

# 線

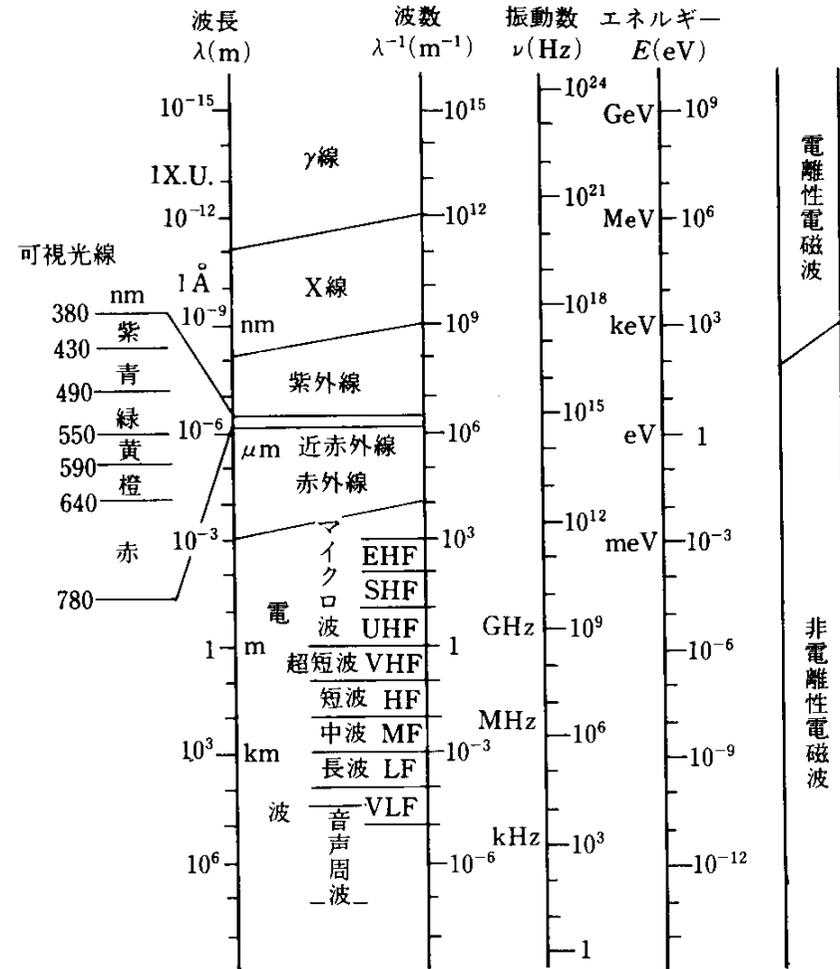
原子核が高いエネルギー状態 (励起状態) から  
低いエネルギー状態へ遷移する際放出される  
電磁波 (数keV ~ 数MeV)

$$E = pc = h\nu = \frac{2p \cdot \hbar c}{l}$$

$E$  : エネルギー  
 $p$  : 運動量  
 $h$  : Planck定数  
 $l$  : 波長

加速器等により人工的に作られる  
高エネルギーの電磁波 (MeV以上)

X線 原子の軌道電子の状態の遷移に伴うエネルギーの高い電磁波 (keV ~ 100 keV)  
可視光 赤 ~ 紫 (eV)



## 線の物質による吸収

線は、物質中で主に次の3つの相互作用をして、**個数が減っていく**(減衰)。  
(1個の線のエネルギーが減っていくのではない!)

光電効果 (photoelectric effect )

コンプトン効果 (Compton effect )

電子対生成 (electron pair creation )

物質の厚さ  $dx$  で失われる線の個数  $dI$  は、線の総量  $I$  及び  $dx$  に比例する。

$$dI = -mI dx$$

従って、厚さ  $x$  の物質の通過後の線の個数  $I(x)$  は、通過前の個数を  $I_0$  として

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

$$m = m_{\text{p.e.}} + m_{\text{Compt}} + m_{\text{pair}}$$

$m$ : 全吸収係数

線形吸収係数 [1/cm]

