



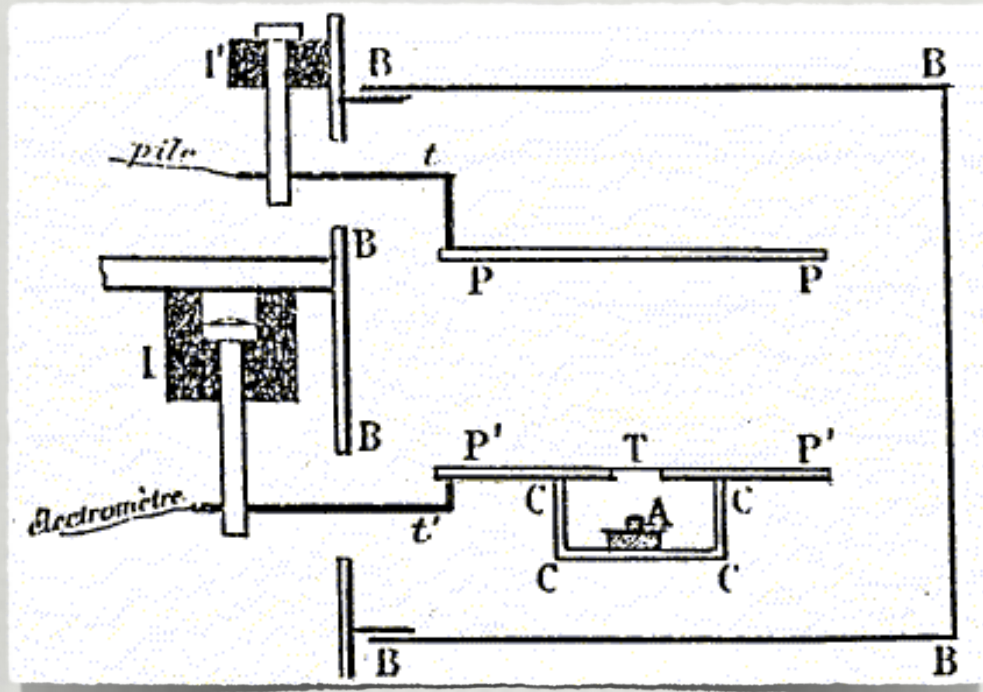
Parçacıkların Maddeyle Etkileşimi

V. Erkan Özcan
Boğaziçi Üniversitesi

10 Şubat İÇ12025, TÜBİTAK TBAE

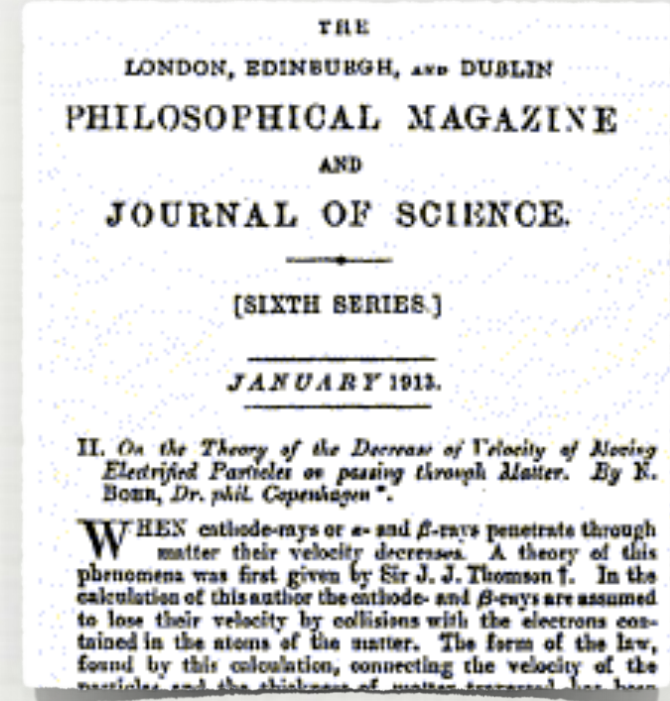
Biraz Tarih

- Radyasyonun madde ile etkileşiminin anlaşılması parçacık fiziğinin tarihiyle iç içe olmuştur. Örneğin iyonların hedefle etkileşimine bakalım...



1900: M. Curie'nin deney düzeneği:

A noktasındaki radyoaktif kaynaktan çıkan ışınlar, T ile işaretlenmiş ince filmden geçip, P-P' elektrometresinde ölçülecek akımı sağlıyorlar.

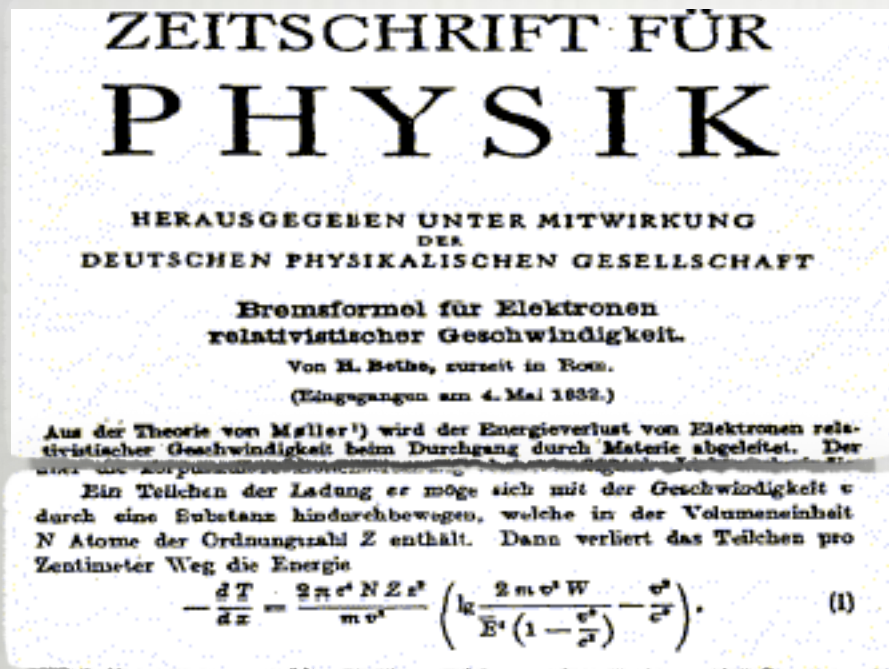


1913-15: N. Bohr adlı bir doktora sonrası araştırmacı, elektronlarla etkileşim sebebiyle gerçekleşen enerji kaybının, çekirdekle etkileşim sebebiyle olandan kat kat büyük olması gerektiğini çıkarıyor.

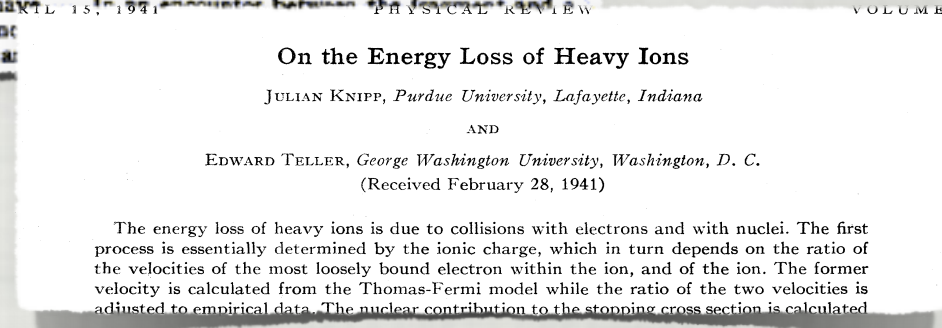
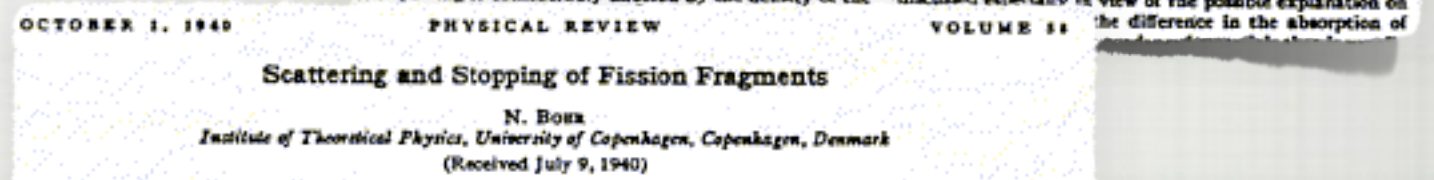
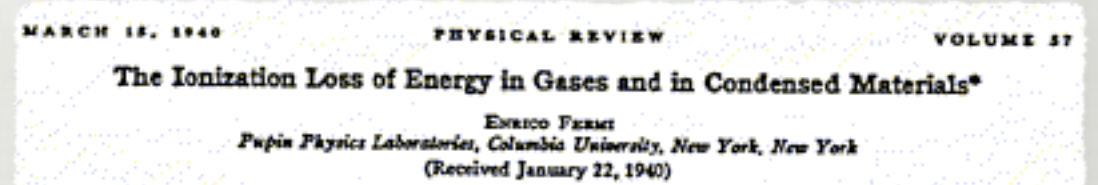
(Rutherford atom modeli 2 yaşında.)

Biraz Daha Tarih

- 30lar ve 40lar, kuantum mekaniğinin uygulamaları ve atom bombası...



1930lar: H. Bethe, kuantum mekaniği ve rölativite ile hesap yaparak günümüzde Bethe-Bloch formülü diye bilenen durduma kuvveti formülünü geliştiriyor.

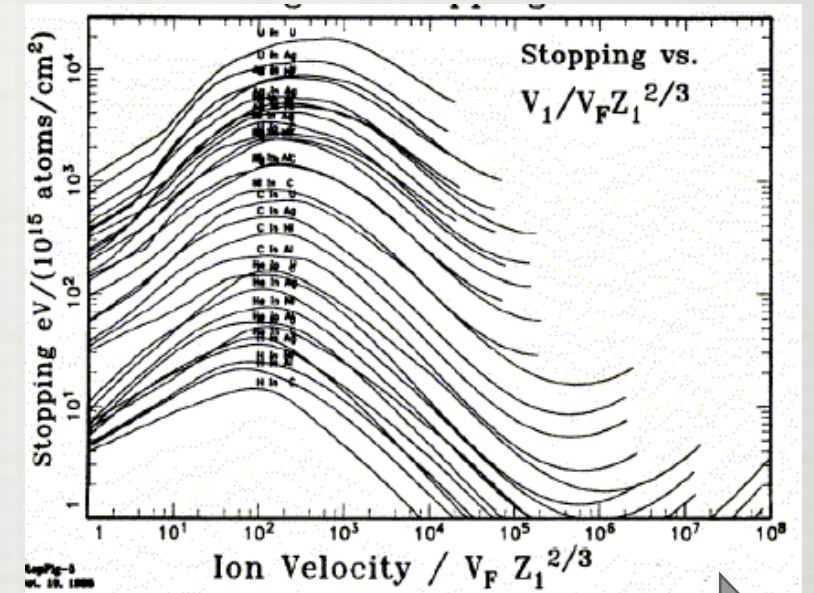
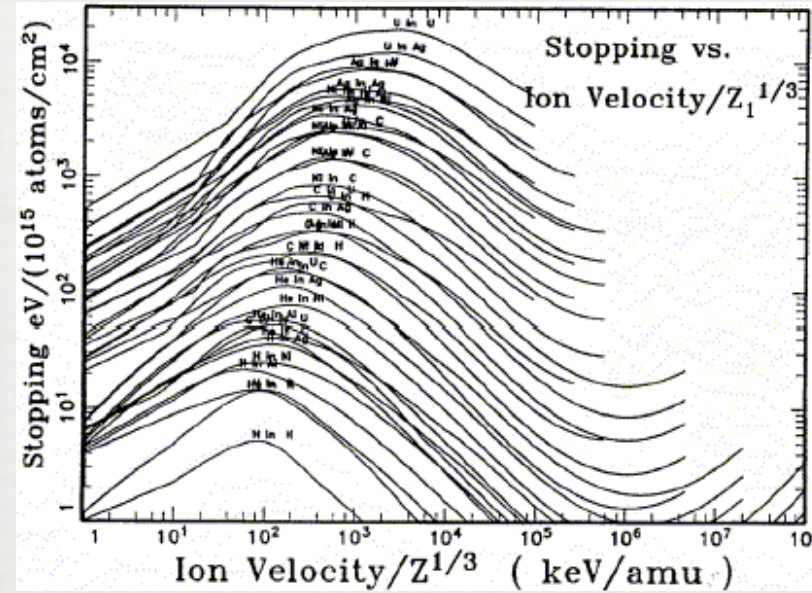
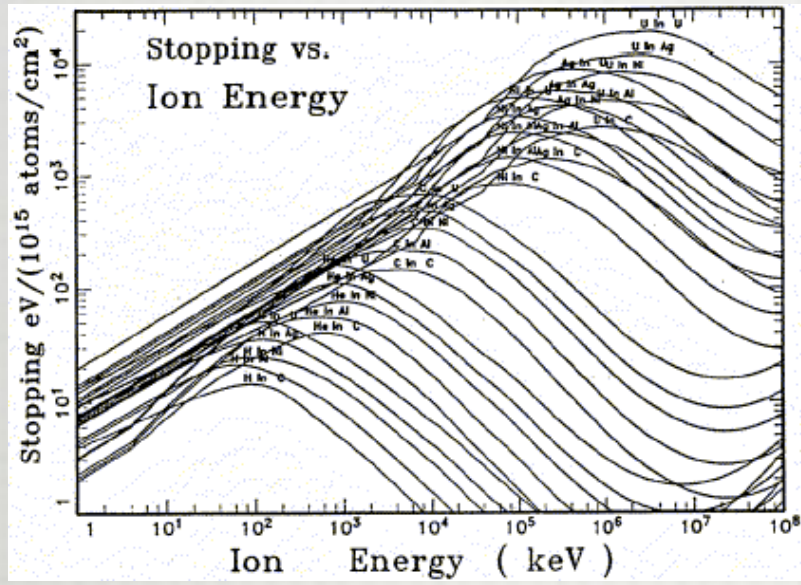


1940ların başı: Fisyon ürünlerine karşı zırhlama önem kazanıyor. (Bohr, Lamb, Knipp, Teller, Fermi,...) Elektronlarını tamamen kaybetmemiş ağır iyonlar düşünülerek efektif yük kavramı dolaşıma giriyor.

$$Z_1^* = Z \frac{1}{3} \frac{V}{V_0}$$

Biraz Daha Yakın Tarih

- 40ların sonundan 90lara: enerji kayıplarının %5-6 seviyesinde anlaşılması...



