

銀河 X 線 観 測 結 果

早川幸男*・松岡 勝・山下広順*

Energy Spectra of Galactic X-Rays

By

Satio HAYAKAWA, Masaru MATSUOKA and Koujun YAMASHITA

Abstract: Galactic X-rays were observed with three types of X-ray counters borne on sounding rockets L-3-3, L-3H-1, K-9M-12 and K-9M-15 launched from March, 1965 to March, 1966.

Scintillation counters borne on rockets L-3-3 and L-3H-1 detected the energy spectra of the isotropic component of galactic X-rays and atmospheric X-rays. In the energy range between 5 and 40 keV, the energy spectrum of isotropic galactic X-rays was found to be represented by a power law of the differential exponent of 1.9 ± 0.2 . A little worse, but a reasonable fit was obtained by an exponential spectrum, which corresponds to the free-free transition at a temperature of $T = (1.5 \pm 0.5) \times 10^8 \text{K}$.

Two proportional counters borne on a rocket K-9M-12 detected X-rays with the energy range between 2 and 20 keV from Sco X-1 and X-ray sources in Cygnus. X-rays in the energy range between 5 and 40 keV from X-ray sources in Cygnus were also obtained with detectors on L-3H-1. X-rays from Tau X-1 with the energy ranges of 1~6 keV and 5~40 KeV were detected with twenty-three GM counters on a rocket, K-9M-15, and with two scintillation counters on a rocket, L-3H-1, respectively. Reasonable fits were obtained with an exponential spectrum of $\exp(E/T)dE/E$ with $T = (5 \pm 1) \times 10^7 \text{K}$ for X-rays from Sco X-1, and with a power spectrum of $E^{-(3 \pm 1)} dE$ for X-rays from Tau X-1 and of $E^{-(1.6 \pm 0.5)} dE$ for X-rays emitted from Cyg X-1.

概 要

1965年3月から1966年3月までに銀河X線の観測のためにL-3-3, L-3H-1, K-9M-12, K-9M-15の4機のロケットが用いられた。このとき使用されたX線検出器はシンチレーションカウンター, 比例計数管, GM計数管の3種である。この結果L-3-3とL-3H-1ではおもにX線の等方成分特に後者では大気上層からくるアルベドX線のエネルギースペクトルが5~40 KeVのエネルギー領域にわたって得られた。われわれの結果によると, 銀河X線の等方成分のスペクトル形はべきエネルギー分布とするとその負べきは微分形で 1.9 ± 0.2 によく合う。他方, 指数関数形だとすると $(1.5 \pm 0.5) \times 10^8 \text{K}$ に相当する自由-自由遷移の高温プラズマの熱ふく射に合う。

一方, 銀河X線源のうちSco X-1のエネルギースペクトルはK-9M-12によって2~

* 名古屋大学理学部

20 KeV のエネルギー範囲で測定され、その形は $(5 \pm 1) \times 10^7 \text{K}$ の高温プラズマの熱ふく射とする指数関数形によく合うことがわかった。TauX-1 では 1~6 KeV は K-9M-15 により 5~40 KeV は L-3H-1 によって得られたが負べきスペクトルで 1.5~3 のべきに合う。ここに示した差はエネルギー領域で異なることを意味する。CygX-1 (Cyg A も含む) のエネルギースペクトルは K-9M-12 と L-3H-1 で得られたが、これは負べきのエネルギースペクトルに合わすと 1.6 ± 0.5 によく合う結果になった。

以上の結果はX線のスペクトルの形としてべきエネルギー分布形と指数関数形との二種があることがわかった。

1. 諸 言

1962年6月アメリカのASE-MITのグループが太陽以外の何ものかの天体から強いX線がやってくることを発見した [1]。われわれはその重要性をただちに認識して日本のロケットでも銀河X線の観測を試みるために基礎実験に着手した。2年ほどの準備期間を過ぎたのち1年余りで4回のロケット観測の機会にめぐまれ、それぞれでいくつかの観測結果を得ることに成功した [2~5]。われわれのこれまでの実験ではつぎの2点が目標におかれた。すなわち第1に銀河X線のエネルギースペクトルを得ること。第2に今後さらに高度な測定方法を用いるために基礎的な実験によって資料と経験を得ることである。この4回の実験のおもな条件を第1表に掲げた。ここに示したうち L-3-3, K-9M-12, K-9M-15 の観測はX線観

