

低バックグラウンド比例計数管の開発*

宮本 重徳**・奥村 由治**・常深 博**
高橋 一道**・吉崎 博文**・中川 道夫***

(1984 年 12 月 15 日受理)

High Background Rejection Methods in Proportional Counters

By

S. MIYAMOTO, Y. OKUMURA, S. TUNEMI,
K. TAKAHASHI, S. YOSHIZAKI and M. NAKAGAWA

Abstract: A single anode single large cell counter, with veto-counters around it, is described. To get uniform response of the pulse height and the energy resolution, the counter has field-adjusting electrodes at the end walls of the anode wire, and these electrodes are also used to reject the background events which are caused by cosmic rays passing through near the end walls of the anode.

A rocket flight experiment showed that the combination of rise time discrimination and anti-coincidence method reduced the cosmic ray induced background events to a level of 1.2×10^{-4} counts/sec cm² keV in the energy range of 2-40 keV, which represented an overall background reduction of 98 % in this energy range.

第1章 序 論

宇宙 X 線の観測には、ガス封入型比例計数管が広く使用されている。宇宙空間での観測に於いては、地球外からの宇宙線により、或は地球周辺の放射線帯に捕えられた高エネルギー荷電粒子のために、比例計数管には、目的とする宇宙 X 線以外のバックグラウンドを

* 宇宙研特別事業費による研究論文

** 大阪大学理学部

*** 大阪市立大学理学部

生じ、宇宙 X 線の観測の障害となる。この比例計数管におけるバックグラウンドを除去する方法として、これまでに信号の反同時計測による方法や、信号の立ち上り時間を利用した方法などが行われてきた。

宇宙 X 線観測用天文衛星第一号であるウフル衛星（米国）に於いては、信号の立ち上り時間を利用した方法が、バックグラウンド除去に用いられた。この方法の原理は次のようなものである。高エネルギーの荷電粒子がガス検出器中を通過する場合、その飛跡に沿って電子雲を作る。ここで、同じ数の電子雲を作る X 線による場合と比べると、荷電粒子による場合には、長い距離、即ち広い範囲に亘って電子雲ができていく。これらの電子がアノードの近くに到着し、ガス中で電子雪崩がおこり信号となるわけであるが、上述の理由により、荷電粒子による信号は、X 線によるものと比べて、各一次電子の到着時刻がよりバラつくことになる。そこで、信号の立ち上り時間が長いかに短いかによって、荷電粒子か X 線かを区別しようというわけである。この方式により PR ガス (Ar 90 %, CH₄ 10 %) を使用した検出器で ⁶⁰Co からの γ 線により生じた信号の 75 % が除去可能であることを J. L. Campbell (1968) は示している。又同様の方式を使い、P. Gorenstein と S. Mickiewicz (1968) は、PR ガスを使用した検出器を宇宙空間で動作させ、3-10 keV のエネルギー範囲において 80 % のバックグラウンド除去率を得ている。

反同時計測による方法と、上記の立ち上り時間による方法とを併用した PR ガスを使った比例計数管が、B. A. Cooke 等 (1973) により製作され、⁶⁰Co からの γ 線及びロケット実験により試験されている。このロケット実験によれば、ガス検出器の窓以外の五面を反同時計測用のシンチレーション検出器で覆い、更に立ち上り時間を併用して、バックグラウンド除去を行なったもので、7 keV 付近で 94.4 ± 0.9 % のバックグラウンド除去率を得ている。又、ガス検出器の内部の三面に反同時計測用のガス比例計数管を設置したものに、立ち上り時間による方法を併用した場合には、0.6-9 keV の範囲で 85.8 ± 1.3 % のバックグラウンド除去率を得た、とのことである。又、英国の人工衛星 Ariel V に搭載されたガス検出器で、三面の反同時計測と立ち上り時間とを併用したものは、⁶⁰Co からの γ 線に対して 93 %、宇宙空間においては 96 % のバックグラウンド除去率を得ている (Bailey 他 1978)。

さらに Bailey 等 (1978) は、ガス検出器の芯線の両端部分の二面に生じた信号を、Cathode strip を用いて検出し、これに前述の反同時計測用検出器の三面を加え、併せて五面による反同時計測を行ない、立ち上り時間による方法も併用することにより、低バックグラウンド検出器を実現している。彼等は、Ar (95 %), CO₂ (5 %) の混合ガスを封入した検出器に、⁶⁰Co からの γ 線を照射した場合、2-10 keV のエネルギー範囲で 98.2-98.8 % のバックグラウンド除去率を得ている。但し、彼等の定義する除去率とは、2-10 keV の範囲の X 線と判定した信号数についての、2 keV 以上に相当する全入射信号数に対する除去率である。従って、X 線、バックグラウンド共に 2-10 keV の範囲に相当する信号だけについてのバックグラウンド除去率は、96.4-97.6 % 程度と推定される。

これまでに述べてきた検出器は、すべて Ar ガスを主体としたものである。Ar ガス以外に、X 線検出器には Xe ガスも使用することができる。Ar ガスは Xe ガスに比べると、高

エネルギー X 線に対する検出率が低いために、広いエネルギー範囲の X 線の測定には不適當である。それにもかかわらず、Ar ガスを使用する利点は、立ち上り時間を利用したバックグラウンド除去が容易であるためである。

Xe ガスを使用した低バックグラウンド比例計数管としては、R. Rothschild 等 (1979) により HEAO-1 (A-2 実験) に用いられた、マルチワイヤー型検出器があげられる。これは小さなセルの検出器を、横に 14 個、縦に 4 層並べたもので、X 線入射窓に近い一層にはプロパンガス、下部の三層には Xe ガスを封入したものである。この検出器で、周囲がガス検出器により囲まれた第二層、第三層での Xe ガスセルの検出器の、即ち四面反同時計測型検出器のバックグラウンドは、宇宙空間で 3.6×10^{-3} counts/sec/cm²/(3-60 keV) であった。しかし、その除去率については算出されていない。

我々は、まず HEAO-1 (A-2 実験) に用いられたものと同じ型の検出器に改良を加えた、五面反同時計測を利用したマルチワイヤー型比例計数管を試作した。次に、この型の欠点をなくした、五面反同時計測を利用したシングルワイヤー型比例計数管を試作、後者のものについてロケット実験を行ない、その低バックグラウンド検出器としての性能を確認した。以下、第 2 章でマルチワイヤー型比例計数管の試作、第 3 章でシングルワイヤー型比例計数管の試作、第 4 章にそのロケット実験について、そして、第 5 章でまとめを述べる。(S. MIYAMOTO 他 (1985))。

第 2 章 マルチワイヤー型比例計数管の試作

2-1 検出器の概要

宇宙 X 線検出用の、バックグラウンドの低い比例計数管を開発するために、最初の試作として、HEAO-1 (A-2 実験) に用いられたものに改良を加えた、五面反同時計測の出来るマルチワイヤー型比例計数管で、図-1(a) に示す様な構造を持つものを作り、バックグラウンド除去の性能を調べた。本体はアルミニウム製で、入射窓にはアルミ蒸着マイラー膜を使用した。比例計数管は、横方向に 10 個、深さ方向に 4 層、計 40 個のセルより構成されており、各セルは、3.25 mm 間隔にはった 100 μ m 径金メッキタングステン線のカソードワイヤーによって、区切られている。各セルは、断面が 13×13 mm²、長さ 160 mm で、その中央に 50 μ m 径金メッキタングステン線のアノードワイヤーを持つ。その両側及び底のカウンター内壁に接するセルについては、カソードワイヤーによって区切られる面と壁面によって区切られる面があるので、アノードワイヤーからカソードワイヤーまでの距離を、壁面までの距離と等しくすると、一様なガス増幅率が得られない。そこでガス増幅率が一樣になるよう電場を補正するために、アノードから内壁までの距離をカソードワイヤーまでの距離よりも 0.5 mm 大きくとり、セルの断面を 13×13.5 mm² としている。同様に 2 面を内壁によって区切られる両隅のセルの断面は、 13.5×13.5 mm² となっている。この電場補正には、ASTRO-C に搭載予定の大面积比例計数管 (LAC) の計算を借用した (牧島一夫 私信)。

また、一層目のセルについては、その上面を反同時計測用のセルによって覆うことができない。そこで、窓の近傍の電場を弱くして、信号の立ち上がり時間によるバックグラウ

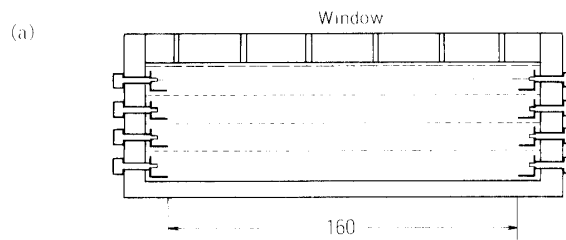


図-1(a) 五面反同時計測のできるマルチワイヤー型比例計数管の構造を示す。本体はアルミニウム製で、入射窓にはアルミ蒸着マイラー膜を使用した。比例計数管は、深さ方向に4層、横方向に10層、計40個のセルより構成されており、各セルは、 $100\ \mu\text{m}$ 径金メッキタングステン線のカソードワイヤーによって区切られ、その中央に $50\ \mu\text{m}$ 径金メッキタングステン線のアノードワイヤーを持つ。両側及び底のカウンター内壁に接するセルは、ガス増幅率が一样になるよう電場を補正するために、少し大きくなっている。図中の長さの単位は mm である。

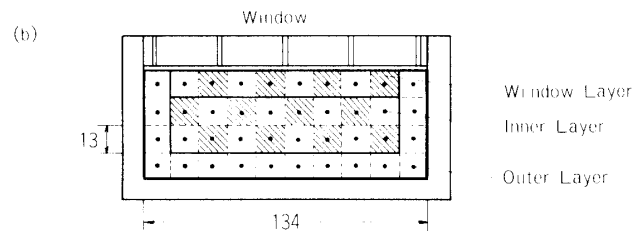


図-1(b) マルチワイヤー型比例計数管での測定は、40本のアノードを図に示す様に3つのグループに分けて行った。両側と底面の16個のセルよりなるグループ (Outer Layer)、入射窓に面する8個のセルよりなるグループ (Window Layer)、及び Outer Layer と Window Layer によって囲まれ、検出器内壁に接していない16個のセルよりなるグループ (Inner Layer) の3つである。このうち、Window Layer と Inner Layer を X 線検出用使用する。Outer Layer は、荷電粒子による信号を反同時計測によって除去するためのみ用いる。図中の長さの単位は mm である。

ンド除去が有効に行なえるように、入射窓とアノードとの間隔を $5\ \text{mm}$ 大きくとり、その間に金属メッシュを入れられるようにした。従って一層目のセルだけは $13 \times 18\ \text{mm}^2$ の長方形の断面を持っている。

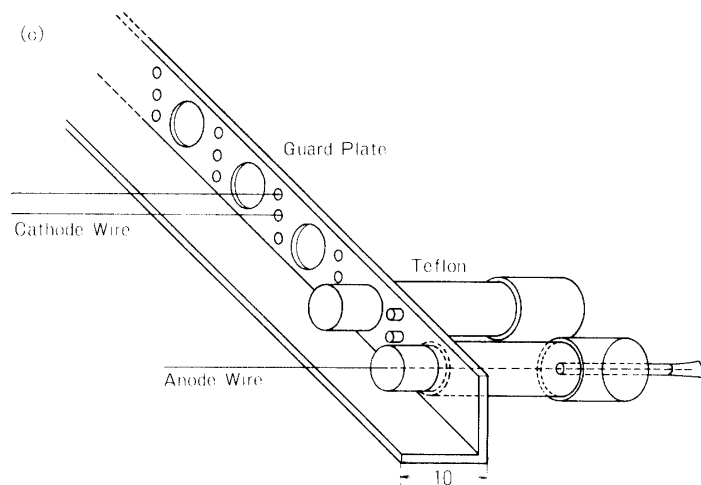


図-1(c) マルチワイヤー型比例計数管のアノードの両端には、ここに示す様な L 字型の金属プレート（ガードプレート）を取り付けてある。ガードプレートに誘起される電荷を信号としてとり出すことにより、アノード両端付近に入射した荷電粒子を検出し、反同時計測により除去できる。ガードプレートは、直接検出器本体に固定せず、アノードをテフロン製の円柱に通し、それをガードプレートにあけた穴に差し込んで固定した。これにより、ガードプレートとグラウンドとの間の容量カップリングによる信号の損失をおさえ、しかもアノードとの間での放電も防ぐことができた。図中の長さの単位は mm である。

アノードの両端には、図-1(c)に示す様な L 字型の金属プレート（ガードプレート，GP）が取り付けられている。これにより、アノード両端付近でおこった電子雪崩が、ガードプレートに誘起する電荷を信号としてとり出し、アノード両端付近に入射した荷電粒子を検出し、反同時計測により除去できる様になっている。従って、入射窓面を除く五面については、反同時計測によるバックグラウンド除去が行なえる。

2-2 製作にあたって

試作したマルチワイヤー型検出器は、4 層からなるが、製作にあたっては、厚さ 13 mm のアルミニウム製の枠組を用いて、それぞれ 10 個のセルよりなる層を作り、4 層を重ねて窓枠に固定している。そして、 $310 \times 240 \times 90 \text{ mm}^3$ のアルミニウム製の箱に窓枠でふたをするような形で検出器をはめ込み、箱にガスを常時流すことによって、検出器を動作させる方法をとった。

マルチワイヤー型検出器では、セルを 3.25 mm 間隔に張ったカソードワイヤーによって区切っているため、アノードと合わせると、検出器一体を作るために、280 本ものワイヤーを張らねばならない。ワイヤーの切断やたるみは、エネルギー分解能の低下、さらには

放電につながるので、ワイヤーには適当な張力をかけておく必要がある。我々は、ワイヤーに張力を持たせるために、金メッキタングステン線の片側の端を、0.3 mm 径のピンバイスの刃に数回巻きつけてスプリング状にした。また、多数のワイヤーを張るのにかかる手間を省くために、ワイヤーの両端の固定に半田や接着剤などは使わず、ワイヤーの端をカウンターの外で真ちゅう製のパイプ(外径 1.0 mm, 内径 0.6 mm, 長さ 12.0 mm)に通し、このパイプを刃をなましたニッパーでかshめて、ワイヤーを固定する方法をとった。100 μm 径のワイヤーには約 120~150 g 重の、50 μm 径のワイヤーには約 30~50 g 重の張力を加え、固定した。金メッキタングステン線を、0.3 mm 径のピンバイスの刃に巻きつけて作ったスプリングの場合、それ以上の張力を加えると、巻いた部分が伸びきってしまい、スプリングとして役をなさない。

観測ロケットに搭載される装置は、飛しょう中の苛酷な条件に耐えることが要求される。その中で、最も酷しいのは、飛しょう中に生ずる振動であり、ロケット機体の共鳴振動数近辺の振動には特に注意しなければならない。この共鳴振動数は、個々の機体毎に少しずつ異なるが、これまでの測定によれば、だいたい数十 Hz であり、100 Hz を越すことはない。この共鳴振動数が、ワイヤーのそれと一致すれば、ワイヤーの切断するおそれが生ずる。このために、ワイヤーの固有振動数は、安全を見込んで 200 Hz 以上にしておくのが望ましい。ワイヤーの固有振動数 ν は、ワイヤーの長さを s , 張力を T , 線密度を ρ として

$$\nu = (T/\rho)^{0.5}/2s$$

と表わされる。固有振動数を 200 Hz にするためには、100 μm 径、50 μm 径の金メッキタングステン線の場合それぞれ 62 g 重、15.5 g 重の張力でよく、ワイヤー自身を巻いたスプリングによって得られる張力で充分であることがわかる。ワイヤーとして Be-Cu 製のものも試みたが、Be-Cu 線はタングステン線に比べて、スプリングにしたときに張力が少なく、充分な張力をかけることが出来ないうえ、柔らかいために、パイプの中でかshめた時容易に切れてしまい、この方法には適さないことがわかった。

ガードプレートの取り付けにあたって、ガードプレートは直接検出器本体に固定せず、図-1(c)に示す様にアノードをテフロン製の円柱に通し、そのテフロン製円柱をガードプレートに開けた穴に差し込むことによって固定した。これにより、ガードプレートとグラウンドとの間の静電容量を小さくし、カップリングによる信号の損失をおさえることができ、しかも、アノードとの間での放電も防ぐことができた。

2-3 測定結果

2-3-1 アノードのグループ分けと反同時計測の方法

測定は、40 本のアノードを図-1(b)に示す様に、大きく 3 つのグループに分けて行った。検出器は、両側と底面の 16 個のセルよりなるグループ (Outer Layer ; OL), 入射窓に面する 8 個のセルよりなるグループ (Window Layer ; WL) 及び OL と WL によって囲まれ、検出器内壁に接していない 16 個のセルよりなるグループ (Inner Layer ; IL) の 3 つに分けられ、このうち WL と IL を X 線検出用に使用する。OL は、検出器に入射する広かった電離飛跡を持つ荷電粒子による信号を反同時計測によって除去するための、veto

counter として用い、X 線検出用としては使用しない。

WL から得られた信号は、OL、IL 及び GP (ガードプレート) からの信号と反同時計測をとる。一方、IL から得られた信号は、OL、WL 及び GP との反同時計測をとる。このようにして、荷電粒子による信号を除去することができるが、より効果的な反同時計測によるバックグラウンド除去を行うために、IL と WL はさらに図-1(b)に示すように、その中で斜線を施した部分と、それ以外の部分との 2 つに分け、互いに反同時計測をとることができるようにした。これによって、IL と WL のすべてのセルから、それに隣接する 4 つのセルと同時計測のない信号だけを選別することが可能になっている。

2-3-2 測定条件

測定は、PR ガスを大気圧のもとで常時流し、アノード印加電圧 1800 V で行った。テストのための X 線源としては、 ^{55}Fe (5.9 keV) と ^{109}Cd (22.1 keV) を用い、 ^{60}Co からの γ 線 (1.17, 1.33 MeV) をバックグラウンド線源として使用した。また、実験室内での自然のバックグラウンドについても測定を行った。

2-3-3 エネルギー分解能

^{55}Fe (5.9 keV) X 線源をアノードに垂直にコリメートして、検出器中央部に照射した時のエネルギー分解能は、IL では 17.9 %であったが、WL では 21.8 %と悪く、その信号波高の平均も IL の約 0.7 倍と低かった。これは、窓の直後に金属のメッシュを入れずに測定したため、WL の断面が長方形で、アノードと 2 層目との境界であるカソードワイヤーとの間隔が 6.5 mm であるのに対し、アノードと入射窓との間隔が 11.5 mm と 5 mm も大きいことが原因である。またガードプレートによってアノード両端付近でガス増幅率が大きくなり、検出器のエネルギー分解能を悪くしている。

2-3-4 アンチレベルの設定

IL のアノードからの信号を取り出す際、他のアノードの信号が何 mV 以上あったときに、それを反同時信号として採用するのが適当であるかを調べるために、そのディスクリレベルを変えて、そのときに除去できるバックグラウンド (γ 線) と、バックグラウンドと間違えずに検出する ^{55}Fe からの X 線との様子を調べたのが図-2 である (バックグラウンド線源として ^{60}Co を使用した)。図よりわかる様に、ディスクリレベルが X 線のエネルギーに換算して 1 keV よりも大きくなると、バックグラウンド除去率が悪くなる。バックグラウンド信号が、最少電離損失の電子によるものだとすれば、それが OL のセルを垂直に横切った時、一気圧の PR ガス 13 mm で失う平均のエネルギーは、約 7.8 keV である。それにもかかわらず、反同時計測信号のディスクリレベルが、1 keV を超えるとバックグラウンド除去率は、悪くなっているので、平均の損失エネルギー 7.8 keV よりも、かなり小さいエネルギー損失をして、セルを突き抜ける電子の存在していることがわかる。これは、7.8 keV に平均値を持つ電子のエネルギー損失の分布が、かなり広がった分布となるためである。今回の実験では、種々の雑音に影響されない範囲で最大限に反同時計測を有効に行うために、他のアノードからの信号のディスクリレベルを 0.1 keV に設定した。

ガードプレートからの信号のディスクリレベルは、アノード印加電圧 1800 V のときに、ガードプレートの端から 1 cm 離れた所で生じた、波高で 1 keV 以上の信号を、反同時計測

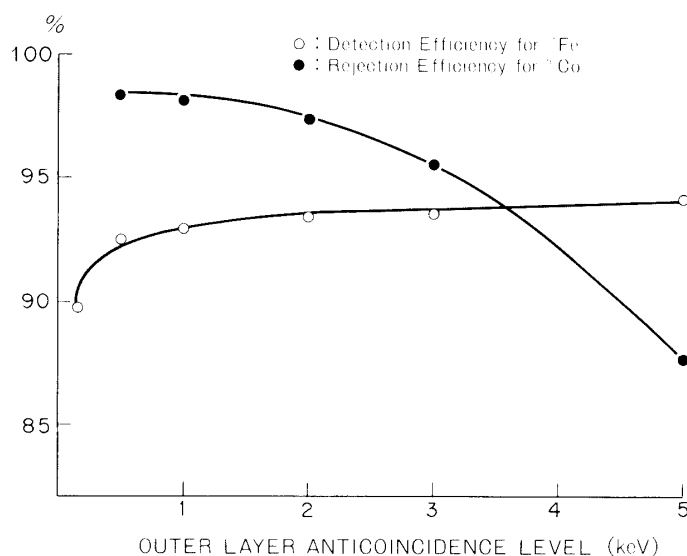


図-2 マルチワイヤー型比例計数管の、ILのアノードからの信号を取り出す際、他のアノードの信号を反同時信号としたとき、その信号のディスクリレベルを変えて、そのときに除去できるバックグラウンド(●)と、 ^{55}Fe からのX線でバックグラウンドと見誤らずに検出できるもの(○)の様子を示す(バックグラウンド線源として ^{60}Co を使用した)。ディスクリレベルが、X線のエネルギーに換算して1 keVよりも大きくなると、バックグラウンド除去率の悪くなることがわかる。

用の信号として取り出せるよう、前置増幅器の出力で0.8 mVに設定した。

2-3-5 信号の立ち上がり時間の分布

前置増幅器からの出力信号の立ち上がり時間は、図-3のような回路を用いて測定した。前置増幅器出力(減衰時定数20 μsec)を2つに分け、その片方を2 μsec 遅延した後、反転して元の信号に加え合わせる。このように波形整形し、その信号の波高が、最大波高の90%から10%になるまでの時間を測定して、元の信号の立ち上がり時間とする。

この様にして、 ^{55}Fe 線源からのX線による信号と、 ^{60}Co からの γ 線によるバックグラウンドとしての信号との、立ち上がり時間を測定した結果を図-4に示す。2つの分布は重なり合っているため、信号の立ち上がり時間によってバックグラウンドを除去する際には、いくらかのX線信号も同時に除去してしまうことになる。

図-5は、立ち上がり時間による選別のディスクリレベルを変えることによって、 ^{55}Fe からのX線、及び ^{60}Co からの γ 線によるバックグラウンドが、除去されずに残る割合の変化を示したものである。今回の測定では、約10%程度の ^{55}Fe によるX線の信号を犠牲にすることによって、約65%程度の ^{60}Co に起因する信号を除去できるように、立ち上がり時間のディスクリレベルを設定した。

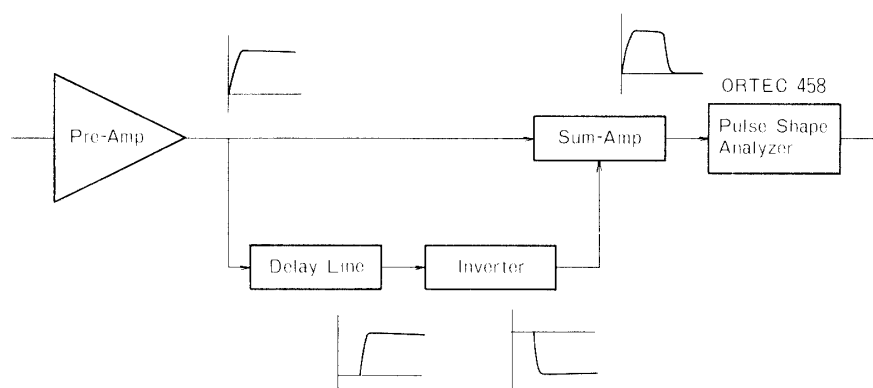


図-3 マルチワイヤー型比例計数管の、前置増幅器からの出力信号の立ち上がり時間は、この図の回路を用いて測定した。その信号の波高が、最大波高の 10 % から 90 % になるまでの時間を測定して、その信号の立ち上がり時間としている。

