

中重核二体崩壊反応における前分裂点時間の角運動量への依存性

東北大学 中川恵子

低～中高入射エネルギー領域における重イオン核反応において二体崩壊過程のダイナミックスは原子核の散逸 (dissipation) や粘性 (viscosity) などの情報を与えるものとして注目されている。理論的には、様々なモデルを用いて、系の粘性が大きくなると分裂までの時間が長くなることが示唆されている。したがって実験的に系の反応時間を決定することが系の粘性に関して何らかの情報を与えるのではないかとと思われる。このような重イオン核反応では複合核に持ち込まれる角運動量がさまざまな崩壊過程を分類する上で非常に重要な役割をしており、さらには反応時間にも影響を与えていると考えられる。しかしながら実験において系のもつ角運動量を完全に把握することは困難であるため、考察も乏しく、新しい実験的情報が要求されている。

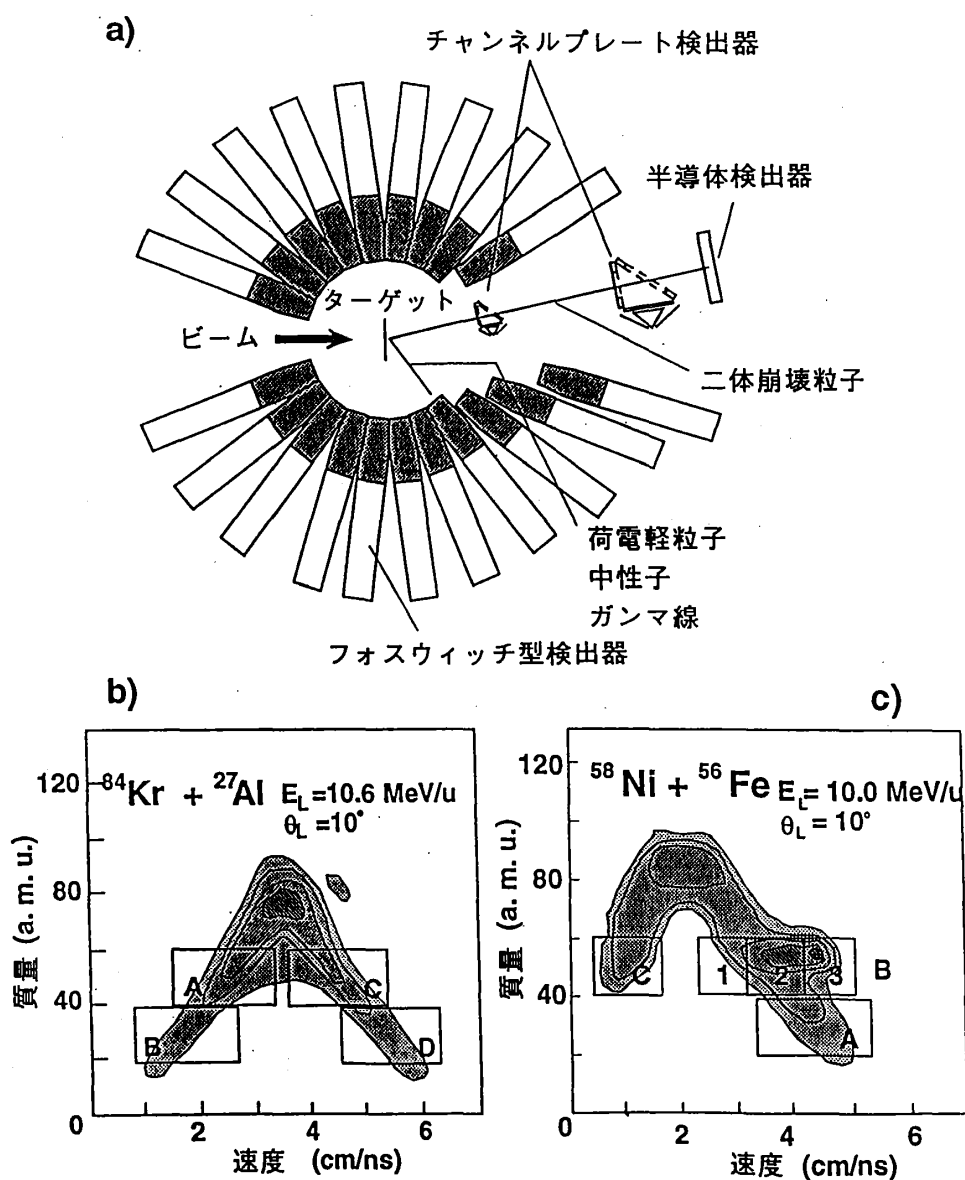
最近、反応中に放出される軽粒子を二体崩壊した粒子と同時に測定することにより、複合核の存在時間 (前分裂点時間: pre-scission time) を導出する実験が行われ、その結果、蒸発軽粒子の多くは前分裂点 (pre-scission) で放出されており、中心となる二体崩壊反応は遅く、しかも複合核は分裂点 (scission point) ではかなり低い励起状態にあることが報告された [1]。

