

高純度ゲルマニウム検出器を用いた
 β^+ 線最大エネルギーの測定

長 明 彦

報告番号 甲 第 3323 号

①

高純度ゲルマニウム検出器を用いた
 β^+ 線最大エネルギーの測定

長 明彦

1995年 12月

目次

1 序論	1
1.1 はじめに	1
1.2 β 線測定器	2
1.3 研究の目的	3
1.4 遷移領域の中性子欠損核の崩壊に関するこれまでの研究	6
1.4.1 $^{121,123,125}\text{Ba}$ の崩壊	6
1.4.2 $^{121-124,126}\text{Cs}$ の崩壊	6
1.4.3 $^{125,126,127}\text{Pr}$ の崩壊	6
1.5 論文の構成	7
2 陽電子線に対する HPGe 検出器の応答関数の作成	9
2.1 応答関数の作成の意義	9
2.2 陽電子線に対する HPGe 検出器の応答関数の作成	9
2.3 応答関数のエネルギー依存性	10
2.4 モンテカルロ法による計算機シミュレーション	13
3 β^+ 線スペクトルの解析	18
3.1 β^+ 線スペクトルの解析上の問題点	18
3.2 応答関数のモデル化	19
3.3 解析検討用 β^+ 線線源の作成と測定	19
3.4 解析の手順	21
3.5 結果	24
3.6 β^+ 線-消滅 γ 線同時計数測定法	29
4 短寿命中性子欠損核の β^+ 線測定	34
4.1 重イオン反応による中性子欠損核の生成および分離	34
4.2 β^+ 線測定	37

4.3	崩壊図式の作成	38
4.3.1	$^{121,123,125}\text{Ba}$ の崩壊	38
4.3.2	未知核種 $^{125,127}\text{Pr}$ の探索と ^{126}Pr の崩壊	40
5	結果 及び 議論	46
5.1	β^+ 線最大エネルギーの測定	46
5.1.1	Ba isotopes	46
5.1.2	Cs isotopes	50
5.2	崩壊図式の作成	58
5.2.1	$^{121,123,125}\text{Ba}$ の崩壊	58
5.2.2	未知核種 $^{125,127}\text{Pr}$ の探索と ^{126}Pr の崩壊	76
5.3	議論	82
6	まとめ	88
6.1	結論	88
6.2	今後	89
	謝辞	91
	参考文献	93
	発表論文一覧	99

第1章

序論

1.1 はじめに

1911年に物質の構成要素として原子核が発見されて以来様々な原子核の性質についての研究が行われている。現在、約2500の核種が発見されているが、その多くは安定領域から遠く離れていて α 崩壊や β 崩壊を繰り返して安定核種へと変換していく。今日まで多くの核模型が提唱されており、そこから予想される核種の数、核模型に依存するが6000に及ぶとされている。崩壊に伴い放出される α 線、 β 線、 γ 線を詳細に測定することにより我々は、それらの原子核の内部構造について様々な情報を得ることができる。

β 線スペクトルを測定し最大エネルギーを決定することにより、 β 崩壊で放出される全エネルギー、即ち Q_β 値を直接知ることができる。この物理量は β 崩壊前後の原子核の質量差を表し、ここから間接的に原子核の質量という基本的な物理量を知ることができる。安定領域から離れた原子核について精度良く β 線最大エネルギーを測定することにより、原子核の存在しうる範囲を予測する各種の原子核模型・質量公式に対して、その検証・改善のためのデータの提供ができる。

重イオン加速器による核反応によって陽子ドリップライン近傍の中性子欠損核についてもその原子核構造を調べるのが可能となった。その主たるものは核反応やIn-beamでの原子核分光であり、崩壊からの低エネルギー励起準位の研究はあまり行われていない。特に短寿命中性子欠損核の β^+ /軌道電子捕獲(ϵ)崩壊の Q 値(Q_ϵ)については現在ほとんどデータが提供されていない。

原子質量の測定には、磁場・電場を利用してイオンの形で捕獲・保持し、そのときのパラメータから直接質量を求める方法と、崩壊や核反応の Q 値から間接的に求める方法がある。最近の研究では、大規模な装置による直接質量測定によって精度の高い結果が出されている。ヨーロッパ連合原子核研究機関(CERN¹)ではイオントラップ法を用いて不

¹設立母体であった Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire の略称が定着したもの。European Organization for Nuclear Research が現在の名称である。

安定核種イオンを閉じこめて原子質量の測定を行っている (ISOLDE/CERN : Penning trap mass spectrometer ISOLTRAP)。またドイツの重イオン研究所 (GSI; Gesellschaft für Schwerionenforschung) では、貯蔵リング (ESR; Experimental Storage Ring) に不安定核種を周回・貯蔵し、飛行時間法 (TOF method; time of flight method) を用いて原子質量を測ることが計画されている。これらの実験装置では、データの信頼性を上げるために、標準となる質量を持つ核種を含んだ広範囲にわたる系統的な実験が要求され、その不安定核種ビームを作り出すための大規模の装置が必要である。

1.2 β 線測定器

β 線最大エネルギー測定に用いられる検出器は大別して、磁場を利用した磁気スペクトロメータと、プラスチックシンチレーション検出器、そして半導体検出器としてリチウムドリフトシリコン (Si(Li)) 検出器や高純度ゲルマニウム (HPGe) 検出器に分けられる。

磁気スペクトロメータは、分解能が良く β 線スペクトルの形状を損なうことなく測定することができる。しかし、基本的にはシングルチャンネル的な測定を行うため検出効率が低く、また装置が大規模なため短寿命核種への適用は難しい。そのため、マルチチャンネル測定が可能なプラスチックシンチレーション検出器、そして半導体検出器として Si(Li) 検出器や HPGe 検出器が短寿命核種の β 線測定に用いられる。

これまでの HPGe 検出器を β^- 線測定器として用いた中性子過剰核の β^- 線最大エネルギーの測定についての研究 [1-6] でその有用性が示されている。本研究では β^- 線最大エネルギー測定の研究を発展させて β^+ 線測定に HPGe 検出器を用いることにした。

β^+ 線測定器としての HPGe 検出器には次のような長所が挙げられる。

1. 測定できるエネルギー領域が広く ($\sim 10\text{MeV}$) エネルギー較正が γ 線を測定することで精度良くできる
2. 電子線に対するエネルギー分解能が良い ($\sim 20\text{keV}$)
3. 磁気スペクトロメータに比べ検出効率がよく線源強度がそれほど強い必要がない ($\sim \text{kBq}$)
4. 小規模で使い勝手がよい

一方 HPGe 検出器を用いて β 線最大エネルギーを測定した場合、ゲルマニウムと電子線の相互作用が複雑なため β 線スペクトルが歪められてしまうことが問題になってく

る [7, 8]。β⁺ 線 (陽電子線) の場合、Ge 結晶中で消滅した陽電子の消滅 γ 線の寄与によって相互作用がさらに複雑になるため、β⁺ 線スペクトルの形状を補正するための応答関数を決定することが重要である。しかし HPGe 検出器の電子線・陽電子線に対する応答関数を実験的に測定した研究はほとんど行われていない。陽電子線に関しては Dautet の会議録 [9] があるが、詳しい報告はなされていない。一般的にはモンテカルロ法でゲルマニウム結晶に入射した電子線の動向をシミュレーションし応答関数を計算することが多い [7]。

陽電子線測定での応答関数を単純化する一つの方法として、Ge 結晶中で消滅した陽電子のうち、その消滅 γ 線のエネルギーを Ge 結晶に付与しなかった事象を取り出す方法が考えられる。このような事象での単一エネルギーの陽電子線に対する応答関数は Fig. 1-1 に示すように電子線に対するものと同じになると仮定することができ、解析が単純になることから、得られる結果に対する信頼性が上がることを期待される。同様の研究は Keller [10] によって行われている。彼らは Si(Li) β⁺ 線検出器を BGO 消滅 γ 線検出器対で囲み、検出器対に陽電子の消滅 γ (γ[±]) 線が検出される事象、即ち β⁺ 線検出器に γ[±] 線がエネルギー付与していない事象を取り出すことで γ[±] 線エネルギーの加算の影響を除いた β⁺ 線測定システムを作っている。この方法の短所は、消滅 γ 線との同時計数測定を行うことによるシステムとしての検出効率が低いことである。

1.3 研究の目的

本研究においては、安定領域から中性子欠損側に離れた不安定核の原子質量決定を研究の対象とした。Fig. 1-2 に研究対象領域の核図表を示す。

単一エネルギーの陽電子線に対して応答関数を実験的に作成し、その応答関数を用いて β⁺ 線最大エネルギーを解析した場合の系統的な誤差を定量的に押さえた。測定対象には、球形核から変形核への遷移領域の短寿命中性子欠損核でこれまで多くの原子質量測定が行われて精密な評価がなされている Cs の同位体 (^{121-124,126}Cs) と、現在まであまり測定例のない Ba の同位体 (^{121,123,125}Ba) を選んだ。β⁺ 崩壊に伴い放出される β⁺ 線の最大エネルギーを精密測定して Q_{β^+} を求め Cs 同位体の原子質量を基準に Xe, Ba の同重体の原子質量を決定する。さらに、中性子欠損側の原子核存在限界近傍の研究を行うため、未知核種を含む ^{125,126,127}Pr の崩壊について崩壊図式作成を目的とする。

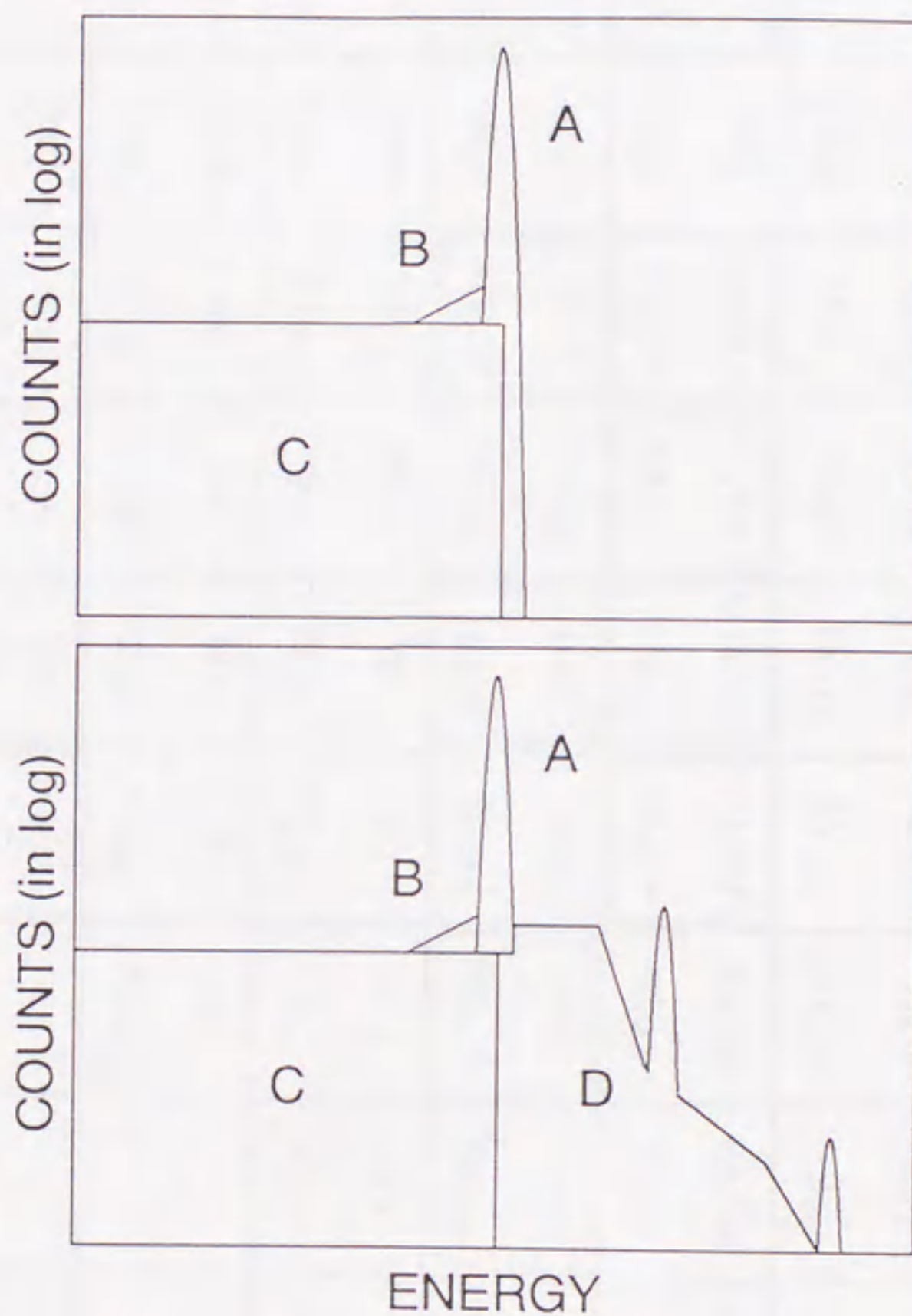


Fig. 1-1: Schematic view of response function for monoenergetic electron and positron. A: Full energy peak. B: Bremsstrahlung escape. C: Side and back scattering. D: Summation of annihilation photons.

1.4 遷移領域の中性子欠損核の崩壊に関するこれまでの研究

1.4.1 $^{121,123,125}\text{Ba}$ の崩壊

β^+ 線測定を行うには、 β^+ 線の測定とともに、注目した β^+ 遷移の遷移する準位やその準位から発する γ 線、解析に際して混入する恐れのある他の β^+ 遷移などの崩壊図式に関する情報が必要である。必要な崩壊図式がこれまで報告されていない、もしくは充分でない $^{121,123,125}\text{Ba}$ の崩壊については β^+ 線測定に合わせて崩壊図式の作成を行った。

^{121}Ba に関してはIchikawa [11]によって崩壊図式が提案されているが、周辺核種の崩壊図式の系統性から導かれたものでコインシデンス関係が確定していない。 Q_β はBogdanov [12]による β^+ 遅発放出陽子のエネルギーと陽子分離エネルギーの評価値[13]から導出されているが、 β^+ 線最大エネルギーはこれまで測定されていない。 ^{123}Ba に関してはArlt [14]による崩壊の研究とMarguier [15]による ^{123}Cs の励起準位の研究が行われているが、互いに一致していない。 β^+ 線最大エネルギーはこれまで測定されていない。 ^{125}Ba に関してはArltとD'Auria [16]によって崩壊の研究が行われている。現在、崩壊図式としてはArltの提案したものが採用されている。 Q_β はD'Auriaの報告がある。

1.4.2 $^{121-124,126}\text{Cs}$ の崩壊

中性子欠損側のCs同位体の Q_β に関してはWestgaard [17]、Alkhazov [18]によって系統的な研究が行われている。

$^{121,m,g}\text{Cs}$ の崩壊の研究はSoifa [19]、Genevey [20]によって行われ、 ^{121m}Cs の励起エネルギーについてもGeneveyが行った内部転換電子の測定によって決定されている。 Q_β はWestgaard, Sofia, Alkhazovの報告がある。 ^{122}Cs に関しては、Droste [21] Genevey [22]によって崩壊の研究が行われている。 Q_β はWestgaard, Alkhazovの報告がある。 ^{123}Cs に関しては、Sofia, Marguierによって崩壊の研究が行われている。 Q_β はWestgaard, Sofia, Alkhazovの報告がある。 ^{124}Cs に関しては、Droste, Charvet [23]によって崩壊の研究が行われている。 Q_β はWestgaard, Alkhazovの報告がある。 ^{126}Cs は、Pathak [24]、Mantica [25]によって崩壊の研究が行われている。 Q_β はWestgaard, Pathak, Alkhazovの報告がある。

1.4.3 $^{125,126,127}\text{Pr}$ の崩壊

中性子欠損側のPr同位体についての最近の報告では、 ^{129}Pr の崩壊図式が作られている[26]。偶核では $^{128}\text{Ce}_{70}$ について、基底準位の回転バンドと γ 振動バンド [27]、 $^{124}\text{Ce}_{56}$

[28] と $^{126}\text{Ce}_{68}$ [29, 30] に関しては基底準位の回転バンドが報告されている。 ^{125}Pr , ^{127}Pr は半減期や崩壊に伴う γ 線等が報告されていない未知核種である。陽子結合エネルギーの質量依存性を Fig. 1-3 に示す。この領域の Q_β の測定により陽子結合エネルギーが負となる陽子ドリップラインに対する質量公式の予測がどの程度正しいかが判定でき、原子核の存在範囲に関する情報を得ることができる。

1.5 論文の構成

第2章では、HPGe 検出器を β 線測定器として使用するための特性(応答関数)測定について述べる。第3章では、 Q_β の精度良く測定されている β^+ 線線源を測定し、得られた β^+ 線スペクトルについて解析方法の検討・考察を行う。第4章では、日本原子力研究所東海研究所の 20 MV タンデム加速器に設置されたオンライン同位体分離器及び同研究所高崎研究所の AVF サイクロトロン加速器に設置されたオンライン同位体分離器での本論文の中心の実験である短寿命中性子欠損核種の崩壊に関する研究、 β^+ 線最大エネルギー測定について述べる。第5章では測定結果について述べるとともに議論を行う。最後に第6章では、本研究のまとめを行い、今後の課題について述べる。

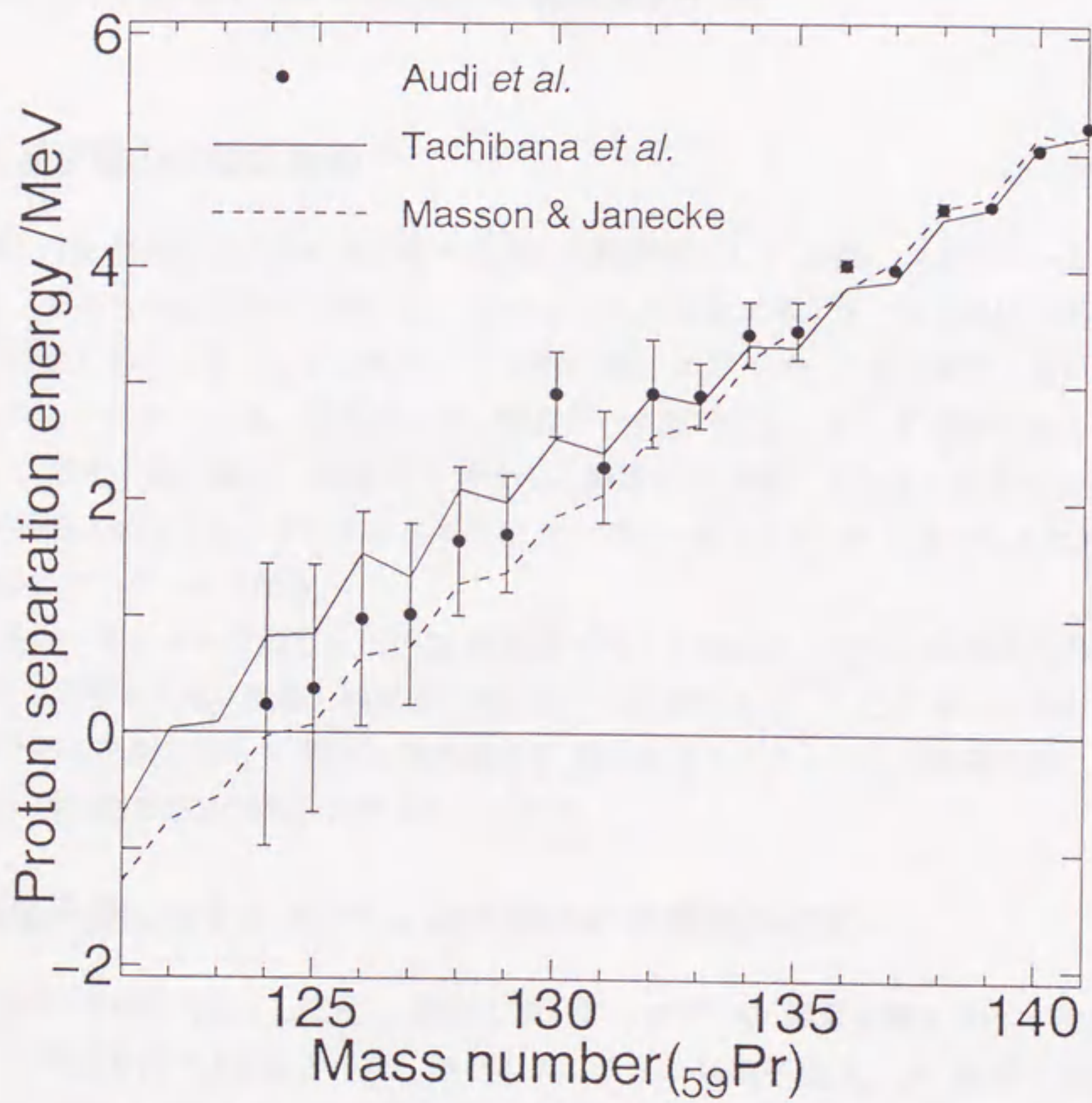


Fig. 1-3: Proton separation energies versus mass number of Pr. Closed circles show predicted values.[31] Solid and broken lines show results of mass formulae.[32, 33]

第2章

陽電子線に対する HPGe 検出器の応答関数の作成

2.1 応答関数の作成の意義

電子線は Ge 結晶中に入射すると様々な相互作用を起こし、結晶にエネルギーを与えながら、あるものは結晶中で停止し、またあるものは全エネルギーを結晶に付与する前に再び結晶から出ていってしまう。そのため単一エネルギーの電子線の入射に対して得られるスペクトルは、全エネルギー吸収ピークだけにとどまらず複雑な形となる。加えて陽電子線の場合、結晶中で停止した陽電子が消滅したときに発生する消滅 γ 線が同時に吸収され、そのエネルギー(0.511 MeV γ 線 \times 2本)が加算されるため、さらに複雑なスペクトルとなる。

β^- 線最大エネルギーの測定を HPGe 検出器で行うためには、HPGe 検出器の陽電子線に対する応答を的確に把握し検出器の較正を行う必要がある。ここで単一エネルギーの陽電子線の入射に対して HPGe 検出器から得られるスペクトルを「陽電子線に対する HPGe 検出器の応答関数」と呼ぶことにする。

2.2 陽電子線に対する HPGe 検出器の応答関数の作成

応答関数の作成の方法としては、実際に単一エネルギーの陽電子線を HPGe 検出器に入射し測定を行う方法をとった。単一エネルギーの陽電子線は、 β^+ 線源の放出する連続 β^+ 線から β 線スペクトロメータを使って疑似的に取り出した。実験には、京都大学原子炉実験所(KURRI)付置のセクタ型二重収束スペクトロメータ($\rho=34\text{cm}$)[34]を使用した。この装置により取り出しうる単一エネルギー陽電子線のエネルギー範囲は50 keV から5 MeV である。スペクトロメータの概略図および測定の配置を Fig. 2-1 に示す。使用した β^+ 線源は、 ^{68}Ge - ^{68}Ga ($T_{1/2} = 270.8\text{d}$, $E_{\beta_{\text{max}}} = 1.9\text{ MeV}$)と $^{34\text{m}}\text{Cl}$ ($T_{1/2} = 32.2\text{min}$, $E_{\beta_{\text{max}}} = 4.5\text{ MeV}$)である。 ^{68}Ge - ^{68}Ga 線源は日本アイソトープ協会より購入した。 $^{34\text{m}}\text{Cl}$ 線源は KURRI の35 MV 電子リニアック[35]から得られる制動 γ 線で、ポ

Table 2-1: Experimental condition of KURRI-LINAC for ^{34m}Cl production.

Energy	: ~ 27 MeV
Current	: $\sim 80\mu\text{A}$
Repeat rate	: ~ 80 /sec.
Sample	: polyvinilidene chloride $-(\text{CH}_2\text{CHCl})_n-$
Reaction	: $^{35}\text{Cl}(\gamma, n)^{34m}\text{Cl}$

リ塩化ビニル¹または塩化ナトリウムを、照射して $^{35}\text{Cl}(\gamma, n)$ 反応で作った。照射は試料を Al カプセルに入れ気送管で照射位置まで送って行った。照射条件を Table 2-1 に示す。

使用した HPGe 検出器は、ORTEC 社製の プレナ型 HPGe 検出器 LEPS (Low Energy Photon Spectrometer; $16\text{mm}\phi \times 10\text{mm}$, $50\mu\text{m}$ thick Be window) である。測定は $0.8\sim 3.5$ MeV のエネルギー範囲で行った。このうち $0.8, 1.2, 1.6$ MeV の 3 点は ^{68}Ge - ^{68}Ga 線源を用いて、 $2.0, 2.5, 3.0, 3.6, 3.8$ MeV の 5 点は ^{34m}Cl 線源を用いて行った。測定時間は ^{68}Ge - ^{68}Ga 線源で $4.3\sim 9.2$ 時間、 ^{34m}Cl 線源では 1 回の照射で得られる線源について $10\sim 60$ 分間測定しそれを約 10 回繰り返した。各測定点における 応答関数の全計数は $2.0 \times 10^4 \sim 5.5 \times 10^5$ である。Fig. 2-2 に測定したスペクトルを示す。電子線に対する 応答関数と同様の、全エネルギー吸収、側方・後方散乱、制動放射に起因するスペクトルに加え、消滅 γ 線 (0.511 MeV γ)、消滅 γ 線のエネルギー (0.511 MeV) を 1 つ完全に吸収したピーク (以後 シングル・サムピークと呼ぶ) と 2 つ完全に吸収したピーク (以後 ダブル・サムピークと呼ぶ) のスペクトルが現れている。

2.3 応答関数のエネルギー依存性

実験によって得られた 応答関数を大きく Fig. 2-3 のように 4 つの成分に分けた。A 部は入射した単一エネルギーの陽電子線の全エネルギーが吸収された部分である。B 部は入射した陽電子がゲルマニウム結晶中での制動放射により一部エネルギーを失った部分である。C 部は陽電子がゲルマニウム結晶により側方・後方に散乱され全エネルギーを付与する前に結晶外に出てしまった部分である。D 部はゲルマニウム結晶中で停止するまでに陽電子が与えたエネルギーと、その陽電子が消滅したとき放出される消滅 γ 線がゲルマニウム結晶に与えたエネルギーが加算された部分である。

¹ポリ塩化ビニルをリニアックで照射した場合、化学結合が切れ塩素ガスを発生する。化学的に危険である上放射性のガスが含まれるため、最初のテスト実験以後は照射試料を結合の強い塩化ナトリウム (NaCl) に変更した。

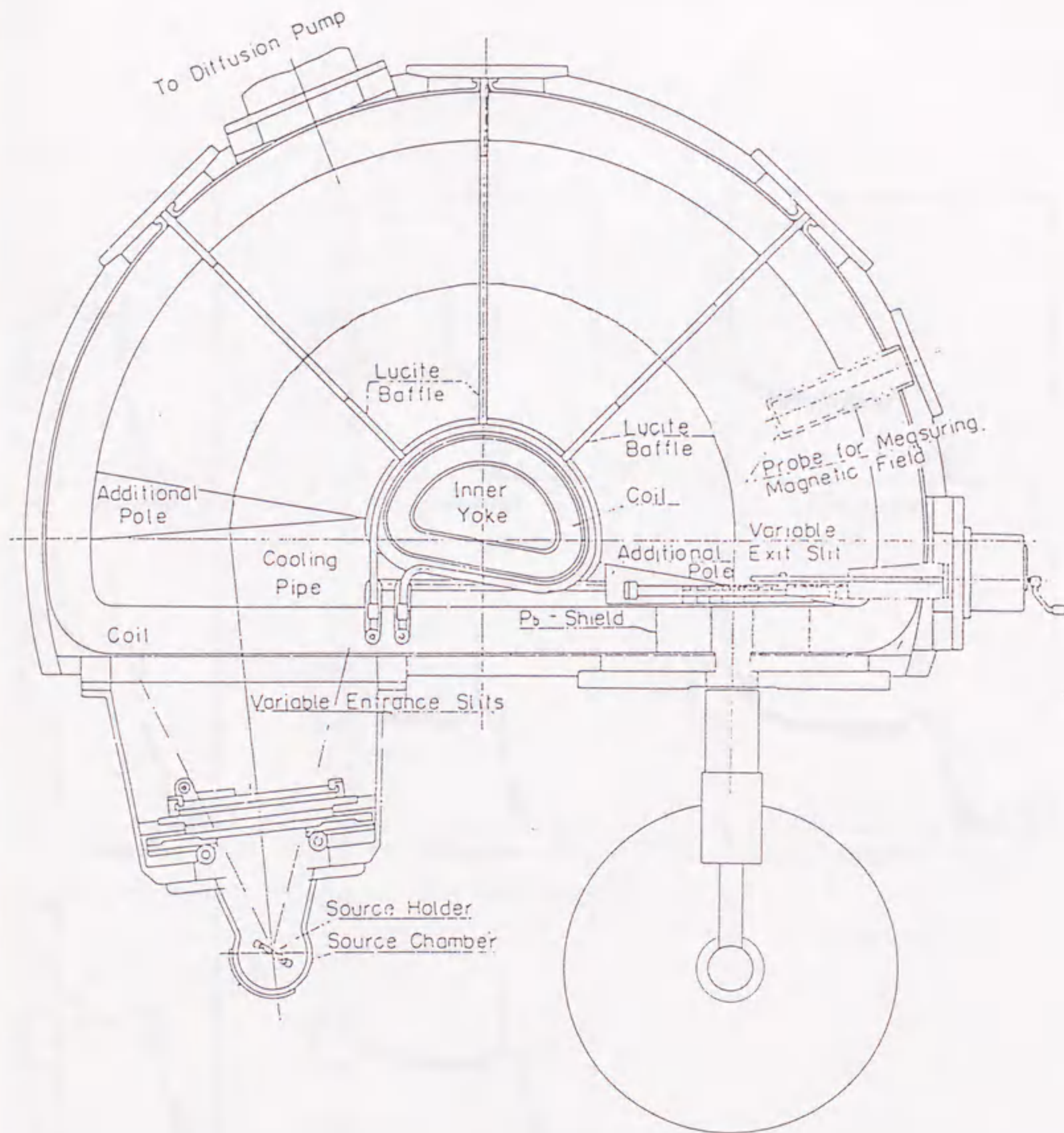


Fig. 2-1: Schematic view of the sector type double focusing beta-ray spectrometer at KURRI.

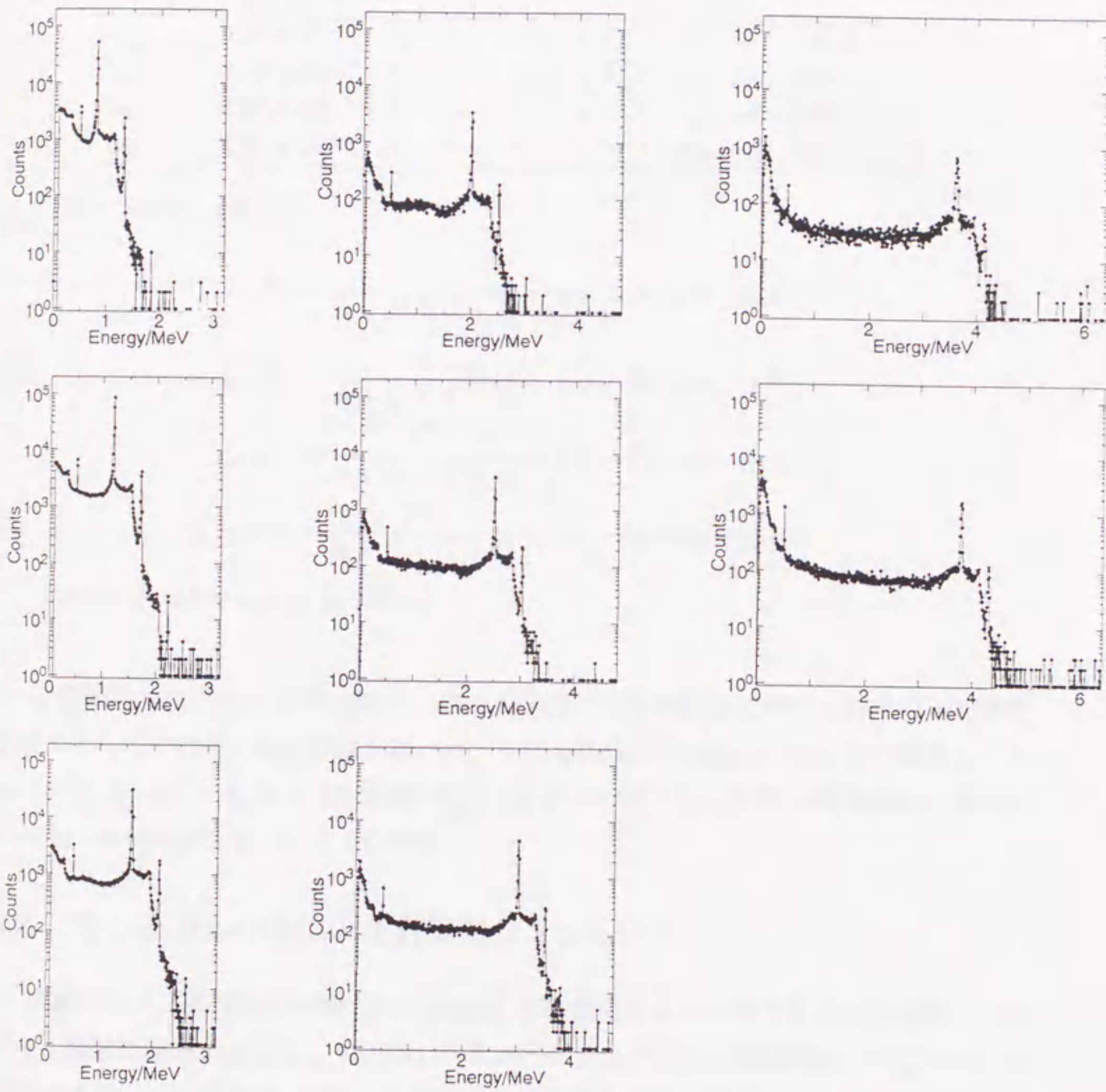


Fig. 2-2: Experimental response function of an HPGe detector ($16 \text{ mm}^\phi \times 10 \text{ mm}^t$) for monoenergetic positrons.

Table 2-2: Parameters for describing the energy dependence of relative intensities in the response functions of an HPGe detector(16mm ϕ \times 10mm t) for monoenergetic positrons.

α_A	$= 5.23 \times 10^{-2}$	β_A	$= -5.30 \times 10^{-1}$	γ_A	$= 4.22 \times 10^{-1}$
α_B	$= 2.89 \times 10^{-2}$	β_B	$= 3.10 \times 10^{-2}$	γ_B	$= 3.61 \times 10^{-1}$
α_C	$= 8.25 \times 10^{-1}$	β_C	$= 7.15 \times 10^{-1}$	γ_C	$= 4.40 \times 10^{-1}$
α_D	$= 7.49 \times 10^{-2}$	β_D	$= -2.01 \times 10^{-1}$	γ_D	$= 3.92 \times 10^{-1}$

The fitted curves are

$$I_A(E) = \frac{A}{A+B+C+D} = \alpha_A - \beta_A \exp(-\gamma_A E),$$

$$I_B(E) = \frac{B}{A+B+C+D} = \alpha_B - \beta_B \exp(-\gamma_B E),$$

$$I_C(E) = \frac{C}{A+B+C+D} = \alpha_C - \beta_C \exp(-\gamma_C E),$$

$$I_D(E) = \frac{D}{A+B+C+D} = \alpha_D - \beta_D \exp(-\gamma_D E),$$

where E is the energy in MeV.

応答関数を以上のように分割し、各々の部分の全体の計数に対する割合の入射陽電子線エネルギーに対する依存性を調べた。各部分の強度を Table 2-2 に示す関数とパラメータ $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i (i = A, B, C, D)$ を用いてフィッティングした。また、応答関数の各部分のエネルギー依存性を Fig. 2-4 に示す。

2.4 モンテカルロ法による計算機シミュレーション

実験による応答関数の作成では実験装置・実験環境により作成できる応答関数のエネルギー領域に制限が生じる。KURRIの β スペクトロメータの場合測定できるエネルギー領域は50 keV~5 MeVであり β 線測定で予想される6 MeV以上の β 線に対する応答関数を作成することはできない。また、HPGe検出器による β 線測定を一般化する際に、各々の検出器に対して実験的に応答関数を作ることが望ましいが、実験環境等の条件であらゆるグループがこの実験を行うことは難しい。計算機シミュレーションによる応答関数の作成の意義は、実験的に応答関数を作成することのできない場合に、その応答関数を再現・予測することにある。応答関数の問題は検出器の特性としての観点からも興味ある問題である。

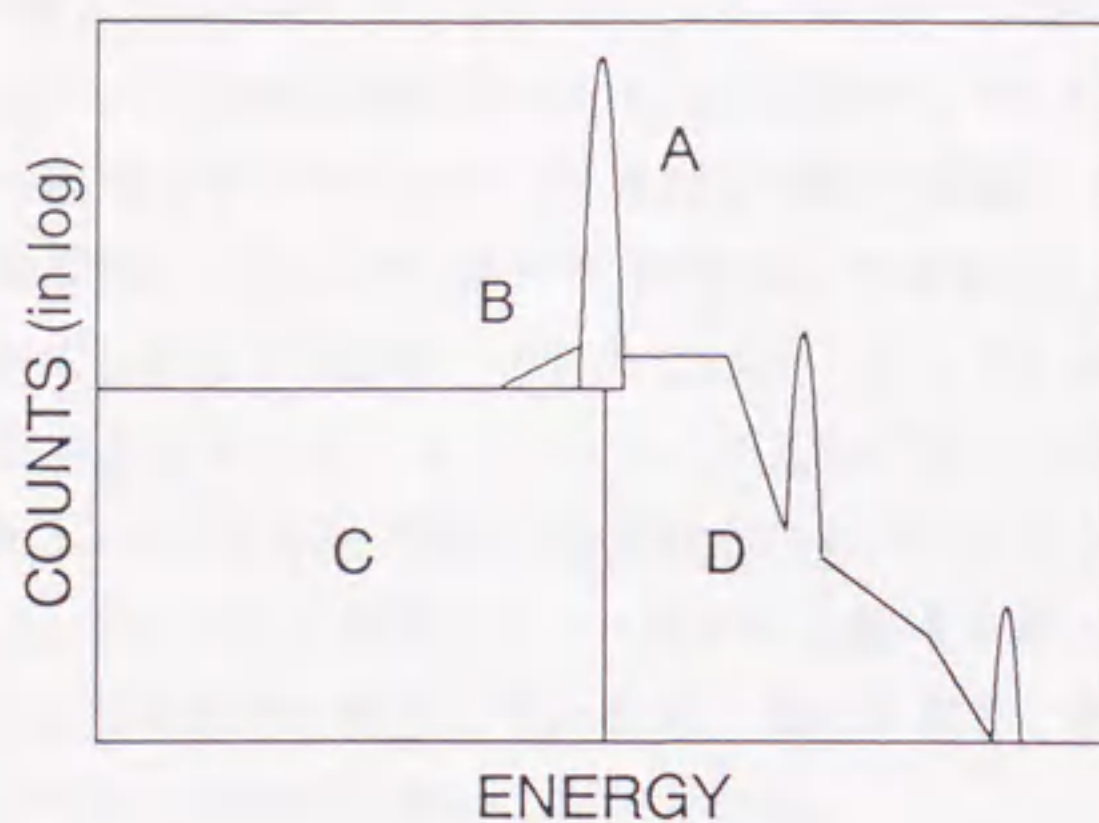


Fig. 2-3: Schematic view of response function. A: Full energy peak. B: Bremsstrahlung escape. C: Side and back scattering. D: Summation of annihilation photons.

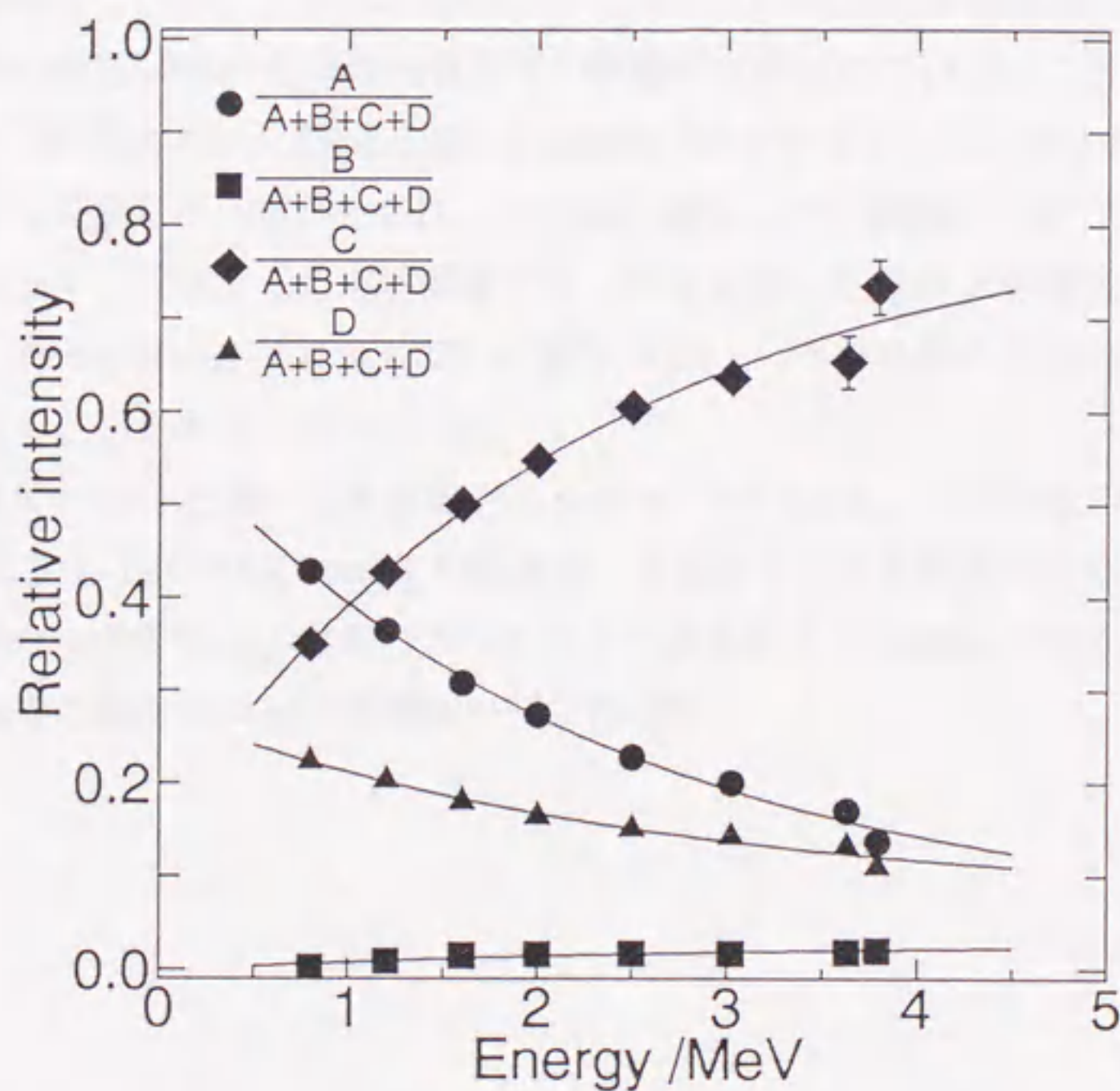


Fig. 2-4: Energy dependence of relative intensities of A, B, C and D to total counts of response function. They are fitted by following functions of the incident positron energy, E . $I_i(E) = \alpha_i - \beta_i \exp(-\gamma_i E)$ (E ; in MeV: $i = A, B, C$ and D). Each parameter is summarized in table 2-2.

