

論文の内容の要旨

論文題目 Study of Radiative Capture Reaction ${}^7\text{Be}(p, \gamma) {}^8\text{B}$ at Astrophysical Energy via Coulomb Dissociation Method

(クーロン分解反応による太陽エネルギー領域での放射捕獲反応
 ${}^7\text{Be}(p, \gamma) {}^8\text{B}$ の研究)

氏名 平井 正明

太陽ニュートリノ問題に関連して重要な原子核反応 ${}^7\text{Be}(p, \gamma) {}^8\text{B}$ の低エネルギーでの断面積を求めるため、入射エネルギー62.0MeV/u の ${}^8\text{B}$ ビームを用いて、 ${}^{208}\text{Pb}$ 標的によるクーロン分解反応を測定する実験を行った。

「太陽ニュートリノ問題」とは、理論が予測する高エネルギー太陽ニュートリノの放射量と比較して、地表ではその数分の一ないし半分ほどしか観測されない、というものである。ここでいう高エネルギー太陽ニュートリノはほとんどが ${}^8\text{B}$ を起源としているので、 ${}^8\text{B}$ が太陽中にどれくらい存在するかを決定するためには、 ${}^7\text{Be}(p, \gamma) {}^8\text{B}$ 反応の 20keV での反応断面積を正確に求める必要がある。しかし実際にこのエネルギーで測定を行うには断面積が小さすぎるため、できるだけ低いエネルギーでの測定を行い、理論的に 20keV での値を推測することになる。

この反応断面積は 60 年代より陽子ビームによって測定されてきたが、クーロン障壁の影響により反応断面積自体が小さいことなどから、現在までの測定エネルギー下限は約 120 keV にとどまっている。また標的である ${}^7\text{Be}$ が約 2 ヶ月 の半減期を持つ放射性同位体であることから大きな系統誤差を持つ可能性があり、複数の測定結果には倍ほどの開きがある。

我々はこの反応に関しクーロン分解による逆反応測定を行っている。これは高エネルギーの ${}^8\text{B}$ ビームを電荷の大きい標的に照射し、そのクーロン場によって ${}^8\text{B}$ を分解し、詳細釣合の原理と仮想光子理論を用いて、実効的に ${}^7\text{Be}(p, \gamma) {}^8\text{B}$ の断面積を求める、という方法である。

この方法は、放射性の標的が不要なこと、高エネルギービームを使えるため検出効率が高いこと、実効的に大きな断面積が得られること、などから極めて効率の良い測定となっている反面、大強度の放射性核ビームが必要であること、順反応にはほとんど寄与しない E2 成分が仮想光子数の関係からクーロン分解では無視できない量となること、 ${}^7\text{Be}$ の励起状態へ分解する分岐比(${}^8\text{B} \rightarrow {}^7\text{Be}^* + p$)もまた無視できない量であること、などの問題を抱えている。

クーロン分解によって同反応を測定し、天文学的光学因子(astrophysical S -factor)を導出した報告は3例(それぞれ入射エネルギーが46.5 MeV/u、51.9 MeV/u(我々のグループによる測定)、254 MeV/u(GSI グループによる測定))あり、それらの測定におけるエネルギー下限は250 keVである。

この測定では、測定精度とエネルギー下限は、バックグラウンド事象、統計量、検出器の分解能の3つで決定される。本研究では、この3つを改善することで、 S -factor をより低いエネルギーまでより高い精度で測定することに重点を置いて実験を設計した。

