

# 経過報告

田中 隆己

2011 年 10 月 28 日

## 1 HIME の作業

HIME でやることは、

- PMT の動作テスト、ゲインチェック。
- テーパディバイダ型の PMT の性能チェックをしたいのでこれを組み上げる (2 セット)。
- シンチレータが一本気泡入り (そんなに大したことは無いが) だったので返品交換対応。
- 回路図を考えて必要なモジュール、ケーブル等を見積る。
- PAC の準備 (シミュレーション等もろもろ)。

## 2 $^{10}\text{Li}$ の実験

### 2.1 production target

二次ビームに  $^{11}\text{Li}$  を用いるときはエネルギーを  $250\text{MeV}$  ( $\sim 9.0Tm$ ) まで落とさないといけない。これを実現するには、

- 一次ターゲットでエネルギーロスさせる
- low-momentum 側を拾う

の二つの方法が考えられる。エネルギーロスさせる場合は、 $\text{Be}:3\text{cm}$  か  $\text{Cu}:1\text{cm}$  を使えばよい。low-momentum 側を拾う場合は他の二次ビーム ( $^{11}\text{Be}, ^{12}\text{B}$ ) を用いる場合と同じ、 $\text{Be}:1.5\text{cm}$  でも十分なイールドが得られる。ただし、この場合は多くの二次ビームが想定外のところに当たることになるので、事前に相談が必要かもしれない。

ちなみに BigRIPS の  $B\rho$  の許容される最大値は  $9Tm$  と web に書いてあるが、小林さん曰く、optics を工夫すると  $D1$  が  $9.4Tm$  でもビームを通せるらしい。

### 2.2 シミュレーションにおいて時間分解能の考慮をミスっていた！

シミュレーションをするときにプラスチックの時間分解能を考慮するが、TOF の時間分解能 (Start Counter は無視) が分かっているとき、PMT 片方のチャンネルの時間分解能はその  $\sqrt{2}$  倍である。

これを忘れていて、PMT 片方のチャンネルの時間分解能を  $\sqrt{2} * 130\text{ps}$  としなければいけないところを

130ps としていた。このためざっくり 1.4 倍も相対エネルギー分解能を過大評価していたことになる。最終的なスペクトルに与える影響はそこまで大きくないが、数値としては  $^{11}\text{Li}$  の場合で 160keV と proposal に書いたのが 190keV 程度まで悪くなる。これは非常にまずい (200keV 程度であれば実験としては問題ないが) ので、とりあえず分解能とイベントレートとの関係を見直して分解能の改善する余地があるか探してみた。

### 2.2.1 分解能とイベントレート

分解能とイベントレートはトレードオフの関係にあり、中性子と荷電粒子はそれぞれ以下の様な関係にある。

- 中性子の分解能 → 検出器の位置
- 荷電粒子の分解能 → ターゲット厚

これらのバランス点を見積ることが最適化の具体的な課題である。

### 2.2.2 $^{11}\text{Li} \rightarrow ^{10}\text{Li}$ の場合

中性子の分解能がネックになっている。中性子の分解能をあげるには簡単には検出器を下げればよい。このとき、アクセプタンスの関係でイベントレートが減るが、ターゲット厚を増やしても荷電粒子の分解能が下がることはほとんど分解能に影響しないので、検出器を下げた分厚みを増やせばよい。これより、 $^{11}\text{Li}$  の場合は検出器を 10m またはそれ以上離して、ターゲットを 2~4g 程度とするのが最適解となる。

### 2.2.3 $^{11}\text{Be} \rightarrow ^{10}\text{Li}$ の場合

2g/cm<sup>2</sup> のターゲットを使うとだいたい中性子と荷電粒子の分解能がコンパラとなる。この場合は 8~10m ぐらいに中性子検出器を置き、1~2g/cm<sup>2</sup> のターゲットを使うのが最適解となる。

### 2.2.4 $^{12}\text{B} \rightarrow ^{10}\text{Li}$ の場合

1g/cm<sup>2</sup> のターゲットを使っても荷電粒子の分解能がネックとなる。さらに断面積も小さいと予想されるので、イベントレートを優先する必要がある。このため、中性子検出器は 7~8m 程度まで近づけるのが解となる。

### 2.2.5 結論が出ない

実験中に検出器を動かすことは T0 のキャリブレーションがずれるので避けたい。さらに厄介なのは、HIME の分解能は中性子の時間分解能にかなり左右されるが、これがまだかなり不確定なので、分解能にセットアップを振るのかイベントレートにセットアップを振るのかどちらが良いかかなり微妙なところである。楽観的には時間分解能は荷電粒子程度の分解能 (~110ps) で決まり、この場合は荷電粒子検出器とコンパラとなりイベントレートさえ気にすればよい。逆に最悪の場合、従来程度の時間分解能 (200ps ~ 300ps) しか出ないときは中性子検出器をできるだけ離し、ターゲットを厚くすることによりバランスを取るようになる。

以上から結論がまだ出ていない。

### 3 Geant4(QGSP\_BIC\_HP) を用いたときの角度分布

Geant4 で QGSP\_BIC\_HP を用いたときの elastic と inelastic の断面積が正しいことは前回示した。今回は反跳 proton の角度分布を調べた。Geant4 で直接反応過程を引っ張ってくる方法が分からなかったため、実際に実験をすることにより角度分布を求めた。

