

RCNP における HIME のテスト実験の基礎資料 (1)

田中 隆己

2012 年 1 月 10 日

概要

中村研では従来よりも高精細 (一本:2cm*4cm*100cm) な中性子検出器 HIME (High resolution detector array for Multi-neutron Events) を開発している。現在計画している実験では、HIME の性能を評価するために RCNP の N0-course を用いて単色中性子を生成し、時間分解能と efficiency を求める。

本資料では実験を行うための基礎となる情報をまとめる。

目次

1	中性子検出器 HIME	3
1.1	シミュレーションについて	3
1.2	HIME の外観・スペック	3
1.3	HIME の特徴	3
1.4	HIME の時間分解能	4
1.5	HIME の efficiency	5
1.6	HIME の目指す物理	6
2	実験の具体的な内容 (仮)	10
2.1	共通事項	10
2.2	時間分解能の評価	10
2.3	efficiency の評価	10
2.4	run の流れ	10
3	実験を行うにあたって考慮すること・議論	12
3.1	時間分解能と efficiency を測定する意義	12
3.2	タイムスケジュール	12
3.3	beam intensity	13
3.4	energy 分解能	13

3.5	degrader の厚みと energy loss, energy straggling	14
3.6	geometry	15
3.7	efficiency の測定の場合	16
3.8	acceptance	16
3.9	断面積	17
3.10	event rate の見積り	18
3.11	精度・必要な event 数	19
3.12	single rate および環境放射線による background	19
3.13	background run	19
3.14	gamma-ray run(イベント数が少ないので難しい)	20
3.15	beam time request	20
4	疑問・質問・調べたいこと	22
4.1	beam について	22
4.2	大強度 beam の実験について	22
4.3	background について	22
4.4	degrader について	22
4.5	magnet 周りについて	22
4.6	geometory について	23
4.7	雑多	23
4.8	議論	23
4.9	memo	23

1 中性子検出器 HIME

1.1 シミュレーションについて

以下の内容で出てくるシミュレーションは基本的に Geant4 を用いている。物理は Geant4 に標準で実装されているものを用いており、半分ブラックボックスとして用いている。断面積や Kinematics は十分に正しいように見える (図 1.1) が、例えば Carbon 由来の 4.4MeV の gamma 線は出ているようには見えない。このシミュレーションを LNEUT を用いた実験に対して適応した場合、相対エネルギー分解能は

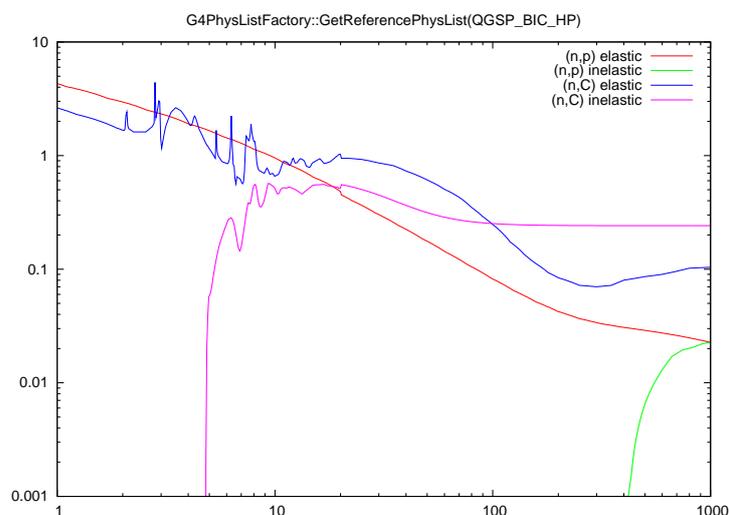


図 1.1 Geant4 で用いている反応断面積。elastic,inelastic で分けられている。

0.19MeV(Erel:1MeV) と正しく (fit の仕方によって変わる程度) 求められているが、efficiency に関しては 1割ぐらい under estimate していることが分かっている。

1.2 HIME の外観・スペック

HIME の外観を図 1.2 に示す。

HIME の Geometrical なスペックを表 1.1 に、物理的なスペックを表 1.2 に示す。

相対エネルギー分解能は例えば RIBF で 10Li の測定を行うと FWHM で 200keV 程度までいける計算となる (RIPS の LNEUT や RIBF の NEBULA の 2 倍, GSI の LAND の 3~4 倍)。

1.3 HIME の特徴

HIME は一本のモジュールの厚みが 2cm と薄く、neutron がプラスチックから打ち出す recoil proton は複数のモジュールを通過することができる。accept される event の数は図 1.3 によりおおよそ検討がつく。現在の HIME(5 層) をシミュレーションすると三層以上モジュールが鳴る確率は $E_{in}=250\text{MeV}$ のときに 1n の efficiency に対して約 1/4 である。

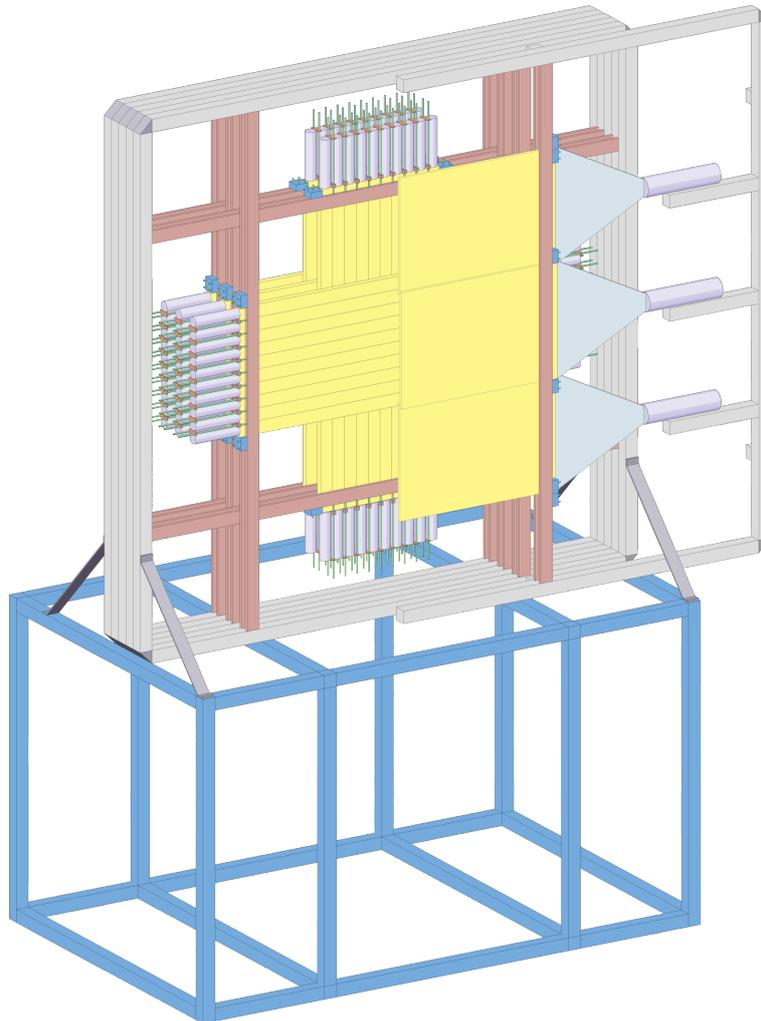


図 1.2 HIME の外観図。NEUT が見えるように VETO は半分のみ描かれている。

複数層通過することにより反跳 proton のトラッキングが可能である。これの具体的な応用の評価はまだ行えていない。基礎情報として反跳 proton の角度分解能を図 1.4,1.5 に示す。本実験でこのトラッキングの性能を評価したいところではあるがよい方法が思いつかない。

