

陽子 / クラスター-Knockout反応による原子核構造の研究

(P 0 5 1 : 平成 1 3 年度報告)

小林俊雄、大津秀暁、岩佐直仁、奥田貴志、大関和貴、渡辺極之、薬師寺崇 (東北大理)
、松山芳孝 (高工研) 、高田栄一 (放医研)

「 1 」 目的

「 2 」 研究経過

(2 - 1) 磁気スペクトロメータ用電磁石のコイル修理

(2 - 2) 新しい 2 次ビームライン SB2 の試験

(2 - 3) $p(^{12}\text{Be}, 2p)^{11}\text{Li}$ 反応による **中性子過剰核 ^{12}Be 、 ^{11}Li** の構造

(2 - 3) $p(^{10,11}\text{Be}, 2p)^{9,10}\text{Li}$ 反応による **共鳴状態 ^{10}Li** の構造

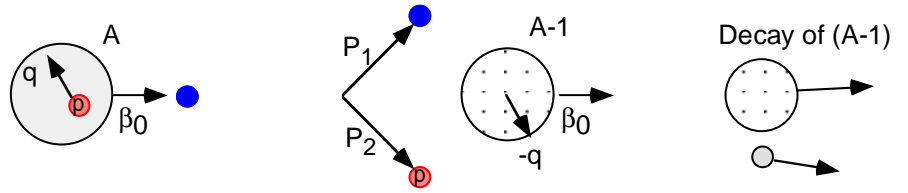
(2 - 4) $p(^{15}\text{C}, 2p)^{14}\text{B}$ 反応による **中性子過剰核 ^{15}C 、 ^{14}B** の構造

「 3 」 今後の予定

「1」目的

不安定核と陽子標的をInverse Kinematicsで用いた陽子・クラスターノックアウト反応

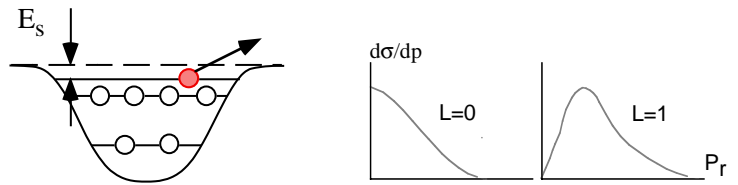
陽子knockout反応
(p,2p)



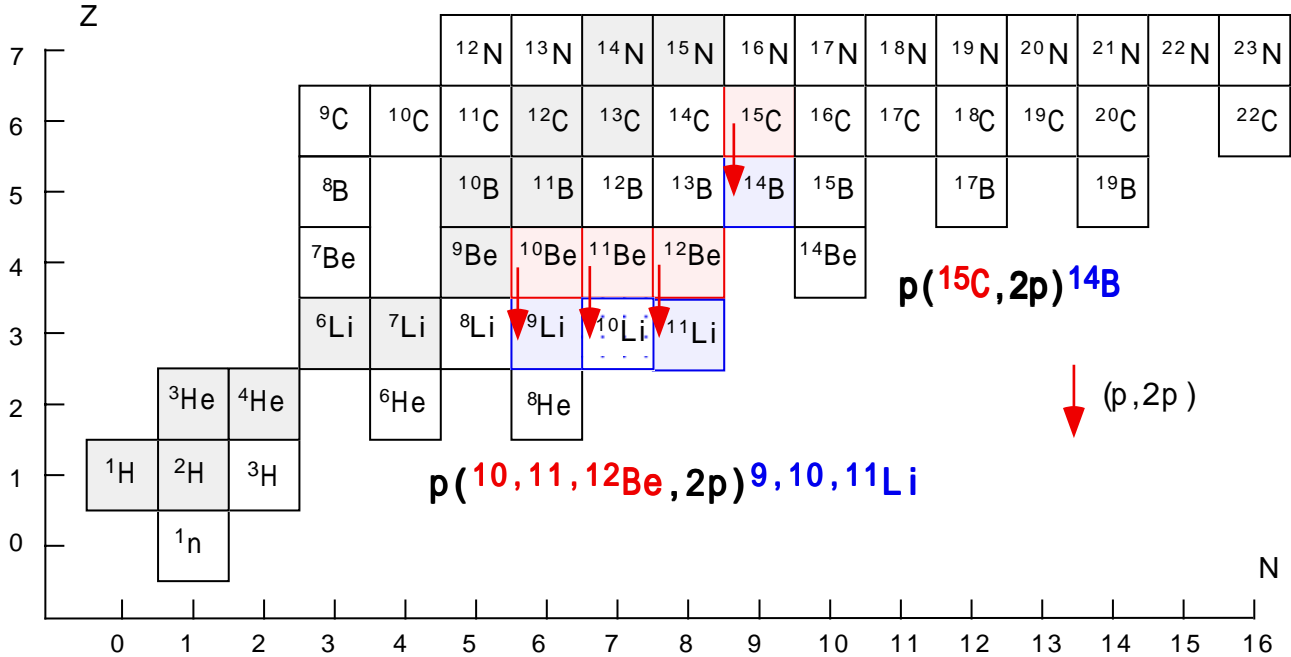
陽子過剰核側

空孔状態を通じて、陽子過剰核中の陽子単一粒子波動関数 $\Psi = (\Phi_{A-1} | \Phi_A)$ に関する情報：
主に弱束縛された外殻陽子について

