

経過報告

田中 隆己

2011年11月18日

1 10Li 見積り

1.1 beam intensity, purity

RIPS(160, エネルギー不明 (135MeV/A と思われる), web page に載っている実測値)

- 11Li:4.5e4,100%
- 11Be:1.23e7,100%
- 12B:1.34e8,99.5%

RIBF(180, 290MeV/A, Be 15mm, LISE++)

- 11Li:1.0e6,100%(low momentum 側)
- 11Be:2.3e7,100%
- 12B:2.4e7,100%

他はどれもディテクターのレートで決まる。

1.2 ディテクターのレート耐性

1.2.1 plastic

78Ni の実験で plastic のレート耐性を見た。その結果、レートが $1e5$ だとパイルアップは 2% 程度であった (南方くんのログノートに貼った)。これより、 $5e5$ 程度は十分に耐えられると考えられる。

1.2.2 IC

$1e5$ ではパイルアップが真のシグナルの 2 倍程度いた。これよりビーム調整には使えるが IC で dE を測ることはできない。

1.2.3 PPAC・DC

PPAC・DC については調べていない。

1.3 検出効率

中性子検出器のアクセプタンス、解析能力 (3 本以上でシグナルが鳴る)、ターゲットの厚みを考慮したときの E_{rel} に対する検出効率を図 1.1 示す。分解能は 1% 以内 (FWHM:210keV@1MeV) で一致している。

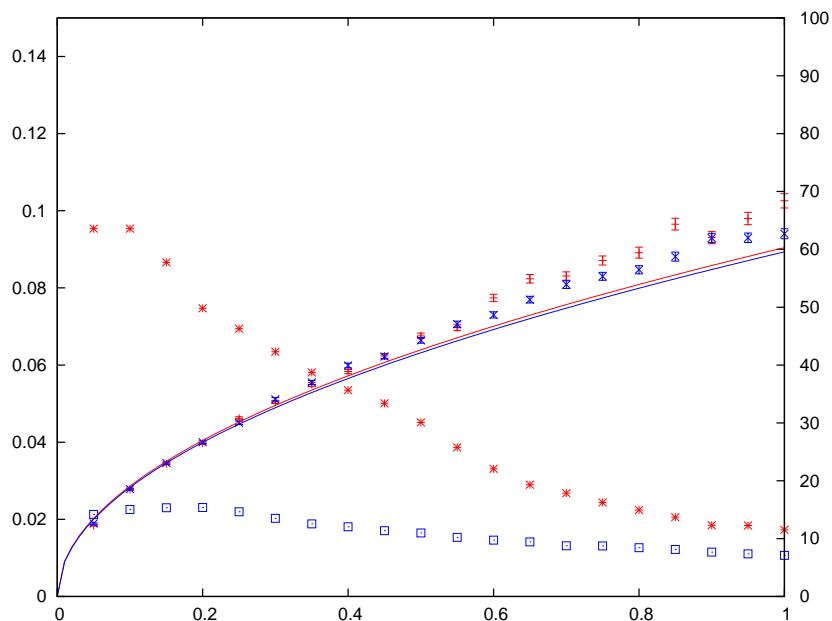


図 1.1 RIPS と RIBF における検出効率と分解能。分解能は同じになる様にセットアップした。検出効率は RIBF の方が 3~4 倍多い。

1.4 ターゲット厚

RIBF

- ^{12}C :1g/cm²
- energy loss difference:31.57MeV
- estrag:1.0MeV
- multiple scattering:1.4mrad

RIPS

- ^{12}C :0.42g/cm²
- energy loss difference:24.81MeV
- estrag:0.57MeV
- multiple scattering:2.5mrad

