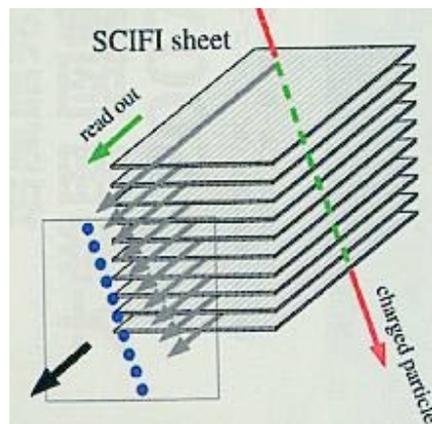


演習番号 4: 地球に降りそぐ宇宙線を見る！
～シンチレーティングファイバーシート飛跡検出器の製作と宇宙線の測定～

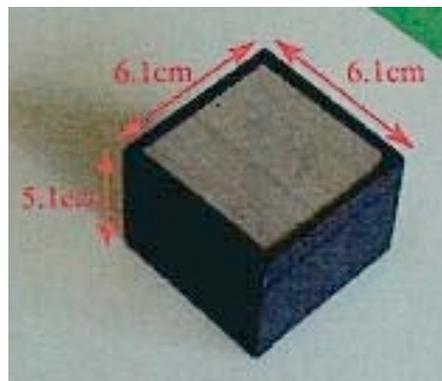
第1回

高エネルギー加速器研究機構サマーチャレンジ(KEK素粒子・原子核サマースクール)

平成19年8月21日(火)～8月29日(水)



SciFi ブロックによる荷電粒子の観測



SciFi ブロックの例

講師 : 原俊雄(神戸大学大学院理学研究科)
青木茂樹(神戸大学大学院人間発達環境学研究科)
山本和弘(大阪市立大学大学院理学研究科)
鈴木州(神戸大学大学院理学研究科)
石田卓(高エネルギー加速器研究機構)

TA : 田村直樹(神戸大学大学院理学研究科)

1. 実験課題の概要と目的

シンチレーティングファイバー（以下 SciFi と記す）は、太さ 1 mm 程度のプラスチックファイバーに「シンチレーション物質」をまぜたものです。この中を荷電粒子（陽子、 μ^{\pm} 粒子、 π^{\pm} 中間子、電子、陽電子など電荷をもつ素粒子）が通過するとシンチレーション光を発生します。発生した光は、通常の光ファイバー中と同様にファイバー表面で全反射を繰り返しながら、ファイバーの端まで伝わって来て、端で光っているのが見えます。一つのファイバーが覆える面積は小さいので、それを多数並べて1枚のシート状にしたものをシンチレーティングファイバーシート（SciFi シート）と呼びます。さらに SciFi シートをいくつか重ねて固まりにしたものをシンチレーティングファイバーブロック（SciFi ブロック）と呼びましょう。SciFi ブロックに荷電粒子が通過すれば、何が起こるのでしょうか？ 荷電粒子が通過したファイバーだけが光り、SciFi ブロックの端面で視していると、荷電粒子の通過した跡（飛跡と呼びます）がファイバーの端での光として連なって見えます。この光はとても微弱で人間の目では見えないでしょう。そこで、先端科学技術の高感度撮像管（Image Intensifier Tube, IIT と略称）を使って視るのです。

この演習では、シンチレーションファイバーから、SciFi シート、SciFi ブロックをできるだけ自作してもらいます。さらに、IIT と SciFi ブロックを組み合わせて宇宙線を観測します。そして、宇宙線の到来方向分布の測定を行い、到来方向の理論的予想値と合致するか否かを確かめかす。

地球表面には、今このときもミュー粒子と呼ばれる荷電粒子がたくさん降りそそいでいます。このミュー粒子のように宇宙から地球に降りそそいでいる粒子のことを宇宙線と言います。シンチレーティングファイバーシート飛跡検出器を作りましょう。そして、地球に降りそそぐ宇宙線を視みましょう。

2. ファイバーシート切り出しとファイバーブロックの製作

具体的には、実物を目の前にして説明します。ファイバーブロック製作の手順を以下に示します。

I 直径が 0.7mm のシンチレーティングファイバーを 2 層俵積みにしたシンチレーティングファイバーシート（幅 40cm、長さ 2.4m）を用意する。（KEK における K 2 K 実験に用いたシンチレーティングファイバーシートを利用する。）

