

平成 28 年度卒業論文

スパークチェンバーの製作と教育的利用

2017 年 3 月 10 日

京都教育大学 理科教育専攻
学籍番号 131215

山下 将暉

背景

私は所属している基礎物理学研究室で素粒子などについて研究をしていることが多くある。また私は高校の物理教員を志しているが、高校物理の学習指導要領の中では電磁気学に関する分野が最も苦手で、原子などに関する分野はほとんど理解できていなかった。その理由としては電子や原子の振る舞いが目に見えないので現象がイメージしにくいということが最も大きな理由である。しかし教員として教壇に立つ以上専門教科で苦手な範囲があってはいけないと考え、教壇に立って電磁気学という目に見えない分野について教えるときに少しでもわかりやすい授業を展開するためにも電磁気学に関してもっと深く理解していなければならないと思う。なのであえて自分の苦手な分野から卒業論文の題材を探していたところ、高嶋先生から初めて耳にするスパークチェンバーというものの存在を教えて頂いた。なぜならばスパークチェンバーは普通の高校などではなく、博物館で展示されているようなものだからである。スパークチェンバーは私の出身である大阪府にある大阪大学で発明されたものであり、将来は大阪府で働きたいということを併せると良い題材ではないかと思いスパークチェンバーの作成に取り組もうと思った。また、スパークチェンバーは目に見えない電子などの荷電粒子を可視化できるという点にも魅力を感じた。

目次

1	はじめに	3
1.1	空気シャワー現象	3
1.2	ニュートリノ	4
2	ガス検出器	10
2.1	ドリフトチェンバー	10
2.2	スパークチェンバーの概要図	12
3	スパークチェンバーの製作	14
3.1	本体の組み立て	14
3.2	電気回路	22
4	まとめ	25
5	謝辞	27
6	参考文献	28

1 はじめに

1.1 空気シャワー現象

空気シャワー現象とは、宇宙には太陽表面の爆発などで生じた高エネルギーの宇宙線が存在しておりこれらの宇宙線が地球に降り注ぐ際には地球の大気原子核と衝突、相互作用して陽子、中性子、中間子などの素粒子を発生させる。これらの発生した素粒子もさらに空気の原子核などと衝突し、相互作用を繰り返してエネルギーを失ってゆく。そして最後には相互作用を起こさないミュー粒子などになって地表へと降り注ぐ。この一連の流れを空気シャワー現象と呼ぶ（図1）。これらの粒子は宇宙から地球に降り注いでくるものであり、地球の大気中などに吸収されずに地表まで降り注いでくるので観測機を用いると容易に観測をすることができる。その測定器としてスパークチェンバーなどの機器を用いることによって荷電粒子の飛跡を可視化することができる。空気シャワー現象で生成する荷電粒子について詳しく説明すると次のようになる。

宇宙から降り注いだ宇宙線は地球の大気と原子核と衝突し様々な素粒子を作る。この中で中性パイ粒子は2つのガンマ線に崩壊し、正荷電パイ粒子はミューニュートリノ、反ミュー粒子に崩壊する。反ミュー粒子は陽電子、反ミューニュートリノ、電子ニュートリノに崩壊する。また、負荷電パイ粒子は反ミューニュートリノ、ミュー粒子に崩壊する。ミュー粒子は電子、ミューニュートリノ、反電子ニュートリノに崩壊する。このように大気中で作られたニュートリノを特に大気ニュートリノという。

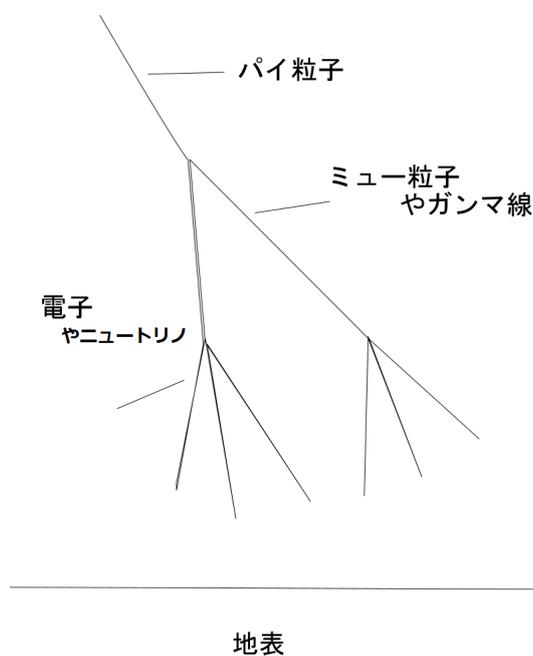


図1 空気シャワー現象

1.2 ニュートリノ

ニュートリノは電荷を持たない素粒子であり、非常に透過性が高くほかの物質ともあまり反応しないのでニュートリノを直接観測することは難しい。ニュートリノは太陽や宇宙の星々が光るときに生まれ、宇宙線が地球の大気と衝突した時にも生まれる。ニュートリノの中にも電子ニュートリノ、ミューニュートリノ、タウニュートリノという3種類のニュートリノが存在する。これらのニュートリノを直接観測することは難しいために間接的に観測をしようとしたものがカミオカンデである。カミオカンデは岐阜県飛騨市神岡町の地下で3000トンの超純水を蓄えたタンクと、その壁面に設置した1000本の光電子増倍管を設置してチェレンコフ光を観測するという装置である。チェレンコフ光とはニュートリノが原子核などと衝突したときに電子やミュー粒子が飛び出る。その飛び出た粒子が水の中を走るときに出る光である。

大気ニュートリノをカミオカンデを使って観測していたところ、電子ニュートリノの数は想定していた範囲内であったがミューニュートリノは想定していた数よりも少ないという観測結果であった。この原因として考えられるものはニュートリノ振動によってミューニュートリノがカミオカンデでは観測しにくいタウニュートリノに変わっていたということが考えられ、スーパーカミオカンデによってニュートリノ振動に関する観測が行われ、ニュートリノ振動は実際にあるものであるということがわかった。

ニュートリノは粒子なので微小ではあるが質量を持ち、波の性質も持っている。先ほどニュートリノには電子ニュートリノ、ミューニュートリノ、タウニュートリノという3種類のニュートリノがあるという分け方をしたが、ニュートリノの波の性質に注目するとそれぞれ異なった周波数のニュートリノ1、ニュートリノ2、ニュートリノ3という異なった分け方をすることができる。電子ニュートリノなどは3種類のニュートリノ1, 2, 3が合成されたものであるので、波の重ね合わせ方によっては電子ニュートリノがミューニュートリノに姿を変えるということも起こり得る。このことをニュートリノ振動という。