1.5 運動量分解能

Erel によって多少運動量分解能は違ってくるので Erel=0.5MeV の場合を図 1.2, 1.3 示す。

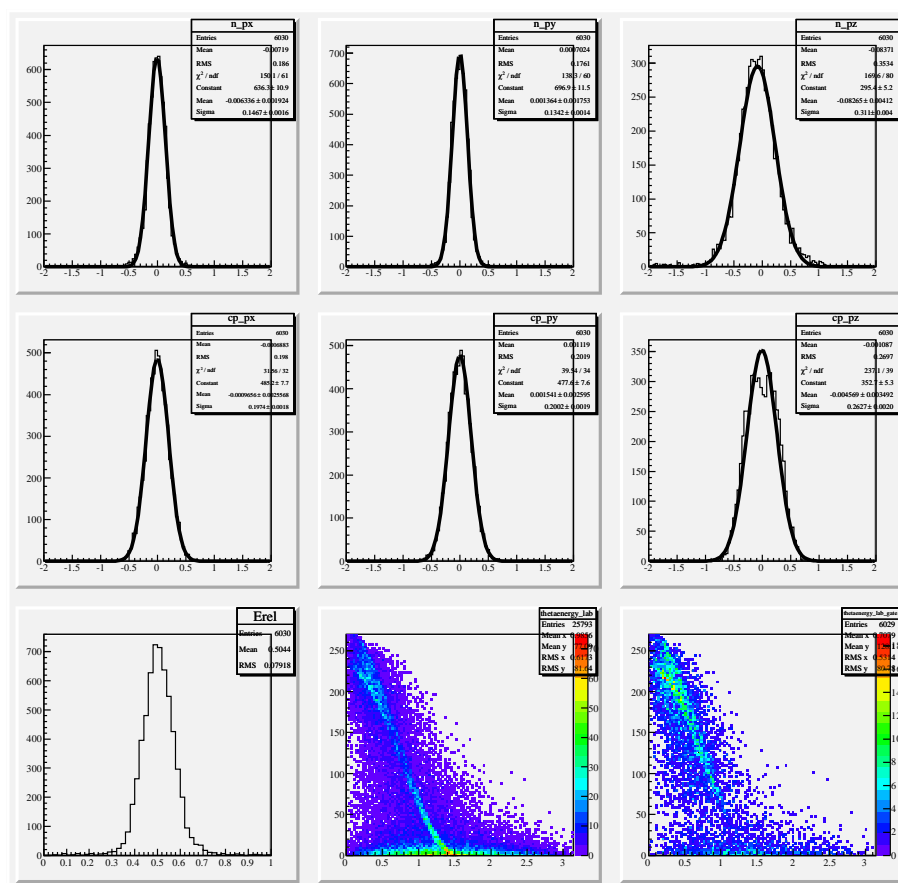


図 1.2 RIBF における運動量分解能。

1.6 断面積 (250MeV/nucleon)

- $12\text{B}(1+) \rightarrow 10\text{Li}(1+)$ 0.87 mb
- $12\text{B}(1+) \rightarrow 10\text{Li}(2+)$ 0.08 mb
-
- $11\text{Be}(-p)$, $S_p=20.164$ MeV, $1p_{3/2}$ proton removal
- 19.2 mb (I guess we expect C^2S 2)
-
- $11\text{Li}(-n)$, $S_n=400$ keV, $1p_{1/2}$ neutron removal
- 78 mb (I guess we expect C^2S 1?)
-