以上のようなことを踏まえて、我々は系の持つ角運動量が反応時間にどのような影響を与えるかを実験的に導出することを試みた。まず、ほぼ等しい複合核をほぼ等しい励起エネルギーで形成する二つの異なる系において蒸発軽粒子の多重度 (multiplicity) を測定し、多重度から導出された前分裂点時間が、系の入り口チャンネル、さらには系の持つ角運動量にどのように依存するかを考察する。選んだ系は $^{84}\text{Kr}+^{27}\text{Al}$ ($E_{\text{lab}} = 10.6$ MeV/u)、および $^{58}\text{Ni}+^{56}\text{Fe}$ ($E_{\text{lab}} = 10$ MeV/u) である [2]。さらに、反応において放出されるガンマ線の多重度は系の角運動量に関して良い量であると一般に言われている。この点に着目して、 $^{58}\text{Ni}+^{56}\text{Fe}$ 系においては軽粒子と同時測定されたガンマ線の多重度から系そのものの角運動量に関する情報を導くことを試みた。

実験は理化学研究所加速器研究施設の大散乱槽 (アシユラ) [3] において行われた。陽子およびアルファ粒子の多重度を上記二つの反応において二体崩壊粒子と同時測定した。図 1 (a) に測定器の配置を示す。二体崩壊粒子は前方 10 度におかれたチャンネルプレート検出器 [4] と半導体検出器を用いた飛行時間測定装置で測定し、軽粒子は立体角 3π を覆うマルチ検出器系で測定した。この検出器系は 120 本のフォスウィッチ型検出器 (Phoswich detector) からなり実験室系で 10 度から 160 度までを覆っている。個々のフォスウィッチ型検出器は薄いプラスチックシンチレーターと BaF_2 のクリスタルから

