

筑波大学大学院修士課程

理工学研究科修士論文

高エネルギー原子核実験のための

Pestov Spark Counter の試作と評価

学籍番号 993431

氏名 箱崎 大祐

主任指導教官 物理学系 三明 康郎

目次

目次	1p
論文要旨	3p
第1章 序論	4p
1.1 高エネルギー原子核衝突実験	4p
1.2 粒子識別	5p
1.3 Spark Counter の動作原理	5p
1.4 Pestov Spark Counter について	6p
1.5 Pestov Spark Counter の問題点	7p
1.6 ストリーマー放電について	8p
1.7 プラスチック・シンチレーションカウンタについて	10p
1.8 本研究の目的	11p
第2章 Pestov Spark Counter の製作	12p
第3章 宇宙線での測定原理	14p
3.1 測定装置	15p
3.2 回路図	15p
3.3 検出効率の求め方	16p
3.4 Single Rate の測定	16p
3.4.1 測定方法	16p
3.4.2 結果	16p
3.5 時間分解能の測定について	18p
3.6 Slewing 効果	18p
3.7 Start Counter の時間分解能	19p
第4章 結果と考察	21p
4.1 出力の観測	21p
4.1.1 出力の立ち上がり	21p
4.1.2 出力の問題点	22p
4.2 検出効率	24p
4.2.1 検出効率と測定時間の関係	24p
4.2.2 効率が何に依存するのか？	26p
4.2.3 付着物の解析	30p
4.2.4 検出効率に関するまとめ	32p
4.3 時間分布	33p

4.4 効率の減少と時間分布の広がりの原因の考察	39p
第5章	42 p
第6章 まとめ	44p
謝辞	45p
参考文献	46p

論文要旨

核子あたり 10 ～ 数 100GeV まで加速させた原子核同士を衝突させる高エネルギー原子核実験の目的は、高温・高密度の物質相の生成と理解である。衝突の様子を知るためには運動量分布等の測定が有効であるが、飛行時間法等による粒子識別を行えば、より系統的な計測が可能となる。粒子識別は、粒子の質量を測定することにより行う。測定方法としては飛行時間測定法がとられ、粒子の運動量 P と速度 V を測定することによって、質量をもとめ、その違いによって粒子識別をする。そのために飛行時間測定器としては、位置・時間分解能に優れていることが要求される。

プラスチック・シンチレーションカウンタは、現在高エネルギー原子核実験で用いられている飛行時間測定器である。荷電粒子が通過することによって発生したシンチレーション光を両端の光電子増倍管により、読み出す。時間・位置分解能としては 70ps、 4cm^2 が報告されている。

Pestov Spark Counter は、ガス平行電極板検出器であり新しい飛行時間測定器である。荷電粒子が入射することによって作られた電子を電極板間での高電場によって増幅させてストリーマー放電により出力を得る。放電を局所化するために、ガスとして希ガスをベースにして有機ガスを混合したものを使用し、高抵抗アノードを使用している。時間・位置分解能が 30ps、 0.5mm が報告されており、プラスチック・シンチレーションカウンタより優れた性能を持っている。しかし一方では、時間分布に単一のガウス分布から外れる成分があり、検出器を安定に保つために、ガスの種類と比率、ガスの流量速度、アノードの抵抗値などの調整が困難であるなどの問題点が知られている。

検出器として要求されることを考えると従来のカウンタより Pestov Spark Counter の方が優れている。しかし、先の問題点もあることから、本研究では実際に製作し、特性（持続性を中心とした性能特性）についての評価を行なった。結果から、製作した検出器は、測定時間と共に検出効率が減少し、タイミングが遅れて時間分布も広がることがわかった。その原因は、カソード上に付着物が形成されることにあり、その付着物のため、ストリーマー放電に至る過程が変化するためと考えられる。この付着物はクロロホルムに溶けることから有機物であり、核磁気共鳴測定の結果から、主成分は CH_2 と CH_3 であることがわかった。このことから、この付着物は、混合ガスの中で二重結合をもち反応しやすいエチレン、イソプレンが放電によってポリマー化したものと考えることができる。一方では、出力の立ち上がり時間が、従来のカウンタであるプラスチック・シンチレーションカウンタよりも3倍早く、運用直後では時間分解能が $84 \pm 10\text{ps}$ と従来のカウンタと同程度の性能を持つことがわかった。このことから、検出器を安定することができれば、従来のカウンタを凌ぐ性能をだせるであろうと言える。

第 1 章 序論

1.1 高エネルギー原子核衝突実験

高エネルギー原子核衝突実験の目的は、新しい物質層であるクォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) の生成と検出である。QGP とは、物質を構成する最小の粒子だと考えられているクォークと強い相互作用を媒介する粒子と考えられているグルーオンが核子の閉じ込めから解放された状態である。QCD 理論において、QGP は高温・高密度下において存在が予測され、地上で唯一高エネルギー重イオン衝突実験が達成の手段とされている。

衝突の様子を知るためには運動量分布等の測定が有効であるが、飛行時間法等による粒子識別を行えば、より系統的な計測が可能となる。粒子識別の手段としては、飛行時間測定法 (節 1.2) が取られている。そのため、検出器としては、時間・位置分解能が高いことが要求される。また、衝突の際に生成される粒子数が多いことがこの実験の特徴であり、そのために検出器の粒子密度が高くなる。したがって検出器は、粒子密度の高い中で測定できることが要求される。

1.2 粒子識別

粒子識別とは、粒子の質量を測定することにより行う。質量の測定法としては、飛行時間測定法がある。飛行時間測定法とは、粒子の運動量 P と速度 V を測定することによって、質量をもとめ、その違いによって粒子識別をする。以下の式を使い、質量を求める。

$$mc^2 = cp \sqrt{\beta^{-2} - 1}$$

m : 質量、 p : 運動量、 V : 速度 $\quad \beta = V/c$

1.3 Spark Counter の動作原理

Spark Counter の動作原理は、ガス中を粒子が通過することにより作られた電子を電極板間にかけて高電場により増幅させてストリーマー放電を引き起こさせることにより出力を得ることである。

Spark Counter の利点としては、増幅器なしで高出力を得られ、時間応答が速いことがある。一方では、放電の持続時間が長く、放電の範囲が大きいため、カウンターの不感範囲と時間が大きくなってしまふ欠点がある。放電の範囲が大きくなる原因は、荷電粒子による一次電子なだれの際に生成される紫外光により、カソードの電子が叩き出されて二次電子なだれを引き起こしてしまい放電が起こるからである。図 1.1 は、放電の模式図である。

カウンターの不感範囲と時間が長いと検出効率を少なくしてしまう。この欠点のため、高エネルギー原子核衝突実験では、飛行時間測定器として Spark Counter を用いることができない。そこで、これらの欠点を解決する方法を取り、高エネルギー原子核衝突実験の飛行時間測定器として開発・研究をされているものが Pestov Spark Counter である。

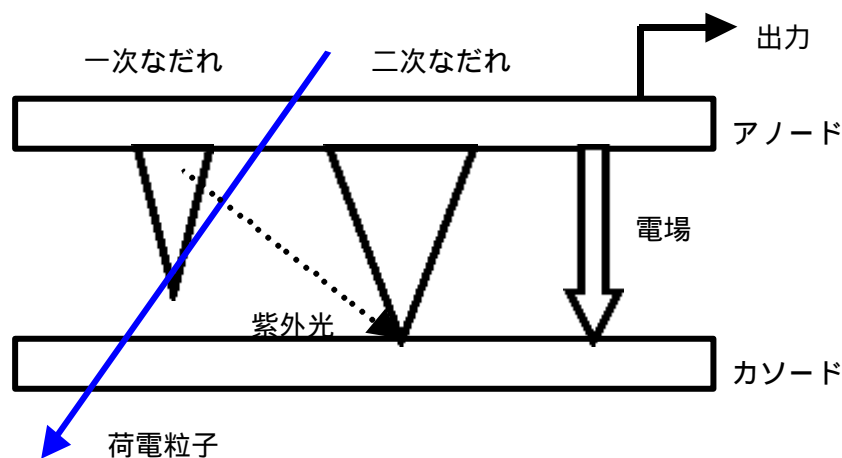


図 1.1 Spark Counter

1.4 Pestov Spark Counter について

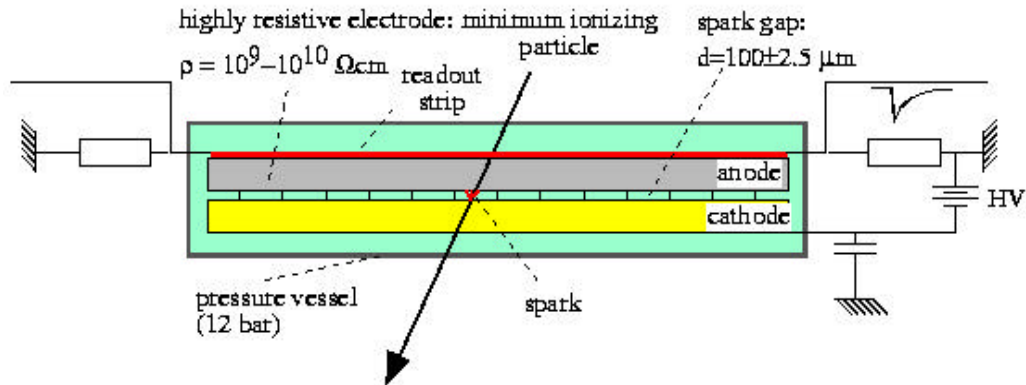


図 1.2 Pestov Spark Counter

Pestov 氏により、20 年前に提唱されたガス平行電極板検出器である。現在、ドイツの GSI において研究されている。高エネルギー原子核衝突実験のために、Spark Counter の欠点を解決する工夫をしている。その工夫の目的は放電の範囲を狭めることである。その工夫は以下の通りである。

- (1) 希ガスをベースにして、有機ガスを混合する。
- (2) 高抵抗のあるアノードを使用する。

混合ガスを使用する目的は、電子なだれの際に作られる紫外光を吸収することである。紫外光がカソードから、電子を叩き出すことにより作られる 2 次電子なだれを防ぐことにより、電子なだれの範囲を狭めている。また、高抵抗のあるアノードを使用する目的は、ストリーマー放電の範囲を狭めることである。ストリーマー放電は、電子なだれの際に生成される電子とイオンのために電極板間の電場が打ち消されたときに起こると考えられている。そのために高抵抗のあるアノードを使用することにより、電極板間の電場を打ち消され難くして、ストリーマー放電の範囲を狭めている。

以上の工夫により、放電の範囲を狭めることができる。その結果、カウント率を上昇することができ、電極板のダメージを少なくすることが可能になる。以下には、GSI により最適化された Pestov Spark Counter のカウンターパラメーターを示す。

- (1) ギャップ $100 \pm 2.5 \mu\text{m}$
- (2) ガス Ar 75% + イソブタン 20% + エチレン 2.5%
+ イソブレン 0.6% の混合ガス
- (3) アノード 抵抗値 $10^9 \sim 10^{10} \text{ cm}$ 、厚さ 2 mm
- (4) カソード Al、Cu の金属板
- (5) 印加電圧 $< 0.6 \text{ MV/cm}$

以上の工夫と最適化されたカウンターパラメーターにより、時間・位置分解能は、25

$p \leq 0.5 \text{ mm}^2$ が報告されている。図 1.4 は、粒子の飛行時間差と運動量の関係のであるが、この図から k を 4 で 4 GeV/c まで分けることが可能である。

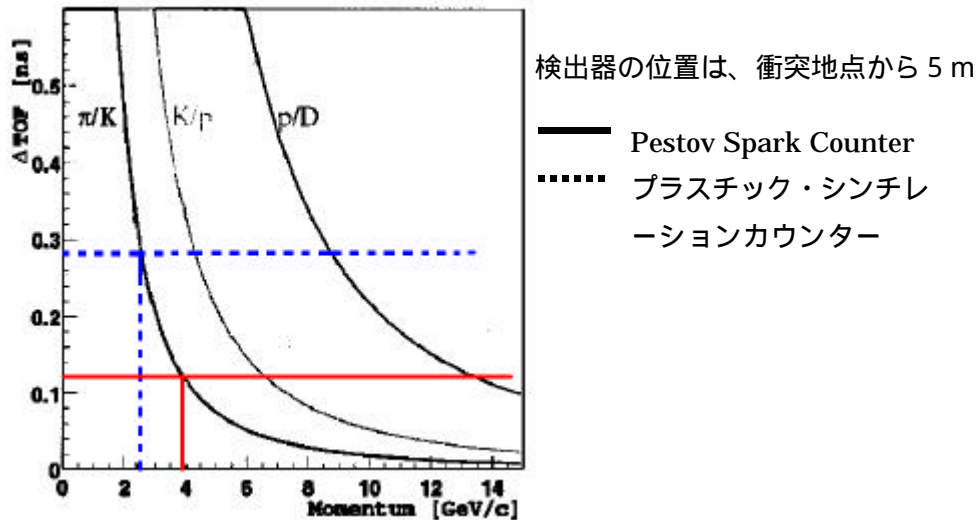


図 1.4 粒子の飛行時間差と運動量

1.5 Pestov Spark Counter の問題点

Pestov Spark Counter はこれまで主要な高エネルギー原子核衝突実験に用いられていない。

その原因の一つ目は、時間分布に Tail の存在があることが知られているからである。図 1.3 は GSI によって測定された Pestov Spark Counter の時間分布である。図からわかるように、時間分布は、単一のガウス分布から外れる成分 (Tail) がある。この Tail は、全体の 10% を占めており、原因については、いまだに明確になっていない。GSI の解釈としては、一次電子なだれの電子数がストリーマー放電を引き起こすことができる数に達しなく、紫外光による二次電子なだれの力を借りてストリーマー放電を引き起こす状態があり、timing が遅い成分 (Tail) が生まれるとされている。この Tail の存在は、粒子識別を困難にしてしまう。そのためにも、Tail を減らす必要がある。

また、二つ目の原因としては、カウンターを持続させるために、ガスの種類と比率、ガスの流量速度、アノードの抵抗値の最適化が困難であることが知られているからである。

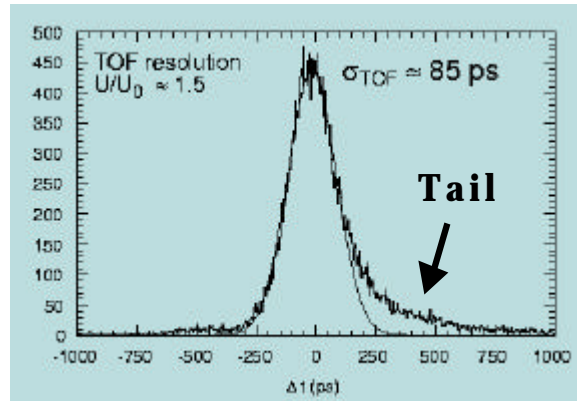


図 1.3 GSI による Pestov Spark Counter の時間分布

1.6 ストリーマー放電について

母電子なだれがカソードから成長して、ギャップ中に残された正イオンによる電場が十分大きくなると (Fig 2-3, a)、このまわりで光電離などにより生じた電子は、外部電場方向ではなく、正イオンの方向に新しくなだれをおこす (Fig 2-3, b)。この新しいなだれが、母なだれと結合して、正、負イオンが混合した線状の放電路 (ストリーマー) が形成される (Fig 2-3, c)。このストリーマーが両電極を短絡して、火花となる。

Meek は、「電子なだれからストリーマーへの転換は、正イオン空間電荷による電場が印可電場の程度になったとき起こる。」という仮定のもと、破壊電圧を計算した。正イオンが Fig 2-4 のように、半径 r の球内に一様に分布していると仮定したとき、正イオン電荷 Q による空間電荷表面の電界 E_{sp} は

$$E_{sp} = Q \quad 4 \quad 0r^2 = (n_+ e \quad 3 \quad 0)r \quad (3)$$

ここで、 n_+ は球内の正イオン密度である。

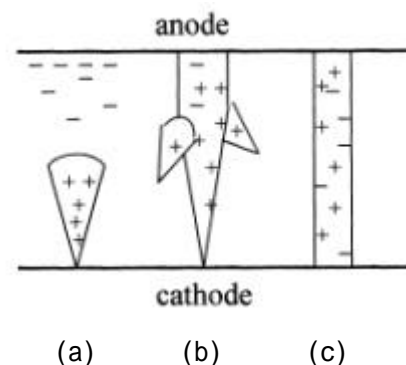


Fig 2-3 電子なだれからストリーマーへの転換 [12].