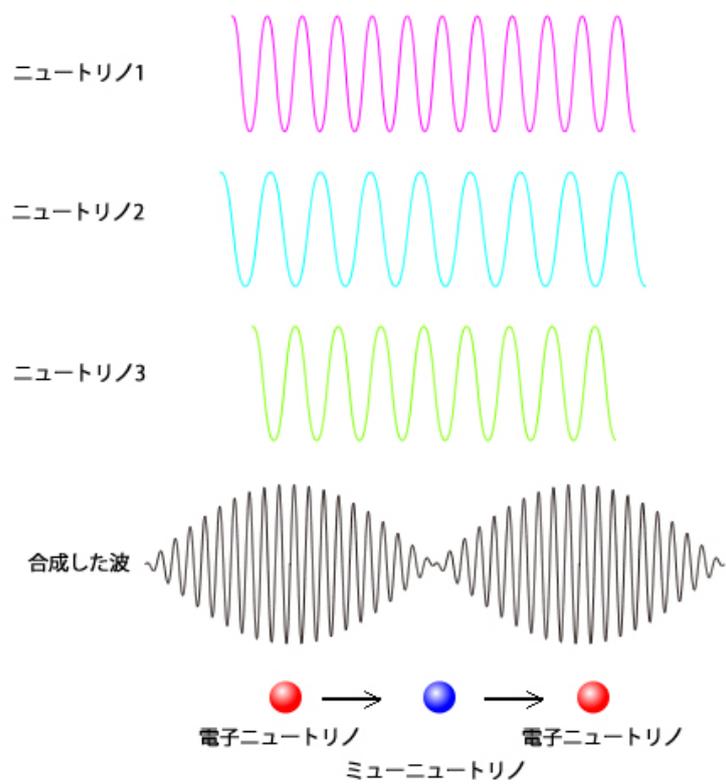


図2 ニュートリノ振動

昨今の日本では児童・生徒の理科離れが叫ばれており、理科は覚えることが多いから嫌いだという意見や、将来の役に立たないから勉強する必要がないなどという声を聞く。このような生徒に対して理科の面白さを伝えるツールの一つとしてスパークチェンバーを用いることができると考える。一般的にスパークチェンバーは市販されておらず、スパークチェンバーを見ようと思うと博物館などに行かなければならない。しかし簡易的なスパークチェンバーを作ることによって学校に居ながらにして荷電粒子の飛跡を観測することができるようになる。スパークチェンバーを用いる具体的な方法としては、授業の中などで生徒に対してスパークチェンバーの映像を見せるのではなく、実物を見せることで理科が嫌いな生徒に対して実際に存在しているが目に見えないものを目の前で実際に見せることによって理科の面白さに触れるキッカケにしたり、理科が好きな生徒に対してはスパークチェンバーに使われているコッククロフト・ウォルトン回路やブロッキング回路などの機構を取り上げることによって発展学習のような内容で知的興味を掻き立てることもつなげられる。他にもパソコンで自分で回路を書き、様々な端子とそのパラメータを設定することによって任意の場所におけるアウトプットなどをシミュレーションしてくれる LTSpice というシミュレーションソフトがあるのでこのソフトを用いることによって計算が困難な回路などのシミュレーションを簡単にすることができる。次の図は LTSpice を用いて書いたコッククロフト・ウォルトン回路、ブロッキング回路とそのシミュレーション結果である。これらのアウトプットの値はスパークチェンバーを作成するにあたり、適切な値となるように設定している。

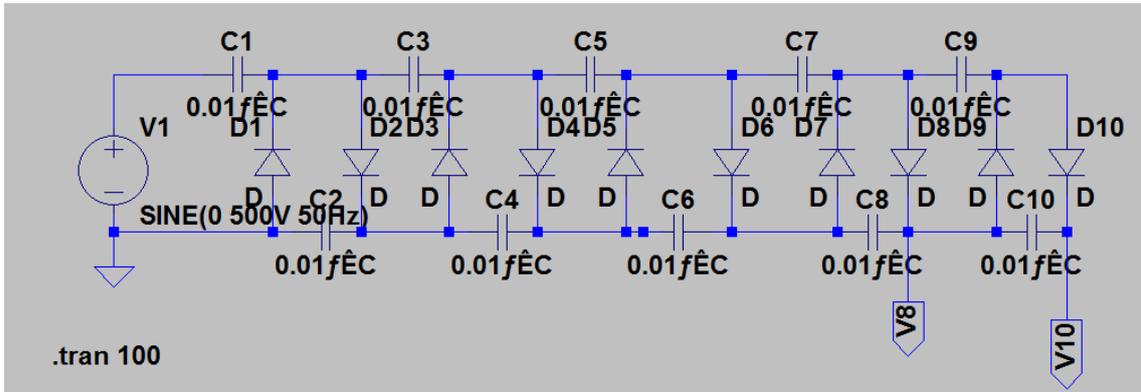


図3 コッククロフト・ウォルトン回路

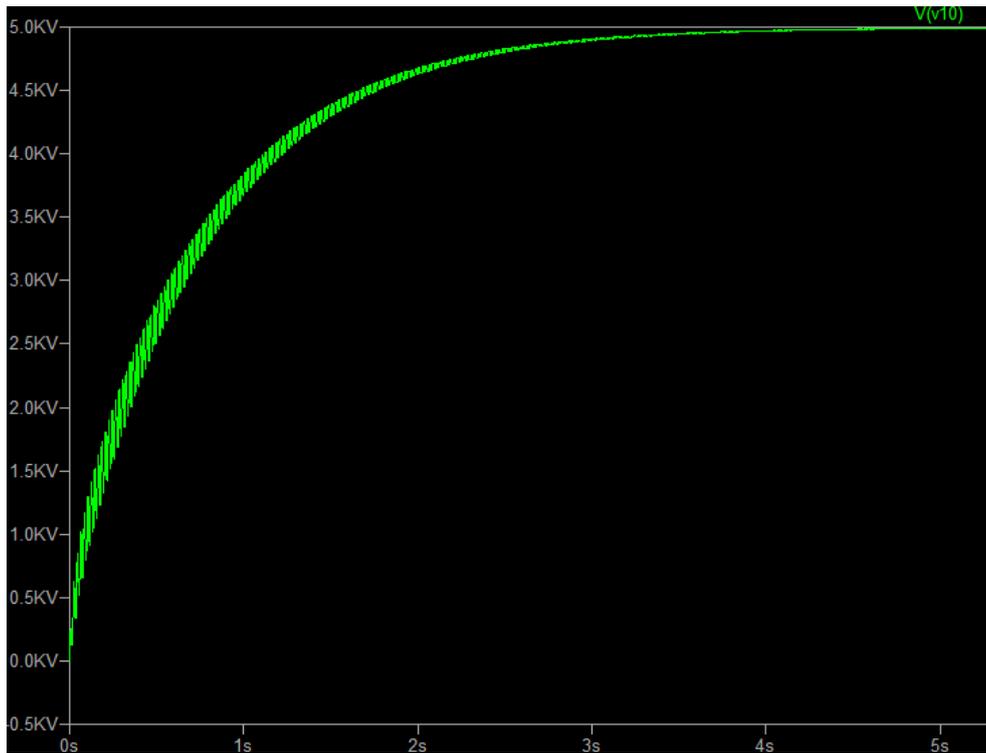


図4 コッククロフト・ウォルトン回路 シミュレーション結果

コッククロフト・ウォルトン回路とはダイオード、コンデンサー、交流電源を用いて作成されている回路であり、ダイオードが一定方向にしか電流を流さない性質と交流の性質を併せてコンデンサーに順番に電気がたまっていく仕組みとなっている。

