

# スパークチェンバーの作製

榊真吾 田中裕己 三宅聡平 吉田将

2016年3月

## 目次

1	序論	3
1.1	動機	3
1.2	背景	3
2	実験原理	4
2.1	宇宙線が飛来しスパークが発生するまでの一連の流れ	4
2.2	スパークがつくられる機構	4
2.3	スパーク発生頻度の計算	5
3	作製手順	6
3.1	素子の規格決定	6
3.2	電流・電圧計算	8
3.3	組み立て	14
4	実験結果	16
4.1	動作確認	16
4.2	回路の変更	17
4.3	結果	18
5	考察・まとめ	18
5.1	考察	18
5.2	今後の課題	19
5.3	今後の展望	19
5.4	謝辞	19
5.5	参考文献	20

# 1 序論

## 1.1 動機

放射線は世にありふれたものである。空からは宇宙線が降り注いでおり掌を開けば1秒に1個程度が通過するし、また、建物に使われるコンクリートには放射性同位体が含まれている。

しかしながら、我々が普段の生活において放射線の存在を意識することは少ない。これは人間の五感によって放射線をとらえることができないからであろう。2011年の原発事故以来人々の間にある放射線に対する恐怖も、放射線が目に見えないものであることが理由の一端にあるとされている。

そこで今回我々は放射線(特に宇宙線)を可視化したいと考え、スパークチェンバーの作製に取り組んだ。可視化することで放射線を実感し理解を深めるとともに、飛跡を実際に観測することで宇宙線の天頂角分布の測定や粒子識別をすることを考えた。

## 1.2 背景

粒子の飛跡を観測する装置としては1897年に発明された霧箱や1952年に発明された泡箱があった。これらにより陽電子やニュートリノの観測が行われた。1955年、イタリアのConversiが開発したホドスコープチェンバーは宇宙線の飛跡を観測する装置で、高電圧パルスが宇宙線が通過した信号でトリガーして印加するという新しい方式の気体放電を利用する測定器である。

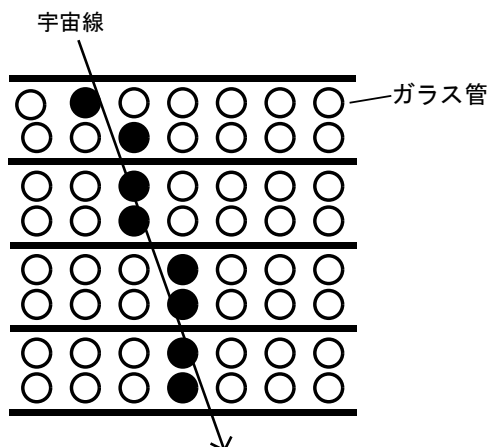


図1 ホドスコープの発光部模式図

図1のようにネオンガスを封入したガラス管を層状に並べる。電荷をもった宇宙線が通過するとネオン管が光り、放電光の列から飛跡が得られる。ホドスコープチェンバーの飛跡決定の空間分解能はガラス管の直径によって決まる。

実際は、管内の放電は宇宙線が通過した局所から始まっている。この局所性を追求し、1957年福井崇時と宮本重徳が開発したのがスパークチェンバーである。スパークチェンバーもホドスコープチェンバー同様に飛跡はトリガーによって得られる。情報がトリガーされているため、スパークチェンバーの時間分解能は $1\mu\text{s}$ より狭く、バックグラウンドの多い環境中の特定の現象を選別して検出、観測できるという特徴を持っている。

## 2 実験原理

### 2.1 宇宙線が飛来しスパークが発生するまでの一連の流れ

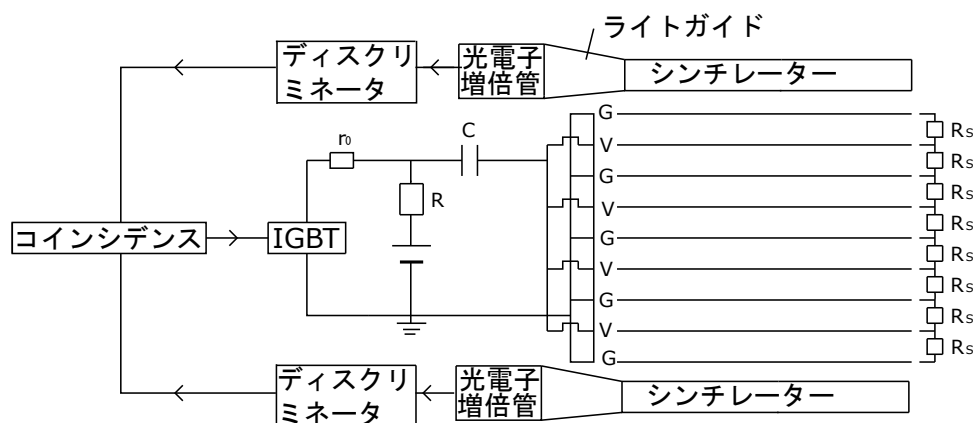


図2 スパークチェンバー概念図

スパークチェンバーの基本構造は図2のようになっている。スパークチェンバーの上下に置かれたシンチレーターを両方通過する宇宙線があったとき、コインシデンス回路を通じて絶縁ゲートバイポーラトランジスタ (IGBT) にゲート入力される。すると IGBT のコレクタとエミッタが導通することになるのでコンデンサ C に蓄えられていた電荷が高電圧パルスとなって極板に印加され図2のように高電位とグラウンドが交互に並ぶ。極板間に充満しているヘリウムガスを宇宙線が電離し、電離電子が電子ナダレを起こす。パルス電場の尖頭値が  $1000\text{V/cm}$  程度からスパークが起こり始める。スパークが起こると極板の電荷が放出され、はじめの状態に戻る。

### 2.2 スパークがつくられる機構

#### (1) 電圧パルス印加前

電荷をもった宇宙線が通過した時につくられる電離電子が放電の種となる。パルス印加前、電場はないので電離電子は熱運動をして拡散してゆく。

#### (2) 電圧パルス印加中

電離電子は高電界により急激に加速され、さらにねずみ算式に気体分子を電離 (Townsend 電離) する。そして、電子ナダレとなり発達してゆき、ナダレ先端部の電子群と正イオン群との空間電荷電界強度がパルス電界強度に等しくなると、電子群は空間電荷電界に引き付けられ陽極へと進めなくなりナダレの成長は止まる。このナダレ中につくられた多数の励起原子から放射される光により、ナダレの近くに多くの光電子がつくられる。ナダレの前方と後方は電気力線が集中し電場の傾きが急になっている。このところに作られた光電子は直ちに電子ナダレに成長し、始めのナダレとともに電子と正イオンとの集団ができ、電氣的に伝導性の柱状となる。この柱状のところを大電流が流れスパークとなる。非常に鋭い立上りの電圧パルスを1気圧の希ガス空間に印加した場合、電子ナダレが成長し、空間電荷電界が臨界に達するまでの時間は約  $10^{-7}\text{s}$  で、この後スパークとなるまでの時間は約  $10^{-8}\text{s}$  である。



