重イオン核反応の最近の話題 準核分裂反応

(日本原子力研究所) 原 田 吉之助

重イオン核反応にはいろいろなタイプのものがあるが、最近フランス、オルセーの研究者によって準核分裂反応 (quasi-fission) と呼ばれる新しいタイプの反応が見出された。この新しい反応を、重イオンの複合核生成反応と関連させて紹介する。理論的な説明はまだ確立されていないが、一つの定性的解釈についても言及する。

I. はじめに

最近、重イオン核反応の研究が世界の各地で盛んに進められている。なぜ精力的に進められているのだろうか。“そこに山があるから登る”という答と似た理由付けをしようとするれば、中性子や軽イオンによる核反応と比べて、重イオン核反応には不明の点が山積しているからといえようが、重イオン核反応の場合にはこの研究を魅力的にするもっと積極的な理由が存在する。それは、重イオン核反応が核物理の研究対象を縦と横に大幅に拡げてくれるからである⁽¹⁾。ここでは、縦という言葉を原子核のもつ励起エネルギーまたは角運動量を表わすために用い、横という言葉を実験領域から遠く離れたところに位置する原子核を示すために用いた。重イオン核反応によって生成される複合核は、非常に高い励起エネルギーと大きな角運動量をもつ。このような状態にいる複合核は、軽イオン入射反応では作ることができない。また、現在知られている原子核の数は約1,500であるが、重イオン核反応により、新たに約4,000にも及ぶ新しい放射性同位元素を生成し、それらの核構造を研究できることも、大きな魅力である。このように、重イオン核反応は、いままでは知ることができなかった原子核の側面にも光をあててくれると期待されている。

重イオン核反応には種々のタイプのものがあり、そのメカニズムも複雑である。それらについて、網羅的に解説することは誌面の関係で到底できないので、ここでは中性子反応などでよく知られている、いわゆる“複合核反応”が重イオンの場合どのようにになっているのかについて整理し、それに関連して最近話題になっている“準核分裂反応”について解説する。重イオンを原子核に衝突させて行われる複合核生成は、これから

述べるように従来の複合核反応に比べてかなり様相が違っている。例えば、複合核の崩壊のしかたは入射チャンネルに強く依存し、生成と崩壊は独立でない。また複合核の寿命も短く、複合核全系が熱平衡状態になってから崩壊するとは必ずしも考えられない。このような相違を考慮して、重イオン反応では従来の“compound nucleus”の代わりに、“complete fusion”という言葉がよく用いられる。本稿でも、この使い分けを踏襲して“完全融合”という言葉を用いることにする。

II. 2つの原子核がどのくらい近接したら完全融合反応を起すか

重イオンはいままでもなく荷電粒子である。重イオンと原子核の間の相互作用ポテンシャル $V(r)$ は、引力である核力と、斥力であるクーロン力からくるポテンシャル $V_{\text{nucl}}(r)$ および $V_{\text{coul}}(r)$ との合成である。すなわち、

$$V(r) = V_{\text{coul}}(r) + V_{\text{nucl}}(r) \quad (1)$$

第1図にポテンシャル $V(r)$ の外側の部分を示した(内部については、まだわかっていない)。角運動量がある場合には、これに遠心力ポテンシャル((4)式参照)が付加される。 $V(r)$ の表面部分の実験的チェックは、各種核反応のしきい値(反応が起り始めるエネルギー)を測定することによって調べることができる。完全融合を起させるためには、少なくとも第1図に示したポテンシャルの山を通り抜けられるエネルギーまで重イオンを加速しなければならない。本稿では、このポテンシャルの山の高さより高いエネルギーを持った重イオンがひき起す反応について述べる。

全反応断面積 σ_R は、 l -部分波の透過係数を T_l と

A Topic in Heavy-Ion Reactions, Quasi-Fission Reactions, Kichinosuke HARADA.

