

宇宙硬 X 線偏向度検出器の構成についてのモンテカルロ  
シミュレーション\*

桜井 敬久\*\*・平山 秀也\*\*・野間 元作\*\*・新関 八郎\*\*\*  
中川 道夫\*\*\*

(1987年5月28日受理)

Optimization of the Design of a Cosmic Hard X-ray  
Polarimeter by Monte Carlo Calculation

By

Hirohisa SAKURAI, Hideya HIRAYAMA, Motosaku NOMA, Hachiro NIIZEKI  
and  
Michio NAKAGAWA

**Abstract:** The development of a Compton-scatter X-ray polarimeter is taking place to observe the linear polarization of cosmic hard X-ray sources. The polarimeter consists of a scatterer of plastic-scintillator and four NaI scintillation counter to catch scattering X-rays. The size of the scatterer in the 50-100 keV energy range was optimized with the aid of a Monte Carlo simulation assuming the observation of Cyg X-1 at a balloon altitude. The plastic-scintillator of 5 inch in diameter and 6 cm in thickness was better as the scatterer in the calculation. The minimum detectable polarization at 3 standard deviation for Cyg X-1 in a 60 min. observation time is 10 % in the designed detector.

---

\* 宇宙研特別事業費による研究論文  
\*\* 山形大学理学部  
\*\*\* 大阪立大学理学部

## 1. はじめに

宇宙 X 線源の直線偏光度の観測は、カニ星雲のような広がりのある X 線源の磁場構造、Her X-1 のような X 線パルス発生機構、そして Cyg X-1 のようなアクリション・ディスクの構造を調べる上で重要である。特に、幾何学的には薄い光学的に厚いディスクからの X 線は、電子散乱を受けるため偏向していると考えられ [1]、硬 X 線領域では、軟 X 線より大きく偏向している可能性がある。

今まで、Li を散乱体とした Thomson 散乱型検出器や石墨結晶反射板のブラッグ反射型検出器により数 KeV 領域の観測が行われており、カニ星雲で 19 %、Cyg X-1 で 5 % の偏光度を示している [2], [3]。しかし硬 X 線での観測結果は、現在まで出されていない。硬 X 線での偏光度の観測は、X 線源の内部構造を直接知る上で非常に重要であり有効な硬 X 線偏光度検出器の開発が必要である。

我々は、50~100 KeV 領域の硬 X 線偏光度検出器としてプラスチックシンチレータを散乱体とした Compton 散乱の方位角分布の指向性を利用した検出器の開発を行っている [4]。指向性のよい散乱体の形状を求める事は、この開発の重要な点であるため偏向 X 線に対するモンテカルロシミュレーション計算を行い、観測に最適な形状を調べた。又、高度 3.5 g/cm<sup>2</sup> で Cyg X-1 をこの検出器で気球観測した場合の測定可能な偏光度の下限値をバックグラウンドを含めたシミュレーションにより推定した。

## 2. 偏光度検出器の構成

図 1 に検出器の構成を示す。円板のプラスチックシンチレータを散乱体として四方を散乱 X 線検出器である NaI シンチレーションカウンタで囲んでいる。散乱体は、散乱 X 線検出器系の中心に置く。入射 X 線がプラスチックシンチレータでコンプトン散乱をしたときに生じる反跳電子を検出するため、プラスチックシンチレータは光電子増信管で覗かれている。反跳電子と散乱 X 線の同時計数によりバックグラウンドの除去を行う。NaI シンチレータは、15 cm × 15 cm 角型であり、コリメータは、観測を考慮して 8° × 8° (FWHM) の円筒形する。プラスチックシンチレータは、NE 102 A とし、その直径及び厚さはモンテカルロシミュレーションにより観測に最適な値を求める。

## 3. 偏向 X 線のモンテカルロシミュレーション

偏光度検出器は、散乱 X 線の方位角分布の指向性を利用して、入射 X 線の偏光度を測定するものである。従って散乱体は指向性のみで考えれば多重散乱のない点状のものが最適である。しかし、観測においては、面積が大きく且つ検出効率の良い散乱体が必要となる。散乱体の最適な直径、厚さを求めるため偏光 X 線のプラスチックシンチレータ内での振舞いをモンテカルロシミュレーションにより調べた。このシミュレーション計算は、観測データの処理にも必要となる。

