

2008/08/19

最新鋭のガス型検出器で素粒子を見る

~GEM 検出器~

小沢恭一郎 ozawa@phys.s.u-tokyo.ac.jp
高橋武士、村瀬拓郎、生出秀行、宇都宮
和樹

目次

概論	4
素粒子・原子核物理と実験	4
ガスを用いた放射線検出	5
信号とするには？	5
電子の増幅	6
最新鋭の検出器～GEM 検出器～	7
GEM とは？	7
演習内容	8
ログノート・発表会.....	8
課題 1・GEM 検出器の信号を見てみよう	9
セットアップ.....	9
信号を見る	10
課題 2・電子回路を作ってみよう！	11
オペアンプ回路	11
実際の基板配置	11
半田付け	11
オシロスコープの使い方とテスト	11
課題 3・GEM 検出器を自分で動かしてみよう！	12
GEM 検出器のセットアップ.....	12
その他の準備.....	13
放射線源	13

電圧のかけかた	14
X 線源を使った時の信号	15
課題 4 ・ 宇宙線の性質を調べる	16
課題 ・ Time Projection Chamber を動かしてみよう！	17
Time Projection Chamber とは？	17
課題 ・ 宇宙線を TPC で測定してみよう！	18
応用課題 ・ 宇宙線の軌跡の 3 次元情報を測定してみよう！	19
読み出し電極の組み合わせ	19
時間情報の収集	19
データの解析	20

最新鋭のガス型検出器で素粒子を見る

～GEM 検出器～

概論

素粒子・原子核物理において広く使われている放射線検出器、特に気体（ガス）を用いた検出器に関して概説します。さらに、最新鋭の検出器である GEM 検出器とは何か、そこからどのように信号を取り出すのかななどを解説し、今回の課題内容について説明します。

素粒子・原子核物理と実験

素粒子・原子核物理の歴史は発見の歴史です。その発見を支えてきたのがさまざまな検出器です。たとえば、下の写真はキュリー夫人がラジウムの発見に使った電離箱と呼ばれる検出器です。これは、



まさに私たちがこれから扱うことになるガスを用いた検出器のご先祖様にあたります。

さて、放射線を検出しようと思ったら、その放射線の性質を知らなければなりません。私たちの世界が、原子から成り立っていて原子は原子核と電子からできているという話は、知っていると思いますが、その他にどんな放射線を知っていますか？

問題：知っている放射線の例を挙げてみよう

原子核や素粒子の反応は、私たちの身近にもあふれています。地球上の生物のエネルギー源である太陽光を作り出しているのも、太陽での原子核反応です。また、私たちの体を形作っている元素は、宇宙の歴史の中で作り出されてきたものです。放射線を使った医療検査やガン治療は、多くの成果をあげています。意外なところでは、蛍光灯のグロー放電管、目覚まし時計の夜光塗料、天井についている煙探知器（右図）などに使われていたりもします。

煙探知器には、アメリカシウム 241 という α 線を出す放射性同位元素が用いられています。どのように使われているか分かりますか？



ガスを用いた放射線検出

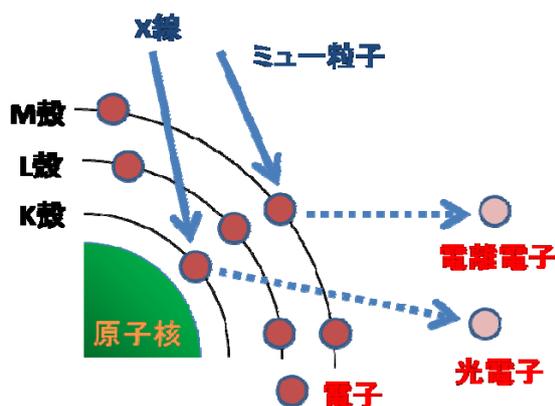
放射線の測定には、物質中を放射線が通過するときに放射線が起こす相互作用を利用します。

