

JAERI-M  
6992

<sup>109</sup>Rh の崩壊特性の研究  
(崩壊熱核データの整備)

1977年3月

金沢 光隆\*・大矢 進\*\* 田村 務  
松本純一郎・陸路 直\*\*

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

$^{109}\text{Rh}$  の崩壊特性の研究

( 崩壊熱核データの整備 )

日本原子力研究所東海研究所物理部

金沢光隆\*・大矢 進\*\*・田村 務

松本純一郎・陸路 直\*\*

( 1977年2月1日受理 )

$^{109}\text{Rh}$  の  $\beta$  崩壊から  $^{109}\text{Pd}$  の準位構造を調べた。使用した測定系は種々の高分解能の Ge 検出器でシングル、同時計数両モードで精度の高いデータが得られた。 $^{109}\text{Rh}$  の半減期は  $80 \pm 2$  秒で 35 本の  $\gamma$  線が見出され、それらは  $^{109}\text{Pd}$  の 14 本の準位に組込むことができた。第一励起準位 ( 113.4 keV ) の寿命は  $380 \pm 50$  n sec に決定された。3 本の  $\gamma$  線について、K 内部変換係数が決まった。これまでの ( d, p ), ( d, t ) 反応の結果とこの研究からの  $\beta$ ,  $\gamma$  崩壊特性をもとにしてスピン・パリティを与え、最近の核モデルで準位構造を検討した。

\* 学生研究員 新潟大学理学部修士課程

\*\* 新潟大学理学部

Decay Scheme of  $^{109}\text{Rh}$

Mitsutaka KANAZAWA\*, Susumu OHYA\*\*, Tsutomu TAMURA

Junichiro MATUMOTO and Naoshi MUTSURO\*\*

Division of Physics, Tokai, JAERI

(Received February 1, 1977)

The energy levels of  $^{109}\text{Pd}$  have been studied from the decay of  $^{109}\text{Rh}$  by using high-resolution  $\gamma$ -detector systems in singles and coincidence modes. A total of 35  $\gamma$ -transitions were observed and were placed in the decay scheme involving 14 excited states of  $^{109}\text{Pd}$ . The half-life of 113.4 keV level was determined as  $380 \pm 50$  nsec. K conversion coefficients for a few low-energy transitions were determined. Spins and parities of most the levels were deduced from  $\beta^-$  and  $\gamma$ -transition properties combined with previous results of the (d, p) and (d, t) reactions. The levels are considered in terms of the current nuclear models.

---

\* ) Research student, Faculty of Science, Niigata Univ.

\*\*) Faculty of Science, Niigata Univ.

# 目 次 な し

## 1. はじめに

原子炉の安全性、照射済燃料の取扱いあるいは環境への影響等、核分裂生成物の核データを必要とする分野が多い。原子炉の事故解析では、冷却剤の喪失に際して、核燃料体中に発生する $\beta$ 、 $\gamma$ 崩壊熱の推定が重要な問題としてクローズ・アップされてきている。実験上の困難さから、生成核種に対するミクロな核データをベースにした崩壊熱を総和する方法が行われている。崩壊熱の発生は核分裂の停止からほぼ指数関数的に減少しており、短寿命核種からの寄与を精度よく推定するために短寿命核分裂生成核種の核データの整備が重要となっている。

核物理第2研究室では従来、短寿命核の研究を行ってきており、これまでに開発した測定技術を生かし、対象を核分裂短半減期核種に限定して信頼性と精度の高い核データを提供するための研究を進めている。これまでに測定を行った核種には $^{99}\text{Nb}$ (2.7 m),  $^{103}\text{Tc}$ (50 sec),  $^{109}\text{Rh}$ (80 sec),  $^{113m}\text{Ag}$ (1.2 m),  $^{113g}\text{Ag}$ (5.3 h),  $^{115m}\text{Ag}$ (18 sec),  $^{115g}\text{Ag}$ (20 m)などがあり、半減期や崩壊モードについての新らしい知見が得られた。この報告は $^{109}\text{Rh}$ の崩壊に関するものである。

### 1.1 $^{109}\text{Rh}$ と $^{109}\text{Pd}$ についてのこれまでの研究

$^{109}\text{Pd}$ の励起準位はCohenら<sup>1)</sup>による $^{108}\text{Pd}$ (d, p) $^{109}\text{Pd}$ 反応、Diehlら<sup>2)</sup>による $^{110}\text{Pd}$ (d, p)反応の研究で約2.5 MeVまでの核準位に対する移行角運動量とスペクトロスコピック因子が求められ、スピントバリティがきめられている。 $^{109}\text{Rh}$ の $\beta$ 崩壊でまちまちの半減期が報告されていた<sup>3)</sup>。最近Fettweisら<sup>4)</sup>は $^{235}\text{U}$ の核分裂生成物から迅速化学分離によって線源を作製し測定を行ってFig.1の崩壊様式を得ている。同図の右側に反応スペクトロスコピーからの準位が示してある。 $\beta$ 崩壊からの核準位との重なりもあるが、さらに詳細な検討を行うには十分ではない。Fettweisらの研究でも $\gamma$ 線スペクトルの各ピークに対する半減期は49 sec ~ 150 secにばらついている(Table 1)。

この研究では $^{109}\text{Rh}$ の放射能を $^{110}\text{Pd}$ ( $\gamma$ , p)反応で生成し、最新の $\gamma$ 線測定技術を用いて研究し、信頼性と精度の高い核データを得た。観測された約35本の $\gamma$ 線を14本の核準位に組込むことができた。近傍の核に対する核準位のシステムティックスと核モデルからの予測を援用して、核構造を理解することを試みた。

## 2. 実験過程

### 2.1 $^{109}\text{Rh}$ 線源の準備

$^{109}\text{Rh}$ の線源は $^{110}\text{Pd}$ ( $\gamma$ , p)反応によって生成した。ターゲットに使用したPdはORNL製で質量数110について97%に濃縮されており、その同位元素比と不純物含有量をTable 2に示す。原研の100 MeVリニアックからの50 MeV電子ビームを水冷した10 mmのTa板で制動輻射に変換して照射に使用した<sup>5)</sup>。 $^{110}\text{Pd}$ の試料はAl箔に包み、さらにAl製のカプセル

ルに封入して、気送管照射装置を用いて約80秒照射した。照射後カプセルを回収して薬包紙に包みかえて測定を行った。照射カプセルの回収に約5秒、Al箔の包みかえに約30秒を必要とし、照射後50秒から測定を開始した。目的とした<sup>109</sup>Rh以外に<sup>110</sup>Pdの( $\gamma$ , n), ( $\gamma$ , pn), ( $\gamma$ , 3n)反応あるいは<sup>108</sup>Pd( $\gamma$ , n)反応によって<sup>109m</sup>Pd(4.7m), <sup>109</sup>Pd(13h), <sup>108g,m</sup>Rh(5.9m, 16.8sec), <sup>107m</sup>Pd(21sec)などが生成された。しかしながら<sup>109m</sup>Pd(4.7m)以外はいずれも生成量が少なく、化学分離なしで<sup>109</sup>Rhの種々の測定に対して妨害は小さかった。

<sup>110</sup>Pdのターゲットは金属形で約0.5mmの粒子状だったため低エネルギーの $\gamma$ 線の測定では自己吸収が大きい。低エネルギーを対象とした $\gamma$ 線シングルおよび $\gamma\gamma$ 同時計数の測定では約20mg/cm<sup>2</sup>にロールしたものを使用した。

## 2.2 放射線測定装置

$\gamma$ 線シングルおよび $\gamma\gamma$ 同時計数の測定のために種々の高分解能のGe検出器を、 $\beta$ 線の測定のためにアントラセン検出器を、3台のADC(4096 Ch × 2, 8192 Ch × 1)がインターフェースされたオンライン計算機と組合わせて、種々のモードで測定を行った。各装置の主要な性能を述べる：

### (1) $\gamma$ 線測定系

#### i Ge(Li)検出器

60cc 同軸型(自製) 1台

分解能 2.5 keV FWHM (at 1.3MeV)

40cc 同軸型(ORTEC製) 縦および横型各1台

分解能 1.5 keV FWHM (at 122 keV)

2.4 keV FWHM (at 1.3MeV)

#### ii LEPS (Low Energy Photon Spectrometer)

(ORTEC製) 25mm<sup>2</sup> × 5mm

分解能 400 eV FWHM (at Pd K Xray)

600 eV FWHM (at 122keV)

#### iii USC-3 オンライン計算機(東芝製)

コアメモリ 20 bit × 16 KW

ドラム 20 bit × 64 KW

ADC PHA(東芝製) 4096 Ch × 2

(Nuclear Data製) 8192 Ch × 1

タイムアナライザー(原研製)

25 n sec/Ch × 1

その他

磁気テープ装置(TEAC製) 9トラック × 2

ロッター(岩崎通信機製) 1

測定モード 自動／手動

## シングル計数および事象記録方式

40 cc および 60 cc の大型 Ge (Li) 検出器による 100 ~ 1,500 keV の範囲の  $\gamma$  線の測定では  $^{152}\text{Eu}$  を用いて系のエネルギーと相対検出効率を校正した。LEPS による低エネルギーの  $\gamma$  線の測定では  $^{75}\text{Se}$  と  $^{241}\text{Am}$  を標準線源として使用した。またエネルギーの決定精度を向上させる目的では  $^{109}\text{Rh}$  と  $^{75}\text{Se}$  および  $^{241}\text{Am}$  を適当な強度で混合して測定する方法がきわめて有効であった。

測定された  $\gamma$  線スペクトルからピーク・チャンネルの位置と面積、さらに  $\gamma$  線のエネルギーと強度を得るために、 $\gamma$  線自動解析プログラム B O B 73<sup>6)</sup>, B O B 75<sup>7)</sup> を用い、原研の FACOM 230 - 75 で解析した。

(2)  $\beta$  線測定系

$\beta$  線スペクトルの測定ではアントラセン・シンチレータを高安定光電子増倍管 R C A 8053 と組合せて用いた。エネルギーの基準として  $^{198}\text{Au}$  ( $\beta$  - 961 keV),  $^{137}\text{Cs}$  (662 keV K + L + M ライン),  $^{175}\text{Yb}$  ( $\beta$  - 467 keV),  $^{114\text{m}}\text{In}$  (192 keV K + L + M ライン,  $\beta$  - 1984 keV)などを使用した。 $^{109}\text{Rh}$  の  $\beta$  崩壊で基底状態を含めた  $\beta$  線の分岐比を決定するため  $\beta$  線と  $\gamma$  線を同時に測定した。これと同一幾何学的条件で  $^{137}\text{Cs}$  からの  $\beta$  線と 662 keV の内部変換電子線および  $\gamma$  線を測定して両検出器系の効率を求めた。

## (3) 同時計数および遅延同時計数系

$\gamma\gamma$  同時計数は 60 cc - 40 cc の Ge (Li) 検出器系、および LEPS - 40 cc Ge (Li) 検出器の 2 つの組合せで行った。2 つの検出器は角相関効果を考慮して  $130^\circ$  の角度に配置し、それぞれ相手方の検出器からの散乱  $\gamma$  線が検出されるのを防ぐように鉛の吸収体を挿入した。LEPS を使用した  $\gamma\gamma$  同時計数では両方の検出器の検出効率が著しく異なるので、線源を LEPS にできるだけ近づける必要があった。

これらの測定では 3 パラメータ (2 つの Ge (Li) 検出器からのエネルギー信号と、これらの 2 つの信号の時間差に比例する信号) を U S C - 3 計算機の事象記録モードを利用して磁気テープに書き込む方式を採用した。この核種の半減期は 80 秒ときわめて短かいにもかかわらず、非常に良質の同時計数実験が行われた。

このシステムのブロック図を Fig. 2 に示す。両検出器からの時間信号はそれぞれの前置増幅器から T F A (Timing Filter Amplifier), C F D (Constant Fraction Discriminator) を通して成形し T A C (Time to Amplitude Converter) によって両信号の時間差に比例する振幅をもつ信号に変換された。この信号の一部は A D C (Analogue to Digital Converter) の一つに加えられ、他の一部は L S D (Logic Shape and Delay) で成形して、エネルギー分析用の 2 台の A D C のゲート信号として用いられる。3 台の A D C で分析されたディジタル信号は一たん計算機のコアメモリーに記録されたのち、512 語毎に磁気テープへ転送される。このようにして記録された事象は実験終了後 U S C - 3 計算機または U - 200 計算機によってソフト的に処理されて、 $\gamma$  線のカスケード関係を決定するための重要な情報をもつた。

113 keV の準位の寿命の測定では U S C - 3 計算機にインターフェースされた 25 n sec/channel のクロックをもつタイム・アナライザーを用いて行われた。

