

# スパークチェンバーの製作

2007年 高エネルギー加速器研究機構サマーチャレンジ演習

担当：首都大学東京 住吉孝行、汲田哲郎、春名毅、遠藤裕介

## 1. 宇宙線

宇宙には、超新星の爆発や太陽表面の爆発などで発生した高エネルギーの粒子が飛び交っている。これは一次宇宙線と呼ばれていて、約90%が陽子、約8%がアルファ粒子（ヘリウムの原子核）、その他の粒子が約1%含まれる。一次宇宙線は、 $10^9$  eV から  $10^{19}$  eV 以上までの広いエネルギー分布をしている。しかし地表面は、大体10メートルの水の厚さに相当する  $1000 \text{ g/cm}^2$  の大気層によって遮蔽されているため、一次宇宙線がそのままの姿で地表まで達することはほとんどない。即ち、地表面で観測される宇宙線は、一次宇宙線が大気中で空気の原子核と相互作用して発生させた二次的なものであり、二次宇宙線と呼ばれる。

一次宇宙線は空気の原子核と衝突して相互作用を起こし、核子（陽子、中性子）や中間子などの素粒子を多く発生させる。これらはさらに空気中の原子核と電磁相互作用や強い相互作用を繰り返し素粒子をつくりだしながらエネルギーを失ってゆく。この過程は大気シャワー現象と呼ばれる（図1）。地表面まで到達する宇宙線は強い相互作用を起こさない電子・ガンマ線やミュー粒子がほとんどで、陽子・原子核や中間子は空気中で吸収されてしまう。

