JAERI-M
4461

Ge(Li)検出器によるガンマ線スペクトル集

1971年 5月

東條隆夫，近藤 眞
稗田正美，白石忠男

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

Ge(Li)検出器によるガンマ線スペクトル集

日本原子力研究所原子炉研修所
東條隆夫，近藤　眞
稗田正美*，白石忠男

（1971年6月受理）

要　旨　　原子炉研修所において行なわれる"核燃料の非破壊検査法による燃焼率測定"，"核分裂生成物の分離"および"放射化法による中性子束測定"やその他の放射線計測実験の過程でたびたび取扱う代表的な22核種のガンマ線スペクトルをGe(Li)検出器を用いて測定し，実験の参考資料として用いるためにそれらを集録した。

さらに付録として，Ⅰ 8種の標準線源と放射平衡に達した^{226}Raを用いたGe(Li)の全エネルギー吸収ピーク効率の光子エネルギー依存性の測定，Ⅱ Ge(Li)の集束ガンマ線のスキャンニングによる有感寸法などの測定，およびⅢ 水素の捕獲ガンマ線および励起状態の^{12}Cからのγ線スペクトル（4.43MeV），が報告されている。

＊ 協力研究員（茨城県総合職業訓練所）

A Compilation of Gamma-Ray Spectra with a Ge(Li) Detector

Takao TOJO, Makoto KONDO, Masami HIETA*, and Tadao SHIRAISHI

Nuclear Engineering School, JAERI

(Received June, 1971)

Abstract

Abstract The set of gamma-ray spectra has been compiled for reference use in such experiments as nondestructive assay of nuclear fuel burnup, mutual separation of fission products and neutron flux measurement with activation detectors at the Nuclear Engineering School of JAERI.
The spectra compiled are for the 22 nuclides which are often used in the experiments.
"Measurements of full-energy peak efficiency dependence on photon energy for a Ge(Li) detector using 8 standard sources and also ^{226}Ra in equilibrium with its decay products" are given in the Appendix I, "gamma-ray scanning for a Ge(Li) by a collimated beam" in II, and in III," thermal neutron capture gamma-ray spectrum of hydrogen together with the 4.43 MeV gamma-rays from the excited state of ^{12}C due to $^{9}Be(\alpha,n)^{12}C$ reaction".

目　　次

1　まえがき …… 1

2　放射性核種のデータ …… 1

3　測定方法 …… 1

4　γ線スペクトルのリスト …… 2
　γ線スペクトル …… 3

付録Ⅰ　Ge(Li)検出器の検出効率の
　光子エネルギー依存性の測定 …… 25

付録Ⅱ　集束したγ線によるGe(Li)
　上のスキャンニング …… 29

付録Ⅲ　水素の捕獲γ線および励起状
　態の^{12}Cからのγ線の測定 …… 32

1. まえがき

Ge(Li)検出器のめざましい進歩と普及により，これを用いて各種の測定を行なう機会が多くなりつつあるのが最近の動向である。原子炉研修所においてもGe(Li)を用いた核燃料の非破壊検査法による燃焼率測定実験などを行なっており，今後更に広い分野での利用が検討されている。

このような情勢の中にあって，当面の原子炉研修所の実験実習の過程でたびたび取扱う代表的な核種およびγ線スペクトロメータの較正に日常用いられている核種のγ線スペクトルを集録し，実験の参考に資するように意図した。

2. 放射性核種のデータ

本スペクトル集中に引用された放射性核種の壊変図，半減期，放射線エネルギー値などはTable of Isotope [1] に示されているものを用いた。ただし，^{57}Co，^{88}Y および^{203}Hgの光子エネルギー値はIAEAの勧告値（1970年）を用いた。

3. 測定方法

Ge(Li)検出器および放射線源を10cm厚の鉛遮蔽中に置いて測定した。線源は検出器軸上の検出器前面から5cmの位置に置かれた。

使用した機器の仕様などを以下に示す。

検出器：Elron Electronic Industry Ltd.製 EGL／1／2C型（同軸型）Ge(Li)検出器（ダイオード番号219／03）
有感面積：6.33 cm²，有感厚さ：10.25 mm
有感長さ：5.4 cm
入射窓：300ミクロン厚のアルミニウム
最大使用電圧：－2000V
漏洩電流：0.7×10⁻⁹ A以下（－2000Vにおいて）
エネルギー分解能（FWHM）：3.3 keV（1.33MeV光子，－1250V，1.6または3.2 μsec時定数で）
検出器容量：58 pF

前置増巾器：Elron Electronic Industry Ltd.製 CA－N－270型電荷比例型前置増巾器

比例増巾器：大阪電波KK製 MPS－1224型低雑音増巾器

高圧電源：Elron Electronic Industry Ltd.製 HV－N－1 型高圧電源装置

1. まえがき

Ge(Li)検出器のめざましい進歩と普及により，これを用いて各種の測定を行なう機会が多くなりつつあるのが最近の動向である。原子炉研修所においてもGe(Li)を用いた核燃料の非破壊検査法による燃焼率測定実験などを行なっており，今後更に広い分野での利用が検討されている。

このような情勢の中にあって，当面の原子炉研修所の実験実習の過程でたびたび取扱う代表的な核種およびγ線スペクトロメータの較正に日常用いられている核種のγ線スペクトルを集録し，実験の参考に資するように意図した。

2. 放射性核種のデータ

本スペクトル集中に引用された放射性核種の壊変図，半減期，放射線エネルギー値などはTable of Isotope [1] に示されているものを用いた。ただし，^{57}Co，^{88}Y および^{203}Hgの光子エネルギー値はIAEAの勧告値（1970年）を用いた。

3. 測定方法

Ge(Li)検出器および放射線源を10cm厚の鉛遮蔽中に置いて測定した。線源は検出器軸上の検出器前面から5cmの位置に置かれた。

使用した機器の仕様などを以下に示す。

検出器：Elron Electronic Industry Ltd.製 EGL／1／2C型（同軸型）Ge(Li)検出器（ダイオード番号219／03）
有感面積：6.33 cm²，有感厚さ：10.25 mm
有感長さ：5.4 cm
入射窓：300ミクロン厚のアルミニウム
最大使用電圧：－2000V
漏洩電流：0.7×10^{-9} A以下（－2000Vにおいて）
エネルギー分解能（FWHM）：3.3 keV（1.33MeV光子，－1250V，1.6または3.2 μsec時定数で）
検出器容量：58 pF

前置増巾器：Elron Electronic Industry Ltd.製 CA－N－270型電荷比例型前置増巾器

比例増巾器：大阪電波KK製 MPS－1224型低雑音増巾器

高圧電源：Elron Electronic Industry Ltd.製 HV－N－1 型高圧電源装置

1. まえがき

Ge(Li)検出器のめざましい進歩と普及により，これを用いて各種の測定を行なう機会が多くなりつつあるのが最近の動向である。原子炉研修所においてもGe(Li)を用いた核燃料の非破壊検査法による燃焼率測定実験などを行なっており，今後更に広い分野での利用が検討されている。

このような情勢の中にあって，当面の原子炉研修所の実験実習の過程でたびたび取扱う代表的な核種およびγ線スペクトロメータの較正に日常用いられている核種のγ線スペクトルを集録し，実験の参考に資するように意図した。

2. 放射性核種のデータ

本スペクトル集中に引用された放射性核種の壊変図，半減期，放射線エネルギー値などはTable of Isotope [1] に示されているものを用いた。ただし，^{57}Co，^{88}Y および^{203}Hgの光子エネルギー値はIAEAの勧告値（1970年）を用いた。

3. 測定方法

Ge(Li)検出器および放射線源を10cm厚の鉛遮蔽中に置いて測定した。線源は検出器軸上の検出器前面から5cmの位置に置かれた。

使用した機器の仕様などを以下に示す。

検出器：Elron Electronic Industry Ltd.製 EGL／1／2C型（同軸型）Ge(Li)検出器（ダイオード番号219／03）
有感面積：6.33 cm²，有感厚さ：10.25 mm
有感長さ：5.4 cm
入射窓：300ミクロン厚のアルミニウム
最大使用電圧：－2000V
漏洩電流：0.7×10⁻⁹ A以下（－2000Vにおいて）
エネルギー分解能（FWHM）：3.3 keV（1.33MeV光子，－1250V，1.6または3.2 μsec時定数で）
検出器容量：58 pF

前置増巾器：Elron Electronic Industry Ltd.製 CA－N－270型電荷比例型前置増巾器

比例増巾器：大阪電波KK製 MPS－1224型低雑音増巾器

高圧電源：Elron Electronic Industry Ltd.製 HV－N－1 型高圧電源装置

波高分析器　：　Nuclear Data社製2200型多重波高分析器
（チャンネル容量：2048，50MHz ADC）
記　録　計　：　Hewlett Packard社製5050A型デイジタル・プリンタ）

4. γ線スペクトルのリスト

γ線スペクトルは原子番号の順に集録し，同一原子番号の中にあっては質量数の順に集録した。

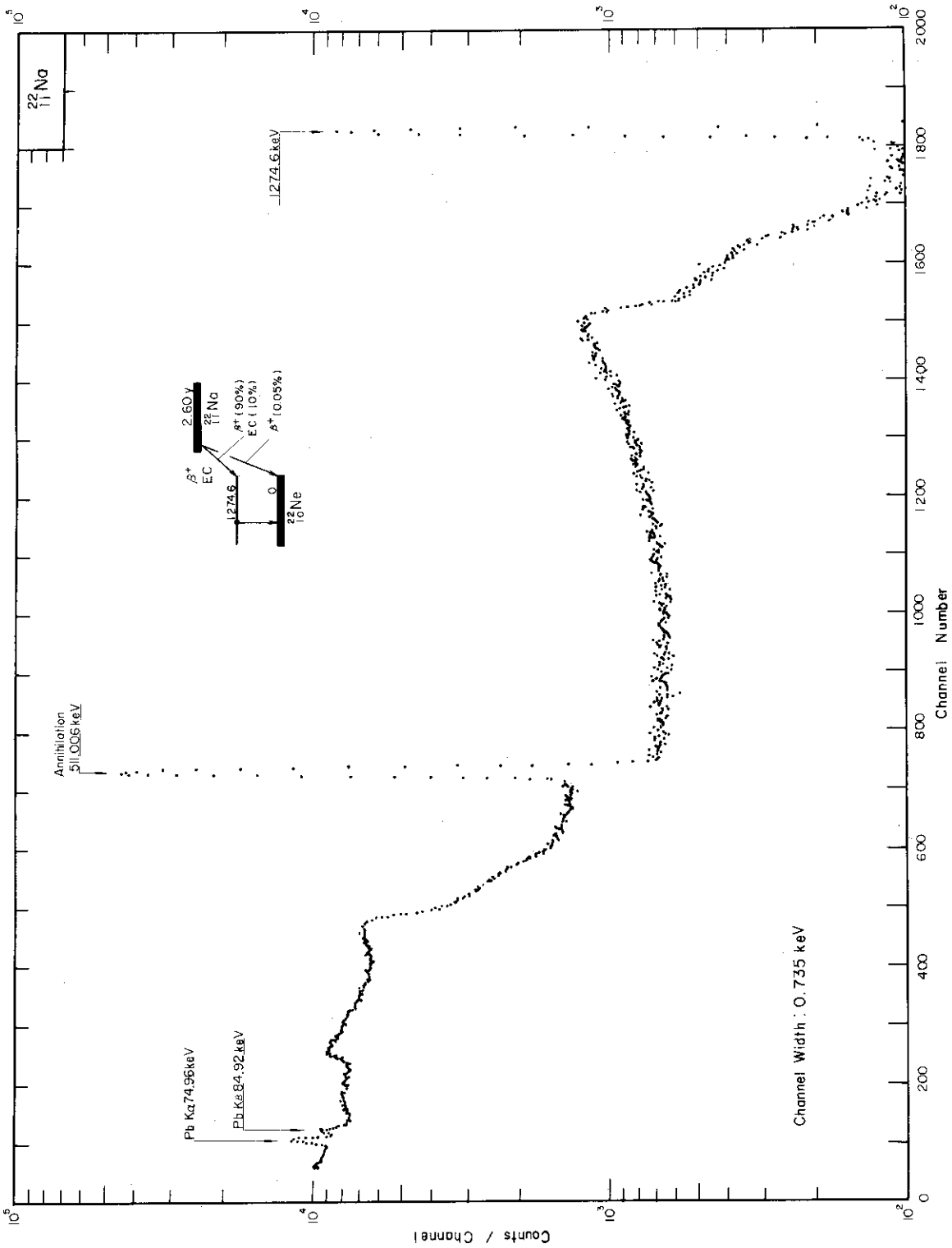
核　種	頁	核　種	頁
$^{22}_{11}Na$	3	$^{137}_{55}Cs$ (^{137m}Ba)	15
$^{24}_{11}Na$	4	$^{133}_{56}Ba$	16
$^{54}_{25}Mn$	5	$^{144}_{58}Ce$ ($^{144}_{59}Pr$)	17
$^{57}_{27}Co$	6	$^{165}_{66}Dy$	18
$^{60}_{27}Co$	7	$^{176m}_{72}Lu + ^{177}_{72}Lu$	19
$^{64}_{29}Cu$	8	$^{198}_{79}Au$	20
$^{65}_{30}Zn$	9	$^{203}_{80}Hg$	21
$^{88}_{39}Y$	10	$^{207}_{83}Bi$	22
$^{95}_{40}Zr$ ($^{95}_{41}Nb$)	11	^{226}Ra（娘核）	23
$^{95}_{41}Nb$	12	^{226}Ra（娘核）＋	
$^{116m}_{49}In$	13	^{228}Ra（娘核）（メソトリウム）	24
$^{122}_{51}Sb + ^{124}_{51}Sb$	14		

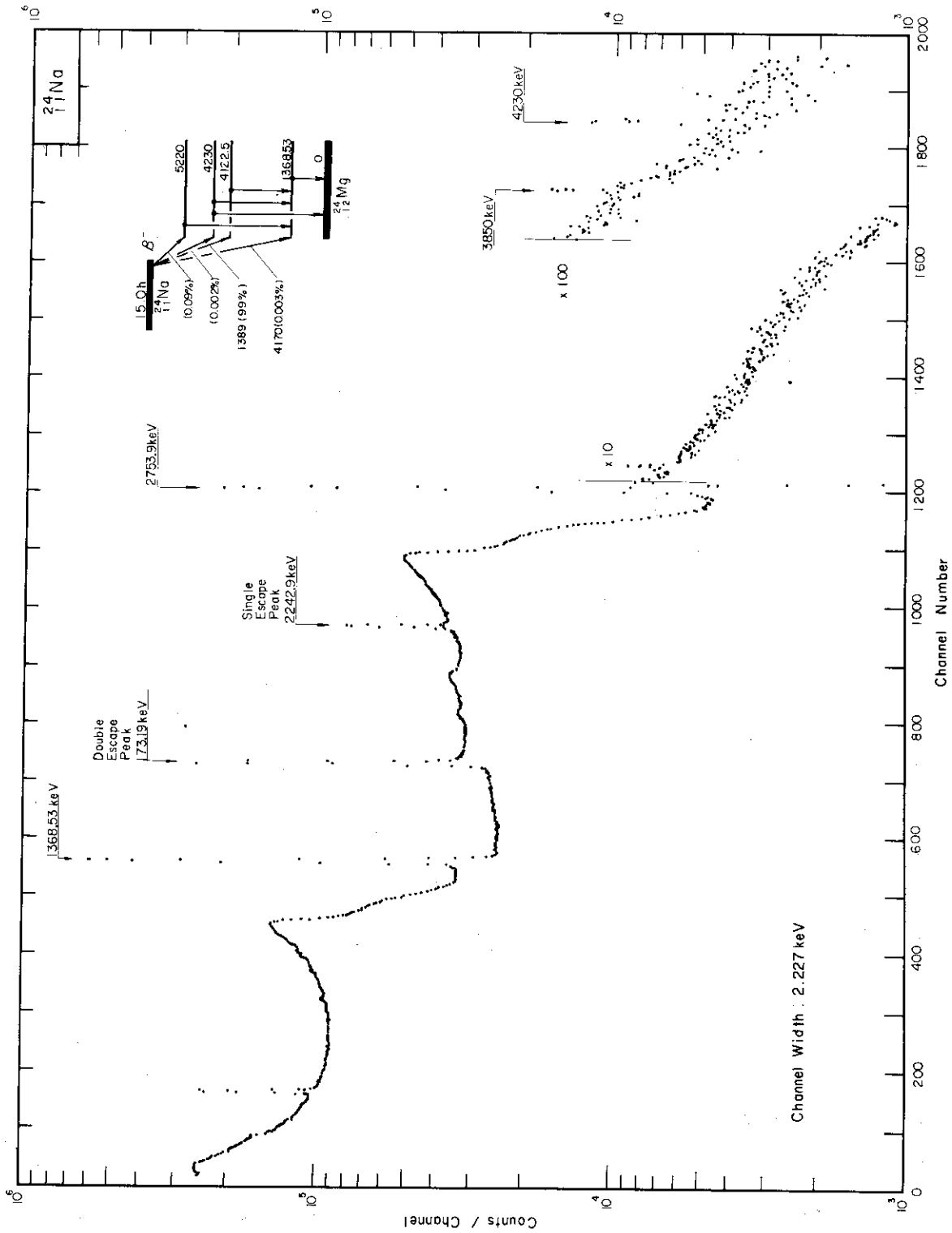
波高分析器　：　Nuclear Data社製2200型多重波高分析器
（チャンネル容量：2048，50MHz ADC）
記　録　計　：　Hewlett Packard社製5050A型デイジタル・プリンタ）