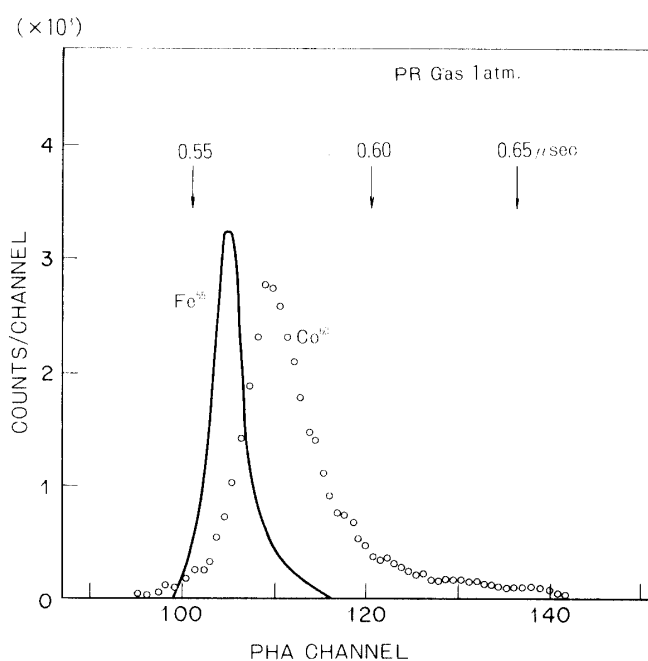


図-4 マルチワイヤー型比例計数管において、 ^{55}Fe 線源からの X 線による信号 (実線) と、 ^{60}Co からの γ 線によるバックグラウンドとしての信号 (○) との立ち上がり時間の分布を示す。2 つの分布はオーバーラップしているので、信号の立ち上がり時間によってバックグラウンドを除去する際には、いくつかの X 線信号も同時に除去してしまうことになる。

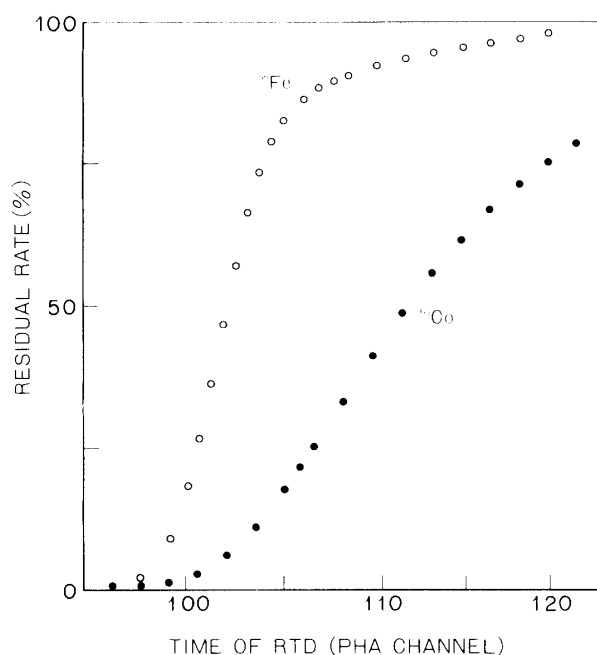


図-5 マルチワイヤー型比例計数管において、立ち上り時間による選別のディスクリレベルを変え、 ^{55}Fe からのX線(○), 及び ^{60}Co からの γ 線(●)によるバックグラウンドの検出される割合を示した。

2-3-6 バックグラウンド除去の様子

図-6に、WLについての測定を行うときの、回路図のブロックダイアグラムを示す。反同時計測及び立ち上り時間による選別で、バックグラウンドと見なされれば、単安定マルチバイブレーターにより約40 μ secにわたりゲートが閉じられ、この間にアノードから来る信号は計測されない。ILについても、同様の回路を使って測定をおこなった。尚、今回の測定では、信号処理回路の都合上、IL及びWL内で二分したグループについて、互いに他方を反同時計測用として使いながら両方の信号を処理することができなかったため、一方のグループだけに着目し、他方はveto counterとしてだけに使用した。IL及びWLについて、バックグラウンド除去の組合わせを変え、その時のバックグラウンド除去率を測定した結果を表-1に示す。この表において、ILの場合の三面アンチとは、OLの信号だけを反同時計測のバックグラウンド除去に使用した場合のことであり、五面アンチとはさらにガードプレート(GP)からの信号も使用した場合、六面アンチとは、それらにWLからの信号も併せて使用した場合を示している。又六面+相互アンチとは、六面アンチに加えて、IL内で二分したうちの一方の側の信号も、反同時計測によるバックグラウンド除去に利用したものである。さらに、それぞれについて、立ち上り時間によるバックグラウンド除去を併用したときの場合についても測定した。WLについて三面アンチとは、OL及びILを用いて反同時計測によるバックグラウンド除去を行ったものであり、そのほかについ

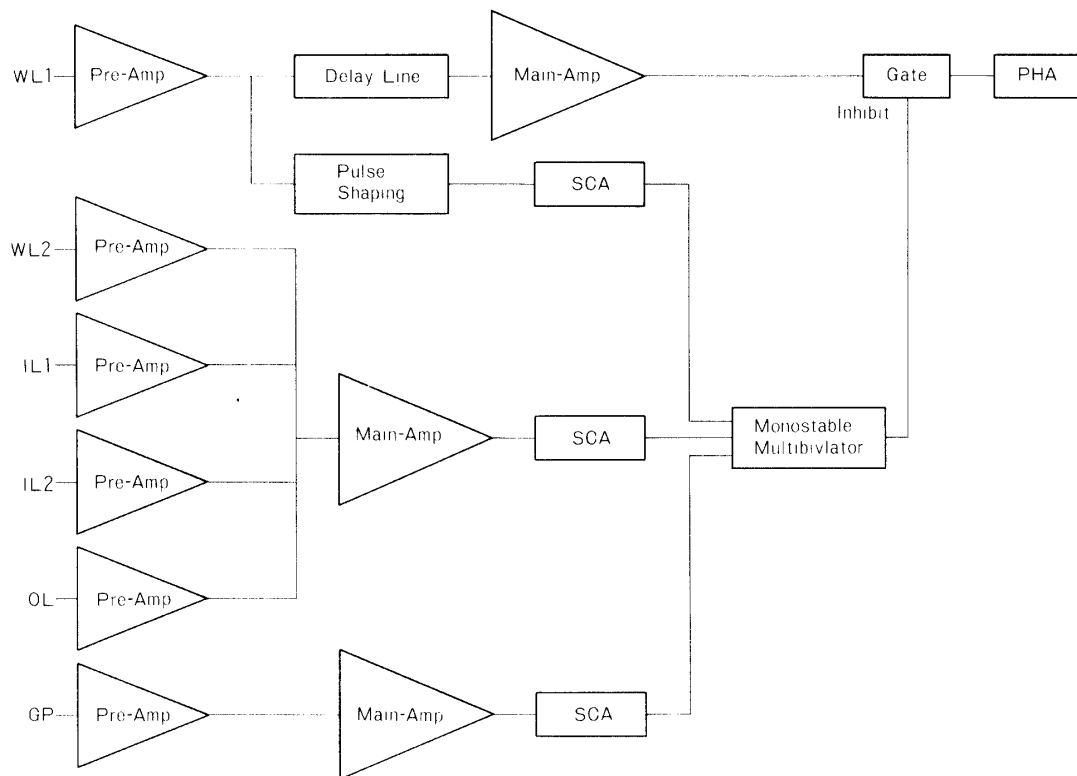


図-6 マルチワイヤー型比例計数管で、WL についての測定を行う
ときの回路図のブロックダイアグラムを示す。

表-1 マルチワイヤー型比例計数管におけるバックグラウンド除去率

(PR ガスによる測定)	Widow layer	Inner layer
^{60}Co の γ 線によるシミュレーション		
三面反同時計測	83.0%	88.9%
五面反同時計測	89.7%	94.2%
五面反同時計測 + 相互反同時計測	96.8%	
R. T. D.* + 五面反同時計測 + 相互反同時計測	97.5%	
六面反同時計測		97.8%
六面反同時計測 + 相互反同時計測		99.2%
R. T. D. + 六面反同時計測 + 相互反同時計測		99.4%
自然 (室内) のバックグラウンド		
R. T. D. + 五面反同時計測 + 相互反同時計測	90.3%	98.1%

*: R. T. D. は立ち上り時間を利用したバックグラウンド除去の方法を表わす

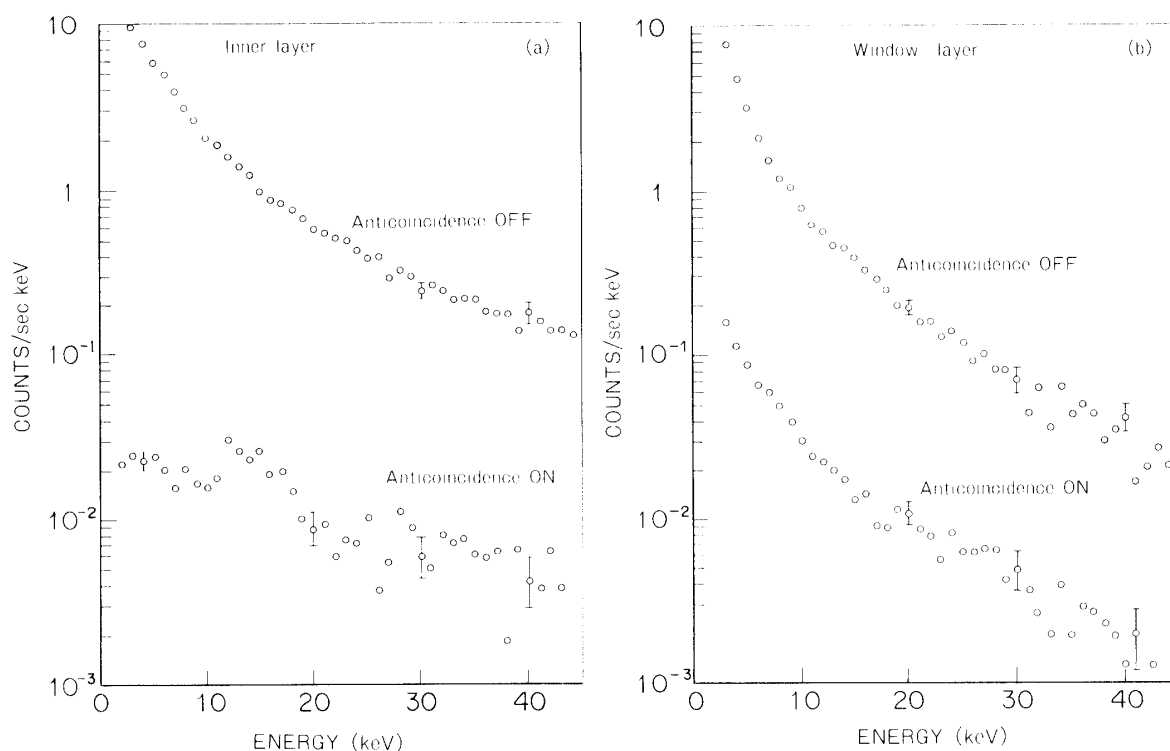


図-7 マルチワイヤー型比例計数管のIL(a)及びWL(b)において、反同時計測と立ち上り時間とによるバックグラウンド除去を行わない場合(上部)と、行った場合(下部)における、 ^{60}Co の γ 線による信号の波高分布を示す。ILでは高エネルギーの信号に較べて、低エネルギーの信号除去率の方がよい。

てはILの場合と同様である。

表-1からわかるように、 ^{60}Co からの γ 線をバックグラウンド源とみなした測定では、ILで約99.4%のバックグラウンドを除去できるのに対して、WLでは約97.5%が除去できるとどまり、バックグラウンドの残留率が4倍程度あることがわかる。これは、アルミニウム蒸着マイラー膜及びアルミニウム製の窓枠と、 ^{60}Co からの γ 線との相互作用でできた電子のうち、飛程の短いものが、バックグラウンド除去システムにかからずに、残ったものと考えてよい。また、実験室内での自然のバックグラウンドを測定した結果、除去できなかった割合は、ILで1.9%、WLで9.7%と、 ^{60}Co からの γ 線をバックグラウンドとした時の場合よりも、それぞれ3.3倍、3.8倍大きくなっている。

次に、マルチワイヤー型計数管のIL及びWLにおいて、反同時計測と立ち上り時間とによるバックグラウンド除去を行わない場合と、行った場合の ^{60}Co の γ 線による信号の波高分布を図-7に示した。これからわかるように、ILでは高エネルギーの信号に較べて、低エネルギーの信号の除去率の方がよい。それぞれのセル中での、エネルギー損失の小さ

い信号としては、飛程が 1 mm 程度以下であるような低エネルギー電子 ($E \leq 10$ keV) によるものと、単位長さ当りのエネルギー損失の小さい高エネルギー電子 ($E \geq 1$ MeV) によるものとがある。このうち、低エネルギー電子による信号は、そもそも飛程が短かく、X 線の入射した場合とよく似た振舞いをするので、反同時計測や、立ち上り時間によるバックグラウンド除去の方法では、なかなか除去できない。このことから、IL では壁や窓に面していないので、飛程の短い低エネルギー電子の入射数が少なく、その結果として、低エネルギーのバックグラウンド信号の除去率を良くしている、と考えられる。

2-4 マルチワイヤー型検出器の問題点

X 線の測定をマルチワイヤー型検出器で行うことにより、以下で示すような問題点が明らかになった。

2-4-1 X 線の検出効率

図-8 に示すのは、 ^{109}Cd からの X 線 (22.1 keV) を照射したときに、反同時計測によるバックグラウンド除去を行った場合と、行なわない場合とで得られる、アノードからの信号の波高分布の結果である。これからわかるように、反同時計測によるバックグラウンド除去を行なわない時には、22.1 keV にみられるピークよりも低エネルギー側において、かなりの計数率があるが、反同時計測によるバックグラウンド除去を行なうことにより、その殆んどが除去される (図-8 に見られるピークは 22.1 keV に相当するものと、これが銅製のガードプレートにあたり、そこから出る Cu-KX 線 (8.04 keV) とによるものである)。これは、次のように理解することができる。22.1 keV の X 線が、PR ガス中で光電効果によりつくる最初の電子の飛程は約 4.5 mm であり、これは検出器内の各セルの大きさ $13 \times 13 \text{ mm}^2$ に比べて無視できない。結局、最終的につくられる一次電子雲は、隣接するセルに分割され、そのうちの一個のセルだけに含まれる一次電子による信号だけからそのエネルギーを測定するために、低エネルギー部分において計数されることになる。さらに、一次電子雲が隣接するセルに分割された場合には、反同時計測によるバックグラウンド除去を行なうと、低エネルギー側に見られる信号は、殆んどなくなってしまう。一方、 ^{55}Fe からの X 線 (5.9 keV) の場合には、その最初の電子の飛程が約 0.7 mm であるため、22.1 keV の X 線の場合のような現象は見られない。即ち、PR ガスを用いた場合には、入射する X 線のエネルギーが高くなるにつれ、一次電子雲の広がりが無視できなくなり (例えば飛程が 2 mm 程度になる電子のエネルギーは約 12 keV である)、反同時計測によるバックグラウンド除去を行なう限り、X 線の検出効率は低下することになる。但し、PR ガスの代りに Xe ガスを用いれば、電子の飛程は約半分になるので、20 keV 以下の X 線検出効率の低下は、あまり顕著ではなくなると予想される。

検出効率の低下する原因として、以上の他に、蛍光 X 線による場合がある。つまり、入射 X 線により励起された原子が、蛍光 X 線を出して基底状態にもどったときに、この X 線が他のセルで吸収されることがある。その場合、それによる信号は、バックグラウンドとして除去されてしまうことになる。この現象は、Ar ガスについては 3.2 keV 以上の、Xe ガスについては 34.6 keV 以上の X 線について起こる。

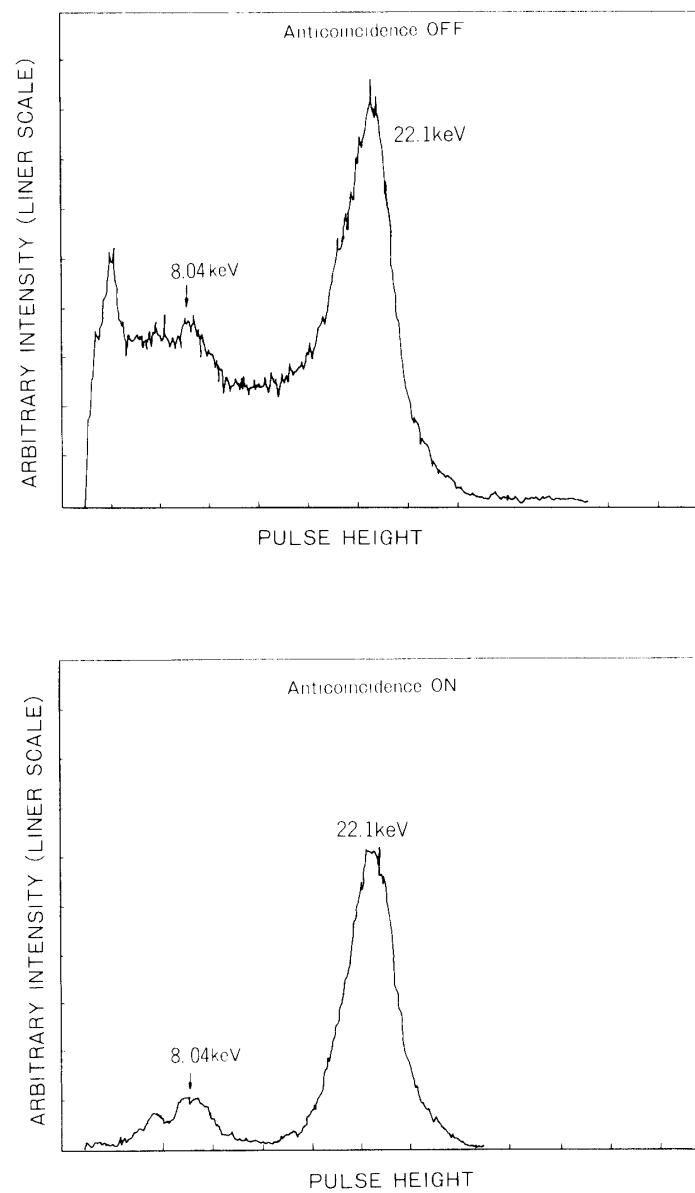


図-8 マルチワイヤー型比例計数管に、 ^{109}Cd からのX線(22.1 keV)を照射したときに、反同時計測によるバックグラウンド除去を行った場合(a)と、行なわない場合(b)とで得られる信号の波高分布の結果を示す。ここに見られるピークは22.1 keVに相当するものと、これが銅製のガードプレートにあたり、そこから出るCu-KX線(8.04 keV)とによるものである。

2-4-2 入射 X 線エネルギーによる有効面積の変化

ガードプレートからの信号を使って、反同時計測によるバックグラウンド除去をする場合、その信号の大きさは、X 線の入射位置だけでなく、そのエネルギーによっても変化する。そのために、高エネルギー X 線ほど、ガードプレートから離れた場所に入射しても、ガードプレートに大きな信号を励起するので、バックグラウンドとして除去されやすい。即ち、入射 X 線のエネルギーにより検出器の有効面積が変化してしまう。この点については、複雑ではあるが、適当な処理をすることによって解決することが知られている (Smith & Turner (1981))。

2-4-3 エネルギー分解能の低下

図-9 に示すように検出器の両端では、ガス増幅率が増加しているが、これはガードプレートにより、電場が強くなっているためである。この現象は、ガードプレートから約 2 cm に及び、そのために、検出器全体としてのエネルギー分解能の低下をもきたしている。又、IL においても、二分したそれぞれのグループでガス増幅率のそろっていないことなど、ワイヤーの多いことが、エネルギー分解能を向上させる上でのさまたげになっているといえる。

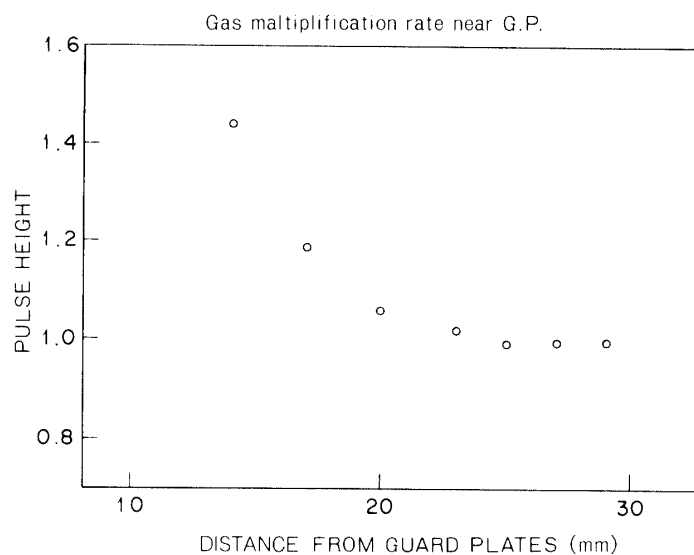


図-9 マルチワイヤー型比例計数管の、検出器の両端では、ここに示すように、ガス増幅器率が増加している。これはガードプレートにより、電場が強くなっているためである。

第3章 シングルワイヤー型比例計数管の試作

3-1 シングルワイヤー型検出器の概要

マルチワイヤー型検出器について、既に述べたような問題点を補い、さらに、効果的なバックグラウンド除去を行うために、新しく X 線用のセルを一個だけ持つ、シングルワイヤー型の比例計数管を試作し、その性質を調べた。図-10 に検出器の概要を示す。検出器本体はアルミニウム製で、入射 X 線窓には $150\ \mu\text{m}$ 厚のベリリウム薄膜を使用している。全体のガス容積は、断面 $60 \times 80\ \text{mm}^2$ 、長さ $120\ \text{mm}$ で、その中央部分には、立ち上り時間

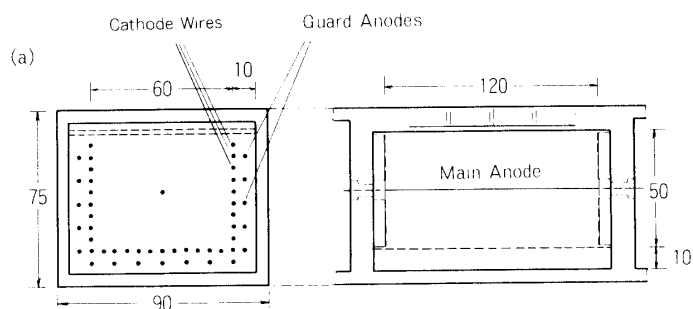


図-10(a) シングルワイヤー型比例計数管の検出器の概要を示す。これは、ロケット実験に使用したものである。検出器本体はアルミニウム製で、入射 X 線窓には $150\ \mu\text{m}$ 厚のベリリウム薄膜を使用している。中央部分には、立ち上り時間によるバックグラウンド除去を有効に行うために、X 線検出用のセルが一個あり、その両側面と底面との三面を、反同時計測用の検出器で囲んである。図中の長さの単位は mm である。

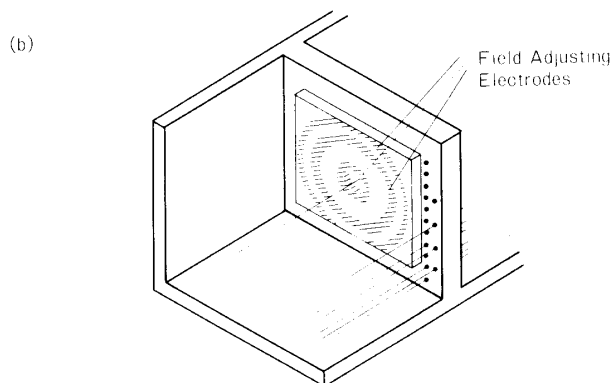


図-10(b) シングルワイヤー型比例計数管内の、電場の不均一を補正し、さらにアノードの両端付近を通過する荷電粒子を、除去するために、検出器の両端に三枚の同心円板からなるガードリングを取り付けた。ガードリングは、マコール製の板に接着し、それを検出器本体にネジ止めた。

