

# 前期P4実験 GAGGの荷電粒子に対する応答

片山一樹 高井弦希  
土井隆暢 中森悠太  
西原拓哉 原田健志  
古田悠稀

# GAGG( $\text{Gd}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}(\text{Ce})$ )とは

- ・東北大学金属材料研究所と古河機械金属グループが共同開発
- ・無機シンチレータ
- ・酸化物であるために潮解性をもたないので取り扱いが容易
- ・ $\gamma$ 線の検出器として広く用いられ始めている



表： $\gamma$ 線に対するGAGGとCsIの応答

	密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	エネルギー分解能 (FWHM)@662keV	発光時間 (ns)	発光量 (光子/MeV)
GAGG(Ce)	6.63	5~6%	88	47,000
CsI(Tl)	4.51	6%	1000	56,000

# GAGG( $Gd_3Al_2Ga_3O_{12}(Ce)$ )とは

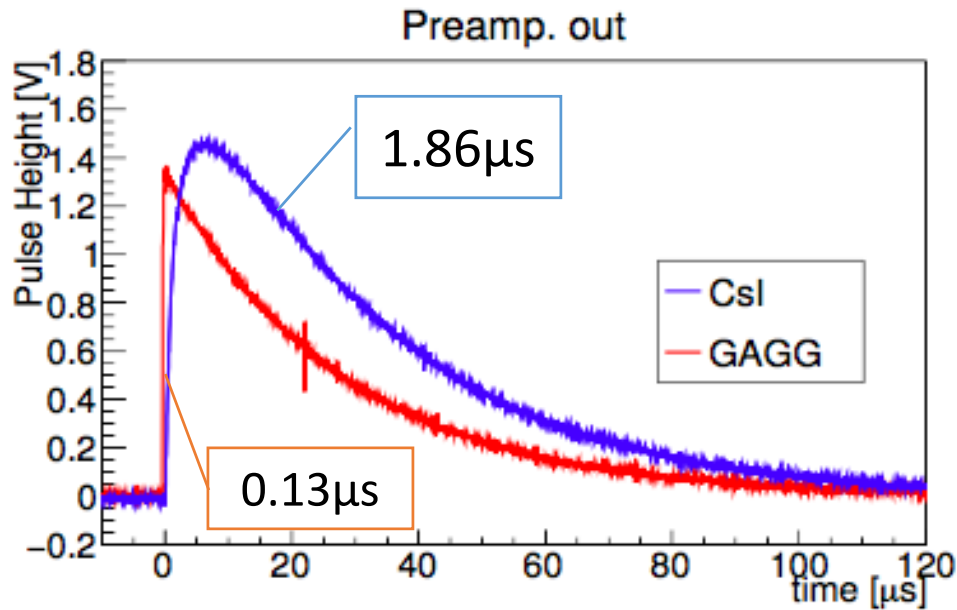
- ・東北大学金属材料研究所と古河機械金属グループが共同開発
- ・無機シンチレータ
- ・酸化物であるために潮解性をもたないので取り扱いが容易
- ・ $\gamma$ 線の検出器として広く用いられ始めている



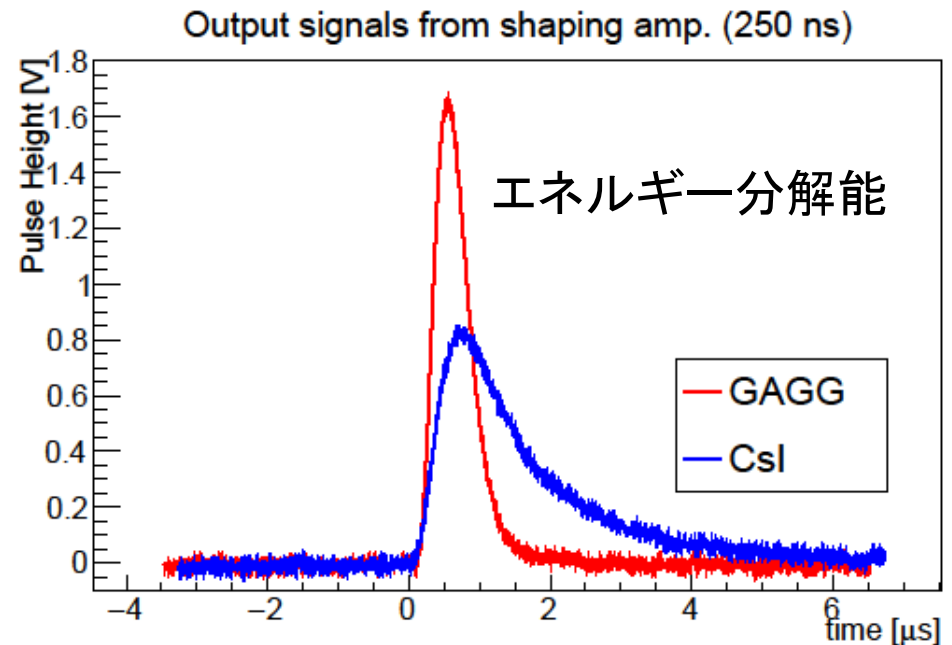
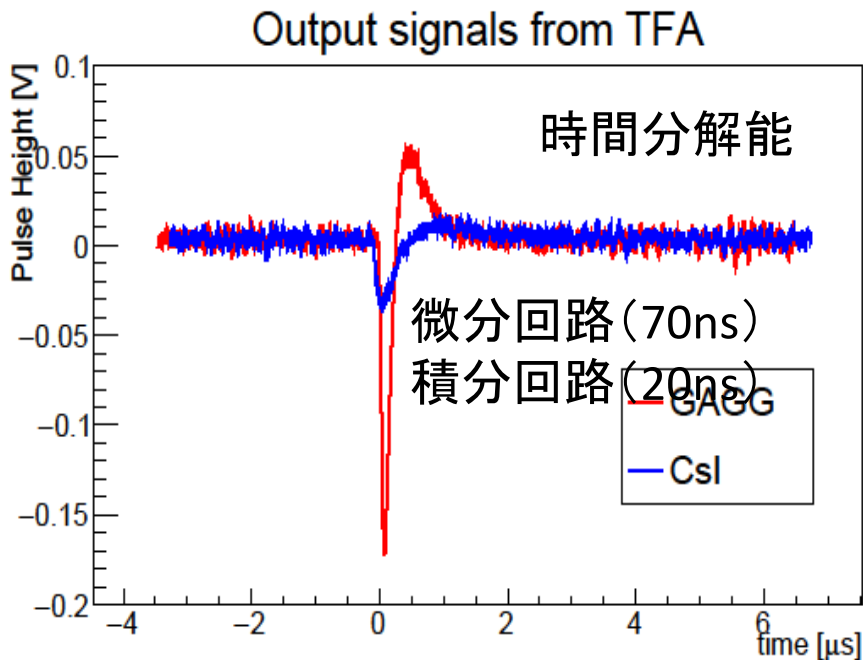
表： $\gamma$ 線に対するGAGGとCsIの応答

	密度 ( $g/cm^3$ )	エネルギー分解能 (FWHM)@662keV	発光時間 (ns)	発光量 (光子/MeV)
GAGG(Ce)	6.63	5~6%	88	47,000
CsI(Tl)	4.51	6%	1000	56,000

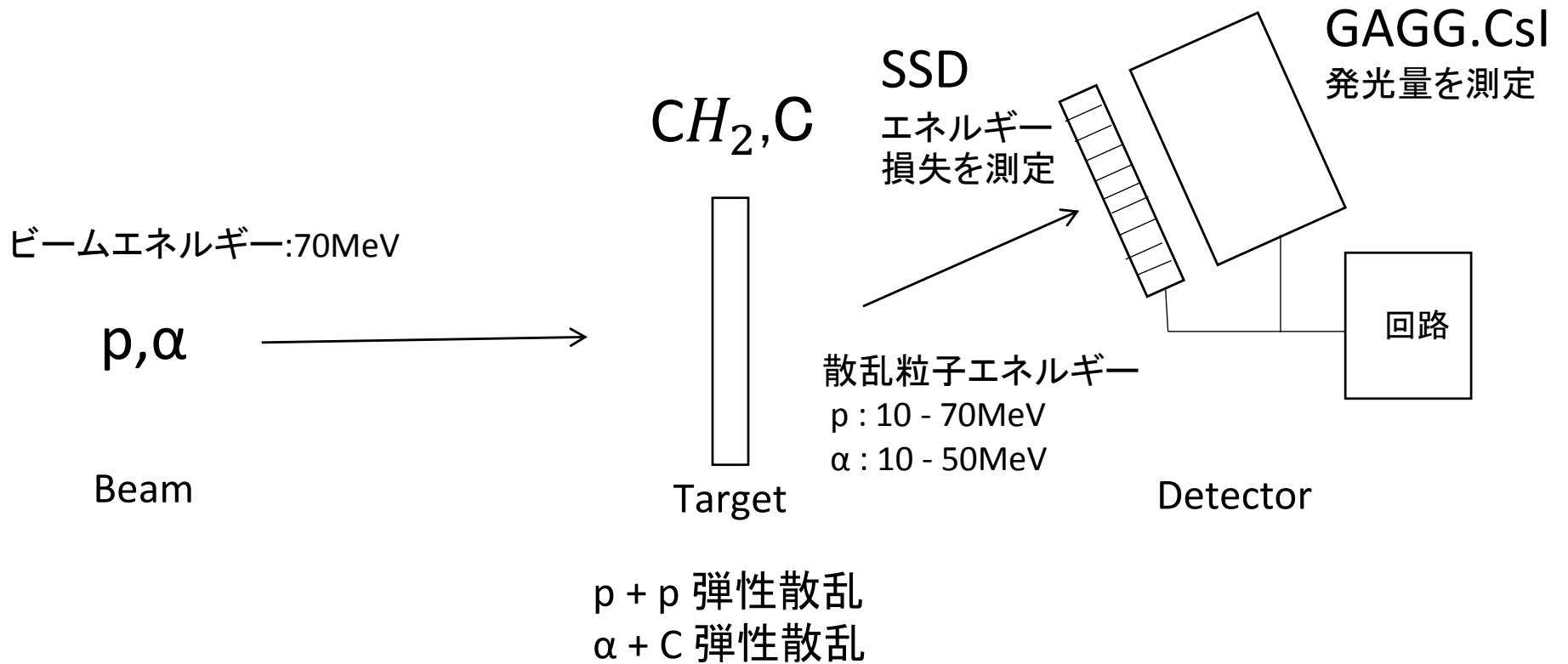
# $^{137}\text{Cs}$ からの $\gamma$ 線(661keV)に対する出力波形 (Koshikawa et al.)



- Preampの出力では波高は同じくらい
- 時間, エネルギー分解能の性能を調べる  
信号に対してもGAGGは高い波高が得られる  
( $\gamma$ 線に対しての応答はたくさん調べられている)
- 数少ない荷電粒子に対する応答を調べた実験  
→ Koshikawa et al.

