

論文の内容の要旨

論文題目 Measurement of fusion excitation functions of $^{27,29,31}\text{Al} + ^{197}\text{Au}$
($^{27,29,31}\text{Al} + ^{197}\text{Au}$ の核融合反応励起関数の測定)

氏名 渡邊 裕

重イオン反応では核子あたり 10 MeV 程度以下の低エネルギー領域においても入射粒子のド・ブROI波長が標的核の核半径よりも小さく、古典的な粒子軌道を考えることができるため、衝突径数によって核反応が分類され得る。核力の影響が無視できる程度に衝突径数が大きい場合にはクーロン散乱やクーロン励起が起き、衝突径数が小さくなるにつれて準弾性散乱や深部非弾性散乱が観測される。さらに衝突径数が小さくなると入射粒子と標的核の重なりが大きくなり、核融合反応が起こる。本研究は、核融合反応に焦点をあわせて低エネルギーにおける重イオン反応の反応機構を解明することを目的とする。

重イオン核融合反応の断面積は、クーロン障壁より高いエネルギー領域では古典的なポテンシャル模型による計算と良く一致する。クーロン障壁以下のエネルギー領域では古典的には核融合反応は禁止されるが、実験により有限の断面積が観測されている。クーロン障壁以下での核融合反応は部分的にはポテンシャルのトンネル効果として理解されるが、観測される断面積の大きさは一次元的な障壁透過による計算に比べて数桁大きく、この核融合反応断面積の増大現象を説明する模型として様々な模型が提案されてきた。巨視的な模型としては、零点振動による核表面の揺らぎに起因するポテンシャルの変化や、多次元の巨視的自由度を持った液滴模型によるネック形成などがある。一方、現象論的手法としてクーロン障壁が単独なものではなく連続的に分布していると考えられる模型があり、Stelson は本来のクーロン障壁を中心として特定の幅で広がる一様な障壁分布を提案し、クーロン障壁以下での核融合反応断面積を説明した。この模型では障壁分布の低エネルギー側の縁が中性子分離エネルギーと相関を持ち、中性子分離エネルギーの大小が断面積の増大に大きく影響を与える。これらの巨視的な模型とは別に微視的な立場からチャンネル結合の効果としての説明が試みられてきた。結合チャンネル模型ではクーロン障壁以下での断面積の増大は複合核に至る戸口状態の多寡により説明され、戸口状態として非弾性散乱チャンネルや核子移行チャンネルなどが考えられる。チャンネル結合はポテンシャルの立場ではクーロン障壁の多分化に相当し、結合チャンネルが多いと先の現象論的な連続した障壁分布に至る。

近年の不安定核ビームの進展はクーロン障壁以下での核融合反応の研究に新たな関心を呼び起こしたが、中性子過剰核に固有の特徴からクーロン障壁以下での断面積の更なる増大の可能性が考えられている。中性子スキンやハローと呼ばれる特異な核構造が示す中性子分布の広がりによるポテンシャルの変化や、弱く束縛された価中性子とコア核との振動として記述されるソフト $E1$ 励起のチャネル結合、および中性子解離チャネルの結合による断面積の増大が理論的に議論されている。また不安定核ビームを用いると中性子分離エネルギーの広範な領域にわたる測定が可能であり、先に述べたような障壁分布との関連から断面積の増減に興味もたれる。

これまで、わずかに中性子ハロー核 ^{11}Be とスキン核 ^6He についての実験研究があるが、クーロン障壁以上、以下ともに一致した結果が得られておらず、また反応機構の解明という点でも統一された見解は無い。そこで我々は、中性子分離エネルギーの広い領域での中性子過剰核ビームを使った初めての本格的な実験研究を行い、クーロン障壁以下での核融合反応の異常増大の問題を調べた。

本研究では Al の同位体 $^{27,29,31}\text{Al}$ に関して標的核 ^{197}Au を用いて核融合反応断面積の系統的測定を行った。 $^{27,29,31}\text{Al}$ の二中性子分離エネルギーはそれぞれ 24.4 MeV、17.2 MeV および 12.9 MeV と広範に渡り、Stelson の模型の立場から中性子移行の寄与に関する知見が得られるものと期待される。核融合反応を同定するのに我々は測定の利便性から核融合-核分裂反応を選択した。カスケード計算によると Al+Au の系では複合核のほぼ 100% が核分裂を起こし、また標的の加工の容易さから標的核として Au を用いた。