応答関数の計算機シミュレーションの一例として、既存の応答関数の作成コードである HICOAK code-I[7] に若干の改良を加えたものを用いた。HICOAK code-I は、ゲルマニウム結晶にある初期エネルギーを持って入射した電子・陽電子の結晶中での挙動(運動方向、相互作用の有無、エネルギー損失等)を理論式で確率的に計算し、結晶中で停止または結晶外へ出てしまうまで追跡するものである。そして各過程を経てゲルマニウム結晶に与えられるエネルギーを、スペクトルとして示すようになっている。Ishii [2] は実際測定を行った HPGe 検出器に条件を合わせるためベリリウム窓をつけた状態にプログラムを改良した。Fig. 2-5 に計算によって得られた陽電子線に対する応答関数を示す。全体としておおよその傾向を再現しているが、細部を見ると散乱の影響や、消滅 γ 線の加算したスペクトルの再現性が悪いことがわかる。

実測による応答関数と同じ考えで応答関数を4つの成分に分け、そのエネルギー依存性を見た(Fig. 2-6)。HICOAK CODE-I によって得られた応答関数は、 β 線スペクトロメータを用いて実測した応答関数に比べ全体に占める散乱に起因すると考えられる部分を過小評価している。これはこのコードで考えている HPGe 検出器が理想的なものであり、実際の電気回路の電荷の未収集等の影響が考慮されていないことと、電子線の散乱に関する計算に用いた理論式[36]が簡素化されていることによると考えられる²。 β 線の場合にも同様な不一致が見られ、その場合実測した応答関数と HICOAK CODE-I で計算機シミュレーションした応答関数では、前者を用いた方が β 線最大エネルギーの解析に関して Fermi-Kurie プロットでの直線性がよい、つまり真の β 線スペクトルに近い補正ができることがわかっている[3]。

HICOAK code-I を用いた計算機シミュレーションでは、応答関数の再現に成功していない。しかし HICOAK code-I の開発は、実測による応答関数の作成の手段がない状態で行われたものである。実測のスペクトルが得られている現在、そのスペクトルを再現する方向での新たなコードの開発が望まれる³。

²HPGe 検出器の応答関数の計算機シミュレーションに関しては、 γ 線の応答でもアンチコンプトン γ 線検出器でのコンプトン部分抑制効果の過大評価の問題もある。

³ β 線最大エネルギー測定の研究では、最近 Greenwood [37] が実測による応答関数でなくモンテカルロシミュレーションで作成した応答関数を使っている。

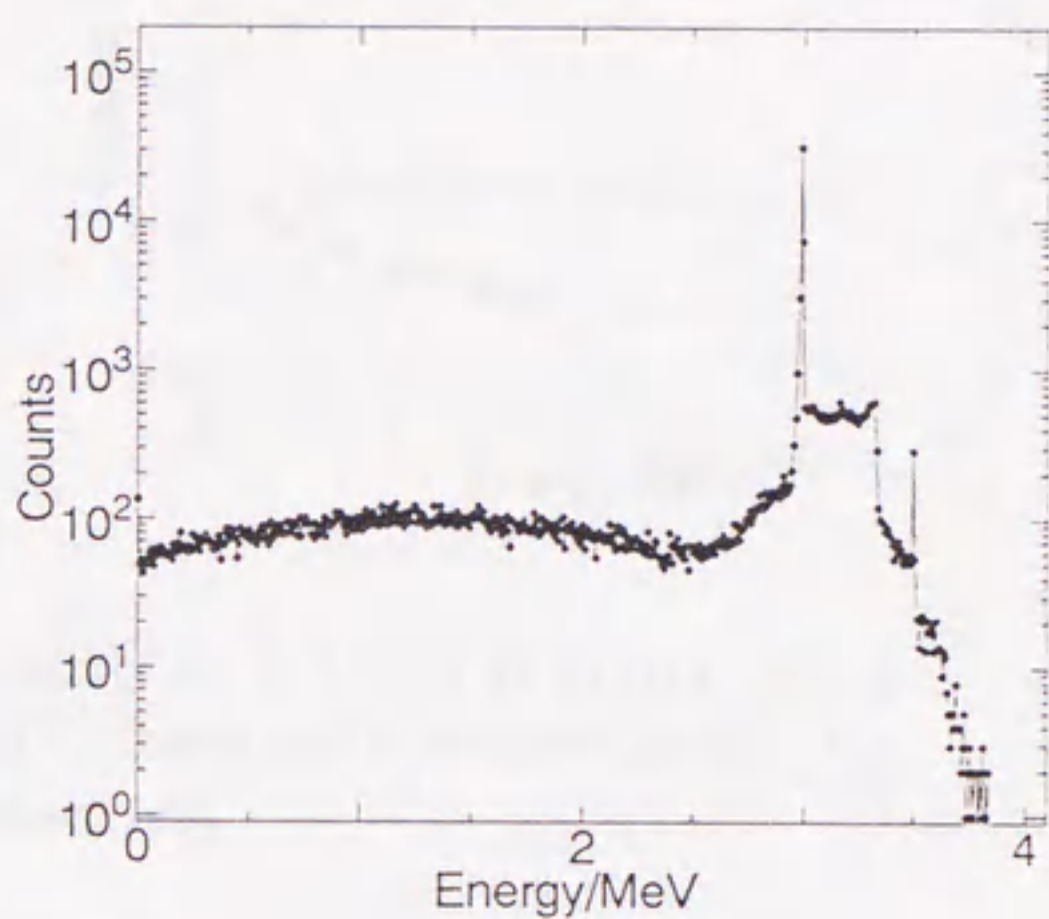
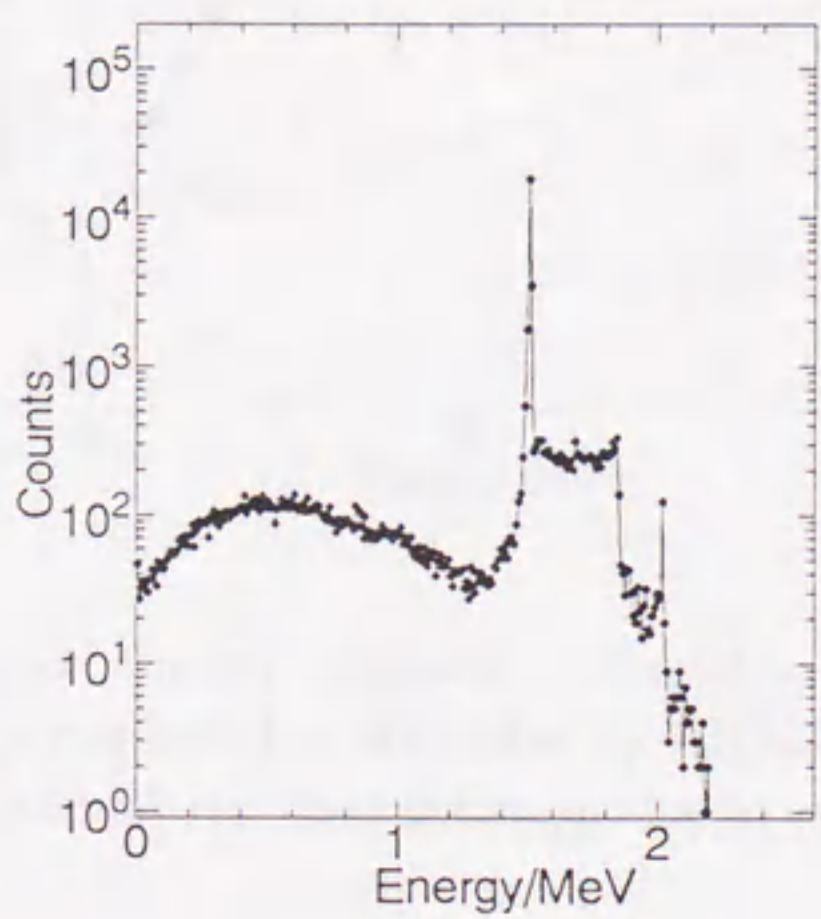
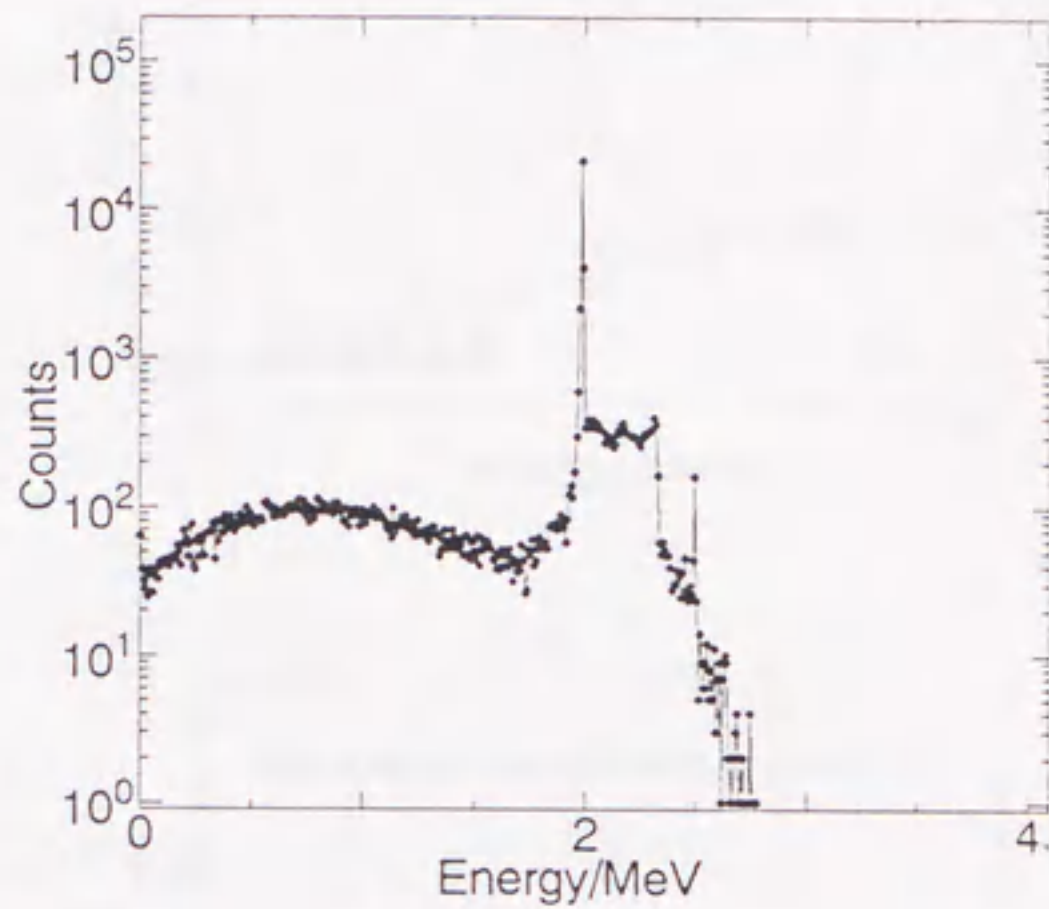
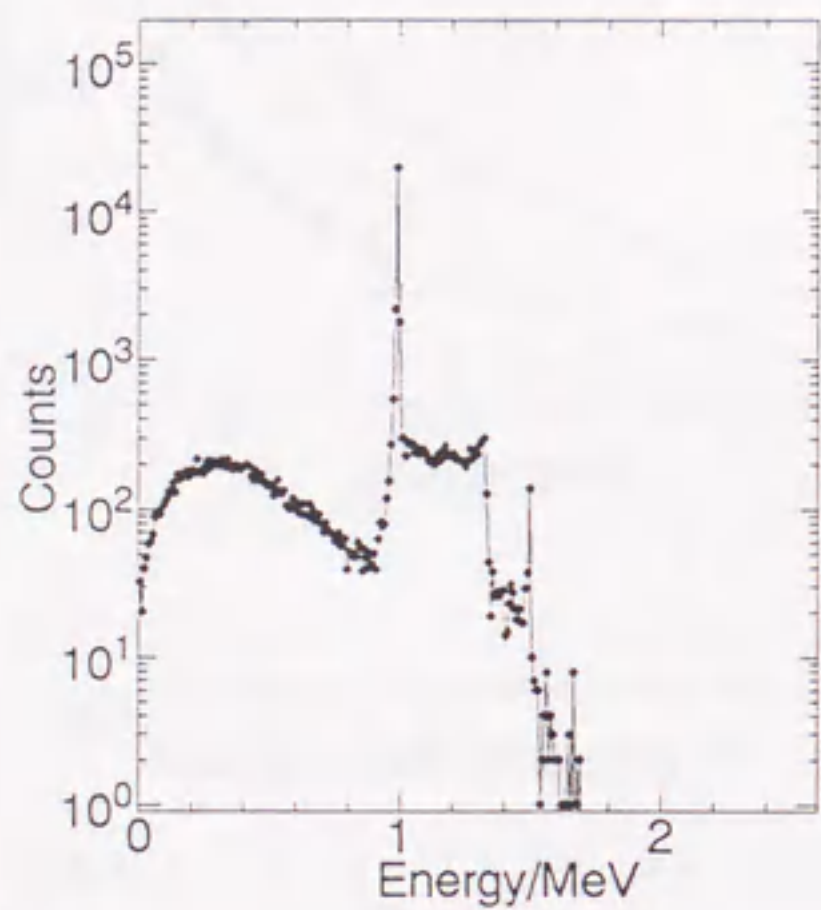


Fig. 2-5: Response functions calculated by HICOAK code-I.

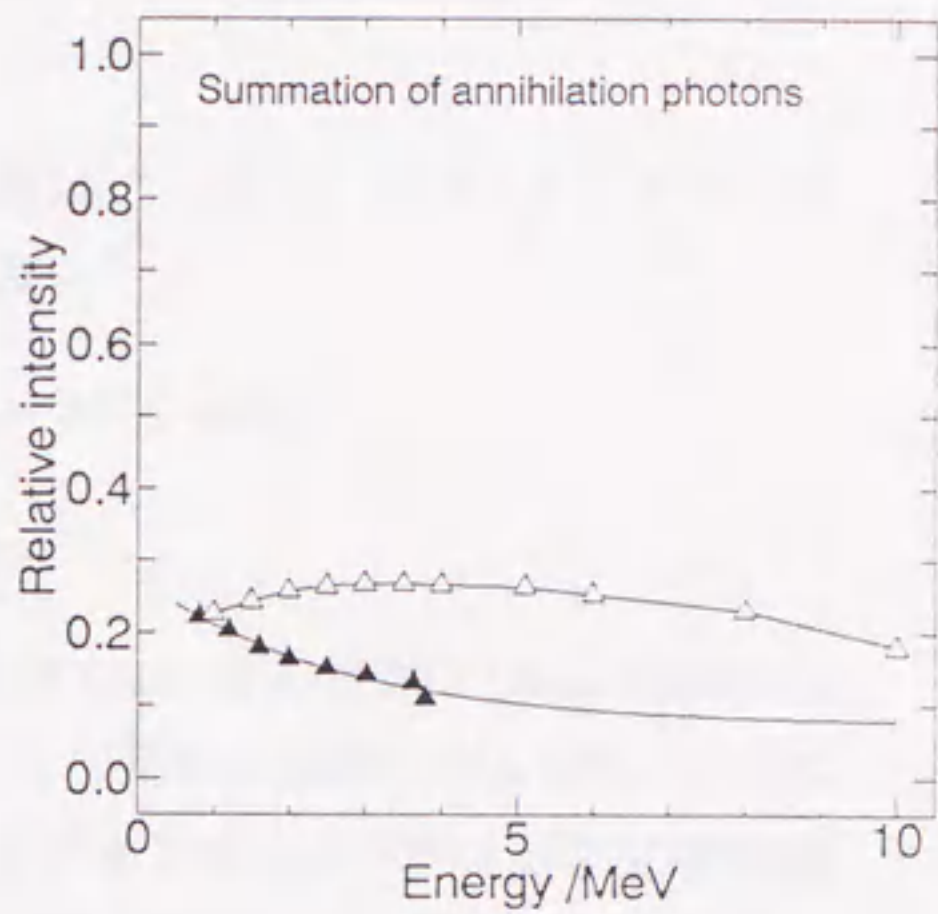
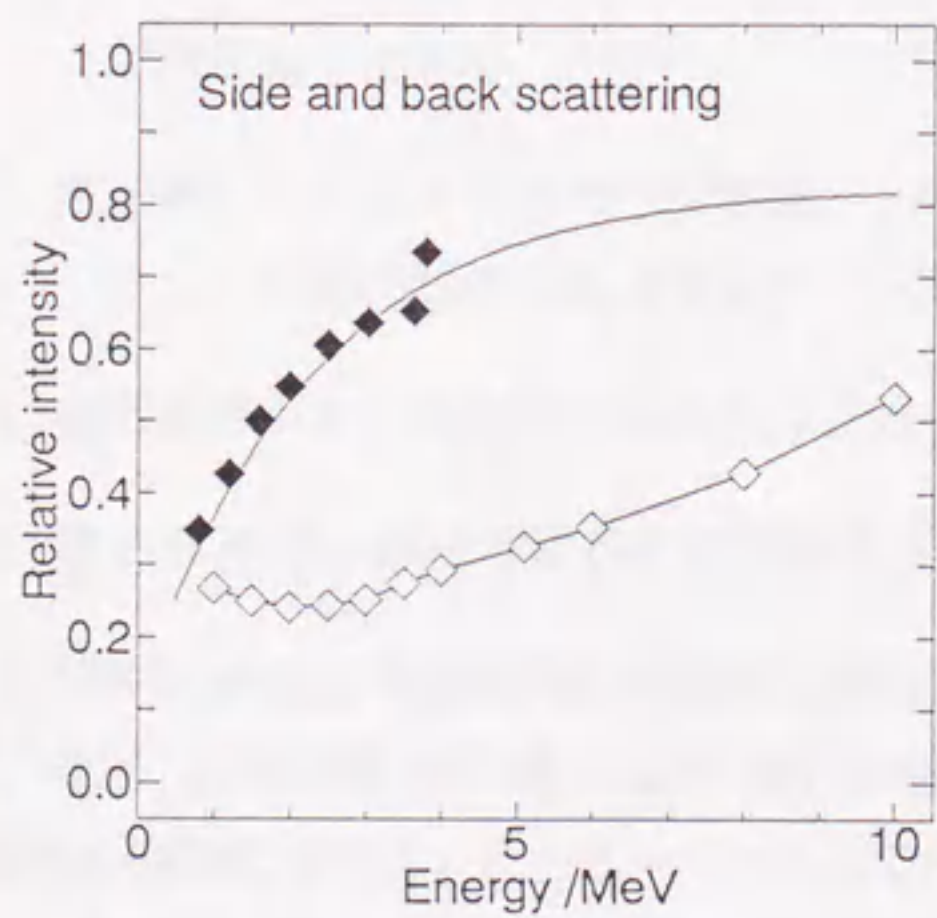
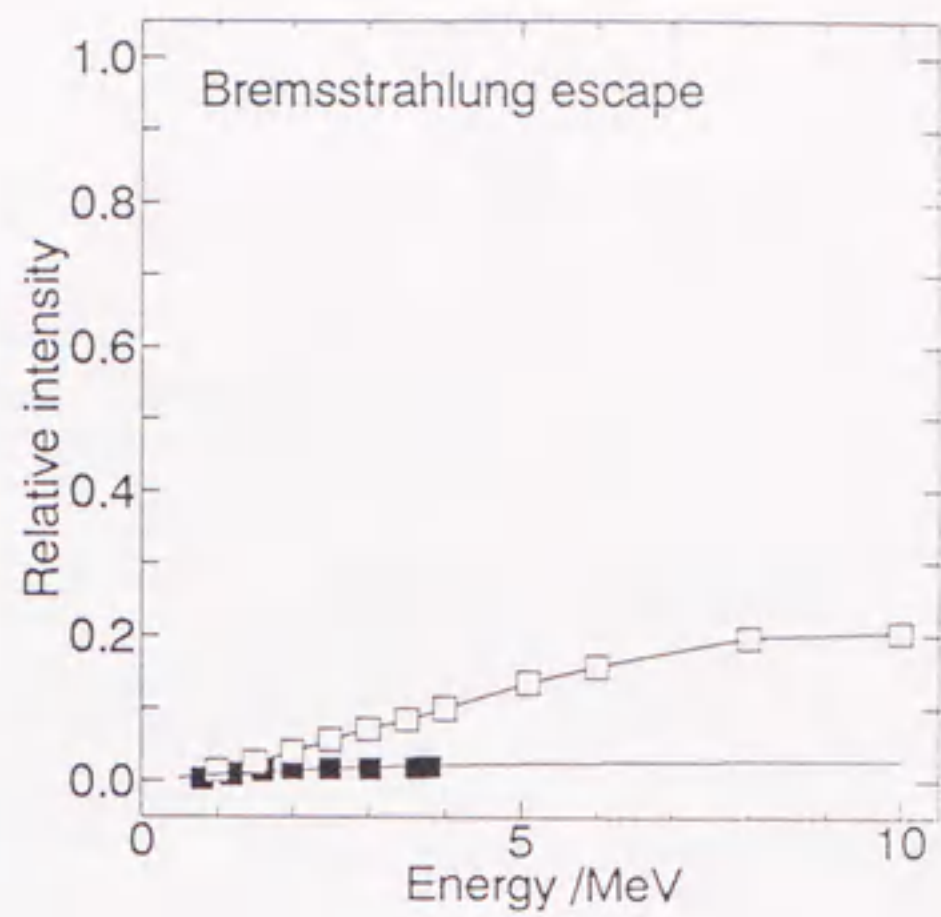
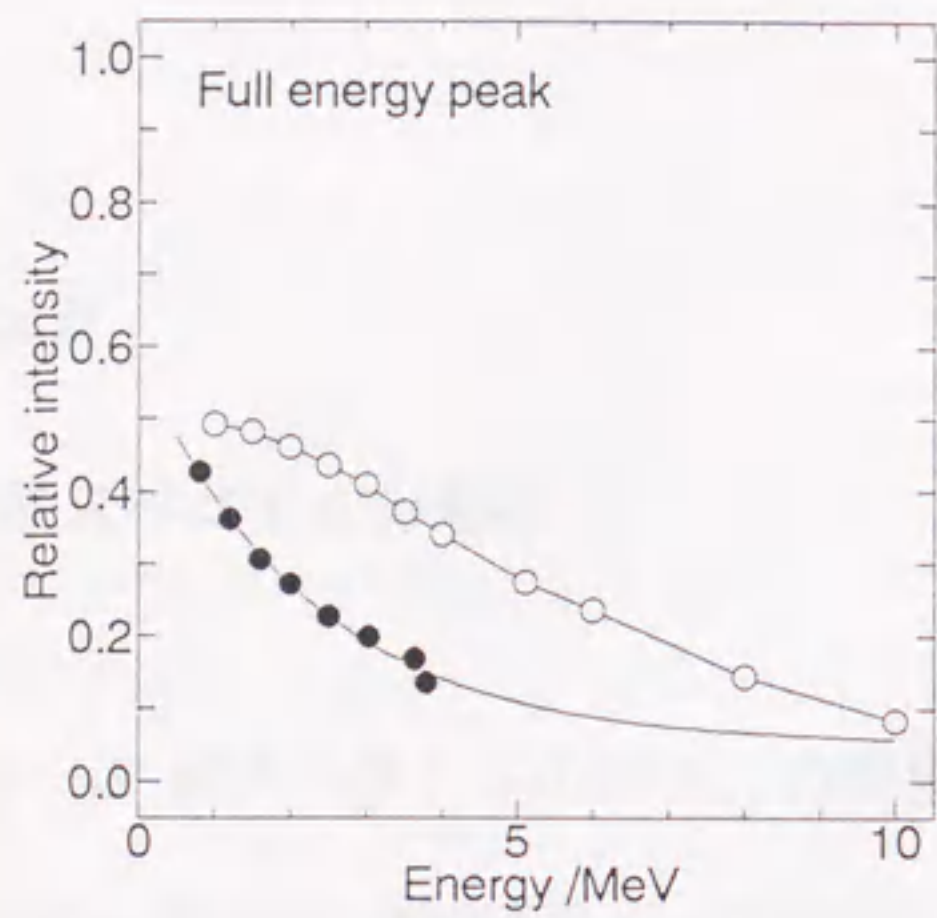


Fig. 2-6: Energy dependence of relative intensities of A, B, C and D to total counts of response function calculated by HICOAK code-I. Closed and open symbols show the experimental results and the calculated ones, respectively.

第3章

β^+ 線スペクトルの解析

3.1 β^+ 線スペクトルの解析上の問題点

HPGe 検出器の β 線測定器としての特徴には、

1. 測定できるエネルギー領域が広く ($\sim 10\text{MeV}$) エネルギー較正が γ 線を測定することで精度良くできる
2. 電子線に対するエネルギー分解能が1%程度(数keV)であり、プラスチックシンチレーション検出器の10%程度に比べて極めて良い
3. 検出効率がよく線源強度がそれほど強い必要がない($\sim \text{kBq}$)
4. 電子線・陽電子線に対する応答関数が複雑である

などが挙げられる。今回使用した HPGe 検出器について 1～3 の特徴は Ukon [3] に詳しい¹。今回、測定対象を β^- 線から β^+ 線に拡張したことで新たに問題になるのは、4 の応答関数の複雑さである。 β^- 線スペクトルでは、あるチャンネルのカウントを 応答関数の全エネルギー吸収に寄与するものとしたときに、それ以下のチャンネルから そのカウントに比例する散乱・制動放射による寄与分を差し引くピーリングオフ (peeling-off) という操作を、スペクトルの上端を始点に 順次低エネルギー側に行っていく方法で 実験によるスペクトルを 真のスペクトルに直すことができた。このように β^- 線スペクトルでは その上端を応答関数の精度良く決まっている全エネルギー吸収ピークと見なして 解析を行うことができる。しかし β^+ 線スペクトルでは 上端は応答関数の精度が低いダブルサムピークとなり、この部分を用いて応答関数全体を予測することは解析の精度を著しく落とすことになる。そのため β^- 線スペクトルの解析とは 違った観点からの解析方法を開発する必要が出てきた。

¹Ukon, Ikuta [38] 等は、これら 1～3 の特徴を生かして広範囲の中性子過剰核核分裂生成物について β^- 線の測定を行っている。

3.2 応答関数のモデル化

解析で必要となる 応答関数の取り扱いを 簡素化するために 応答関数を前章で示したように 4 つの部分に分け Fig. 3-1a のようにモデル化を行った。

$$R(E, E') = R_A(E, E') + R_B(E, E') + R_C(E, E') + R_D(E, E')$$

ここで E' は陽電子が検出器内で検出されたエネルギーである。応答関数の各成分の強度のエネルギー依存式 $I_i(E)$ を用いて、応答関数を次のように表した。

$$\begin{aligned} R_A(E, E') &= I_A(E)\delta(E - E') \\ R_B(E, E') &= (2I_B(E)/b_1^2) \times (E' - E + (b_0 + b_1)) \\ &\quad (E - (b_0 + b_1) \leq E' \leq E - b_0) \\ &\quad b_0 = 75\text{keV} \quad b_1 = m \times E - n \\ &\quad m = 1.58 \times 10^{-1} \quad n = 1.06 \times 10^{-2} \\ R_C(E, E') &= I_C(E)/E \\ &\quad (0 \leq E' \leq E) \end{aligned}$$

1チャンネルあたりのエネルギーは HPGe 検出器の陽電子に対する分解能程度 (20 keV) とした。A 部は 1チャンネル幅のピークとした。B 部は A 部から一定エネルギー ($b_0 = 75\text{keV}$) 下の底辺 $b_1\text{keV}$ の三角形に近似した。ここで b_0 および b_1 のエネルギー依存性 m, n は電子線に対するこの HPGe 検出器の値を用いた [4]。C 部は 入射エネルギーに対応するチャンネル数で平均した高さを持つ長方形とした。D 部は応答関数の形をできるだけ忠実に再現するように Fig. 3-1b のように決めた。

3.3 解析検討用 β^+ 線線源の作成と測定

解析方法の検討のために Q_β が精度良く決まっている β^+ 線線源を作成し測定を行った。作成した β^+ 線線源は、 $^{62}\text{Cu}, ^{68}\text{Ga}, ^{91}\text{Mo}$ の 3 核種である。Table 3-1 にこの 3 核種の半減期、 Q_β 、主な β 遷移の始状態と終状態の スピン・パリティを示す。

各々の線源は以下の手順で作成した。

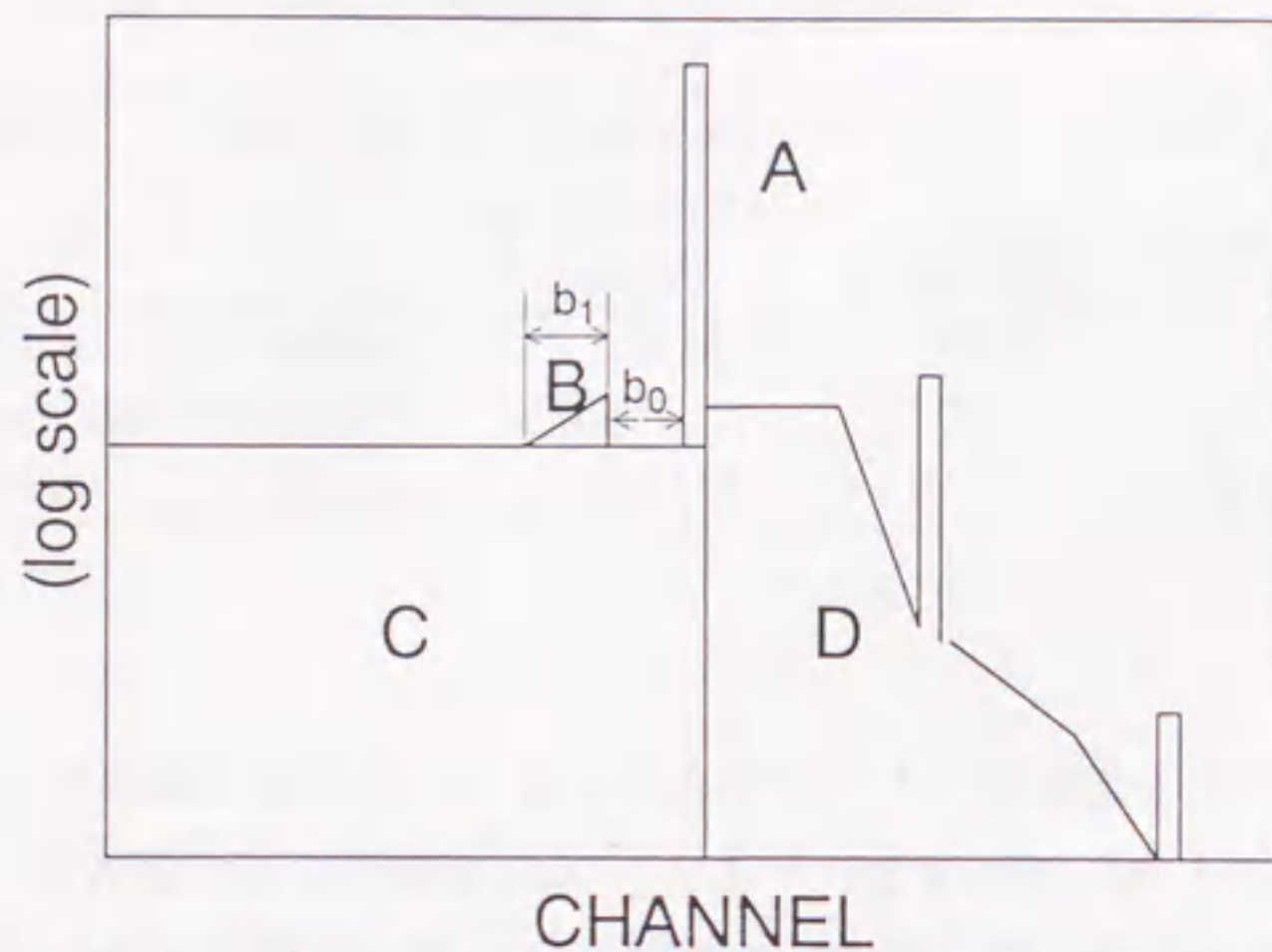


Fig. 3-1a: Schematic view of response function. A: Full energy peak. B: Bremsstrahlung escape. C: Side and back scattering. D: Summation of annihilation photons.

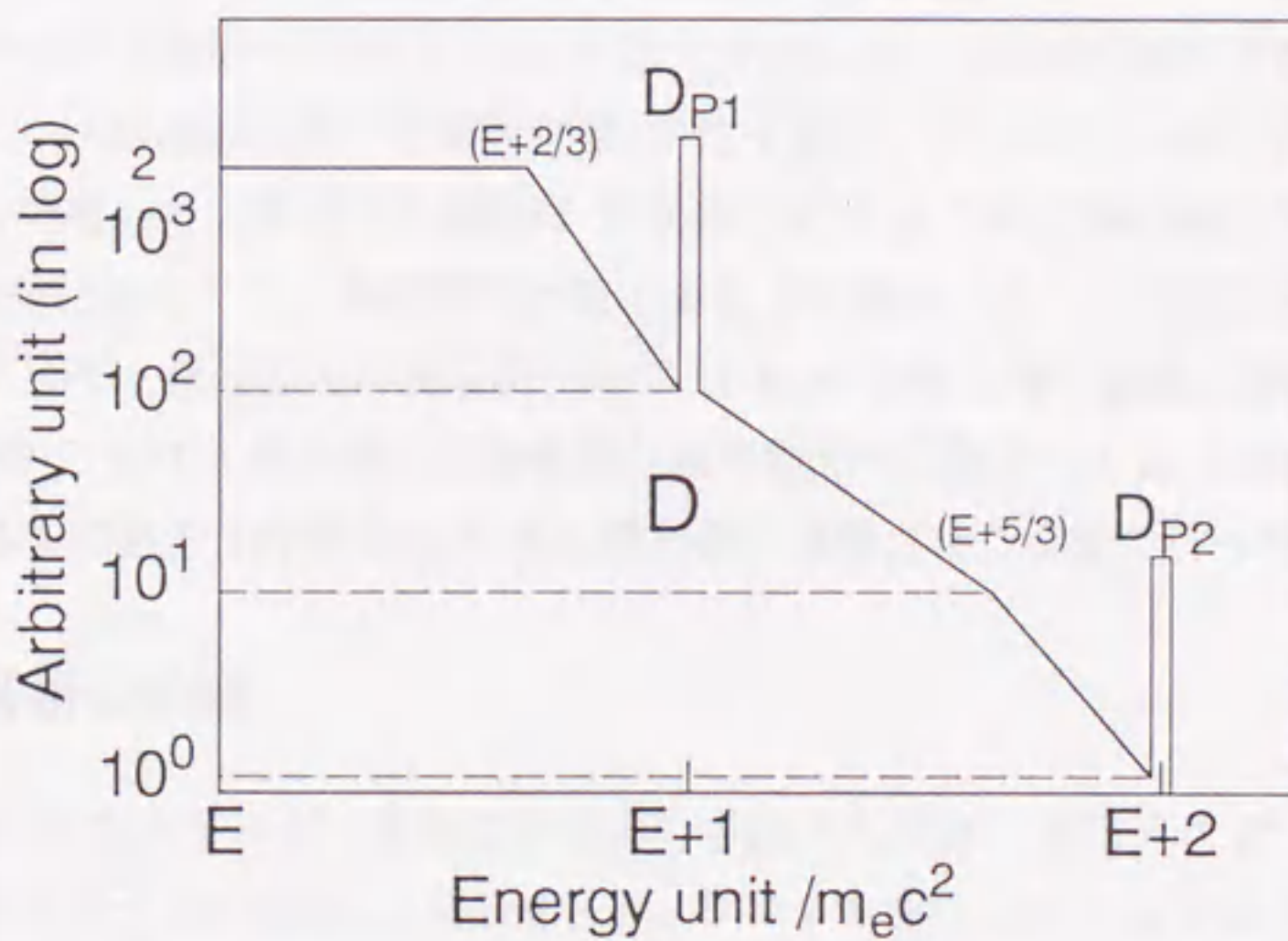


Fig. 3-1b: A shape of component D of response function ($R_D(E, E')$). Energy unit corresponds to a mass of positron, $m_e c^2 = 0.511$ MeV. D_{P1} and D_{P2} correspond to a one photon sum peak and a two photon sum peak, respectively. The energy of a one photon Compton edge and a two photons Compton edge are assumed to $\frac{2}{3}$ of $m_e c^2$ and $\frac{5}{3}$ of $m_e c^2$, respectively.

Table 3-1: β^+ -ray sources with well-known Q_β values.

Nuclide	Half life	Evaluated Q_β -value [31] (MeV)	spin and parity	
			initial state	final state
^{62}Cu	9.74 min.	3.949(5)	1^+	0^+
^{68}Ge - ^{68}Ga	270.8 d.	2.9211(12)	0^+	1^+
^{91}Mo	15.49 min.	4.438(13)	$9/2^+$	$9/2^+$

1) ^{68}Ga

^{68}Ga は ^{68}Ge と放射平衡にあるため、日本アイソトープ協会から ^{68}Ge - ^{68}Ga 線源として購入した。購入時の化学形態は GeCl_4 であったため NH_4OH を加えて加水分解し GeO_2 の形にしてろ紙上に滴下した。自然乾燥させた後、薄いビニル袋にいった。

2) ^{62}Cu , ^{91}Mo

^{62}Cu および ^{91}Mo は大阪大学工学部強力 14MeV 中性子工学実験装置 (OKTAVIAN) を用いて Cu 箔 ($9\text{mg}/\text{cm}^2$ 天然組成) および Mo 箔 ($3.07\text{mg}/\text{cm}^2$, ^{92}Mo 97.37%濃縮同位体) を 14MeV 中性子で照射して (n,2n) 反応により作成した。1cm 角の試料を塩化ビニル製のカプセルにいれ気送系を用いて照射位置 (中性子束 $\phi = (6 \sim 10) \times 10^9 \text{ n}/\text{cm}^2 \text{ s}$) まで運び 20~30 分照射した。照射した試料は気送系により速やかに測定室まで戻されマイラ膜製の支持体にはさんだ。偶然同時計数による β^+ 線スペクトルの変形を抑えるため、線源強度は HPGe 検出器での測定開始時に 10 kcps を超えない程度に冷却調整した。同様の理由から HPGe 検出器の主増幅器は波形整形時定数を $0.5 \mu\text{s}$ に設定した。1),2) の測定は応答関数の作成済みの HPGe 検出器に密着させた位置で行った。

3.4 解析の手順

β^+ 線の最大エネルギーを求めるための手段としては、測定した β^+ 線スペクトルを真の β^+ 線スペクトルに戻し、Fermi-Kurie プロットを行ってエンドポイントエネルギーとして求める方法を採用した。以下に今回行った β^+ 線スペクトルの解析の手順を示す。

(1) チャンネルの束ね合わせ。

3.2 でモデル化した応答関数を使用するために、1チャンネルあたり約 2 keV で測定したスペクトルを、1チャンネルあたりのエネルギーが HPGe 検出器の陽電子に対するエネルギー分解能 ($\sim 20\text{keV}$) 程度になるように束ね合わせた。

(2) ランダムサムの寄与分の差引。

HPGe 検出器による測定では、計数率に比例してゲルマニウム結晶にエネルギーが偶然同時に与えられ、エネルギーが加算された形で出力される、ランダムサムが避けられない。 β 線測定の場合、解析で最も重要となるエンドポイント付近の計数にこのランダムサムの影響が大きく出てしまうため適切な処理が必要となる。 β 線の場合、ランダムサムの部分は、計数の平方根を取りプロットすると経験的にほぼ直線とみなすことができる。そこで予想されるエンドポイントの 1.022 MeV 以上の部分の計数の平方根を取り最小自乗法で直線フィッティングした。その直線を低エネルギー部分へ延長してランダムサムの差引を行った。(スペクトル $M_o(E')$)

(3) 計算によるエンドポイントの予想。

今、 β 遷移を Fermi 型であると仮定すると、任意の最大エネルギー E_m を持った β^+ 線スペクトル $T(E, E_m, Z)$ を計算することができる [39]。このとき多成分の β 遷移を含むスペクトルの解析に際しては、崩壊関式に基づいて β^+ 線最大エネルギー・遷移強度を決め主な遷移を含む β^+ 線スペクトルを計算する。解析するスペクトルと同じエネルギー較正のもとで計算した理論スペクトルに対して 3.2 で決めた応答関数 $R(E, E')$ を演算しスペクトルをフォールディングさせることで、HPGe 検出器によって得られる β^+ 線スペクトル $S(E')$ を予想することができる。

$$S(E') = \int_0^\infty R(E, E') T(E, Z, E_m) dE$$

(2) までの処理を終わったスペクトル $M_o(E')$ と任意の最大エネルギーを持った計算スペクトル $S(E')$ の比をとると、適切な最大エネルギーで計算したスペクトルは γ 線の影響が無視できる エンドポイント付近で計数の比が一定値 (r) をとる。

(4) 測定スペクトルを真のスペクトルに直す。

(3) で予想された適切な最大エネルギー E_m で計算したスペクトル $T(E, Z, E_m)$ に対して 3.2 で決めた応答関数のうち A 部を除く部分を演算し r を掛けたスペクトルを作る。このスペクトルを測定スペクトルから差し引くと、全エネルギー吸収ピークだけでできたスペクトルが残る。これを応答関数のうち、全エネルギー吸収ピークになる効率で補正をすると真のスペクトル $M_c(E')$ が得られる。

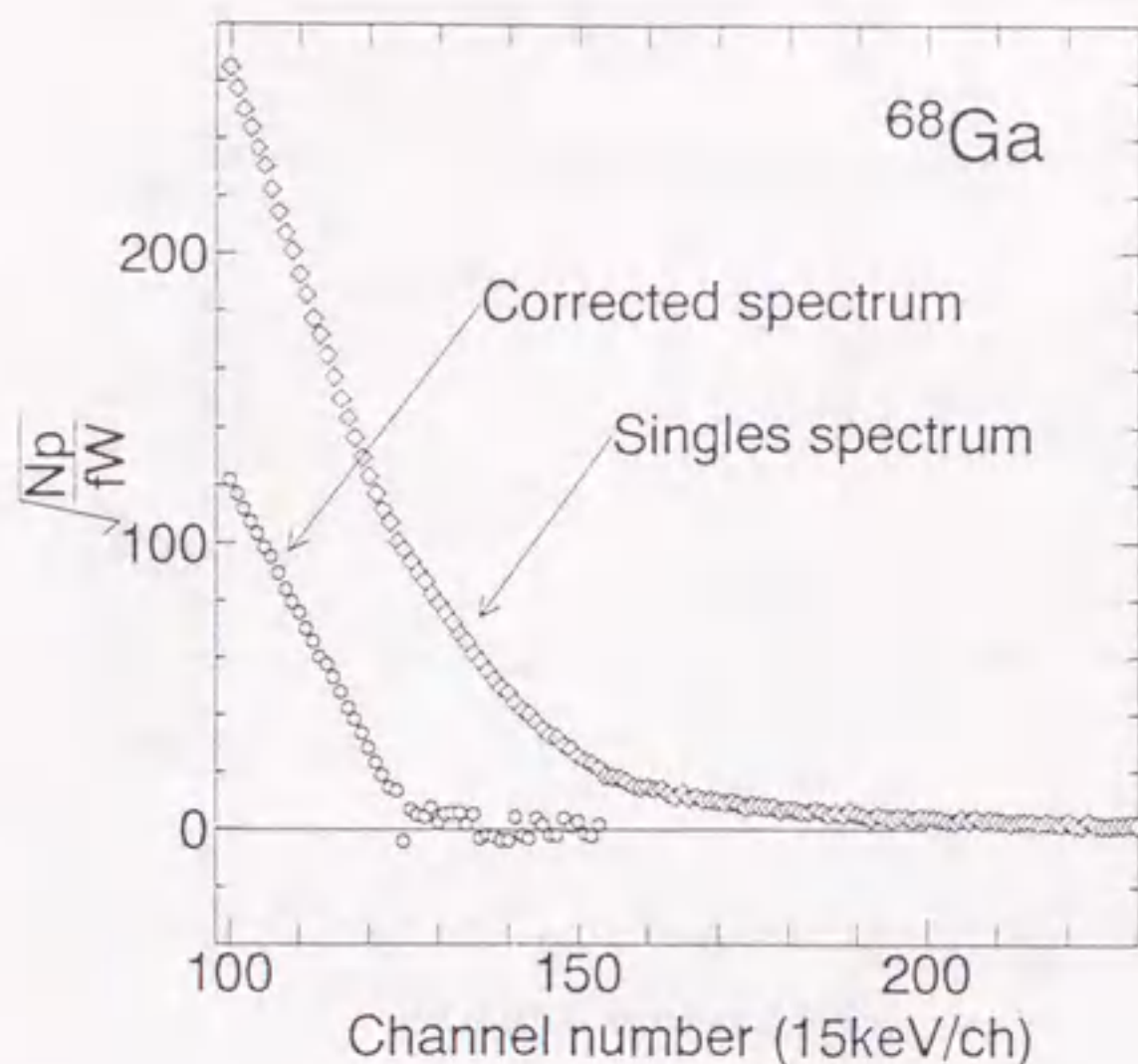


Fig. 3-2: Fermi-Kurie plots of β^+ -ray spectra of ^{68}Ga with an HPGe detector. Diamonds and open circles show singles spectrum and corrected one, respectively.

$$M_c(E') = \frac{M_o(E') - r \int_0^\infty \{R(E, E') - R_A(E, E')\} T(E, Z, E_m) dE}{R_A(E', E')}$$

(5) Fermi-Kurie プロットを行い、直線フィッティングする。

(4) までの手順で補正したスペクトル $M_c(E')$ に Fermi-Kurie プロットを行い、最小自乗法で直線フィッティングした。フィッティングは 予想されるエンドポイントエネルギーを基準に 応答関数の記述の曖昧さが累積しないように 最大 1 MeV の範囲に限定して行った。この範囲内でフィッティングの領域をいろいろ変えてエンドポイントの変動を見た。(3) で予想したエンドポイントエネルギーと大きく矛盾した場合、ここで得られたエンドポイントエネルギーで (3) 以降の手順を繰り返した。Fig. 3-2 に ^{68}Ga の測定した β^+ 線スペクトルをそのまま Fermi-Kurie プロットしたものと、ここまで示した手順で補正した β^+ 線スペクトルを Fermi-Kurie プロットしたものを比較して示す。

(6) エネルギー損失の補正

(5) で決定したエンドポイントエネルギーに対して、ベリリウム窓、線源の保持体などによるエネルギー損失を補正し、 β^+ 線最大エネルギーを決定した。ベリリウム窓のエネルギー損失の値は理論式 [40] を用いて計算した (Fig. 3-3)。ベリリウム窓への斜め

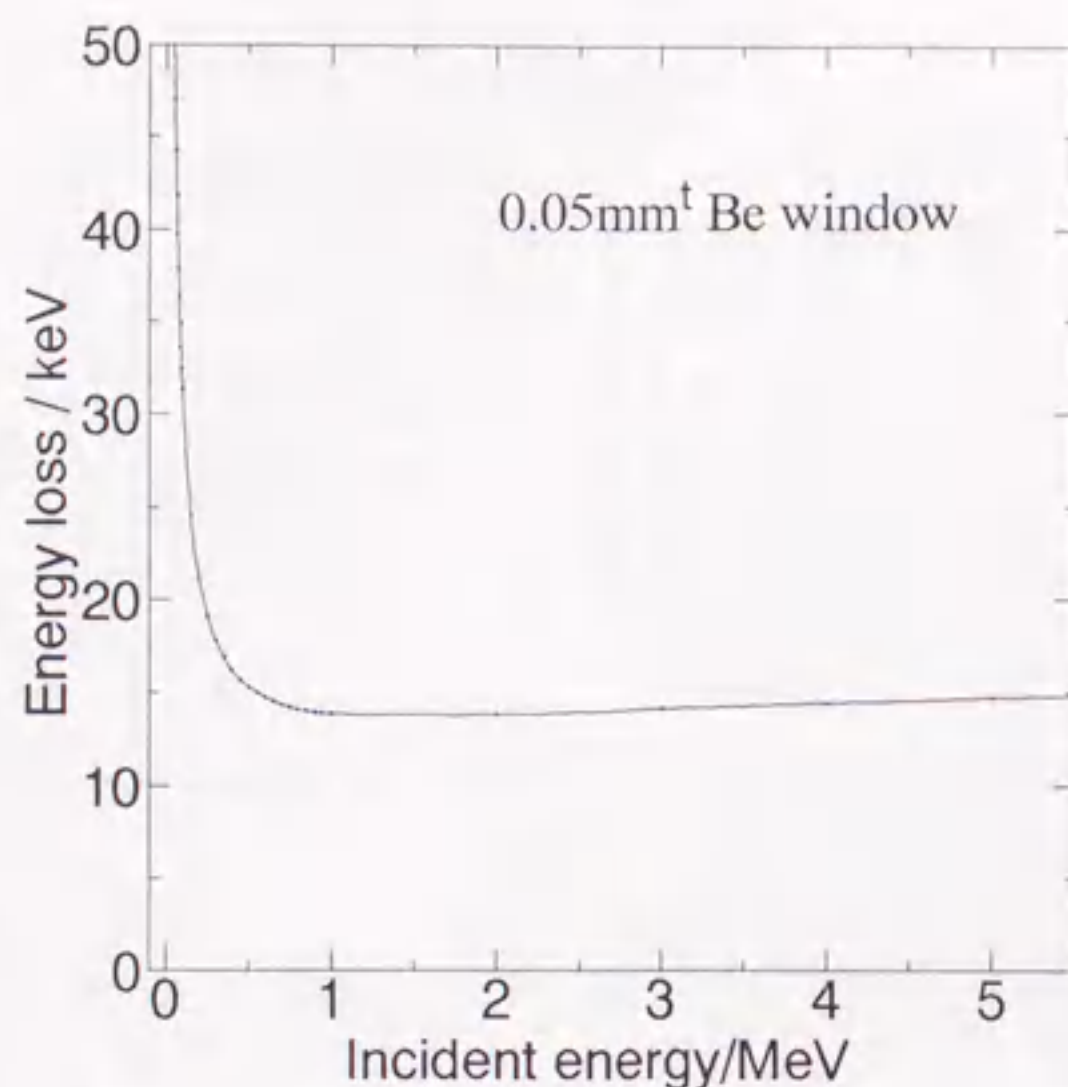


Fig. 3-3: Theoretical curve of energy loss with the 0.05 mm² beryllium window.

