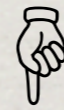


放射線計測学特論

放射線スペクトル測定

γ線スペクトル測定

✪ 電磁波は電氣的に中性  エネルギーを電子に伝達



光子の性質は不連続に大きく変化する

✪ γ線スペクトロメータとしての必要な機能

✪ 高速電子を発生する相互作用確率を持った転換物質

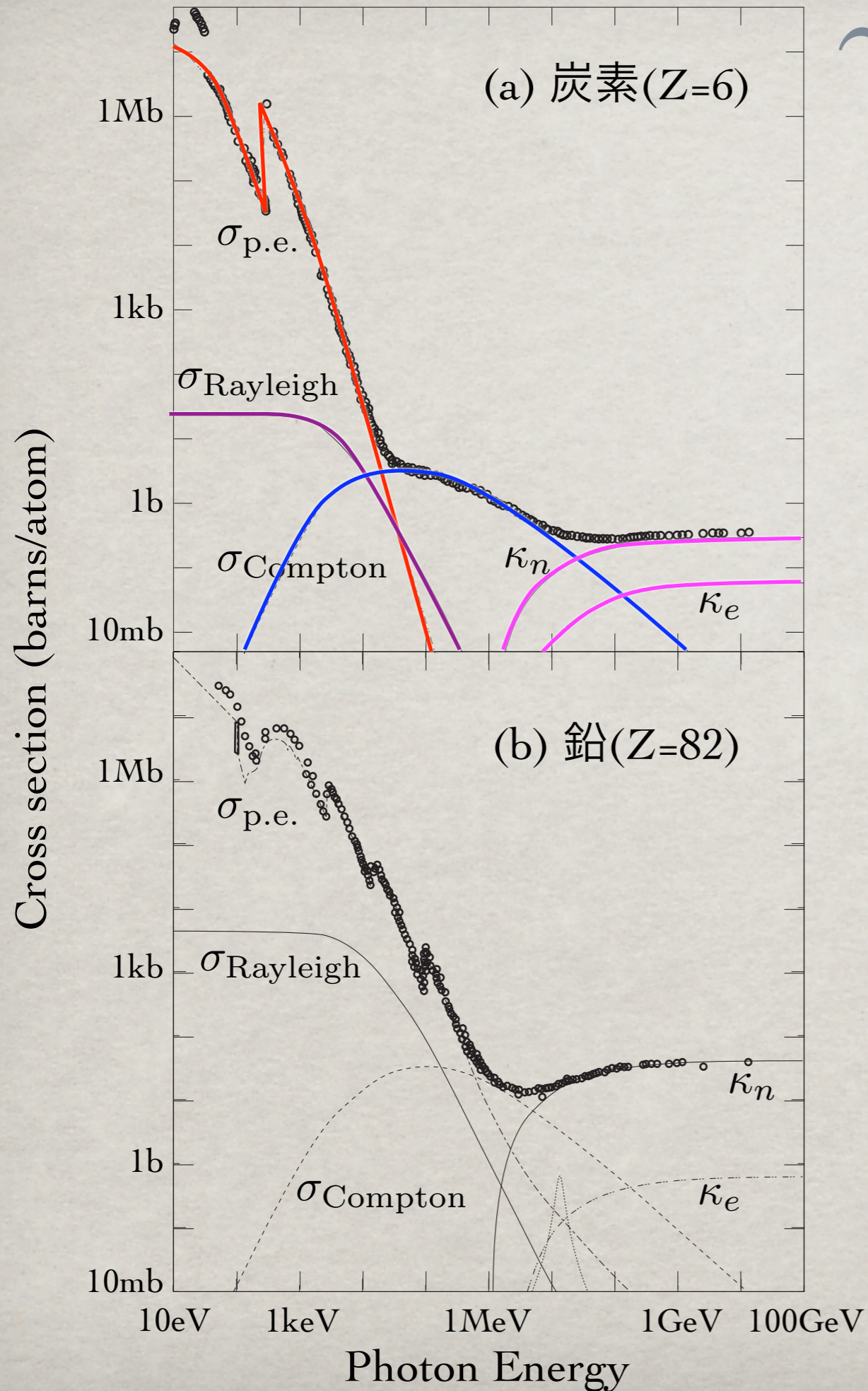
✪ 2次電子の有効な検出器

✪ 数 MeVの入射 γ線の平均飛程 : 数 mm

物質に入射してから止まるまでの進んだ距離

$$R = \int \frac{dE}{\left(\frac{dE}{dx}\right)}$$

γ線の相互作用



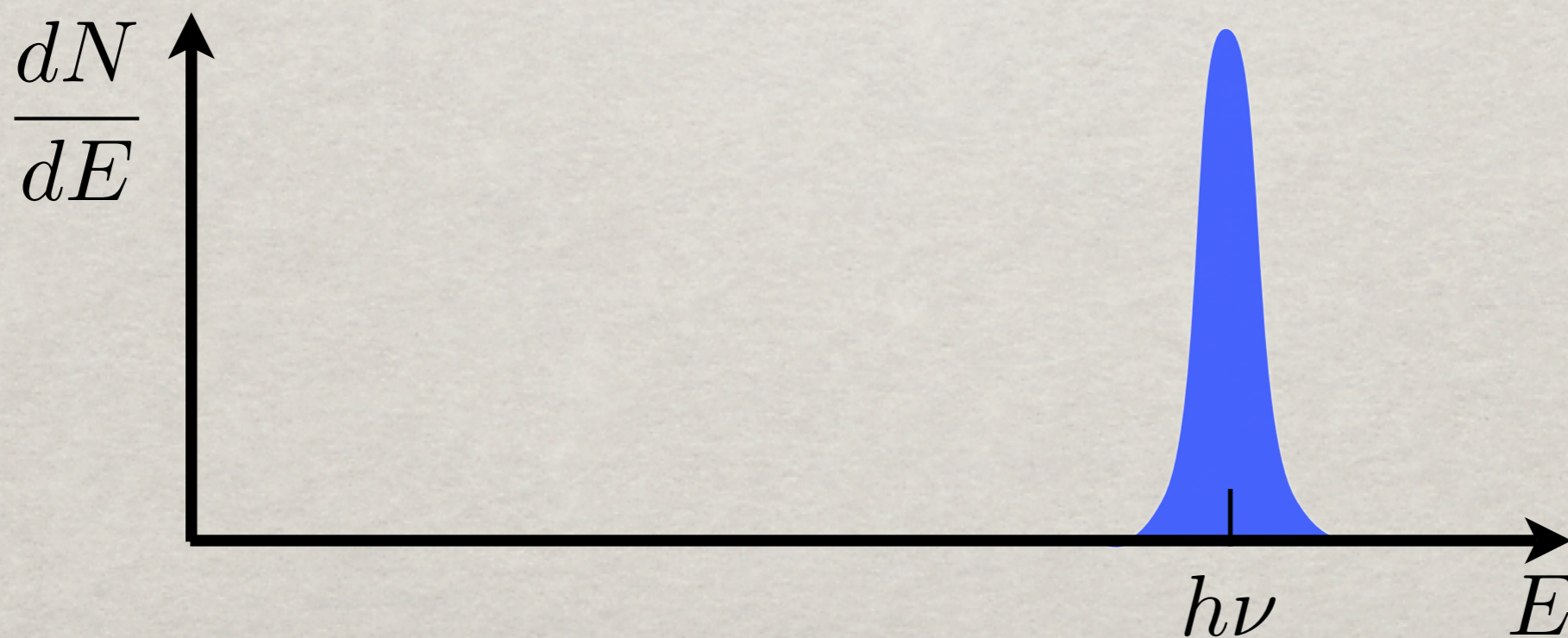
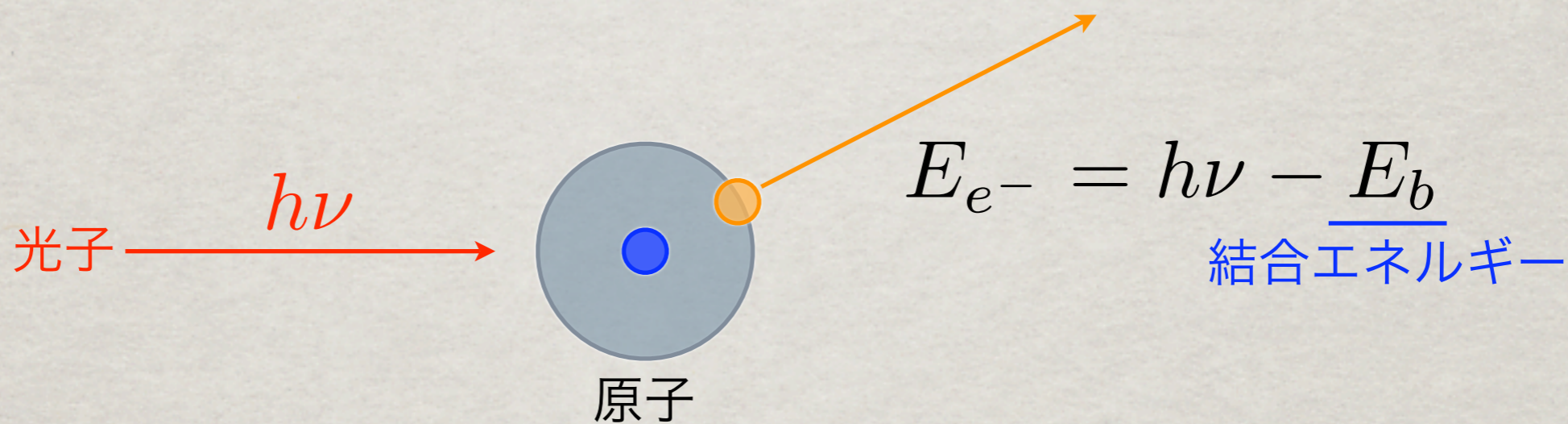
○ 測定データ

- $\sigma_{p.e.}$ 光電吸収 < 1 MeV
- σ_{Rayleigh} Rayleigh 散乱
- σ_{Compton} Compton 散乱 $\sim 1 \text{ MeV}$
- κ_n 電子対生成 (原子核) > 1.022 MeV
- κ_e 電子対生成 (電子)