図 2 にシミュレーションの流れ図を示す。入射 X 線のエネルギーは、50~100 KeV であるので、散乱体内での相互作用は、光電効果、レイリー散乱、コンプトン散乱の三過程と

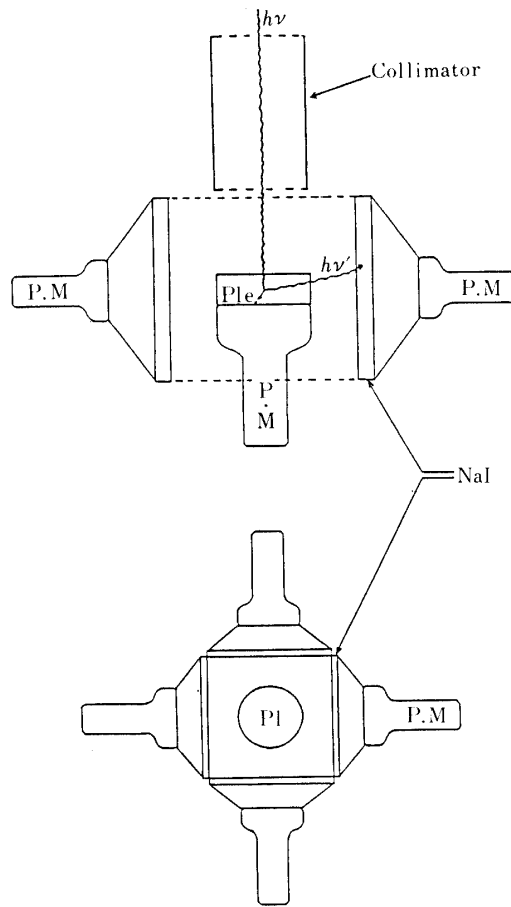


図1 偏向度検出器の構成

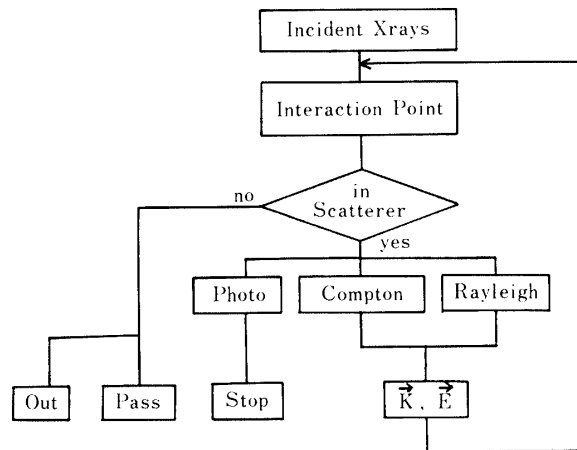


図2 偏向X線のモンテカルロシミュレーション計算の流れ図  $\vec{K}$  は、散乱X線のエネルギーと方向余弦、 $\vec{E}$  は、その電気ベクトルの方向余弦

した。各相互作用のプラスチックシンチレータでの断面積は、Grodstein[5]の炭素と水素についての断面積とプラスチックシンチレータの炭素と水素の組成比により求めた。入射 X 線が散乱体内で光電効果を起したときは、stop とし他の 2 過程のときは、散乱 X 線のエネルギー、方向及び電気ベクトルを求め追跡を繰り返す。散乱体内で 1 回も相互作用したい場合は Pass とし、1 回以上の散乱後、散乱体内より出てきたときを Out とする。入射 X 線個々の履歴はすべて記録される。

レイリー散乱、コンプトン散乱による散乱角 ( $\theta$ ) 方位角 ( $\varphi$ ) 及び電気ベクトルは、以下の偏向 X 線に対する微分断面積の分布を用い、一様乱数を使って求めた。

レイリー散乱

$$d\sigma = r_0^2 (1 - \sin^2 \theta \cos^2 \varphi) d\Omega$$

コンプトン散乱

$$d\sigma = \frac{r_0^2}{2} \frac{K^2}{K_0^2} \left( \frac{K_0}{K} + \frac{K}{K_0} - 2 \sin^2 \theta \cos \varphi \right) d\Omega$$

