

研究計画詳細：陽子/クラスターノックアウト反応による原子核構造の研究

1. 研究目的

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1A)と、反応で生成される共鳴状態の探索を行う(図1B)。

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である。

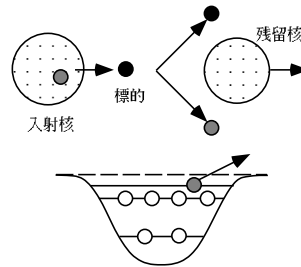


図1(A)：核子Knockout反応

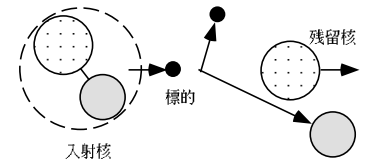


図1(B)：クラスターKnockout反応

目的1：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、その理解には弱束縛核子の粒子軌道の理解が不可欠である。本研究では、(p,2p)-陽子knockout反応による陽子過剰核中の陽子軌道に関する実験を行う。具体的には、陽子ドリップライン上の原子核である¹²N, ¹³O等外殻陽子軌道の情報を、陽子ノックアウト反応により調べる。

又、p-shell原子核中のs-hole状態については、その対称性からの議論も行われているが、測定な行われていない。中性子が増えるに従って陽子の束縛エネルギーは強くなるので、同時に得られるs-hole状態の同位体依存性も興味深い。

目的2：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。これを用いて、p(⁶He,2p)⁷Hとp(⁶Li,³He,p)⁶Hの場合に、⁷Hの探索と、前方で³Hを識別した場合の⁶Hの再測定を行う。しかし2次原子核ビームの種類や強度の制限により、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。この内、³He-knockout反応により、超重水素同位体の安定性の理解上重要な⁶H(外殻中性子が奇数個)の存在/不存在を、p(⁶Li,p³He)⁶H反応で調べる。この様に、水素の同位体⁵H, ⁶H, ⁷Hを同じ種類の反応で調べると、原子核の安定性の理解に重要な、ペアリングエネルギーと角運動量障壁の効果の競争に関する情報を最も単純な系で調べる事ができる。

2. 現在の状況

過去3年間放医研での共同利用実験(P051)で、2次原子核ビームからの陽子ノックアウト反応と、³Heクラスターノックアウト反応の測定を行ってきた。結果は別紙にまとめた。まず、2次ビームと2個の高エネルギー陽子の測定に必要な、検出器と関連する架台等の製作を完了した。次に、(p,2p)陽子ノックアウト反応に関してp(⁴He,2p)³H, p(⁹C,2p)⁸B, p(⁶He,2p)⁵H等の測定を行った。これから、(p,2p)反応に関してはその方法論としては確立する事ができたと考えている。この結果はなるべく早く論文にまとめたい。クラスターノックアウト反応に関しては、99年11月に試験的な測定をp(⁴He,³Hep), p(⁶Li,³Hep)に関して行い、2000年1月に最終的な測定を行う予定である。

図1を見てわかる様に、この逆運動学を用いたノックアウト反応の最大の長所は残留核又はそこからの崩壊粒子を前方で識別する事により、残留核の崩壊モードが同時に得られる事である。現在は、その前方粒子の測定にはシンチレータからなるレンジテレスコープを用いている。其のため、得られる情報は、放出粒子の電荷(原子番号)で、より重要な質量数の情報は得られない。又、前方粒子識別は断面積の小さなp(⁶He,2p)⁵H, p(⁶Li,³He,p)⁶H反応でバックグラウンドを除く為に必要不可欠である。其のため、前方検出器を磁気分析器に変更する計画を進めている。SB1が使えるのが2000年度のみという境界条件もあり、なるべく早く磁気分析器を完成させ、p(⁶He,2p)⁵H, p(⁶He,2p)⁷H, p(⁹Li,³He,p)⁶Hを、前方での³H識別を含めて行うのを、平成12年度中に行いたい。

Knockout反応は、分離エネルギー分解能が同じであればフェルミ運動より充分高いエネルギー領域での実験が適している。現在、200MeV/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、

(代表者：小林俊雄)

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、世界的にもユニークであると考えている。又、現在この種の実験は他の施設では行われていない。

3. 研究計画

研究に必要な装置としては、(1) 2次ビームコース、(2) 2次ビームエネルギー測定用検出器と粒子識別用検出器、(3) 2次ビームベクトル測定用検出器、(4) Knockout反応で放出される2個の陽子/クラスター測定用Two-Arm検出器、(5) Knockout反応で生成される残留核やその崩壊粒子を測定する前方検出器、の5つの部分から成る。このうち、(1)から(4)に関しては完成している。

