

II. Fission Neutron Spectra; Perspective and Suggestion A.B. Smith (ANL) INDC(USA) 37/G (Aug. 1971)

飯 島 勉 (原研)

核分裂即発中性子スペクトルに関するデータの現状をサーベイした結果の報告である。問題点をよく検討して今後のデータの改良のために15項目の Recommendation を行なっており極めて示唆的な内容である。

I. Macroscopic Characteristics

A. Fission - Neutron Spectra

高速炉臨界実験装置やしきい検出器による積分測定の結果と微分分裂スペクトルから求めた積分値との間には明らかな差があることがこれまで多くの人々によつて指摘されて来た。U-235 と Pu-239 の核分裂スペクトルの平均エネルギーの比 $\bar{E}(\text{Pu-239})/\bar{E}(\text{U-235})$ についても微分測定による 1.084 ± 0.006 に対し積分測定は $1.02 \sim 1.04$ といつた値を与えている。この差について原因として考えられそうなことを種々吟味している。しきい検出器においては in-cavity での測定ではバックグラウンドの補正が難しいことを指摘している。又、臨界実験の解析において従来一般に、核分裂スペクトルが核分裂を起す中性子のエネルギーによつて変ることをとり入れていない点を問題点として指摘している (Recommendation 1)。臨界実験におけるデータも従来はモックアップ体系の如き複雑な要素を含んだものが多いので、核分裂スペクトルのデータテストのために optimize された体系で実験すべきことを提案している (Recommendation 5)*。

B. Fission-Neutron Cross Section of U-238 in a U-235 Fission - Neutron Spectrum

この量 ($\sigma_f(\chi_{235}^{238}\text{U})$) は核分裂スペクトルのインデックスとしてしばしば用いられている。多くの測定が $310 \sim 315 \text{mb}$ の間に入っている。これらの値は微分断面積、微分スペクトルから計算された値 (Grundl) よりかなり大きい。又、最近の U-238 核分裂断面積の微分測定は従来広く用いられている値より断面積が大きいことを示している。これらのことから $\sigma_f(\chi_{235}^{238}\text{U})$ の正確な測定 (高精度の微分測定と同じくバックグラウンドをさけるため Pulsed source

筆者注 *) これに関連して最近 FCA において U-235/U-238 系, Pu-239/U-238 系 (いずれも $K_{\infty} = 1$ 炉心) で U-235 と Pu-239 の核分裂スペクトルの差をチェックする実験が行なわれた。現在データを整理中であるが source スペクトルの違いについて定量的な結果が得られるものと期待している。

fast timing technique による)が必要である(Recommendation 6)。

C. Age to In Resonance in H₂O

1961年以前のAge τ の測定値は27-31 cm²の範囲にあるが最近はやや小さくなり26-28 cm²となつている。Storyは τ の評価からそのsourceの平均エネルギー \bar{E} は微分測定による核分裂スペクトルの \bar{E} と非常に近いということを示した。 τ は \bar{E} にかなり敏感であり、 τ の10%の変化は \bar{E} の10%の変化に対応している。しかし τ より求めると $\bar{E}(\text{Pu-239})/\bar{E}(\text{U-235}) \sim 1.04$ であり積分測定による結果に近い。 τ は絶対的にも相対的にも核分裂スペクトルのよいインデックスであり、したがって τ の標準として理想的な点源であるCf-252のH₂O中での τ を $\pm 1 \text{ cm}^2$ の精度で測定すべきことを提案している(Recommendation 7)。

II. Microscopic Characteristics

A. Average-Fission-Neutron Energies and their Ratios

核分裂スペクトルの微分測定に関しては60件以上も報告されているがそのうち30以上がU-235, Pu-239に関するものである。測定法は大別して、1) TOF, 2) 反跳陽子法, 3) Li-6, He-3等のreaction Spectrometerの3つのカテゴリーに分けられる。これらの結果について一般的に云えることは、1) $A \leq 244$ に対しては積分測定におけるような $\bar{E} \sim 2.2 \text{ MeV}$ の如きhardな結果は無い、2) 各実験者の報告している誤差($\pm \Delta \bar{E}$)はconsistentでない、3) $\bar{E}(\text{Pu-239})/\bar{E}(\text{U-235})$ は積分測定より大きい、といつた点である。

