

スパークチェンバーの開発とミュー粒子の観測

2018 年度卒業研究

瀧瀬優斗、山本祥太郎

神戸大学理学部物理学科 粒子物理研究室

2019 年 3 月 31 日

概要

宇宙線ミュー粒子の飛跡を観測することができるスパークチェンバーの製作を目的とし研究に取り組んだ。
ミュー粒子の電離作用によりイオン化し発生する電子なだれに沿って放電が生じることで、飛跡を視覚化させることができるこの装置は、8 kV 出力の高電圧スイッチング回路と、ガス漏のないチェンバーを作成することが必要となる。

首都大学東京のチェンバー等を見本にして、自作の効率的な多層化スパークチェンバーの製作に取り組み、3 層のスパークに成功して飛跡を観測することができた。

また動画解析によって、スパークチェンバーによるミュー粒子検出の検出効率を測定した。

目次

1	序論	4
1.1	研究の動機	4
1.2	宇宙線	4
2	スパークチェンバーの原理	5
2.1	スパークチェンバーとは	5
2.2	スパークが起こる機構	6
3	高電圧印加回路	7
3.1	装置概要	7
3.2	高電圧スイッチング回路	8
3.3	出力電圧の確認	9
4	設計製作	11
4.1	スパークチェンバー本体	11
4.2	ガスフロー	12
5	実験結果	13
5.1	回路の動作確認	13
5.2	作成した回路・チェンバー本体を用いて動作確認	13
5.3	放電効率の測定	14
6	まとめ	16
6.1	今後の課題	16
6.2	今後の展望	16
6.3	謝辞	16

1 序論

1.1 研究の動機

素粒子物理学を学ぶ中で、「宇宙線」という放射線を知った。放射線は我々の身の回りにありふれたものであるが、目に見えないという理由でその存在を意識することは少ない。しかし、可視化することで目に見えない放射線を実感し、理解を深めることができると考えた。

そこで我々は、宇宙線の一種であるミュー粒子を観測することができるスパークチェンバーを製作し、物理教育ツールの一つとして粒子物理研究室に提供したいと考え、本研究に取り組んだ。

1.2 宇宙線

宇宙には超新星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。一次宇宙線がそのまま地表に到達することはほとんど無く、地球の大気を通過する際に、空気の原子核と反応して、 π 中間子や K 中間子、ミュー粒子、ニュートリノ、電子、ガンマ線などが作られる。これら地球内で発生する宇宙線を二次宇宙線と呼ぶ。二次宇宙線はさらに空気原子核と電磁相互作用や強い相互作用を繰り返して、エネルギーを失っていく。この過程は「大気シャワー現象」と呼ばれる。模式図を図 1.1 に示す。

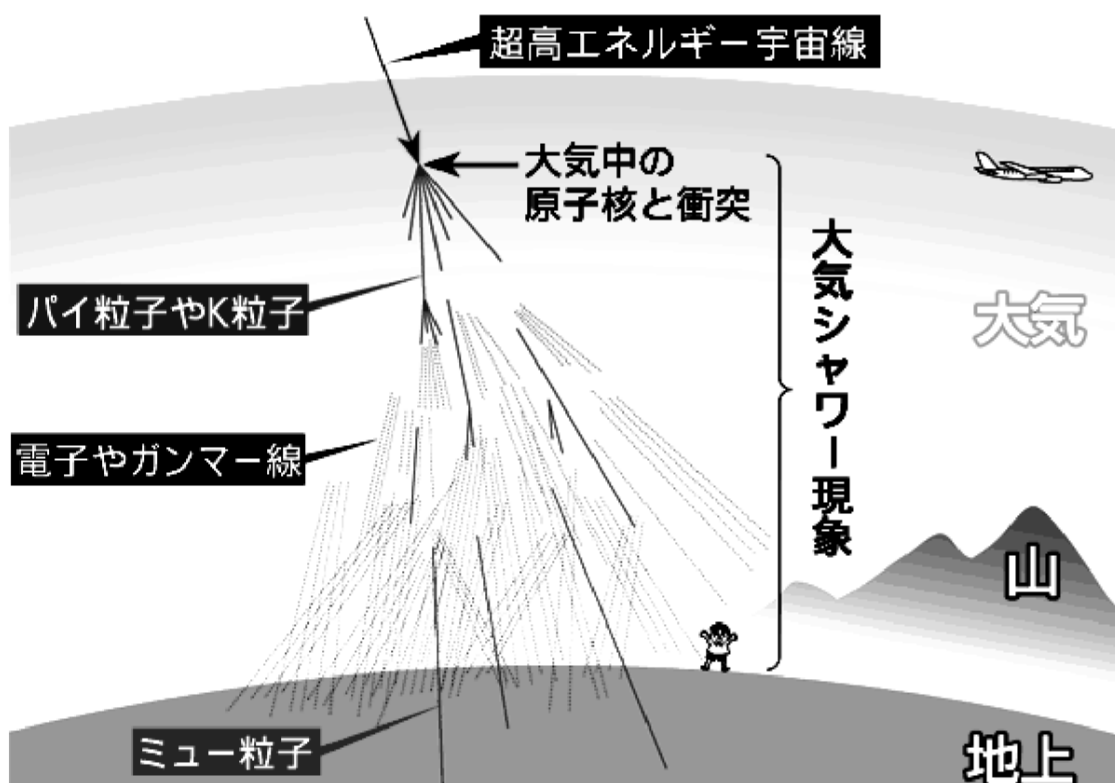


図 1.1 大気シャワー現象 [1]