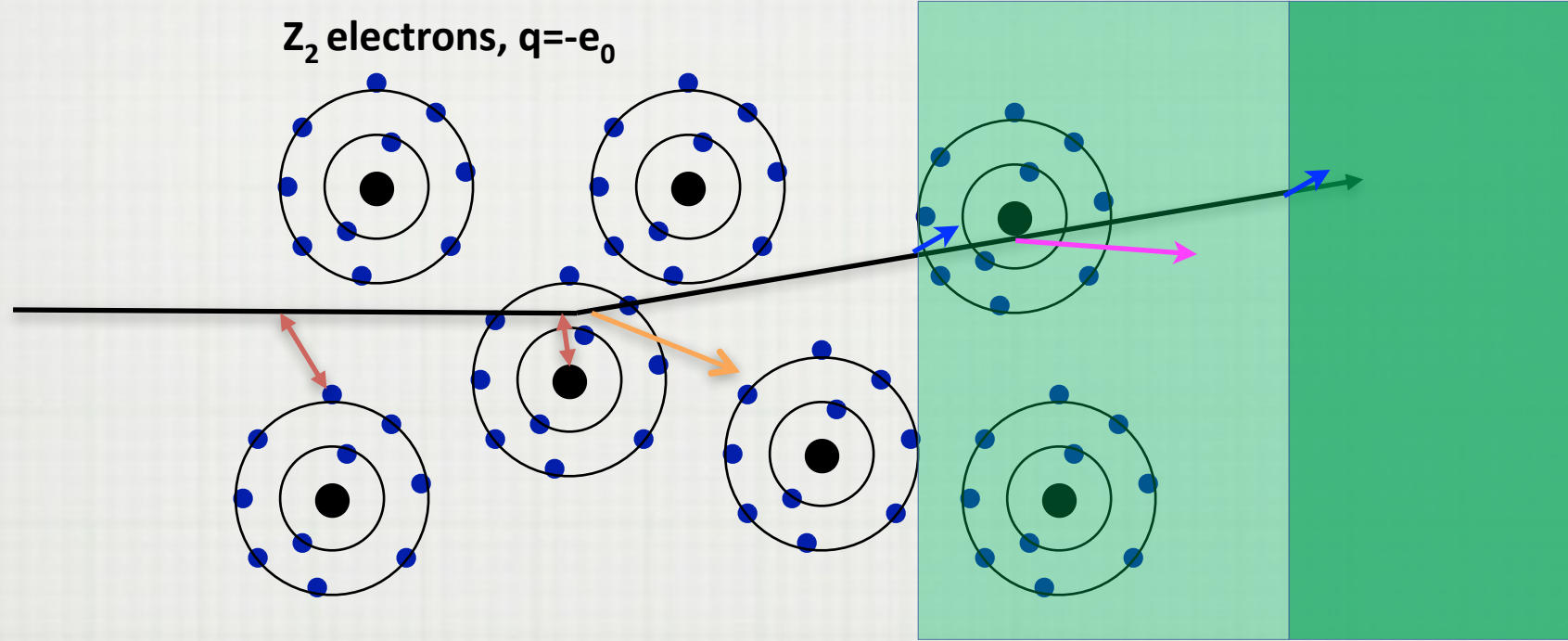
1940lardan 80lere: Bohr, Landau, Lindhard, Scharff, Schiott, Brandt, Kitagawa,...

Hareket eden parçacıkların efektif yükü içinde buldukları maddenin Fermi hızına göre belirlenir. Maddeyi oluşturan atomlardaki yükün perdelenmesi modele eklenir, vs.

Stopping power - Durdurma gücü $\equiv -\langle dE/dx \rangle$, birim mesafedeki ortalama enerji kaybı, genellikle (enerji/yoğunluk) birimleriyle (MeV/(g/cm³)) ifade edilir.

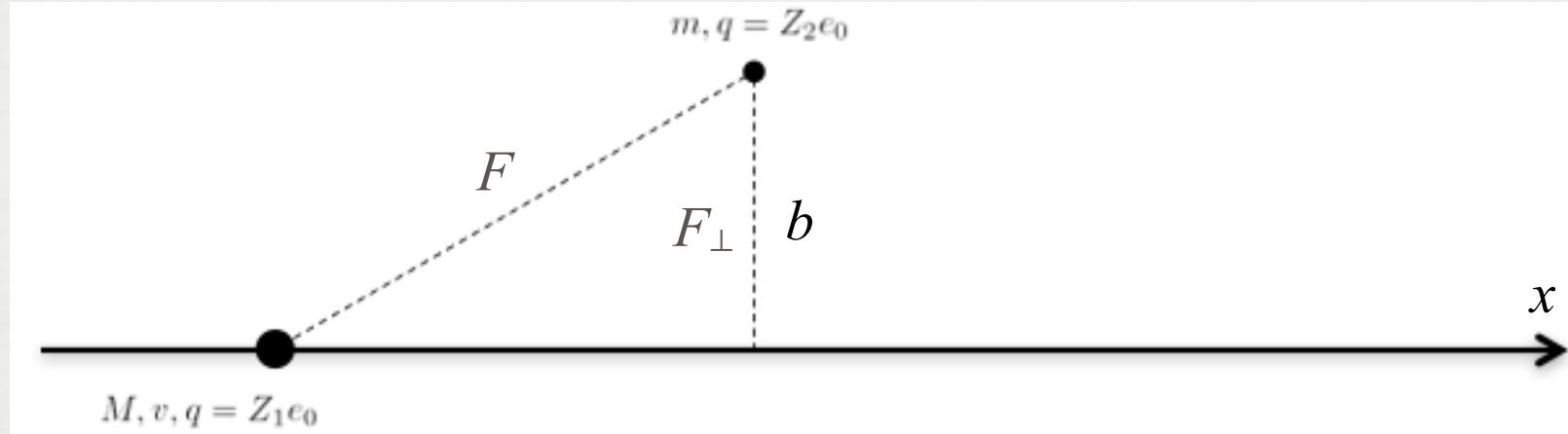
(Not: Birim açısından aslında durdurma kuvveti demek daha doğru olurdu.)

Elektromanyetik Etkileşim



- Yüklü bir parçacığı maddenin içinden geçirelim:
- Elektronlarla etkileşimler - atomların uyarılması ve iyonlaşması, çoklu saçılma, Bremsstrahlung (ve diğer EM radyasyonu), Çerenkov ışınması, geçiş ışınması.

İki Parçacık Arası Coulomb Kuvveti



- Z_1e_0 yüklü bir parçacık Z_2e_0 yüklü parçacığın yanından geçerken Coulomb kuvveti sebebiyle olan momentum transferi.

$$F_{\perp} = \frac{b}{\sqrt{b^2 + (vt)^2}} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Z_1 Z_2 e_0^2}{b^2 + (vt)^2} \quad \Delta p = \int_{-\infty}^{\infty} F_{\perp} dt = \frac{2Z_1 Z_2 e_0^2}{4\pi\epsilon_0 v b}$$

- Aktarılan enerji: $\Delta E = \frac{(\Delta p)^2}{2m} = \frac{Z_2^2}{m} \frac{2Z_1^2 e_0^4}{(4\pi\epsilon_0)^2 v^2 b^2}$

$$\Delta E(\text{electrons}) = Z_2 \frac{1}{m_e} \frac{2Z_1^2 e_0^4}{(4\pi\epsilon_0)^2 v^2 b^2} \quad \Delta E(\text{nucleus}) = \frac{Z_2^2}{2Z_2 m_p} \frac{2Z_1^2 e_0^4}{(4\pi\epsilon_0)^2 v^2 b^2} \quad \frac{\Delta E(\text{electrons})}{\Delta E(\text{nucleus})} = \frac{2m_p}{m_e} \approx 4000$$

- O halde, bu şekilde kaybedilen enerjinin çoğu elektronlarla etkileşim sebebiyle.

Not: Bu hesap relativistik yapıldığında da aynı sonuçları alırız. Deneyebilirsiniz.

Hedefin İyonlaşması, Uyarılması

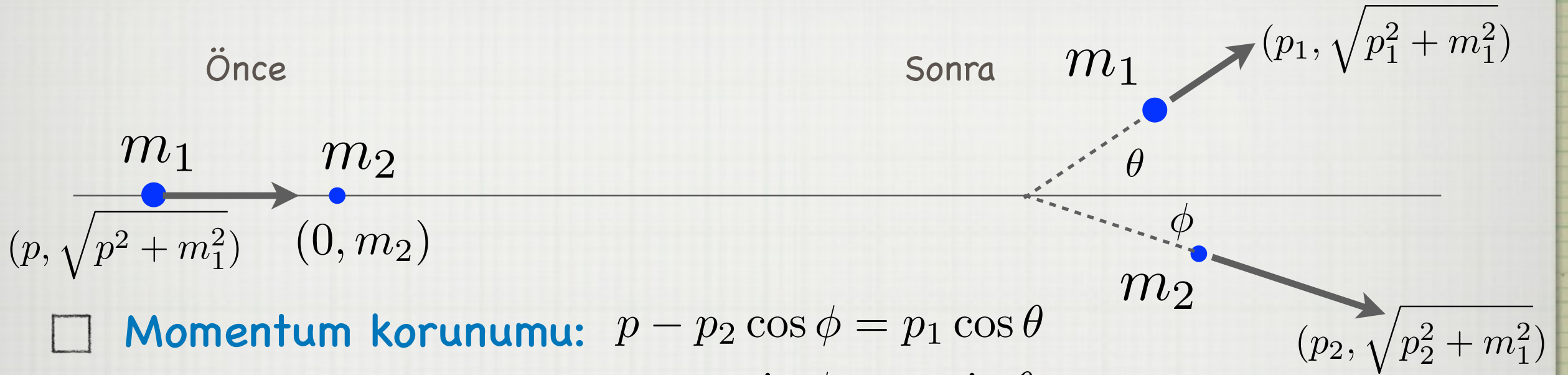
$$\Delta E(\text{electrons}) = \frac{2Z_2 Z_1^2 m_e c^2}{\beta^2 b^2} \frac{e_0^4}{(4\pi\epsilon_0 m_e c^2)^2} = \frac{2Z_2 Z_1^2 m_e c^2}{\beta^2 b^2} r_e^2$$

- Hedef madde: Atom ağırlığı A , atom numarası Z_2 , yoğunluk ρ :
- Birim hacme düşen atom sayısı (cm^{-3}): $N_A \frac{\rho}{A}$
- 0 halde herşeyi bir araya getirip b üzerinden integral alabiliriz.
- İntegral limitleri: $b_{\min}=0$ olmamalı, olabilecek en yüksek enerji transferine karşılık gelmeli. => Göreli kinematikle hesaplayabiliriz.
- b_{\max} =sonsuz olmamalı, aktarılabilecek en düşük enerji transferine karşılık gelmeli. => Ortalama olarak hedefin iyonlaşma/uyarılma enerjisi seviyesinde alabiliriz.

$r_e \equiv$ elektronun klasik yarıçapı

Azami Enerji Aktarımı

$c=1$



Momentum korunumu: $p - p_2 \cos \phi = p_1 \cos \theta$

$$p_2 \sin \phi = p_1 \sin \theta$$

$$p^2 - 2pp_2 \cos \phi + p_2^2 = p_1^2$$

Enerji korunumu: $\sqrt{p^2 + m_1^2} + m_2 = \sqrt{p_1^2 + m_1^2} + \sqrt{p_2^2 + m_2^2}$

Aktarılan enerji: $T = \sqrt{p_2^2 + m_2^2} - m_2 = \frac{2m_2 p^2 \cos^2 \phi}{(m_2 + \sqrt{p^2 + m_1^2})^2 - p^2 \cos^2 \phi}$

Elektronlara aktarılan azami enerji: $T_{max} = \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{1 + 2\gamma m_e / m_1 + (m_e / m_1)^2}$

Acaba yazılanlar doğru mu? Üç denklem, dört bilinmeyen. T için olan formülü kontrol edebilir misiniz?

Bethe Formülü

- İntegrali aldığımızda ortaya çıkan sonuç (T_{max} azami enerji, I ortalama uyarılma enerjisi):

$$\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = -2\pi r_e^2 m_e c^2 \frac{Z_1^2}{\beta^2} N_A \frac{Z}{A} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{max}}{I^2} \right]$$

- Bethe formülü:

$$\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = -4\pi r_e^2 m_e c^2 \frac{Z_1^2}{\beta^2} N_A \frac{Z}{A} \times 2 \times \left[\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right]$$

kuvantum mekaniği

"density effect" -
maddenin polarize olması.

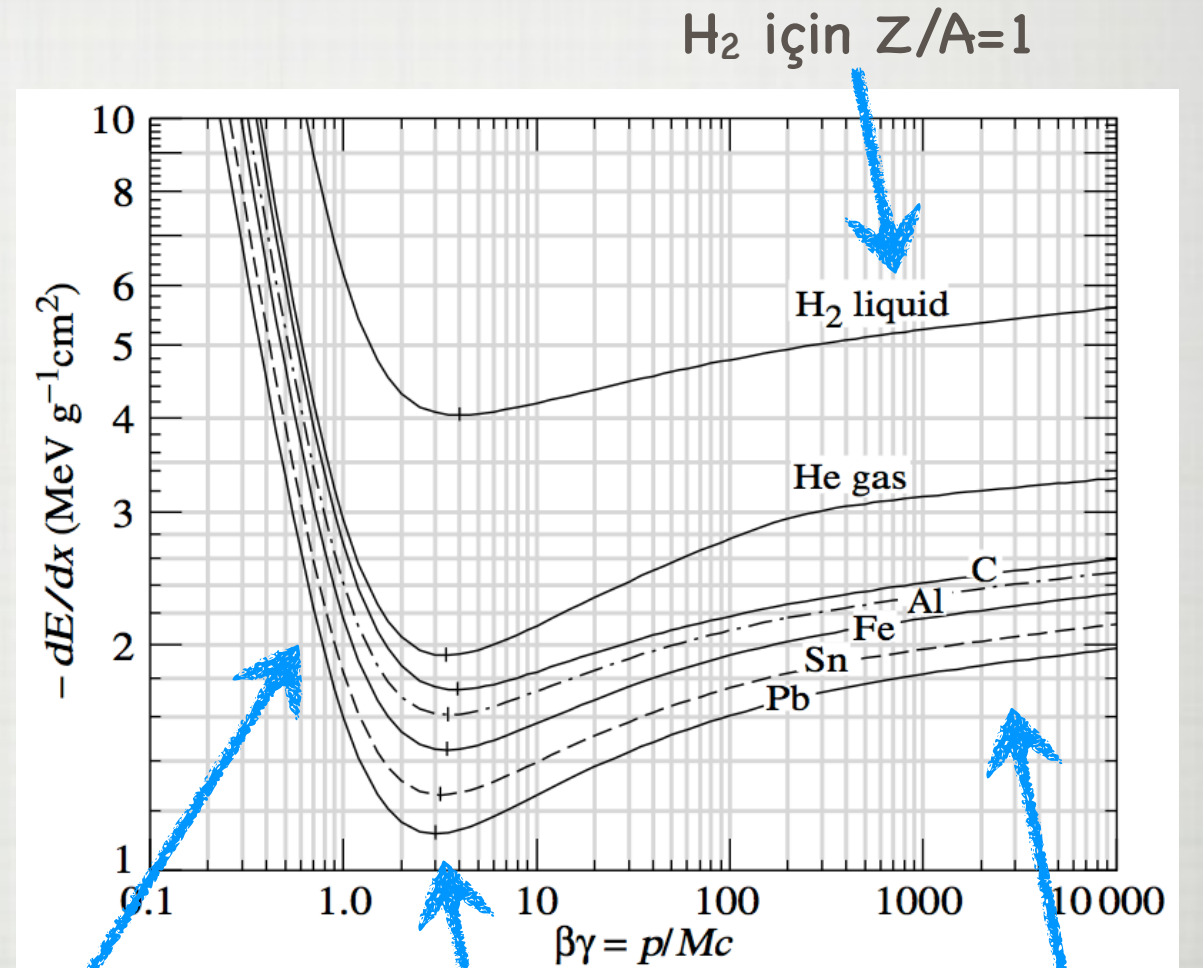
$$\delta(\beta\gamma) = \ln h\omega_P/I + \ln \beta\gamma - 1/2$$

elektronun spini

kinematik terim:
 $\langle dE/dX \rangle \propto \beta^{-2}$

$\beta\gamma \approx 3-4$:
minimum iyonlaşma.

Fermi platosu



Dikkat: Hesap yaparken, yoğunlukla (ρ) çarpmayı unutmayın!

