

# 物理実験学 (粒子と物質との相互作用)

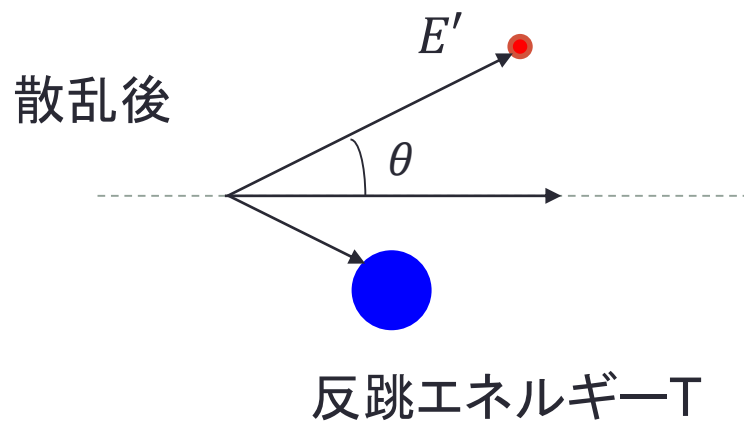
---

河野能知

2018年12月3日(月)

# ラザフォード散乱

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



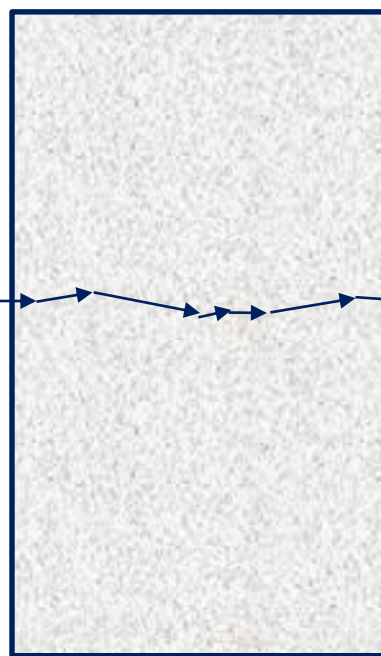
微分断面積から

- $\theta$ 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( $\sim 1/T^2$ )

