

24,25/03/2003

高エネルギー放射光
の
コンプトン散乱実験への利用

坂井信彦
(姫工大大学院理学研究科)

1.

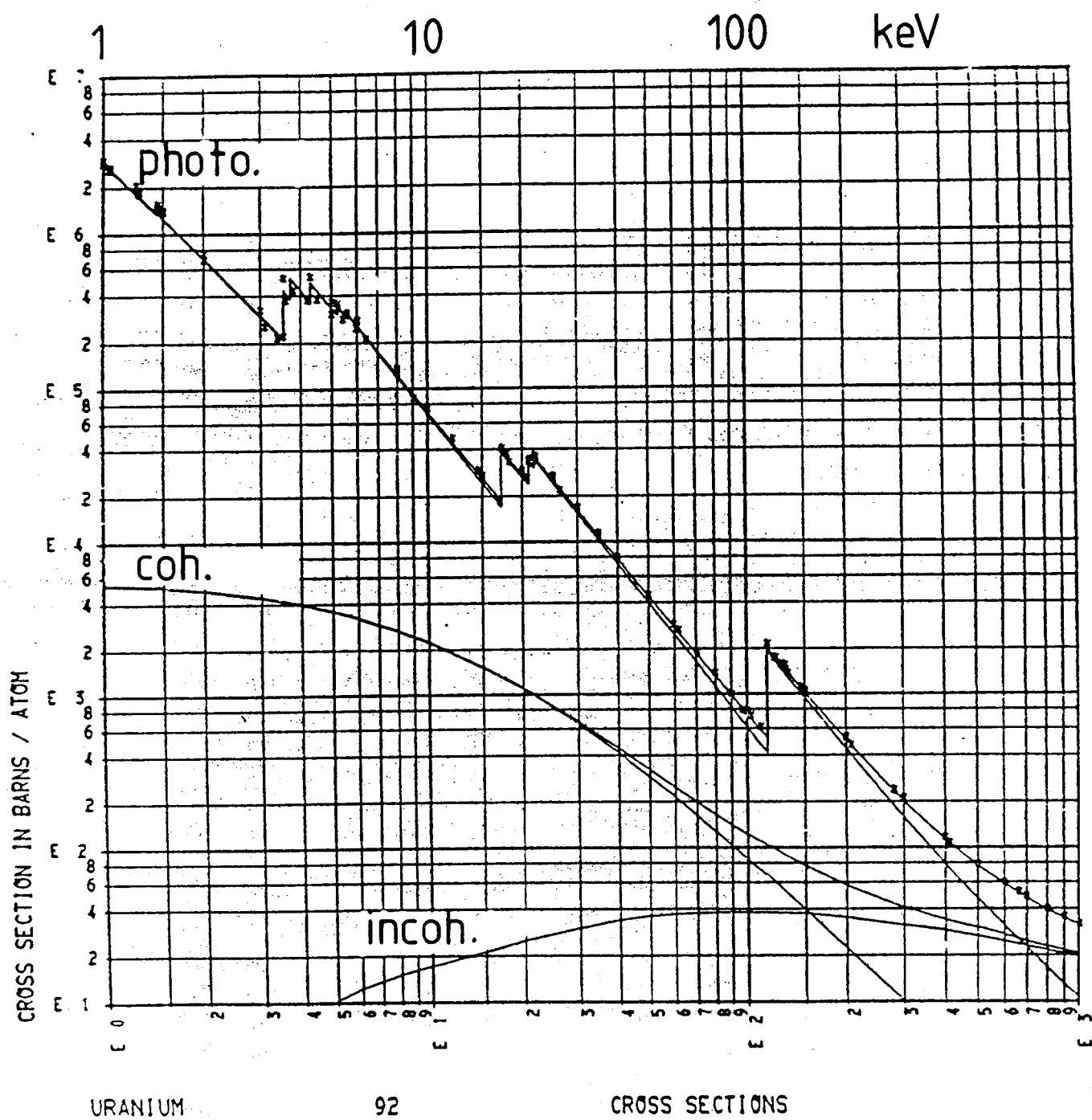
コンプトン散乱による物性研究

目的： 物質内の電子運動量分布状態の観察

2.

高エネルギーX線にはどのような利点があるか

- a. 電子スピンの依存する散乱強度の増大
- b. 反跳電子の観察が容易



Scattering of X-rays

Scattering probability ;

$$\left| \langle f | \exp(i\mathbf{K} \cdot \mathbf{r}) | \psi(\mathbf{r}) \rangle \right|^2, \quad \mathbf{K} = \mathbf{K}_1 - \mathbf{K}_2$$

coherent scatt.

$$\left| \int |\psi(\mathbf{r})|^2 \exp(i\mathbf{K} \cdot \mathbf{r}) d\mathbf{r} \right|^2$$