問題：前問の放射線が物質を通ると何が起こるか想像してみよう

この演習中では、二つの放射線の測定を行います。

Fe-55 という放射線同位元素からの X 線
宇宙線を起源とするミュー粒子

Fe-55 からの X 線は、5.9 keV のエネルギーを持っています。（このエネルギーの単位は、単位電荷を 1V で加速したときのエネルギーです）。この X 線がガスの満たされた箱を通過すると、たまに光電効果により吸収されます。それによりガス中の原子が電離され、電子とイオンがガス中にできます。これをほっておくと再結合して終わりなのですが、ガス中に電場をかけておくことで、電子を集めることが可能になります。



ミュー粒子が通ったときには、少し違いますが似たようなことが起こります。ミュー粒子が、最外殻の電子を弾き飛ばして、やはり原子を電離します。

信号とするには？

これらの場合、どちらも電子が作られることが分かりました。そうすると放射線が通ったことを電気信号として取り出すことができそうです。さて、それでは、ちょっと考えてみましょう。

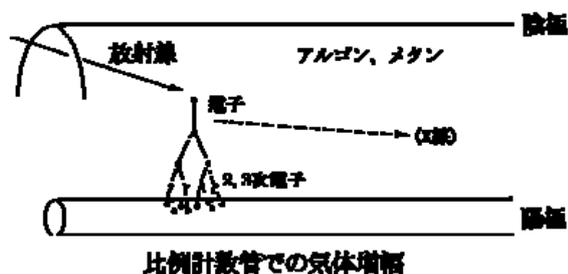
問題：X 線とミュー粒子の作る電子の数を推定してみよう

素電荷は 1.6×10^{-19} クーロンです。たとえば世の中で売っているコンデンサーの中には、静電容量が 1 ピコファラドというものがあります。このコンデンサーに電荷をためるとすると、何 V になるでしょう？オシロスコープの最小のレンジは、5 mV 程度です。見えそうですか？キュリー夫人の使った装置は、この電荷を測定できるようになっていました。現代でも、そのような測定は可能ですが、もうちょっと楽にやりたいと思います。

電離された電子の数をガスの中で増やすことができれば、楽に測定できると思いませんか？さて、そんなことが可能か考えてみましょう。

電子の増幅

電子を集めるのに電場を使うと言いましたが、電場に引っ張られて電子が動くときに何が起こるか考えてみましょう。ここで、考慮に入れて欲しいのは、電子が動いていくのはガス中であるということです。



問題：電子が電場によってガス中を動く時に起る事を想像してみよう
ヒント：電子はミュー粒子がガス中を通った時と同じようにふるまいます。

さて、電子によって起こることには、電場の強さの違いによる差があります。

問題：さらに、電場の違いによって何が起こるか想像してみよう

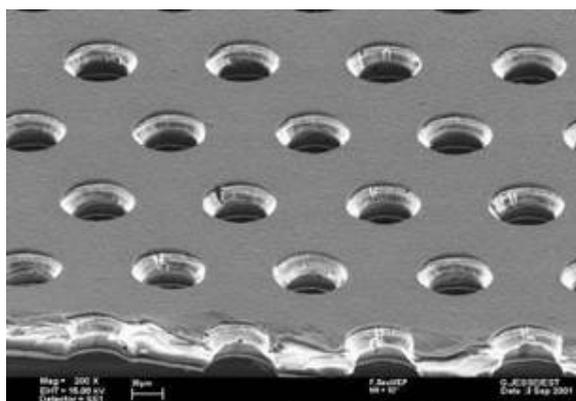
十分に高い電場が存在した場合、“電子なだれによるガス増幅”と呼ばれる現象が起きます。たとえば、これまでに良く用いられているガス型の検出器として比例計数管というものがあります。ガイガー管と呼ばれているものも構造は一緒です。比例計数管には、一本の細いワイヤが張ってあって、そのワイヤと周りの筒の間に電圧をかけることで大きな電場をワイヤの周りに作り出しています。その生み出された強い電場中で最初の電子の数が1万倍程度にまで増える“電子なだれ”という現象が起きます。これにより電気信号を測定することが可能になります。

