

## 研究計画詳細

### 1. 研究の目的

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,p<sup>3</sup>He)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)。

(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。

(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反応による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<sup>9</sup>C中の外殻陽子軌道の情報を、p(<sup>9</sup>C,2p)<sup>8</sup>B反応により調べる。又この測定では、核内陽子の運動量分布を、2個の陽子の四元ベクトル測定と、反跳核の角度分布測定の2通りの方法から求める事ができ、入射核破碎反応機構の解明にも役立つと思われる。

(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が、2次原子核ビーム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<sup>3</sup>Heクラスターknockout反応が考えられる。この反応はまだ2次ビームを用いては測定された例が無いが、超重水素同位体の安定性の理解に重要な中性子間のペアリングの情報を含んでいる<sup>6</sup>H(外殻中性子が奇数個)共鳴状態を、p(<sup>9</sup>Li,p<sup>3</sup>He)<sup>6</sup>H反応で調べる事を試みる。

(本施設での研究の特徴)：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。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とHIMACの二つのみである。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し、現在の所他のグループはこの種の測定を行っていない。

### 2. これまでの研究経過

研究に必要な装置としては、図2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、

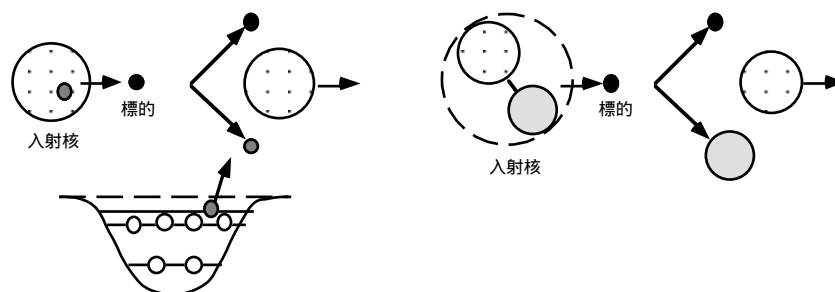


図1(A)：核子Knockout反応

図1(B)：クラスターKnockout反応

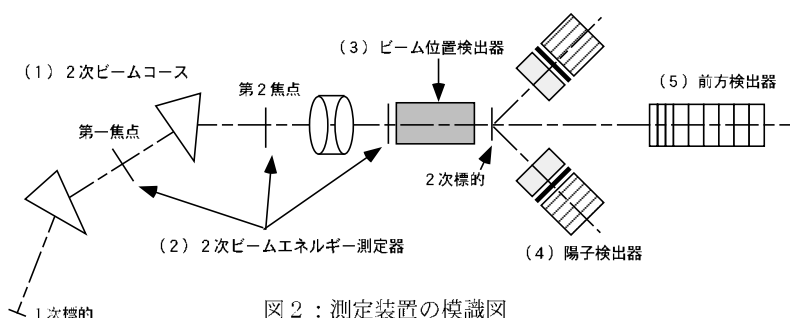


図2：測定装置の模識図

(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つの部分から成る。

98年1月には、完成した2次ビームラインを用いて、実際の測定に用いる陽子、 $^3\text{He}$ 、 $^{12}\text{C}$ 、 $^7\text{Li}$ 等の2次ビームの光学的性質の測定等を行った。これにより、

(A) F1/F2/F3焦点面に置いたシンチレーション検出器間の飛行時間(TOF)測定から、 $^{12}\text{C}$ 等の2次ビームエネルギーを約1 MeV/A (rms)の精度で測定できた。これはNaI(Tl)検出器系での全エネルギー測定精度と同程度であり、ほぼ満足できる。又 $^{12}\text{C}$ の強度は約 $3 \times 10^4$  pppであり、充分とは言えないまでも、数日間あれば充分測定が可能だ。

