

50MeV 陽子に対する自己消滅ストリーマモードを用いた位置検出計数管の特性

亀谷, 均
九州大学大学院総合理工学研究科エネルギー変換工学専攻

栄, 武二
九州大学工学部応用原子核工学科

桑折, 範彦
九州大学工学部応用原子核工学科

百武, 幹雄
九州大学工学部応用原子核工学科

他

<https://doi.org/10.15017/17585>

出版情報 : 九州大学大学院総合理工学報告. 5 (2), pp.181-188, 1983-12-01. Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University

バージョン :

権利関係 :

50 MeV 陽子に対する自己消滅ストリーマモード を用いた位置検出計数管の特性

亀谷 均 ・ 栄 武二* ・ 桑折範彦*
百武幹雄* ・ 隈部 功* ・ 牧 孝**
小松和則***・井尻秀信****・的場 優****

(昭和58年9月30日 受理)

Position Sensing of 50 MeV Protons with a Single-Wire Position Sensitive Counter in Self-Quenching Streamer Mode

Hitoshi KAMETANI, Takeji SAKAE, Norihiko KOORI,
Mikio HYAKUTAKE, Isao KUMABE, Takashi MAKI,
Kazunori KOMATSU, Hidenobu IJIRI
and Masaru MATOBA

Using a 1.8 m single-wire position sensitive counter with an anode wire of 25 μm diameter stainless steel, the position sensing has been performed with the gas avalanche mode called as self-quenching streamer for 50 MeV protons analyzed with the QDMDQ spectrograph RAIDEN¹⁾ installed at the RCNP AVF cyclotron facility.

Although the transition in the avalanche size from the proportional to the self-quenching streamer mode can't be observed directly, it is found that the position sensing is possible at the region where the self-quenching streamer mode is dominant from comparison with the results of the experiments for 4.5 keV X-rays.

1. 序

ガス計数管において、電子増倍率が心線印加電圧の上昇にともなって、電離箱領域、比例計数管領域、制限比例領域およびガイガー領域と変化することが知られている²⁾。この内、電離箱領域、比例計数管領域およびガイガー領域で動作するガス計数管は、それぞれ電離箱、比例計数管およびガイガーミュラー (GM) 計数管としてひろく利用されている。一方、制限比例領域は比例領域からガイガー領域への過渡的な領域としてあまり目が向けられていなかった。ところが1970年代になってこの制限比例領域が、ガス混合比、ガス圧力、陽極心線径等のある条件の下でガス計数管の

動作にとって興味ある特性を示すことが発見され第4の放電モード (自己消滅ストリーマモード: Self-Quenching Streamer mode 以下 SQS モードと略す。) として様々な研究機関で研究されるようになった³⁾⁻⁸⁾。

この SQS モードでは、1) 陽極心線出力が初期電子の数に依存せずほぼ一定 (約 10^8 個) であり、飽和している。比例計数管における出力に比べて極めて出力が大きい。2) GM 計数管の場合のように電子などが空間的に広がらない。3) その為不感時間が比較的短い。4) 比例領域から SQS 領域への遷移がはっきりと観測される。5) 混合ガスの種類と混合比、ガス圧力および陽極心線径の大きさ等の違いによって、SQS 領域への遷移電圧が異なる。などの特徴を有することが報告されている。このような SQS モードについて、現在まで主として β 線⁹⁾、X線⁹⁾ および α 線¹⁰⁾ を利用して様々な基礎的な研究が行なわれてきた。

エネルギー変換工学専攻博士課程

* 工学部応用原子核工学科

** 産業医科大学医療技術短大

*** エネルギー変換工学専攻修士課程

**** エネルギー変換工学専攻

最近、ガス計数管は、放射線の位置検出に広く利用されるようになってきた。この場合、ガス計数管は比例領域で動作させている。我々は大阪大学 AVF サイクロトン施設において大型の QDMDQ 型荷電粒子スペクトログラフ (RAIDEN: 雷電) を使用して核反応の研究を行なっている。このスペクトログラフの位置検出システムとして 1.5m 長の比例計数管数台とプラスチックシンチレーターから構成されるシステム (KYUSYU 検出器システム)¹²⁾ を開発し、実験に使用している。ところが 1.5m 長の比例計数管では、RAIDEN スペクトログラフ出口窓を完全におおうことができず更に長い位置検出器の実現の希望があった。我々が使用してきた 1.5m 長の比例計数管は、抵抗心線型の比例計数管で陽極心線の抵抗が大きいほど位置分解能が良くなるという特徴がある。この 1.5 m 長の比例計数管の陽極心線には、直径 10 μm のニクロム線を用いているが、更に長い比例計数管を作ろうとすると、陽極心線が陰極に引き寄せられ放電が起るとい問題が生じた。この問題を解決する為には、太い陽極心線の使用が考えられるが、位置分解能が劣化することになる。このような状況の下で、分解能を劣化させず、更に長いガス計数管を作ることと考えて、陽極心線から得られる出力が大きい SQS モードによる位置検出法の採用を計画した。

