

cathode読み出し MWPC の特性

東北大学 理学部 物理学科
素粒子・核物理学講座 原子核物理研究室

土橋 一夫

1999年3月31日

目次

1	目的	3
2	原理	3
2.1	cathode 読み出し MWPC の特徴	3
2.2	動作原理	3
2.3	gas について	5
3	plateau curve	6
3.1	測定方法	6
3.2	測定結果及び考察	7
4	gain	9
4.1	測定方法	9
4.2	calibration	10
4.3	測定結果及び考察	10
5	位置分解能	13
5.1	測定方法	13
5.1.1	centroid method	14
5.1.2	charge ratio method	15
5.1.3	位置 spectrum の求め方	16
5.2	測定結果及び考察	17
6	まとめ	24

1 目的

MWPCは規模の大きな実験に使われる事が多いが、実際に測定をする前にそれぞれの MWPC の特性をつかんでおかななくてはならない。そのために、今回は主に plateau curve と位置分解能を測定する。

また、MWPCの性能は内部に流す gas によって大きく左右されるが、その gas として現在あまり使われていない Ar-CO₂ と、それと比較するために、よく使われている Ar-isoC₄H₁₀ を用いた時の性能を調べる。

2 原理

2.1 cathode 読み出し MWPC の特徴

cathode 読み出し MWPC (以下 'cathode chamber' と呼ぶ) は、anode 読み出しの MWPC (以下 'anode chamber' と呼ぶ) と比べると、長所としては位置分解能が良い事が挙げられる。anode chamber では位置分解能は wire 間隔そのままの値になるが、cathode chamber は測定した電荷を解析する事によってより良い位置分解能を得ることができる。

また、短所としては dead time が長いことが挙げられる。anode chamber と比べると noise に弱い事も挙げられる。これは、anode chamber では avalanche による電荷全てを読み込むが、cathode chamber では avalanche によって誘起された電荷を読むため、cathode 面二つに別れる時点で二分の一、それがいくつかの pad に分かれて誘起されるのだからさらに電荷量は減ってしまう。そのために noise による影響は大きくなる。

2.2 動作原理

cathode chamber は、一般に anode 面が 2 つの cathode 面の間に張っている。今回使う cathode chamber は、各 wire の間隔は 1mm、面の間隔は 3mm である。

chamber 内に粒子が入射すると、気体分子を電離して電子を発生する (今回の実験では Ar 原子)。この時に、anode 面に高い電圧をかけておくと anode wire の周りには強い電場が生じているので、発生した電子は anode wire に向かって強く加速される。するとその電子がさらに気体分子を電離する。この過程を繰り返す事によって最終的に電子は $10^3 \sim 10^6$ 倍程度まで増える。この倍率を gain、またこの現象を avalanche と呼ぶ。

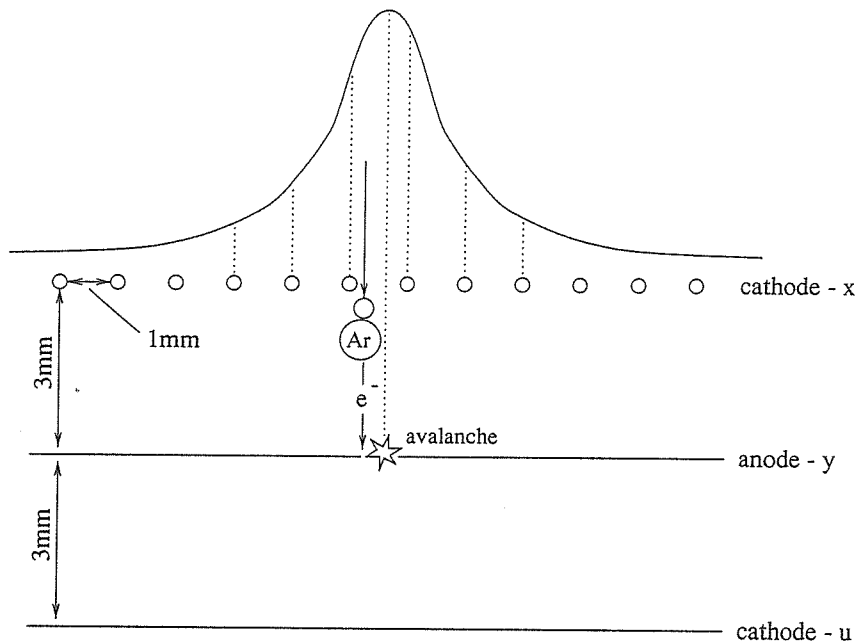


図 1: chamber 内部

anode wireに電荷が発生すると、cathode 面上に電荷が誘起される。その分布は次のように表される。

$$\rho(y) = -\frac{Q}{4D} \frac{1}{\cosh\left(\frac{\pi(y-y_a)}{2D}\right)}$$

ここで、 ρ は電荷分布、 Q は avalanche によって発生した全体の電荷、 D は anode 面と cathode 面との距離、 y_a は avalanche の発生した位置である。cathode wire の電荷の分布から avalanche の発生した位置を求めることができる。

また、avalanche が起こる過程で Ar 原子が励起して光子を出す事がある。これを放っておくとさらにその光子が avalanche を引き起こしてしまい、それが繰り返されて avalanche が止まらなくなってしまう（放電という）。そうなる大きな電流が流れ、wire が切れて動作しなくなってしまうので、これを防ぐために quencher を入れる（今回では $\text{isoC}_4\text{H}_{10}$ と CO_2 ）。

2.3 gasについて

流す gasによっても chamber の性能は大きく左右される。今回の実験では、Ar-isoC₄H₁₀ を混合比80:20で、また Ar-CO₂ を、混合比をいくつか変えて測定した。この場合、Ar を base gas、CO₂ と isoC₄H₁₀ を quencher という。それぞれの主な役割は、base gas は入射粒子と衝突して avalanche の種となる電子を作る事、quencher は avalanche が起こる過程で放出されてしまう光子を吸収する事である。

base gas に求められる性質は、ion-electron pair 生成のために必要な energy W が放射線の種類、energy に関わらず一定であり、なおかつ低い値であることである。この base gas として一般的なものは希ガスである。いくつかの gas の W を下に示す。

gases	W(eV)	gases	W(eV)
He	42.3	Xe	21.9
Ne	36.4	CO ₂	32.8
Ar	26.3	iso-C ₄ H ₁₀	23.2
Kr	24.05		