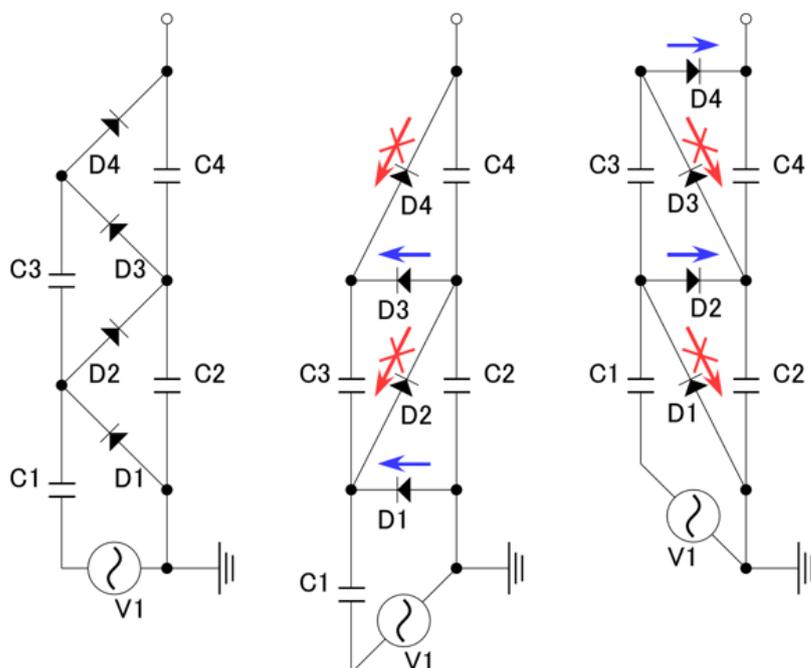


図5 回路を縦に置き換えたコッククロフト・ウォルトン回路

電圧を高さにして考え、一番左の状態は電圧がかかっていない状態（標準状態）とする。まず、真ん中の状態（負電位）になると D1 を通して電流が流れ、C1 が充電される。次に、右の状態（正電位）になると C1 の上側極版には C1 で蓄えられた電位と電源から供給された電位の和が生じる。そして、逆バイアスとなる D1 に電流は流れず正バイアスである D2 に電流が流れて C2 が充電される。そして、負電位になったときには先ほど充電された C2 から新たに生バイアスの D3 を通り C3 が充電される。この過程を経て次々にコンデンサーが充電され、全てのコンデンサーが充電されると電流は流れなくなる。このようにしてコンデンサーを充電するだけで高い電圧を生じさせることができる原因としては、コンデンサーの充電のサイクルの中で標準状態のときにはコンデンサー同士は並列接続になるからである。

例えば C2 には電源電圧と C1 で蓄えられた電位の和が生じる。C3 には C2 と C1 で蓄えられた電位の和が生じることになる。このような考え方でコッククロフト・ウォルトン回路は昇圧回路となっている。