### (3) スパーク形成後

スパーク電流を各電極に接続した抵抗で制限したり、電源のコンデンサーの容量が特に大きくなければパルス電界はスパーク電流でほとんど消滅しスパークも消える。スパークができた空間には大量の電子と正イオンの集団が残されている。いずれも密度が高いためそれぞれの集団の内部で反発しあい自由拡散より早く拡散する双極拡散をしながら再結合する。それぞれの密度が減ると電子と正イオンは自由拡散して再結合する。これらの再結合の時に後続発光が放射される。双極拡散が起こっている時間は $\sim 10^{-7}$ sで、再結合で電子がほとんどなくなるまでの時間は $\sim 10^{-4}$ sである。放電箱を実験装置として利用するとき、この時間は遅すぎる回復時間なのでスイーピング電解によって電子を早く取り除かねばならない。正イオンはパルス電界によって放電にまで成長することはないので少々残留していても構わない。

## 2.3 スパーク発生頻度の計算

宇宙線は、約 10cm の鉛を透過できるエネルギーを持っているか否かで、硬成分と軟成分とに分類される。硬成分には、ミューオン ( $>0.22$ GeV)、パイオン ( $>0.4$ GeV)、陽子 ( $>3$ GeV)、中性子 ( $>0.3$ GeV) などが含まれ、軟成分には、電子、ミューオン ( $<0.22$ GeV)、陽子 ( $<3$ GeV) などが含まれる。宇宙線の強度分布は、天頂角  $\theta$  を用いて、

$$J(\theta) = J_0 \cos^n \theta \quad (1)$$

で表すことができる。  $J_0$ 、  $n$  はそれぞれ、

$$\text{硬成分} : n = 2, J_0 = 0.82 \times 10^{-2} [\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sr}] \quad (2)$$

$$\text{軟成分} : n = 3, J_0 = 0.31 \times 10^{-2} [\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sr}] \quad (3)$$

である。

ここから、スパークチェンバーの上下に置かれたシンチレーター両方を通過する宇宙線がどの程度あるのかを考える。

距離  $h$  だけ離れた 2 つの平行な平面  $S_1$ 、  $S_2$  それぞれに、非常に小さな領域  $dS_1$ 、  $dS_2$  があるとする。ただし、  $dS_2$  は  $dS_1$  からみて、天頂角  $\theta$ 、距離  $r$  の位置にあるものとする (図 3)。このとき、  $dS_2$  を通って  $dS_1$  に入射する宇宙線がどの程度あるのかを考える。  $dS_1$  からみて、  $dS_2$  の占める立体角は、

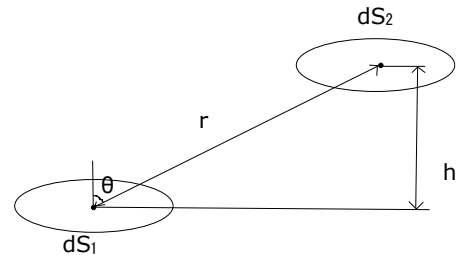


図 3 宇宙線の入射角

$$\frac{dS_2 \cos \theta}{r^2} = \frac{dS_2}{h^2} \cos^3 \theta \quad (4)$$

である。したがって、式 (1) より、求める宇宙線が入射する頻度は、

$$J_0 \cos^n \theta \cdot dS_1 \cdot \frac{dS_2}{h^2} \cos^3 \theta = \frac{J_0}{h^2} \cos^{n+3} \theta dS_1 dS_2 [/\text{s}] \quad (5)$$

となる。ただし、  $h$  の単位は cm、  $dS_1$ 、  $dS_2$  の単位は  $\text{cm}^2$  である。ゆえに、平面  $S_1$ 、  $S_2$  をともに通過する宇宙線が入射する頻度は、

$$\int_{S_1} \int_{S_2} \frac{J_0}{h^2} \cos^{n+3} \theta dS_1 dS_2 [/\text{s}] \quad (6)$$

と書くことができる。これを 2 つのシンチレーターに適用すれば、必要な数値を求めることができるが、平行に向かい合う 2 つの正方形についてこの積分を実行するのは難しい。そこで、2 つの平面  $S_1$ 、  $S_2$  をそれぞれ



$$C_{\text{He}} = \epsilon_0 \epsilon_{\text{He}} \frac{S_{\text{He}}}{l} = 8.85 \times 10^{-12} \times 1.0007 \times \frac{0.01}{0.01} = 8.85 \times 10^{-12} [\text{F}] \quad (8)$$

$$C_{\text{アクリル}} = \epsilon_0 \epsilon_{\text{アクリル}} \frac{S_{\text{アクリル}}}{l} = 8.85 \times 10^{-12} \times (2.7 \sim 4.5) \times \frac{0.0044}{0.01} = (10.51 \sim 17.5) \times 10^{-12} [\text{F}] \quad (9)$$

したがって、1 ユニット当たりの静電容量は

$$C_{s1} = C_{\text{He}} + C_{\text{アクリル}} = 19.3 \sim 26.3 [\text{pF}] \quad (10)$$

8 ユニットは積層しているが各ユニットは並列しているのでスパークチェンバー全体の静電容量は

$$C_s = C_{s1} \times 8 = 155 \sim 211 [\text{pF}] \quad (11)$$

となる。ここで求めたスパークチェンバーの静電容量をもとにその他の素子の規格を決めていった。

・スパークチェンバーと並列につながれている抵抗 ( $R_s$ )

スパークが一度起きて次のスパークが起こるまでは平均約 5s ある。そこでスパークチェンバー電極の電圧が ms 程度で減衰するように抵抗の大きさを決めた。スパークチェンバー 1 ユニットの静電容量が約 20pF なので図 4 の点線四角部の時定数  $C_s R_s$  が ms 程度になるには  $R_s$  は  $10^8 \Omega$  以下であればよい。今回は  $1 \text{M}\Omega$  とした。

