

Ⅲ 理論研究トピックス

— Pre-equilibrium model を中心として —

九大工 農 部 功

1. はじめに

Pre-equilibrium model (平衡前模型) は Griffin によって提案され、その後多くの人達によって発展させられ、種々の核反応の解析に用いられ、大きな成功を収めている。この報告では 14MeV 中性子を主とした高速中性子による核反応を平衡前模型にもとづいて解析した例を、最近の九大での研究を中心に述べる。

2. 理 論

平衡前模型には大きく分けて2つの流れがある。その1つは主にイタリアのミラノグループによって発展させられた Exciton model であり、もう1つは Blann 等によって発展させられた Hybrid model である。

2.1 Exciton model

Braga-Marcuzzan 等 (Phys. Rev. C6 (1972) 1398) は Williams によって与えられた式を少し変形して平衡前崩壊に対する (n, p) 反応断面積の絶対値を次の様にと与えた。

$$\frac{d\sigma(n, p)}{d\epsilon} = \frac{2}{3} (2s+1) \sigma_c \frac{m\epsilon \sigma_{\text{inv}}(\epsilon) \hbar}{\pi^2 \hbar^3} \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{1}{|M|^2} \cdot \frac{1}{g^4 E^3} \cdot \sum_{\substack{\bar{n} \\ n=3}} \left(\frac{U}{E} \right)^{n-2} (n+1)^2 (n-1), \quad (1)$$

($\Delta n=2$)

ここで $s=1/2$ = 陽子スピン, σ_c は入射粒子に対する反応断面積, m は放出粒子の質量, ϵ は放出粒子の運動のエネルギー, $\sigma_{\text{inv}}(\epsilon)$ は放出粒子に対する逆反応断面積, $|M|^2$ は転移行列要素の2乗, g は単一粒子準位密度, E は複合核の励起エネルギー, U は残留核の励起エネルギー, n はエキサイトンの数, \bar{n} は平衡状態になったときの n の極限值である。加算において n は3から \bar{n} まで2つつ変わる。

さて $|M|^2$ は次のように書ける。

$$|M|^2 g^4 / A = \alpha \quad (2)$$

ここでAは質量数である。

α は質量数に依らない常数であると考えられており、その値は $10^{-4} \sim 10^{-3}$ であり、実験値と計算値との比較によって決められるべきものである。

2.2 Geometry dependent hybrid model

Blann 等 (Phys. Rev. Lett. 21(1968)357 ; 27(1971)337 ; 28(1972)757) は Miller 等の master equation approach と simple exciton model との marriage によって hybrid model を提案した。この理論において河合、菊地氏によって計算された核物質中での nuclear scattering の平均自由行程が用いられた。Blann 等はさらに hybrid model に nuclear density distribution を取り入れて改良した geometry dependent hybrid (GDH) model を導いた。それは次のようなものである。

$$P_x(\epsilon) d_x = \sum_{\substack{n=n_0 \\ \Delta n=n_0}}^{\bar{n}} n f_x \left[\frac{\rho_{n-1}(U)}{\rho_n(E)} \right] \left[\frac{\lambda_c(\epsilon)}{\lambda_c(\epsilon) + \lambda_{n+2}(\epsilon)} \right] \cdot \left[\prod_{n=n_0+2}^n (1 - P_{n'-2}) \right] \quad (8)$$

詳細については原論文を参照されたい。

2.3 (n, α) 反応に対する理論

Milazzo-Colli 等 (Nucl. Phys. A210(1973)297) は α 粒子放出の場合に粒子放出に対する平衡前模型(1)式を係数 φ を導入することにより変形した。ここで φ は入射粒子と核内にあらかじめ形成された α クラスターとの衝突確率である。具体的な式は省略するので原論文を参照されたい。

3. 実験結果の解析

Blann 等の model では反応断面積の絶対値を計算できるが hybrid model によって計算された放出粒子のエネルギースペクトルは実験値にくらべると高エネルギー側で急にさがりすぎるし、GDH model による計算では実験値よりも平坦すぎる値を与える。これに反して exciton model による計算ではスペクトルの形がほぼ実験値を再現することが多い。(例として Fig. 9 を見よ) そこで我々は主に exciton model を用いて実験値の解析を行った。

3.1 (n, p) 反応

我々 (Niidome et al. : Nucl. Phys. A245(1975)509) はカウンターテレスコープを用いて 14.1 MeV 中性子による In (n, p) 反応のエネルギースペクトルを測定した。その

