

二重微分断面積の測定

東北大工 馬場 護

(序)

近年、核融合炉や加速器中性子源などのニュートロニクス分野で、二重微分中性子断面積(放出二次中性子のエネルギー及び角度に対する微分断面積、以下DDXと略称する)の重要性が指摘されてきている。その背景として考えられることは、こうした分野で必要とされる核データが、従来の一重微分断面積(SDX)の取扱い—すなわちDDXを反応径路(チャンネル)各の角度分布・エネルギー分布に分譲する方法： $\sigma(E \rightarrow E', \Omega) \approx (\sigma(E \rightarrow E') \times P(E, \Omega))$ —が不適当であるか、又は実用上不便であることによっている。

すなわち、^{6,7}Li, Be, C等核融合炉ニュートロニクスで重要な軽核においては、ターゲット核の反跳により、放出中性子は強いエネルギーと角度の相関をもち、上述の近似は妥当性を欠く。このことは、実験データと評価値との比較において明らかである。¹⁾ (図1)

地方、これらの分野で問題となる高エネルギー中性子による核反応においては、数多くの反応チャンネルが開き従来の反応径路ごとに、放出中性子のエネルギー角分布を与える方式は、実際上のニュートロニクスの計算において実用的でなく、すべての反応径路について総和されたDDXが有効であるという点である。²⁾ 又、前平衡過程による比較的エネルギーの高い中性子の放出も、DDXが必要とされる理由となっている。(図2)

一方、DDXデータの現状は、測定データは少なく、一部の例外^{1), 3)}を除けば、評価にも組み入れられていないのが実情である。測定データは、軽核に関しては無いに等しいし、中重核に関しても、弾性散乱や低励起状態についての非弾性散乱データ、蒸発中性子スペクトルのデータ—これらもDDXの一部には違いないのであるが—が主流を占め、意識的にDDXが測定されたのは比較的新しいことのようにある。

表1に、比較的新しいDDXの測定例をまとめてある。^{4~13)} サイクルの種類も多くはないし、エネルギー点・角度点さらに二次元中性子エネルギーの範囲においても実用データを提供するという意味では決して十分ではない。特に重要性が指摘されている、8~14 MeV領域のデータは、皆無に近い。又、測定データ間に大きな、くいちがいがみられることも多い。

14 MeV付近の中性子に対するデータはある程度の蓄積がみられ、Hermsdorf,⁴⁾ Kammerdiner⁵⁾ Clayeux⁶⁾らのデータは、評価および理論解析の対象とされている。この結果として、中重核に対しては、前平衡過程や各段階Hauser-Feshbachモデルにより、反応理論の整備が進められ、

角度分布も含め、かなりの実験データの再現がえられるようになってきている。¹⁴⁾ (図3)

これに対して、軽核に対する理論的解析や評価はあまり進展しているようにはみえない。弾性散乱や非弾性散乱に対しては、R-行列や光学模型にもとづく、ある程度の解析がなされているが、 ${}^6\text{Li}(n \cdot n' \alpha) \alpha$, ${}^7\text{Li}(n \cdot n' \alpha) t$, ${}^9\text{Be}(n, 2n)$, ${}^{12}\text{C}(n, n' \alpha)$ 反応などの結果生じる連続スペクトル中性子に対しては、ほとんど解析はなされていないし、評価においても、純現象論的な“pseudo-level evaluation”がLASL^{1), 3)}で行われている程度である。(但し、この点については、評価の問題のみでなく、核データ格納方式の問題でもあることが指摘されている。¹⁵⁾)

(測定方法と結果)

従来のDDXの測定は、ほとんどの場合、図4に示すような方法を用いて行われている。すなわち単色中性子をサンプルに入射させ、二次中性子をT-O-F法で測定するものである。

他の方法として、図5に示すような、ORELAにおいてMorgau¹³⁾によって用いられてきた方法がある。ORELAよりの白色中性子をT-O-F法でエネルギー分析し、散乱中性子スペクトルはシンチレータの波高をunfoldすることによって求めている。この方法は、もともと、評価済データの評価法として、開発されたもので、広いエネルギー範囲にわたる系統的な測定(とくに8-14 MeV)を可能とするが、反面、大きなリング状サンプルを使用するため、二次元中性子の角度・エネルギー分解能は前者の方法に比べ、かなり低いものとなる。また、データの統計をかsekため、入射中性子に対しても、1 MeV程度の中でバンチングが行われており、DDX測定の手段としては、二次的なものと考えるべきであろう。