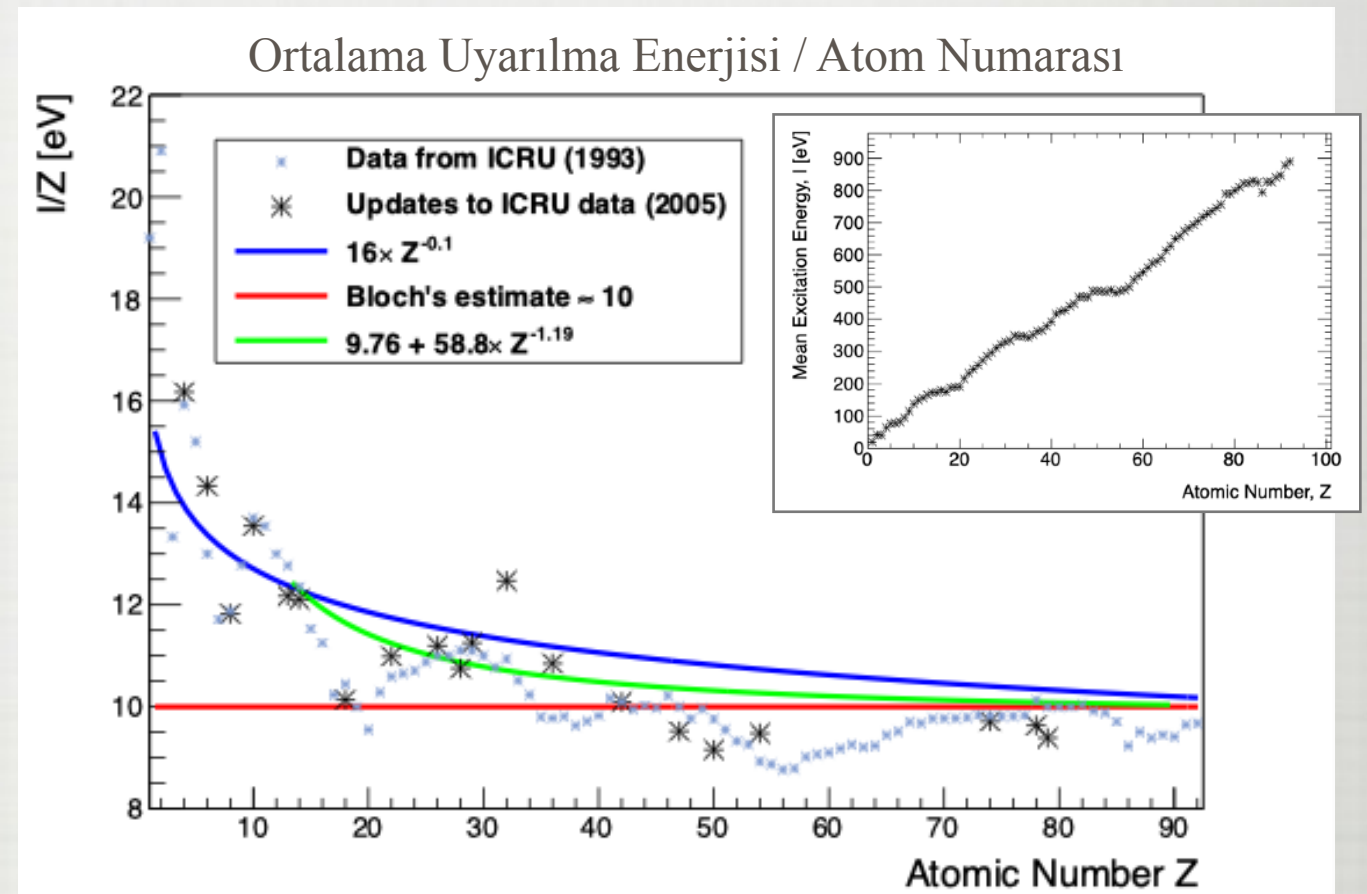
Bethe Formülü Hakkında Birkaç Ufak Nokta

□ Deneysel parçacık fiziğinin bu belki en ünlü formülü hakkında yaygın yanlış anlamalar olabiliyor.

□ Adı özellikle bazı eski kaynaklarda Bethe-Bloch. Bloch, 1933: $I/Z \sim 10\text{eV}$

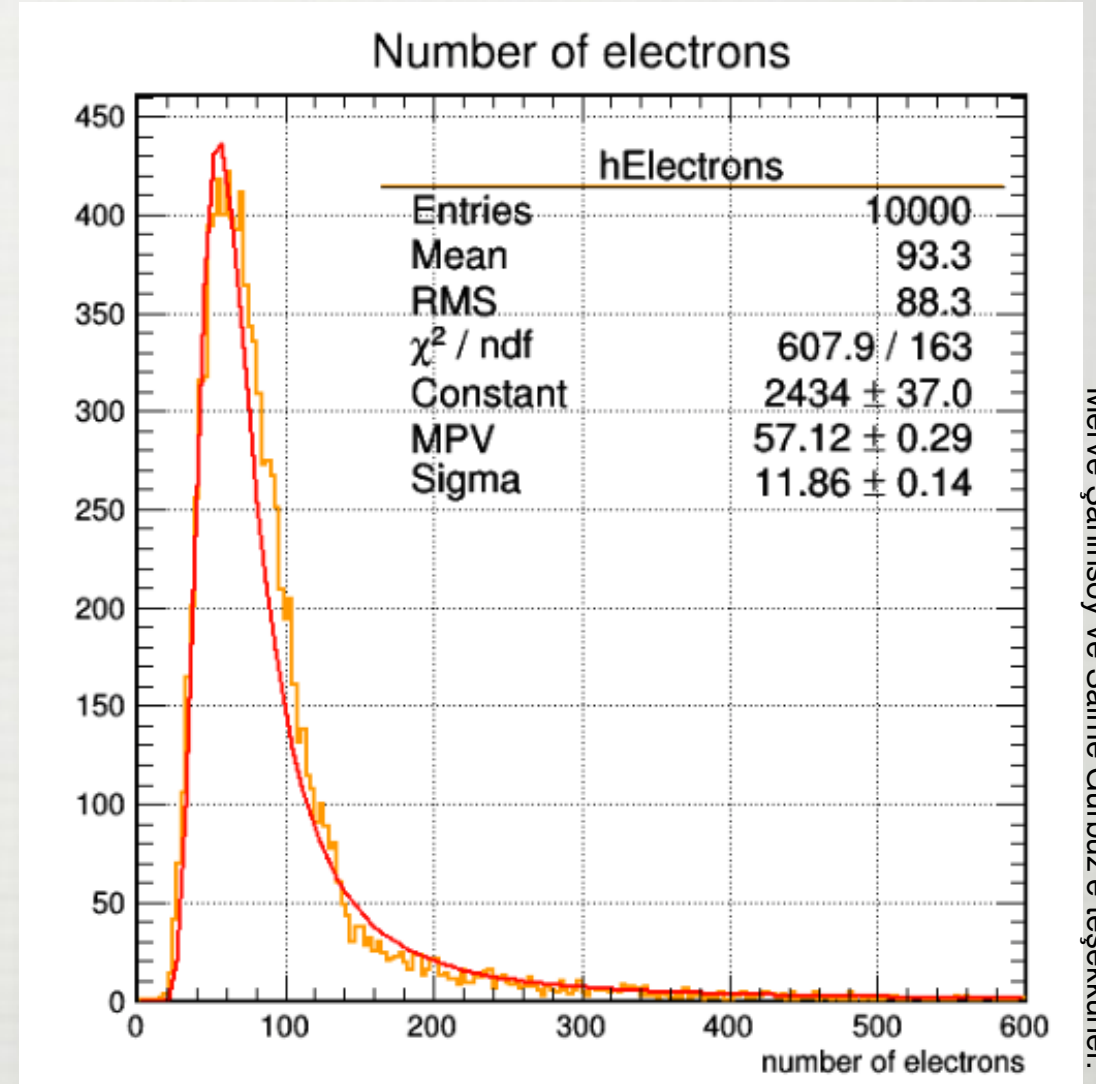
□ Bethe formülü parçacığın "kendi" ışınım yapmasını içermiyor.

□ Bethe formülünü türetirken maddeyle tüm elektromanyetik etkileşimi modellemeye çalıştık. Maddenin (algıcın) içerisinde bırakılan bu enerjinin ne olacağını tartışmadık. Bu enerji atomları uyarabilir, iyonize edebilir, vs. Algıç tasarlarken ne olacağını bilmek önemli.



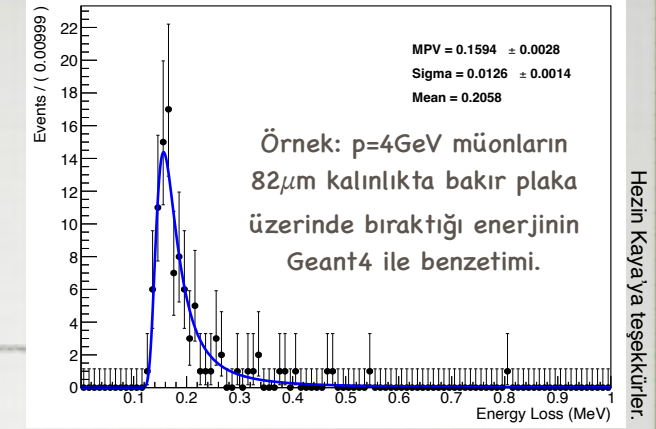
Enerji Kaybının Dağılımı

- Bethe formülünün ortalama enerji kaybını ifade ettiği sıklıkla unutuluyor. Ortalamanın içerisinde ender rastlanan ama çok fazla enerji transferi yapan tek tük olayların etkisi büyük.
- Bir benzetim programını (Geant, Fluka, Garfield, vs.) ilk kez yüklediğinizde birinci yapılacak iş.
- İnce** bir hedef alın, içinden müon vs. geçirin ve kayıp enerji miktarına bakın.
 - Dağılım Landau'ya oturuyor mu?
 - Dağılımın ortalama değeri, Bethe hesabını tutuyor mu?



Örnek: Garfield ile Argon gazı içinde 120MeV protonların ortaya çıkarttığı elektron sayısı.

Landau Dağılımı



Hezin Kaya'ya teşekkürler.

- PDF eğer hedef ince ise, öyle ki ortalama kaybedilecek enerjinin bir çarpışmada kaybedilebilecek azami enerjiye oranı 0.01'den küçükse ($k \equiv \langle \Delta \rangle / T_{max} < 0.01$) Landau dağılımı olur:

$$\xi = 2\pi N_A r_e^2 m_e c^2 Z_1^2 \frac{Z}{A} \frac{d}{\beta^2} \rho \simeq \langle \Delta \rangle$$

$$f(\Delta; \beta, d) = \frac{1}{\xi} \phi(\lambda)$$

$$\lambda = \frac{\Delta}{\xi} - \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 \xi}{I^2} - \beta^2 - 1 + \gamma_E$$

Euler-
Mascheroni
sabiti \approx
0.5772

$$\phi(\lambda) = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty e^{-u \ln u - u\lambda} \sin(\pi u) du$$

- 0.01 < k < 10 arasında Symon ya da Vavilov teorileri kullanılabilir. k > 10 için ise Gaussian pdf yaklaşımı geçerli.
- Dikkat: $\phi(\lambda)$ fonksiyonunun ortalama değeri ve daha yukarı momentleri tanımlı değil.

İpucu: Landau fonksiyonu ROOT'da TMath::Landau olarak mevcut.

Gaussian ve Landau girişim örneği için ise: <http://root.cern.ch/root/html/tutorials/fit/langaus.C.html>

Kalın Hedeflerde Enerji Kaybı

- Kalın hedeflerde ise ($k > 10$) enerji kaybının dağılımı, Gaussian bir pdf (olasılık yoğunluk fonksiyonu) ile modellenenir.
- Eğer CLT (merkezi limit teoremi) kullanılabilecek kadar kalın, ama parçacığın madde içerisinde hareket halindeyken kaybettiği enerji sebebiyle hızında olacak düşüşün göz ardı edilebilir seviyede kalacağı miktarda da ince bir hedefimiz varsa...

Dikkat:
Yoğunluğu
koyduk bu
sefer!

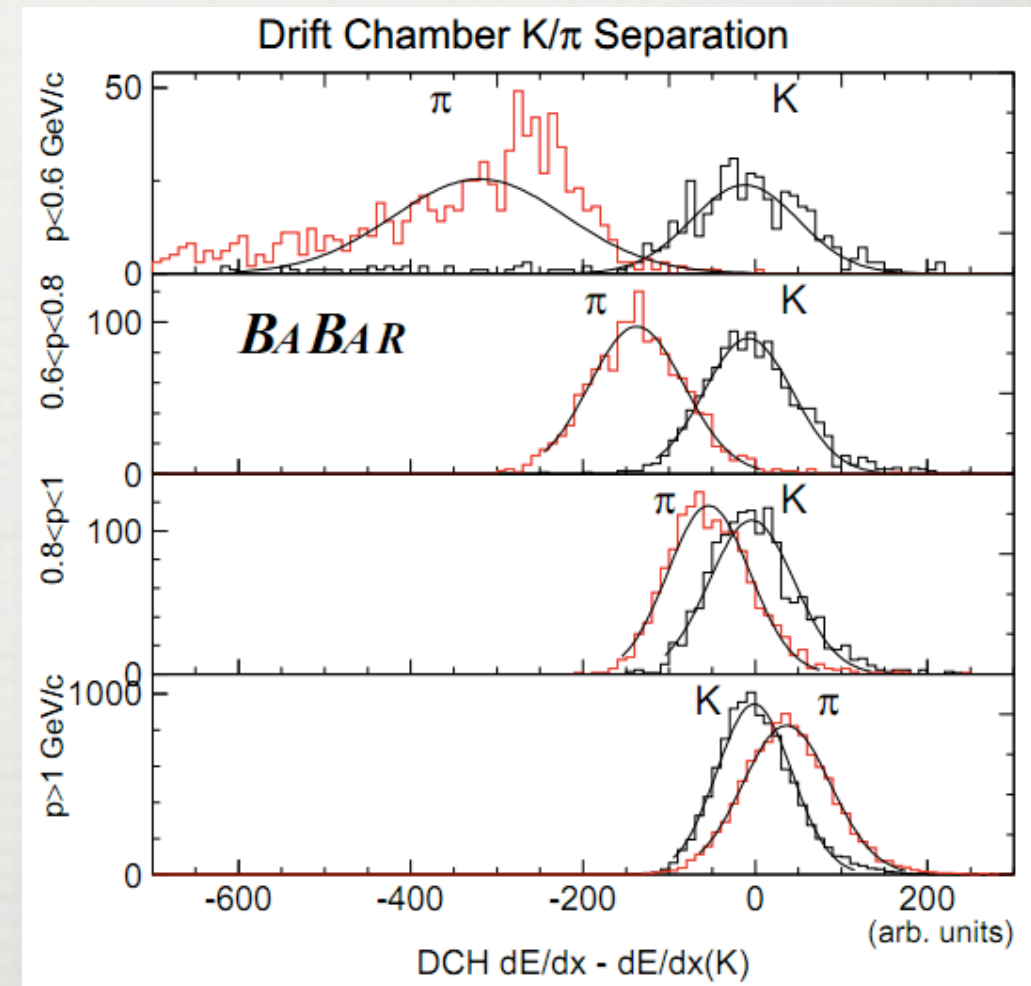
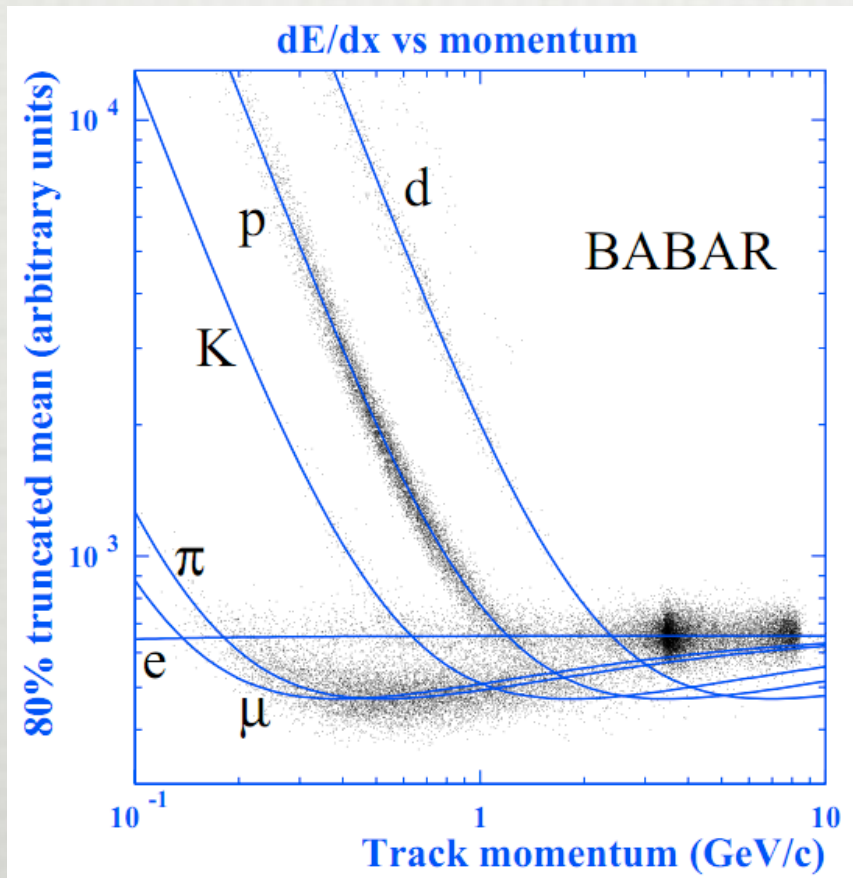
$$f(\Delta; \beta, d) \propto \exp\left(\frac{\Delta^2 - \langle \Delta \rangle^2}{2\sigma^2}\right) \quad \sigma^2 = \left(1 - \frac{\beta^2}{2}\right)\gamma^2 \times \underbrace{4\pi N_A r_e^2 m_e^2 c^4 \rho \frac{Z}{A} d}_{\text{Born terimi}}$$