- $p(n,pn)$  のときの反跳 proton の性質と accept される proton の角度分布
- $C(n,pX)$ ,  $H(n,pn)$  の角度分布
- Geant4 で想定している反応の検証

これらを調べた。

#### 3.1 $p(n,pn)$ のときの反跳 proton の性質と accept される proton の角度分布

純粋な  $p(n,pn)$  反応の場合、proton の散乱角がある角度以下となると 3 層通過できなくなる。これより、HIME を用いた測定では検出効率は proton の散乱角に対して強い相関を持つ。

まず、 $p(n,pn)$  を想定した場合の proton の散乱角に対するエネルギー、プラスチックの厚み、range を図 3.1 に示す。

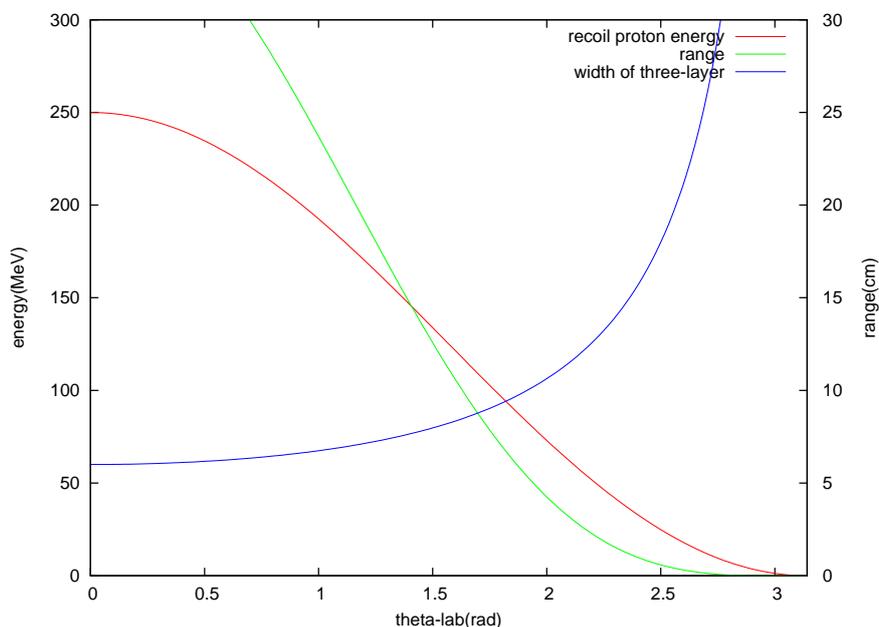


図 3.1  $p(n,pn)$  反応を想定した場合の proton の散乱角とエネルギー、プラスチックの厚み、range の関係。range とプラスチックの厚みの交点が検出の可否の境となる。

次に、Geant4 でシミュレーションしたときの proton の散乱角と検出効率の関係を図 3.2 に示す。

Geant4 のシミュレーションより求まる角度に対する検出効率は  $p(n,pn)$  の計算から求まる角度とおおよそ一致する。

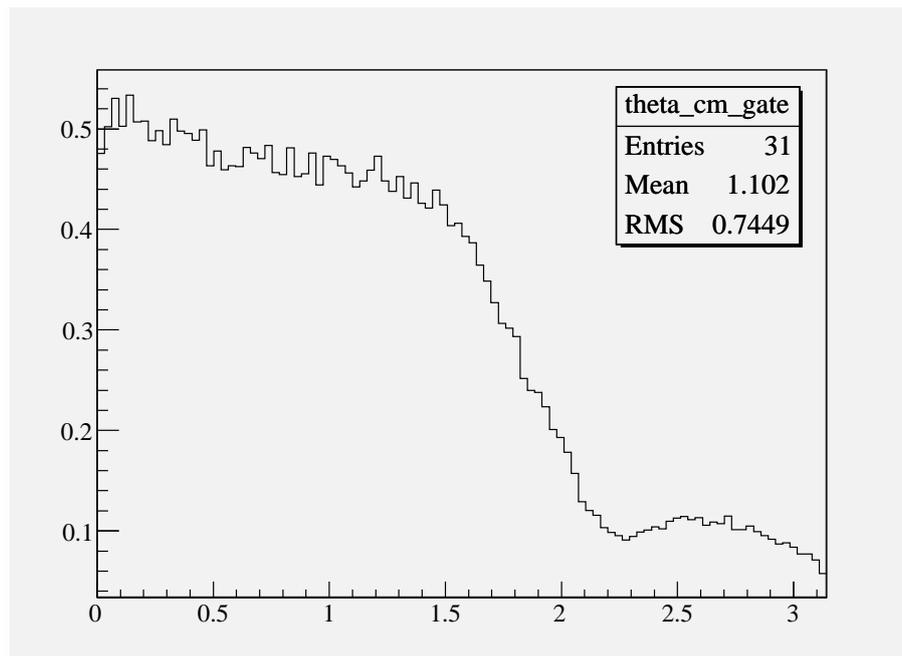


図 3.2 Geant4 でシミュレーションしたときの proton の散乱角と検出効率の関係。p(n,pn) の計算から求まる角度とおおよそ一致する。

### 3.2 C 及び H を target としたときの反跳陽子の角度分布

H(n,pn) と C(n,pX) の結果を図 6.1~6.10 に示す (巻末)。図では cm 系での角度分布を示す。

target を LH2 とした場合は p(n,pn) 反応であり、確かに教科書に載っているような角度分布となった。

C の場合は C(p,np) などの実験と比べればいいはずだがまだ見つかっていない。エネルギーが高くなったときに cm 系で見ると散乱角が大きい方 (低エネルギー側) に peak を持っている様に見えるが、これは C が励起して proton を放出することにより観測される proton と考えられる。この推察を確かめるために Geant4 内で何が起きているか調べた。