### 3. 測定結果

#### 3.1 $\gamma$ 線シングル・スペクトル

40 cc Ge(Li)検出器で測定した  $^{109}\text{Rh}$  の  $\gamma$ 線スペクトルを Fig.3 に示す。照射後 50 秒から 160 秒間の測定を 5 回繰り返し、それらを加えたものである。各ピークの崩壊曲線、エネルギーおよび強度の解析から、ピークの同定を行った。もっとも強い 188.95 keV のピークは  $^{110}\text{Pd} (\gamma, n)$   $^{109m}\text{Pd}$  反応で直接生成されたアイソマーの崩壊によるもので、 $^{109}\text{Rh}$  から、ビルド・アップする成分は認められなかった。また初期のスペクトルでは半減期 21 sec の  $^{107m}\text{Pd}$  による 213 keV ピークが見られた。それ以外には短かい半減期をもつ不純物は見出せなかつた。このスペクトルで、215, 266, 276 などのピークは半値幅が大きく、複合ピークであることが予測された。LEPS で得られた  $^{109}\text{Rh}$  の薄い線源からの  $\gamma$ 線スペクトルを Fig.3 に示す。このスペクトルでは低いエネルギー領域で K X 線、35.3, 50.6 や 59.0 keV などのピークが観測され、211.9, 213.8, 264.3, 266.3, 274.2, 325.4 keV などのピークが分離されて、エネルギーと強度を正しく求めることができた。今回の測定で  $^{109}\text{Rh}$  に同定された  $\gamma$ 線のエネルギーと相対強度を Table 3 に示す。\*印は  $\gamma\gamma$  同時計数実験から追加された  $\gamma$ 線である。Fettweis ら<sup>4)</sup>による 95 keV Riccati ら<sup>8)</sup>による 93 keV の  $\gamma$ 線はみつかなかつた。

#### 3.2 $\beta$ 線エネルギーと分岐比の測定

$\beta$ ,  $\gamma$ 測定系を同時に動かせて、 $^{109}\text{Rh}$  1  $\beta$ 崩壊当たりの 326.8 keV + 325.4 keV  $\gamma$ 線の収率を求めた。

レベルスキームから  $^{109}\text{Rh}$  および  $^{109}\text{Pd}$  両基底状態間の  $\beta$  転移は  $15.9 \pm 10\%$  と決められた。326.8 keV 準位に対する  $\beta$  分岐比は 64 % であるが、この  $\beta$  線に対する最大エネルギーは 2.25  $\pm 0.2$  MeV でこれまでの  $Q_\beta$  のシステムティックスからの予測値と一致する。

#### 3.3 $^{109}\text{Rh}$ の半減期

$^{109}\text{Rh}$  の半減期については、はじめに述べたように測定者によって、まちまちの値が報告されており、これを決定することが今回の実験の大きな目的の一つであった。 $\gamma$ 線ピークのすべてについて、崩壊曲線を求めたが、これらはいづれも  $80 \pm 2$  sec に一致した。326.8 keV と 426.1 keV の  $\gamma$ 線の崩壊曲線を Fig.5 に示す。また同図のように、 $\beta$ 線スペクトルの崩壊曲線についても  $80 \pm 2$  sec と一致する。これ以外の半減期をもつアイソマーが存在する可能性を考えて、種々の照射時間と測定条件により測定を行つた。しかしながら 5 sec 以上の半減期をもつアイソマーの存在は認められなかつた。

#### 3.4 同時計数

事象記録方式によって磁気テープに収録されたコインシデンス事象は、時間スペクトルおよび Ge(Li) 検出器の一方のスペクトルの一部あるいは全部にゲートを設定して、それらに対応

する他の Ge(Li) 検出器の同時計数スペクトルに変換される。この過程は USC-3 および U-200 計算機によってほぼ自動的に処理される。

Fig.6 はタイムスペクトルであって、同時計数領域(a), 遅延同時計数領域(b) に分けられる。全領域にわたって偶然同時計数が含まれていることは注意すべきである。

エネルギー・スペクトルでそれぞれのピークには高いエネルギー側にある  $\gamma$  線のコンプトン分布が含まれている。この点を考慮して、ピーク部分と隣合った平坦部分に対するスペクトルを比較する必要がある。

タイム・スペクトルと 40 cc Ge(Li) 検出器の種々のゲートに対して得られた同時計数および遅延同時計数スペクトルの例を Fig.7 に示す。それぞれのスペクトルはつきのゲート条件に対して得られたものである。

(a)	40 cc	全エネルギー領域
	タイム	同時計数領域 200 n sec
(b)	40 cc	113 keV
	タイム	遅延同時計数領域 700 n sec
(c)	40 cc	113, 249, 245, 276.3 keV
(f)	タイム	同時計数領域 200 n sec

これらのスペクトルでは近接のバック・グラウンド・スペクトルを差引いてある。

LEPS-40 cc Ge(Li) 検出器の組合わせで行った同時計数スペクトルを Fig.8 (a) 9 (d) に示す。(b) 図に見られるように K X 線ゲートに対して多くの  $\gamma$  線が同時計数している。40 cc Ge(Li) 検出器をゲート側とした場合には、291.4, 178.0 keV に対するスペクトルで 35.3 keV ピークと同時に KX 線が顕著に現われ、35.3 keV の内部変換過程で出ていることが明らかで、K 内部変換係数を計算することができた。KX 線の強度を正しく求めるため、つきの取扱いをした。

(1) 40 cc Ge 検出器のエネルギー・スペクトルの 178 keV とタイム・スペクトルの遅延同時計数部分をゲートとし、113.4 keV と対応する KX 線を測定して、E 2 転移と仮定して KX 線と 113.4 keV における LEPS の検出効率の比を求めた。

(2)  $\beta$  線による KX 線の発生に対しては、 $\beta$  線以外に他の  $\gamma$  線とコインシデンスしない 426.1 keV の  $\gamma$  線をゲートに選んだときの KX 線の生成量の測定値を使って補正した。

(3) 291.4 keV ゲートの場合の 35.3 keV の  $\gamma$  線と 249.2 keV  $\gamma$  線の比率から線源内での 35.3 keV における自己吸収係数を求めた。他のエネルギーの  $\gamma$  線では、35.3 keV の  $\gamma$  線の吸収に相当する厚さに対する  $\gamma$  線吸収量を文献<sup>9)</sup> から求めた。

Fig.10 に今回の実験から求められた K 内部変換係数を E 1, M 1, E 2 転移に対する理論値<sup>10)</sup>とともに示す。

$\gamma\gamma$  同時計数できめられたコインシデンス関係を Table 4 にまとめた。

### 3.5 113.4 keV 準位の寿命の測定

113.4 keV の準位のスピン・パリティは  $1/2^+$  で基底状態への  $\gamma$  転移は E 2 と考えられ、<sup>107</sup>Pd の場合と同じく観測可能な寿命をもつと期待された。寿命の測定には 178 keV の  $\gamma$  線を

60 cc Ge 検出器で検出し、これを成形してタイムアナライザーのスタート・パルスとした。同じく 113.4 keV の  $\gamma$  線を 40 cc Ge 検出器で検出し、タイムアナライザーのストップ・パルスとした。得られたタイム・スペクトルは Fig.11(a) のよう ( $T_{1/2} = 380 \pm 50 \text{ n sec}$ ) の半減期を示した。 $^{109}\text{Rh}$  の場合と同じゲート位置で  $^{22}\text{Na}$  に対してはシャープなタイムスペクトルが得られた (Fig.11(b))。また測定系の動作を確認する目的では  $^{169}\text{Tm}$  の 316. keV 準位 ( $T_{1/2} = 670 \text{ n sec}$ ) の測定を行った (Fig.11(c))。

#### 4. 核準位構造と $\gamma$ 線の継続関係の確立

3 章で述べた  $\gamma$  シングル、 $\beta$  線測定、 $\gamma\gamma$  同時計数、遅延同時計数の測定結果を総合して  $^{109}\text{Rh}$  の崩壊からの  $^{109}\text{Pd}$  の核準位構造および  $\gamma$  線の位置を確立した。Table 5 に確立された核準位と関連する  $\gamma$  線間に成り立っているエネルギー関係、同時計数あるいは遅延同時計数関係を示す。対応する核準位がすでに反応スペクトロスコピーで知られているものについて移行角運動量  $\ell$  と準位エネルギーを示した。245.0, 326.8 keV  $\gamma$  線については強度が大きく、同時計数が弱いことからも、直接基底状態に足つきがあると考えてよさそうである。また、291.4 keV 準位と 266.3 keV 準位との間に 25.1 keV の  $\gamma$  転移が存在すると思われる。

第 1 の理由は 249.2 keV  $\gamma$  線をゲートに選んだとき、291.4, 178.0 keV  $\gamma$  線が同時計数があることのほか、152.9 keV と 266.3 keV  $\gamma$  線が同時計数している。第 2 の理由として Pd の KX 線でゲートした場合に強度の小さい 152.9 keV と 266.3 keV の  $\gamma$  線が強く現われる。しかしながら今回の  $\gamma$  線シングルの測定では、線源内での自己吸収あるいは Ag KX 線との重なりのために発見されていない。

得られた  $^{109}\text{Rh}$  の崩壊様式を Fig.12 に示す。図において  $\gamma$  線のエネルギーは keV で、その強度は 326.8 keV を 100 とした場合の相対値である。 $\beta$  分岐比は基底状態へ、直接崩壊する 15.9 % の成分を考慮して、 $\gamma$  転移の強度バランスから算出した。 $\gamma$  転移強度は関係するレベル間で期待される最低次の多重度から推定した。また  $\log ft$  の計算には Gove ら<sup>13)</sup> の数表を用いた。

#### 5. $^{109}\text{Rh}$ の基底状態と $^{109}\text{Pd}$ の核準位の検討

前章で得られた  $^{109}\text{Rh}$  からの  $\beta$  および  $\gamma$  崩壊特性、核反応スペクトロスコピー<sup>1,2)</sup>、さらに近傍の核についてのシステムティックスに基づいて、 $^{109}\text{Rh}$  および  $^{109}\text{Pd}$  の核準位のスピン・パリティおよび核モデルによる検討を行う。

##### 5.1 $^{109}\text{Rh}$ の基底状態

Rh の奇核の核準位についてのシステムティックス<sup>3)</sup>を Fig.13 に示す。Rh の基底状態は  $^{103}\text{Rh}$  よりも軽い核では  $1/2^-$ 、 $^{105}\text{Rh}$  では  $7/2^+$  に確定されている。 $^{107}\text{Rh}$  では  $7/2^+$  ある

いは  $5/2^+$  であるがまだ確定されていない。この附近の陽子は殻モデルの  $p_{3/2}$ ,  $f_{5/2}$  の軌道を満たしており、フェルミ・レベルは  $p_{1/2}$ ,  $g_{9/2}$  軌道附近にあって、単純な殻モデルでは  $1/2^-$  または  $9/2^+$  のスピン・パリティを予測する。 $^{103}\text{Rh}$  および  $^{105}\text{Rh}$  で  $7/2^+$  スピン状態が  $9/2^+$  スpin状態よりも下っている。この現象は Rh のみならず Ag の奇核でも系統的に観測され、 $j - 1$  の anomalous coupling state あるいは intruder state として、種々の理論的解釈がなされている。栗山、丸森、松柳は着物を着た 3 準粒子配位による計算で  $7/2^+$  が  $9/2^+$  よりも低くなり、中性子数の増加によって系統的に変化する傾向をも再現した。しかしながら、 $5/2^+$  状態が  $9/2^+$  あるいは  $7/2^+$  状態よりも下がることはなさそうである。

今回の実験では、基底状態として  $5/2^+$  あるいは  $7/2^+$  のどちらかであるが、そのどちらであるかを決定することはできなかった。

$^{103}\text{Rh}$  よりも軽い Rh 奇核では  $1/2^-$  のスピン・パリティが現われている。これは  $p_{1/2}$  軌道に対応し、 $^{107}, ^{109}\text{Rh}$  では基底状態の  $5/2^+$  あるいは  $7/2^+$  との間に観測可能なアイソマーを形成していることが予想された。 $^{109}\text{Rh}$  の半減期として、従来さまざまの値が報告されていることもこのような事情を反映しているのではないかとの見地から種々の実験を行った。しかしながら  $1/2^-$  状態の位置や 80 秒以外の半減期をもつアイソマーは観測できなかった。