Cross section ⇨ 反応確率

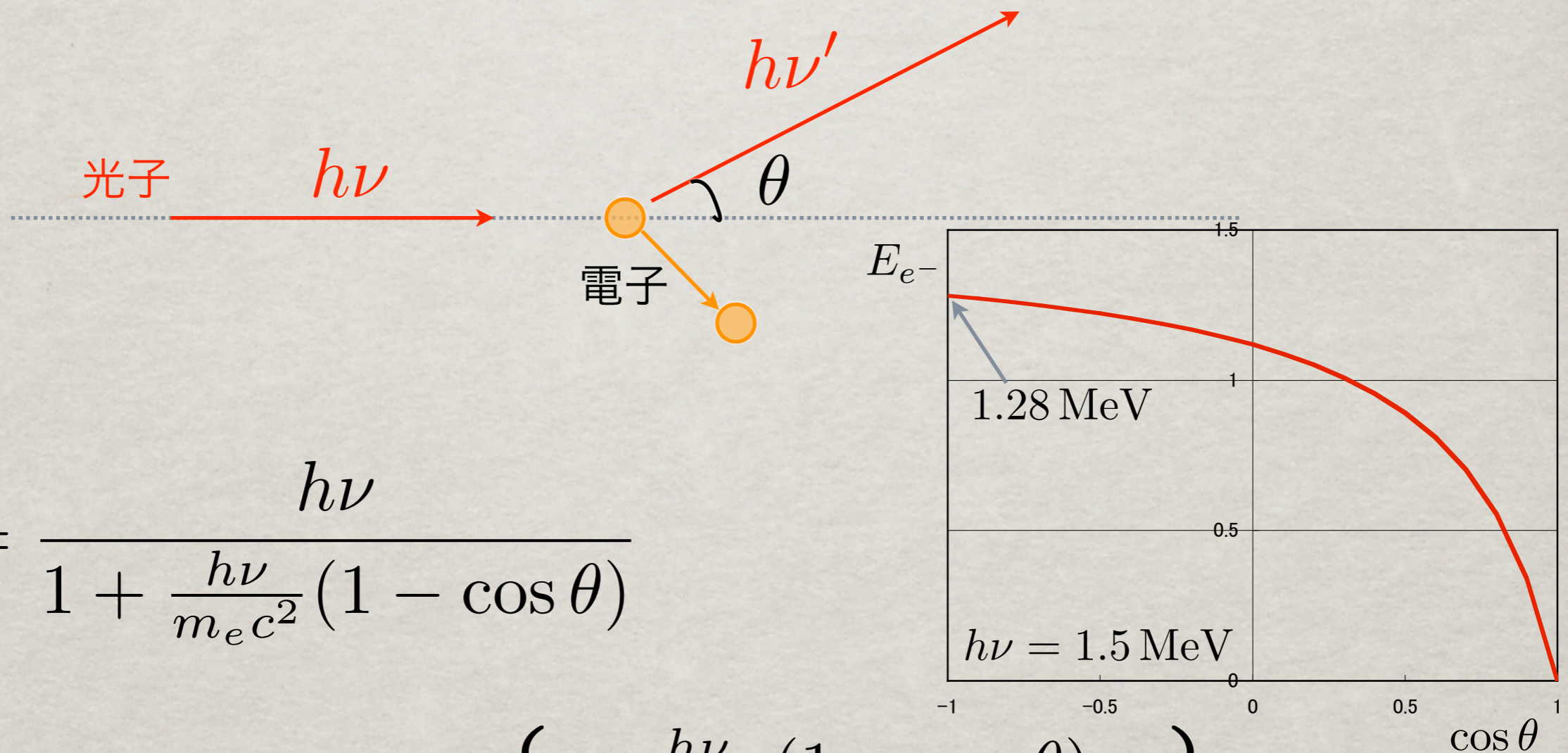
光電吸収

- ✪ エネルギーが数百 keVまでの γ 線に対して重要



コンプトン散乱

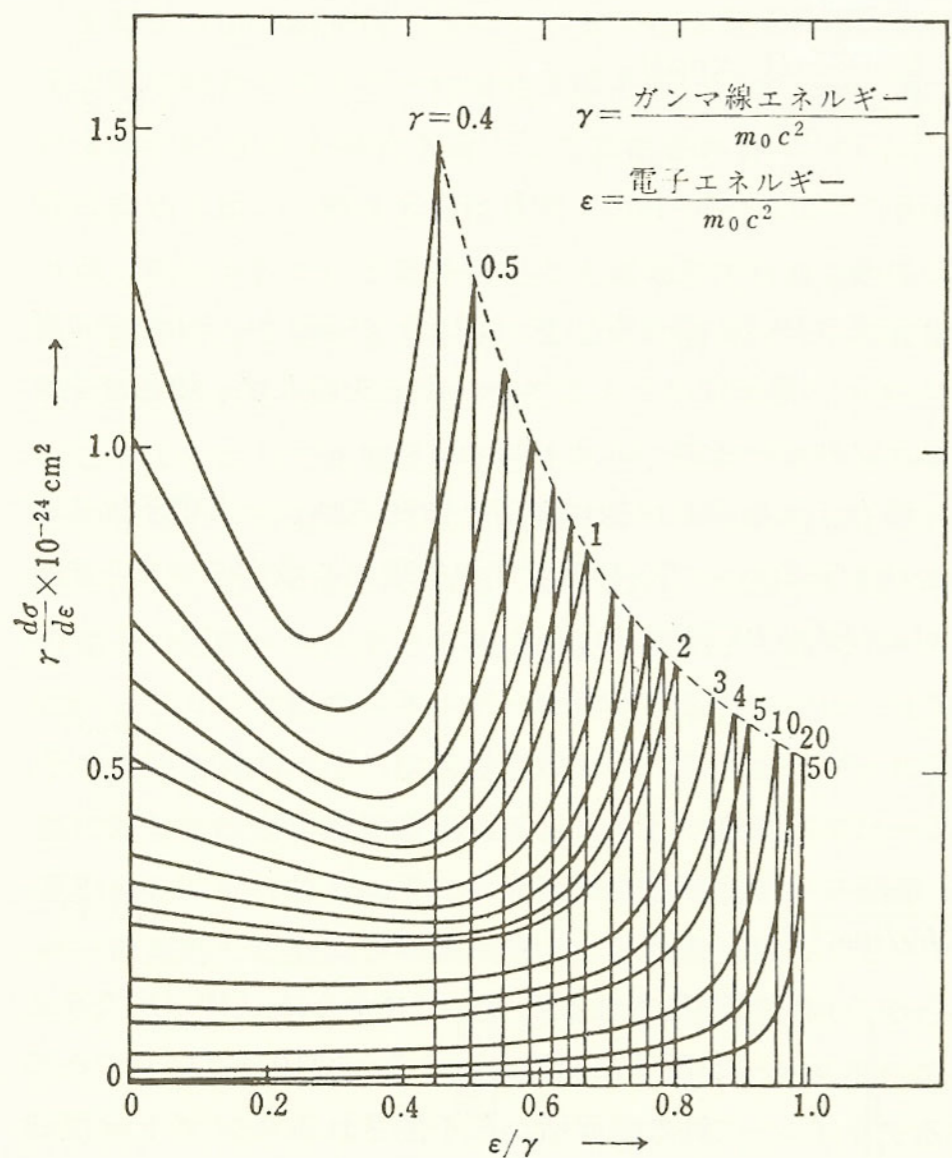
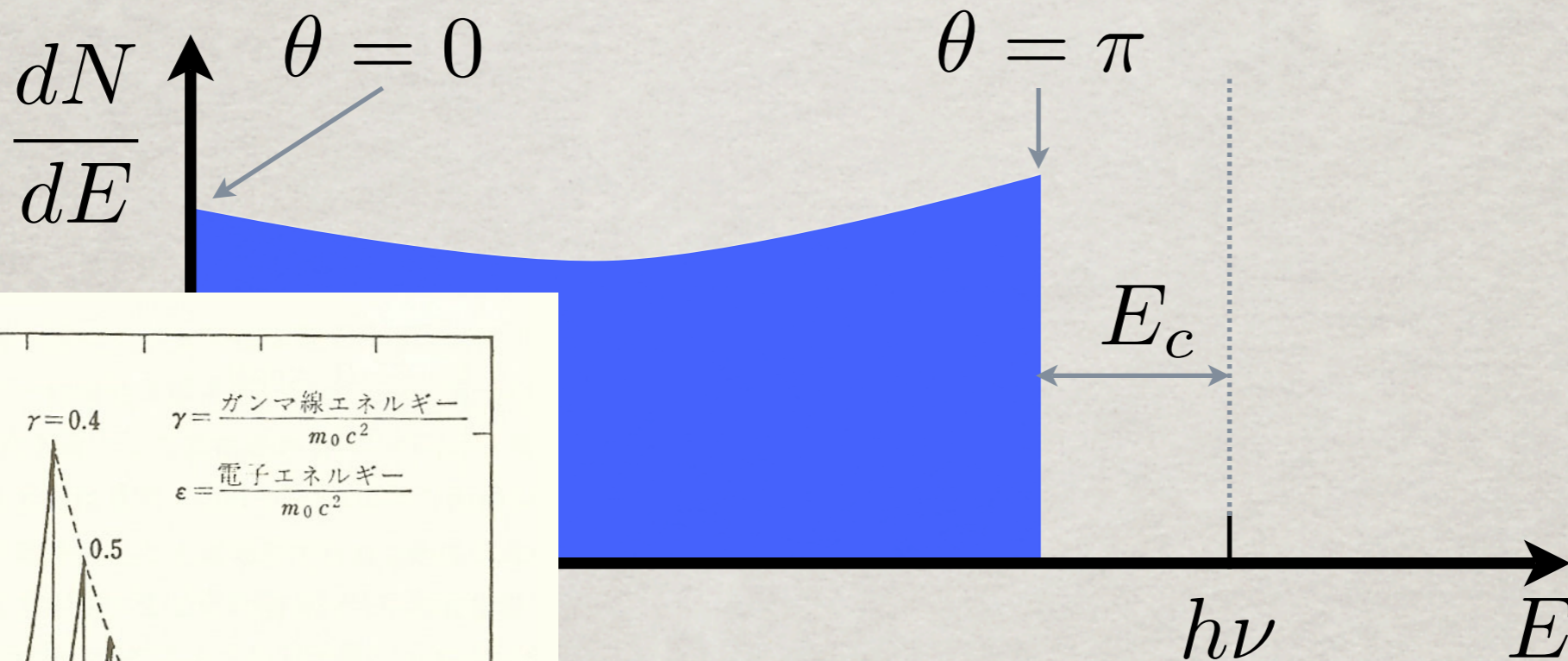
✿ エネルギーが数 MeV の γ 線に対して重要



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

$$E_{e^-} = h\nu - h\nu' = h\nu \left\{ \frac{\frac{h\nu}{m_e c^2} (1 - \cos \theta)}{1 + \frac{h\nu}{m_e c^2} (1 - \cos \theta)} \right\}$$

コンプトン散乱

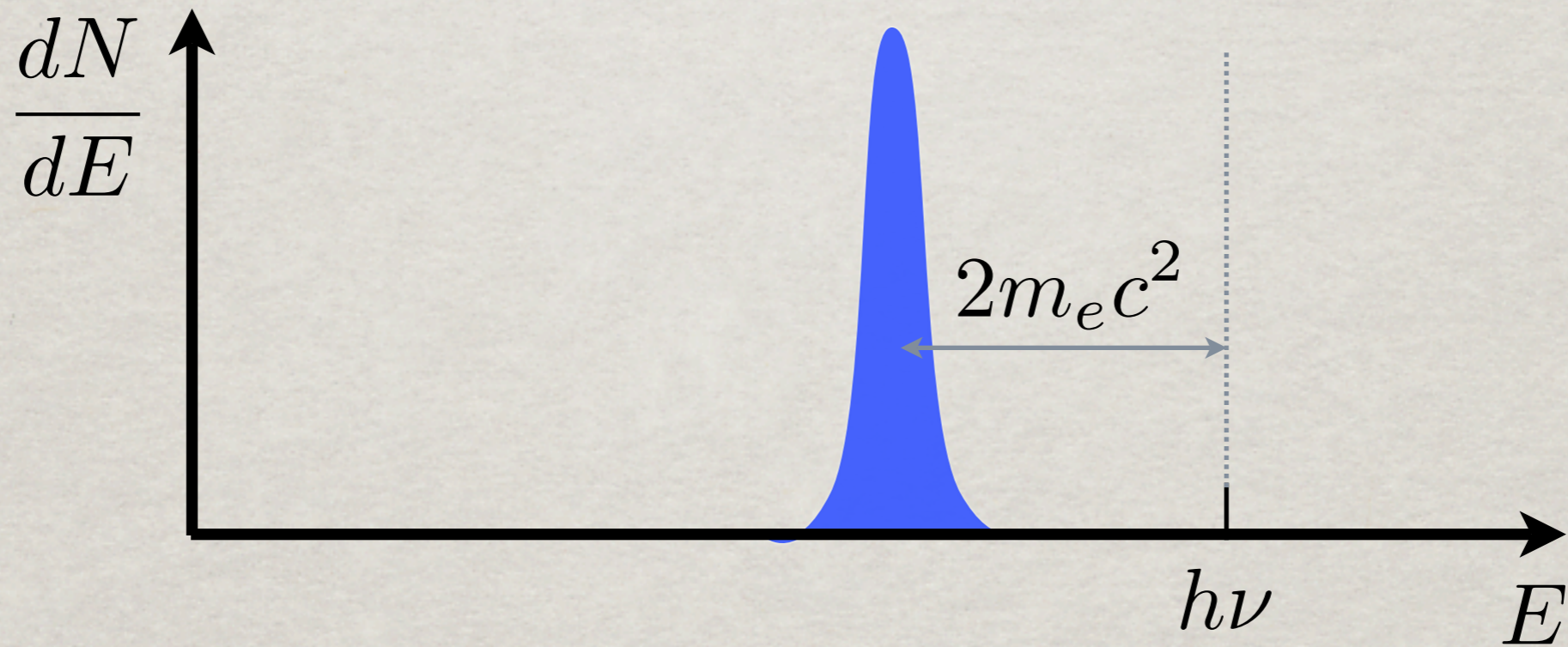


$$E_c \cong \frac{m_0 c^2}{2} (= 0.256 \text{ MeV})$$

$$E_c = h\nu - E_{e^-} |_{\theta=\pi} = \frac{h\nu}{1 + \frac{2h\nu}{m_e c^2}}$$

電子対生成

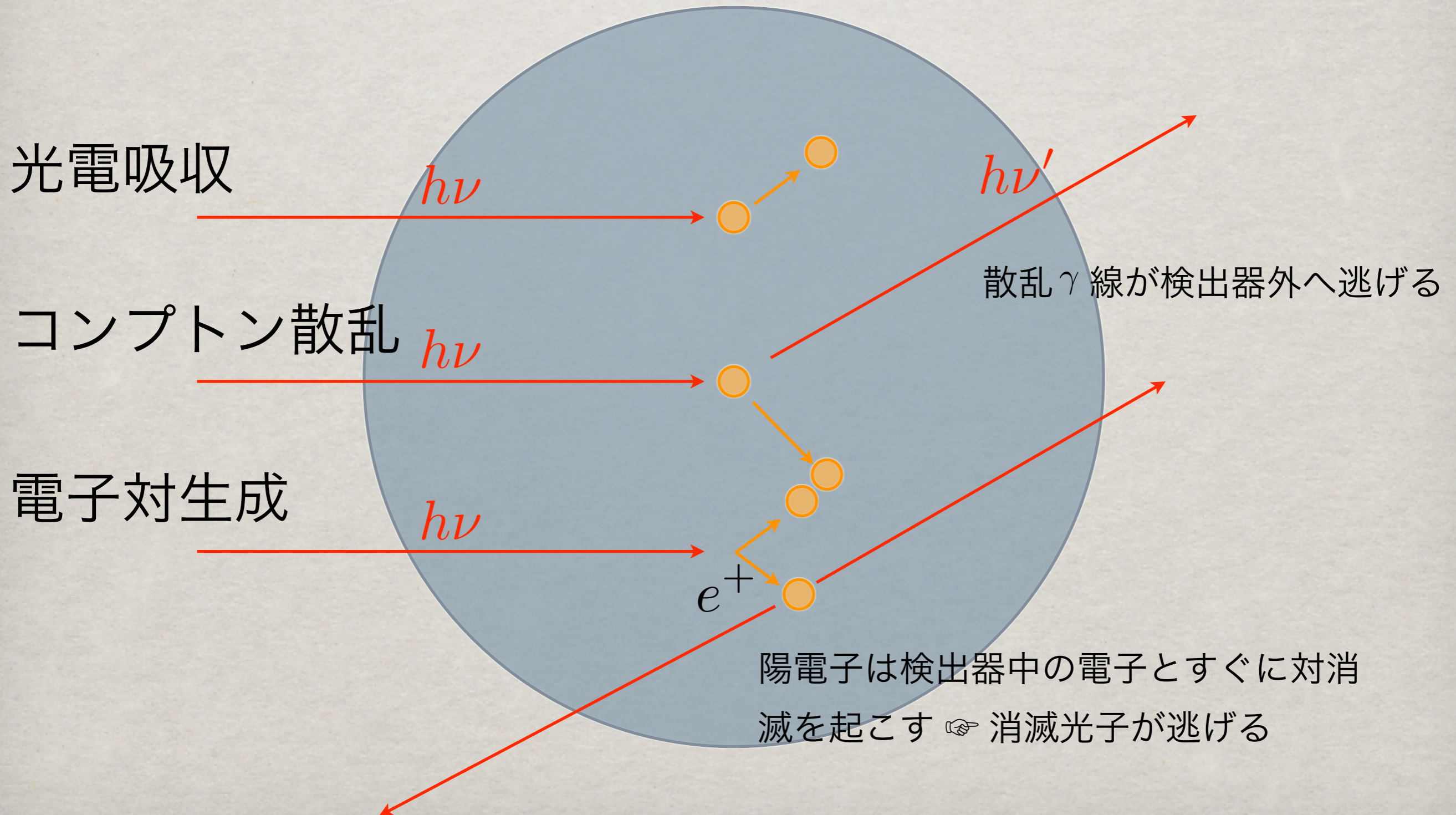
- ✻ エネルギーが5~10 MeV以上の γ 線に対して重要



$$E_{e^-} + E_{e^+} = h\nu - 2m_e c^2$$

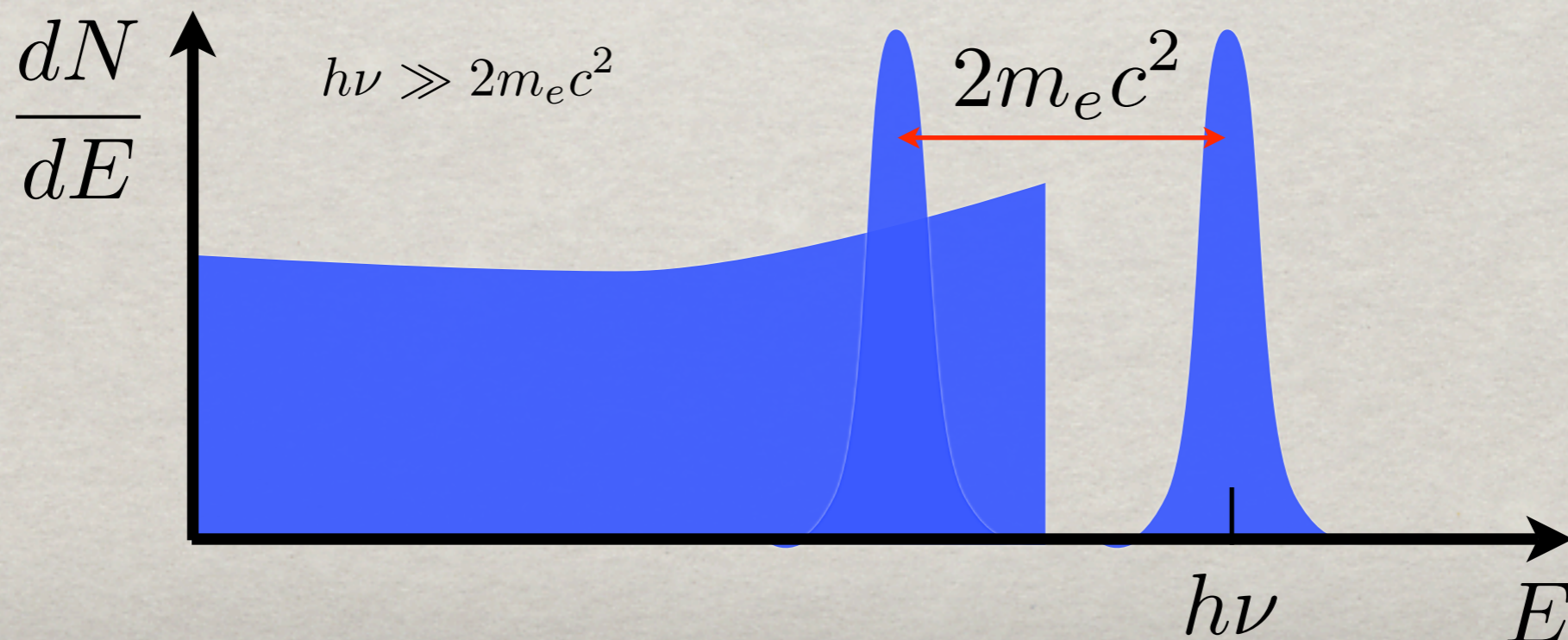
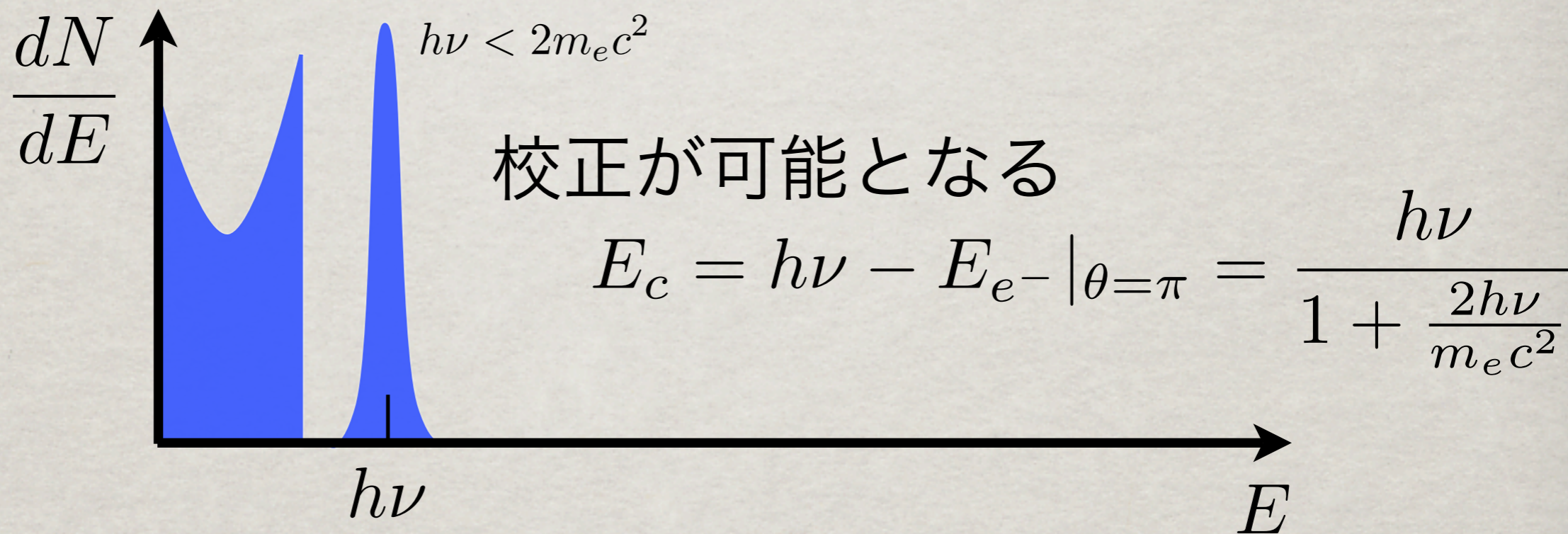
予測応答関数