運動量分布 q 、分離エネルギー E_s 、角運動量 L 、占有数 ...等



陽子過剰側



中性子過剰側

中性子過剰核側

Drip Line上の中性子過剰核からの陽子ノックアウト反応による

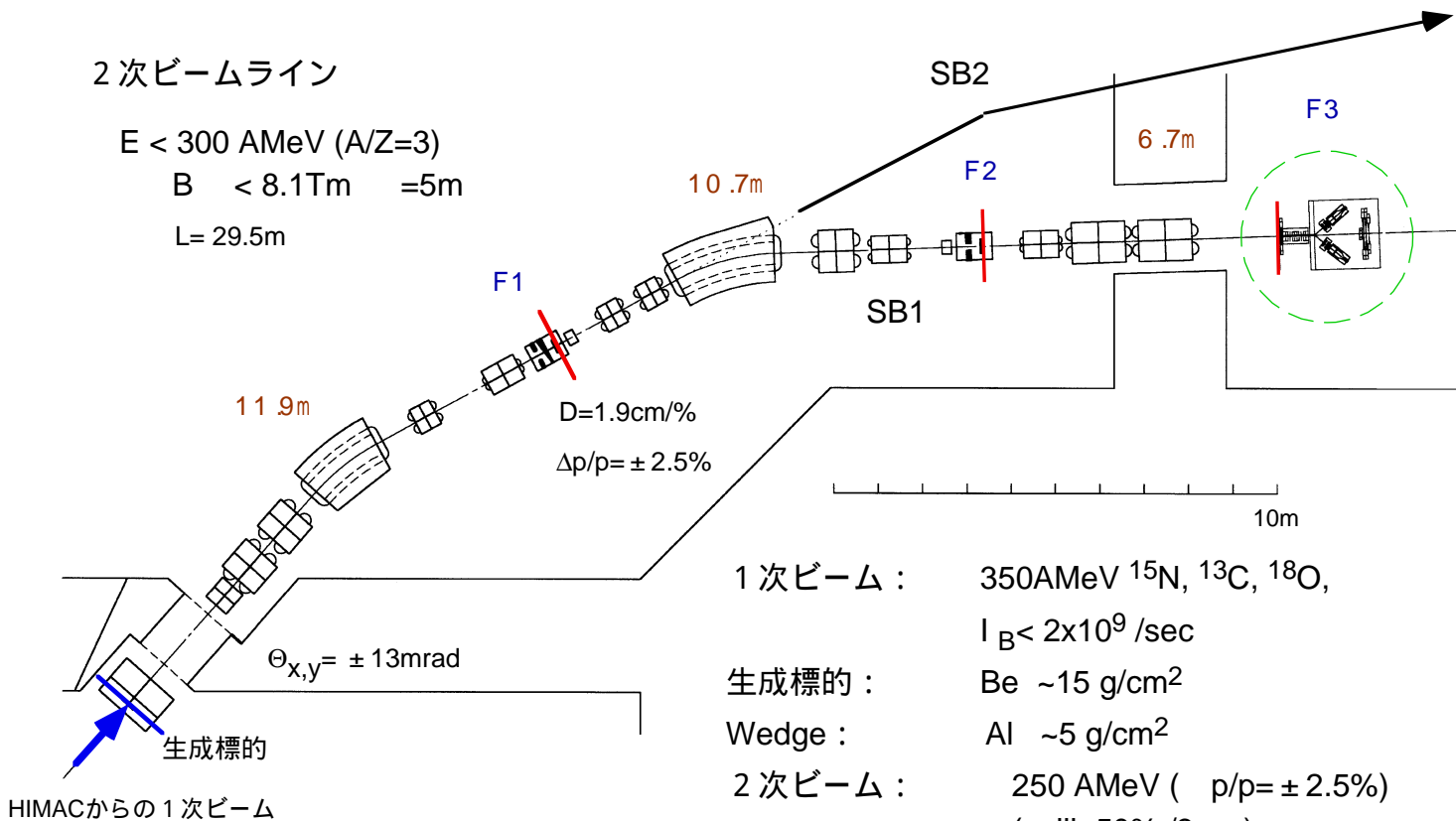
Drip Line外側のExoticな共鳴状態

中性子過剰核中の深く束縛された陽子空孔状態

実験Setup

2次ビームライン

$E < 300 \text{ AMeV (A/Z=3)}$
 $B < 8.1 \text{ Tm} \quad = 5 \text{ m}$
 $L = 29.5 \text{ m}$



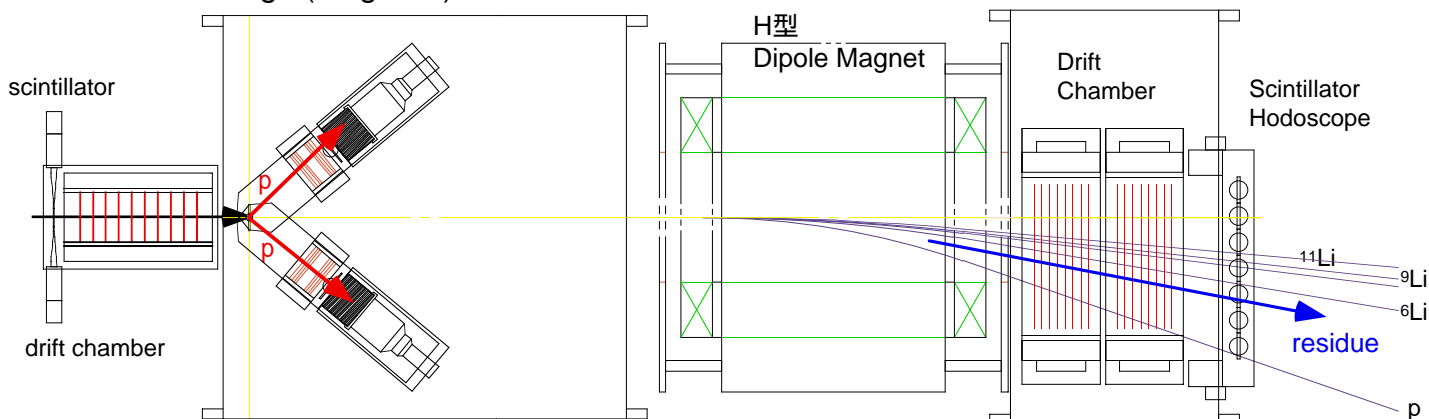
- 1次ビーム : 350 AMeV ^{15}N , ^{13}C , ^{18}O ,
 $I_B < 2 \times 10^9 / \text{sec}$
 生成標的 : Be $\sim 15 \text{ g/cm}^2$
 Wedge : Al $\sim 5 \text{ g/cm}^2$
 2次ビーム : 250 AMeV ($p/p = \pm 2.5\%$)
 (spill: 50% / 3sec)
 ^{12}Be $I_B = 1.2 \times 10^4 / \text{spill}$
 $^{10,11}\text{Be}$ $I_B = 9.0 \times 10^4 / \text{spill}$
 ^{15}C $I_B = 1.0 \times 10^5 / \text{spill}$
 2次標的 : 0.1-0.2 g/cm 2 CH $_2$ /C stack-target

F3検出器系

ビーム検出器

CH $_2$ /C target (0.2 g/cm 2)

前方磁気スペクトロメータ



陽子検出器

前方磁気スペクトロメータ

$(p,2p)$ 反応で生成した空孔状態 / それからの崩壊粒子の同時計測
 崩壊様式の測定

平成 12 年度秋完成。 初回実験 11 月

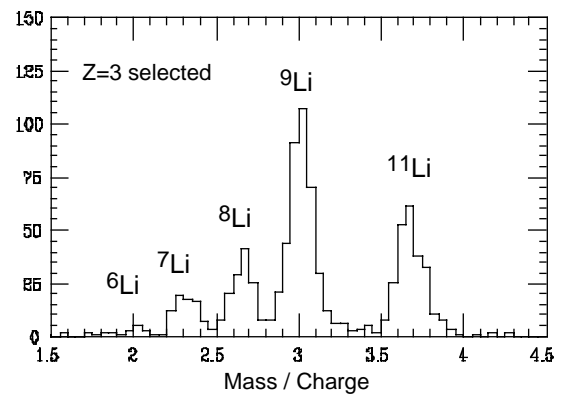
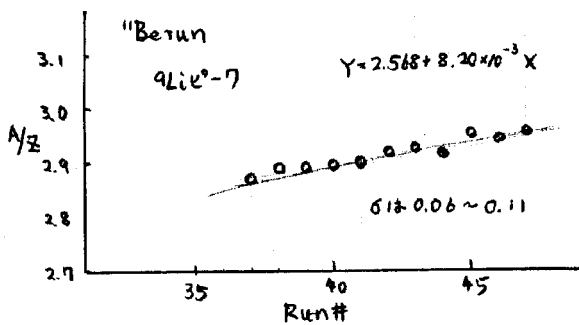
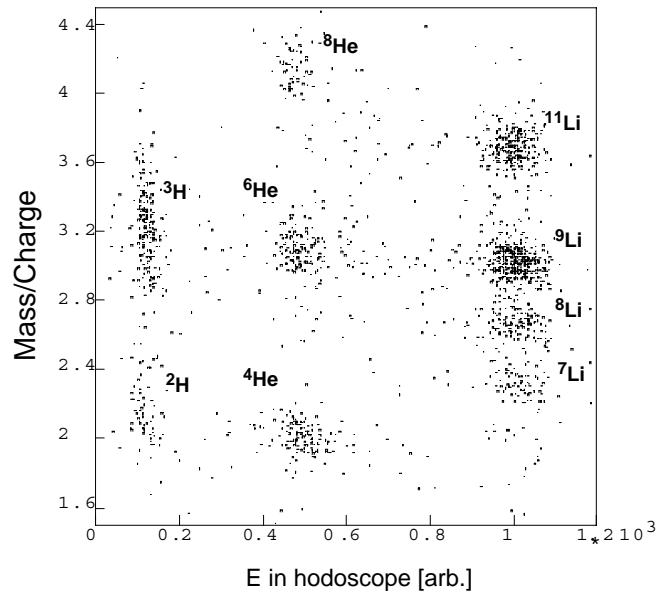
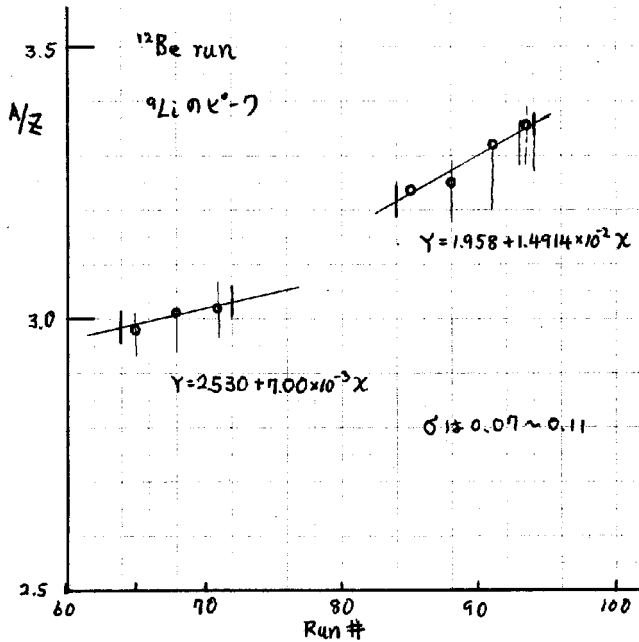
(2 - 1) 磁気スペクトロメータ用電磁石のコイル修理