表 1: 平均イオン化 energy

CO₂、isoC₄H₁₀ の W そのものは希ガスとあまり変わらないが、多原子分子は入射粒子と衝突した際に、電子を出すだけでなく分子の回転にもエネルギーが使われてしまうため、最終的に電離にかかるエネルギーは大きくなるので base gas としてはあまりふさわしくない。

quencher に求められる性質は、base gas から出てくる光子に対して反応断面積が大きい事である。また、quenching の過程で quencher は分離するが、気体によっては分離したあとに再結合し高分子を形成してしまう事がある。その高分子が cathode, anode に付くと chamber に悪影響を及ぼすのでそのような高分子を作りにくい quencher を用いなければならない。普通の butane(C₄H₁₀) を使わずにわざわざ isoC₄H₁₀ を使うのはこの理由からである。

また、CO₂ の isoC₄H₁₀ に対する利点は安価な事、欠点は quenching の能力が低い事である。

3 plateau curve

plateau curveとは、入射粒子を検出する確率の、anode面とcathode面との電位差についての変化をグラフにしたものである。実際に粒子を検出する際には、この検出効率が100%近くになる電位差にして実験を行なうことになる。

3.1 測定方法

線源は ^{90}Sr (β 線)を用いて行なった。線源の置き方は次の図に示した通りである。

chamberの上に線源を、下にplastic scintillatorを置いている。collimateしているが、これはchamber内に入射した全ての β 線がplastic scintillatorを通るようにするのが主な理由である。

β 線が入射すると、電位差とgasの種類によって決まるある確率でchamber内でavalancheを起こし、そのあとplastic scintillatorに入射する。plastic scintillatorではほぼ全ての β 線が検出されるので、anode面で検出されたcount数をplastic scintillatorでのcount数で割れば検出効率が求まる。

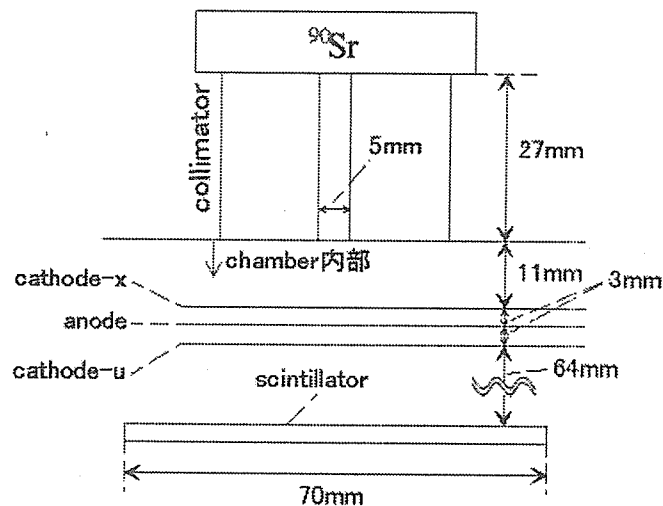


図 2: 線源の置き方

回路は、最初に測定した時は anode 信号にかける discr を $V_{th} = 150\text{mV}$ に設定していたのだが、それでは CO_2 では plateau 領域に到達しなかったため、threshold curve をとって V_{th} の値を 70mV に最適化した。

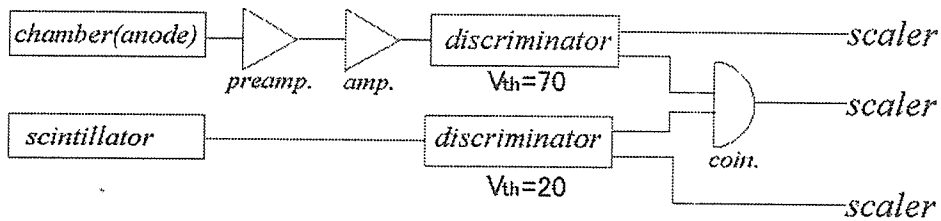


図 3: plateau curve 測定回路

3.2 測定結果及び考察

plateau curve は次のようになった。グラフを見てわかる通り、 CO_2 を用いた場合は plateau 領域がほとんどない。これは CO_2 の quencher としての働きが十分でない事が原因であろう。唯一 plateau らしきものが出たのは CO_2 20% の場合だけである。iso C_4H_{10} と同程度の quenching を期待する事はできないようだ。

また、同じ電圧で比べると CO_2 が少ないほど検出効率が高くなる傾向があるが、これは Ar の割合が増える事によって avalanche が起こりやすくなるからであろう。 CO_2 が増えるほどかけられる電圧が大きくなるが、これは CO_2 が、あまり性能は良くないながらも quencher としての役割を果たしている事と、Ar が減って quench すべき光子の放出が減った事が原因だろう。

