

Ge検出器を用いた 高分解能ガンマ線分光による 原子核の形状測定

p3 γ 班

上垣内 暁
中尾 政夫

目次

- 研究動機
- 慣性モーメント測定実験
 - 実験原理
 - 実験装置
 - 実験の結果と解析
- Qモーメント測定実験
 - 実験原理
 - 実験装置
 - 実験の結果と解析
 - 次回の実験について
- まとめ

実験動機

- 原子核は非常に強い相互作用で結合しているのですが、球形と予想されるが、実際は変形した核も存在する。
我々はその変形をどのように計測し、物理量を求めるのかということに興味を持ち、今回の実験を計画した。

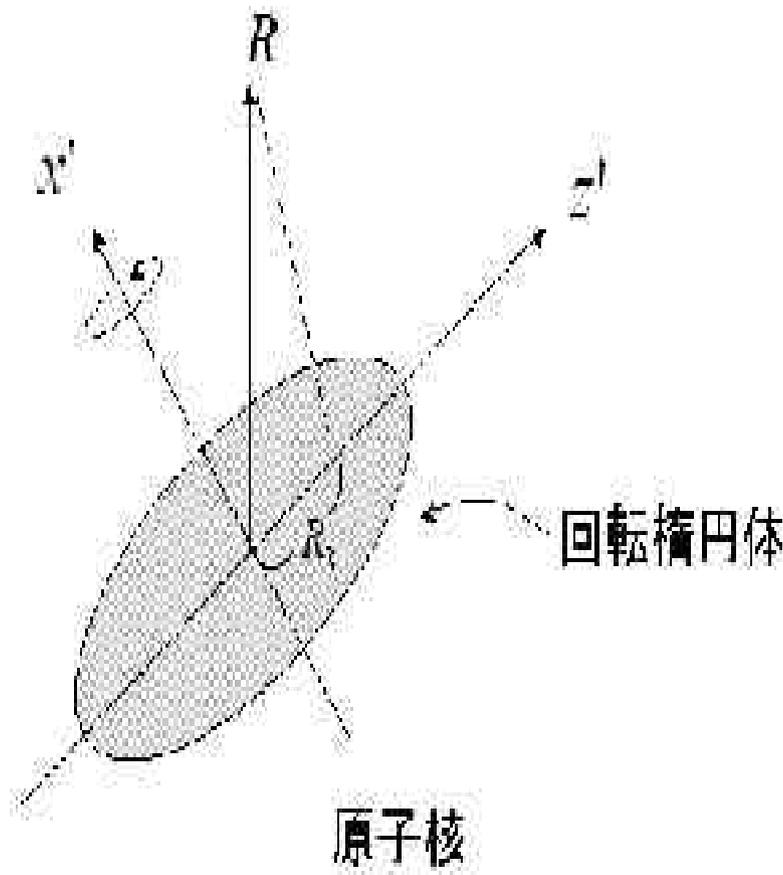
知りたいこと 測定する物理量

- 知りたいのは原子核がどのような形状をしているか？ ということである。
今回の実験では
慣性モーメント
電気四重極モーメント
を測定する。これらの量から原子核の形状を知ることができる。以下で詳しく説明する。

慣性モーメント測定 実験

- 仮定 変形原子核は回轉楕円体で表せる。

慣性モーメント、 δ 、 ρ



- まずZ軸周りに対称な回転楕円体の回転エネルギーは、対称軸 z' 周りに、それに直行する2軸 x' 、 y' 周りの慣性モーメントを j_3 、 j として

$$E = (\hbar^2/2j)(R^2 - R_3^2) + (\hbar^2/2j_3)R_3^2 \quad \text{と書ける。}$$

ここで、さらに仮定

- ・回転によるエネルギーは核子の励起エネルギーと分離できる。
- とすると、

$$\text{全角運動量 } I = R$$

また、 z' 軸周りの回転に対し、状態は変化しないので、 $R_3 = 0$ となる。

つまり、 x' 軸周りに回転する。

以上より、回転によるエネルギーは

$$E_I = (\hbar^2 / 2J) I(I + 1)$$

となる。ここで、陽子数 = 偶数

中性子数 = 偶数

(偶-偶核)のときは、 x' 軸周りの180度回転
に対する対称性とパリティの固有関数とな
る必要性から、原子核のとり角運動量は

$I=0, 2, 4, 8\cdots$ となる

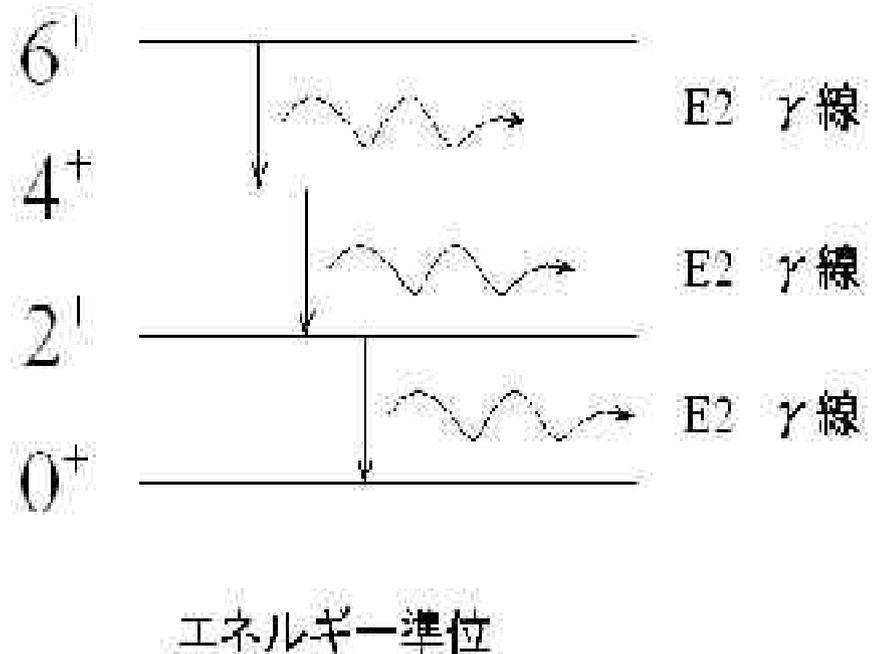
よって、回転楕円体偶-偶核のときは

右のような準位構造になり、角運動量2の γ 線を放出して準位間を遷移する。(E2遷移)

