

話題 (その IV)

10-50MeV 中性子断面積に関するシンポジウム(BML)
に出席して

原研・核データセンター 田中茂也

このシンポジウムは米国DOE Div. of Magnetic Fusion Energyおよび
Div. of Nuclear Physics 主催:「Symposium on Neutron Cross
Section from 10-50 MeV」という原題名のものである。

1977年5月, BNLで同様な題名(ただしエネルギーの上限は40MeVであった)のシンポ
ジウムが開催された。今回はその後丁度3年を経た時点で, すなわち1980年5月12日-14
日に, 同じくBNLで開かれた。そしてこの分野の研究にどのような進展があったかが報告された。
ここで報告される中性子核データは, 現在ハンフォードに建設されつつあるFMIT (Fusion
Material Test Facility) のために必要とされる核データを中心としたものである。
その他に増殖用加速器による中性子源に関する報告も数編加わっている。

参加人員は96名, その内米国外から17名の参加者があった。

シンポジウムは次に挙げる6つのセッションから成り, 各レビュー・トークのあとに7-11編
の報告が続くという形出で行われた。またワーク・ショップが4つのセッション別に開かれ, 今後
の指針が recommend された。

セッションI 開会の辞

- 1977年のシンポジウムの概要, および「その後何が成されたか」

A. B. Smith (ANL)

セッションII 強力高エネルギー中性子源とその特性

- 核融合材料照射用中性子源の特性 (レビュー)

L. R. Greenwood (ANL)

セッションIII ドシメトリ反応を含む微分データ

- 高エネルギー中性子断面積の現情 (レビュー)

J. C. Browne (LASL)

セッションⅣ FMIT 関連問題 - 遮蔽および材料損傷研究

- FMIT の遮蔽設計関連の核データ (レビュー) L.L.Carter (HELD)
- 高エネルギー中性子による核融合炉材料の研究 - 現状報告 (レビュー) D.G.Doran (HELD)

セッションⅤ 原子核模型コードおよびデータ評価

- 核反応理論および計算における最近の発展 (レビュー) D.G.Gardner (LLL)

ワーク・ショップ

セッションⅥ 総会 - ワークショップ報告の発表と討議

報告者 C.D.Bowman (NBS), F.G.J.Perey (ORNL),
F.M.Mann (HELD), P.G.Young (LASL)

次に各セッション毎に、特に私の興味をひいたものを重点にその概略を紹介する。

セッションⅠ「その後何がなされたか」

A.B.Smithによって、最近3年間に行われた活動に対して、評定が行われた。中性源に関する研究活動に対しては、彼は、Li+d source 関係の測定はよく行われ、可成りの進歩があったといっている。微分データについては、弾性散乱断面積はよく測定されたが、非弾性散乱は測定がむづかしいので、あまりみるべきものがなかった。(n, Charged particle) 反応の測定はLLLのQ-マグネットを用いたスペクトロメータによってA \approx 40~60の核種に関するよいデータが出始めた。これはしきい値近くでもよく測ることができると賞讃している。評価に関しては、ENDF/B-V のドシメトリ用データはⅣのものに比べて遙かに改善されているが、高いエネルギー領域のデータはまだまだである。高いエネルギー領域のデータに関しては、それを盛り込むENDF/B フォーマットの問題が起っている。反応の種類などが複雑であるために、現在討議中の段階にあるとのことである。

セッションⅡ 強力高エネルギー中性子源

現在運転されているLLLのRTNSの最高中性子束は約 10^{13} n/cm²-s であり、実験に用いられる体積が約1 cm³ と小さい。(核融合炉では約 10^{22} n/cm²-year) HELDに建設中のFMITでは、中性子束 10^{15} n/cm²-s, 実験に用いられる体積 10 cm³ が期待される。またLASLのLAMPFやANLのIPNSのような高エネルギーの spallation neutron

source も材料の研究に用いられてきた。

以上の introduction のあと、(i) 中性子ドシメトリによる中性子源の特性、(ii) 核分裂炉による fusion material test、(iii) $T(d, n)$ 中性子源、(iv) $Li(d, n)$ 中性子源、(v) Spallation 中性子源、(vi) He 測定、(vii) その他のテクニックについてのサーベイ・トークが行われた。これらの各項目については、このあとの Contributed paper の報告と重複する部分も多いので、こゝでは次の2点だけを挙げる。すなわち(1) (i)に関して、従来スペクトル解析には SAND II が広く用いられてきたが、2つの新しいコード STAYSL および FERRET が数学的に優れ、かつ共分散誤差を含められること、(2) (vi)に関して、材料中で生成されるヘリウムの量は照射の影響を理解する上で重要なパラメータであることが判ったこと、そしてヘリウムの量を測る質量分析技術が正確になつたこと。