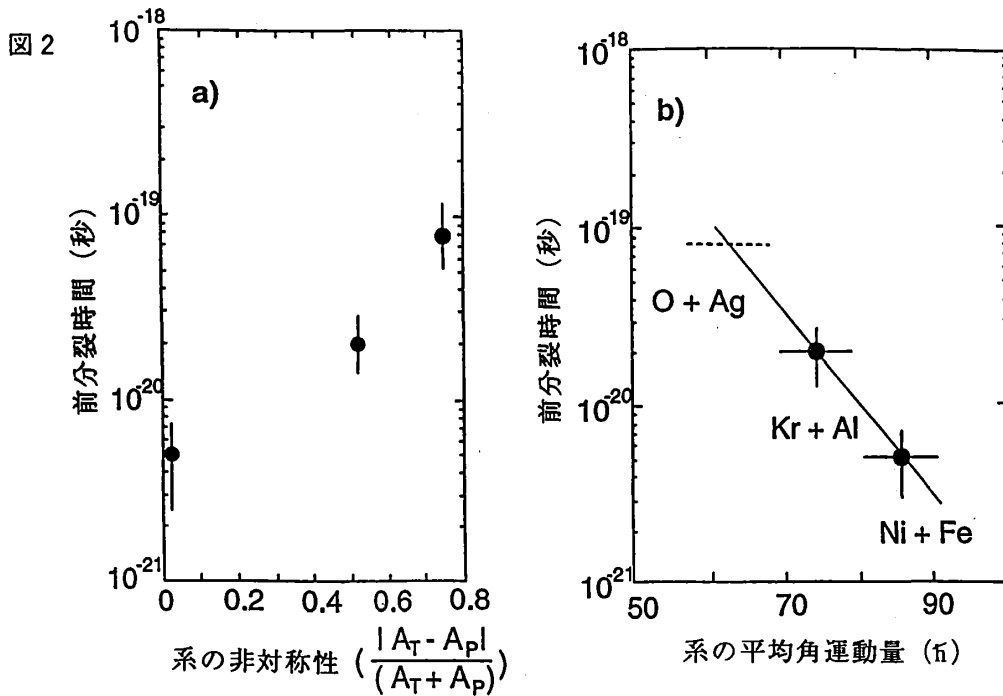
できているため、陽子、アルファ粒子のみならずガンマ線、中性子の測定も同時に可能である [5]。図 1 (b) および (c) に飛行時間測定装置で得られた二体崩壊粒子の速度と質量の分布をそれぞれの系について示す。図中には解析で用いた速度と質量の範囲をあわせて表示した。

図 1



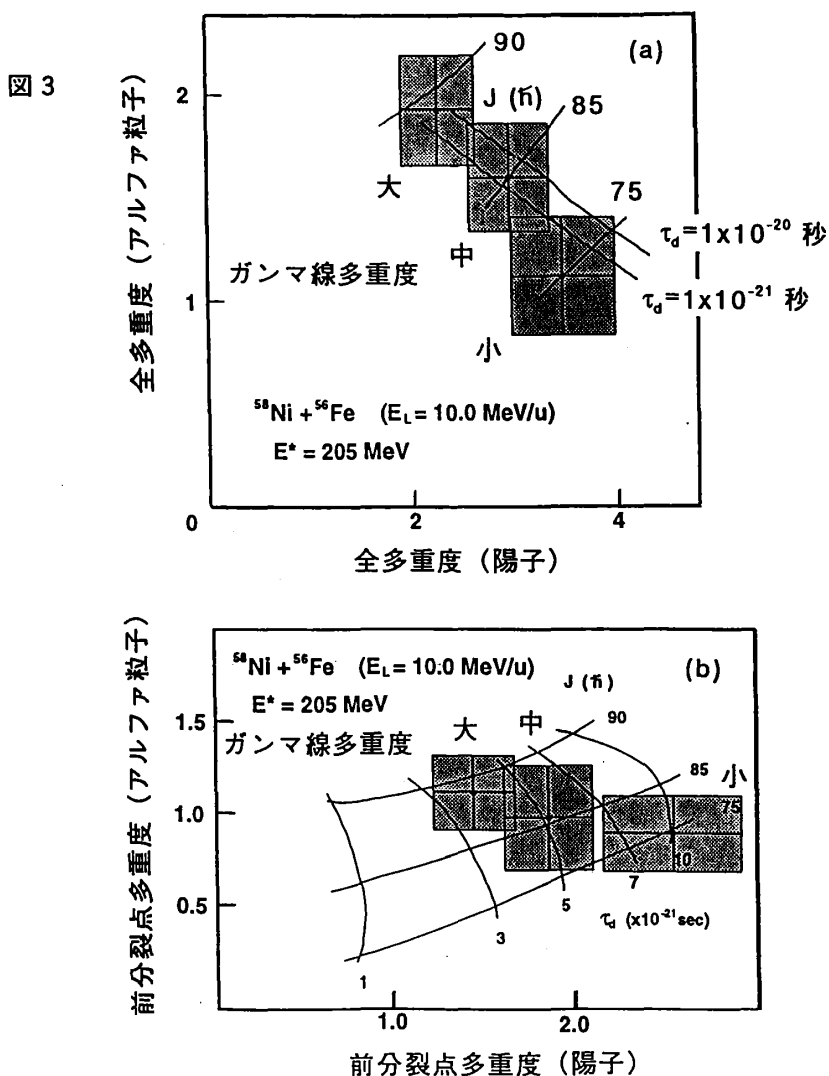
それぞれの質量と速度の範囲について得られた陽子、アルファ粒子のエネルギースペクトルから moving source 解析によってそれぞれの前分裂点および分裂点後での多重度を導出する。軽粒子の放出源として複合核、および二つの二体崩壊粒子を仮定した。得られた前分裂点多重度 (pre-scission multiplicity) から統計モデル計算により前分裂点時間を導出した。用いた統計モデル計算は GEMINI 計算と PACE2 計算である。

