

## オックスフォード大における核物理・核データの研究

九州大学総合理工学研究科

渡辺 幸信

核データニュース前巻 No.49 の「オックスフォード滞在記 1993」の中で、オックスフォード大での体験について触れ、留学中の雑感を述べたので、本報告ではオックスフォード大における核物理・核データ研究という視点から、とくに、核データ活動に関連した話題として、進展の著しい統計的多段階反応に関する研究成果を中心に紹介しよう。

### 1. オックスフォード大の核物理研究コミュニティ

表 1 にオックスフォード大物理学科の Sub-department (大講座制の研究室のような単位) の分類を示す。これらの中で、PARTICLE AND NUCLEAR PHYSICS と THEORETICAL PHYSICS の Sub-department に原子核物理を研究しているグループがいる。前回 [1] 述べたように、オックスフォード大の加速器 (10 MV バンデグラフ 静電加速器) は Daresbury の Nuclear Structure Facility (NSF) の 20 MV タンデム加速器の稼働 (1983) に伴ってシャットダウンし、現在では核物理の実験的研究はここでは行われていない。したがって、オックスフォードが英国の核物理をリードしていた十数年前に比べると、原子核物理を専攻している学生もスタッフも非常に少なく、現在ではアクティビティはけっして高いとは言えない状況にある。こういった環境の中で、PARTICLE AND NUCLEAR PHYSICS に所属する W.D.M. Rae 博士が率いる実験グループが、Daresbury の NSF タンデムで重イオン反応における原子核の  $\alpha$  クラスタや分子的共鳴の研究 [2] を精力的に行ってきたが、1993 年 3 月に NSF がシャットダウンしたことで、彼らの実験の活動の場は英国本土から遠く離れ、オーストラリアのキャンベラへ移ってしまった。現在、英国では核物理専用の粒子加速器が稼働していない状況にあり、Rutherford 以来、世界をリードして数々の成果を挙げてきた英国の伝統的な実験核物理の歴史は大きな転換期を迎えたといえるであろう。

一方、オックスフォードにおける核構造や核反応の理論的研究は先述の 2 つの Sub-departmen で行われている。THEORETICAL PHYSICS には、D.M. Brink 博士 (現在、イタリアのトレント大) と B. Buck 博士がいて、重イオン反応の研究や原子核の集団運動・クラスター構造・IBM モデルなどの核構造研究を継続して行っている。Buck 博士は、Rae 博士らのグループの A.C. Merchant 博士らと一緒に、 $\alpha$  崩壊やエキゾ

ティック崩壊 [3] の半減期の理論的計算に取り組んでいる。Brink 博士と Buck 博士の業績は、核データ評価の理論計算においても引用される機会があるので御存じの方が多いであろう。ちなみに、複合核反応の  $\gamma$  線崩壊幅の計算に Brink-Axel モデルが使われ、非局所光学ポテンシャルや DWBA 断面積計算における非局所性の補正に Perey-Buck の研究成果が引用されている。

次に、PARTICLE AND NUCLEAR PHYSICS には、P.E. Hodgson 博士と J.R. Rook 博士の研究グループが核理論や実験データ解析の分野で研究を行っている。Hodgson 博士は、核データ評価コミュニティの中でもっとも名の通った核物理屋の代表であろう。低エネルギーでのグローバルな中性子光学ポテンシャルとして広く使われている Wilmore-Hodgson ポテンシャルとしてその名を知らない者はいないであろう。最近は、Feshbach-Kerman-Koonin (FKK) モデルを用いた前平衡核反応過程や  $\alpha$  クラスタ現象に関連した核反応の研究を精力的に進めている。Rook 博士は、微視的な光学ポテンシャルの先駆的な研究で核データ評価コミュニティの中でも知られている研究者である。前述の実験グループに分類した W.D.M. Rae 博士と A.C. Merchant 博士も、彼らの実験的研究に関連して、 $\alpha$ -連鎖状態 (例えば、 $^{28}\text{Si}$  の 7  $\alpha$  連鎖状態) を仮定した  $\alpha$  クラスタモデルによる superdeformed 核や hyperdeformed 核の粒子崩壊に関する理論的研究 [4] を進めている。