結論として、こゝ3年間で中性子源の characterization は非常に改善された。例えば Flux-spectra は $\pm 10-30\%$ の誤差で、また integral damage のパラメータは $\pm 10-15\%$ までの精度で求められることが、積分データテストによって判った。しかし 28 MeV 以上で activation cross section は知られていないこと、displacement の計算は 14 MeV 以上で大きな誤差を持つことなど、核データはまだまだ必要とされることが述べられた。

次に contributed talk について述べる。

1. D.L. Johnson (HEDL) : Thick Target Neutron Yield and Spectra from the $Li(d, xn)$ Reaction at 35 MeV 図1に示すように 20° における yield 測定において高エネルギー側にコブのあることが指摘された。
2. IPNS Group (ANL) : Measurements on the ZING-P' Pulsed Spallation Neutron Source
陽子エネルギー 300 および 500 MeV で中性子測定がなされた。ターゲットに Ta および U を用いた場合の中性子束の比較が図示された。
3. D.W. Kneff (Rockwell) : Characterization of the $Be(d, n)$ Neutron Field by Passive Dosimetry Techniques
30 MeV の重陽子加速時の実験である。測定の特長として、foil activation とヘリウム蓄積測定を同時に行ったことが挙げられる。結果は、当然予期されることではあるが、急な fluence の勾配を示している。
4. H. Takahashi (BNL) : Fission Reaction in High Energy Proton Cascade

Spallation 反応の後、核分裂反応は蒸発反応と競走過程にある。この分岐率を Vandebosch-Huizenga の式で求め、FP の分布を Fong の統計モデルで求めた。

Post evaporation nuclei の質量分布を3種の質量公式を用いて計算すると、実験と違っていずれも二山分布となってしまった。高橋氏は scission のときの nucleon exchange を考慮すれば二山はならされるだろうといている。

5. M.A.Lone(Chalk River) : Low Energy Neutron Emission from Be(d,n) and Be(p,n)

実験の結果、特に Be+p 反応の際に、direct inelastic によって励起された核の neutron decay もまた重要な役割を演じていることが判った。

6. J.S.Fraser(Chalk River) : Neutron Production in Thick Targets of Lead, Thorium and Uranium Bombarded by 480MeV Protons

7. G.J.Russel(LASL) : Spallation Target-Moderator-Reflector Studies at WNRF

WNRF の 800MeV 陽子による spallation 中性子源の実験の報告である。角分布、 90° 方向での中性子収率、全中性子収率などを測定している。 90° 方向の中性子収率を TOF 法で測定して計算と比較したものを図 2 に示す。一致の度合は蒸発成分に対してはよいが、カスケード成分に対してはよくない。

セッション III ドシメトリ反応を含む微分データ

Browne によるサーベイ・トークでは、微分データに対する要求精度の話の次に、前回のシンポジウム以降どれだけの測定がなされたかが、全断面積、弾性散乱、nonelastic、ヘリウム生成、水素生成等の断面積について紹介された。例えば、20MeV 以上の弾性散乱の実験では C, O, Si, Ca, Fe に対するものが報告されている。Ni に対する水素生成断面積は重要であるが、15MeV 以上では、20MeV と 60MeV のデータがあるだけである。

最後に、dosimetry cross section は 10~15MeV 領域でももっと測定が必要であることが強調された。

Contributed paper について、

1. R.C.Haight(LLL) : Status of (n, charged particle) Measurements at LLL

これは Grimes らが製作した Q-レンズ・スペクトロメータを用いた測定の報告である。こ

これはQ-レンズを用いて、サンプルから出て来る荷電粒子を検出器上にfocusするもので、検出器をサンプルから遠ざけることによって S/N比を30倍位改善できるといっている。(別の機会に、Ohio大学のFinloyに、同大学のQ-レンズ・スペクトロメータの調子はどうかときいたところ、計数率が小さいのが欠点だ。S/N比は非常によいという答えであった。)

今まで、14~15 MeVで、Al, Ti, Cr, V, Fe, Ni, Cu, Ni, stainless steel 304 と 316, $^{46,48}\text{Ti}$, $^{50,52}\text{Cr}$, $^{54,56}\text{Fe}$, $^{58,60}\text{Ni}$, $^{63,65}\text{Cu}$, ^{27}Al , ^{51}V , および ^{93}Nb の (n, p), (n, d), (n, α) 断面積が測定された。現在, $^{92-96}\text{Mo}$, ^{12}C , ^7Li などの測定を行っている。今後は検出効率をあげるためにもっと大きいQ-レンズを作る予定であるといった精力的かつ意欲的な報告であった。

A. B. Smithのコメント：スチール中の水素含有が核融合研究で大きな問題となっている。

2. R.L.Walter(Duke U.) : Neutron Cross Section Program at TUNL

8-15MeVで弾性散乱と偏向入射重陽子による中性子のpolarizationの実験の報告である。光学ポテンシャル・パラメータの V_{SO} は ≈ 6 MeVと求まった。

