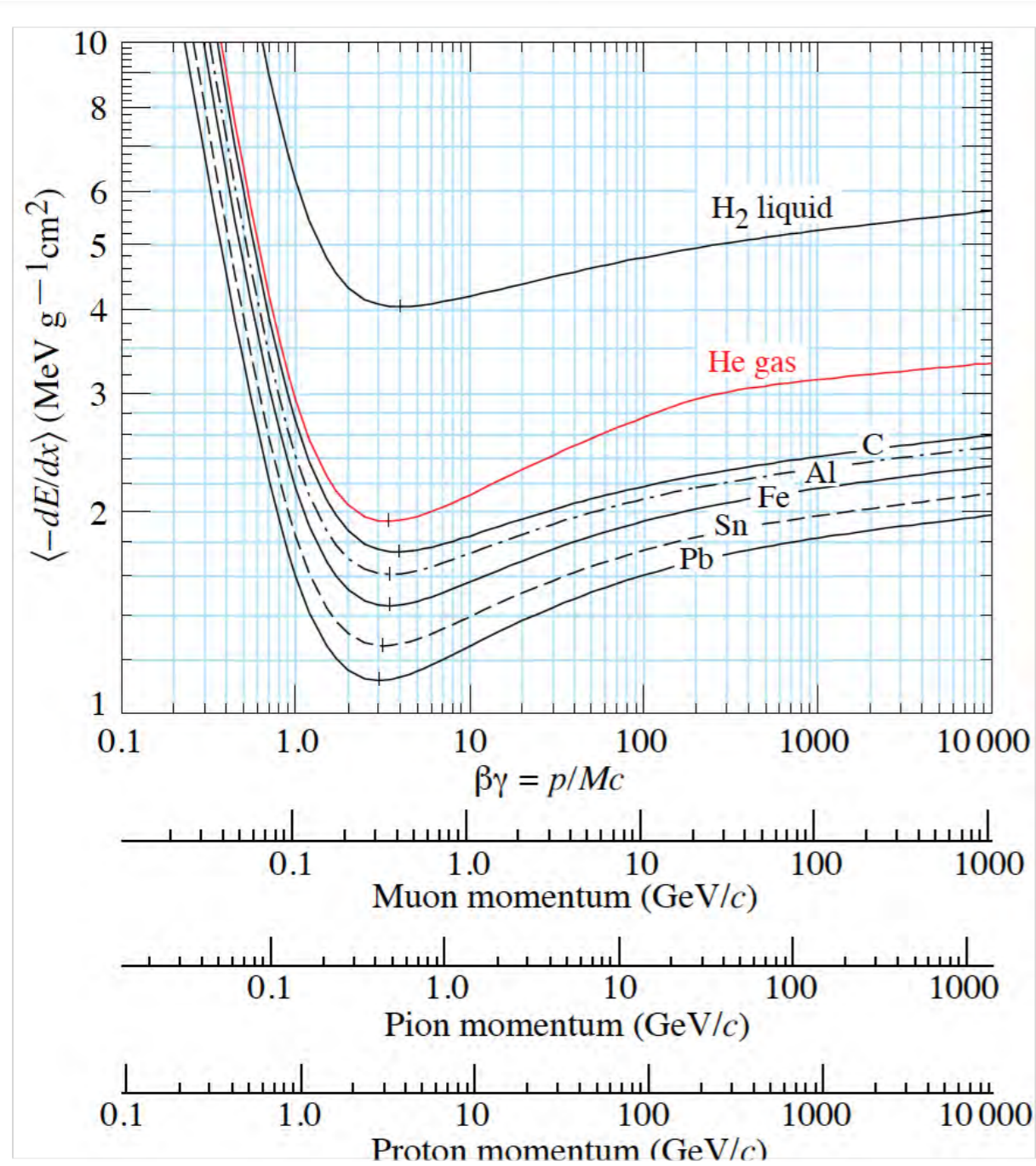
- ◆ Artan enerjiyle birlikte logaritmik bir  $dE/dx$  yükselişi vardır ("görelî yükseliş")

☑ Yüksek Enerjiler:

- ◆ Enerji kaybı bir düzlüğe ulaşır



# Bethe-Bloch Enerji Kaybı



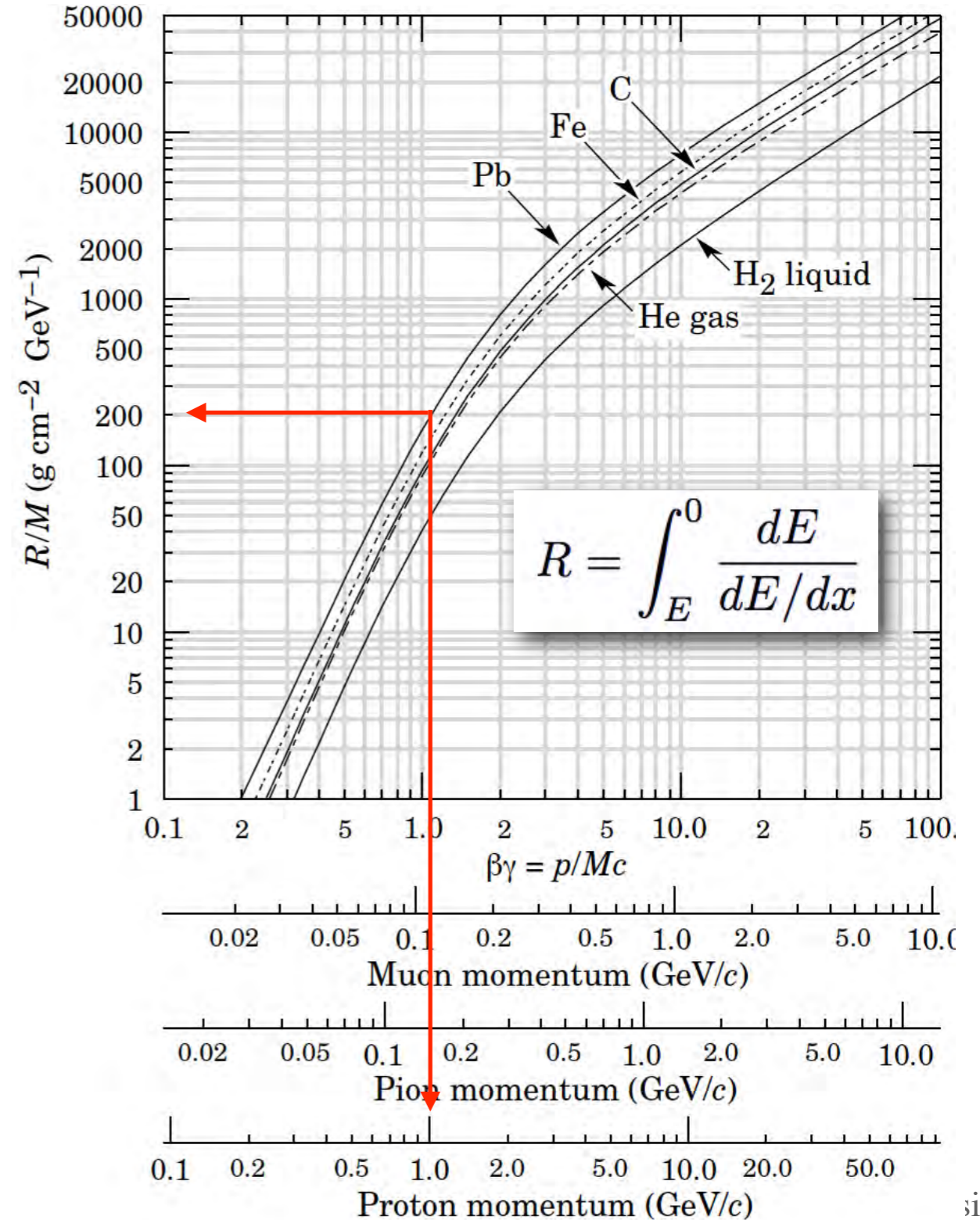
# Parçacıkların Menzili

☑ 1 GeV momentumlu bir protonu Pb hedefinde düşünelim

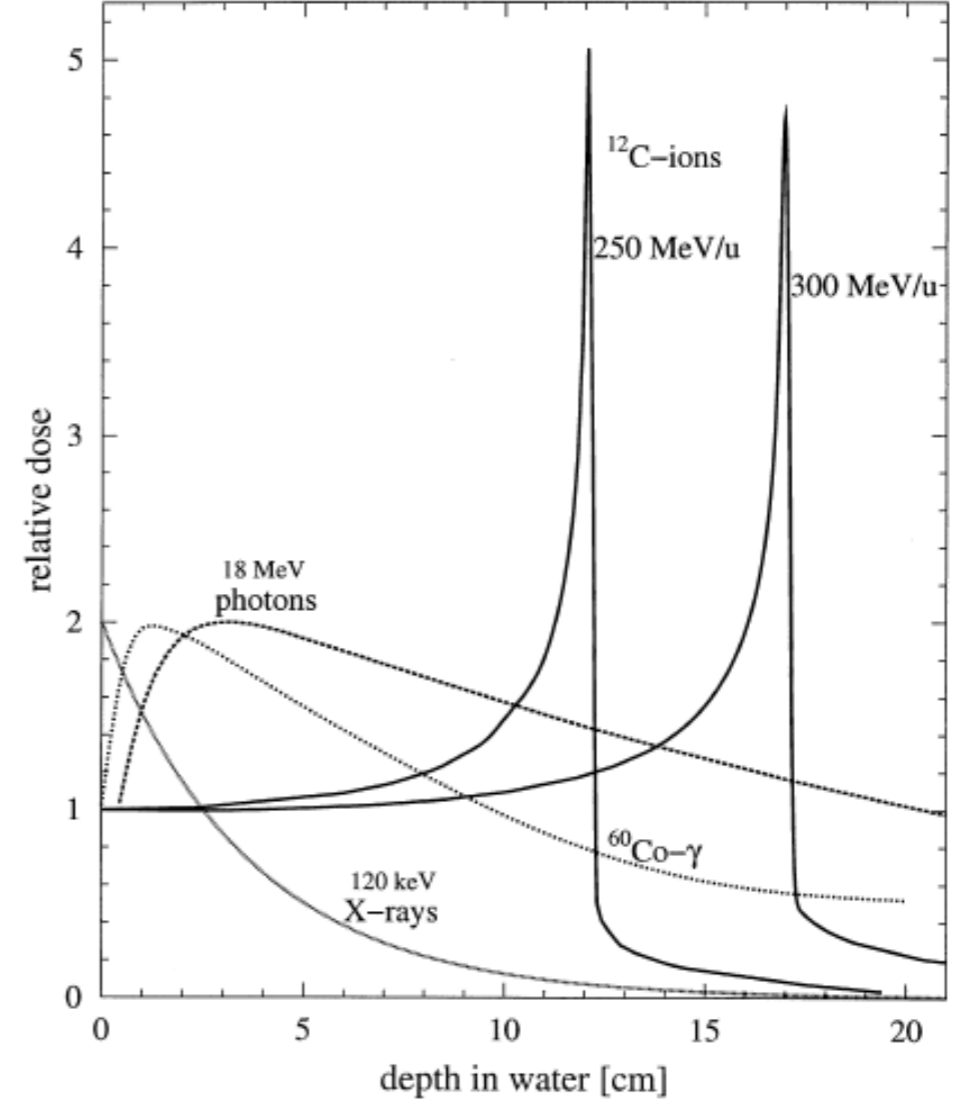
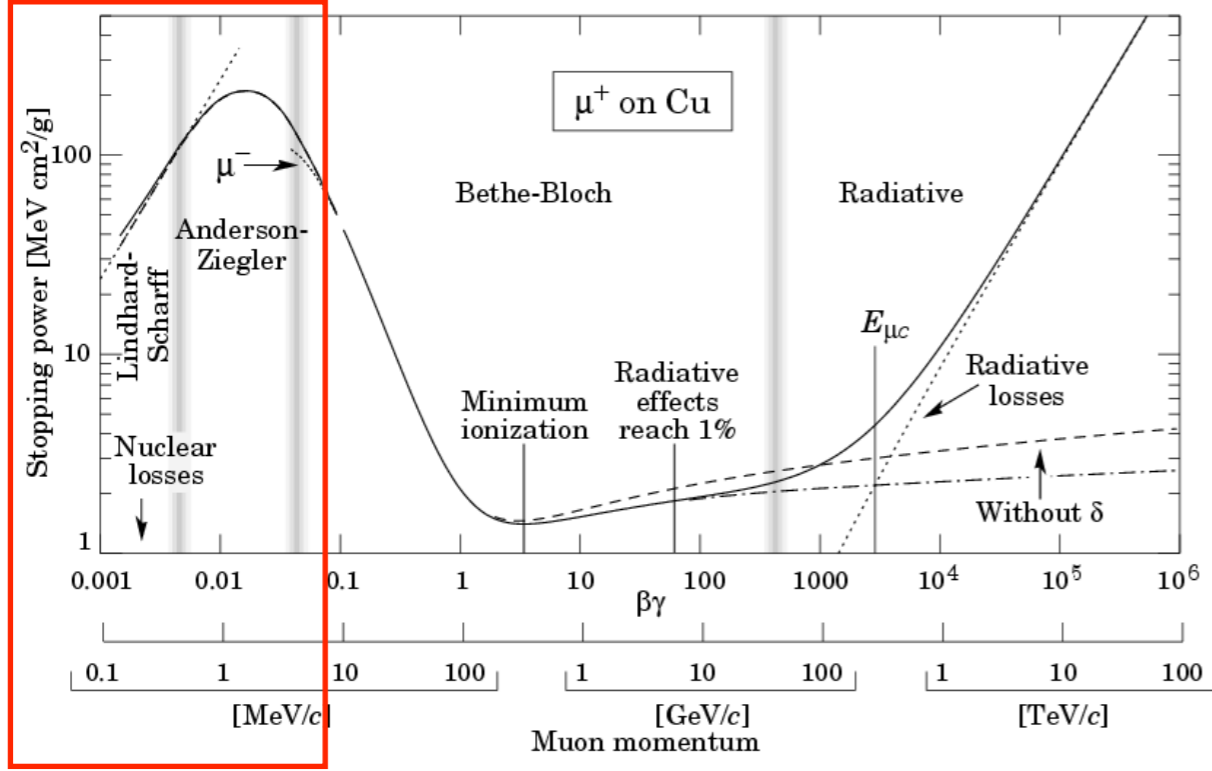
- ◆  $\rho \approx 11,3 \text{ g/cm}^3$
- ◆  $R/M = 200 \text{ g cm}^{-2} \text{ GeV}^{-1}$
- ◆  $R = 200/11.3 \text{ cm} \approx 18 \text{ cm}$

☑ Sadece iyonlaşma ve atomik uyarılma ile enerji kaybeden parçacıklar için geçerlidir.