測定は以下のようにして行った。測定装置の概念図を図1にあげる。

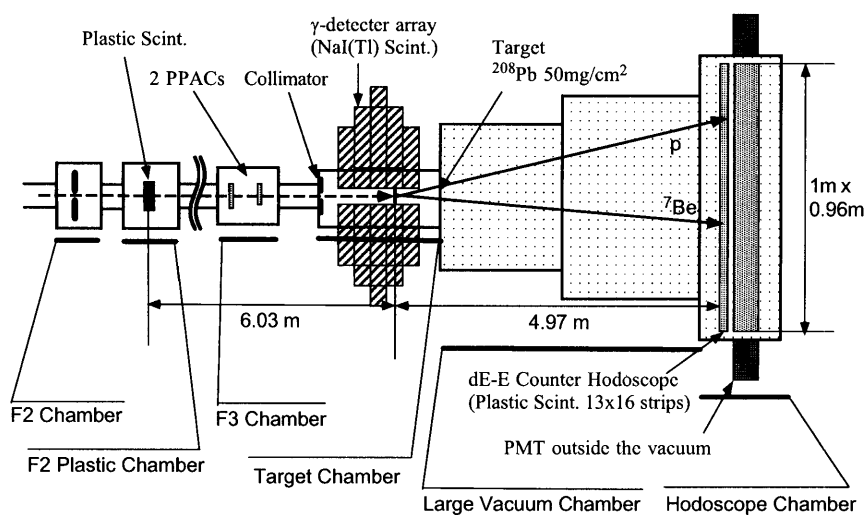


図1 実験装置の概略図

理化学研究所加速器施設において、リングサイクロトロンから供給された135 MeV/uの ^{12}C ビームを用い、入射核破砕片分離装置RIPSによって、エネルギー65 MeV/uの ^8B ビームを含んだ約70 kcpsのビームに変換する。2次ビームの強度は検出器側で制限されるため純度が実験の統計を左右する。我々の以前の2例の実験

では、 ^8B の含有量は10~20%程度であったが、今回の実験ではこれをおよそ65%にまで高くすることができた。 ^8B ビームはRIPSの第3焦点面下流に置かれた厚さ50 mg/cm²の ^{208}Pb 標的に照射され、そこでクーロン力によりpと ^7Be に分解する。

標的より5.0 m後方には ΔE (13本)、 E (16本)のプラスチックシンチレータからなる有効面積約1 m²のカウンターホドスコープがあり、ここで ^{208}Pb 標的中で分解したpおよび ^7Be の運動量を飛行時間法とカウンタホドスコープの分割を用いて同時計測する。

我々の以前の測定ではこの区間は3~4 mであったが、今回は測定の分解能を上げるため、若干立体角を犠牲にしてできるだけカウンタホドスコープを後方に置くこととした。

また以前の実験ではこの5.0 mの区間はヘリウムバッグで占められていたが、このヘリウムが多くバックグラウンド事象を作り、かつ多重散乱により運動量測定の精度を悪くすることが分かっていた。そこで以降の段階ではできるだけヘリウムやその他の物質を取り除くことに主眼が置かれた。

様々な方法を試みた結果、最終的には我々は、カウンタホドスコープのうち、プラスチックシンチレータ部分を真空中に、光電子増倍管を大気中におき、一部にシリコンゴム

を使用したライドガイドを使って真空を保つ方法で、ほとんどバックグラウンドのないなデータを得ることに成功した。

${}^7\text{Be}$ の励起状態へと分解する割合は、この分岐比は、我々のグループが過去に測定しており、平均して全クーロン分解イベントのおよそ2~5%を占めることが分かっているが、分解エネルギー依存性については未知であることから、再測定の必要があった。

励起状態の ${}^7\text{Be}^*$ はすぐに脱励起して γ 線(429keV)を放出するため、分岐比の測定のために、標的の周囲、ほぼ 3π を NaI(Tl)シンチレータ 55 個からなる DALI 検出器で囲った。この γ 線の測定から、励起状態へと分解する分岐比をエネルギーの関数として求めることができた。

図2に、 S -factor の測定結果をあげる。横軸は分解のエネルギーでプロットしてある。過去の我々のクーロン分解による測定と、最新の直接測定との結果、ある理論によるフィッティングを合わせて示してある。前述したように、クーロン分解反応には、 E_2 の寄与が混じると推測されているが、これについては現在は信頼できる理論がないため、クーロン分解の測定点は E_2 の寄与を補正しないままの値を示している。

最終的に我々は 100keV 以上の領域で S -factor を求めることに成功した。最新の理論を用いてゼロエネルギーでの S -factor を推測した結果は、 $19.1 \pm 1.0 \text{ eV} \cdot \text{b}$ である。この結果