いま、電子なだれがカソードから距離 x だけ離れた点まで進んでいるとき、この点における電子個数は(1)式より e^{-x} である。よって、 dx だけなだれが進む間に、 $dn_+ = e^{-x} dx$ 個の正イオンが作られる。これが半径 r の円筒内にあるとして、

$$n_+ = \int_0^x e^{-x} dx \quad r^2 dx = \int_0^x e^{-x} r^2 dx$$

1次元の拡散を考えて $r = \sqrt{2D_e x} \sqrt{v_e}$ を式(3)に代入すると、

$$E_{sp} = \frac{e^{-x} e^{-3}}{3} \quad \text{or} \quad E_{sp} = \frac{e^{-x} e^{-3}}{3} \quad \frac{1}{2D_e x} \sqrt{v_e}$$

また、電子の移動速度について、印可電界を E として、

$$v_e = \mu E \quad \mu : \text{電子移動度}$$

より、

$$E_{sp} = \frac{e^{-x} e^{-3}}{3} \quad \frac{1}{2D_e x} \mu E$$

ここで、アインシュタインの関係式 $D_e = \mu k T / e$ 、電子の熱運動速度に対する Compton の実験式、電子の運動速度に対する Langevin の式を用いて、

$$E_{sp} = 5.28 \times 10^{-7} e^{-x} \quad x \quad P \text{ [V/cm]} \quad P \text{ [mmHg]}, x[\text{cm}]$$

となる。これが最大になるのは、電子なだれが陽極に到達する直前で、

$$E_{sp} = 5.28 \times 10^{-7} e^{-d} \quad d \quad P[\text{V/cm}]$$

この値が、印可電界 E に等しくなるとストリーマーに転換するものとして、破壊電圧 ($V_s = E_{sp} d$) が求められる。しかし正しくは、 $E_{sp} = kE$ ($k = 0.1 \sim 1$) として実測値との補正がされる [7]。この Meek の理論によると、Pestov Spark Counter では電子なだれ中の電子数が 10^8 個になったときに、電子なだれからストリーマーに転換すると計算される。

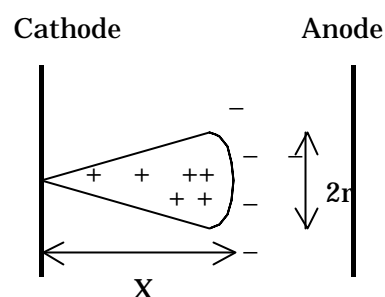


Fig 2-4 平行平板電極における電子なだれと空間電荷効果 [10].

1.8 プラスチック・シンチレーションカウンターについて

従来から高エネルギー原子核・原子核衝突実験で用いられている。図 1.3 のように、プラスチック・シンチレーターの両端に光電子増倍管を取り付けた構成となっている。荷電粒子が通過することによって発生したシンチレーション光を両端の光電子増倍管により、読み出す。荷電粒子の通過した位置も測定できる。時間・位置分解能は 70ps、 4.0 cm^2 が報告されている。図 1.4 から、 k を 4 で約 2.5 GeV/c まで分かることができる。

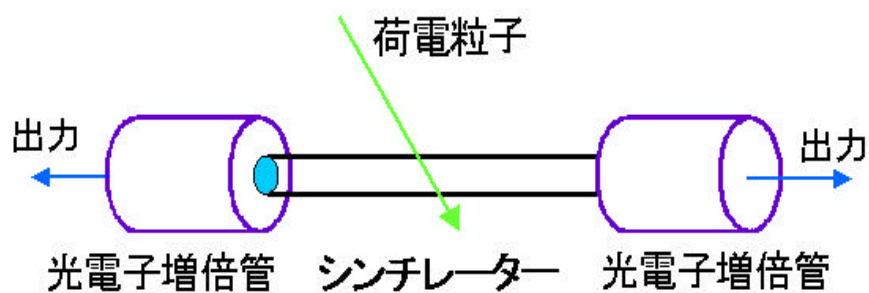


図 1.5 プラスチック・シンチレーションカウンター

1.9 本研究の目的

目的

検出器として求められることを考えると、プラスチック・シンチレーションカウンタより、Pestov Spark Counterの方が適している。しかし、先の問題点の存在もあることから、本研究では、Pestov Spark Counterを試作し、特性（特に持続性）について評価をすることにした。

方針

方針としては、以下のことを行い実行した。

- (1) Pestov Spark Counterを試作する。
- (2) Single Rateの測定をする
- (3) 宇宙線での評価をする。

出力の観測を行う。

カウンター効率の測定をする。

時間分布の測定をする。

電荷分布を測定する。

第2章 Pestov Spark Counter の製作

製作

以下は、製作をした Pestov Spark Counter の構成要素である。

(1) ガス

Ar 75 % + イソブタン 20 % + エチレン 2.5 % + イソプレン 0.6 % の混合ガス
ガスの比は、GSI と同じである。ガスポンペは、Ar + エチレン + イソプレン (A
ポンペ) とイソブタン (B ポンペ) の二種類ある。まず、容器に B ポンペからイ
ソブタンを流し、次に A ポンペから混合ガスを容器に流すことにより、混合ガス
の比率とガス圧をコントロールする。測定中ガスは、容器内に封じ込める。

(2) アノード

ガラスに鉄を混ぜたもの (5×10^{-9} cm)

GSI でもらったものを使用する。4cm×4cm×2mm である。

(3) カソード

アルミの板で表面を良く研磨したもの。

7cm×7cm×4mm である。

(4) ギャップ

ガラスの板で厚さは $100 \mu\text{m}$ (10^{-7} cm)

5mm×5mm×100 μm

(5) 出力の読み出しの仕方

プラスチックシート状にアルミシートを貼り付けたものをアノード上に置き、誘起
された信号を読み出す方法を取った。

(6) F a n

GSI では、ガスを流量させている。しかし、この研究の測定装置では、ガスを測定の間容器内に封じ込める方法しかできない。そこで、容器内に Fan を取り付ける (図 2.2)。これにより、電極板間のガスを強制対流させることにする。Fan は、電極板から 2cm の位置にある。

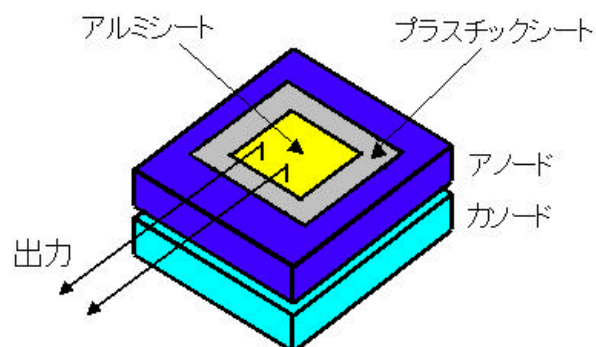


図 2.1 Pestov Spark Counter

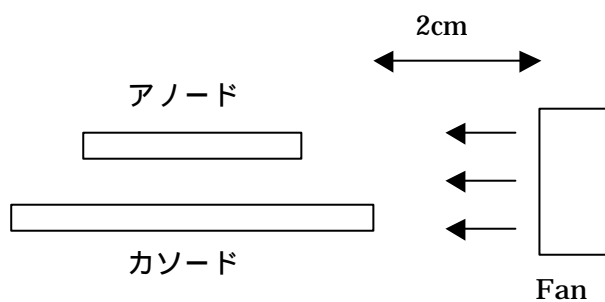


図 2.2 容器内の Fan の図

第3章 宇宙線での測定の原理

3.1 測定装置

Pestov Spark Counter のカウンター効率、時間・電荷分布の測定は宇宙線を使って測定をする。図 3.1 は、装置図である。図のように、Pestov Spark Counter の上下に Start Counter と Defining Counter を置く。

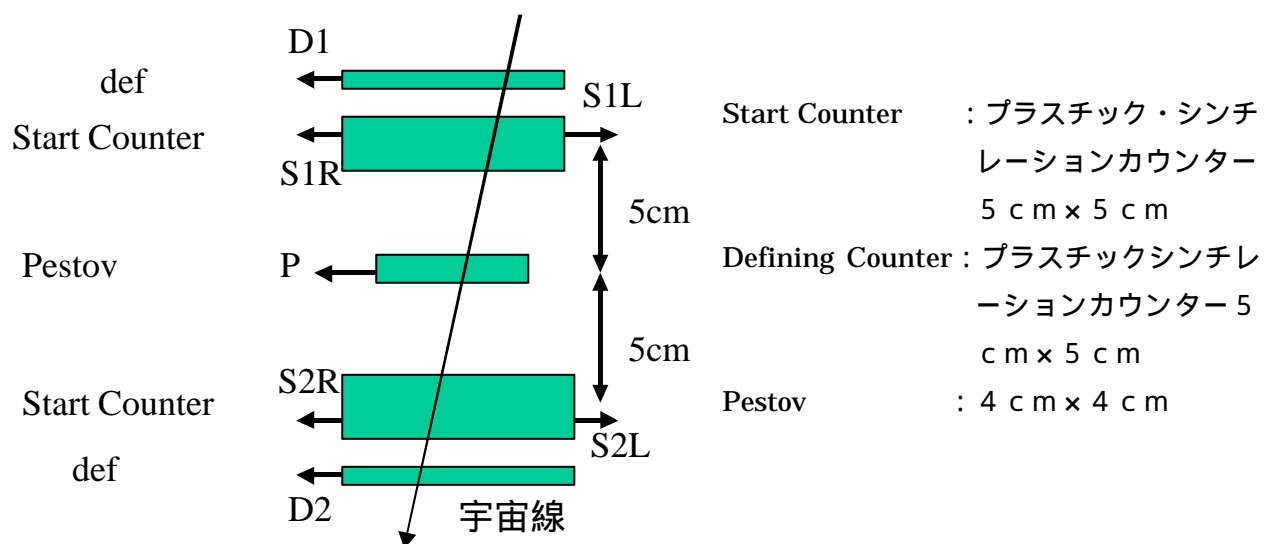


図 3.1 宇宙線での測定図

3.2 回路図

図 3.2 は、宇宙線での測定の回路図である。Start Counter と Defining Counter の各々の出力を Discriminator で NIM 信号に変換する。変換した信号の同期をコインシデンスによってとり、その信号をトリガーとして使いADC のGateとTDC のStartを作る。出力の観測はこのトリガーをオシロスコープのトリガーに入力して、同期のあるPestov Spark Counter の出力を観測する。Start Counter と Pestov Spark Counter からの出力と出力を Discriminator によって変換した NIM 信号を ADC のチャンネルとTDC のチャンネルに入力することにより、電荷分布と時間分布の測定をする。

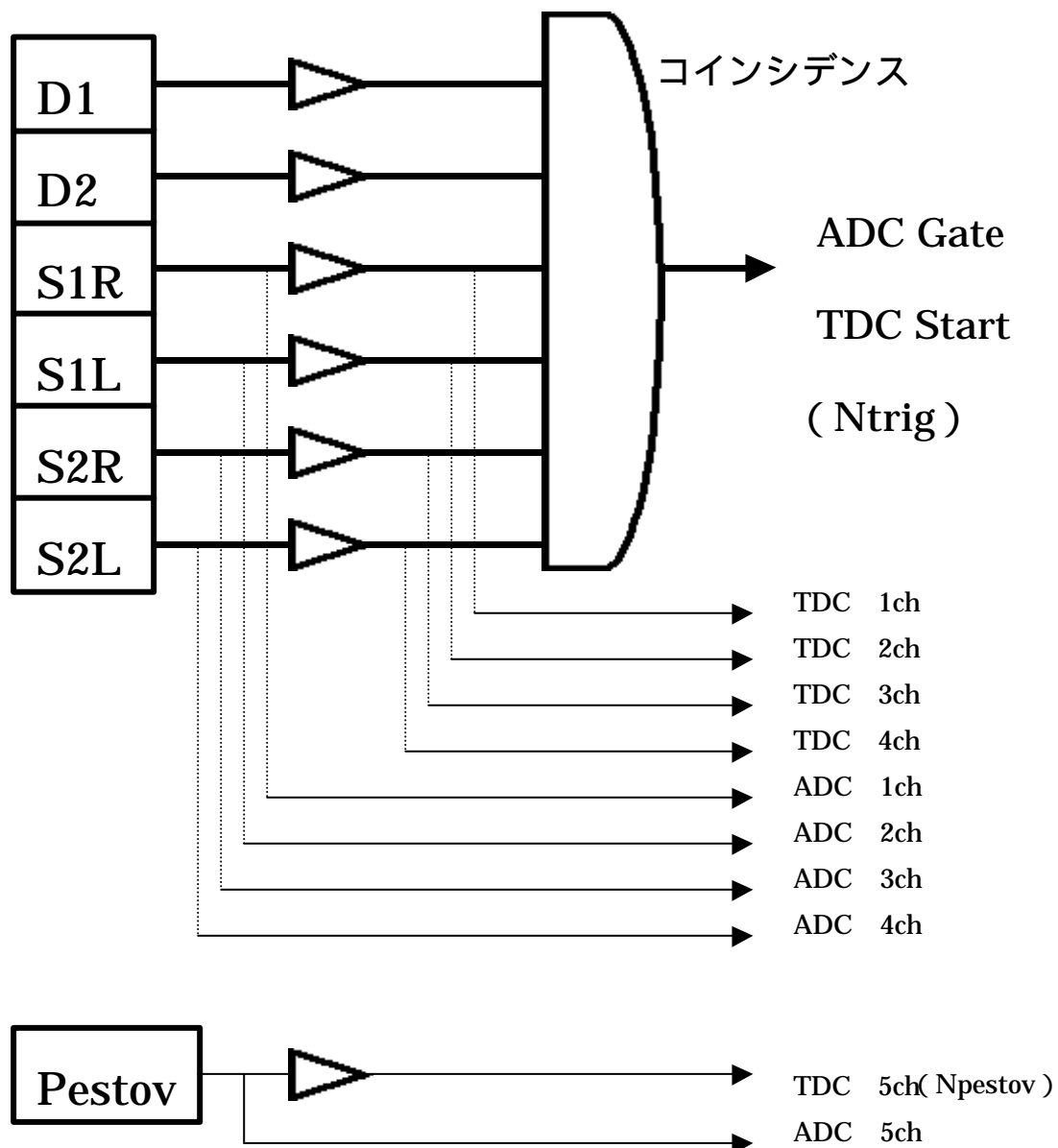


図 3.2 回路図

3.3 検出効率の求め方

Start Counter と Defining Counter によって作られたトリガー数を Ntrig とする。また、トリガーが作られた際の Pestov Spark Counter からの出力回数を Npestov とする。トリガーを作れる宇宙線が、Pestov Spark Counter も通過する割合は、測定配置から 85 パーセントなので、Pestov Spark Counter の検出効率は、以下の式となる。

$$P(\%) = \frac{N_{\text{pestov}}}{N_{\text{trig}}} \times \frac{100}{85} \times 100$$