・スパークチェンバーに直列につながるコンデンサ ( $C$ )

スパークチェンバーの極板間には 8kV が  $C_s$  と  $C$  の静電容量の逆比に分配された分の電圧がかかる。スパークが起こるための極板間電圧は  $3 \sim 5 \text{kV/cm}$  が適当である。高電圧源の電圧がなるべくスパークチェンバーに配分されるように  $C$  の静電容量は  $C_s$  に比べて大きい方がよい。しかし、 $C$  の静電容量があまりに大きいと充電に時間がかかりすぎ不適である。今回は 1nF のコンデンサを 4 個並列して 4nF のコンデンサとした。

・高電圧源からつながる抵抗 ( $R$ )

今回用いた高電圧モジュールは  $500 \mu\text{A}$  までの耐電流の仕様になっていた。なので定格以上の電流が流れないように  $20 \text{M}\Omega$  の抵抗を用いた。

・IGBT からつながる抵抗 ( $r_0$ )

この抵抗は IGBT 等に大電流が流れるのを制限している。今回は  $20 \Omega$  とした。

以上の素子はすべて 10kV 耐圧がある素子である。

また、図 4 の左部分はフォトカプラで絶縁するゲートドライバを使った IGBT にゲート入力する回路であり、ゲートドライバに付随する抵抗やコンデンサの値はゲートドライバのデータシートを参考にして決めた。18V の電源は 9V の乾電池を 2 個直列に繋いだものを使用した。100M $\Omega$  の抵抗は 8kV を抵抗分割し、4kV 耐圧の IGBT に均等に電圧をかけるために用いた。

### 3.2 電流・電圧計算

上で決定した素子を用いて 8kV の電圧をかけたときスパークチェンバーの極板間にかかる電圧の変化を考える。

まずはスイッチを切り十分時間がたった後にスイッチを入れて放電するときの電圧の変化を考える。印加する電圧を  $V_0 = 8[\text{kV}]$ 、時刻  $t$  におけるコンデンサ  $C$  の両端の電位をそれぞれ  $V_1(t)$ 、 $V_2(t)$  とする。このとき、スパークチェンバーにかかる電圧が  $V_2(t)$  である。そして、時刻  $t$  において抵抗  $r_0$ 、コンデンサ  $C$ 、スパークチェンバーの 1 ユニット  $C_{s1}$  に流れる電流をそれぞれ  $I_0(t)$ 、 $I_1(t)$ 、 $I_2(t)$  とする。さらに、時刻  $t$  にコンデンサ  $C$  およびスパークチェンバーの 1 ユニット  $C_{s1}$  に蓄えられている電荷をそれぞれ  $Q_1(t)$ 、 $Q_2(t)$  とする。これらを図にまとめると図のようになる。そして、これらの関係を考えて、

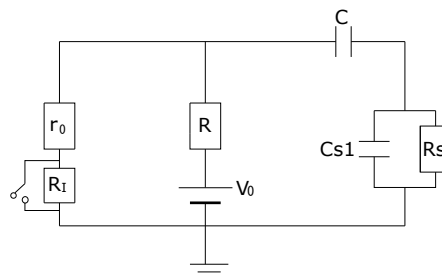


図 6 計算用簡易回路図。IGBT 部分は簡単のためスイッチで描いてある。またスパークチェンバーの極板は並列なので 1 ユニットのみ代表して描いてある。

$$V_0 - V_1 = R(I_0 - I_1) \quad (12)$$

$$V_1 = r_0 I_0 \quad (13)$$

$$V_2 = -R_s \left( \frac{I_1}{n} - I_2 \right) \quad (14)$$

$$Q_1 = C(V_1 - V_2) \quad (15)$$

$$Q_2 = C_{s1} V_2 \quad (16)$$

$$\frac{dQ_1}{dt} = -I_1 \quad (17)$$

$$\frac{dQ_2}{dt} = -I_2 \quad (18)$$

となる。ここで、 $n$  はスパークチェンバーのユニット数である。式 (12)、(13) より、

$$V_1 = \frac{r_0}{R + r_0} (V_0 + R I_1) \quad (19)$$

式 (14)、(16)、(18) より、

$$I_2 = R_s C_{s1} \left( \frac{1}{n} \frac{dI_1}{dt} - \frac{dI_2}{dt} \right) \quad (20)$$

式 (15)、(16)、(17)、(18)、(19) より、

$$-I_1 = C \left( \frac{R r_0}{R + r_0} \frac{dI_1}{dt} + \frac{I_2}{C_{s1}} \right) \quad (21)$$

ここで、式 (20)、(21) にラプラス変換

$$I_1 \longrightarrow \tilde{I}_1(s) = \int_0^{\infty} I_1 e^{-st} dt \quad (22)$$

$$I_2 \longrightarrow \tilde{I}_2(s) = \int_0^{\infty} I_2 e^{-st} dt \quad (23)$$

を用いる。このとき、

$$\frac{dI_1}{dt} \rightarrow \int_0^\infty \frac{dI_1}{dt} e^{-st} dt = s\tilde{I}_1 - I_1(0) \quad (24)$$

$$\frac{dI_2}{dt} \rightarrow \int_0^\infty \frac{dI_2}{dt} e^{-st} dt = s\tilde{I}_2 - I_2(0) \quad (25)$$

$$(26)$$

となるが、

$$V_1(0) = \frac{R_0}{R+R_0}V_0, V_2(0) = 0$$

より、

$$I_1(0) = \frac{R_I}{(R+R_0)r_0}V_0, I_2(0) = \frac{R_I}{n(R+R_0)r_0}V_0$$

である。ただし、 $R_0 \equiv R_I + r_0$  とおいている。したがって、式 (20)、(21) より、

$$\left(s + \frac{1}{R_s C_{s1}}\right) \tilde{I}_2 = \frac{s}{n} \tilde{I}_1 \quad (27)$$

$$\left(s + \frac{1}{C} \frac{R+r_0}{Rr_0}\right) \tilde{I}_1 + \frac{1}{C_{s1}} \frac{R+r_0}{Rr_0} \tilde{I}_2 = \frac{R_I}{(R+R_0)r_0} V_0 \quad (28)$$

