

経過報告

田中 隆己

2011年7月8日

1 見積り関連

1.1 HIME 予算

HIME に使える予算だが、10月末までに480万(内25万ほどは旅費に使いたい)、年末までに640万(内150万は残したい)とのこと。計、最小で945万の予算となる。

1.2 概算

細かい話はこの後の章で行うが、まずはいくらくらいになりそうかを表1.1に示す。税込。検出器の数は50本(5層, 有効面積40cm*40cm, 有効厚み8cm)を予定している。回路は全てどこからか借りるとした。表

PMT(H7415)	$63700 \times 100 \times 1.05 = 6,688,500$
シンチ, アセンブリ	$27000 \times 50 \times 1.05 = 1,417,500$
LEMO ケーブル	$2250 \times 100 \times 1.05 = 236,250$
SHV ケーブル	$5300 \times 100 \times 1.05 = 556,500$
(参考: スプリッター + アッテネータ 24chBox	$400,000 \times 1.05 = 420,000$)
架台 + 諸費用	1,000,000(適当)
計	$8,909,750 + 1,000,000 = 9,909,750$ 円

表 1.1 お買い物の概算。検出器は50本。税込。

に示した通り、50検出器全てを組もうとすると40万ほど予算が足りない。これはケーブルやアセンブリする数40検出器分に減らすことにより捻出する。

1.3 予算配分の問題

10月末までの予算が予想外にPMTにつぎ込めず、200万ほどあまってしまい、後半はPMTの数も多く、中村さんの使う150万のこともあり、80万ほどしか残らない。さらに、アセンブリは後半のお金で買うことになるので、これを除くと後半で使える予算が40万のみとなる。つまり、10月末までの予算で架台とケーブルを購入しなければならない。架台の仕様はRipsなのかBigRips両方に対応できるようにし、早急に見積りを取り始めないといけない。

1.4 架台

ということで、先に架台の概観を図 1.1 に示す。検出器を一層ずつ組んでから順番に土台にボルト ON とい

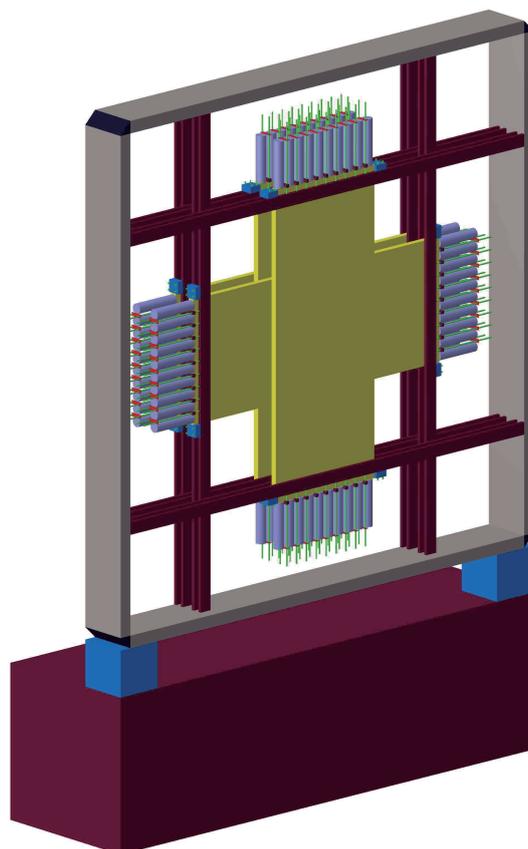


図 1.1 HIME 架台の概略図。HIME 本体の外観は現実こんな感じになる。下の部分に回路関係を置くかどうかはまだ何も考えていない。

う方式にするが、二人いれば組めると思われる。この概略図通りならば 50-70 万円程度で作れると思われる。現実的なマウントを考えたことにより、Z 方向の検出器同士の間隔が 2cm 開くことになる。しかし、これは大きく検出器の性能を落とすことにはならないと考えている。

架台下部は SUS で設計してしまうのが安くて簡単と推測。高さも調整できるしなにより自分が慣れている。ちなみに、余った SUS パーツは SUS が下取りしてくれるので少しだけ安くできるかもしれない。

1.5 見積りの詳細：PMT

PMT の仕様が決まり、既に発注がかかっている、10 月末までに 40 本、3 月末までに 60 本入ってくると考えられる（今思い出したが、3 月末に納品されてもアセンブリできないので困る。おそらく 2 月中旬ぐ

らいが目安と考えられる)。型番は H7415MOD(SHV,LEMO)、磁気シールドは普通の仕様。一本あたり定価 85000 円 (税抜)。50 から 99 本なら 20% 引き、100 本以上なら 25% 引きで 100 本で発注した。

1.6 見積りの詳細：シンチレータ及びアッセンブリ

シンチ及びアッセンブリは G-teck の方が安かった。以下に見積りの中身の詳細を示す。

・ G-teck

シンチレータ (EJ-200, キャスト, 切削面研磨) 21,000 円

光学接着 (2ヶ所) 2,000 円

遮光作業 4,000 円

計 27,000 円 x25 台 = 675,000 円 (税抜)

・ CI 工業

シンチレータ (EJ-200(BC-408 のまちがい?), キャスト, 4 面切削光学研磨) 24,000 円

光学接着 (2ヶ所) 2,000 円

遮光作業 4,000 円

単価 30,000 円 x25 台 = 750,000 円 (税抜)

CI の光学研磨が気になるが、ここまで G-teck の製品でテストしてきていて、またそこその時間分解能がでていること、CI の評判から考えると、素直に G-teck をお願いする。

G-teck の場合、納期は 2 ヶ月程度。しかし、PMT がぎりぎりには納品されないの、先にシンチレータのみ購入するということになる。

1.7 見積りの詳細：回路関係

回路はどこまで買えるかわからないが、ケーブル、コネクタ、スプリッター、アッテネータ、ディレイについては見積りを取った。具体的な値段は見積書があるのでそちらを参照されたい。

以下細かい話。

固定アッテネータでも差し替えアッテネータでも値段はあまりかわらない (もっとも林栄基準なんで軽く数万ぐらいいは変わると思うが)。さらには一つの箱に押し込めるのも、バラバラにするのもあまり変わらない。(これも、林栄基準で、数百 ch あれば数十万は変わるらしい。) 最安値は「スプリッター Box、ディレイ (500ns 以下)+ アッテネータ Box、」と分けて買うことだそう。これはディレイ + アッテネータ Box を NEBULA で既に設計してあるからで、例えばスプリッター、ディレイ、アッテネータを一つの箱に収めようとすると、設計費がかかり、むしろ高くなるらしい。