1.4 HIME の時間分解能

各粒子に対するモジュール一本の時間分解能を表 1.3 に示す。

neutron に対する時間分解能だが、反跳 proton が複数の plastic を通過した場合はその event は proton が発生しているとタグでき、さらに少なくとも二層目のシグナルは proton に対する時間分解能で決まるはずである。これより、複数回測定によって分解能が上がる ($\sim \sqrt{n}$, 実際にシミュレーションをするとそこまで改善しない) だけでなく、従来の様に gamma 線と比較して neutron に対する時間分解能が悪くなることなく、根本的に時間分解能が改善する可能性がある。この推察から三層突き抜け event のシミュレーションでは neutron に対する時間分解能は 110ps と仮定して計算している。

Neutron Detectors	
Geometry of 1Module	4x100x2(D) cm ³
Scintillator	EJ-200(same as BC-408)
Photomultiplier Tube	H7415(ϕ 28) + SHV,LEMO connector
Number of Modules per 1Layer	10
Number of Layers	5
Total Number of Modules	50
Total Number of Phototubes	100
Veto Detectors	
Geometry of 1Module	105(H)x36(V)x1(D) cm ³
Scintillator	EJ-200(same as BC-408)
Photomultiplier Tube	H6410(single signal output version of H7195)
Number of Modules	3
Number of Phototubes	6

表 1.1 HIME の neutron-detector 部、及び veto-detector 部の geometrical なスペック

Analysis Method	$\epsilon_{1n}(\%)$	timing resolution(ps)
Single Hit	10	140
Multi-Hit($n \geq 3$)	3	105
Multi-Hit($n \geq 4$)	1.5	95

表 1.2 HIME の efficiency と timing resolution. Single Hit とは従来 (NEBULA や LNEUT) と同様の解析方法のことで、一つずつのモジュールで event を決定する。Multi-Hit と言っているのは反跳陽子が複数層通過したことを仮定して解析する方法で、tracking を行うことにより分解能を改善させる。Single Hit のときは gamma 線に対する時間分解能 (130ps) を固有の時間分解能と仮定して計算している。Multi-Hit のときは陽子に対する時間分解能 (110ps) を仮定して計算している。

最後にシミュレーションより求めた neutron に対する時間分解能の energy 依存性を図 1.6 に示す。図に示すように時間分解能の energy 依存性は見られない。層の数がもっと多ければ energy が上がると突き抜ける層の数が増えるので分解能が改善することが期待されるが、現在の HIME は 5 層しかないので時間分解能が入射 energy にあまり依存しないと考えられる。

1.5 HIME の efficiency

従来方法 (一つずつのモジュールで neutron を測定) を用いた場合の neutron に対する検出効率はおおよそ 10% である。3 層以上シグナルがなることを要請した場合は、図 1.3 から半分のイベントが accept され、さらに HIME は 5 層しかないので 3 層通過するためには手前の 1 か 2 層目で proton が打ち出される必要がある。これにより大雑把にはさらにイベント数が半分になる。つまり、一本のモジュールで検出した場合の効率である 10% から 1/4 になるので検出率はおよそ 2.5% と概算できる。実際にシミュレーションを行った

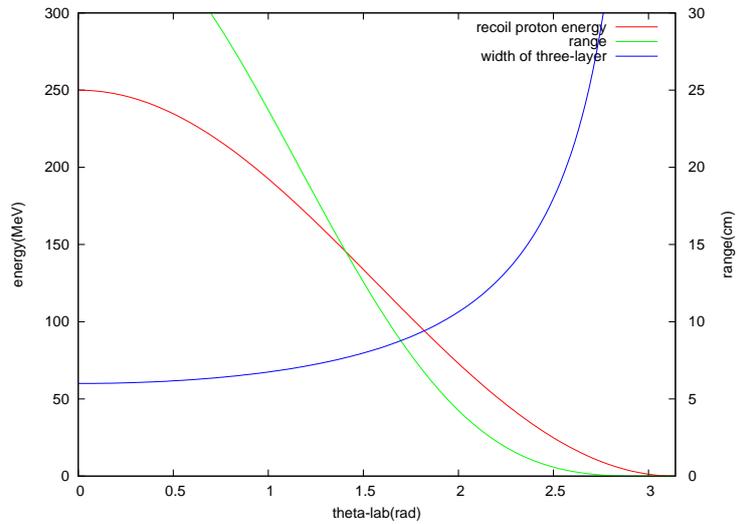


図 1.3 反跳 proton の反跳角とエネルギー、range、plastic の厚みの関係。neutron の入射エネルギーが 250MeV の場合。

particle	timing resolution(ps)
muon	70
proton	110
gamma	130
neutron	—

表 1.3 モジュール一本の時間分解能。muon に対する時間分解能は intrinsic な値に直している。proton と gamma の場合はスタートカウンターやモジュールの厚み込みの時間分解能である。neutron に対する評価はまだできていない。

場合の efficiency のエネルギー依存性を図 1.7 に示す。概算とシミュレーションの結果が consistent なのがわかる。

次に、efficiency の threshold 依存性を図 1.8 に示す。threshold 依存性はハードウェアの thr を十分に下げておけばソフトウェアで解析できるので event 数を勘定するときに特に意識する必要はない。

1.6 HIME の目指す物理

主には不変質量法において相対エネルギー分解能の底上げを図る (^{10}Li , ^{16}B , ^{21}C , etc)。軽い原子核については RIPS でもまだ世界最高のエネルギー分解能で実験できる。しかし、HIME の特徴である多層突き抜けを生かすには RIBF で実験を行うことが望ましい。将来的には HIME の layer 数を増やすことにより複数中性子 event を従来よりも高信頼・高効率で測定できるようになり、 $2n$ (^5H , ^{10}He , etc) や最終定期には $4n$ (^4n , ^7H , 280 , etc) の質量測定を行う。