### 3.3 Geant4 で用いている反応の検証

エネルギーが高い (250MeV/u 程度) ので検出に寄与する主な反応は C(n,np)B である。また、このとき carbon 中の proton との散乱は自由な proton との散乱に良く一致する (quasi-free)。これが成り立っているか確認するために、シミュレーション結果について proton の theta vs E の相関を見た (図 3.3)。これより、quasi-free からくるカーブと、静止系で放出される proton の二種類からなると読み取れる。

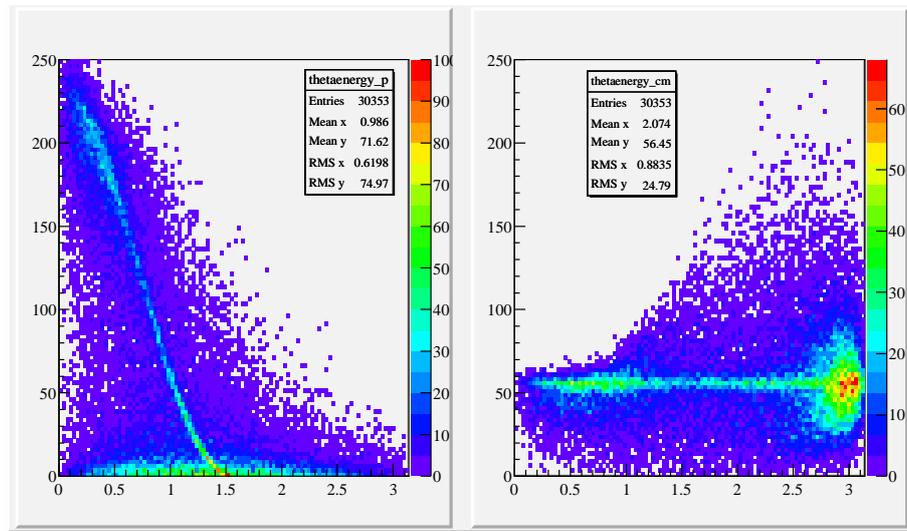


図 3.3 proton の散乱角対 proton の運動エネルギー。左:lab 系, 右:cm 系。quasi-free からくるカーブと、静止系で放出される proton の二種類からなると読み取れる。

## 4 Geant4 によるシミュレーションで考えたことの memo

### 4.1 MeVee(発光等量)

荷電粒子がシンチレータを通過するとき出てくる光は単純にエネルギーロスに比例するわけではない。電子の場合はエネルギーロスと発光量は十分比例関係がなりたつので、電子が通過したときの発光量を基準とする。つまり、1MeV の電子がシンチレータを通過したときの発光量が 1MeVee である。

プラスチックシンチレータでは proton の発光等量が重要となるのでこれは詳細に調べられている。次に重要なのが alpha 粒子に対する応答であり、プラスチックシンチレータという一括りでパラメータが求められている。重イオンに関しては DEMONS では一律のパラメータを用いている。

重イオンは発光等量に換算するとかなり発光量が小さくなり、さらにそもそも中性子から受けとるエネルギーが小さいので一律のパラメータで十分表現できると考えられる。

ROOT で行っている解析では DEMONS の値 (proton, alpha は CECIL の値と同じ) を用いた。また、deuteron や triton は proton と同じとし、He3 は alpha と同じ変換とした。

解析に取り入れたコードの MeVee 変換の結果を図 4.1 に示す。

また、MeVee 変換を考慮して解析したときの結果を図 4.2, 4.2 に示す。

MeVee 変換を行ってもほとんど結果が変わらないことがわかる。あえて挙げれば thr を変更していないので若干イベント数が減っている。これより三層突き抜けによる解析は proton を良く選択出来ていると言える。

### 4.2 dp/p と dE/E の関係 (ターゲットでのエネルギーロスによる運動量分解能の変化)

ターゲット中で反応を起こした位置の不確か性により荷電粒子のエネルギーがその分不確定になる。このときのエネルギーロスの不確かさを dE と置く。荷電粒子の分解能を考えるとときには運動量に変換した方がわか