得られた前分裂点時間を入り口チャンネルの質量の非対称性を $|A_t - A_p|/(A_t + A_p)$ (A_t, A_p はそれぞれ標的核、入射核の質量) で定義してその関数でグラフにプロットすると図 2



(a) (黒丸) のようになる。 $^{16}\text{O} + \text{Ag}$ の結果は比較のために他の文献より引用した [6]。この系は完全融合の時には $^{84}\text{Kr} + ^{27}\text{Al}$ および $^{58}\text{Ni} + ^{56}\text{Fe}$ とほぼ等しい質量と励起エネルギーの複合核を形成する。この系に関しても文献の中で報告されている励起エネルギー 197 MeV と角運動量 $80 \hbar$ を用いて同様に計算を行い前分裂点時間を算出した。図からわかるように前分裂点時間は系がより非対称になると長くなる。次に前分裂点時間を二体分裂の平均角運動量の関数で図に表わしてみると図 2 (b) (黒丸) のようになった。各系の二体崩壊の平均角運動量は実験で得られた反応断面積から Sharp Cut-off Model によって算出した。 $^{16}\text{O} + \text{Ag}$ の系に関しては入り口での不完全融合のために角運動量が一意には決めることができないが、図からわかるように系の平均角運動量が減少すると前分裂点時間が長くなる傾向が見られる。

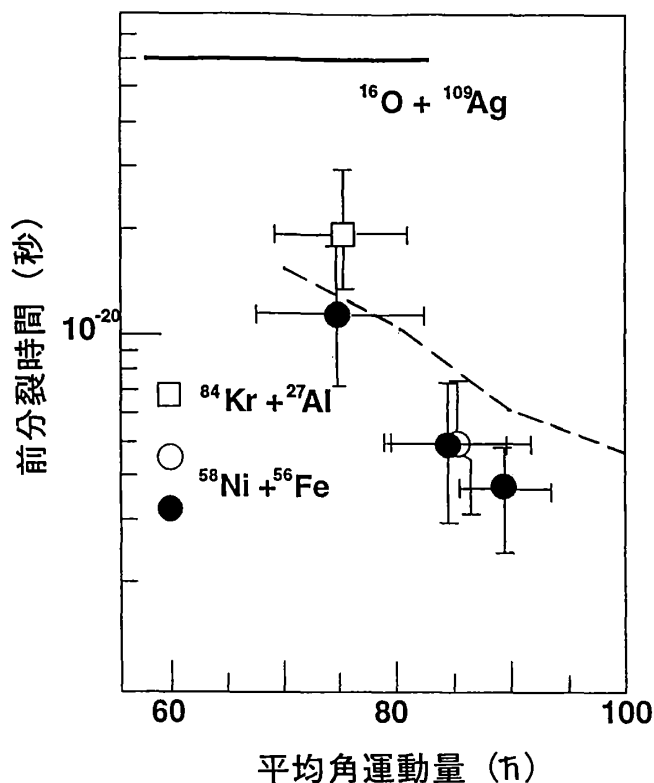
以上の様に異なる二つの系を比較することによって系の角運動量が分裂までの時間にどのような影響を与えるかを考察したが、二つの異なる系を比較する限り、複合核形成までの時間が考慮されていないという問題が残る。入り口チャンネルの違いによって当然ながら複合核形成までの時間が異なると考えられる。したがって我々は一つの系において角運動量の効果を観測するためにガンマ線に着目した。先にも述べたように我々の検出器はガンマ線も同時に測定できるため、二体崩壊粒子と荷電軽粒子およびガンマ線を同時に測定し得られたガンマ線の多重度をもとに系の角運動量についての情報を導出することを試みた。ガンマ線の多重度を三つの範囲に分けて、それぞれの範囲について同時測定された陽子、アルファ粒子の前分裂点、および分裂点後の多重度を moving source 解析によってそれぞれ算出した。得られた陽子とアルファ粒子の全多重度 (前分裂点 + 分裂点後: total multiplicity) および前分裂点での多重度を三つのガンマ線多重度の範囲に関して図 3 (a)、(b) にそれぞれ示す。明らかにガンマ線の多重度が大きくなると