# 荷電粒子の物質中におけるエネルギー損失

荷電粒子を物質に入射

$E > 100 \text{ keV}$



物質中の

- 原子核との散乱 → 角度のずれ
- 電子との散乱 → エネルギー損失

相対論的補正

密度効果

Bethe-Blochの式

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

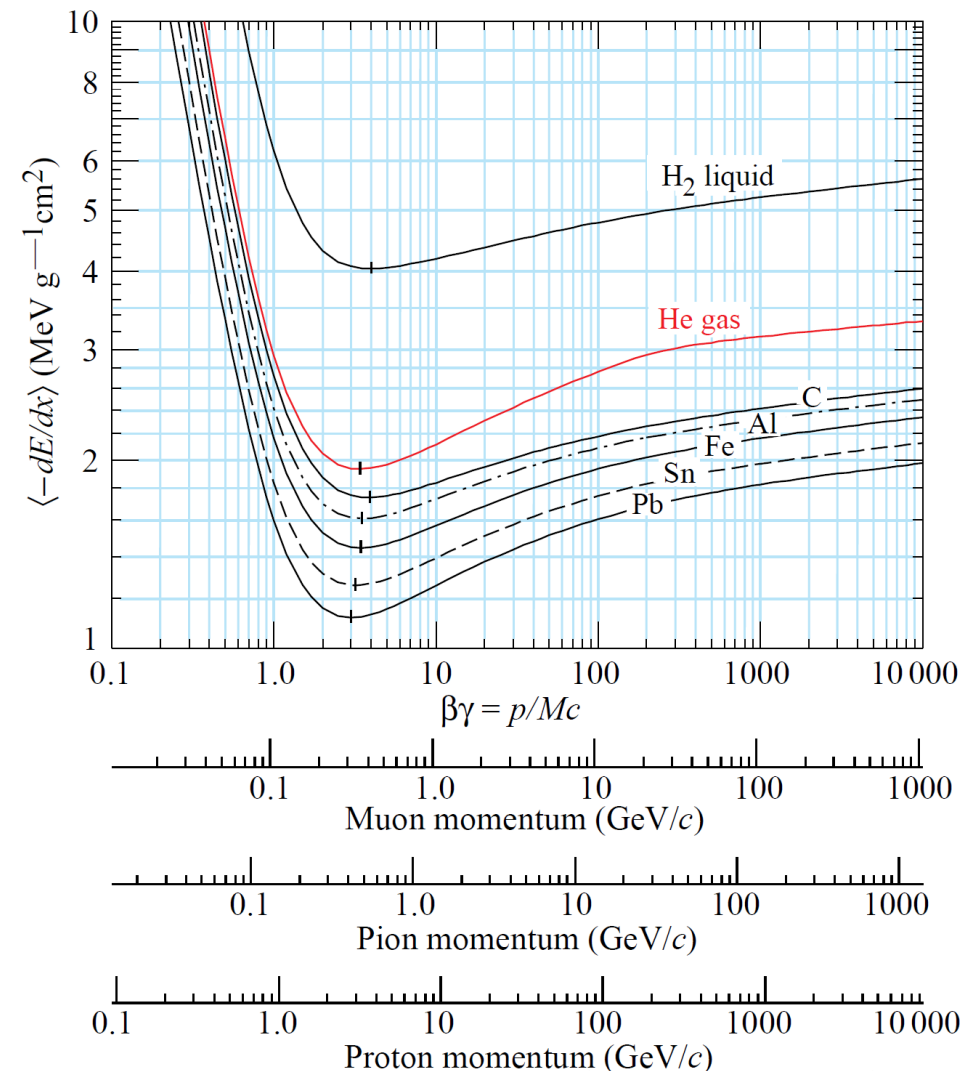
# Bethe-Blochの式によるエネルギー損失

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

$$\beta = \frac{v}{c}, \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad (c \text{は光速})$$

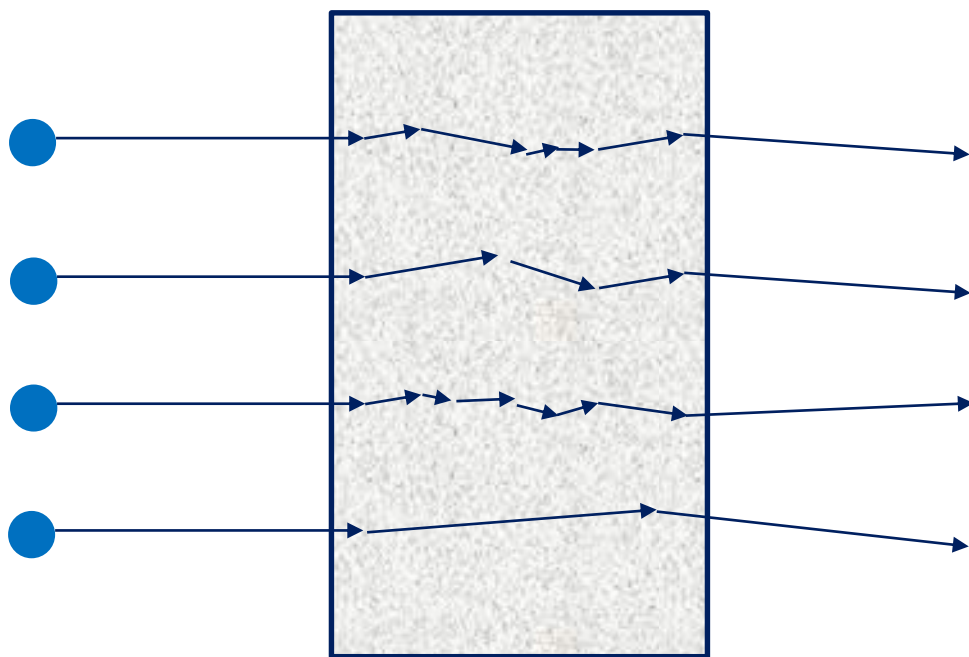
$$\text{運動量 } p = m\gamma v = \frac{mv}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

- 単位長さ当たりのエネルギー損失量は、粒子の種類に関わらず、粒子の電荷と速度によって決まる
- $\beta\gamma = 3 \sim 4$ で最小となる
- 速度が大きいところでは、ほぼ一定の値