陽子・原子核、中間子は空気中で吸収されてしまう。地上まで到達する粒子のほとんどがミュー粒子である。

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad (1)$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \nu_\mu \quad (2)$$

ミュー粒子 (μ^+ , μ^-) は (1),(2) 式の崩壊で発生する二次宇宙線である。一平方センチメートルで毎分 1 個の割合で地上まで飛来する。

2 スパークチェンバーの原理

スパークチェンバーについて、成り立ちと放電原理を示す。

2.1 スパークチェンバーとは

スパークチェンバーとは、ミュー粒子の飛跡を放電として可視化して観測することができる装置である。

スパークチェンバーは 1957 年に大阪大学で発明された。大阪大学理学部の福井崇時と宮本重徳はホドスコープチェンバーの研究開発をしていた。ホドスコープチェンバーとは、細長いガラス管の中にネオンガスを封入したものを積み重ね、宇宙線の通過信号をトリガーとしてガラス管に高電圧を印加し、宇宙線が通過したガラス管のみを放電させる装置である。研究を続ける中で、宇宙線の飛跡を立体的に観測することの可能性を見出した二人はさらに、ネオンガスをガラスの箱に封入して電気を通す板ではさみ、これに高電圧をかけて宇宙線を観測した。これがスパークチェンバーとなる。

スパークチェンバーは宇宙線観測のほかに、現代物理学の実験にも広く使用され、大きな成果あげている。また日本の多くの科学館には、宇宙線を見せるためのスパークチェンバーが設置されている。図 2.1 に首都大学東京が作成したスパークチェンバーを示す。

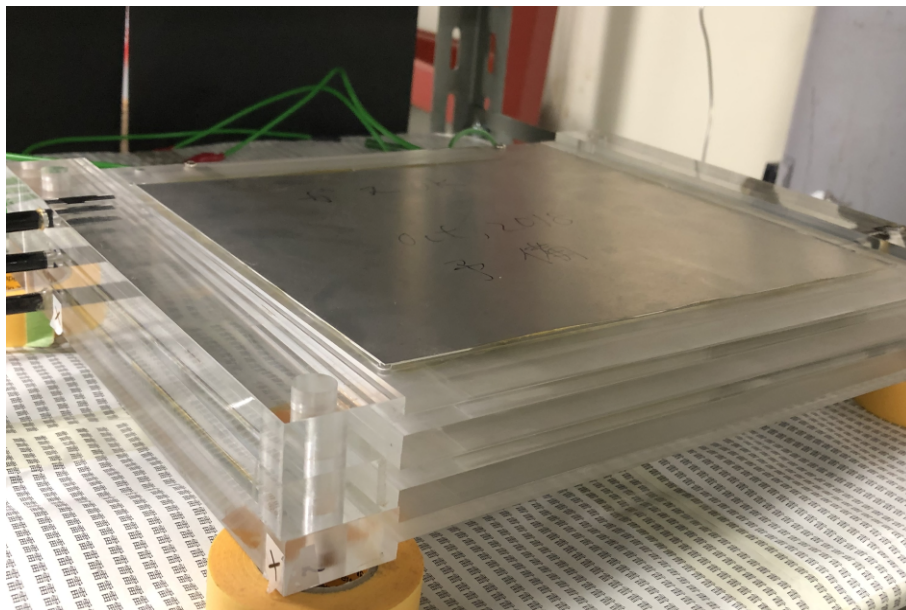


図 2.1 スパークチェンバー本体図：図は本研究でお借りした首都大学東京が製作したスパークチェンバー本体

2.2 スパークが起こる機構

ミュー粒子の飛跡を放電として観測するスパークチェンバーは、宇宙線のもつ電離作用を利用している。不活性ガスを封入したチェンバーにミュー粒子が入射すると、その飛跡のまわりの気体分子がイオン化する。この時チェンバーの極板に高電圧を印加することで、発生した電子はプラスの電圧がかかった電極へと加速される。加速された電子がさらに他の気体分子をイオン化させて、新たな電子を生成し電子数がネズミ算式に増大して電極間にミュー粒子の飛跡に沿った放電が生じる。このチェンバーを幾層も重ねることでミュー粒子の飛跡を目視することができる。