アルファ粒子の多重度が陽子の多重度比べて大きくなっている。それぞれのガンマ線多重度の範囲について系の持つ角運動量と前分裂点時間を見積もるために統計モデル計算を行った。結果を図 3 (a)、(b) に実線で示す。計算結果と実験データの比較により、ガンマ線の多重度が大きくなると系の持つ角運動量が増加することから、ガンマ線多重度が角運動量に関して良い量になっていることが確認された。以上のようにして求めることができた系の角運動量と前分裂点時間を図 4 に示す。図中の波線は核分裂過程を記述するランジュバン方程式に軽粒子放出を取り入れた計算を行った結果である [7]。平均角運動量が減少するとともに系の前分裂点時間が長くなる傾向がよく再現されている。

以上のようにほぼ等しい励起エネルギーと質量をもつ複合核をつくる二つの異なる系 ($^{84}\text{Kr} + ^{27}\text{Al}$ $E_{\text{lab}} = 10.6 \text{ MeV/u}$ と $^{58}\text{Ni} + ^{56}\text{Fe}$ $E_{\text{lab}} = 10.0 \text{ MeV/u}$) において実験を行い結果を比較することによって、前分裂点時間の系の対称、非対称性への依存性および系の二体崩壊の平均角運動量への依存性を調べた結果、系が非対称になるほど前分裂点時間は長くなり、系の持つ角運動量が大きくなるほど前分裂点時間は短くなることがわかった。さらに $^{58}\text{Ni} + ^{56}\text{Fe}$ 系において、ガンマ線の多重度で Gate をかけると、蒸発陽子と蒸発

図 4



アルファ粒子の多重度の比が変化することより、ガンマ線多重度が系の角運動量に対して良い量になっていることが確認された。このことを用いて、ガンマ線の多重度（系の角運動量）への系の前反応時間の依存性を調べたが、系の角運動量が大きくなると前分裂時間は短くなることが一つの系においても観測された。

参考文献

- [1] D. Hilscher and H. Rossner, Ann. Phys. Fr. 17 (1992) 471 and references therein.
- [2] K. Yuasa-Nakagawa et al., Phys. Lett. B351 (1995) 77
- [3] T. Nakagawa et al., RIKEN Accl. Prog. Rep. 22 (1988) 147
- [4] T. Mizota et al., Nucl. Instr. Meths. A305 (1991) 493
- [5] Y. Futami et al., Nucl. Instr. Meths. A326 (1993) 513
- [6] D. J. Hinde et al., Phys. Rev. C45 (1992) 1229
- [7] T. Wada et al., Phys. Rev. Lett. 70 (1993) 3538