我々が行ってきた測定¹¹⁾¹²⁾は前者の方法にもとづく。中性子源は、東北大学ダイナミトロンからのパルスビームを用い、 $D(d, n)$, $T(d, n)$ 反応によって発生させたものを用いた。エネルギー点は、3.2-7 MeV, 及び15.4 MeVである。この方法によるDDXの測定は基本的に、弾性散乱や非弾性散乱の測定と同じであるが、DDXの場合には、ピークを形成しない広範囲にわたる連続スペクトル中性子の測定を主眼とするため、いくつかの実験上及びデータ処理上の問題を経験した。

i) 広い二次中性子エネルギー範囲にわたって、良好なS/N比をうること。

DDXの測定においては、弾性散乱中性子から可能な限り広い範囲にわたって、二次中性子を測定することが望まれる。そのためには検出器バイアスを低く保つことが必要となり、必然的にバックグラウンド感度を高めS/N比を悪化させる。図6は測定の生データであるが、低エネルギー側でS/N比が悪化する様子が分る。(因みに、この図で0.4 MeV附近での断面積は、約50 mb/Sr/MeVであり、決して少なくはない)

このため、シールド・コリメータの構造、配置¹⁶⁾¹⁷⁾や検出器の特性にわたる注意が必要

である。図7は、この様子を示す。我々の場合、図4のシールド・コリメータを用いているが、かなり改良の余地がある。中性子検出器としては、5" ϕ \times 2" 層のNE 213を用いているが、広い範囲の中性子エネルギーをカバーするため、最大400:1ダイナミックレンジを有するn-7弁別回路を用いている。(これで300keVより20MeVまでカバーする)

ii) バックグラウンド評価

i) に関連して、バックグラウンド評価も精度を決める重要な因子である。S/N比が余りすぐれないデータにとって Foreground Backgroundの規格化の誤差は、結果に大きな影響をもつ。また、サンプル依存のバックグラウンドすなわち、サンプルとターゲット周辺物質やシャドールーバでの多重散乱の結果、検出器に入射するものは、シミュレーション¹⁰⁾ や実験的方法¹¹⁾ によって、評価されるべきである。

iii) 中性子発生ターゲット

ターゲット又はその近傍で発生する不純物中性子(C, Si等の不純物やターゲット構成物質によるもの)は、DDXの測定で無視できない影響をもつことが多い。そのため発生中性子の純度には注意と対策が必要である。

8-14MeV領域では“break up neutron”のため、話がめんどうになる。Triangle Univ⁸⁾では、計算により、この影響をとりのぞいている。又、LASL¹⁰⁾では、H(t,n)反応により“break up neutron”の影響は無視しうることを報告している。

IV) 多重散乱効果の補正

DDXの測定データに対し、多重散乱効果の補正を行うには、放出二次中性子の全エネルギー範囲にわたって、DDXがある程度の精度で知られている必要があるが、現在この条件が十分かどうかに関しては疑問がある。とくに軽核の場合には、エネルギー・角度相関のために問題が多い。又、放出中性子スペクトルにiterationによる補正をほどこすことは困難であり、弾性散乱や離散非弾性散乱にくらべ、補正の誤差はかなり大きいものと考えられる。

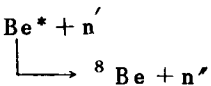
以上のことより、DDXの測定の場合には、ピークを形成する断面積に比べより多くの問題点があり、データの補正及び実験条件等についての吟味が必要と思われる。

図8に、Al, Nbに対する15.4MeVのデータ¹²⁾を他のデータとともに示す。測定データのエネルギー分解能にもよるが、測定データ間にかかなり大きくいちがいがある。角度積分したデータ(図9)では、くいちがいはいく分小さくなるが、10MeV附近でのデータのくいちがい、及びENDF/B-Nとのちがいは依然として残る。前平衡過程模型による計算値とは定性的な一致を示している。この他にも中重核に関しては、Ti, V, Cr, Ni, W などにおいて、ENDF/B-Vと、実験値の大きくいちがいが指摘されており、¹⁴⁾ データの蓄積が必要と考えられる。