によるバックグラウンド除去を有効に行うために、 $50 \times 60 \text{ mm}^2$ と断面を大きくとった X 線検出用のセルが一個ある。そして、その周囲のうち、両側面と底面との三面を、10 mm の厚さを持つ 9 個の反同時計測用のセルで囲んだ。反同時計測用の 9 個の各セルは、5 mm 間隔にはった $100 \mu\text{m}$ 径の金メッキタングステン線のカソードワイヤーによって仕切られており、カソードワイヤーは、マルチワイヤー型検出器の場合と同様に、一端をスプリング状にしたものを用いた。その両端は、真ちゅう製のパイプで止めてあり、そのパイプは、導電性接着剤で検出器本体に固定してある。ワイヤーを張るとき、そのワイヤーには 80 g 重の錘を吊り下げた状態で、パイプをかしめることによりワイヤーを固定し、どのワイヤーにも均一な張力を持たせた。アノードワイヤーに使用する線材は、金メッキタングステン線であり、アノード、リヤアノードにはそれぞれ $20 \mu\text{m}$ 径、 $70 \mu\text{m}$ 径のものを使用した。 $70 \mu\text{m}$ 径の線材はそれ自身を巻いてスプリング状にし、その一端をハーメチックシールに半田で固定し、他端には 40 g 重の錘を下げて、ハーメチックシールにあらかじめ接着した真ちゅう製のパイプをかしめて固定することにより、張力を持たせた。一方、アノードに使った $20 \mu\text{m}$ 径の線材は、それ自身では細すぎてスプリングにはならないので、 $70 \mu\text{m}$ 径の線材で作ったスプリングを導電性接着剤でとめたものを用いた。そして、このワイヤーを、リヤアノードと同じ方法で 20 g 重の錘を下げて張力を持たせて、パイプをかしめて固定した。アノード、リヤアノードにそれぞれ $20 \mu\text{m}$ 径、 $70 \mu\text{m}$ 径の金メッキタングステン線を使用したのは、これらに印加する高電圧を殆んど同じ値にするためである。

断面の大きいセルは、信号の立ち上り時間によるバックグラウンドの選別には有利であるが、その反面、ワイヤーの長さに対してセルの断面が大きいために、一様な電場が得られず、X 線の入射位置によりガス増幅率が異なってしまう、という欠点がある。この効果は、検出器の両端で最も大きく、端から検出器の深さ程度の領域までその効果が及ぶ。即ち、図-10(a)に示す検出器のような寸法では、その中央部分でさえも、一様なガス増幅率は得られないことになってしまう。

この電場の不均一を補正し、さらに、アノードの両端付近を通過する荷電粒子を、反同時計測により、バックグラウンドとして除去するために、検出器の両端に図-10(b)に示すような、三枚の同心円板からなるガードリングを取り付けた。取り付けにあたり、ガードリングと検出器本体の絶縁のために、ガードリングをマコール製の板に接着し、それを検出器本体にネジ止めた。次に、X 線の入射位置にかかわらず、一様なガス増幅率を得るために、これら三枚のガードリングに印加すべき電圧を推定しよう。今、検出器全体をその芯線径 a 、カソード径 b の円柱状の電極と近似的に考えると、その円柱の中心から距離 r の点における電位 V は、芯線に印加する電圧を V_0 とすると

$$V(r) = V_0(\log b/r)/(\log b/a)$$

で与えられる。芯線から三枚のガードリング（内側から順にリング 1、リング 2、リング 3 とする）までの距離は、それぞれ 4 mm、15 mm、22 mm である。また、検出器を円柱状の電極とみたとき、 $a = 10^{-2} \text{ mm}$ 、 $b = 30 \text{ mm}$ 程度である。つまり、三枚のガードリングにはそれぞれ

$$V_1=0.25 V_0, \quad V_2=0.087 V_0, \quad V_3=0.039 V_0$$

なる電圧を印加すれば、電場補正ができることになる。しかし実際には、検出器の断面が長方形であること、ガードリングに幅のあること、などのためにこのような電圧を印加しても充分な一様性は得られなかった。そこで、ガードリングに印加する電圧を、上記の値から変化させて測定したところ

$$V_1=0.31 V_0, \quad V_2=0.12 V_0, \quad V_3=0.035 V_0$$

で、検出器全体に亘るガス増幅率が最もよく一様になった。以後の測定は、 V_0 を抵抗分割することにより、それぞれのガードリングには、上記の電圧が印加されるようにして行った。

3-2 測定結果

3-2-1 PR ガスでの特性

大気圧のもとで、PR ガスを常時流すことにより、検出器の特性を測定した。このときの

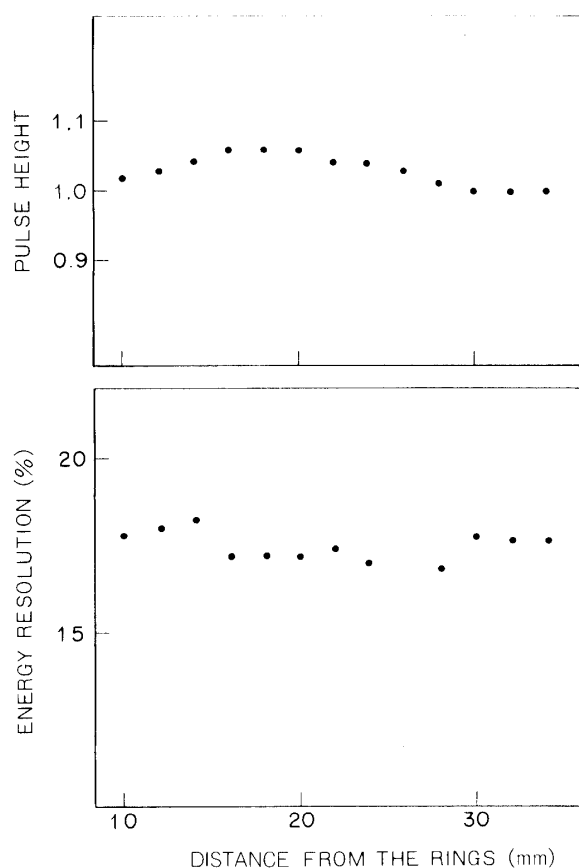


図-11 シングルワイヤー型比例計数管の三枚のガードリングに適正な電圧を印加したときの、X線入射位置による信号波高(上図)と、エネルギー分解能(下図)を、5.9 keVのX線について測定した結果を示す。この図で信号波高は、検出器中央部にX線を照射したときの値で規格化してある。

印加電圧は、アノード 1700 V, リヤアノード 1870 V, リング 1-3 は各々 530 V, 200 V, 60 V である。計測に使用する X 線源としては、 ^{55}Fe (5.9 keV), ^{109}Cd (22.1 keV), バックグラウンド用線源としては、マルチワイヤー型検出器の場合と同様に、 ^{60}Co (γ 線源) を使った。三枚のガードリングに、上述した電圧を印加したときの、X 線入射位置による信号波高と、エネルギー分解能の変化を、5.9 keV の X 線について測定した結果を、図-11 に示す。この図で、信号波高は、検出器中央部に X 線を照射したときの値で規格化してある。種々の入射位置における信号波高の偏差は、5 % 以内であり、アノードに沿って一様なガス増幅率を持つ電場の作られていることがわかる。又、エネルギー分解能も、検出器の両端付近での劣化は、殆んどみられない。以上のことから、相対的に大きな断面を持つ検出器の特性が、ガードリングにより大幅に改善されていることがわかる。

我々の製作したシングルワイヤー型検出器において、アノードの両端付近でおこるイベントは、ガードリングに励起される信号を利用して、除去することができる。図-12 は、 ^{55}Fe による X 線を入射したときの入射位置と、それぞれのガードリングに励起される信号の大きさとの関係を示したものである。入射位置が、ガードリングから離れるにともない、内側のガードリング（リング 1）に励起される信号は、急速に小さくなるが、外側のガードリング（リング 3）に励起される信号は、これに比して、除々に減少するだけで、X 線が

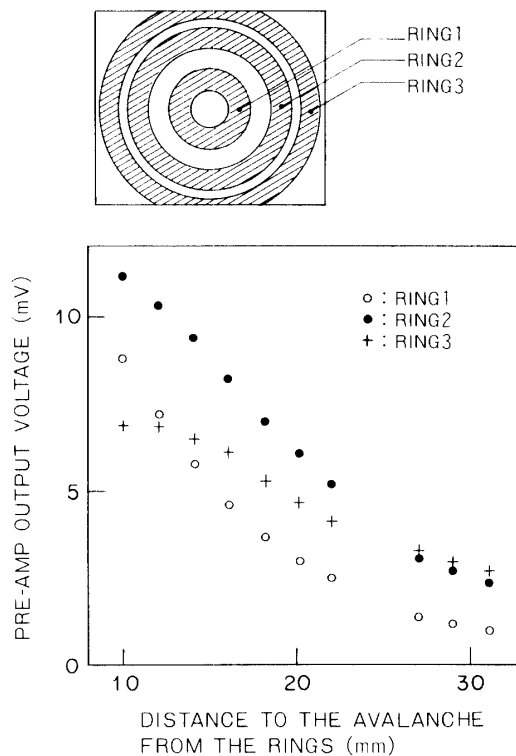


図-12 シングルワイヤー型比例計数管において、 ^{55}Fe による X 線を入射したときの入射位置と、それぞれのガードリングに励起される信号の大きさとの関係を示したものである。

検出器の中央付近に入射した場合でも、信号が励起されている。ここで、リング1に励起される信号と、リング3に励起される信号との差をとると、検出器の端から離れた位置に入射した場合には、負の信号が得られる。次に、X線の入射位置を徐々に検出器の端に近づけていくと、信号の大きさはやがて正になる。このような測定を、X線の入射エネルギーを変化させて行くと、リング1の信号波高とリング3のそれとの等しくなるX線入射位置は、そのエネルギーによらず、ほぼ一定であった。そこで、リング1の信号とリング3のそれとの差が正のときだけを、反同時計測用信号としてとり出し、バックグラウンドとして除去するものとすれば、入射X線のエネルギーによらず、検出器の端から一定の距離内でおこった現象だけを、除去することができることになる。つまり、コリメーター等により、検出器の両端には、X線の入らないようにしておけば、両端の壁を通して入ってくる荷電粒子、あるいは、壁からでてくる電子などによる信号と、X線による信号とを区別することができるわけである。実際には、除去出来る現象の検出器端からの距離は、一定にはならず、そのエネルギーにより変化してしまう。これは、リング1の信号とリング3のそれとの差がある程度大きくないと、雑音と区別出来ないからである。我々は、このとき前置増幅器出力で3 mV以上の信号を取り、バックグラウンド除去に使用した。これは、5.9 keVと22.1 keVのX線を検出器の端に入射させた場合、バックグラウンドとして除

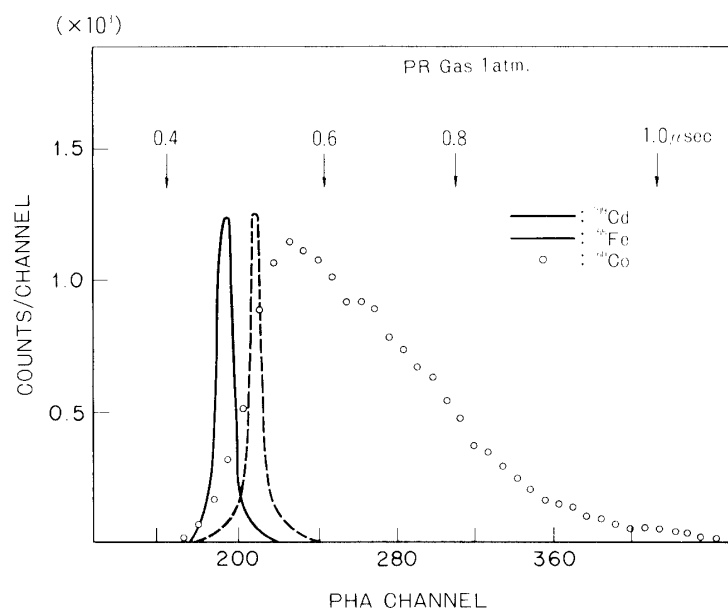


図-13 シングルワイヤー型比例計数管において、 ^{55}Fe 及び ^{109}Cd の X線源からの X線による信号（実線と破線）と、 ^{60}Co からの γ 線によるバックグラウンドとしての信号(○)との、立ち上り時間の分布を示す。X線と γ 線の分布はオーバーラップしているので、信号の立ち上り時間によってバックグラウンドを除去する際には、いくつかの X線信号も同時に除去してしまうことになる。

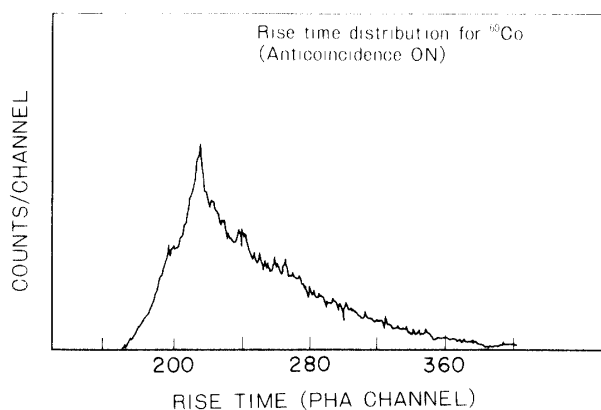


図-14 シングルワイヤー型比例計数管において、 ^{60}Co からの γ 線による信号で、反同時計測によるバックグラウンド除去を行った後に残ったものの、立ち上がり時間の分布を示す。図-13のそれと比べると、立ち上がり時間の長い信号程、反同時計測によるバックグラウンド除去が効率よく行なわれている。

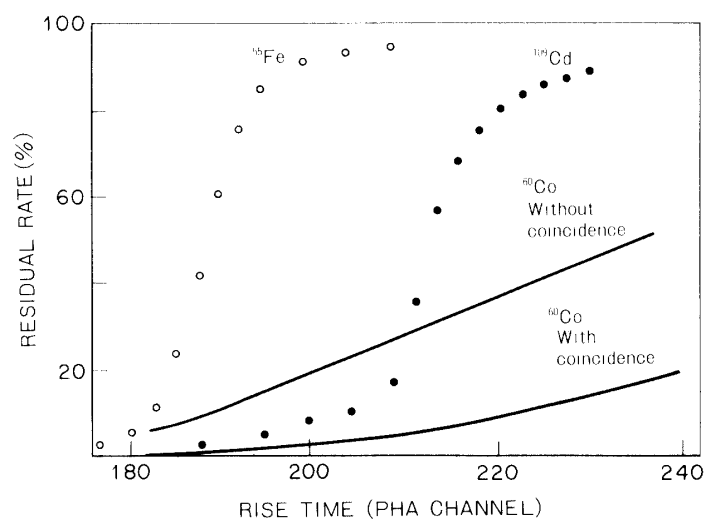


図-15 シングルワイヤー型比例計数管において、信号の立ち上がり時間がある値 τ よりも長いものを、バックグラウンドと判断した時、この τ を種々変化させたときに、 ^{55}Fe , ^{109}Cd , ^{60}Co 等からの X 線や γ 線がどの程度除去されずに残るかを示す。X 線ができるだけ残り、 γ 線ができるだけ残らないような τ が最も効率的な立ち上がり時間によるバックグラウンド除去を可能にする。図中の実線は、それぞれ ^{60}Co からの γ 線で反同時計測によるバックグラウンド除去をした後の信号（下部実線）と、しない場合の信号（上部実線）とに対する割合を示す。

去出来る入射位置の検出器端からの最大距離が，それぞれ 10 mm と 12 mm になることに相当する。

信号の立ち上がり時間については，マルチワイヤー型検出器の場合と同じ方法で測定した。マルチワイヤー型検出器で測定した信号の立ち上がり時間の結果（図-4）と，シングルワイヤー型検出器で測定したそれ（図-13）とを比べると，X 線による立ち上がり時間の分布と， γ 線によるそれとの差は，シングルワイヤー型検出器のほうが大きい。従って，立ち上がり時間によるバックグラウンド除去は，シングルワイヤー型検出器のほうが効果的に行なえる。また， ^{60}Co を照射したときに，五面反同時計測によるバックグラウンド除去後に残った信号の立ち上がり時間の分布は，除去前に比べて，立ち上がり時間の長い信号の割合が少ないことがわかる（図-14）。これは，立ち上がり時間の長い信号は，一次電子雲のひろがりが大きく，従って，一般的に反同時計測によるバックグラウンド除去で充分に落とされてしまうからである。信号の立ち上がり時間が，ある値 τ よりも長いものは，バックグラウンドと判断し除去するとした時，この τ を種々変化させたときに， ^{55}Fe ， ^{109}Cd ， ^{60}Co 等からの X 線や γ 線が，どの程度除去されずに残るかを，図-15 に示した。 ^{55}Fe ， ^{109}Cd からの X 線ができるだけ残り， ^{60}Co からの γ 線ができるだけ残らないような τ が，最も効果的な立ち上がり時間によるバックグラウンド除去を可能にする。今回の測定では， ^{55}Fe の X 線は約 95 %，

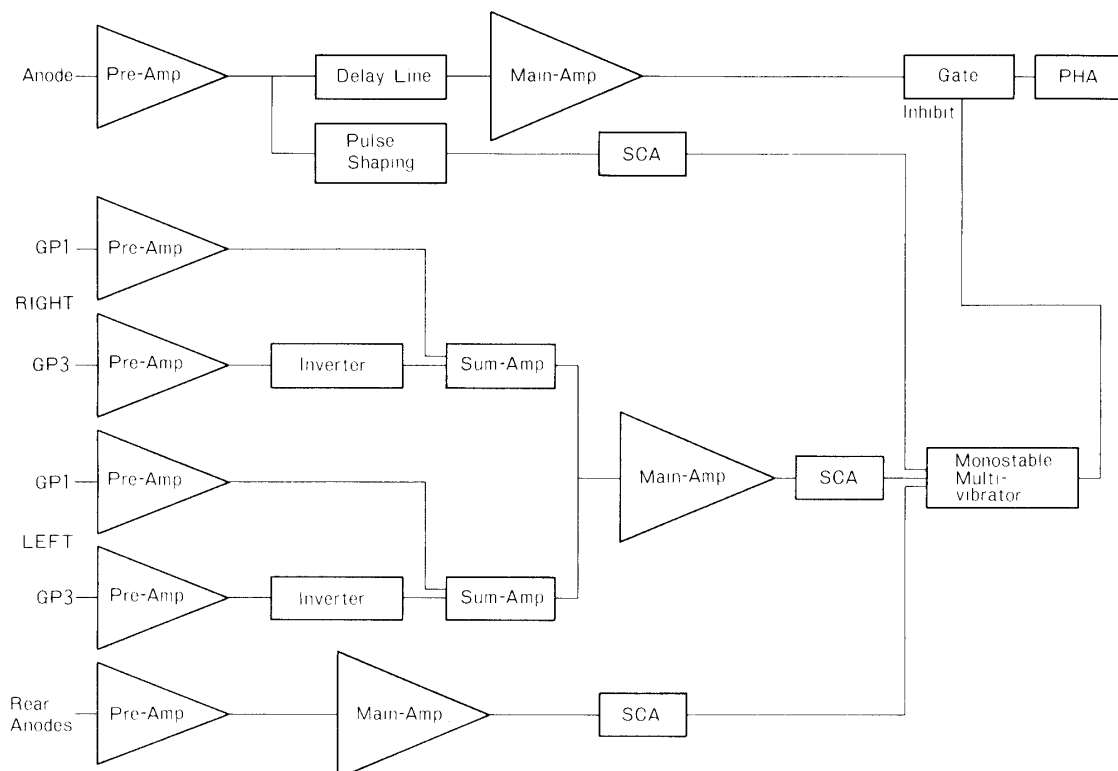
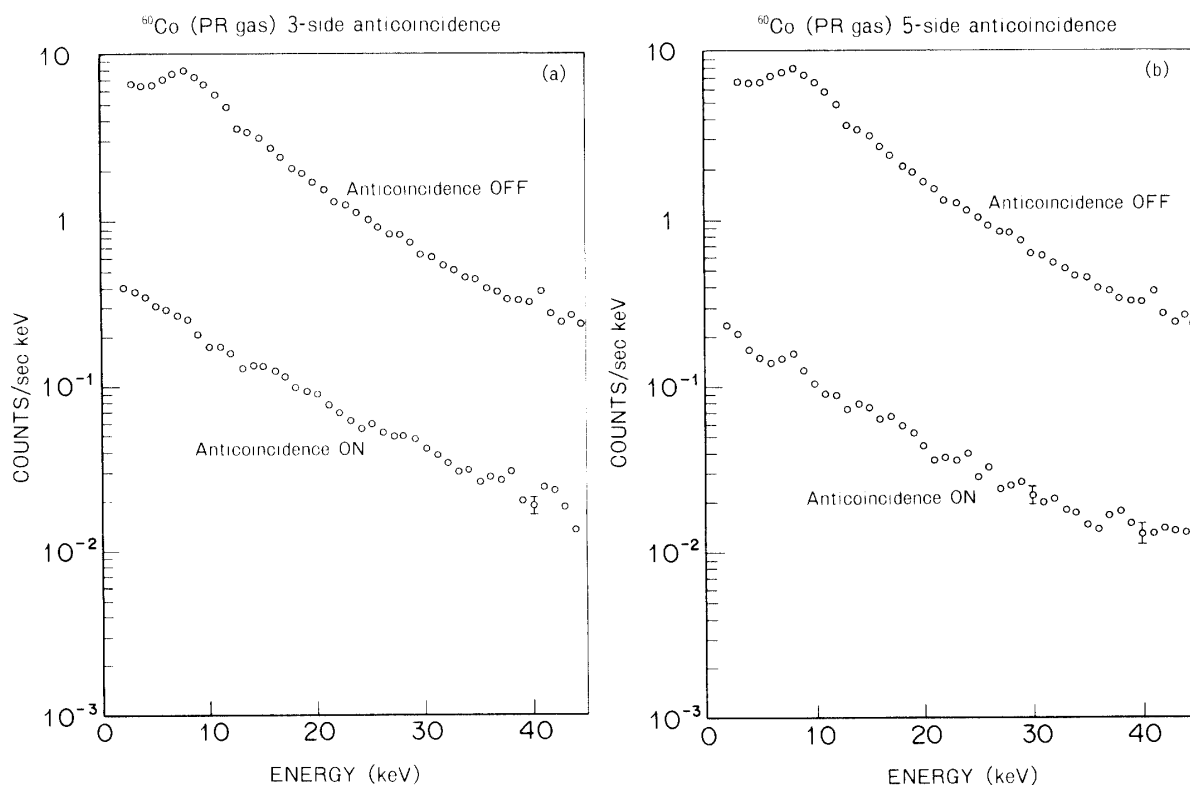


図-16 シングルワイヤー型検出器において，反同時計測と立ち上がり時間を利用して，バックグラウンド除去を行うシステムのブロック図を示す。

^{109}Cd の X 線は約 80 % 除去されずに残り、 ^{60}Co の γ 線は約 91 % まで除去されるような立ち上り時間として、 $\tau=520$ n sec に設定した。

図-16 に、シングルワイヤー型検出器において、反同時計測と立ち上り時間を利用してバックグラウンド除去を行うシステムのブロック図を示す。この図は、マルチワイヤー型検出器の場合と同様に、veto counter, ガードリング, 立ち上り時間を処理した回路で、入射した信号がバックグラウンドであると判断すると、 $40 \mu\text{sec}$ の間はアノードからの信号を処理しないようになっている。図-17, 18 に、このようなシステムを用い、バックグラウンド除去の方式を種々組合わせたときの除去できるバックグラウンドの割合を、 ^{60}Co の γ 線をバックグラウンドとみた場合、及び、実験室内の自然のバックグラウンドについて測定した場合について示す。図-17(a)-(e) は、それぞれの除去方法について、除去前と後の信号のエネルギー分布を、図-18(a)-(e) には、その時のエネルギーによるバックグラウンドの残留率を示す。これらの結果から、立ち上り時間によるバックグラウンド除去を追加することにより、5 keV 以下のバックグラウンド除去率のよくなること、反同時計測によるバックグラウンド除去は、10 keV 前後で最も効率がよく、エネルギーの増加に伴い、徐々にその効率の悪化することなどがわかる。

PR ガスの、それぞれの場合についての、バックグラウンド除去率を表-2 の中央部に示す。シングルワイヤー型検出器に PR ガスを使用した場合に、除去できるバックグラウンドは、 ^{60}Co の γ 線で 98.9 %, 実験室内での自然のバックグラウンドについては 95.3 % であった。