- d = hedefin kalınlığı. Δ = parçacığın geçerken bıraktığı enerji.
 $\langle \Delta \rangle$ = ortalama enerji kaybı (Bethe formülünden \times yoğunluk ρ)

Acaba yazılanlar doğru mu? σ^2 formülü üzerinde boyut/birim analizi yapabilir misiniz?

dE/dx İle Parçacık Türünün Belirlenmesi

- Bethe formülünde giren parçacığın sadece hızı (ve yükü) rol oynuyor. Eğer yüklü bir parçacığın momentumunu da ölçebiliyorsak, kütlelerini ve dolayısıyla hangi parçacık olduğunu bulabiliriz.



M. Kelsey for the BaBar Collaboration,
"Performance and Aging of the BABAR Drift Chamber", SLAC-PUB-10344, 2004.

Parçacıkların Menzili

- Belli bir E_i ilk enerjisi ile bir hedefe girmiş M_p kütleli parçacık durana kadar enerji kaybetsin. Ulaştığı menzil:

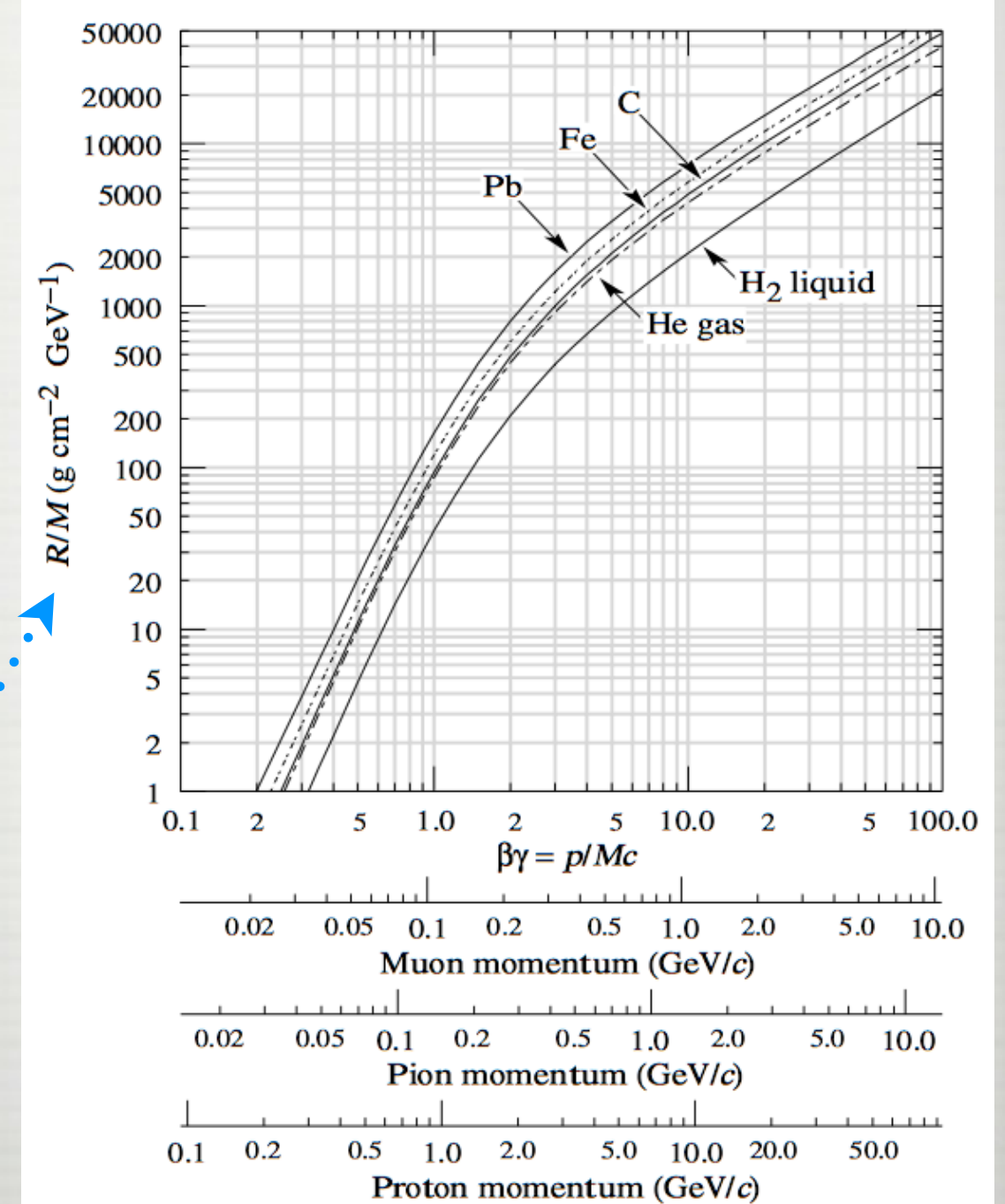
$$R(E_i) = \int_{E_i}^0 \frac{-1}{dE/dx} dE$$

- $E = \gamma mc^2$ olduğunu hatırlarsak:

$$R(\beta_i \gamma_i) = \frac{M_P}{\rho} \frac{1}{Z_1^2} \frac{A}{Z} f(\beta_i \gamma_i)$$

- Materyalin ne olduğundan çok etkilenmeyen bir sonuç:

$$\frac{\rho}{M_P} R(\beta_i \gamma_i) = \frac{1}{Z_1^2} \frac{A}{Z} f(\beta_i \gamma_i)$$



Pratik Menzil Hesapları

- Diyelim bir radyasyon zırhı hesabı yapmak istiyoruz, veya elimizdeki belli madde için olan veriyi parmak hesabıyla çabucak başka bir madde için kullanmak istiyoruz.
- Azami enerjisi E_β [MeV] olan β ışınları için azami menzil [g/cm²] (zırhtan çıkabilen betaların miktarının pratikte doğal fon seviyesine düştüğü menzil), Katz-Penfold formülü:

$$R_\beta^{max} = \begin{cases} 0.412E_\beta^{1.265-0.0954 \ln(E_\beta)} & 0.01 \leq E_\beta \leq 2.5 \\ 0.530E_\beta - 0.106 & E_\beta > 2.5 \end{cases}$$

- **Ağır parçacıkların menzilleri [mm]:**

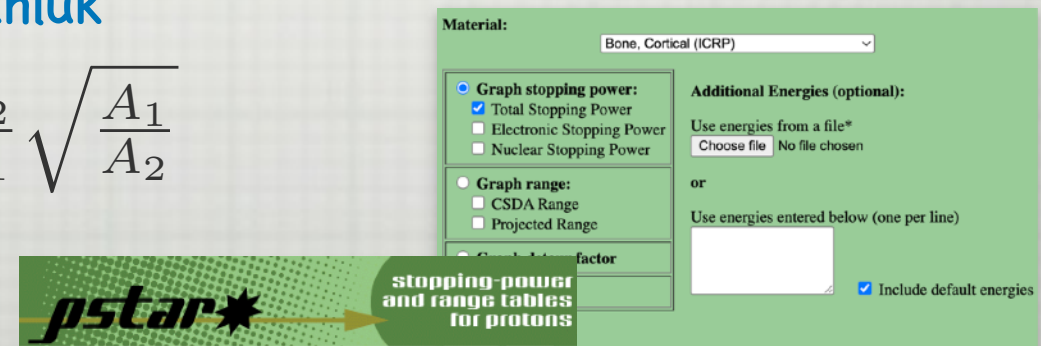
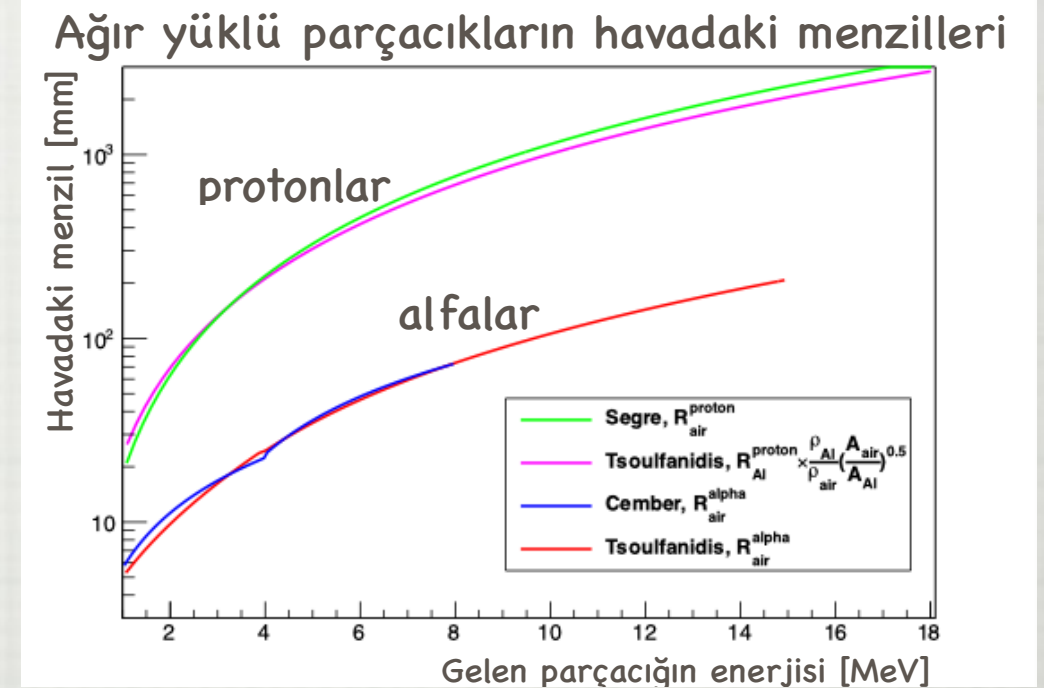
$$R_\alpha^{air} = \begin{cases} \exp(1.61\sqrt{E_\alpha}) & 1 < E_\alpha [\text{MeV}] \leq 4 \\ (0.05E_\alpha + 2.85)E_\alpha^{1.5} & 4 < E_\alpha [\text{MeV}] \leq 15 \end{cases}$$

$$R_p^{Al} = \begin{cases} 0.421E_p^{1.5874} & 1 < E_p [\text{MeV}] \leq 2.7 \\ 0.105E_p^2 / (6.8 + 4.34 \ln E_p) & 2.7 < E_p [\text{MeV}] \leq 20 \end{cases}$$

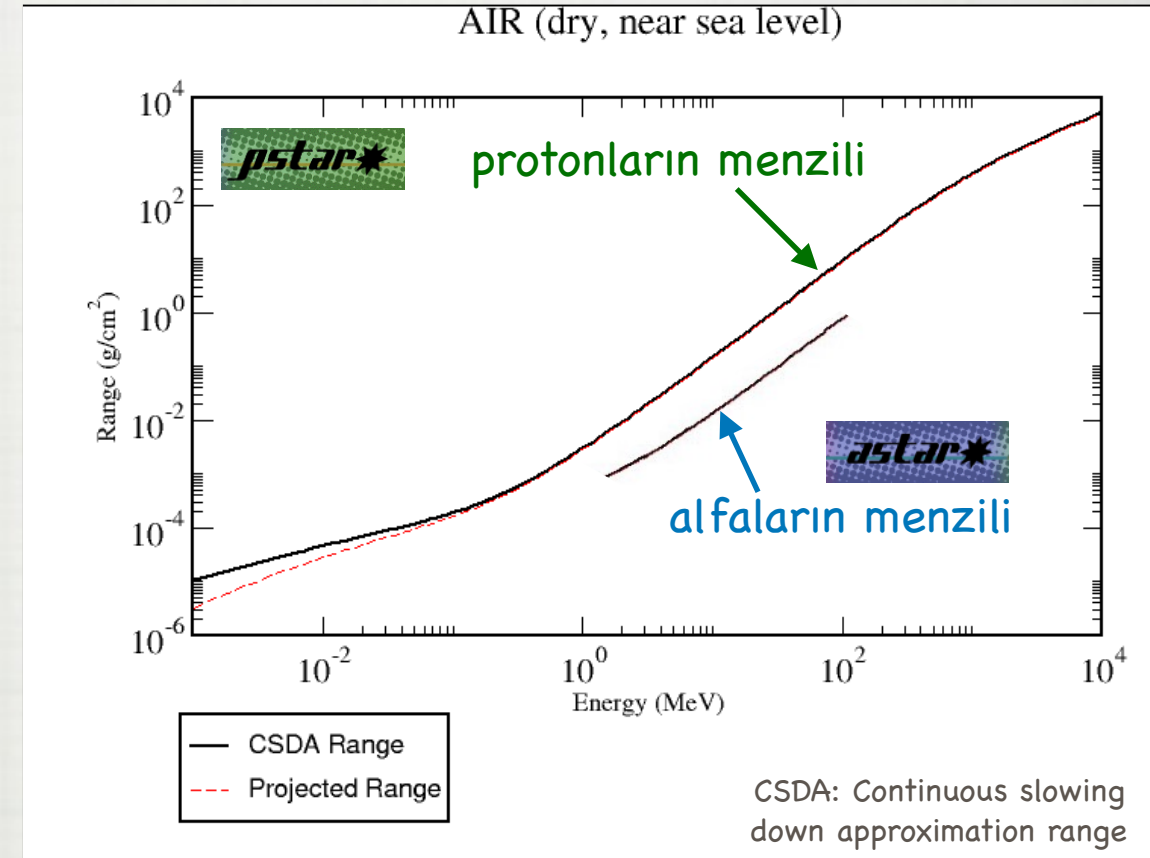
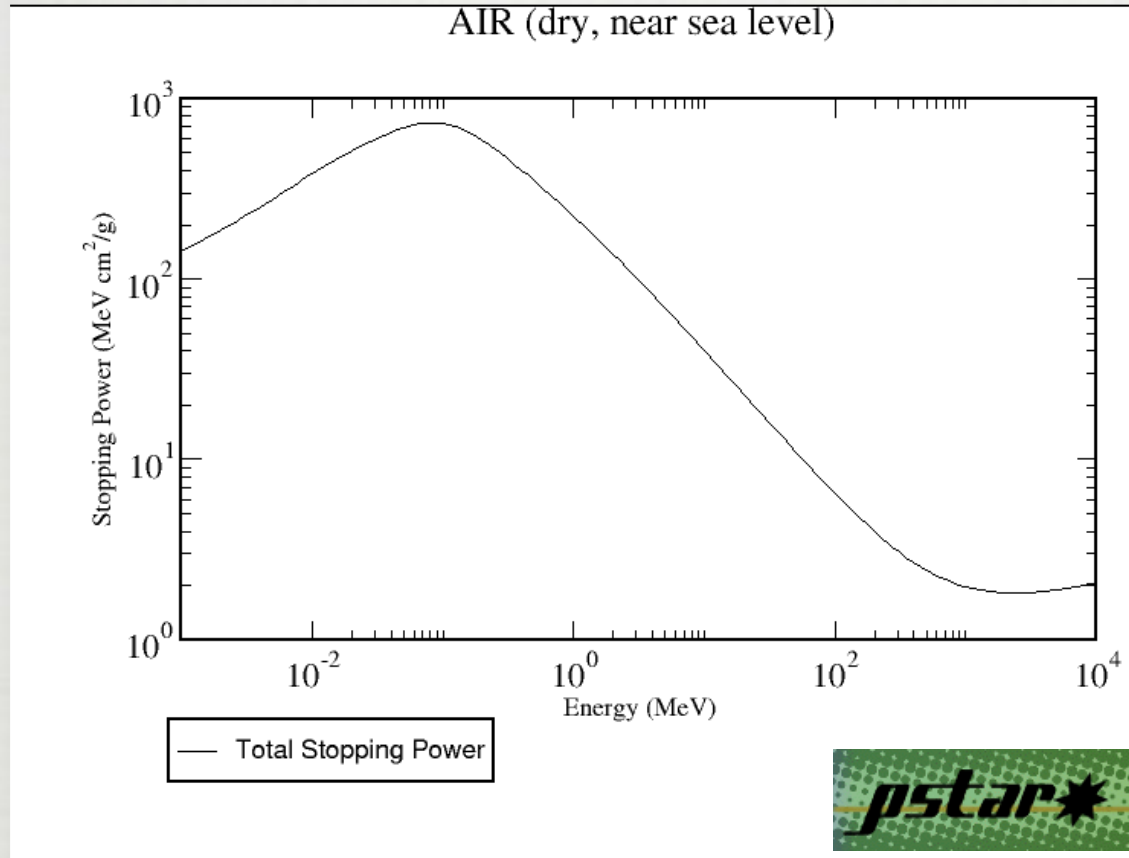
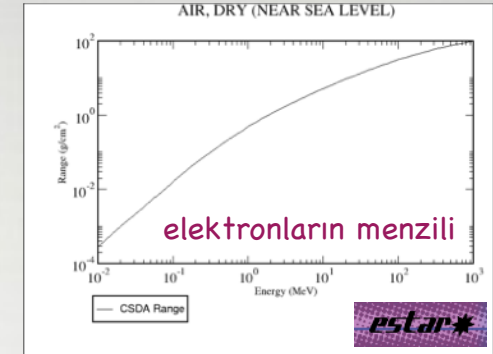
- **Bragg-Kleeman kuralı: Ağır parçacıkların yoğunluk ve yaklaşık atom ağırlığı bilinen iki ayrı hedefteki menzillerinin oranı.**