↑ acceptance factor

3.4 Single Rate の測定

Pestov Spark Counter の測定を行う前に Single Rate の測定を行った。この測定の目的は、宇宙線での測定データにどのくらいのバックグラウンドがあるのかを調べることである。

3.4.1 測定方法

図 3.3 は、回路図である。Pestov Spark Counter からの出力を discriminator によって NIM 信号に変換する。1 回の出力で NIM 信号が 1 回得れるために NIM 信号の幅は 100ns とする。Discriminator の閾値は 10mv とする。NIM 信号をスケーラーに入力してカウントを測定する。

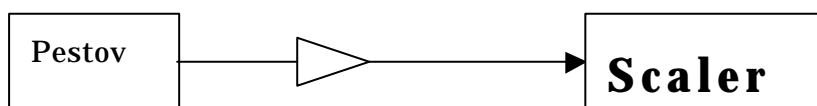


図 3.3 Single Rate の測定回路図

3.4.2 結果

図 3.4 は、測定結果である。図から、Single Rate は、測定時間と共に上昇して、下降する結果を得た。最高で 37.5K(Hz) となる。宇宙線の測定でのトリガー Rate は、0.02Hz であり、TDC の Full Range が 118ns であることを考えると、宇宙線での測定データの中にバックグラウンドが作られることは 1 日で数回であることがわかった。このことから、Single Rate は測定データから容易にカットできる。

この測定で得られる Single Rate は、主にカソード表面からの自発放電と考えられる。

この結果から言えることの一つは、測定時間と共に Rate が上昇するのは、カソード表面の傷やほこりが印加電圧に反応して放電を起こすために上昇を見せるが、測定時間と共に反応しなくなり下降すると考えられる。Spark Chamber では、慣らし運転をするが、その目的は、電極板のほこりを印加電圧をかけることによりちらして取り除くことである。この結果から、Pestov Spark Counter は、慣らし運転を 1 日必要とすることができる。また、別な見方としては、後の検出効率の結果から、電極板表面に付着物が形成されることから、Single Rate にも影響を及ぼすことが考えられるので、この上昇して下降する結果が得られたと考えられる。

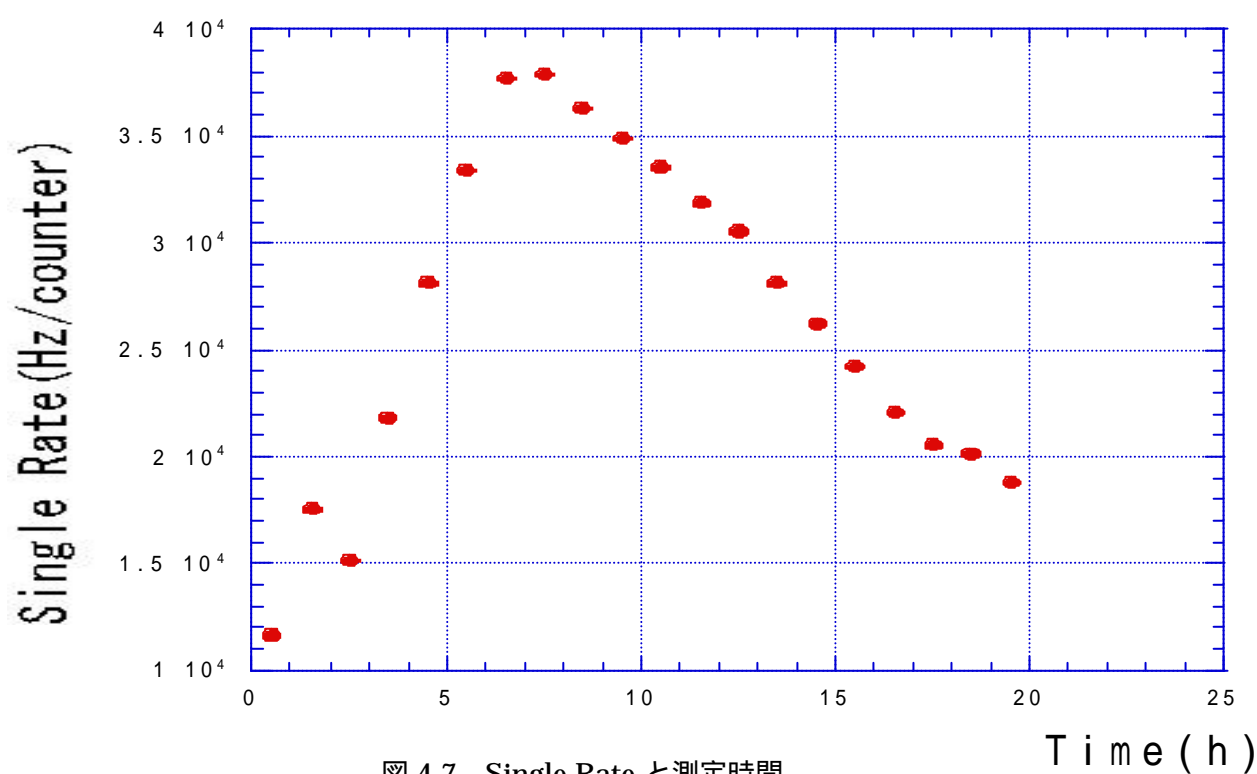


図 4.7 Single Rate と測定時間

3.5 時間分解能の測定について

我々が言う時間分解能とは、時間分布をガウスフィットした時に得られる σ を指す。本研究で行う Pestov Start Counter の測定で得られる時間分布は、Pestov Spark Counter と Start Counter の時間差の分布である。得られた時間分布の $\sigma_{\text{pestov-start}}$ は、以下の式の関係がある。

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{pestov-start}}^2 &= \sigma_{\text{pestov}}^2 + \sigma_{\text{start}}^2 \quad \Rightarrow \quad \sigma_{\text{pestov}}^2 = \sigma_{\text{pestov-start}}^2 - \sigma_{\text{start}}^2 \\ \sigma_{\text{start}}^2 &= \sigma_{\frac{s1+s2}{2}}^2 = \left(\frac{\sigma_{s1}}{\sqrt{2}} \right)^2 = \frac{\sigma_{s1}^2}{2} = \frac{\sigma_{s1}^2 + \sigma_{s2}^2}{4} = \frac{\sigma_{s2-s1}^2}{4} \\ \Rightarrow \quad \sigma_{\text{start}} &= \frac{\sigma_{s2-s1}}{2} \end{aligned}$$

となる。ここで、 σ_{s1} と σ_{s2} と σ_{pestov} は、Start Counter と Start Counter と Pestov Spark Counter の時間分解能である。また、Start Counter と Start Counter は、独立で同等の検出器であると考えられる。

もし、Start Counter の時間分解能を知ることができれば、上式から Pestov Spark Counter の時間分解能を知ることができる。そこで、Pestov Spark Counter の時間分布を測定する前に、Start Counter の時間分解能を測定する必要がある。

3.6 Slewing 効果

光電子増倍管のアナログ信号はリーディングエッジ・ディスクリミネターによって NIM 信号に変換される。アナログ信号をデジタル信号に変えるためには、スレッシュホルドを決めてその値を超える信号が入力されたときに信号を出すようになっている。ここで問題となるのは、入力されるアナログ信号の大きさにより出力されるタイミングが変わることにある。その模式図を図 3.5 に示す。図からわかる様に、大きい信号と小さい信号では一定のスレッシュホルドに対して $t_1 - t_2$ の差を持った信号を出す。この効果は Slewing 効果と呼ばれている。この効果の補正は、信号の形が比較的変わらないと考えると補正される。アナログ信号の電荷量を積分によって求めて信号の大きさと積分値が比例すると考えて補正量を求める。以下の式がそれである。

$$T' = T - \frac{\alpha}{\sqrt{\text{電荷}}} - \beta$$

T' : 補正後のタイミング、 T : 補正前のタイミング
 α : 補正係数、 β : 補正係数

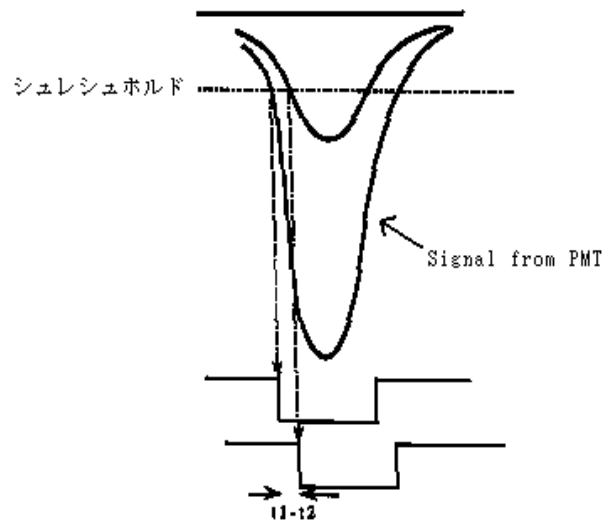
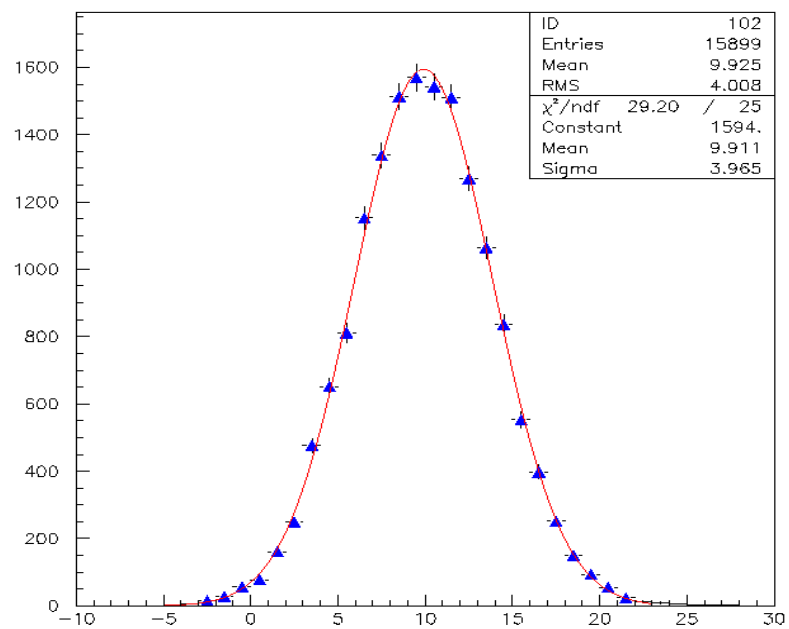


図 3.5 Slewing 効果

3.7 Start Counter の時間分解能

図 3.6 は、得られた Start Counter の時間分布である。この分布は、得られた電荷をもとに Slewing の補正をしている。分布をガウスフィットすることにより、 $\sigma = 99 \pm 1 \text{ ps}$ を得ることができた。



(Ts1-Ts2) /2、 1bin = 25ps

図 3.6 Start Counter の時間分布

第4章 結果と考察

4.1 出力の観測

4.1.1 出力の立ち上がり

出力の観測は、印加電圧 4.5kV、ガス圧 9 bar の条件下で行った。得られた出力の立ち上がりを高エネルギー原子核衝突実験での従来のカウンターであるプラスチック・シンチレーションカウンター (Start CounterI) と比べてみた。図 2.5 は、両者の立ち上がりを比較した図である。縦軸は、電圧であり任意単位にしてある。出力がピークに達するまでの時間は、それぞれ以下の通りになる。

Pestov Spark Counter	1.2ns
プラスチック・シンチレーションカウンター	3.4ns

Pestov Spark Counter は、プラスチック・シンチレーションカウンターよりも立ち上がり時間が約 3 倍早いことがわかる。

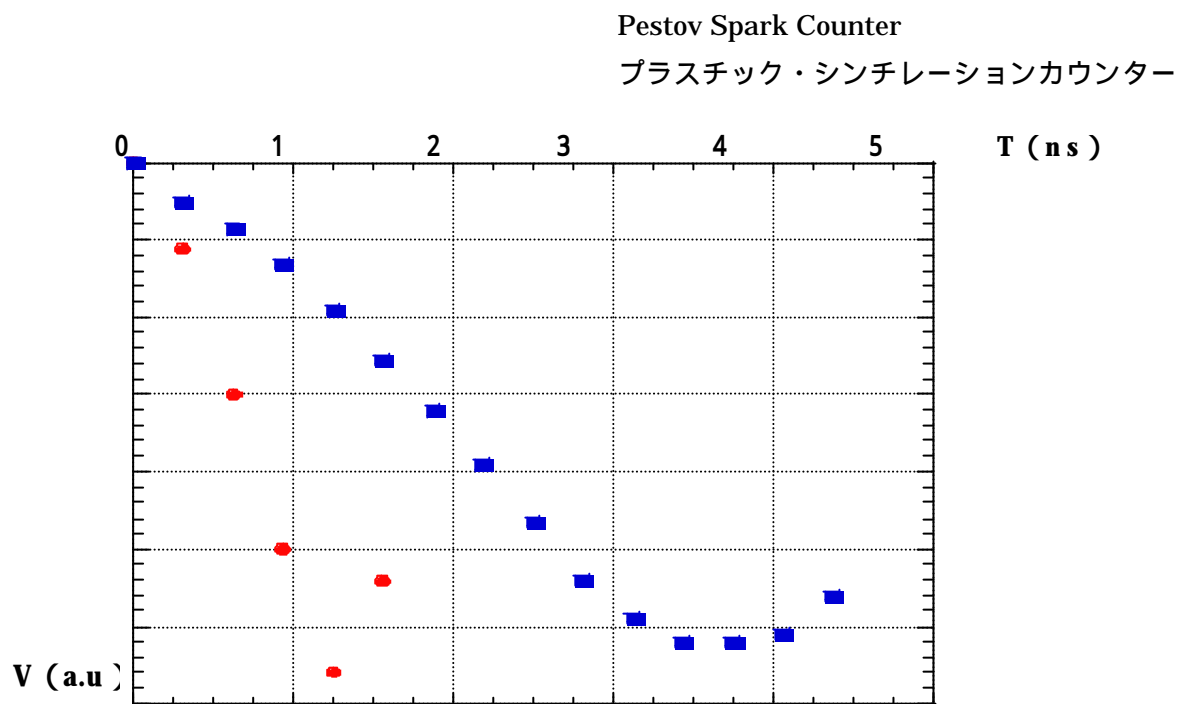


図 4.1 Pestov Spark Counter とプラスチック・シンチレーションカウンターの出力の立ち上がり

4.1.2 出力の問題点

図 4.2 は得られた出力の様子である。図から、ピークが二つあることが確認できる。この二つ目のピークは観測できないときもある。そこで紫外光による二次放電の影響が現れていると考えられる。紫外光による放電は、紫外光がカソードの電子を叩き出し、その電子がだれによりストリーマー放電に達するパターンである。

