

研究室だより (I)

東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター 核放射線物理学講座・測定器研究部

東北大学

織原 彦之丞

はじめに

私たちの所属する東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンターは、サイクロトロンの多目的利用、各部局では取扱い困難な高レベル RI やサイクロトロン生成短寿命 RI の利用、RI 安全取扱いの全学的な教育・訓練などを行うために、昭和 52 年度に設立された学内共同教育研究施設です。本センターには、共同利用支援と、サイクロトロンと RI 利用の独自の教育・研究を行うため、加速器（理学）、測定器（理学）、核薬学（薬学）、サイクロトロン核医学（医学）並びに放射線管理（工学）の各研究部がおかれ、各々括弧内の大学院研究科の基礎講座、部門等となり、現在 30 名近くの 4 年次の学部学生、博士課程（前期・後期）の院生が所属しています。東北大学でも大学院重点化がすすみ、理学研究科所属の 2 研究部が一緒になって核放射線講座物理学講座となり、理学部ならびに理学研究科の学生・院生の教育・研究に直接携わり講義の他、4 年次学生 2 名、博士課程の院生は前期、後期併せて 10 名がこの講座所属となっています。

「研究室だより」といたしましては、この核放射線講座物理学講座全体の紹介をするべきと考えられますが、この稿では測定器研究部で私と寺川貴樹氏とで行っている中性子飛行時間分析装置を使った高速中性子の高分解能測定による研究のうち、核データの研究にお役に立てればと考えたものを紹介させていただきます。なお、平成 7 年 3 月までは石井慶造氏も本センターに所属されていました。同氏は今も大部分の仕事はわれわれと一緒にですが所属は東北大学工学部となっています。

加速器研究部では藤岡 學氏を中心に、(1) 当センターのサイクロトロンからの加速粒子を用いてオンライン的に目的核種を選別するイオンガイド式質量分離器を用いる超不安定核崩壊 (2) 質量分離器の性能向上のための開発 (3) 不安定核ビーム生成のための負イオン源の開発 (4) イオントラップを用いた超微細相互作用の研究並びに (5) 現有サイクロトロンの性能向上のための軸入射の開発などの研究がなされています。

1. 高速中性子飛行時間分析装置 (Time of Flight: TOF) による (p,n) 反応の研究

中性子検出による原子核研究として、一番興味をもたれてきたものは (p,n) 反応です。ここでは、入射した陽子の代わりに標的核から中性子がたたき出されたとも考えられますが、別な見方をすれば、入射した陽子が電荷という衣を脱ぎ捨てて原子核に渡して、裸になって中性子となり飛び出してくるとも考えられます。また一方原子核にとっては、陽子と中性子が入れ替わりるわけですから β^- 崩壊をしたのと同じになります。ここでは電荷を交換していますのでアイソスピン空間での反応になりますし、さらに、スピンを変える反応を選択的に観測すれば、スピン・アイソスピン励起という新しい原子核の励起様式が出てきます。さらに“電荷の衣”を脱ぎ捨てる事は π 中間子 (π プラス) を交換したことに対応し、核子と原子核の相互作用の重要な部分も見えて来ることになります。

このようにして (p,n) 反応は、強い相互作用の関与するハドロンの散乱でありながら、 β^- 崩壊という弱い相互作用の支配する現象とも結びつけられ、一方で核力の基本である中間子交換とも関係し、また、電磁相互作用によっておこる電子非弾性散乱などとも同等の情報が得られることなどから核構造、核反応、原子核の励起の素過程ならびに核子多体系の集団運動の研究に、重要な役割を果たすことがわかりました。具体的に本センターで (p,n) 反応によって研究されたテーマをあげておきますと、

- (1) Gamow-Teller 型励起
- (2) 伸びきった状態の観測
- (3) $\Delta J\pi = 0^-$ 遷移

となります。(1) はスピン交換をともなう β^- 崩壊 (ガモフ・テラー型といわれる) に対応する (p,n) 反応であり、(2) はスピン交換をともなう高スピン励起のトピックスであり、また (3) はパイ中間子交換の効果を直接見ることに対応し、あわせて核内核子が自由な核子とどのように異なる振舞いをするかということを見るプローブ (探針) ともされている反応です。