H型電磁石の上側コイルのレイヤーショート

時間的に磁場が変動

Runごとにdriftを考慮して解析

粒子識別： 運動量とTOF



Window frame型コイルの改修

全体重量：	6 t
Pole Gap：	25 cm
コイル巻数：	340 /2 coil
最大電流：	510 A
Magnet Motive force：	0.173 MAT
最大磁場：	0.8 T
磁場有効長：	1 m
最大BL：	0.8 Tm

B=0.8Tでの安定した動作

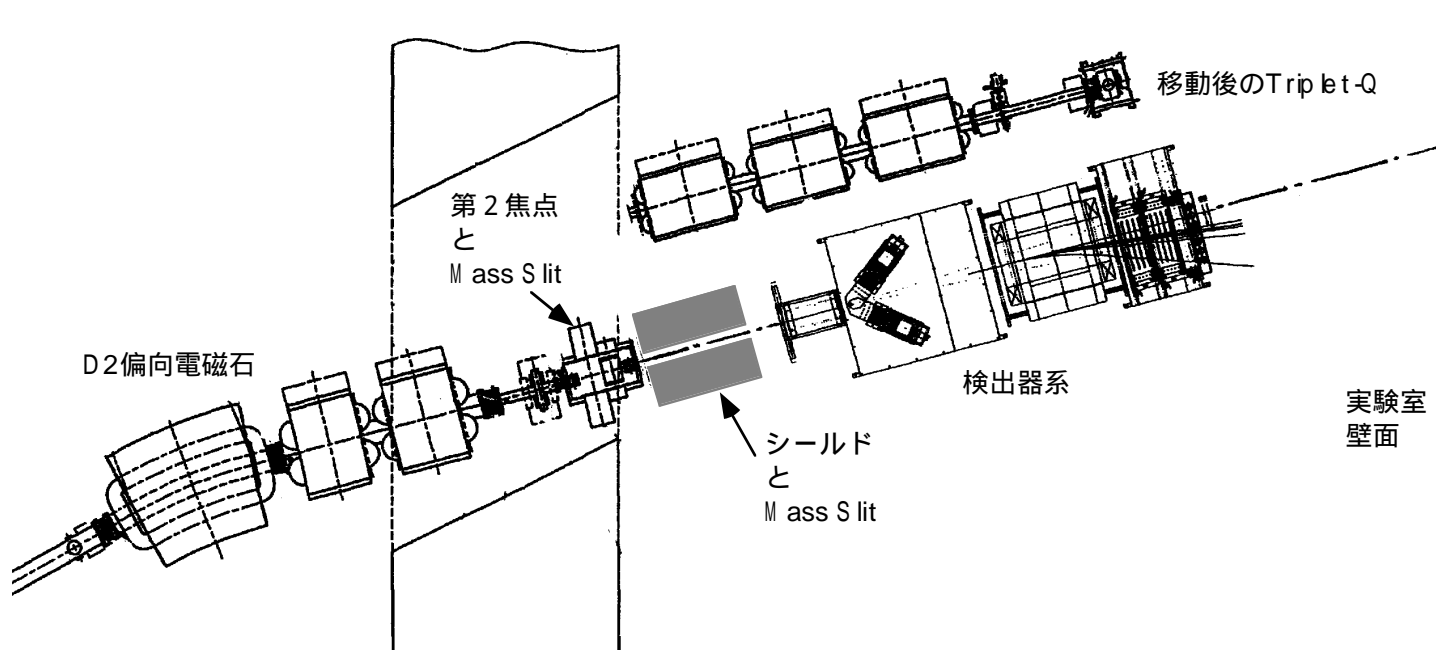
(2-2) 新しい2次ビームラインSB2の試験

旧SB1ライン： 平成13年4月から治療専用

新しいSB2ライン：

* 最終焦点F3から壁まで約3m < 検出器系の長さ約5m

* 設計の段階で、F2 - F3に置かれるTriplet-Qを移動可能にしよう。



新SB2ラインの問題点

* F2 Mass Slit - 2次標的間： シールド代替りのTriplet-Qが無い。

Mass Slitを通り抜ける軽い粒子 (^3H , ^6He 等) が直接検出器へ入射するbackground!
不要な粒子を止めるshieldが必要。

* Achromatic焦点F2以降に独立な収束要素が無い。

2次標的上でのビームサイズの増加。

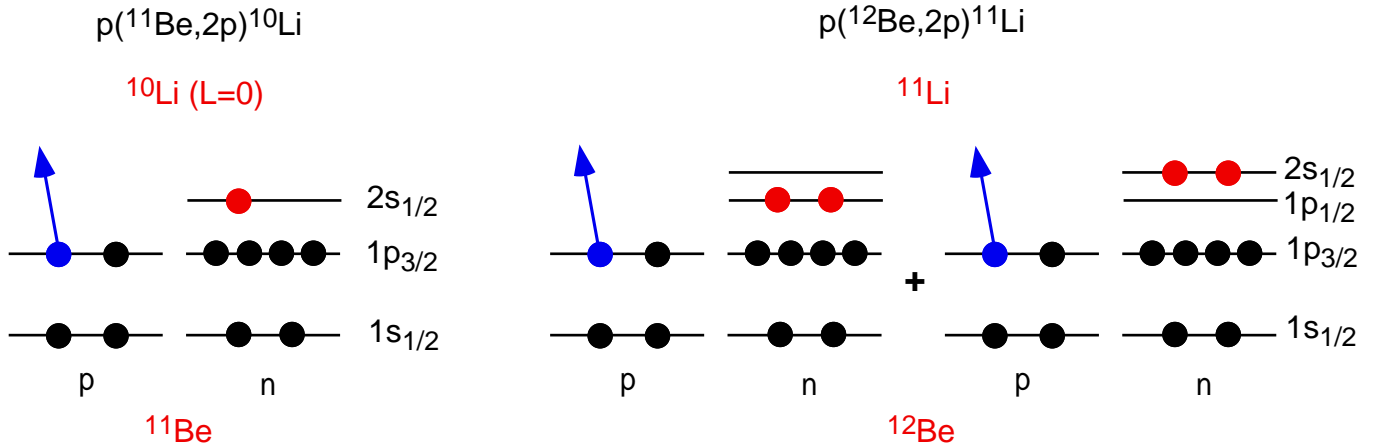
実際の使用条件下での試験

(+) 約50cmの鉄シールドを用いると、background的にはなんとか使用可能

(-) A/Z=3を持つ粒子 (^3H , ^6He , ^9Li) を用いる実験は不可能

(-) 2次標的上でのビームサイズの増加

(2 - 3) p ($^{10,11,12}\text{Be}, 2\text{p}$) $^{9,10,11}\text{Li}$ 反応による中性子過剰核 ^{12}Be 、 $^{10,11}\text{Li}$ の構造