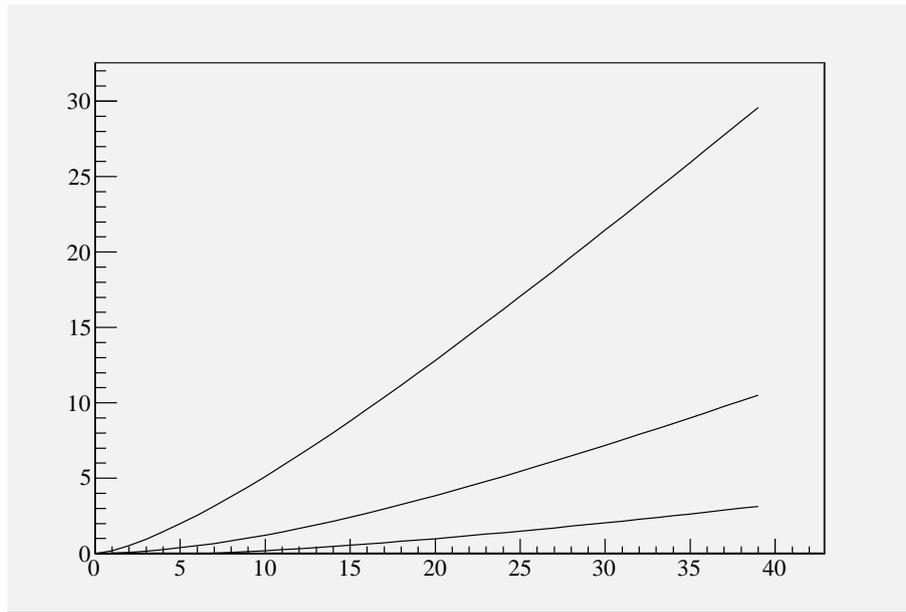


図 4.1 横軸 : MeV, 縦軸 : MeVee。上から proton, alpha, heavy ion。注意しなければならないのは、この図は入射粒子がシンチレータ中で静止した場合であり、粒子が通過した場合  $dE$  を直接 MeVee 変換するのではなく、まず  $E_{in}$  と  $E_{out}$  をそれぞれ MeVee 変換し、それらの差を取らなければならない。

りやすいので、これを運動量の誤差に変換する。まず、非相対論で求める。ここでは、全エネルギーを  $E$ 、運動エネルギーを  $K$  として区別する。

$$K = \frac{p^2}{2m} \quad (4.1)$$

$$\therefore \frac{dK}{dp} = \frac{p}{m} \quad (4.2)$$

$$\therefore \frac{dK}{K} = \frac{p^2}{mK} \frac{dp}{p} \quad (4.3)$$

$$= 2 \frac{dp}{p} \quad (4.4)$$

$$(4.5)$$

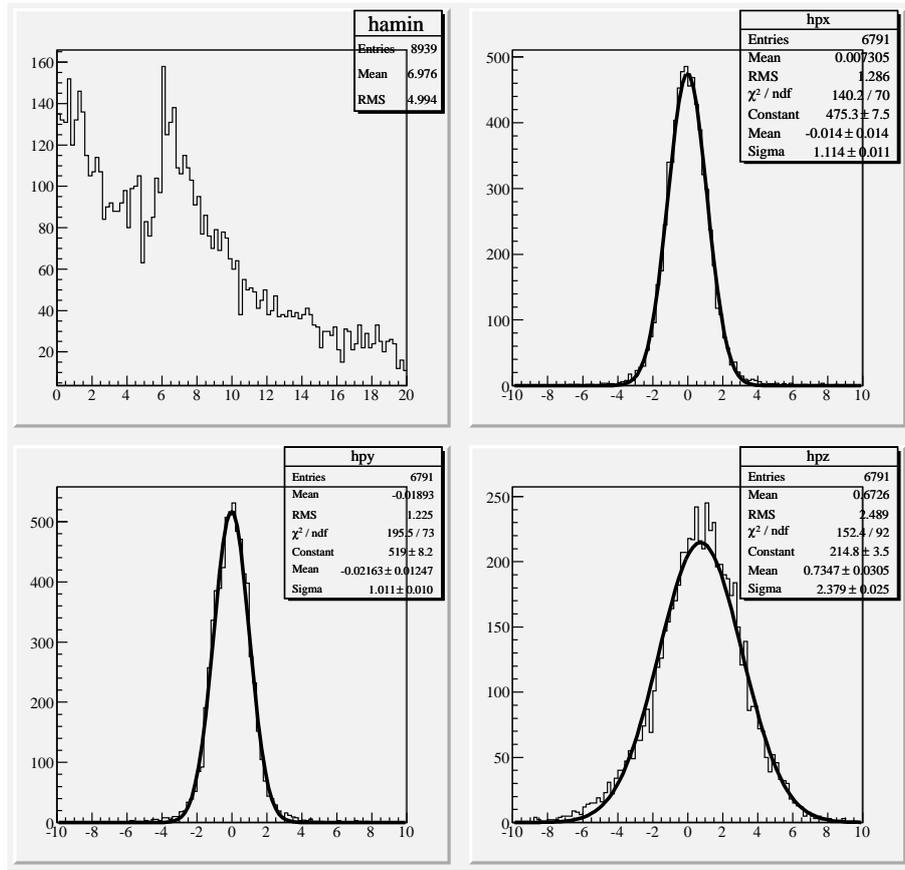


図 4.2 MeVee 変換を行わなかった場合

次に、相対論で求める。

$$K = E - m \quad (4.6)$$

$$= \sqrt{m^2 + p^2} - m \quad (4.7)$$

$$\therefore \frac{dK}{dp} = \frac{p}{\sqrt{m^2 + p^2}} \quad (4.8)$$

$$= \frac{p}{K + m} \quad (4.9)$$

$$\therefore \frac{dK}{K} = \frac{p^2}{K(K + m)} \frac{dp}{p} \quad (4.10)$$

$$= \frac{K + 2m}{K + m} \frac{dp}{p} \quad (4.11)$$

$$(4.12)$$

非相対論極限は  $K \ll m$  より上の計算と一致することが分かる。相対論極限では比例係数が 1 となるので運動エネルギーと運動量が等価になる。

われわれの実験的には  $K \ll m$  がある程度なりたち、具体的 RIBF だと  $K \sim 250A \text{ MeV}$ ,  $m \sim 930A \text{ MeV}$  より比例係数が約 1.8 となり、非相対論のときの 2 と比べて 1 割の違いとなる。

