

核データ評価コース3年生

NAIG 山室信弘

核データ実験コースを修了して、改めて評価コースに入学して早くも2年、今春4月めでたく3年生に進級した。この間先輩諸氏のご指導よろしきを与えて、おかげですくすくと成長することができた。もっとも実験コースを修了したといっても本当はあやしいもので、一つの道を極めるには一生かかっても足りないのが普通であり、今後も実験家として新しい技術の実践をすることは無理としても、そのセンスを失わないための最低の配慮は続けなければいけないと考えている。そしてそういった気持ちが評価コースに身を置いてその仕事をする時に、意外に役立つことを発見したのである。

毎週原則として水曜日にN社に出勤する。私にとって会社務めは二度目で、一度目は40年以上も前のことであるがやはり三井系の会社であった。人間何か不思議な糸で結び付けられているものである。定刻より1時間遅れて出勤すると、所長室の隣に私のデスクがあり、専用の電話(内線555)までデスクの上で光っている。新しい電話器なので、私の気持ちと同じように「ピッカピッカ」なのである。隣には評価コース大先輩のI氏が頑張っており、その他同コースの諸先輩からいろいろと助言の受けられる場所であるので、環境抜群とすることができる。私にとって大型計算機にインプットできるのはこの日一日であるから、出勤してから入力条件を考えている時間はほとんどない。そこで予め我が家にあるパソコンなどを駆使して前処理をすませ、条件を設定しておく。そして当日は「俺達に明日はない」という意気込みでTSSの前に座るのである。結果が当日入手できない場合は先輩諸氏にお願いして出力を郵送してもらい、早速パソコンで図を画いてみるなどの後処理をして、次週の準備をすると週末がやってくる。こうして2年間、われながらよく勉強したなと感心している。自分で感心していたら世話はないとよく言うが、広辞苑によるとせわ(世話)には「人のために尽力すること」という意味より、「世間のうわさ」、「世人の評判」の意味が先に出ている。世話はないというのは評判倒れといった意味なのであろうか。

実験コース在学中から私は大型計算機のユーザーである腕だけは維持できるよう心掛けていた。入力がカード形式からTSSに移り変わってゆくの文字通り体験したが、なかなかカードから足が洗えなくて苦勞もした。利用の範囲ははじめは実験データの補正計算が主であったが、次第に測定装置の設計や、解析計算にも手をそめていった。ちょうどその頃中性子捕獲ガンマ線スペクトルの精度よい測定が、組織的に展開を開始していたから、その解析計算に五十嵐氏作製のCASYHが取り上げられたのは当然のなりゆきであった。私も若い人の作ったマニュアルを相手に自分で入

力データを作るようになったが、このマニュアルがなかったらちょっとC A S T H Yに入っただけはゆけなかったのではないと思う。そして自分で入力データを作って見てひっかかったのがレベル密度であった。C A S T H Yには実に8種類のレベル密度のオプションが用意されている。一体どれを使うのが適切なのだろうか。そこでGilbert - Cameron¹⁾の論文を引張り出して再読した。前に読んだ際には実験家の立場から一応は理解したという程度の論文であったが、今回は具体的に計算をする立場から見たので、appendixの難かしいところを除けば丁寧に読みかえしていろいろと示唆を受けた。これが私がレベル密度の検討に入った第一歩であった。