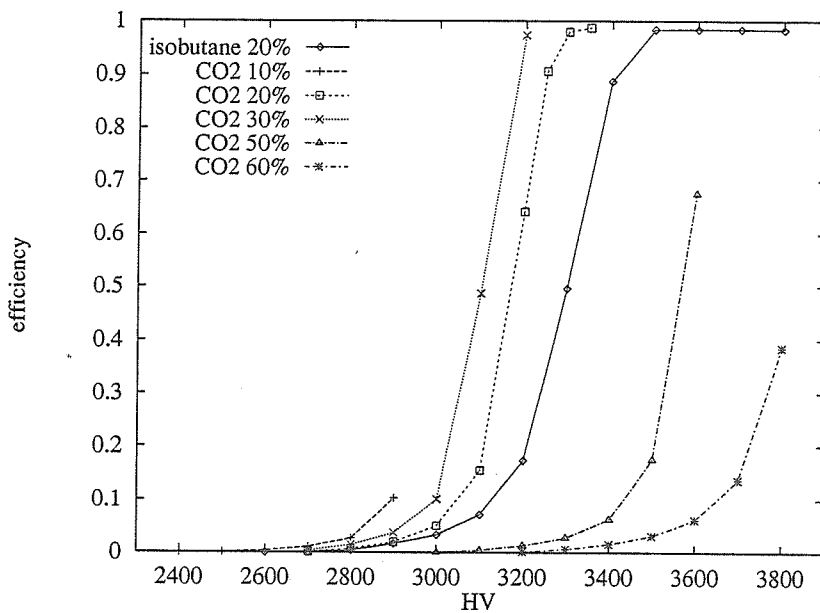


図 4: 検出効率

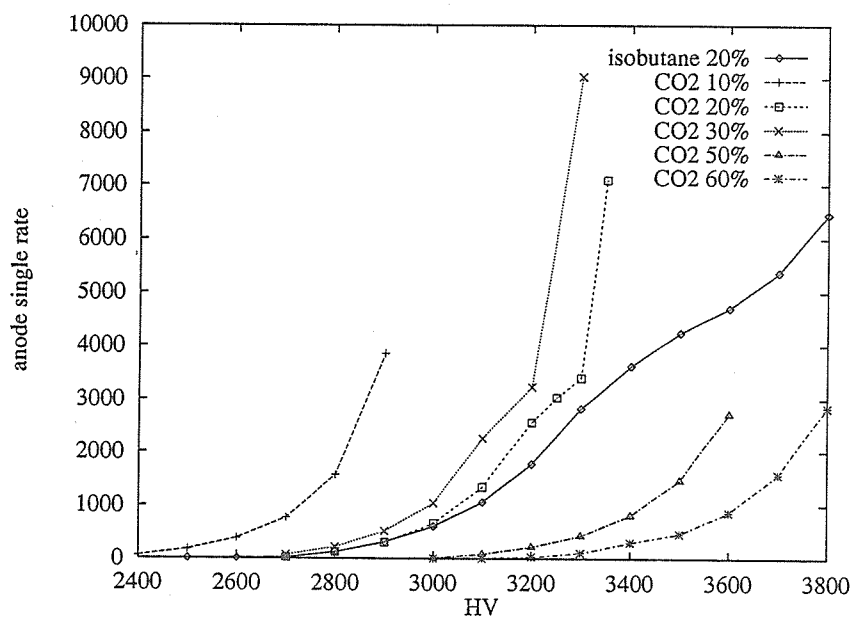


図 5: anode single rate

4 gain

4.1 測定方法

図のような線源の配置と回路で、anodeから self gate を作って測定した。gasの種類は Ar-CO₂90対10, 80対20, 50対50, Ar-isoC₄H₁₀80対20を用いた。

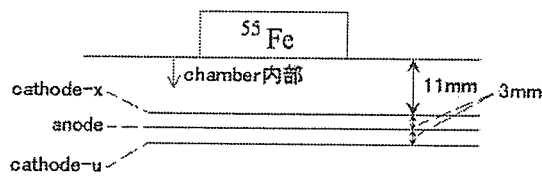


図 6: X線源の置き方

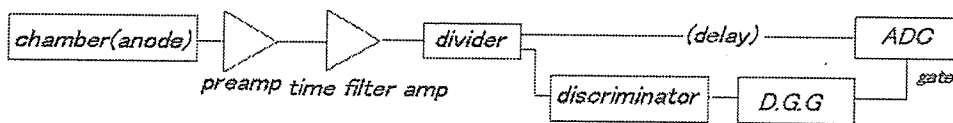


図 7: gain 測定回路

⁵⁵FeからのX線は5.9keVのenergyを持っており、その全てが電離によって消費されるとすると、base gasを電離するために必要なenergyはわかるので、X線によって電離されてできる電子の数もわかる。このavalancheの「種」になる電子を一次電子というが、その数は、Arの平均イオン化energyは26.3eVなので

$$\frac{5.9\text{keV}}{26.3\text{eV}} \approx 224$$

となる。これを電荷に直して、実際に測定した電荷と比べる事によってgainを求める事ができる。

回路は anode からの信号を amp に通した後、divider でわけて片方を discriminator と DGG に通して gate をかけた。

4.2 calibration

KODAQの画面に出てくるスペクトルと chamber からの入力電荷を対応させるため、calibrationを行なった。gainの回路では、anode信号を入れる代わりに preampの手前から電荷を入力し、その入力電荷と KODAQのスペクトルの channelとの関係を一次関数で fitした。またここでは直接関係ないが、cathode読み出し回路にも同様に calibrationを行なった。

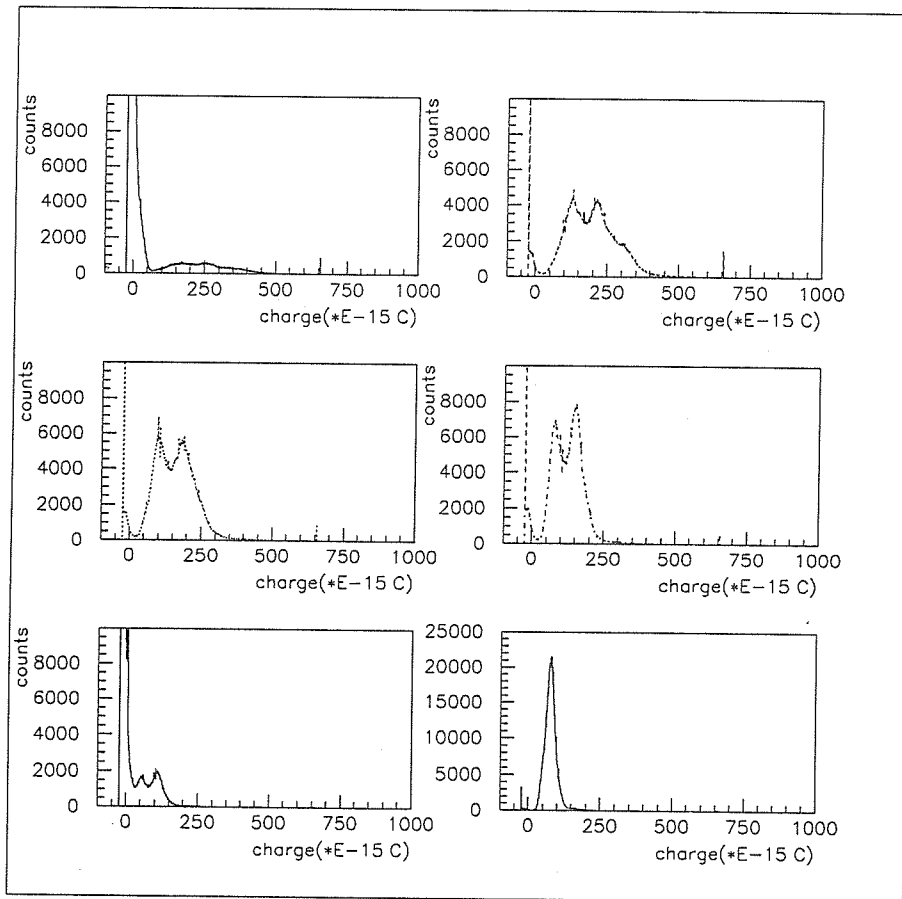
4.3 測定結果及び考察

まず、電荷スペクトルは次のようになった。これらは Ar-isoC₄H₁₀80 対 20 のものである。見てすぐわかるように、peakが二つ出ているが、このうち左の peak はエスケープピークだと思われる。