第1表 銀河X線観測に使われたロケットと測定条件

	L-3-3	K-9M-12	K-9M-15	L-3H-1	
				UP	SIDE
Time	Mar. 19, '65 1907 JST	Jul. 26, '65 2101 JST	Mar. 20, '66 2115 JST	Mar. 5, '66 1350 JST	
Max. altitude	1,085 km	350 km	300 km	340 km	
{ Altitude at which detectors are uncovered	155 km	73 km	60 km	105 km	0 km
Observation time	1,000 sec	380 sec	500 sec	200 sec	600 sec
Counter	Scintillation C. NaI(Tl) 1"φ×1.5 mm Be 150 μ	Proportional C. Xe 320 mmHg Be 100 μ	GM C. I Ar 750 mmHg Be 100 μ II Ne 700 mmHg Be 100 μ III Ne 700 mmHg Mica 3.3 μ	Scintillation C. NaI(Tl) 1"φ×1.5 mm Be 150 μ	
No. of counters	1	4	I 7, II 8, III 8	1	1
Effective area of counters	4.52 cm ²	3.27×2 cm ²	I 4.7×7 cm ² II 4.7×8 cm ² III 2.5×8 cm ²	4.52 cm ²	4.52 cm ²
Acceptance angle	±82°	±45°	±20°	±38°	
Full width half max. angle	±52°	±20°	±8.5°	±25°	
Area times solid angle	10.65 cm ² sr	1.24 cm ² sr	I 0.33 cm ² sr II 0.33 cm ² sr III 0.16	2.1 cm ² sr	
Angle between counter and rocket axis	45°	75°	90°	0°	90°

X-ray energy and wavelength ranges	I 5~10 KeV II 10~15 KeV III 15~20 KeV IV ≥16 KeV	I 2~ 4 KeV II 4~ 8 KeV III 8~16 KeV IV ≥16 KeV	I { 1 ~3.9 Å 3.9~ 8 Å II 2 ~ 8 Å III { 2 ~7.5 Å 7.5~11 Å	I 5~10 KeV II 10~20 KeV III 20~40 KeV IV ≥40 KeV
Spin period	0.455 sec	0.55 sec	1.5 sec	11 sec
Precession period	18 sec	79.7 sec	166 sec	66 sec 66 sec
Direction of precession axis	RA 7 ^h .2 Dec 24°	RA 17 ^h .86 Dec 15°.1	RA 8 ^h .48 Dec -26°36	RA 2 ^h .5 Dec 58°
Precession cone angle	7° 5	10° .4	43° .7	29°
X-ray sources scanned	Tau X-1 Cyg X-1 CasA, M87	Cyg X-1, 2 Sco X-1, 2, 3 Sgr X-1, 2 Oph X-1 Ser X-1 Cas A, M87	Tau X-1 M87, Cas A	Tau X-1 Tau X-1 Cyg X-1, 2 Cyg X-1, 2 Cas A CasA

測の3種の特長的な方法で行なったものである。すなわちX線測定器として手軽に使えるシンチレーションカウンター、比例計数管、GM計数管の3種である。どの測定器も一長一短があって測定目標によって使いわけるのがよい。測定装置のさらに詳しいことは文献[5]に述べてある。L-3-3はおもにX線の等方成分のエネルギー分布を得るために行なわれた。K-9M-12とK-9M-15ではSco X-1, Cyg X-1, Tau X-1などのX線源のエネルギースペクトルについて情報を得ることができた。L-3H-1の観測はL-3-3の実験によってアルベドX線が南北によって異方性のある特長的な結果が出たのもう少し詳しくアルベドX線と銀河X線を分離測定するために行なわれたものである。

