

研究計画詳細

1. 研究の目的

要約： 陽子標的と2次原子核ビームの反応により原子核中の陽子を弾き出す(p,2p)陽子Knockout反応や、クラスターを弾き出す(p,p³He)等のクラスターKnockout反応を用いて、安定線から離れた原子核中の陽子軌道状態の研究(図1-A)と、反応で生成される新しい共鳴状態の探索を行う(図1-B)、と共にこの新しい実験方法の確立をめざしたい。

(目的1)： 殻模型は原子核の性質を記述するのに有効な模型の一つであるが、核子は平均場中の粒子軌道上を運動しているという描像に基づいている。この粒子軌道の特徴付ける量に、束縛エネルギー、運動量分布、軌道角運動量等の物理量があり、これらはknockout反応の測定から得る事ができる。この方法は従来、高エネルギー陽子ビームと原子核標的の組み合わせにより行われてきたが、高エネルギー2次原子核ビームと陽子標的の反応を逆運動学で行う事ができると、ベータ不安定核を含む全ての原子核を研究対象に拡大する事が可能になる。本研究では、新しい検出器系を用いて、2次ビームからの陽子/クラスターknockout反応の実験方法をまず確立させたい。

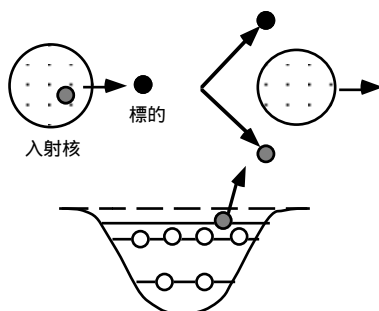


図1(A)：核子Knockout反応

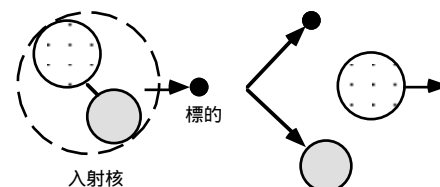


図1(B)：クラスターKnockout反応

(目的2)： 安定線から離れた原子核には中性子ハロー等の安定核にはない面白い現象が見い出されている。この現象は外殻核子の束縛が弱い事が主な原因であり、これらの現象の理解には弱束縛核子の粒子軌道の性質の理解が不可欠である。本研究では、(p,2p)陽子knockout反応により陽子過剰核中の陽子軌道の研究のうち、代表的な弱束縛陽子過剰核である⁹Cとその鏡映核⁹Li中の外殻陽子軌道の情報を、p(⁹C,2p)⁸Bとp(⁹Li,2p)⁸He反応により調べる。

(目的3)： 中性子ドリップライン上の中性子過剰核からの(p,2p)反応を用いると、安定線の外側にあるexoticな共鳴状態を生成する事ができる。しかし2次原子核ビーム強度の制限等により重要ではあるが生成できない共鳴状態が幾つかある。これを解決する方法としてクラスターknockout反応が考えられる。この種の反応の可能性をp(⁷Li,p³He)⁴H反応で探ると共に、超重水素同位体の安定性の理解に重要な⁶H(外殻中性子が奇数個)の存在/不存在を、p(⁹Li,p³He)⁶H反応で調べてみたい。

2. 現在の状況

過去3年間放医研での共同利用実験(P008)で、逆運動学による(p,2p)陽子knockout反応のfeasibility studyを行ってきた。まず、(p,2p)反応で実験室系45度付近に放出される2個の陽子を測定するTwo-Arm検出器系を製作した。次に、1次原子核ビーム(¹²C 230MeV/A)とポリエチレン標的(陽子標的)によるp(¹²C,2p)¹¹B反応の測定を行い、逆運動学でも程々のエネルギー分解能(約1.2MeVrms)、運動量分解能(約5MeV/c rms)とS/N比で測定できる事が証明できた(図3)。本研究では、次の段階として2次ビームによる陽子/クラスターknockout反応の研究を行いたい。

2次原子核ビームによる陽子/中性子knockout反応はquasi-free的である為には、入射エネルギーはフェルミ運動や束縛エネルギーに較べて”充分”高い必要があると考えられる。理研で可能な2次ビームのエネルギーは約90MeV/Aなので充分高いとはいえない。