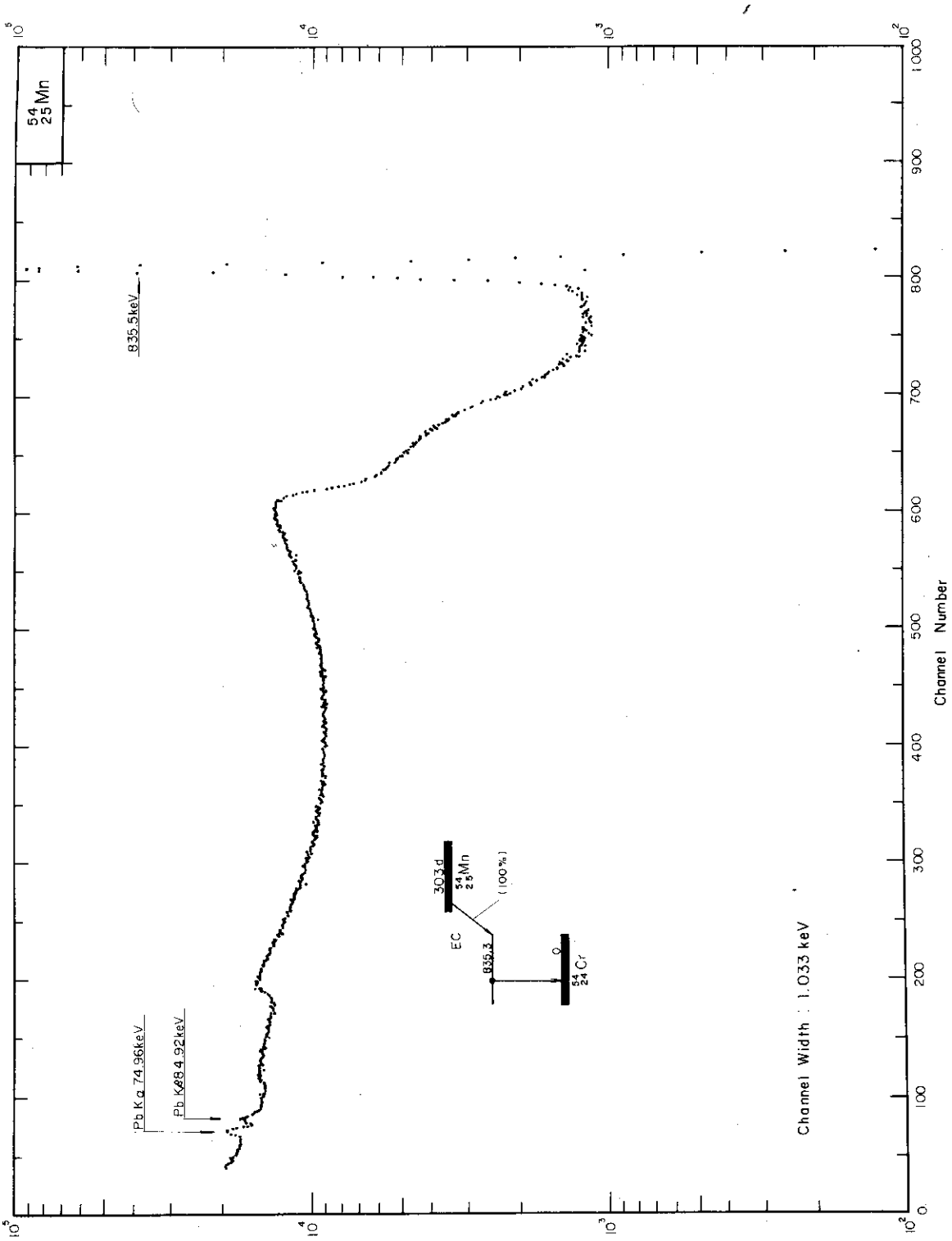
4. γ線スペクトルのリスト

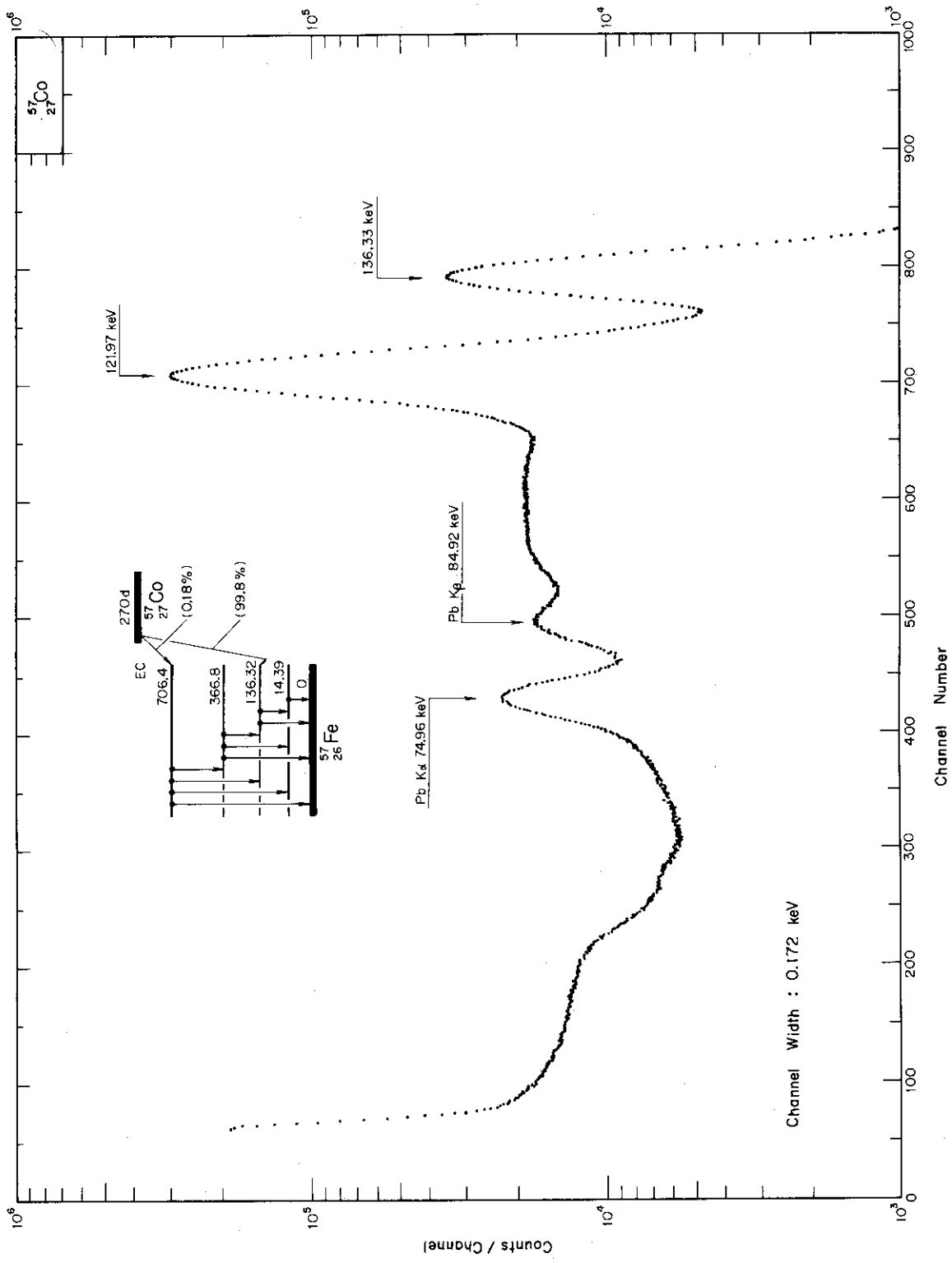
γ線スペクトルは原子番号の順に集録し，同一原子番号の中にあっては質量数の順に集録した。

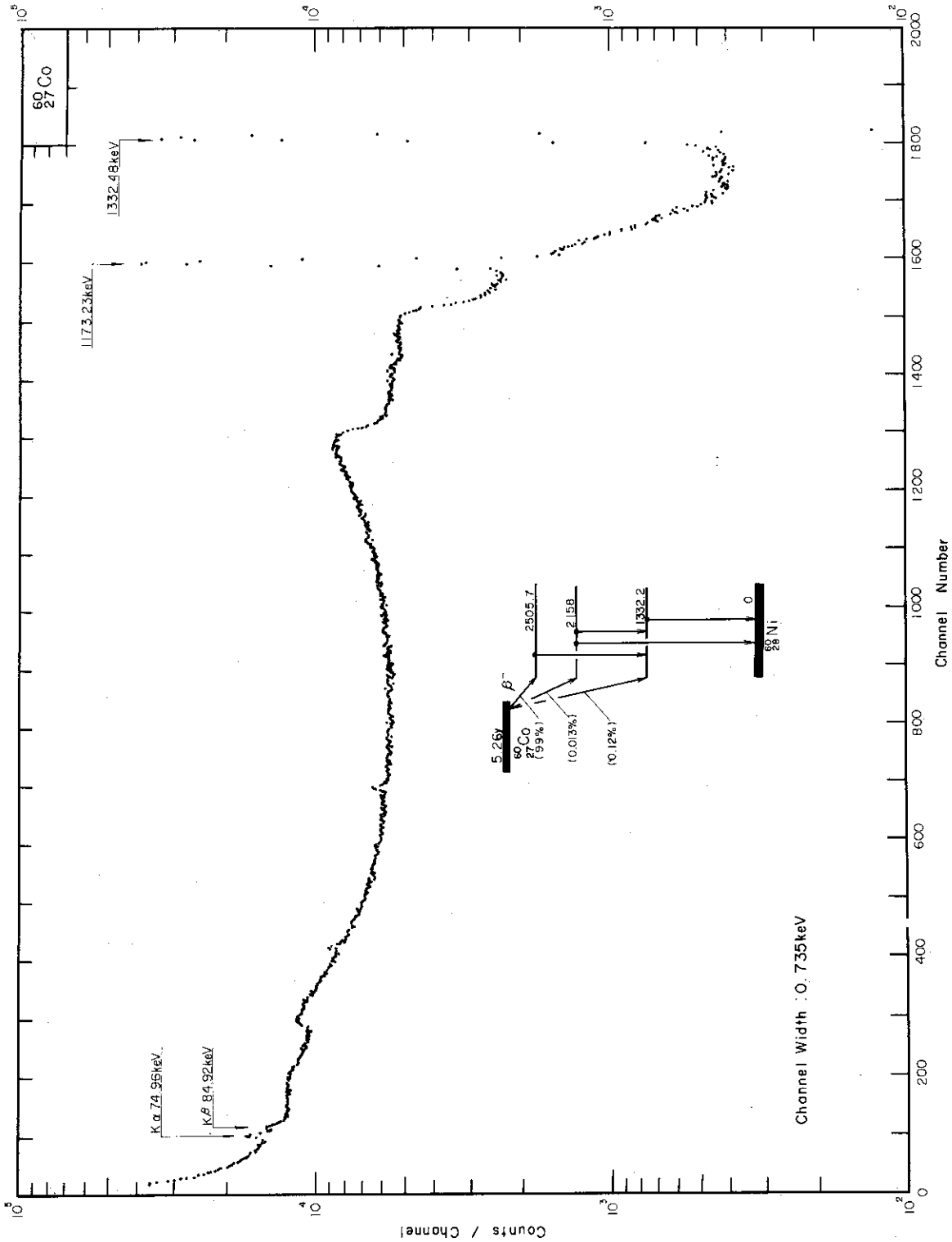
核　種	頁	核　種	頁
$^{22}_{11}Na$	3	$^{137}_{55}Cs$ (^{137m}Ba)	15
$^{24}_{11}Na$	4	$^{133}_{56}Ba$	16
$^{54}_{25}Mn$	5	$^{144}_{58}Ce$ ($^{144}_{59}Pr$)	17
$^{57}_{27}Co$	6	$^{165}_{66}Dy$	18
$^{60}_{27}Co$	7	$^{176m}_{72}Lu + ^{177}_{72}Lu$	19
$^{64}_{29}Cu$	8	$^{198}_{79}Au$	20
$^{65}_{30}Zn$	9	$^{203}_{80}Hg$	21
$^{88}_{39}Y$	10	$^{207}_{83}Bi$	22
$^{95}_{40}Zr$ ($^{95}_{41}Nb$)	11	^{226}Ra（娘核）	23
$^{95}_{41}Nb$	12	^{226}Ra（娘核）＋	
$^{116m}_{49}In$	13	^{228}Ra（娘核）（メソトリウム）	24
$^{122}_{51}Sb + ^{124}_{51}Sb$	14		

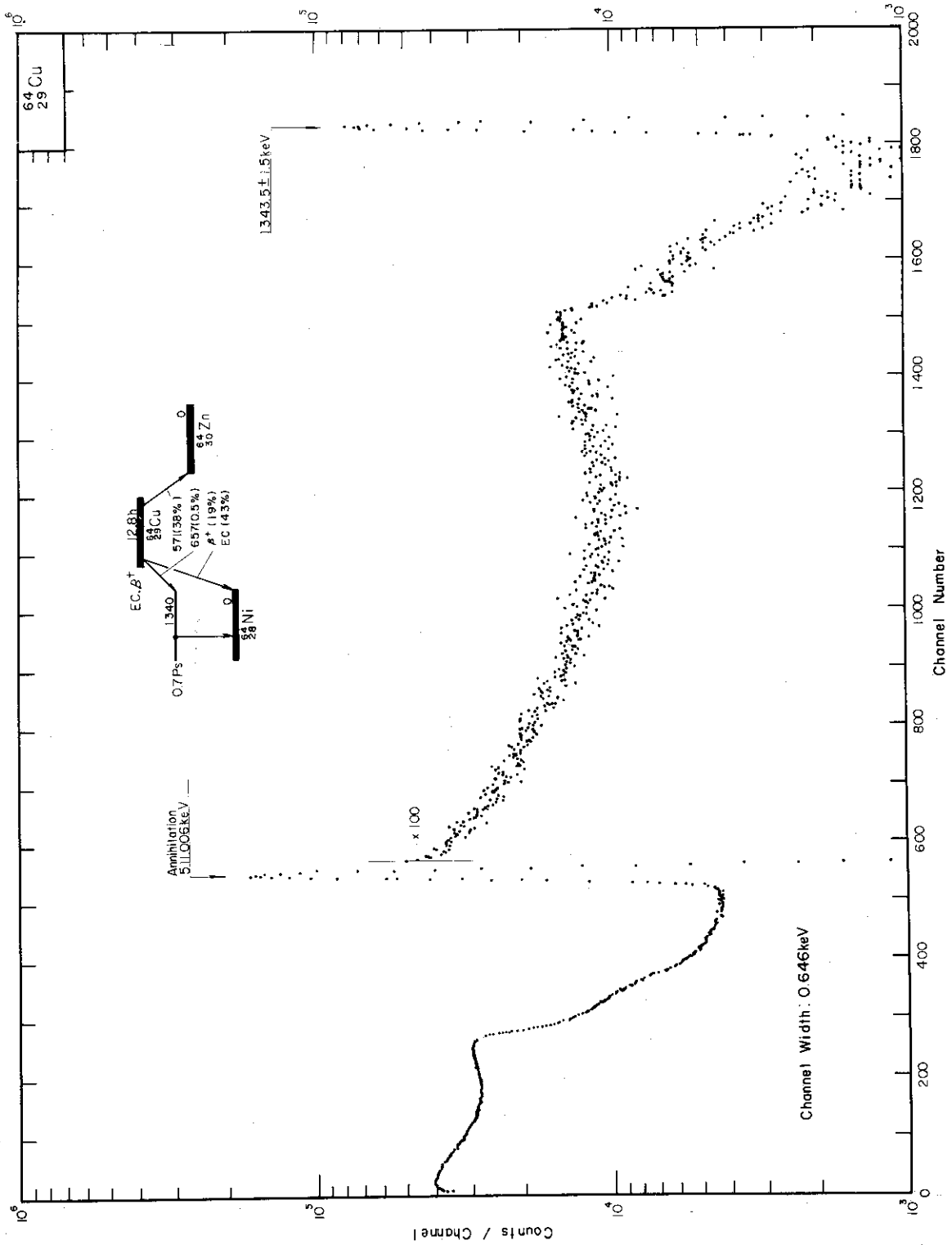

$^{22}_{11}$Na
1274.6keV
2.60y
$^{22}_{11}$Na
β^+ (90%)
EC (10%)
β^+ (0.05%)
β^+
EC
1274.6
0
$^{22}_{10}$Ne
Annihilation
511.005keV
Pb Kα74.96keV
Pb Kα84.92keV
Channel Width : 0.735 keV
Counts / Channel
Channel Number
0
200
400
600
800
1000
1200
1400
1600
1800
2000
10^2
10^3
10^4
10^5
10^6