となる。これらの式から  $\tilde{I}_2$  を消去して整理すると、

$$\tilde{I}_1 = \frac{s + \frac{1}{R_s C_{s1}}}{s^2 + \left[\frac{1}{R_s C_{s1}} + \left(\frac{1}{C} + \frac{1}{n C_{s1}}\right) \frac{R+r_0}{Rr_0}\right] s + \frac{R+r_0}{RR_s r_0 C C_{s1}}} \frac{R_I}{(R+R_0)r_0} V_0 \quad (29)$$

となる。ここで、

$$\alpha \equiv \frac{-(1+A) + \sqrt{1+A^2+2B}}{2R_s C_{s1}} \quad (30)$$

$$\beta \equiv \frac{-(1+A) - \sqrt{1+A^2+2B}}{2R_s C_{s1}} \quad (31)$$

$$\gamma \equiv \frac{1}{R_s C_{s1}} \quad (32)$$

とおく。ただし、

$$A \equiv R_s \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{r_0}\right) \left(\frac{1}{n} + \frac{C_{s1}}{C}\right) \quad (33)$$

$$B \equiv R_s \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{r_0}\right) \left(\frac{1}{n} - \frac{C_{s1}}{C}\right) \quad (34)$$

である。すると、式 (29) は、

$$\tilde{I}_1 = \frac{s+\gamma}{(s-\alpha)(s-\beta)} \frac{R_I}{(R+R_0)r_0} V_0 = \left(\frac{\alpha+\gamma}{\alpha-\beta} \frac{1}{s-\alpha} - \frac{\beta+\gamma}{\alpha-\beta} \frac{1}{s-\beta}\right) \frac{R_I}{(R+R_0)r_0} V_0 \quad (35)$$

と書くことができる。この式を逆ラプラス変換すると、

$$I_1 = \left( \frac{\alpha + \gamma}{\alpha - \beta} e^{\alpha t} - \frac{\beta + \gamma}{\alpha - \beta} e^{\beta t} \right) \frac{R_I}{(R + R_0)r_0} V_0 \quad (36)$$

となり  $I_1$  が求まった。この結果から  $I_2$ 、 $V_1$ 、 $V_2$  を求めると、それぞれ、

$$\begin{aligned} I_2 &= -C_{s1} \left( \frac{I_1}{C} + \frac{Rr_0}{R+r_0} \frac{dI_1}{dt} \right) \\ &= - \left[ \left( \frac{C_{s1}}{C} + \frac{Rr_0 C_{s1}}{R+r_0} \alpha \right) \frac{\alpha + \gamma}{\alpha - \beta} e^{\alpha t} - \left( \frac{C_{s1}}{C} + \frac{Rr_0 C_{s1}}{R+r_0} \beta \right) \frac{\beta + \gamma}{\alpha - \beta} e^{\beta t} \right] \frac{R_I}{(R + R_0)r_0} V_0 \end{aligned} \quad (37)$$

$$\begin{aligned} V_1 &= \frac{r_0}{R+r_0} (V_0 + RI_1) \\ &= \left[ r_0 + \frac{RR_I}{R+R_0} \left( \frac{\alpha + \gamma}{\alpha - \beta} e^{\alpha t} - \frac{\beta + \gamma}{\alpha - \beta} e^{\beta t} \right) \right] \frac{V_0}{R+r_0} \end{aligned} \quad (38)$$

$$\begin{aligned} V_2 &= -R_s \left( \frac{I_1}{n} - I_2 \right) \\ &= - \left[ \left( \frac{1}{n} + \frac{C_{s1}}{C} + \frac{Rr_0 C_{s1}}{R+r_0} \alpha \right) \frac{\alpha + \gamma}{\alpha - \beta} e^{\alpha t} - \left( \frac{1}{n} + \frac{C_{s1}}{C} + \frac{Rr_0 C_{s1}}{R+r_0} \beta \right) \frac{\beta + \gamma}{\alpha - \beta} e^{\beta t} \right] \frac{R_I R_s}{(R + R_0)r_0} V_0 \end{aligned} \quad (39)$$

となる。よって、 $I_1$ 、 $I_2$ 、 $V_1$ 、 $V_2$  の時間発展は図 7～図 10 のようになる。

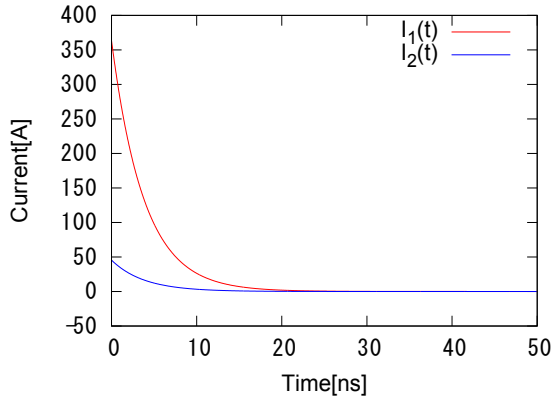


図7 放電時の  $I_1, I_2$  の時間発展 (50ns)

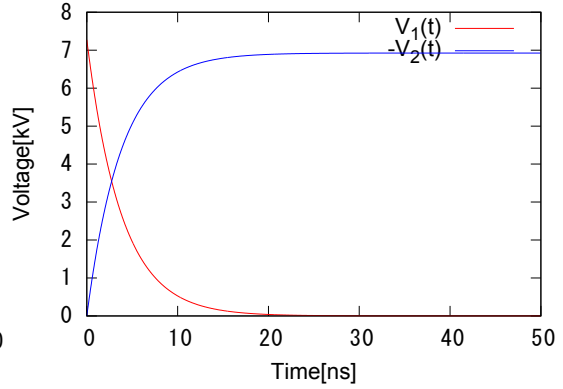


図8 放電時の  $V_1, V_2$  の時間発展 (50ns)

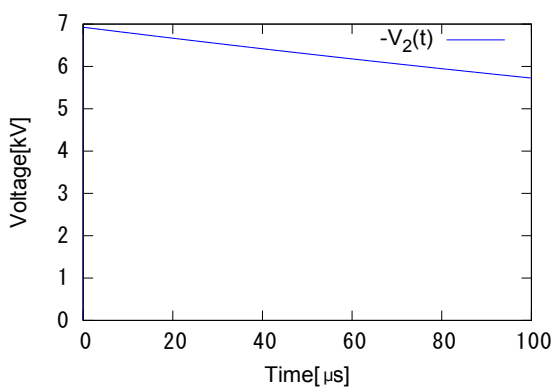


図9 放電時の  $V_2$  の時間発展 (100 $\mu$ s)