図1に示したごとく、軽核については、連続スペクトルの実験データが乏しいのみならず、評価値と実験値の間には、大きくないちがいがある。 ${}^7\text{Li}, {}^9\text{Be}$ について、実験値¹⁰⁾と評価値(ENDF/B-IV)との比較を図10に示す。これらに共通していえることは、スペクトルの構造とともにスペクトルの角度依存性が再現されないことである。ENDF/B-IVでは、角度依存性のない“Temperature Model”でデータが与えられており、いわば当然の結果であるが、実験値とのくいちがいは余りに大きい。図1の例では、非弾性散乱中性子が弾性散乱中性子よりエネルギーが大きいという不合理も生じている。

一方、軽核の核反応の解釈によく用いられてきた phase-space 分布も、データをよく再現しない。このため、我々は、 ${}^7\text{Li}(n, n'\alpha)t$ 反応において、 α と t の間に Coulomb 力による S-波相互作用を考慮し、 n' の角分布は、重心系で等方とするモデル¹⁸⁾を試みた。このモデルは、 ${}^6\text{Li}(d, n\alpha){}^3\text{He}$ や ${}^7\text{Li}(p, n\alpha){}^3\text{He}$ 反応の角度依存スペクトルを比較的よく再現した¹⁸⁾結果を図11に示す。なお、 ${}^7\text{Li}(n, 2n)$ 反応については、反応過程がよく知られておらず、計算が困難なので、ENDF/B-IVの値を借用した。実験値をかなりよく再現している。又、 $Q = -4.6 \text{ MeV}$ のピークについては、 α と t の f-波相互作用を入れることにより、データを定性的に再現できる。

${}^9\text{Be}$ についての測定結果¹¹⁾の1例を図12に示す。Drake のデータ¹⁰⁾(但し、非弾性散乱ピークはさしひかれてある)とはよい一致を示している。次に $(n, 2n)$ 反応の連続スペクトル部分について、ENDF/B-IVとの比較を示す。(図13) スペクトルの形の角度依存性は大きくはないが、エネルギー・角度相関をとり入れる必要のあること、ENDF/B-IVのデータは実験値と大きくくいちがうことが示されている。このことは Drake¹⁰⁾によっても指摘された。ENDF/B-IVでは、 ${}^9\text{Be}(n, 2n)$ の反応過程として、

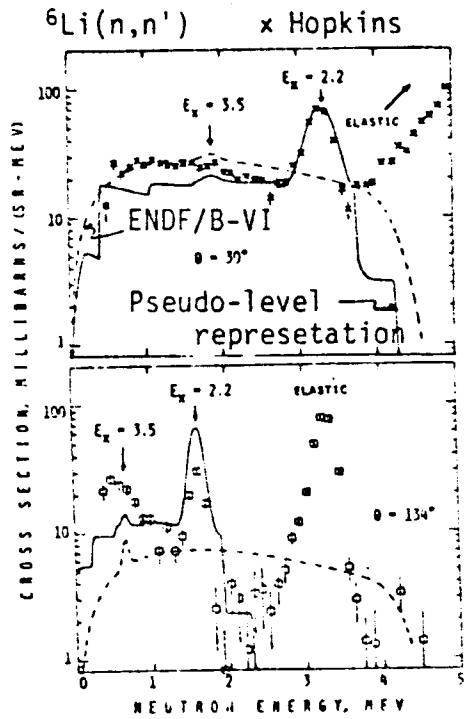


が仮定されているが、我々のデータ¹¹⁾—Drake¹⁰⁾のデータでも—は $\sigma(n, n') < \sigma(n, 2n')$ であり、その差は 100 mb 前後に及ぶ。連続スペクトルの形状の点でも ENDF/B-IV の仮定では、充分説明できず、他の反応過程の寄与が考えられる。¹¹⁾