※ 小型の検出器の場合



予測応答関数

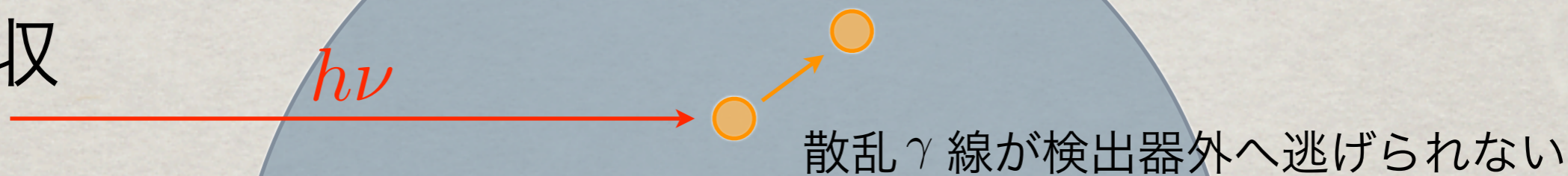
✻ 小型の検出器の場合



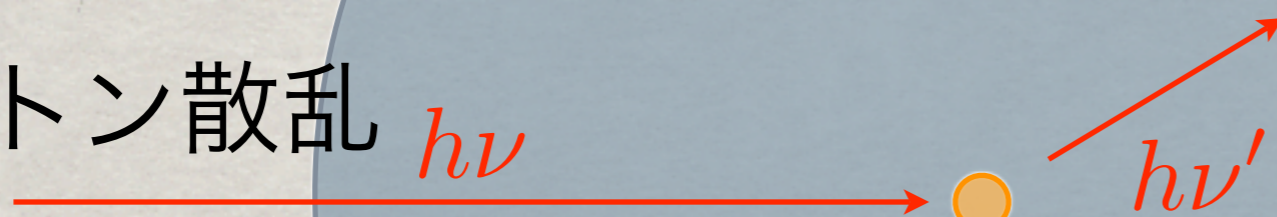
予測応答関数

大型の検出器の場合

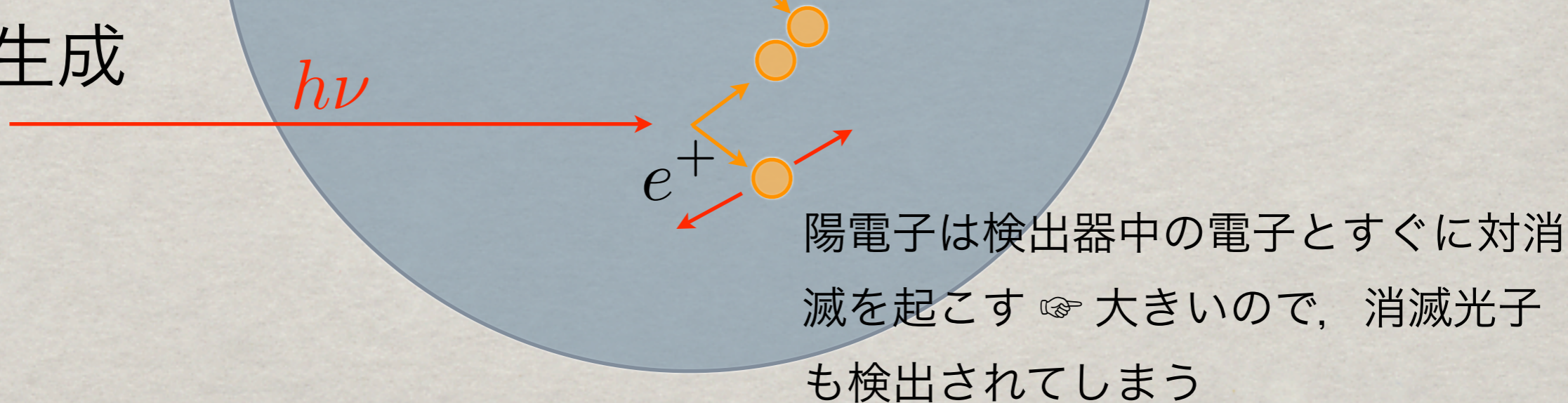
光電吸収



コンプトン散乱

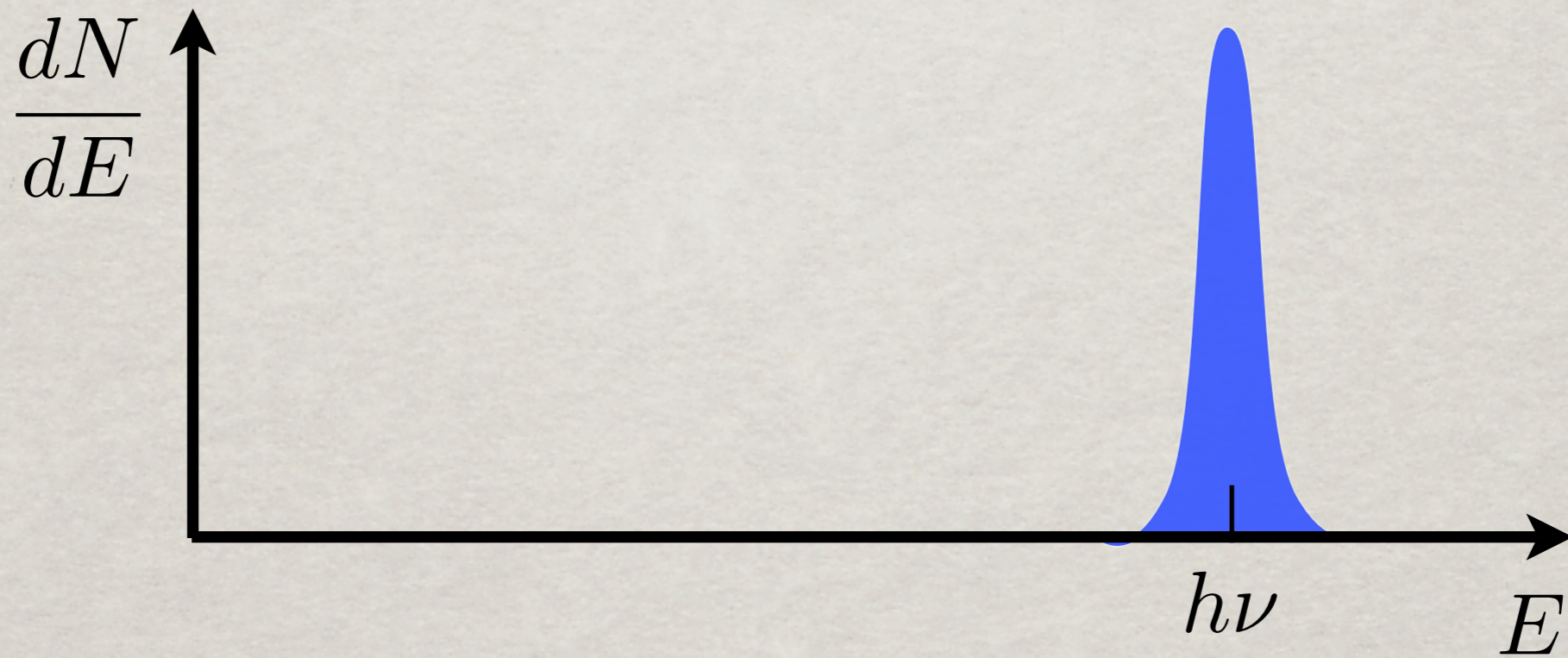


電子対生成



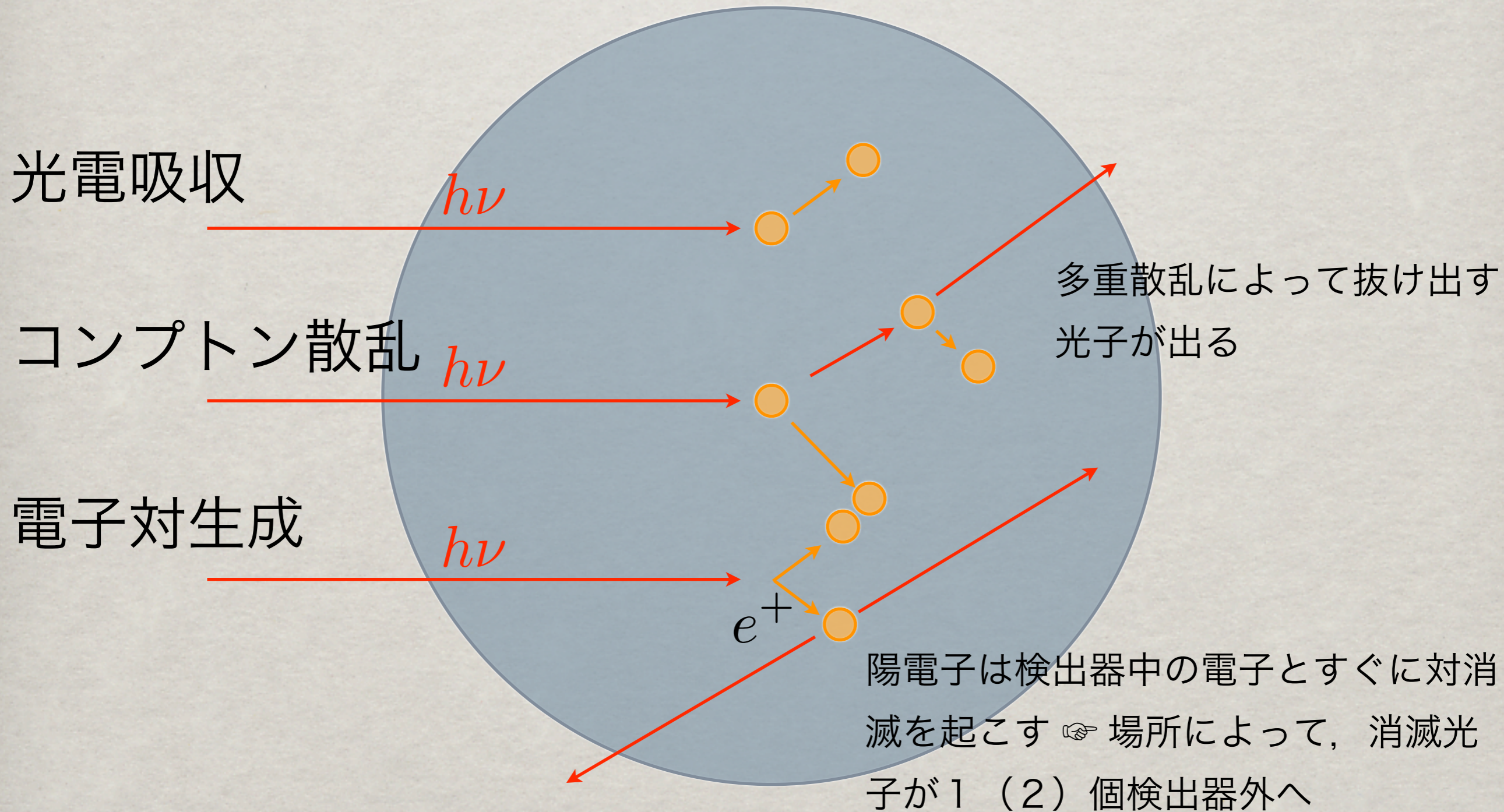
予測応答関数

✻ 大型の検出器の場合



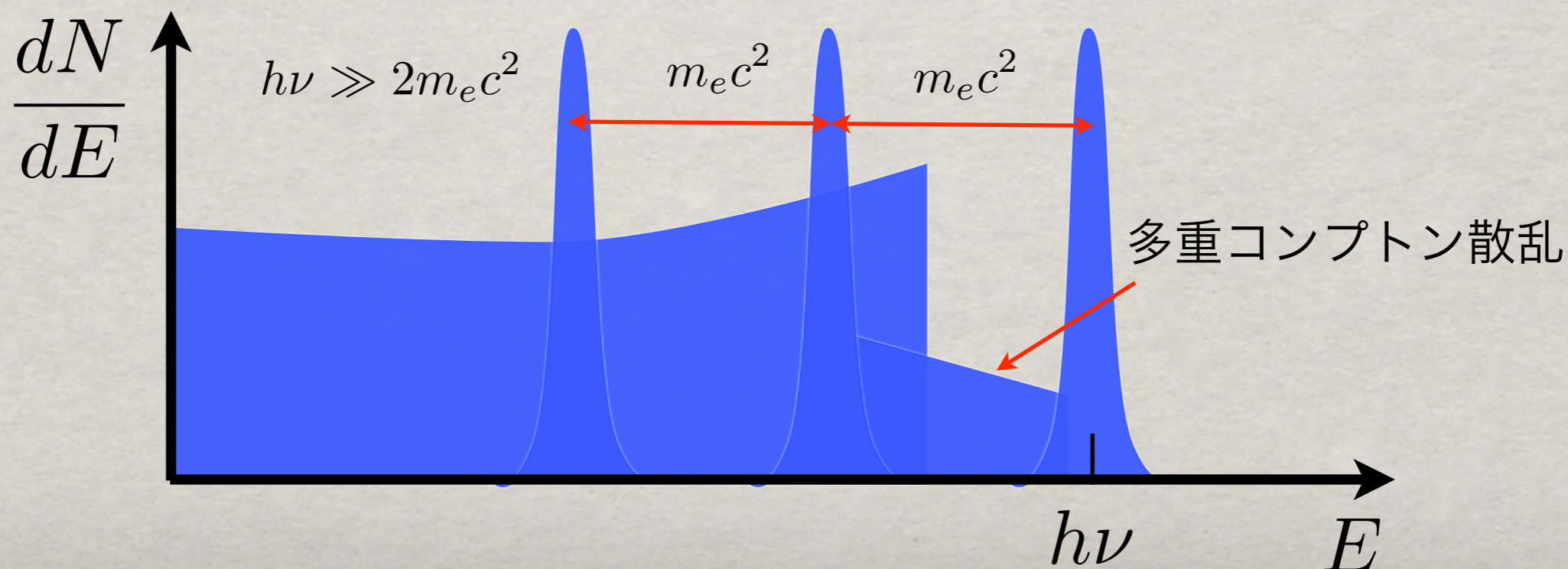
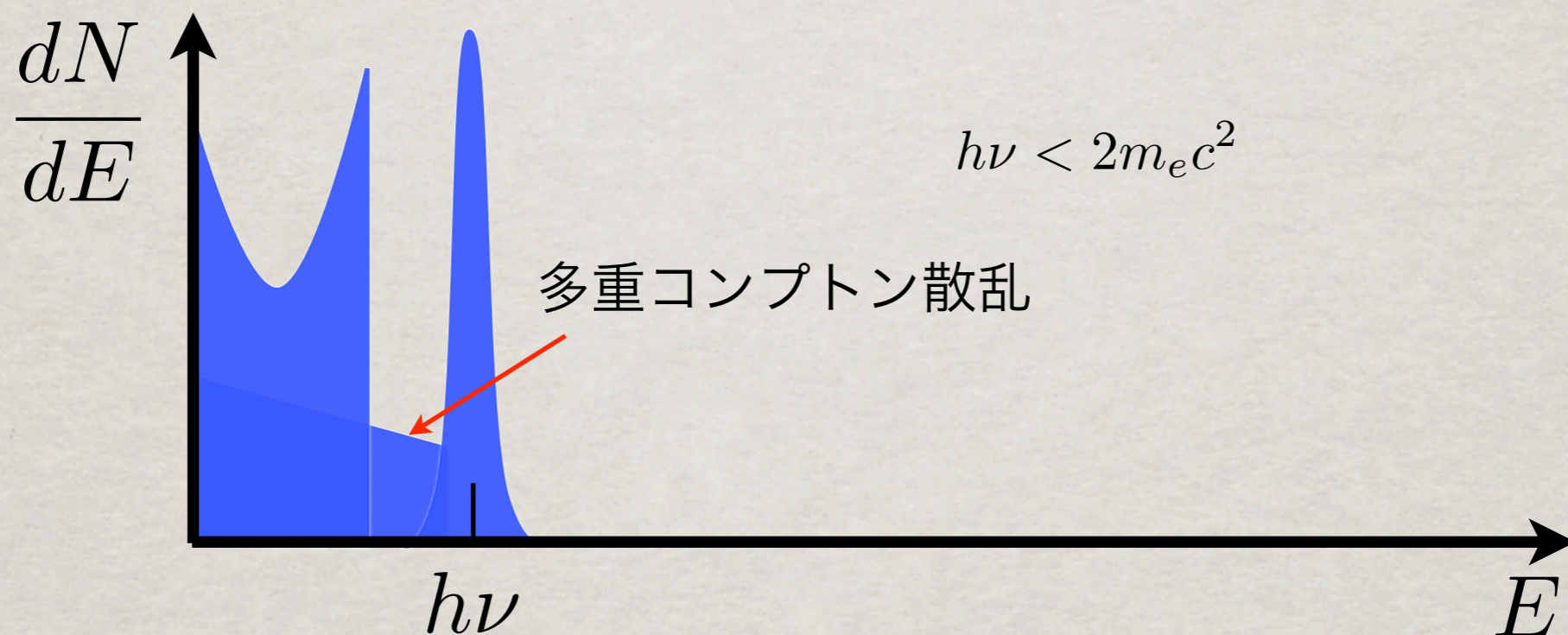
予測応答関数