^{10}Li のs 波共鳴部分を選択的に生成

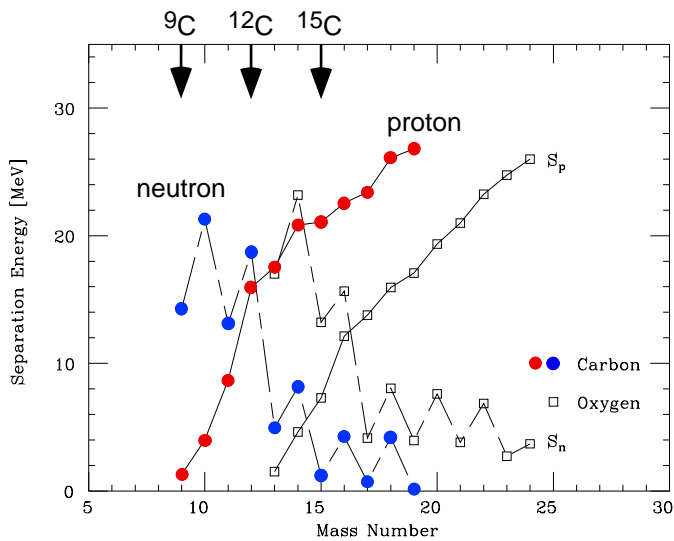
中性子： ^{12}Be と ^{11}Li の共通点

(2 - 4) p ($^{15}\text{C}, 2\text{p}$) ^{14}B 反応による中性子過剰核 ^{15}C 、 ^{14}B の構造

C 同位体の深い陽子空孔状態： $(\pi 1s_{1/2})^{-1}$

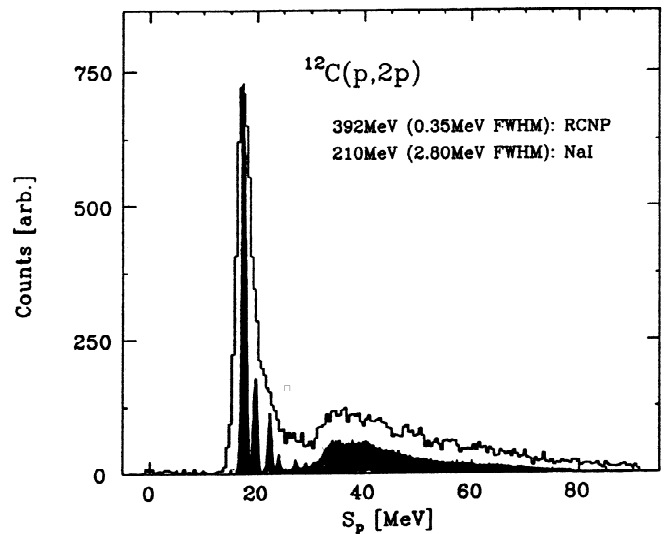
中性子過剰核では陽子はより深く束縛される

^{12}C の $(\pi 1s_{1/2})^{-1}$ 状態は崩壊モードを含め良く知られている



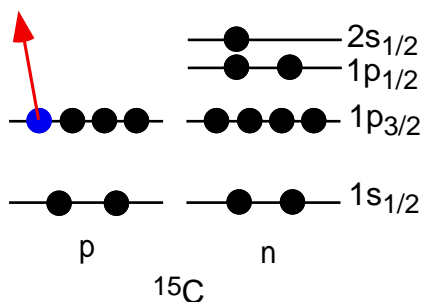
S_p : 1.3 16.0 21.1 [MeV]

S_n : 14.3 18.7 1.2 [MeV]



深い空孔状態の観測にはエネルギー分解能を必要としない

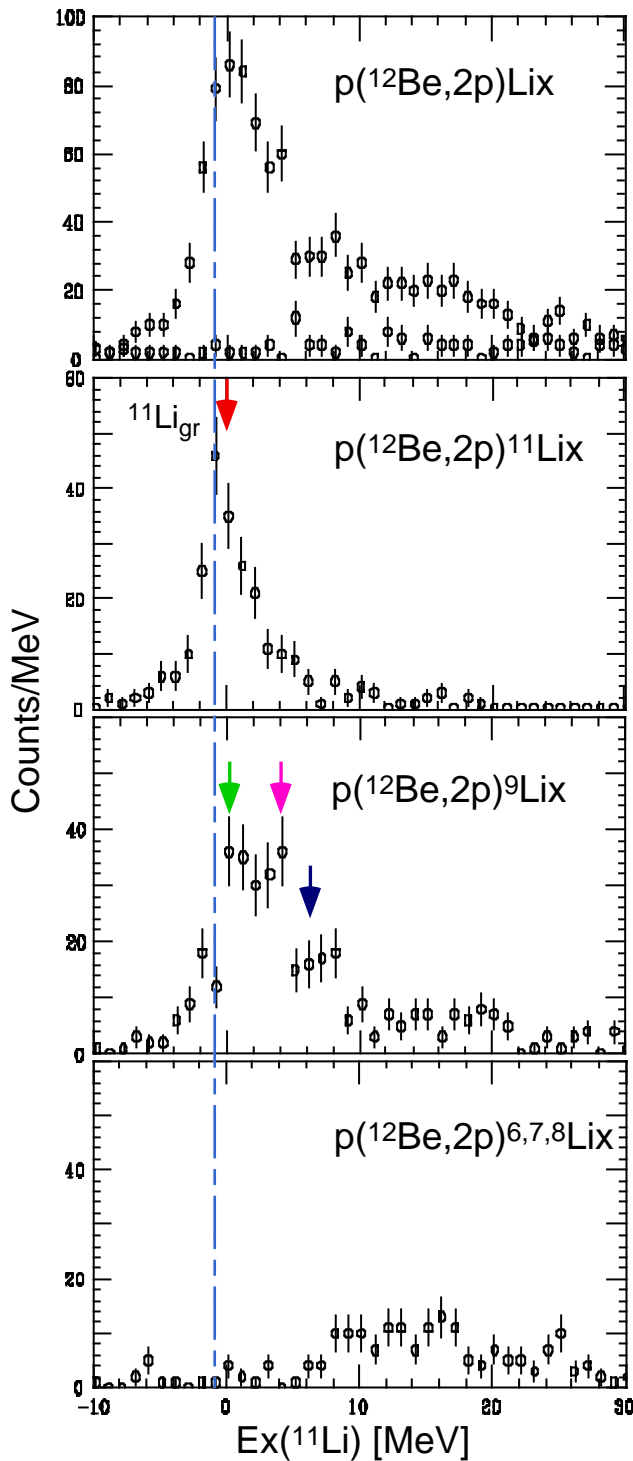
^{15}C と ^{14}B



$J^\pi(^{15}\text{C})=1/2^+$, $J^\pi(^{14}\text{B})=2^-$

p(¹²Be,2p)¹¹Li 反応の分離エネルギー分布

¹¹Li 励起エネルギー



前方でLi 同位体検出: CH₂/C問題無し

¹²Beから生成された¹¹Li 基底状態

$\sigma(E_x) = 1.7 \text{ MeV}$

⁹Liに崩壊する¹¹Li 励起状態

分解能が悪く、状態を分離できないが:

#1: $E_x = 1.3 \text{ MeV}$

#2: $E_x = 5.0 \text{ MeV}$

#3: $E_x = 7.0 \text{ MeV}$

$Y(^{11}\text{Li}; \text{ground})$

$Y(^{11}\text{Li}; E_x = 1.3 \text{ MeV})$

$Y(^{11}\text{Li}; E_x = 5.0 \text{ MeV})$

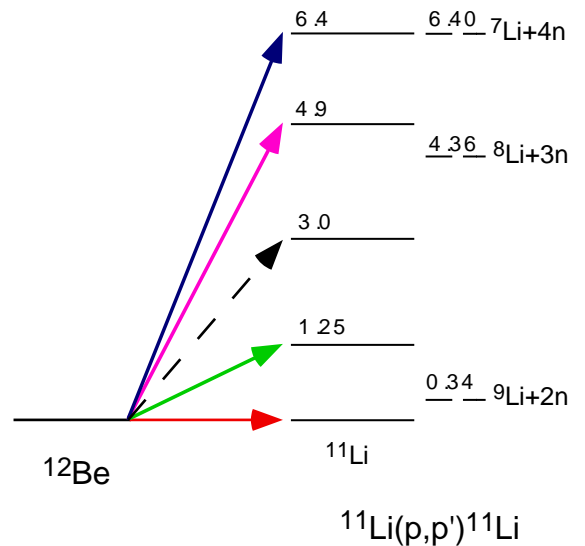
11.3

$E_x = 3.0 \text{ MeV}$ 付近の状態は?

(p,2p)反応の選択性と励起状態の性格

陽子励起 / 中性子励起??

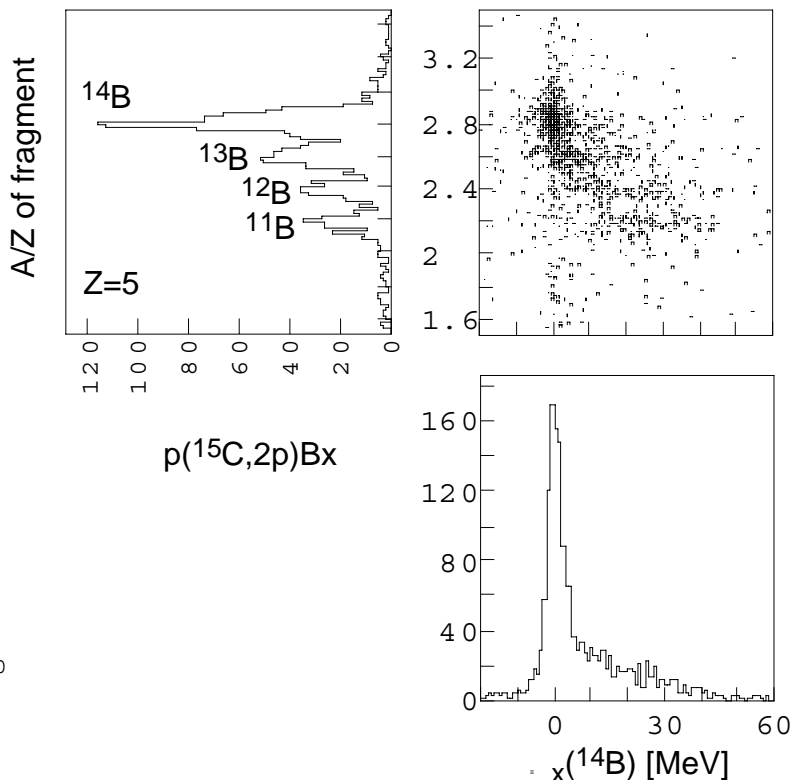
分離エネルギー分解能の改善



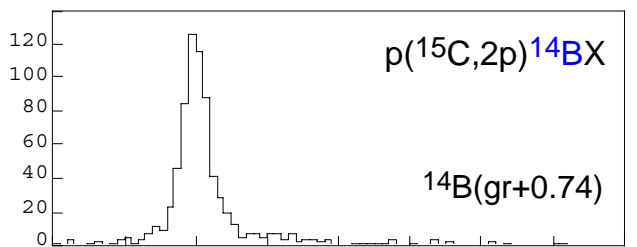
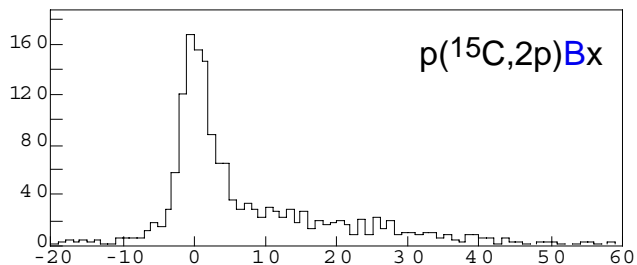
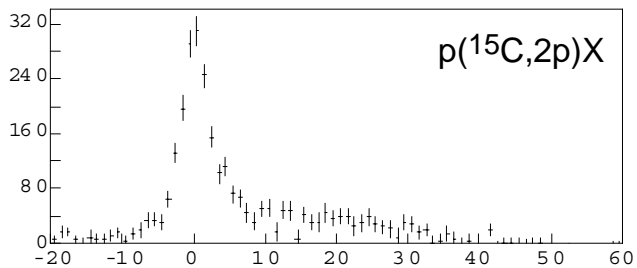
¹¹Li(p,p')¹¹Li

$p(^{15}\text{C}, 2p)^{14}\text{B}$ @250AMeV

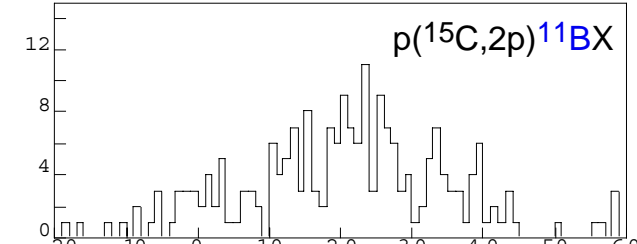
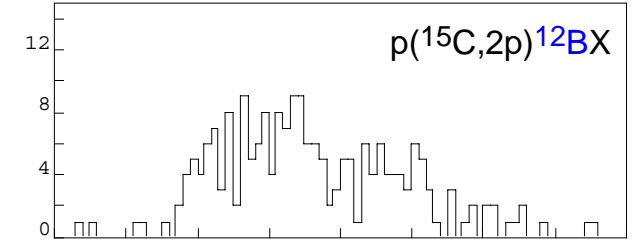
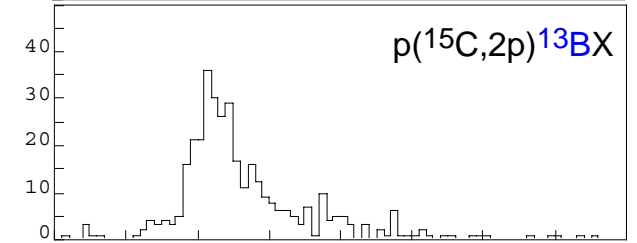
$E_x(^{14}\text{B})$ と前方粒子の相関