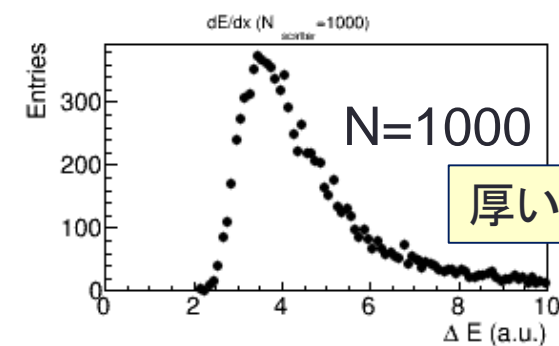
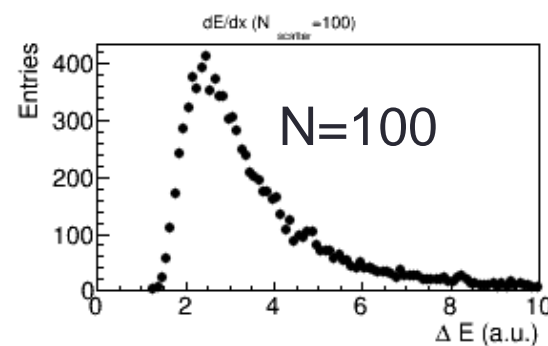
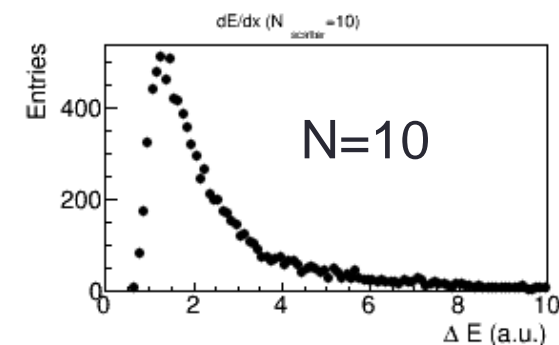
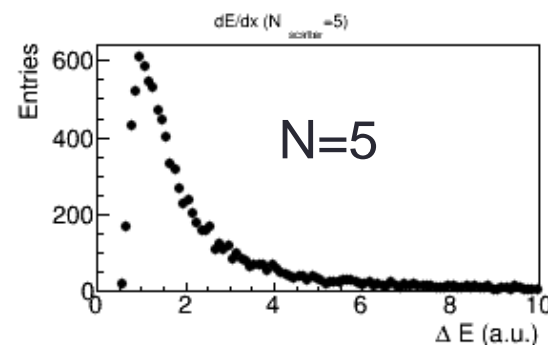
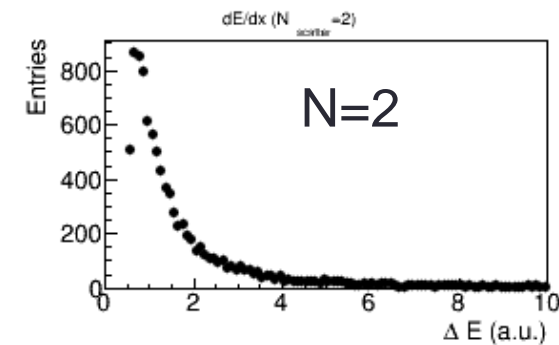
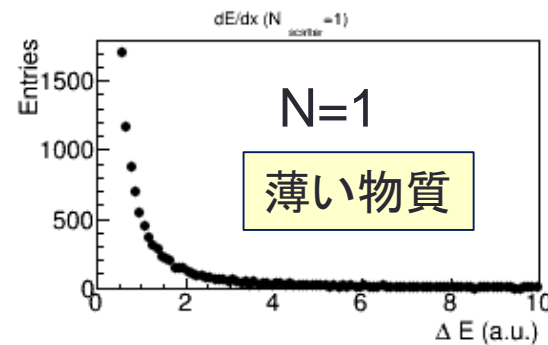


# 1/T分布からランダム分布へ

物質に入射した粒子がどのように散乱を起こすかは確率的なことしか分からない。



- エネルギー損失 $T$ を起こす確率が $1/T^2$ 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