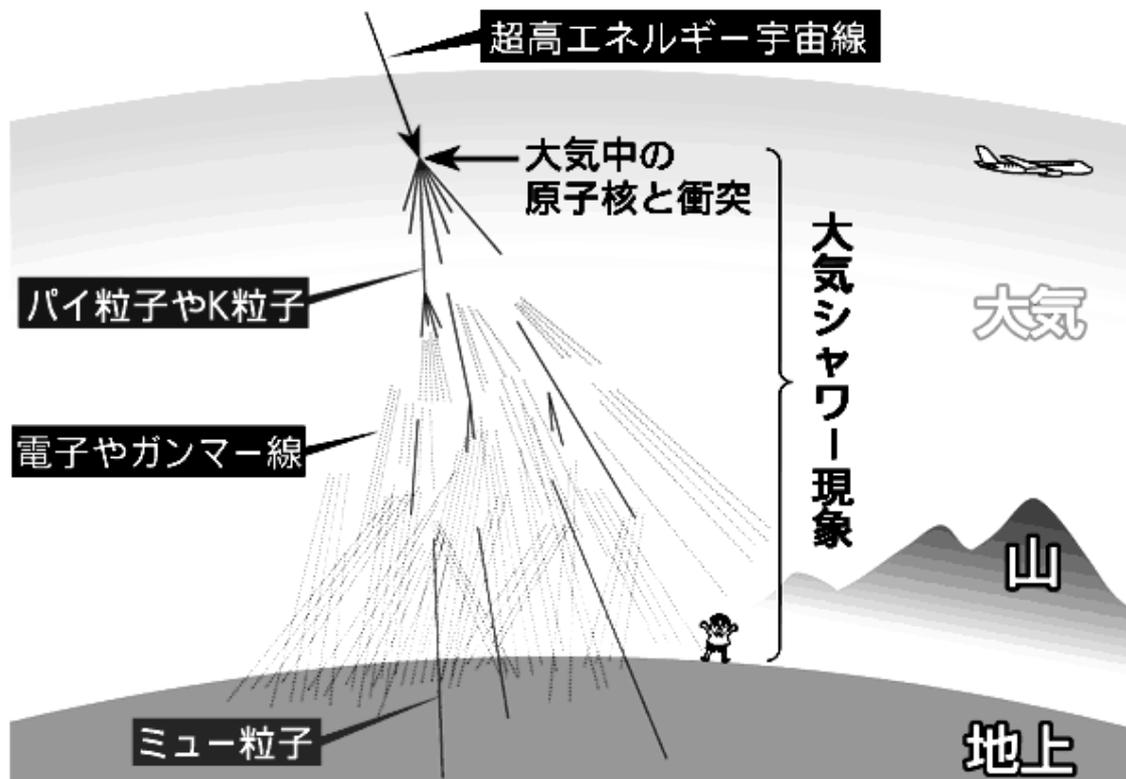


図1：大気シャワーによる二次宇宙線の生成

二次宇宙線の大部分を占めるミュー粒子の天頂角(鉛直上向きを0とした角度)分布は実験的

に測定されている。単位面積・単位時間・単位立体角あたりの粒子数で強度を定義すると、天頂角 $\theta$ から飛来するミュー粒子の強度  $J(\theta)$ は

$$J(\theta) = J(0) \cos^2 \theta$$

$$J(0) = 0.83 \times 10^{-2} / \text{cm}^2 \cdot \text{sec} \cdot \text{sr}$$

で与えられる。ここで、 $J(0)$ は鉛直方向から飛来するミュー粒子の強度である。上の式を積分すると、全方向からのミュー粒子は、1平方センチあたり毎分1個くらいの頻度となる。

## 2. スパークチェンバーの概要

スパークチェンバーは大阪大学の福井崇時、宮本重徳が開発した、荷電粒子の飛跡を観測する装置である。ミュー粒子や電子のような荷電粒子が、物質中を通過すると、周りの分子や原子をイオン化して電子と正イオンを生成することを利用している。

図2に、スパークチェンバーの原理を示す。

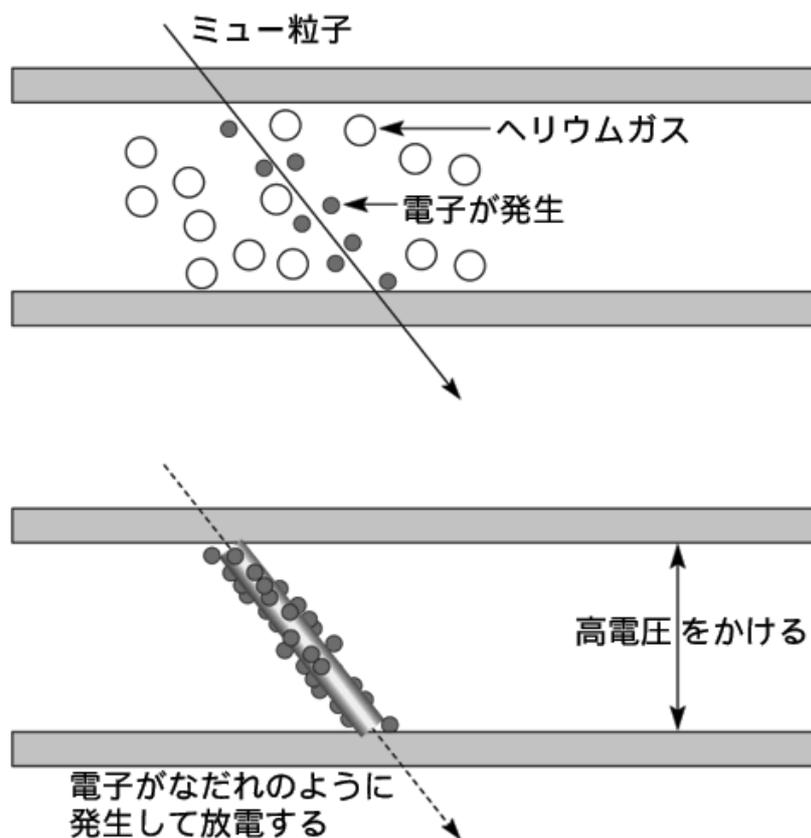


図2：スパークチェンバーの原理

ヘリウムのような不活性気体中に荷電粒子が入射すると、粒子の軌跡の周りの気体原子がイオン化する。この時、気体中に置かれた電極に高電圧を印加すると、電子はプラスの電

圧がかかった電極に引き寄せられて加速される。加速された電子がさらに他の原子をイオン化して電子を生成し、電子数がねずみ算式に増大（電子のなだれ現象）して、電極間に荷電粒子の飛跡に沿った放電（スパーク）が発生する。このような電極対を何枚も並べることにより、荷電粒子の飛跡が放電による発光として目視できる。これがスパークチェンバーの原理である。