proposal では非相対論の場合の”2” という数字を使っていたが、これを相対論で計算することにより、12B

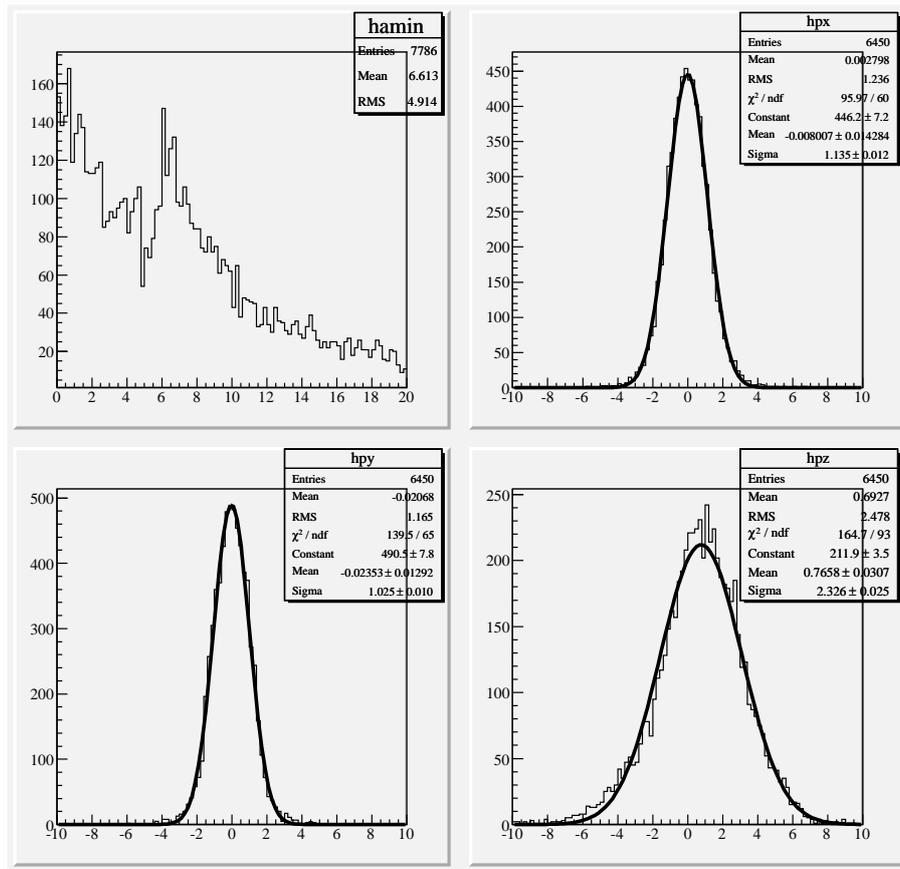


図 4.3 MeVee 変換を行なった場合 (thr は変更していない)

の場合の分解能が 220keV から 230keV と悪くなる。

### 4.3 3D 直線の fit

$x, y, z$  それぞれに誤差が付いていると解析的に解けなくなる。しかし、どれか一つは誤差が十分小さいと考えられるなら解析的に簡単に解ける。ここでは HIME の fit を意識して  $z$  の誤差は小さいと考える。

3D 直線の式は、

$$x = a + bz \tag{4.13}$$

$$y = c + dz \tag{4.14}$$

と表せる。このとき、 $z$  の誤差を無視するので、 $zx$  及び  $zy$  平面で  $x, y$  のみが誤差を持っている場合の fit に帰着される。

あとは簡単で本を読めば a,b,c,d が決まる。結果のみ引用すると (自分で計算はしていない)、

$$b = \frac{[1][xy] - [x][y]}{[1][x^2] - [x][x]} \quad (4.15)$$

$$a = \langle y \rangle - b \langle x \rangle \quad (4.16)$$

ただし、(4.17)

$$[f] := \frac{1}{n} \sum \frac{f_i}{\sigma_i^2} \quad (4.18)$$

$$\langle f \rangle := \frac{[f]}{[1]} \quad (4.19)$$

上記の内容をコーディングし、確かに正しく fit できていることは確かめた。

ちなみに、上記の様に 3D 直線を表現した場合の点 ( $x_p=(x,y,z)$ ) と直線の関係を示す。

$$z = 0 \rightarrow x_0 = (a, c, 0) \quad (4.20)$$

$$z = 1 \rightarrow x_1 = (a + b, c + d, 1) \quad (4.21)$$

$$\therefore v_0(\text{直線の方向ベクトル}) = x_1 - x_0 = (a + b, c + d, 1) - (a, c, 0) = (b, d, 1) \quad (4.22)$$

$$(4.23)$$

点  $x_p$  から直線を指すベクトル  $v_1$  は  $(x_0 - x_p) + k * v_0$  と表せる。 $v_1$  が最短距離、つまり直線に対して垂直になる条件から、

$$((x_0 - x_p) + k * v_0) \cdot v_0 = 0 \quad (4.24)$$

$$\therefore k = \frac{v_0 \cdot (x_p - x_0)}{|v_0|^2} \quad (4.25)$$

と比例係数  $k$  が求まり、三次元空間でのある点から直線に対して引いた垂線のベクトルが求まる。

## 5 ドップラー補正

$\gamma$  線検出器について何も考えたことがなかったので、せめてドップラー補正の計算をしてみた。

ビーム軸方向を  $z$  とし、プライムを付けた変数をビーム系、プライムを付けない変数を lab 系とする。ここでは lab 系を基準とする。ローレンツ変換するだけなので、

$$\begin{pmatrix} p'_z \\ E' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma & \beta\gamma \\ \beta\gamma & \gamma \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_z \\ E \end{pmatrix} \quad (5.1)$$

$$\therefore E' = \beta\gamma p_z + \gamma E \quad (5.2)$$

$$(5.3)$$

ただし、 $E$  と  $p$  は  $\gamma$  線のエネルギーと運動量であり、 $\beta$  と  $\gamma$  は反応後の粒子の値である。