## 5.2 $^{109}\text{Pd}$ の核準位

$^{109}\text{Pd}$  は中性子数が 63 個で、 $g_{7/2}$  軌道よりも下にあるすべての軌道が満され、フェルミ準位は  $d_{5/2}$  軌道附近にある。したがって基底状態は単純な殻モデルの予測として  $5/2^+$  のスピン・パリティで、これまでの研究からよく確められている。その励起状態には魔法数 50 と 82 の間にある  $g_{7/2}$ ,  $d_{5/2}$  ( 基底状態 ),  $d_{3/2}$ ,  $s_{1/2}$ ,  $h_{11/2}$  軌道にもとづく、粒子あるいはホール状態が期待される。Fig.14 にこの研究の  $^{109}\text{Pd}$  を含めて、Pd の同位元素 103 ~ 111 に対して 730 keV までに現われた核準位のシステムティックスを示す。これらの奇核では基底状態と低い励起状態に、上に述べた殻モデルの予測と一致して  $d_{5/2}$ ,  $s_{1/2}$ ,  $h_{11/2}$ ,  $d_{3/2}$ ,  $g_{7/2}$  などに対応するスピン・パリティが見られる。一方偶々核では第一励起準位の  $2^+$  状態が中性子数の増加にともなって次第に下がってくる傾向が現われ、球形振動モードから変形回転モードへの転移のはじまりと理解されている。奇核の励起状態でも、偶々核の  $2^+$  準位の動きに対応した準位構造の変化が見られ、de-Shalit による弱結合モデル<sup>14)</sup> Kisslinger と Sorensen による準粒子とフォノン結合モデル<sup>15)</sup> 栗山、丸森、松柳らによる着物を着た 3 準粒子モデル<sup>11)</sup> 等の理論的な取扱いが進められてきている。Fig.15 に  $^{105}\text{Pd}$  と  $^{97}\text{Mo}$  に対する  $d_{5/2}$  および  $g_{7/2}$  の 2 軌道に対する着物を着た 3 準粒子構造が示してある。弱結合モデルで期待される以上の大きな分離が見られる。

Pd の奇核では負パリティの準位として、 $11/2^-$  の状態が現われており、コアとの結合によって、 $9/2^-$  や  $7/2^-$  などの準位が  $11/2^-$  状態より 200 ~ 300 keV 高いエネルギーに現われる可能性がある。このような準位を  $^{109}\text{Pd}$  に見つけることも、この研究における興味の一つであったが、 $7/2^+$  または  $5/2^+$  の親の状態からの供給は非常に少ないのである。

$^{109}\text{Pd}$  の核準位に関する最も貴重な研究は Cohen グループによる ( $d$ ,  $p$ ) 反応<sup>16)</sup> および ( $d$ ,  $t$ ) 反応<sup>2)</sup> の実験で移行角運動量( $\ell$ )とスペクトロスコピック因子からスピン・パリティ

イが提案されている。スペクトロスコピック因子から  $j$  の値を判断できる場合もあるが、一般には核子スピンによる  $\ell \pm \frac{1}{2}$  の自由度が残されている。本章以下の検討では、 $^{109}\text{Rh}$  の  $\beta$  崩壊の  $\log ft$  値と  $\gamma$  転移の多重度など併せて考察し、核モデルによる解釈を試みる。

### i) $^{109}\text{Pd}$ の基底状態

$^{109}\text{Pd}$  の基底状態は ( $d, p$ ), ( $d, t$ ) 反応より  $\ell = 2$  で、スペクトロスコピック因子が大きい点で 1 準粒子的であると思われる。 $^{109}\text{Ag}$  の 88.3 keV 準位 ( $7/2^+$ )への  $\beta$  崩壊で  $\log ft = 6.5$  であることから許容転移また第 1 禁止転移でなければならない。このことから  $5/2^+$  のスピン・パリティが確定する。 $^{109}\text{Rh}$  から基底準位への  $\beta$  崩壊の分岐比が  $16 \pm 10\%$  と測定されており  $\log ft = 5.7$  で  $^{109}\text{Rh}$  のパリティは +, スピンは  $3/2, 5/2, 7/2$  に限定される。

### ii) 113.4 keV 準位

113.4 keV 準位は ( $d, p$ ), ( $d, t$ ) 反応でスピン・パリティが  $1/2^+$  に決定しており、スペクトロスコピック因子の大きいことから  $s_{1/2}$  の 1 準粒子状態とみなされる。この準位の半減期は今回  $380 \pm 50 \text{ n sec}$  と測定された。 $\gamma$  転移は E 2 特性をもち、その転移確率は中性子の有効電荷を 1 とした Weisskopf 流の計算で 1.3 倍である。 $^{107}\text{Pd}$  にもこの準位に対応した 115 keV 準位があり<sup>12)</sup>、ほぼ同じ程度の Weisskopf 値である。113.4 keV 準位はほとんど高い準位からの  $\gamma$  線で供給されており、 $\beta$  崩壊による供給はない見なし得る。

### iii) 188.95 keV 準位

188.95 keV 準位は ( $d, p$ ) と ( $d, t$ ) 反応で  $\ell = 5$  で、スペクトロスコピック因子が大きく、 $h_{11/2}$  の 1 準粒子的状態と考えられる。基底状態 ( $5/2^+$ ) への  $\gamma$  転移は E 3 である。Fig.14 の Pd 核のシステムティックスで  $^{105}\text{Pd}$  での 489 keV から  $^{107}\text{Pd}$  の 214 keV までかなり急激に変化するが、 $^{109}\text{Pd}$  と  $^{111}\text{Pd}$  では大きな変化はみられない。188 keV  $\gamma$  線について、崩壊曲線を求めたが、初期の build up もみられず、この準位を経由する  $\beta$  または  $\gamma$  線は存在していないと考えられる。

### iv) 245.0 keV 準位

245.0 keV 準位は ( $d, p$ ), ( $d, t$ ) 反応で  $\ell = 4$  で、スペクトロスコピック因子が大きいことから、 $g_{7/2}$  の 1 準粒子的な性格をもつと考えられる。スピン・パリティに関しては後に述べるよう  $326.8 \text{ keV}$  準位 ( $5/2^+$ ) との間に  $81.8 \text{ keV}$  の  $\gamma$  線が M 1 特性を含んでいることから  $7/2^+$  と決定される。この準位への  $\beta$  転移の分岐比は 0.3 % 以下、 $\log ft > 7$  である。

### v) 266.5 keV 準位

この準位は反応より  $1/2^+$  に決定されており、スペクトロスコピック因子は小さい。したがって 1 準粒子的な準位とは考えられず、 $^{107}\text{Pd}$  の 412 keV 準位に対応しているようである。この準位への  $\beta$  崩壊の分岐比は 0.3 % 以下で、 $1/2^+$  のスピン・パリティと矛盾しない。

### vi) 276.3 keV 準位

( $d, p$ ), ( $d, t$ ) 反応ではこの準位に対応する準位はみつかっていない。 $^{109}\text{Rh}$  からの  $\beta$  崩壊の分岐比は 0.7 % で  $\log ft = 6.8$  である。 $\gamma$  転移の特性から考えて、 $^{107}\text{Pd}$  における 392 keV 準位に対応し、スピン・パリティに関して ( $5/2, 7/2, 9/2$ ) $^\pm$  であろう。

## VII) 291.4 keV 準位

この準位は (d, p), (d, t) 反応より  $\ell = 2$  でスペクトロスコピック因子が大きいことから  $d_{3/2}$  の 1 準粒子準位と考えられる。この準位から 266.3 keV 準位 ( $1/2^+$ ) への 25.1 keV  $\gamma$  転移が M1 特性をもっていることは  $3/2^+$  のスピン・パリティを支持する。

この  $3/2^+$  準位への  $\beta$  転移がもし許容転移であることが明らかになれば、親の  $^{109}\text{Rh}$  の基底状態は  $5/2^+$  に確定できるはずである。しかしながらこの準位は強く内部変換されている 35.3 keV の  $\gamma$  転移で供給されているので、 $\beta$  線による供給の大きさを精度よく決めることができない。この点で  $^{109}\text{Rh}$  の基底状態のスピン・パリティの決定に  $5/2^+$  あるいは  $7/2^+$  の不確定さを残すことになった。

## VIII) 325.4 keV 準位

この準位への  $\beta$  分岐比は 0.5 % 以下で  $\log ft > 7.0$  である。 $(d, p)$ ,  $(d, t)$  反応では 324 keV に  $\ell = 0, 2$  の 2 つの準位が重なっていることを示し、 $^{109}\text{Rh}$  の親状態のスpin・パリティ ( $5/2^+$  または  $7/2^+$ ) を考えるとこの準位が  $\ell = 0$  に対応すると解釈できる。スペクトロスコピック因子の小さい点で 1 準粒子的状態とは考えにくい。

## IX) 326.8 keV 準位と禁止されない許容転移

325.4 keV 準位のところで述べたように、 $(d, p)$ ,  $(d, t)$  反応で見出されている 324 keV の  $\ell = 2$  準位に対応し、スペクトロスコピック因子が非常に小さい点で 1 準粒子的準位ではないと思われる。245.0 keV 準位への 81.8 keV  $\gamma$  転移が M1 (+ E2) であることから、スpin・パリティは  $5/2^+$  である。 $^{109}\text{Rh}$  からの  $\beta$  崩壊の  $\log ft = 4.8$  で許容転移である。この  $\beta$  転移はつきのメカニズムで理解することができよう。 $^{109}\text{Rh}$  の親状態としては  $g_{9/2}^p$  軌道に 3 個の陽子が入って  $7/2^+$  をつくる配位のほか、 $g_{9/2}^n$  とフォノンが結合して  $7/2^+$  状態をつくる配位も含まれていると考えられる。 $^{109}\text{Pd}$  の 326.8 keV 準位についても同様に  $g_{7/2}^n$  粒子を含む 3 粒子が  $5/2^+$  を作ると仮定する。これら 2 つの準位の間に下に示すような禁止されない許容転移が可能となる：

$$\textcircled{1} \quad [ (g_{9/2}^p)_{7/2}^3 + (g_{7/2}^n)_0^2 ]_{7/2}^+ \xrightarrow{\beta^-} [ (g_{7/2}^n, (g_{9/2}^p)_1^2)_{5/2}^+, (g_{9/2}^p)_0^2 ]_{5/2}^+$$

$$\textcircled{2} \quad [ (g_{9/2}^p, 2^+)_{7/2}^+, (g_{7/2}^n)_0^2 ]_{7/2}^+ \xrightarrow{\beta^-} [ (g_{7/2}^n, 2^+)_{5/2}^+, (g_{9/2}^p)_0^2 ]_{5/2}^+$$

$$\textcircled{3} \quad (g_{9/2}^p, 2^+)_{7/2}^+ \xrightarrow{\beta^-} (g_{7/2}^n, 2^+)_{5/2}^+$$

$$\text{実際には}, [ (g_{9/2}^p, (g_{7/2}^n)^2 2^+)_{7/2}^+ \xrightarrow{\beta^-} [ (g_{9/2}^p)_2^+, g_{7/2}^n ]_{5/2}^+$$

上の 3 つの過程は、 $g_{7/2}^n \rightarrow g_{9/2}^p + \beta^- + \bar{\nu}$  という禁止されない許容  $\beta$  転移が基本になっていく。

この事情は親状態が  $5/2^+$  に結合している場合にも成り立つ。すでに IV) で述べたように 245.0 keV の準位は  $g_{7/2}^+$  の殻モデルの 1 準粒子的状態と考えられるが、この 326.8 keV 準位との間のエネルギー差が小さく、この 2 準位間で転移 (M1 + E2) が大きい事実は、326.8 keV 準位が丸森らの着物を着た 3 準粒子的解釈を可能にする。

## X) 426.1 keV 準位

426.1 keV 準位は ( $d, p$ ), ( $d, t$ ) 反応で  $\ell = 4$  で、スペクトロスコピー因子が大きく 1 準粒子的と考えられる。 $\log ft = 5.6$  から VIII) で述べた  $g_{\gamma/2}^{\prime \prime}$  を含む 3 準粒子的成分の混ざりを仮定することができる。

## xi) 491.7 keV 準位

491.7 keV の準位は反応から  $\ell = 2$  で、スペクトロスコピック因子が小さい。

## xii) 540.7 keV 準位

540.7 keV 準位は、反応から  $\ell = 2$  で、スペクトロスコピック因子が小さく、またその比  $S(d, t)/S(d, p)$  が小さいことから  $5/2^+$  のスピン・パリティが提案されている。 $^{109}\text{Rh}$  の  $\beta$  崩壊は 9 % の分岐比で、 $\log ft = 5.5$  で許容転移になる。Fettweis らはこの準位のスピン・パリティを  $3/2^+$  と提案しているが、関連する  $\gamma$  転移からそのような理由をみつけることはできない。この準位は  $^{107}\text{Pd}$  における 670 keV に対応しているようである。

## xiii) 597.3 keV 準位

597.3 keV 準位については ( $d, p$ ), ( $d, t$ ) 反応から  $\ell = 4$  でスペクトロスコピック因子も小さいことがわかつており、準粒子的でなさそうである。

## xiv) その他の準位

663 keV 以上の準位については、 $\beta$  分岐が小さく、( $d, p$ ), ( $d, t$ ) 反応との対応も明らかでない。

## ま　　と　　め

この研究で、 $^{109}\text{Rh}$  の半減期や  $\beta$ ,  $\gamma$  崩壊モードについて基本的な核データが得られた。これらは崩壊熱の推定に対して、ほぼ十分な結果として計算用核データ・ファイルに入れることができる。また核構造的な見地では、かなり多くの準位について確定的な核構造情報が得られ、単純な殻モデルや着物を着た 3 準粒子的モードから期待されるものと一致した。しかしながら  $^{109}\text{Rh}$  の基底状態や  $^{109}\text{Pd}$  の 276.3 keV, 426.1 keV, 491.7 keV などの準位のスピン値を確定することはできなかつた。