以下等方成分と局所的X線にわけ、われわれの実験で得たエネルギースペクトルの結果を述べる。

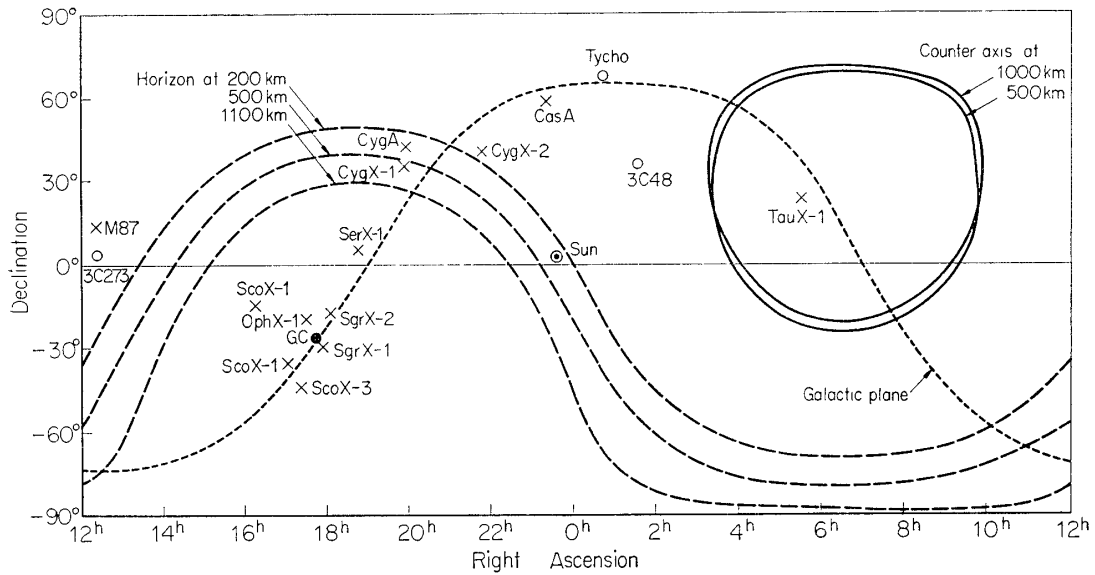
2. X線の等方成分

2.1. L-3-3

銀河X線としてはある特殊な天体からくる局所的X線源と等方的に分布するX線とがあることが発見頭初から知られていた。そこでわれわれもL-3-3ロケットによって5KeV~20KeVのX線の等方成分を測定することを試みた。ここで使ったシンチレーションカウンターは荷電粒子成分を逆同時回路で取り除くことをしなかったが、荷電粒子成分が普通測定されている宇宙線の強度ならばS/Nは十分大きいことが確かめられた[5]。

第1表に掲げた条件でなされたL-3-3ロケットによるX線カウンターが走査した空は第1図に示した。ここには200 km, 500 km, 1,100 kmからみた地平線とカウンター軸の方向を天球図上に示してある。われわれのカウンターの角分解能は半値幅で±52°と言う広い角度だったので飛ばし中カウンターは天球および地球方向の両方にわたってながめる。このような条件で得られた生のデータから銀河X線の等方成分を得るには次の3種の補正をしなければならない。

(1) カウンターが地球の方向をみた部分の補正



第1図 L-3-3においてミンチレーションカウンターが走査した領域

これはロケットのトラジェクトリの各点からみたカウンターの視野に入る地球方向と天空との立体角を求め、地球方向をみた分は、次の項で述べるL-3H-1のアルベドX線の強度を使って差し引いた。

(2) 宇宙線が各チャンネルに及ぼす効果の補正

宇宙線の影響としてはPotzer maximumをすぎた直後の各チャンネルの強度を基準にし、高度とともにcut offが下ってゆく効果を入れて差し引いた。第2表にはPotzer maximumを越えた直後の宇宙線による各チャンネルに及ぼすバックグラウンドを示した。