ただ、ケーブルディレイは short neut,long neut の使っていたのがとりあえず当てになるので (しかし BNC なので BNC-LEMO が 160 個必要)、スプリッター + 差し替えアッテネータ Box が欲しくなる。というか、これらは意外と借りる当てがない気もする。スプリッター + 差し替えアッテネータ Box の概算は 24chBox が 40 万となっている。

背面 IN にすると 1ch あたり値段が 1000 円ぐらいいあがる模様。スプリッターの In は背面 IN の方がいい気もするが、ちゃんと考えないといけない。

ちなみに、回路側の値段は LEMO でも BNC でも変わらないらしい (by 林栄の星屋さん)。LEMO のパネルネジ止めのレセプタクルは 600 円ほど。ケーブルにつけるオスとかは 1500 円ほど。基板実装用の LEMO レセプタクルは 1300 円ほど。SHV や BNC でもそうだが、パネルに止めるタイプは以外にもオスの半額ぐらいである。

新しい業者を、と思い、東大の友達に聞いた業者 (エヌ・アンド・エヌ、主に KEK と取引している) に見積りを取って見たが、結局カイズを紹介されたり高かったりで、残念な感じだった。ただ、電子パーツを抵抗一本から売ってくれるとのことで、LEMO のメスや 16Ω の抵抗などを発注してみている。

2 佐藤さんに磁場の計算をしていただいた

HIME はマグネットに近づける予定なので、漏れ磁場が気になってくる。そのため、理研の佐藤さんをお願いし、磁場の計算結果をいただいた。そのデータより、1m 単位で磁場の最大値をまとめると、以下の様になる。計算範囲は (-80,-80,300) から (80,80,600)[mm,mm,mm] の範囲の直方体。なお、中性子の飛行距離は中心からの距離プラス 3m ぐらいとなると考えている。(計算結果について、x 方向は原点对称だが y 方向は対称でない。) x,y,z の定義は図 2.1 に示す (佐藤さんよりいただいた)。中村さんと相談し、PMT には手を加

@300[cm]	B[mT]	(x,y)[cm,cm]
$B_{x_{max}}$	0.2	80, 80
$B_{y_{max}}$	-2.8	4,-56
$B_{z_{max}}$	2.0	68, 80
@400[cm]	B[mT]	(x,y)[cm,cm]
$B_{x_{max}}$	0.1	80, -80
$B_{y_{max}}$	-1.7	16, -80
$B_{z_{max}}$	0.9	20, 80
@500[cm]	B[mT]	(x,y)[cm,cm]
$B_{x_{max}}$	0.1	80, -80
$B_{y_{max}}$	-1.0	0, -80
$B_{z_{max}}$	0.4	20, -80
@600[cm]	B[mT]	(x,y)[cm,cm]
$B_{x_{max}}$	0.05	80, -80
$B_{y_{max}}$	-0.5	0, -16
$B_{z_{max}}$	-0.3	-8, -80

表 2.1 磁場の計算 (by H.Sato) 結果のまとめ。1m おきに、各方向で最大の磁場を示した。

えず、必要になったら後からシールドを被せることにした。これは、ライトガイドを付けることによる性能低下や予測不可能な事態を避けるためで、また、最悪の場合でも検出器を SAMURAI から離せば良いという考察からである。

1/6/2011 12:16:35

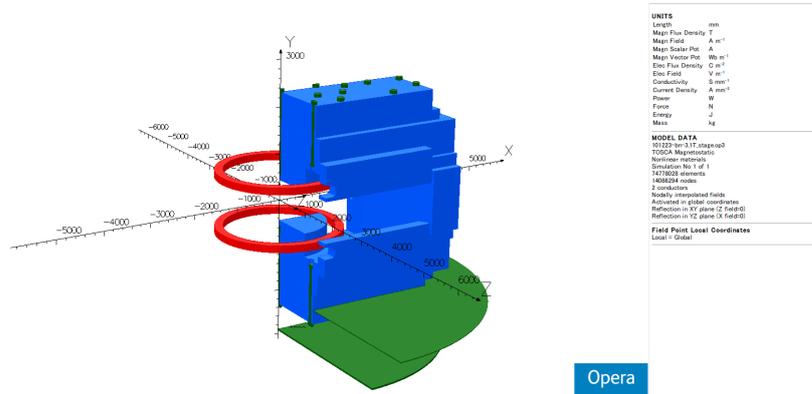


図 2.1 SAMURAI の座標設定。佐藤さんからいただいた図の転載。

3 初実験の概要・概算

HIME は本来は多中性子測定に対して高効率を目指しているが、現状それは無理なので、高分解能であることを生かした実験を行う。アクセプタンスは 3 割程度 (@1MeV)、中性子の固有検出効率も 6% 程度と低いので、一中性子イベントに絞られる。これらの要因と個人的な理由から、¹⁰Li の中性子が s1/2(≃ 0MeV), p3/2(≃ 0.25MeV), p1/2(≃ 0.5MeV), (d5/2(≃ 1.5MeV)) 状態にいるイベントを狙う。二次 beam は ¹¹Li, ¹¹Be, ¹²B が候補になる。¹¹Li の場合は過去に多く実験があり、s,p,d どの状態も生成される。しかし、¹¹Li が直接 ⁹Li に壊れる ch があり、これより出てくる中性子が大きなバックグラウンドとなる。¹¹Be の場合は ¹¹Be の基底状態では最外核の中性子が s 軌道にいる (ハロー) ので、プロトンノックアウトでできる ¹⁰Li の状態は s が多くなると考えられる。対して ¹²B の場合は基底状態では最外核の中性子が p 軌道にいる可能性が高い (正確な configuration が知りたい) ので、比較的 p が多く生成されると期待される。以上、それぞれに特色があり、比較することにより二次 beam 自身の configuration を考察することができる。また、¹⁰Li の s,p を区別し、さらには今までは s に埋もれて見えなかった p3/2 を断定することが目標で有るので、s に特化した実験と p に特化した実験の両方を行うことによりそれぞれをより正しく評価できると考えられる。これらから、二次 beam には ¹¹Be, ¹²B をメインに使い、可能ならば ¹¹Li も使うということを考えている。

3.1 Rips or BigRips

エネルギー：135MeV, 300MeV beam 量：検出器のカウントレートがボトルネックになる。(Rips の ¹¹Li の場合だけは beam がボトルネックになる。) アクセプタンス：結局変わらない。分解能：BigRips では反跳プロトンのエネルギーが高くなるので、最終的には BigRips の方が良いかもしれない。beam の切り替え：キャリブレーションを H2 でやりたいので、これは Rips の方が楽？ beam タイムの取りやすさ：来年強行しようと思うと Rips か NEBULA とのバッティング：NEBULA と実験が被らなければ人員的にもモジュール的にも楽になるはず。

