

Her X-1 観測用新型硬 X 線検出器*

中川 道夫**・山内 誠**・折戸 正紀**
内田 正美***・桜井 敬久†・平山 秀也†

(1985 年 7 月 25 日受理)

New type hard X-ray detectors for observation on Her X-1

By

M. NAKAGAWA, M. YAMAUCHI, M. ORITO
H. SAKURAI, H. HIRAYAMA and M. UCHIDA

Abstract: We made two types of detector to observe the cyclotron emission line emitted by strong magnetic field around Her X-1. One is a single wire Xe gas proportional counter with field adjusting ring, the other is a NaI scintillation counter with a thin PR gas proportional counter on its window. To observe the emission line, it is necessary to reduce the background event below 8.3×10^{-2} photons/cm²·sec. We had achieved it with both counters in the energy range of 30-90 KeV by balloon experiment.

第1章 序論

現在, 天体からの X 線を測定する方法としては, 気球による方法, ロケットによる方法, 人工衛星による方法がある。

気球による方法の場合, 長時間観測が可能であるが, あまり高度の高い所へ到達することが出来ない, X 線の大気による吸収の為に軟 X 線の観測には向かない。また, ロケットによる方法では, 高度は気球よりも高くなるが, 長時間の観測は出来ない。人工衛星による方法では, かなり上空へ達することが出来, 軟 X 線の観測も可能で, 時間的にも気球ほどではないが, ロケットよりは長時間連続観測が出来る。しかし人工衛星の場合, そ

* 宇宙研特別事業費による研究論文

** 大阪市立大学理学部

*** 大阪信愛女学院

† 山形大学理学部

の性格上単能のものには出来ないので、硬 X 線の観測には向かない。従って観測する対象により、最適なものを選ぶ必要がある。

我々は Her X-1 の中性子星のまわりの磁場について、30 keV から 90 keV の硬 X 線領域での観測を行う為に二種類の検出器を開発し、気球による観測を行った。Her X-1 の中性子星のまわりの磁場についての情報を与えるものとして、X 線スペクトル中のサイクロトロン・ラインがあるが、その部分のフラックスは、 2.0×10^{-3} photons/cm²·sec 程度であるので、検出器の有効面積を 300cm² にした時に、30 分程度の観測で統計的に有意にサイクロトロン・ラインを観測する為には、検出器のバックグラウンドを 8.3×10^{-2} photons/cm²·sec 以下にする必要がある。

次章では、Her X-1 からの X 線について述べ、第 3 章以後は、バックグラウンド低減化の為に開発した検出器と、それを搭載しての気球実験について述べる。

第 2 章 Her X-1 からの X 線

Her X-1 は、ヘラクレス座にある X 線天体で、位置は赤緯 35.4 度、赤経 16 時 5 分にある。

この Her X-1 から来る X 線の強度は、周期的に変動していることが知られている。その中で、ほぼ 35 日の周期で強度が変化する ON - OFF サイクルがあるが、これについての機構は、まだよく解っていない。また、1.7 日周期の変動もある。この変動については Her X-1 が Hz Her と連星系を成しており、その軌道周期が 1.7 日であるので Her X-1 の軌道上の位置によっては、Hz Her によって食を受ける為であると考えられている。その他に正確に 1.24 秒周期でくり返すパルス的な変動が見つかった。この為に Her X-1 は X 線パルサーと呼ばれているが、これに対する解釈は以下の様になる。

Her X-1 の主星 Hz Her はロッシュ・ローブいっぱい膨張しており、そのロッシュ・ローブからあふれた物質は Her X-1 の重力により、Her X-1 へ向かって落ちてゆく。この時その物質が持っていた角運動量が保存されるので、Her X-1 のまわりに円盤上に降り積もる。これはアクリション・ディスクと呼ばれるが、Her X-1 のもつ強い磁場の為に降着して来た物質は、ある距離以上はその磁場を横切って Her X-1 に近づくことが出来ないで、磁場に沿って落ちて行くことになる。そうすると Her X-1 の磁極付近では、これらの物質は高温のプラズマとなって thermal emission により X 線を放射する。ところがこの X 線は磁極付近からビーム状に放射されているので、Her X-1 の自転軸に対し磁軸が傾いていると、地球から見た場合に、Her X-1 の自転によりこの X 線のビームが見えかくれすることになる。ここで Her X-1 の自転周期を 1.24 秒であるとする、観測される X 線の強度も 1.24 秒周期で変動することになる。

Her X-1 は、この様に高速に自転しているが、その回転に対する星の安定性からくる要請や、軟 X 線領域での観測により、中性子星であると考えられている。

図 1 は、Her X-1 からの X 線を各エネルギーバンドについて 1.24 秒の周期で重ね合わせたものである。上記の議論によると、このパルスのピークの時に X 線のビームを観測していることになる。従って、ビームを見ている時のデータより求めた X 線スペクトルから、

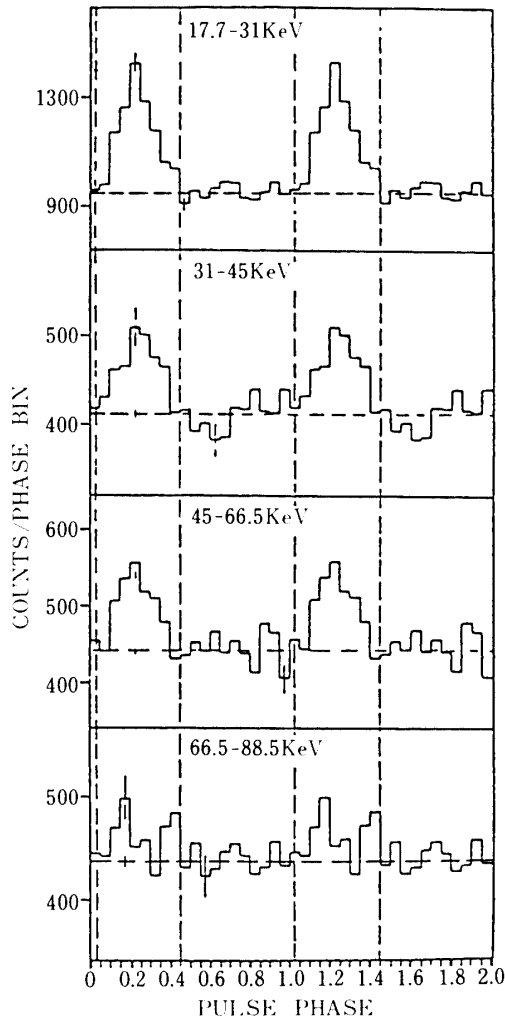


図 1 Her X-1 の Pulse Profile
Her X-1 からの X 線をエネルギーバンド
別に 1.24 秒周期で重ね合わせたもの
(Trümper. et.al 1977 より)

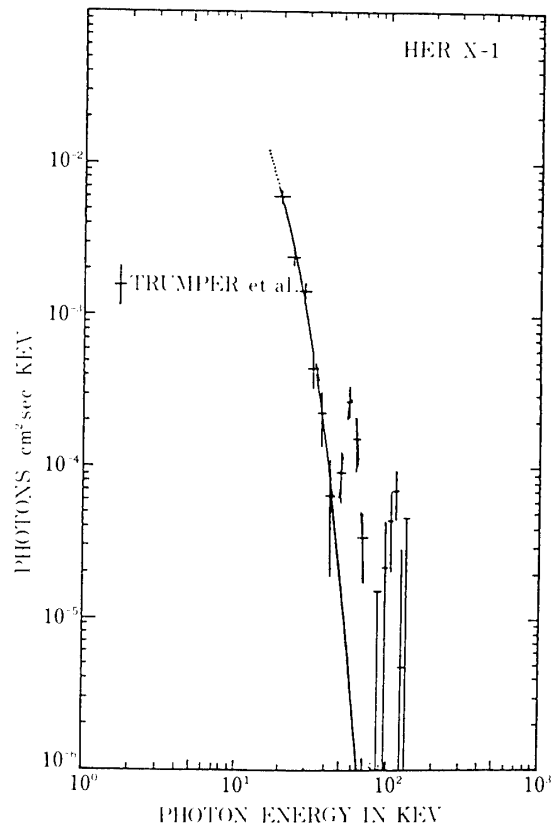


図 2 Her X-1 のビームの X 線スペクトル

ビームを見ていない時のデータより求めた X 線スペクトルを引くと、ビーム自身の X 線スペクトルが得られることになる。このようにして求めた Her X-1 のスペクトルは図 2 の様になっている。これは 1976 年に Trümper 達が NaI シンチレーションカウンターを用いて 4 時間にわたる Her X-1 の気球観測から求めたものである。データは十字で示されているものであり、それに fit する様に実線が引かれているが、これはプラズマの温度を $kT=7.9 \text{ keV}$ ($\sim 10^8 \text{ K}$) とした時に考えられる thermal emission が与える exponential 型の分布である。データは 15 keV 付近から 50 keV 付近までは exponential 型分布とよく一致しており、Her X-1 からの X 線が磁極付近の高温プラズマからの thermal emission によるとしたことと一致する。ところが 58 keV の所に exponential 分布からの excess が見

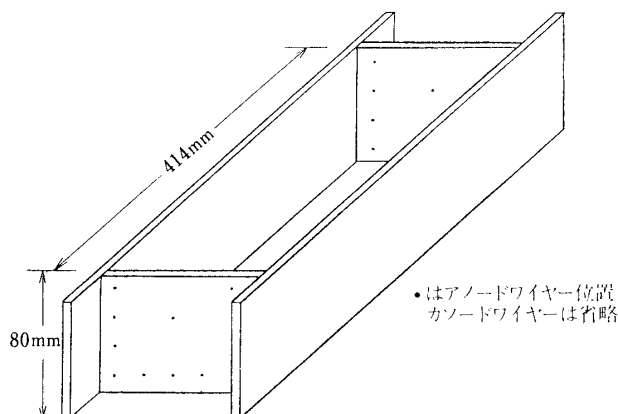


図 3 比例計数管

られる。これは磁極付近の強力な磁場中で生じる電子の cyclotron emission line であると考えられている。これは次の様なものである。

磁場中での電子の cyclotron 運動を磁場に垂直な面に投影すれば、自由電子は円運動を行うが、これは一次元調和振動と等価であるから量子化されて次式で表わされる Landau level と呼ばれるエネルギー準位をもつ。

$$E_n = \left(n + \frac{1}{2} \right) \hbar \omega_c, \quad n=0,1,2,\dots \quad (1)$$

但し、 $\omega_c = \frac{eB}{mc}$ は cyclotron frequency

この Landau level 間の遷移が cyclotron line emission で、ある励起状態から、1つ下の状態へ遷移する時に放出されるエネルギーは次式で与えられる。

$$E_1 = \hbar \omega_c = \hbar \frac{eB}{mc} \quad (2)$$

Her X-1 の X 線スペクトル中で 60 keV 以下に line が見られないことから、60 keV あたりで見られるものは、(2)式で与えられる cyclotron line の first harmonics であると考えられる。ここで $E_1 = 58 \text{ keV}$ を(2)式に代入し、 B の値を見積もると、大体 5.8×10^{12} ガウスとなる。

以上の事柄をまとめると、Her X-1 は中性子星であると考えられており、X 線を放射しているが、その中に cyclotron emission line が見られ、そのエネルギーを測定することにより、Her X-1 の磁極付近の磁場が求められることになり、中性子星を理解する上で重要な手がかりになると思われる。

ところが、この cyclotron emission line の観測は、現在まだ1例しかないので、より統計精度のよい観測を行うことにより、これを確立したいと考える。

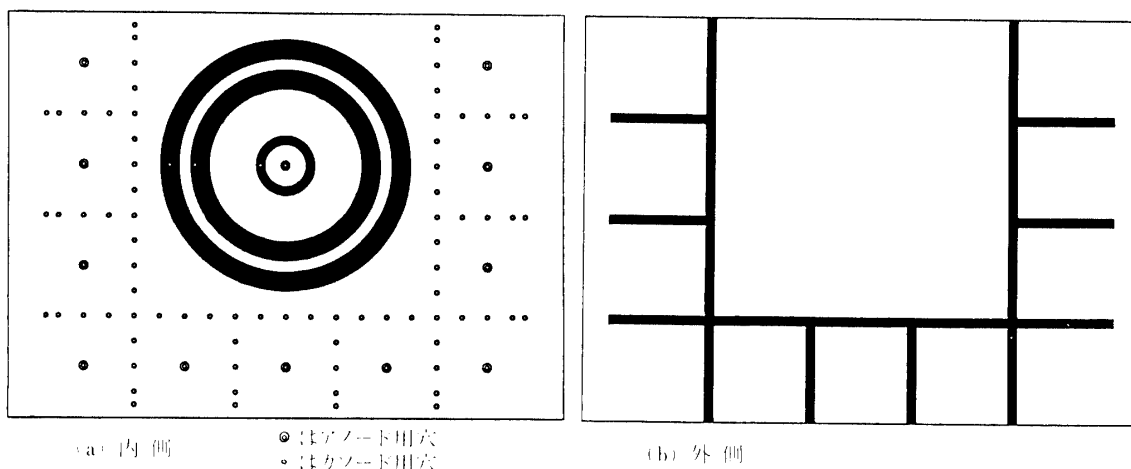


図4 ガラスエポキシ板

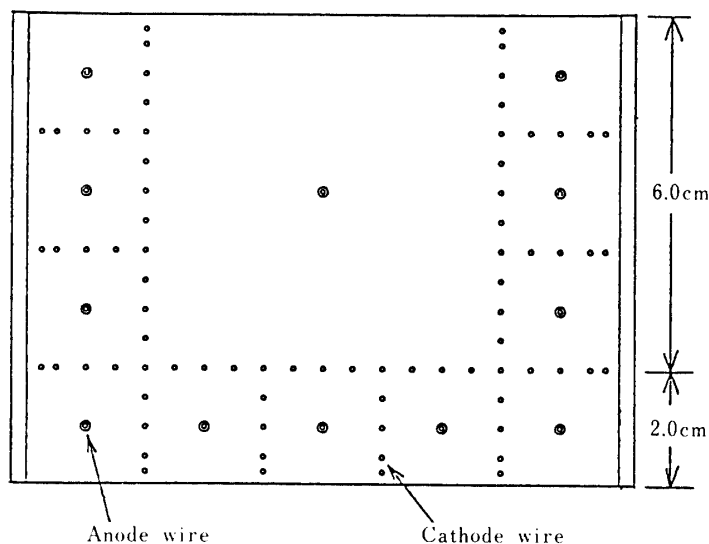


図5 ガス比例計数管の断面

第3章 シングルワイヤー型比例計数管の製作

宇宙からのX線を検出する為には、バックグラウンドの低い計数管を開発する必要がある。この目的の為に後に述べる反同時計測法（アンチ法）と、信号の立ち上がり時間による弁別法（RTD法）を使って、X線を検出する時にバックグラウンドとなる荷電粒子による信号を取り除くことが出来る様にした。

3-1 検出器の概要

製作した検出器は、五面反同時計測の出来るシングルワイヤー型比例計数管で図3の様な構造をもっている。カウンターの長手方向の両端部は、図4(a)、(b)の様にプリントされた厚さ5mm縦80mm横110mmのガラスエポキシ板がある。それを厚さ5mm縦80mm横479mmのアルミ板に幅5mm深さ2mmの溝を掘って、図4(a)の側を内側に

して両サイドから溝にはめ込み接着剤で固定してある。この両端のガラスエポキシ板間の距離は 414 mm あり、ワイヤーはアルミ板に平行に張ってある。計数管を断面から見ると図 5 の様になっており、全部で 12 個のセルに分かれている。各セルは $100\text{ }\mu\text{m}$ 径の金メッキタングステン線のカソードワイヤーにより区切られている。各セルは長さが 414 mm あり、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とがあるが、四隅のセルについては、二面が壁面になっているので、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、他のセルと比べて一様なガス増幅度が得られなくなる。そこでガス増幅度が一樣になる様に電場を補正する為に、アノードから壁面までの距離をカソードワイヤーまでの距離よりも長くしてある。

中央の大きな断面をもつセルはメインカウンターと呼ばれる X 線検出用のセルである。断面積が $60\times 63\text{mm}^2$ と大きいのは、RTD 法によるバックグラウンド除去を有効に行う為である。ところがこの様に断面が大きいと RTD 法によるバックグラウンドの弁別には有利であるが、ワイヤーの長さに対してセルの断面が大きい為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度が異なってしまう。この効果は検出器の両端部で最も大きく、端から検出器の深さ程度の領域まで及ぶ。この電場の不均一を補正する為に、検出器の両端のガラスエポキシ板上に図 4 (a) に示す様にメインカウンターのアノードと同心円状に 3 つのガードリングを取りつけ、ここに電位をかけることにより一様なガス増幅を得られる様にした。さらにこのガードリングからは、計数管の両端付近を通過する荷電粒子を、反同時計測により除去する為の信号も得る。

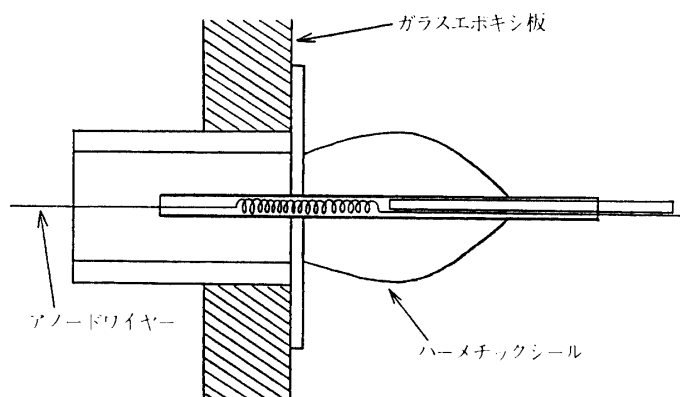
このメインカウンターを 3 面からとり囲む様に 11 個の小さな断面をもつセルが配置されているが、これは反同時計測用のカウンターで、11 個をまとめてベトカウンターと呼ぶ。これらの断面積は、四隅のものが $23\times 23\text{mm}^2$ で他の 7 個は、 $20\times 23\text{mm}^2$ である。