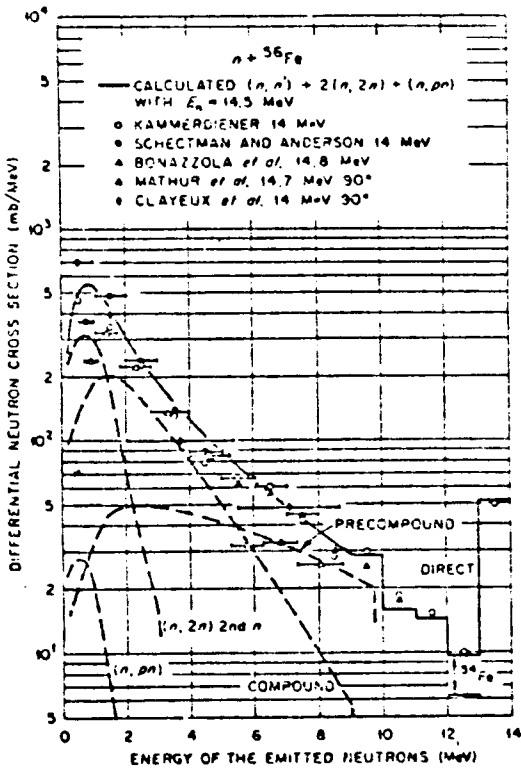
このように、軽核においては、仮定された反応過程の問題と角度—エネルギー相関のため、評価値には多くの問題があり、データのつみ上げと計算方法の整備が必要と考えられる。又、現在までなされている感度解析は、ENDF/B-IVのデータを使ってなされており、改善の余地があるように思われる。又、こうした現状のもとでは“pseudo-level representation”は、1つの有効な評価方式といえよう。

参考文献

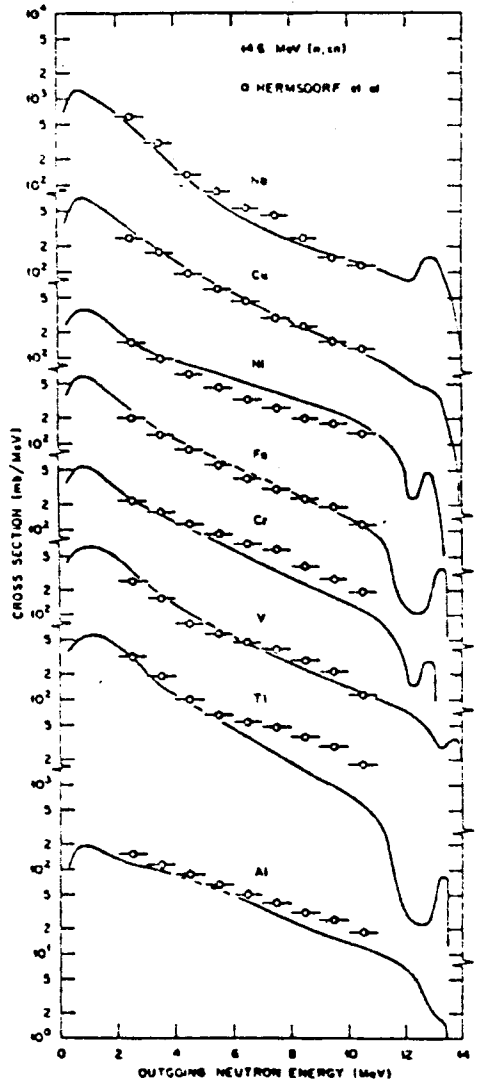
- 1) L. Stewart and P. G. Young, TANSO 23, 22 (1976)
- 2) F. G. Perey, "Advisory Group Meeting on Nuclear Data for Fusion Reactor Technology", Dec. 11-15, (1978)
- 3) P. G. Young and L. Stewart, LA-7932-MS (ENDF-283)(1978)
- 4) D. Hermsdorf et al., Zfk-277(II)(1975)
- 5) J. L. Karmomerdiener, UCRL-51232(1972)
- 6) G. Clayeux and J. Voignier, CEA-R-4279(1972)
- 7) Y. Irie et al., J. N. S. T. 13, 334(1976)
- 8) A. Bayerle et al., Knoxville Conf. (1979) BB2
- 9) J. Hopkins et al., Nucl. Phys. A107, 139(1968)
- 10) D. M. Drake et al., N. S. E. 63, 401(1977)
- 11) M. Baba et al., Harwell Conf (1978) p.198, Knoxville Conf. (1979) AB3
- 12) S. Iwasaki et al., Knoxville Conf.(1979) AB10
- 13) G. L. Mangau et al., N. I. M. 128, 125 (1975)
- 14) C. Y. Fu, Knoxville Conf. (1979)
- 15) R. J. Howerton and S. T. Perkins, N. S. E.
- 16) D. W. Glasgow et al., N. I. M. 114, 521 (1974)
- 17) D. Schlegel-Bickmann et al., N. I. M. 169, 517 (1980)
- 18) M. Baba et al., NETU-27 (Tohoku University),
原子力学会52年秋 D-12



