

エアロジェルからの チェレンコフ光の研究

2008年8月

KEKサマーチャレンジ

飯嶋徹、原康二、椎塚晋(名古屋大学)

宮林謙吉、岩下友子、辻知佳(奈良女子大学)

小川了、澤藤奈津子、松尾友和(東邦大学)

石井良和(千葉大学)

足立一郎、西田昌平(KEK・素核研)

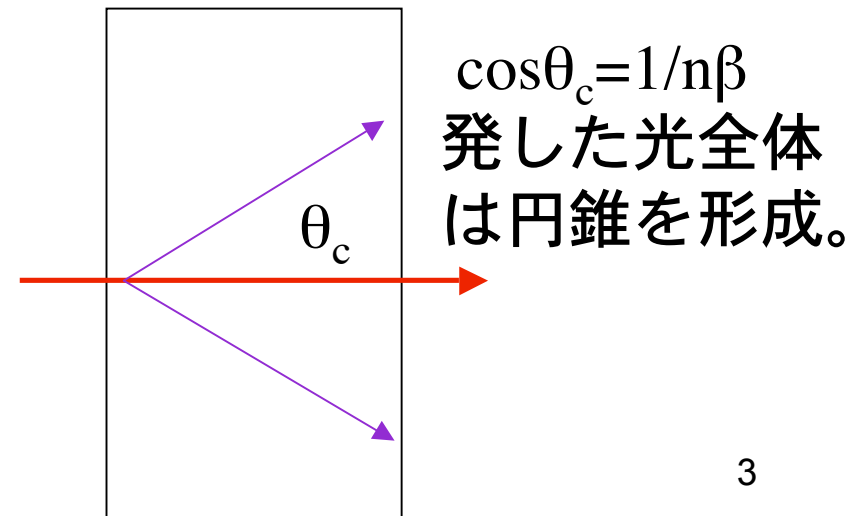
目次

- チェレンコフ光とは？
- エアロジェルとは？
- 実験の目的・目標
- 光電子増倍管
- シンチレーションとは？
- 課題1:エアロジェルの屈折率測定
- 課題2:トリガーカウンターの動作確認
- 課題3:同時係数(Coincidence)
- 信号処理・記録用エレクトロニクス
- 課題4:5インチ光電子増倍管の動作確認
- 課題5:エアロジェルをセット
- 発展課題:屈折率依存性・厚み依存性
- まとめ・考察
- 使用物品リスト

チェレンコフ光とは

- 透明な媒質を、その媒質中の光の伝播よりも速い荷電粒子が通過すると発生。
- 荷電粒子の速度に敏感な発光なので、運動量測定と組み合わせて荷電粒子の識別に利用。
- 水や空気でも発生するので、超大型の検出器が可能（神岡実験など）。

今回の演習では小規模な装置を組み、媒質としてエアロジェルを使用し、チェレンコフ光の基本的性質を調べることにする。



チェレンコフ光とは(続)

- 発生する光子数は次式で得られる。

$$\frac{d^2N}{dx d\lambda} = \frac{2\pi\alpha z^2}{\lambda^2} \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2(\lambda)} \right)$$

α : 微細構造定数=1/137

β : v/c , $c=3\times 10^8\text{m/s}$

$n(\lambda)$: 屈折率(厳密には波長依存性あり、今回は気にしなくてよい)

λ : 光の波長

z : 入射粒子の電荷(通常1)