また、HIME は適度に小さいため可能性として (p,pn) 等の missing mass への応用も考えられる。

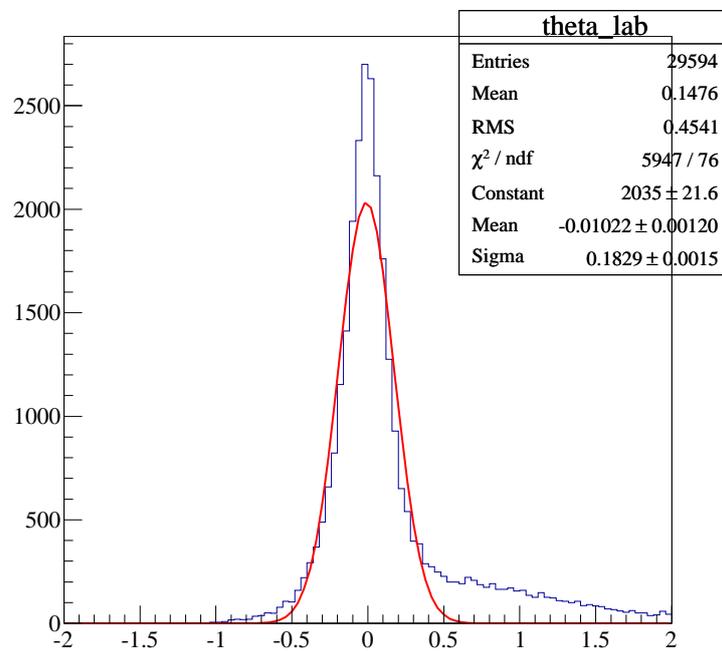


図 1.4 横軸:theta.cm(rad), 縦軸:a.u.。CM 系における反跳 proton の角度 (theta) 分解能。beam 軸方向を z 軸としている。

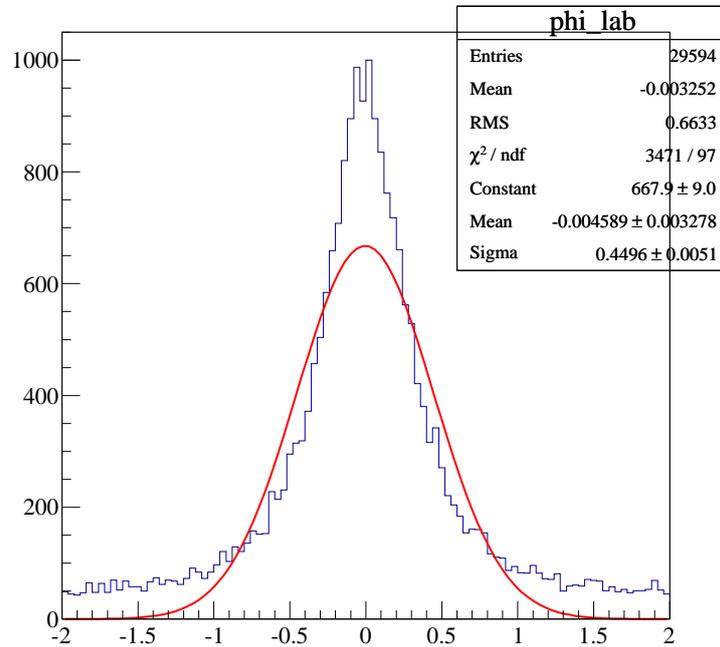


図 1.5 横軸:phi_cm(rad), 縦軸:a.u.。CM 系における反跳 proton の角度 (phi) 分解能。beam 軸方向を z 軸としている。

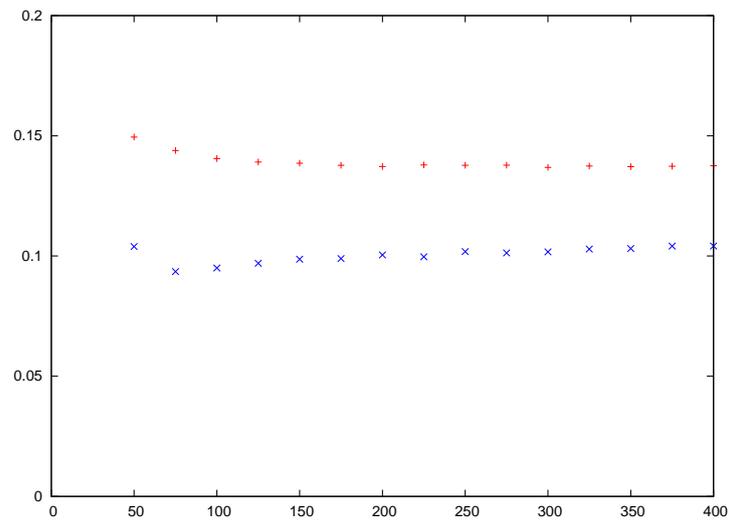


図 1.6 横軸:ein(MeV), 縦軸:timing resolution(ns)。ToF の energy 依存性。上の線は Single Hit のときを表し、gamma 線に対する時間分解能 (130ps) で決まるとして計算している。下の線は Multi-Hit($n \geq 3$) のときを表し、陽子に対する時間分解能 (110ps) で決まるとして計算している。

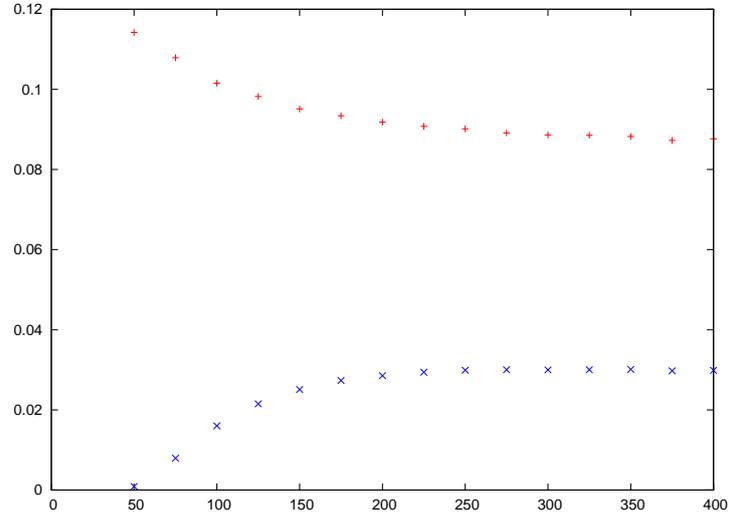


図 1.7 横軸:ein(MeV), 縦軸:efficiency(rate)。efficiency の energy 依存性。threshold は 3MeVee 程度である。efficiency は低エネルギーで大きく変化し、特に 150MeV 以下では linear に立ち上がってくる。