厚さ  $x$  を長さ [cm] で表す。

質量吸収係数 [cm<sup>2</sup>/g]

厚さ  $x$  を長さ×密度 [g/cm<sup>2</sup>] で表す。

物質との**相互作用の大きさ**に関する。

## 光電効果 (photoelectric effect)

線 (光子) が物質中の**束縛電子に吸収**され、電子にエネルギー  $E_g$  を与え、電子が飛び出す。  
電子の運動エネルギー  $T$  は、電子の束縛エネルギーを  $B$  とすると

$$T = E_g - B$$

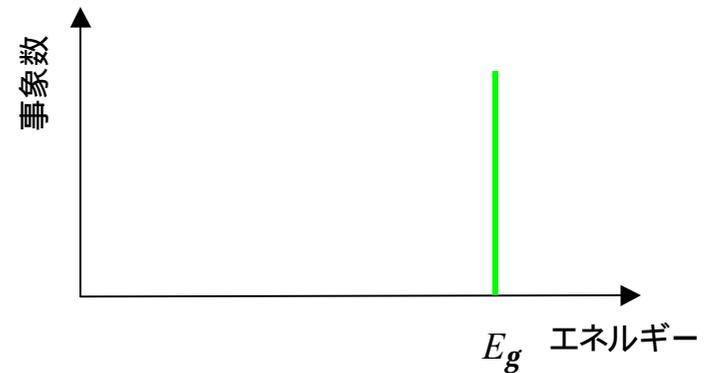
この電子 (光電子) の運動エネルギーが物質 (シンチレータ) に与えられ、エネルギーが測定される。  
束縛エネルギーに対応する分も最終的に物質に与えられ、測定されるエネルギーは、もとの線のエネルギー  $E_g$  に対応する**線スペクトル (光電吸収ピーク)**となる。



線のエネルギー測定上重要

相互作用の大きさ  
物質の原子番号 ( $Z$ ) の5乗に比例

$$m_{\text{p.e.}} \propto Z^5$$

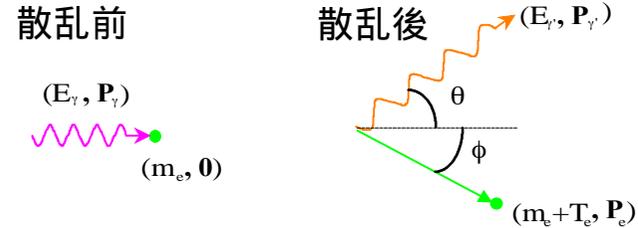


# コンプトン効果 (Compton effect)

線 (光子) と電子 (束縛エネルギーを無視) との散乱

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

$$T_e = E_g - E_{g'} = \frac{E_g}{1 + \frac{E_g}{m_e c^2} (1 - \cos \theta)}$$

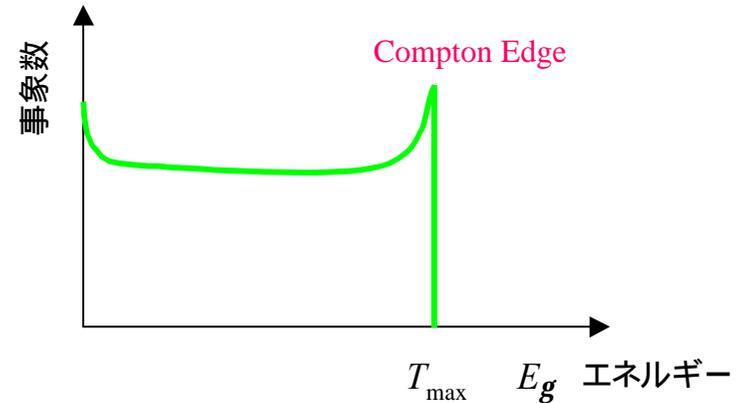


反跳電子に与える (運動) エネルギーは、 $0 (\theta = 0)$  から最大値  $T_{\max} (\theta = \pi)$  まで連続分布  
従って、連続スペクトルになる。最大値のことを **Compton Edge** といい

