

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)

小林俊雄、大津秀暁、氏家徹、奥田貴志、関口昌嗣、大関和貴、田澤信也（東北大理）
吉田敦（理研）、松山芳孝（KEK田無）、沖花彰（京教大教）、
福田直樹（東大理）、高田栄一（放医研）

「1」 目的

「2」 研究経過

「3」 実験方法とSETUP

「4」 結果

$p(^9\text{C}, 2p)^8\text{B}$ 反応による陽子過剰核 ^9C の構造

$p(^4, ^6\text{He}, 2p)^3, ^5\text{H}$ 反応による水素同位体 ^5H の探索

^3He -knockout反応の予備実験

$p(^3, ^4\text{He}, p^3, ^4\text{He})$ 弾性散乱

$p(^4\text{He}, p^3\text{He})x$ ^4He からの ^3He knockout反応

$p(^9\text{Li}, p^3\text{He})x$ 反応の予備測定

$p(^9\text{Li}, p^3\text{He})^6\text{H}$ 反応による水素同位体 ^6H の探索

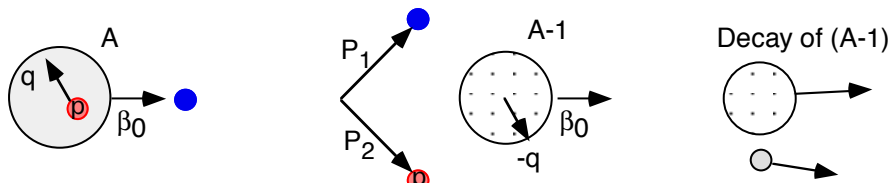
「5」 その他の開発

「6」 今後の予定

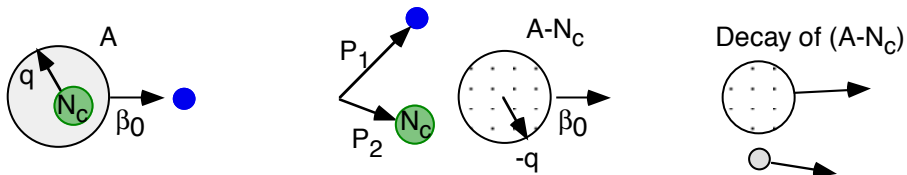
「2」 目的

「2-1」 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)



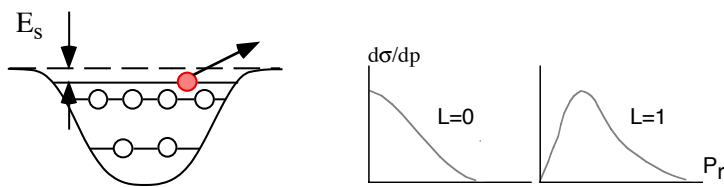
クラスターknockout反応
(p,p³He)



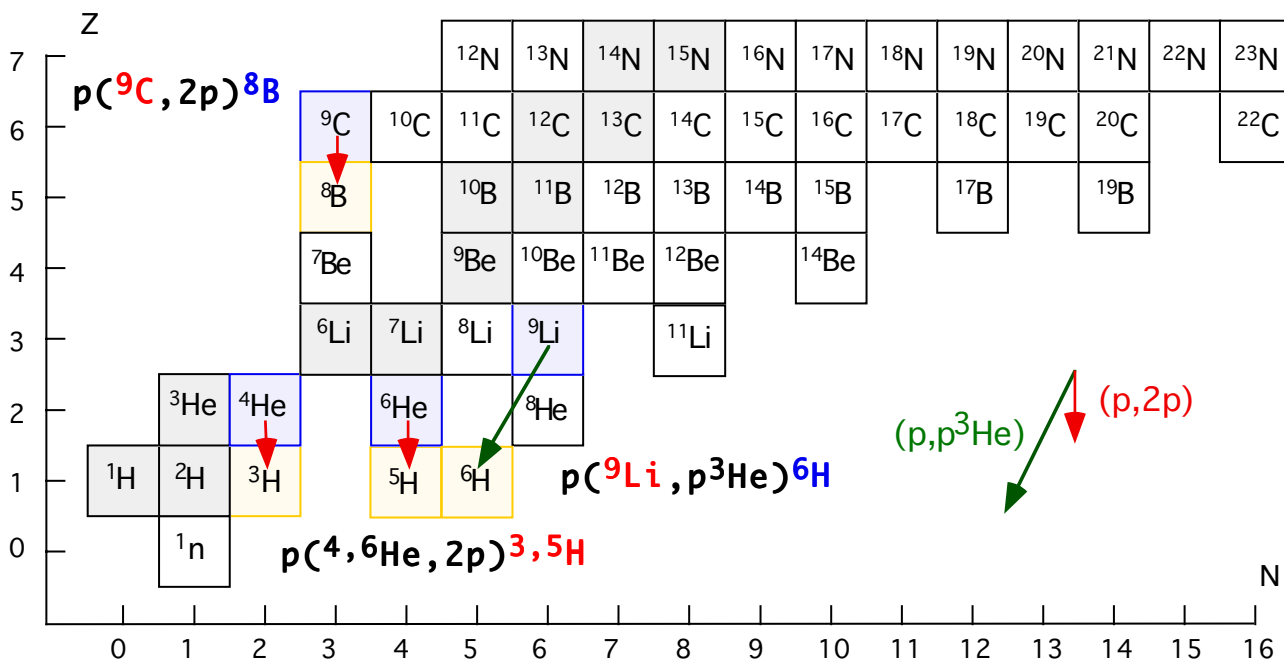
●陽子過剰核側

Hole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

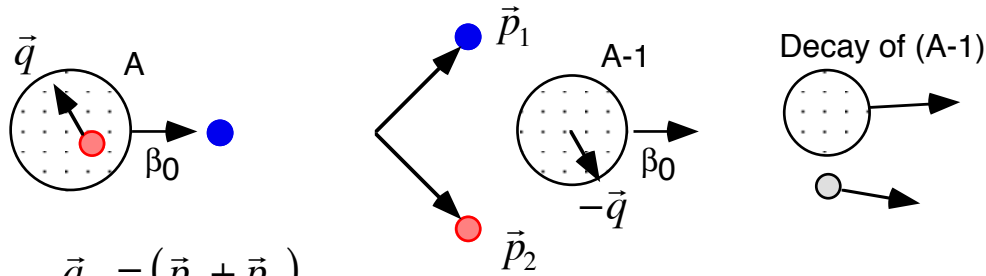
●中性子過剰核側

Drip Line上の中性子過剰核からの陽子・クラスターknockout反応により

Drip Line外側のExoticな共鳴状態の生成

「2-2」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 :



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

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

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

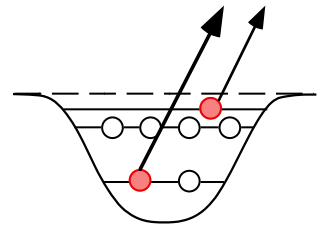
- 反応がQuasi Free的 :

(1) 陽子 (標的) のドブロイ波長 \ll 核子間距離 (~ 1.8 fm)

(2) 入射エネルギー \gg 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 @ $A/Z=3$ $\Leftrightarrow E_B > 10-15 \times S_p$

HIMAC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 1次ビーム強度の制限 (?)

② 逆運動学でのノックアウト反応の長所 :

ノックアウト反応で生成された残留核 / そこからの崩壊粒子が超前方に放出される

\Rightarrow 残留核の崩壊モードが高効率で測定可

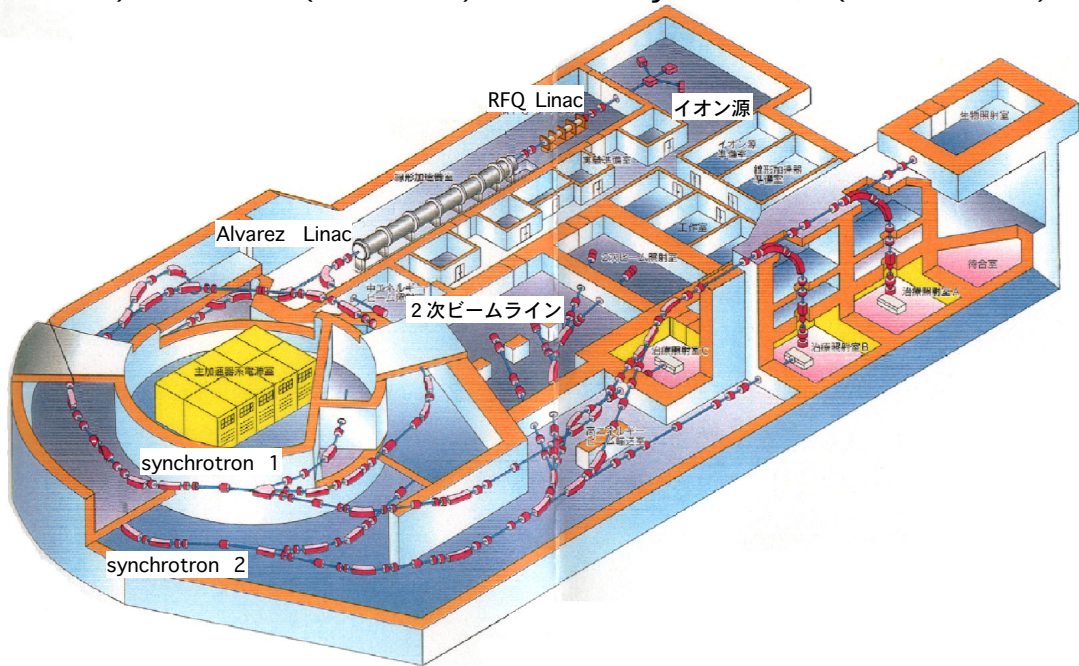
現在は前方磁気分析器が無い為、(Z, A)の粒子識別が不可能で、長所を生かしきれて無い