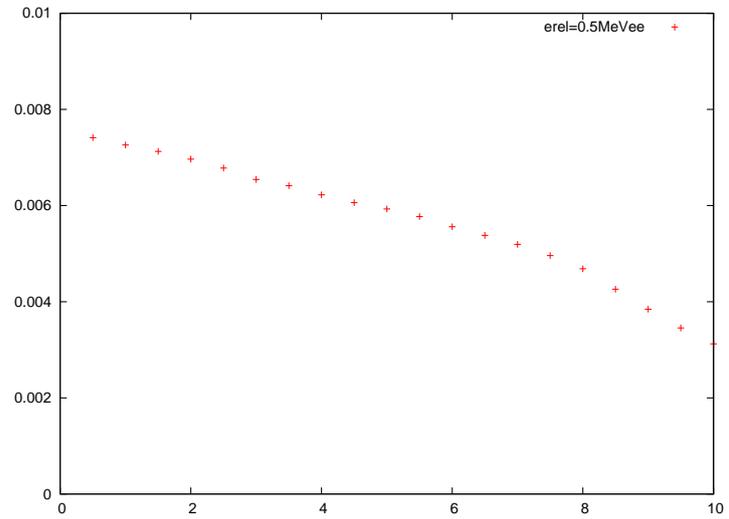


図 1.8 横軸:threshold(MeVee), 縦軸:efficiency(rate)。efficiency の threshold 依存性。入射エネルギーは 250MeV, 解析方法は $n \geq 3$ とした。

2 実験の具体的な内容 (仮)

実験の具体的なセットアップを先に示しておく。詳細は後の章で示すが議論の余地は多分に残っている。

2.1 共通事項

- reaction:Li(p,n)Be
- angle:0° のみ
- HIME setup:28cm(V)x48cm(H)x10cm(D)
- layer 構成:7mod(横置き)x12mod(縦置き)x7mod(横置き)x12mod(縦置き)x7mod(横置き)
- ch 数:NEUT 90ch, VETO 6ch 計 96ch

2.2 時間分解能の評価

- distance:3m
- energy:250MeV
- target 厚:1g(~1cm)
- de:3.3MeV(rectangle)
- dt:40ps(位置の不定性が 32ps, エネルギーの不定性が 23ps)
- intensity: 5×10^5
- event rate:1400cph(HIME 全体)、140cph(一本)

2.3 efficiency の評価

- distance:45m
- energy:100~250MeV(50MeV 刻み,degrader 使用)
- target 厚:0.5(100MeV)~1g(250MeV)
- de:2MeV(FWHM)
- intensity: 1×10^{10} (~2nA)
- event rate:66000cph(HIME 全体)、6600cph(一本)

2.4 run の流れ

どのセットアップにおいても

- proton 素通り (回路調整, ToF のキャリブレーション, beam の E, 及び dE のチェック)
- (gamma による ToF キャリブレーション)
- neutron
- background

が必要である。理想的には、

- (i) 3m 位置,beam 強度 10^3 cps,250MeV,proton 素通し
- (ii) (3m 位置,beam 強度 10^6 cps,250MeV,gamma 線,Carbon Target)
- (iii) 3m 位置,beam 強度 10^5 cps,250MeV,neutron,ToF
- (iv) 3m 位置,beam 強度 10^5 cps,250MeV,neutron,background
- (v) 後ろへ HIME、回路を移動
- (vi) 45m 位置,beam 強度 10^3 cps,250MeV,proton 素通し
- (vii) 45m 位置,beam 強度 10^{10} cps,250MeV,neutron,efficiency
- (viii) 45m 位置,beam 強度 10^{10} cps,250MeV,background
- (ix) 45m 位置,beam 強度 10^3 cps,200MeV(degrader),proton 素通し
- (x) 45m 位置,beam 強度 10^{10} cps,200MeV(degrader),neutron,efficiency
- (xi) 45m 位置,beam 強度 10^{10} cps,200MeV(degrader),background
- (xii) 以下 150,100MeV まで繰り返し

という流れになる。

3 実験を行うにあたって考慮すること・議論

以下では実験を行うにあたって考慮することの議論をする。

3.1 時間分解能と efficiency を測定する意義

3.1.1 物理的意義

相対エネルギー分解能 dE_{rel} は、

$$dE_{rel} \sim \sum_{i=x,y,z} (\beta_{ni} - \beta_{fi})^2 \left(\left(\frac{dp_{ni}}{p_n} \right)^2 + \left(\frac{dp_{fi}}{p_f} \right)^2 \right) \quad (3.1)$$

と表される。運動量分解能 dp は時間分解能に比例するので結局時間分解能は相対エネルギー分解能に比例する。これより時間分解能の決定精度が物理量の測定においてその分解能の評価の精度を決定する。相対エネルギー分解能が物理量に直接効く例として、virtual-resonance を特徴付ける散乱長などが上げられる。近似的に散乱長と resonance の幅は逆数の関係にあるので、分解能の決定精度が散乱長の決定精度に比例する。これより例えば時間分解能は誤差 5% 以下で決定したい (根拠がほんとは欲しい)。

一方 efficiency の決定精度は断面積の測定精度に直接影響する。断面積は反応論との比較に用いることができる (具体的なことは勉強不足で知らない)。また、spectroscopic factor の決定にも影響する。これより efficiency も例えば誤差 5% 以下で決定したい (根拠がほんとは欲しい)。

3.1.2 実験の実現可能性

実際に原子核の質量を測定する実験を計画する段階で実験の実現可能性を評価する必要がある。特に HIME は high resolution の実験を行うことを主とするので、resolution が正確に分かっている必要がある。実験の実現可能性という意味では efficiency は 10 割程度の精度でわかっているだけで十分である。

3.1.3 シミュレーションの検証

HIME は今までの中性子検出器を発展させた検出方法を取るため (複数層 proton が突き抜けた event を解析する)、従来のシミュレーションがどこまで適応可能なかが評価できていない。また、複雑なジオメトリを解決するために現在は Geant4 を用いたシミュレーションを行っている。この Geant4 を用いたシミュレーションでは現状従来の中性子検出器の性能を 1 割の精度で再現する (分解能は 5% 以下、efficiency は LNEUT の場合で 1 割 under estimate)。HIME の性能を内挿・外挿するために現在のシミュレーション方法のキャリブレーションを行いたい。

3.2 タイムスケジュール

ビームが 6 月から 12 月まで止まるとのことだが、自分の修論に間に合わせたいことと SAMURAI のコミショニング (3 月) 及び実験 (まだ未定, 4~5 月?) があることから 5 月末、もしくは 12 月末に行う必要がある。ただ、HIME 自体が 3 月~4 月にならないとそろわないこともあり 5 月末もかなり厳しい。