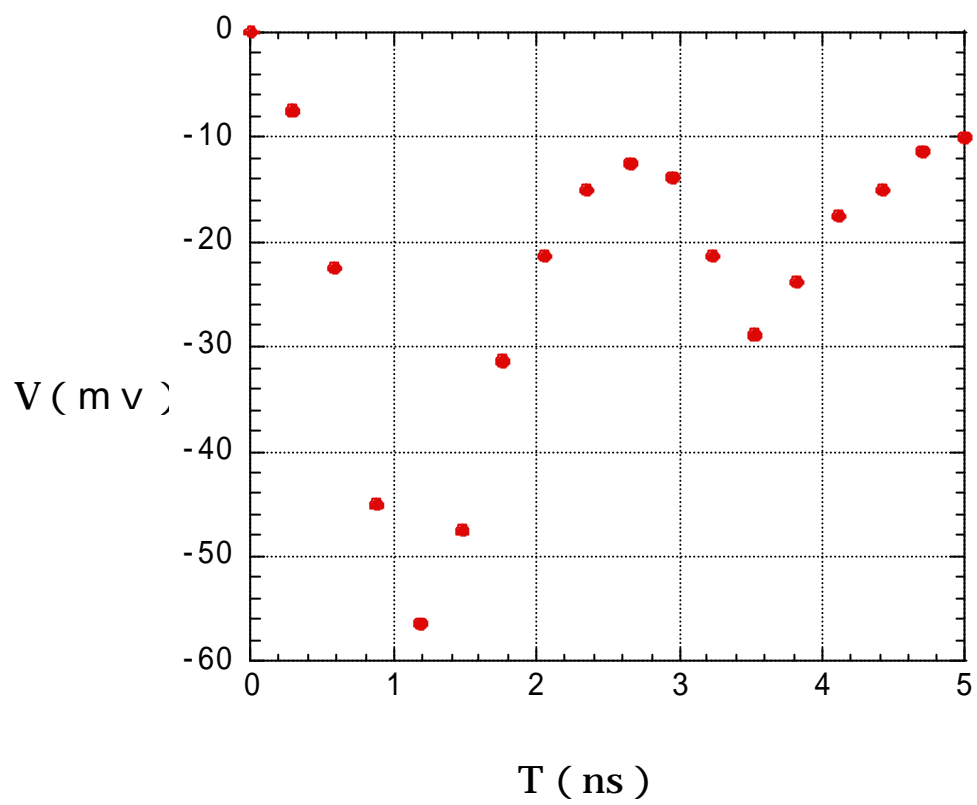


図 4.2 出力の様子

4.2 検出効率

4.2.1 検出効率と測定時間

Pestov Spark Counter の検出効率が測定時間に依存するかを測定してみた。測定は、H.V. = 4.5kV、ガス圧 = 9 bar で行った。得られた結果は、図 4.3 である。図から分かる様に、測定時間と共にカウンター効率が下降するのがわかる。

この原因を確かめるために、電極板の状態を見てみた。図 4.4 は、測定前と測定後でのカソード表面の状態を顕微鏡で拡大して撮影したものである。測定前と測定後を比べてわかる様に、測定後ではカソード表面に付着物が形成されていることがわかる。この付着物が、効率減少の原因なのかを確かめるために、付着物をアセトンで洗浄して再度測定を行うことにした。図 4.3 は、その結果である。図からわかる様に付着物を洗浄することによって、効率が元の状態に戻り、カウンターが再生することがわかる。このことから、付着物が効率減少の原因と考えられる。

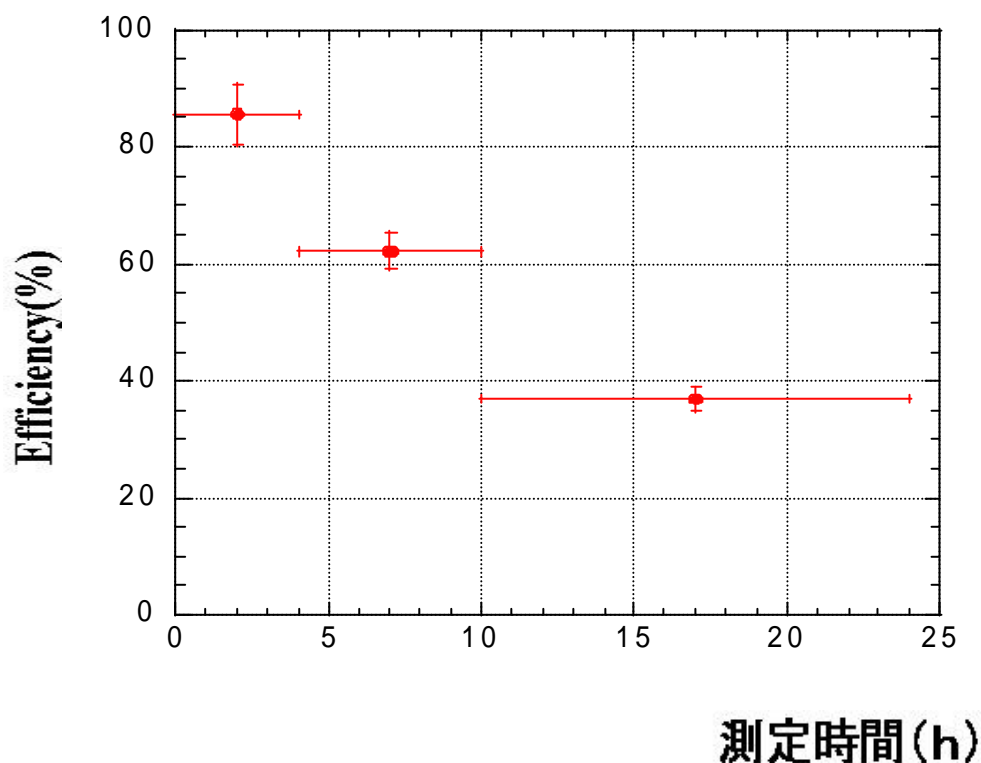


図 4.3 カウンター効率と測定時間の関係

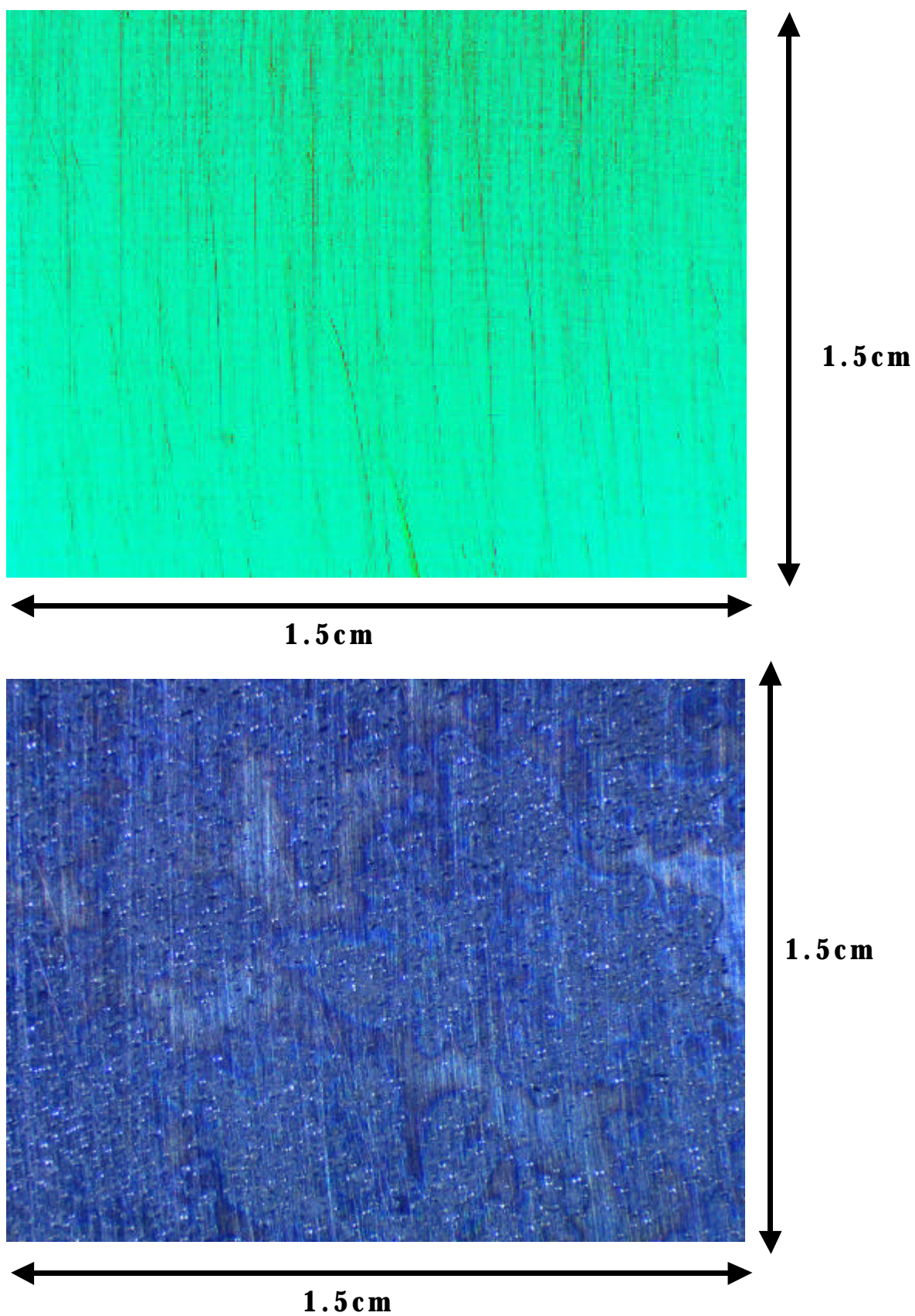


図 4.4 測定前（上）と測定後（下）のカソードの状態

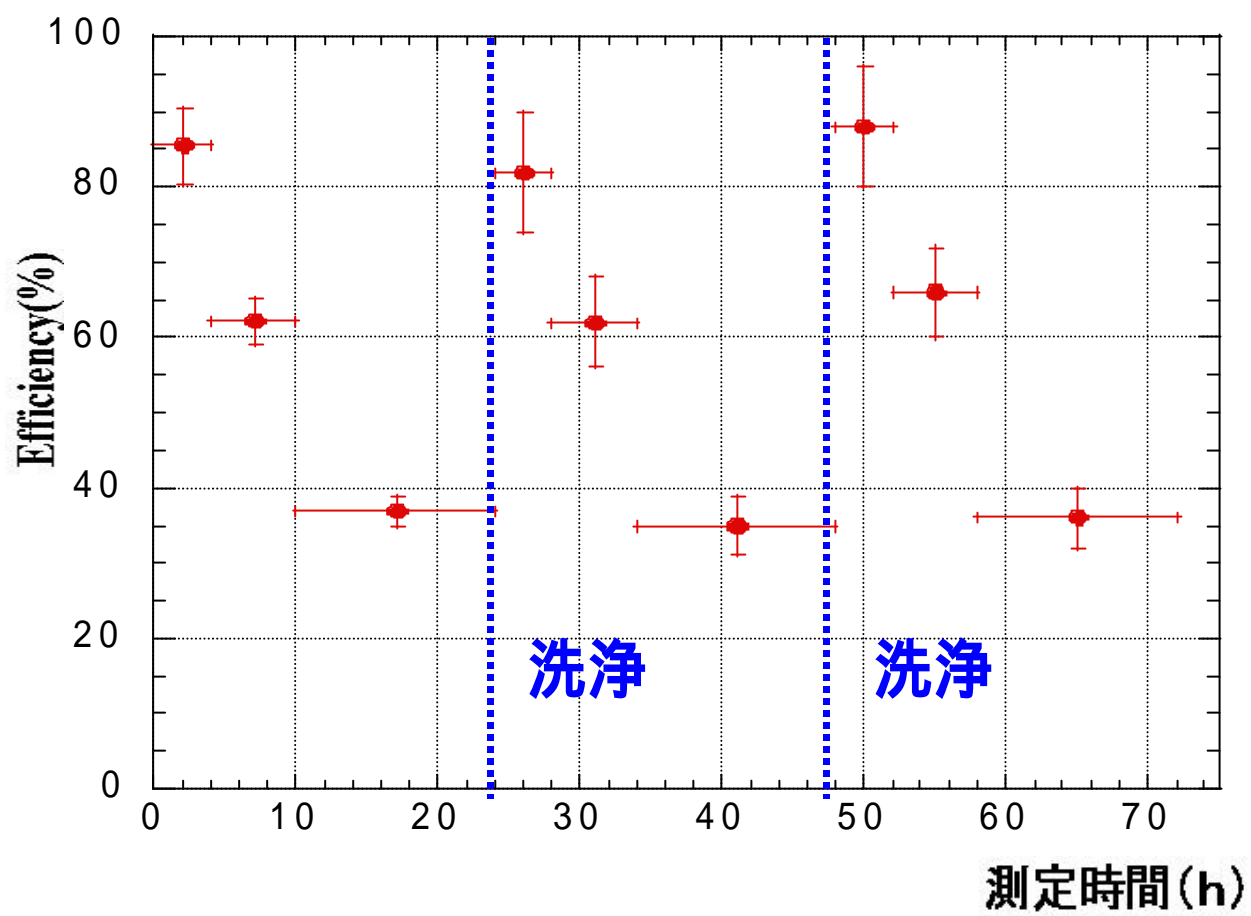


図 4.5 付着物をアセトンで洗浄することによる効率の変化

4.2.2 効率の減少が何に依存するか？

この節では、効率の減少が何に依存するのかを論じる。

(1) 印加電圧に依存するか？

効率の減少が印加電圧の大きさに依存するかを調べてみた。測定は、印加電圧 4.0kV、4.5kV、6.5kV、ガス圧 9bar、4cmFan で行った。図 4.6 は、その結果である。図からわかるように、効率の減少の仕方には違いが見られない。また、表 4 は印加電圧と 24 時間での効率の関係であるが比較した所、誤差の範囲で一致している。そのことから、効率の減少は、印加電圧の大きさには依らないと考えることができる。