3.2 イベントレート

イベントレートは結局 DAQ のレートで決まり、一つの beam につき 1 日でいける感じがある。¹²B の場合は断面積が小さいので、1 日で十分か怪しいところではある。過去のデータなどからより詳細な計算をしていく必要がある。

4 アクセプタンス計算

アクセプタンスの計算を Geant4 で行った。このとき、検出器は単なる直方体とした。手計算 (6m で片側最大 52cm, 同様に 7m で 61cm, 8m で 70cm) と consistent なので結果は正しそうで有る。¹¹Li- > ¹⁰Li + n を仮定したとき (完全に勘違い、本来は ¹⁰Li- > ⁹Li + n を計算するべきだがめんどうなのでとりあえずこの結果を示す) のアクセプタンスカーブを図 4.1, 4.2 に示す。このように、0.2MeV 程度までは効率が高いが、

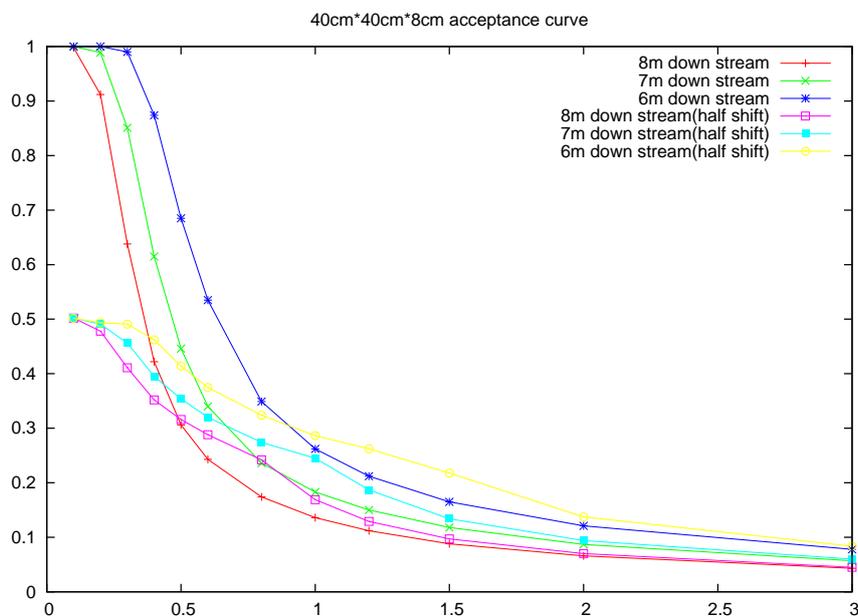


図 4.1 ¹¹Li- > ¹⁰Li + n を仮定したとき (完全に勘違い) のアクセプタンスカーブ。40cm*40cm*8cm とした。単純に直方体のシンチレータを通過した数を数えた。相対エネルギーは x 軸の値を mean 値とし、 $\sigma=0.05\text{MeV}$ のガウシアンとした。ビームラインは BigRips を想定し、6m, 7m, 8m の三つを示した。

注目している 0.5MeV ではすでに 3 割程度まで下がってしまっている。今回に限っては beam rate の方が余裕があるので、無理やり中心のアクセプタンスを低くして平らに近づける方が目的の状態を満遍なく取れるのでよいと考えられる。その結果が shift させた場合のグラフである。これより、検出器を半身 shift させる方が目的の state を満遍なく見れて、よいと考えられる。

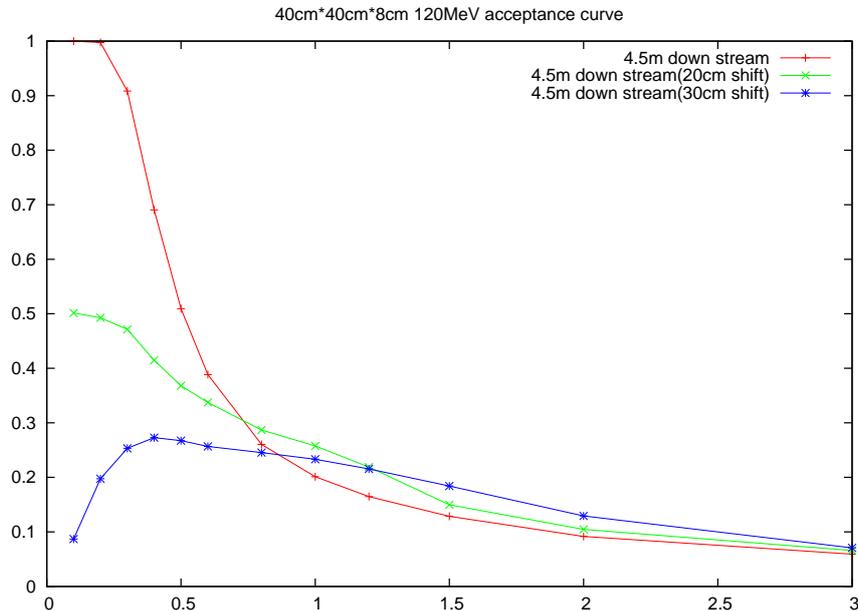


図 4.2 こちらは Rips を想定し、4.5m とした場合。

4.0.1 オブジェクト指考の宣伝

アクセプタンスを計算する時に、二体の崩壊のコードを書いた。そこで汎用的にするために、particle クラスというものを定義した。このクラスでは、エネルギーや運動量を変更する場合は常に実装された関数でセットするようにしている。これにより、常にその粒子の物理量 (energy,momentum,kinetic-energy,beta,etc..) を consistent に保つことができ、安全、確実に粒子の物理量を取得することができる。当然 class なので作り放題だし、particle 同士の計算を定義することもできる。また、particle に関する関数は内部で完結させられるので、流用しやすく、また、DEBUG もしやすい。このような particle class はオブジェクト指向のもっとも力の発揮するところであると思う (Geant 内にはこのような base のクラスがあり、それをさらに粒子の種類ごとに継承するなどして、高い多様性を実現している (はず))。

5 Geant4 による中性子検出器のシミュレーション

Geant4 の example の extended/hadronic や novice の N02 に汎用の物理エンジンを使ったサンプルが入っており、これにより、とりあえず中性子を用いたのシミュレーションが行える。とにかくこれを用いて中性子検出器のシミュレーションを始めた。

ただ、イベントを視覚的にみたと、一見して出てくるプロトンの数が少ない感じが、gamma も 4.4MeV が選択的に出ている感じはなかったので、かなり汎用的・統計的な計算を用いているという印象を受けた。

5.1 やったこと・理解したこと

- 複数の検出器を一塊として扱い、まとめて動かしたり回転させたりする。
- データ収集について ApplicationManager に頼らず、Geant4 標準の Hit class を用いた実装。
- ROOT の Tree に詰めるための Manager を作り、取得する物理量の数を動的に決定できるようにした。
- 検出器への入射時間、エネルギーデポジット、検出器番号の取得。
- Geant4 の UI で動的にジオメトリや target の物質を変える。