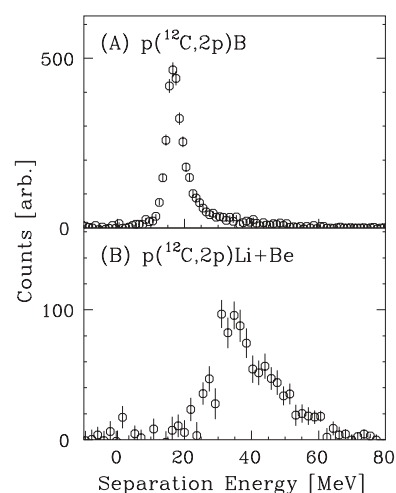


図3：230MeV/A ¹²Cからの(p,2p)反応。(A)はp軌道、(B)はs軌道からのknockoutに対応する。

現在、200 MeV/A以上のエネルギー領域の2次原子核ビームによる実験研究が可能な加速器施設は、ドイツのGSI-SIS18以外にはHIMACしかない。その意味で、比較的高いエネルギーの2次原子核ビームが必要なknockout反応の実験は、その方法論が確立すれば、世界的にもユニークな研究になるはずである。

エネルギーは、反応機構的には高いほうがいいのはもちろんであるが、実際には陽子の全エネルギーの測定は検出器内での核反応で制限されて約200MeVと考えられ、これは約200-250MeV/Aの入射エネルギーに対応する。一方軽い核に対する(p,2p)反応断面積の系統性を見ると入射エネルギーが核子分離エネルギーの約15-20倍になると断面積はPWIA計算値の約50%程度になる事が知られている。従って、入射エネルギー約250 MeV/Aの領域で陽子過剰核からの(p,2p)の実験を行う事は悪くない設定であろう

又200MeV/A以上のエネルギーで実験を行うメリットの一つに、陽子過剰側での粒子分離の良さが上げられる。理研の100MeV/A領域で陽子過剰核の実験を行うと、projectile fragmentation以外の過程の作る低エネルギー側の分布により、目的の核の数倍から10倍程度のisobarが混じってくる。しかし最近のGSIの実験で、入射エネルギーを200MeV/A程度まで上げるだけでisobarの混入は数%以下にできる事がわかった。これは実験的には非常に大きな長所である。HIMACの1次ビーム強度が弱い事を考えると、陽子過剰核側での(p,2p)反応に重点をおいて実験を行う事は、このfacilityの特徴を最大限に生かしているといえるだろう。

3. 研究計画

研究に必要な装置としては、図4に示したように

(1) 2次原子核ビーム分離コース、(2) 2次原子核ビームのエネルギーを測定する検出器、(3) 2次標的の上流のビームの位置ベクトルを測定する検出器、

(4) Knockout反応で放出される2個の陽子(又はクラスター)を測定するtwo-Arm検出器、(5) Knockout反応で生成される残留核を前方で測定する前方検出器、の5つの部分から成っている。

陽子検出器(4)本体については過去の共同利用実験P008で基本的には完成しており、又、2次ビームコース(1)については放医研グループにより建設がほぼ終了した。

2次ビームエネルギー測定器(2)の部分は、最も開発とテストが必要な部分である。2次ビームは $\pm 2.5\%$ 程度の大きな運動量分散を持つ為、分離エネルギー分解能を陽子検出器の分解能である約1MeVrms程度に保つには、入射エネルギー200MeV/A付近で、ビームエネルギーを1MeV/A(rms)以下の精度で測定する必要がある。最終段のトリプレットの両側に置いたシンチレーター間約7mのTOFでは、精度は約1.3MeV/A(rms)で十分ではない。Momentum-dispersive焦点面(F1)での粒子位置を1mm(rms)程度の精度で測定すれば、ビームエネルギー分解能が約0.4MeV/A(rms)となり要求をみたす。しかし位置検出器は、F1 degrader付近での高い計数率に耐える必要があり、検出器自体もF1真空箱中で働かす必要があり、そう簡単な話でもない。