媒質の屈折率がわかったら、

•媒質の透明度または光電子増倍管の感度がある範囲で λ で積分

•厚み x について積分

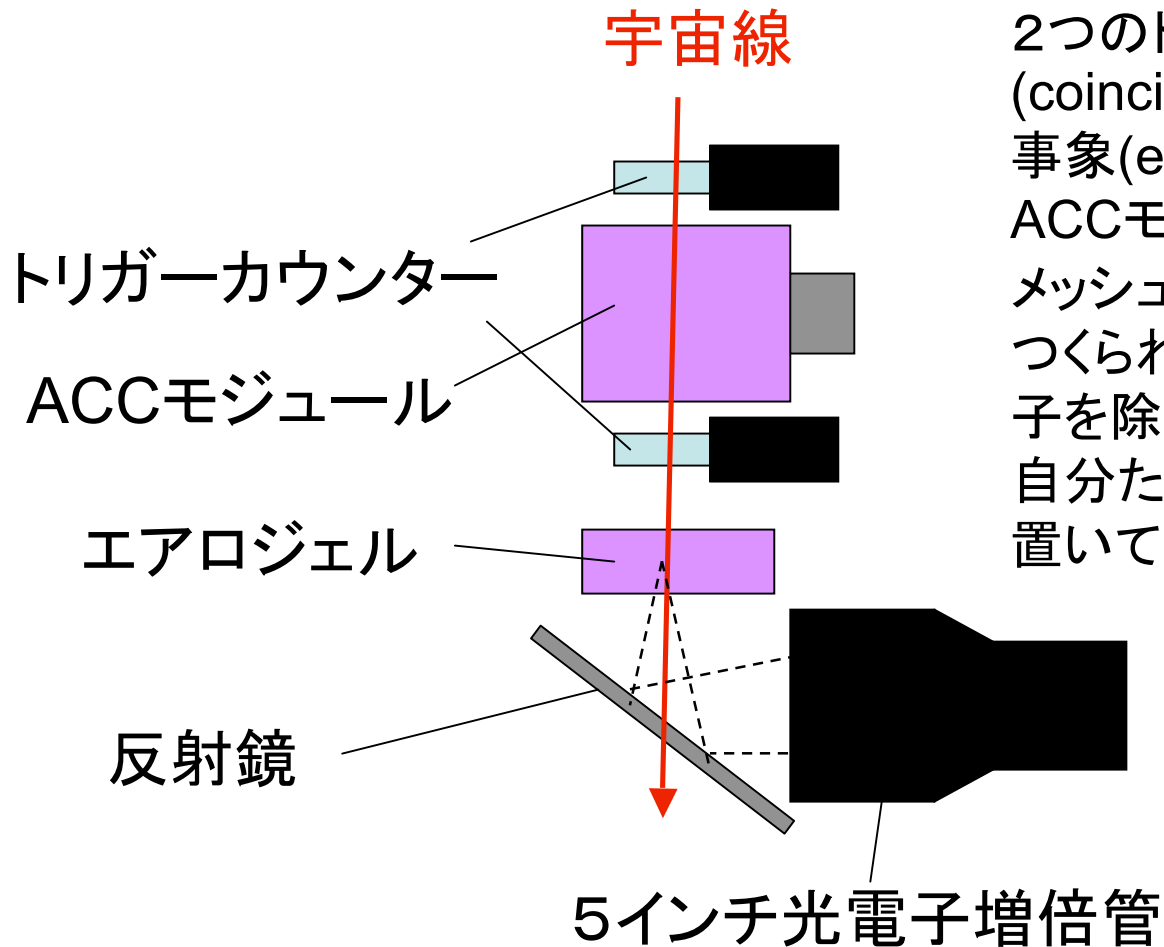
すれば、発生する光子の全数を得る。

エアロジェルとは

- 二酸化ケイ素主体の固体が微細な気泡を多量・均一に含んだもの。シリカゲルの仲間だが、水分を吸うと透明度が落ちるので疎水性のものをKEKで開発した。
- 本実験で用いるのは屈折率 $n=1.05$ 程度のもの。