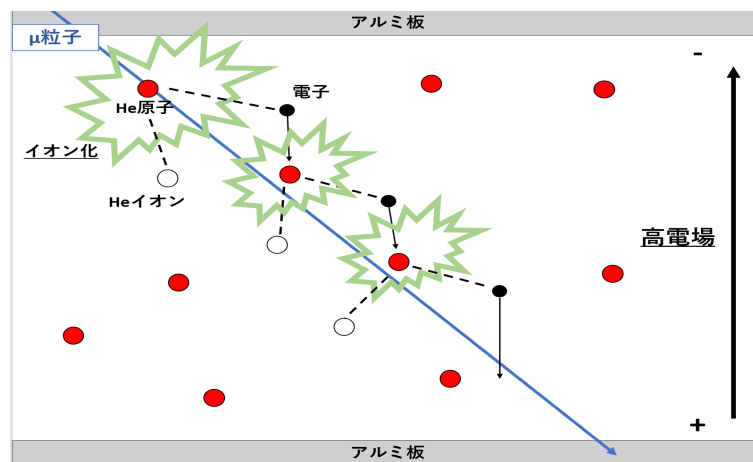


図 2.2 スパークの起こる機構 1

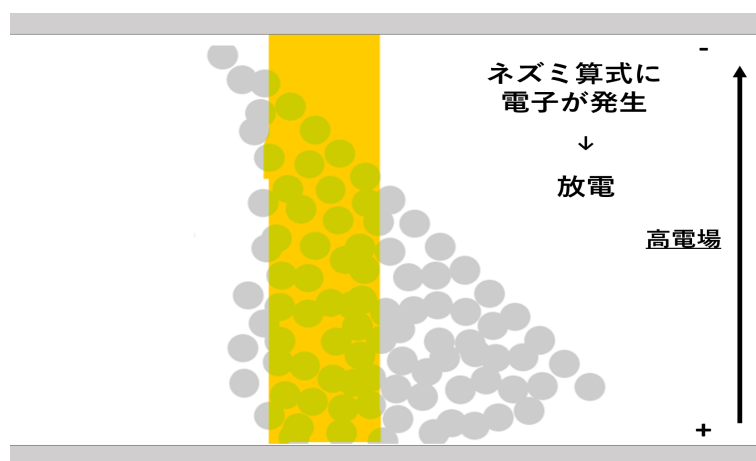


図 2.3 スパークの起こる機構 2

3 高電圧印加回路

高電圧を常時印加していると回路が焼き切れる危険性があるため、ミュー粒子の通過時にのみ高電圧を印加するためのスイッチング回路が必要となる。

3.1 装置概要

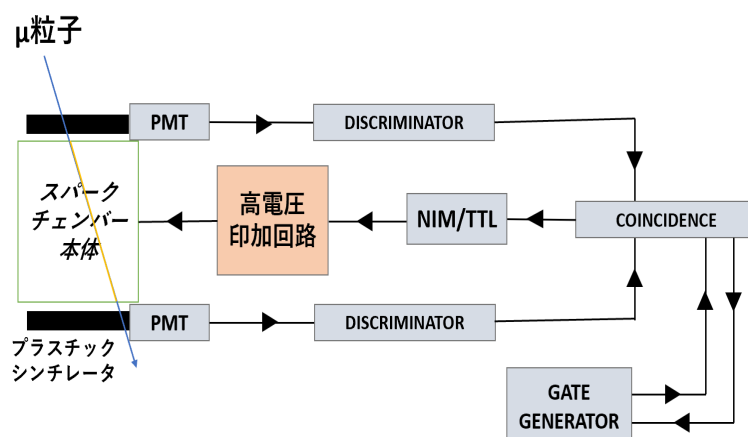


図 3.1 スパークシステムの概略図

スパークチェンバーの高電圧印加システムの概略図は図 3.1 のようになっている。

ミュー粒子がスパークチェンバーを通過したことは、チェンバー本体の上下に平行に設置したプラスチックシンチレータの発光により検出する。シンチレータに接続された PMT（光電子増倍管）により信号としてディスクリミネータに送られる。ディスクリミネータでは、電気的ノイズやダークカレントをカットするために -38 mV のスレッシュホールド（閾値）を設定することで、ミュー粒子の通過によるデジタル信号を出す。NIM モジュールを用いているので、-0.8 V のデジタル信号である。図 3.2 と図 3.3 にミュー粒子の信号を、図 3.4 に上下シンチレータからのコインシデンス信号を示す。

2つのディスクリミネータからの信号が同時に入ってきたときにデジタル信号を出力するのがコインシデンスである。コインシデンス信号が、チェンバー本体を通過したミュー粒子がありましたよと、いう信号となり、極板に高電圧を印加するスイッチング回路へのトリガーとなる。スイッチング機能を担うサイリスタのトリガーとして、+ 5 V のパルスが入力が必要となるため、NIM → TTL 変換を行っている。本実験では + 2.5 V パルスのトリガーとなっているが、サイリスタは正常に動作していた。チェンバー本体にかかる高電圧は充電が必要である。ミュー粒子がそれよりも短い頻度で連続で到来することもありうるため、ゲートジェネレータによる 0.3 s の veto をかけている。