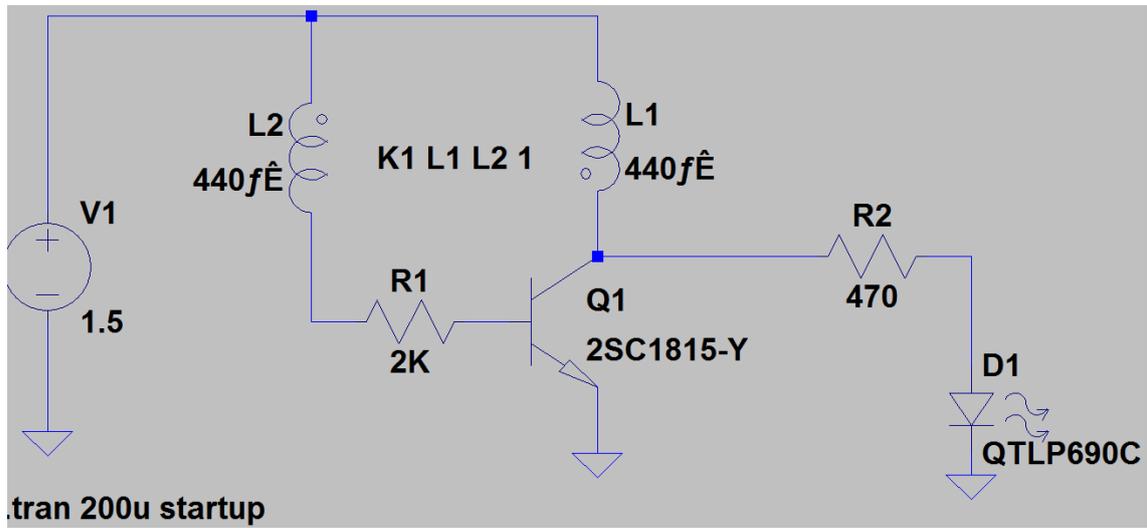


図6 ブロッキング回路

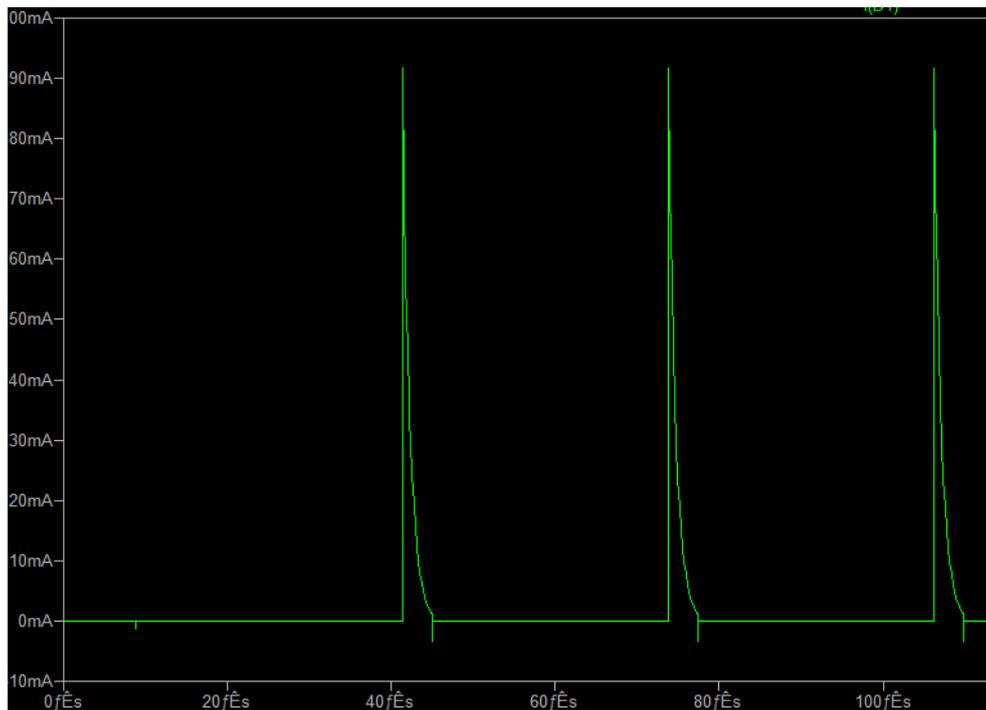


図7 ブロッキング回路 シミュレーション結果

2 ガス検出器

2.1 ドリフトチェンバー

スパークチェンバーとは1957年に福井崇時氏と宮本重徳氏によって開発されたガス検出器であり、この装置の発明により様々なガス検出が発展する礎となった。例えばドリフトチェンバーはスパークチェンバーを発展させたガス検出器であり、アクリル板の間などに希ガスを封入し、高圧をかけたワイヤーを何本も通すことで荷電粒子が測定器を通過するときに、電子が希ガス原子にぶつくと希ガス原子から電子が叩き出され、希ガス原子がイオン化する。このとき叩き出された電子は近くの陽極ワイヤーに引き寄せられて加速する。加速した電子はほかの希ガス原子にぶつかり、新たな電子を叩き出す。この過程によって電子がネズミ算式に増えていく。このことを電子雪崩と呼ぶ(図)。このとき出てきた電子を近くにある陽極ワイヤーに集め、電子からの信号を読み取りそれらのデータから荷電粒子の飛跡を観測するというものである(図)。スパークチェンバーがドリフトチェンバーなどと異なる大きな点としては、ドリフトチェンバーは検出した信号をパソコンなどで読み取り、荷電粒子の飛跡を割り出すのに対してスパークチェンバーは測定器を使って荷電粒子の飛跡を実際に見ることができるという点である。

- ドリフトチェンバーの機構

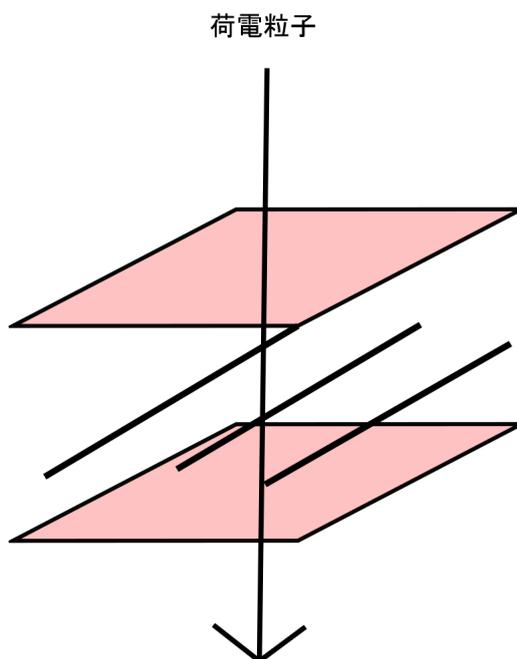


図8 ワイヤーの位置を少しづつ変えたこの構造を何層もつくる

- 電子雪崩の概略図

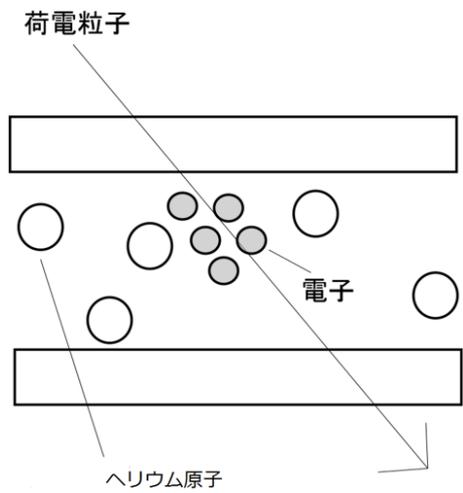


図9 高電圧印可前

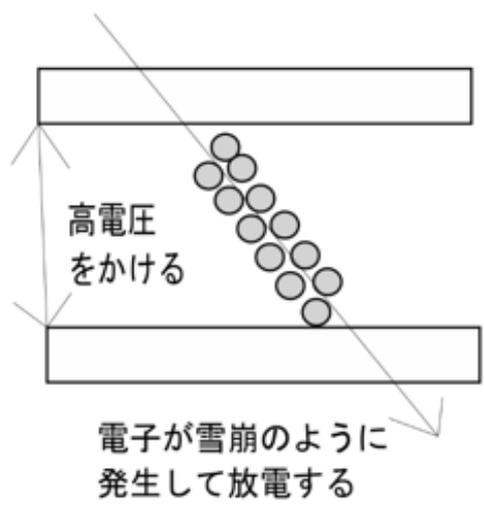


図10 高電圧印可後

2.2 スパークチェンバーの概要図

スパークチェンバーは荷電粒子が高電圧をかけたアルミ板とアクリル板で封入した希ガス気体中を荷電粒子が通過する瞬間に希ガス原子が電子雪崩の原理でイオン化する。このとき発生した電子はドリフトチェンバーの場合は陽極ワイヤーに集められたが、スパークチェンバーでは陽極ワイヤーの代わりにアルミ板に高電圧をかけることによって発生した電子が正の電極のほうに引き寄せられて加速することによってアルミ板間で荷電粒子の飛跡に沿った電子の放電 (スパーク) を観測することができる。この原理を用いてアルミ板を何層にも重ねて荷電粒子の飛跡を観測する装置がスパークチェンバーとなっている。

電圧をかけていないスパークチェンバーを荷電粒子を通過しても電子雪崩現象は起きないのでスパークチェンバーの極板に電圧をかける必要があるのだが、常時電圧をかけていると蛍光灯のように常に放電状態となり荷電粒子が通過した飛跡のみを観測することができない。よって荷電粒子が飛んできた瞬間だけ高電圧をスパークチェンバーにかけなければならない。スパークチェンバーに用いられている機器の説明は後述する。

以下の図は電子雪崩を踏まえたうえでのスパークチェンバーの概要図となっている。荷電粒子の飛跡に沿ってできてくる黄色い線はスパークの飛び方を模式的に表したものである。