エスケープピークは、X線が K 殻電子を弾き出す事によって現れる。その場合、L 殻から電子が落ちてきて二次的な X 線を出す。この二次的な X 線が chamber の外に逃げてしまうと、chamber 内に与えられる energy はその分少なくなってしまう。よって種となる電子の数も少なくなり、gain もずれる事になる。Ar の特性 X 線は 3~3.2keV なので、エスケープピークの gain は高い方の peak のものと比べて $(5.9keV - (3 \sim 3.2keV))/5.9keV \approx 0.5$ 倍になっているはずであるが、このスペクトルはこれに合致していると言える。

横軸は電荷にしてあるが、calibrationをとった際に用いたコンデンサーの電器容量の誤差、chamber 内に残る電荷、などの影響を考えると、電荷量そのものの値はあまり信頼できない。

電荷が 0 のあたりに計数が集まっているものとそうでないものがあるが、この違いがどうして起こるかはよくわからなかった。ただ今回の回路の構造を考えると、gateがかかってなおかつ電荷が 0 付近であるというのはかなり鋭く立った信号でなければならず、そのような信号が chamber から出るとは考えにくい。何らかの noise が断続的に出ていたと考えるのが妥当だと思われる。



hv3800	hv3700
hv3600	hv3500
hv3400	hv3300

図 8: 電荷スペクトル

二つの peak のうち高い方を取り、それぞれの gas 比で 電圧 vs gain をプロットしたのが次のグラフである。CO₂ のグラフを見ると、同じ電圧ならば、CO₂ が減るにつれて gain は上がる。これは avalanche のもととなる Ar が増えるためである。また、CO₂ を用いた場合の gain は総じて低くなっている。quencher としての性能の低さから、十分に電圧を上げられない事が原因であろう。グラフでは CO₂10% が isoC₄H₁₀20% と同程度の gain になっているが、CO₂10% は限界まで電圧を上げていたのに対し isoC₄H₁₀20% はまだ余裕がある状態だったのでより高い電圧をかければさらに高い gain を得られたはずである。

CO₂20% と isoC₄H₁₀20% とを比べると、iso-C₄H₁₀20% はかなり高圧側にシフトしている。Ar が同じ量なのだから、この二つのグラフは重なるように出るだろうと予想していたので少し意外であった。この原因についてはわからなかった。

この結果から、Ar-CO₂ では Ar-isoC₄H₁₀ 程の gain は望めず、その値は 10³ 程度であるということがわかった。

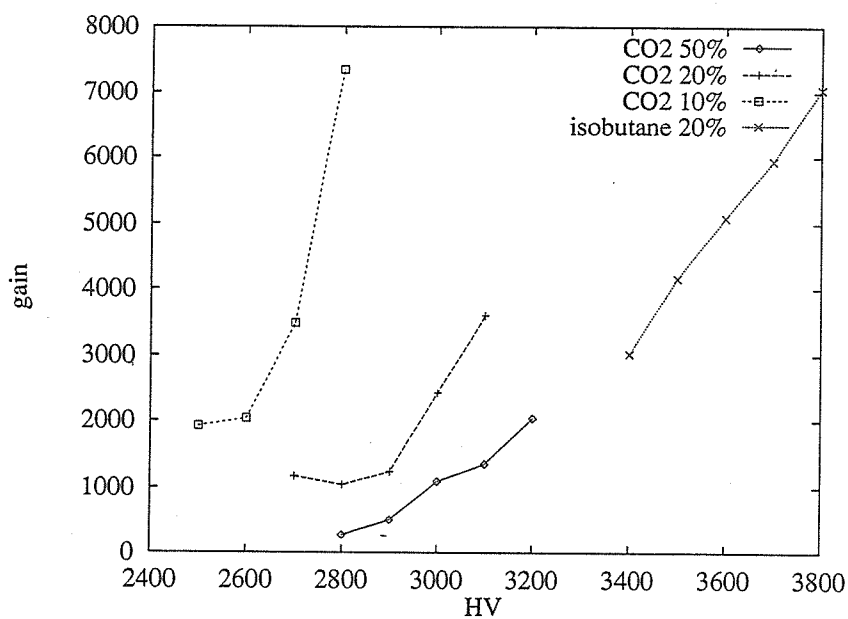


図 9: gain

5 位置分解能

5.1 測定方法

線源の種類と置き方は、ともに plateau curve を測定した時と同じである。もう一度載せておく。また、読み出し回路は下の図のようになる。

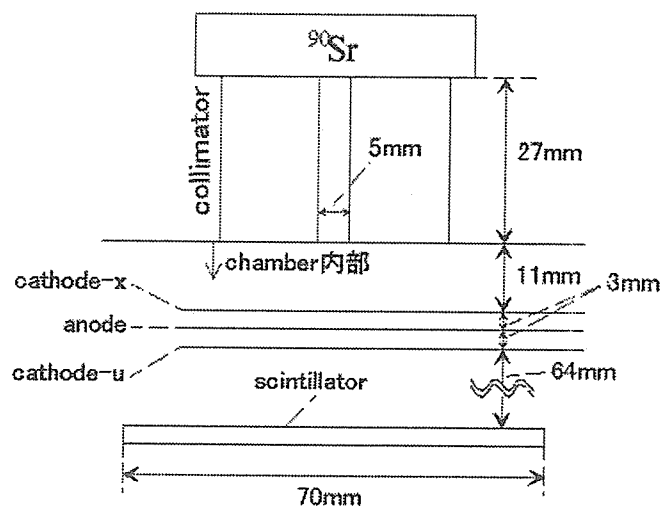


図 10: 線源の置き方 (再掲)

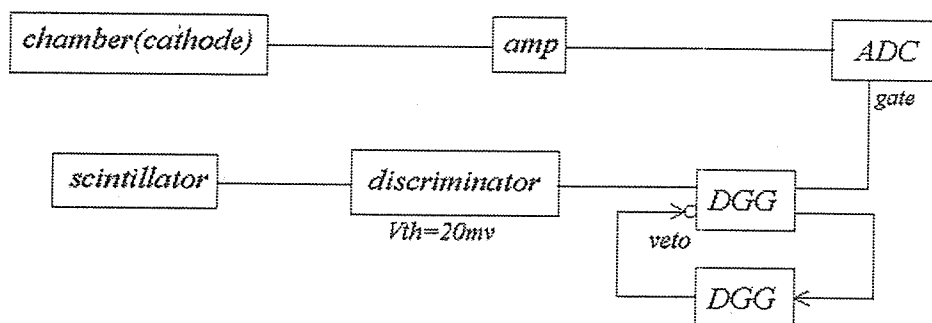


図 11: cathode 読み出し回路

chamberからは、cathode-x,uそれぞれから信号を5chずつ、計10ch読み込み、gate用にscintillatorからの信号も読む。DGGから出た信号を再度DGGを通してvetoに入れているのは、その後のADCでの処理に時間がかかるため、一度信号が入ったら一定時間gateをかけるのを止めるためである。