中性子過剰核 $^{29,31}\text{Al}$ の実験は理化学研究所の入射核破砕片分離装置 RIPS を用いて行った。一次ビーム ^{40}Ar と標的核 ^9Be との入射核破砕反応により得られる中性子過剰核 $^{29,31}\text{Al}$ を二次ビームとして ^{197}Au の標的に入射させ、核分裂片を多心比例計数箱 (以下 MWPC) で検出した。二次ビームとして生成される不安定核ビームは強度が弱く、エミッタンスが大きい上、エネルギーの広がりが大きいという欠点をもつ。とくに本測定ではエネルギー減衰板を用いてクーロン障壁近傍までビームを減速させるため、エネルギーの広がりは更に大きくなる。そこで大きいサイズの標的を用いることで大きなエミッタンスに対処し、10 枚の標的をビーム軸上に並べることで強度の弱さを補った。また、ビーム軸の左右に片側二層、計四枚の MWPC を配置することにより、検出効率を高めている。ビームのエネルギーの広がりについては個々の入射粒子について飛行時間を測定することでエネルギーを定めた。標的は MWPC と共に検出ガスが封入された一つの容器に納められており、ビームは標的とガスにより減速される。ビームのエネルギーの広がりや各標的上でのエネルギーのずれを利用して、広いエネルギー領域での励起関数の測定を一括して行うことが可能である。核分裂片は、MWPC でのエネルギー損失や片側二層の MWPC により得られる飛跡の情報を用いて弾性散乱等のバックグラウンドから選別する。シミュレーションにより求めた測定装置の検出効率を考慮して、Al 同位体 $^{29,31}\text{Al} + ^{197}\text{Au}$ の核融合反応の励起関数を得る。

安定核 ^{27}Al の実験は不安定核の実験で用いられた検出装置を使用して過去に行われているが、断面積の絶対値の規格化に問題があったため、新たに別の手法で測定を行った。日本原子力研究所のタンデム加速器により供給される ^{27}Al ビームを散乱槽の中の Au 標的に照射し、核分裂片を ΔE - E 検出器で検出する。本検出器は共通の電離箱と八つの Si 半導体検出器 (以下 SSD) から構成され、各 SSD は 15° おきに水平に設置されている。電離箱で測定されるエネルギー損失と SSD で測定される全エネルギーの情報から核分裂片を同定し、各 SSD での収量から核分裂片の角度に関する微分断面積が得られる。ビーム量は別個の SSD により弾性散乱を測定し、ラザフォード散乱の断面積を用いて規格化した。タンデム加速器の終端電圧を変えることでビームのエネルギーは 125 MeV から 157 MeV の間で 8 点取り、核融合反応断面積の励起関数を求めた。

得られた三核種の核融合反応励起関数の比較を行ったところ、クーロン障壁以下のエネルギー領域で中性子過剰核 $^{29,31}\text{Al}$ の断面積は安定核 ^{27}Al に比べて大きな値を示すことが確認された (Fig. 1)。

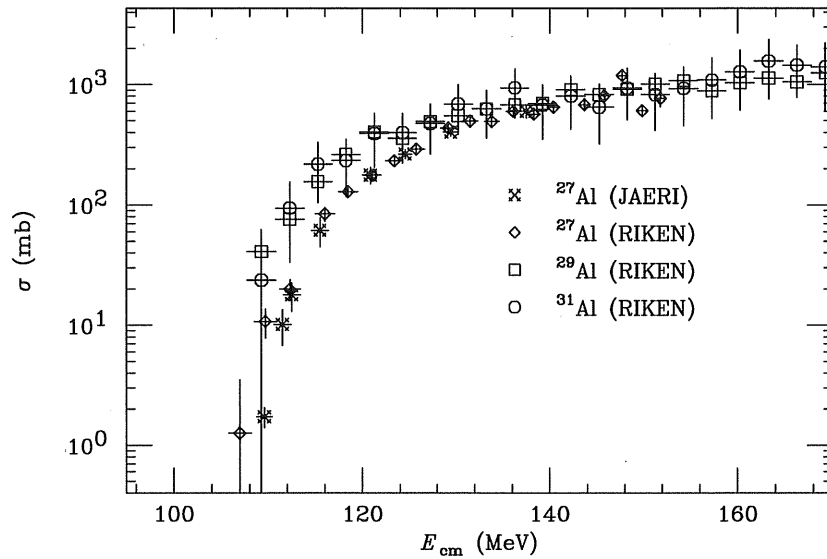


Figure 1: $^{27,29,31}\text{Al} + ^{197}\text{Au}$ の核融合反応励起関数。横軸は重心系でのエネルギーを示し、縦軸は核融合反応断面積を示す。