つまり、

$$E_{\gamma} = E_I - E_{I-2}$$

となり、 γ 線エネルギーとその準位の核運動量が分かれば 慣性モーメントが分かる。



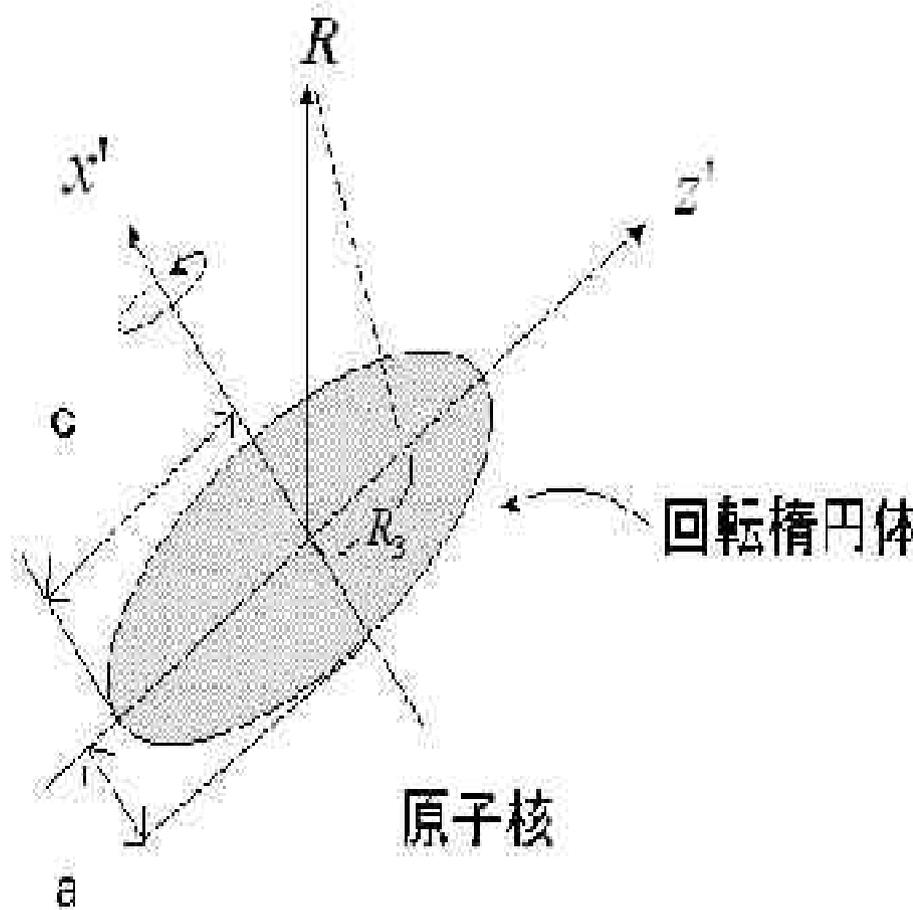
次に慣性モーメントを'形状'の情報にしたい

回転楕円体を密度一様で
内部核子の運動が無視
できるものとする、

$$\delta = \frac{(c-a)}{R_0}$$

$(R_0^3 = a^2 c)$ について
 $\delta \ll 1$ のとき

$$J \simeq 0.58 M A^{5/3} \left(1 + \frac{1}{3} \delta\right)$$



さらに、

$$\rho = \frac{1}{J} \frac{dJ}{dI}$$

という量を定義します。
これは、角運動量の変化に対する慣性モーメントの変化、'柔らかさ'のようなものを表している。

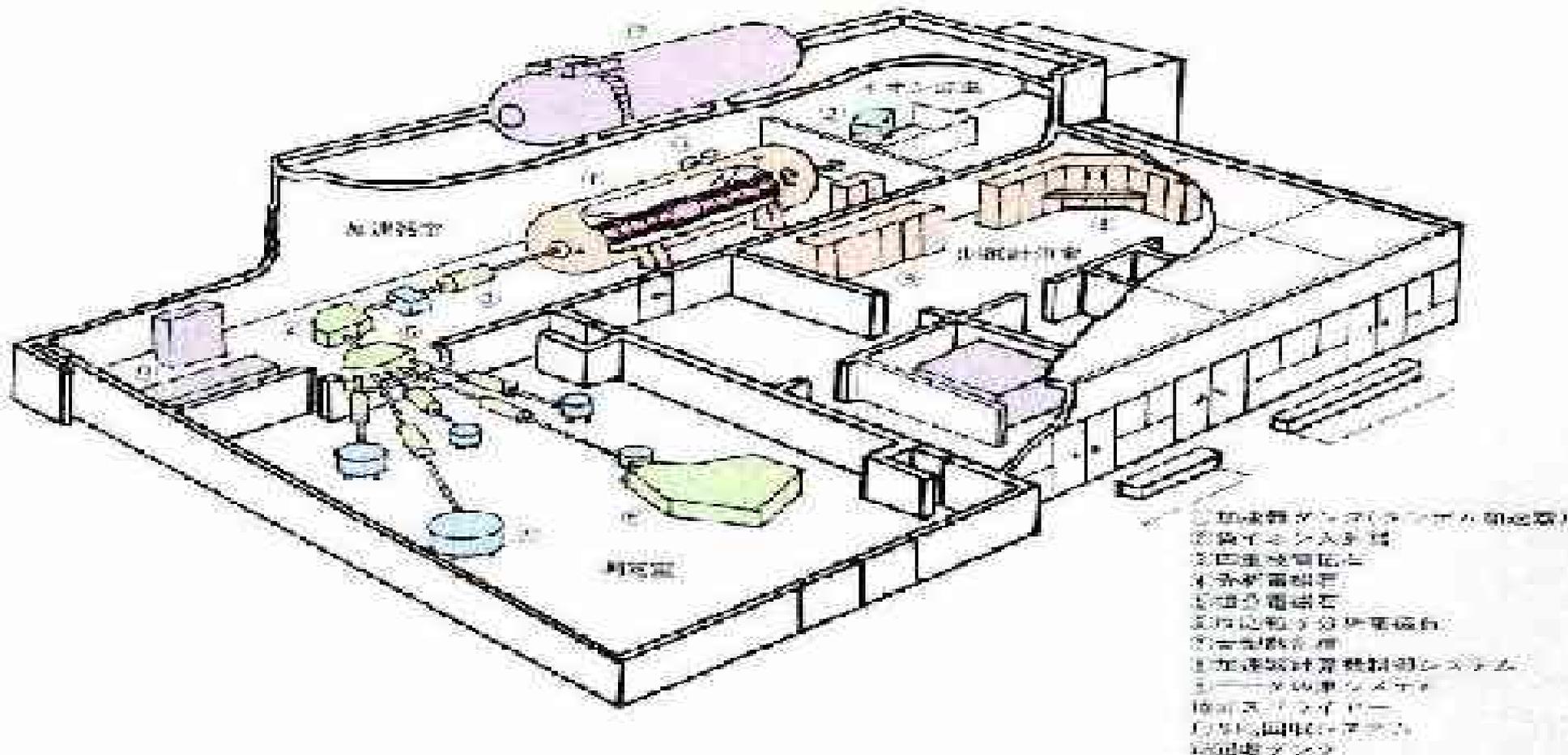
以下の実験でこれら

$$J, \delta, \rho$$

を求めます。

実験配置

実験は京都大学タンデム加速器Gコースで行った。陽子ビームを13Mevに加速して、ターゲットに衝突させた。下のようなもの。

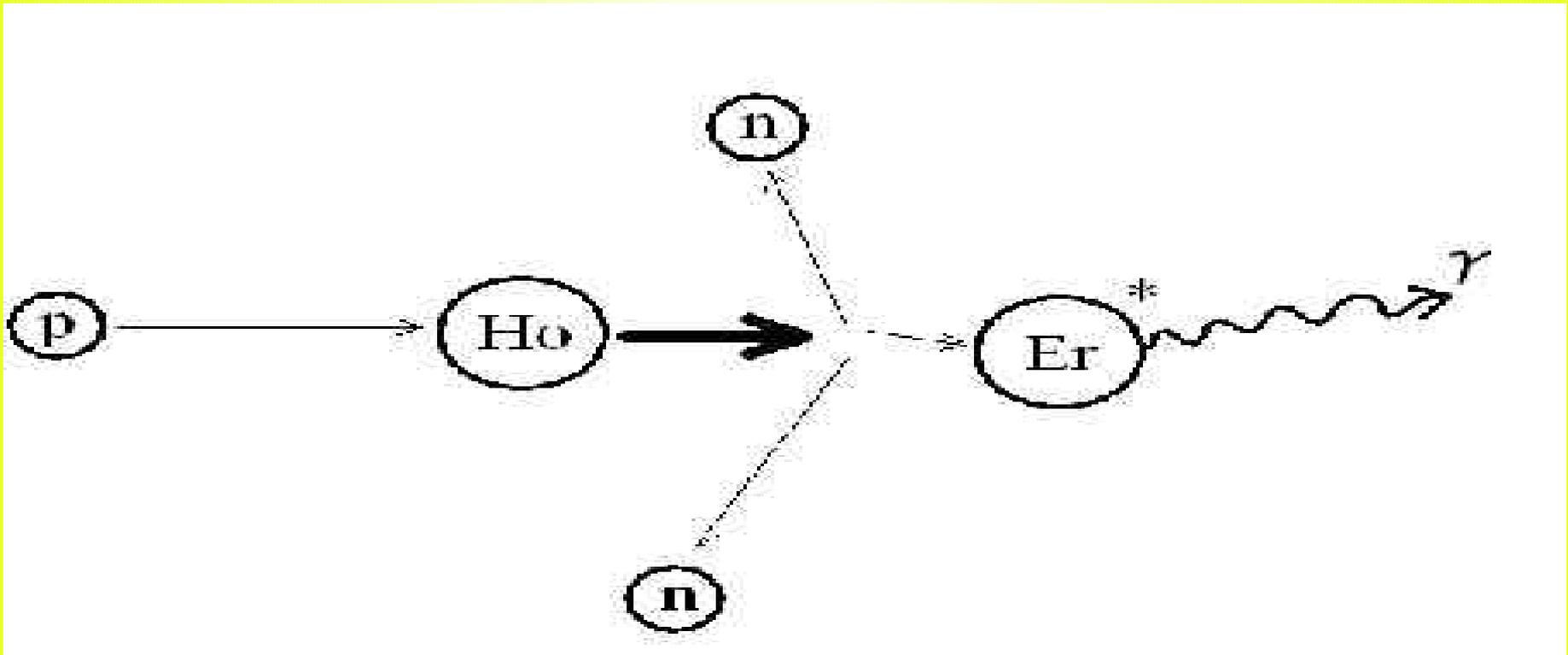


ターゲットは $^{165}_{69}\text{Ho}$ を用い、

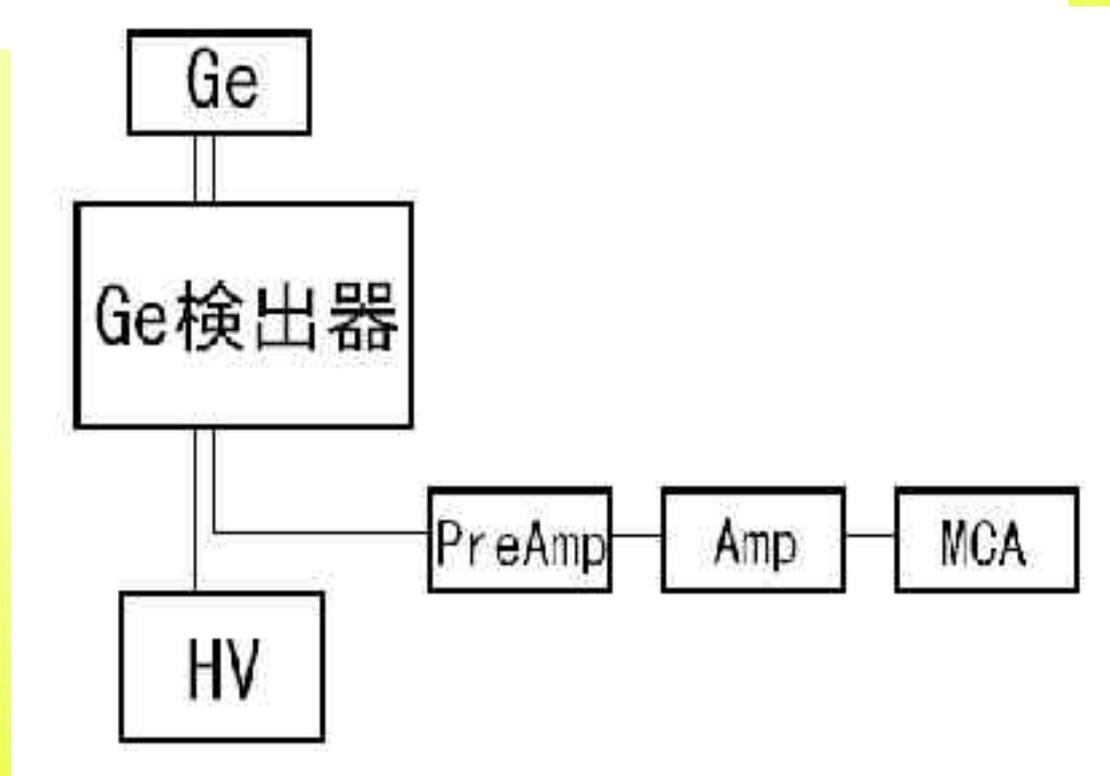
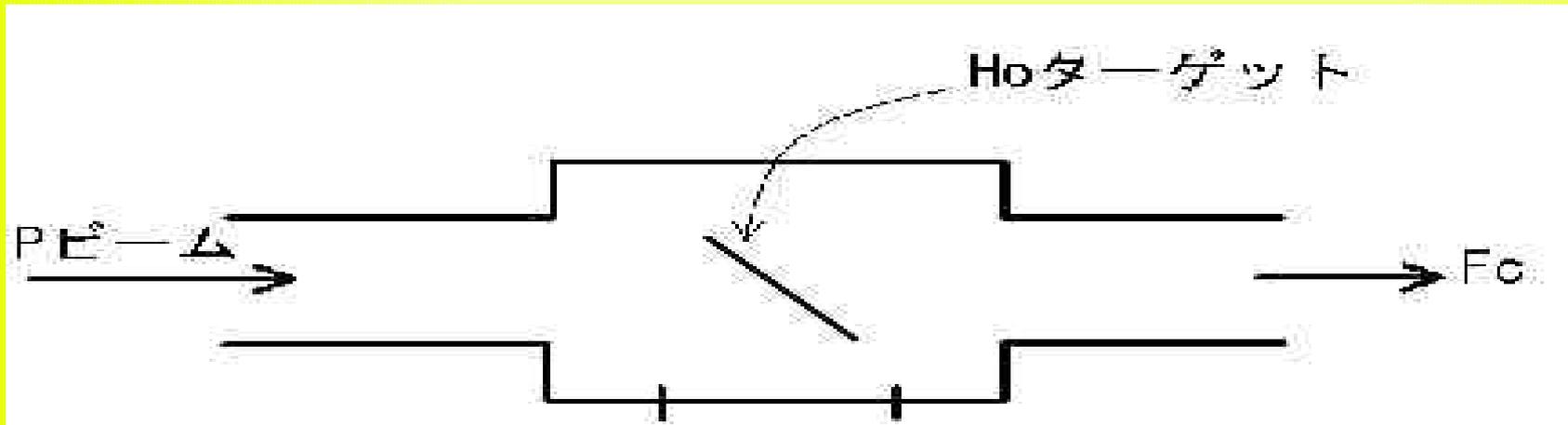