\Rightarrow 前方磁気分析器 (電磁石 + 位置検出器) を準備中

「3」 実験方法とSETUP

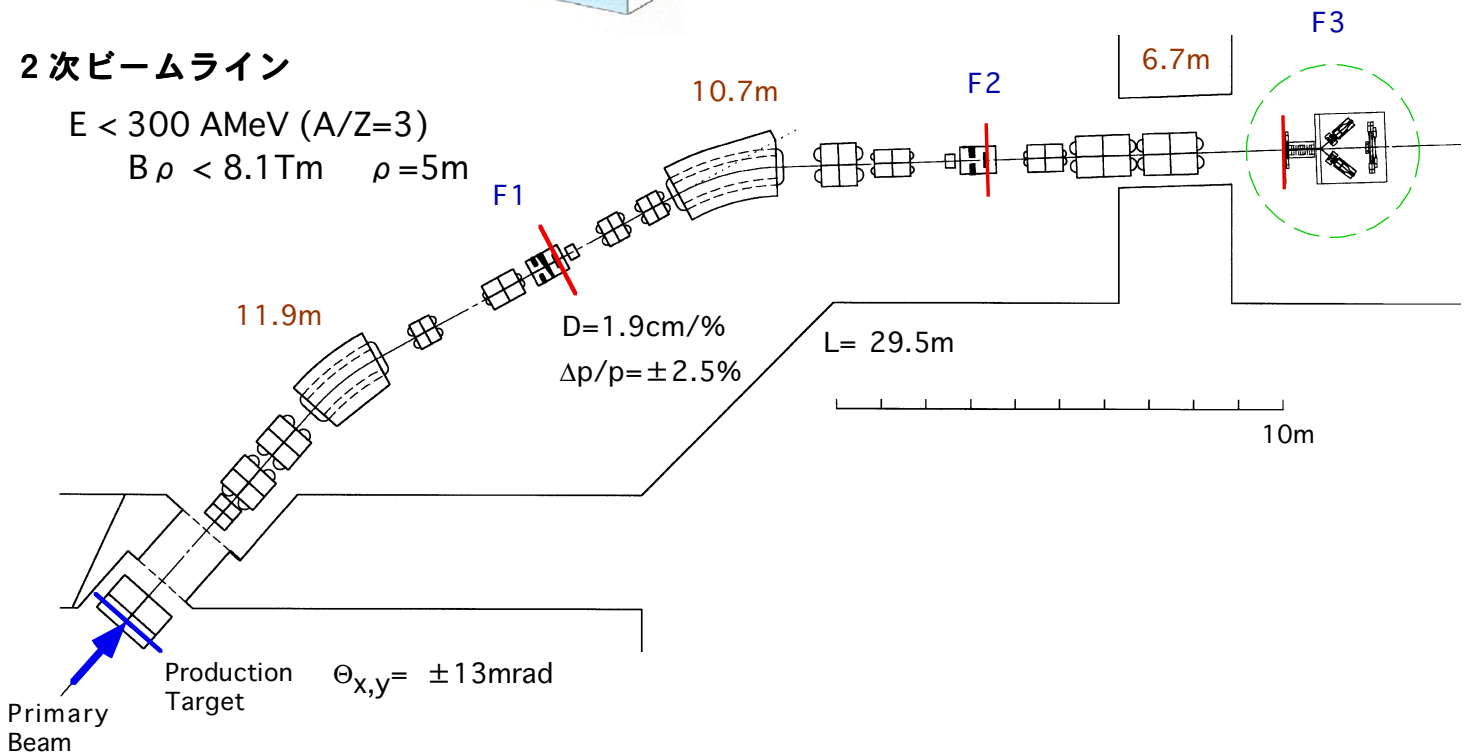
「3-1」 HIMAC加速器施設

RFQ (0.8 AMeV) + Alvarez (6 AMeV) + double synchrotron (800 AMeV)



2次ビームライン

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

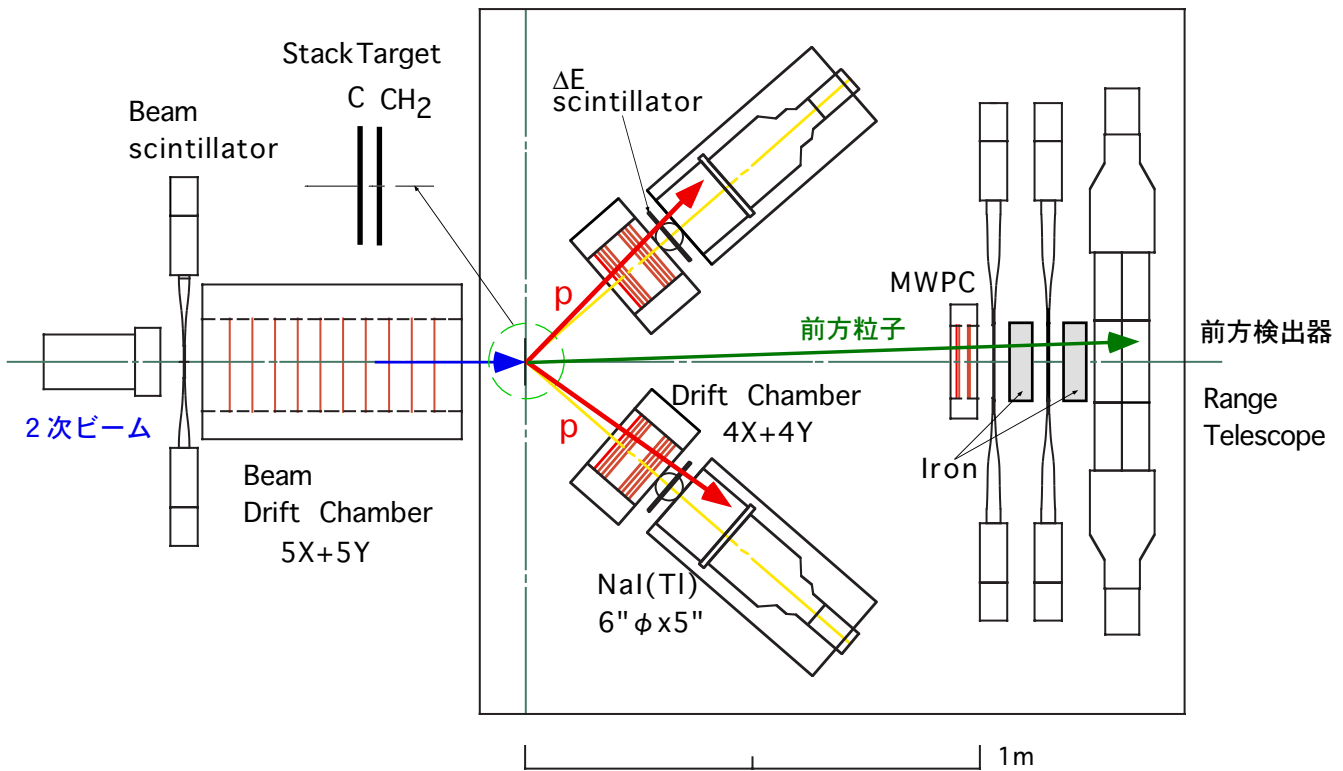


1次ビーム [AMeV]	^{12}C 400	^{12}C 350	^4He 230	^{12}C 290	^4He 230	^1H 230
強度 [/sec]	2×10^9	2×10^9	$< 2 \times 10^9$	2×10^9	1×10^6	1×10^6
生成標的 [g/cm ²]	Be9.4	Be14	Be3.7	Be7.4		
Degrader [g/cm ²]	Al4.7	Al8.0	Al0.95	Al13.5		
2次ビーム [AMeV]	^9C 255	^6He 255	^3He 208	^9Li 196		
$\Delta p/p$ [%]	± 2.5	± 2.5	± 2.5	± 2.5		
強度 [/spill]	3×10^4	1×10^5	5×10^5	4×10^4		