- スパークの概略図

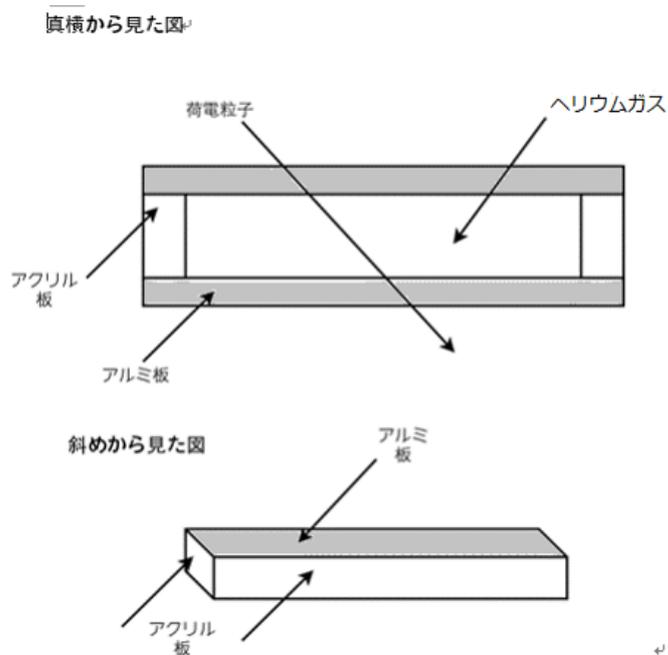


図 11

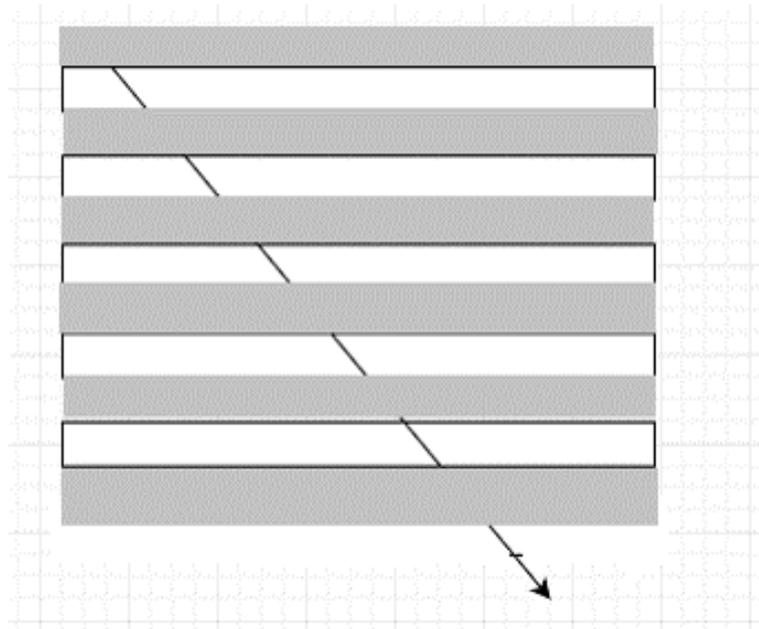


図 12 荷電粒子の飛跡

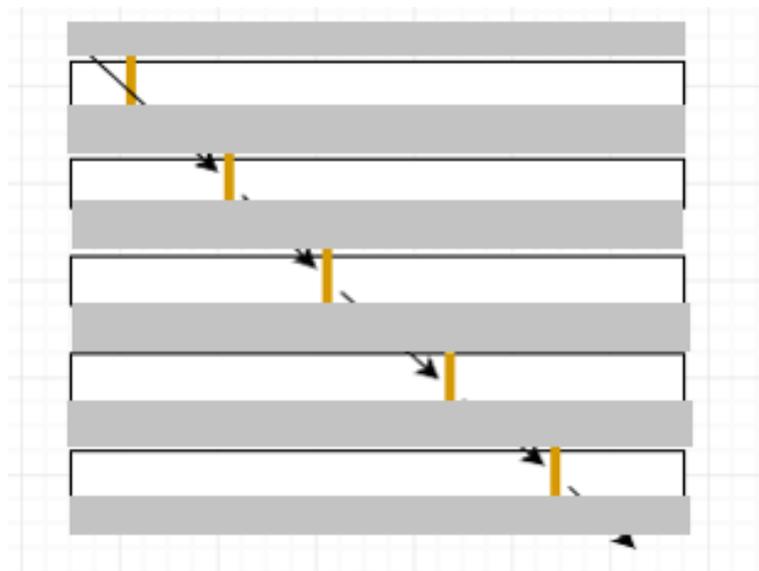


図 13 放電の様子

3 スパークチェンバーの製作

3.1 本体の組み立て

スパークチェンバーにおいて荷電子の飛跡を観測するためには、アクリル板とアルミ板を交互に重ね合わせ、アクリル板を側面から見たときに飛跡を観測できるようにする。その為に、アクリル板を長辺 18cm、短辺 2cm、厚さ 5mm で切り出した。切り出したアクリル板の断面からスパークを観察するので、スパークを観察しやすいように観測面にも断面を紙やすりの 2000 番までを用いて研磨を行いアクリル板の向こう側が透けて見えるくらいまで研磨をしてスパークを観察しやすいようにした。アクリル板の上に重ねるアルミ板は縦 22.5cm、横 18.5cm、厚さ 1mm のものを用いた。これらのアクリル板 4 枚とアルミ板 2 枚でスパークチェンバーの 1 層とした。上が研磨後のアクリル板で下が研磨前のアクリル板である。

アクリル板同士はアクリル樹脂用接着剤を用いて接着した。そして、アクリル板とアルミ板は以下の図のようにポリカーボネイト製のねじを用いて一緒に締めることによって希ガスの封入をすることにした。また、アクリル板を挟んでいるアルミ板に高圧とグラウンドの電圧をかけており、希ガスを封入するときにアルミ管を用いているのでアルミ管を通じて電圧がリークすることを防ぐためにガスを封入する部分のアクリル板はアルミ板よりも 1cm ほど太くすることによってアルミ管から電圧がリークしないようにした。他にもアルミ板に高圧とグラウンドの電圧を送り込む部分に導線などをつないだときに放電が起きないようにするためにアルミ板にタブを作り放電が起きにくいようにした。他にもアルミ板に電圧をかけるためにアルミ板のタブに 2mm のねじを取り付けて電圧を印可できるようにし、タブも高圧とグラウンドが同じ側にならないように工夫をした。

which are combined in a compact low-inductance bank. Unlike the so-called avalanche transistor switches, the MOSFETs of the HTS switches are not operated in breakdown but are controlled via their gates giving rise to a high degree of reliability and a switching performance which is excellent. By means of a special driving circuit the individual MOSFETs are controlled absolutely synchronously and with a low impedance. In conjunction with connection technique particularly low in inductance, it is possible in this way to obtain allows the devices to be used as high-side switches. A TTL-compatible control signal and an external auxiliary voltage are all that are required on the input side (except for optional high-

