

# 非弾性共鳴散乱 $^{12}\text{C} (^{12}\text{C}, ^{12}\text{C}[\text{O}_2^+]) ^{12}\text{C}[\text{O}_2^+]$ による $\alpha$ 凝縮状態探索

荒川 結  
延與 紫世  
金剛 亮太

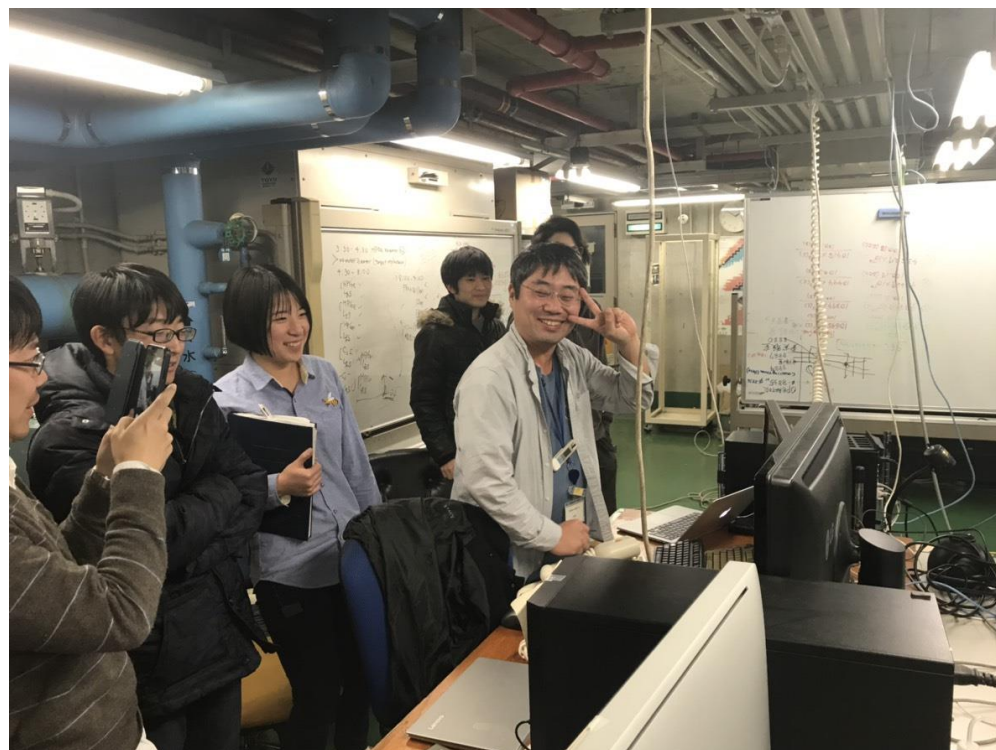
坂梨 公亮  
高木 周  
土方 佑斗

松本 凜子  
三神 拓哉  
宮里 慶子



# 目次

1. 導入
  - 実験の背景と原理
2. 実験装置
  - ビームライン
  - 標的
  - 検出器
3. 解析と結果
4. 考察と結論
5. まとめ



# 1. 導入

- 背景
- 原理

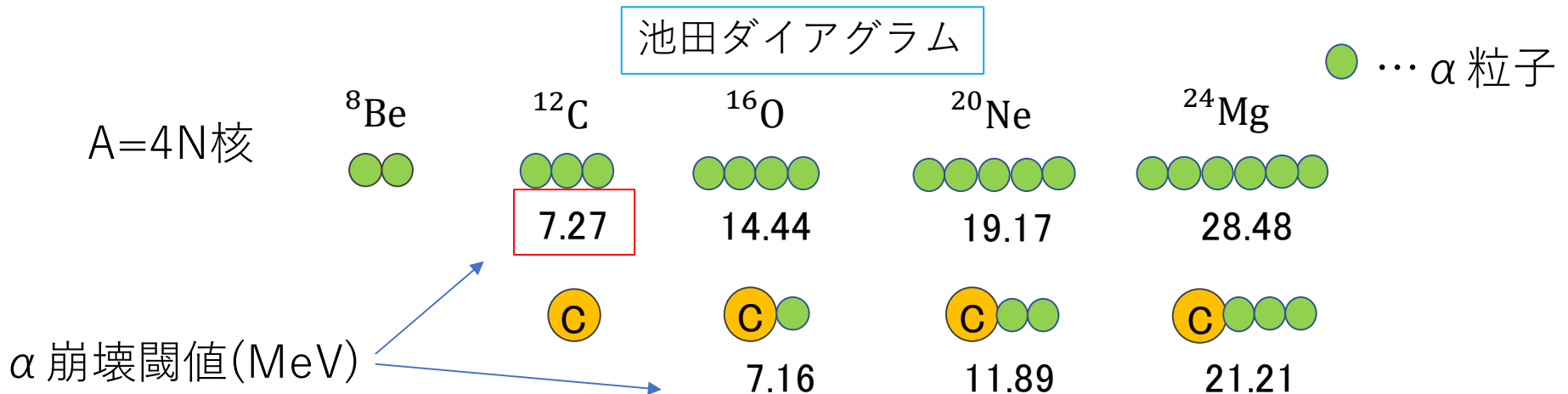
# 背景 $\alpha$ クラスタ構造

- ・ 殻模型

平均場ポテンシャル中で核子が一粒子運動をしているという描像

- ・  $\alpha$  クラスタモデル

原子核が複数の  $\alpha$  粒子からなるクラスター状態であるという描像



$^{12}\text{C}(0_2^+)$  ( $E_x = 7.65$  MeV) は、殻模型で説明できない状態

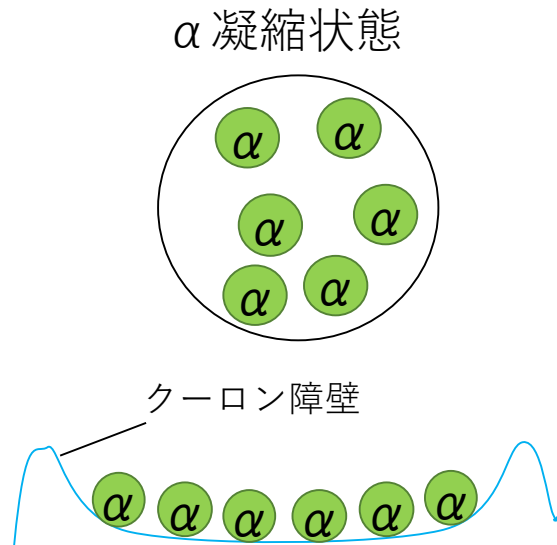
→ 閾値近傍にある  $3\alpha$  クラスタ状態

→  $\alpha$  凝縮状態と指摘

# 背景 原子核の $\alpha$ 凝縮状態

○全ての $\alpha$ 粒子が最低エネルギー状態（0s軌道）に入っている  
： $\alpha$ 凝縮状態

○通常の原子核より半径が大きく、希薄ガスのような低密度状態



原子核の新しい存在形態

- $\alpha$ 凝縮状態は ${}^8\text{Be}$ ,  ${}^{12}\text{C}$ では確認されているが、  
重い原子核については存在が確立されていない。  
→ $\alpha$ 凝縮状態は重い核においても普遍的に存在するのか？

# 背景 重い核における $\alpha$ 凝縮状態

## ✓ $A=4N$ 核の $\alpha$ 凝縮状態存在可能性

N 増加  $\Rightarrow$  E 増加

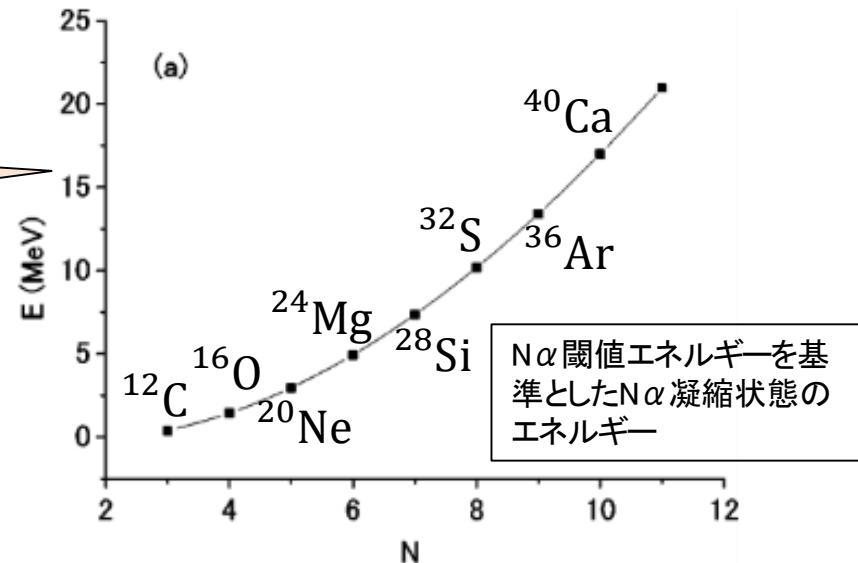
$\Rightarrow$  クーロン力の効果増大

$\Rightarrow$  核力とクーロン力のバランスが崩れてクーロン障壁が消失

☞  $\alpha$  凝縮状態は準安定に存在しなくなる

□ 理論的には  $N \leq 10$ 、 $^{40}\text{Ca}$  までしか準安定的に存在できない

□ 実験的には、 $N \geq 4$  の粒子の  $\alpha$  凝縮状態についての知見は極めて限定的。 $N = 4, 5$  の候補が見つまっているだけ。



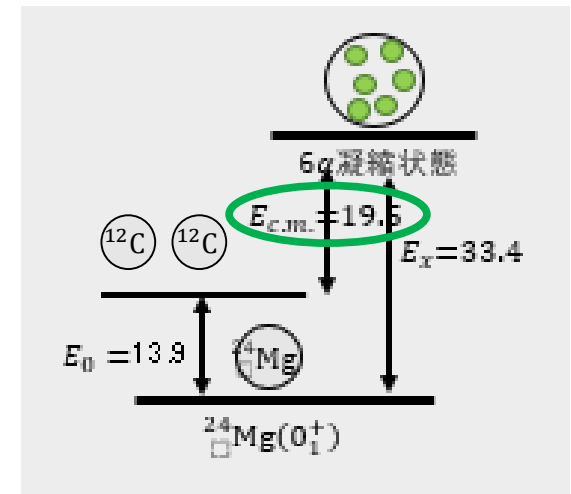
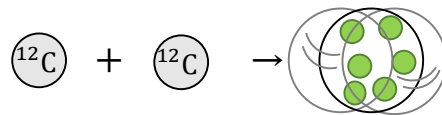
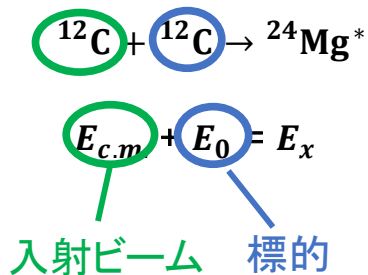
T.Yamada, P.Schuck,  
*Phys. Rev. C* **69** 024309 (2004).

本実験では、  
 $^{24}\text{Mg}$  における 6  $\alpha$  凝縮状態を探索!

# 実験の原理①

目的:  $^{24}\text{Mg}$ における6 $\alpha$ 凝縮状態を実験により探索する

- 励起エネルギー $E_x=33.4\text{MeV}$ の $^{24}\text{Mg}$ 6 $\alpha$ 凝縮状態の存在が、理論的計算により予想されている。
- この状態を $^{12}\text{C}$ と $^{12}\text{C}$ の非弾性散乱によって作る。



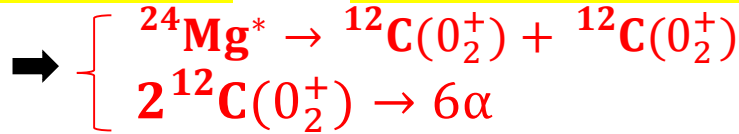
$E_x=33.4\text{MeV}$ 、  
 $E_0=13.9\text{MeV}$ より  
 $E_{c.m.}=19.5\text{MeV}$   
 よって  
 $E_{beam} = 2 \times E_{c.m.}$   
 $= 39.0 \text{ MeV}$

$E_{beam}$ (MeV)	$E_x$ (MeV)
57.0	42.4
49.9	38.9
41.2	34.5
39.7	33.8
38.1	33.0

実際に計測したエネルギー点

# 実験の原理②

- 何をもって $^{24}\text{Mg}6\alpha$ 凝縮状態だと同定するか？



の反応に着目

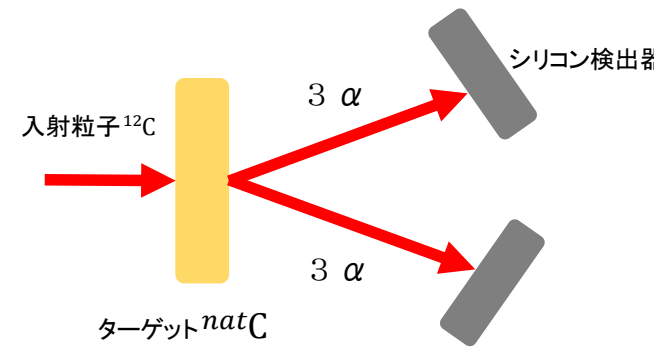
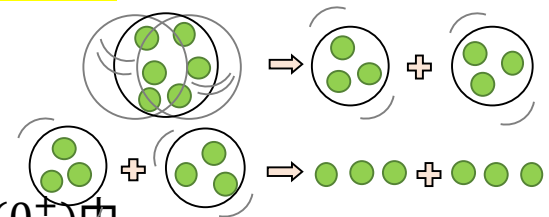
$^{24}\text{Mg}6\alpha$ 凝縮状態が形成されていれば $^{12}\text{C}(0_2^+)$ 由来の $6\alpha$ が観測されるはず



検出器を右図のように2つ配置し、**両検出器に3αずつ**入ったイベントを観測

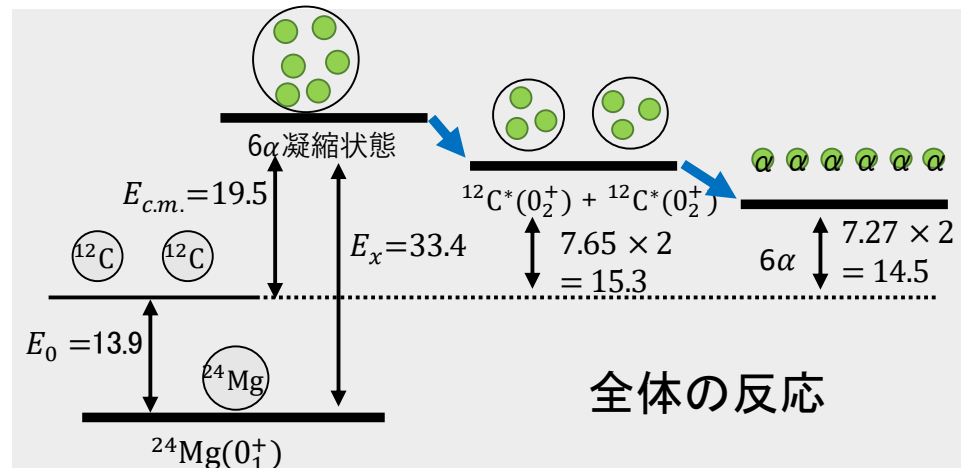


観測した粒子が必ずしも $^{12}\text{C}(0_2^+)$ 由来の $\alpha$ とは限らないので**エネルギー・時間・不変質量計算**により $^{12}\text{C}(0_2^+)$ 由来 $\alpha$ を抽出しそのイベントを $^{24}\text{Mg}6\alpha$ 凝縮状態イベントとする