# 陽電子(電子の反粒子)の発見

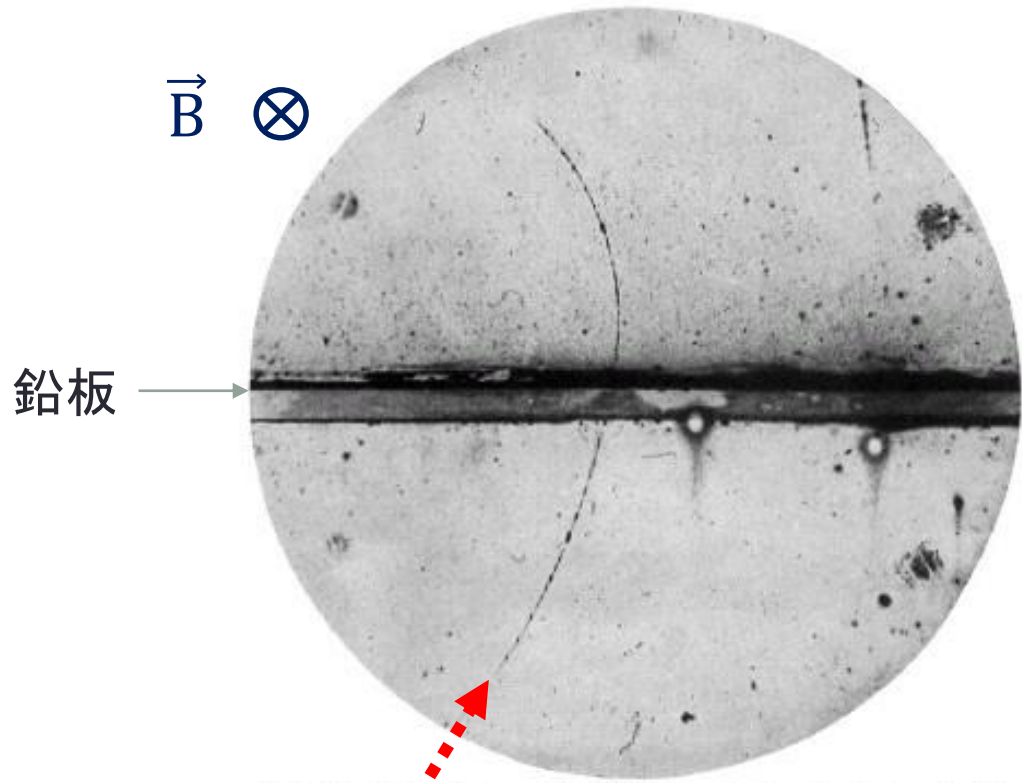
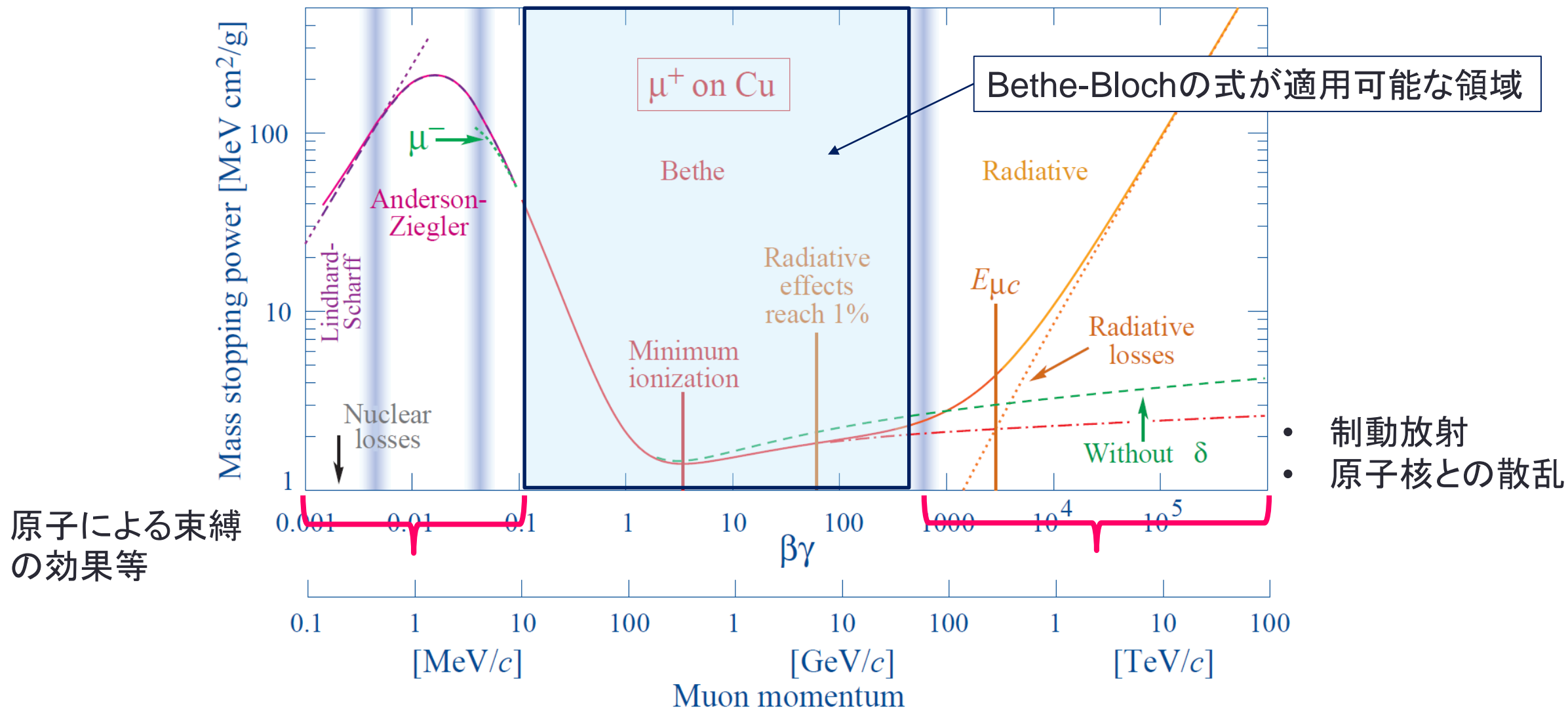


FIG. 1. A 63 million volt positron ( $H_p = 2.1 \times 10^6$  gauss-cm) passing through a 6 mm lead plate and emerging as a 23 million volt positron ( $H_p = 7.5 \times 10^4$  gauss-cm). The length of this latter path is at least ten times greater than the possible length of a proton path of this curvature.