現在、(5)に関してはシンチレータからなるレンジテレスコープを使っていて、原子番号に関する情報が得られない。それで磁気分析器を整備中である。現在の2次ビームライン(SB1)は平成12年度末までしか使えないという事情があるので、以下の様な計画で準備/実験を進めたい。

平成12年度：平成13年度からSB1が使えなくなるという事情から、超重水素同位体 ${}^5\text{H}$, ${}^6\text{H}$, ${}^7\text{H}$ の探索に重点をおいて行う。

(1) 前方磁気分析器の準備

磁気分析器を図2に示すが、磁石本体、2台のDrift Chamberとシンチレータホドスコープから成る。磁石本体はKEK田無より東北大に移管され、平成11年度予算でその架台等の製作を行い、現在放医研に設置してある。トリガー用/電荷測定用のホドスコープ本体は平成11年度予算で製作中。運動量分析に必要な位置検出器であるdrift chamberはKEKの物を2台借用し、修理/整備を進めている。検出器架台と、その検出器移動機構製作については、12年度からすぐ始められる用に設計を進めている。

磁石の電源等は他の磁石との共用を兼ねて、設置が予定されている。又冷却系に関しては、磁石の水圧が放医研標準よりも低いので、減圧した水を磁石に流し帰りの水を再昇圧して排水側へ戻す方式をとる。

前方磁気分析器の読出回路については、検出器にビームと軽い粒子が両方通る状況下で使用する(例えば、 ${}^9\text{Li}$ が通過する状況下で、 ${}^3\text{H}$ を検出する)為、特別の工夫が必要になる。その技術的開発は理研で以前に行ったが、読出回路についてはかなり多量なので、他の研究機関から借用というわけにはいかず、その為かなりの予算が必要になる(別紙2参照)。又、現在2次ビーム測定用に使用しているBeam Drift ChamberにPre-ampをつけて、高計数率に耐えられるようにする。

磁気分析器は、不安定核の巨大共鳴の励起等、HIMACの高いエネルギーを利用した他の実験にも有効に利用できる。その実験は別に提案したい。

(2) 前方磁気分析器のビームによる試験。

${}^3\text{H}$, ${}^6\text{He}$, ${}^9\text{Li}$ 等による位置検出器の動作試験を行う。

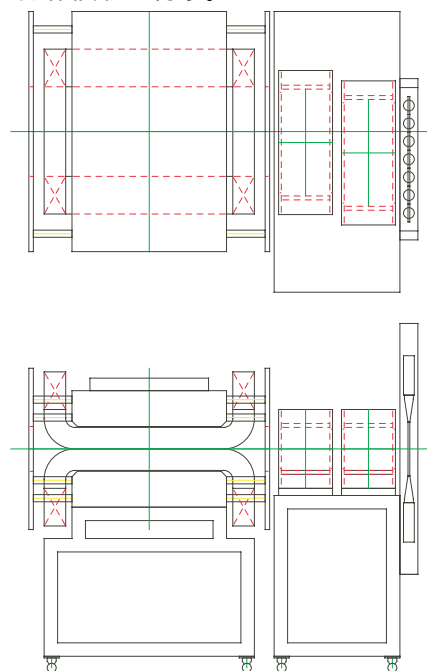


図2：前方磁気スペクトロメータ

(代表者：小林俊雄)

(3) ${}^6\text{He}$, ${}^8\text{He}$ からの陽子ノックアウト反応 $p({}^6\text{He}, 2p){}^5\text{H}$, $p({}^8\text{He}, 2p){}^7\text{H}$ を用いた、 ${}^5\text{H}$ と ${}^7\text{H}$ の測定。

1次 ${}^{12}\text{C}$ から ${}^6\text{He}$ を作り、 $p({}^6\text{He}, 2p){}^5\text{H}$ 反応を行う。これに関しては平成11年度に前方検出器無しの状態での測定を行い、 ${}^5\text{H}$ がきれいに観測された(と考えている)。今回は主な崩壊モードからの ${}^3\text{H}$ を前方で検出し、 p や d へ崩壊するバックグラウンドを低減し、又、その寄与を確認する。

1次 ${}^{16}\text{O}$ から ${}^8\text{He}$ を作り、 $p({}^8\text{He}, 2p){}^7\text{H}$ 反応の測定を行う。これも、 ${}^7\text{H}$ の主な崩壊モードである ${}^3\text{H}$ を前方で検出し、バックグラウンドの低減をはかる。

(4) ${}^9\text{Li}$ からの ${}^3\text{He}$ クラスターノックアウト反応 $p({}^9\text{Li}, {}^3\text{He}){}^6\text{H}$ を用いた、 ${}^6\text{H}$ の測定。

前方検出器無しでの測定は平成11年1月に予定されている。その結果を見た上で、バックグラウンドの低減に有効であろうと考えられる前方での ${}^3\text{H}$ 検出を加えた状態で測定を行う。