この回路を通して測定したcathode面からの信号を解析して、avalancheの位置を求めるが、その解析の方法として今回はcentroid methodとcharge ratio methodの二つを用いる。

5.1.1 centroid method

cathode面から得た電荷を $(q(i)(i = 1, 2, \dots, n))$ 、読み出し口の位置をそれぞれ $p(i) (i = 1, 2, \dots, n)$ とすると、その重心 x_a は、

$$x_a = \frac{\sum_{i=1}^n q(i)p(i)}{\sum_{i=1}^n q(i)}$$

である。今回の実験では、読みだし口の位置としてはpadの中心を使った。x,u面ともに5 padずつ読んでいるが、5 padのうち電荷が最大だったpadとその両隣の3 padから重心を求めた。

5.1.2 charge ratio method

まず、R という量を次のように定義する。

$$R = \frac{q(m) - q(m-1)}{q(m) - q(m+1)}$$

ここで $q(m)$ は x, u それぞれの面の pad のうち電荷が最大のもの、 $q(m-1), q(m+1)$ はその両隣の pad の電荷である。

avalanche によって誘起される電荷の分布は、最初にも出した式

$$\rho = -\frac{Q}{4D} \frac{1}{\cosh\left(\frac{\pi(y-y_a)}{2D}\right)}$$

で求められるので、avalanche の位置と理論値の R との関係をあらかじめ計算して求めておく。理論値の R と avalanche の位置の式は avalanche の位置について解析的に解くのが困難なので、その理論値 R のグラフを描いてそれと実験で求めた R とを比較して、実際に起った avalanche の位置を求める。

この charge ratio method の利点は noise の影響を受けにくい事である。avalanche による電荷を q_a , noise による電荷を q_{noise} とし、各 wire での q_{noise} は等しいとすると、実際に読み出す電荷 q は

$$q(m) = q_a(m) + q_{noise}$$

$$q(m+1) = q_a(m+1) + q_{noise}$$

$$q(m-1) = q_a(m-1) + q_{noise}$$

となる。これらの式から、

$$\begin{aligned} R &= \frac{q(m) - q(m-1)}{q(m) - q(m+1)} \\ &= \frac{q_a(m) + q_{noise} - q_a(m-1) - q_{noise}}{q_a(m) + q_{noise} - q_a(m+1) - q_{noise}} \\ &= \frac{q_a(m) - q_a(m-1)}{q_a(m) - q_a(m+1)} \end{aligned}$$

よって、R は noise の影響を受けにくい事がわかる。

5.1.3 位置 spectrum の求め方

cathode 読み出し MWPC の場合、cathode 面ひとつでは avalanche の位置の情報としては cathode wire と直角な方向の情報しかわからない。つまり、cathode wire と anode wire とが平行ならば cathode 面ひとつで位置分解能を求める事ができるが、今回の実験ではそのような cathode 面はない。cathode-x は x 方向、anode は y 方向、cathode-u は直線 $y=-x$ の方向に wire を張っているからである。

しかし、x 面からは y 座標の情報、u 面からは直線 $y=-x$ に平行な、ある直線上に乗っているという情報がわかるので、分解能は一つの面から出す時に比べて悪くなるものの、二つの面を用いることで avalanche の x 座標を求める事ができる。

また、avalanche はほぼ anode wire 上で起こるので、avalanche の、anode wire と直角な方向の座標がわかると、そのスペクトルは anode wire の位置に合わせて次の図のようになるはずである。centroide methode、charge ratio methode それぞれによって出した spectrum の peak から位置分解能を求める。今回は、先にとった plateau curve から Ar-iso C_4H_{10} では $h\nu 3800$ と $h\nu 3700$ 、Ar- CO_2 では $h\nu 3300$ と $h\nu 3200$ について調べることにした。

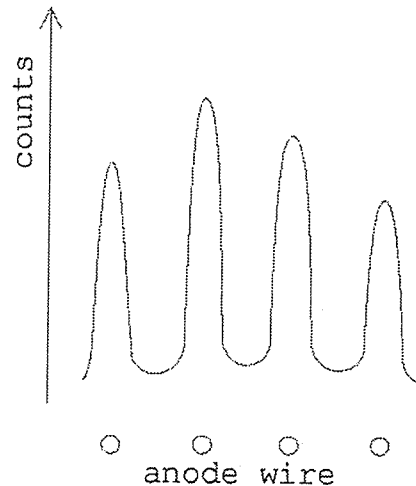
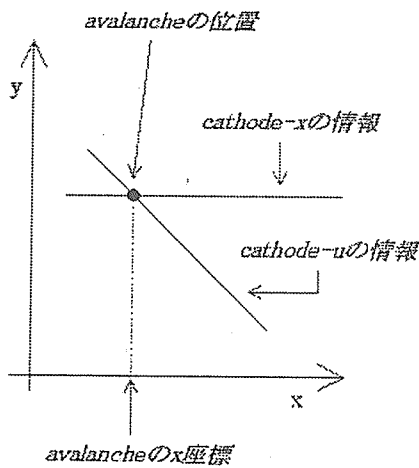