- 霧箱とよばれる装置で荷電粒子の飛跡を可視化
- 磁場中での曲がり具合から粒子の運動量が分かる
- 鉛板を通過後に粒子の運動量が減っている
- 測定量
  - 物質に入射前後の飛跡の曲率
    - → 物質に入射前後の運動量
    - → エネルギー損失量
    - → Bethe-Blochの式から粒子速度を推定
    - → 運動量と速度から質量を推定
- 結論
  - この粒子は**正の電荷**をもつ
  - 電荷の大きさを電気素量と同じと仮定すると、この粒子は**電子とほぼ同じ質量**をもつ

# 物質中でエネルギー損失

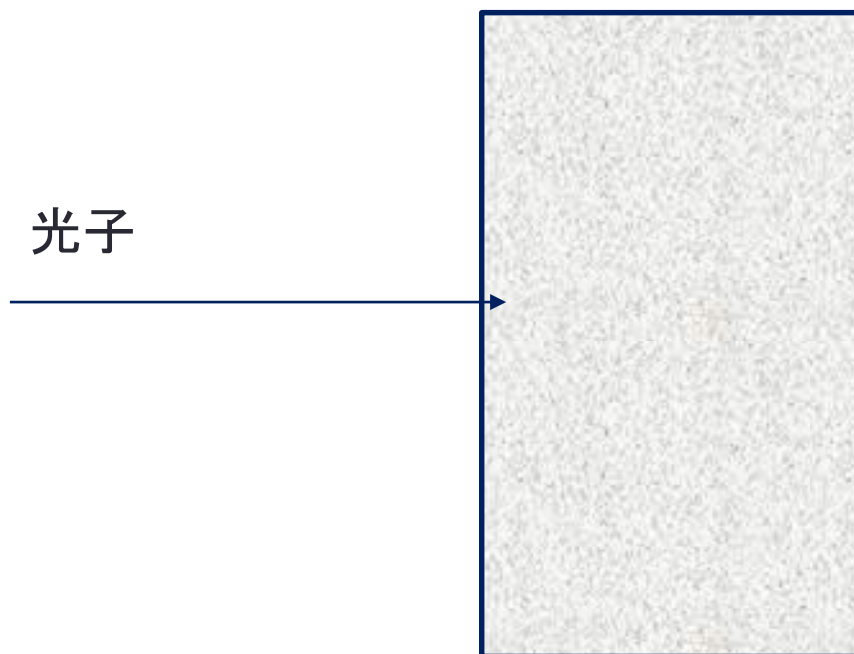


# ここまでのまとめ

- 粒子同士の散乱過程
- 散乱断面積: 散乱の起こりやすさを表す量
  - ラザフォード散乱について、古典的に導出した
  - 他の粒子間の散乱過程も量子力学に基づいて計算可能
- 断面積を使うと、巨視的な物質の中で粒子がどのように相互作用するかも理解できる
  - 例として、エネルギー損失に関するBethe-Blochの式
  - 他にも、物質による吸収率、透過率、電離作用なども分かる



# 光と物質との相互作用



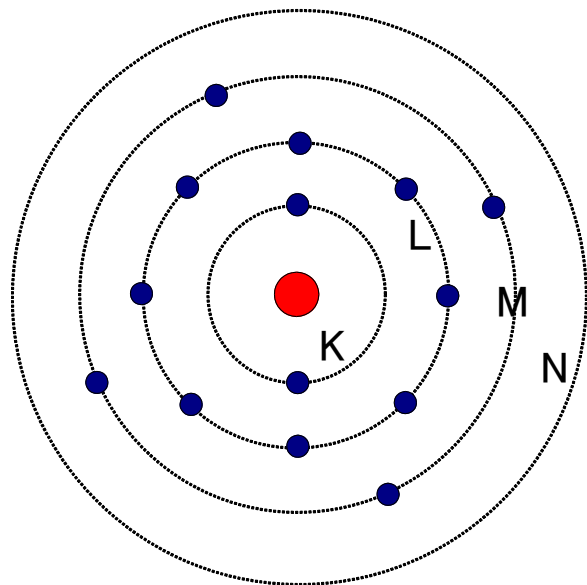
## 日常経験する光と物質との相互作用

- 透過、屈折、吸収、反射、散乱
- 光と物質との相互作用は物質の性質によって大きく異なる
  - 黒い紙 → 吸収
  - ガラス → 透過
  - アルミフویل → 反射
- 可視光のエネルギー: 2~3 eV
  - 物質中の電子の準位間のエネルギー差に近い
  - 物質中の電子状態によって光学的性質は大きく異なる
    - → 物性物理