平成13/14年度：

陽子過剰核 ${}^{10,11}\text{C}$, ${}^{12,13}\text{N}$, ${}^{13,14}\text{O}$ からの陽子ノックアウト反応による、外殻陽子状態と s -hole状態の測定を行う。又13年度には、RIBFでの実験用に開発している高純度Ge-stack検出器が完成する。これは今使用しているNaI(Tl)により分離エネルギーの分解能が2 MeV (rms)程度に制限されている事の改善の為に製作中のものである。直径60mm、厚さ20mmの平板型高純度Ge結晶6枚からなり、約250MeVまでの陽子を検出することができる。この検出器試験とそれを用いた高分解能測定も合わせて行いたい。

4. マシンタイムの見積り(平成12年度分)

(1) 前方磁気分析器のビームによる試験。

エネルギーが250 MeV/A程度の ${}^3\text{H}$, ${}^6\text{He}$, ${}^9\text{Li}$ 等による位置検出器の動作試験を行う。3晩程度あれば充分。最初の試験なので、(1)と(2)の間隔は離したい。

(2) ${}^6\text{He}$, ${}^8\text{He}$ からの陽子ノックアウト反応 $p({}^6\text{He}, 2p){}^5\text{H}$, $p({}^8\text{He}, 2p){}^7\text{H}$ を用いた、 ${}^5\text{H}$ と ${}^7\text{H}$ の測定。

この測定は連続して行った方がエネルギー校正等のオーバーヘッドが少なくなり好都合である。

230MeV陽子ビームと $p(p, 2p)$ 反応を用いて、NaI(Tl)のエネルギー校正を行うのに最低1晩必要。

前方検出器の調整を250 MeV/A程度の ${}^3\text{H}$, ${}^6\text{He}$, 等を用いて行うのに最低1晩必要。

1次 ${}^{12}\text{C}$ ビームから約250 MeV/Aの ${}^6\text{He}$ を作ると、強度としては約 $8 \times 10^4 / 3\text{sec}$ が得られる。この場合、1晩の予備測定と週末1.5日間の測定で、約2500 event程度が得られた。統計としては、この程度で充分である。

1次 ${}^{16}\text{O}$ ビームから約180 MeV/A(これはビームラインの最大rigidityで決まる)の ${}^8\text{He}$ を作ると、強度は約 $2 \times 10^3 / 3\text{sec}$ と予想される。生成断面積が ${}^6\text{He}$ からの断面積と同じだとすると、100 event程度収集するのに、約2.5日かかる。最低2週間(週末2回分)の測定が必要と思われる。

(3) ${}^9\text{Li}$ からの ${}^3\text{He}$ クラスターノックアウト反応 $p({}^9\text{Li}, {}^3\text{He}){}^6\text{H}$ を用いた、 ${}^6\text{H}$ の測定。

前方検出器無しでの測定は平成11年1月に予定されている。その結果を見た上で測定時間の予想を行いたいが、やはり2週間程度の時間は必要だと思われる。

5. 新2次ビームライン(SB2)に関するお願い

現在の2次ビームライン(SB1)は平成13年度からは治療とその基礎実験の為に、物理実験には使用できなくなります。SB2の設計/製作が進んでいますが、現在の設計では最終焦点から壁までの距離が3m程度しか無く、大きな検出器を用いた実験は不可能になります。このエネルギー領域の加速器施設が他にはGSIしか無い事を考えると、第2焦点で実験を行えるオプションを残してはいただけませんか? 例えば、最後の3連の4重極磁石を横にルール上を移動させるようにすると、それが可能になります。私達の実験では、ビームのエネルギーと方向は各々測定しているので、ビームの条件がかなり悪くても実験が可能です。よろしくご配慮の程お願いいたします。

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.

Nucleon-knockout Reactions from RI Beams

T. Kobayashi

Proceedings of the Second International Conference on Fission and Neutron-Rich Nuclei, 1999, St. Andrews, Scotland

別紙：これまでの研究経過

平成9年度から平成11年度までの3年間、P051「陽子/クラスターノックアウト反応による原子核構造の研究」を行ってきた。

(1) 実験に必要な検出器系の製作

実験装置は(ア)2次ビームのエネルギー測定と粒子識別用検出器、(イ)2次ビームの方向測定用位置検出器、(ウ)2個の高エネルギー陽子測定用検出器、(エ)前方に放出される残留核や崩壊粒子の検出器、から成る。

(ア)に関しては、F1/F2/F3の各焦点面に高計数率用プラスチックシンチレーション検出器を設置し、F1での位置から2次ビームの運動量を、各検出器でのエネルギー損失から粒子識別を行う。F1での計数率は非常に高い為、光電子増倍管にブースターを付ける事と増幅器を併用する事で、数MHz程度までの測定が可能になった。それにより、2次ビームのエネルギーを約0.8 MeV/A(rms)の精度で測定できる。