$E' = f(E, \theta)$  と表したいので、 $p_z = p_z(E, \theta)$  を求めると、

$$E = p \quad (5.4)$$

$$= \frac{p_z}{\cos \theta} \quad (5.5)$$

$$\therefore p_z = E \cos \theta \quad (5.6)$$

以上から、

$$E' = \gamma E + \beta \gamma E \cos \theta \quad (5.7)$$

$$= \gamma E (1 + \beta \cos \theta) \quad (5.8)$$

$$\therefore \frac{E'}{E} = \gamma (1 + \beta \cos \theta) \quad (5.9)$$

と求まる。

ドップラー補正は単に逆の変換を行うだけなので、 $\beta = -\beta$  と置き換えるだけである。

せっかくなので、 $\theta$  に対する変化と  $\beta$  を考える。

$$\frac{d(E'/E)}{d\theta} = \beta \gamma \sin \theta \quad (5.10)$$

$$\frac{d(E'/E)}{d\beta} = \beta \gamma^3 (1 + \beta \cos \theta) + \gamma \beta \cos \theta \quad (5.11)$$

$$\sim \beta \gamma^3 \quad (5.12)$$

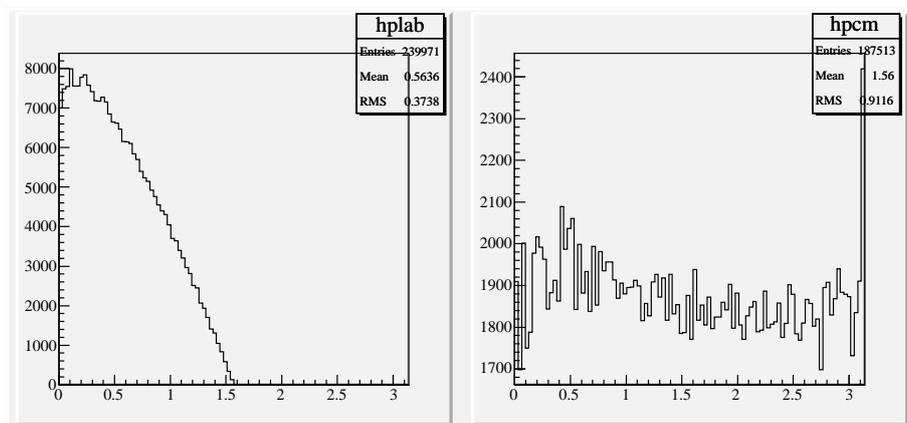
以上から、誤差の寄与は  $d\theta$  と  $\gamma^2 d\beta$  の大小できまる。ところで、

$$\frac{d\beta}{dp} = \frac{1}{E\gamma^2} \quad (5.13)$$

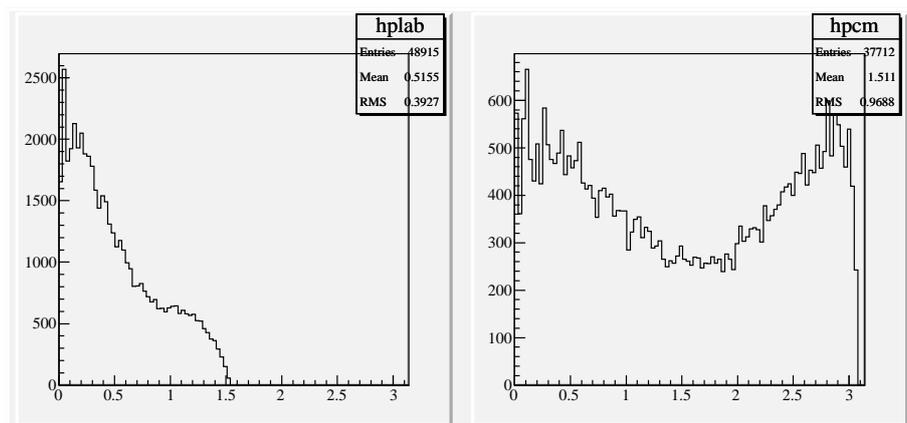
$$\therefore \gamma^2 d\beta = \frac{dp}{E} = \beta \frac{dp}{p} \quad (5.14)$$

以上から、 $d\theta \sim 1/10 \gg \gamma^2 d\beta = \beta \frac{dp}{p} \sim 0.6 * 1/700 \sim 1/1000$  となり、荷電粒子の運動量分解能が極端に悪くならない限り  $\gamma$  線検出器の角度分解能がボトムネックとなる。