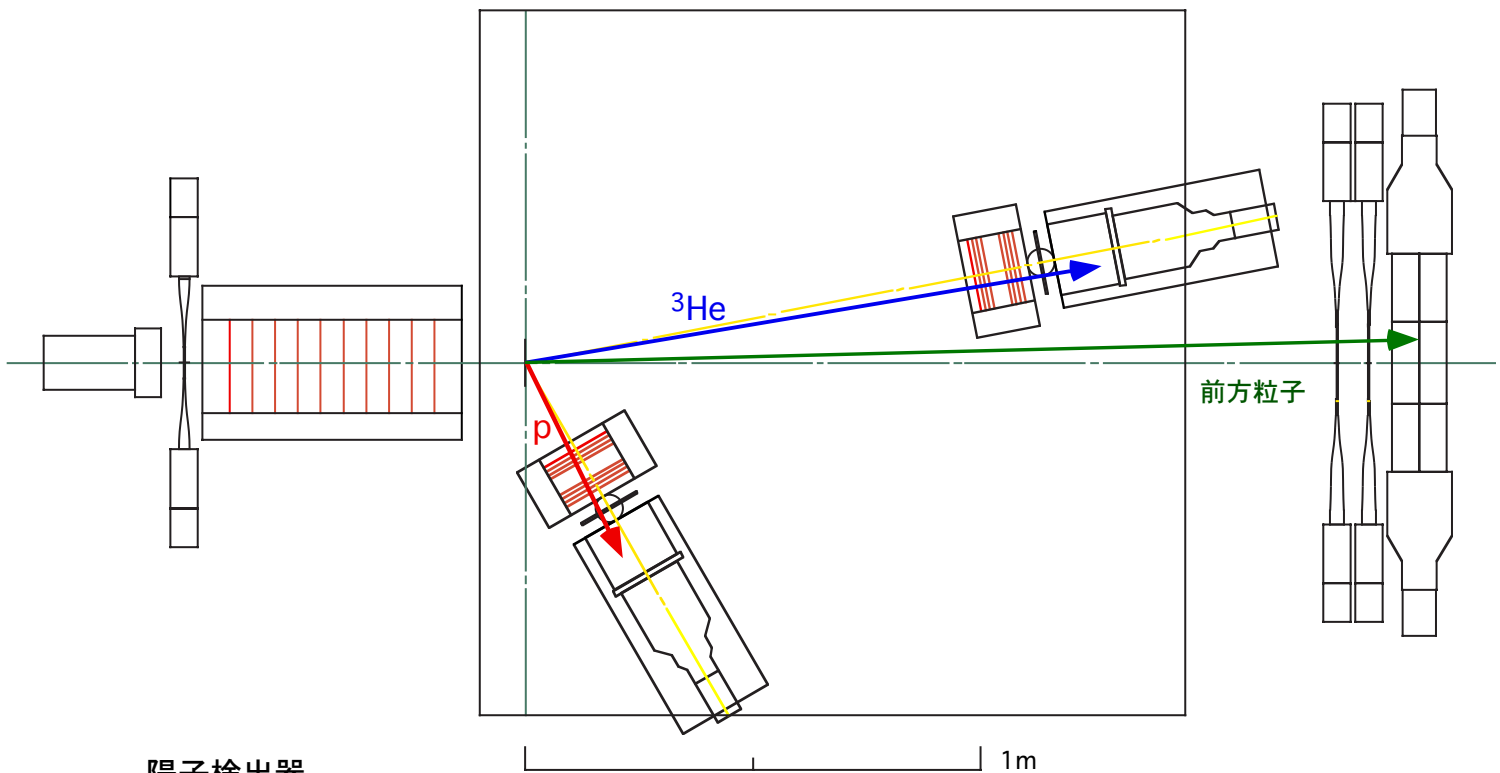
注：陽子過剰核側の粒子分離は約100AMeV（理研）領域よりはるかに良い

「3-2」 検出器系 @F3

●陽子knockout反応



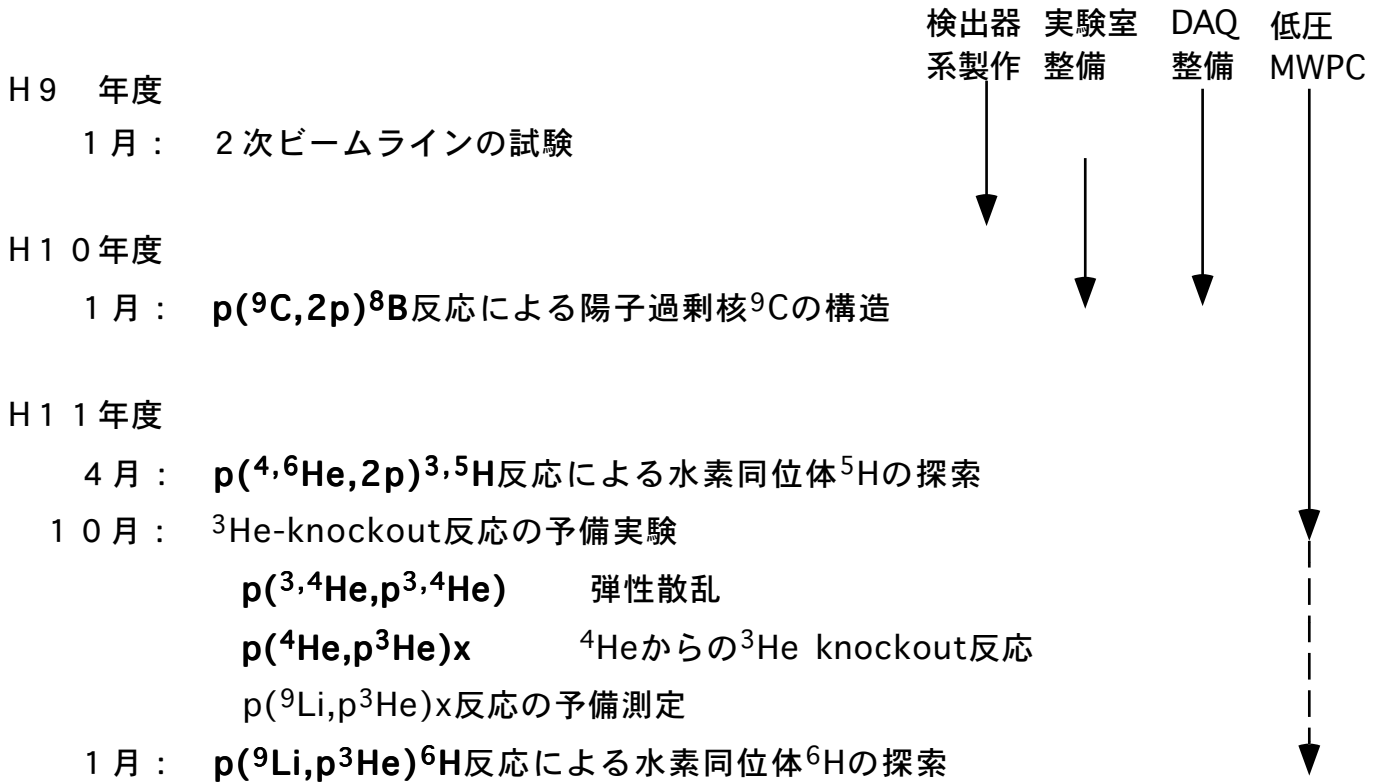
●クラスター(³He)knockout反応



陽子検出器

角度範囲 : $\pm 10^\circ$ (H,V) 立体角 : 約0.1sr
 $E_p < 210$ MeV

「4」研究経過



「5」結果

「5-1」 $p(^9\text{C}, 2p)^8\text{B}$ 反応による陽子過剰核 ^9C の構造

「5-2」 $p(^4, ^6\text{He}, 2p)^{3,5}\text{H}$ 反応による水素同位体 ^5H の探索

「5-3」 ^3He -knockout 反応の予備実験

$p(^3, ^4\text{He}, p^3, ^4\text{He})$ 弾性散乱

$p(^4\text{He}, p^3\text{He})x$ ^4He からの ^3He knockout 反応

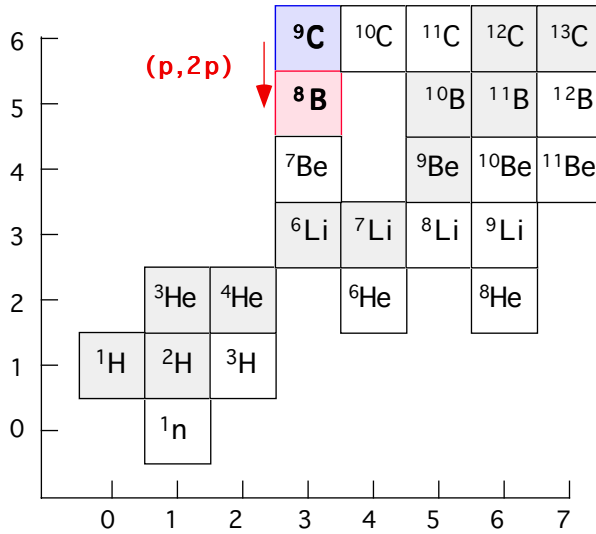
$p(^9\text{Li}, p^3\text{He})x$ 反応の予備測定

「5-4」 $p(^9\text{Li}, p^3\text{He})^6\text{H}$ 反応による水素同位体 ^6H の探索：解析中

「5-1」 $p(^9\text{C}, 2p)^8\text{B}$ 反応による陽子過剰核 ^9C の構造

[5-1-1] 目的

(1) 弱く束縛された valence proton ($\pi p_{3/2}$) を持つ陽子過剰核 ^9C の構造



注: ^8B には particle-stable な励起状態無

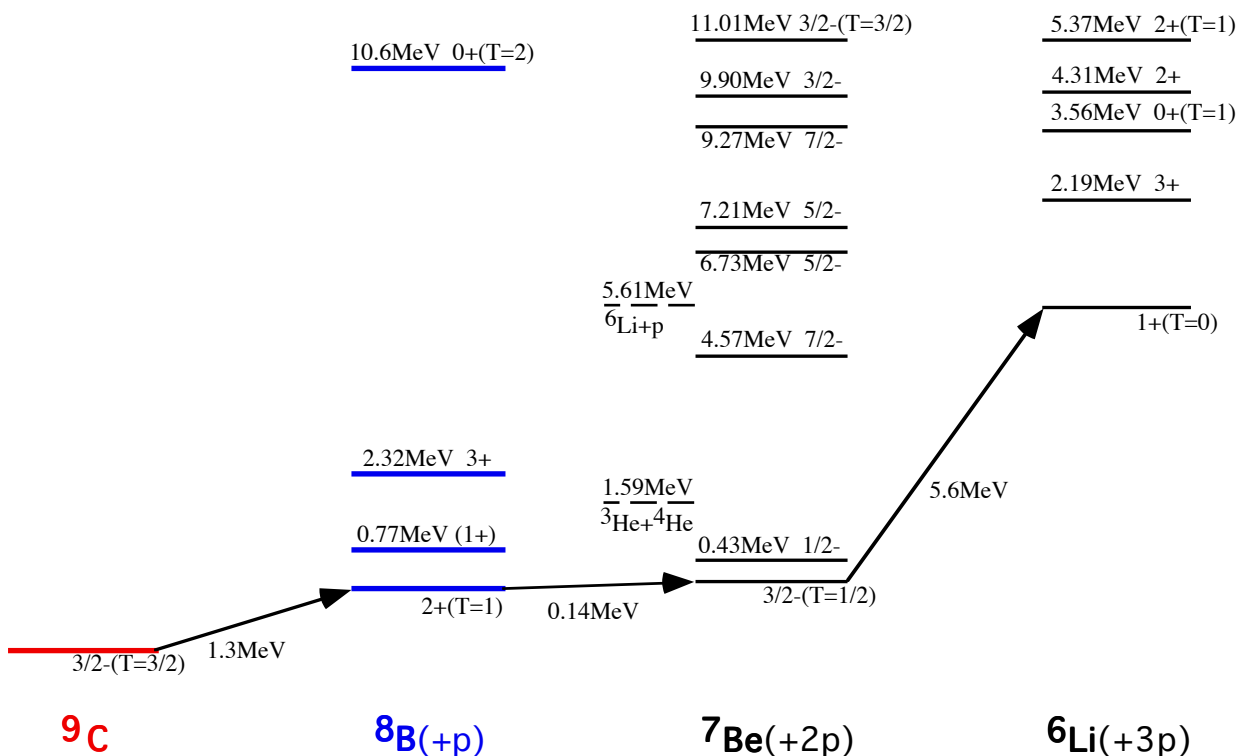
$S_p(^9\text{C}) = 1.30 \text{ MeV}$

$S_p(^8\text{B}) = 0.14 \text{ MeV}$

- $\pi p_{3/2}$ valence proton の運動量分布
 - ⇒ 空間波動関数の情報
- 遷移強度を shell model 計算と比較
 - ⇒ spectroscopic factor 等の情報
- $\pi s_{1/2}$ proton の knockout による deep hole state の観測?
 - 高い入射エネルギーを生かす

(2) 高エネルギー (255 A MeV) 2 次原子核ビームを用いた
逆運動学での陽子 knockout 反応の方法論の確立

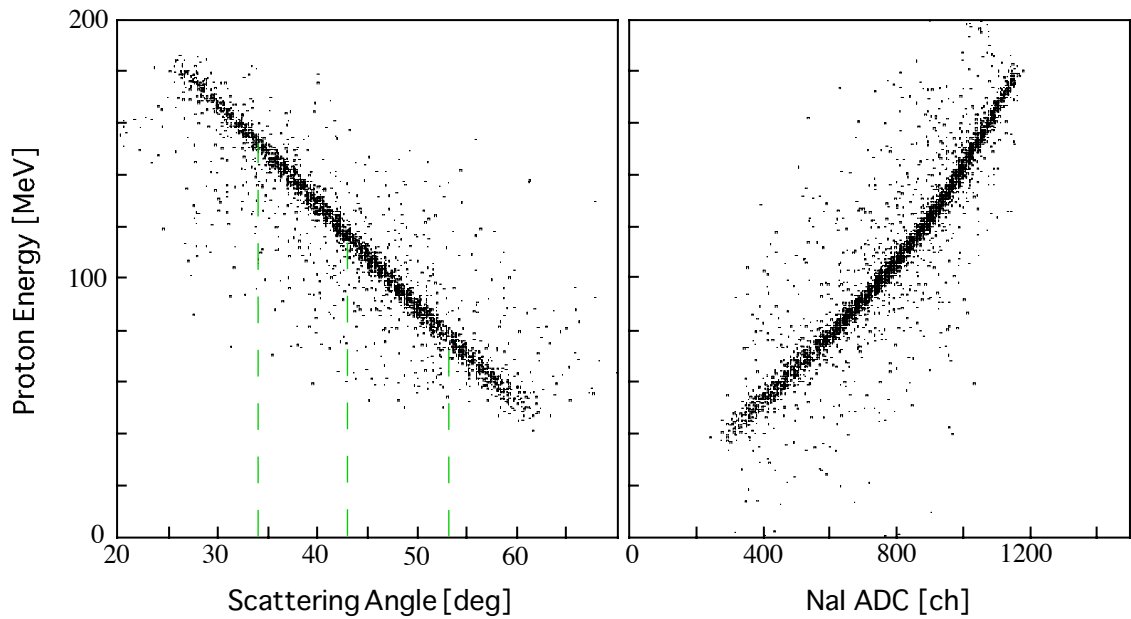
参考:



「3」 解析と結果

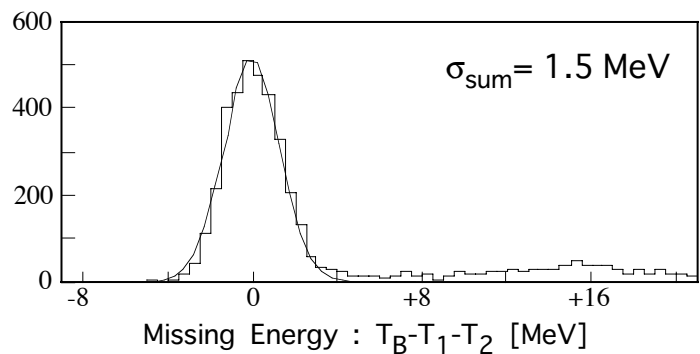
「3-1」 p-p散乱によるNaI(Tl)のエネルギー較正

p(p,2p)反応 : 230MeV 1次陽子ビーム + 0.2 g/cm² CH₂



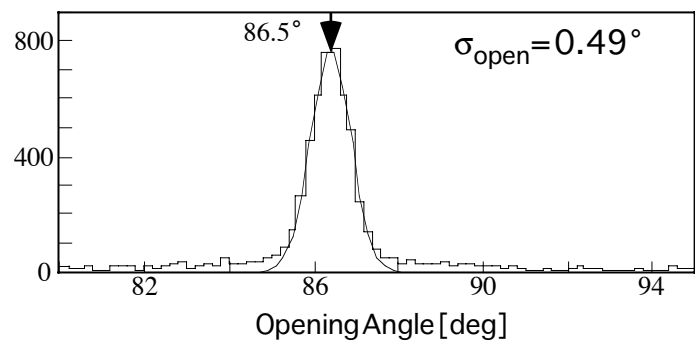
陽子エネルギー分解能 :

$$\sigma_p \sim 1.1 \text{ MeV @ } 120 \text{ MeV}$$



角度分解能 :

