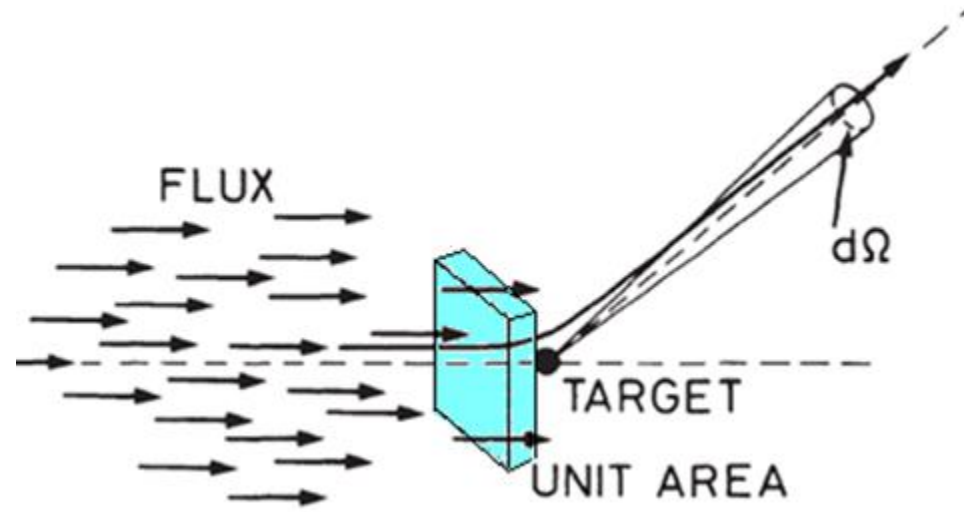


Madde Parçacık Etkileşimleri



Ahmet Bingöl

Gaziantep Üniversitesi Fizik Müh. Bölümü
bingul@gantep.edu.tr

İÇİNDEKİLER

- Giriş
- Yüklü Parçacıkların Madde ile Etkileşimi
- Fotonların Madde ile Etkileşimi
- Elektromanyetik ve Hadronik Yağmurlar
- Yararlanılan Kaynaklar

Temel Sabitler

$c = 3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$	Işık Hızı
$e = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$	Elektron yükü
$h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J.s}$	Planck Sabiti
$N_A = 6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$	Avagadro #

Semboller

ρ	Madde yoğunluğu [g/cm ³]
λ	Ortalama serbest yol [cm]
λ	Dalgaboyu [nm]
M_u	Molar kütle [g/mol]
σ	Tesir Kesiti [m ²]
X_0	Işınım uzunluğu [cm]
Z	Atom Numarası
A	Kütle Numarası
$\bar{I}$	Ortalama iyonlaşma enerjisi
I	Şiddet

Bazı Yüklü Parçacıkların Durgun Kütleleri

$m_e = 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg} = 0.511 \text{ MeV}/c^2$	Elektron
$m_p = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg} = 938 \text{ MeV}/c^2$	Proton
$m_\pi = 2.50 \times 10^{-28} \text{ kg} = 140 \text{ MeV}/c^2$	Pion
$m_\mu = 1.88 \times 10^{-28} \text{ kg} = 106 \text{ MeV}/c^2$	Muon
$m_\alpha = 6.64 \times 10^{-24} \text{ kg} = 3727 \text{ MeV}/c^2$	Alfa

Dönüşüm Nasıl yapılıyor?

$$1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J} \Rightarrow 1 \text{ MeV} = 1.6 \times 10^{-13} \text{ J}$$

$$E = mc^2$$

$$\begin{aligned} E &= m_e c^2 = (9.11 \times 10^{-31} \text{ kg})(3 \times 10^8 \text{ m/s}) \\ &= 2.733 \times 10^{-22} \text{ J} \\ &= 0.511 \text{ MeV} \end{aligned}$$

$$m_e = \frac{E}{c^2} = 0.511 \frac{\text{MeV}}{c^2}$$

MALZEME BİLGİSİ

Malzeme	Yoğunluk ρ (g / cm ³)	Atom Numarası Z	Kütle Numarası A	Molar Kütle M _u (g / mol)	Elektron yoğunluğu n (10 ²⁴ / cm ³)	İşinım Uzunluğu X ₀ (g / cm ²)
Alüminyum (Al)	2.70	13	27	26.98	0.78	24.28
Bakır (Cu)	8.94	29	63	63.55	2.46	13.05
Demir (Fe)	7.87	26	56	55.85	2.21	14.18
Kurşun (Pb)	11.40	82	207	207.20	2.72	6.30
Karbon (C)	2.27	6	12	12.01	0.68	42.97

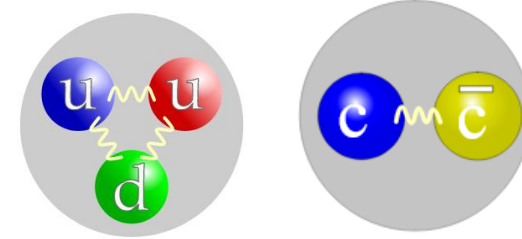
Giriş

(Temel Kavramlar)

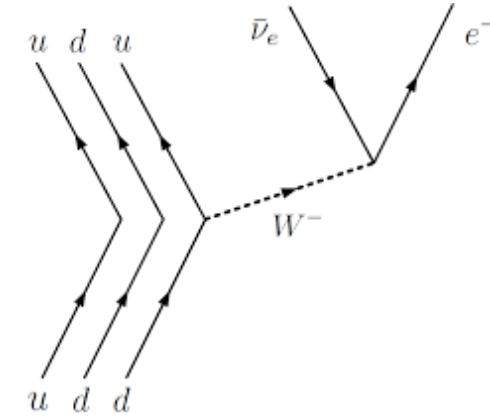
GİRİŞ

Temel parçacık etkileşimlerini incelemek için üç deneysel araştırma yapılır:

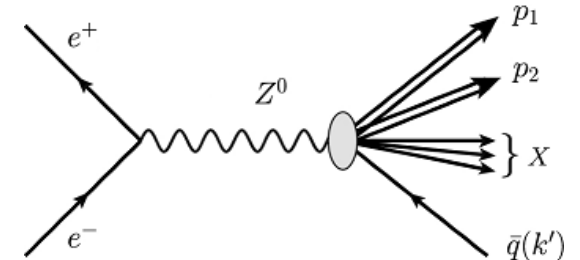
- Bağlı Durumlar [$\pi^+(\bar{u}d)$, $p(uud)$, $J/\psi(c\bar{c})$]



- Bozunumlar [$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$, $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$]



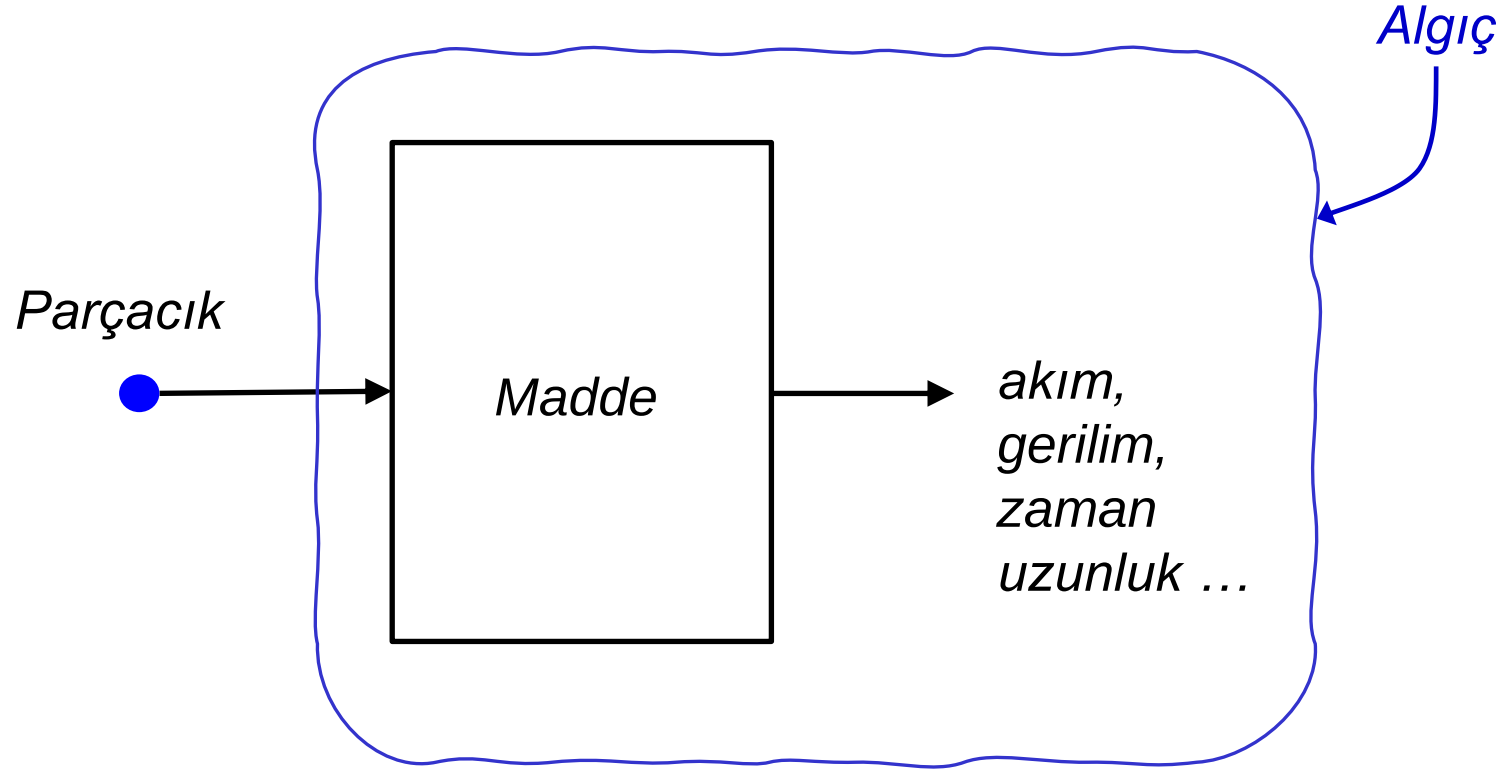
- Saçılmalar [$e^- + e^+ \rightarrow Z^0 \rightarrow \text{hadronlar}$]



Algıç

Bir **parçacığı** ölçmek (tespit etmek) için,

1. Onun bir **madde** etkileşime girmesini sağlanmalı
2. Sistemdeki **ölçülebilir değişimleri** incelenmeli



Algıç Benzetimi

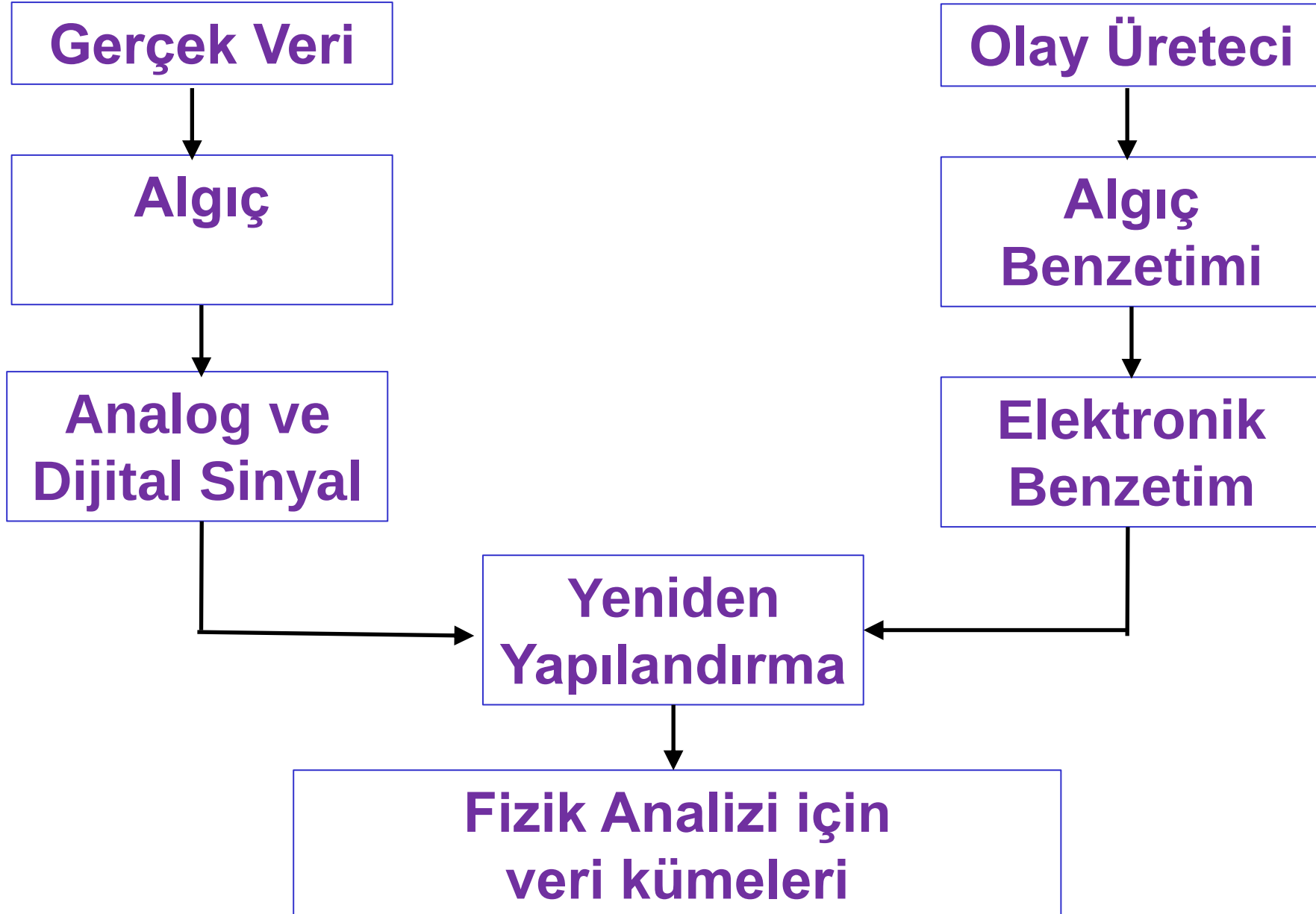
Benzetimler kuramsal hesaplamaları kullanır.