## 6 卷末



☒ 6.1 target=lH2, Ein=10MeV



☒ 6.2 target=lH2, Ein=50MeV

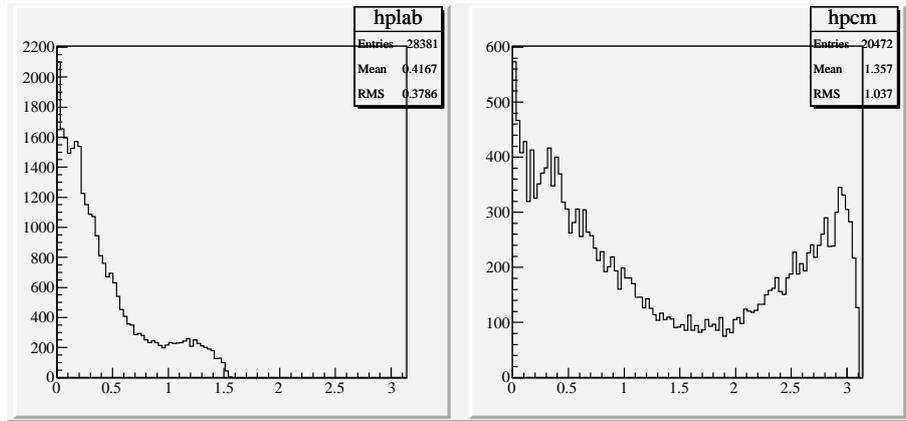


图 6.3 target=lH2, Ein=100MeV

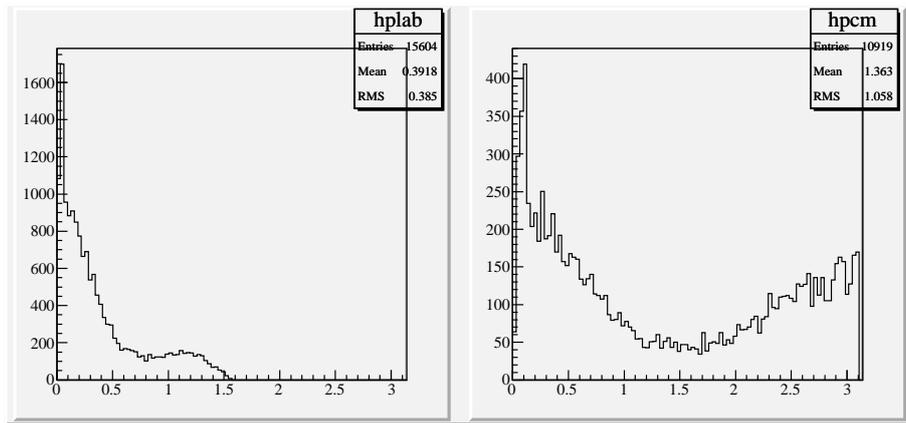


图 6.4 target=lH2, Ein=200MeV

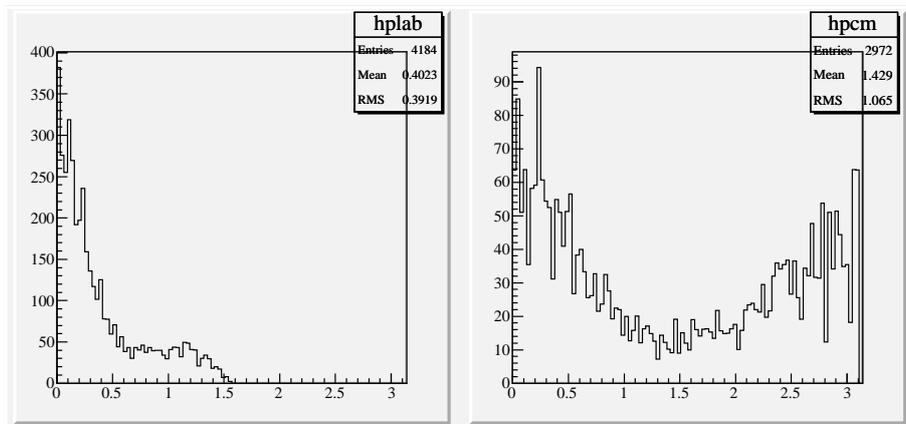


图 6.5 target=lH2, Ein=300MeV

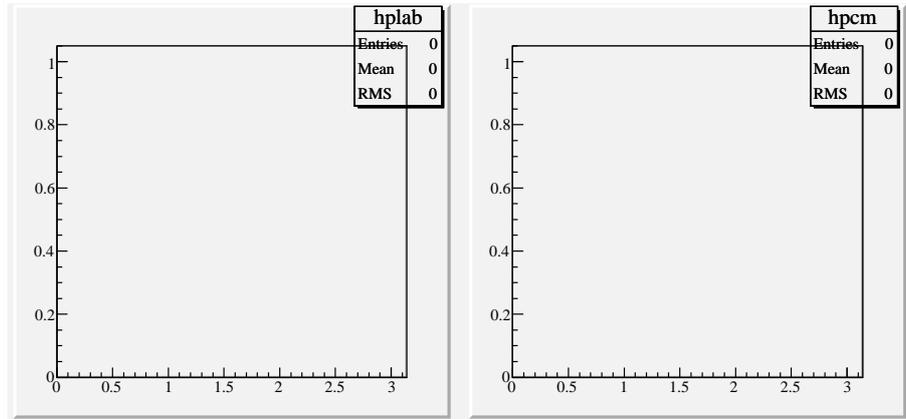


図 6.6 target=C, Ein=10MeV(そもそも proton が出て来れないので何もいない)