- ◆ Düşük enerjili hadronlar
- ◆ Birkaç 100 GeV'ye kadar müonlar



# Bragg Tepesi

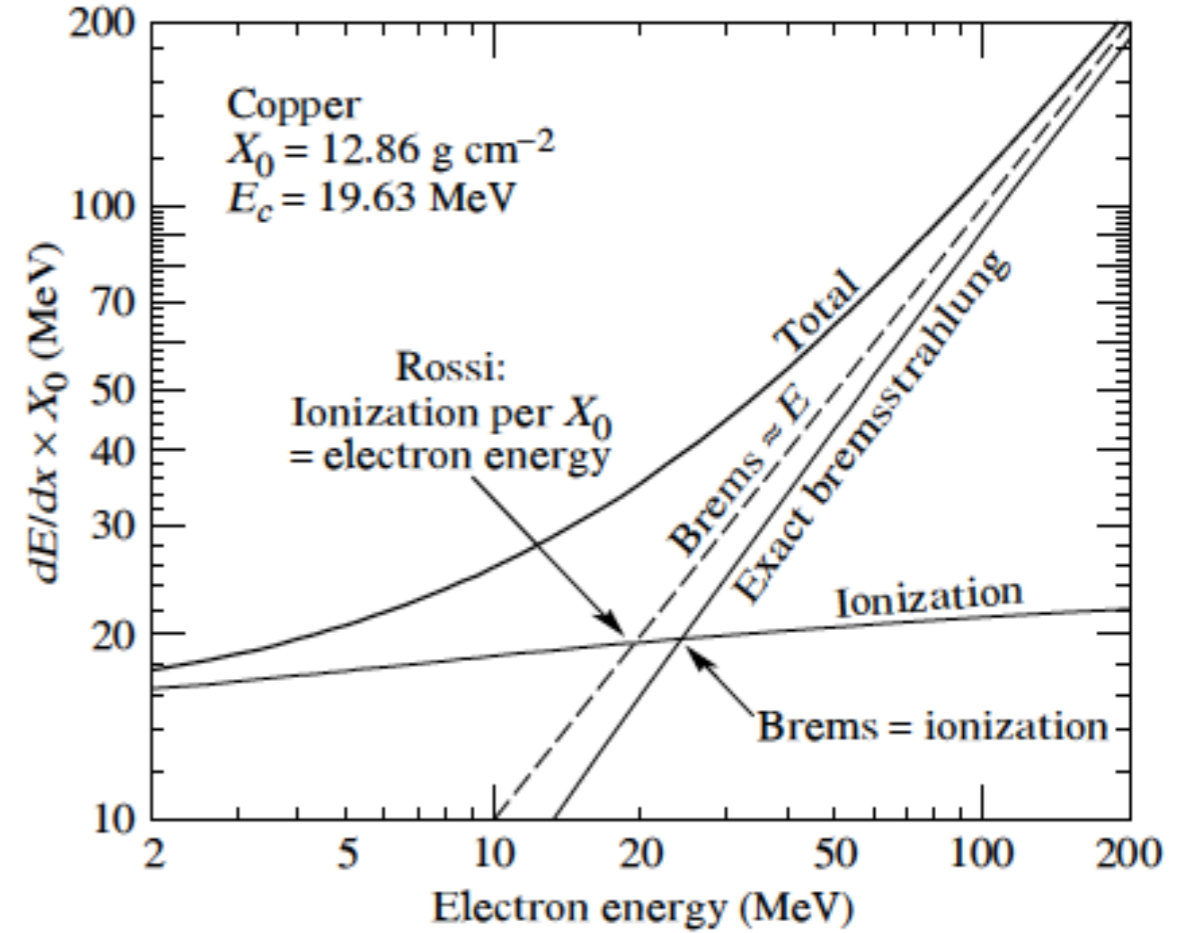


☑ Küçük  $\beta\gamma$ 'da enerji kaybı artar

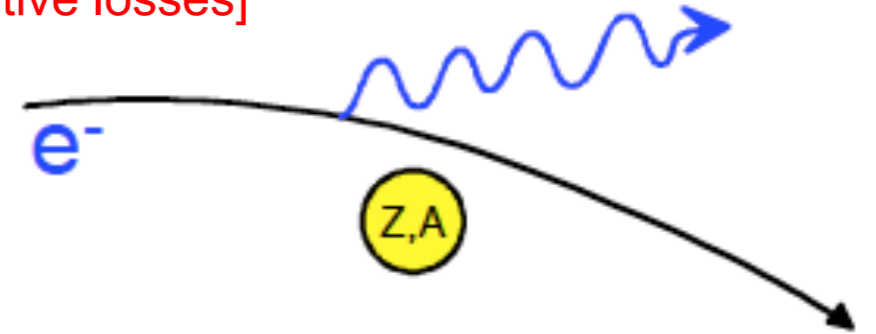
- ◆ Enerjinin çoğu, menzilin sonuna yakın bir yerde biriktirilir
- ◆ Bragg Tepesi
- ◆ Hadron terapi

# Bremsstrahlung

- ☑ Frenleme ışması, ivmelenen yüklü bir parçacığın yaptığı ışmadır.
- ☑  $1/m^2$  ile orantılıdır.
- ☑ Aynı enerjideki elektron ve muon arasındaki oran  $(m_\mu/m_e)^2 \approx 4 \cdot 10^4$
- ☑ Kritik enerji ( $E_c$ ) = Bir parçacığın madde içinde hareket ederken iyonizasyon ve Bremsstrahlung sebebiyle olan enerji kayıplarının eşit olduğu durumdaki enerjisidir.
  - ◆ Örneğin bakır için  $E_c = 20$  MeV dir.
  - ◆ İnce bir bakır folyodan geçen 20 MeV'lik bir elektron, iyonlaşma ve Bremsstrahlung yoluyla eşit miktarda enerji kaybeder.



[radiative losses]



# İşinım Uzunluğu

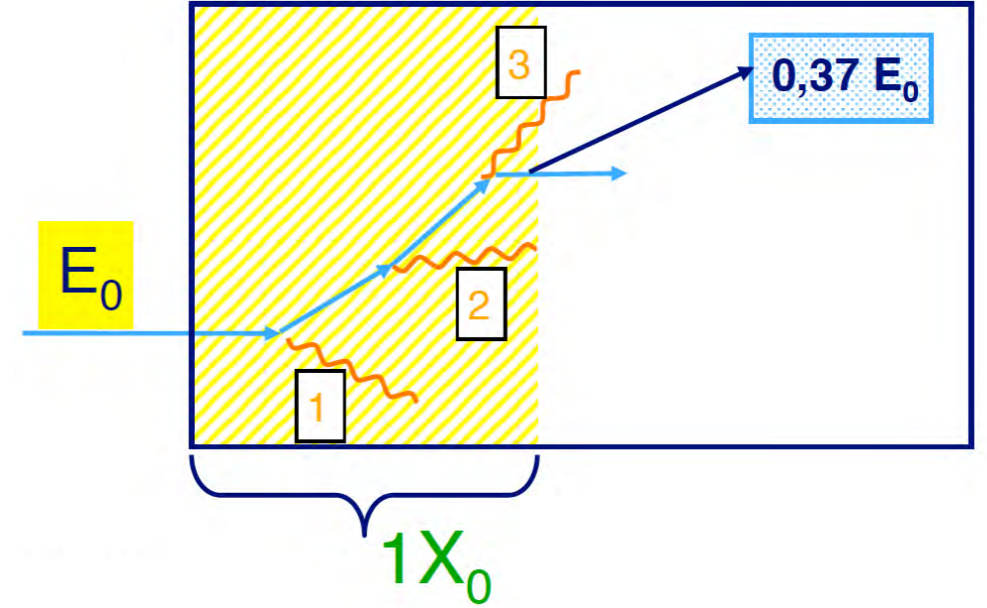
☑ Elektron için Bremsstrahlung yoluyla meydana gelen enerji kaybı:

$$-\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle_{Brems} = \frac{E}{X_0} \quad X_0 = \frac{A}{4\alpha N_A Z^2 r_e^2 \ln \frac{183}{Z^{1/3}}}$$

$$E = E_0 e^{-x/X_0}$$

☑  $X_0$  = işinım uzunluğu

☑  $X_0$  aynı zamanda bir fotonun madde içerisinde bir elektron-pozitron çiftine dönüşmesi için gereken ortalama yolun 7/9'una eşittir.

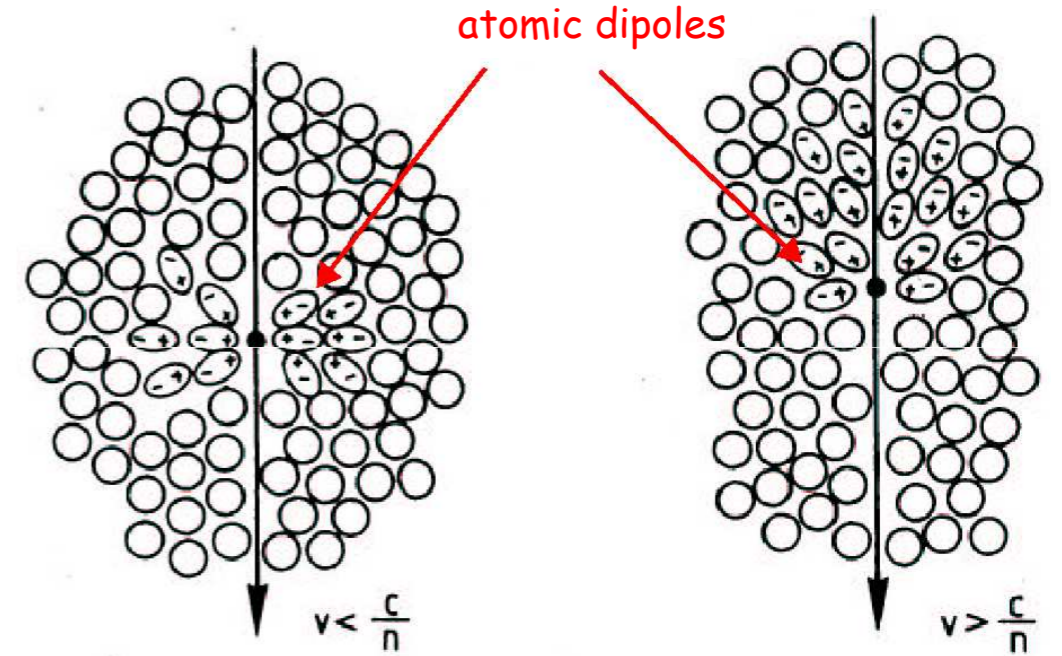


Material	Z	$X_0$ (cm)	$E_c$ (MeV)
H <sub>2</sub> Gas	1	700000	350
He	2	530000	250
Li	3	156	180
C	6	18.8	90
Fe	26	1.76	20.7
Cu	29	1.43	18.8
W	74	0.35	8.0
Pb	82	0.56	7.4
Air	7.3	30000	84
SiO <sub>2</sub>	11.2	12	57
Water	7.5	36	83



# Cherenkov Işınımı

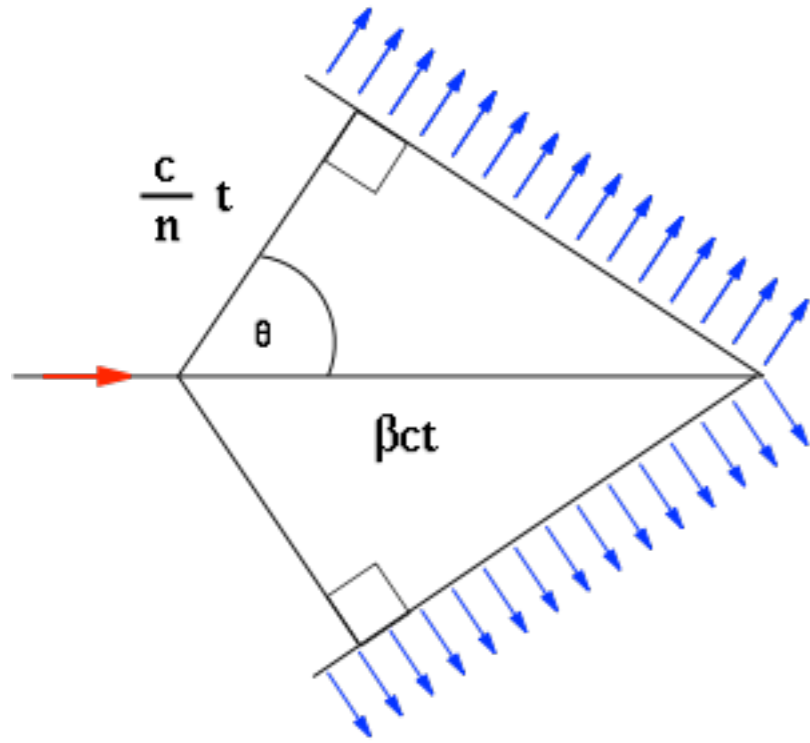
- ☑ Işık madde ortamından geçerken hızı azalır.
  - ✓ kırılma indisi katsayısı  $n$ .
  - ✓  $n = c/v$
- ☑ Yüklü bir parçacık madde ortamından geçerken bazı atomik elektronları polarize eder.
- ☑ Eğer parçacığın hızı, ışığın o ortam içindeki hızında  $c/n$  fazla ise bir elektromanyetik şok dalgası meydana gelir. Buna Cherenkov radyasyonu denir.
- ☑ Cherenkov radyasyonunda kaynaklı enerji kaybı küçüktür.
  - ✓  $dE/dx \sim 1-5\%$



$v < c/n$  dipoller  
simetrik,  
net radyasyon yok

$v > c/n$  dipoller  
asimetrik,  
Cherenkov  
radyasyonu

# Cherenkov Radyasyon Açısı



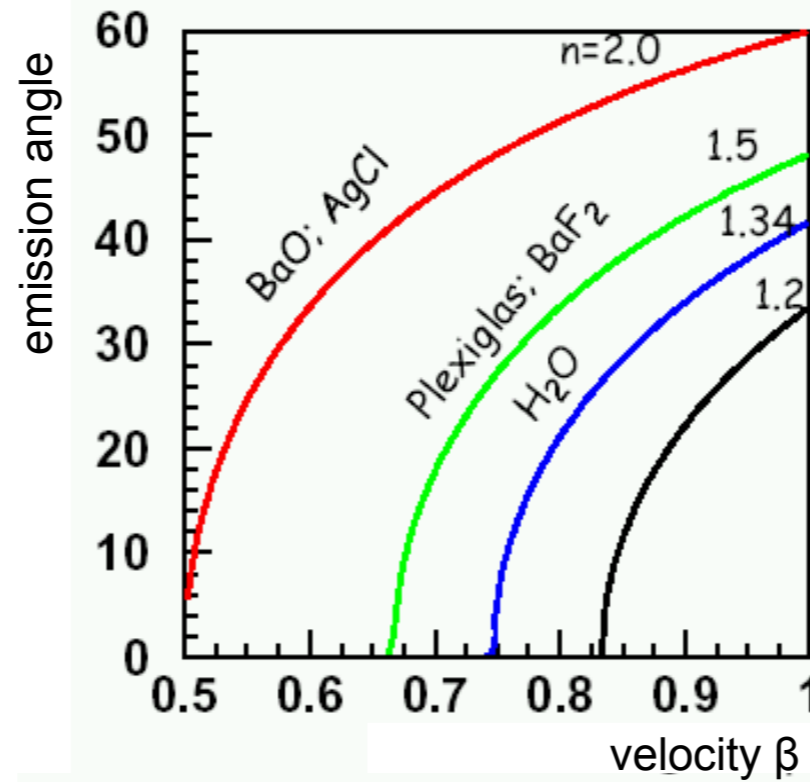
$$\cos \theta_c = \frac{c}{n \beta c} = \frac{1}{n \beta}$$

✓ Yayınlanma açısı  $\theta_c$  parçacığın hızına ve ortamın kırılma indisi katsayısına bağlıdır.