Girdiler: Parçacık enerjisi, maddenin özellikleri ve geometrisi

Çıktılar: Madde-Parçacık etkileşme sürecinin sonuçları (kimlik, 4-vektör, enerji birikimi, ...)



Veri Toplama



Tesir Kesiti (σ)

Bir saçılma deneyinde, deneycinin ölçtüğü ve kuramcının hesapladığı önemli niceliklerden biri **Tesir Kesiti**'dir.

etkileşme olasılığı $\approx \frac{\text{etkileşen parçacık sayısı}}{\text{gelen parçacıkların sayısı}} \approx \frac{\text{toplam tesir kesit alanı}}{\text{toplam geometrik alan}}$

$$P = \frac{N - N_0}{N_0} = \frac{n(S\Delta x)\sigma}{S} \Rightarrow P \approx n\sigma\Delta x$$

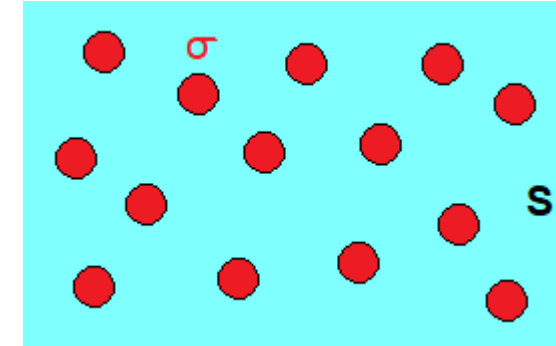
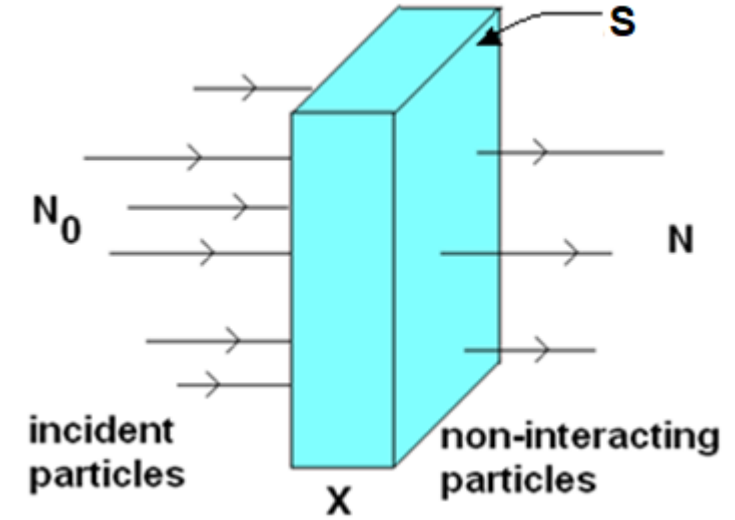
Δx yeterince küçük seçilirse, etkileşmeden öte tarafa geçen parçacık sayısı:

$$N(x) = N_0 \exp(-n\sigma x)$$

$n = \rho N_A Z / M_u$: birim hacimdeki atom sayısı

$\sigma = \sigma(E, Z, A)$: tesir kesiti (birimi barn ve $1b = 10^{-24} \text{ m}^2$)

x : malzeme kalınlığı



Kırmızı daireler her biri tesir kesiti σ olan atomlardır. Dikdörtgene gönderilen bir parçacığın kırmızı bir daireyi vurma olasılığı nedir?

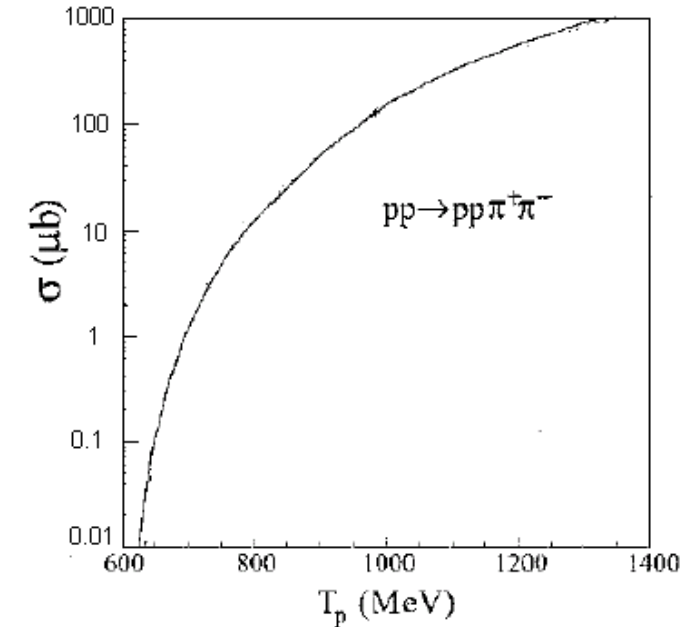
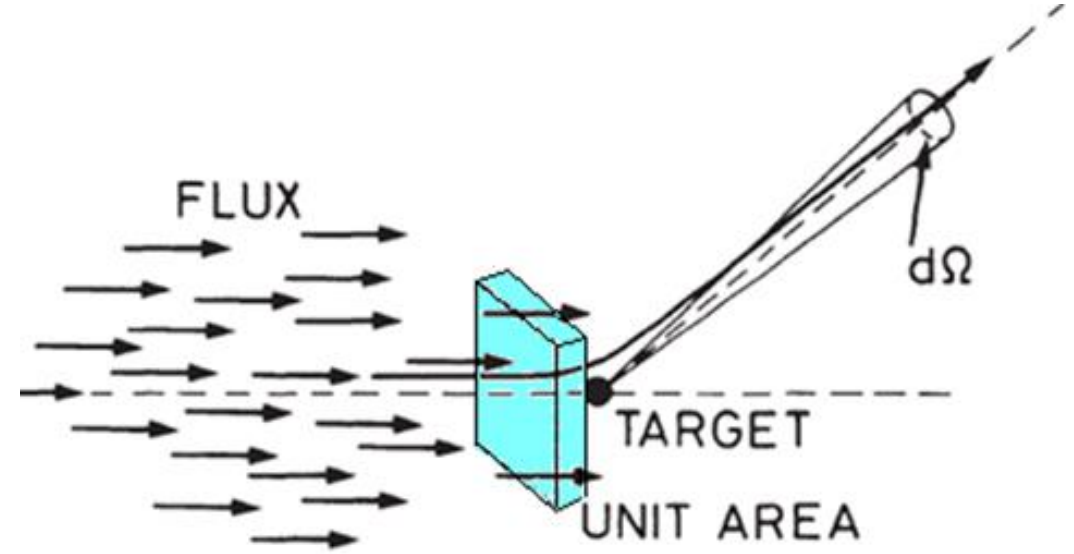
Diferansiyel Tesir Kesiti

F ($\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) gelen parçacık akısı olmak üzere, saçılmaya ait diferansiyel tesir kesiti aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{1}{F} \frac{dN}{d\Omega} \equiv \frac{\text{saçılan parçacık sayısı}}{\text{sr} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}}$$

Toplam tesir kesiti (genellikle enerjiye bağlı):

$$\sigma(E) = \int \frac{d\sigma}{d\Omega} d\Omega$$



Bazı Tanımlar

Tek bir elementten oluşan malzemedeki bir parçacık için **ortalama serbest yol**:

$$\lambda = \frac{\Delta x}{P} = \frac{\Delta x}{n\sigma\Delta x} = \frac{1}{n\sigma} = \frac{M_u}{\rho N_A \sigma}$$

Parçacığın madde ile **etkileşme olasılığı**:

$$P(x) = 1 - \exp\left(-\frac{x}{\lambda}\right) = 1 - \exp(-n\sigma x)$$

Ortam içinde parçacığın aldığı yol, **kütle kalınlığı (mass thickness)** olarak adlandırılan bir parametre ile de tanımlanır:

$$T = \rho t$$

ρ : yoğunluk (g/cm³)

t : uzunluk (cm)

T : kütle uzunluğu (g/cm²)

Elektrik Yüklü Parçacıkların Madde ile Etkileşimi

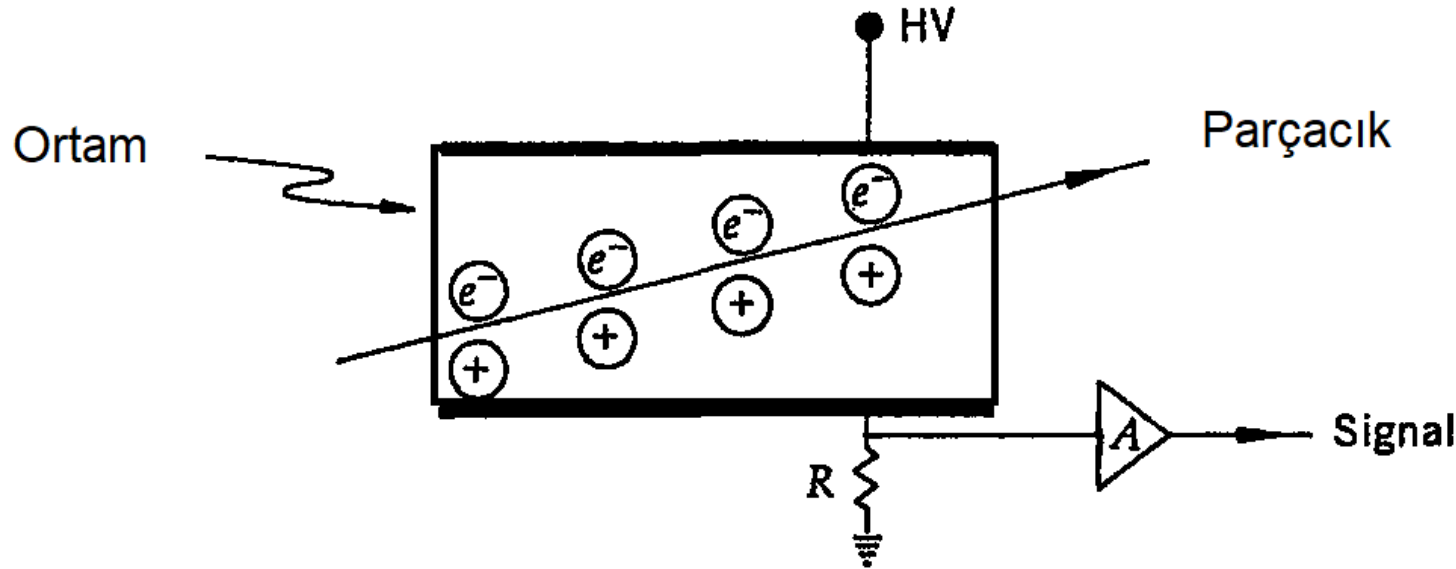
Yüklü Parçacıkların Etkileşimleri

Elektrik yüklü bir parçacık bir ortamda hareket ederken,

- Atomik elektronlarla etkileşir (esnek olmayan çarpışma).
- Atom çekirdekleri ile etkileşir (esnek saçılma).

Parçacık yeterli kinetik enerjiye sahipse, yolundaki atomları iyonize ederek, atomları (veya molekülleri) daha yüksek durumlara uyararak bu enerjiyi ortamda biriktirebilir.

[Uyarılmış atomlar daha sonra taban durumuna foton yayarak düşer]



Yüklü bir parçacık bir ortamda ilerlerken ortamdaki parçacıkları nasıl iyonlaştırır?

Bir ortamın iyonlaşma özelliklerini betimleyen en uygun değişken **durdurma gücü** (stopping power) yada **iyonlaşma enerji kaybıdır** (ionization energy loss).