(B) NaI(Tl)系エネルギー較正に用いる2次陽子ビームに対するTOF測定からのエネルギー測定精度は約2 MeV(rms)であり若干不足であるし、ビーム強度が弱く較正に時間がかかる。しかし最近の加速器グループが約200 MeVの1次陽子ビームの開発に成功し、比較的短時間でエネルギー較正が可能になった。

(C) 理研の100 MeV/A領域で陽子過剰核の実験を行うと、projectile fragmentation以外の過程で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倍程度のアイソバーが混入する。しかし入射エネルギーを250 MeV/A程度に上げればアイソバーの混入(例えば $^{12}\text{C}$ に対する $^{10}\text{B}$ の混入)は数分の1以下にできる事がわかった。これは実験的に大きな長所であり、HIMACの1次ビーム強度が比較的弱い事を考えると、陽子過剰核側での(p,2p)反応は、このfacilityの特徴を生かしている。

2次標的周りの検出器(ビーム位置検出器、陽子検出器、前方検出器)については、図3の様な装置が完成した。ビーム位置検出器としてはdrift chamber、陽子検出器としてはdrift chamber、プラスチックシンチレータとNaI(TL)検出器、前方検出器としてはdrift chamberと3連のプラスチックシンチレータを用いた。陽子検出器は、(p,2p)測定ではほぼ対称位置に置かれるが、(p, $^3\text{He}$ )測定では $^3\text{He}$ 用のアームを延ばして前方に置く。99年1月に約3.5日間の実験が予定され、装置の総合試験と、 $^{12}\text{C}$ ビームを用いた $^{12}\text{C}(p,2p)^{10}\text{B}$ 反応の測定を行う予定である。

### 3. 研究計画

(1) 99年1月の測定は、Full Setupの初回という事もあり、多分統計的に不足すると思われるので $^{12}\text{C}$ の測定をもう一度行う(必要があるかもしれない)。

(2)  $^3\text{He}$ ビームと $p(^3\text{He}, ^3\text{He})p$ 反応を用いて、 $^3\text{He}$ 粒子に対するNaI(Tl)系のエネルギー較正を行うとともに、 $^3\text{He}$ をどの程度前方角度まで実際に測れるか試験を行う。

(3) 今の前方検出器は、粒子電荷(つまりZ)の測定のみで、質量を分離できない。 $^{12}\text{C}$ の測定の場合にはボロンの同位体は $^{10}\text{B}$ しか無いので電荷の測定のみで充分であったが、 $p(^7\text{Li}, ^3\text{He})^6\text{H}$ の実験の為に $^6\text{H}$ が崩壊してできる $^3\text{H}$ を前方で識別する必要がある。約250 MeV/Aの $^3\text{H}$ (鉄中でのレンジは1.8 cm)の識別を大型磁石を用いずに行うには、今の所、鉄板とシンチレータを組合わせたレンジテレスコープ以外は考えつかない。前方粒子の完全な粒子識別の為に、約10連のシンチレータと鉄板を組合わせたレンジテレスコープを製作する。この検出器は間に入れる物質厚を調節する事により、他の

<sup>9,10,11</sup>C等の粒子識別にも利用できる。

(4)(2)と(3)が済んだ時点で、 $p(^9\text{Li}, ^3\text{He})^6\text{H}$ の測定を行い、理研で測定した<sup>5</sup>H, <sup>7</sup>Hと比較を行う。

#### 4. マシントイム見積り

(1) <sup>9</sup>Cを用いた測定

(1-1) 陽子ビームによるNaI(Tl)系のエネルギー較正。

約230MeVの1次陽子ビームを約10<sup>6</sup>ppp程度の強度で用いる。標的として0.1g/cm<sup>2</sup>のCH<sub>2</sub>を用い、角度3種、±45°, (+35°, -55°), (+55°, -35°)のデータをとるには約2晩必要。