図 12: avalanche の x 座標の求め方 図 13: 位置 spectrum の予想図

5.2 測定結果及び考察

まず、読んだ event 全てについてさまざまなグラフを書くと次のようになった。これらは isoC₄H₁₀20%、hv3600 の場合である。

下の、anode wire の像が出ているスペクトルから求めると、分解能は半値幅で 500 μ m ほどになっている。

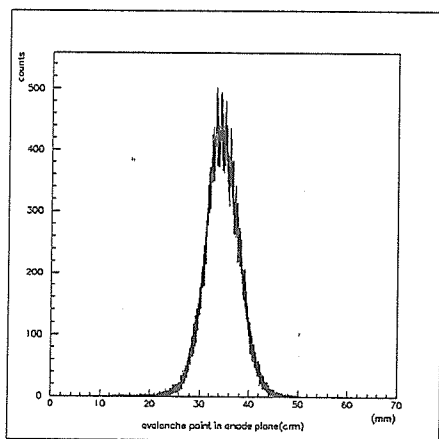


図 14: 位置スペクトル

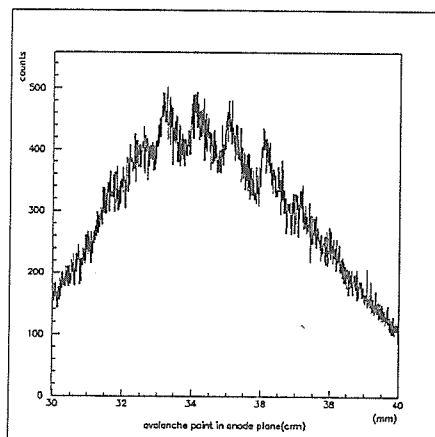


図 15: 位置スペクトル拡大図

これでは期待された数十 μ m には程遠いので、解析の方法に手を加える事にした。まず各 event ごとの全電荷を調べて、peak から大きく離れているものは取り除いた。その境は gas によって違うが、例として isoC₄H₁₀20% の電荷スペクトル（読み出した 5 pad に誘起された電荷の合計のスペクトル）を載せておく。次に、avalanche の起きた場所を 2 次元プロットした図で、縦に cathode-x の像が出てしまっているが、この像と像の間 event だけを取り出した。

また、charge ratio method では $q(m+1)/q(m)$ vs $q(m-1)/q(m)$ をプロットし、理想値を計算してプロットしたものと比べると、全体が左下にずれたような形をしていたのでこれを修正した。

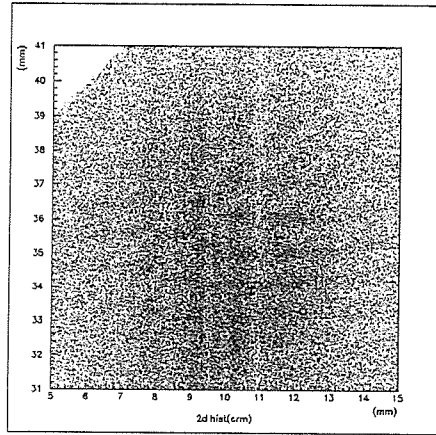
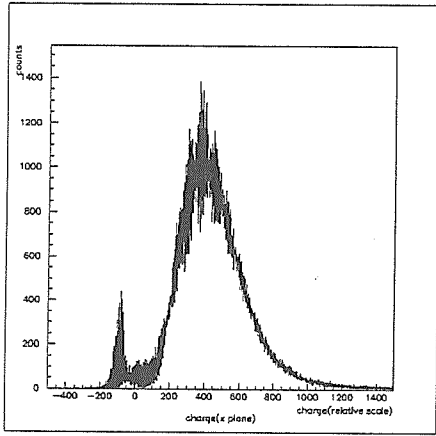


図 16: cathode 面に誘起された総電荷
図 17: avalanche の位置の二次元プロット

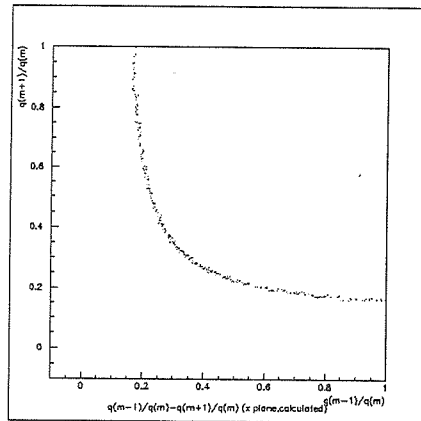
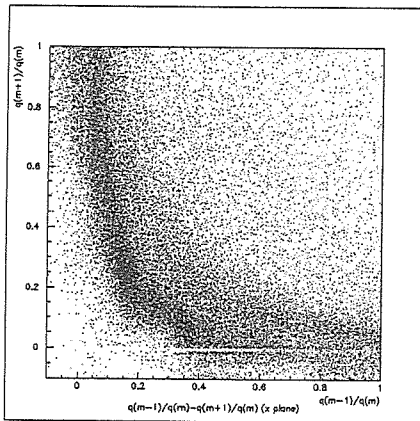