$$\sigma_{\theta} \sim 6 \text{ mrad}$$



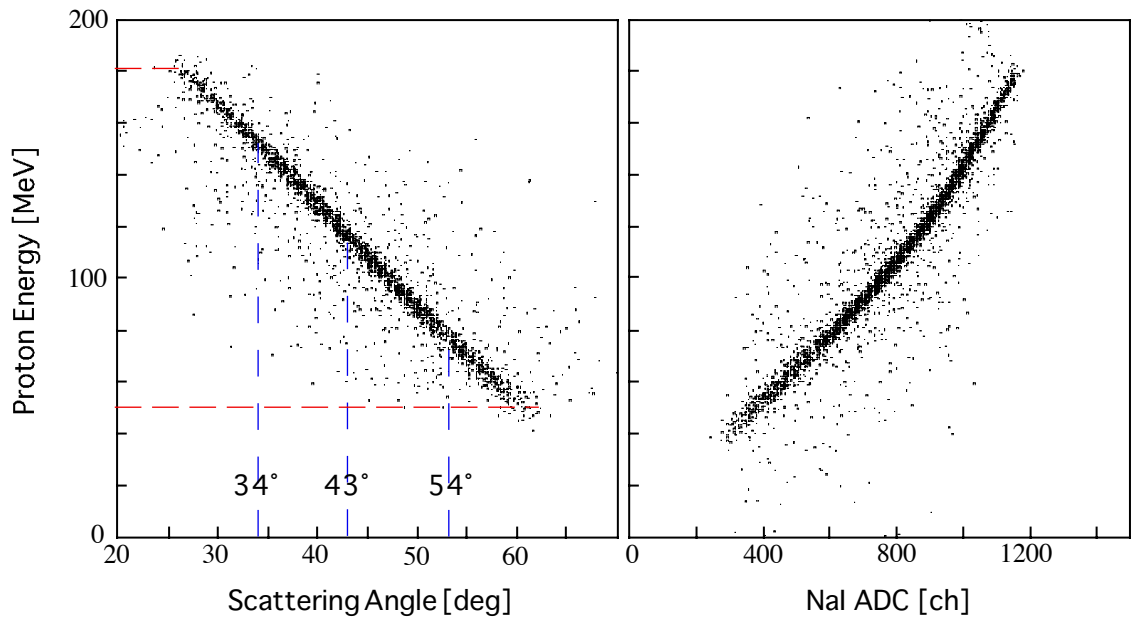
Drift Chamber : He 50% + C₂H₆ 50%

面当りの位置分解能 $\sim 100\mu\text{m}$ (rms)

[5-1-2] 陽子knockout反応の解析

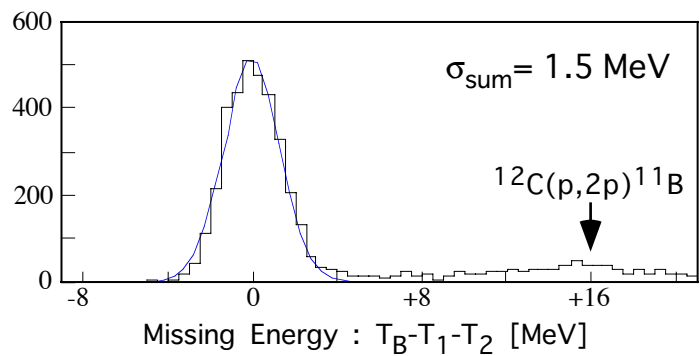
(1) p-p散乱によるNaI(Tl)のエネルギー較正

p(p,2p)反応 : 230MeV 1次陽子ビーム + 0.2 g/cm² CH₂



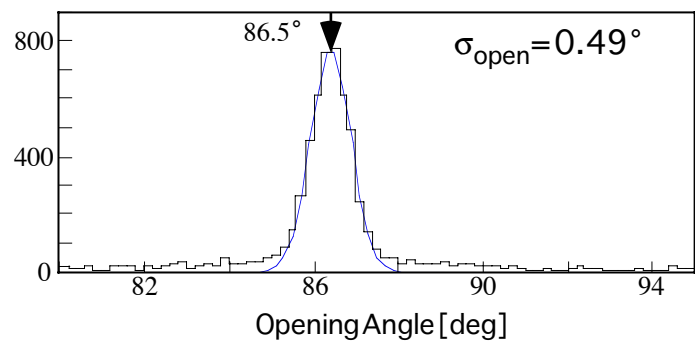
陽子エネルギー分解能 :

$$\sigma_p \sim 1.1 \text{ MeV @ } 120 \text{ MeV}$$



角度分解能 :

$$\sigma_{\theta} \sim 6 \text{ mrad}$$



Drift Chamber : He 50% + C₂H₆ 50%

面当りの位置分解能 $\sim 100 \mu\text{m}$ (rms)

(2) 2次ビームのエネルギー測定

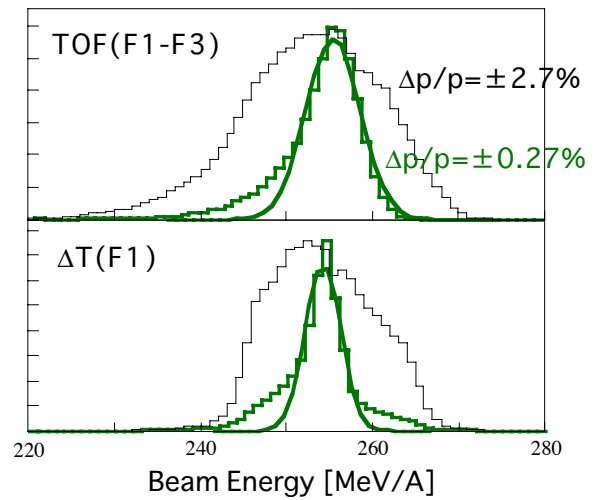
TOFによる方法：

TOF(F1-F3), L(F1-F3)=17.5m, $\sigma_T = 0.2\text{nsec}$
 $\rightarrow \sigma_{\text{beam}} = 1.5 \text{ AMeV}$

ただし、F1の計数率 > 1MHzの為不安定

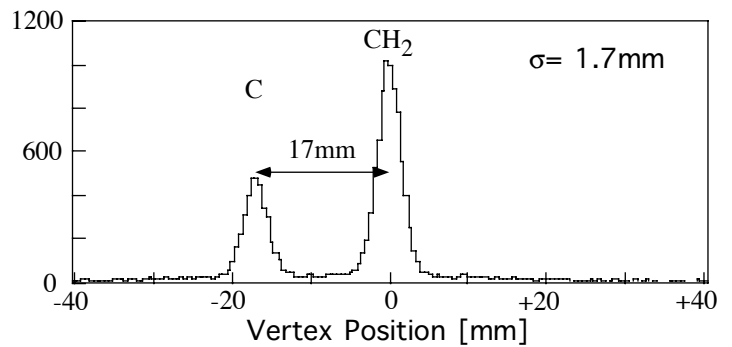
F1の位置を測定する方法：

$\Delta T(F1) \rightarrow X(F1) \rightarrow \sigma_{\text{beam}} = 1.7 \text{ AMeV}$

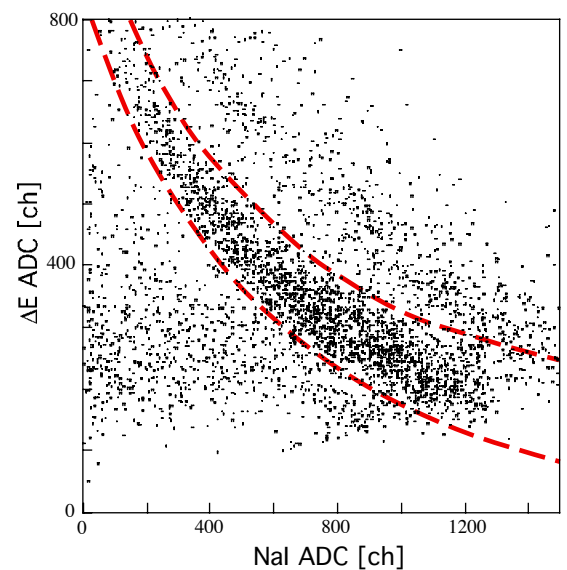


(3) Stack TargetのCH₂ / C 選択

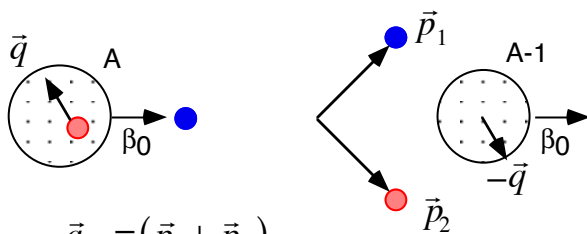
2個の陽子のvertex cut



(4) ΔE-Eによる陽子選択 + NaI中での核反応事象の除去



(5) 2個の陽子のエネルギー／運動量からEs, qの導出



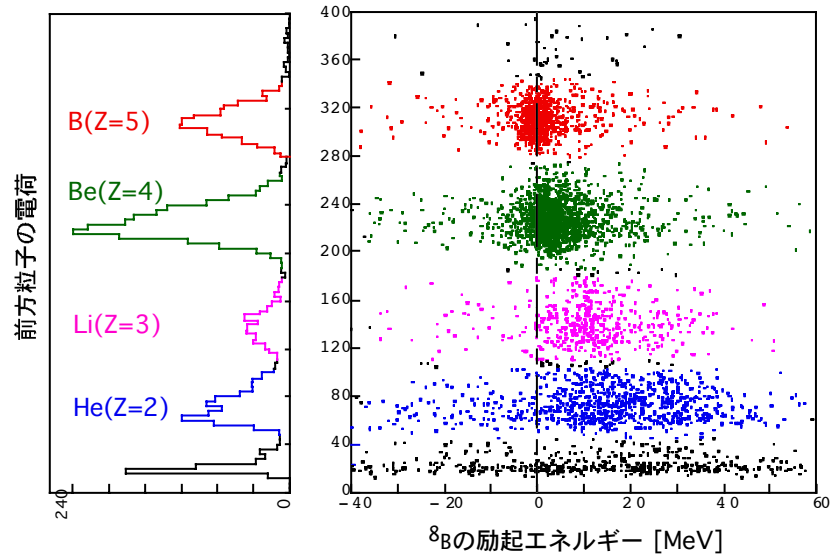
$$\vec{q}_\perp = (\vec{p}_1 + \vec{p}_2)_\perp$$

