

ORELAでの測定研究

原 研 水 本 元 治

1. はじめに

1年9ヶ月(1976年9月~1978年6月)の間米国テネシー州にあるオークリッジ国立研究所のリニアック(ORELA)に留学する機会を得た。リニアックは1969年に稼働を始めて以来、中性子に関する核データ測定分野で貴重なデータを提供し続けている。その活動については豊富な文献⁽¹⁾を通してすでに多くの方々がご存知のことと思われるので、ここでは私が直接たずさわった仕事を紹介するとともに、幸いじかに接することが出来た研究の様子がいくらかでも報告出来れば幸いである。

2. 研究の様子

リニアックは物理部と中性子物理部の2つの部によって共同で利用されていて、研究者の人数は私がいた当時(1977年)、物理部9人、中性子物理部13人、他に測定器や計算機の専門家、リニアックの改造保守にたずさわる人等をあわせると全部で50人近くの人が働いており、その他にもロスアラモス等の国立研究所、大学からの研究者が常時数人づつ滞在していた。私が属した物理部は、J.A. Harvey氏を中心とした全断面積、散乱断面積を測定するグループ、R.L. Macklin氏の捕獲断面積の測定グループ、S. Raman, G.G. Slaughter氏の捕獲 γ 線スペクトルの測定グループがある他、J.W.T. Dabbs氏等のアクチナイド元素の分裂断面積の測定が行われていた。さらには中性子物理部でもR.W. Peelle氏をリーダーに、応用により主眼を置いてほぼ同様の実験を行っており、互いに緊密に連絡し合って測定を行っていた。表1と2にリニアックにある各飛行管の利用の様子と最近の構成人員を示した。これはもちろん一時的なものであってテーマの選択は流動的である。物理部では経験豊かな人が多く(平均年齢55才以上、ちなみに研究所の停年は65才)、特に印象的であったのは、その人達が率先して現場で働いていたことであった。(グループリーダーのHarveyさんがワイシャツの腕をまくり上げて駆けまわっているのはその最たるものである。)

研究所全体としていわゆるバックアップの体制が実によくとのつていて、実験者自身がこまかいエレクトロニクスの心配等はする必要がなく、又論文用の図なども簡単な指示だけでみごとなものを作成してくれる。データ収集用にはSEL810 Bという高速のディスクを持った計算

機が3台あり、解析用には中形計算機PDP-10が置かれていた。

この計算機には、6ヶのCRTディスプレイを含めて10個近くの端末がリニアックの建屋内に付置されており、解析の能率を上げるために最大限の努力がはらわれていた。

3. 携わった研究の内容

リニアックで私が行ったのは、主に中性子捕獲断面積の研究であった。仕事は以下の3つに分けることが出来る。(1) $^{207}\text{Pb}(n, \gamma)$ 反応の研究 (2) ^{159}Tb 捕獲断面積の測定 (3) ^{206}Pb 中性子反応の測定、(1)では主にMacklin氏の捕獲 γ 線測定装置 G_6F_6 検出器を用いた共鳴単位解析の様子、(2)では同測定器を用いた100 keV領域における平均捕獲断面積の測定と解析 (3)では $\text{Ge}(\text{Li})$ 検出器を用いて共鳴単位から放出される γ 線スペクトルの測定、又 ^6Li ガラス検出器を用いた全断面積測定の様子を述べてみたい。

3.1 $^{207}\text{Pb}(n, \gamma)$ 反応の研究^{(2)~(4)}

まず全体の共鳴の様子を図1で見てください。1 MeV 迄に約250個の共鳴単位がある。570 keV 以上には非弾性散乱による γ 線があって実際には共鳴単位はづつと混んだものとなるが、この γ 線は検出器のバイアスを570 keV 以上にすることによってこの図では落とされている。図はすでに実効断面積になおされていて、これを求める以前に、バックグラウンドの差し引き、検出器の検出効率、中性子束による規格化等、各段階のデータ処理が個別になされている。これらのいわばきまりきった手順についての処理プログラムは、非常によく整備されていて、特別な問題が発生しない限り測定終了後一週間以内くらいで実効断面積の値が求まるしくみになっている。この後この一本一本の共鳴について、その共鳴パラメーター $\left(\frac{g\Gamma_n\Gamma_\gamma}{\Gamma}$ の値を求める。解析はブライトウィグナーの一単位公式を用いて行い、エネルギー分解能やドブラー効果による共鳴の巾の広がりや考慮し、さらにサンプルの厚みによる効果(共鳴遮蔽、多重散乱)などを含めた形で最小2乗法で共鳴の形をあわせる訳である。先に述べた大きな磁気ディスクとライトペン付のCRTディスプレイを大いに駆使しても、これはかなり時間を要する作業であった。 ^{208}Pb は陽子、中性子共に魔法の数を持った原子核であって、磁気双極子(M1)巨大共鳴単位が中性子の結合エネルギー付近(7~8 MeV)にあることが予見されていた。この単位はp-波中性子によって励起される $J^\pi = 1^+$ の単位であり、 ^{208}Pb の基底状態($J^\pi = 0^+$)へ直接M1の γ 線を放出して遷移する。中性子捕獲の逆過程である、光中性子反応($^{208}\text{Pb}(\gamma, n)^{207}\text{Pb}$)で、大きな Γ_γ を持った 1^+ の単位が報告されていたが、我々の仕事で新たに 1^+ の共鳴単位を発見すると共に、いくつかの(γ, n)反応で報告されている 1^+ の単位に疑問が投げかけられた。(このあたりの事情は参考文献4

に詳しく述べられている)さらには 36Co の 2^+ の共鳴準位に関しては(図2参照)電子四極子($E2$)放射による γ 線の強度が求められた。中性子の共鳴準位からの $E2$ 放射の観測例はいままできわめて少なかった。