## “放射線”と呼ばれる光(X線、 $\gamma$ 線)

- X線:  $E > \text{約} 1 \text{ keV}$
- $\gamma$ 線:  $E > \text{約} 1 \text{ MeV}$
- 物質中の電子のエネルギーに比べて十分高いので物質による違いは見えない

# 水素原子のエネルギー準位

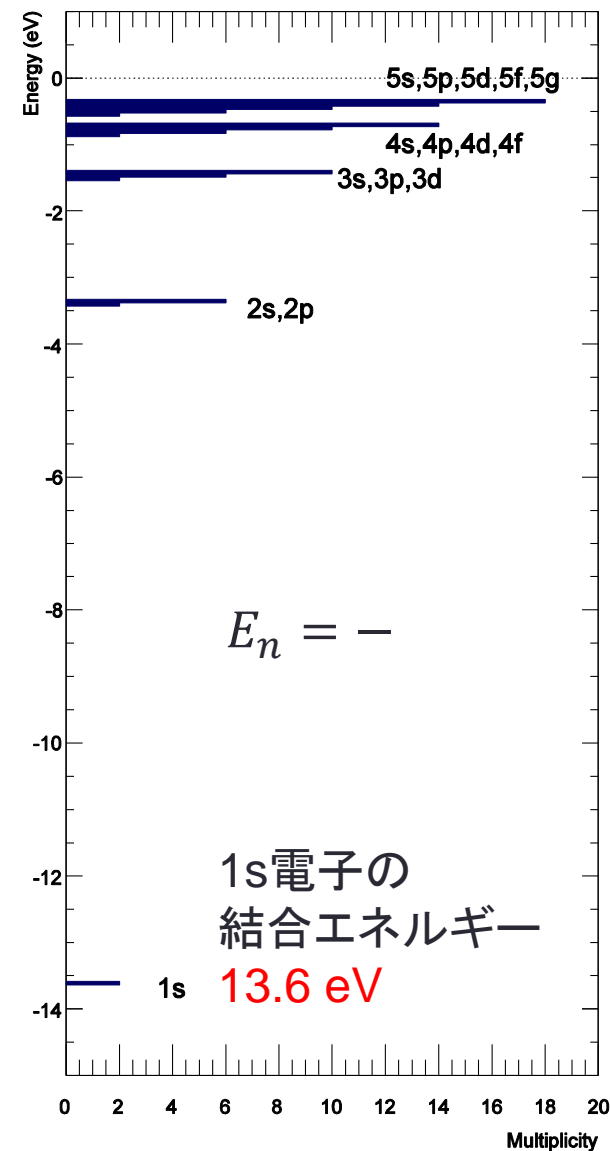


$$E_n = -\frac{Z\alpha^2 m_e c^2}{2n^2}$$

水素原子の中の電子の  
エネルギー準位

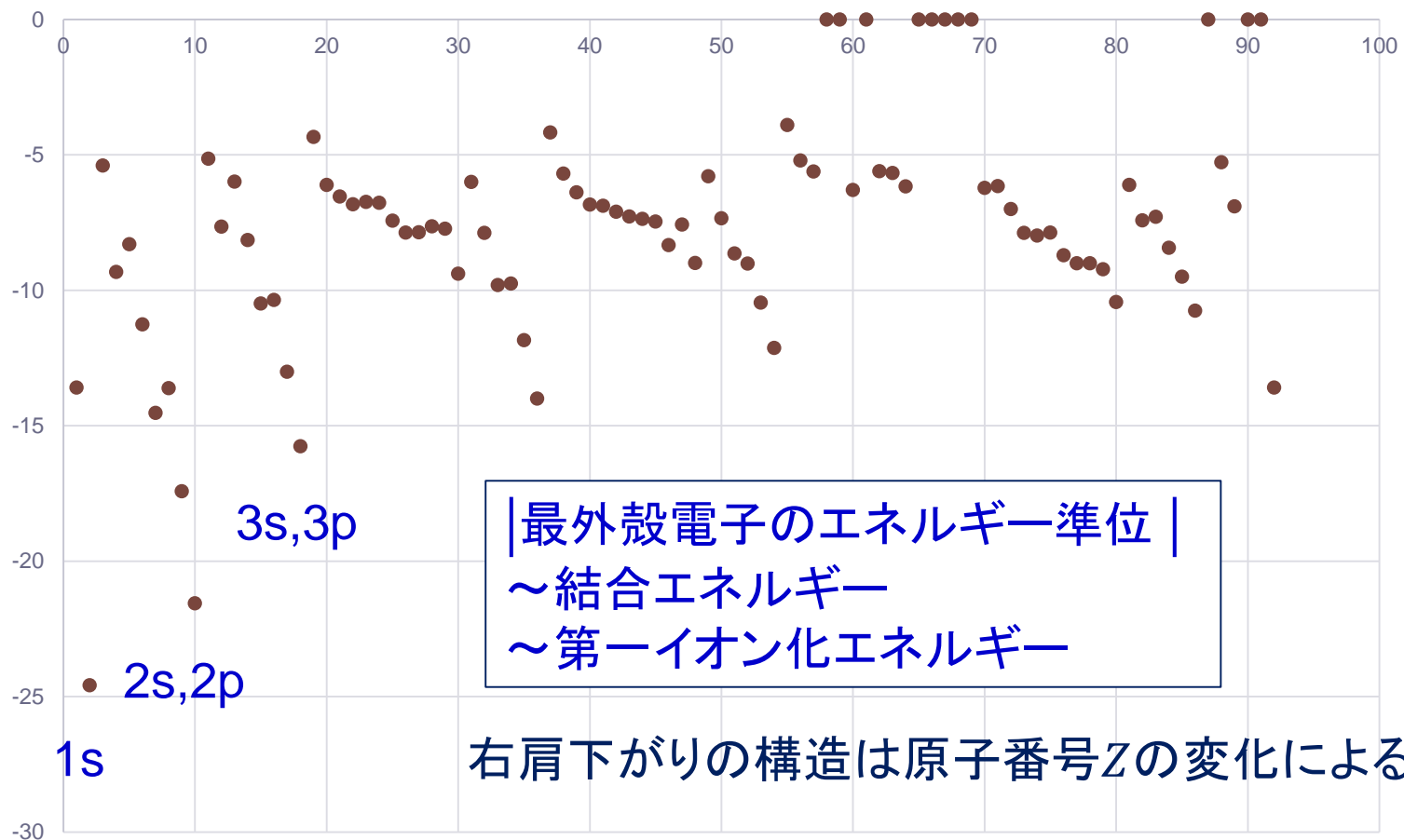
## 主量子数nと状態数

- n=1:
  - 1s: 2重に縮退
- n=2:
  - 2s: 2重に縮退
  - 2p: 6重に縮退
- n=3: 18重に縮退
  - 3s: 2重に縮退
  - 3p: 6重に縮退
  - 3d: 10重に縮退



# 原子の第一イオン化エネルギー

-イオン化エネルギー



$$E_n = -\frac{Z\alpha^2 m_e c^2}{2n^2}$$

## 主量子数nと状態数

- n=1:
  - 1s: 2重に縮退
- n=2:
  - 2s: 2重に縮退
