

IV A Simultaneous Evaluation of the Fission Cross-Sections of U-235, Pu-239 and U-238 and the Capture Cross-Section of U-238 in the Energy Range 100 eV to 20 MeV by M. G. Sowerby & B. H. Patrick, U. K. A. E. A., A. E. R. E.

(CN-26/34)(1970)

松 延 広 幸 (住友)

本報告書は高速炉の核計算において重要な役割を果たす²³⁵U, ²³⁹Pu及び²³⁸Uの核分裂断面積と²³⁸Uの捕獲断面積とに就て従来の方法よりも一歩進んだ評価を提起したものである。高速炉の核設計を行なう際対象となるエネルギー領域の上記断面積に就ては現在迄にかなり多くの測定値が発表されているが、著者は下記の二つの理由からデータ評価の必要性を述べている。

1. 原子炉計算に使用するデータファイルを作成するための断面積の最適値を提供すること
2. 実験の測定精度が炉物理屋の要求を満たしているかどうかをチェックすること

今迄に行なわれた上記断面積の評価では、2の要求精度は満たされていない傾向にある。又最近になつて30 keV以下のエネルギー領域で、多くの測定のスタンダードになつている¹⁰Bの(n, α)断面積のエネルギー依存性が1/v型からずれることが判明したこと、及びkeV領域に

において ^{235}U の核分裂断面積に構造が見られることから、著者はデータの再評価が必要であると説いている。

従来の断面積評価の一般的な欠陥としては二種類以上の断面積を同時に考慮して評価する方法が採られていなかった事が挙げられる。例えば ^{235}U の核分裂断面積を先ず評価した後、他の断面積を評価すると言った方法であり、断面積比も含めて同時に評価するような方法が採られなかった。断面積及びその断面積比の測定は相互関係が極めて強いものであり、従来の方法ではデータの利点をフルに活用しているとは言えない。又もう一つの欠陥は断面積の最良値を求めるのに、分布している測定データをうまく通るように手で曲線を書いて求めていた事であり、多分に主観的な傾向が強かった。この方法では数多くの実験に夫々適切なウェイトを付け、それを考慮して曲線を引くと言うことは困難である。

これらの欠陥を除去するために著者が試みた評価法と言うのは、100 eV から 20 MeV 迄のエネルギー領域に於て断面積とその断面積比を同時に評価する方法である。この同時評価法を実施するに当つて（従来の評価法に於ても同様であるが）、著者は実験データの質を厳密に判定し、不当と思われるデータは除去或いは実験誤差をふやすような処置を採るために、データアブストラクト作成の必要性を述べている。このアブストラクトの一例が本報告書の付録に記載されているが、内容的にはシグマ研究委員会に於て作成しているデータシートと全く同じである。

次に著者は 30 keV 以下の断面積データと 30 keV 以上の断面積データとは別個に取扱わなければならないと主張している。その理由は 30 keV 以下のデータの場合はその大部分は T. O. F. 法による連続的なデータであるが、30 keV 以上の場合には主として単色エネルギー中性子源によるスポット的なポイントデータであるため、本質的に分離して考える必要があると言うことである。又 30 keV 以下の領域に於ては断面積比の測定は極めて少ないので、断面積のみを独立に評価し得ると言うことも理由の一つである。

さて前置が大分長くなつて了つたが、この同時評価法の具体的なプロセスに就て述べると、上記アブストラクトを検討して適当と思われるデータをプロットして断面積及び断面積比を作成する。本報告書に記載されているこれらのグラフを Fig. 1 ~ 3 に示す。次にこれらのデータを通るように曲線を描き、この曲線から与えられたエネルギーにおける断面積及び断面積比の値を求め、且つこれらの値の妥当と思われる誤差を評価する。（この誤差の具体的な算出法に就ては不明）この誤差の値を Table III に示す。この曲線から求めた断面積及び断面積比の値（初期値）と夫々に付随した誤差、並びに測定データより下記の如き関数 $F(E)$ 、 $G(E)$ 、 $H(E)$ を作り、 $F(E)$ の最小値を見つけることによつて与えられたエネルギー E における断面積の最良値が求められる。

$$F(E) = G(E) + H(E)$$

$$G(E) = \sum_i \left(\frac{x_i - \sigma_i}{\Delta x_i} \right)^2$$

$$H(E) = \sum \left(\frac{R_{k\ell} - \sigma_k / \sigma_\ell}{\Delta R_{k\ell}} \right)^2$$