O R E L Aの優れた中性子エネルギー分解能を示す例として、図3に 600keV 近傍のいくつかの共鳴準位の様子を示す。上からそれぞれ 40m 、 200m 、 150m の飛行管を用いた、三種類の測定系 C_6F_6 、NE 110(プラスチックシンチレーター)、大型液体シンチレーション検出器によって測定されたものである。以前は上図の2つの共鳴を分離することすら大変な仕事であった。すぐれたエネルギー分解能の必要性を示す例である。各準位の J^π の値はこのデータに加えて 200m における散乱の実験をもとに多準位のR行列理論によってデータを解析して得られたものである。

3.2 ^{159}Tb 捕獲断面積の測定

図4に ^{159}Tb の複合核状態からの γ 線スペクトルにいわゆる重み関数を掛けたものを示す。この曲線から平均の γ 線のエネルギーを求めることが出来る。捕獲断面積を求める際もこの同じ重み関数を用いて、 γ 線のパルスハイトを観測し、それに相当して重みのかかった形での飛行時間スペクトルを記録する。ついでながら一回の実験に使用する磁気ディスク上の容量は、平均として、捕獲断面積測定で約 200K 語、全断面積で 500K 語といったところであろうか。図5は 2.5 から 3.5keV 迄の共鳴解析の例であり、実験点と解析の曲線が同時に描かれている。解析のプログラムでは1度に15個の共鳴準位を合わせることが出来るが、準位の混み具合からいってもこれが共鳴解析の上限といったところかもしれない。図6に平均断面積の求められた結果を示す。全体としての断面積の誤差は $3\sim 10\%$ であった。低い領域($<20\text{keV}$)での我々の値が既存のデータより 30% 近くも低めにしていることが解る。このデータを解析することによって、 p -波、 d -波の中性子強度関数(s -波については全断面積測定からの値を用いた。)、 Γ_γ/D 、及び非弾性散乱の効果が求められている。各部分波による成分が同時に図示してある。

3.3 ^{206}Pb 中性子反応の断面積測定⁽⁶⁾

keV 領域の個々の共鳴準位からの捕獲 γ 線スペクトルの測定は、不十分な中性子強度とエネルギー分解能のため非常に難かしいものである。図7に ^{206}Pb のいくつかの低いエネルギーの共鳴からの Ge(Li) 検出器によって観測された γ -線スペクトルを示す。 ^{206}Pb の共鳴準位からの γ 線の本数は ^{207}Pb の場合と同様に非常に少なく、1ないし2本、多くても5本以上になることはない。比較的強い強度を持った γ 線を、双極子放射($E1$ 又は $M1$)であ

るとする仮定から、いくつかの共鳴準位のスピンを決定することが出来る。例えば一番上の図 3, 37 keV の共鳴準位は ^{207}Pb の第 1 励起状態 $5/2^+$ 570 keV への γ 線 ($E_\gamma = 6171$ keV) を出して崩壊することから p-波による共鳴準位 $3/2^-$ 状態であることが決められる。(s-波による $1/2^+$ 状態 又はもう 1 つの p-波による $1/2^-$ 状態からでは, E1 又は M1 ではこの状態 $5/2^-$ には γ 線を放出出来ない)。さらに我々は中性子エネルギー 50 keV 以下の領域において, 全断面積, 捕獲断面積を測定して今迄不十分であった共鳴パラメーターのより正確な値を求めた。図 8 に捕獲断面積と全断面積(中性子透過法による)測定の結果を同じエネルギーで作図したものである。下の図は主に中性子巾 (Γ_n) を表わし, 上図は $\frac{g\Gamma_n\Gamma_\gamma}{\Gamma}$ の値を表わしているといつてよく, 個々の共鳴に関してはその強さが入れかわっているものなど, 中性子による共鳴準位のある特徴をよく表わしているといえる。中性子のエネルギー分解能(このエネルギー領域では約 0.1%)と同じ全巾 Γ を持った共鳴準位については, 捕獲断面積の形をあわせること(いわゆる shape fitting)によって全巾 Γ を求めることが出来る。又全断面積測定のピークの高さ及び形から J の値を求めること可能である。16 keV にある共鳴をよく見るとその共鳴項とポテンシャル散乱との干渉から s-波の中性子によるものであることが確認された。以前の不十分な分解能ではこの干渉を見ることは出来なかった。さらに 25, 36, 47 keV にある 3 つの大きな p-波の出現はドアウェイ状態の存在とも合せて興味深いものである。

4. おわりに

私の狭い範囲のつきあいからだけだが, アメリカの研究者は, 比較的よく(多分能率的に)働くといった印象を持った(最も時間外に働く人の数はそう多くはないが)。仕事はかなり分業化されており, 各人の仕事に専念出来るようであった。又彼らの自分の仕事を他人に伝えるたくみさと, その熱心さとは関心させられ, 頻繁に行われるセミナーでは, 講演者は自分の仕事を専門外の人に理解させるかに骨をおり, 内容豊富でかつ解り易い話をする人が多かったように思う。又口角泡を飛ばすといった議論が多いのもお国がらのようであった。

以上のように, 個人的に得た仕事の限られた経験と, 漠然とした印象しか報告出来なかったが ORELA の様子が少しでも伝えられていれば幸いである。

References

- 1 For recent publications, see Reports to the DOE nuclear data committee, BNL-NCS-24273, p. 225, April 1978.
- 2 S. Raman, M. Mizumoto and R.L. Macklin, Phys. Rev. Lett. 39, 598 (1977)
- 3 S. Raman, M. Mizumoto, G.G. Slaughter and R.L. Macklin, Phys. Rev. Lett. 40, 1306 (1978).
- 4 S. Raman, Invited paper presented at the Third International Symposium on Neutron Capture Gamma-Ray Spectroscopy and Related Topics, September 18-22, 1978, Brookhaven National Laboratory, Upton, New York.
- 5 M. Mizumoto, R.L. Macklin and J. Halperin, Phys. Rev. C17, 522, (1978).
- 6 M. Mizumoto, J.H. Hamilton, S.Raman, R.L. Macklin, G.G.Slaughter and J.A. Harvey, The Third International Symposium on Neutron Capture Gamma-Ray Spectroscopy and Related Topics, September 18-22, 1978 and accepted for publication in Phys. Rev. C19, (1979).