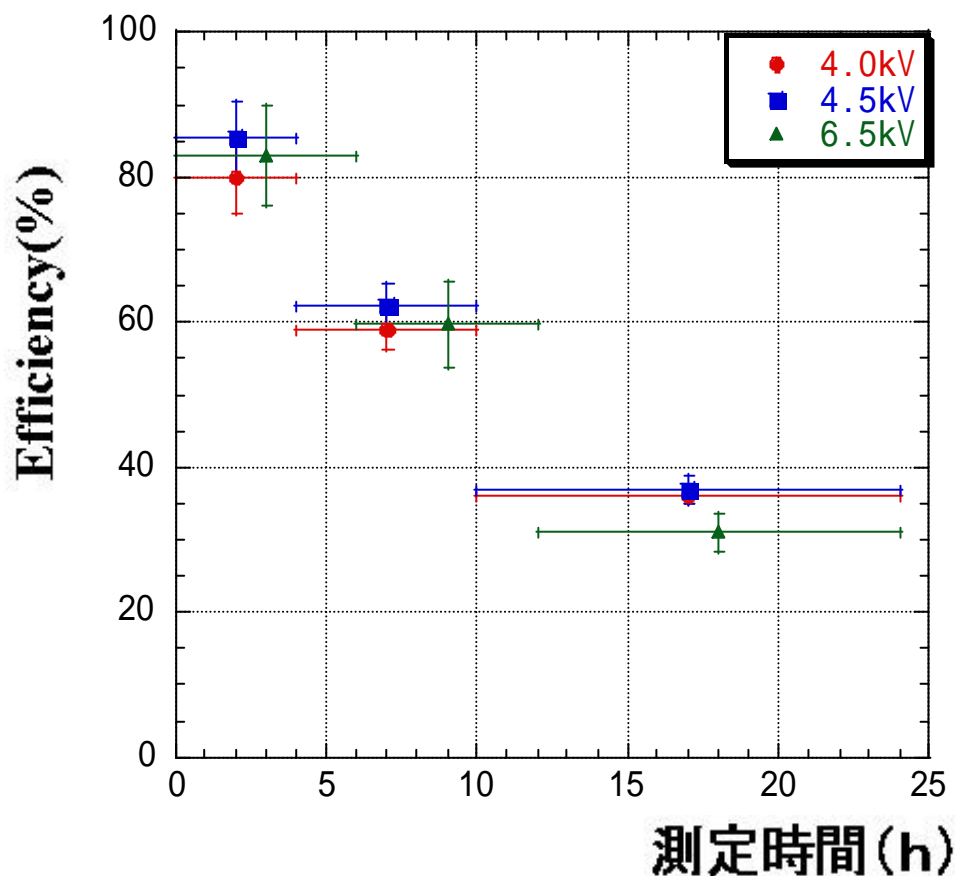


図 4.6 印荷電圧による効率と測定時間の関係

印加電圧	4.0 k V	4.5 k V	6.5 k V
24 時間の効率(%)	49.1 ± 1.9	51.4 ± 2.0	51.2 ± 2.0

表 4.1 印加電圧と 24 時間の効率の関

(2) ガスのみで効率の減少に依存するのか？

効率の減少が放電に依存するのかを調べるために、ガスを封入してから印加電圧をかけて測定を行った場合とガスを封入してから印加電圧をかけないで 24 時間置いた後に印加電圧をかけて測定を行った場合とで比較を行った。図 4.7 は、その結果である。図からわかるように、効率の減少の仕方に変化がみられない。また、表 4.2 は 24 時間での効率であるが、誤差の範囲で一致していることがわかる。このことから、ガスのみでは効率は減少しないことがわかり、効率は放電が起きないことには減少しないと考えることができる。

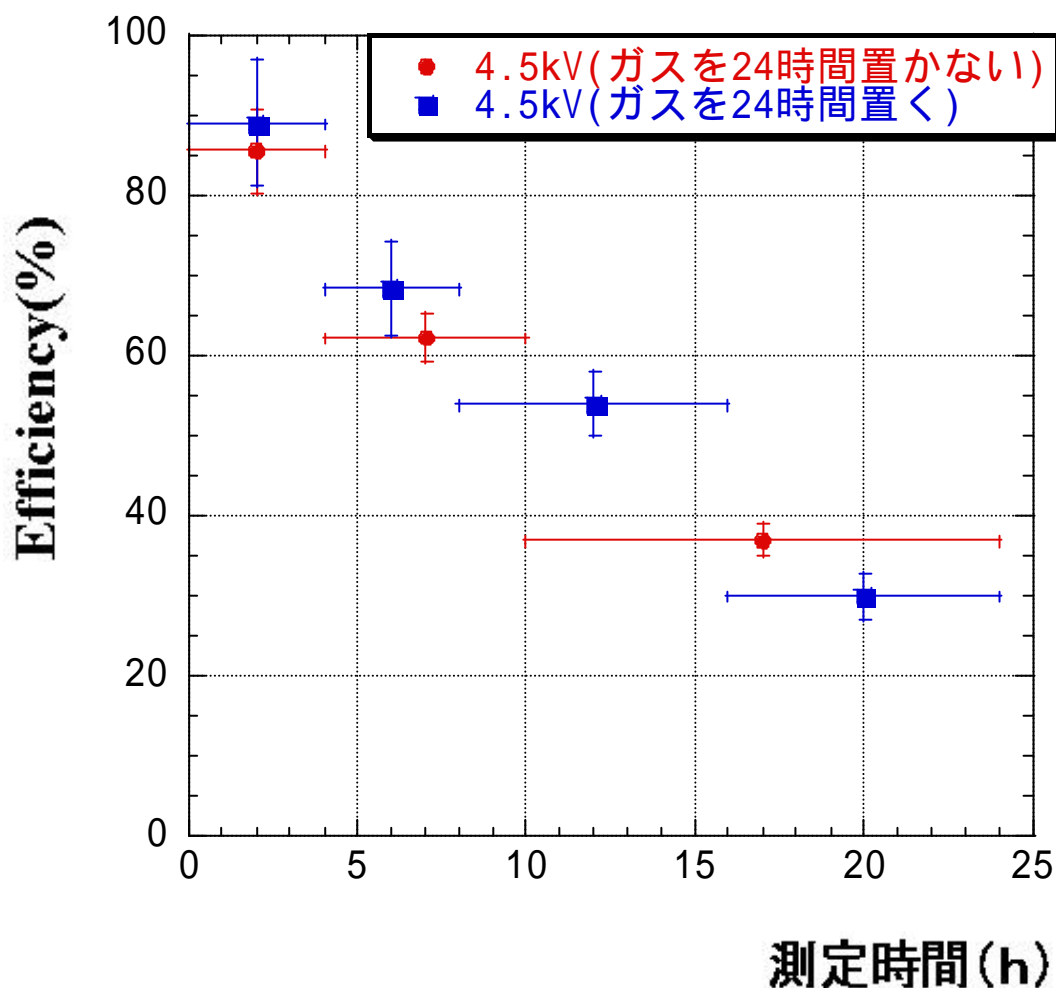


図 4.7 ガス封入直後に印加電圧をかけた測定とガス封入
24 時間後に印加電圧をかけた測定の比較

	ガスを 24 時間置かない	ガスを 24 時間置く
24 時間での効率 (%)	51.4 ± 2.0	54.2 ± 2.9

表 4.2 ガス封入直後の測定とガス封入して印加電圧をかけないで 24 時間置いてから印加電圧をかけた測定の 24 時間での効率

(3) ガスの流量に依存するのか？

ガスの流量に依存するのかを調べるために、Fan の直径 () を変化させて測定を行った。比較としては、ファンなし、4 cm ファン、8 cm ファンを使って測定を行う。図 4.8 は、その結果である。図からわかるように、ファンが大きい方が効率の減少が小さいことがわかる。このことから、効率は、ガスの流量に依存すると考えることができる。

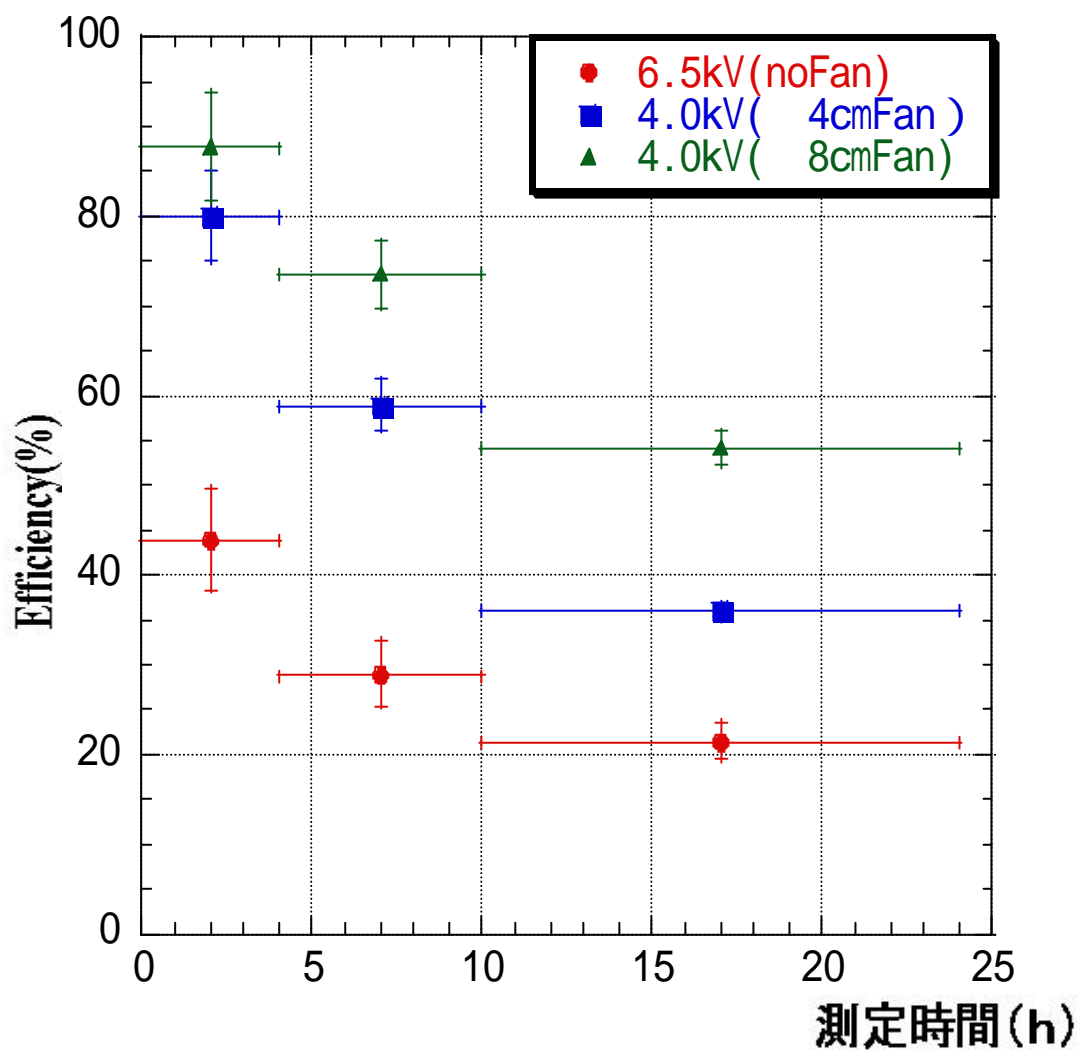


図 4.8 ガスの Flow 速度による効率の違い

4.2.3 付着物の解析

(1) 付着物が有機物なのか無機物なのか？

付着物が有機物なのか無機物なのかを、カソード上の付着物をクロロホルムによって超音波洗浄することで判別することにする。検出器で用いている有機ガス（イソブタン、エチレン、イソブレン）で反応が起こり生成される可能性のある有機物は、クロロホルムに溶ける。そのことから、付着物が有機物なのか無機物なのか判別できる。

30 分間の超音波洗浄により、カソード表面の付着物がクロロホルムに約 8mg 溶けることが分かった。このことから、有機物 8mg が 1 日の測定によってカソード上（ $4 \times 4 \text{ cm}^2$ ）に生成されることが分かる。しかし、洗浄後の表面を見てみると洗浄しても溶けない微量の物質があることが確認できた。クロロホルムに溶けないことから無機物である。この無機物は、有機物とカソード（アルミ）との酸化などの反応により作られたのか、放電によりカソードが酸化したものとも考えることもできる。

(2) 核磁気共鳴測定

付着物の有機成分がどのような成分で作られているのかを核磁気共鳴測定を行うことにより調べてみた。図 4.9 は、その結果である。図の（1）と（2）のピークは、 CH_2 、 CH_3 であることが経験的に言える。どちらがどちらのピークであることは言えない。また、その周りのなだらかな山は、飽和炭化水素であると考えることができる。この結果から、付着物の有機成分は、 CH_2 、 CH_3 によって生成されたポリマーと考えることができる。有機ガスの中で、エチレンとイソブレンは二重結合を持ち、反応しやすいことから、放電によってエチレンとイソブレンの二重結合が壊れることにより、ポリマーが生成されたと考えることができる。