図 14 研磨したアクリル板



図 15 アクリル板同士の接着に用いた接着剤

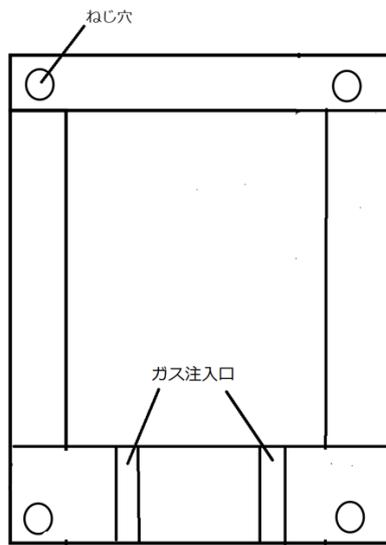


図 16 上から見た組み立て図

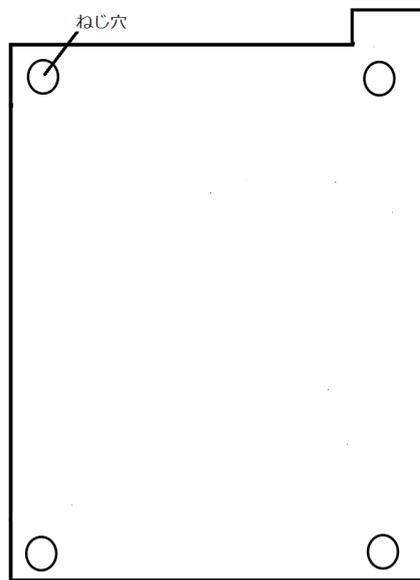


図 17 アルミ板

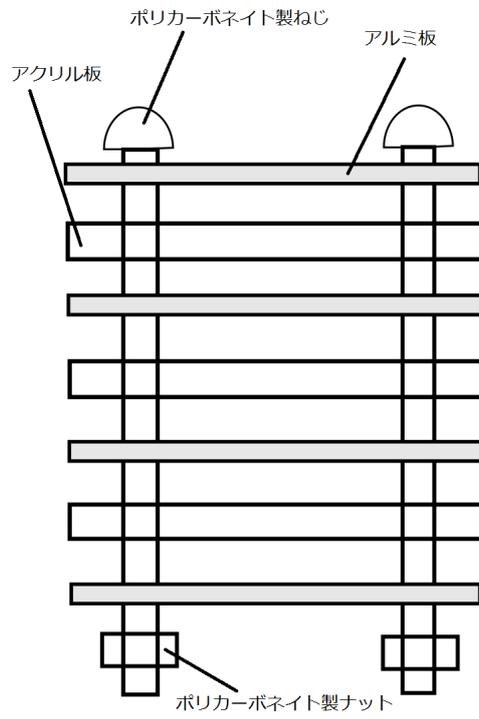


図 18 横から見た組み立て図 1

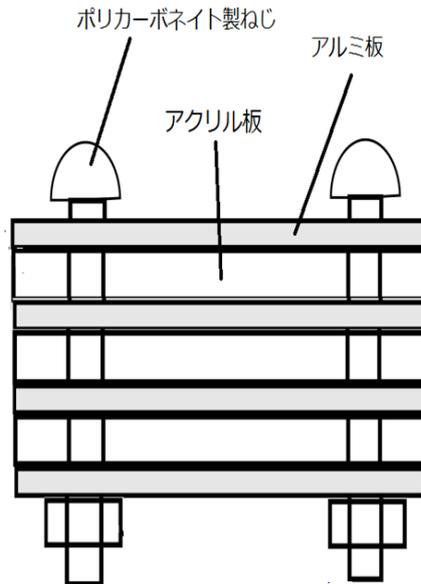


図 19 横から見た組み立て図 2



図 20 組み立てた図

スパークチェンバーはアクリル板とアルミ板を層状に重ね合わせたものの中に気体を封入する必要があるので、アクリル板の1つにボール盤で4mmの穴をあけ、4mmのアルミの管を通して気体を封入できるようにした。空気の封入の仕方としては、以下の図のようにレギュレーターを調節してガスを空気層に送り込む。このとき空気層を希ガスだけの状態にするために2か所に空気穴を設け、片方をガス送入口、もう一方をガス排出口として空気層にガスで満たすとき2つの出入り口を開け、空気層が希ガスで充満したときに排出口、送入口の順に閉める。

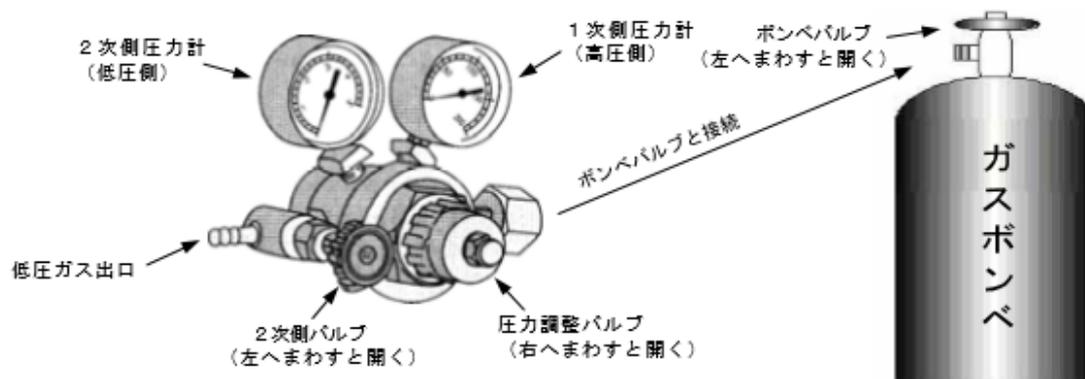


図 21 レギュレーションシステム

試験的にアルミ棒を用い、ギャップが2mm、1気圧の常温の空気を封入し電圧をかけると約4kVで放電が起こった。次に、封入する気体をヘリウムに変えて実験を行ったところ約1kVで放電がおこった。このことにより封入する気体は空気よりもヘリウムガスの方が低い電圧で放電を起こすことができるので、スパークチェンバーに封入する気体もヘリウムにすることにした。この現象はパッシェンの法則を用いても説明することができる。次に示すパッシェンの法則の図の横軸は圧力と距離の積となっており、1Torr=1mmHgである。本研究では1気圧においてスパークチェンバーの放電距離を5mmと設定しているので約760mm×0.5cmの積の部分に縦軸に平行な線を引く。すると約4kVと最も低い電圧で放電可能となる気体はヘリウムとなっていることがわかる。よって本実験の条件下においてはヘリウムが最も放電しやすい気体となっているのでスパークチェンバーに封入するガスはヘリウムとする。また、窒素が8割を構成している空気においては放電を起こすためには約8kVの電圧をかけなければいけないということがわかる。他にもヘリウムなどの気体が候補に挙がったが、以下の参考文献により、アルゴンガスが最も低い電圧で放電を起こしやすいことがわかったのでヘリウムを用いることにする。