↓

II 幅 8cm、長さ 10cm のファイバーシートを、超音波カッターで切り出す。

↓

III 厚さ 1cm の黒アクリルで作成したブロックの中に、II のファイバーシートを接着剤アラルダイトで接着しながら高さ 6cm になるまで重ねる。

↓

IV 約 1 日間乾燥させたあと、ファイバー端面を、KEK の工作センターのフライス盤で研磨加工する。最終的には、ラッピングシートで最終研磨加工をしてできあがる。

3. トリガーシステム

3.1 概要

イメージインテンシファイア (IIT) による画像の取り込みは、常に行われるわけではなく、外部から画像取り込みのタイミング信号を与えなければならない。このタイミング信号を与える行為をトリガーと言い、その信号をトリガー信号と言う。本実験では、シンチレーティングファイバーブロックの周り 4 面をプラスチックシンチレータで囲み、4 面中 2 面を宇宙線 (矢印) が通過した時にトリガー信号を発することにする (図 3-1)。

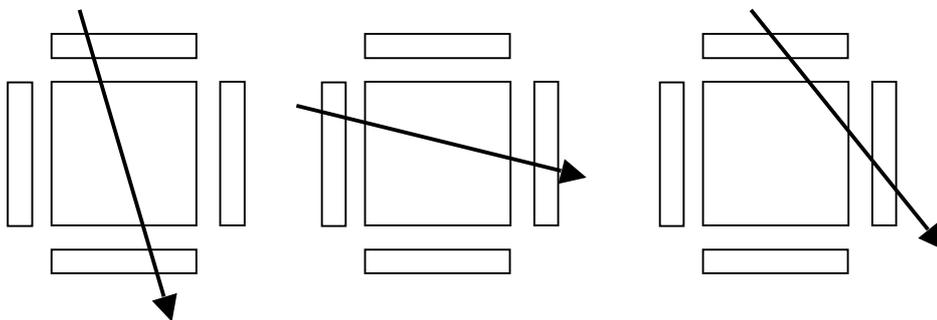


図 3-1 検出器の正面図。ファイバーブロック (中央の正方形) の周囲 4 面をプラスチックシンチレータで囲み、4 面中 2 面を宇宙線 (矢印) が通過した時にデータを取得するようにセッティングする。

プラスチックシンチレータとは、プラスチックに発光物質を混ぜ、荷電粒子が入射すると励起の後の緩和現象の一環として起こる発光をしやすいとしたものである。その光は微弱であるので、光電子増倍管で増幅する。この、シンチレータと光電子増倍管の組み合わせをシンチレーションカウンターといい、本実験ではトリガーをかけるカウンターでもあるので、特にトリガーカウンターと呼ぶことにする。光電子増倍管からの信号をまず **discriminator** という電子回路モジュールに入力する。**Discriminator** とは、あらかじめ設定した閾値を越えた波高の信号が来たときに出力してくれるモジュールで、これにより荷電粒子による信号とノイズとを区別する (荷電粒子による信号は、ノイズより大きいと考えられる)。**Discriminator** の出力信号 (-800mV の矩形波) を **coincidence module** に集めるが、その出力条件を 4 入力中 2 つの入力から信号が来たときに設定しておく。**Coincidence module** の出力信号も -800mV であるが、これをさらに **level adaptor** を介して TTL 信号 (+5V の矩形波) に変換してからトリガー信号として IIT に与える (IIT へのトリガー信号は、TTL でなければならない)。

3.2 トリガーカウンターの製作

本実験で用いるプラスチックシンチレータの 1 辺は 10cm、それに対して光電子増倍管の光電面の

直径は 5cm である。プラスチックシンチレータからのシンチレーション光をライトガイドを通じて効率良く光電面に集める。プラスチックシンチレータとライトガイドの接着にはオプティカルセメントを用いる。ライトガイドと光電子増倍管は接着せず、後で分離可能なようにグリースを用いて接触させる。この後、光電子増倍管に外部からの光が入らないよう、ブラックテープなどを用いて遮光する。