入射の影響は下記の式で補正した [2]。ここで θ は円柱状ゲルマニウム結晶の対象軸状にある線源から望んだ円柱外周への角度である。

$$f = \frac{\log(\cos \theta)}{\cos \theta - 1}.$$

Fig. 3-4 に今回用いた HPGe 検出器でのベリリウム窓からの距離に対しての補正係数を示す。

3.5 結果

前節の手順に従い、⁶²Cu, ⁶⁸Ga, ⁹¹Mo の測定したスペクトルを解析した。Fig. 3-5 に ⁶²Cu, ⁶⁸Ga, ⁹¹Mo の β^+ 線スペクトルの Fermi-Kurie プロットを示す。

得られた Fermi-Kurie プロットを直線フィッティングして、エンドポイントエネルギーを決定し、ベリリウム窓と線源の支持体などのエネルギー損失を加えて、 β^+ 線最大エネルギーを求めた。崩壊の前後の質量差と同等である Q_β を β^+ 線最大エネルギーに電子対の生成エネルギー (1.022 MeV) を加えて求めた。

今回の方法により Q_β を求めた場合、系統的にどの程度の誤差を含むかを確認するため、それぞれの核種の Q_β の文献値 (⁶²Cu [41-44], ⁶⁸Ga [45-52], ⁹¹Mo [53-55]) と今回の測定値を比較して Table 3-2 及び Fig. 3-6 に示す。また Q_β の評価値 [13] を基準としたときの今回の測定値との差を Fig. 3-7 に示す。これらの比較から、この方法の系統的な誤差は 20 keV 以内と見なすことができる。

$$r = \frac{\log(\cos \theta)}{\cos \theta - 1}$$

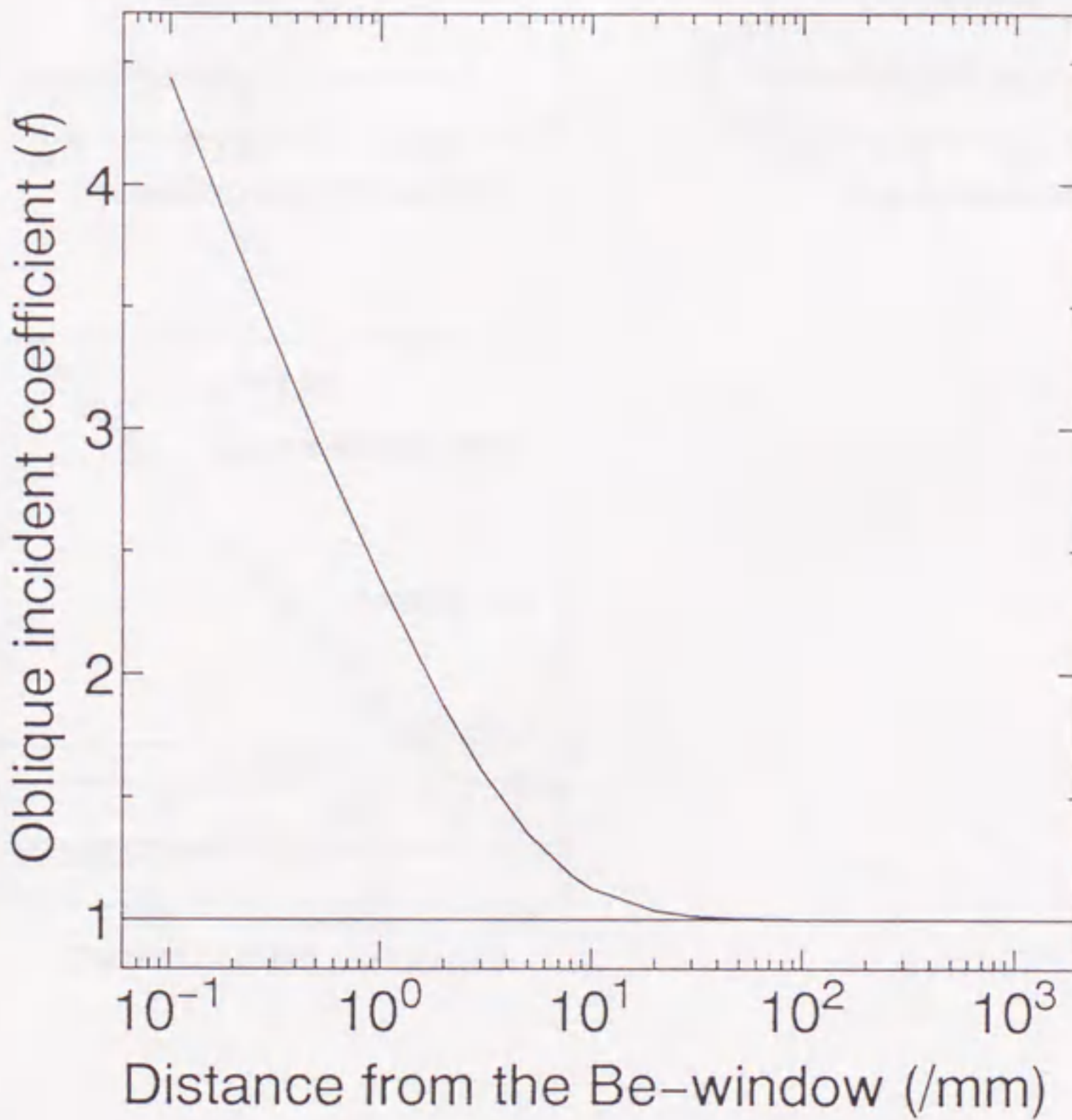
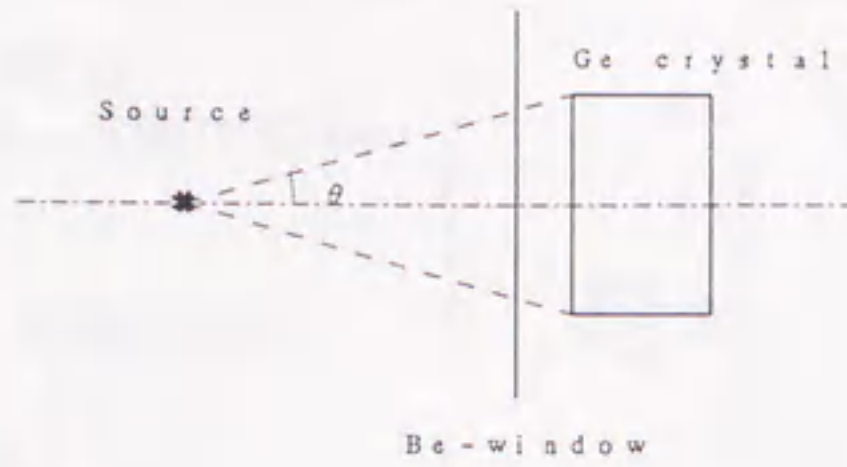


Fig. 3-4: Oblique incident coefficient as a function of the distance between a source the Be-window. The HPGe detector has a 0.05 mm beryllium window and a germanium crystal with dimensions 16 mm in diameter and 10 mm in thickness. The distance between Be-window and Ge-crystal is 5 mm.

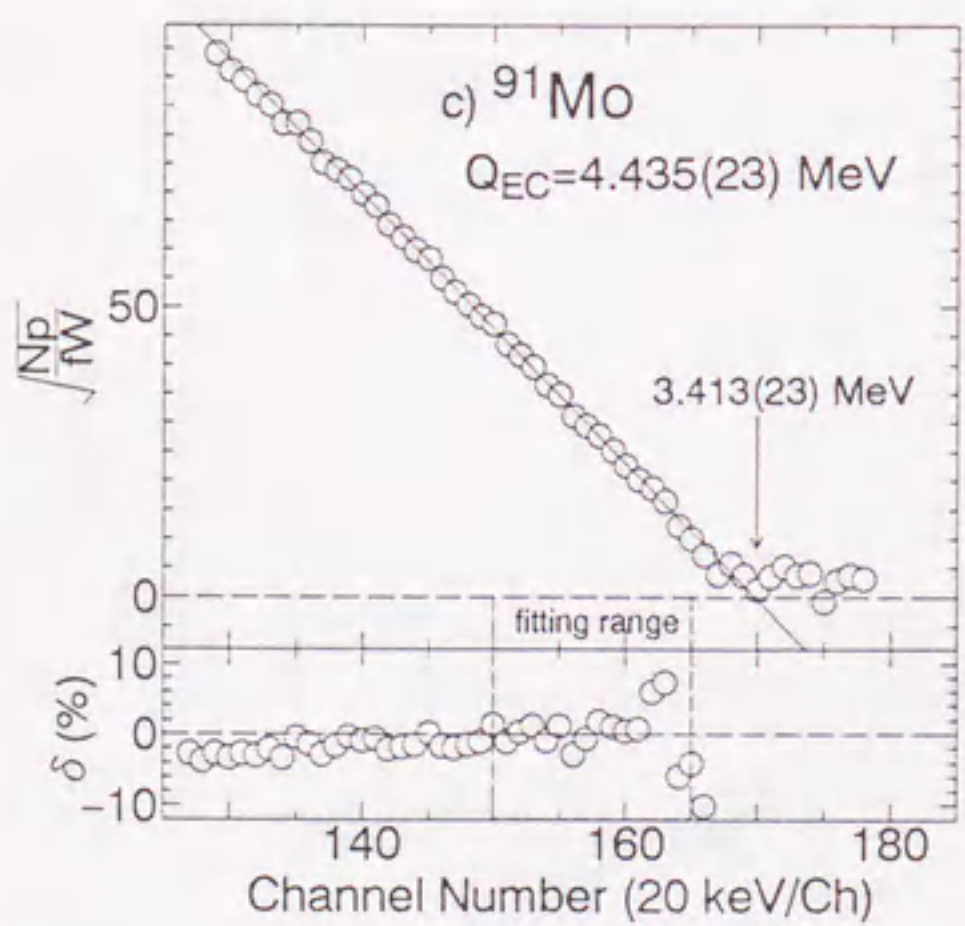
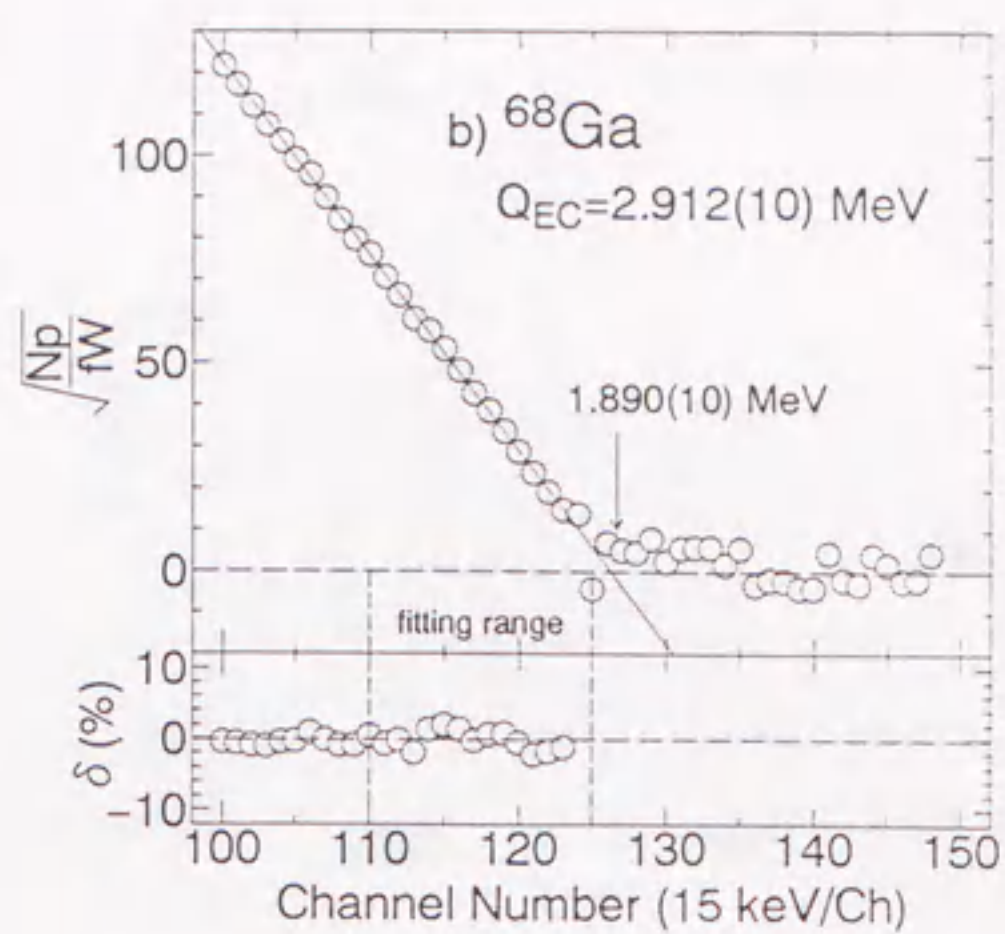
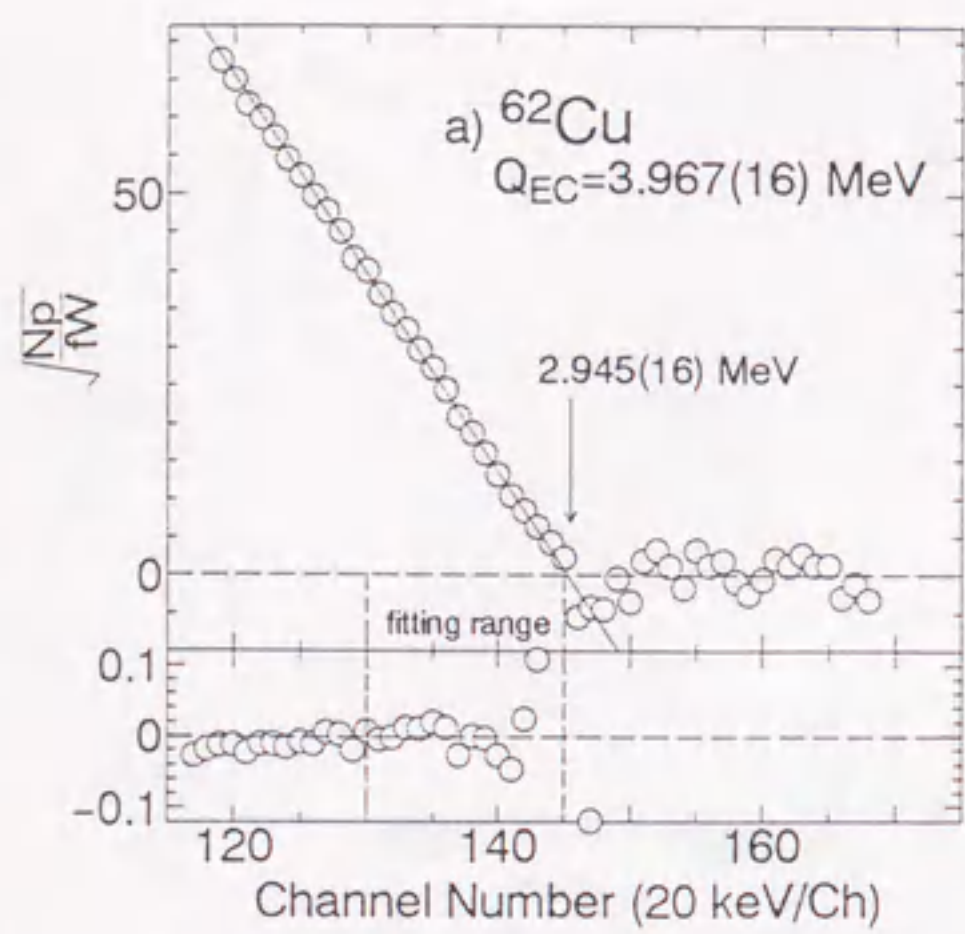


Fig. 3-5: Fermi-Kurie plots of singles β -ray spectra with an HPGe detector corrected with response functions. a) ^{62}Cu , b) ^{68}Ga and c) ^{91}Mo .

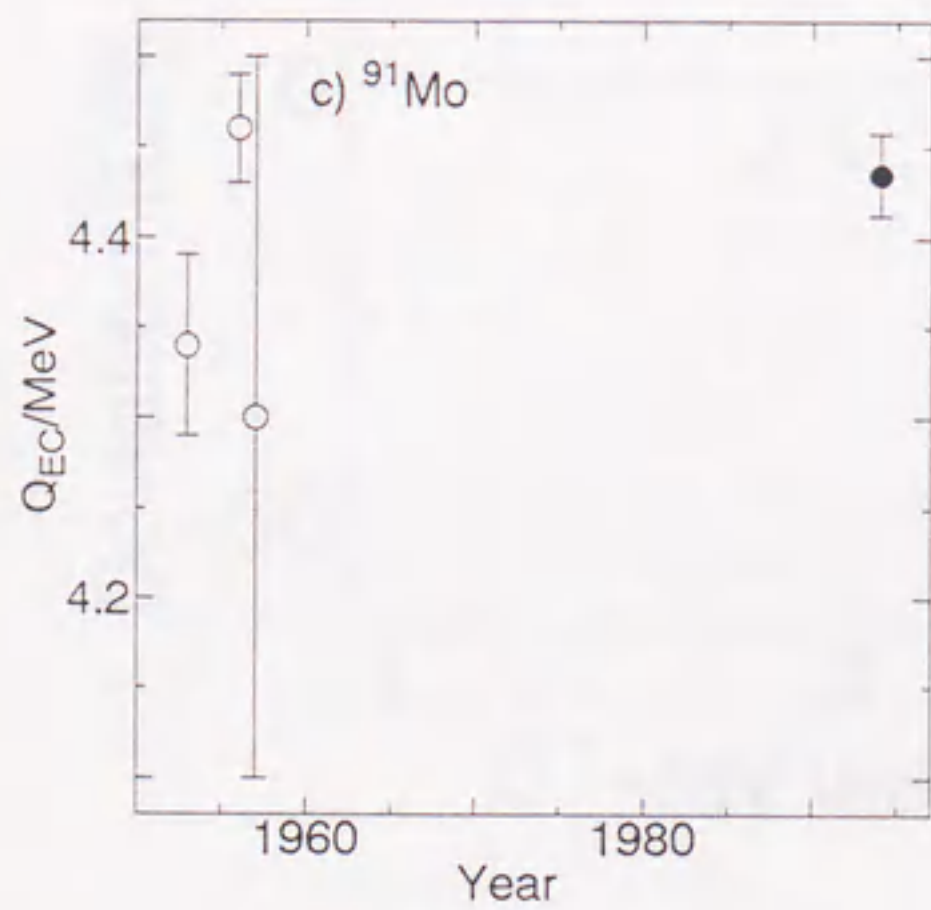
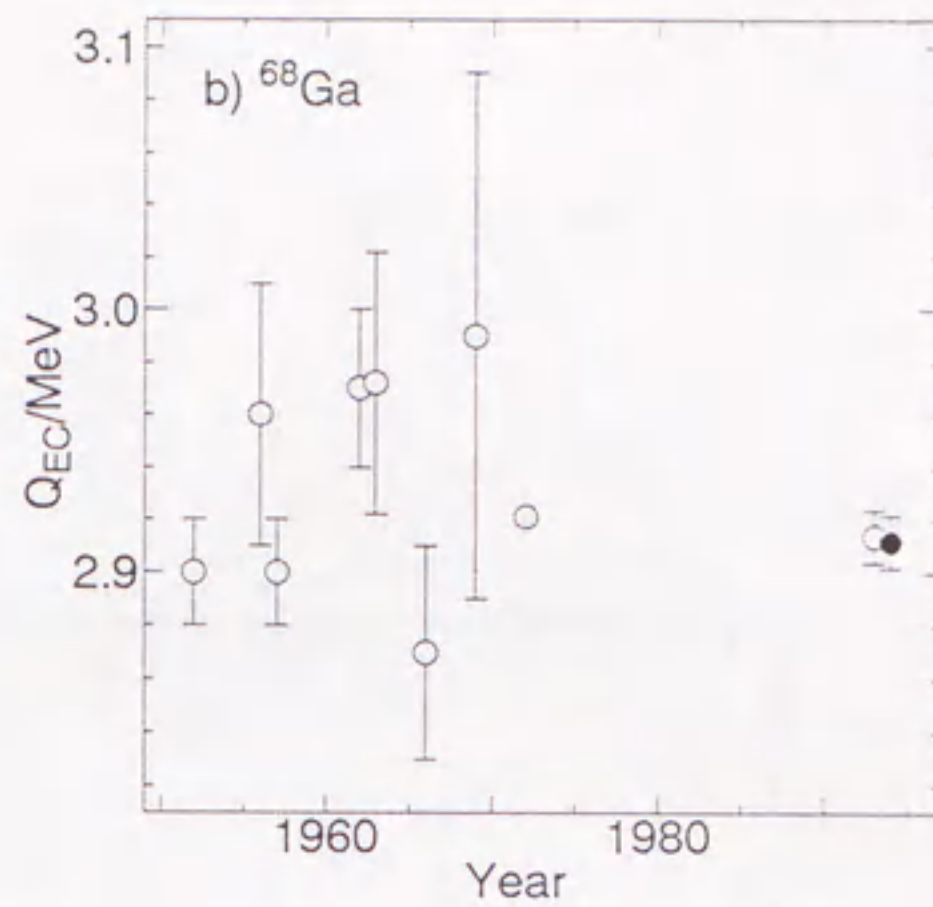
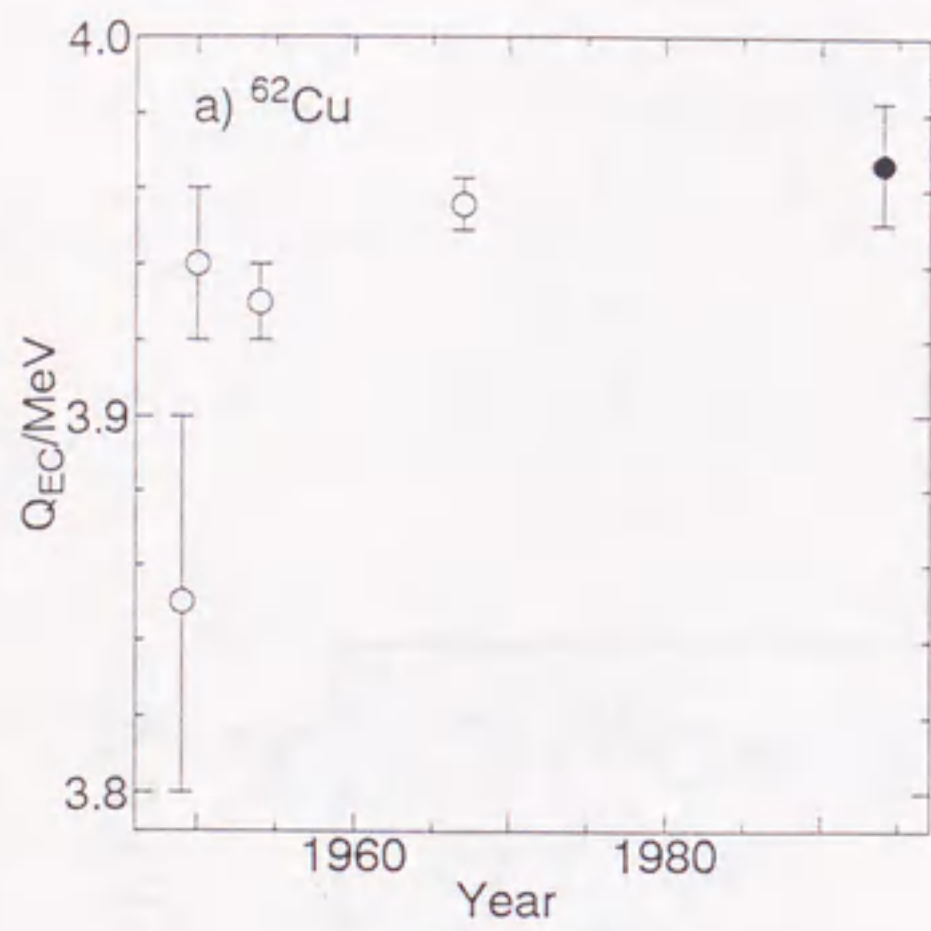


Fig. 3-6: Comparison of present measured Q_{ϵ} -values versus those of previous ones.
 a) ^{62}Cu , b) ^{68}Ga and c) ^{91}Mo .

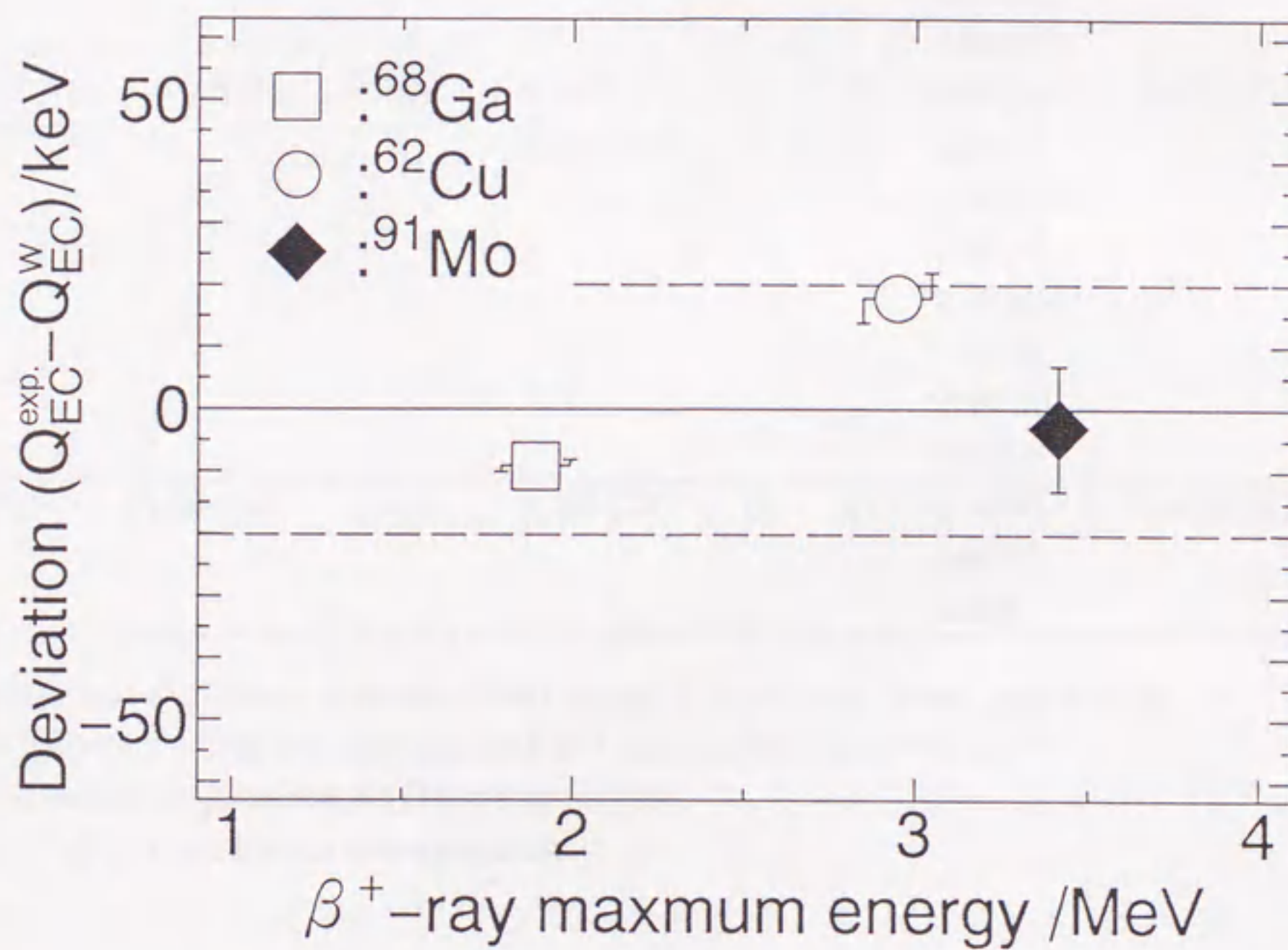


Fig. 3-7: Deviation from the evaluated Q_{ϵ} -value. $Q_{EC}^{exp.}$ and Q_{EC}^W mean the present Q_{ϵ} -value and the evaluated one, respectively. The error shows only statistical one.

Table 3-2: Results of β^+ -ray maximum energy together with previous work.

Nuclide	Half life	Endpoint energy (MeV)	Q_β (MeV)	Error		Previous works [§] (MeV)	Evaluated value [†] (MeV)
				stat. (keV)	sys. (keV)		
⁶² Cu	9.74 min	2.945	3.967(16)	4	16	3.85(5)	3.949(5)
						3.94(2)	
						3.93(1)	
						3.956(7)	
⁶⁸ Ge- ⁶⁸ Ga	270.8 d	1.890	2.912(10)	1	10	2.90(2)	2.9211(12)
						2.914(10) [‡]	
						2.96(5)	
						2.90(2)	
						2.97(3)	
						2.972(50)	
						2.87(4)	
2.99(10)							
⁹¹ Mo	15.49 min	3.413	4.435(23)	10	20	4.34(5)	4.438(13)
						4.46(3)	
						4.3(2)	

stat. and sys. mean the statistical and the systematic error, respectively.

[§] Previous works are summarized in "Table of Isotopes 7th ed."

[†] Evaluated Q_β -values are listed in ref.[13].

[‡] β^+ - $2\gamma^\pm$ coincidence measurement.

3.6 β^+ 線-消滅 γ 線同時計数測定法

前節までは HPGe 検出器のみを用いて、消滅 γ 線の寄与を含んだ形で β^+ 線の測定を行ってきた。この方法は、測定のシステムが簡素である反面、応答関数の複雑さに起因して解析が繁雑になっている。そこで前節までに検討した測定・解析方法の正当性を確認するため、 β^+ 線線源を Ge 結晶中で消滅した陽電子のエネルギーが加算されない事象を取り出す β^+ 線最大エネルギー測定システムで測定した。このような条件での単一エネルギーの陽電子線に対する応答関数は電子線に対するものと同じになると仮定することができ、応答関数の単純化により解析に対する信頼性が高い。

同様の測定システムは Keller [10] によって、Si(Li) β^+ 線検出器とそれを囲む BGO

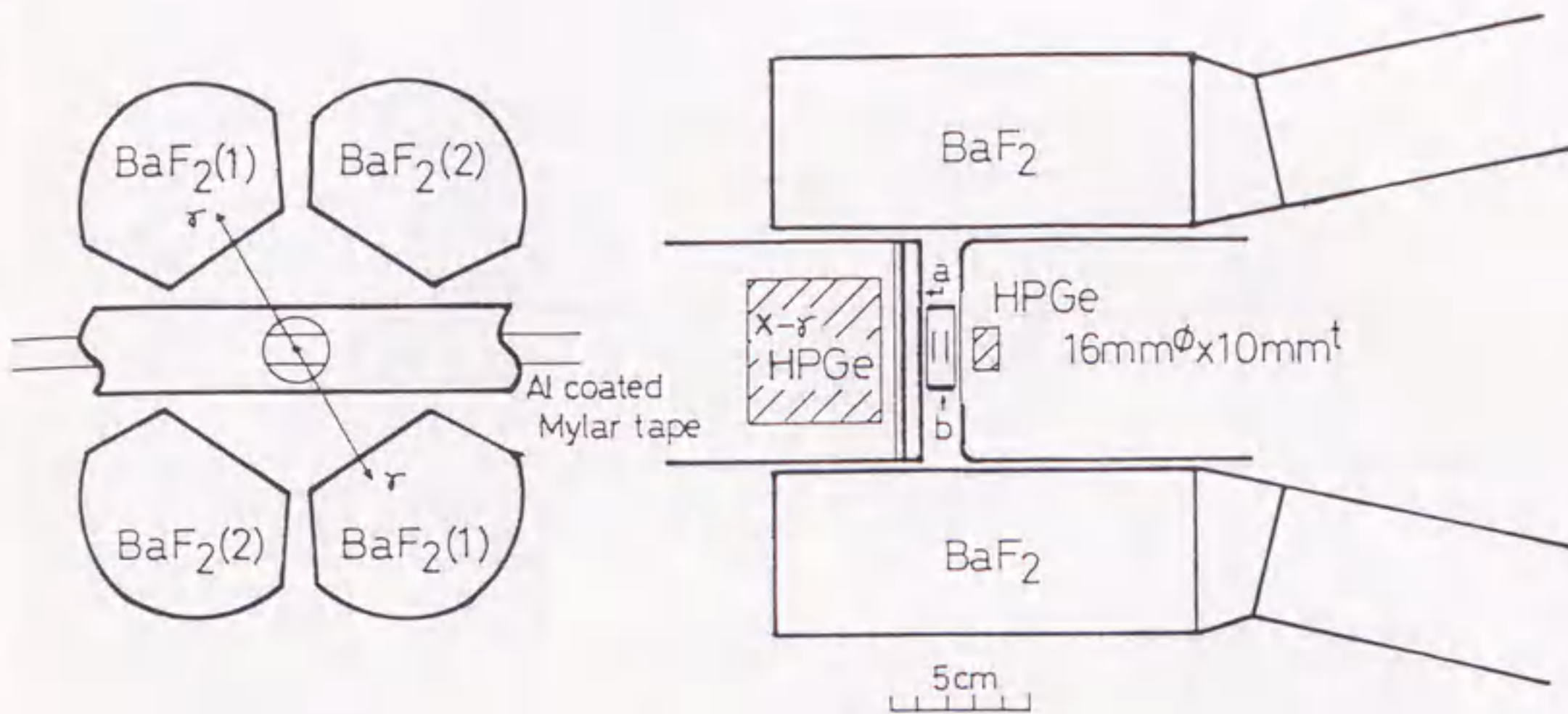


Fig. 3-8: Schematic view of the detector setup for the $\beta^+ - 2\gamma - \gamma$ coincidence measurement. (a) 5mm acrylic absorber; (b) tape transport canal at the JAERI-ISOL.

消滅 γ 線検出器対の構成で作られている。本研究では、前節まで取り上げた HPGe β^+ 検出器と BaF₂ 消滅 γ 線検出器を組み合わせたシステムを作った (Fig. 3-8)。BaF₂ シンチレータのサイズは、各々長さ 150 mm、厚さ 60 mm であり HPGe 検出器の周りに 2 対配置されている。BaF₂ 検出器の 511 keV γ 線に対するエネルギー分解能は約 15% である。BaF₂ 検出器のエネルギー信号は、対面する組毎に加算増幅器を通す (Fig. 3-9)。各々の検出器で検出された消滅 γ (γ^+) 線の全吸収ピーク (511 keV) が加算されてできた 1022 keV 相当のピーク ($2\gamma^+$) に対してゲートを設定し、 $\beta^+ - 2\gamma^+$ 同時計数測定を行った。この測定により消滅 γ 線の影響を除いた β^+ 線スペクトルが得られる。この測定システムの単一エネルギー陽電子線に対する応答関数は電子線に対するものと同じと考えることができる (Fig. 3-10)²。

β^+ 線-消滅 γ 線同時計数測定法を用いて ⁶⁸Ga の β^+ 線最大エネルギー測定を行った。作成した測定試料を HPGe β^+ 検出器の前に固定し、 $\beta^+ - 2\gamma^+$ 同時計数測定を行った。

²この問題に関しては、京都大学原子炉実験所 (KURRI) 付置のセクタ型二重収束スペクトロメータを使用して本文中と同様の応答関数作成を Ikuta が行っている。全エネルギー吸収ピークより高エネルギー側に若干の除去できない成分があるもののほぼ単一エネルギー電子線に対する応答関数と同じ形状・比率であることがわかった。

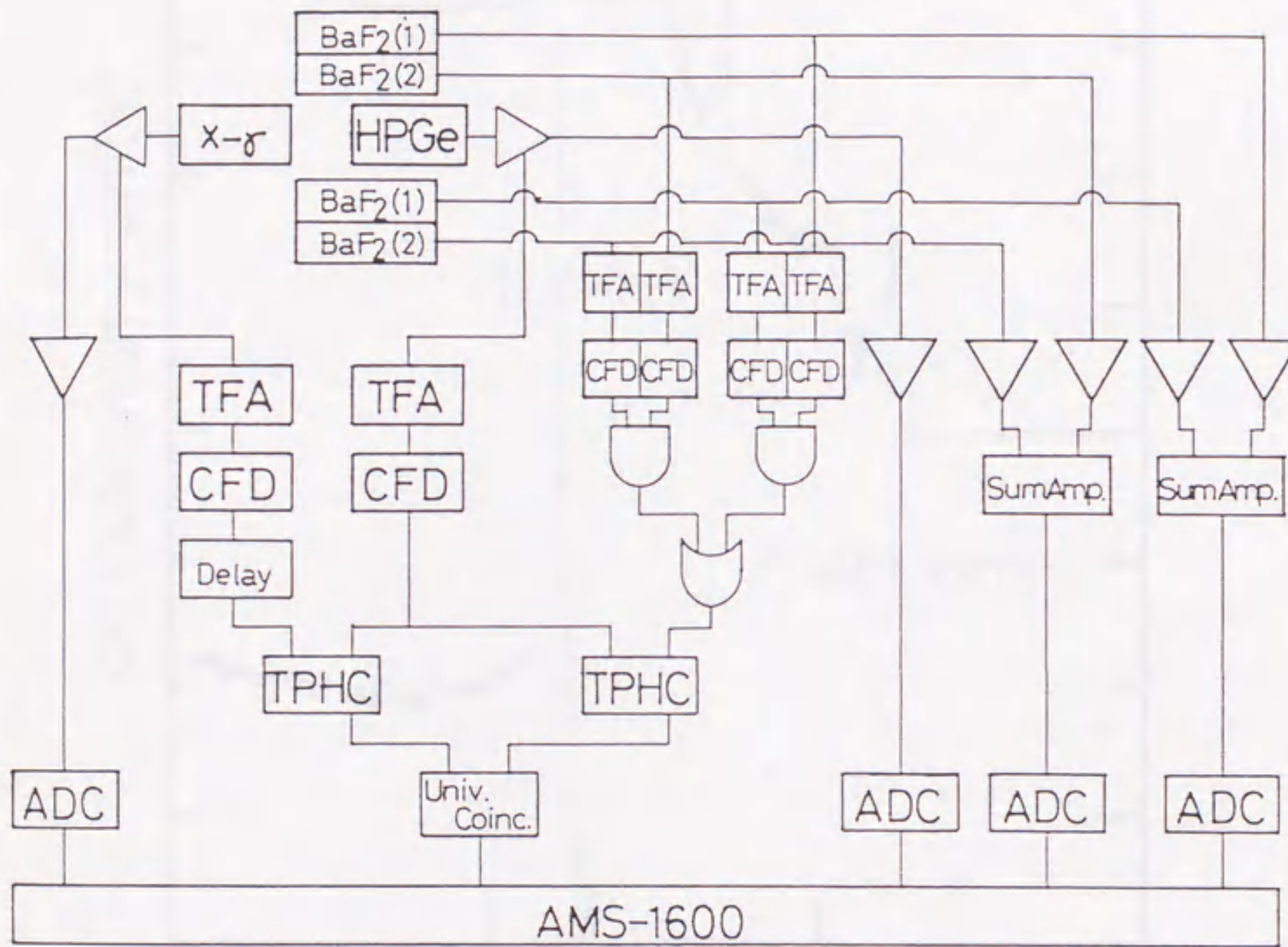


Fig. 3-9: Schematic diagram of the electronics for the $\beta^+ - 2\gamma - \gamma$ coincidence measurement.

