

# 経過報告

田中 隆己

2012年7月19日

## 1 ANAROOT

生越くんをターゲットに導入の tutorial(ANAROOT wiki 上) を作ってみました。どうですか？

branch を anafile で作れるようにしました。もちろん、gate とか使えるので、1Dhist を作る感じで branch が作れます。個人的には anafile で必要な event に絞った tree を作って、その tree に対してコードを書くのが処理・コーディングが早くていい感じです。tree にした場合は処理が軽ければ 10 万 event/sec くらいです。NEBULA のスルー補正やアイテレーション等いろいろ試したくなるときに強力です。また、中性子・荷電粒子の運動量から物理的考察をするときにも使えます。

## 2 NEBULA

修論を書きながら進めている。また、上記 ANAROOT の更新を受けて、tree ベースで解析を進めたい・ANAROOT チェックしたいというのがあり、キャリブレーションを再度行っている (macro はできているのでほとんど整理整頓・図の作成に時間がかかっている)。

## 3 HIME

NPOL について調べているときに思ったことを列挙する。

- target が厚いので、target 後の farday cup では正常にビーム強度を測れない可能性が高い。そこで、例えば target in/out を交互にやることで farday cup のキャリブレーションをやる必要があるかも。
- start counter の slew と beam のエネルギー広がりを区別するために、start counter 近傍に plastic を置いて slew パラメータを決めたい。
- target を真空槽にいれる必要はない (HIMAC と同じ方式で、ラミネーター方式) ので、実は start counter のそばの大気中に置いてもよい。この方場合、target とホルダーに自由度あり設計しやすい。ただし、微妙に focus しないが気にならないはず。
- 理想的には HIME の位置分解能測定のために HIME の前に DC を置きたい。
- 時間分解能を直接評価する (時間的な広がりが小さくなるように、target にできるだけ近づけて測定する) 予定だったが、むしろ、遠距離において、中性子のエネルギーを測定して間接的に時間分解能を評価する方が RCNP ではお得の可能性もある。実際、NPOL3 では時間分解能 100ps 程度のものをこの方法で評価している (ただし、beam のエネルギー・角度広がりを十分に狭める必要がある)。今回の

beam time は遠方・近傍、両方の実験するのでどちらの方法でも評価できる。

- HIME はアクティブな体積に対して有効な体積が半分ぐらいしかなく、さらに、単色でない中性子、 $M_j=3$  のイベントなど解析して意味があるイベントに対する無意味なイベントの比がものすごく大きい。このため、大強度 beam にしたときは DAQ の live time が足を引っ張ることになる。例えば、1kHz とってたととしてもそのうち使えるイベントは 10event とかになりかねない。なので、 $M_j=3$  トリガーを作って、 $M_j=1$  トリガーと混ぜながらデータをとったり、dead time を攻める工夫が必要である。さらには、必要なのは (Li,Be) の peak のみなので、ハードウェアで timing を攻めるというのも有効である。
- 実験をする前に一度 RCNP の実験に参加しないとやばい。また、若狭研の学生などが実験に参加してくれるとおそらくものすごく助かる。

## 4 QTC

QTC とは神岡で開発された電荷を時間情報に変換する IC チップである。具体的には analog 入力に対して、threshold level を超えたタイミングで出力が立ち上がり、電荷を積分・放電し、threshold level を割ったタイミングで出力が立ち下がる。このため、multi-hit TDC でこの波形を取得すれば TDC 一台で T と Q が得られ、さらに analog delay が必要なくなり、またモジュール自身の deadtime は 1usec 程度と短いので超高速データ収集に向いている。

QTM とは QTC をコアとするモジュールの呼称で、6ch/1module 備える。およそ 30 万円 (仁木工芸)。  
以下には QTC について分かったことを列挙する。

- QTC は HIT 出力があるので、これを使えばロジック用に discrim はいらなくなる。ただし、QTM を見る限りその様な出力はないので、どうせ買うなら width 調整付きの出力端子をつけて欲しいところである。
- もともとシングルフォトンの測定用に作っているので無駄に一段目にアンプが入っていたりする。
- dynamic range が広い場合は波高が小さいときにジッターが見えてしまう可能性が高い (原論文・川瀬さん ppt 参照)。つまり 100ps を目指す HIME に使うには微妙。
- 仮に plastic に使うには時間性能が足りずに時間情報を使えなかった場合でも、delay+QDC と QTC+TDC では値段がおよそ同じなので、タイミング調整がいらぬ+analog delay がなくなり軽いという観点から QTC+TDC の方が有利と言える。