実験コース最後の1~2年から評価コースの1年位の間はいわゆるスピン選択レベル積み上げを、Joly²⁾らの論文を真似て試み、京大炉電子ライナックで測定した捕獲ガンマ線スペクトルの計算³⁾をして見るといった、いわば模索の段階であった。JolyらはLoneの示唆で高いスピン値をもつレベルの見落としを避けるために、標的核基底状態のスピンの値に近いもの、つまり $I \pm \frac{3}{2}$ のものだけを選んでいった。この選択基準は例えば¹⁹⁸Auのように、低エネルギー中性子捕獲反応でのガンマ線スペクトルスコーピーでレベルを見付けている原子核にはまずまず適切で、私もはじめこれに従った。しかしすべての原子核がこうしてレベルを見出しているわけではないので $I \pm \frac{3}{2}$ の選択基準ではたちまち壁にぶつかってしまう。ちょっと前にGilbert - Cameronの論文を再読して感銘を受けたと書いたが、その一つはスピンの選択というのはJolyらがはじめて実行したのではなく、Gilbert - Cameronこそはじめてこれを適用しているということである。但し彼らの場合は共銘レベル間隔の実験値Dobsからフェルミガスレベル密度パラメータaを求める時であるが。このことがスピン選択の基準をもっと一般化してみようと思いつ一つの動機になった。つまり実験データのおかれていた状態を正しく把握し、信頼できる実験データに忠実にパラメータの値を決めるという基本的態度を貫くことが改めて必要と思われたのである。

では何がスピン選択基準になりうるか。低励起レベルについてはエネルギーとスピンとパリティの三つの情報がある。理論的な式を持たないパリティ分布は手がかりになりにくい。エネルギーの情報は今まで積み上げ図を作る上で利用してきた。残るはスピンのみ。これには分布を表わす式がある。そしてここでは「如何にしてスピンを選ぶか」を目標にしているのだからこれしかない。そこでどの核種でもかたっぱしからスピンの値の分布を作る。これに最小二乗法でスピン分布の曲線を求めて重ねて見る。今やろうとしているのはレベルの見落としのあるだろう不完全なデータセットの補償なのだから、スピンの理論分布曲線と実際の観測値とを比較して足りないものをうめるようにすればよい。それには分布の中で突出して数の多いスピンのみを選んでレベル積み上げをしたらどうだろうか。次にそこで画かれた積み上げ図にフィットするのは従来通り定温度型を示す指数関数でよいのか。ここでは以上の10数行で議論の発展を述べて、比較的整理した格好で記述した

が、ここまでするにはやはり半年位の期間を要した。この辺の事情は私のノートにくわしい⁴⁾。

さてスピンを選んで積み上げた階段状の図にフィットさせる曲線の問題では学会における瑞慶覧氏の質問が刺激になった。「貴方のやり方で行くのならば、そこで指数関数を用いるのは間違いではないのですか」、その通り。私もその時までは考えがつかなかったので近似として従来通りの指数関数を用いていた。積み上げ図の上に指数関数を表わす直線が何本でも引けそうで、唯一の解答を引き出しにくい。スピン選択をする以上、Gilbert - Cameron のいわゆる Observable level density は早くから放棄していた。何故ならその式はスピンについて 0 から ∞ まで既に積分した後の式であるからだ。そこでスピンについて積分していない前の式 $\rho(E, J)$ の式を出発点におく。五十嵐氏がこの式を partial level density と呼んでいたので、名前はそれに倣うことにした。低エネルギー領域でも partial level density としての定温度モデルの式をとる。Gilbert - Cameron は Observable level density として定温度の式を導入しているのであって私の式と同じでないことに注意が肝要。非常に大事な点なのである。さてスピン選択が J_1 から J_2 まで行われたとしてスピン項の和をとってみよう。

$$S_J(E) = \sum_{J=J_1}^{J_2} R(J, E),$$

ここで $R(J, E) = (2J + 1) \exp \left\{ - \left(J + \frac{1}{2} \right)^2 / 2 \sigma^2(E) \right\}$ である。