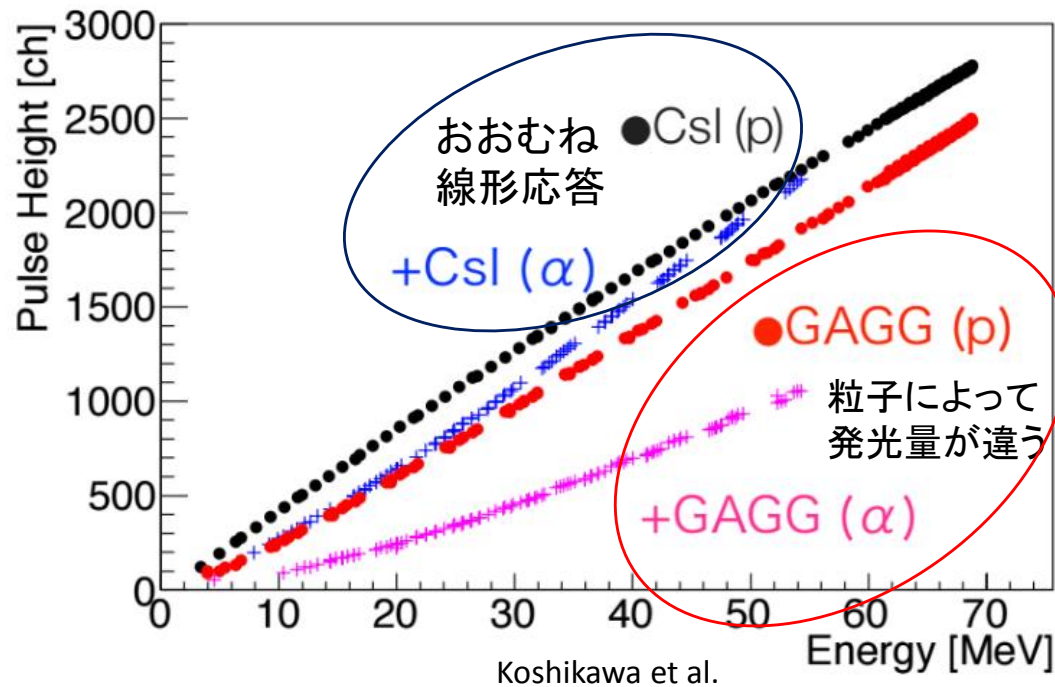


# Koshikawa 実験概略



# 荷電粒子のエネルギーに対する GAGG,CsIの発光量の関係

単位エネルギー  
あたり発光量  
 $\frac{dL}{dE}$



発光量を粒子によらない形で表したい

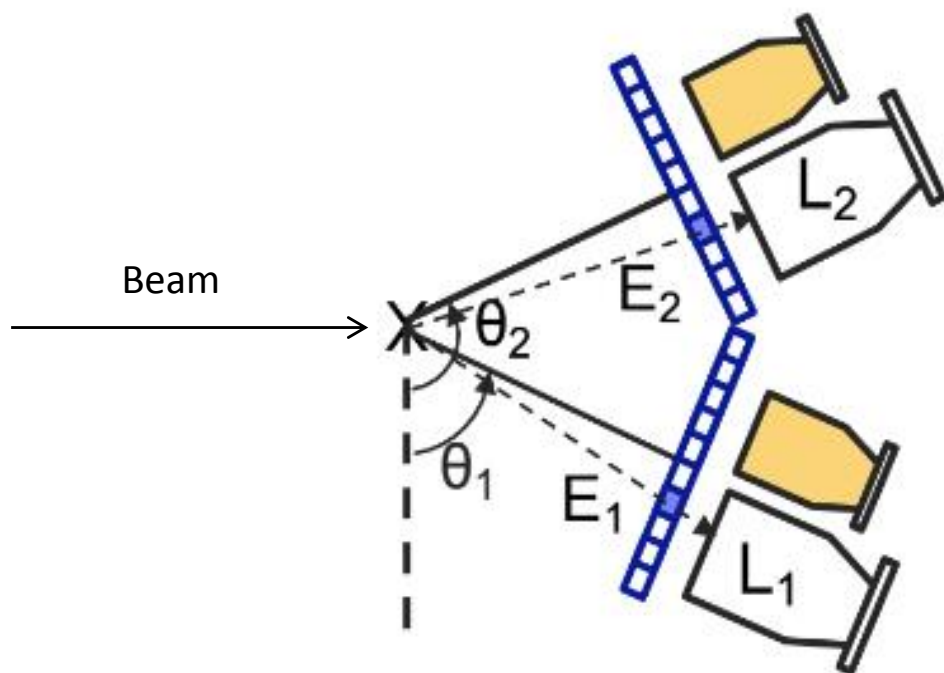
→軸を変える

単位長さあたり  
エネルギー損失

$$\frac{dE}{dx}$$

Koshikawa et al.

# 荷電粒子の種類によらない量



Koshikawa et al.

$L_1, L_2$ : 発光量  
 $E_1, E_2$ : エネルギー

単位エネルギーあたり発光量

$$\frac{dL}{dE} = \frac{L_1 - L_2}{E_1 - E_2}$$

単位長さ辺りエネルギー損失

$$\frac{dE}{dx}$$

はSRIMで計算

# 単位長さに落とすエネルギーと 単位エネルギーあたり発光量の関係



データが  
欲しい

Koshikawa et al.



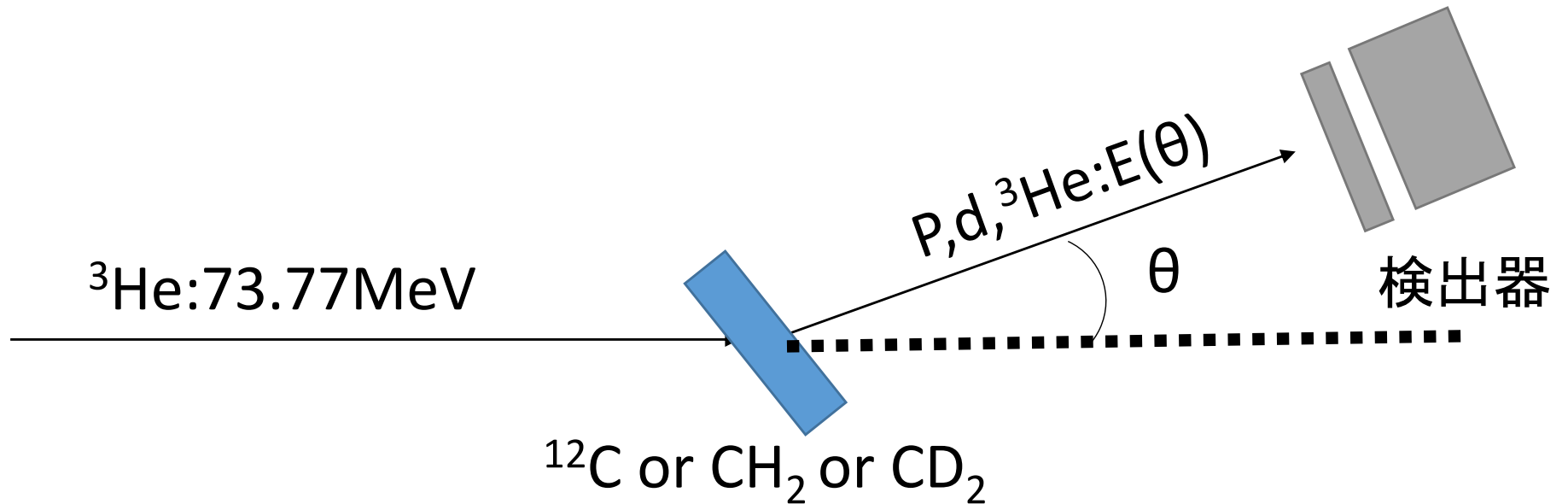
# Experiment & Set up

- 検出器テストに使用した粒子ビーム
- 利用した弾性散乱反応
- 計数率の概算
- 実験系、実験装置の概略図
- 実験回路

# 使用した粒子ビーム

- 使用した結晶:GAGG,CsI
- ビーム: ${}^3\text{He}$  73.77MeV
- 使用した標的: ${}^{12}\text{C}$ , $\text{CH}_2$ (ポリエチレン), $\text{CD}_2$ (重水素化ポリエチレン)

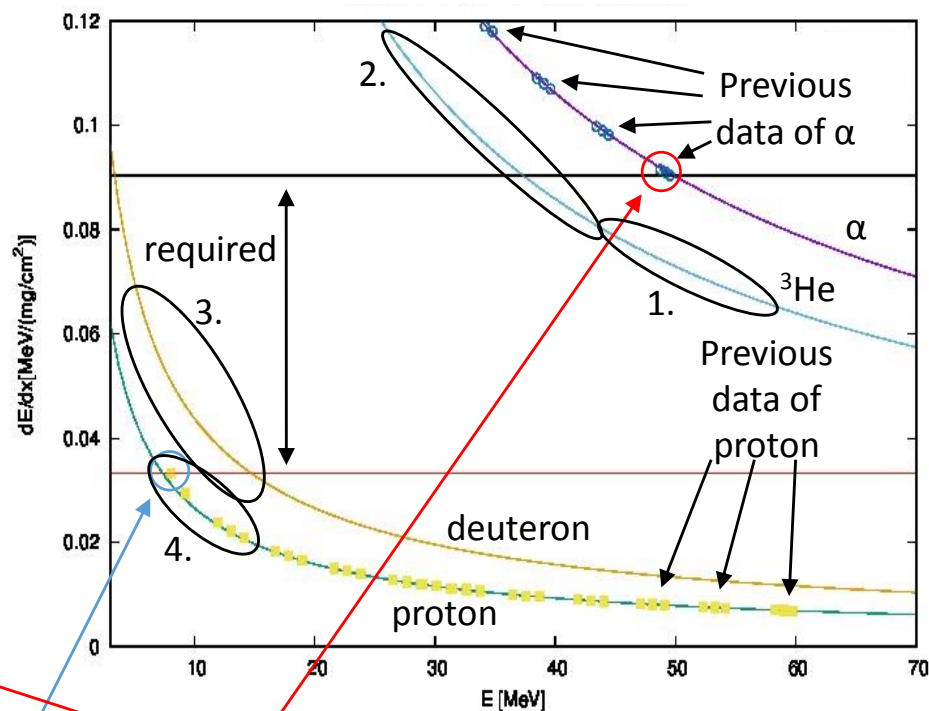
角度 $\theta$ に弾性散乱された、対応するエネルギー $E(\theta)$ を持った粒子(proton,deuteron, ${}^3\text{He}$ )を検出器に入射した。



# 弾性散乱反応より得られるであろう実験点

1.  $^{12}\text{C}(^3\text{He}, ^3\text{He})^{12}\text{C} \rightarrow 15^\circ \sim 60^\circ$
2.  $d(^3\text{He}, ^3\text{He})d \rightarrow 22^\circ \sim 34^\circ$
3.  $d(^3\text{He}, d)^3\text{He} \rightarrow 55^\circ \sim 65^\circ$
4.  $p(^3\text{He}, p)^3\text{He} \rightarrow 58^\circ \sim 65.5^\circ$

GAGG結晶に対する単位行程当たりのエネルギー損失  
(理論曲線と過去の実験点)



見せられないよ！

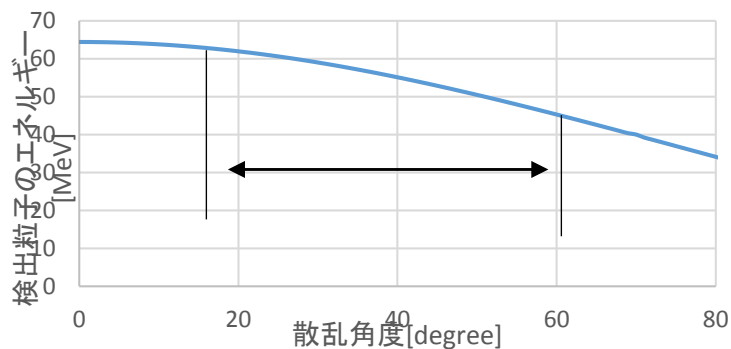
$dE/dx$  [MeV/(g/cm<sup>2</sup>)]  
Koshikawa et, al.

同じ実験点

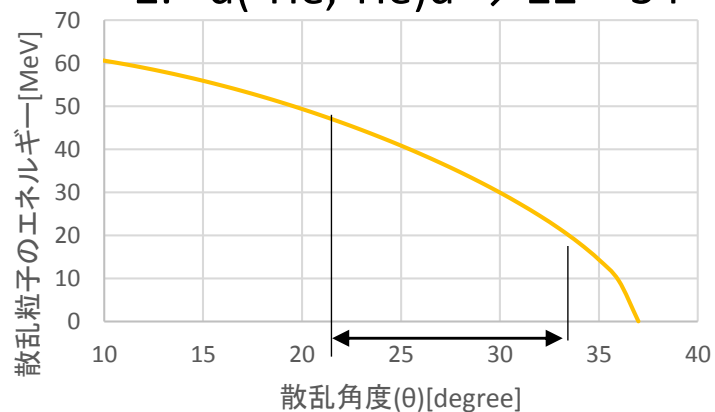
同じ実験点

# 利用した弾性散乱反応

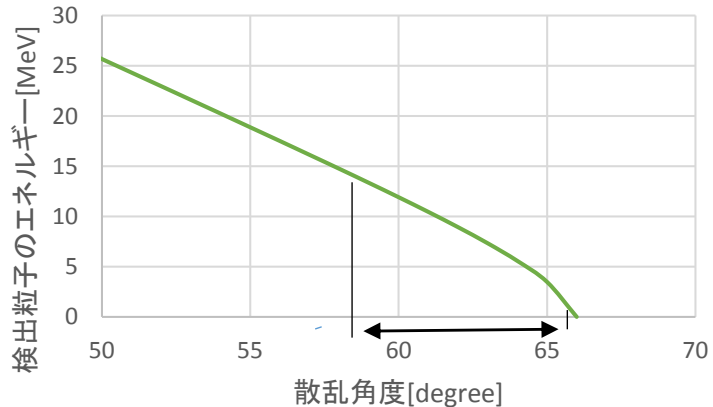
1.  $^{12}\text{C}(^3\text{He},^3\text{He})^{12}\text{C} \rightarrow 15^\circ \sim 60^\circ$



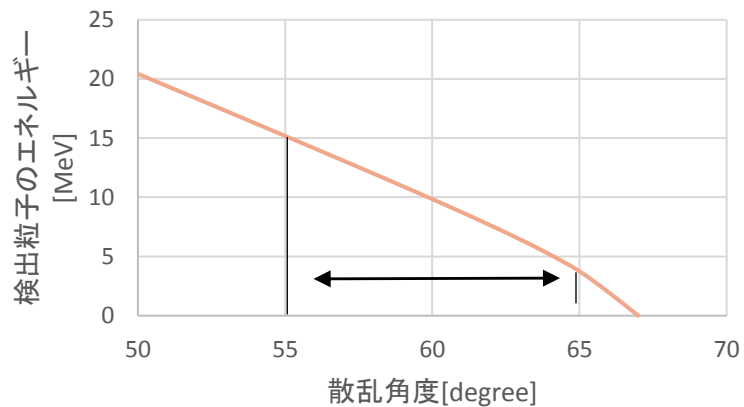
2.  $d(^3\text{He},^3\text{He})d \rightarrow 22^\circ \sim 34^\circ$



