

## FKK 理論についてのコメント

九州大学先端エネルギー理工学専攻

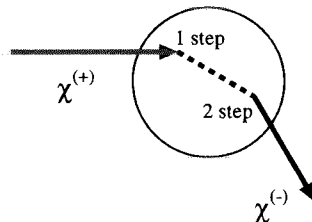
河野 俊彦

kawano@aees.kyushu-u.ac.jp

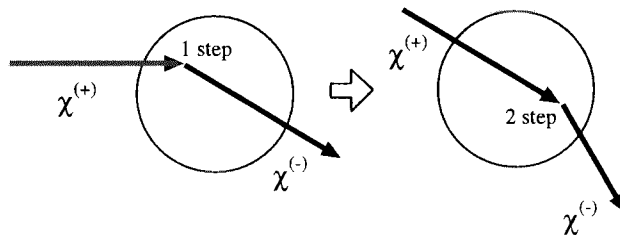
核データニュース第 65 号に、拙文「二重微分断面解析への量子論的アプローチ」を掲載していただき、低エネルギー領域の DDX データ解析を対象とする理論を概説した [1]。これについて、もう少し書き加えておいた方が良かったので、この場をお借りして簡単にまとめておく。それは主に FKK 理論の問題点についてである。

1980 年に FKK の論文 [2] が出てすぐに、主に Bonetti らによる計算 (例えば Ref.[3]) が行われている。その後、Chadwick によって新たに計算コード FKK-GNASH[4] が作られ、いくつかのデータ解析に応用されてきた。それと並行して、これらの計算が間違っているという指摘がなされて来たのである。この問題については、九州大学・河合教授によっていくつかの解説 [5] がなされているので、そちらも参照して頂きたい。

最初に FKK のどこが問題なのかを明らかにしておく必要がある。前号 [1] にも書いたが、前平衡過程は MSC と MSD に分けて取り扱われる。FKK では、MSC と MSD それぞれに対する式を与えているが、問題になっているのは MSD の 2 段階以上の場合である。2 段階過程の遷移行列要素は、 $\langle \chi_b^{(-)} | V_2 G V_1 | \chi_a^{(+)} \rangle$  と書くことができ、Green 関数  $G$  を含んでいる。FKK 理論では、Green 関数に対して on-energy-shell の近似を用いることで、計算を簡単にしている。その結果、2 段階の行列要素は、第 1 段階の行列要素  $\langle \chi_c^{(+)} | V_1 | \chi_a^{(+)} \rangle$  と第 2 段階の行列要素  $\langle \chi_b^{(-)} | V_2 | \chi_c^{(+)} \rangle$  とに分離される。FKK の問題と言われるものは、その後起こる。この  $\langle \chi_c^{(+)} | V_1 | \chi_a^{(+)} \rangle$  の計算を  $\langle \chi_c^{(-)} | V_1 | \chi_a^{(+)} \rangle$  の様な DWBA の形で代用し、DWUCK や ECIS の様な計算コードを使ってそれを計算している点である。これは、核内で 2 回衝突する過程



を、次のように分離して、それぞれを通常の DWBA で計算していることになる。



1999年のTrentoでの専門家会議 [6] ではこの問題点について議論されたが、この代用の正当化が受け入れられることは無かった。また、行列要素を修正して (Modified DWBA と呼ばれる) 用いる試みも行われているが、断面積が異常に増加してしまうなどの不具合が生じ [7], 筆者の見限り成功しているとは言えないようである。

FKK に関してしばしば言及される他の問題点として、有効相互作用の強さ  $V_0$  が挙げられる。FKK (あるいは FKK-Bonetti) では、粒子-空孔対を励起する相互作用にレンジ 1 fm の湯川型を仮定している。1 段階の断面積の絶対値は  $V_0^2$  (2 段階は 4 乗) に比例し、この値は実験値に合うように決められる。このような調節パラメータを含んでいるので、実験データをそれなりに再現できてしまうのである。しかしながらそれは、計算を行う上でそのような相互作用を仮定した結果であって、FKK 理論そのものの問題というわけではない。例えば、同様の相互作用を NWFY 理論 [8] の計算に用いれば、ここにも  $V_0$  が調節パラメータとして入ってくることになる。また、 $V_0$  によって変化するのは断面積の絶対値であり、DDX の角度分布やエネルギー分布の形状は変わらない。従って、絶対値が与えられないことは、理論を用いる上での欠点ではあっても、理論的に間違っていると云った様な問題ではない。絶対値までも理論的に決定するには、相互作用に、湯川型の様な単純なものではなく、より現実的な有効相互作用を使用すればよい。このような試みも実際に行なわれている [9, 10]。