5.2 これからやらなければならないこと

- 断面積等の妥当性
- 中性子の崩壊により決定する運動量等の実装
- DEMONS との比較
- 検出器の分解能を導入
- MeVee 変換
- 実際に中性子のエネルギー分解能を評価する

余裕があったら、

- DEMONS の物理過程の移植
- 検出器の optics の実装
- Geant4 の手引き作製

5.3 ROOT

5.3.1 ModuleForRoot

オンライン解析では簡単なコマンドで処理できる必要がある。ROOT は汎用性が高い代わりに、コマンドは必然的に長くなってしまふ。また、高エネルギーの人たちが開発しているので、どうしても長大な macro を処理することが念頭にあると思われる。

このコマンドの洗練されてなさが anapaw に大きく劣っている点であったが、コマンドをラップし、擬似的に alias をはるることができるようになったので、短いく、且つ tab 補間が効くコマンド群を開発できることがわかった。そこで、第一歩として、xval,xyval を実装し、web ページにアップした。基本的なところは完成しているので、あとはこれにコマンドを追加していくだけである (もっともこの開発が大変だが)。

オブジェクト指向が使えるので、個別にコマンドを作製していても、統合はしやすい環境にある。また、名前の衝突なども本質的に解決できるようになっている。

今のところはオンライン解析に十分に耐えうる環境を提供できていると考えている。だから、まずは中村研でコマンドの拡充をしていきたいと思う。

5.3.2 RootManager

Geant4 内での DAQ として ROOT の Tree を用いるのが便利である。そこで ROOT の Tree によるデータテイキングを study して、tree に格納することや呼び出し等について一定の理解を得た。さらに、ROOT を manage するクラス (RootManager) を作って、安全・便利に ROOT の Tree にデータを格納できるようにした。これは web に公開しているので、参考程度に試ってみてほしい。sample コードを真似するだけでそれなりに使えると思う。また、本来の ROOT の TFile や TTree クラスは多様なことができるが、その機能のうち一部しか使えない。逆に言えば必要な機能しか実装していないので簡潔であるといえる。

5.3.3 ROOT:マクロのコンパイルのすすめ

ROOT では、(1) ROOT 内で cint に c++ っぽいコードを渡す (2) ROOT 内で正式な c++ コードを実行 (3) プログラム内で ROOT を呼ぶと、使用方法を大きく三つに分けられる (1. に関してはさらに細かく分けられるが詳細は web で)。

基本的に (1) のように cint 上でコードを渡す場合は anapaw という ht,pry,lgy 程度のことしかやらないべきである (macro にして .x で呼ぶのも同じ)。逆に (3) の様に、ROOT をライブラリとしてプログラム内に内蔵する人もいるが、これはこれで流用できないし、計算する部分と視覚化する部分を分離していないので我々に取っていいやり方とは言えない。結局、(2) の様に、計算用 macro 等を動的ライブラリにして ROOT 内で呼ぶのがよいと思う。

ROOT のマクロは .x macro.mac として呼び出すと、cint に渡すことになり、ちょっと複雑なことを書くときにバグる。また実効速度も遅い。そこで、.L macro.mac++ とすればコンパイルしてくれる。こうして出来た動的ライブラリはあとからロードすることもできる。

コンパイルすれば実効速度が上がるだけでなく、DEBUG の役割にもなり、複雑な class 等も定義できるので後で流用が効き、ゆくゆくは共有して便利なモジュール群ができるはずである。これらの理由から、macro をコンパイルする方法を進める。コンパイルに必要なのは c++ に則った文法と、ヘッダーファイルをちゃんと include することだけである。詳しくは僕の web ページなりを見てほしい。

6 HIMAC の解析

6.1 基本的なところをやり直した

tcal, slew 補正, dT_{offset} , $\log(A_1/A_r)_{\text{offset}}$, position_{cal} をいつだか (三週間ぐらい前) にやり直した。まだ、本気ではないので、詳細な評価はしていない。本気になるのは 500ps 問題が理解できてからと思っているが、これの目処も立っていない。

6.2 π_0 起源の gamma の時間分解能

gamma の時間分解能について。モジュールの中心とエネルギーに gate をかければ良いところで 150ps 程度は十分に出ることがわかった。逆に、 π_0 期限の gamma 付近全てに対して fit すると 200ps~250ps 程度まで落ちる。低エネルギー側の分解能は低く、低エネルギーのイベント数が多いことから全体に対して fit した場合は低エネルギー側の分解能に引きずられ時間分解能が落ちたと考えられる。

ちなみに、スタートカウンターからの gamma と思われるピークがぎりぎり見えない程度の分解能まで出て

いる。

6.3 π_0 起源の gamma のエネルギーデポジットとそのレート、時間コウセイの可能性

正確に評価していないが、7MeV 以上のエネルギーを落とすシグナルは急激に減ることが分かった (解析ノート p66 参照)。HIME でキャリブレーションしたいところは 8MeV から 10MeV 程度の領域で、ここのコウセイが命とも言える。しかし、 π_0 起源の gamma ではエネルギーデポジットがそこまでなく、また 5MeV 程度のシグナルも多いとは言えない (5MeV 以上の合計が約 180counts/h(run96)) ので、HIME のキャリブレーションに適しているとは言えない。さらに、後ろのレイヤーは前のレイヤーからくる電子を拾っていて、これは微妙に時間情報が異なってくる。正確に計算ないしシミュレーションすれば使えないことはないが、見通しがいいとは言えず、HIME は時間分解能が期待できるので、他の方法を考えていきたい。

6.4 500ps 問題等の DEBUG の進捗状況

6.4.1 スタートカウンター由来の考察

start カウンターのシグナル中に 500ps ほど遅いシグナルが混ざっていることがわかった。これは、TRraw に対して本物っぽいのに gate をかけ、これ以外を見ることにより見える。また、start カウンターのシグナルには不可解な点が多く、例えば本物っぽいピークに厳しく gate をかけると、neut 側ではむしろ T vs A の相関に見える「山」がより鋭くなったりそのピークの位置が変化したりする。

6.4.2 SC の T Lraw の 500ps ほど遅いのに gate をかける

start カウンターの TR の強いところに gate をかけると、TL に 500ps 遅いシグナルが見える (run117 等)。しかし、さらにこれに gate をかけても、500ps と完全に連動しているわけではなく、真ん中がすぼんと抜けて、後は左側のイベントが HIME ではおおく、NEBULA では同じく真ん中はないが左右対称になる。このとき、N5 だけは他より一桁イベント数が少なく、分布も綺麗。これは、HIME の後ろにいないからなのか、架台から離れているからなのかは不明。HIME3 は 500ps が見えないが、TvsA はやっぱりおかしい感じ。