結果および理論計算の結果を Fig. 1 に示す。点線は統計模型による計算値であり、実線は(1)式による平衡前模型による計算値である。この場合(2)式の α は $3.3 \times 10^{-4} \text{ MeV}^{-2}$ を用いた。

(Braga-Marcazzan 等の用いた α と同じ値)スペクトルの形および断面積の絶対値共に平衡前模型によるものの方が実験値とよく合うことが分る。

$^{90}\text{Zr}(n, p)$ 反応の励起関数に関する実験値と計算値(中島, 大田: 九大工学集報48(1975)569)とを Fig. 2 に示す。ここで計算値は実験値と合うように $\alpha = 2.46 \times 10^{-4} \text{ MeV}^{-2}$ を用

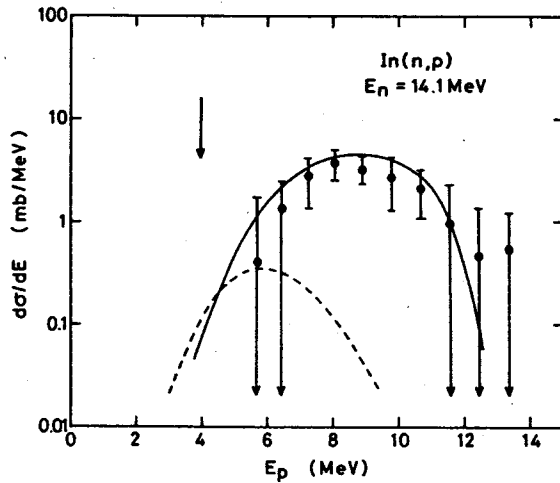


Fig. 1

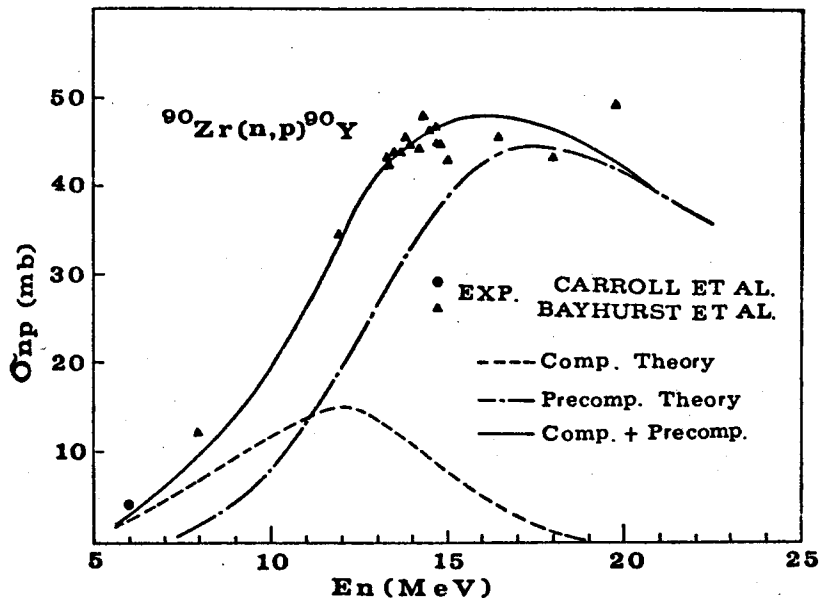


Fig. 2

いた。横軸は入射中性子エネルギーである。統計模型および平衡前模型による計算値の和が実験値をよく再現していることが分る。

Braga-Marcazzan 等は平衡前模型にもとづく(1)式を用いて (n, p) 反応の断面積およびエネルギースペクトルを計算し、質量数 A が 100 以上の核に対して、10 ~ 20 MeV の入射粒子に対してほぼ実験値と合う事を示した。この際実験との比較から α の値の平均値は $3.3 \times 10^{-4} \text{ MeV}^{-2}$ であることを得た。彼女等の解析において、Csikai 等 (At. Energy Rev. 7 (1969) 93) が収集した実験データが用いられた。ところがこれ等の実験データの中には信頼性の薄いデータ、あるいはお互い矛盾するようなデータが沢山含まれておるので、これらのデータと計算値との比較から決定的な結論を引き出すことは難しいと思われる。一方、Levkovskii (Sov. J. Nucl. Phys. 18 (1974) 361) は発表されたすべてのデータの信頼性を慎重に評価し、14 MeV における (n, p) , (n, α) 反応断面積の最も信頼できる平均値を与えた。