電極に高電圧を常時印加しておく、ネオン管や蛍光灯のように、いったん放電が始まると止まらなくなってしまう。そこで、荷電粒子が通過した時だけ電極に高電圧が印加されるような電気回路が必要となる。図3に、システム全体の概念図を示す。スパークチェンバーに宇宙線が通過したことは、電極の上下にプラスチック・シンチレーターを2枚平行に置き、両方が同時に発光したことにより検出することができる。シンチレーターに接続された光電子増倍管から信号が同時に出力された時に電極に高電圧を印加する。

このように、検出器（または、その一部）から得られた情報によって、他の検出器やデータ収集用計算機を動作させるかどうかを決定する信号を、高エネルギー物理学業界では、「トリガー（引き鉄の意味）」と呼ぶ。この実験では、2枚のシンチレーターの同時発光により、スパークチェンバーの動作にトリガーをかけている。（放射線のエネルギー測定では、シンチレーターからの信号により、ADCにトリガーをかけた。）

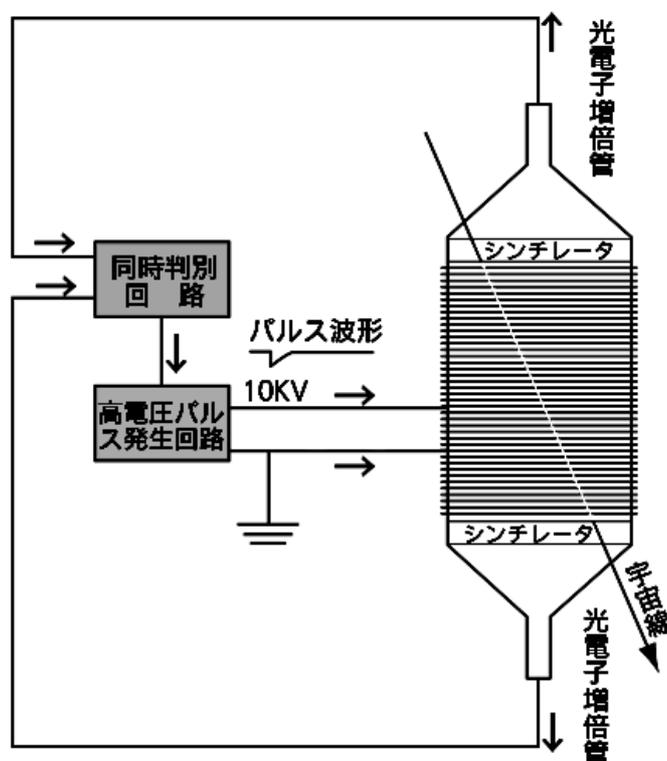


図3：システム全体の概念図

### 3. スパークチェンバー電極の製作

本実験で制作するスパークチェンバーは、図4のような構造をしている。厚さ4mmの亚克力板をアルミ板電極でサンドイッチしたものを各人2枚ずつ製作し、それを重ねることによってスパークチェンバーを構成する。放電による発光は、透明亚克力越しに目視できる。イオン化させる気体にはネオン65%・ヘリウム35%の混合気体を用いる。この気体中では、電子なだれの増幅率が高いことが知られている。