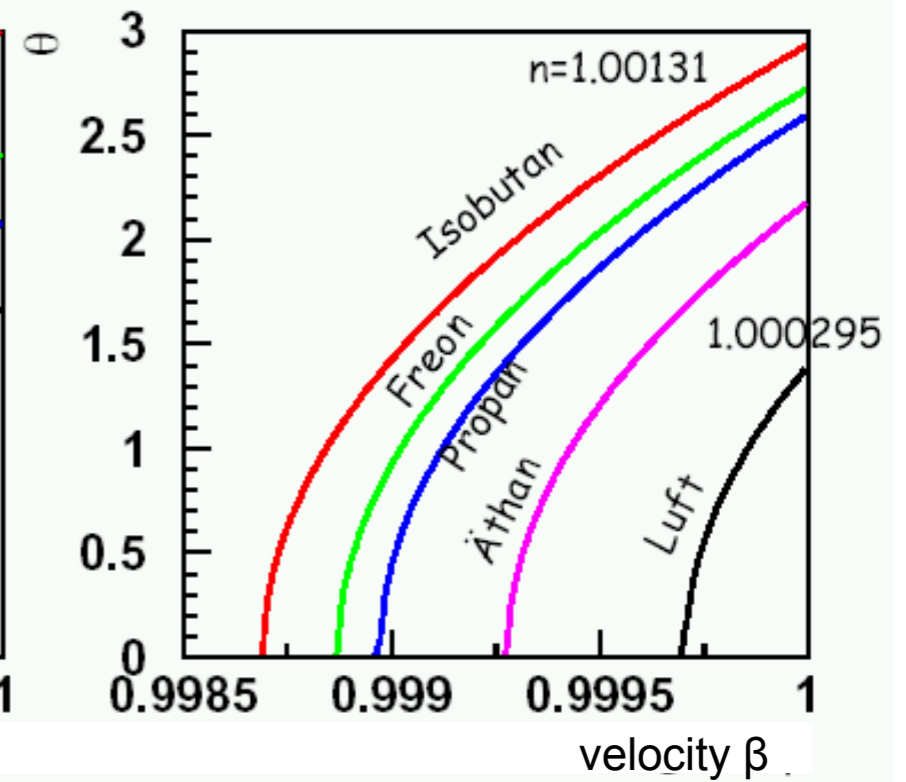
✓  $\beta_{eşik} = 1/n \Rightarrow$  açılma açısı  $\theta_c \approx 0^\circ$

✓ en fazla açılma açısı:  $\beta \approx 1 \Rightarrow \arccos \theta_c = 1/n$

Liquids, solids



Gases



	$\theta_{c, \max}$	$\sin^2(\theta_{c, \max})$
Hava	$1.38^\circ$	$5.8 \times 10^{-4}$
CO <sub>2</sub>	$1.72^\circ$	$9.0 \times 10^{-4}$
Su	$41.4^\circ$	0,44

# Cherenkov Radyasyon Enerjisi

- ☑ Cherenkov radyasyonu için eşik enerjisi.

$$E_{thresh}(n, m) = mc^2 \frac{n}{\sqrt{n^2 - 1}}$$

- ✓ Bu enerjide fotonlar parçacık ile aynı yönde yayımlanır.
- ✓ Enerji arttıkça açı meydana gelir.

- ☑  $\Delta n = n - 1 \ll 1$  için,

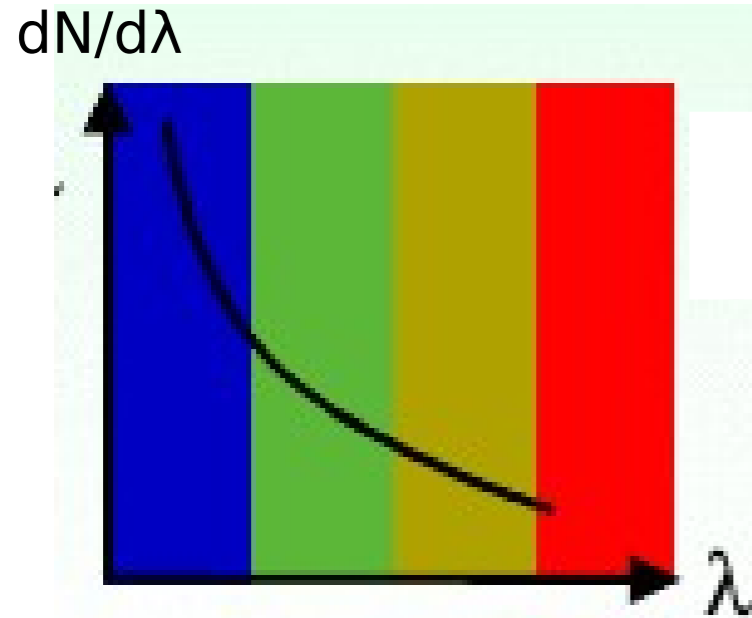
$$E_{thresh}(n, m) = \frac{mc^2}{\sqrt{2\Delta n}}$$



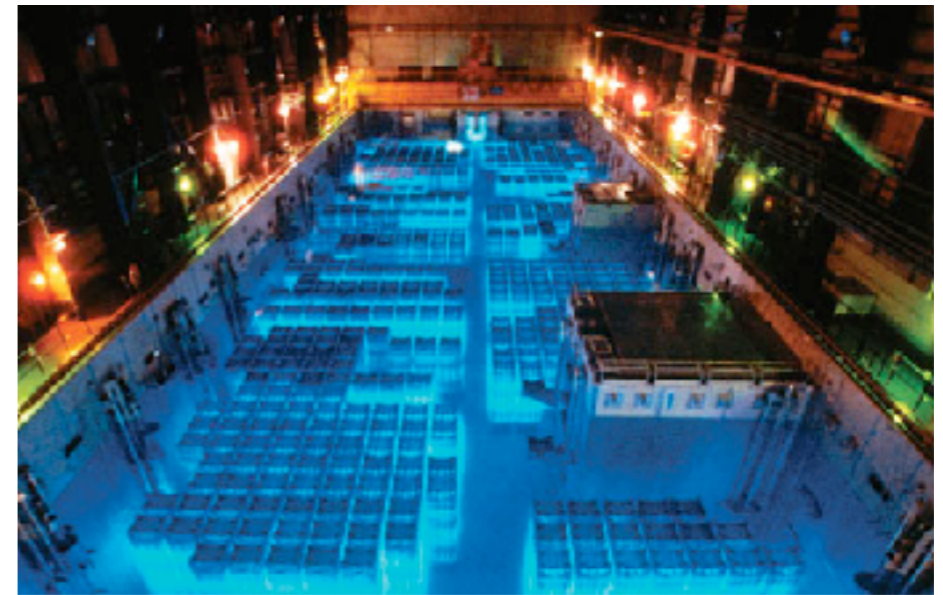
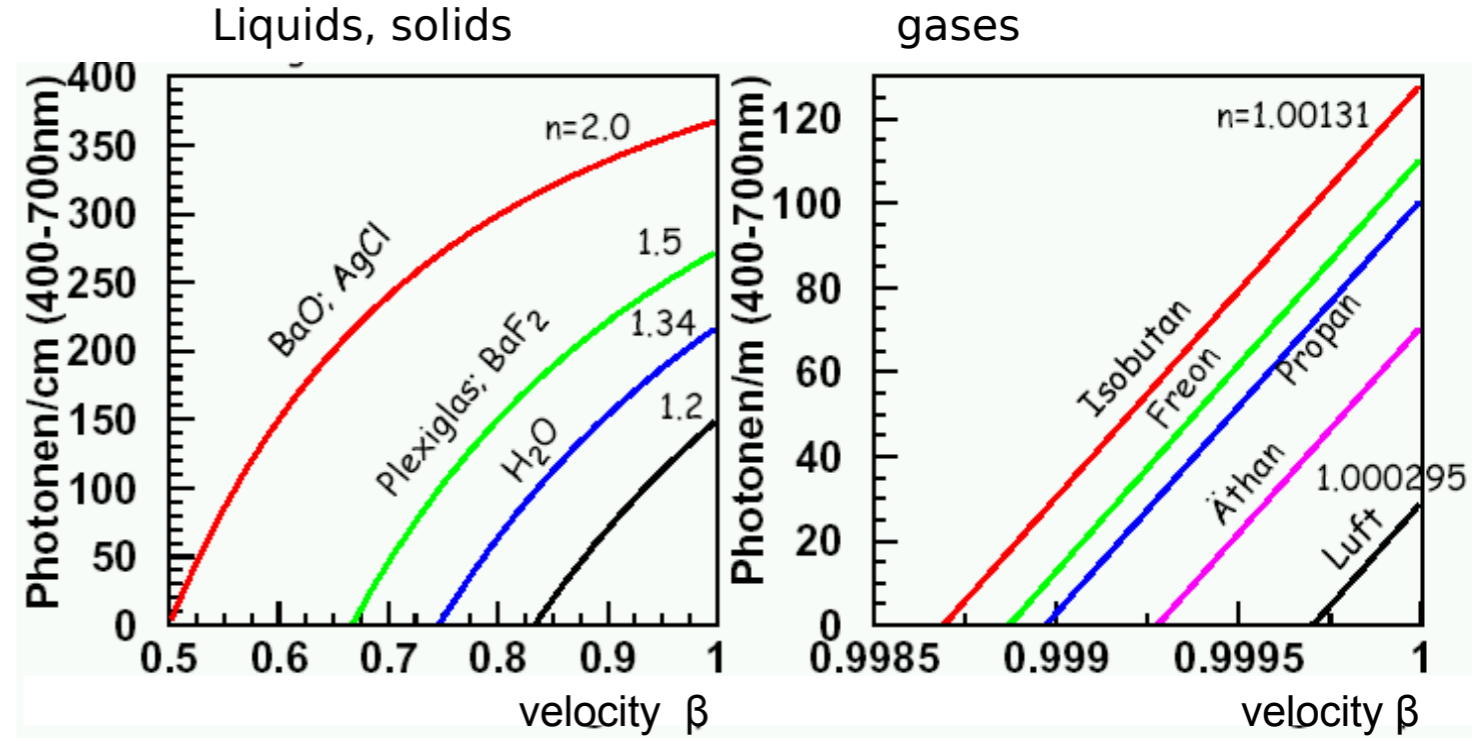
	Hava ( $\Delta n = 2.9 \times 10^{-4}$ )	CO <sub>2</sub> ( $\Delta n = 4.5 \times 10^{-4}$ )	Su ( $n = 1.33$ )
e	20.75 MeV	16.7 MeV	0.75 MeV
$\mu$	4.4 GeV	3.52 GeV	159 MeV
$\pi$	5.6 GeV	4.5 GeV	204 MeV
p	39 GeV	31 GeV	1.4 GeV