これ等の評価ずみの実験値と平衡前模型にもとづく計算値と比較することは非常に興味のあることである。

そこで我々は(1)式を用い $\alpha = 4.9 \times 10^{-4} \text{ MeV}^{-2}$ として 14 MeV (n, p) 反応断面積を計算した。複合核反応からの寄与を統計模型で計算した結果 $A < 120$ の核に対してはかなりの寄与があることが分ったので上記評価ずみの実験値から複合核過程の寄与を差引いた残りの値と平衡前模型による計算値と比較した。なお、 $A > 120$ の核に対しては複合核過程の寄与は数パーセント以下であるので無視した。統計模型での計算では Gilbert & Cameron (Can. J. Nucl. Phys. 43 (1965) 1446) の単位密度および単位密度パラメータを用いた。

実験値と計算値との比 $\sigma_{\text{exp}}/\sigma_{\text{cal}}$ を Fig. 3 の中部に示す。横軸は質量数である。おおまか質量数依存性があることが分る。この図の上部に単位密度と平均の単位密度 ($= A/7.5$) との比 a/\bar{a} の質量数依存性と $\sigma_{\text{exp}}/\sigma_{\text{cal}}$ のそれとの間に強い相関があることが見つかった。 σ_{exp} と σ_{cal} に $(a/\bar{a})^2$ を乗じたものの比を同図下部に示す。点の 1.0 からのずれがかなり改善されたことが分る。

σ_{cal} に $(a/\bar{a})^2$ を乗じて補正したことの根拠について以下に述べる。Braga-Marcazzan 等は(2)式を用いたが $|M|^2 g^4$ は正確には次の式で与えられる。(このことは彼女等の論文中で指摘されている。)

$$|M|^2 g^4 = \alpha \left(\frac{g_c}{g} \right)^4 \left(\frac{g}{g_r} \right)^2 A$$

ここで g は単一粒子単位密度のフェルミガス値である。 g_c と g_r はそれぞれ複合核と残留核に対する真の値である。入射粒子エネルギーが 14 MeV の場合、複合核の励起エネルギーは約 20 MeV となる。このように高い励起エネルギーにおいては殻構造による影響は薄くなってしまふと考えられるので g_c は近似的に g に等しくなる。一方 $g = 6 \bar{a} / \pi^2$, $g_r = 6 a / \pi^2$ であるので、結局 $|M|^2 g^4$ は次のようになる。

$$|M|^2 g^4 = \alpha \left(\frac{g}{g_r} \right)^2 A = \alpha \left(\frac{\bar{a}}{a} \right)^2 A$$

このような結果から σ_{cal} に $(a/\bar{a})^2$ の補正をすることは理由があると言える。

前述のように $(a/\bar{a})^2$ の補正をすることにより実験値と計算値との一致が非常によくなったわけであるが、特に以下の事はこの補正の有効性を顕著に示したものである。即ち $A = 120 \sim 140$ の核に対して $\sigma_{exp}/\sigma_{cal}$ の値は 0.4 と 0.8 の 2 つの値のまわりにグループを作っているが、補正後は 0.9 の 1 つの値のまわりに集中してしまうという事である。

実験値の誤差は 10 ~ 20 % である。 a の値の誤差は Abdelmalek 等 (Nucl. Phys. 58 (1964) 601) によると 7.5 % と見積られている。従って a^2 の誤差は 15 % となり、実験値の誤差と a^2 の誤差との合計の誤差は約 20 % となる。 Fig. 3 の下部のプロットの点のちらばり具合を表わすものとして標準偏差を用いるとこの値は約 25 % となる。従って現段階では $(a/\bar{a})^2$ の補正をした計算値はかなりよく実験値を再現すると言うことが出来るであろう。