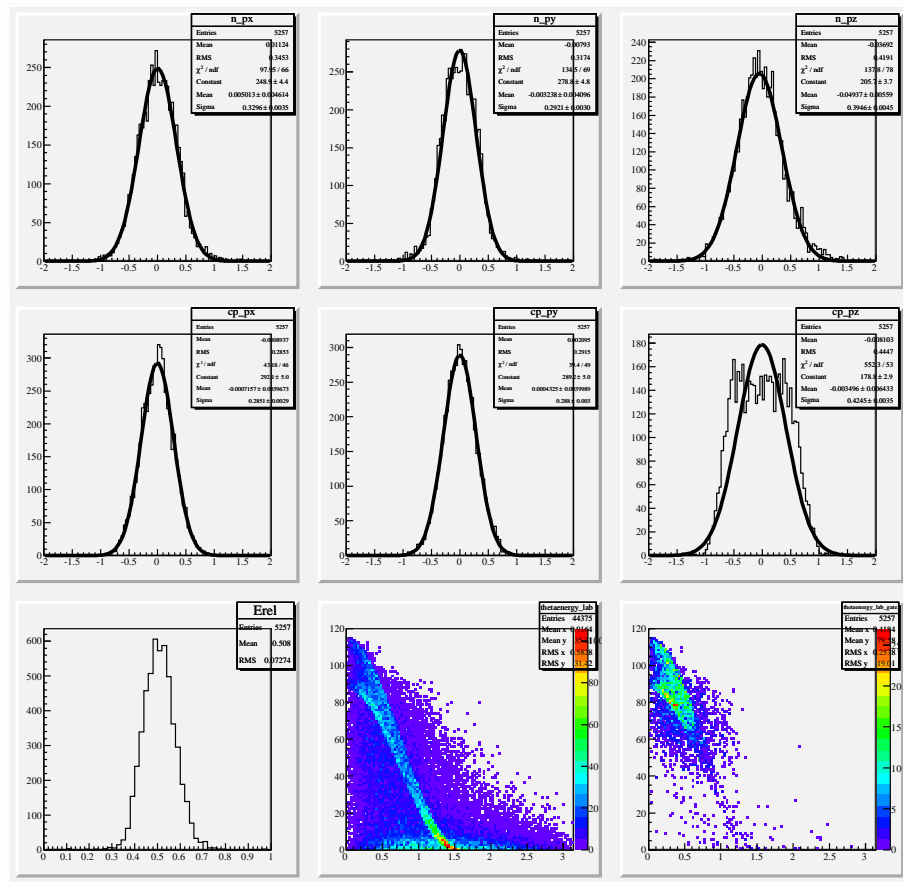


図 1.3 RIPS における運動量分解能。RIBF より悪いが、Ein が小さいので結局同じ質量分解能になる。

- $^{11}\text{Li}(-n)$, $S_n = 400$ keV, $2s_{1/2}$ neutron removal
- 139 mb (I guess we expect C^2S 1?)

1.7 $^{11}\text{Li} \rightarrow ^{10}\text{Li}$ の運動量分布

$^{11}\text{Li} \rightarrow ^{10}\text{Li}$ の運動量分布を図??に示す。運動量を測ってうれしいのは s と p が混ざる ^{11}Li から来るときのみであり、また統計的に ^{11}Li 以外は厳しいと思われる。運動量の分解能は荷電粒子側で決まり、どちらの方向もおよそ 20 MeV である。荷電粒子のアクセプタンスは計算していないのでどこまで取れるのか評価できていない。

1.8 スペクトル

1.8.1 ^{11}Li : 20000 以上?

^{11}Li の fit は間に合わなかった。12B で $1+$ が決定できればあとは $2+$ を決定するだけなので数千カウントでも可能。ただし、12B で $1+$ が見える保証はないので、保険という意味で 20000 イベント以上欲しい。また、角度分布を見る上でもイベントは一桁多い方がいい。