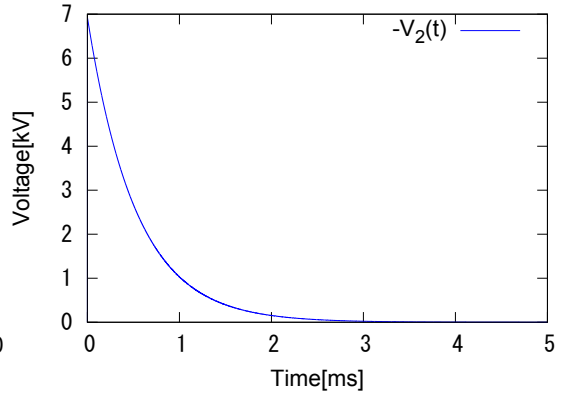


図10 放電時の  $V_2$  の時間発展 (5ms)

図8から宇宙線によって電離された電子と正イオンが再結合してしまう前 ( $1\mu$ s 以内) に高電圧が電極に印加されていることがわかる。また図10より、ms程度の時間で放電は終了し、次の放電に備えられていることがわかる。

次に、スイッチを入れた状態で十分な時間が経過した後に、スイッチを切り充電するときの電圧の変化を考える。放電について考えたときと同じように関係式を書き出すと、

$$V_0 - V_1 = R(I_0 - I_1) \quad (40)$$

$$V_1 = R_0 I_0 \quad (41)$$

$$V_2 = -R_s \left( \frac{I_1}{n} - I_2 \right) \quad (42)$$

$$Q_1 = C(V_1 - V_2) \quad (43)$$

$$Q_2 = C_{s1} V_2 \quad (44)$$

$$\frac{dQ_1}{dt} = -I_1 \quad (45)$$

$$\frac{dQ_2}{dt} = -I_2 \quad (46)$$

となる。ただし、 $R_0 \equiv R_I + r_0$  においている。これらの式と、

$$V_1(0) = \frac{r_0}{R + r_0} V_0, V_2(0) = 0$$

より、

$$I_1(0) = -\frac{R_I}{R_0(R+r_0)}V_0, I_2(0) = -\frac{R_I}{nR_0(R+r_0)}V_0$$

であることから、放電について考えたときと同様に、ラプラス変換を用いて計算すると、

$$I_1 = -\left(\frac{\alpha+\gamma}{\alpha-\beta}e^{\alpha t} - \frac{\beta+\gamma}{\alpha-\beta}e^{\beta t}\right) \frac{R_I}{R_0(R+r_0)}V_0 \quad (47)$$

$$I_2 = \left[\left(\frac{C_{s1}}{C} + \frac{RR_0C_{s1}}{R+R_0}\alpha\right) \frac{\alpha+\gamma}{\alpha-\beta}e^{\alpha t} - \left(\frac{C_{s1}}{C} + \frac{RR_0C_{s1}}{R+R_0}\beta\right) \frac{\beta+\gamma}{\alpha-\beta}e^{\beta t}\right] \frac{R_I}{R_0(R+r_0)}V_0 \quad (48)$$

$$V_1 = \left[R_0 - \frac{RR_I}{R+r_0} \left(\frac{\alpha+\gamma}{\alpha-\beta}e^{\alpha t} - \frac{\beta+\gamma}{\alpha-\beta}e^{\beta t}\right)\right] \frac{V_0}{R+R_0} \quad (49)$$

$$V_2 = -\left[\left(\frac{1}{n} + \frac{C_{s1}}{C} + \frac{RR_0C_{s1}}{R+R_0}\alpha\right) \frac{\alpha+\gamma}{\alpha-\beta}e^{\alpha t} - \left(\frac{1}{n} + \frac{C_{s1}}{C} + \frac{RR_0C_{s1}}{R+R_0}\beta\right) \frac{\beta+\gamma}{\alpha-\beta}e^{\beta t}\right] \frac{R_I R_s}{R_0(R+r_0)}V_0 \quad (50)$$

となる。ただし、

$$\alpha \equiv \frac{-(1+A) + \sqrt{1+A^2+2B}}{2R_s C_{s1}} \quad (51)$$

$$\beta \equiv \frac{-(1+A) - \sqrt{1+A^2+2B}}{2R_s C_{s1}} \quad (52)$$

$$\gamma \equiv \frac{1}{R_s C_{s1}} \quad (53)$$

$$A \equiv \frac{R_s}{R} \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R_0}\right) \left(\frac{1}{n} + \frac{C_{s1}}{C}\right) \quad (54)$$

$$B \equiv \frac{R_s}{R} \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R_0}\right) \left(\frac{1}{n} - \frac{C_{s1}}{C}\right) \quad (55)$$