反応で

生成するErからの脱励起 γ 線をGe検出器で検出した。

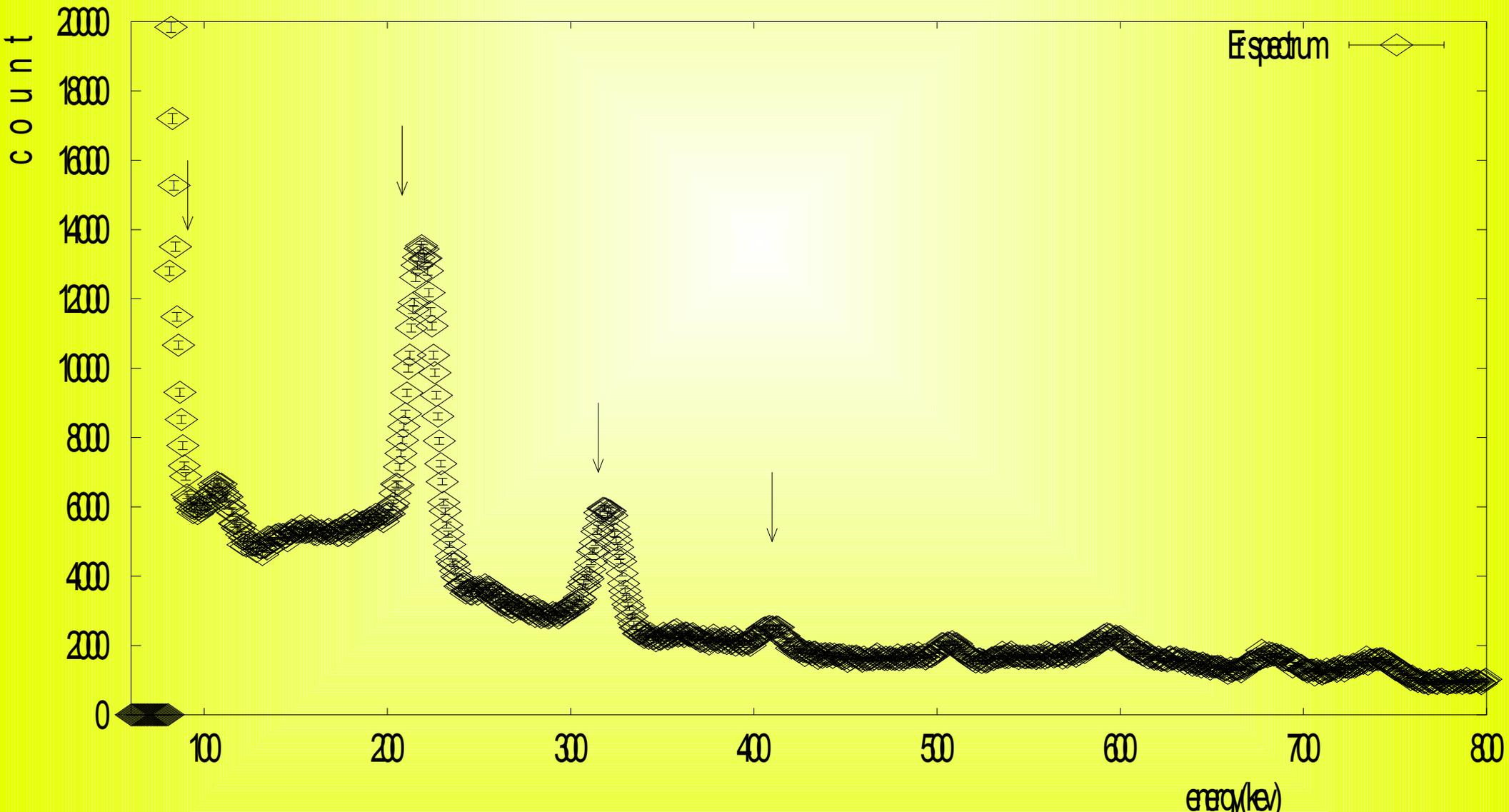


γ 線の計測にはGe半導体検出器を用いた。
下に配置を記す。



実験結果

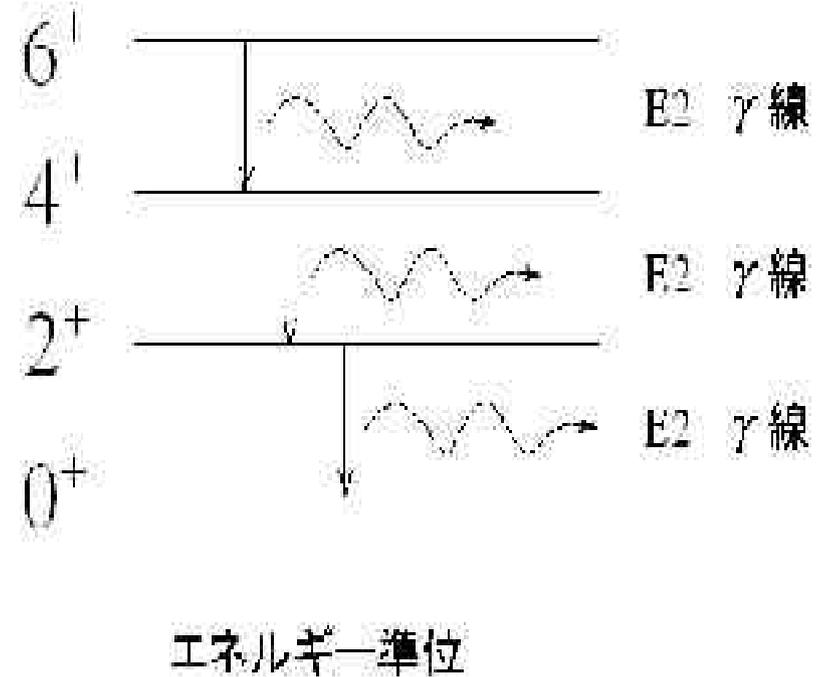
得られたスペクトルは以下である。横軸はエネルギー (keV) 縦軸はカウント数である。



スペクトルのピークのうちどれが回転準位間遷移でスピンの大きさは？
という問題がある。

・低エネルギーの遷移ほど計数が多く高準位になるほど少ない

・慣性モーメントが角運動量の変化で急激に変わらないとすれば、 E_I は $I(I+1)$ と大体比例関係をなす。



矢印は文献より、そこに回転準位間遷移がある、と考えられるエネルギー。
結局、今回の実験だけからでは回転準位間遷移とIを正確に決定することは難しい。
よって文献を参考にして決定した。

結果 E_I とIの関係は以下。(単位keV)

	$E_I (Er)$	ピークフィットの誤差
I=2	106.3	± 0.3
I=4	324.3	± 0.3
I=6	642.7	± 0.4
I=8	1051.5	± 0.6

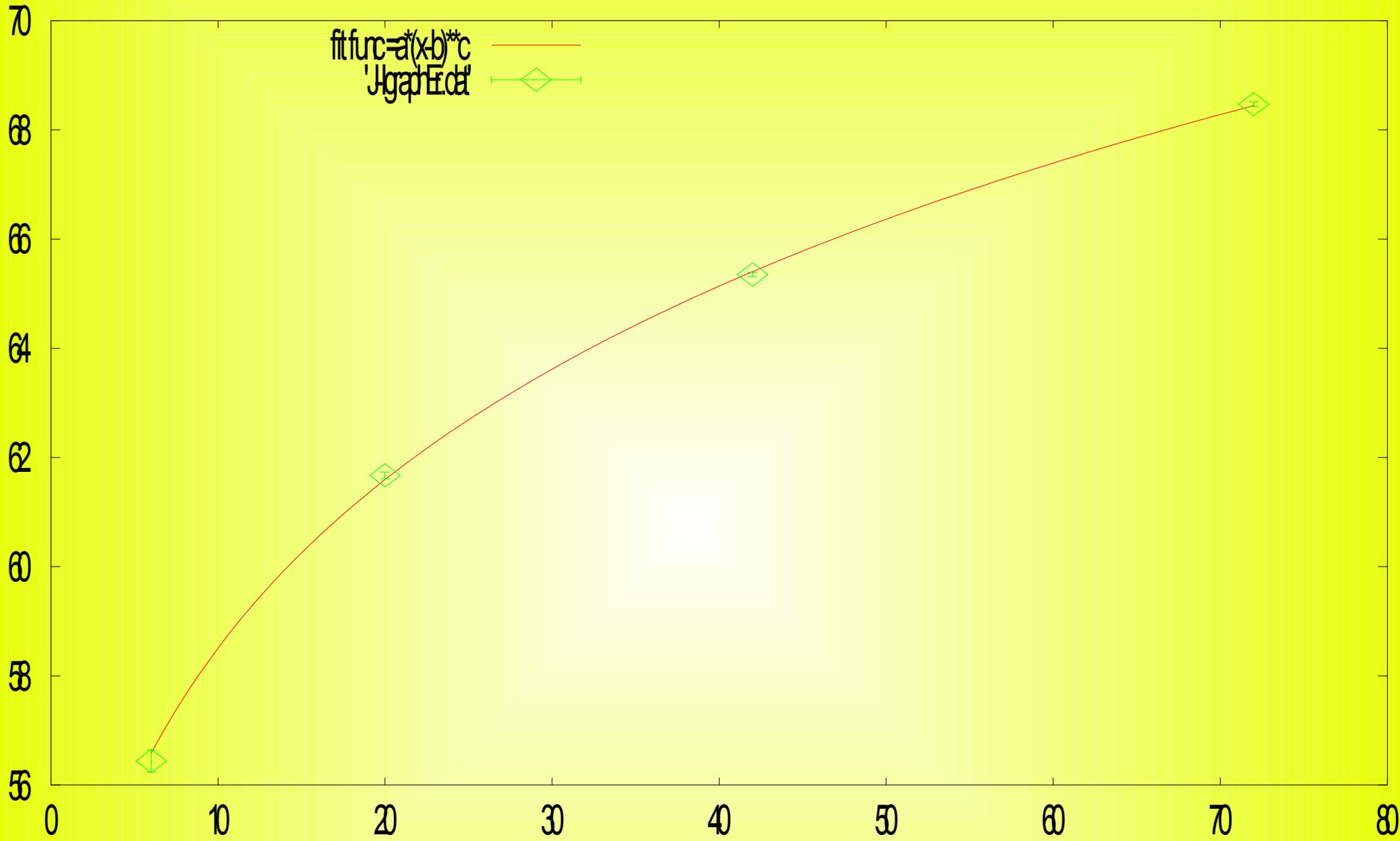
このE から

$$E_I = (\hbar^2 / 2J) I(I + 1)$$

を使って、慣性モーメントを計算すると、以下。

E_I	I=2	I=4	I=6	I=8
$\frac{2J}{\hbar^2}$	56.44 ± 0.16	61.67 ± 0.06	65.35 ± 0.04	68.47 ± 0.04

慣性モーメントの単位は MeV^{-1}
グラフで表すと



E_r の

$$\frac{2JI}{\hbar^2}$$

—

$$I(I+1)$$

のグラフ

データ点をつなぐ曲線はフィット関数である。
フィット関数 $= a * ((I(I+1)-b)^c)$ とした。

このフィット関数と慣性モーメントの値から

$$J \simeq 0.58 M A^{5/3} \left(1 + \frac{1}{3} \delta\right)$$

$$\rho = \frac{1}{J} \frac{dJ}{dI}$$

を用いて、 δ, ρ を求めると次。

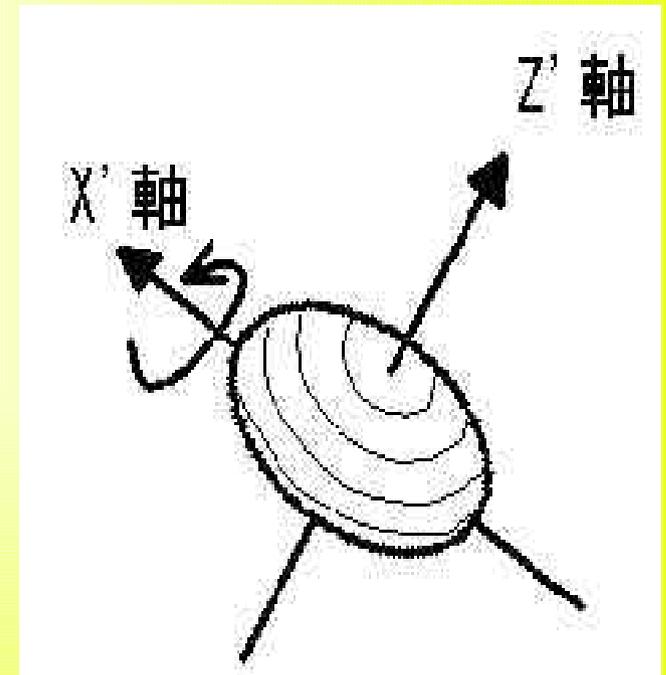
	I=2	I=4	I=6	I=8
$\delta(E_T)$	-0.55	-0.32	-0.16	-0.02