2 段階以上の計算方法に間違いがあるという指摘がなされて来たにもかかわらず、FKK-MSD の計算は、高エネルギー核反応実験データの解析に応用され、数多くの論文を生産した。そして、それらはデータを良く再現しているように見える。その理由は、多段階過程の寄与の割合にある。例えば、Koning によれば、 $^{90}\text{Zr}(p,p')$  反応の  $E_p = 80$  MeV において、1 段階の寄与は全体の 70% 近くを占め、2 段階は 30% 程度である (これは簡略化された計算の結果であり、また、この割合は放出陽子エネルギーによって変わる)。実験データの解析は、 $\sigma_{1step} \times V_0^2 + \sigma_{2step} \times V_0^4$  が実験値に合うように  $V_0$  を調節することでなされるが、1 段階の断面積が大きな部分を占めるため、2 段階の寄与は埋もれてしまい、その 2 段階過程計算の差異の影響は見えにくい。

近年では高エネルギー核データ評価の活動が活発化し、高エネルギー核反応に関する理論計算の重要性も増してきている。14 MeV データのための評価であれば、前号で述べたように MSC+1step MSD だけで事が足るため、FKK の多段階での問題は生じない。従って、20 MeV 以下を対象とする汎用核データライブラリの評価に対して、FKK 理論はそれなりに有用である。しかしながら、より高エネルギーでの核データ評価には、2 段階以上の過程を考慮することが不可欠であり、その目的のために FKK-GNASH 等を使って間違った計算を行なう合理性は無い。

Luo-Kawai [11] によって提唱された SCDW モデルは、FKK や TUL とは異なったアプローチの量子論的なモデルであり、断面積の絶対値を調節パラメータ無しに決定できる特徴を持つ。SCDW では、多段階への拡張 [12] やいくつかの精密化 [13][14][15] が行なわれており、種々の中間エネルギー核反応理論計算に成功している。また、Herman は、Lenske と Wolter によって書かれた TUL 計算コード ORION-TRISTAN を、EMPIRE II コードに組み込み、核データ評価に利用している (EFF-3.0,  $^{56}\text{Fe}$ )。今後、高エネルギー領域における信頼できる核データ評価のためには、このようなコードを積極的に利用していくべきである。

最後に、本稿執筆にあたり、九州大学渡辺助教授の御助言を頂きました。この場を借りてお礼申しあげます。

## 参考文献

- [1] 河野 俊彦, “二重微分断面積解析への量子論的アプローチ”, 核データニュース 65 号, p.40 (2000).

- [2] H. Feshbach, A. Kerman, and S. Koonin, *Ann. Phys.*, (N.Y.) **125**, 429 (1980).
- [3] R. Bonetti, M. Camnasio, L. Colli Milazzo, and P.E. Hodgson, *Phys. Rev. C*, **24**, 71 (1981).
- [4] M. B. Chadwick and P. G. Young, *Phys. Rev. C*, **47**, 2255 (1993).
- [5] 例えば, 河合 光路著「核反応」第5章, 丸善(1995), 「中性子ポテンシャルの現状」 p.220, 日本原子力学会(1997).
- [6] M. B. Chadwick, et al., *Acta Physica Slovaca*, **49**, 365 (1999).
- [7] I. Kumabe, M. Harura, M. Hyakutake, and M. Matoba, *Phys. Lett.*, **140B**, 272 (1984).
- [8] H. Nishioka, H. A. Weidenmüller, and S. Yoshida, *Ann. Phys.* (N.Y.) **183**, 166 (1988).
- [9] R. Lindsay, *Acta Physica Slovaca*, **45**, 717 (1995).
- [10] 河野 通郎, 渡辺 幸信, 孫 偉力, 緒方 一介, 河合 光路, 日本物理学会講演概要集, 第55巻第1号第1分冊, p.32 (2000).
- [11] Y. L. Luo and M. Kawai, *Phys. Lett.*, **B235**, 211 (1990), *Phys. Rev. C*, **43**, 2367 (1991).
- [12] M. Kawai and H. A. Weidenmüller, *Phys. Rev. C*, **45**, 1856 (1992).
- [13] Y. Watanabe, R. Kuwata, Sun Weili, M. Higashi, H. Shinohara, M. Kohno, K. Ogata, and M. Kawai, *Phys. Rev. C*, **59**, 2136 (1999).
- [14] K. Ogata, M. Kawai, Y. Watanabe, Sun Weili, and M. Kohno, *Phys. Rev. C*, **60**, 054605 (1999).
- [15] Sun Weili, Y. Watanabe, M. Kohno, K. Ogata, and M. Kawai, *Phys. Rev. C*, **60**, 064605 (1999).