である。よって、 $I_1$ 、 $I_2$ 、 $V_1$ 、 $V_2$  の時間発展は図 11～図 14 のようになる。



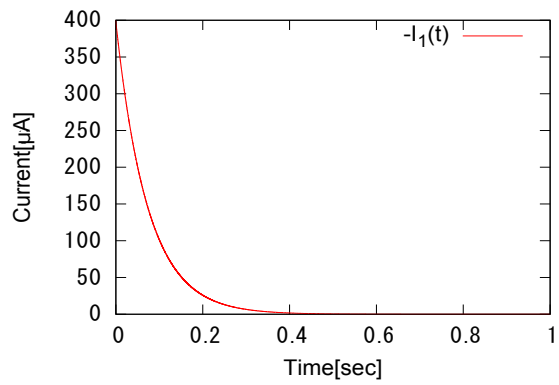


図 11 充電時の  $I_1$  の時間発展

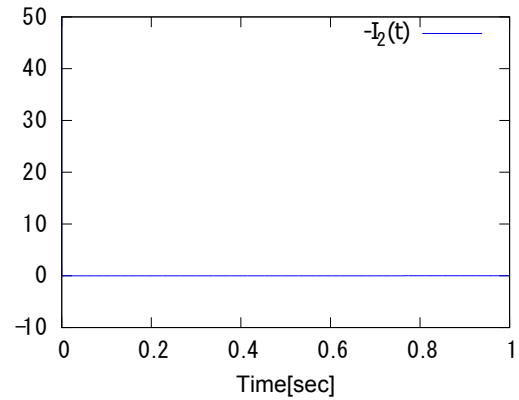


図 12 充電時の  $I_2$  の時間発展

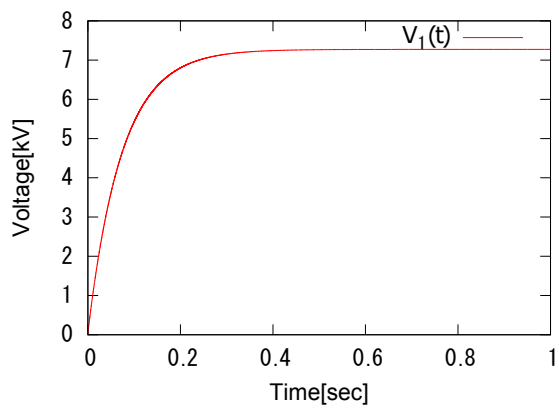


図 13 充電時の  $V_1$  の時間発展

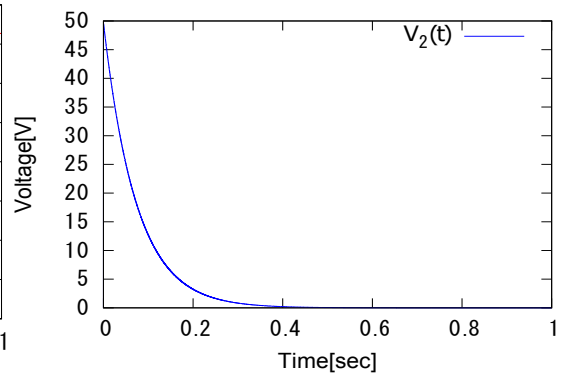


図 14 充電時の  $V_2$  の時間発展

図 13 から充電は 0.5s 以内に終了していることがわかる。スパークの起こる頻度は 0.2235 イベント/s なので十分な速さで充電できている。

### 3.3 組み立て

- ・スパークチェンバー本体

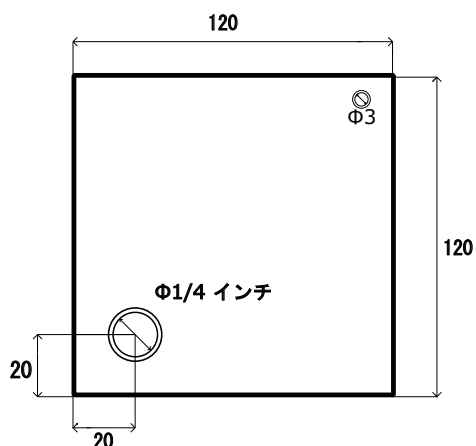


図 15 上下極板

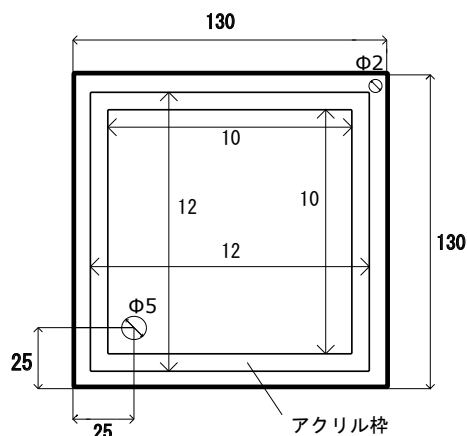


図 16 中間極板

上下の極板には図 15 のように L 型スウェジロックをねじ留めできるように縁から 2cm 内側に直径 1/4 インチの穴を貫通させタップを切り、角には圧着端子を付けられるように M3 の穴をあけた。間の 7 枚の極板には (図 16) ヘリウムガスを導通させるための M5 の穴をあけ、角には圧着端子用の M2 の穴をあけた。これらの極板の中心にアクリル枠をアラルダイトで気体の漏れがないよう接着した。8 層積み上げた。圧着端子で各ユニット、コンデンサに並列に抵抗  $R_s$  をつないだ。圧着端子を極板に留めるのにはポリカビスを用いた。この抵抗の導線部分は安全のため熱縮チューブで被膜した。また高電圧パルスがかかったとき抵抗が動いてしまわないようアクリル板で抵抗を固定する枠を作った。

以上のように作ったスパークチェンバー本体部分は下の図 17 である。



図 17 スパークチェンバー本体

He ガスは下面のスウェジロックから導入し、上面のスウェジロックから抜けていくが上面のスウェジロックの先には 20m のチューブをつなぎ空気が逆流しないようにしている。

・シンチレーションカウンター

アクリル枠の内側と同じ 10cm 四方に切断したプラスチック・シンチレーターをアディアバチック型ライトガイドとオプティカルセメントで接着し、ライトガイドと光電子増倍管はグリースで貼り付けた。シンチレーターとライトガイドをアルミホイルで軽く覆い、さらにそれらと光電子増倍管をブラックシートで覆った。(図 18)



図 18 シンチレーションカウンター

・IGBT 用回路

図 4 の絶縁ゲートドライバの左側は電圧が低いので低耐圧用のリード線で配線した。右側は kV 単位の高電圧がかかるので 10kV 耐圧のリード線を用いた。絶縁ゲートドライバは隣り合う足が非常に近くはんだ付けが困難であった。そこで、基盤を作り配線しやすいようにした。こうして配線が完了した様子が図 19 である。これらと  $R$  や  $C$  等の素子もまとめてシャーシに入れた。

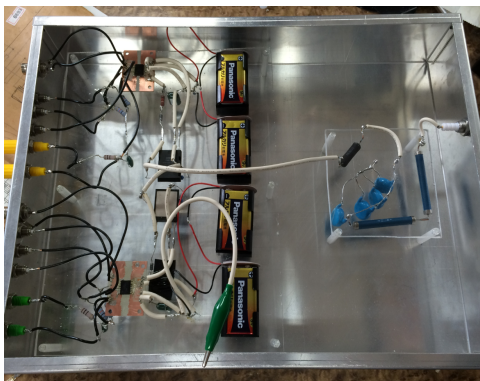


図 19 回路全貌

#### リークチェック

チェンバー内のヘリウムガスが漏れる量の確認を行った。本実験でヘリウムガスを流出させる方のバルブを閉め、レギュレータを用いてチェンバー内のヘリウムガスの圧力を調整し、長時間において圧力の変化を観測した。