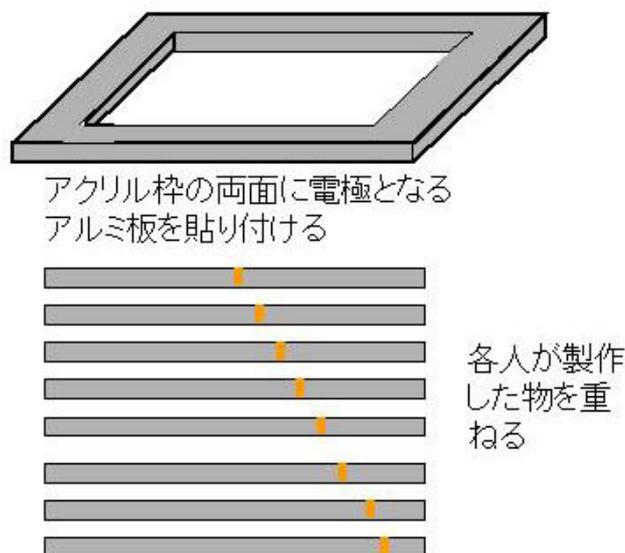


図4：製作するスパークチェンバーの構造

用意された亚克力板に、アルミ板をエポキシ接着剤で接着する。両面に、別の亚克力補強版を被せて、Cクランプで押さえつけ、接着剤の乾燥時間を待つ。両サイドに開けられた穴には、ガス導入用の金属パイプを接着する。

電極間の体積は、 $20\text{cm} \times 15\text{cm} \times 0.4\text{cm} = 120\text{cm}^3$ である。

### 4. 電子回路

図5にトリガー電子回路の概念図を示す。トリガー回路の構築にはNIMモジュールを用いる。光電子増倍管からの信号は、ディスクリミネーターに入力される。ディスクリミネーターは入力信号が設定された電圧以上(この実験では20mV)の時にデジタル信号を出力する。NIMモジュールでは、デジタル信号は電圧-0.8Vのパルスである。

図6に、オシロスコープで観測した光電子増倍管からの信号とディスクリミネーターからの信号を示す。光電子増倍管からの信号が入力された直後(20ナノ秒以内)に、ディスクリミネーターから-0.8Vの矩形パルスが出力されていることが分かる。

同時判別回路(coincidence)は二つのディスクリミネーターからの信号が同時に入力された時にデジタル信号を出力する。ここで「同時」というのは、50ナノ秒程度以内の時間差

であり、これは光が 15m 走る時間に相当する。ゲート・ジェネレーターは同時判別回路からの出力パルスの幅を長くするために用いる。スケーラーによって検出した宇宙線の数をカウントする。