次に積み上げ図に画くレベルの数を表わす関数 $N(E)$ を求めるには定温度を表わす指数関数と共に上記の $S_J(E)$ が含まれる項を積分せねばならぬ。そこで解析的な積分を実行するために $S_J(E)$ はエネルギー 0 の点とフィットを行うエネルギーの上限附近の値 E_m の間で線形で近似できると仮定する。定温度領域でのスピン切断因子 $\sigma^2(E)$ は Gruppelaar らによって 0 と E_J (フェルミガスとの接合エネルギー) の間で線形に仮定されているから $S_J(E)$ はもちろん線形ではない。それを狭い領域に限ることによって線形としたのである。この近似はレベル密度パラメータの決定に際し、問題はなさそうだ。こうするとレベル数を表わす関数として

$$N(E) = S_J(0) \cdot C \cdot T \left\{ 1 + f_s(E - T) \right\} \exp(E/T)$$

が求まる。ここで $f_s = \{ S_J(E_m) / S_J(0) - 1 \} / E_m$,

$$\text{又} \quad C = \rho(E_J) \cdot \exp(-E_J/T) \quad \text{である。}$$

この $N(E)$ の式は従来の指数関数で表わされた式と括弧内に $f_s(E - T)$ の項がある点で異なる。核温度 T の前後でこの項の符号が変わる。低エネルギー側は負で、高エネルギー側は正である。

f_s が指数関数からのずれの大きさを決めるので shape factor とでも呼ぼうかと思っている。ここで再び、上の式で用いているレベル密度に関する物理量はすべて partial level density に関するもので、observable level density に関わらないことに注意しよう。昭和 59 年の年会で述べたように「Observable level density よさようなら」であるのである。こうして瑞慶覧氏の質問にも胸を張って答えられるようになった。

評価コース 1 年生だった私は以上のような新しいレベル密度パラメータ決定法によるレベルを、Ta 及び Au の捕獲ガンマ線スペクトルの解析に用いてきた。その結果をまとめて今度 Santa Fe に行く。ところでガンマ線のスペクトルだけでは特徴を表わしにくい。というのは、ガンマ線スペクトルにはレベル密度の他にガンマ線強度関数というのがあるがこの二つをうまく組合せれば、実験データに合うスペクトルが計算できるからである。もちろん例えば ^{198}Au の Young ら⁵⁾の結果と私のものと比較すれば、私の方がよいと思う。というのはスペクトルの計算結果はどちらも同じであるが、結果として定まるガンマ線強度関数が Young らの場合、独立に実施されているガンマ線強度関数の実験データに一致しないのに、私の場合にはよく一致するからである。その意味で Santa Fe が楽しみである。なかなか納得はしないだろうが。

評価コース 2 年になると、銅の評価を始めた。はじめは相変わらず C A S T H Y 相手であったが、1 2 月頃から G N A S H に乗り換えた。G N A S H 新版は K 氏らの努力によって N 社でも実行可能になった。但しやや万能選手型の編集で私が既に正しいものと認めていない Gilbert - Cameron の a や U_x の系統式まで含めてあるので、その辺を簡略化し、又原版ではガンマ線強度関数の出力形式が冗長、複雑なのを訂正したりした G N A S H - N Y 版を作った。N Y は私のイニシャルでもあり、又ニューヨーク版と呼んでいただいてもよい。専らこれで G N A S H の計算を実行している。

さて銅の評価をするとなると銅ばかりでなく、ニッケルとコバルトの同位体のレベル密度パラメータを決めなければならない。手始めは Dobs のデータ集めからである。こうして Fröhner⁶⁾の最近の仕事を知った。彼は Porter - Thomas 分布を手がかりにレベル数え落しを補正した Dobs を求めようとしている。私のは極めて実際の簡単であるのに対し、彼のはかなり難かしい数学的手法を使っているようだが発想は同じである。とにかく彼のニッケルの Dobs を使わせてもらう。Dobs のない核種は経験的な系統性からの推定しか方法がないが、上記三核種の 20 以上の同位体の a 値が出揃う。数を多くやると又なにかとわかってきて、自分の推定の適否にある程度の判断ができるようになる。これらの a 値を Gilbert - Cameron の a 値と比較する。Gilbert - Cameron の値はすべて小さい。20 数核種すべてについてである。Gilbert - Cameron の論文が 1965 年に書かれたものであるから、これは 20 年間の Dobs の観測データの進歩を物語

