

MWPC制作の試み

樋口 翔 国吉 宏一郎

2017年4月

概要

荷電粒子検出器の一つであるMWPC(Multi Wire Proportional Chamber)の制作を行った。2014年度P2を参考にして、当時ネックであったプリアンプの制作を、今回はASD(GNA-210 ASD D TYPE34+10)を用いることで改善が見込まれると期待していた。また当初はMWPCを作ったのちに性能評価やほかの検出器(前年度に制作されたスパークチェンバーや今年度のチェレンコフリング検出器)と組み合わせて宇宙線を観測する予定であったが、電圧を上げる途中で放電が起きてしまい検出器の制作は失敗に終わった。

目次

1	理論	3
1.1	電氣的相互作用による荷電粒子の検出	3
1.2	avalanche 増大	3
1.3	drift chamber	4
1.4	MWPC	6
1.5	ワイヤーの力学的安定性	7
1.6	ガス	7
2	チェンバーの制作手順	8
2.1	チェンバーの構造と基板設計	8
2.2	ワイヤー、パーツの接着	8
2.3	ガス配管	11
3	実験と結果	12
4	考察・反省	12
5	謝辞	13

1 理論

今回用いた MWPC は電場の形を見ると独立した円筒型の drift chamber と同じようなものとみなせる。そこでまずシンプルな円筒型のチェンバーでどのように信号が得られるかを説明する。

1.1 電氣的相互作用による荷電粒子の検出

荷電粒子の、物質との相互作用によるエネルギー損失は以下のような Bethe-Bloch 方程式で与えられることが知られている。

$$\frac{dE}{dX} = -\frac{KZ\rho}{A\beta^2} \left[\ln \frac{2mc^2\beta^2 E_M}{I^2(1-\beta^2)} - 2\beta^2 \right] \quad (1)$$

ただし、 N はアボガドロ数、 $m \cdot e$ は電子の質量・電荷、 $Z \cdot A \cdot \rho$ は物質の原子数・質量・密度、 I は有効イオン化エネルギーである。また $K = \frac{2\pi N z^2 e^4}{mc^2}$ で $z \cdot \beta$ は荷電粒子の電荷・速度 (を光速で割ったもの) である。

これらの損失エネルギーがガスのイオン化に用いられると仮定すると、生成される電子・イオン対の数を計算できる。MWPC はワイヤーに高い電圧をかけることにより、これらの電子イオン対を avalanche 増大することによって信号を大きくする。

1.2 avalanche 増大

電場が十分に強い場合、加速された電子はイオン化を引き起こし、さらにまた加速されてイオン化を引き起こす…というように電子の数が飛躍的に増大していく。その増幅は、距離 dx を進む間に増える電子の数を dn 個とすると以下の関係で与えられる。

$$dn = n\alpha dx \quad (2)$$

$$n = n_0 \exp\left(\int \alpha dx\right) \quad (3)$$

α はタウンゼント係数 (townsend coefficient) と呼ばれ、気体の種類、圧力、電場に依存する。

$$\frac{\alpha}{P} = A \exp(-BP/E) \quad (4)$$

以上の関係式に実際に用いたガス、電場のパラメータを用いることで、増幅後の電子・イオン対の数を計算することができる。

(Ar の場合、 $A=14\text{cm}^{-1}\text{Torr}$, $B=180\text{V cm}^{-1}\text{Torr}$)

1.3 drift chamber

drift chamber は、上で説明した電子・イオン対が電場中を運動することによってできる信号線の電位の変位を観測するものである。シンプルな例として円筒型チェンバーを考える。チェンバーの外径・内径を $b \cdot a$ 、内径にかけた電位を V_0 とすると電場 E と電位 V は以下のように表せる。

$$E(r) = \frac{CV_0}{2\pi\epsilon_0 r} \quad (5)$$

$$V(r) = \frac{CV_0}{2\pi\epsilon_0} \ln(r/a) \quad (\text{where } C = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln(b/a)}) \quad (6)$$