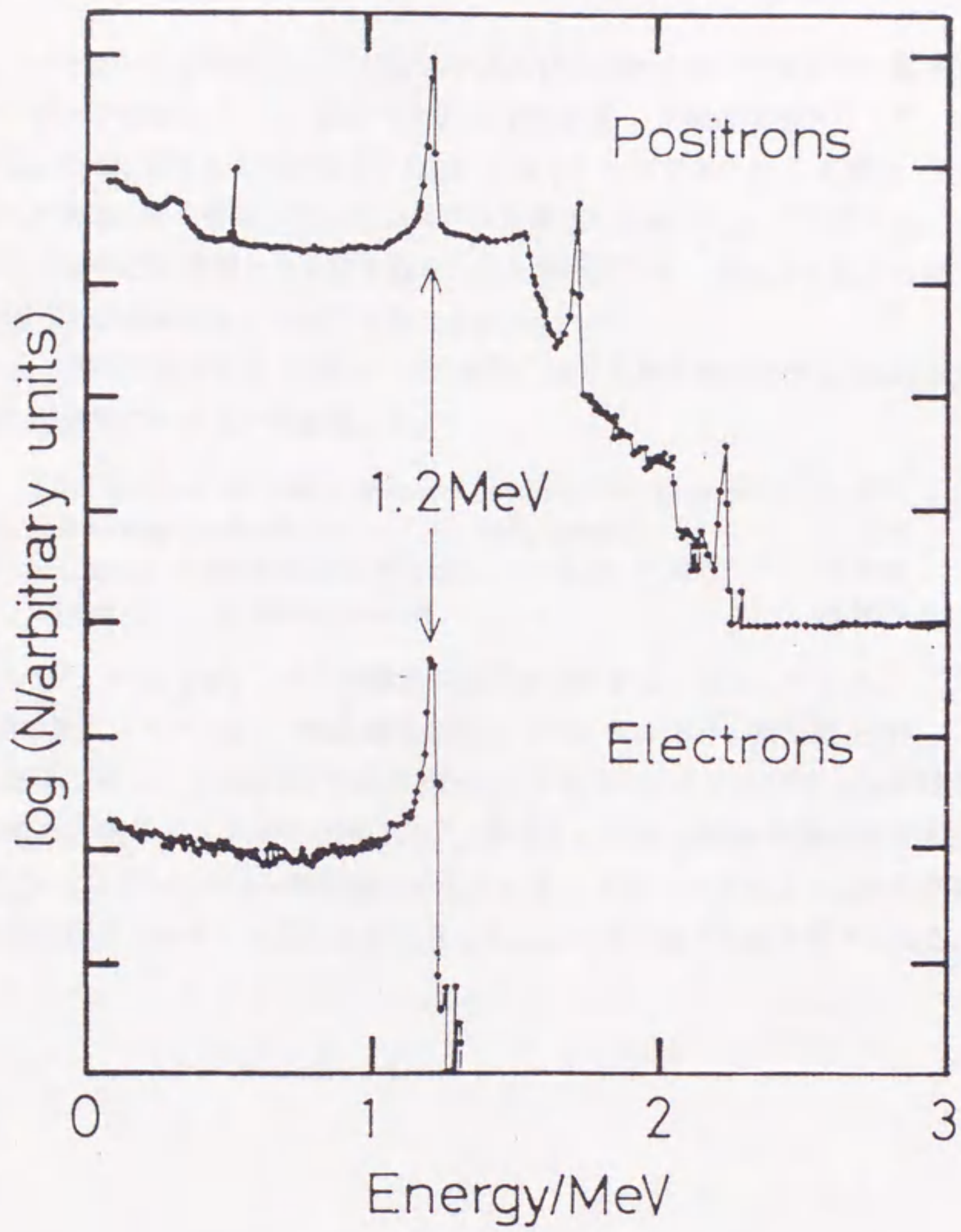


Fig. 3-10: Experimental response function of the HPGe detector for monoenergetic positrons and electrons of 1.2 MeV.

測定したスペクトルの解析は、このシステムの応答関数を単一エネルギー電子線に対するものと同じと仮定して、 β^- 線スペクトルの解析[3]と同様の手順で行った。解析の結果、 ^{68}Ga の Q_β 値として2.914(10) MeVを導くことができた。この値は、HPGe検出器のみの消滅 γ 線の寄与を含んだシステムで測定した結果とよく一致する。このことから陽電子線の応答関数をそのまま取り入れた解析方法は、複雑な手法であるが正当な結果を導く検出効率の良い方法であることがわかった。

$\beta^+-2\gamma^\pm$ 同時計数測定での β^+ 線シングル測定に対する相対検出効率は $3.0\pm 0.5\%$ であった。個々の効率は次のように評価した。

Ω	:solid angle of the BaF_2 detectors covering the Ge crystal.	$\simeq 50\%$
ϵ	:full energy peak efficiency of the BaF_2 detector.	$\simeq 40\%$
T	:transmission coefficient of 511 keV in the Ge crystal.	$\simeq 70\%$
f	:efficiency of the electric circuit.	$\simeq 90\%$

$\epsilon^2 \times \Omega \times T^2 \times f^2 \simeq 3.2\%$ となり実験から求めた3%をよく再現している。

今回の測定システムは、消滅 γ 線検出器として2対の BaF_2 検出器を用い、 β^+ 線シングル測定に対して $3.0\pm 0.5\%$ の相対検出効率であった。このシステムを短寿命中性子欠損核種の β^+ 線最大エネルギー測定に広く適用するには、消滅 γ 線検出器を検出効率の高いBGOシンチレーション検出器にすることで、測定システムとして検出効率を約3倍の10%程度まで大きくすることが可能であり十分実用性があると考えられる。

第4章

短寿命中性子欠損核の β^+ 線測定

4.1 重イオン反応による中性子欠損核の生成および分離

加速器で重イオンを加速し標的核と衝突させることで生成する原子核は、安定領域から遠く離れた不安定核である。これらの核種の特徴は、

1. 中性子欠損核であり β^+/ϵ の崩壊連鎖を形成する。
2. 半減期で数秒から数分程度の短寿命核種で、崩壊の Q 値が大きい ($\sim 10\text{MeV}$)。

この領域で β^+ 線の最大エネルギーを測定し、崩壊の Q 値 (Q_β) を決定することは各種の質量公式の検証を安定領域から離れた領域で行えるという意味で重要である。

β^+ 線測定の実験は、日本原子力研究所東海研究所の 20 MV タンデム静電加速器に付設されているオンライン同位体分離器 (JAERI-ISOL; Japan Atomic Energy Research Institute, Isotope Separator on-line)[56] で行った。JAERI-ISOL の概略図を Fig. 4-1 に、主な性能を Table 4-1 に示す。 $^{125,126,127}\text{Pr}$ の β^+ 線測定の予備実験については 4.3.2 で述べる。

Table 4-1: Performance of the JAERI-ISOL.

Mass range	1 to 270 amu for single-charged ions
Resolving power $M/\Delta M$	1500 or greater
Acceleration voltage	10 - 100 kV
Type of the ion source for on-line experiments	A surface-ionization type ion source
Temperature of the ion source	Up to 2800 K

測定対象としては、遷移核領域にありこれまで多くの原子質量測定が行われて精密な評価がなされている Cs の同位体と、現在まであまり測定例のない Ba の同位体を選ん

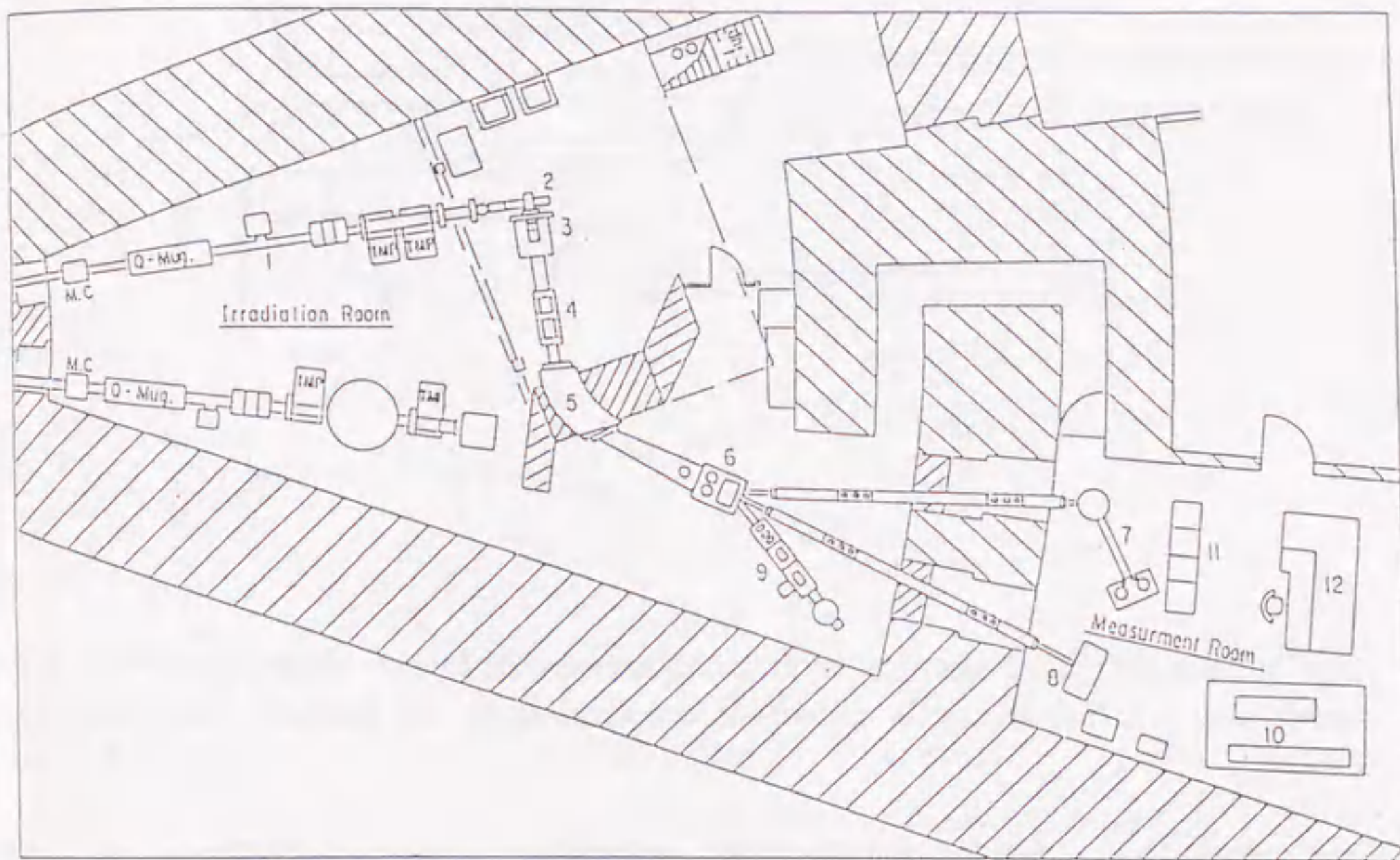


Fig. 4-1: General layout of the JAERI-ISOL. (1) tandem beam line, (2) ion source, (3) extraction chamber, (4) quadrupole doublet, (5) analyzing magnet, (6) collection chamber, (7) tape transport system I, (8) tape transport system II, (9) laser beam path, (10) laser apparatus, (11) data acquisition system and (12) control console.

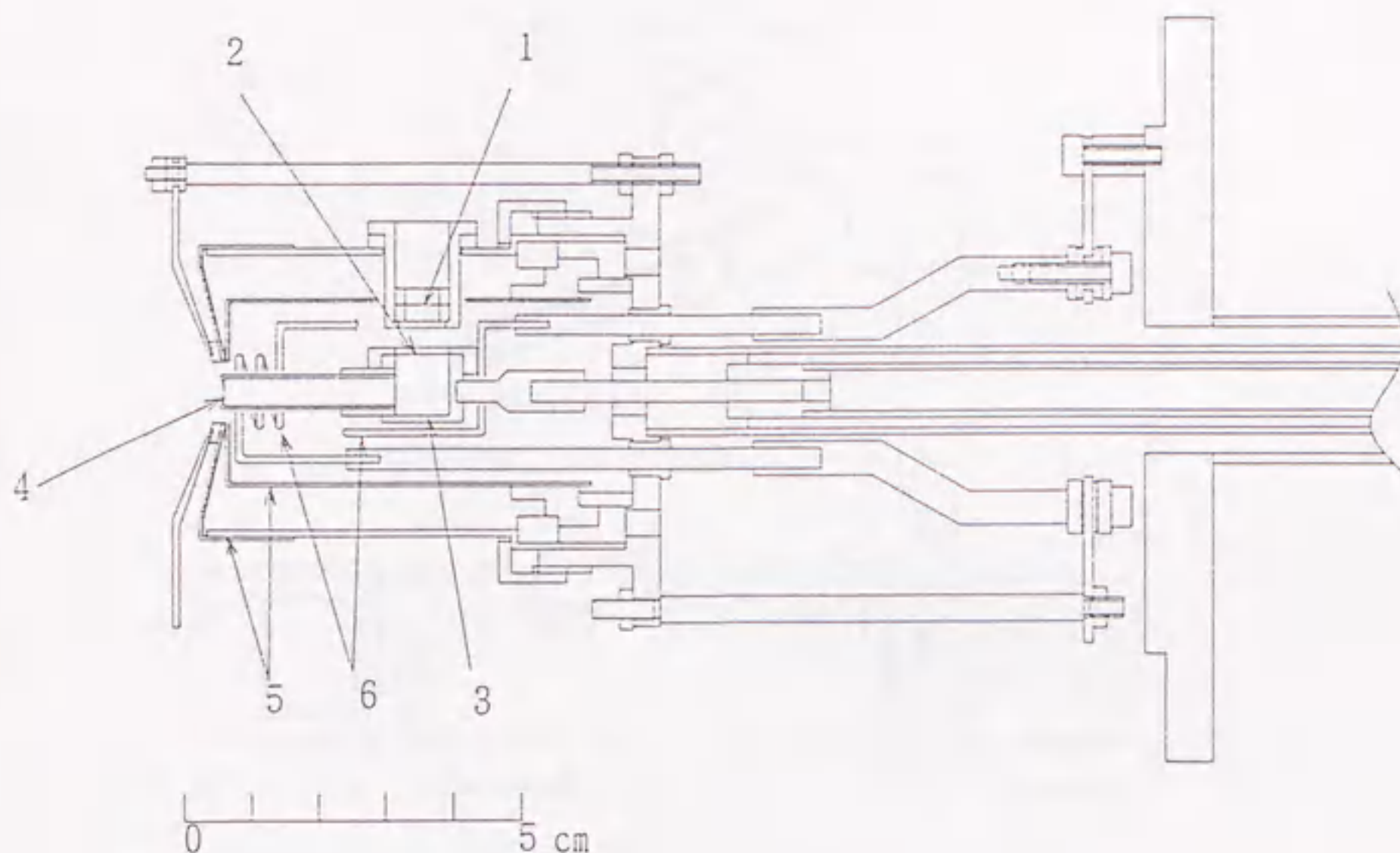


Fig. 4-2: A schematic view of the thermal ion source. (1) target, (2) thin window foil, (3) vaporizer, (4) ionizer (W; inner surface is covered by a thin Re foil), (5) heat shield and (6) filament.

だ。これらの核種を得るために、対象核種毎に適切な重イオン核反応として、 $^{32}\text{S}^{10+} + \text{Mo}$ 反応と $^{35}\text{Cl}^{11+} + \text{Mo}$ 反応の2種類の反応を選択した。Table 4-2 にタンデム加速器および JAERI-ISOL の実験条件を示す。反応によりターゲットより反跳された原子核は、イオン源内でイオン化され引き出される (Fig. 4-2)。

Table 4-2: Experimental conditions for production of Cs and Ba isotopes in the JAERI-ISOL.

Produced nuclide	Projectile		Target		
	Energy (MeV/u)	Current (particle nA)	Thickness (mg/cm ²)		
$^{121-124,126}\text{Cs}$, ^{125}Ba	$^{32}\text{S}^{10+}$	5.2	40	^{nat}Mo	4
$^{121,123}\text{Ba}$	$^{35}\text{Cl}^{11+}$	5.3	45	$^{92}\text{Mo}^{\dagger}$	3

\dagger Enriched to 97.37%

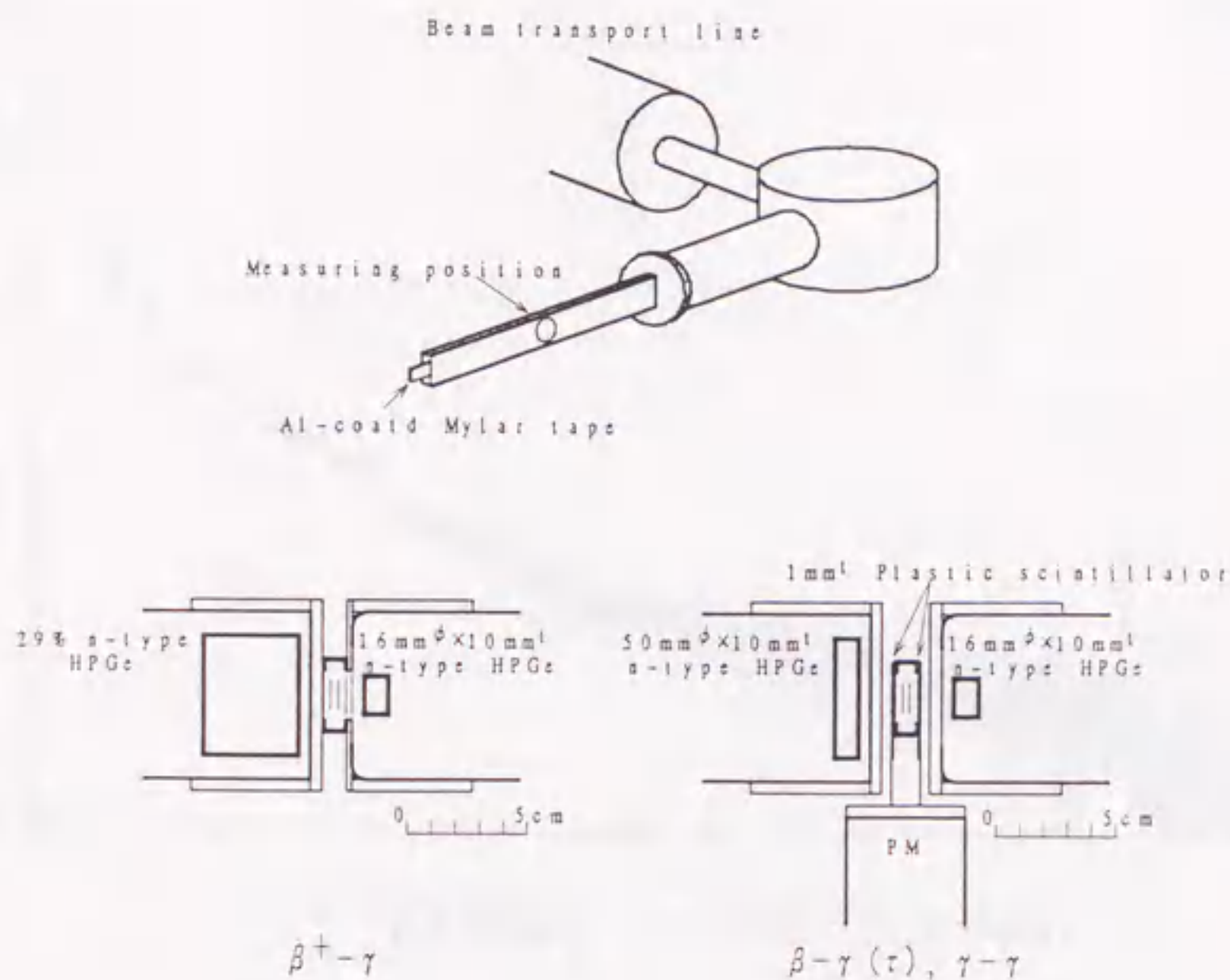


Fig. 4-3: Schematic view of the detector setup at the JAERI-ISOL.

重イオン反応によって生成された線源は質量分離されたのち、テープ装置のアルミニウム蒸着マイラテープ上に収集した。一定時間収集した線源はテープ装置によって測定位置に運び測定を行った。テープ装置の時間設定は半減期等を考慮して決めた。

4.2 β^+ 線測定

β^+ 線検出器としては、前述の単一エネルギー陽電子線に対する応答関数が作成済みのLEPS (Low Energy Photon Spectrometer: $16\text{ mm}^\phi \times 10\text{ mm}^t$, $50\text{ }\mu\text{m}$ thick Be Window) を用いた。 β^+ - γ 同時計数測定を行うために29% n型 HPGe 検出器を γ 線検出器として用いた。測定位置の概略図を Fig. 4-3 にあげる。高計数率による β^+ 線検出器の偶然同時計数を低減するために、LEPS の増幅器の波形整形時定数は $0.5\text{ }\mu\text{s}$ に設定した。測定時の計数率は $100\sim 2000\text{ cps}$ で、各々の核種についての測定は解析時に重要となるスペクトルの上端の約 1 MeV のエネルギー範囲の全計数が数万カウントになることを目標に行った。測定時間は各質量数につき、7~24 時間である。

また、反応系の中で収量の一番多い ^{126}Cs については $\beta^+-2\gamma^\pm-\gamma$ 同時計数測定を行った。システムとしての検出効率を考慮して、58 時間の測定を行った。

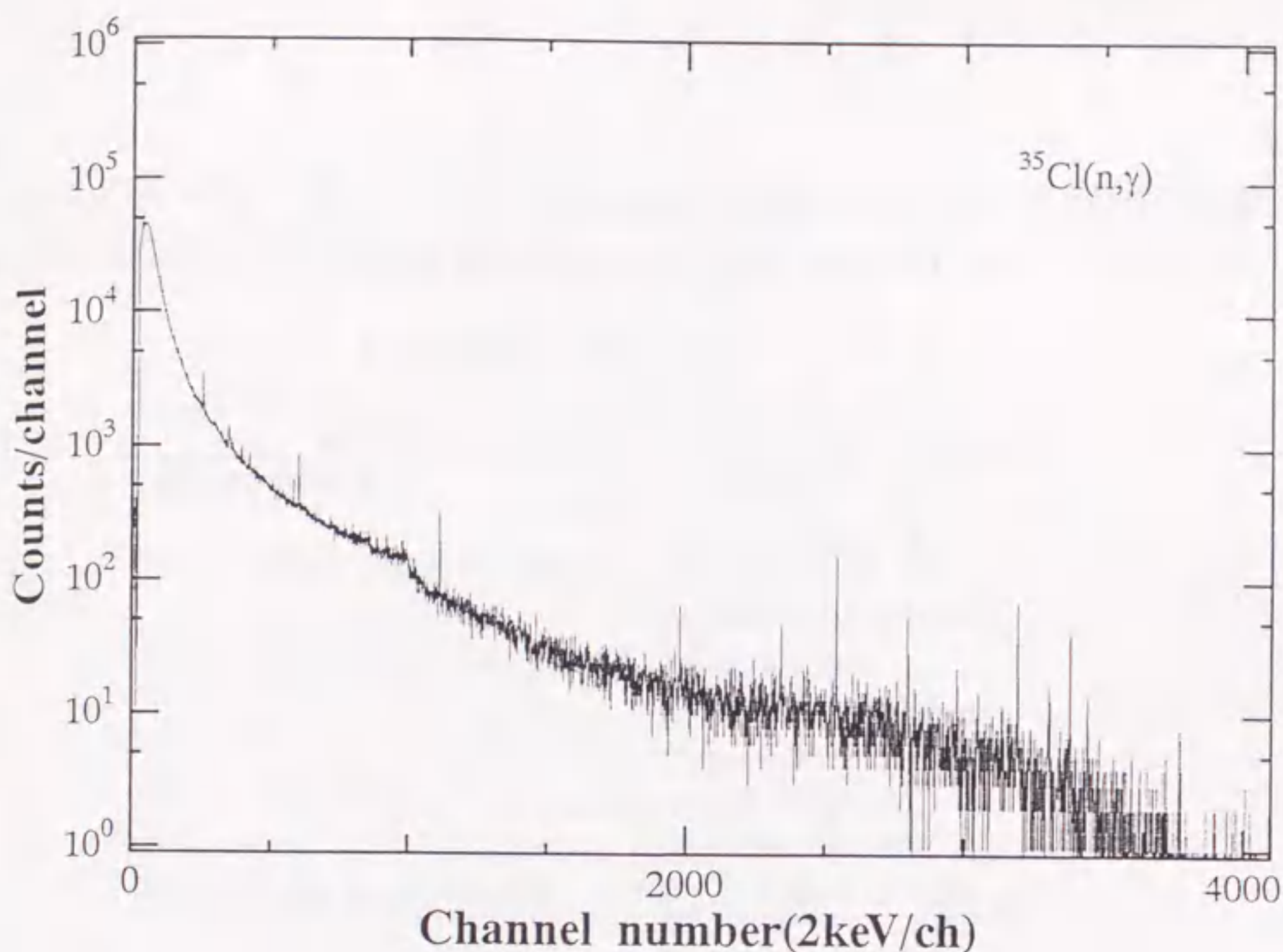


Fig. 4-4: Gamma-ray singles spectrum of prompt γ -rays from the thermal neutron capture of ^{35}Cl with an HPGe β -ray detector.

LEPS のエネルギー較正は ^{56}Co の γ 線と、 ^{252}Cf の自発核分裂で生じた中性子を用いて Fe 及び Cl の即発 γ 線 ($^{56}\text{Fe}(n,\gamma)$, $^{35}\text{Cl}(n,\gamma)$) を発生させて行った [57]。使用した ^{252}Cf 線源の強度は 3.5 MBq である。約 2 時間の測定で得られたスペクトルを Fig. 4-4 に示す。

多次元測定 of データ収集は (株) ラボラトリ・イクイップメント・コーポレーション製のマルチパラメータシステム AMS-1600 を NEC PC-9801 で制御して行った。同時計数事象のデータは リストモードで磁気テープに記録した。個々のエネルギースペクトルは フロッピーディスク上に記録した。

4.3 崩壊図式の作成

4.3.1 $^{121,123,125}\text{Ba}$ の崩壊

Fermi-Kurie プロット による β^+ 線最大エネルギーの決定には β^+ 遷移強度を含む崩壊図式の情報が必要であるため情報の乏しい $^{121,123,125}\text{Ba}$ について崩壊図式の作成を行った。JAERI-ISOL で質量分離された線源は、テープ装置によって測定位置に運ばれた後

γ 線シングルス測定、 γ 線 Spectrum Multichannel Scaling (SMS) 測定、 γ - γ 同時計数測定及び β - γ 遅延同時計数測定をそれぞれ行った。使用した検出器を Table 4-3 に示す。

Table 4-3: Detectors used for the experiments.

Detector	Measurement(Data size)
29% n-type HPGe	γ singles(4096 ch), $\gamma\gamma$ (4096 ch \times 4096 ch)
HPGe-LEPS (16mm ϕ \times 10mm t)	β^+ singles(4096 ch), $\beta^+\gamma(E)$ (4096 ch \times 4096 ch)
HPGe-LEPS (25mm ϕ \times 15mm t)	γ singles(4096 ch), $\gamma\gamma$ (4096 ch \times 4096 ch), $\beta\gamma(t)$ (4096 ch \times 4096 ch)
HPGe-LEPS (50mm ϕ \times 10mm t)	γ singles(4096 ch), $\gamma\gamma$ (4096 ch \times 4096 ch)
Plastic scintillation detector	$\beta\gamma(t)$ (4096 ch \times 4096 ch)

線源の調整

$^{121,123,125}\text{Ba}$ は Mo ターゲットを $^{32}\text{S}^{10+}$ イオンにより照射し重イオン核反応によって合成した。反応によりターゲットから反跳された原子核は、イオン源内でイオン化され引き出される。Table 4-4 にタンデム静電加速器及び ISOL の実験条件を示す。

引き出された原子核は ISOL で質量分離されたのち、テープ装置のアルミニウム蒸着マイラテープ上に収集した。一定時間収集した線源はテープ装置によって測定位置に移動し測定を行った。テープ装置の時間設定は対象核種の半減期の約 2 倍を基準として収集-測定を繰り返した。

測定

γ 線測定 γ 線シングルス測定、 γ - γ 同時計数測定を行って、 γ 線エネルギー及びコインシデンス関係を決定した。Fig. 4-3 に示すように HPGe 検出器はテープカナルをはさんで 180° 位置に配置した。検出器の周りはバックグラウンドを抑止するために 4 mm t の銅板と鉛ブロックで遮蔽した。

β 半減期測定 β 半減期は測定試料が測定位置に運ばれてからの約 2 半減期を 16 分割して測定した。各々の分割した測定スペクトルはテープ装置の運転と連動させて加算し

Table 4-4: Experimental condition of the tandem accelerator and the JAERI-ISOL.

Tandem accelerator	
Beam	: $^{32}\text{S}^{10+}$
Energy	: $\sim 165 \text{ MeV}$ ($\sim 5.2 \text{ MeV/u}$)
Current	: $\sim 400 \text{ enA}$ ($\sim 40 \text{ pA}$)
JAERI-ISOL	
Target	: $^{\text{nat}}\text{Mo}$ (4 mg/cm^2) : ^{92}Mo (3 mg/cm^2)
Accelerator voltage	: 50 kV
Extraction voltage	: 20 kV
Temperature of Ion Source	$\sim 2500 \text{ K}$

た。半減期測定は(株)ラボラトリ・イクイップメント・コーポレーション製のスペクトル・マルチチャンネル・スケーリング システム SMS-48 を NEC PC-9801 で制御して行った。

励起準位寿命測定 原子核の励起準位寿命を、プラスチックシンチレーション検出器を β 線検出器に、HPGe-LEPS ($25 \text{ mm}^{\phi} \times 15 \text{ mm}^t$) を γ 線検出器に用いて β - γ 遅延同時計数法で測定した。

近傍核種の系統性から $^{121,123,125}\text{Ba}$ の崩壊では $5/2^+ \rightarrow 1/2^+$ 準位間の E2 遷移に伴う比較的長い寿命 (\sim 数 10 ns) が予測されるため、解析は傾斜法で行った。

4.3.2 未知核種 $^{125,127}\text{Pr}$ の探索と ^{126}Pr の崩壊

中性子欠損側の原子核の存在限界に近い領域を研究するため、陽子結合エネルギーが負となる陽子ドリップライン近傍の Pr 同位体 ($^{125,126,127}\text{Pr}$) について Q_{β} の決定に必要な崩壊図式作成の実験を行った。このうち、 $^{125,127}\text{Pr}$ は半減期や崩壊に伴う γ 線などが確認されていない未知核種である。

実験は日本原子力研究所高崎研究所の AVF サイクロトロンに付設されているオンライン同位体分離器 (TIARA-ISOL, Takasaki Ion Accelerators for Advanced Radiation Application, Isotope Separator on-Line) で行った。短寿命中性子欠損核種 $^{125,126,127}\text{Pr}$ はそれぞれ $^{36}\text{Ar}(^{92}\text{Mo}, p2n)^{125}\text{Pr}$, $^{36}\text{Ar}(^{92}\text{Mo}, pn)^{126}\text{Pr}$, $^{36}\text{Ar}(^{94}\text{Mo}, p2n)^{127}\text{Pr}$ の重イオン核反応によって合成した。反応によりターゲットから反跳された原子核は、イオン源内でイオン化され引き出される。

Table 4-5: Experimental condition of the JAERI AVF cyclotron and the TIARA-ISOL.

AVF cyclotron	
Beam	: $^{36}\text{Ar}^{8+}$
Energy	: 195 MeV (5.4MeV/u)
Current	: 250 pA
TIARA-ISOL	
Target	: Enriched ^{92}Mo (97.37%, 3 mg/cm ²) : Enriched ^{94}Mo (93.9%, 3 mg/cm ²)
Accelerator voltage	: 40kV
Extraction voltage	: 20kV
Temperature of Ion Source	~2600K

Table 4-5に AVF サイクロトロン及び TIARA-ISOL の実験条件を示す。

イオン源の性能

核反応によりイオン源内には Ba, La, Ce, Pr, Nd の様々な同位体が存在しイオン化されるため、質量分離したビームには同重体が含まれる。希土類元素の金属単体と一酸化物での元素毎のイオン化挙動の違いを利用して、実験目的に応じて金属イオン(M^+)または酸化物イオン($M^{16}O^+$:質量数+16)として質量分離した。

Fig. 4-5 に希土類元素の金属単体のイオン化ポテンシャル($IP(M)$)、一酸化物のイオン化ポテンシャル($IP(MO)$)、一酸化物の解離エネルギー($D_0(MO)$)を示す[74]。La, Ce, Pr, Nd は Ba に比べ酸化物の解離エネルギーが大きく(高温で安定)、イオン化ポテンシャルも酸化物で小さい。そのため、イオン源内に残留している酸素と結合を起こした反応生成物は、Ba をのぞきイオン源内に安定に存在し、金属イオンより酸化物イオンとして多くイオン化される。また、Pr, Nd は酸化物の解離エネルギーが La, Ce に比べて小さいため、イオン源温度を高く設定した場合、解離して金属イオンとして取り出し易くなる。Fig. 4-6 にイオン源温度による希土類元素の、酸化物イオンと金属イオンの強度比を示す。この手法を使うことにより、新核種 ^{127}Pr の探索において崩壊に伴って放出される Ce の特性 K_{α} X線の確認を、同重体の ^{127}Ba の崩壊に伴う Cs の特性 K_{β} X線の妨害無しに測定することができた。(Fig. 4-7)

反応生成物は、ターゲットから反跳されイオン源蒸発室内 Catcher foil に打ち込まれる。打ち込まれた反応生成物は、熱せられイオン源内に蒸発し、イオン源イオン化室内でイオン化されるが、イオン化されるまでの時間(イオン源内滞留時間)は各元素毎に異

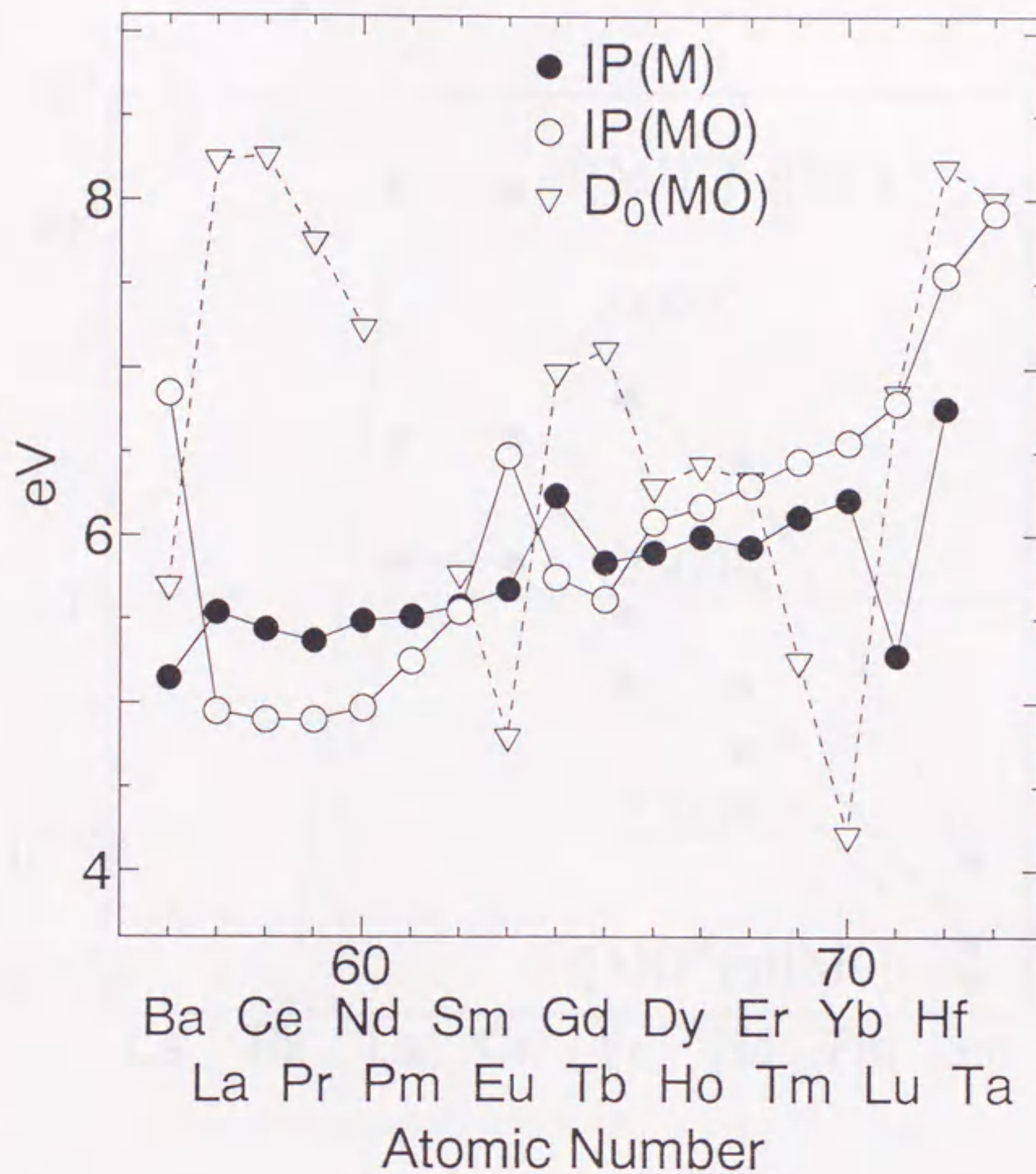


Fig. 4-5: Dissociation energies of the neutral gaseous monoxides and the first ionization potentials of the gaseous atoms and monoxides for elements 56-73.

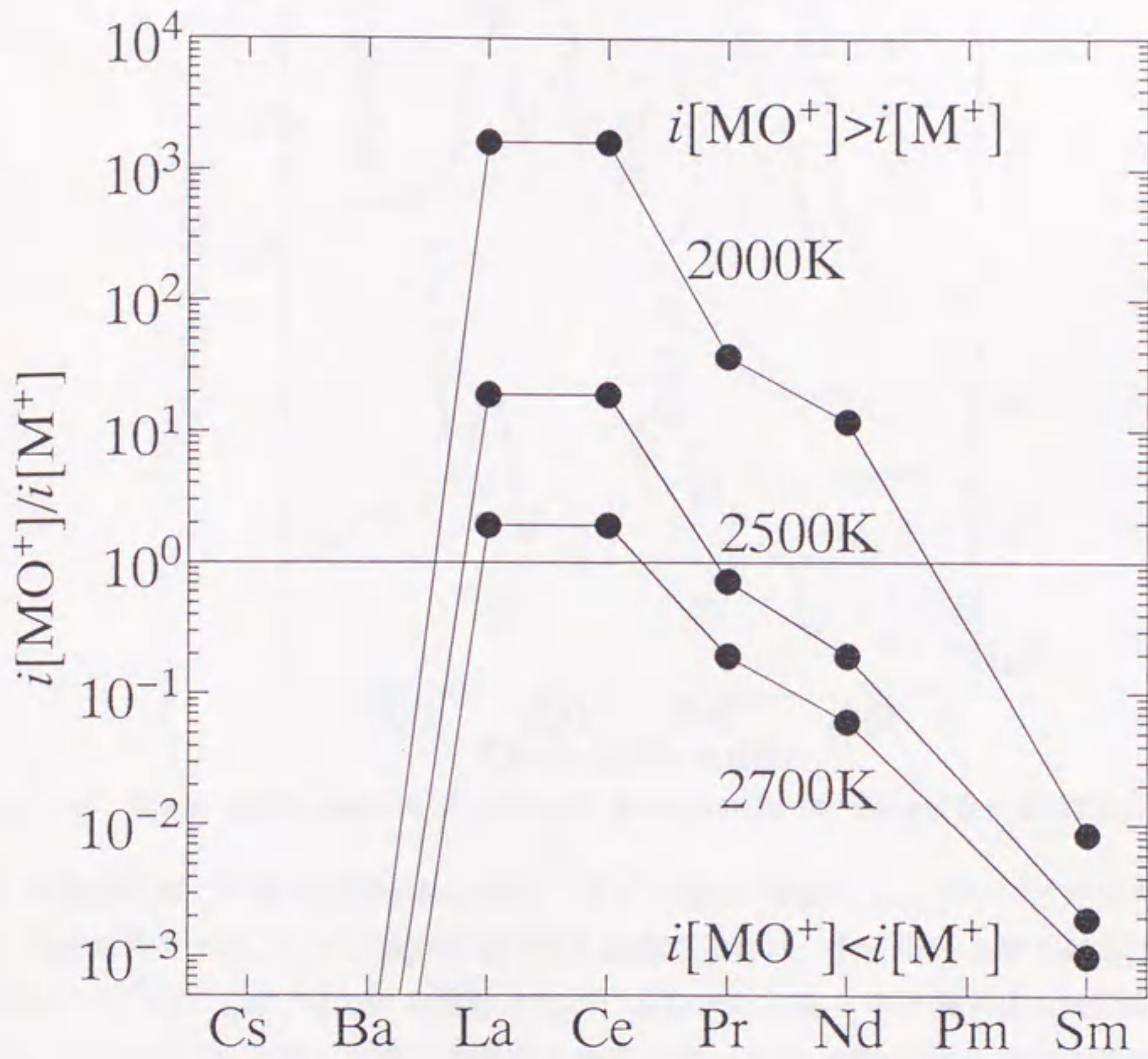


Fig. 4-6: Ionization characteristics of atom and monoxide.

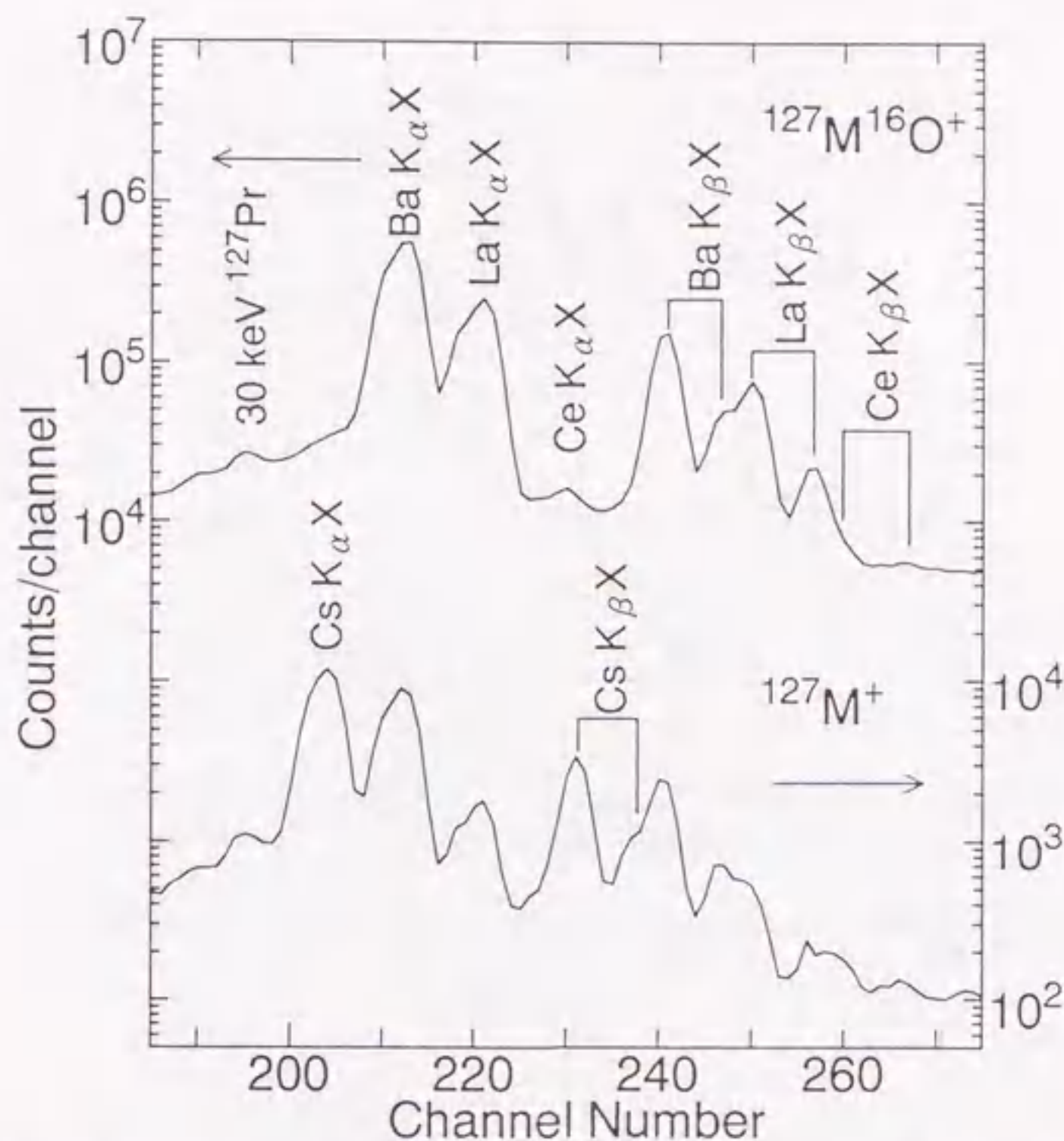


Fig. 4-7: X-ray region spectra of the oxide and metallic ion beams for $A=127$.

