

# 粒子検出器(1)

---

河野能知

2015.02~03

資料:

<http://hpx.phys.ocha.ac.jp/wiki/Lec2015ParticleDetectors>

# 内容

1. 素粒子実験と粒子検出器
2. 粒子と物質との相互作用
3. 検出器の基礎
  1. シンチレーター、PMT、ガス比例計数管、半導体検出器
  2. 偶発事象と同時計測
  3. 統計について
4. 飛跡検出器
  1. MWPC、シリコンMicro-strip, pixel検出器、TPC
5. カロリメーター(エネルギーの測定)
  1. サンプリング型カロリメーター
  2. エネルギー分解能
6. 素粒子実験で用いられる測定器システム

# 前回のまとめ

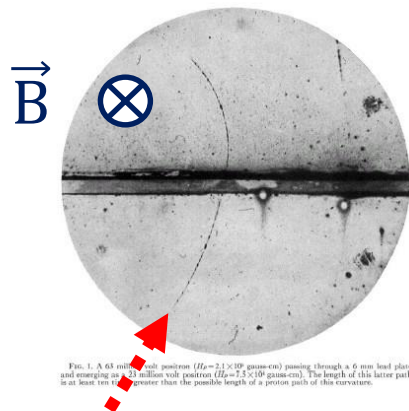
- 検出器の動作原理を理解する
  - 粒子と物質との相互作用を考える。素過程は何か
  - 信号の増幅方法
  - 信号の記録、読み出し方法
- 粒子と物質との相互作用
  - 物質を構成しているのは、種々の原子核と電子である
  - 荷電粒子、電子、光子、ハドロンによって振る舞いが異なる
  - 荷電粒子のエネルギー損失は主に電子との散乱による
  - 粒子の進行方向のずれは原子核との散乱による効果が多い
- いろいろな概念
  - イオン化、断面積、エネルギー損失、Landau分布、Bethe-Blochの式、電磁シャワー、放射長

# 今回の内容

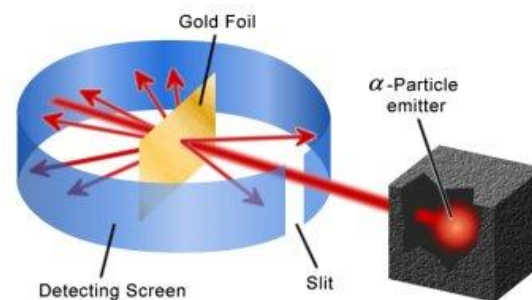
- 検出器の例
  - ガス比例計数管
  - シンチレーター、PMT
  - 半導体検出器
- 粒子の信号とノイズの見分け方
  - 確率・統計の考え方に慣れる
  - 偶発的事象の頻度
  - 同時計測