言い換えると、ガス中に大きな電場を生み出すことが重要なポイントになります。今回の演習で使用する GEM 検出器というのは、この大きな電場を簡単な方法で生み出すことを可能にした画期的な装置です。

放射線を捉えるということは、物質中で放射線により原子をイオン化し、そのとき生じた電子から作られた電気信号を捉えるということになります。電子を電気信号にするために、強い電場を用いたガス増幅を行います。この演習では、ガス増幅部分に GEM 検出器という最新鋭の装置を用いて放射線を捉えてみます。また、電気信号を扱う簡単な回路を自分の手で作成してみます。

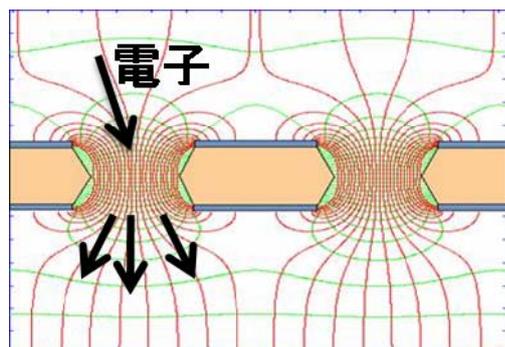
最新鋭の検出器～GEM 検出器～

放射線が物質中を通る時の反応はキュリー夫人の時代から変わっていませんが、その反応をより感度良くより精度高く捉えようという努力が検出器の発展を支えてきました。そして、現代は新しい検出器の出現が素粒子・原子核物理の発展にとって本質的になってきています。今回、演習に使う GEM 検出器は最新型の検出器で、この検出器により新たな素粒子・原子核物理が開かれようとしています。



GEM とは？

GEM は、小さな穴の開いた厚いサランラップの両面に電極を蒸着したような構造をしています。そんな簡単なもので何ができるのかというと、要は全く逆の発想でワイヤの代わりに穴を開けてしまったのです。具体的には、両面を数 μm 厚の金属で被覆した $50\mu\text{m}$ 厚の絶縁体フィルムに直径 $70\mu\text{m}$ 、間隔 $140\mu\text{m}$ で孔を配置した構造を持ちます。両面の金属層は電極として働き、この電極間に電圧を加えると GEM の穴の中に強い電場が生じます。電子がこの穴を通過すると、強い電場により電子なだれを起こします。この GEM は 1997 年に CERN の Dr. F. Sauli によって開発されました。



さて、たったこんだけの話なのですが、この穴あきのフィルムは、ワイヤを使った検出器に比べて、たくさんの利点を持っています。

まず、放射線がどこを通ったかという位置の情報を 2 次元で取り出すことが可能になります。電子の増幅は、放射線が通ったところで起こるので、増幅された電荷を小さな電極で読み出すことが出来れば、どこの電極から信号が来たかを調べることで、放射線の手場所が分かります。

また、GEM は通常、3 段重ね、4 段重ねの構造で使用します。これは、増幅された電子を次の段の GEM フィルムに送り込むことで、さらに増幅することが可能になるからです。このように多段にすることで、10000 倍以上の増幅率を達成します。

その他にも GEM の利点として以下のようなものが挙げられます。

- フィルムなので、様々な形状の検出器を作ることが出来る。(例えば、円筒状など)
- 電荷を集める電極を自由に選ぶことが出来る。
- 表面にさまざまな物質を蒸着することで、いろいろな検出器に応用ができる。



演習内容

今日からの8日間で、以下の演習を行います。この演習の目的は、最先端の科学の一端に触れてもらいつつ、素粒子・原子核物理に関する理解を深めてもらおうというものです。用意された課題を全てこなすことが目的ではありません。全員の理解を大切にしながら、一步一步、ゆっくり進んでいこうと思いますので、自分のペースで焦らずにこなしてください。