実験の目的・目標

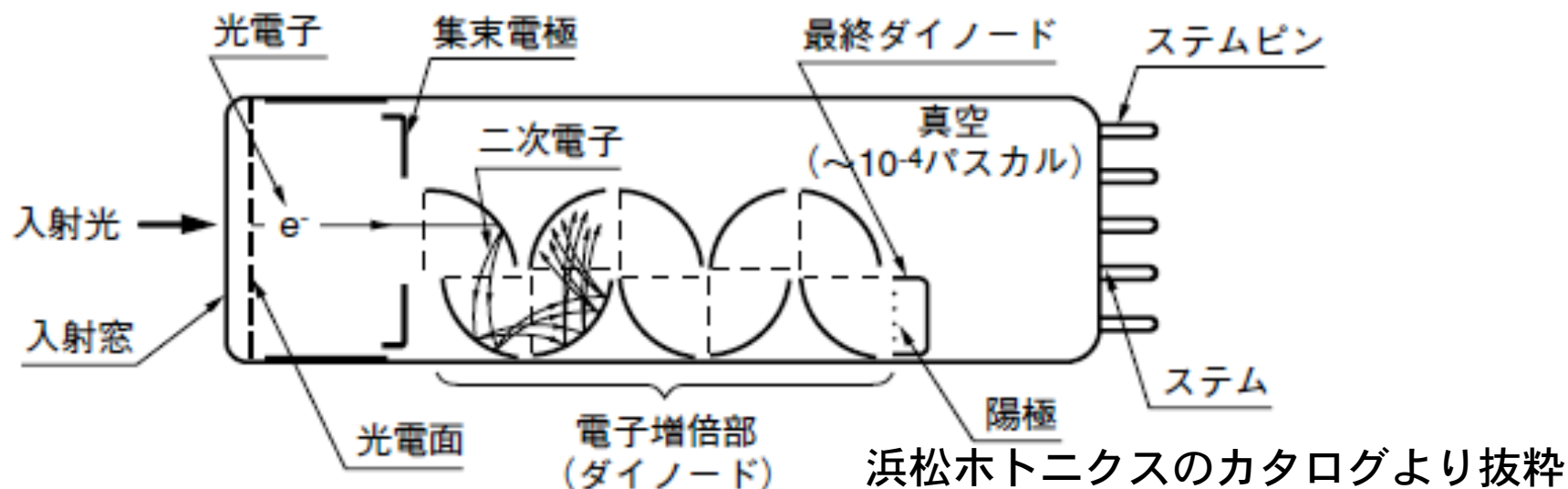


2つのトリガーカウンターの同時係数 (coincidence)により、宇宙線が貫通した事象(event)をつかまえる。

ACCモジュールはエアロジェルとファインメッシュ型光電子増倍管を組み合わせてつくられた、いわば既製品。遅い宇宙線粒子を除くのに使う。

自分たちでエアロジェルと光電子増倍管を置いてチェレンコフ光を検出してみる。

光電子増倍管



光電面：入射窓ガラスの裏側に光電効果を起こしやすい物質を塗布して、光子を光電子に変換。
ダイノード：内部に何段かもうけられている電極。ダイノード間に電位差をつけてあるので、電子がダイノードに当たるたびに新たに電子をたたき出すことによって、電気信号を大きく(=増幅)する。
英語ではPhotomultiplier、略称はPMTあるいはフォトマル。

シンチレーションとは

- 粒子が物質を通過中にエネルギー損失すると、それが結晶中の電子や分子内の電子の励起に使われ、基底状態に戻るときに発光する。
- プラスチックシンチレーター+光電子増倍管の組み合わせは荷電粒子入射に検出に広く用いられている。本実験でも宇宙線の入射・貫通の検出に使用。
- シンチレーションを起こす効率のよい材料をシンチレーターと呼ぶ。
 - 有機物ではプラスチック(ポリスチレン)をベースに波長変換剤を混合したもの等。
 - 無機結晶ではNaI、CsI等。
- 発光量はチェレンコフよりだんぜん多い。

課題1:エアロゲルの屈折率の測定

波長 405nm の紫色半導体レーザーが
回転台上のエアロゲルの角を通過すると、
スクリーン上のスポットがずれる(図1)。
スポットの変位が最小になるように回転台を
回し、そのときのスポットの変位を d とする。
エアロゲルの角が直角のとき、スクリーンまでの
距離を L とすれば、屈折率は式1で表される。
(この方法をフラウンホーファー法と呼ぶ)