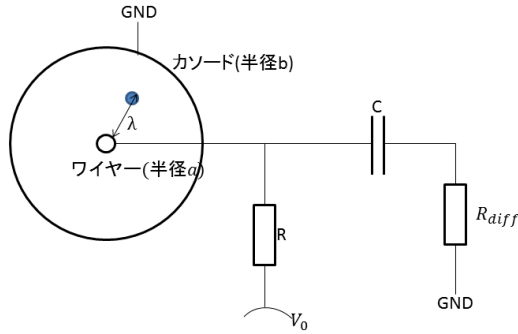


図 1: 円筒チェンバーの概念図

チェンバー内で宇宙線などの入射により電子・イオン対が発生し (増幅され) たとし、その総電荷を Q とする。

ワイヤーの電位を v 、初期の電位を v_0 とする。中心から距離 r のところにある電荷 Q が微小距離 dr 移動することにより誘起されるワイヤーの電荷の変化 dq はエネルギー保存より以下のように与えられる。

$$Q \nabla V(r) \cdot d\mathbf{r} + v_0 dq = 0 \quad (7)$$

ただし、ワイヤーの電圧変化は v_0 に比べて大きくないので第 2 項は v を v_0 で近似した。

よってワイヤーの電圧の変化 dv は以下のように与えられる。

$$dv = \frac{dq}{C} = -\frac{QE(r)dr}{Cv_0} = -\frac{Q}{2\pi\epsilon r} dr \quad (8)$$

よって表面からの距離 λ で発生した電子・イオンがアノード・カソードにそれぞれ移動することにより誘起される電位の変化は以下ようになる。

$$v^{electron} = \frac{Q}{2\pi\epsilon l} \int_{a+\lambda}^a \frac{dr}{r} = -\frac{Q}{2\pi\epsilon l} \ln \frac{a+\lambda}{a} \quad (9)$$

$$v^{ion} = -\frac{Q}{2\pi\epsilon l} \int_{a+\lambda}^b \frac{dr}{r} = -\frac{Q}{2\pi\epsilon l} \ln \frac{b}{a+\lambda} \quad (10)$$

それらの比をとると以下ようになるので、イオンによる寄与が支配的だとわかる。

$$\frac{v^{electron}}{v^{ion}} = \frac{\ln a + \lambda - \ln a}{\ln b - \ln a + \lambda} \simeq 0.01 \quad (11)$$

そこで以下では電子の寄与を無視する。イオンの移動による電位の時間発展はイオンの時刻 t での位置 $r(t)$ でかける。

$$v^{ion} = -\frac{Q}{2\pi\epsilon l} \ln \frac{r(t)}{a+\lambda} \quad (12)$$

一方、電場中をイオンが運動するとき、その速度は電場に比例することが知られており、その係数は mobility と呼ばれる。

(Ar の場合 $\mu=1.87\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{sec}^{-1}$)

$$v^{ion} = \mu^{ion} E(r) \quad (13)$$

これを解くとイオンの運動がわかる。

$$\frac{dr}{dt} = \frac{\mu^{ion} C v_0}{2\pi\epsilon r} \quad (14)$$

$$r(t) = \sqrt{\frac{\mu^{ion} C v_0}{\pi\epsilon} t + a^2} \quad (15)$$

結局イオンのドリフトによるワイヤーの電圧変化は次になる。

$$v^{ion}(t) = -\frac{Q}{4\pi\epsilon l} \ln\left(1 + \frac{\mu^{ion} C v_0}{\pi\epsilon P a^2} t\right) \quad (16)$$

$$= -\frac{Q}{4\pi\epsilon l} \ln\left(1 + \frac{t}{t_0}\right) \quad (\text{where } t_0 = \frac{\pi\epsilon P a^2}{\mu^{ion} C v_0}) \quad (17)$$

イオンがカソード面まで加速される時間 T は

$$r(T) = b \quad (18)$$

$$T = \frac{\pi\epsilon P (b^2 - a^2)}{\mu^{ion} C v_0} \quad (19)$$

で、典型的なセッティング約 $550\mu\text{sec}$ である。

($a=10\mu\text{m}, b=8\text{mm}, \mu^{ion}=1.7\text{cm}^2\text{sec}^{-1}$ (Ar), $V^{-1}\text{atm}^{-1}, v_0=3\text{kV}$)

ただしオシロスコープなどで信号を読む際には、表される電位の変化は回路の時定数 ($\tau = R_{diff} C$) に依存するものになる。このときの時定数が下がればトリガーレートは上がることになる。