# 素粒子物理実験

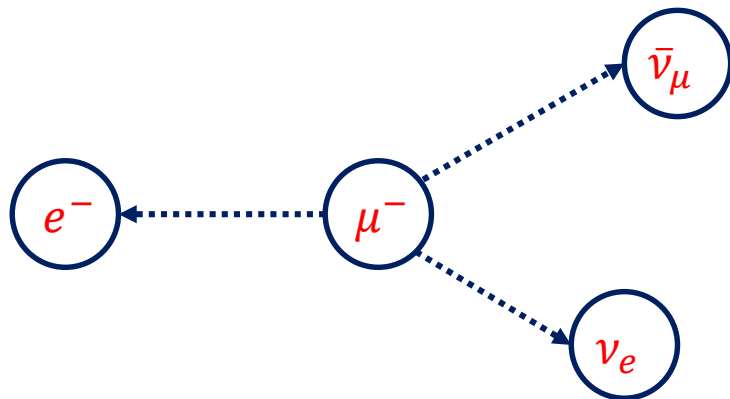
## 1. 自然界にある放射線を観測



## 2. 人工的に粒子を発生して標的に衝突させて散乱過程を調べる



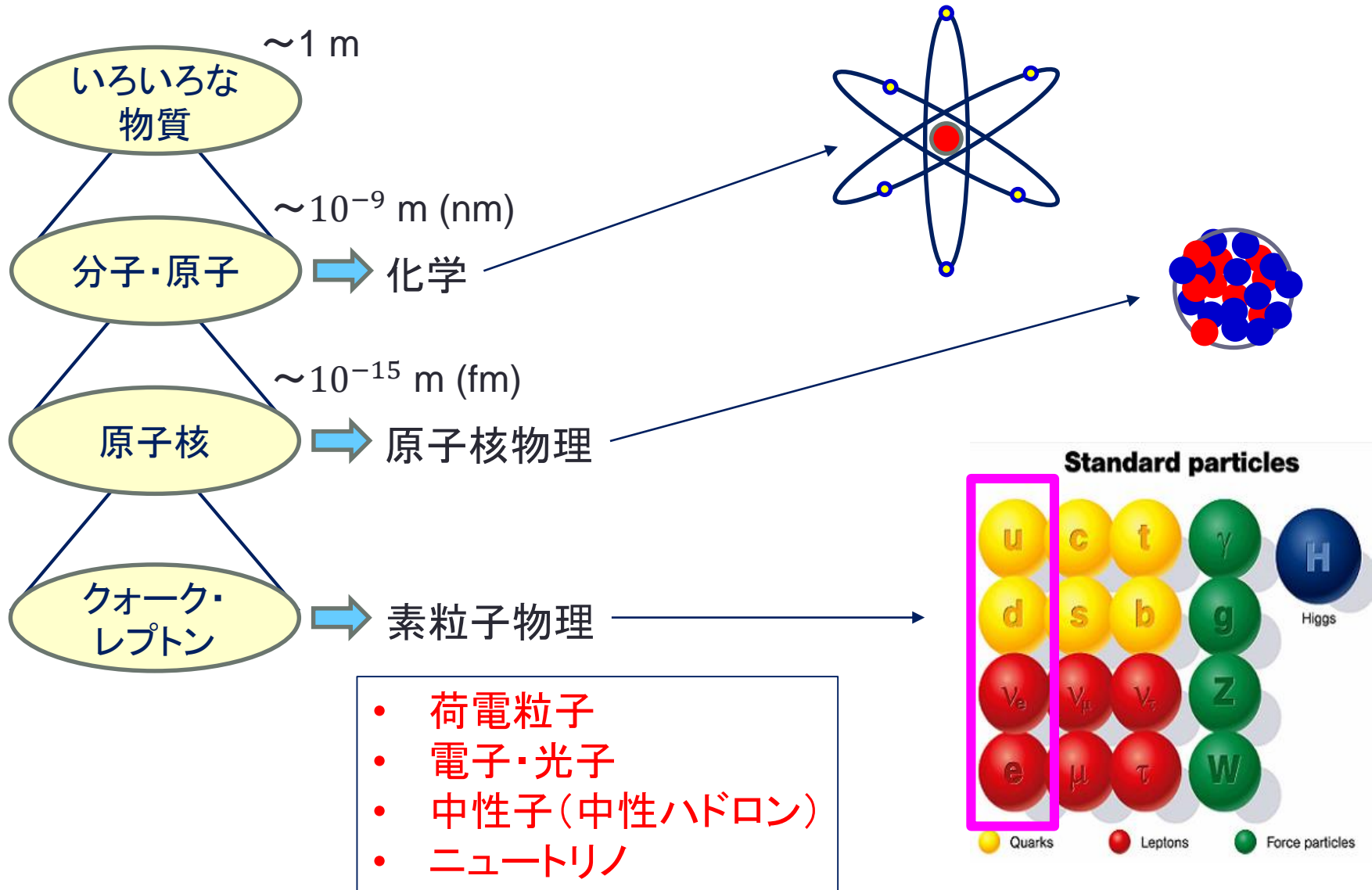
## 3. 粒子の崩壊現象を測定



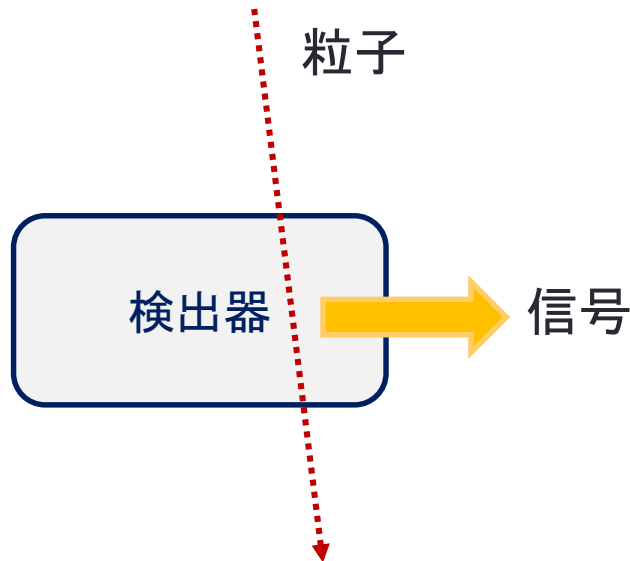
# 検出器の役割

- 粒子の存在を確認
  - 時刻、位置。検出器のノイズと識別できる必要がある
- 粒子の性質の測定
  - エネルギー、運動量、速度
  - 質量、電荷
- 粒子の種類を特定
  - 質量、電荷を測定でいけば良いが、これらの量を直接測定できなくても粒子の種類がわかる場合もある
- 複数の粒子が同時に現れていないか調べる
  - 散乱や崩壊で多数の粒子が一斉に生成する場合がある
  - 複数の検出器の相関をみる。同時計測
- 素過程の事象を再構成

# どんな粒子を検出するのか



# 粒子検出の基本



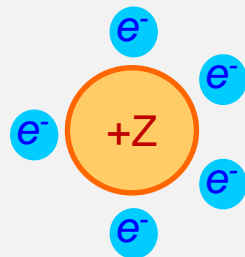
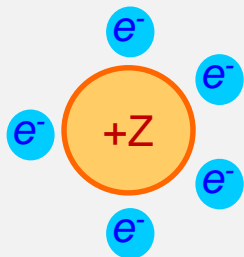
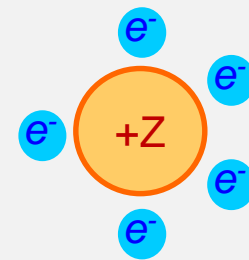
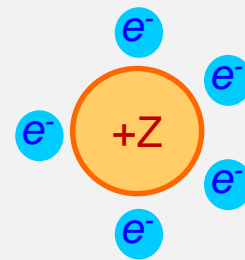
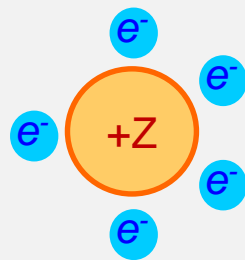
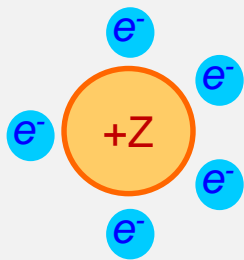
- 粒子と物質との相互作用
  - 素過程
  - 物質にどのような変化が生じるか
  - その変化を検出する
- 信号増幅の仕組み
  - 素過程で生じる信号を増幅
- 外部に信号を取り出す仕組み
  - 増幅された信号を外部に読み出すか、記録する必要がある

- 粒子は非常に小さく目に見えないし、手で触れることもできない
- 検出器は人間が触れられるほどの大きさのマクロな物質である

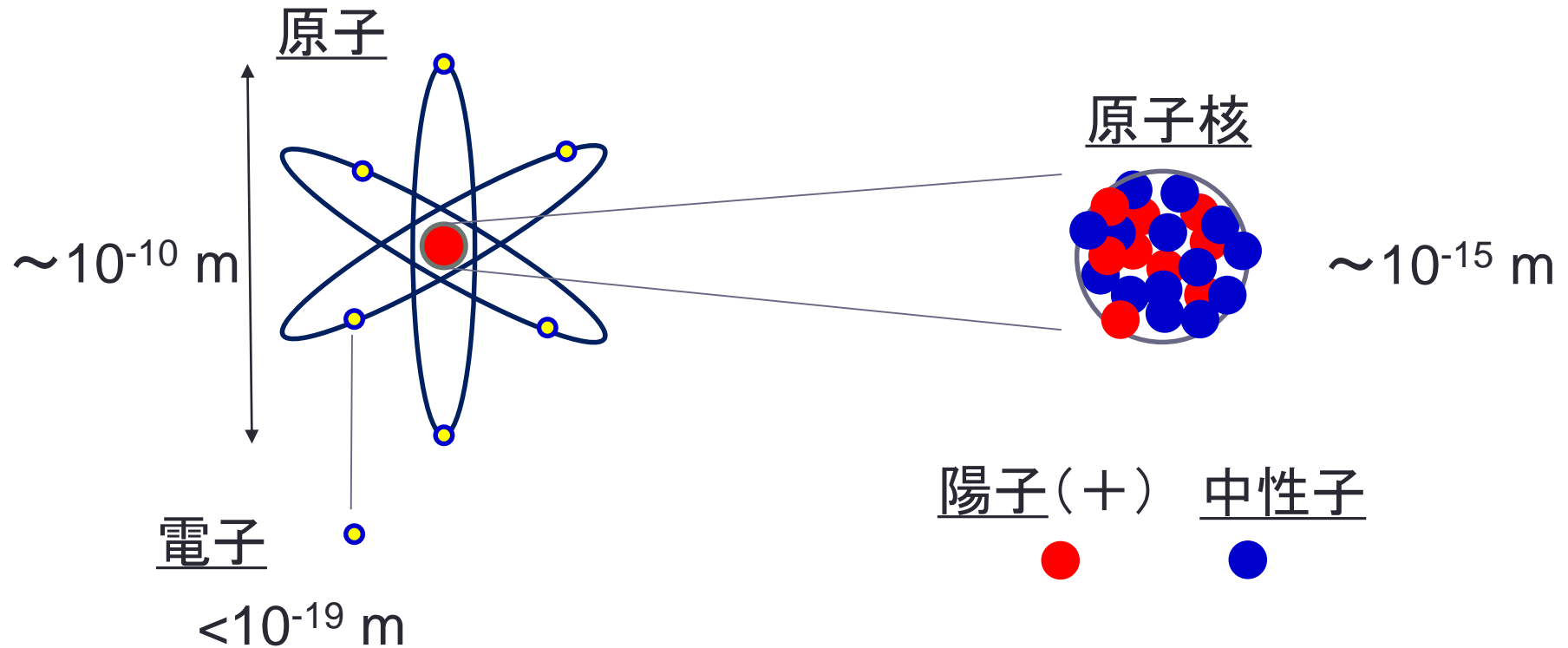


# 粒子と物質との相互作用

- 粒子が検出器に入射した時に何が起きるか
- 検出器を構成する物質は、粒子レベルではどのように見えるか
  - 物質は原子が膨大な数集まったもの
  - 原子は原子核と電子からなる