Birim uzunlukta kaybedilen **ortalama enerji**:

$$-\frac{dE}{dx} = n_i \bar{I}$$

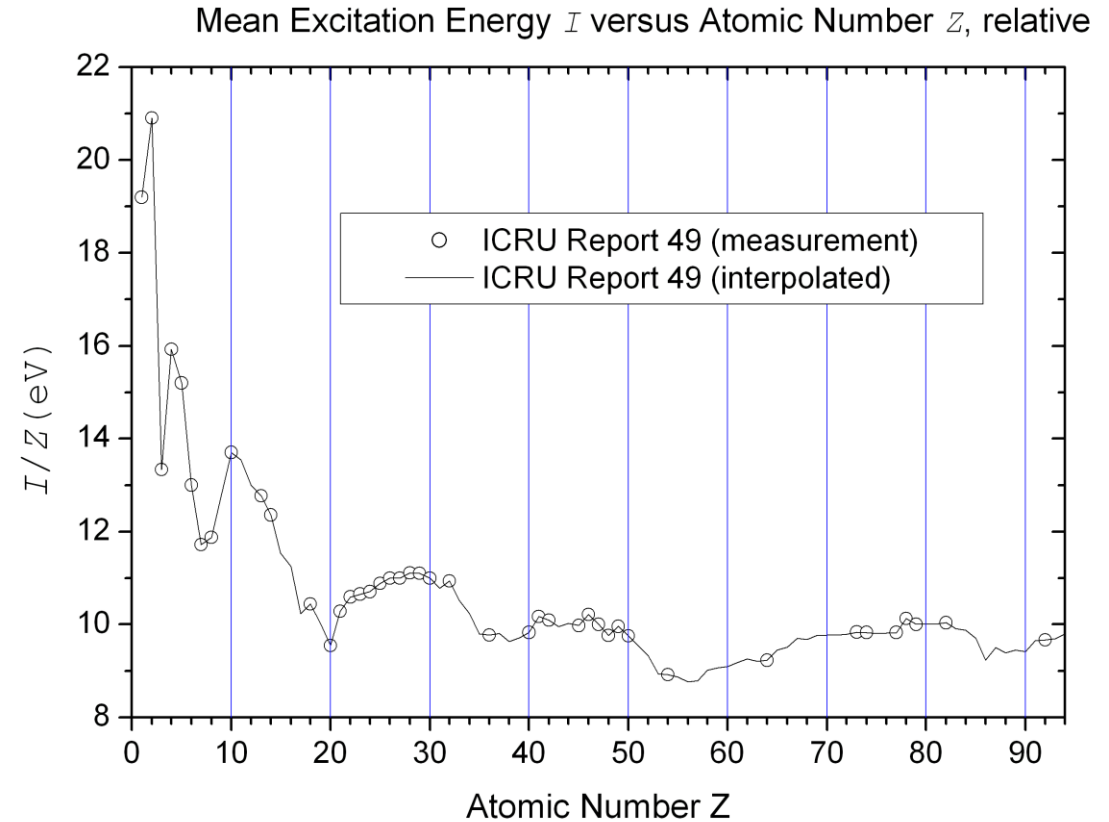
E = Parçacığın enerjisi

n_i = birim uzunlukta oluşan elektron-iyon çifti

$\bar{I}$ = ortalama iyonlaşma/uyarma enerjisi

Z değeri büyük olan atomlar için:

$$\bar{I} \approx 10(\text{eV}) Z$$



Bethe-Bloch Formülü

Enerji kaybına ait ayrıntılı hesaplamalarda sadece EM etkileşmeler dikkate alınır. Buna göre, Hans Bethe ve Felix Bloch görelî parçacıklar için geliştirdiği formül:

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi}{m_e c^2} \cdot \frac{n z^2}{\beta^2} \cdot \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \cdot \left[\ln \left(\frac{2m_e c^2 \beta^2}{I \cdot (1 - \beta^2)} \right) - \beta^2 \right]$$

Burada:

$$n = \frac{N_A \cdot Z \cdot \rho}{A \cdot M_u}$$

ρ

Z, A

M_u

z

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

malzemenin elektron yoğunluğu

malzeme kütle yoğunluğu

malzemeye ait atom ve kütle numarası

malzemenin molar kütlesi

parçacığın yükü / e (genellikle ± 1)

parçacığın hızı ve gama faktörü

Enerji kaybı (**kütle uzunluğu** cinsinden):

$$-\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} = z^2 \frac{Z}{A} f(\beta, I) \quad \left[\frac{\text{MeV}}{\text{g/cm}^2} \right]$$

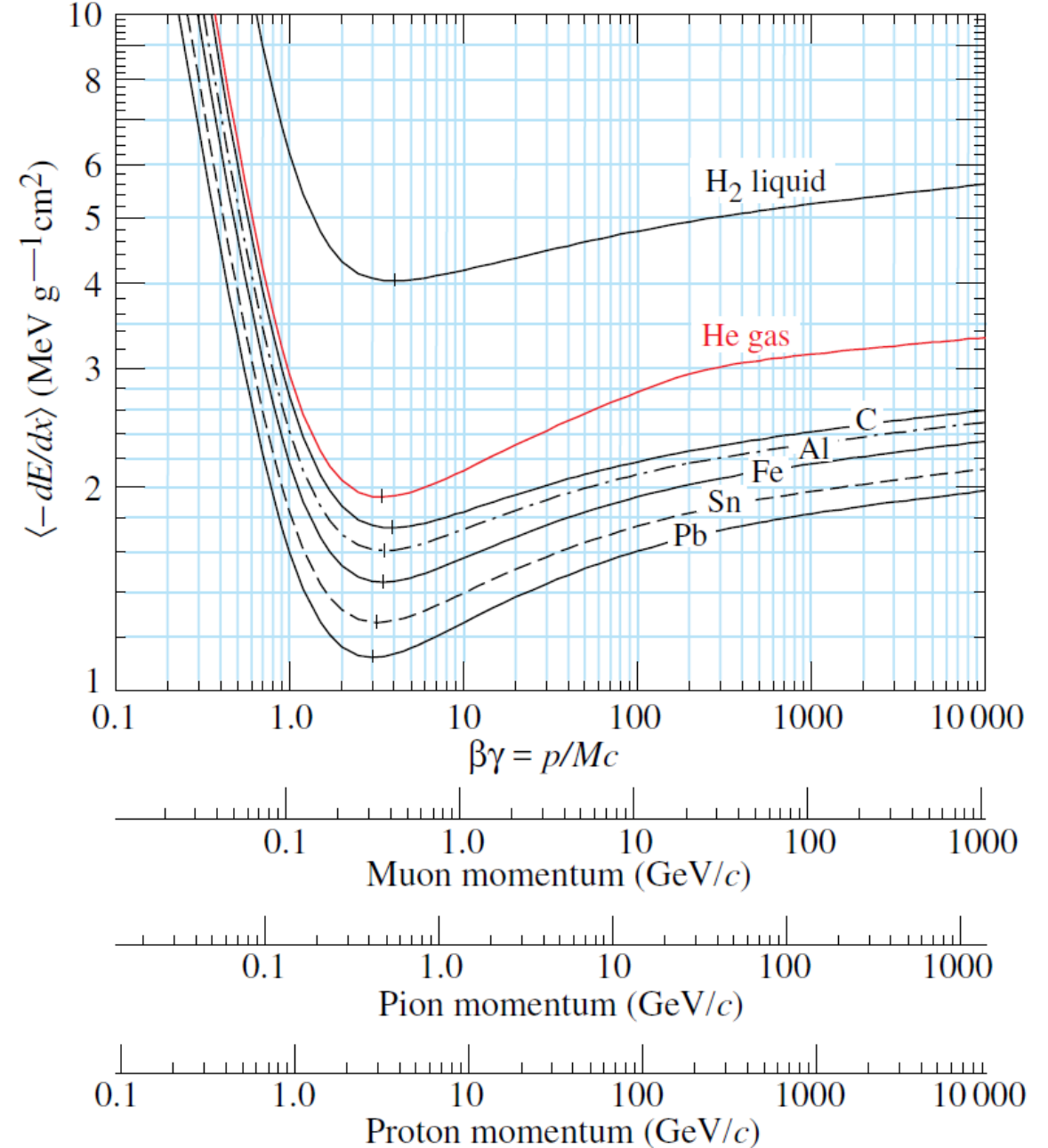
Z/A oranı ve I değerinin değişimi sonucu çok ciddi etkilemez (neden?)

Buna göre $-\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx}$ değeri malzemeye çok az bağımlıdır. Grafiği inceleyin.

Soru: 1 GeV enerjili bir müon 2 cm'lik bir demir bloktan geçerken, blokta bırakacağı ortalama enerji ne kadardır?

Yanıt:

$$\Delta E \approx \left(1.8 \frac{\text{MeV}}{\text{g/cm}^2} \right) / \left(7.9 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right) (2 \text{ cm}) \approx 0.5 \text{ MeV}$$

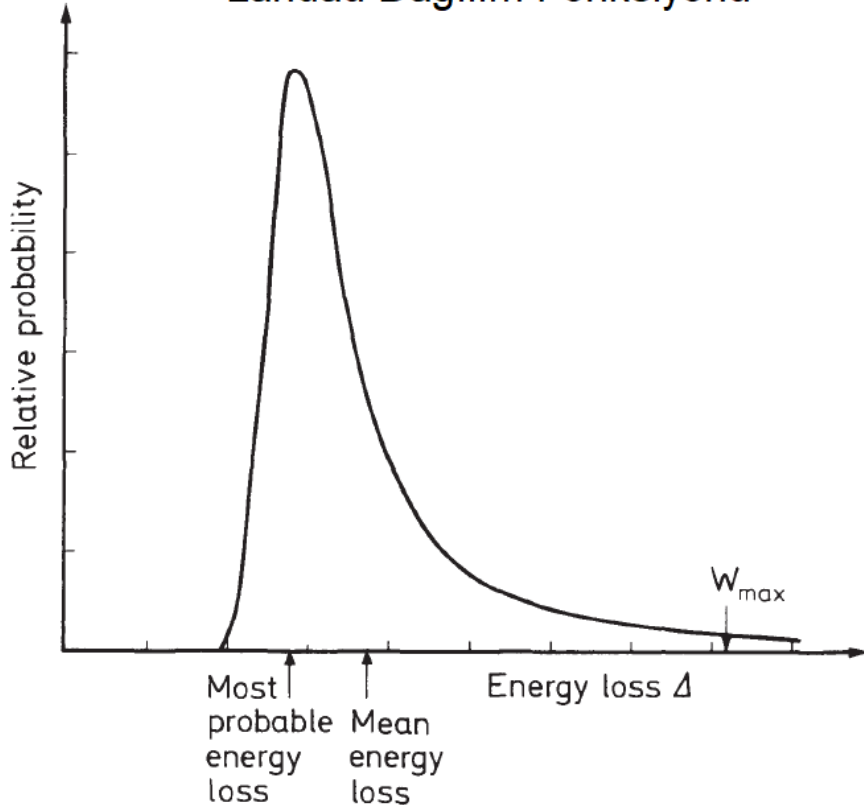


Landau Dağılım Fonksiyonu

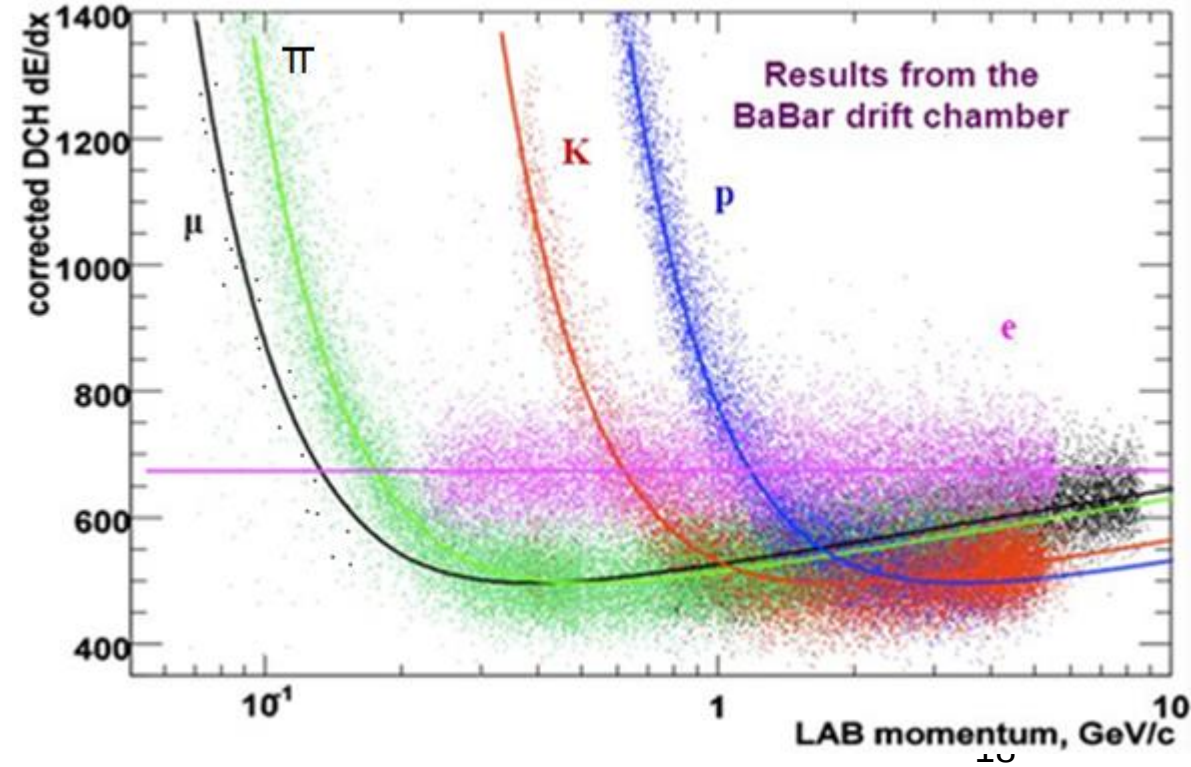
- Bethe-Bloch formülü yüklü parçacığın ortamdaki **ortalama** enerji kaybını tanımlar (1932).
- Landau dağılımı parçacığın enerji kaybındaki **dalgalanmaları** açıklar (1944).

$$f(x) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} e^{-u \ln u - xu} \sin(\pi u) du$$

Landau Dağılım Fonksiyonu



Enerji kaybı parçacıkların kimliğini belirlemede kullanılır.



Erim (Range) ve Bragg Eğrisi

Bir parçacık bütün enerjisini kaybedinceye kadar ortamda ne kadar yol alır?

İki özdeş parçacık aynı etkileşmeye maruz kalmaz.

Erim mesafesi her ikisi için de farklıdır.