ここでは、1.5m 長の比例計数管を RAIDEN スペクトログラフ出口窓を完全におおうことができる 1.8 m 長のガス計数管に変更することを目的として行なった SQS モードによる 1.8m のガス計数管のテスト実験の結果を報告する。

2. 実験装置

2.1 ガス計数管

Fig. 1 に実験に使用したガス計数管の構造図を示す。ガス計数管容器は長さ 2,000 mm、高さ 160 mm 幅 25 mm のアルミニウムブロックから作られておりその両側に高さ 30 mm、長さ 1,800 mm の窓がある。窓とガス計数管中央部にはマイラーにアルミニウムをコーティングした $\sim 6 \mu\text{m}$ の薄膜を張り、ガスのシールを行なった。この容器内には 2 台のガス計数管が取り付けられ一方を従来の比例領域において動作させるガス計数管、もう一方を SQS 領域で動作させる計数管とした。前者は厚さが 10 mm、高さが 30 mm のガス計数管で陽極心線としては長さ 1.52 m、直径

10 μm のニクロム線を張った。後者は厚さ、高さがそれぞれ 15 mm、30 mm であり陽極心線として長さ 1.8m、直径 25 μm のステンレス線を張った。陽極心線は窓の両端にあるテフロンにねじ止めされた燐青銅線バネに導電性の接着剤で固定した。心線への張力はネジを使って変化させることができる。本実験では同じ形のガス計数管容器をもう 1 台使用し、都合 3 台のガス計数管を同時計数型で使用した。

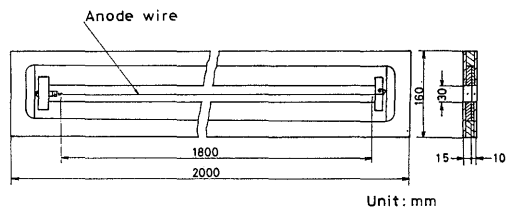


Fig. 1. Schematic view of the position sensitive gas counter. SQS-Counter has an anode wire of 1.8 m long and 25 μm diameter stainless steel. X-Counter and ΔE -Counter have an anode wire of 1.5 m long and 10 μm diameter nichrome.

2.2 ガス系

Fig. 2 に本実験を用いた計数管ガス供給系の模式図を示す。Ar: CH₄ 混合ガス (70% : 30%) を調整器によって 1.3 atm に減圧し体積流量計を介してガス計数管 I に毎分 70 cc の割合で流す。ガス計数管 II のガス出口から流れ出るガスはトラップを通過させ、消滅ガスとしてエチルアルコールを飽和させた。このエチルアルコールを含んだ混合ガスをガス計数管 II へ導入する。従ってガス計数管 I は Ar+CH₄ 混合ガスが、ガス計数管 II は Ar+CH₄+C₂H₅OH 混合ガスが

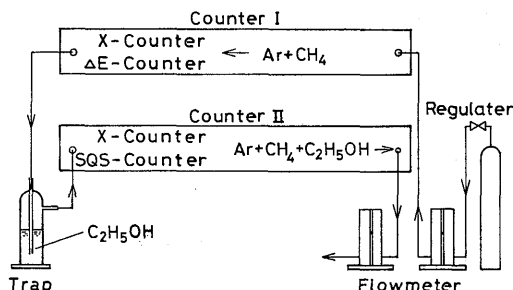


Fig. 2. Gas flow system used in the experiment at RCNP AVF cyclotron.

充填されていることになる。ガス計数管Ⅱにエチルアルコールを飽和させたのは、このガス計数管を SQS モードで使用するためで、エチルアルコールを加えることにより、ダブルストリーマ⁹⁾以上の放電を抑えることができることが知られているからである。特にエ