3.  $d(^3\text{He},d)^3\text{He} \rightarrow 58 \sim 65.5^\circ$



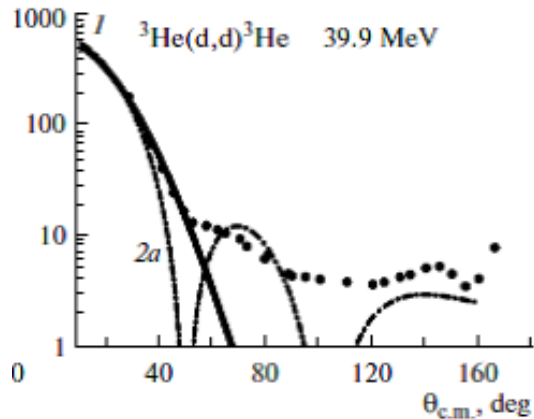
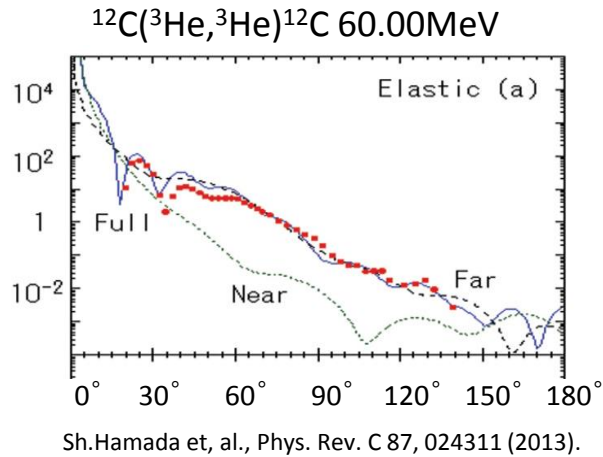
4.  $p(^3\text{He},p)^3\text{He} \rightarrow 55^\circ \sim 65^\circ$



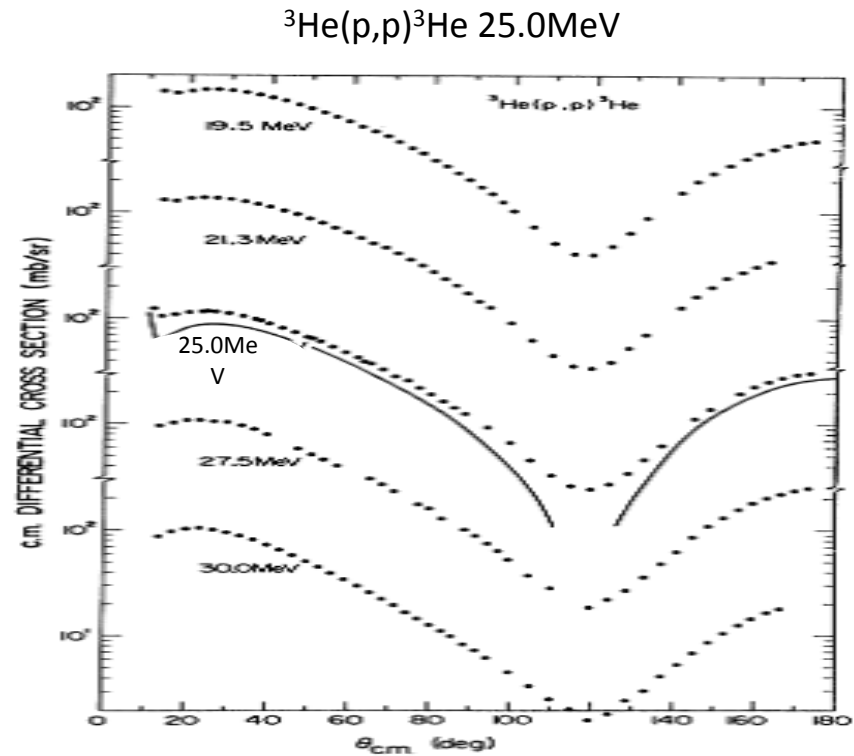
# 計数率の概算

標的	散乱粒子	$\theta_{lab}$ [deg]	散乱粒子 エネルギー [MeV]	散乱粒子 dE/dx(GAG G)[MeV/(m g/cm <sup>2</sup> )]	<sup>3</sup> Hebeam強 度[enA]	計数率 [cps]
12C	3He	15°	62.99	0.061	20	21
12C	3He	60°	45.27	0.078	20	2.1
CD2	3He	34°	18.26	0.152	5	4.5
CD2	3He	22°	46.24	0.077	5	2.2
CD2	d	58°	14.75	0.033	5	5.8
CD2	d	65.5°	2.13	0.114	5	2.6
CH2	p	55°	15.18	0.019	1	5.5
CH2	p	65°	3.75	0.053	1	7.5

# 計数率計算に用いた過去の断面積の実験データ



O.O. Beliuskina et, al., Bull. Russ. Acad.of Sci. Phys. 76, 928-933(2012)



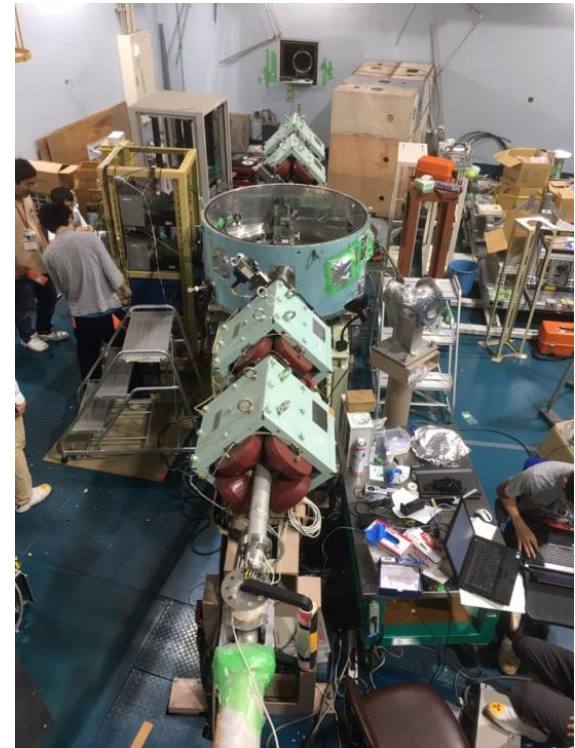
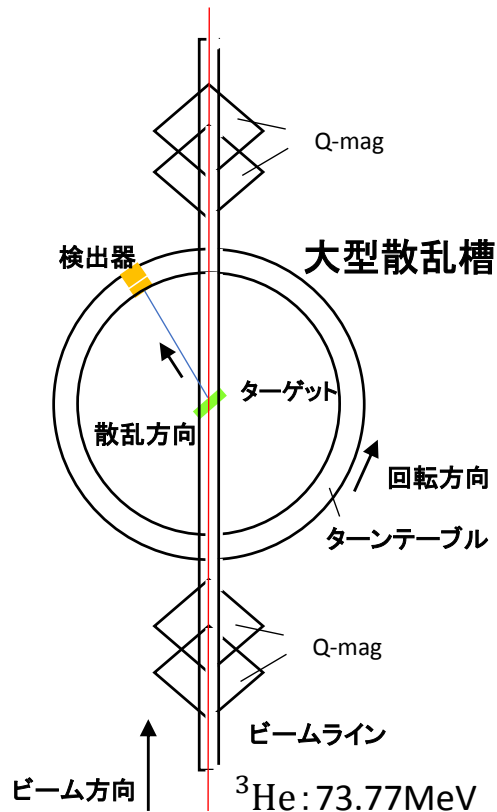
3]B. T. Murdoch et, al., Phys. Rev. C 29, 2001-2008 (1984).

# セットアップ

大阪大学核物理研究センターで実験を行った。

4つのQ-magの罫書き線を目印にビームラインを決定

ビームの通り道とターンテーブルの回転中心が一致することが重要！



# ターンテーブル回転中心の導出

・ターンテーブルの回転中心とターゲットのズレを確認するために $\theta$ を変えながら $l(\theta)$ を測る。

$$l(\theta) = \sqrt{(x' - x)^2 + (y' - y)^2}$$

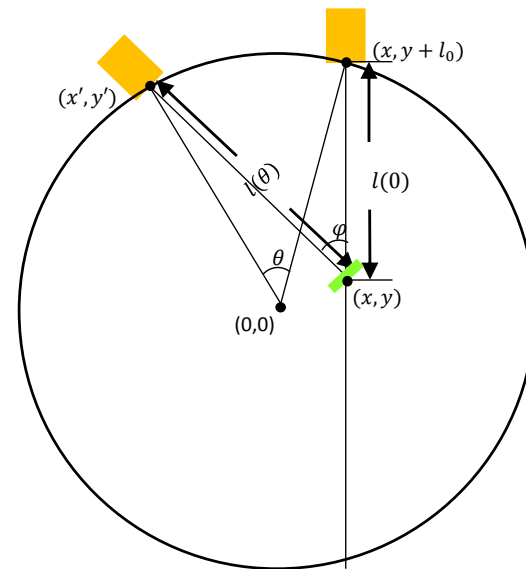
$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y + l(0) \end{pmatrix}$$

測定した $l(\theta)$ を上式を用いてfitting

得られた $(x, y)$ を、ターンテーブルの回転中心からのターゲットのずれとした。

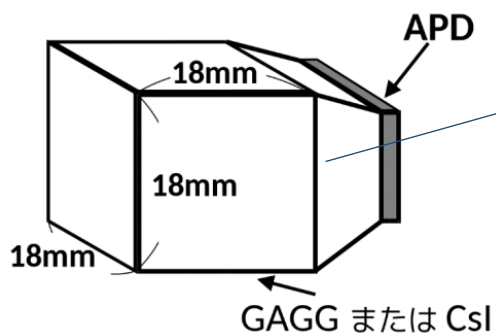
$l(\theta)$ : 検出器からターゲットまでの距離  
 $\theta$ : ターンテーブルの回転角度

$(0,0)$ : ターンテーブルの回転中心  
 $\varphi$ : 真の散乱角



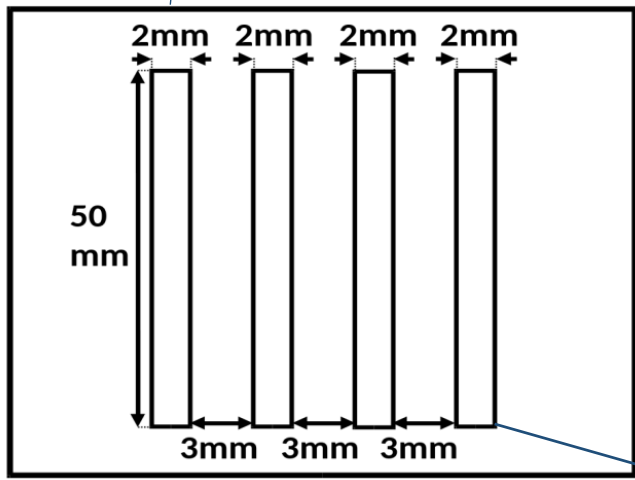
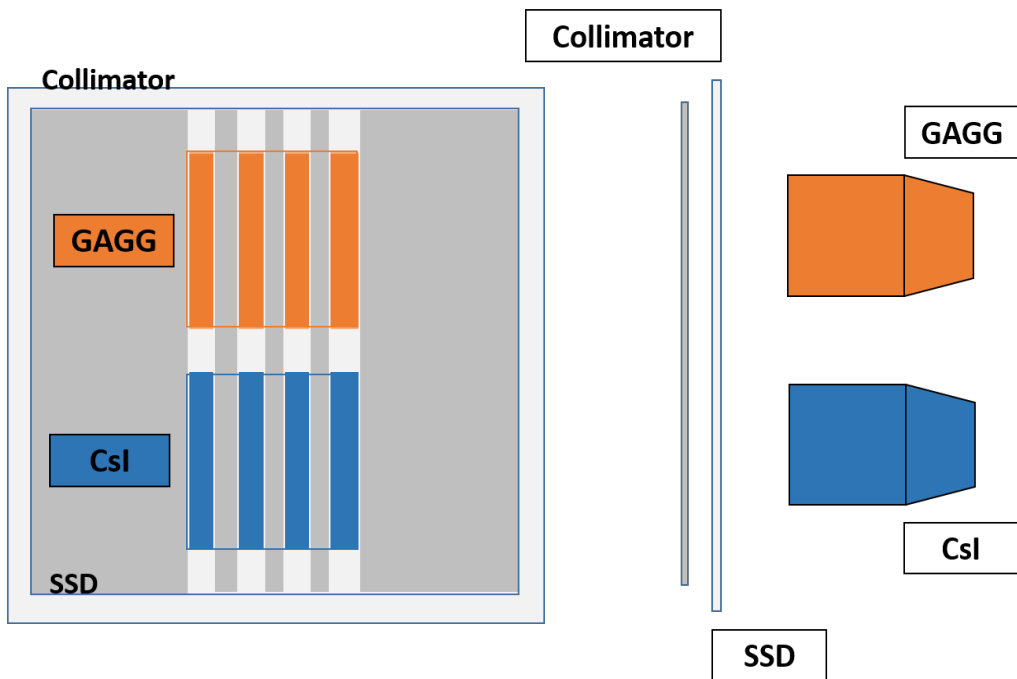