クーロン力(斥力)と核力(引力)からくるポテンシャルの合成である。

第1図 重イオンと原子核の相互作用ポテンシャル

すると、よく知られているように

$$\sigma_R = \pi \lambda^2 \sum_l (2l+1) T_l \quad (2)$$

ここで、 λ : 入射重イオンの波長
で与えられる。完全融合反応断面積の実験値は、 l の臨界値 l_{cr} までの部分波に対して $T_l=1$ 、それ以上の部分波に対しては $T_l=0$ と近似し、よく再現できることは知られている。これを用いると、(2)式は

$$\sigma_R = \pi \lambda^2 [(l_{cr}+1)^2 + \sum_{l=l_{cr}+1}^{\infty} (2l+1) T_l] \\ = \sigma_{CF} + \sigma_{NOF} \quad (3)$$

と書くことができ、[]内の第2項 σ_{NOF} は完全融合以外の反応断面積を与える。次に、完全融合を起すために必要な近接距離 R_{cr} を求めるために

$$E = V(R_{cr}) + \frac{\hbar^2 l_{cr}(l_{cr}+1)}{2\mu R_{cr}^2} \quad (4)$$

を用いて σ_{OF} の表式から l_{cr} を消去してみる。(4)式は、 l_{cr} までの部分波に対するポテンシャル障壁が重イオンの入射エネルギー E より低く、入射重イオンがポテンシャル障壁を通り抜けられることを表わしている。 μ は入射重イオンと標的核の換算質量であり、(4)式の第2項は l_{cr} 部分波に対する遠心力ポテンシャルである。(4)式から $l_{cr}(l_{cr}+1)$ を求め、それを $(l_{cr}+1)^2$ と同一とみなして(3)式の σ_{OF} の部分に代入すると、

$$\sigma_{OF} = \pi \lambda^2 (l_{cr}+1)^2 \\ = \pi R_{cr}^2 \left(1 - \frac{V(R_{cr})}{E}\right) \quad (5)$$

となる。 $V_{nuc}(r)$ はまだ一義的に決まっていないが、Orsay グループは、これに Orsay ポテンシャル²⁾と呼ばれるものを用い、 σ_{OF} の実験値を(5)式を用いて整理したところ、高エネルギー領域では

$$R_{cr} = r_{cr}(A_1^{1/3} + A_2^{1/3}) \\ r_{cr} \approx 1.0 \text{ fm} \quad (6)$$

ここで、 A_1, A_2 : それぞれ入射重イオンと標的核の質量数

で系統的によく合うことを見出した。この r_{cr} の値は中性子の核反応断面積の解析など³⁾で通常用いられている核半径定数に比べてかなり小さく、重イオン完全融合はかなり標的核の内部に侵入して起ることを示唆している。

Ⅲ. ^{40}Ar イオンによる完全融合反応

さて、完全融合の反応断面積 σ_{OF} が測定されると、(5)式を用いて臨界角運動量 l_{cr} が求まる。 ^{40}Ar イオンの場合の例を第2図⁴⁾に示した。図から、 l_{cr} はこの場合 100 くらいの大きさであり、 l_{cr}^2 は入射エネルギーに比例して増大していることがわかる。この実験事実は、 l_{cr} が複合核固有の性質(回転運動などの)によ

第2図 ^{40}Ar による完全融合反応の臨界角運動量 l_{cr} の実験値⁴⁾(I)を入射エネルギーの関数としてプロットしたもの

って完全に決定されるものではないことを示している。重い重イオンの入射で作られる複合核の主な崩壊モードは核分裂であるが、複合核が回転すると核分裂の障壁は低くなる。核分裂障壁がゼロになる回転スピンを臨界角運動量とすると、これは入射エネルギーによらなくなる。第2図中に $J(B_f=0)$ と書かれている横軸に平行な点線はこれを示している。実験データは、明らかにこの点線から外ずれている。