Cf-252については9例の測定があるが標準核分裂スペクトルとして適当であるので数keV-10MeVにわたつて出来るだけ正確に測定する必要がある(Recommendation 8)。又、U-235, Pu-239 についてCf-252との平均エネルギーの比を $\pm 1\%$ で求めるべきである(Recommendation 9), Spectral ratio $^{235} \text{N}(\text{E}) / ^{252} \text{N}(\text{E})$ を数keV-10MeVにわたつて求めれば核分裂スペクトルのStructureについての情報が得られる(Recommendation 10), 積分測定に有用な反応率インデックスとくにU-238の σ_f をCf-252のスペクトルで較正すること(Recommendation 11)等を提案している。

B. Spectrum Shape and Structure

通常、核分裂スペクトルは

$$N(E)dE \sim \exp(-bE) \sinh \sqrt{CE} \quad (\text{Watt}) \quad (1)$$

$$\text{又は Maxwellian } N(E)dE \sim \sqrt{E} \exp(-E/T) \quad (\text{Torrell}) \quad (2)$$

で表わされる。両者の差は小さいが、複雑な核分裂プロセスを考えれば当然これらの簡単な近似からのdeviationがあることが予想される。いくつかの微分測定結果では低エネルギー成立が上式

よりも大きいことが示されている。又、臨界実験装置での研究でも low energy excess が示されている。したがって Cf-252 の核分裂スペクトルの低エネルギー側の non-Maxwellian behavior を ~2% の精度でしらべるべきであるとしている (Recommendation 13)。又、核分裂スペクトルの Structure は ratio measurement $X_N(E)/Y_N(E)$ で精度よくチェック出来ると考えられる、なぜなら核種が異れば Structure が同じとは考えられないからである (Recommendation 14)。

C. Spectral Dependence on $\bar{\nu}$ and Incident Energy.

Terrell によつて与えられた式

$$\bar{E} = A + B \sqrt{\bar{\nu} + 1} \quad A = 0.75, \quad B = 0.65 \quad (3)$$

を利用可能なデータにフィットさせて $\bar{\nu}$ と \bar{E} の関係をしらべた。^{*}精度のよいデータのみを選ぶと勾配 B が急になる傾向がある。しかしこれらのカーブは微分スペクトルの測定値と consistent ではない。すなわち平均エネルギーの比 $\bar{E}(\text{Pu-239})/\bar{E}(\text{U-235})$ は Terrell の値では 1.04、一方微分データでは 1.08 である。結局、多くの実験値に系統誤差がある。又は(3)式が正しく物理現象を表わしていない、あるいはこれら両方の理由によつてこのような矛盾が現われていると考えられ、Cf-252 の核分裂スペクトルとの正確な ratio value が測定されればこの問題に解決が与えられるであろうとしている (Recommendation 14)。

D. Comments on Flux Normalization and Detector Efficiency

核分裂スペクトルの測定は keV から 10 MeV におよび、かつ要求される精度からしてきわめて難しいものである。多くの測定が反跳陽子法にもとづいているが、測定系のレスポンスの較正にはとくに精度が要求される。n-p 多重散乱や炭素の共鳴散乱等の補正は注意深く行なう必要がある。

E. Isomeric Fission

Pilcher と Brooks は 30 keV の中性子による U-235 の核分裂のかかりの部分 100 ns のオーダーの半減期をもつ U-236 の isomeric state を通じて起ることを報告している。これは TOF 法によるスペクトルを歪ませることになるので ANL の Meadows と Poenitz が 30 keV 中性子で実験したところ U-236 isomeric process は 3×10^{-2} % 以下であり TOF スペクトルに対してもほとんど問題にならないことが結論された。

筆者注 ^{*}最近 Howerton と Doyas は利用可能なデータを用いて最小 2 乗フィットを行ない $A = 0.353$, $B = 0.510$ という値を得ている (Nucl. Sci. Eng., **46**, 414, (1971))。

III. Concluding Remark

種々の問題点を列挙して来たが、全般的に云えば核分裂スペクトルについての現在の微視的なデータはきわめて精度の良いものである。例えば“Watt”とMaxwellian表示の間の数%の差や、 $\bar{E}(\text{Pu-239})/\bar{E}(\text{U-235})$ 比の誤差にしても、最も基礎的な断面積の一つであるU-235の分裂断面積の誤差よりも大きくはない*)。

実験の困難さから考えて近い将来核分裂スペクトルの精度が飛躍的に上るとは考えられないが、列挙したRecommendationの実行によりbasic dataのfactor 2-5程度の改善を望んでいる。