# 水素様原子

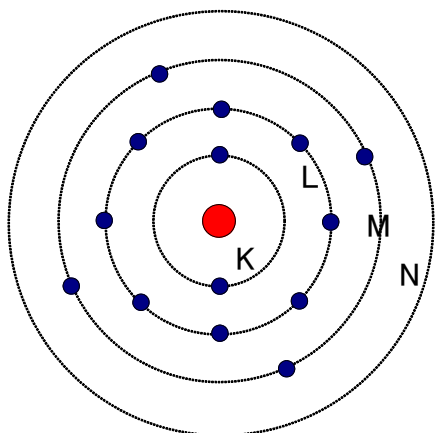


粒子の種類	大きさ
原子(電子の広がり)	$\sim 1 \text{ \AA} (10^{-10} \text{ m})$
原子核	$\sim \text{fm} (10^{-15} \text{ m})$
電子	$< 10^{-19} \text{ m}$

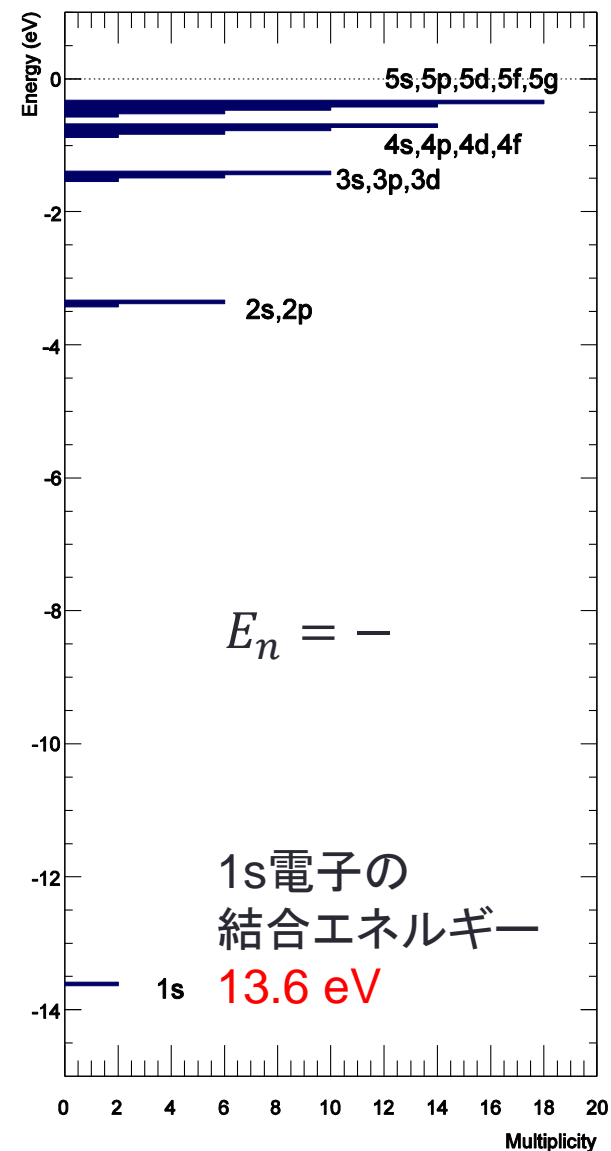
- 原子の中は、ほぼ空っぽ
- あるのは、正電荷の原子核と負電荷の電子
- それと電磁的なポテンシャル

# 水素様原子の電子状態

- 電荷+Zの原子核と電子一個からなる系
- 実際には多数の電子が存在するが、電子1個の系で得られた解にエネルギーの低い状態から順番に占有されていく
  - 電子間の相関を無視した近似
- Schrödinger方程式の解 ( $\psi_{nlm}$ )
  - $n=1, 2, 3, \dots$
  - $l=0, 1, 2, \dots, n-1$
  - $m=-l, -l+1, \dots, l-1, l$



水素原子のエネルギー準位

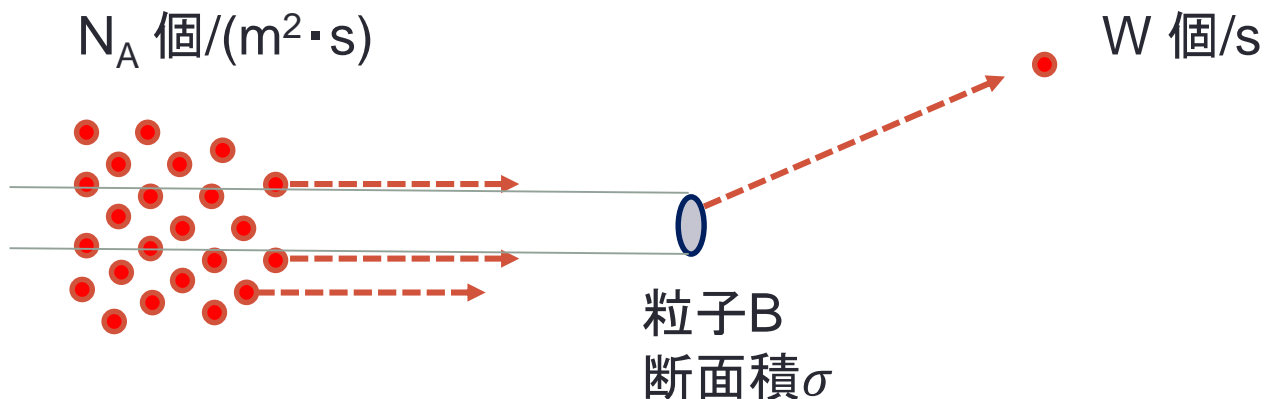


# 断面積

粒子同士の散乱の起こり易さを表す量

断面積の定義:

粒子Aを単位面積、単位時間当たり $N_A$ 個 ( $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) 入射して、標的粒子B一つに衝突させようとしたとき、粒子Aが散乱される単位時間当たりの頻度を $W$  ( $\text{s}^{-1}$ ) とする。



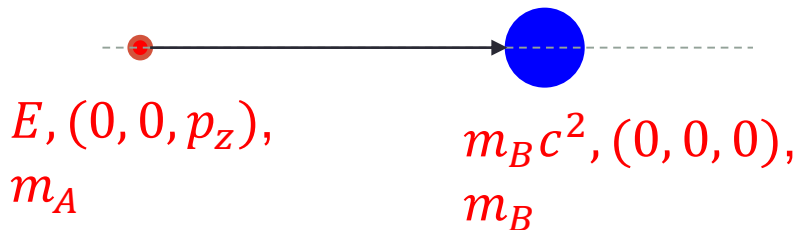
$$W = N_A \cdot \sigma$$

これから逆に

$$\sigma = \frac{W}{N_A} = \frac{\text{反応数(個)}}{\text{フラックス}(\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}) \times \text{測定時間(s)}}$$