なる。半減期に対して滞留時間が長い場合、イオン源内で崩壊してしまい、イオンの引き出し収量は減少する。イオン源内滞留時間を測定するため、 ^{36}Ar ビームを入射してイオン源内に ^{131}Pr ($T_{1/2}=1.7$ min) を飽和させビームを止めた後、その掃き出し時間を測定した。(Fig. 4-8) Pr に関して滞留時間は 2 成分 ($T_{1/2}^{del.}=4.3$ s, $T_{1/2}^{del.}=22$ s) 存在する事が確認され、速い成分の存在により数秒程度の短寿命の Pr 同位体に関して使用するイオン源でのイオン化が可能であることが判った。

測定

引き出された原子核は ISOL で質量分離されたのち、短寿命核分光装置テープ装置のアルミニウム蒸着マイラテープ上に収集した。一定時間収集した線源はテープ装置によって測定位置に移動し測定を行った。テープ装置の時間設定は対象核種の予測半減期の約 2 倍を基準として収集-測定を繰り返した。テープ装置によって測定位置に運ばれた線源について n 型 HPGe 検出器、HPGe-LEPS、プラスチックシンチレーション検出器を用いて γ 線シングルス測定、 γ - γ 同時計数測定、 β gated γ 線測定をそれぞれ行った。

多次元測定のためのデータ収集は(株) ラボラトリ・イクイップメント・コーポレーション製のマルチパラメータシステム LN-9000 を NEC PC-9801 で制御して行った。同時計数事象

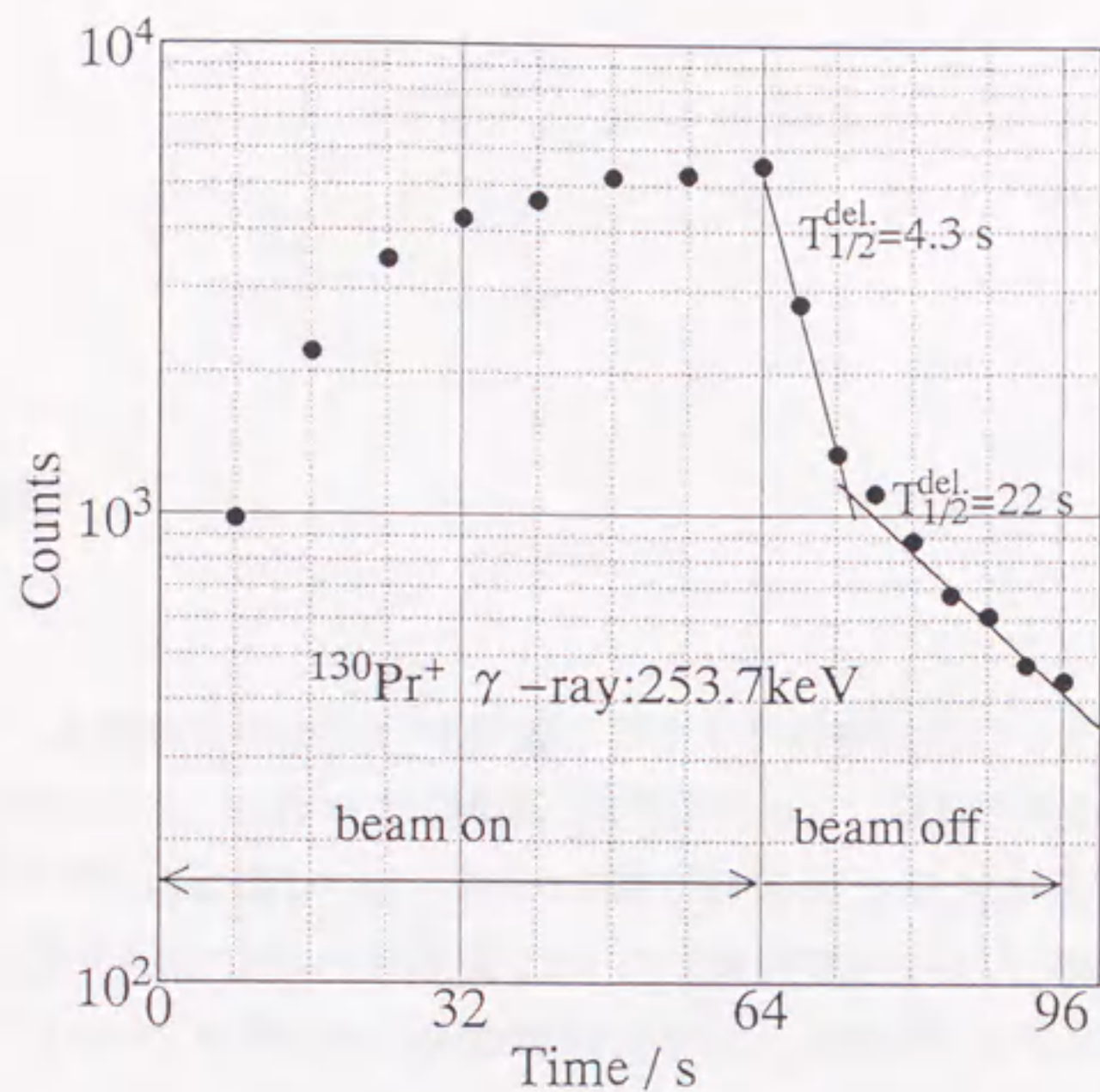


Fig. 4-8: A release profile of the $^{130}\text{Pr}^+$ ion at an ion source temperature of 2600 K.

のデータは リストモードで光磁気ディスクに記録した。

半減期測定は 測定試料が測定位置に運ばれてからの約 2 半減期を 16 分割して測定した。各々の分割した測定スペクトルは テープ装置の運転と連動させて加算した。半減期測定の制御は 同社製のスペクトル・マルチチャンネル・スケーリング システム (MCS : Multi Channel Scaling) SMS-48 を NEC PC-9801 で制御して行った。

第5章

結果 及び 議論

第3章で検討した解析方法を用いて β^+ 線スペクトルの解析を行った。Cs の同位体 ($^{121-124,126}\text{Cs}$) に関しては、これまでに崩壊の研究が行われ、崩壊図式が作られている。Ba の同位体 ($^{121,123,125}\text{Ba}$) に関しては、十分な崩壊の研究は行われておらず、これまで発表されている崩壊図式も低エネルギー領域において不確実であるので、崩壊図式の作成を行った。 125,126,127 については得られる線源強度の制約から崩壊図式の作成にとどまった。

5.1 β^+ 線最大エネルギーの測定

今回測定を行った8核種の中には β^+ 線最大エネルギーが4 MeV を超えるものが含まれている。これらは作成した応答関数の範囲を超えるが、応答関数のエネルギー依存性を外挿して使用した¹。以下にそれぞれの核種について述べる。ここでエンドポイントエネルギー及び加重平均する前の個々の Q_β の誤差に関しては統計誤差のみを示し、最終結果の Q_β の誤差には解析上の系統誤差として第3章で得られた20 keV とあわせた平方誤差を示している。

$^{121,123,125}\text{Ba}$ の崩壊図式の詳細は5.2で述べる。

5.1.1 Ba isotopes

^{121}Ba

これまでの ^{121}Ba の崩壊に関する研究は文献[59]にまとめられている。今回行った γ - γ 同時計数測定の結果では、ここで取り上げられている崩壊図式に示された γ 線の相互関係は確認できなかったため、コインシデンス関係から崩壊図式を作成した。

^{121}Cs は低エネルギー励起準位に強い γ 遷移があることから励起準位への β^+ 線の分岐が考えられる。しかし、 ^{121}Ba の線源は非常に弱く β^+ - γ 同時計数測定のデータで

¹最近行われた応答関数の研究[58]に於いて、今回の実験式による外挿は8 MeV までの実験値を良く再現していることが確認された

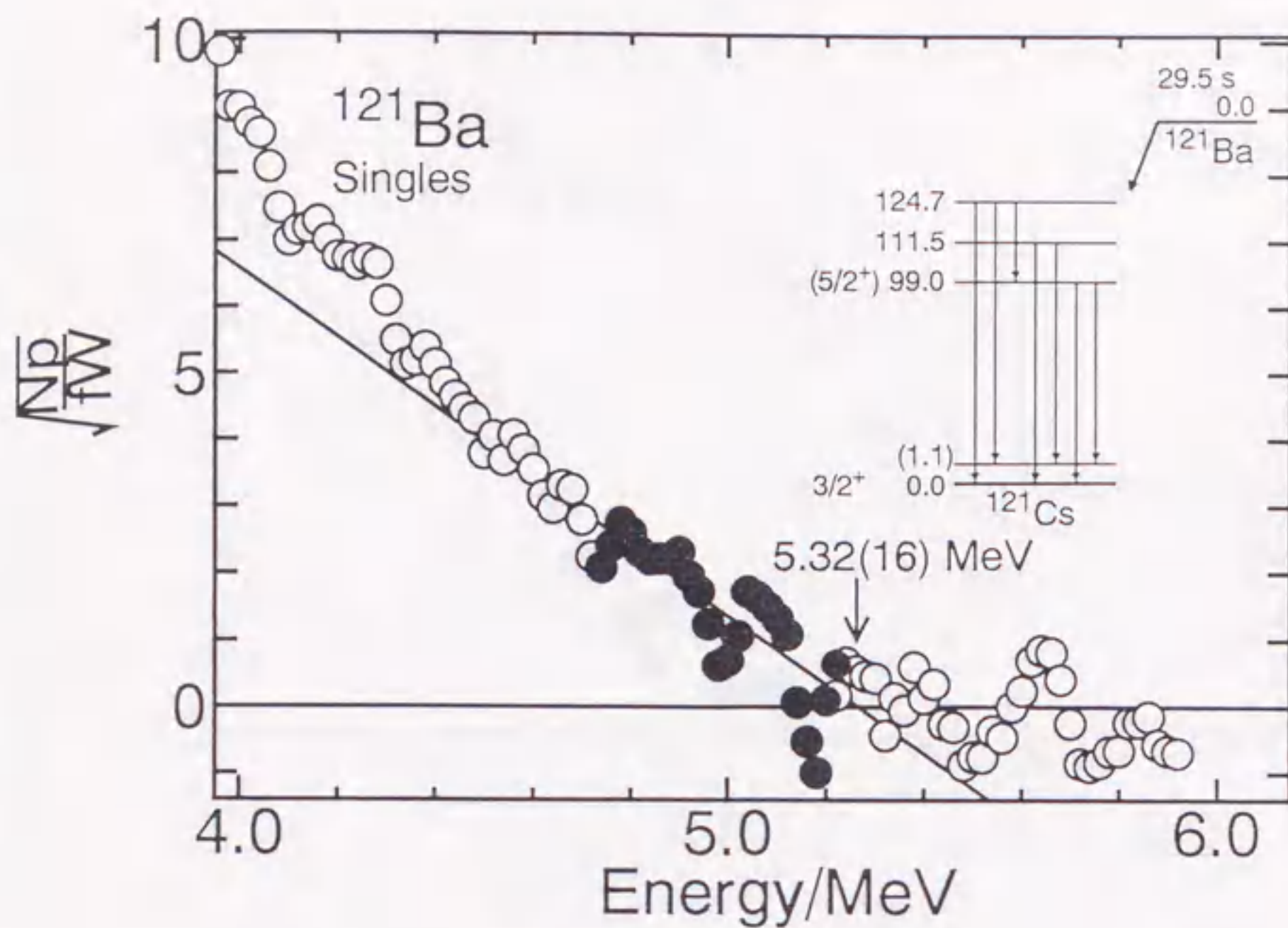


Fig. 5-1-1: Fermi-Kurie plots of the singles β -spectrum of ^{121}Ba measured using a planar-type HPGe detector. The spectrum is corrected with response functions to monoenergetic positrons experimentally determined. The fitting data range is shown by closed circles. A decay scheme is shown in the inset.

は、解析に必要な十分な統計が得られなかった。そこで β^+ 線シングルス測定データを解析した。

得られたスペクトルの Fermi-Kurie プロットを Fig. 5-1-1 に示す。エンドポイントエネルギーから導かれる Q_β は、6.34(16) MeV となる。

^{121}Ba の崩壊に関しては β^+ 遅延陽子放出崩壊の研究 [12] が行われており、 β^+ 遅延陽子のエネルギー 4.2(3) MeV 及び陽子解離エネルギー $S(p)$ の評価値 2.61(5) MeV [31] から導出された Q_β は、6.81(30) MeV となる。

^{123}Ba

^{123}Cs の低エネルギー励起準位は文献 [14, 15] に示されている。 γ - γ コインシデンス関係の結果は Marguier [15] の報告と一致する。崩壊図式から ^{123}Ba は ^{123}Cs の 94.6 keV の励起準位へ強く遷移する。そこでこの励起準位から遷移する γ 線についてゲートを設

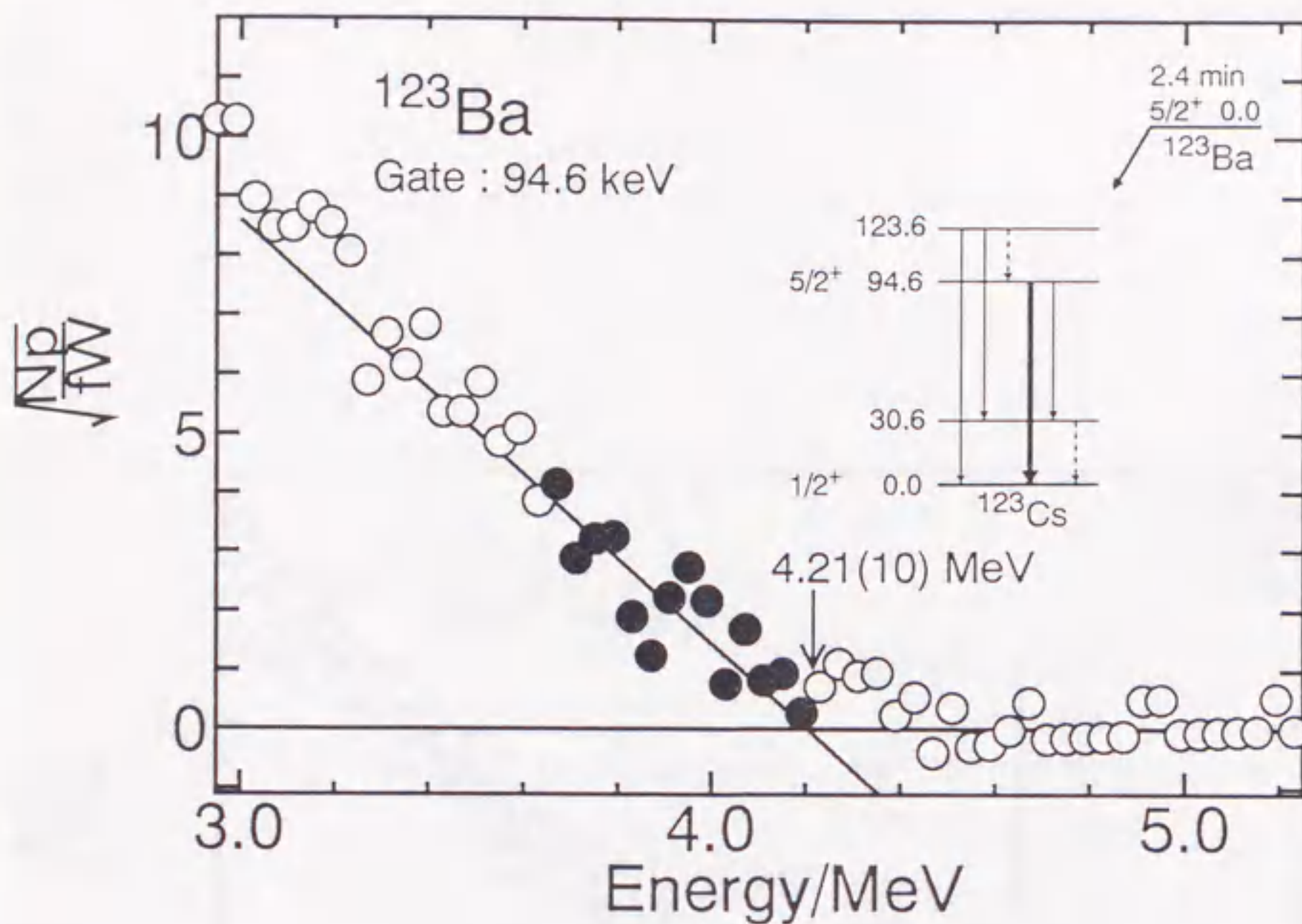


Fig. 5-1-2: Fermi-Kurie plots of the β -spectrum of ^{123}Ba in coincidence with 94.6 keV γ -ray. The fitting data range is shown by closed circles. A decay scheme is shown in the inset.

定して得られた β^+ 線スペクトルに対して解析を行った。Fermi-Kurieプロットしたスペクトルを Fig. 5-1-2 に示す。エンドポイントエネルギーから Q_β 値は 5.33(10) MeV が得られた。

^{125}Ba

γ - γ コインシデンス関係の結果は Arlt [14] の報告と一致する。崩壊図式から、 ^{125}Ba の強い γ 遷移の 77.3, 140.5 keV についてゲートを設定した。140.5 keV γ 線にゲートを設定して得られた β^+ 線スペクトルの Fermi-Kurie プロットを Fig. 5-1-3 に示す。それぞれ得られたエンドポイントエネルギーから Q_β 値は 4.36(6), 4.41(7) MeV となり、加重平均値として 4.38(5) MeV を得た。これまでの報告値は 4.6(2) MeV [16] である。

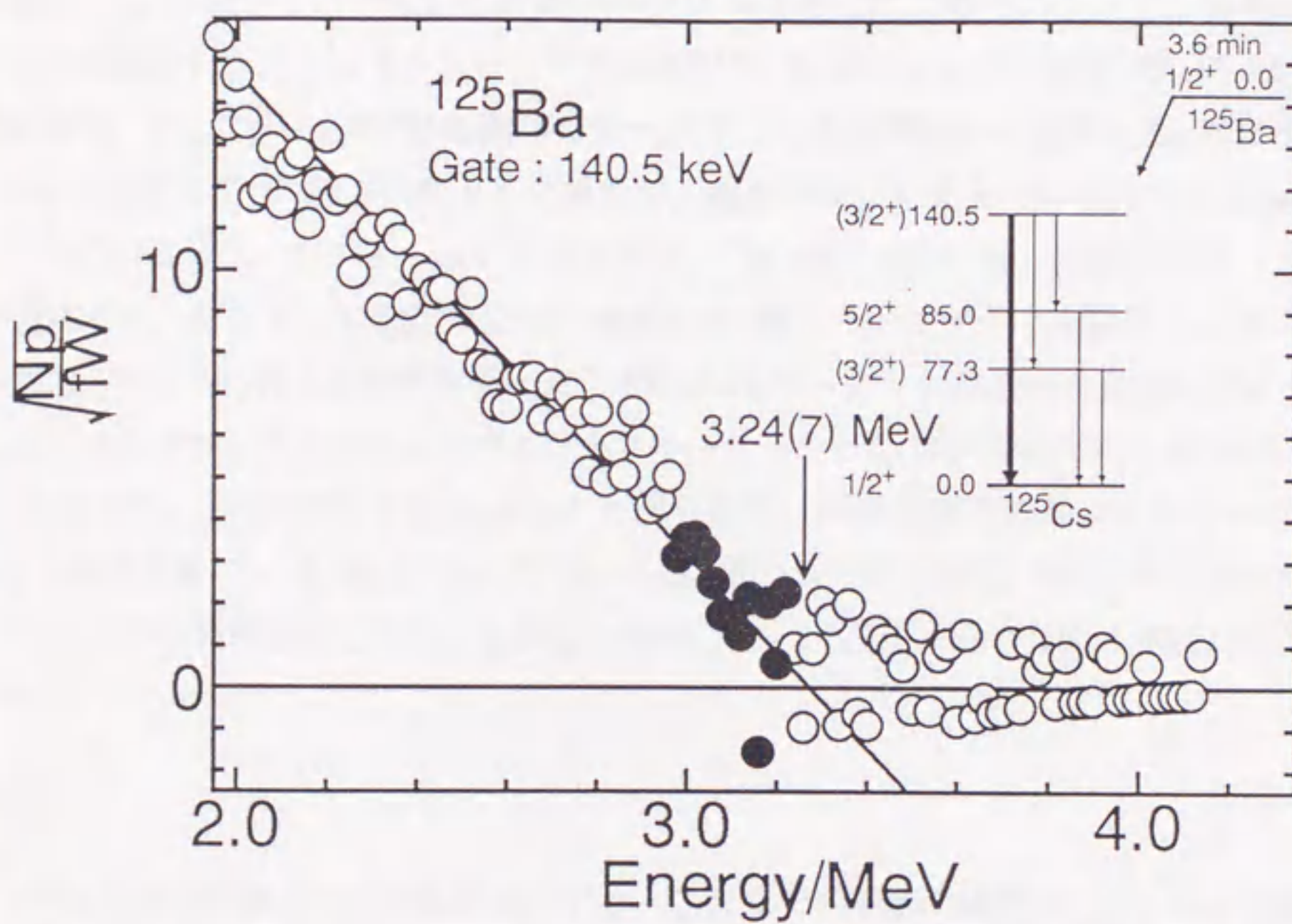


Fig. 5-1-3: Fermi-Kurie plots of the β -spectrum of ^{125}Ba in coincidence with 140.5 keV γ -ray. The fitting data range is shown by closed circles. A decay scheme is shown in the inset.

5.1.2 Cs isotopes

^{121}Cs

重イオン反応によって生成した核種を、質量数 121 で質量分離した場合、測定位置には ^{121}Ba と ^{121}Cs が同時に送られてくる。これまで行われている ^{121}Cs の崩壊の研究 [20] によると ^{121}Cs には半減期が 155 秒の基底状態 (^{121g}Cs) と、122 秒の核異性体 (^{121m}Cs) が存在する。 ^{121g}Cs は ^{121}Xe の基底状態への β^+ 遷移が 48.9% と最も大きい。親核の ^{121}Ba の Q_β が大きく、 ^{121g}Cs の β^+ 線スペクトルを覆っているためシングル測定のスぺクトルを解析することはできない。 ^{121g}Cs は ^{121}Xe の 239.8 keV の励起準位に 9.2% β^+ 遷移する。そこで β^+ - γ 同時計数測定でこの励起準位から遷移する γ 線についてゲートを設定して β^+ 線スペクトルを得たが、統計が少なく十分な解析はできなかった。

^{121m}Cs は ^{121}Xe の 179.5 keV の励起準位へ 15.4%、459.6 keV の励起準位へ 11.0% β^+ 遷移する。そこでこの励起準位から遷移する γ 線についてゲートを設定して得られた β^+ 線スペクトルに対して解析を行った。得られたスペクトルの Fermi-Kurie プロットを Fig. 5-1-4 に示す。各々のエンドポイントエネルギーから Q_β 値はそれぞれ 5.46(4), 5.49(9) MeV となり、加重平均 5.47(4) MeV が得られた。核異性体の励起エネルギーは 68.5 keV と報告されている [20] ため、 ^{121g}Cs の Q_β 値としては 5.40(4) MeV が得られた。

これまでの報告値としては $\geq 5.64(37)$ MeV [17], 5.37(10) MeV [18], 5.40(2) MeV [19] がある。

^{122}Cs

^{122}Cs は測定位置での妨害反応はないが、これまでの崩壊の研究 [21, 22] から半減期が 21 秒の基底状態 (^{122g}Cs) と、4.2 分の核異性体 (^{122m}Cs) が存在することが分かっている。測定は ^{122g}Cs に注目して行った。 ^{122g}Cs は ^{122}Xe の基底状態へ 46%、331.1 keV の励起準位へ 36% の β^+ 遷移をしている。シングルス測定のスぺクトルのデータと 331.1 keV 励起準位から遷移する γ 線についてゲートを設定して得られた β^+ 線スペクトルに対して解析を行った。Fermi-Kurie プロットしたスペクトルを Fig. 5-1-5 に示す。シングルス測定のスぺクトルは基底準位と 331.1 keV 励起準位の 2 成分が含まれるものとして解析した。エンドポイントエネルギーから Q_β 値はシングルススペクトル 基底準位 7.13(5) MeV, 331.1 keV 準位 6.97(12) MeV, β^+ - γ スペクトル 331.1 keV 準位 6.98(10) MeV が得られ、加重平均として 7.08(5) MeV を得た。これまでの報告値には 7.15(70) MeV [17], 7.00(15) MeV [18] がある。

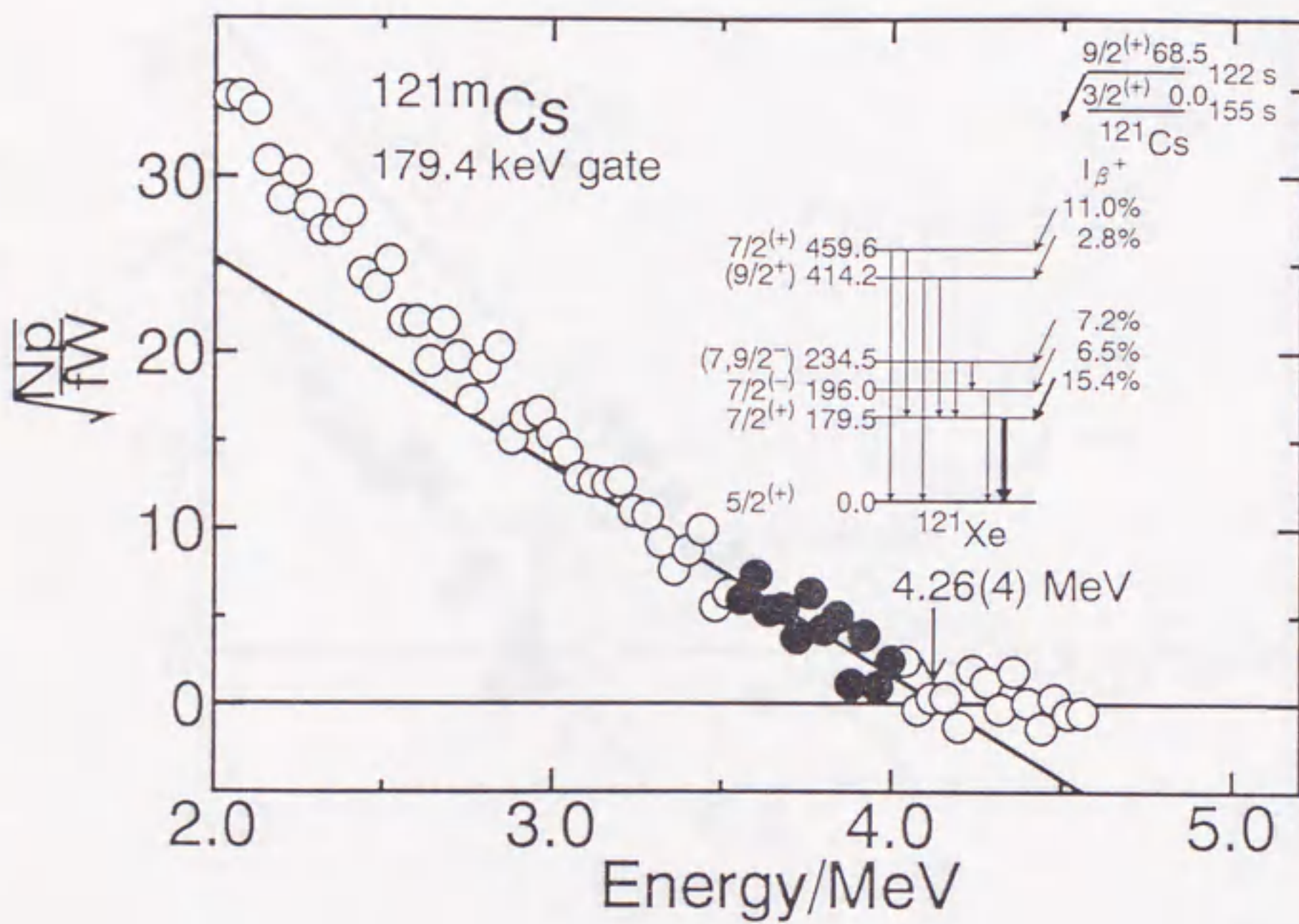


Fig. 5-1-4: Fermi-Kurie plots of the β -spectrum of ^{121m}Cs in coincidence with 179.4 keV γ -ray. The fitting data range is shown by closed circles. A decay scheme is shown in the inset.

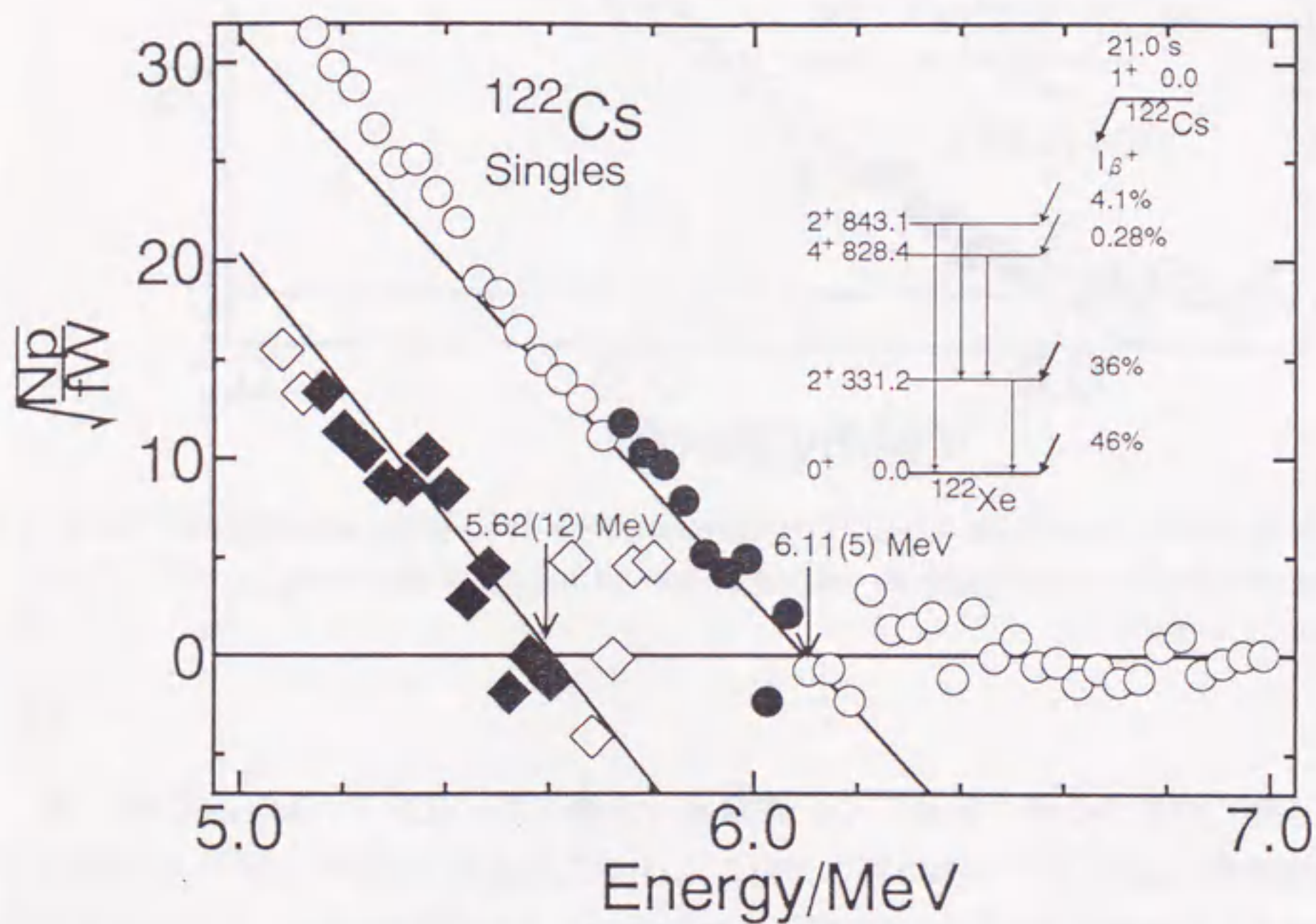


Fig. 5-1-5: Fermi-Kurie plots of the singles β -spectrum of ^{122}Cs . The spectrum is resolved into two components, feeding to the ground state (circles) and the 331.1 keV state (diamonds). The fitting data ranges are shown by closed circles and diamonds, respectively. A decay scheme is shown in the inset.

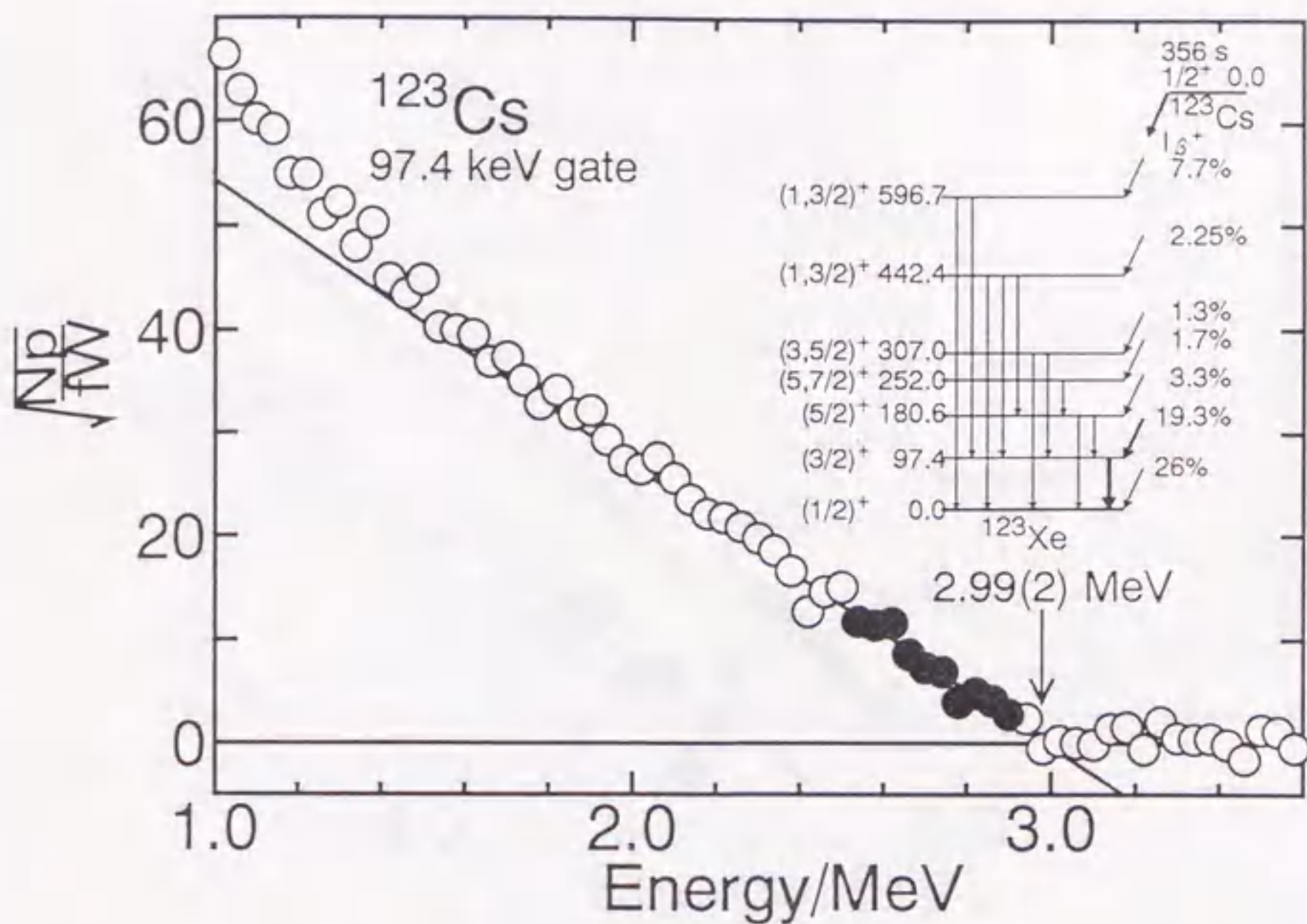


Fig. 5-1-6: Fermi-Kurie plots of the β -spectrum of ^{123}Cs in coincidence with 97.4 keV γ -ray. The fitting data range is shown by closed circles. A decay scheme is shown in the inset.

^{123}Cs

重イオン反応によって生成した核種を、質量数 123 で質量分離した場合、測定位置には ^{123}Ba と ^{123}Cs が同時に送られてくる。これまで行われている ^{123}Cs の崩壊の研究 [15] によると ^{123}Cs には半減期が 356 秒の基底状態 (^{123g}Cs) と、1.7 秒の核異性体 (^{123m}Cs) が存在する。 ^{123m}Cs は 100% 核異性体転移であるため ^{123g}Cs のみに注目する。 ^{123g}Cs は ^{123}Xe の基底状態へ 33% β^+/ϵ 遷移するが、親核の ^{123}Ba の Q_β の方が大きく、 ^{123g}Cs の β^+ 線スペクトルを覆っているためシングル測定のスペクトルを解析することはできない。 ^{123g}Cs は ^{123}Xe の 97.3 keV の励起準位へ 25%、596.4 keV の励起準位へ 11.4% β^+/ϵ 遷移する。そこでこの励起準位から遷移する γ 線についてゲートを設定して得られた β^+ 線スペクトルに対して解析を行った。得られたスペクトルの Fermi-Kurie プロットを Fig. 5-1-6 に示す。エンドポイントエネルギーから導かれる Q_β は、それぞれ 4.10(2) MeV, 4.23(8) MeV となり加重平均値として 4.11(3) MeV を得た。これまでの報告値は 4.10(31) MeV [17], 4.20(10) MeV [18], 4.0(1) MeV [19] である。

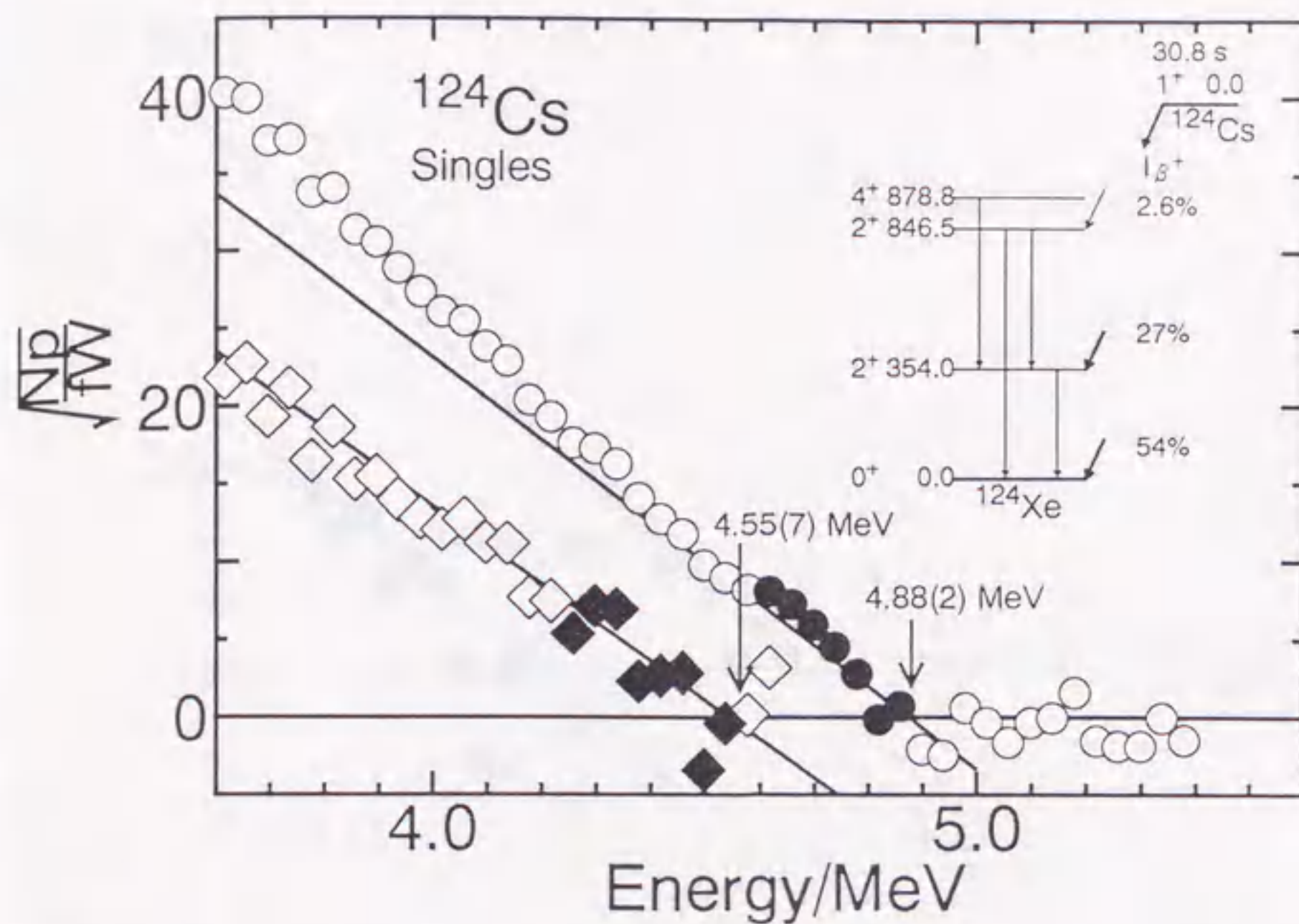


Fig. 5-1-7: Fermi-Kurie plots of the singles β -spectrum of ^{124}Cs . The spectrum is resolved into two components, feeding to the ground state (circles) and the 353.9 keV state (diamonds). The fitting data ranges are shown by closed circles and diamonds, respectively. A decay scheme is shown in the inset.

^{124}Cs

^{124}Cs は測定位置での妨害反応がなく、またこれまでの崩壊の研究[23]から ^{124}Xe の基底状態へ54%、353.9 keVの励起準位へ27% β^+ 遷移する。シングル測定 of β^+ 線スペクトルと $\beta^+-\gamma$ 同時測定 of データでこの励起準位から遷移する353.9 keVの γ 線についてゲートを設定して得られた β^+ 線スペクトルに対して解析を行った。得られたスペクトルの Fermi-Kurie プロットを Fig. 5-1-7に示す。エンドポイントエネルギーから導かれる Q_β は、シングルススペクトル 基底準位 5.91(2) MeV, 353.9 keV 準位 5.92(7) MeV, $\beta^+-\gamma$ スペクトル 353.9 keV 準位 5.88(23) MeV となり加重平均値として 5.91(3) MeV を得た。これまでの報告値は 5.92(46) MeV [17] と 5.90(9) MeV [18] である。

^{126}Cs

^{126}Cs は測定位置での妨害反応がなく、またこれまでの崩壊の研究[25]から ^{126}Xe の基底状態へ48.3%、388.6 keVの励起準位へ24.4% β^+ 遷移する。このためシングル測定

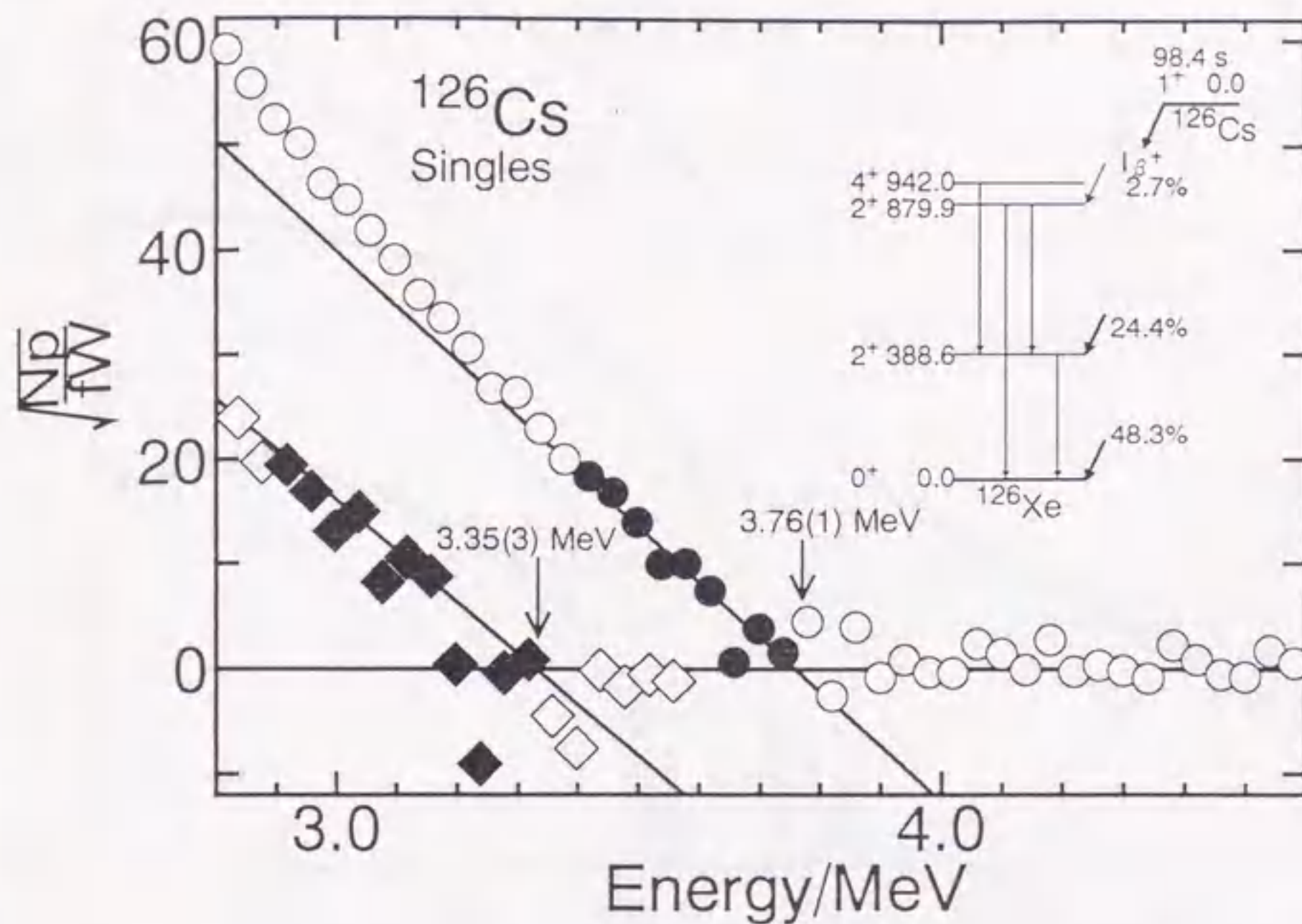


Fig. 5-1-8: Fermi-Kurie plots of the singles β -spectrum of ^{126}Cs . The spectrum is resolved into two components, feeding to the ground state (circles) and the 388.6 keV state (diamonds). The fitting data ranges are shown by closed circles and diamonds, respectively. A decay scheme is shown in the inset.