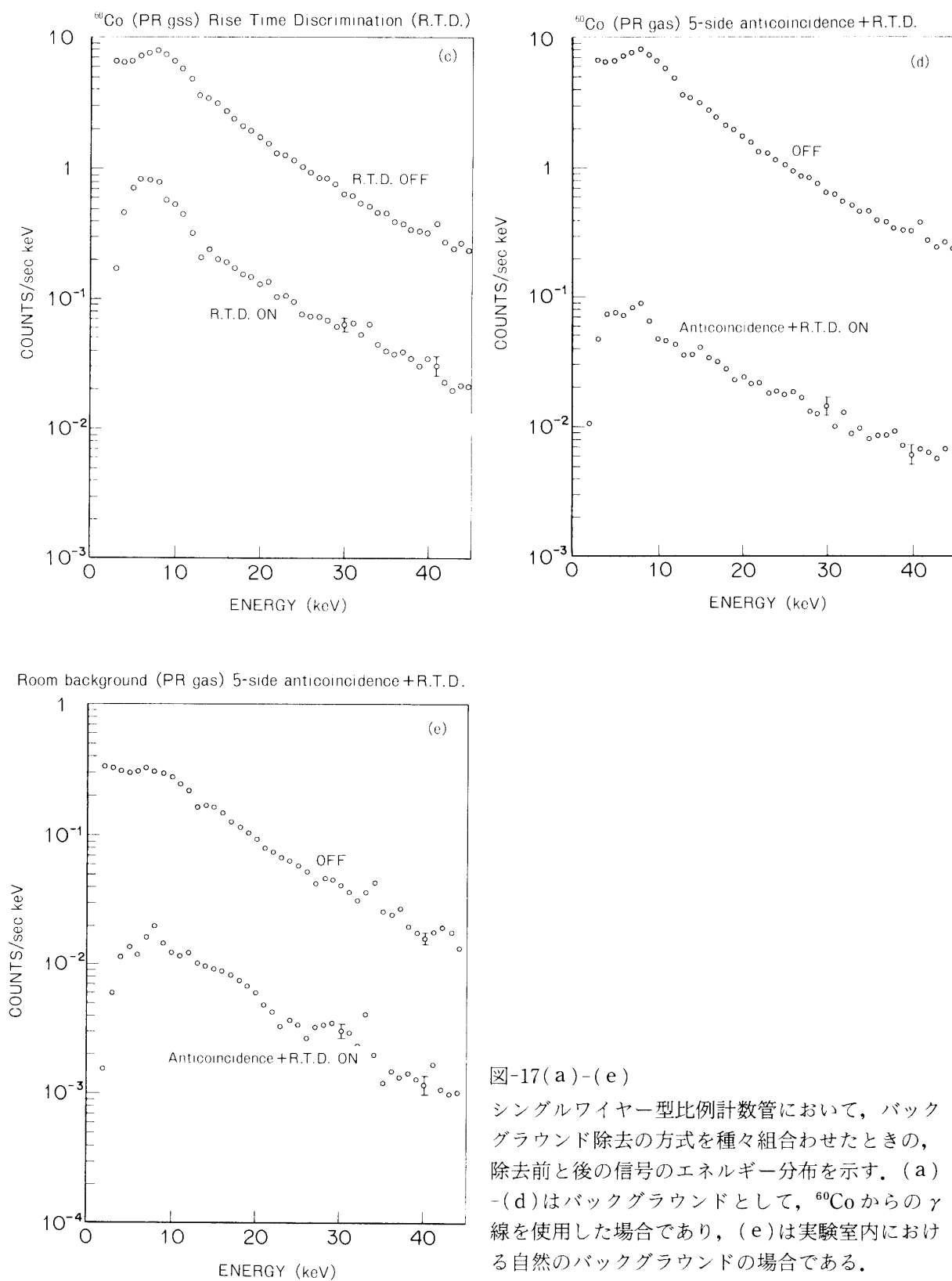
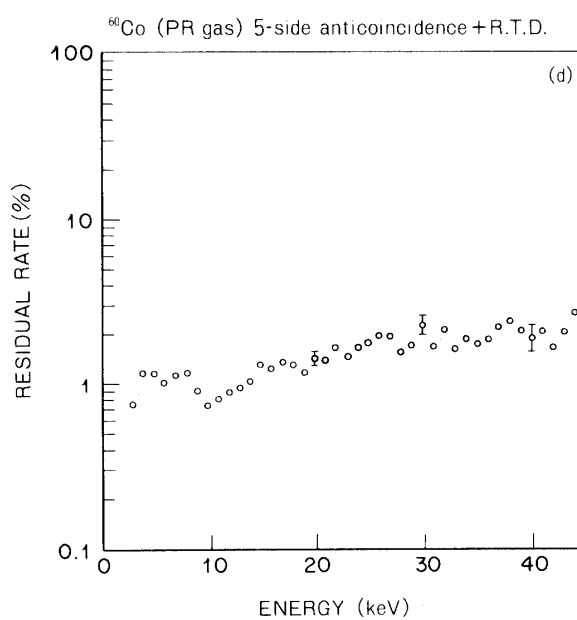
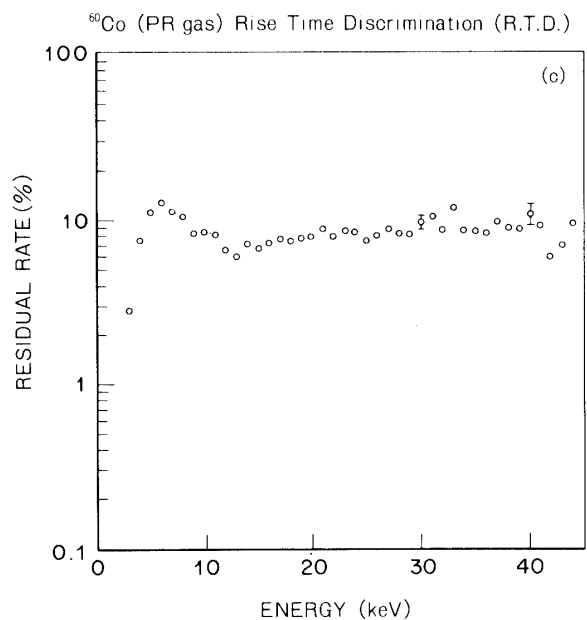
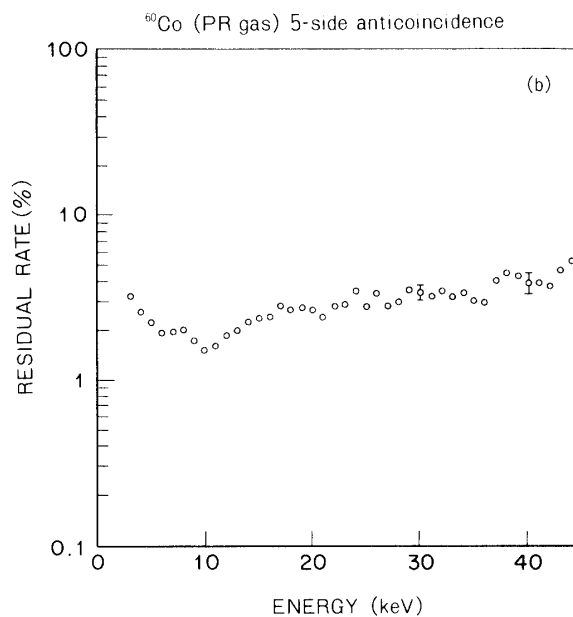
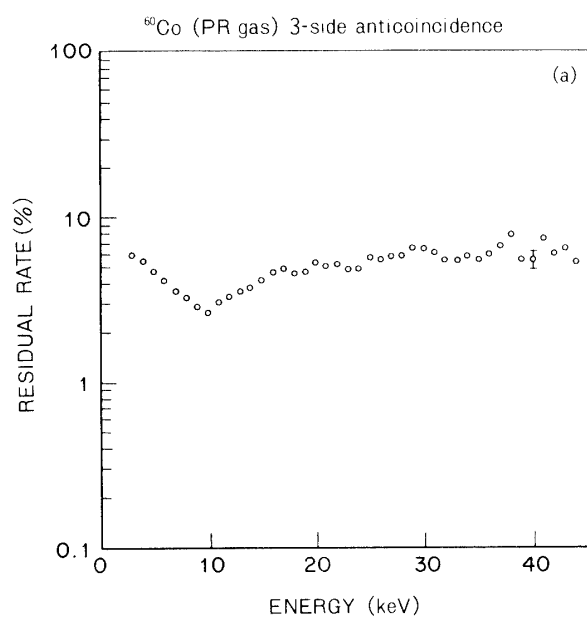


図-17(a)-(e)

シングルワイヤー型比例計数管において、バックグラウンド除去の方式を種々組合わせたときの、除去前と後の信号のエネルギー分布を示す。(a)-(d)はバックグラウンドとして、 ^{60}Co からの γ 線を使用した場合であり、(e)は実験室内における自然のバックグラウンドの場合である。



Room background (PR gas) 5-side anticoincidence + R.T.D.

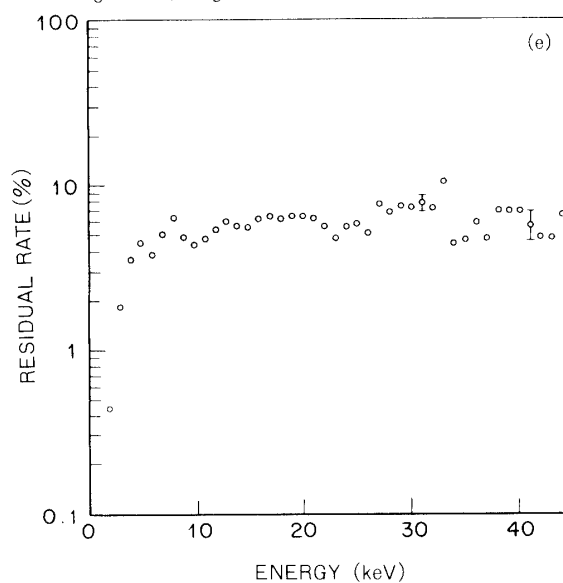


図-18(a)-(e) 同じく、バックグラウンド除去の方式を種々組合わせたときに、除去できずに残るバックグラウンドの割合を示す。

表-2 シングルワイヤー型比例計数管におけるバックグラウンド除去率

	PR gas (1 atm)	Xe (95%) + Co ₂ (5%) (1.1 atm.)
⁶⁰ Coγ線によるシミュレーション		
三面反同時計測	95.9%	83.9%
五面反同時計測	97.7%	90.6%
R. T. D.*	91.5%	81.3%
R. T. D. + 五面反同時計測	98.9%	95.4%
自然（室内）のバックグラウンド		
R. T. D. + 五面反同時計測	95.3%	87.5%
ロケット実験による結果		
三面反同時計測		83.0%
五面反同時計測		94.0 ± 0.5%
R. T. D.		79.2 ± 0.7%
R. T. D. + 五面反同時計測		97.7 ± 0.3%

* : R. T. D.は立ち上り時間を利用したバックグラウンド除去の方法を表わす

3-2-2 Xe ガスでの測定

既述したように、PR ガスを用いた測定結果によって、シングルワイヤー型検出器は、マルチワイヤー型検出器に比べて、優れた特性とバックグラウンド除去効率とを持つことがわかった。PR ガス (Ar 90 %, CH₄ 10 %) は入手しやすく、実験室での測定には便利であるが、10 keV 以上のエネルギーを持つ X 線に対しては、その検出効率が悪い。そこで、高いエネルギー範囲まで検出できるようにするために、Ar ガスよりも原子番号の大きい Xe ガスの使用が考えられる。我々は、PR ガスを使った測定の後、同じシングルワイヤー型検出器に、Xe ガスを封じ込めて、Xe ガスによる検出器の特性を測定した。既述したようなベリリウム膜をもつ検出器本体を真空排気装置に接続し、約 80°C の温度でベーキングしながら、7 日間排気した後、ガス詰めを行なった。この間、窓材であるベリリウム膜が酸化されないように、その部分には乾燥した Ar ガスを流し続けた。ガス封入型検出器を製作する場合には、ガスの封入後に、酸素や水などの不純物が検出器内に出ないようにするために、その内壁面に吸着したものは、充分に取り除く必要がある。そのためには、一般にベーキングする際の温度は高い方が有利である。併し、ハーメチックシールや、真ちゅう製のパイプの接着、及び、密封に使用した接着剤 (Emerson & Cuming 社 Eccobond 51) と、検出器本体の材質であるアルミニウムの熱膨張率の差から、あまり温度を上げると接着部分の剝離が生じ、密封性が失われてしまうことになる。

ガス封入後も、長時間に亘って検出器が安定に動作するためには、検出器内のガスの純度を、充分高く保っておく必要がある。酸素や水などのように、電子を吸着して負イオンになりやすい分子は、入射 X 線によりできた一次電子を吸着するので、実質的には一次電子数が少ないことになってしまい、エネルギー分解能の劣化や、さらには、信号波高の低下をひきおこす。ガスの純度の劣化の原因となるものは、ピンホールなど密封性の不完全さ、及び、内壁面からの脱ガスである。密封性については、ベリリウム膜の酸化防止に注意をはらうと同時に、接着剤を使用する際に、その接着面を充分にやすり、その接着面積を大きくしたり、接着面の洗浄、並びに、接着剤の脱泡を行うなどして、充分な密封性が得られるように努めた。ここで、脱ガスを仰えるためには、真空中で充分ベーキングを行うことだけでなく、それ以前に有機溶剤等による脱脂、アルカリや蒸留水による洗浄、などの充分な処置を検出器内壁に対して行う必要がある。

今回使用した検出器には、Xe ガス 1.056 kg 重/cm² の他に、電子雪崩による紫外線により二次電子が出るのを防ぐためのクエンチングガスとして、CO₂ ガス 0.052 kg 重/cm² を加えた混合ガスを使用した。

図-19 にはアノードに印加する電圧と、⁵⁵Fe, ¹⁰⁹Cd からの X 線 (各々 5.9 keV, 22.1 keV) を照射したときの、前置増幅器出力との関係、及び、二種類の X 線に対する出力信号比を示す。二種類の X 線のエネルギー比は 3.76 倍であるが、実際に測定した出力信号比はこれよりも小さく、ガス増幅率の線型性のくずれていることがわかる。また、このくずれは印加電圧が高くなるにつれて顕著になっている。図-20 には、アノードに印加する電圧に対するこれらの X 線のエネルギー分解能の関係を示す。

以下の測定においては、アノード、リヤアノード、三枚のガードリングにはそれぞれ 1900

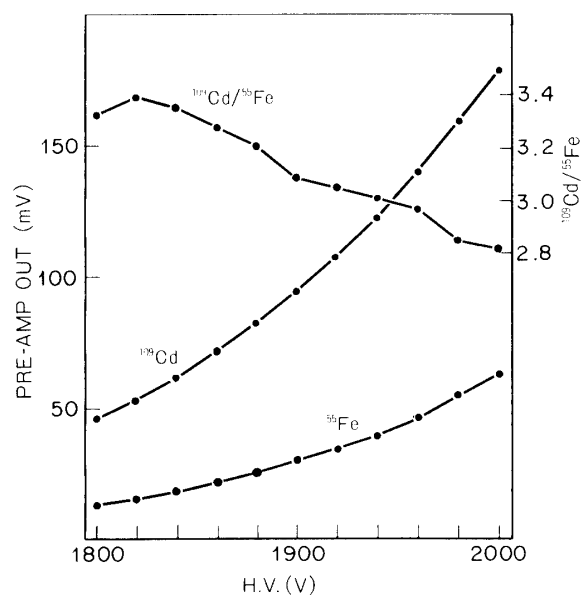


図-19 アノードに印加する電圧と、 ^{55}Fe , ^{109}Cd からの X 線 (各々 5.9 keV, 22.1 keV) を照射したときの前置増幅器出力との関係, 及び, それらの出力信号比を示す. 二種類の X 線のエネルギー比は 3.76 倍であるが, 実際に測定した出力信号比はこれよりも小さい.

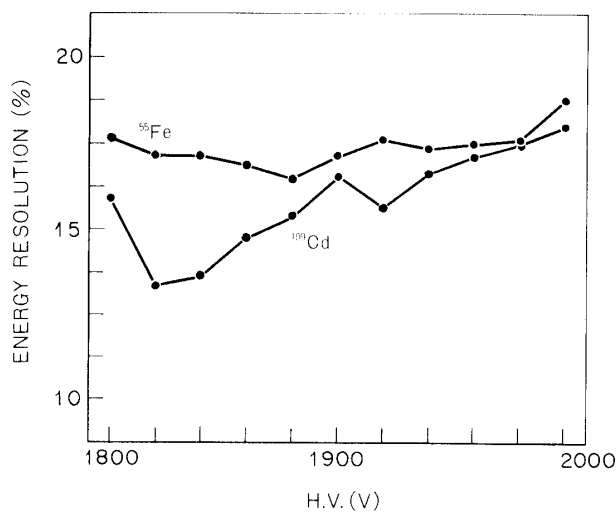


図-20 アノードに印加する電圧に対する, ^{55}Fe , ^{109}Cd からの X 線 (各々 5.9 keV, 22.1 keV) のエネルギー分解能の関係を示す.

V, 2150 V, 650 V, 224 V, 67 V を印加した。図-21 には、5.9 keV の X 線の入射位置に対する信号波高と、エネルギー分解能との関係を示す。この結果から、Xe ガスを使用した場合にも、PR ガスの場合と同様に、ガードリングによる電場の補正がうまく働き、検出器全体にわたり一様なガス増幅率と、エネルギー分解能の得られていることがわかる。

次に、種々の線源を用いて、その信号の立ち上がり時間の測定を行った。図-22 に示すように、 ^{60}Co による γ 線に対する立ち上がり時間の分布は、時間の短い方にピークを持っているが、これは、自然のバックグラウンドに起因するものである。自然のバックグラウンドの立ち上がり時間の分布は、 ^{60}Co からの γ 線の場合と異なり、立ち上がり時間の長い方にはピークを持たず、比較的立ち上がり時間の短い信号が多い。 ^{60}Co からの γ 線を照射して、これに五面反同時計測によるバックグラウンド除去を行った後に残った信号の立ち上がり時間の分布も、やはり短い時間の信号が多く、自然のバックグラウンドに似たものとなっている。

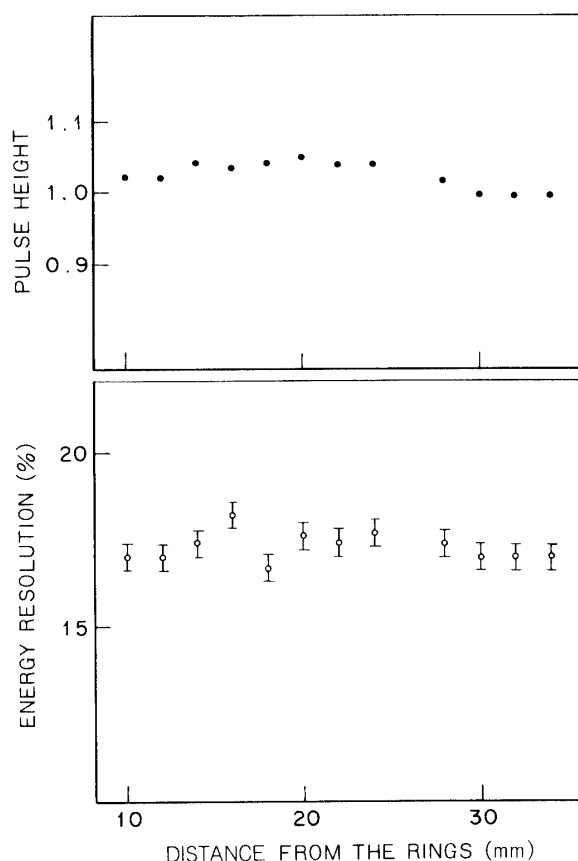


図-21 この図には、Xe ガスを封入した検出器における、5.9 keV の X 線の入射位置に対する信号波高（上図）と、エネルギー分解能（下図）との関係を示す。この結果から、ガードリングによる電場の補正がうまく働いているのがわかる。

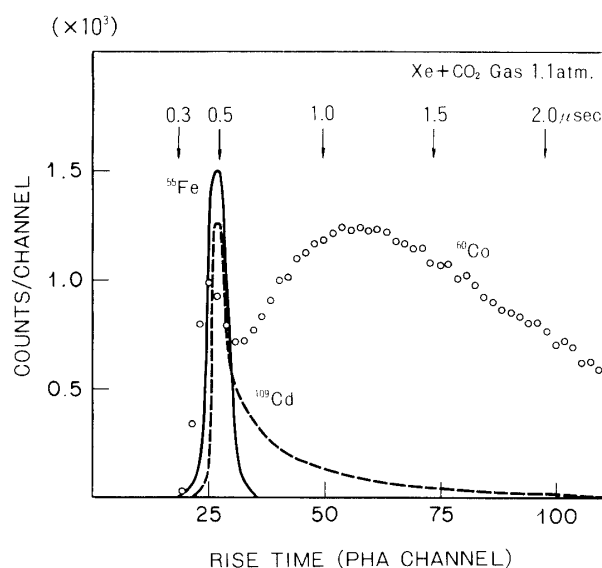


図-22 ^{60}Co による γ 線, ^{55}Fe , ^{109}Cd からの X 線に対する立ち上り時間の分布を示す. ^{60}Co からの γ 線に対する立ち上り時間の分布は, 時間の短い方にもピークを持っているが, これは自然のバックグラウンドに起因するものである.

図-23(a)から図-23(e)には, アノードに印加した電圧と, 5.9 keV, 22.1 keV の X 線からの信号の立ち上り時間の分布との関係を示す. 22.1 keV の X 線に見られる, 立ち上り時間の分布の鋭く立ち上り長い方へ裾を引く様子は, アノードに印加する電圧によってあまり変化しない. ところが, 5.9 keV の X 線を照射した場合に見られる立ち上り時間は, アノードへの印加電圧の低い場合には, 緩やかな分布を示すが, 電圧を上げるに従って 22.1 keV の X 線の場合の分布に近づき, 電圧依存性のあることがわかる. 又, PR ガスを使用した測定において, X 線による信号の立ち上り時間の分布は, 時間の長い方へは裾を引かないが, Xe ガスの場合には裾を引くこと, 5.9 keV と 22.1 keV の X 線に対する立ち上り時間の分布のピークの位置の順序が, ガスにより異なることなど, 検出器に使用するガスにより, 立ち上り時間の分布の様子がかなり違うことがわかる.

アノードに印加する電圧と, 5.9 keV, 22.1 keV の X 線の立ち上り時間の分布におけるピーク値, 及び, それぞれの X 線による信号の 90 %を検出できるように, バックグラウンド除去のための立ち上り時間を設定したときの, 設定時間との関係を図-24 に示す.