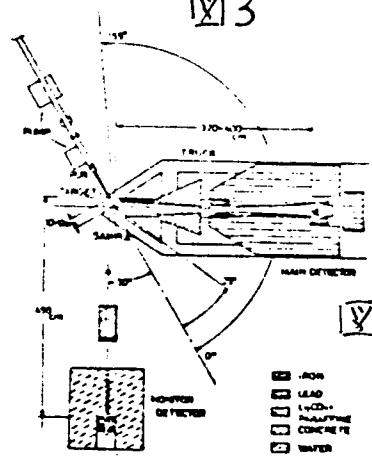
1



2



3



4

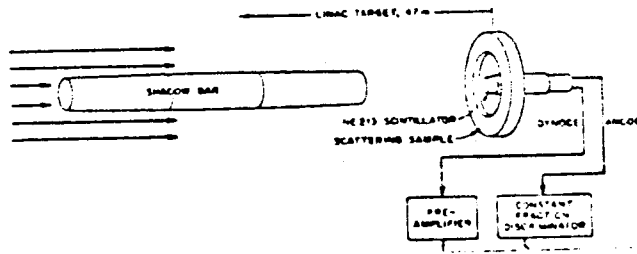


Fig. 6

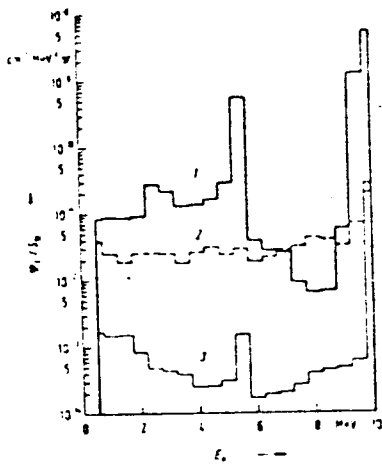


Fig. 7. Spectral flux density S_D at the central detector point (in relation to the differential source strength S_D): 1 spectrum of neutrons scattered by a ^{12}C sample; 2 spectrum of neutrons emitted from the source and scattered by the collimator walls; 3 spectrum of background neutrons coming from the scattering sample and scattered by the collimator walls. Neutron source: $R = 15 \text{ cm}$, $\theta = 30^\circ$, $E_n = 10 \text{ MeV}$.

Fig. 7

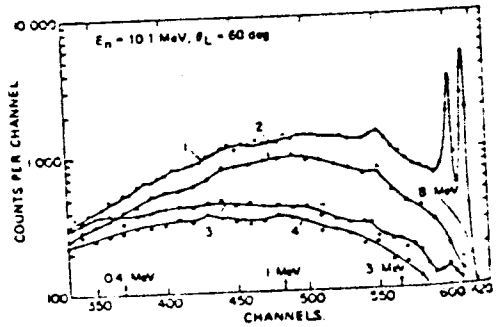
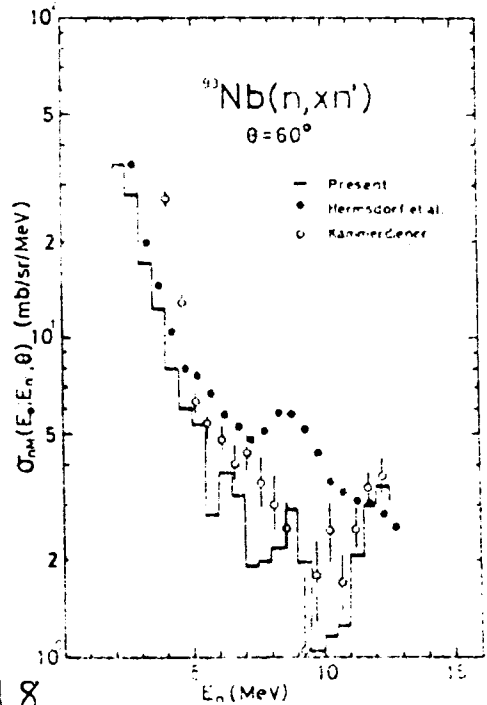
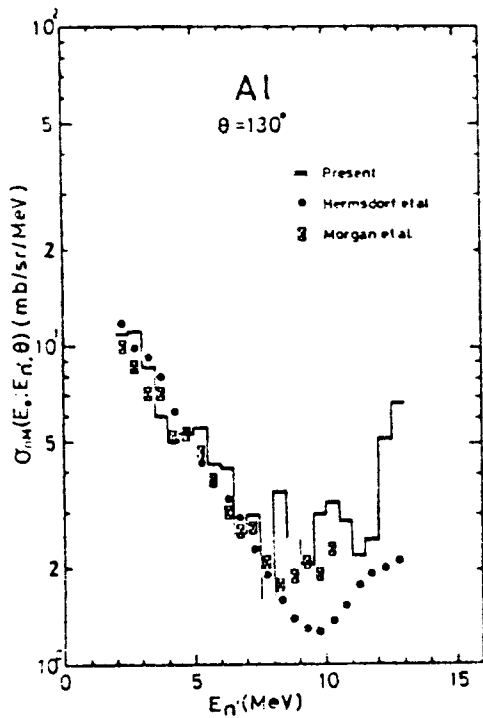