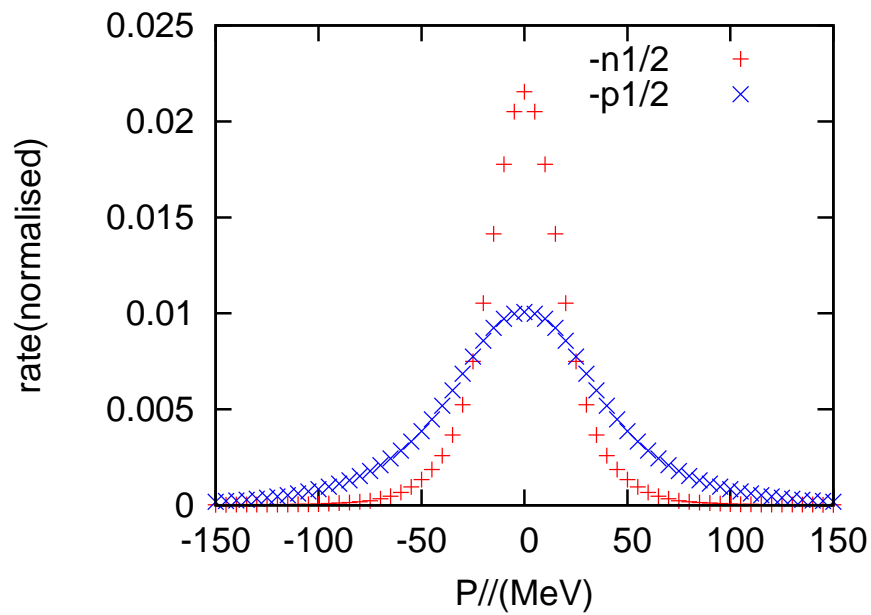


図 1.4 $^{11}\text{Li} \rightarrow ^{10}\text{Li}$ の運動量分布。運動量を測ってうれしいのは ^{11}Li から来るときのみであり、また統計的に ^{11}Li 以外は厳しいと思われる。

1.8.2 ^{11}Be :4000 以上

fit の結果を図 1.5,1.6,1.7 に示す。fold に関してはガウシアン ($\sigma = \sqrt{E_{rel}}$) でなましているだけなので、低エネルギー (100keV 以下) のところでは正確に fold できていない。このため正しい fit が行えていない。