3. D.C.Larson(ORNL) : ORELA Program to Meet Fusion Energy Cross Section Data Needs

ORELAによるNaIを用いた(n, x γ)測定、環型の散乱体とNE-213シンチレータを用いた(n, xn)と(n, x γ)の測定、および高エネルギーにおける全断面積の測定の話があった。図3にCrの全断面積を示す。光学模型による計算が今のところいかに実験値と合わないかが明瞭である。ORELAでは(n, p), (n, α)の測定も計画されている。

4. D.W.Kneff(Rockwell) : Helium Generation Cross Sections for Fast Neutrons

148MeVで高感度gas mass spectrometryの方法でヘリウム発生断面積が測定された。断面積の値を求めるために、照射位置のfluence mapの測定が詳細に報告された。測定資料はAl~Auの14種、その内Niのアイソトープ5種を含んでいる。

5. P.W.Lisowski(LASL) : Neutron Cross Section Measurements at WNR

LAMPFからの800MeVを用いて、中性子エネルギー5~150MeVで全断面積の測定を報告している。 ^{208}Pb , ^{232}Th , および ^{242}Pu をENDF/B-Vのデータと比較してB-Vとの違いを指摘している。B-Vの ^{208}Pb には入力ミスがある。B-Vの全断面積は10~20MeVで ^{232}Th の場合現在のものより小さく、 ^{242}Pu の場合現在のものより逆に大きい。

6. D.L.Johnson(HEDL) : Measurements of Neutron Total and Total Nonelastic Cross Sections for C,O,Ca and Fe at UC Davis

$E_n=35.3, 40.3, 50.4\text{MeV}$ でCa と Fe の全断面積の測定を行った。また $40.3, 50.4\text{MeV}$ でC,O,Ca およびFe の total inelastic cross sectionを測定した。後者の測定には透過法に似た測定法を用いている。たゞし試料よりも大きな検出器を用いて、弾性散乱の前方散乱(この fraction を f とする)も計数する。このとき透過法と同様にして求めたみかけ上の断面積を σ_x とすると non-elastic cross section σ_{non} は

$$\sigma_{\text{non}} = \{ \sigma_x - (1-f)\sigma_T \} / f$$

で与えられる。こゝで σ_T は全断面積である。報告者はこの方法で誤差 8% 位で求まるといっている。

7. T.S.Subramanian(LBL) : Neutron Induced Charged Particle Measurements from C, N and O at UC Davis

8. H.Vonach(IRK, Vienna) : Measurement of the Angle-Integrated Second Neutron Spectra from Interaction of 14 MeV Neutrons with Medium and Heavy Nuclei

9. R.W.Finlay(Ohio U.) : Differential Cross Section Measurements Above 20 MeV

Ohio 大学の中性子散乱の実験が紹介された。光学模型における isovector effect に言及している。

10. R.W.Finlay(Ohio U.) : Neutron Induced Charged Particle Reaction Studies at Ohio University

Q-lens spectrometer が準備中である。

11. J.Fréhaut (Bruyère-le-Chatel) : Status of $(n,2n)$ Cross Section Measurements at Bruyère-le-Chatel

Gd-loaded 液体シンチレータのタンクを用いた、 $E_n=8.5\sim 15\text{MeV}$ でNd およびSm のアイソトープの $(n,2n)$ 反応の断面積測定が報告された。Gilbert-Cameron のレベル密度を用いた計算と比較しているが、実験値とは全く合わない。(Gilbert-Cameron は15年前のものだからもう使うなというコメントがあった。)

セッション V FMIT 関連問題—遮蔽および材料損傷の研究

L.L.Carter(HEDL) : Nuclear Data Relevant to Shield
Design of FMIT

Li(d,n) 中性子源において前方の中性子収率に図1に示すような高エネルギー側のプラトーやピークは遮蔽設計算に重要であることが指摘された。

D.G.Doran(HEDL) : Fusion Materials High Energy Neutron
Studies - A Status Report

Hanford に建設されるFMITは今年の2月22日に掘さくを開始した。

R T N S - II では、最高の実用フルエンスを得るべく研究が進められている。23cm ϕ のリシウムの回転ターゲットを5000rpm で回転させ40keV重陽子を40mA あてて、ターゲットの寿命80時間程度を得ている。これによる照射テストは、もっと弱い中性子源によるテストと関連づけられることが判った。今後の計画として、Fe,Cu,Ni,Nb の displacement cross section を50MeVまで、またヘリウム生成断面積を40MeVまで測るそうである。