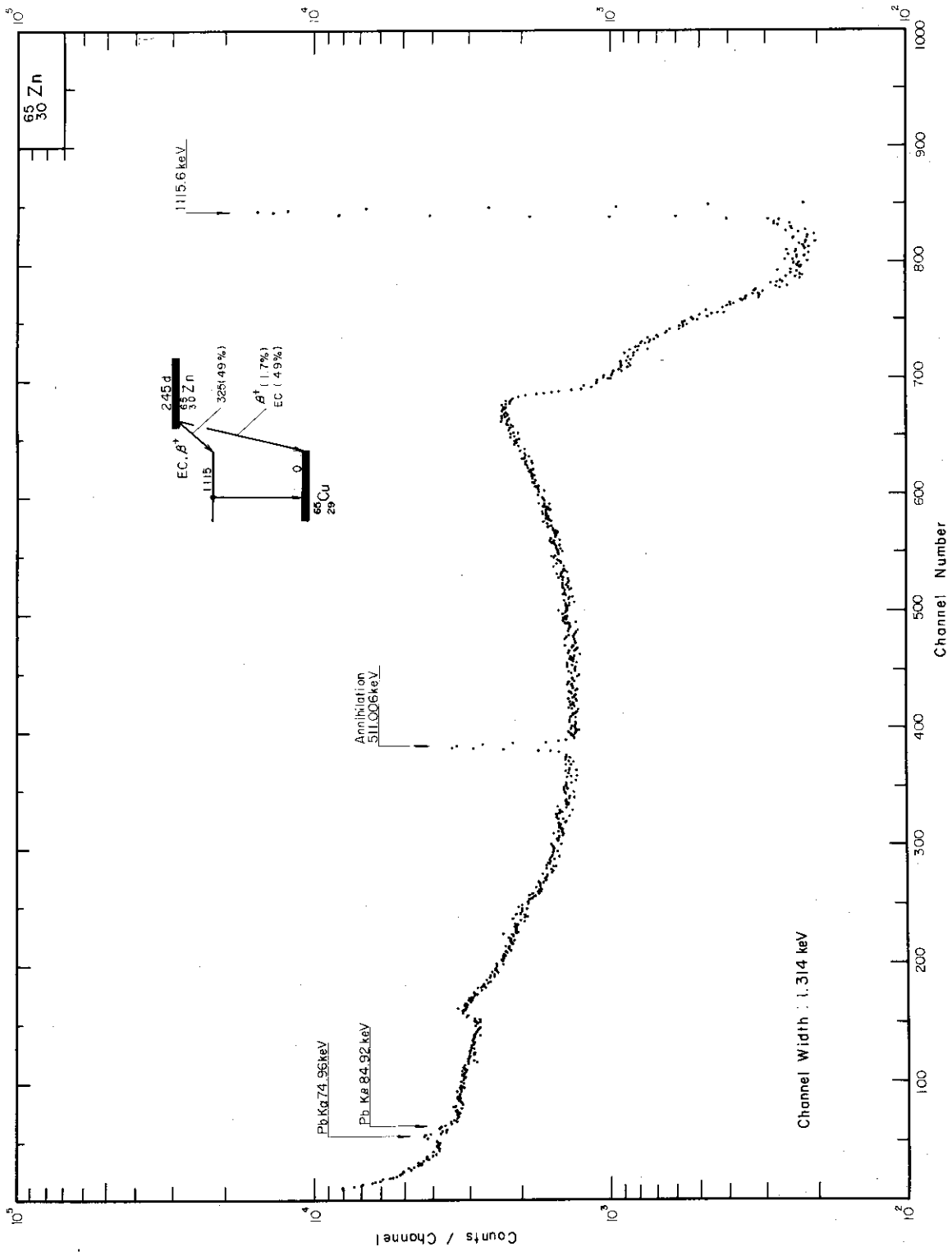

24 11 Na
15.0h
24 11 Na
β⁻
5220
4230
4122.5
1368.53
0
24 12 Mg
(0.09%)
(0.002%)
1389 (99%)
4170(0.003%)
2753.9keV
Single Escape Peak 2242.9keV
Double Escape Peak 1731.9keV
1368.53 keV
4230keV
3850keV
x 100
x 10
Channel Width : 2.227 keV
Counts / Channel
Channel Number

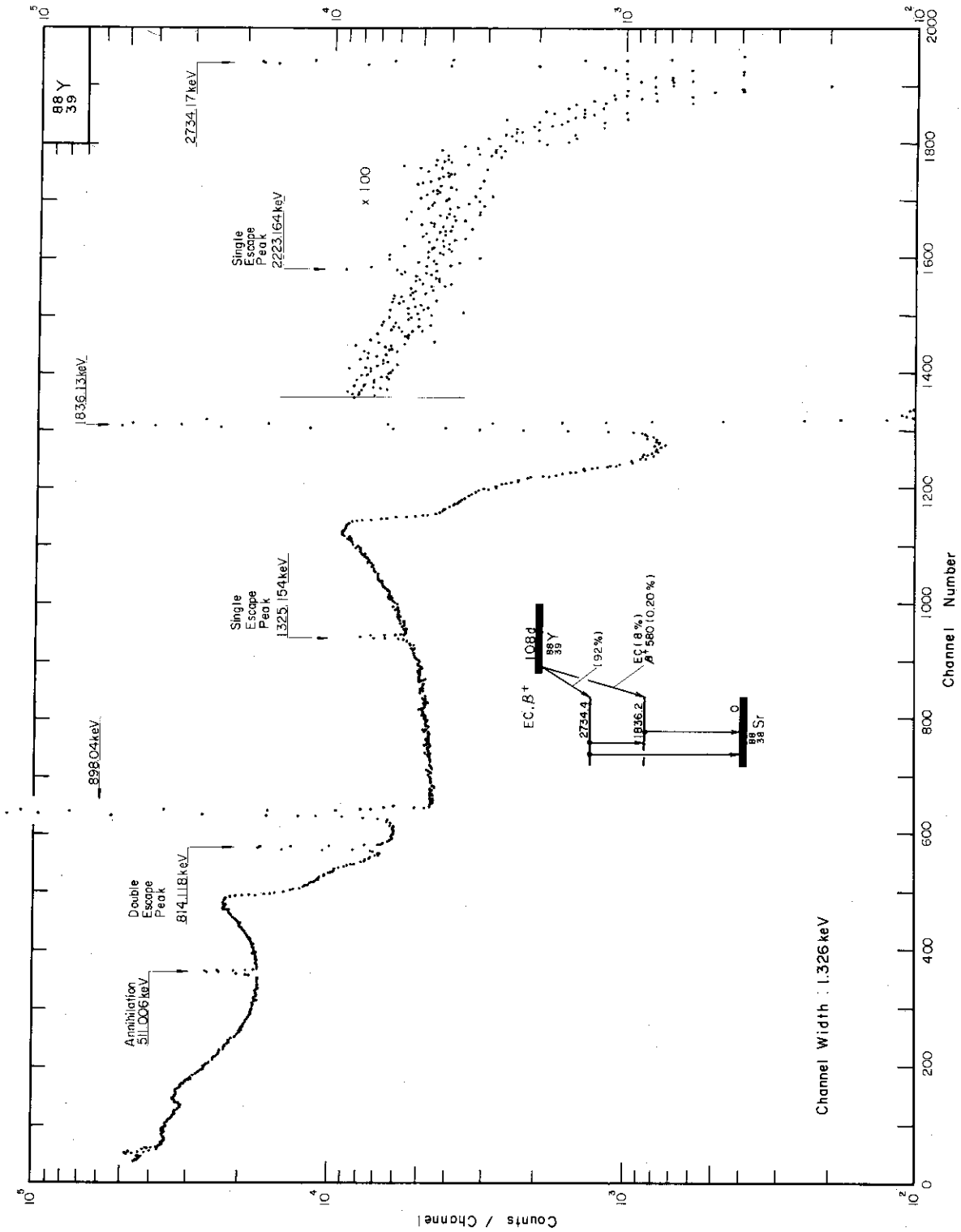

54 25 Mn
835.5keV
Pb Kα 74.96keV
Pb Kβ 84.92keV
303d
54 25 Mn
(100%)
EC
835.3
0
54 24 Cr
Channel Width : 1.033 keV
Channel Number
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
10^2
10^3
10^4
10^5

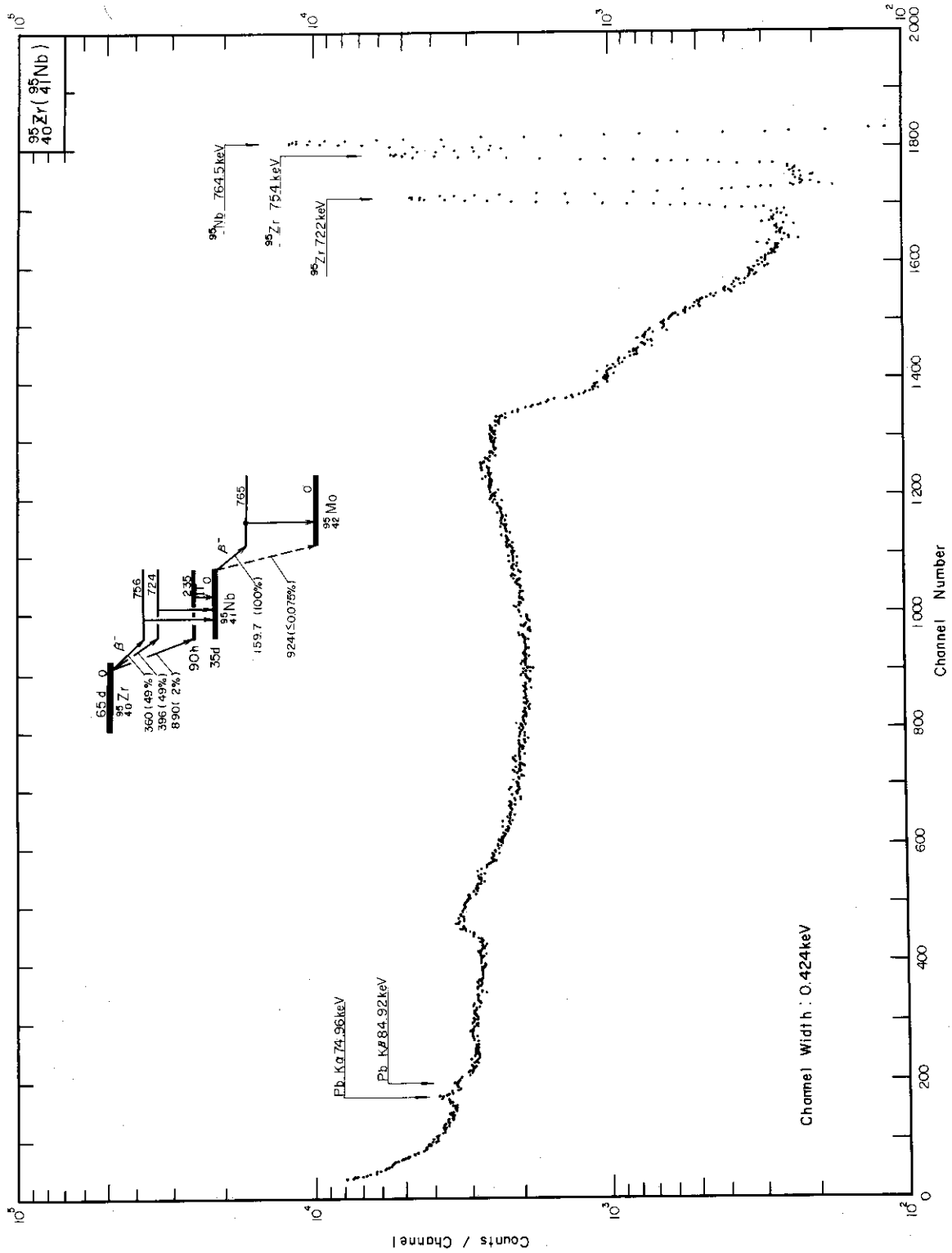

$^{57}_{27}Co$
270d
EC
706.4
(0.18%)
(99.8%)
366.8
136.32
14.39
0
$^{57}_{26}Fe$
121.97 keV
136.33 keV
Pb Kα 74.96 keV
Pb Kβ 84.92 keV
Channel Width : 0.172 keV
Counts / Channel
Channel Number

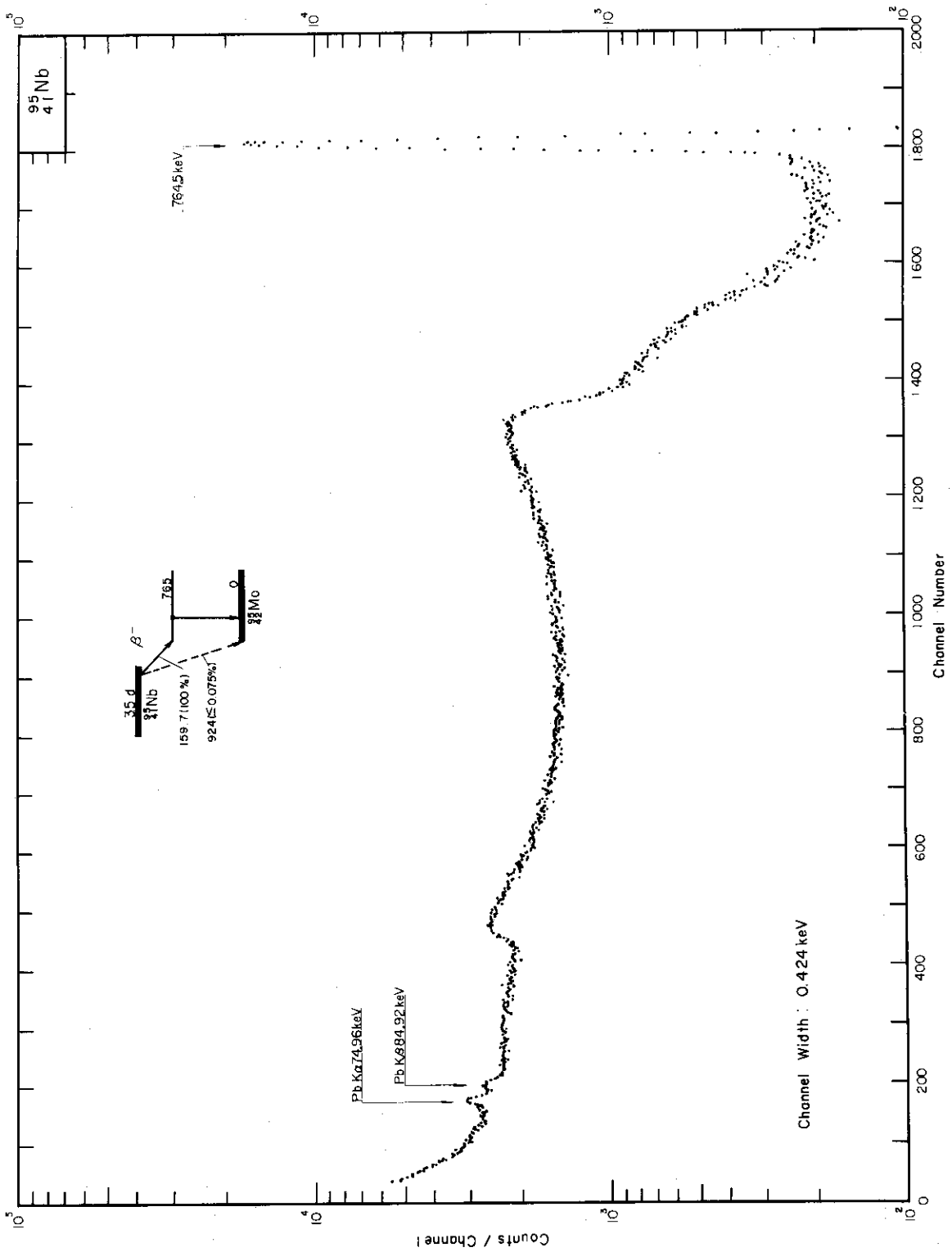

60 27 Co
1332.48keV
1173.23keV
Kα 74.96keV
Kβ 84.92keV
5.26y
60 27 Co
(99%)
β⁻
(0.013%)
(0.12%)
2505.7
2.158
1332.2
0
60 28 Ni
Channel Width : 0.735keV
Counts / Channel
Channel Number
0
200
400
600
800
1000
1200
1400
1600
1800
2000