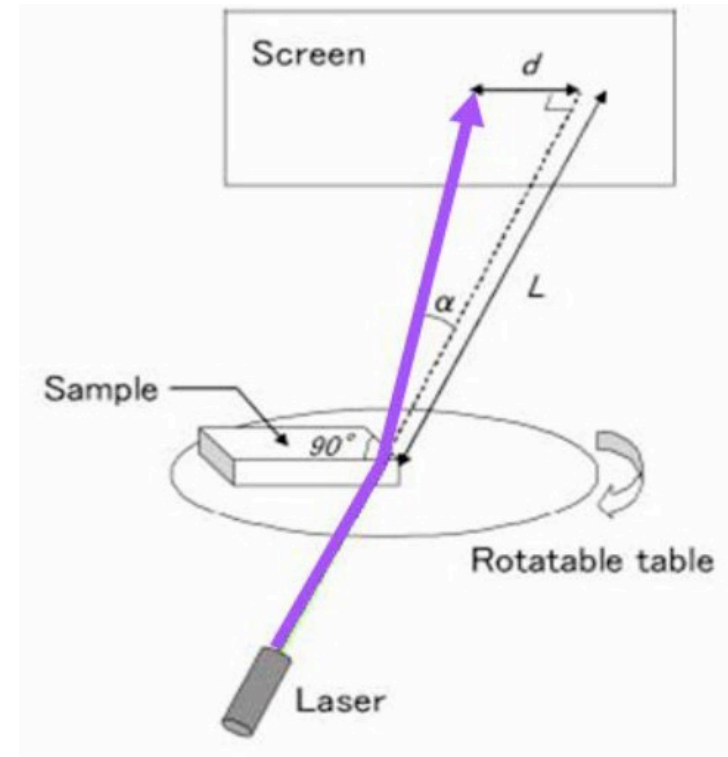


図1

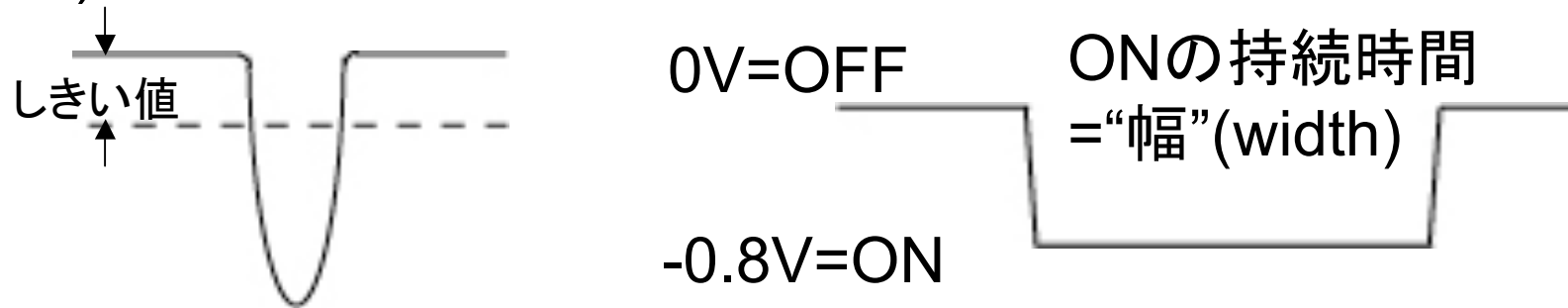
$$n = \frac{\sin\left(\frac{\alpha}{2} + \frac{\pi}{4}\right)}{\sin \frac{\pi}{4}}, \quad \alpha = \tan^{-1} \left(\frac{d}{L} \right) \quad \text{式1}$$

課題2:トリガーカウンターの動作確認

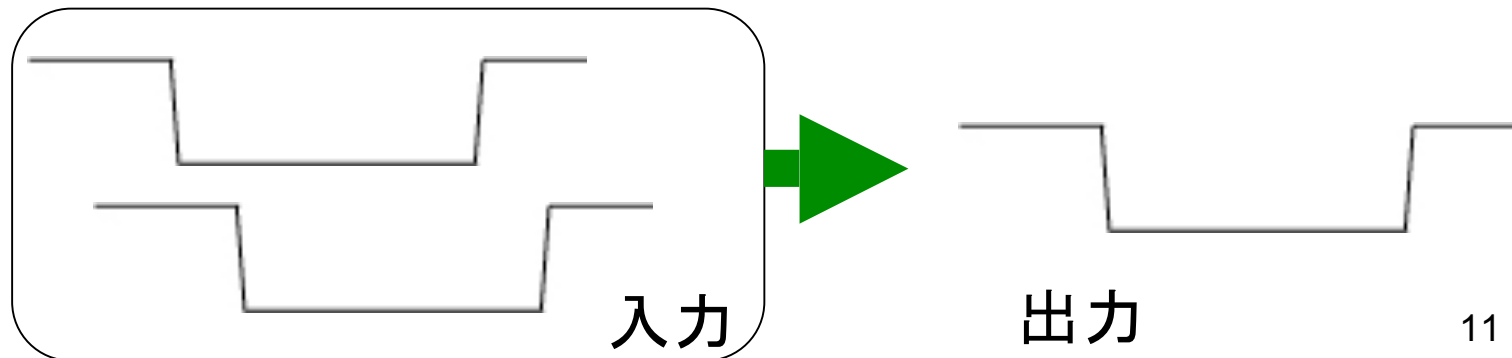
- 宇宙線の μ 粒子が入射し、エアロジェルを貫通した事象を選ぶためのカウンターを置く。これをトリガーカウンターと呼ぶ。
- プラスチックシンチレーター板を光電子増倍管に接着した上、アルミ фоль (反射材) でくるんだ上から遮光テープを巻いたもの。
- 高電圧をかけ、デジタルオシロスコープで信号パルスを観察
 - 光漏れがないことを確認せよ。
 - 2本の有感部を重ねて、同時に信号パルスが出ているか観察せよ。
 - ^{90}Sr の β 線をあてて、信号が出ていることを確認してもよい。