第2表 宇宙線によるバックグラウンド

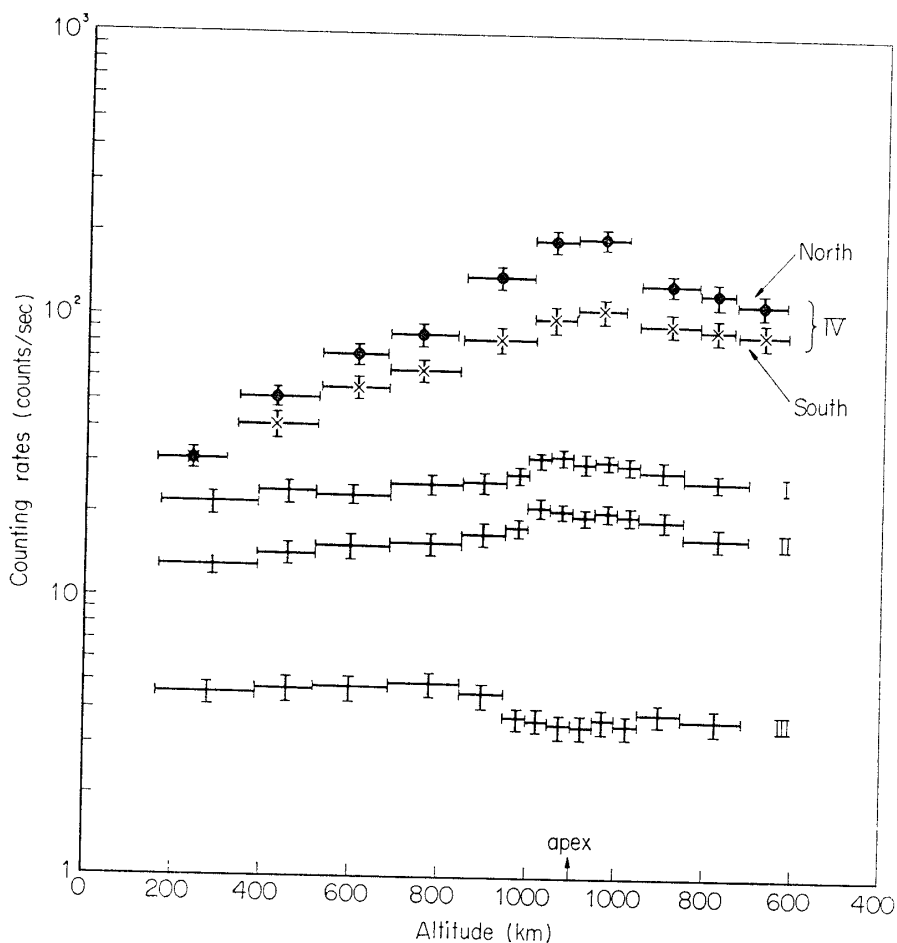
Channel*	counting rates (counts/sec)	
	L-3-3	L-3H-1
I	0.5 ± 0.4	0.50 ± 0.25
II	0.23 ± 0.15	0.33 ± 0.15
III	0.12 ± 0.08	0.4 ± 0.1
IV	7 ± 2	5 ± 0.8

* L-3-3 と L-3H-1 は同じchannel でもエネルギー領域が異なることを注意 (第1表参照)

(3) すでに知られているX線源の影響を差し引く

これは第1図に示したカウンターの走査した領域に入ったX線を調べこの強度を差し引いた。L-3-3ではTau X-1が生データの1割強の寄与をしている以外はほとんどのX線源の影響は無視できる。

以上の補正はI~IIIチャンネルについてだけなされた。IVチャンネルはカウンターの性質上さらに数100 KeVの電子成分や数MeVの陽子成分の影響がきいてくるため補正がむ



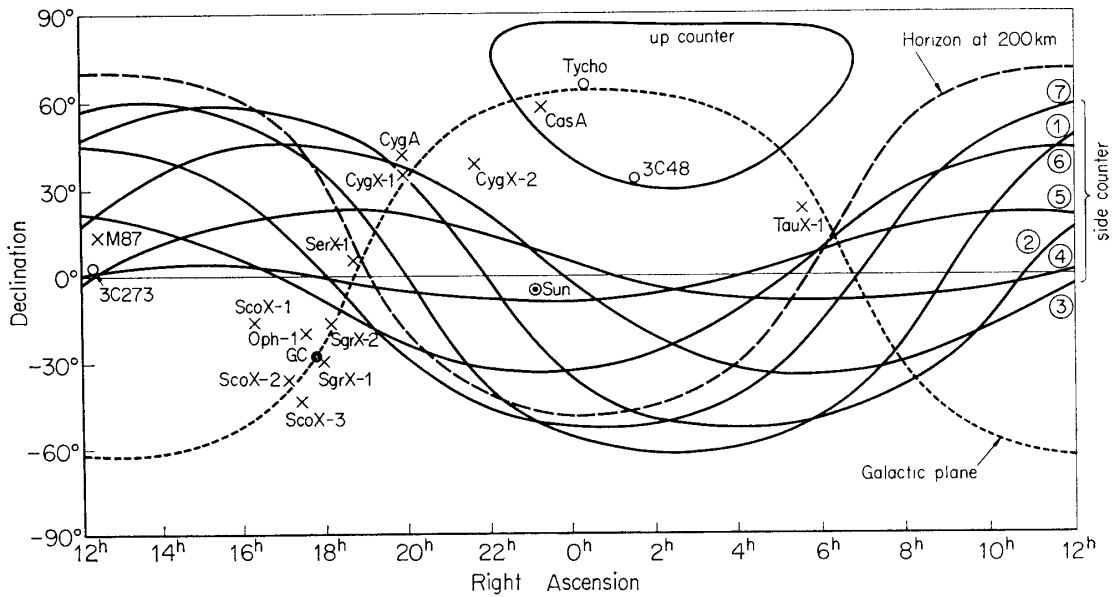
第2図 計数率の高度の変化. I~IIIチャンネルはアルベドX線, 宇宙線, X線源の補正がされている. IVは得られたそのままのデータ