Xe ガスと PR ガスとで, 信号の立ち上り時間の分布は, かなり異なる. 以下, この理由について考えよう. 比例計数管内で, X 線がガスに光電効果により吸収されると, その場所に一次電子雲ができる. この電子雲は, アノードに印加された電圧により移動するが, この間に拡散によっても広がる. 前置増幅器の応答時間が充分速ければ, 広がった電子雲による最初の電子雪崩から, 最後の電子雪崩までの時間が, アノードに励起される信号の

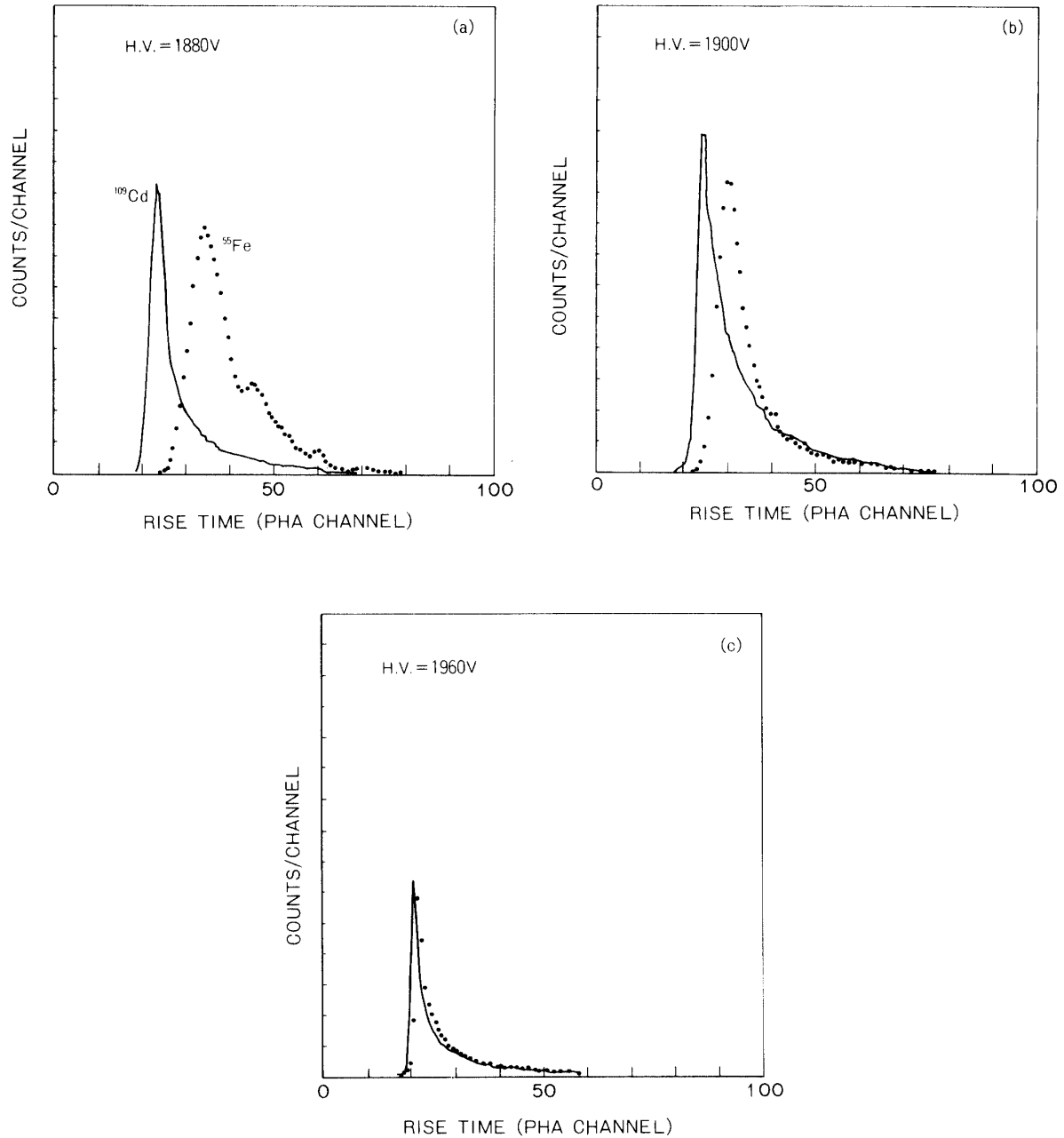


図-23(a)-(c) シングルワイヤー型比例計数管において、アノードに印加した種々の電圧と、5.9 keV, 22.1 keVのX線からの信号の立ち上がり時間の分布との関係を示す。

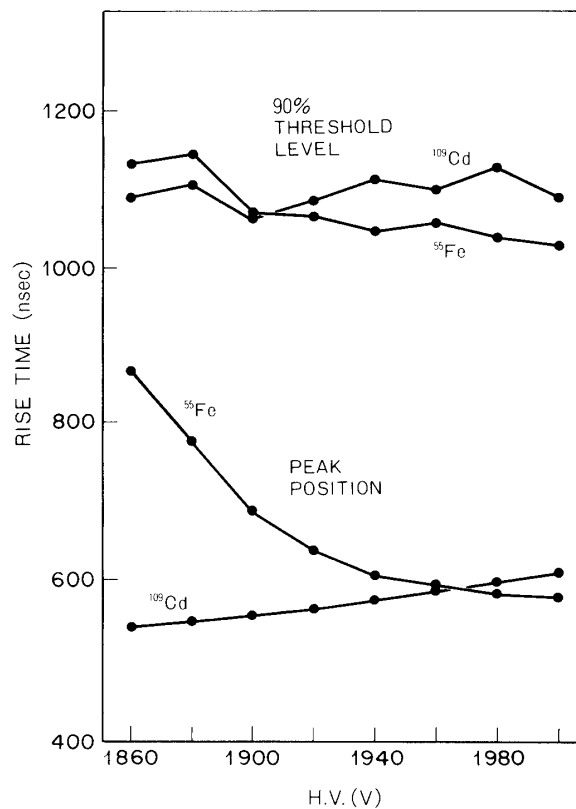


図-24 アノードに印加する電圧と、5.9 keV, 22.1 keV の X 線の立ち上り時間の分布におけるピーク値, 及び, それぞれの X 線による信号の 90 % を検出できるように, 立ち上り時間を設定したときの設定時間との関係を示す。

立ち上り時間となる。これは、X 線の入射位置、アノードに印加する電圧にもよるが、主にガス中での電子の易動度で決まる。今、アノードからの距離 r の点で吸収された X 線により生じた一次電子雲の大きさを x , これが時間 t 後にアノードまで達し、そのときまでに拡散により大きさ s だけ広がるものとする。アノード付近における電子のドリフト速度を V_0 とすると、信号の立ち上り時間 τ は

$$\tau = (x + s) / V_0$$

となる。ここで拡散による広がり s は、電場に平行な電子の拡散係数 D を用いて

$$s = 2(Dt)^{0.5}$$

と表わされ、次の式を得る。

$$\tau = (x + 2(Dt)^{0.5}) / V_0$$

図-25(a), (b)は, PR ガスと Xe+CO₂ ガス中での電子のドリフト速度を, E/p (E は電場の強さ, p はガスの圧力) の関数として表したものである (W. N. English and G. C. Hanna 1953). 使用した検出器を半径 2.5 cm の円柱とみなし, ガス圧力を大気圧とすると, $E/p=0.3/r$ (V/cm/mmHg) と近似することができる. この式を用いて, PR ガスと Xe+CO₂ ガス中での電子のドリフト速度を, 使用した検出器のアノードからの距離 r の関数として図-26(a), (b)に示した. PR ガス中では, アノードからの距離によってドリフト速度はあまり変化しない. そこで, PR ガス中でのドリフト速度を一定値 (5×10^6 cm/sec) とみなし, 電場に平行な電子拡散係数 D (Dutton, 1975) を使用するとすると, 拡散による電子雲の広がり s は

$$s = 1.2 \times 10^{-1} r^{0.5} \text{ cm}$$

となる. 今, かりに $r=2$ cm とすると, $s=0.17$ cm 程度となり, 一次電子雲の広がり (5.9 keV の X 線で 0.7 mm, 22.1 keV のそれで 4.5 mm) に比べて大きくないことがわかる. つまり, PR ガス中では, X 線による信号の立ち上り時間は, 主に一次電子雲の大きさによって決まり, 5.9 keV の X 線に対する信号の立ち上り時間が, 22.1 keV のそれよりも短いという測定結果を説明できる.

一方 Xe ガス中においては, アノードの近傍を除いて, ドリフト速度はアノードからの距離にほぼ反比例して遅くなる. そこで, ドリフト速度 $v(r)=A/r$ ($A=3 \times 10^5$) とすると

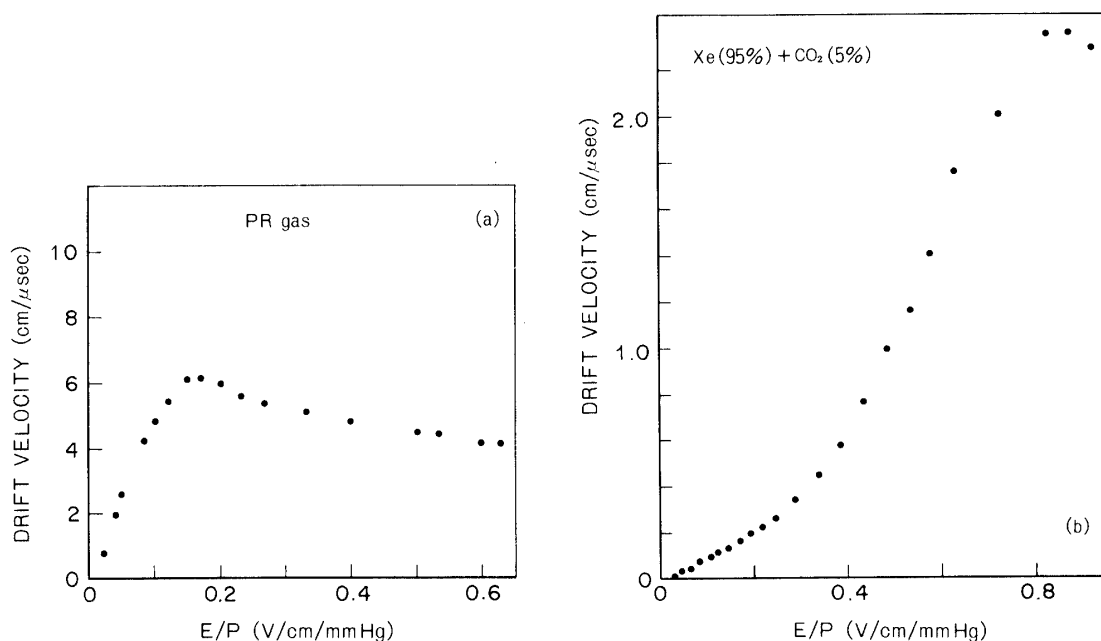


図-25 PR ガス (a) と Xe+CO₂ ガス (b) 中での電子のドリフト速度を, E/p (E は電場の強さ, p はガスの圧力) の関数として表したものの.

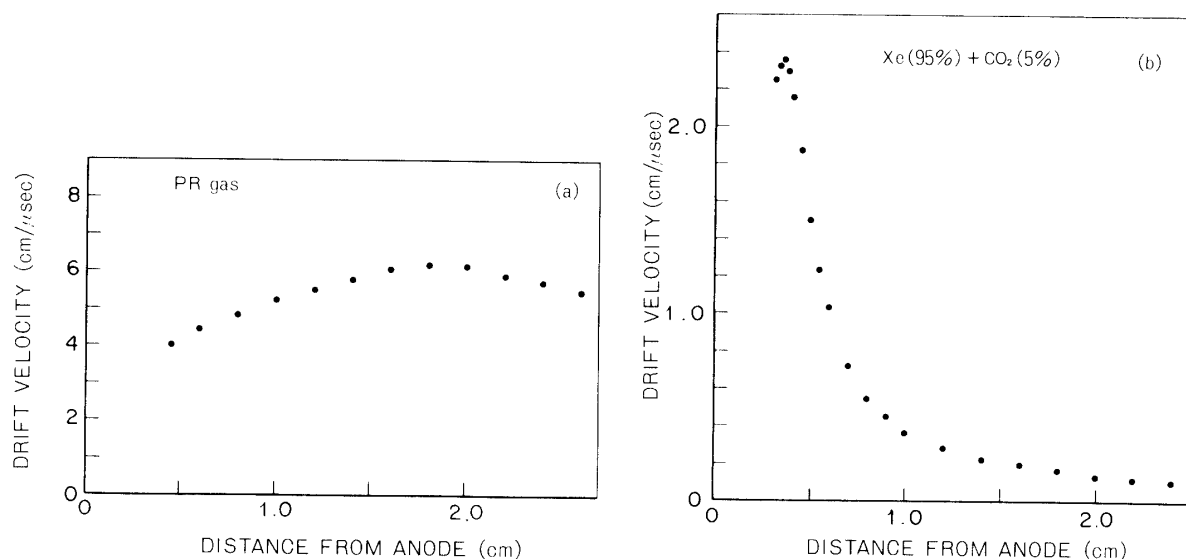


図-26 PR ガス (a) と Xe+CO₂ ガス (b) 中での電子のドリフト速度を、使用した検出器のアノードからの距離 r の関数として示したもの。

$$t = \int_r^0 dr/v(r) = r^2/A$$

$$s = 2(D/A)^{0.5}r$$

となり、Xe ガス中での電場に平行な電子拡散係数 D を使って

$$s = 9.3 \times 10^{-2} r (\text{cm})$$

となる。 s は、PR ガス中で $r^{0.5}$ に比例したのに対して、Xe ガス中では r に比例すること、一次電子雲の大きさは、Xe ガス中では PR ガス中の約 1/2 倍であることから、Xe ガス中の X 線による信号の立ち上り時間は、X 線がガス中で吸収された場所により、PR ガスの場合と比べれば、より大きく変化することがわかる。即ち、その立ち上り時間の分布は、PR ガスの場合に比べると、裾を引いたものになる。一方、Xe ガスを使った検出器に、22.1 keV の X 線を照射した場合には、そのガス中での平均吸収距離(約 5 cm)を考慮すると、検出器中のガスのどの部分においても、等確率で吸収されるとみなせる。又、その時の一次電子雲の大きさ x は約 2 mm である。従って、22.1 keV の X 線による信号の立ち上り時間は、検出器上のどの部分に入射させても、その入射位置による影響をあまり受けず、どこでも一定の形をした分布になる。立ち上り時間の分布に見られる遅い成分は、次のように考えられる。一部、壁やカソードワイヤーの近くの電場の弱い所で吸収された X 線は、その一次電子雲がアノードまでドリフトするのに時間がかかり、従って、拡散による電子雲の広がりも大きくなり、これが立ち上り時間の遅い成分となる。これが、Xe ガスを使っ

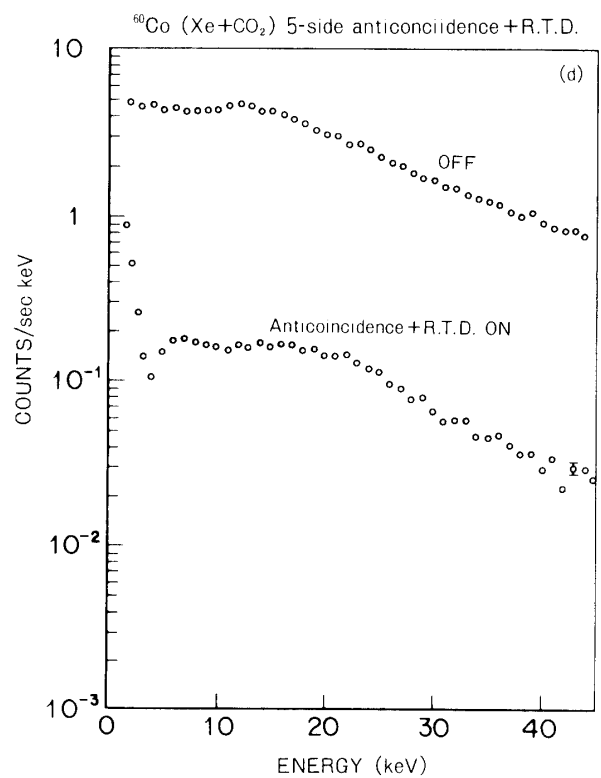
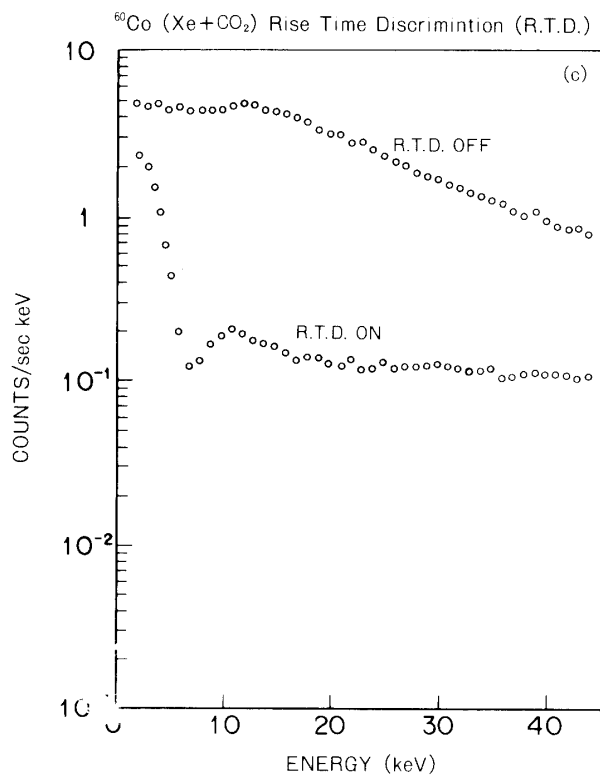
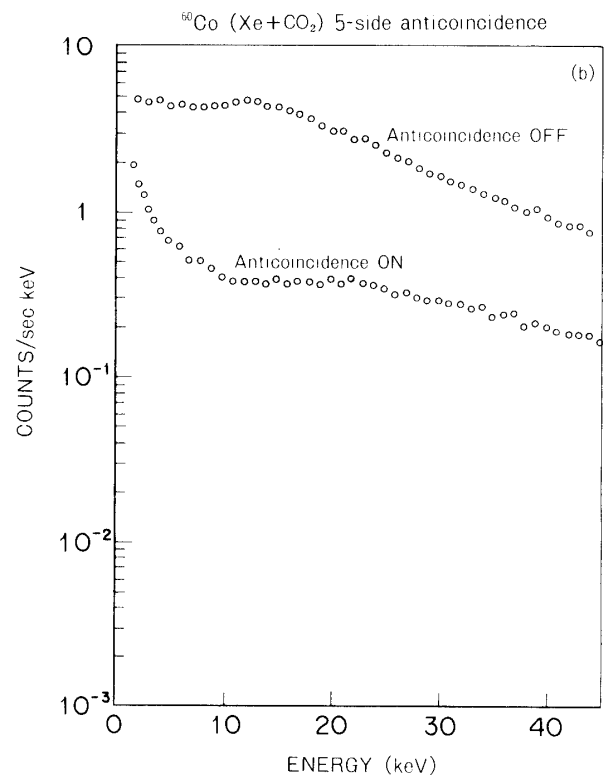
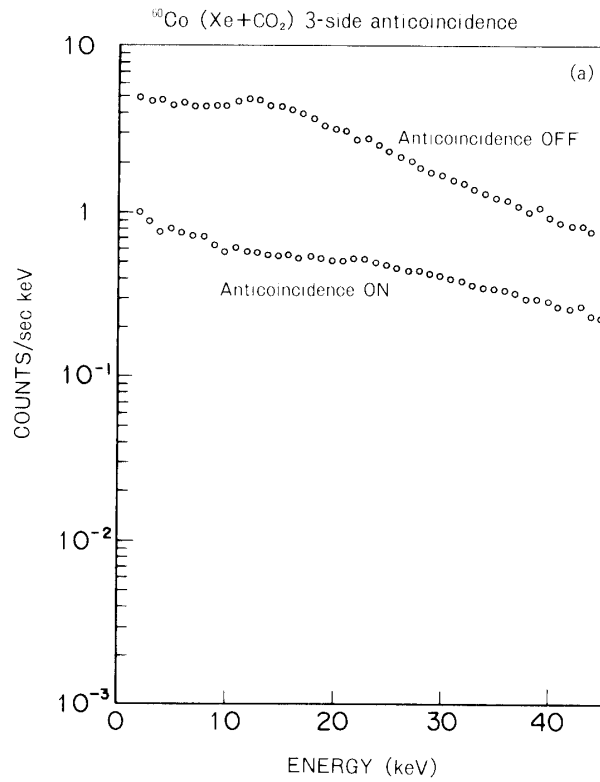
た検出器において、X 線の信号の立ち上り時間の分布が、時間の長い方に裾を引く原因であろう。ところが、5.9 keV の X 線を照射した場合には、その平均吸収距離は 1.9 mm しかないために、その総べての X 線は窓のすぐ近傍、即ち、電場の弱い部分に吸収される。そのために、信号の立ち上り時間は遅くなり、又、アノードに印加する電圧によっても変化しやすくなる。

図-27(a)-(e)及び図-28(a)-(e)には、それぞれ Xe ガス検出器について、バックグラウンド除去の組み合わせをいろいろ変えた時の、バックグラウンドの計数率と、残留率とのエネルギー依存性を示したものである。10 keV 前後において、除去率の良くなっているのは、PR ガスの場合と同様である。一方、エネルギーが数 keV 以下のバックグラウンド信号は、PR ガスの場合、立ち上り時間によるバックグラウンド除去によって大幅に除去できたが、Xe ガスの場合には、これによつてはあまり効率のよいバックグラウンド除去のできていないことがわかる。Xe ガスを使用した検出器内では、電子のドリフト速度が遅いために、 ^{60}Co からの γ 線を照射した時に、前置増幅器から出てくる信号には、1 μsec 程度で立ち上り、前置増幅器で定まる時定数(約 20 μsec)で減衰する正常な信号の他に、いくつかのピークの重った異常なものも多い。このような異常な信号に対して、その立ち上り時間を測定するために、波形整型を行つても、使用した波形解析回路(Pulse Shape Analyser, PSA; Ortec 458)ではうまく立ち上り時間の測定ができず、バックグラウンドとして除去されないものがでてくる。

今回用いた回路では、PSA で処理できる場合でも、その信号波高が大きいと、PSA から立ち上り時間に比例した波高の信号が出て、ゲートを閉じるまでに最大 8 μsec かかるので、アノードからの信号は、10 μsec 程度遅延させなければならない。一方、一つのバックグラウンド信号により、アノードとリヤアノードとに、同時に信号が励起される場合でも、一次電子雲の電子が芯線までドリフトするのに時間がかかり、それぞれの場合にドリフトする距離が異なるために、それらの信号には時間的なズレが生ずる。このズレは、ガス中のドリフト速度で決まり、Xe ガスの場合には最大 20 μsec 程度になる。アノードからの信号は、さらに遅延させてゲートに入るので、ゲートを閉じておく時間が、30 μsec 程度以下であると、リヤアノードからの信号によって閉じられたゲートが再び開き、アノードからの信号が、入ってしまうことにもなる。つまり、このような信号に対しては、反同時計測によるバックグラウンド除去の方法では、除去できないために、Xe ガスを用いた場合には、PR ガスを用いた場合に比べて、ゲートを閉じる時間をかなり長く(40 μsec 程度)しておく必要がある。

表-2 に、シングルワイヤー型検出器において、Xe+CO₂ ガスと PR ガスとを使用した時の、バックグラウンド除去性能の測定結果をまとめておく。バックグラウンド除去に、立ち上り時間だけを利用した場合には、両者にあまり差は見られないが、反同時計測によるバックグラウンド除去を行った場合には、Xe+CO₂ ガスを使用した方が、PR ガスの場合よりも、3-6 倍バックグラウンドの残留率が高くなっている。このことを理解するために、 γ 線が X 線測定におけるバックグラウンドとなる過程を、以下で考察する。

^{60}Co からの γ 線によって、測定したい X 線のエネルギー範囲に、信号を出す確率の最も



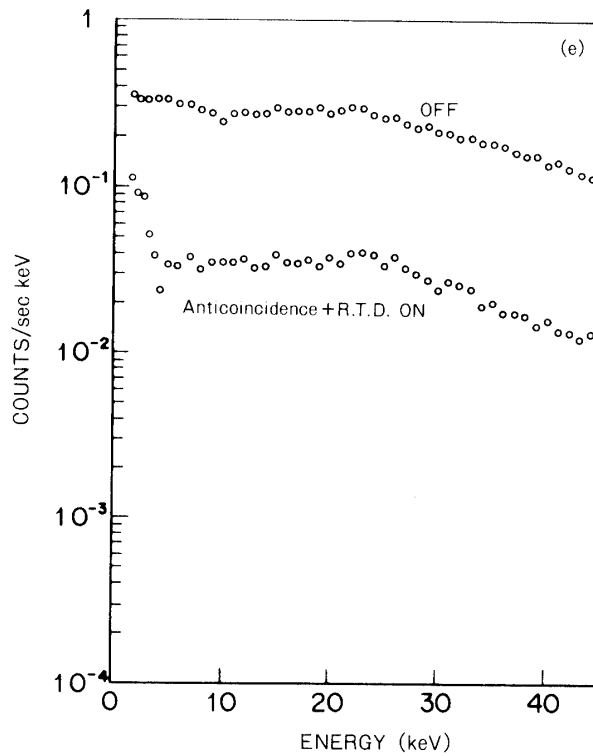
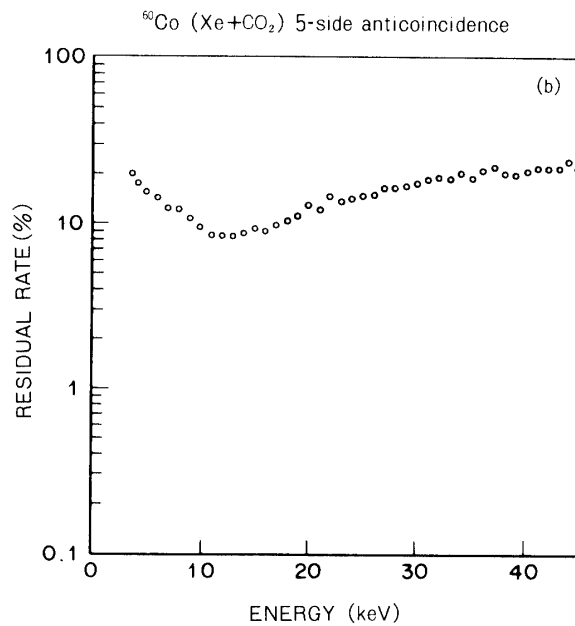
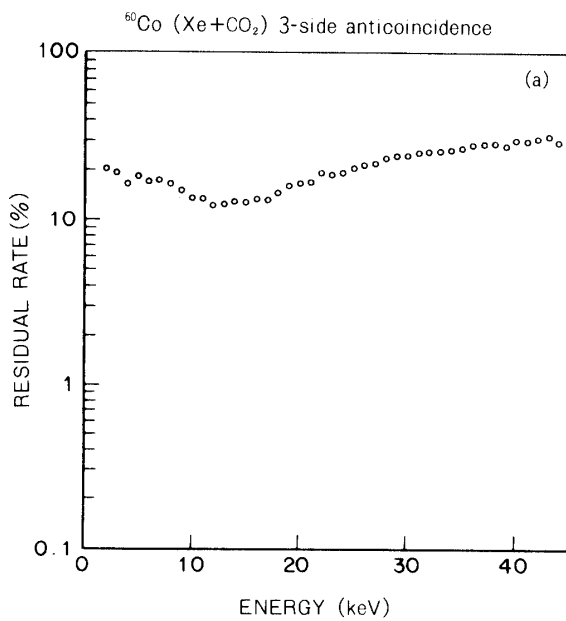
Room background (Xe+CO₂) 5-side anticoincidence + R.T.D.