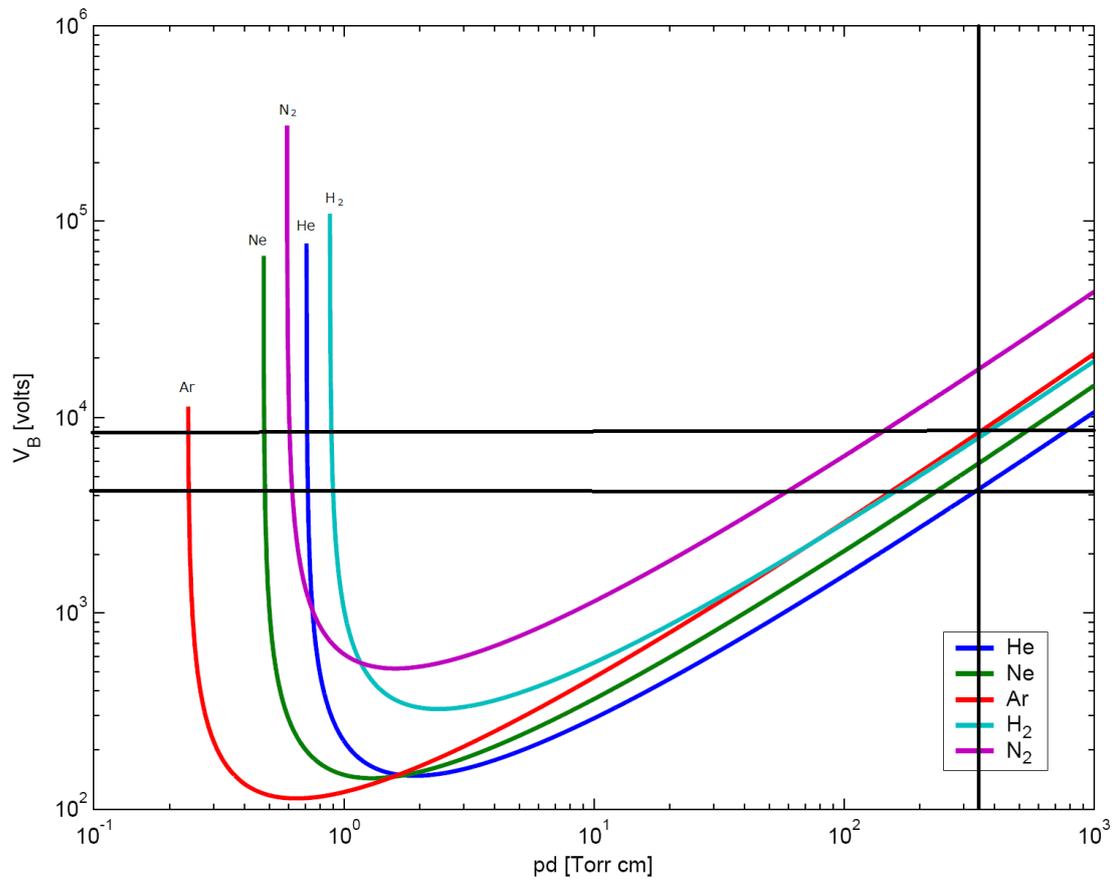


図 22 パッシェンの法則

スパークチェンバーにかける高電圧をアルミ板にかけるのだが、組み立ての部分でも述べたようにアルミ板に付けたタブに高電圧印可回路を接続した。

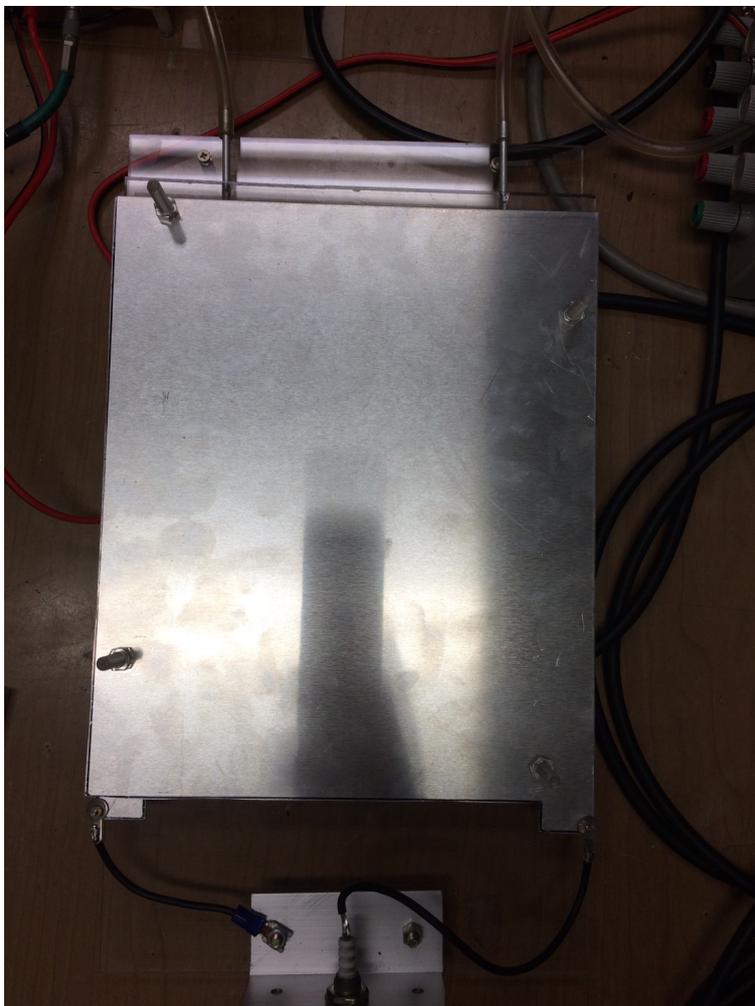


図 23 スパークチェンバー本体に高圧印可回路を接続したもの

スパークチェンバーの下側のアルミ板を高圧にしたのでスパークチェンバーの下にアクリルで製の台を置くことによって直接机に置くことなく絶縁を行うことができています。

3.2 電気回路

スパークチェンバーは荷電粒子が通過した瞬間にスパークを起こし、荷電粒子の飛跡を目視できるようにする装置であるので、荷電粒子が観測部分を通じた瞬間に高電圧を電極にかける必要がある。瞬間的に高電圧をかけるということがポイントであり TTL の信号を受け取ってからアルゴンイオンがイオン対になって結合する前に印加を行わなければならない。また、常時高電圧をかけていると蛍光灯のように常に放電を起こし、荷電粒子の飛跡を確認することができなくなるからである。荷電粒子がスパークチェンバーを通過したことを感知するためにプラスチックシンチレーターを用いる。プラスチックシンチレーターとは蛍光塗料が含まれているプラスチックである。ここで発生した光を光電子増倍管で増幅させ、一定の強さ以上の信号を受け取ったときにパルスが発生させるディスクリミネータに接続する。今回はプラスチックシンチレータがきれいな信号を検出せずアフターパルスのようなものが出ていたのでスレッシュドレベルを 230mA に設定した。パルスの幅や振動数はパルサーをつないでパルサーについているアナログのスイッチで切りかえる。ディスクリミネータから NIM-TTL 回路を経由し、高電圧印加回路に接続する。今回は高電圧印加回路は BEHLKE を用いた。BEHLKE には、high side switch と low side switch があり、high side switch とは、信号が来ていない状態では電圧をかけず、信号がきたときに高電圧をかけるものである (図)。対照的に low side switch とは信号がきたときに電圧を落とすようにはたらくものである。今回の実験では信号が来た時に高電圧をかける必要があるので high side switch を用いる。最後にスケラーをつけ、観測した荷電粒子の数を記録する (図)。