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

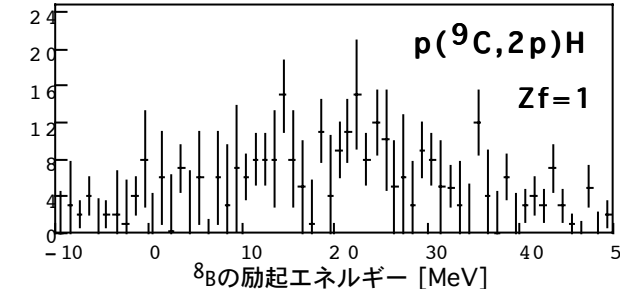
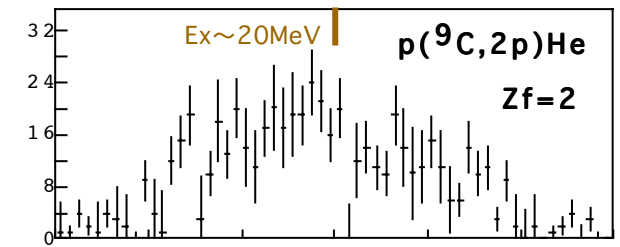
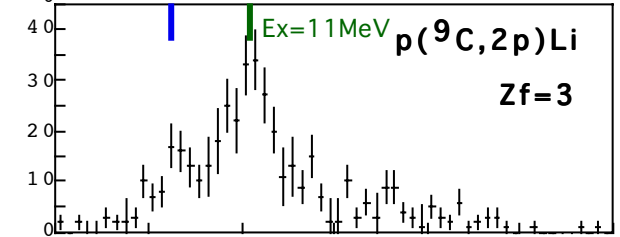
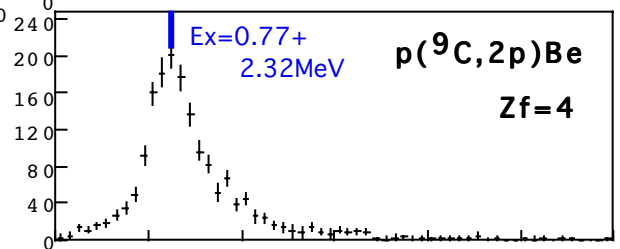
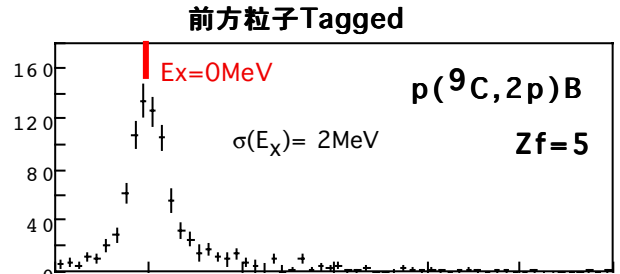
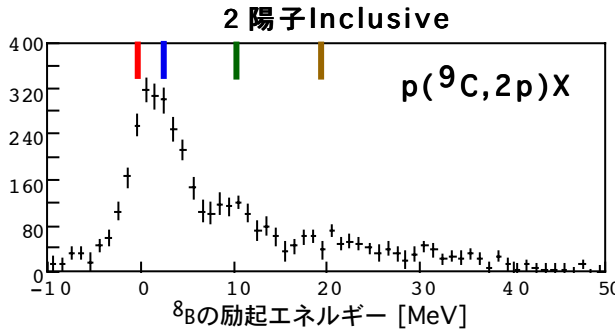
$$E_s = T_0 - \gamma(T_1 + T_2) - 2(\gamma - 1)m_p + \beta\gamma(\vec{p}_1 + \vec{p}_2)_\parallel - \frac{q^2}{2M_{A-1}}$$

[5-1-3] $p(^9\text{C}, 2p)$ 反応の分離エネルギー分布

●前方粒子との相関



●分離エネルギー分布



~20MeV deep hole state?

●遷移強度比

計算 実験
1.09 0.28±0.03

10.6MeV 0+(T=2)

5.61MeV $^6\text{Li}+p+p$

1.92 1.86±0.20

2.32MeV 3+

1.59MeV $^3\text{He}+^4\text{He}+p$

1.0 1.0±0.07

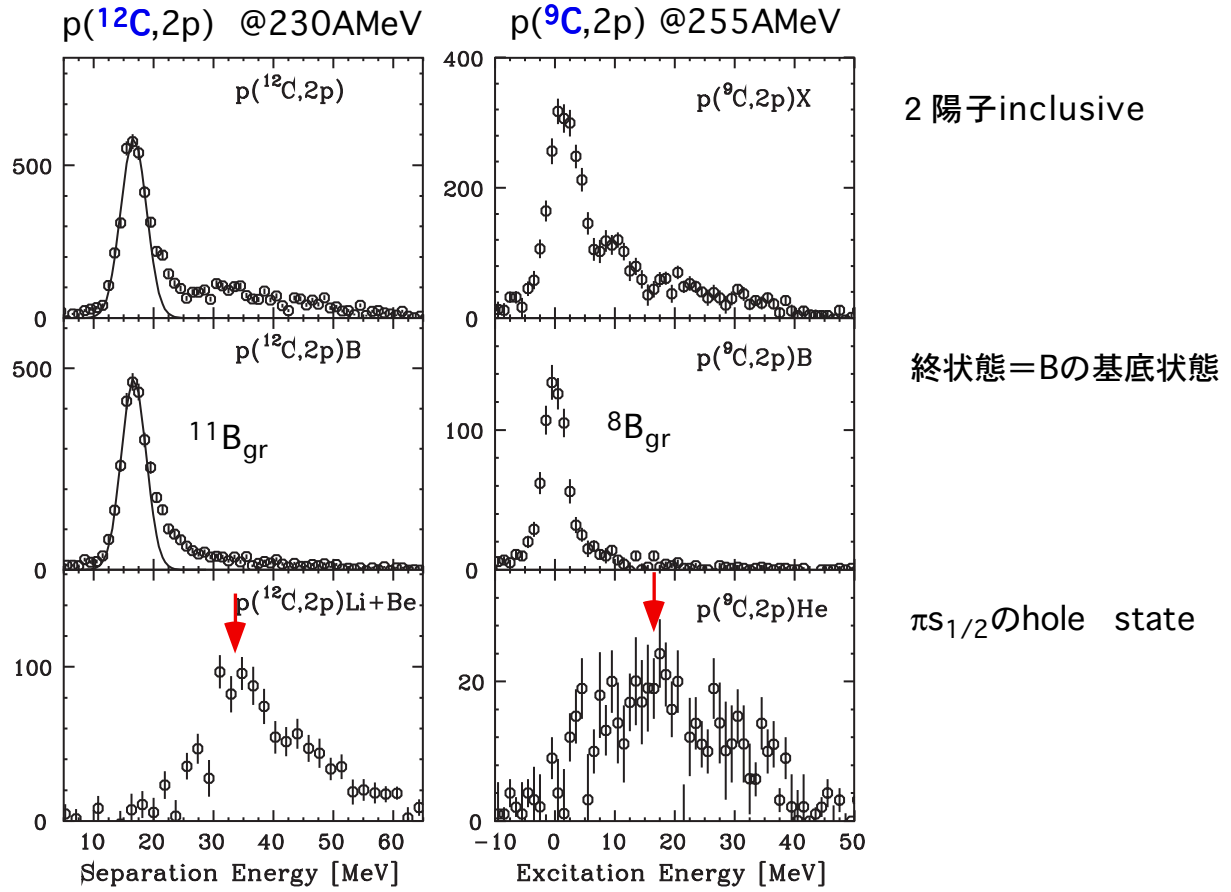
0.77MeV (1+)

0.14MeV $^7\text{Be}+p$

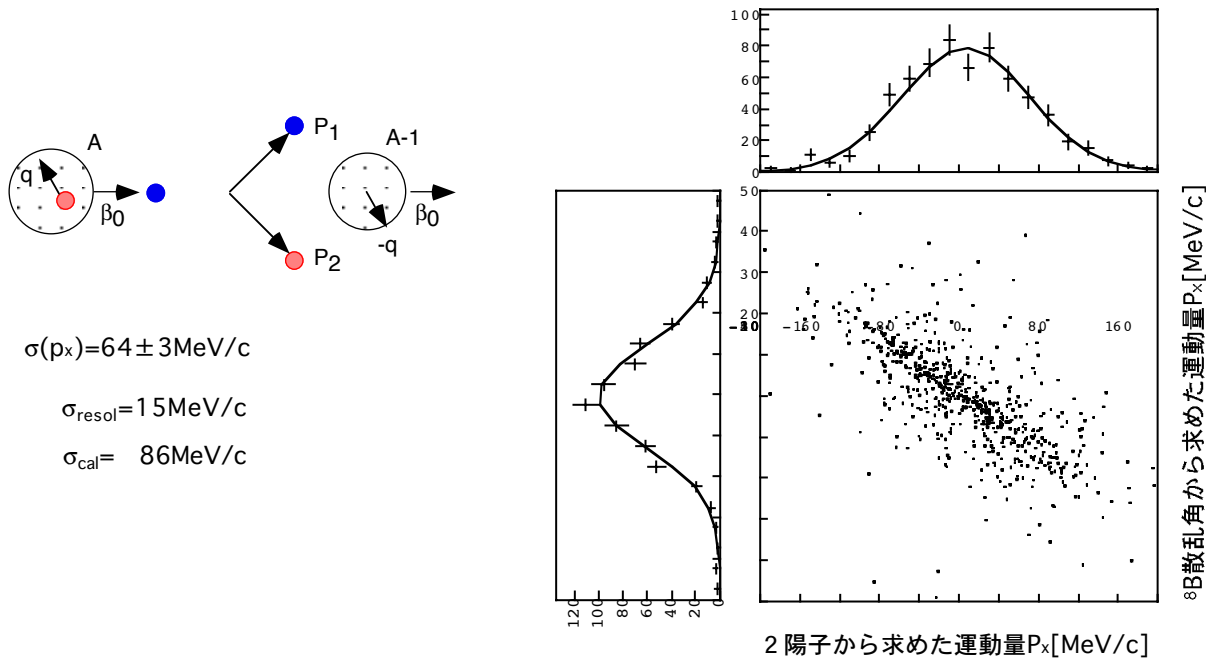
2+(T=1)

^8B

[5-1-4] Deep Hole State



[5-1-5] ^9C のvalence proton運動量分布



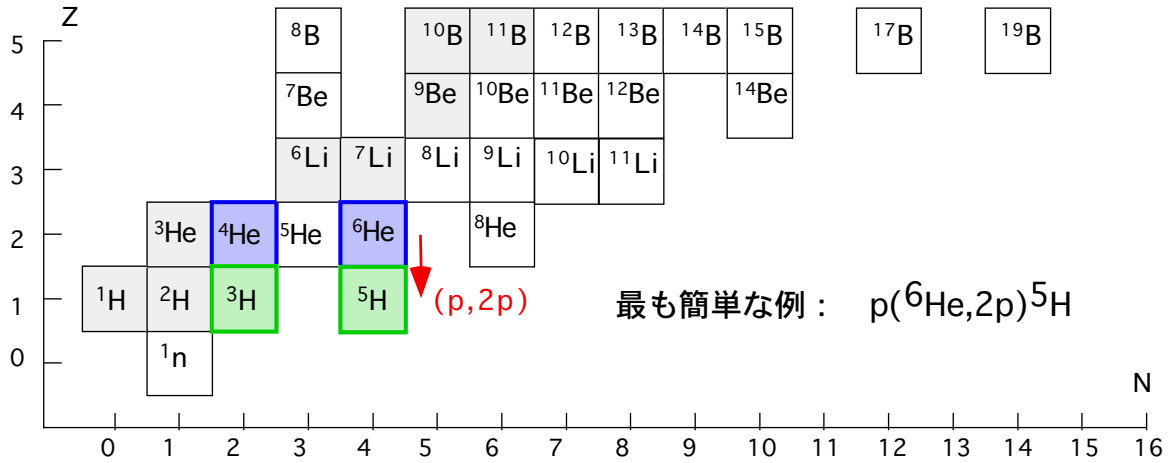
分離エネルギー1.3MeVが合う様にした波動関数の（全空間での）フーリエ変換よりも巾が狭い。