# 検出器



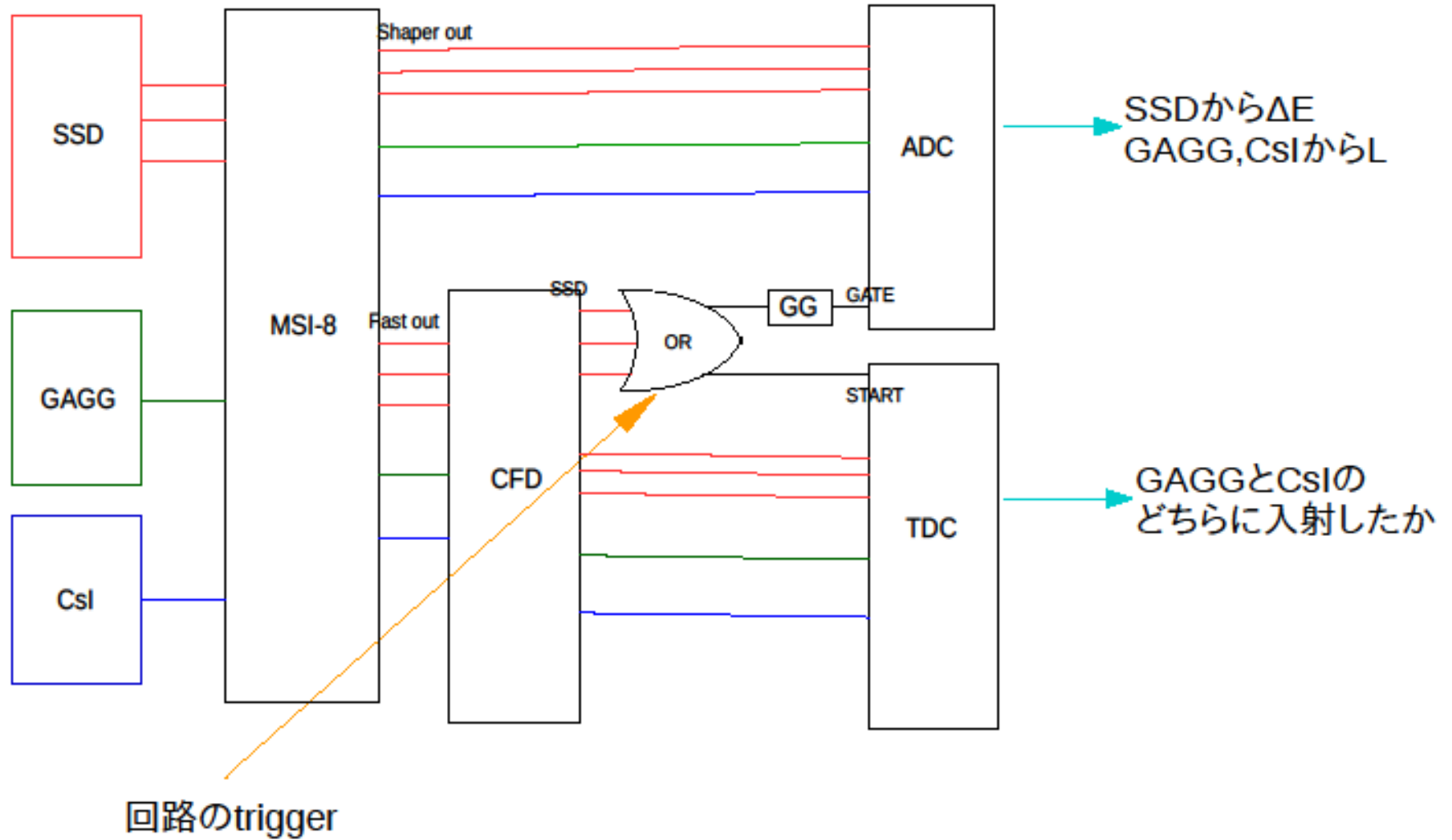
シンチレーション光の収集効率を上げるために反射フィルム(ESR)で包装

スリット幅を絞ると角度が絞られる  
⇒エネルギー分解能が良くなる



ここはSSDの信号が取れなかった

# 回路



# Energy較正

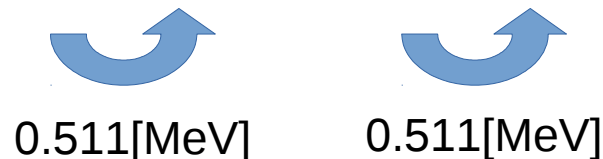
- Pluserを用いてADCで読み取れるchと信号の波高を関係づけた
- Si半導体検出器については3種混合 $\alpha$ 線源

$^{241}\text{Am}$	$^{244}\text{Cm}$	$^{148}\text{Gd}$
5.486[MeV]	5.805[MeV]	3.182[MeV]

- GAGG、CsIについてはトリタン棒を用いた

トリタン棒(トリウム入りタングステン電極棒)に含まれている $^{208}\text{Pb}$ (トリウム系列)の脱励起を利用

全吸収	Single escape	Double escape
2.614[MeV]	2.103[MeV]	1.592[MeV]



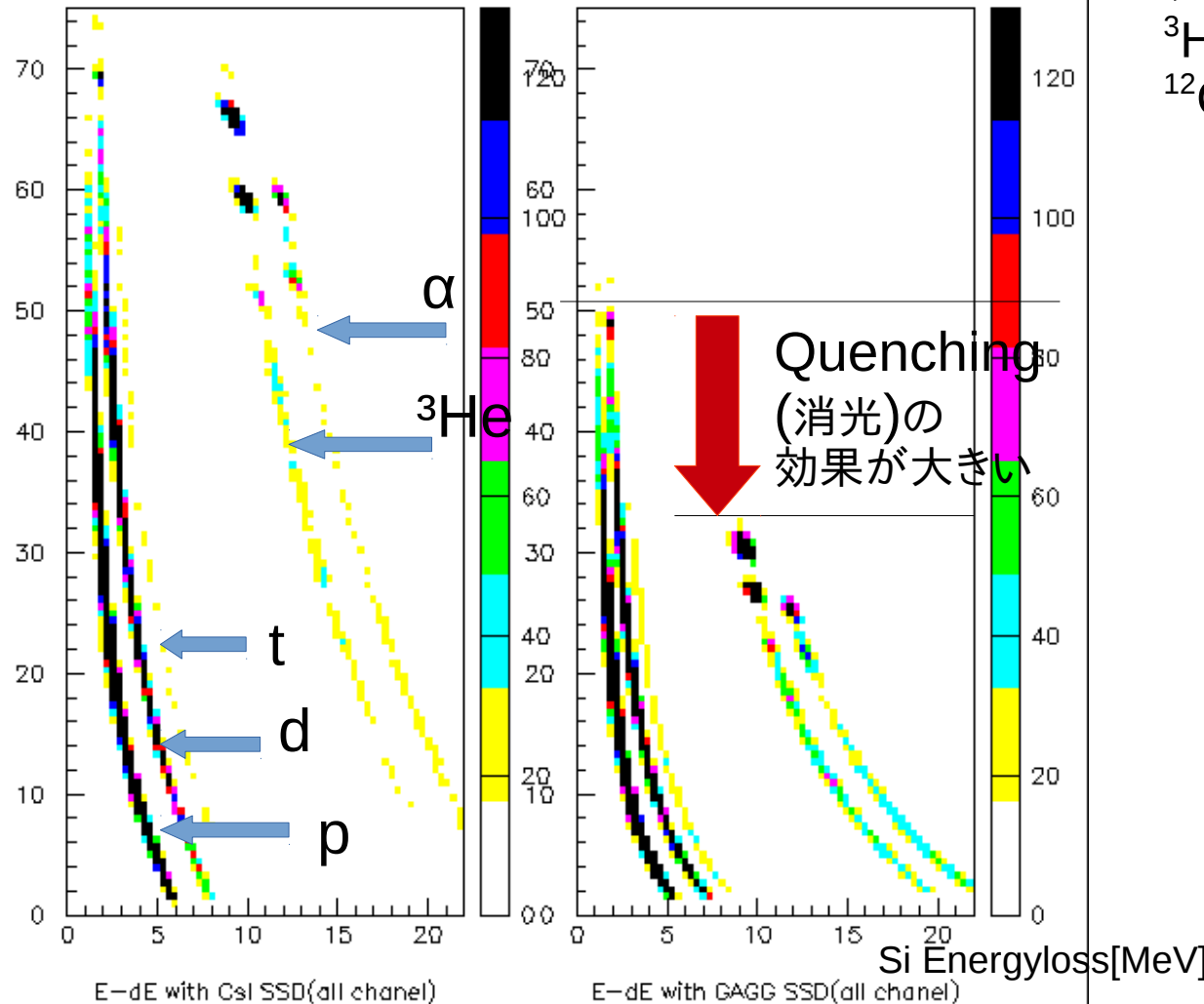
対消滅の際に発生した $\gamma$ 線がエネルギーを持ち出す

発光量を[ch]から[MeVee]に較正

MeVee(MeV electron equivalent)

# E-dE相関による粒子判別

発光量[MeVee]



データは45°に散乱された  
<sup>3</sup>He  
<sup>12</sup>C(<sup>3</sup>He,<sup>3</sup>He)