ここで  $r_0$  は古典電子半径、 $\frac{K}{K_0} = \frac{1}{1 + (E/m_0c^2)(1 - \cos \theta)}$  で  $E$  は X 線のエネルギー、 $m_0c^2$  は電子の静止質量である。

以下に、シミュレーションの一例として 60 KeV の偏向 X 線 30 000 個を直径 5"  $\phi$ 、厚さ 6 cm のプラスチックシンチレータ円板全面に一様に垂直入射させたときの結果を示す。図 3 は、その多数回散乱を含めた Out の X 線の方位角分布である。但し、反跳電子のエネ

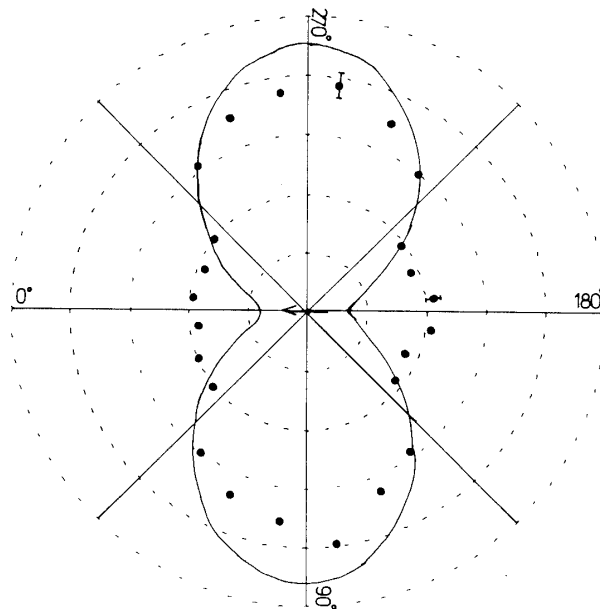


図 3 大きさをもつ散乱体全面に一様入射した偏向 X 線の多数回散乱を含めた散乱 X 線の方位角分布 ← は入射 X 線の電気ベクトルの向き

ルギーを光電子増倍管で検出可能な 5 KeV 以上とし、散乱 X 線は、四方の NaI シンチレータに入ったものだけを取り出している。方位角は、円板の中心から見て 15° 毎に四方の NaI シンチレータを区切った範囲を示す。曲線は、Klein-Nishina の微分断面積を散乱角 45°-135° で積分した方位角分布である。指向性を

$$\xi = (N_{\perp} - N_{\parallel}) / (N_{\perp} + N_{\parallel})$$

； $N_{\perp}$ ：電気ベクトルに垂直な面に入った散乱 X 線の数

$N_{\parallel}$ ：電気ベクトルに平行な面に入った散乱 X 線の数

で示すと、1 点入射で 0.43 に対し全面入射では 0.27 であった。方位角 0°、180° でのふくらみは、円板を 4 辺で囲った影響であると考えられる。図 4 a) に Out 迄の散乱回数の分布を示す。散乱回数は指数関数的に減少しており平均の散乱回数は約 2 回である。図 4 b) は 1, 2, 3 各散乱回数で出てきた散乱 X 線の指向性を示す。3 回散乱後でも指向性を残している。点線は、すべての多数回散乱を含めた指向性を示す。