3-2 テスト用検出器の製作

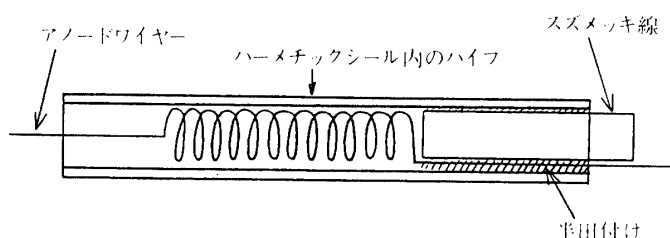
試作したシングルワイヤー型比例計数管には、77 本のカソードワイヤーと 12 本のアノードワイヤーを張ってあるが、これらのワイヤーがたるむと、エネルギー分解能が低下したり、放電につながったりするので、ワイヤーには適当な張力をかけておく必要がある。そこでカソードに用いた $100\text{ }\mu\text{m}$ 径の金メッキタングステン線は、その一端を直径 0.56 mm の絹針に 40 回巻きつけ、スプリングとした。また、アノードワイヤーは、メインカウンターのものが直径 $30\text{ }\mu\text{m}$ 、ベトカウンターのものが直径 $50\text{ }\mu\text{m}$ の金メッキタングステン線であるので、細すぎてそれ自身を巻いたのではすぐに伸びきってしまう。そこで、アノードワイヤーには $100\text{ }\mu\text{m}$ 径の金メッキタングステン線で作ったスプリングを導電性の接着剤で接着した。

◎アノードワイヤーの固定

アノードワイヤーの固定は、ガラスエポキシ板に直径 6 mm の穴をあけ図 6 (a) の様にハーメチックシールを接着し、そのパイプにワイヤーを通して半田付けした。この時パイプに直接半田付けすると半田が流れ込んでスプリングまで達してしまうので、図 6 (b) の様にパイプにスズメッキ線をさし込んで流れ込む半田の量を少なくする様にした。半田付けの順序としては、まず、スプリングのついていの方を固定し、他方は 15 g 重の錘を下げ



(a) ハーメチックシールの接着の様子



(b) アノードワイヤー固定の様子

図 6 アノードワイヤー固定の様子

て張力を持たせて半田付けした。

◎カソードワイヤーの固定

カソードワイヤーの固定は図 4 (b) のガラスエポキシ板の銅箔に外径 2 mm の銅パイプを半田付けし、そこにワイヤーを通して銅パイプに半田付けした。この時パイプにはアノードワイヤーの時と同じ理由により直径 1 mm のスズメッキ線もさし込んである。半田付けの順序はアノードワイヤーの時と同じで、20 g 重の錘を下げて張力を持たせた。

このようにして出来たテスト用計数管 (第 3 図参照) に、厚さ 20 μm のアルミ箔をカソードとして、入射面と底面とにはり、そしてこれをガスの出入口以外は密封した容器に入れた。ただしこの容器での X 線の入射面はマイラフィルムになっている。

3-3 測定原理

図 7 に見られる様に X 線がメインカウンター内に入射して来ると、ある所で計数管内のガス分子と光電効果を起こし電子を飛び出させる。この時飛び出す電子のエネルギーは、入射した X 線のエネルギーと次式の関係がある。

$$E_e = h\nu - I \quad (3)$$

E_e : 飛び出す電子のエネルギー

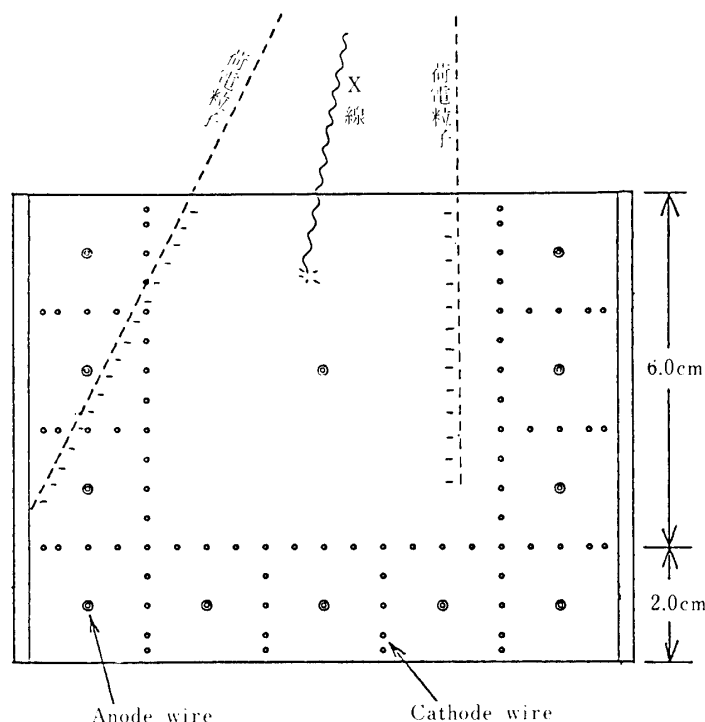


図 7 ガス比例計数管に荷重粒子や X 線が入射している様子

ν : 入射 X 線の振動数

I : 仕事関数

このようにして飛び出した電子は、そのエネルギーで決まるガス中の飛程の間にガス分子を電離して行き 1 次電子雲をつくる。この電子雲が計数管内の電場によりアノードワイヤーへ向かってドリフトするが、アノードワイヤーの近傍では電場が特に強くなっている為に電子なだれを起こしアノードに到達する。このようにしてアノードから信号が得られるようになっており、アノードに到達する電子数は、入射 X 線のエネルギーに比例する。

ところが荷電粒子が計数管に入射した場合もガス分子を電離するので、アノードから信号が出てくる。このような信号は X 線を測定する時のバックグラウンドとなってしまう。しかしその経路が 2 つ以上のセルにまたがる場合には、その 2 つ以上のセルから同時に信号が出てくるので反同時計測をすることにより、X 線と区別することが出来る。ところが荷電粒子が 1 つのセルの途中でエネルギーを失って止まってしまうと、1 つのセルからのみ信号が出るだけなので、このような時には上記の反同時計測法では区別できない。このようなものに対しては RTD 法を用いる。それは、X 線の場合には、その入射によってできた光電子による 1 次電子雲がアノードに到達して信号を出すのに対し、荷電粒子の場合には、その経路に沿って 1 次電子雲ができる為にその広がり X 線の時と比べて大きくなり、アノードに到達した時に出す信号の立ち上がりが遅くなるので、その違いを利用して X 線と荷電粒子を区別する方法である。

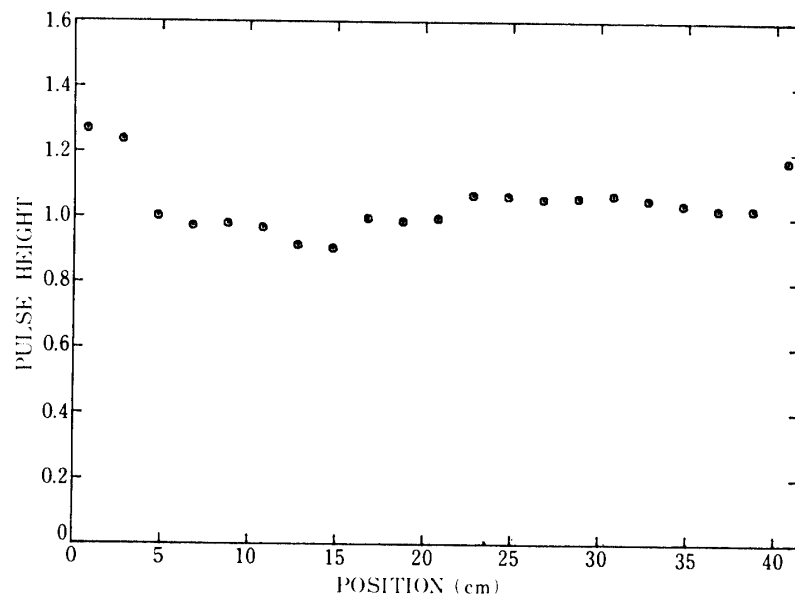


図 8 (a)カードリングに電圧を印加しなかった場合 Position
は検出器の端からの距離で示す
(以下の図, 全て同じ)

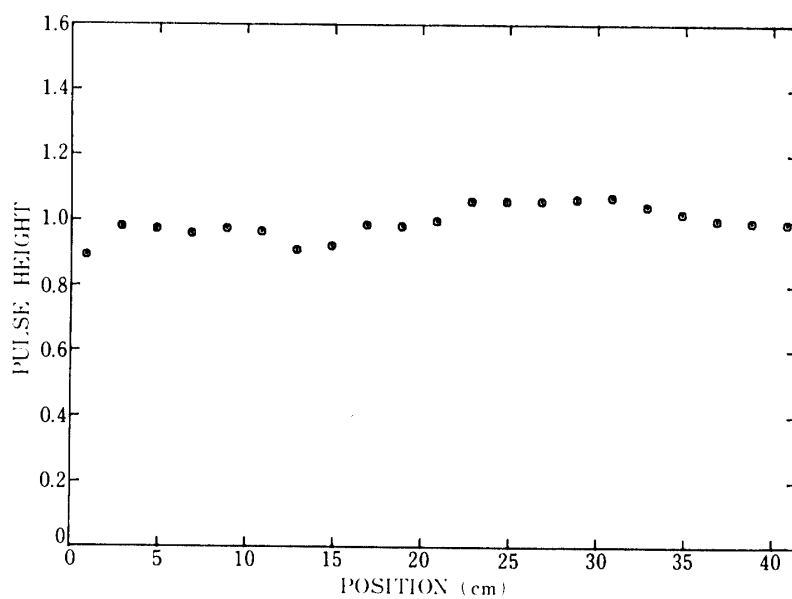


図 8 (b)ガードリングに電圧を印加した場合

3-4 測定条件

測定は, PR ガスを大気圧のもとで常時流し, メインカウンターのアノード印加電圧 2070 V, ベトカウンターのアノード印加電圧 1900 V で行なった. またメインカウンター両端部

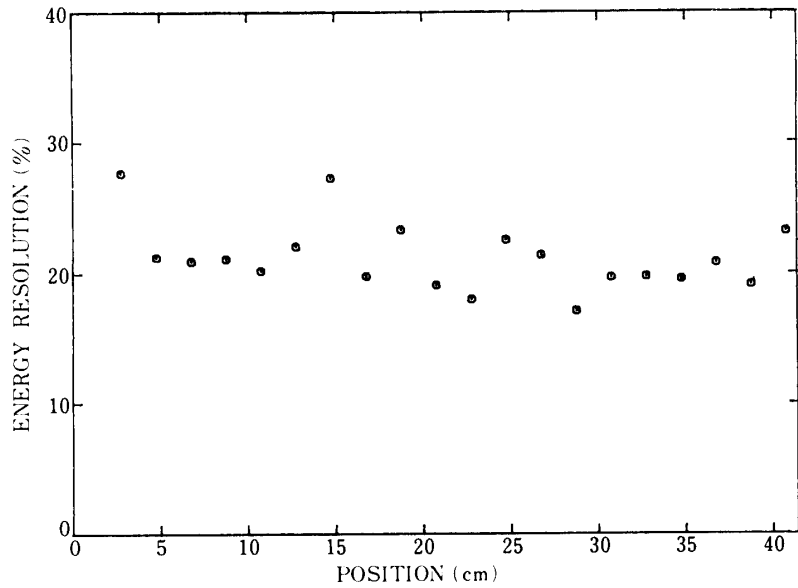


図 9(a) ガードリングに電圧を印加しなかった場合

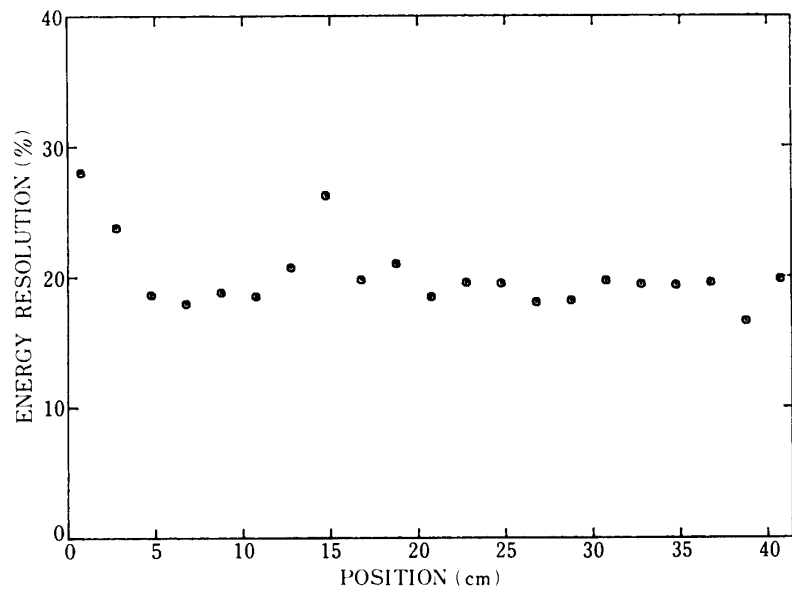


図 9(b) ガードリングに電圧を印加した場合

のガードリングへ印加する電圧は次の様にして決めた。

今、メインカウンター全体をアノード径 a 、カソード径 b の円柱状の電極であると近似的に考えると、その円柱の中心から距離 r だけ離れた点における電圧 V は、アノードに印加する圧を V_0 とすると

$$V(r) = V_0 (\log b/r) / (\log b/a) \quad (4)$$

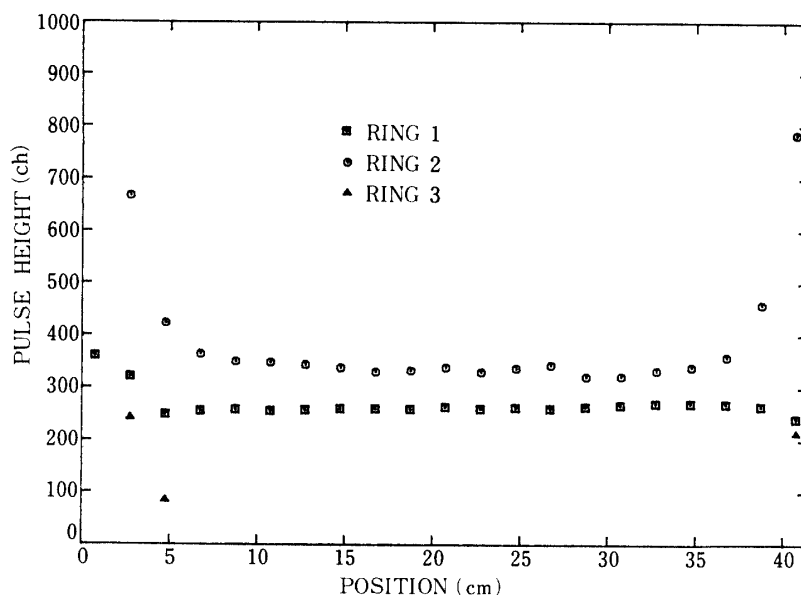


図 10 ガードリングでの信号波高

で与えられる。アノードワイヤーから三つのガードリング(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, 21 mm でリングの幅は 2 mm, 4 mm, 4 mm である。また, 検出器を円柱状の電極とみたとき, $a=3\times 10^{-2}$ mm, $b=30$ mm 程度である。従って 3 枚のガードリングにはそれぞれ,

$$V_1=0.29 V_0, V_2=0.10 V_0, V_3=0.052 V_0$$

の電圧を印加すればよいはずである。しかし実際の使用に際しては, これらの電圧を抵抗分割により供給するので任意の値のものが作れず, 次のものを用いた。

$$V_1=0.26 V_0, V_2=0.074 V_0, V_3=0.037 V_0$$

このようにして決めた電圧はそれぞれ 537 V, 153 V, 76.7 V である。計測に使用した X 線源は ^{56}Fe (5.9 keV) である。

3-5 信号波高分布とエネルギー分解能

三つのガードリングに, 前記の電圧を印加しなかった時と印加した時の, X 線入射位置による信号波高を, それぞれ図 8 (a), (b) に示す。この図で信号波高は検出器中央部に X 線を照射した時の値で規格化してある。ガードリングに電圧を印加しなかった時には計数管の両端部の信号波高が高くなっており, 全体としての波高のばらつきは 38 % あるが, ガードリングに電圧を印加したものは計数管の両端部の信号波高が高くならずに, ばらつきは 13 % 以内におさえられている。図 8 で端から 15 cm 位の所の信号波高が小さくなっているのは, 計数管のその部分のアルミ箔にしわができていたとことにより, 電場が変わっていた為である。

また、ガードリングに電圧を印加しない時と印加した時の X 線入射位置によるエネルギー分解能の変化を図 9 (a), (b) に示す。図の様にガードリングに電圧を印加した時の方が、わずかではあるが分解能の劣化がおさえられている。