TABLE EXPERIMENTS AT ORELA

FLIGHT PATH NO.	STATION	EXPERIMENT
1	18 m	TOTAL CROSS SECTIONS OF SMALL SAMPLES
	80 m	HIGH-RESOLUTION NEUTRON TOTAL CROSS SECTION
	200 m	MEASUREMENTS
2	10 m	FISSION FRAGMENT ASYMMETRIES FROM ALIGNED FISSIONABLE NUCLIDES
	20 m	CROSS SECTIONS FOR POLARIZED NEUTRONS ON POLARIZED NUCLEI
3	15 m	
4	20 m	BEING PREPARED FOR AUXILIARY EXPERIMENTS FOR FLIGHT PATH 6
5	20 m	PRELIMINARY EXPERIMENTS FOR FLIGHT PATH 6; MEASUREMENTS OF η NEAR THERMAL ENERGIES
	40 m	NEUTRON CAPTURE CROSS SECTION USING SCINTILLATION TANK
6	150 m	AS ABOVE WITH BETTER ENERGY RESOLUTION AND LESS GAMMA FLASH
	40 m	NEUTRON CAPTURE CROSS SECTIONS FOR NONFISSIONABLE MATERIALS IN THE KEV RANGE
7		INELASTIC NEUTRON SCATTERING
	20 m	PRECISION NEUTRON CROSS SECTION MEASUREMENTS
8	30 m	SECONDARY GAMMA RAY SPECTRA FOR SHIELDING STUDIES
	50 m	SECONDARY GAMMA RAY SPECTRA FOR SHIELDING STUDIES
9		
10		
11	10 m	GAMMA RAY SPECTRAL MEASUREMENTS FROM RESONANCE NEUTRON CAPTURE, INELASTIC NEUTRON SCATTERING

TABLE II. Members of ORELA (in 1976-1978).

- I. Transmission measurements
 G.F.Auchampaugh, R.W.Benjamin, J.L.Fowler¹, J.B.Garg, R.Gwin², J.A.Harvey¹,
 N.W.Hill¹, D.J.Horen¹, C.H.Johnson¹, R.Nelson, D.K.Olsen², K.Rush¹ et al.
 Studied: ⁷Li, ⁴⁰Ca, ⁵²,⁵³,⁵⁴Cr, ⁵⁸Fe, ⁵⁹Ni, ⁹⁰,⁹¹,⁹²Zr, ⁹⁴,⁹⁶Zr,
²⁰⁷,²⁰⁸Pb, ²³⁸U, ²³⁷Np, ²⁴⁰Pu, ²⁴⁹Cf etc.
- II. Scattering measurements
 D.J.Horen¹, J.A.Harvey¹, K.Rush¹, W.Kinney², F.G.J.Perey² et al.
 Studied: F, Al, Mg, Fe, ²⁰⁷Pb etc.
- III. Capture cross section measurements
 B.J.Allen³, J.W.Boldeman³, G.T.Chapman², D.Drake, E.D.Earle, J.B.Garg,
 J.Halperin¹, W.J.Kenny², R.L.Macklin¹, J.Malanify, M.Mizumoto, A.R.Musgrove³,
 S.Raman¹, G.de Saussure², R.R.Spencer², H.Weigman, R.R.winters, et al.
 Studied: Na, Mg, ²⁸Si, P, ⁴⁵Sc, ⁵¹V, ⁵⁷Fe, ⁵⁹,⁶¹Ni, ⁶²,⁶⁴Ni,
¹⁰⁰,¹⁰¹,¹⁰²,¹⁰⁴Ru, Cd, ¹⁷⁵Lu, ¹⁹¹,¹⁹³Ir, ²⁰⁶,²⁰⁷,²⁰⁸Pb, ²⁰⁹Bi, etc.
- IV. Capture gamma-ray measurements
 R.F.Carlton, G.T.Chapman², E.T.Jurney, D.A.McClure, M.Mizumoto, G.L.Morgan²,
 S.Raman¹, G.G.Slaughter¹, H.Weigman, J.C.Wells,Jr., et al.
 Studied: ⁵⁸Fe, ¹⁰⁰Mo, ¹¹⁴,¹¹⁶,¹¹⁸Sn, ¹⁴⁵Nd, ²⁰⁷,²⁰⁸Pb, etc.
- V. (n,α) and (n,p) measurements
 C.Renner, J.A.Harvey¹, N.W.Hill¹, J.Halperin¹, G.L.Morgan², S.Raman¹, K.Rush¹
 et al.
 Studied: ⁶Li, Ti, ¹⁹⁵Pt, ⁵⁹Ni, etc.
- VI. Actinide total, fission and capture cross section measurements
 G.F.Auchampaugh, C.E.Bemis, J.W.T.Dabbs¹, C.F.Difilippo, R.Gwin², N.W.Hill¹,
 R.W.Ingle², R.Nelson, R.B.Perez², S.Raman¹, G.de Saussure², J.H.Todd²,
 L.W.Weston², et al.
 Studied: ²³²Th, ²³⁵,²³⁸U, ²³⁷Np, ²⁴⁰,²⁴¹Pu, ²⁴³,²⁴⁵Cm, ²⁴⁹Cf etc.