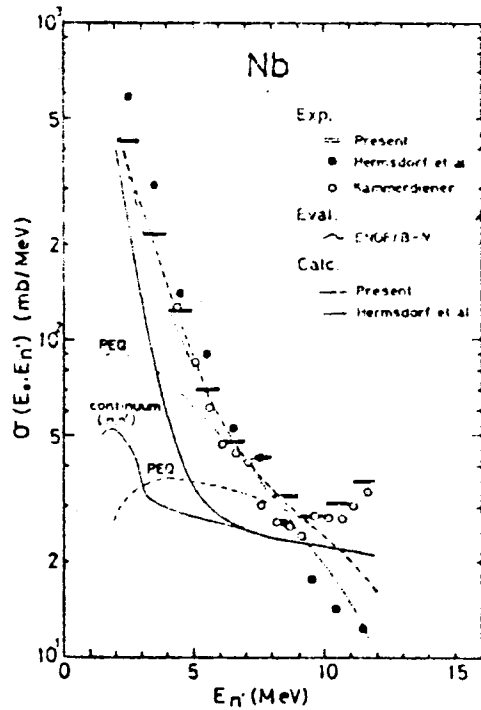
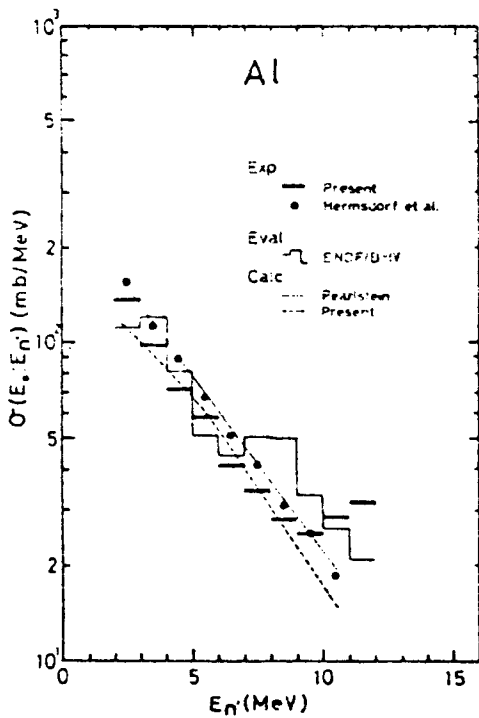
Fig. 2. Time-of-flight spectra for 10.1-MeV incident neutrons in beryllium for a laboratory scattering angle of 60 deg . The source reaction is $^9\text{Be}(^1\text{H},n)^8\text{He}$ and the four spectra are:

1. sample in-gas in (\bullet)
2. sample in-gas out (\blacktriangle)
3. sample out-gas in (\circ)
4. sample out-gas out (\circ).