以上の様に、大きな断面を持つ検出器の特性が、ガードリングにより改善されている。

3-6 ガードリングからの信号

今回試作した検出器では、メインカウンターのアノードの両端付近でおこるイベントに対しては、ガードリングに誘起される信号を利用して、除去することができる。図 10 は、X 線の入射位置と各々のガードリングに誘起される信号の波高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と共に、リング 3 からの信号は急速に小さくなり、6 cm 以上離れると回路の雑音に埋もれてしまう。これに対してリング 2 からの信号は、リング 3 のものよりもゆるやかに減少しており、検出器の中央に X 線を入射した場合でも信号が出ている。そこで、リング 3 からの信号を適当に増幅して、リング 2 からの信号との差をとると、X 線の入射位置によって、ある場所ではその差はゼロになり、それよりも検出器の端に近づけると差は正となる。また逆に検出器の中央に近づけると差は負になる。ところで、このリング 3 の信号とリング 2 の信号の差がゼロになる位置は、入射 X 線のエネルギーに依らずほぼ一定であるという報告（宮本他，宇宙科学研究所報告 特集第 12 号，1985）があるので、リング 3 の信号とリング 2 の信号の差が正の時だけ反同時信号としてとり出し、バックグラウンドとして除去すれば、入射 X 線のエネルギーに依らず、検出器の端から一定の距離内で起こったイベントのみを取り除くことができる。従って、コリメーターにより、検出器の両端には X 線が入らない様にしておくと、壁を通して入って来る荷重粒子から出てくる電子による信号は除去できる。

3-7 ベトカウンターの信号波高とエネルギー分解能

ベトカウンターは、図 5 に見られる様に全体としてはマルチワイヤー型比例計数管となっており、ここではメインカウンターの左右にある縦 4 つをまとめて、それぞれ S1 カウンター、S2 カウンターと呼び、メインカウンターの下の横 3 つを B カウンターと呼ぶことにする。

この S1 カウンター、S2 カウンター各々の 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それぞれ図 11, 図 12 に示す。このようにマルチワイヤー型の場合、各セルの信号波高が違っていると、それらをまとめた時にエネルギー分解能が悪くなってしまう。

3-8 フライト用検出器の製作

上記の検出器と同じ構造のものをフライト用として製作した。ただし、ここではカソードワイヤーを半田付けするパイプとして、外径 2.2 mm, 厚さ 0.2 mm の 30 % NiT パイプを使用した。本体は図 13 に示す様な厚さ 1 cm のアルミニウム容器に入れ、(Xe+5 % CO₂) ガスを 2 気圧で封入し密封した。X 線の入射面は図 13 の様に window として厚さ 1 mm にまで削ってある。

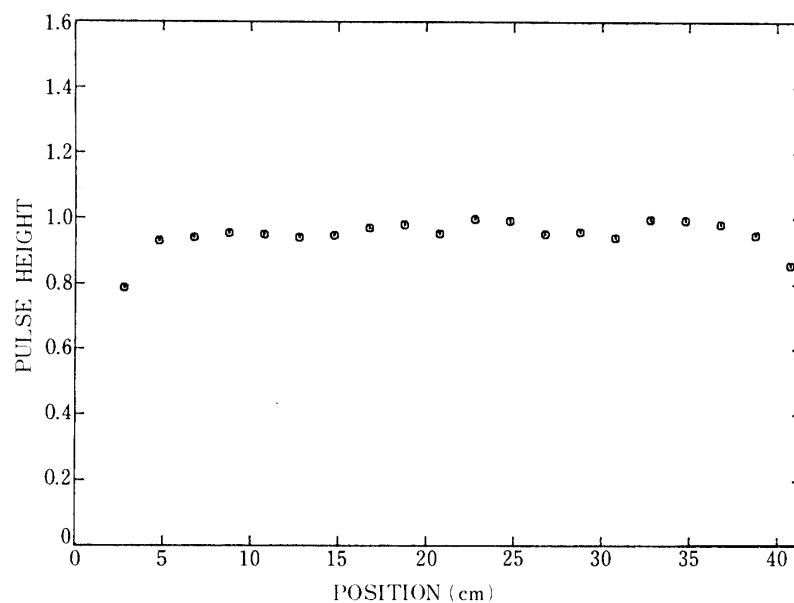


図 11(a) S1 カウンターの信号波高

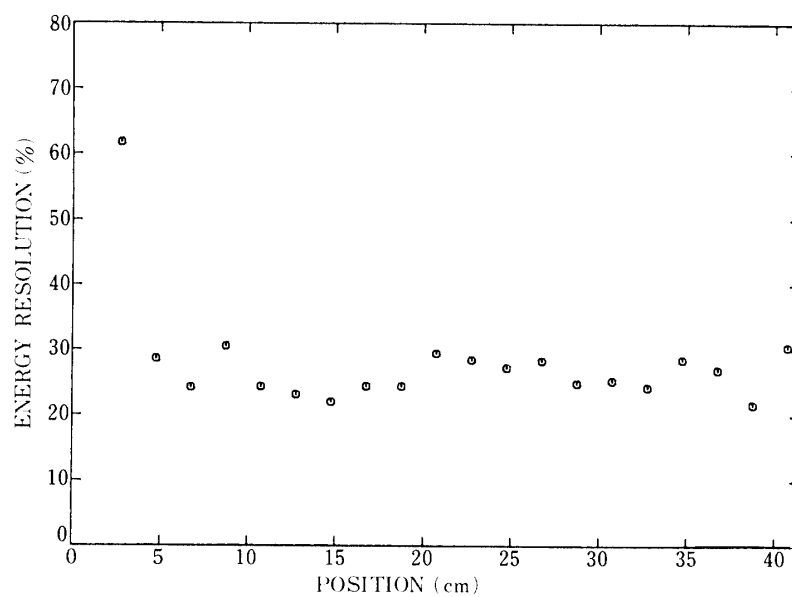


図 11(b) S1 カウンターのエネルギー分解能

3-9 フライト用検出器のテスト

3-9-1 信号波高とエネルギー分解能

メインカウンターのアノードに 2530 V, ベトカウンターのアノードに 2210 V を印加して検出器の性能をテストした。この場合, ガードリングには内側から順に 734 V, 253 V,

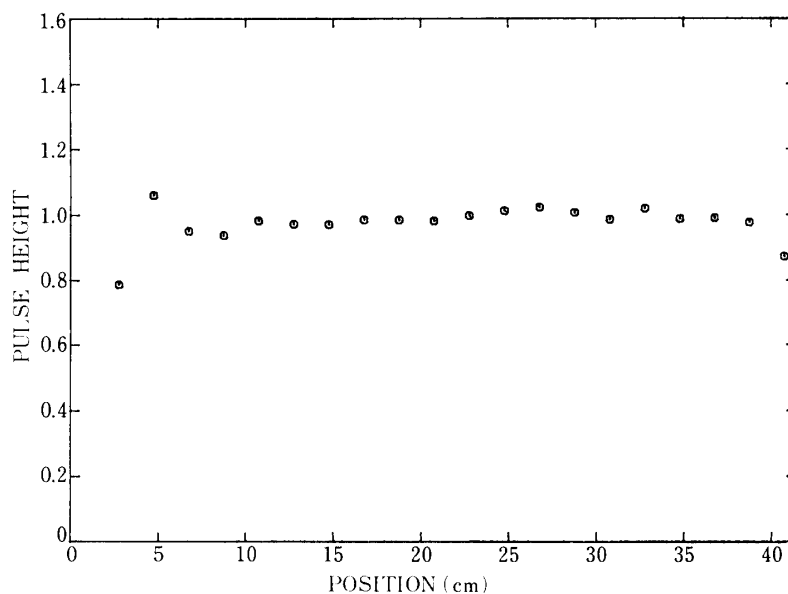


図 12 (a) S2 カウンターの信号波高

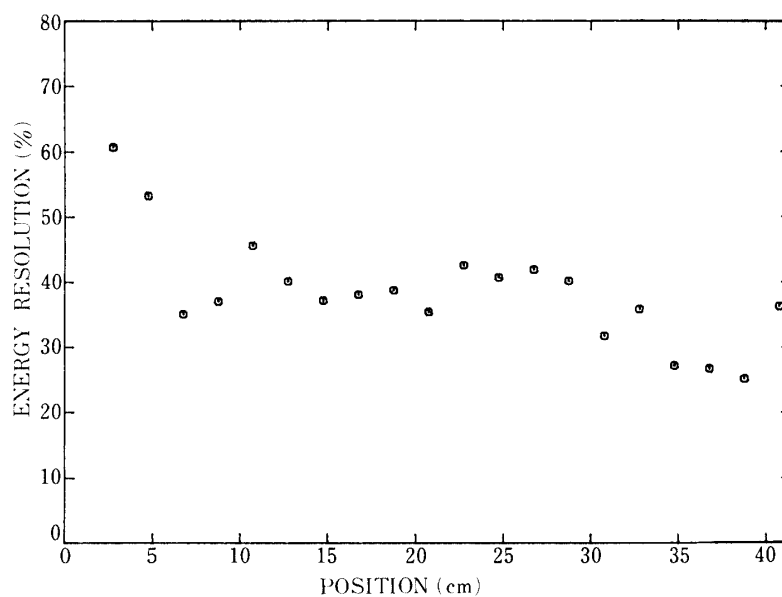


図 12 (b) S2 カウンターのエネルギー分解能

93.6 V を印加していることになる。図 15 から図 17 に X 線入射位置を変えていった時の信号波高の変化を、また図 18 にはメインカウンターについて、X 線入射位置を変えていった時のエネルギー分解能の変化を示す。この図 15 から図 17 における X 線入射位置の表現は、図 14 に示すものである。ただし、テスト用検出器の場合は、メインカウンターの両側のカウンターを S1 カウンタ、S2 カウンターとしていたが、フライト用では、この 2 つを

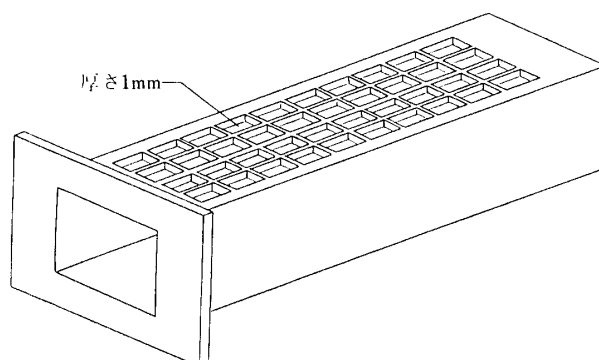


図 13 フライト用 Al 容器
厚さ 1 cm の Al 容器で X 線入射部は window として厚さ 1 mm に削ってある.

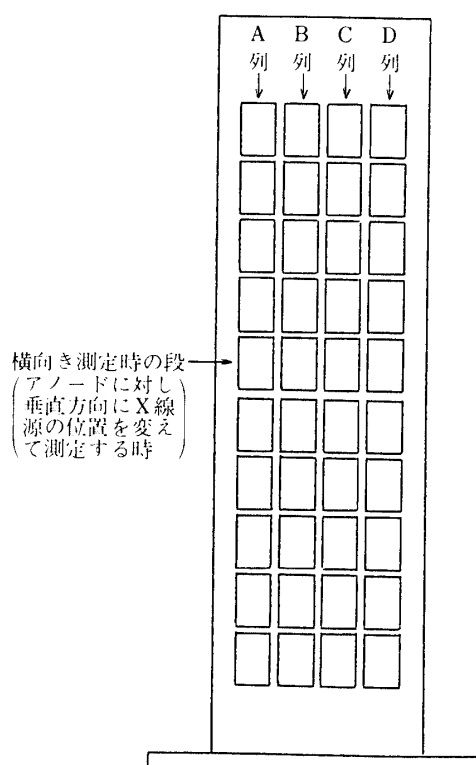


図 14 X 線入射位置
Xe ガス比例計数管を入射面からみた図で, 例えば A 列というのは, X 線源を A 列上で場所を変えて測定することを示す.

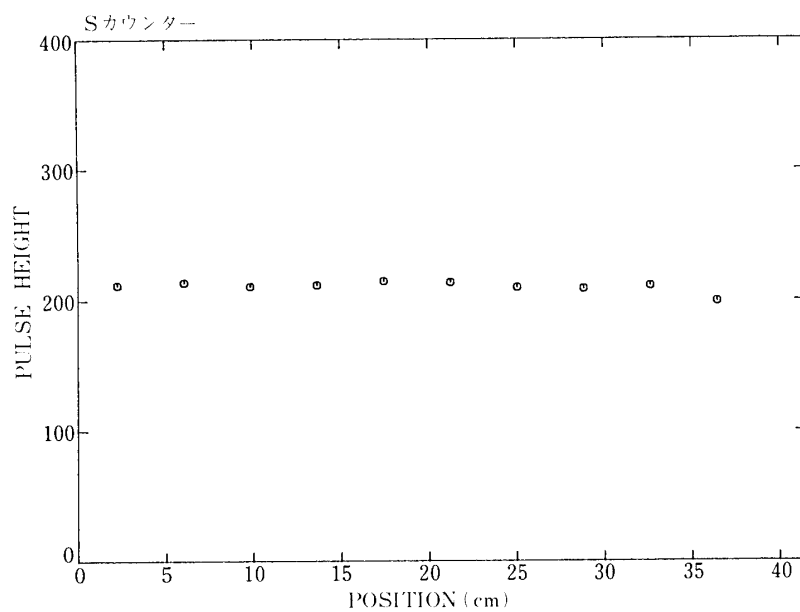


図 15 (a) A 列に置いた時の信号波高
信号波高は PHA のチャンネルで表わす (以下同じ)

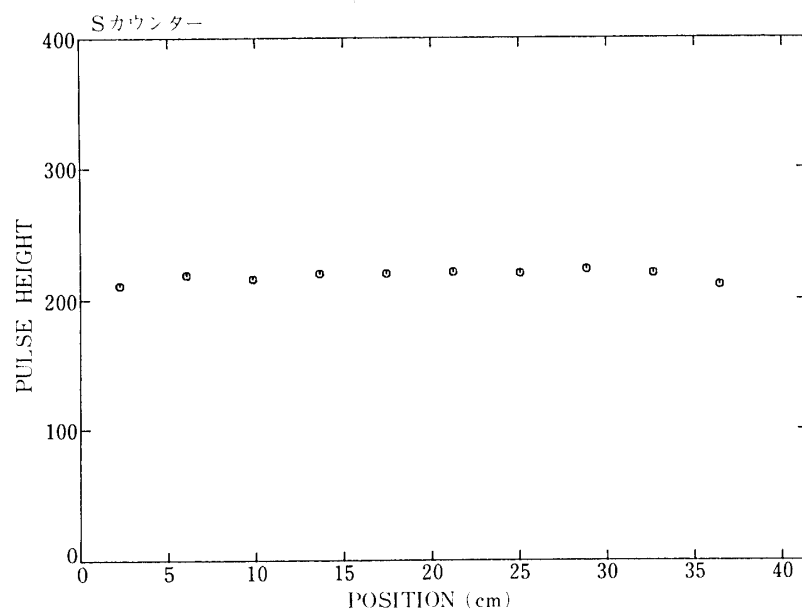


図 15 (b) D 列に置いた時の信号波高

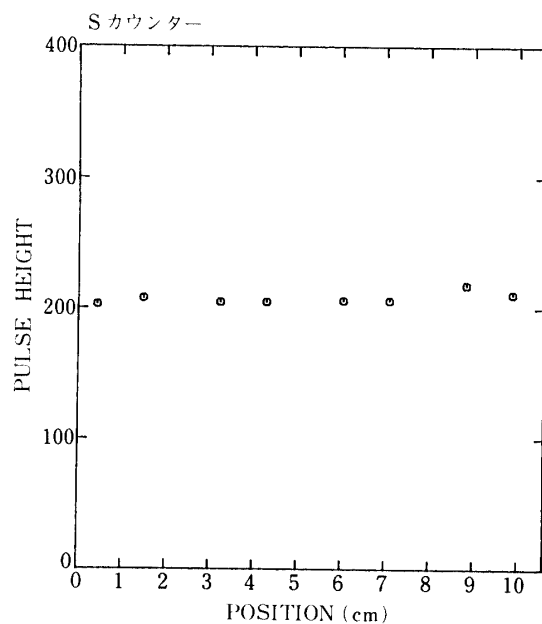


図 15 (c) 横向きに X 線源を移動した時の信号波高

まとめて S カウンターとしてある。図からわかる様に、S カウンター、B カウンターについては、その信号波高は、ほぼ X 線の入射位置によらず一定となっている。しかし、メインカウンターについては、X 線入射位置をアノードワイヤーに沿って変えた時には、その信号波高はほぼ一定であるが、アノードワイヤーに垂直に X 線の入射位置を変えた時に