図-27(a)-(e) Xeガス検出器において、バックグラウンド除去の組み合わせをいろいろ変えた時の、バックグラウンドの計数率のエネルギー依存性を示したもの。



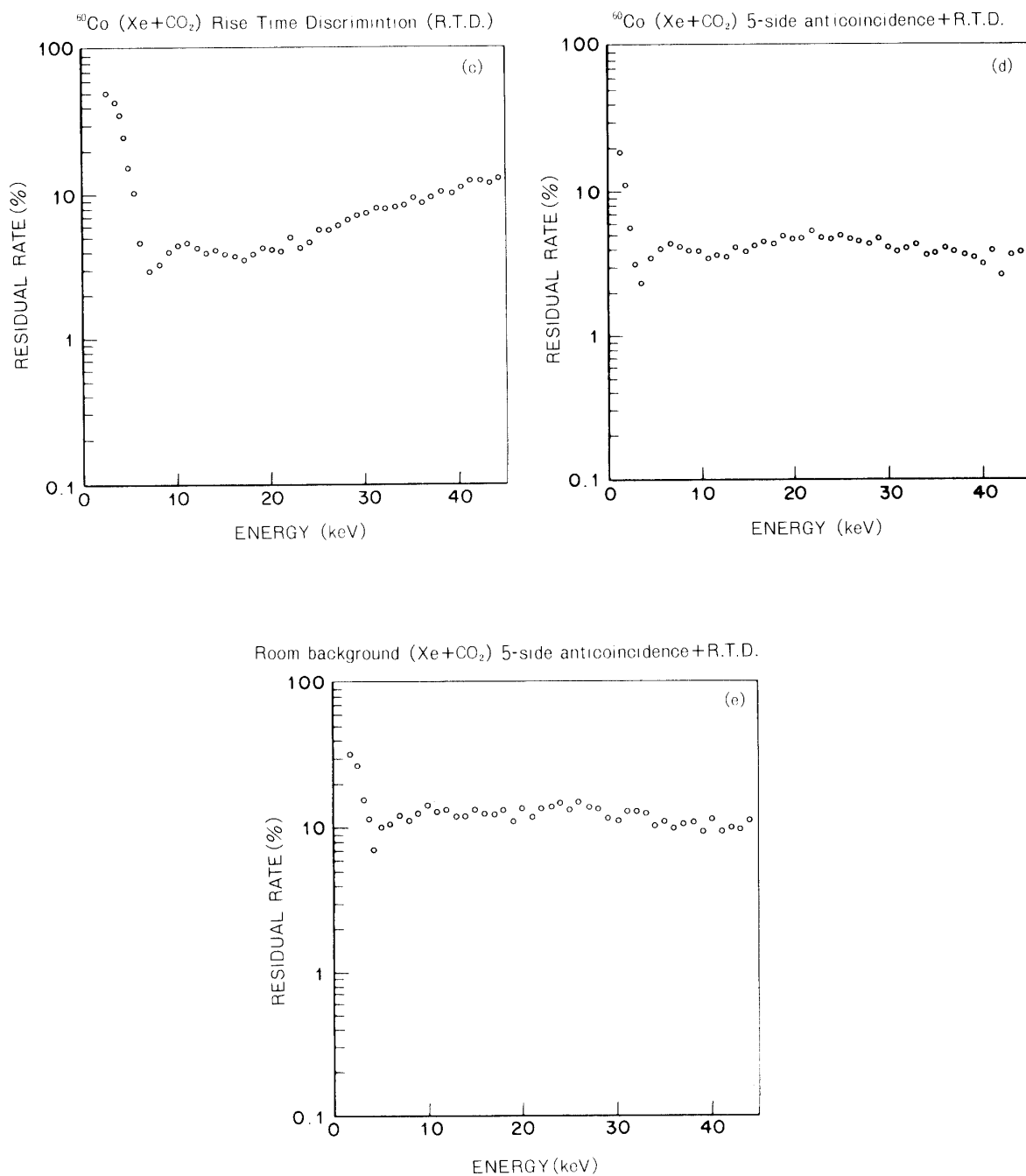


図-28(a)-(e) Xeガス検出器において、バックグラウンド除去の組み合わせをいろいろ変えた時の、バックグラウンドの残留率のエネルギー依存性を示したもの。

大きいのは、 γ 線と検出器本体のアルミニウムとで起こるコンプトン効果により電子の出てくる場合と考えられる。アルミニウム中での、1 MeV の γ 線の平均吸収距離は約 6.2 cm であるので、検出器の壁厚 5 mm の間では、8 % 程度吸収されることになる。このとき、アルミニウム中で γ 線の吸収される割合は、どこでもほぼ一様と考えてよく、その結果、1 MeV 以下のエネルギーを持つ電子が、弾き出されることになる。しかし、1 MeV 程度の運動エネルギーを持った電子の、アルミニウム中での飛程は 1.5 mm 程度であるために、ガスとの境界面から、精々 1.5 mm 以内に作られた電子だけがガス中に飛び出してくる。このようにしてできた電子のうち、エネルギーの大きいもの、或は反同時計測用検出器に接する壁（入射窓側でない壁）から出てくるものは、殆んど反同時計測と立ち上り時間によるバックグラウンド除去の方法により除去されてしまうが、測定領域の X 線と同程度のエネルギーを持った電子で、窓枠あるいはカソードワイヤー表面からガス中に入ったものは、アノードだけに信号を生じるので、反同時計測によるバックグラウンド除去の方法では、X 線と区別することができない。しかし、入射窓側の壁はその殆んどの部分が、ベリリウムの薄膜で覆われていること、窓枠にあるアルミニウムの量は、他の壁に比べると大変少ないことなどから、 γ 線と検出器本体との相互作用で出てくる電子による信号は、殆んど反同時計測によるバックグラウンド除去の方法で除去できると考えてよい。

^{60}Co からの γ 線によって、測定したい X 線のエネルギー範囲に、信号を出す確率で次に大きいのは、 γ 線と検出器内のガス原子とで起こるコンプトン効果によって電子の出てくる場合である。1 MeV の γ 線を散乱する確率は、Xe ガスのほうが PR ガスよりも約 3 倍大きい。このとき、入射した γ 線のエネルギーは、電子の運動エネルギーと散乱光子のエネルギーとに分割される。その分割の比は、散乱角度により決まるが、散乱角度の小さい場合には、電子の運動エネルギーも小さくなり、従って、その運動エネルギーが、測定したい X 線のエネルギー範囲に入ってくる。この時、散乱光子が検出器から脱け出してしまうと、あとに残った電子による信号は、このバックグラウンド除去の方法では X 線と区別することができず、除去できないバックグラウンドになる。即ち、ガス原子との相互作用で生ずる除去できないバックグラウンドの量は、Xe ガスの方が、PR ガスの場合よりも多いことがわかる。

1 MeV の γ 線が、検出器の内壁から 1.5 mm 以内で吸収される確率は約 3 % であり、厚さ約 5 cm のガス中でコンプトン散乱される確率は、PR ガスと Xe ガスとの場合、それぞれ 0.05 %, 0.17 % である。今、上述したように、 γ 線を照射した時に、測定エネルギー範囲の除去できるバックグラウンドとなるものは、総べて検出器内壁の浅い部分で、アルミニウムとコンプトン効果を起こしてできた電子であると考えよう。つまり、 γ 線で、ガス原子とコンプトン効果を起こしてできた電子のうち、測定エネルギー範囲に入ったものは、バックグラウンドとして除去できなかったと考えるわけである。そうすると、 γ 線による信号のうち、バックグラウンドとして除去されずに X 線と判定された割合は、PR ガス、Xe ガスの場合それぞれ、 $0.17/3=5.7\%$ 、 $0.05/3=1.7\%$ 程度になる。

この他、 γ 線とアルミニウム壁との間のコンプトン効果によりできた二次的な X 線で、40-80 keV のエネルギーを持つ X 線が検出器に入ると、PR ガスの場合には検出される確

率は略ゼロであるが、Xe ガスの場合には一部が吸収される。この時、その X 線を吸収した原子からの蛍光 K-X 線 (35.4 keV) が検出器の外に出てしまうと、残った一次電子による信号は測定エネルギー範囲 (0-40 keV) に入るために、これが除去しきれないバックグラウンドとなる。このように、除去しきれないバックグラウンドが、 γ 線に起因した高エネルギー光子と、検出器のガスとの相互作用によるものと考ええると、表-2 の測定結果をかなり説明することができる。

3-3 立ち上り時間の分布

Xe ガスを封入した検出器において、入射 X 線を入射窓に垂直に入れる場合と、そうでない場合とでは、信号の立ち上り時間の分布には差異が生ずる。図-29 に、5.9 keV の X 線における信号の立ち上り時間の分布を示す。これは、コリメータを使い、X 線の入射方向を約 3° に制限して、検出器の入射窓に垂直に入れた場合である。図-22, 図-23, 図-24 等にしてあるのは、入射方向を特に制限しない場合である。同様の差異は、22.1 keV の場合には、5.9 keV の場合よりもかなり小さかった。これから明らかなように、X 線が入射窓に垂直に入ると、立ち上り時間の長い成分の減少することがわかる。この傾向は、エネルギーの低い X 線の方が顕著であることもわかった。これは、次のようにして、定性的に理解できる。

X 線が、入射窓に垂直に入った場合には、傾きを持って入った場合に比べると、一次電子の生成される場所が、窓から遠くなる。窓の近傍に一次電子の出来た場合には、窓の近傍は特に電場が弱いので、その一次電子雲が芯線に達するまでにかかなり時間がかかる。この間に、拡散により電子雲は広がるから、信号の立ち上り時間も長くなることがわかる。この傾向は、当然、ガスに吸収されやすい低エネルギーの X 線の場合には顕著になる。こ

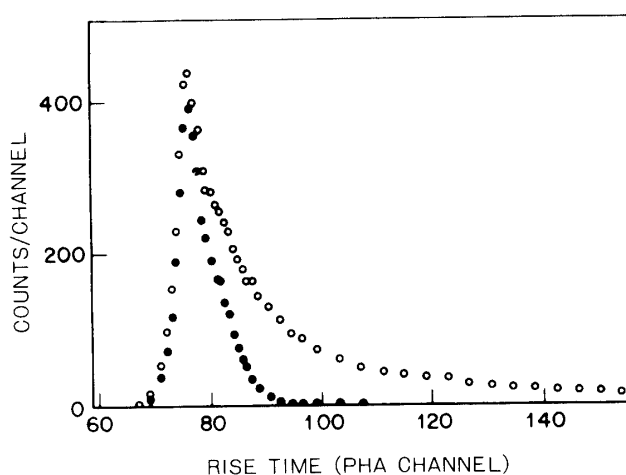


図-29 5.9 keV の X 線を、Xe ガスを封入した比例計数管に入射させた時の、立ち上り時間の分布を示す。入射方向を制限しない場合(○)と、コリメータで入射方向を制限した場合(●)とでは、時間の長い方への裾の引き方が異なっている。22.1 keV X 線の場合には、これほど顕著な差はない。

のことから、立ち上がり時間による X 線と荷電粒子との区別には、エネルギーにより、立ち上がり時間のしきい値を変化させる必要があることになる。次章で述べるロケット実験の場合には、これまでと異なり、コリメータにより、入射 X 線の方向は約 3° 以内に制限されるので、立ち上がり時間によるバックグラウンド除去のしきい値は、そのエネルギーの一次関数であると仮定した (4-6 参照)。

第 4 章 シングルワイヤー型比例計数管のロケット実験

4-1 実験装置

我々の製作した低バックグラウンド比例計数管が、ロケット観測で正常に動作すること、及び、宇宙空間でのバックグラウンド除去率を知ることを目的として、ロケットに搭載できるシステムを製作し、充分な地上実験の後、宇宙科学研究所の観測ロケット K-9 M-77 号機に搭載し、1984 年 1 月 14 日に実験した。我々の実験装置は、GXR と命名されたが、図-10 にはそれに使用したシングルワイヤー型比例計数管の構造を示す。計数管の本体は、アルミニウム製で、外形 $180 \times 90 \times 75 \text{ mm}^3$ 、本体の中央部には Xe ガス (圧力 1.056 kg 重/cm^2) と CO_2 ガス (圧力 0.052 kg 重/cm^2) との混合ガスを満たしたガス室があり、その両側は、高電圧供給部、及び、信号の取り出し口で、真空用の樹脂 (エレクトロンワックス) で充填してある。中央部のガス室は、その一面が $150 \mu\text{m}$ 厚のベリリウム薄膜になっており、ここから X 線が入射する。ベリリウムの薄膜は空気中の水分によりピンホールができてやすいため、この表面に約 $20 \mu\text{m}$ 厚のバックシールを塗り、充分な耐水性を持たせた。搭載した比例計数管の入射 X 線に対する検出効率、低エネルギー側は、入射窓の薄膜による吸収で抑えられ、高エネルギー側は、X 線が検出器内のガスを透過してしまうことにより抑えられる。

既に、第 3 章で述べたように、計数管には、全部で 6 種類の高電圧を印加する必要がある。このうち、リヤアノードに印加する電圧が約 2200 V で最も高く、次いで、アノードに印加する電圧が約 1930 V である。さらに、アノードの両端で、電場を補正するためにつけてある三重のガードリングには、内側から順に、それぞれ 648 V 、 224 V 、 75 V 程度を印加している。

アノードワイヤーからの信号は、一個の前置増幅器に入る (この信号をアノードの信号と呼ぶ) が、アノードワイヤーの周りにある全部で 9 本のリヤアノードワイヤーからの信号は、総べてまとめて一個の前置増幅器で処理される (この信号をリヤアノードの信号と呼ぶ)。左右の三重のガードリングのうち、一番内側と一番外側のリングからの信号は、それぞれ別の前置増幅器に入り、それぞれ必要に応じて減衰させて、信号処理部に送られる。そこで、内側のリングの信号と外側のリングの信号との差をとる (これを左右のガードリングに対応して、それぞれガードプレート 1、及び 2 の信号と呼ぶ)。こうして、検出器から全部で 6 種類の信号が出てくる。

計数管に入射する X 線は、その前に置かれたコリメータにより入射方向が制限される。コリメータは、 0.1 mm 厚のフォトリソグラフィにより製作したステンレススチール製のメッシュと、 1 mm 厚のアルミニウム製のスペーサーとからなる。コリメータは、 113

枚のメッシュと、40枚のスペーサーとからなり、その有効視野は半値幅で $1.5 \times 1.5 \text{ deg}^2$ である。コリメーターと入射窓とにより決まる最大有効面積は 27 cm^2 である。コリメーターで制限される方向以外からは、X線が入射できないように、計数管のまわりは、総べて0.3 mm 厚の鉛板で覆った。計数管の背面下部には、小さい穴を鉛板に明け、ここに較正用線源として ^{109}Cd をリヤアノードにだけ照射した。これにより、比例計数管のガス増幅率を、常時モニターすることができる。 $^{109}\text{Cd}(22.1 \text{ keV})$ の X 線強度は、リヤアノードで 11 カウント毎秒、アノードでは全く照射されていない (0.03 カウント毎秒以下) ことを確認した。

計数管本体の背面部には、前置増幅器のケースがある。この中に、6個の電荷感应型前置増幅器があり、アノード、リヤアノード、及び左右のガードリングから、それぞれ2個の信号が、それぞれの前置増幅器に入る。前置増幅器をでた信号は、計数管下部に置かれた信号処理部に送られる。信号処理部での信号処理の方法を、図-30 にブロックダイアグラムで示す。すべての信号は、Lower Discr level (LD と呼ぶ) で下限が、Upper Discr level (UD と呼ぶ) で上限が、表-3 のように決められる。この範囲に入った信号だけが、詳しく処理されるわけである。即ち、アノードから来た信号で、その波高が 1-40 keV に相当するものは、その波高 (パルスハイト) および信号の立ち上り時間 (ライズタイム) を波高に変換したものを、Amalog to Digital Converter (ADC) に入れ、64 チャンネル (6 ビット) のデータに変換する (立ち上り時間は、0-2 $\mu \text{ sec}$ の間を、64 チャンネルに変換する)。

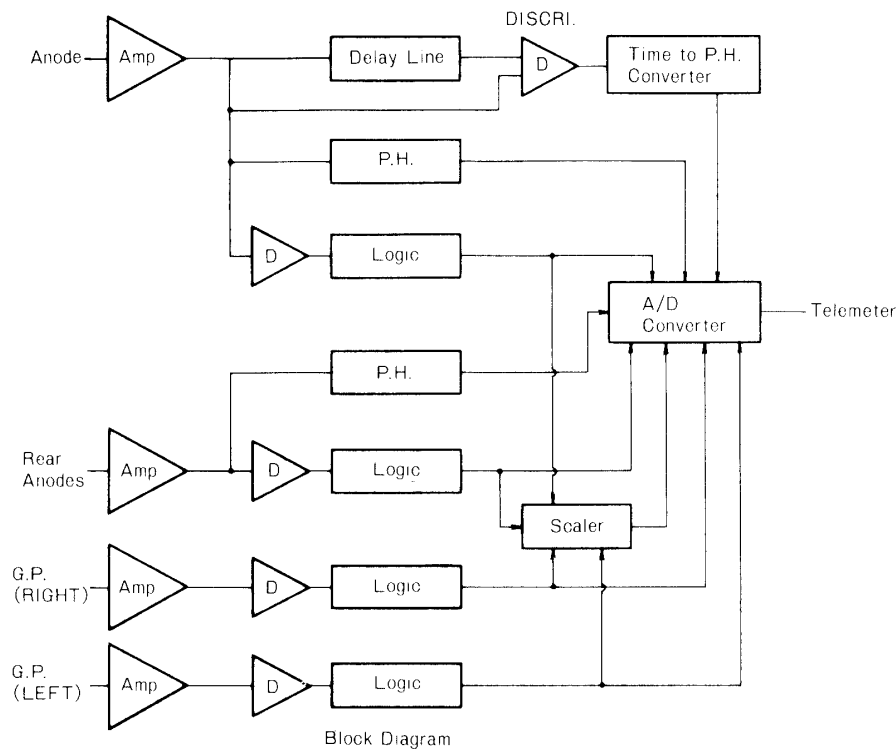


図-30 観測ロケット K-9 M-77 号機に搭載した、GXR の信号処理部のブロックダイアグラム。

表-3 各種信号の処理レベル

信号レベル名	前置増幅器レベル	コ メ ン ト
Anode LD	11 mV	入射 X 線エネルギーで約 1.5 keV に対応する
Anode UD	190 mV	入射 X 線エネルギーで約 40 keV に対応する
Rear LD	10 mV	入射 X 線エネルギーで約 1 keV に対応する
Rear UD	220 mV	入射 X 線エネルギーで約 50 keV に対応する
Guard P-1 LD	3.1 mV	Guard Plate-1 から 6 mm を Veto とするために設定
Guard P-1 UD	11.9 mV	Guard Plate-1 の働きをモニターするため
Guard P-2 LD	3.2 mV	Guard Plate-2 から 6 mm を Veto とするために設定
Guard P-2 UD	12.5 mV	Guard Plate-2 の働きをモニターするため

リヤアノードからの信号で、その大きさが 1-50 keV に相当するものは、その波高だけが 64 チャンネルのデータに変換される。

リヤアノード、及び、アノードからの信号は、あわせて 2.5 ミリ秒毎に一個しか処理できない。これは、後に述べるように、テレメーターに割り当てられたデータの伝送量で決まる。アノード、及び、リヤアノードの両者からほとんど同時 (40 μ sec 以内の同時性) に信号が来た時には、アノードからの信号を優先して処理する。この時、処理する信号と同時に (前後 40 μ sec 以内の同時性) に、他の信号 (リヤアノード及び左右のガードプレートからの信号) があったかどうかを判定し、もしあれば、どの信号であったかをも判別する。つまり、検出器内に突入する荷電粒子のように、アノード、リヤアノードの両方から信号を出す場合には、必ずアノードでの信号の波高、及び立ち上り時間を測定するようになっている。アノード、リヤアノードのどちらからでも、入った信号は必ず二回 ADC で処理されるために、一個の信号の処理時間は約 60 μ sec かかる。この他、処理速度の関係で、処理しきれない信号、あるいは、処理範囲を越えるような大信号、さらにはガードプレートからの信号などは、夫々別の計数回路で数え、4 ビットスケララーのデータとする。信号処理部には全部で 12 種類の計数回路があり、検出器に入射した X 線の信号は、どこに入っても、総べて何らかの形で処理されると考えてよい。

この他、信号処理部では、比例計数管に供給する高電圧装置を制御するとともに、高電圧部の出力のモニターも行なう。高電圧部は、約 2400 V の電圧を比例計数管に印加するが、印加する電圧 1600-3200 V に対応して、0-5 V のモニター電圧を作り、これをテレメーターに送る。これにより、高圧電源の小さな変動も知ることができた。信号処理部は、以上の各種信号を処理し、決められた順序等に並べ換えてテレメータに送る。ロケットには、その位置を測定するためにレーダーが搭載されており、これから 2.5 μ sec 幅のパルス信号が毎秒 200 回発射される。この時の瞬間出力は約 100 W であり、これは、電気信号処理回路に影響を与える可能性が強い。そこで、パルス発生の時刻信号をレーダー回路からもらい、パルス発生の前後約 60 μ sec の間、信号処理回路が動作し始めないようにした。結局、我々の観測装置 GXR に搭載した信号処理回路での不感時間は、ADC の動作時間と、レーダーによるものとがある。

4-2 テレメーターフォーマット

この観測ロケットに使用されたテレメーターは、Hybrid telemeter と呼ばれるもので、FM データ（アナログ量）として 14 種類（ch-2 から ch-15 まで）、PCM データ（デジタル量）としては、20 キロビット毎秒のデータ伝送能力を持つ。GXR からのデータは、表-4 に示したように、FM データとして、3, 9, 10, 11, 12 の 5 個のチャンネルを使い、PCM データとして、8 キロビット毎秒分を使用した。FM データには、表-4 に示すように高電圧装置のモニター出力を ch-3 に、他のチャンネルには 4 種類の信号の計数を 8 ビットスケール（up down counter）で数え、これを 8 ビット Digital to Analog Converter で 0-5 V の電圧に変換して出力した。

表-4 K-9 M-77 号機に搭載した GXR 関係のテレメーターフォーマットの内容
FM データの内容（GXR 関係分）

channel 3	GXR に供給する高電圧（2200 V 程度）を 3 V 程度に減衰させてモニター アノードだけから来た（X 線とみなせる）信号を計数する ガードプレート 1 から来た信号を計数する アノードから来た総べての信号を計数する リヤアノードから来た信号を計数する（校正線源のモニター）
channel 9	
channel 10	
channel 11	
channel 12	

PCM テレメータ(テレメーター)フォーマット（各列は 1 minor frame＝32 bit に相当）																					
bit	0	1	2	3	...	12	14	16	18	20	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	
minor frame	GIR etc.										パルス波高						同定信号				
	GIR etc.										立ち上り時間						計数率				
	GIR etc.										パルス波高						同定信号				
	GIR etc.										立ち上り時間						計数率				
	GIR etc.										パルス波高						同定信号				
	GIR etc.										立ち上り時間						計数率				

FM データは、PCM データに比べると、後処理はめんどうであるが、データの変化を最も早く認識できるので、搭載機器の様子を全体的に把握するのに最適である。そこで、つぎの 4 種類の信号を選んだ。即ち、アノード、リヤアノード、ガードプレート 1 の、それぞれ LD を越えた信号数、及びアノードだけにパルスが入り、他からは信号のなかったもの（X 線によると思われるもの）の信号数を、それぞれの FM チャンネルに出力した。こうして、FM のデータを見るだけで、大体の検出器の様子を知ることができた。

PCM データは、FM データに比べると、複雑なデータを送ることができるが、データの内容をただちに認識することは困難である。そのため、次に述べるようなマイクロコンピュータを利用した地上系のデータ解析装置を作り、PCM データも直ちに CRT ディスプレイ上に表示することができるようにした。GXR に割り当てられた PCM のデータ量では、40 ミリ秒毎に、全部で 20 ビット×16 個のデータを送ることができるので、20 ビット

の内、6 ビットを波高に、別の 6 ビットを信号の立ち上り時間に、4 ビットを異なる信号間の同時性を知るための同定信号に使用した。但し、アノードからの信号については波高、立ち上り時間、同定信号には、それぞれの意味があるが、リヤアノードからの信号については、波高しか測定していないので、立ち上り時間についてのデータは、波高のそれと同じである。これは、アノードとリヤアノードとに同時に信号が入った場合には、必ずアノードの信号が優先的に処理され、リヤアノードからの信号は、反同時計測によるバックグラウンド除去に利用されるだけであること、リヤアノードからの信号で、アノードとの同時性のないものは、較正用線源からの信号であるとみなしてよく、つまりその波高がわかれば充分であること、などの理由からである。こうして、40 ミリ秒毎に、アノード及びリヤアノードからの信号をあわせて 16 個まで処理することができた。即ち、この方法では毎秒 400 個の信号が処理できることになる。残りの部分には、全部で 12 種類の計数率を計れるように、4 ビットスケalerからの出力を順に入れた。表-5 に 4 ビットスケalerで計測した信号の種類、及び、実際に測定したデータから計数率を求めて示しておく。このようにして、検出器からの出力信号はほとんど総べて、テレメーターを通して、知ることができた。

表-5 各スケaler毎の一秒当りの計数率

スケalerの名称	打ち上げ前	開頭前*	開頭後の平均
Anode LD 以上	7.90 ± 0.16	24.60 ± 1.11	27.10 ± 0.26
Anode UD 以上	3.05 ± 0.10	11.67 ± 0.76	12.32 ± 0.18
Rear LD 以上	19.98 ± 0.26	41.07 ± 1.43	45.29 ± 0.34
Rear UD 以上	1.77 ± 0.08	6.40 ± 0.57	8.09 ± 0.14
Guard Plate 1 LD 以上	5.28 ± 0.15	17.20 ± 0.93	** 30.84 ± 0.28
Guard Plate 1 UD 以上	1.45 ± 0.08	5.00 ± 0.50	6.29 ± 0.13
Guard Plate 2 LD 以上	5.43 ± 0.15	17.47 ± 0.93	20.22 ± 0.22
Guard Plate 2 UD 以上	1.46 ± 0.08	6.00 ± 0.55	6.50 ± 0.13
Anode and Rear	4.89 ± 0.13	20.40 ± 1.01	21.84 ± 0.23
Anode and Guard P-1	1.81 ± 0.08	5.53 ± 0.53	6.59 ± 0.13
Anode and Guard P-2	1.62 ± 0.07	5.20 ± 0.51	5.88 ± 0.12
Rear and Guard P-2	1.08 ± 0.06	4.53 ± 0.48	4.68 ± 0.11

* 打ち上げ後 50 秒から 70 秒までのデータから求めた。

** 開頭後から着水までの 400 秒間に約 20 counts/sec から約 40 counts/sec に暫増した。

4-3 地上系信号処理装置

前述したように、PCM データは、複雑なデータを送ることができるが、FM データのように簡単には内容を知ることができない。そこで、我々は、マイクロコンピュータを使用した地上系信号処理装置を製作した。この装置は、受信機からのデジタル信号を解読するだけでなく、観測装置をロケットに搭載するまえの地上で行う各種の試験では、GXR にテレメーターから送られてくる各種の信号や、必要な電力を供給し、GXR からの信号を受

け取り, その入力信号の波高分布や, 立ち上り時間の分布, 校正用線源によるリヤアノードからの信号の波高分布, さらには 12 種類の信号の計数率などを, CRT ディスプレイ上に表示することができる. こうして取得したデータは, すべて, 自動的にフロッピーディスクに格納するようにした.