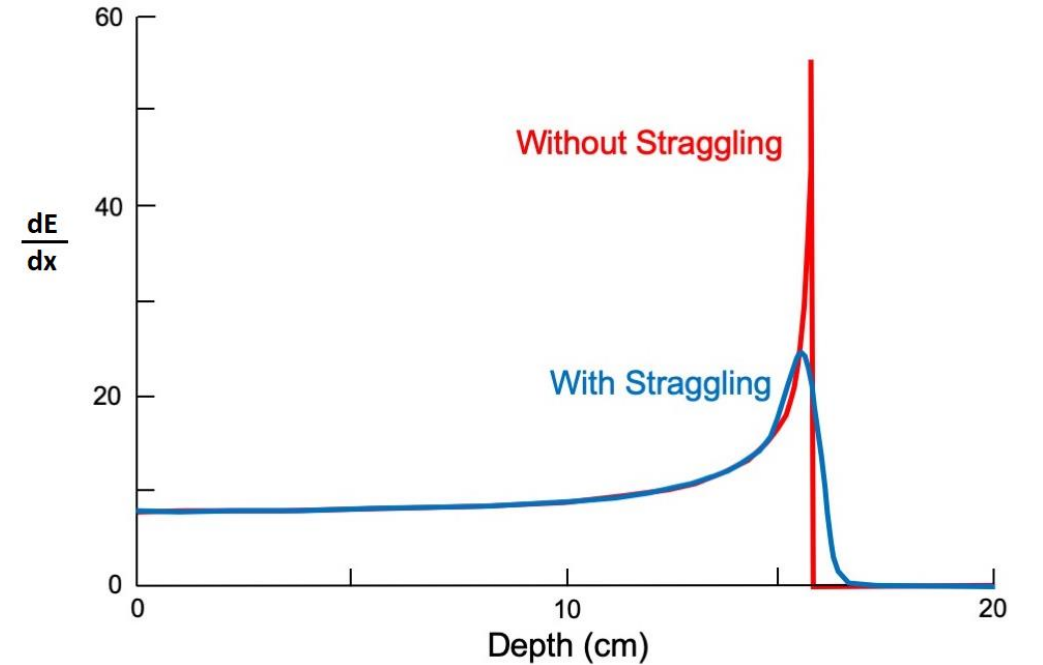
Yani, erim istatistiksel bir dağılım gösterir.

Buna hadiseye **Erim Dağınlığı** denir.

Kuramsal olarak erim mesafesi:

$$R = \int_0^{T_0} \left(\frac{dE}{dx} \right)^{-1} dE$$

T_0 = başlangıç kinetik enerjisi



Soru: $T = 100$ MeV'lik bir protonun Alüminyum içindeki erim mesafesi nedir?

Yanıt:

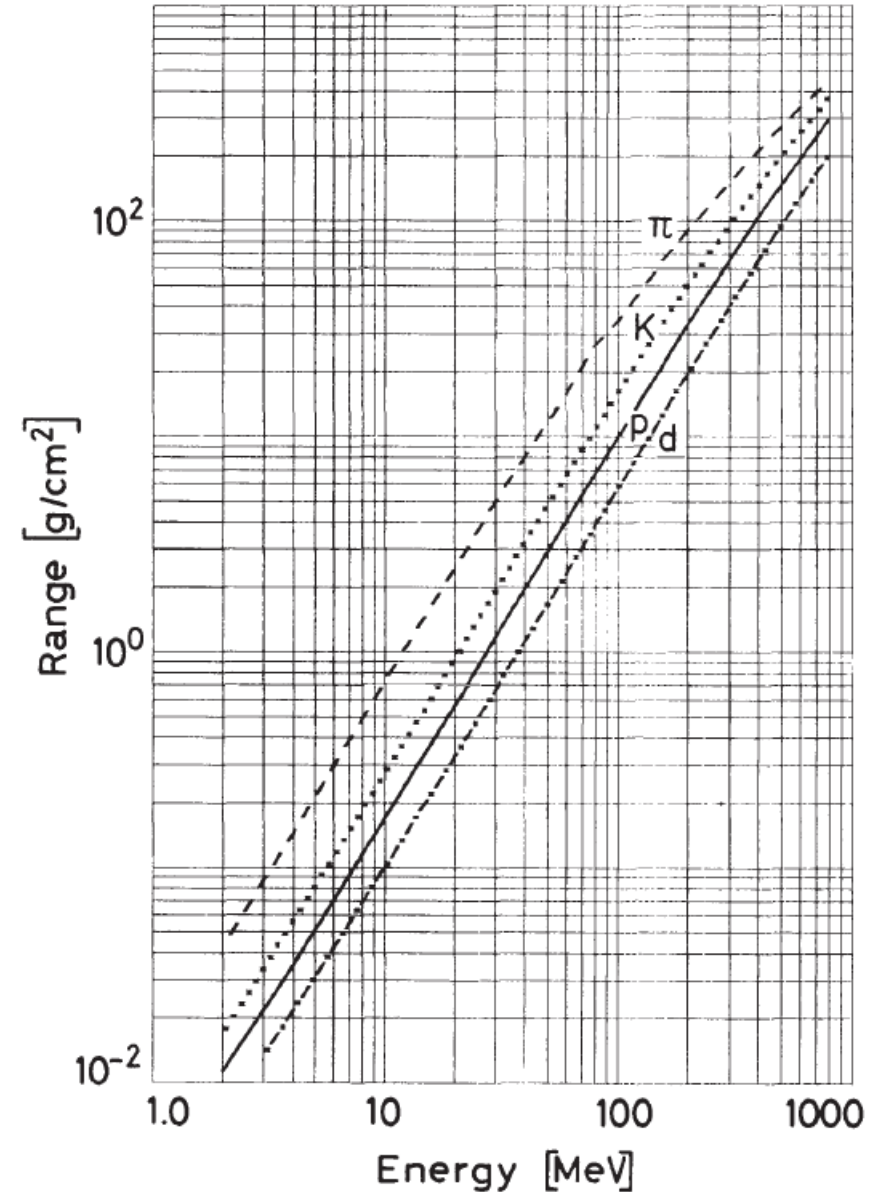
$$R = \int_0^{100} \left(\frac{dE}{dx} \right)^{-1} dE \approx (10 \text{ g/cm}^2) / (2.7 \text{ g/cm}^3) = 3.7 \text{ cm}$$

Soru: $T = 600$ MeV'lik bir protonun enerjisini 400 MeV'e düşürmek için kullanılması gereken bakır bloğun kalınlığı ne olmalıdır?

Yanıt:

$$\Delta x = \int_{400}^{600} \left(\frac{dE}{dx} \right)^{-1} dE \approx 12 \text{ cm}$$

Farklı parçacıkların Alüminyum içinde hesaplanan erim eğrileri



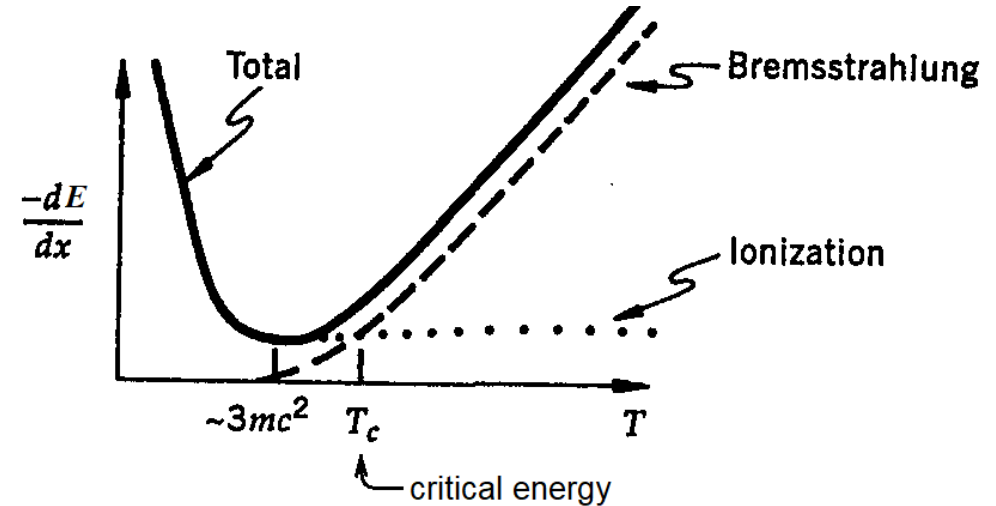
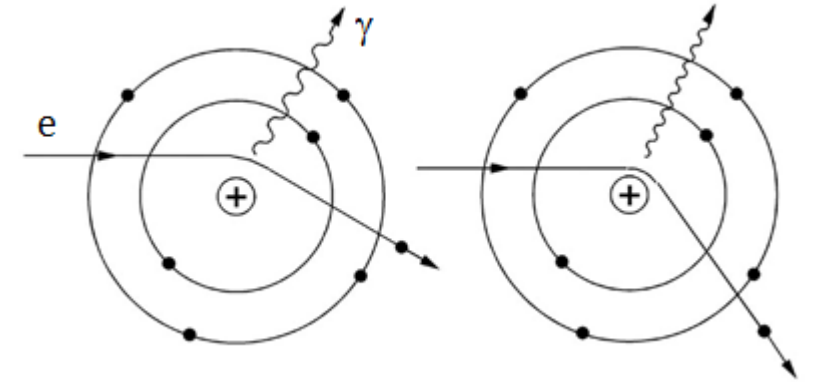
Elektronların Etkileşimi

- Bethe-Bloch formülü elektronlar için kısmen doğrudur.
- Elektronlar ortamdaki yüklerin (özellikle çekirdeklerin) elektrik alanından çok etkilenip ivme kazanırlar. Bu ivme sonucunda '**bremstrahlung**' adı verilen ilave bir ışınım (EM dalga) yayarlar. Bremsstrahlung özellikle yüksek enerjide enerji kaybına büyük katkı yapar.
- Madde içinde ilerleyen elektronlar için toplam kayıp:

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{top} = \left(\frac{dE}{dx}\right)_{iyon} + \left(\frac{dE}{dx}\right)_{brem}$$

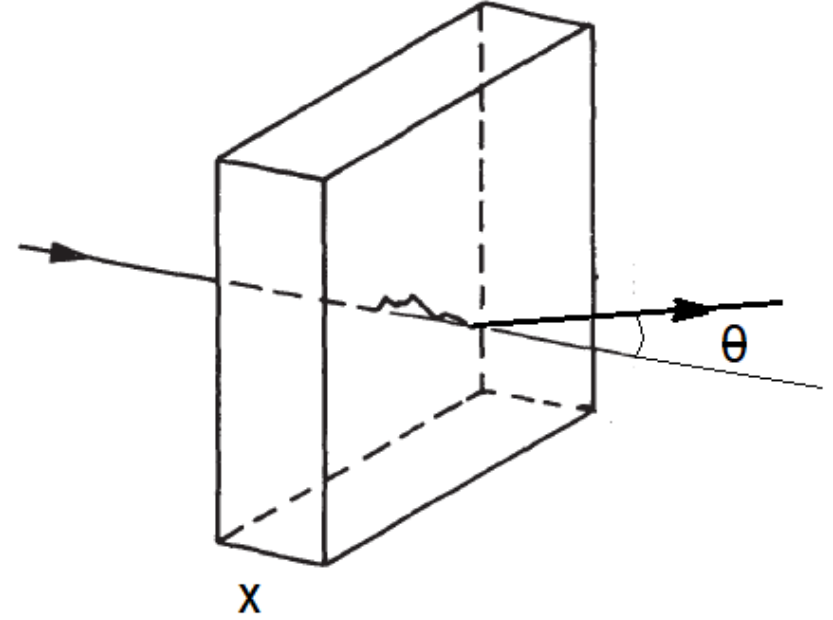
$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{brem} = -\frac{E}{X_0} \quad X_0 = \frac{716.4A}{Z(Z+1)\ln(287/\sqrt{Z})}$$

X_0 = ışınım uzunluğu (radiation length)
ışınım yüzünden elektron enerjisinin 1/e değerine
düştüğü uzunluk / yoğunluk değeri.



Çoklu Coulomb Saçılması (Multiple Coulomb Scattering)

- Çoklu saçılma, parçacıkların maddeyle etkileşime girdiği ve atomlarla (veya moleküllerle) çoklu çarpışmalara maruz kaldığı bir olgudur.
- Saçılma açısının RMS değeri (yaklaşık ifade):



$$\theta_{RMS} \approx \frac{20 \text{ MeV}}{\beta p c} Z \sqrt{\frac{x}{X_0}}$$

$$z = (\text{parçacığın yükü}) / e$$

$$X_0 = \frac{716.4A}{Z(Z+1) \ln(287/\sqrt{Z})}$$

Soru: Momentumu 100 MeV/c olan bir protonun, Argon gazı içinde 1 cm ilerlediğinde, saçılma açısını tahmin edin. (Argon gazı için $X_0 = 105 \text{ cm}$)

Yanıt: $p = 100 \text{ MeV/c} \Rightarrow v = 0.1 c$

$$\theta_{RMS} \approx \frac{20}{(0.1)(100)} (1) \sqrt{\frac{1}{105}} = 20 \text{ mrad}$$

Cherenkov Işıması (Cherenkov Radiation)

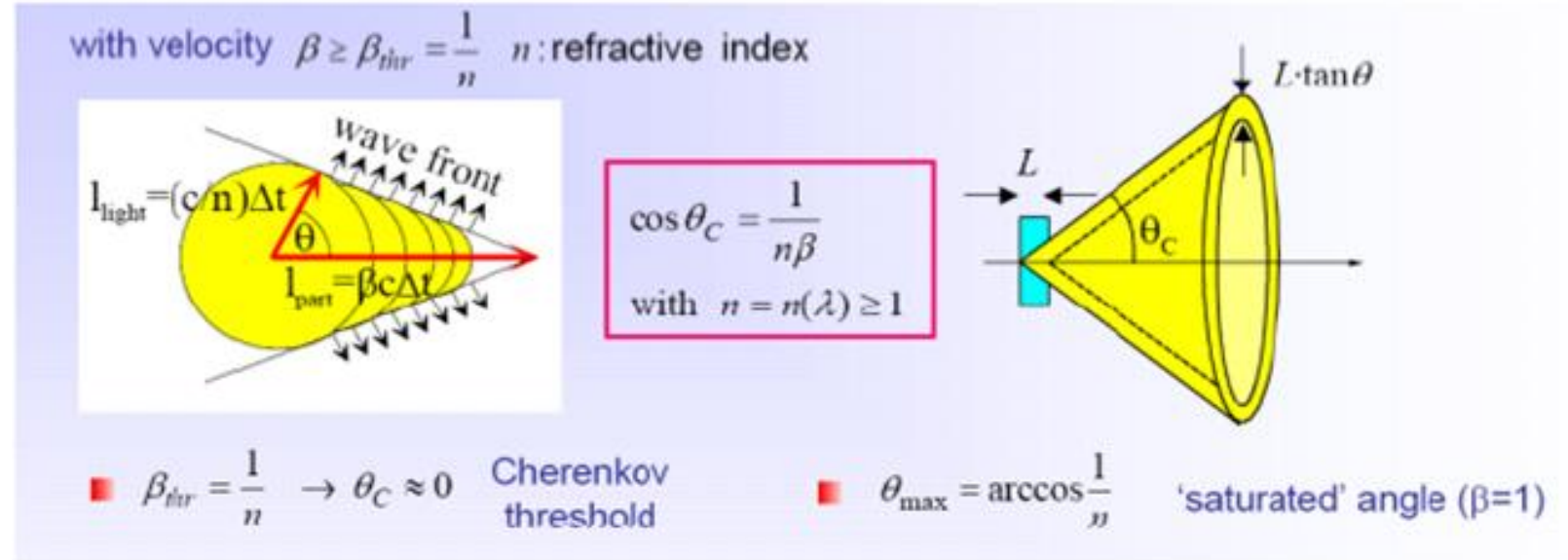
- Optik ortamdan geçen yüklü bir parçacığın hızı ortamdaki ışığın hızından büyükse $v > c/n$ (n : kırılma indisi) Cherenkov ışıması yaparak parçacık enerjisini kaybeder.
- Işınım bir koni şeklinde yayılır. Koni açısı:

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

ile belirlenir.