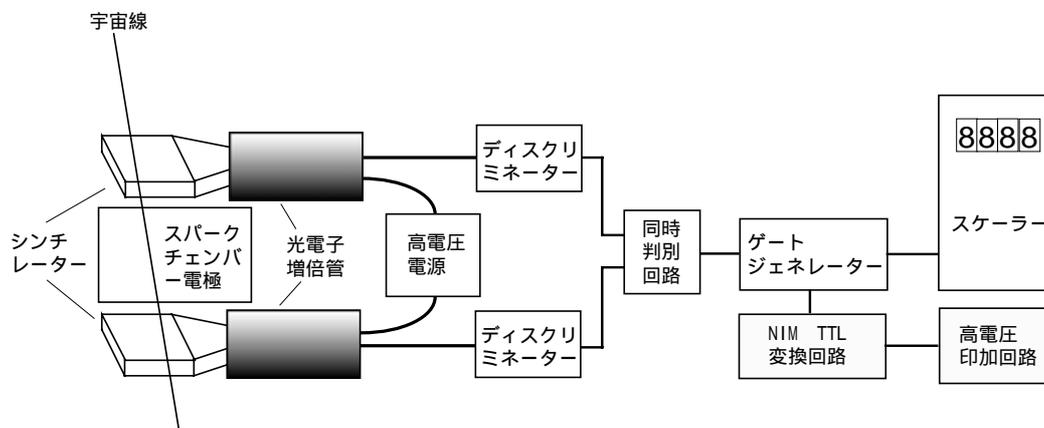


図5：トリガー電子回路

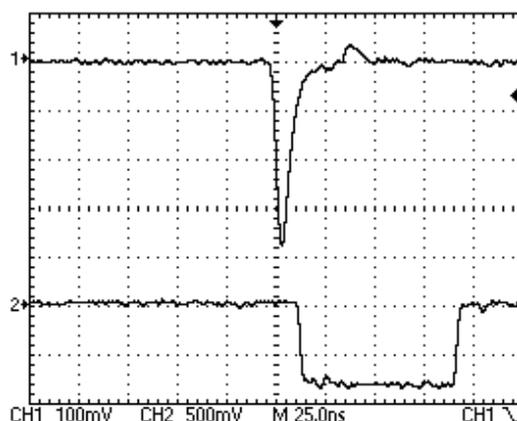


図6：光電子増倍管(上)とディスクリミネーター(下)からの信号

スパークチェンバーの電極には約 10kV の電圧を印加するが、これを電氣的に ON/OFF するために、高電圧スイッチとしてサイリスター(SCR)を用いる。SCR は高電圧大電流を制御可能なトランジスターの一種であり、この実験で用いる SCR は 5V の入力信号によって、最大 12.8kV、1000A の電圧・電流を制御できる。電極には、宇宙線によってイオン化されたガスの電子とイオンが再結合してしまう前、1 マイクロ秒以内に高電圧を印加する必要がある。実験で用いる SCR は 500 ナノ秒以内に 10kV の電圧をスイッチできるが、実際に短時間で電極に高電圧を印加するためには、回路のインピーダンスを小さくする工夫が重要である。SCR を ON するためには、+5V(TTL レベルと呼ばれる)のパルスを入力する必要がある。そのため、図 5 に示したように NIM 標準デジタル・パルス(-0.8V)から TTL パルスへの変換を行う。図 7 に高電圧印加回路の概念図を示す。

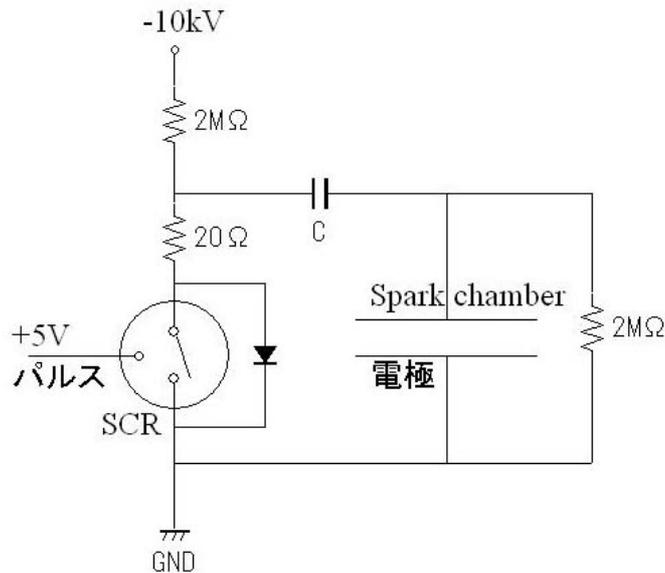


図 7 : 高電圧印加回路

宇宙線が通過していない時には、SCR が OFF になっている。この時、コンデンサー C には、2M の抵抗 2 つを通して 10kV の電圧がかかり、充電されている。この抵抗は、高電圧電源の定格以上の電流が流れないように制限する働きをする。

宇宙線が通過し、SCR に +5V のパルスが入力されると、SCR が ON になる。コンデンサーに蓄えられた電荷は、SCR と 20 の抵抗を通してスパークチェンバーの電極に到達し、電極間には瞬間的に 10kV の電圧が印加されて放電が起こる。電極間の気体(He/Ne 混合ガス)が宇宙線によってイオン化されていれば、放電は、そのイオン化領域に沿って起こり、宇宙線の飛跡を再現する。

SCR に対して直列に接続された 20 の抵抗は、SCR に大電流が流れるのを制限し、並列接続されたダイオードは、回路のインダクタンスの逆起電力により、SCR に逆方向の電流が流れるのを防ぐ(ダイオードがバイパスして電流を流す)ために入れられている。これらがないと SCR が破壊される可能性がある。

電極に印加される電圧は、電極間の静電容量(100 ~ 1000pF 程度)と 2M の時定数で減衰するため、ミリ秒程度の短い時間で放電は終了し、次の放電に備える。