1. D.L.Johnson(HELD) : Measurement and Evaluations of
Nuclear Data to Support Early Design Needs of the
FMIT Facility

FMIT 開発のために、リシウム・ターゲットおよび加速器内壁材料に重陽子をあてたときの、(d,xn), (d,x γ), (d,gas production), さらにLi(d,xp) 反応の断面積データも重要であることが強調された。また鉄の non-elastic の例を挙げ、20~50 MeV 範囲で最近の測定値は、今までの多くの評価値の半分程度の値であることをリマークした。

2. F.M.Mann(HELD) : Neutron Environment in d+Li Facilities
50 MeV までの15 $^{\circ}$ 方向の中性子スペクトルは非常によく計算に乗っている。

3. S.M.Qaim (Jülich) : Integral Cross Section Measure-
ments on (n,x) Reactions Induced by d-Be Break-up
Neutrons on FRT Wall and Structural Materials
30 MeV d-Be 中性子施設を用いて、multiple foil activation の方法で、
沢山の積分断面積(一定エネルギー範囲のスペクトル平均断面積)を測定している。

4. R.Gold(HEDL) : Cross Sections Required for FMIT Dosi-
metry

FMIT のドシメトリ計画の話のあと、ドシメトリ用断面積のニーズが述べられた。

5. R.Gold (HEDL) : Cr-39 Polymer, A Promising New Solid

State Track Recorder for High Energy Neutron Applications

6. G.F.Dell(BNL) : Calculation of Radiation Effects for Non-Metals

これら2つの話は聴き落した。

7. R.G.Johnson(NBS) : Source Imaging for FMIT Using a Neutron Pin-Hole Camera

このピンホール・カメラはNBSライナックの低いエネルギー中性子用に開発したものであるが、最近 14 MeV 中性子源に用いて、2次元測定ができるようになった。

セッション V 原子核模型コードおよびデータ評価

LLLのGardner によるサーベイ・トークでは原子核反応理論の最近の発展に関する話があった。

光学模型による解析ではBologna の Specialist Meeting (1979) に報告されたLagrange et al. の仕事, Ohio 大学のRappaport et al. の仕事(N.P. A330, 15(1979)), などが最近の主なるものである。レベル密度に関してはGilbert-Cameron では $\langle m^2 \rangle = 0.146A^{2/3}$ であるが, REF F O では $0.24A^{2/3}$ と採っている。統計モデルに関しては, $^{90}\text{Zr}+n$ についてコードの比較の結果の話があった。Preequilibrium については T.Tamura の (p , p') の計算が紹介され, 実験との比較が図示された。高い励起のあたりでは不一致がみられる。

1. C.Y.Fu(ORNL) : Developments and Applications of Multi-Step Hauser-Feshback/Pre-Equilibrium Model Theory

角運動量保存を考慮した compound と precompound を combine した新しいモデルに基づく理論とその計算結果が紹介された。このモデルは放出粒子の角分布も含めることができる。複合核の段階で用いられる random phase 近似は precompound の段階では部分的に取り除かれている。

図4および図5にそれぞれ, スペクトルと角分布の計算例を示す。図4で破線のカーブは binary step のみの計算結果である。

この理論は角運動量保存を考慮している点において, 非常に興味深い。参考文献: C.Y.Fu, ORNL/TM-7042(1980) and submitted to Phys. Rev. C.

2. C.Kalbach(Duke U.) : Phenomenology of Preequilibrium Angular Distribution

これはFuのやり方とは違って、可成り徹底した現象論である。簡単な式で広い範囲の質量数、エネルギーおよび反応のタイプに適用出来るものを求めている。

3. H.Gruppelaar(Petten) : Comparison of Experimental and Calculated Neutron Spectra and Angular Distributions
微分非弾性散乱断面積をAkkermansの方法(Phys. Letter 22B (1979)28)で計算した。結果は $A < 90$ の軽い核に対しては、後方での実験との一致はあまりよくない。
4. R.Y.Cusson(Duke) : Prediction of Heavy Element Fission Barrier Features for Multiple Chance Neutron Cross Section Calculations
5. E.D.Arthur(LASL) : Evaluation of Neutron Cross Sections to 40 MeV for $^{54,56}\text{Fe}$
6. E.D.Arthur(LASL) : Calculation of ^{59}Co Neutron Cross Sections Between 3 and 50 MeV
 $^{59}\text{Co}(n,p), (n,\alpha)$ および (n, xn) 反応断面積の計算が紹介された。
7. T.W.Phillips(LLI) : A Study of Optical Model Parameters for High Energy Neutron Cross Sections from 5-50 MeV
飛行距離250mのTOFによって、 ^{140}Ce の全断面積と ^{142}Ce , ^{141}Pr および ^{139}La の透過比とを約70MeVまで測定した。 ^{140}Ce に対して60 MeVまでの光学模型による解析を行っている。
8. L.F.Hansen(LLI) : Neutron Scattering Cross Sections for ^{232}Th and ^{238}U Inferred from Proton Scattering and Charge Exchange Measurements
26,27 MeV において、IAS への (p,n) および (p,p) 反応の微分断面積を結合チャンネルに理論を用いて、よく fit するパラメータを求め、それを用いて中性子弾性散乱を計算して実験値と比較している。
9. A.B.Smith(ANL) : Measured and Evaluated Bismuth Cross Sections for Fusion-Fission Hybrid Reactors
数MeVまでの実験と解析である。
10. S.Cierjacks(KFK) : Neutron Yields and Spectra from 590 MeV (p,n) Reactions on Lead Target
この講演ははじめ予定されていなかったが、特別に追加された。