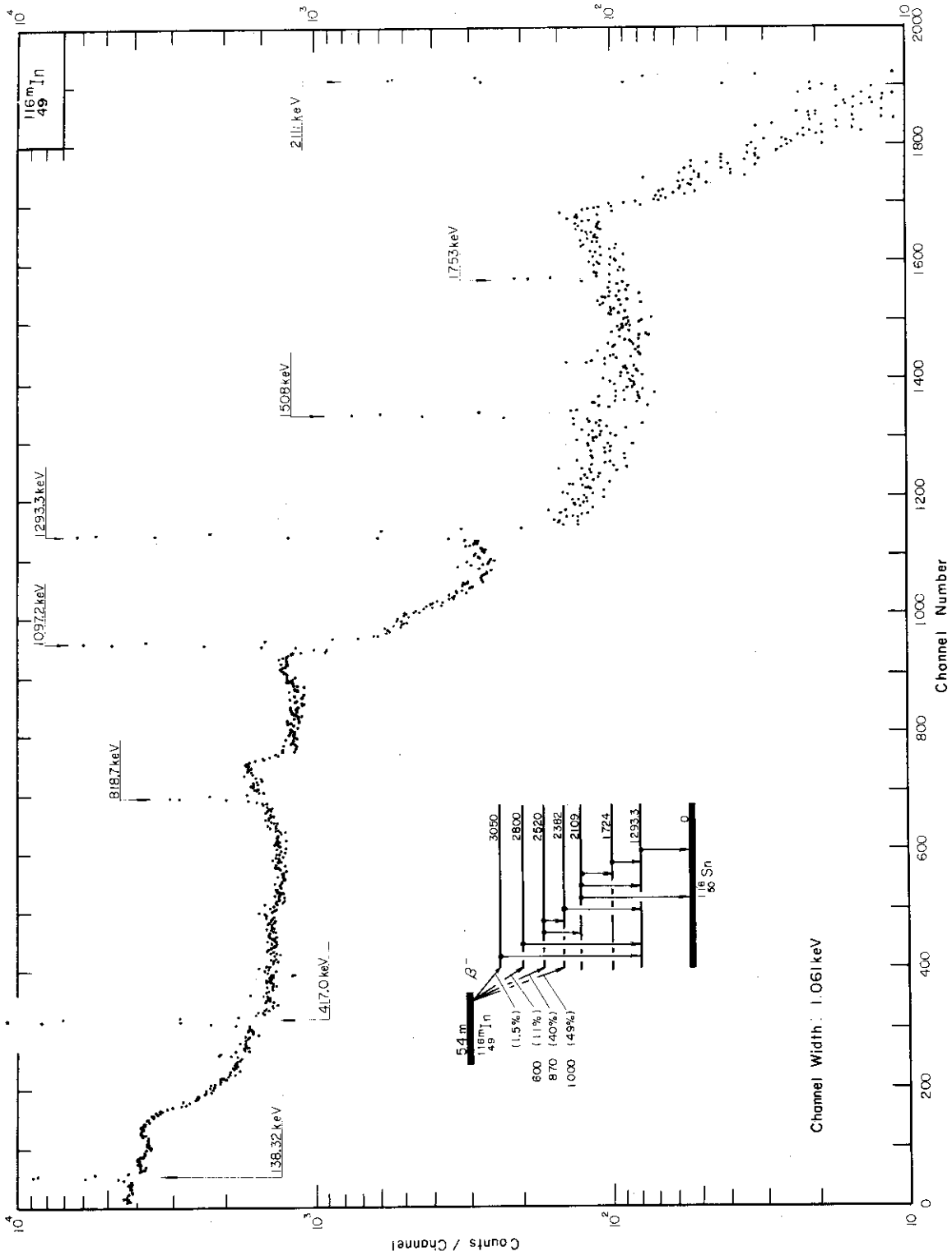

64 29 Cu
1343.5±1.5keV
12.8h
64 29 Cu
64 30 Zn
57(38%)
65(10.5%)
β+ (19%)
EC (43%)
EC, β+
1340
0.7Ps
64 28 Ni
Annihilation 511.006keV
x 100
Channel Width: 0.646keV
Counts / Channel
Channel Number

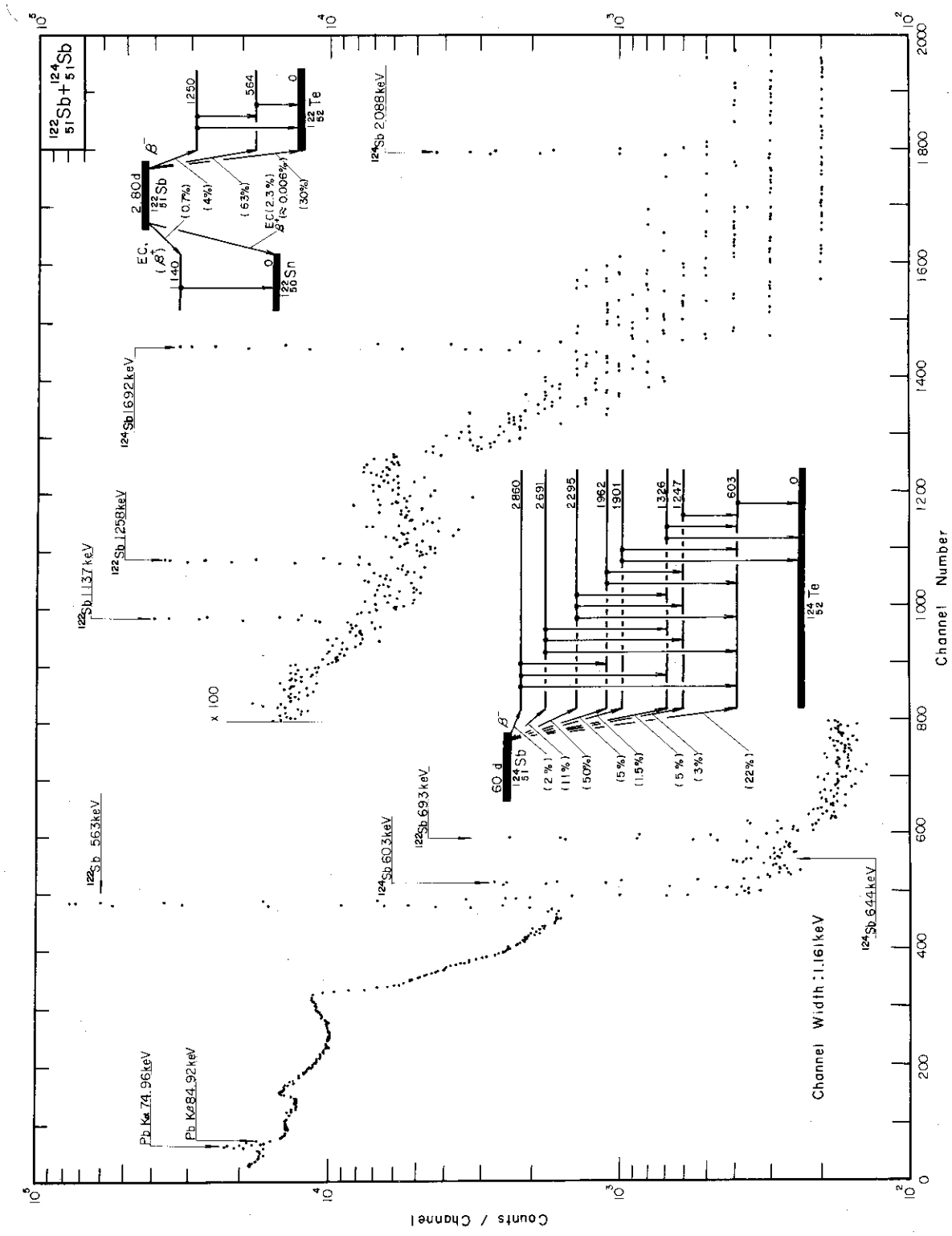

65 30 Zn
1115.6 keV
245 d
65 30 Zn
326(49%)
β+ (1.7%)
EC (49%)
EC, β+
1115
0
65 29 Cu
Annihilation
511.006 keV
Pb Kα 74.96 keV
Pb Kβ 84.92 keV
Channel Width : 1.314 keV
Channel Number
Counts / Channel

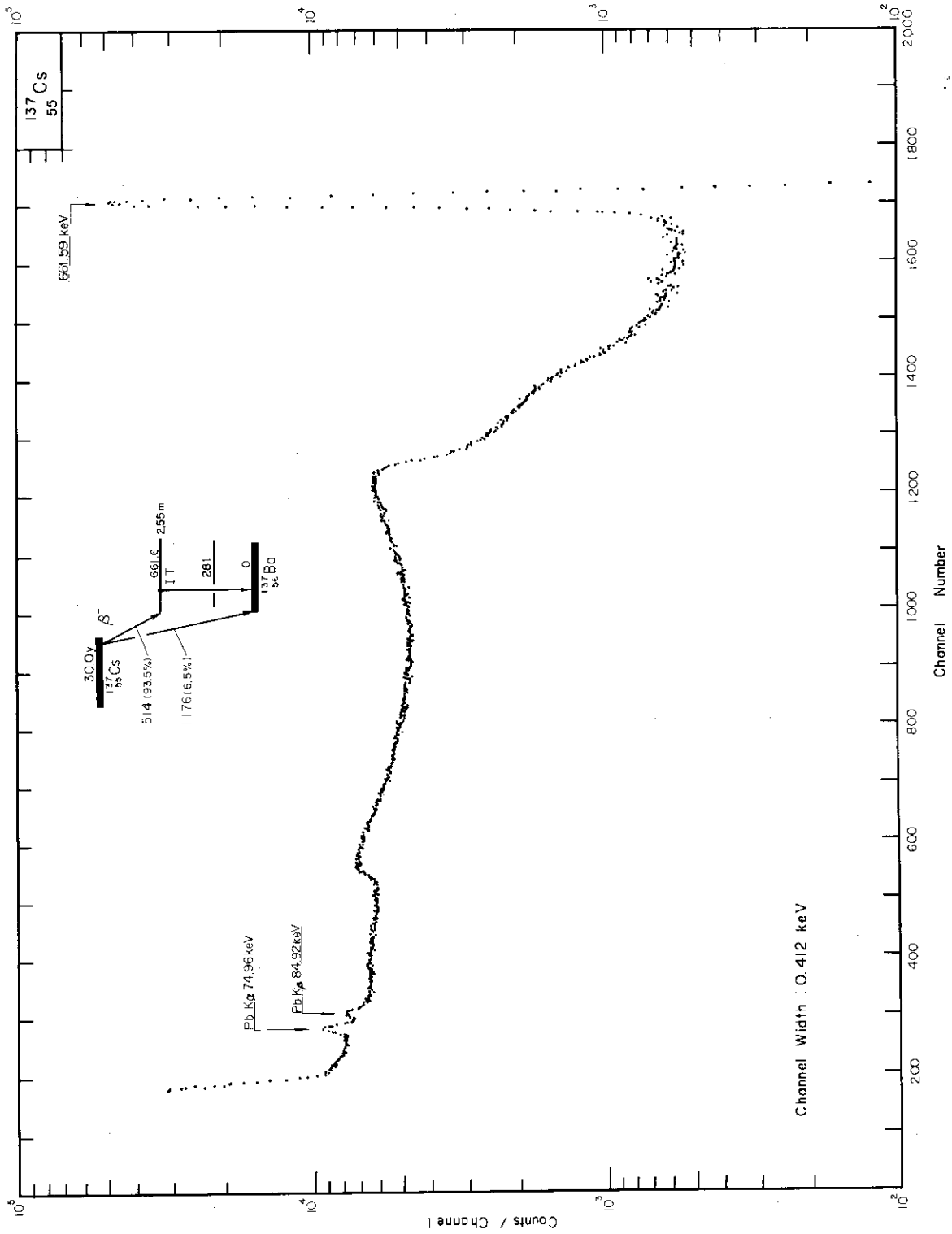

88 Y 39
2734.17keV
Single Escape Peak 2223.164keV
x 100
1836.13keV
Single Escape Peak 1325.154keV
898.04keV
Double Escape Peak 814.118keV
Annihilation 511.006keV
EC, β+
108d
88 39 Y
(92%)
EC (8%)
β+ 580 (0.20%)
2734.4
1836.2
0
88 38 Sr
Channel Width : 1.326 keV
Channel Number
Counts / Channel

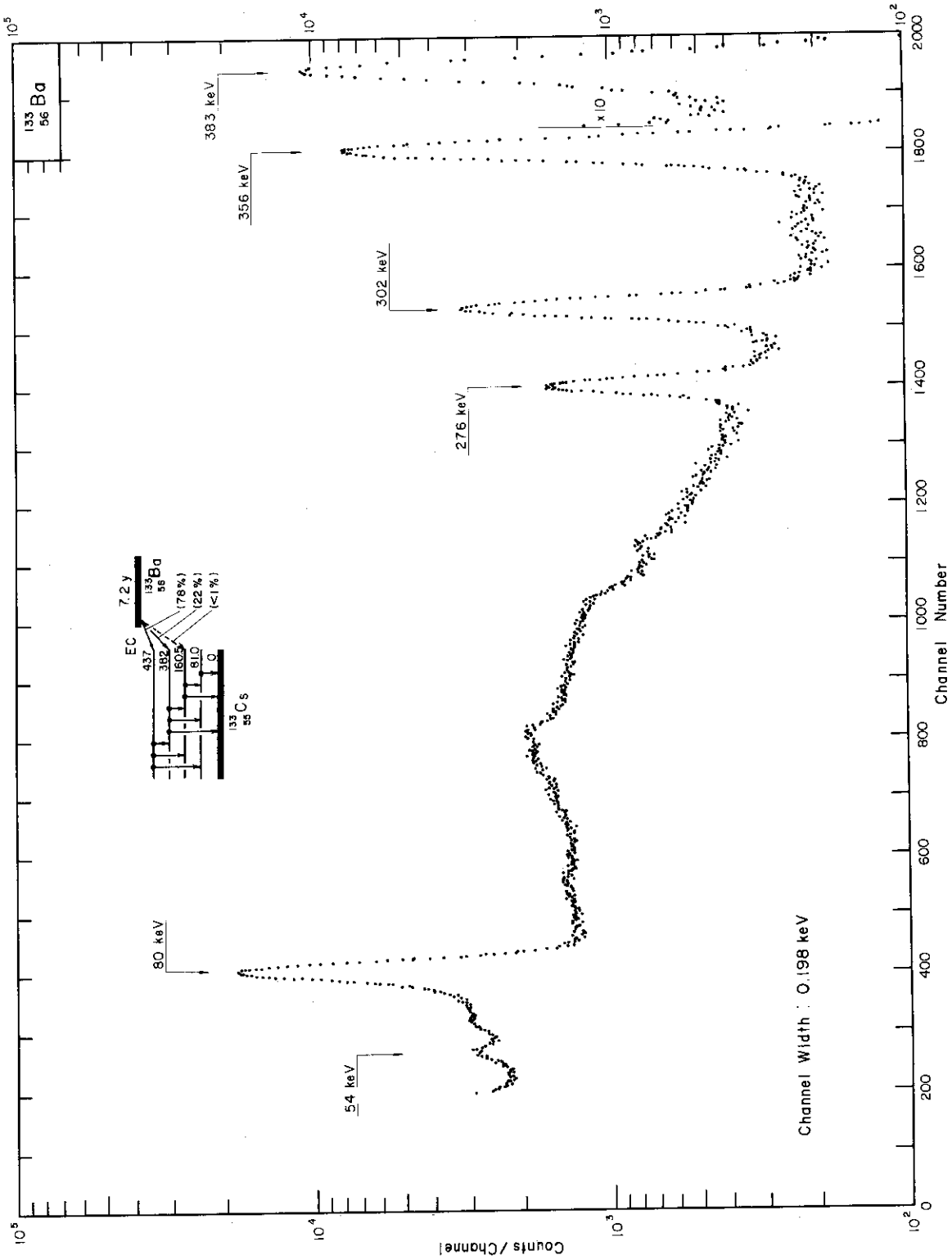

95 40 Zr (95 41 Nb)
95 Nb 764.5keV
95 Zr 754.keV
95 Zr 722keV
65 d
95 40 Zr
360 (49 %)
396 (49 %)
890 (2 %)
90h
35d
95 41 Nb
756
724
235
β⁻
159.7 (100%)
924 (≤0.075%)
765
95 42 Mo
Pb Kα 74.96keV
Pb Kβ 84.92keV
Channel Width : 0.424keV
Counts / Channel
Channel Number