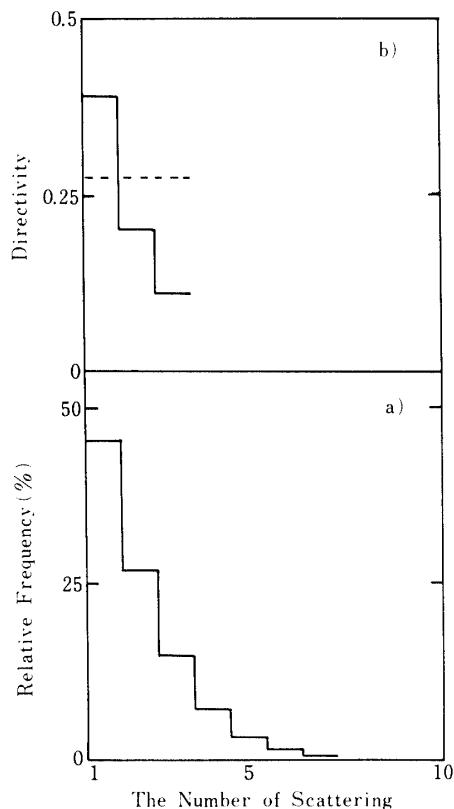


図 4 a) 散乱体より出てきた散乱 X 線の散乱回数分布  
b) 各散乱回数に対する指向性破線は、全散乱の指向性

## 4. シミュレーションの結果

観測に適した検出器の良さは

$$\alpha = \frac{N_{\perp} - N_{11}}{\sqrt{N_{\perp} + N_{11}}}$$

により決められる。

多数回散乱を含めた指方向性を $\xi$ 、検出効率(入射 X 線に対する Out の散乱 X 線の数の比)を $\eta$ とすると観測される偏向度は、

$$P = \frac{\alpha \sqrt{I_x + I_B \Omega}}{I_x}, \frac{1}{\xi \sqrt{\eta} \sqrt{AT}}$$

となる。

ここで、 $I_x$  は X 線源の強度、 $I_B \Omega$  はバックグラウンドの強度、 $A$ 、 $T$  は各々、散乱体の面積と観測時間である。

又、1回散乱にのみ注目したときは、1回散乱の指向性を $\xi_1$ 、検出効率を $\eta_1$ とすると

$$P = \frac{\alpha \sqrt{I_x + I_B \Omega}}{I_x} \cdot \frac{\sqrt{\eta}}{\xi_1 \eta_1 \sqrt{AT}}$$

となる。

ここで

$$Q_M = \frac{1}{\xi \eta \sqrt{AT}}, \quad Q_1 = \frac{\sqrt{\eta}}{\xi_2 \eta_1 \sqrt{AT}}$$