また、第2図中に $\sigma_R/\pi\lambda^2$ と書かれている点線は、全反応断面積に寄与する最大の l の2乗を与えるもので、この点線と完全融合反応の実験値との比較から、高エネルギー領域では、 σ_{CF}/σ_R は約0.5であることがわかる。あとで述べるが、 ^{84}Kr イオンを入射した場合はこの比がさらに小さくなる。低エネルギー中性子による核反応では、複合核経路が大部分であったのと比べると、重イオン反応では、核の内部に侵入しても非完全融合過程がかなり多く混在していることに注目すべきであろう。

IV. ^{84}Kr イオンによる完全融合反応と準核分裂反応

Ar より重い重イオンによる完全融合反応はどうなっているだろうか。超重元素の生成と関連して、この種の実験がなされた。第3図に、Ar+U と Kr+W の組合せでの反応生成物の質量と全運動エネルギーとの関係を等高線地図で示してある⁽⁵⁾。この2つの組合

第3図 Kr+W 反応と Ar+U 反応での反応生成核の質量と全運動エネルギーの等高線地図⁽⁵⁾

せは同じ原子番号110、ほぼ同じ質量の複合核に到達する。また、励起エネルギーおよび持ち込まれる角運動量もほぼ同じである。

Ar+U の場合(下図), 中央の三角形の形をした分布は、完全融合で出来た質量数 278 の原子核が対称核分裂することを示している。三角形の左右にある2つの丸い部分は、エネルギー損失および質量数の変化がほとんどない、完全融合以外の反応の収量を与えている。完全融合反応の角分布は、大きな角運動量を持った複合核からの核分裂破片の角分布と同じで、 90° 対称の $1/\sin \theta$ の形をしていることが見出されている。

Kr+W の場合(上図)を見ると、完全融合はほとんど起っておらず(三角形が見えていない), その代わりエネルギー損失が大きく(140 MeV くらい), 質量数変化のほとんどない(質量数84と186にピークがある), 新しい反応がかなり起っていることがわかる。反応後の全運動エネルギーが約 200 MeV で、通常の核分裂の場合と似ていることから、この新しいタイプの反応は準核分裂反応(quasi-fission)と呼ばれている。600 MeV での $^{84}\text{Kr} + ^{209}\text{Bi}$ 反応で準核分裂反応を経て放出された軽い分裂片核の角分布を第4図に示す⁽⁶⁾。曲線(a)および(b)はそれぞれ実験室系と重心系の角分布である。このような鋭い角分布は、多くの部分波が同じ角度に散乱されていることを示している。

準核分裂反応について、Orsay グループは以下のよ

第4図 Kr+Bi の準核分裂反応で放出された軽い分裂片核の再分布⁽⁶⁾

うに推論している⁽⁵⁾⁽⁷⁾。準核分裂反応は完全融合反応ではないが、エネルギーの損失が大きいため、これも2つの原子核が互いに深く侵入しあうような衝突であり、標的核の外側をかすめて通るとき起るものではないと考える。そこで、準核分裂反応断面積 σ_{sf} を(3)式の σ_{NOF} に含めないで、 σ_{OF} の中に含めることにし、 σ_{OF} を近接衝突 (close collision) 断面積 σ_{cc} と

呼びかえることにする。すなわち、

$$\sigma_{cc} = \sigma_{OF} + \sigma_{sf} \quad (7)$$

とし、 σ_{cc} が(5)式で与えられるとする。このようにして計算された σ_{cc} と実験値との比較を第1表に示した⁽⁵⁾。両者はよく一致している。このように整理すると、 l_{cr} の実験値に入射重イオンの質量による不自然な変化も見られず、系統性がよい。

第1表 完全融合と準核分裂反応断面積の実験値と近接衝突断面積の計算値との比較⁽⁵⁾

Projectile	Target	E_{lab} (MeV)	Exp.				Calc.
			σ_{OF}	σ_{sf}	σ_{OF+sf}	Ref.	σ_{cc}
^{63}Cu	^{186}W	395	200	250	450 ± 120	(10)	670
	^{197}Au	365	0~30	280~250	280 ± 50	(7)	320
^{84}Kr	^{208}Bi	525	0	450	450 ± 80	(4)	480
		605	0	1,500	$1,500 \pm ?$	(6)	900
	^{238}U	450~600	55	470	525 ± 80	(11)	480†

† Values averaged over the indicated energy range.