その後我々は Blann の GDH 模型による計算を行い Levkovskii によって評価された実験値との比較をした。その結果は $\sigma_{exp}/\sigma_{cal}$ の値は質量数依存性があり、しかも Fig. 3 の中部に示した exciton model による計算からえられた $\sigma_{exp}/\sigma_{cal}$ と殆ど同じ形をすることが分った。 Blann は GDH 模型による計算では 2 のファクター以内で実験値の絶対値を再現出来ると言っている。 GDH 模型による計算値に $(a/\bar{a})^2$ の補正をすれば計算値と実験値との一致は非常によくなるものと期待される。ちなみに Blann は単一粒子単位密度として $g = A/14$ を用いている。なお Blann の計算では対エネルギーの効果を無視しているが GDH 模型による計算においても対エネルギーを考慮した方がよいとの報告がいくつかあるので上記の我々の計算では対エネルギー効果を取り入れた。

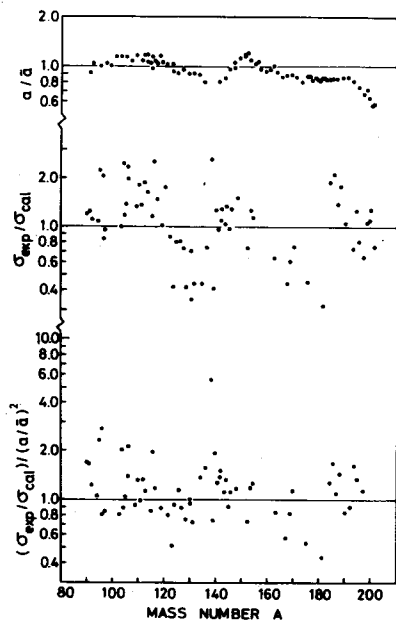


Fig. 3

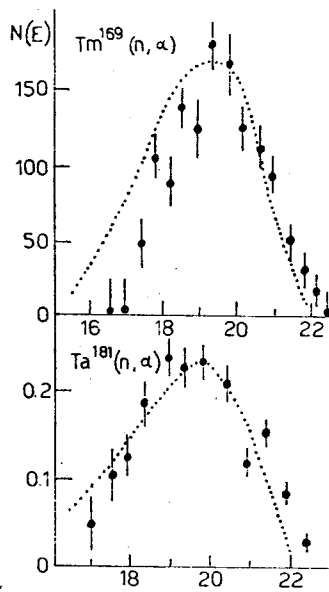


Fig. 4

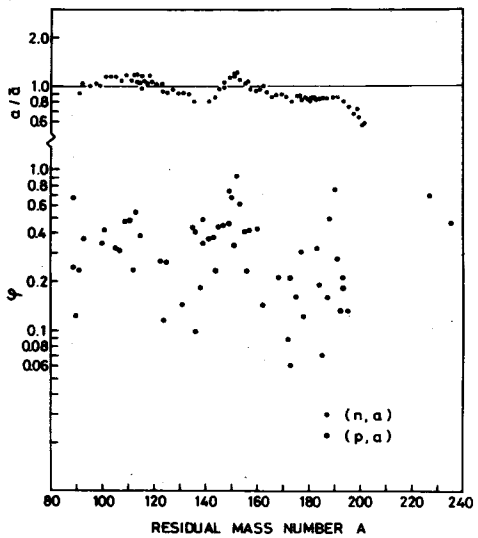


Fig. 5

3.2 (n, α) 反応

重い核に対する (n, α) 反応からの α 粒子のエネルギースペクトルを平衡前模型による計算と比較した例を Fig. 4 に示す。(Milazzo-Colli 等: 前出の論文と同じ) かなりよく一致していることが分る。

Milazzo-Colli 等 (Nucl. Phys. A218 (1974) 274) は $A > 140$ の核に対して (n, α) 反応と (p, α) 反応断面積の実験値と平衡前模型による計算値との比較から φ の値を導びき質量数に対してプロットした。その図をみると φ の質量数依存性のおおまかな形が (n, p) 反応の場合の Fig. 1 の $\sigma_{\text{exp}}/\sigma_{\text{cal}}$ とよく似ていることが分った。そこで我々は $A < 140$ の核についてどうなっているのか調べる為に $A = 90 \sim 140$ の核について平衡前模型によって計算し、Levkovskii によって評価された (n, α) 反応断面積と比較し、 φ の値を求めた。Fig. 5 の下部に φ の値をプロットした。同図上部に a/\bar{a} の値を比較のためにプロットしてある。 φ の値と a/\bar{a} の値の質量数依存性の間に強い相関があることが分る。ちなみに φ の値は (n, α) 反応の場合、 $\sigma_{\text{exp}}/\sigma_{\text{cal}}$ ($\varphi = 1.0$ とした時) の値と非線型に比例するものである。但しこれでは分りにくいので $\varphi = 1.0$ としたときの $\sigma_{\text{exp}}/\sigma_{\text{cal}}$ の値のプロットを Fig. 6 の上部に示す。勿論同じような質量数依存性を示す。 $(a/\bar{a})^2$ の補正をしたものを同図下部に示す。余り改善されていないように見えるが、Levkovskii によって評価された実験値を用いたもの (白丸の点) のみをみればかなり改善されていることが分る。黒丸の点は未評価の実験値を用いたものであり信頼性が薄いものが含まれている。