  - 2p: 6重に縮退
- n=3: 18重に縮退
  - 3s: 2重に縮退
  - 3p: 6重に縮退
  - 3d: 10重に縮退

# 光と電子との相互作用

## 光電吸収

$$\gamma + e^- \rightarrow e^-$$

- 光子が電子に完全に吸収される
- 終状態の電子は、入射光子のエネルギー・運動量を得る
- 低エネルギーの光子で支配的

## コンプトン散乱

$$\gamma + e^- \rightarrow \gamma + e^-$$

- 光子と電子の弾性散乱
- 散乱角に応じて光子が失うエネルギーは異なる

## 電子・陽電子対生成

$$\gamma \rightarrow e^- + e^+$$

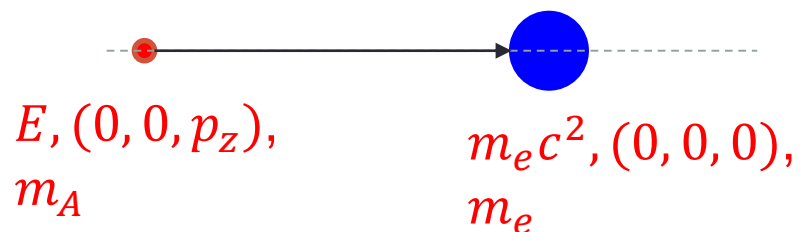
- 光子のエネルギーが電子と陽電子の質量エネルギーに変換
- $m_e c^2 = 511 \text{ keV}$
- $E_\gamma > 1.022 \text{ MeV}$ でのみ可能
- 高エネルギーでは支配的

## 物質中の電子

- 束縛された準位に存在
- エネルギーを獲得した電子は、
  - 異なる準位に励起 or
  - 束縛を離れて自由になる(電離)