## 5. 高圧ガス

実験で使用する He/Ne 混合ガスは、約 100 気圧(10MPa)の高圧でポンペに蓄えられている。これをレギュレーター(減圧調整器)によって 1 気圧(約 0.1MPa)に減圧して、チェンバー内に導入する。図 8 にレギュレーターの構造を示す。

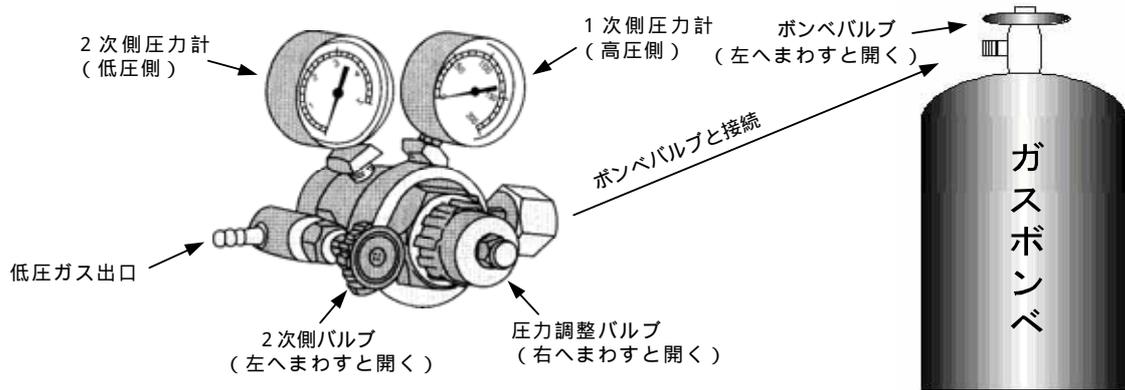


図 8 : レギュレーター (ガス減圧調整器) の仕組み

1 次側圧力計はボンベの、2 次側圧力計はスパークチェンバーを接続した下流側の圧力を表示する。

使用する時には、まずレギュレーターに接続されているボンベバルブを開ける (反時計回り) 開ける角度は少しでよい。1 次圧力計にボンベ内のガスの圧力が表示される。次に、圧力調整バルブで 2 次側圧力を調整する。時計回りでバルブが開き、2 次側圧力が高くなるので注意する。2 次側圧力を 0.1MPa に調整したら、以後は使用後・再使用時にも圧力調整バルブを動かす必要はない。圧力が調整できたら、2 次側バルブを開き (反時計回りで開く) ガスをチェンバーに流す。ガスの流量は、流量計の「浮き」を見ながら 2 次側バルブで調整する。

実験を中断する時は、2 次側バルブ、ボンベバルブの順に閉める。圧力調整バルブは閉じる必要がない。

# 付録：実験装置の説明

このテキストでは、実験に使用するシンチレーションカウンターと電子回路モジュールについて説明する。

## 1 シンチレーションカウンター

シンチレーションカウンターはシンチレーターと光電子増倍管を接続したものである。シンチレーターの中で発生した光は反射を繰り返しながら光電子増倍管に集められる。シンチレーターと光電子増倍管の間には、オプティカル・グリースと呼ばれる透明なシリコン樹脂のグリースを塗って接続する。屈折率がシンチレーターやガラス面と近いグリースを使うことにより、多くの光量を集めるためである。シンチレーターには外から光が入らないようにし、光を反射させるため一番内側にアルミ蒸着マイラーを、その上に黒のビニールテープを巻いてある。光電子増倍管は光だけでなく振動にも弱い為、その取扱は静かに行う。

### 1.1 シンチレーター

シンチレーターとは荷電粒子が通過すると発光する材質で、蛍光の減衰時間が比較的短いものが用いられる。化学組成によって無機シンチレーターと有機シンチレーターに大別出来る。