それでは、 l_{cr} までの部分波のうちどの部分波が準核分裂反応にきいているのであろうか。第1表の Cu イオン入射の2つの場合を見ると、 σ_{sf} はほぼ同じ大きさだが、 σ_{OF} に大きな違いがあることがわかる。

簡単な計算から、Cu+W 系では $l \sim 170$ までの部分波が、Cu+Au 系では $l \sim 130$ までの部分波がきいていると推定される。このことから、文献(5)、(7)の著者らは、準核分裂反応には低い l の部分波がきいているだろうと推測している(第Ⅶ章で述べるようなポテンシャルエネルギーのくぼみも Cu+Au 系の方が浅い)。また、 $^{84}\text{Kr} + ^{74}\text{Ge}$ 反応と $^{40}\text{Ar} + ^{118}\text{Sn}$ 反応で作られた同じ複合核 ^{158}Er から5個中性子が放出される $5n$ 反応との励起関係がそれぞれ測定されており、Ar イオン入射の場合はすべての l 波が完全融合し、Kr イオン入射の場合は $l \sim 50$ までの部分波は完全融合を起さないと仮定して計算したものとよく合うことが報告されている⁽⁴⁾。

第5図 角運動量 l をもった部分波の反応に寄与する度合

(2)式に従って、各部分波の反応に寄与する度合を示すと第5図のようになる。重い重イオンの場合、斜線をつけた低い l の部分は準核分裂に、高い l の部分は完全融合以外のものに、斜線のない部分が完全融合を起すと考えられている。実験データは確かにこのような考え方を支持しているように見えるが、理論的にはまだその妥当性が証明されていないのが現状である。

V. 近接衝突の1つの定性的解釈

第Ⅲ、Ⅳ章で述べたような完全融合反応、準核分裂反応の断面積、エネルギー損失、角分布などを理論的に理解しようとする試みが多くなされているが、定量的な説明にはまだ成功していない。エネルギーの損失が大きいため、古典力学的には近接衝突を、2つの原子核が激しく衝突する際、大きな摩擦力を受けるものと考えられる。球状をした2つの原子核を考え、第6図に示したような座標をとると、系の運動エネルギー T は

$$T = \frac{1}{2}(\mu \dot{r}^2 + \mu r^2 \dot{\theta}_0^2 + I_1 \dot{\theta}_1^2 + I_2 \dot{\theta}_2^2) \quad (8)$$

ここで、 I_1, I_2 : それぞれ原子核1, 2の慣性モーメントと書ける。ここで次のような新座標 q_i を導入する⁽⁸⁾。

$$\begin{aligned} q_1 &= r, & q_2 &= R_1(\theta_1 - \theta_0) + R_2(\theta_2 - \theta_0) \\ q_3 &= \theta_2 - \theta_1, & q_4 &= \theta_0 \end{aligned} \quad (9)$$

新座標 q_1, q_2, q_3 に関する摩擦力をそれぞれ radial, tangential, rolling friction と呼んでいる。tangential friction は2つの原子核が表面をこすり合う時受ける

摩擦力である(他の2つの摩擦力については、 q_1, q_2 の定義から容易に理解できよう)。3つの摩擦力を適当に仮定して、新座標についてのラグランジュ方程式を解いて近接衝突のエネルギー損失や角分布を求めることが行われている。

第6図 重イオンと原子核の衝突を記述するために用いた座標

tangential friction の効果を見るために、2つの等しい大きさの、自転していない原子核が衝突し、衝突後表面で密着 (clutch) したまま全体として回転する場合を考えてみる。これは tangential friction が極めて強い場合に相当し、rolling friction の値は2つの等しい原子核の場合以下の結論に全く影響しない。2つの原子核は衝突後それぞれ自転運動することになるので、相対角運動量は衝突前のその5/7になる。それは次のように証明される。