筆者はオックスフォードにて半年間 (1993.6 - 1993.11)、P.E. Hodgson 博士とともに、FKK モデルによる核子入射反応解析の仕事を行ってきた。次の節では、その成果に主眼を置いて、Hodgson 博士等の研究を紹介することにしよう。

## 2. P.E. Hodgson グループの研究活動

まず、Hodgson 博士の研究スタイルの特徴は、「国際間の人的ネットワークを利用した共同研究」にある。毎年、長・短期の訪問研究者が欧米・アフリカ・アジア諸国からやってきて、Hodgson 博士と共同研究や論文などの共同執筆を行う。例えば、筆者が関係した FKK モデルによる統計的多段階反応研究のネットワークは図 1 に示すようになる。この中には、NEA/NSC の核データ国際協力タスクに関係している研究者が多く含まれており、核データ活動にも間接的ではあるが、オックスフォード大で行われている共同研究が貢献していることに気づくであろう。また、筆者も含め、実験グループもこのネットワークに参加しており、実験データ解析の結果が、核物理の知見をさらに深めるために、次に何を新しく測定すべきかを決定するプロセスにフィードバックされる。

以下、オックスフォードでの FKK モデル解析の現状について報告する。なお、FKK

モデルについては筆者の解説記事 [5] や Gadioli & Hodgson の解説本 [6] を参考にしてもらいたい。Hodgson 博士の FKK モデルによる解析の歴史は Bonetti との共同研究 [7] (1981) から始まり、M.B.Chadwick 博士 (現在、米国 LLNL) のオックスフォード大 D.Phil (博士課程 1986-1989) 時代を経て、現在に至っている。この間、FKK モデルに基づく計算コードが整備されていった。現在、オックスフォード大の VAX コンピュータ上で利用可能なコードを表 2 に列挙する。筆者が滞在中、Bonetti コードのユーザである M. Avrigeanu と W. Richter の両博士が訪問研究者と滞在した機会に、2 人で各々の MSD 計算コードの相互比較を行い、類似点やいくつかの相違点を明かにした。その結果の詳細は文献 [8] にまとめている。(興味のある方は連絡していただければ、内部レポートの別刷りをお送りいたします。)

Hodgson 博士のグループは、ここ数年、阪大 OKTAVIAN での系統的な 14.1 MeV ( $n,n'$ ) データに対する FKK モデル (表 2 の Olaniyi コード + GAMME コードを利用) 解析を続けている。この一連の解析における最大の関心は、MSD 計算における唯一の調整可能なパラメータである有効相互作用の強さ  $V_0$  の系統性 (入射エネルギー依存性と質量数依存性) を調査することである。

FKK モデルが属する統計的多段階反応モデルでは、前平衡粒子放出過程を前方ピークの角分布を示す反応の時間スケールでは速い反応に相当する多段階直接過程 (MSD) と重心系で  $90^\circ$  対称の角分布を持ち、遅い反応に相当する多段階複合核過程 (MSC) に分けて取り扱われる。実験的には、両反応過程を分離して測定することはできないので、MSD と MSC 成分が混在した inclusive な放出粒子の前平衡スペクトルとして観測される。従来 of 十数 MeV の核反応の FKK 解析では、後方角では MSC 成分が MSD 成分に比べ圧倒的に大きいという仮定の下に、後方角での測定スペクトルの解析に MSC が使われた。一方、数十 MeV 以上の核反応に対しては、放出粒子エネルギーが高い場合、MSD 過程が優勢になるために、おもに MSD 計算のみで実験データの解析が行われてきた経過がある。しかしながら、数十 MeV 以下の比較的低エネルギー反応においても、MSD 過程 (とくに 1 段階過程) の寄与が後方角でも大きいことが知られ始めた [9]。そこで、実験データから MSD の相対的な割合を詳細に議論するためには、この両過程成分をなんらかの手法で分離して解析する必要が生じた。筆者がオックスフォードで仕事を始めた当初、Hodgson 等は、この問題に対して Subtraction 法と呼ぶ解析手法 [10] を考案し、14 MeV ( $n,n'$ ) データの解析に応用し始めていた。