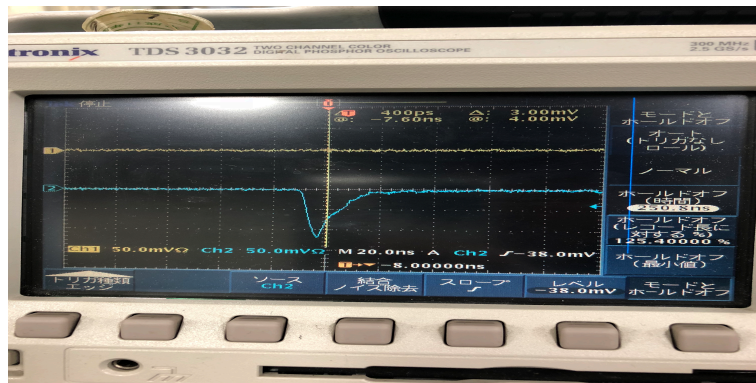


図 3.2 ミュー粒子による信号：本体上のシンチレータ

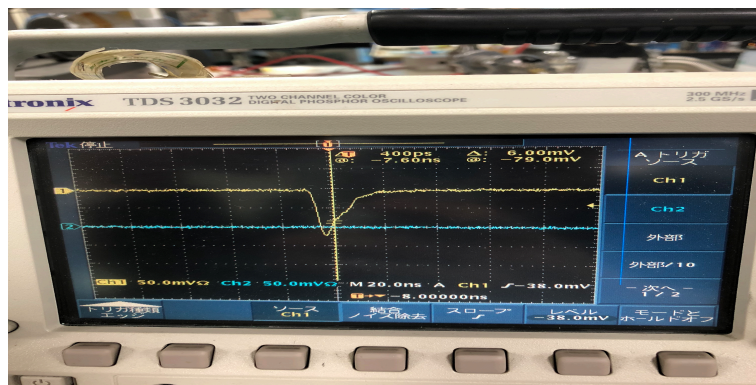


図 3.3 ミュー粒子による信号：本体下のシンチレータ

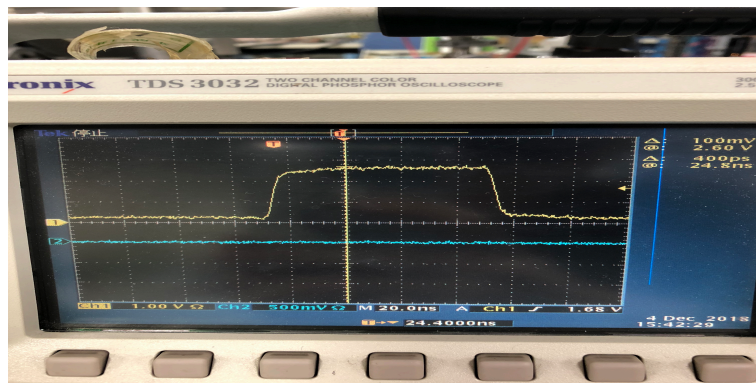


図 3.4 上下シンチレータからの信号のコインシデンスを取った後、TTL レベルに変形した信号の波形

3.2 高電圧スイッチング回路

図 3.5 が製作した高電圧スイッチング回路の概略図である。

高電圧出力には、松定プレジジョンで購入した高電圧モジュール型電源 HGR30-25 を用いて-8 kV を出力し

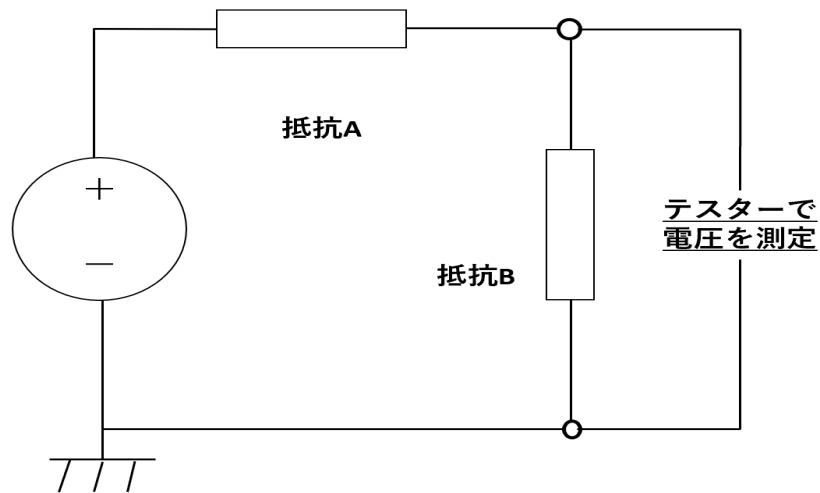


図 3.6 ハイボルディバイダ：高電圧出力をテスターで測れるようにした装置

ここで $3.0\text{ k}\Omega$ で頭打ちにあってるのは、私用している 24Vdc の印加電流が小さく、今回のハイボルディバイダに使用している抵抗がこれ以上の電圧に対応できなかったためである。