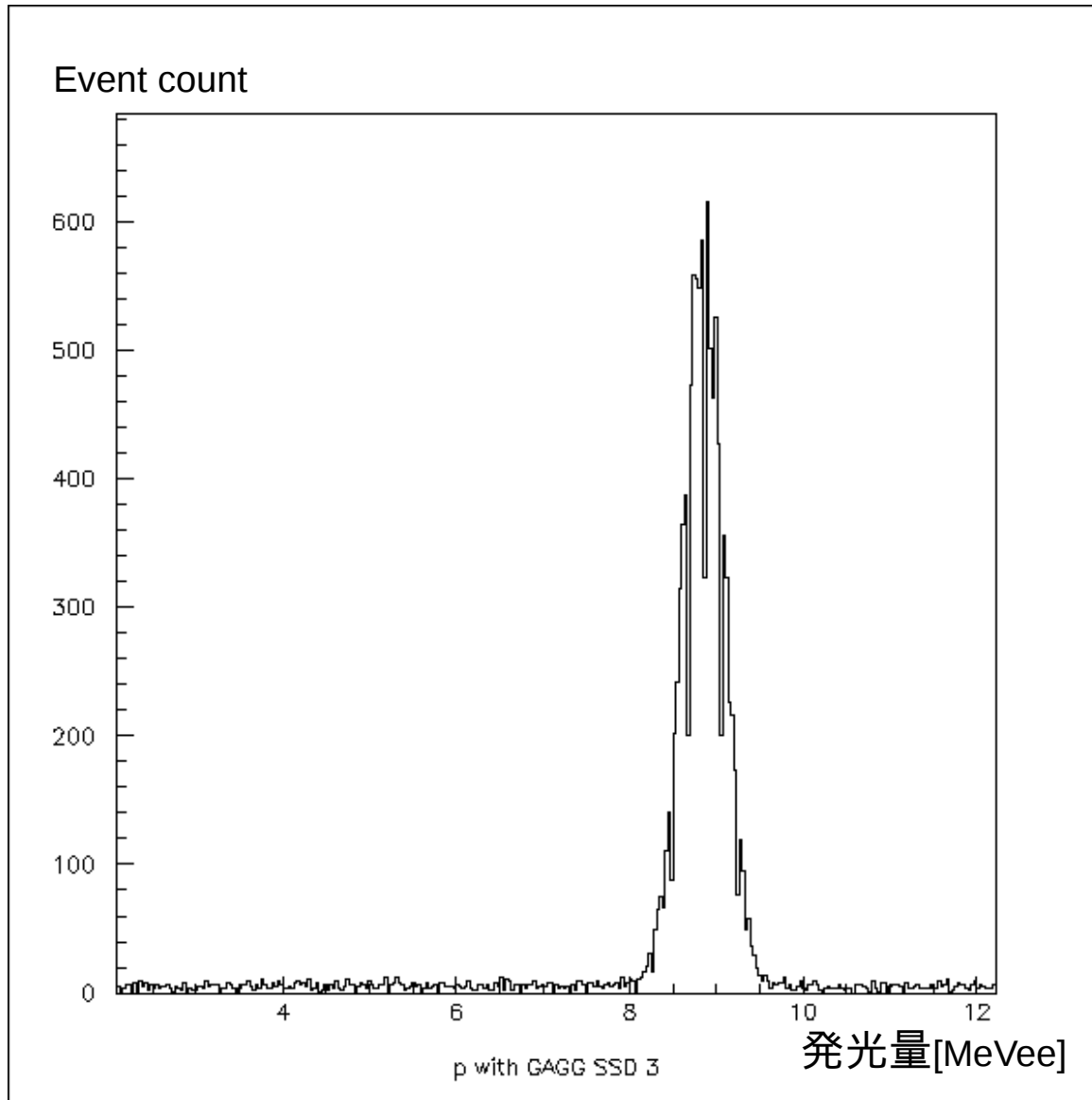
$$\Delta E \propto Az^2/E$$



質量数、電荷が  
 違えば  
 違うラインに乗る

ライン付近の粒子だけ  
 選び出して  
 発光量[MeVee]の  
 1次元Histに

# 発光量(MeVee)の決定



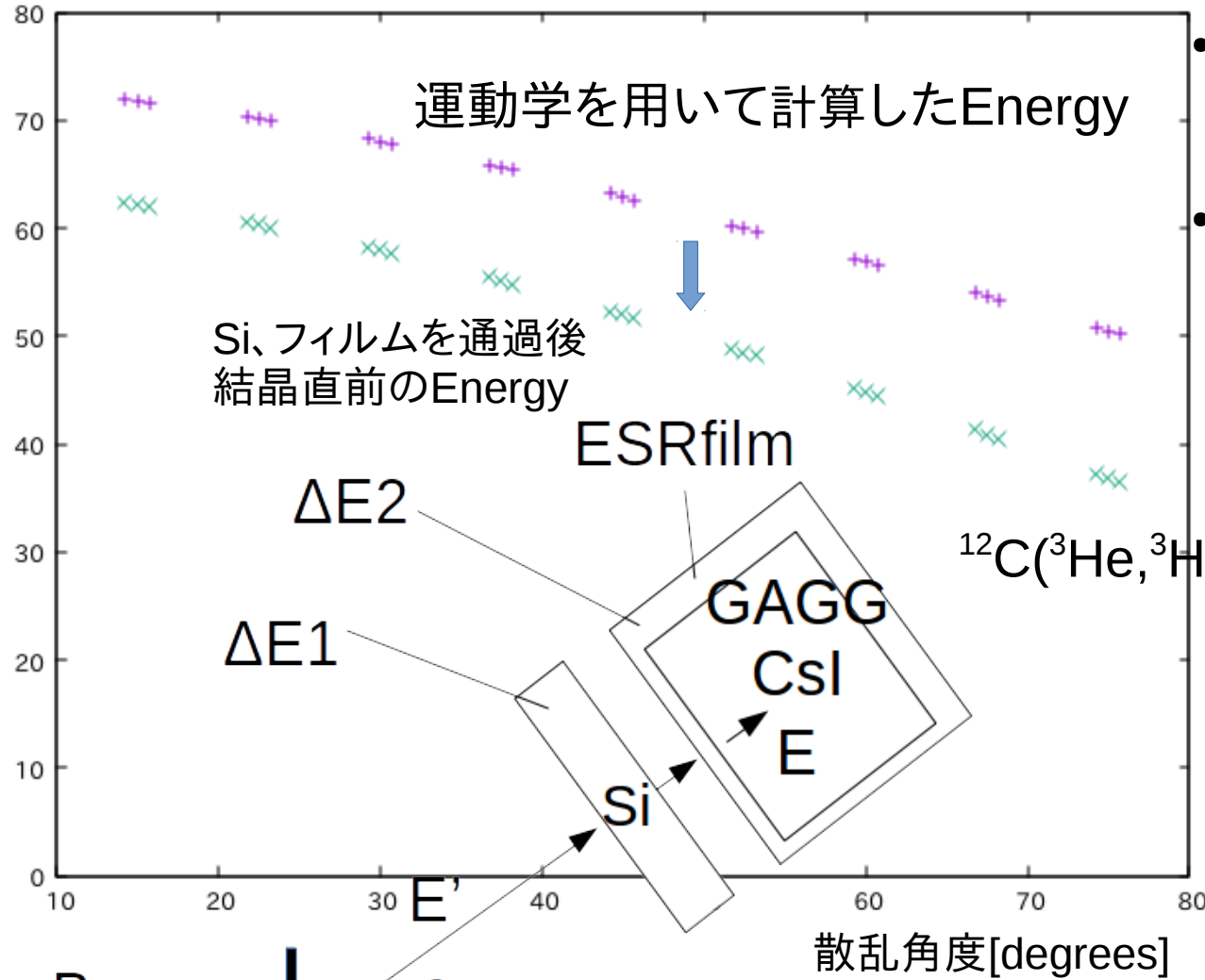
- 58°に飛んできたproton  $p(^3\text{He},p)$
- ピークをGaussianでFittingして発光量(MeVee)を決定
- MeVeeの読み取り誤差は $\pm 0.02$ [MeVee]程度とした



散乱角度、粒子に対する  
発光量の決定

# 散乱角度とEnergy

Energy[MeV]



- $^{12}\text{C}(^3\text{He}, ^3\text{He})$ 散乱の  
角度に対するEnergy

- Si、ESRフィルムで  
Energy lossした後に  
結晶に入る直前のEnergy

Energy lossはLISE++を  
用いて計算した

$^{12}\text{C}(^3\text{He}, ^3\text{He})$



散乱角度に対する  
結晶入射Energyが  
出たので  
結晶入射Energyと  
発光量が対応

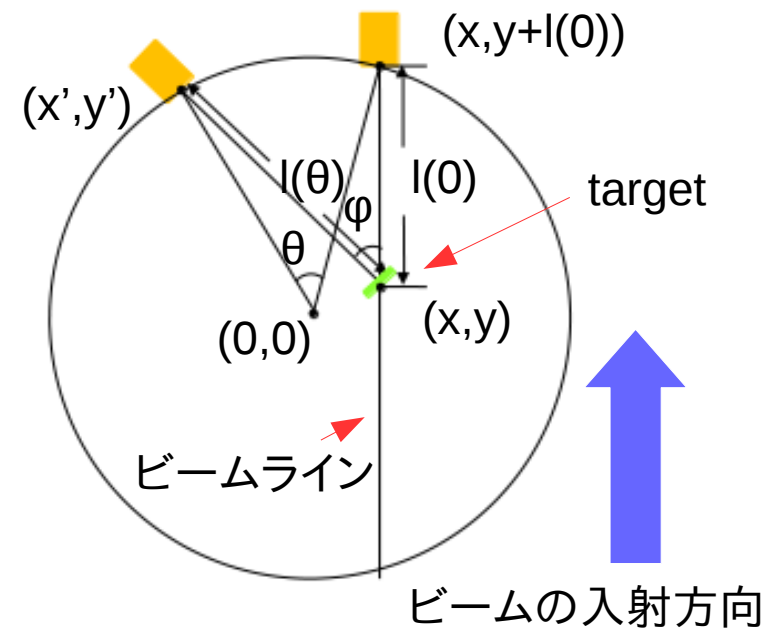
# 散乱角度のずれについて

今回散乱槽を回転させることで検出器の角度を変えて実験したが、散乱槽の回転中心がずれていた場合想定していた角度とずれが生じる

そこで真の回転中心を求めた

$$l(\theta) = \sqrt{(x' - x)^2 + (y' - y)^2}$$
$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y + l(0) \end{pmatrix}$$

$l(\theta)$ を $0^\circ \sim 90^\circ$ で $10^\circ$ ごとに計測しfitting



$l(\theta)$ : 検出器からターゲットまでの距離     $\phi$ : 真の散乱角  
(0,0): ターンテーブルの回転中心     $\theta$ : ターンテーブルの回転角度

fittingの結果

x	y
0.753mm	1.109mm

のずれが確認できた。

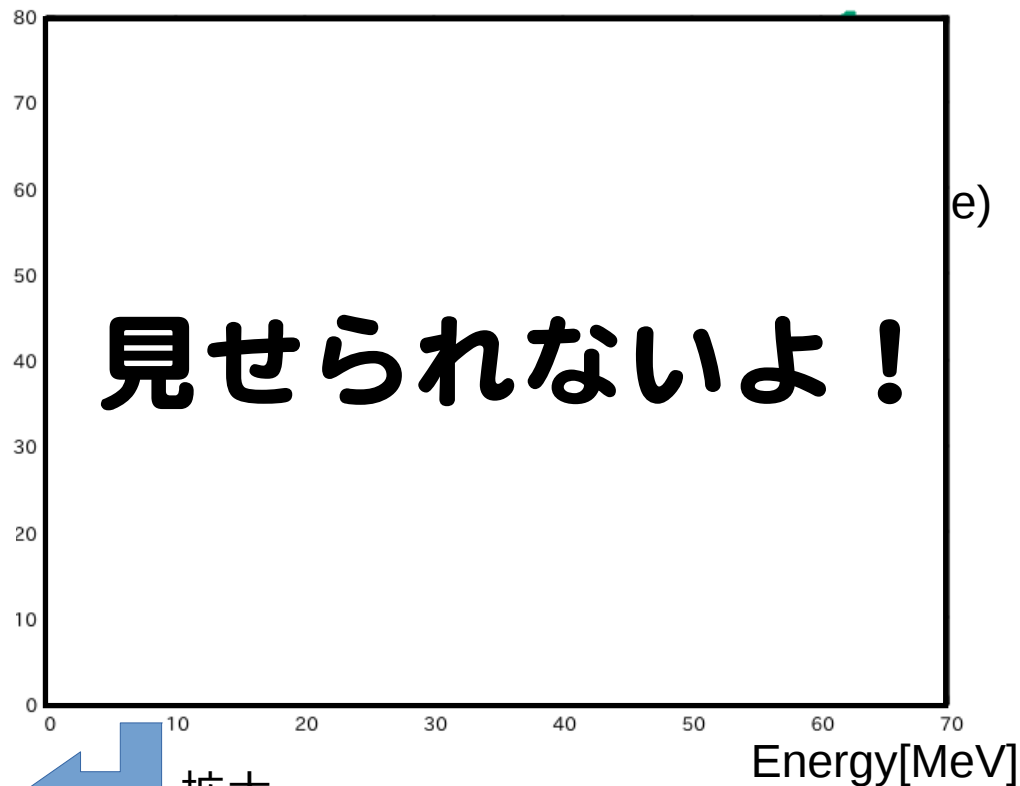
このずれによって、最大で $0.08^\circ$ ほどの角度のずれが起きることが分かった

しかし、回転中心を求めるために計測した点は少なく、また距離を計測したポイントも分解能が適当でなかったことからこのずれを信用して散乱角度を計算しなおすのではなく誤差に含める程度に収めた

# Energyと発光量(MeVee)

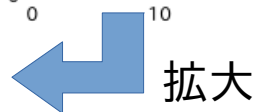
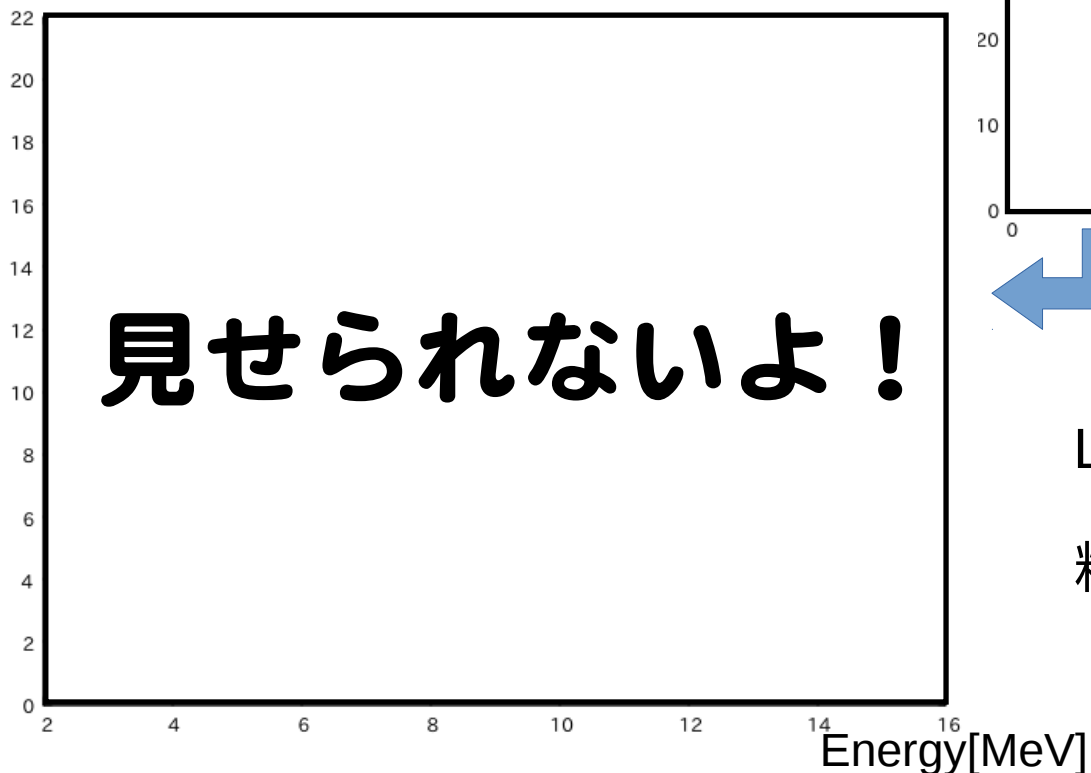
発光量[MeVee]

3He、p、d



発光量[MeVee]

p、d



L-Eに関係が見られるが

粒子によってL-E関係式が異なる



# Energy当たりの発光量とEnergy

dL/dE[MeVee/MeV]

縦軸はEnergy当たりの発光量[MeVee/MeV]

$$\frac{dL}{dE} = \frac{L_1 - L_2}{E_1 - E_2}$$

横軸は散乱粒子のEnergy[MeV]で  
dL/dEと対応させるために平均をとった

$$E = \frac{E_1 + E_2}{2}$$

**見せられないよ！**

- 誤差棒は発光量の読み取り誤差
- 誤差帯は散乱角度のずれによるEnergyのずれを考慮してつけた

誤差帯の大きさは角度によるEnergyのずれが大きい散乱ほど大きい

Energy[MeV]

dL/dEとEの関係は粒子によって違う



dL/dEとdE/dxの関係は？

# Energy当たりの発光量と 長さ当たりのEnergy損失

$dL/dE$ [MeVee/MeV]



KOS

$dE/dx$ [MeV/(g/cm<sup>2</sup>)]

(log scale)

- 横軸の単位長さ当たりのEnergy損失はSRIMを用いて計算した
- 帯のついていない点がKoshikawa実験
- Koshikawa実験の間をうまく埋めることができた

*et al.*( $\alpha$ )



