

本実験の簡易解析

久保 一

2005 年 12 月 20 日

revised 12 月 23 日

1 TDC で見た GSO-PlasticScinti の 3Coincidence

TDC に関連する部分の回路図及び、信号の概念図を (図 1) に示す。common start に入る信号は 3-coin と thin の coincidence 信号だが thin の信号が常に遅いように delay 調整がなされているため trigger は 3coin、timing は thin になっている。(図中の ① を参照されたい)

今回使った TDC は仕様では 1ch が 50ps、fullscale が 100ns(11bit) となっている。(12/10 に行われた calibration では $10\text{ ns} \simeq 230\text{ch}$)

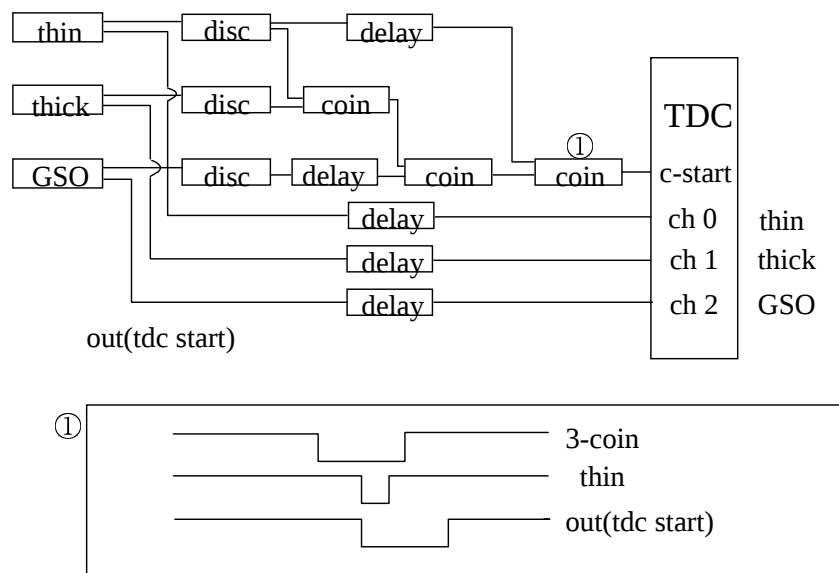


図 1: 回路の簡略図

まずは 1RUN(2 時間分) の TDCdata を見てみよう。sample は main_28.root の data である。

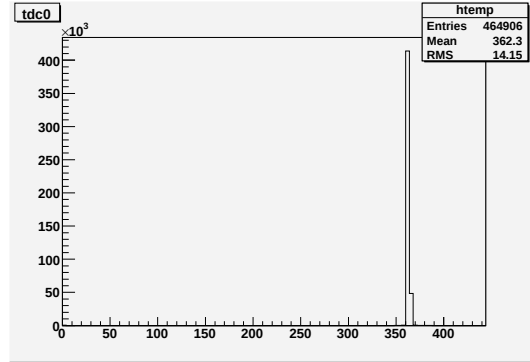


図 2: thin の TDC

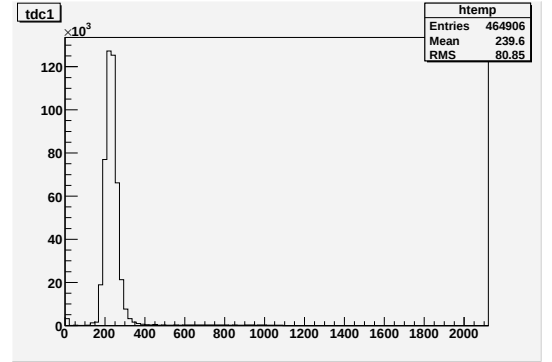


図 3: thick の TDC

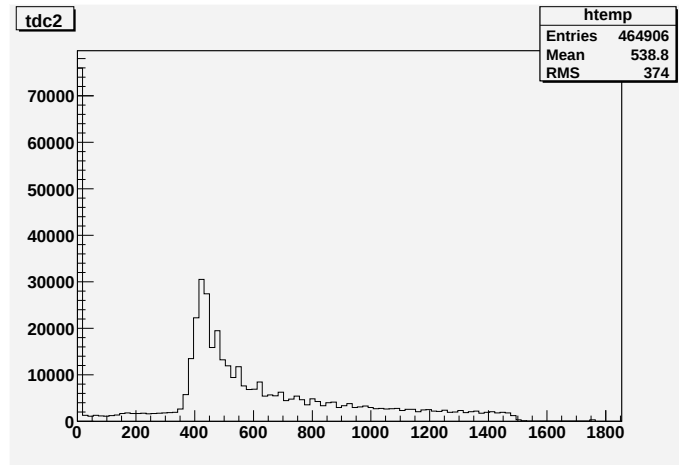


図 4: GSO の TDC

(図 2) の thin scinti は自分自身が start なのでほぼ同一の ch に集まる。(図 3) の thick scinti は少しぼやけるが、thin scinti との timing 差は少なく、100 ch $\simeq$ 5 ns 程度の幅に収まっている。問題は GSO なのでさらに詳しく考察していこう、GSO の信号は、plastic scinti の信号に比べて立ち上がり・減衰が遅い。そのため、pulse の大きさによって discriminator の threshold にかかる timing にはっきりとしたズレが生じてくる (zitter)。(図 5) のイメージ。

大きい pulse ほど早く、小さい pulse ほど遅く discri 信号が立つことになる。ただし、これが言えるのは「正しい」3-coincidence の event に限ったことである。accidental coincidence の場合は、関連性の無い β 線と γ