SINのサイクロトロンからの590MeV陽子をheavy metal targetに当て、TOF法でターゲットからの中性子と陽子の収率を観測している。観測は 30° , 90° , 120° で行っている。

この他に東北大, Y.Hino et al. の contribution があったが口頭発表はなかった。題名は「Cross Sections for the Reactions of $^9\text{Be}(n, t_1 \gamma)$ and $^{12}\text{C}(n, n' \gamma)$ between 13.0 and 15.0 MeV」

夜、8時から4つのグループのワーク・ショップが開かれた。私はF.G.Pereyのグループに入った。ビールを飲みながらの討論で、あまり記憶が定かでないが、こゝ3年間の測定では dosimetry cross section の測定が足りないことがしきりにいられていた。

セッション VI ワークショップ報告の発表と討議

C.D.Bowman(NBS) : 強力中性子源とその特性

Passive, active およびCalculational dosimetryいずれも可成り進歩したが、active dosimetry の内の1つとしてbeam diagnostics 用のものが要る。FMITができたあとも、INSは必要である。今後医療用データをもっと必要である。thick target neutron yield dataも核データファイル化すべきである。等々がrecommendされた。

F.G.Perey(ORNL) : 微分データ測定

- C, O, N等をもっと測定すべきである。
- 15~50MeV の範囲で陽子や軽イオン入射の実験をもっと必要である。
- σ_T は光学模型のSystematics 研究のために、凡ての核種について測られるべきである。
- その他の反応の断面積、すなわち σ_{el} , $\sigma_{n, xn}$, $\sigma_{n, charged particle}$ 等をもっと測定されるべきである。
- dosimetry cross section ももっと測る必要がある。
- 前回 coordinated measurement を要求したが、実行されなかった。

F.M.Mann(HEDL) : FMIT関連問題 遮蔽と材料損傷の研究

測定の優先順位は第1にNi, Co, Fe である。次にV, Nb, Mo, Ti, ..., 次にC, O, N 遮蔽設計のためにはFeのデータが最優先である。

FMIT用核データのため `useful format` を作る必要がある。等々の発表があった。

P.G.Young (LASL) : 核モデル・コードとデータ評価

Precompound の treatment については見るべきものがあった。レベル密度に関しては発展はほとんどなかった。 γ 線の強度関数を multistep Hauser-Feshbach 理論を使って求めることを recommend する。……など。

シンポジウムのあと、BNL の G.Prince にさそわれて CSIG の計算コードの比較に出席してみた。Preequilibrium model による計算コード GNASH と STAPRE とを用いて ^{90}Zr について計算し、結果の違いの原因を討論する会合であった。あまりよくわからなかったが、両者のコード間には rate expression と Pauli energy の定義から生ずる相異があるようである。

シンポジウムの全体としての印象として、米国のポテンシャルは依然として可成り高いと感じた。それに、高いエネルギー領域の中性子実験はまだ不足しているとはいっても、いくつかの新しい実験が行われ、実験データによって validate された計算・評価が行われていることはうらやましい限りである。