F3付近の検出器を図1に示す。これらは、2次ビーム測定用Drift Chamber、陽子測定用のDrift Chamber、dEプラスチックシンチレーション検出器、NaI(Tl)検出器、前方粒子識別の為のdEプラスチックシンチレーション検出器からなる。Drift chamberに関しては大体100 μ m程度の位置分解能が、NaI(Tl)に関しては135MeV陽子に対して約1MeV(rms)の分解能が得られた。

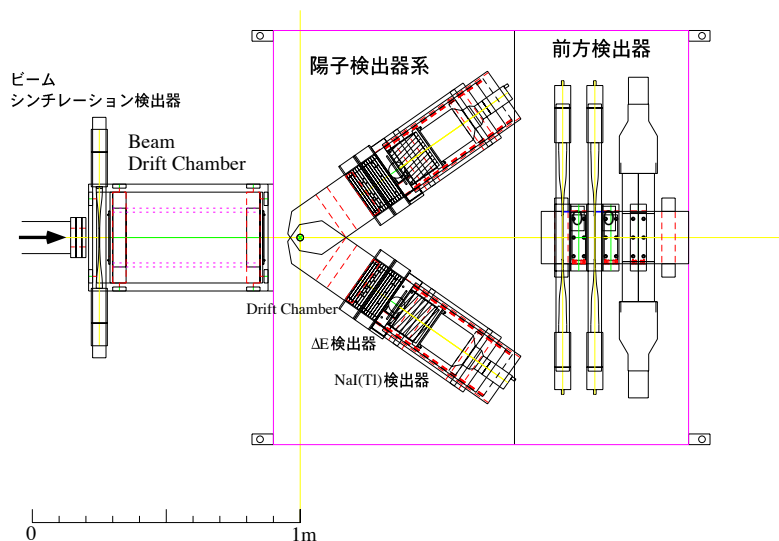


図1：F3焦点付近の検出器系

(2) 陽子過剰核 ${}^9\text{C}$ からの陽子ノックアウト反応： $p({}^9\text{C}, 2p){}^8\text{B}$

目的の一つである、陽子過剰核の性質を調べる目的で、最外殻陽子の分離エネルギーが1.3 MeVと小さい ${}^9\text{C}$ からの陽子ノックアウト反応の測定を255 MeV/Aで行った。これは、終状態の ${}^8\text{B}$ の構造が比較的良く知られているので、方法論の確立という目的もある。

2個の陽子測定から得られる分離エネルギースペクトルには、 $E_x=0, 10, 20$ MeV付近に構造が見られる。次にこれを前方粒子の種類で分類すると、右図の様に知られている全ての ${}^8\text{B}$ の状態が分離でき、前方粒子のTAGは非常に有効である事がわかる。特に10.6MeVのT=2状態もきれいに観測され、又陽子過剰核のs-hole状態が初めて観測された。同様に最外殻陽子の運動量も2個の陽子測定から得られ、この方法で核内核子運動量が測定できる事が照明できた。

(3) 中性子過剰核 ${}^6\text{He}$ からの陽子ノックアウト反応： $p({}^6\text{He}, 2p){}^5\text{H}$

第2の目的である、ドリップライン外側のexoticな共鳴状態探索の最初の例として、重い水素同位体 ${}^5\text{H}$ の探索を行った。これは以後継続したい ${}^6\text{H}$, ${}^7\text{H}$ の探索の最初の例であり、ドリップライン近くの原子核の安定性を理解する上で重要な、ペアリングエネルギーと角運動量バリアーの競合を調べる上でも重要と思われる。結果としては、比較的きれいなピークが観測された。これが ${}^5\text{H}$ とすると、共鳴エネルギーは3.3 MeVとなる。この測定では ${}^5\text{H}$ 崩壊の主な過程と考えられる ${}^3\text{H}$ を前方で識別できなかったが、前方磁気分析器を準備して再測定を行いたい。

(4) ${}^3\text{He}$ クラスターノックアウト反応：

実験の3つ目の目的である、クラスターノックアウト反応に関しては、平成11年度10月に最初のテスト実験を行った。確認の為に、 ${}^4\text{He}$ からの ${}^3\text{He}$ ノックアウト反応の測定 $p({}^4\text{He}, {}^3\text{He})n$ を行い、成功した。目的である、 $p({}^6\text{Li}, {}^3\text{He}){}^6\text{H}$ 反応の予備的な測定を行ったが、現在は目的の ${}^6\text{H}$ はピークとして観測はされていない。平成12年1月に再度測定を行う予定である。この反応は陽子ノックアウト反応よりも断面積が小さいと考えられ、前方磁気分析器で ${}^3\text{H}$ の同時計測を行う事によりバックグランドを減らす事を考えている。