つかしくなる. こうして得られた結果は高度に対する計数率の変化として第2図に示した. 第IVチャンネルは得られたそのままのデータで南の方向からの強度と北からの強度とにわけて示した. ここで注目されることは北からの成分は南からの成分より常に強いということである. この南北効果は I~III ではほとんど出なかった. この原因は荷電粒子によるのかアルベドX線の硬X線成分によるのかこれだけの実験でははっきりしない. ただ荷電粒子が異方性を示すことは考えにくい. したがって多分高緯度地方では低緯度地方に比べて precipitation electron が多くあり, これが気層でX線を発生していると推定される. いずれのチャンネルも高度とともに計数率が上っている. ただしIIIチャンネルは例外で約 900 km 以上ではその強度は減っている. これはテレメータのレスポンスが 35 c/s の所にIIIとIVを混ぜて送ったためレスポンス以上の信号がきて dead time が長くなったためIIIチャンネルの信号がみかけ上減ったからである. I~IIIチャンネルは適当な補正をしたにもかかわらず高度変化があらわれたことは次のような原因が考えられる. 高度変化を示す分は多分宇宙線のように高エネルギーではないが大気上層にあると推定される比較的低いエネルギーの荷電粒子が影響するのだろう. もし高度 1,000 km で 200 KeV 程度の電子がカウンターに 100 particles/sec

入射したとすればこの高度変化は説明がつく．このような電子が高度とともに予想以上に存在することは立教大学のグループの半導体検出器を使った測定からも確かめられている[6]．高度 200~300 km では荷電粒子の影響のうち本来の宇宙線以外はほとんど無視できるため，第2図に示した I~III チャンネルは銀河X線の等方成分と考えてよい．これから求めたスペクトルは次の節の第6図に示してある．

2.2. L-3H-1

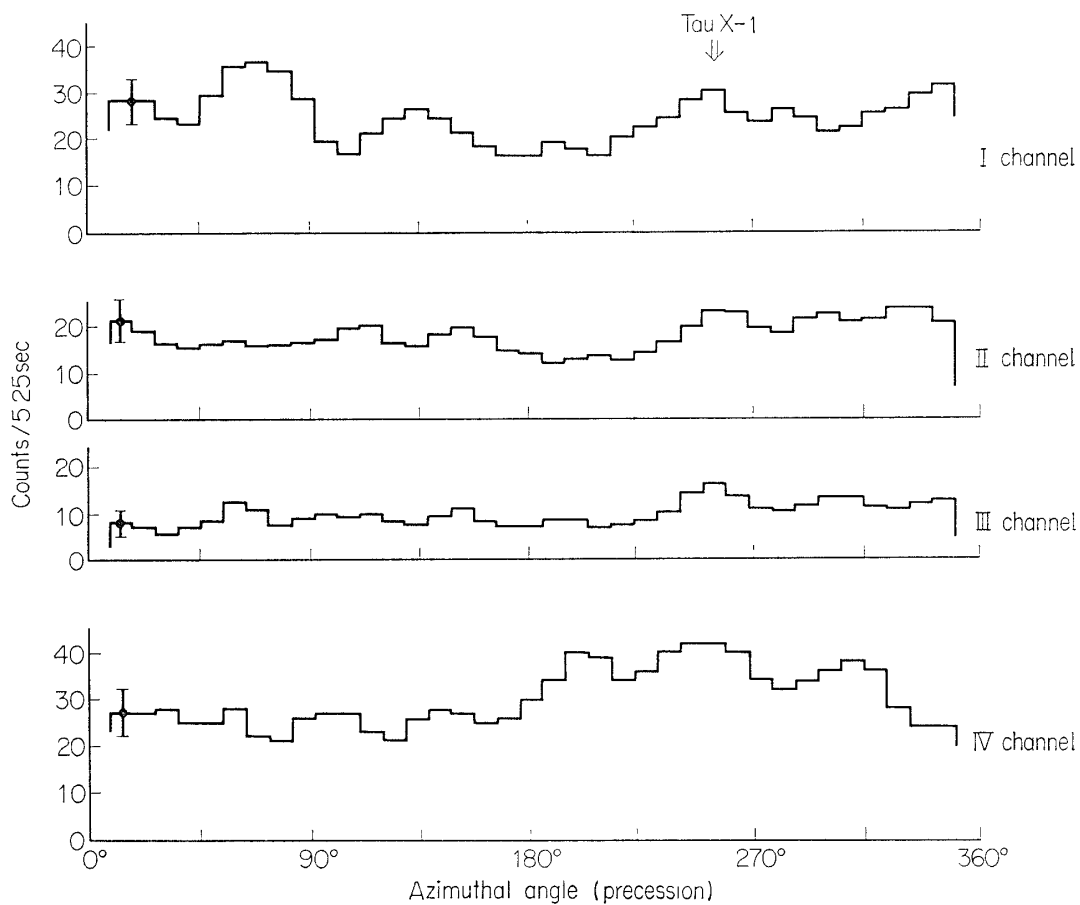
前節にも示したように L-3-3 の観測の結果，地球近傍の放射線が予想以上に強いことがわかった．そこで早速 L-3H-1 のブースターに L-3-3 と同じシンチレーションカウンターを少し方向分解をよくしてアルベドX線と天空からのX線との分離測定を行なった．カウンターとしてはロケット軸方向 (up-counter) とそれに直角の方向 (sidecounter) との2台をのせて結果を比べることとした．2個のカウンターが走査した領域は第3図に示した．up-counter は地球の方向をみなかったが side counter は地球をみる機会が多かった．この結果からアルベドX線と強いX線源のない銀河X線の等方成分の強度が求められる．