1 Physics Division.

2 Neutron Physics Division.

3 AAEC Research Establishment, Australia.

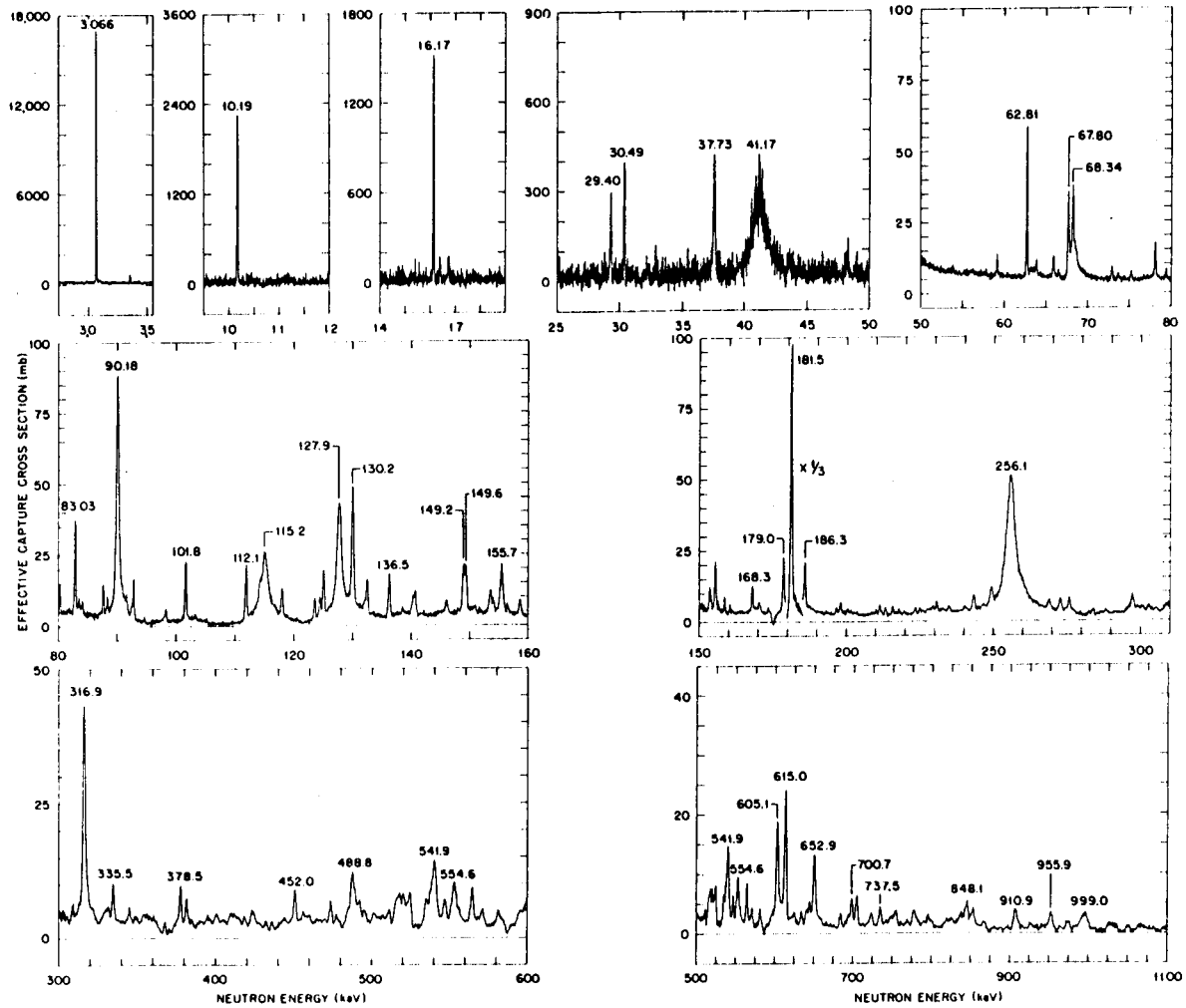


Fig. 1

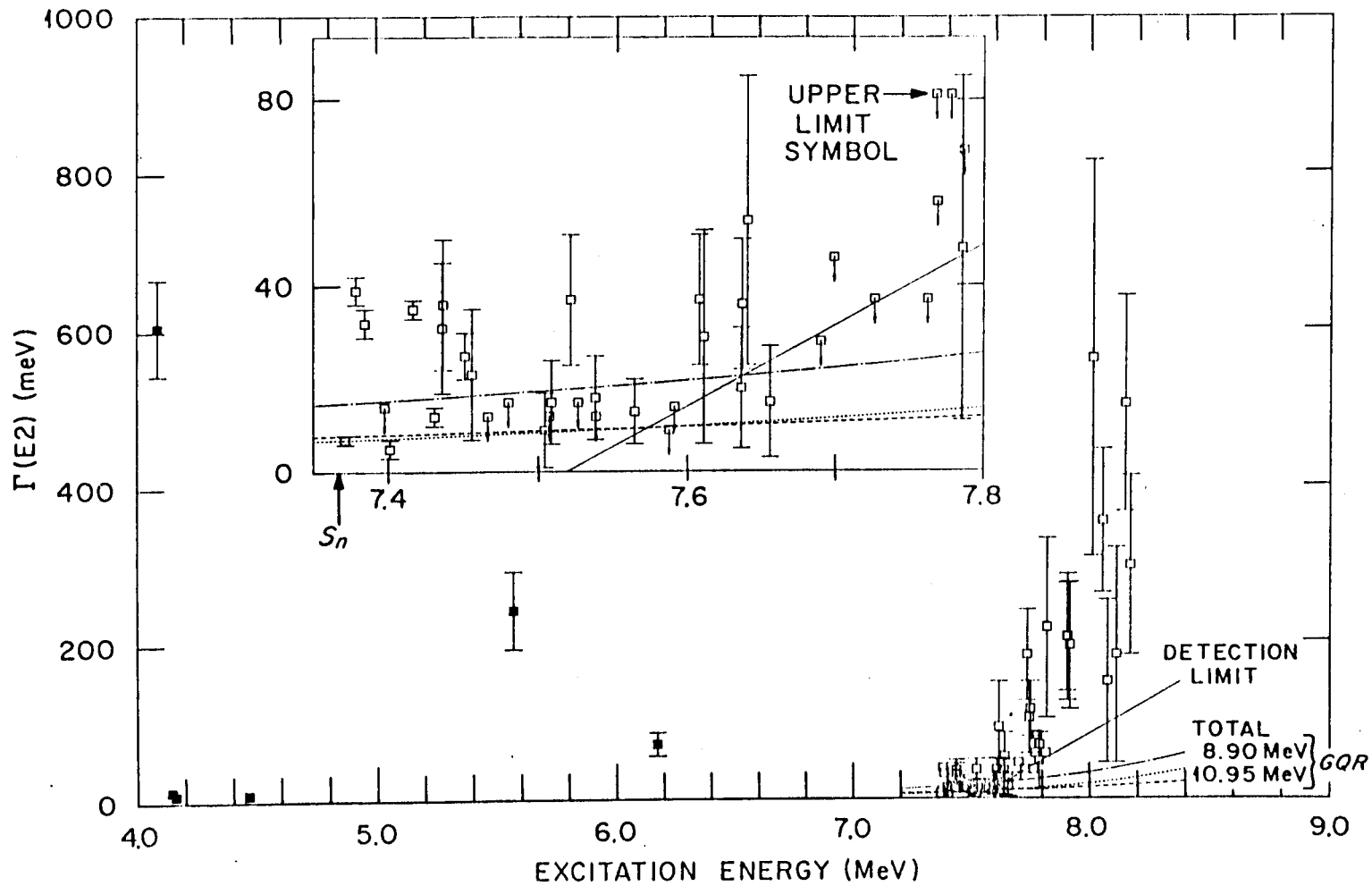


Fig. 2