$E_x(^{14}\text{B})$ 分布



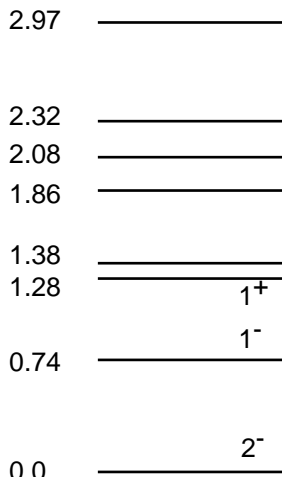
$^{14}\text{B}(\text{gr}+0.74)$



$E_x(^{14}\text{B})$ [MeV]

$E_x > 10\text{MeV}$ は
殆ど中性子放出で崩壊

5.85
--- $^{12}\text{B}+n$



^{14}B

0.97
--- $^{13}\text{B}+n$

「3」問題点と今後

(1) 分離エネルギー分解能

約1.7 - 2.0 MeV (rms)

標的厚を薄く / 標的周囲のヘリウムバッグ等による改善

(2) 検出器用回路の不足から、高強度2次ビームに充分対応できない。

殆どは、商業的に得られなくなったDrift Chamber用 Multi Hit TDCの数の問題

所有している理研加速器施設からの借用

(3) 前方粒子検出器での粒子識別

B同位体でかろうじて分離可能

主にスペクトロメータ電磁石の積分磁場値の問題：0.8Tm

磁石上流にdrift chamberをもう1台設置予定

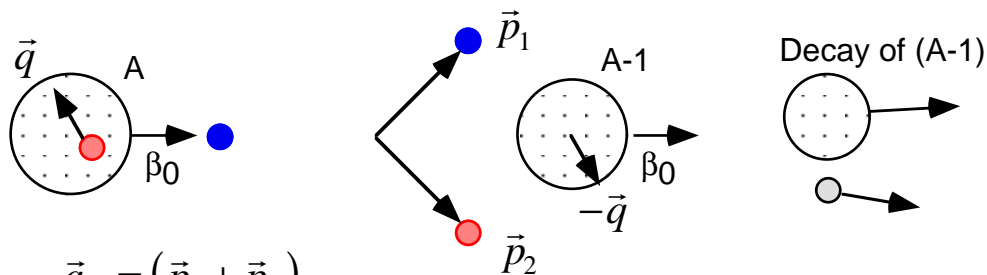
(4) 深い空孔状態からの陽子放出崩壊モード

CH₂中の炭素からのbackgroundが >90%で非常に多い

厚さ約5mmの固体水素標的の使用した実験を平成14年度中に行う予定

逆運動学での陽子・クラスターノックアウト反応

Quasi Free p-p(p-cluster)散乱による陽子(cluster)knockout反応：



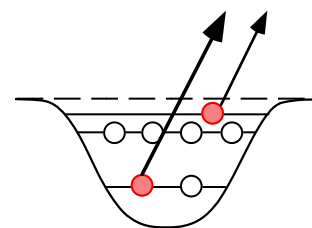
$$\vec{q}_\perp = (\vec{p}_1 + \vec{p}_2)_\perp$$

$$\vec{q}_\parallel = \frac{(\vec{p}_1 + \vec{p}_2)_\parallel - \gamma\beta(M_A - M_{A-1})}{\gamma}$$

$$E_s = T_0 - \gamma(T_1 + T_2) - 2(\gamma - 1)m_p + \beta\gamma(\vec{p}_1 + \vec{p}_2)_\parallel - \frac{q^2}{2M_{A-1}}$$

反応がQuasi Free的：

- (1) 陽子(標的)のドブロイ波長 核子間距離 (~ 1.8 fm)
- (2) 入射エネルギー 陽子分離エネルギー S_p 、Fermi運動量 P_f
- 陽子過剰核のvalence proton : $S_p \sim 1$ MeV
- 中性子過剰核中の陽子 : $S_p = 20 - 30$ MeV



重イオン加速器 + 2次ビームライン

理研 : < 80 A MeV

放医研 : < 300 A MeV @ A/Z=3 $E_B > 10-15 \times S_p$

H M A C施設はGSI(SIS18+FRS)同様、100 A MeV以上の2次原子核ビームが使用可能
比較的”高い”エネルギーが必要なノックアウト反応には最適な施設

現在の問題点

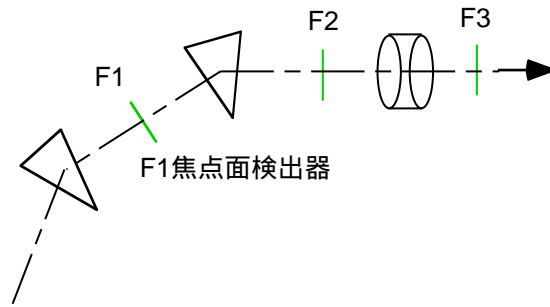
1次ビーム強度の制限

CH₂標的中の炭素からのbackground

実験準備期間(約10日)と実験期間の関係

検出器系 @F3

2次ビームライン

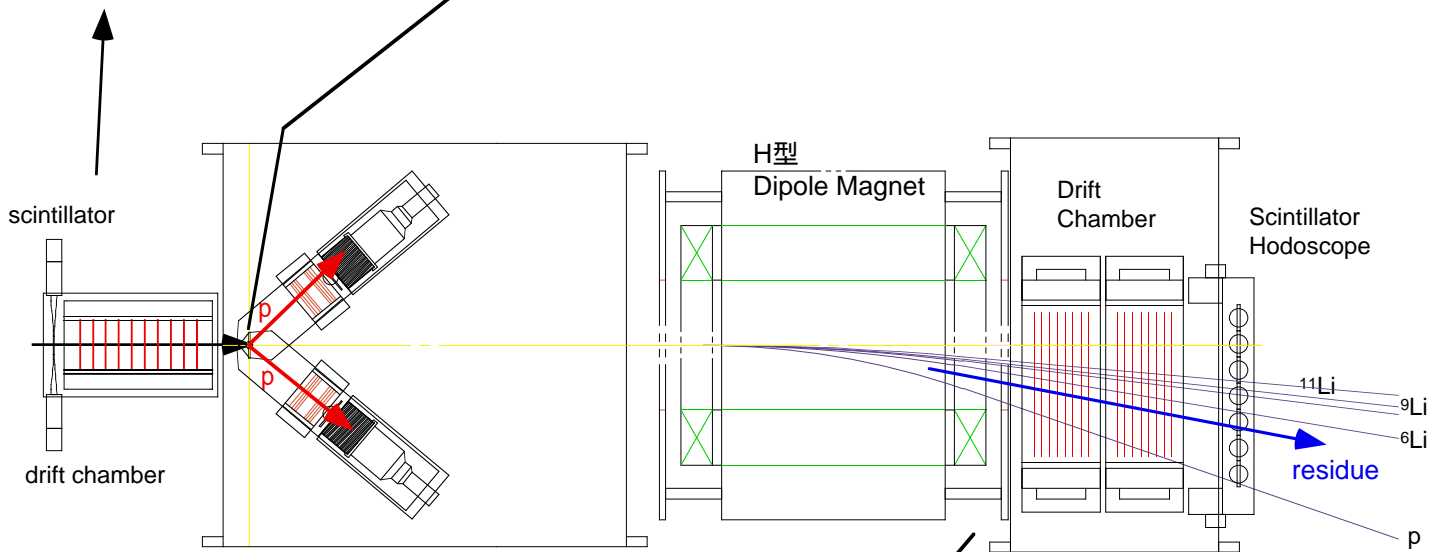


ビーム検出器

Plastic scint.
+ Drift Chamber:
5x+5Y, drift=9mm

CH₂/C 標的

stack target



陽子検出器

前方磁気スペクトロメータ

Drift chamber

+ E scintillator +NaI(Tl) 6" x5"t

エネルギー : 20 MeV E_p <math>< 210</math> MeV

分解能 : p 1 MeV @130 MeV

角度 : $p = 40 \pm 10^\circ$ (H&V)