多少ガタつきはあるが、Csl、GAGGそれぞれ粒子に依らない1本の線に乗せることができた



$dL/dE$ と $dE/dx$ の関係式を求めていく

# Fitting(Birks)

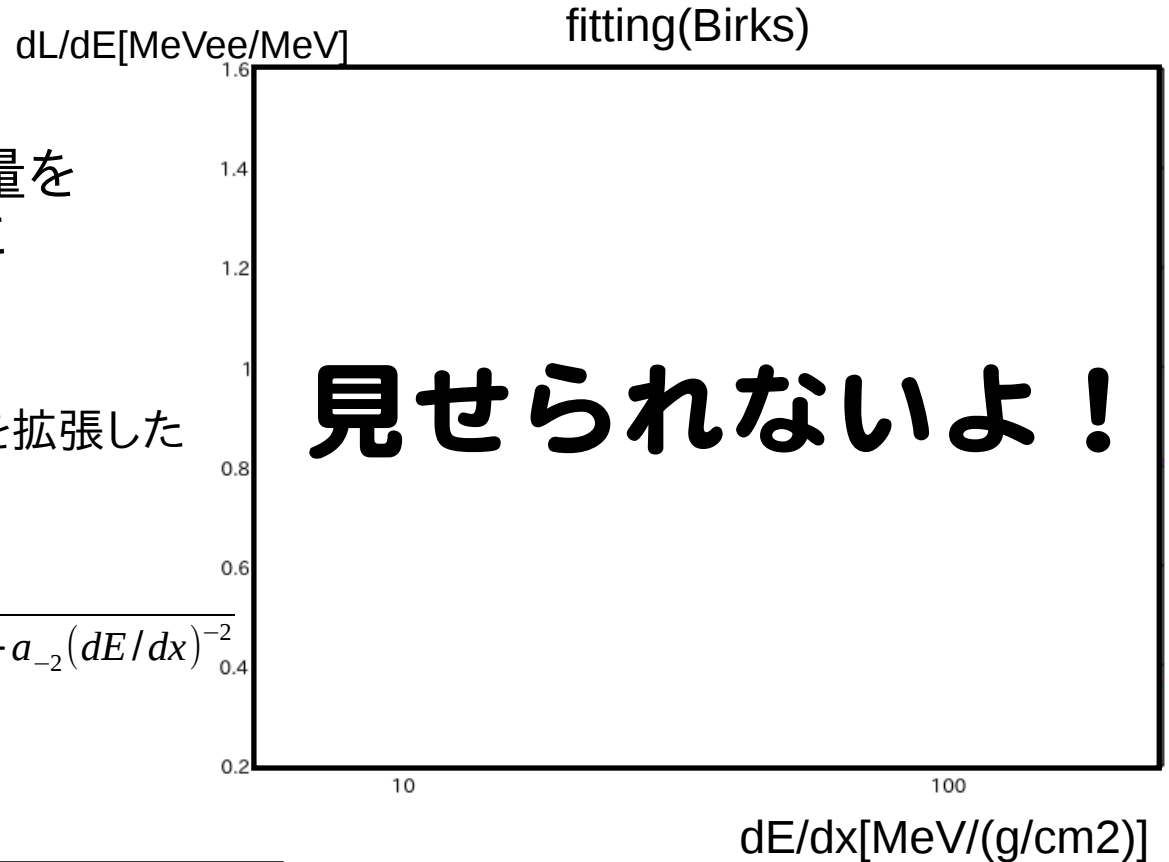
dL/dEとdE/dxの関係式にはいくつか経験式があり、今回は2つの式を用いる

1つ目はKoba et al.がCsIの発光量を調べたときに用いた、Birksの式に修正を加えたもの

$$\frac{dL}{dE} = \frac{a_0}{1 + a_1(dE/dx) + a_{-1}(dE/dx)^{-1}} \quad \text{を拡張した}$$

$$\frac{dL}{dE} = \frac{a_0}{1 + a_1(dE/dx) + a_2(dE/dx)^2 + a_{-1}(dE/dx)^{-1} + a_{-2}(dE/dx)^{-2}}$$

を用いてfitting



Crystal	CsI	GAGG
a-1	<b>見せられないよ!</b>	
a-2		
a0		
a1		
a2		

粒子に依らないdL/dEとdE/dxの関係式が求められた

# Fitting(Romero)

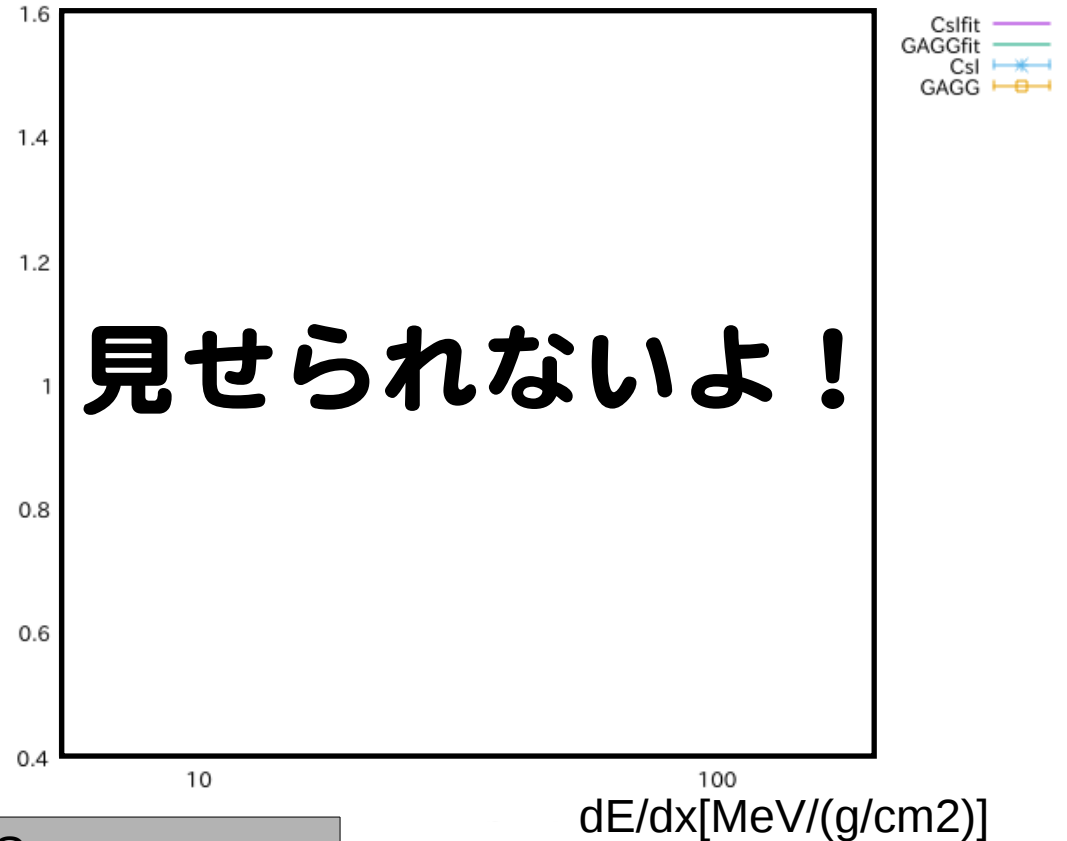
2つ目は  
Romero et al.がNaIの発光量を  
調べたときに用いた経験式

$$\frac{dL}{dE} = \sum_{t=0}^5 a_t \left( \ln \frac{dE}{dx} \right)^t$$

を用いてfitting(t=4まで)

dL/dE[MeVee/MeV]

fitting



Crystal	Csl	GAGG
a0	<b>見せられないよ！</b>	
a1		
a2		
a3		
a4		

こちらも  
粒子に依らない  
dL/dEとdE/dxの  
関係式が得られた

# 発光量とEnergy

ここまでで $dL/dE$ を $dE/dx$ の関数にすることができたが、この式の妥当性を確認したい

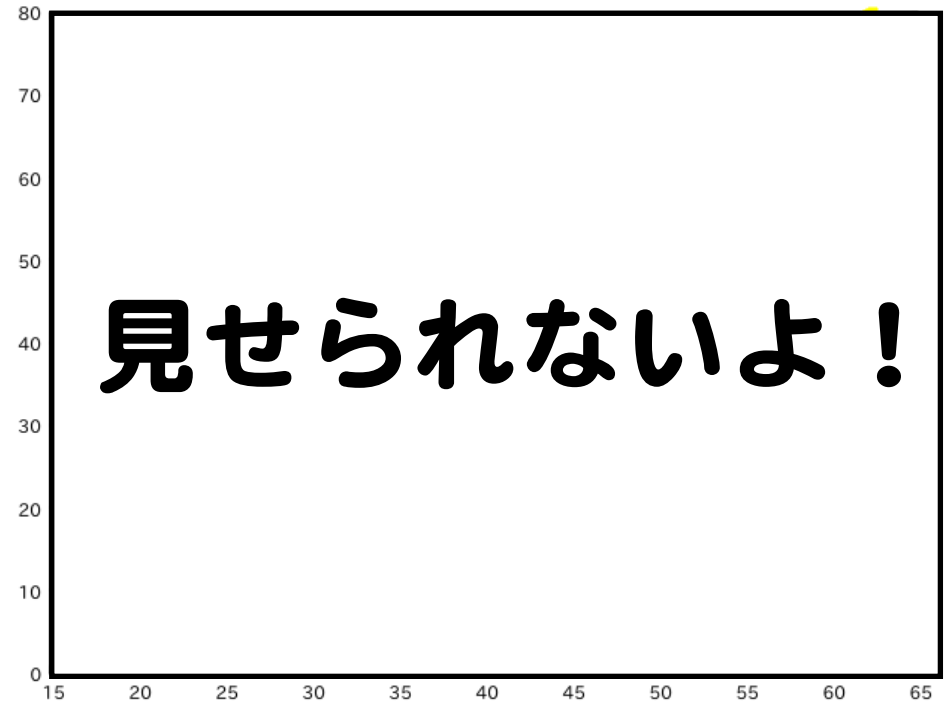
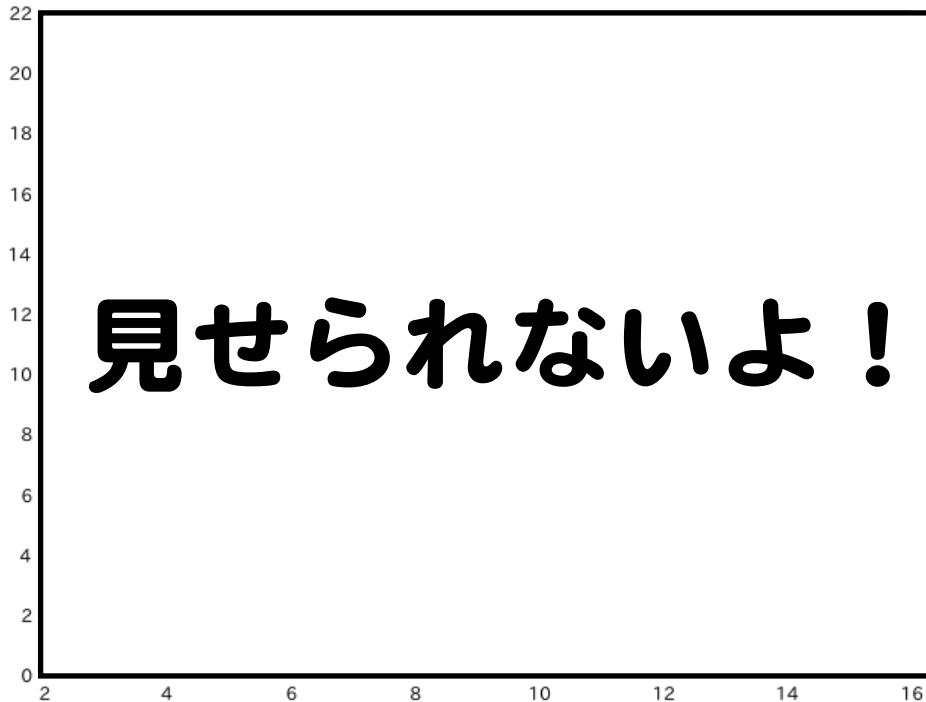


得られた式を積分してLとEの関係式にする( $dE/dx$ はBethe-Bloch式より粒子に依るEの関数で表せる)



出た式を解析の初めに得られていた発光量とEnergyの関係と比較してみる

発光量[MeVee]



Energy[MeV]

どちらの式も概ねL-Eの関係を再現できていた

# まとめ

- GAGGにおける荷電粒子に対する応答を調べ  $dL/dE$  と  $dE/dx$  の経験式を求めることができた。
- 発光量はCsIに比べて小さいものの  
応答速度が早く、時間分解能が必要な実験で