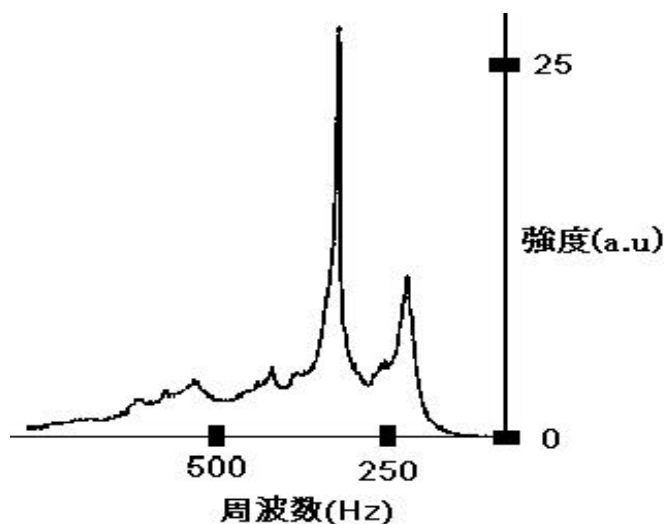


図 4.9 割合と共鳴周波数

(3) 紫外光領域での吸収強度の測定

付着物の有機物成分の紫外光強度を調べてみた。図 4.10 は、測定装置である。紫外光は、Xe ランプで発生させた光を分光器により特定の波長に変えることにより作り出す。作ることができる波長は 200nm までである。紫外光を試料 A、B に入射させ透過光を光電子増倍管に照射して電気信号に変換し、その大きさの比をとることにより、B と A の吸収強度の比を求めることができる。試料 A は、エタノールである。試料 B は付着物の有機成分 (8mg) をエタノール 50cc に溶かしたものの内の 1cc である。図 4.11 は、測定結果である。この図は、有機物がカソード表面 (4cm×4cm) に均一にあることを想定して吸収確率 (%) を求めている。図 4.12 は、試作した Pestov Spark Counter の混合ガスの光吸収係数である。イソプレンではなく、ブタジエンを載せているが、両者の吸収係数に差は無い。アルミの仕事関数と混合ガスの吸収領域には、図の様に Gap がある。付着物の有機物はこの差を埋める形になる。このことにより、測定初期より、測定後期の方が二次電子なだれが少なくなることが言える。

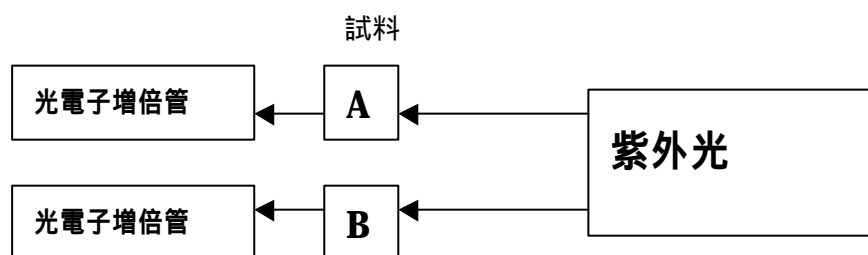


図 4.10 吸収強度の測定装置

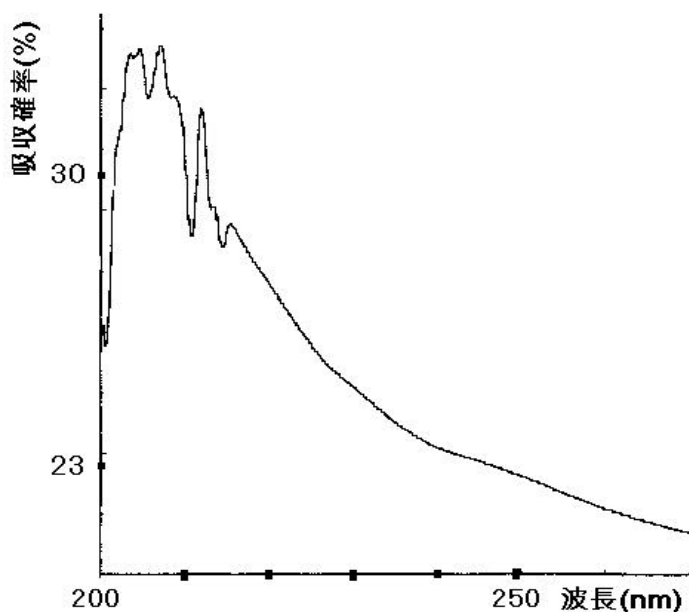


図 4.11 付着物の有機成分の紫外光領域での吸収確率

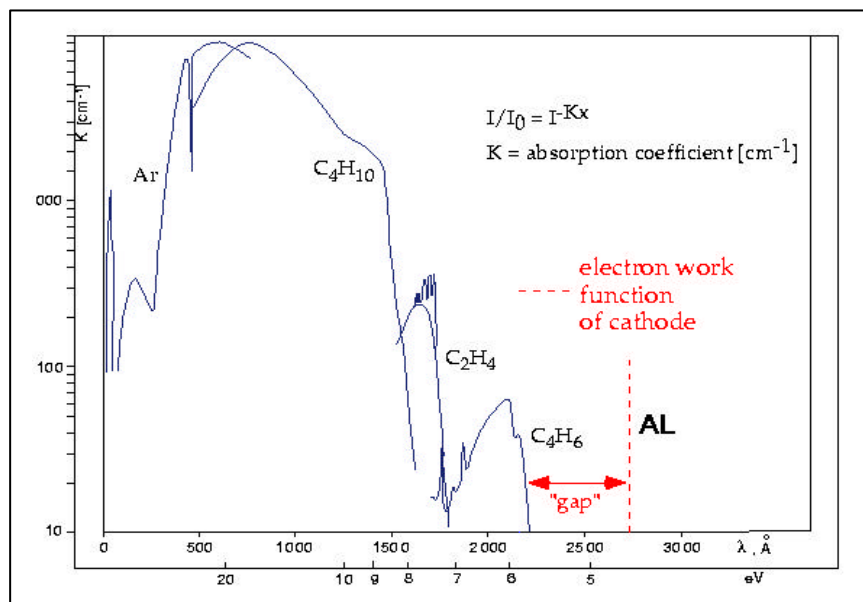


図 4.12 試作した Pestov Spark Counter'で使用した混合ガスの光吸収係数

4.2.5 検出効率に関するまとめ

検出効率は、測定時間と共に減少する。原因は、カソード表面上の付着物であると考えられる。効率の減少は、付着物のパラメーターとして考えられる放電とガスの流量に依存する。付着物は、主に有機物であることが分かった。この有機物は、 CH_2 と CH_3 を主成分とし、二重結合を持ち反応しやすいエチレンやイソプレンが放電によってポリマー化したものと考えられる。

4.3 時間分布

この章では、前節での効率の減少の理由を探るために時間分布について論じる。時間分布の測定は、印荷電圧 4.5 kV、ガス圧 9bar の条件下で行った。図 4.13 は、測定開始から 4 時間以内の時間分布である。図からわかるように、得られた時間分布は単一のガウス分布から外れる成分がある。そこで、時間分解能を求めるために得られた時間分布を実線の範囲でガウスフィットしてみた。フィットから、 $\text{Pestov} - \text{Start} = 5\text{ch} = 130 \pm 7\text{ps}$ であり、Start Counter の時間分解能 $\text{Start} = 99\text{ps}$ を考慮すると、 $\text{Pestov} = 84 \pm 10\text{ps}$ となる。プラスチック・シンチレーションカウンターの時間分解能が 70ps であるので、Pestov Spark Counter は同程度の性能を持つことがわかる。

図 4.14 は、測定 10 時間から 24 時間以内の時間分布である。比較のために、図 4.13 をガウスフィットした時に得られたパラメーターを使ったガウス分布（点線）を載せている。図 4.13 と図 4.14 を比較してわかるように、測定後期の時間分布は、タイミングが遅れて、さらに広がっていることがわかる。図 4.15 は、効率（横軸）と時間分布の RMS（縦軸）の関係である。図からわかるように、効率が減少すると共に時間分布の RMS も大きくなり、時間分布が広がっていくことがわかる。この原因としては、以下のことが考えられる。

- (1) 出力波高によるタイミングのズレ（Slewing 効果）
- (2) 放電形成によるタイミングのズレ

そこで、効率と電荷の関係を見てみた。図 4.16 は、測定開始から測定 4 時間以内の電荷分布である。測定図 4.17 は、効率（横軸）と ADC Mean（縦軸）の関係である。図から、効率の減少と共に ADC Mean が減少することがわかる。このことから、出力波高によるタイミングのズレにより、時間分布が広がる可能性がある。そこで、電荷とタイミングの関係を見てみた。図 4.18 は、Pestov Spark Counter と Start Counter の時間差（縦軸）と ADC Mean（横軸）の関係である。図から、効率が減少すると、電荷の低い所ではタイミングが遅れる成分ができることがわかる。しかし、電荷が低い所では、電荷が同じなのにタイミングが最大で約 5ns 遅れる成分があることがわかる。このことから、効率が減少して、時間分布が広がる原因は、出力波高によるタイミングのズレの影響だけではないと考えることがわかる。

しかし、電荷が高い所では、効率が減少してもタイミング差が少ないことから、電荷と時間分布の関係を調べてみることにする。電荷と時間分布の関係を調べる方法としては、測定初期の時間分布をガウスフィットした範囲を第一成分として、その割合と電荷の関係を求めることで評価した。図 4.19 は、第一成分の割合（縦軸）と ADC Mean（横軸）の関係である。図から、ADC Mean が減少すると第一成分の割合も減少することがわかる。また、ADC Mean が 7ch 以上の所では、第一成分の割合は測定初期と測定後期での差が、小さいことがわかる。このことから、電荷が高いときは、効率が減少し

ても時間分布は広がらないと考えることがわかる。そこで、測定初期と測定後期の時間分布を電荷が高いとき（ADC Mean が 7ch 以上）と低いとき（ADC Mean が 7ch 以下）で比較してみた。図 4.20 は、電荷が高い時の測定初期（実線）と測定後期（点線）の時間分布である。なお、縦軸は、比較のため全個数 N_{all} で割ってある。また、図 4.21 は電荷が低いときのものである。図から、電荷が高い時では、測定初期と測定後期での時間分布に差異は見られない。一方、電荷が低いときでは、測定後期の時間分布は測定初期と比べると、タイミングが遅れて、広がっていることがわかる。

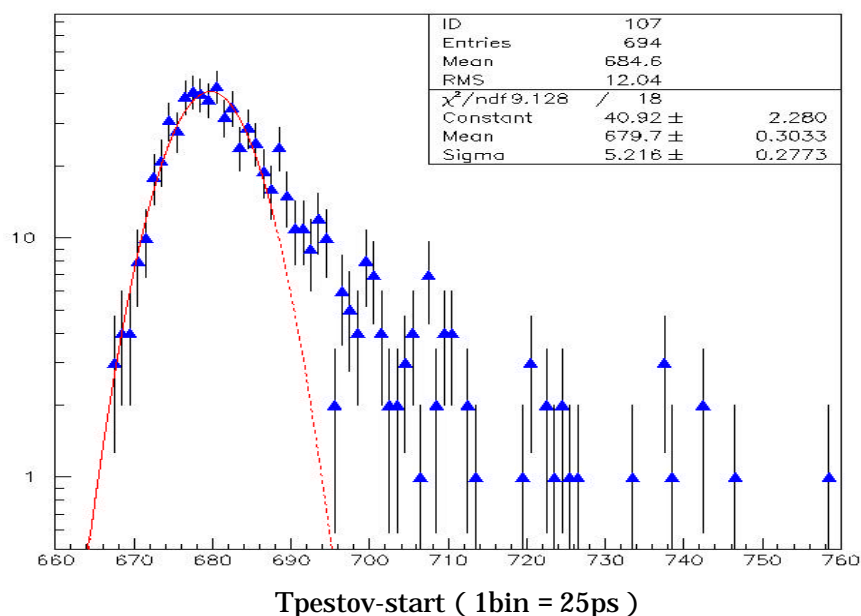


図 4.13 測定開始から測定 4 時間以内の Pestov Spark Counter と Start Counter の時間差分布

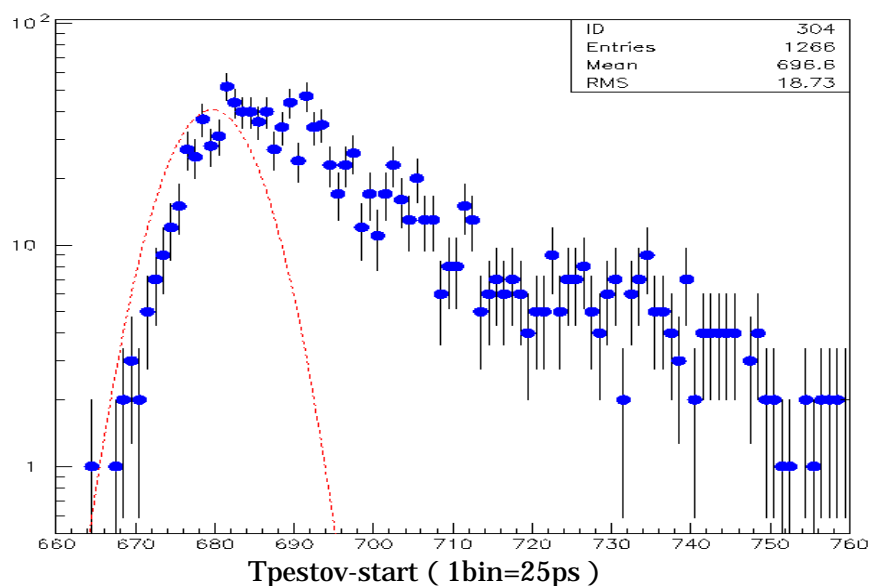


図 4.14 測定開始 10 時間から測定 24 時間以内の Pestov Spark Counter と Start Counter の時間差分布

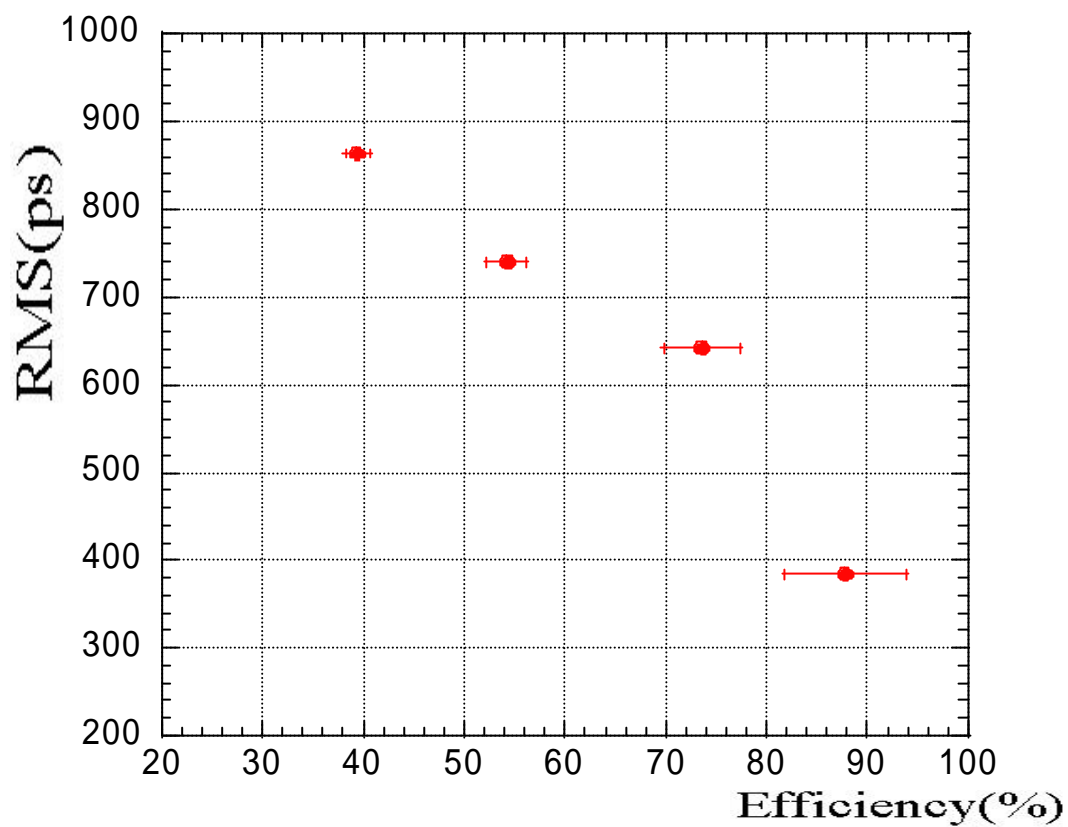


図 4.15 時間分布の RMS (ps) と検出効率 (%)