の β^+ 線スペクトルと $\beta^+-\gamma$ 同時測定の数値でこの励起準位から遷移する 388.6 keV の γ 線についてゲートを設定して得られた β^+ 線スペクトルに対して解析を行った。得られたスペクトルの Fermi-Kurie プロットを Fig. 5-1-8 に示す。エンドポイントエネルギーから導かれる Q_β は、シングルススペクトル 基底準位 4.79(1) MeV, 388.6 keV 準位 4.76(3) MeV, $\beta^+-\gamma$ スペクトル 388.6 keV 準位 4.65(12) MeV となり加重平均値として 4.78(2) MeV を得た。

^{126}Cs に関しては、 $\beta^+-2\gamma^\pm-\gamma$ 同時計数測定を行った。得られたスペクトルを Fig. 5-1-9 に示す。 $\beta^+-2\gamma^\pm$ 同時計数事象で得られたデータを 2 成分の β 遷移として解析して ^{126}Xe の基底状態への遷移に対して 3.81(4) MeV 388.6 keV の励起準位への遷移に対して 3.42(7) MeV の値をエンドポイントエネルギーとして得た (Fig. 5-1-10(A))。 $\beta^+-2\gamma^\pm-\gamma$ 同時計数事象のうち 388.6 keV γ 線にゲートを設定して得られたスペクトルからは 3.39(16) MeV の値を得た (Fig. 5-1-10(B))。これらの値を加重平均して Q_β として 4.83(3) MeV が得られた。この値は、陽電子線に対する応答関数を用いた解析法で得られた値より若

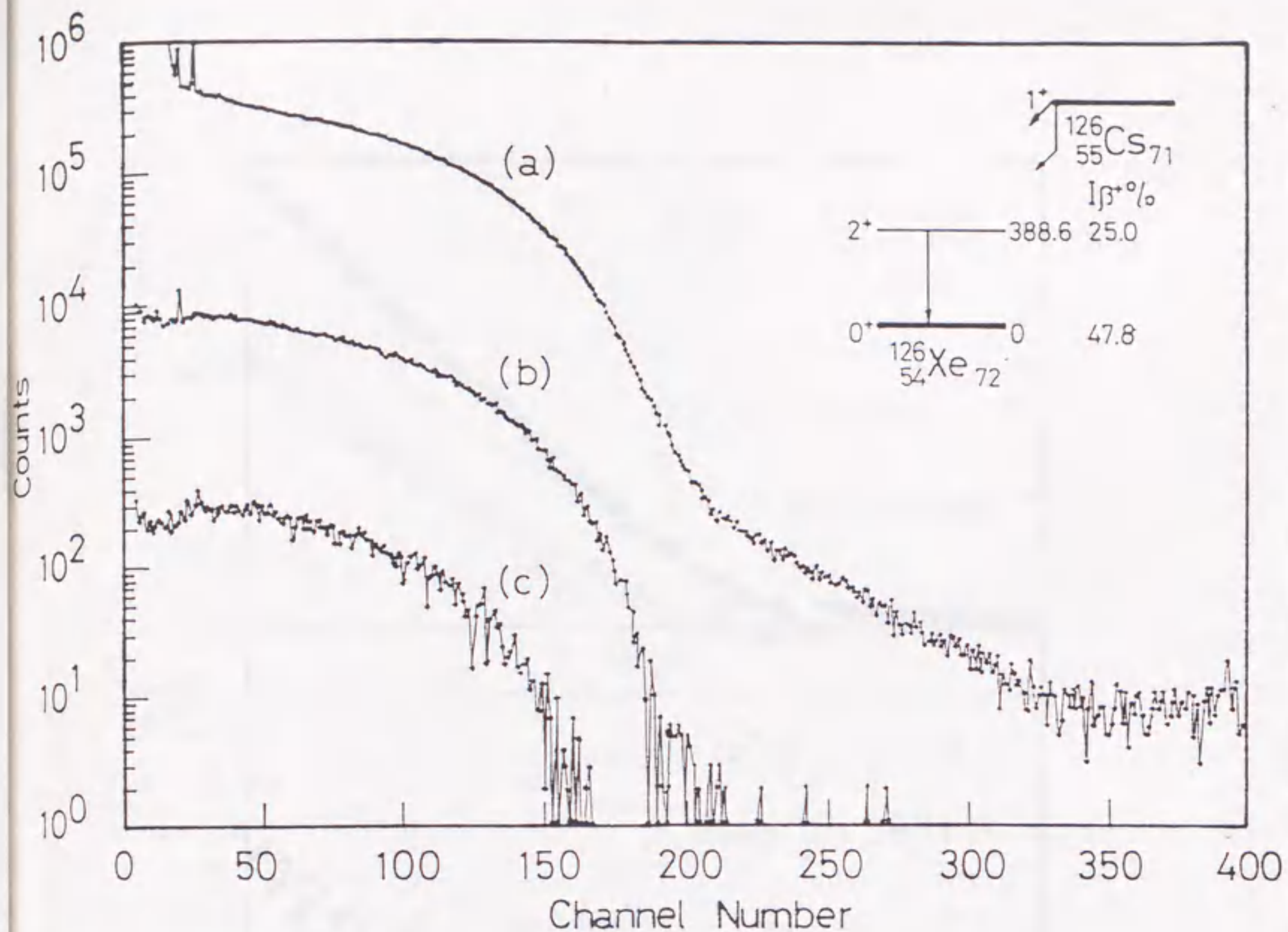


Fig. 5-1-9: Spectra of ^{126}Cs obtained with a planar-type HPGe detector: (a) singles measurement; (b) coincidence with annihilation photons in opposing BaF_2 detectors surrounding the HPGe detector ($\beta^+-2\gamma^\pm$); (c) additional coincidence with the 389 keV γ -rays ($\beta^+-2\gamma^\pm-\gamma$). A simplified decay scheme is shown in the inset.

千大きくなっている。この違いは $\beta^+-2\gamma^\pm-\gamma$ 同時計数測定法で電子線に対する応答関数と同一と仮定したこの測定システムの応答関数と、実際の応答関数のずれに起因するものと考えられる。このほかの報告値は 4.69(14) MeV [17], 4.73(10) MeV [18], 4.8(1) MeV [24] である。

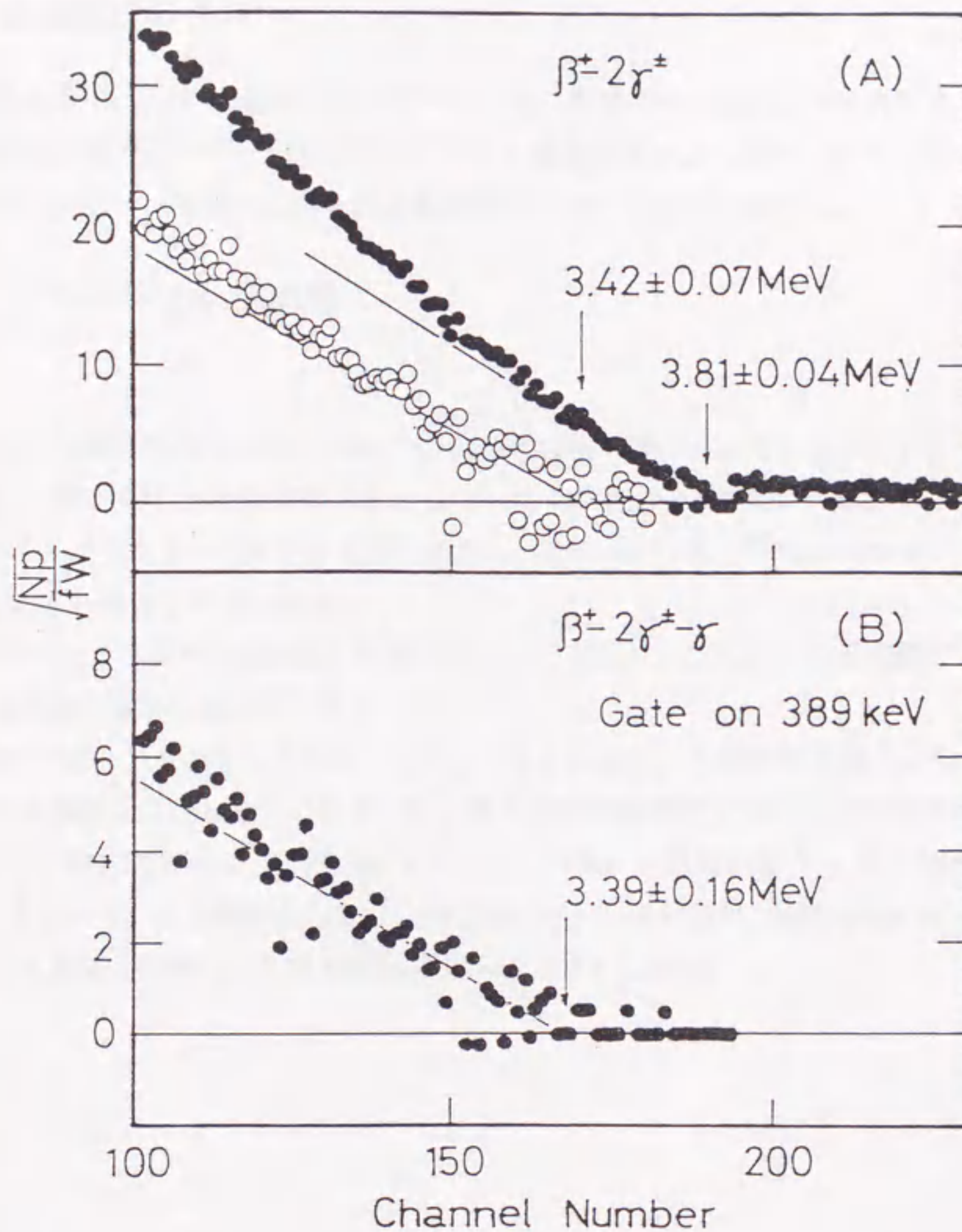


Fig. 5-1-10: (A) shows Fermi-Kurie plots of the β^+ -ray spectrum of ^{126}Cs free from summation ($\beta^+ - 2\gamma^\pm$). Open circles show the second component which is obtained from subtraction of the component feeding the ground state. (B) shows the Fermi-Kurie plot of the β^+ -ray spectrum free from summation and coincident with γ -ray of 389 keV.

5.2 崩壊図式の作成

Q_β の決定には、 β^+ 線最大エネルギーとともに崩壊図式の情報が必要である。今回の測定対象核種では $^{121,123,125}\text{Ba}$, $^{125,126,127}\text{Pr}$ の崩壊図式がよく調べられていないもしくは全く報告がない。実験から得られた崩壊図式について以下に述べる。

5.2.1 $^{121,123,125}\text{Ba}$ の崩壊

^{121}Ba

^{121}Ba の崩壊図式は JAERI-ISOL での初期の実験で報告されている [59, 11]。 ^{121}Cs の励起準位に関しては核磁気共鳴 [60] と In-beam の実験からの報告で基底状態と核異性体のスピン・パリティがそれぞれ $3/2^+$, $9/2^+$ と決まっている。 ^{121m}Cs のエネルギー準位は 68.5 keV と報告されている [20]。

今回行った γ - γ 同時計数測定の結果では、ここで取り上げられている崩壊図式に示された γ 線の相互関係は確認できなかった。

LEPS で得られた γ 線スペクトルを Fig. 5-2-1 に示す。 γ 線強度を Table 5-1、 γ 線の同時計数関係を Table 5-2 に示す。 β - γ 遅延同時計数測定で得られた励起準位の寿命のうち ($5/2^+$) 準位の寿命は 3.7(2) ns となった。 ^{121}Ba の崩壊に伴う γ 線の崩壊曲線を Fig. 5-2-2 に示す。 β 半減期として $T_{1/2} = 29.5(5)$ s が得られた。同時計数のデータで得られた相互関係から導出された崩壊図式を Fig. 5-2-3 に示す。

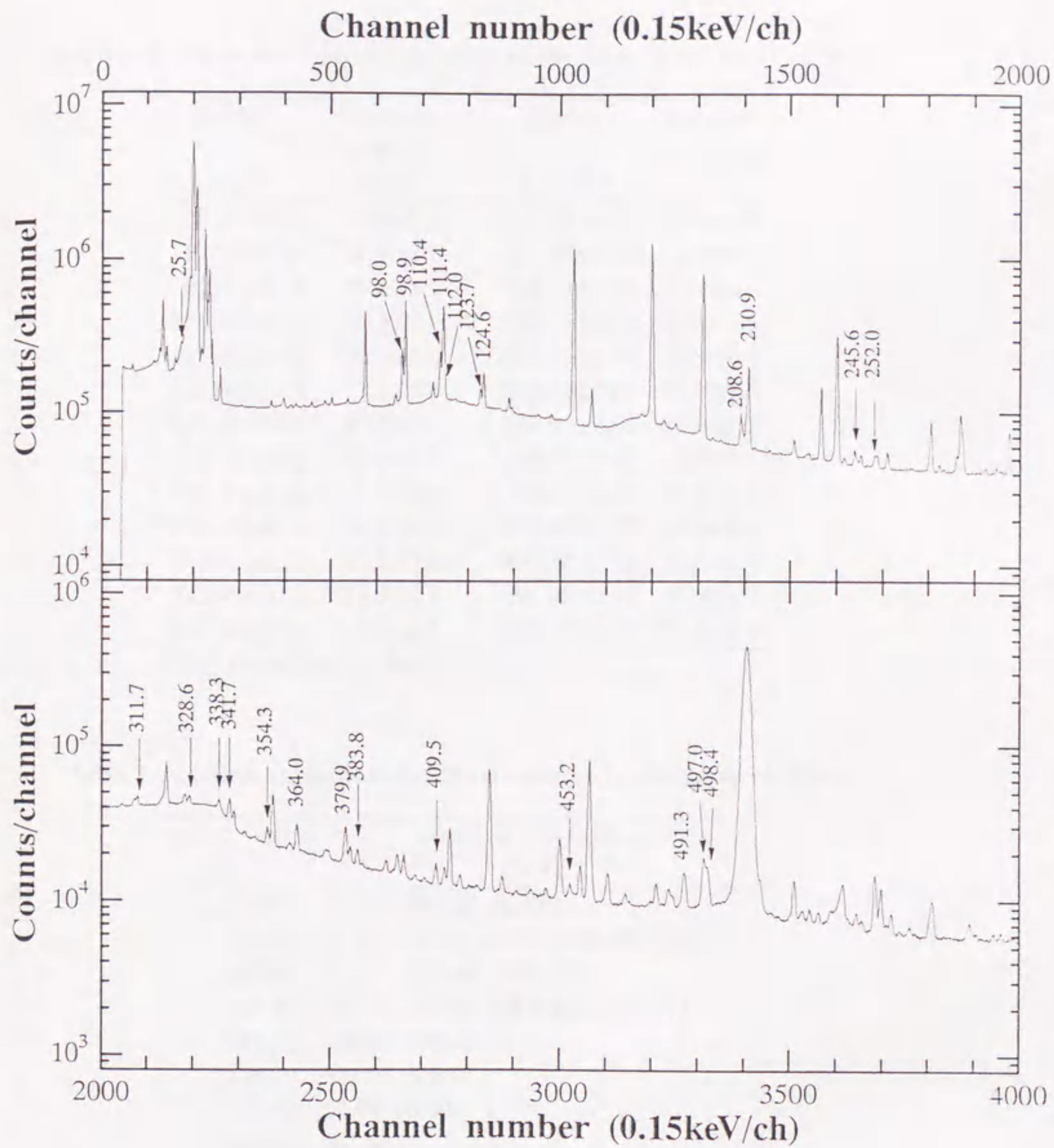


Fig. 5-2-1: Gamma-ray singles spectrum in the decay of ^{121}Ba obtained with an HPGe-LEPS. Gamma-ray energies are in keV.

Table 5-1: Energies and relative intensities of the γ -ray in the decay of ^{121}Ba .

Energy	Relative intensity	Energy	Relative intensity
$E_\gamma(\text{keV})$	$I_\gamma(\%)$	$E_\gamma(\text{keV})$	$I_\gamma(\%)$
25.71 ± 0.06	2.0 ± 0.1	$^\dagger 311.73 \pm 0.02$	10.6 ± 0.8
97.95 ± 0.03	31.7 ± 1.0	328.56 ± 0.03	9.7 ± 0.7
99.01 ± 0.03	95.5 ± 2.9	338.30 ± 0.03	11.7 ± 0.8
110.42 ± 0.02	33.5 ± 1.0	341.73 ± 0.04	23.8 ± 1.5
111.48 ± 0.02	100.0 ± 3.0	354.26 ± 0.04	13.4 ± 0.9
112.05 ± 0.02	7.1 ± 2.5	363.94 ± 0.05	20.0 ± 1.3
123.64 ± 0.02	10.7 ± 0.4	379.86 ± 0.05	28.8 ± 1.8
124.71 ± 0.02	21.4 ± 0.7	$^\dagger 383.81 \pm 0.06$	9.1 ± 0.6
$^\dagger 142.42 \pm 0.01$	1.7 ± 0.2	$^\dagger 409.50 \pm 0.07$	10.6 ± 0.7
$^\dagger 208.56 \pm 0.01$	39.2 ± 2.5	453.25 ± 0.10	4.9 ± 0.4
210.93 ± 0.01	122.7 ± 7.6	491.21 ± 0.13	10.5 ± 0.7
$^\dagger 245.60 \pm 0.01$	11.9 ± 0.8	$^\dagger 496.95 \pm 0.14$	30.3 ± 1.9
251.94 ± 0.01	9.6 ± 0.7	$^\dagger 498.33 \pm 0.14$	22.9 ± 1.5

† Not placed in the decay scheme.

Table 5-2: Gamma-gamma coincidence relations in the decay of ^{121}Ba .

gated γ -ray (keV)	γ -rays in coincidence (keV)
97.94	112.03, 354.27, 363.95
98.99	25.70, 112.03, 354.27, 363.95, (409.52)
110.41	341.74, 379.88, (498.37)
111.46	341.74, 379.88, (383.82), (498.37)
123.63	328.56, 338.31
124.70	328.56, 338.31
112.03	97.94, 98.99
210.93	251.93
328.56	124.70
341.74	110.41, 111.46
354.27	97.94, 98.99
251.95	210.93
363.95	97.94, 98.99
379.88	110.41, 111.46

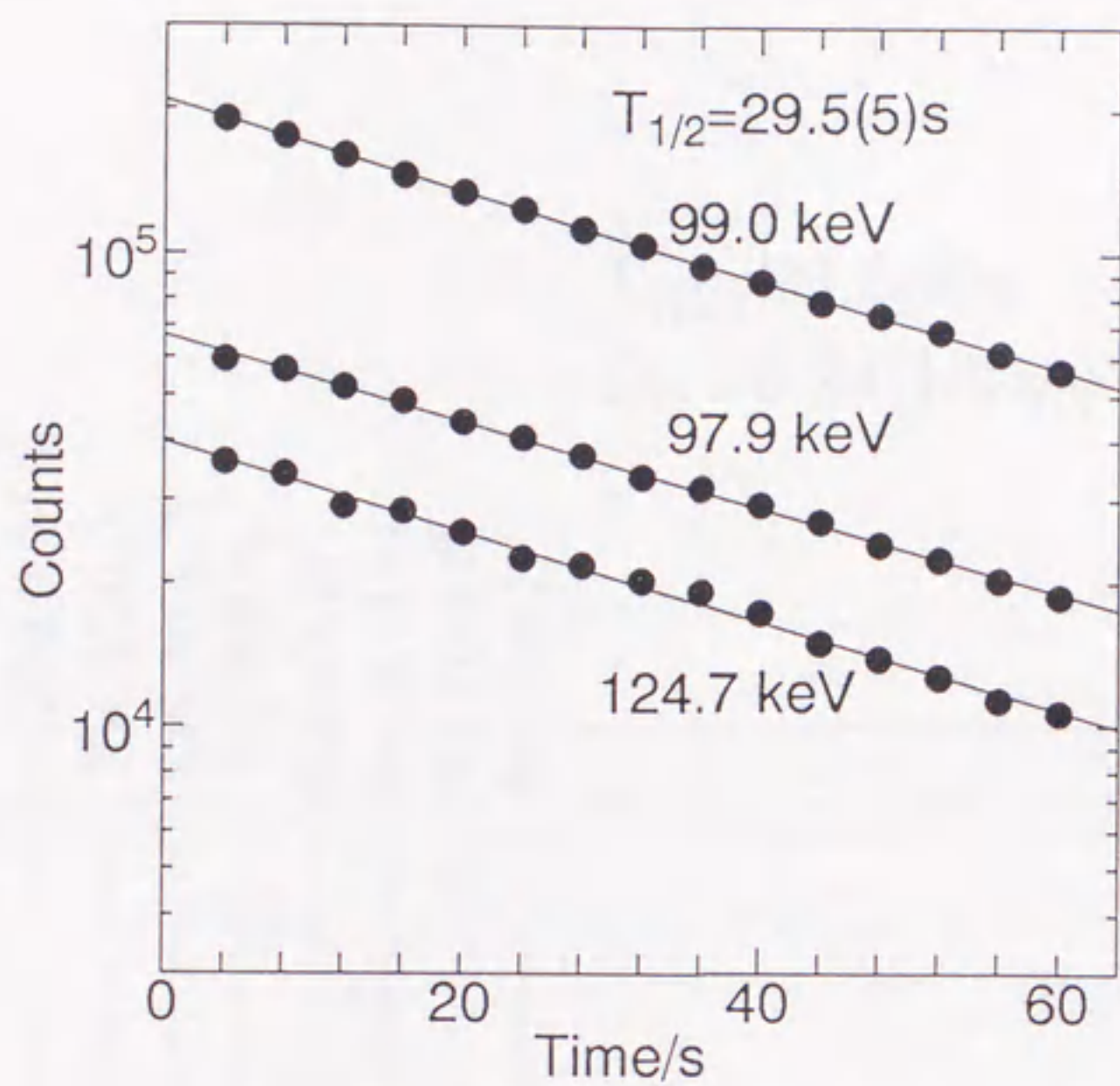


Fig. 5-2-2: Decay curves of the 97.9, 99.0 and 124.7 keV γ -rays in the decay of ^{121}Ba .

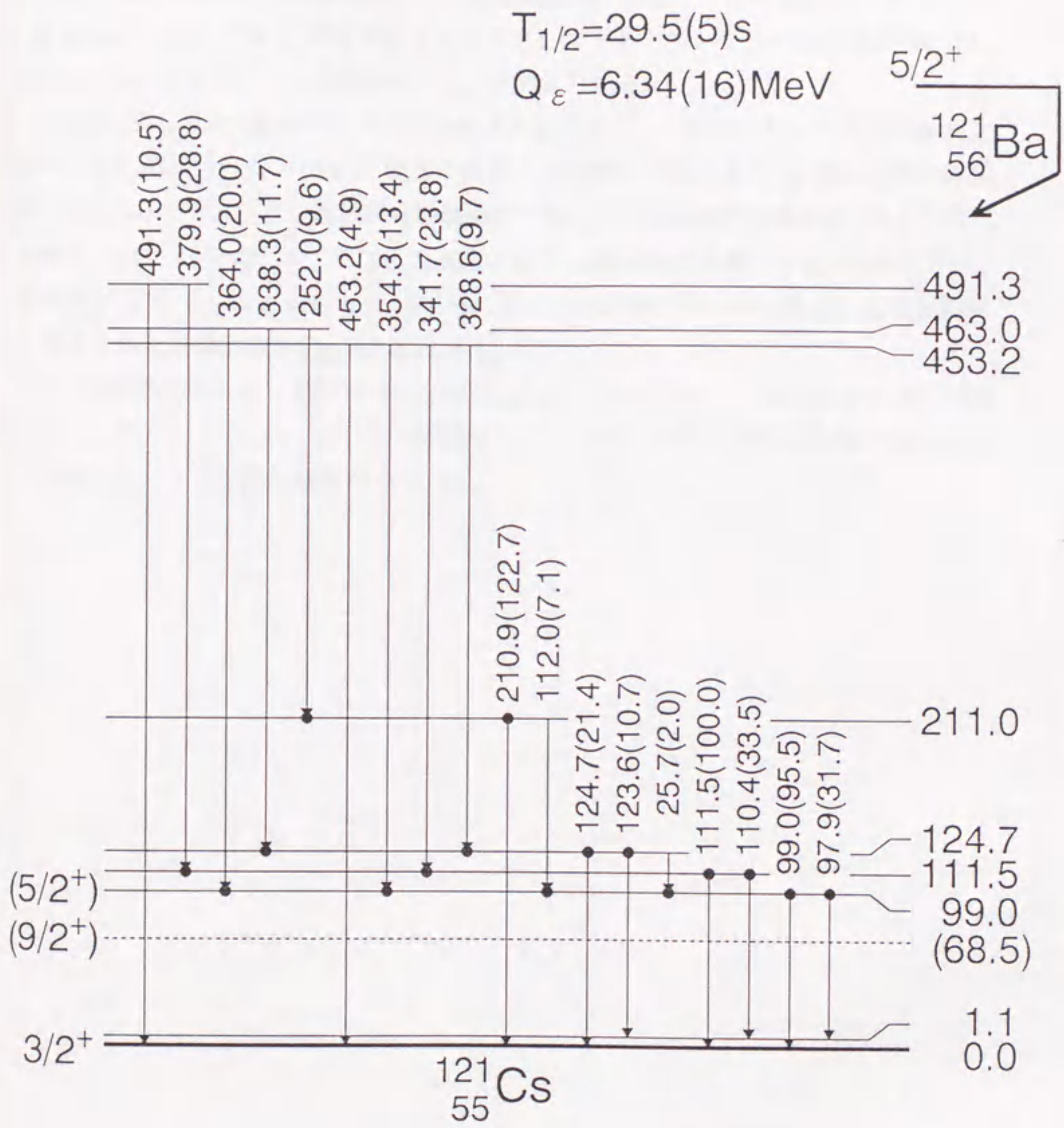


Fig. 5-2-3: Partial decay scheme for ^{121}Ba . The relative γ -ray intensities are given in parentheses. Gamma-ray energies are in keV.

^{123}Ba

^{123}Cs の低エネルギー励起準位については報告例が少なく、その報告も Arlt ら [14] と Marguier ら [15] で第 1 励起準位ですでに互いに矛盾していた。今回の測定からは、Marguier らのコインシデンス関係が正しいと考えられる。

LEPS で得られた γ 線スペクトルを Fig. 5-2-4 に示す。今回行った γ - γ 同時計数測定から導出された ^{123}Ba の崩壊に伴う γ 線強度を Table 5-3、 γ 線の同時計数関係を Table 5-4 に示す。 β - γ 遅延同時計数測定で得られた励起準位の寿命のうち $\frac{5}{2}^+$ 準位の寿命は $7.8(1)$ ns となった。 ^{123}Ba の崩壊に伴う γ 線の崩壊曲線を Fig. 5-2-5 に示す。 β 半減期として $T_{1/2} = 2.4(1)$ min が得られた。同時計数のデータで得られた相互関係から導出された崩壊図式を Fig. 5-2-6 に示す。

第 1 励起準位からの γ 遷移については K_{α} x-ray の妨害が大きく放出強度の確定が困難である。ただし、このエネルギー領域のコインシデンスデータの γ 線強度解析からは γ 遷移に対して肯定的な結果がでている。

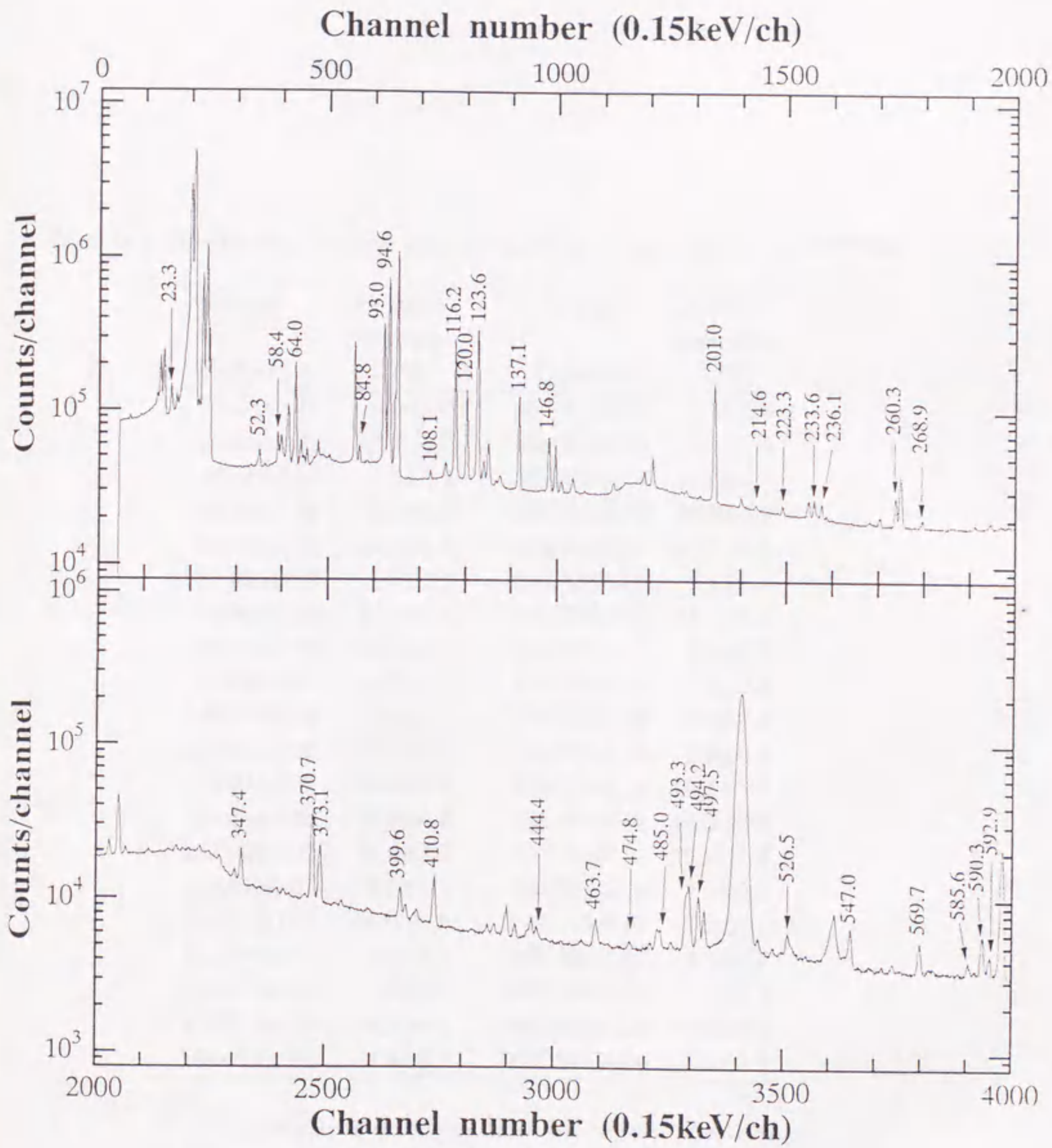


Fig. 5-2-4: Gamma-ray singles spectrum in the decay of ^{123}Ba obtained with an HPGe-LEPS. Gamma-ray energies are in keV.

Table 5-3: Energies and relative intensities of the γ -ray in the decay of ^{123}Ba .

Energy	Relative intensity	Energy	Relative intensity
E_γ (keV)	I_γ (%)	E_γ (keV)	I_γ (%)
23.29 ± 0.05	6.9 ± 1.0	260.27 ± 0.01	9.1 ± 1.4
29.00 ± 0.05	$\ddagger 3.7 \pm 1.2$	$\dagger 268.90 \pm 0.01$	2.0 ± 0.3
52.24 ± 0.05	1.5 ± 0.2	347.36 ± 0.04	11.5 ± 1.7
$\dagger 58.31 \pm 0.04$	3.4 ± 0.3	370.66 ± 0.05	39.6 ± 5.9
63.98 ± 0.04	18.5 ± 1.8	373.12 ± 0.05	20.0 ± 3.0
84.86 ± 0.03	1.8 ± 0.2	399.58 ± 0.06	7.4 ± 1.1
92.96 ± 0.03	47.0 ± 4.7	410.78 ± 0.07	13.1 ± 2.0
94.61 ± 0.03	100.0 ± 3.0	444.38 ± 0.10	2.3 ± 0.4
96.54 ± 0.03	11.7 ± 1.2	463.62 ± 0.11	5.7 ± 0.9
108.09 ± 0.02	0.8 ± 0.1	$\dagger 474.75 \pm 0.12$	1.1 ± 0.2
116.20 ± 0.02	46.7 ± 4.7	$\dagger 484.88 \pm 0.13$	2.9 ± 0.4
120.00 ± 0.02	19.8 ± 2.0	493.25 ± 0.14	10.8 ± 1.6
123.59 ± 0.02	62.3 ± 6.2	494.45 ± 0.14	15.3 ± 2.3
137.09 ± 0.02	22.6 ± 2.3	497.46 ± 0.14	10.9 ± 1.6
146.84 ± 0.01	10.9 ± 1.1	526.53 ± 0.19	3.1 ± 0.5
201.03 ± 0.01	66.0 ± 9.9	$\dagger 547.10 \pm 0.19$	7.2 ± 1.1
214.60 ± 0.01	1.0 ± 0.2	$\dagger 569.76 \pm 0.22$	4.3 ± 0.7
$\dagger 223.27 \pm 0.01$	1.9 ± 0.3	$\dagger 585.74 \pm 0.23$	1.2 ± 0.2
233.62 ± 0.01	4.3 ± 0.6	$\dagger 590.48 \pm 0.24$	5.8 ± 0.9
236.07 ± 0.01	3.4 ± 0.5	$\dagger 592.50 \pm 0.24$	1.2 ± 0.2

\ddagger The intensity is estimated from coincidence spectrum.

\dagger Not placed in the decay scheme.

Table 5-4: Gamma-gamma coincidence relations in the decay of ^{123}Ba .

gated γ -ray (keV)	γ -rays in coincidence (keV)
23.3	64.0*, 93.0, 94.6*, 123.6
52.3	64.0, 94.6
64.0	120.0, 137.1, 370.3*, 373.1, 399.6, 493.1
84.8	23.3, 116.2, 123.6*, 146.9
93.0	23.3, 347.4*, 370.7, 410.8*, 497.3
94.6	52.3, 120.0, 137.1, 233.6, 347.4*, 370.3*, 373.1, 399.6, 493.6, 526.3
96.4	137.1, 201.0
108.1	93.0, 123.6
116.2	84.8, 347.3, 410.8
120.0	64.0, 94.6, 260.3
123.6	23.3, 108.1, 347.4*, 370.7, 410.8*, 497.3
137.1	64.0, 94.6, 96.4
146.8	84.8, 347.3, 410.8
201.0	96.4, 236.1
233.6	64.0, 94.6
236.1	137.1, 201.0
260.3	120.0
347.4	93.0*, 94.6*, 116.2, 123.6*, 146.8
370.7	64.0*, 93.0, 94.6*, 123.6
373.1	64.0, 94.6
399.6	64.0, 94.6
410.8	52.3, 64.0*, 93.0*, 94.6*, 116.2, 123.6*, 146.8
493.3	64.0, 94.6
497.5	93.0, 123.6

* : possible coincidences.

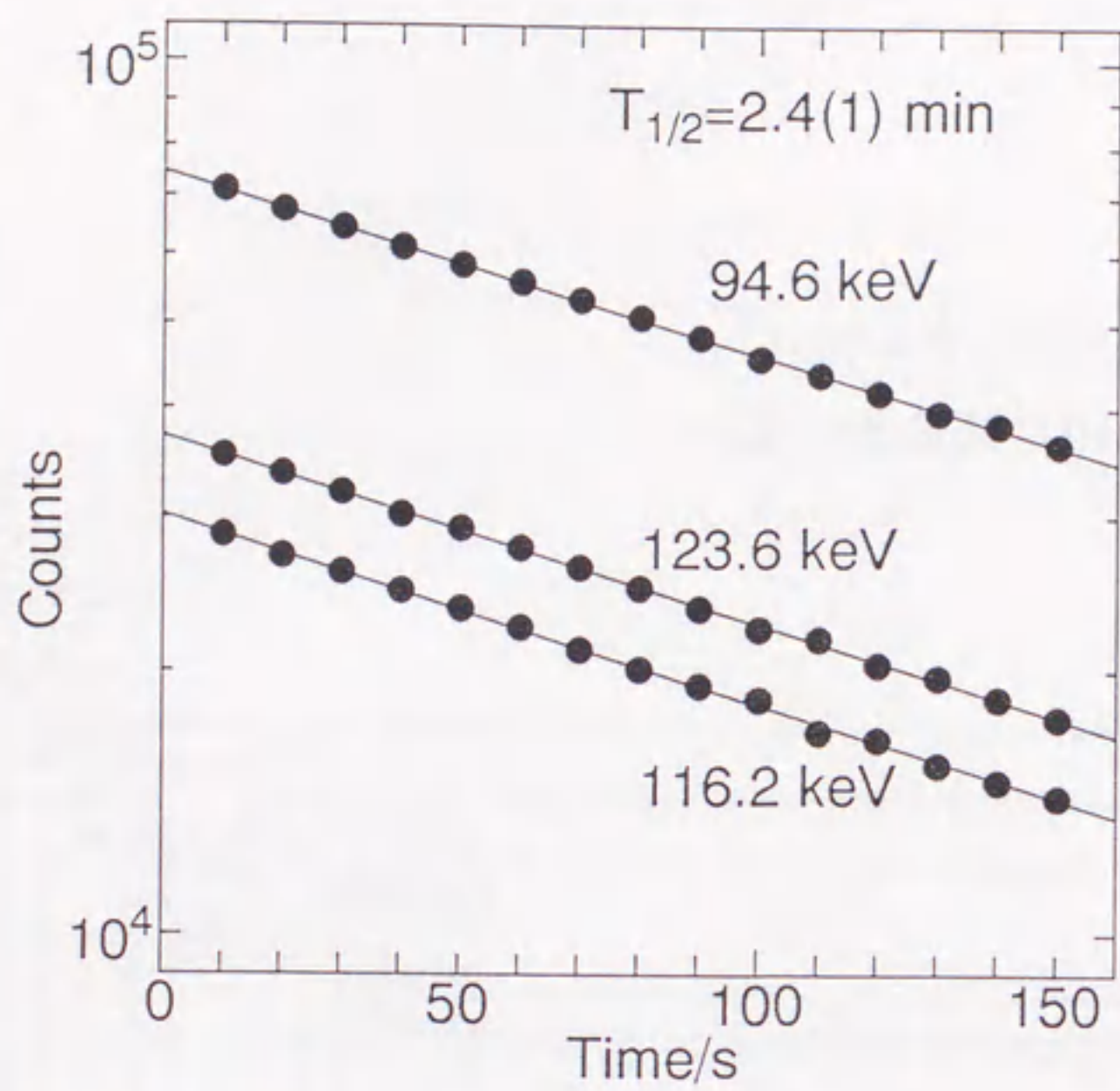


Fig. 5-2-5: Decay curves of the 94.6, 116.2 and 123.6 keV γ -rays in the decay of ^{123}Ba .

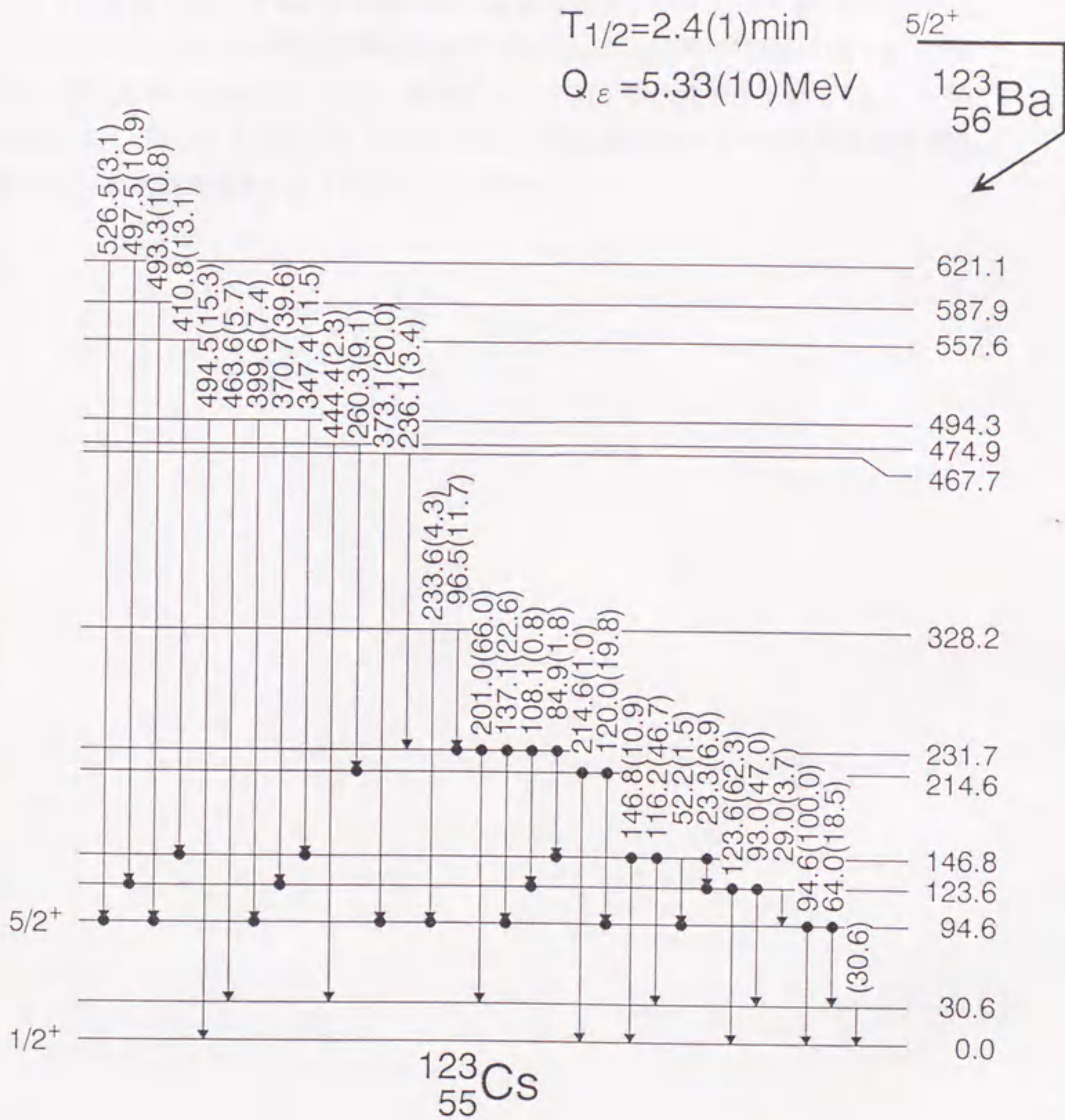


Fig. 5-2-6: Partial decay scheme for ^{123}Ba . The relative γ -ray intensities are given in parentheses. Gamma-ray energies are in keV.