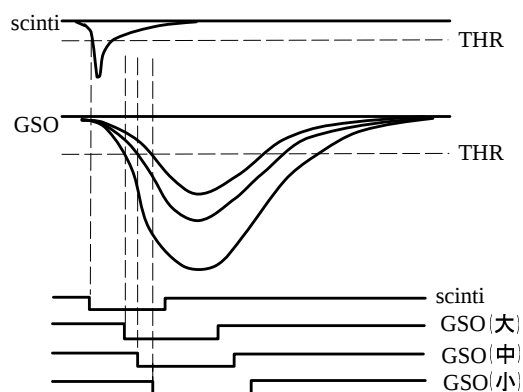


図 5: zitter の概念図

線（時には β 線同士）が coincidence 幅のどこに入っても良いことになる。つまり、GSO の pulse の大きさに無関係に coincidence 幅全体に、均一に分布すると考えられる。

このことを利用して、accidental coincidence の event を除くことが可能である。まずは (図 4) の意味を理解するところから始めよう。(図 6) の

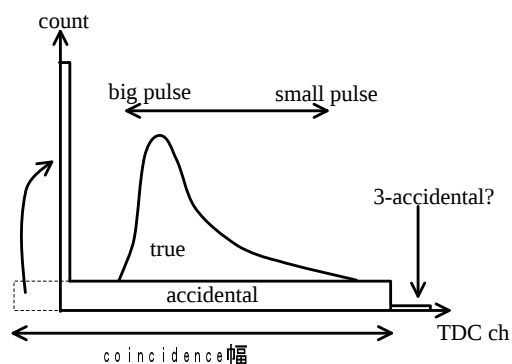


図 6: TDC の概念図

ように全体に均一に分布する accidental coin の上に真の 3-coin の event が乗っていると理解できる。

0ch に立っている count は、TDC の幅をはみ出してしまった分の count の積算であろう。(実際に delay 調整の際、common start より若干早く来

る信号がわずかに見られた) 本来ならもう少し delay をかけて入れたいところなのであったが TDC の fullscale が 100 ns しかないこと、及び delay モジュールの不足により妥協せざるを得なかった事情がある。

さて、この見方のもっともらしさを大雑把ではあるが評価してみよう。まずここに、(図 4) を拡大したものがある。(図 7)

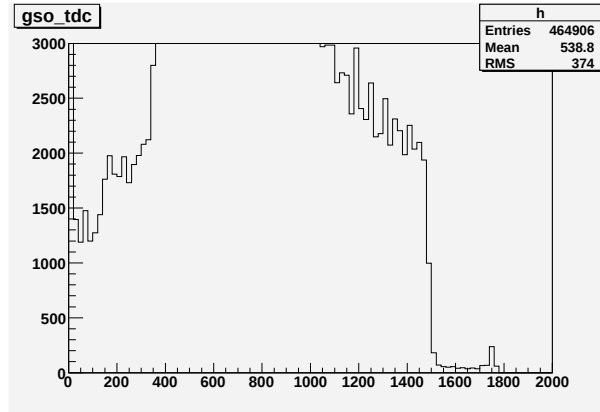


図 7: TDC の拡大図

accidental の平地は、およそ 2000 count 程度であろうか。この graph の 1 bin は 20 ch であるので 1 ch あたり 100 count となる。平地は 1500 ch 付近で途切れている。すると、0 ch に立っていた count 数はおよそ 76000 であるので平地 760 ch 分に相当する。合計での 2260 ch は約 100 ns に相当し、これは 3-coincidence を取る際の coincidence 幅 (2-coin 80 ns、GSO 50ns の合計 130 ns よりはやや短くなるだろう) にほぼ一致する。

さらに真の event に対する accidental coin の event の割合を見てやろう。

	main28(count)	main28(cps)
2-coin	200,482,488	55,690
GSO	36,860,302	10,239
3-coin	464,314	129.0