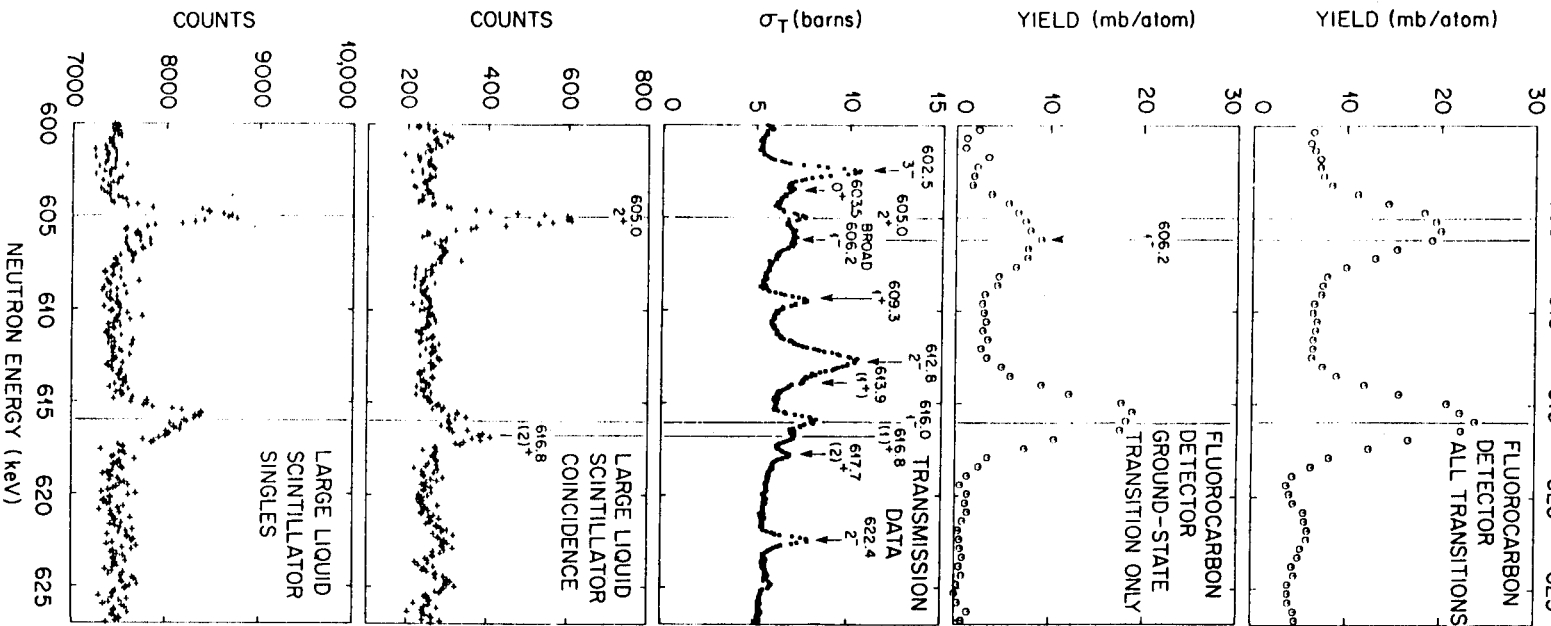


Fig. 3

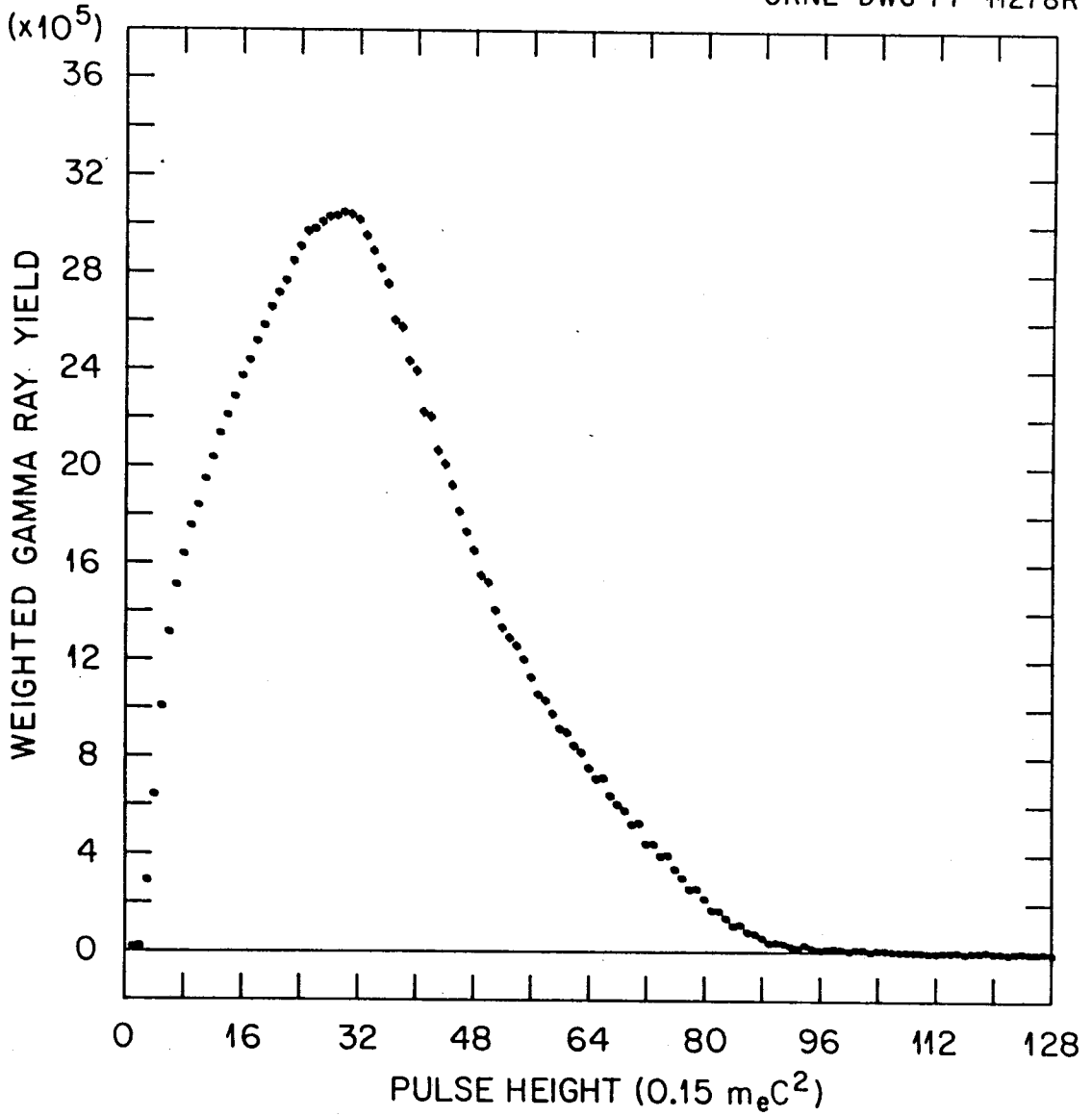


Fig. 4