ここで東北大学サイクロトロン OF 装置について紹介させていただきます第 1 図は OF 装置の全体図です。入射陽子ビームは $k = 50$ MeV の AVF サイクロトロンによって加速されたものです。陽子ビームの最高エネルギーは 42 MeV ですが系統的なデータとするため、この研究のはじめからほとんどのデータを 35 MeV でとっています。このサイクロトロンの特長は、ビームパルスの時間分解能が 500 ピコセカンド以下で、かつきわめて安定であるということで、OF 測定にはうってつけの加速器です。検出器は、NE213 液体シンチレーターを 12 本の容器に 22.5 リットル充填したもので、一

本の検出器の時間分解能は、光電子増倍管とエレクトロニクス込で 400 ピコセカンドです。Flight Path もほとんどの場合 44 メートルに固定して測定を行い、20 MeV の中性子に対し 90 keV 位のエネルギー分解能が得られています。飛行時間、発光量、 $n-\gamma$ 弁別などの情報は、デジタル化されて光ケーブルで計数室まで転送されて、 μ -VAX でデータの蓄積とオンラインモニターが行われています。検出器を固定したままで中性子生成の微分断面積の角度分布を測定するため、入射ビームの方向を -5° から 145° まで変えられるようにビームスウィングャーが設置されています。第 2 図に中性子スペクトルの一例を示します。

2. (p,n) 反応微分断面積の殻模型 (Shell Model) と歪曲波ボルン近似 (Distorted Wave Born Approximation: DWBA) による解析

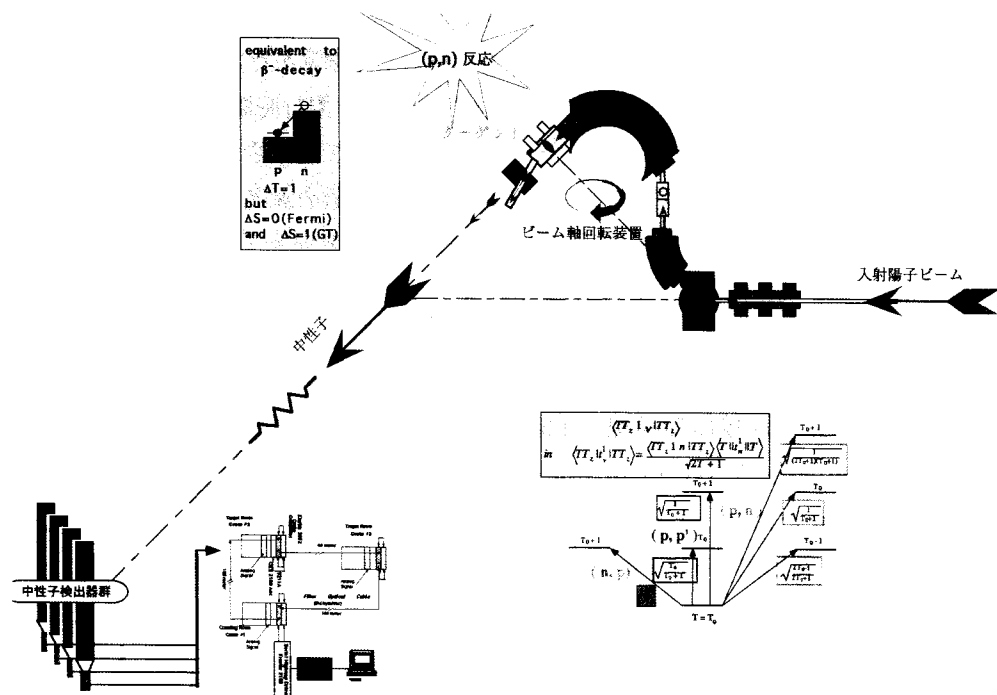
先に述べましたとおり、 $\Delta\pi=0^+$ 遷移の (p,n) 反応の断面積とガモフ・テラー (GT) 型の β^- 崩壊の確率との間の関係が議論されてきました。 β^- 崩壊の強度 $B(GT)$ は、