筆者注 *) しかし原子炉の諸特性とくに臨界性に対しては現在の精度では不十分である。例えば $\bar{E}(\text{Pu-239})/\bar{E}(\text{U-235})$ 比が1.04か1.08かにより前記FCA炉心の K_{∞} の値には1%以上の差が生ずる。換言すれば、原子炉側からの核データに対する要求はそれほど厳しいものであるということである。

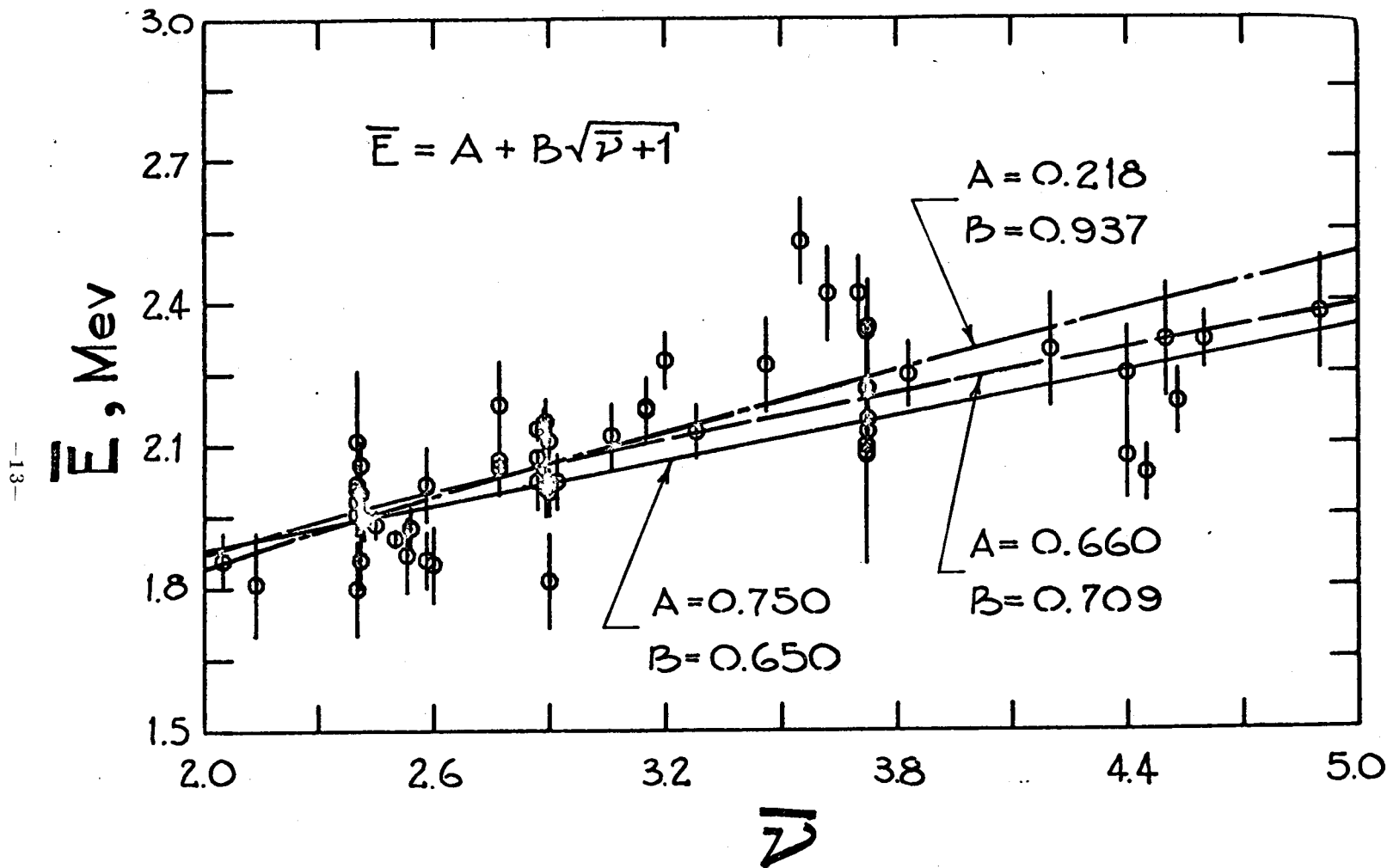


Fig. 1 Dependence of average-fission-neutron energy, \bar{E} , on $\bar{\nu}$. Data points are from Table 4. Curves indicate the Terrell⁶² expression with various parameter choices as described in the text.