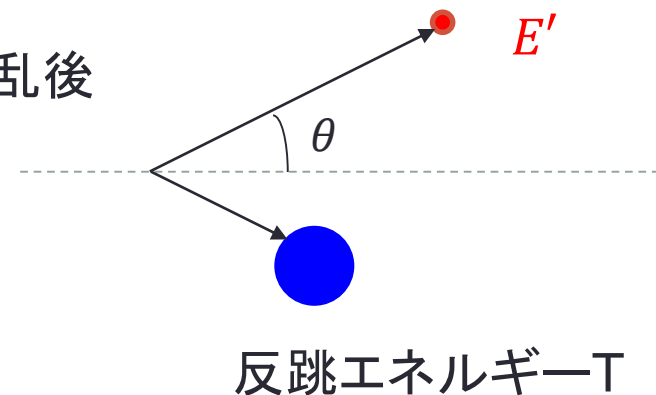
# コンプトン散乱の運動学

散乱前



エネルギーをもった光子が物質中で静止した電子に衝突する

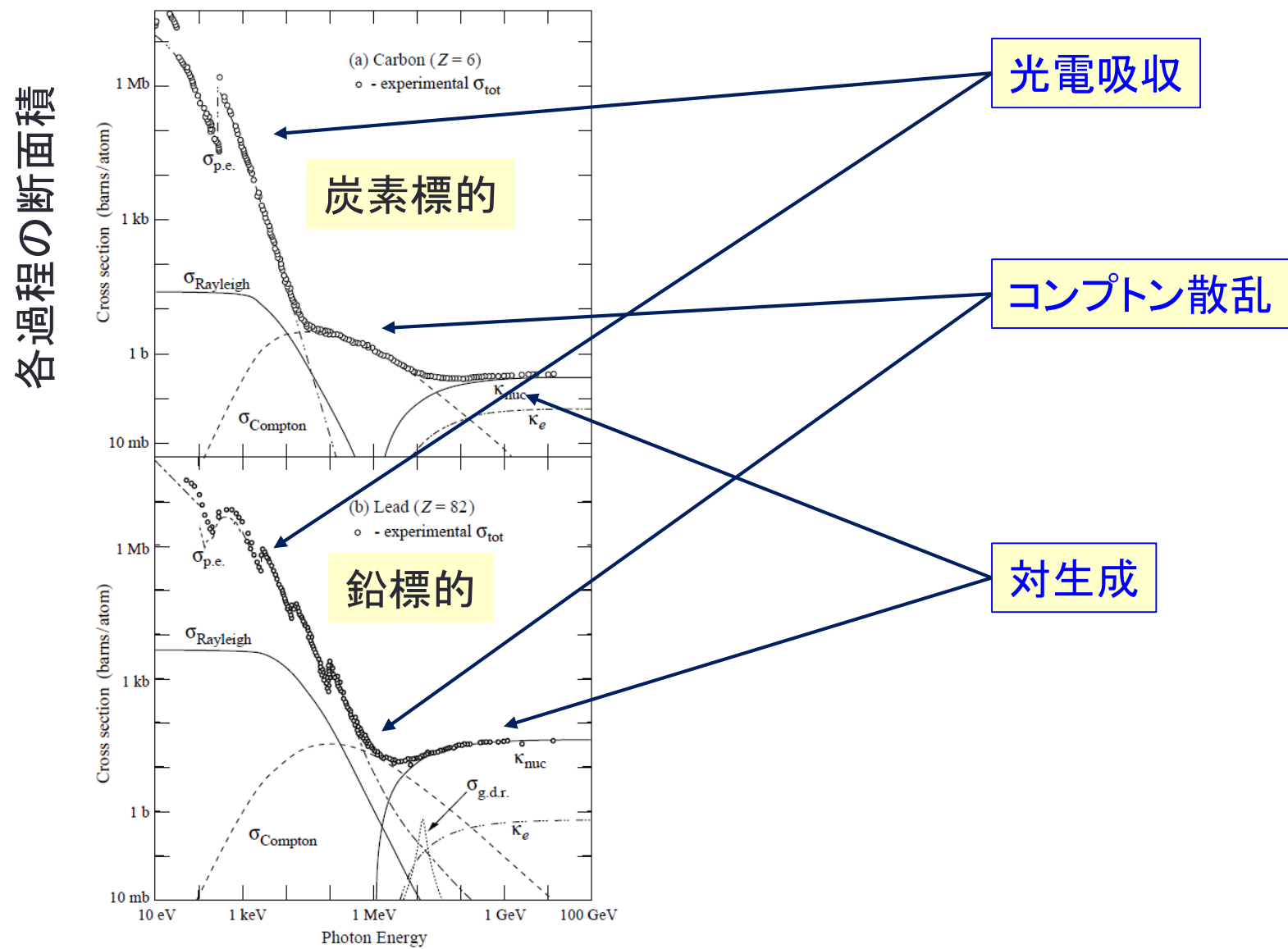
散乱後



光子はある方向に散乱して、エネルギーの一部を電子に与える

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

# 光子と物質の相互作用



# 粒子検出器