# ラザフォード散乱(クーロン散乱)

散乱前



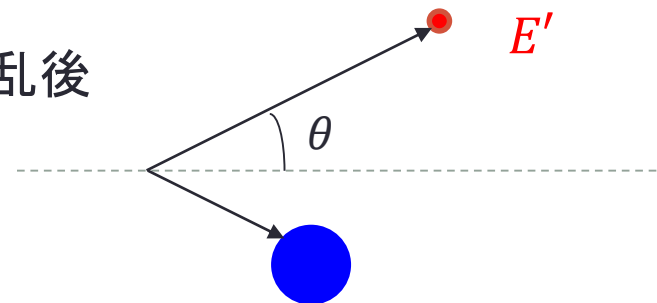
$m_A \ll m_B$ とすると、運動学的には  
コンプトン散乱と同じ。

$$E' = \frac{E}{1 + \frac{E}{m_B c^2} (1 + \cos \theta)}$$

$\theta = 0$ で $E' = E$ 。

$\theta$ が大きくなるにつれて、散乱後の  
粒子Aのエネルギー $E'$ は小さくなる

散乱後



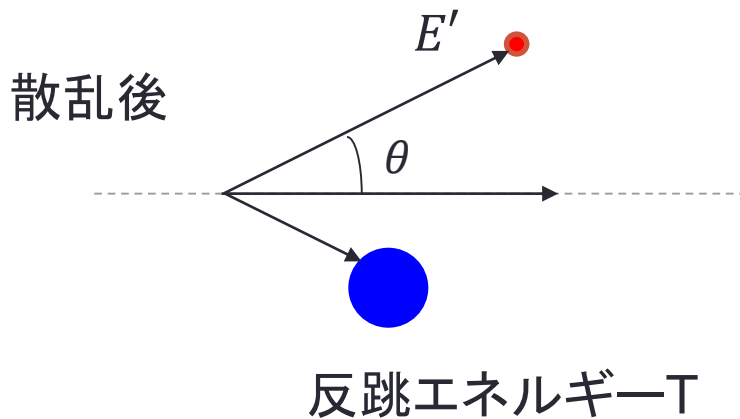
反跳エネルギー $T$

$$\begin{aligned}
 E + m_B c^2 &= E' + E'_B \\
 T &= E'_B - m_B c^2 \\
 &= E - E' \text{ (エネルギー損失)}
 \end{aligned}$$

- 粒子Bが受ける反跳エネルギーは  
 $E'$ が小さいほど大きい
- 同じ $\theta$ では、 $m_B$ が小さいほど $E'$ は  
小さく $T$ は大きくなる
- 入射粒子のエネルギー損失は、標  
的が原子核よりも電子の時に大き  
くなる

# ラザフォード散乱の断面積

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{Rutherford}} = \frac{Z^2 \alpha^2 (\hbar c)^2}{4E^2 \sin^4 \frac{\theta}{2}} \xrightarrow{\text{変数変換}} \frac{d\sigma}{dT} = \frac{2\pi \alpha^2 z^2}{mv^2} \frac{1}{T^2}$$

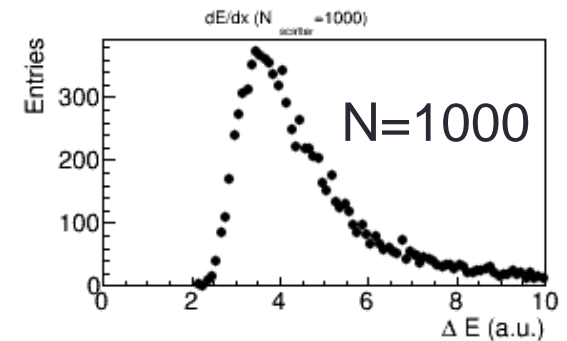
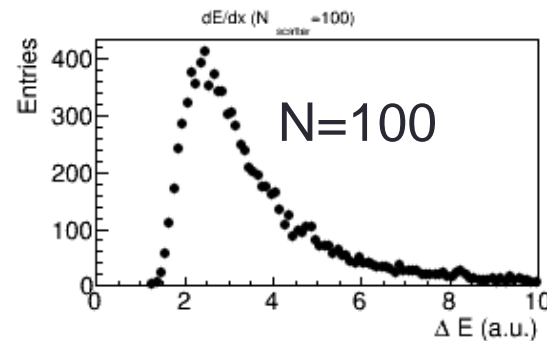
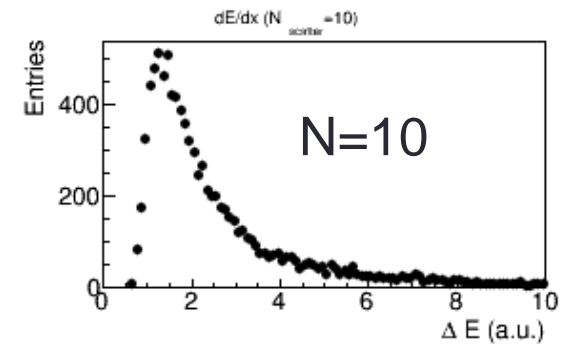
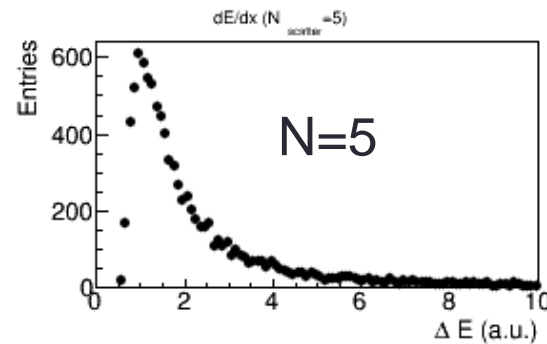
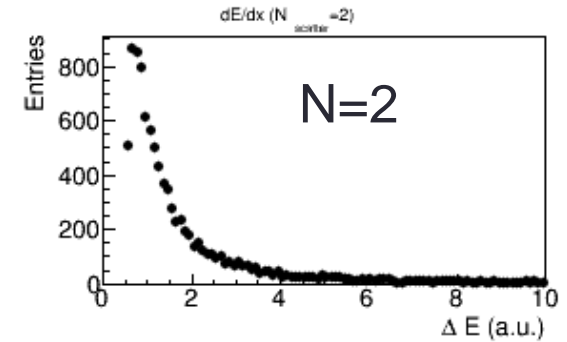
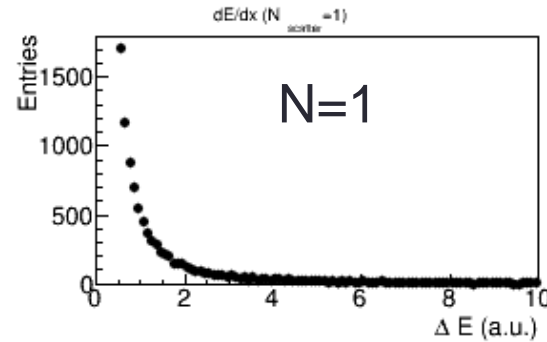