大切なのは、今回の演習の内容や素粒子・原子核物理に関して、サマーチャレンジが終わった後で、自分の言葉で語れるようになることです。

具体的な演習の進め方は以下ようになります。

- 概論・演習内容説明
- 既存の GEM 検出器による測定
- 電気信号を扱う電子回路の製作
- 製作した電子回路を用いた放射線の測定
- GEM 検出器を応用した Time Projection Chamber による宇宙線の測定
- Time Projection Chamber による 3 次元軌跡の測定

ログノート・発表会

ログノートには、自分のやったこと、見たこと、考えたことを、すべて記録してください。雑記帳のように全てのことを書きましょう。整理することは後からできますが、後から思い出すことはとても大変です。その場で、記録をつけるクセを付けて下さい。

消しゴムは使いません。思考の記録が残るように、間違ったら線で消しましょう。

測定の結果は、数値だけではなく、グラフとして残すように努力しましょう。測定と同時にグラフを作りましょう。

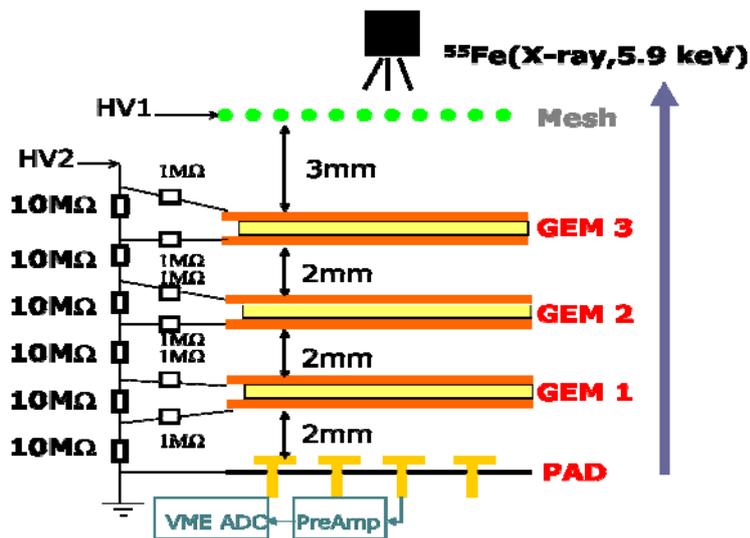
多くの測定は共同で行ってもらいます。測定係、記録係など手分けしてやってもらいますが、ひとつの測定が終わった後は、記録を取った人のログノートをコピーして、自分のログノートに貼って、情報を共有するようにしてください。手で写すと間違える可能性があります。

サマーチャレンジの最終日に発表会を行います。この演習課題で学んだこと、測定したことを発表してもらいます。ログノートを元に、発表用の資料を作り、全員に発表してもらいたいと思っています。

発表は、全体の内容を手分けして行いますが、どの部分をやらうかは、最後に決めたいと思いますので、全員が全ての部分を理解するように、お互い助けあってがんばってください。