今回の実験方法で以下に述べるような事項が直接成果につながつた：

i)  $^{109}\text{Rh}$  の線源は Pd のアイソトープの中では、もっとも中性子数の多い  $^{110}\text{Pd}$  の ( $\gamma, p$ ) 反応で生成したので、副反応生成物が少なかつた。

ii) Ge(Li) 型の大型検出器に加えて、純粋 Ge 型の検出器を用いて低エネルギーの近接した  $\gamma$  線を分離した。

iii) Ge(Li) - Ge(Li), Ge(Li) - Ge(pure) の組合せによって、定量的な同時計数情報が得られた。低エネルギーの  $\gamma$  線に対して、K 内部変換係数が得られ、多重度を決定する手掛りとなつた。

iv) 基底状態間の  $\beta$  分岐比の精度は 10 % であった。その他の核準位に対する  $\beta$  分岐比は  $\gamma$  転移強度から求まつた。供給する  $\gamma$  転移と崩壊する  $\gamma$  転移の強度がほとんど同じである 291.4

keV 準位では、 $\beta$  分岐比が十分な精度で求まらなかつた。したがつて、 $^{109}\text{Rh}$  のスピン・パリティをきめる手掛りとならなかつた。

今回の実験で、可能な限り多くの核データ情報を定量的に求めるための努力を払つた。しかしながら、今後実験手段の拡大や改良によつて、さらに精密化できる部分も少くない。以下に4つの可能性を列記する：

- I)  $\gamma$  線の分岐比の決定では  $\gamma$  線検出器の検出効率を 1 % 程度で決定する測定および解析方法の確立が必要である。
- II)  $\beta$  線の測定でも  $4\pi\beta$  測定などによつて 1 % の決定精度を期待できる。
- III) 線源の生成と測定系へのマウントにオンライン的な手法が開発されれば、より精密な  $\gamma\gamma$  同時計数や  $\gamma\gamma$  角相関、 $\beta\gamma$  同時計数などの測定が可能であろう。
- IV) 最近、核分裂生成核種を原子炉に設置したオンライン・質量分離器から取り出して詳細な測定を行つてゐる例が多い。 $^{109}\text{Rh}$  でもこの方法の適用が望まれる。

この論文では核準位構造について、これまでの理論からの予測を現象的にあてはめただけである。 $\beta\gamma$  転移について、さらに詳しい情報が得られれば、理論的な解析への助けとなろう。

#### 謝 辞

この研究は核物理第2研究室と新潟大学理学部陸路直との間で進めている協力研究の一部で、筆者の一人金沢が学生研究生として原研核物理第2研究室において行つた測定を中心にして得られた成果であります。

この研究の推進にあたつて、核物理第2研究室、大学開放研究室の皆様に非常にお世話になつたことに感謝します。またデータ解析に関して、B O B プログラムの使用では馬場宏氏に負うところが多い。最後に論文の作成について、激励いただいた、物理部塙田部長ならびに核物理第2研究室浅見室長に深くお礼を申し上げます。

## References

- 1) B.L.Cohen et al. : Phys. Rev. 161 (1967) 1257
- 2) R.C.Diehl et al. : Phys. Rev. C1 (1970) 2086
- 3) F.F.Bertrand : Nuclear Data Sheets (A=109) B 6 (1971) 1
- 4) P.Fettweis, P. del Marmol : Z. Physik A 275 (1975) 359
- 5) H.Takekoshi et al.: JAERI-1238 in Japanese (1973)
- 6) H.Baba, I.Sekine, H.Okashita : JAERI-1227 (1973)
- 7) H.Baba et al.: in Japanese (1975)(unpublished )
- 8) Riccato : Radiochimica Acta 15 (1970) 3
- 9) A.H.Wapstra et al.: Nuclear Spectroscopy Tables North-Holland Publishing Co., (1958)
- 10) R.S.Harger and E.C.Selzer : Nuclear Data A4 (1968) 1
- 11) A.Kuriyama, T.Marumori, K.Matsuyanagi : Prog.Theo.Phys.47 (1972) 498, 51 (1974) 779 ; Supplement Prog.Theo.Phys.58 (1973) 53, 103
- 12) Nuclear Data Group : Nuclear Data Sheets A=101 ~ 111.
- 13) N.B.Gove, M.J.Martin : Nuclear Data Table A10 (1971) 205
- 14) A.de-Shalit : Phys.Rev.: 122 (1961) 1530
- 15) L.S.Kisslinger, R.A.Sorensen : Rev. Mod. Phys. 35 (1963) 853

Table 1 Summary of the previous results on  $\gamma$ -rays  
and half-life of  $^{109}\text{Rh}$  (ref. 4)

Pierson			Wilhelmy			Riccati			Fettweis		
E $\gamma$	I $\gamma$	T $_{1/2}$	E $\gamma$	I $\gamma$ <sup>a</sup>	T $_{1/2}$	E $\gamma$	T $_{1/2}$	E $\gamma$	I $\gamma$	T $_{1/2}$	
—	—	—	—	—	—	93.4 <sup>b</sup>	66s	95.1	weak	69s	
110	—	50s	113.2 <sup>b</sup>	12.5	115s	113.4 <sup>b</sup>	60s	114.0	10±3	48s	
—	—	—	151.4	3.6	96.4s	—	—	150.7	9±4	a few ten sec	
—	—	—	177.9	20	98.8s	177.7 <sup>b</sup>	108s	177.8	13±4	77±20s	
—	—	—	249.49	22 <sup>c</sup>	60.3	249.5 <sup>b</sup>	84s	249.1	10±2	150s	
—	—	—	—	—	—	—	—	276.6	12±2	91s	
—	—	—	215.09	3	90s	—	—	—	—	—	
—	—	—	291.33	35 <sup>c</sup>	64.7	290.3 <sup>b</sup>	96s	290.6	20±8	150s	
315	—	30s	326.81	100	81.2	326.9 <sup>b</sup>	90s	326.7	100	114s	
490	—	30s	—	—	—	—	—	—	—	—	

a Normalized from fission yields relative to the 326.8 keV transition.

b No isotope assignment given.

c Intensity relative to the 326.81 keV line.

Table 2 Isotopic composition of  $^{110}\text{Pd}$  target

ELEMEN	PALLADIUM	ISOTOPIC ANALYSIS		SPECTROGRAPHIC ANALYSIS	
ISOTOPE	110	ISOTOPE	ATOMIC PERCENT	ELEMENT	PERCENT
SERIES	PR	102	<0.01	AG .02	MO <.01
SAMPLE	191501	104	0.12	AL <.05	NA <.01
		105	0.36	AU <.05	NB <.05
		106	0.46	B <.01	NI <.02
		108	1.32	BA <.01	PB .02
		110	97.73	BE <.001	PT <.05
		RARE EARTH ANALYSIS Y<.005 DY <.1		BI <.02	RB <.02
		LA <.02	HO <.05	CA <.01	RH <.05
		CE <.1	ER <.005	CD <.05	RU <.1
		PR <.05	TM <.05	CO <.05	
		ND <.05	YB <.002	CR <.02	SB <.05
		SM <.05	LU <.005	CS <.05	
		EU <.005		CU .07	SI <.01
		GD <.02		FE <.02	SN <.02
		TB <.05		GA <.02	SR <.01
				GE <.02	TA <.05
				HF <.1	TI <.01
				HG <.05	V <.02
				IN <.05	
				IR <.05	W <.05
					ZN <.2
				K <.01	ZR <.02
				LI <.005	
				MG <.01	
				MN <.02	

Table 3  
Energies and relative intensities of  $\gamma$  rays from  $^{109}\text{Rh}$  decay

$E\gamma$ (keV)	$\Delta E\gamma$ (keV)	$I\gamma$	$\Delta I\gamma$	Multipolarity
25.1				$M_1(+E_2)$ *
35.34	0.1	2.4	0.3	$M_1(+E_2)$
50.6	0.3	0.06	0.02	
59.0	0.3	0.06	0.02	$M_1$
81.78	0.05	1.3	0.1	$M_1(+E_2)$
113.35	0.05	10.5	0.6	$E_2$
149.82	0.07	1.1	0.1	
152.91	0.07	1.2	0.1	$M_1$
166.3	0.5	0.1	0.05	
178.03	0.05	14.1	0.7	
200.13	0.07	0.9	0.1	
211.88	0.1	1.2	0.2	$M_1$
213.81	0.1	1.0	0.2	
215.28	0.07	3.2	0.2	
245.03	0.07	2.4	0.2	
249.16	0.05	10.8	0.6	
264.33	0.1	0.7	0.2	
266.26	0.1	0.5	0.1	
274.21	0.1	0.2	0.1	
276.26	0.07	4.0	0.3	
291.36	0.07	13.9	0.8	
295.54	0.1	0.6	0.1	
320	1.0	0.1	0.05	
325.43	0.2	2.7	0.5	
326.83	0.05	100.0		
378.05	0.07	2.3	0.2	
391	1.0	0.1	0.05	
426.14	0.07	14.3	1.3	
427.3		<0.5		
491.67	0.2	0.7	0.1	
540.68	0.2	0.9	0.1	
597.3	0.5	0.2	0.1	
617.9	1.0	0.2	0.1	
692	2.0	0.2	0.1	
1041.7	0.5	0.2	0.05	
1072	1.0	0.1	0.05	
1318	1.0	0.2	0.1	

\* No  $\gamma$ -ray was observed, but inferred from  $\gamma\gamma$ -coincidence measurement. the 25.1 keV transition intensity was deduced from coincidence spectrum for the 249.2 keV gate.

Table 4  
Result of  $\gamma$ - $\gamma$  coincidence

gate $\gamma$ (keV)	coincidence $\gamma$ (keV)					
35.3	152.9	178.0	291.4			
81.8	245.0					
113.4	152.9	178.0	200.1	211.9	215.3	249.2
	(427.1)					378.1
149.8	276.3					
152.9	35.3	59.0	113.4	249.2	274.2	
166.3	(113.4)	(211.9)	(245.0)	(325.4)		
178.0	35.3	113.4	(152.9)	200.1	249.2	(692)
200.1	(113.4)	178.0	291.4			
211.9	113.4	215.3				
213.8	326.8					
215.3	59.0	(113.4)	211.9	325.4		
245.0	81.8	295.5				
249.2	113.4	152.9	178.0	(266.3)	291.4	
264.3	276.3					
266.3	249.2					
274.2	152.9					
276.3	50.6	149.8	264.3	(320)	391	1041.7
291.4	35.3	200.1	249.2			
295.5	245.0					
325.4	166.3	215.3				
326.8	213.8					
378.1	113.4					
426.1	(113.4)	(339)	(495)			
597.3						
617.9						
692	(178.0)					
1041.7	276.3					
1072						
1318						

Table 5  $\gamma$ -ray energies and coincidence relations  
in  $^{109}\text{Pd}$

Level keV	Energy relation $\gamma_1 + \gamma_2 = \gamma_{\text{level}}$	Coincidence relation coin./del.coin.	$(d, p)(d, t)$	
			$\ell$	$E_{\text{level}}$
113.4	113.35	del.coin.	0	113
188.9	188.9	no coin.	5	188
245.0	245.03		4	243
266.3	266.26 152.91+113.35= 266.26 )0.00	del.coin.	0	266
276.3	276.26			
291.4	291.36 113.35+178.03= 291.38 )0.02	del.coin.	2	291
325.4	325.43 113.35+211.88= 325.23 )0.20 266.26+ 59.0 = 325.26	coin.	0	324
326.8	326.83 291.36+35.34 = 326.70 )0.16 276.26+50.6 = 326.86 245.03+81.78 = 326.81	coin.	2	324
426.1	426.14 276.26+149.82= 426.08 )0.06	coin.	4	426
491.7	491.67 325.43+166.3 = 491.73 )0.33 291.36+200.13= 491.49 113.35+378.05= 491.40	coin. coin. del.coin.	2	491
540.7	540.68 325.43+215.28= 540.71 291.36+249.16= 540.52 276.26+264.33= 540.59 266.26+274.21= 540.47 )0.24 245.03+295.54= 540.57 326.83+213.81= 540.64 113.35+427.3 = 540.6	coin.	2	540
597.3	597.3 276.26+320. = 596.26 )1.04	coin.	4	596
667.3	276.26+391 = 667.26	coin.	1	671
983.4	291.36+692 = 983.36	coin.	2	985
1318.	276.3 +1041.7= 1318	coin.		