6.4.3 slew run(ビームレートが低い run)

run118 の start カウンターのシグナルは綺麗。

6.4.4 コインシデンスのタイミングを決めている物

HIME にあたり NEBULA に当たる経路や、架台に当たる、後ろのダンプに当たる等で timing がぐちゃぐちゃになっていると思われ、どの検出器がトリガーになっているかはっきりしない。そのため、NEBULA にあたらぬ条件をつけると綺麗になるかもしれない、と思って NEBULA と NEBULA-VETO を切ってみたが、綺麗にならなかった (解析ノート p67 参照)。

6.5 T vs A に見える複数本の線

Ar ランの T vs A を見ても、中性子由来のシグナルが複数本の線となって見えていることがわかった (解析ノート p60 参照)。今までもプロトンがこの様に複数の線を作っていることは分かっていたが、はっきりと中性子も同じような現象を起こしていることが分かった。さらに、Ar ランの荷電粒子のシグナルを見てみると、

はっきりと T が変に曲がっていることがわかった (解析ノート p65 参照)。Thr と波形の関係からくることも考えられるが、大きくはシグナルの波高が原因と考えられ、宇宙線を用いた DEBUG 実験を行うことを予定している。

7 今後の方針

学会も近く、このまま止まっても先が見えないので、まずは 200ps および 300ps と思ってシミュレーションをすることがよいと考えている。順番としては、先ず DEMONS である程度評価し、さらに詳細を Geant4 で評価していく (既に進行中)。

8 Appendix:slew 補正

卒論で書いたものを元に、具体的な補正の方法やその実際に踏み込んだ話。

Discriminator を用いた時間測定ではシグナルの波高に依存して測定時間が変化する。この時間変化のことを slew といい、slew を補正することを slew 補正という。シグナルの強度を A、シンチレータの長さを z とすると slew は近似的に、

$$(slew) = \frac{a}{\sqrt{A}} + b \quad (8.1)$$

と表される。slew を評価するためには、slew 以外の物理量によって変化しない時間に関する量を評価する必要があり、代表的には二つのシンチレータの間の飛行時間 (ToF)、

$$(ToF) = \frac{T_5 + T_6}{2} - \frac{T_7 + T_8}{2} \quad (8.2)$$

により slew を求める。このとき、それぞれのシンチレータに落ちるエネルギーに相関がない場合、横軸に片方のモジュールで測定されたシグナルの強度を取ると、そのモジュールの両端の PMT の時間 ($T_l + T_r$)/2 に由来する slew のみが見える。以上から、 $(T_l + T_r)/2$ を評価していく。

8.1 slew を評価するための元となる式

T' を slew を含む時間 (実験で得られる測定値)、 l, r はそれぞれ左右を表す添字とする。エネルギーと飛行時間の相関について飛行時間を縦軸に、

(i) $\frac{1}{(A_l A_r)^{1/4}}$ を横軸にとると、

$$(2 * ToF) = T'_l + T'_r \quad (8.3)$$

$$= T_l + \frac{a_l}{\sqrt{A_l}} + b_l + T_r + \frac{a_r}{\sqrt{A_r}} + b_r \quad (8.4)$$

$$= T_l + T_r + \frac{1}{(A_l A_r)^{1/4}} \left(a_l \left(\frac{A_r}{A_l} \right)^{1/4} + a_r \left(\frac{A_l}{A_r} \right)^{1/4} \right) + b' \quad (8.5)$$

(ii) $\frac{1}{\sqrt{A_l}} \left(\frac{1}{\sqrt{A_r}} \right)$ でも同義) を横軸にとると、

$$(2 * ToF) = T'_l + T'_r \quad (8.6)$$

$$= T_l + \frac{a_l}{\sqrt{A_l}} + b_l + T_r + \frac{a_r}{\sqrt{A_r}} + b_r \quad (8.7)$$

$$= T_l + T_r + \frac{1}{\sqrt{A_l}} \left(a_l + a_r \left(\frac{A_l}{A_r} \right)^{1/2} \right) + b' \quad (8.8)$$

と整理できる。括弧でくくった中身が slew としてグラフに現れる量である。

上記の式より、slew は左右の slew の和としてしか求まらない。そこで、まずは、左右の slew の和を正確に求める方法について議論し、次に、さらに a_l, a_r を独立に求める方法を議論していく。

8.2 左右の slew の和を求める方法

まず、左右の slew の平均値について議論していく。

以下では減衰長を λ として、

$$A \sim \exp\left(-\frac{z}{\lambda}\right) \quad (8.9)$$

を仮定して話を進めていく (この仮定はシンチレータの辺の長さ程度の範囲であれば十分よい近似である)。

$$a_l \left(\frac{A_r}{A_l} \right)^{1/4} + a_r \left(\frac{A_l}{A_r} \right)^{1/4} = a_l \exp\left(\frac{z_l - z_r}{4\lambda}\right) + a_r \exp\left(\frac{z_r - z_l}{4\lambda}\right) \quad (8.10)$$

$$\therefore |z_l - z_r| \ll 4\lambda \text{ のとき} \rightarrow a_l + a_r \quad (8.11)$$

$$a_l + a_r \left(\frac{A_l}{A_r} \right)^{1/2} = a_l + a_r \exp\left(\frac{z_r - z_l}{2\lambda}\right) \quad (8.12)$$

$$= \exp\left(\frac{z_r - z_l}{4\lambda}\right) \left(a_l \exp\left(\frac{z_l - z_r}{4\lambda}\right) + a_r \exp\left(\frac{z_r - z_l}{4\lambda}\right) \right) \quad (8.13)$$

$$\therefore |z_l - z_r| \ll 2\lambda \text{ のとき} \rightarrow a_l + a_r \quad (8.14)$$

$$(8.15)$$

となり、どちらの方法でも中心で測定することにより左右の slew の和を評価できる。このとき相乗平均を取った方が位置の依存性が小さい。さらに、slew の個体差が小さいならば、 $(T_a + T_b)/2$ のから得られる slew は、そのまま一つの slew になることがわかる。

8.3 a_l, a_r を独立に求めることについての議論

8.3.1 (i), (ii) から求める素朴な方法

A_l/A_r はエネルギーロスに依らず、粒子の入射位置にのみ依存するので、(i),(ii) どちらの場合でも、位置に gate をかけて slew を見ることにより原理的には slew が求まる。ただし、 $(A_l/A_r)^{1/2}$ の値は 1 に近く、slew の誤差により求めることができなくなる。以下、これを定量的に評価していく。