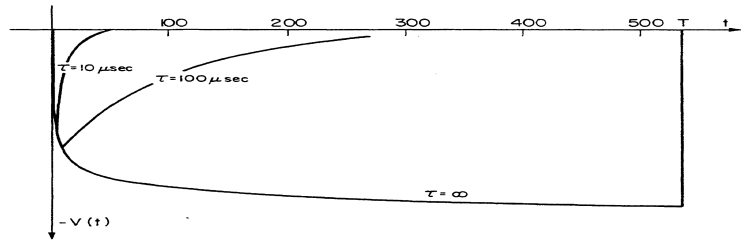


図 2: ワイヤー電圧の変化 (Sauli より)

1.4 MWPC

MWPC 内の電場は以下のように得られる。

$$V(x, y) = \frac{CV_0}{4\pi\epsilon} \left[\frac{2\pi l}{s} - \ln 4 \left(\sin^2 \frac{\pi x}{s} + \sinh^2 \frac{\pi y}{s} \right) \right] \quad (20)$$

$$\left(\text{where } C = \frac{2\pi\epsilon}{\pi l/s - \ln(2\pi a/s)} \right) \quad (21)$$

ただし、 V_0 はワイヤーにかかる電圧、 l はアノードとカソードの距離、 s はワイヤー同士の間隔である。図を見るとそれぞれのワイヤーが独立した比例計数管のように働くと思える。

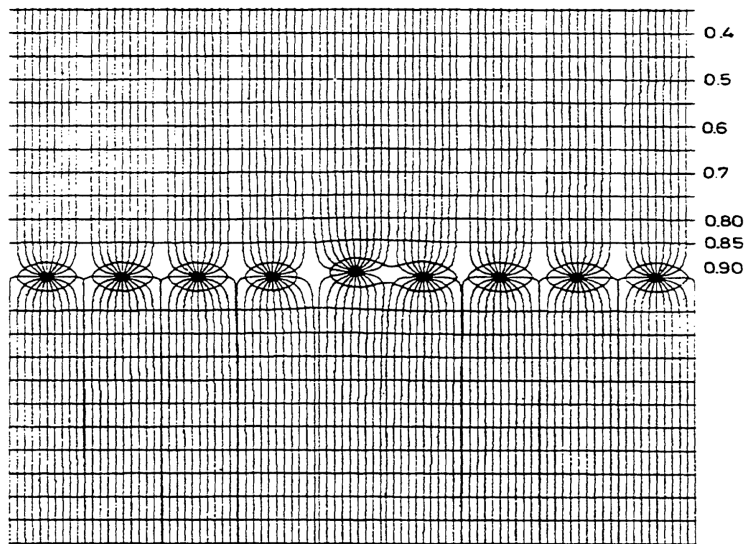


図 3: MWPC 内の電位 (Sauli より)

1.5 ワイヤーの力学的安定性

ワイヤーが元の位置から微小に δ ずれるとする。(このずれによる電場の変化は無視して式 (20) のままであるとする) ワイヤーは単位長さあたりに CV_0 の電荷をもっているので、そこにかかる垂直方向の力は

$$F(x)_{bot} = 2 \frac{(CV_0)^2}{2\pi\epsilon} \left[\frac{\delta}{s^2 + \delta(x)^2} + \frac{\delta}{(2s)^2 + \delta(x)^2} + \dots \right] \quad (22)$$

$$\simeq \frac{(CV_0)^2}{\pi\epsilon} \delta \left[\frac{1}{s^2} + \frac{1}{4s^2} + \dots \right] \quad (23)$$

$$= \frac{(CV_0)^2 \pi}{6\epsilon} \frac{\delta}{s^2} \quad (24)$$

である。ただし δ は微小として近似した。ワイヤーの変位の力のつり合いは以下で与えられる。

$$T \frac{d^2\delta}{dx^2} = - \frac{(CV_0)^2 \pi}{6\epsilon} \frac{\delta}{s^2} \quad (25)$$

境界条件 $\delta(0) = 0, \delta(L) = 0$ を課すと (L はワイヤーの長さ) 解は

$$\delta(x) = \delta_0 \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \quad (26)$$

$$\text{where } T = \frac{1}{6\pi\epsilon} \left(\frac{CV_0}{ns}\right)^2 \equiv \frac{T_c}{n^2} \quad (27)$$