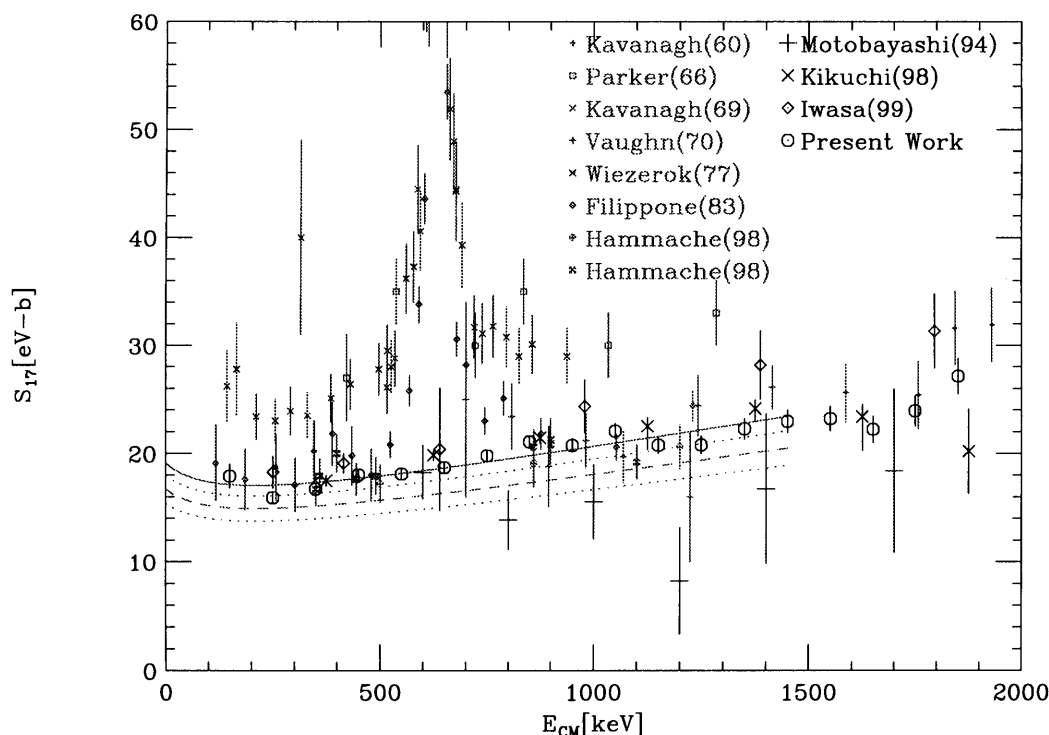


図2 S -factor の測定値

は、過去のクーロン分解測定の結果(例えば我々自身の 51.9MeV/u での測定の結果 $18.9 \text{ eV} \cdot \text{b} \pm 1.8$)と一致しており、またよりよい実験精度を得ている。

このようにして求められた S -factor を順反応のそれと比較するためには、E2 遷移の寄与の程度を見積もる必要がある。

原理的にはこれらの寄与は、大散乱角の反応断面積を見ることと、異なるパリティの成分があることから生じる分解の干渉(分解の非対称性として見える)を見ることで、見積もることが可能であるが、 ${}^8\text{B}$ の核構造自体がまだよく知られていないことと、実験精度の問題もあって、前提なしではこれらの寄与を正しく見積もることはできない。

散乱角依存性に関しては過去の我々自身の測定に基づいた解析がすでに報告されており、非常に小さい E2 遷移($E_{\text{rel}}=0.6\text{MeV}$ において $S_{\text{E2}}/S_{\text{E1}} < 0.1 \times 10^{-4}$)を示している。一方、分解の前後非対称性に関する MSU のグループによる測定・解析は、大きな E2 遷移(同じく $S_{\text{E2}}/S_{\text{E1}} = 6.7_{-1.9}^{+2.8} \times 10^{-4}$)を示している。

今回の我々の実験では、バックグラウンドの低減につとめたことで、軸非対称性に関しても測定を行うことができるようになった。有感領域の問題から、結果が得られたのは $E_{\text{rel}}=0.4-0.55\text{MeV}$ 、 $\theta_8=0.5-4.0^\circ$ の領域に限られるが、この領域の非対称性から、 θ_8 について積分した非対称性を推測し、MSU のグループが解析に使っている Bertsch らの理論と比較を行った。非対称性の大きさは、Bertsch らの理論($S_{\text{E2}}/S_{\text{E1}} = 9.5 \times 10^{-4}$)のほぼ3分の1であり、換算すると $S_{\text{E2}}/S_{\text{E1}} = 3.5 \pm 2.1 \times 10^{-4}$ に相当する。

我々の求めた $S(E=0)=19.1 \pm 1.0 \text{ eV} \cdot \text{b}$ から、この E2 の寄与をエネルギー依存性を仮定した上で差し引くと、 $S(E=0)=16.7 \pm 1.0 \pm 1.3 \text{ eV} \cdot \text{b}$ となる。

過去の直接測定を最新のデータを用いて再解釈すると、 $S(E=0)=25 \text{ eV} \cdot \text{b}$ 前後を示唆する結果と、 $S(E=0)=18 \text{ eV} \cdot \text{b}$ 前後を示唆する結果との大きく2つに分けられる。我々の結果は、全分解断面積に関しては過去のクーロン分解測定と一致しており、また直接測定との比較に関しては後者の $18 \text{ eV} \cdot \text{b}$ 前後を示唆するグループの結果を補強している。

今後、E2 の遷移強度と分解の非対称性の関係をより詳しく調べ、クーロン分解の結果をより正しく直接測定の結果と比較できるような研究が望まれる。