「5-2」 $p(^4,^6\text{He},2p)^3,^5\text{H}$ 反応による水素同位体 ^5H の探索

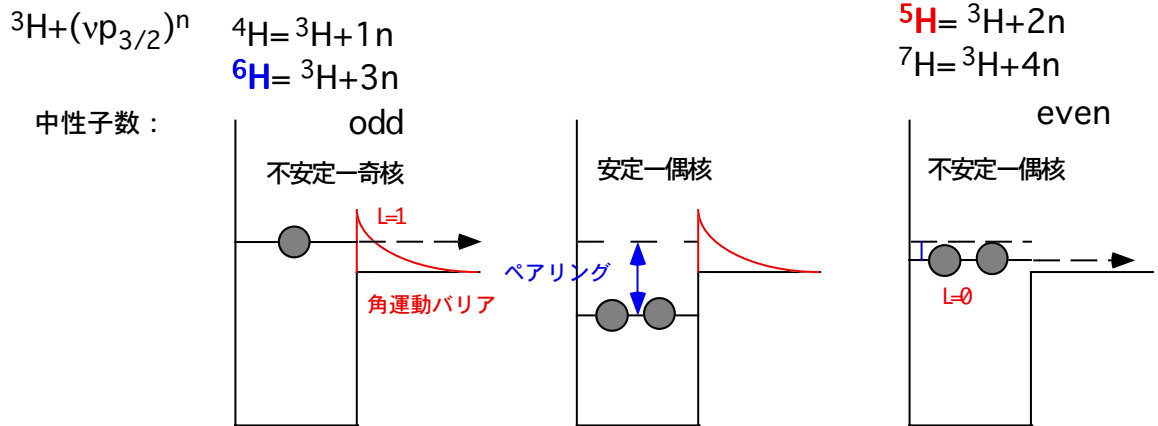
[5-2-1] 目的・動機

(1) Drip Line上の中性子過剰核からの(p,2p)陽子knockout反応

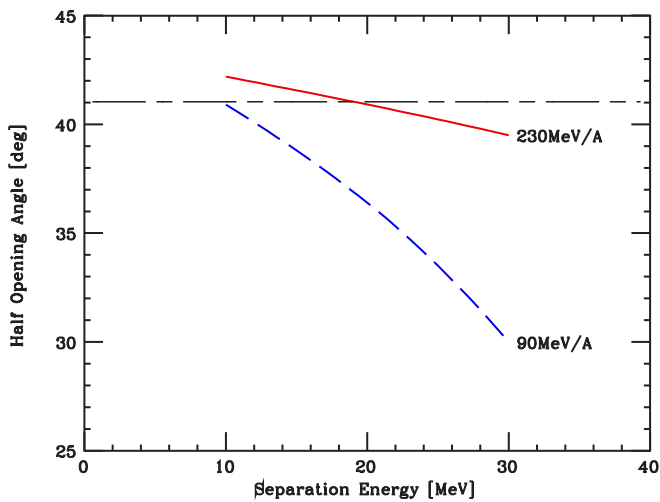
→ Drip Line外側のExoticな共鳴状態



(2) 水素同位体 (共鳴状態) の安定性 : Pairingと角運動量バリアの競合?



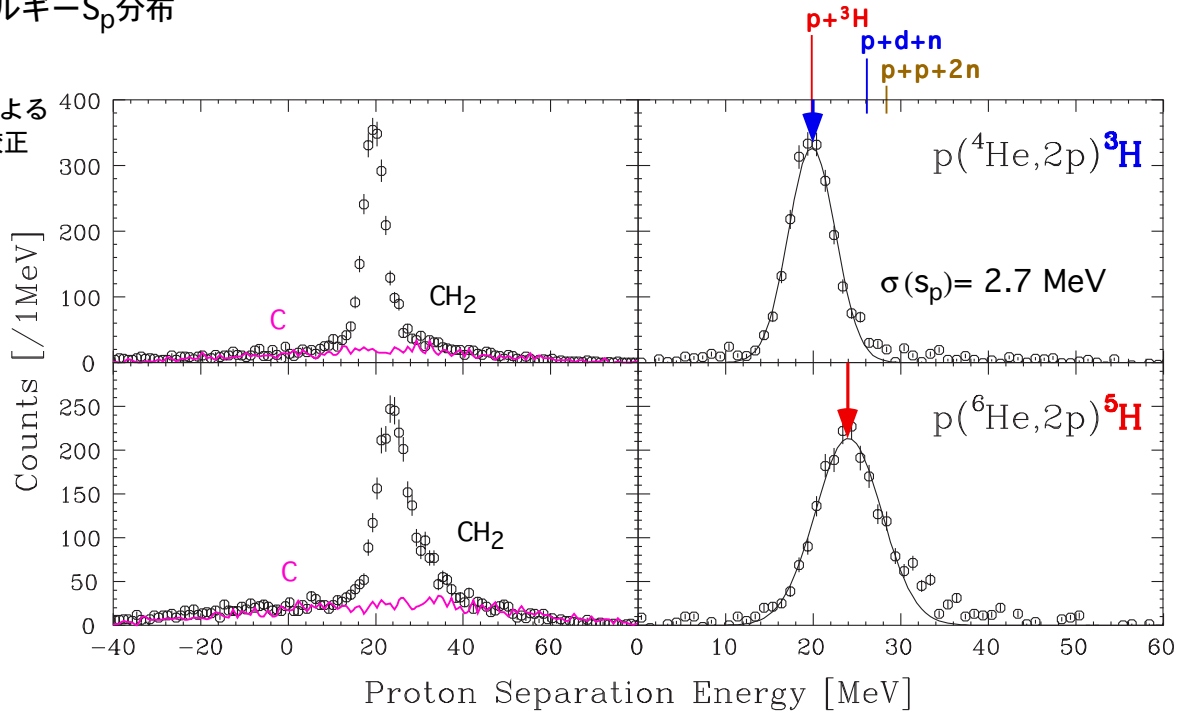
(3) 高い入射エネルギーでの角度acceptanceの増加



[5-2-2] $p(^{4,6}\text{He}, 2p)$ 反応の分離エネルギー分布

● 陽子分離エネルギー S_p 分布

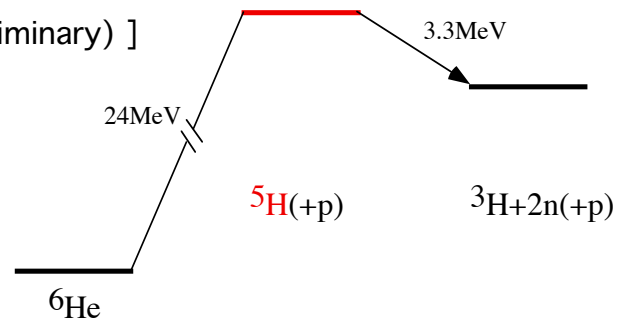
^4He 1次ビームによる
分離エネルギー較正



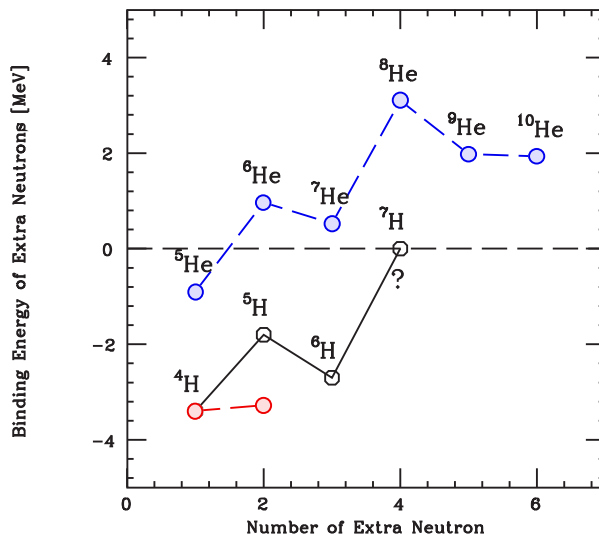
● この構造が ^5H によるのであれば、

$$S_p = 24.0 \pm 0.5 \text{ MeV} \Leftrightarrow E_r(^3\text{H}+2n) = 3.3 \pm 0.5 \text{ MeV}$$

$$\sigma_{\text{obs}} = 3.8 \text{ MeV} \Leftrightarrow [\Gamma_r = 6.3 \text{ MeV (preliminary)}]$$



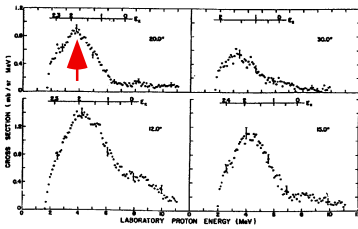
● 水素/He同位体の系統性



[5-2-3] 過去のデータとの比較

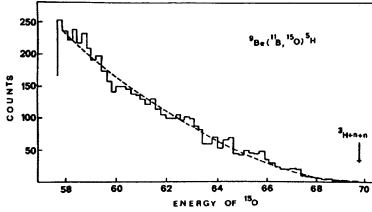
P. Young

$t(t,p)^5\text{H}$ $E_r=1.8\text{MeV}$



A. Belozyorov

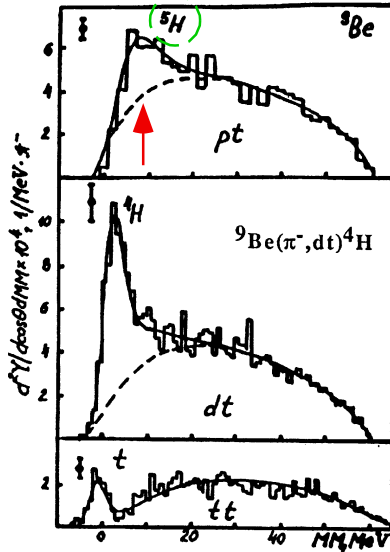
$^9\text{Be}(^{11}\text{B},^{15}\text{O})^5\text{H}$