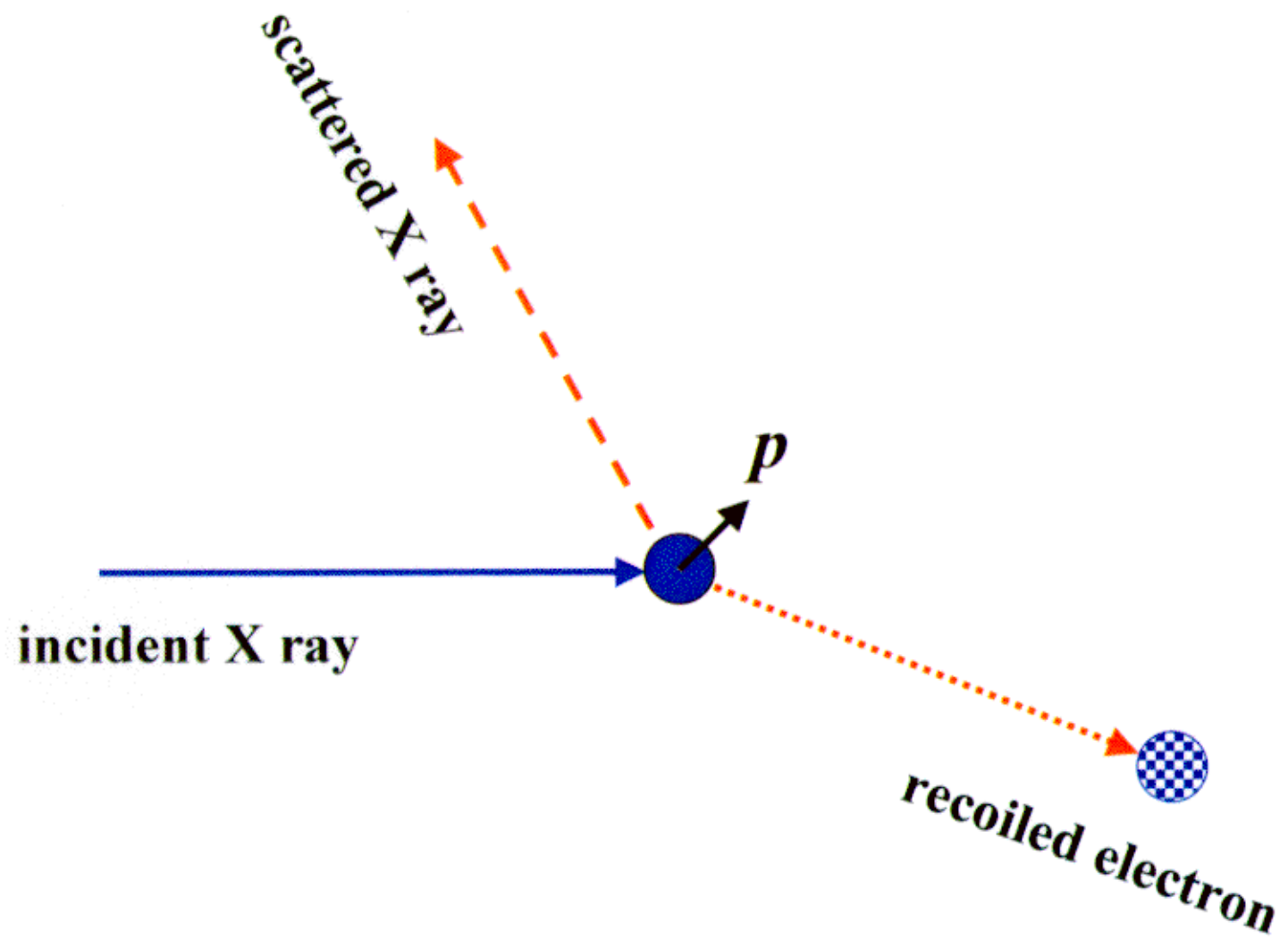
= FT(charge density)

Compton (incoherent) scatt.

$$\left| \int \psi(\mathbf{r}) \exp(i\mathbf{p} \cdot \mathbf{r}) d\mathbf{r} \right|^2$$

= momentum density

= $\rho(\mathbf{p})$



散乱断面積

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = r_0^2 \left(\frac{k}{k_0} \right) [\Phi_0 + \Phi_1(P_L) + \Phi_2(P_C, \vec{\sigma})]$$

$$\Phi_0 = \frac{1}{8} \left[1 + \cos^2 \theta + \frac{\hbar(k_0 - k)}{mc} (1 - \cos \theta) \right]$$

$$\Phi_1 = \frac{1}{8} [P_L \sin^2 \theta]$$

$$\Phi_2 = -\frac{1}{8} P_C \frac{\hbar}{mc} \left[(1 - \cos \theta) \vec{\sigma} \cdot (\vec{k}_0 \cos \theta + \vec{k}) \right]$$