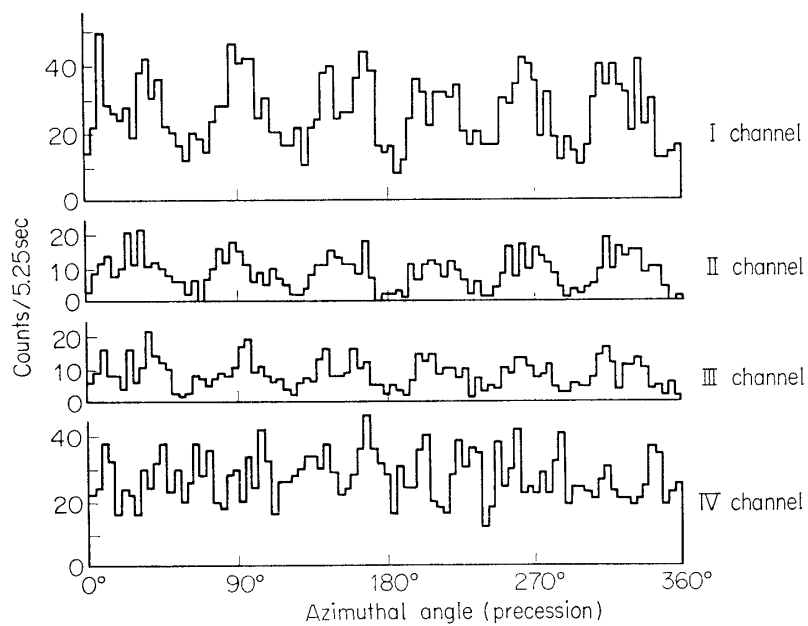
第3図 L-3H-1 のカウンターが走査した領域．丸で囲んだ番号は precession の異なる時期での1回の spin でカウンターが走査した領域を意味する

まず第4図には up-counter がとらえたそのままの計数率を precession 角度による変化として示した．ここにはいくつかの統計誤差以上のふらつきがあるが Tau, Cyg, Cas 方向のX線源をみたときのピークに相当する．このうち Tau X-1 以外はみる角度と強度が弱いので適当なスペクトルを得ることができなかった．これから求めた Tau X-1 のスペクトルは K-9M-15 の結果とともに第13図に示してある．

第5図は side-counter が走査した各方向での生の計数率を示した．このうち各 spin による走査毎にあらわれる強度の低い部分は地球をみたときで，これからアルベドX線が求められるピークに相当する部分には Cyg や Tau にある X 線源と銀河 X 線の等方成分が含まれている，このうち Cyg X-1 (Cyg A も含まれる) のスペクトルは K-9M-12 の結果とともに第