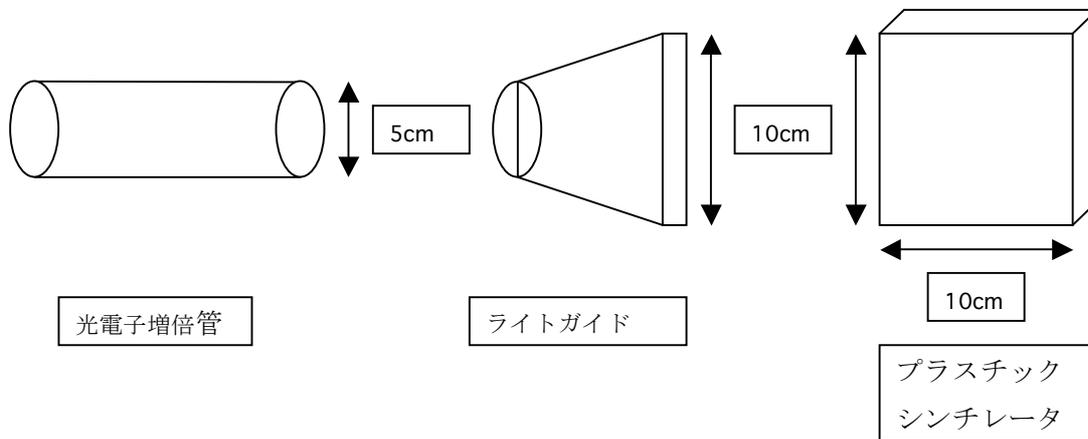


図 3-2 トリガーカウンター。ライトガイドとプラスチックシンチレータはオプティカルセメントで接着するが、光電子増倍管とライトガイドはオプティカルグリースで接触させるだけにする。

3.3 出力信号の確認

トリガーカウンター製作後、光電子増倍管に高電圧をかけ、外部からの光の入射（光漏れ）がないか、宇宙線の信号が得られるかなどをオシロスコープ等で確認する。3.1 で述べたようにモジュール類との結線を行い、4つの信号のタイミングがそろっているか等の確認をオシロスコープを用いて行う。トリガーカウンターをシンチレーティングファイバブロックの周囲に固定し、全体にトリガーシステムとして正常に作動することを確認する。

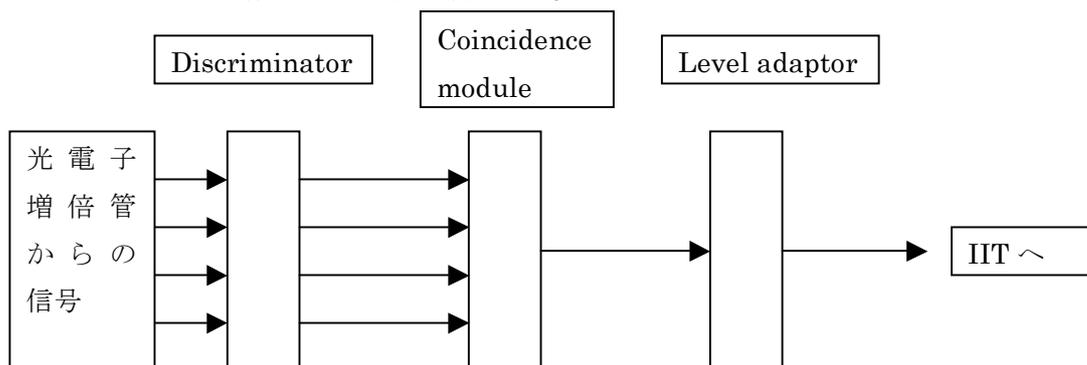


図 3-3 電子回路モジュール類の結線

4. イメージンテンシファイア (I.I.T.)

シンチレーティングファイバーからの光は、光子の数にして 10~100 個程度ですので、その読み出しには超高感度の撮像デバイスが必要となります。微弱な光の検出器としては神岡実験などでも使われている光電子増倍管 (PMT) が知られています。PMT は入力窓面で光子を光電効果により電子に変換し、その電子を高電圧によって増殖させて電荷信号としてとらえるデバイスです。光を電子に変換することは同じですが、イメージンテンシファイアは (IIT) 位置情報を画像として保持しつつ、出力窓面で電子を光に戻し画像として増強するデバイスです。血管造影やバリウムによる胃透視など医療の現場で使用されたり、夜間戦闘用ゴーグルなどで使われています。

図 3-1 にいろいろなタイプのイメージンテンシファイアを示します。どのタイプも入力窓の光電面で光を電子に変換し、その電子を増殖したり加速した上で出力窓の蛍光面に打ち込むことによって、もとの光よりもたくさんの量の光を発生させます。図 4-1 に示すとおり、イメージンテンシファイアは電子の結像方法によってインバーター型と近接型に大別され、画像の増倍方法によって第 1 世代、第 2 世代と区別されます。