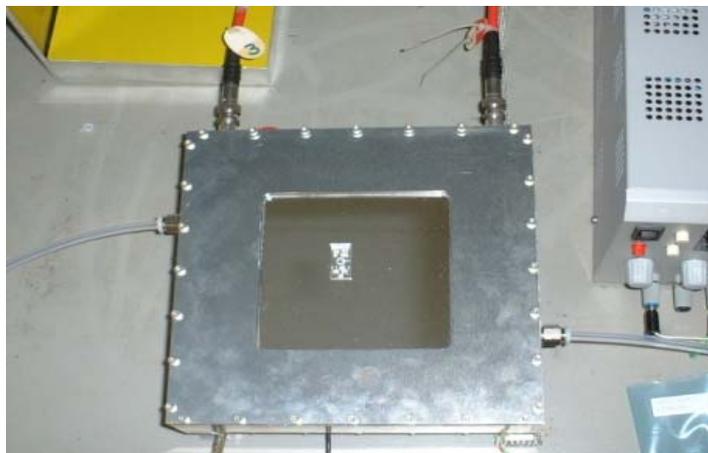
課題 1・GEM 検出器の信号を見てみよう

ここでは、まず、すでに用意されている GEM 検出器をつかって、その信号をオシロスコープで見えます。



セットアップ

すでに、TAの手によって、動く検出器がセットアップされています。



信号を見る

オシロスコープの input を、high impedance にして、電圧モードで信号を見てみます。

まずは、どんな信号が見えるか、予想（想像）してみよう！物理は予想と検証の学問です。

問題 信号の高さを予想してみましょう。

考察 これから X 線の測定などを行うのに十分な信号が得られているだろうか？

... このままだと、信号に対してノイズが大きく、また、信号の電荷を積分することができないので、次の課題で製作する電子回路が必要になる。

課題 2・電子回路を作ってみよう！

オペアンプ回路

実際の基板配置

半田付け

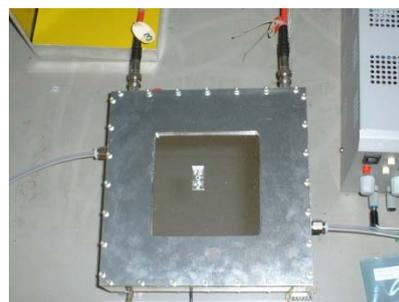
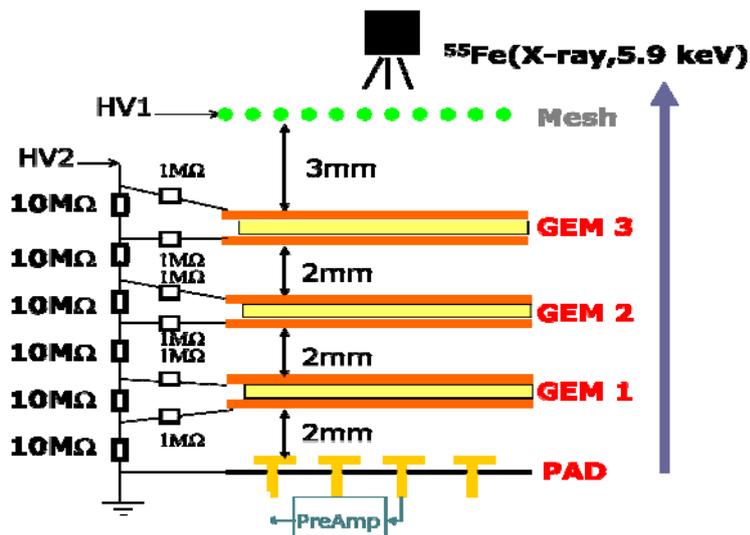
オシロスコープの使い方とテスト

この課題の説明は、T Aの高橋君が別に作成してくれています。

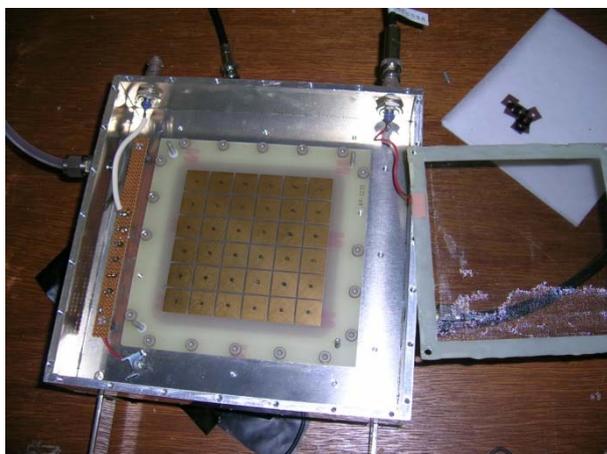
課題 3・GEM 検出器を自分で動かしてみよう！

課題 2 で作成した電子回路を使って、X線からの信号をとらえてみよう。

GEM 検出器のセットアップ



- 1) 課題 1 で製作した GEM フォイルを、検出器の箱の中へ止めていく。そのときに、GEM フォイルと GEM フォイルの間に空間を作るために、角の 4 本の棒にワッシャーを入れるのを忘れないようにする。