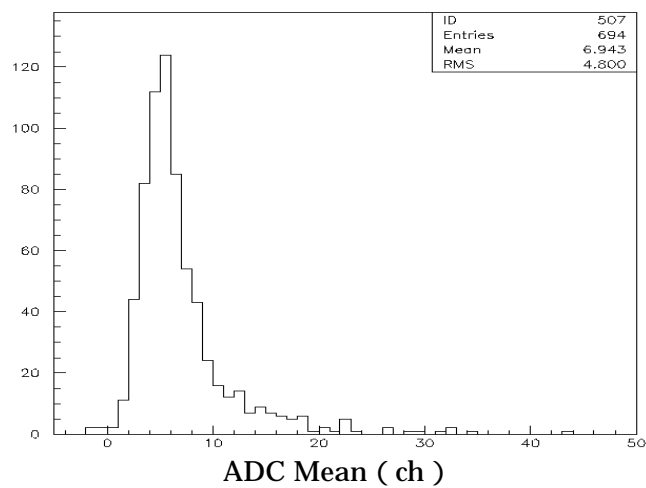


図 4.16 測定開始から測定 4 時間以内の電荷分布

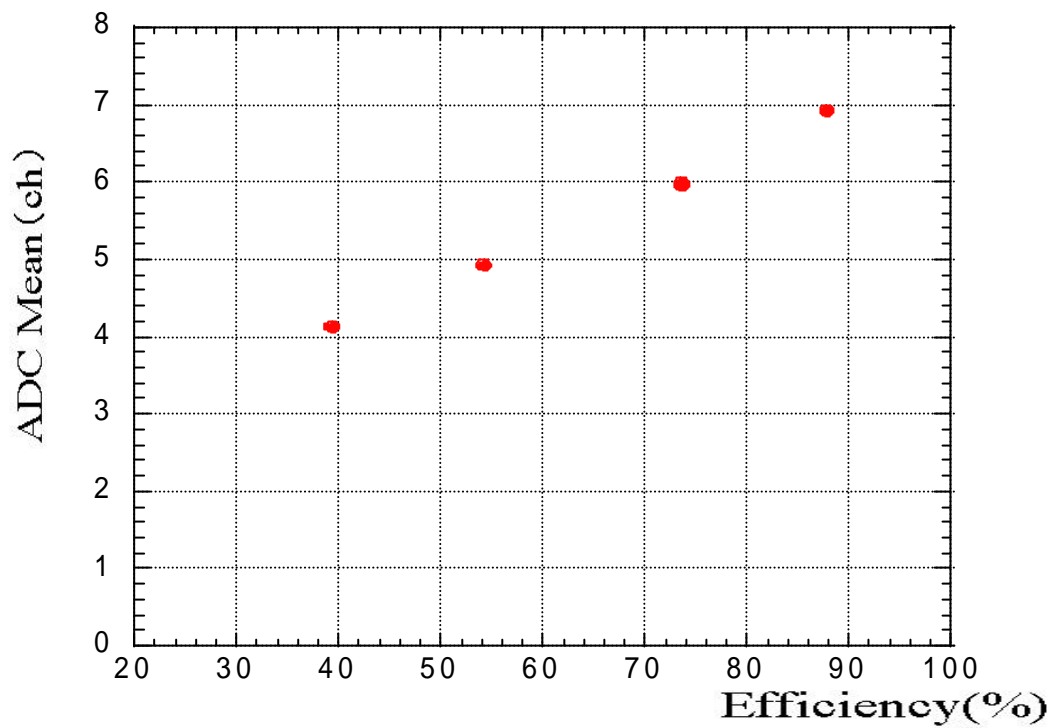


図 4.17 ADC Mean (ch) と検出効率 (%)

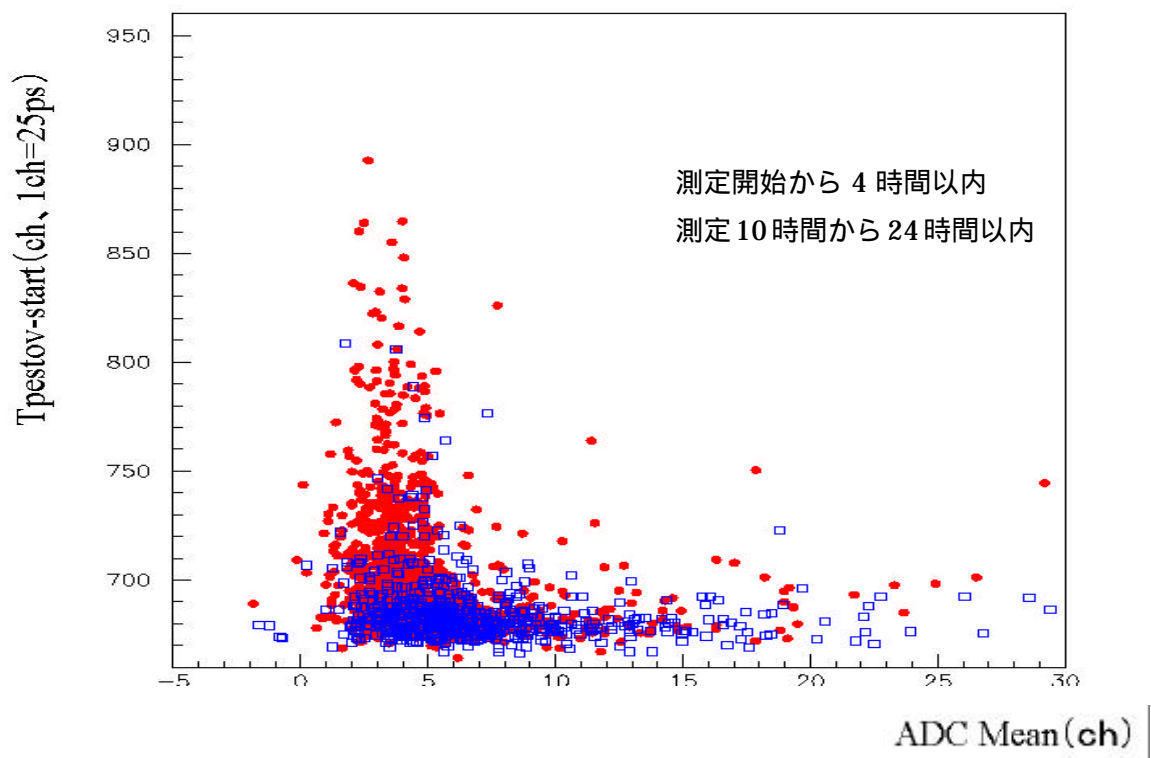


図 4.18 Timing と ADC Mean の関係

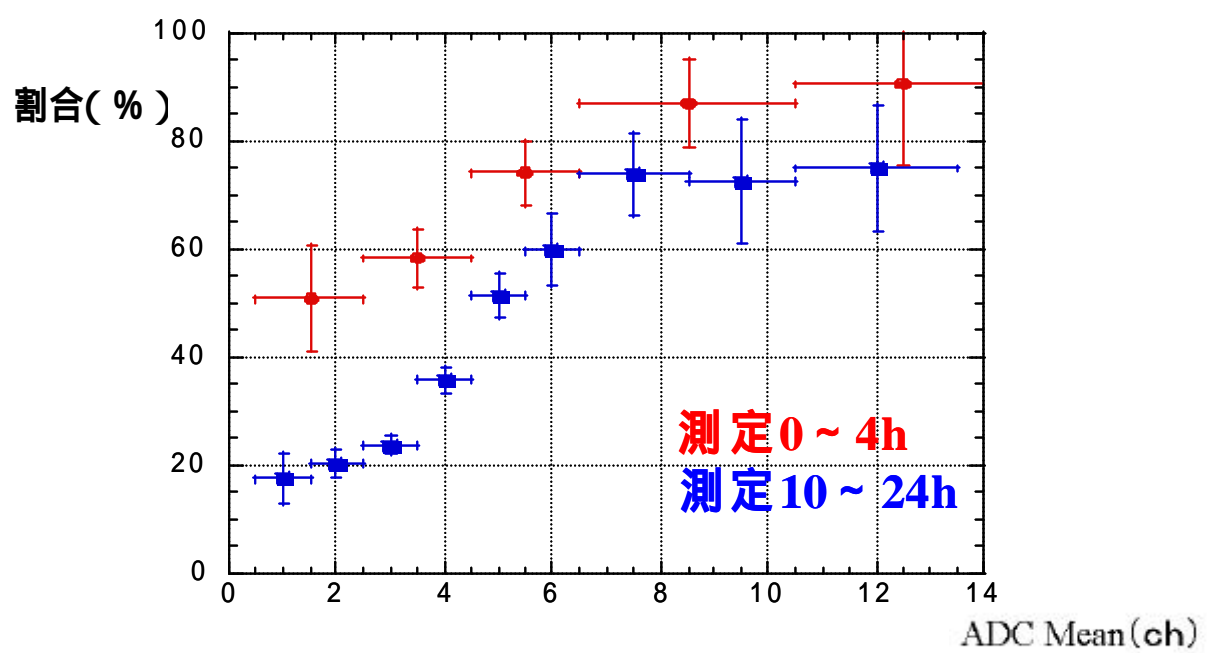


図 4.19 第一成分の割合 (%) と ADC Mean (ch) の関係

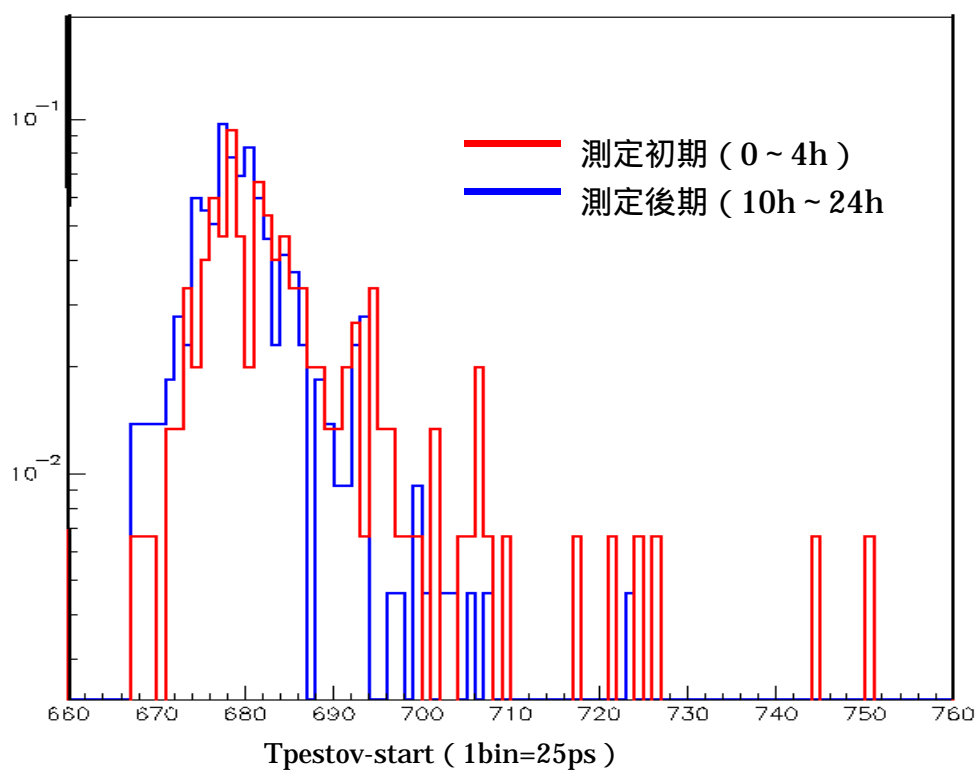


図 4.20 ADC Mean が 7 以上の時の時間分布の比較

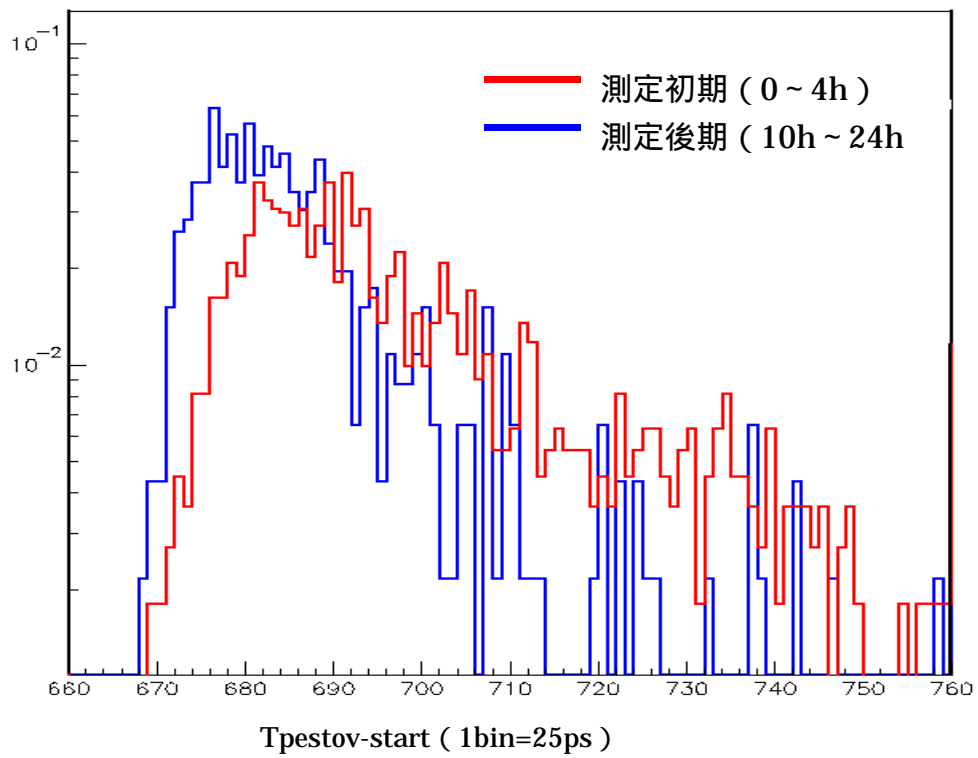


図 4.21 ADC Mean が 7 より小さい時の時間分布の比較

4.4 効率の減少と時間分布の広がりの原因

検出効率と時間分布の測定によって、以下のことが考えられる。

- (1) 効率は、測定時間と共に減少し、原因はカソード表面の付着物である。
- (2) 効率の減少と共に、時間分布はタイミングが遅れて広がる。
- (3) 電荷が高い時は、測定初期と測定後期の時間分布に差がない。