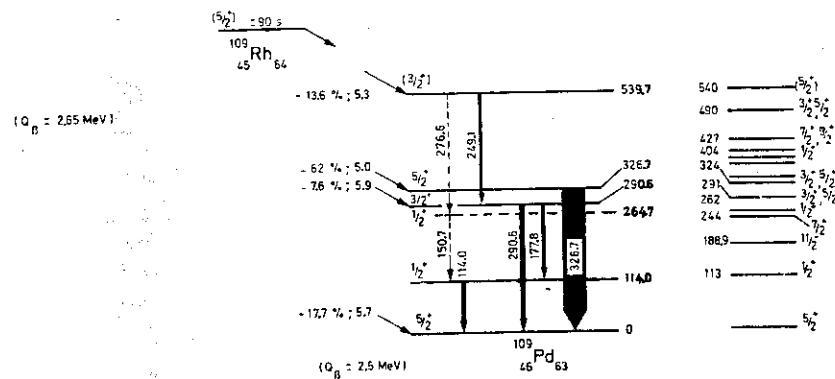


Fig.1 Decay scheme of  $^{109}\text{Rh}$  proposed by Fettweis et al.<sup>4)</sup>

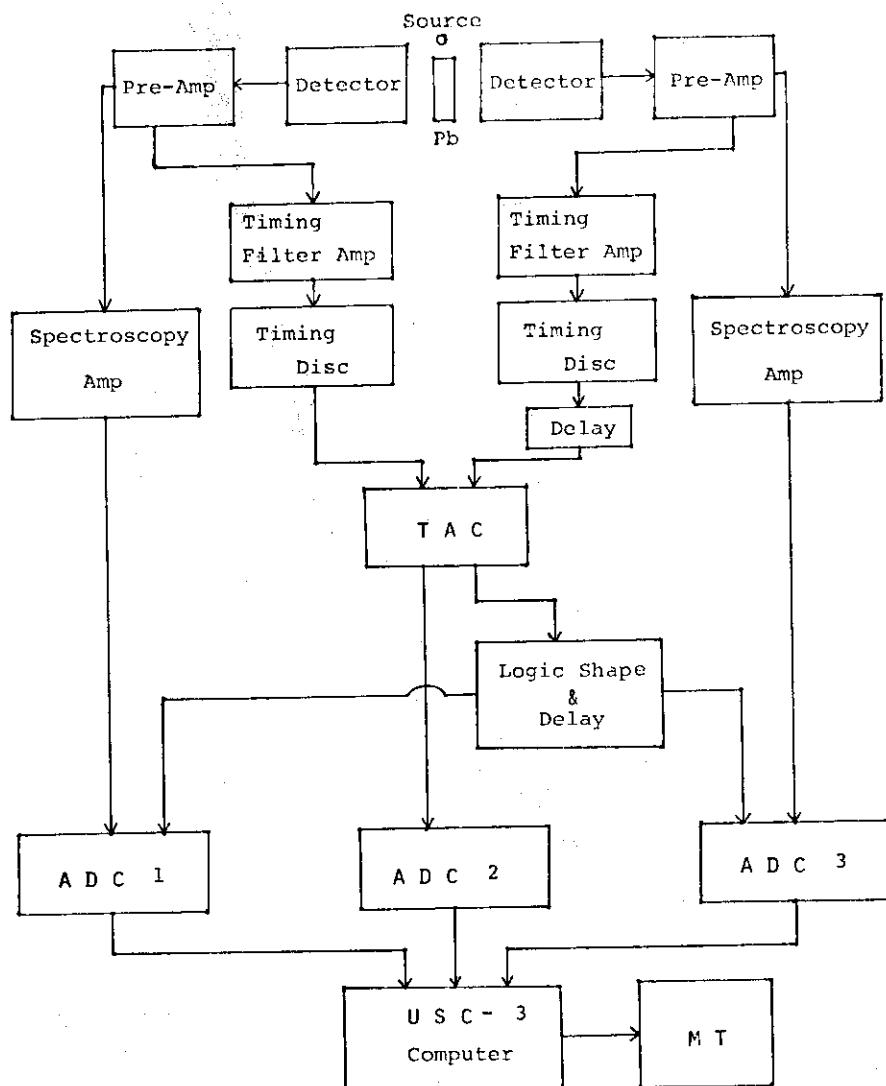


Fig.2 Block diagram of coincidence system based on event-by-event recording mode.

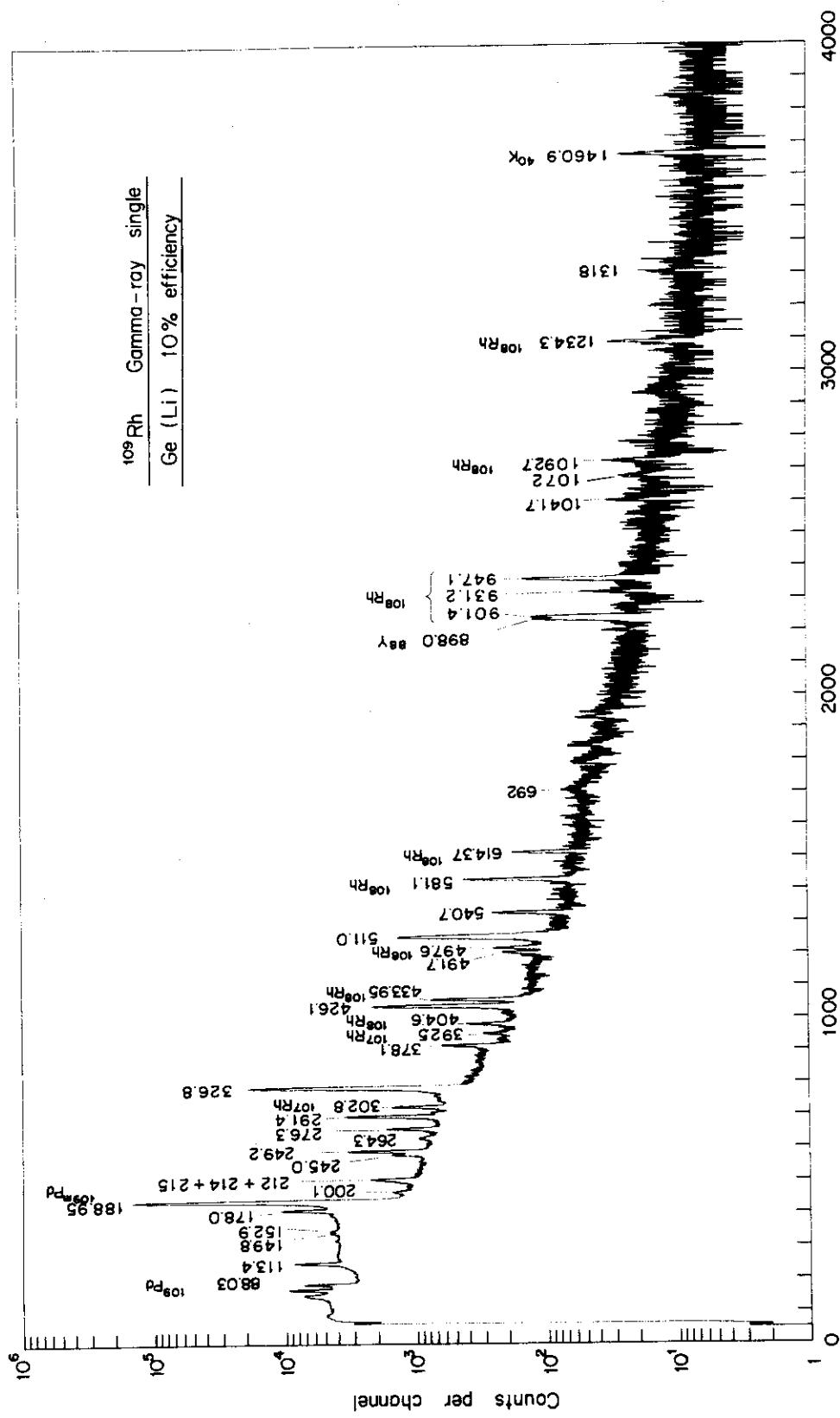


Fig.3 Gamma-ray singles spectrum of  $^{109}\text{Rh}$  observed by 40cc Ge(Li) spectrometer.

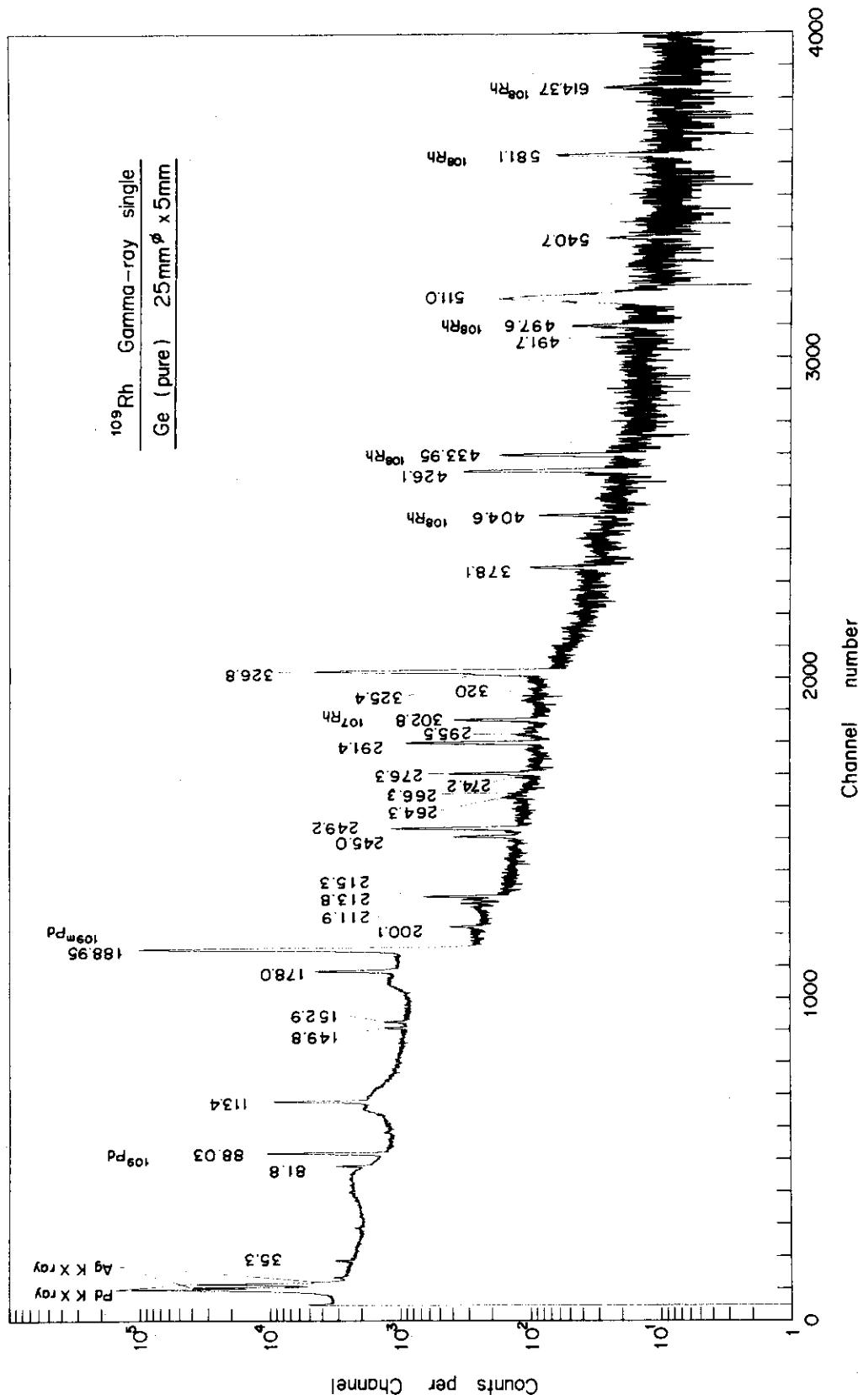


Fig. 4 Gamma-ray singles spectrum of  $^{109}\text{Rh}$  observed by LEPS.

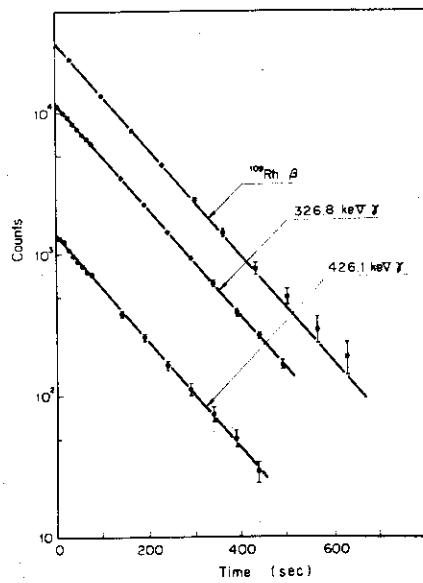


Fig.5 Decay of  $^{109}\text{Rh}$   $\gamma$ -rays and  $\beta$ -ray.