るもので、もちろん Gilbert-Cameron の責任ではない。a が決まると、私の作った PC-9801 用のプログラムが大活躍をする。このプログラムも何回ものバージョンアップが実行され、最近ほぼ完成した。この中には、GNASH 中のサブルーチン GILCAM かむヒントを得て作られた部分もある。これがレベル密度パラメータ決定のスピードアップに大変貢献している。

銅の評価を進めるうち遅まきながら光学ポテンシャルの重要性を知った。これは浅見氏の好意で Hetrick ら⁷⁾ の銅の断面積評価の報告が入手できたことにはじまる。Hetrick らが極めて丁寧な光学ポテンシャルの決定に多くの紙数をさいているのに感服した。そこで今回は中性子・陽子・ α 粒子の総てについて Hetrick と同じ値を用いることにした。そしてレベル密度パラメータだけは私の値を用いた。その結果一つだけ Dobs から決めた a の値を変えねばならなくなった。それは ^{60}Co であり BNL-325 では $\text{Dobs} = 1.1 \text{ keV}$ とある。この値から得られる a 値は 8.7 であって、この値では $^{63}\text{Cu}(n, \alpha)$ の断面積が極めて小さい。そこで共鳴データに戻り、思い切って $\text{Dobs} = 400 \text{ eV}$ と仮定して $a = 9.9$ とすることにした。Hetrick はと見ると、なんと $a = 11.0$ とおいている。これはいくらなんでも大き過ぎる。これでは $\text{Dobs} = 170 \text{ eV}$ としなければならぬ。そしてそれぞれの計算結果は Grimes ら⁸⁾ の α 粒子スペクトルの実験結果との比較において私の方が良さそうだ。二つの図をここに掲載しておこう。こうして私の自信も大分ついてきた。Hetrick らも Santa Fe にやってくるという。楽しみが又一つふえた。

こうして評価の経験を蓄積してゆくと、だんだん私の頭の中に感度係数が生まれてくる。つまり ^{63}Cu のパラメータ a をこうすれば、 $(n, 2n)$ 、 (n, p) 、 (n, α) 及び $(n, n' \gamma)$ などの断面積がこう変わるだろうという予測ができるようになるのである。もちろん予測精度はあまりよいとは言えない。そこで予測精度向上のために、この道でも先輩の I 氏にあやかってパソコンによる蒸発モデル計算に着手した。もう平衡過程の計算だけはできるようになった。こうして精度が上げれば、断面積評価の能率向上に資するのではないかと思っている。

核データ評価コース 3 年生は今年も又希望を持って進もうとしている。昨年同様水曜出社のペースが続くだろう。そして仕事を終えた夕刻からはもう一つおまけがつくのである。I 氏らと一緒に足を向ける所は 2、3 か所。そこでのママさんが魔の水曜日という表現をした。これは I 氏にとって魔の水曜日か、3 年生にとって魔の水曜日かわからない。二人にとって共に魔の水曜日なのだろう。しかし魔もあってはじめて神を知る。人生大いに楽しまねばならぬ。核データ評価で人生を楽しめるなんて最高ではなからうか。3 年生は今週も元気に鞆を下げて足取りも軽く家を出る。

参考文献

1. A. Gilbert and A. G. W. Cameron, *Can. J. Phys.*, 43, 1466 (1965).
2. S. Joly, D. M. Drake and L. Nilsson, *Phys. Rev., C*, 20, 2072 (1979).
3. N. Yamamuro et al., *J. Nucl. Sci. Technol.*, 20, 797 (1983).
4. 山室信弘, 新しいレベル密度パラメータ決定法のすすめ, NAIG, KG-ND-84014 (1984).
5. P. G. Young and E. D. Arthur, Analysis of $n+^{197}\text{Au}$ cross sections, LA-10069-PR (1983).
6. F. H. Fröhner, Statistical Inference of Level Densities from Resolved Resonance Parameters, IAEA Advisory Group Meeting on Basic and Applied Problems of Nuclear Level Densities, p. 219 (1983).
7. D. H. Hetrick, C. Y. Fu and D. C. Larson, Calculated Neutron-Induced Cross Sections for $^{63, 65}\text{Cu}$ from 1 to 20 MeV and Comparison with Experiments ORNL/TM-9083 (1984).
8. S. M. Grimes and R. C. Haight, *Phys. Rev., C*, 19, 2172 (1979).