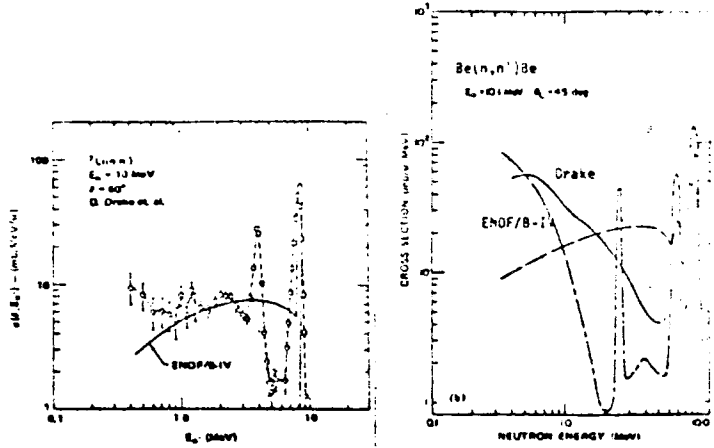
Fig. 6



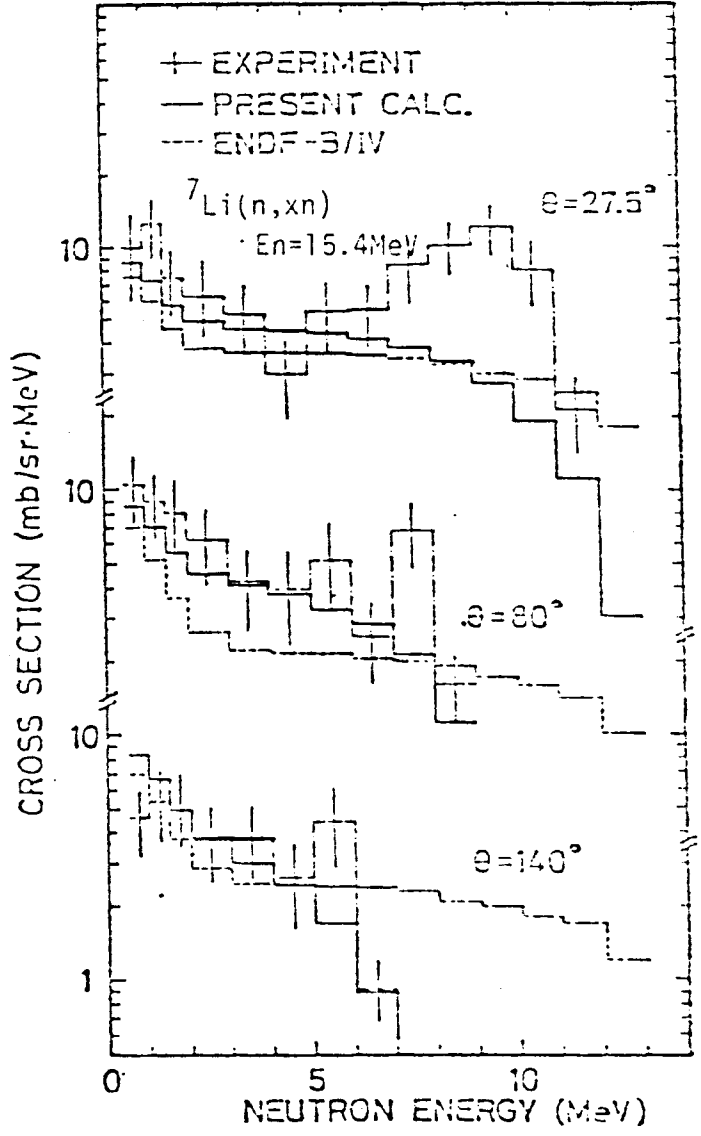
12 8



12 9



10



11

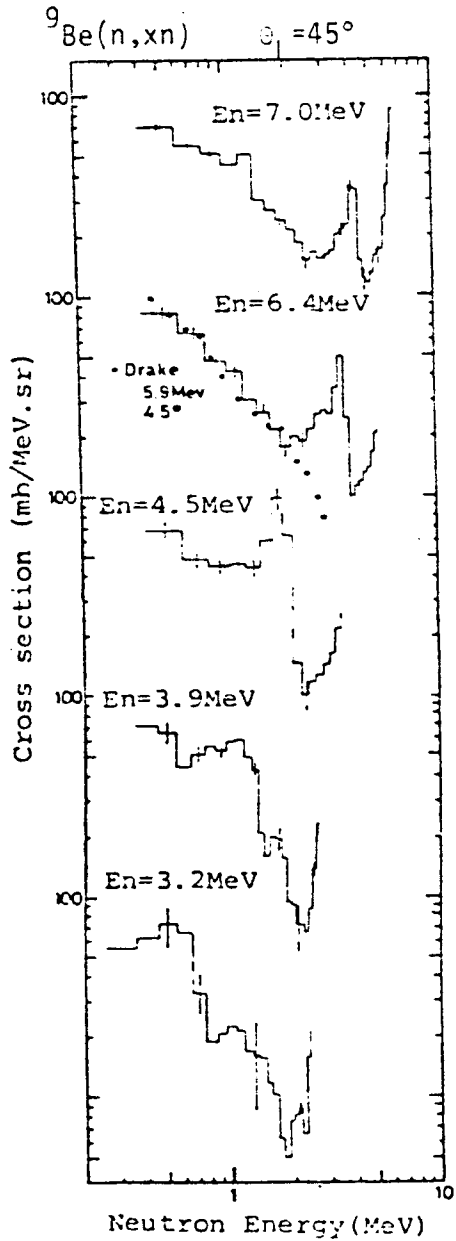


Fig. 12

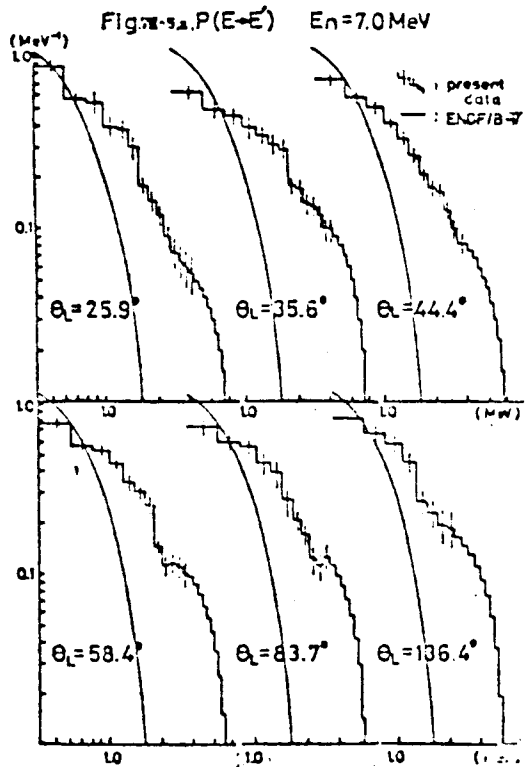


Fig. 13

表 1

ACTIVITY IN DOUBLE-DIFFERENTIAL NEUTRON CROSS SECTION MEASUREMENT

AUTHOR	INSTITUTE	NUCLEI	E_n (MeV)	E_n' (MeV)	Ω (DEG)
HERMSDORF	DRESDEN	Be ~ Bi (34)	14	~ 2	53 ~ 131 (4)
KARMMERDIENER	L.L.L.	C ~ Pu (8)	14	> 0.01	20 ~ 161 (10)
CLAYEUX	C.E.A.	Mg ~ Pb (6)	14		
IRIE	KYUSHU	V, Au	14		20 ~ 150 (5)
BEYERLE	TRIANGLE	Fe, Cu, Ni, Pb	8 ~ 12	> 0.7	40 ~ 150 (6)
HOPKINS	LASL	${}^6, {}^7\text{Li}$	3.3 ~ 7.5	> 0.4	30 ~ 140 (7)
DRAKE	LASL	${}^6, {}^7\text{Li}, \text{Be}$	5.9, 10, 14	> 0.2	25 ~ 145 (11)
BABA	TOHOKU	${}^7\text{Li}, \text{Be}$	3.2 ~ 7.15	> 0.4	27 ~ 135 (7)
IWASAKI	TOHOKU	Al, Nb	15	> 1	25 ~ 155 (12)
MORGAN	ORNL	${}^7\text{Li} \sim \text{Nb}$ (10)	1 ~ 20	> 0.9	55, 125