この装置により, 我々は, 打ち上げ前に, 各種の X 線を照射して観測装置の特性を調べた. 用いた X 線は, 放射性同位体である ^{55}Fe (5.9 keV), ^{109}Cd (22.1 keV) からの X 線及び, これらの線源を使って得た特性 X 線 C1-K (2.4 keV), Cu-K (8.1 keV) 及び Pb-L (12 keV) である. これらの X 線により, 検出器の入射 X 線エネルギーに対する直線性, 信号の立ち上り時間分布などを調べた例を図-31 に示す. この他に, ^{60}Co を利用して, γ 線に対する波

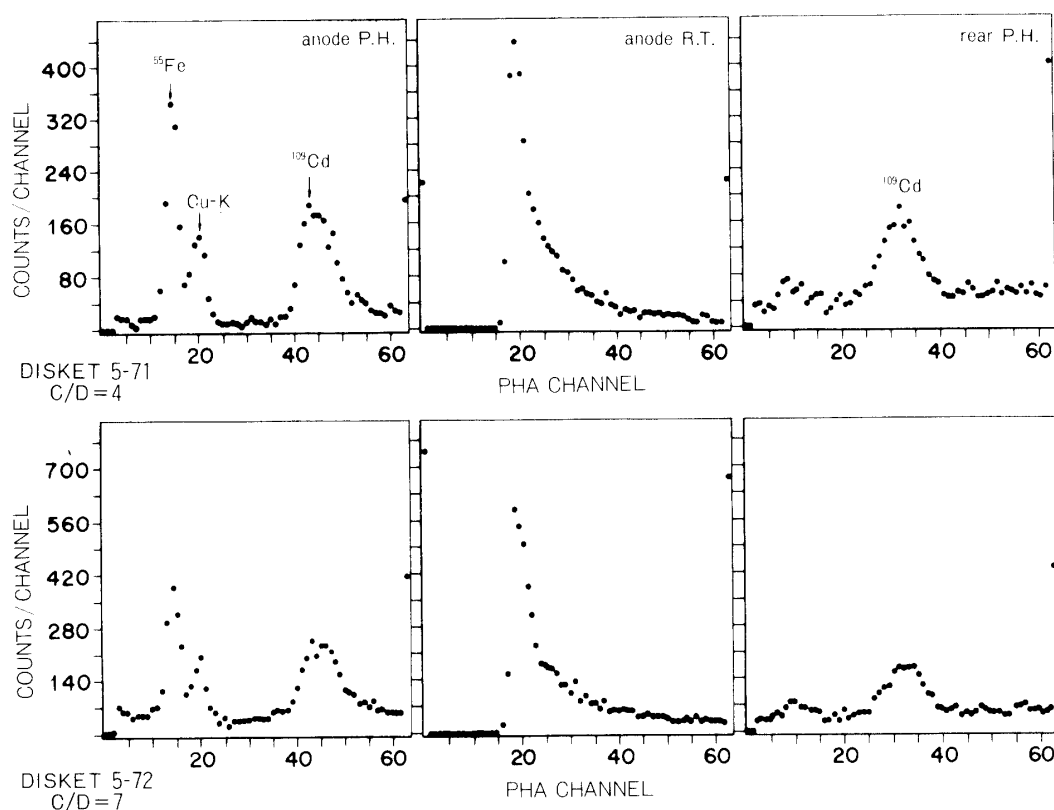


図-31 観測ロケットに搭載した比例計数管を使って得た種々の X 線 Mn-K (5.9 keV), Cu-K (8.04 keV) 及び Ag-K (22.1 keV) に対する測定結果. 左図はアノードの信号の波高分布で, 三個のピークが見えている. 中央の図は, 左図に対応するアノードの信号の立ち上り時間の分布, 右図はリヤアノードの信号の波高分布で, 校正線源 (^{109}Cd からの 22.1 keV の X 線) からのピークが見えている. それぞれの図は, いずれも 64 チャンネルのデータからなる. 上段の三個の図のうち, アノードからの信号については, 反同時計測によるバックグラウンド除去を行った場合で, 下段のそれは行わない場合の測定結果を示す.

高分布や、立ち上り時間の分布を測定した。図-32 に示すように、X 線と γ 線に対しては、その立ち上り時間の分布の全く異なることがわかる。これとは別に、自然のバックグラウンドの測定なども行い、図-33 のような結果を得た。このような特性試験を、大気中だけでなく、装置全体を真空槽の中に入れて、大気圧から宇宙環境に至るまでの気圧変動を与えて、いろいろな状況におけるデータを収集した。こうして打ち上げ前には、我々の製作した X 線検出器が、これまでになくよい性能を持っていることを確認した。

さらに、打ち上げ時には、受信機からの信号を直接我々の地上系信号処理装置に入れ、実時間で GXR の動作をモニターすることができた。

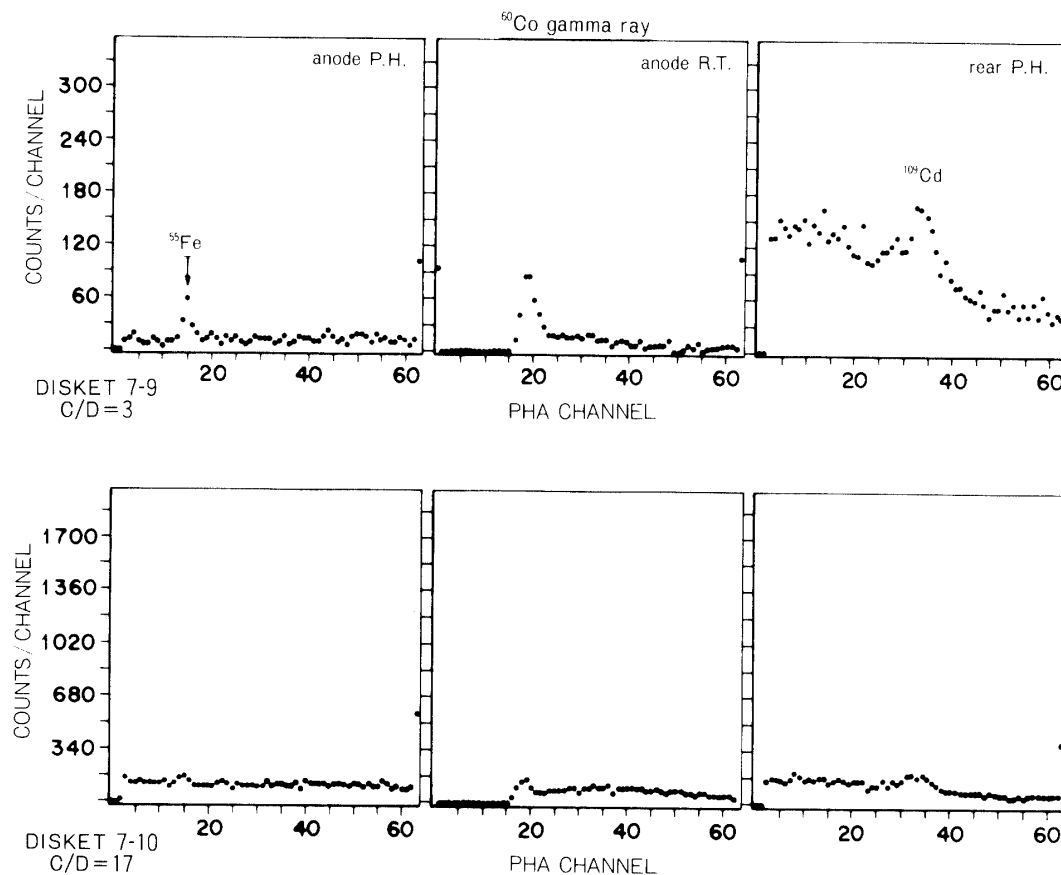


図-32 観測ロケットに搭載した比例計数管を使って得た、 ^{60}Co の γ 線に対する波高分布、立ち上り時間の分布を示す。図の説明は図-31 と同じ。弱い ^{55}Fe からの X 線をアノードに照射しているので、反同時計測によるバックグラウンド除去を行った場合 (上段) には、X 線によるピークが、波高分布と立ち上り時間の分布に見える。リヤアノードに照射している較正用線源 (^{109}Cd) からの X 線は、殆んど γ 線による信号に埋もれてしまっている。

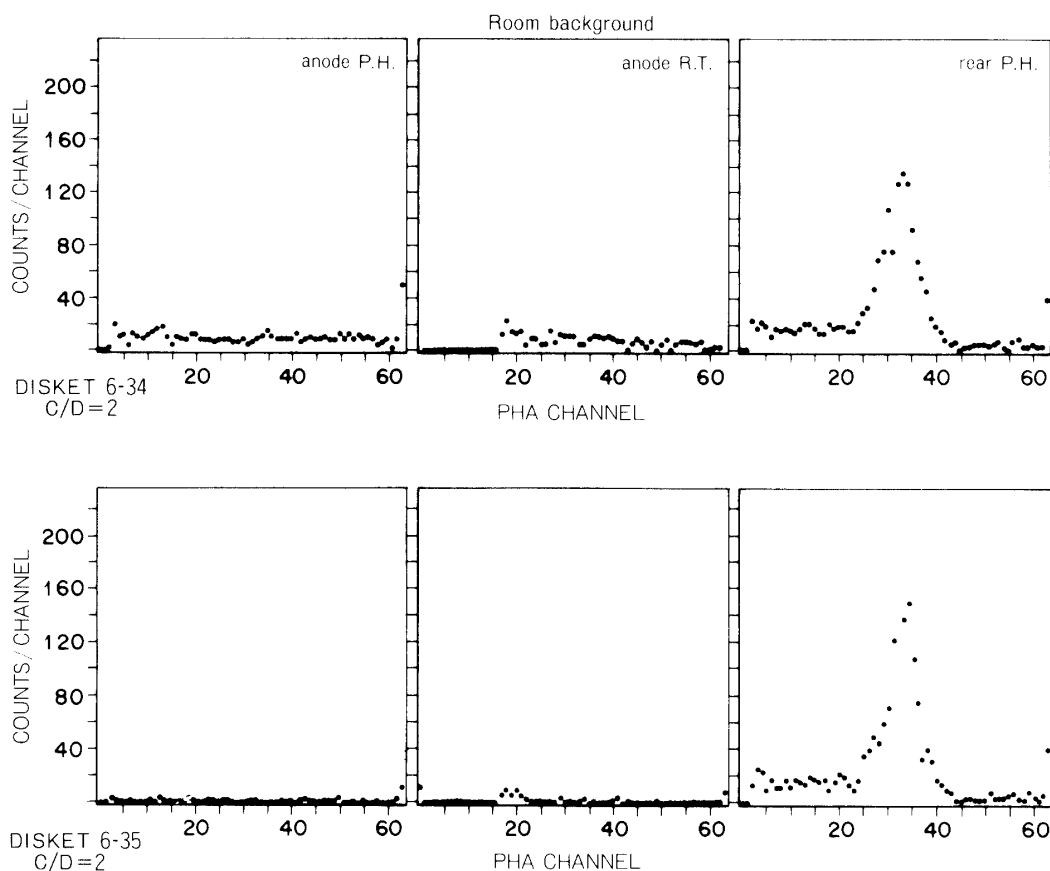


図-33 同じく、自然のバックグラウンドに対する測定結果を示す。
図の説明は図-31と同じ。反同時計測によるバックグラウンド除去を行った場合でも、立ち上がり時間の短い方(20チャンネル近傍)にピークが残る。

4-4 検出器の入射 X 線窓に使用した窓材の厚さの測定

既に述べたように、X 線検出器の X 線検出効率は、高エネルギー側はガスによる吸収で、低エネルギー側は入射窓に使う窓材の厚さで決まる。ガスによる吸収は、検出器の内寸、ガスの種類と圧力とで決まる。ところが、窓材に使ったベリリウム膜の厚さは、 $150\ \mu\text{m}$ であるが、大気中の湿気による劣化を防ぐために、膜全面に接着剤の一種（バックシール）を塗ったために、その正確な厚さを測定しておく必要がある。このために、塩化ビニール膜に、 ^{55}Fe からの X 線（Mn-KX 線で $5.9\ \text{keV}$ ）を照射して、Cl-K（ $2.4\ \text{keV}$ ）の X 線を発生させ、これにより膜厚を以下のように測定した。

塩化ビニールと ^{55}Fe とで作った、Cl-K の X 線を発生させる装置を較正するために、約 $1\ \mu\text{m}$ 厚のポリプロピレン膜（膜厚は膜の製作時に各種の特性 X 線により測定済）を持ったガスフロー型比例計数管により、その強度を測定した。これにより、図-34 に示すような結

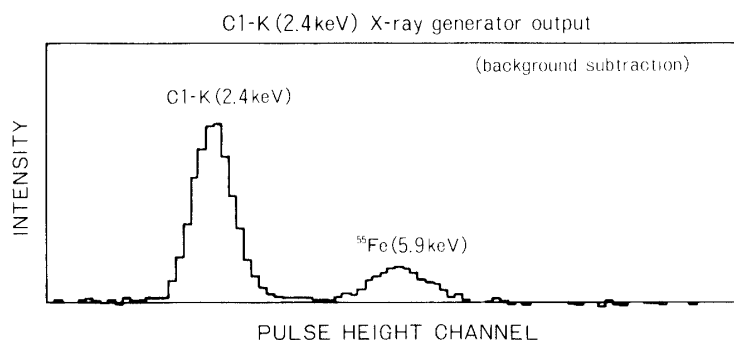


図-34 塩化ビニールと ^{55}Fe とで作った、Cl-K の X 線 (2.4 keV) を発生させる装置を較正するために、約 $1\ \mu\text{m}$ 厚のポリプロピレン膜 (膜厚は膜の製作時に各種の特性 X 線により測定済) を持ったガスフロー型比例計数管により、その強度を測定したもの。この装置からは、Ck-K X 線以外に ^{55}Fe からの X 線 (5.9 keV) も、もれていることがわかる。このときに使用したガスは、PR ガス (Ar 90 %, CH_4 10 %) なので、5.9 keV の X 線強度に比例して、Ar によるエスケープピーク (2.7 keV) があり、これが Cl-K のピークに混入していることになる。 ^{55}Fe からの X 線の強度から、エスケープピークへの寄与がわかり、これより Cl-KX 線の絶対強度がわかる。

果を得た。これからわかるように、この装置からは Cl-KX 線以外に ^{55}Fe からの X 線ももれていることがわかる。つまり、このときに使用したガスは、PR ガス (Ar 90 %, CH_4 10 %) なので、5.9 keV の X 線強度に比例して、Ar によるエスケープピーク (2.7 keV) があり、これが Cl-K (2.4 keV) のピークに混入していることになる。そこで、同じ計数管で測定した ^{55}Fe からの X 線の測定結果から、5.9 keV の X 線のエスケープピークへの寄与を測り、これより、今回製作した Cl-KX 線発生装置の絶対強度を計算した。この装置を使い、検出器の窓を通して測った X 線スペクトルの一例を図-35 に示しておく。

以上のことから、検出器のそれぞれの窓の厚さを計算したところ、窓毎により異なるが、ベリリウムに換算した厚さは、190-210 μm であることがわかった。この値から推定すると、実際に塗ったバックシールの厚さは、その成分や比重から考えれば大体 20 μm 程度と思われる。

4-5 ロケット実験

既に述べたように、我々の製作した実験装置 (GXR) は、宇宙科学研究所の観測ロケット K-9 M-77 号機に搭載された。この観測ロケットの最先端には、名大理学部を担当する赤外線観測装置 (GIR) が搭載され、GXR はその下部に配置された。図-36 に、搭載した観測装置の外観を示す。我々は、1983 年末から充分に実験室で各種測定を行い、1984 年 1 月 10 日に鹿児島県内之浦にある鹿児島宇宙空間観測所に GXR を搬入した。その後、組上げ

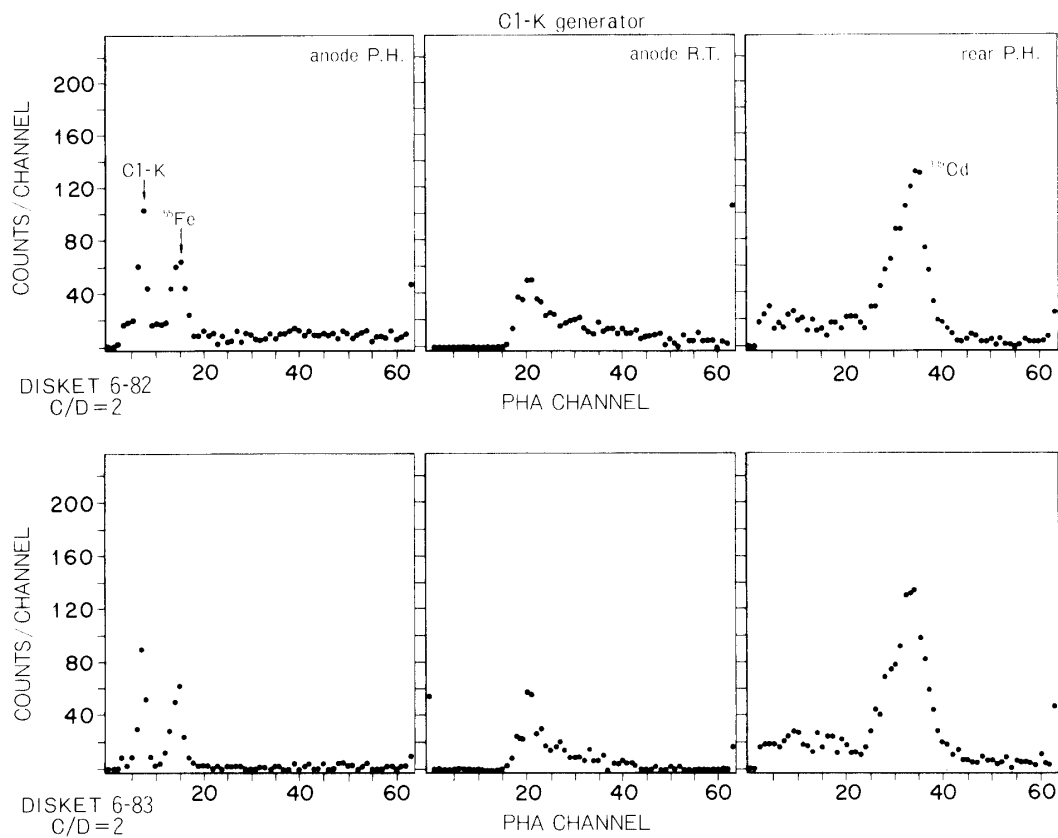


図-35 Cl-KX線を発生させる装置を使い、検出器の窓を通して測ったX線スペクトルの一例を示す。図の説明は図-31と同じ。図-34と比べると、Cl-Kの強度は弱くなり ^{55}Fe のそれと略同じである。これは、Cl-KX線がベリリウム膜に吸収されてしまうからである。

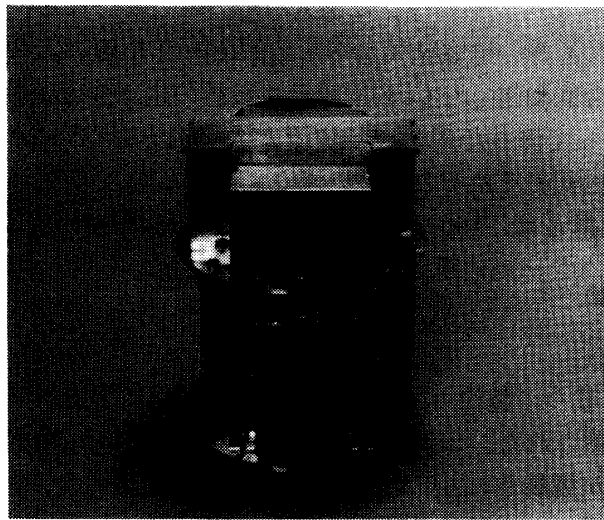


図-36 ロケットに搭載した低バックグラウンド比例計数管 (GXR) の外観。

前後の動作試験などを経て、正常に動作していることを確認し、ロケット頭胴部に搭載した。ところが頭胴部組み上げ後の動作試験で、GXR のデータの一部に異常が見つかった。これは、GIR に使用している回転機構の機械的な振動が、GXR の比例計数管の信号として出ているものと思われた。そこで、GXR の比例計数管の底面に、振動吸収板(スチロール)を入れて、これを完全に取り除くことが出来た。この間、実験装置には、できるだけ乾燥窒素ガスを流し続け、ベリリウム薄膜に湿気によるピンホールができないように注意した。又、できる限り頻繁に較正用線源などにより、比例計数管の特性をチェックし、正常に動作していることを確かめた。

ロケットの先端に搭載された GIR は、その視野がロケット軸にほぼ平行であるが、その下の GXR の視野はロケット軸に直交している。ロケットの飛しょう中は、機体はその機軸回りに回転するので、GXR の視野はほぼ大円に沿ったものとなるが、GIR の視野はほとんど一定になってしまう。そこで、発射後 77 秒でヨータンブラーを切断し、ロケットに歳差運動をおこさせ、GIR の視野が少し広い天空を掃くように計画されていた。このため GXR の視野も大変広い天空を掃くことになり、その視野の狭さから考えて個々の X 線源からの寄与はほとんどなく、一様宇宙 X 線バックグラウンドだけが寄与したものと思われる。この他、ロケットには、その飛しょう中の姿勢を知るために、地磁気センサー、星姿勢計、地平線センサーなどが搭載されている。

ロケット実験は、1984 年 1 月 14 日午前 04 時 30 分に行なわれた。ロケットの飛しょうは予定どおりで、発射後約 35 秒でブースター並びにメインモーターの燃焼終了、約 1.7 RPS のスピンのかかり正常に飛行した。同じく 70 秒後にノーズコーンの開頭が行われ、大気圏をぬけ宇宙からの X 線の観測態勢に入った。さらに、同 77 秒後にはヨータンブラーを切り