抵抗値と出力電圧の関係

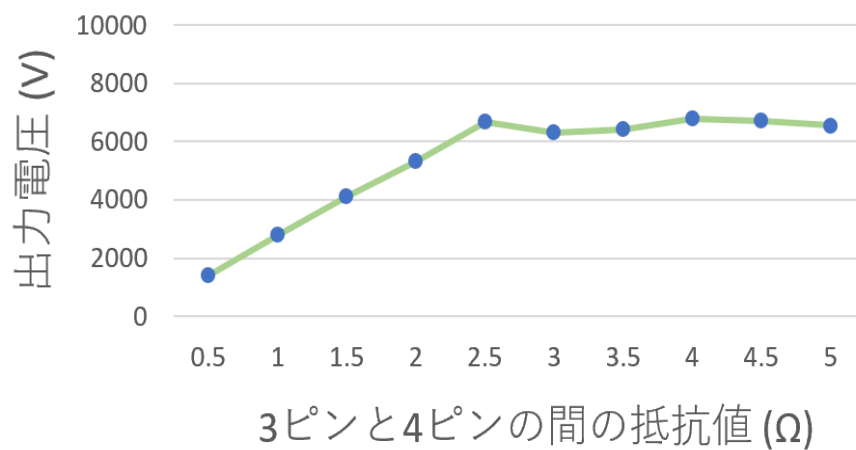


図 3.7 ハイボルディバイダを用いて測定した測定値と出力電圧の関係。測定にはテスターを用いた。

可変抵抗の値は、3 ピン–4 ピン： $3.5\text{ k}\Omega$ 、4 ピン–5 ピン： $1.5\text{ k}\Omega$ として、高電圧出力がおよそ 8 kV になるように設定した。実験の設定によっては印加電流が小さく、出力電圧が頭打ちにあって 6.6 kV ほどになる場合もある。

4 設計製作

スパークチェンバーは検出範囲が広く、効率の良いものであるように設計した。

4.1 スパークチェンバー本体

スパークチェンバー層は、アルミ板が縦横 23.4 cm と 14.4 cm であり厚さ 0.3 cm のものを二枚、溝付きアクリル棒を縦横 1 cm と 1 cm であり厚さ 50 cm のもの 2 本でできている。スパークチェンバー層は縦横 25 cm と 26 cm であり厚さ 2 cm、有効体積は縦横 23 cm と 24 cm、厚さ 0.6 cm である。スパークチェンバー内の放電を横から見るためにアクリル棒は透明であり、実験のため最低二方向から観測できるようにした。赤いコードは上に HV (High-Voltage) をかけるケーブルである。透明なチューブはヘリウムを流入、排出させるためにチューブを通していている。図 4.1 に製作したスパークチェンバーの写真を示す。

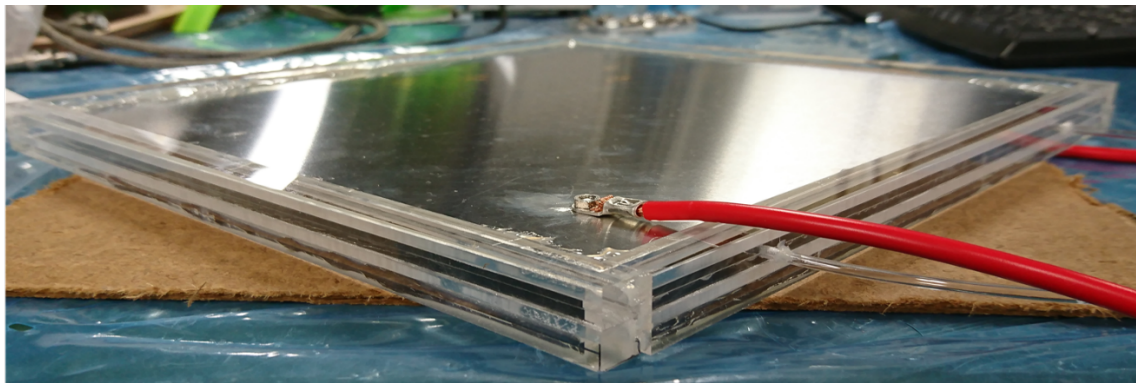


図 4.1 スパークチェンバー層全体

溝付きアクリル棒は図 4.3 のようになっておりこれを上下に並べ有機溶剤接着剤で接着した (図 4.2)。接着したアクリル棒の 1 本にガスチューブ (外径 3 cm、内径 2 cm) 用の M3 の穴をあけ、アラルダイトで固定した。アルミ板には M3 の穴が開いており、そこからねじを通し圧着端子によって HV をかけられるようになっている。ケーブルに圧着端子をつけナットでアルミ板に固定した。低頭ねじを使いアラルダイトでねじから放電しないようにしてある。アクリル棒で枠組みを作り溝にアルミ板を差し込み、ガスが漏れないようアラルダイトで隙間を塞ぐよう固定した。(図 4.4)。