ここで x_i 及び Δx_i は断面積の初期値及びその誤差、 σ_i は断面積の測定データ、 $R_{k\ell}$ 及び $\Delta R_{k\ell}$ は断面積比の初期値及びその誤差、 σ_k / σ_ℓ は断面積比の測定データであり、 $H(E)$ の右辺の和は断面積比の利用し得る組合わせ全部に就て採る。

尚、著者はデータを通る曲線を画く場合、その最適曲線は Horsley 達の修正された Cubic Spline Fitting Programme を使用することによつて得られるだろうが、本報告書は未だプログレスレポートの段階であり、Spline 関数を使用する迄に到っていないと述べている。

上記評価法に続いて本報告書では 30 keV 以下の断面積データと 30 keV 以上の断面積データに就て、かなり詳細に考察しているが、それを全部紹介すると長くなるので重要と思われる点のみに触れることにする。

30 keV 以下のデータの場合、殆んどデータは ^{10}B 又は ^6Li の (n, α) 断面積をスタンダードとして相対測定によつて求められているが、前述したように ^{10}B の断面積は $1/v$ 型からずれているので、 ^{10}B をスタンダードとした測定データは補正せねばならない。又入射中性子スペクトルの測定は、多くの場合銅の管壁を用いた BF_3 カウンターを使用して行なわれているが、この場合 Cu の全断面積の共鳴部分がカウンターの効率に影響を及ぼしていることが考えられる。実際に Sowerby 達の測定によれば 532 eV から 612 eV 迄のエネルギー領域で Cu の 577 eV の共鳴によつて効率が平均して 4% 減少していることが判つたとの事である。従つて銅が使われている BF_3 カウンターを使用した実験データに就ては、そのデータが信頼出来るものか否かをチェックするための実験を行なう必要があり、この実験が行われるようになる迄は銅の影響を受けたと考えられる測定データのウェイトを下げるのが賢明である。

本報告書は掲題の核種に就てその断面積及び断面積比の同時評価の現状をまとめたものであり、未だ完全なものとは言えないが、現時点に於て得られた結論を要約すると下記のようになる。

1. ^{235}U の核分裂断面積は今迄考えられている程明確に判つていない。多くの実験が規格化されている 10 eV 近傍に於てその断面積には $\pm 3\%$ 程度の不確かさがある。keV 領域に於て ^{235}U の核分裂断面積に構造があることが判つたため、今迄正確だと考えられていた Perkin

達の 228 keV のデータは S_b - B_e 線源による中性子のエネルギー・スペクトルが明確になる迄殆ど使用出来ない。White 及び Allen and Ferguson の上記データは ^{238}U の (n, γ) 断面積及び $^{238}\text{U}(n, \gamma) / ^{235}\text{U}(n, f)$ の値と consistent ではない。彼等のデータは $^{197}\text{Au}(n, \gamma)$ の絶対測定及び $^{197}\text{Au}(n, \gamma) / ^{235}\text{U}(n, f)$ の値とも一致していない。

次に 30 keV から 100 keV 迄の領域における ^{235}U の核分裂断面積は一般に考えられている値よりも低いように思われる。T.O.F. 法による測定から、40 keV における断面積は White の値よりも低いことを示している。この事実は ^{235}U の核分裂断面積に対して相対的に測定された。Barry 及び Bame and Cubitt の ^6Li の (n, α) 断面積測定の結果からも指摘される。 ^{235}U の核分裂断面積を 10% 減らすと、 ^6Li の (n, α) の断面積の値は最新の最も良いとされる評価値と良く一致する。これらの現状と照らし合わせて著者は 30 keV ~ 1 MeV の領域で ^{235}U の核分裂断面積を T.O.F. 法で正確な絶対測定から求める事を recommend している。