は、検出器の検出効率を含めた良さの指標となり小さな値ほど良い。

図5は、5"φ、6 cm厚のプラスチックシンチレータの $Q_M$ 、 $Q_1$ の偏向 X 線の入射エネルギー

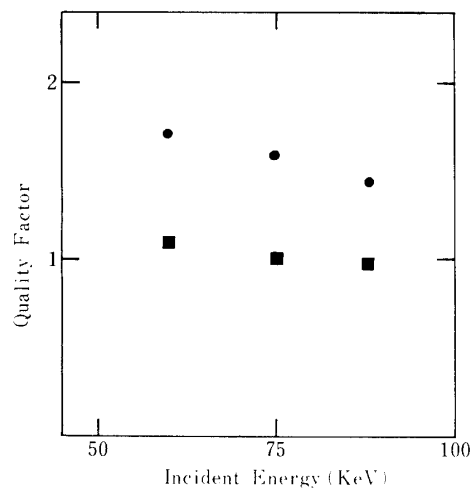


図5  $Q_M$ 、 $Q_1$  値の入射偏向 X 線のエネルギーに対する依存性(本文参照) ● :  $Q_1$ , ■ :  $Q_M$

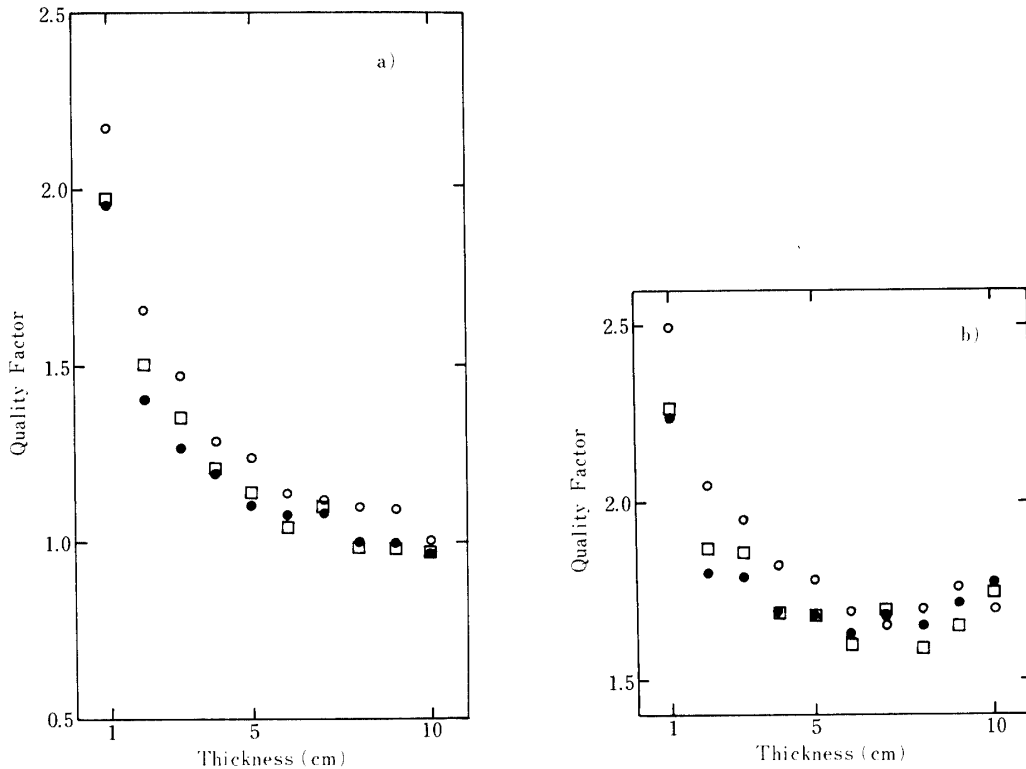


図6 各直径の散乱体の厚さに対する a)  $Q_M$  値, b)  $Q_1$  値 ●: 6"φ, □: 5"φ, ○: 4"φ

ギーに対する依存性を示している。全体に緩やかな減少傾向は、コンプトン散乱の断面積が50~100 KeVのエネルギー付近では小さな変化である事による。 $Q_1$ の減少率が大きいのは、エネルギーとともに指向性が良くなる事による。

このように散乱体の大きさは、入射偏向X線のエネルギーに依存するので、Cyg X-1を高度3.5 g/cm<sup>2</sup>で観測する場合の最適な散乱体の直径、厚さを調べた。シミュレーションは、50,000個の入射偏向X線のエネルギーをCyg X-1のエネルギースペクトラムに合わせて行った。

図6 a), b)は、直径が4"φ, 5"φ, 6"φの各厚さに対する $Q_M$ ,  $Q_1$ を示している。 $Q_1$ は、厚さ6 cm付近が極小となっており $Q_M$ も6 cm付近からの減少率が小さくなっている。 $Q_M$ が6 cmより厚くても減少するのは、 $\xi$ が一定でその場合の割合が大きくなるからである。

シミュレーションの結果は、反跳電子の検出効率を厚さに対して一様としたとき、直径5"φ、厚さ6 cmのプラスチックシンチレータが散乱体として適当である事を示している。又、この散乱体の偏向度検出器によってCyg X-1を高度3.5 g/cm<sup>2</sup>で60分観測したとき、大気バックグラウンドを考慮したシミュレーションでは、3 $\sigma$ での観測可能な偏向度の下限值は10.1%であった。

このシミュレーション計算は、山形大学情報処理センターにおいて行った。

#### 参 考 文 献

- [ 1 ] R. A. Sumyaev and L. G. Titarchuk *Astron. Astrophys.* **143**, 374 (1985)
- [ 2 ] M. C. Weisskopf, E. H. Silver, H. L. Kestenbaum, K. S. Long and R. Novick *Ap. J. (Letters)* **220** L 117 (1978)
- [ 3 ] K. S. Long, G. A. Chann and R. Novick *Ap. J.* **238**, 710 (1980)
- [ 4 ] 桜井敬久, 新関八郎, 野間元作, 前沢潔, 中川道夫, 大気球シンポジウム p 125 (1983)
  
- [ 5 ] G. W. Grodstein *National Bureau of Standards Report NBS-583* (1957)