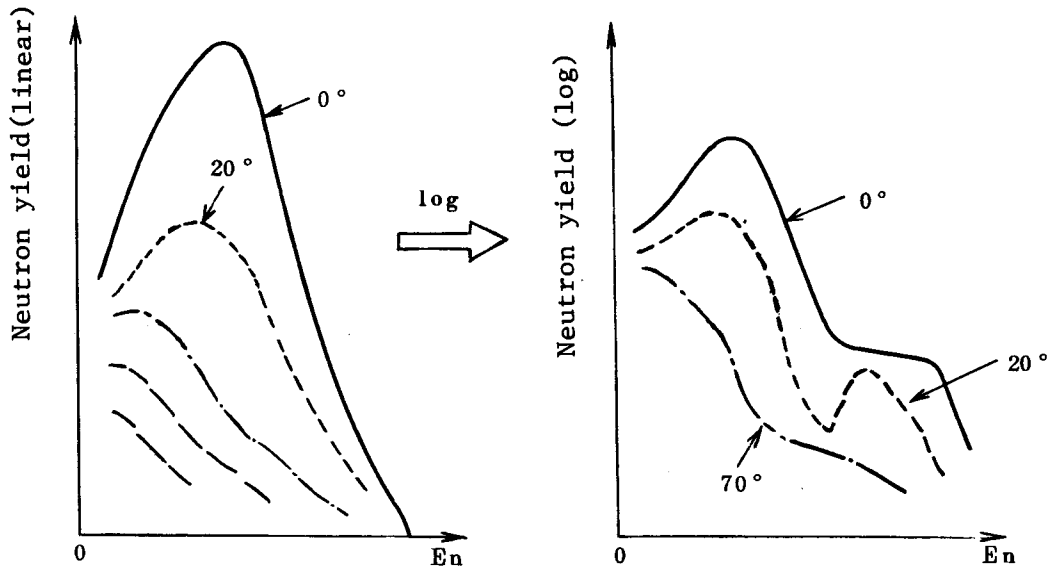


図1. 厚いターゲットで、35MeV 重陽子入射によるLi(d, xn) 中性子源からの中性子収率

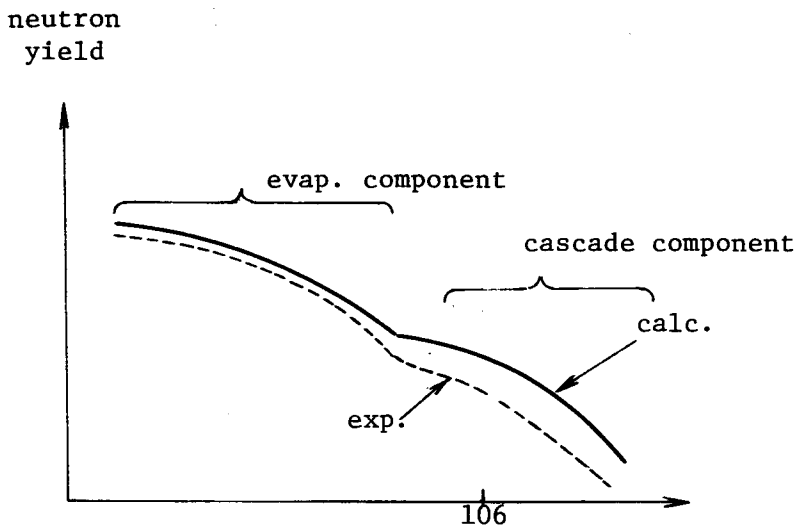


図2. WNR Fでの90° 方向の中性子収率の測定と計算との比較