- Bu süreçte açığa çıkan ortalama foton sayısı (N) aşağıdaki formülle hesaplanır:

$$\frac{d^2N}{dx d\lambda} = \frac{2\pi\alpha}{\lambda^2} \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2} \right)$$



Fotonların Madde ile Etkileşimi

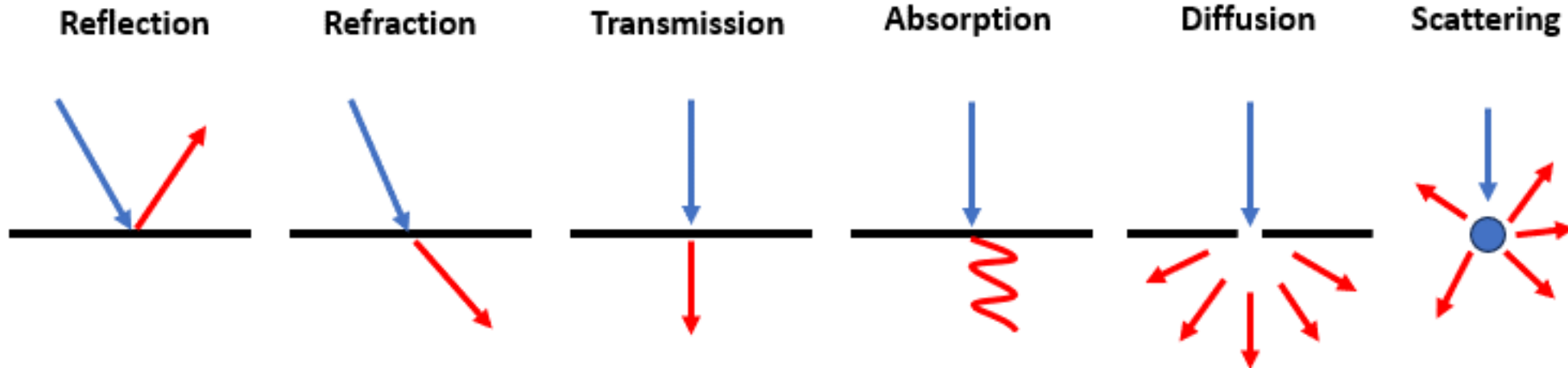
Foton-Madde Etkileşimleri

Fotonlar yüksüz olduğu için madde içinde Coulomb kuvvetine maruz kalmaz. Bu yüzden ilerlediği oramı iyonlaştıramaz kanısına kapılabiliriz. Ancak, fotonlar EM alanın taşıyıcı parçacığı olduğu için, madde ile farklı etkileşimlere girebilir.

Optik Fotonlar dalgaboyu $\lambda = [10 \text{ nm}, 1 \text{ mm}]$ arasında olan EM radyasyondur.



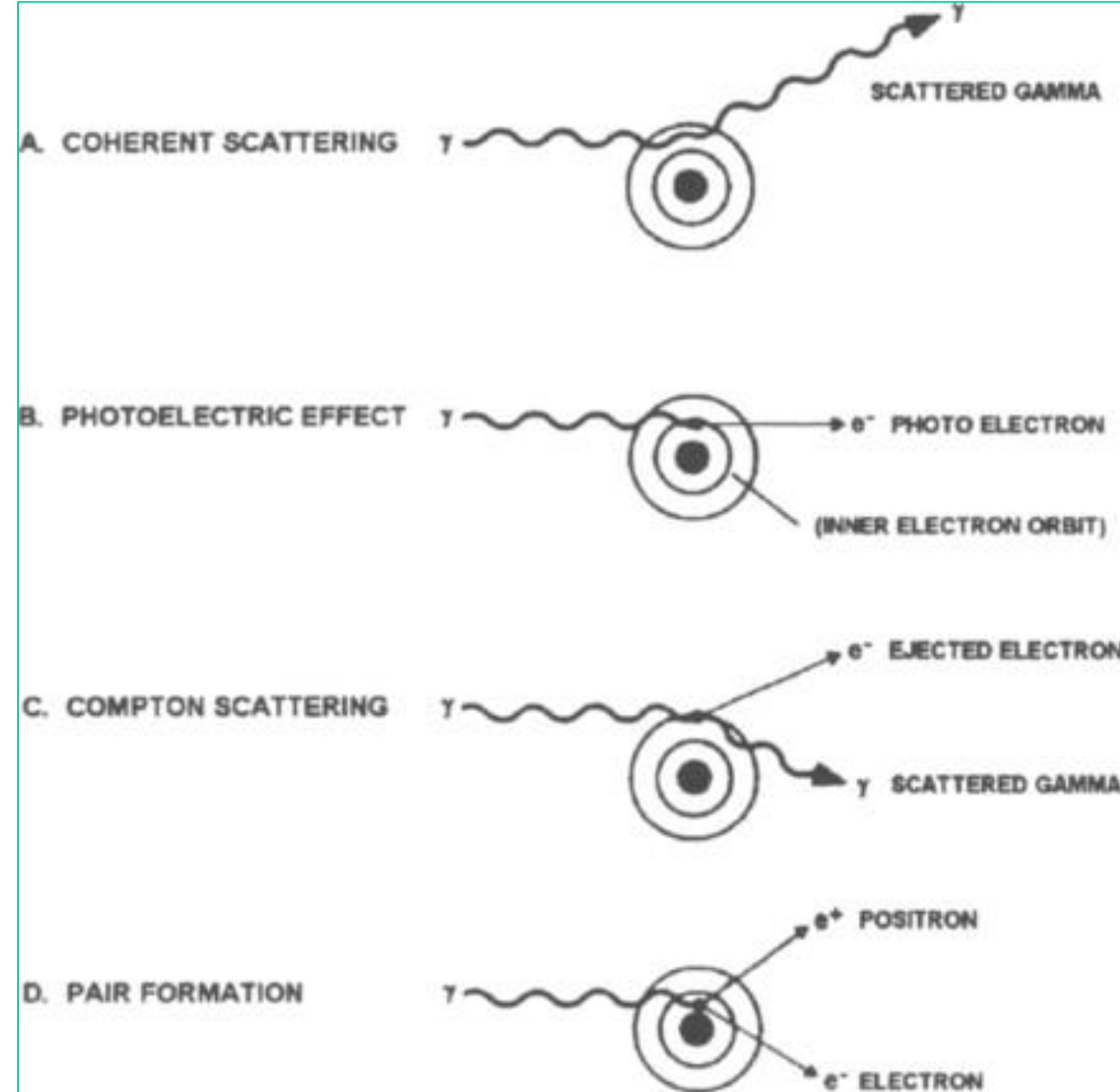
Genellikle, optik bölgedeki fotonlar aşağıdaki süreçlerde incelenir:



Foton-Madde Etkileşmeleri

Daha yüksek enerjili X-ışınları ve γ -ışınları madde ile aşağıdaki etkileşimleri yapar:

- Saçılma
- Fotoelektrik olay
- Compton saçılması
- Çift oluşumu



Fotoelektrik
soğurma

$$E = h\nu$$

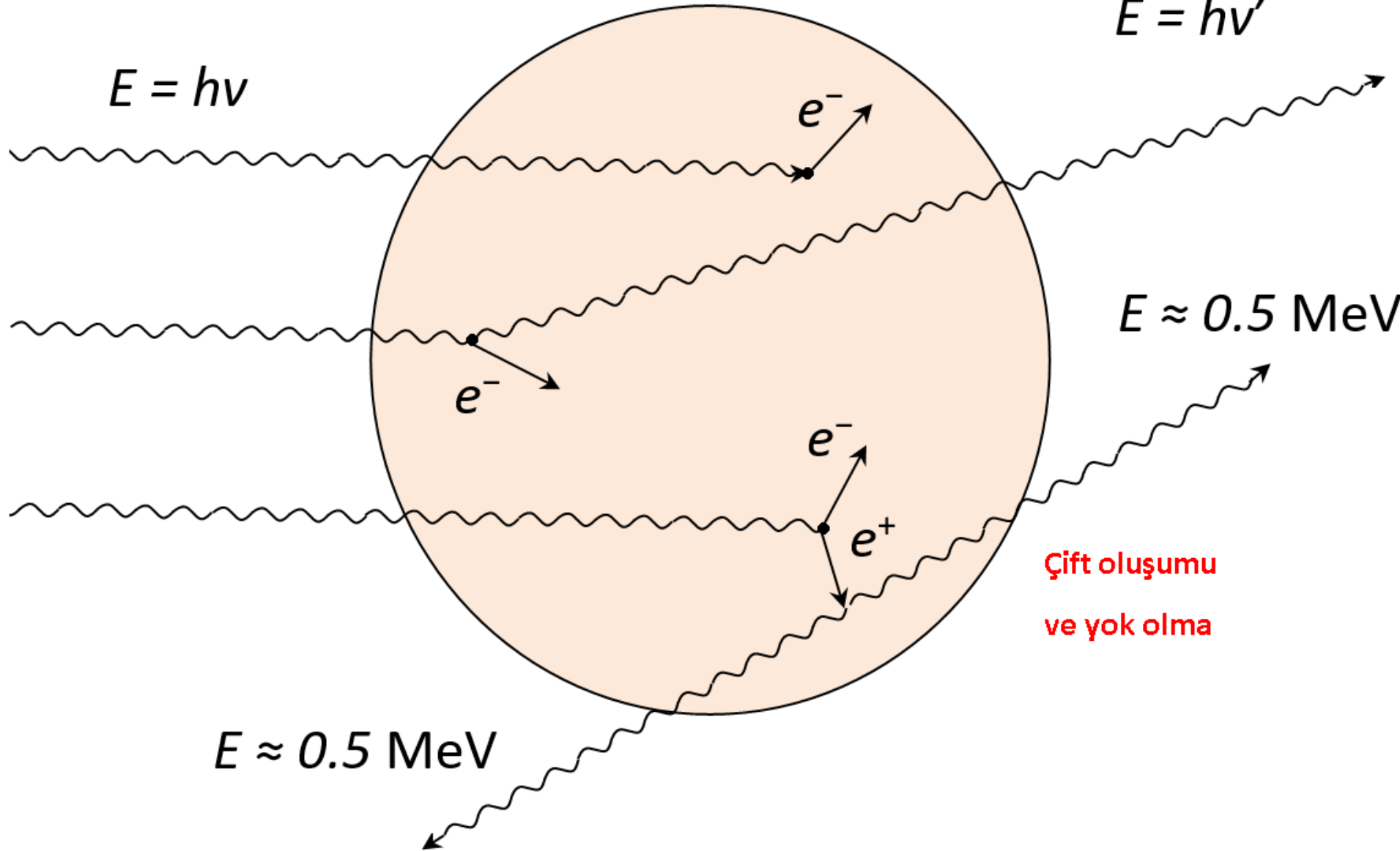
$$E = h\nu'$$

Compton
Saçılması

$$E \approx 0.5 \text{ MeV}$$

Çift oluşumu
ve yok olma

$$E \approx 0.5 \text{ MeV}$$



Zayıflama (Attenuation)

Zayıflama, soğurma katsayısı μ (absorption coefficient) ile tanımlanır. ($\mu \propto \sigma$)