放射線のエネルギーを測定するためには、主に無機シンチレーターが用いられる。広く使われている無機シンチレーターは、NaI や CsI などの密度が高い結晶である。シンチレーターが放出する光量は、荷電粒子がシンチレーター中の原子を電離・励起して失うエネルギーに比例するが、十分に大きなシンチレーターを用いて荷電粒子を完全に止めれば、全エネルギーに比例した光量を測定できる。無機シンチレーターは密度が高く、発光量が大きいので、エネルギー測定に適している。反面、蛍光の減衰時間が長い為、放射線の飛来時間の測定には向いていない。 $\gamma$ 線は中性粒子であるが、密度の高い物質中では、光電効果やコンプトン散乱によって電子をはじき出すので、無機シンチレーターは $\gamma$ 線のエネルギー測定にも使用できる。

放射線の飛来時間を観測する目的には、有機シンチレーターの一種であるプラスチックシンチレーターがよく使われる。これはスチレン又はビニールトルエンの中に第一溶媒（ターフェニール等）、第二溶媒（POPOP 等）を溶かして重合させたものである。安定で加工も容易であり、任意の形や大きさのものをつくることができる。有機シンチレーター内に荷電粒子が通過すると、分子中の電子が励起される。そしてこの状態から分子間の特殊な相互作用によって可視光を出す。プラスチックシンチレーターは、蛍光の減衰時間が短いため、飛来時間測定に適している。反面、密度が低く、発光量が小さいため、エネルギー測定には適していない。

### 1.2 光電子増倍管 (photomultiplier tube(PMT)、フォトマル)

シンチレーターから出た光は、光電子増倍管表面にある金属薄膜で出来た光電陰極 (photocathode) に当たり、光電効果によって電子が 20 %程度の効率で飛び出

す。これを光電子という。この電子は管内の静電場によって加速されて第1段の2次電子電極 (dynode) に衝突する。この時、金属内の電子が新たに飛び出してくる。これを2次電子という。ここで1個の入射電子に対し3~4個の2次電子がつくられ、これが次の第2段2次電極でさらに3~4倍に増幅される。こうして最終段の陽極 (anode) では、光電子1個あたり、 $10^7$  個程度の電子に相当する電流パルスを得る。電子数の増幅のため、光電子増倍管には2kV程度の高電圧を印加する。

光電子増倍管は、全く光が入らないときでも小さな信号を出力する。これを暗電流 (dark current) と呼ぶ。主な原因は、絶縁体を通しての高電圧漏洩、残留ガスのイオン化、陰極面やダイノードからの熱電子放出などが考えられる。暗電流による信号を宇宙線からの信号と区別するために、電子回路を工夫する必要がある。また、シンチレーターの遮光に使用しているアルミ蒸着マイラーやビニールテープに小さな穴が開いていると、光電子増倍管は蛍光灯の光を検出して、高い頻度で信号を出す。この「光漏れ」を防ぐために、遮光には注意が必要である。

## 2 電子回路

この実験には、NIM(Nuclear Instrument Module) と呼ばれる電子回路システムを用いる。NIMは、原子核・素粒子・宇宙物理実験などで使用される高速エレクトロニクスの規格であり、10ナノ秒程度の時間精度で信号を扱うことができる。このような高速電気パルスの伝送には、中心に信号線、外側にグラウンドの網線を配した同軸ケーブルを用いる。同軸ケーブルには、目的によって一般的なBNCコネクタだけでなく、小型のLEMOコネクタや、高電圧用のSHVコネクタが付属している。NIMはbinと呼ばれる筐体の中に、各種のモジュール化された電子回路を差し込んで使用するようになっている。各モジュール間の配線は、主にLEMOコネクタが付属した細い同軸ケーブルで行なう。この実験では、高電圧電源、ディスクリミネーター、コインシデンス、ゲート・ジェネレーター、スケーラー等のモジュールを使用する。NIM bin電源と高電圧電源のトグル・スイッチは、安全のため、手前に引きながらでないとON/OFFできないので、注意する。NIM規格の電子回路は、アナログ信号とデジタル信号を扱う。一般的なTTLデジタル回路では、0Vと+5Vに二進数の0と1を対応させているが、NIM規格では0Vと-0.8Vが、それぞれに対応している。