$\Phi_0 + \Phi_1$ → 電荷に依存する散乱振幅

Φ_2 → スピンに依存する散乱振幅

θ : 散乱角

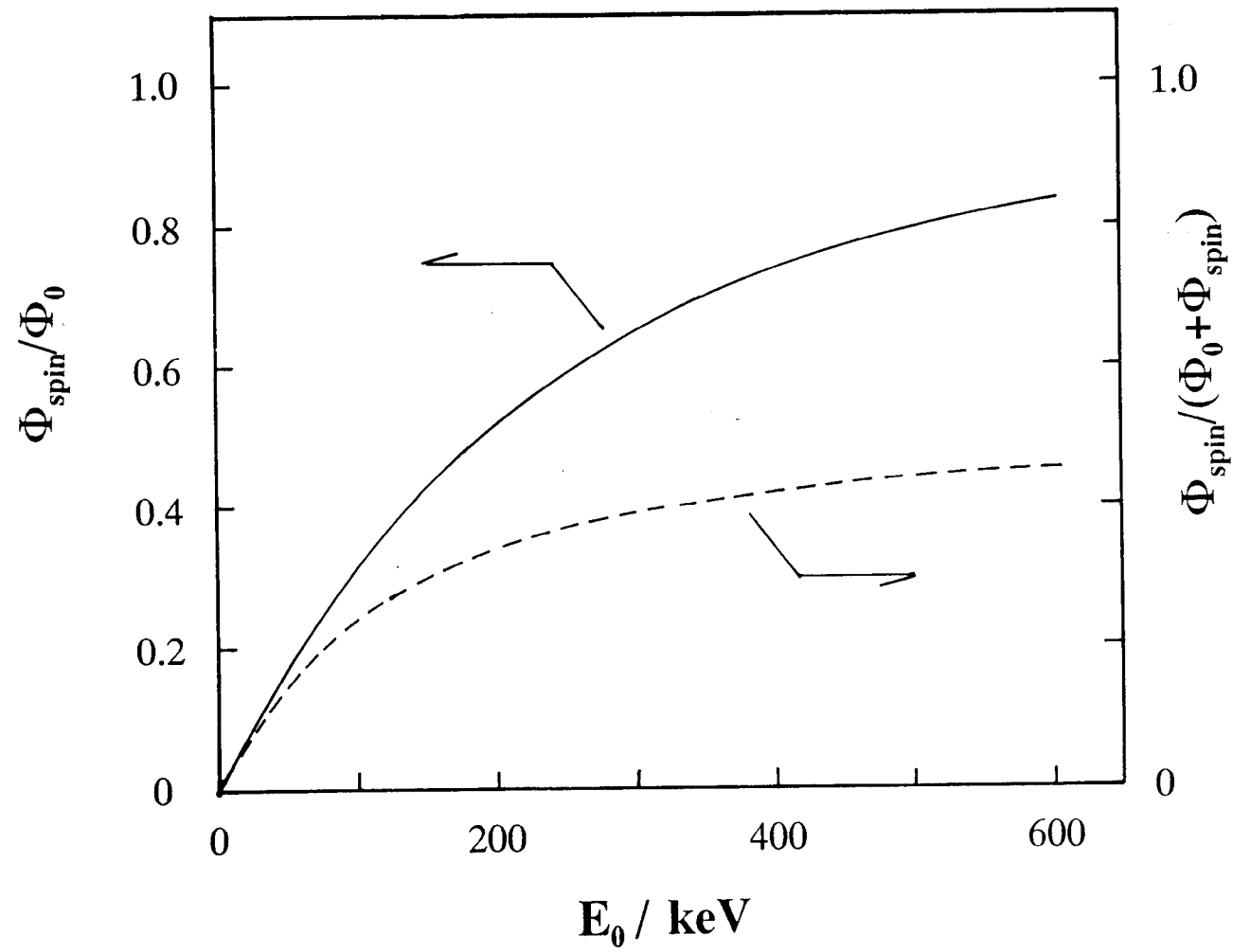
$\vec{\sigma}$: 電子のスピンベクトル

$\vec{k}_0, k$: 入射、散乱X線の波数ベクトル

P_L, P_C : 入射X線の直線、円偏光度

r_0 : 電子の古典半径

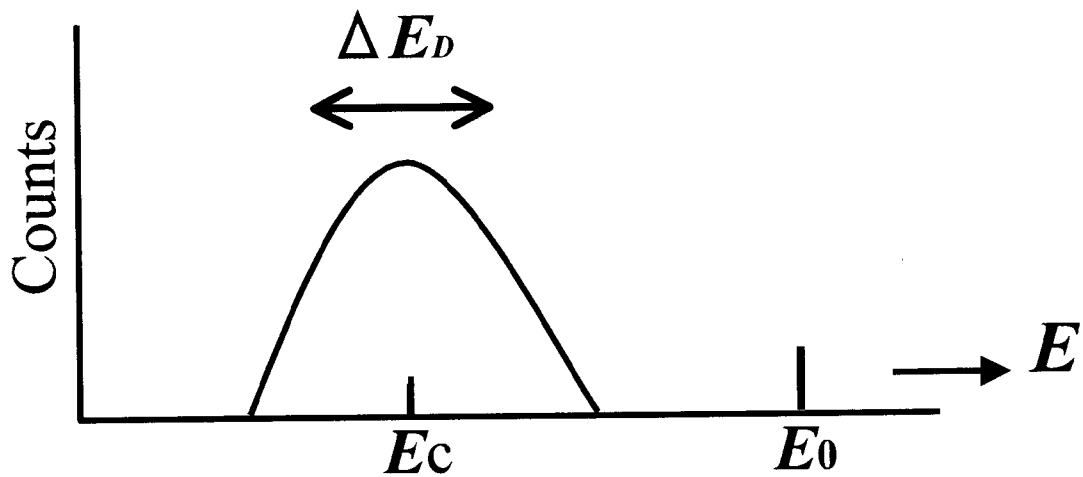
$$P_C = 1.0, \quad \theta = \pi$$

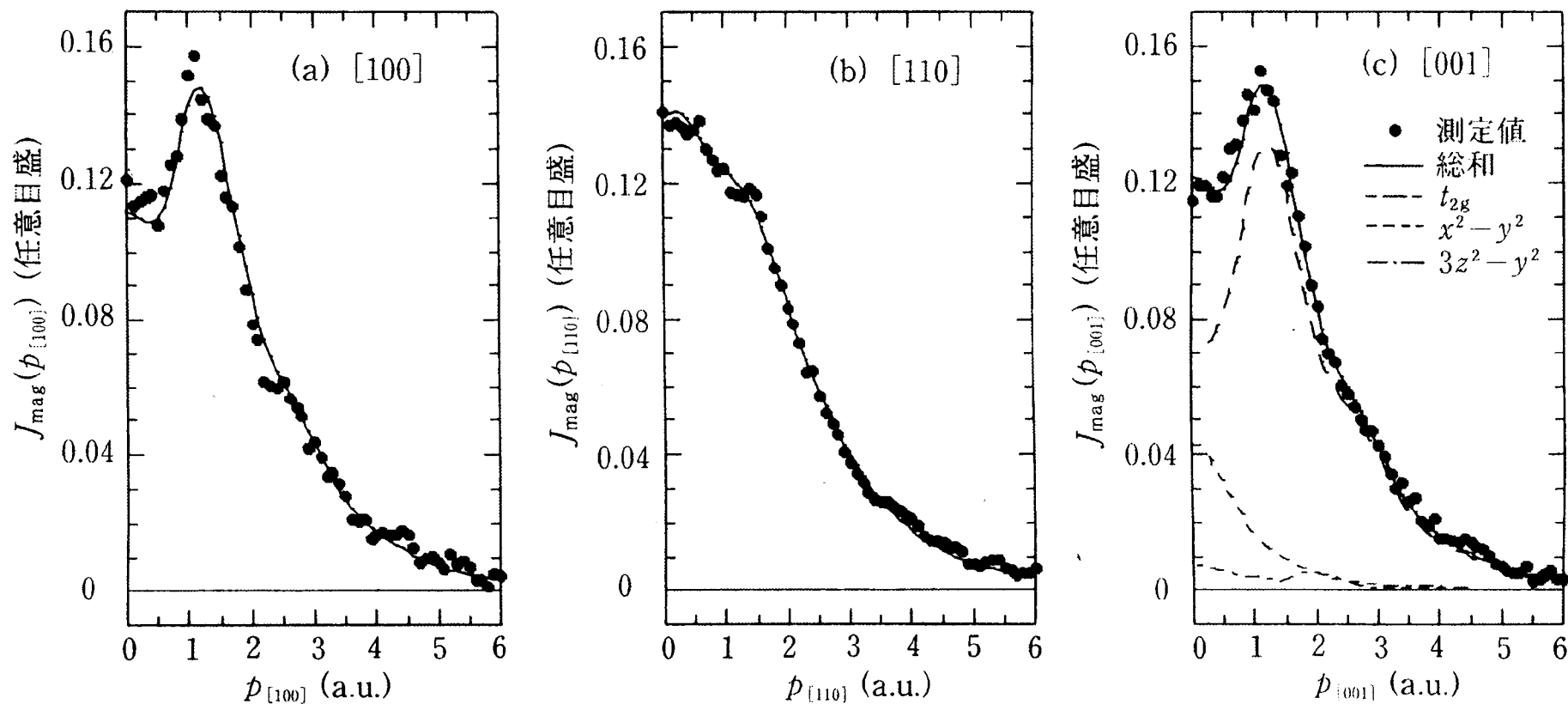


Compton Profile: $J(p_z)$

$$J(p_z) = \iint \rho(\mathbf{p}) dp_x dp_y, \quad z \parallel \mathbf{K}$$