Fotonların giriş şiddeti: I_0

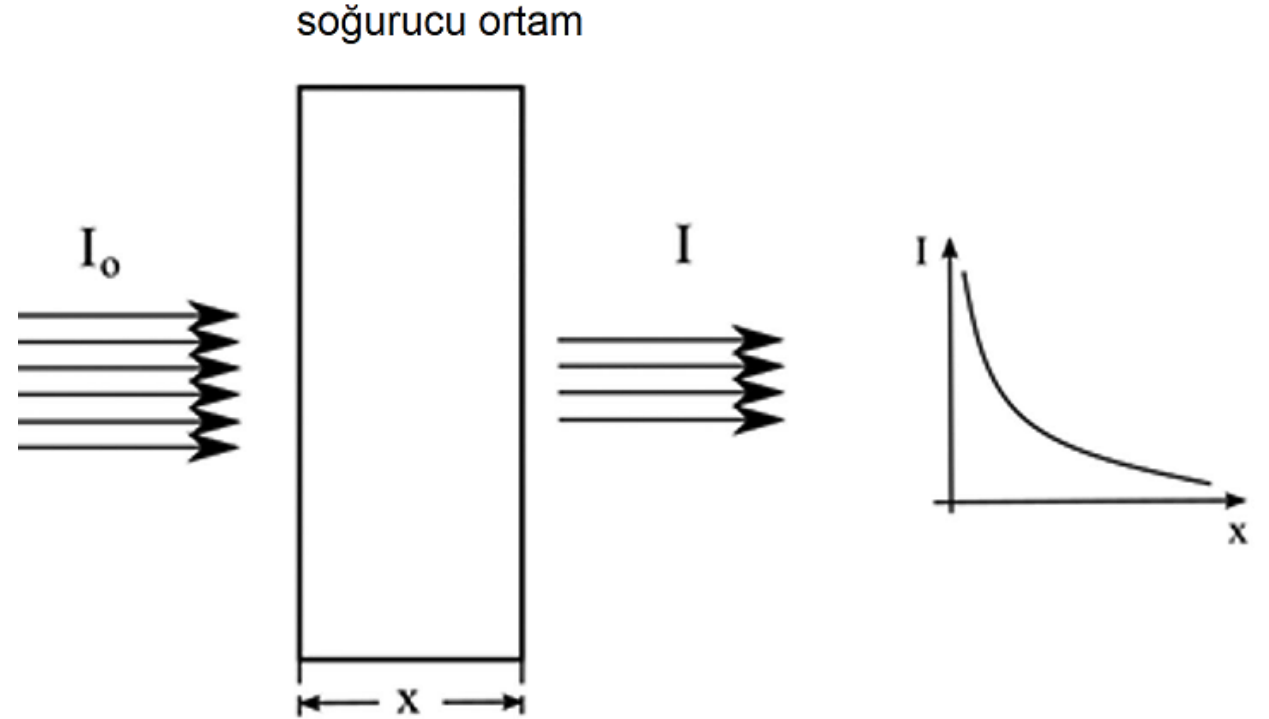
Fotonların çıkış şiddet: I

ortam kalınlığı: x

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

Işınım uzunluğu: $X_0 = \frac{1}{\mu}$

Tesir kesiti: $\sigma = \frac{\mu}{n} = \frac{A}{\rho N_A} \mu$



Fotoelektrik Olay

Düşük enerjili bir foton, atoma bağlı elektron tarafından soğurulur.
Foton enerjisinin bir kısmı elektrona aktarılır.

$$T_e = E_\gamma - \phi = h\nu - \phi$$

ν = fotonun frekansı

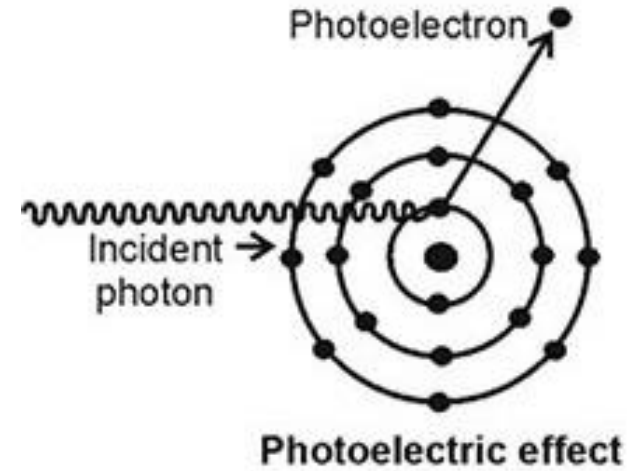
ϕ = elektronun bağlanma enerjisi

T_e = fotoelektronun max. kinetik enerjisi

Tesir kesiti:

$$\sigma_f \propto \frac{Z^5}{(h\nu)^{3.5}} \quad (E_\gamma < m_e c^2)$$

$$\sigma_f \propto \frac{Z^5}{h\nu} \quad (E_\gamma > m_e c^2)$$

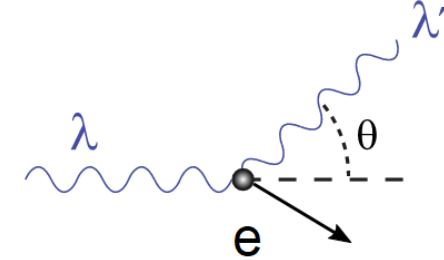
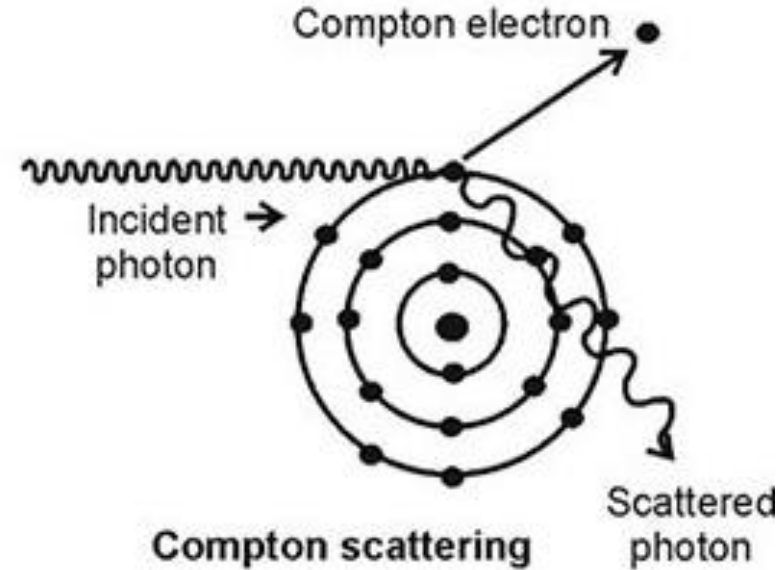


Compton Saçılması

Compton saçılması serbest elektron için fototelektrik olay gibi düşünebiliriz. Süreç sonunda foton soğurulmaz. Ancak, enerjisinin bir kısmını elektrona aktarır. Saçılan fotonun dalgaboyu:

$$\lambda' = \lambda + \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \theta)$$

Tesir kesiti: $\sigma_c \propto \frac{Z}{h\nu}$



Çift Oluşumu (Pair Production)

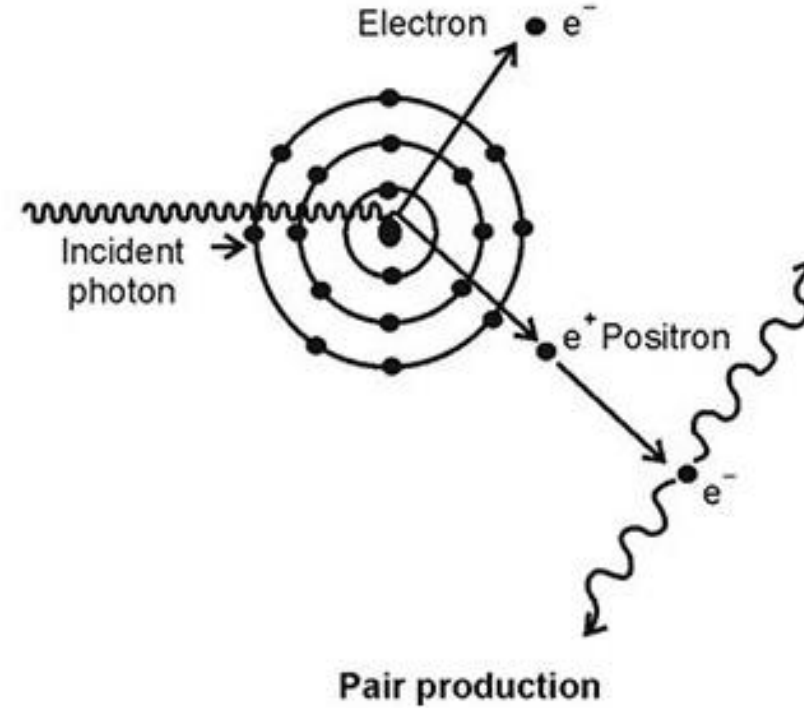
Bir foton yeterli enerjiye sahipse, madde içinde soğurup zıt yüklü iki parçacık oluşturabilir.

$E_\gamma > 2m_e c^2 \approx 1 \text{ MeV}$ ise, en iyi bilinen çift $e^+ e^-$.

Tesir kesiti: $\sigma_p \propto Z^2$

$E_\gamma > 100 \text{ MeV}$ ise soğurma katsayısı hemen hemen sabit kalır ve ortalama serbest yol ışıınım uzunluğuna eşit olur.

$$X_p = (\mu_p)^{-1} = \frac{9}{7} X_0$$



Toplam Soğurma

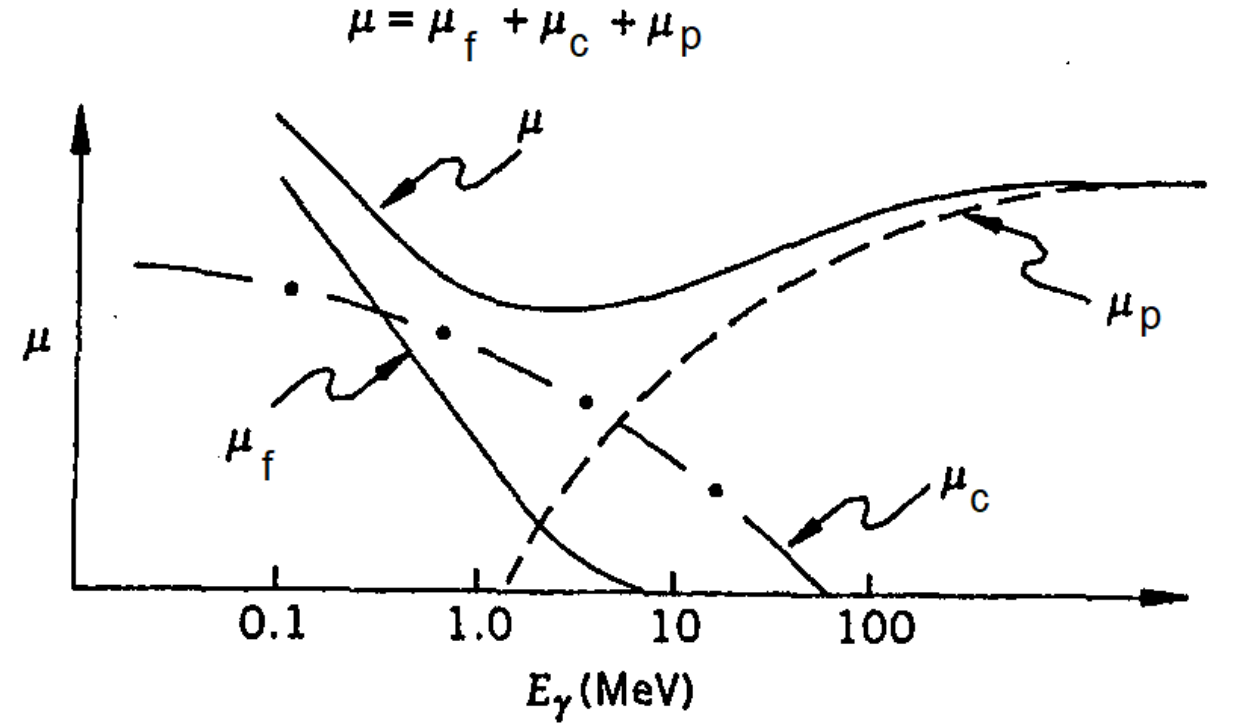
Bu üç süreç soğurma katsayısına ayrı ayrı katkı sağlar.

Toplam soğurma katsayısı:

$$\mu = \mu_f + \mu_c + \mu_p$$

Toplam tesir kesiti:

$$\sigma = \frac{\mu}{n} = \frac{A}{\rho N_A} \mu$$



Soru: Yüksek enerjide kuşunun ışınlam uzunluğu $X_0 = 5.6$ mm'dir. Soğurma katsayısını ve e^+e^- çift oluşum tesir kesitini hesaplayınız.