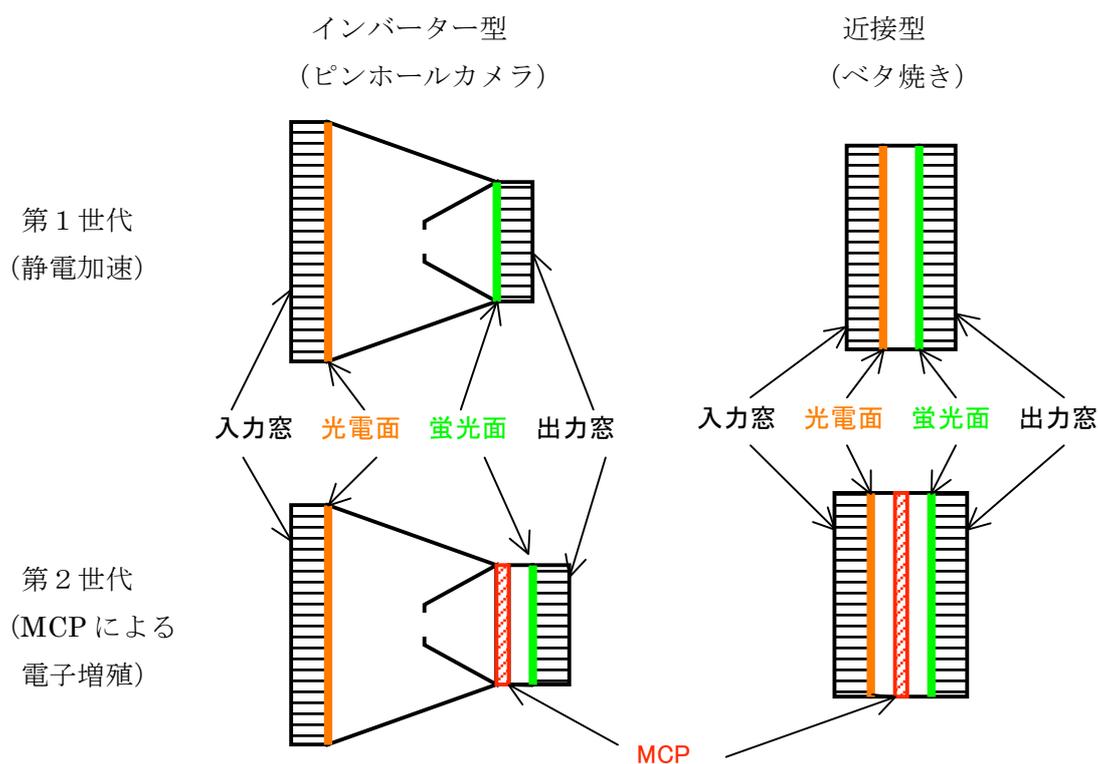


図 4-1 : イメージンテンシファイアの分類

また、それぞれのタイプのイメージンテンシファイアの特徴を図 4-2 に示します。

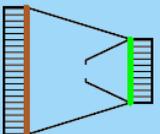
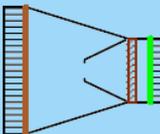
結像法 増倍法	インバータ型 (ピンホールカメラ)	近接型 (ベタ焼)	
第1世代 (静電加速)			<ul style="list-style-type: none"> ・加速電圧が十分高ければ 検出効率は光電面のQEに 準ずる ・ゲインは高くない
第2世代 (MCPによる増殖)			<ul style="list-style-type: none"> ・高ゲイン ・線形性は低下(電子増殖 初期の統計的ゆらぎに起因) ・単光電子レベルの入力では 検出効率が低下 (MCPの開口率のため)
	<ul style="list-style-type: none"> ・画像の縮小が可能 →大口径化が容易 	<ul style="list-style-type: none"> ・光学系による歪なし ・磁場中でも使用可能 ・大口径化は困難 	

図4-2：タイプ別のイメージインテンシファイアの特徴

イメージインテンシファイアの特徴としては、微弱光の画像を可視化することに加えて、電子の加速電圧を ON/OFF することで、超高速シャッターが実現可能なことがあげられます。今回の実験では、第1世代と第2世代のイメージインテンシファイアをそれぞれ前段、後段に使用し、前段の出力蛍光面で保持している画像に対して、後段で高速シャッターをかけることによって、宇宙線が通過した瞬間の画像だけを可視化するようにし、光が当たらなくても熱的に発生する電子による信号(暗電流とか熱電子ノイズと呼びます)を抑制するようにしています。