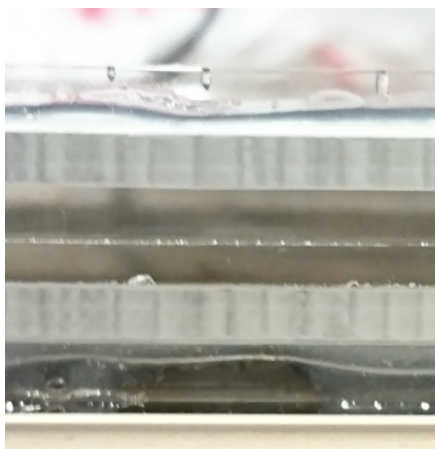


図 4.2 アクリル棒を上下に並べ接着



図 4.3 溝付きアクリル棒



図 4.4 スパークチェンバーを横からみた図

4.2 ガスフロー

ガスボンベからヘリウムガスをスパークチェンバーに流す。図 4.5 で示すようにフローメーターを設置した。スパークチェンバーにはヘリウムを毎分 25 ml で流入させた。流入、排気のフローメータを使うことによってガスがスパークチェンバーから漏れ出していないか確認できるよにした。排気チューブは 10 m 以上のものをつなぎ、空気が逆流してこないようにした。

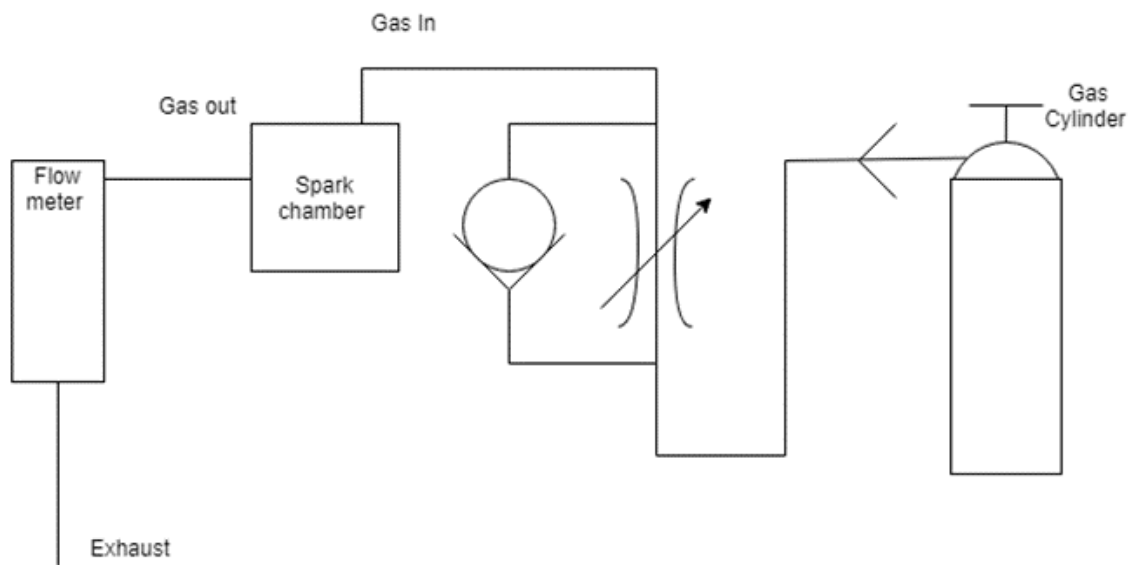


図 4.5 スパークチェンバー周りのガスフロー

5 実験結果

サイリスタに 5 V の電圧をかけ、PMT にそれぞれ 1507 V、1570 V をかける。高圧印加装置用の 24 V 電源の印加電流を調節しスパークチェンバーにかかる電圧を調節する。これを 0.1 A から徐々に上げてゆきスパークチェンバーが放電する電流まで上げてゆく。

5.1 回路の動作確認

まずは、放電することがわかっている首都大学東京のスパークチェンバー本体を用いて、作成した高電圧印加回路の動作確認をした。

- チェンバー 1 層の場合
印加電流は 1.0 A ほどで、スパークが起こった。本体にはおよそ 6 kV がかかっている。
- チェンバー 3 層の場合
印加電流が 0.6 A を超えると、印加後しばらくするとサイリスタ電源用の 5Vdc がシャットダウンした。シャットダウンするまでの時間に規則性は無かった。印加電流を 0.5 A として動作すると問題なくスイッチングをして、スパークが起こった。3 層を貫くミュー粒子の飛跡が観測できた。

5.2 作成した回路・チェンバー本体を用いて動作確認

回路が動くことが確認できたので、自作のスパークチェンバー本体を用いて動作確認をした。電圧 8 kV 程度をかけることによって放電することが確認できた。図 5.2 と図 5.3 に放電の様子を示す。