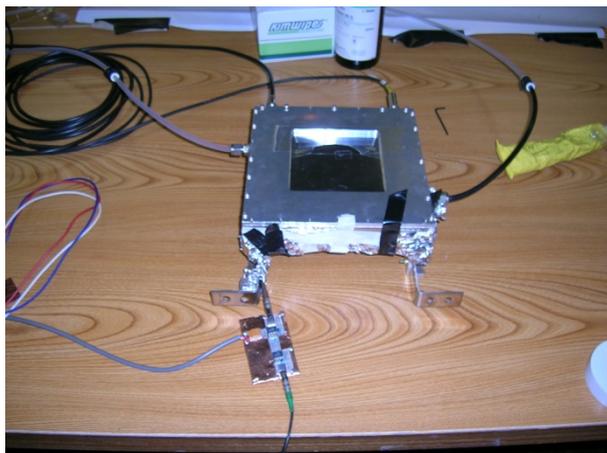


- 2) GEM から出ている抵抗は、端の基盤に下から順番に差し込んでいく。基盤からの線が HV コネクタにつながっていることを確認。

- 3) 一番上にメッシュを入れる。

このメッシュが何のために必要なのか考えてみよう！

- 4) メッシュからの抵抗が別のHVコネクタにつながっていることを確認。
5) ガス止めのジェルを壁の上部に塗り、ふたを閉める。ネジでよく固定する。
6) 裏面のピンに製作した電子回路を差し込み、信号を取る準備をする。



- 7) TAに頼んでガスを流してもらおう。

その他の準備

ガスを流すために、配管などが必要です。他の準備ができたならTAにお願いしてください。

放射線源

放射性同位体元素を濃縮した放射線を発生する物質です。今回は、Fe-55と呼ばれるもので、安定なのほとんどは質量数56を持つので、中性子が一つ小さいものになっています。このFe-55が内殻の軌道中の電子を捕獲して、Mn-55になります。すると、一個、電子軌道が空きますから、そこに外殻から電子が落ちてきます。この時にX線が放射されます。

このX線を短時間浴びることは危険なものではありませんが、体内に入ると非常に危険です。そのため、この物質は密閉されています。

取扱いは、TAに任せてください。

電圧のかけかた

かける電圧は、GEM用とメッシュ用の2種類。ゆっくり交互にかけていくこと。**放電しないか、箱の音を良く聞くこと。途中でパチパチ言ったら、すぐに電圧を下げること。**

最初は、GEM 500V、メッシュ500V程度

次に、交互に数百Vずつ上げて、両方1800Vまで上げ、放電がないか確認する。

GEM 1980V－メッシュ2310Vで、放電がないか確認

信号が出ているか確認。信号がなければ、放電に気をつけながら次の表の高い電圧の組み合わせを試す。

放電が起こったら、すぐに電圧を下げる。

実際にかけるGEM電圧	実際にかけるメッシュ電圧	(参考:GEM一層の電圧)
1980V	2310V	330V
2010V	2345V	335V
2040V	2380V	340V
2070V	2415V	345V
2100V	2450V	350V