QTC はシングルフォトンなどをターゲットにしている、時間性能はあまり重視していない感がある。例えば、一旦アンプ (オペアンプによるボルテージフォロワ) を通した後にコンパレータでディスクって、さらにタイマーを通過した後にやっとフリップフロップに入って立ち上がりのパルスを生成する。また、電荷の測定誤差は 1.5pC (full range:400pC) 程度で一定で、絶対的な性能は従来の QDC (0.5pC 程度)、Discrim+TDC には負ける。このため、単純に置き換えるわけには行かず、検出器の性能を良く考慮する必要がある。

上記から QTC は我々のような plastic にはあまり向いていないことがわかる。そこで、時間性能が Discrim と同じになる様に、QTC もどきを回路シミュレータ (Multisim) を使って作ってみた。立ち上がりは高速なコンパレータに直接入力することにより生成する。電荷を時間情報に変えるところは、従来の QDC の様に単純に RC で積分し、放電して電圧が下がっていく、その立ち下がりを出力パルスの立ち下がりになるようにし

た。(電荷に対して出力パルスの幅が線形にはならないのでキャリブレーションが必要)。ということで回路シミュレータ上では目的の出力が得られた(別資料)。ただし、このシミュレーションでは反射などは考えられておらず、また、フリップフロップや NOT 回路は理想的な特性としてシミュレートされている。名前の付いているモジュールに関しては時間的な応答性能は評価されている(立ち上がりの遅延や速度など)。

## 5 dineutron の非対称度

dineutron(重中性子)は自由空間では非束縛であるが、中性子過剰核の中では最外核の二つの中性子が dineutron の様な構造を取ると考えられている。dineutron を構成する中性子のスピンは互いに逆向きであるが、これを直接測定した例はないと思われる。しかし、NEBULA や HIME を利用することで efficiency は低いものの原理的には測定できる。ここでは sector method を用いたときの非対称度とその誤差を求め、feasibility について議論する。

### 5.1 偏極中性子単体の場合

まず偏極した中性子単体を中性子偏極度計に入射した場合を考える。ここでは理想的に、(n,p) 反応で出てくる核子の散乱角を無限の分解能で測定できるものとする。theta の角度依存を無視したときの (n,p) 反応における中性子の散乱角分布を、

$$f(\phi) = \frac{1}{2\pi} (1 + p \cos \phi) \quad (5.1)$$

と仮定する。ここで p は中性子の偏極を表す。このとき、左右の計数  $Y_L, Y_R$  は

$$Y_L = \int_{-\Phi}^{\Phi} N f(\phi) d\phi = \frac{N}{\pi} (\Phi + p \sin \Phi) \quad (5.2)$$

$$Y_R = \int_{\pi-\Phi}^{\pi+\Phi} N f(\pi + \phi) d\phi = \frac{N}{\pi} (\Phi - p \sin \Phi) \quad (5.3)$$

となる。これを整理して、

$$p = \frac{Y_L - Y_R}{Y_L + Y_R} \frac{\sin \Phi}{\Phi} \quad (5.4)$$

と、偏極が左右の計数と積分範囲  $\Phi$  で求められる。偏極 p の誤差  $\delta p/p$  は、

$$\frac{\delta p}{p} \sim \frac{1}{\sqrt{N} A_{y;eff}} \frac{\sqrt{\Phi}}{\sin \Phi} \quad (5.5)$$

と求まる。 $A_{y;eff}$  は effective analysing power と呼ばれ、現実の検出器の分解能が無限大でないことから、

$$p A_{y;eff} = \frac{Y_L - Y_R}{Y_L + Y_R} \frac{\sin \Phi}{\Phi} \equiv \varepsilon \quad (5.6)$$

という関係式で定義される。 $\varepsilon$  は asymmetry と呼ばれる。

## 5.2 dineutron の場合

次に dineutron の場合、つまり二つの中性子が互いに反対のスピンを持つ場合を考える。ここでは簡単のため、スピンがならず N の方向を align されていると仮定する。このとき、それぞれの中性子の角度分布は、

$$f_{\uparrow}(\phi) = \frac{1}{2\pi} (1 + p_{2n} \cos \phi) \quad (5.7)$$

$$f_{\downarrow}(\phi) = \frac{1}{2\pi} (1 - p_{2n} \cos \phi) \quad (5.8)$$

となる。ここでいう偏極  $p_{2n}$  は二つの粒子のスピンが反平行である割合を表し、dineutron であれば 1 となることが期待される。中性子が一つだけ入射する場合は左右の計数の差を考えれば良かったが、dineutron の場合は二つの中性子の区別がつかないので、それぞれの中性子の角度分布に意味はなく、二つの中性子の相対的な分布に意味がある。これより考えるべきは、上向きスピンの反跳方向 (左右) と下向きスピンの反跳方向 (左右) の組み合わせで四種類である。まず、それぞれの事象が起こる確率 P を求める。確率 P の添字は左側が上向きスピンの反跳方向を、右側が下向きスピンの反跳方向を表す。このとき、