微分断面積から

- $\theta$ が小さい散乱ほど起こり易い
- $T$ が小さい散乱ほど起こり易い ( $\sim 1/T^2$ )

# 1/T<sup>2</sup>分布からLandau分布へ

- エネルギー損失 $T$ が $1/T^2$ に従うとして、 $N$ 回散乱が起こった時の平均エネルギー損失の分布



# 荷電粒子のエネルギー損失

- 荷電粒子が物質に入射する
  - 物質中の原子核や電子とクーロン散乱を繰り返す
  - 入射粒子のエネルギー損失は電子と散乱する場合の方が大きい
  - 一回の散乱によるエネルギー損失は散乱角 $\theta$ に依り、 $\theta$ が大きいほどエネルギー損失も大きくなる
  - 微分断面積の振る舞いから、ほとんどの散乱は $\theta$ が小さいものである
- ある厚さの物質を通過した時のエネルギー損失の平均値は次のBethe-Blochの式で与えられる

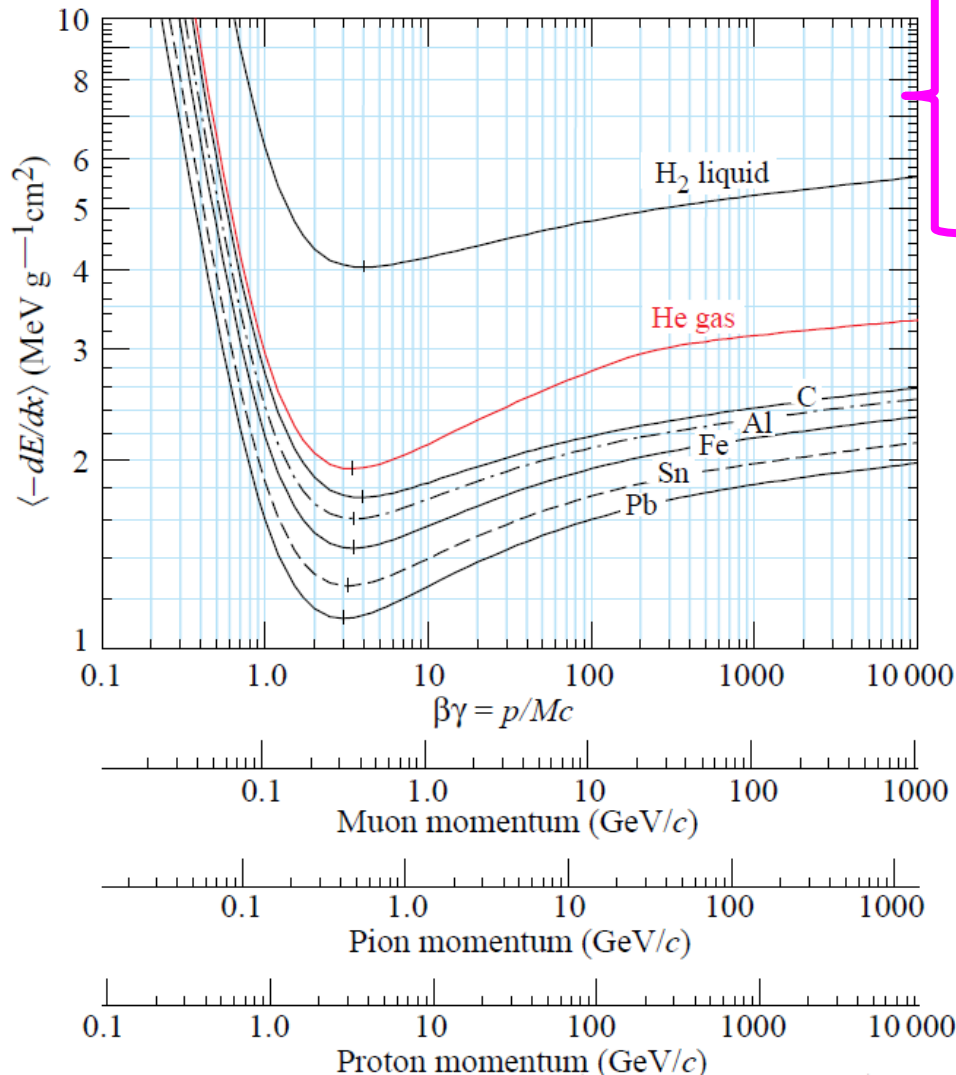
$$-\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = K Z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[ \frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \gamma^2 T_{max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right]$$