チルアルコールを添加することにより、心線方向へ広がる光子が吸収され、異常放電の発生を強く抑制すると考えられている。

2.3 データ処理

ガス計数管の配置とデータ処理回路系を Fig. 3 に

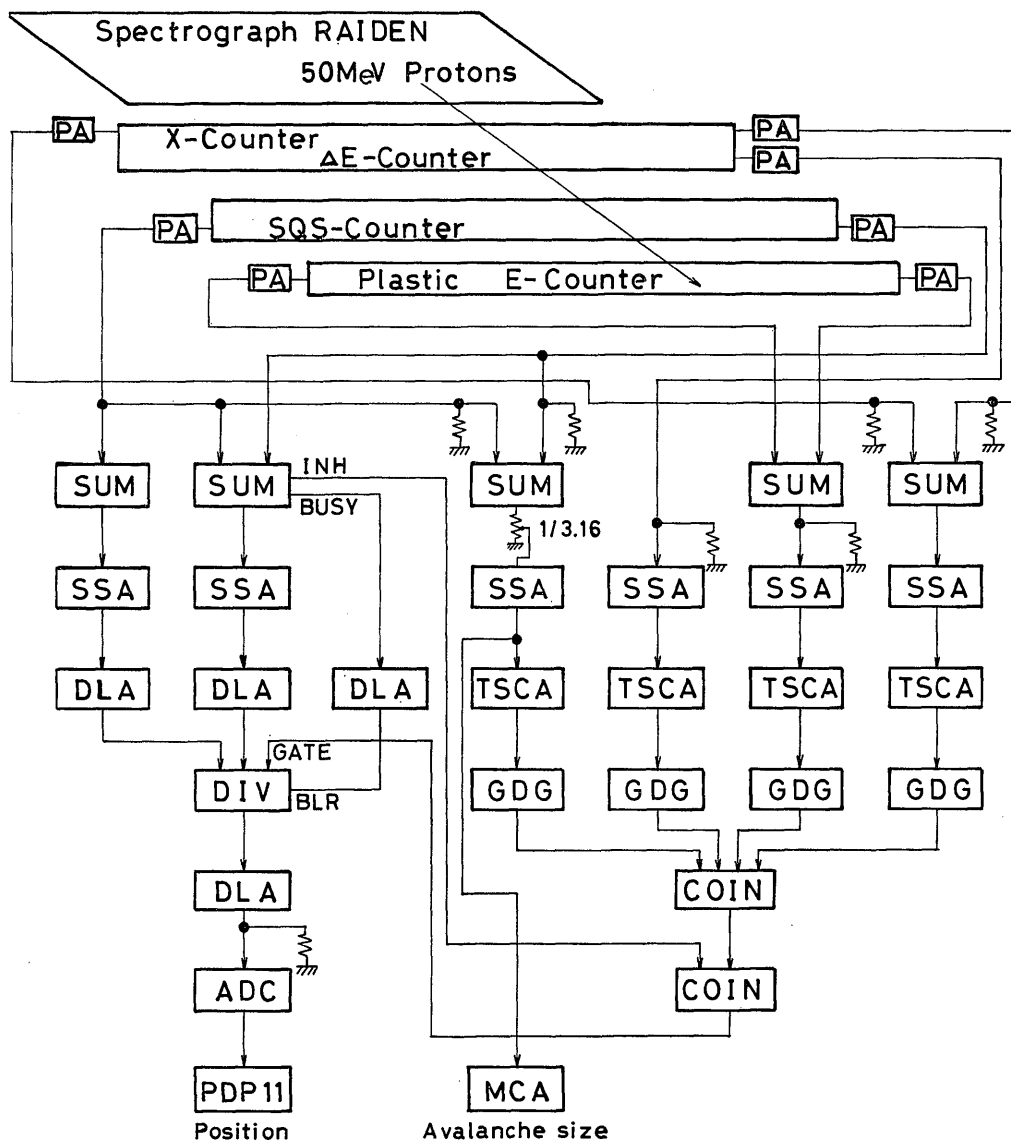


Fig. 3. Electronic block diagram of the gas counter system. PA: Pre-amplifier; SUM: Sum amplifier (ORTEC 433 A); SSA: Spectroscopy amplifier (ORTEC 472); TSCA: Timing single channel analyzer (ORTEC 455); DLA: Delay amplifier (ORTEC 427 A); GDG: Gate and delay genelator (ORTEC 416 A); COIN: Coincidence circuit (ORTEC 418 A); DIV: Analog division circuit; MCA: Multichannel analyzer.