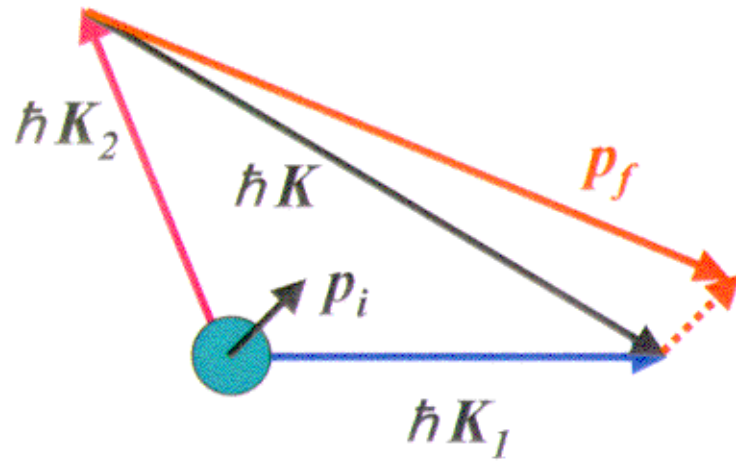
$$\begin{aligned} E &= \frac{E_0}{1 + \frac{E_0}{mc^2}(1 - \cos\theta)} + \frac{(\hbar \mathbf{K} \cdot \mathbf{p})/m}{1 + \frac{E_0}{mc^2}(1 - \cos\theta)} \\ &= E_C + \Delta E_D \end{aligned}$$





第 6 図 $\text{La}_{2-2x}\text{Sr}_{1+2x}\text{Mn}_2\text{O}_7$ ($x=0.35$) における磁気コンプトン・プロファイル (MCP) の異方性。
 (a) $[100]$ 軸方向での MCP, (b) $[110]$ 軸方向での MCP, (c) $[001]$ 軸方向での MCP。