第 4 図 up-counter の precession の方向に対する計数率の変化



第 5 図 side-counter の precession による方向変化に対する計数率

10図に示してある。

以上 L-3-3, L-3H-1 から得られる銀河 X 線の等方成分を求めると第 6 図のようになる。ここには K-9M-15 の結果も書き入れてある。各々の方法で出した結果は統計誤差以内で大体一致しているが、ところどころ食い違う点は、(1)測定器が違うために出た機械的誤差か、(2)走査する天空の領域の違いによる差、のいずれかが考えられる。(2)の意味する銀河 X 線の等方成分に領域による強度の強弱があるかどうかは X 線天文学における一つの重要な論点であるがわれわれの実験からだけでははっきりした結論が下せない。

最後に、求められたスペクトルがべきエネルギー分布を示すか指数関数的かを調べる。べきエネルギー分布とするとその負べきは $\gamma=1.9\pm 0.2$ になり、指数関数に合せると $T=(1.5\pm 0.5)\times 10^8\text{K}$ の高温プラズマに相当する。

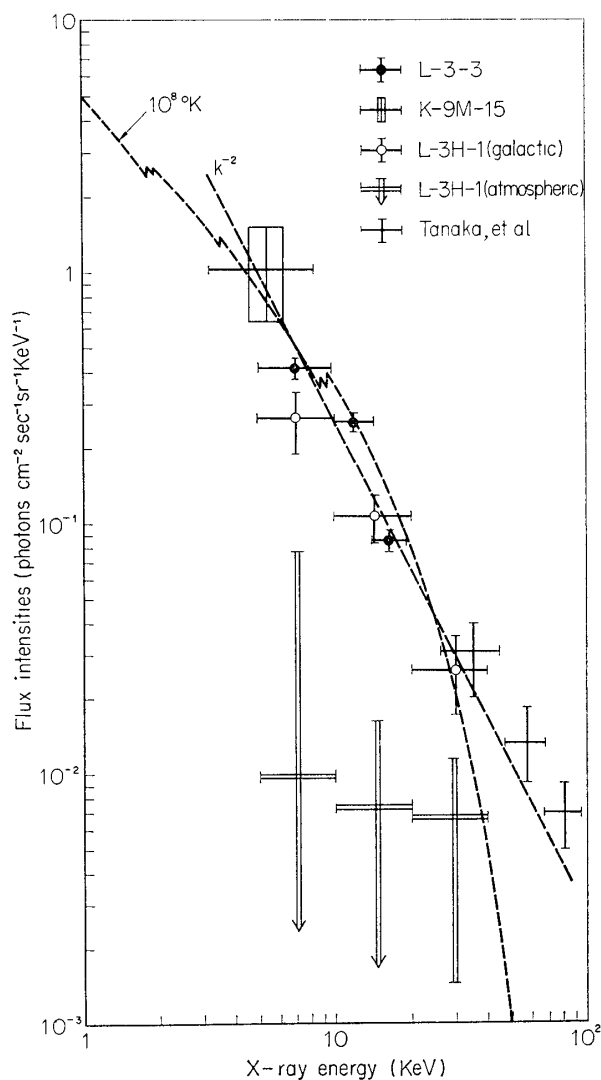
3. X 線源のスペクトル

3.1. K-9M-12

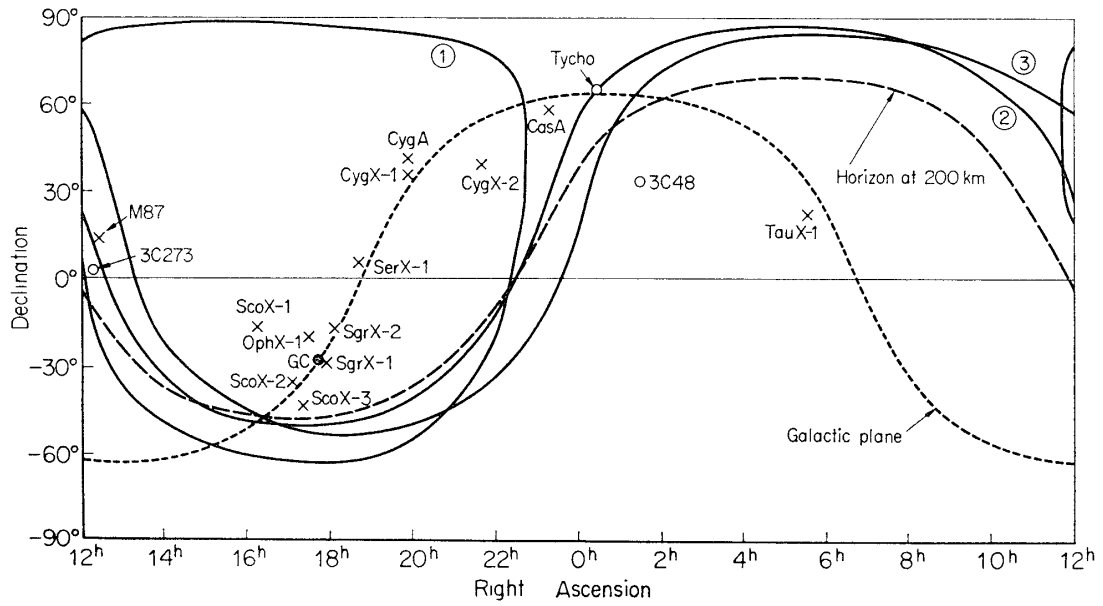