3.3 beam intensity

3.3.1 ToF の測定の場合

今回の様な simple な実験では限界まで beam の強度を上げたい。PMT からのシグナルの幅 (40ns) や Gate 幅 (100ns) を考えれば plastic がへたらない限り 10^6 cps は十分可能なはずだが、ここでは beam のパイルアップを議論する。

パイルアップを計算するのに Live time の計算を利用する。Live time は、

$$\frac{N'}{N} = 1 - N't \quad (3.2)$$

$$\therefore \text{Livetime} = \frac{1}{1 + N't} \quad (3.3)$$

で与えられる (小林さんの memo)。N は Total event rate(s^{-1}), N' は Accepted event rate(s^{-1}), t は Dead time(s) を表す。beam の rate を $1 * 10^6$ cps とし、gate の幅を 100ns とすると、

$$\text{acceptedevent} = \frac{1}{1 + 10^6 \text{cps} * 100 \text{ns}} = 1/1.1 = 0.91 \quad (3.4)$$

となる。これより完全にランダムに beam が来た場合、約 1 割の event はパイルアップしてしまう (本当に 1 割しかパイルアップがないのなら何ら問題ない)。

一方、岩元さんの論文にあるように 500ns の chopper が使えるのならば、一つのパンチに 2 個以上 beam が入らないかぎりパイルアップは起きない。

他の人の話では 10^6 cps でやると plastic がへたってくるとのことなので、以下の見積りでは安全策で $5 * 10^5$ cps で計算する。

3.3.2 efficiency の測定の場合

こちらは nA のオーダーの beam を扱う。そのとき岩元さんらは 500ns の chopper を使っている？が、これの考え方がいまいまいちわからない。ここでは想像で計算する。

平均で $1 * 10^{10}$ cps 出すことを考える。そのためには一回の chopper あたり $5 * 10^3$ counts の proton が必要となる。これを 1ns の間に詰め込むには $5 * 10^{12}$ cps (~1000nA(無理)) 必要になる。こういう計算で合ってるのでしょうか？

3.4 energy 分解能

^7Be の高励起状態への遷移や QF, $\text{Li}(p,n^3\text{He})\alpha$, $\text{Li}(p,xn)$ 反応によるバックグラウンドが存在する。これの寄与を減らすためには neutron の energy 分解能を上げる必要がある。 ^7Be は G.S. と 0.4MeV の励起状態の他に、9.9MeV と 11MeV に 3/2- の非束縛状態がある ($^7\text{Li}(\text{G.S.}):3/2-$)。これがそれなりに見える様で、efficiency の精度を出すためにはこの peak を分ける必要がある。岩元さんらの論文のグラフを元に例えば 9MeV(FWHM, HIME を 3m に置いた場合の最高の分解能) で fold した結果を図 3.1 に示す。この図から $dE \sim 9\text{MeV}$ (FWHM) では 10MeV の peak が区別できなくなり、単純には 1 割ほどの不確実性が生じる。これより 3m の位置では efficiency の十分な評価はできないので、岩元さんらと同様に $dE \sim 2\text{MeV}$ (FWHM) に抑えたい。

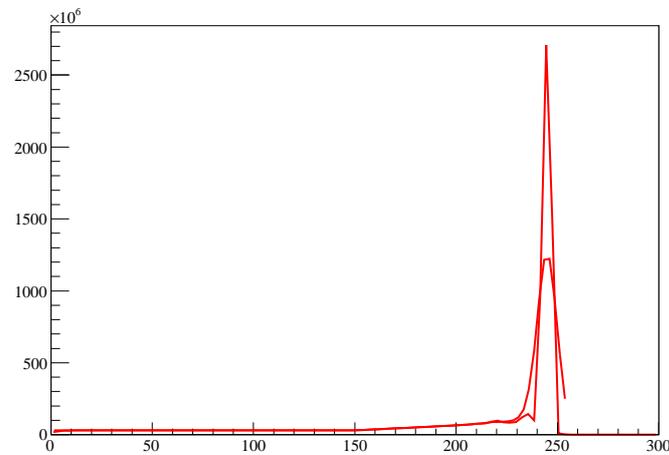


図 3.1 横軸:ein(MeV), 縦軸:a.u.。neutron の energy 分解能。岩元さんの論文の fig.5 を元にその図をさらに 9MeV(FWHM) で fold した (なまっている線)。もともとの分解能は 2.3MeV(FWHM) である (鋭い方の線)。9MeV(FWHM) で fold した場合は真のシグナルに対して 10MeV ほど下にいる 7Be の高い励起状態を区別できなくなっている。

beam の dE だが、公式に入射エネルギーに対して 10^{-3} までいけるとのことで、これは数百 keV オーダーなので十分エネルギーはそろっており問題にならない。

3.5 degrader の厚みと energy loss, energy straggling

efficiency のエネルギー依存性を求めるためにビームのエネルギーの切り替えに 1.5 日も待つのはもったいないので degrader を用いることを考える。

入射エネルギーを 250MeV としたときの degrader の厚みと energy loss, 及び energy straggling の関係を表 3.1 示す。energy 分解能を 2MeV(FWHM) 程度に抑える必要があり、いずれの場合でもスリットが必要と

thickness(g/cm ²)	eout(MeV)	energy loss(MeV)	estrag(FWHM)
8.0	225	25	2.1
15.0	201	49	3.1
28.0	151	99	4.7
39.0	98	152	7.3

表 3.1 degrader の厚みと energy loss、及び energy straggling の関係。

なる。

3.6 geometry

HIME を置く位置だが、ToF resolution の測定では近い方がよく、efficiency の測定では遠い方が良い。以下ではこれを定量的に評価する。

3.6.1 ToF resolution の測定の場合

ToF resolution の測定においては neutron の ToF の幅を HIME の resolution(100ps 丁度) の半分以下(50ps) ぐらいに抑えたい。

ToF の幅を決めるのは HIME の位置と target 厚 (neutron のエネルギーの広がり) である。中性子シールドまでの距離が 4.5m であることから HIME を置く位置を 3m と決め打ちする。このとき、ToF の幅が 50ps となるとき target 厚を表 3.2 に示す。

Ein(MeV)	dt(ns)/de(MeV)@3m	de@50ps	de@Li:1g(rectangle)	g@50ps	g@de=2MeV(rectangle)
50	0.29	0.17	11.7	0.050	0.19
100	0.10	0.50	6.3	0.27	0.32
150	0.053	0.95	4.6	0.71	0.44
200	0.033	1.5	3.8	1.4	0.53
250	0.023	2.2	3.3	2.3	0.60
300	0.017	3.0	3.0	3.5	0.68