- この反応断面積を入射ビームごとに求める。

$\rightarrow$   $^{24}\text{Mg}6\alpha$ 凝縮状態が存在すれば  
 $E_{beam} = 39.0 \text{ MeV}$ において反応断面積が大きくなるはず！

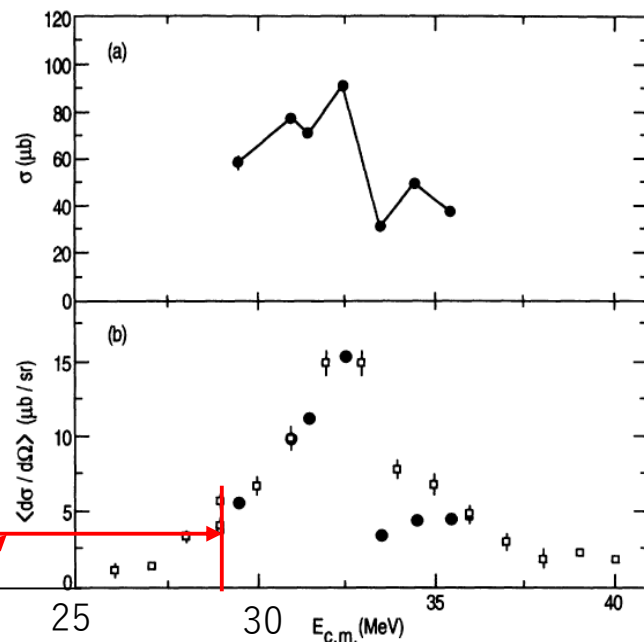




# 先行研究

H. Wuosmaa, et al., *Phys. Rev. C* 50 2909 (1994) において  
本研究と同じ手法で6 $\alpha$ の検出による $^{12}\text{C}(^{12}\text{C}, ^{12}\text{C}^*[0_2^+])^{12}\text{C}^*[0_2^+]$ の非弾性散乱  
断面積を求めている。

この先行研究は入射ビームを  
 $E_{c.m.} = 25 \sim 40 \text{ MeV}$   
としているのに対し、本研究では  
 $E_{beam} = 2 \times E_{c.m.}$   
 $= 38.1 \sim 57 \text{ MeV}$   
 $\therefore E_{c.m.} = 19 \sim 28.5 \text{ MeV}$   
としている。



このピークを期待

今回測定する範囲

6 $\alpha$ の検出による  
 $^{12}\text{C}(^{12}\text{C}, ^{12}\text{C}^*[0_2^+])^{12}\text{C}^*[0_2^+]$ の非弾性散乱断面積

## 2. 実験装置

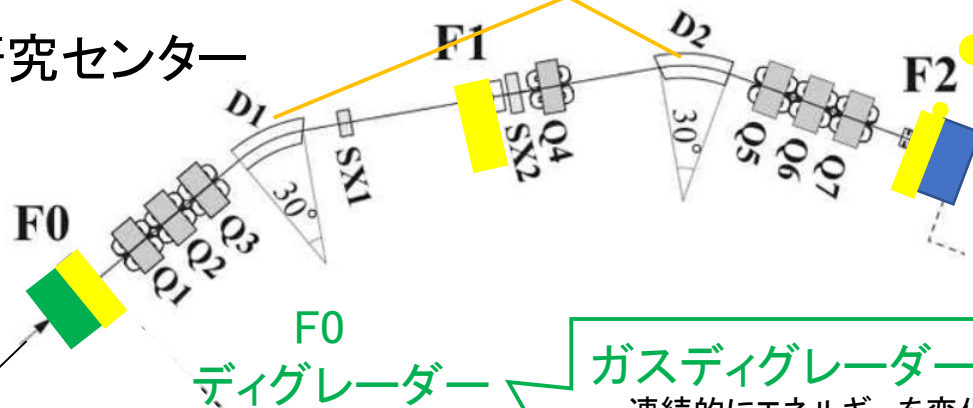
- ビームライン
- ディグレーダー
- 標的
- 検出器
- 回路

# ビームライン

自作したコリメーターが  
不慮の事故により壊れ  
てしまう

核物理研究センター  
ENコース

磁場によるエネルギー選択

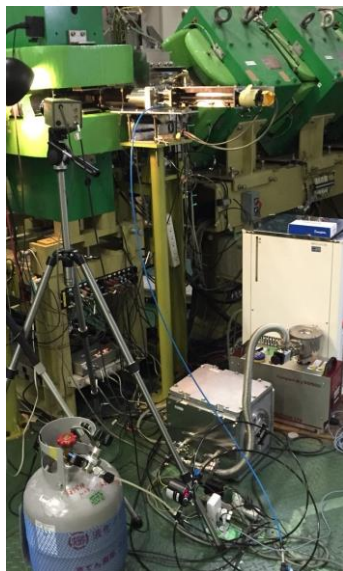


F2  
検出器、標的

サイ  
クロ  
ロン

ビームエネルギー  
を変えるのは苦手

F0  
ディグレーダー



ガスディグレーダー

- ・連続的にエネルギーを変化させることができる
- ・放射線に弱く膜が破れるかもしれない

アルミディグレーダー

- ・不連続にしかエネルギーを変化させることができない
- ・放射線に強い

コリメーター

ディグレーダーを通過して  
広がったビームを細くする



# ディグレーター

## ガスディグレーター

サイクロトロン  
からのビーム  
57.0 MeV

アラミド(5.9  $\mu\text{m}$ )

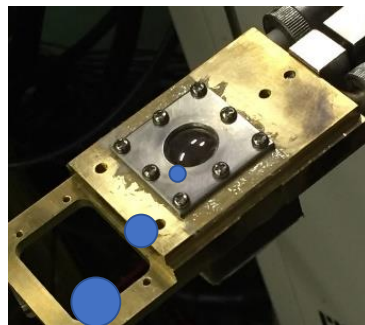
ディグレーター  
通過後のビーム  
49.9, 57.0 MeV

イソブタンガス

サイクロチェンバー

サイクロチェンバー  
で圧力を管理

圧力計



## アルミディグレーター

サイクロトロン  
からのビーム  
57.0 MeV

アルミホイル(26, 28, 30  $\mu\text{m}$ )

ディグレーター  
通過後のビーム  
41.2, 39.7, 38.1 MeV



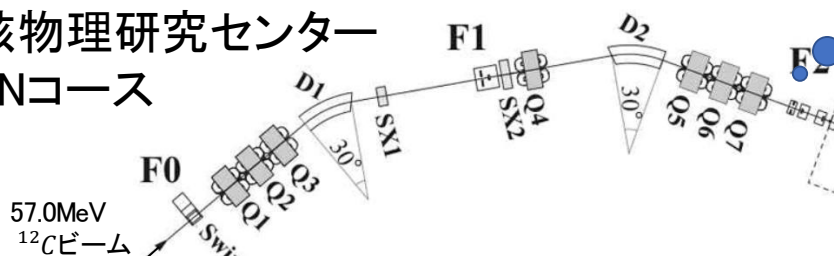
膜が破れてしまいデータが1点でしか取れなかった

ディグレーター通過後のビームエネルギー(MeV)	ブタンの圧力(kPa) アルミの厚さ( $\mu\text{m}$ )
57.0	0 kPa
49.9	12 kPa
41.2	26 $\mu\text{m}$
39.7	28 $\mu\text{m}$
38.1	30 $\mu\text{m}$

# ビームエネルギー

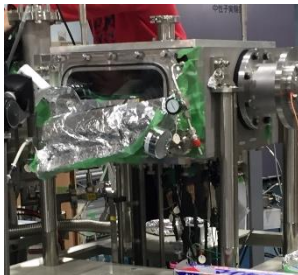
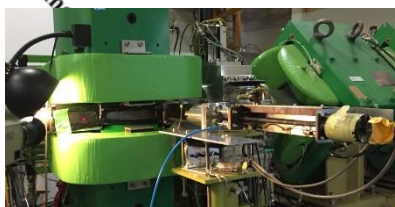
実験開始早々に不慮の事故により壊れてしまう

核物理研究センター  
ENコース



57.0 MeV  
<sup>12</sup>Cビーム

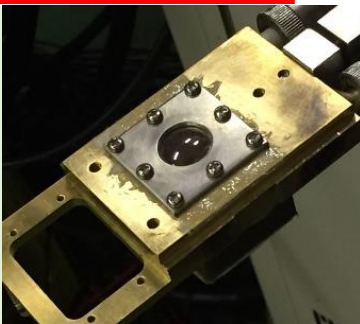
サイクロトロン



F0  
ディグレーダー

F2  
標的、検出器

ビームのエネルギーを変えるのは苦手

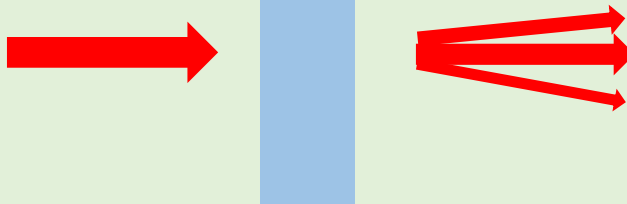


ガ 実験終盤に不慮の事故により膜が破れる

F0  
ディグレーダー(インブタンorアルミホイル)

サイクロトロンからのビーム  
57.0 MeV

ディグレーダー通過後の粒子  
38.1~57.0 MeV



- ・ディグレーダーの厚さを変えてビームのエネルギーを変える
- ・ビームが広がるので黄色でカット

アルミディグレーダー

# ビームライン

○大阪大学核物理研究センター (IENコース)

$^{12}\text{C}$  (57.2 MeV) ビーム

サイクロトロン

○ガスディグレーダー

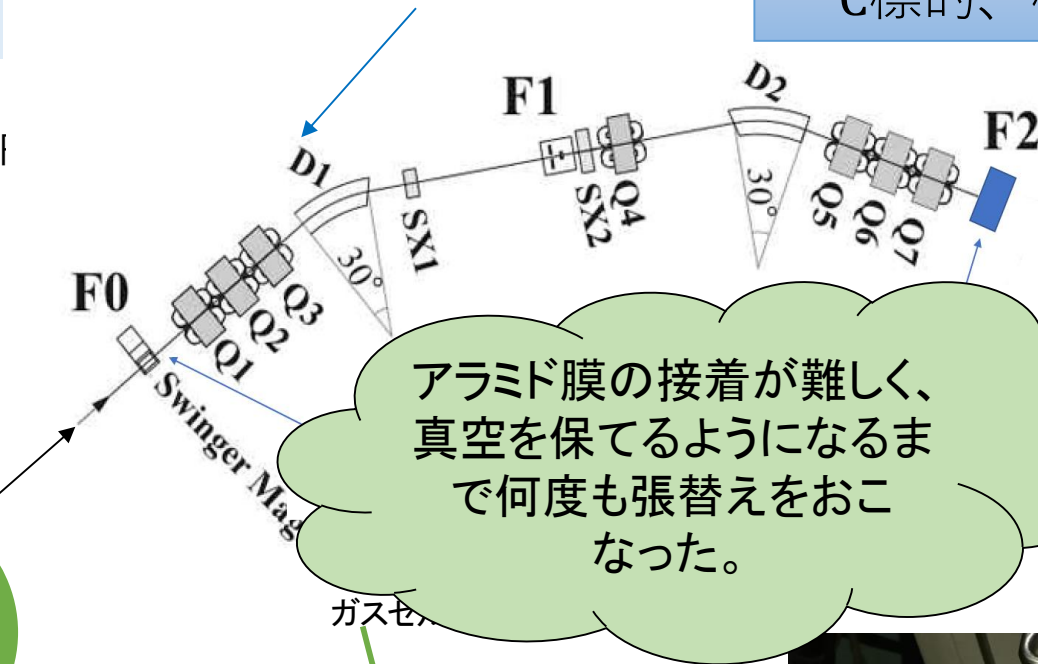
ビームエネルギーを調整をできるように、ガスディグレーダーを開発した。

イソブタン

アラミド膜 (5.9  $\mu\text{m}$ )

磁場によるエネルギーの選択

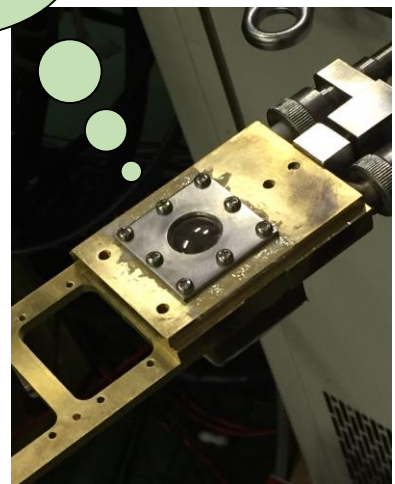
$^{12}\text{C}$  標的、検出器



エネルギー調整前の粒子  
56.7 MeV



ガスセル通過後の粒子  
36.5~50.0 MeV



# 標的

○標的-厚さ $0.51 \text{ mg/cm}^2$ のNatural Carbon  
理化学研究所の長谷部裕雄氏により作製

## 厚さの決め方

収量を増やすために標的を厚くしたいが、  
標的が厚くなりすぎるとビームの上流で反応した  
粒子が標的から出てこなくなる

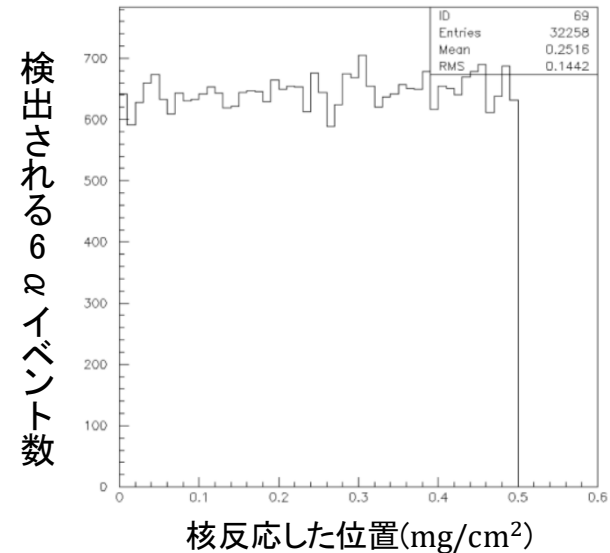
標的中での反応点によらず  $\alpha$  粒子が検出できる  
ような厚さをシミュレーションで決定した

厚さ $0.5 \text{ mg/cm}^2$ で長谷部裕雄さんに製作を依頼

実際に測定した厚さは $0.51 \text{ mg/cm}^2$

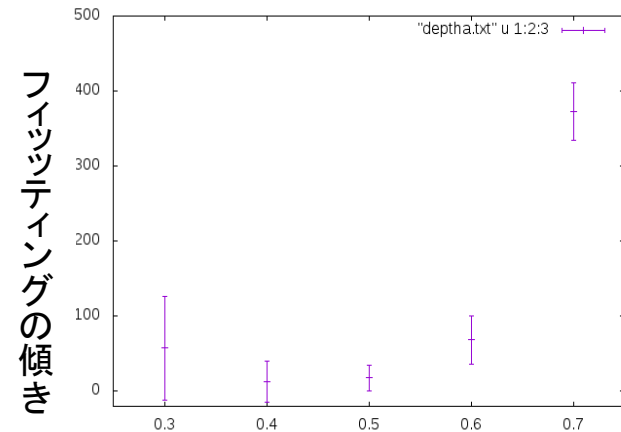
## シミュレーション

標的内の反応した位置と検出される $6\alpha$  イベント数



検出される $6\alpha$  イベント数

核反応した位置( $\text{mg/cm}^2$ )