表 1: scaler の値

ここから、実質的な coincidence 幅を 100ns として accidental coincidence の rate を計算してやると

$$55,690 \times 10,239 \times 100 \times 10^{-9} = 57.0[\text{cps}]$$

これは全体の 44.2% に相当する。一方、(図 4),(図 7) から同じ数字を見

積もってやると $(76,000 + 100 \times 1,500)/464,906 \simeq 48.6\%$

とほぼ同じ数字を示す。(図 6) の概念はほぼ正しいといってよいだろう。

次に、ADC の値を加えてより明確に zitter の効果を見てみよう。

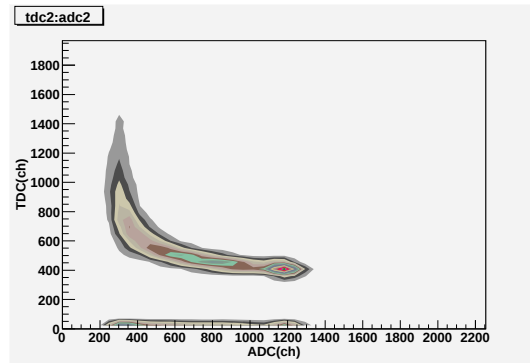


図 8: GSO の TDC:ADC 等高線 plot

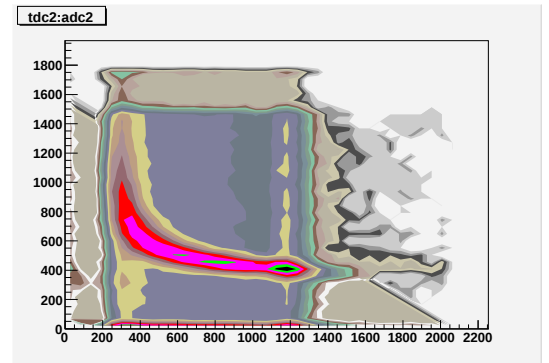


図 9: GSO の TDC:ADC z 軸 log scale

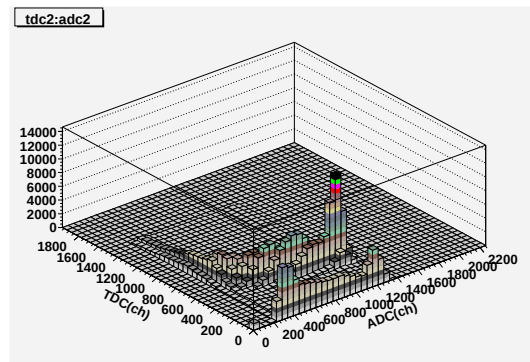


図 10: GSO の TDC:ADC 等高線 plot

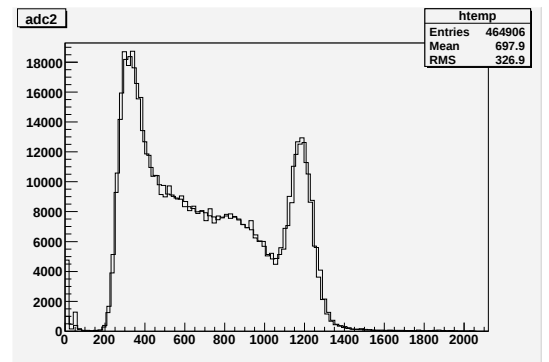


図 11: TDC=0 の条件をつけた物を 6.5 倍

(図 8),(図 9) で ADC の値の大きい event ほど、TDC の値が小さくなっていることがよく見て取れる。特に (図 9) では accidental らしき event が薄く全領域に渡って広がっているのが分かるだろう。また、(図 10) でも少し見えているが TDC=0 のところの event は全て accidental と考えられる為 ADC spectrum 全体と同じ構造を持っている (図 11)。このことも前の議論を強める。

さて、(図 8) をもう一度見ると特定の energy 領域 (ADC ch) に絞って考えたときそれに対応する TDC ch はかなり狭くなりそうである。これはそれだけ「真の」3-coincidence の timing を限定できるということである。

まずは GSO の ADC spectrum を単独で見よう。

光電 peak を全てカバーするように、少し広めに 1000 -1500 ch を取ろう。この領域に限定した TDC の spectrum を (図 14) に表す。

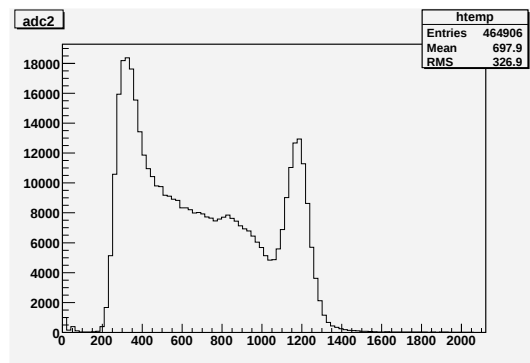


図 12: GSO の ADC spectrum

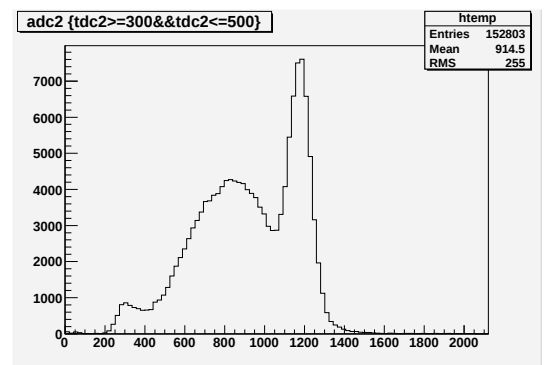


図 13: TDC で制限をつけた GSO の ADC spectrum

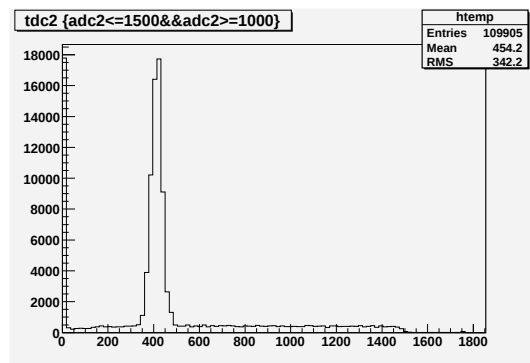


図 14: 光電 peak 付近の TDC spectrum

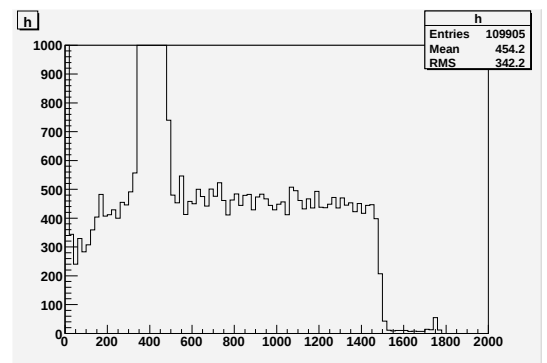


図 15: 1 bin 20 ch 拡大図

本物らしい event は、TDC 300 - 500 ch にほぼ収まっているようである。この制限をつけて ADC spectrum を見ると、少し順番が前後するが (図 13)。(図 12) と比べると低い energy 側がはっきり切られているのが分かる。さて、これだけでどれほど accidental coincidence を減らせたのだろうか? (図 15) の平地の高さ約 400 から、ADC 1000 - 1500 ch, TDC 300 - 500 ch に入る accidental coin はおよそ 4000、対してその領域の全 event 数は 63957 なので $4000/63957 \simeq 6.3\%$ 。元の 45% からするとかなり減らすことができた。