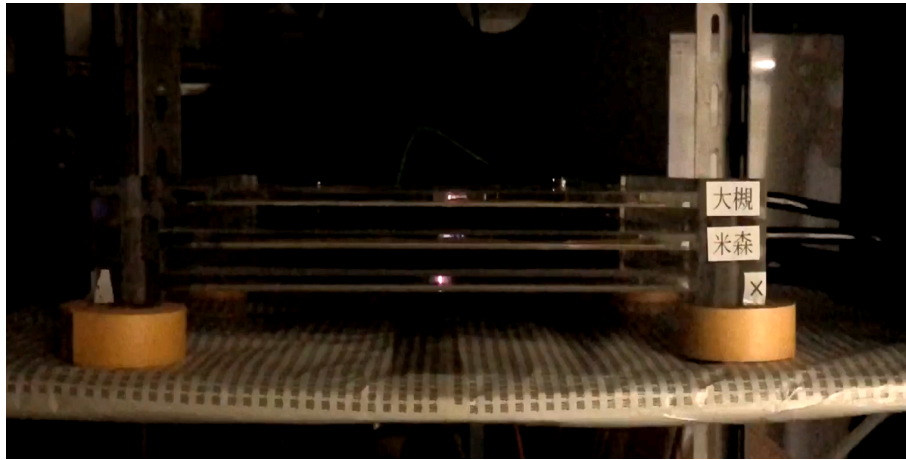


図 5.1 回路動作確認：首都大学東京スパークチェンバー 3 層を用いた場合の放電の様子

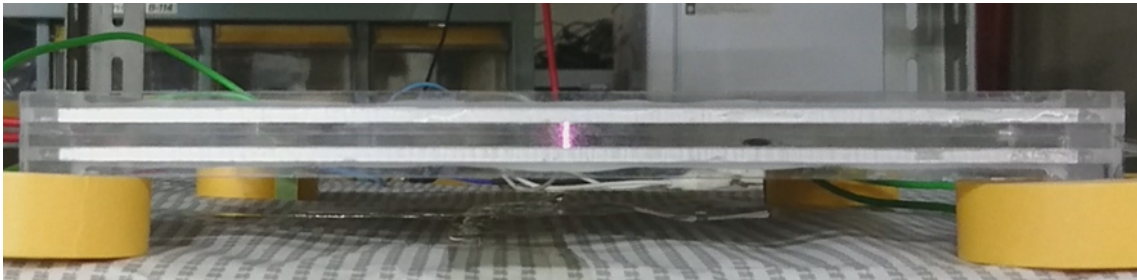


図 5.2 観測された放電の写真

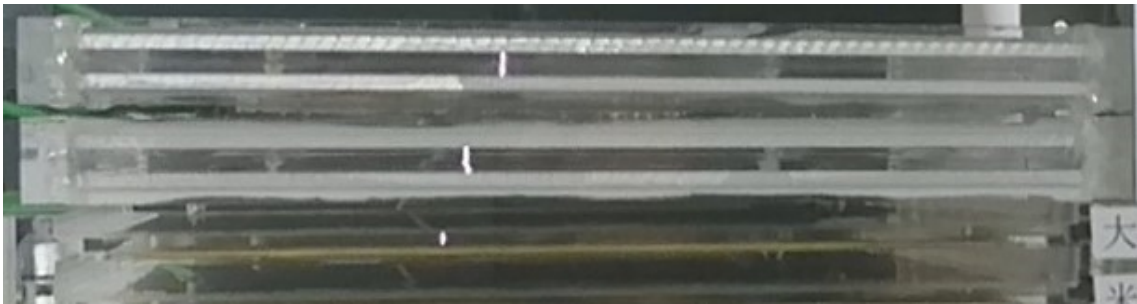


図 5.3 三層にわたっての放電の写真

5.3 放電効率の測定

プラスチックシンチレーター同士のコインシデンスが取れ、スパークチェンバー 1 層 (図 5.2) が放電した割合を考える。放電した割合 ε は

$$\varepsilon = \frac{\text{放電回数} : M}{\text{コインシデンスが取れた数} : N}$$

計測はスパークチェンバーの一方から動画を一眼レフ FHD 60 fps でコインシデンスに繋がっているオシロスコープとスパークチェンバーを撮影する。撮影データをパソコンで動画の 1 フレームずつ確認してスパーク

クチェンバーから放電回数:M、オシロスコープの画面からコインシデンス:N をカウントする。測定方法の図と写真をそれぞれ図 5.4 図 5.5 に示す。スパークチェンバー層 (図 5.2) で 593 秒観測した結果、コインシデンスが取れた回数が 302 回、そのうち放電した回数が 282 回であった。スパークチェンバー層の効率 ϵ は