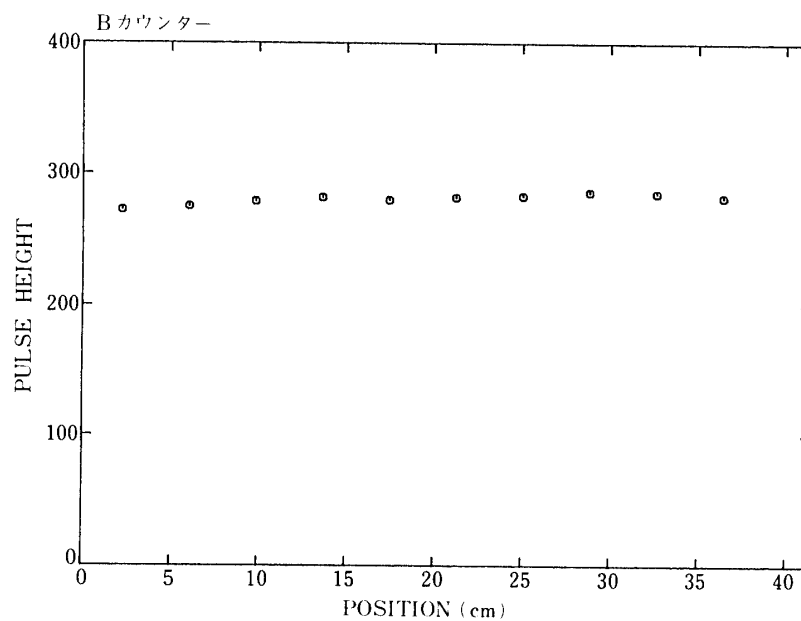


図 16 (a) B 列に置いた時の信号波高

は、その位置によりかなり変化している。このことは図 18 の様にメインカウンターのエネルギー分解能が悪いことを説明できる。即ち、メインカウンターへ入射する X 線は、ある広がりをもって入射してくる。この時、アノードワイヤーに対し垂直な方向への広がりが 1 cm 程度あると、図 17 の様に信号波高が最高と最低で 35 % 程度異なることになり、エネルギー分解能としては、良くても 65 % ということになるからである。

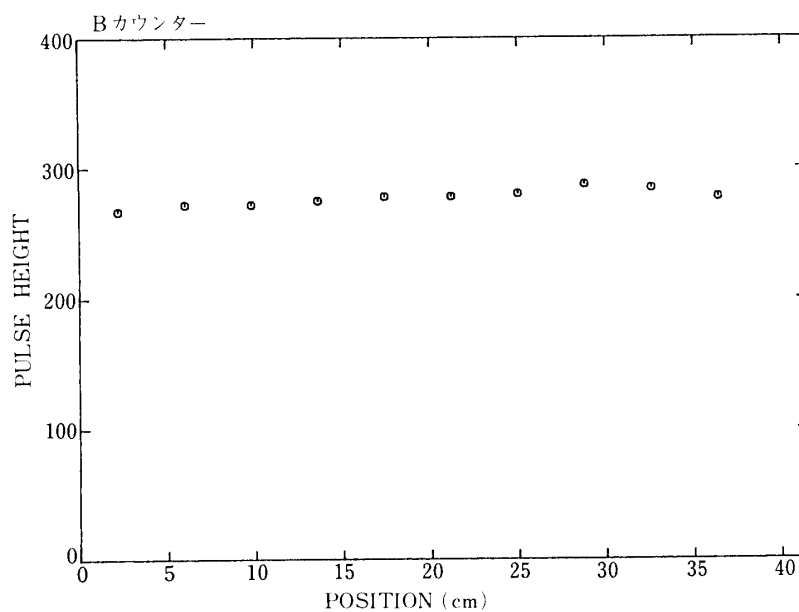


図 16 (b) C 列に置いた時の信号波高

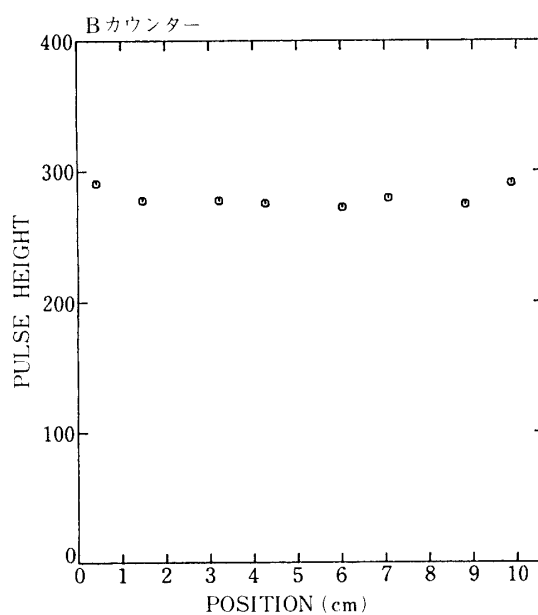


図 16 (c) 横向きに X 線源を移動した時の信号波高

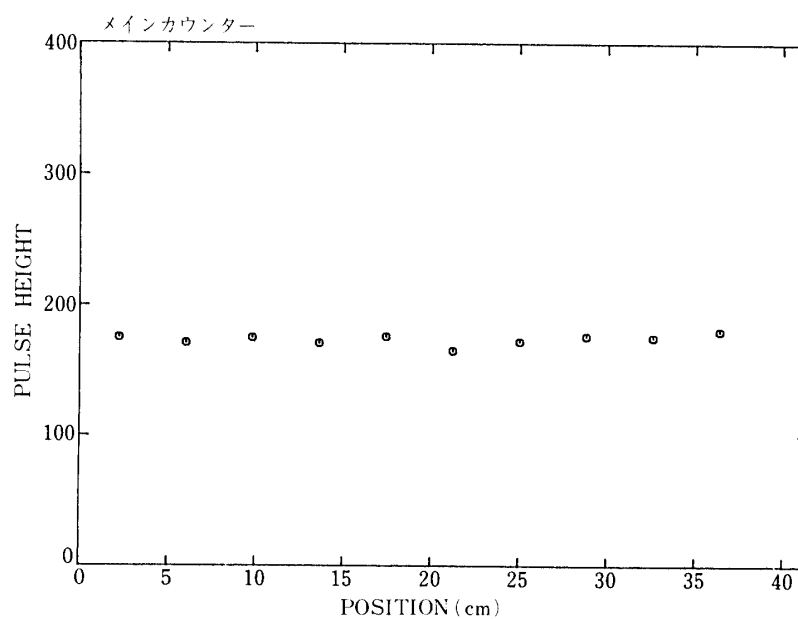


図 17 (a) B 列に置いた時の信号波高

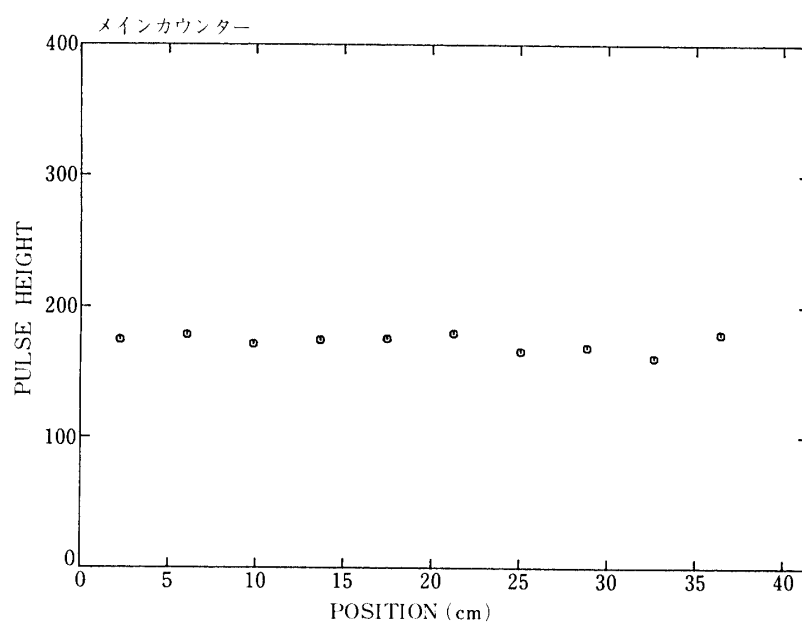


図 17 (b) C 列に置いた時の信号波高

この原因としては、今回、信号処理回路の都合上アノードワイヤーに印加した電圧が 2530 V であったが、これが低すぎた為に十分なガス増幅が得られなかったことが考えられる。

3-9-2 信号の立ち上がり時間

メインカウンターの中央に、 ^{109}Cd の X 線と、 ^{90}Sr の β 線 (540 keV) を照射した時の信

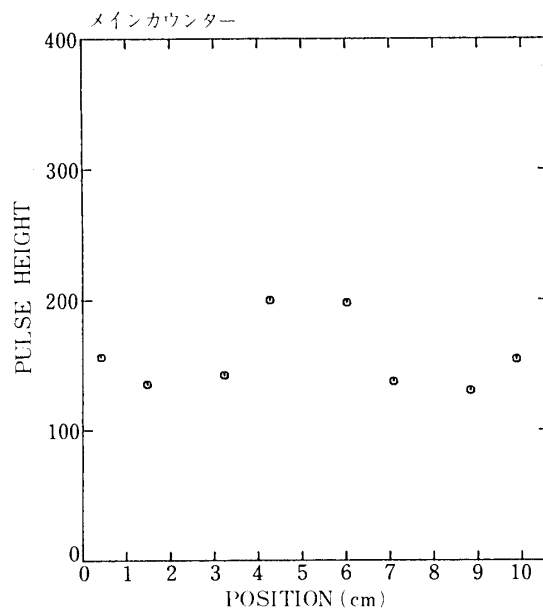


図 17 (c) 横向きに X 線源を移動した時の信号波高

号の立ち上がり時間をそれぞれ図 19, 図 20 に示す. ただし ^{90}Sr は β 崩壊して ^{90}Y になり 2.27 MeV の β 線を放出している. また実験室内のバックグラウンドで測定したものを図 21 に示す. 図 19 の様に 22.1 keV の X 線による信号の立ち上がり時間は, 860 ナノ秒程度であり, 3 マイクロ秒程度に現われているピークは, 実験室内のバックグラウンドによるものである. また図 20 に見られる様に β 線による信号の立ち上がり時間は, 3 マイクロ秒

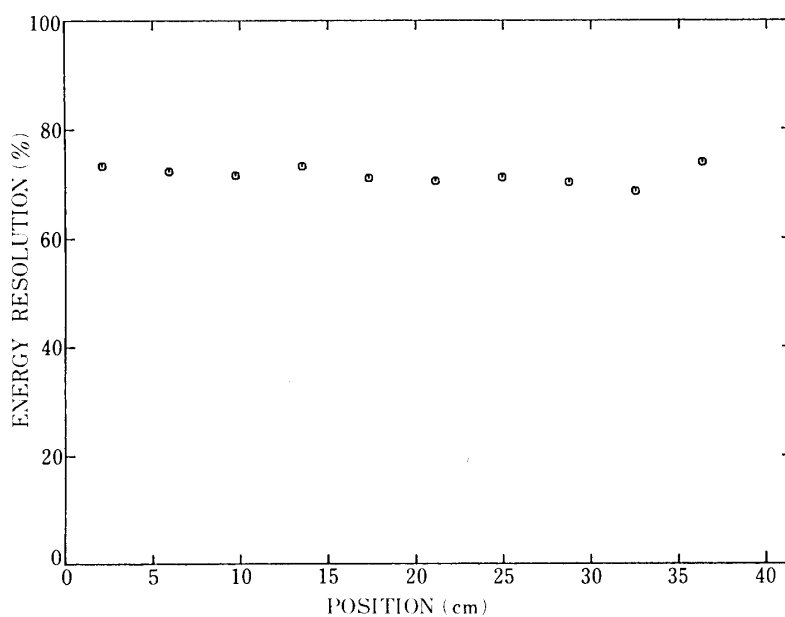


図 18 メインカウンターのエネルギー分解能

程度ある。この図で1マイクロ秒位にあるピークは、電子と検出器の window(厚さ 1 mm のアルミ) との相互作用により出来た γ 線によるものであると考えられる。

上記の立ち上がり時間は、次の様に考えることができる。検出器内の各点における電場の強さは、アノードの半径を a とし、カソードを半径 b の円筒であると仮定すると次式で与えられる。

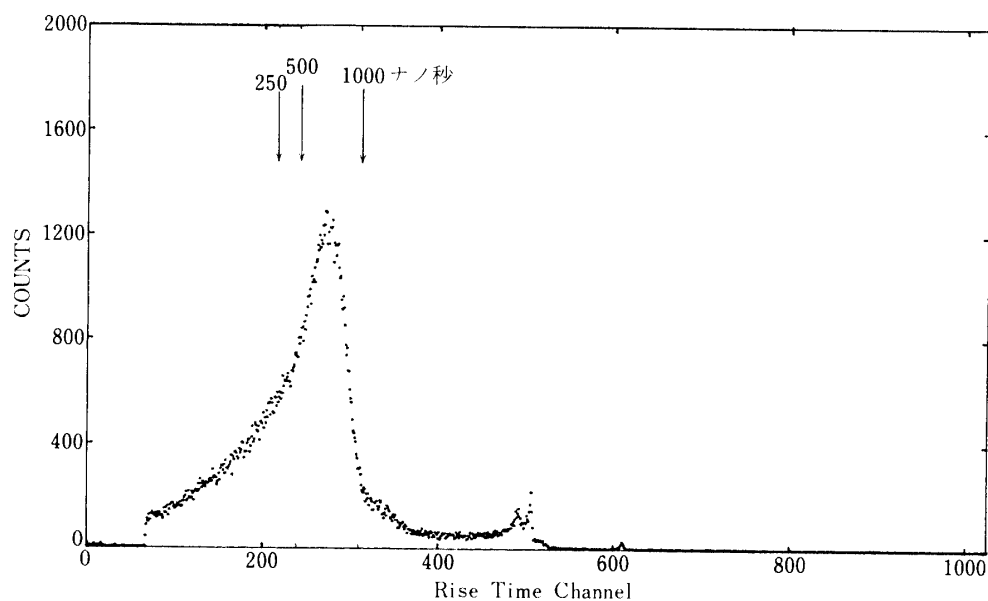


図 19 ^{309}Cd 照射時の信号の立ち上がり時間

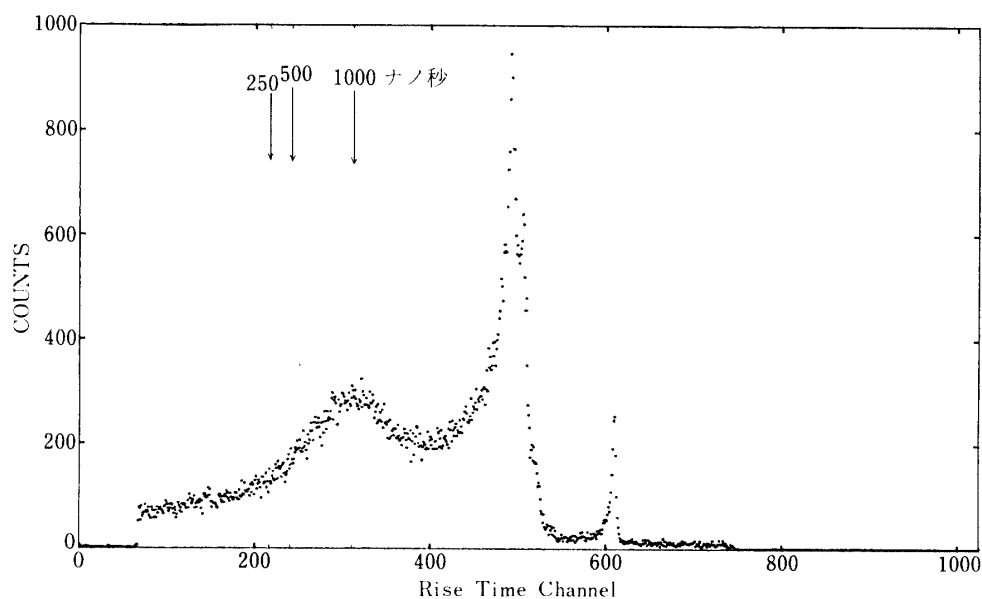


図 20 ^{90}Sr 照射

$$E(r) = V_0 / \ln(b/a)r \quad (5)$$

ここで r はアノード中心からの距離で、 V_0 はアノードに印加する電圧である。ところが検出器内の電子のドリフト速度は、Xe ガスの圧力を $P(\text{mm Hg})$ とすると E/P の関数とし

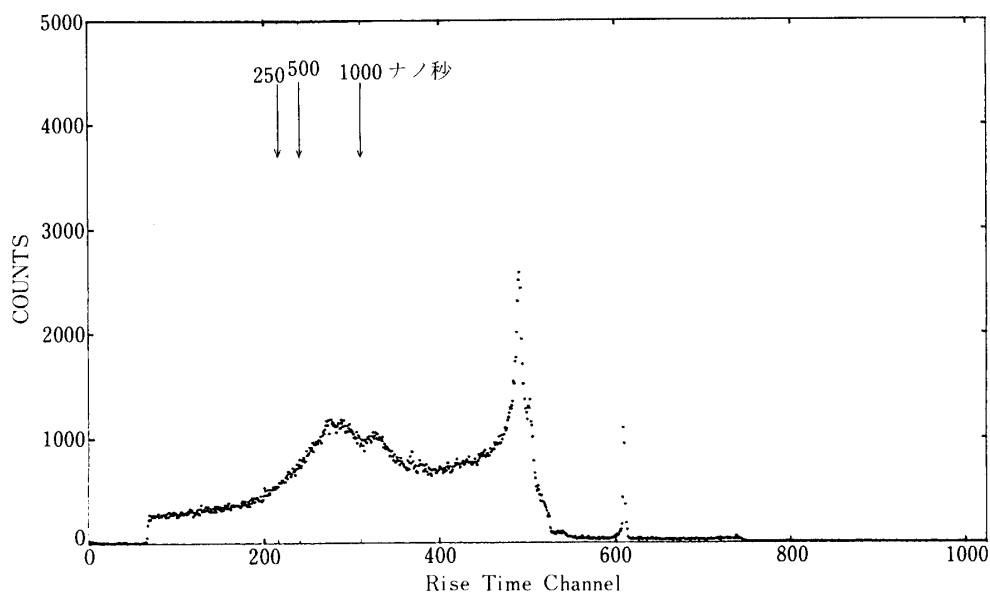


図 21 バックグラウンド

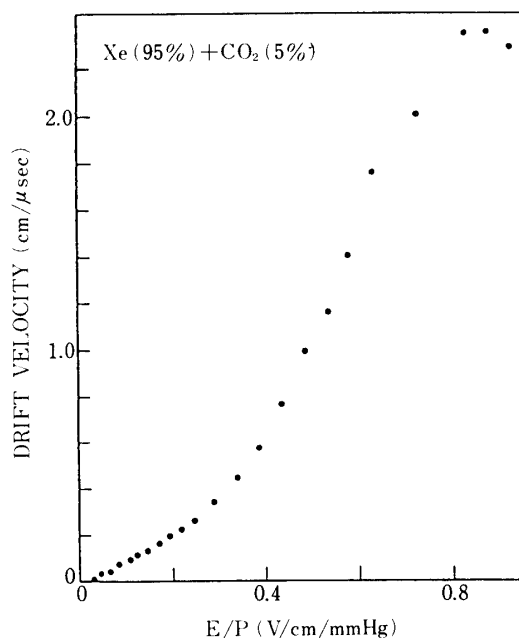


図 22 Xe+CO₂ ガス中での電子のドリフト速度を E/P の関数として表わしたもの

(S. Miyamoto, et al. 1984. 宇宙研報告より引用)