である。よって $T \geq T_c$ であれば許される解は $\delta(x) = 0$ のみになり、ワイヤーは安定になる。

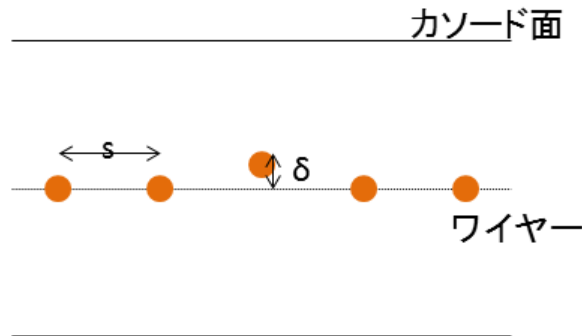


図 4: ワイヤーの変位に対する安定性

1.6 ガス

チェンバー内に封入するガスについて。avalanche 増大が比較的低い電場で起こる、などの理由で希ガスが用いられることが多い。(価格などの理由で

Arを用いることが多い)しかし、Arはイオン化エネルギーが高く(11.6eV)、脱励起に伴い放射される光子がcathod面で電子放出を起こしたり離れた場所の原子を電離させたりして新たなavalanche増大を起こすことがある。一方、多原子分子では振動・回転の自由度があるので広いエネルギー範囲のphotonを吸収する。(メタンでは7.9から14.5eV)また受け取ったエネルギーは衝突やradicalの生成などに使われ光子放出が起こりにくいので、Arの場合に起こっていたavalanche増大が起きにくくなる。したがってArなどの希ガスに少量の多原子分子ガスを加えたものを用いると放電が起きにくくなる。今回はAr90%とCH₄10%のP10ガスがあったのでそれを用いた。またカソード面にカーボンを塗ることによっても紫外線の放出を抑えられる。(1号機では塗り忘れていた。)

2 チェンバーの制作手順

チェンバーの中で有意に効いてくるパラメータはワイヤー間隔s、カソード・アノード間隔l、ワイヤー半径aである。

制作手順は以下のようなものである。

- 基盤制作ソフトを用いて回路の基盤を作成
- ワイヤーを張り、外枠や継ぎ手、アルミの板を接着する
- バブラーを制作しガスの配管を行う

2.1 チェンバーの構造と基板設計

2015年度のP2のMWPC制作を参照にしてチェンバーの大まかな構造を決めた。

理論で述べた計算式を用いると以下の表のように構造とgainの関係が得られる。

回路図は以下のようになるように基板設計をした。(50Ωのterminatorを用いた場合、時定数は $470\text{pF} \times 50\Omega = 23.5\mu\text{s}$)

10本のワイヤーを張ったが端の2本は電場補正用で読み出しには使わない。最初はP2のものと同じワイヤー間隔3mmのものを作ったが、2号機ではgainが大きくなるように4mmのものをつくった。