(1-2)  $p(^9\text{C}, 2p)^8\text{B}$ 反応

400 MeV/Aの<sup>12</sup>Cビーム、9.5g/cm<sup>2</sup>厚Be標的、4.7g/cm<sup>2</sup>厚Al-degraderを用いて約250MeV/Aの<sup>9</sup>Cビームを作る。2x10<sup>9</sup>pppの1次ビームから約3x10<sup>4</sup>pppの<sup>9</sup>Cが得られる。p-軌道陽子の有効陽子数を2個、CH<sub>2</sub>標的の厚さを0.1g/cm<sup>2</sup>とすると、(p,2p)反応の収量は約0.3 events/pulseとなり、週末3日間の測定で、約25K eventsが予想される。

(2) <sup>3</sup>Heを用いた測定

230 MeV/A <sup>4</sup>Heビーム、3.7g/cm<sup>2</sup>厚Be標的、0.95g/cm<sup>2</sup>厚AL-degraderを用いて約210MeV/Aの<sup>3</sup>Heビームを得る。1x10<sup>8</sup>pppの1次ビームから、約1x10<sup>5</sup>pppの<sup>3</sup>Heが得られる。CH<sub>2</sub>標的と $p(^3\text{He}, ^3\text{He})p$ 反応を用いて、<sup>3</sup>He粒子に対するNaI(Tl)系のエネルギー較正を行うとともに、<sup>3</sup>Heをどの程度前方角度まで測定可能か確認する。約3晩必要。

(3) <sup>9</sup>Liを用いた測定

(3-1) <sup>1</sup>H / <sup>2</sup>H / <sup>3</sup>Hビームによるレンジテレスコープの試験

230MeV/A 1次<sup>4</sup>Heビームから約200MeV/Aの水素同位体<sup>1</sup>H, <sup>2</sup>H, <sup>3</sup>Hを作り、レンジテレスコープの応答を調べる。約3晩必要。

(3-2) 陽子ビームによるNaI(Tl)系のエネルギー較正。

230MeV 1次陽子ビームを用い、約1晩必要。

(3-3) <sup>3</sup>HeビームによるNaI(Tl)系のエネルギー較正。

230 MeV/A 1次<sup>4</sup>Heビームから<sup>3</sup>Heを作る。約1晩必要。

(3-4)  $p(^9\text{Li}, ^3\text{He})^6\text{H}$ 反応

300MeV/Aの<sup>12</sup>Cビーム、9.5g/cm<sup>2</sup>厚Be標的、4.7g/cm<sup>2</sup>厚Al-degraderを用いて約230MeV/Aの<sup>9</sup>Liビームを作る。2x10<sup>9</sup>pppの1次ビームから約3x10<sup>4</sup>pppの<sup>9</sup>Liが得られる。断面積は実はよくわからないが、(p,2p)反応の約1/10以下とすると、週末3日間の測定で、約2K events程度が予想される。統計によっては週末2回分の測定が必要。

#### 5. 関係論文リスト

小林俊雄：

Measurement of the b-decay branching ratio of <sup>17</sup>Ne into the first excited state of <sup>17</sup>F

A. Ozawa, M. Fujimaki, S. Fukuda, S. Ito, T. Kobayashi, S. Momota, T. Suzuki, I. Tanihata, K. Yoshida, G. Kraus and G. Muenzenberg

J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. **24** (1998) 143-150

大津秀暁：

Detector system of the first focal-plane of the spectrometer Amart at RIKEN

H. Okamura, S. Ishida, N. Sakamoto, H. Otsu, T. Uesaka, T. Wakasa, Y. Satou, H. Sakai, T. Niizeki, H. Ohnuma, and T. Ichihara

Nucl. Instr. and Meth. **A406** (1998) 78-88

高田栄一：

Scheduling in operation of HIMAC accelerator facility

E. Takada, Y. Sano, T. Fujimoto, and N. Shinozaki

Proc. Workshop on accelerator operations, Vancouver, Canada, May 1998., in press.