	I=2	I=4	I=6	I=8
$\rho(E_T)$	0.05	0.03	0.03	0.02

結果

これより、 E_r はパンケーキ型に変形しており、 I が大きくなると、球に近づくことが分かる。

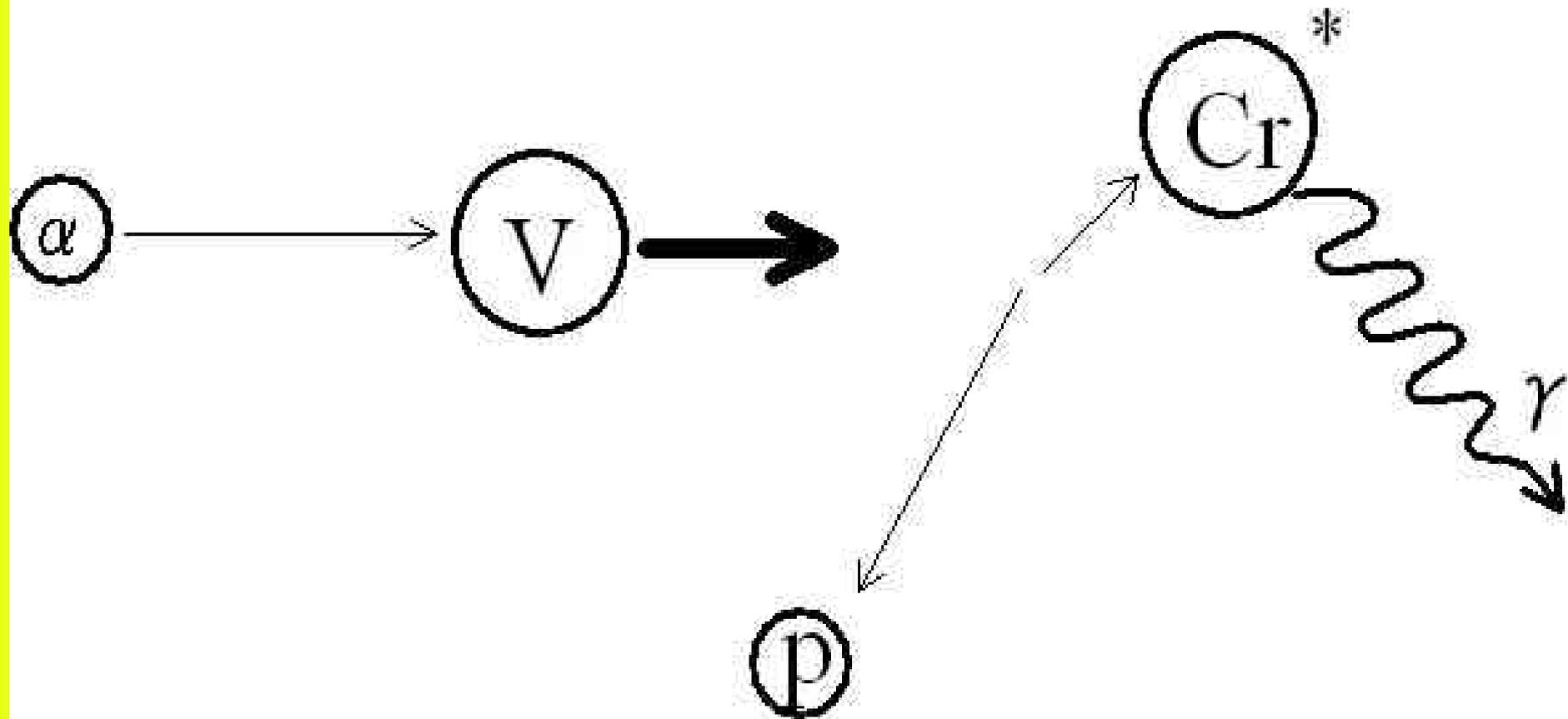
また、 I が大きくなるにつれ、変形しにくくなるということが分かる。



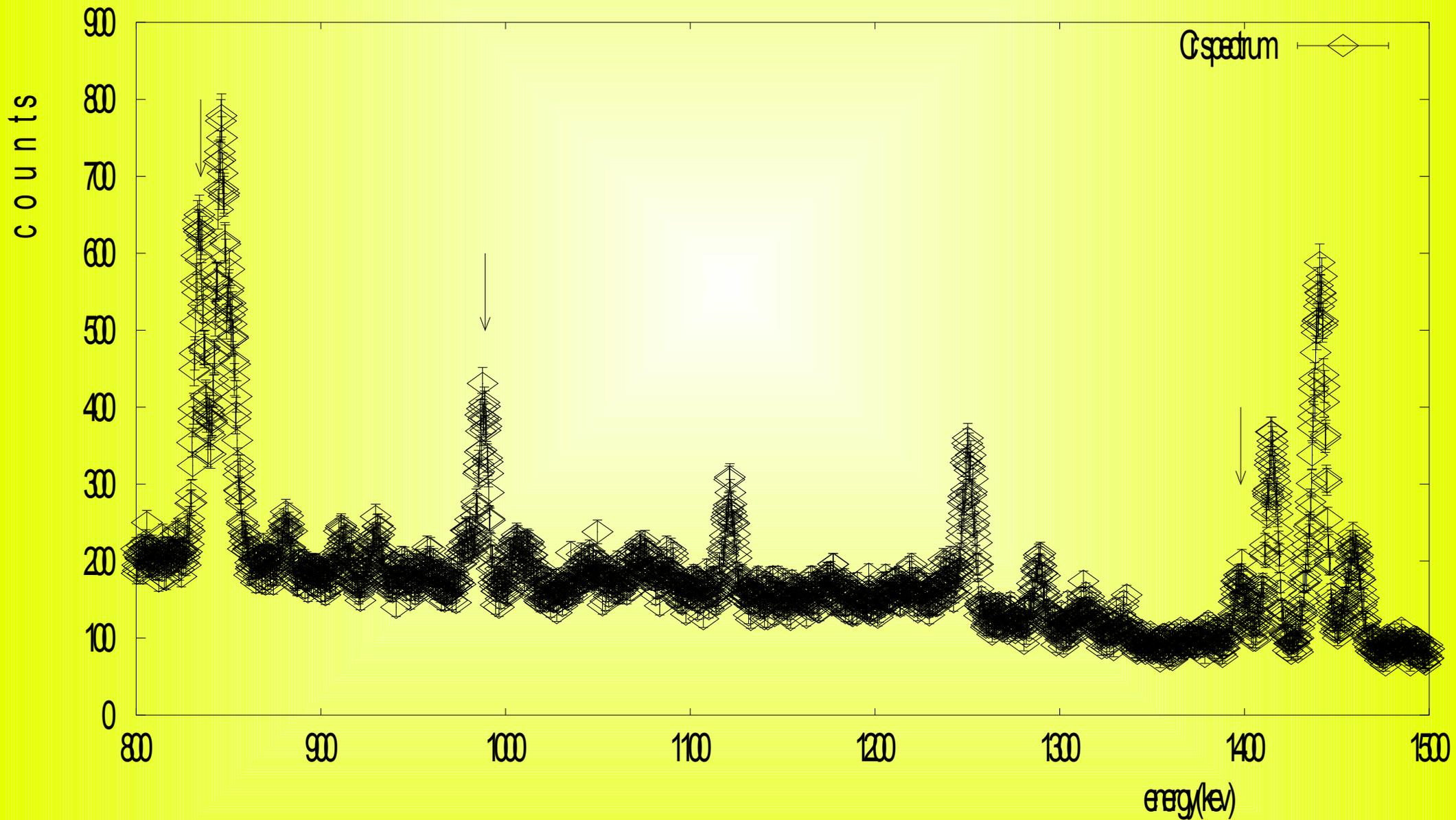
では、他の原子核と比べたらどうか？

と考え、 ^{54}Cr についても同様のじっけんを行った。

^{51}V をターゲットにし α 粒子を衝突させCrを生成した。



得られたスペクトル。矢印は文献参照した回転準位間遷移



このデータから慣性モーメントを出し、更にその値から δ 、 ρ を計算したものが下。

	I=2	I=4	I=6	I=8
$\delta(E_{\Gamma})$	-0.55	-0.32	-0.16	-0.02
$\delta(C_{\Gamma})$	-1.01	0.04	0.61	

	I=2	I=4	I=6	I=8
$\rho(E_{\Gamma})$	0.05	0.03	0.03	0.02
$\rho(C_{\Gamma})$	0.52	0.11	0.07	

(以上のように発表会では申しましたが、後にこの値は間違っていることが分かりました。正しくは以下です。)

	I=2	I=4	I=6	I=8
$\delta(\text{Er})$	-1.76 ± 0.0035	-1.65 ± 0.0013	-1.57 ± 0.0009	-1.5 ± 0.0009
$\delta(\text{Cr})$	-2.00 ± 0.0003	-1.47 ± 0.0003	-1.18 ± 0.0003	

δ は小さいとしているので正しい値とはいえません。詳しくは卒業論文を参照。)

結果

以上の δ 、 ρ から

- ・Erにおいて

初めパンケーキ型に変形しており
Iが大きくなるにつれ球形に近づく。

- ・Crにおいて

始めはパンケーキ型だが、変形率
が大きいため球形、レモン型へと
変形していく。

ということがわかった。(ここも訂正が必要です)

以上、原子核の形状についての知見が得られたが、我々はこれでも満足せず、更に形状の測定を追及した。

電気四重極モーメント(Qモーメント)を測定することにより、電荷分布を知る実験までも行った。

以下、Qモーメント測定実験

Qモーメントを求めるために寿命を測定する

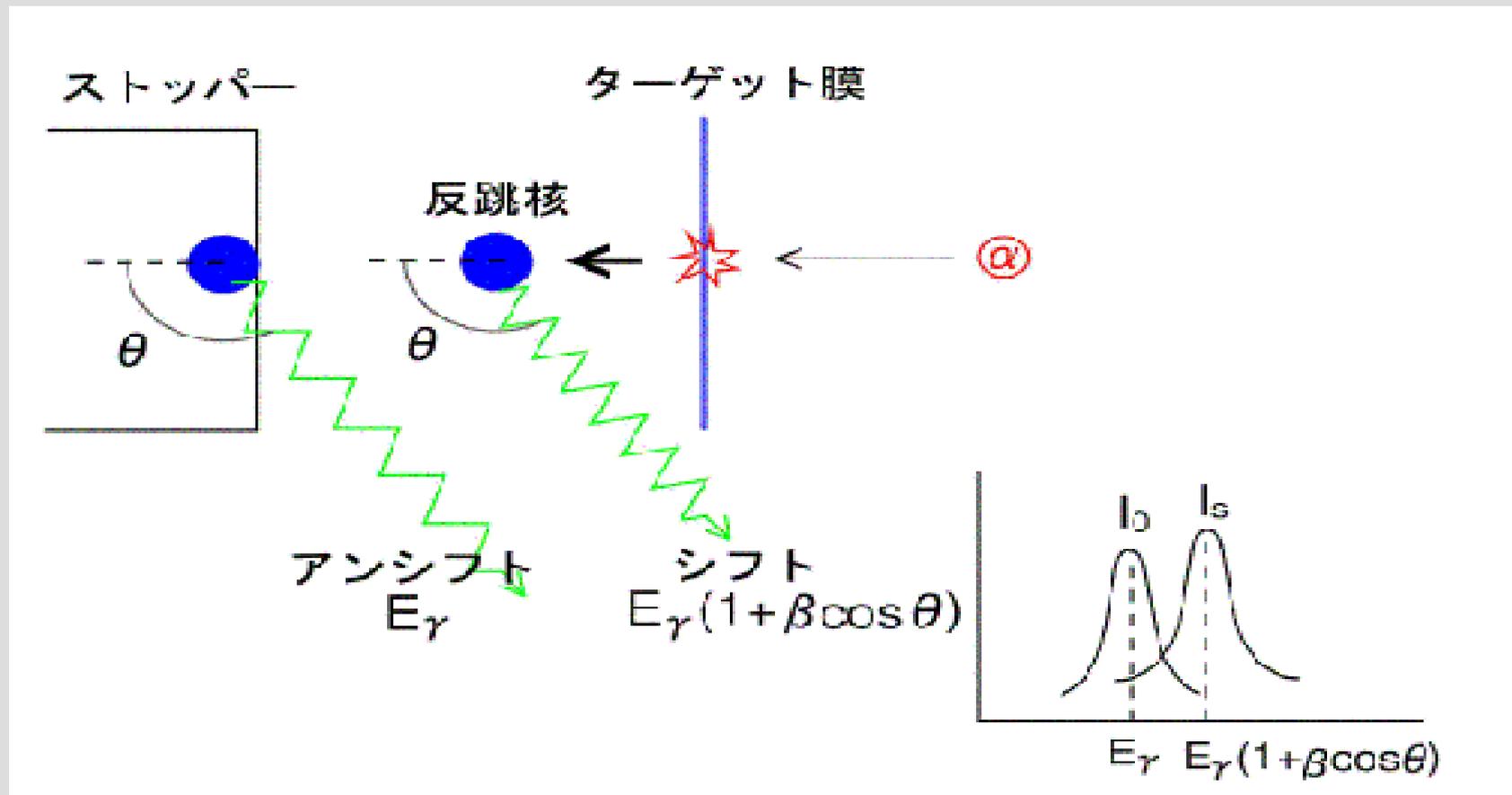
$|i\rangle$ から $|f\rangle$ へ遷移する際の寿命とQモーメントの関係は、次の式の関係があることが知られている。

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{60\hbar} \left(\frac{E_\gamma}{\hbar c}\right)^5 e^2 Q_0^2 (I_i 0 2 0 | I_f 0)^2$$

そこで、原子核の励起状態の寿命を測定することにした。

RDM (Recoil Distance Method) とは

- 反跳核は真空中を飛行し、放出される γ 線はドップラーシフトする。



寿命を τ として、ターゲットーストップパー間飛行時間 t_f に崩壊する原子核は

$$I_s = \int_0^{t_f} -\frac{dN(t)}{dt} dt = N_0(1 - e^{-t_f/\tau})$$

t_f 飛んだ後、ストップパー内で停止して崩壊する原子核数は

$$I_0 = \int_{t_f}^{\infty} -\frac{dN(t)}{dt} dt = N_0 e^{-t_f/\tau}$$

ターゲットーストップパー間距離をD、反跳核速度vとして $t_f = D/v$ であり、

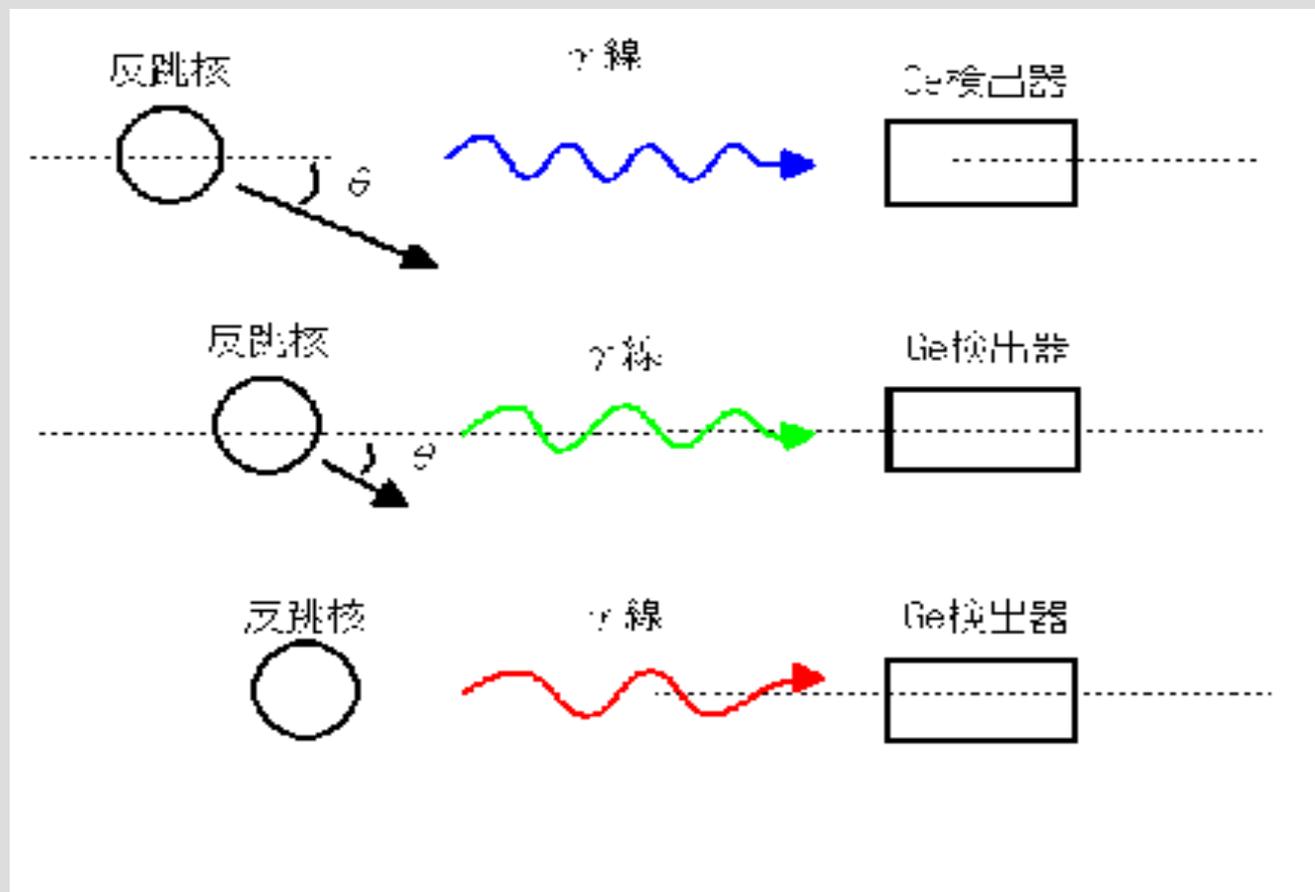
$$\frac{I_0}{I_0 + I_e} = e^{-D/v\tau}$$