全系の角運動量 L は

$$L = \mu r^2 \dot{\theta}_0 + I_1 \dot{\theta}_1 + I_2 \dot{\theta}_2 \quad (10)$$

で与えられ、これは衝突の前後で保存される量である。いまの場合、 $I_1 = I_2 = 2/5 MR^2$ である。衝突前は、もちろん $\dot{\theta}_1 = \dot{\theta}_2 = 0$ で相対角運動量(第1項)が L に等しい。衝突後は表面で clutch して回転するので、 $\dot{\theta}_1 = \dot{\theta}_2 = \dot{\theta}_0$ 、 $r = 2R$ であるから、

$$\begin{aligned} L &= \left[\frac{1}{2} M(2R)^2 + \frac{2}{5} MR^2 + \frac{2}{5} MR^2 \right] \dot{\theta}_0 \\ &= \frac{7}{5} \left[\frac{1}{2} M(2R)^2 \dot{\theta}_0 \right] \\ &= \frac{7}{5} (\text{衝突後の相対角運動量}) \end{aligned} \quad (11)$$

したがって、重イオンの衝突において、tangential friction が大きいと、入射重イオンが持っている角運動量 l_{in} の一部は2つの原子核の自転運動に使われ、衝突後の相対角運動量 l_{out} は l_{in} より小さくなる。そして、上の簡単な考察ではその減り高 Δl は入射角運動量に比例する。一般の場合にはもっと複雑になる⁽⁹⁾。

さて、Lefort⁽⁷⁾に従い、tangential friction がある場合に重イオンの衝突がどうなるかを、重イオンの角運動量に依存する遠心力ポテンシャルまで付加したポテンシャル・エネルギー曲線で考察してみよう。第7図にそれが示されている。(a)図は Ar のような軽い重イオンの場合で V_{eoul} が小さいのでポテンシャル・エネルギー曲線に深くくぼみが出来る。すなわち、高い l に対してもくぼみが出来る。したがって、tangential friction で l が小さくなり相対運動のエネルギーを失うと、 (ΔE) 、 l_{cr} までの部分波はすべてこのくぼみの中に捕えられて完全融合反応を起すと考えられる。(b)および(c)図は重い重イオンの場合で、 V_{eoul} が大きいのでくぼみは浅い(高い l に対してはくぼみがなく

種々の相対角運動量に対するものが描かれている。

第7図 重イオンと原子核の相互作用ポテンシャル(文献(7)のものを一部修正して引用)

なる)。(b)図は入射重イオンの角運動量 l_{in} が大きい場合で、(c)図は小さい l_{in} の場合である。(b)図では Δl が大きい(ΔE も大きい)ため、くぼみに捕えられて完全融合を起し、(c)図では Δl が小さい(ΔE も小さい)ので、くぼみに捕えられずに準核分裂反応を起すと考えられる。

もし、radial friction がかなり強く tangential friction が弱いと、すなわち ΔE が大きく Δl が小さいと上のような議論は逆になり、(b)が準核分裂に、(c)が完全融合に移行するようにも考えられる。第IV章で述べた実験データは tangential friction が強いことを支持しているように見えるが、それを判定するには詳しい解析が必要である。また、上の議論は準核分裂反応の角分布には何も触れていないので、この点からも摩擦力を考慮した詳細な解析がなされることが望まれている。

Ⅶ. おわりに

本稿では、筆者の主観で、重イオン核反応のうち重い重イオンによる準核分裂反応にスポットをあてたので、主にオルセー、パークレイでなされた研究について述べることになってしまった。重イオン核反応の研究は、現在、理研、東大、京大などで精力的に進められている。それらの研究成果については、例えば文献(10)