2. ^{239}Pu の核分裂断面積及び ^{238}U の捕獲断面積の評価値の精度は ^{235}U の核分裂断面積曲線の選び方に密接に関係している。30 keV 以上の領域で ^{239}Pu の核分裂断面積に関する我々の知識は、実質的に ^{235}U の核分裂断面積に対する断面積比の測定に基づくものである。この断面積比は 100 keV 以上の領域で大体 3% 位と考えられているが、 ^{235}U の核分裂断面積の不確かさから見て、30 keV ~ 15 MeV の領域で ^{239}Pu の核分裂断面積の絶対測定を是非とも行なう必要がある。

^{238}U の捕獲断面積に関して、状況は ^{239}Pu の核分裂断面積よりも幾分良い。1 MeV 迄の領域には ^{235}U の核分裂断面積に依存しない測定が多数あり、且つこれらのデータはかなり良く一致している。しかしこれらのデータは ^{235}U の核分裂断面積に対する相対測定の値とは一致しない。100 keV ~ 1 MeV の領域で断面積比データを無視すれば、 ^{238}U の捕獲断面積の精度は大体 6% 程度であるが、この精度を更に良くするような研究を必要とする事は明らかである。

以上で本報告書の概要紹介を終えるが、シグマ研究委員会においても断面積の評価が重要問題となつている折柄、本報告書は我々にとって一つの良き指針となるものと思う。断面積評価の問題に関心のある方々に一読されることをお勧めする次第である。

Table I

Normalisation of measurements of the U-235 fission cross-section

| Experiment | Normalisation | $\int_{E_1}^{E_2} \sigma(E) dE$ (barns.eV) | |
|------------------------|--|--|--|
| | | $E_1=5 \text{ eV}$ $E_2=10\text{eV}$ | $E_1=10\text{eV}$ $E_2=15\text{eV}$ |
| Van Shi-Di et al. [4] | 582b at 0.0253 eV | 256.3 | 205.9 |
| De Saussure et al. [5] | $\int_{0.45}^{10} \sigma(E) dE/E = 127.9$ as given by Bowman et al. | 281.4 | 216.7 |
| Bowman et al. [6] | 577.1 b at 0.0253 eV | 292.1 | 220.0 |
| Brooks et al. [7] | $\eta = 2.084$ at 0.06 eV | 258.0 | 197.7 |
| Shore and Sailor [8] | Effectively to 582b at 0.0253 eV | 272.4 | |
| Michaudon [9] | to Shore and Sailor between 8 and 10 eV | 277.8 | 218.7 |
| Deruytter et al. [10] | 587b at 0.0253 eV | 265.0 | 212.0 |

Table II

U-238 capture cross-section at 30 keV

| Experiment | Energy (keV) | Cross-section (mb) | Comments |
|--------------------------|--------------|------------------------------|---|
| Moxon [17] | 30 ± 8 | 425 ± 31 | Flux from ${}^7\text{Li}(p,n)$ reaction obtained from ${}^7\text{Be}$ associated activity |
| Hanna and Rose [18] | 30 ± 8 | 375 ± 51 | |
| Gibbons et al. [19] | 30 ± 8 | 473 ± 47 | Relative to Au(n, γ) Flux from ${}^7\text{Li}(p,n)$ reaction obtained from ${}^7\text{Be}$ associated activity |
| Menlove and Poenitz [20] | 30 ± 8 | 492 ± 17 473 ± 15 | |
| Belanova [21] | 30 | 427 ± 39 | Corrected value of Miller and Poenitz [22]. Cross-section extrapolated to 30 keV using same data of Moxon [17] |
| Mean value | | 468 ± 10 ± 13 | (Internal Error) (External Error) |