今回の解析ではこの条件で **Asymmetry** を導出することにした。

同様の操作を thick scinti の TDC についても施してやれば、accidental な 2-coin にさらに GSO が coincidence したような事象も大部分取り除くことができるだろう。ただ、この事象は元々が数% 以下であるので大きな効果は望めないかもしれない。((図 16) で平地の高さを 200 とすると約 2.4%)

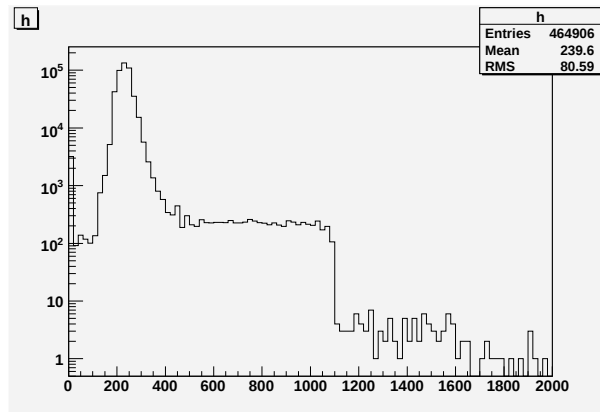


図 16: thick scinti の TDC log scale

最後に、GSO と thick scinti の TDC data を同時に見てやろう。(光電 peak 周辺の energy 領域で)

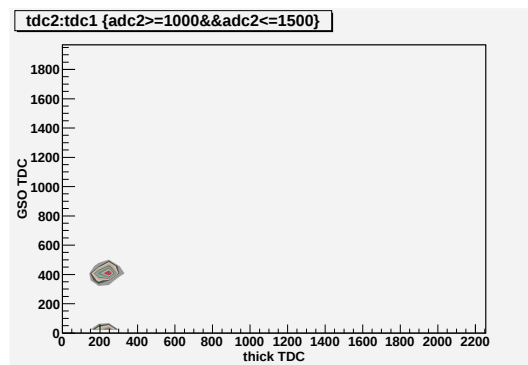


図 17: GSO と thick の TDC 等高線 plot

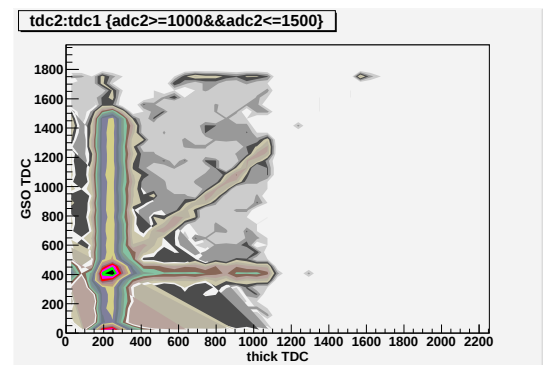


図 18: GSO と thick の TDC z 軸 log scale

(図 17) を見る限りは予想通り、ごく狭い領域に集中しているようだが (図 18) のようにすると面白い構造が見えてくる。より多くの data を集めた方が分かりやすいので、解析に使った 21RUN、42 時間分全てを集めたのが (図 19) である。

thin, thick, GSO の 3 つの signal のうち、どれとどれが「本物」でどれが「偽者」であったのかははっきりと見分けることが出来る。全体に薄く分布しているのは「3 つの signal のどれも同じ原子核の崩壊に伴うものではない」言ってみれば 3-accidental のイベントであろう。

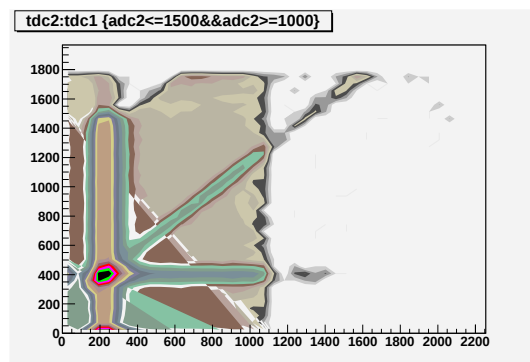


図 19: GSO と thick の TDC z 軸 log 総和

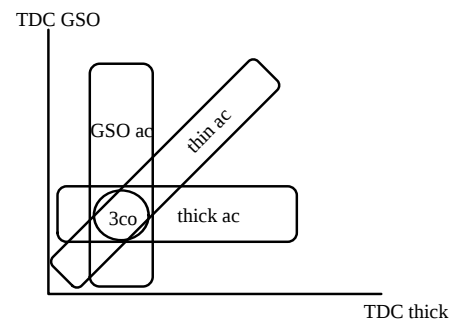


図 20: イメージ図

2 Asymmetry の導出 (現場解析)

いよいよ本題に入ることにしよう。(Log ノートにあった回路図を勝手に使わせていただきました、石川君？ごめん)