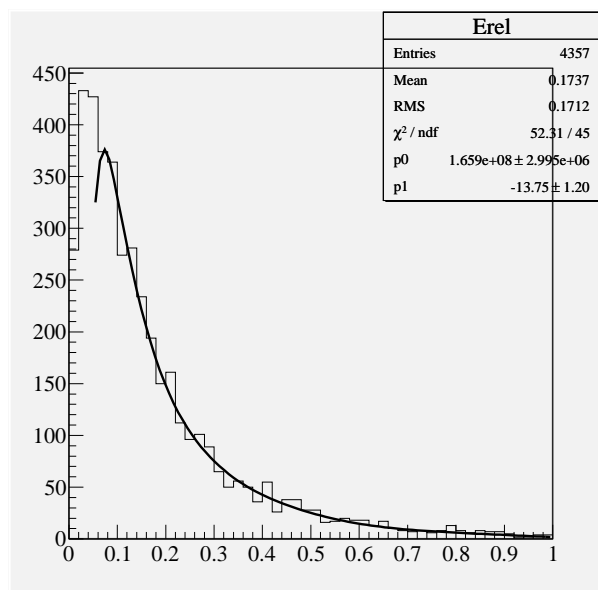


図 1.5 $^{11}\text{Be} \rightarrow ^{10}\text{Li}$ の相対エネルギースペクトル。4000 カウントの場合

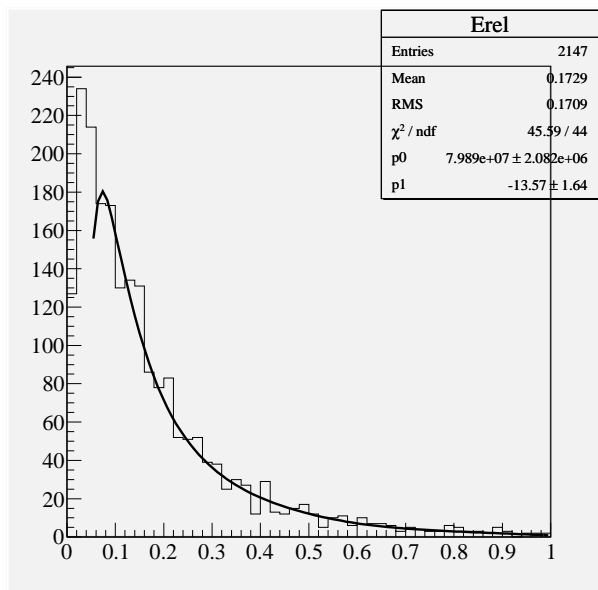


図 1.6 $^{11}\text{Be} \rightarrow ^{10}\text{Li}$ の相対エネルギースペクトル。2000 カウントの場合

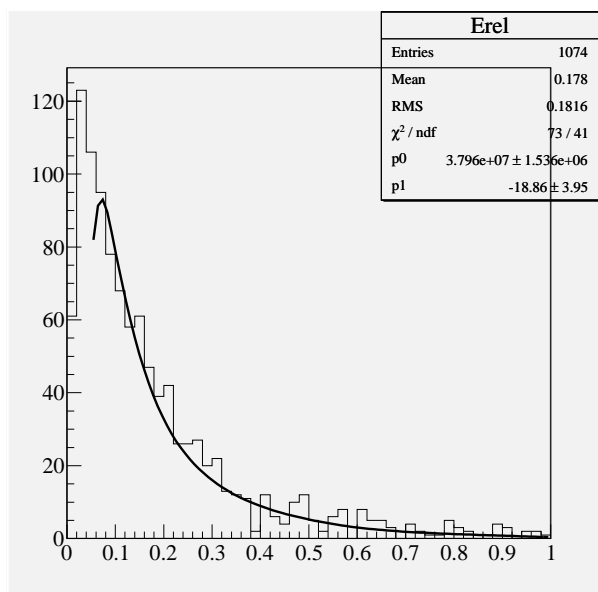


図 1.7 $^{11}\text{Be} \rightarrow ^{10}\text{Li}$ の相対エネルギースペクトル。1000 カウントの場合

s の散乱長の正確な決定には幅を正確に fit できる必要があり、4000 イベントは必要である。

1.8.3 ^{12}B :1000~4000 程度

fit の結果を図 1.8,1.9,1.10 に示す。 ^{10}Li の $1+$ が多く生成されるとするとこの状態は鋭い resonance なので 1000 イベントでもピークの位置を統計誤差数 % で決められる。逆に、 $2+$ はイベントが少ないこととアクセプタンスの関係から fit が行えない。状況次第であり、最低 1000 イベント、可能なら 4000 イベント以上欲