表 3.2 入射エネルギーとエネルギーロス、dt=50ps になる厚みの関係。

ところで、HIME の厚みによる ToF のブレを図 3.2 に示す。HIME は 2cm しかないので通常のエネルギー

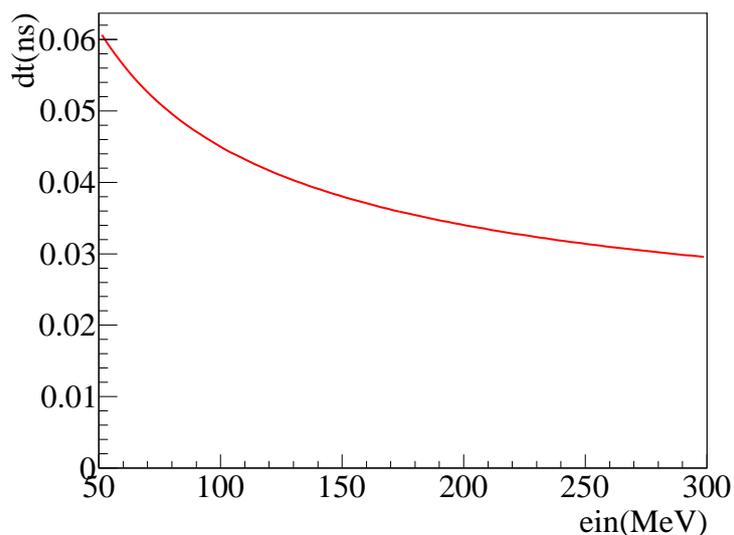


図 3.2 HIME の厚みによる ToF のブレ。HIME は 2cm しかないので基本的に問題とならない。

領域では厚みによる ToF のブレは無視していいほど小さい。

3.7 efficiency の測定の場合

energy 分解能の議論から $dE=2\text{MeV}$ (FWHM) になるようにセットアップする。エネルギーの幅と ToF の幅の関係は特殊相対論から、

$$dE/E = \gamma(1 + \gamma)dt/t \quad (3.5)$$

と求まる。ここで E は運動エネルギー、 t は ToF を表す。この結果を図 3.3 に示す。例えば $e_{in}=250\text{MeV}$ だ

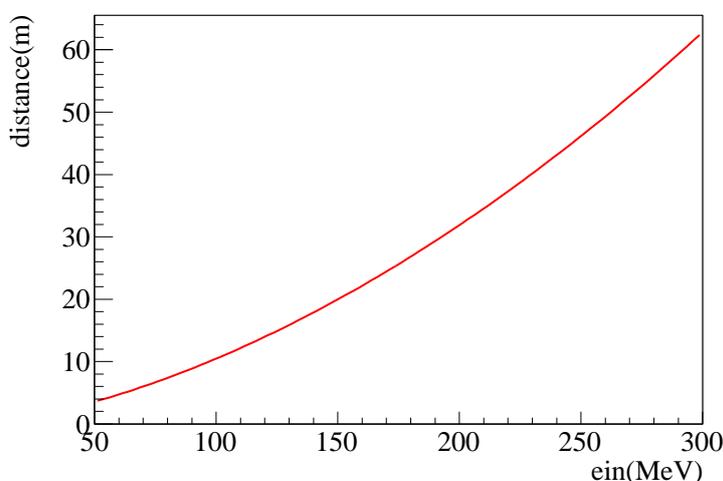


図 3.3 $dE=2\text{MeV}$ (FWHM) となる距離。dt は岩元さんらの gamma 線に対する分解能である 0.7ns (FWHM) を用いた。

と 45m ぐらいの位置に置くのが適切である。

3.8 acceptance

図面より、magnet のギャップは 10cm あることになっている。ターゲット位置から magnet が切れるところまでの距離は 92cm ある。これより縦方向は $\pm 54\text{mrad}$ となる。上流から見て右方向は 108mrad の余裕があり、左方向は十分に余裕がある。

HIME の acceptance だが、3m 位置に置いたとき通常のセットアップ ($40\text{cm} \times 40\text{cm}$) だと 67mrad ($1.8 \times 10^{-2}\text{sr}$) となる。これでは微妙に損なので、HIME を $28\text{cm} \times 48\text{cm}$ ($1.5 \times 10^{-2}\text{sr}$) と横長にする。このときの acceptance は縦方向が $\pm 47\text{mrad}$ 、横方向が $\pm 80\text{mrad}$ ($1.5 \times 10^{-2}\text{sr}$) となり、無駄なく event を拾うことができる。

中性子シールドの後ろにおいた最大の acceptance だが、中性子シールドまでの距離が 4.5m、シールドの厚みが 1.5m、シールドの窓の大きさが $10\text{cm} \times 12\text{cm}$ なので $\pm 11\text{mrad} \times \pm 13\text{mrad}$ ($3.3 \times 10^{-4}\text{sr}$) となる。

HIME を後方 45m に置いた場合は $\pm 3.1\text{mrad} \times 5.3\text{mrad}$ ($6.6 \times 10^{-5}\text{sr}$)、後方 60m に置いた場合は $\pm 2.3\text{mrad} \times 4.0\text{mrad}$ ($3.7 \times 10^{-5}\text{sr}$) となる。

3.9 断面積

Li(p,n)Be 反応における断面積を Taddeucci 氏の論文から求めた結果を表 3.3、表 3.4、表 3.5 に示す。こ

rad(lab)	rad(cm)	m.t(fm-1)	sigma(mb/sr)	sigma(mb)	sigma_sum(mb)
0.00e+00	0.00e+00	0.00e+00	2.60e+01	0.00e+00	0.00e+00
1.00e-02	1.16e-02	2.61e-02	2.59e+01	3.27e-02	3.27e-02
2.00e-02	2.31e-02	5.22e-02	2.56e+01	5.38e-02	8.65e-02
3.00e-02	3.47e-02	7.83e-02	2.51e+01	7.39e-02	1.60e-01
4.00e-02	4.63e-02	1.04e-01	2.44e+01	9.24e-02	2.53e-01
5.00e-02	5.78e-02	1.31e-01	2.36e+01	1.09e-01	3.62e-01
6.00e-02	6.94e-02	1.57e-01	2.26e+01	1.23e-01	4.85e-01
7.00e-02	8.10e-02	1.83e-01	2.15e+01	1.35e-01	6.21e-01
8.00e-02	9.25e-02	2.09e-01	2.03e+01	1.45e-01	7.65e-01
9.00e-02	1.04e-01	2.35e-01	1.90e+01	1.51e-01	9.17e-01
1.00e-01	1.16e-01	2.61e-01	1.76e+01	1.55e-01	1.07e+00