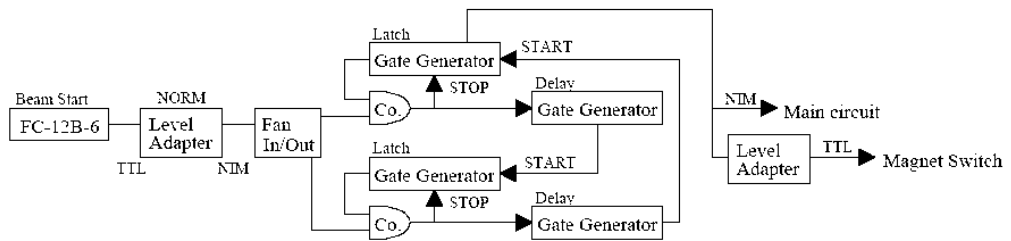


図 21: 磁場反転回路図

Asymmetry の導出であるが、最も単純なのは磁場平行・反平行での GSO の count 数を比べてやることである。しかし、そうは問屋が卸さない事情がいくつも出てきたのである。

まずは磁場方向別に分けて記録された GSO の ADCspectrum を見てみよう。引き続き例は main_28 である。尚、「a」というのは磁場と γ 線の進行方向が反平行、「b」は磁場と γ 線の進行方向が平行で統一されている。

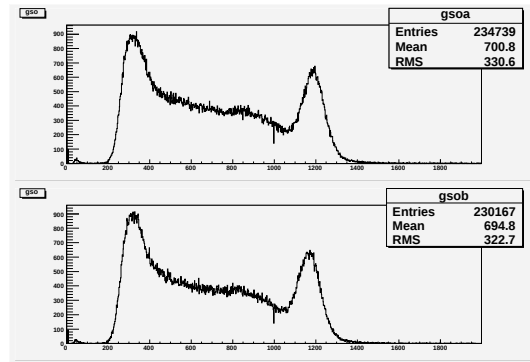


図 23: GSO の ADCdata 磁場方向別

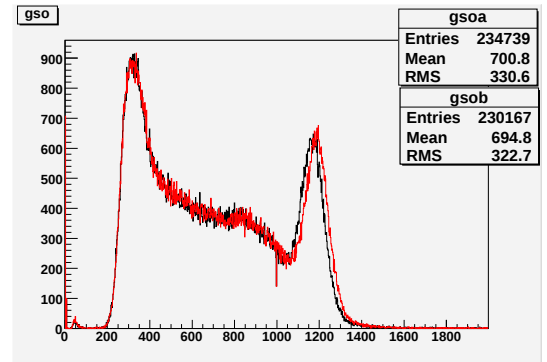


図 24: GSO の ADCdata 重ね書き

(図 23) のように重ねて書いてやると一目瞭然であるが、明らかに peak の位置がずれている。GSO に接続している PMT が磁石から漏れる磁場の影響を受けて gain が変化していると考えられる。そのため、discriminator で切られる基準も当然違って来る為、単純な entry 数の比較では正しい Asymmetry を出すことが出来ない。光電 peak のみを使うにしても、何かこの gain 変動に影響されない基準が必要である。

そこで、**適当な関数で fit して光電 peak の数を算出することにした。**

念のため、plastic scintillator の ADC data も同じように見てみよう。同じように重ね書きをしてみる。

こちらは磁石からの距離が遠いため、影響をほとんど受けないようだ。**scinti の count 数は磁場の影響を受けておらず、そのまま信頼できる。**このことは後で重要になってくる。

もう 1 つの困難は、磁場反転回路及び測定 check の信頼性、加えて beam 強度の変動である。Asymmetry をそのまま導出するのなら「平行・反平行で同じ数の原子核の崩壊について観測した」ことが保証されていないといけない。もし「同じ時間だけ、同じ beam 強度で観測した」のであればその条件を満たすことができるが、現実にはその両方が実現できなかったのである。

まず、磁場反転回路及び測定 check の信頼性について。我々は、磁場が 2 分ごとに交互に反転するように回路を組み、そして常に偶数回そのサイクルを走らせるように check 項目を設けた。関連する機構をまとめた (図