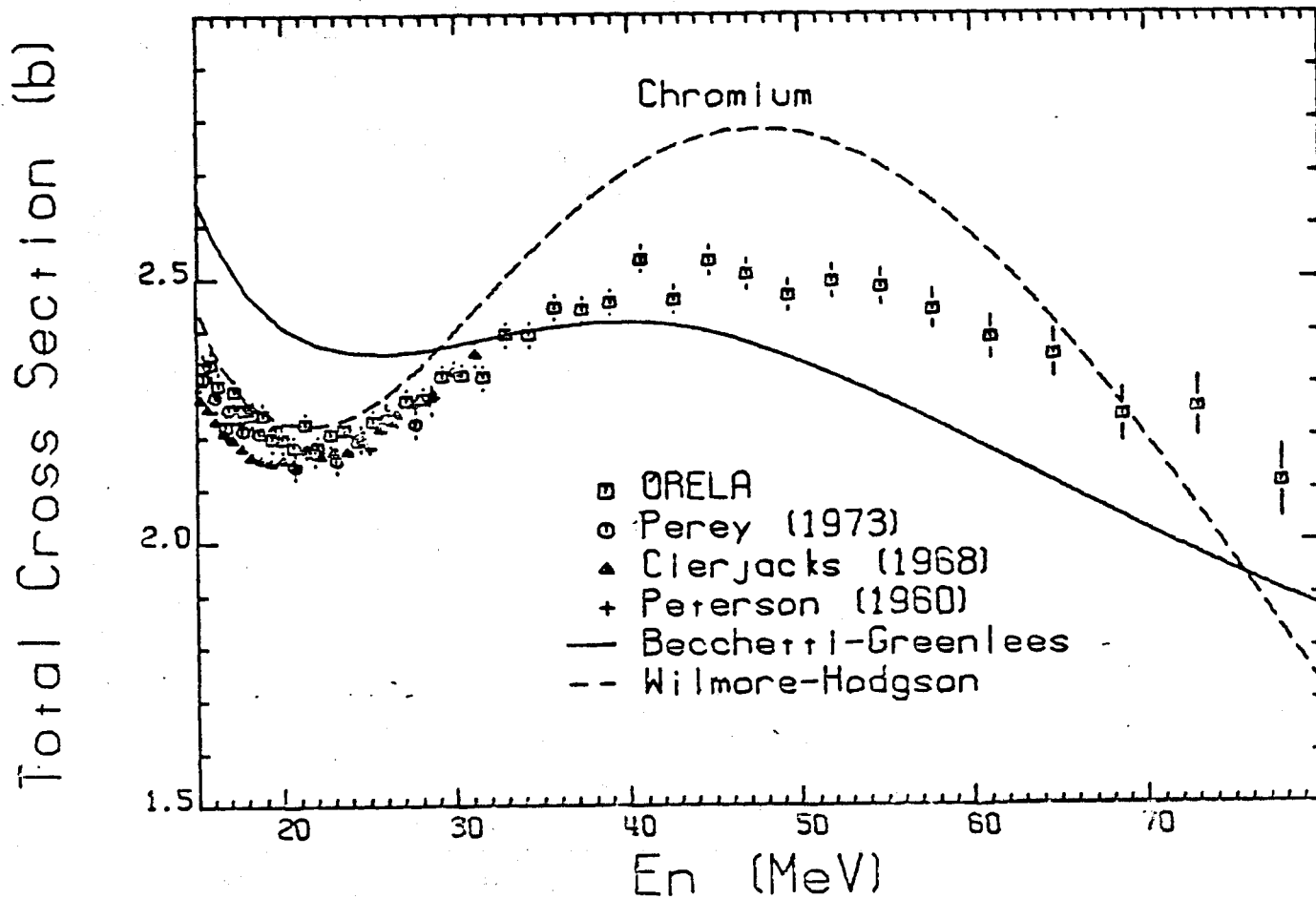


図3. ORELAによるCrの全断面積の測定値, 光学模型による計算との比較を示す。

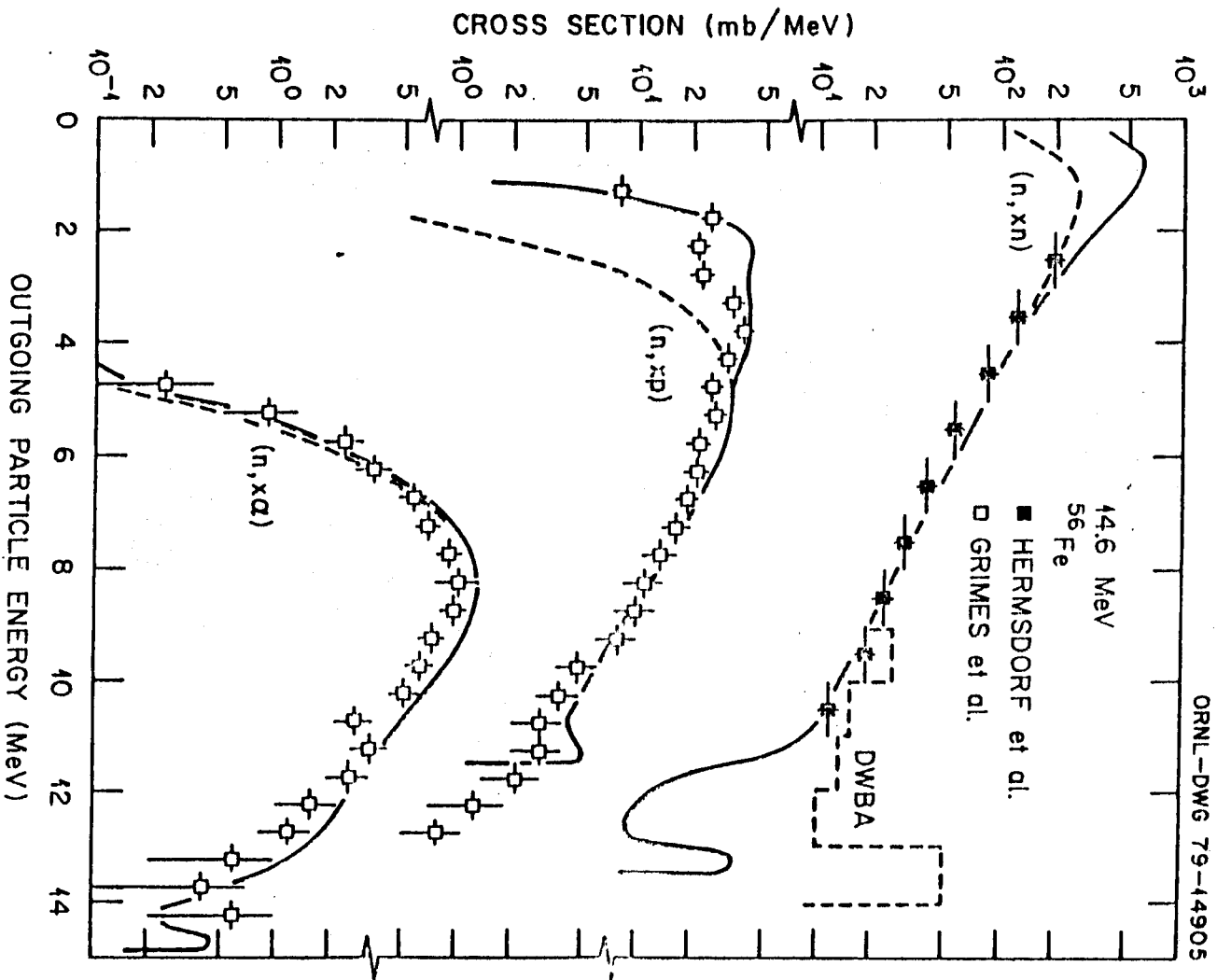


図 4. ORNLのPuによるmulti-step H.F./pre-equilibrium