$$B(GT) = \left| \left(\frac{g_v}{g_s} \right) \sum_{jj'} Z_{jj'} \left\langle j' \parallel \sigma \tau \parallel j \right\rangle \right|^2, \quad Z_{jj'} = \left\langle j' \parallel \left[a_p^\dagger \otimes \tilde{a}_p \right]^\lambda \parallel j \right\rangle$$

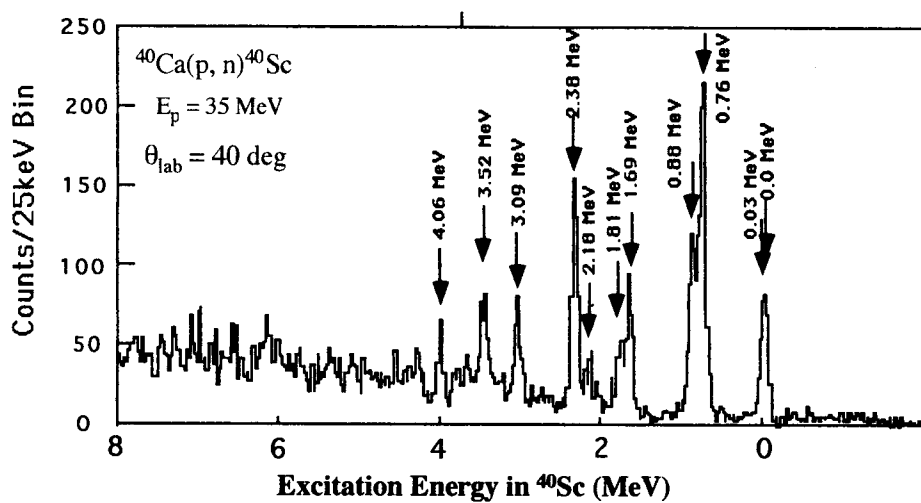
で表わされます。ここに、 $Z_{jj'}$ は、One-Body Transition Density (OBTD) で、始・終状態の原子核の波動関数によってきまるものです。最近の核模型計算の進歩はめざましく、特に sd 殻核について MSU グループは精度の良い波動関数を開発し、OXBASH という計算コードを公表しています。 μ -VAX による計算のため、少々計算時間がかかるのが難点ですが、大変に便利の良いものです。1990 年代に入ってから、Full sd-殻核から fp-殻核まで拡張されてさらに有用なものとなりました。核データの観点からもこの核模型計算の検証をベータ崩壊のみならずダイナミックスを含む核子移行や荷電交換反応で行うことは、きわめて重要であると考えられます。

もう 10 年近くになりますが、我々は $^{34}\text{S}(p,n)^{34}\text{Cl}$ 反応でこの波動関数の検証を行いました。第 3 図は、OXBASH による OBTD を使い、先の $B(GT)$ の式を使って計算した GT- 型ベータ遷移の強度分布を (p,n) 反応の微分断面積と比較したものです。大雑把に言ってここにはまだ核反応論は介入しておりません。これらは全て残留核 ^{34}Cl にある 1^+ 状態ですが、励起エネルギーも含めて良く一致しています。このような比較は、 ^{18}O 、 ^{26}Mg 、 ^{30}Si 、 ^{38}Ar などの $N=Z+2$ 核を対象とした (p,n) 反応の GT- 型遷移についても行い、それぞれ良い一致を得ています。