Table III

Percentage errors in the starting values of the cross-sections and ratios

| Energy (keV) | U-235 (n,f) | Pu-239 (n,f) | $\frac{^{239}\text{Pu}(n,f)}{^{235}\text{U}(n,f)}$ | U-238 (n, γ) | $\frac{^{238}\text{U}(n,\gamma)}{^{235}\text{U}(n,f)}$ | Au-197 (n, γ) | $\frac{^{197}\text{Au}(n,\gamma)}{^{235}\text{U}(n,f)}$ |
|-----------------|----------------|-----------------|--|-------------------------|--|--------------------------|---|
| 30 | 10 | 10 | 5 | 3 | 10 | | |
| 40 | 10 | 10 | 5 | 4 | 10 | | |
| 50 | 10 | 10 | 5 | 4 | 10 | | |
| 60 | 7 | 10 | 4 | 4 | 10 | | |
| 70 | 7 | 10 | 4 | 4 | 10 | | |
| 80 | 7 | 10 | 4 | 4 | 10 | | |
| 90 | 7 | 10 | 4 | 4 | 10 | | |
| 100 | 5 | 10 | 4 | 4 | 7 | 4 | 5 |
| 200 | 5 | 10 | 4 | 6 | 4 | 4 | 5 |
| 300 | 5 | 10 | 4 | 6 | 3 | 4 | 5 |
| 400 | 5 | 10 | 4 | 6 | 3 | 4 | 5 |
| 500 | 5 | 10 | 4 | 6 | 3 | 4 | 5 |
| 600 | 5 | 10 | 4 | 6 | 3 | 4 | 5 |
| 700 | 5 | 10 | 4 | 6 | 3 | 4 | 5 |
| 800 | 5 | 10 | 5 | 6 | 3 | 4 | 5 |
| 900 | 5 | 10 | 5 | 6 | 3 | 4 | 5 |
| 1000 | 5 | 10 | 5 | 6 | 3 | 4 | 5 |