Subtraction 法とは、MSC 粒子放出が重心系で  $90^\circ$  対称の角分布をもつという特徴を利用し、重心系に変換した 2 重微分断面データ  $\sigma(\theta)$  を  $90^\circ$  に関して対称な角度の対 (例えば、 $30^\circ$  と  $150^\circ$ ) で引き算をすることにより、前方ピーク性をもつ MSD 成分のみを抽出する方法である。MSD 計算の結果も同様な角度対に対して引き算をする

ことで、実験データとの比較を行い、上述の有効相互作用の強さ  $V_0$  パラメータを最小自乗法で決定する。14 MeV ( $n,n'$ ) データに対して、Subtraction 法を適用した結果 [11] の一例を図 2 に示す。さらに、広範なターゲットに対して導出された  $V_0$  パラメータの質量数依存性を図 3 に示す。質量数が増加するにつれ、 $V_0$  値は減少する傾向があることがわかる。現時点では、この傾向の物理的な説明が十分なされてなく、核物理的視点からは課題が残っているが、核データ評価への応用という見地からは、経験式が得られれば十分であろうと思われる。こうして、決定された  $V_0$  値を用いた MSD 計算に MSC および複合核成分、さらに低励起状態への集団励起も含めたトータルな計算結果と実験値との比較を図 4 に挙げておく。

次に、筆者のオックスフォードでの研究 [12] の一端を紹介しよう。上述の解析手法を陽子入射反応へ適用し、 $V_0$  値の入射エネルギー依存性ならびに入射核子のアイソスピン依存性を調査することをメインテーマとした。解析対象の実験データとして、九大タンデムおよび原研タンデムで過去に系統的に測定がなされた 12 ~ 26 MeV ( $p,p'$ ) データおよび Hamburg グループが以前測定した 26 MeV ( $p,n$ ) データのなかから、同一ターゲットとして  $^{98}\text{Mo}$  と  $^{106}\text{Pd}$  を選んで、FKK-GNASH コード [9] を用いた解析を行った。Subtraction 法により、求めた  $V_0$  値の入射エネルギー依存性を図 5 に示す。まず、( $p,p'$ ) と ( $n,n'$ ) で  $V_0$  値の入射エネルギー依存性が異なっている点に気づく。( $p,p'$ ) の  $V_0$  値は、入射エネルギーの平方根の逆数に比例する傾向があるが、( $n,n'$ ) の方は光学ポテンシャルのエネルギー依存性と似た傾向を示している。この違いに対する 1 つの解釈として、核内での入射粒子の運動エネルギーがクーロンポテンシャルの影響で陽子と中性子で異なっている点を挙げるができる。つまり、たとえ同一の入射エネルギーでも核内核子と衝突する際に相互作用に関与するエネルギーが異なることになる。1 段階過程が主に起こる核表面近傍での運動エネルギーを横軸にして、 $V_0$  値をプロットすると ( $p,p'$ ) と ( $n,n'$ ) とともにエネルギーとともにゆるやかに減少する曲線上にのることがわかった。ただし、本解析における入射エネルギー領域では、1 段階直接過程ですべて MSD 成分を説明可能であるので、入射エネルギーが高くなり、多段階過程の寄与が大きくなった場合の  $V_0$  値の系統性についてはさらに調査が必要だと思われる。また、図 5 に示すように、同一エネルギーでの ( $p,p'$ ) と ( $p,n$ ) では、 $V_0$  値が約 2 倍異なることがわかった。この理由として、現在の MSD 計算では、核内核子を陽子と中性子に区別して取り扱う 2 コンポーネントモデルのアプローチがなされていないので、残留核の  $1p-1h$  状態密度の違いが考慮されていない点や、( $p,p'$ ) では連続スペクトル領域にも集団的励起成分が含まれている可能性があり、直接過程成分が強く現れることなどが予想される。詳細な議論のためには、さらに多くの系統的な実験データの収集ならびに総合的な解析が待たれる状況にある。図 6 に、FKK-GNASH コードを用いて計算した 25.6

MeV (p,p') と (p,n) スペクトルの実験値との比較を示している。全体的に、実験値とのよい一致が見られており、FKK-GNASH コードの 20 MeV 以上の核データ評価への適用可能性を示している。なお、ここで述べた (p,p') と (p,n) 反応の解析結果の詳細は、近々、Phys. Rev. C 誌に発表される予定である。