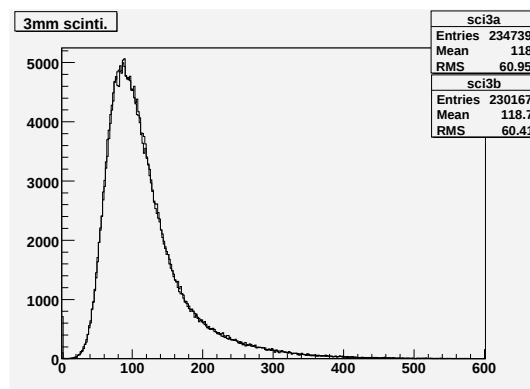


図 25: thin scinti の ADC 重ね書き

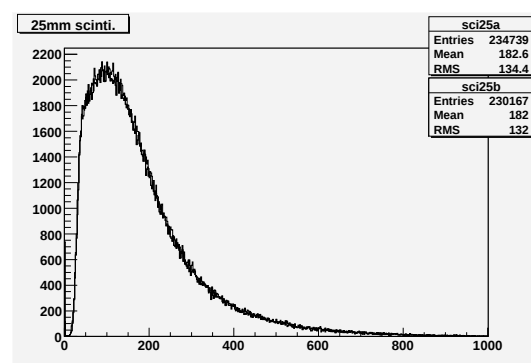


図 26: thick scinti の ADC 重ね書き

27) で説明しよう。

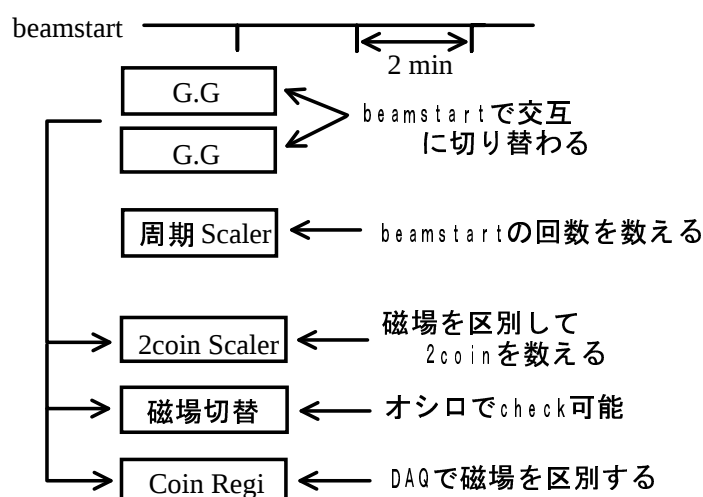


図 27: 磁場反転系の概略

2分ごとに出る beamstart 信号が全ての元になっている。これによって 2つの G.G が交互に信号を出し、それが磁場反転回路・測定機器と連動している。それとは別に、beamstart 信号を直接 count している周期 Scaler というものがある。この G.G のランプ点灯の上下、及び周期 Scaler の奇偶、磁場 check オシロ、2coin Scaler の値、さらには実際の時間経過で各磁場方向の観測時間の均衡について 5 重の check ができることになる。

しかし、明らかに奇数回のサイクルを取ってしまったような data が複

数個ある上に check の際に複数の項目で整合しないところが出てきたのである。

(表 2) は 2coin Scaler の値であるが、beam が安定していればこの比は 50% になるはずである。実際に大半の data では 49.9% - 50.1% を保っており、やや不安定な beam 状態になった時でも 50.2% 台程度である。しかし、この main07 の値はそれから大きくかけ離れている。この値は、(平行) を 1 サイクル多くとってしまった場合の理論値 ($31/61 = 50.820\%$) と非常に近く、疑わざるを得ない。だが、check シートを見る限り人間のミスはなさそうである。

	main07(k)	main28(k)
2-coin(全体)	130,515	200,482
2-coin(平行)	66321	100,256
比 (平行/全体)	50.815%	50.007%

表 2: 2coin Scaler の値

これはどうしたことだろうか？この状況で取った data の信頼性は大丈夫なのだろうか？

1 つ仮説を立ててみるならば、beamstart 信号の二重 count あるいは数え洩らしが G.G 切り替えの coincidence と、周期 Scaler で独立に起こることであろう。

そうなった場合、「G.G のランプ点灯上下」、「周期 Scaler」、「実時間」の対応は保証されない。しかし、beamstart 信号の「数」に依存しない部分「G.G のランプ点灯上下」、「2coin Scaler の振り分け」、「磁場の向き」、「DAQ に入る CoinRegi」の対応はまだ信頼することができる。前者が pulse による「点」のつながりなのに対し、後者は Gate との coincidence によるいわば「面」のつながりなのである。

実際、幸いなことに G.G のランプ点灯と磁場オシロの上下が一致しない記録はないようである。

よって、**Coincidence Register と磁場の対応はついている**
さらに**測定時間は 2Coin Scaler から推定できる**

次に beam の安定性であるが、ターミナル電圧が微妙に drift して beam が左右に振れてしまうことで実際に target まで到達する beam 強度が変動してしまうことがある。

各 RUN(2 時間) ごとに check して調整をしているものの、FC4 の値が RUN の前後で半減してしまっているような data も複数ある。単調に beam 強度が減少していくとき、先に取った側の磁場方向が有利になってしまう

がこの問題についても **2coin Scaler** の値によって補正を加えてやることで容易に解決しそうである。

さあ、以上のことを考慮して正しい Asymmetry を出す方法を考えよう。要点をもう一度まとめる。

- GSO の gain が磁場の影響を受ける
→ Fit して光電 peak 数を計算
- 測定時間・beam 強度が一定でない
→ 2-coin Scaler を崩壊原子核数の指標にする
- accidental coin の割合が多い
→ TDC data から制限を加えてなるべくカットする

まずは GSO の TDC の値で 300 - 500 ch に制限した GSO の ADC spectrum を用意する。(図 28)

このデータは main06 - main28 の (途中欠番あり) 21RUN(42 時間分) の総和である。それに対して 2 つの gaussian の和で fitting をしてやることにする (図 29)