# Cherenkov Radyasyon Fotonları

$$\frac{d^2 N}{dE dx} \approx 370 \sin^2 \theta_c(E) eV^{-1} cm^{-1}$$



Yayımlanan foton sayısı  $\sim 1/\lambda^2$   
görünebilir ve morötesi ışık



# Geçiş Işınması

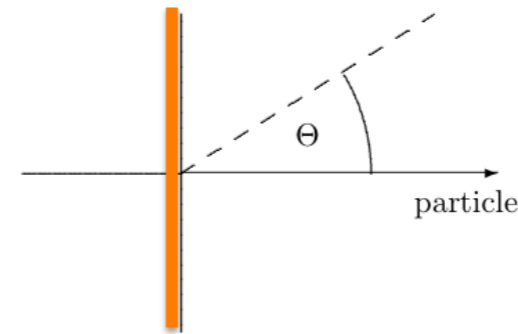
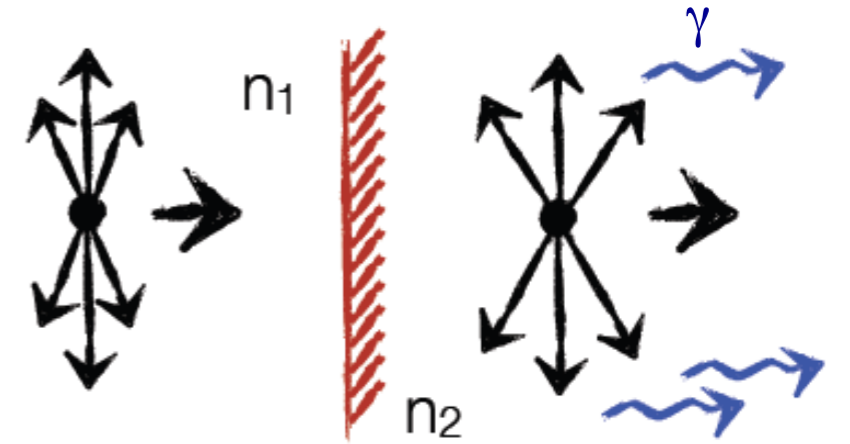
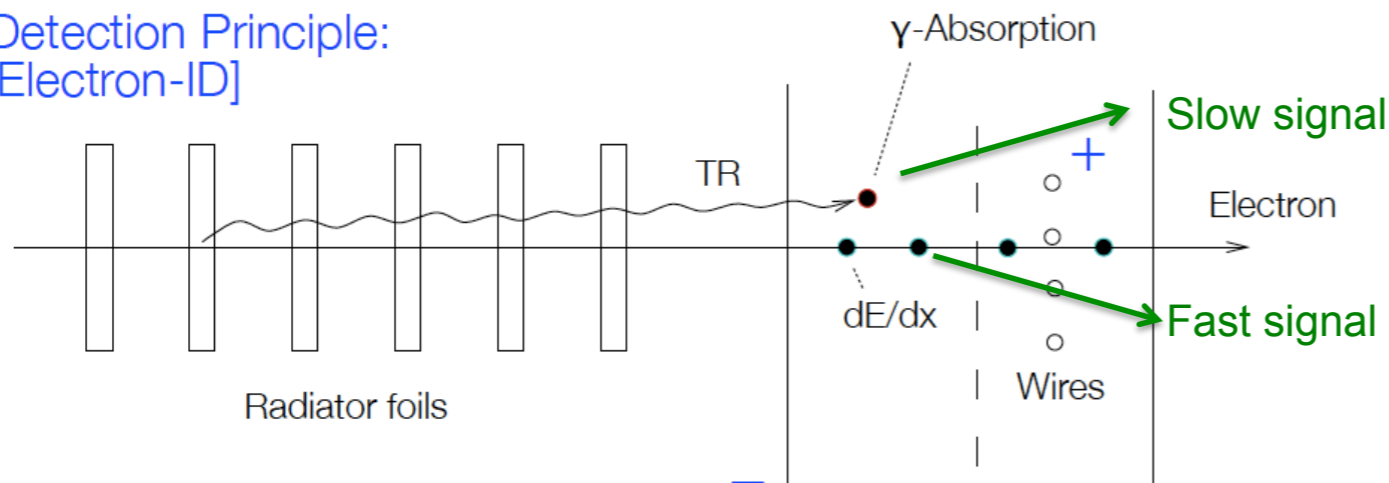
☑ Geçiş ışınması yüksek enerjili yüklü bir parçacığın kırılma indisi (dielektrik sabiti) farklı iki ortam arasında yaptığı geçiş sırasında ortaya çıkar.

◆ Elektrik alanının yeniden ayarlanması

☑ Tek bir sınırdan yayımlanan toplam enerji

$$S = \frac{1}{3} \alpha z^2 \gamma \hbar \omega_p \quad (\hbar \omega_p \approx 20 eV)$$

Detection Principle:  
[Electron-ID]



$$\theta = 1/\gamma$$

$\gamma$ , geçiş ışınması enerjisi

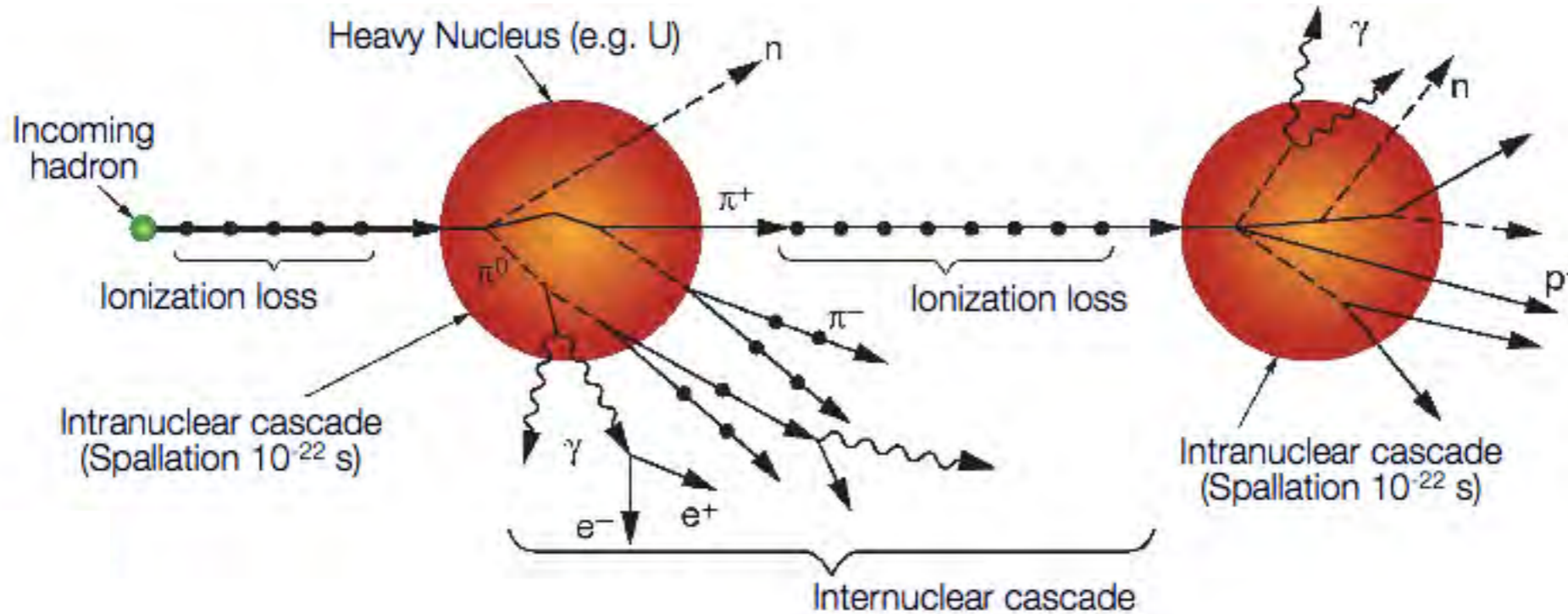
$\gamma > 1000$  efektif değer

☑ Düşük Z li geçiş materyalleri ve yüksek Z li gaz dedektörü beraber kullanılır.

☑  $E > 20$  keV x-ışınları radyatör katmanlarından sorulmadan geçebilir.

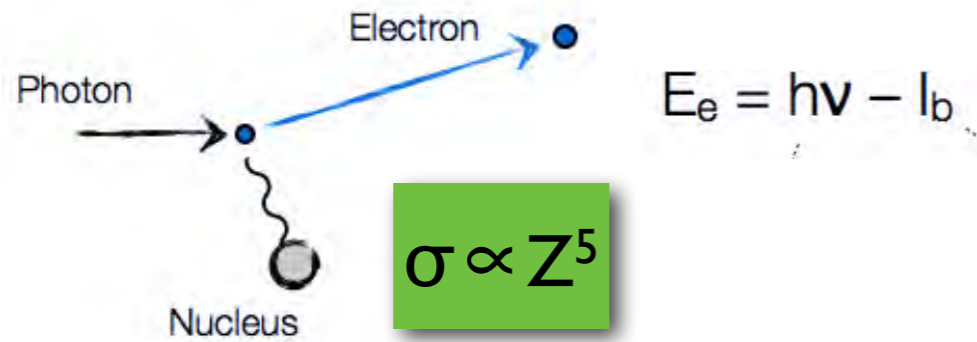
# Hadronik Etkileşim

- ☑ Yüksek enerjili hadronları durdurmak için baskın süreçtir.
- ☑ Parçacık çekirdek ile etkileşir.
- ☑ Hadronik bir duş oluşturarak tüm enerji depolanır.
- ☑ Detektör yapısı aktif ve pasif kısımlardan meydana gelir.
  - ◆ Ağır bir metal + sintilatör

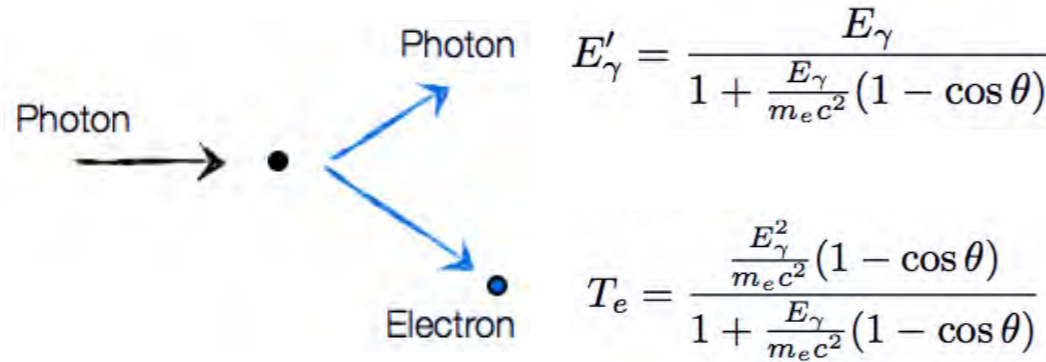


# Foton Etkileşmesi

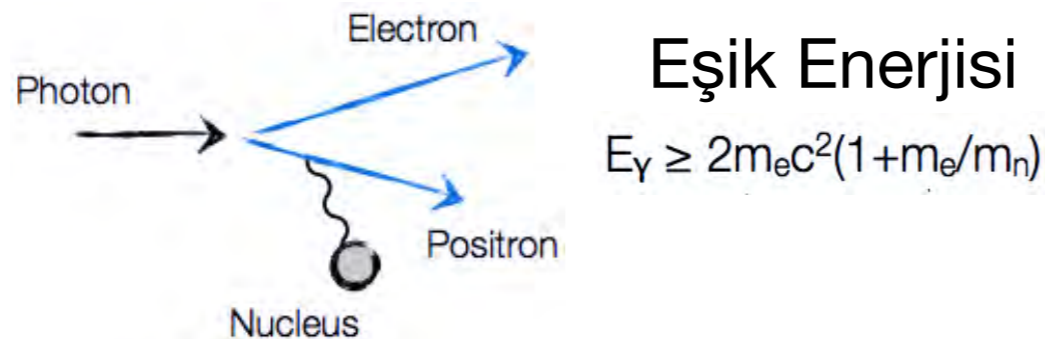
☑ Fotoelektrik etkisi, Compton saçılması, çift oluşumu



Photoelectric effect



Compton effect



Pair production



# Nötron Etkileşimleri

- ☑ Yüksüzdür. Geçtikleri ortamı direkt iyonize etmezler.
- ☑ Çekirdek ile etkileşim sonucu ortaya çıkan ikincil radyasyonlar ile belirlenebilir.
- ☑ Temelde dört farklı enerji bölgesi vardı
  - ◆ Yavaş nötronlar: 0 - 0.4 eV
    - ▶ Ultra soğuk, soğuk, termal ve sıcak
  - ◆ Epitermal nötronlar: 200 keV'e kadar
  - ◆ Hızlı nötronlar: 200 keV-20 MeV
  - ◆ Yüksek enerji: 20 MeV den büyük
- ☑ Elastik saçılma, inelastik saçılma, nötron yakalama



# Nötron Elastik Saçılma

☑  $n + X \rightarrow n + X$

☑ Çekirdek ile esnek çarpışarak enerji kaybederler. Kayıp enerji optik foton olarak açığa çıkar.

☑ Esnek çarpışma başına enerjideki logaritmik azalma

$$\xi = \ln \frac{E_0}{E} = 1 + \frac{(A-1)^2}{2A} \ln \left( \frac{A-1}{A+1} \right) \quad n_{saçılma} = \frac{\ln(E_0/E)}{\xi}$$

☑ A atom numarasıdır. Hidrojen en iyi nötron durdurucusudur.

☑ Hızlı bir nötronun (1 MeV) termal nötrona (0.025 eV) dönüşmesi için

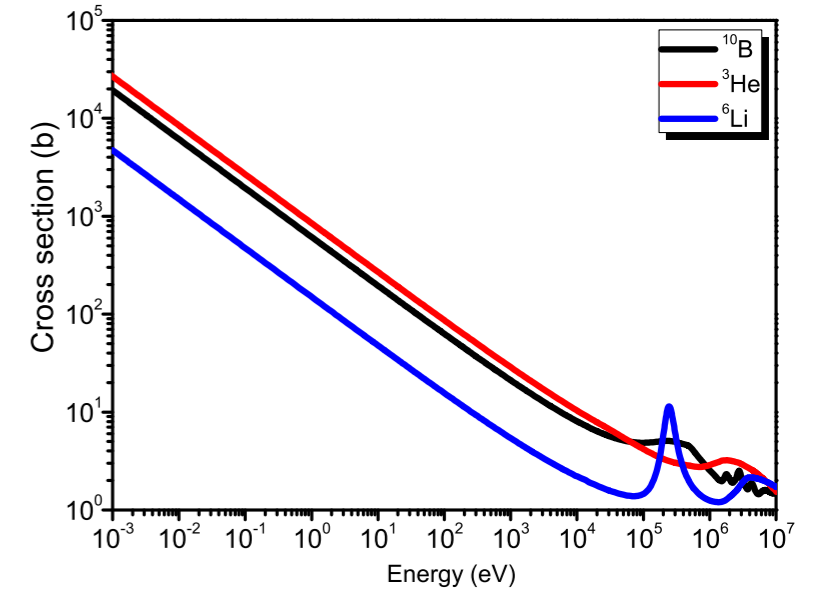
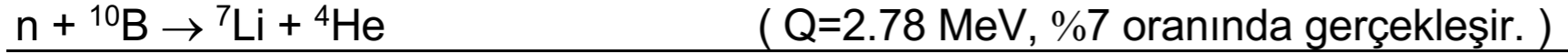
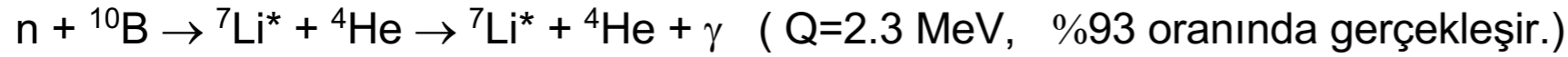
☑ Hidrojen için 18 kez saçılma