かくて、(n, α) 反応の場合の $\sigma_{\text{exp}}/\sigma_{\text{cal}}$ の質量数依存性は α クラスターの質量数依存性によるものではなくて a の値の質量数依存性によるものであると結論できるであろう。また、値がよく分っていないパラメータ φ を用いることなしに $\varphi = 1.0$ で平衡前模型によって計算し、その値に 0.066 と $(a/\bar{a})^2$ を乗ずればかなりよく (n, α) 反応断面積を再現できると言えるであろう。

3.3 (n, n'), (n, 2n) 反応

Fig. 9 に 14.6 MeV 中性子による ^{93}Nb からの放出中性子エネルギースペクトルの実験値 (Hermsdorf et al. : J. Nucl. Energy 27 (1973) 747) と統計模型および平衡前模型 (exciton model) による計算値を示す。高エネルギー領域のスペクトルを平衡前模型による計算値がよく再現していることが分る。もっと低い入射中性子の場合はどうなるかを見るために計算したのが Fig. 7 と Fig. 8 である。入射中性子エネルギー 10 MeV では高エネルギー領域において平衡前過程の寄与がかなり大きい徐々に減少し、入射中性子エネルギーが 6 MeV 以下では無視できる程少なくなることが分る。但しこれは計算だけの話で実験値と比較してないので

れ程信用できるか疑問である。

Ag に対する (n, n') と $(n, 2n)$ 反応断面積の励起関数の実験値と計算値を Fig. 10 に示す。(Augustyniak et al.: Nucl. Phys. A 247(1975)231)。彼等は平衡前過程に対してはGDH模型による計算を行った。実験値と計算値との一致は ^{107}Ag についてはよいが ^{109}Ag については余りよくないが大体の傾向は合うと言える。

中性子非弾性散乱に exciton model を使い時には α の値をいくりにするか問題である。そこで我々は 14 MeV 中性子の ^{51}V , ^{93}Nb , ^{181}Ta , ^{197}Au による散乱エネルギー Spektrum を(1)式を少し変形した exciton model を用いて解析し、 α の平均値として $6.6 \times 10^{-4} \text{MeV}^{-2}$ をえた。(Irie et al.: J. Nucl. Sci. Technol. 13(1976)58)。Fig. 9 から分るように放出中性子の高エネルギー部分では平衡前過程の寄与が大きいので $(n, n' r)$ 反応では平衡前過程の寄与がかなり大きくなる。一方 $(n, 2n)$ 反応では複合核過程の寄与が大きいのであるが、全中性子放出断面積が一定ならば $(n, n' r)$ 反応断面積が増すと $(n, 2n)$ 反応断面積は減少することになる。従って平衡前過程の寄与は $(n, 2n)$ 反応に対しても間接的に影響してくるので $(n, 2n)$ 反応断面積の計算の際にも平衡前過程を考慮しないと行けない。平衡前模型として exciton model を用い、 $\alpha = 6.6 \times 10^{-4} \text{MeV}^{-2}$ を用いた計算と統計模型による計算とを行い、 $(n, 2n)$ 反応断面積の実験値と比較したものを Fig. 11 に示す。(Kumabe: J. Nucl. Sci. Technol. 14(1977) No 6)。 $\sigma_{\text{exp}}/\sigma_{\text{cal}}$ の値には質量数依存性はないようにも見えるがよくよく見ると $A=140 \sim 150$ で少し上り、 $A=150$ 付近で少し下るような質量数依存性があるように見えないこともない。もし $(n, n' r)$ 反応の場合にも (n, p) 反応の場合と同じような質量数依存性があり σ_{cal} に $(a/\bar{a})^2$ を乗ずるのが適当であるならば、 $(n, n' r)$ 反応断面積のうちの平衡前過程の寄与 ($150 \sim 200 \text{mb}$) は $(a/\bar{a})^2$ を乗ずることにより $\pm 100 \text{mb}$ 程度変化する可能性がある。一方 $(n, 2n)$ 反応断面積は約 2000mb であるので、この効果は 5% 程度であろう。Fig. 11 において $\sigma_{\text{exp}}/\sigma_{\text{cal}}$ の値の 1.0 からのずれが 5% 程度であり、しかも Fig. 3 の a/\bar{a} のプロットの質量数依存性と全く裏がえしの傾向が Fig. 11 に見られることは $(n, n' r)$ 反応にも (n, p) 反応と同じ質量数依存性があると言えるのかもしれない。但し誤差棒が長いのでこの様に結論するのはまだ早いように思われる。