 模型計算, 破線はbinary step だけからの寄与を示す。

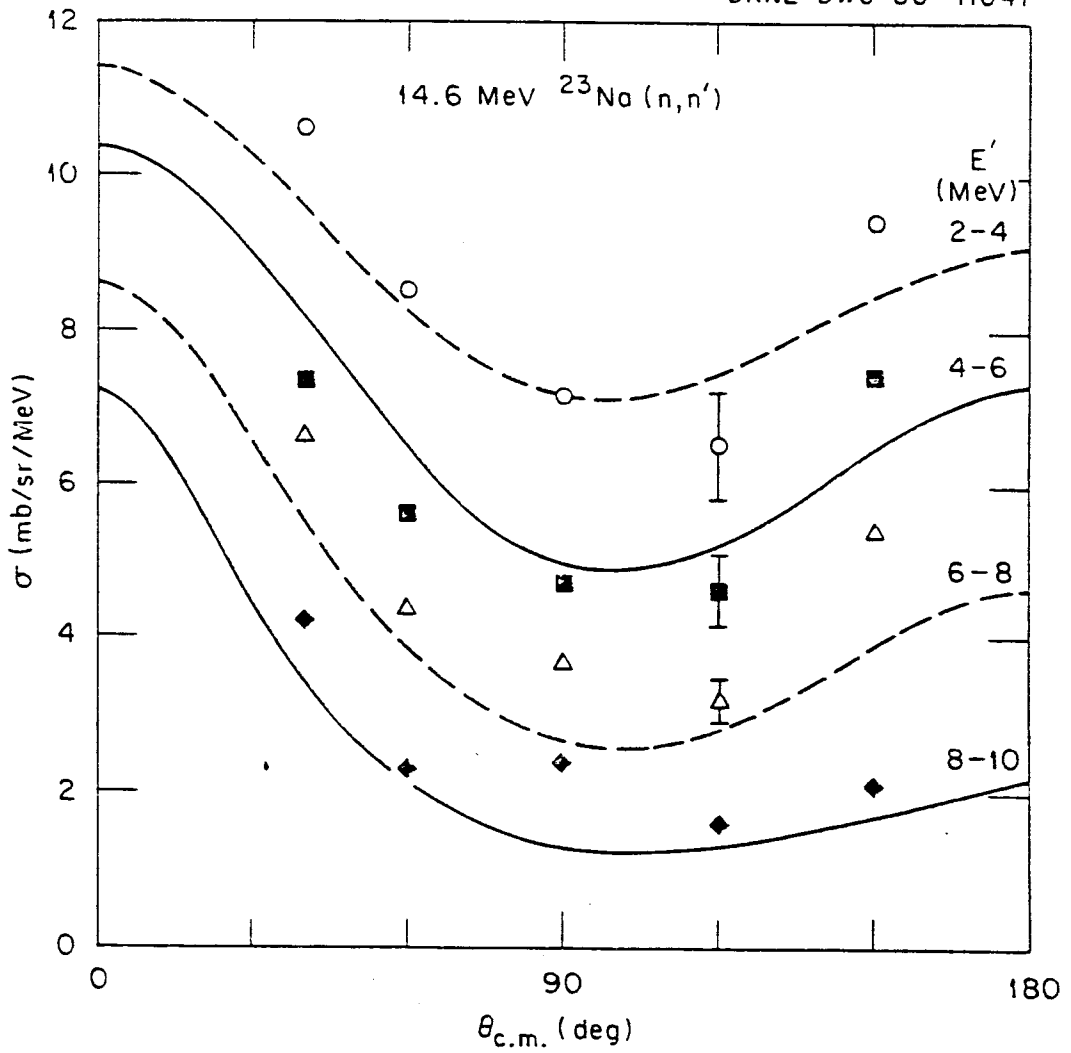


図5. ORNLのFuによるmulti-step H.F./pre-equilibrium
 模型に基づく角分布の計算。右側の数字は残留核の励起の範囲を示す。