☑ Karbon için 200 kez saçılma

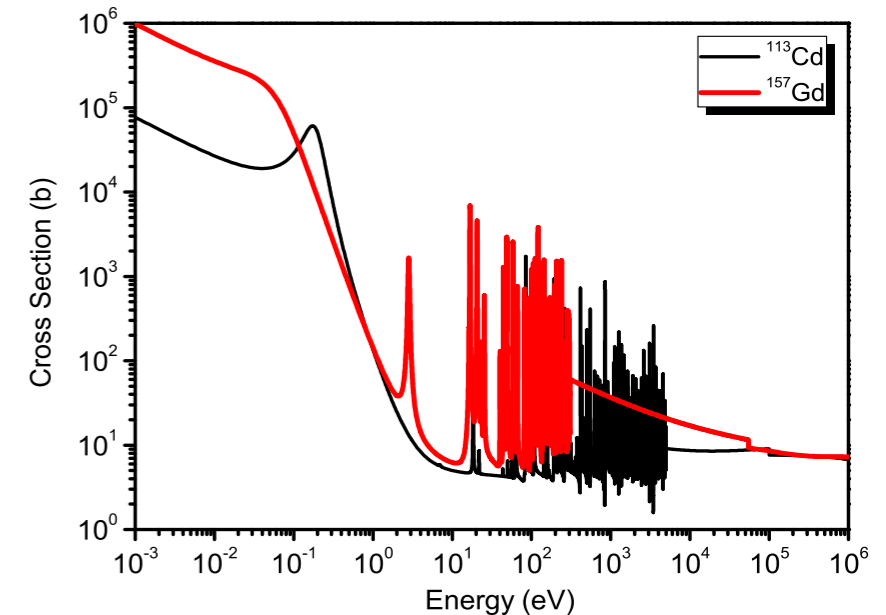
☑ Demir için 500 kez saçılma

# Nötron İnelastik Saçılma ve Nötron Yakalama

## İnelastik Saçılma



## Nötron Yakalama



# Nötrino Etkileşimleri

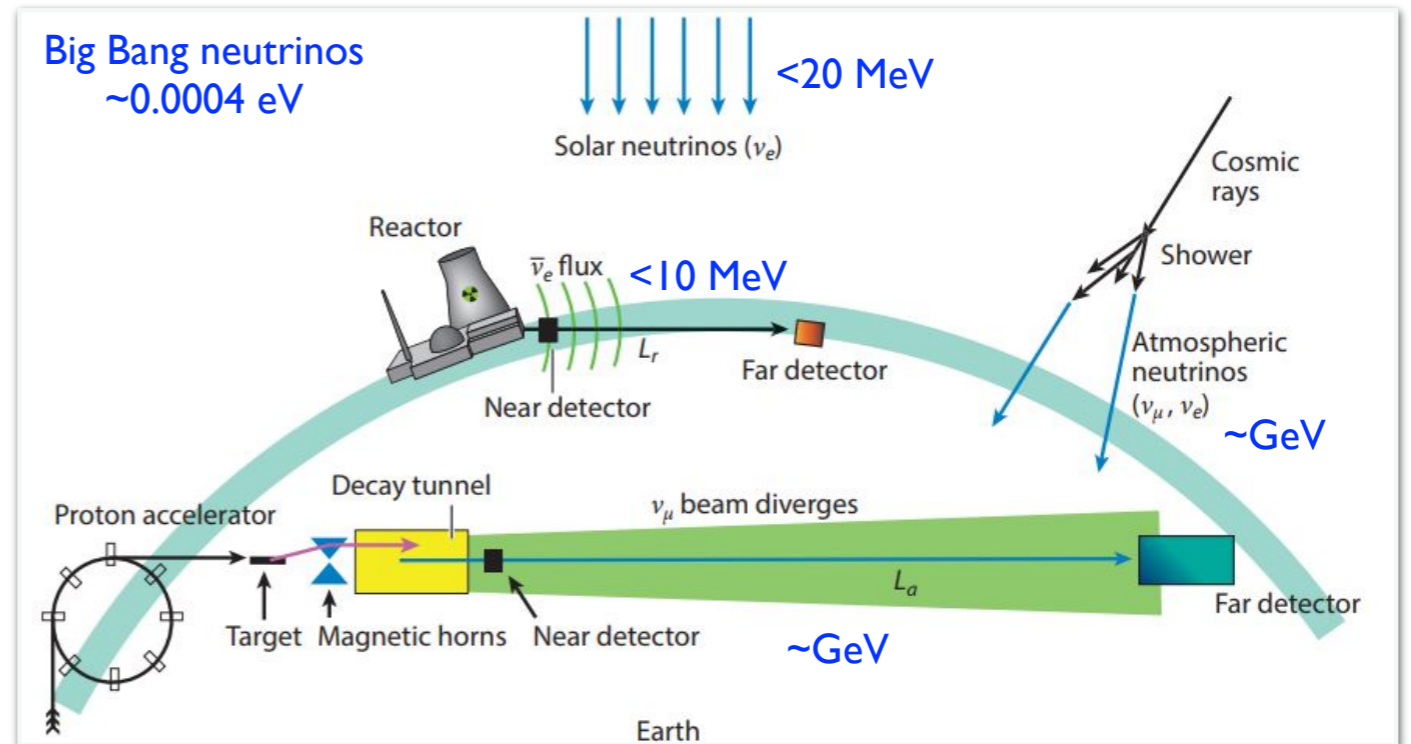
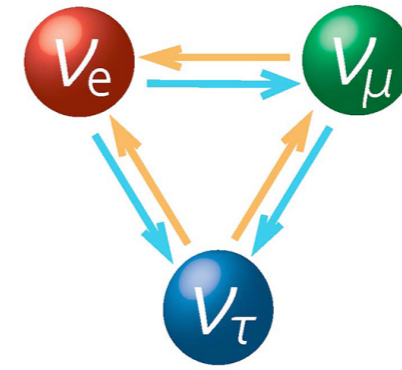
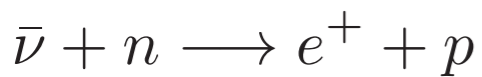
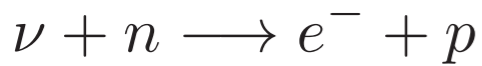
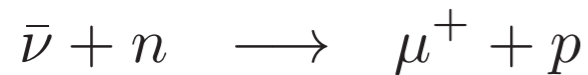
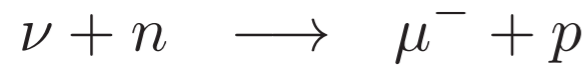
☑ Nötrinolar neredeyse kütsesiz, temel ve zayıf etkileşen parçacıklardır.

☑ Üç tür nötrino vardır.

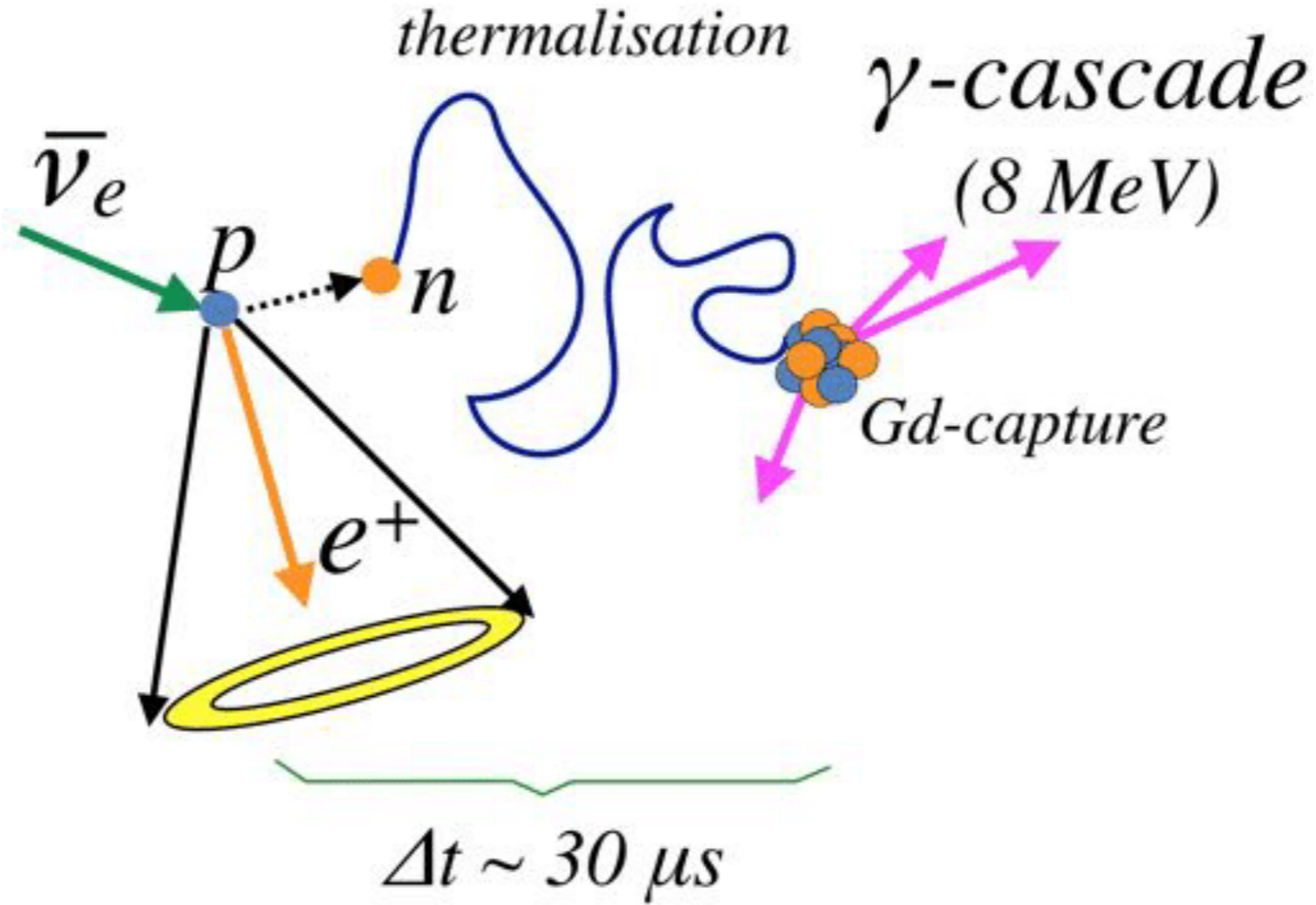
◆ Nötrino osilasyonu

☑ Etkileşim tesir kesiti çok düşük.

☑ Nötrino etkileşimleri:

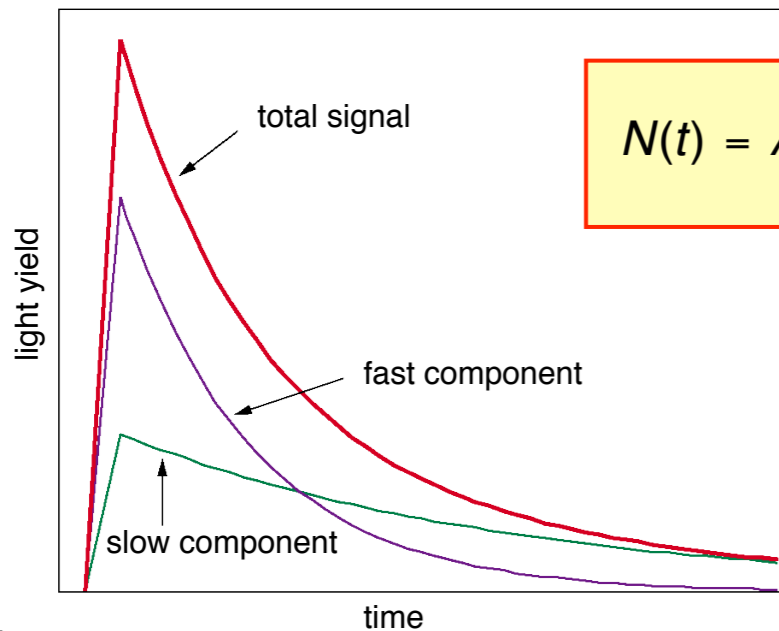
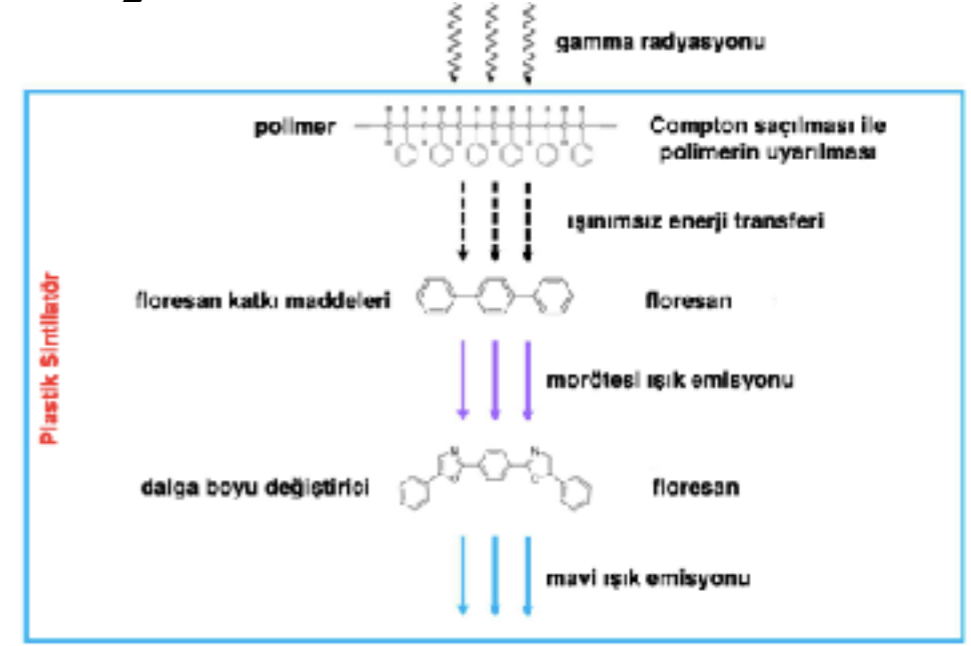