☀ 中型の検出器の場合



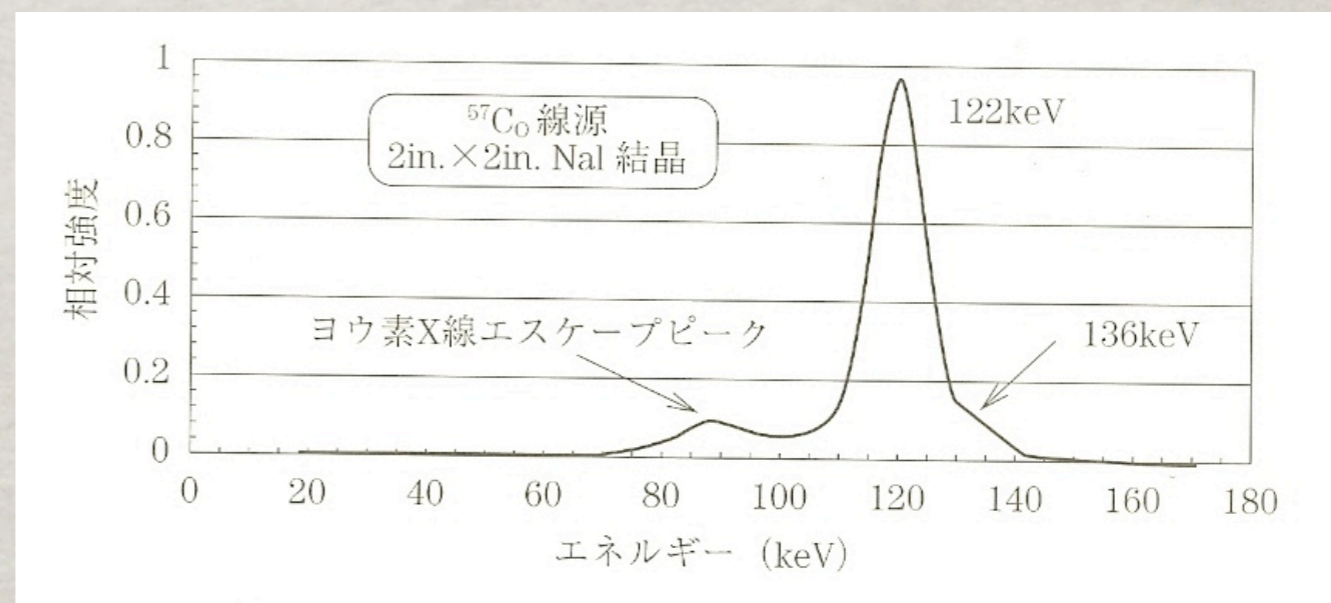
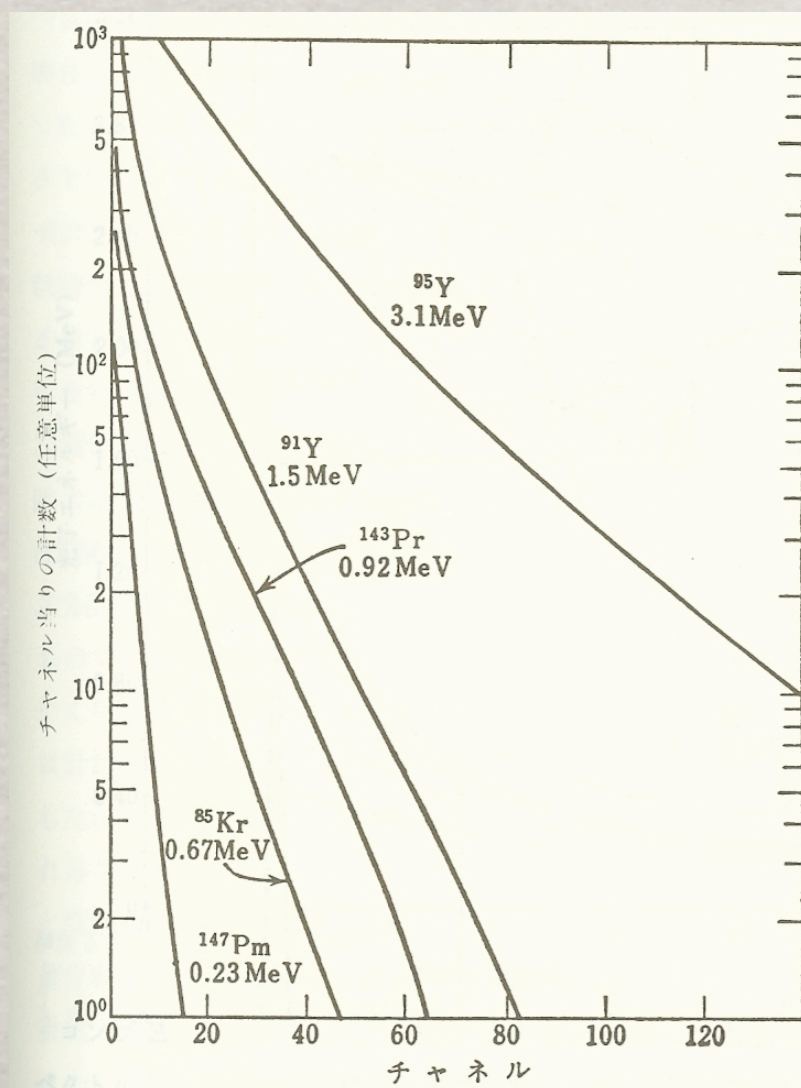
予測応答関数

※ 中型の検出器の場合

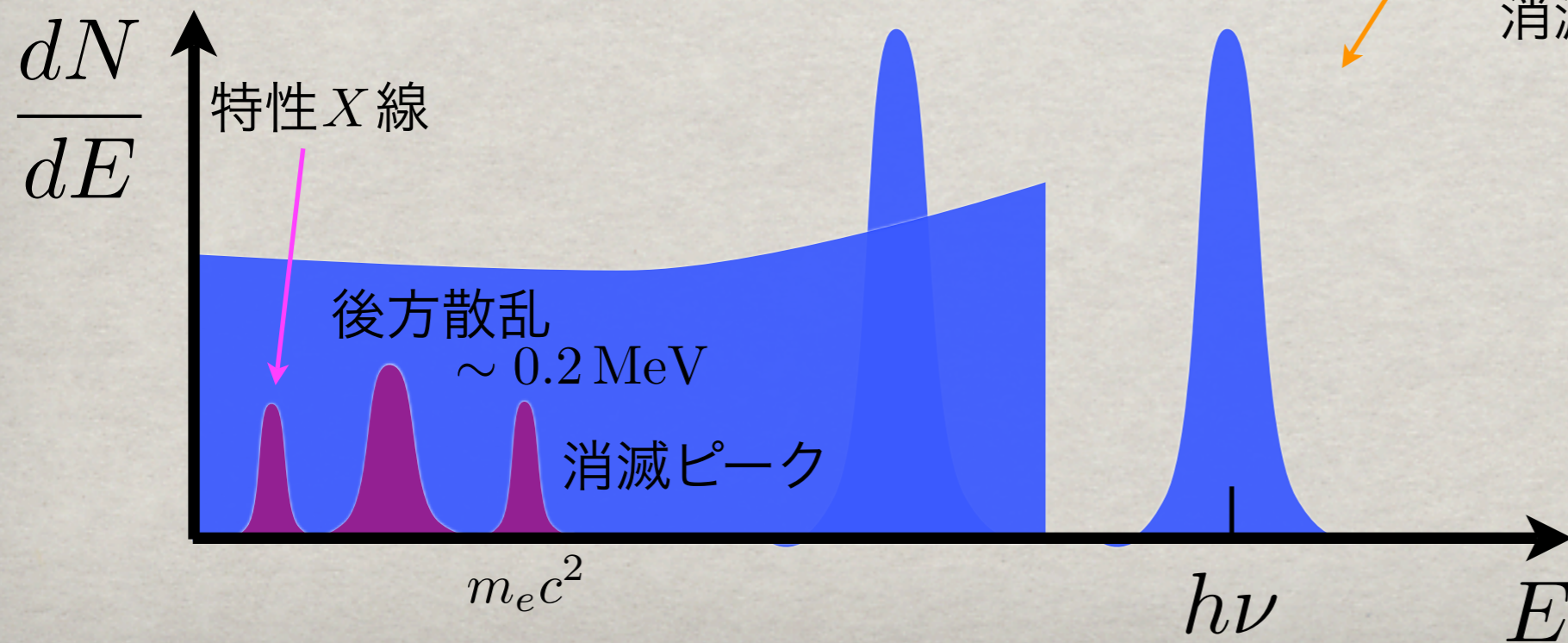
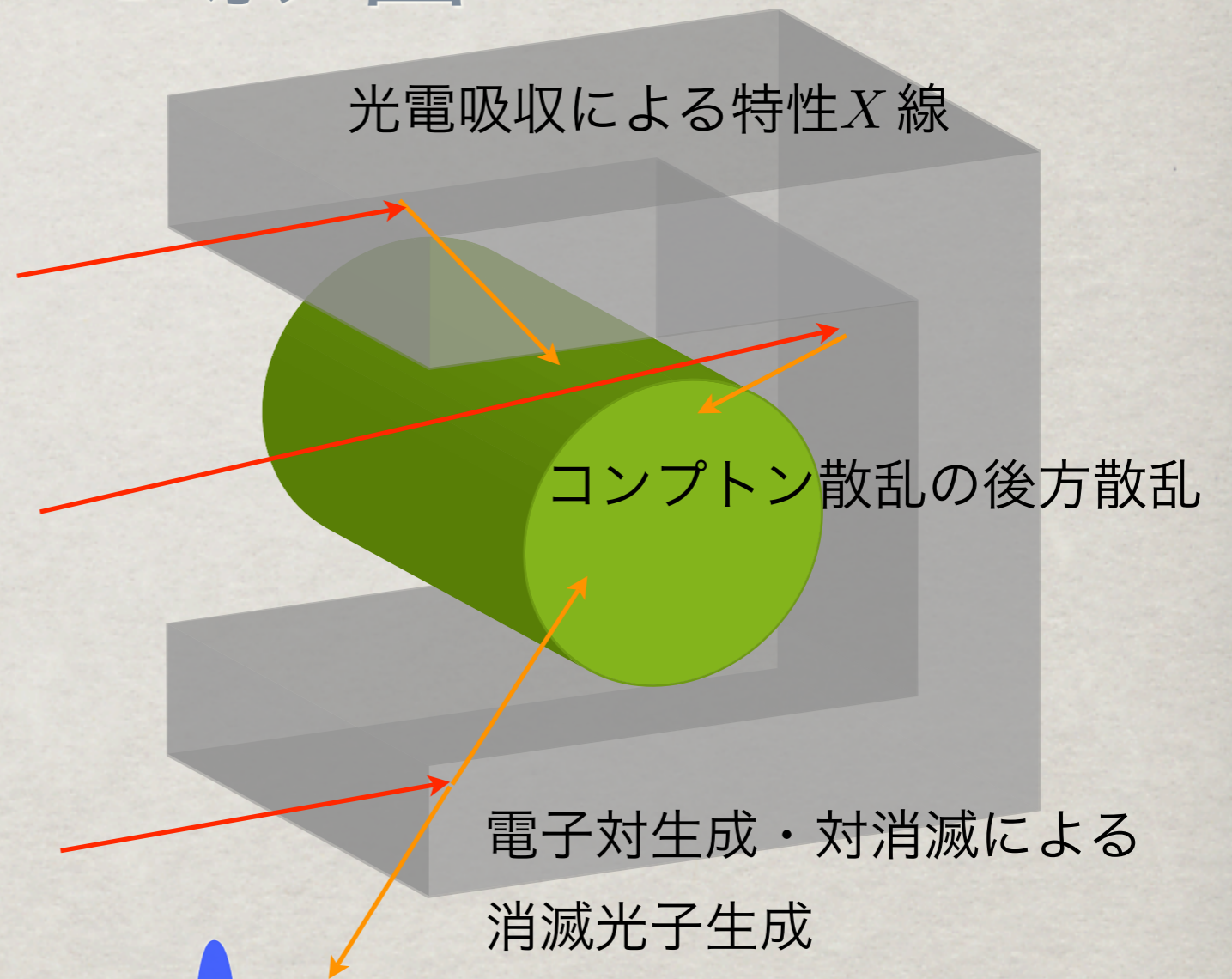