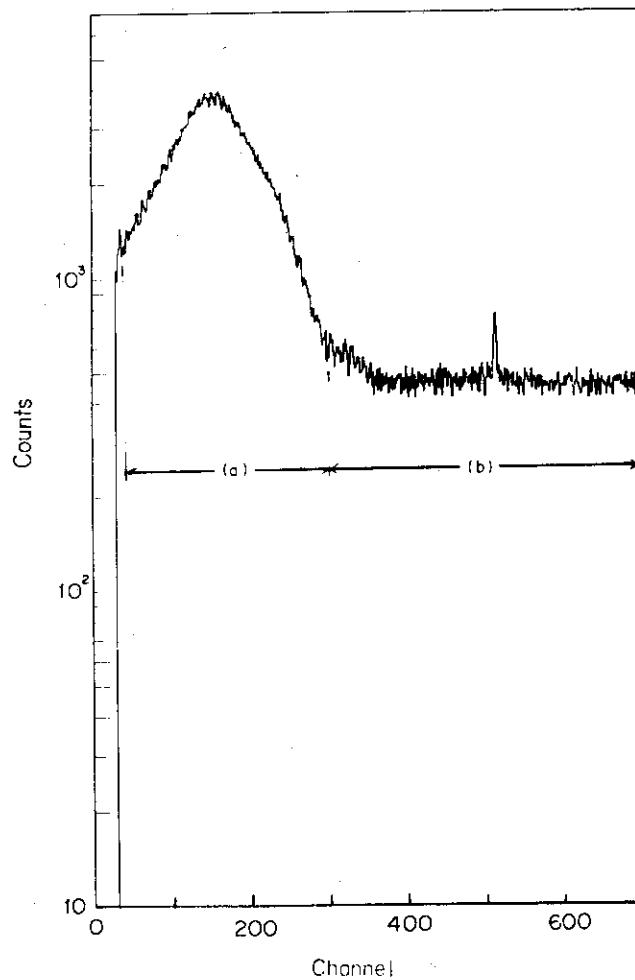


Fig.6 Time spectrum for total gates.

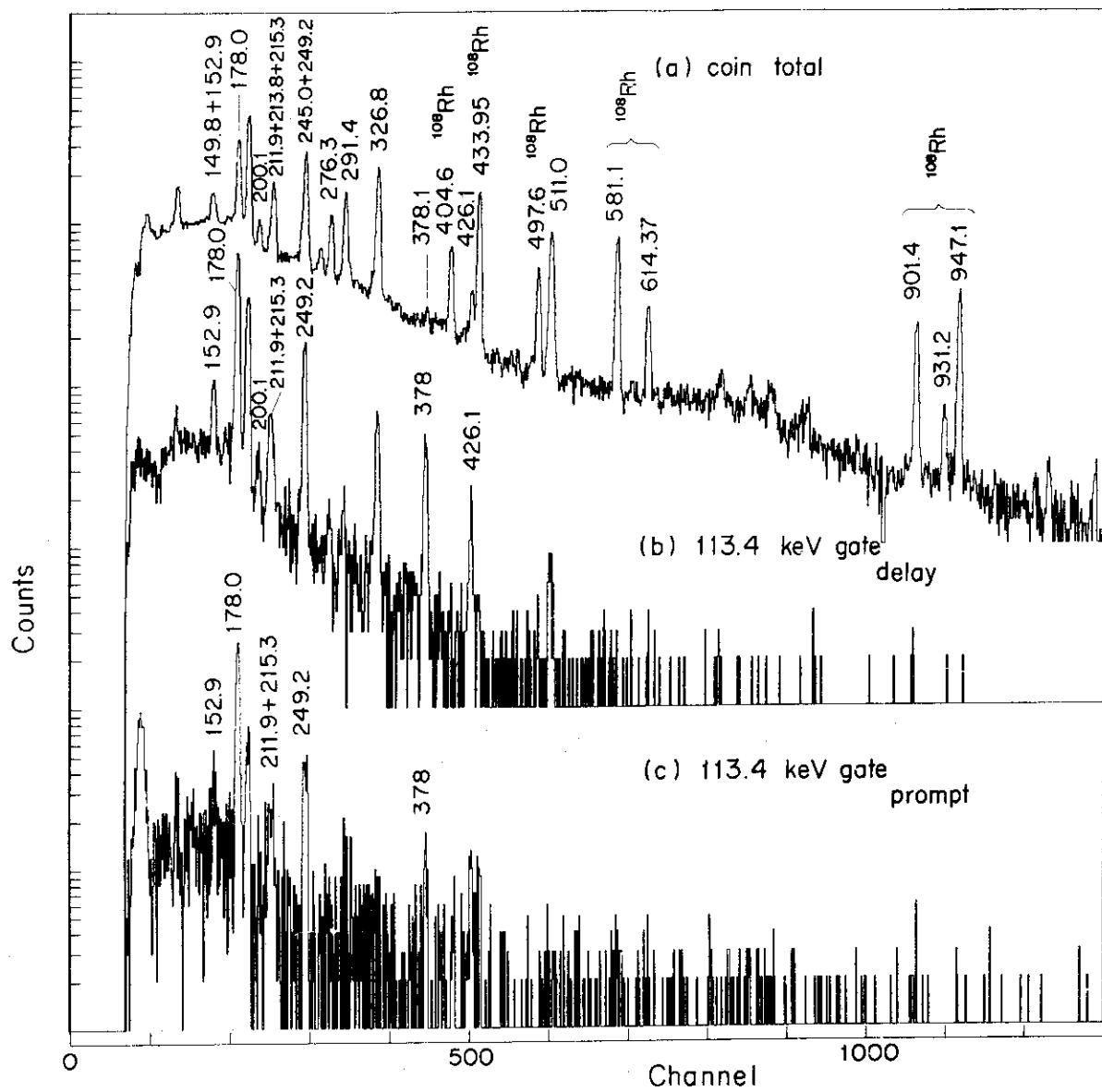
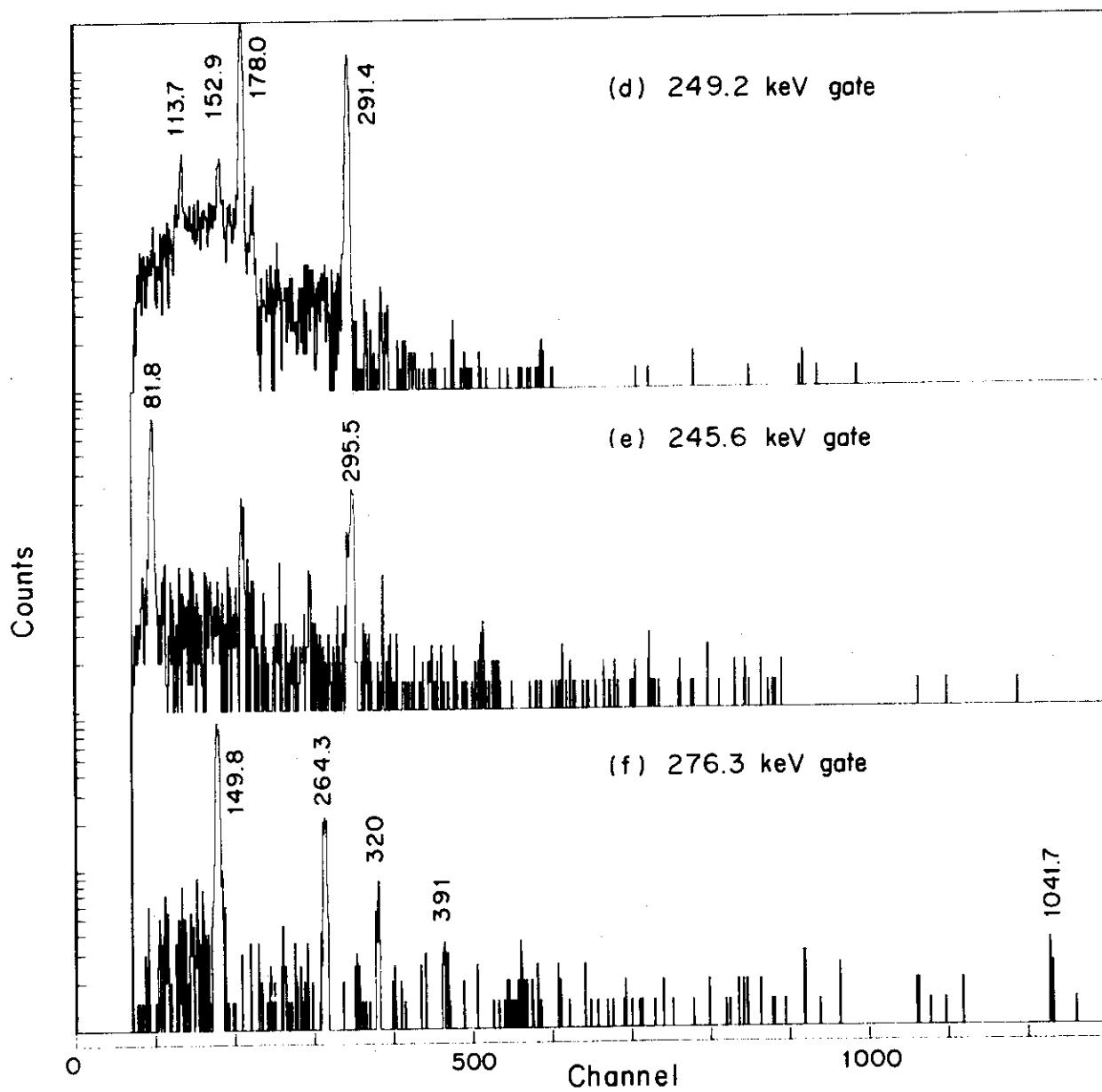


Fig. 7 Typical  $\gamma\gamma$ -coincidence spectra of  $^{109}\text{Rh}$  observed by 40cc-60cc Ge(Li) detector combination.

- (a) Total gate, prompt
- (b) 113.4 keV gate delayed
- (c) 113.4 keV gate prompt



- (d) 249.2 keV gate prompt
- (e) 245.0 keV gate prompt
- (f) 276.3 keV gate prompt

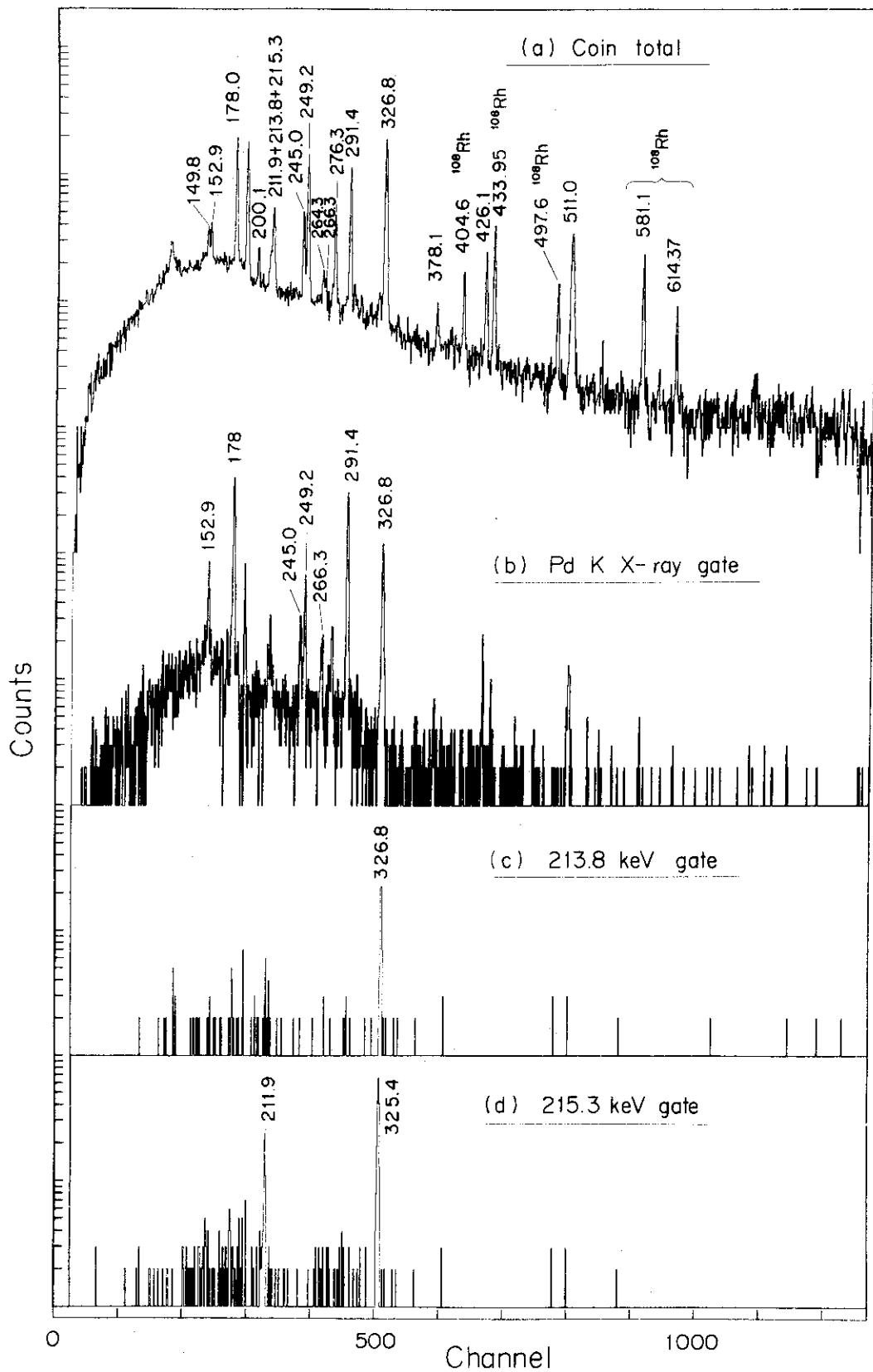


Fig.8 Typical  $\gamma\gamma$ -coincidence spectra of  $^{109}\text{Rh}$  observed from LEPS-40cc Ge(Li) detector combination. Spectra (a) to (d) are prompt coincidences for the LEPS gate.