相対論的補正

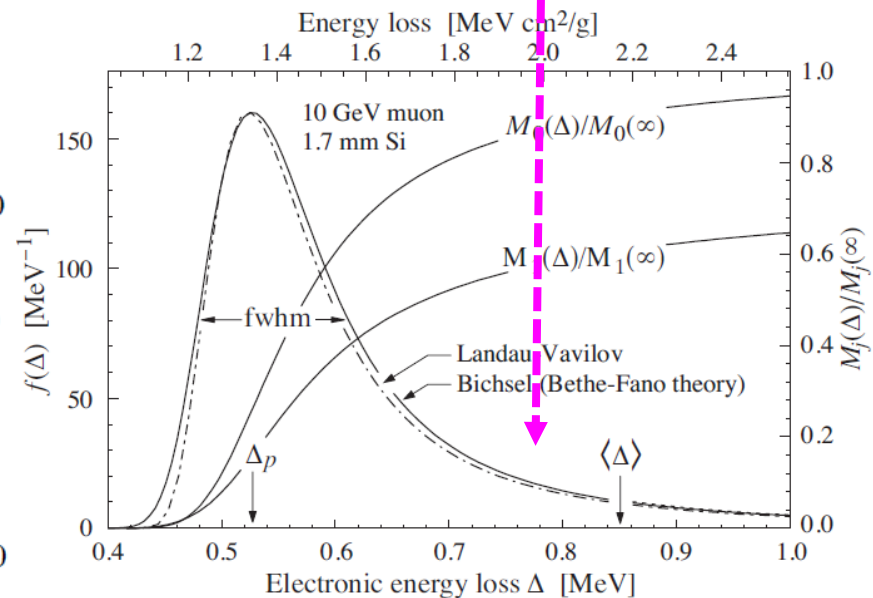


# 荷電粒子のエネルギー損失の様子

Bethe-Blochの公式を図示

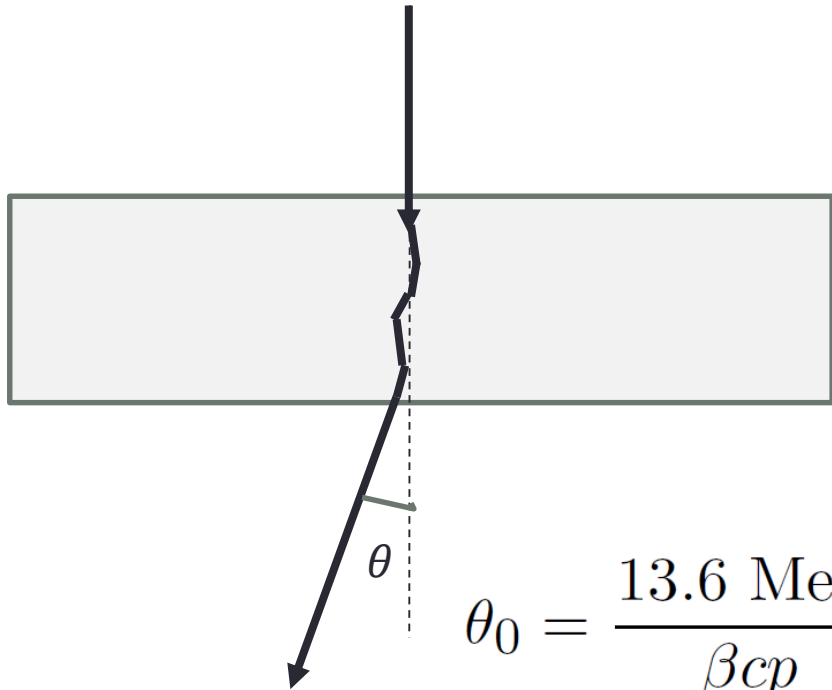


- 粒子の種類に依らず  $\beta\gamma \sim 3$  で最小値をとる (最小電離損失)
- $\beta\gamma$  が大きくなるにつれて一定値に近づく
- Landau分布
- エネルギー損失の高い方に長く分布が続いている



# 多重散乱

- エネルギー損失は電子との散乱による寄与が大きい
- 散乱による粒子の進行方向の変化は原子核との散乱による寄与が大きい



- 角度のずれは、ゼロ度を中心としたガウス分布になる
- その広がり $\theta_0$ は下の式で与えられる

$$\theta_0 = \frac{13.6 \text{ MeV}}{\beta cp} \approx \sqrt{x/X_0} \left[ 1 + 0.038 \ln(x/X_0) \right]$$

# 電子の場合

- 電子も荷電粒子なのでイオン化によるエネルギー損失はあるが、質量が小さいため制動放射による効果が多い
  - 電子の質量: 511 keV
  - 加速器実験で扱う電子: 100 MeV ~ 1,000 GeV ( $\beta\gamma > 1,000$ )
- 制動放射 (Bremsstrahlung)
  - 荷電粒子が加速度を受けると電磁波を放射する

制動放射によるエネルギーの変化

$$E = E_0 \exp(-x/X_0)$$

$X_0$ : 放射長 (Radiation length)

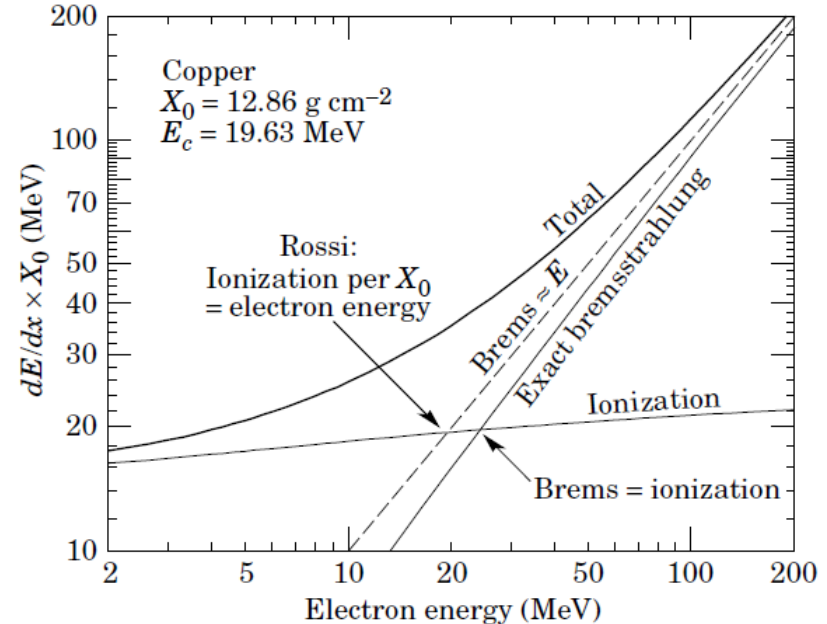
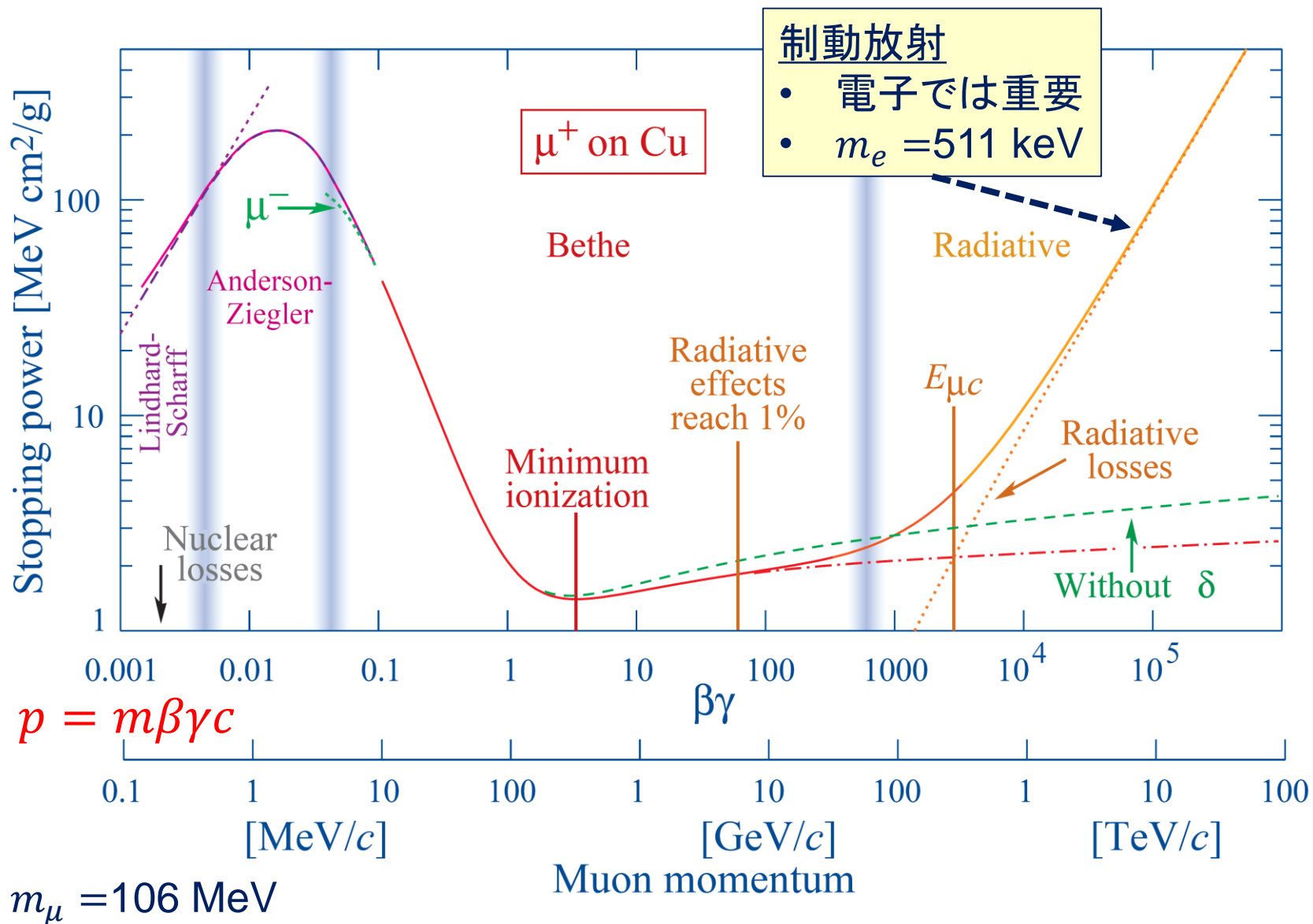