1. 高電圧電源：一つのNIMモジュールの中に4つの電源が入っていて、独立に電圧を調整することができる。光電子増倍管への高電圧供給に用いる。使用するのは負電圧電源である。光電子増倍管への配線は、SHVコネクタのついた赤色の高電圧用同軸ケーブルで行なう。4つの独立電源は、チャンネルと呼ばれる。モジュールの背面に各チャンネルに対応した4つのSHVコネクタが配置されている。各チャンネルの電圧コントロールはモジュール前面のダイヤルで行なう。LED表示器下の、左のボタンでチャンネルを選び、右のボタンでVOLTを選ぶと、各チャンネルが出力している電圧をデジタル表示できる。
2. ディスクリミネーター (波高弁別回路)：ディスクリミネーターは、設定した閾値より大きな信号が入力された時に、デジタル信号 (NIM規格 -0.8V) を出力する装置である。光電子増倍管からの出力をディスクリミネーター

に入力し、電氣的ノイズやダークカレントによる小さい信号を取り除いて、放射線による信号の可能性が高い、大きい信号だけを取り出すのに用いる。この実験では、閾値を  $-20mV$  程度に設定する。光電子増倍管は負極性の信号を出力するため、 $-20mV$  よりも（マイナス側に）大きい信号が入力された時に、デジタル信号が出力される。一つの NIM モジュールの中には、独立した 8 チャンネルのディスクリミネーターが入っている。閾値電圧は、各チャンネルごとに  $V_{TH}$  と印された調整ネジを精密ドライバーで回転して行なう。設定されている電圧は、各調整ネジの直ぐ上の黄色く縁取りされた端子とモジュール下部にある G 端子（グラウンド）との間の電圧をテスターで測定することによって知ることができる。出力パルスの時間幅は、W(WIDTH) 調整ネジで調整する。この実験では、 $50nsec$  程度に設定する。 $-20mV$  以上のパルスを入力して、出力をオシロスコープで観測しながら時間幅を調整する。この時、入力には光電子増倍管ではなく、クロック・ジェネレーター（一定の間隔で NIM 規格のデジタル・パルスを出力する NIM モジュール）を使用すると便利である。

### 3. 同時判別回路

同時判別回路 (coincidence) は、一般的なデジタル回路では AND 回路と呼ばれる。ディスクリミネーターからの出力を、同時判別回路の INPUT に入力し、同時に入力があった時に出力を出す。ディスクリミネーターの出力パルス幅が  $50nsec$  である場合、2つのチャンネルからの信号が  $\pm 50nsec$  の範囲内で来た時に、信号が同時に入力されたと判断する。

### 4. スケーラー

NIM 規格信号のパルス数を数えるカウンターで、カウント数はデジタル表示される。START スイッチで計測を開始、STOP で計数を中断する。RESET でカウント数を 0 にリセットする。

## 3 実験にあたっての注意事項

1. 装置が並べられている裏側や電源の放熱板や光電子増倍管の中などに触らない。高電圧がかかっているので危険である。
2. 電圧を上げ下げする時には、必ずダイヤルをゆっくりと回すようにする。速く回すと、電子回路を壊す恐れがある。また、高電圧用同軸ケーブルを抜き差しする時は、必ず、電圧を 0V に下げてから行なう。
3. 光電子増倍管の最大電圧は  $-2.5 kV$  である。絶対にこの電圧を越えないように注意する
4. 高電圧電源から光電子増倍管に繋がれたケーブル、光電子増倍管からディスクリミネーターに繋がれたケーブルを抜き差しする時には、必ず、高電圧がかけていないことを確認してから行なう
5. 高電圧電源を切るときは電圧を 0V に下げてから切る。
6. シンチレータと光電子増倍管は機械的に弱いので衝撃を与えないように注意する。光電子増倍管はガラス製であり、特にシンチレータと光電子増倍

管の接着部は弱い。シンチレータの回りの黒いテープは剥がれたり、破れたりすると光漏れを起こし、光電子増倍管はシンチレータ光以外の光を計数してしまう。強い光が入ると光電子増倍管を破壊してしまう。

7. 光電子増倍管は測定を始める 5 分程前に電源を入れて温めておく。