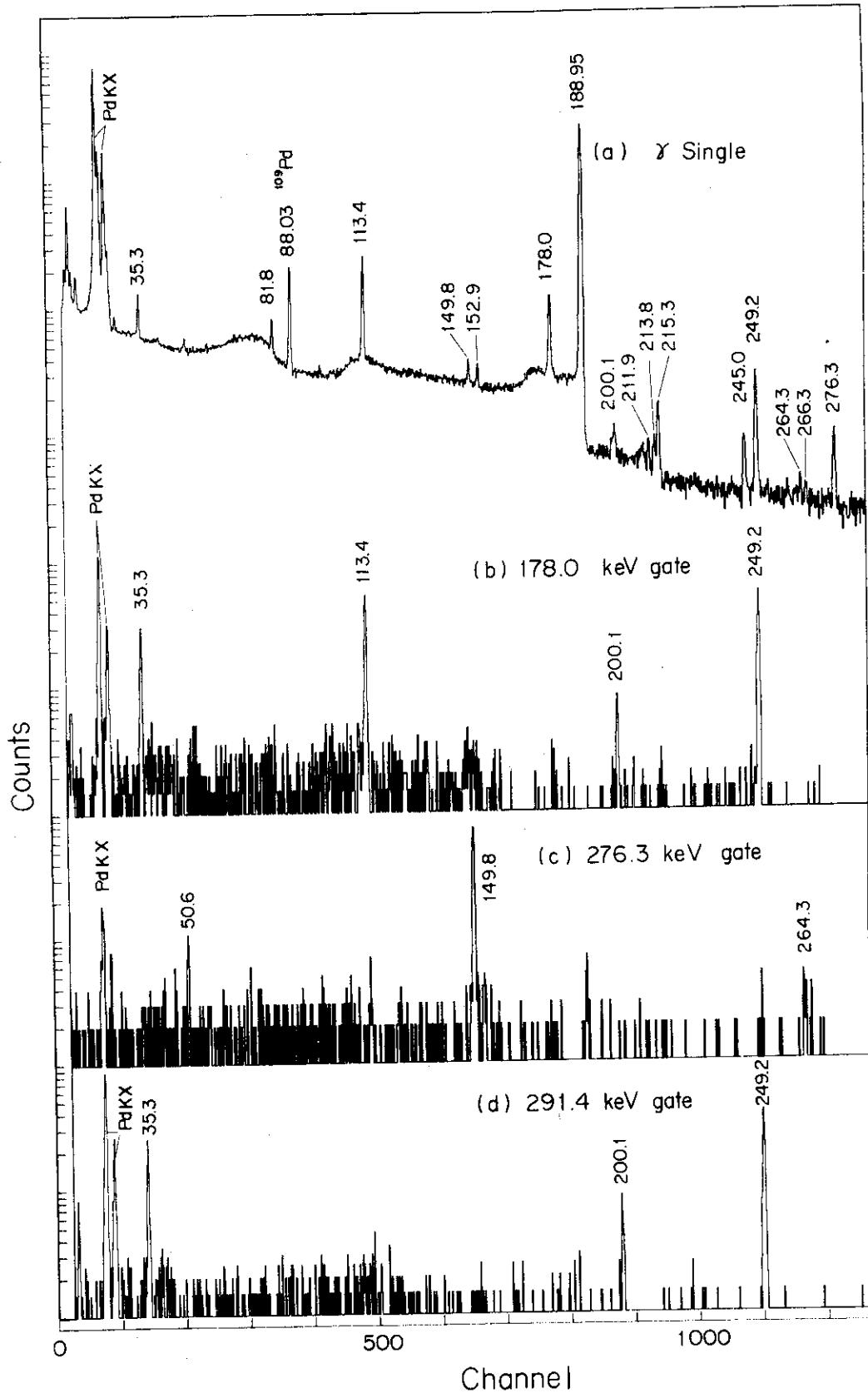


Fig.9 Typical  $\gamma\gamma$  coincidence spectra of  $^{109}\text{Rh}$  observed from LEPS-40cc Ge(Li) detector combination. Spectra (a) to (d) are prompt coincidences for the 40cc detector gates.

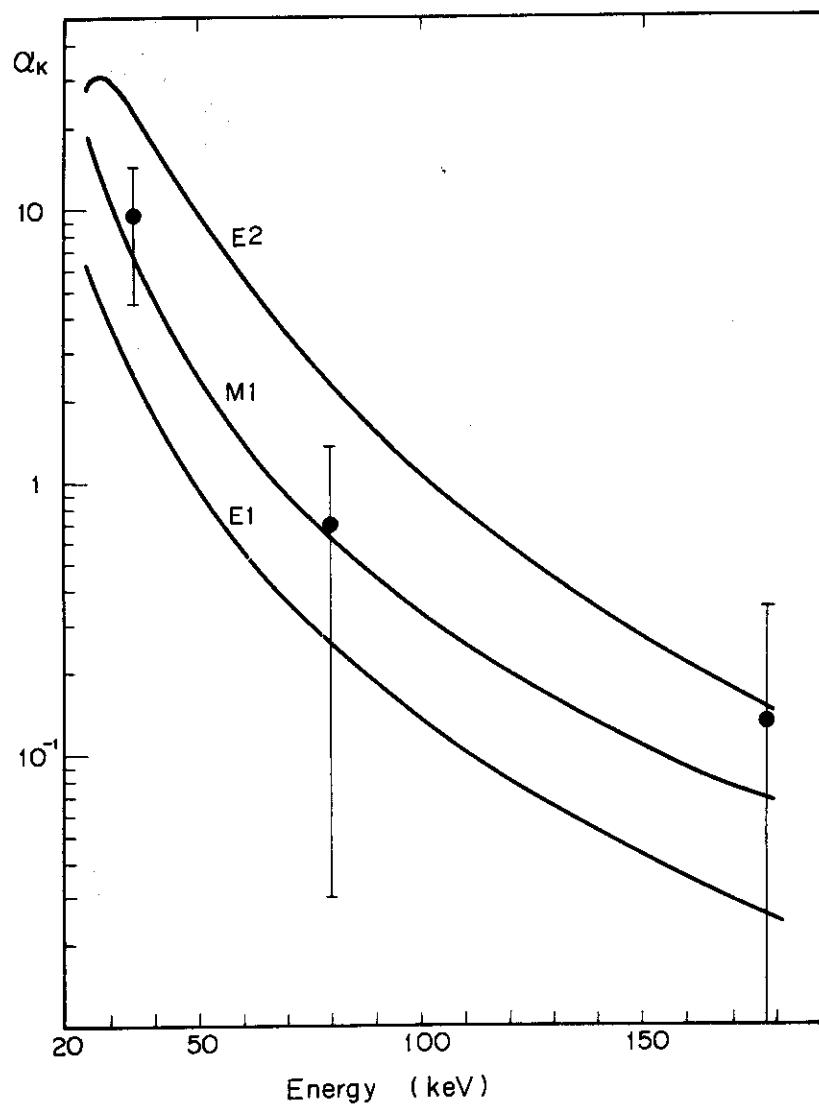


Fig.10 K conversion coefficients determined with  $K/\gamma$  in coincidence experiments. Theoretical values for E1, M1 and E2 were due to ref 10).

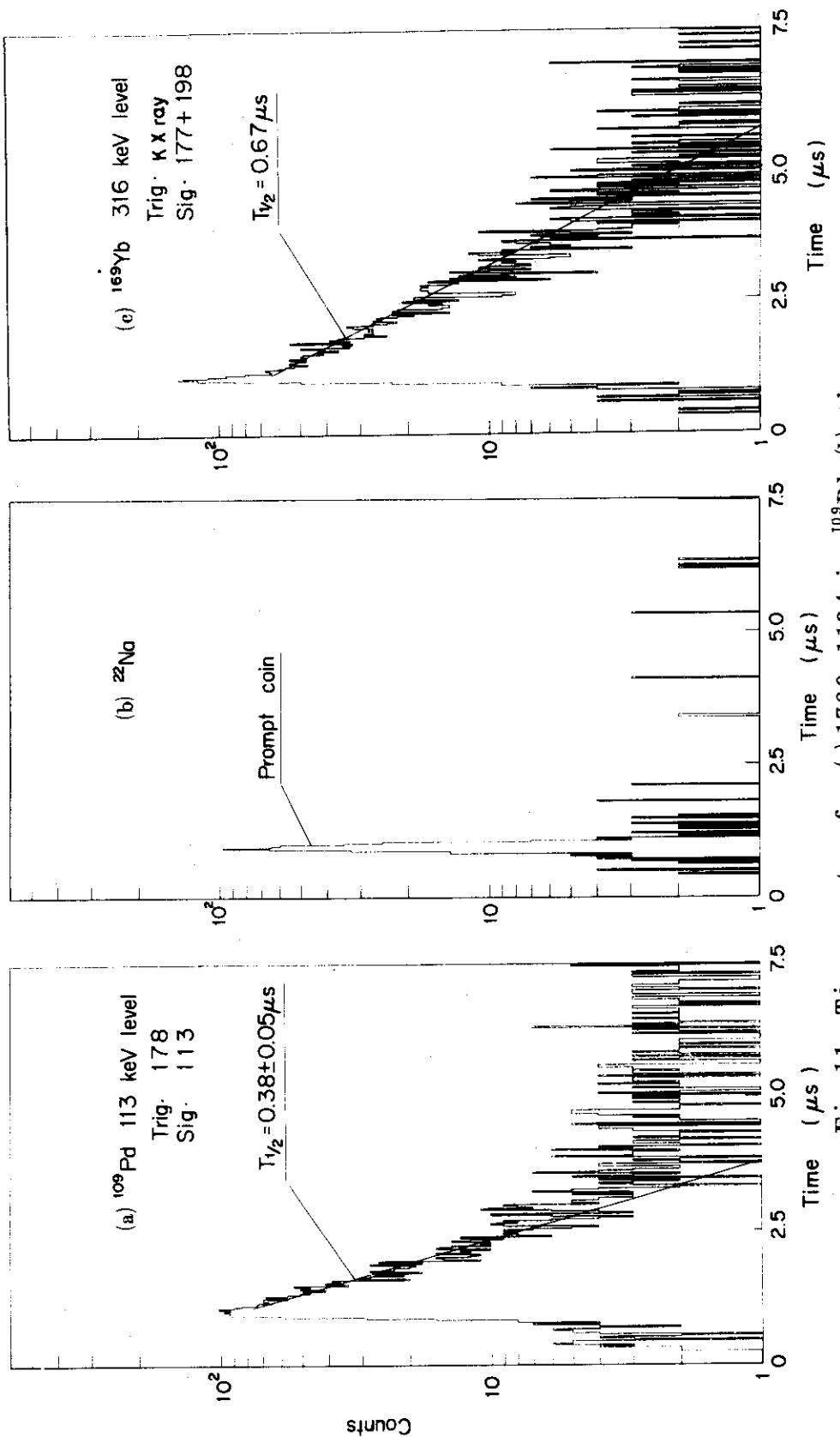
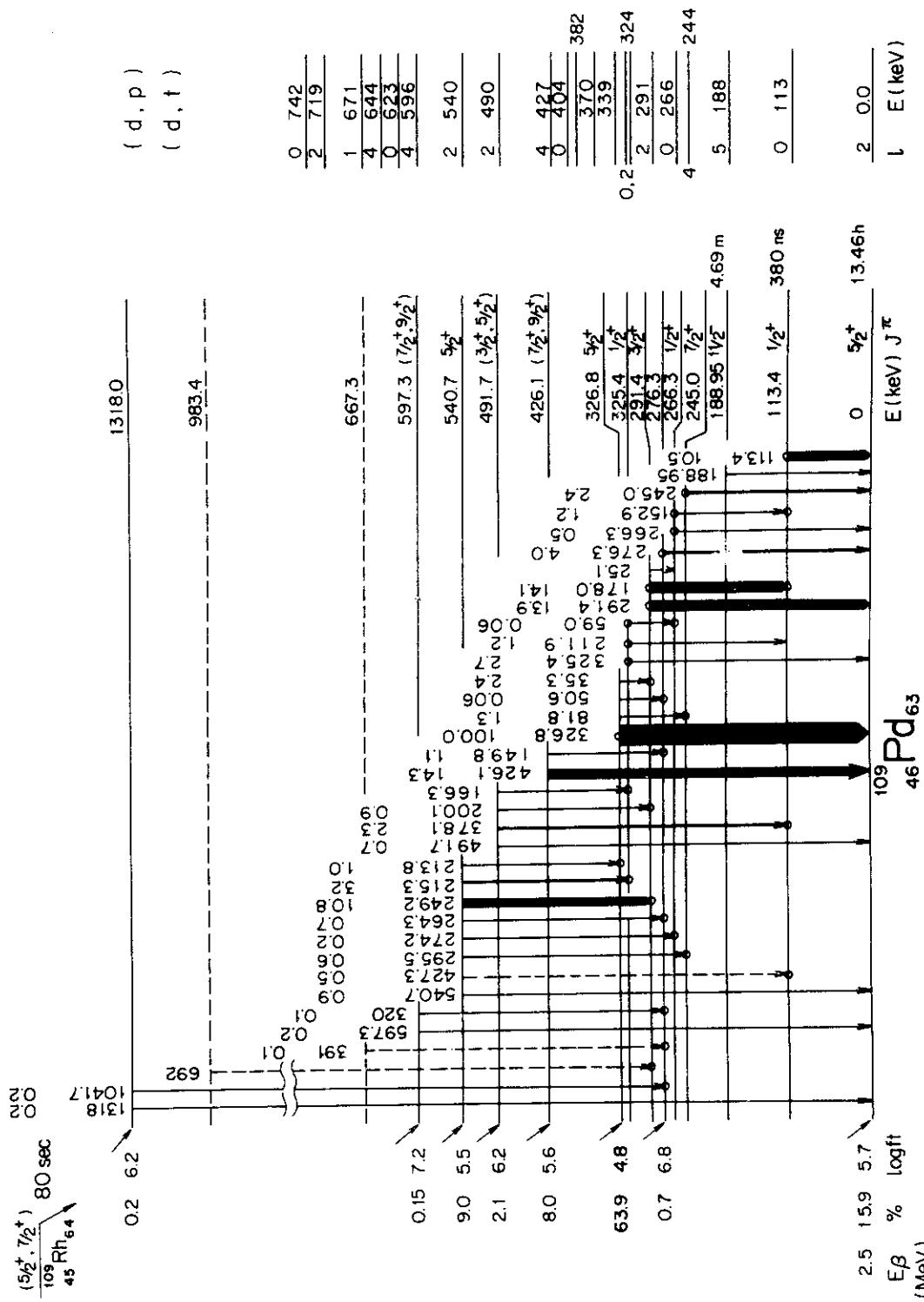