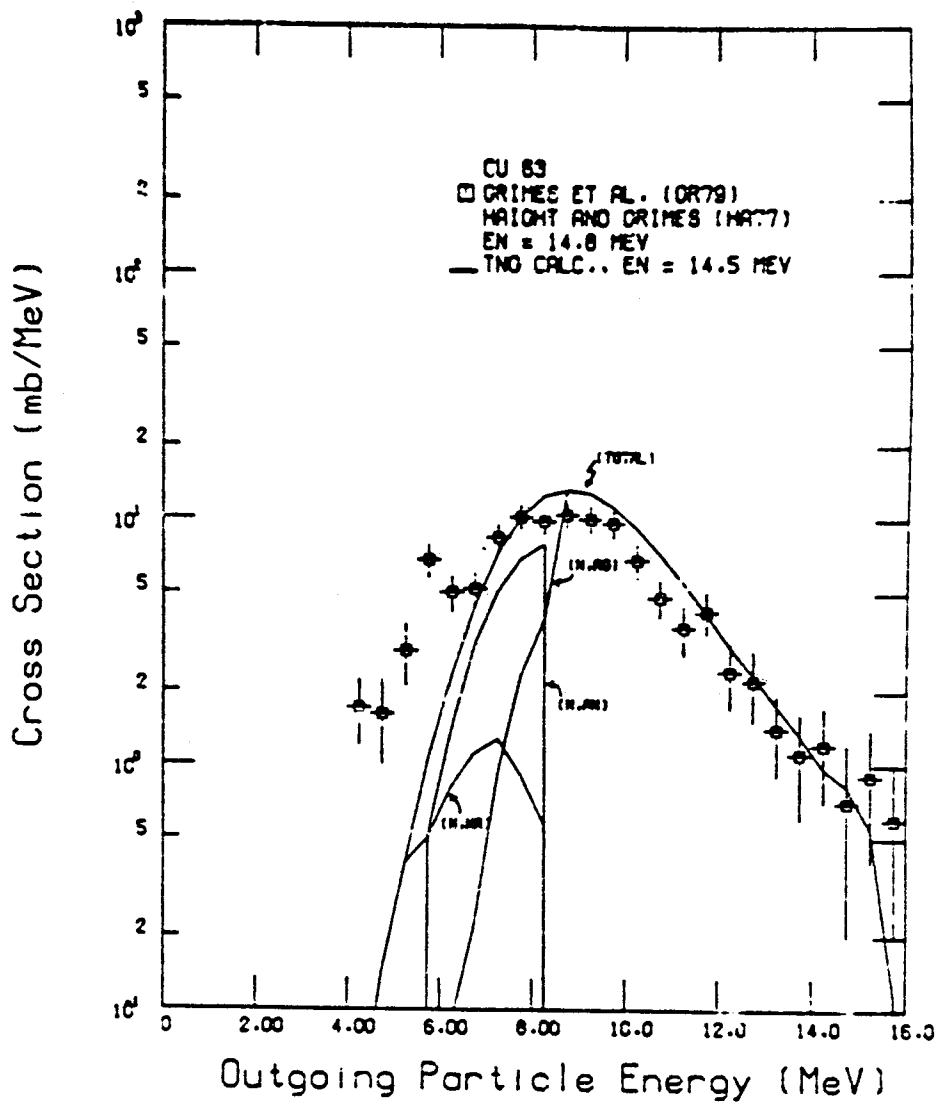


Fig. 1 ^{63}Cu α 粒子放出スペクトル (Hetrick et al. 's calculation)