図 18: 2次元 scatter plot
図 19: 2次元 scatter plot, 理論値

以上のように data に手を加えて処理した結果、位置スペクトルは次のようになった。

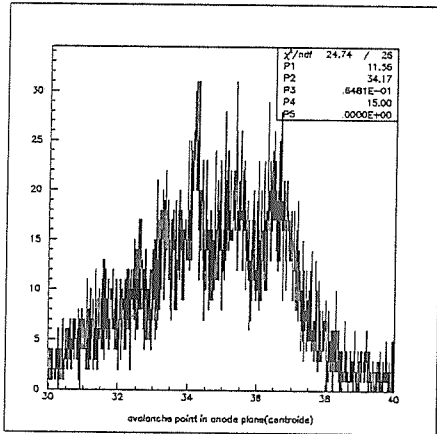


図 20: isoC₄H₁₀20%, hv3600, centroid method

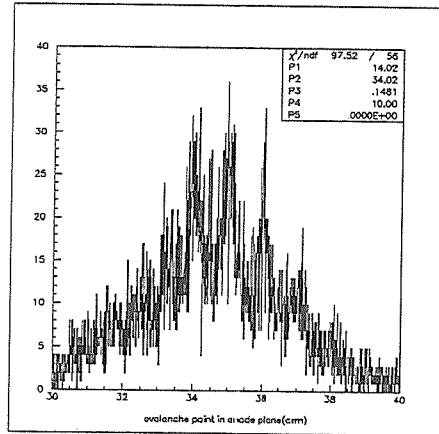


図 21: isoC₄H₁₀20%, hv3600, charge ratio method

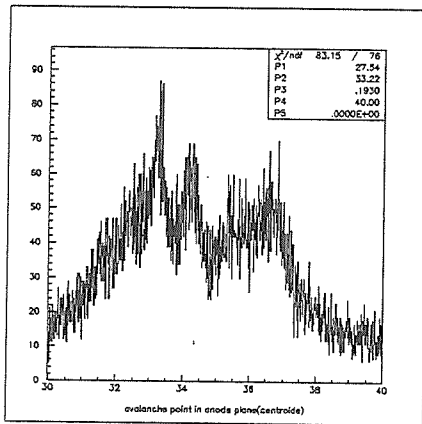


図 22: isoC₄H₁₀20%, hv3500, centroid method

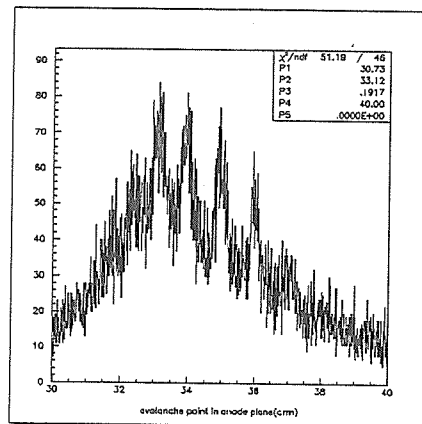
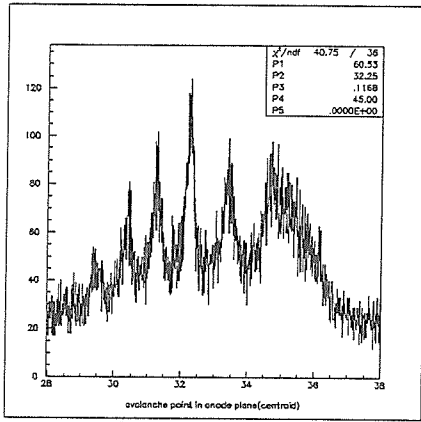
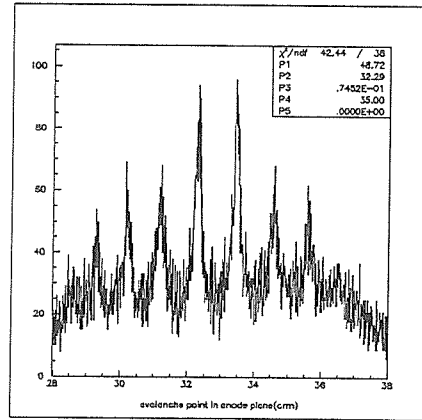


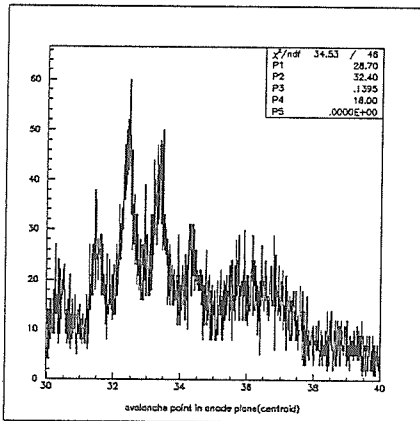
図 23: isoC₄H₁₀20%, hv3500, charge ratio method



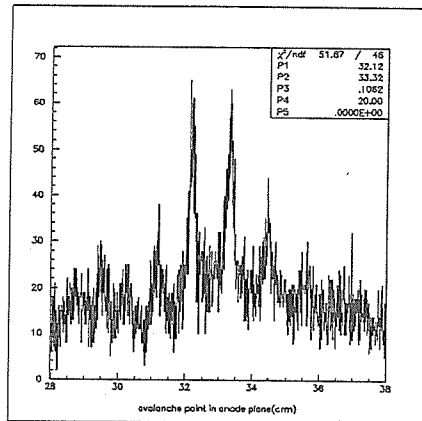
☒ 24: CO_2 20%, hv3300, centroid method



☒ 25: CO_2 20%, hv3300, charge ratio method



☒ 26: CO_2 20%, hv3200, centroid method



☒ 27: CO_2 20%, hv3200, charge ratio method

これらは、横軸が y 座標（つまり anode wire と直角の方向）、縦軸が計数である。さきに挙げたような処理をする事で、かなり peak がはっきりと見えるようになった。

まずスペクトルを見るといくつか peak が立っているが、これが anode wire の像である。anode wire は 1mm 間隔で張ってあるが、示した 8 つのスペクトルの peak はすべて、それにほぼ一致していると言える。

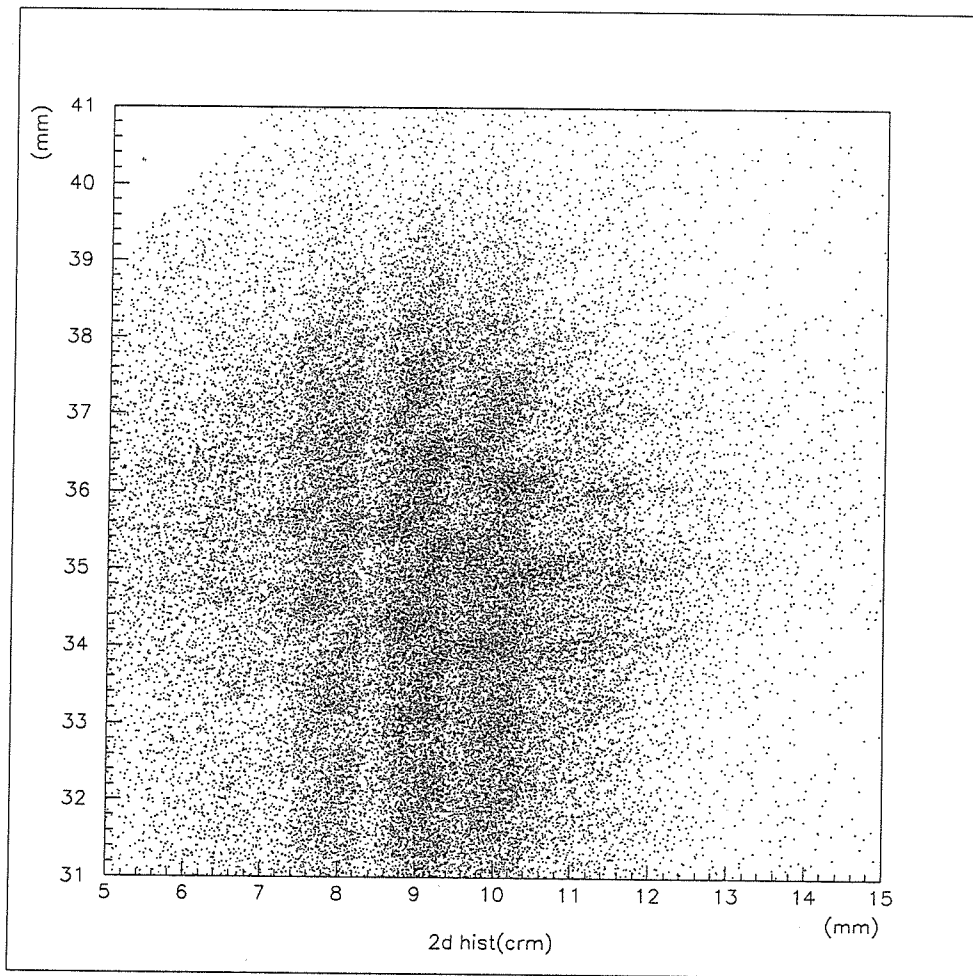
以上のスペクトルから位置分解能を求めると、次のようになった。これらは半値幅で出している。

	isoC ₄ H ₁₀		CO ₂	
	hv3600	hv3500	hv3300	hv3200
charge ratio method	348μm	450μm	175μm	250μm
centroid method	153μm	456μm	275μm	329μm