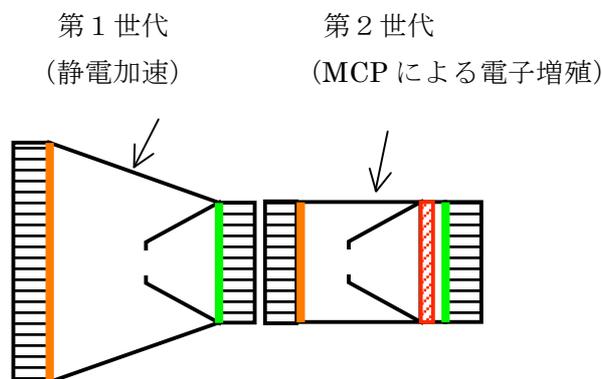


図4-3：イメージインテンシファイアチェーン
(複数のイメージインテンシファイアをつないだもの)

5. イメージインテンシファイアからの画像データの取り込み

イメージインテンシファイアで明るさを増幅された画像は、装置の最後尾に取り付けられている CCD カメラに投影されます。CCD という呼び名は Charge Coupled Device の頭文字を取ったものですが、日本語では“電荷結合素子”と呼ばれています。約 $10\mu\text{m}$ 四方の半導体ピクセルが敷き詰められた構造をしており、光を当てると各ピクセルが光の強さに応じた数の電荷を蓄積します。これらの電荷をピクセルの順番に読み出すことによって画像の取得を行います。CCD は、デジタルカメラ等で使われるようになってからは日常生活でも非常に身近な存在になりました。今回の実習で用いられている CCD カメラはモノクロ動画用のもので、NTSC 規格と呼ばれるビデオ信号で画像が出力されます。NTSC は日本やアメリカで一般家庭用 TV のビデオ信号として採用されている規格で、その信号は 1 秒間に 30 枚の走査フレームで構成されています。各フレームの総走査線数は 525 本ですが、この 525 本のうち画像信号を含んだ有効走査線は 485 本で、表示に使われていない走査線は、垂直同期信号、垂直帰線などに使われます。CCD カメラから出力されたこのようなビデオ信号は、パソコンに搭載された画像キャプチャーボードへと入力されます。画像キャプチャーボード上では、入力されたビデオ信号が NTSC 規格に従って解釈され、デジタル変換された後にメモリーに蓄積されます。パソコンはメモリーにアクセスすることによって画像データを参照します。

ここまでは、一般でも最近普及している、パソコンでの TV 録画と同じ流れなので、イメージしやすいと思います。ただし、TV 録画のように全ての画像を保存し、後から 1 枚ずつコマ送りをさせながら宇宙線の画像を探すのは大変です。従って、宇宙線がシンチレーティングファイバーに入射したタイミングで“トリガー信号”を画像キャプチャーボードに入力し、これが入力されたときのビデオ信号のみを選択的に保存します。(図 5-1) こうすることによって目的の画像を効率よく集めることができます。この実験テーマでは、画像データの収集作業を Windows XP のソフトウェアで行います。データは後で解析を行いやすいように専用のフォーマットでハードディスクに保存されます。ソフトウェアの使い方の詳細は当日の実習時間に指導を受けてください。

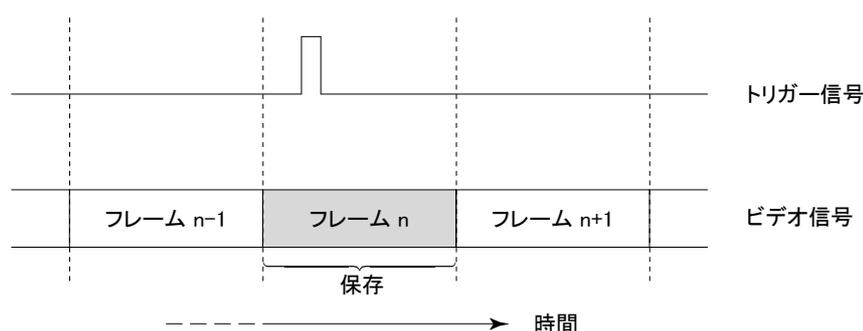


図 5-1 : パソコンに入力されるビデオ信号とトリガー

6. 宇宙線ミュオン粒子測定と、ミュオン粒子の到来方向分布の解析

実験測定に即して説明します。