FKK モデルも含め、量子論的な統計的多段階反応モデルの課題の一つ、 $\alpha$  粒子などの前平衡複合粒子放出過程のモデリングがある。前述したように、オックスフォードの核物理コミュニティの共通したテーマに原子核のクラスター現象の究明がある。Hodgson らは、これまでの  $\alpha$  クラスタに関する多くの知見 [13] をベースにして、最近、pre-formed  $\alpha$  粒子のノックオン機構を仮定した FKK-MSD 計算を始めた。(p, $\alpha$ ) 反応に対する予備的な計算結果と実験値との比較の例を図 7 に示す。高放出エネルギー領域で、ほぼ実験データを再現できているが、複合核過程の蒸発成分と MSD 領域の中間領域で過小評価の傾向が見られる。この理由として、MSC 成分の寄与を無視していることが考えられ、1995 年度の共同研究として複合粒子放出過程を考慮した MSC モデルの開発を計画している。さらに、他の複合粒子、d, t,  $^3\text{He}$  も含めた量子論的な統計的多段階反応モデルの構築を目指していく予定である。

### 3. 結 び

以上、1994 年秋の原子力学会（核データ・炉物理）合同特別会合にて報告した「オックスフォード大における核物理・核データの研究」の内容を整理した。オックスフォードにおける核物理研究活動の中で、とくに、Hodgson 博士が進めている統計的多段階反応の FKK モデル解析の現状を紹介した。統計的多段階反応の研究は、今後の中高エネルギー核データ評価という応用面でもっとも重要視されている。現時点では FKK モデルはその有力な理論モデル候補の一つであろう。しかしながら、核理論の立場から言って、FKK-MSD モデル自体にも未解決な理論的な問題 [14] を抱えている現状を指摘しておかねばならないであろう。

核データ評価という応用からの要求が、統計的多段階反応にも関連した核反応の非平衡ダイナミクスの基礎研究をさらに発展させようとする機運を国内外で生み出しており、基礎と応用にまたがる興味深い核物理のテーマを見いだすことができる。今後は、様々な量子論的なアプローチ（QMD、AMD、SCDW モデルなど）による計算結果の相互比較を通じて、中高エネルギー核データ評価に最適な理論モデルを選択して行くことになろう。この作業過程の中で、図 1 に示したような個々の研究者が作る国際ネットワークの環による貢献を大いに期待している。

最後に、オックスフォード留学に際して、経済的な援助をいただいたブリティッシュ

カウンスルに心より感謝の意を表します。

#### 参考文献

- [1] 渡辺幸信、核データニュース、No. 49 (1994) p. 88.
- [2] 例えば、W.D.M. Rae, Proc. of the 1989 International Nuclear Physics Conference, Vol. 2. 299–309, (World Scientific, Singapore,1990); The Charissa Collaboration, Z. Phys. A 349, 349 (1994) など .
- [3] B. Buck, A.C. Merchant, S.M. Perez and P. Tripe, J. Phys. G20 351 (1994).
- [4] 例えば、A.C. Merchant and W.D.M. Rae, Nucl. Phys. A571, 43 (1994) など .
- [5] 渡辺幸信、核データニュース、No. 43 (1992) p. 17.
- [6] E. Gadioli and P.E. Hodgson, Pre–Equilibrium Nuclear Reactions, (Oxford Science Pub., 1991).
- [7] R. Bonetti, et al., Phy. Rev. C 24, 71 (1981).
- [8] Y. Watanabe, M. Avrigeanu, and W.A. Richter, Oxford University, OUNP–93–30 (1993).
- [9] M.B. Chadwick and P.G. Young, Phys. Rev. C 47, 2255 (1993).
- [10] P. Demetriou, P. Kanjanarat, and P.E. Hodgson, J. Phys. G19, L193 (1993).
- [11] P. Demetriou, P. Kanjanarat, and P.E. Hodgson, J. Phys. G20, 1779 (1994).
- [12] Y. Watanabe et al., Presented to Int. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology, May 9–13, 1994, Gatlinburg, Tennessee, USA.
- [13] P.E. Hodgson, Z. Phys. A 349, 197 (1994); 7th International Conf. on Nuclear Reaction Mechanisms, Varenna, 6–11 June, 1994.
- [14] M. Kawai, private communication to Feshbach; I. Kumabe et al., Phys. Lett. 140B, 272 (1984); A. Koning and J.M. Akkermans, Ann. Phys. (N.Y.) 208, 216 (1991).