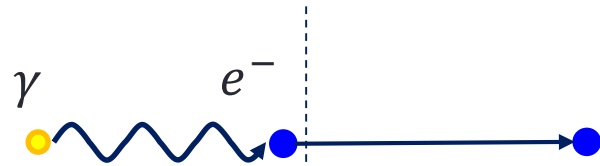
Figure 32.13: Two definitions of the critical energy  $E_c$ .

# エネルギー損失(広範囲)



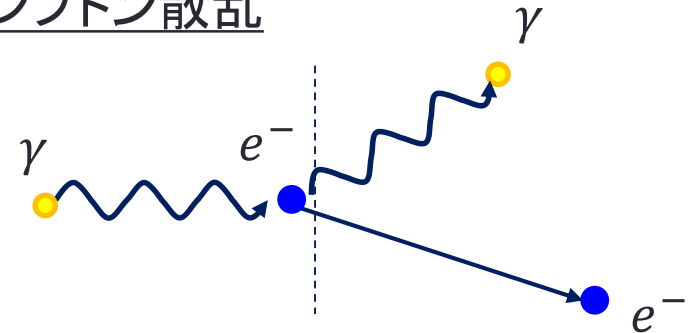
# 光子と物質の相互作用

## 光電吸収



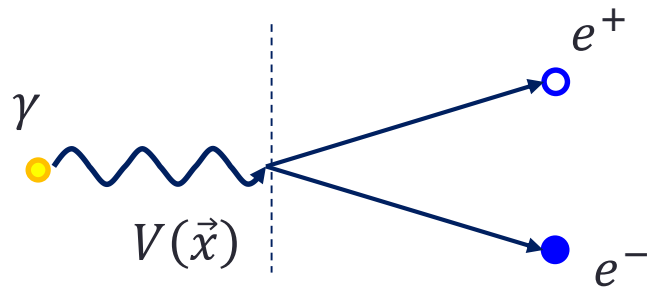
- 光子のエネルギーが完全に吸収される
- 低いエネルギーでは支配的 ( $\sigma \sim Z^5$ )

## コンプトン散乱



- 光子と電子の弾性散乱

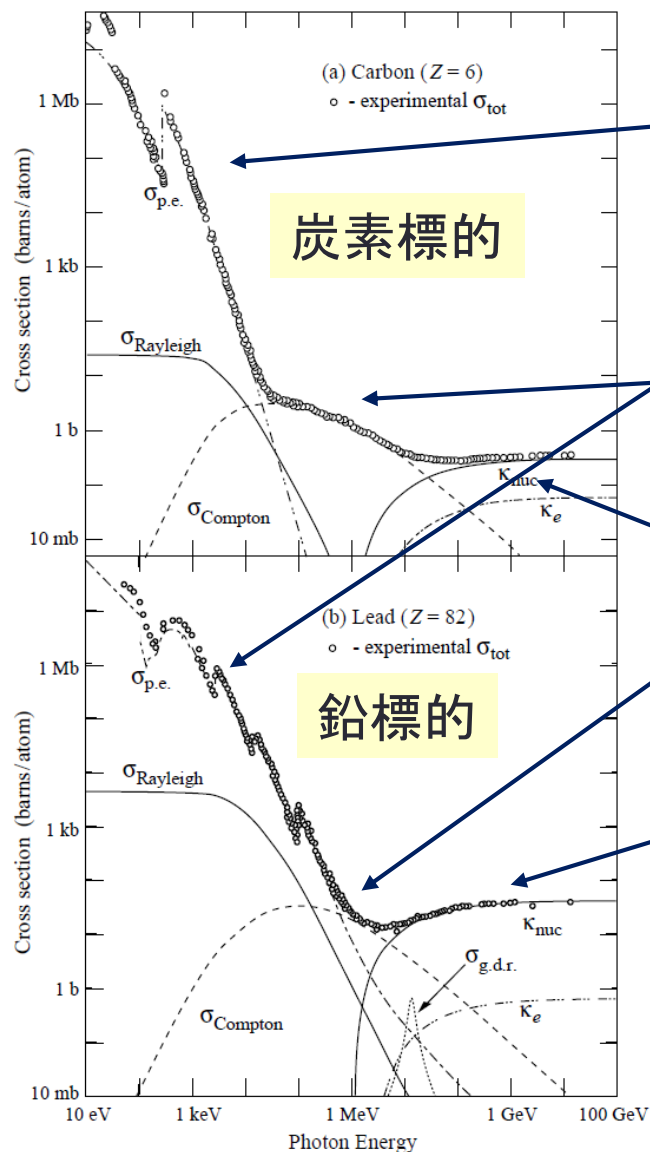
## 電子・陽電子対生成



- 最低でも  $E_\gamma > 2m_e c^2$  が必要
- 高エネルギーでは支配的

# 光子の相互作用の断面積

各過程の断面積



光電吸収

炭素標的

コンプトン散乱

対生成

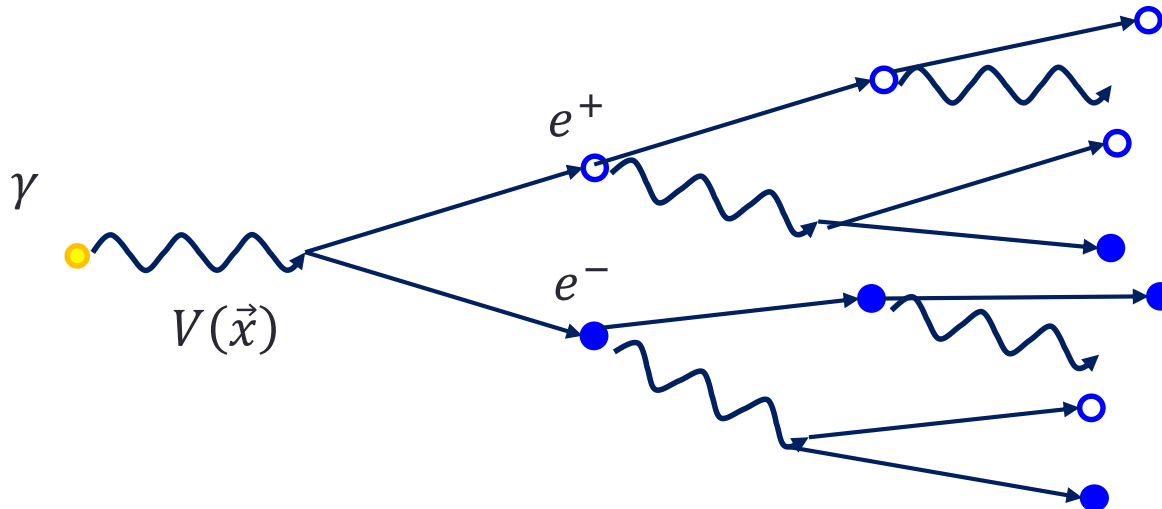
鉛標的

# 電磁シャワー

- 高エネルギーの電子では制動放射が起こり易い
- 高エネルギーの光子では対生成が起こり易い



- 電磁シャワー (Electromagnetic shower)
  - これらの過程を繰り返して指数関数的にエネルギーを失っていく
  - 粒子数も指数関数的に増加していく
  - 最終的に光電効果やコンプトン散乱でエネルギーが吸収されるまで続く