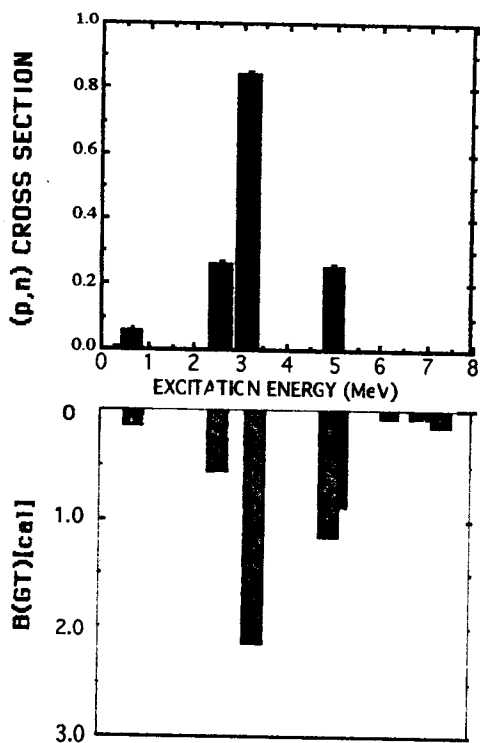
さて、(p,n) 反応の微分断面積ならびにその角度分布を、核反応理論と比較するためには、OBTD の他、粒子-空孔有効相互作用、ならびに歪曲波生成用の光学ポテンシ



第 1 図 高速中性子飛行時間分析装置全体図



第 2 図 $^{40}\text{Ca}(p,n)^{40}\text{Sc}$ 反応の中性子スペクトル

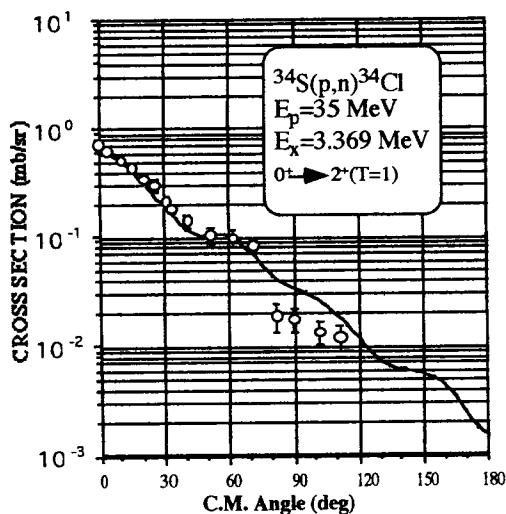


第3図 殻模型計算による B(GT) と (p,n) 微分断面積の比較

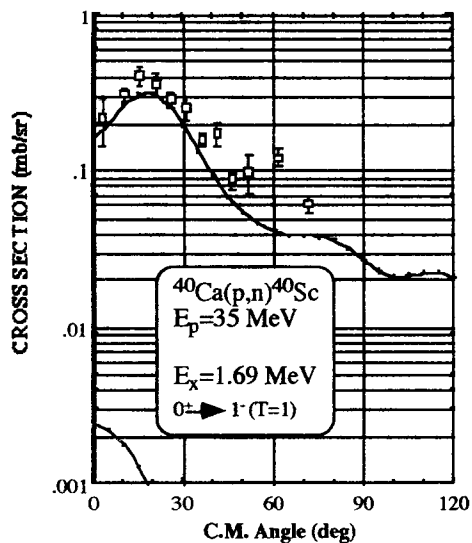
ャルを用意しなければなりません。DWBA 計算コードは、反対称化の効果を正確に取り込み、35 MeV という比較的低い入射エネルギーでノックオン・エクスチェンジ反応機構が重要となる領域で有効な、Saeffer と Raynal による DWBA-70 を使用しています。ミクロスコピックな計算をするための粒子-空孔有効相互作用としては、Bertsch 達による M3Y (Michigan 3-range Yukawa) 相互作用を使用しています。これは G- 行列の手法によるものであり、核内核子の運動量と同程度の運動量を持つ 35 MeV の陽子による反応を取り扱うに適しているものと考えられます。実際の形と 3 個の range のポテンシャルの深さは、下の表の通りです。光学ポテンシャルについては、一貫して入射陽子については Becchetti & Greenlees のセットを使い、放出中性子についてこれを中性子に焼き直したものを使用しています。