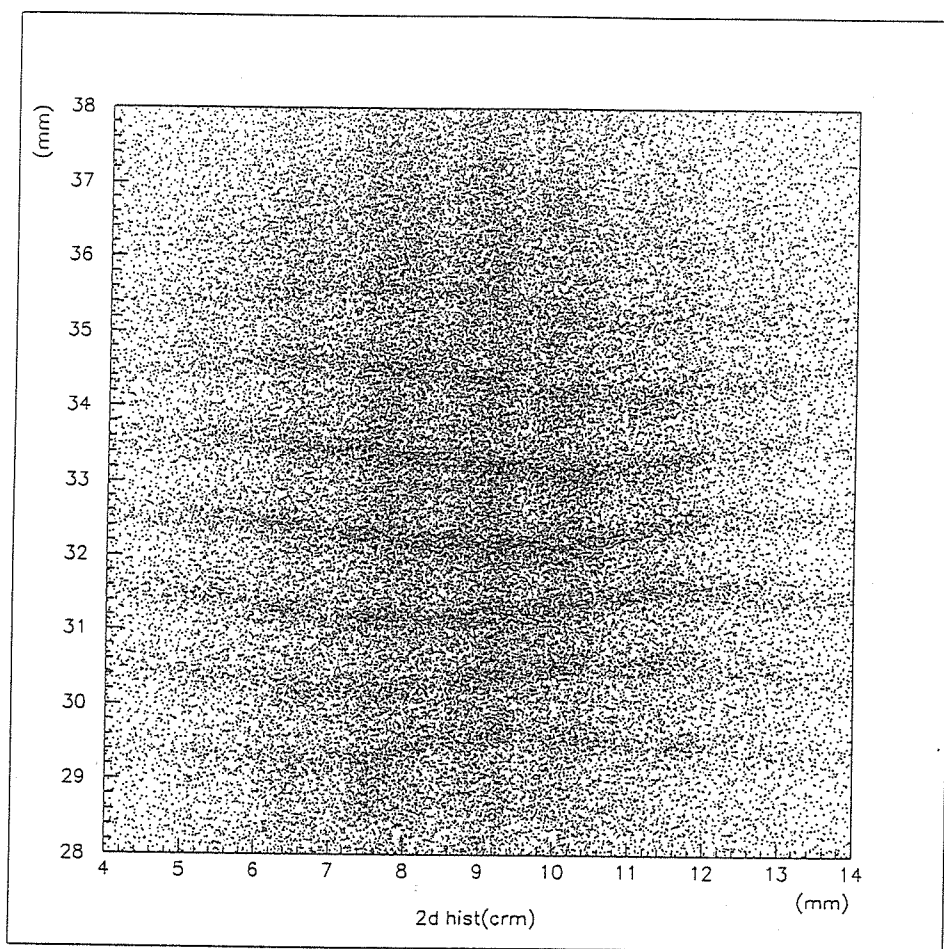
表 2: 位置分解能

これらは、それぞれのスペクトルの peak のうち最も鋭いものを fit して求めた値である。charge ratio method の分解能は centroid method のそれを、4 つのうち 3 つ上回っている。hv3600 では centroid method の方が分解能が良くなっているが、スペクトルを見ると fit した peak 以外はあまり鋭くない。これは様々な条件をかけて count 数が減ってしまった事も考えると、再現性はないと見た方が妥当であろう。

最後に、isoC₄H₁₀20%, hv3600, charge ratio method と CO₂20%, hv3300, charge ratio method での、avalanche の起こった位置を二次元プロットしたものを載せる。横に走っている像が anode wire の像である。また、縦と斜めにも像が出てしまっているが、これは cathode-x、cathode-u それぞれの wire の像だと思われる。この図では、理想的には anode wire の像だけがまっすぐに出るはずなのだが、これらの像が出てしまっているのは calibration が完全でなかったためであろう。



☒ 28: isoC₄H₁₀20%,hv3600,charge ratio method



☒ 29: CO_2 20%.hv3300,charge ratio method

6 まとめ

位置分解能は、最も良いもので半値幅で $153\mu\text{m}$ になった。これは期待されていた数十 μm に比べてかなり悪い。さまざまな条件を課して処理した事も考えると、これは非常に寂しい結果だと言わざるを得ない。その原因としては、はっきりとした事はわからないが noise 落としが十分でなかった事が主なものではないかと思っている。

CO_2 の結果は良いものを得た。位置分解能は期待よりも悪かったとはいえ、Ar-iso C_4H_{10} よりもよい分解能であることを考えればかなり有望だと言っているのではないだろうか。ただ、plateau curve と gain の測定結果からは分解能がこのような結果になるという事は予想しにくい。はっきりとした結論を出すためには Ar-iso C_4H_{10} の測定の際に不備がなかったか、などを調べ、さらに測定を重ねる事が必要だろう。

謝辞

橋本治教授には、普段の4年セミナーなどはもちろん、興味深い研究テーマを与えて下さった事、深く感謝しております。

田村裕和助教授には、実験について様々な事を学ばせて頂きました。どんな質問でも懇切丁寧に説明して頂き、非常に感謝しております。

高橋俊行助手、藤井優助手には、実験やデータ解析、とりわけPC関係についてはたくさんの御指導を頂きました。感謝しております。

原子核物理研究室の中川武美教授、小林俊雄教授、田中英二助教授、大津秀暁助手には、多くの御指導を頂き、感謝しております。

加藤守男氏、川村直子氏には、普段の学生生活を支えて頂いている事、感謝しております。

また、院生の方々、四年生の方々には、物理に限らず様々な事について相談に乗って頂いた事、感謝しております。

特に荒木公太氏には、私の質問にいつも笑顔で答えて頂いた事、非常に感謝しております。ありがとうございました。