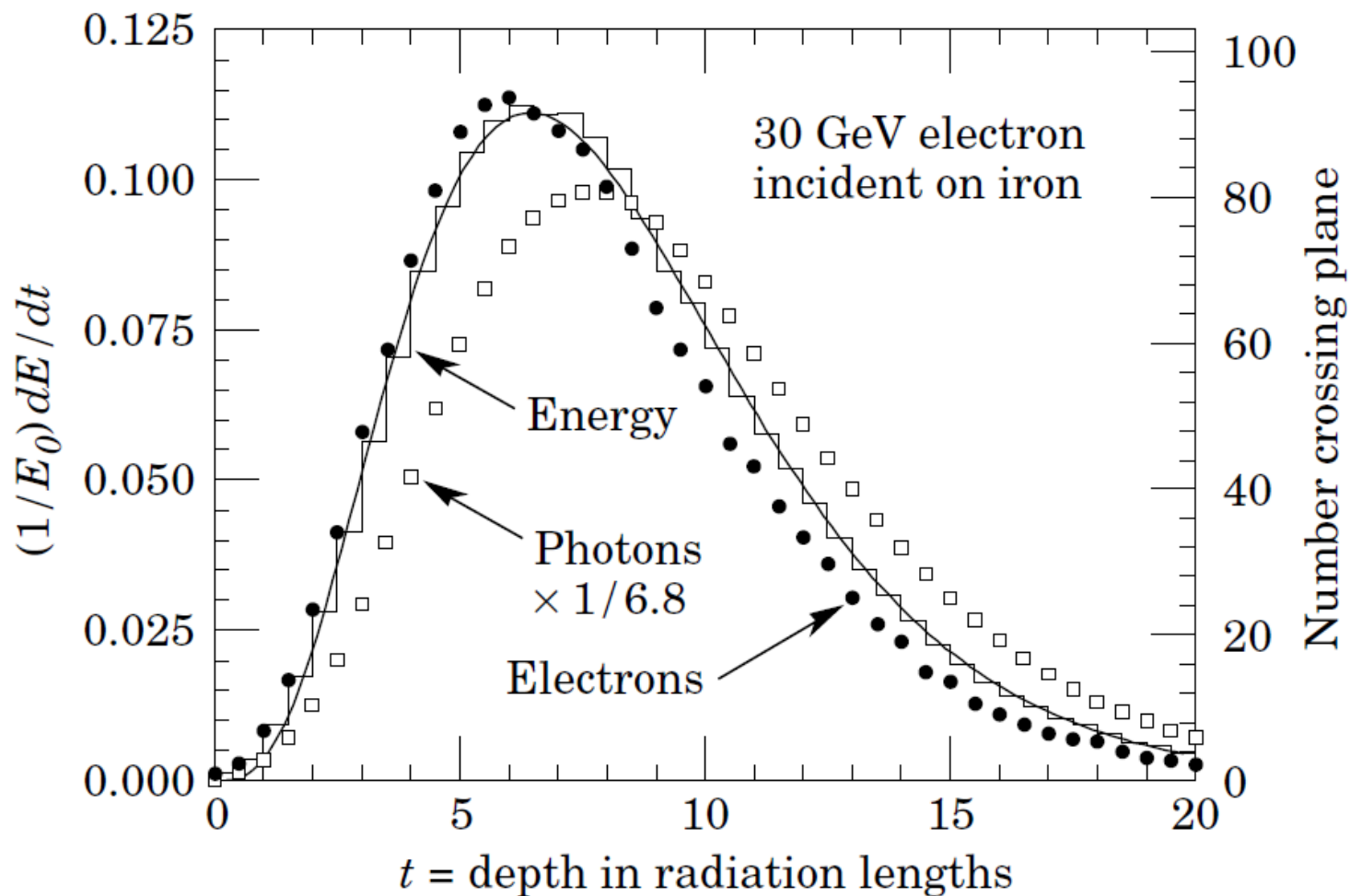
# 電磁シャワーと放射長

- 電磁シャワーが起きると、元々の粒子が持っていたエネルギーは物質の厚みに対して指数関数的に減少していく
  - $E = E_0 e^{-x/x_0}$
  - $X_0$ のことを放射長 (Radiation length) と呼ぶ
  - $X_0$ は物質によって異なる
- エネルギーがN倍になっても厚みを  $\ln N$  倍するだけで粒子のエネルギーを吸収できるので経済的である
  - 例:  $N=1000$ の場合、厚みを約7倍にするだけでよい。



# 電磁シャワーの形

その厚さにおけるエネルギー損失の割合



放射長を単位とした厚さ

# 中性ハドロン

- 中性なので、電磁気的な相互作用は非常に弱い
- 特に低エネルギーの中性ハドロンの測定は困難である
- 原子核との核反応によって、徐々にエネルギーを失っていく
  - 高エネルギー粒子の場合に有効である
  - 電磁シャワーと同様に雪崩的に反応を起こして2次的な粒子を多数生成して、その中の荷電粒子を用いて測定を行う
  - ハドロン・シャワー
- カロリメーターを説明するところで、もう一度考える

# 問題

1. 標的が粒子一つではなく、質量数 $A$ 、原子番号 $Z$ の原子の集合で密度 $\rho$ 、厚さ $d$ の場合、断面積をどのように定義すれば良いか
2. コンプトン散乱で光子の散乱角と散乱後のエネルギーの関係を求める

# 相対性理論と静止エネルギー

$$E = \gamma mc^2, \vec{p} = \gamma m\vec{v}$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \beta = \frac{v}{c}$$

非相対論的な場合の近似 ( $\beta \ll 1$ , 物体の速さが光速に比べて遅い)

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \beta^2}} \approx mc^2 \cdot \left\{ 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{v}{c} \right)^2 \right\} = mc^2 + \frac{mv^2}{2}$$

↑ 静止(質量)エネルギー
 ← 運動エネルギー

- 速度  $v = 0$  でもエネルギー  $E = mc^2$  を持つ
- 運動エネルギー  $\leftrightarrow$  質量エネルギーとエネルギーの形態を変えることが可能
  - $\rightarrow$  十分高い運動エネルギーがあれば、新たに粒子を作り出せる
- 素粒子現象では  $\beta \approx 1$ 。Newton力学とは異なる運動学