 図(c) 中で, 実線: フィッティング解析の結果, 破線: t_{2g} 軌道, 点線: x^2-y^2 軌道, 一点鎖線: $3z^2-r^2$ 軌道の各プロファイルを示す。
 図(a), (b) 中の実線は, $[001]$ 方向での解析結果から再現したプロファイルを表わす。

Momentum conservation



$$\hbar K_1 + p_i = \hbar K_2 + p_f$$

$\therefore$

$$\begin{aligned} p_f &= (\hbar K_1 - \hbar K_2) + p_i \\ &= \hbar K + p_i \end{aligned}$$

$$K = K_1 - K_2$$

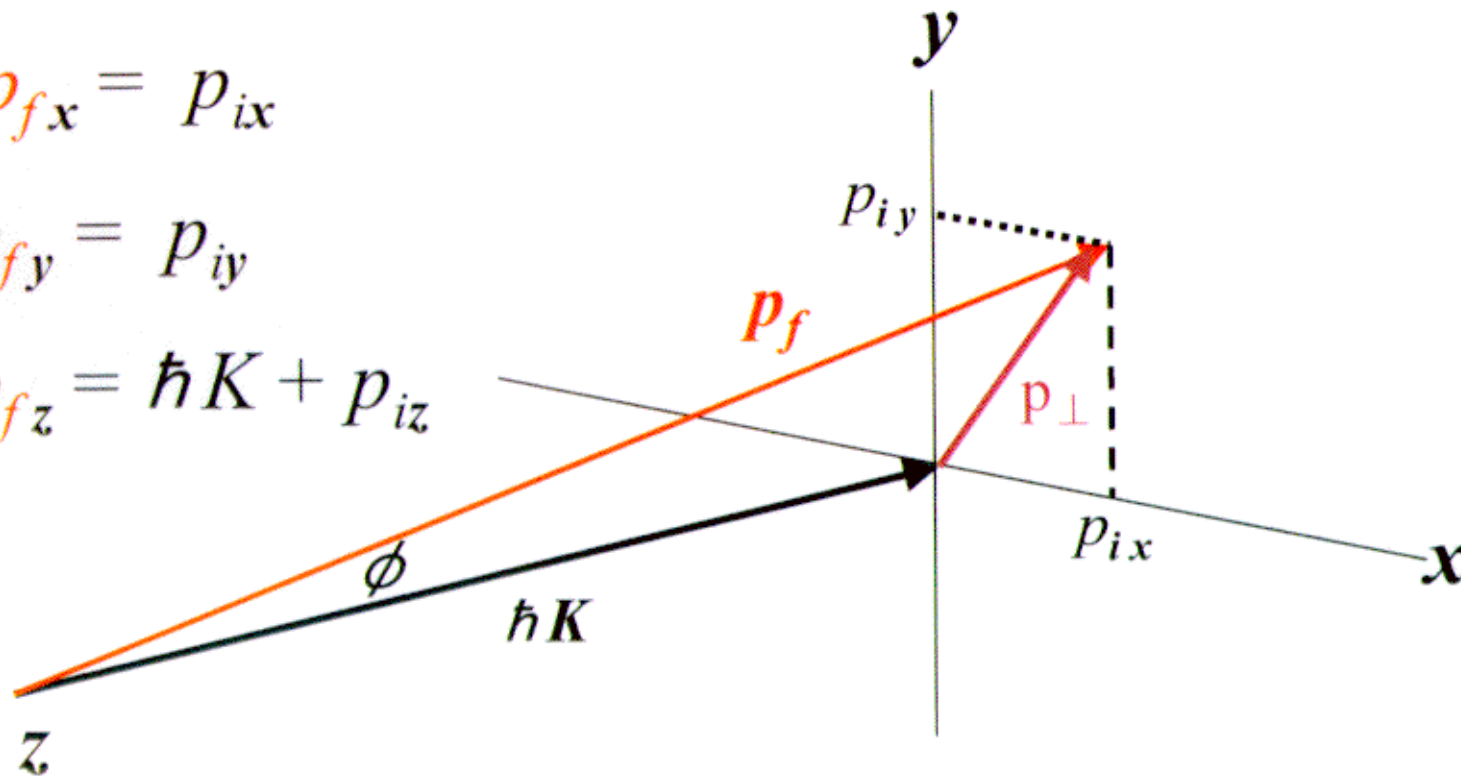
2D Momentum Distribution: $\rho(p_{ix}, p_{iy})$