標的の厚さ( $\text{mg/cm}^2$ )

# 標的

○標的-厚さ $0.51 \text{ mg/cm}^2$ のNatural Carbon  
理化学研究所の長谷部裕雄氏により作製

## 厚さの決め方

収量を増やすために標的を厚くしたいが、  
標的が厚くなりすぎるとビームの上流で反応した  
粒子が標的から出てこなくなる

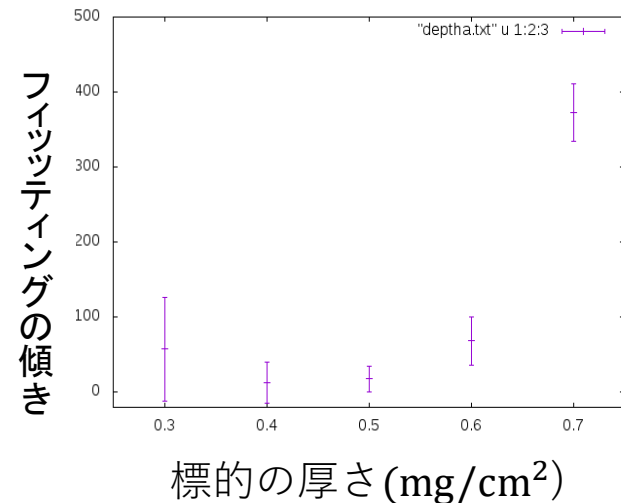
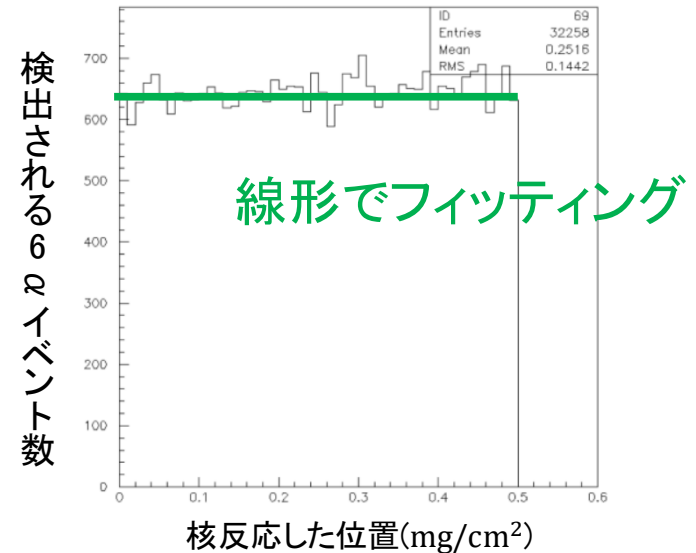
標的中での反応点によらず  $\alpha$  粒子が検出できる  
ような厚さをシミュレーションで決定した

厚さ $0.5 \text{ mg/cm}^2$ で長谷部裕雄さんに製作を依頼

実際に測定した厚さは $0.51 \text{ mg/cm}^2$

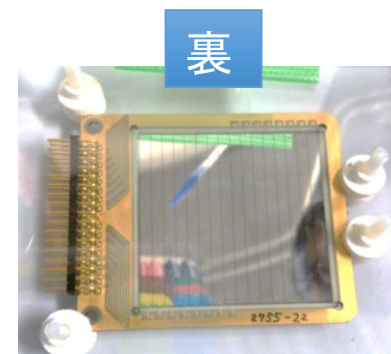
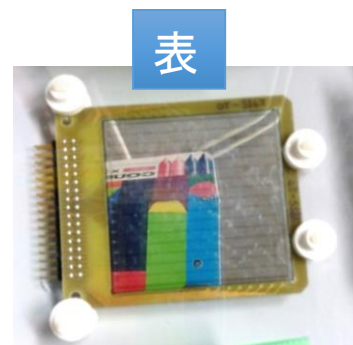
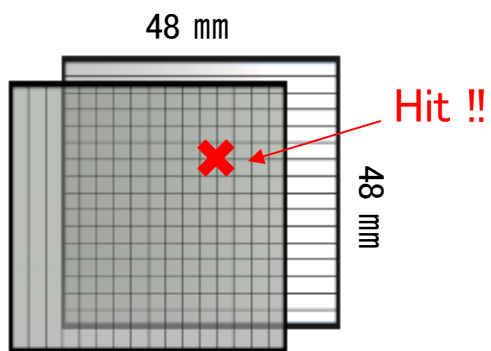
## シミュレーション

標的内の反応した位置と検出される $6\alpha$  イベント数

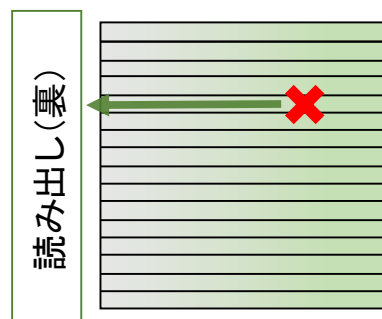
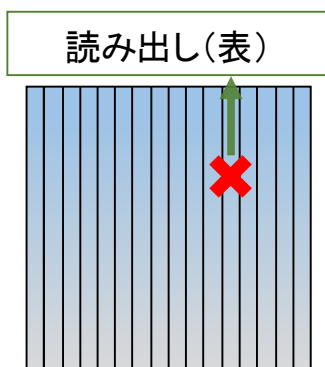




# Si検出器



16 × 16 strip  
厚さ: 65 μm



16 + 16 = 32ch解析することによって、3 × 3mmの精度で入射した粒子の位置とエネルギーを測定

# 検出器の配置

## ○角度と距離の決定

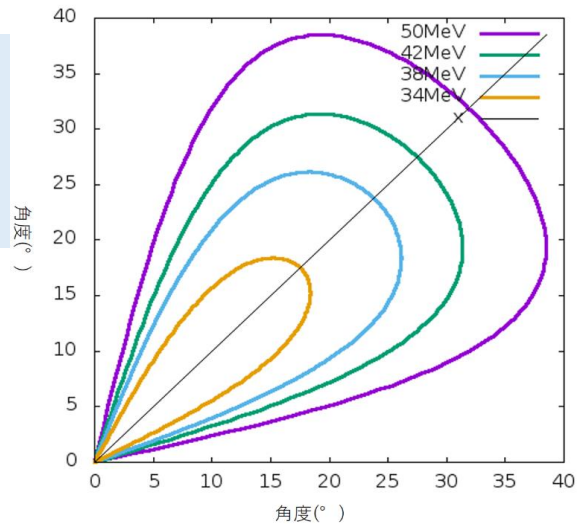
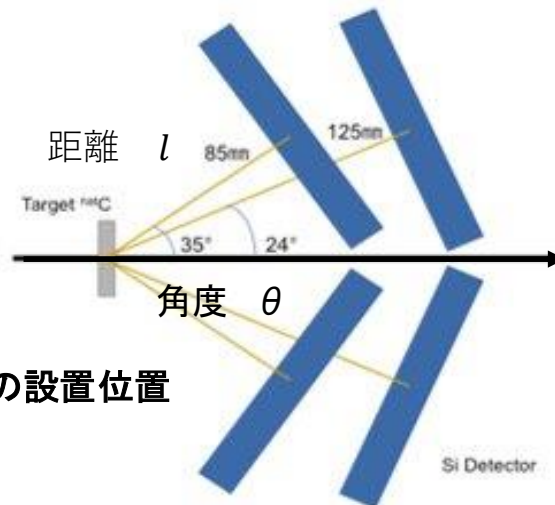
- ・ 標的との距離をなるべく短く
- ・ 2つの検出器を左右対称に
- ・ ビームの軌道に乗らないように
- ・ 配置の変更回数を最小限に

⇒シミュレーションの結果、最も収量が大きくなるように変更回数・角度・距離を決定した。

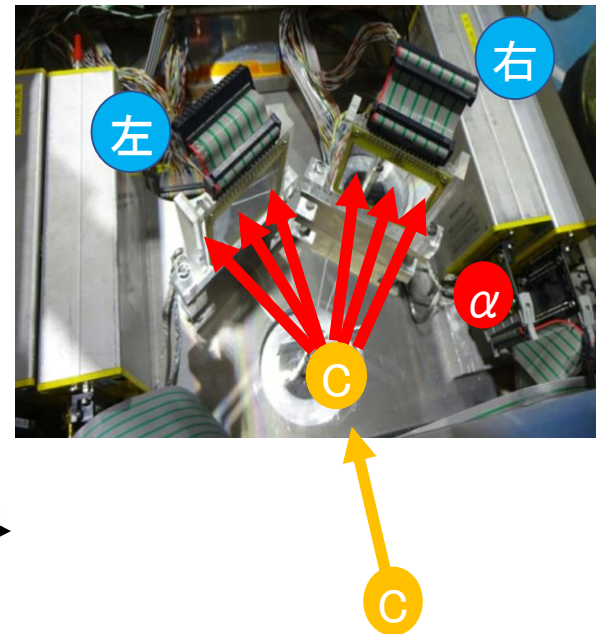
$$(l, \theta) = \begin{cases} (85 \text{ cm}, 35^\circ) (E_{\text{beam}} = 42.5 - 50.0 \text{ MeV}) \\ (125 \text{ cm}, 24^\circ) (E_{\text{beam}} = 36.5 - 41.0 \text{ MeV}) \end{cases}$$

## ○エネルギー較正

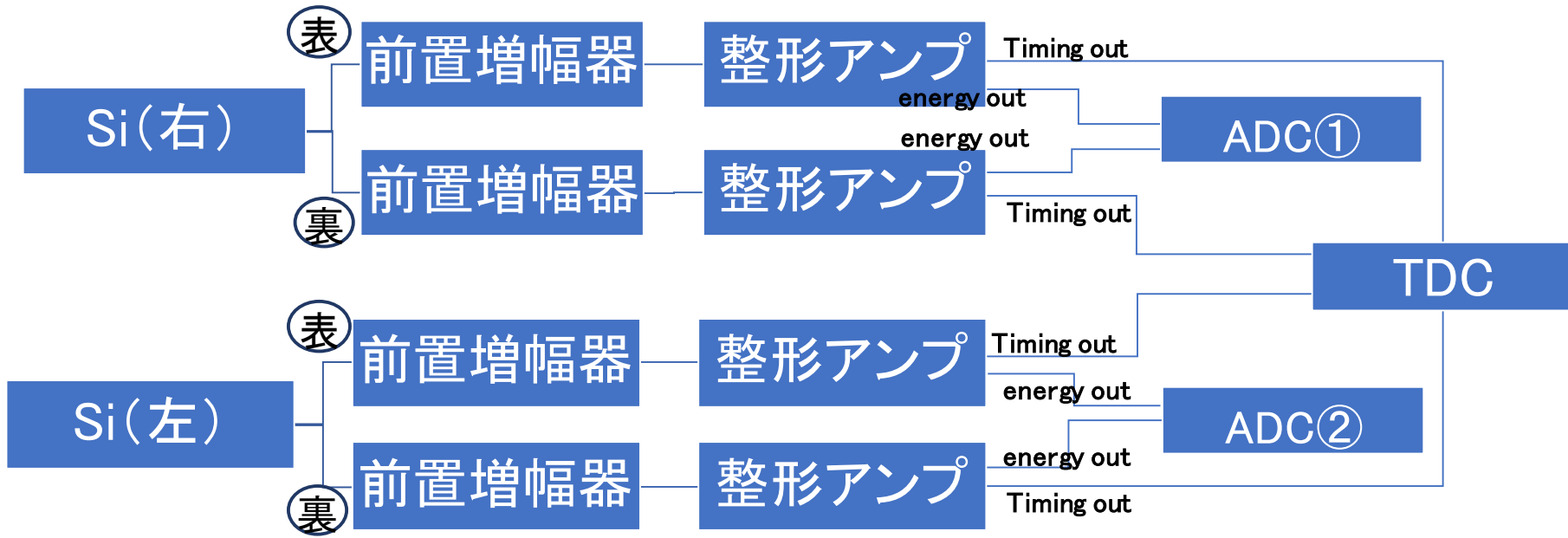
$\alpha$ 線源を用い、各ストリップについてエネルギー較正を行った。



C+C非弾性散乱での散乱角度の相関



# 回路



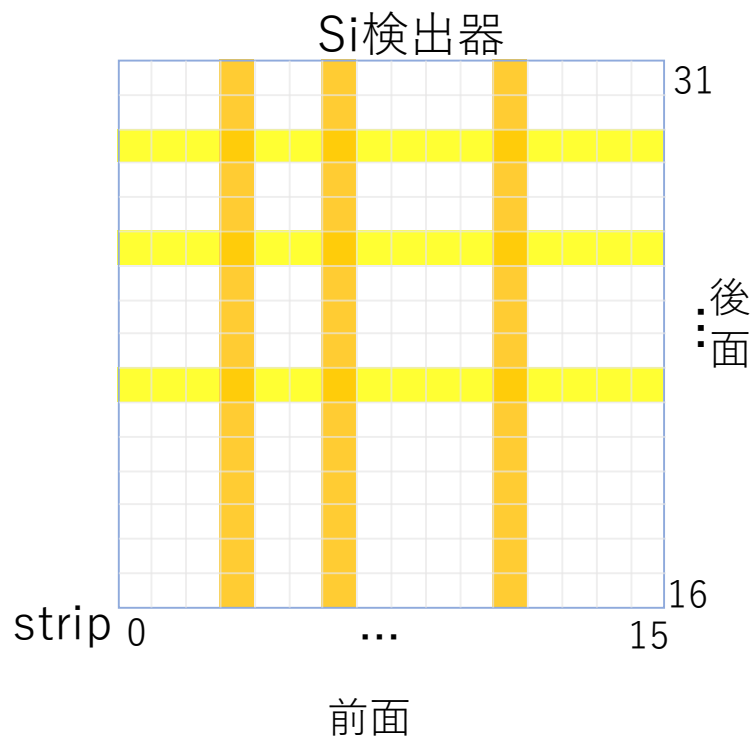
表・裏それぞれで、2個以上の信号が得られたときのみ、ADCやTDCに送られるようなTriggerがかけてある。

# 3. 解析と結果

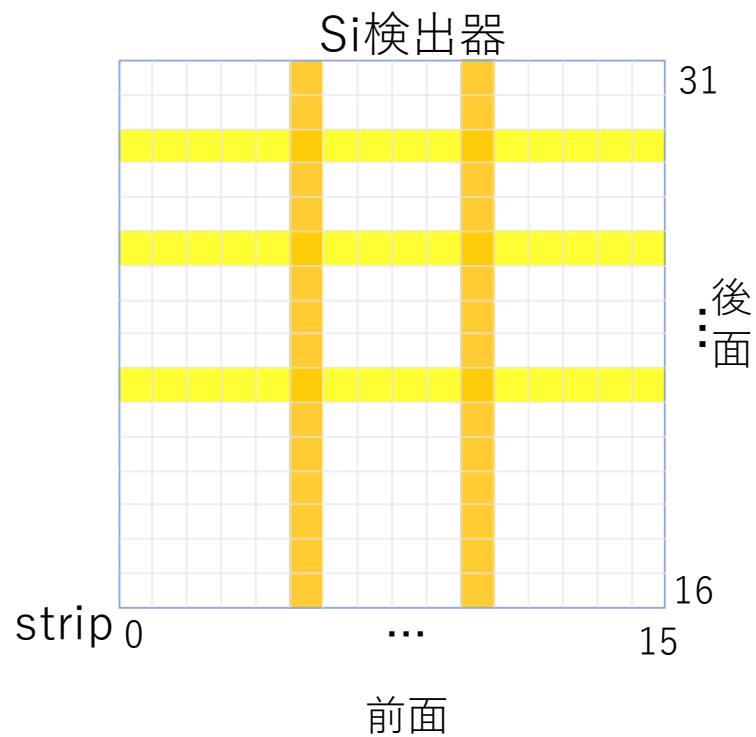
- ① イベント選択
- ② ADC(エネルギーによるカット)
- ③ TDC(時間によるカット)
- ④ 位置の決定
- ⑤  $6\alpha$  イベントの同定
- ⑥ 断面積の決定、結果