課題3: 同時係数(coincidence)

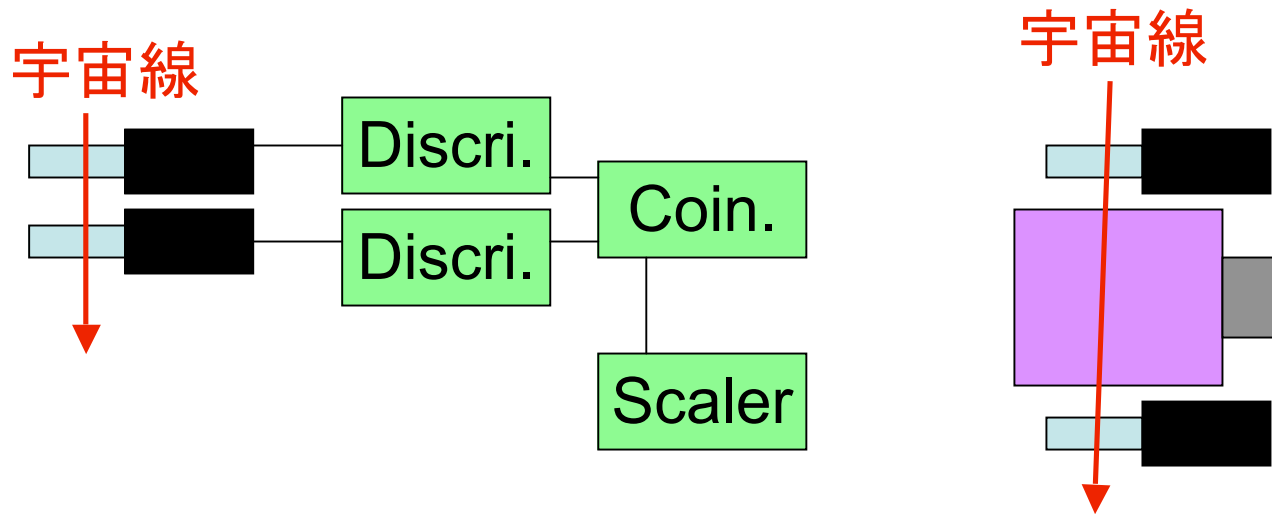
- ディスクリミネーター(Discriminator): しきい値(Threshold)を超えた信号パルスが入力されたときだけ矩形波パルス(NIMパルス)を出力。



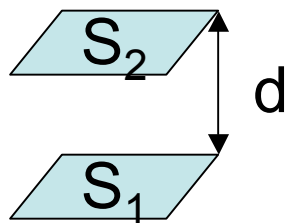
- コインシデンス(Coincidence): 同時にONとなる複数のNIMパルスが入力された場合だけ、NIMパルスを出力(つまりAND回路)。



課題3: 同時係数(続)



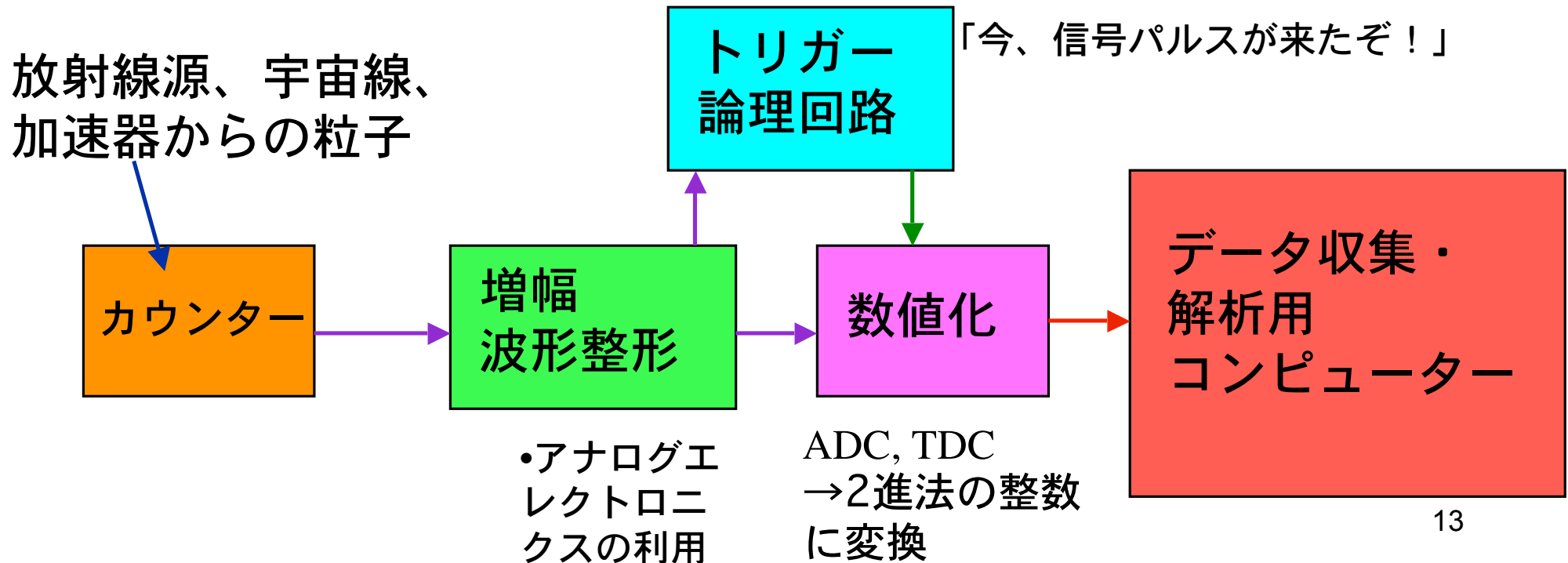
2つのトリガーカウンターの有感部分を重ねて、同時係数の数をスケーラー(Scaler)で数えてみる。
トリガーカウンターの間にACCモジュールを置いた配置でも、同様のことを行う。