$$\mathbf{p}_f = \hbar \mathbf{K} + \mathbf{p}_i, \quad \mathbf{K} \parallel \mathbf{z}$$

$$p_{fx} = p_{ix}$$

$$p_{fy} = p_{iy}$$

$$p_{fz} = \hbar K + p_{iz}$$



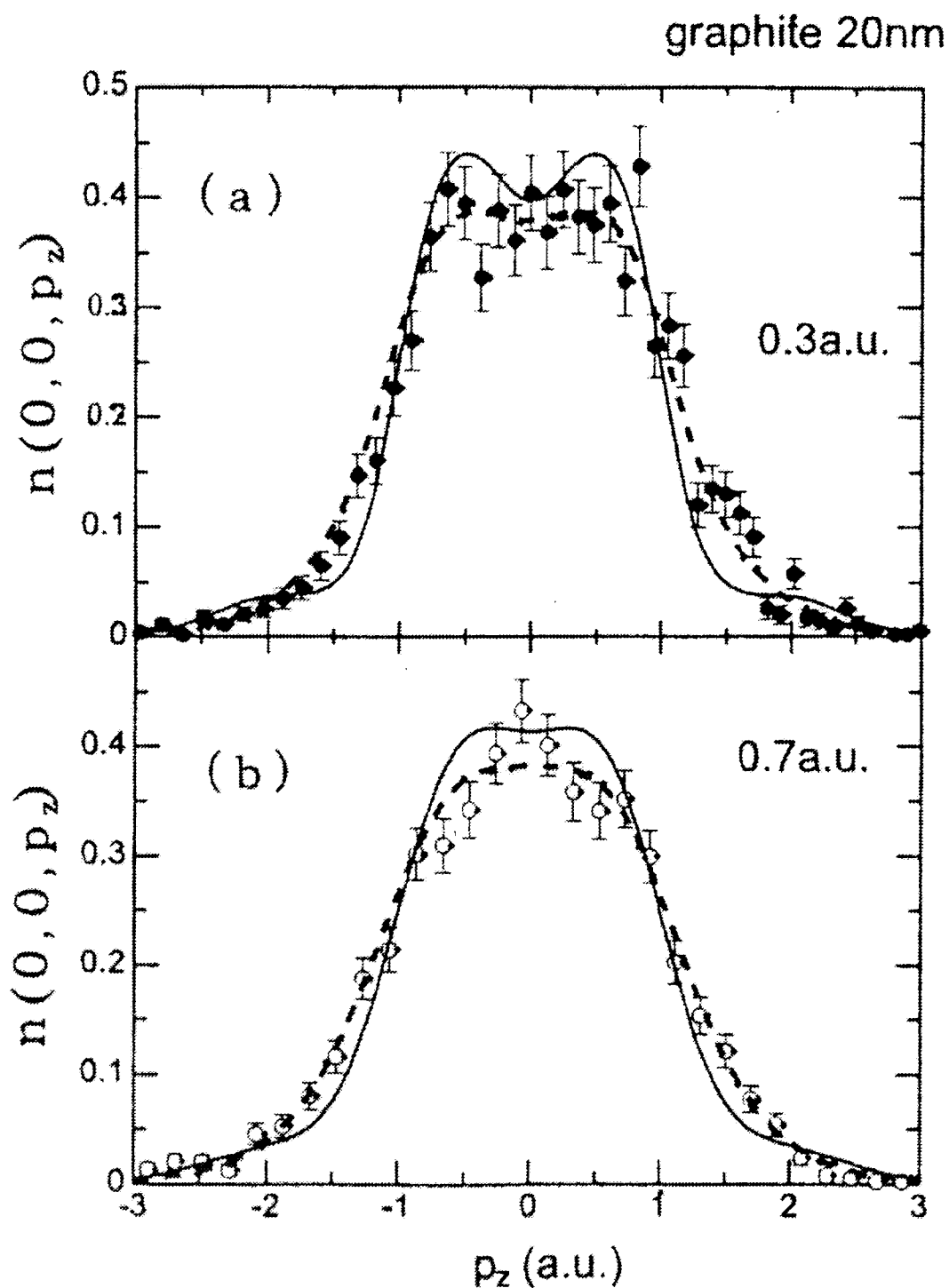


図 9. グラファイトの電子運動量密度分布 $n(0,0,p_z)$ 。
 (a)はコンプトン散乱と反跳電子の同時測定において、反跳電子のエネルギー分析より得たもの、(b)は同じくコンプトン散乱光子のエネルギー分光から得たものである。図中実線は理論計算値であり c 軸に対称的に、破線は等方的に平均してあり、それぞれの分解能でコンボリュートしてある。