示す。RAIDEN スペクトログラフの焦点面に Fig. 3 に示すように KYUSHU 検出器システムすなわち X カウンター, ΔE カウンター, SQS カウンターおよび E カウンターを配置した。ビーム照射中, 測定室内は, バックグラウンドが非常に高くなる。そこで図に示すように X カウンター, ΔE カウンターおよび E カウンターを同時計数カウンターとして使うことでバックグラウンドを減少させる方法を取った。

SQS カウンターによる位置情報は, 陽極心線の両端を実効的に接地した時両端に流れ込む電荷の総量が電子なだれの起った位置に比例して分割される¹³⁾ ことを利用した電荷分割法で得た。つまりパルス割算回路の分母に心線の両端で得られる電荷パルスの和を, またその分子に片端から得られる電荷パルスを入力することで陽子の入射位置が決定される。各ガス計数管から得られる電荷信号はすべて電荷有感型プリアンプを使って出力させた。SQS カウンター用プリアンプでは陽極心線出力電荷量が大きい為, 44 pF のフィードバックコンデンサーと 50 M Ω の抵抗で積分し, また他のカウンター用プリアンプは 22 pF のコンデンサーを用い一回積分し, 70 μ sec の時定数で微分した後増幅した。

SQS カウンタープリアンプの左側の信号を一台のサムアンプに, 左右両方の信号をもう一台のサムアンプに入力する。これらの信号はそれぞれ位置の情報となだれサイズの情報をもちスペクトロスコーピアンプおよびディレイアンプを通して割算回路の分子及び分母入力となる。スペクトロスコーピアンプを通す前にプリアンプの左右の信号の和をとることは, 心線の抵抗に起因するジョンソンノイズを打ち消すことにもなる¹⁴⁾。スペクトロスコーピアンプの整形時定数はすべて 0.5 μ sec とした。

割算回路としては Westphal¹⁵⁾ の考案した回路を当グループが改良した回路¹⁶⁾ を用いた。この回路の積分直線性は 20 : 1 のダイナミックレンジで 0.1 % 以下である。X カウンター, ΔE カウンター, SQS カウンターおよび E カウンターからの出力信号の同時計数をとることによりバックグラウンドを減少させ, 更に同時計数回路の出力とスペクトロスコーピアンプの INHIBIT 出力との反同時計数をとることによってスペクトロスコーピアンプのパイルアップの影響を減少させている。割算回路の出力は ADC においてデジタル化され, Raw Data Processor を経てミニコン

ピューター PDP-11 で処理される。

3. 実験方法および実験結果

3.1 実験方法

本実験で用いた粒子は, 大阪大学 AVF サイクロトロンで加速された 50 MeV 偏極陽子を ¹⁰⁶Pd ターゲット (≈ 1 mg/cm²) に照射することによって弾性散乱された陽子である。この陽子を RAIDEN スペクトログラフで分析し, ガス計数管に入射させた。検出器への入射角度は 36° である。

ガス計数管の印加電圧は, X カウンター, ΔE カウンターおよび E カウンターにそれぞれ 1.65 kV, 1.75 kV および -1.2 kV とし, SQS カウンターは 1.8 kV から 2.4 kV まで変化させた。

3.2 波高分布

SQS カウンターへの入射放射線を X 線とし他の条件を同一にした場合に, なだれサイズの比例領域から SQS 領域への遷移は, 心線印加電圧が 2.5 kV のとき観測された。また, SQS 領域ではなだれサイズが飽和していることから 50 MeV 陽子の場合, 陽極心線の印加電圧が 2.1 kV あたりで SQS 領域に入っているものと予測された。そこで本実験では SQS カウンターの心線印加電圧を 2.0 kV, 2.2 kV, 2.3 kV および 2.4 kV とし比例領域の波高分布を 1 点, SQS 領域の波高分布を 3 点測定した。その結果を Fig. 4 (a) から (d) に示す。Fig. 4 は, 縦軸がチャンネル当りのカウント数を, 横軸がなだれサイズを示す。Fig. 4 (a) は, 波高の高い側にすそを引く典型的なランダウ型のエネルギー損失スペクトルを示しており, 比例領域での波高分布を表わしていると考えられる。Fig. 4 (b) および (c) の波高分布はガウス分布を示しており, これらは SQS モードの波高分布と極めて似ていることから明らかに比例領域での電子なだれによるものでないことがわかる。Fig. 4 (d) ではガウス分布が崩れ始めており, これは光子が陽極心線方向へ広がり, 新しい電子なだれが生じたものと考えられる。

3.3 位置スペクトル

Fig. 5 (a) から (d) に測定によって得られた位置スペクトルを示す。これらは, Fig. 4 のデータと同一条件で測定されたものであり, (a), (b), (c) および (d) における陽極心線への印加電圧はそれぞれ 2.0 kV, 2.2 kV, 2.3 kV および 2.4 kV である。図のピークは ¹⁰⁶Pd (\vec{p}, p) 反応の基底状態のピークであるが,