# Reaktör Nötrinosu Etkileşimi

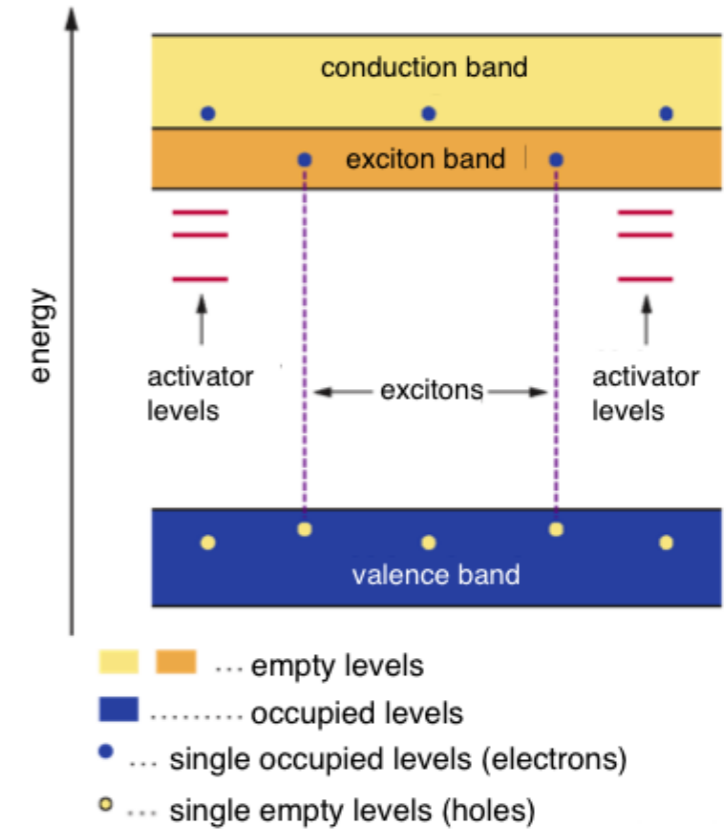


# Sintilasyon (Parıldama)

- ☑ Sintilasyon, atomların ve moleküllerin radyasyon ile uyarılmasının ardından fotonların yayımlanmasıdır.
- ☑ Sintilasyon yapan malzemeden yapılan detektörlere sintilatörler denir.
  - ◆ İnorganik kristal, organik kristal, organik sıvı, plastik, cam
  - ◆ Hızlı tepki süresi, hassas enerji ölçümü, ucuz ve güvenilir



$$N(t) = A \cdot \exp\left(\frac{-t}{\tau_f}\right) + B \cdot \exp\left(\frac{-t}{\tau_s}\right)$$



# Sintilatörler

Name	Formula	Density (g/mm <sup>3</sup> )	Z <sub>eff</sub>	Light yield (ph/MeV)	Primary Decay time (ns)	Emission (nm)
LSO:Ce	Lu <sub>2</sub> SiO <sub>5</sub> :Ce	7.40	66	35,000	32	420
GSO:Ce	Gd <sub>2</sub> SiO <sub>5</sub> :Ce	6.71	59	20,000	60	440
LPS:Ce	Lu <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>7</sub> :Ce	6.2	64	23,000	30	380
GPS:Ce	Gd <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>7</sub> :Ce	5.5	58	30,000	46	380
BGO	Bi <sub>4</sub> Ge <sub>3</sub> O <sub>12</sub>	7.13	74	8,000	300	480
YAP:Ce	YAlO <sub>3</sub> :Ce	5.35	34	20,000	24	365
LuYAG:Pr	Lu <sub>2.25</sub> Y <sub>7.75</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub> :Ce	6.20	60	33,000	20	310
GGAG:Ce	Gd <sub>3</sub> Ga <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>12</sub> :Ce	6.5	54	47,000	51	540

PROPERTIES	EJ-200	EJ-204	EJ-208	EJ-212
Light Output (% Anthracene)	64	68	60	65
Scintillation Efficiency (photons/1 MeV e <sup>-</sup> )	10,000	10,400	9,200	10,000
Wavelength of Maximum Emission (nm)	425	408	435	423
Light Attenuation Length (cm)	380	160	400	250
Rise Time (ns)	0.9	0.7	1.0	0.9
Decay Time (ns)	2.1	1.8	3.3	2.4
Pulse Width, FWHM (ns)	2.5	2.2	4.2	2.7
H Atoms per cm <sup>3</sup> (×10 <sup>22</sup> )	5.17	5.15	5.17	5.17
C Atoms per cm <sup>3</sup> (×10 <sup>22</sup> )	4.69	4.68	4.69	4.69
Electrons per cm <sup>3</sup> (×10 <sup>23</sup> )	3.33	3.33	3.33	3.33
Density (g/cm <sup>3</sup> )	1.023	1.023	1.023	1.023

## ☑ İnorganik sintilatörlerde

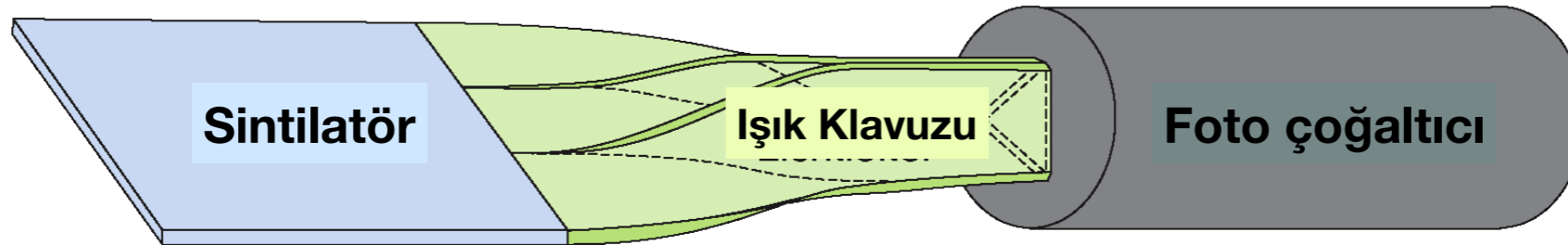
- ◆ Işık çıktısı yüksek enerjili parçacıkların enerji depozisyonu ile neredeyse lineerdir.
- ◆ Yüksek Z ile gama detektörü olarak sıklıkla kullanılır
- ◆ Üretimi zor ve pahalıdır.

## ☑ Organik sintilatörlerde

- ◆ Plastik, kristal, sıvı
- ◆ Hızlı tepki zamanı
- ◆ Üretimi kolay, esnek ve ucuz

# Basit Detektör Yapısı

- ☑ Basit bir detektör sintilatör, ışık klavuzu ve bir fotoçoğaltıcıdan oluşur.
- ◆ Sintilatör: Radyasyonu görünür ışığa çevirir. Plastik sintilatörler, inorganik sintilatörler, cam sintilatörler, sıvı sintilatörler, ..
- ◆ Işık Klavuzu: Görünür ışığı fotoçoğaltıcıya taşır. Işık klavuzu, dalga boyu kaydırıcı, fiberler, ..
- ◆ Fotoçoğaltıcı: Görünür ışığı elektrik akımına çevirir. Fotoçoğaltıcı tüp, silikon fotoçoğaltıcı, hibrit foto diyot, ...

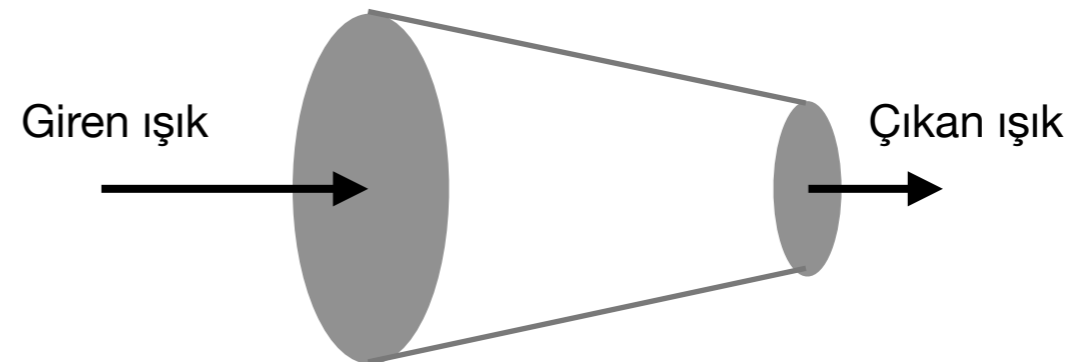


# Işık Klavuzu

- ☑ Çoğunlukla sintilatörler fotoçoğaltıcılara direkt olarak bağlanamaz.
  - ◆ Yüksek manyetik alan, biçimsel sınırlamalar, vs.
- ☑ Sinlatörleri fotoçoğaltıcılara bağlar.
- ☑ Maksimum ışık transferi çıktı ile girdi alanlarının oranlarıyla orantılıdır.
- ☑ PMMA (pleksi) en yaygın kullanılan materyaldir.



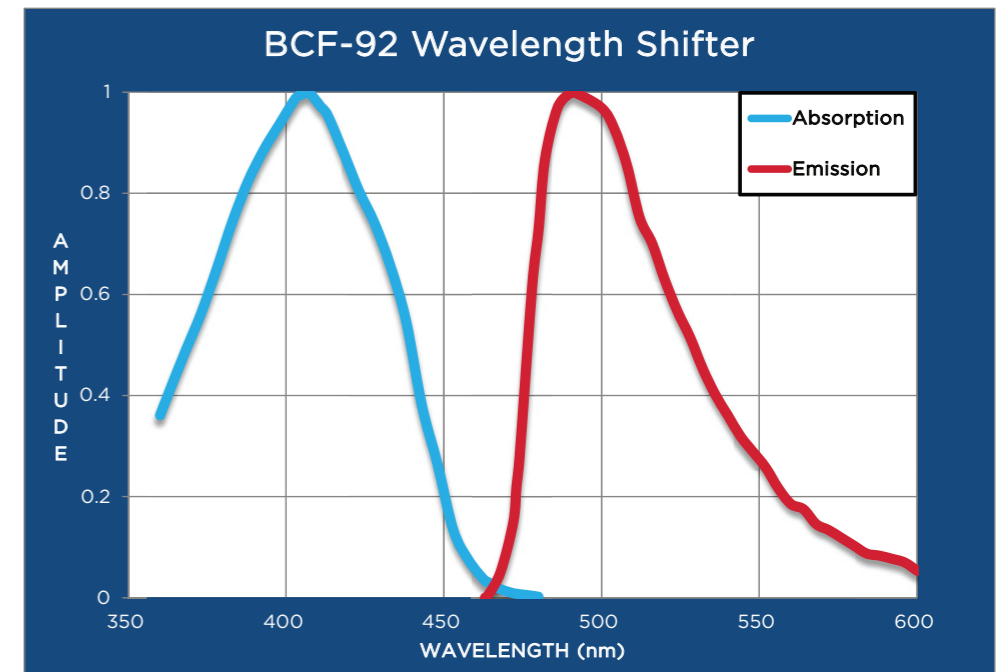
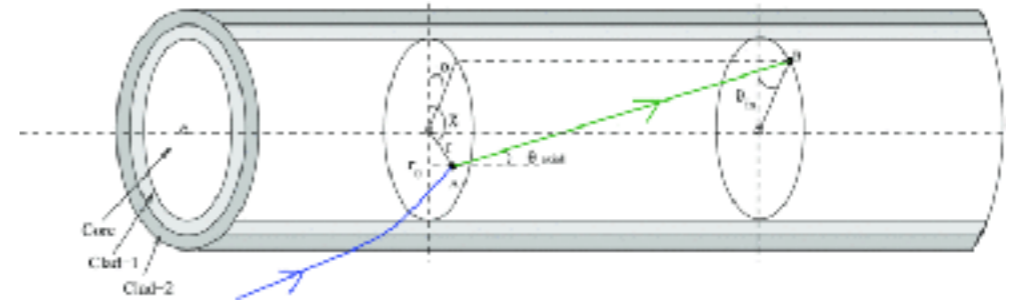
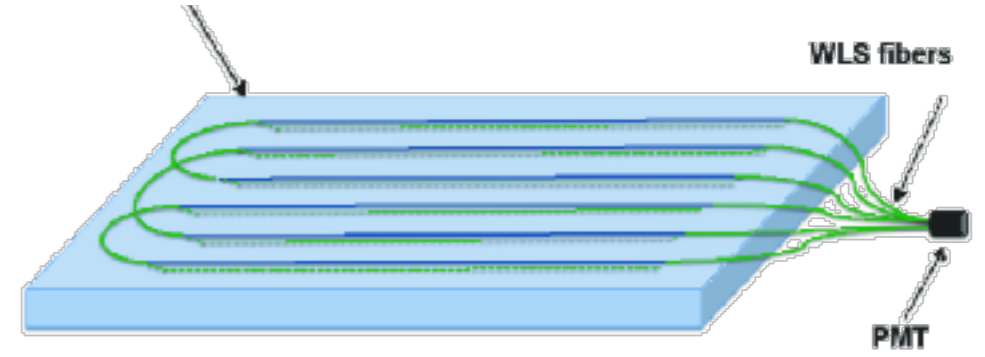
$$\frac{I_{out}}{I_{in}} \leq \frac{A_{out}}{A_{in}}$$





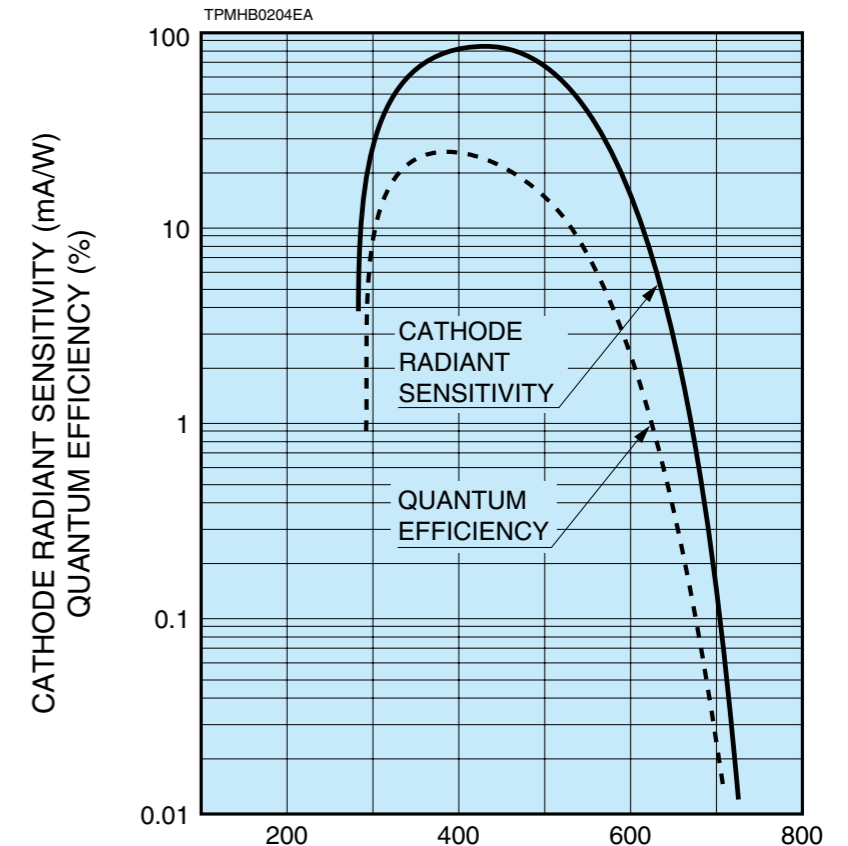
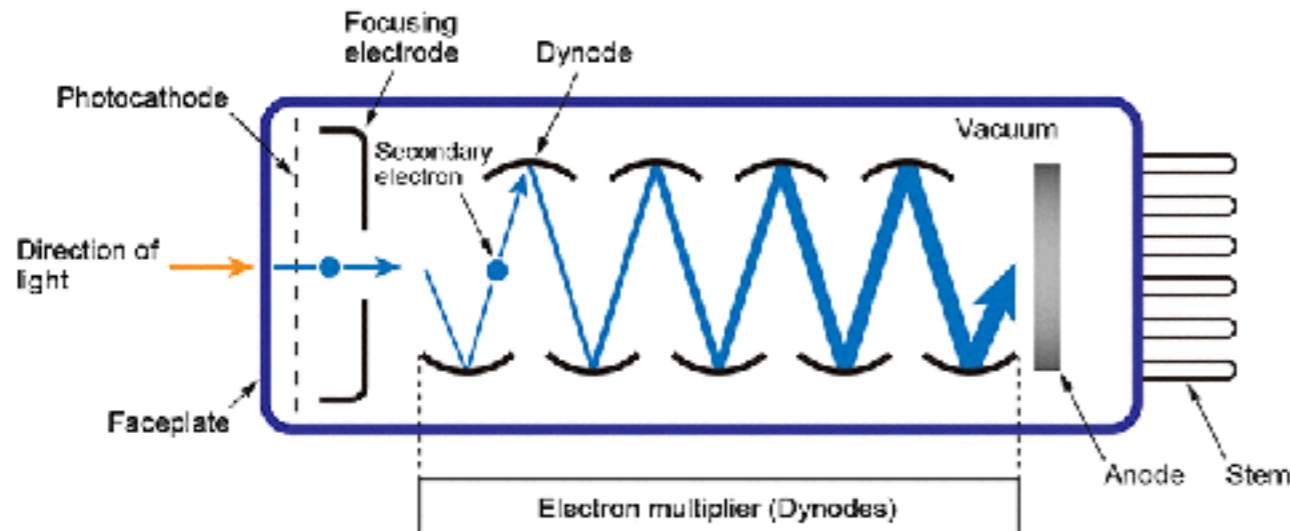
# Dalga Boyu Kaydırıcı Fiberler (WLS)