表1 オックスフォード物理学科の Sub-department 組織図

Sub-department 名
ASTROPHYSICS
ATMOSPHERIC, OCEANIC & PLANETARY PHYSICS
ATOMIC AND LASER PHYSICS
CONDENSED MATTER PHYSICS
PARTICLE AND NUCLEAR PHYSICS
THEORETICAL PHYSICS

表2 オックスフォードで利用可能な F K K モデル計算コード一覧

コード	開発者	取り扱う反応過程
GAMME	Bonetti & Chadwick (1991) <sup>a)</sup>	MSC
MSD	Bonetti & Chiesa <sup>b)</sup>	MSD
MSD	Olaniyi (1992) <sup>c)</sup>	MSD
FKK-GNASH	Chadwick & Young (1993) <sup>d)</sup>	MSD+MSC+HF

Ref.)

- a) R. Bonetti and M.B. Chadwick, GAMME code, Oxford University, OUNP-91-16 (1991)
- b) R. Bonetti and C. Chiesa, MSD code, University of Milano, unpublished.
- c) H.B. Olaniyi, P. Kanjanarat, and P.E. Hodgson, J. Phys. G 19, 1029 (1993).
- d) M.B. Chadwick and P.G. Young, Phys. Rev. C 47, 2255 (1993).