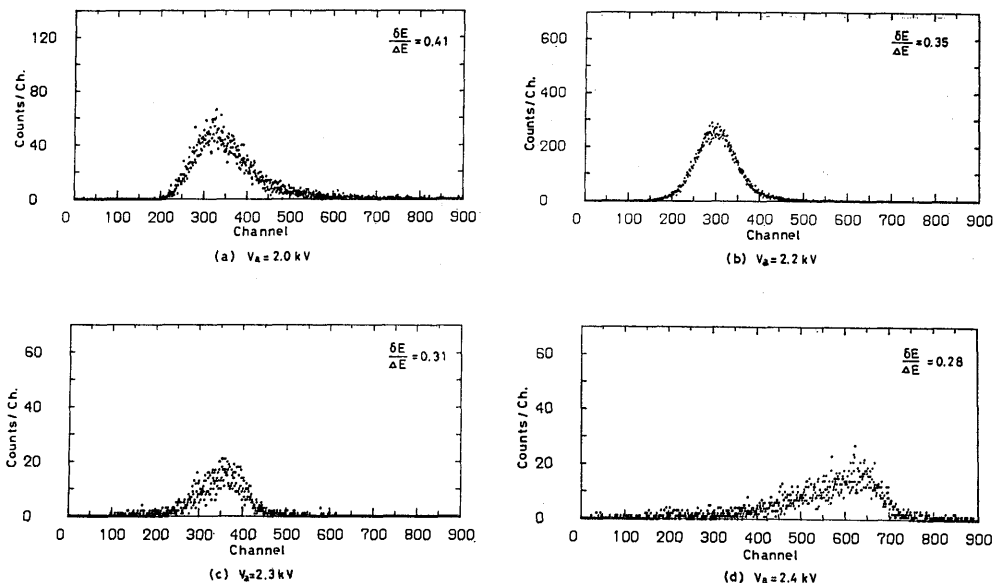


Fig. 4. Amplitude spectra of signals at different anode voltages. Incidence particle: 50 MeV protons. Gas mixture: 66 % Ar+28 % CH₄+6 % C₂H₅OH.

半値幅はそれぞれ, 9.7 (13 mm), 6.6 (9 mm), 7.1 (10 mm), 4.5 (6 mm) チャンネルとなった。Fig. 5 (a), (b) および (c) はガウス型のスペクトルとなっているが, 半値幅に関しては (d) の場合について最良の結果が得られた。しかしスペクトルの両すそが広がって, バックグラウンドの多いスペクトルとなっている。

3.4 だれサイズ

Fig. 6 は心線印加電圧の関数として表わしただれサイズの変化を示すもので●印が 50 MeV 陽子, ○印が 4.5 keV X線による結果¹⁷⁾を示す。X線の場合, 図のようになれサイズのはっきりした遷移が観測されたが 50 MeV 陽子の場合にははっきりしない。しかしこれは, 陽子の検出器ガス中でのエネルギー損失が大きいため, SQS 領域のなれサイズと比例領域のなれサイズが連続的につながったようにみえているためであり, モード遷移が存在しない為ではないものと考えられる。

4. 考 察

Fig. 5 の位置スペクトルをみると, 比例領域よりも SQS 領域でとったスペクトルの半値幅が印加電圧を上げるにつれて狭くなる傾向にあることが分かる。

このことを定量的に考えてみる。

単位長さ当りの抵抗が r の陽極心線から得られる信号を電荷有感増幅し, 時定数 τ のフィルタにより波形の整形を行なうとき, 信号の雑音電荷 Q_N は次式で表わされる¹⁴⁾。

$$Q_N = \frac{1}{\eta} \left(\frac{4\kappa T \beta \tau}{r l} \right)^{1/2} \quad (1)$$

ここで η はパルスの立ち上がりの効果を, κ はボルツマン定数を, T は絶対温度を, β はフィルタの種類によって決まる定数を, および l は陽極心線の長さを表す。また雑音電荷と位置分解能 $4\chi^{sn}$ は次式で表わされる。

$$\frac{4\chi^{sn}}{l} = 2.35 \frac{Q_N}{Q} \quad (2)$$

ここで Q は陽極心線に入射する総電荷量 (クーロン) である。本実験の条件から $\eta \approx 0.5$, $T \approx 300^\circ\text{C}$, $\tau = 0.5 \mu\text{ sec}$, $r = 1.94 \text{ k}\Omega/\text{m}$ 及び $l = 1.8 \text{ m}$ ¹⁸⁾ とすると, (1) 式および (2) 式から, 雑音電荷による位置分解能 $4\chi^{sn}$ は