が成立する。原子核からのドップラーシフトした放射 γ 線のエネルギーは $E = E_\gamma (1 + v/c \times \cos\theta)$ なので生成原子核反跳方向と検出器の角度 θ 、 γ 線のエネルギーと計数、Dが計測できれば原子核の寿命 τ が分かる。この方法で測定できる寿命のオーダーはns~psである。

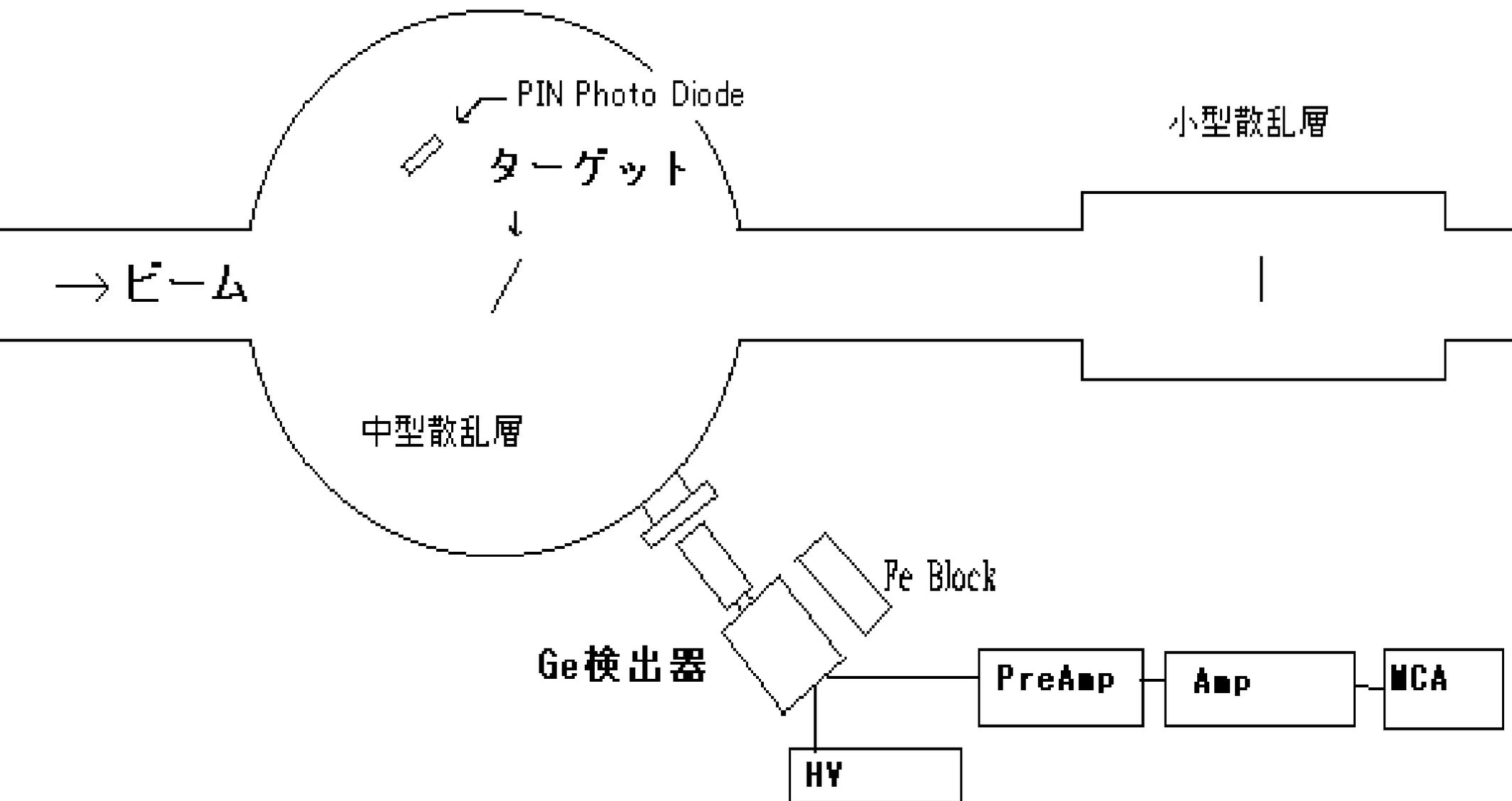
DSAM (Doppler Shift attenuation Method) とは

- 物質中で反跳核の速さは減衰する。(この時間は物質によって異なるが 1 ps程度)

$\beta \ll 1$ の時は静止している核から出る γ 線のエネルギーを E 、反跳方向と検出器のなす角 θ として $E(1 + \beta \cos \theta)$ になる。



実験の配置

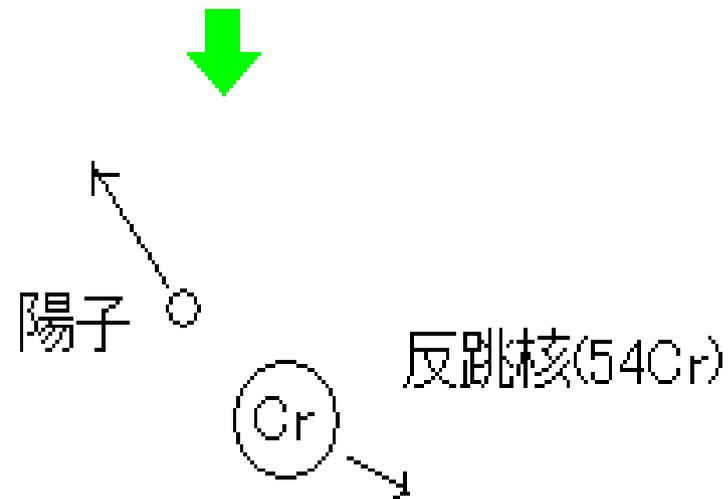
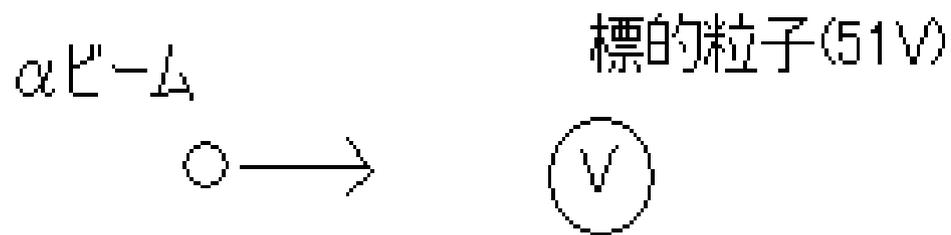




SP

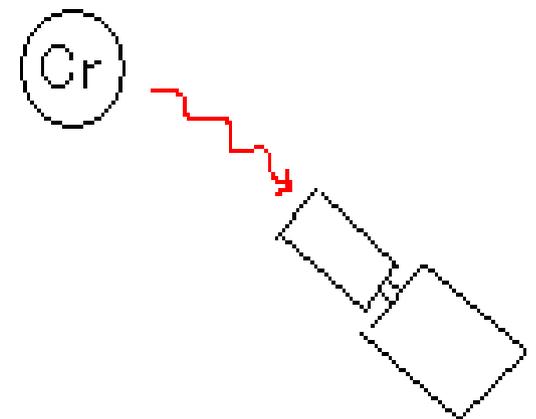
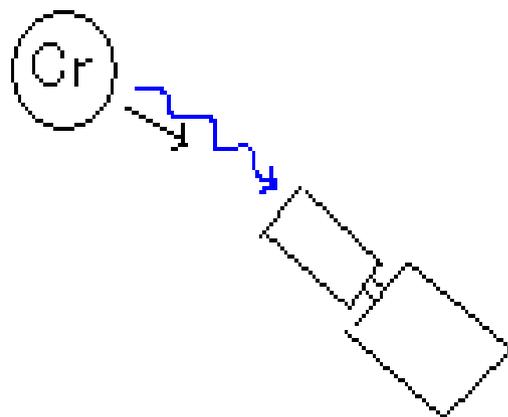
Popper

EG&G OR



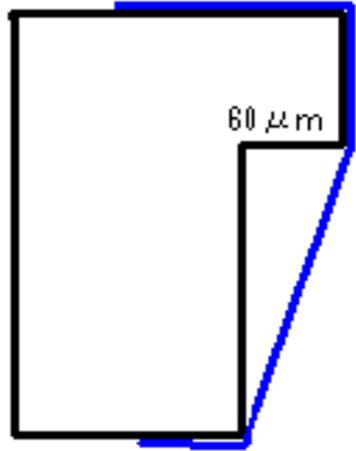
動いているうちに γ 線を出す

止まってから γ 線を出す



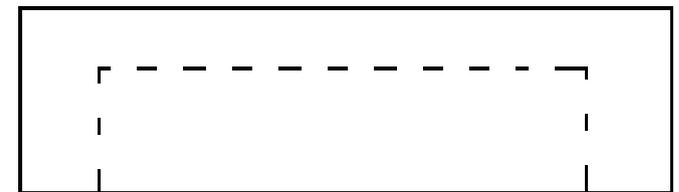
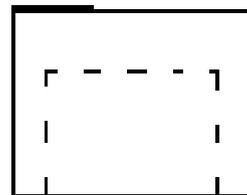
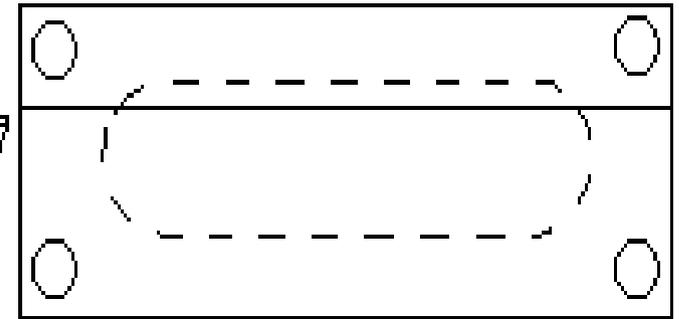
ターゲットその1