# 解析 ① イベント選択

① 3つの $\alpha$ 粒子が別々のストリップに入射したイベント(3 vs 3)を選択



② 同じストリップに2つの $\alpha$ 粒子が入ったイベント(3 vs 2)を選択



そのために

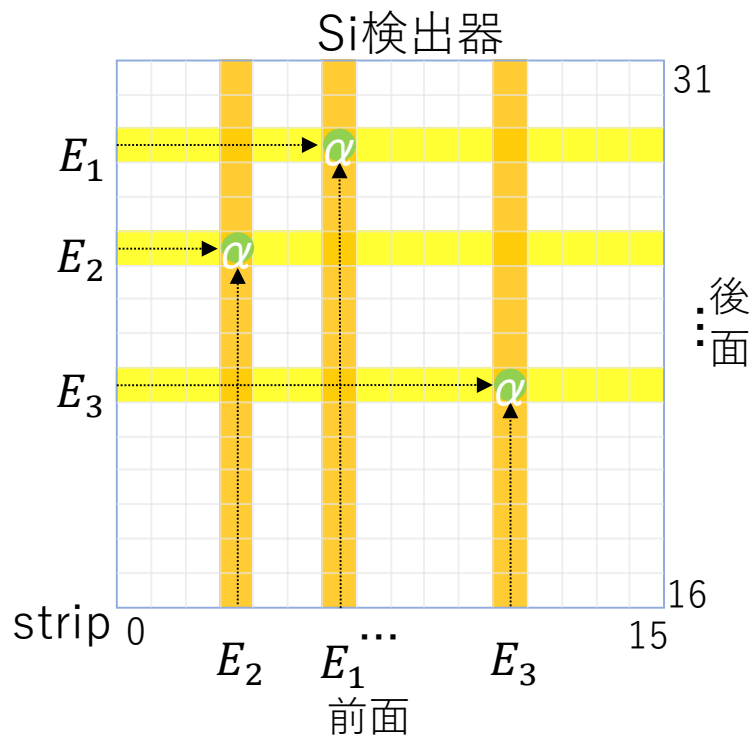
- ・時間(TDC)
  - ・エネルギー(ADC)
- によるカット



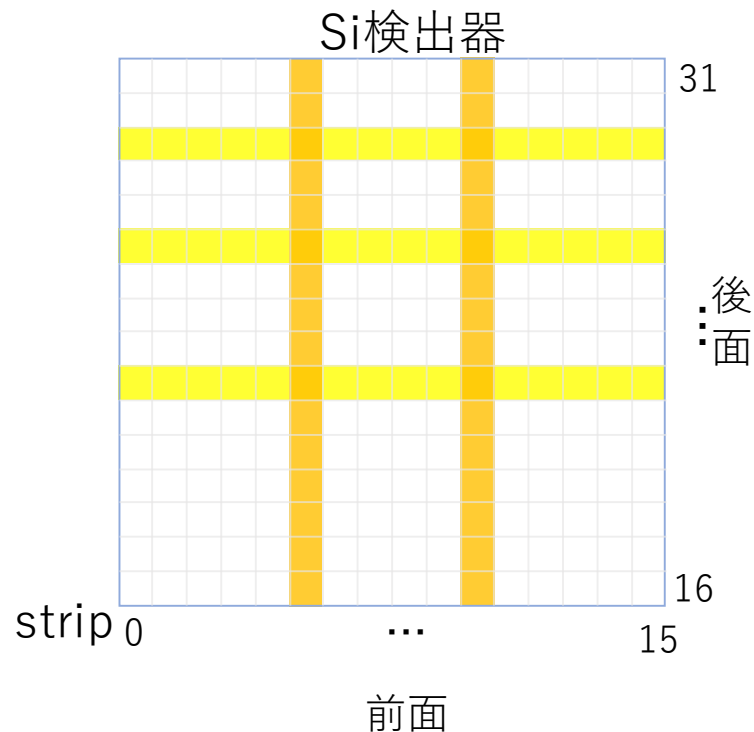
$^{12}\text{C}(^{12}\text{C}, ^{12}\text{C}[0_2^+])^{12}\text{C}[0_2^+]$  の検出

# 解析 ①表裏ストリップの対応

① 3つの $\alpha$ 粒子が別々のストリップに入射したイベント(3 vs 3)を選択



② 同じストリップに2つの $\alpha$ 粒子が入ったイベント(3 vs 2)を選択



そのために

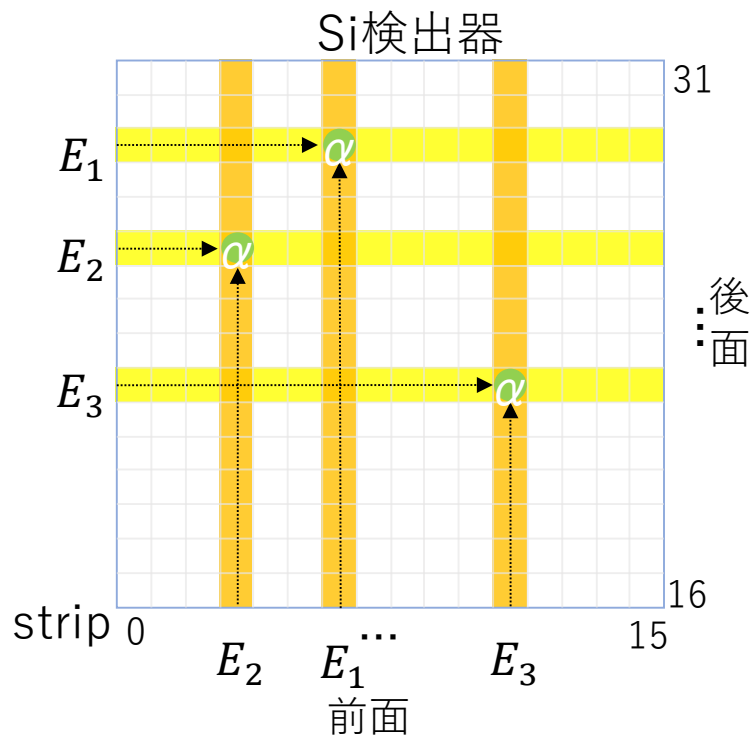
- ・時間(TDC)
  - ・エネルギー(ADC)
- によるカット



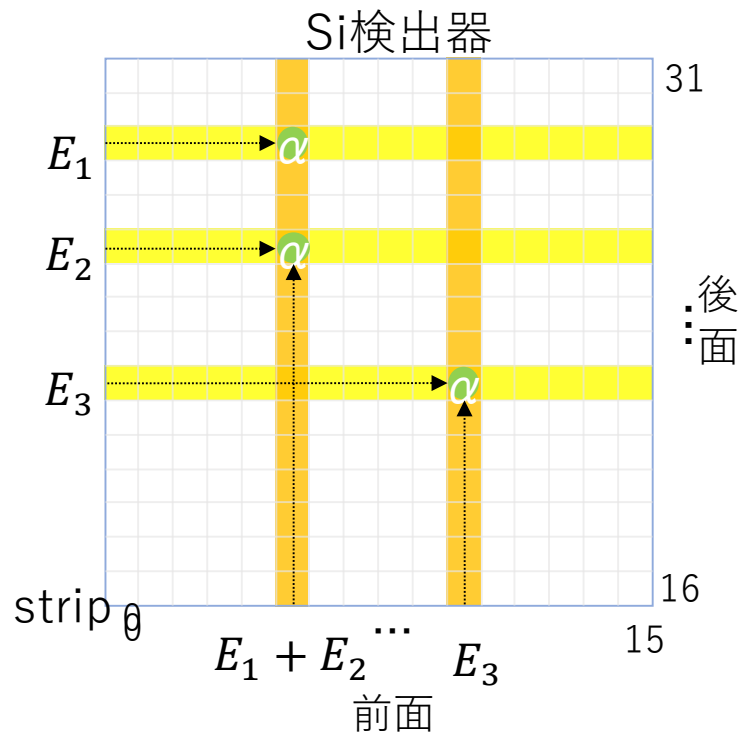
$^{12}\text{C}(^{12}\text{C}, ^{12}\text{C}[0_2^+])^{12}\text{C}[0_2^+]$  の検出

# 解析 ①表裏ストリップの対応

① 3つの $\alpha$ 粒子が別々のストリップに入射したイベント(3 vs 3)を選択



② 同じストリップに2つの $\alpha$ 粒子が入ったイベント(3 vs 2)を選択



そのために

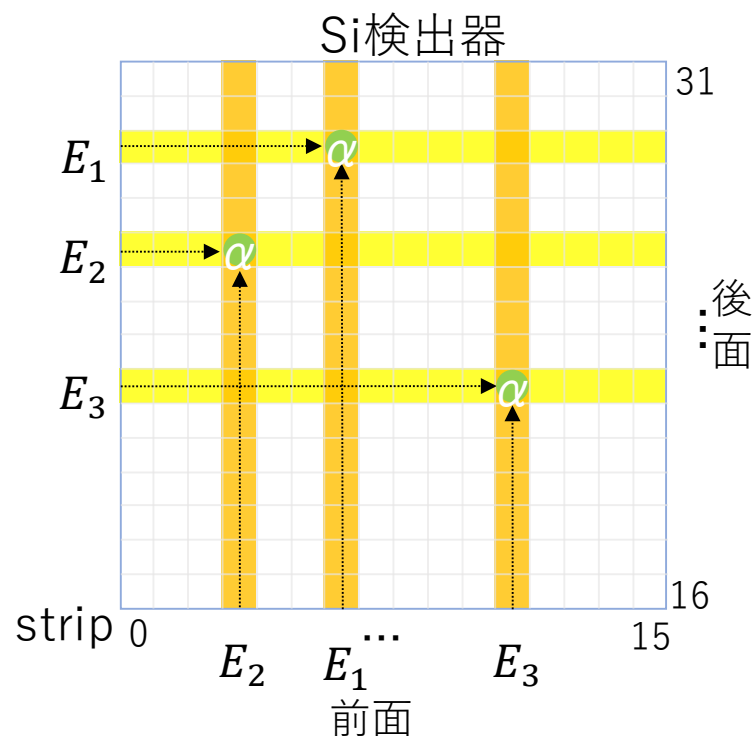
- ・時間(TDC)
  - ・エネルギー(ADC)
- によるカット



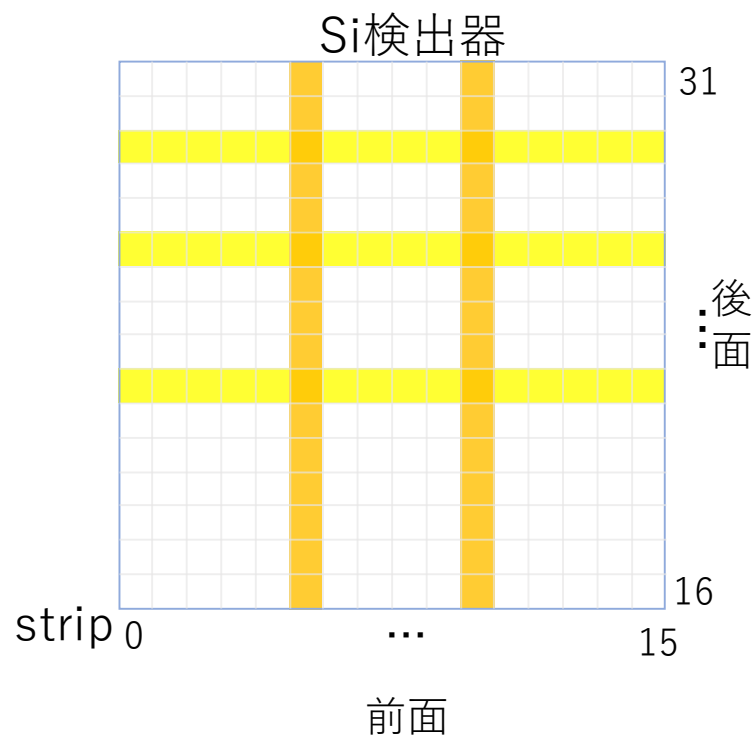
$^{12}\text{C}(^{12}\text{C}, ^{12}\text{C}[0_2^+])^{12}\text{C}[0_2^+]$  の検出