この同位体間の断面積の変化の要因を調べるために、いくつかのモデルによる計算値と比較を行った。まず一次元的な障壁透過による計算と比べると、三核種ともにクーロン障壁以下のエネルギー領域で計算値に対して断面積の増大が見られ、量子トンネル効果では説明できない断面積の増大機構が関与していることが分かる。そこで入射核と標的核の集団運動励起を考慮したチャンネル結合計算と実験値を比較した。チャンネル結合計算の結果は一次元透過モデルの計算値に比べて断面積の増大が見られるが、その度合は三核種とも実験値より小さく、測定値が計算値を一桁程度上回っていた。恣意的に結合の強さを変化させて測定データを再現させると、許容できない程度の大きな集団性を要求することになり、適切な範囲内では実験データを説明できない。この計算とのずれは非弾性散乱チャンネル以外の効果が重要であることを示唆しているが、特に中性子移行の寄与を考察するため、Stelson の一様な障壁分布のモデルによる計算と実験値との比較を行った (Fig. 2)。先に述べたようにこのモデルは障壁分布の立上りを二中性子分離エネルギーから求めるが、これはそのポテンシャルに対応する核間距離において中性子移行を介して核融合反応が誘起されることを意味している。本モデルによる計算は先の非弾性散乱チャンネルの結合計算に比べてより大きな断面積の増大を示し、実験データに見られる大きな障壁のシフトと一致する。このように中性子移行による障壁のシフトがクーロン障壁以下での断面積に大きく寄与すると考えられるが、当領域において依然として実験値との差異が存在し、本モデルでは説明できない要因が示唆される。

以上に述べたように、本研究では $^{27,29,31}\text{Al} + ^{197}\text{Au}$ に対してクーロン障壁以下のエネルギー領域までの核融合反応断面積の系統的測定を行い、クーロン障壁以下での同位体間の断面積のずれを確認した。非弾性散乱チャンネルとのチャンネル結合計算、および中性子移行と関連づけられる一様な障壁分布モデルによる計算との比較を行ったところ、依然として計算では説明できない断面積の増大が見られるものの、中性子移行がクーロン障壁以下のエネルギー領域において重要な役割を果たしていることが示唆された。

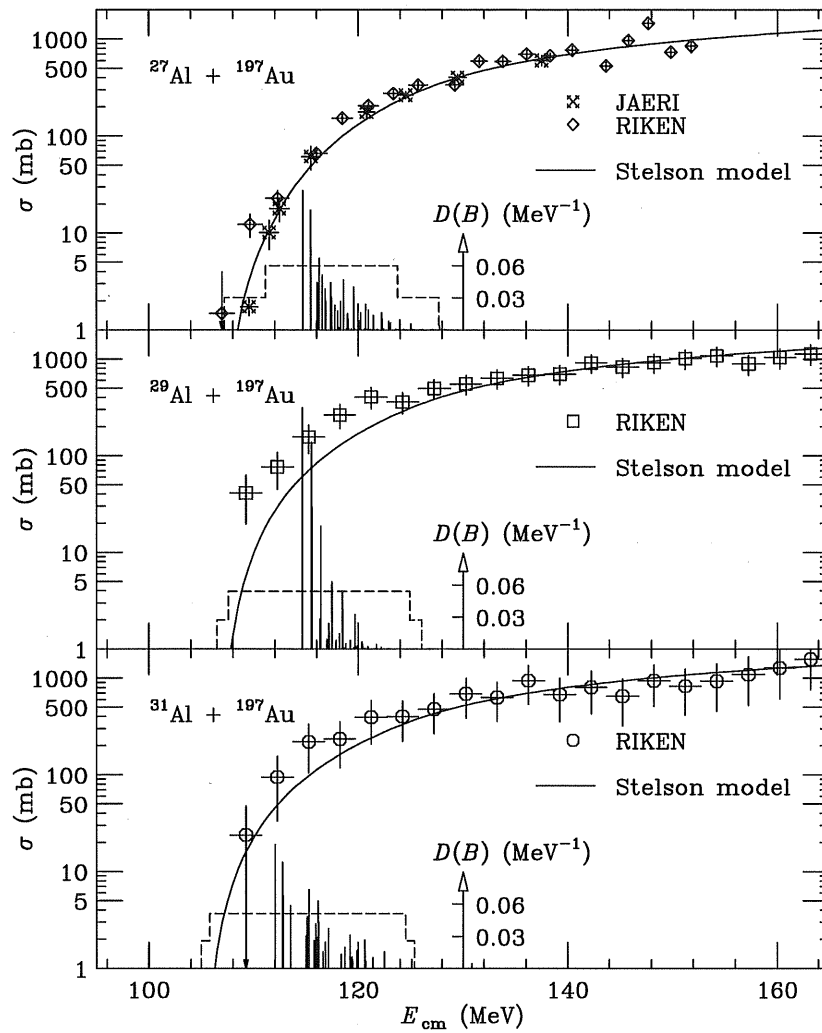


Figure 2: 測定された核融合反応励起関数と一様な障壁分布のモデルによる計算との比較。実線は計算値を示す。破線は用いられた障壁分布 $D(B)$ を示す。