¹²⁵Ba

LEPS で得られた γ 線スペクトルを Fig. 5-2-7 に示す。今回行った γ - γ 同時計数測定
のデータから導出された ¹²⁵Ba の崩壊に伴う γ 線強度を Table 5-5、 γ 線の同時計数関
係を Table 5-6 に示す。 β - γ 遅延同時計数測定で得られた励起準位の寿命のうち $\frac{5}{2}^+$ 準位
の寿命は 12.6(3) ns となった。¹²⁵Ba の崩壊に伴う γ 線の崩壊曲線を Fig. 5-2-8 に示す。
 β 半減期として $T_{1/2} = 3.6(3)$ min が得られた。同時計数のデータで得られた相互関係
から導出された崩壊図式を Fig. 5-2-9(a),(b) に示す。

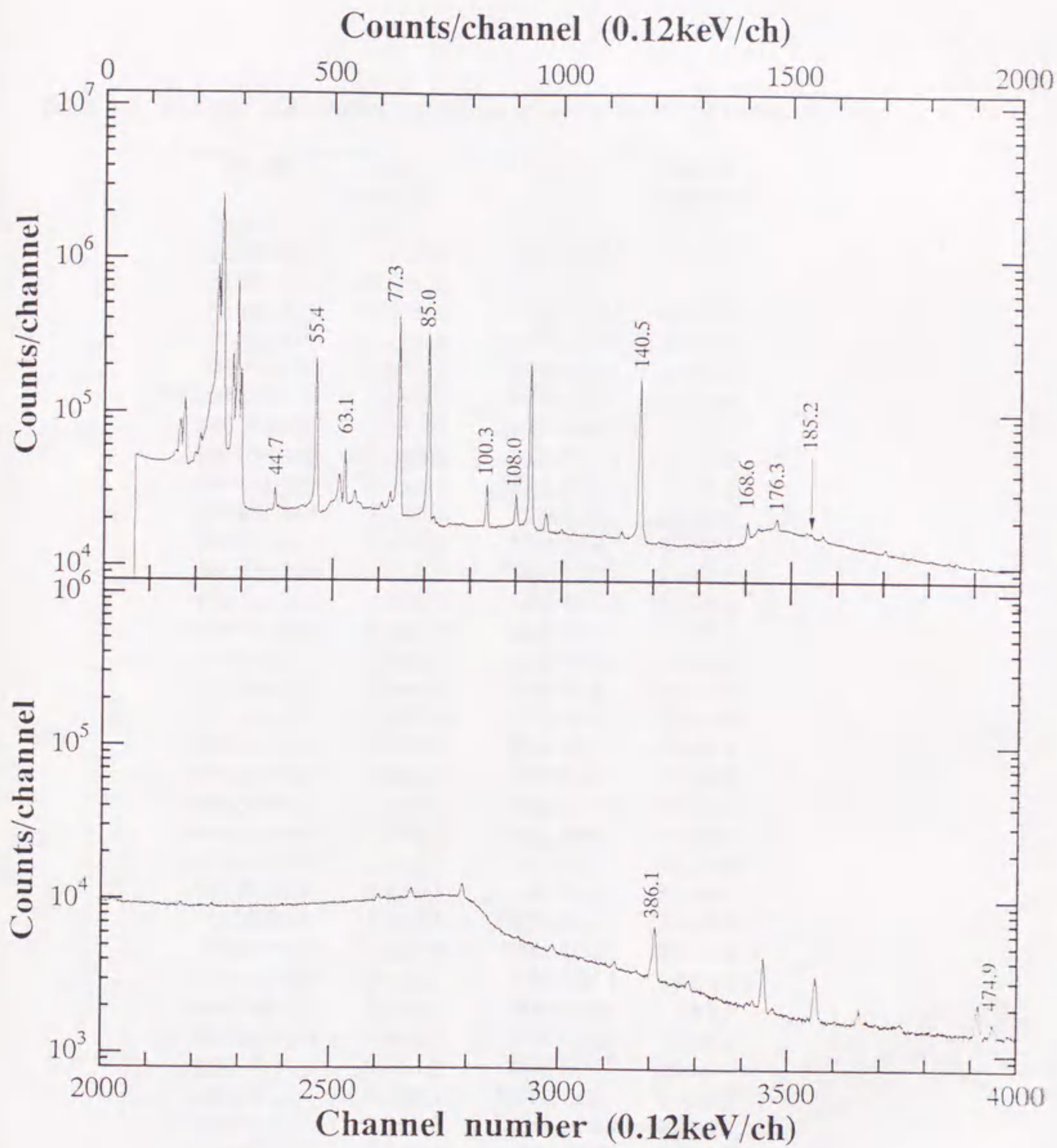


Fig. 5-2-7: Gamma-ray singles spectrum in the decay of ^{125}Ba obtained with an HPGe-LEPS. Gamma-ray energies are in keV.

Table 5-5: Energies and relative intensities of the γ -ray in the decay of ^{125}Ba .

Energy	Relative intensity	Energy	Relative intensity
E_γ (keV)	I_γ (%)	E_γ (keV)	I_γ (%)
44.76±0.11	2.1±0.1	1224.3±0.1	5.6±0.6
55.46±0.10	48.6±1.5	1243.9±0.1	4.6±0.5
63.14±0.10	10.8±0.3	1252.4±0.1	4.5±0.5
77.30±0.09	125.7±3.8	†1269.4±0.1	4.9±0.5
84.98±0.09	94.8±2.8	1299.0±0.1	4.6±0.5
100.31±0.08	5.4±0.2	1320.5±0.1	14.3±1.4
108.06±0.07	9.6±0.3	1324.9±0.1	3.3±0.3
140.53±0.06	100.0±3.0	1329.9±0.1	22.9±2.3
168.60±0.05	3.6±0.1	†1351.1±0.1	2.5±0.3
176.26±0.05	3.0±0.1	1376.0±0.1	6.4±0.6
185.22±0.04	1.4±0.1	1383.3±0.1	4.7±0.5
386.12±0.03	17.9±0.6	†1408.8±0.1	2.2±0.2
475.04±0.03	1.5±0.1	1461.1±0.1	17.7±1.8
495.37±0.03	22.3±0.7	1465.5±0.1	3.4±0.3
498.98±0.04	2.8±0.1	1540.7±0.1	1.8±0.2
526.50±0.04	(weak)	†1564.8±0.1	3.0±0.3
552.44±0.04	46.1±1.4	1573.6±0.1	9.7±1.0
562.06±0.04	3.7±0.3	1604.2±0.1	3.6±0.4
578.52±0.05	3.6±0.2	1609.0±0.1	2.5±0.3
634.36±0.12	1.7±0.2	1664.3±0.1	3.0±0.3
641.83±0.06	4.8±0.3	1671.9±0.1	7.9±0.8
†672.29±0.07	1.6±0.2	1747.9±0.1	1.9±0.2
756.72±0.09	5.4±0.3	1755.6±0.1	0.9±0.1
764.26±0.09	2.7±0.3	†1776.3±0.1	2.7±0.3
777.95±0.09	17.0±0.6	1858.4±0.1	3.4±0.4
803.55±0.10	4.8±0.4	1935.8±0.1	5.4±0.5
841.70±0.12	2.5±0.3	†1945.8±0.1	1.3±0.1
880.99±0.13	1.6±0.2	2705.0±0.2	1.6±0.2
1005.7 ±0.1	9.5±1.0	2758.7±0.2	1.3±0.1
1013.8 ±0.1	3.5±0.4	†2791.1±0.2	2.5±0.3
1066.1 ±0.1	2.0±0.2	†2819.0±0.2	1.0±0.1
1124.6 ±0.1	2.2±0.2	†2988.0±0.2	1.5±0.2
1129.1 ±0.1	2.6±0.3	†3002.3±0.2	1.8±0.2
1168.9 ±0.1	0.9±0.1	†3044.5±0.2	1.3±0.1
1174.4 ±0.1	5.3±0.5	3207.8±0.2	1.4±0.1
1189.3 ±0.1	3.9±0.4	3285.2±0.2	1.0±0.1

† Not placed in the decay scheme.

Table 5-6: Gamma-gamma coincidence relations in the decay of ^{125}Ba .

gated γ -ray (keV)	γ -rays in coincidence (keV)	gated γ -ray (keV)	γ -rays in coincidence (keV)
55.5	85.0	1269.4	386.1, 526.6
77.3	63.1, 108.1, 176.3, 562.1	1299.0	85.0
85.0	55.5, 100.3, 168.6, 386.1, 495.4, 634.4, 756.7, 1005.7	1320.5	140.5
		1324.9	85.0
		1351.1	140.5
		1376.0	85.0
100.3	85.0	1383.3	552.4
108.1	77.3	1408.8	495.4
140.5	44.8, 386.1, 499.0, 578.5	1465.4	44.8, 100.3, 108.1
		1540.7	140.5
386.1	55.5, 140.5, 803.6	1564.8	44.8, 100.3
495.4	85.0	1573.6	77.3
526.6	803.6	1604.2	77.3
552.4	778.0	1609.0	55.5, 140.5
562.1	77.3	1664.3	85.0
641.8	77.3	1671.9	77.3
756.7	85.0	1747.9	85.0
764.3	77.3	1755.6	77.3
778.0	552.4	1776.3	77.3
803.6	386.1, 526.6	1858.4	77.3
881.0	495.4	1945.8	85.0
1005.7	85.0	2697.4	552.4
1013.8	77.3	2705.0	495.4
1066.1	44.8, 100.3, 108.1	2758.7	386.1, 526.6
1124.6	386.1, 526.6	2789.8	55.5, 140.5
1129.1	552.4	2791.1	386.1
1168.9	495.4	2819.0	386.1, 526.6
1174.4	77.3	2988.0	77.3
1189.3	55.5, 140.5	3002.3	55.5, 140.5
1224.3	44.8, 100.3, 108.1	3044.5	55.5, 140.5
1243.9	55.5, 140.5	3207.8	77.3
1252.4	77.3		

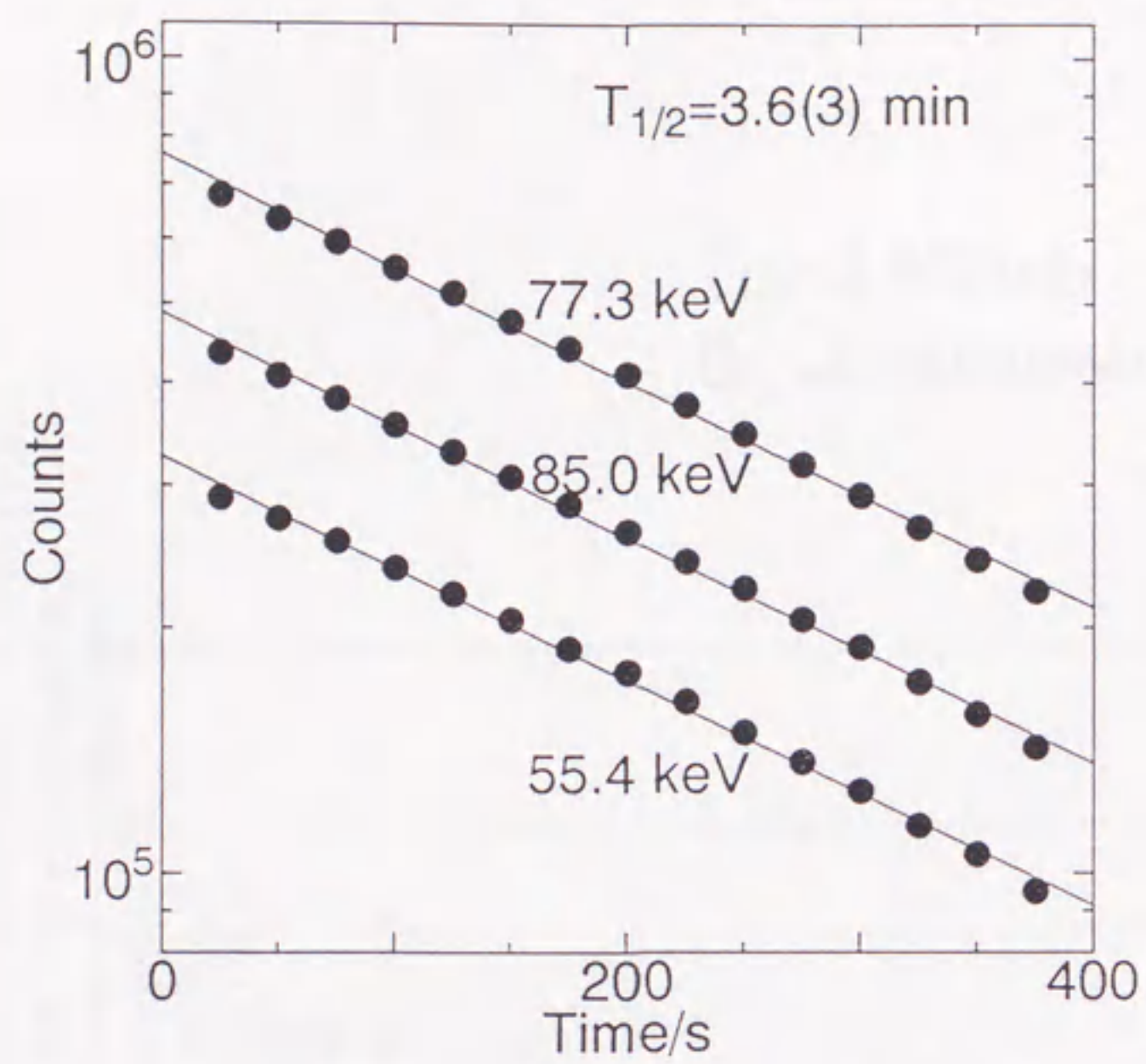


Fig. 5-2-8: Decay curves of the 55.4, 77.3 and 85.0 keV γ -rays in the decay of ^{125}Ba .

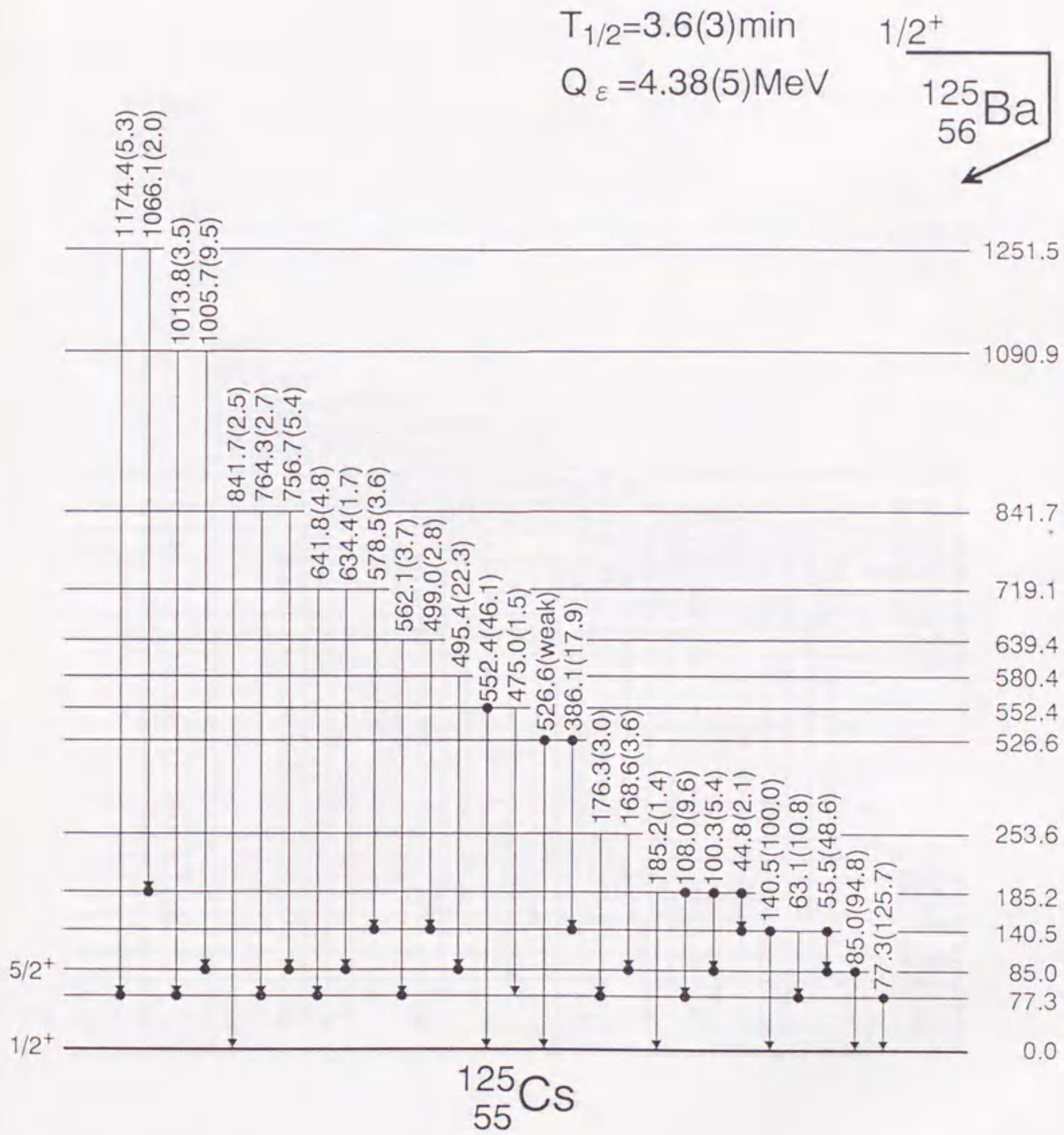


Fig. 5-2-9(a): Proposed decay scheme for ^{125}Ba below 1.3 MeV (a). The relative γ -ray intensities are given in parentheses. Gamma-ray energies are in keV.

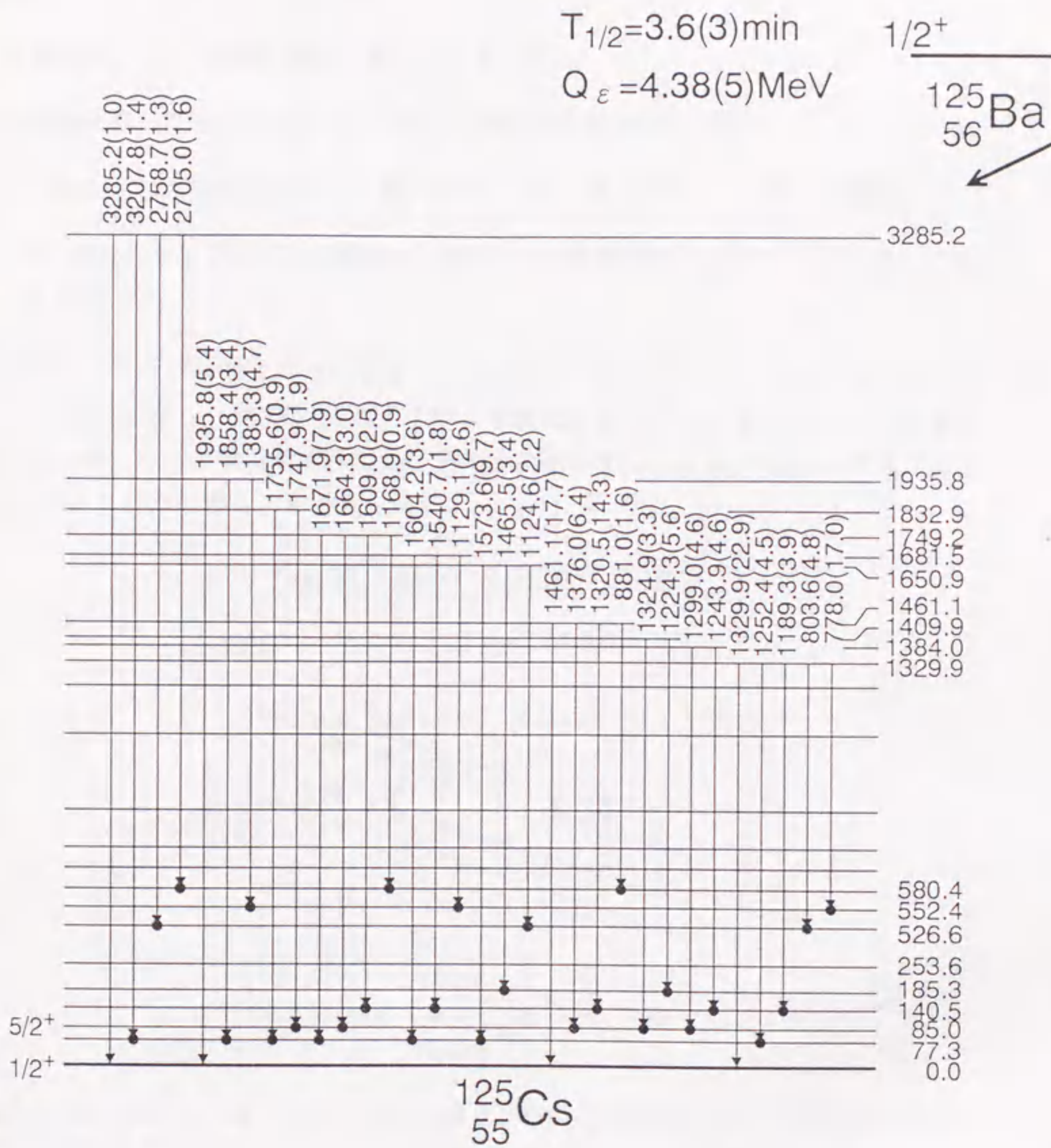


Fig. 5-2-9(b): Proposed decay scheme for ^{125}Ba above 1.3 MeV (b). The relative γ -ray intensities are given in parentheses. Gamma-ray energies are in keV.

5.2.2 未知核種 $^{125,127}\text{Pr}$ の探索と ^{126}Pr の崩壊

^{127}Pr

未知核種 ^{127}Pr の探索に際して次のことを行った。

- 崩壊に伴って放出される Ce の特性 X 線の確認及びその半減期
- 上記と同じの半減期を持つ γ 線の確認と Ce X 線とのコインシデンス関係
- β^+ 線とのコインシデンス関係で γ 線が Ce の核異性体に起因するものでないことを確認

その結果、 ^{127}Pr の崩壊に伴う γ 線として 29.53(5), 125.82(5), 159.81(7), 162.49(5) の 4 本の γ 線を確認し、半減期として 7.7(6) s を得た (Fig. 5-2-10)。Fig. 5-2-11 に質量数 143 ($127+16$)、テープ装置時間周期 19.7 秒で 2.4 秒 \times 8 (=19.2 秒) の設定で半減期測定したスペクトルの 1 番目と 8 番目を示す。

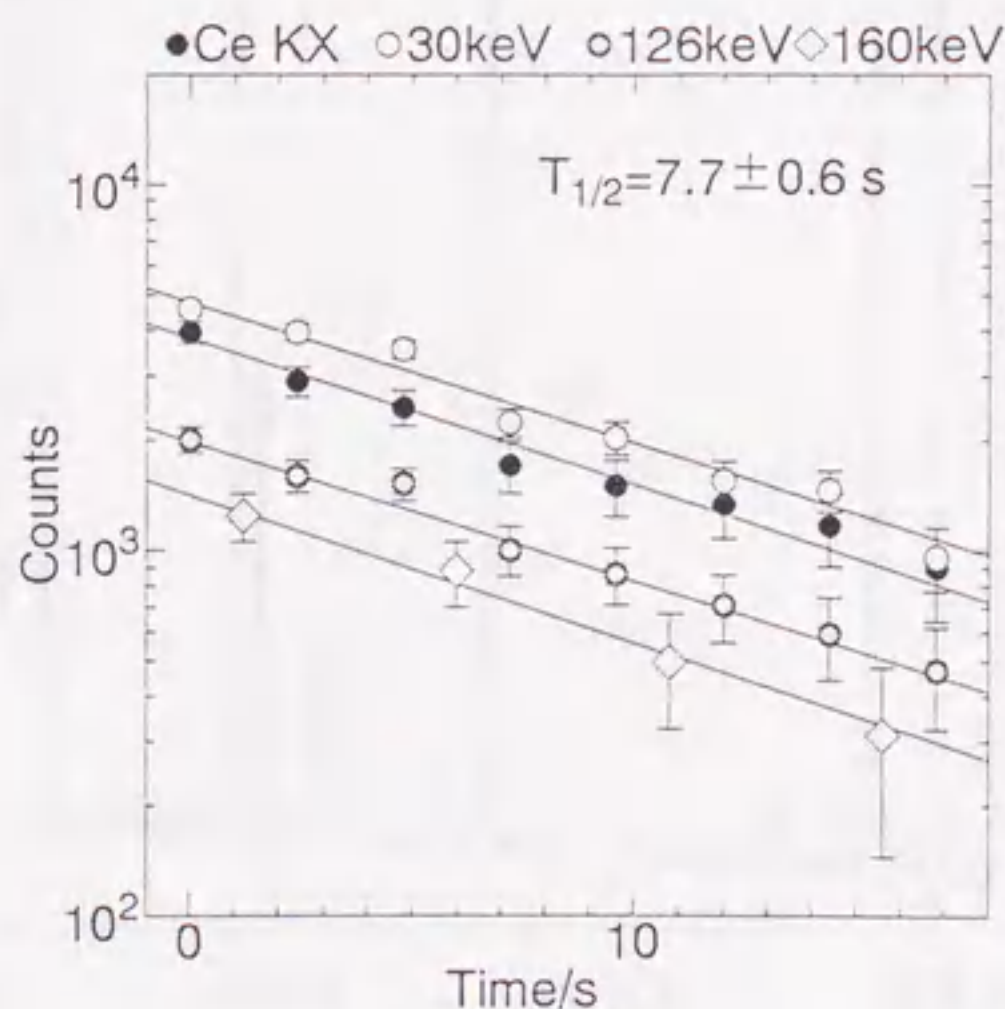


Fig. 5-2-10: Decay curves of new γ -rays and K_{α} X-ray, obtained from the measurements in the decay of ^{127}Pr .

半減期の確認後、収量の多い金属イオンによって分離を行い Table 5-7 に示す γ 線を新たに確認した。

γ - γ コインシデンス関係から得られた崩壊図式を Fig. 5-2-12 に示す。29.56 keV γ 線は強い遷移にも関わらず、他の γ 線とコインシデンス関係が見られない。原因としては、

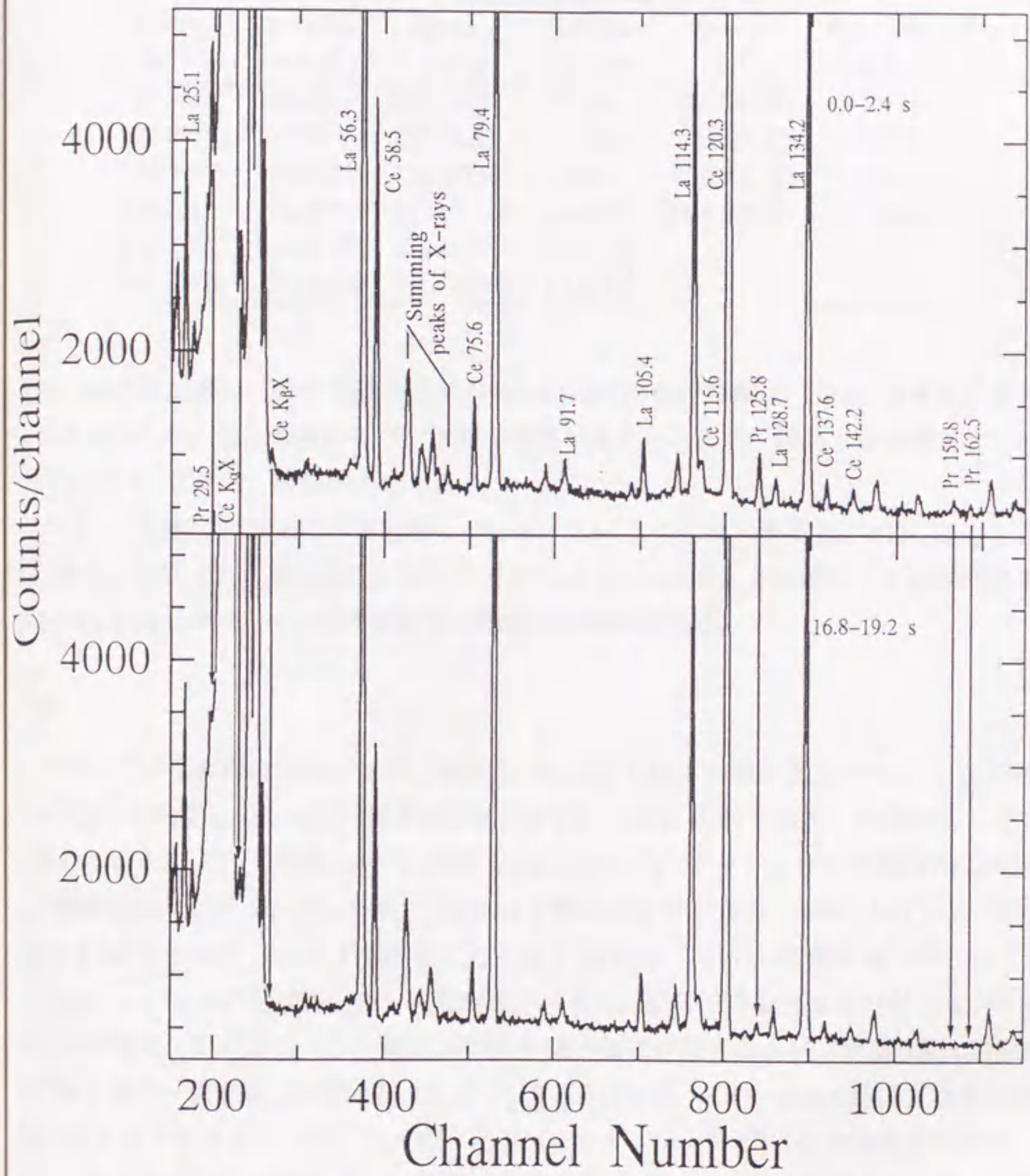


Fig. 5-2-11: The first 2.4-s and last 2.4-s spectra obtained in a multispectrum-mode measurement of the oxide-ion beam for $A=127$.

Table 5-7: γ -rays associated with the decay of ^{127}Pr

Energy (keV)	Relative intensity	Energy (keV)	Relative intensity	Energy (keV)	Relative intensity
29.56(5)	106(6)	243.14(7)	77(12)	672.32(27)	7.1(13)
125.84(5)	100(4)	390.55(8)	5.5(9)	740.19(27)	24.6(27)
159.84(7)	48.0(30)	431.38(9)	55(4)	834.75(11)	6.9(12)
162.53(5)	30.9(32)	579.31(10)	31.0(20)	894.87(27)	20.7(20)
198.79(7)	10.9(23)	614.31(10)	13.7(14)		
205.68(9)	25.2(32)	658.51(27)	14.4(15)		

この γ 線の放出準位に通常の計測にかからない程度の長い寿命($\sim 10\mu\text{s}$)が存在することが考えられる。放出強度からバンド間の遷移が考えられるが、該当する候補としては $5/2^+ \leftrightarrow 7/2^-$ 間のE1遷移が上げられる。

^{127}Pr の崩壊に関しては、同時期にGeneveyらによる報告がある[26, 61]。確認された γ 線及び提案された崩壊図式に関して一致がみられる点もあるものの、半減期の結果(4.2(3)s)をはじめいくつかの実験結果の解釈に相違点がある。

^{126}Pr

^{126}Pr では基底準位回転バンドに属する349.54(5) keV γ 線の測定から、半減期を3.14(22) sと決定した。過去の報告値は3.2(6) s[62] 3.0(4) s[30]であり、今回の値と良く一致している。 ^{126}Pr の崩壊に伴う γ 線をTable 5-8に、 γ - γ コインシデンス関係から決定した崩壊図式をFig. 5-2-13に示す。954.2 keV準位は 2_2^+ で 3^+ 準位(1154.7 keV)、 4^+ 準位(1337.2 keV)と共に、 γ バンドを形成すると考えられる。これらの励起エネルギーはCe同位体の γ バンドの系統性と良い連続性を示す[27]。 2_2^+ 準位の励起エネルギーは ^{126}Ce で急激に増加しているが、この傾向は中性子-陽子相互作用するボソン模型(IBM-2)[63]の予測と良く一致する。分岐比 $B(E2; 2_2^+ \rightarrow 0_1^+)/B(E2; 2_2^+ \rightarrow 2_1^+)$ は0.24(8)となりこれもIBM-2の予測と良く一致する。(但しE2/M1比 $\delta^2=15.7$ をIBM-2の計算から仮定した。) ^{126}Ce は ^{122}Ba と共にボソン数11となりLuらによって示されたボソン数10の組(^{128}Ce , ^{124}Ba)と同様にFスピン多重項の良い候補となる。

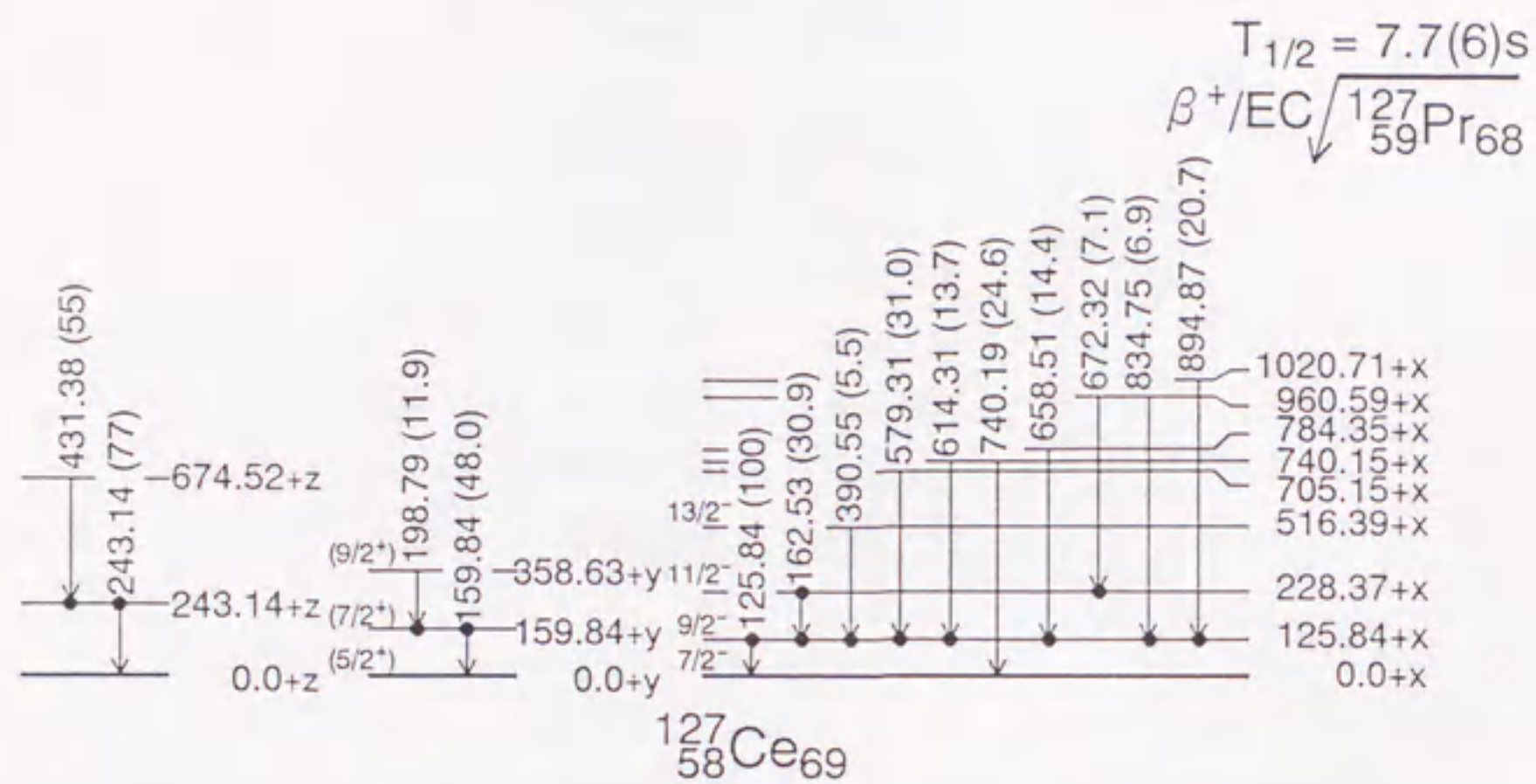


Fig. 5-2-12: Partial decay scheme for ^{127}Pr . The relative γ -ray intensities are given in parentheses. Gamma-ray energies are in keV.

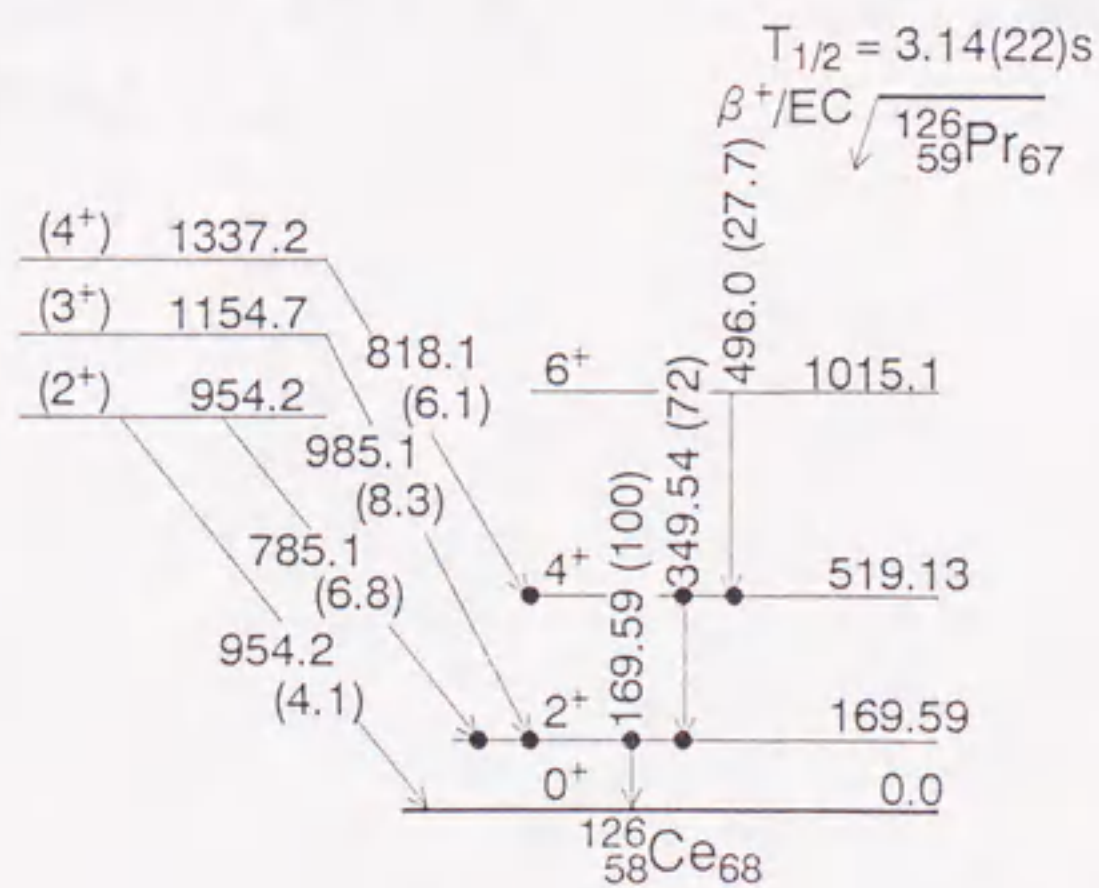


Fig. 5-2-13: Partial decay scheme for ^{126}Pr . The relative γ -ray intensities are given in parentheses. Gamma-ray energies are in keV.

Table 5-8: γ -rays associated with the decay of ^{126}Pr

Energy (keV)	Relative intensity
169.59(3)	100(6)
349.54(5)	72(4)
496.0(1)	27.7(19)
785.1(5)	6.8(14)
818.1(2)	6.1(9)
954.2(4)	4.1(7)
985.1(4)	8.3(12)

^{125}Pr

未知核種 ^{125}Pr に関しては、生成断面積が小さく同重体のCe, Laの影響が大きくなるため酸化物イオン法によるCe特性X線の直接測定は行えない。そこで、収率の多い金属イオンを分離しX- γ コインシデンスによって ^{125}Pr の崩壊に伴う γ 線を確認した。その結果135.76(5), 146.1(5), 180.2(7) keVの γ 線が確認され、マルチチャンネルスケーリング測定で確認できた135.76 keVの γ 線の崩壊曲線(Fig. 5-2-14)から半減期を3.3(7)sと求めることで、未知核種 ^{125}Pr を同定した。 γ - γ コインシデンス関係から ^{125}Pr の崩壊図式をFig. 5-2-15の様に決定した。

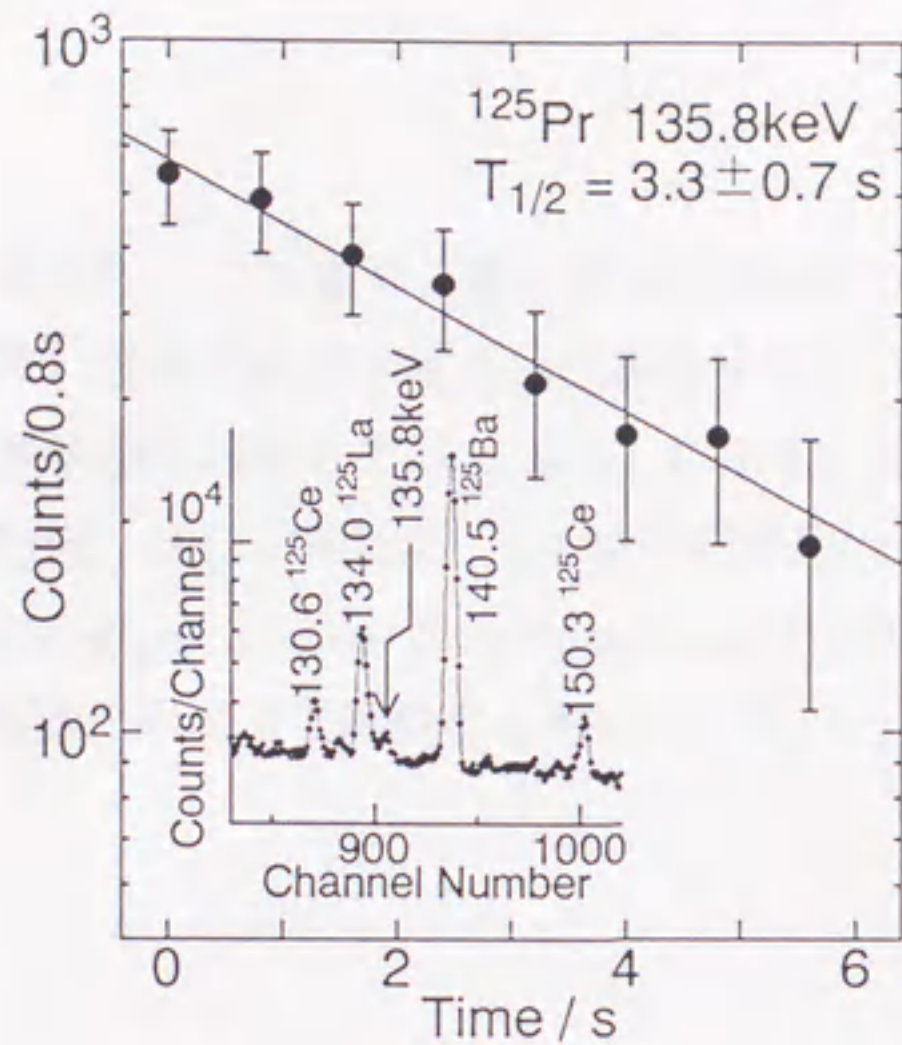


Fig. 5-2-14: Decay curves of the 136-keV γ -ray. Gamma-ray spectrum of $A=125$ is shown in the inset.

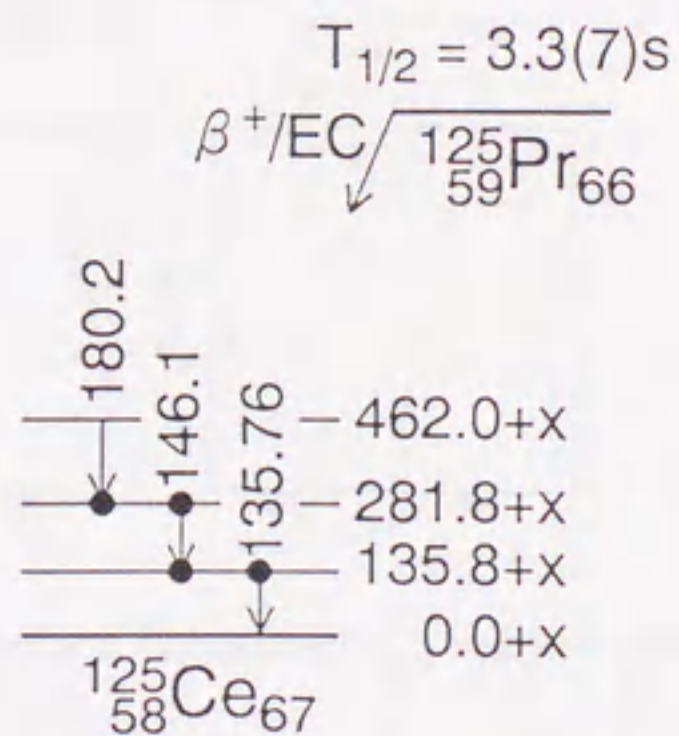


Fig. 5-2-15: Partial decay scheme for ^{125}Pr .