放電を繰り返すと、GEMフォイルが壊れてしまいます。慎重に、慎重に、電圧をかけてください。

X線源を使った時の信号

オシロスコープで、GEMからの信号を測定してみよう！

ちゃんと放射線源を外した時と置いたときで違いが見えるか、確かめてみよう！

問題：信号の高さは、何を表しているか？

課題1の high impedance mode とは何が違うのか？

問題：GEMへ印加する電圧を変えると信号の高さは、どう変化していくか？（放電に気を付けて）

応用問題：フォイルとフォイルの距離を変えると何が起こるか？

問題：フォイルとメッシュの間の距離を変えると何が起こるか？（信号の頻度にも着目してみよう）

課題 4 ・ 宇宙線の性質を調べる

課題 3 の放射線源の測定で得た知識をもとに、宇宙線とガスの相互作用について調べてみよう。

問題：信号の高さから何がわかるか？

放射線源を使った測定により、僕らのシステムが 5.9 keV のエネルギー損失に対して、どの程度の大きさの信号を出すかが、定量的に分かっている。そこから計算すれば、宇宙線がガス中で失うエネルギー損失を定量的に測定することが可能である。

問題：宇宙線が損失するエネルギーは、宇宙線の全エネルギーか？

X 線源を用いた場合、測定されるエネルギーは、X 線の全エネルギーであった。それに対して、宇宙線（荷電粒子）の場合を考えてみよう。荷電粒子の物質中でのエネルギー損失を定量的に計算してみよう。

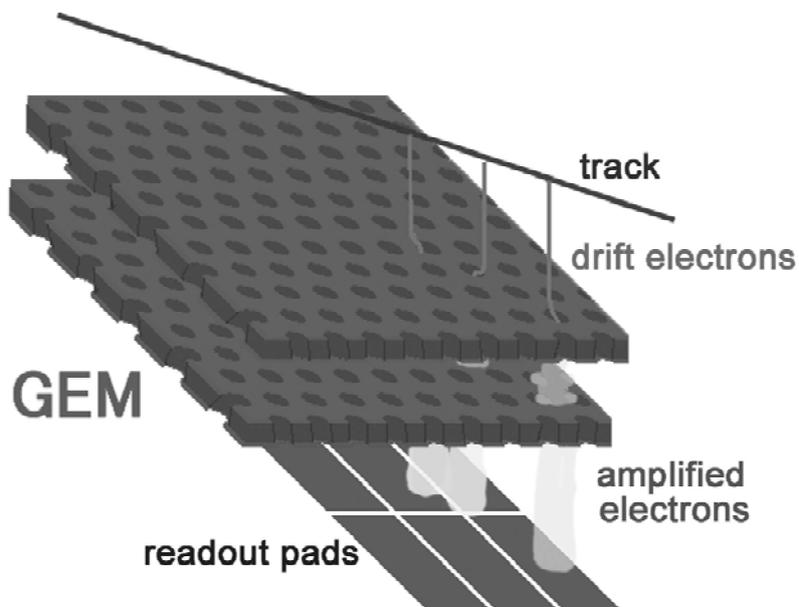
問題：フォイルとメッシュの間の距離を変えると何が起こるか？

X 線の時とは、違ったことが起こります。それは、なぜでしょうか？

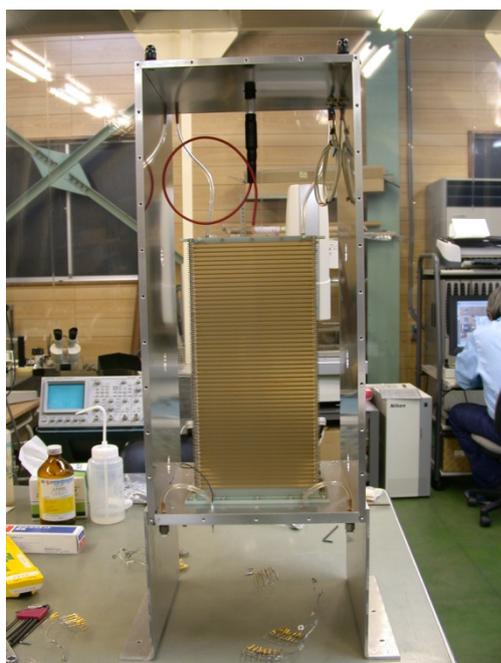
課題・Time Projection Chamber を動かしてみよう！

Time Projection Chamber とは？

電子がガス中で動く（ドリフトと呼びます）ことを利用して、2次元の読み出し（GEMです）を使って、放射線が3次元空間中のどこを通ったかを測定する検出器です。



実際に使用する Time Projection Chamber の中身です。あとで実際に見てみます。中央に見える縞模様の電極を用いてその中の箱に電子を上から下まで運ぶための均一な電場を作り出しています。GEMは一番下に設置されていて底の方に読み出し用の電極があります。