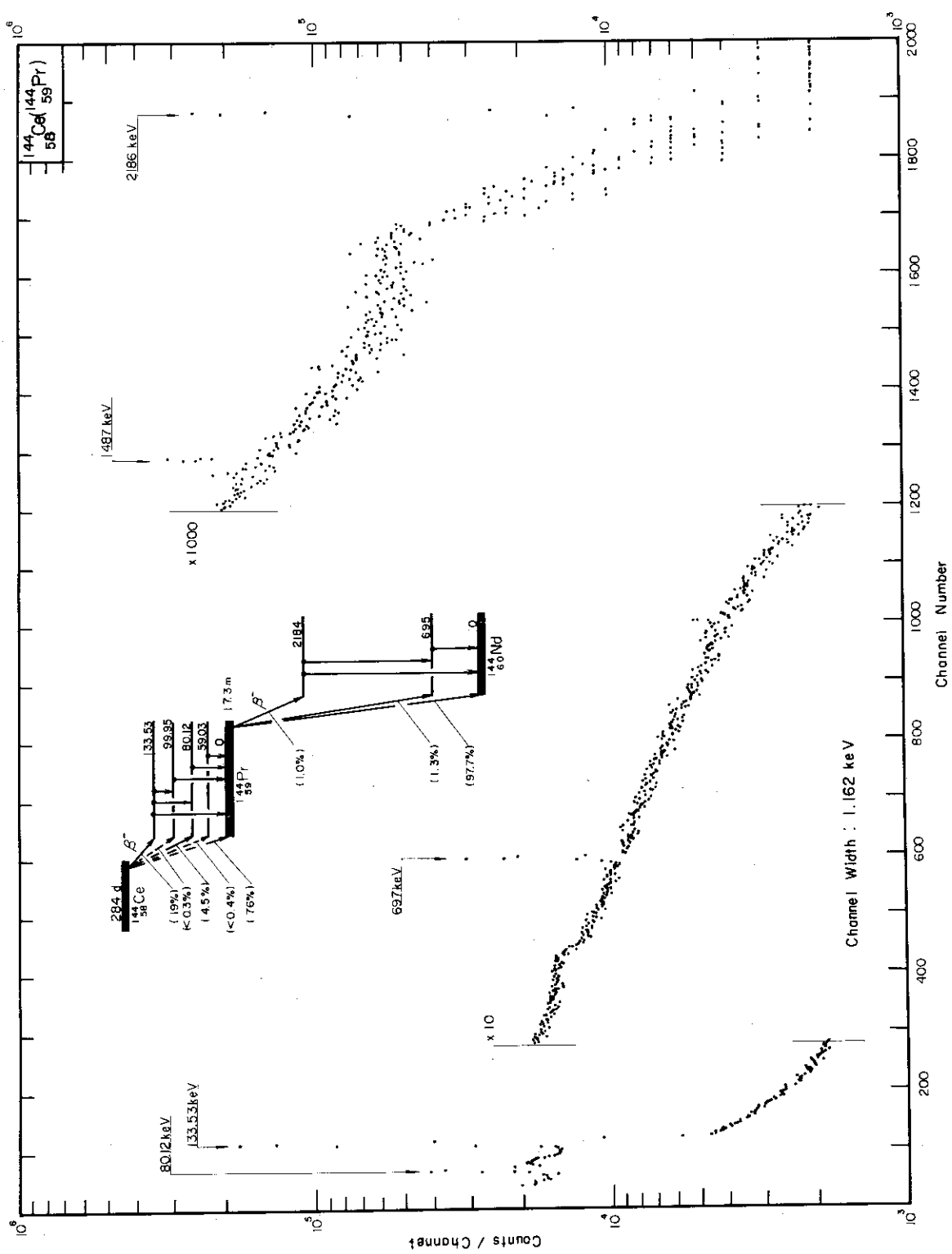

95 41 Nb
35 d
β⁻
765
0
159.7 (100%)
924 ≤ 0.075%
Pb Kα 74.96 keV
Pb Kβ 84.92 keV
765 keV
Channel Width : 0.424 keV
Counts / Channel
Channel Number

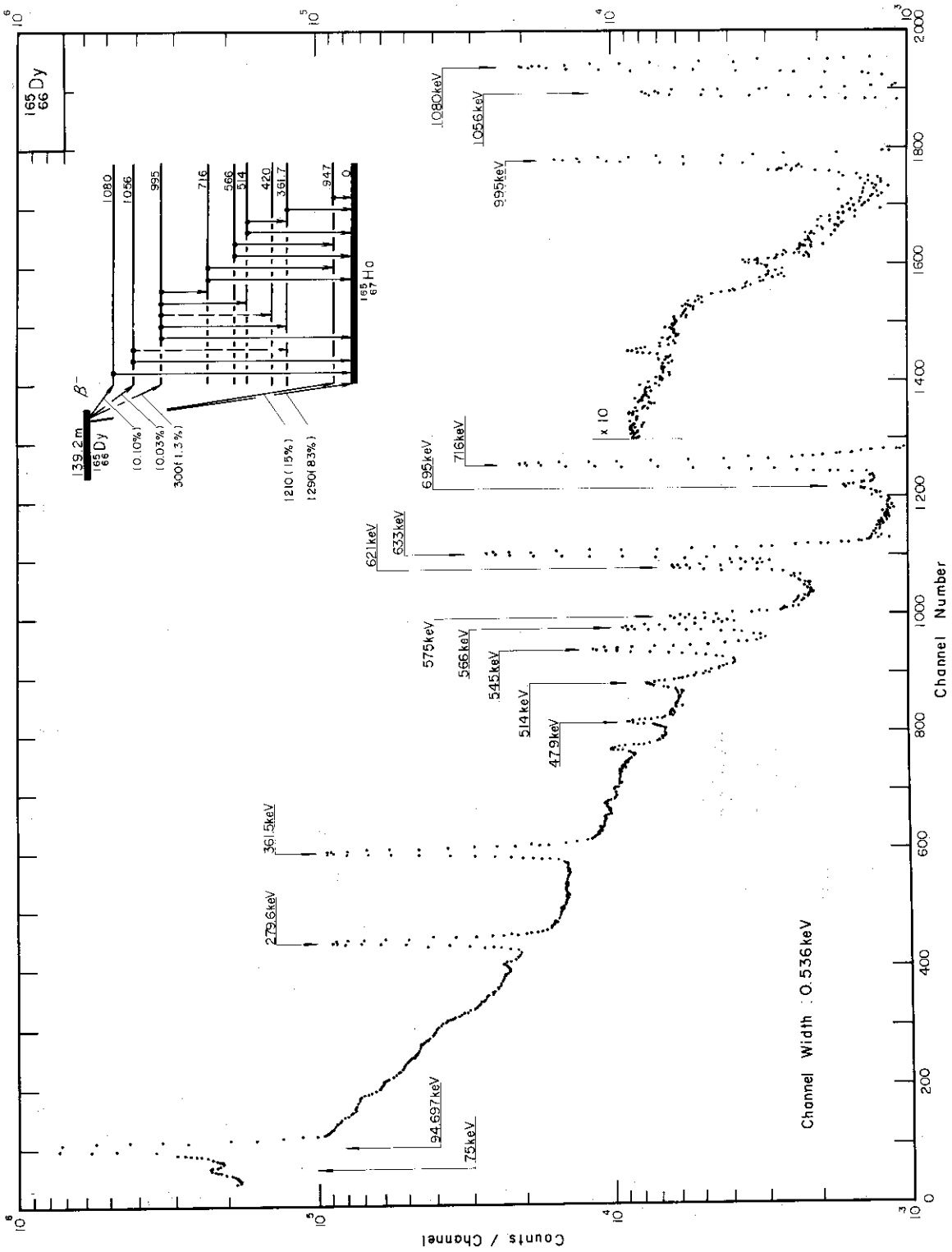

116m In 49
138.32 keV
417.0 keV
818.7 keV
1097.2 keV
1293.3 keV
1508 keV
1753 keV
2111 keV
54 m
116m In 49
β⁻
(1.5%)
(11%)
(40%)
(49%)
600
870
1000
3050
2800
2520
2382
2109
1724
1293.3
0
116 Sn 50
Channel Width : 1.061 keV
Counts / Channel
Channel Number
0
200
400
600
800
1000
1200
1400
1600
1800
2000

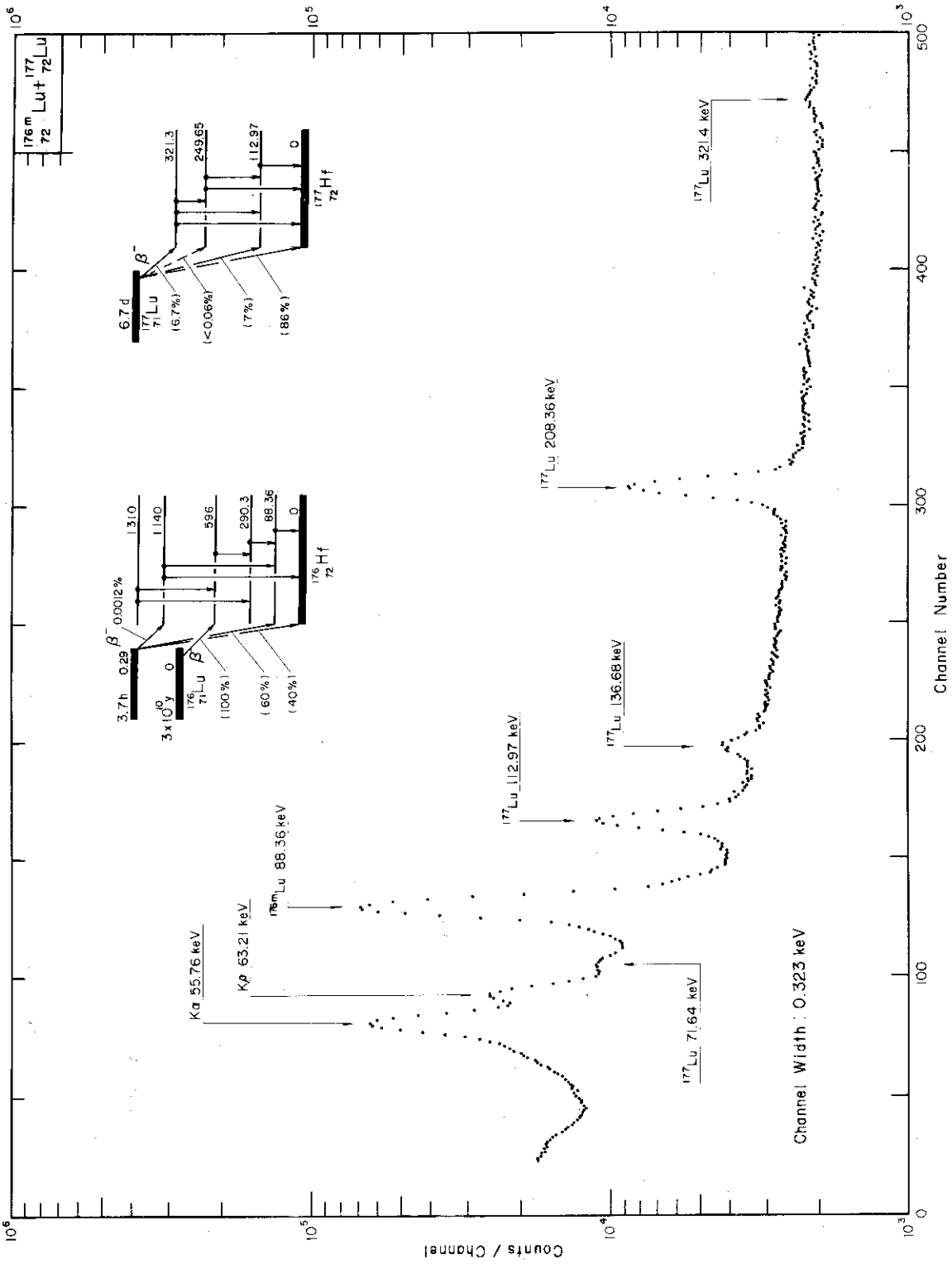

122 51 Sb + 124 51 Sb
2.80d
122 51 Sb
β⁻
EC. (β⁺)
140
0
122 50 Sn
(0.7%)
(4%)
(63%)
EC(2.3%)
β⁺(≈0.008%)
(30%)
1250
564
0
122 52 Te
124 Sb 2088keV
124 Sb 1692keV
122 Sb 1258keV
122 Sb 1137keV
x 100
122 Sb 563keV
124 Sb 603keV
122 Sb 693keV
60 d
124 51 Sb
β⁻
(2%)
(11%)
(50%)
(5%)
(1.5%)
(5%)
(3%)
(22%)
2860
2691
2295
1962
1901
1326
1247
603
0
124 52 Te
124 Sb 644keV
Pb Kα 74.96keV
Pb Kβ 84.92keV
Channel Width: 1.161keV
Counts / Channel
Channel Number

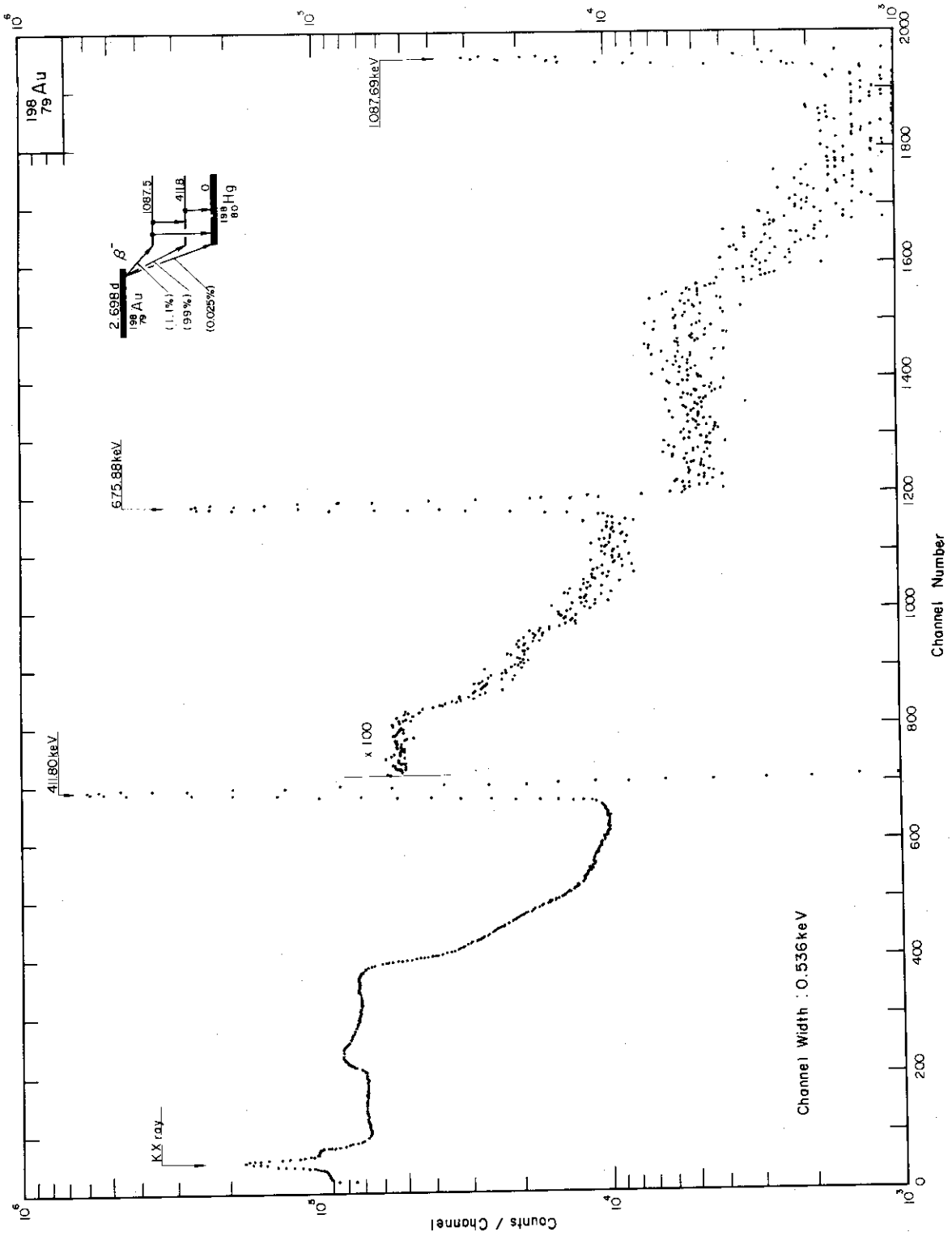

137 Cs
55
661.59 keV
30.0y
137 55 Cs
β⁻
514 (93.5%)
1176 (6.5%)
661.6
2.55m
IT
281
0
137 56 Ba
Pb Kα 74.96keV
Pb Kβ 84.92keV
Channel Width : 0.412 keV
Counts / Channel
Channel Number