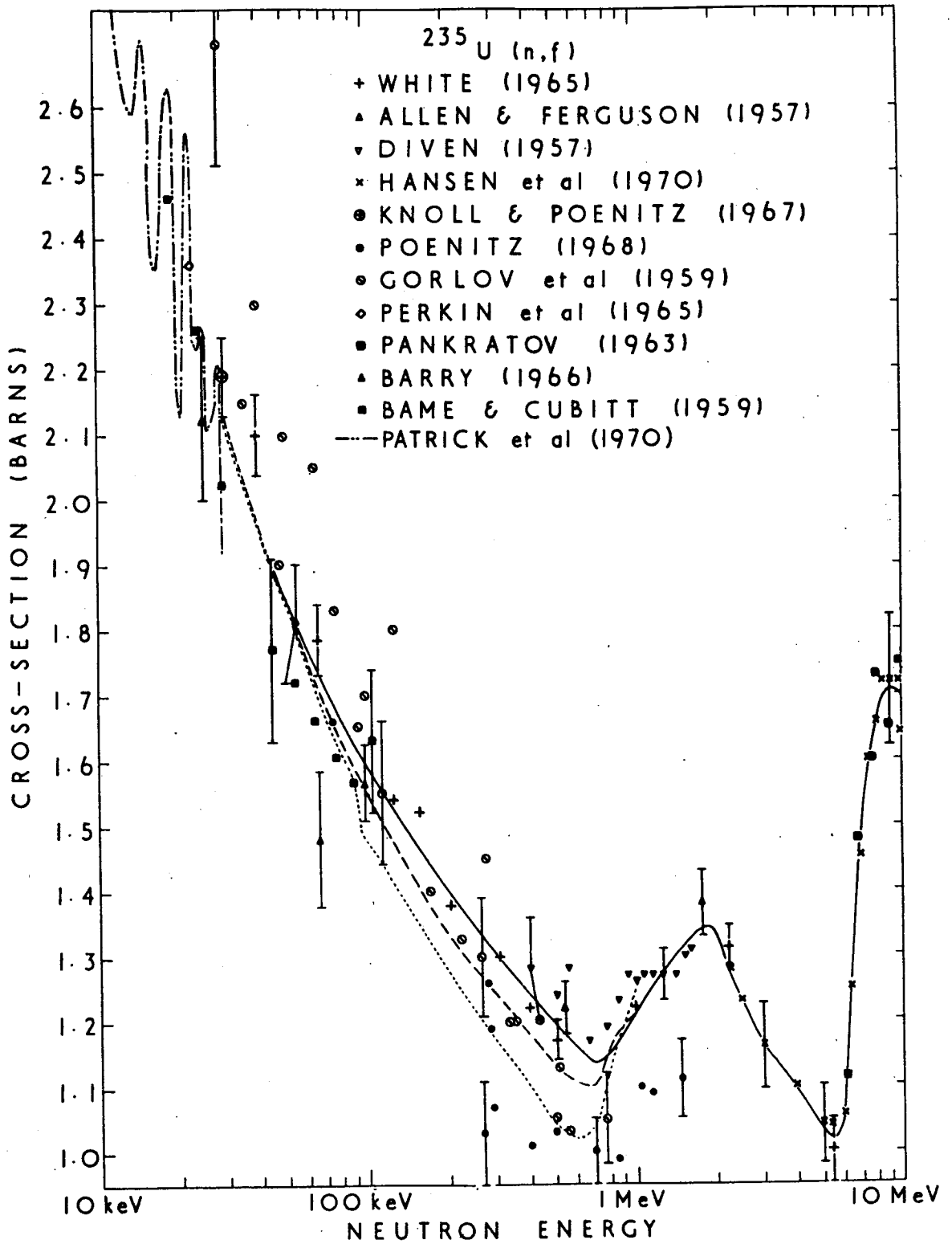


FIG. 1

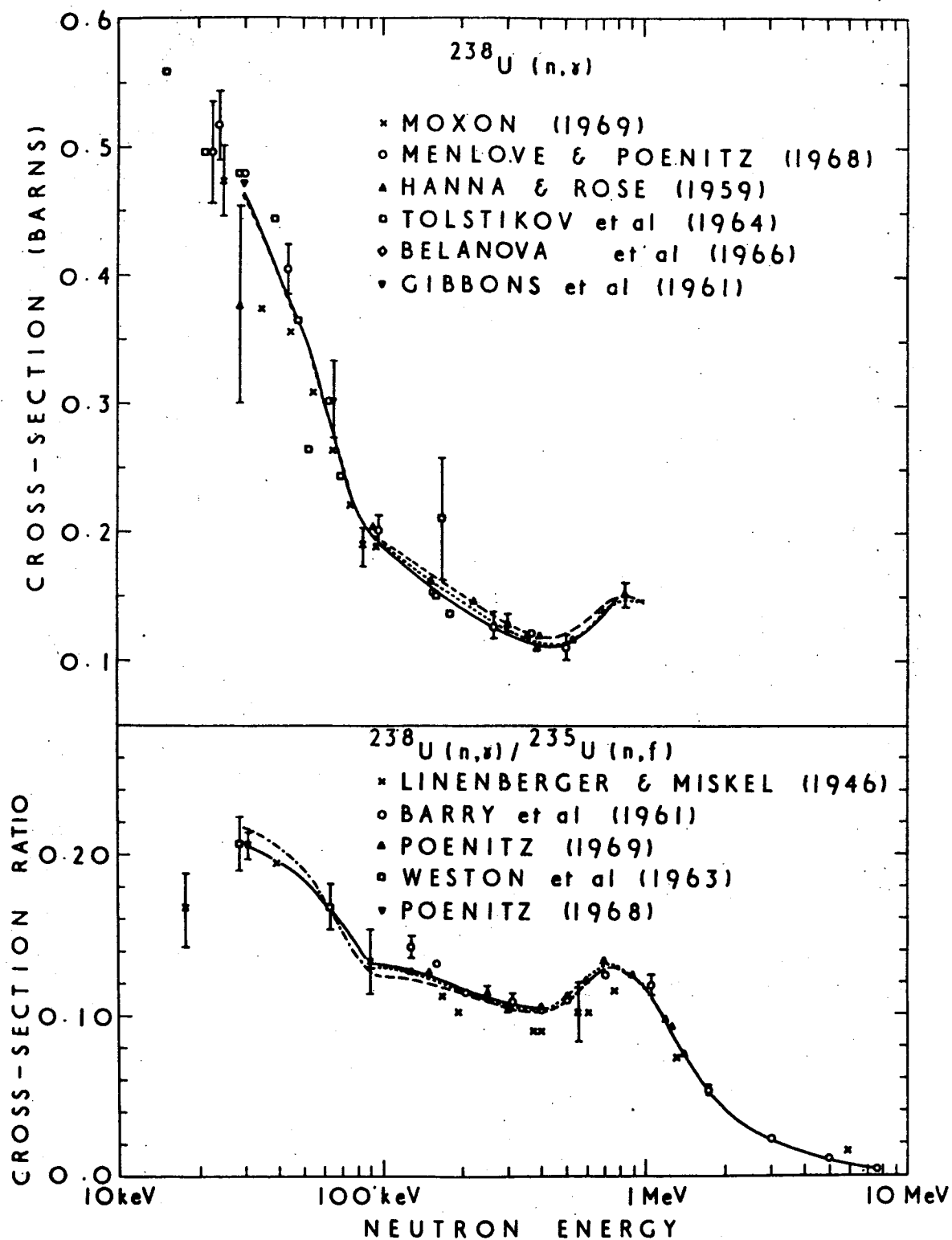