表 3.3 入射エネルギーが 100MeV のときの断面積

rad(lab)	rad(cm)	m.t(fm-1)	sigma(mb/sr)	sigma(mb)	sigma_sum(mb)
0.00e+00	0.00e+00	0.00e+00	2.60e+01	0.00e+00	0.00e+00
1.00e-02	1.17e-02	3.83e-02	2.58e+01	3.33e-02	3.33e-02
2.00e-02	2.34e-02	7.66e-02	2.51e+01	5.41e-02	8.73e-02
3.00e-02	3.51e-02	1.15e-01	2.41e+01	7.26e-02	1.60e-01
4.00e-02	4.68e-02	1.53e-01	2.27e+01	8.80e-02	2.48e-01
5.00e-02	5.85e-02	1.91e-01	2.11e+01	9.97e-02	3.48e-01
6.00e-02	7.02e-02	2.30e-01	1.93e+01	1.08e-01	4.55e-01
7.00e-02	8.19e-02	2.68e-01	1.73e+01	1.11e-01	5.66e-01
8.00e-02	9.36e-02	3.06e-01	1.52e+01	1.11e-01	6.78e-01
9.00e-02	1.05e-01	3.44e-01	1.32e+01	1.08e-01	7.85e-01
1.00e-01	1.17e-01	3.82e-01	1.13e+01	1.02e-01	8.87e-01

表 3.4 入射エネルギーが 200MeV のときの断面積

れより HIME を 3m に置いたときの断面積はおよそ 0.35mb、45m に置いたときは acceptance の計算より $6.6 \times 10^{-5} \text{sr} \cdot 26 \text{mb/sr} = 1.7 \mu\text{b}$ となる。

rad(lab)	rad(cm)	m.t(fm-1)	sigma(mb/sr)	sigma(mb)	sigma.sum(mb)
0.00e+00	0.00e+00	0.00e+00	2.60e+01	0.00e+00	0.00e+00
1.00e-02	1.18e-02	4.85e-02	2.57e+01	3.38e-02	3.38e-02
2.00e-02	2.37e-02	9.71e-02	2.46e+01	5.42e-02	8.80e-02
3.00e-02	3.55e-02	1.46e-01	2.30e+01	7.09e-02	1.59e-01
4.00e-02	4.73e-02	1.94e-01	2.10e+01	8.30e-02	2.42e-01
5.00e-02	5.92e-02	2.43e-01	1.86e+01	8.98e-02	3.32e-01
6.00e-02	7.10e-02	2.91e-01	1.60e+01	9.16e-02	4.23e-01
7.00e-02	8.28e-02	3.40e-01	1.35e+01	8.87e-02	5.12e-01
8.00e-02	9.46e-02	3.88e-01	1.10e+01	8.22e-02	5.94e-01
9.00e-02	1.06e-01	4.36e-01	8.78e+00	7.31e-02	6.67e-01
1.00e-01	1.18e-01	4.85e-01	6.81e+00	6.27e-02	7.30e-01

表 3.5 入射エネルギーが 300MeV のときの断面積

3.10 event rate の見積り

3.10.1 ToF resolution を求める場合

- target thickness:1g/cm²(3.2 で示した値は 2.3g/cm² だが、target 中での位置の不確実性が入ってきてしまうので 1g(～2cm) に抑える。)
- accept される断面積:0.35mb(上記参照)
- beam intensity:5x10⁵
- efficiency of HIME:2.5%(1.7)

これらの値で event 数を計算すると、

$$0.6 * 0.35mb * 1(g/cm^2)/7 * 5 * 10^5 cps * 2.5\% = 0.38cps = 1400cph \quad (3.6)$$

となる。

3.10.2 efficiency を求める場合

- target thickness:0.5g(100MeV)～1g(250MeV)/cm² (3.2 より最後の列の値を $\sqrt{12}/2.35$)
- accept される断面積:1.7μb(上記参照)
- beam intensity:1x10¹⁰(～2nA)
- efficiency of HIME:2.5%(1.7)

これらの値で event 数を計算すると、

$$0.6 * 1.7\mu b * 0.5(g/cm^2)/7 * 10^{10}cps * 2.5\% = 18cps = 66000cph \quad (3.7)$$

となる。HIME は有効領域及び解析可能なイベントが少ないだけで、実際には neutron に対して 4 倍の rate でシグナルが鳴る。これとバックグラウンドを考えるとビーム強度を上げてても新しいイベントが 100cps となる rate 程度までである。

3.10.3 HIME のモジュール一本の rate

HIME のモジュール一本に対して測定したい場合 4/50 倍の rate になる。まず 50 は簡単でモジュールが 50 本あるからである。4 という数字は上のイベントレートの計算は 3Hit Coin. を仮定している。この効率は約 2.5% であるのに対して単純に一本以上鳴る確率は 10% なので 4 倍の rate になる。結局およそ 1/10 の rate と思えば良い。

3.11 精度・必要な event 数

3.11.1 ToF resolution を求める場合

とりあえず精度は 5% とする。statistical error のみ考えれば 400counts でよい。上の計算から 1400cph のカウントレートがあるので一時間もあれば十分ということになる。実際は 400counts では足りない (想定外のバックグラウンドがいたり) と考えられる。また、モジュール一本ごとに時間分解能を評価できるほどに event は欲しい。一本ごとに評価するには 10 倍程度のイベントが必要だがそれでも 3 時間で事足りる。

3.11.2 efficiency を求める場合

とりあえず精度は 5% とする。こちらは 66000cph なので人間の速度が律速となる。よって考えることを省略する。

3.12 single rate および環境放射線による background

環境放射線による single rate と accidental に beam に coin. してしまう数を見積る。環境放射線の rate は threshold が 1MeV ぐらいでおよそ 50cps/モジュール程度だった気がする。HIME 全体では 2500cps となる。coincidence の幅を 100ns とし、ToF の測定の場合を考えると、 $5 \times 10^5 \text{cps} \times 100 \text{ns} \times 2500 \text{cps} \approx 100 \text{cps}$ の single rate となる。さらに start に対して ToF が neutron に一致する時間間隔は 200ps であり、0.2cps の background となる。真のシグナルの rate が 0.38cps なので、0.5 倍の background が存在することになる。...と計算しそうになるが、0387cps というのは 3 層突き抜けの場合であり、3 層突き抜けを条件にいれると環境放射線は無視できると考えられる。

efficiency の測定の場合の single rate は 500ns の chopper が入ったとすると、 $2 \times 10^6 \text{cps} \times 100 \text{ns} \times 2500 \text{cps} \approx 400 \text{cps}$ となる。start に対して ToF が neutron に一致する時間間隔は 1ns 程度であり、4cps の background となる。真のシグナルの rate は 18cps なので、0.2 倍の background が存在することになる。しかし、こちらの 18cps という rate も 3 層突き抜けの場合であり、実際には環境放射線は無視できることになる。

background としては問題ないが single rate という観点からはかなり厳しいので、threshold と相談しながらできるだけ環境放射線の count rate を下げておきたい。