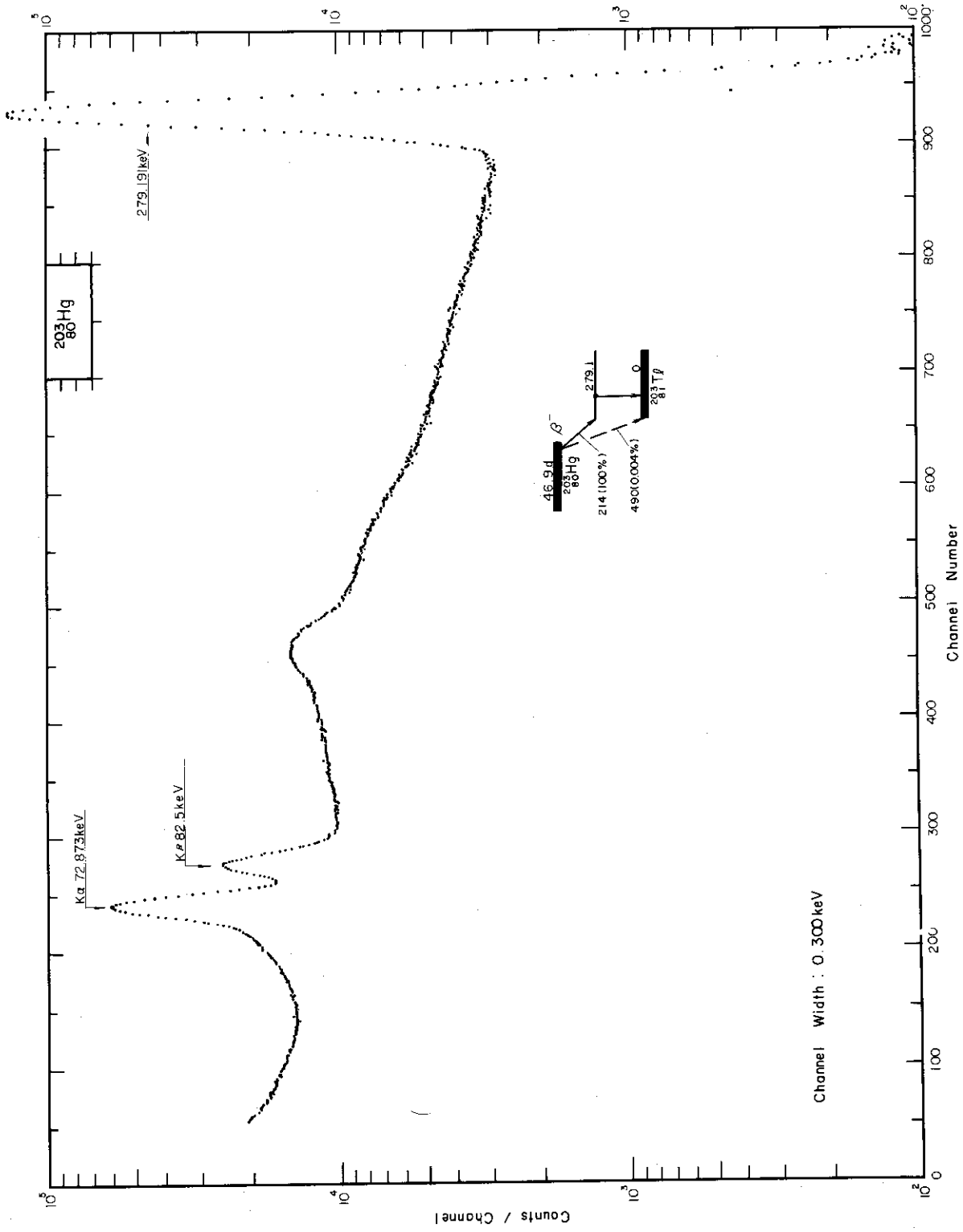

133 56 Ba
383 keV
356 keV
302 keV
276 keV
80 keV
54 keV
x10
7.2 y
133 56 Ba
EC
(78%)
(22%)
(<1%)
437
382
1605
810
0
133 55 Cs
Channel Width : 0.198 keV
Counts / Channel
Channel Number
0
200
400
600
800
1000
1200
1400
1600
1800
2000
10^2
10^3
10^4
10^5

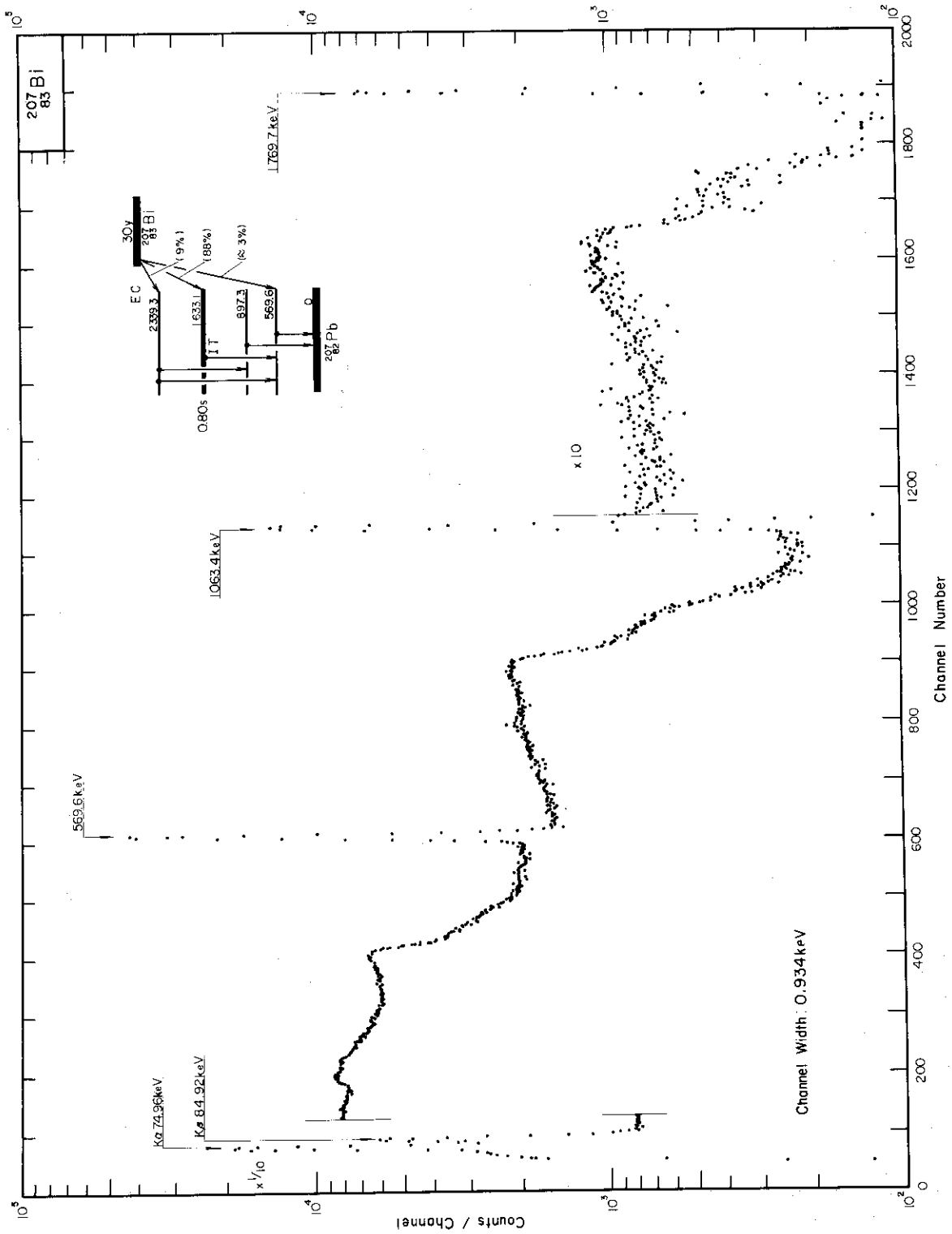

 $^{144}_{58}Ce$ $^{144}_{59}Pr$)
2186 keV
1487 keV
x 1000
2184
695
0
$^{144}_{60}Nd$
17.3 m
β^-
133.53
99.95
80.12
59.03
0
$^{144}_{59}Pr$
(1.0%)
(1.3%)
(97.7%)
284 d
$^{144}_{58}Ce$
(19%)
(<0.3%)
(4.5%)
(<0.4%)
(76%)
697 keV
x 10
133.53 keV
80.12 keV
Channel Width : 1.162 keV
Channel Number
Counts / Channel

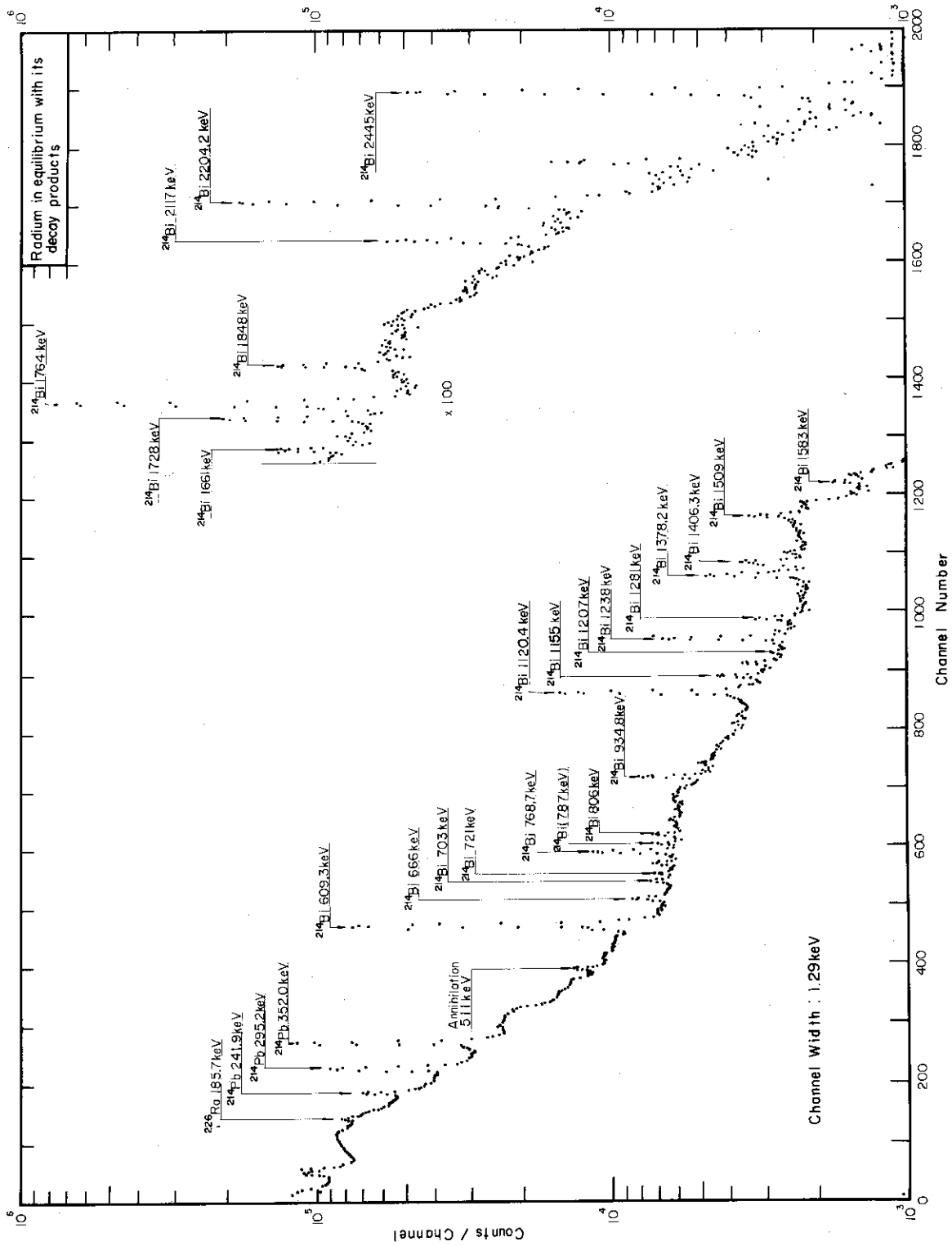

165 66 Dy
139.2m
165 66 Dy
β⁻
(0.10%)
(0.03%)
300(1.3%)
1210(15%)
1290(83%)
1080
1056
995
716
566
514
420
361.7
947
0
165 67 Ho
1080keV
1056keV
995keV
x 10
716keV
695keV
633keV
621keV
575keV
566keV
545keV
514keV
479keV
361.5keV
279.6keV
94.697keV
75keV
Channel Width : 0.536keV
Channel Number
Counts / Channel