2.2 ワイヤー、パーツの接着

ワイヤーの位置をできるだけ正確にするため、下の図のようなマイクロメーター付きの台を用いておもりを垂らしながら基盤にハンダ付けした。今回は

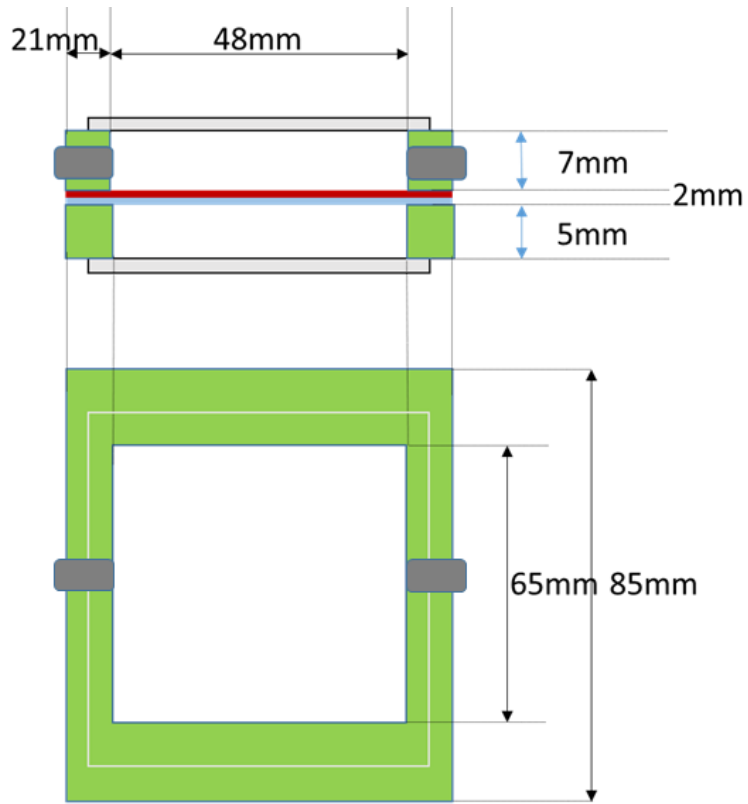


図 5: チェンバーの概要図。茶色の板は基盤、上下の鼠色の板はアルミ板、左右の鼠色のパーツは継手、緑色の枠はガラエポの枠

電極間の長さ l(mm)	ワイヤー半径 a(μm)	ワイヤー間隔s(mm)			
		1	2	3	4
4	15	3.73	5.96	7.27	8.07
	20	3.80	6.15	7.56	8.43
	25	3.86	6.30	7.79	8.72
7	15	2.28	3.96	5.16	6.02
	20	2.31	4.04	5.30	6.21
	25	2.33	4.11	5.41	6.37

図 6: 構造に対する単位長さあたりの容量 C(pF/m)

Gain M	電圧V(kV)				
	1	2	3	4	
容量C(pF/m)	2.33	1.00	1.11	1.91	5.47
	4.11	1.06	3.11	39.7	1370
	5.41	1.25	13.6	1130	28700
	6.37	1.57	54.5	19300	(21400000)

図 7: 容量に対する gain

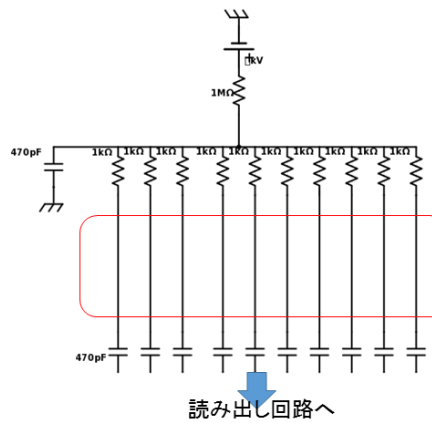


図 8: 回路図

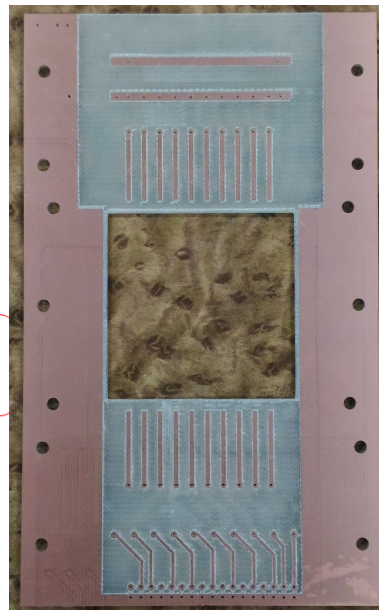


図 9: 制作した基盤

ワイヤーの長さが短かったため、必要な張力はさほど大きくなかった。(ワイヤーの長さを 5cm としたとき $T_c=4.5 \times 10^{-4} \text{N}$ である。今回は一応ワイヤーが切れない範囲でできるだけ重くして約 14g のおもりを用いた。) 基盤のハンダ付け後には枠やチューブ継手などのパーツをアラルダイトで接着した。ガス配管の後に漏れがないようにリークチェックとアラルダイト塗りを何回か繰り返した。

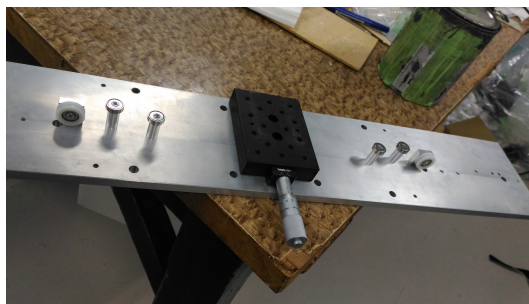


図 10: ワイヤー設置に用いた台

2.3 ガス配管

配管は以下の図のように行った。チェンバーは非常に壊れやすいので、流量調節のために最初のニードルバルブを付けた。2つ目のバルブは、このバルブとガスの流れを閉めて圧力を計ることでリークチェックを行った。またチェンバー内への逆流を防ぐためにバブラーを設置した。また今回流量計を設置しなかったが、バブラーの泡の出方から流量を見積もることができる。