て図 22 の様に変化する．この変化を近似的にリニアであるとみなして，(5)式と組み合わせると，今回製作した検出器内での電子のドリフト速度は， r を cm で表わすと，

$$v(r) = 2.8/r - 0.3 \quad (\text{mm}/\mu\text{sec}) \quad (6)$$

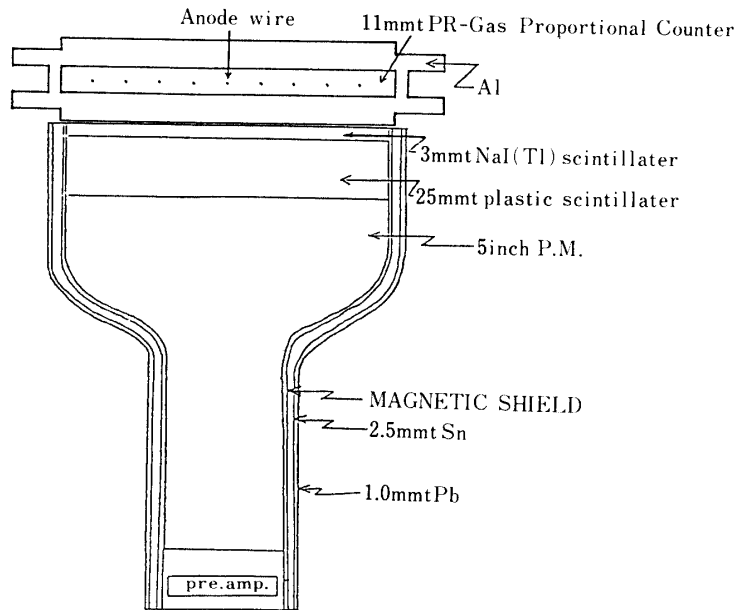


図 23 ハイブリッド型検出器

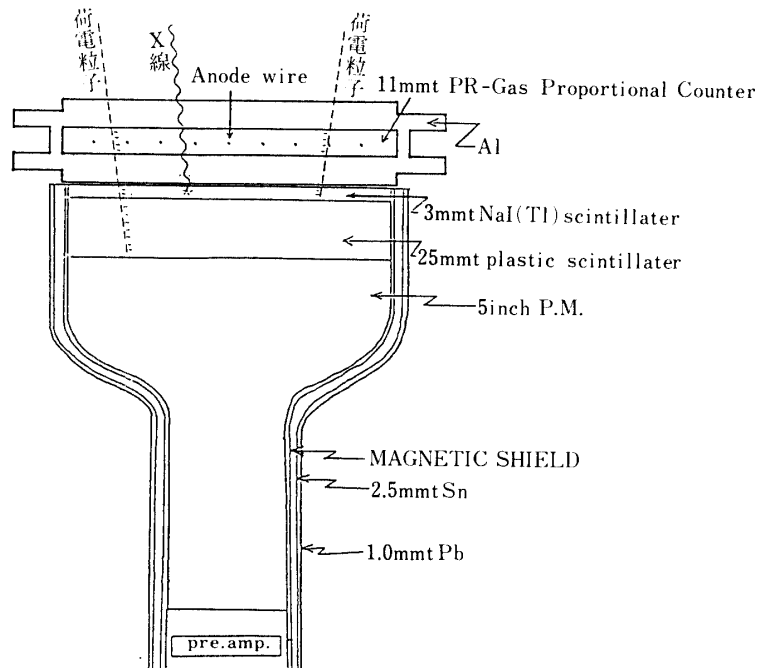


図 24 ハイブリッド型検出器に荷重粒子や X 線が入射している様子

となる。

ところで、2気圧のXeガス中での22.1 keVのX線の平均飛程は、4.3 cm程度であり、22.1 keVの電子の飛程は0.85 mmである。従ってアノードワイヤーから2 cm程度離れた所でX線が光電効果により光電子を放出し一次電子雲を作ったとすると、その広がりか0.85 mm程度であるので、信号の立ち上がり時間は800 ナノ秒程度になり、 ^{109}Cd 照射による結果と一致する。また、荷重粒子が入射した場合、一次電子雲の広がりか電場に平行に投影した場合、最大で3 cm程度になるので信号の立ち上がり時間としては3 マイクロ秒程度になる。これも ^{90}Sr を照射した場合の結果と一致する。

第4章 ハイブリッド型検出器

従来から広く用いられているNaI (Tl) シンチレーターを使ったシンチレーションカウンターの入射面を薄型のPRガス比例計数管で覆い、バックグラウンドに対する情報を増やす為のハイブリッド型検出器を製作した。

4-1 ハイブリッド型検出器の構造

ハイブリッド型検出器の概略図を図23に示す。直径5インチ、厚さ3 mmのNaI (Tl) シンチレーターと、同じ直径で厚さ25 mmのプラスチックシンチレーターをシリコン樹脂で、5インチ光電子増倍管に接着し光学的に一体化している。そして入射面を除く周囲を磁気シールド材、及び厚さ2.5 mmのスズと厚さ1.0 mmの鉛で覆っている。入射面には、アノードワイヤー9本をもつガス depth 11 mmのPRガス比例計数管を取りつけてある。この比例計数管は周囲がアルミ製であるが、NaIシンチレーターに接する面と、X線の入射面はwindowとして厚さ0.1 mmのアルミを使っている。このことにより30 keV

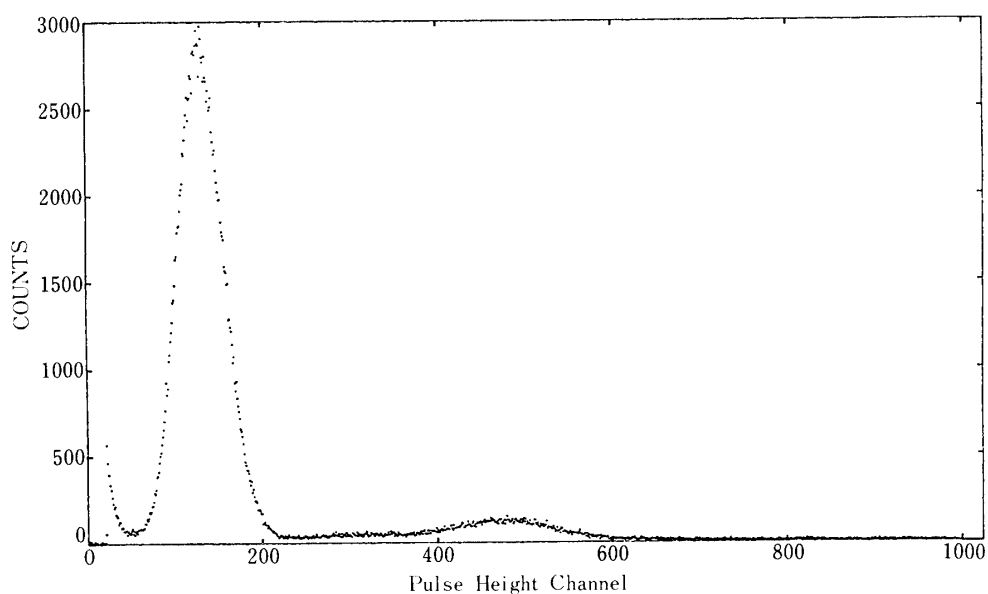


図 25 (a) ^{109}Cd 照射時の信号波高
22.1 keV のピークは131 chに見られる

から 90 keV の X 線は、ほぼ 100 % この比例計数管を通り抜けることになる。

4-2 測定原理

図 24 の様に X 線が検出器に入射した場合、30 keV から 90 keV のエネルギーのものは、ほぼ 100 % PR ガス比例計数管を通り抜け、NaI シンチレーターを光らせる。この光を光電子増倍管で見るのであるが、荷電粒子が入射した場合も NaI シンチレーターを光らせる

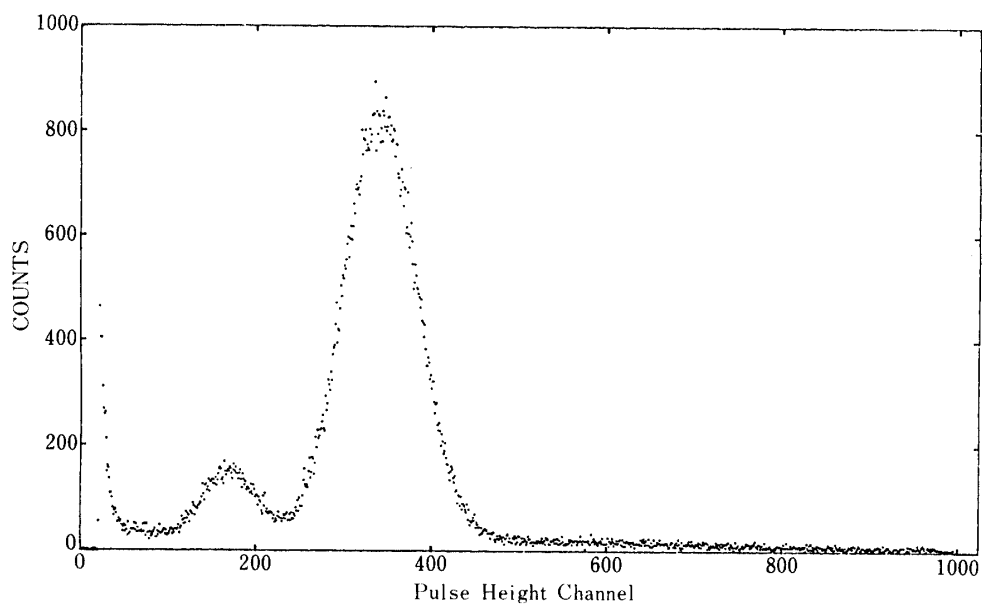


図 25 (b) ^{241}Am 照射時の信号波高
60 keV のピークは 340 ch に見られる

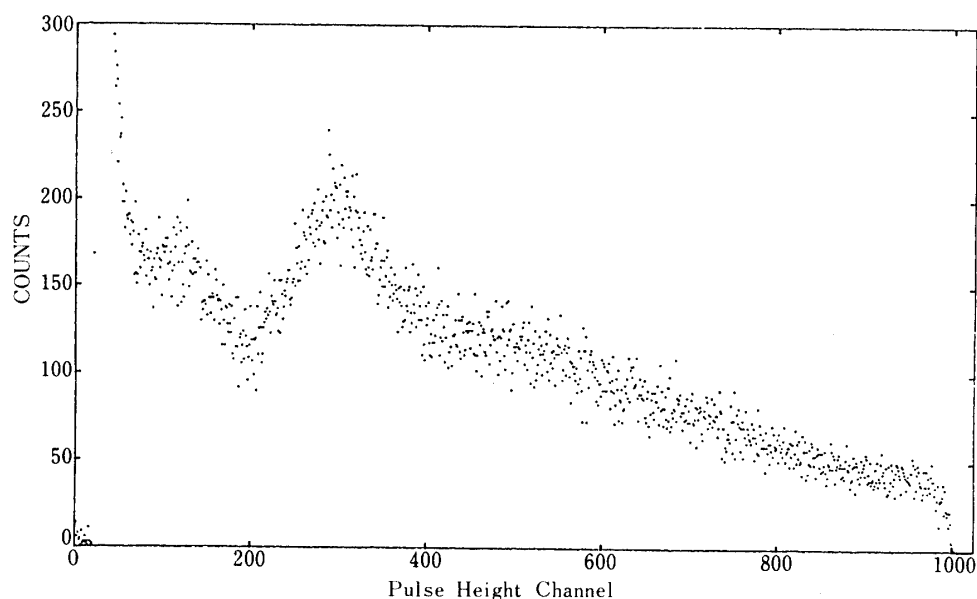


図 25 (c) バックグラウンドによる信号波高

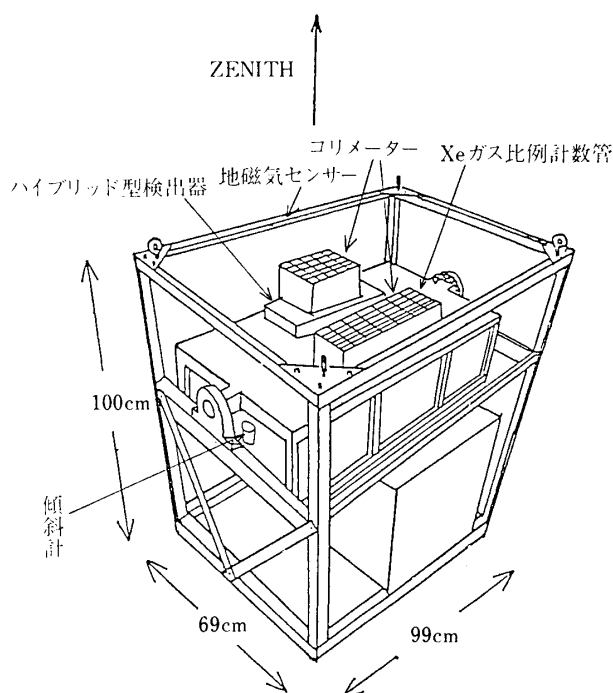


図 26 ゴンドラ

ので、それもバックグラウンドとなってしまう。しかし荷電粒子の場合 NaI を通過した後、プラスチックシンチレーターまで達したものについては、ここでも光を出す。この時 NaI とプラスチックとの発光機構の違いによって、NaI で光った時に出る信号は、その立ち上がり時間が遅く、プラスチックで光った時に出る信号は、その立ち上がり時間が速い。従って立ち上がりの速い信号と同時に出了る信号については、荷電粒子によるものであるとして取り除く。また、荷電粒子が NaI 中でエネルギーを失ってしまった場合には、上記の方法は使えないが、荷電粒子の場合は比例計数管でも信号を出すので、これとの反同時計測により取り除くことができる。

4-3 信号波高とエネルギー分解能

ハイブリッド型検出器に ^{109}Cd の X 線を照射した時と、 ^{241}Am の X 線 (60 keV) を照射した時の信号波高分布を、それぞれ図 25(a), (b) に示す。また実験室内のバックグラウンドによる信号の波高分布を図 25(c) に示す。図 25(a), (b) よりエネルギー分解能を求めると、22.1 keV では $(45 \pm 4)\%$ 、60 keV では $(30 \pm 2)\%$ となった。

第5章 気球実験

我々は上記の二種類の検出器が上空で正常に動作することの確認と Her X-1 の観測を目的として、気球による実験を行った。

5-1 ゴンドラ

検出器を搭載したゴンドラの概略を図 26 に示す。ゴンドラの中には、地上からのコマンドによりモーターで上下角を変えることができる中ゴンドラがあり、検出器はこの中ゴン

ドラに載せてある。検出器の入射面には、半値巾で東西方向 15 度、南北方向 4 度のコリメーターを取り付け、その視野を絞ってある。これにより検出器の有効面積は、Xe ガス比例計数管が 294 cm^2 、ハイブリッド型検出器が 110 cm^2 となった。また、各検出器、コリメーターは入射面を除く部分を厚さ 1 mm の鉛で覆った。

ゴンドラには、その環境を知る為の各種センサーが取り付けられており、その内、検出器の視野の天頂からの傾きを知る為の傾斜計（東西方向と南北方向の二方向）と温度計は、中ゴンドラに取り付けてある。ゴンドラの向きを知る為の地磁気センサー（GA センサー）と気圧計（高圧用、低圧用）は、ゴンドラの支柱に取り付けてある。ゴンドラの重量は、バラストを除いて 118.2 kg である。

5-2 信号处理系

各検出器からの信号は、図 27 のブロックダイアグラムにある様に処理される。Xe ガス比例計数管については、メインカウンターの信号は、ベトカウンターの信号とアンチコインシデンスをとり、その信号波高と立ち上がり時間がデジタル化されて送られる。ベト