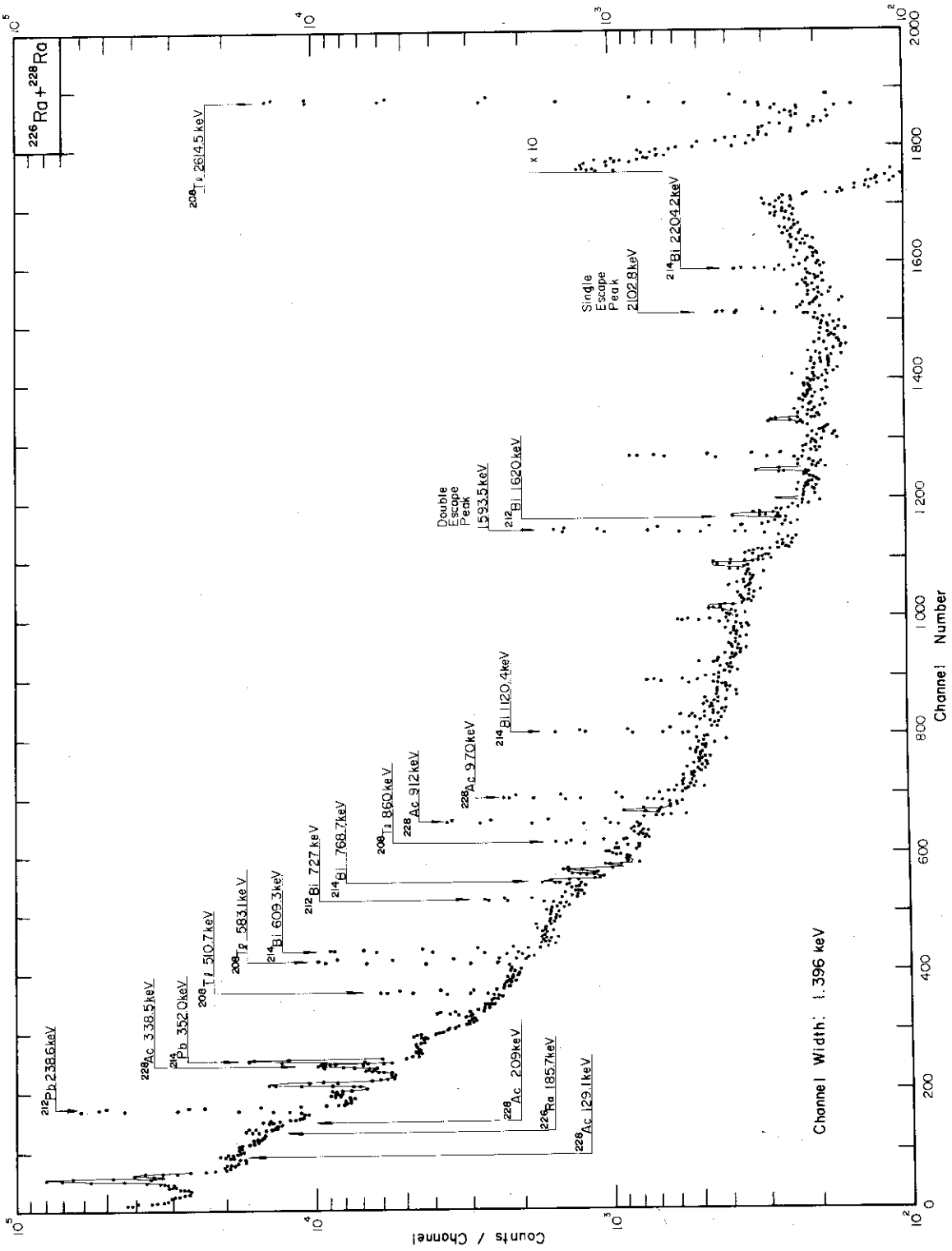

176m 72 Lu+ 177 72 Lu
6.7d
177 71 Lu
β⁻
(6.7%)
(<0.06%)
(7%)
(86%)
321.3
249.65
112.97
0
177 72 Hf
3.7h
0.29
0.0012%
3x10¹⁰y
176 71 Lu
(100%)
(60%)
(40%)
1310
1140
596
290.3
88.36
176 72 Hf
Kα 55.76 keV
Kβ 63.21 keV
176m Lu 88.36 keV
177 Lu 112.97 keV
177 Lu 136.68 keV
177 Lu 208.36 keV
177 Lu 321.4 keV
177 Lu 71.64 keV
Channel Width : 0.323 keV
Counts / Channel
Channel Number
10⁶
10⁵
10⁴
10³
0
100
200
300
400
500


198 79 Au
2.698 d
198 79 Au
β⁻
(1.1%)
(99%)
(0.025%)
1087.5
411.8
0
198 80 Hg
1087.69keV
675.88keV
411.80keV
KX ray
x 100
Channel Width : 0.536keV
Counts / Channel
Channel Number


279.191keV
$^{203}_{80}$Hg
Kα 72.873keV
Kβ 82.5keV
46.9d
$^{203}_{80}$Hg
β^-
279.1
214(100%)
490(0.004%)
0
$^{203}_{81}$Tl
Channel Width : 0.300keV
Counts / Channel
Channel Number


207 83 Bi
30y
207 83 Bi
(9%)
(88%)
(≈ 3%)
EC
2339.3
1633.1
897.3
569.6
IT
0
0.80s
207 82 Pb
1769.7keV
1063.4keV
569.6keV
Kα 74.96keV
Kα 84.92keV
x 1/10
x 10
Counts / Channel
Channel Number
Channel Width: 0.934keV


Radium in equilibrium with its decay products
214Bi 2445keV
214Bi 2204.2 keV
214Bi 2117 keV
214Bi 1848 keV
214Bi 1764 keV
214Bi 1728 keV
214Bi 1661 keV
x 100
214Bi 1583 keV
214Bi 1509 keV
214Bi 1406.3 keV
214Bi 1378.2 keV
214Bi 1281 keV
214Bi 1238 keV
214Bi 1207 keV
214Bi 1155 keV
214Bi 1120.4 keV
214Bi 934.8keV
214Bi 806keV
214Bi 787keV
214Bi 768.7keV
214Bi 721keV
214Bi 703 keV
214Bi 666keV
214Bi 609.3keV
Annihilation 511 keV
214Pb 352.0keV
214Pb 295.2keV
214Pb 241.9keV
226Ra 185.7keV
Channel Width : 1.29keV
Channel Number
Counts / Channel


²²⁶Ra + ²²⁸Ra
²⁰⁸Tl 2614.5 keV
x 10
²¹⁴Bi 2204.2 keV
Single Escape Peak 2102.8 keV
Double Escape Peak 1593.5 keV
²¹²Bi 1620 keV
²¹⁴Bi 1120.4 keV
²²⁸Ac 970 keV
²²⁸Ac 912 keV
²⁰⁸Tl 860 keV
²¹⁴Bi 768.7 keV
²¹²Bi 727 keV
²¹⁴Bi 609.3 keV
²⁰⁸Tl 583.1 keV
²⁰⁸Tl 510.7 keV
²¹⁴Pb 352.0 keV
²²⁸Ac 338.5 keV
²¹²Pb 238.6 keV
²²⁸Ac 209 keV
²²⁶Ra 185.7 keV
²²⁸Ac 129.1 keV
Channel Width: 1.396 keV
Channel Number
Counts / Channel

付録Ⅰ　Ge(Li)検出器の検出効率の光子エネルギー依存性の測定

Ge(Li)検出器を用いて核種の定量を行なうためには，光子エネルギーの関数としてのGe(Li)検出器の検出効率を知っておく必要がある。しかし，i) Ge(Li)検出器の有感体積はNaI(Tl)のようには明確に知ることができず，その形状も複雑であるため，計算によって検出効率を求めることは困難である，ii) 検出器の体積や形状が個々の検出器についてかなり異なるため，かりに計算によって検出効率を求め得たとしても，その適用性には一般性が少ないため，その意義は薄い，などの問題がある。このため，個々の検出器に対して，検出器の効率を実験的に求める方法[2〜15]が一般的に採用されている。Ge(Li)の場合の検出効率は光子を全エネルギー吸収ピーク(full－energy peak，FEP)として検出する効率，full－energy peak efficiency (ε_f) が一般的に用いられている。これの測定のためには，放射能強度が既知の線源，したがって原子核の壊変あたりにエネルギーEの光子が放出される割合(放出率)がわかっているが故にその線源から放出される光子数 $N_\gamma(E)$〔γ／sec〕が既知の線源が用いられる。各種の光子エネルギーを有するこのような線源を用いたγ線パルス波高分布からFEPとして測定した計数率$N_p(E)$〔cps〕を求め，$\varepsilon_f(E)$〔$=N_p(E)/N_\gamma(E)$〕が得られる。特定の線源－検出器の幾何的条件のもとで$\varepsilon_f(E)$を測定しておけば，その条件下での核種の定量は容易に行なえる。一方，幾何的効率を考慮に入れ，Ge(Li)に入射した光子あたりにFEPとして検出する効率，intrinsic full－energy peak efficiencyの測定も行なわれている。[6,11]

放射能強度が未知の場合でも，光子の放出率がわかっていれば，種々のエネルギーの光子を放出する単一の核種の測定により，またはたがいに重複しているエネルギー範囲の光子を放出する複数の核種の測定結果を規格化することにより，光子エネルギーの関数としての相対的な検出効率(relative full－energy peak efficiency)を求めることができる。これを用いて核種の定量を行なうには特定エネルギーの検出効率を標準線源を用いて較正する必要がある。

Ⅰ－1　標準線源を用いたfull－energy peak efficiencyの測定

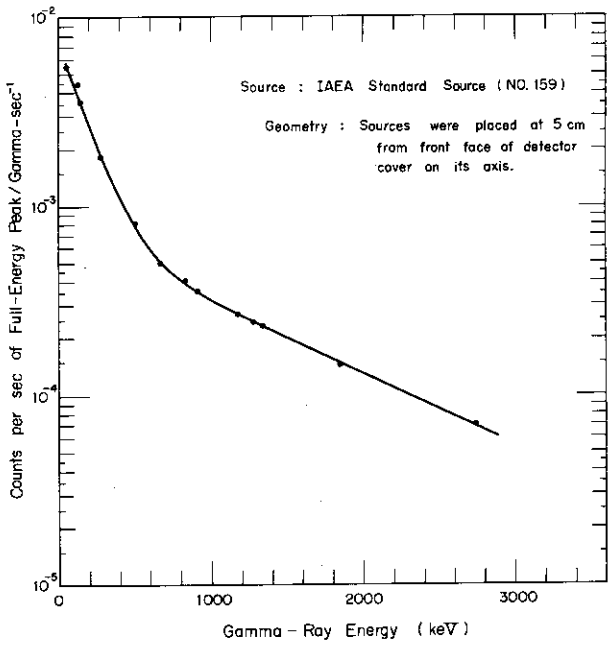
標準線源を用いた$\varepsilon_f(E)$〔cps of FEP／$\gamma\cdot sec^{-1}$〕の測定を一定の線源－幾何的条件下で行なった。線源としては第1表に示すIAEAの標準線源を用いた。計算に必要な諸定数は第1表に示すIAEAの勧告値(11－16－1970)を用いた。

線源(直径20㎜の円板状)はその軸をGe(Li)の軸と共有して検出器入射窓の前方50㎜の位置に窓面に平行に配置された。

測定結果を第2表および第Ⅰ－1図に示す。

第1表　IAEA標準線源

核　種	半　減　期	光子エネルギー (keV)	放　出　率 (%)	測定時放射能 (μCi)
^{88}Y	107.4 ±0.8日	898.04 1836.13 2734.17	91.4 99.4 0.62	8.44
^{54}Mn	312.6 ±0.3日	834.81	100	9.39
^{203}Hg	46.8 ±0.2日	279.19	81.55	11.179
^{57}Co	271.6 ±0.5日	121.97 136.33	86.0 11.4	9.72
^{22}Na	2.602± 0.005年	511.006 1274.55	181.1 99.95	10.08
^{60}Co	5.275± 0.005年	1173.23 1332.49	99.87 99.999	10.46
^{137}Cs	29.90± 0.005年	661.635	85.1	10.32
^{241}Am	432.9年	59.543	35.9	10.70



第I－1図　Ge(Li)検出器のfull－energy peak efficiency (cps of FEP／γ・sec^{-1})の光子エネルギー依存性

線源―検出器間距離；50 mm

線源；IAEA標準線源

第2表　Full－energy peak efficiency の測定結果（線源－検出器間距離：50㎜）

光子エネルギー keV	Full－energy peak efficiency (cps of FEP／γ・sec^{-1})	Relative value (661 keVの値を1)
59.5	0.005380	10.627
121.9	0.004484	8.8582
136.3	0.003593	7.0980
279.1	0.001847	3.6488
511.0	0.0008250	1.6298
661.6	0.0005062	1.0000
834.8	0.0004054	0.8009
898.0	0.0003534	0.6981
1173.2	0.0002682	0.5298
1274.5	0.0002465	0.4870
1332.4	0.0002327	0.4597
1836.1	0.0001479	0.2922
2734.1	0.00007014	0.1386

Ⅰ－2　^{226}Raを用いた relative full－energy peak efficiency の測定

放射平衡に達している^{226}Ra線源を用いその娘核から放出される種々なエネルギーの光子を利用して，Ge(Li)の relative full－energy peak efficiencyの測定を簡便に行なうことができる。[6,12] 放射平衡に達した^{226}Raから放出される代表的な光子とその放出率を測定結果とともに第3表に示す。

第Ⅰ－2図に示されているのはRa線源を用いた場合と標準線源を用いた場合のそれぞれについて得られた relative full－energy peak efficiency を661 keV（^{137}Cs）に対する効率を1として表わしたものである。

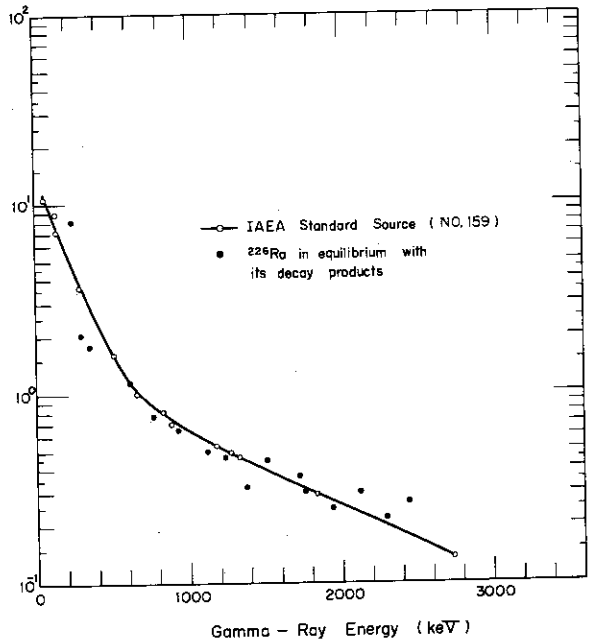
Ra線源を用いた場合は，その放射能強度が約5mgと大きなため，線源は検出器前方1.5㎡の位置に置かれた。

したがってこの際の幾何的条件は，検出器前方50㎜の位置に置いた標準線源を用いた場合の幾何的条件とは異っている。

第Ⅰ－2図に示されている各種標準線源を別々に測定して得た結果とRa線源で得た結果を比較すれば，前者の方法が優れていることが明らかである。両者とも十分な統計精度が得られる計数値を蓄積したにもかかわらず，Ra線源を用いた方の測定点のばらつきが大きくなる原因としては，ⅰ）多種のエネルギーの光子を同時に測定する結果として，低エネルギー光子の full－energy peak は高エネルギー光子のコンプトン・スペクトルの影響を標準線源の場合より多く受け，full－ energy peak の計数値の統計精度が悪くなる，ⅱ）Ra線源の光子放出率の精度は標準線源のそれら程には高くない，ⅲ）Ra線源を封入した白金－イリジウム容器による低エネルギー光子の吸収や散乱の影響が存在する，などの理由が考えられる。

第3表　放射平衡の^{226}Ra線源から放出される代表的な光子に対するrelative full－energy peak efficiency

光子エネルギー (keV)	放　出　率[16] (%)	FEPの計数値／放出率	Relative full－energy peak efficiency (661keVの値を1)
185.7	4.0	1443150	1.977
241.9	10.5	5952095	8.154
295.2	18.9	1506873	2.064
352.0	37.7	1316217	1.803
609.3	47.1	828248	1.134
768.7	5.3	550320	0.754
934.8	3.3	480030	0.658
1120.4	16.6	362572	0.497
1238	6.0	402416	0.551
1378.2	4.8	341458	0.468
1509	2.4	234875	0.322
1728	2.4	325500	0.446
1764	16.3	267392	0.366
1848	2.3	220688	0.302
2117	1.4	179500	0.246
2204.2	5.2	217403	0.298
2292.5	0.4	160000	0.219
2445	1.6	193625	0.265



第I－2図
Ge(Li)検出器のrelative full－energy peak efficiencyの光子エネルギー依存性
（Ra線源を用いた場合と標準線源を用いた場合の比較，661keVに対する効率を1とした）

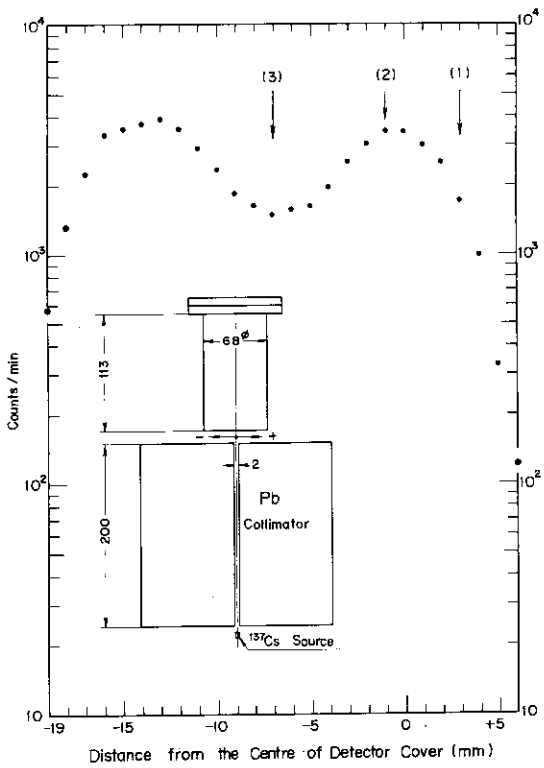
付録Ⅱ　集束したγ線によるGe(Li)上のスキャンニング

集束したγ線をGe(Li)に入射させてGe(Li)上の各位置における検出器信号を測定すれば，真空容器内でのGe(Li)の位置やi層の直径，厚さおよび長さ，など検出器の構造や計測上必要な知見が得られる。