# 解析 ① イベント選択

① 3つの $\alpha$ 粒子が別々のストリップに入射したイベント(3 vs 3)を選択



② 同じストリップに2つの $\alpha$ 粒子が入ったイベント(3 vs 2)を選択



そのために

- ・ 時間(TDC)
  - ・ エネルギー(ADC)
- によるカット

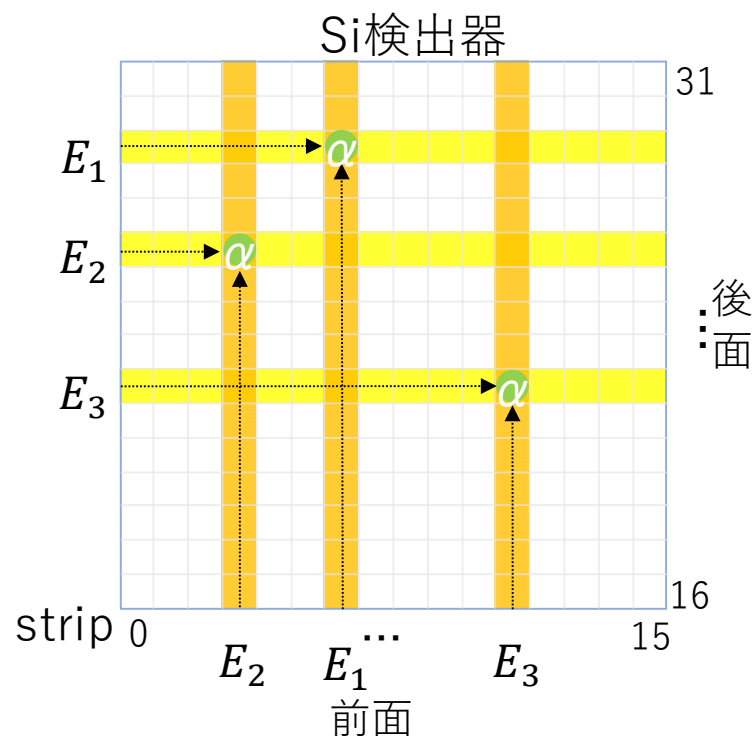


$^{12}\text{C}(^{12}\text{C}, ^{12}\text{C}[0_2^+])^{12}\text{C}[0_2^+]$  の検出

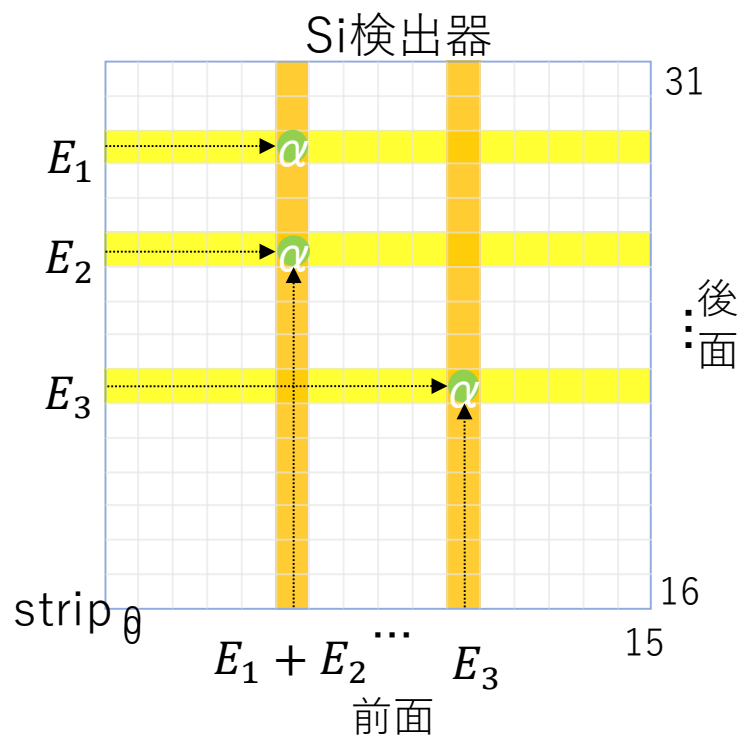


# 解析 ① イベント選択

① 3つの $\alpha$ 粒子が別々のストリップに入射したイベント(3 vs 3)を選択



② 同じストリップに2つの $\alpha$ 粒子が入ったイベント(3 vs 2)を選択



そのために

- ・ 時間(TDC)
  - ・ エネルギー(ADC)
- によるカット

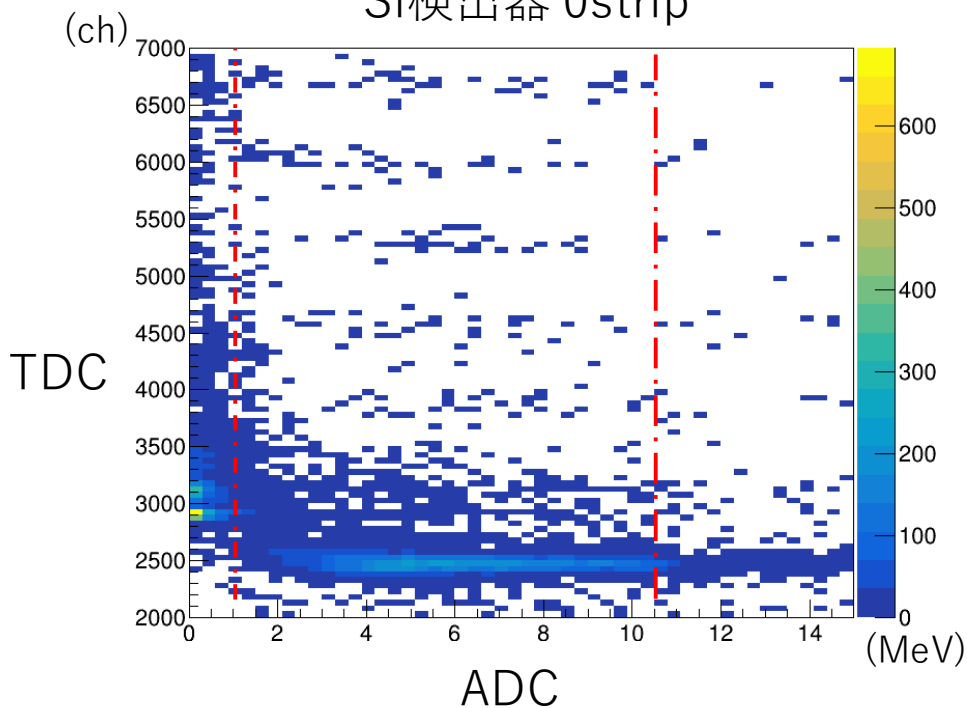


$^{12}\text{C}(^{12}\text{C}, ^{12}\text{C}[0_2^+])^{12}\text{C}[0_2^+]$  の検出

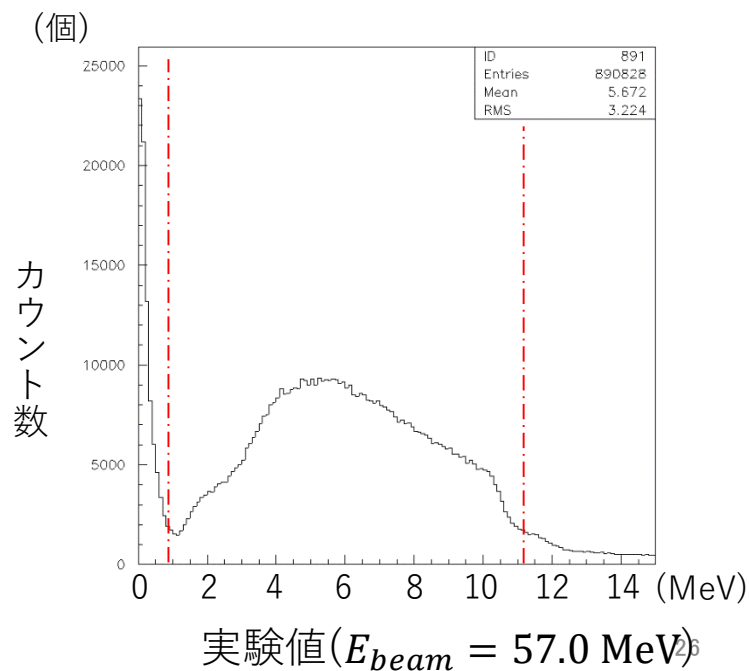
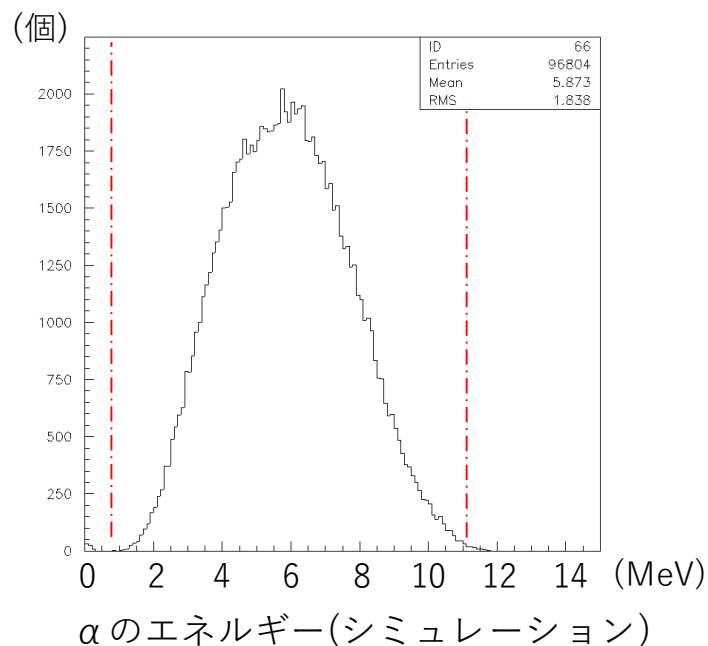
# 解析 ②エネルギーによる カット

○  $E_{beam} = 57.0$  MeVについて説明

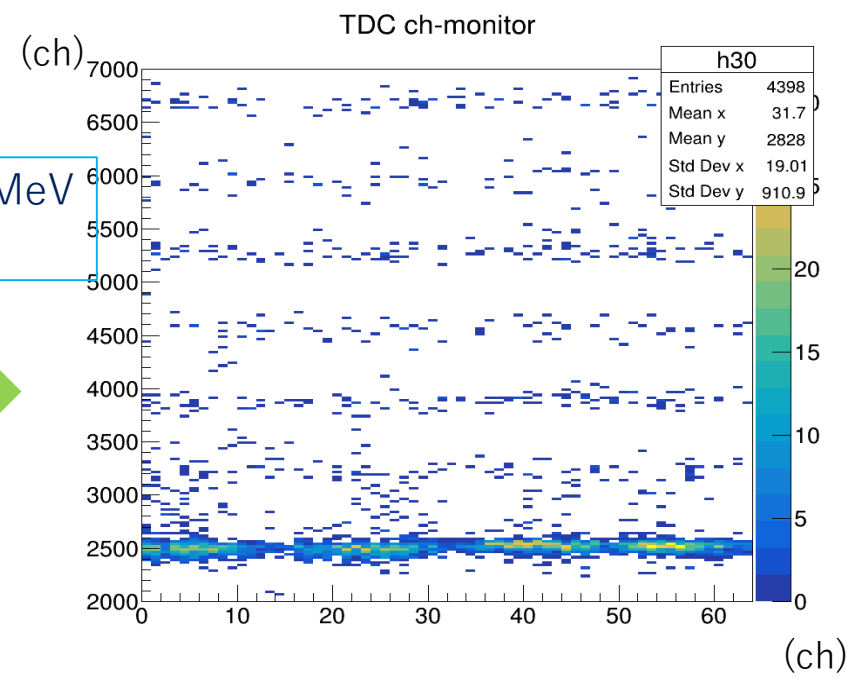
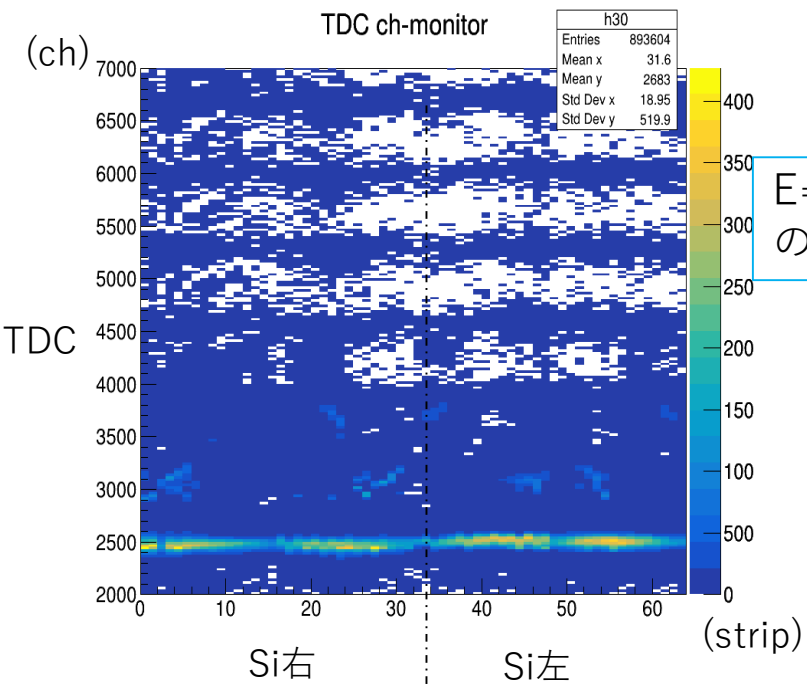
Si検出器 0strip



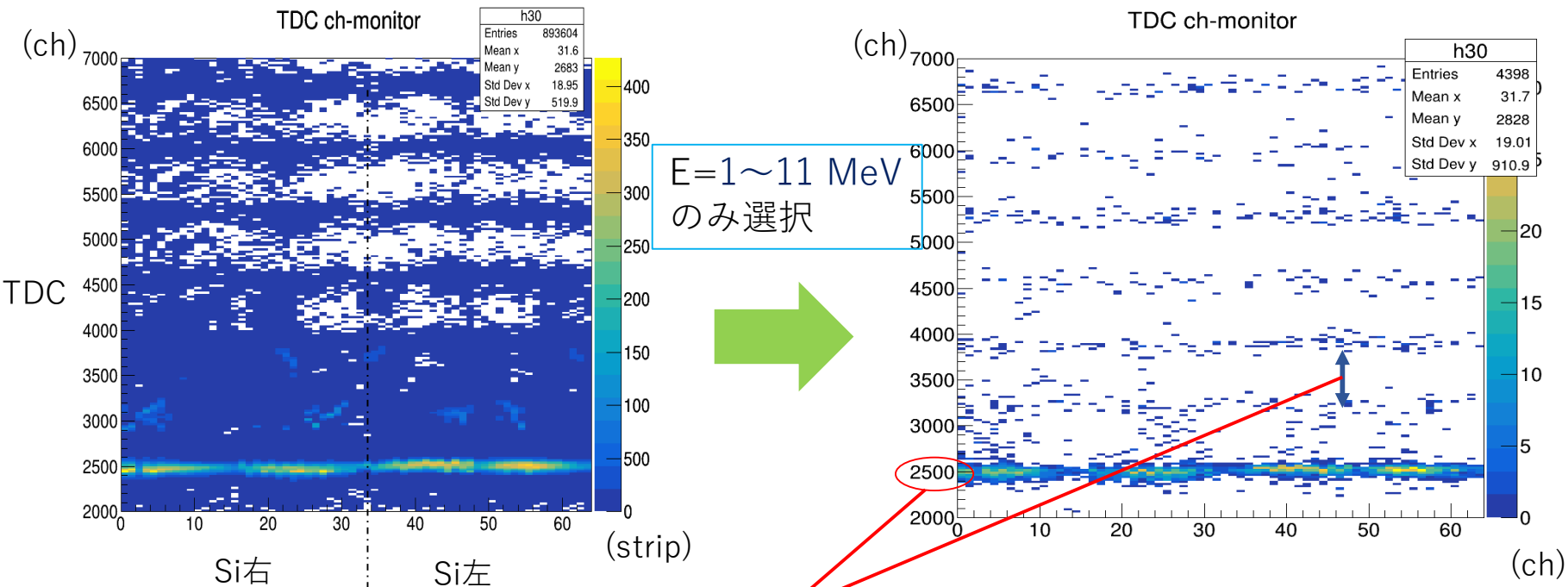
- 2 MeV 以上の信号を多く観測
- 1 MeV 以下の信号  
→ クロストーク