$$4\chi^{sn} = \frac{1.25 \times 10^{-14}}{Q} (m) \quad (3)$$

と表わされる。この式と心線印加電圧が 2.0 kV, 2.2

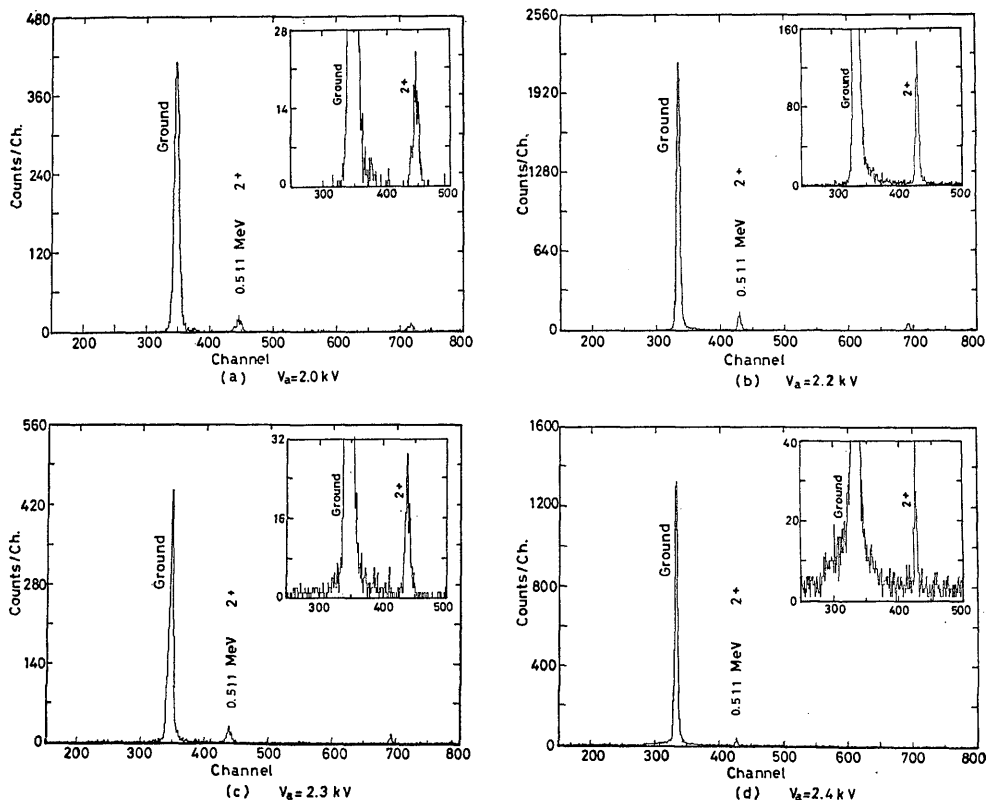


Fig. 5. Position resolution of the 1.8 m single wire gas counter with SQS-mode for 50 MeV protons.

Table 1. Experimental and calculated position resolutions as a function of anode voltage.

Anode voltage (kV)	Resolution				
	Experiment (Channel)	Experiment (mm)	Calculation $\Delta\chi^{sn}$	Calculation $\Delta\chi^{st}$	Calculation $\sqrt{\Delta\chi^{st2} + \Delta\chi^{sn2}}$ (mm)
2.0	9.7	13	5.01	2.46	5.6
2.2	6.6	8.9	1.26	2.08	2.4
2.3	7.1	9.6	0.81	1.85	2.0
2.4	4.5	6.1	0.52	1.64	1.7

kV, 2.3 kV および 2.4 kV のそれぞれの場合の電荷量から Table 1 の $\Delta\chi^{sn}$ を得る。

次に入射粒子がガス計数管面に対して斜めに入射する効果について考えてみる。斜め入射による位置分解能を $\Delta\chi^{st}$ とするとこれは次式により表わされる¹⁹⁾。

$$\Delta\chi^{st} = \frac{1}{\sqrt{12}} d \cot\theta \frac{\delta E}{\Delta E} \quad (4)$$

ここで、 d はガス計数管の厚さを、 θ は入射粒子とガ

ス計数管面のなす角度を、 ΔE は入射粒子の検出器ガス中でのエネルギー損失を表わし、 δE はその広がりを表わす。実験条件 $d=15$ mm, および $\theta=36^\circ$ と Fig. 4 から各心線印加電圧に対する $\delta E/\Delta E$ を計算することで Table 1 の $\Delta\chi^{st}$ の値を得た。心線印加電圧を上げることによって比例モードから SQS モードへガス計数管の動作モードを変えることで、位置分解能が良くなる傾向にあるのは、上で議論した