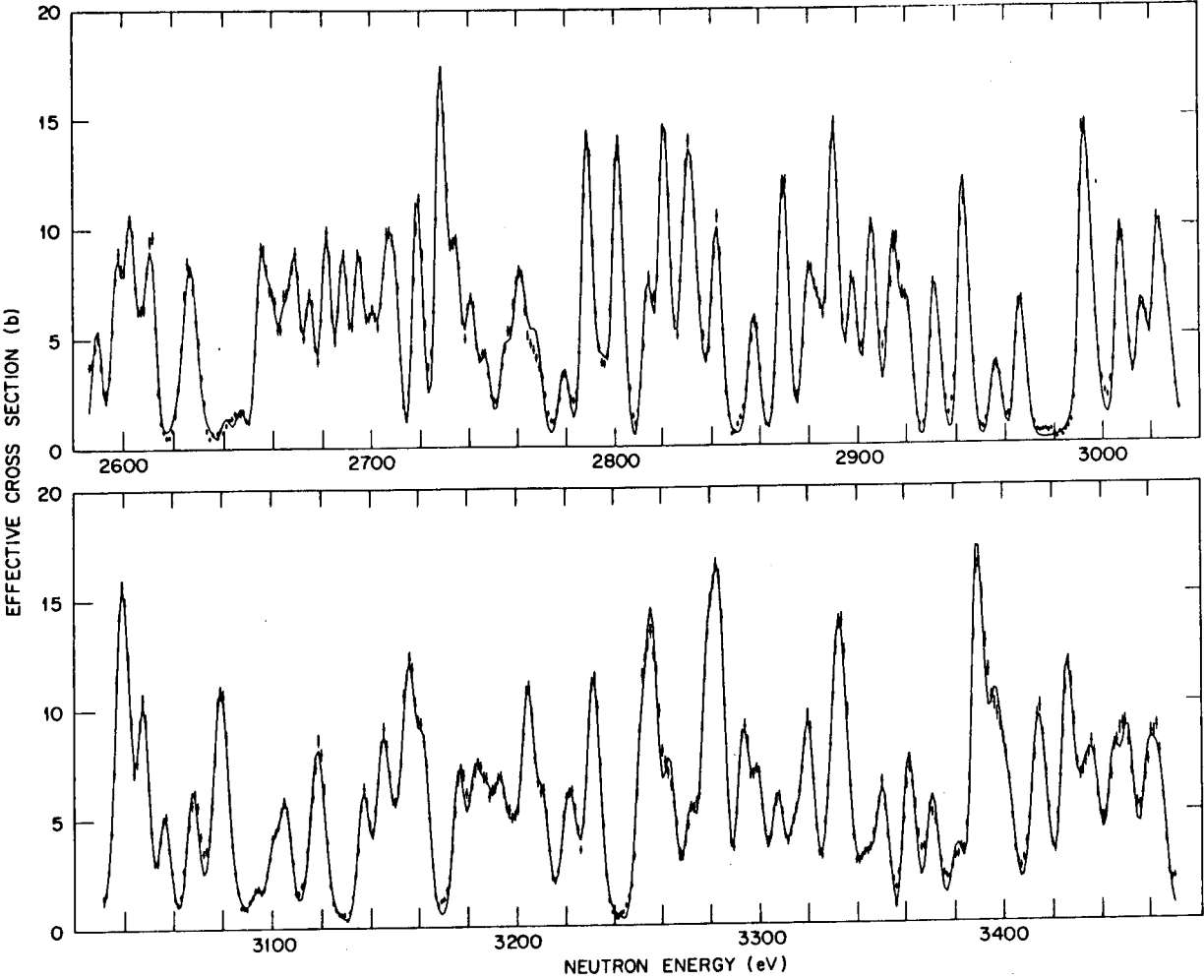


Fig. 5 Neutron spectrum

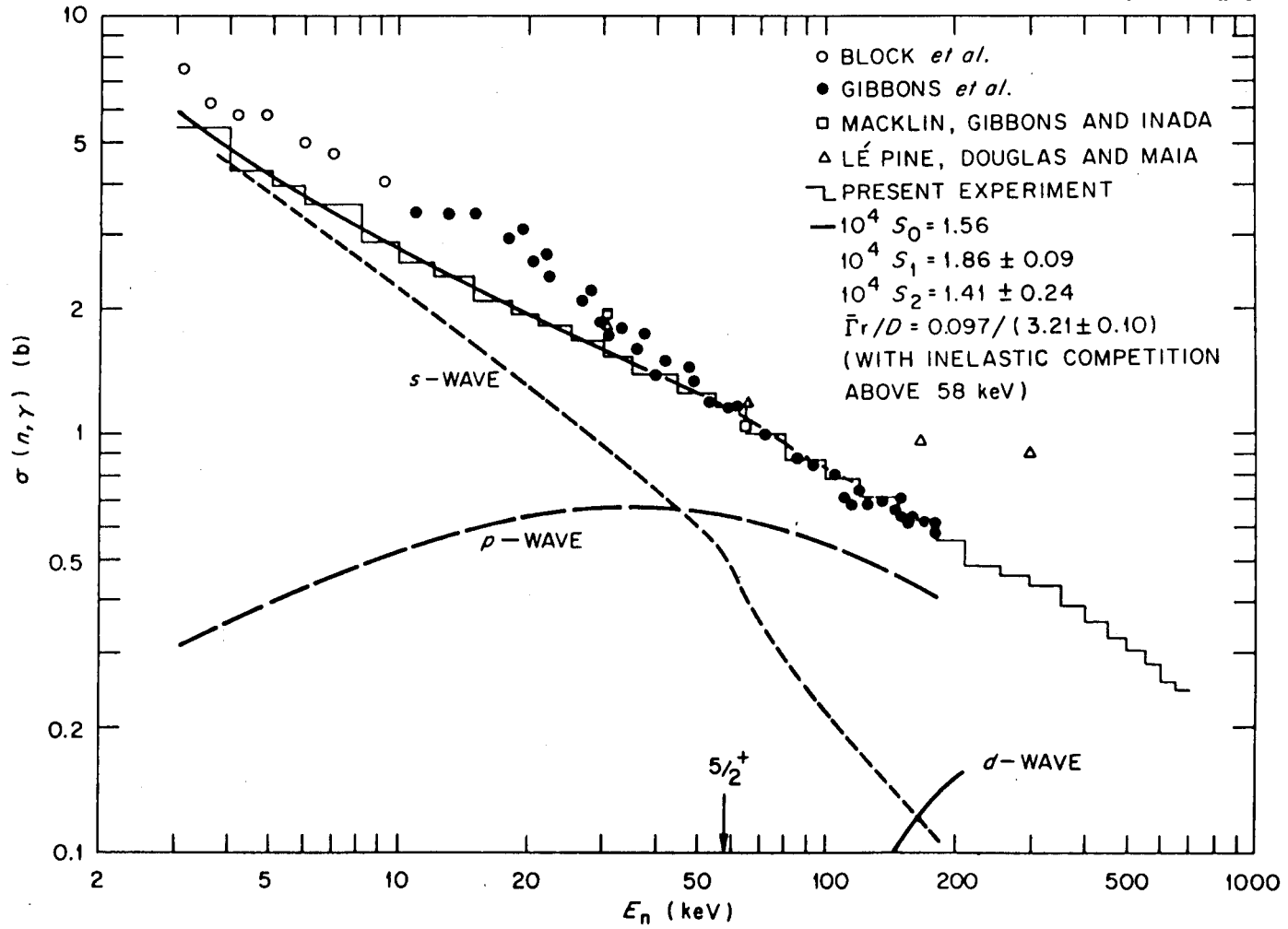


Fig. 6