分解能 : 6 mrad

立体角 : 0.1 sr

分離エネルギー : (E_S) 1.8 MeV

粒子識別 & 核反応の除去 :

Magnet: 50cm(H)x25cm(V)x100cm(L)

BL 0.8 [Tesla] x 1.0 [m]

Drift Chamber: $xyx'y'x'y'xy+xyx'y'x'y'xy$

drift 2.5cm, He+50%C₂H₆

Hodoscope: $s(T)=0.1$ nsec

角度acceptance: 140mrad(H)x55mrad(V)

運動量分解能 : p/p 2.2%

@ $p = 2.2$ GeV/c (250A MeV A/Z=3)

角度分解能 : 4mrad

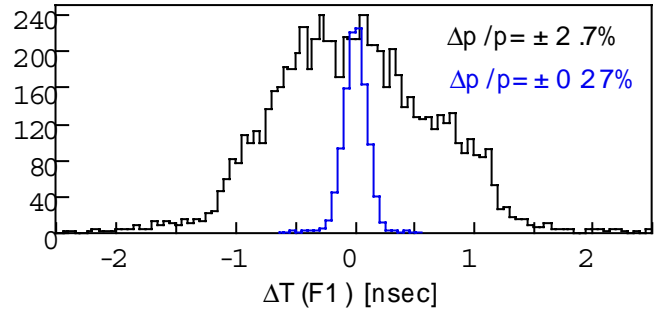
粒子識別 :

解析

2次ビームのエネルギー：運動量分散焦点F1での位置測定： $D=1.9\text{cm}/\%$

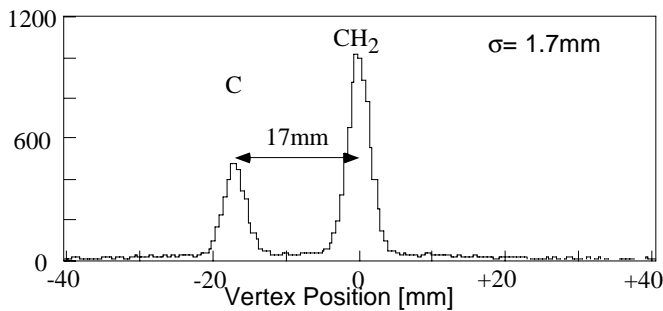
$\Delta T(F1)$ $X(F1)$ $\sigma_{\text{beam}}=1.5\text{ AMeV}$

F1計数率： $I_B(F1)>\text{several MHz}$

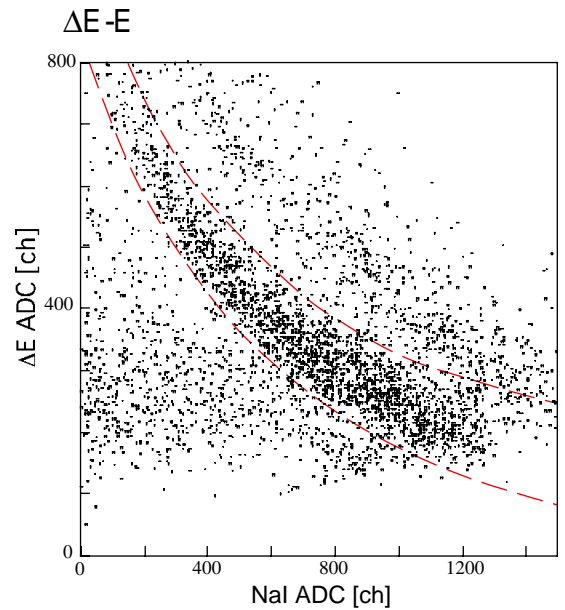


陽子検出器：

標的Vertex：

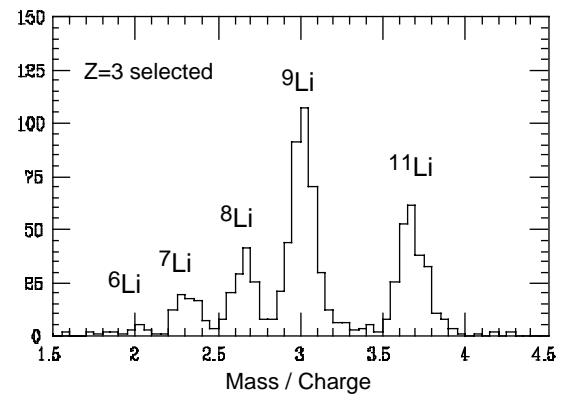
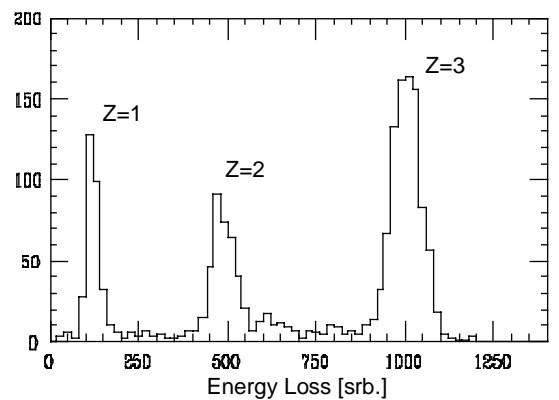
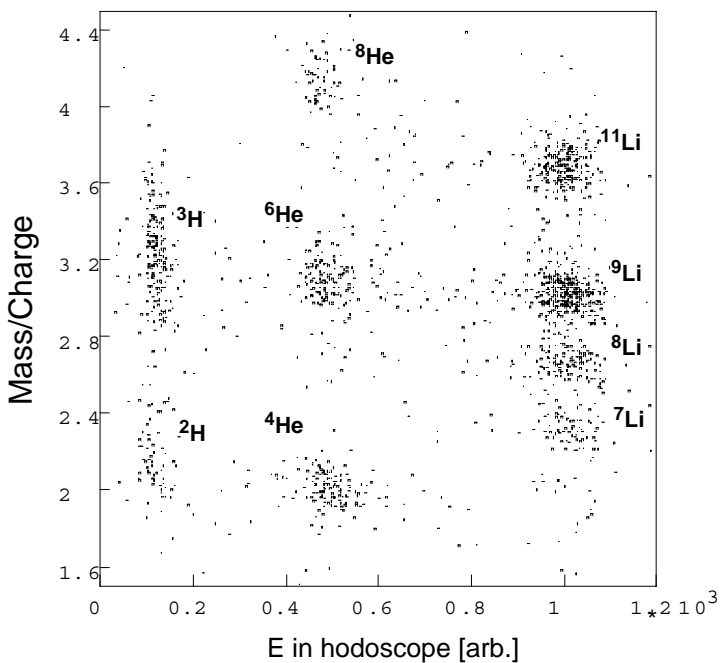