- ☑ Sintilatörlerden fotoğöçaltıcıya ışığı aktarmak için kullanılır.
  - ◆ Karmaşık yapıli dedektörlerde.
- ☑ Işığın dalga boyunu değiştirir.
  - ◆  $h\nu \rightarrow h\nu'$
- ☑ Bir çekirdek ve etrafını saran iki (veya bir tane) katmanlı yapıdır.
- ☑ Işık yaklama verimliliği %2-%3 civarındadır.



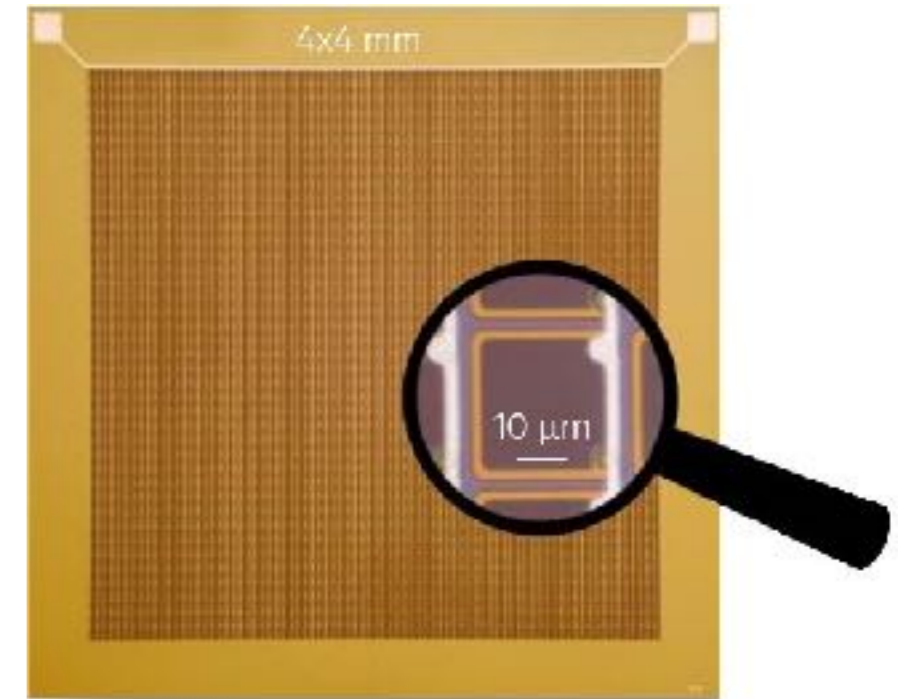
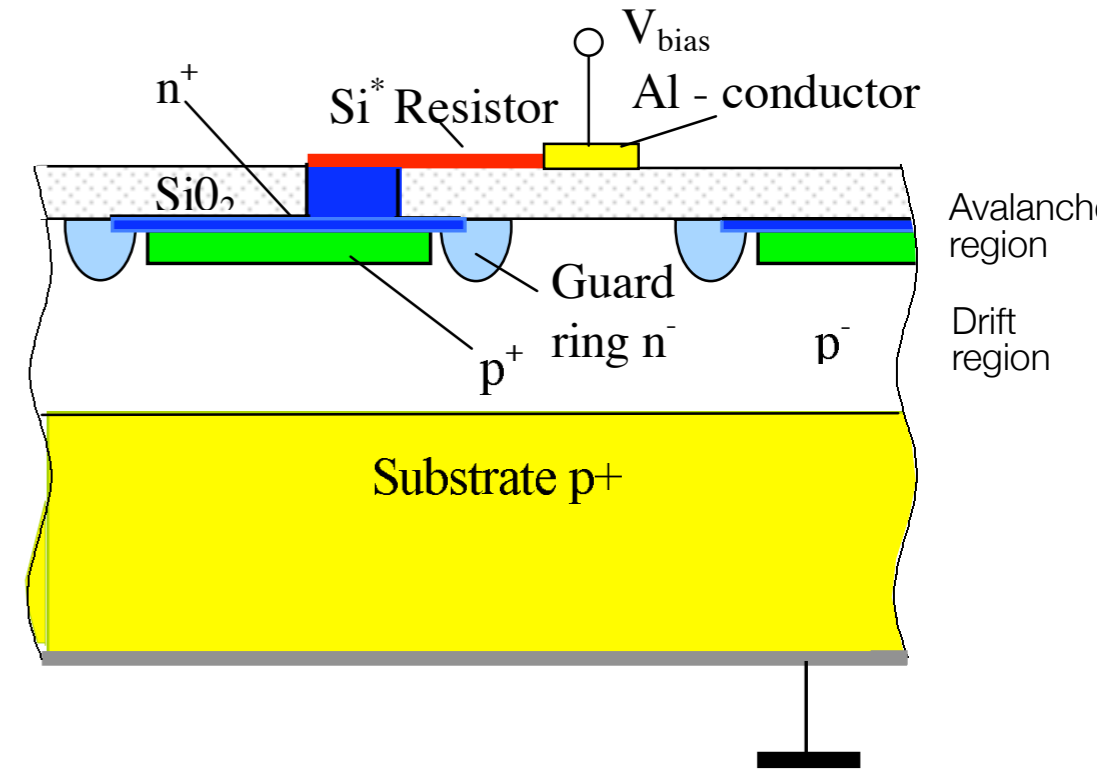
# Fotoçoğaltıcı Tüp (PMT)

- ✓ Işığı elektrik akımına çevirir.
- ◆ Katoda çarpan ışık fotoelektrik etki ile elektron koparır.
- ◆ Dinotlara çarpan elektronlarda ikinci elektronlar üretir.
- ◆ En son anoda bir elektron duşu ulaşır.
- ✓ Çeşitli şekil ve boyutlarda olabilirler.
- ✓ Yüksek voltaj gerektirir (1200-1700 V)
- ✓ Kazanç, kuantum verimlilik, sinyal zamanı, karanlık akım önemli parametrelerdir.

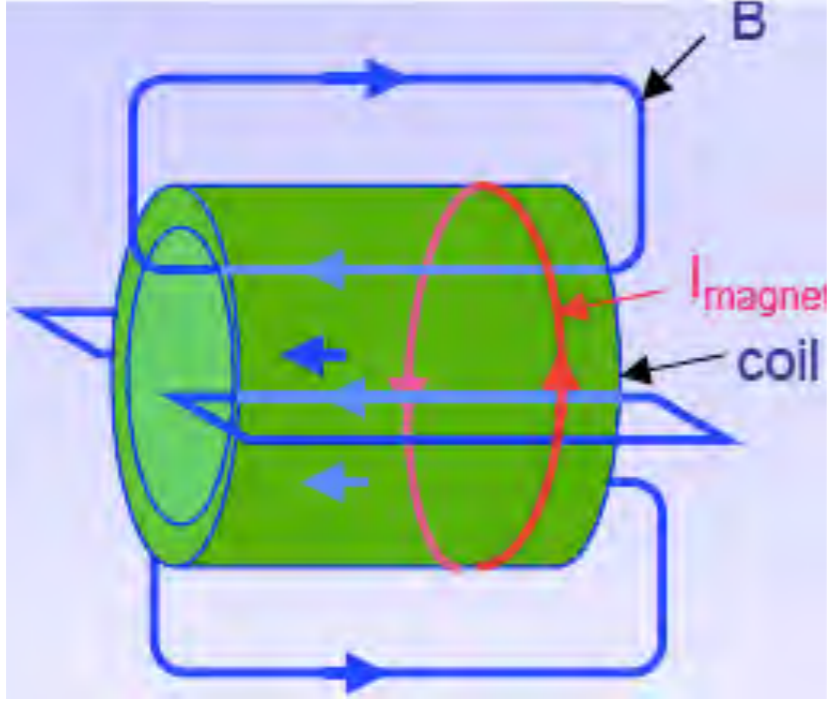


# Silikon Fotoçoğaltıcı

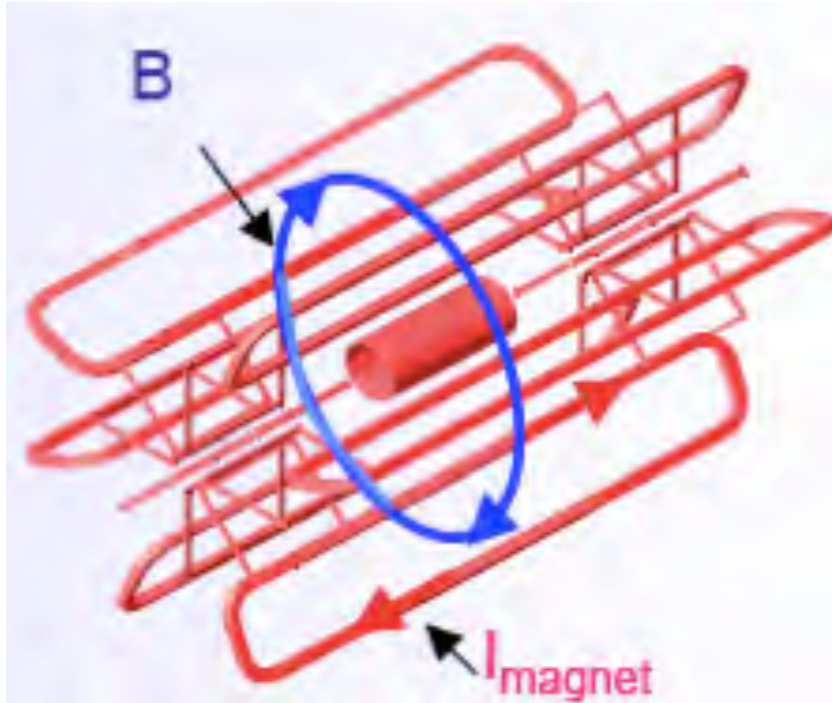
- ☑ Işığın elektrik akımına çevirir.
- ◆ Yarı iletken
- ☑ Piksellerden meydana gelir.
- ◆ 1000 piksel/mm<sup>2</sup>
- ☑ Yüksek kazanç, hızlı zaman tepkisi
- ☑ Düşük çalışma voltajı
- ☑ Manyetik alandan etkilenmez.
- ☑ Küçük yüzey alanı.