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1} \sqrt{\frac{A_1}{A_2}}$$

- Ya da elinizde internet varsa: PSTAR, ASTAR.



NIST PSTAR Örneği



- Bileşik ve karışımlar için olan durdurma kuvvetini uygun şekilde ağırlıklı ortalama olarak bulabilir miyiz?
- Farklı parçacıklar için olan benzer veri tabanları da mevcut: ASTAR, ESTAR, XCOM

Composition of AIR, DRY (NEAR SEA LEVEL):

Density (g/cm³) = 1.20479E-03
Mean Excitation Energy (eV) = 85.700000

| COMPOSITION: | |
|---------------|--------------------|
| Atomic number | Fraction by weight |
| 6 | 0.000124 |
| 7 | 0.755267 |
| 8 | 0.231781 |
| 18 | 0.012827 |

ASTAR and PSTAR Materials:

1: Hydrogen submit

Ek ödev: Wilson'ın makalesinde kullandığı formül ile uyumlu mu?

Radiological Use of Fast Protons

ROBERT R. WILSON

Research Laboratory of Physics, Harvard University
Cambridge, Massachusetts

Bragg Tepesi



EXCEPT FOR electrons, the particles which have been accelerated to high energies by machines such as cyclotrons or Van de Graaff generators have not been directly used therapeutically. Rather, the neutrons, gamma rays, or artificial radioactivity have been the primary methods of treatment. These properties make it possible to apply to medical problems. This has been a large part, but not the very short penetration in tissue of protons, deuterons, and alpha particles from present accelerators. Higher energy machines are now under construction and these will in general be energetic enough to have a penetration comparable to body dimensions. It must have occurred to many people that the particles themselves now become of considerable therapeutic interest. The object of this paper is to acquaint medical and biological workers with some of the physical properties and possibilities of these particles.

☐ **dE/dx grafiklerinden de görebildiğimiz üzere, yavaş parçacıklar çabuk enerji kaybediyorlar.**

☐ **Sonuç: "Bragg peak" - Yüklü ağır bir parçacık enerjisinin çoğunu menzilin sonuna yakın bırakır.**

☐ **1946: Robert Rathbun Wilson protonların tıpta kullanılabileceğine işaret eder. Dokuları geçip tümörü hedeflemek mümkün...**

☐ **Bugün değişik giriş enerjisi olan protonlar kullanılarak, yayılmış Bragg tepesi (spread-out Bragg peak) yöntemiyle radyoterapi yapılıyor.**

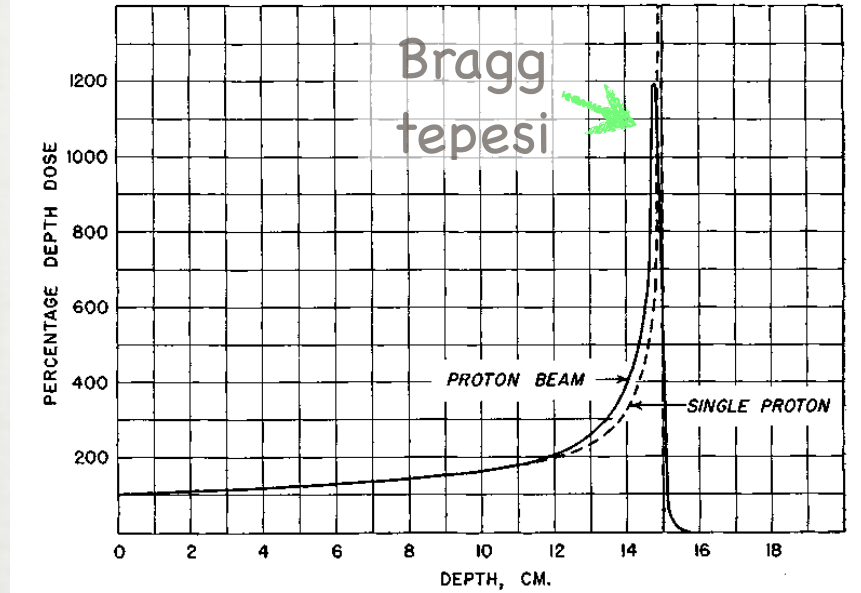
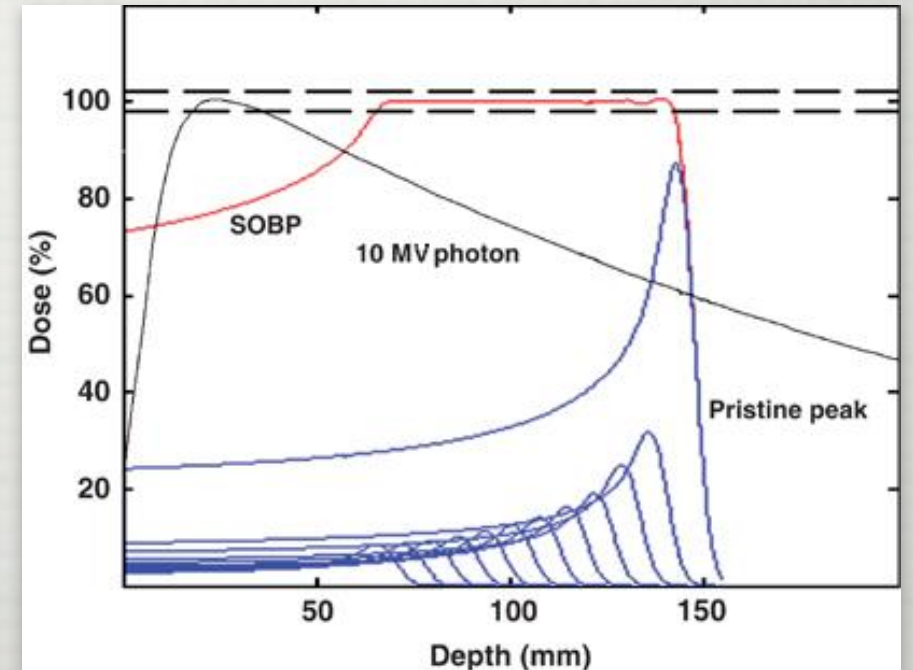


Fig. 2. The dotted curve shows the relative dose due to a single 140 Mev proton. The full curve shows qualitatively the depth dose curve for a beam of 140 Mev protons in tissue.



¹ Accepted for publication in July 1946.

² The range of a proton in air in meters is given by the convenient formula $R = (E/9.29)^{1.8}$ where the energy is expressed in Mev. The range in tissue is 1.11×10^{-3} times the range in air. The stopping power of other substances may be found in Livingston and Bethe: Rev. Mod. Physics 9: 246, 1937. The physical calculations of this paper will be submitted to the *Physical Review* for publication.

Çoklu Saçılma

Multiple Scattering

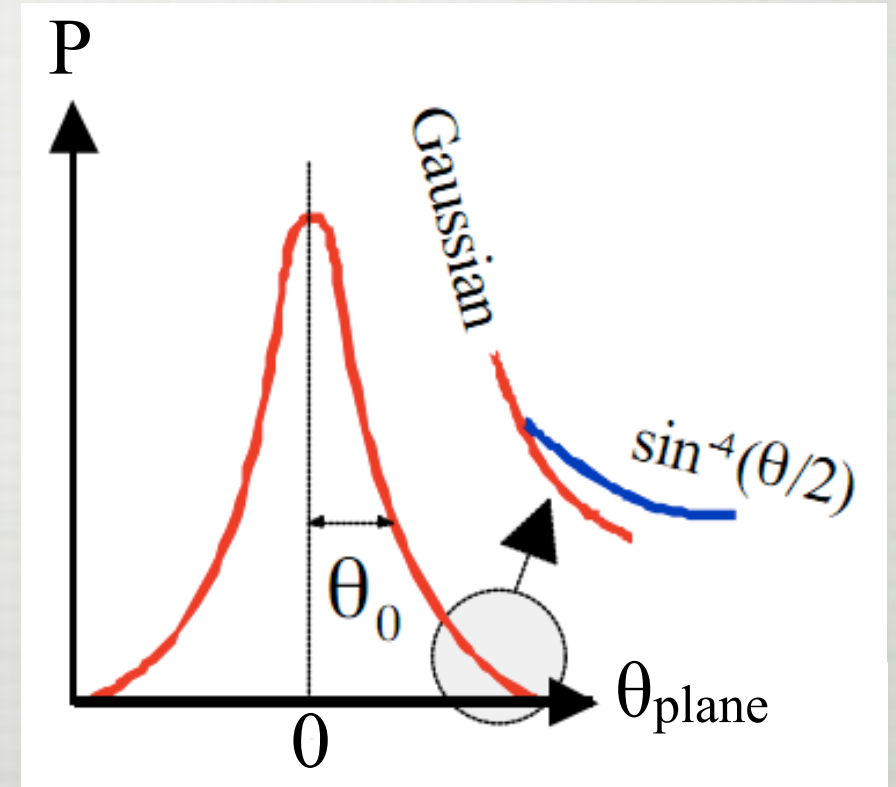
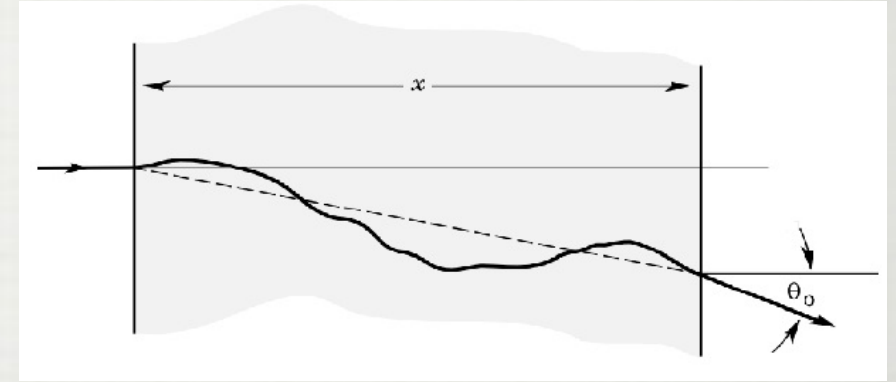
- Yüklü parçacık hedefteki atom çekirdekleriyle etkileşimlerinden az enerji transferi yapsa da, yönü sapabilir. (Eğer parçacık hadronsa, bu çekirdekle güçlü etkileşim de buna katkıda bulunabilir.)

- Bu şekilde çok sayıda etkileşimin sonunda ne kadar sapma olacağı istatistiki yöntemlerle çıkarılabilir.

$$\theta_0 = \frac{13.6 \text{ MeV}}{\beta c P} Z_1 \sqrt{\frac{x}{X_0}} [1 + 0.038 \ln(\frac{x}{X_0})]$$

- Çoklu saçılma iz sürme dedektörlerinin verebileceği en iyi momentum çözünürlüğünü kısıtlar:

$$\frac{\sigma(P_T)^{MS}}{P_T} \simeq \frac{0.045}{B[\text{Tesla}]x[m]} \sqrt{\frac{x}{X_0}}$$