簡単のために、(ii) の場合 ($1/\sqrt{A_l}$ でくくった場合) を考える。 $(A_l/A_r)^{1/2} = R_A$ と置くと、

$$\frac{d(\text{slew})}{dR_A} = \frac{1}{2} a_r \quad (8.16)$$

となる。これより、実験から求めた slew の誤差 $error(slew)$ と R の関係が、

$$d(slew) = \frac{1}{2}a_r dR_A \gg error(slew) \quad (8.17)$$

$$\therefore \frac{1}{2}dR_A \gg \frac{error(slew)}{a_r} \simeq (slew \text{ の相対誤差}) \quad (8.18)$$

を満たさないと実験的に求められないことになる。左辺値は大きくても 0.1 程度になるので、この方法により求めるのはかなり難しいことがわかる。

8.3.2 dT より求める方法

次に、dT から a_l と a_r を求めることを考えていく。定義から、

$$dT = T'_l - T'_r \quad (8.19)$$

$$= \left(T_l + \frac{a_l}{\sqrt{A_l}} + b_l \right) - \left(T_r + \frac{a_r}{\sqrt{A_r}} + b_r \right) \quad (8.20)$$

$$= T_l - T_r + \frac{1}{\sqrt{A_l}} \left(a_l - a_r \left(\frac{A_l}{A_r} \right)^{1/2} \right) + b'' \quad (8.21)$$

となる。

このとき、 $T_l - T_r$ は入射位置に依存するので、dT で左右の slew の違いを評価するには入射位置を絞る必要がある。定量的には、

$$T_l - T_r \ll \frac{1}{\sqrt{A_l}} \left(a_l - a_r \left(\frac{A_l}{A_r} \right)^{1/2} \right) \quad (8.22)$$

となれば左右の slew の違いが評価できる。

左右の slew の違いは小さいと考えられるので、その差が $2[\text{ch}^{-1/2} \cdot \text{ns}]$ とすると (slew 自体は $20\text{ch}^{-1/2} \cdot \text{ns}$ 程度)、 $1000\text{ch}(\simeq 10\text{MeV})$ では、

$$T_l - T_r \ll 0.064\text{ns} \simeq 0.95\text{cm} \quad (8.23)$$

となり、位置の gate をかなり絞らないと左右のスルーの差が見えないことになる。位置の gate は、外部からかけるか、 $\log(A_l/A_r)$ によってかけられる。いずれにせよ、普通に slew を求める以上に event が必要である。

実際に $-0.01 < \log(A_l/A_r) < 0.01$ (位置にして $-3\text{mm} \times 3\text{mm}$ 程度) の gate をかけてみると、確かに dT 分布がエネルギーに依存している様子が見える。これを図 8.1 に示す。しかし、これを元に slew 補正しても時間分解能の明らかな改善は見られなかった。そもそも、和を一定にしたまま左右のスルーを変化させたとき、全体の時間分解能はあまりかわらないからと考えられる。時間分解能自体の誤差が大きいためこれ以上正確に評価できない。

8.3.3 左右のアイテレーションにより求める方法

これは式 8.8 より収束しないことが分かる。なぜならば、 A_l を横軸としたとき、right の slew の方が (ほんの少しだけ) 大きく寄与するからである。

8.4 実際のところ

- $A_l/A_r \rightarrow$ むり

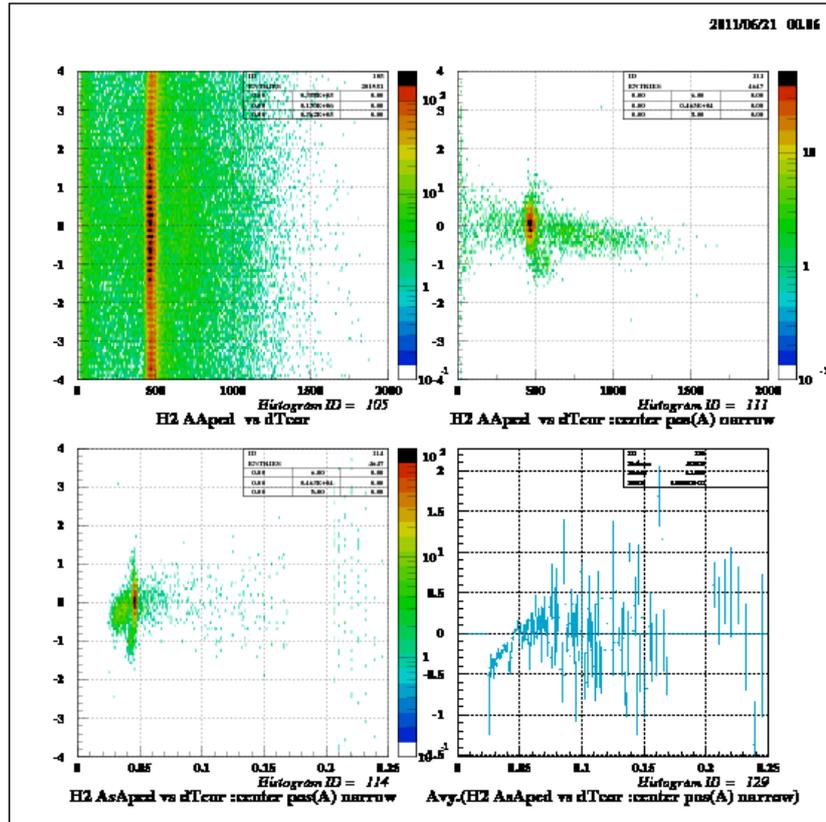


図 8.1 dT により slew を求める方法。run115,117,gate:-0.01;log(AI/Ar);0.01。確かに slew が見えるのが分かる。

- dT → 見えるけど微妙
- アイテレーション → やってない
- 分解能の極小値 → やってない

結局、slew 補正は左右のずれを求める以上に、そもそもの誤差が大きくどうしようもない。さらに、slew が一番見えやすい方法で見ているのに求まらないということは、分解能を見ながら slew ファクターを決めても、それは slew を見ていることにはならない。

つまり、これ以上は無理。現在の準局所的 (110MeV) な slew 補正で 150ps 程度と時間分解能が出ているので、これ以上 slew を頑張るよりも、広範囲で適当な補正を行うことの方が重要と考えられる。

やはり、左右の和として求めるのが限界である。逆にいえば、左右で同じにするために thr の値はできる限り一致させるべきである。

9 Appendix:二体の計算

実験的には neutron の lab 系での出射角度が求まるので、そこから neutron の速度を求めたくなる。

これは lab 系でのエネルギー保存と運動量保存から求められそうだが、式がごちゃごちゃして解けない? ので、ローレンツ変換を用いて、実験室系での角度から重心系での角度に戻し、重心系での運動量をもとめてこれを実験室系に戻す。実験室系の角度から重心系での角度は綺麗に求まるので、初等的な計算で求まる。