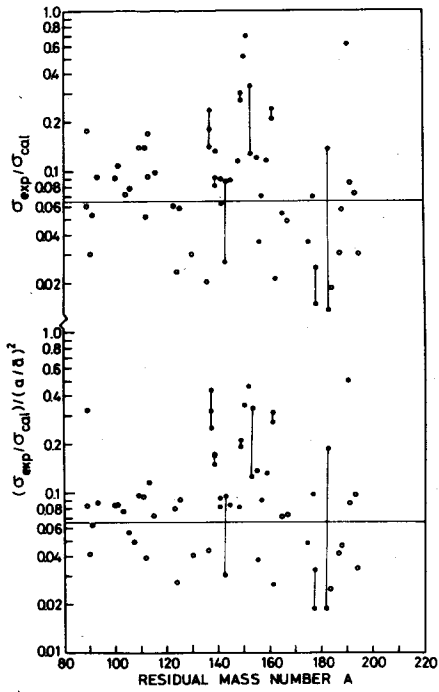


Fig. 6

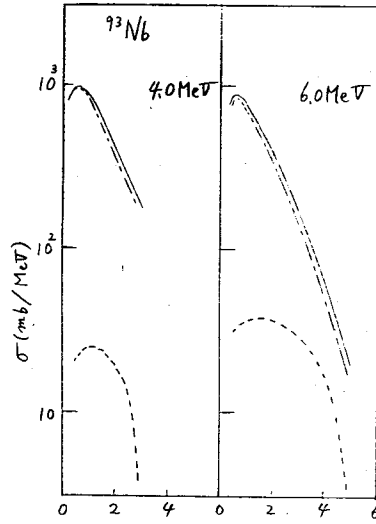


Fig. 7

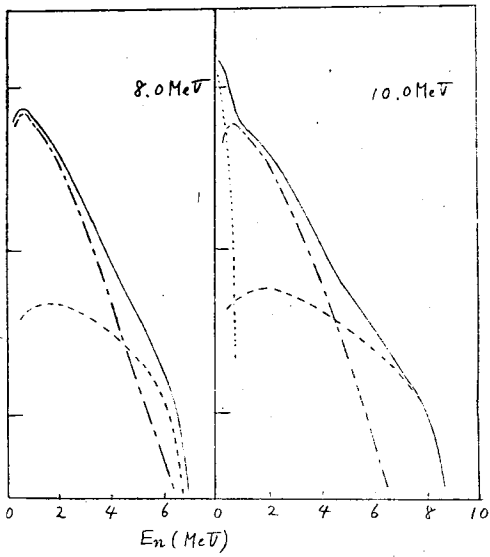


Fig. 8

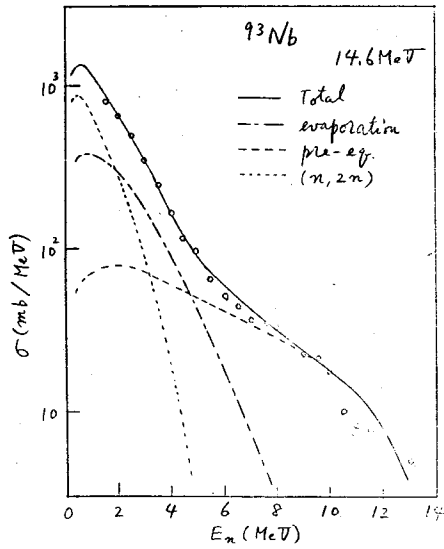
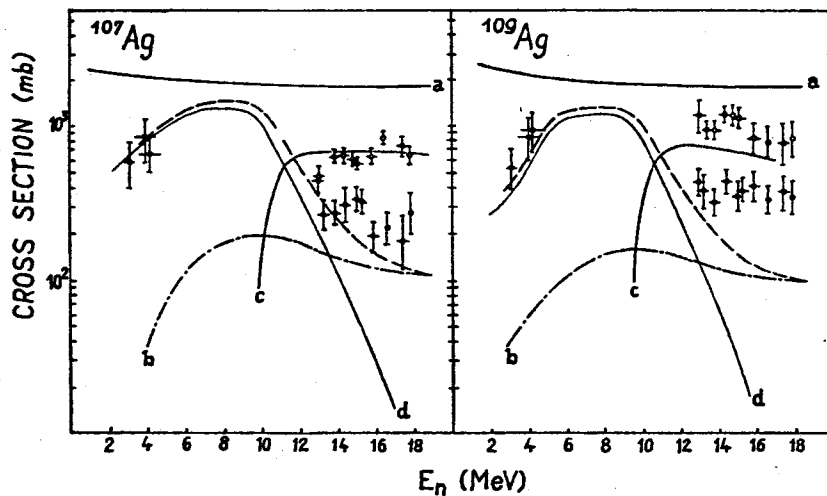


Fig. 9



- (a) Optical model reaction cross section.
- (b) Preequilibrium cross section for inelastic scattering.
- (c) The(n, 2n) reaction cross section.
- (d) Inelastic scattering cross section.

Fig. 10

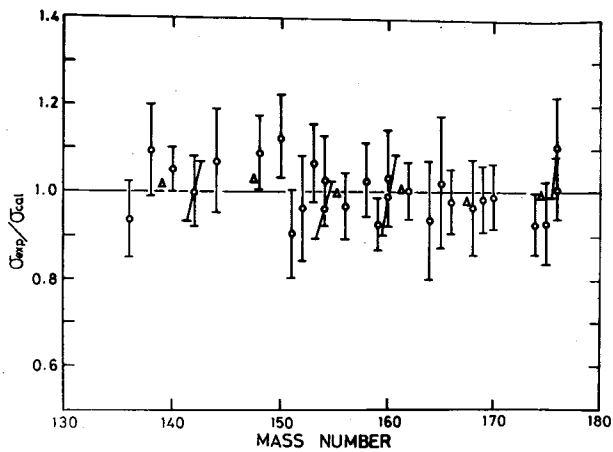


Fig. 11

4. むすび

14 MeV(n, p) 反応に関しては $A > 120$ の核に対しては平衡前過程の寄与が大部分であり, $90 < A < 120$ の核に対しては平衡前過程の寄与がかなりあることが分った。Exciton 模型にもとづく計算値に $(a/\bar{a})^2$ の補正をすれば実験値をかなりよく再現できることが分った。また, Blann の GDH 模型にもとづく計算値にも $(a/\bar{a})^2$ の補正が必要であることが分った。