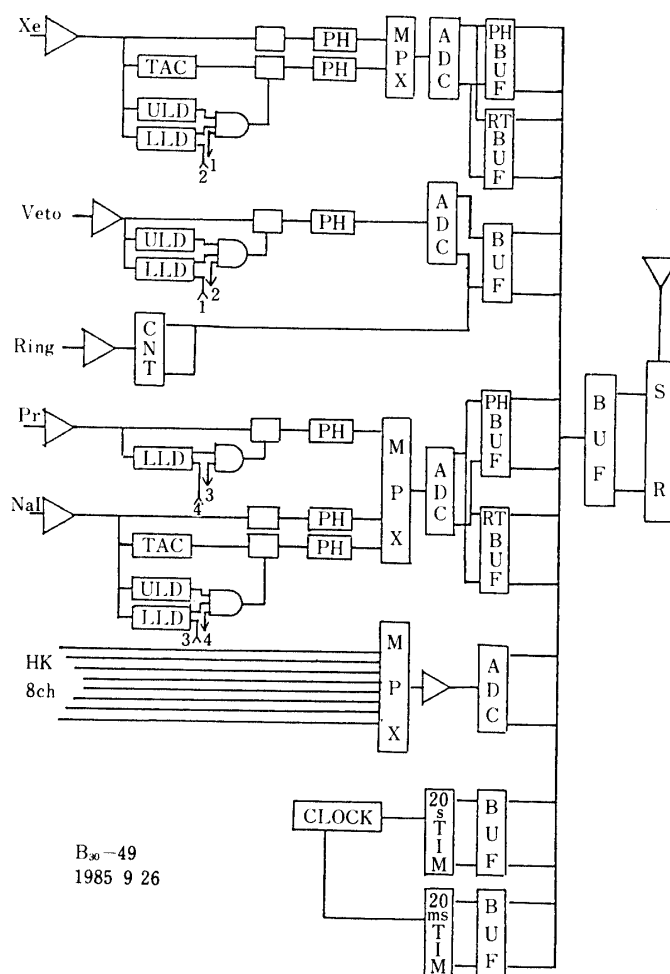


図 27 ブロック・ダイアグラム

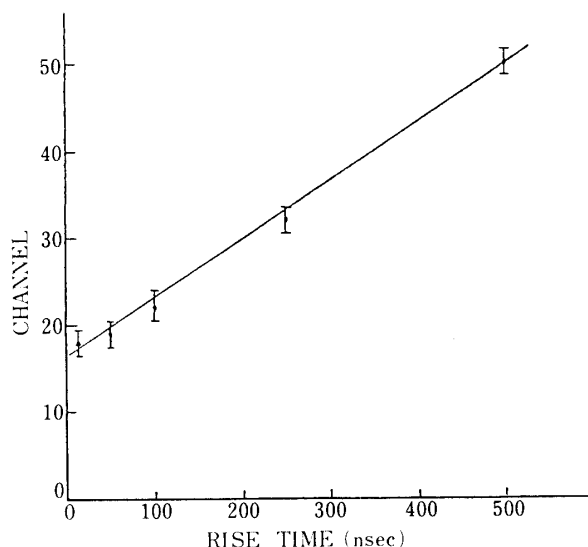


図 28 立ち上がり時間処理回路
(Xe ガス比例計数管用) の入出力特性

カウンターの信号は、メインカウンターとのアンチコインシデンスにより、その信号波高のみがデジタル化されて送られる。また、ガードリングからの信号は、当初の予定では2つのリングからの信号の差をとりアンチ信号とする予定であったが、地上でのテストの結果、後に述べる様に十分な信号が出なかった為、急きょリング1からの信号のカウントだけをデジタル化して送ることにした。

ハイブリッド型検出器については、シンチレーションカウンターからの信号を、PR ガス比例計数管からの信号とアンチコインシデンスをとり、その信号波高と立ち上がり時間がデジタル化されて送られる。PR ガス比例計数管からの信号は、シンチレーションカウンターとのアンチコインシデンスにより、その信号波高のみが送られる。

その他 HK センサーからの出力信号とコマンド応答信号、20 ミリ秒のタイマー信号がデジタル化されて送られる。

5-3 地上テスト

フライト用の信号処理回路の動作を確認することと、それを用いての検出器の動作を確認する為に、以下に示すテストを行なった。

5-3-1 Xe ガス検出器

(A) 信号の立ち上がり時間

立ち上がり時間処理回路にパルサーからの信号を、その立ち上がり時間を変化させて入力した時の出力の変化を図 28 に示す。図の様に入力信号の立ち上がり時間と出力チャンネルは、ほぼリニアである。図中の直線は最小自乗法により決めたものである。

次に Xe ガス比例計数管に ^{109}Cd からの X 線 (22.1 keV) を照射した時と、実験室内のバックグラウンドを計測した時について、メインカウンターからの信号をフライト用の回

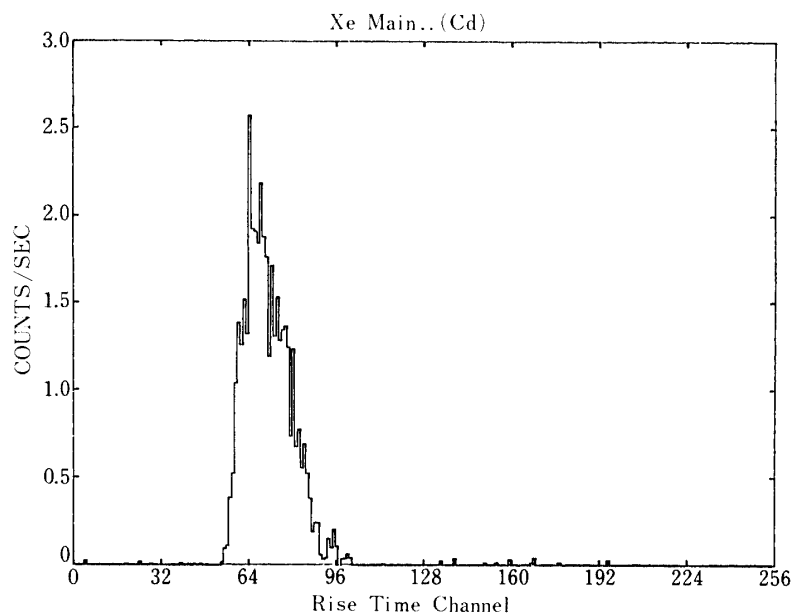
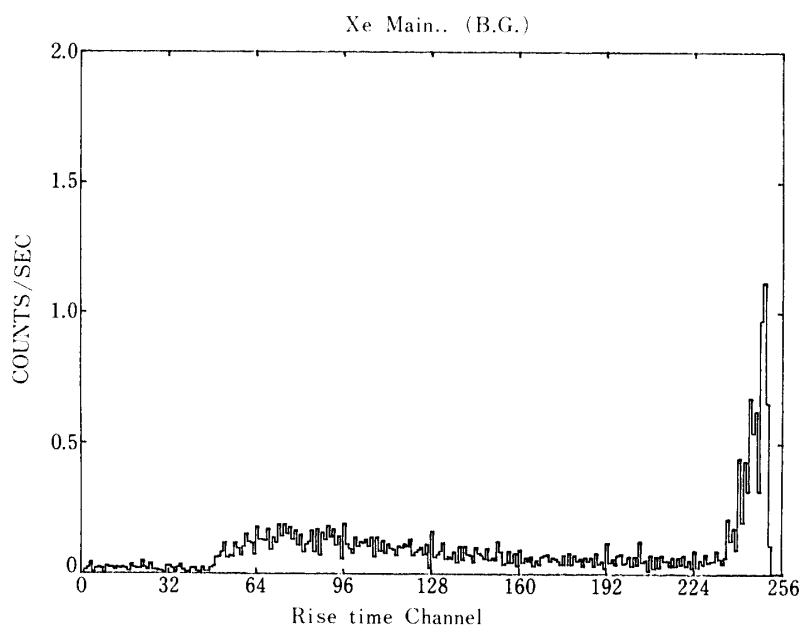
図 29 ^{109}Cd 照射時の信号の立ち上がり時間

図 30 バックグラウンドによる信号の立ち上がり時間

路を用いて立ち上がり時間を見たのが、それぞれ図 29, 図 30 である。X 線による信号の立ち上がり時間は 70 チャンネル付近にあり、立ち上がり時間としては、0.8 マイクロ秒程度である。またバックグラウンドについては、ピークが 250 チャンネル付近であり、立ち上がり時間としては 3.3 マイクロ秒程度である。これらは前回の測定と一致しており検出器が正常に働いていることを示している。

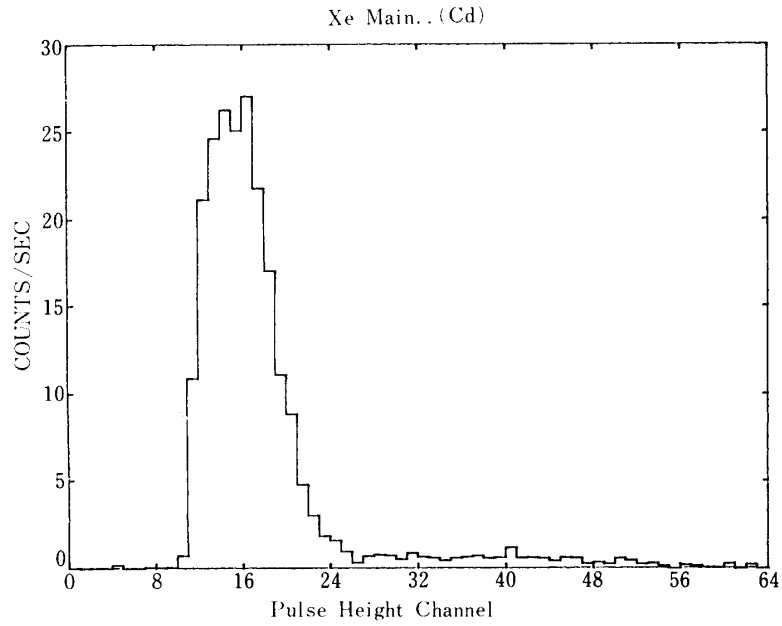


図 31 ^{109}Cd 照射時の信号波高
22.1 keV のピークは 16 ch に現われている。

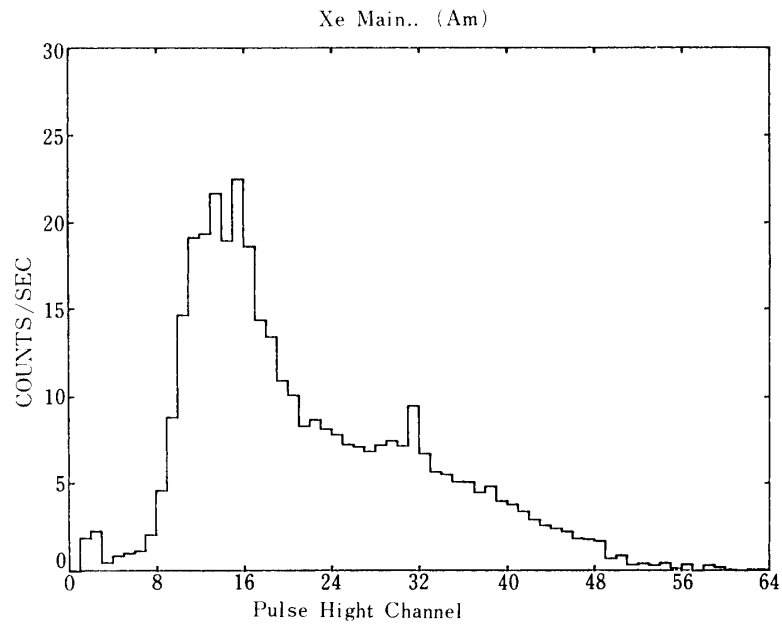


図 32 ^{241}Am 照射時の信号波高
エネルギー分解能が悪い為に 60 keV のピークはそのエスケープピーク (25.4 keV) に埋もれている。

(B) 信号波高

Xe ガス比例計算管に ^{109}Cd の X 線と ^{241}Am の X 線を照射して、そのメインカウンターからの信号をフライト用の回路で処理した時の信号波高の分布をそれぞれ図 31, 図 32 に示す。また実験室内のバックグラウンドによる信号波高の分布を図 33 に示す。前回の測定

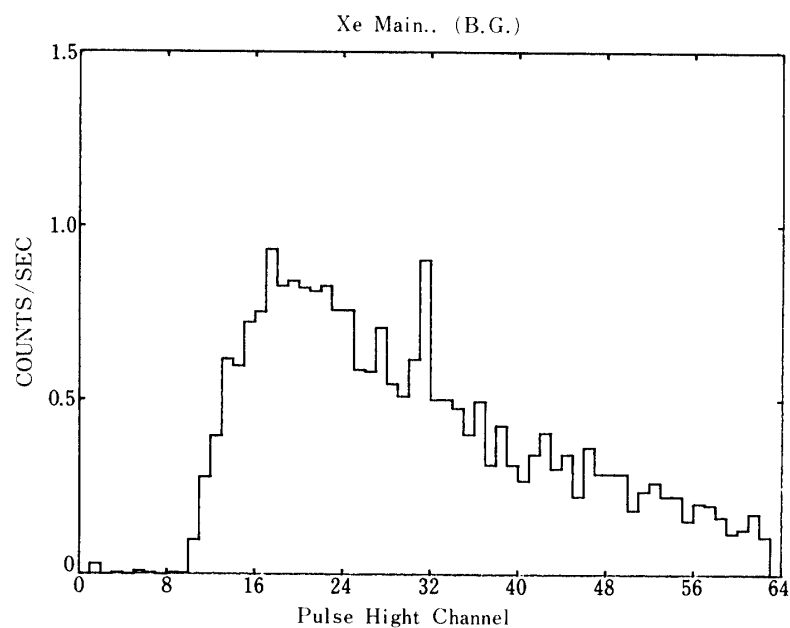


図 33 バックグラウンドによる信号波高

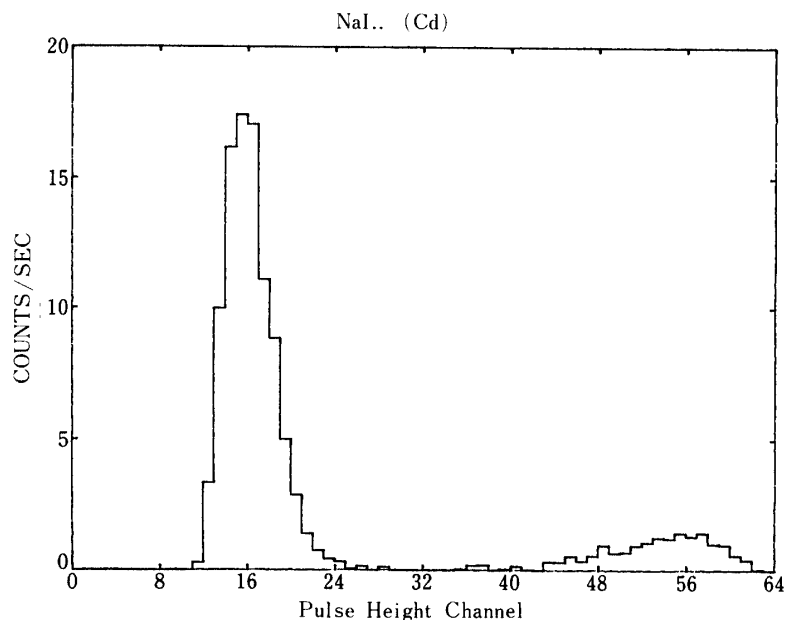


図 34 ^{109}Cd 照射時の信号波高
22.1 keV のピークが 16 ch に現われている。

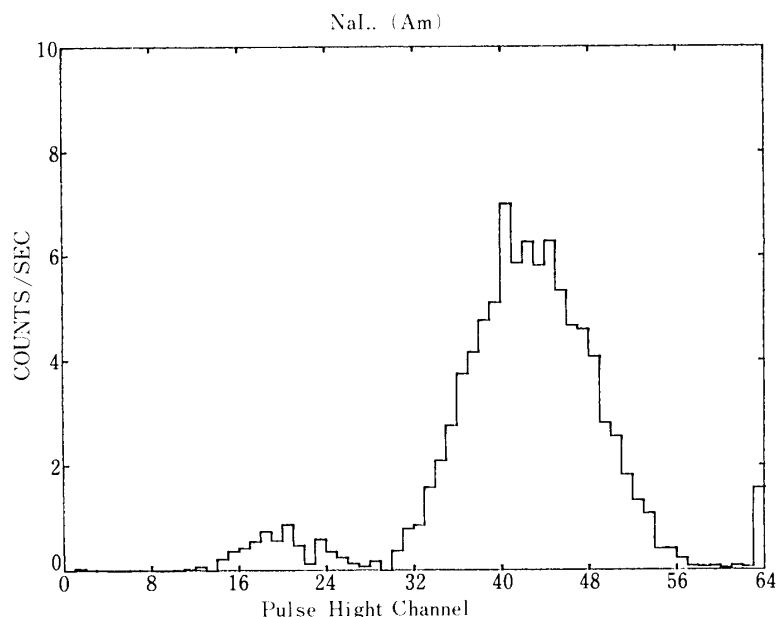


図 35 ^{241}Am 照射時の信号波高
60 keV のピークが 42 ch に現われている。

で示した様に、エネルギー分解能が悪い為、 ^{241}Am の測定において 60 keV のピークが、そのエスケープピーク (25.4 keV) に埋もれてしまっているのが解る。

(C) ガードリングからの信号

^{109}Cd からの X 線を照射して、ガードリングからの信号を測定したが、リング 1 からの信号が回路系のノイズと比べて、わずかに判るだけで、その他のリングからの信号はノイズに埋もれてしまっていた。この原因としてアノードへ印加する電圧の不足が考えられるが、今回はアノードからの信号を処理する回路の都合上、印加電圧を上げることが出来なかったため、リング 1 からの信号のカウントのみをデータとして送ることにした。