このことから、原因は付着物に起因していると考えられ、付着物により(2)(3)のことが引き起こされると考えられる。そこで、付着物による変化を考えてみると以下のことが考えられる。 に関しては、節 4.2.4 において、確かめられている。

電極板間のギャップ長の減少

混合ガスとカソードの仕事関数とのギャップの領域での紫外光の吸収

まず、 によって引き起こされる影響は、荷電粒子によって、生成される初期電子数が減少することである。このことから、一次電子なだれの電子数が減少する。また、一次電子なだれの電子数の減少により、発生する紫外光が減少し、カソードの電子をたたき出すことによって起こる二次電子なだれが減少する。

また、 によって引き起こされる影響は、紫外光がカソード表面にぶつかる前に吸収されることにより二次電子なだれの減少することである。

このことから、ストリーマー放電に至る過程が変化すると考えることができる。ここで大事なことは、出力は電子なだれでは得られず、ストリーマー放電に達しないと得られないことである。このことを踏まえて、放電形成の変化によって、効率が減少し、時間分布が広がるのかを考察する。

初めに、付着物が形成される前の、放電形成を考えてみる。図 4.22 は、付着物形成前のストリーマー放電形成過程の模式図である。ストリーマー放電のパターンは、図のような 3 パターンが考えられる。

- (1) 一次電子なだれ ストリーマー放電
- (2) 一次電子なだれ + 二次電子なだれ ストリーマー放電
- (3) 二次電子なだれ + 二次電子なだれ ストリーマー放電

次にこのパターンが付着物形成後どのように変化するのかを考える。図 4.23 は、付着物形成後のストリーマー放電形成過程の模式図である。付着物形成により、一次電子なだれの電子数が減少し、ストリーマー放電が起こるために必要な電子数に達することができなくなる状態が増えることが考えられる。また、紫外光による二次電子なだれの減少により、一次電子では、ストリーマー放電に達しなく二次電子なだれを足し合わせるにより起こるストリーマー放電が減少すると考えられる。

以上から、ストリーマー放電が起き難くなり効率が減少すると考えることができる。また、測定初期では、主に(1)のパターンで出力を得ていたが、測定後期では、(1)のパターンでは出力を得られず、(2)(3)のパターンで出力を得る状態が作られて

時間分布が広がると考えられる。(カスケード模型では、(2)は(1)より200ps タイミングが遅れる。)電荷が高い時は、放電形成が良い状態、すなわち(1)のパターンにより、ストリーマー放電に至る状態と考えることができるので、測定後期でも電荷が高いと測定初期の時間分布と同じになると考えられる。

付着物における変化、のどちらの影響が大きいかを考えると、1日の測定で作られる付着物による紫外光の吸収は、カソードの仕事関数より大きい領域で平均約30%であり、付着物により1個の紫外光による二次電子なだれが起きる確率は、初期と比べて0.7倍になる。この比率を考えると、による影響の方が大きいと考えることができる。また、の影響は紫外光による二次電子なだれを抑制し二次放電を減少させ放電の範囲を狭める利点と二次放電により出力を得て、時間分布でのタイミングが遅れる成分を減少させる利点がある。このことからによる影響だけを取り除けることができれば、Pestov Spark Counterの向上につながるといえる。

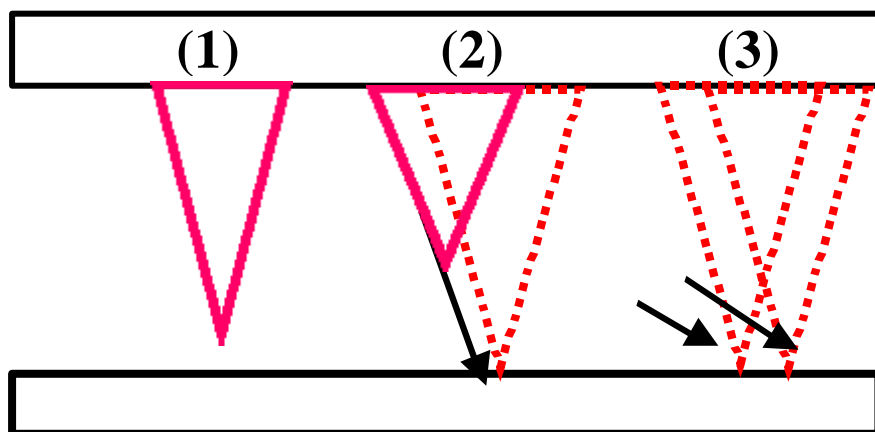


図 4.22 付着物形成前のストリーマー放電形成の模式図

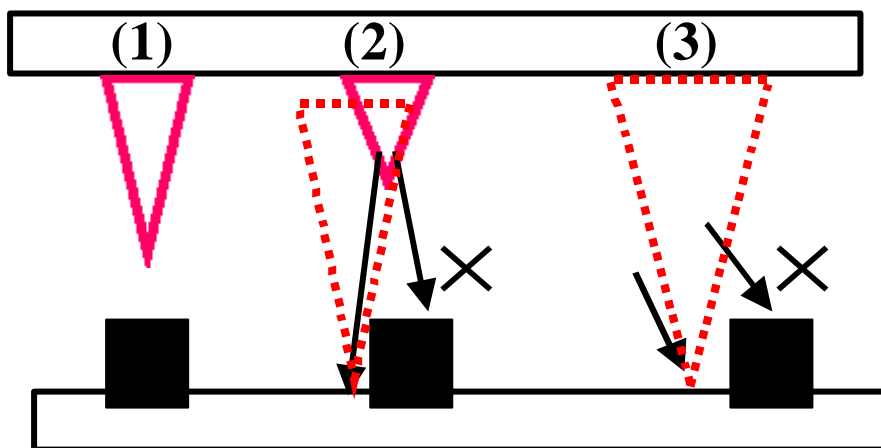


図 4.23 付着物形成後のストリーマー放電形成の模式図

第5章 今後の安定化への展開

今後の安定化のための手段は、以下のことが考えられる。

(1) 仕事関数の高いカソードを使う。

混合ガスを使う目的は、カソードの仕事関数より高い紫外光を吸収することである。図 5.1 は、混合ガスの光吸収係数と光の波長、エネルギーの関係である。今回試作で使用したカソードは、アルミニウムであったが、仕事関数は 4.2eV であるので、二重結合を持ち反応しやすいエチレン、イソプレンを使う必要がある。例えば、窒化アルミニウム (AlN) の仕事関数は 8.7eV であるが、これをカソードとして使用すれば、エチレン、イソプレンを使用しなくても良いと言える。

(2) エチレン、イソプレン以外のガスを使う。

二重結合を持たないで反応しにくいガスを変わりに使う方法としては、イソブタン、エチレンに変えてジメチルエチル (DME) を使う手段が考えられる。図 5.1 からジメチルエチルは、イソブタンとエチレンをカバーすることができると言える。イソプレンを変えるガスを探したが、今のところ二重結合を持つものしか見つかっていない。これは、吸収してほしい光のエネルギーが二重結合のエネルギーであるからであり、一重結合をもつガスはこの領域にないと言っても良いと考えられる。

(3) カソード表面に付着物を付着させない (化学系鹿島先生提案)

気体から固体になるには、気体を冷却をすればよいことを考慮すると、容器内に冷たいところ (低温) をつくり、カソードを暖めて (高温)、電極板間のガスを低温の所に流してやれば、付着物はカソード表面に付着し難くなると考えられる。(図 5.2)

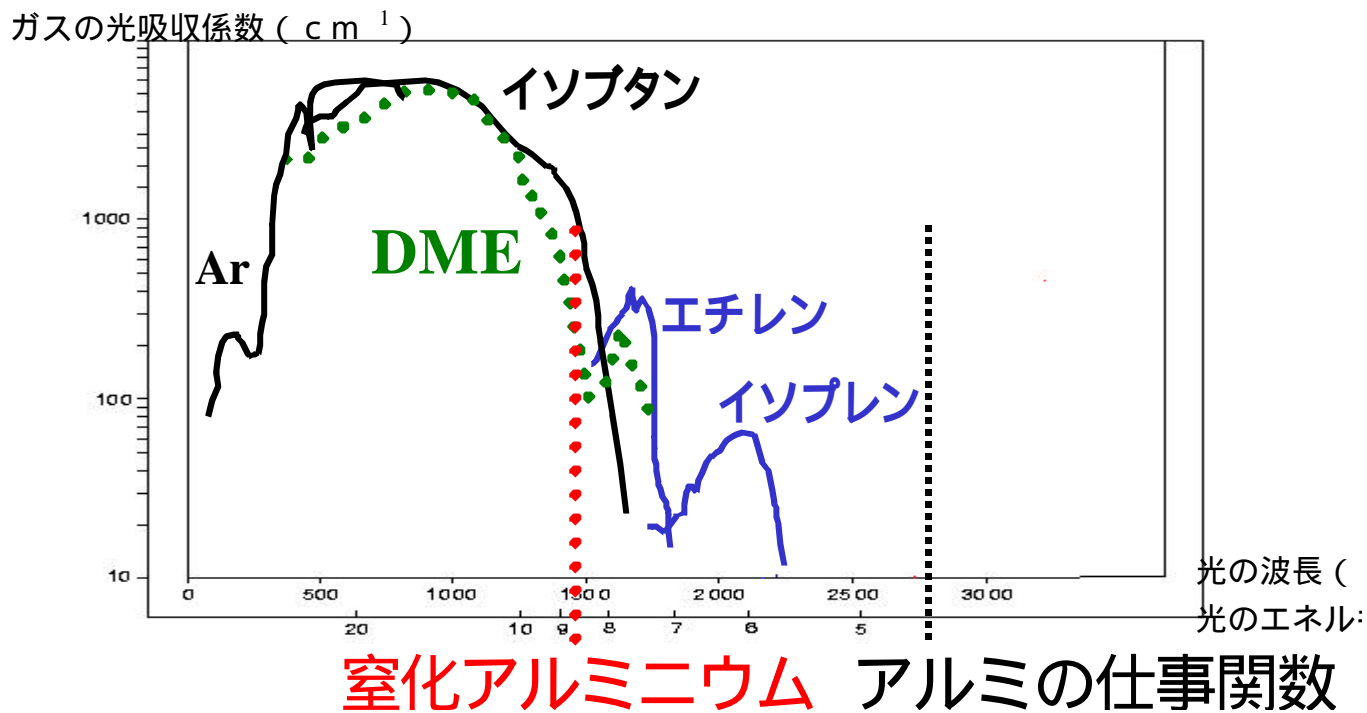


図 5.1 混合ガスの光吸収係数と光の波長

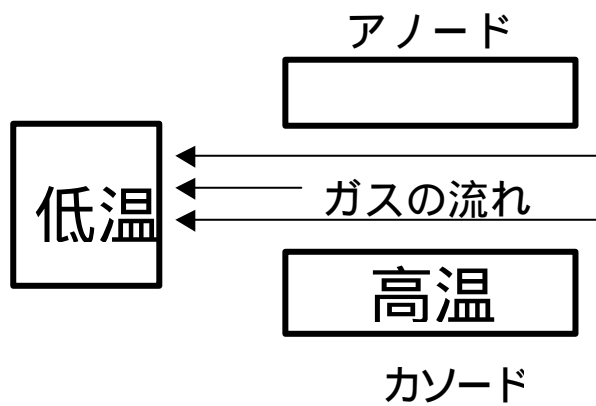


図 5.2 付着物をカソード表面に付着し難くする手段

第6章 まとめ

Pestov Spark Counter を試作し、宇宙線による評価を行った。

カウンター効率は、測定時間と共に減少する。時間分布は、効率の減少に伴いタイミングが遅れて、さらに広がる。原因は、カソード表面に付着物が形成されてストリーマー放電形成に至る過程が変化するためと考えられる。付着物は有機物であり、主成分は CH_2 、 CH_3 である。この付着物は二重結合を持ち反応しやすいエチレン、イソプレンが放電によりポリマーに変化したものだと考えられる。

一方では、従来のカウンターであるプラスチック・シンチレーションカウンターよりも立ち上がり時間が3倍早く、運用直後では、時間分解能が $85 \pm 10 \text{ ps}$ と従来のカウンターと同程度の性能を持っている結果を得ることができた。

今後の安定化に向けて、エチレンとイソプレンを使わない手段と付着物を付着し難くする手段を提案することができた。

謝辞

本研究を行うにあたり、多くの皆様に助言と協力を頂きました。この場を借りて皆様に感謝の言葉を述べさせて頂きたく思います。

三明康郎教授には、本研究のきっかけを与えて頂くと共に多くの助言を頂きました。

佐藤進助手には、本研究における様々な議論をして頂くと共に多くのアドバイスを頂き、発表のための多くのご指導を頂きました。

江角晋一講師には、発表のための多くの指導を頂きました。

鈴木美和子氏には、Pestov Spark Counter の製作において多大なるサポートを頂きました。

同僚である相澤美智子氏と坏雄太氏には、本研究における議論をして頂くと共に多大なるアドバイスを頂きました。

化学系の鹿島長次助教授には、付着物の解析方法について議論して頂くとともにご指導を頂きました。

福谷研には、超音波洗浄器を使わせて頂きました。

研究室の加藤純雄氏、清道明男氏、鶴岡裕士氏、小野雅也氏、黒木善昭氏には、様々な面で多くのサポートを頂きました。

参考文献

- (1) Status of the Pestov Spark Counter development for the ALICE experiment
E. Badura et al., Nucl. Inst. Meth. A 379 (1996) 468-471
- (2) Pestov spark counter prototype development for CERN-LHC ALICE
E. Badura et al., Nucl. Inst. Meth. A 372 (1996) 352-358
- (3) Timing Below 100ps with Spark Counters: Work Principle and Applications
Yu.N. Pestov, XXXVI Intl. Winter Meeting on Nucl. Phys., Bormio, 1998
GSI-Preprint-98-21, April 1998
- (4) Pestov Spark Counters: Work Principle and Applications
H.R. Schmidt, Proc. 6th International Conference on Advanced
Technology and ParticlePhysics, Villa Olmo, Como 5-9 October 1998
- (5) Long Term Stability Test of a Parallel Plate Spark Counter
GSI Nachrichten 6/95
- (6) Pestov Spark Detector - A high-resolution time of flight detector
GSI Nachrichten 6/96
- (7) 飛行時間測定器 Pestov Spark Counter の持つ時間性能のカスケード放電模
型による解釈
鈴木美和子、筑波大学大学院物理学研究科修士論文