3.13 background run

3.13.1 ToF resolution を求める場合

荷電粒子は最後 Faraday Cup で止められるが、簡易図からだところからの neutron や gamma がかなり background となることが予想される。Faraday Cup からの立体角は $2 \times 10^{-3} \text{sr}$ 程度である。beam 一発に対

して必ず何か飛んでくると仮定し、HIME の gamma もしくは neutron に対する検出効率を 10% と考えると

$$10^5 \text{ cps} * 2 * 10^{-3} / 4\pi * 10\% = 1.6 \text{ cps} \quad (3.8)$$

となる。もし beam に同期する場合は ToF が 30ns ぐらい違うのでソフトウェアで十分切れる。逆に beam に非同期の場合だが、これは環境放射線に比較してかなり少ないので無視できる。

一方 timing が同じになるような event は上流の plastic からの event がメインになる。plastic の厚みは 1mm 程度で十分なので厚みから 1 割程度の background となる。

以上から 1 割程度の background run が必要と考えられる。

3.13.2 efficiency を求める場合

こちらは target 上流に start counter を置かないのでそこからの back ground は考える必要がない。基本的には散乱してきた timing のまったくことなる neutron がいるだけと考えられる。ビームラインも真空なので 1 割も background を取れば十分と考えられる。

3.14 gamma-ray run(イベント数が少ないので難しい)

gamma 線に対する時間分解能は HIMAC で測ったが実験のチェックにもなるので再度測っておきたい。これと同時に gamma 線に対するノイズ除去性能を測りたい。neutron が HIME に入射したときに Carbon が励起されて内部で 4.4MeV の gamma 線が発生する。これをどの程度取り除けているかで efficiency が変わってくる。現在のシミュレーションでは threshold:2MeV 程度で 3Hit Coin. を取ると 10^{-3} ぐらいは落とせることになっているのでこれのチェックを行いたい。

Carbon Target にして 4.4MeV の gamma 線を狙うとして event 量を見積る。Carbon の厚みは 2g/cm^2 ($dt=50\text{ps}$)、大雑把に断面積は 1mb とし、target 起源なので gamma 線は等方に出てくると仮定する。intensity は $5 \times 10^5 \text{ cps}$ とする。HIME の立体角は $1.5 * 10^{-2} \text{ sr}$ で検出率がおよそ 10% なので、

$$0.6 * 1\text{mb} * 2(\text{g/cm}^2) / 12 * 5 * 10^5 \text{ cps} * 1.5 * 10^{-2} \text{ sr} / 4\pi * 10\% = 0.006 \text{ cps} = 22 \text{ cph} \quad (3.9)$$

必要な event 数は 400event(statistical error=5%) なので少なくとも 1000event 程度は貯めたいがこれではどうしようもなく少ない。。代わりに Pb target を用いるというのもありうるが断面積がわからない。

3.15 beam time request

以上の議論から必要な beam time を表 3.6(degrader が使える場合), 3.7(degrader が使えない場合) に示す。ここでは現実的な時間設定にした。

position	energy	Target-in	Target-out	Total
3m	250MeV	8h	2h	10h
45m	250MeV	2h	0.5h	2.5h
45m	200MeV	2h	0.5h	2.5h
45m	150MeV	2h	0.5h	2.5h
45m	100MeV	2h	0.5h	2.5h
Total				20h
electronics tuning				12h
exchange of setup				16h
				2days

表 3.6 Days to be requested.Degrader が使えた場合。

position	energy	Target-in	Target-out	Total
3m	250MeV	8h	2h	10h
45m	250MeV	2h	0.5h	2.5h
45m	100MeV	2h	0.5h	2.5h
Total				15h
electronics tuning				12h
exchange of setup				8h
change beam energy				32h
				2.8days

表 3.7 Days to be requested.Degrader が使えない場合。

4 疑問・質問・調べたいこと

4.1 beam について

- proton 素通しのためにちよろちよろ (10^3 cps) で出せる？
- 10^6 cps 程度のときでも beam に構造はある？
- 10^6 cps の beam を chopper によって整流できる？
- ハロー対策は必要？
- Faraday cup の絶対値と相対値の精度は (10% だと微妙)？
- サイクロトロン周波数を教えてください。

4.2 大強度 beam の実験について

- 1 次 beam の実験をしたことがないので一度誰かの実験に参加するか知っている人に参加してもらいたい。
- $dt=0.7$ ns(FWHM) は素直に chopper のタイミングを使うだけで出る？
- chopper は 500ns ごとに一つのパンチを切り出すことができるという理解で正しい？

4.3 background について

- 環境放射線は通常よりも多い？ (single rate が結構厳しい)
- 中性子シールドは完全に退かせる？
- Faraday Cup からの back ground は大丈夫？ (単純計算では問題ない)
- Faraday Cup からの back ground に対する対策手段はある？
- 遠距離においたときの gamma 線のバックグラウンドは問題になる？ (岩元さんらは the total and slow components of the light outputs で分けている)

4.4 degrader について

- degrader を入れられる (厚み 10cm 程度)？
- そのあと momentum を切ることは出きる？
- degrader を入れた場合の磁場設定とかはどちらがやる？
- degrader を入れた場合の proton の energy 測定はこちらでやる必要がある？

4.5 magnet 周りについて

- swinger magnet の磁場をすぐに落とせる？
- HIME の位置の漏れ磁場、及びスタートカウンター辺りの磁場
- スタートカウンターを入れるところの大きさ (両読み PMT は入る？)、上下の機構

- target の install の機構、出し入れにかかる時間

4.6 geometory について

- 大量の回路をトンネルにいれられる？
- 回路は detector の側に置くのが best？
- 搬入経路、何 m までなら簡単に搬入できる？
- magnet のギャップは 10cm で OK？
- beam line の高さは 1.4m で OK？
- HIME は 3m の位置に本当に置ける？
- トンネルの奥までどうやって HIME と回路を動かす？どのくらい時間かかる？

4.7 雑多

- 5 月末に実験もしくは 12 月末に実験は可能？
- 回路は中村研、理研からの借り物でまかなうつもりだが Delay と 19inch ラックは RCNP にお借りしたい。
- 計測室は何がそろっている？緊急用の回路はある？
- キャリブレーション用の放射線源はいつでも我々が借りられる？
- 放射線関連の手続きはどのくらいかかる？
- LAN は自由に使える？

4.8 議論

- 時間分解能は 250MeV だけでいいのか。
- efficiency は何点測るか。
- 10^6 cps に plastic は耐えられるか
- HIME のトラッキングの性能を評価したいがいい方法はないか。

4.9 memo

- $1nA=6.3 \times 10^9$
- 岡村弘之教授の名前が <http://www.rcnp.osaka-u.ac.jp/Divisions/plan/b-pac/reference.html> に残っていました。