A. Amelin

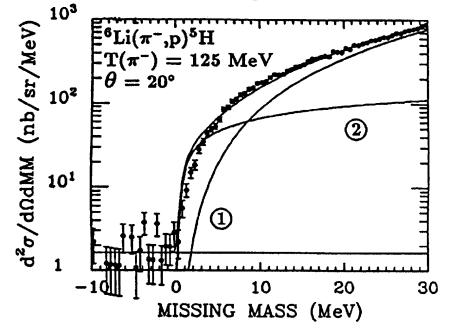
$E_r=3\text{MeV}$

$^9\text{Be}(\pi^-,pt)^5\text{H}$ $\Gamma=5\text{MeV?}$

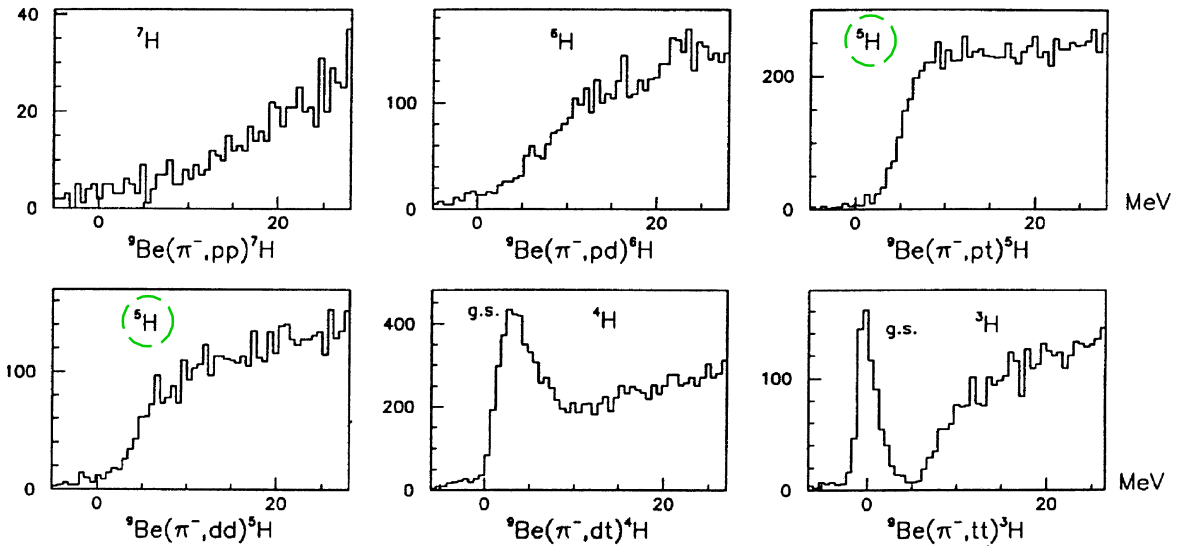


K. Seth

$^6\text{Li}(\pi^-,p)^5\text{H}$

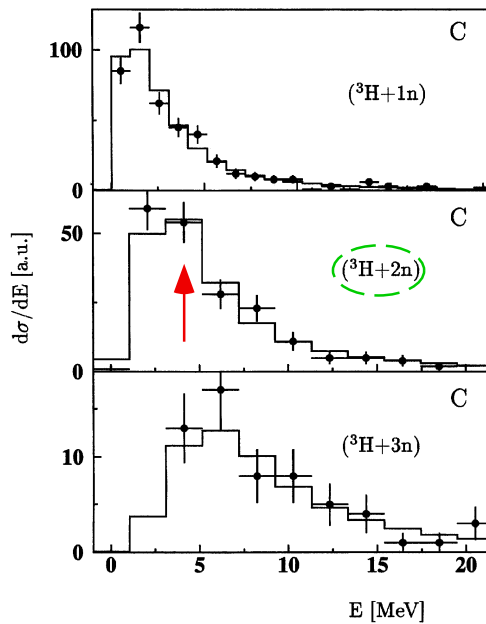


K. Seth



B. Eberlein

$^8\text{He}+\text{C} \rightarrow ^3\text{H}+2\text{n}+\text{x}$

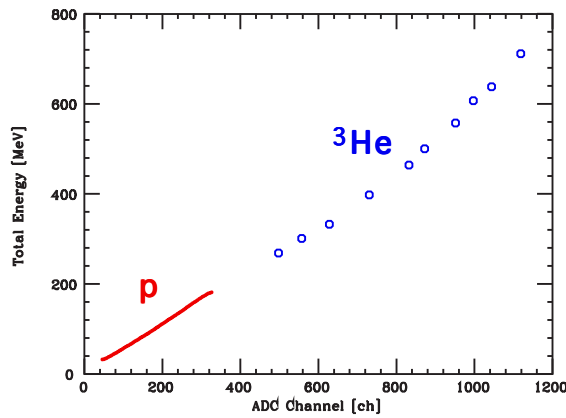


過去のデータは
あまり一致していない。

「5-3」³He-Knockout反応の予備実験

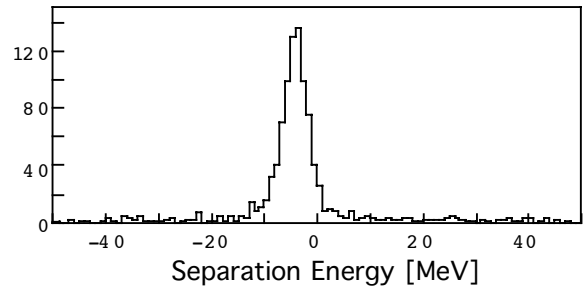
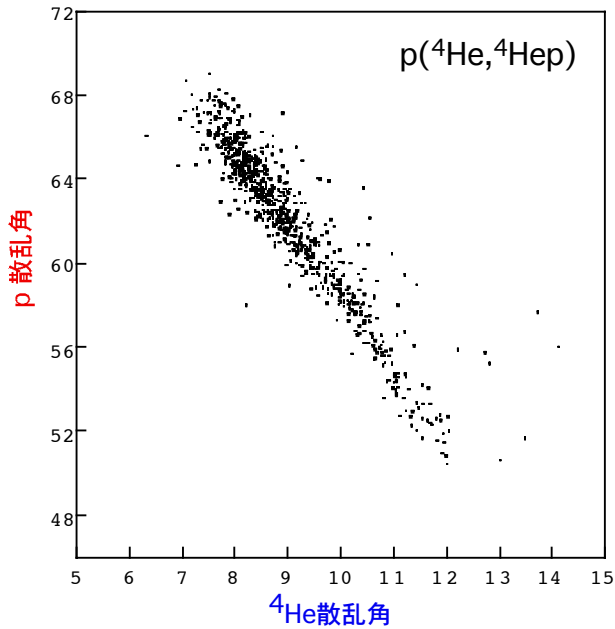
[5-3-1] 陽子、³Heに対するNaI(Tl)の応答関数

230MeV陽子ビームによるp(p,2p)散乱 : $E(p) = 40 - 180 \text{ MeV}$ を用いたエネルギー較正
 2次³He ビーム : $E(^3\text{He}) = 90 - 242 \text{ AMeV}$

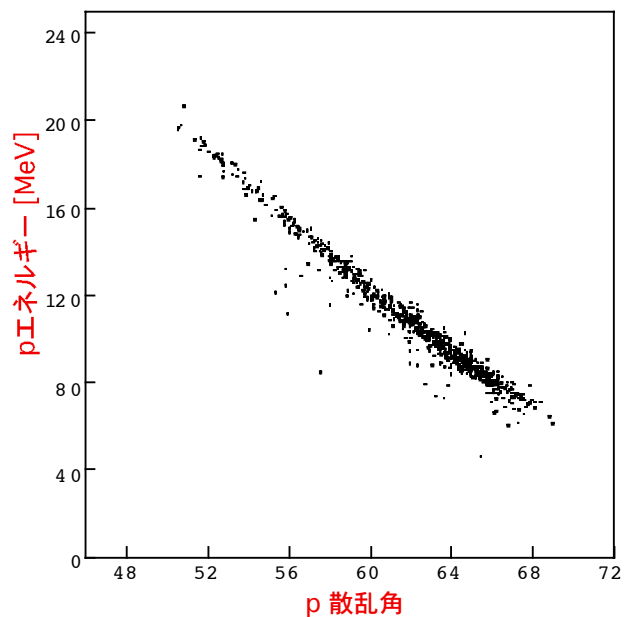
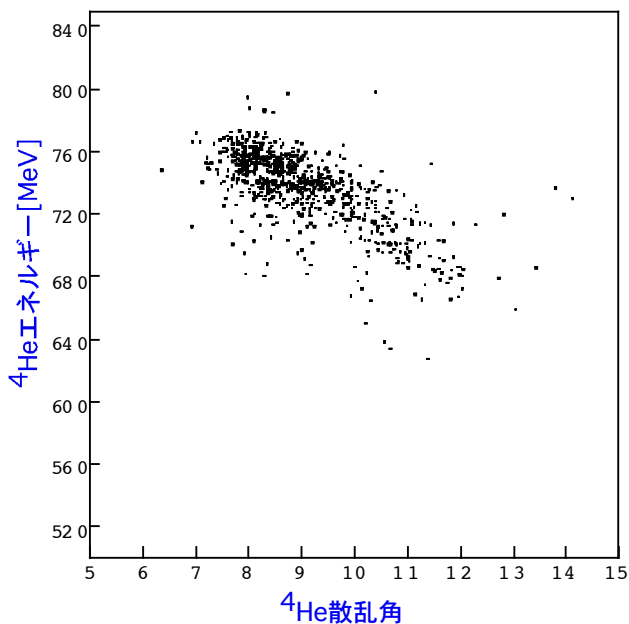


ほぼ全エネルギーでscaleする

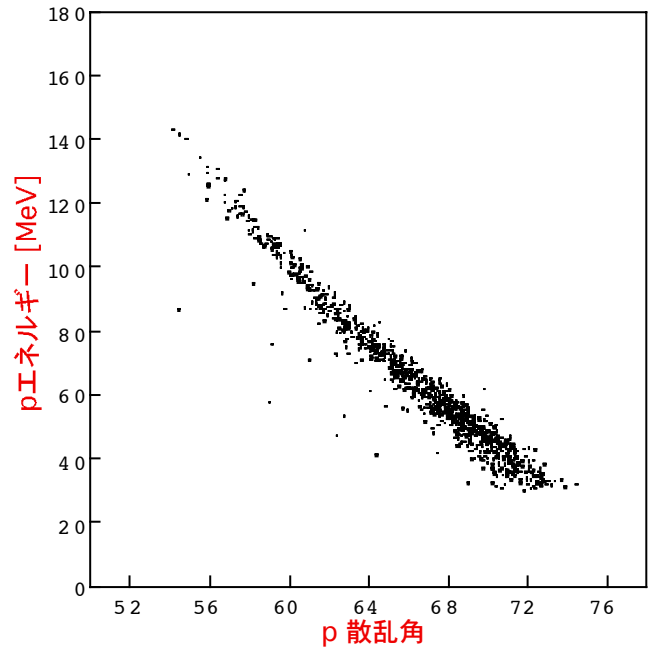
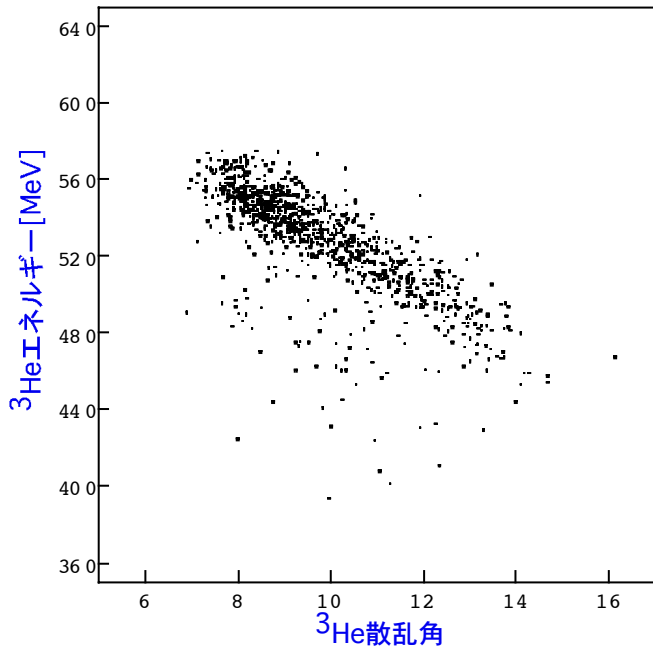
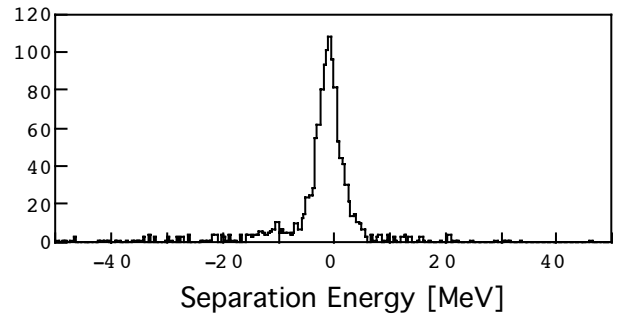
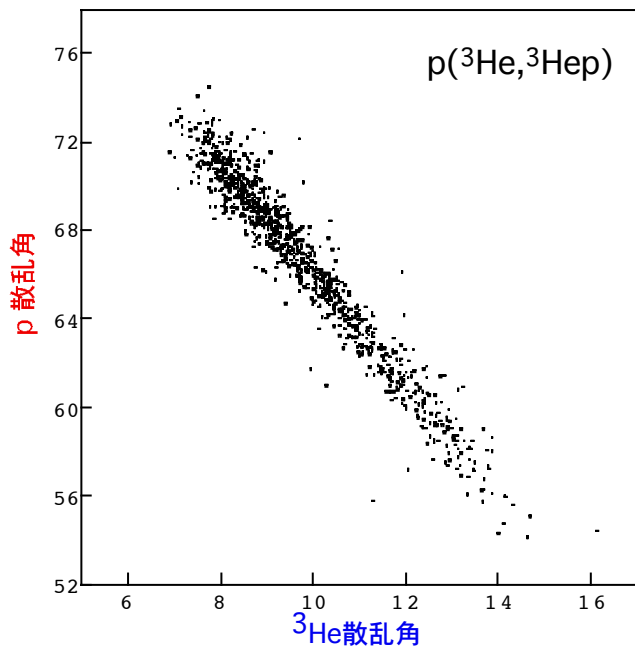
[5-3-2] 逆運動学での⁴He-p弾性散乱 @230 AMeV