宇宙線の同時係数期待値の概算は
 $S_1 S_2 / d^2 \times (1/60)$
 $S_1, S_2 [\text{cm}^2], d [\text{cm}]$

信号処理・記録用エレクトロニクス

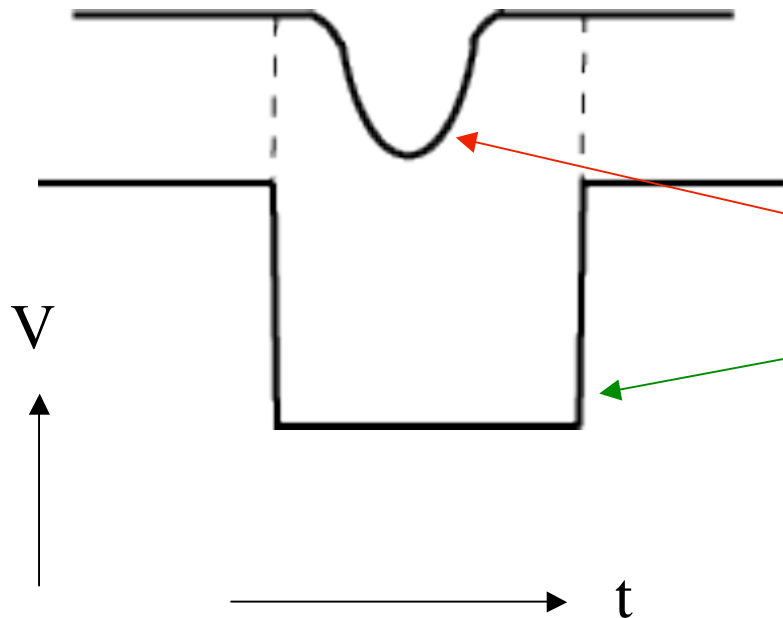
カウンターからの電気信号パルスは一瞬(=数10nsから高々 μs)で終わってしまう。それ以外は記録してもムダ。それで「トリガー」が必要になる。一般的には下図のようになる。