Kinetic Energy of Recoiled Electron

$$E_R = \frac{\xi}{1 + \xi} E_0$$

$$\xi = \frac{E_0}{mc^2} (1 - \cos \theta)$$

for an initial electron at rest,

$$\hbar K \cong \sqrt{\left(\frac{E_R}{mc^2}\right) \left(2 + \frac{E_R}{mc^2}\right)} \times 137 \text{ (a.u.)},$$

$$\frac{E_R}{mc^2} = \frac{\xi}{1 + \xi} \frac{E_0}{mc^2}.$$

For $E_0 = mc^2 = 511 \text{ keV}$ and $\theta = 90^\circ$, $\rightarrow \xi = 1$.

then $E_R = E_0 / 2 = 256 \text{ keV}$, $\hbar K = 153 \text{ a.u.}$

$$\theta = 90^\circ$$

$$E_R = \frac{\xi^2}{1 + \xi} mc^2,$$

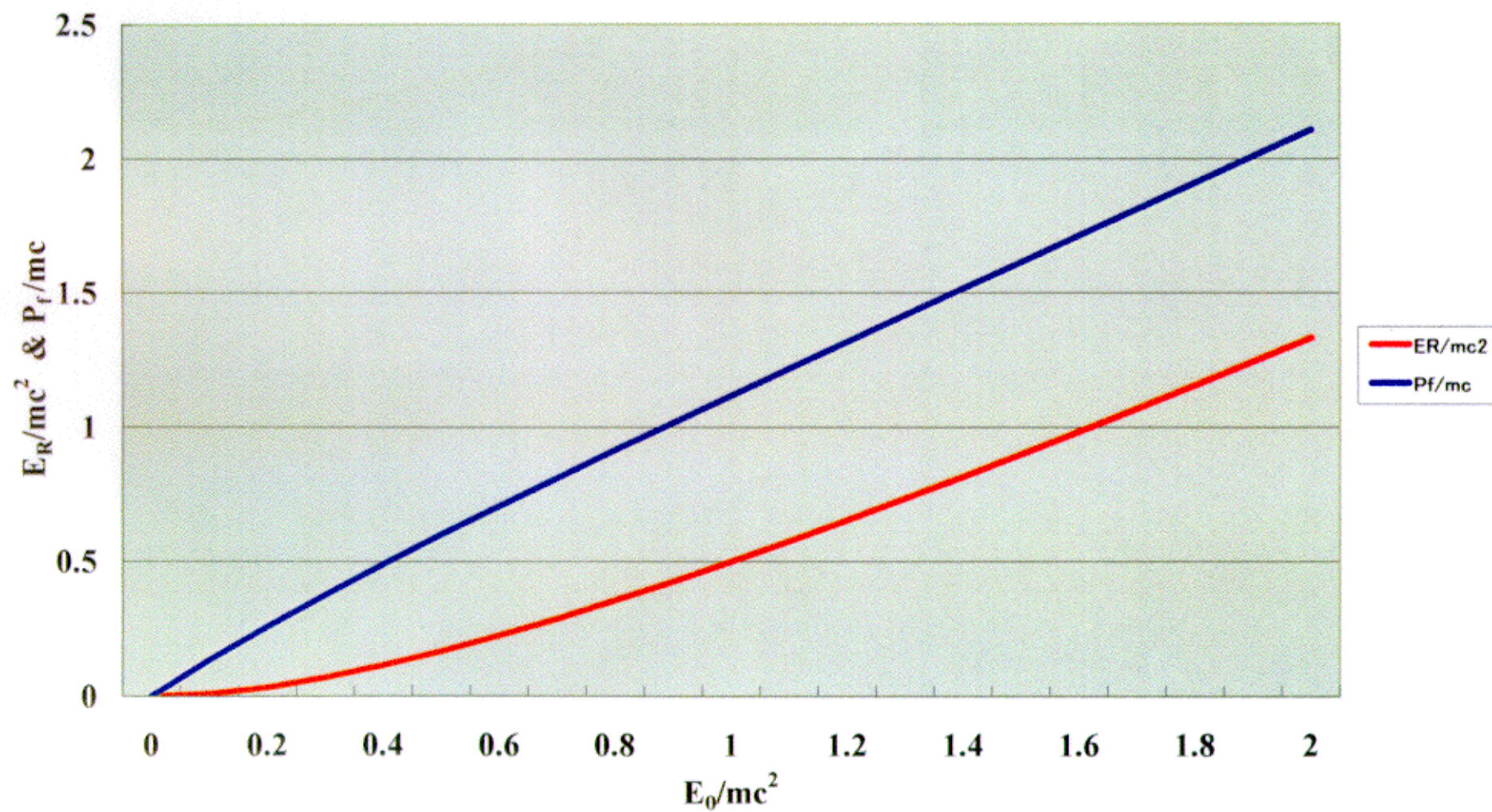
$$\hbar K = \xi \sqrt{1 + \left(\frac{1}{1 + \xi} \right)^2} mc,$$