しいところである。

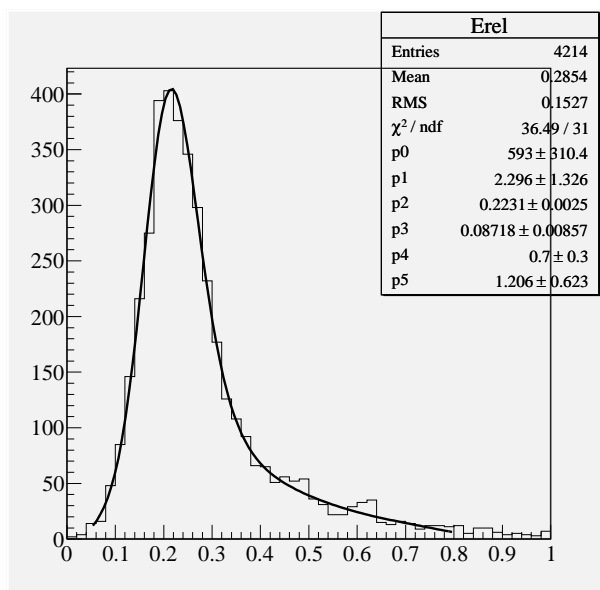


図 1.8 $^{12}\text{B} \rightarrow ^{10}\text{Li}$ の相対エネルギースペクトル。4000 カウントの場合

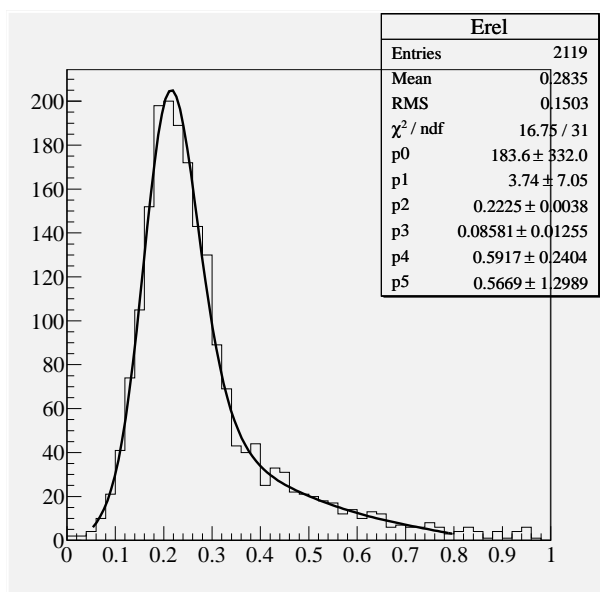


図 1.9 $^{12}\text{B} \rightarrow ^{10}\text{Li}$ の相対エネルギースペクトル。2000 カウントの場合

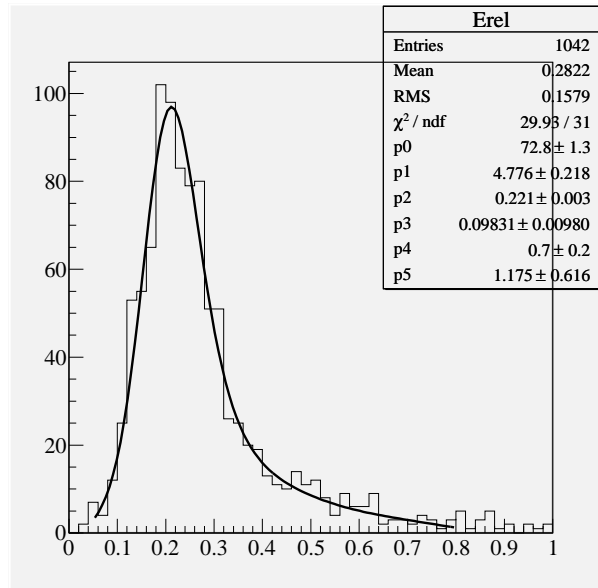


図 1.10 $^{12}\text{B} \rightarrow ^{10}\text{Li}$ の相対エネルギースペクトル。1000 カウントの場合

1.9 gamma キャリブレーション

1.10 シングルレート

1.11 イベントレートと thr

1.12 サチる問題と thr

1.13 必要なカウント数

1.14 バックグラウンドラン

バックグラウンドは下記で示すようにイベント数に対するバックグラウンドの量を r とすると、 $1/r$ の時間だけ取ればよいことになる。RIBF の場合なら上流のプラスチックを 3mm 程度にする予定で、ターゲット厚は 1g とするので、およそ $1/3$ の時間イベントを集めれば良い。RIPS の場合はターゲット厚を 0.4g にする予定で、そもそもアクティブターゲットにする必要があるかもしれない。

1.15 ビームタイム

HIME の検出効率は RIBF セットアップで 0.6% 程度。RIPS の場合は 0.2% と仮定する。断面積は理論計算の半分を仮定して、 ^{12}B :0.5mb, ^{11}Be :10mb, ^{11}Li :100mb とする。ビームの強度は申請通り $1e5$ とする (RIPS の ^{11}Li だけ $0.5e5$)。

2 シミュレーションの妥当性

2.1 QGSP_BIC_HP について

2.2 断面積

2.3 proton の角度分布 (lab,cm)

2.4 proton の角度分布に対する検出効率

2.5 ^{11}Be の実験のシミュレーション:検出効率

2.6 ^{11}Be の実験のシミュレーション:分解能

3 HIME の特性

3.1 エネルギーロス分布

3.2 アクセプタンス

3.3 proton の入射エネルギーと range

3.4 2 体の場合のアクセプトされる proton の角度のエネルギー依存

3.5 HIME の分解能 ($dT=110\text{ps},130\text{ps},200\text{ps}$)

クリティカルには効かない。

3.6 3,4,5 層突き抜けの場合の dpz の変化

イベントは 1/4 に減って 5% ぐらいしか改善しない。層の数が増えるとイベントのロスは少なくなり、また、改善した pz に合わせてセットアップを組めば全体ではまだ 1,2 割分解能を上げられると考えている。

4 ターゲット厚とバックグラウンド

5 ディテクターセットアップ

6 荷電粒子のアクセプタンス

7 back ground run の見積り

バックグラウンドランをどれだけとればよいかについて。

基本的には貯めたイベントの統計誤差と同程度の誤差になるようにバックグラウンドランを取ればよい。ある時間 t イベント貯めたときのイベント数を N とする。イベント数に対するバックグラウンドの割合を r とし、バックグラウンドランを時間 t/k だけ取ったとする。このときそれぞれの統計誤差が一致するときの k