以下、詳細。

9.0.0.1 notation

${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ を想定して添字を付ける。また、lab 系の値には L を、cm 系の値には cm を付ける。エネルギーを E 、運動量を p 、beam 軸との角度を θ と置く。

9.0.0.2 $E_p^L, p_p^L, E_{Li}^L, p_{Li}^L$ から $E_p^{cm}, p_p^{cm}, E_{Li}^{cm}, p_{Li}^{cm}$ へ

入射粒子とターゲットの運動量は一直線上とし、 $p_x = p_y = 0$ と取る。lab 系から cm 系へのローレンツ変換 Ω は、

$$\begin{pmatrix} E_p^{cm} \\ p_p^{cm} \end{pmatrix} = \Omega \begin{pmatrix} E_p^L \\ p_p^L \end{pmatrix} \quad (9.1)$$

$$\begin{pmatrix} E_{Li}^{cm} \\ p_{Li}^{cm} \end{pmatrix} = \Omega \begin{pmatrix} E_{Li}^L \\ p_{Li}^L \end{pmatrix} \quad (9.2)$$

$$\text{ただし、}\Omega = \begin{pmatrix} \gamma & -\gamma\beta \\ -\gamma\beta & \gamma \end{pmatrix} \quad (9.3)$$

と求められる。cm 系への変換の条件は、

$$p_p^{cm} + p_{Li}^{cm} = 0 \quad (9.4)$$

であるので、これを計算すると、

$$\beta = \frac{p_p^L + p_{Li}^L}{E_p^L + E_{Li}^L} \quad (9.5)$$

$$\left(\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}\right) \quad (9.6)$$

とローレンツ変換が決まる。

9.0.0.3 $E_p^{cm}, p_p^{cm}, E_{Li}^{cm}, p_{Li}^{cm}$ から $E_n^{cm}, p_n^{cm}, E_{Be}^{cm}, p_{Be}^{cm}$ へ

エネルギー保存則より、

$$\sqrt{m_n^2 + p_n^2} + \sqrt{m_{Be}^2 + p_{Be}^2} = E_p^{cm} + E_{Li}^{cm} \quad (9.7)$$

が成り立つ。 $p_n = p_{Be}$ をより p_n について解くと、

$$p_n = \frac{1}{2E} \sqrt{(m_n^2 - m_{Be}^2)^2 - 2(m_n^2 + m_{Be}^2)^2 E^2 + E^4} \quad (9.8)$$

$$(E = E_p + E_{Li}) \quad (9.9)$$

となる。残りの E_n, p_{Be}, E_{Be} は自明な計算により求まる。

ここで、 p について解くのではなく、不変質量を M として E について解けば、

$$E_n = \frac{M^2 - m_{Be}^2 + m_n^2}{2M} \quad (9.10)$$

$$E_{Be} = \frac{M^2 - m_n^2 + m_{Be}^2}{2M} \quad (9.11)$$

$$(M = \sqrt{(E_p + E_{Li})^2 - (p_p + p_{Li})^2}) \quad (9.12)$$

と求めることもできる。

9.0.0.4 E_n^{cm}, p_n^{cm} から p_{nx}^L, p_{ny}^L へ

$p_n^{cm} = (p_{nx}^{cm}, p_{ny}^{cm}, 0) = (p_n^{cm} \cos \theta^{cm}, p_n^{cm} \sin \theta^{cm}, 0)$ と置く。 p_{nx}^L は、

$$\begin{pmatrix} E_n^L \\ p_{nx}^L \end{pmatrix} = \Omega^{-1} \begin{pmatrix} E_n^{cm} \\ p_{nx}^{cm} \end{pmatrix} \quad (9.13)$$

により求まる。整理すると、

$$p_{nx}^L = \gamma \beta E_n^{cm} + \gamma p_n^{cm} \cos \theta^{cm} \quad (9.14)$$

$$p_{ny}^L = p_n^{cm} \sin \theta^{cm} \quad (9.15)$$

となる。

9.0.0.5 θ^{cm} と θ^L の関係

p_{nx}^L/p_{ny}^L より、

$$\gamma \tan \theta^L = \frac{\sin \theta^{cm}}{\beta E_n^{cm}/p_n^{cm} + \cos \theta^{cm}} \quad (9.16)$$

$$(9.17)$$

と、 θ^{cm} と θ^L の関係式が求まる。これを解くと、

$$\cos \theta^{cm} = \frac{-a^2 b \pm \sqrt{a^4 b^2 - (a^2 + 1)(a^2 b^2 - 1)}}{a^2 + 1} \quad (9.18)$$

$$(a = \gamma \tan \theta^L, b = \beta E_n^{cm}/p_n^{cm}) \quad (9.19)$$

となる。

以上より、 $E_p^L, p_p^L, E_{Li}^L, p_{Li}^L, \theta^L$ から θ^{cm} が求まったので、後は自明な計算により p_n^L が求まる。

θ^{cm} が求まったので、これより断面積が求められることもできる。一連の計算コードは web ページに上げた。

10 インピーダンス整合等回路の話

高周波回路においてインピーダンス整合を取らないと反射するのは有名だが、意外と細かいところで直感的には説明がうまくできなかつたりする。それらを意識して、理解したことをまとめる。(注意:電力の電送におけるインピーダンス整合とは違う)

10.1 インピーダンス整合

「分布定数回路」という単語をキーワードに調べると高周波についての文書がいっぱい見つかる。一般に高周波回路というと、どんな線路であろうとも有意にそのインダクタンス、キャパシタンスが見えてしまうことを強調する。この基礎方程式が電信方程式であるが、これだと本格的に高周波回路を考える話になってしまい、単にインピーダンス整合を考えようとする少し話が深すぎてわからないままになってしまう(僕は高周波回路は理解できていない)。しかし、インピーダンス整合を考えるだけならこのことを意識しなくとも理解できる。

そもそもシグナルは電磁場(光)として線路を駆け抜けている。その時、周りの空間の状態(誘電率と透磁率)により電磁場の電場と磁場の比は決まってしまう。これはマクスウェル方程式を勉強したなら素直に受け入れられると思う。ここで、電場～電圧、磁場～電流、であるので、線路の性質により伝搬するシグナルの電圧と電流の比は決まってしまう。逆に言うと、その比でしかシグナルは伝わらないのである。話はこれだけで、インピーダンス整合とは、シグナルを電送するときに電圧と電流の比を一定にするだけである。電圧と電流の比の単位は良く知っているように抵抗 $[\Omega]$ なので、電送における電圧と電流の比を特性インピーダンスと呼ぶ。

直感的に、電送中で特性インピーダンスが変化してしまえば電送していたシグナルの一部はその先の線路に適した特性インピーダンスで電送していき、残りは戻っていく。これが反射である。