蒸着膜



アルミニウム箔にバナジウムを蒸着した膜を真鍮のストッパーに貼り付けたもの

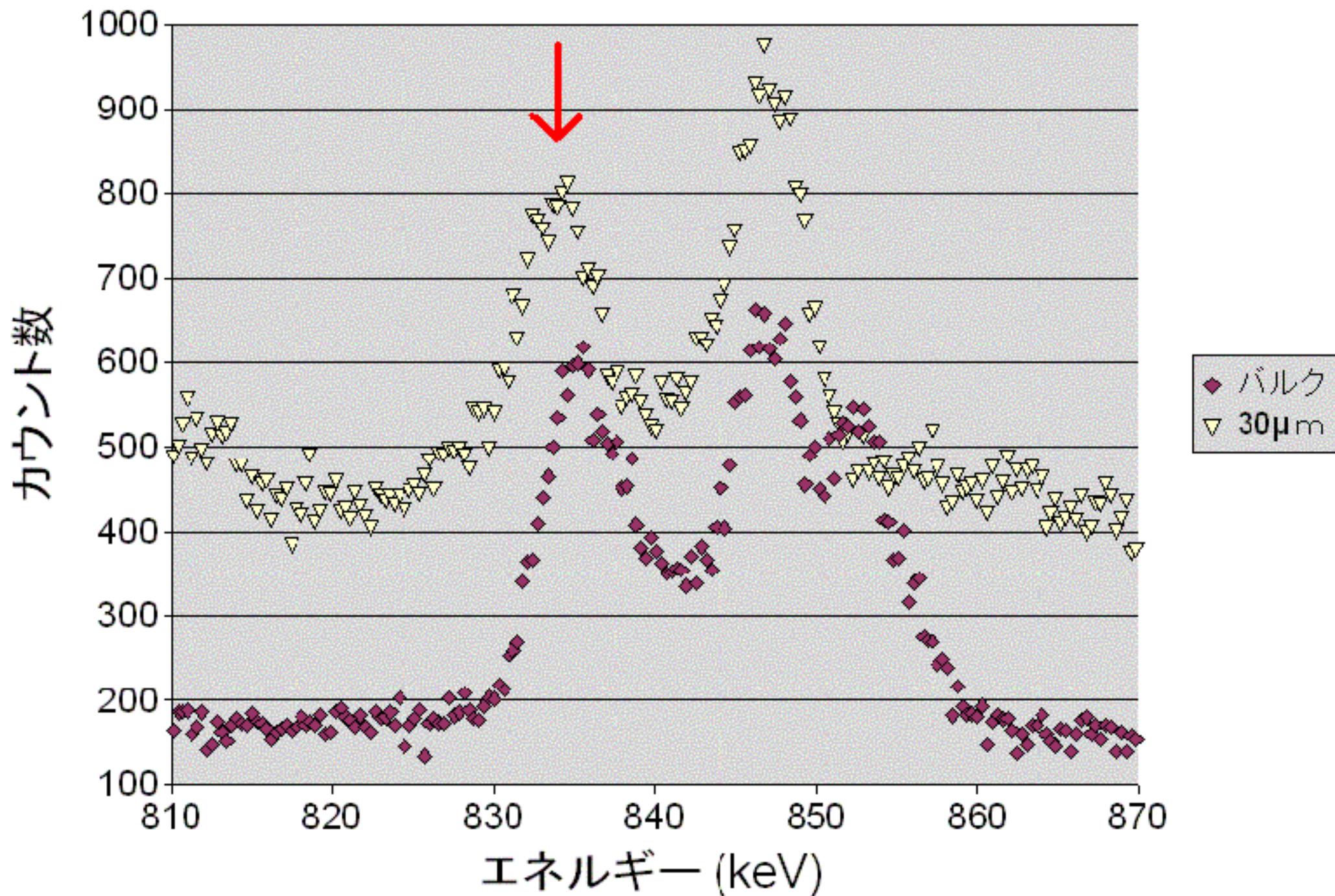
60 μmの段差



ラダー

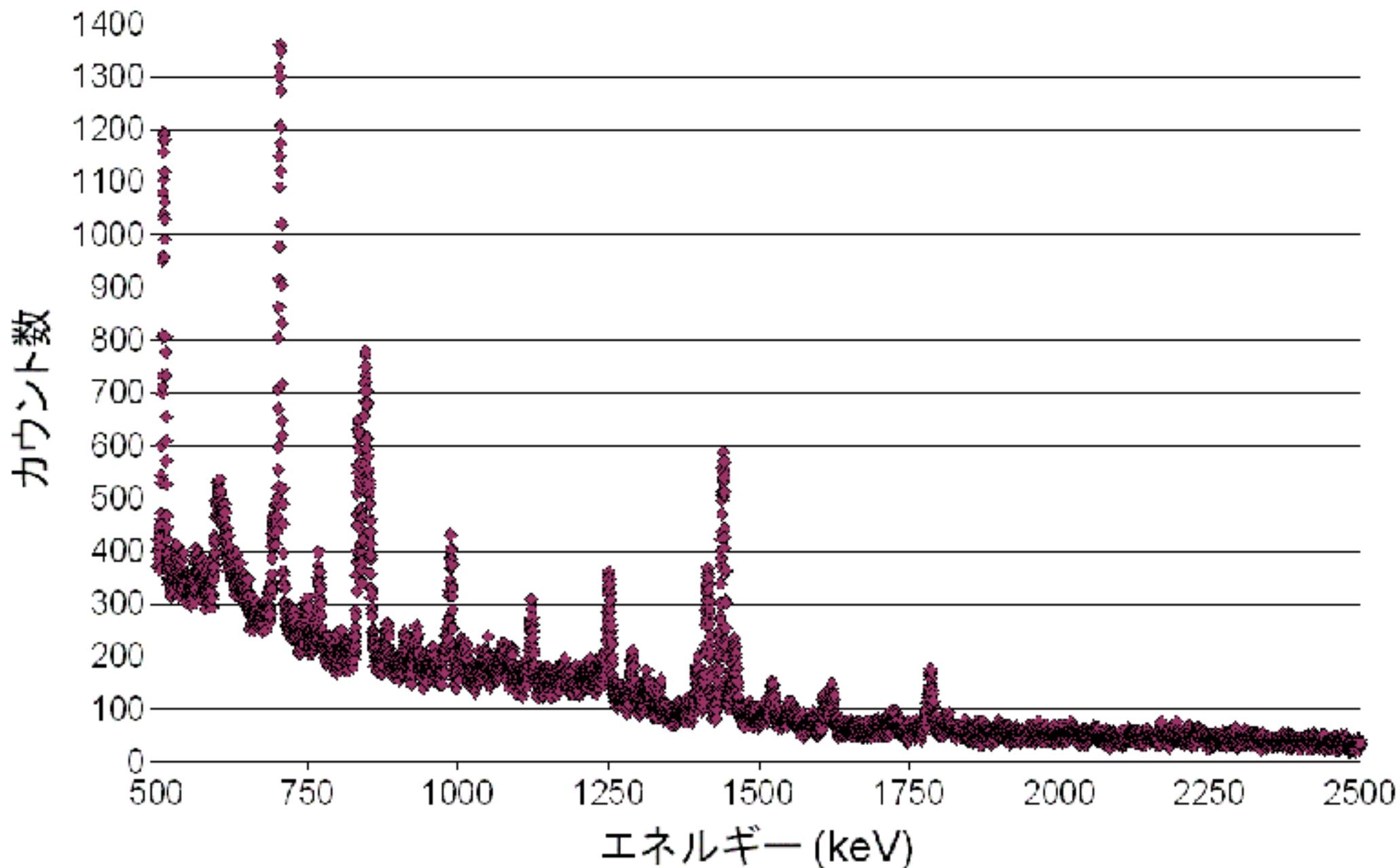


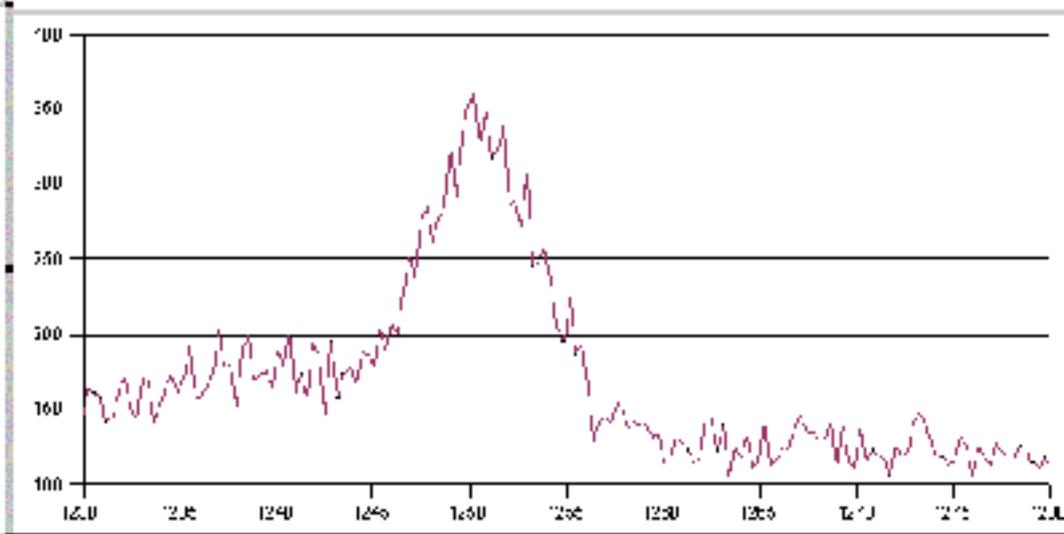
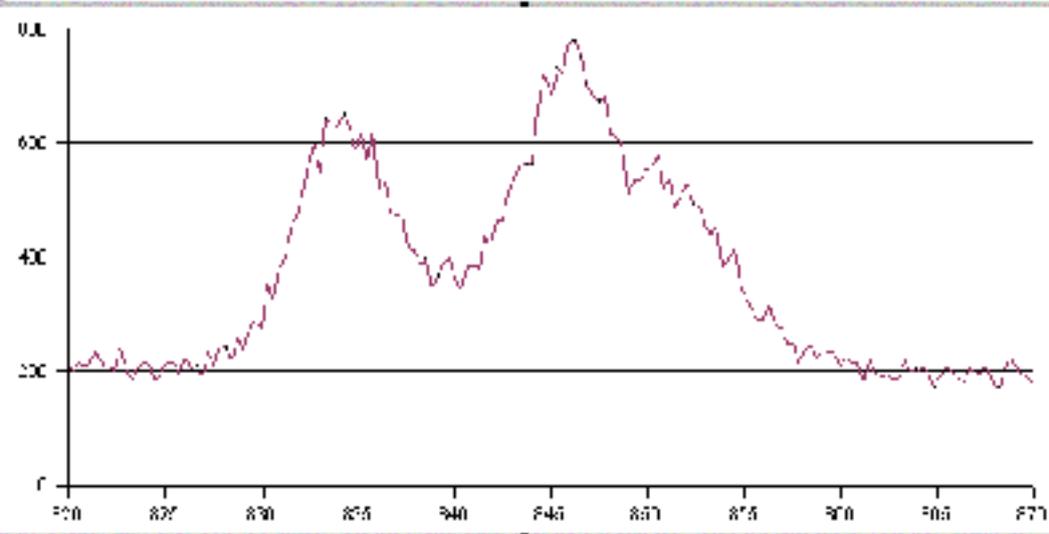
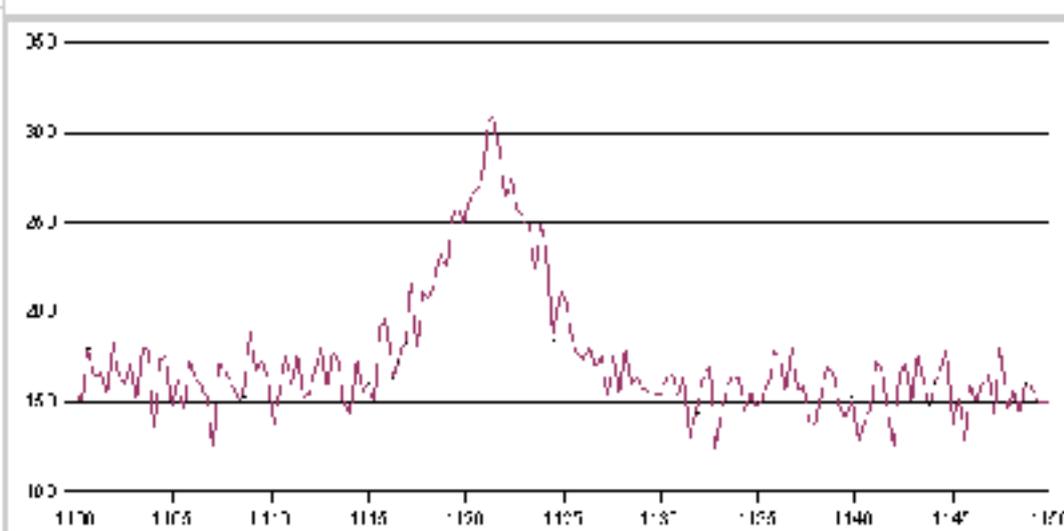
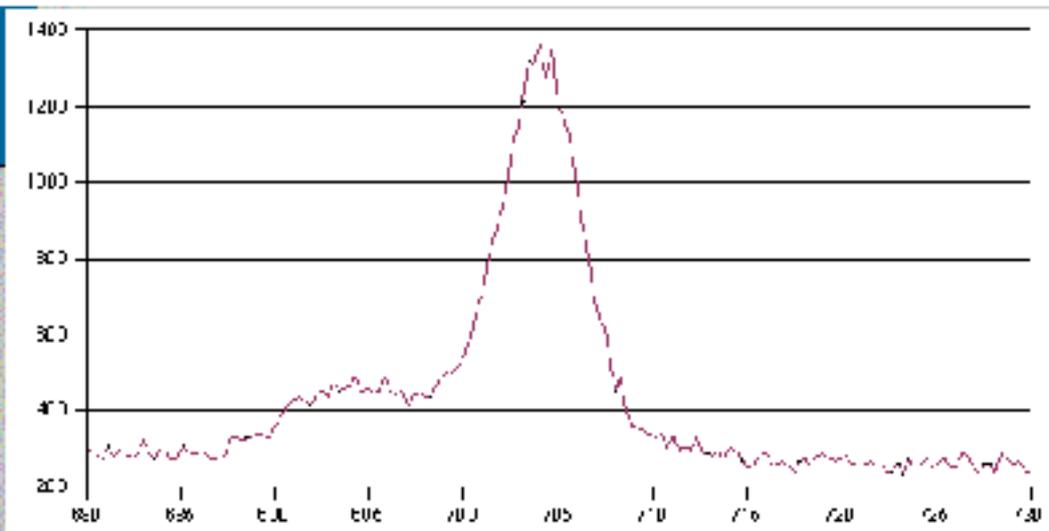
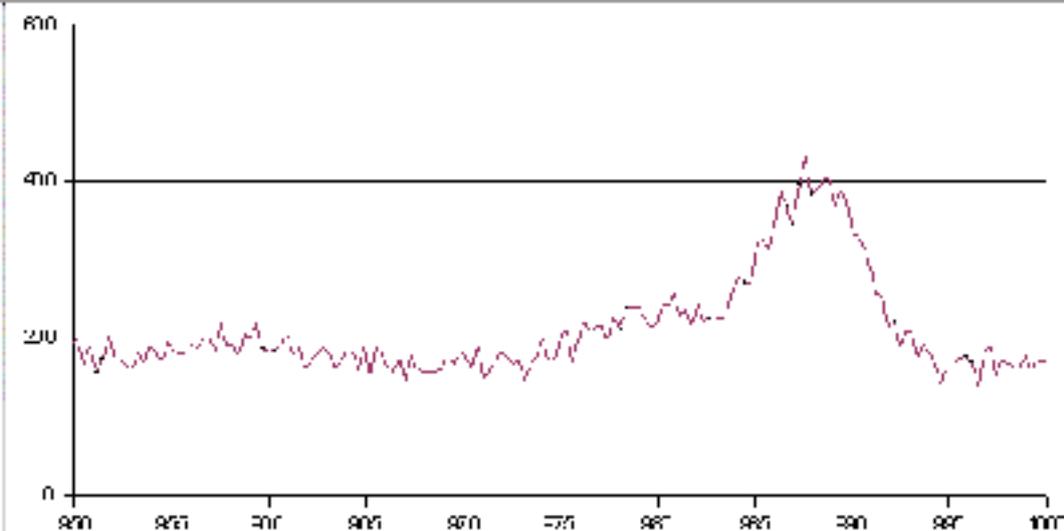
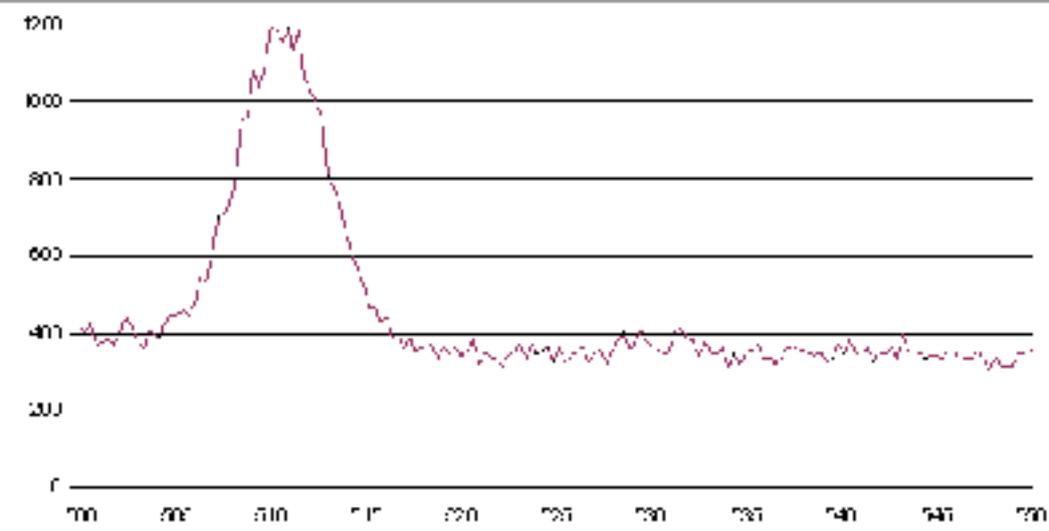
30 μ m ターゲットとVバルクの比較