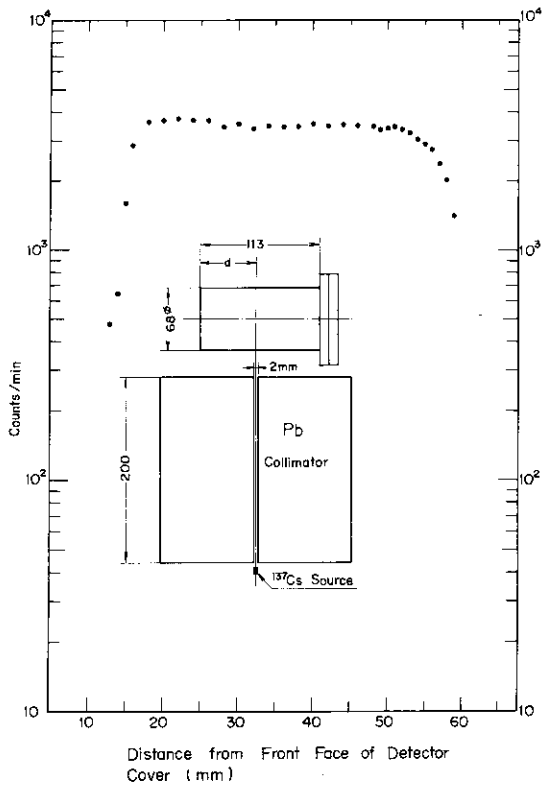
ここでは約10mCiの^{137}Cs線源と2㎜角の穴を有する鉛製のコリメータを用い，Ge(Li)の半径および軸方向のスキャンニングを行ない，各位置におけるfull－energy peakのパルスをシングル・チャンネル・アナライザーで選別して計数した。

第Ⅱ－1図に真空容器窓面の中心を通る半径方向のスキャンニングの測定結果を示す。同図から，ⅰ）Ge(Li)の中心は容器の中心より約6.5㎜向って左にずれた状態でマウントされている，ⅱ）Ge(Li)の中心からi層の中間までの半径は5.5㎜である，ⅲ）i層の厚さは約10㎜である，などが明らかである。

第Ⅱ－2図に真空容器窓面を起点として，軸方向にスキャンニングを行なった際の測定結果を示す。同図から，ⅰ）Ge(Li)のi層（有感部）は窓面の後方15㎜（計数率が定常値の$^1/_2$になる位置）からはじまっている。



第Ⅱ－1図　Ge(Li)の半径方向のスキャンニングによる測定



第Ⅱ－2図　Ge(Li)の軸方向のスキャンニングによる測定

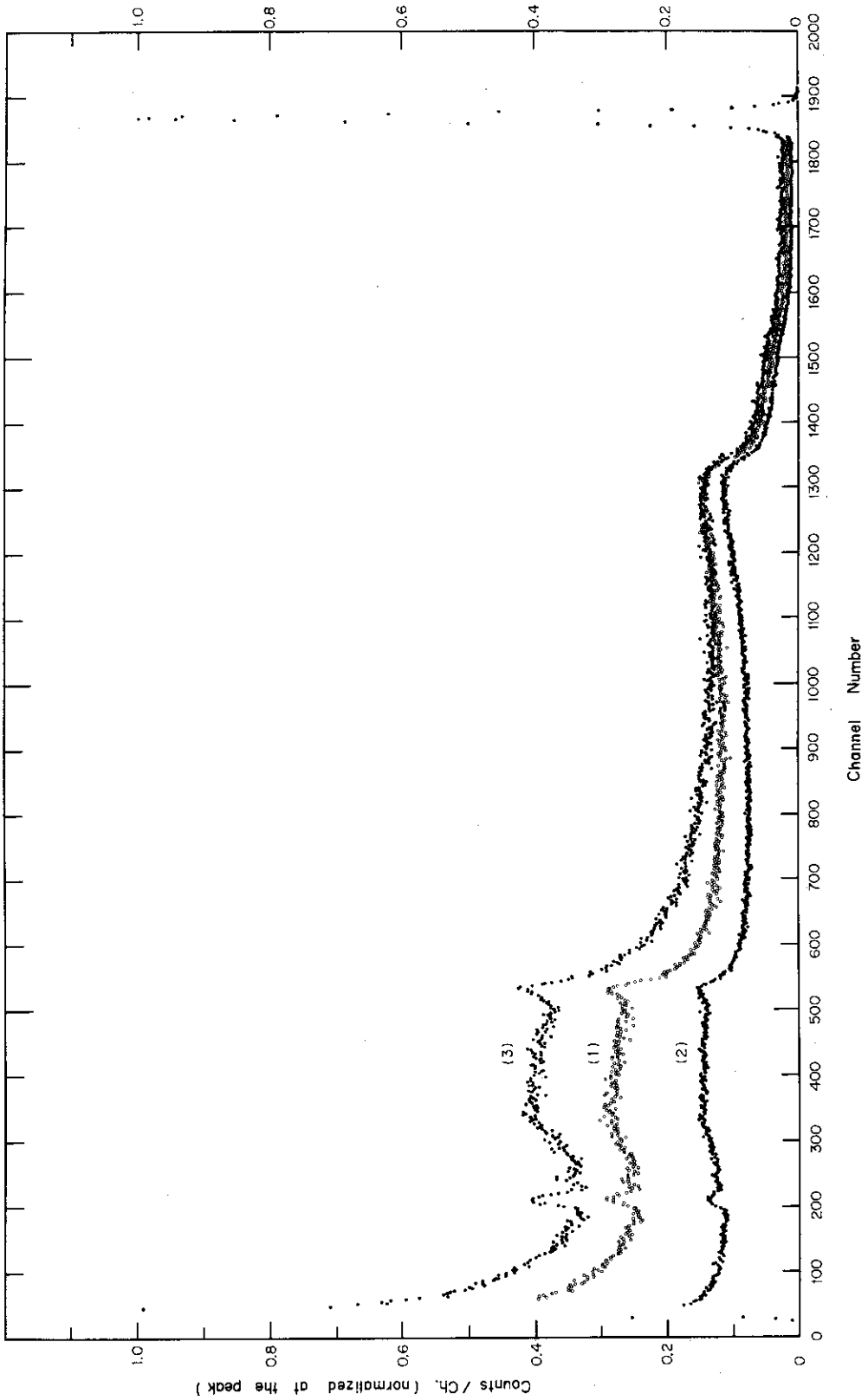
ii） i層（有感部）の長さは44 ㎜である，などが明らかである。

一方，γ線がGe(Li)に入射した位置とγ線パルス波高分布の関係を測定した結果の一例を第Ⅱ－3図に示す。

同図に示したものは半径方向のスキャンニングを行なった際に得られたものであり，入射位置は第Ⅱ－1図に番号で示した位置を代表として選んだ。第Ⅱ－3図の各パルス波高分布に付記された番号は第Ⅱ－1図に示したγ線の入射位置に対応するものである。各パルス波高分布はその全エネルギー吸収ピークの最も高い計数値を1とした相対的分布としてプロットされている。

第Ⅱ－3図から明らかなように，コンプトン・スペクトルはγ線がi層の中間に入射したとき最も低く，中心（p層）に入射したときに最も高く測定されている。この結果をpeak－to－total ratioで入射位置（2）の値を1として表わせば，入射位置（1）および（3）の値はそれぞれ0.74，0.74となる。このことを第Ⅱ－3図の結果とともに考えれば，p層およびn層ともコンプトン・スペクトルに大きな影響を与え，後側方散乱については特にp層が顕著な影響を与えることがわかる。

またエネルギー分解能も，入射位置（1）および（3）に対応するものは（2）の値に比較してFWHMでそれぞれ0.15，0.8 keV悪くなっていることが明らかになった。



第Ⅱ－3図　Ge(Li)上のγ線入射位置によるパルス波高分布の変化
（ピークの計数値に対する相対分布）
入射位置：(1) n層側，(2) i層の中間，(3) p層
〔Ge(Li)の中心〕

付録Ⅲ　水素の捕獲γ線および励起状態の^{12}Cからのγ線の測定

Am－BeやPu－Be のように（α，n）反応を利用した中性子源は中性子測定装置の点検などによく用いられる。

このような中性子源を水やパラフィンのような水素を含んだ減速材中においた場合，次に示す関係によって高いエネルギーを有する水素の捕獲γ線と励起状態の^{12}C からのγ線が顕著に観測される。

水素の捕獲γ線：　$^{1}_{1}H + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{2}_{1}H + \hbar\nu$（2225.5±1.5 keV [17]）

^{12}C γ線：　$^{9}_{4}Be + ^{4}_{2}He \rightarrow ^{13*}_{6}C$

$^{13*}_{6}C \rightarrow ^{1}_{0}n + ^{12*}_{6}C$

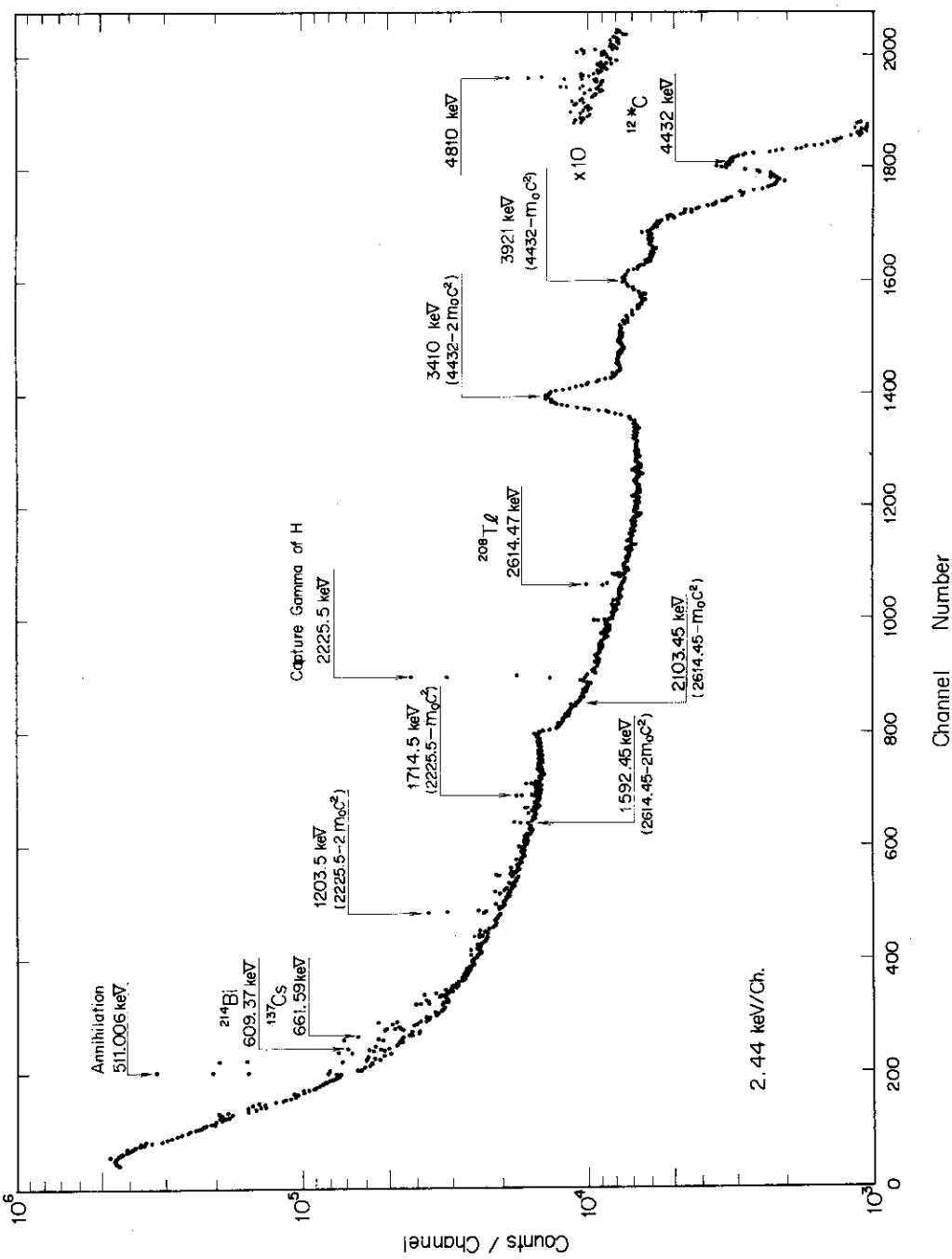
$^{12*}_{6}C \rightarrow ^{12}_{4}C + \hbar\nu$（4.432±0.010MeV [18]）

これらのγ線，とくに水素の捕獲γ線はγ線スペクトロメーターのエネルギー較正に用いられることがある。

ここでは100mCiのAm－Be（α，n）^{12}C中性子源をパラフィン中に置いてγ線スペクトルの測定を行ない，その結果を第Ⅲ－1図に示す。

第Ⅲ－1図から明らかなように，2225keV の水素の捕獲γ線，4432keV の^{12*}C からのγ線がそれぞれのsingle escape peakおよびdouble escape peak とともに明瞭に測定されている。4432keV のγ線およびそれに起因するピークが他のピークに比べて比常に大きなエネルギー的ひろがりをもつのは，^{12*}C が高速で運動する原子核であるため，それから放出されたγ線がドップラー効果を受けるからである。このγ線エネルギーのDoppler broadeningは^{13*}Cが中性子を放出したとき受ける反跳および^{9}Be原子核がα粒子を吸収することによって起る^{13*}C の高速運動に基因している。[19]

第Ⅲ－1図には上記以外のγ線も多数測定されているが，これらは^{137}Cs に代表されるように^{241}Amを使用済燃料から分離した際に不純物として混入した核分裂生成物，ウラン系列（^{214}Biなど）やトリウム系列（^{208}Tlなど）に属する核種による自然放射能および種々の物質の捕獲γ線によるものであると考えられる。



第Ⅲ－1図　Ge(Li)検出器による水素の捕獲γ線および励起状態の^{12}Cからのγ線のパルス波高分布

参　考　文　献

1) C.M. Ledere, J. M. Hollander and I. Perlman, "Table of Isotopes", (1967)
2) G. T. Ewan and A. J. Tavendale, Can. J. Phys., **42**, 2286 (1964)
3) J. M. Freeman and J. G. Jenkin, Nucl. Instr. and Meth., **43**, 269 (1966)
4) D. P. Donnelly, H. W. Baer, J. J. Reidy and M. L. Wiedenbeck, Nucl. Instr. and Meth., **57**, 219 (1967)
5) W. R. Kane and M. A. Mariscotti, Nucl. Instr. and Meth., **56**, 189 (1967)
6) G. Walford and C. E. Doust, Nucl. Instr. and Meth., **62**, 353 (1968)
7) D. P. Donnely and M. L. Wiedenbeck, Nucl. Instr. and Meth., **64** , 26 (1968).
8) P. H. Baker and R. G. Conner, Nucl. Instr. and Meth., **57** , 147 (1967)
9) G. V. Walford and C. E. Doust, Nucl. Instr. and Meth., **67** , 272 (1969)
10) P. Mukherjee and A. K. Senguta, Nucl. Instr. and Meth., **68**, 165 (1969)
11) R. A. Mowatt, Nucl. Instr. and Meth., **70** , 237 (1969)
12) G. Wallece and G. E. Goote, Nucl. Instr. and Meth., **74** , 353 (1969)
13) G. Aubin, J. Barrette, G. Lamoureux and S. Monaro, Nucl. Instr. and Meth., **76** , 85 (1969)
14) T. S. Nagpal and R. E. Gaucher, Nucl. Instr. and Meth., **89** , 311 (1970)
15) R. J. Gehrke, J. E. Cline and R. L. Heath, Nucl. Instr. and Meth., **91** , 349 (1971)
16) B. S. Dželepow, N. N. Zhukovsky, S. A. Shestopalova and I. F. Uchevatkin, Nucl. Phys., **8** , 250 (1958)
17) A. H. Kazi, N. C. Rasmussen and H. Mark, Phys. Rev., **123** , 1310 (1961)
18) T. Lauritsen and F. Ajzenberg-Selove, Rev. Mod. Phys., **27** , 77 (1955)
19) T. Tojo, J. Nucl. Sci. and Technol., **8** , 48 (1971)