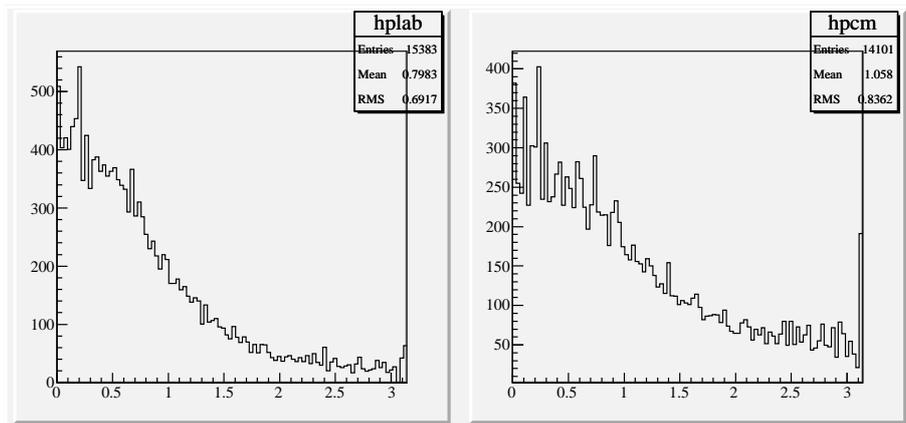


図 6.7 target=C, Ein=50MeV

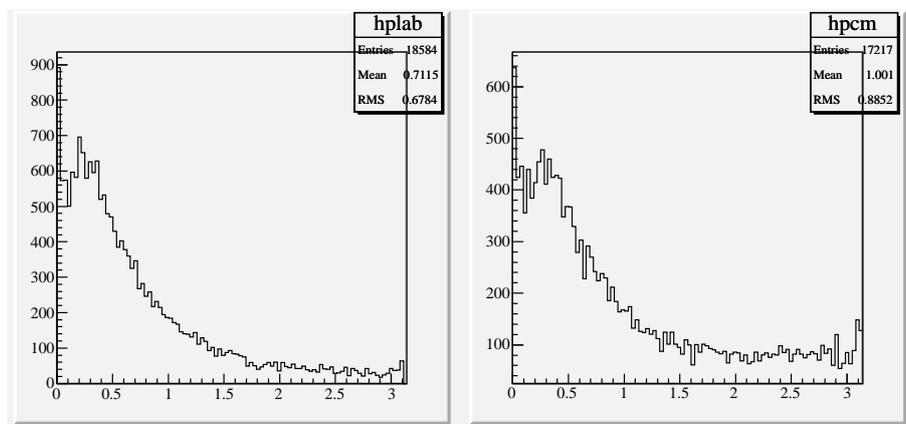


図 6.8 target=C, Ein=100MeV

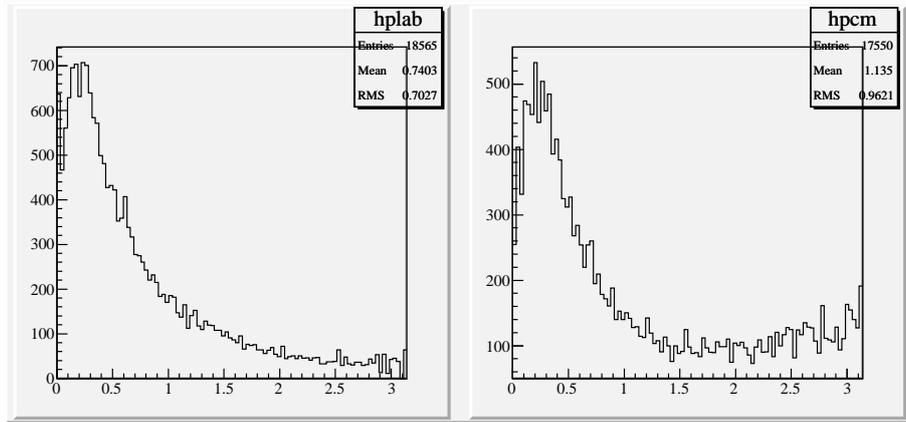


图 6.9 target=C,  $E_{in}=200\text{MeV}$

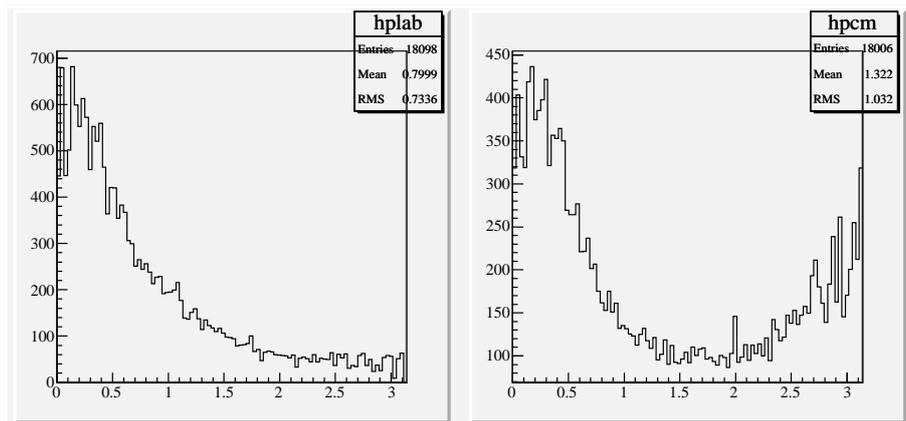


图 6.10 target=C,  $E_{in}=300\text{MeV}$