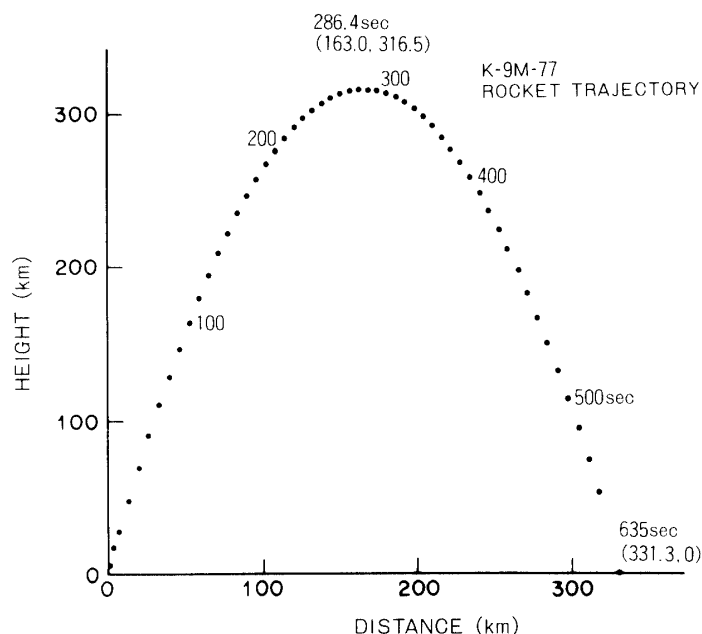


図-37 レーダーによって測定された、K-9 M-77 号機の飛しょう経路。

離し、約 30 度の歳差運動を始めた。打ち上げ後 216 秒で最高高度 316 km に達し、約 600 秒後、内之浦南東約 400 km の海上に着水した。その飛しょう経路を図-37 に示す。この間、総べての観測装置は正常に作動した。GXR は打ち上げ直前まで、発射台でのバックグラウンドを測定した。発射後、メインモーター燃焼終了まではモーター燃焼による振動のため有効な測定はできなかったが、発射後 35 秒からノーズコーン開頭までは、宇宙空間におけるバックグラウンドを測定した。開頭後から大気圏に再突入するまでの約 450 秒間に亘って、我々の製作した比例計数管は正常に作動し、実験中の簡単なチェックでも、予想通り極めて低いバックグラウンドであることがわかった。

4-6 実験結果（その1）

テレメーターから送られてきた信号は、総べて計算機用の磁気テープに入れられる。その中には、GXR 以外のデータ、例えば地磁気センサー、赤外線観測装置に付属している星姿勢計のデータなどが含まれている。これらのデータを調べた結果、ヨータンブラ切り放し後の観測装置は、歳差角 (half cone angle) 31.5° 、周期 96 秒の歳差運動をしていることがわかった。そのときの歳差運動の中心は、赤経 10 h 36 m、赤緯 51.0° であり、その時の天頂方向は赤経 11 h 41 m、赤緯 31.0° であった。ロケットのスピン周期は、前述したように 1.7 RPS であったので、GXR の視野の軌跡がわかり、宇宙空間を向いていた時間と、地球を向いていた時間とが決定できた。視野が宇宙空間を向いていれば、検出器には、一様 X 線バックグラウンドが入ったであろうし、同じく地球を向いていれば、全くこれがなくなり、入射した X 線はない、と考えてよい。また、宇宙空間を見ているときでも、前述したように個々の X 線源からの寄与はないと考えてよいので、検出器に入射する X 線は、一様 X 線バックグラウンドの強度から推定することができる。このようにして、この両者のデータを比較して、どの程度 X 線が検出器に入射したかを決定した。

図-38 に、GXR の 12 種類の計数回路からのデータを示す。打ち上げ前 300 秒から打ち上げ後約 550 秒で着水するまで、ほぼ連続したデータが得られた。モーター燃焼中及び大気圏突入時を除いて、雑音の殆んどないデータであることがわかる。このうちガードプレート 1 及び 2 の LD 以上の計数率には、他と比べると、雑音のある回数が多い。これは表-3 に示すように、電気回路上、この部分のゲインが最も高かったからである。雑音の混入した時刻は、それぞれ、機械的な衝撃の発生時刻に対応している。即ち、着脱コネクタの引き抜き、GIR コネクタ引き抜き、及びカップラーの巻き上げ、発射時の衝撃、開頭、ヨータンブラ切り放し、GIR 蓋開け、星姿勢計の繰り出し、などである。これとは別に、ガードプレート 1 の LD 以上の計数率が、飛しょう中に暫増しているのがみられるが、この原因については、いまのところ不明である。しかし、その計数率は少ないので、データの解析上は何の問題にもならない。

飛しょう中に我々の地上系の装置により、実時間で得たデータの一例を図-39 に示す。これにより、特に著しい異状もなく動作しており、バックグラウンドも少ないことがわかった。飛しょう中の検出器の動作状況は、リヤアノードからの信号に含まれる較正用線源 ^{109}Cd からの X 線 (22.1 keV) のスペクトルによって、知ることができる。打ち上げ前 300 秒から、着水までの 800 秒に亘るデータを、100 秒毎に調べた結果、較正用線源からの X 線

による波高分布は、64チャンネルモードで、そのピークが35チャンネル、半値幅が7-9チャンネルであり、統計精度内で一定であった。この値は、打ち上げ以前での測定値ともよく一致しており、検出器は順調に作動していたことがわかった。また、高压電源の電圧モニターにも、測定精度内での変化は見られず、GXRは正常に動作したことがわかる。

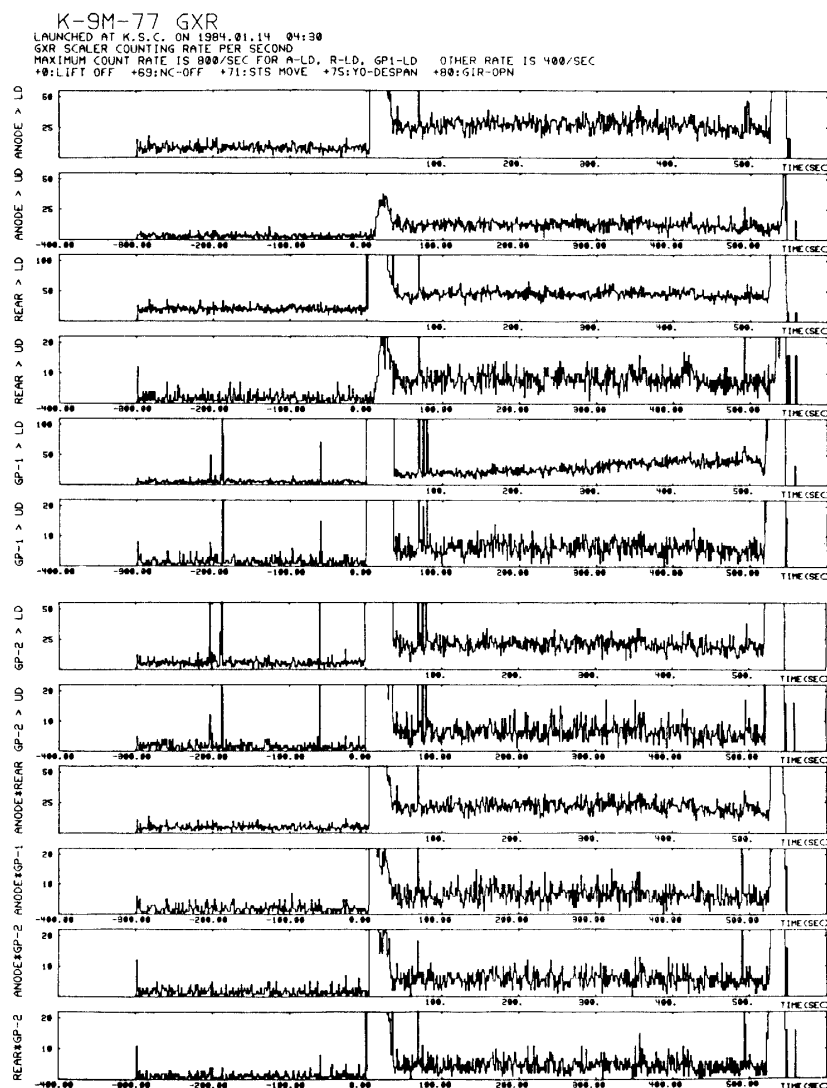


図-38 GXRに搭載した12種類の計数回路からのデータを示す。
データの内容は、表-5と同じである。ここには、発射前約300秒から、着水までの全データを示す。

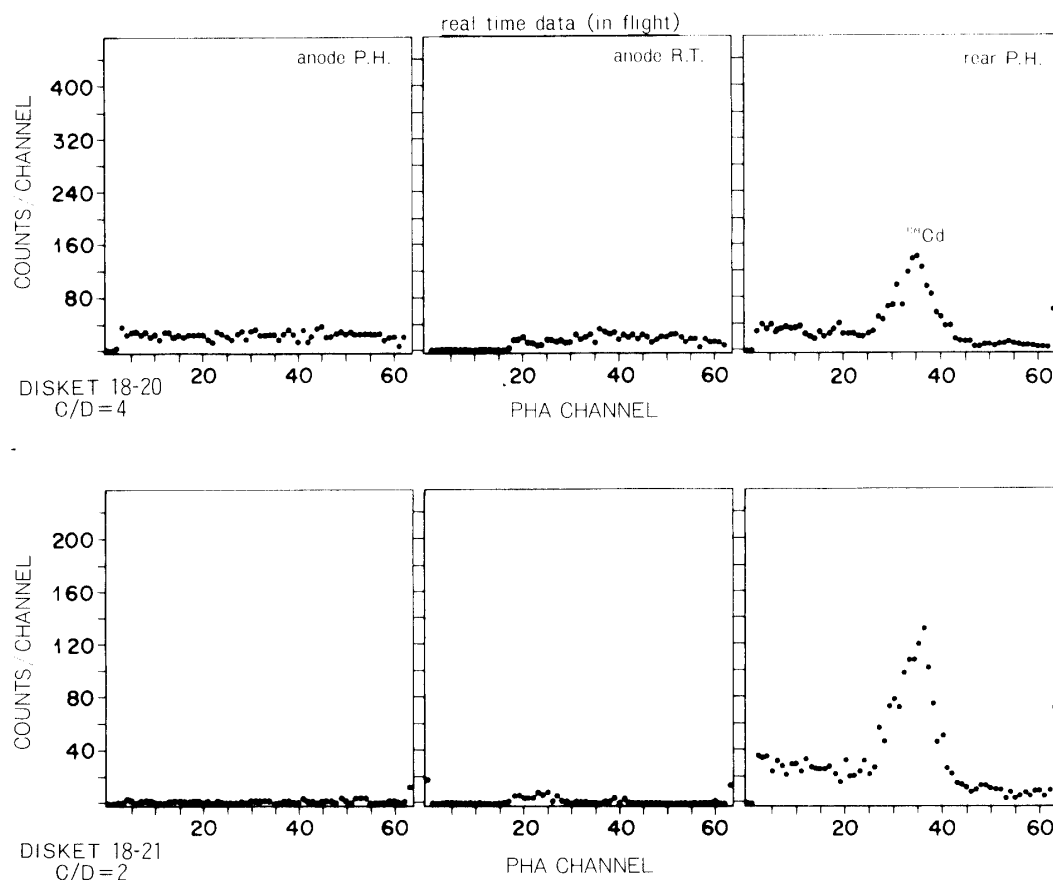


図-39 飛しょう中に地上系の装置により、実時間で得たデータの一
例を示す。特に著しい異状もなく動作しており、バックグラ
ウンドも少ない。図の説明は図-31 と同じ。

4-6 X線信号処理効率

ロケットの飛しょう中の400秒の間にアノード、リヤアノードから来た信号で、処理されたものの数は、それぞれ5573個、7893個であり、又、この間に、それぞれから処理されるべき範囲に入った信号の数は、5913個、14881個であった。但し、このうちの何個の信号が、同時に入ったかはわからない。いま、GXRの信号処理回路は2.5 msec毎に一個の信号しか処理できないので、上に述べた信号数の差は次のように考えることができる。

A: 2.5 msecのうちにアノードから測定範囲内に来る信号数の平均値

R: 2.5 msecのうちにリヤアノードから測定範囲内に来る信号数の平均値

C: 2.5 msecのうちに同時に測定範囲内に来る信号数の平均値

とすると、2.5 msecあたりに処理した信号の平均値 T は当然 $T = A + R - C$ である。いま2.5 msecを時間単位としてやると、信号の到着はポアソン分布に従うこと、同時に到着した信号はアノードのものが優先的に処理されることに注意すると、以下の式を得る。単位

時間当りに、アノードの信号で処理されるものの確率は

$$\int_0^1 e^{-(R-C)t} e^{-At} A dt = A(1 - e^{-(A+R-C)}) / (A + R - C)$$

同様にリヤアノードの場合の確率は

$$\int_0^1 e^{-(R-C)t} e^{-At} (R-C) dt = (R-C)(1 - e^{-(A+R-C)}) / (A + R - C)$$

となる。この場合には、単位時間あたり処理された信号の総数は $1 - e^{-(A+R-C)} = 8.416 \times 10^{-2}$ であることから、 $A + R - C = 8.792 \times 10^{-2}$ 、同様にして $A = 3.638 \times 10^{-2}$ 、即ち 400 秒間にアノードの処理範囲に入った信号の総数は、5822 個程度と見積もることができる。ところが実際には、同時間内に 5913 個の処理されるべき信号のあったことが、殆んど不感時間のない計数回路によりわかっている。この差は測定回路上、なんらかの不感時間のあったことを示している。不感時間の総量は、2.5 msec あたり約 40 μ sec 程度になる。このうちわけとしては、既に述べたレーダのための不感時間 (5 msec 毎に 60 μ sec)、及び ADC による分 (この場合の計数率から考えると、2.5 msec 毎に約 8 μ sec) で概ね説明できることがわかる。

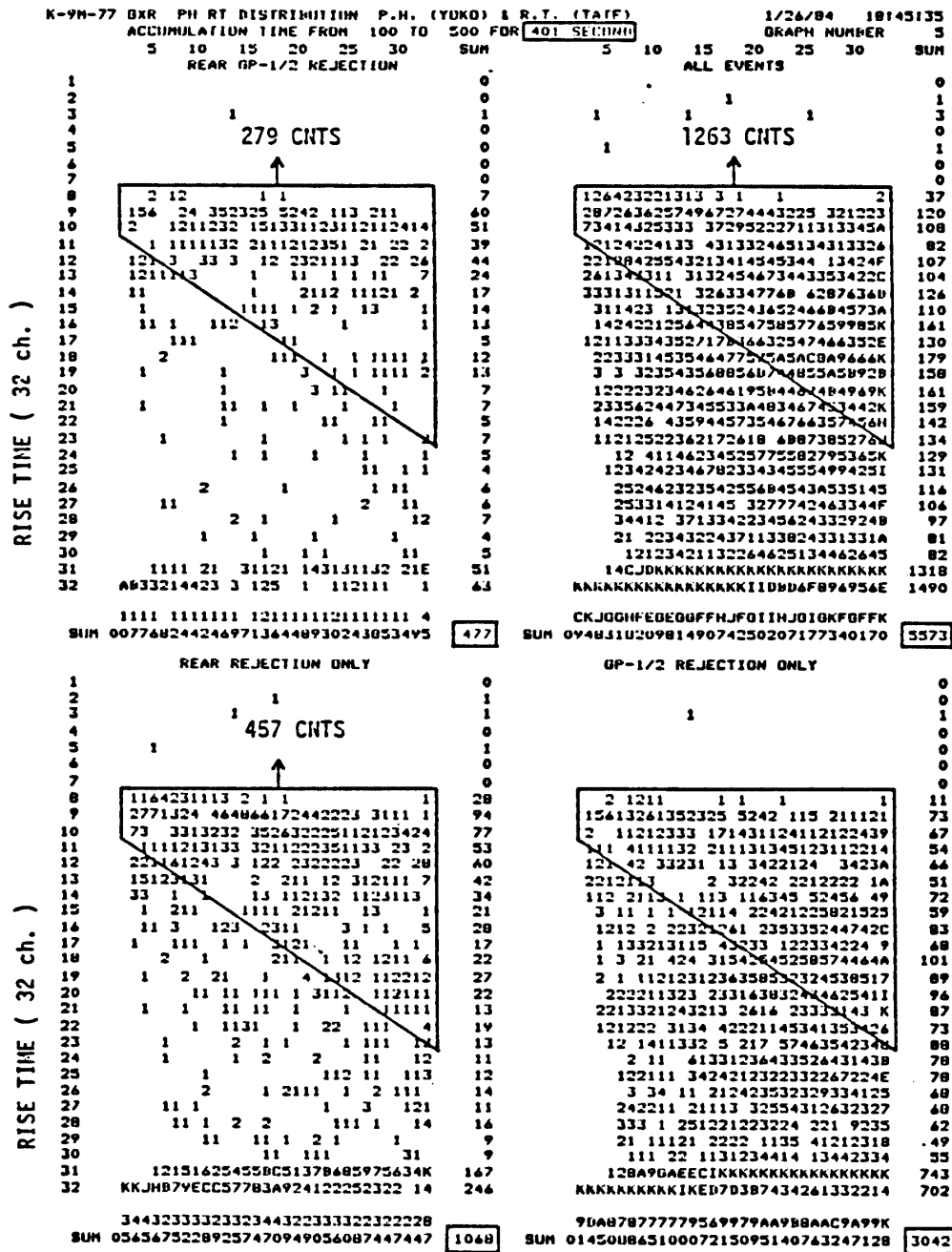
4-7 実験結果 (その 2)

飛しょう中、検出器に入った信号のうち、アノードの測定エネルギー範囲 (即ち LD 以上で UD 以下の信号) の全数は、発射前 300 秒間に、1456 個あり、発射後 100 秒から 500 秒までの 400 秒間に、5913 個あった。このうち、信号処理系で処理されたものは、それぞれ 1416 個及び 5573 個である。同様に、リヤアノードのそれは、それぞれ 5464 個及び 14881 個であり、信号処理系で処理されたものは、それぞれ 4019 個及び 7893 個である。又、アノードとリヤアノードとの同時計数は、それぞれの場合 1453 個と 8736 個であったが、これは、両者の LD を同時 (40 μ sec 以内の同時性) に越えた信号の数であり、このうち半分程度は、UD をも越えていたと思われる。このために、アノードとリヤアノードとの同時計数の信号が、処理すべき範囲 (LD 以上で UD 以下) に何個あったかは、正確にはわからない。アノードとリヤアノードとに、同時に入った信号で、処理されたものの総数は、前と同じ時間内に、それぞれ 924 個及び 4505 個であった。この数から判断すると、数え落しはあまりないものと思える。テレメータで決まる信号処理可能な量は、アノードとリヤアノードとからの信号をあわせて毎秒 400 個である。

アノードからの信号を、波高及び立ち上り時間別に、二次元的に表現したものを表-6、7 に示す。発射前の 300 秒間のデータでは、反同時計測によるバックグラウンド除去を全くしなければ、1416 個の信号であるものが、リヤアノードだけによる反同時計測によるバックグラウンド除去により、492 個に、さらにガードプレートによるそれを加えると、252 個にまで減少することがわかる。これに立ち上り時間を考慮すると、X 線と思える信号数は、155 個 (0.52 counts/sec) あったことになる。ここで、立ち上り時間により X 線とバックグラウンドとを区別するためのしきい値は、前章で述べたように (3-3 参照)、エネルギーの一次関数であるとし、X 線でバックグラウンドとして落とされる割合が、10 % 以下であ

表-7 表-6と同じく、ロケット実験によって得たデータを、二次元的に表示したもの。これは、ロケット飛しょう中の401秒間のデータである。各表の意味は、表-6と同じである

ANODE >LD 10841 CNTS



るように設定した。この範囲にある信号数は、それぞれ表-6, 7 の中の実線部分で囲んである。この間に、アノードの LD 以上の信号数は、全部で 2370 個あった。同様に、発射後 100 秒から 500 秒迄の 400 秒間のデータでは、反同時計測によるバックグラウンド除去を全くしなければ、5573 個の信号があったが、リヤアノードだけによる反同時計測のそれにより、1068 個に、ガードプレートによるそれを入れると、477 個に減少する。さらに、立ち上り時間を考慮すると、279 個 (0.70 counts/sec) になる。このなかには、宇宙からの一様 X 線バックグラウンドが含まれ、検出器の視野、及び、ロケットの大体の姿勢を考慮すると、0.38 counts/sec 程度の寄与があったことになる。このことを考えると、GXR の検出器本体からのバックグラウンドは 1.2×10^{-4} counts/sec cm² keV であったことがわかる。この間にアノードの LD 以上の信号数は、全部で 10841 個あったので、そのバックグラウンド除去率は 99 % 程度になる。図-22 からわかるように、波高の大きい信号程、立ち上り時間による弁別は難しいので、測定エネルギー範囲を 2-40 keV からもっと低エネルギーの範囲、例えば 2-20 keV のようにすればバックグラウンド除去の効率は、さらに向上することがわかる。

第5章 まとめと今後の計画

宇宙 X 線用低バックグラウンド比例計数管を、開発することを目的として、まず HEAO-1 (A-2 実験) に用いられたものと同種の検出器に、ガードプレートを付加した五面反同時計測、立ち上り時間併用型の比例計数管を試作した。その次に、この型の計数管の欠点を補うものとして、三面を反同時計測用検出器で囲み、さらにガードリングを設置した、シングルワイヤー型検出器を試作し、その特性を調べた。その結果、以下のことが明らかになった。

マルチワイヤー型比例計数管では、検出器に囲まれた内層の検出器 (Inner layer counter) は、⁶⁰Co の γ 線をバックグラウンド源とした時、そのバックグラウンド除去率は、PR ガスで 99.4 % にも達し得る。但し、窓側の検出器 (Window layer counter) に於いては、そのバックグラウンド除去率は、PR ガスで 97.5 % である。一方、シングルワイヤー型比例計数管のバックグラウンド除去率は、⁶⁰Co の γ 線をバックグラウンド源とした時、PR ガスで 98.9 % (2 keV-40 keV)、Xe ガスで 95.4 % (2 keV-4 keV) であった。

又、この検出器に、Xe (95 %) + CO₂ (5 %) のガス、1.1 気圧を封入したものを、ロケットに搭載し、宇宙空間でのバックグラウンド除去率を調べたところ、97.7 % (2 keV-40 keV) という結果が得られた。上記の二種類の検出器を比較すると、表-8 のようになる。この比較により、シングルワイヤー型比例計数管の低バックグラウンド検出器の方が、種々の点で優れていることが明らかである。但し、マルチワイヤー型比例計数管の内層の検出器は、バックグラウンド除去率に優れている。従って、シングルワイヤー型比例計数管の前面に、メタンガス等の、X 線吸収能のわるいガスで、単層のセルを持った比例計数管を設置した、ハイブリッド型比例計数管が、最も優れたバックグラウンド除去率を示すと予想される。今後、この型の検出器を試作したいと考えている。

表-8 二種類の検出器の比較表

		マルチワイヤー型比例計数管	シングルワイヤー型比例計数管
製作の難易度		ワイヤーの本数が多いために製作は困難	ワイヤーの本数が少ないために製作は比較的容易
エネルギー分解能		使用するアノードワイヤーの本数が多いために、良い分解能を得るのは比較的難しい	使用するアノードワイヤーの本数が一本しかないので、良い分解能を得やすい
検出効率		エネルギーの高い X 線では、一次電子雲が隣合うセルにまたがる可能性のために、検出効率が下がりやすい 蛍光 K-X 線が別のセルで検出されるとアンチ信号となる X 線と荷電粒子との立ち上り時間の差が、比較的小さい	X 線検出用のセルが大きいためマルチワイヤー型比例計数管程検出効率は下がらない X 線と荷電粒子との立ち上り時間の差は、比較的大きい
B. G. 除去率	PR ガス (⁶⁰ Co)	窓側 97.5% 内部 99.4%	窓側 98.9%
	Xe ガス (⁶⁰ Co)	測定無し	窓側 95.4%
	Xe ガス 宇宙空間	測定無し	窓側 97.7%

参 考 文 献

- T. A. Bailey, A. Smith and M. J. L. Turner ; Nucl. Instr. Meth. 155 177 (1978)
 J. L. Campbell ; Nucl. Instr. Meth. 65 333 (1968)
 B. A. Cooke, R. E. Griffiths and A. F. Janes ; Nucl. Instr. Meth. 106 147 (1973)
 J. Dutton ; J. Phys. Chem. Ref. Data 4 577 (1975)
 W. N. English and G. C. Hanna ; Canadian Journal of Physics 31 768 (1953)
 P. Gorenstein and S. Mickiewicz ; Rev. Sci. Instr. 39 816 (1968)
 S. Miyamoto, Y. Okumura, H. Tsunemi and M. Nakagawa ; Nucl. Instr. Meth. in press (1985)
 R. Rothschild, E. Boldt, S. Holt, P. Serlemitsos, G. Garmire, P. Agrawal, G. Riegler, S. Bowyer
 and M. Lampton ; Space Sci. Instr. 4 269 (1979)
 A. Smith, M. J. L. Turner ; Nucl. Instr. Meth. 189 511 (1981)