$$\epsilon = \frac{M}{N} \pm \sqrt{\frac{(1-\epsilon)\epsilon}{N}}$$

と示すことができ、放電効率

$$\epsilon = 0.93 \pm 0.02$$

となった。放電効率 0.9 以上なのでよくできたように思う。スパークチェンバーやガスチューブの接続の気密性を更にあげると放電効率が良くなる。

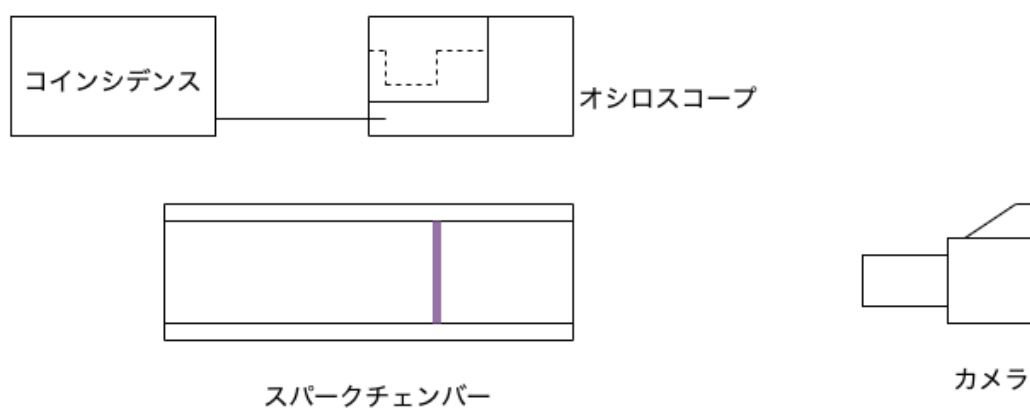


図 5.4 放電効率の測定方法

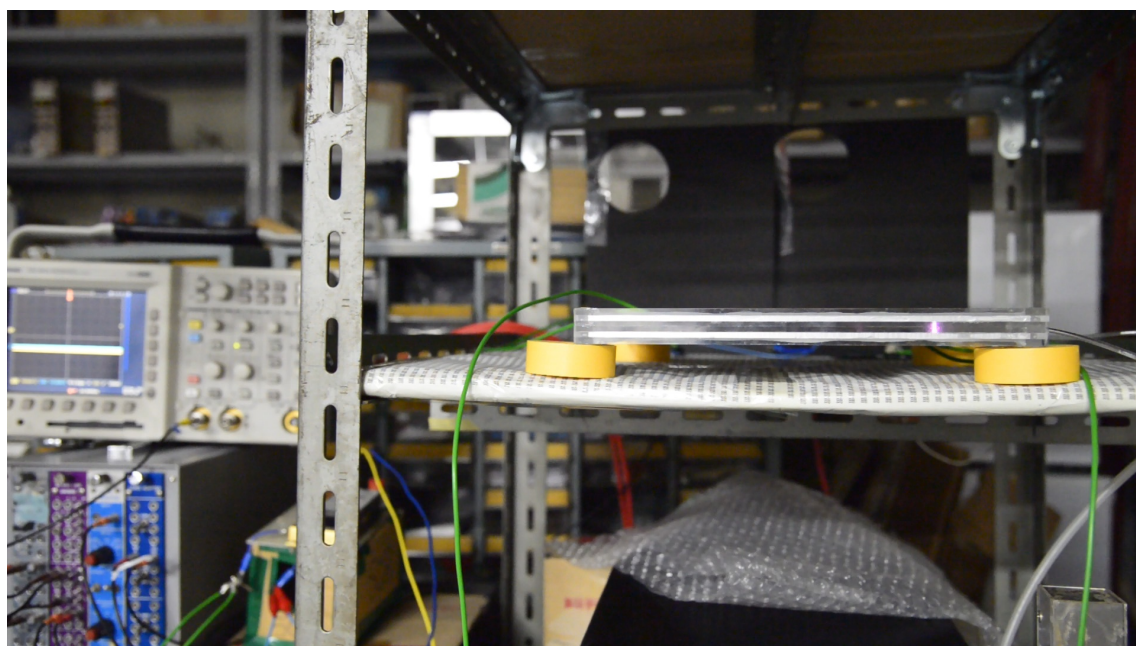


図 5.5 実際の放電効率の測定を行なっている時の写真

6 まとめ

6.1 今後の課題

今回、製作したスパークチェンバー二層で放電は観測されたが、多層化スパークチェンバーを観測中、サイリスタに印加している 5 V 電源が頻繁にシャットダウンした。机に置いているコンデンサや高圧電源、サイリスタの距離を離すことで少し改善したが、長時間の放電の観測ができなかった。

また今回製作したスパークチェンバーは二層だけだったので大きな問題にはならなかったが、これからさらに多層化を進めていくと、スパークチェンバーに十分ガスを流すのに時間がかかりすぎてしまう、そのうえに下層ではヘリウムガスが空気に置換されづらく層ごとに効率が小さくなる可能性がある。スパークチェンバーの設計を見直しすべての層が直接ガスボンベからガスを取り込めるようにしたほうが良い。

6.2 今後の展望

今後スパークチェンバーを用いて行うことができる測定をいくつか挙げる。ミューオンの天頂角分布が $\cos^2 \theta$ 則に従うかどうかの測定。そのデータを用いた東西効果の測定などもできる。今回はヘリウムを用いて実験を行ったが、アルゴン等のヘリウム以外の希ガスを用いることも出来るので、他のガスをを用いた場合の放電効率、放電の色の違いなどを観測したい。

6.3 謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々にお世話になりました。ここに深く感謝いたします。特に前田先生には電気装置のセットアップ、スパークチェンバーの設計製作など多くのことを教えてもらいました。同じ研究室の実験「宇宙線ミューオンを用いた透視実験の解析結果」の谷口君・角君・吉田さんにも感謝します。一年間ありがとうございました。

参考文献

- [1] 榊真吾、田中裕己、三宅聡平、吉田将 (2016) 「スパークチェンバーの作製」