# 解析 ②エネルギーによるカット



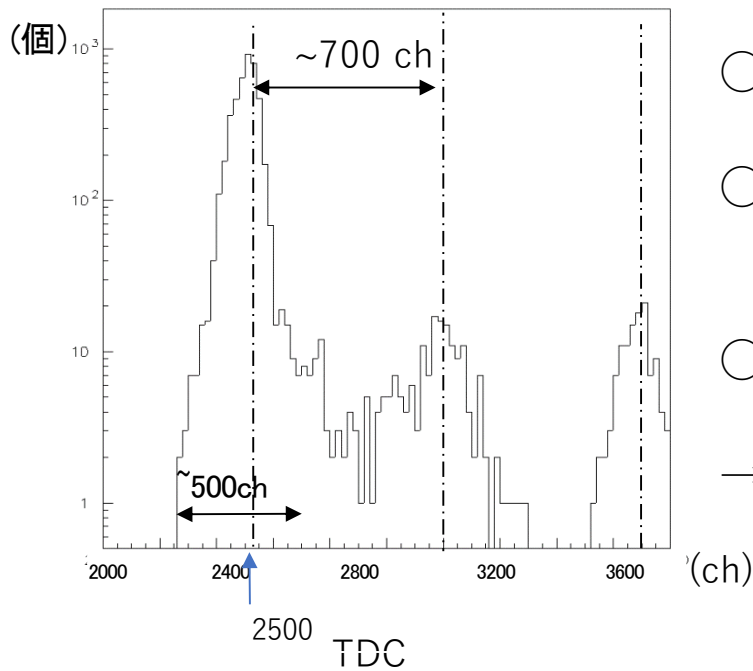
# 解析 ②エネルギーによるカット



- 加速周波数…14 MHz  
→ ビーム間隔…70 ns (700 ch)
- 2500 ch 付近でトリガー生成

➡ TDCの情報から、同時に来たイベントを選択

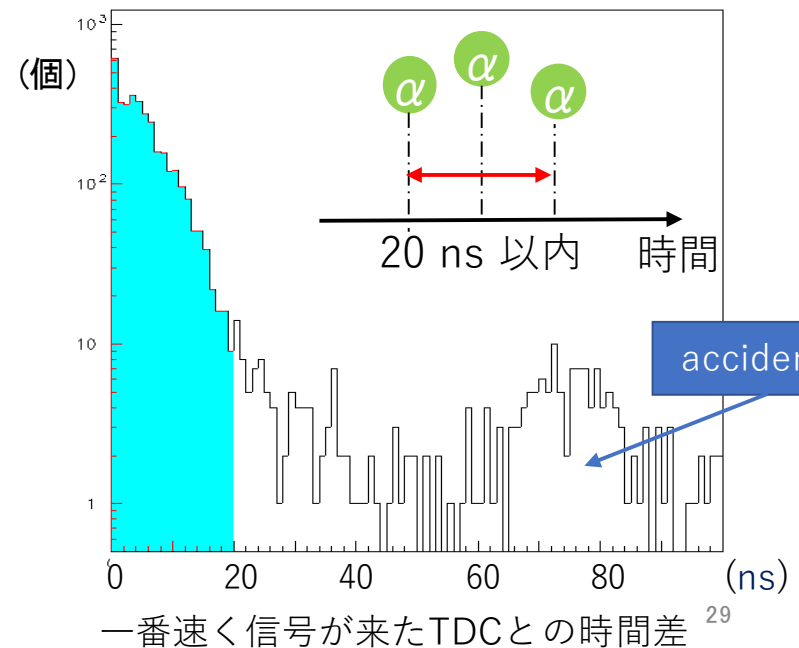
# 解析 ③時間によるカット



- 2500 ch付近のピーク幅は500 ch (50 ns) 程度
- 放出される $\alpha$ 粒子のエネルギーによる到達時間の差…最大5 ns 程度
- 真のイベントであれば5 ns 以内に信号が検出されるはず  
→TDCの時間差をしてみる

○余裕をもたせて20 ns 以内でゲートをか  
ける

➡ 2枚のSi検出器で3つずつ粒子が  
検出されたイベントを選択

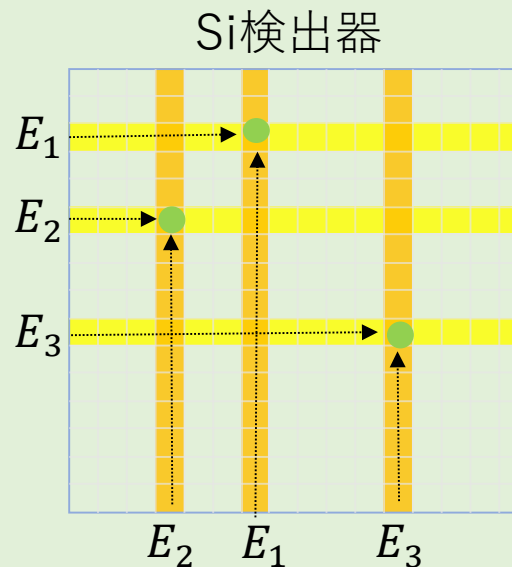


# 解析 ④stripの対応付けと位置決定

鳴ったstripの情報から $\alpha$ が当たった位置は6通りが考えられる

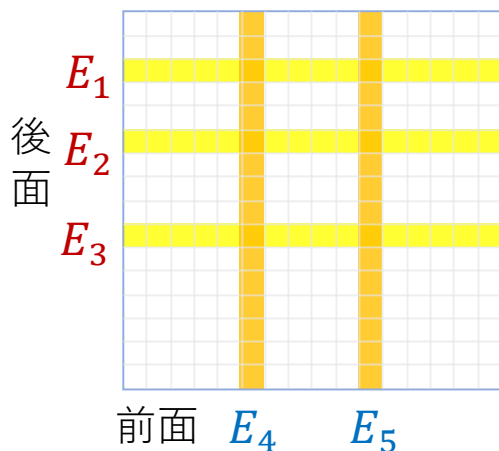
3vs3イベントの場合…

- 前面と後面でADCの値に関して降順でペアを組むことで $\alpha$ 粒子の当たった位置を特定
- エネルギーの大小関係だけでの対応のみ(前後面のエネルギー差の確認が必要)
- TDCの値などから精査が必要



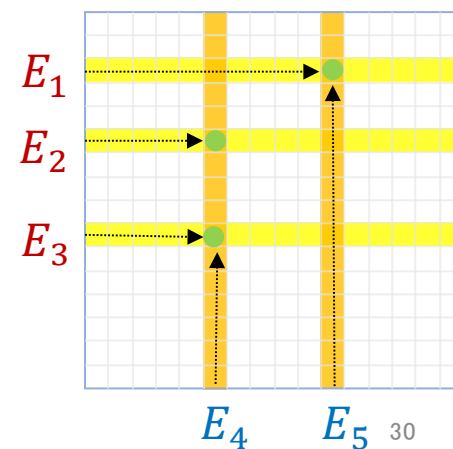
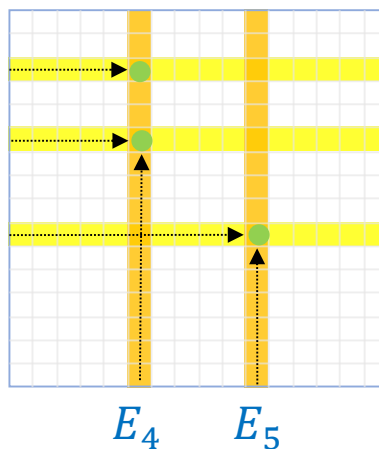
3vs2イベントの場合…

Si検出器



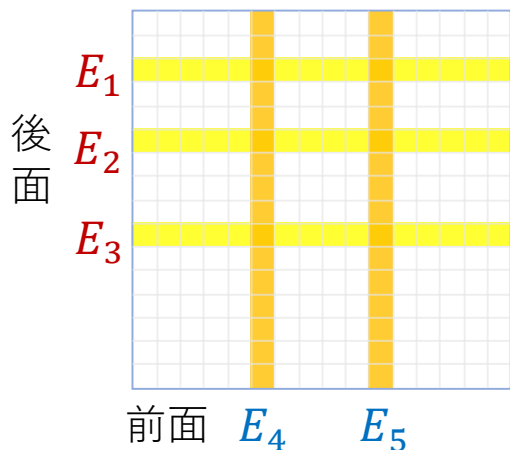
当たった位置

→大小関係だけでは決められない



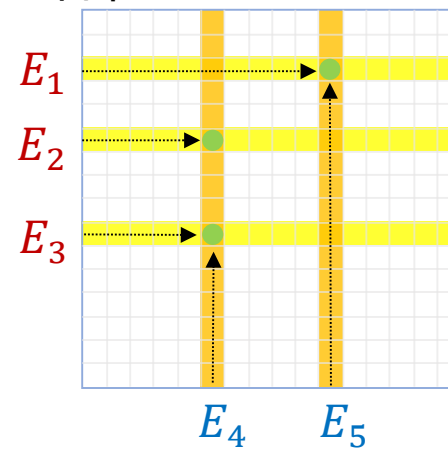
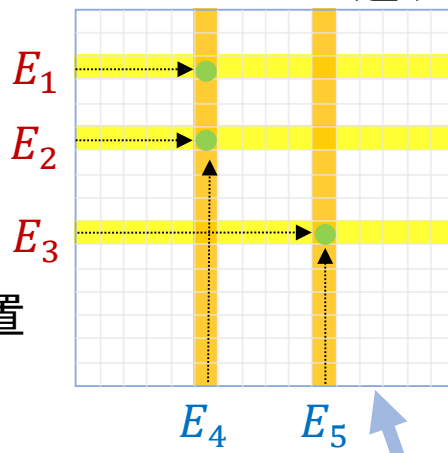
# 解析 ④ 3vs2 イベントの位置の決定

Si検出器



当たった位置

6通りの組み合わせ



組み合わせのエネルギー差を表す  $d$  を定義

→最も  $d$  が小さくなる組み合わせを正解の位置とする

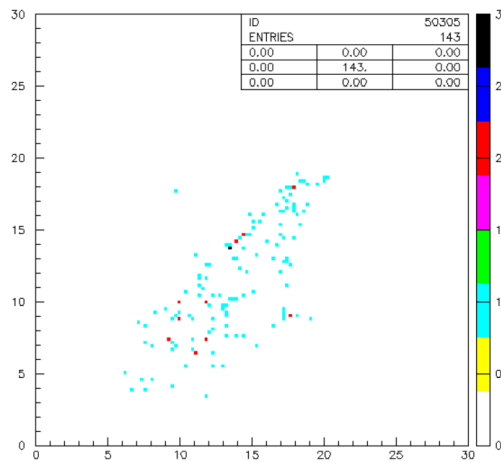
$$d = |E_3 - E_5| + |E_1 + E_2 - E_4|$$

二回鳴ったstrip  
の信号

$E_4$

それに対応する  
stripの和

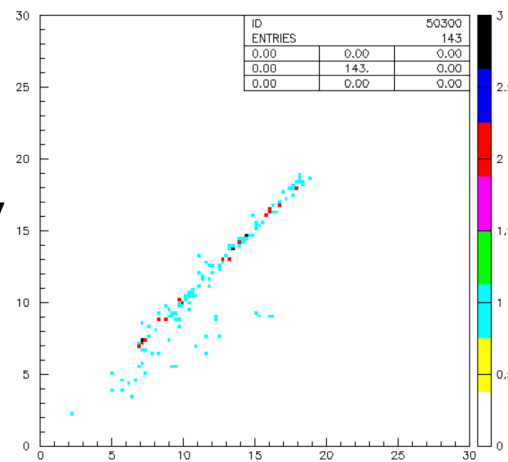
$E_1 + E_2$



最適化すると...

$E_4'$

$E_1' + E_2'$

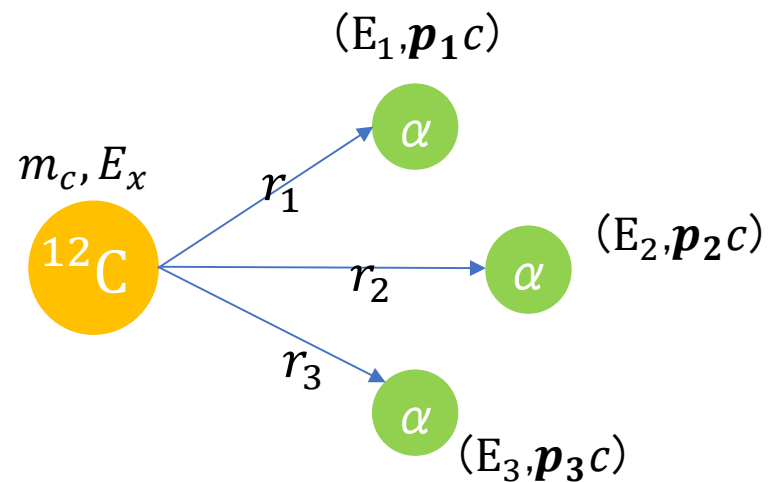
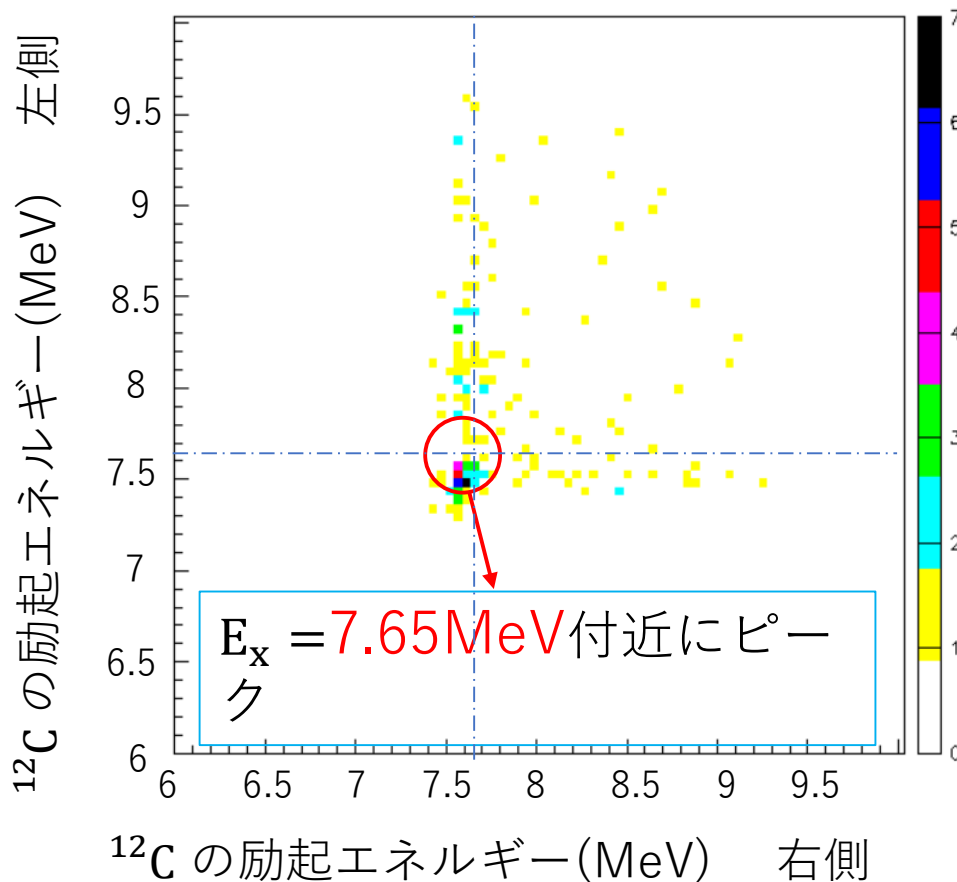


# ⑤ 6 α イベントの同定

○  $^{12}\text{C}(0_2^+) \rightarrow 3\alpha$  の不変質量を計算  $\rightarrow$   $^{12}\text{C}$  の  $E_x$  がわかる！

$$(m_c c^2 + E_x)^2 = (E_1 + E_2 + E_3)^2 - (\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2 + \mathbf{p}_3)^2 c^2$$

$\uparrow$   $^{12}\text{C}(0_2^+)$  なら  $E_x = 7.65 \text{ MeV}$





# ⑤ 6α イベントの同定

○  $^{12}\text{C}(0_2^+) \rightarrow 3\alpha$  の不変質量を計算  $\rightarrow$   $^{12}\text{C}$  の  $E_x$  がわかる!