Bremsstrahlung

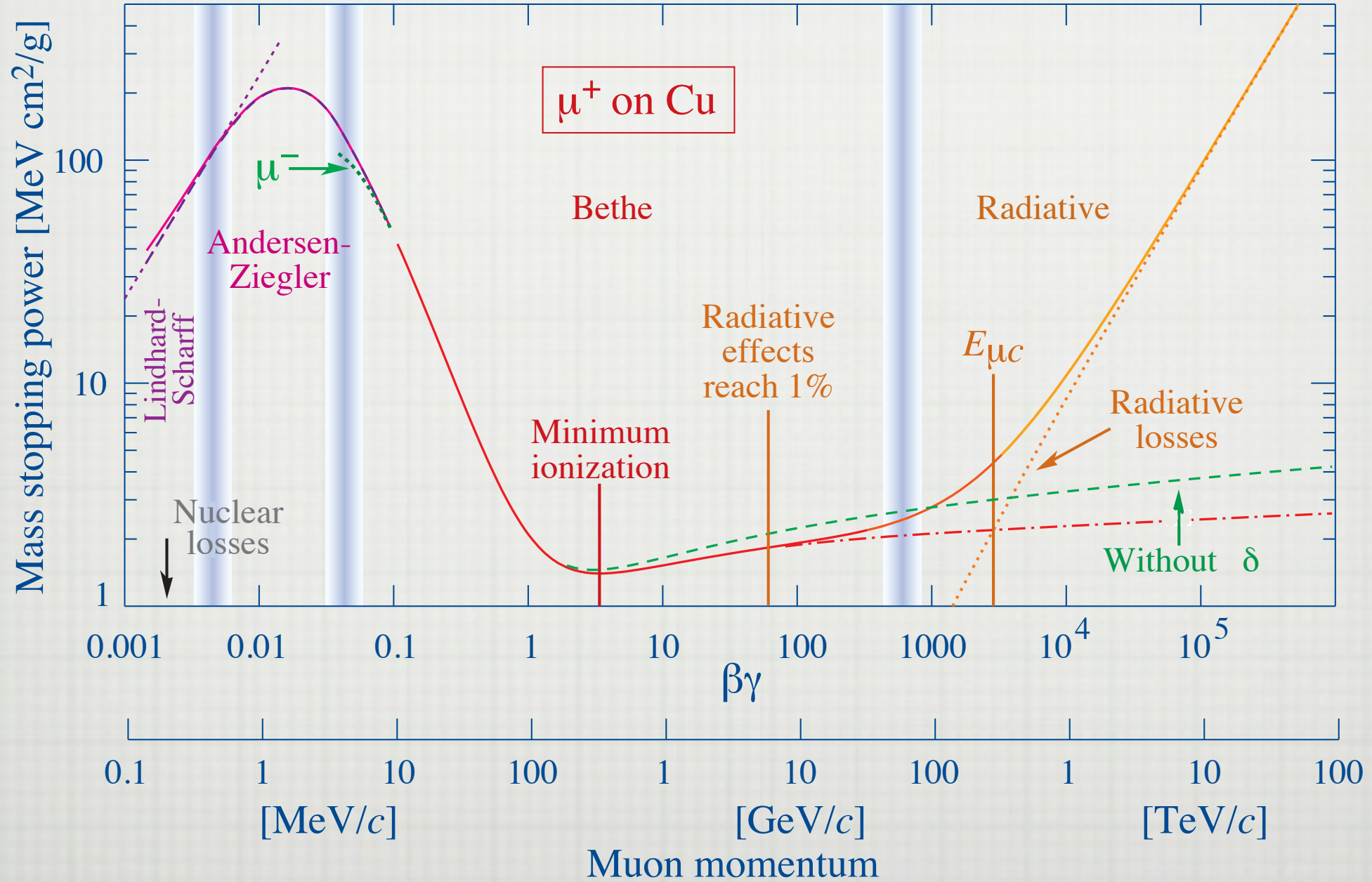
- Bremsstrahlung (frenlenme ışınması): İvmelendirilen herhangi bir yüklü parçacığın yaptığı ışınma.
- Parçacık hedefin atomlarının çekirdekleri tarafından saptırılıyor. Saptırılma sırasında EM ışınma yapıyor.
- Klasik olarak, Maxwell denklemleri ile belli bir momentum transferi sırasında yapılacak EM ışınmanın enerjisini hesaplayabiliriz.
- Bremsstrahlung gelen parçacığın kütlesinin karesiyle ters orantılı. => Özellikle elektronlar ve muonlar için önemli.
- Kritik enerji (E_C)≡Bir parçacığın madde içinde hareket ederken iyonizasyon ve Bremsstrahlung sebebiyle olan enerji kayıplarının eşit olduğu durumdaki enerjisi.
- Elektronlar: $E_C \approx 800 \text{ MeV} / (Z + 1.2)$
Müonlar: $E_{\mu C} \approx 5700 \text{ GeV} / (Z + 1.47)^{0.838}$

$$\frac{E_{\mu C}}{E_C} \propto \frac{m_{\mu}^2}{m_e^2}$$

Dikkat: Kritik enerji katılar/sıvılar ve gazlar için farklılık gösterir.

Dikkat: Kritik enerji için Rossi'nin yukarıdaki tanıma yakın değerler veren ayrı bir tanımı mevcut.

Bethe ve Bremsstrahlung



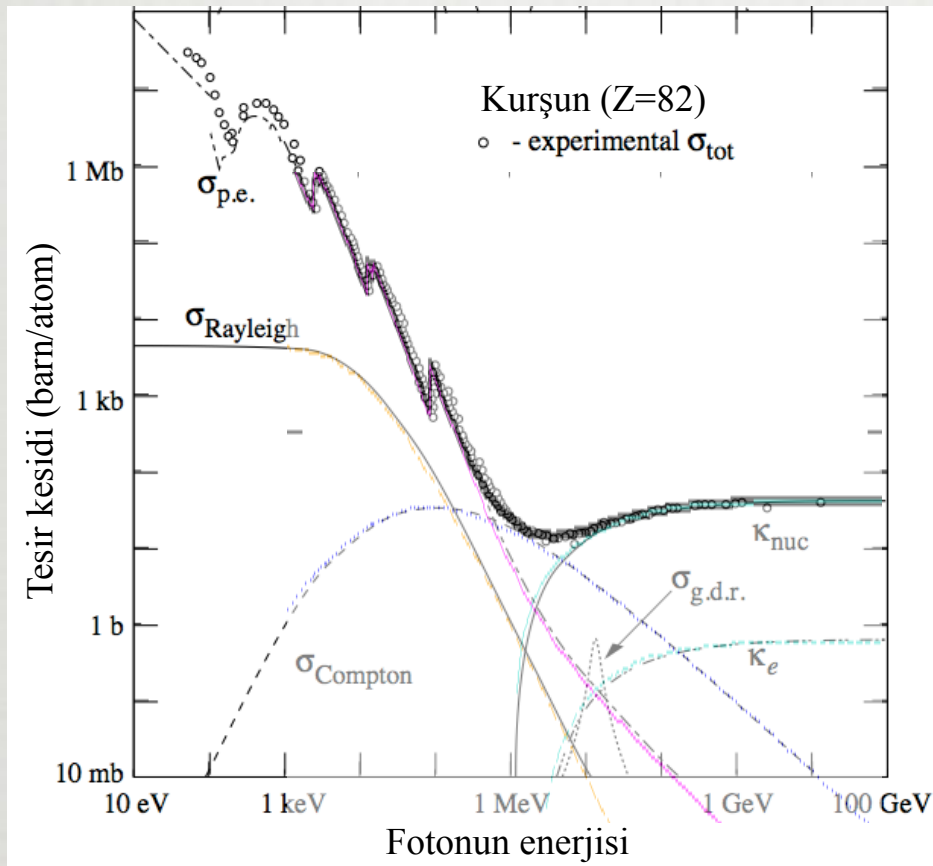
- En az anladığımız bölge: $0.01 < \beta < 0.05$. Bu aralıkta Anderson ve Ziegler tarafından geliştirilmiş fenomenolojik formüller kullanılıyor.

Işınım Uzunluğu

- Bremsstrahlung ile kaybedilen enerjiyi kolay hesaplamayabilmek için, karakteristik bir uzunluk tanımlanır.
- Radiation length, $X_0 \equiv$ Bir elektronun madde içerisindeki kayıplar sebebiyle enerjisinin başlangıçtaki enerjisinin $1/e$ 'sine düştüğü ortalama mesafe. ($E(x) = E_0 e^{-x/X_0}$)
- Değeri tablolardan bulunabilir. Yaklaşık:
$$X_0 = \frac{716.4 \text{cm}^{-2} A}{Z(Z+1) \ln(287/\sqrt{Z})}$$
- Kuantum alan kuramındaki çaprazlama simetrisini kullanarak gösterebiliriz ki, X_0 aynı zamanda bir fotonun madde içerisinde bir elektron-pozitron çiftine dönüşmesi için gereken ortalama yolun $7/9$ 'una eşittir.

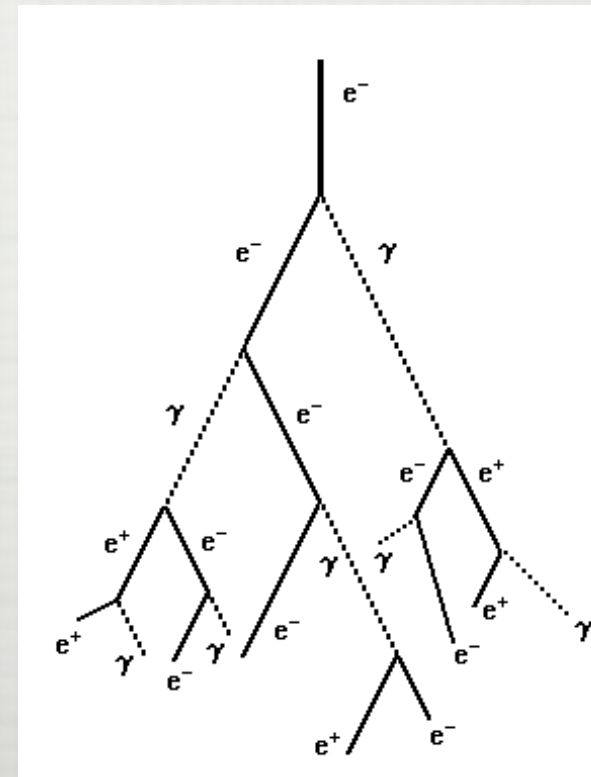
Fotonlar

XCOM

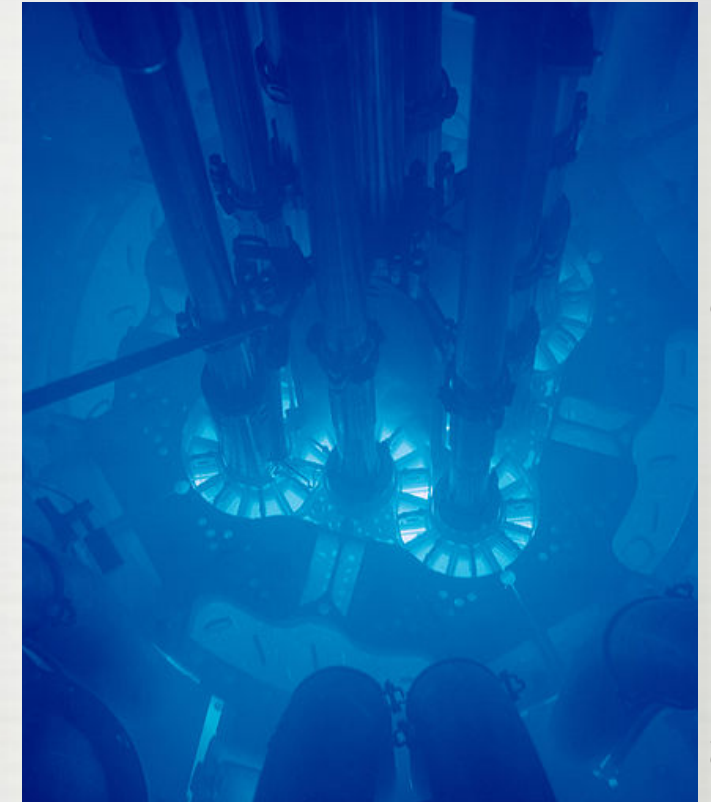
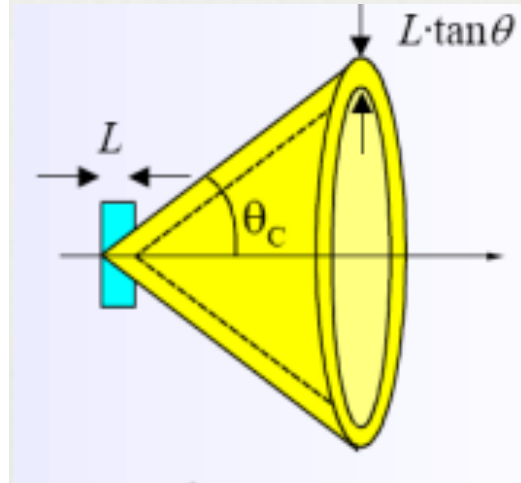
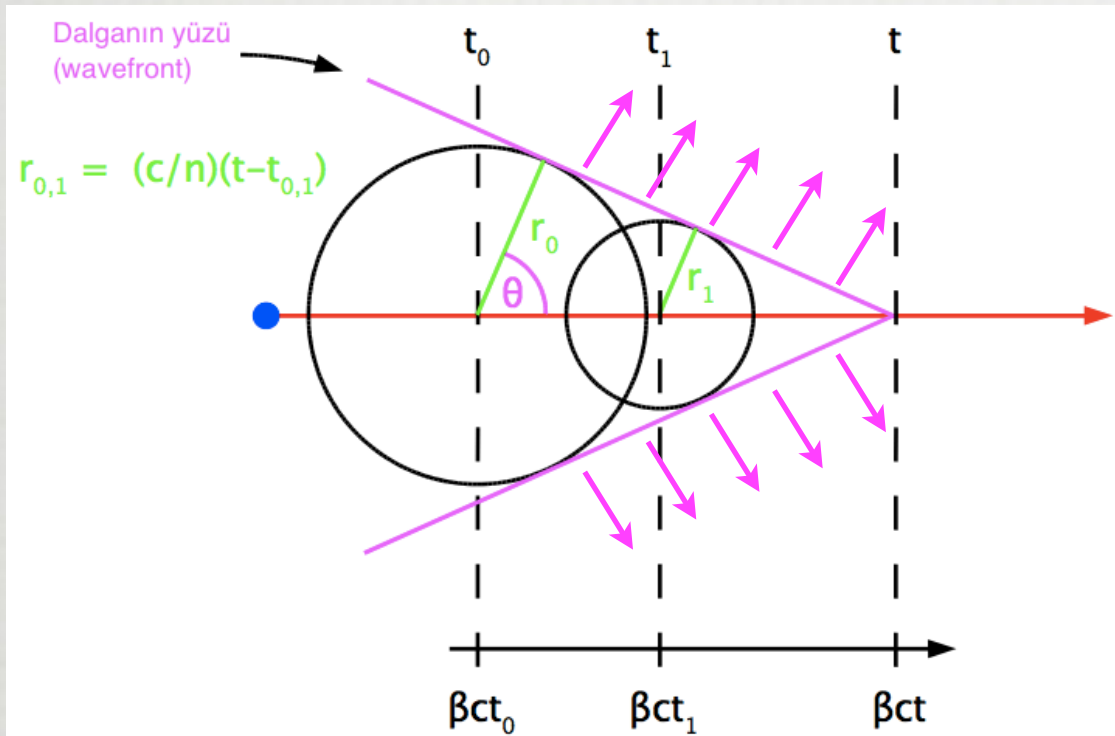


- Enerji yükseldikçe çekirdeğin alanı sebebiyle olan elektron-pozitron çift oluşması (K_{nuc}) en önemli etki olur. (Elektronların alanındaki çift oluşması iki mertebe daha düşük.)
- Yüksek enerjili foton ve elektronlar, çift oluşması ve Bremsstrahlung sayesinde EM çağlayanlar oluşturur.

- Düşük enerjilerde fotonlar için en büyük enerji kaybı fotoelektrik etki (p.e.) ile. İkinci sırada yer alan Rayleigh saçılması (coherent scattering) ise kat kat daha küçük.
- Foton enerjisi MeV seviyesinde ise, özellikle hafif çekirdekli hedeflerde Compton saçılması (incoherent scattering) da önemli rol oynar.



Çerenkov Işıması



Argonne Ulusal Laboratuvarı'ndaki ATR'nin çekirdeği
commons.wikimedia.org/wiki/File:Advanced_Test_Reactor.jpg

- Eğer yüklü bir parçacığın belli bir madde içindeki hızı (β), ışığın o madde içindeki hızından ($\beta_{thr}=1/n$, $n \equiv$ kırılma katsayısı, $n \geq 1$) yüksek ise, parçacık hızı ve ışığın kırılma katsayısı ile ilintili belli bir açıda ($\cos \theta_c = 1/(n\beta)$) ışımaya yapar.