5-3-2 ハイブリッド型検出器

(A) 信号波高とエネルギー分解能

ハイブリッド型検出器に ^{109}Cd の X 線と ^{241}Am の X 線を照射したもの、及び実験室のバックグラウンドによるものの信号について、フライト用の回路を用いて信号波高を測定した時の結果を図 34 から図 36 に示す。これによりエネルギー分解能を求めると、22.1 keV で $(39 \pm 6)\%$ 、60 keV で $(35 \pm 3)\%$ となり、前回の測定と一致しており検出器は正常に働いている。

(B) 信号の立ち上がり時間

ハイブリッド型検出器からの信号を処理する回路に、パルサーからの信号を入力した時の出力の様子を図 37 に示す。この様に入力と出力はほぼニアになっている。図中の直線は最小自乗法により決めたものである。

ハイブリッド型検出器に ^{109}Cd の X 線を照射したもの、及び実験室のバックグラウンド

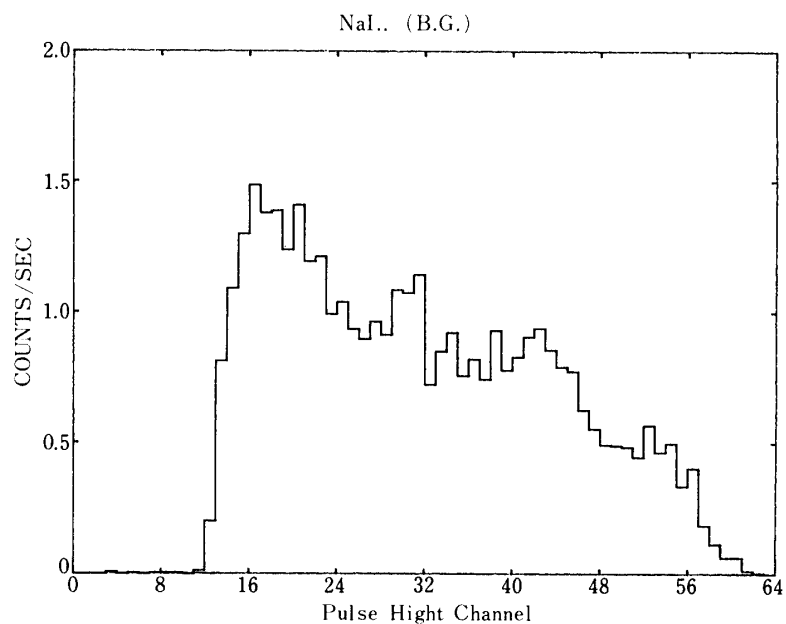
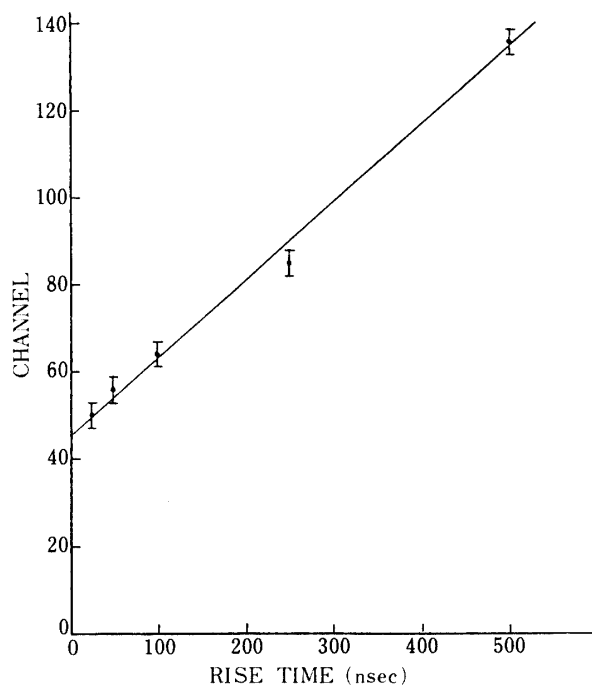


図 36 バックグラウンドによる信号波高

図 37 立ち上がり時間処理回路
(ハイブリッド型検出器用) 入出力特性

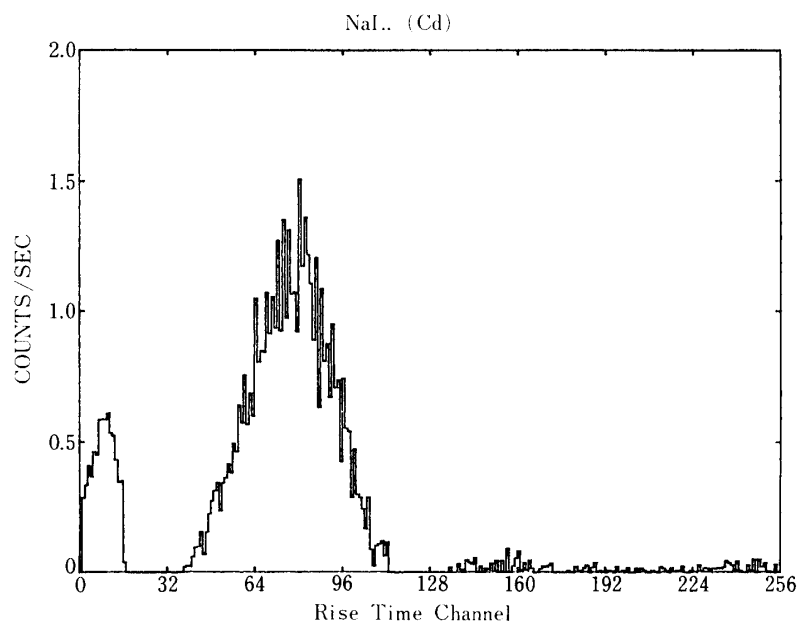


図 38 (a) ^{109}Cd 照射時の信号の立ち上がり時間

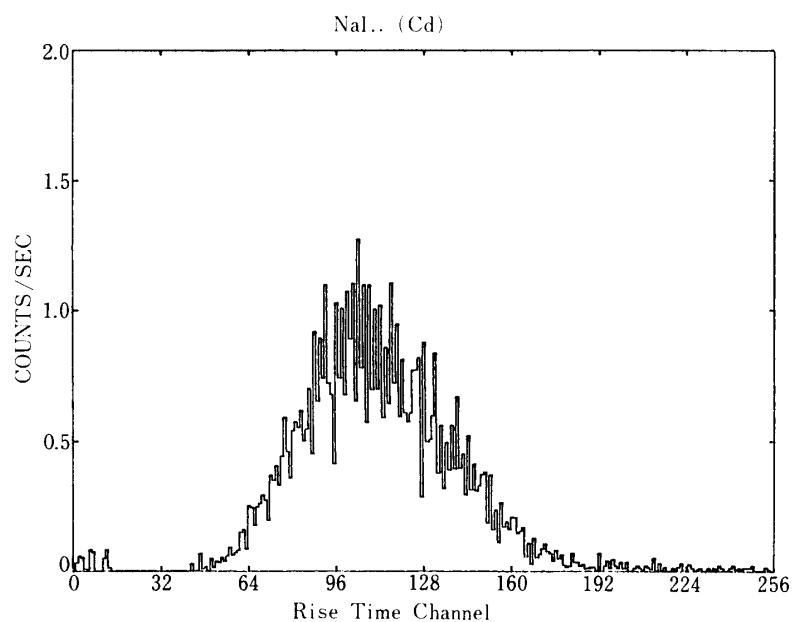


図 38 (b) (a)と同じであるが、回路の入出力特性を変えた為にピークの位置がずれている。

(これ以後は新しい方の入出力特性の設定)

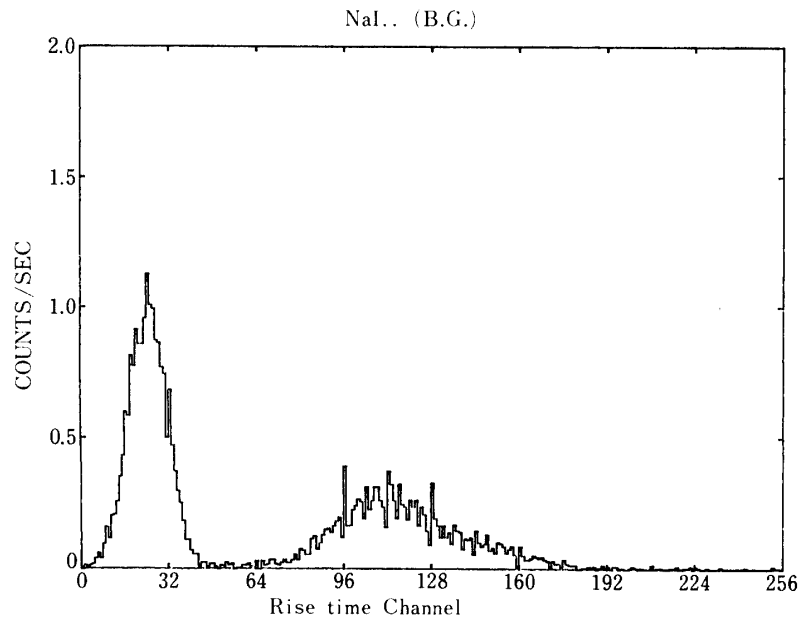


図 39 バックグラウンドによる信号の立ち上がり時間

によるものの信号について、フライト用の回路を用いて立ち上がり時間を測定した時の結果をそれぞれ図 38, 図 39 に示す。図 38 の中で (a) のものは、図 37 と同じ入力対出力の特性によるものであるが、(b) のものは、以後、入力に対する出力を変えて、例えば ^{109}Cd からの X 線による信号の立ち上がりのピークが、元のままでは 80 チャンネルに出る所を、115 チャンネルに出る様にしたものである。従って ^{109}Cd からの X 線による信号の立ち上がり時間は 250 ナノ秒程度であり、NaI の蛍光減衰時間と一致する。ところが、バックグラウンドにおいて立ち上がりの速い所 (図 37 の特性では出てこないはずのチャンネル) にピークが現われている。これは荷電粒子による信号であると考えられるが、この様なチャンネルに出てくるのは、パルサーからの信号に比べ検出器からの信号は decay が速いので、立ち上がりの速い信号については、使用した回路では、より立ち上がりが速い様に測定された為であると考えられる。

5-4 気球実験

検出器を搭載したゴンドラは、1985 年 9 月 26 日午前 7 時 20 分に三陸大気球観測所から B₃₀-49 号気球により放球された。放球後の高度変化の様子を、測距のデータをもとに描いたものが図 40 である。気球は放球後、ゆっくり上昇して行き、午前 11 時頃には、ほぼ高度 34 km に達した。その後若干の上下はあるものの安定にフライトしていた。ところが Her X-1 が検出器の視野に入る直前の 14 時 20 分ごろに外来電波によりゴンドラが切り離され落下してしまった。このように Her X-1 の観測は出来なかったが、安定にフライトしていた時のデータを使って、検出器のバックグラウンドについて解析を行った。

放球後の傾斜計と GA の出力を図 41 から図 43 に示す。傾斜計の出力は、検出器の視野が天頂から 4 度だけ南を向いている時に、東西方向、南北方向共にゼロになる様にセット

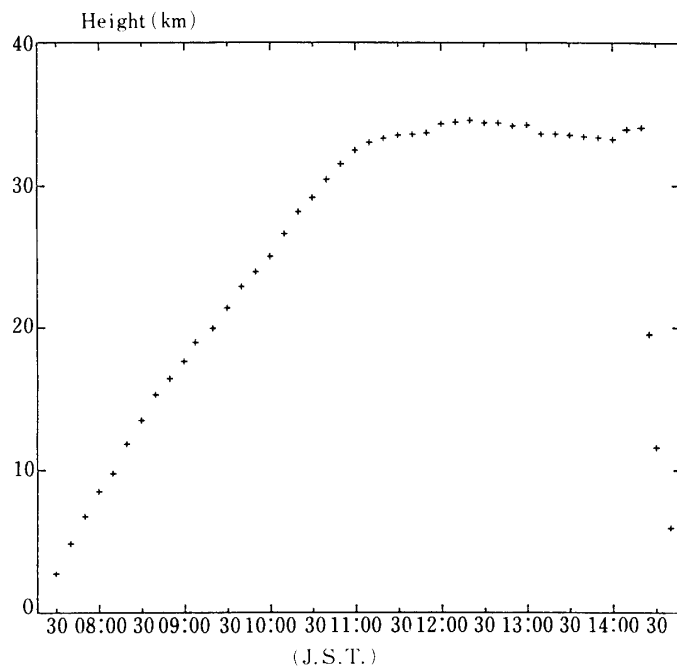


図 40 放球後のゴンドラの高度変化

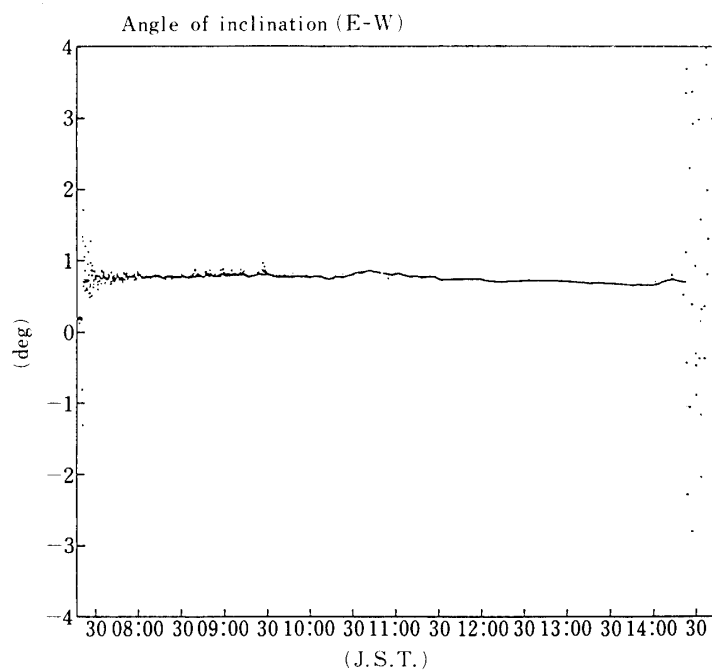


図 41 傾斜計出力（東西方向）

してある。また、GA の出力は検出器が南向きか北向きの時にゼロになる様にセットしてある。GA センサーの出力によると、ゴンドラの上昇中は方位角方向に回転しているが、11 時 17 分に地上からのコマンドにより方向規正をかけてからは、その回転の止まっていること

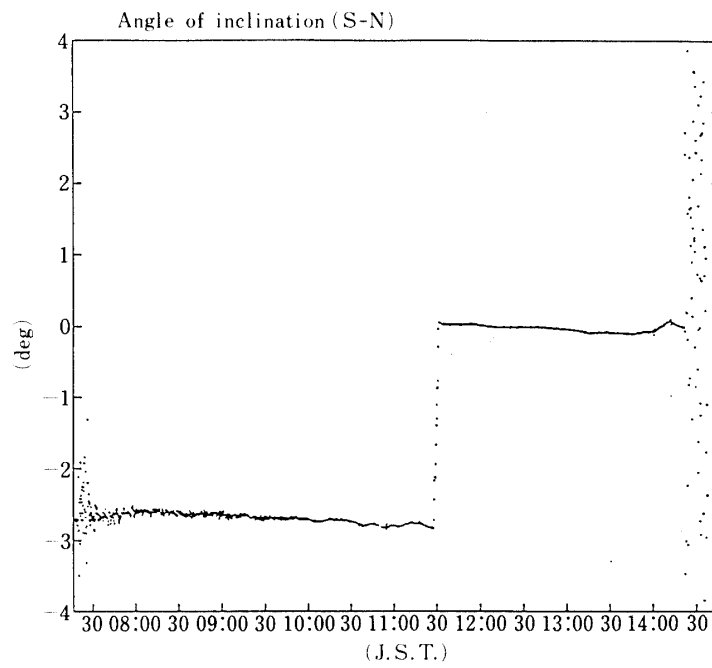


図 41 傾斜計出力 (南北方向)