$$T_{\max} = \frac{E_g}{1 + \frac{m_e c^2}{2 \cdot E_g}}$$

相互作用の大きさ  
 $Z$  (電子の数) に比例

$$m_{\text{Compt}} \propto \frac{Z}{E_g}$$



## 電子対生成 (pair creation)

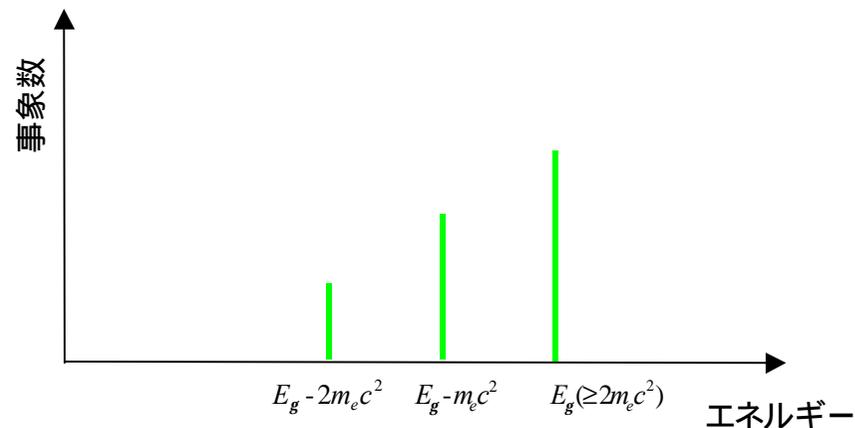
線 (光子) が電子・陽電子対 (electron-positron pair) に変換する。(エネルギーが質量へ)  
 自由空間では、エネルギー保存則と運動量保存則の両者を満たすことができないので起こらない。  
 外場 (原子核の作る電場) のもとで、原子核の反跳があるため起こる。

$$T_{e^-} + T_{e^+} = E_g - 2m_e c^2$$

線のエネルギーが、 $2m_e c^2$  (= 1.022 MeV) 以上でしか、起こらない。

電子 他との相互作用と同様  
 陽電子 物質中で止まり、電子と対消滅  
 反対方向にできる2本のエネルギー  
 $m_e c^2$  (= 511 keV) の線 (消滅線)

消滅線が  
 2本とも (光電) 吸収された。  $E_g$   
 Full Energy Peak  
 1本は、検出器の外へ逃げた。  $E_g - m_e c^2$   
 Single Escape Peak  
 2本とも、逃げた。  $E_g - 2m_e c^2$   
 Double Escape Peak