応答関数の複雑化

- ✿ 2次電子の検出器外への逃散
- ✿ 制動輻射の検出器外への逃散
- ✿ 特性 X 線の検出器への逃散

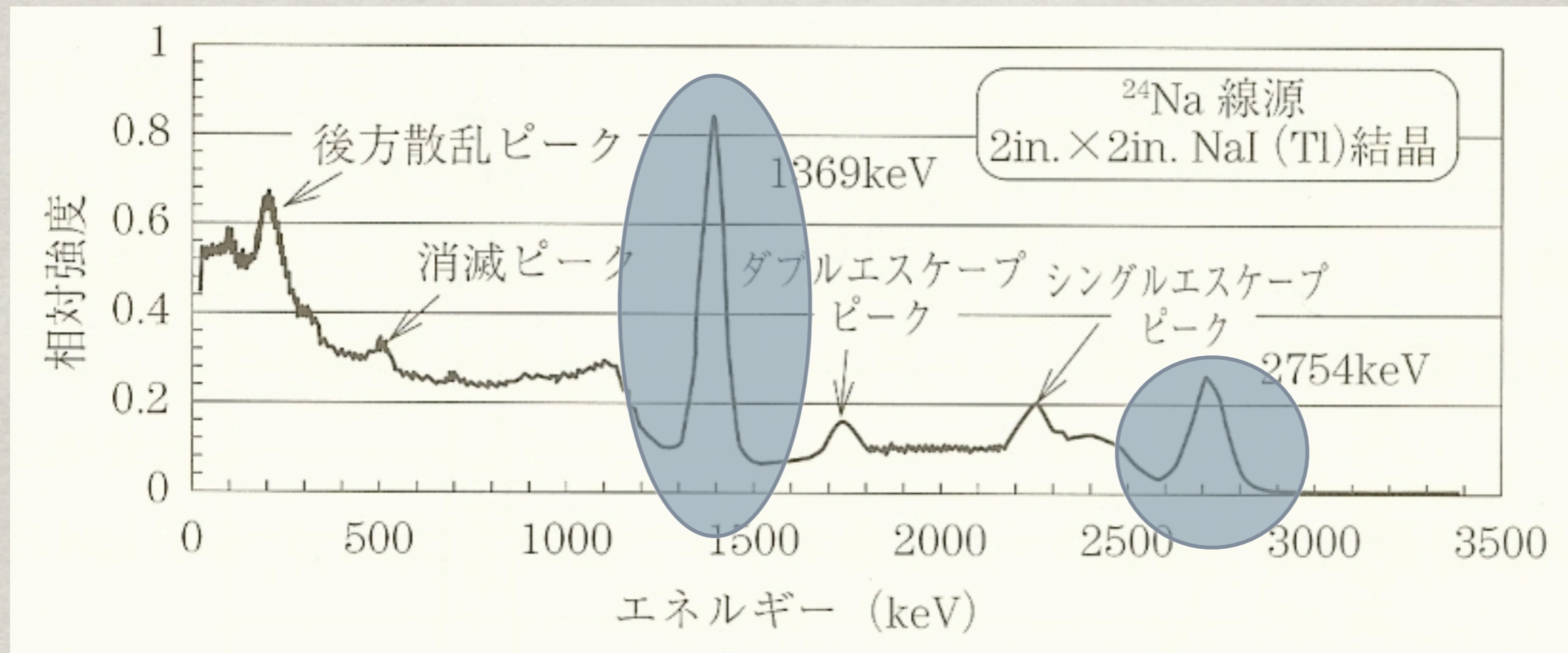


構造体などによる影響

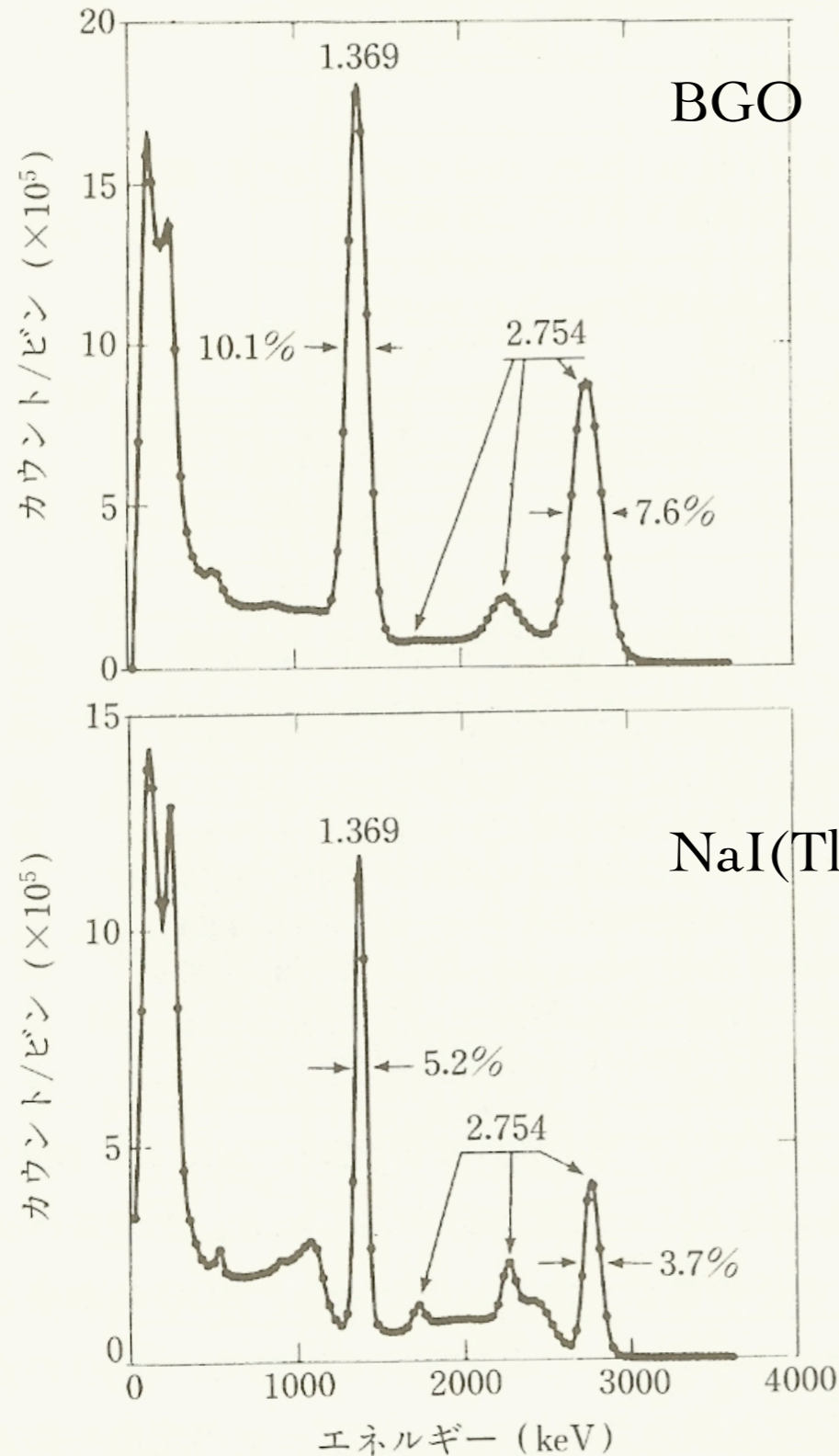


NaI(TL)によるスペクトル測定

- ✪ NaI(Tl)による ^{24}Na から放出される γ 線パルス波高分布

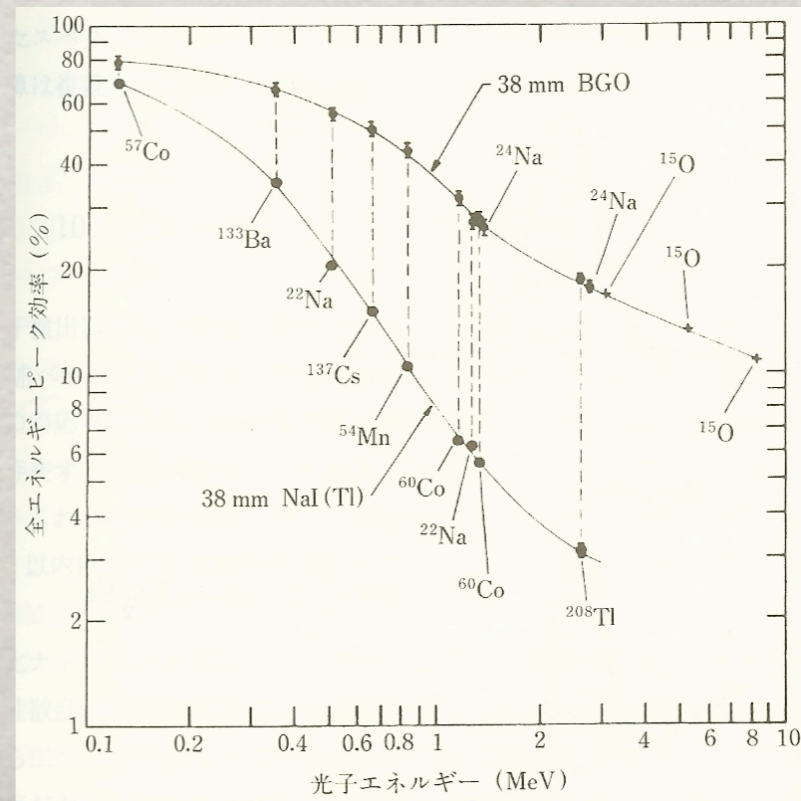


結晶の違いの影響

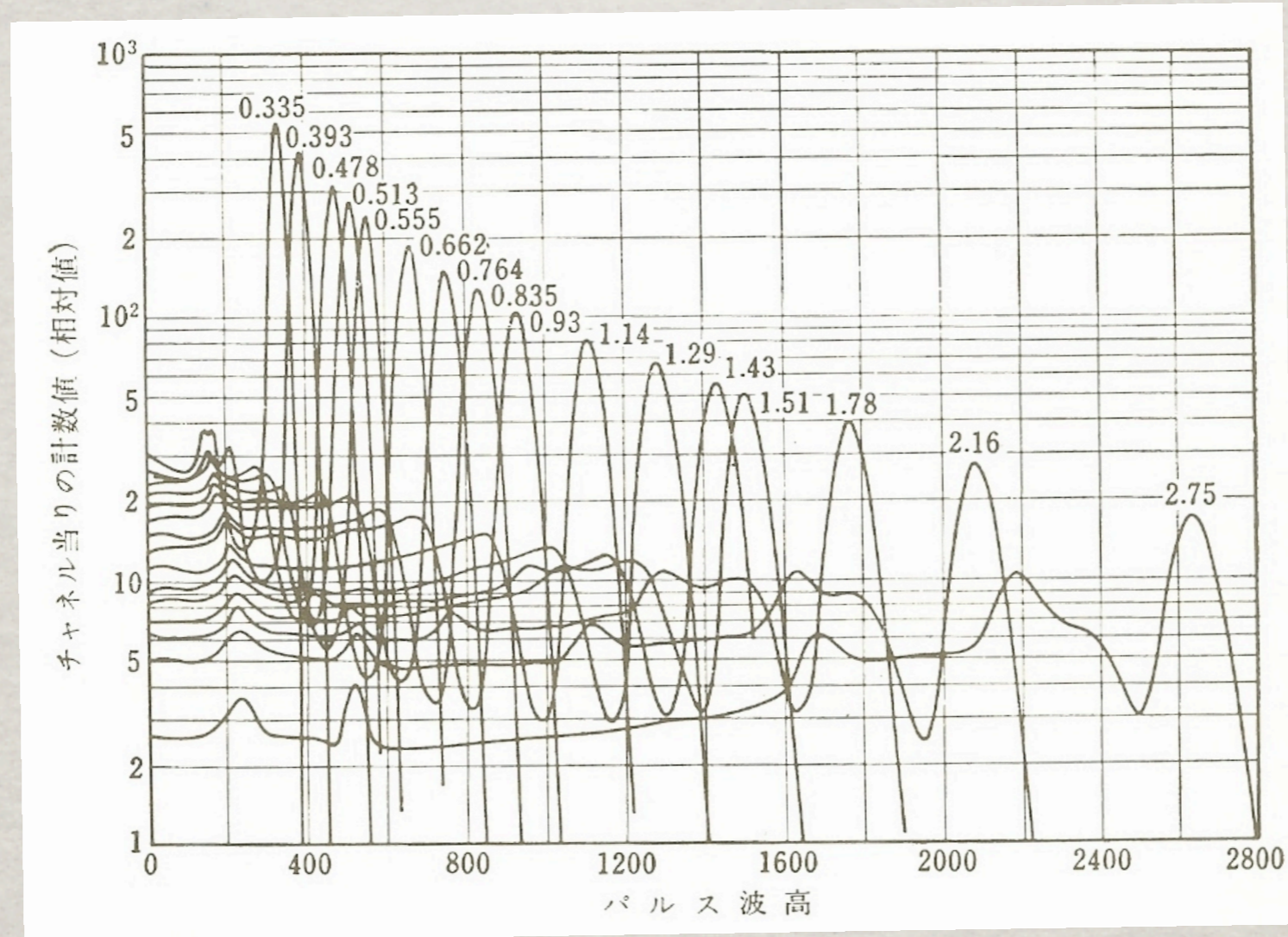


✿ BGO...分解能は劣るが，検出効率が高い（ピーク面積の比較）

✿ NaI(Tl)...分解能はBGOよりも優れているが，検出効率は劣る



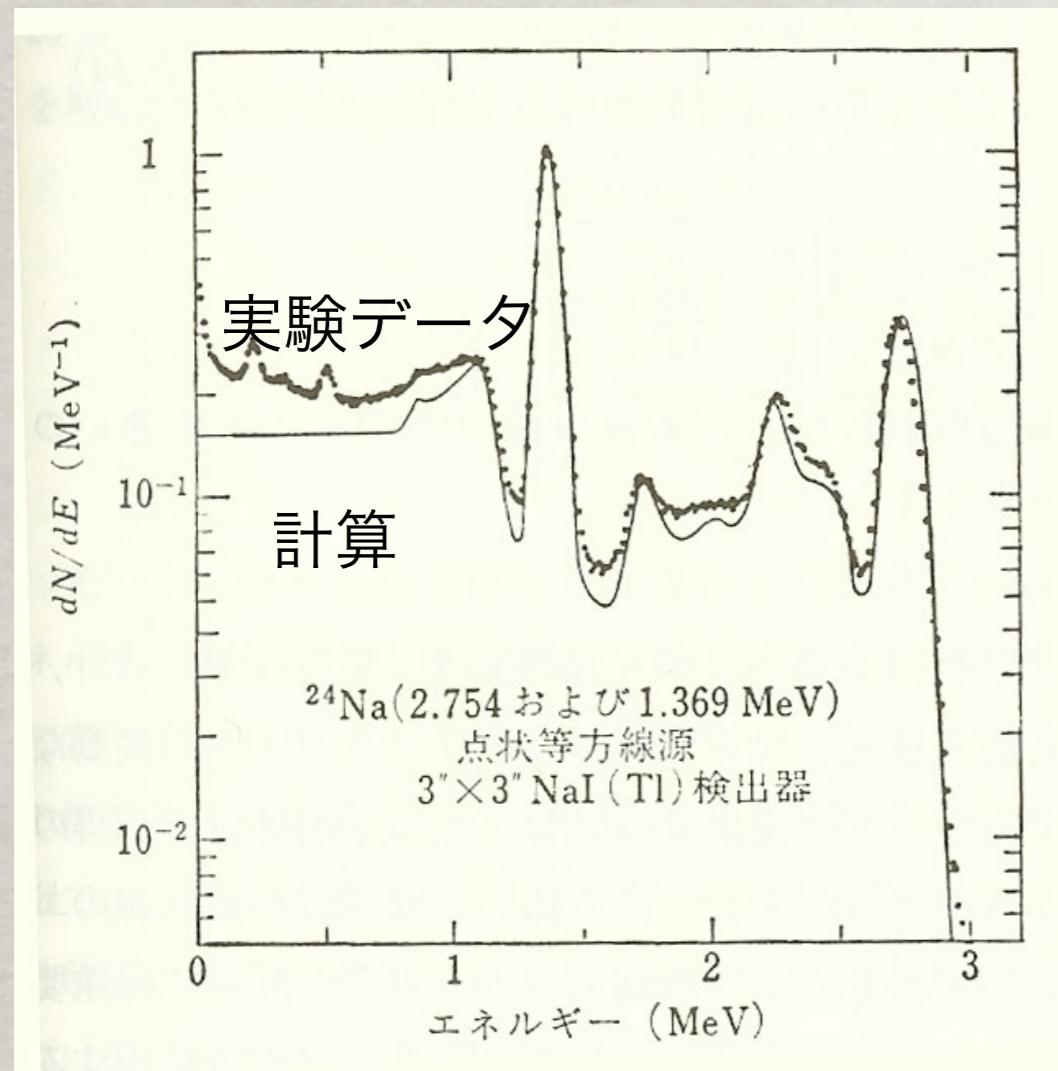
エネルギーによる分解能の違い



- ✿ 信号はポアソン／正規分布にしたがうため，平均値の増大に伴い分解能は大きくなる（相対比は小さくなっていく）

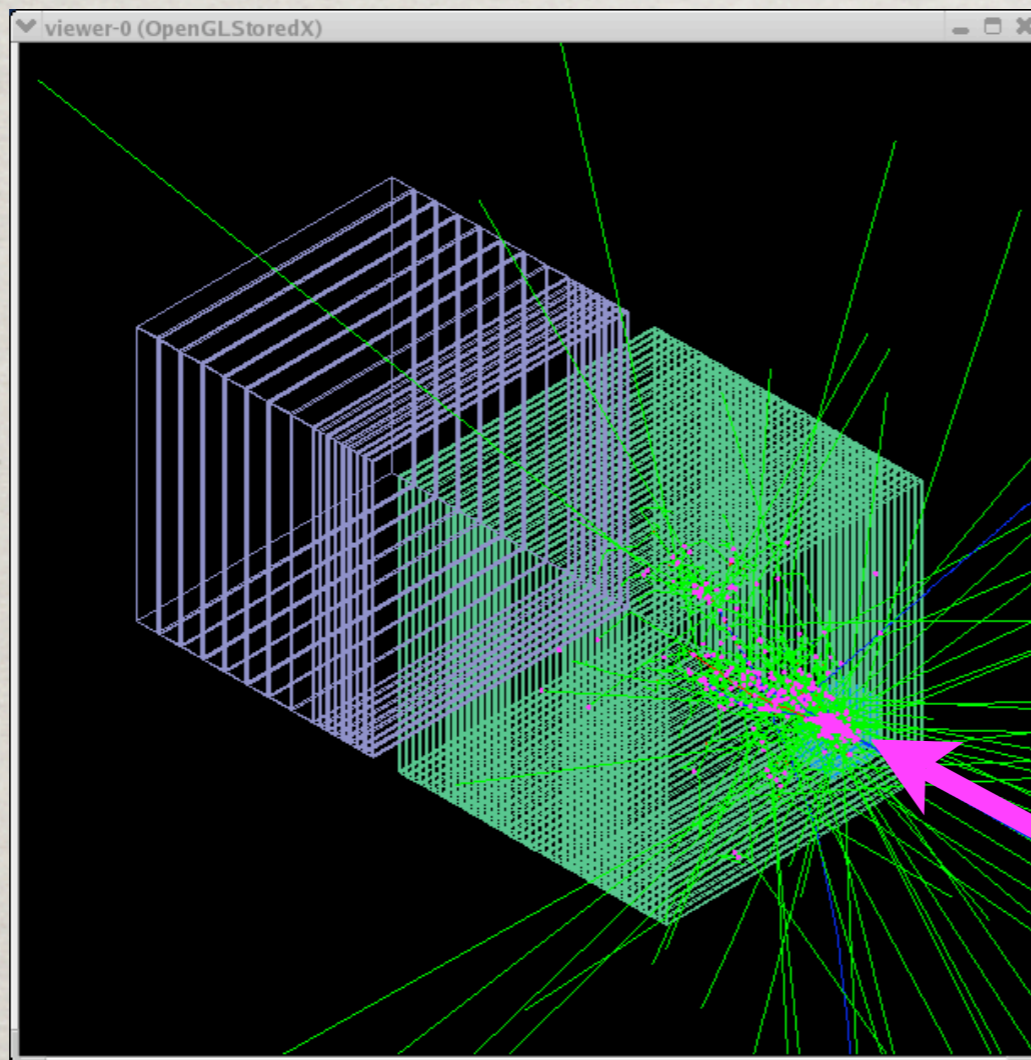
検出器の振る舞いの理解

- ✻ 検出器の振る舞いをどれだけ理解しているかは、理論計算を行って実験データと比較すれば良い。
- ✻ 実際には確率的事象の繰り返しのため、Monte Carlo法が用いられる。