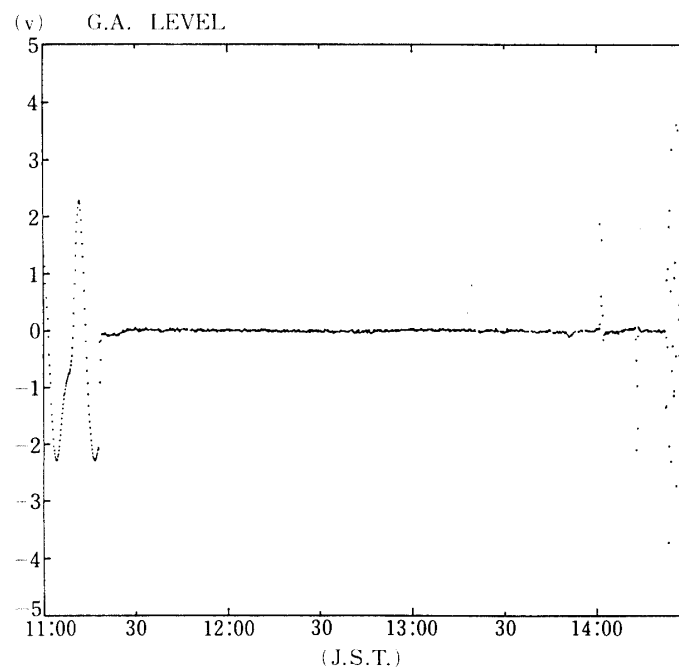


図 43 GA 出力

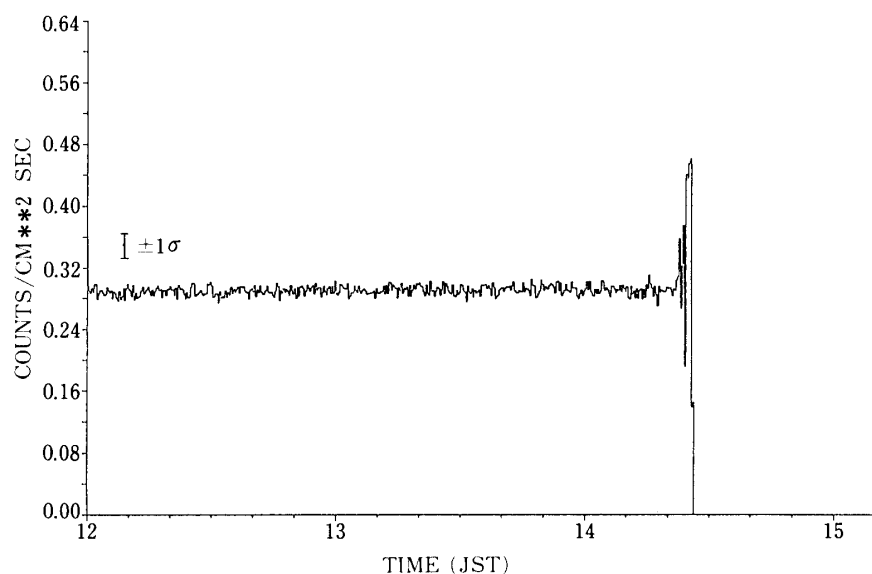


図 44 Xe ガス比例計数管
カウンティングレート

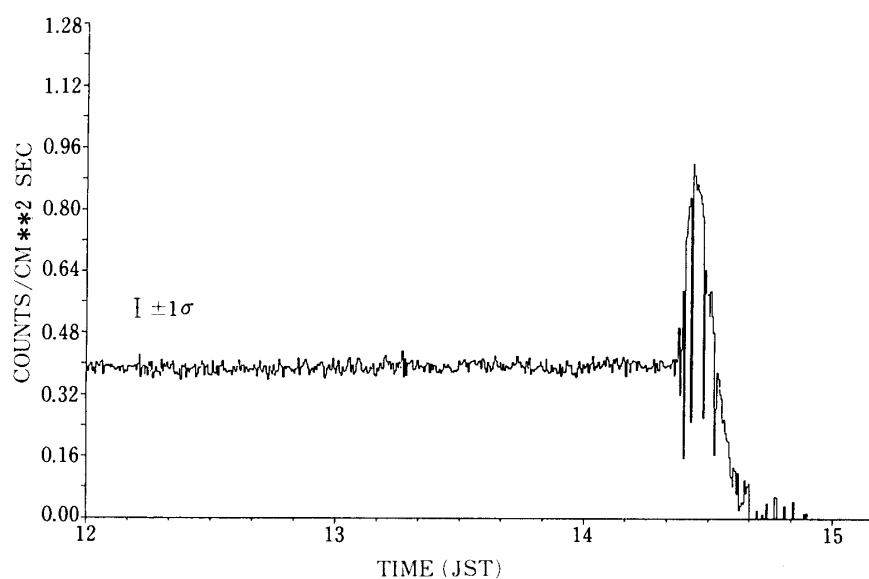


図 45 ハイブリッド型検出器
カウンティングレート

がわかる。また、傾斜計の出力によると、11 時 27 分から 4 回コマンドを送り、南北方向の傾斜角を変えて検出器の視野の向きを天頂から南へ 4 度としたが、その様子が表われている。その後 14 時までは検出器は安定に天頂から南へ 4 度傾いた所を向いていた。そして GA センサーの出力に表われている様に、バックグラウンドの方向依存性を見る為に、14 時 1 分コマンドによりゴンドラの向きを方位角方向に 180 度回転した。そして 14 時 12 分

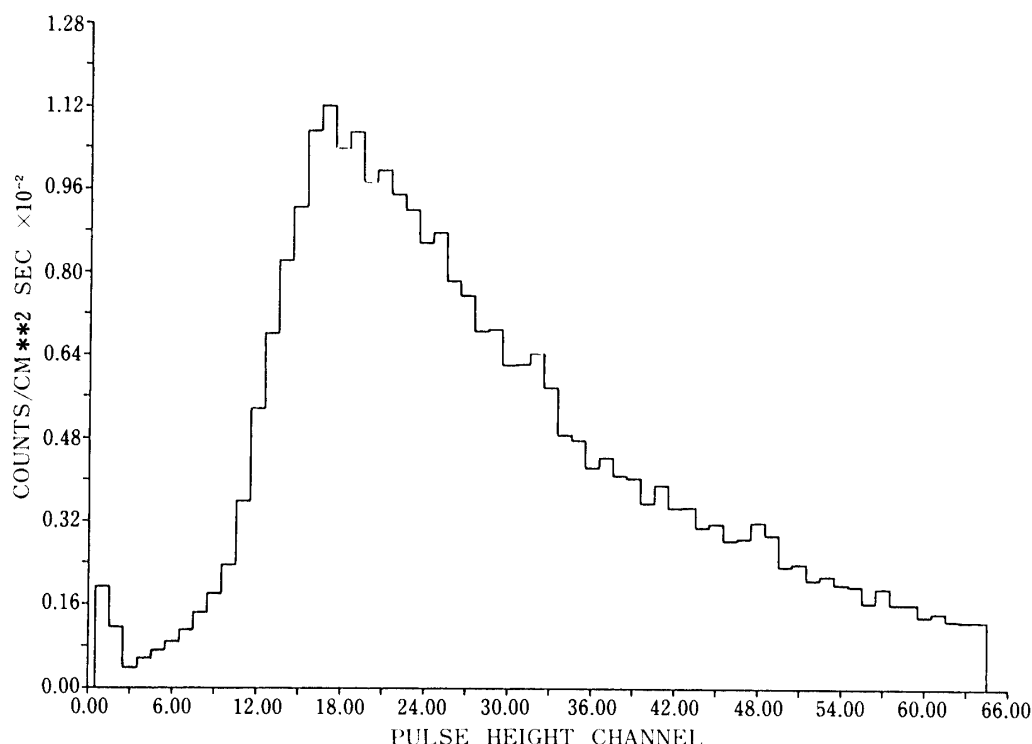


図 46 Xe ガス比例計数管
上空での信号波高分布

に、もう一度 180 度回転させ、ゴンドラの向きを元に戻した。従って 14 時 2 分から 14 時 12 分までの間は、検出器の視野は天頂から北へ 4 度傾いた所を見ていることになる。

5-5 結果

安定にフライトしていた時の内、12 時から 14 時 20 分までの間の Xe ガス比例計数管とハイブリッド型検出器のカウンティングレートの変化をそれぞれ図 44, 図 45 に示す。上記の様に、14 時 1 分と 14 時 12 分に検出器の視野の向きを変えたが、カウンティングレートに変化が見られず、検出器の視野内には X 線源は入ってなかったと考えられる。

この間に Xe ガス比例計数管からの信号により求めた信号波高のスペクトルと立ち上がり時間の分布を、それぞれ図 46, 図 47 に示す。これらのデータは、すでにベトカウンターからの信号を使ってアンチ法により荷電粒子成分が幾分取り除かれているが、RTD 法(図 47 で 11 チャンネル、即ち 1.8 マイクロ秒より遅いものを取り除いた)により、さらに X 線成分だけを取り出すと、バックグラウンドのフラックスは $(7.94 \pm 0.01) \times 10^{-2}$ photons/cm²·sec となり、サイクロトロン・ライン観測の為の要請(8.3×10^{-2} photons/cm²·sec 以下)を満たすことが出来た。ただし RTD 法による除去の場合、X 線による信号と荷電粒子による信号の分布の中に、オーバーラップしている部分があり、上記の所(11 チャンネル)で Cut すると、X 線成分を 15 %程度捨てていることになり、また荷重粒子成分は 20 %程度残っていることになる。

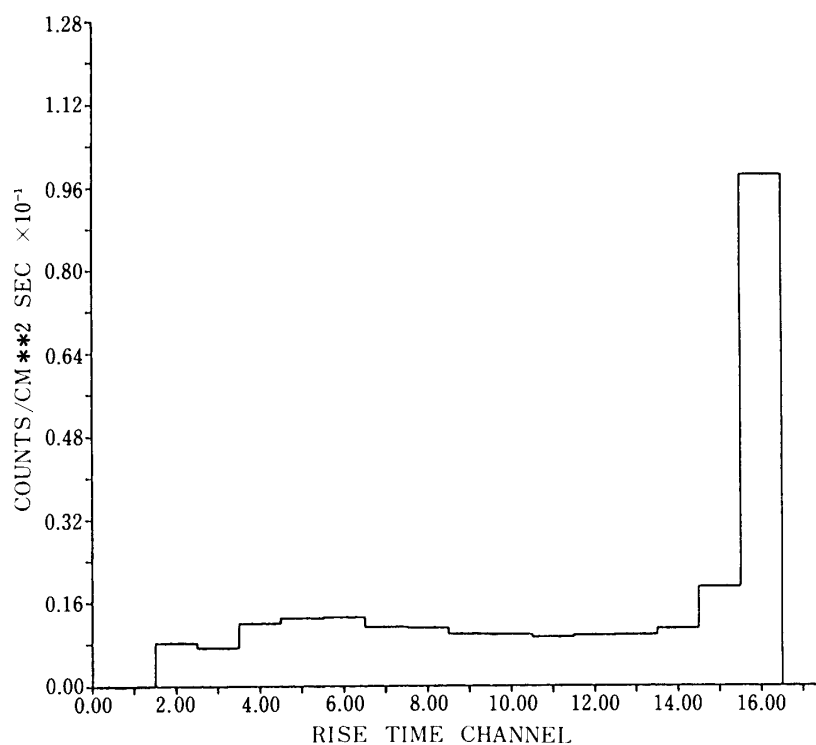


図 47 Xe ガス比例計数管
上空での立ち上がり時間分布

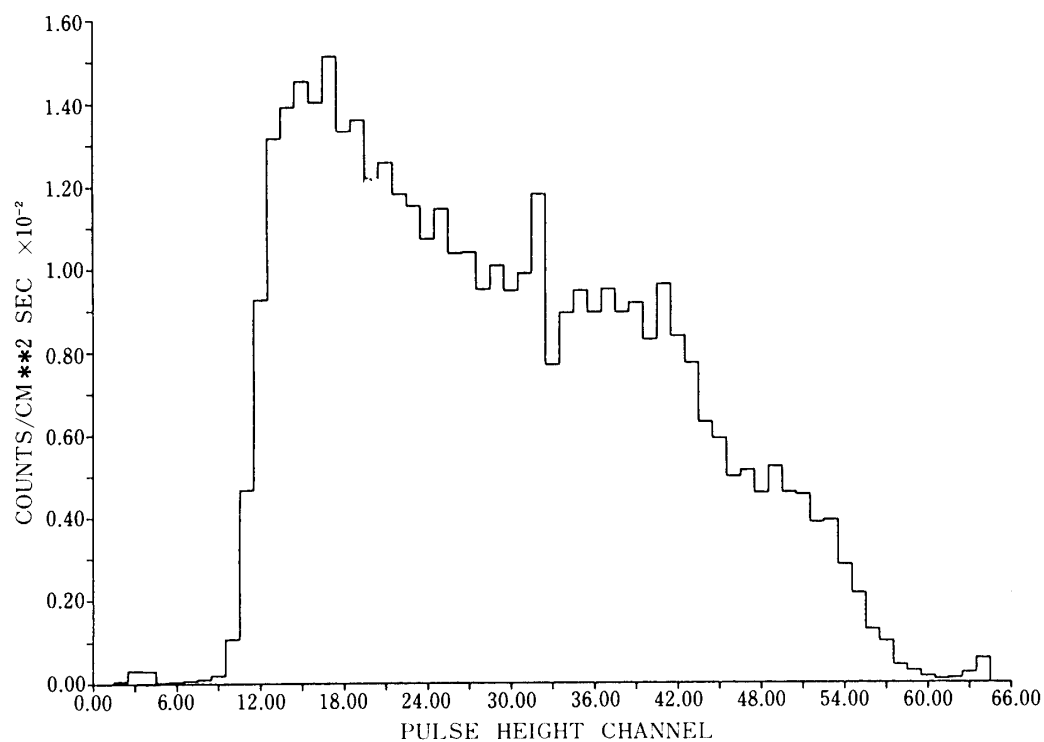


図 48 ハイブリッド型検出器
上空での信号波高分布

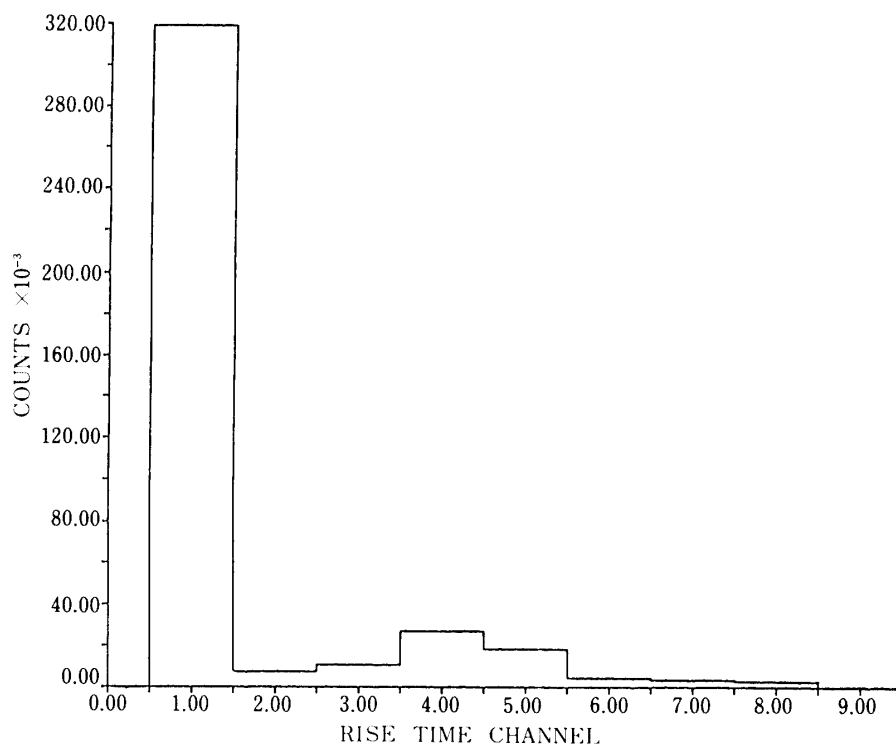


図 49 ハイブリッド型検出器での信号立ち上がり時間

ハイブリッド型検出器からの信号により求めた信号波高のスペクトルと立ち上がり時間の分布を、それぞれ図 48、図 49 に示す。これらのデータは、すでに入射面の薄型比例計数管からの信号を使って、アンチ法によりバックグラウンドを減らしているが、さらに RTD 法により X 線成分だけを取り出すと、バックグラウンドのフラックスは (6.08 ± 0.01) photons/cm²·sec となり、これも所期の要請を満足している。

第 6 章 まとめ

Her X-1 からのサイクロトロン・ラインの観測を目的とする二種類の硬 X 線検出器の開発を行ったが、サイクロトロン・ライン観測の為のバックグラウンドに対する要請については、それを達成することが出来、しかも検出器は観測中安定に働いていたので、所期の目的は果たせた。しかしながら Xe ガス比例計数管において、当初はガードリングからの信号も使って五面反同時計測をする予定であったが、信号が小さすぎて出来ず、三面反同時計測としたことや、エネルギー分解能が悪かったことなど今後改良すべき点が残っている。この二点については、アノードへの印加電圧が低すぎたことによるものであると考えられる。従って、これを改良し五面反同時計測が出来れば、よりバックグラウンドを減らすことが可能となるであろう。また、今回薄型 PR ガス比例計算管を NaI シンチレーションカウンターの入射面に置き、ハイブリッド型検出器としたが、この薄型の計数管を Xe ガス比例計数管の入射面に置くことも考えられ、その方法によりバックグラウンド除去に対して新しい知見が得られるものと考えられる。従って、今後この型の検出器の開発も行いたい

と考える。

参 考 文 献

- [1] P. C. Joss et al. 1977, Ap. J, **214**, 874.
- [2] R. H. Becker et al. 1977, Ap. J, **214**, 879.
- [3] S. H. Pravdo et al. 1977, Ap. J, **215**, 161.
- [4] J. Trümper et al. 1977, Ann. N. Y. Acad. Sci, **302**, 538.
- [5] J. Trümper et al. 1978, Ap. J, **219**, L 105.
- [6] P. C. Joss et al. 1978, Ap. J, **225**, 994.
- [7] P. C. Joss et al. 1980, Ap. J, **235**, 592.
- [8] N. E. White et al. 1983, Ap. J, **270**, 711.
- [9] T. Ohashi. 1984, International Symposium on X-ray Astronomy (Bologna, 1984).
- [10] P. Khabka et al. 1984, International Symposium on X-ray Astronomy (Bologna, 1984).
- [11] H. Oegelman et al. 1984, International Symposium on X-ray Astronomy (Bologna, 1984).
- [12] M. Nakagawa et al. 1984, 宇宙研報告, **11**, 71.
- [13] S. Miyamoto et al. 1984, 宇宙研報告, **12**, 163.