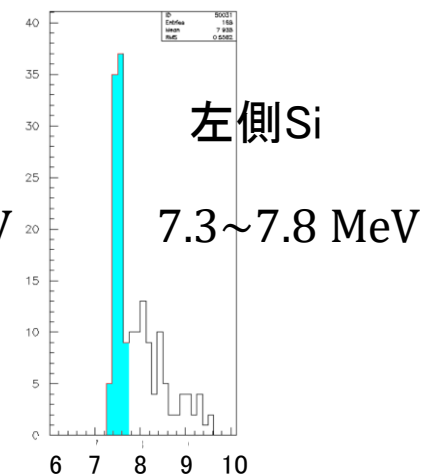
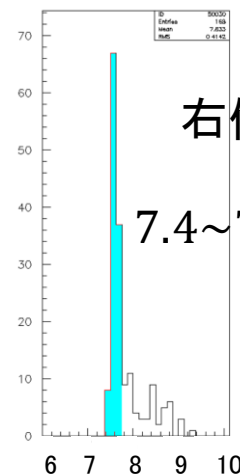
$$(m_C c^2 + E_x)^2 = (E_1 + E_2 + E_3)^2 - (\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2 + \mathbf{p}_3)^2 c^2$$

$\uparrow$   $^{12}\text{C}(0_2^+)$  なら  $E_x = 7.65$  MeV

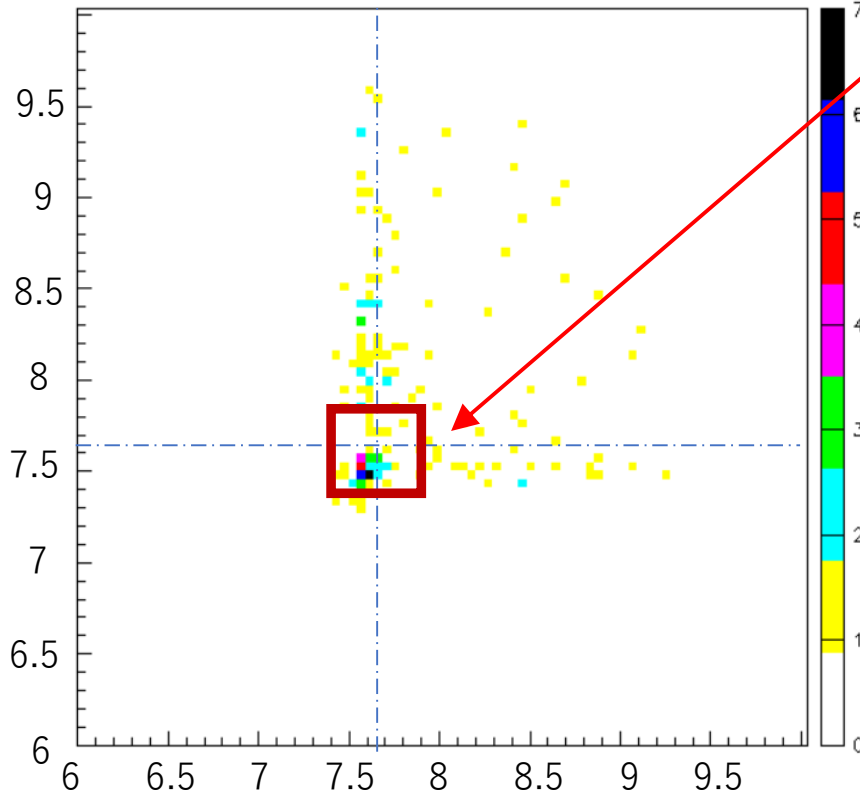
6α イベントを数える

$E_x$  の範囲として

$^{12}\text{C}$  の励起エネルギー (MeV)



左側  $^{12}\text{C}$  の励起エネルギー (MeV)



$^{12}\text{C}$  の励起エネルギー (MeV) 右側

測定した全エネルギーについて  
①~⑤の解析を行った

## ⑥ 断面積の決定

全断面積

3vs3 or 3vs2 イベントの数

$$= \frac{\text{測定イベント数}}{\text{検出効率}} \times \frac{1}{\text{ビームの粒子数}} \times \frac{1}{\text{標的の単位面積当たりの粒子数}}$$

シミュレーションから  
(1~9%)

ビームの電流値より計算

シミュレーション…*cm*系で断面積の分布が等方であるという仮定を含む

# ⑥ 断面積の決定

全断面積

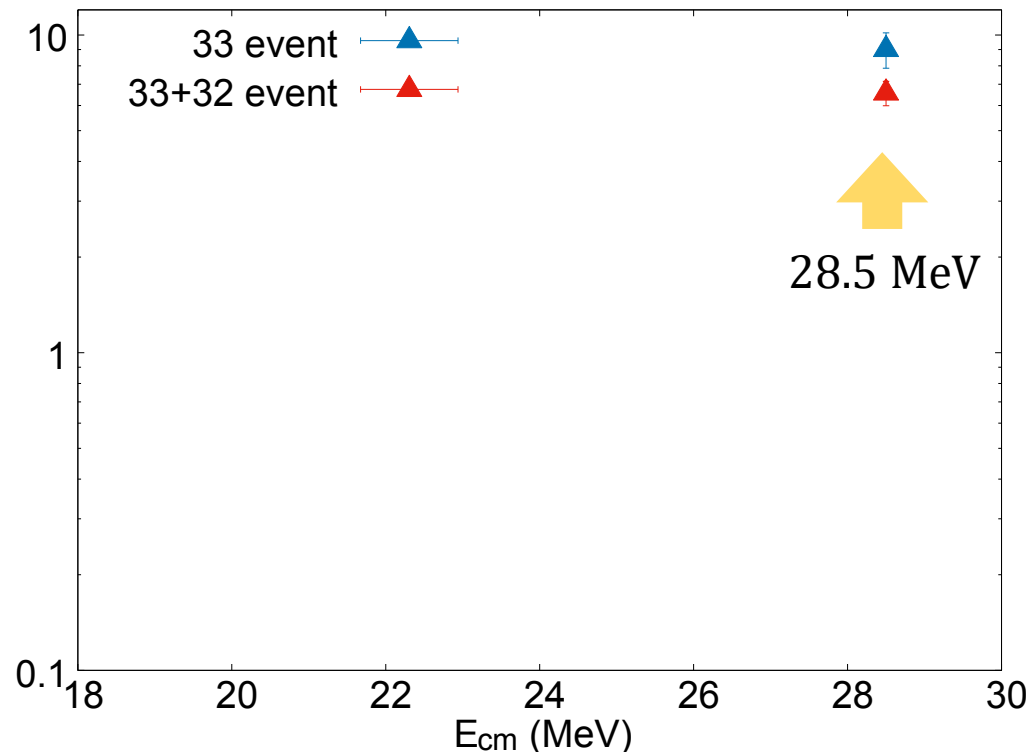
3vs3 or 3vs2 イベントの数

$$= \frac{\text{測定イベント数}}{\text{検出効率}} \times \frac{1}{\text{ビームの粒子数}} \times \frac{1}{\text{標的の単位面積当たりの粒子数}}$$

シミュレーションから  
(1~9%)

ビームの電流値より計算

全断面積( $\mu\text{b}$ )



# ⑥ 断面積の決定

全断面積

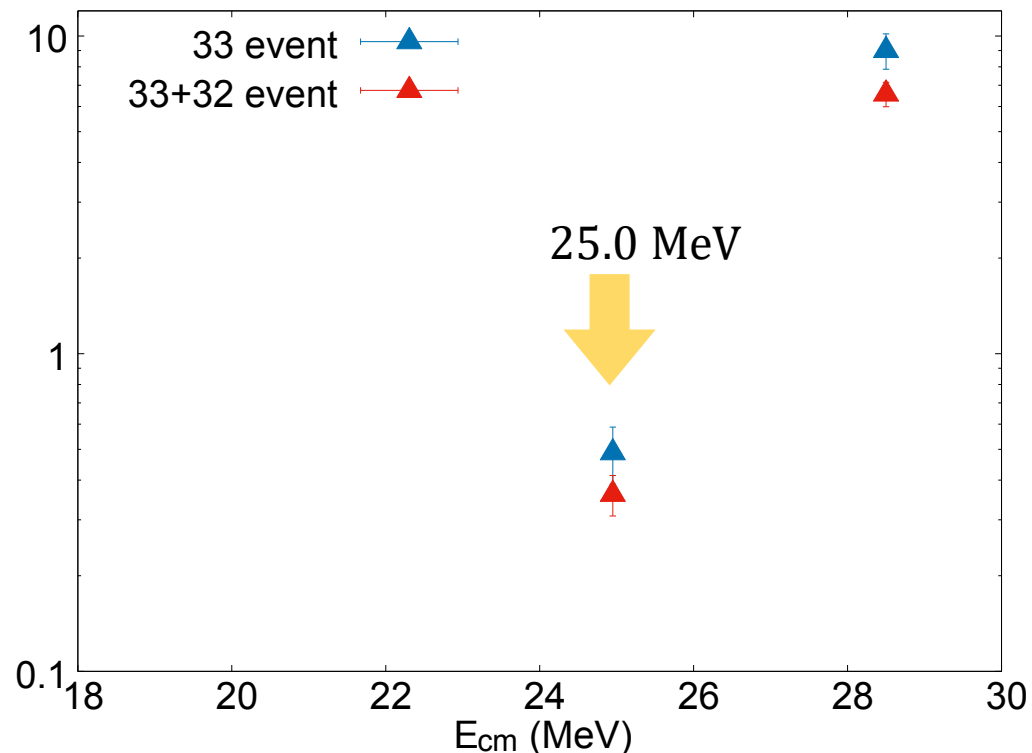
3vs3 or 3vs2 イベントの数

$$= \frac{\text{測定イベント数}}{\text{検出効率}} \times \frac{1}{\text{ビームの粒子数}} \times \frac{1}{\text{標的の単位面積当たりの粒子数}}$$

シミュレーションから  
(1~9%)

ビームの電流値より計算

全断面積( $\mu\text{b}$ )



# ⑥ 断面積の決定

## 全断面積

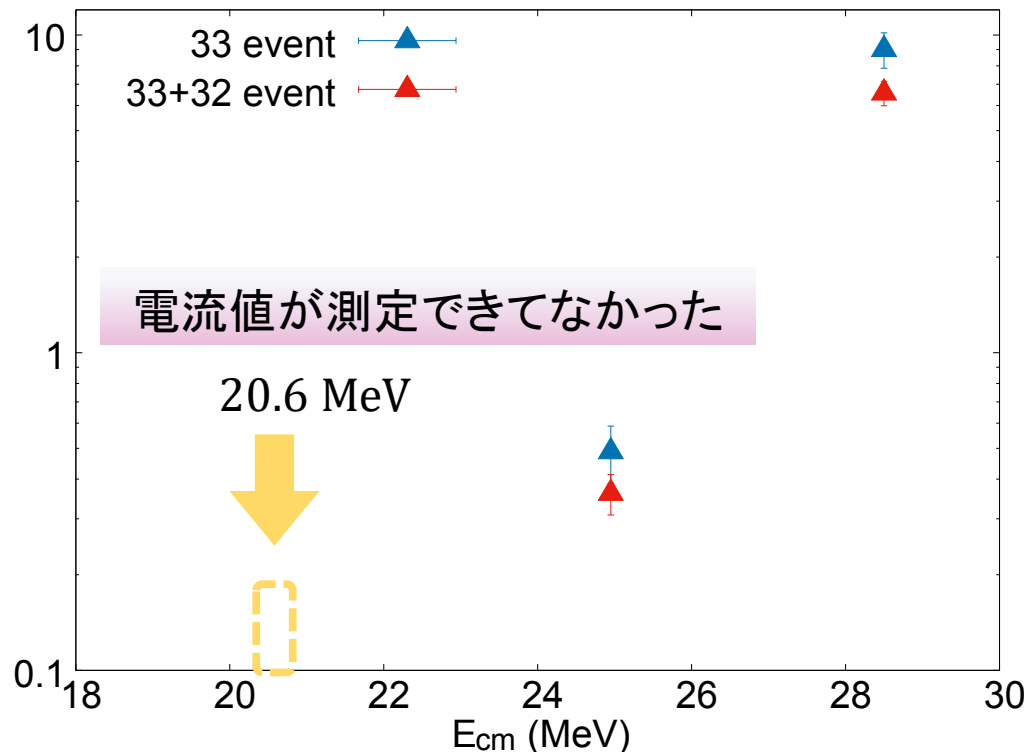
3vs3 or 3vs2 イベントの数

$$= \frac{\text{測定イベント数}}{\text{検出効率}} \times \frac{1}{\text{ビームの粒子数}} \times \frac{1}{\text{標的の単位面積当たりの粒子数}}$$

シミュレーションから  
(1~9%)

ビームの電流値より計算

全断面積(μb)



# ⑥ 断面積の決定

## 全断面積

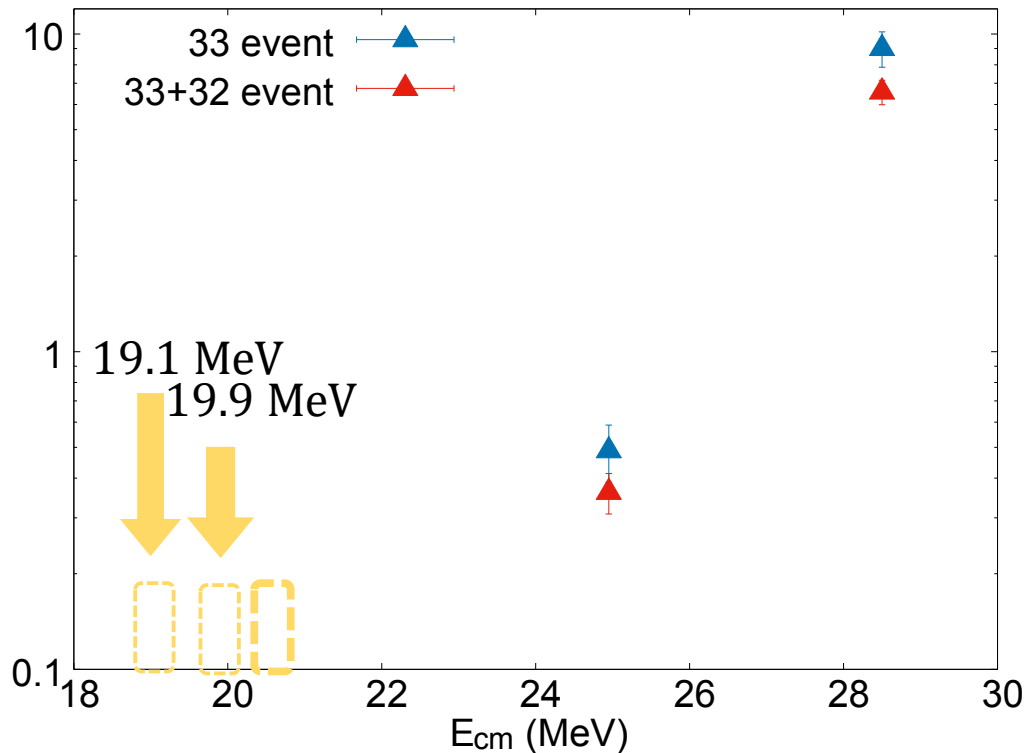
3vs3 or 3vs2 イベントの数

$$= \frac{\text{測定イベント数}}{\text{検出効率}} \times \frac{1}{\text{ビームの粒子数}} \times \frac{1}{\text{標的の単位面積当たりの粒子数}}$$

シミュレーションから  
(1~9%)

ビームの電流値より計算

全断面積( $\mu\text{b}$ )