- **Asgari ve azami Çerenkov açıları:**

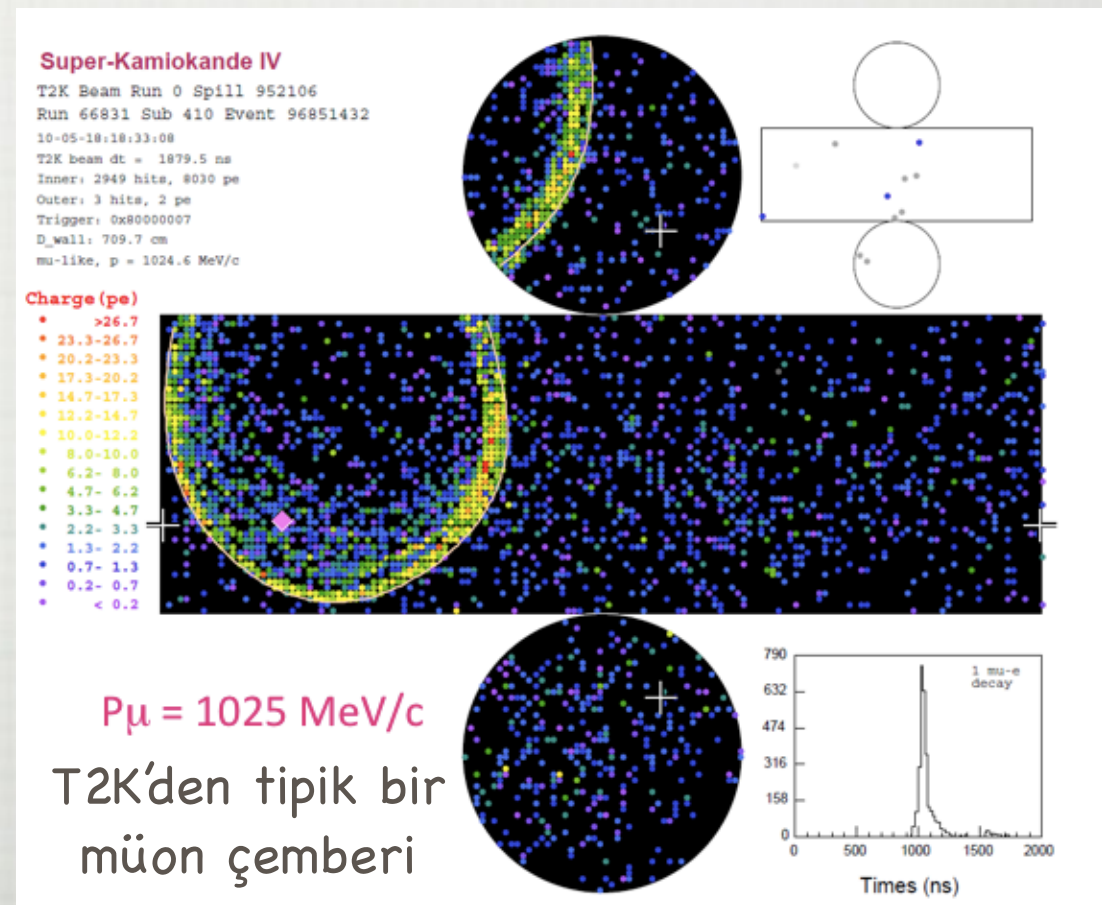
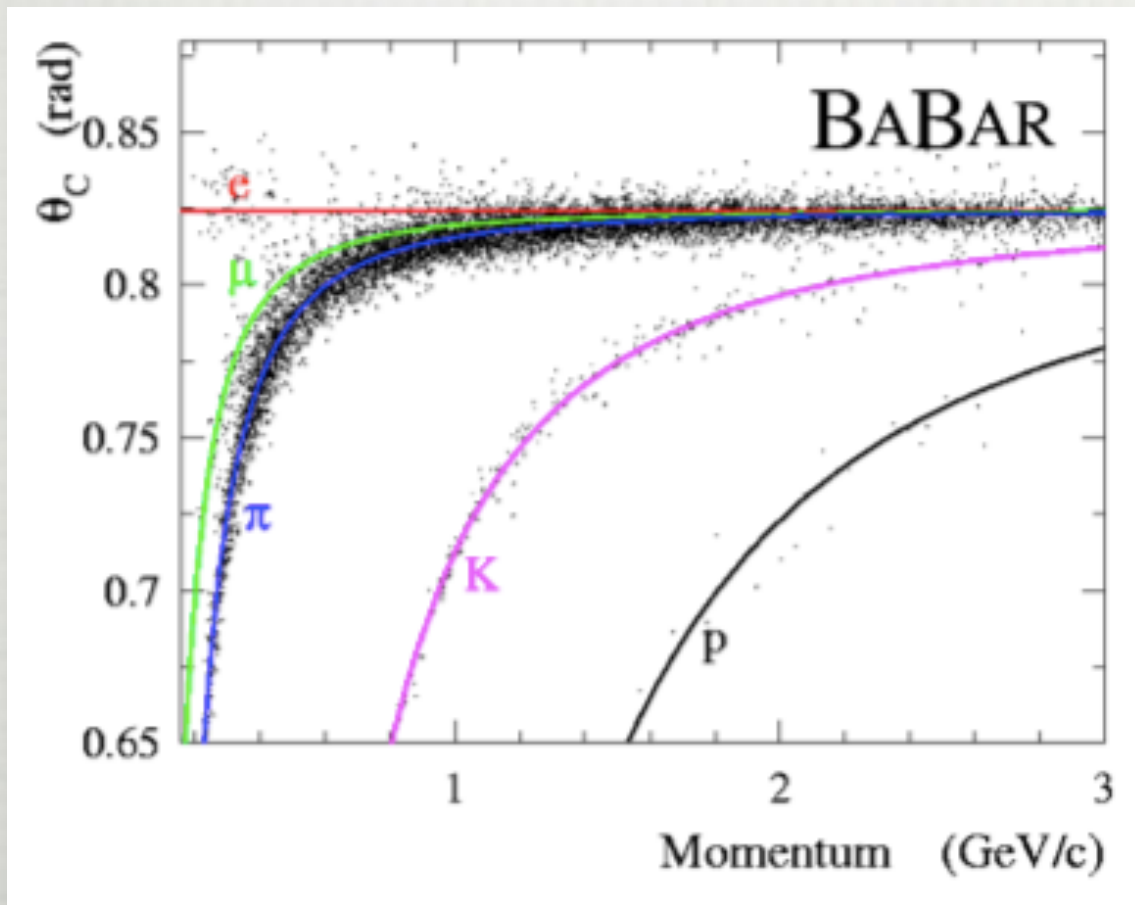
$$\beta_{thr} = \frac{1}{n} \quad \lim_{\beta \rightarrow \beta_{thr}^+} \theta_C = 0^+ \quad \text{asgari limit}$$

$$\theta_{max} = \arccos \frac{1}{n} \quad \text{"doymuş" (azami) açı } (\beta = 1)$$

Soru: ATR'nin çekirdeğinde çıkan parçacıkların ve içinde buldukları sıvının ne olabileceğini düşünün. Bu sayfadaki fotoğrafa bakarak parçacıkların enerjisini tahmin edebilir miyiz?

Çerenkov Işıması İle Parçacık Türünün Belirlenmesi

- Işımanın var olup olmaması veya çıkan foton çemberlerinin ölçülmesi parçacıkların türlerinin belirlenmesinde kullanılabilir.



Geçiş Işınması

- Geçiş ışınması (transition radiation): Yüksek enerjili bir yüklü parçacık bir materyalden dielektrik sabiti farklı başka bir materyale geçerken küçük bir ihtimalle yaptığı ışıma.
- Bu ışıma ile salınan enerji parçacığın yükünün karesiyle ve parçacığın γ faktörüyle doğru orantılıdır.

$$S = \frac{\alpha \hbar}{3} \frac{(\omega_1 - \omega_2)^2}{\omega_1 + \omega_2} Z_1^2 \gamma$$

- S: toplam salınan enerji. (Eski kaynaklarda şiddet(intensity) diye geçebiliyor.)
 $\alpha \approx 1/137$ ω_1, ω_2 : materyallerin plazma frekansları:

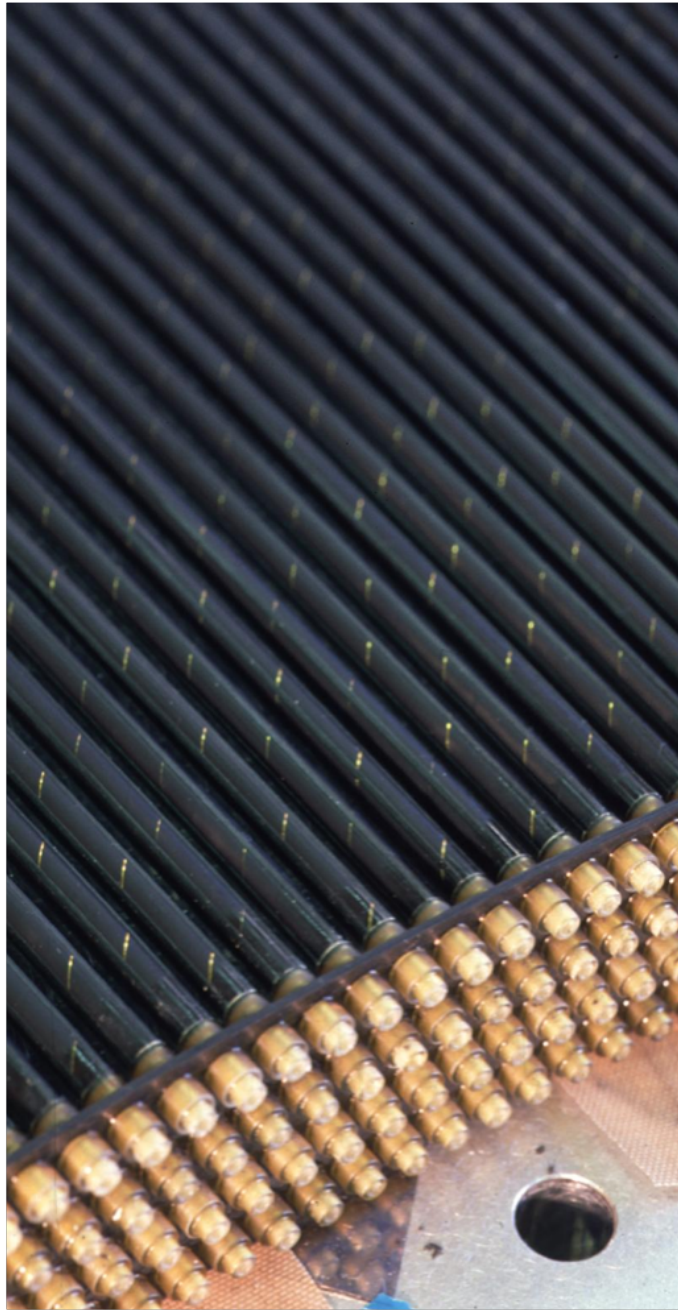
Hava için: $\hbar\omega_p \approx 0.7\text{eV}$.

Çoğu plastik için $\approx 20\text{eV}$

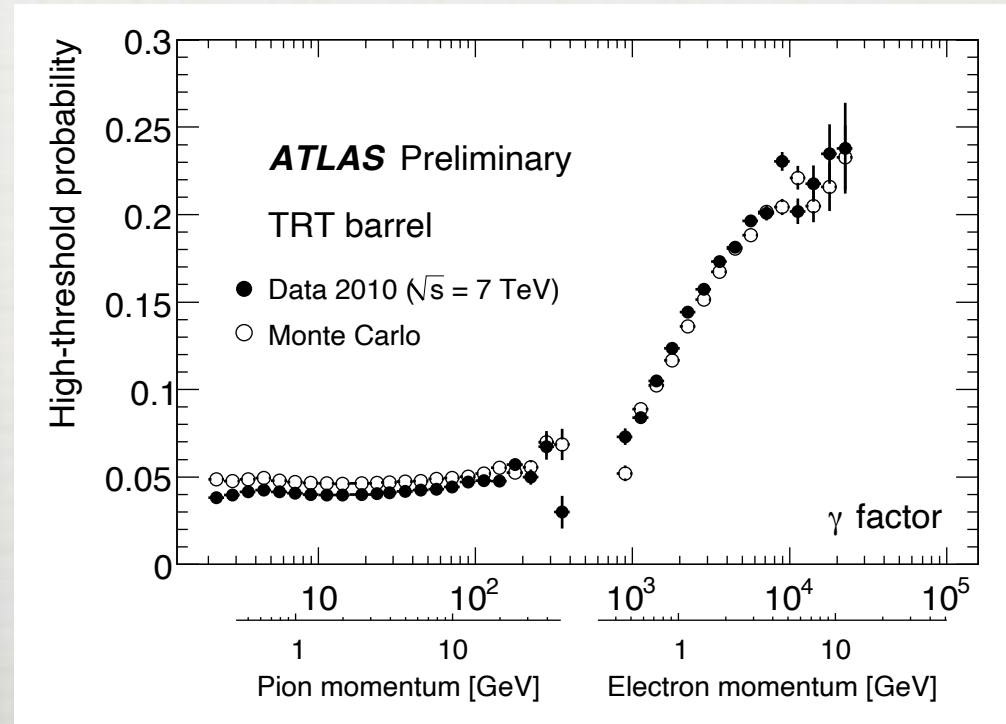
$$\hbar\omega_p = \frac{1}{\alpha} \sqrt{4\pi N_e r_e^3 m_e c^2}$$

- $\gamma=1000$ seviyelerinde 2-40keV enerjili X-ışınları oluşur.

Geçiş Işıması ile Parçacık Türünün Belirlenmesi



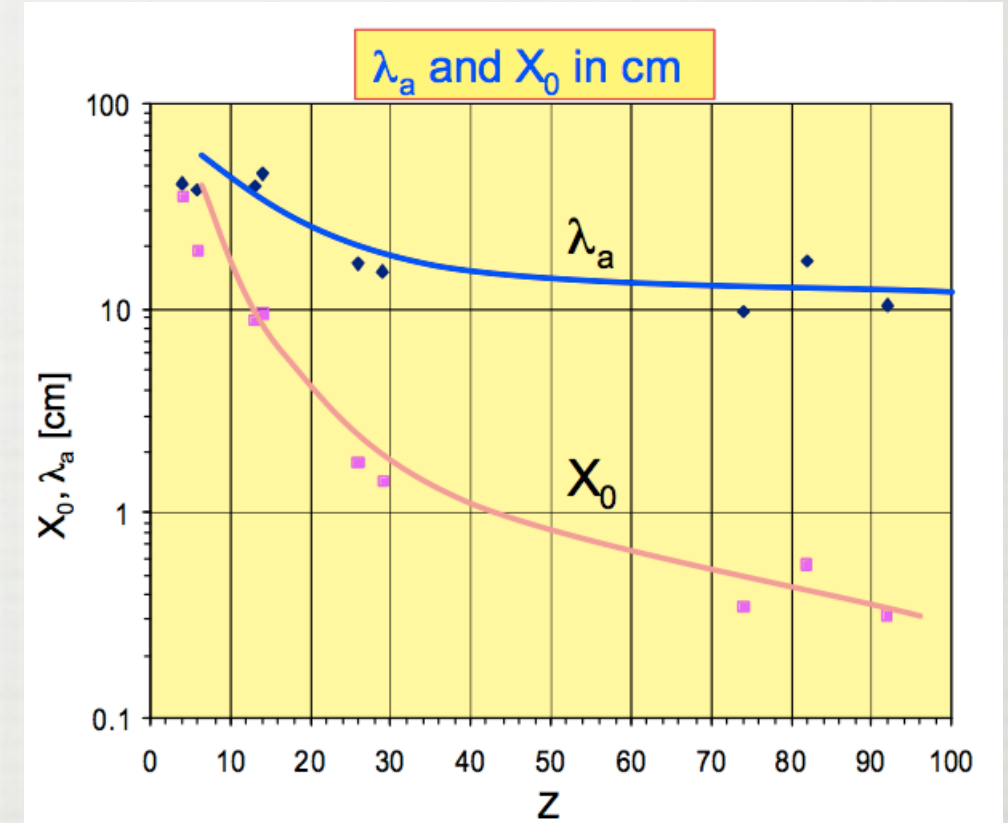
- ATLAS TRT (Transition Rad. Tracker): 4mm kalınlıkta içi gaz (%70 Xe) dolu ve ortasından ince bir tel geçen kamışlar. Yaklaşık 350bin kanal.
- Geçiş ışması normal iyonizasyondan olana göre çok daha yüksek sinyal okunmasını sağlıyor.
- Elektronlar ağır parçacıklardan ayırt edilebiliyorlar.