Fig.11 Time spectra for (a) 1780-1134 in  $^{109}\text{Pd}$ , (b) the same gate to (b) with  $^{22}\text{Na}$  source, (c) K X-ray-178 in  $^{169}\text{Tm}$ .

Fig. 12 Decay scheme of  $^{109}\text{Rh}$ .

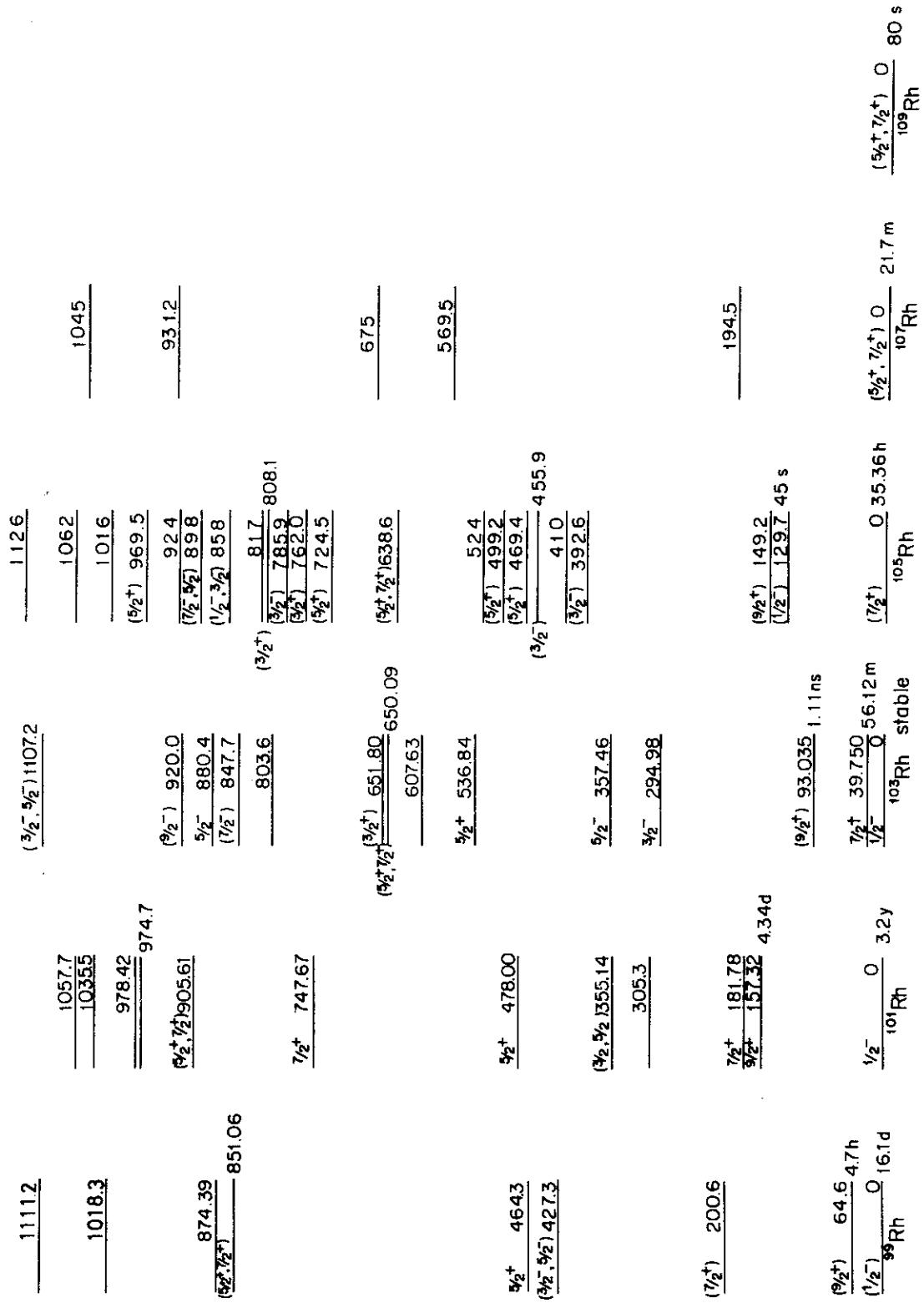
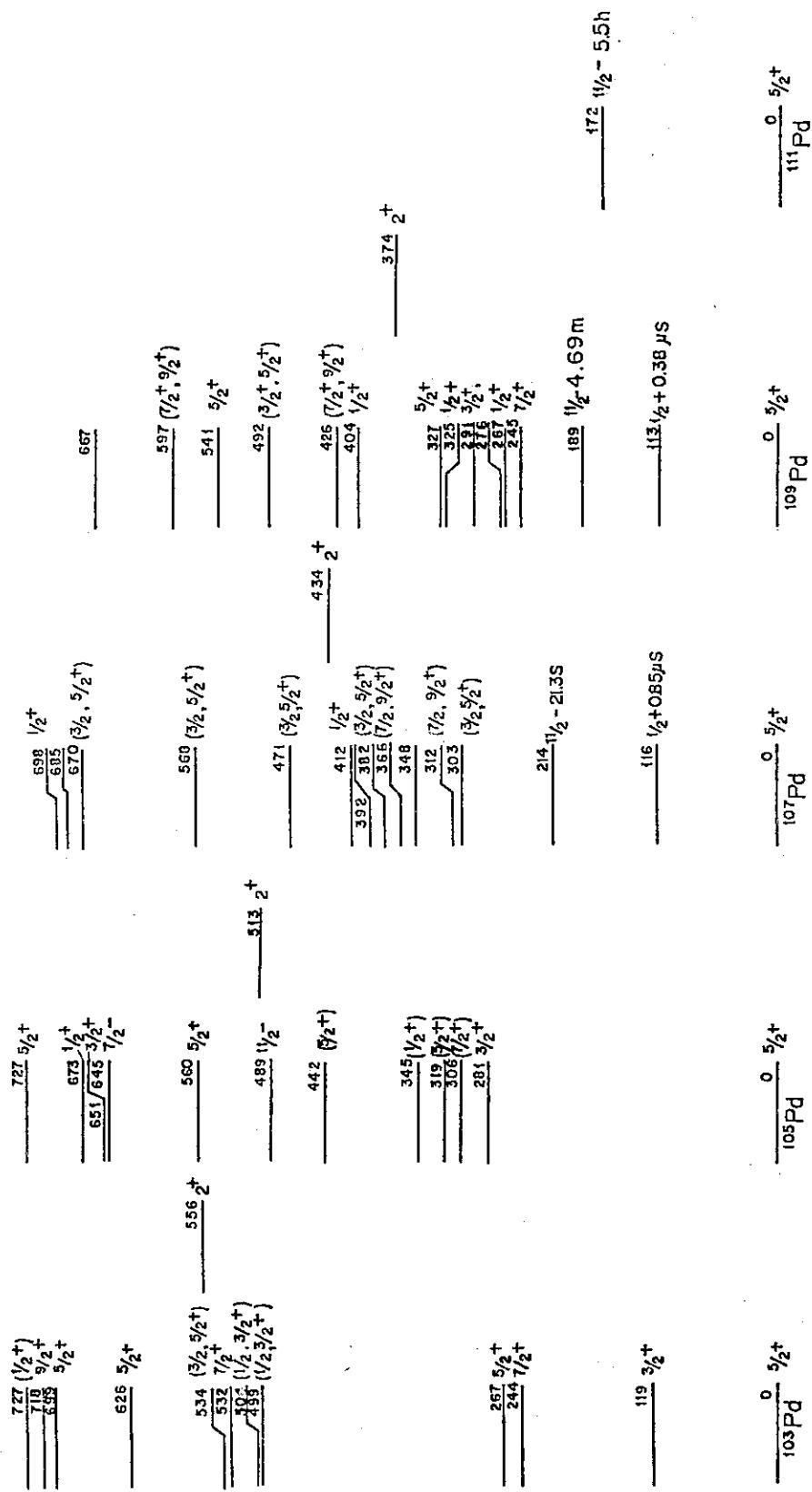


Fig. 13 Levels of odd Rh nuclides.



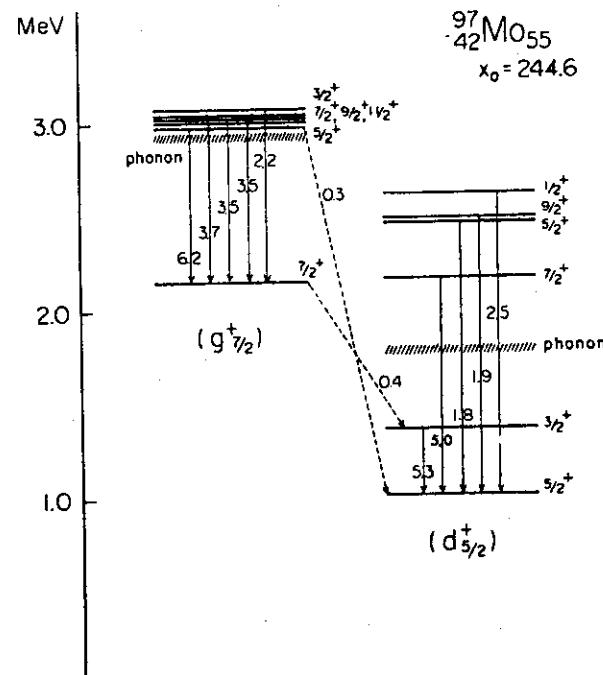
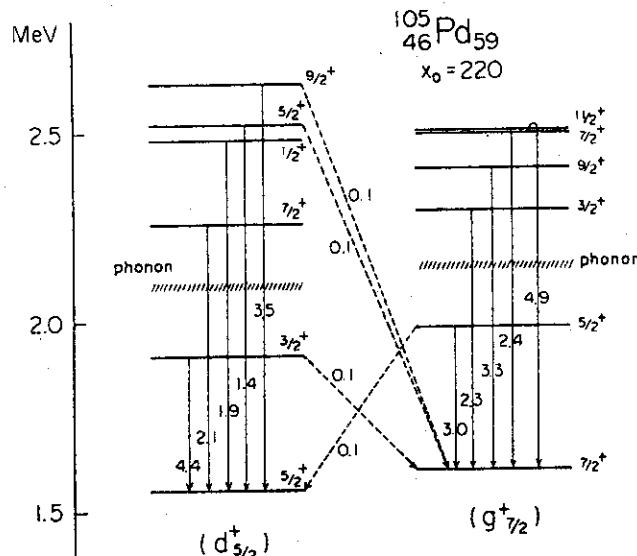


Fig.15 Dressed three-quasi-particle states in  $^{105}\text{Pd}$  and  $^{97}\text{Mo}$  from ref 11).