14 MeV(n, α) 反応に関しては未知のパラメータ ϕ があるために平衡前模型にもとづく計算では (n, α) 反応断面積の絶対値は計算できないと今迄考えられていたが我々の研究の結果, パラメータ ϕ を用いることなしに平衡前模型による計算値に $(a/\bar{a})^2$ の補正をすれば計算できることが分った。但し $(a/\bar{a})^2$ を乗じたのでは補正が不充分のようなので $(a/\bar{a})^3$ の方がよいのかもしれない。いずれにしても, もう少し検討する必要がある。

(n, n' γ) 反応に関しては 14 MeV 入射エネルギーの時は平衡前過程の寄与がかなり大きい。(n, n' γ) 反応では一般に残留核が放射化されないために全断面積のデータが殆どない。エネルギースペクトルのデータはいくつかあるが精度が悪いため (n, n' γ) 反応に対する $\sigma_{\text{exp}}/\sigma_{\text{cal}}$ の質量数依存性を調べることは困難かもしれない。(n, 2n) 反応断面積には (n, n' γ) 反応断面積が間接的に影響してくる。(n, 2n) 反応についての $\sigma_{\text{exp}}/\sigma_{\text{cal}}$ の質量数についてのプロットに僅かに質量数依存性があるように見える。このことは (n, n' γ) 反応についての $\sigma_{\text{exp}}/\sigma_{\text{cal}}$ に質量数依存性があり $(a/\bar{a})^2$ の補正をする必要があることを意味しているのかもしれない。