前方検出器(5)は、Knockout反応で生成された残留核の崩壊モードを特定する為と、ポリエチレン標的中の炭素からのバックグラウンドを減らす為に用いられる。 $p(^{12}\text{C}, 2p)^{10}\text{B}$ 反応の場合は、 ^{10}B より軽い ^{10}B 同位体が存在しない為前方粒子の荷電だけを測定すればよく、薄いシンチレーターで十分である。しかし一般的には、前方での粒子識別(荷電と質量)ができないと逆運動学を用いた反応のメリットは充分には生かされない。特に断面積が小さいと予想される $p(^{6}\text{Li}, p^3\text{He})^6\text{H}$ 反応では、 ^6H 崩壊からの ^3H を ^2H や ^1H と

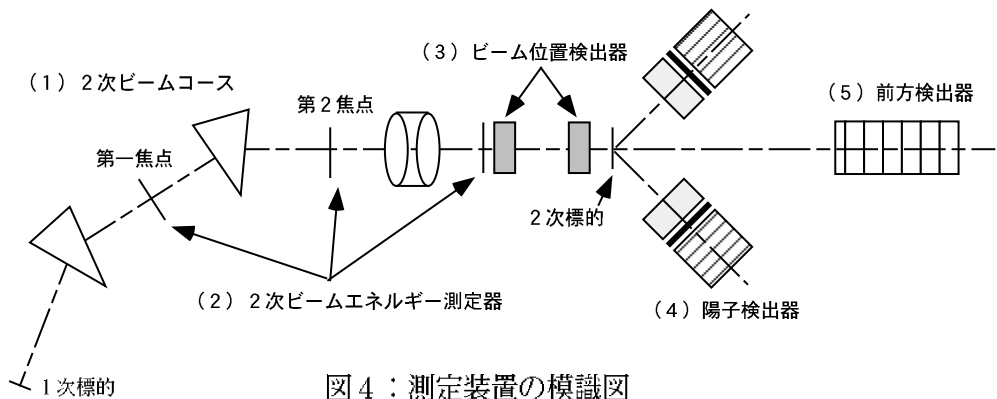


図4：測定装置の模識図

区別する事により多体分解過程のバックグラウンド落とし、測定のS/Nを良くする上で不可欠である。これは大立体角磁気分析器を使えば簡単な事ではあるが、装置が大がかりになり又費用がかなり高くなる。レンジスタックを使う可能性も考えられるが、 ^3H のレンジが長い為検出器中での核反応による損失が多すぎる。粒子識別が可能(で安上がり)な前方検出器のデザインはまだ煮つまっていない。いずれにしても前方検出器には2次ビームが直接当たり、高計数率に耐える必要もある。

共同実験P051として、一年目である**平成9年度**に行った事は、以下の通りである。全般的に作業が遅れぎみがちである。

(1) F1位置検出器として 2mm-spacing / 有効領域100mm x 50mm のMWPCを製作した。この検出器は一気圧では通常のmagic gas (iso C_4H_{10} 21%, メチラール4%, CBrF_3 0.35%, Ar-balance)で正常に動作した。しかし目的であるガス圧0.2気圧付近(検出器は真空中で用いる)で使うには どうもフレオンの量を変える必要があるらしい事がわかった。 低圧ガス処理系とガス混合装置を製作中で、それができたらフレオンの量を変えて低圧での動作試験を行う予定である。

それと平行してTOFの距離をF1-F2-F3に延長する事で TOFによりどの程度のエネルギー分解能ができるか 98年1月のマシンタイムでテストする。 その為booster付の光電子増倍管の製作と、半導体レーザーとビームによる試験を行い、ビーム強度数MHzまでは安定に動作する事を確認した。

(2) 2次標的に入るビームのベクトルを測定する為の high-rate-drift-chamberを2台製作した。これは drift距離2.5mm, 有効領域80mm x 80mmで 1台はX4面Y4面から成っていて、1台でもベクトルを決める事ができる。 今まではビーム用の検出器として1mm間隔のMWPCを用いていた為、読み出しが800 channel近くあったが Drift chamberの採用で読み出しが256 channelに減り、又全体としてのtracking efficiencyも100%近くなるはずである。 このdrift chamberは、今ベータ線源を用いた試験を行っている。