電荷積分型ADC

ON/OFFの論理信号を扱う規格として
NIM信号を使う。

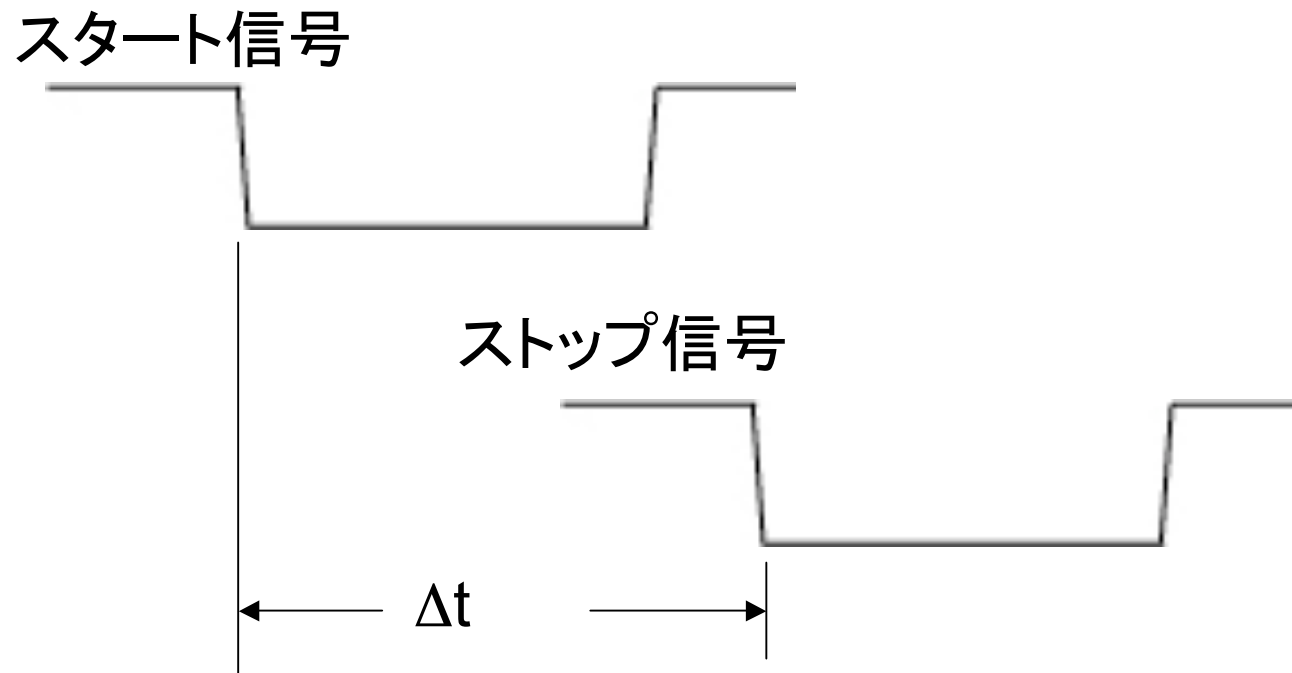
0V:OFF、-0.8V:ONである。



数値化 & 記録したいカウンターの信号
パルスと同時に
NIMのゲートパルスがADCに到着する
ようにしてやる。

本演習で用いるLeCroy2249W型ADC
は、ゲートパルスがONの間のアナログ
入力にきた電荷(=電流を積分)を
対応する整数(カウント)に変換する。
-0.25pC/カウント、11ビットである。

TDC



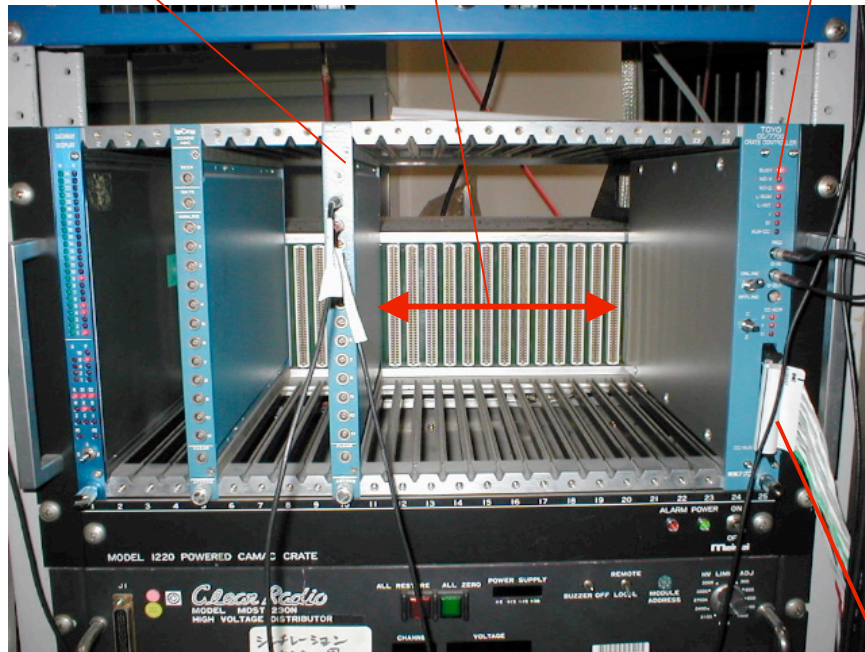
スタート信号とストップ信号の時間差 Δt を数値化する。
RPC060型はスタート信号が共通、25psec/カウント、12ビット。
ストップ信号が来ないときはタイムアウト(=4095カウント)。