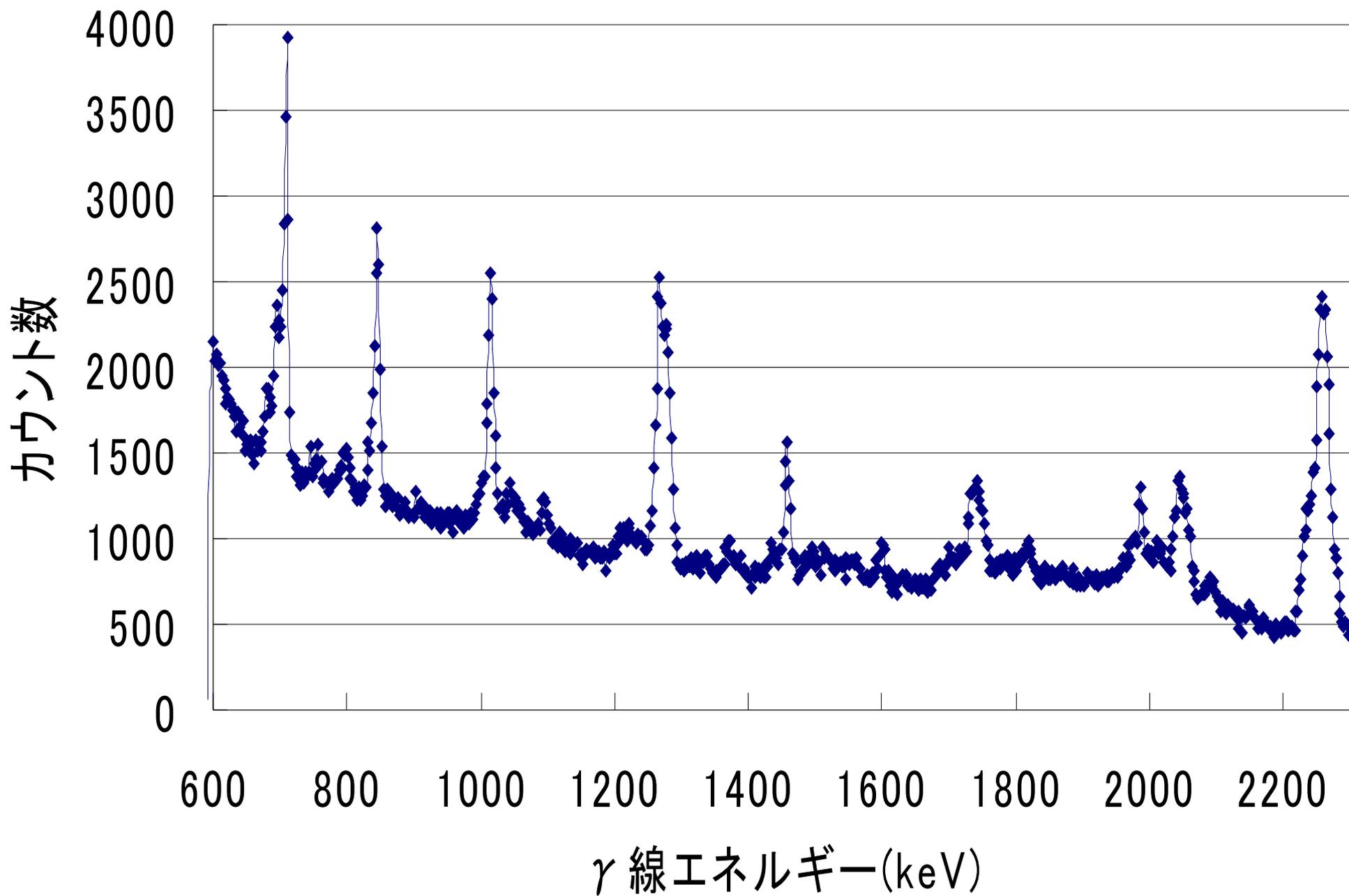
DSAMを使ってみる

Vバルクに α を入射

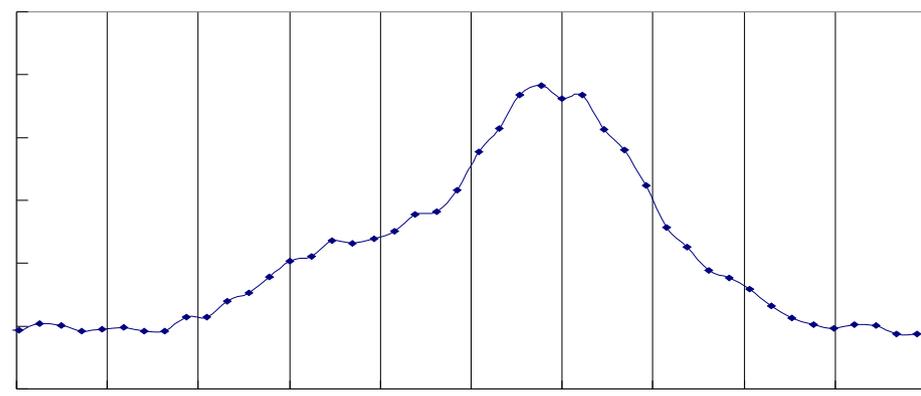
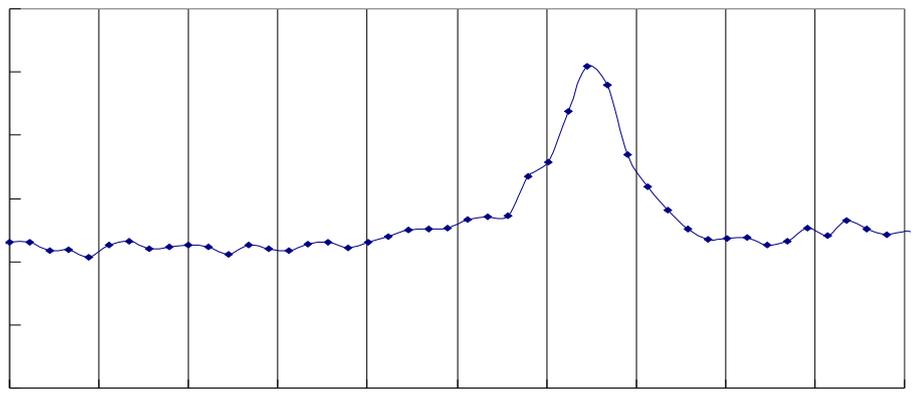
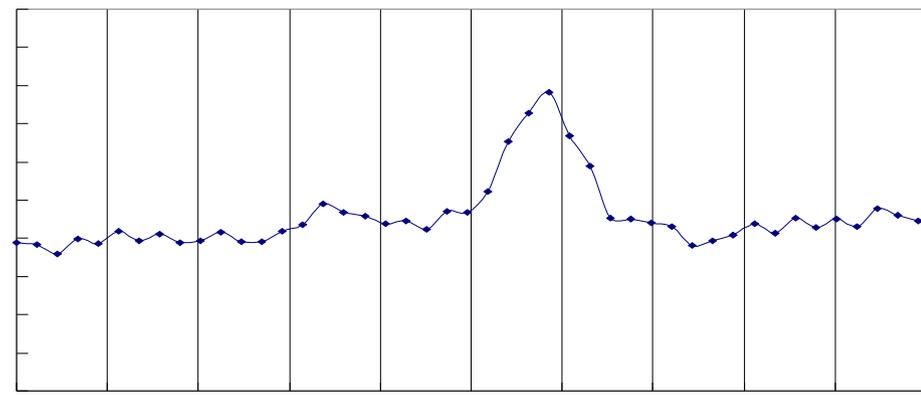
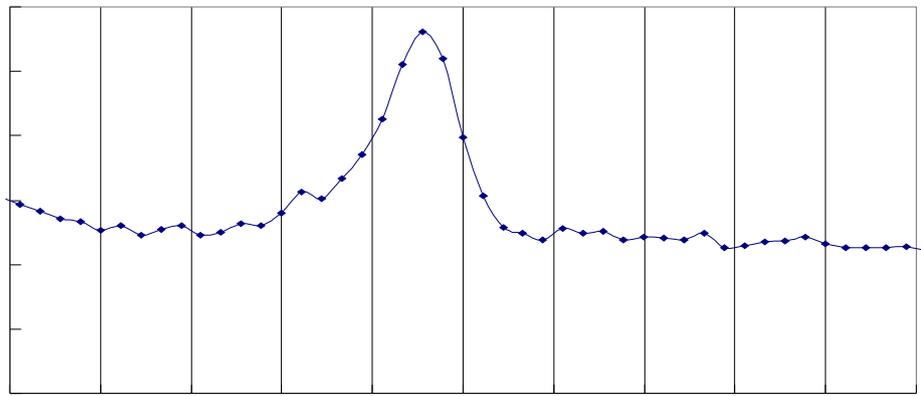
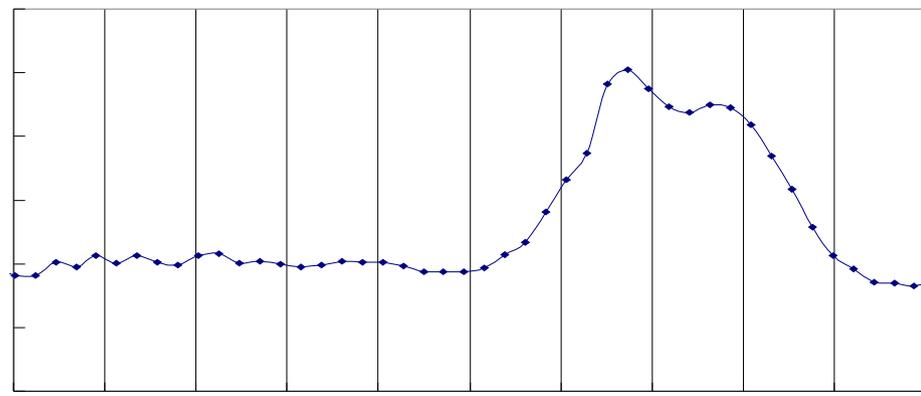
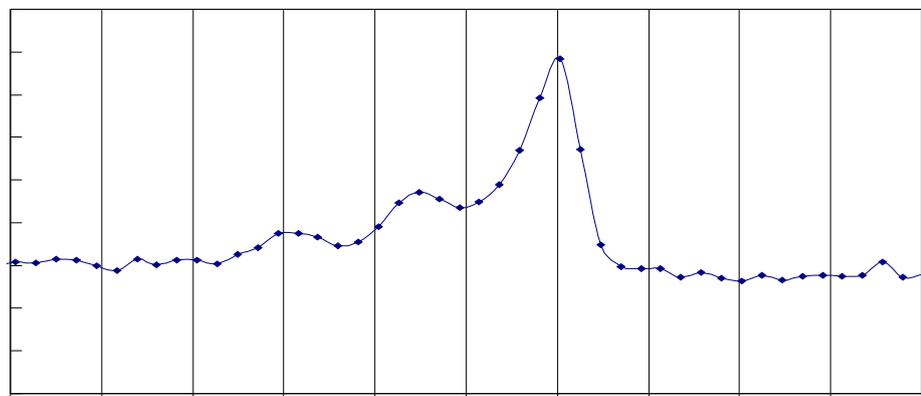