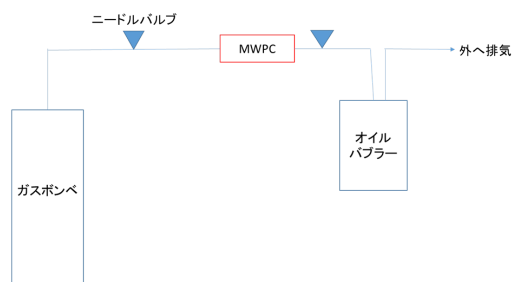


図 11: ガス配管図

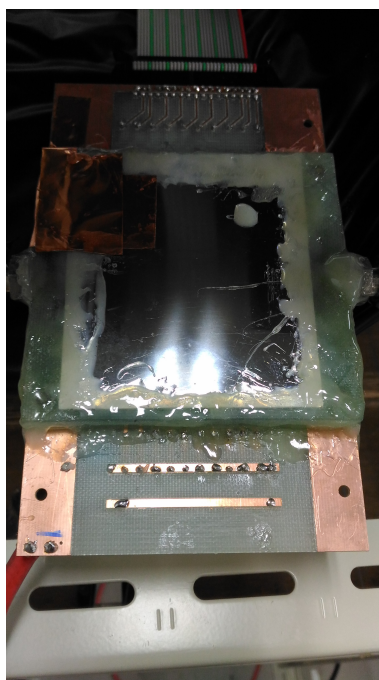


図 12: mwpc の写真

3 実験と結果

MWPC が動いているかどうかを確認するために、プラスチックシンチレータと制作した MWPC を上下に並べて宇宙線による信号を得ようとした。チェンバーの体積の約 10 倍のガスを送ってから電圧をゆっくり上げていった。

最初に作ったワイヤー間隔 3mm のチェンバーでは、チェンバー内で放電が起きるため電圧を 2.5kV 以上あげることができず宇宙線と思われる信号を得ることができなかった。

また次に制作したワイヤー間隔 4mm のチェンバーについても、2.7kV で放電が起こってしまい、宇宙線と思われる信号を得ることができなかった。一応 4mm の際に得られた信号の写真を挙げておく。

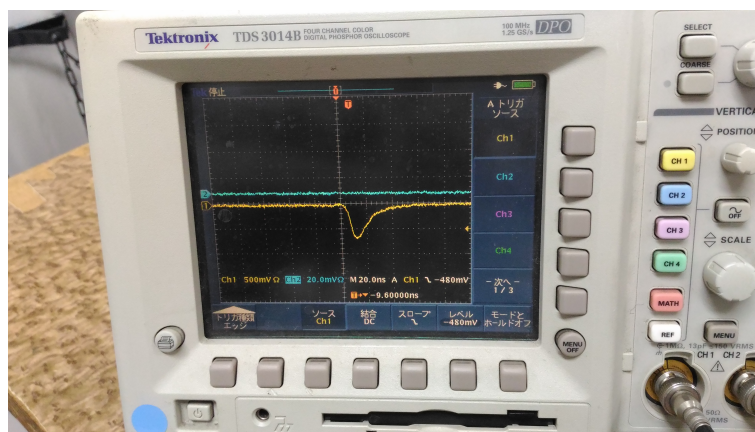


図 13: 2号機(ワイヤー間隔 4mm) で得られた信号。黄色はワイヤーからの信号、青は真下に置いたプラスチックシンチレータからの信号。

4 考察・反省

- gain が足らなかったせいで宇宙線によると思われる信号を判別することは不可能だった。(放電のせいで電圧が上がりきらなかった。)
- 回路の時定数くらいの信号が見られたがこの信号の原因はわからなかった。
- チェンバーの密閉が完全でなかったため電圧が上がりきらなかったと思われる。
- 2014 年度 P2 でも指摘されていたが、ワイヤーの生の信号を増幅するプリアンプ回路を制作する必要があった。今回は製品版の ASD を購入

したが生信号を見られなかったので動作確認の段階では使うことができなかった。

参考文献

- [1] F.Sauli, “Principles of operation of multiwire proportional and drift chambers, “ 1977.
- [2] 2014 年度 P2 レポート

5 謝辞

今回の実験では市川さん、TA の上路さん、吉田さんには実験に必要な器具の準備や装置の使い方を教えてもらうなどして、半期の間快く手伝ってもらい感謝しています。