無難に gaussian を選んだだけであるので、今後の解析ではさらに最適な関数を探す必要もあるだろう。

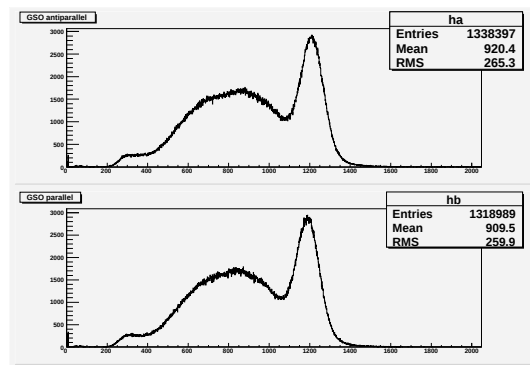


図 28: TDC で制限をかけた状態

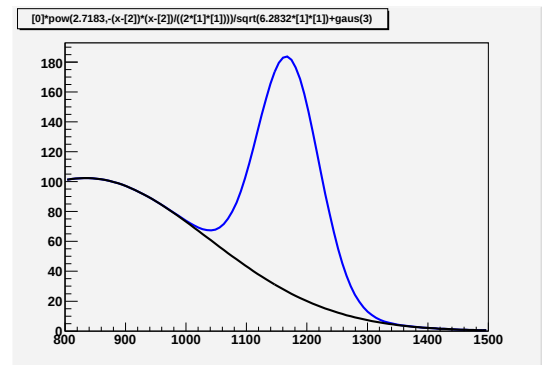


図 29: 2-gaussian イメージ

そして、光電 peak の側に fit した gaussian の面積を求める。

この操作を簡略化するために、ROOT に default で入っている $\text{gaussian}(k, \sigma, m)$ ではなく面積を直接 parameter にした gaussian を定義して fitting を行った (S, σ, m) 。これにより、統計的誤差も直接 fitting から求めることができるようになった。(図 30)

こうして求めたそれぞれの光電 peak の面積 (図 30 の PE square) 及びその誤差を 2-coincidence Scaler の数値によって規格化し、Asymmetry を

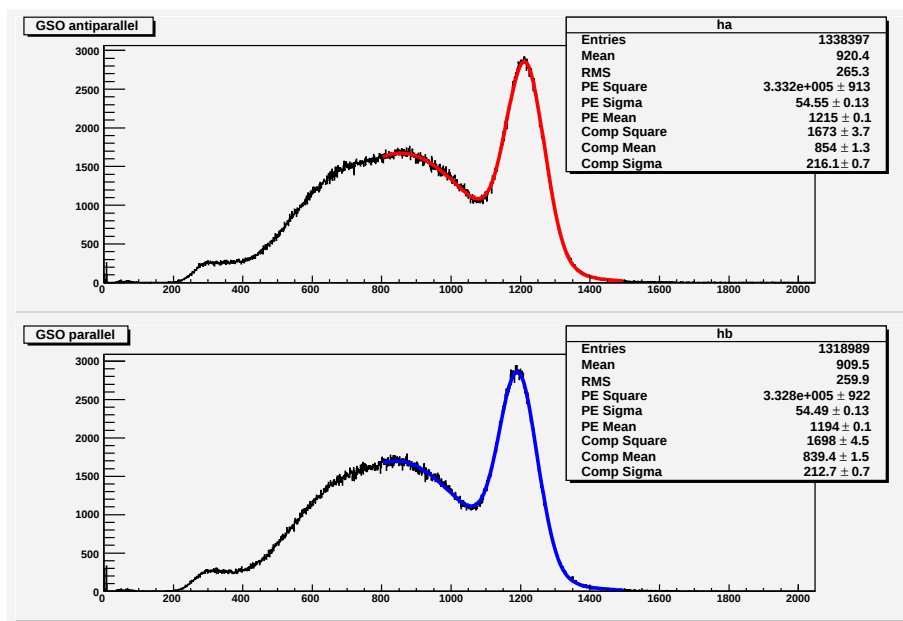


図 30: fitting

求めることが出来る。具体的な導出の式は (1),(2) であり、ここでの変数は (表 3) に従う。

	磁場反平行 (a)	磁場平行 (b)
peak square(S)	333,201	332,754
error(E)	913	922
2-coin(β)	1,614,996 [k]	1,626,321 [k]

表 3: Asymmetry 計算

$$A = \frac{S_a/\beta_a - S_b/\beta_b}{S_a/\beta_a + S_b/\beta_b} \quad (1)$$

$$\Delta A = \frac{\sqrt{(E_a/\beta_a)^2 + (E_b/\beta_b)^2}}{S_a/\beta_a + S_b/\beta_b} \quad (2)$$

そうして求められた Asymmetry の数値は、 $0.417\% \pm 0.195\%$ である。
 2σ 以上で有意に Parity が破れていると言っても良いのかな ??
 ちなみに 96.75% になります。

3 Asymmetry の導出 (簡易解析 その2)

当日の現場解析は上の様にしたものの、その後に気になることが浮上してきた。

GSO の ADCdata を RUN ごとに見ていったとき、peak の位置がだんだんと低い方にずれていっているのである。(図 31) イッシー、また借りるね)

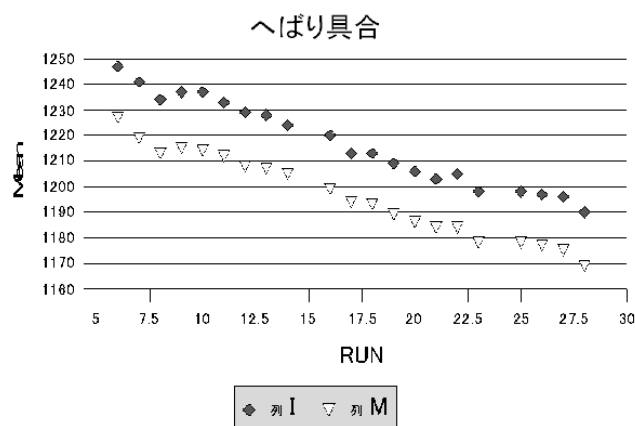


図 31: peak 中心の shift

恐らくは 40 時間超の稼働のうちに、PMT が文字通り「へばって」いつているのでしょう。このままで spectrum を合計すると、(図 32) のようなイメージになる。