を参照されたい。また、重イオン核物理の研究を一層飛躍させるために、国内のいくつかの研究機関で大型加速器の整備が進められていることを付記しておく。

本稿を準備するに当たって、日本原子力研究所岩本昭氏に数々の有益な討論とご協力を頂いた。ここに厚く謝意を表する次第である。

—参考文献—

- (1) 中井浩二: 本誌, 16[12], 605 (1974).
- (2) NGÔ, C., TAMAIN, B., GALIN, J., et al.: *Nucl. Phys.*, A240, 353 (1975).
- (3) 田中茂也: 本誌, 17[5], 211 (1975).
- (4) LEFORT, M., Le BEYEC, Y., PÉTER, J.: "Reactions between Complex Nuclei", (Proc. Int. Conf.), Vol. 2, p81 (1974), North-Holland.
- (5) PÉTER, J., NGÔ, C., TAMAIN, B.: *Nucl. Phys.*, A 250, 351 (1975).
- (6) WOLF, K.L., UNIK, J.P., HUIZENGA, J.R., et al.: *Phys. Rev. Lett.*, 33, 1105 (1974).
- (7) LEFORT, M.: *Phys. Rev.*, C, 12, 686 (1975).
- (8) BONDORF, J.P., SOBEL, M.I., SPERBER, D.: *Phys. Rep.*, 15C, 84 (1974).
- (9) 岩本 昭: 私信.
- (10) Proc. INS-IPCR Symp. Cluster Structure of Nuclei and Transfer Reactions Induced by Heavy-Ions, Tokyo, Mar. 17~22, 1975, *IPCR Cyclotron Progress Rep.*, Suppl. 4.

お知らせ・H, OH 等の反応速度データ

米国 National Bureau of Standards から発行されている、National Standard Reference Data Series の文献をわが国で早く入手するための手番が整いました。このシリーズ中には現在分析機器に連載中の、NSRDS-NBS 43 "Selected Specific Rates of Reactions of Transients from Water in Aqueous Solution. I. Hydrated Electron." のほか、同じく e_{aq}^- に関する NSRDS-NBS 43, Supplement, さらに NSRDS-NBS 46 "Reactivity of the Hydroxyl Radical in Aqueous Solution.", NSRDS-NBS 51 "Selected Specific Rates of Reactions of Transients from Water in Aqueous Solution. II. Hydrogen Atom." 等が含まれております。NBS との交渉の結果、わが国で一括購入の道が開かれました。入手価格は(米国での定価)+(送料)になります。上記文献の定価は90セントから1ドル20セントの間にあります。もし100部以上まとまれば米国内での定価でお届けすることができます。現在発注部数を調査中ですので、文献入手ご希望の方は下記へご連絡下さい。なお NSRDS 中には放射線化学以外の分野の文献が含まれております。それらのリストも下記へご連絡下されば提供致します。

◇連絡先◇ (〒060) 札幌市北区北13条西8丁目
北大工学部原子工学科 片山明石
(Tel. 011-711-2111 内線6672)

◇原子力構造機器の

材料・設計・施工・検査に関する講習会◇

主催 日本溶接協会、本会ほか協賛
とき 3月15日(月)~17日(水)
ところ 自動車会館大会議室
(東京都千代田区九段南, Tel. 03-264-7794)
定員 100名(3月6日締切)
聴講料 40,000円(資料、テキスト代を含む)
問合せ、申込先 日本溶接協会原子力研究委員会
(東京都千代田区神田佐久間町1-11 産報佐久間ビル
[Tel. 03(253)0581~3])

—プラントの構造設計と安全性の

確保に関するシンポジウム—

第2回「ASME CODE とその課題」

主催 日本高圧力技術協会、後援 本会ほか
とき 3月25日, 26日高温高圧装置の設計
5月17日, 18日材料と溶接
6月29日, 30日検査
ところ 全共連ビル 大会議室
(東京都千代田区平河町2-7, Tel. 03-269-3111)
問合せ先 国際産業企画協会
(東京都港区赤坂3-17-8 土橋ビル, Tel. 03(585)6451)