# ⑥ 断面積の決定

## 全断面積

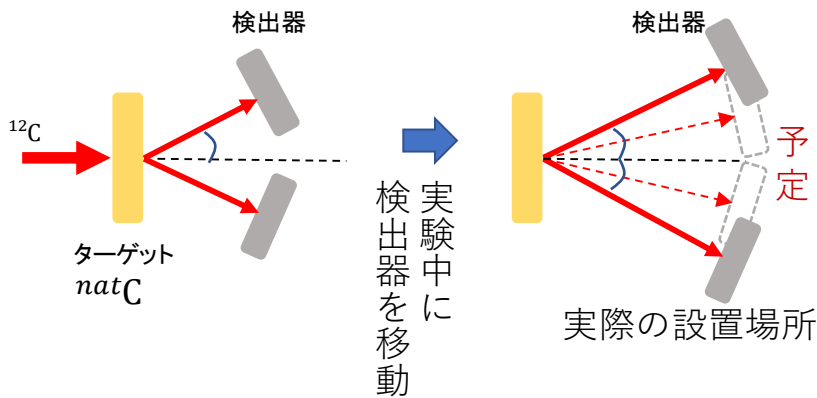
3vs3 or 3vs2 イベントの数

$$= \frac{\text{測定イベント数}}{\text{検出効率}} \times \frac{1}{\text{ビームの粒子数}} \times \frac{1}{\text{標的の単位面積当たりの粒子数}}$$

シミュレーションから  
(1~9%)

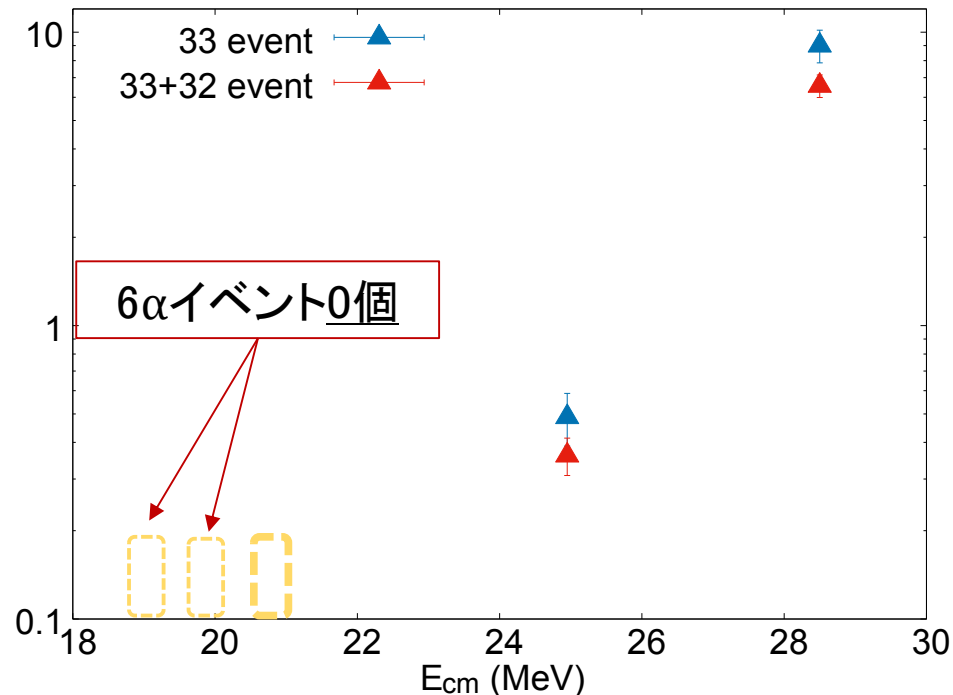
ビームの電流値より計算

今回の実験最大のミス  
→ 検出器の設置角度を間違えた



シミュレーションでは6αが  
検出されない設置位置。  
→ 実際の解析でも0イベント

## 全断面積(μb)



# ⑥ 断面積の決定

## 全断面積

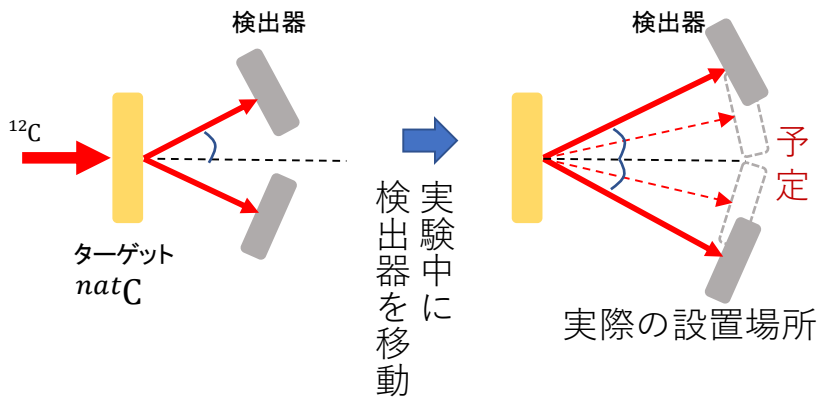
3vs3 or 3vs2 イベントの数

$$= \frac{\text{測定イベント数}}{\text{検出効率}} \times \frac{1}{\text{ビームの粒子数}} \times \frac{1}{\text{標的の単位面積当たりの粒子数}}$$

シミュレーションから  
(1~9%)

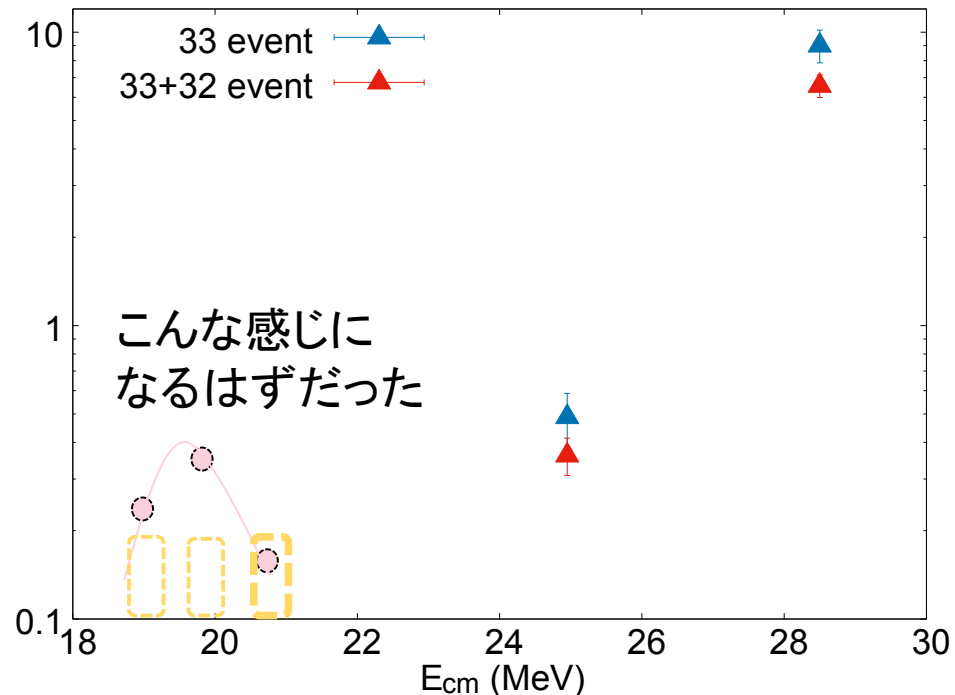
ビームの電流値より計算

今回の実験最大のミス  
→ 検出器の設置角度を間違えた



シミュレーションでは  $6\alpha$  が  
検出されない設置位置。  
→ 実際の解析でも 0 イベント

## 全断面積( $\mu\text{b}$ )





# ⑥ 断面積の決定：結果

全断面積

3vs3 or 3vs2 イベントの数

$$= \frac{\text{測定イベント数}}{\text{検出効率}} \times \frac{1}{\text{ビームの粒子数}} \times \frac{1}{\text{標的の単位面積当たりの粒子数}}$$

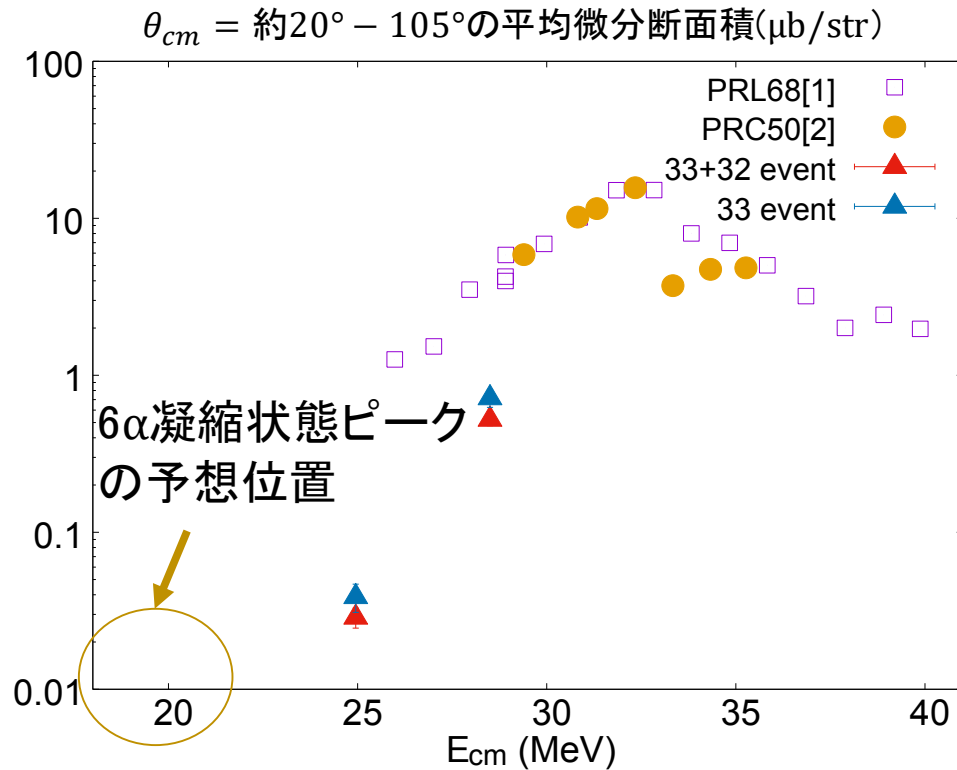
シミュレーションから  
(1~9%)

ビームの電流値より計算

$^{12}\text{C}(^{12}\text{C}, ^{12}\text{C}[0_2^+])^{12}\text{C}[0_2^+]$ の断面積

$E_{beam}$ (MeV)	$E_x$ (MeV)	3 × 3 event	3 × 2 event	3 × 3 検出効率	3 × 3 + 3 × 2 検出効率	全断面積 (33イベントのみ)	全断面積 (33イベント+32イ ベント)
57.0	42.4	64	68	3.2 %	9.3 %	$(9.0 \pm 1.2) \mu b$	$(6.6 \pm 0.6) \mu b$
49.9	38.9	24	44	3.1 %	8.3 %	$(4.9 \pm 1.0) \times 10^{-1} \mu b$	$(3.6 \pm 0.5) \times 10^{-1} \mu b$
41.2	34.5	0	1	0.2 %	1.0 %	—	—
39.7	33.8	0	0	0 %	0 %	—	—
38.1	33.0	0	0	0 %	0 %	—	—

# 4. 考察と結論

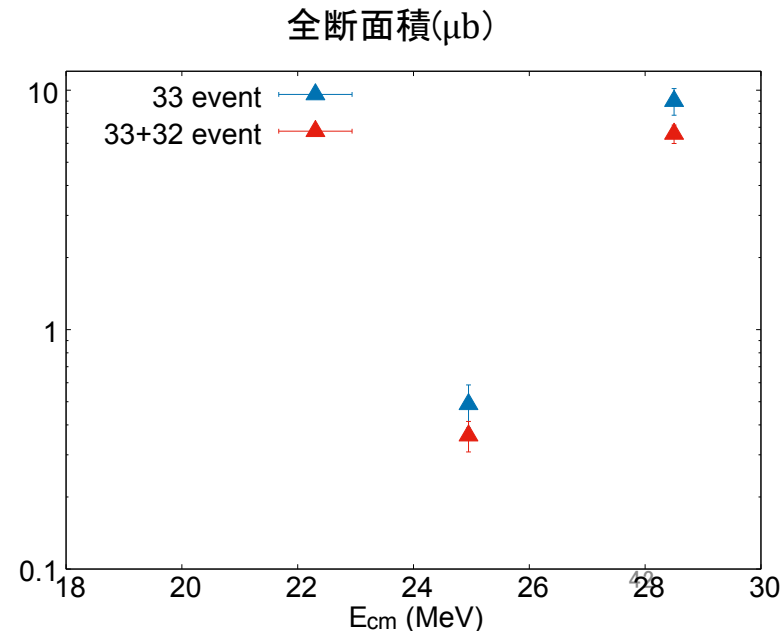


看過できないずれがある  
 →シミュレーションの改善が必要

1. A. H. Wuosmaa, et al., *Phys. Rev. Lett.* **68** 1295 (1992)
2. A. H. Wuosmaa, et al., *Phys. Rev. C* **50** 2909 (1994)

## 結論

- $E_{cm} = 28.5, 25.0$  MeVについて  
 $^{12}\text{C}(^{12}\text{C}, ^{12}\text{C}[0_2^+])^{12}\text{C}[0_2^+]$ の反応断面積を決定した。
- $^{24}\text{Mg}$ の $\alpha$ 凝縮状態の探索には至らなかった。



## 5. まとめ

# まとめ

- 非弾性共鳴散乱  $^{12}\text{C}(^{12}\text{C}, ^{12}\text{C}[0_2^+])^{12}\text{C}[0_2^+]$  の反応断面積を測定することで $^{24}\text{Mg}$  の6 $\alpha$ 凝縮状態の探索を行った。
- 2枚のSi検出器にそれぞれ3個ずつ入射した $\alpha$ 粒子を選択し、不変質量を計算することで $^{12}\text{C}[0_2^+]$  の同定を行い、6 $\alpha$ イベントを検出した。
- $E_{cm} = 28.5, 25.0$  MeVについては反応断面積を決定した。しかし先行研究よりは4倍程度少ない値となった。
- $^{24}\text{Mg}$ の $\alpha$ 凝縮状態の探索には至らなかった。

# 今後の課題

## $\alpha$ 凝縮状態の探索に向けて

- ビームエネルギーの低い測定点を得る  
ディグレーダーを通した→ビーム量が減った。  
→エネルギー可変の加速器を使い、標的も薄くする。
- 検出器の設置角度の改善

## 先行研究との比較について

- 先行研究と約4倍異なる値。  
→シミュレーションの再評価をする。

## さらに…

- $6\alpha$ について時間差やエネルギー差などでも吟味していく

## 共同研究者

(敬称略)

川畑貴裕	大阪大学理学研究科
延與佳子	京都大学理学研究科
吉田賢市	京都大学理学研究科
稲葉健斗	京都大学理学研究科
岡本慎太郎	京都大学理学研究科
片山一樹	京都大学理学部
阪上朱音	京都大学理学研究科
土井隆暢	京都大学理学研究科
藤川祐輝	京都大学理学研究科
古野達也	大阪大学核物理研究センター
王 恵仁	大阪大学核物理研究センター

## 謝辞

標的を作っていただいた理化学研究所長谷部裕雄さん、  
フレンジ、ガスセルの製作をしてくださった早田恵美さん、  
施設を使わせてくださった核物理研究センターのみなさん、  
そのほか研究に関わってくださったみなさん、  
ありがとうございました。