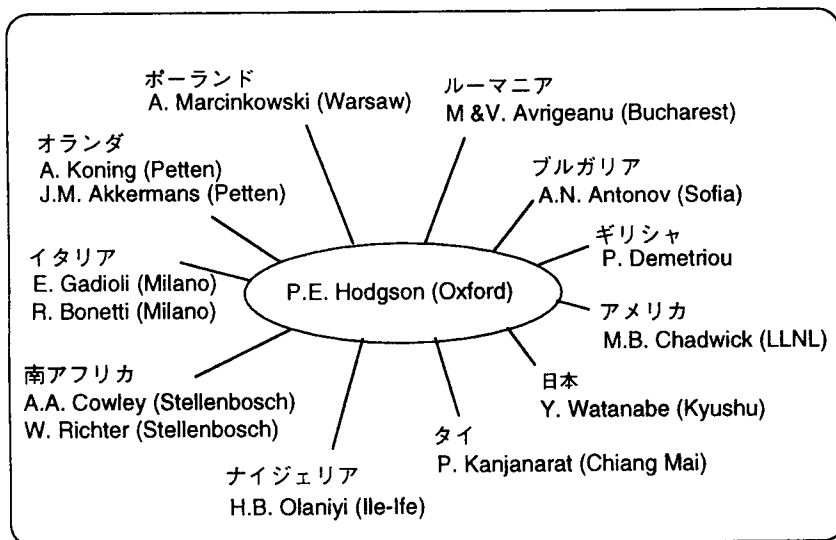


図1 オックスフォードを核とした統計的多段階反応モデルの研究者ネットワーク

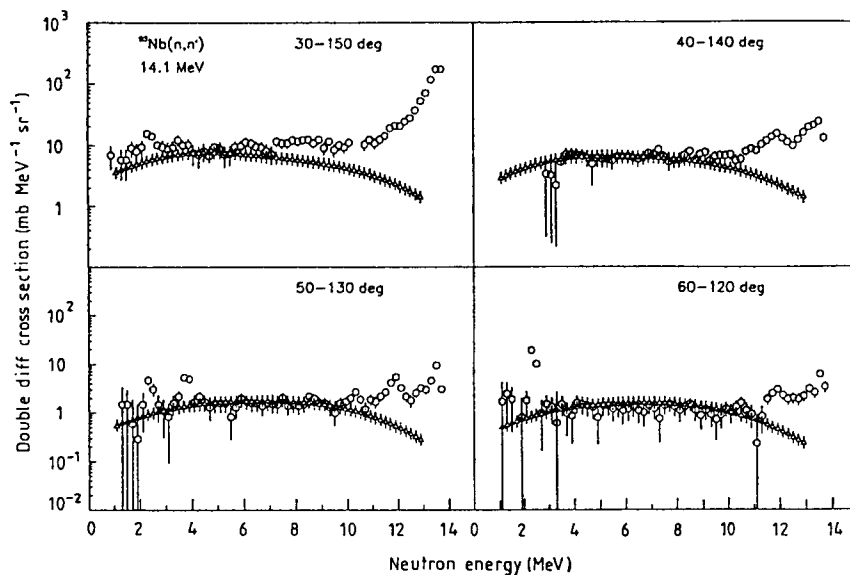


図2 Subtraction法を $^{93}\text{Nb}$ に対する14.1 MeV (n,n')反応の解析に適用した結果。三角マークは平均の $V_0$  (3.5 MeV) を用いて計算されたMSD成分 (文献11より転載)



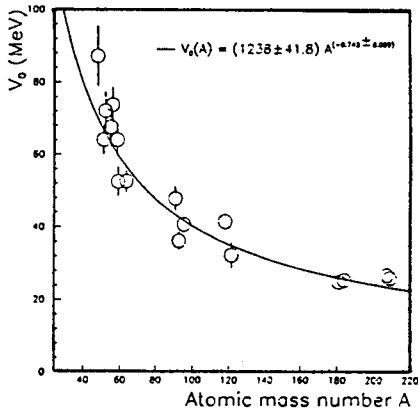


図3 14 MeV (n,n') 反応解析より得られた有効相互作用  $V_0$  の質量数依存性 (文献11)

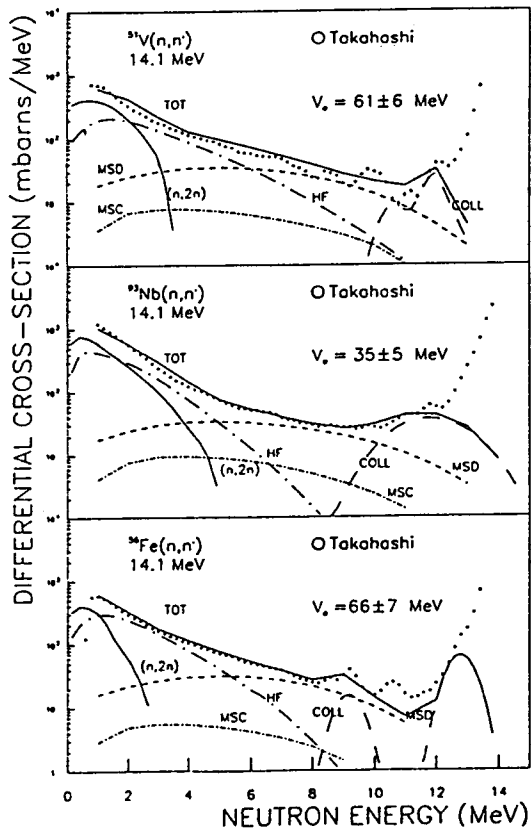


図4 角度積分スペクトルのFKKモデル計算結果と実験値との比較 (文献11)