チェンバーの容積は  $800\text{cm}^3$  であり、加圧開始時の圧力が 大気圧 +  $0.02\text{MPa} = 0.12\text{MPa}$  であったから、大気圧下に換算すると  $960\text{cm}^3$  のヘリウムガスがチェンバーに封入されていた。1 時間静置したのち再びレギュレータの圧力計を見ると、目盛の下がりは  $0.01\text{MPa}$  未満であった。つまり圧力は  $0.11\text{MPa}$  以上であるから、大気圧下に換算して  $880\text{cm}^3$  のヘリウムガスが残存していたことになる。以上より流出したヘリウムガスは  $80\text{cm}^3$  未満であり、流量は  $80[\text{cm}^3]/60[\text{minute}] = 1.33[\text{cm}^3/\text{minute}]$  未満であるから、チェンバーには十分な気密性があると言える。

さらにリークチェック液 (界面活性剤を含む液体) をまんべんなく噴射したところ気泡の発生は見られなかったため、この点からもチェンバーの気密性が保証される。

## 4 実験結果

### 4.1 動作確認

完成した回路にいきなり高電圧を印加すると、回路に不備があった際に大電流が流れる等の予期せぬ挙動をして素子を壊すおそれがある。そのため、高電圧を印加する前に  $100\text{V}$  程度の低電圧で回路の動作確認を行った。

#### 4.1.1 スイッチングの確認

まずトリガー信号に対して IGBT の導通が起こっているか、すなわち想定通りにスイッチが動作しているかを確認した。そのために、コンデンサ  $C$  のスパークチェンバーに接続されていない方の端 (図 4 参照) の電位を見ながらトリガー信号を入力した。これは  $V_1$  を観測することにあたり、図 8 にあるように、スイッチが動作すれば直ちに電位が  $0\text{V}$  まで落ちるはずである。

トリガーの入力にはレベルアダプターを用いた。これは本実験ではコインシデンスの NIM 信号を TTL 信号に変換するのに用いるモジュールである。レベルアダプターには normal と complemental という 2 つのモードがありトグルスイッチでこれらを切り替えることができる。normal では入力のない時は  $5\text{V}$  が出力され、NIM 信号が入力されるとその幅のぶん出力が  $0\text{V}$  になり、complemental では逆に入力のない時は  $0\text{V}$  で、NIM 信号が入力されると  $5\text{V}$  を出力する。NIM 信号を入力せずに、トグルスイッチを動かして complemental から normal にすることで、動作確認用のトリガー信号とした。

以上の要領でスイッチングの確認を行ったところ、 $V_1$  が  $0\text{V}$  まで落ちていないことが判明した。これはいずれかの、あるいは両方の IGBT が導通していないことを意味している。回路各所の接続を確認したが問題はなく、また  $9\text{V}$  電池や  $5\text{V}$  電源は十分な電圧を出力していることが確認されたので、IGBT の不通の原因は IGBT 自体の不調かゲートドライバの不調であると考えられる。

#### 4.1.2 ゲート出力の確認

ゲートドライバの OUT (図 4 参照) は、トリガー信号の入力がなければ GND2 と内部で接続している。トリガー信号が入力されると GND2 との接続が切れ、新たに  $V_{CC2}$  と接続するため、電池の電圧に相当する電

圧のゲートとなって出力される。

ゲートドライバが上記のように正しく動作しているか確認するために、IGBTのエミッタ (GND2と接続されている) とゲート (OUTと接続されている) の間の電位差を見ながら、レベルアダプターを用いて再びトリガー信号を入力した。

確認の結果、図4の下段のゲートドライバは正しく18Vのゲートを出力していたが、上段のゲートドライバは一切ゲートを出力していなかった。はんだ付けの際の熱で破損してしまったものと考えられる。

## 4.2 回路の変更

ゲートドライバの破損が確認されたため回路を変更した。2段構えとなっていたIGBTを1段だけにして、1つのゲートドライバで動かすことにした。なおこの際、回路の時定数が変わらないようにIGBTに並列になが抵抗は $200\text{M}\Omega$ とした。

この変更に伴い、電源の電圧は4kVとなる。このとき $V_1, V_2$ の放電・充電時の時間発展は次の図20から図23のようになる。

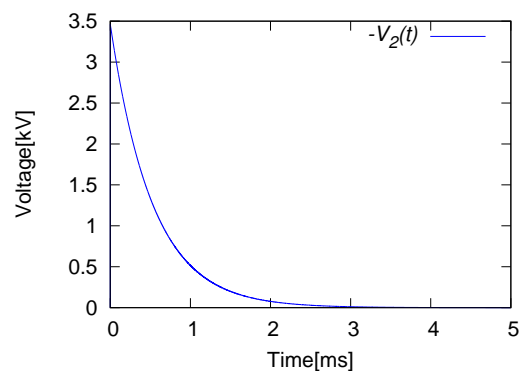
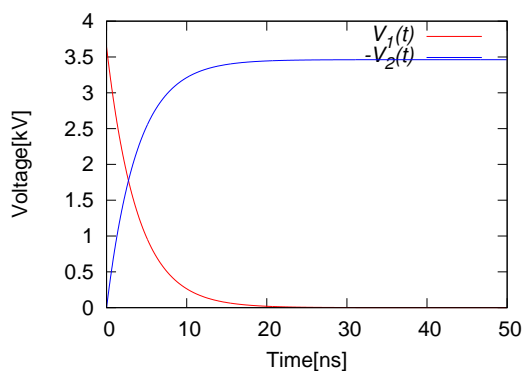


図 20 電源 4kV で放電時の  $V_1, V_2$  の時間発展 (50ns)      図 21 電源 4kV で放電時の  $V_2$  の時間発展 (5ms)

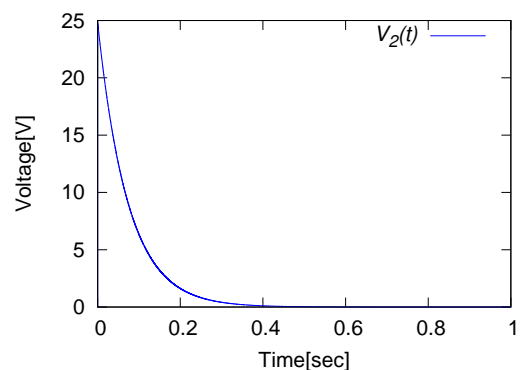
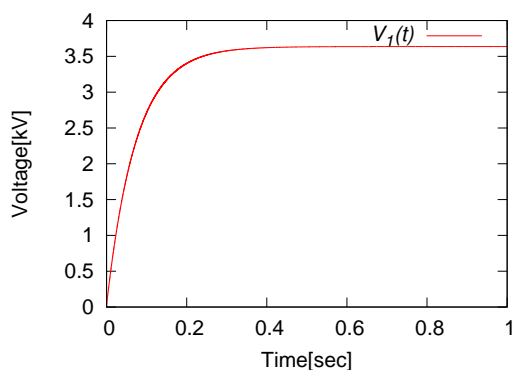