# 追加実験： $^{14}\text{N}(^3\text{He},t)^{14}\text{O}$ の断面積の測定

## ・動機

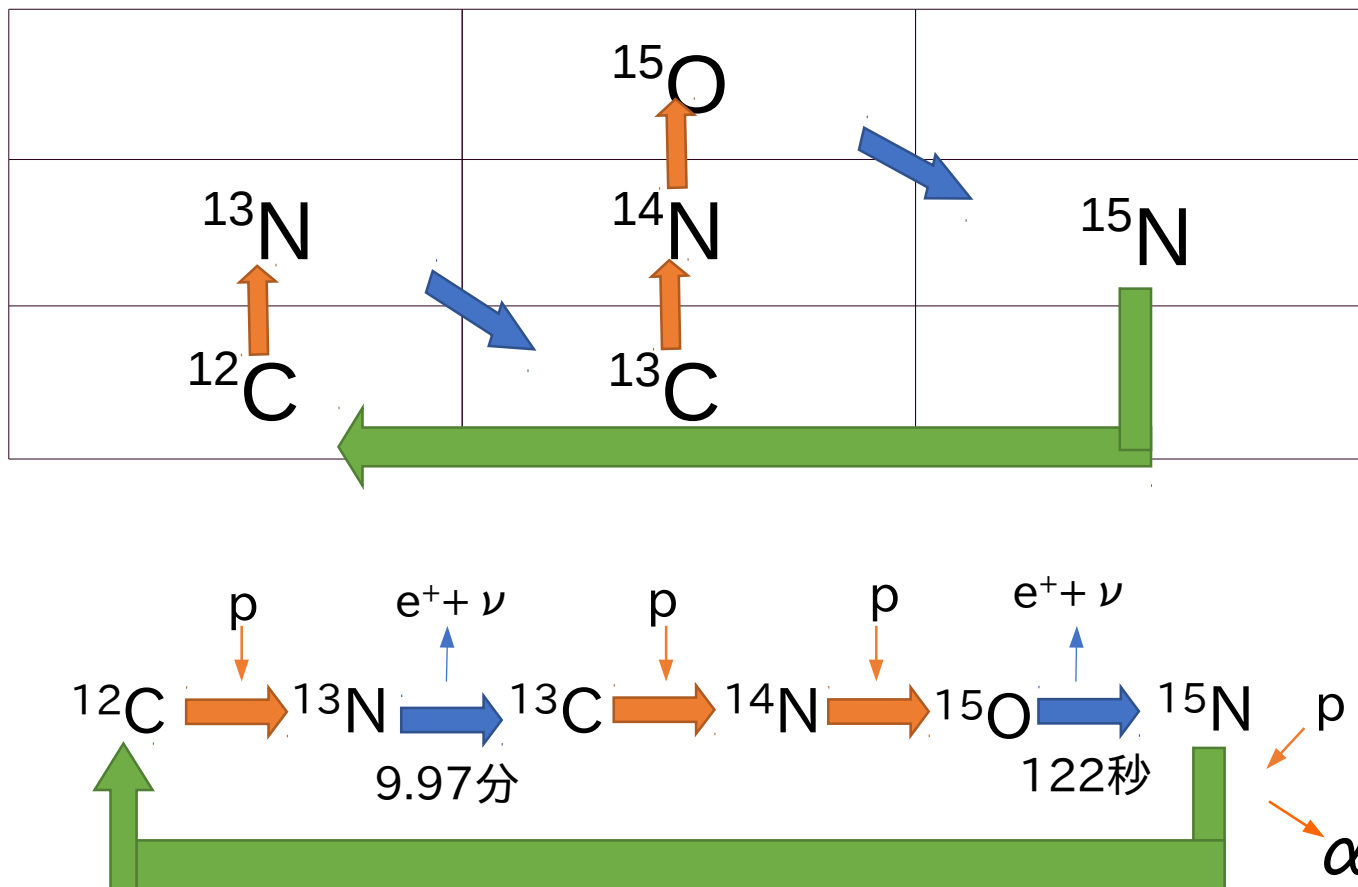
- ・本実験と同じ条件でできる
- ・ $^{14}\text{O}$ の第1励起状態(5.17MeV, 1-)を作りたい  
(hot-CNO サイクルにおいて重要)
- ・次に行う実験の実現可能性を知りたい



$^{14}\text{N}(^3\text{He},t)^{14}\text{O}$ の断面積を求める

# CNOサイクル

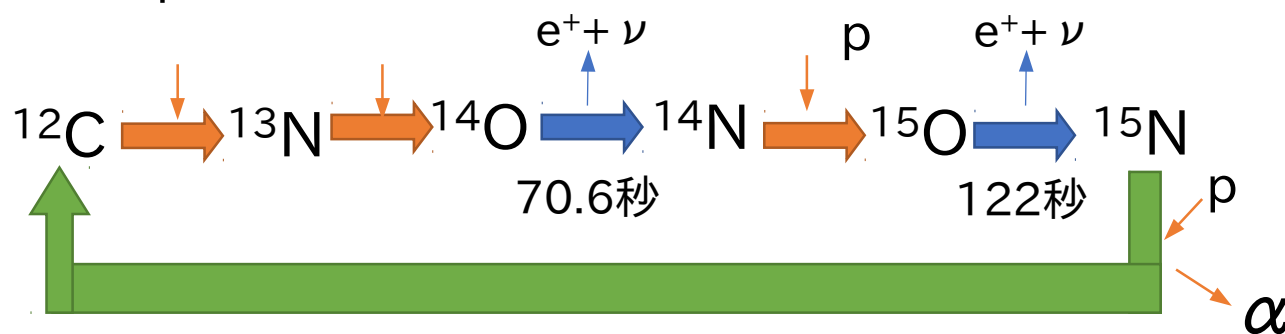
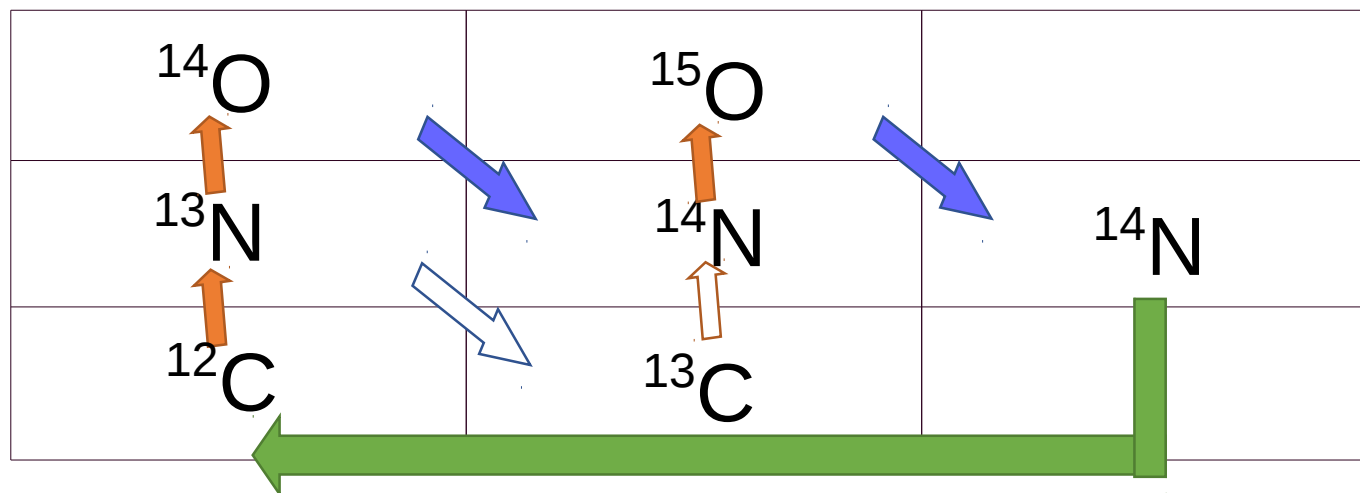
C,N,Oを経由して4つのpを1つ $\alpha$ に変換するサイクル





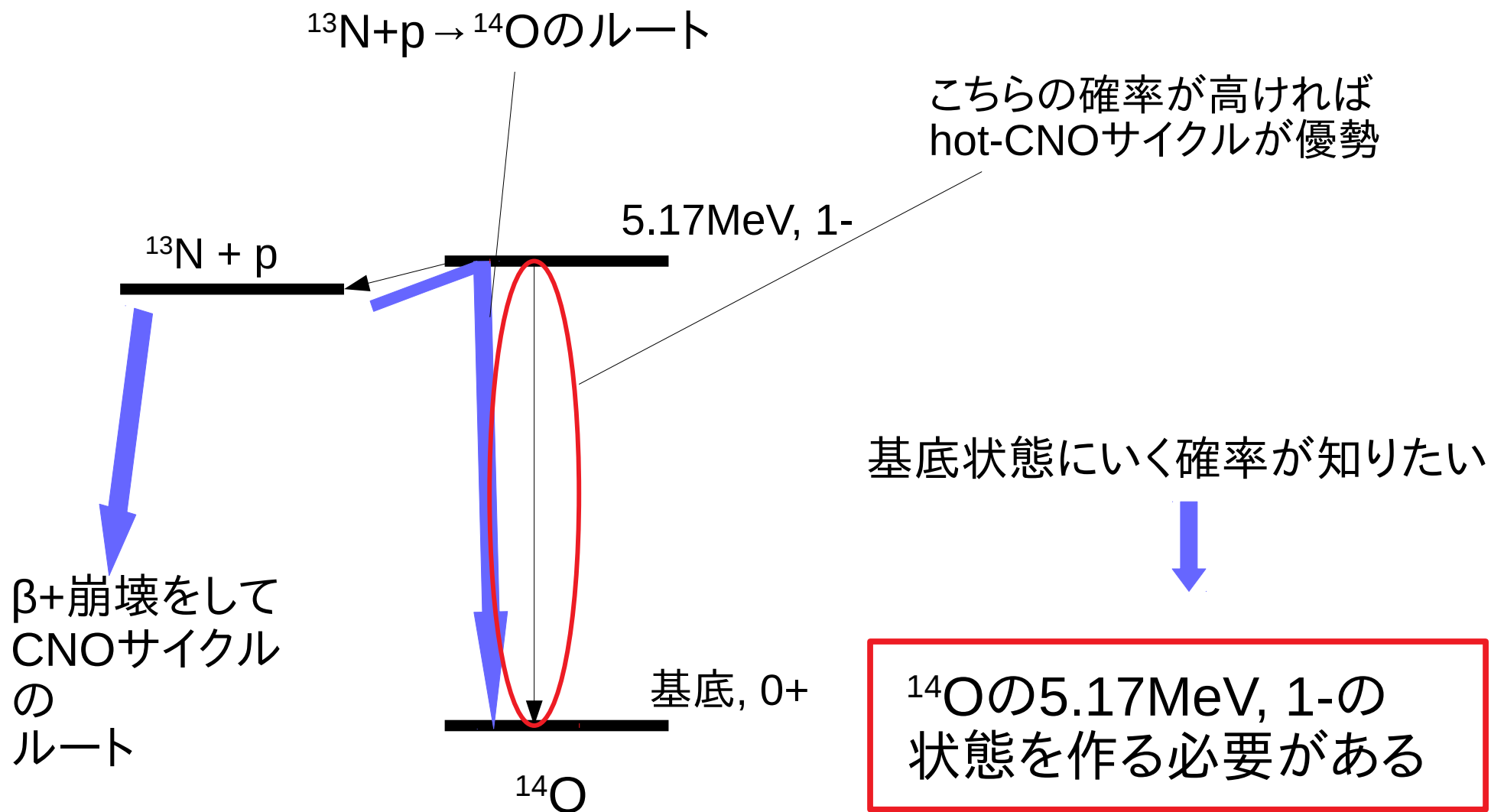
# hot-CNOサイクル

C,N,Oを經由して4つのpを1つ $\alpha$ に変換するサイクル



CNOサイク  
ルより早い!

# hot-CNOサイクルで知りたいこと



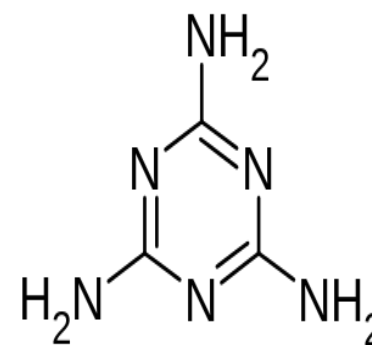
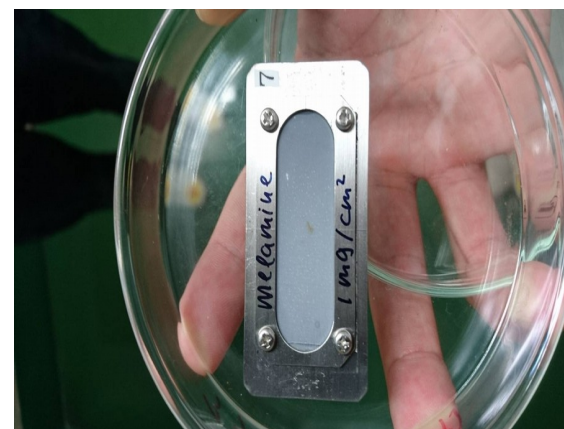
# 実験状況

ビーム: 本実験と同じ73.77MeVの<sup>3</sup>He

ターゲット: メラミン

結晶: CsI(Tl)

角度: 15°, 37.5°, 40°, 45°の4点  
↑ <sup>12</sup>Cと比較することのできる  
角度



メラミン(melamin)

[https://ja.wikipedia.org/wiki/](https://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%A1%E3%83%A9%E3%83%9F%E3%83%B3)

[%E3%83%A1%E3%83%A9%E3%83%9F](https://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%A1%E3%83%A9%E3%83%9F%E3%83%B3)

[%E3%83%B3](https://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%B3),メラミン-wikipedia, 2017/10/12