課題・宇宙線を TPC で測定してみよう！

用意した Time Projection Chamber を横にして、上から下へ通る宇宙線をとらえます。

- 1) Time Projection Chamber の底を開けて、中に GEM をセットアップしよう。
- 2) 読み出し用の電極へ作成した電子回路を付けて、オシロスコープをセットし、信号を読み出す準備をする。何個かいっぺんにつないでみるとよい。
- 3) 2種類の高圧電源（てっぺん（電子のドリフト用）と底（GEM 読み出し用））のケーブルを差す。電子ドリフト用は、14 kV と非常に高圧をかけるので、コネクタ形状も違い、注意する。
- 4) 電圧をかける。ドリフト-14 kV、GEM 用 2380 V。
- 5) 信号を見てみる。

問題：信号は GEM 検出器単体の時と違うか、違うなら何が違うか？

問題：同時にいろんな電極で信号を見てみると何が見えるか？信号は相関しているか？

問題：信号の頻度はどのくらいか？それは見る電極の組み合わせによって変わるか？

応用課題・宇宙線の軌跡の3次元情報を測定してみよう！

電子のドリフトによって3次元情報を得ると言いましたが、測定できるのは、ドリフトしてきた電子の到着時間です。ドリフトにかかった時間を調べるには、スタートした時間が要ります。これをシンチレーション検出器で与えてみましょう。

すると、電子が宇宙線によって生成されていから、電極に到達するまでの時間（ドリフト時間）を測定することが可能になります。これと電極の位置情報により、宇宙線の軌跡の3次元情報が得られます。

目標： 宇宙線の降ってくる3次元角度分布を求める！

読み出し電極の組み合わせ

TPCの読み出し電極には、さまざまな大きさのものがああります。これのうちどの組み合わせを用いれば、角度分布が効率的に取れるでしょうか？

問題 読み出しパッドの組み合わせを考えてみよう

時間情報の収集

時間情報の収集方法を考えてみましょう。

単純には、一定の時間間隔を刻む時計（クロック）があれば、スタート信号からストップ信号までの間に、そのクロックが何回の時間間隔を刻んだかを数えておけば良いということになります。

実験室には、そのようなクロック、クロックと信号の coincidence を取る機械、数を数える装置などが置いてあります。組み合わせを考えてみましょう。

最終的なクロックの数は、CAMAC system という装置を用いて、text file の形で記録されます。

データの解析

データの解析方法を考えてみましょう。収集したデータは、1 event 毎のクロックのカウント数になっています。ここから時間情報に焼き直し、さらに位置情報に焼き直し、さらに角度情報を得るような解析をしなければなりません。

1) 時間情報への変換

$$\text{ドリフト時間} = \text{カウント数} \times \text{1クロックの時間}$$

2) 位置情報への変換

$$\text{粒子のドリフト方向の場所} = \text{ドリフト時間} \times \text{ドリフト速度}$$

だいたいドリフト速度は、データから求められます。やり方が分かりますか？

3) 角度情報への変換

角度 = 二つのヒットを結ぶベクトルが鉛直線となす角度

データを持ち寄って協力してベクトルを出す必要があります。

球座標を考える必要があります。全員で定義を合わせましょう。

データ解析の詳細は、取れたデータに合わせて決定していく必要があります。TA に相談しましょう。

また、データ解析には、EXCEL などを用いてもよいですし、C 言語などで自分でプログラムを書くこともできます。