図 22 電源 4kV で充電時の  $V_1$  の時間発展      図 23 電源 4kV で充電時の  $V_2$  の時間発展

以上の図の通り、電源電圧が 4kV になっても電離電子の再結合より早く高電圧が印加され (図 20)、ms 程度で放電が終了し (図 21)、十分速く充電が完了している (図 22) ことがわかる。また、パルスの尖頭値は約 3.5kV であり、放電に適した条件 3kV~5kV/cm に合致している。

### 4.3 結果

スパークチェンバーに He ガスを 1 気圧で封入したうえで実際に 4kV を印加して動作を確認したところ、図 24 のような放電が何度か観測された。この放電現象についての考察は後述する。

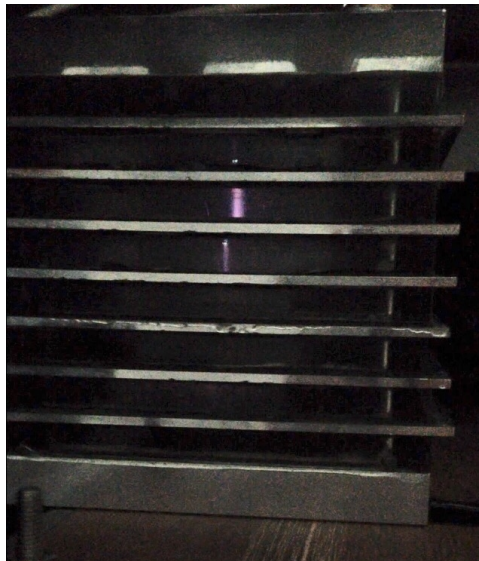


図 24 観測された放電

## 5 考察・まとめ

### 5.1 考察

#### 5.1.1 放電現象と宇宙線の関係

放電を観測していると、2 層目のある特定の点 (以下 x 点と呼称する) での放電が多いことに気が付いた。x 点での放電は必ず図 25 のように 1 つの層に限られていることから、これは x 点で極板に目に見えないたわみ等があり電場が強まって放電が起こりやすくなっているものであり宇宙線でトリガーされた放電ではない可能性を考えた。また、同様に他の点での放電も宇宙線と関係が無い可能性がある。これを調べるために、ランダムトリガーでの実験との比較を行った。

まず通常のトリガーで 10 分間観測を行ったところ、トリガーが 33 回かかった。うち放電を伴ったのは 25 回であり、その放電のうち x 点のみで放電が起こったのは 10 回であっ

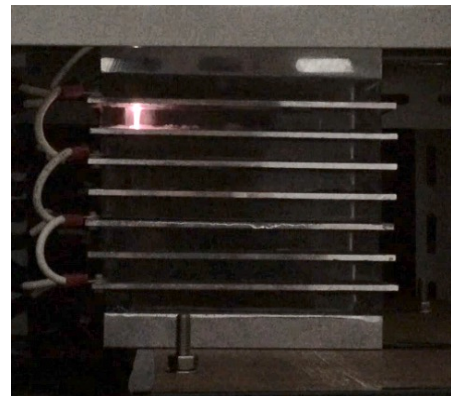


図 25 x 点での放電

た。次に、コインシデンスの代わりにクロックジェネレータ

を用いて、宇宙線と関係ないトリガーを 33 回かけたところ、毎回 x 点で放電が起こった。

以上から、通常のトリガーで起こった x 点での放電は宇宙線によるものではない可能性が高いが、ランダムトリガーでは x 点以外で放電が見られなかったことから、残りの 15 回の放電は宇宙線関連事象であることが推測される。

なお、10 分間で 33 回のトリガーなのでトリガーレートは 0.055Hz であり、計算による値 0.2235Hz の 4 分の 1 程度であるが、これは計算の際に硬成分のうちミューオンでないものの強度を含めたことや、ライトガイドと PMT の接合が不十分であることによる光の漏れなどが原因となっていると考えられる。

### 5.1.2 放電現象と気圧の関係

スパークチェンバーに封じる He ガスを 1 気圧より下げて、放電の観測を行った。0.25 気圧、0.5 気圧、0.6 気圧、0.8 気圧、1 気圧で観測を行ったところ、気圧が高くなるほどトリガーがかかっても放電しない割合が増えるという傾向が見られた。また、気圧が高くなるほど放電時の光が強くなるという傾向が見られた。これは気圧が高く電離電子が密集していると電子が十分に加速されにくく放電しにくいのが、放電が起これば電子が多いために強い電流が流れるからと考えることができる。

## 5.2 今後の課題

今回、放電は観測されたが、スパークチェンバーの全層を貫通する放電は見られず、またトリガーがかかっても放電が起らない場合があった。前者は数層の放電でスパークチェンバーに溜まっている電荷が全て流れてしまうことが原因で、後者はスパークチェンバーにかかる電圧が低いために放電が起きにくいことが原因であると推察される。これらを解決するためにも、より高い電圧を用いて運用ができるよう回路を修正したい。

また、x 点での放電が起きないように、極板間の電場を均一にするような工夫も必要である。

## 5.3 今後の展望

今後スパークチェンバーを用いてすべき測定をいくつか挙げたい。まず我々は飛来する宇宙線の種類とそれらの天頂角分布を調べたい。これを行うことによって、宇宙線の起源についても情報が得られるであろう。また、今回は一定の電圧で実験を行ったが、電圧を変化させたときにスパークの様子がどのように変化するかを調べることも興味深い課題である。また、今回はヘリウムガスを用いて実験を行ったが、原理的にはヘリウム以外のガスを用いたスパークチェンバーも考えることが出来、他のガスを用いた場合のスパーク現象についても調べるべきだと思われる。

## 5.4 謝辞

今回課題研究としてこの実験を行うにあたり、市川先生には部品の設計から実際の運用に至るまで折々ご指導を賜りました。また、TA の中桐さんと平本さんは物品の注文や作業の補助等、様々な手助けをして下さいました。皆様のお蔭でスパークチェンバーを無事完成させることができました。また、同じ実験室で切磋琢磨したポジトロニウム班の井上君・大島君・箕島君にも感謝いたします。一年間ありがとうございました。

## 5.5 参考文献

『粒子物理計測学入門』 福井崇時 ISBN 4-320-03051-6