平成10年と11年度の研究計画としては、

平成10年度：

- * F1検出器による2次ビームエネルギー測定テスト(継続)と ^{12}C 分離の試験
- * ビーム / 陽子検出器の架台製作
- * F1位置検出器とF3 drift chamberの読み出し回路の整備
- * 簡単な前方検出器の製作
- * $^9\text{C}/^9\text{Li}$ ビームによる(p,2p)反応の測定

平成11年度：

- * 粒子識別を伴う前方検出器の設計 / 製作 ?
- * ^7Li ビームによる $p(^7\text{Li}, p^3\text{He})^4\text{H}$ 反応のテスト実験。
- * ^9Li ビームによる $p(^9\text{Li}, p^3\text{He})^6\text{H}$ 反応の測定。

研究経費内訳は別紙にまとめた。

4. マシンタイムの見積り

平成10年度： 2次ビームコースを使用。1次ビームは ^{12}C 、強度は1次標的上で 5×10^9 ppp以上。

(1) F1検出器による2次ビームエネルギー測定テスト(継続)。

100MeV/Aの ^{12}C から約70MeV/Aの2次ビームを作る。このエネルギーでは7mのTOFによるエネルギー測定精度は0.25MeV/A(rms)程度と良いので、F1位置検出器でのエネルギー測定との相互比較が行える。時間は約3晩。

(2) F1検出器の計数率依存性のテスト。

290MeV/Aの ^{12}C から約220MeV/Aの $^9\text{Li}/^9\text{C}$ ビームを作り、実際の測定条件下でどこまで1次ビーム強度を上げられるか確認する。F1での他の粒子によるバックグラウンドがビーム強度を制限するが、それは、陽子過剰側ではprojectile fragmentationでの運動量分布の低エネルギー側の尾の引き方、中性子過剰側では

^3H によるバックグラウンドの量一等で決まる事になる。期間は2次ビームトランスポートのテストを含んで約3晩。

(3) $^9\text{C}/^9\text{Li}$ ビームによる(p,2p)反応の測定。

* 2次陽子ビームによる陽子検出器のエネルギー校正。

290MeV/Aの ^{12}C から約250MeVの2次陽子ビームを作り、ポリエチレン標的からのp(p,2p)反応で陽子検出器のエネルギー校正を行う。2次ビームコースの第一偏向磁石をA/Z=1に合わせた時、F1にどの程度 $Z\geq 2$ の粒子が来るかが正しく予想できないのでF1での運動量測定が可能かどうか明らかではない。だめな場合はF1スリットを $\pm 5\text{mm}$ 程度(陽子エネルギー0.8MeVrmsに相当)に絞って測定を行う。ビーム強度 $5\times 10^4\text{ppp}$ (?)、標的ポリエチレン厚 $0.2\text{g}/\text{cm}^2$ 、片側の立体角を 0.09sr として、計数率は約0.8 events/pulse。1晩の有効測定時間を約6時間として、1晩で約6000events。角度の組合せ、 $\pm 45^\circ$, $(+35^\circ, -55^\circ)$, $(+55^\circ, -35^\circ)$ 、の3組を測定すると実測定時間として3晩必要で、回路/ビームラインの調整を入れて4晩必要。

* $p(^9\text{C}, 2p)^8\text{B}$ 反応の測定

290MeV/Aの ^{12}C から約220MeV/Aの2次ビームを作る。1次ビーム強度が約 $5\times 10^9\text{ppp}$ 、1次Be標的が約 $5\text{g}/\text{cm}^2$ 厚の時、2次ビーム強度は約 $5\times 10^4\text{ppp}$ 程度と予想される。以下安全係数を π として、ビーム強度を $1.7\times 10^4\text{ppp}$ として計数率の予想を行う。この反応の ^8B 基底状態への陽子分離エネルギーは1.3MeVと小さいので、2個の陽子は自由核子核子散乱に近い $\pm 45^\circ$ の角度で測定する。残留核が ^8B かどうかは、前方粒子の荷電を薄いシンチレータで測定する事により確認する。p軌道陽子の有効陽子数を2個(実際4個の50%)、ポリエチレン標的の厚さを $0.2\text{g}/\text{cm}^2$ とすると、(p,2p)反応の収量は約0.5 events/pulse。週末1日分(24時間)の測定で、約15K eventsが予想される。運動量分布の測定に必要な統計はこの約2倍で、計2日間の測定が必要。