Yanıt:

$$\mu \approx \frac{7}{9} X_0 = 1.4 \text{ cm}^{-1} \quad \text{ve} \quad \sigma = \frac{\mu}{n} = \frac{A}{\rho N_A} \mu = 42.3 \text{ b}$$

Elektromanyetik ve Hadronik Yağmurlar (Electromagnetic and Hadronic Showers)

EM Yağmur

Yüksek enerjili elektronlar veya fotonlar bir madde içine girdiklerinde oluşan temel süreçler:

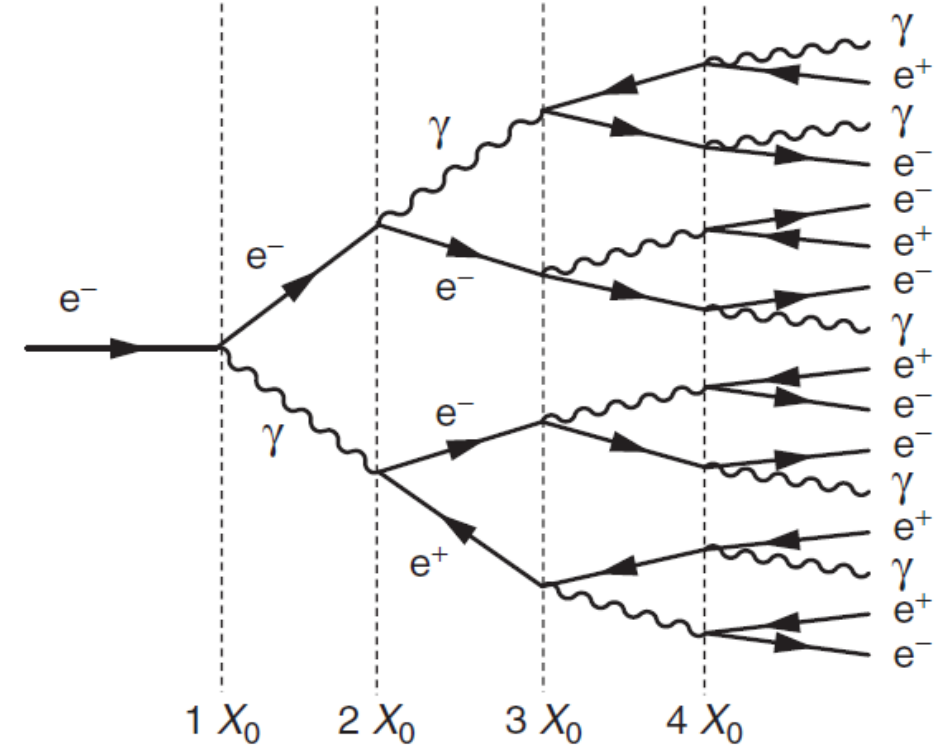
Çift Oluşumu ve Bremsstahlung'dur.

Peşpeşe gelişen bu süreçler katlanarak çoğalır. Sonuçta madde içinde parçacık yağmuru oluşur.

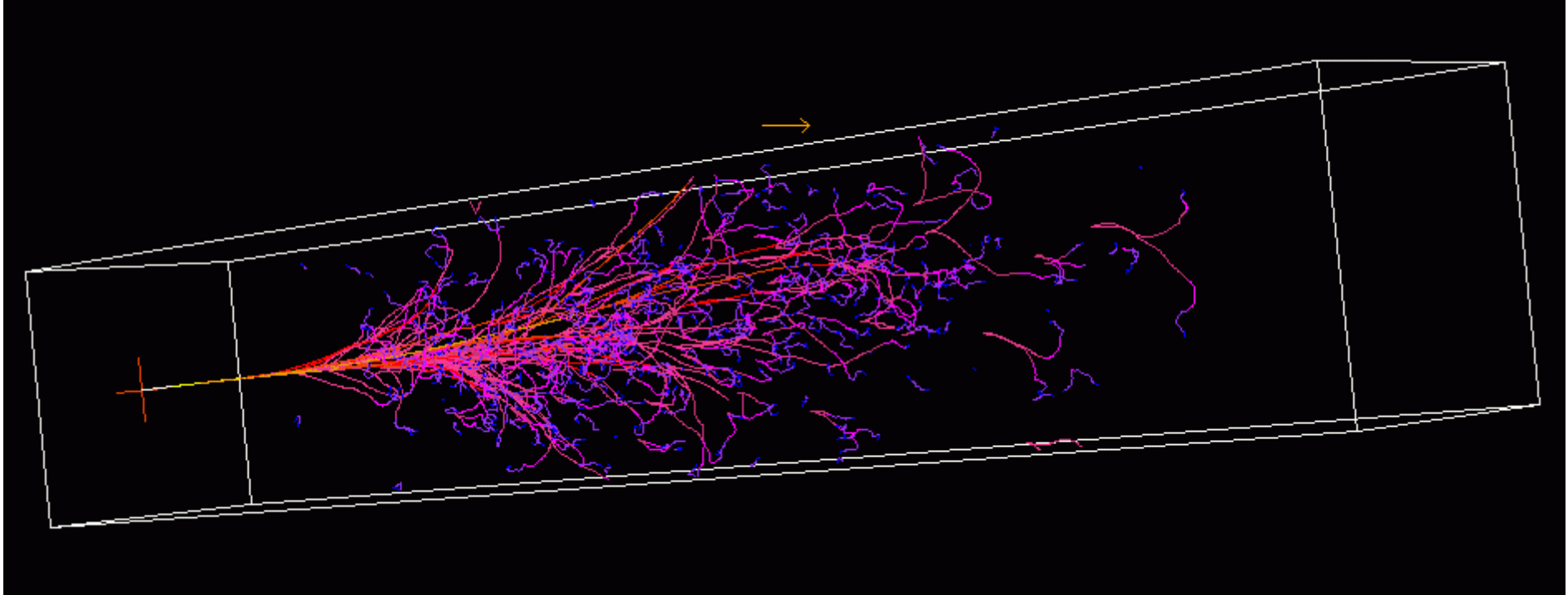
Yağmur oluşma süreci için basit model:

1. Başlangıçtaki elektronun enerjisi E olsun.
2. Elektron bremsstahlung fotonu yaysın, $E_\gamma = E_- = E/2$.
3. Yeni foton 1 ışınım uzunluğu yol alıp, $e^+ e^-$ çifti oluştursun ve diğer elektron $E/4$ enerjili bremsstahlung fotonu yaysın. [Son durumda, $E/4$ enerjili 4 parçacık oluştu (e^+ , e^- , e^- , γ)]
4. L ışınım uzunluğu sonra elimizde N tane parçacık olur. Onların ortalama enerjisi: $E/2^L$.
5. Yağmur kritik bir enerjiye ulaşınca son bulsun:

$$E(L_{\max}) = E_c = E / 2^{L_{\max}} \rightarrow L_{\max} = \ln(E/E_c) / \ln(2) \text{ ve parçacık sayısı } N_{\max} = E / E_c.$$



EM Yağmur Benzetimi



Bu basit modele göre, açığa çıkan parçacık sayısı ilk elektronun enerjisi ile orantılıdır, $N \propto E$.

Süreç bir sayım işlemi gibi düşünüldüğünde, sayıma eşlik eden belirsizlik $\sigma_E = \sqrt{N}$ olur (Poisson dağılımı).

Buna göre:

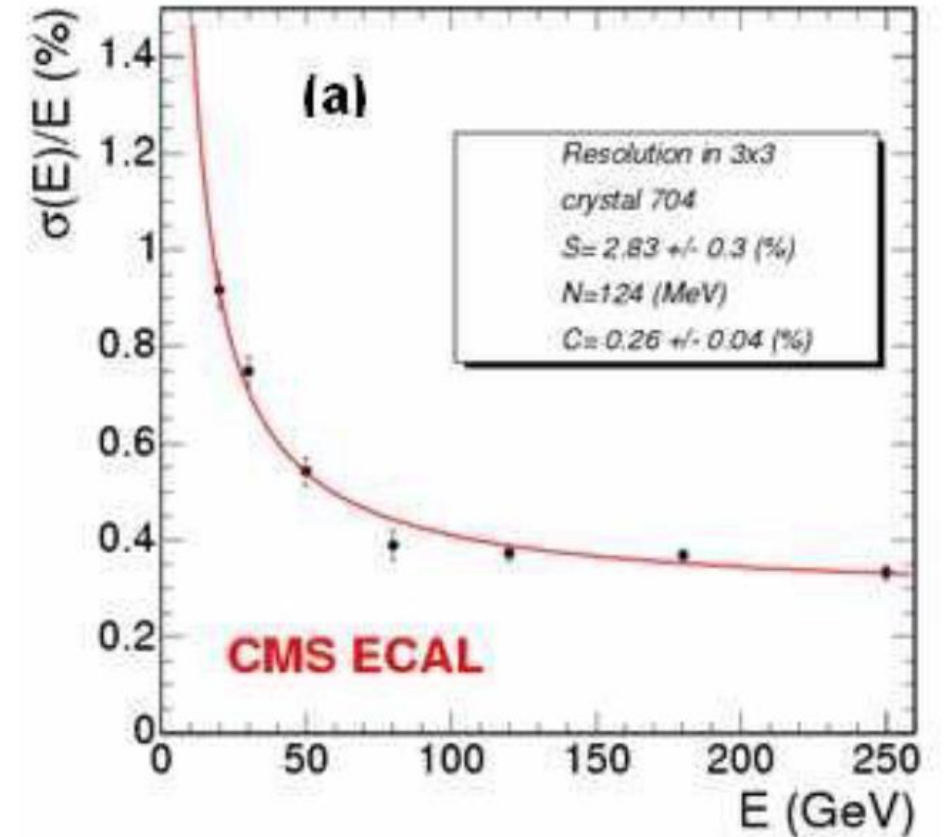
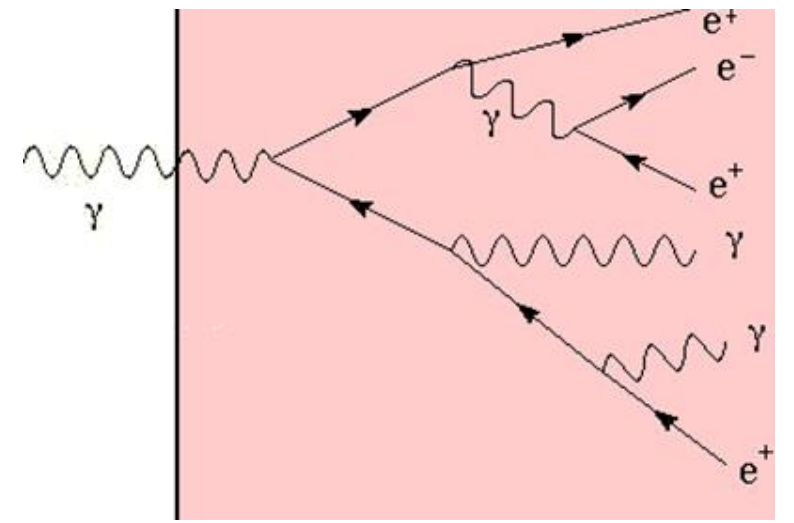
$$\frac{\sigma_E}{E} \propto \frac{\sqrt{N}}{N} = \frac{1}{\sqrt{N}} \propto \frac{1}{\sqrt{E}}$$

yada

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{R}{\sqrt{E}}$$

Atlas için: $R = 0.10 \text{ GeV}^{1/2}$.

CMS için: $R = 0.05 \text{ GeV}^{1/2}$.