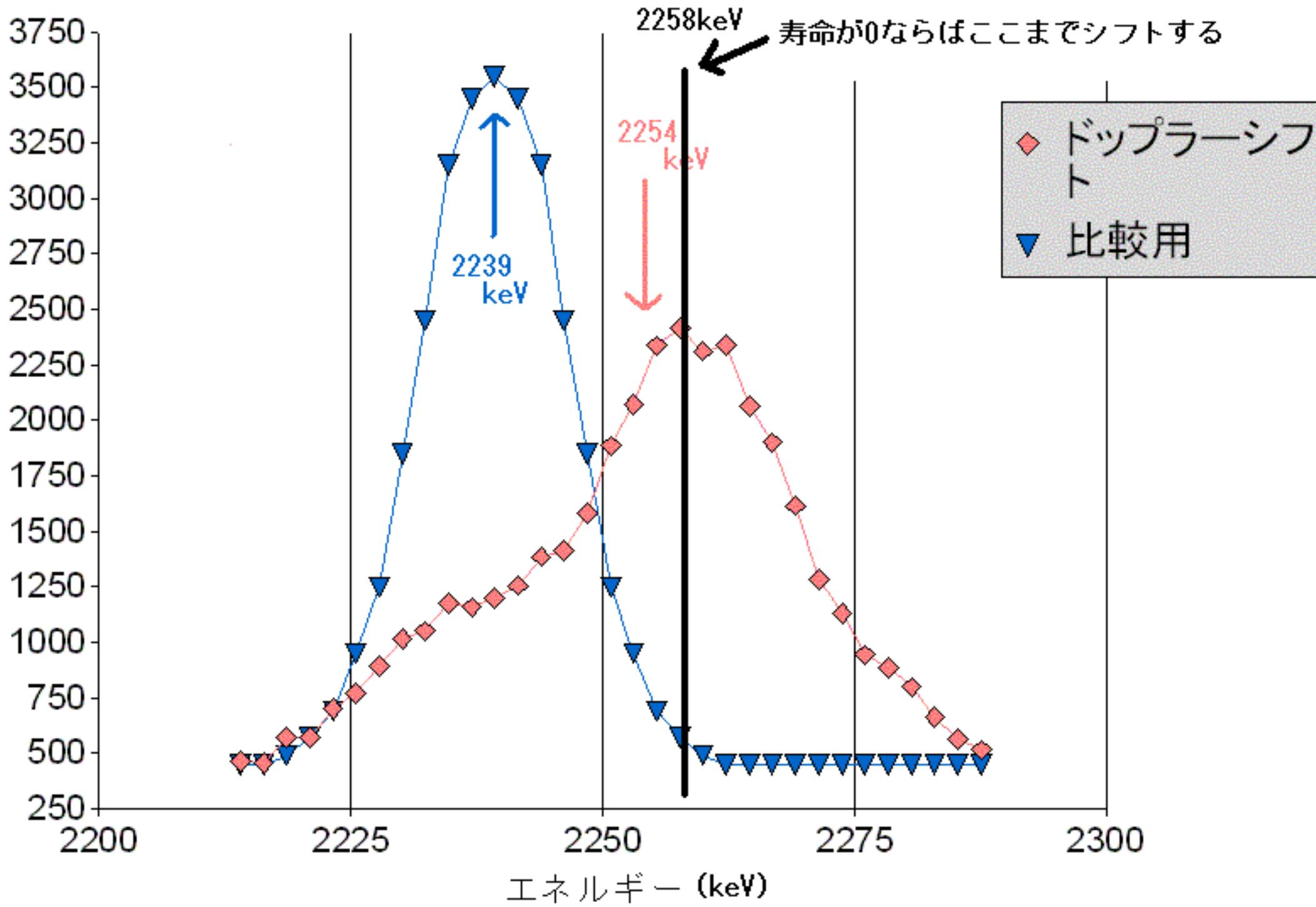
Alターゲットに α ビームを当てたときの γ 線エネルギー



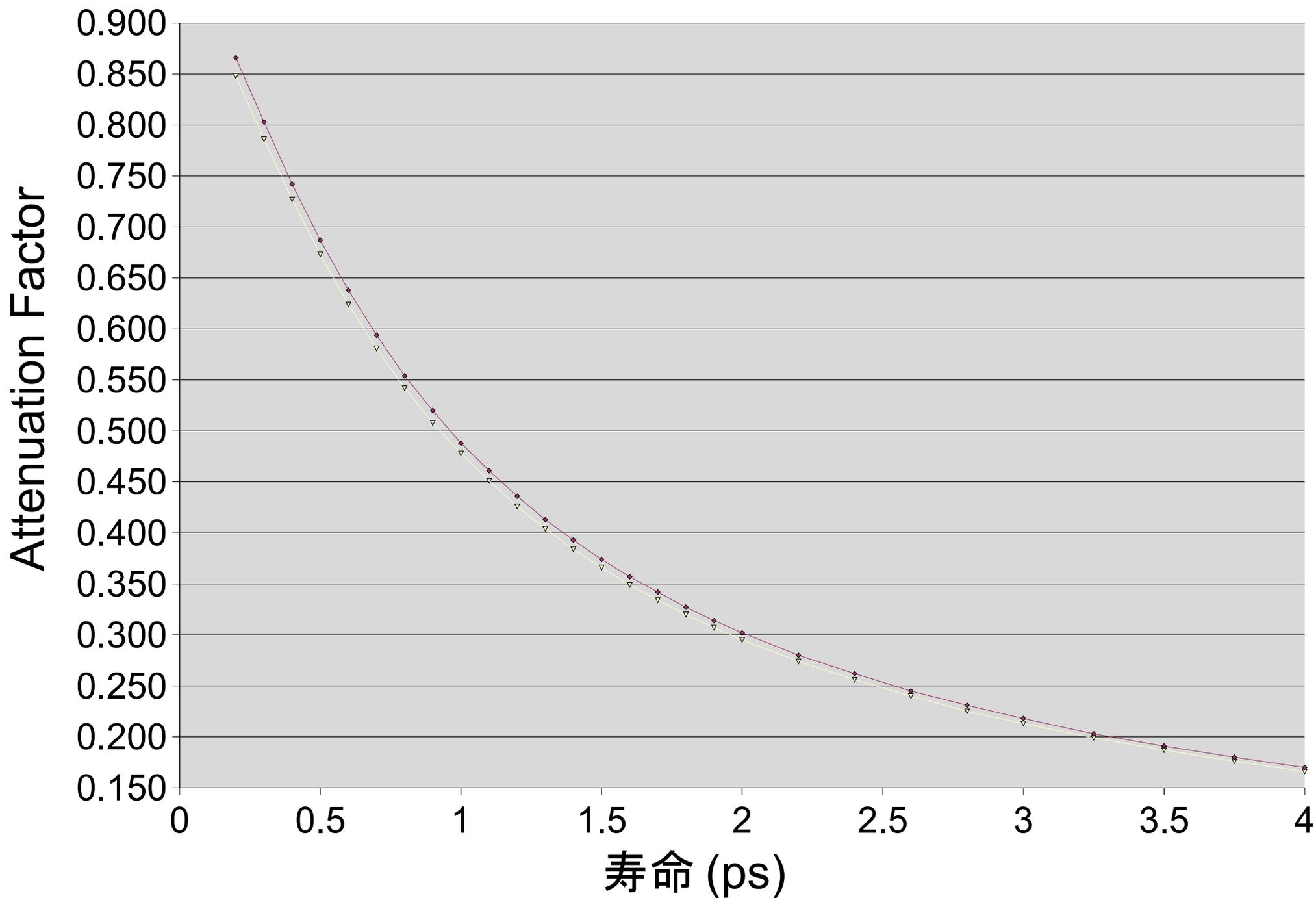
Alに α ビームを当てたときの γ 線(ピーク部分を拡大)



シフトしているピークとしていないピーク



Attenuation Factor と寿命の関係



寿命の算出

Attenuation Factor (減衰率)とは、核反応が起きた直後に γ 線を放出したときのドップラーシフトに対して、実際のドップラーシフトしたピークの重心のシフトがどれだけになったかの量である。これが大きいほど寿命は短いと考えられる。

グラフよりAttenuation Factor (減衰率)は0.8
よって寿命は0.3ps

前述の公式に当てはめると、Qモーメントは
 $Q_0 = 4.1 \times 10^{-22} \text{cm}^2$ となつて、
非常に大きすぎる。
Si核についてはこのモデルは適用できないと考えられる。

まとめ 原子核の形は見えた

Ge検出器の γ 線分光によりスペクトルを観察し、その情報から

JモーメントとQモーメントを求めた。

Jモーメントから δ 、 ρ を求めた。

その値から原子核の形、 I に対する変化の様子を知ることができた。

結論

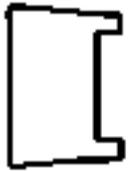
Erはパンケーキ型で I に対する変化は小さい

Crはパンケーキ型で I に対する変化は大きく、レモン型に移行していく（ここも訂正です。）

次回の実験ではRDM法によりCrの寿命を求める

ターゲットその2

真鍮ストッパ



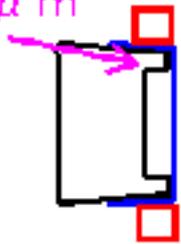
蒸着膜



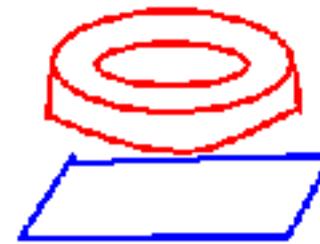
テフロンリング



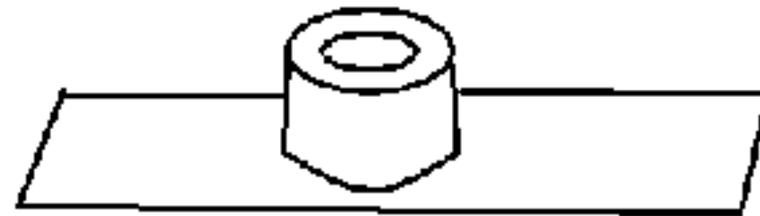
10 μm



テフロンリング



蒸着膜



真鍮ストッパー

ターゲットその3