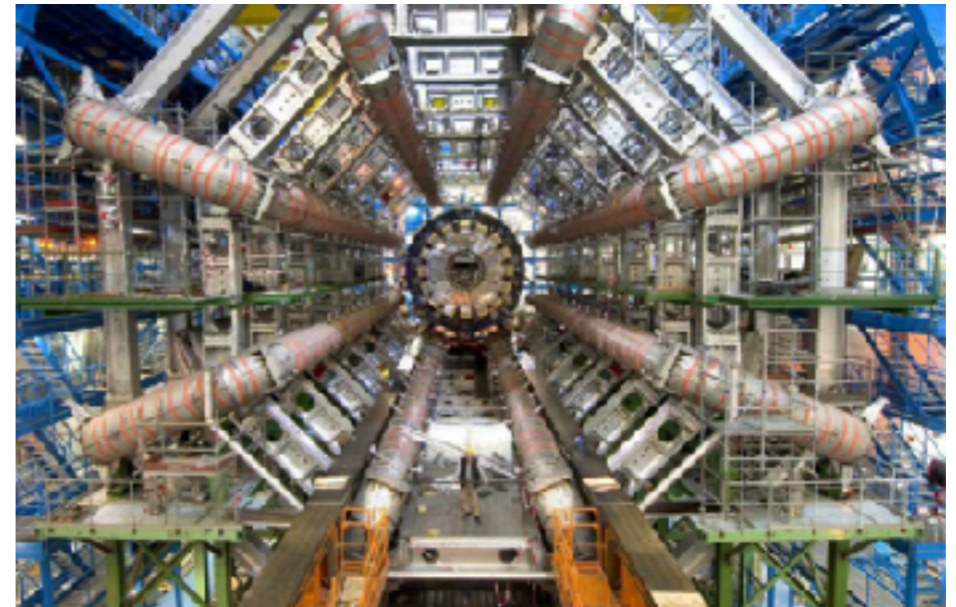
# Manyetik Alan



Compact Muon Solenoid



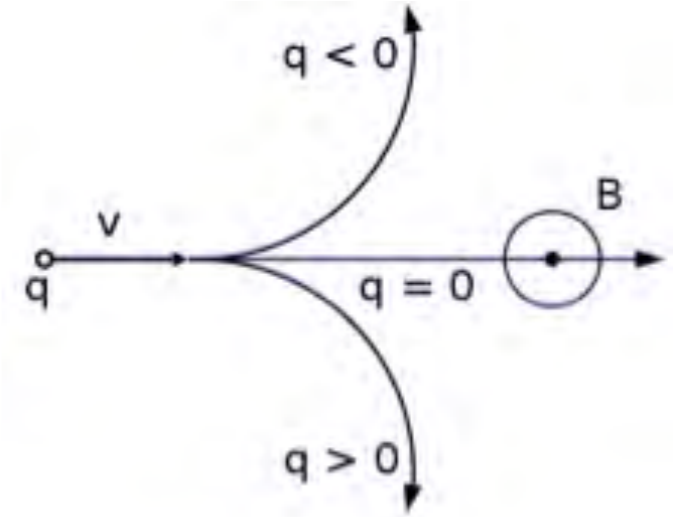
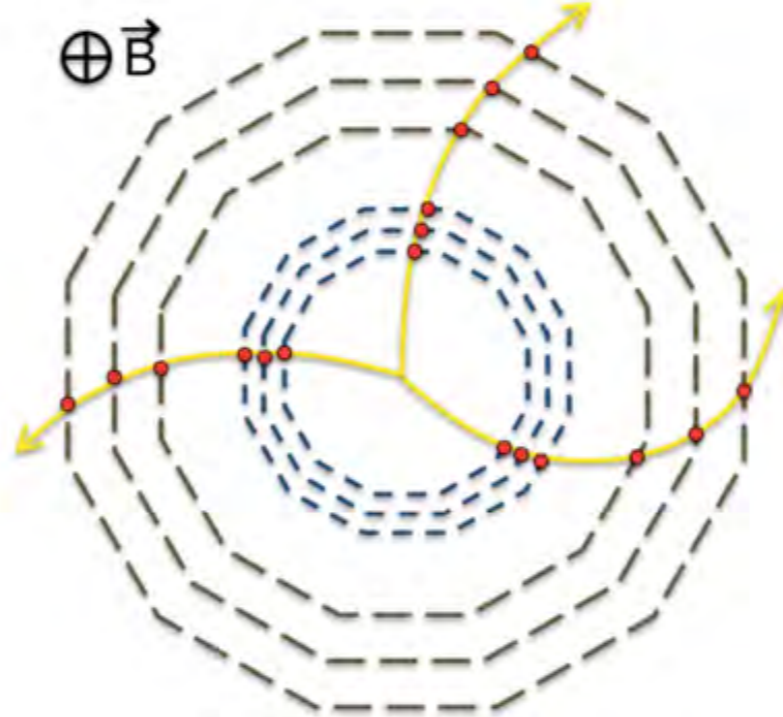
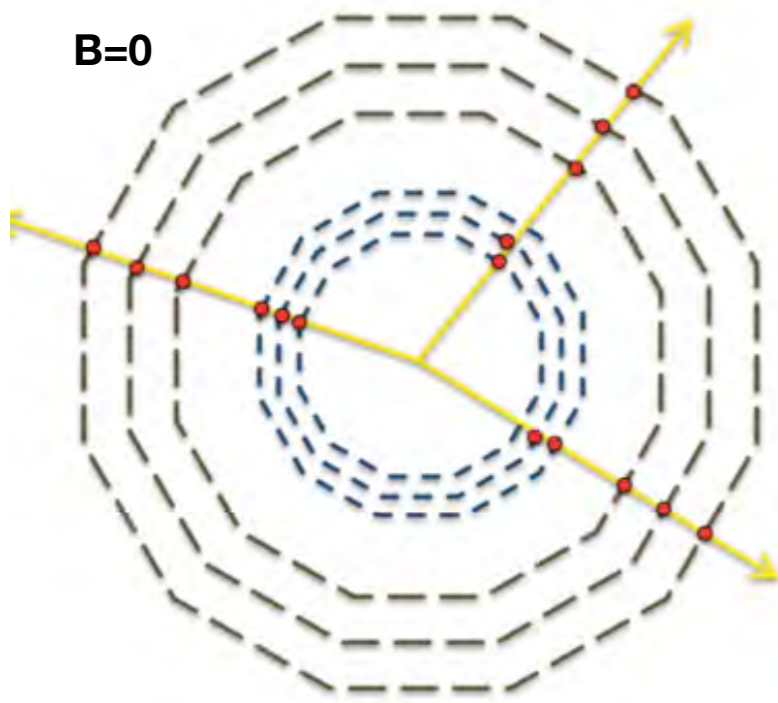
A Toroidal LHC Apparatus



# Manyetik Alan

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B}$$

*Electric force*
*Magnetic force*



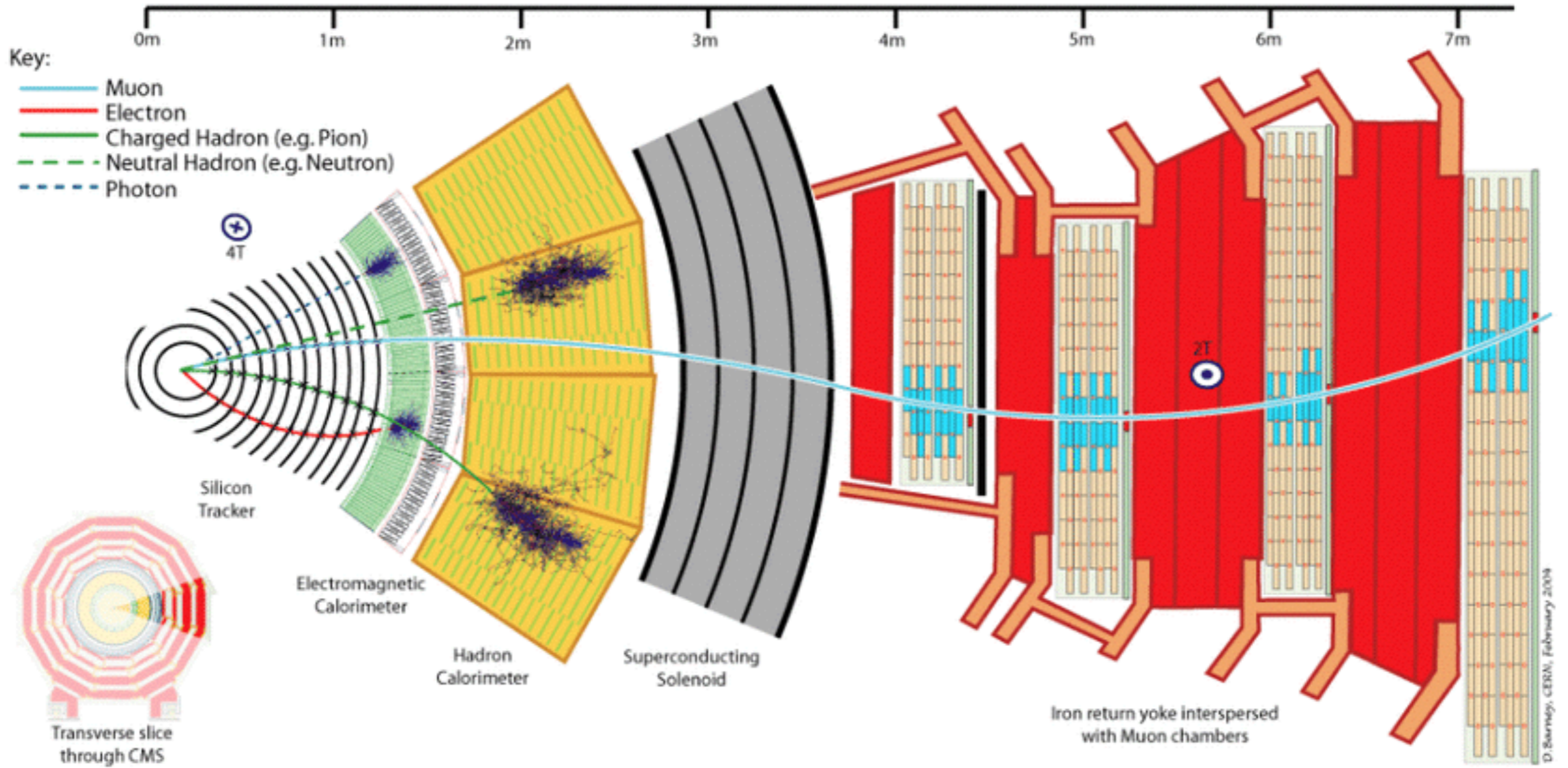
CMS deneyi için bakarsak:

Çarpışma noktasının elektromanyetik detektöre uzaklığı 1.3 m  
Manyetik alan 4 T

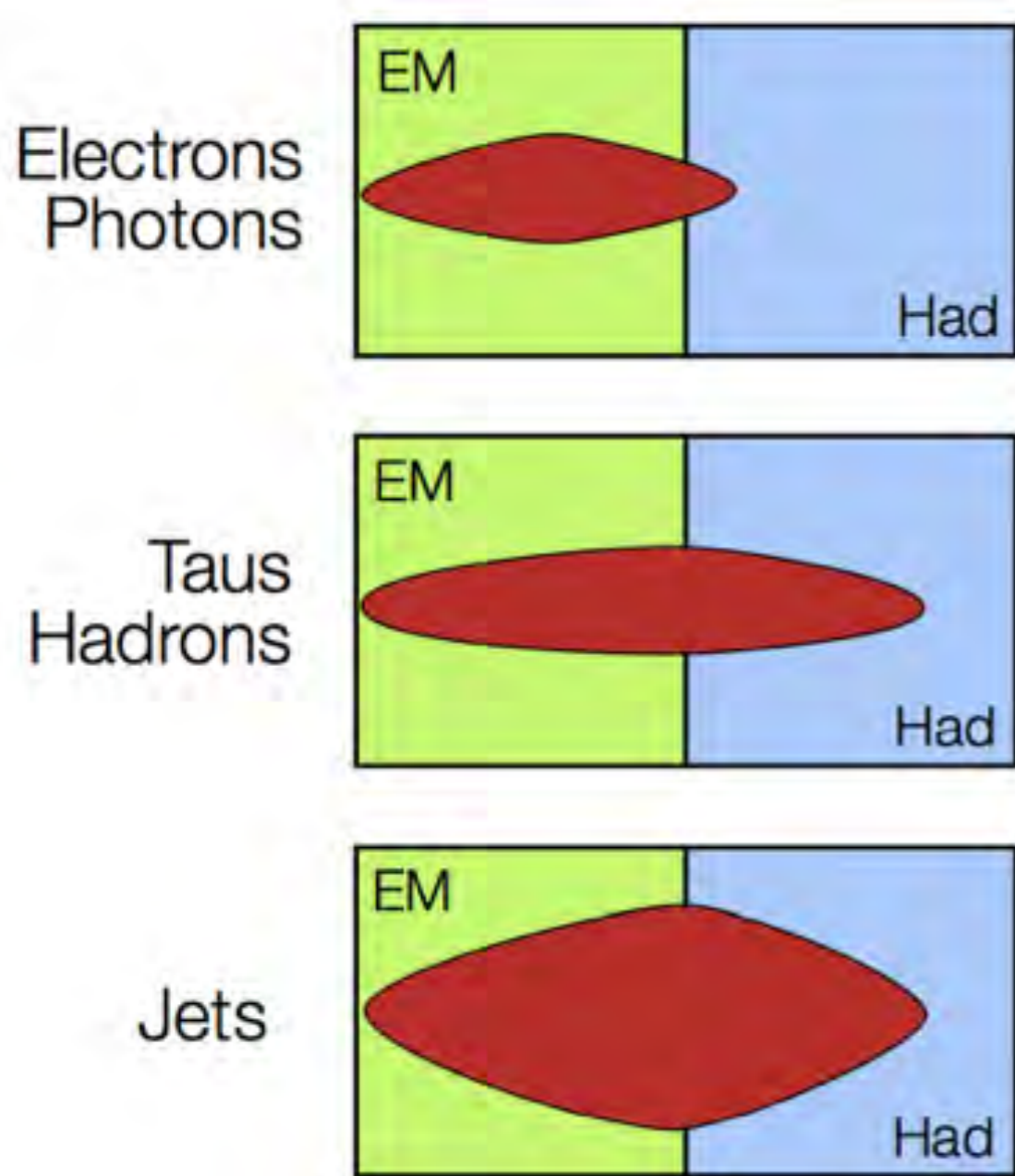
$$P_T = 0.3 \times B \times R$$

$$P_T = (0.3 \times 4 \times 1.3) / 2 \approx 0.8 \text{ GeV}$$

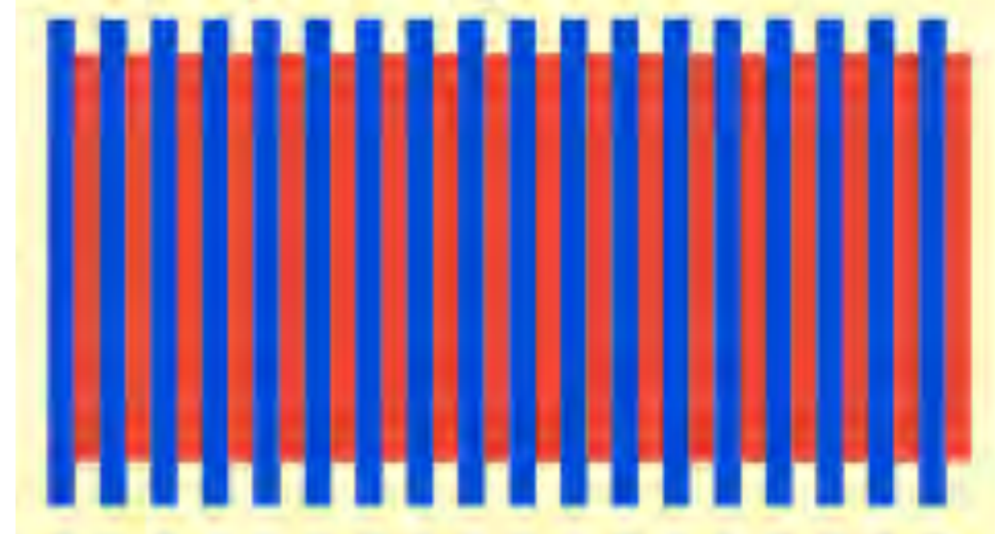
# Katmanlı Yapı



# Kalorimetre



Örnekleme Kalorimetre



Pb ve plastik sintilatör

Homojen Kalorimetre



PbWO<sub>4</sub>, BGO, LYSO, ...

# Kaynaklar