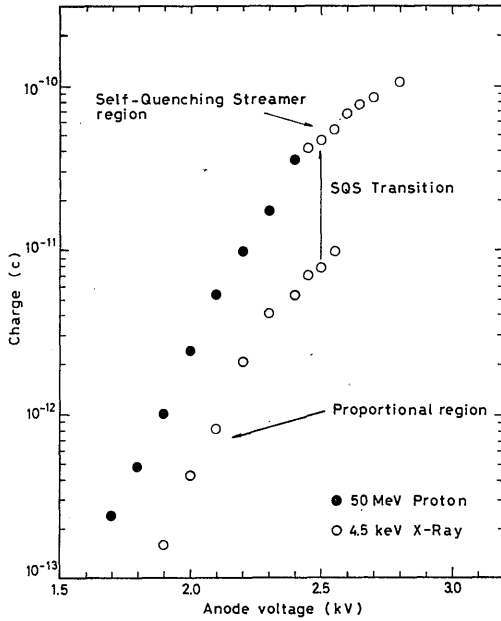


Fig. 6. Avalanche size as a function of the anode voltage for different incident particles.

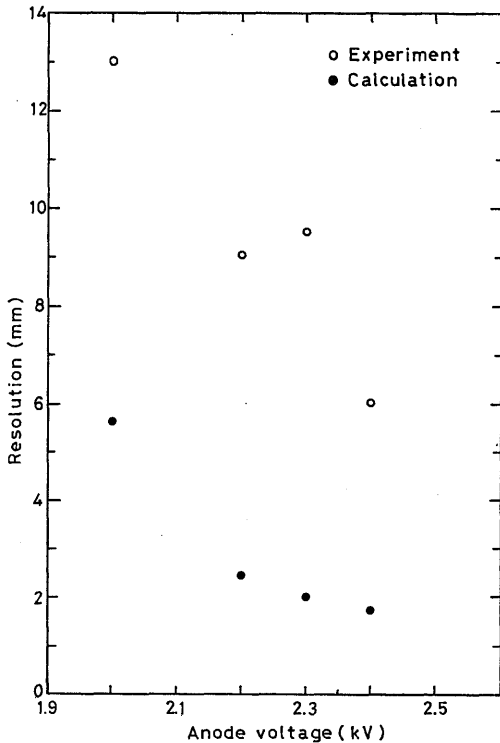


Fig. 7. Positon resolution as a function of anode voltage.

ように、心線印加電圧が上がることで、陽極心線へ入射する総電荷量が增大し雑音電荷による位置分解能 $4\chi^{SQ}$ が向上すること、および $\delta E/\Delta E$ の値が SQS モードになると減少することにより斜め入射による位置分解能の劣化が改善されることに起因していると考えられる。又 $\delta E/\Delta E$ の減少は、Fig. 4 の ΔE スペクトルの形の変化にも表われている。心線印加電圧が 2 kV の比例領域での ΔE スペクトルはエネルギーの高いほうのすその広がったランダム形をしているが、2.2 kV、2.3 kV と印加電圧を上げるとこれがガウス型となり $\delta E/\Delta E$ が小さくなったものと考えられる。2.4 kV の場合の低いエネルギーの領域でのスペクトルのすその広がり、心線印加電圧を高くすることによってストリーマから離れた場所で光電離する確率が増え²⁰⁾、光電離によって生じた電子によって別のストリーマの発生が増えたことによるものと考えられる。2.4 kV で ΔE スペクトルがガウス型から崩れているが、 $\delta E/\Delta E$ がそれ程大きくならなかったこと、又、陽極心線への入射電荷が大きくなったことで、この電圧で最高の位置分解能が得られたと思われる。しかし、このとき位置スペクトル上のバックグラウンドが増加したが、このことも、光電離により発生したストリーマによるものと解釈できる。

Fig. 7 に、位置スペクトルから得られた分解能および雑音電荷 Q_N と斜め入射に基づく位置分解能の和を、心線印加電圧の関数として表わした。実験と計算による位置分解能は SQS モードになると良くなるという傾向は両者とも示してはいるが、計算によって求めた方の絶対値が小さくなっている。これはターゲットによるエネルギー損失、およびビームの揺らぎによるものと考えられる。又 2.3 kV での実験の分解能が 2.2 kV の場合に比べて悪くなっているが、これは回路系の調整が十分ではなかった為と考えられる。

Fig. 6 に、50 MeV 陽子および 4.5 keV X線によるなだれサイズの変化を示したが、同一電圧でも、入射粒子により、なだれサイズが異なっている。これは 4.5 keV X線と 50 MeV 陽子の検出器ガス中でのエネルギー損失に差があるからである。X線の場合、検出器ガス中で一度にそのエネルギーを失うが、50 MeV 陽子の場合、アルゴン+メタン混合ガス (70% : 30%) 中で、約 11 keV/cm のエネルギー損失があり、厚さ 1.5 cm のカウンター中で 36° の入射角で通過する陽子は、約 26 keV のエネルギーをガス計数