相互作用の大きさ  $Z^2$  に比例

$$m_{\text{pair}} \propto Z^2$$

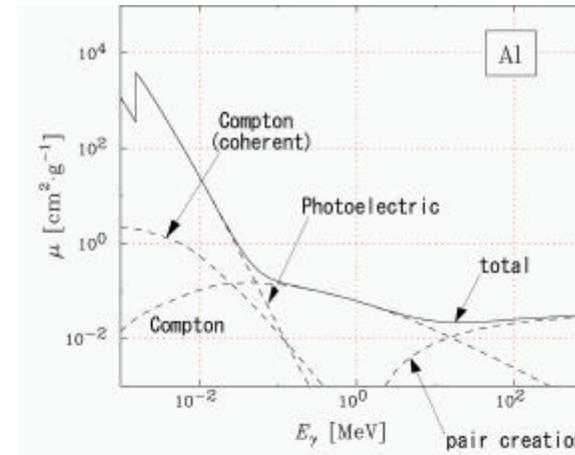
## 吸収係数のエネルギー・物質依存性

Z が大きいほど相互作用は大きい。  
とりわけ、光電効果に対する依存性が強い。  
~ Z<sup>5</sup>

光電効果が大きいのは、100 keV ~ 1 MeV 以下。

MeV の領域では、コンプトン効果が大きい。

10 MeV 以上では、電子対生成がメイン。



アルミニウム中の  $\gamma$  線の質量吸収係数。

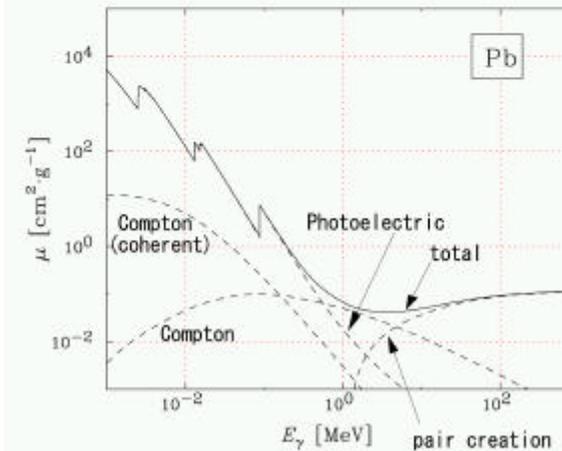


図 3: 鉛中の  $\gamma$  線の質量吸収係数。

# 線検出器 (エネルギー測定装置)

シンチレータ  
光電子増倍管 (PMT )  
前段増幅器 (Preamplifier )  
比例増幅器  
波高分析器

## シンチレータ (蛍光体)

線のエネルギーを電子の運動エネルギーに変える。

→ Z が大きい物質がよい。

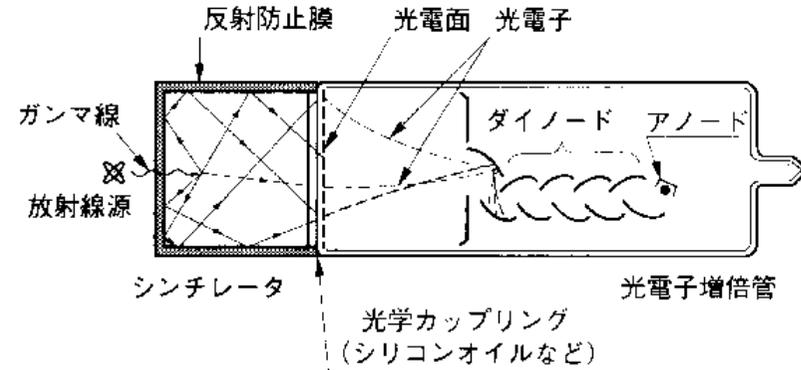
電子の運動エネルギーを電離・励起により、  
蛍光体のエネルギーに変換する。

蛍光体はこのエネルギーの一部を光子 (紫外 ~ 可視光)

(シンチレーション光) に変える (発光)。

→ 発光効率の高いものがよい。

シンチレータに与えられたエネルギーに比例した光子の個数



**NaI(Tl)**

発光効率	12%
蛍光波長 (ピーク)	420 nm

## 光電子増倍管 (PhotoMultiplier Tube)

シンチレーション光を回路で扱える電流 (多数の電子の流れ) に変換する。

シンチレーション光が光電面で光電効果を起こし、光電子が発生。(効率 ~ 20% )

光電子 (1次電子) が電場により加速され、ダイノード電極に衝突し、数個の電子 (2次電子) を生ずる。

2次電子は多数ある電極間で、加速・衝突・2次電子発生を繰り返す。(10数段)

最終的にアノード電極からは、はじめの  $10^6$  倍程度の電子 (電荷) として取り出される。

# 線検出器 (エネルギー測定装置)

## 前置増幅器と(比例)増幅器

入力した電荷 (シンチレータが受けたエネルギーに比例) に比例した波高のパルスに増幅、整形する。  
増幅度 (ゲイン) は、つまみにより、任意に変えられる。

## 波高分析器 (MCA, PHA)

### ADC (Analog to Digital Converter)

アナログ量である波高をデジタル量 (たとえば、0から511の数字) に変換する。

### 計算機 (ソフトウェア)

変換された数値をメモリに記憶し、その頻度分布 (ヒストグラム) を表示する。  
このヒストグラムをエネルギースペクトルという。

## エネルギー分解能

理想的な線スペクトル (光電吸収ピーク) が様々な要因により、幅を持つ。

➡ 検出器の性能

半値幅 (FWHM, full width at half maximum)

$E$  (MeV)

中心値  $E$  (MeV)

分解能  $R = E / E * 100$  [%]