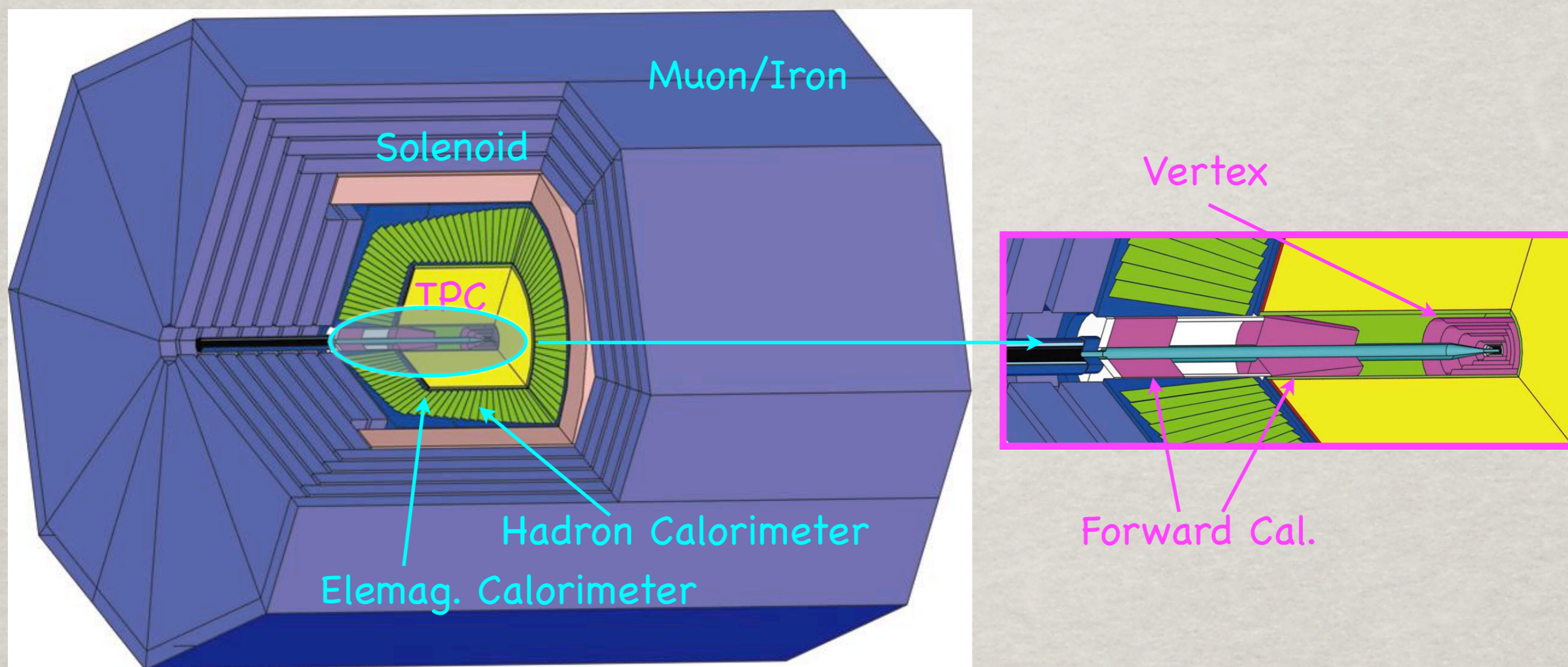
Monte Carloの例

✻ 2GeV π

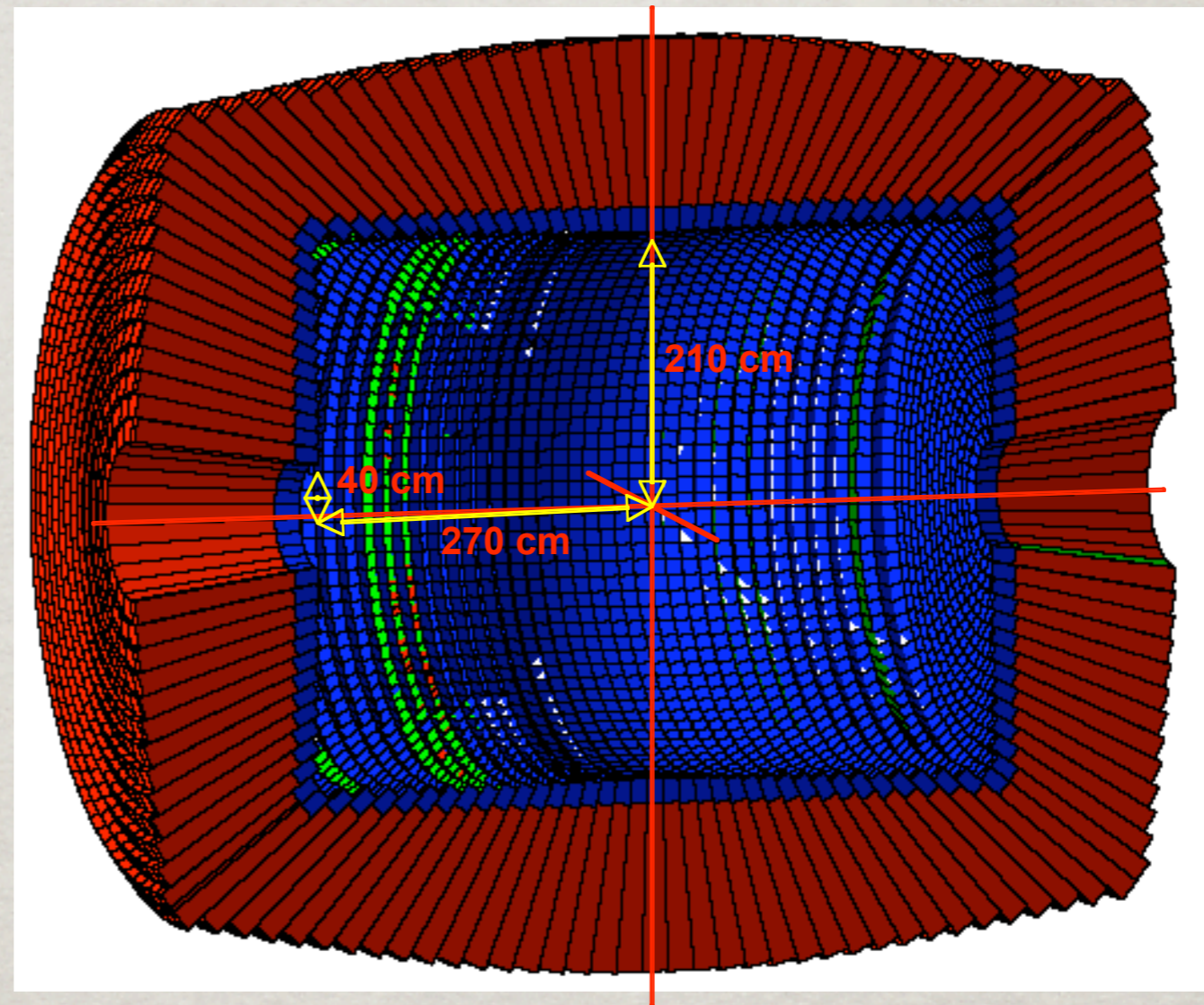
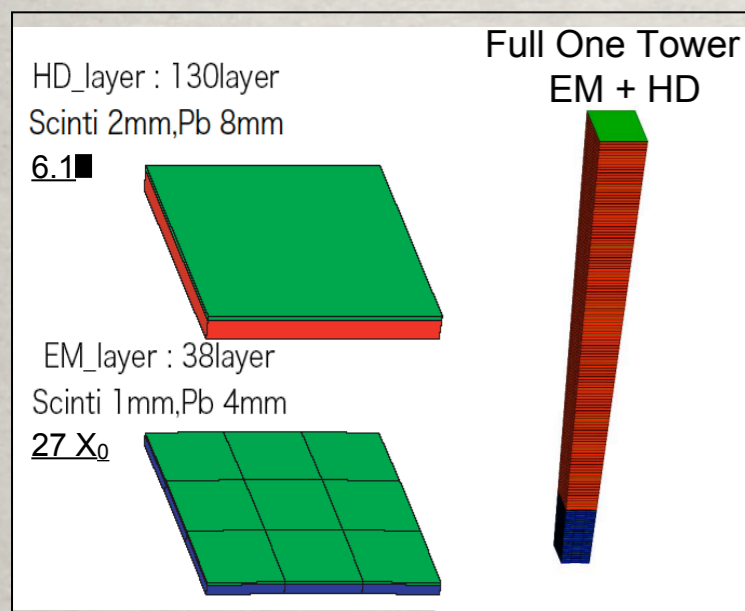