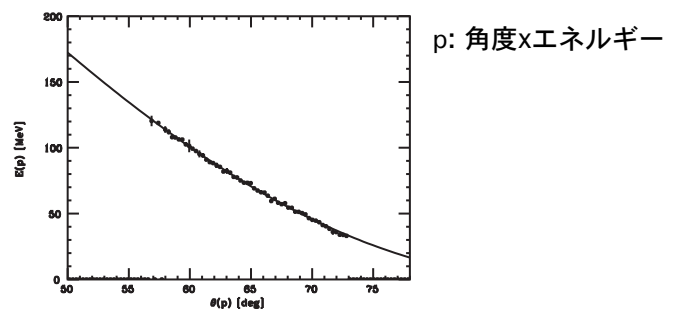
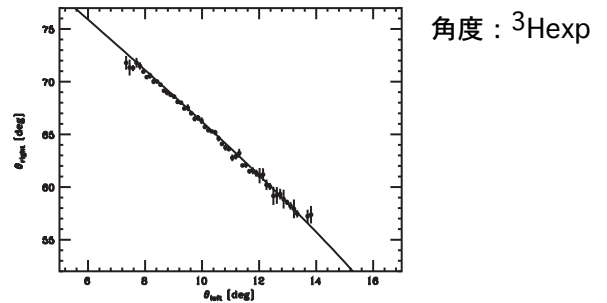
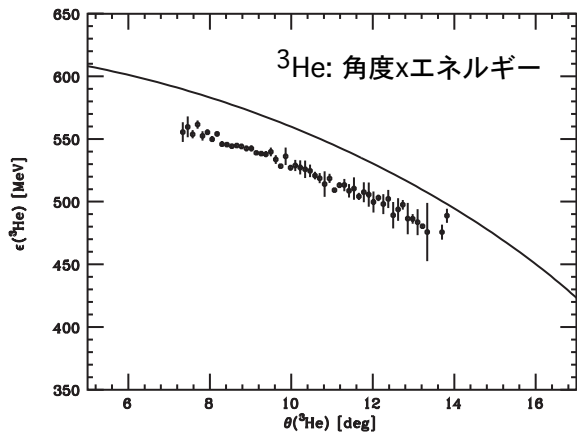
Offsetの問題はあるが弾性散乱を分離



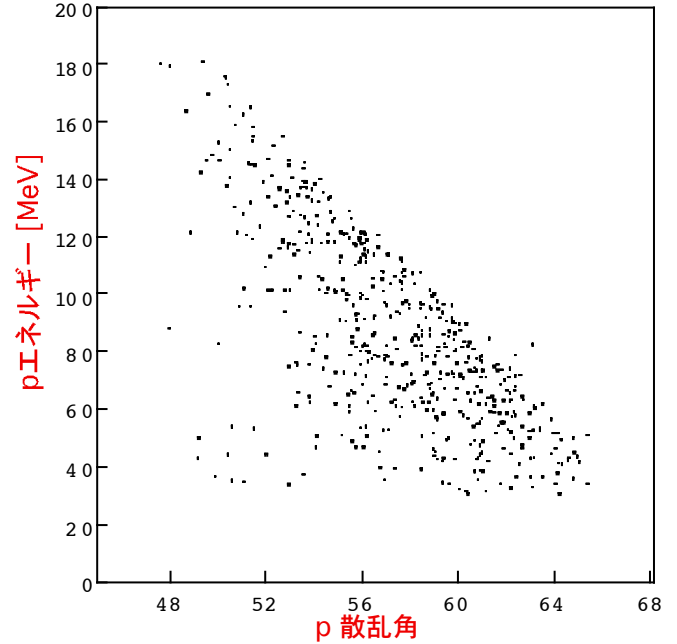
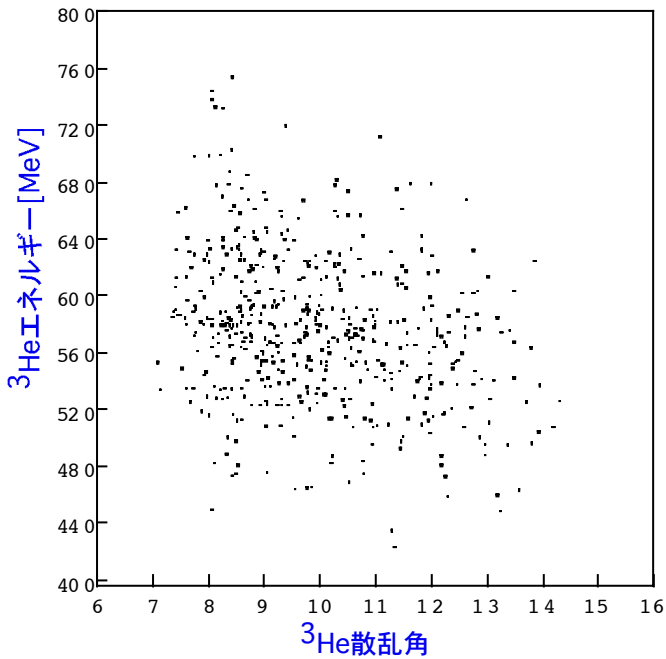
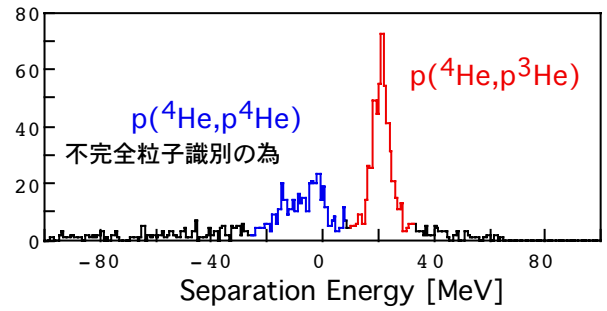
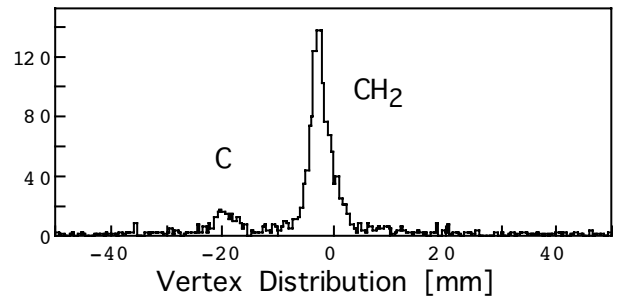
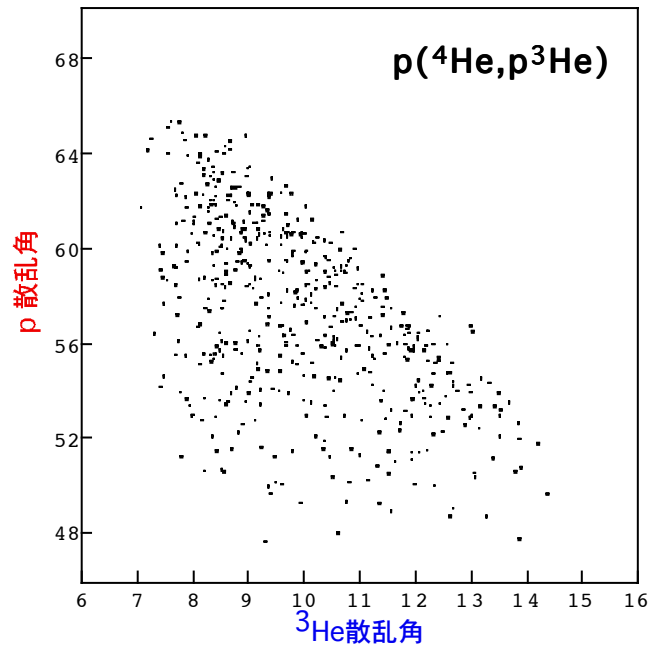
[5-3-3] 逆運動学での ^3He -p弾性散乱 2次 ^3He ビーム@208 AMeV



● ^3He -p弾性散乱は運動学的に合っているが、まだ ^3He のエネルギー較正に問題有り



[5-3-4] 1次 ^4He ビームからの ^3He -knockout反応: $p(^4\text{He},p^3\text{He})x$ @230 AMeV

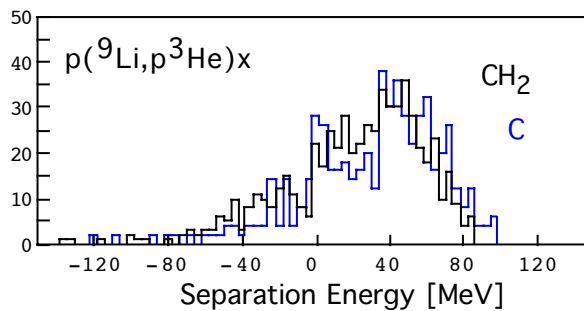
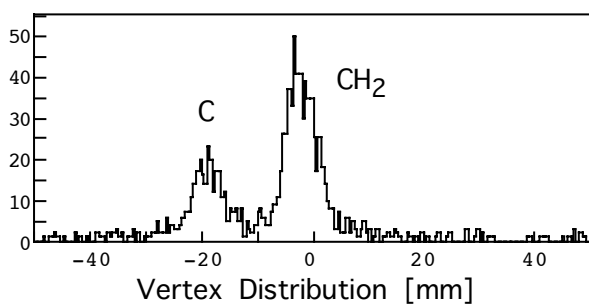


逆運動学での ^4He ビームからの ^3He knockoutが観測できた。

予備実験に使った ΔE 検出器の厚さ (5mm) の為、 ^3He - ^4He 分離が不完全だった。

2度目の実験では10mm厚を使用。

[5-3-5] $p(^9\text{Li}, p^3\text{He})x$ @250 AMeV 予備実験



予備実験の結果：

- ΔE 検出器の厚さ（5mm）の為、 ^3He - ^4He 分離が不完全
- CH_2 - C で有為な差は得られなかった
- ^9Li 入射エネルギー250AMeVでは、 ^3He のエネルギーが高すぎ、 NaI(Tl) を部分的に突き抜けている。

2000年1月の実験では、改良点として

- (1) 入射エネルギーを 196AMeVに下げた \Rightarrow ^3He は NaI(Tl) 中で止まる
- (2) ΔE 検出器の厚さを10mmに増やした \Rightarrow ^3He - ^4He 分離可

「7」現状と今後の予定

(1) 陽子過剰核 ${}^9\text{C}$ からの(p,2p)反応による弱束縛核の構造

中性子過剰核 ${}^6\text{He}$ からの(p,2p)反応でexoticな共鳴状態 ${}^5\text{H}$ の探索
という初期の目的は一応達成できた。

(2) ${}^3\text{He}$ -knockout反応の予備実験を行い、

$p({}^3,{}^4\text{He},p{}^3,{}^4\text{He})$ 弾性散乱 が観測できた
 $p({}^4\text{He},p{}^3\text{He})$ ${}^3\text{He}$ -knockout反応

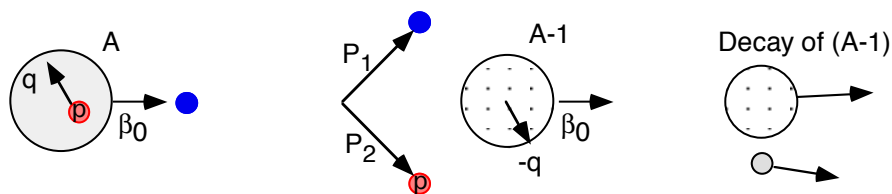
$p({}^9\text{Li},p{}^3\text{He}){}^6\text{H}$ 反応に関して色々の問題点を改良し、1月に再測定を行った。

(3) 逆運動学でのKnockout反応の長所である残留核の崩壊モード測定に関して

現在 Z (原子番号) のみ識別可で、質量数はわからない

${}^5,{}^6\text{H}$ 測定でS/Nを上げる為に必要な ${}^5,{}^6\text{H} \Rightarrow {}^3\text{H} + x\text{n}$ での ${}^3\text{H}$ 識別には成功していない

(250A MeVの ${}^3\text{H}$ のrangeは鉄20cm!)



(4) 前方magnetic Spectrometerを準備中