は、

$$\sqrt{N} = k\sqrt{rN/k} = \sqrt{krN} \quad (7.1)$$

$$\therefore kr = 1 \quad (7.2)$$

以上から k と r は反比例の関係になり、例えばバックグラウンドが 3 割の場合は $1/3$ の時間だけバックグラウンドランを取ればよい。

8 発光の減衰による位置検出 (PPAC の代替)

8.1 実際の分解能

F11Pla は 10cm で $1/40$ の減衰。中心でのアテネーションは 2cm で丁度半分。分解能は 4mm 弱 F11 の場合は PPAC で出した位置の外挿になるのでおそらくそれが限界になっている。

F7Pla も 2cm で半分程度。全体の減衰はわからない。分解能は 2mm 弱こちらも PPAC で出した位置はフォーカスするところの位置なのでこれにより分解能あがっていない気がする。

しかし、光の減衰を使った場合でも 2mm 程度の分解能を出せることがわかる。

ちなみに、時間差を使った場合も光の減衰を使った場合と同程度となった。これより、PPAC で出した位置がネックになっているという主張が正しそうである。

8.2 利点

この発光の減衰を利用した方法の利点は、分解能はエネルギーロスの絶対値と統計誤差にのみ依存し、エネルギーロスの不確定性などには寄らないことである。また、時間分布にも依存しないのでスルー補正等も必要ない。

8.3 問題点

唯一の問題点は PMT のリニアリティが完全ではないのでエネルギーレンジごとにキャリブレーションが必要なことである。

8.4 誤差の理論計算

減衰により位置を求める場合の近似式は、

$$x = k \log(A_l/A_r) \quad (8.1)$$

である。ここでは、比例係数を k と置いた。 A_l, A_r は左右の PMT に到達した光の強さを表す。

誤差の伝播を計算すると、

$$dx/dk = \log(A_l/A_r) \quad (8.2)$$

$$dx/dA_l = k/A_l \quad (8.3)$$

$$dx/dA_r = k/A_r \quad (8.4)$$

となる。 k の誤差はキャリブレーションによって無視できるところまで小さくできるとする。この場合、位置

の誤差の最大値は、

$$\sigma_x = k \frac{\sigma_{A_l}}{A_l} \quad (8.5)$$

となる (A_r でも同じ)。

アテネーションが大きいほど位置の測定精度が改善するのは比例係数 k が小さくなるからということがわかる。具体的には、近似的に $A_l = A(x_l) = \exp(-x_l/\lambda)$ とかけるので、

$$x = k \log A_l/A_r \quad (8.6)$$

$$= k \log (\exp((x_l - x_r)/\lambda)) \quad (8.7)$$

$$= k(x_l - x_r)/\lambda \quad (8.8)$$

$x_l - x_r = L$ のときに $x = L/2$ となるので、

$$k = \lambda/2 \quad (8.9)$$

よって、 k と減衰長 λ は比例の関係になる。

次に σ_{A_l}/A_l について議論する。この値は発光量の測定値の相対誤差である。ここでは測定誤差は光子の数が少ないことからくる統計誤差に支配されていると考える。これより発光量は光子の数に書き換えられ、

$$\sigma_{A_l}/A_l = \sigma_{N_l}/N_l \quad (8.10)$$

と表すことができる。 σ_{N_l} は二項分布より、

$$\sigma_{N_l} = \sqrt{Np(x)(1-p(x))} \quad (8.11)$$

$$< \sqrt{N} \quad (8.12)$$

$$\therefore \frac{\sigma_{N_l}}{N} < \frac{1}{\sqrt{N}} \quad (8.13)$$

となる。確率 p は位置の関数であり、また左右のうち分解能が悪い方で決まるので右辺の上限が実際上の分解能となる。

以上より位置分解能は、

$$\sigma_x = k\sigma_{A_l}/A_l = \frac{\lambda}{2} \sqrt{\frac{p(x)(1-p(x))}{N}} \quad (8.14)$$

$$< \frac{\lambda}{2\sqrt{N}} \quad (8.15)$$

となり、位置分解能の最大値は減衰長と発光量で決まることがわかる。具体的には、光子数が 10000photon(1MeVee のエネルギーロス のときに生じる光の量) で減衰長が 300cm のとき、分解能は 1.5cm となる。