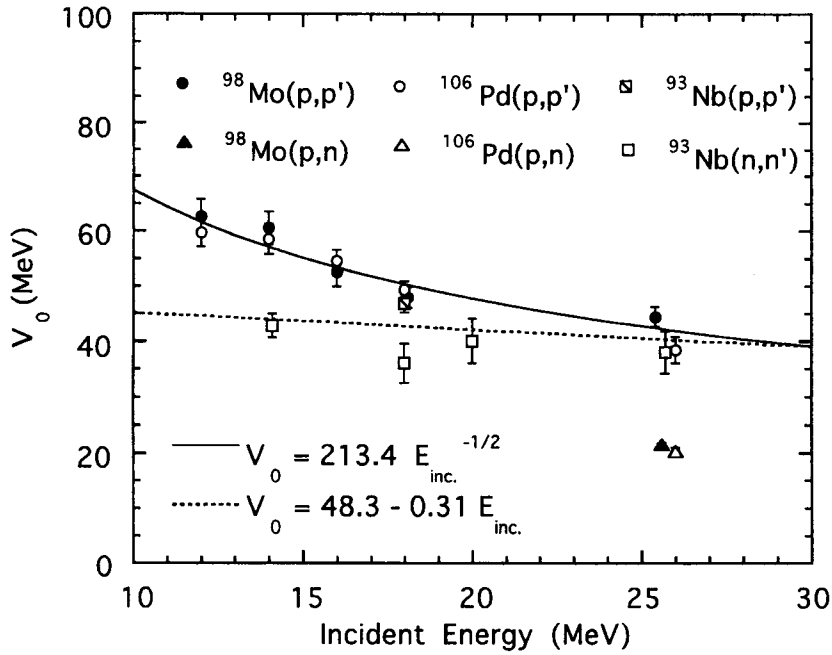


図5 導出された有効相互作用の強さ  $V_0$  の入射エネルギー依存性

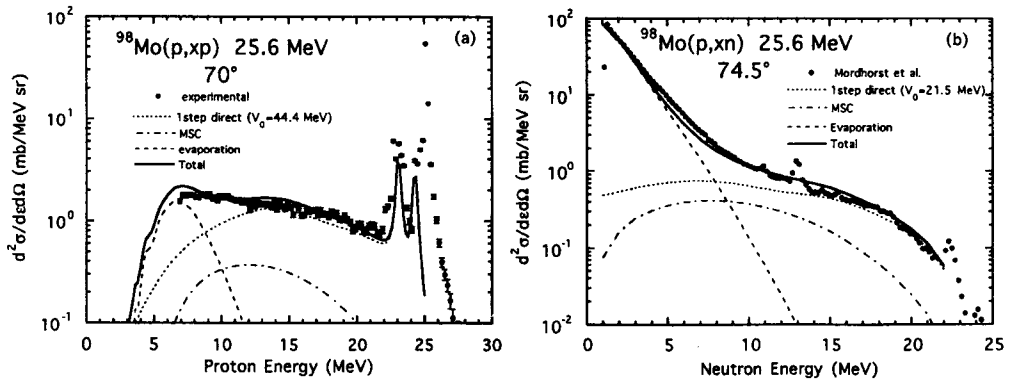


図6 FKK-GNASHコードによる計算結果と実験値との比較

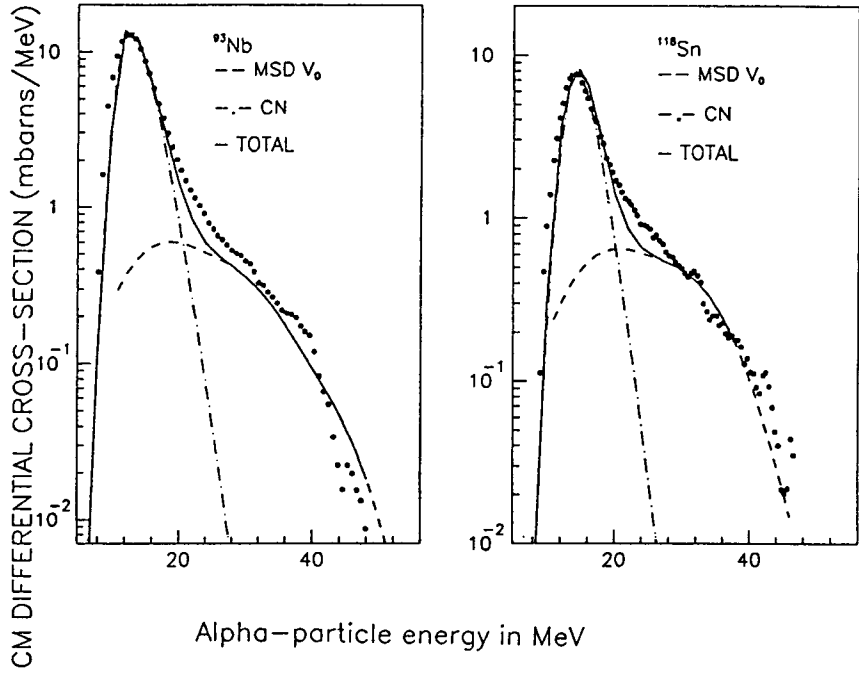


図7 44.3 MeV ( $p, \alpha$ ) 角度積分スペクトルの計算値と実験値との比較  
 (Demetriou, private communication 1994)