# 解析

本実験でCsIの発光量とエネルギーとの関係式がわかっている



tのエネルギーがわかる



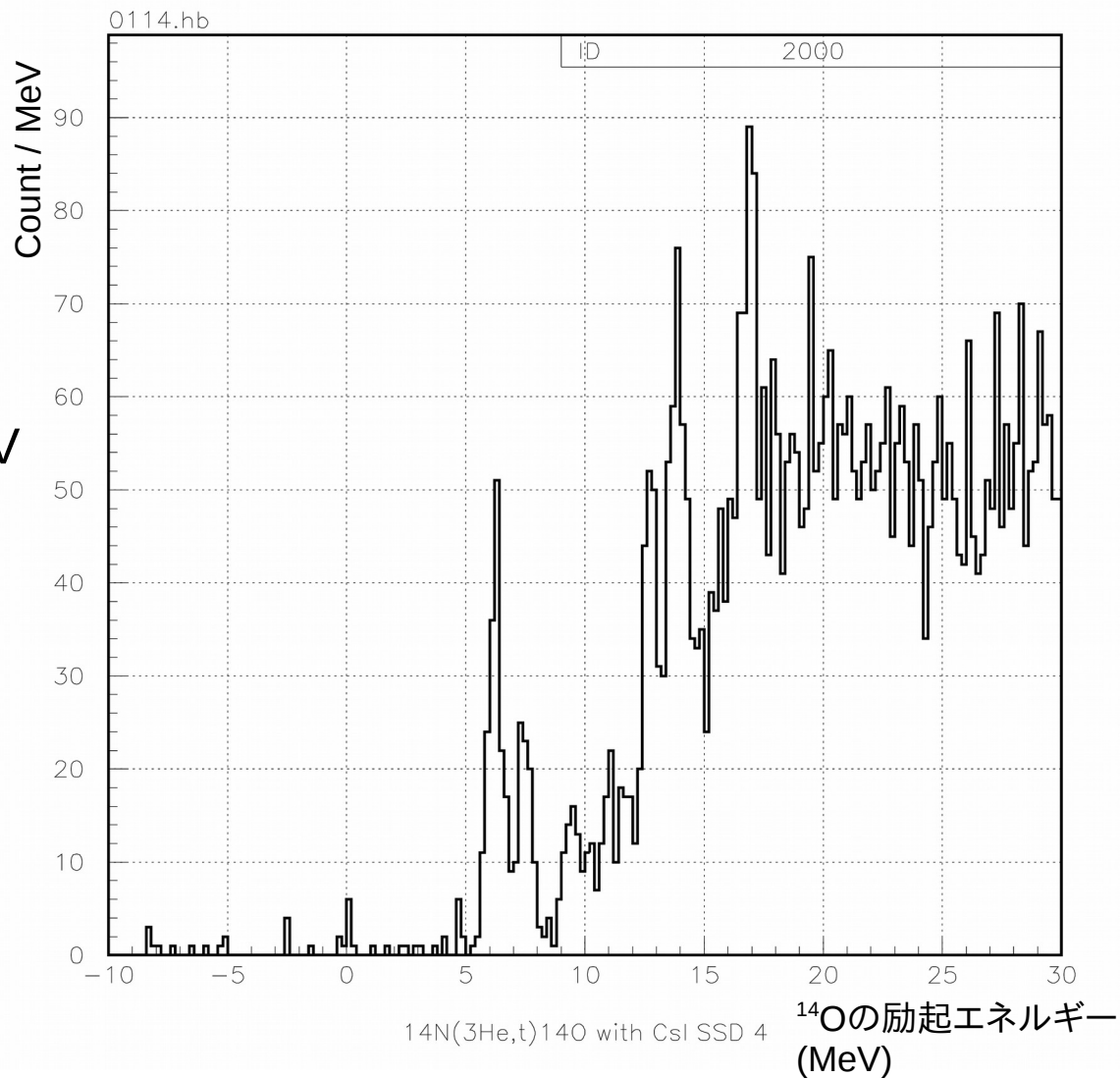
$^{14}\text{O}^*$ (残留核)の励起エネルギーがわかる



知りたいチャネルの散乱断面積がわかる

# 解析

標的:メラミン  
エネルギー:73.77MeV  
散乱角度:37.5度



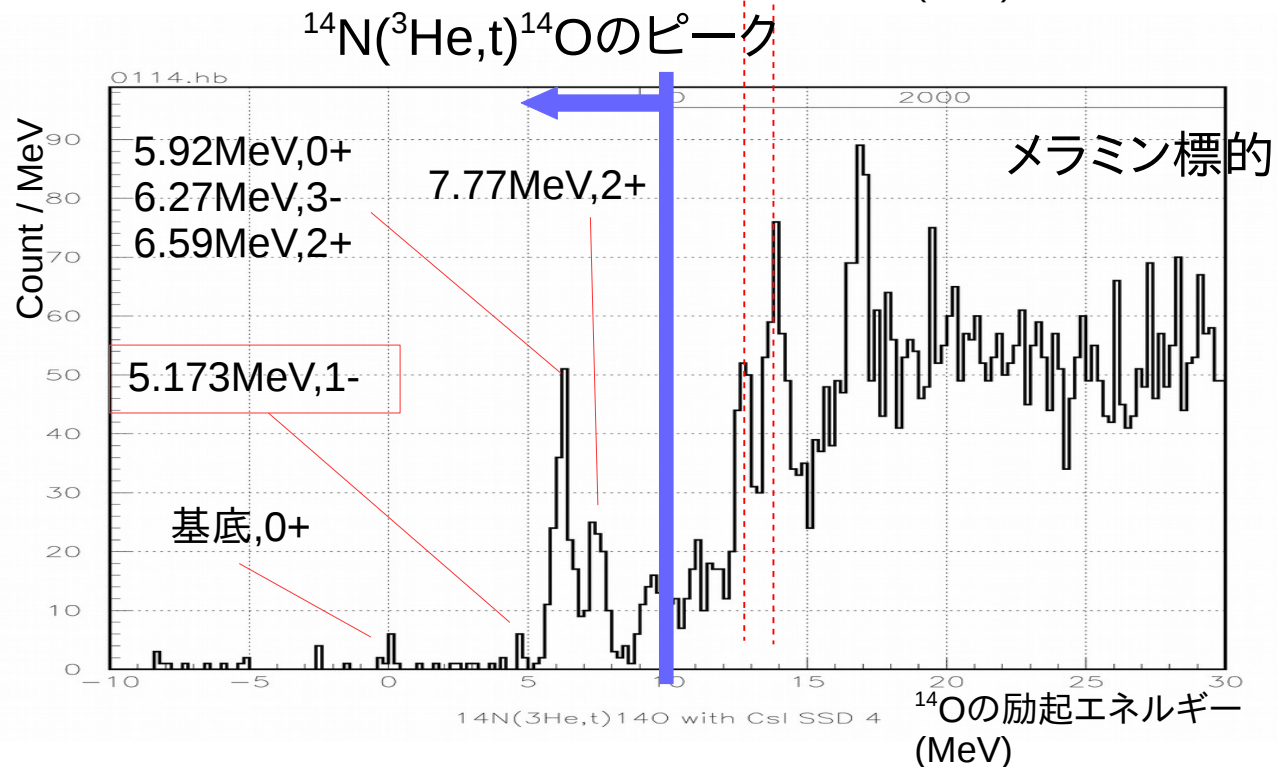
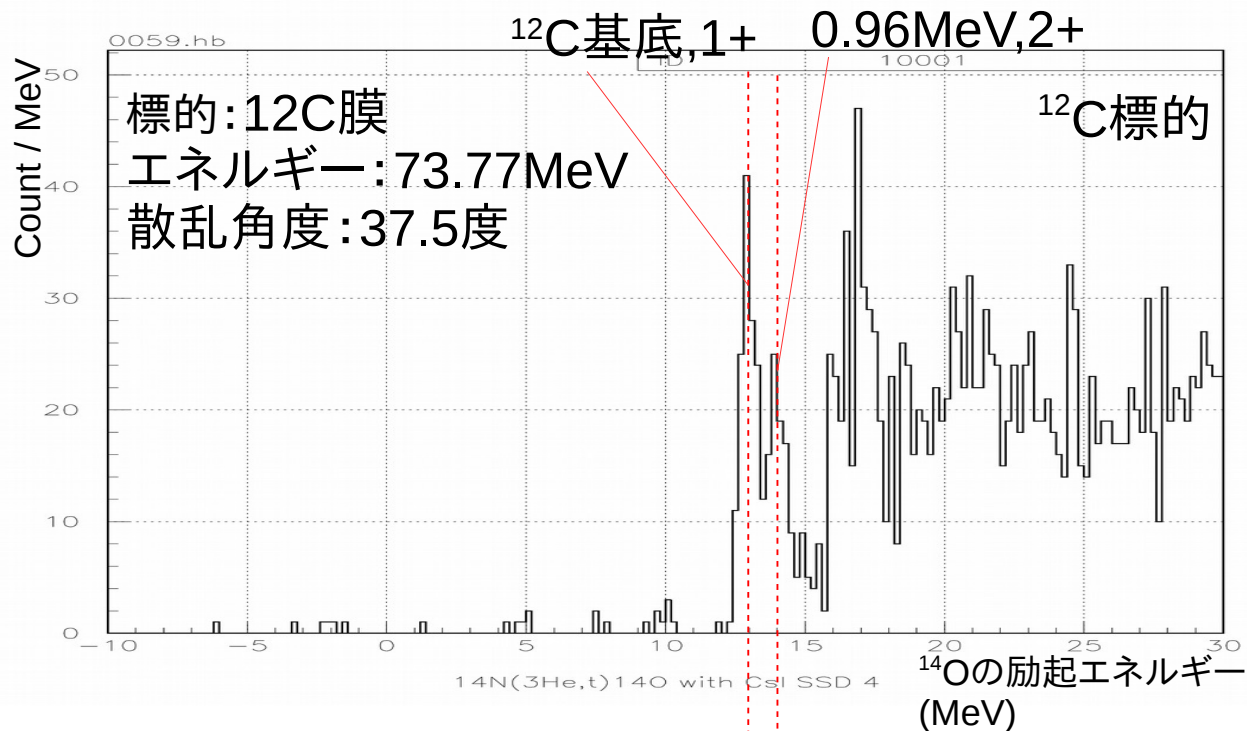
このヒストグラムの中には $^{14}\text{N}(^3\text{He},t)^{14}\text{O}$ 以外のピークも含まれる  
⇒ピークの識別

# 比較

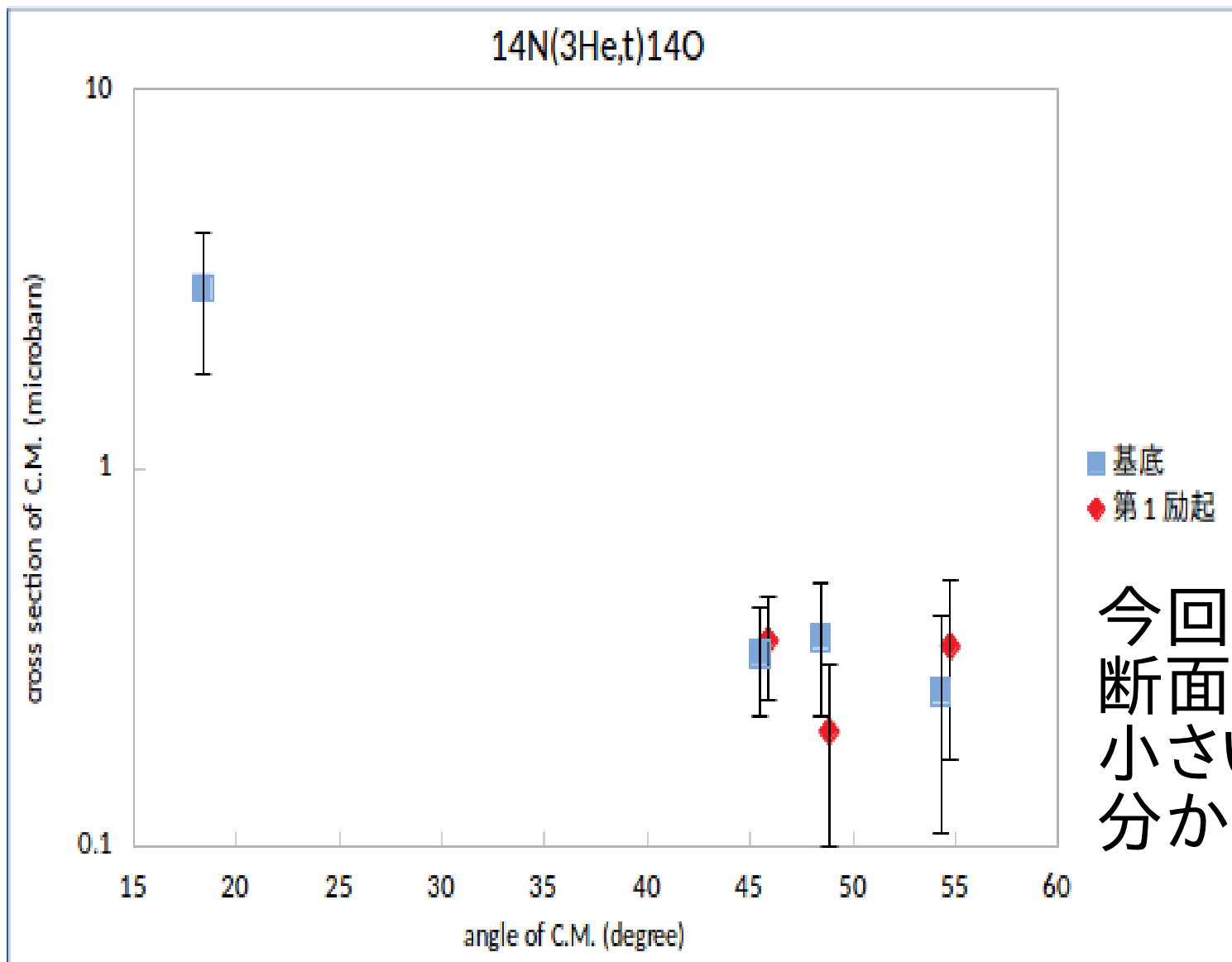
同じ角度の $^{12}\text{C}$ 膜の  
データと比較

ピークと対応する  
準位を特定

2つの標的の断面  
積(基底状態)の比  
較よりメラニン膜は  
 $2.0\text{mg}/\text{cm}^2$ と推定



# $^{14}\text{N}(^3\text{He},t)^{14}\text{O}$ の断面積



今回知りたかった  
断面積はとても  
小さいことが  
分かった