$$P_{LL} = \frac{1}{\pi^2} (\Phi + p_{2n} \sin \Phi) (\Phi - p_{2n} \sin \Phi) \quad (5.9)$$

$$P_{LR} = \frac{1}{\pi^2} (\Phi + p_{2n} \sin \Phi)^2 \quad (5.10)$$

$$P_{RL} = \frac{1}{\pi^2} (\Phi - p_{2n} \sin \Phi)^2 \quad (5.11)$$

$$P_{RR} = \frac{1}{\pi^2} (\Phi + p_{2n} \sin \Phi) (\Phi - p_{2n} \sin \Phi) \quad (5.12)$$

となる。測定において、LR と RL は区別が出来ず、また LL と RR を区別する意味はないので、 $LL=RR=||$ ,  $LR=RL=\times$  と表すことにする。同時に入射粒子の数 N をかけて計数 Y で表記すると、

$$Y_{||} = \frac{2N}{\pi^2} (\Phi + p_{2n} \sin \Phi) (\Phi - p_{2n} \sin \Phi) \quad (5.13)$$

$$Y_{\times} = \frac{N}{\pi^2} \left\{ (\Phi + p_{2n} \sin \Phi)^2 + (\Phi - p_{2n} \sin \Phi)^2 \right\} \quad (5.14)$$

となる。以上からスピンが反平行である割合  $p_{2n}$  は、

$$p_{2n} = \sqrt{\frac{Y_{||} - Y_{\times}}{Y_{||} + Y_{\times}}} \frac{\sin \Phi}{\Phi} \quad (5.15)$$

で与えられる。また、この場合のスピンが反平行である割合の誤差は、

$$\frac{\delta p}{p} \sim \frac{1}{\sqrt{N} A_{y;eff}^2} \frac{\Phi}{\sin^2 \Phi} \quad (5.16)$$

と求まる。

## 5.3 feasibility

NEBULA や NPOL の様に、一層目で分析、二層目で角度分布を検出するタイプ中性子検出器では、複数中性子が入射した時に一層目のシグナルと二層目のシグナルを結びつけることが難しいため、ほとんど解析不

可となる。対して、HIME の様に反跳陽子の飛跡を完全に追うタイプの検出器であれば、入射中性子ごとの散乱角を同定できる。このことから本質的に dineutron の偏極測定は HIME の様な仕組みを取る必要があると言える。

dineutron のスピンの反平行に近いことを示すだけであれば、誤差は  $\pm 1$  のオーダーに収まれば良い。1 中性子が入射したときの反跳陽子に対する二回散乱効率  $\varepsilon_{1n,D.S.}$  と実効偏極分解能  $A_{y;eff}$  は NPOL3 の場合はそれぞれ  $5.9 \times 10^{-3}$ , 0.12 である。HIME も NPOL3 と同等の性能を持つと仮定すると、およそ  $10^8$  個の dineutron が検出器に入射すれば良い計算となる。例えば beam が  $10^5$  来ており、そのうち 1% が dineutron event だったとすると、30 時間取りつづけるだけでよく、例えば  ${}^7\text{Li}$  や  ${}^9\text{Be}$  ならば十分に実験可能な数字である。

ここで実験技術上の問題を考えると、一つは dineutron の場合は中性子間の相対エネルギーが小さいために二つの中性子を分けて識別できる確率が低いことがあげられる。さらに放出粒子の偏極が HIME に対して垂直なイベントしか根本的に解析できないので、反応平面が完全に決められたとしても L 方向の event は捨てることになる。つまり、以上の点が解決できて初めて実現可能となる。

ところで、dineutron の場合の式 5.16 と単体中性子の場合の式 5.5 を比べると、dineutron の場合は  $1/\sqrt{N}$  以外の項が二乗になっただけである。イベント数  $N$  は中性子の二回散乱効率を  $\varepsilon_{1n,D.S.}$  と置くと、一般的に 2 中性子の検出効率は  $\varepsilon_{2n,D.S.} \leq \varepsilon_{1n,D.S.}^2$  となる。これは、2 中性子のスピンを測る場合の測定誤差は入射粒子数以外の項を二乗しただけとなり、直感と一致する。