$$\begin{aligned}
 \text{Central: } V &= \sum_{n=1}^8 v_n Y\left(\frac{r_{12}}{R}\right) \\
 \text{Spin-Orbit: } V &= \sum_{n=1}^8 v_n Y\left(\frac{r_{12}}{R}\right) \mathbf{L} \cdot \mathbf{S} \\
 \text{Tensor: } V &= \sum_{n=1}^8 v_n Y\left(\frac{r_{12}}{R}\right) S_{12} \\
 \text{or } V_3 &\left[Z\left(\frac{r_{12}}{R_{\max}}\right) - \left(\frac{R_{\max}}{R_2}\right)^3 Z\left(\frac{r_{12}}{R_2}\right) \right] S_{12} \\
 Y(x) &= \frac{e^{-x}}{x} \\
 Z(x) &= \left(1 + \frac{3}{x} + \frac{3}{x^2}\right) Y(x)
 \end{aligned}$$

Range	0.25 fm	0.40 fm	0.70 fm	1.414 fm
Central Force				
V_0	7999 MeV	-2134.25 MeV	0.0 MeV	0.0 MeV
V_σ	-2692.25	478.75	0.0	0.0
V_τ	-4885.5	1176	0.0	0.0
$V_{\sigma\tau}$	-421	480	0.0	0.0
Spin-Orbit Force				
V_{LS}	-2004	-668	0.0	0.0
$V_{LS\tau}$	-668	48	0.0	0.0
Tensor Force				
V_T	0.0	-103	3.113	0.0
$V_{T\tau}$	0.0	386	10.508	0.0



第4図 $^{34}\text{S}(p,n)^{34}\text{Cl}^*(3.369\text{MeV})$ 遷移の
微分断面積の角度分布



第5図 $^{40}\text{Ca}(p,n)^{40}\text{Sc}^*(1.69\text{MeV})$ 遷移の
微分断面積の角度分布

第4図に $^{34}\text{S}(p,n)^{34}\text{Cl}$ 反応で励起アイソバリック・アナログ状態へ遷移する場合の微分断面積の角度分布が示されています。図に見られるように、断面積の絶対値を含めDWBAの理論値が実験を再現しています。sd-殻核においては多くの場合、このような良い一致が得られています。

最近 OXBASH が fp-殻核まで拡張されたことは先に述べましたが、解析結果の一例を第5図に示します。N=Z核を標的とした(p,n)反応の断面積は一般に小さいことになっていますが、 $^{40}\text{Ca}(p,n)^{40}\text{Sc}$ 反応で、第2図に見られるように ^{40}Sc の励起エネルギー 1.69 MeV に比較的強く励起される状態が観測されます。殻模型計算からは 2.104 MeV に 1^- 状態が予想され、絶対値を含めて実験値を再現し、このような同定を行いました。なお、荷電多重項を形成する ^{40}K 核では 1.64 MeV に 0^+ がありますが、このためには標的核 ^{40}Ca に2p-2h成分が必要です。この場合の計算もできますが、(p,n)の断面積は図にあるように2桁小さくなります。

おわりに

以上核データの研究に少しでも役にたてばと考え、我々の研究室で行っている (p,n) 反応について紹介させていただきました。これまで主に質量数 60 位までの原子核を対象としてまいりましたが、sd- 殻核については、殻模型計算がきわめて有効に実験データを説明することが判りました。現在、ここでも述べました $^{40}\text{Ca}(p,n)^{40}\text{Sc}$ 反応を含め、 $^{42}, ^{44}, ^{48}\text{Ca}$ ならびに fp- 殻核への拡張を行っているところです。ベータ崩壊強度との比較については、A.Brown と B.Wildenthal が精力的にやっていますが、我々は (p,n) 反応で、とことんこのモデルの検証をやってみようと考えています。参考文献なども挙げずに判りにくいところもあると思いますが、お問い合わせ下さい。