管中で失うことになる。従って 4.5 keV X線と 50 MeV 陽子のエネルギー損失の比は 5.7 倍となる。このエネルギー損失の差が Fig. 6 の差になって表われている。

5. 結 論

大阪大学 AVF サイクロトロンで加速された 50 MeV 陽子を用いた SQS モードによる 1.8m 長単心線ガス計数管のテストを行ない、次の結論を得た。

- 1) 入射放射線が X線の場合のように、なだれサイズの比例領域から SQS 領域への遷移は観測されなかった。
- 2) 4E スペクトルが比例領域から SQS 領域になるにつれて、ランダウ型からガウス型に変化し、エネルギー損失の広がり小さくなることから、SQS モードが斜め入射に強いことが分かった。
- 3) SQS モードによる位置検出が可能であり、分解能の改善が計られることが分かった。
- 4) しかし、SQS モードになるとストリーマが陽極心線方向に広がりバックグラウンドが多くなることが分かった。
- 5) 1.8 m 長単心線ガス計数管を SQS モードで動作させることで、1.5 m の比例計数管よりもむしろ良好な分解能を得ることができた。

謝 辞

本実験を遂行するに当って御協力いただいた大阪大学核物理研究センターの近藤道也教授、池上栄胤教授、小方寛教授をはじめセンターの皆様にご感謝いたします。

この研究は一部、文部省科学研究費試験研究(2)の補助を受けていることを記し、関係者に謝意を表します。

References

- 1) H. Ikegami, S. Morinobu, J. Katayama, M. Fujiwara and S. Yamabe, Nucl. Instr. and Meth. 175 (1980) 335.
- 2) S. A. Korf, Electron and Nuclear Counters (Van Nostrand 1955) p. 13.
- 3) C. Grunberg, L. Cohen and L. Mathieu,

- Nucl. Instr. and Meth. 78 (1970) 102.
- 4) S. Brehin, A. Berger, G. Marel, G. Tarte, R. Turley, G. Charpak and F. Sauli Nucl. Instr. and Meth. 123(1975) 225.
- 5) G. Charpak, G. Peterson, A. Policarpo and F. Sauli, IEEE Taans, Nucl. Soc. NS-25 (1978) 122.
- 6) C. Battistoni, E. Iarocci, M. M. Massai, G. Nicoletti and L. Trasatti, Nucl. Instr. and Meth. 164 (1979) 57.
- 7) M. Atac, IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-28 (1981) 492.
- 8) T. Mulera, A. Del Guerra, V. Perez-Mendez, G. Schwartz, IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-30 (1983) 355.
- 9) G. D. Alekseev, N. A. Kalinina, V. V. Karpukhin, D. M. Khazins and V. V. Kruglov, Nucl. Instr. and Meth. 177 (1980) 385.
- 10) N. Koori et al., to be published.
- 11) M. Matoba, T. Sakae, H. Kametani, H. Ijiri, H. Kurokawa and K. Komatsu, to be published.
- 12) M. Matoba, K. Tsuji, K. Marubayashi, T. Shintake, H. Ikegami, T. Yamasaki, S. Morinobu, I. Katayama, M. Fujiwara and Y. Fujita, Nucl. Instr. and Meth. 180 (1981) 419.
- 13) W. R. Kuhlman, K. H. Lauterjung, B. Schimmer and K. Sistemich, Nucl. Instr. and Meth. 40 (1966) 118.
- 14) M. Matoba, K. Tsuji, K. Marubayashi and T. Shintake, Nucl. Instr. and Meth. 165 (1976) 465.
- 15) G. P. Westphal, Nucl. Instr. and Meth. 134 (1979) 387.
- 16) M. Matoba, H. Kurokawa, T. Sakae, H. Ijiri, H. Kametani and K. Komatsu, to be published.
- 17) H. Kametani et al., to be published.
- 18) M. Matoba, T. Sakae, T. Yamasaki, S. Morinobu, I. Katayama, M. Fujiwara, Y. Fujita, H. Ikegami, H. Iida, Y. Aoki, Y. Toba, S. Kunori, K. Nagano, K. Hashimoto and K. Yagi, Nucl. Instr. and Meth. 196 (1982) 257.
- 19) H. Hafner and H. H. Duhm, Nucl. Instr. and Meth. 160 (1979) 273.
- 20) M. Atac and A. V. Tollestrup, Nucl. Instr. and Meth. 200 (1982) 345.