FIG. 2

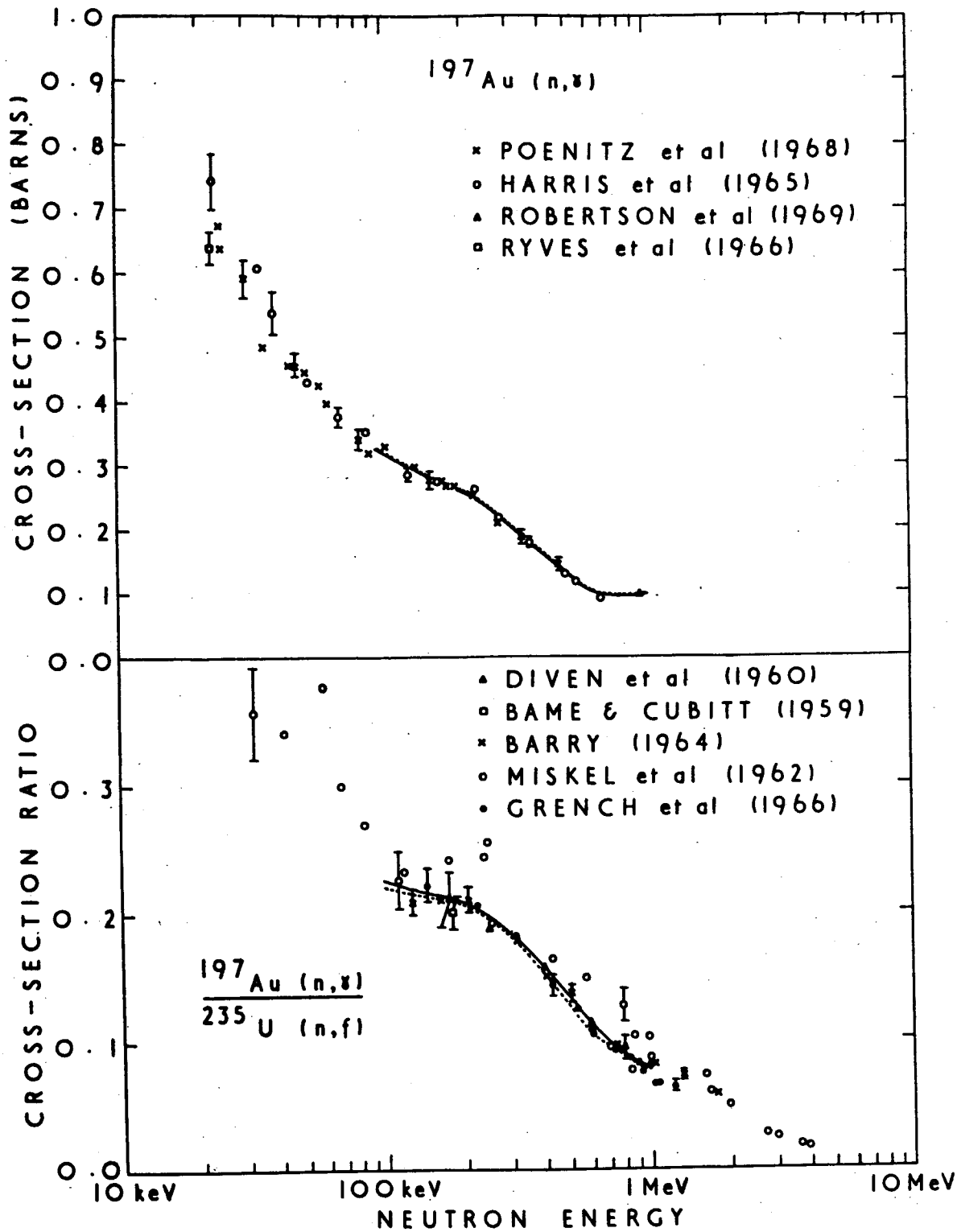


FIG. 3