5.3 議論

得られた Q_{β^+} 値の結果を、これまでの報告値及び系統性からの予測値[31]とともに Table 5-9 に示す。6 列に過去の結果と使用検出器を示した。また、それぞれの核種の Q_{β^+} の報告値と今回の測定値を比較して Fig. 5-3-1 に示す。 β^+ 線の測定にはプラスチックシンチレーション検出器、Si(Li) 検出器、Ge 検出器が用いられている。表中 TGA は全 γ 線吸収検出器 (total gamma absorption spectrometer) [18] を意味している。今回の対象領域ではこの方法のみが β^+ 線測定を用いていない。

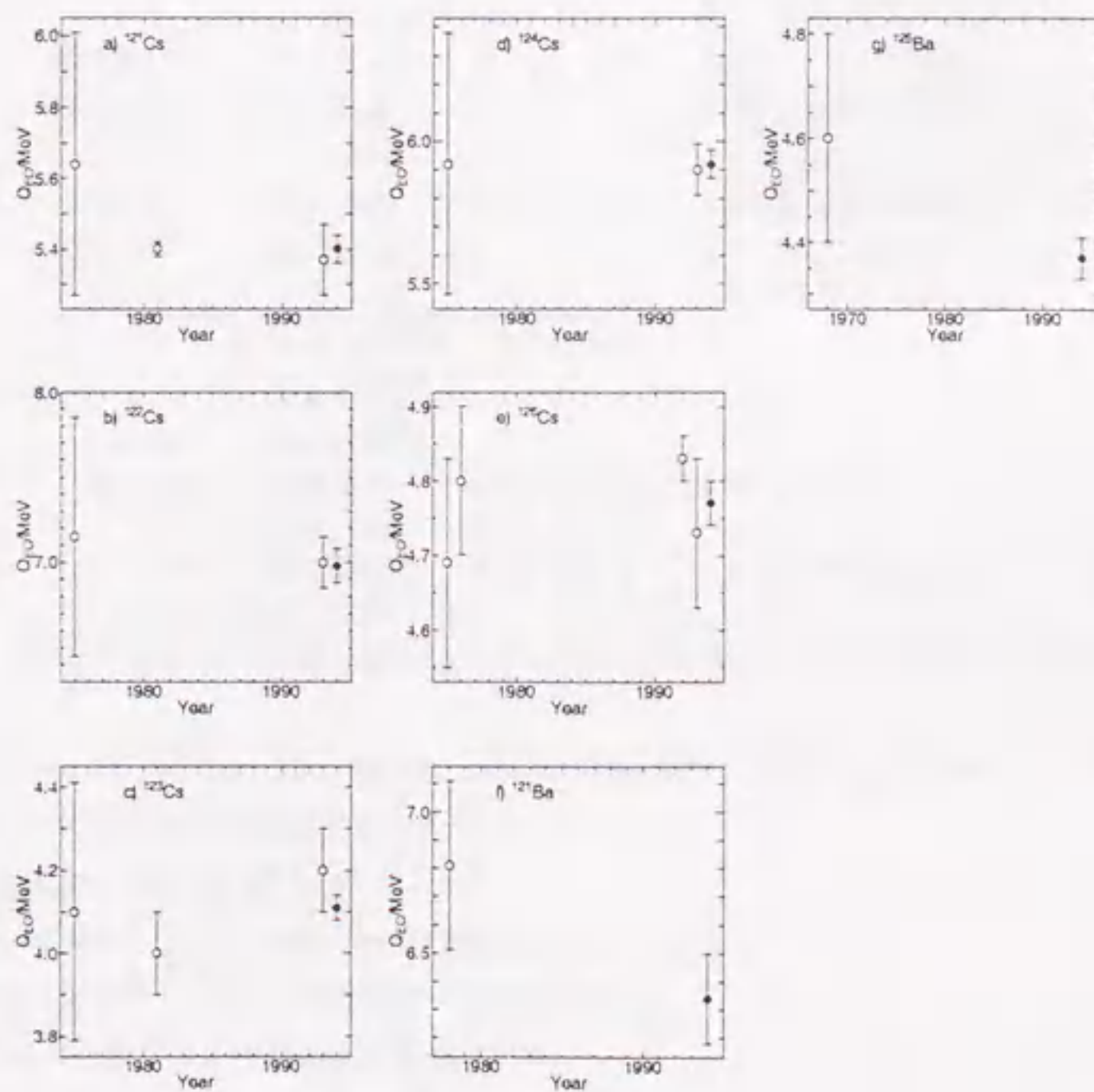


Fig. 5-3-1: Comparison of present measured Q_{β^+} -value versus those of previous one.

Cs の同位体に関しては、過去の Q_{β^+} 値の報告も多く、また今回の結果はそれらとよく一致している。このことは、今回の β^+ 最大エネルギー測定システム及び実験的に求められた単一エネルギー陽電子線の応答関数を用いた本研究の解析方法が合理的であり JAERI-ISOL での実験に適用して得られる結果の信用性が高いことを示している。

Table 5-9: Endpoint energies and Q_ε -values deduced from β^+ -ray maximum energy measurements.

	Half life (s)	Gate (keV)	Endpoint energy (MeV)	Experimental Q_ε -value (MeV)		Evaluated Q_ε -value ^a (MeV)
				Present	Previous(Detector)	
^{121m} Cs	121	179.4 459.8	4.26 ± 0.04 4.01 ± 0.09	5.47 ± 0.04		
^{121g} Cs				5.40 ± 0.04 ^f	≥ 5.64 ± 0.37 ^b (Plastic) 5.40 ± 0.02 ^c (Ge) 5.37 ± 0.10 ^d (TGA ^h)	5.400 ± 0.020
^{122g} Cs	21	Singles ^{†1} Singles ^{†2} 331.1	6.11 ± 0.05 5.62 ± 0.12 5.63 ± 0.10	7.08 ± 0.05	7.15 ± 0.70 ^b (Plastic) 7.00 ± 0.15 ^d (TGA)	7.05 ± 0.09
^{123g} Cs	365	97.4 596.4	2.99 ± 0.02 2.61 ± 0.08	4.11 ± 0.03	4.10 ± 0.31 ^b (Plastic) 4.0 ± 0.1 ^c (Ge) 4.20 ± 0.10 ^d (TGA)	4.200 ± 0.019
¹²⁴ Cs	30.8	Singles ^{†1} Singles ^{†2} 353.9	4.88 ± 0.02 4.55 ± 0.07 4.50 ± 0.23	5.91 ± 0.03	5.92 ± 0.46 ^b (Plastic) 5.90 ± 0.09 ^d (TGA)	5.917 ± 0.012
¹²⁶ Cs	98.4	Singles ^{†1} Singles ^{†2} 388.6	3.76 ± 0.01 3.35 ± 0.03 3.23 ± 0.12	4.78 ± 0.02	4.69 ± 0.14 ^b (Si(Li)) 4.73 ± 0.10 ^d (TGA) 4.8 ± 0.1 ^d (Plastic)	4.826 ± 0.013
			3.81 ± 0.03 ^{§1} 3.42 ± 0.07 ^{§2} 388.6 3.39 ± 0.16 ^{§3}	4.83 ± 0.03		
¹²¹ Ba	29.5	Singles	5.32 ± 0.16	6.34 ± 0.16	6.81 ± 0.30 ^g	6.81 ± 0.30
¹²³ Ba	144	94.6	4.21 ± 0.10	5.33 ± 0.10		5.46 ± 0.30 ^f
¹²⁵ Ba	216	77.3 140.5	3.26 ± 0.06 3.24 ± 0.07	4.38 ± 0.05	4.6 ± 0.2 ^h (Plastic)	4.56 ± 0.25

The error listed in the column 5 are obtained by quadratic addition of the statistical error and the systematic one.

† This value is obtained to subtract the excited energy (68.5 keV [20]) from Q_ε -value of ^{121m}Cs.

†1 First component feeding the ground level of Xe.

†2 Second component feeding the 2₁⁺ level of Xe.

§1 First component of the β^+ -2 γ^\pm coincidence spectrum.

§2 Second component of the β^+ -2 γ^\pm coincidence spectrum.

§3 Deduced from the β^+ -2 γ^\pm - γ coincidence spectrum.

‡ This value is predicted from mass systematics.

^a Audi and Wapstra[31], ^b Westgaard *et al.*[17], ^c Sofia *et al.*[19], ^d Alkhazov *et al.*[18], ^e Pathak *et al.*[24].

^f Bogdanov *et al.*[12] This value is yielded from the decay energy of the β -delayed proton process and a proton separation energy.[31]

^g D'Auria *et al.*[16]

^h TGA means total gamma absorption spectrometer.

Table 5-10: Experimental mass-excess for neutron-deficient in the Xe-Ba region derived from Q_β -value and the 1993 evaluated mass of Cs isotopes.

Nuclide	Evaluated mass-excess ^a (MeV)	Decay	Q_β (MeV)	Nuclide	Mass-excess (MeV)	
					Present	Evaluated ^a
¹²¹ Cs	-77.150(13)	¹²¹ Cs→ ¹²¹ Xe	5.40(4)	¹²¹ Xe	-82.55(4)	-82.550(24)
		¹²¹ Ba→ ¹²¹ Cs	6.34(16)	¹²¹ Ba	-70.81(16)	-70.33(30)
¹²² Cs	-78.120(15)	¹²² Cs→ ¹²² Xe	7.08(5)	¹²² Xe	-85.20(5)	-85.17(9)
¹²³ Cs	-81.053(12)	¹²³ Cs→ ¹²³ Xe	4.11(3)	¹²³ Xe	-85.16(3)	-85.253(16)
		¹²³ Ba→ ¹²³ Cs	5.33(10)	¹²³ Ba	-75.72(10)	-75.59(30) [‡]
¹²⁴ Cs	-81.741(11)	¹²⁴ Cs→ ¹²⁴ Xe	5.91(3)	¹²⁴ Xe	-87.65(3)	-87.6578(20)
¹²⁵ Cs	-84.098(9)	¹²⁵ Ba→ ¹²⁵ Cs	4.38(5)	¹²⁵ Ba	-79.72(5)	-79.54(25)
¹²⁶ Cs	-84.348(11)	¹²⁶ Cs→ ¹²⁶ Xe	4.78(2)	¹²⁶ Xe	-89.13(2)	-89.174(6)

^a Audi and Wapstra[31]

[‡] Atomic mass prediction based on the systematics of atomic masses.

Ba 同位体の Q_β 値の結果を見ると原子質量の系統性から導かれた予測値は、今回の値に対して有為な差を持っていると考えられる。^{121,123}Ba の Q_β 値に関しては、今回得られた値が初の実験値である。これらの新しい Q_β 値は原子核構造の理論計算や原子質量の予測に対して有意義なデータとなる。

Cs 同位体元素の原子質量は、イオントラップを応用した直接質量測定により精密な測定が行われており [64]、また、測定値が豊富であることから評価も詳細に行われている [13, 31]。そこで、同重体である Xe、Ba の原子質量偏差を Cs 原子質量偏差の評価値と今回得られた Q_β 値から導いた。結果を評価値及び系統性からの予測値 [31] とともに Table 5-10 に示す。

今回の結果 及び 各種理論計算値 [65] と評価値 [31] との差を Fig. 5-3-2 に示す。理論計算は、次のように 4 つの質量計算モデルに大別される。

I 半経験的 / 現象論的モデル

Dussel et al.[66] and Tachibana et al.[32]

II 原子核を液滴モデルで記述した計算

Satpathy - Nayak [67] and Spanier - Johansson [68]

III 原子核を殻模型で記述した計算

Möller - Nix[69] and Möller et al.[70]

IV 周辺核種の原子質量との相互関係を用いた計算

Comay et al.[71], Jänecke - Masson[72] and Masson - Jänecke[33]

Xe の原子質量偏差に関しては、評価値及び各種理論計算の値は今回の値とよく一致している。一方、Ba の原子質量偏差に関しては、評価値(近傍の原子質量の系統性からの予測値)は偏差量として小さくなっている。今回の値は、対象領域に関して Ba 原子

核が予測より若干安定であることを示している。計算においては、周辺の既知の原子質量をもとに予測する、原子核模型にあまり依存しない方式の計算がよい一致を示している。殻模型に大きく依存している III のモデルでは、中性子数 82 近傍で魔法数での原子核の安定性が過大に評価されている。今回の測定対象に近い中性子数 66 は、中性子数 50 と 82 の殻の中間にあたるが、モデル II, III ではこの領域も若干安定に評価している。これは中性子数 66 が、魔法数 50 から 82 の殻の 32 の状態を粒子もしくは空孔で充填して考える場合の折り返し点 ($50+16, 82-16$) にあたるためと考えられる。

Xe、Ba はともに陽子数が偶数 (Xe: 54, Ba: 56) の原子核であり、同じ計算方式では計算結果の質量依存の傾向に類似性がみられる。しかし、モデル II に見られるような安定・不安定の逆の傾向を含め、Xe の結果に比べ Ba の結果は評価値に対する差が大きい。これは、中性子欠損核では Xe 同位体が Ba 同位体に比べて安定で、原子核構造の研究が比較的進んでおり、理論計算に必要な情報が豊富であることが理由として考えられる。また、遷移領域核においては、質量数の減少・原子番号の増大に伴って原子核の変形が大きくなる傾向にあり、原子核模型に強く依存する計算方式ほど未知の領域での予測が立てにくいことを示している。

原子質量の系統性をを見るため実験値と評価値から導出される 2 中性子解離エネルギー $S(2n)$ を Fig. 5-3-3 に示す。Xe に関しては、評価値は今回の結果をよく再現している。Ba に関して評価値の $N=67, 68$ で見られる系統性の乱れは、今回の結果の $^{123}\text{Ba}_{67}$ に関してはなくなっている。 $^{121}\text{Ba}_{65}$ に関しては、導出に必要な $^{119}\text{Ba}_{63}$ の原子質量が実際より不安定に評価されていることが影響していると考えられる。今回の測定対象より原子番号の大きい中性子欠損側のランタノイドの領域では、近年、全 γ 線吸収の手法で測定された $^{129}\text{Ce}_{71}$, $^{131}\text{Pr}_{72}$, $^{131}\text{Nd}_{71}$ の Q_α [18] から導出される原子質量以外、実験値はほとんどない。それらのデータを取り入れて導出された $S(2n)$ は $^{129}\text{Ce}_{71}$, $^{131}\text{Ce}_{73}$ に見られるように、周辺の系統性からはずれた振る舞いをしている。このような振る舞いを確かめるためには、La-Ce-Pr の中性子欠損側の系統的な研究が必要である。

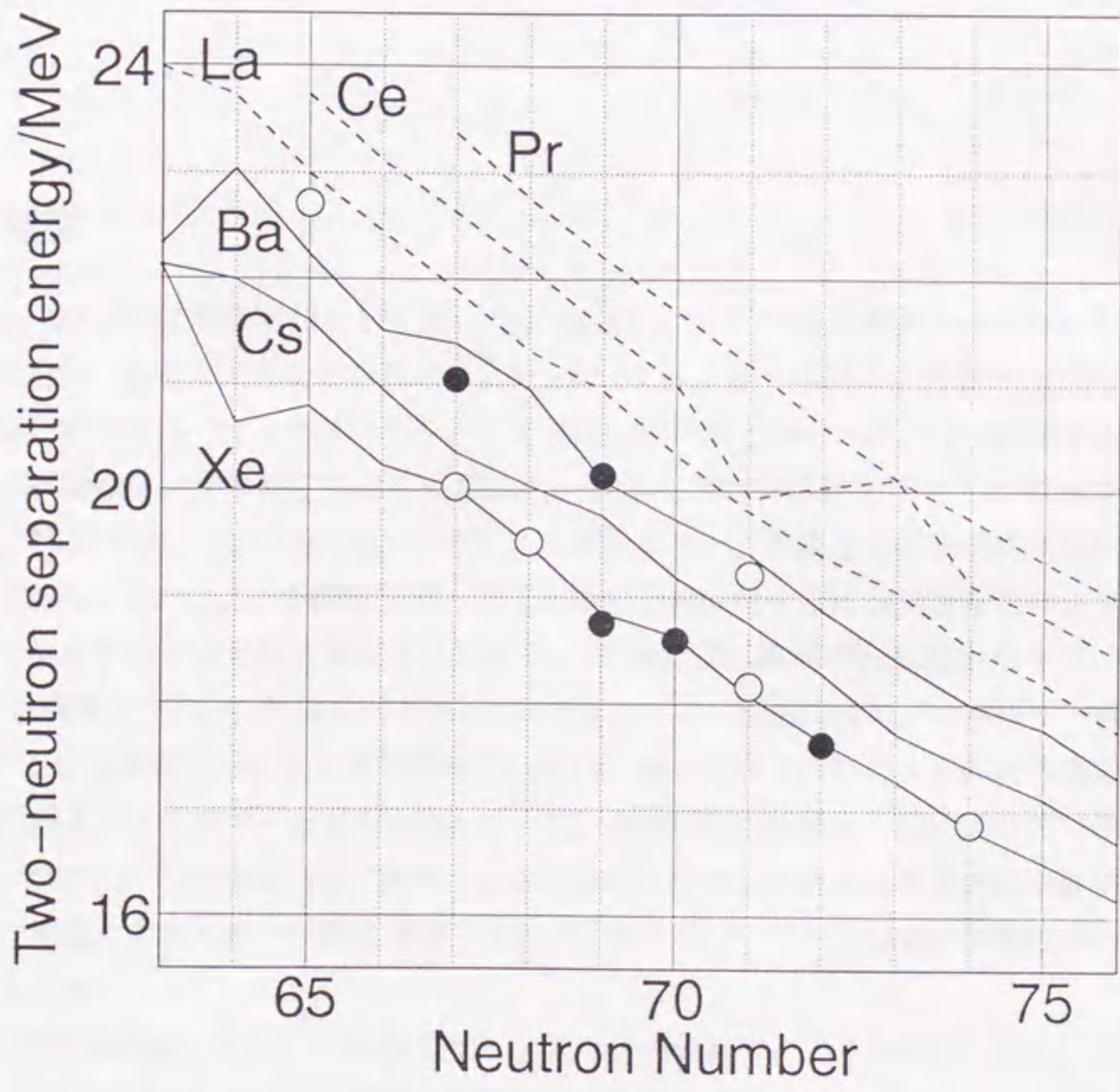


Fig. 5-3-3: Two-neutron separation energies versus neutron number. Closed circles show nuclei whose values are derived from only present masses. Open circles show nuclei whose values are derived from present masses and predicted one.[31]

第6章

まとめ

6.1 結論

HPGe 検出器を β 線測定器として用いた β^+ 線測定により β^+ 線の最大エネルギーを精度良く決定し、 Q_β を求めることを目的に研究を行った。京都大学原子炉実験所(KURRI)セクタ型二重収束スペクトロメータを用いてHPGe 検出器の単一エネルギー陽電子線に対する応答関数を実際の測定により作成した。実測した応答関数を用いて β^+ 線標準線源(^{62}Cu , ^{68}Ge - ^{68}Ga , ^{91}Mo)の β^+ 線スペクトルの解析を行い、本測定法の系統的誤差が20 keV以内に入っていることを確認した。さらに陽電子線に対する応答関数をそのまま取り入れた解析手法の妥当性を確認するために、 β^+ 線-消滅 γ 線同時計数測定法を用いて ^{68}Ge - ^{68}Ga 線源と ^{126}Cs の β^+ 線スペクトルの測定を行った。解析には単一エネルギー電子線に対する応答関数を用いた平易で信頼性の高い β^- 線スペクトルに対する解析方法を適用して β^+ 線最大エネルギーを求め比較を行った。両解析法の結果は、期待通りの一致を示した。次にこれらの準備の後、実際にJAERI-ISOLを用いて得られる短寿命中性子欠損核の β^+ 線最大エネルギーの測定・解析を行い、 $^{121,123,125}\text{Ba}$, $^{121-124,126}\text{Cs}$ の8核種について Q_β を決定した。

Csの同位体に関しては、今回得られた Q_β 値は過去の報告とよく一致している。このことは、検出効率はやいが応答関数が複雑なため取り上げられることのなかった本測定法のOn-line実験での有効性を明確に示していると結論できる。 $^{121,123}\text{Ba}$ の Q_β 値は、今回得られた値が最初の実験値であり、 ^{125}Ba についても大幅に精度が向上した。Xe、Baの原子質量偏差をCs原子質量偏差の評価値と今回得られた Q_β 値から導いた。Xeの原子質量偏差に関しては評価値及び各種理論計算の値は今回の値とよく一致している。一方、Baの原子質量偏差に関しては評価値が今回の値より偏差量として小さく対象領域に関してBa原子核が予測より若干安定である可能性を示している。計算においては、方式の違いによって実験結果の再現・予測の傾向が違い、その差異は原子核が不安定になるにつれて大きくなっている。これは、理論計算に必要な励起準位や原子核の変形などの実

験的な原子核構造の研究が不足しているため、原子核模型に強く依存する計算方式の結果に現れている。今回の Q_β 値は原子核構造の理論計算や原子質量の予測に対して有意義なデータとなる。

今回の測定対象より原子番号の大きい中性子欠損側のランタノイドの領域では、これまで原子質量の実験値はほとんどない。日本原子力研究所高崎研究所のAVFサイクロトロンに付設されたISOLでの ^{36}Ar ビームによる重イオン核反応を使うことで、対象領域をLa-Ce-Prまで延長することが可能となった。本研究では得られる線源強度の制約により Q_β の決定までにはいたらなかったが、 β^+ 線最大エネルギー測定の予備実験として陽子ドリップライン近傍の $^{125,126,127}\text{Pr}$ の崩壊の研究を行い、これまで半減期等が未確認であった未知核種 $^{125,127}\text{Pr}$ の探索を行い、半減期をそれぞれ3.3 s、7.7 sと決定することに成功した。

6.2 今後

今回の研究では、最大3.8 MeVの陽電子線に対する応答関数を実測によって作成を行った。このエネルギーは今回の応答関数の測定を行ったKURRIセクタ型二重収束スペクトロメータの能力($E=0.05\sim 5.0$ MeV)と、使用できる β^+ 線源を考えると限界にきている。その反面、研究対象の短寿命中性子欠損核の β^+ 線最大エネルギーは8~10 MeVに及んでいる。今回は応答関数の適用範囲を約7 MeVまで外挿して解析を行ったが、応答関数の信頼性を高めるために高エネルギーの陽電子線(~10 MeV)に対して、実測の応答関数を作成する必要がある。また、系統誤差を小さくするためにも、応答関数の研究をさらに詳細に行い、応答関数のモデル化をさらに精密に行う必要がある。現在、電子線エネルギー6~10 MeVに対応する簡易型の β 線スペクトロメータを自作し、KURRI電子線ライナックにおいて電子対生成で生じる高エネルギーの電子・陽電子をオンラインで線源として利用した応答関数の研究が行われている。

$\beta^+-2\gamma$ 同時計数測定システムの応答関数に関しては実験的な応答関数作成を生田らが行っている。その結果からは、この測定システムの応答関数は単一エネルギー電子線に対する応答関数とほぼ同じ形状・比率であるが、全エネルギー吸収ピークより高エネルギー側に若干の除去できない成分があることがわかった。今回の測定システムは、消滅 γ 線検出器として2対の BaF_2 検出器を用い、 β^+ 線シングル測定に対して $3.0\pm 0.5\%$ の相対検出効率であった。このシステムを短寿命中性子欠損核種の β^+ 線最大エネルギー測定に広く適用するには、消滅 γ 線検出器を検出効率の高いBGOシンチレーション検出器にして、測定システムとして検出効率を約3倍に大きくすることが考えられる。

今回の測定対象より原子番号の大きい中性子欠損側のランタノイドの領域では、これまで原子質量の実験値はほとんどない。研究を進める上での問題点としては、この領域の原子核を合成するための核反応に必要な重イオンビームとターゲット物質の組み合わせが少ないこと、合成された短寿命のランタノイドが高沸点、高イオン化ポテンシャルであるためイオン化するためには高温・高イオン化効率のイオン源が必要なことがある。今後、測定器の開発及び複雑な崩壊図式での β 線スペクトルの多成分解析等による解析技術の効率化に加え、ISOLイオン源の開発・高効率化を行うことで中性子欠損短寿命ランタノイドについて研究を進めることができる。今回、有効性の示された本測定法を用いて原子質量を広い広範囲で決定することで、原子核の存在限界に対する知見を得ることができるものと期待される。

謝辞

本研究を行うにあたり終始御指導下さった工学研究科エネルギー理工学専攻の河出清教授、山本洋助教授に感謝致します。河出清教授、山本洋助教授には、本研究に留まらず多くの御指導及び議論をしていただきました。

論文作成にあたり御指導下さった工学部原子核工学科の森千鶴夫教授加藤敏郎教授(現名古屋大学名誉教授)に感謝致します。

柴田理尋博士、生田智彦博士(現日本原子力研究所)、谷口秋洋氏(現京都大学原子炉実験所)、大学院生の浅井雅人氏、小島康明氏には実験を協力して行っていただくとともに、研究に関して助言をいただきました。生田智彦博士には $\beta^+-2\gamma$ 同時計数法による実験を、計画段階から協力していただきました。浅井雅人氏、小島康明氏には日本原子力研究所高崎研究所での $^{125,126,127}\text{Pr}$ の崩壊に関する研究を協力して行っていただきました。

HPGe検出器を用いた β 線測定に関しては日比章吾氏(現(株)豊田中央研究所)、石井哲朗博士(現日本原子力研究所)、右近弘栄氏(現東芝メディカル(株))による β^- 線測定に関する研究を通しての、実験技術及び解析プログラムの蓄積なくしては、その発展である β^+ 線測定の研究の完成には至らなかったものと思います。諸先輩の努力に感謝いたします。

陽電子線に対するHPGe検出器の応答関数の作成は、京都大学原子炉実験所共同利用研究により行いました。同川瀬洋一教授には、 β 線スペクトロメータでの応答関数の作成に御尽力いただきました。また、ライナックの皆様にはライナックでの試料照射の準備と運転を行っていただきました。

短寿命中性子欠損核の β^+ 線測定は、大学・原研プロジェクト共同研究「核燃料サイクルバックエンド化学」により行いました。日本原子力研究所の市川進一氏、飯村秀紀博士には、日本原子力研究所における実験に御尽力いただくと同時に夏期休暇実習生、特別研究生として御指導いただきました。未知核種 $^{125,126,127}\text{Pr}$ の探索実験は大学・原研プロジェクト共同研究「放射線高度利用」により行いました。日本原子力研究所の関根俊明博士、小泉光生博士には実験を協力して行っていただくとともに、日々の研究生活の

中で様々な御指導をいただきました。

立教大学の阮 建治教授には、計算機シミュレーションによる応答関数の作成で助言をいただきました。

名古屋大学大型計算機センター、核融合科学研究所附属電子計算機センター、名古屋大学アイソトープ総合センターの方々には、データ処理・解析を行うにあたりお世話になりました。

参考文献

- [1] S. Hibi : B. Thesis, Nagoya University (1983)
- [2] T. Ishii : M. Thesis, Nagoya University (1984)
- [3] H. Ukon : M. Thesis, Nagoya University (1988)
- [4] H. Ukon, M. Miyachi, T. Ishii, H. Yamamoto, K. Kawade, T. Katoh, Y. Kawase, K. Okano and J.Z. Ruan : Proceedings of the International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, Mito (1988) p.893
- [5] D. M. Rehfield : Nucl. Instrum. Methods **157**, 351(1978).
- [6] R. Decker, K. D. Wunsch, H. Wollnik, G. Jung, E. Koglin, G. Siegert : Nucl. Instrum. Methods **192**, 261 (1982).
- [7] H. Noma, F. T. Avignone III, D. M. Moltz, K. S. Toth : Nucl. Instrum. Methods Phys Res. **211**, 391 (1983).
- [8] V. R. Bom : Nucl. Instrum. Methods Phys Res. **207**, 395 (1983).
- [9] H. Dautet, N. Campeau, J.K.P. Lee, C. Bourgeois, B. Roussière and A. Houdayer : Proceedings of the 7th International Conference on Atomic Masses and Fundamental Constants, Darmstadt (1984) p. 257.
- [10] H. Keller, R. Kirchner, O. Klepper, E. Roeckl, D. Schardt, R. S. Simon, P. Kleinheinz, C. F. Liang, P. Paris : Nucl. Instrum. Methods **A300**, 67 (1991).
- [11] S. Ichikawa, T. Sekine, H. Iimura, M. Oshima, N. Takahashi : JAERI Annual Rep. (1984).
- [12] D. D. Bogdanov, A. V. Demyanov, V. A. Karnaukhov, L. A. Petrov, J. Vobořil : Nucl. Phys. **A303**, 145 (1978).

- [13] A. H. Wapstra, G. Audi : Nucl. Phys. A432, 1 (1985).
- [14] R. Arlt, A. Jasiński, W. Neubert, H.-G. Ortlepp : Acta Physica Polonica B6, 433 (1975).
- [15] G. Marguier, A. Charvet, J. Genevey, C. Richard-Serre, A. Knipper, G. Walter, the ISOLDE Collaboration : J. Phys. G: Nucl. Phys. 7, 101 (1981).
- [16] J. M. D'Auria, H. Bakhru, I. L. Preiss : Phys. Rev. 172, 1176 (1968).
- [17] L. Westgaard, K. Aleklett, G. Nyman, E. Roeckl : Z. Phys. A 275, 127 (1975).
- [18] G. D. Alkhazov, L. H. Batist, A. A. Bykov, F. V. Moroz, S. Yu. Orlov, V. K. Tarasov, V. D. Wittmann, : Z. Phys. A 344, 425 (1993).
- [19] K. Sofia, B. N. Subba Rao, J. E. Crawford : Phys. Rev. C24, 1615 (1981).
- [20] J. Genevey, A. Gizon, G. Marguier, C. Richard-Serre, A. Knipper, P. Paris, C. F. Liang, B. Weiss, the ISOLDE and ISOCELE collaborations: Z. Phys. A 338, 405 (1991).
- [21] Ch. Droste, W. Neubert, S. Chojnacki, T. Morek, K. F. Alexander, Z. Wilhelmi : Nucl. Phys. A192, 595 (1972).
- [22] J. Genevey-Rivier, A. Charvet, G. Marguier, C. Richard-Serre, J. D'Auria, A. Huck, G. Klotz, A. Knipper, G. Walter, the ISOLDE collaboration: Nucl. Phys. A283, 45 (1977).
- [23] A. Charvet, J. Genevey-Rivier, L. C. Carraz, C. Richard-Serre, A. Knipper, G. Walter: J. Phys.(Paris), Lett. 38, L-241 (1977).
- [24] B. P. Pathak, L. Lessard, L. Nikkinen, I. L. Preiss : Phys. Rev. C14, 1573 (1976).
- [25] P. F. Mantica, Jr., B. E. Zimmerman, W. B. Walters, J. Rikovska, N. J. Stone : Phys. Rev. C45, 1586 (1992).
- [26] J. Genevey, A. Gizon, J. Inchaouh, S. André, V. Baraci, D. Barnéoud, R. Béraud, J. Blachot, D. Bucurescu, G. Cata-Danil, R. Duffait, H. El-Samman, C. Foin, J. Gizon, C.F. Liang, B. Nyako, P. Paris, I. Penev, A. Plochocki, B. Weiss and L. Zolnai :

Proc. 6th Int. Conf. Nuclei Far From Stability and 9th Int. Conf. Atomic Masses and Fundamental Constants, Bernlastl-Kues, Germany, 19-24 July, 1992 : Inst. Phys. Conf. Ser. 132, 671 (1992).

- [27] J. Lu, J. Mukai, T. Komatsubara, T. Hayakawa and K. Furuno : Z. Phys. A348, 239 (1994).
- [28] K.L. Ying, P.J. Bishop, A.N. James, A.J. Kirwan, D.J.G. Love, T.P. Morrison, P.J. Nolan, D.C.B. Watson, K.A. Connell, A.H. Nelson and J. Simpson : J. Phys. G 12, L211 (1986).
- [29] C.J. Lister, B.J. Varley, R. Moscrop, W. Gelletly, P.J. Nolan, D.J.G. Love, P.J. Bishop, A.J. Kirwan, W.J. Thornley, L. Ying, R. Wadsworth, J.M. O'Donnell, H.G. Price and A.H. Nelson : Phys. Rev. Lett. 55, 810 (1985).
- [30] D. Barnéoud, J. Blachot, J. Genevey, A. Gizon, R. Béraud, R. Duffait, A. Emsallem, M. Meyer, N. Redon and D. Rolando-Eugio : Z. Phys. A330, 341 (1988).
- [31] G. Audi, A. H. Wapstra : Nucl. Phys. A565, 1 (1993).
- [32] T. Tachibana, M. Uno, M. Yamada, S. Yamada : Atomic and Nucl. Data Tables 39, 251 (1988).
- [33] P. J. Masson, J. Jänecke : Atomic and Nucl. Data Tables 39, 273 (1988).
- [34] K. Takumi, H. Yamamoto, H. Ikegami : Nucl. Instrum. Methods Phys Res. 65, 253 (1968).
- [35] 中性子発生装置(電子線加速器)KURRI-LINAC の現状と成果報告
京都大学原子炉実験所 中性子発生装置室 (1988)
- [36] V. G. Molière : Z. Naturforschg. 3a., 78 (1948).
- [37] R. C. Greenwood, M. H. Putnam : Nucl. Instrum. and Methods A337, 106 (1993).
- [38] T. Ikuta, A. Taniguchi, H. Yamamoto, K. Kawade and Y. Kawase : J. Phys. Soc. of Jpn. 64, 3244 (1995).

- [39] "Table for the Analysis of Beta Spectra.", National Bureau of Standards Applied Mathematics Series 13.
United States Government Printing Office, Washington, 1952.
- [40] L. Pages, E. Bertel, H. Joffre, L. Sklavenitis : Atomic Data Tables 4, 1 (1972).
- [41] R. A. Becker, F. S. Kirn, W. L. Buck : Phys. Rev. 76, 1406 (1949)
- [42] R. W. Hayward : Phys. Rev. 79, 541 (1950)
- [43] R. H. Nussbaum, A. H. Wapstra, R. van Lieshout, G. J. Nijgh and L. Th. M. Ornstein : Physica 20, 571 (1954)
- [44] S. Antman, H. Pettersson, A. Suarez : Nucl. Phys. A94, 289 (1967)
- [45] A. Mukerji and P. Preiswerk : Helv. Phys. Acta. 25, 387 (1952)
- [46] B. Craseman, D. E. Rehfuss, H. T. Easterday : Phys. Rev. 102, 1344 (1956)
- [47] H. Daniel : Z. Naturforsch 12, 363 (1957)
- [48] S. Kono : J. Phys. Soc. Jap. 17, 907 (1962)
- [49] H. E. Bosch, T. Urstein : Nucl. Instrum. Method. 24, 109 (1963)
- [50] K. A. Baskova, S. S. Vasil'ev, M. A. Khamo-Leila and L. Ya. Shavtvalov : Bull. Acad. Sci. USSR. (phys. ser.) 29, 201 (1966)
- [51] E. Beck : Nucl. Instrum. Method. 76, 77 (1969)
- [52] W. F. Slot, G. H. Dulfer, H. van der Molen and H. Verheul : Nucl. Phys. A186, 28 (1972)
- [53] L. Katz, R. G. Baker, R. Montalbetti : Can. J. Phys. 31, 250 (1953)
- [54] F. B. Smith, Jr. , N. B. Gove, R. W. Henry, R. A. Becker : Phys. Rev. 104, 706 (1956)
- [55] J. D. Prentice and K. G. McNeeill : Phys. Rev. 107, 1041 (1957)
- [56] S. Ichikawa, T. Sekine, M. Oshima, H. Iimura, Y. Nakahara : Nucl. Instrum. Methods B70, 93 (1992).

- [57] T. Ikuta, A. Osa, A. Taniguchi, H. Yamamoto, K. Kawade : Nucl. Instrum. Methods **A323**, 697 (1992).
- [58] Y. Kojima : B. Thesis, Nagoya University (1994)
- [59] T. Tamura, H. Iimura, K. Miyano, S. Ohya : Nucl. Data Sheets **64**, 323 (1991).
- [60] C. Ekström, S. Ingelman, G. Wannberg, M. Skarestad, the ISOLDE collaboration : Nucl. Phys. **A292**, 144 (1977).
- [61] A. Gizon, J. Genevey, D. Barnéoud, A. Astier, R. Béraud, Gh. Cata-Danil, A. Emasallem, J. Gizon, Y. Le Coz, C.F. Liang and P. Paris : Z. Phys. **A351**, 361 (1995).
- [62] J. M. Nitschke, M. D. Cable and W.-D. Zeitz : Z. Phys. **A312**, 265 (1983).
- [63] G. Puddu, O. Scholten and T. Otsuka : Nucl. Phys. **A348** 109 (1980).
- [64] H. Stolzenberg, St. Becker, G. Bollen, F. Kern, H.-J. Kluge, Th. Otto, G. Savard, L. Schweikhard, G. Audi, R. B. Moore : Phys. Rev. Lett. **65**, 3104 (1990).
- [65] A. H. Wapstra, G. Audi, R. Hoekstra : Atomic and Nucl. Data Tables **39**, 281 (1988).
- [66] G. Dussel, E. Caurier, A. P. Zuker : Atomic and Nucl. Data Tables **39**, 205 (1988).
- [67] L. Satpathy, R. C. Nayak : Atomic and Nucl. Data Tables **39**, 241 (1988).
- [68] L. Spanier, S. A. E. Johansson : Atomic and Nucl. Data Tables **39**, 259 (1988).
- [69] P. Möller, J. R. Nix : Atomic and Nucl. Data Tables **39**, 213 (1988).
- [70] P. Möller, W. D. Myers, W. J. Swiatecki, J. Treiner : Atomic and Nucl. Data Tables **39**, 225 (1988).
- [71] E. Comay, I. Kelson, A. Zidon : Atomic and Nucl. Data Tables **39**, 235 (1988).
- [72] J. Jänecke, P. J. Masson : Atomic and Nucl. Data Tables **39**, 265 (1988).

- [73] G. Beyer, A. Jasiński, O. Knotek, H.-G. Ortlepp, H.-U. Siebert, H. Tyrroff : Nucl. Phys. A260, 269 (1976).
- [74] R. J. Ackermann, E. G. Rauh and R. J. Thorn : J. Chem. Phys. 65, 1027 (1976).

発表論文一覧

副論文

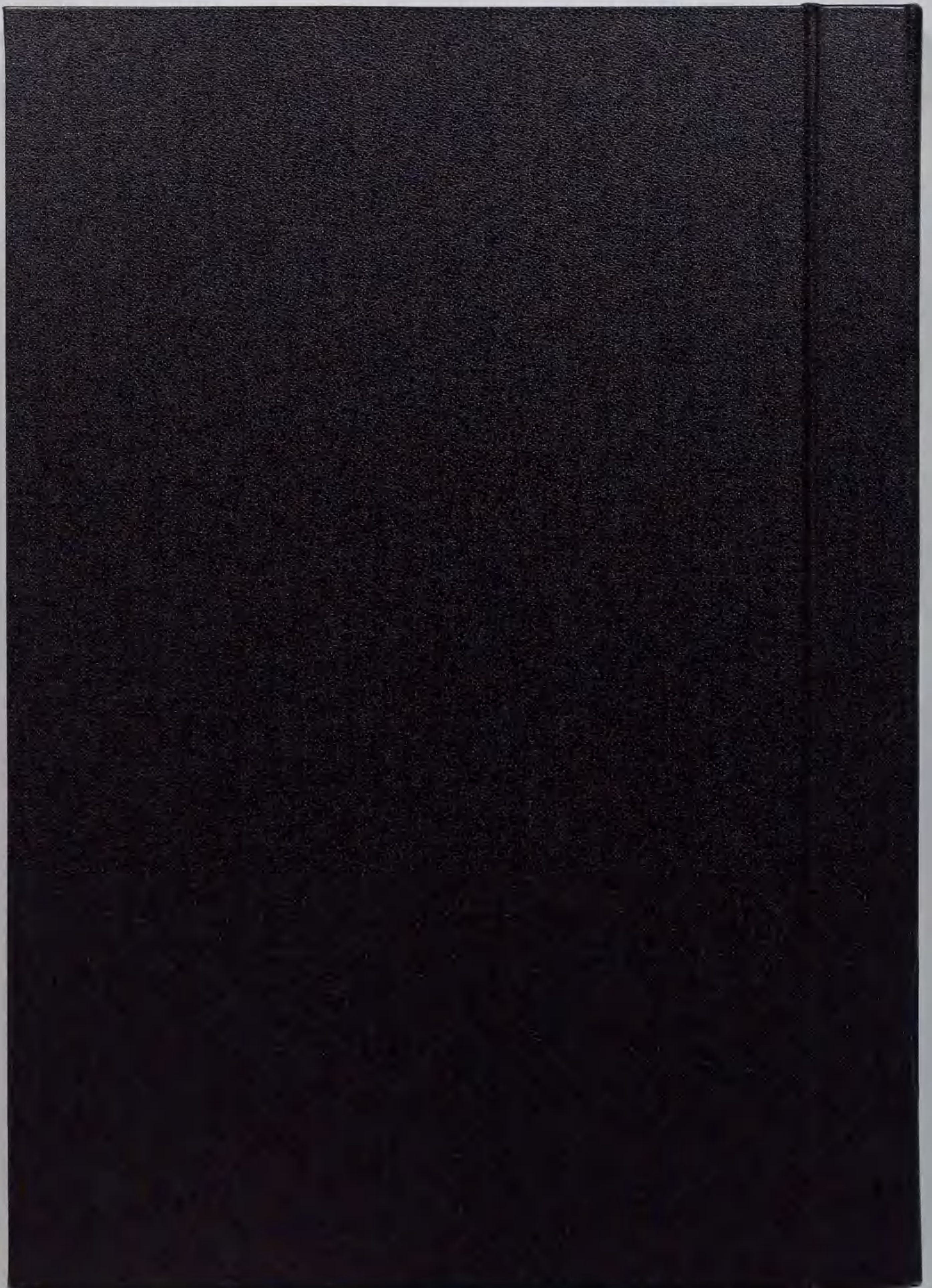
1. A. Osa, T. Ikuta, A. Taniguchi, H. Yamamoto, K. Kawade, S. Ichikawa and Y. Kawase : *Measurement of β -ray maximum energy with an HPGe detector by means of β^+ -annihilation photons coincidence.* Nucl. Instrum. and Methods B70 (1992) 551.
2. A. Osa, T. Ikuta, M. Shibata, M. Miyachi, H. Yamamoto, K. Kawade, Y. Kawase and S. Ichikawa : *Measurement of β^+ -ray maximum energy with an HPGe detector.* Nucl. Instrum. and Methods A332 (1993) 169.
3. A. Osa, T. Ikuta, K. Kawade, H. Yamamoto, and S. Ichikawa : *Beta decay energies of $^{121,123,125}\text{Ba}$ and $^{121-124,126}\text{Cs}$.* J. Phys. Soc. Jpn, submitted.
4. A. Osa, M. Asai, M. Koizumi, T. Sekine, S. Ichikawa, Y. Kojima, H. Yamamoto and K. Kawade : *β^+ decay of unstable praseodymium isotopes: ^{127}Pr , ^{126}Pr and the new isotope ^{125}Pr .* Nucl. Phys. A 588 (1995) 185c.
5. T. Sekine, A. Osa, M. Koizumi, S. Ichikawa, M. Asai, H. Yamamoto and K. Kawade : *Decay of the new isotope ^{127}Pr .* Z. Phys. A 349 (1994) 143.

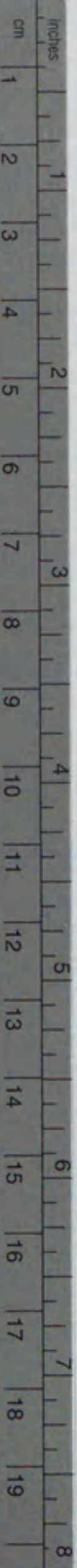
本論文の第2章 2.1~2 は、副論文 2. を参考にしている。第3章 3.2 ~ 5 は、副論文 2. を、3.6 は副論文 1. を参考にしている。第5章 5.1 は副論文 1.,3. を、5.2.2 は副論文 4.,5. を参考にしている。

参考論文

1. T. Morikawa, M. Oshima, T. Sekine, Y. Hatsukawa, S. Ichikawa, H. Iimura, A. Osa, M. Shibata and A. Taniguchi : *Lifetime measurement of the 2_1^+ state in $^{122,124,126}\text{Ba}$.* Phys. Rev. C. 46 (1992) R6.

2. K. Kawade, K. Katou, A. Osa, M. Shibata, H. Yamamoto, T. Katoh, T. Iida, A. Takahashi : *Measurement of β^+ -activity by detecting 511 keV annihilation γ -rays.* Nucl. Instrum. Methods A301 (1991) 594.
3. H. Iimura, M. Shibata, S. Ichikawa, T. Sekine, M. Oshima, N. Shinohara, M. Miyachi, A. Osa, H. Yamamoto, K. Kawade : *Level scheme of ^{123}Ba fed by the ^{123}La decay.* J. Phys. Soc. of Jpn. 60 (1991) 3585.





Kodak Color Control Patches

© Kodak, 2007 TM: Kodak

Blue	Cyan	Green	Yellow	Red	Magenta	White	3/Color	Black

Kodak Gray Scale



© Kodak, 2007 TM: Kodak

- A 1 2 3 4 5 6 M 8 9 10 11 12 13 14 15 B 17 18 19