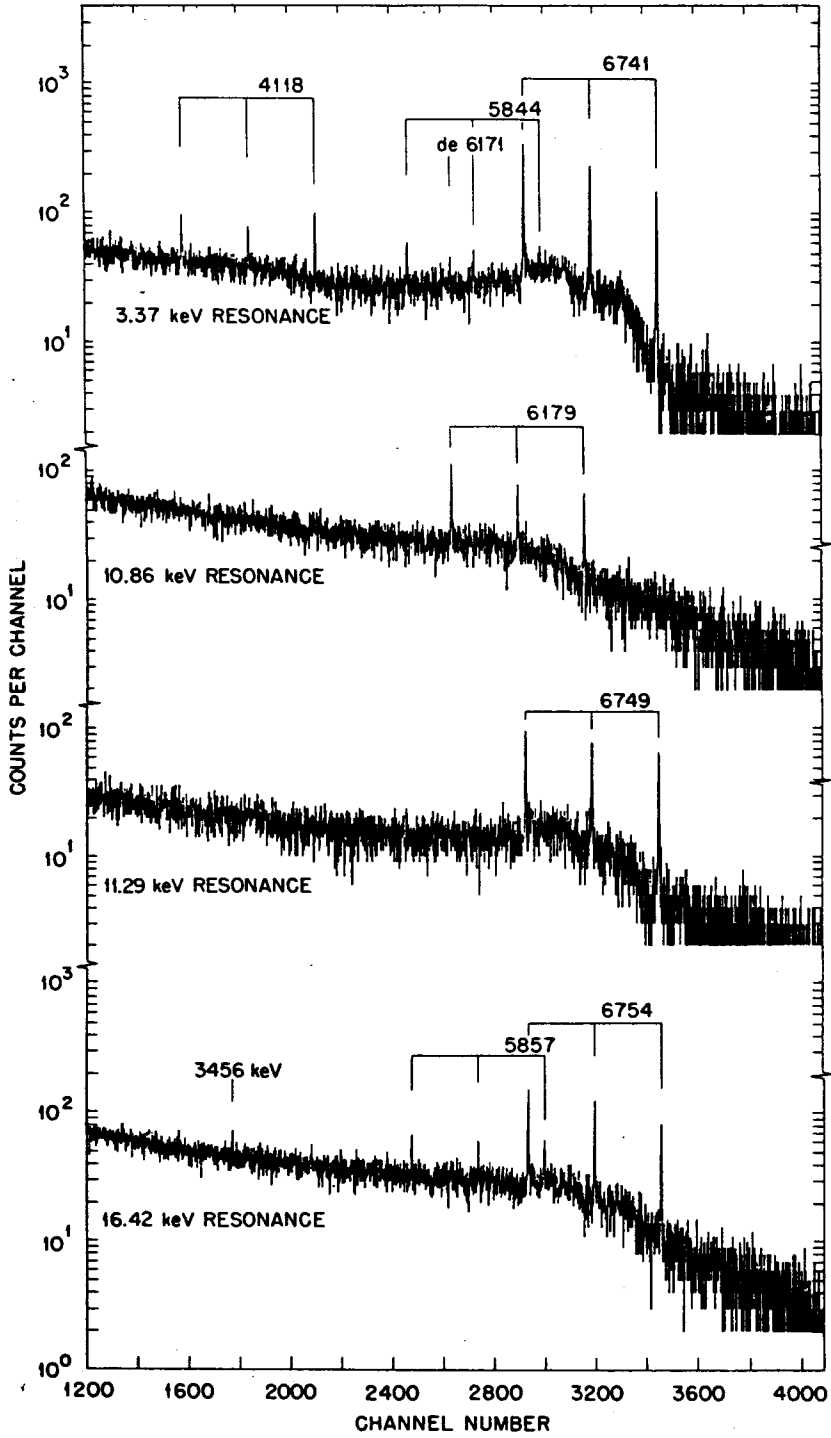


Fig. 7

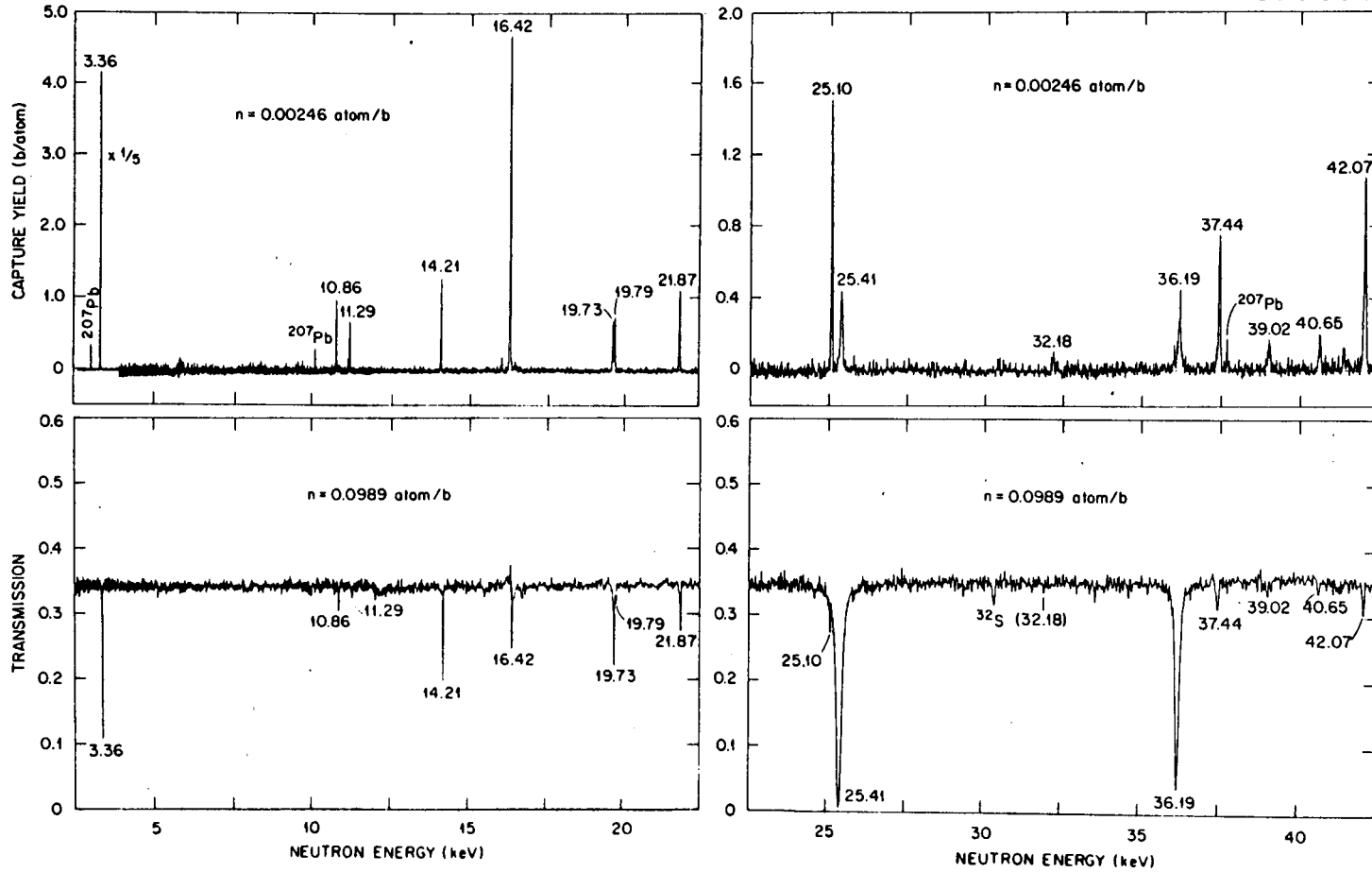


Fig. 8