CAMACによるデータ読み出し

ADC 命令やデータは
バックプレーンでやりとり

クレート
コントローラー

CAMAC: コンピューター制御でデータの読み出しを行う規格。比較的古くからあるものだが、小規模なカウンター実験では今でも使いやすい。



ADCはゲートパルスを受け取り、信号パルスの数値化が終わるとLAM(Look At Meの略)信号をONにする(「LAMを立てる」という)。クリアする命令によりOFFに戻る。

したがって、PC上では以下のようなアルゴリズムのプログラムを走らせればデータの読み出しと保存ができる。
(→次ページに続く)

カウンターの
信号

ゲート
パルス

PCの
インターフェイスへ

CAMACによるデータ読み出し(続)

1. CAMACの初期化
2. データを書き込むファイルをオープン
3. LAMのenable
4. 該当するADCのLAMをチェック
5. LAMがONならば
 - 該当するADCのデータ(レジスタに書かれている)を読み出し
 - ファイルに書き込み
 - LAMをクリアー
 - LAMのチェックに戻る
6. LAMがOFFならば、ONになるまでLAMのチェックに戻る
7. 4. 5. 6.を必要な回数繰り返す。
8. 必要な回数繰り返し終わったら、ファイルをクローズし、CAMACを終端

これでデータがファイルに書かれている。

これをReadしてヒストグラム(度数分布)にして、さらに解析と議論を進める。

課題4: 5インチPMTの動作確認

- LEDをパルスジェネレーターで発光させ、応答をデジタルオシロスコープで確認。
- 十分に減光して、LED発光に同期したゲートパルスをADCに送って波高分布をとる。
- 波高分布に1光子、2光子...のピークが確認できるか？

課題5:エアロジェルをセット

- 6ページに記したセットアップを組み上げる。
- 組み上がったチームから宇宙線データ収集を開始。
- ゲートパルスは二系統の宇宙線トリガーのORをとって作る。
- どちらの宇宙線トリガーが鳴ったかはTDCで記録して、タイムアウトの有無で場合分けして波高分布を作成すればよい。
- ACCモジュール、「エアロジェル＋反射鏡＋5インチPMT」とも、ゼロ点(Pedestal)以外の波高分布が確認できるか？
- ACCモジュールの波高と「エアロジェル＋反射鏡＋5インチPMT」の波高の相関図(二次元プロット)を作ってみる。
 - ACCモジュールが鳴ったときは、速い宇宙線粒子が入射したとき。
 - そのとき、「エアロジェル＋反射鏡＋5インチPMT」の波高分布は？

発展課題

- セットするエアロジェルの厚みを変えていったら波高分布はどのように変化するか？
- 異なる屈折率のエアロジェルをセットしてみたら波高分布はどのように変化するか？

まとめ・考察

- 実験のセットアップの状況と、収集したデータについて整理する。
- 同時係数が正しく行われていることを、適切な数値やグラフを示して説明する。
- ACCモジュール、「エアロジェル＋反射鏡＋5インチPMT」の波高分布を示す。両者の相関も適切な数値やグラフを示して議論する。
- 発展課題については、データ収集して調べた内容について整理する。

メモ

使用物品リスト

- チェレンコフ光発生用輻射体＝エアロジェル板
- 光電子増倍管(5インチ径)
- 反射鏡
- 速度選別用ACCカウンター
- 宇宙線トリガー用シンチレーションカウンター
- 高電圧電源(これがないと光電子増倍管を使えない)
- 遮光用暗幕および黒色遮光シート(いらぬ光を遮断)
- LED(光電子増倍管を試験する光を発生)
- パルスジェネレーター(LEDを光らせる電気パルスを発生)
- デジタルオシロスコープ
- ハンドヘルドメーター

使用物品リスト(続)

- NIMロジックエレクトロニクス
 - クロックジェネレーター(矩形波パルスの生成)
 - ディスクリミネーター(波高弁別)
 - ゲートジェネレーター(ADCに供給するゲートパルス生成)
 - コインシデンス(AND回路)
 - ファンインファンアウト(OR回路)
- CAMACデータ収集システム
 - 電荷積分型ADC(入力信号パルスの電荷を整数に変換)
 - TDC(スタート信号とストップ信号の時間差を整数に変換)
 - クレートコントローラー(ADCと制御用PCの仲介)
 - 制御用PC(Linux、CAMAC制御ドライバーソフトウェアとCERNLIBをインストール済み)