8.5 現実を反映

上記の議論では $N=(\text{エネルギーロス}) \times 10000 \text{photon}/1\text{MeVee}$ と書いたが、実際にはこれが大きく異なる。この N は正確には位置に依存せず減衰する量は差っ引く必要がある。列挙すると、

- 屈折率によってシンチレータから抜けてしまう光 $\simeq 0.2$ 。
- PMT の量子効率 $\simeq 0.25$ (パイアルカリ)。

- PMT の接地面積 ~ 0.5 (HIME の場合)

の3つが主に挙げられる。これより上記で書いた N は正確には $N = (\text{エネルギーロス [MeVee]}) \times 10000 \text{ photon/MeVee} \times 0.25 \times 0.25 \times \text{エネルギーロス [MeVee]} \times 250 \text{ photon/MeVee}$ と求まる。以上で求めた関係式より、HIME に proton を入射した場合を考えると、エネルギーロスは 8MeVee、減衰長は 100cm なので位置分解能は 1.1cm となる。また、 ^{78}Ni の実験における F7Pla (おそらく EJ-212) を想定すると、減衰長が 5cm で 10MeVee 程度なので位置分解能は 0.5mm となる実際に位置分解能を見てみると 2mm 以下 (PPAC から外挿したので正確にはわからない) であった。

上記の計算だとまだ見積りがあまいように思える。その一つの要因として、反射によって減衰長が短くなっている場合は相対的に N が小さくなっていることに相当していると考えられる。他にもライトガイドを用いた場合は減衰長を伸ばすだけでなく発光量の総量を減らす作用があると考えられる。これらを解析的に考慮するのは難しいので計算はここまでとする。詳細な評価は宇宙線を用いた実験で行いたいと考えている。

8.6 位置分解能の評価の方法

PPAC など他の信頼できる位置検出器がある場合は別として、上記の検出器の分解能の評価は非常に難しい。そこで、同一の検出器を三台用意し、これに宇宙線を入射する。それぞれの検出した位置を結び、その rms 等から分解能が評価できる。

8.7 試作

減衰長が短い (さらに時間分解能もものすごく良い) プラスチック (EJ-232, BC-422) があり、の見積りをお願いした。1cmx10cmx10cm で 38000 円とのこと。5mm 厚でもほぼ同じ値段。三枚買いたいのがプラスチックだけで 114000 円となるので少し考えてしまう。テスト用の PMT は HIME の使うことを考えている。

9 PMT がサチる問題

9.1 ^{78}Ni の実験

今回の実験でも PMT に近いところに粒子が入った場合はサチっている印象を受けた。これは左右での減衰が 1/40 以上あることから仕方がないと思われる。注目すべきは HIME で見られたように 500ps 程度のタイミングシフトが起こっていたことである。

9.2 タイミングシフトの解析方法

タイミングシフトは typ. に 500ps 程度なので絶対値で発見するのはかなり大変である。しかし、両読みのプラスチックの場合左右の時間差と位置の相関を見ることにより発見できる。

粒子の入射位置によって減衰量がことなるため、PMT に近い位置に入射するほどサチりやすいといえる。一方、左右の時間差は入射位置に対して連続であるはずである。つまり、タイミングシフトは入射位置対左右の時間差でプロットした相関を見て、連続か離散的かみることにより判断できる。プラスチック単体で調べる場合、入射位置に左右の時間差は使えないので $\log(A_l/A_r)$ を用いれば十分に判断できる。

PMT をサチらせるためには HV をあげるだけでよい。これより、HIME を用いてこのタイミングシフトの

問題を簡単に調査することができる。テーパディバイダの場合についても同様に検証し、タイミングシフトの問題に対する検証手法を確立し、定量的評価が行えると期待される。