大型検出器の例

- ✻ International Linear Collider (ILC)計画に向けた
検出器開発計画の1つの例



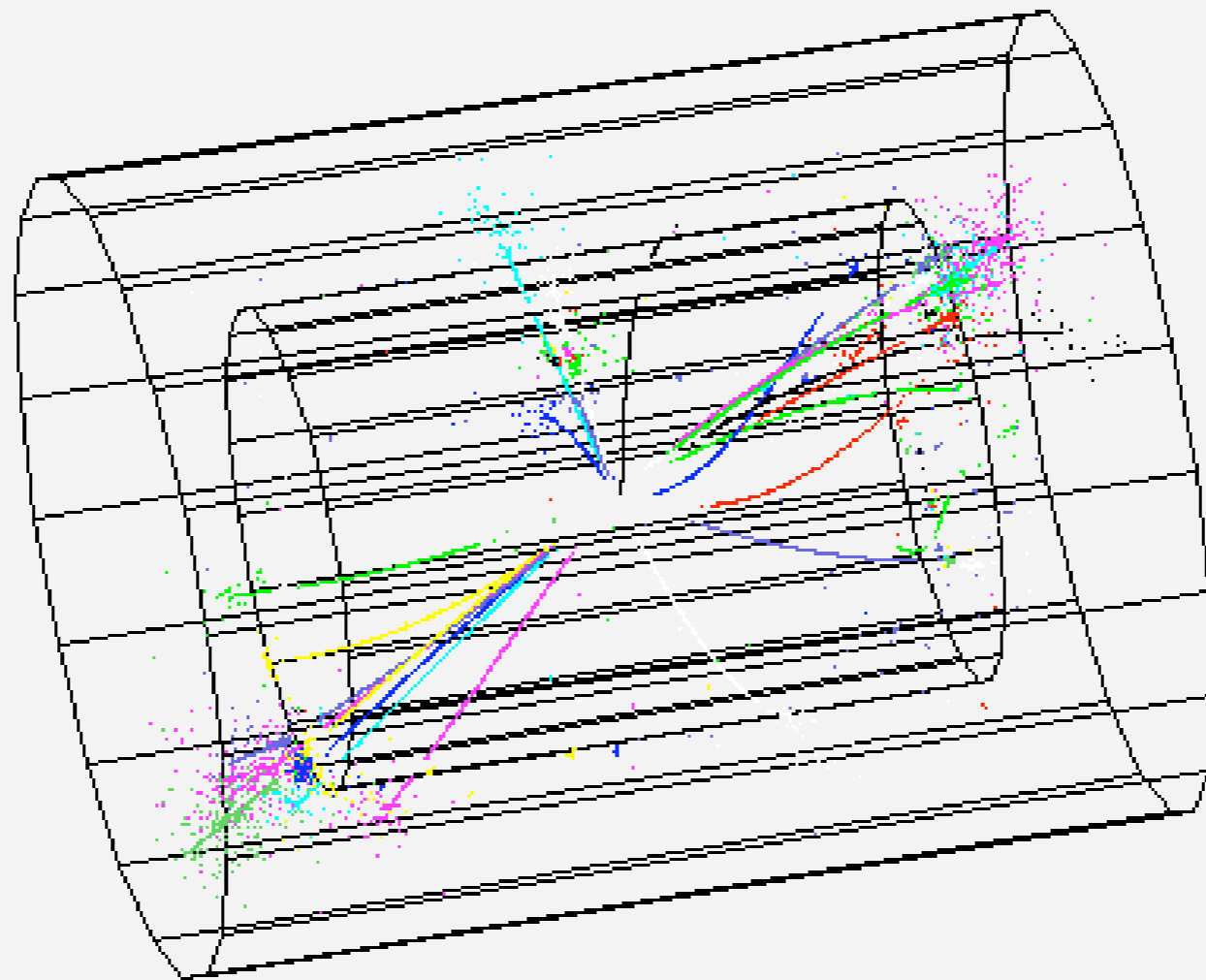
ELEMAG/HADRON CALORIMETER

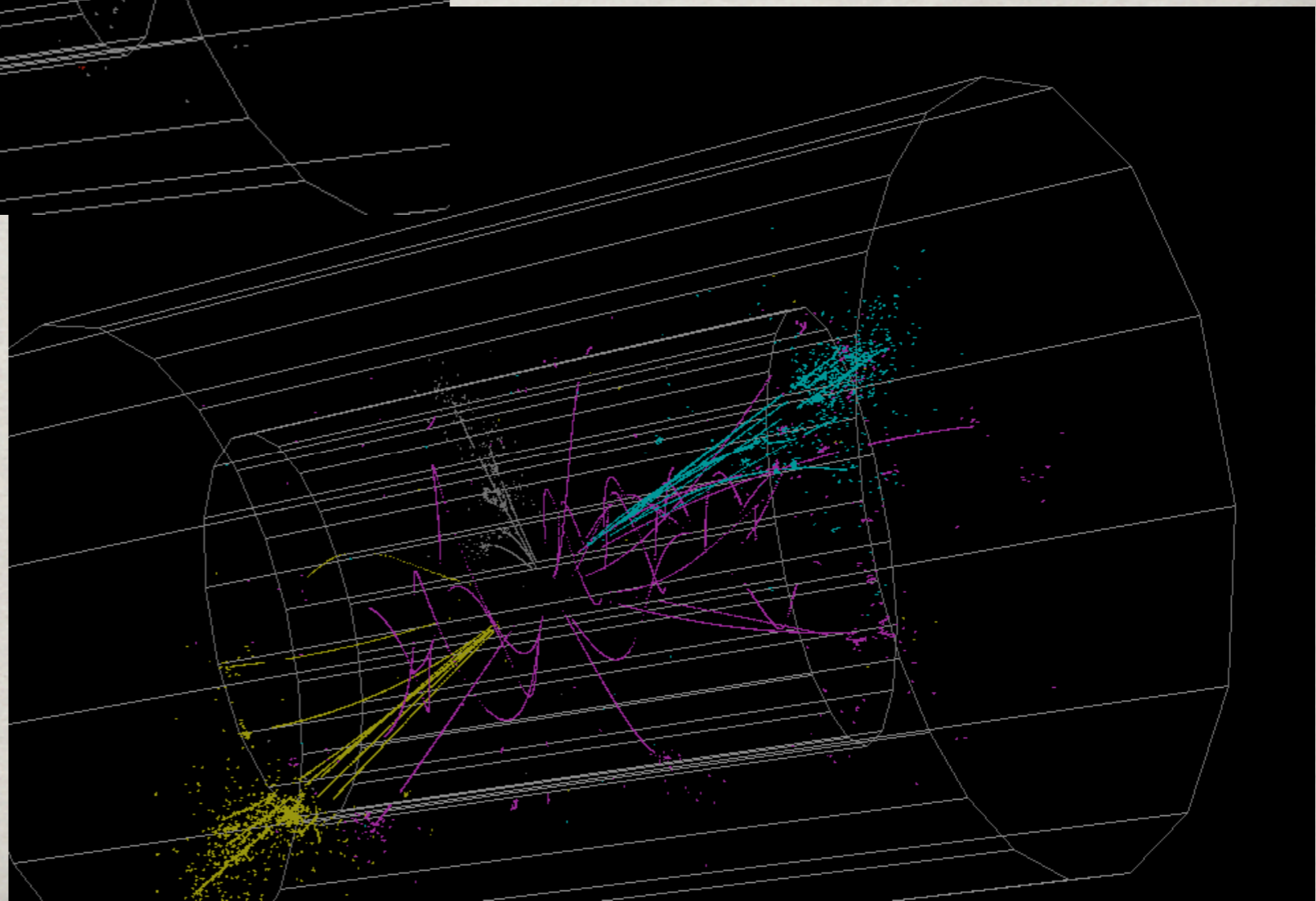
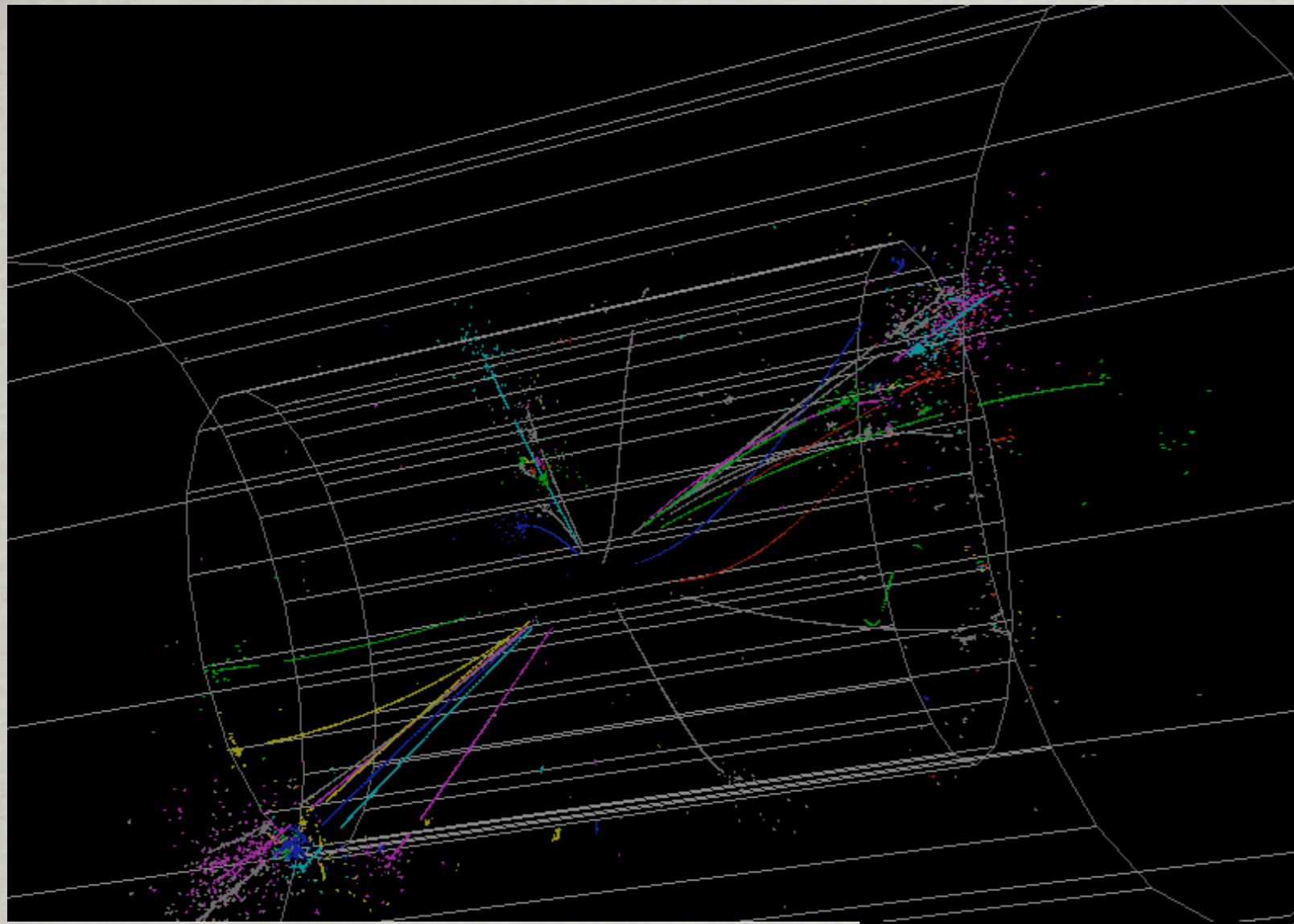


- Default sensor size:
 - EM: 4cmx4cmx1mm, 38 layers
 - HD:12cmx12cmx2mm, 130 layers
- Replica
 - Phi direction : Tower and mini-tower
- Sandwich structure of X/Y scinti structure can be defined.

GEANT4による計算

ZH event @ $E_{cm}=500\text{GeV}$



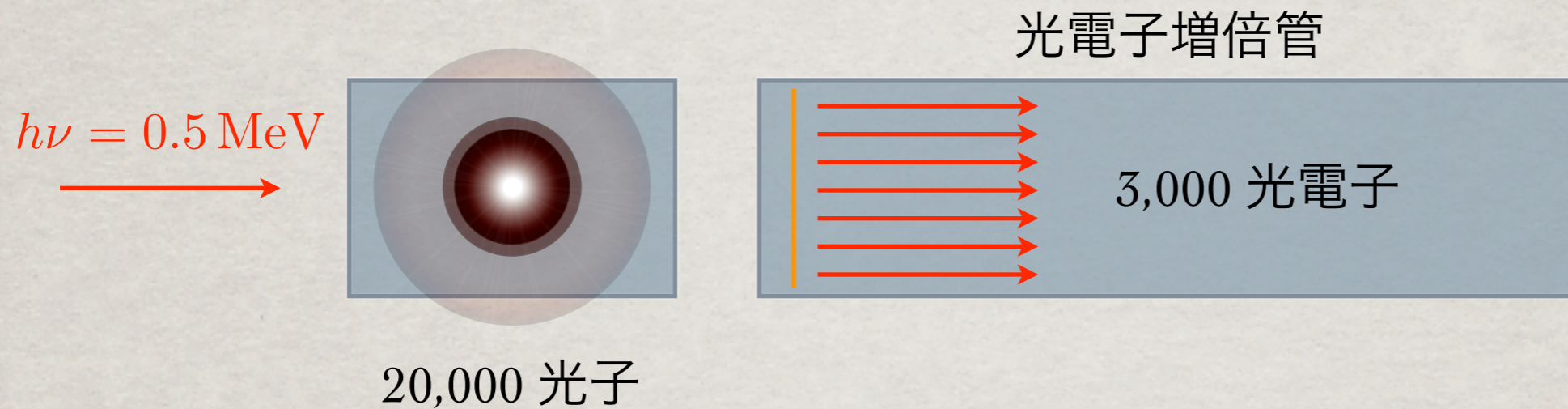


分解能

✻ 分解能決定要因

- ✻ 電荷収集の統計 ← 結構厳しい
- ✻ 電子回路の雑音
- ✻ 有限体積内での検出器応答の変動
- ✻ 測定期間中の動作パラメータの変動
- ✻ 光電子増倍間の利得（シンチレータの場合）

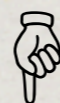
光電子の統計



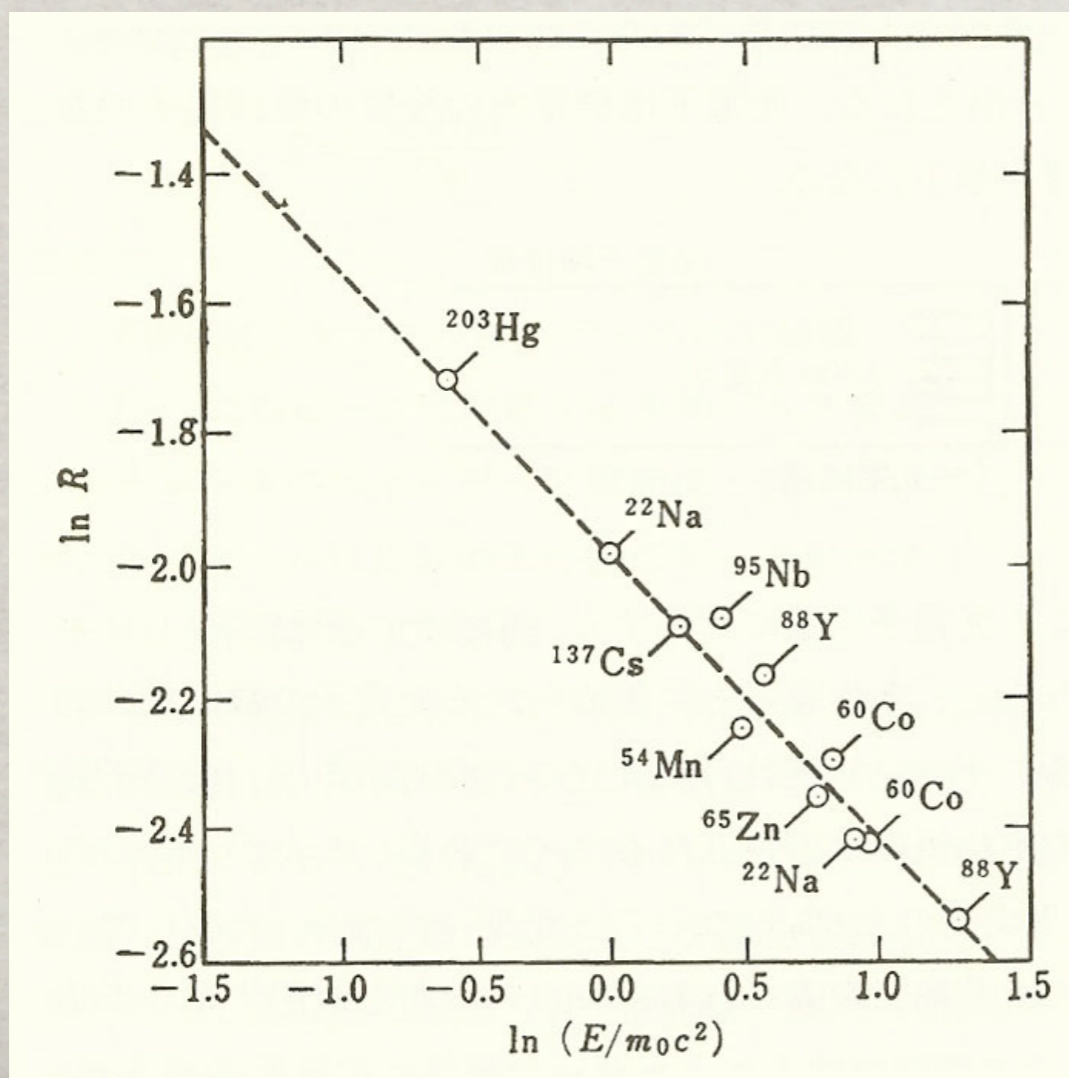
- ✿ NaI(Tl)のシンチレーション効率：~12%
 - ✿ 60 keV \rightarrow 約3 eVの可視光に変換 \rightarrow 20,000 光子
 - ✿ 光伝達により25%が失われたとする \rightarrow 15,000
- ✿ 光電陰極での平均量子効率：~20%
 - ✿ 光電子生成 \rightarrow 3,000光電子
 - ✿ ポアソン分布に従うならば $\sigma = \sqrt{3000}$
 - ✿ 標準偏差：1.8% \rightarrow 分解能：4.3%

スペクトルの分解能

$$R = \frac{\text{FWHM}}{H_0} = k \frac{\sqrt{E}}{E} = \frac{k}{\sqrt{E}}$$



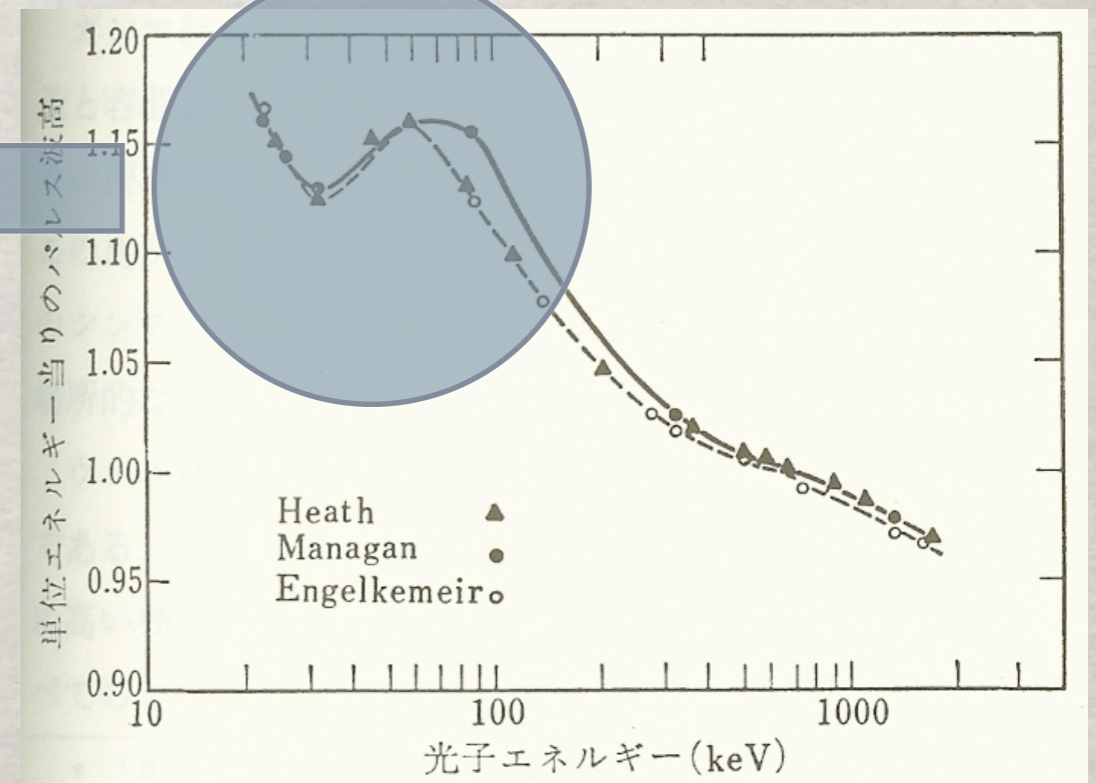
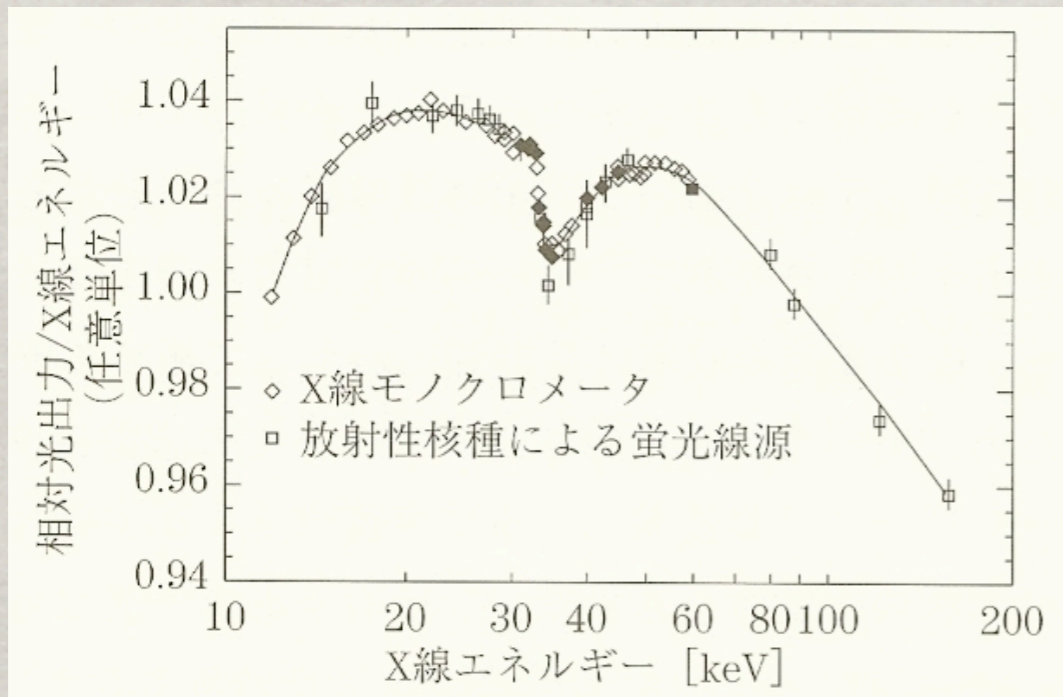
$$\ln R = \ln k - \frac{1}{2} \ln E$$