* $p(^9\text{Li}, 2p)^8\text{He}$ 反応の測定

実験条件は ^9C と殆ど同じだが、 ^8He 基底状態への陽子分離エネルギーが13MeVと大きい為、2個の陽子は $\pm 42^\circ$ 付近で測定する。終状態が ^8He 基底状態かどうかは前方粒子の識別で行うが、簡単な前方検出器では $^8\text{He}/^6\text{He}/^4\text{He}$ の分離ができないのが問題となる。 ^9Li のp軌道陽子数は1個なので収量は ^9C の場合の1/4以下になるだろう。週末1日分の測定で収量は約4K event程度と予想されるので、最低2-3日間の測定が必要。

5. 加速器に関するお願い

この種の実験は1次/2次ビームが直接当たる検出器があり、瞬間(instantaneous)ビーム強度により検出器が正常に働く平均ビーム強度が決まってしまう。その為、引きだしビームのRF構造が無く、引きだし時のリップル等の微細構造が少なく、なるべくspillが長いと、測定が非常に楽になるし、全体的にビーム強度を上げる事ができます。今回の実験申請での2次ビームコースの第一焦点面での粒子位置による2次ビームエネルギーの測定が実際に可能かどうか、上の様な加速器からの引きだしビームの性質に依る所が大きいと思われる。治療用の照射にはあまり重要な事ではないかもしれませんが、改善をよろしくお願いいたします。

6. 関係論文リスト

小林俊雄：

Quasifree nucleon-knockout reactions from neutron-rich nuclei by a proton target

T. Kobayashi, A. Ozawa, K. Yoshida, A. Korshennikov, I. Tanihata, E. Nikolski, and T. Nakamura
Nucl. Phys. A616 (1997) 223c

大津秀暁：

Facility for the (p,n) polarization transfer measurement

H. Sakai, H. Okamura, H. Otsu, T. Wakasa, S. Ishida, N. Sakamoto, T. Uesaka, Y. Satou, S. Fujita,
and K. Hatanaka,
Nucl. Instr. and Meth. A 369 (1996) 120

沖花彰：

Quasifree processes in the ${}^6\text{Li}$ breakup reactions by alpha particles

A. Okihana, K. Ushiro, T. Yoshimura, S. Kakigi, T. Sekioka

Nuclear Physics A (in press)

中村隆司：

Coulomb dissociation of a halo nucleus ${}^{11}\text{Be}$ and direct breakup mechanism

T. Nakamura, S. Shimoura, T. Kobayashi, T. Teranishi, K. Abe, N. Aoi, Y. Doki, M. Fujimaki, N. Inabe,

N. Iwasa, K. Katori, T. Kubo, H. Okuno, T. Suzuki, I. Tanihata, Y. Watanabe, A. Yoshida, and M. Ishihara

Nucl. Phys. A 588 (1995) 81c-84c.

吉田敦：

Measurement of fusion cross section with neutron halo nuclei

A. Yoshida, N. Aoi, T. Fukuda, M. Hirai, M. Ishihara, H. Kobinata, Y. Mizoi, L. Mueller, Y. Nagashima,

J. Nakano, T. Nomura, Y.H. Pu, F. Scarlassala, C. Signorini, and Y. Watanabe

Nucl., Phys. A588 (1995) 109c-112c

高田栄一：

Performance of HIMAC

K. Sato, S. Yamada, H. Ogawa, K. Kawachi, N. Araki, A. Itano, M. Kanazawa, A. Kitagawa, T. Kohno,

M. Kumada, T. Murakami, M. Muramatsu, K. Noda, S. Sato, Y. Sato, E. Takada, A. Tanaka, K. Tashiro,

M. Torikoshi, J. Yoshizawa, M. Endo, Y. Furusawa, T. Kanai, H. Koyama-Ito, N. Matsufuji, S. Minohara,

N. Miyahara, F. Soga, M. Suzuki, H. Tomura, and Y. Hirao

Nucl., Phys. A588 (1995) 229c-234c