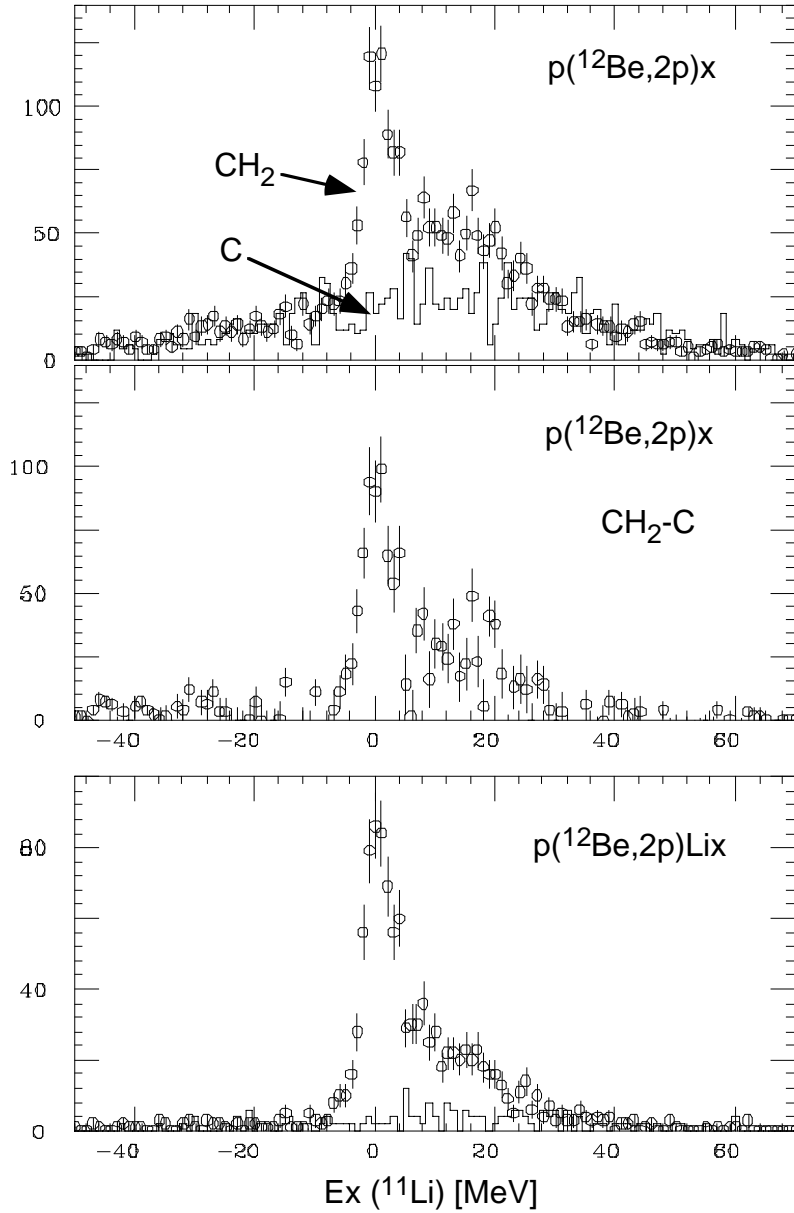
粒子識別 / NaI(Tl)中での核反応除去



前方磁気分析器：

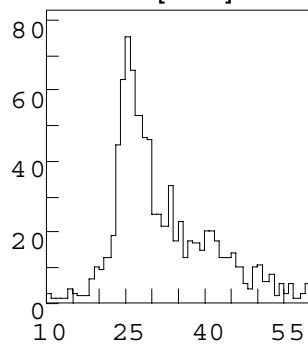
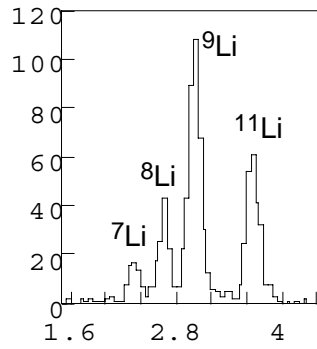
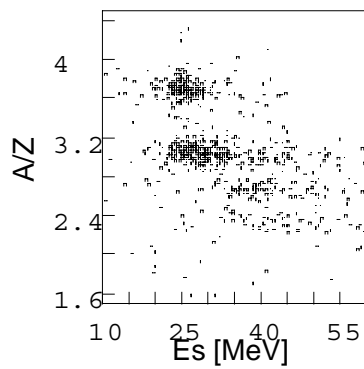
粒子識別： Momentum - TOF





2-proton inclusive

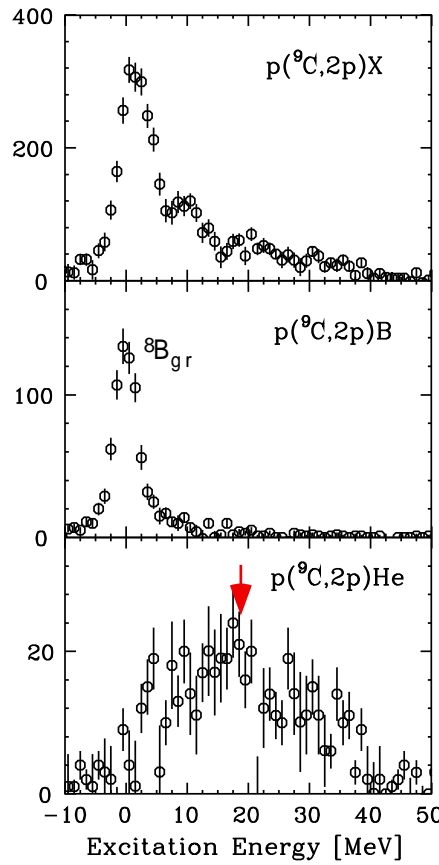
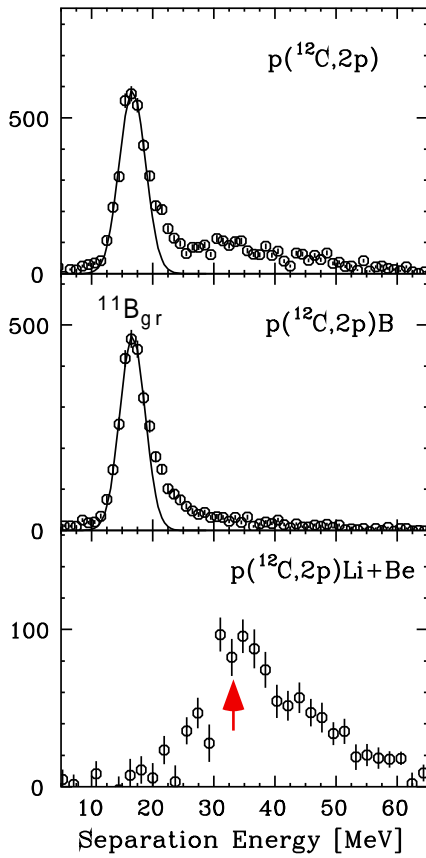
tagged by
forward ${}^6,{}^7,{}^8,{}^9,{}^{11}\text{Li}$



$p(^{12}\text{Be},2p)Lix$
 $Z=3$ gated

$p(^{12}\text{C},2p)$ @230AMeV

$p(^9\text{C},2p)$ @255AMeV



2p Inclusive

$$S_p(^{12}\text{C}) = 16.0\text{MeV}$$

$$S_p(^9\text{C}) = 1.3\text{MeV}$$

終状態： $8,^{11}\text{B}_{\text{gr}}$
 $(\pi p_{3/2})^{-1}$

終状態： $(\pi s_{1/2})^{-1}$

ほぼ同じ励起エネルギー
 巾（構造）は異なる