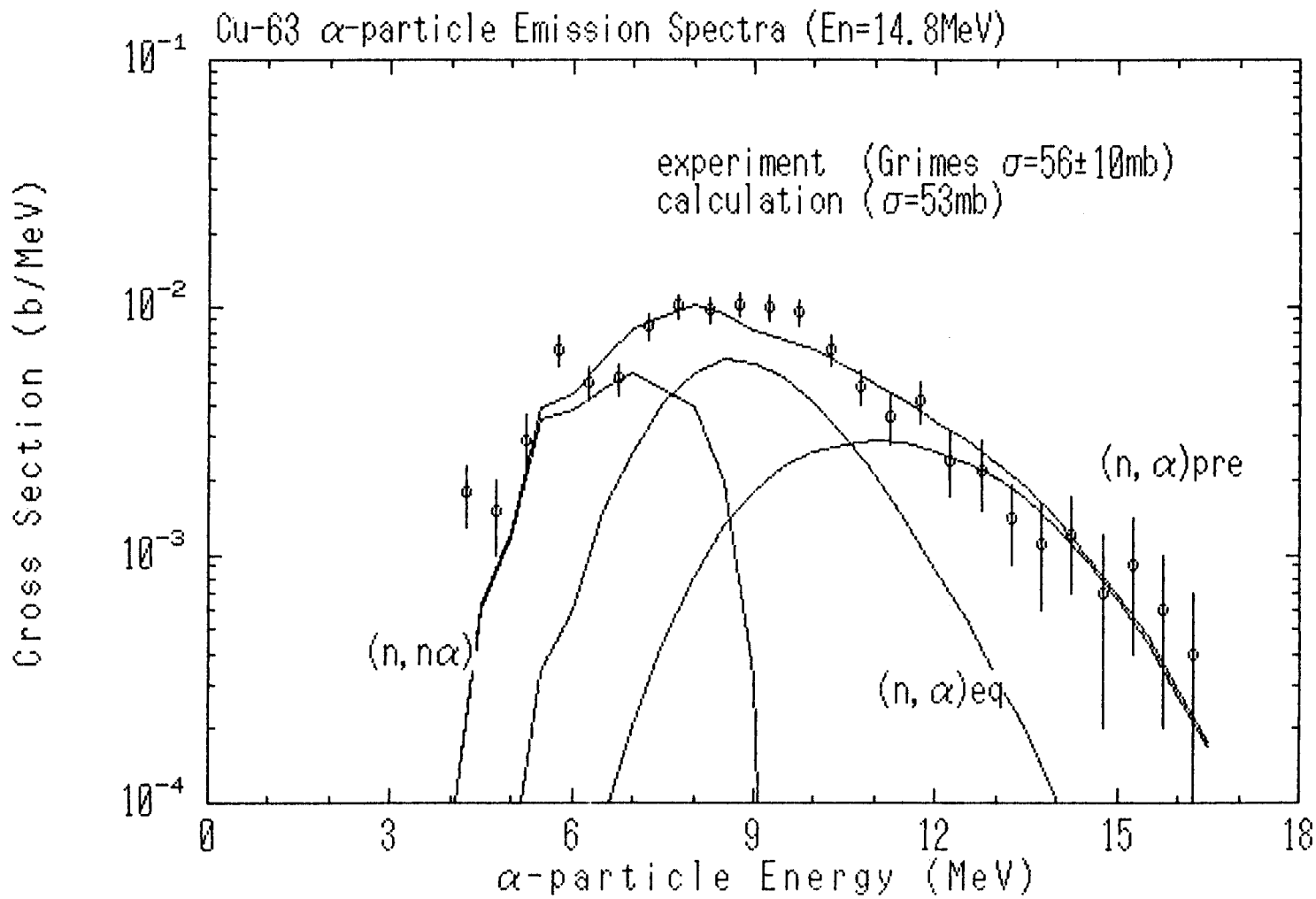


Fig. 2 present calculation