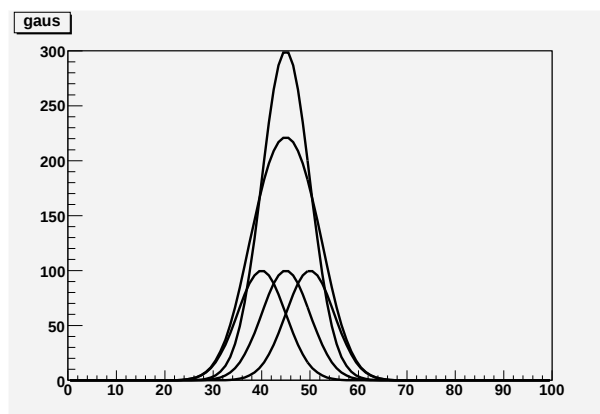


図 32: peak の shift の影響 概念図

shift していった山を重ねあわせたのが太い山で、shift しなかった場合

(細い山) に比べて形がずいぶん変わってしまう。もちろんこれは極端に中心を移動させていますし、peak が gaussian の形であると仮定した場合の例ですが、似たようなことが実際にも起こっているでしょう。

これを回避する為に、解析方法を少し変更する必要がある。

具体的には、各 RUN ごとに Fit することにより peak の位置のずれた spectrum をなるべく重ねないようにし、それぞれで求めた光電 peak の数及び誤差を後で合算する方式である。

$$n = (6, 7, 8, \dots, 27, 28) \quad (3)$$

$$A = \frac{(\sum_n S_{an})/\beta_a - (\sum_n S_{bn})/\beta_b}{(\sum_n S_{an})/\beta_a + (\sum_n S_{bn})/\beta_b} \quad (4)$$

$$\Delta A = \frac{\sqrt{(E'_a/\beta_a)^2 + (E'_b/\beta_b)^2}}{(\sum_n S_{an})/\beta_a + (\sum_n S_{bn})/\beta_b} \quad (5)$$

$$E'_a = \sqrt{\sum_n E_{an}^2}, \quad E'_b = \sqrt{\sum_n E_{bn}^2} \quad (6)$$

	磁場反平行 (a)	磁場平行 (b)
peak square(S)	333,201	332,754
error(E)	913	922
2-coin(β)	1,614,996 [k]	1,626,321 [k]

表 4: Asymmetry 計算 (以前の値)

	磁場反平行 (a)	磁場平行 (b)
peak square(S)	333,612	332,103
error(E)	894	899
2-coin(β)	1,614,996 [k]	1,626,321 [k]

表 5: Asymmetry 計算 (新しい値)

これによる Asymmetry は $0.570\% \pm 0.190\%$ 、ちょうど 3σ になります。
(99.73 % に相当します)

さらに、GSO の ADC だけではなく、他の data も shift していないか一応調べてみました。その結果で気になったところを 2、3 点。

まず、thin scinti の TDCdata が main10 の途中から、main20 の途中まで、ほぼ全体の半分に渡って入っていませんでした (図 33)。正常に働いていても常に同じ ch に入る性質のせいでなかなか気づけなかったようです。

しかし、問題があったのは生 signal の方だけで trigger には問題が無いためその間の GSO,thick の data は正常に取れていて、今のところ解析には影響を与えません (図 34)。

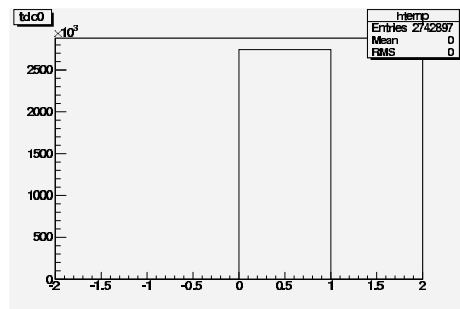


図 33: main11 から main19 の thin TDC

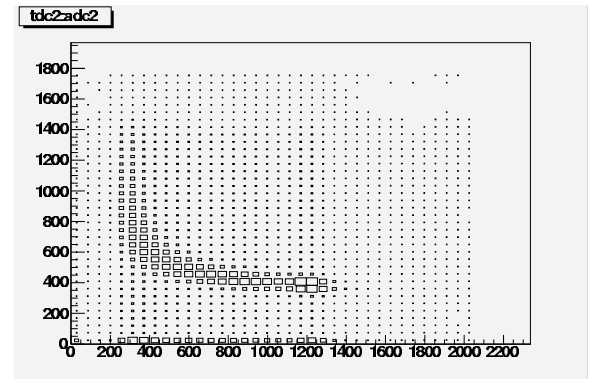


図 34: 問題の部分の GSO data 異常なし

また、GSO の gain が変動したことによる TDC の shift も気になります (図 35)。確かに変動しているもののしっかりと 300 - 500 ch には収まっています。

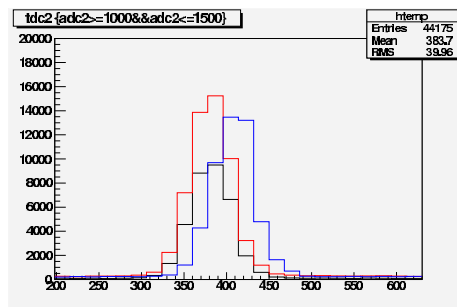


図 35: GSO の TDC の shift 黒 06 赤 16 青 26

最後に、実験中に Excel で作ったグラフを数枚おまけにつけておきます。(TeX ファイルにはなし)