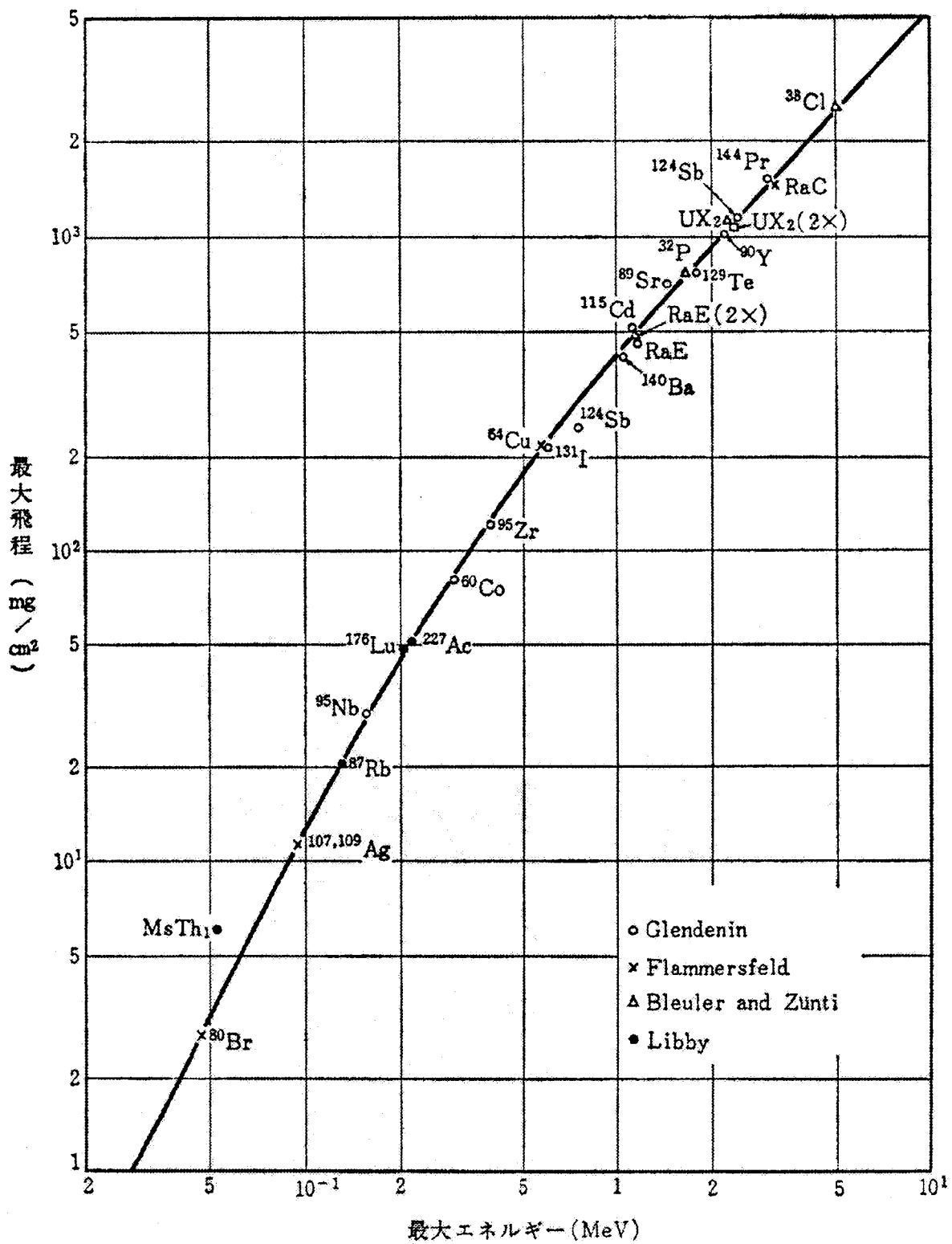
$$\xi = \frac{E_0}{mc^2}.$$

For $E_0 \gg mc^2$,

$$E_R \approx E_0, \quad \hbar K \approx \frac{E_0}{mc^2} mc.$$

Energy and Momentum of Recoiled Electron





【1.3】 β 線の最大エネルギーと最大飛程の関係⁵⁾

$$E_R = 200 \text{ keV}$$

飛程; 0.05 g/cm²

Si結晶内の飛程 (密度; 2.4 g/cm³)

$$L = 0.05 / 2.4 \text{ cm} = 0.021 \text{ cm} = 0.21 \text{ mm}$$

$$E_R = 500 \text{ keV}$$

$$L = 0.84 \text{ mm}$$

試料作成が容易