ここまで分かればインピーダンス整合の計算は簡単である。つまり、シグナルの出入りする機器の入出力インピーダンス(高校生の回路の知識で計算したときの入力から見たインピーダンス、及び出力から見たインピーダンス:云々から見たインピーダンス=入力直前, 出力直後の電流電圧比)と電送路の特性インピーダンスを一致させれば良い。我々は特性インピーダンスが 50Ω のものしか使わないので、常に入出力インピーダンスを 50Ω にすれば良い。

ここで、集積回路(正確には、(波長) \ll (インピーダンス整合の取れていない回路の経路長)、電送路じゃない普通のプリント基板上の回路や家庭用の $100V$ 交流等)は特性インピーダンスを気にしなくていいと良く言われるが、これは何故かと疑問に思う。しかし、そもそもこの物言いが間違いである。実際は低周波だろうが何だろうがシグナルは電磁場なので、盛大に反射を起こしている。(集積回路を扱う) \simeq (気にするレンジがその周波数程度)であるから問題とならないだけである。

これを定性的な答えとしてまとめると、シグナルの波長より十分経路の短い回路ではインピーダンス整合を取らなくても反射の影響が「見えない」からということになる。素朴な描像では一瞬でもインピーダンス整合が取れていないところにやってくると伝搬できないように思ってしまう。しかし、電磁場は空間的に広がっている、これは間違った直感である。おそらく、電磁場はその波長より十分短い空間の性質の変化であれば無視して伝搬できると推察される。これはマクスウェル方程式により評価すべきことであるが、僕は知らない。

10.2 スプリッターの計算

では、スプリッター、アッテネータの設計を例に具体的な計算方法を示していく。

図 10.1 に notation と概念図を示す。ポイントは、インピーダンス整合を取ることと、電流の保存則から、

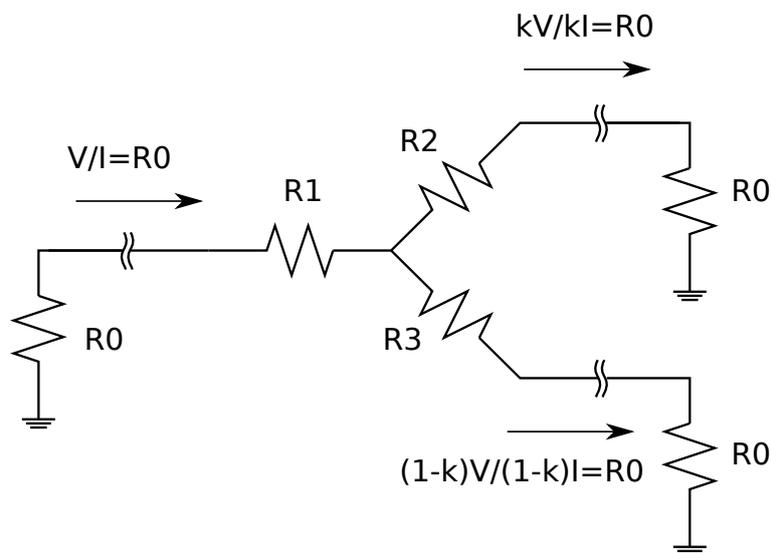


図 10.1 splitte の計算。左からシグナルが来て、二つに分配する。片方の電圧の倍率を k と置く。このとき、インピーダンス整合と電流の保存から反対側の電圧は $(1-k)$ 倍となる。

片方の電圧の倍率を k と置くと必然的に反対側の電圧は $(1-k)$ 倍と決まる。これにより入出力インピーダンスが R_0 となることは保証されるので、大幅に計算が楽になる。つまり、後はキルヒホッフの法則（オームの法則により電圧降下し、回路全体でコンシステントであることを要請する）を適応するだけである。結局、中心での電圧を三方向について計算すると、

$$V - R_1 I = kV + kR_2 I = (1-k)V + (1-k)R_3 I \quad (10.1)$$

が得られる。全体を I で割ると、インピーダンスの次元の方程式になり、

$$(R_0 - R_1) = k(R_0 + R_2) = (1-k)(R_0 + R_3) \quad (10.2)$$

となる。あとはこれを計算すれば良いのだが、 R_0 は 50Ω に固定するとして、任意性 3 つあり式が 2 つしかない。先にも述べたが、既にインピーダンス整合は取ってあるので、実際に任意性が 1 つ残るのである。

例えば、 $R_1 = 0$ と取るのが便利と考えられるので計算してみると、

$$R_2 = \frac{1-k}{k} R_0 \quad (10.3)$$

$$R_3 = \frac{k}{1-k} R_0 \quad (10.4)$$

と求まる。これより、二つに分けたシグナルの電圧の比を m 倍にしたいなら抵抗は特性インピーダンスの逆比倍の値にすればよいということである。例えば、シグナルの電圧の比を 3 倍にするのであれば、抵抗は $50 \times 3 = 150\Omega$ と $50/3 \approx 16.7\Omega$ となる。

次に、よくある 2 分配を実現する場合、 $k=1/2$ より、

$$R_1 = (1 - k)R_0 - kR_2, R_2 = R_3 \quad (10.5)$$

と求まる。この式ではまだ任意性が 1 つ残っている。特に $R_1 = R_2 = R_3$ と対称になることを要請すると、

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_0/3 \quad (10.6)$$

と求まる。この結果は有名で、スプリッターについている抵抗を測ると 16.7Ω 程度になっていることから確かめられる (デルタ型のつなぎ方もあり、その場合は別)。

10.3 実証

計算が本当にあっているかいまいち調べられないので、実証することにした (特に任意倍する splitter の話は web では見つからなかった)。

使用したのは 50Ω の BNC 基板実装用レセプタクルと 20Ω の可変抵抗。まず 16.7Ω に設定し、パルサーのシグナル (width $\simeq 10\text{ns}$) が反射無く分けれることを確認。さらに、 $R_1 = 20\Omega, R_2 = 20\Omega, R_3 = 2.5\Omega$ としてシグナルが計算通りの $3/4$ になることを確認した。

ポテンシオメータでも多少経路が長い感じがあり、少しだけ反射するのが見えた。これより、ポテンシオメータより小さい抵抗を使う必要があり、抵抗を直接ハンダ付けするのが現実的と思われる。抵抗部分を差し替え式にしたいが、それだと経路が長くなるので反射がきついかもしれない。しかし、試してみる価値があると思う。

その後、http://www.microwaves101.com/encyclopedia/Resistive_splitters.cfm

- Chris Owen's resistive unequal splitter
- Greg Adams' resistive unequal splitter

等が見つかったが、いずれもことなるので、林栄さんに現在聞いていて、技術部門で調べてくれるそう。