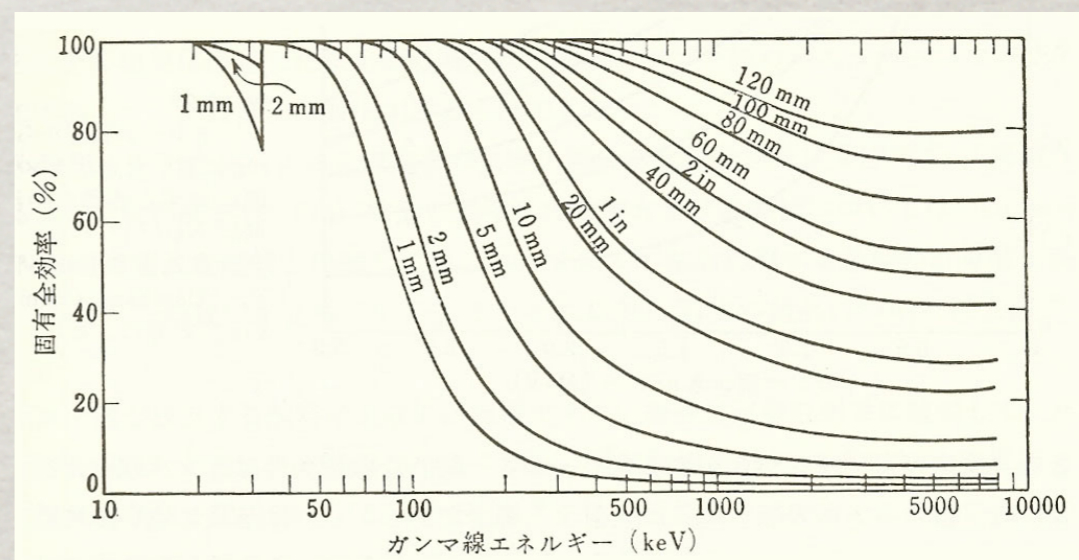
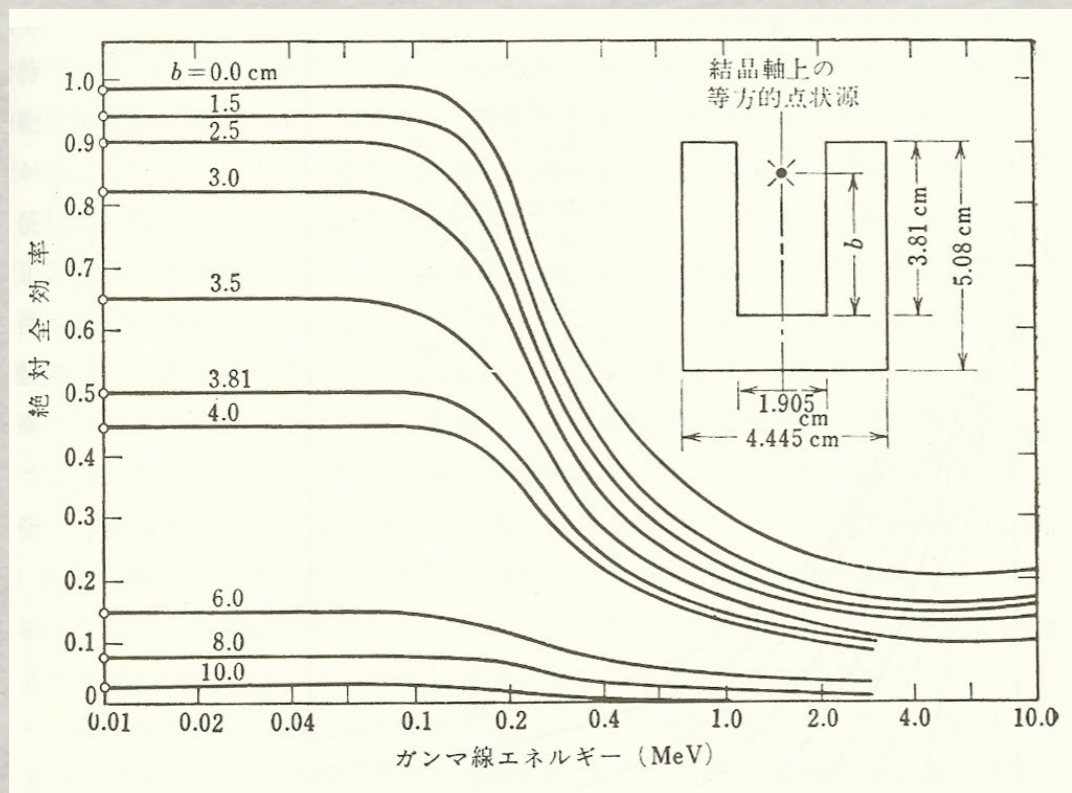
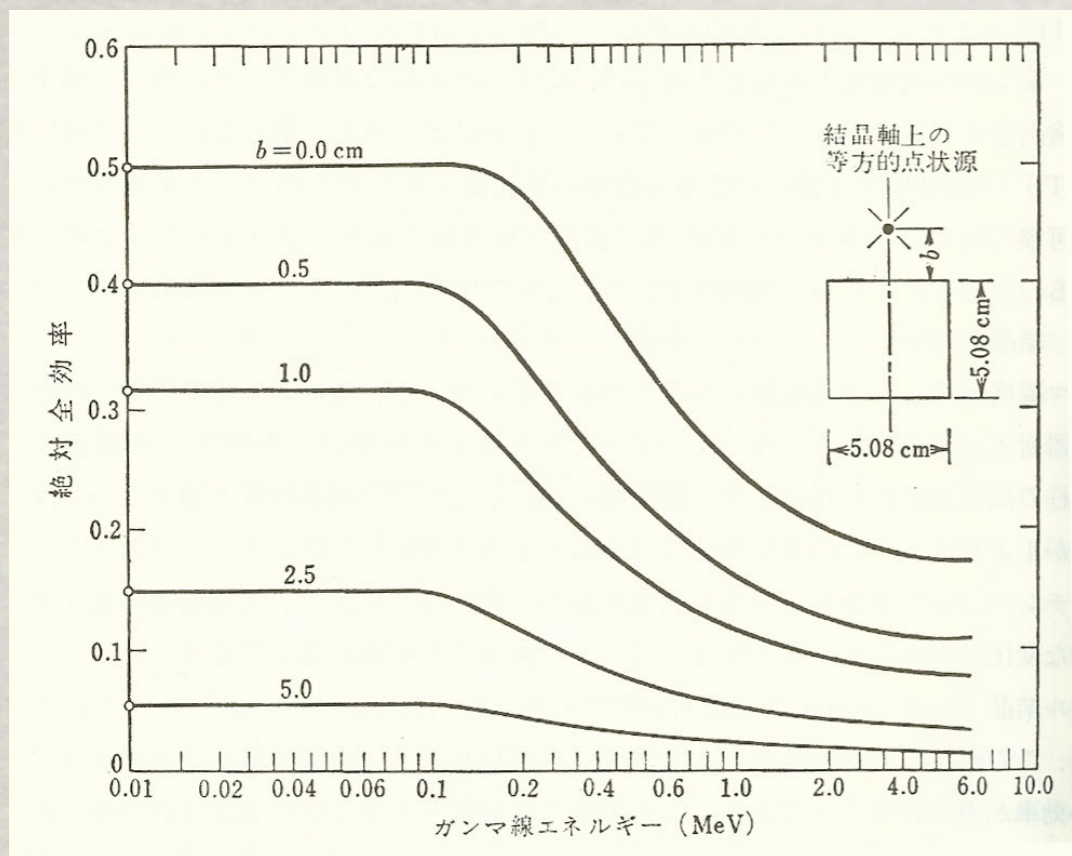
$$R = \frac{\sqrt{\alpha + \beta E}}{E}$$

直線性

- ✿ 高エネルギー領域では、直線による近似はさほどの影響をもたらさないと考えられるが、低エネルギー領域においては非直線性を考慮する必要がある。



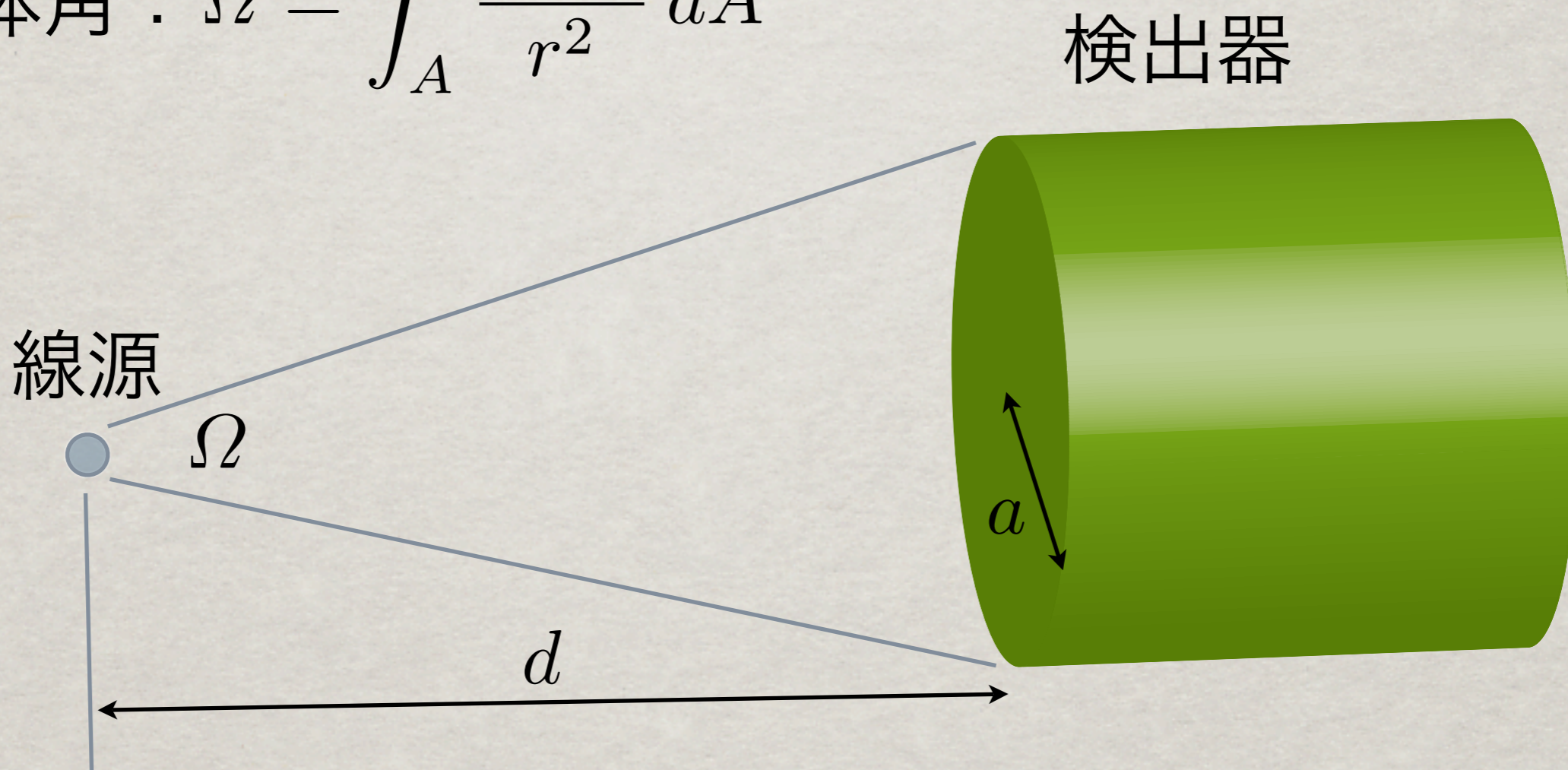
検出器の大きさ／形状の影響



立体角

✪ 線源からの放出量子数： $S = N \frac{4\pi}{\varepsilon_{ip} \Omega}$

$$\text{立体角} : \Omega = \int_A \frac{\cos \alpha}{r^2} dA$$



$$\Omega = 2\pi \left(1 - \frac{d}{\sqrt{d^2 + a^2}} \right)$$

$$\Omega \sim \frac{A}{d^2} = \frac{\pi a^2}{d^2} \quad (d \gg a)$$

立体角

✿ 線源からの放出量子数： $S = N \frac{4\pi}{\varepsilon_{ip}} \Omega$

$$\Omega = \frac{4\pi a}{s} \int_0^\infty \frac{\exp(-\ell k) J_1(sk) J_1(ak)}{k} dk \quad \text{検出器}$$

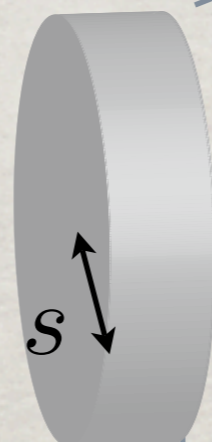
$$F1 = \frac{5}{16} \frac{\beta}{(1+\beta)^{7/2}} - \frac{35}{16} \frac{\beta^2}{(1+\beta)^{9/2}}$$

$$F2 = \frac{35}{128} \frac{\beta}{(1+\beta)^{9/2}} - \frac{315}{256} \frac{\beta^2}{(1+\beta)^{11/2}} + \frac{1155}{1024} \frac{\beta^3}{(1+\beta)^{13/2}}$$

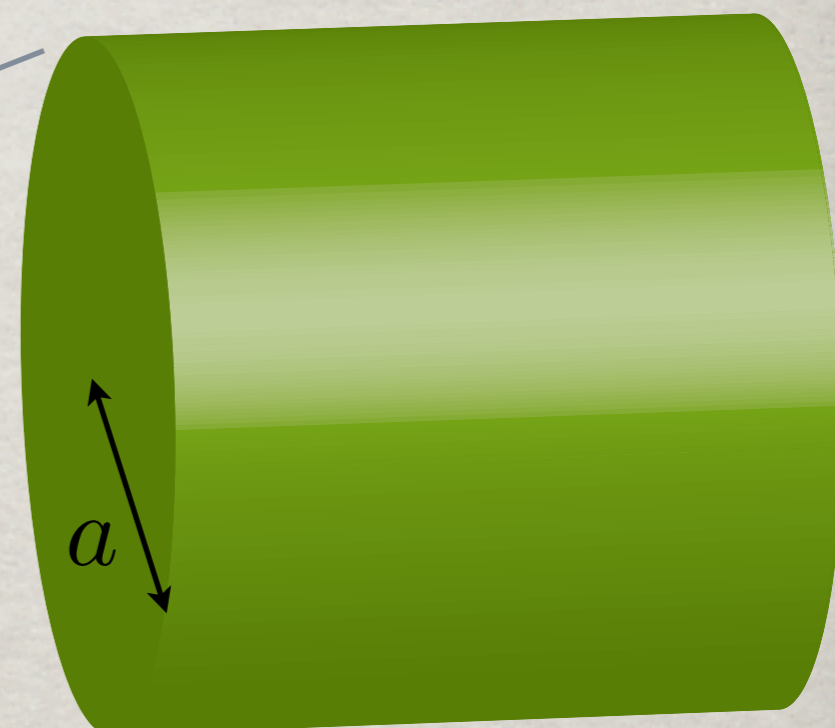
$$\alpha = \left(\frac{a}{d}\right)^2$$

$$\beta = \left(\frac{s}{d}\right)^2$$

線源



Ω



ℓ

$$\Omega \simeq 2\pi \left[1 - \frac{1}{(1+\beta)^{1/2}} - \frac{3}{8} \frac{\alpha\beta}{(1+\beta)^{5/2}} + \alpha^2 [F1] - \alpha^3 [F3] \right]$$

検出器の大きさ／形状の影響