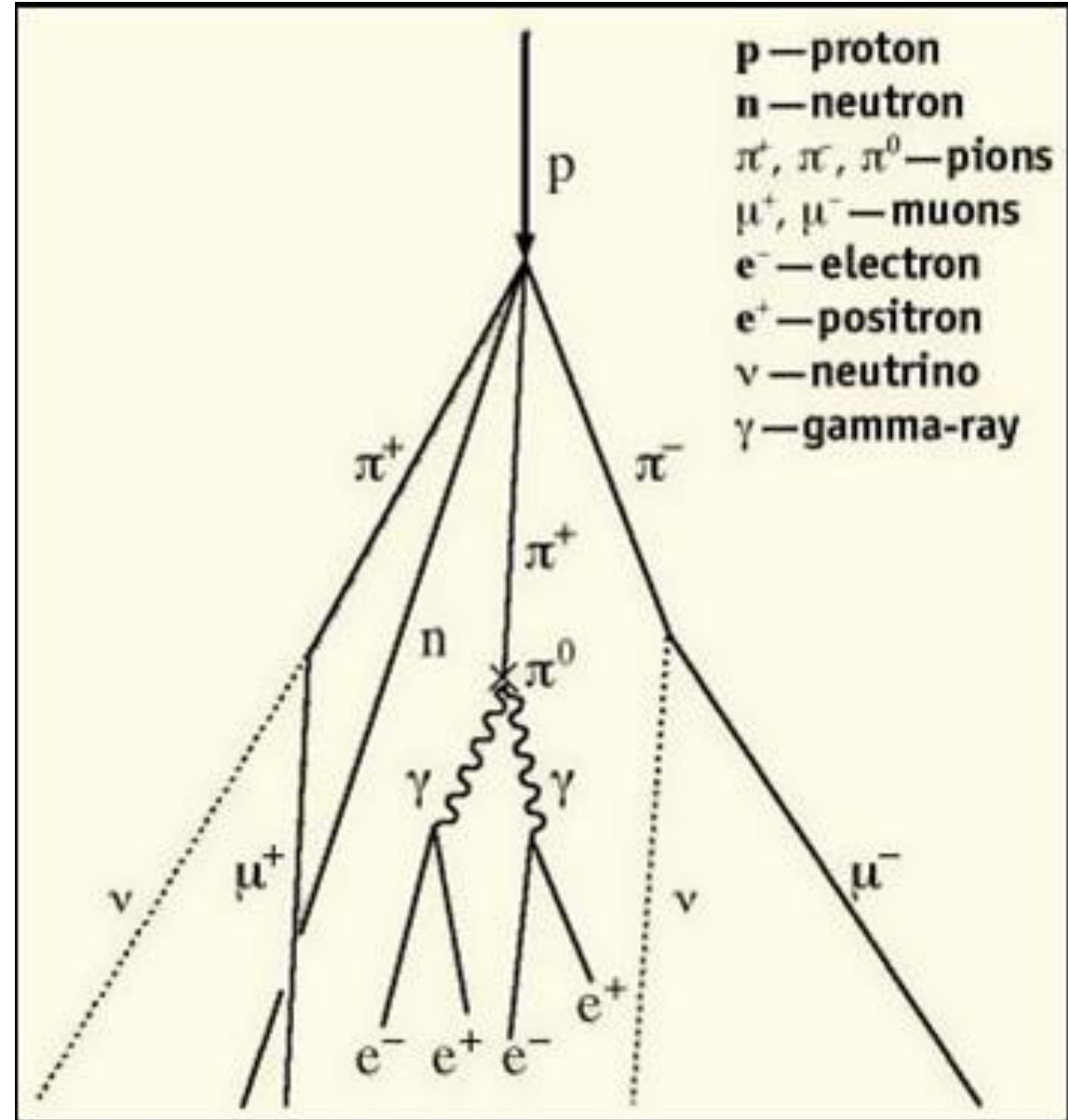


Hadronik Yağmur

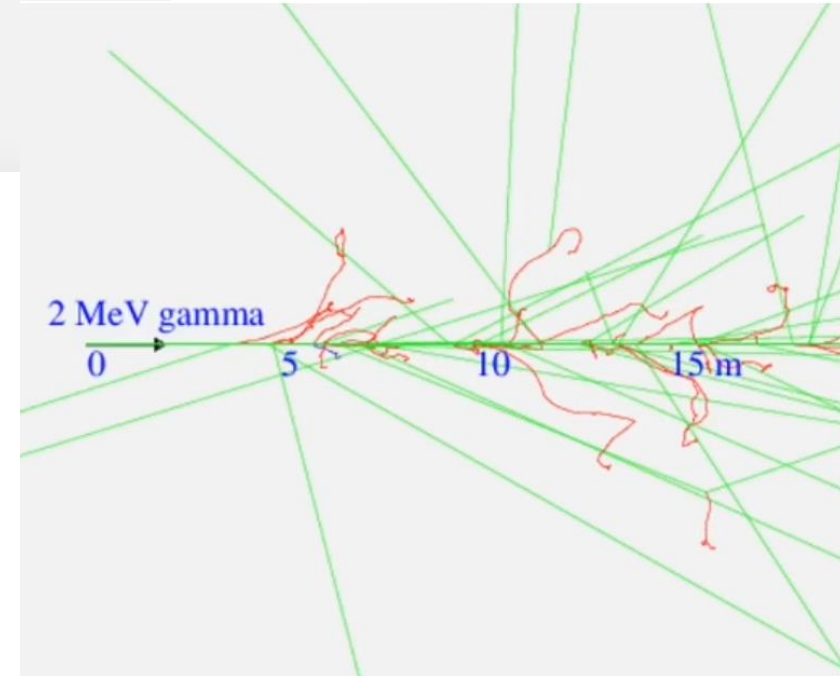
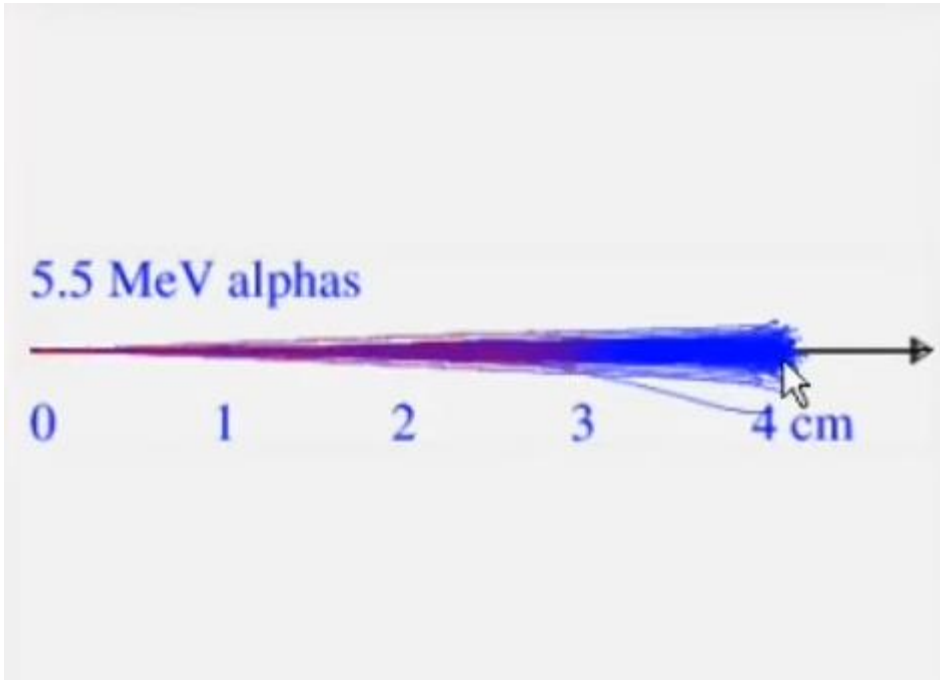
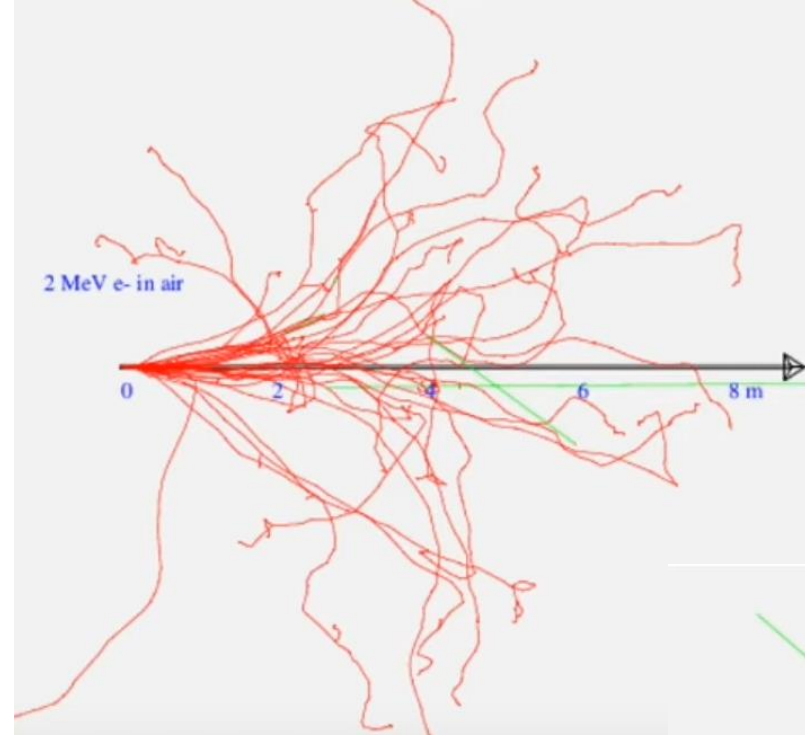
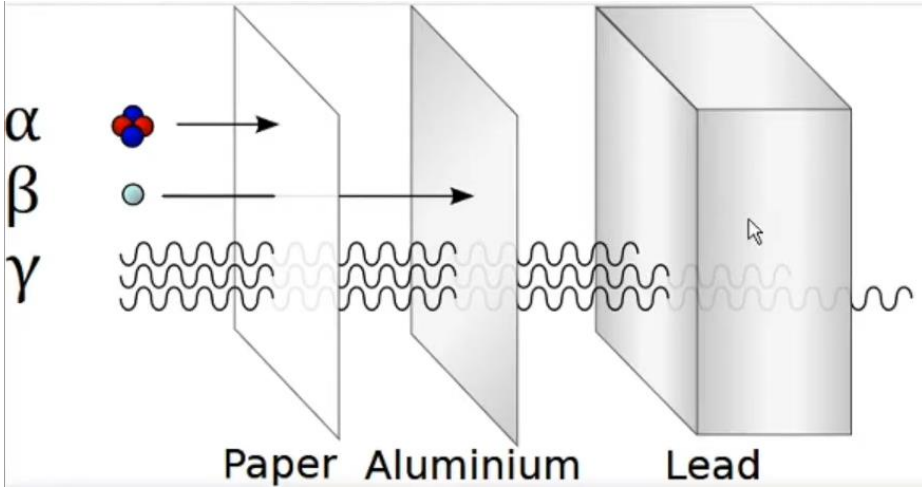
Hadronik yağmur daha karmaşık süreçleri içerir.

Ancak, benzer model burada da kullanılabilir. Bu durumda enerji çözünürlüğü:

$$\frac{\sigma_E}{E} \geq \frac{0.50}{\sqrt{E}}$$

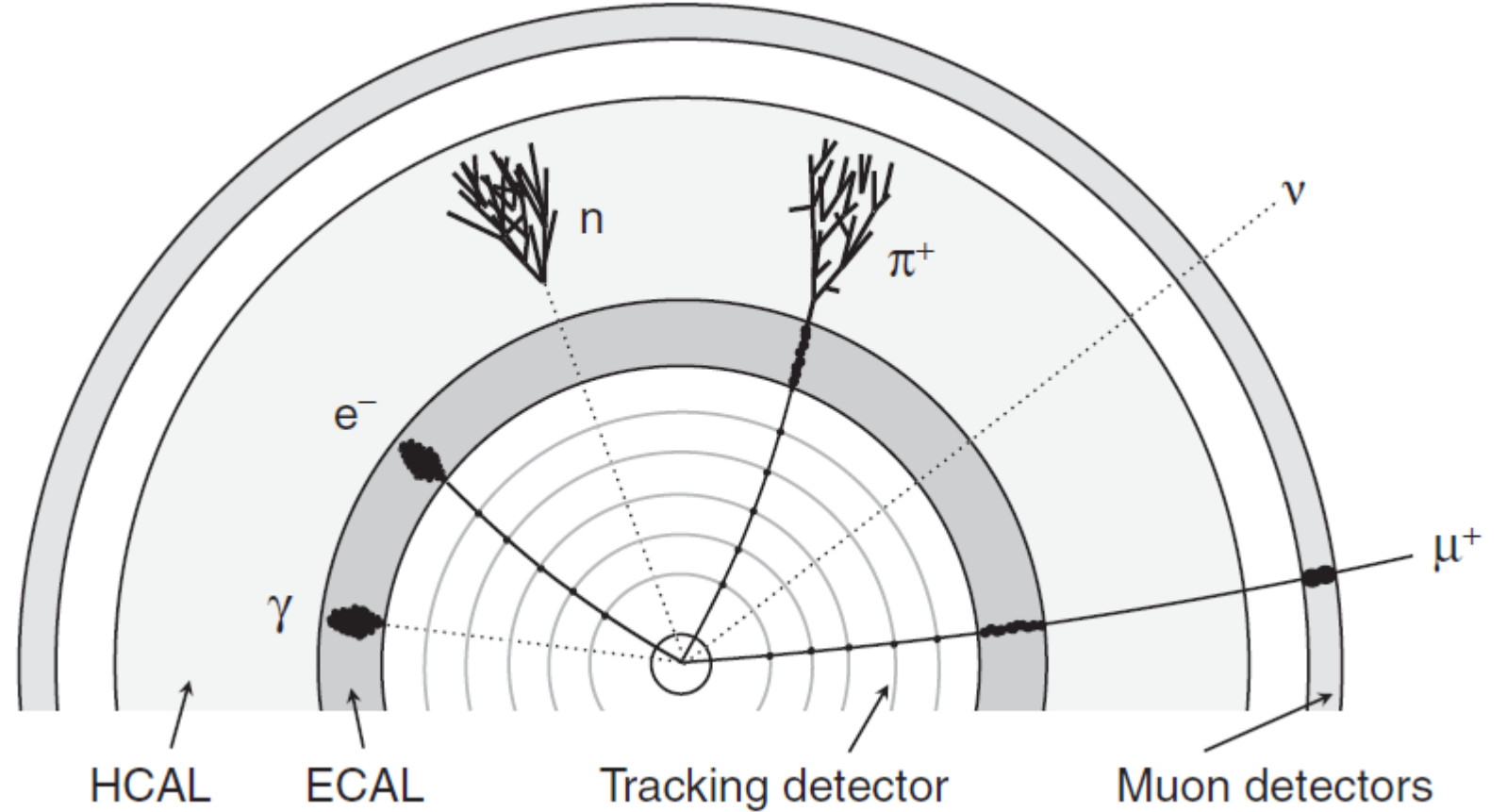
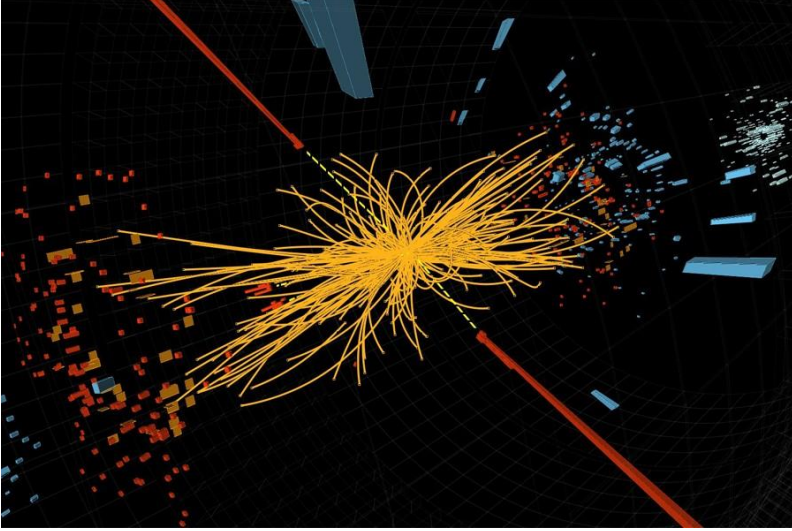


Radyasyon Fiziği



Çarpıştırıcı Deneyleri

Parçacık Çarpıştırıcı deneylerinde farklı tipte algıçlar kullanılır.



Kaynaklar

- [1]. <https://pdg.lbl.gov/2021/reviews/rpp2020-rev-passage-particles-matter.pdf> (2019)
- [2]. <https://cds.cern.ch/record/2674116/files/660.pdf> (2018)
- [3]. A. Das, *Introdunction Nuclear and Particle Physics 2ndEd*, World Scientific (2003)
- [4]. G.E. Knoll, *Radiation Detection and Measurement 3rd Ed*, John Wiley & Sons, Inc. (1999)
- [5]. W.R. Leo, *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments 2nd Ed*, Springer (1994)