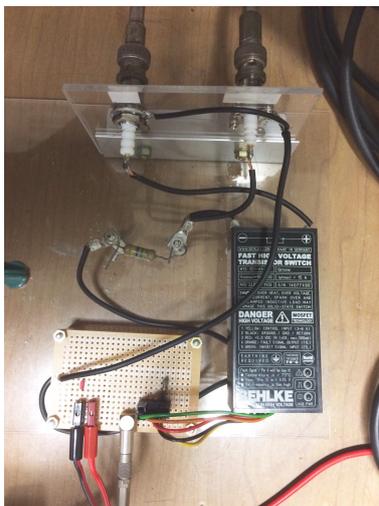


図 24 BEHLKE を用いた高圧印可回路

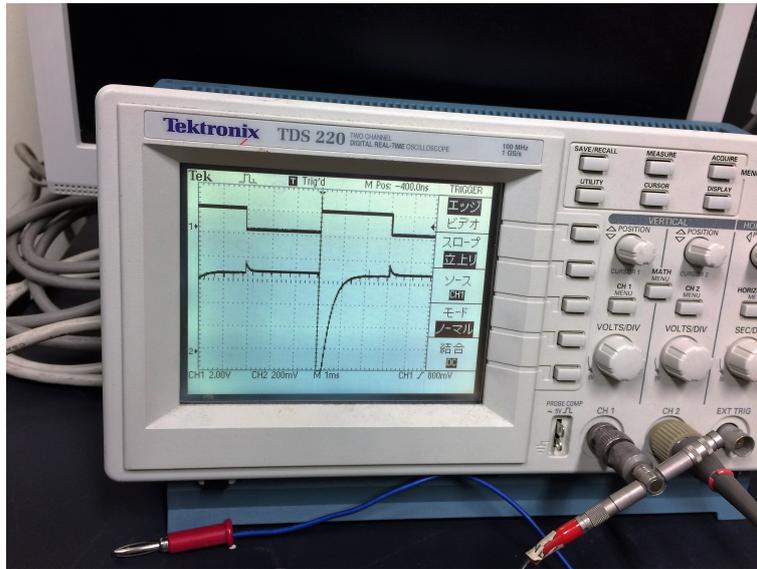


図 25 Low side switch

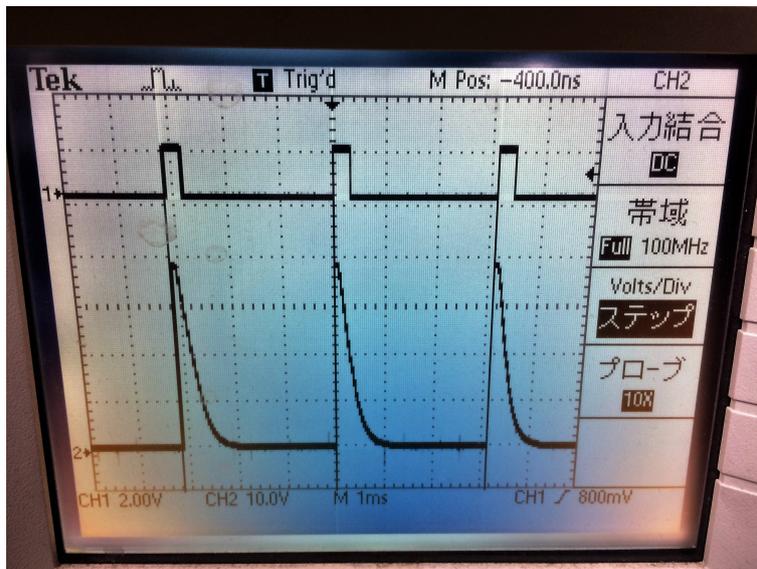


図 26 High side switch

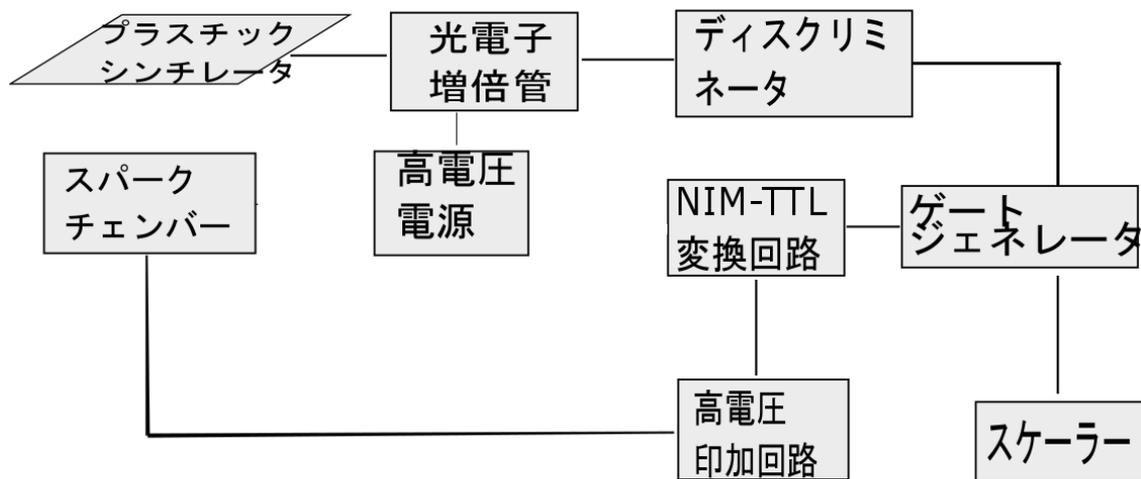


図 27 スパークチェンバー電子回路

4 まとめ

スパークチェンバーを用いるのではなくアクリルパイプを用いてパイプ内にヘリウムガスを封入して簡易的に放電実験を行ってみたところ、高電圧印可回路に使用している BEHLKE にエラーメッセージが出るがアルミ管間において放電を観測することはできた。

この実験をもとにしてスパークチェンバーの1層を用いて放電実験を行ってみたが、BEHLKE にエラーランプが出ているときのみ放電が起こるような音がでている状態となっていた。エラーランプが点灯する原因として考えられるものにはエラーの例として Sw. Frequency is too high が考えられるのでシンチレーターからの信号が多すぎるのでスレッシュホルドレベルをもう少し上げることで受け取る信号の数を減らすことができるのではないかと考える。他にもシンチレーターをきれいな信号を検出できるものに替えて実験を行ってみることも考えられる。

スパークチェンバーでスパークが検出できなかった原因で BEHLKE のエラーランプ以外の原因として考えられたものはアクリル板とアルミ板をポリカーボネイトのねじで締めることで重ね合わせていたがガスを封入するときにアルミ板が少し膨らんでしまいアクリル板との間に隙間ができてガスがすべて流出してしまったことが考えられる。この対策としてはアクリル板とアルミ板を接着剤を用いて接着することによってスパークチェンバーの内部の気密性を確保するということである。

装置の問題以外にもアクリル板を用いてスパークを観測しようとしているがアクリル板の厚さによってスパークが見辛くなっているのではないかということも考えた。

教育的な利用としては、今回の研究だけでは教育的に直接利用できる機構をスパークチェンバーには使用しなかったが、昇圧回路を用いたシュミレーションなどは理科クラブなどで利用することができると思った。また、身近な存在である雷の発生機構とスパークチェンバーのスパークを飛ばす機構は似ているので電子雪崩の説明をもとにして雷の発生機構の説明をすることもできます。雷は高い電圧で放電が起こっているということは自明ですが、窒素の多い空気中を放電することはパッシェンの法則から考えても雷にはかなり高い電圧がかかっているということが裏付けされるということも発展学習として授業の中で紹介することもできると考えます。



図 28 アクリルパイプにおける簡易放電実験

5 謝辞

この研究を卒業論文として形にすることができたのは、ご指導をいただいた教育学部基礎物理学研究室高嶋隆一教授に深く感謝いたします。何もわからないところから研究が始まり基礎的な内容から熱心に細やかな指導をいただき大変心強かったです。この研究を通じて素粒子に関する学問に興味を持つきっかけともなりました。また、家田晋輔先輩には日頃より研究面から様々なことで相談に乗っていただき非常に頼もしかったです。協力していただいた皆様への心からの感謝の気持ちと御礼を申し上げたく、謝辞にかえさせていただきます。

6 参考文献

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、浜田哲郎、春名毅、遠藤裕介

学部卒業研究 スパークチェンバーの設計東京工業大学 理学部 物理学科 柴田研究室 鈴木 研人平成 21 年
2 月 26 日

<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/sk/neutrino.html>

<http://higgstan.com/atmospheric-neutrino-and-oscillation/>

月間フィジクス 7 続・宇宙線一' 79 京都国際会議の成果一
物理屋になりたかったんだよ ノーベル物理学賞への軌跡