Unutul(may)anlar

□ Yüksek enerjili ($\geq 1\text{GeV}$) Hadronlar (p, K, π , vs.): Nükleer (özellikle güçlü nükleer) kuvvetler rol oynayacak. EM çağlayanlara benzer (ama daha çeşitli) hadronik çağlayanlar oluşabilir. Hadronik X_0 'a benzer bir şekilde bir hadronik soğurulma uzunluğu, λ_a , tanımlayabiliriz.

□ Nötronlar: Düşük enerjilerde nötronlar nükleer tepkimelerle yüklü parçacıklara dönüşebilir. Ör: $n+{}^3\text{He}\rightarrow p+{}^3\text{H}$
[2000lerde dünyadaki ${}^3\text{He}$ kaynaklarının tükenmesinin sebebi.]



□ Nötrinolar: Sadece zayıf nükleer kuvvet yoluyla etkileşiyorlar. Kilotonlarca proton ve nötron içeren devasa dedektörlerde gözlemleyebiliriz. Ör: $\nu_e+n\rightarrow e^-+p$

Sonuç

- Parçacıkların maddeyle etkileşimi anlamak dedektör inşaa edebilmenin ilk adımı.
- Günümüzde GEANT4, FLUKA, vs. tarzı bilgisayar programları bu sunumda değinilen ve değinilmeyen bir çok etkileşimin benzetimini yapmamızı sağlar.
- Ancak yeni bir dedektör tasarımının ilk adımı olarak, temel hesapları elle yapmanız gerekecektir.
- Böyle durumlarda ihtiyacınız olan ham verileri sunumun sonundaki örneklerde ve kaynaklarda bulabilirsiniz.

Kaynaklar

- NIST, ESTAR, PSTAR ve ASTAR programları. <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/intro.html> ve alakalı veriler: <http://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/tab1.html>
- J. F. Ziegler, J. P. Biersack, M. D. Ziegler, "SRIM, The Stopping and Range of Ions in Matter", 2009.
- H. Paul, Stopping Power for Light Ions, <http://www.exphys.uni-linz.ac.at/Stopping/>
- K. Nakamura et al. (Particle Data Group), "The Review of Particle Physics", J. Phys. G 37, 075021 (2010). <https://pdg.lbl.gov/2024/web/viewer.html?file=../reviews/rpp2024-rev-passage-particles-matter.pdf>
- W. R. Leo, "Techniques for nuclear and particle physics experiments: a how-to approach", Springer, 1994.
- R. K. Bock, A. Vasilescu, "Particle Detector Briefbook", <http://physics.web.cern.ch/Physics/ParticleDetector/BriefBook/>, 1999.
- P. Sigmund, "Stopping of Heavy Ions: A Theoretical Approach", Springer, 2004.
- W. Riegler, 2011 CERN Summer School dersleri, 2011.
C. Joram, 2002 CERN Summer School dersleri, 2002.
- K. E. Holbert, EE460 Nuclear Power Engineering dersi notlarından "Charged Particle Ionization and Range", <http://holbert.faculty.asu.edu/eee460/eee460.html>
- M. Kelsey for the BaBar Collaboration, "Performance and Aging of the BABAR Drift Chamber", SLAC-PUB-10344, 2004.
- Y. Oyama, Current status of the T2K experiment, ICPP, Istanbul, 2011, <http://indico.cern.ch/contributionDisplay.py?contribId=70&confId=117804>

Yedekler

- Moyal tarafından verilen, integrali tanımlı ve kolay hesaplanabilir enerji kaybı fonksiyonu. (Landau $\Phi(\lambda)$ yerine.)

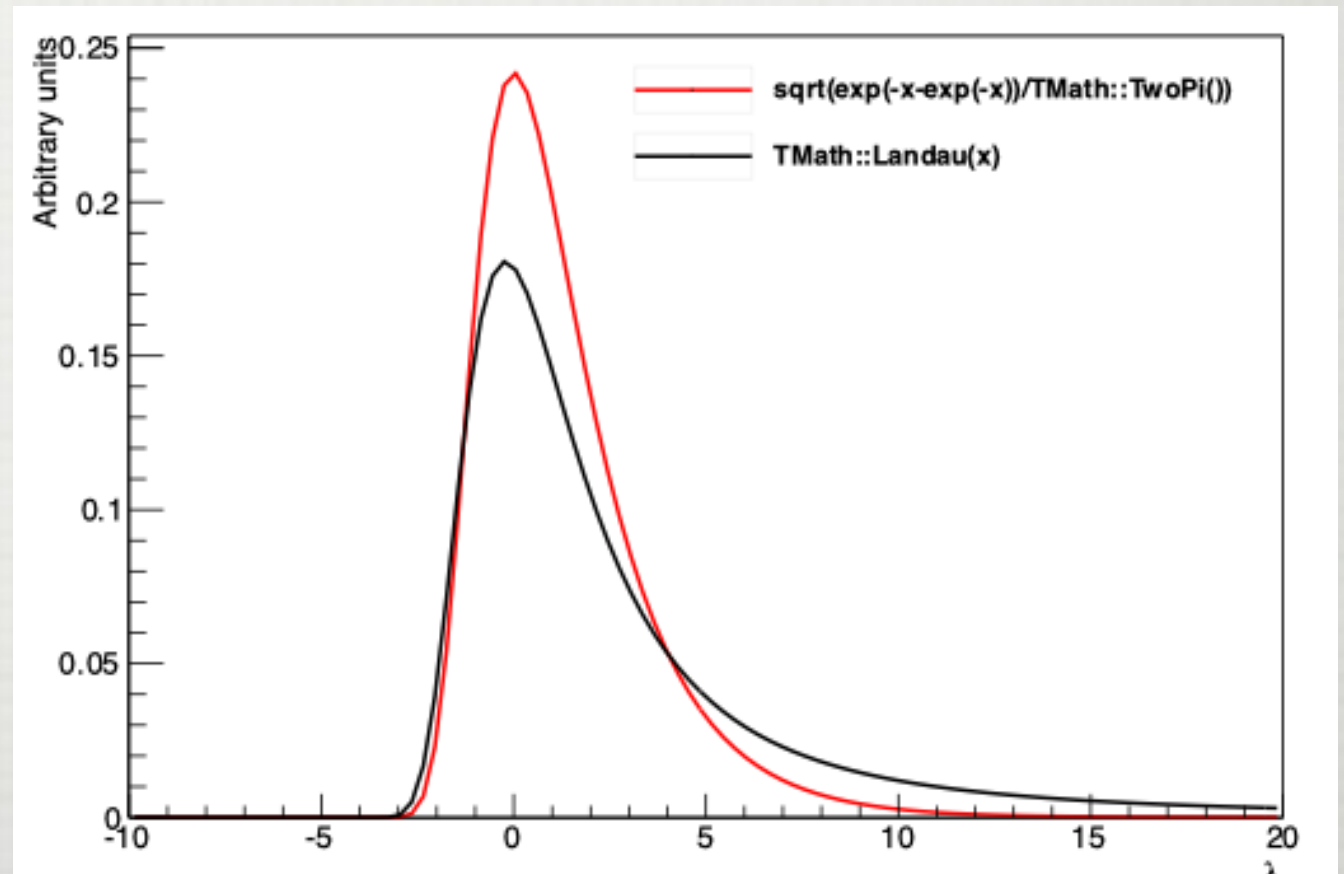
$$\Psi(\lambda) = \sqrt{\frac{e^{-(\lambda+e^{-\lambda})}}{2\pi}}$$

$$\lambda = R(E-E_p)$$

E_p : en olası enerji kaybı

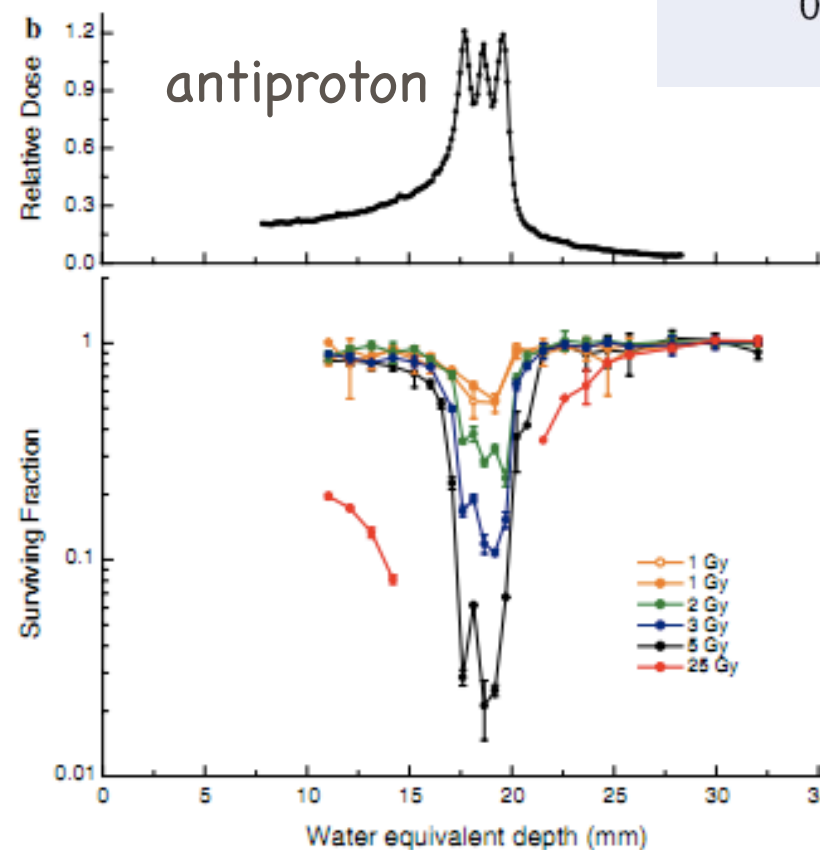
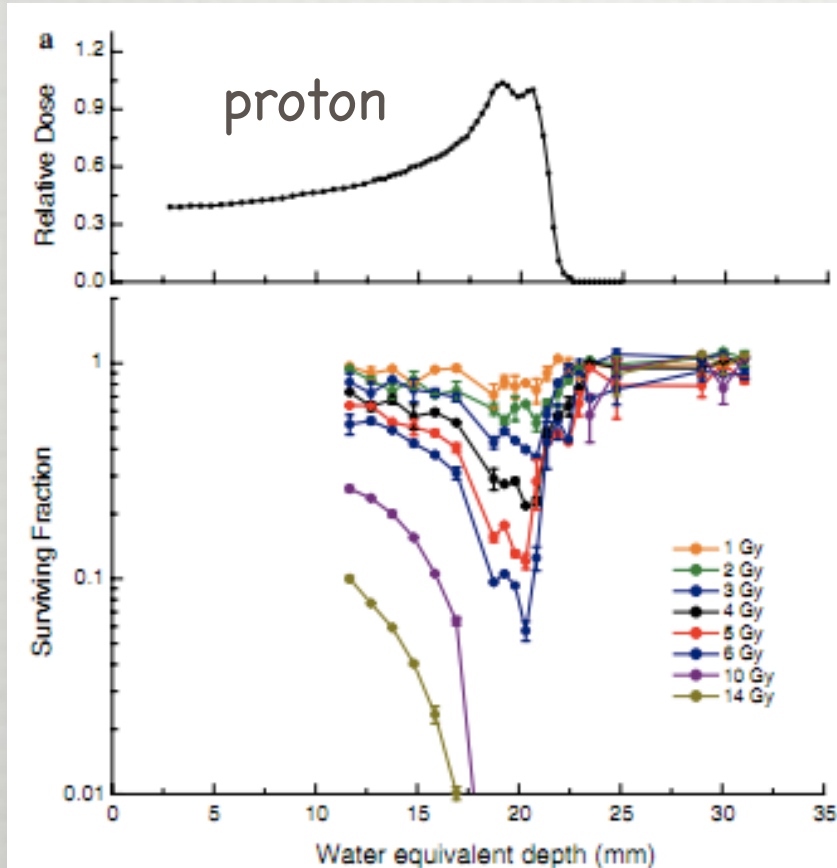
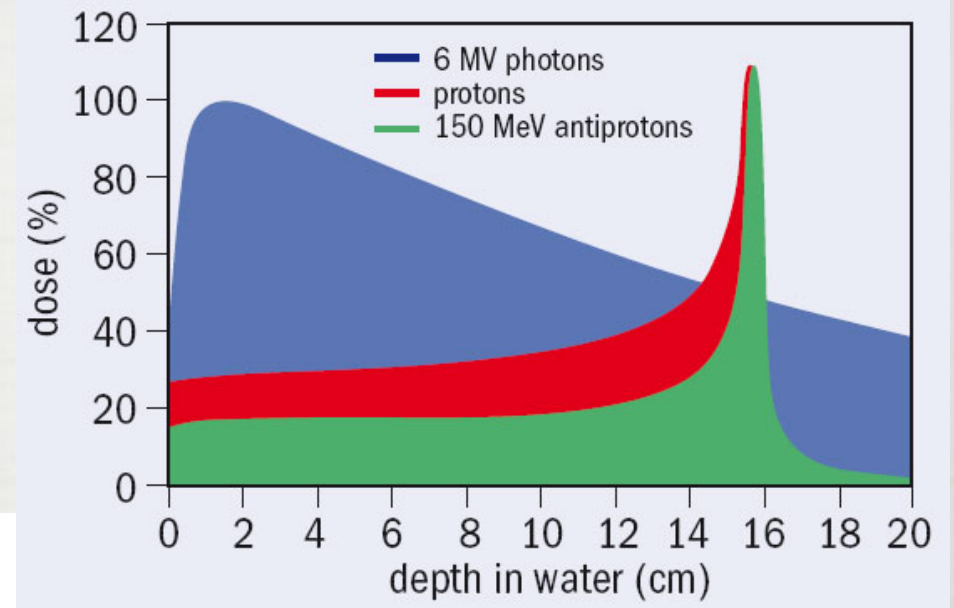
R : hedefe özgü sabit

- Dikkat: Moyal fonksiyonunun kuyruğu kısa.



Yedekler

- Antiprotonlar da radyoterapide kullanılabilir. Annihilasyon sayesinde tümöre daha fazla enerji bırakırlar...
- Holzscheiter MH et al., The biological effectiveness of antiproton irradiation, Radiother Oncol (2006), doi:10.1016/j.radonc.2006.09.01 ; <http://cerncourier.com/cws/article/cern/29763>



Yedekler

- R. R. Wilson hakkında İngilizce Wikipedia'dan:
- In 1967 he took a leave of absence from Cornell to assume directorship of the not-yet-created National Accelerator Laboratory which was to create the largest particle accelerator of its day at Batavia, Illinois. In 1969, Wilson was called to justify the multimillion-dollar machine to the Congressional Joint Committee on Atomic Energy. Bucking the trend of the day, Wilson emphasized it had nothing at all to do with national security, rather:
- "It has only to do with the respect with which we regard one another, the dignity of men, our love of culture. It has to do with: Are we good painters, good sculptors, great poets? I mean all the things we really venerate in our country and are patriotic about. It has nothing to do directly with defending our country except to make it worth defending."

Yedekler

- Hadronik çağlayanlar...
- Bir sürü farklı ikincil parçacık çıkabilir: π , K, p, vs. vs.
- Çarpışmadan sonra hedefin çekirdekleri bölünebilir.
- Müonlar, nötrinolar sebebiyle enerji "kaybedilebilir".
- π^0 ve η mezonları sıklıkla foton çiftine bozunabilirler. => Hadronik çağlayanların EM kısmı da vardır.