X 線源としては現在 10 個以上がみつかっている [7]。その 2~3 は超新星の残がいや電波を出す銀河系外星雲に同定されているがほとんどのものは、光学的にも電波的にもその正体が何ものであるかわからない。

X 線源の物理的状态を知るために X 線のスペクトルを調べることがひとつの重要なテーマである。

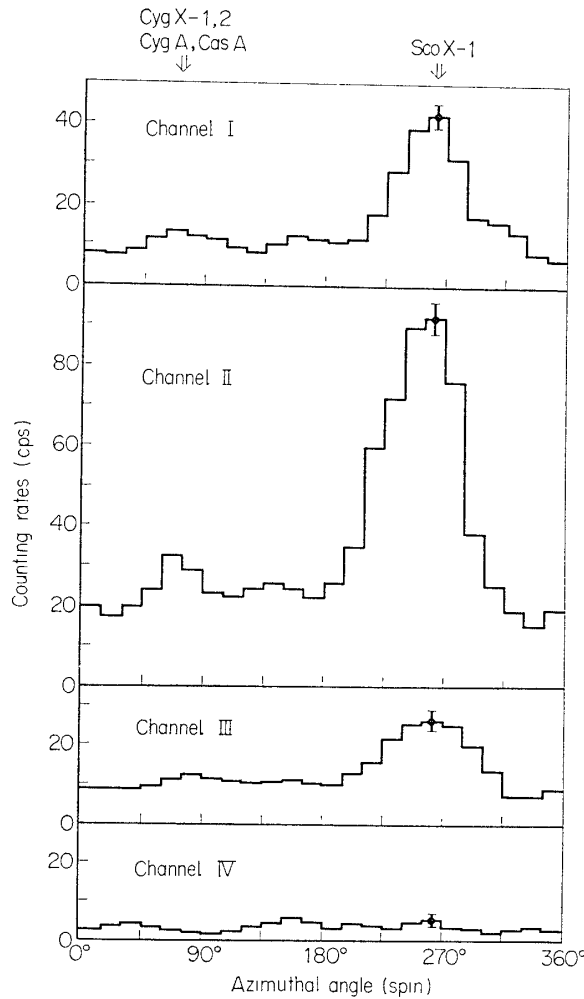
K-9M-12 に載せた比例計数管は数 KeV の X 線を得るためには最もすぐれたエネルギー分解能を示す測定器である。われわれがねらった X 線源はおもに Sco X-1 であったがこのほかに Cyg にある X 線源や銀河中心近くにある X 線源もとらえることができた。しかし角分解能が $\pm 20^\circ$ という広さのため Sco X-1 と Cyg X-1 (Cyg A も含む) のスペクトルしか得られなかった。第 7 図は K-9M-12 で走査した領域であるが、ロケットの飛ばし中スピン、プレセッションいずれの時期も Sco X-1 も Cyg X-1 もまともにカウンターがみる機会はなかった。第 8 図にはプレセッションのある時期 (図では③の場合) でロケットがスピンのときカウンターが走査した計数率の変化を示す。プレセッションのある時期には、Sco X-1 のピークはほとんどかくれて Cyg の方向のピークが大きく出る。このようにカウンターの走



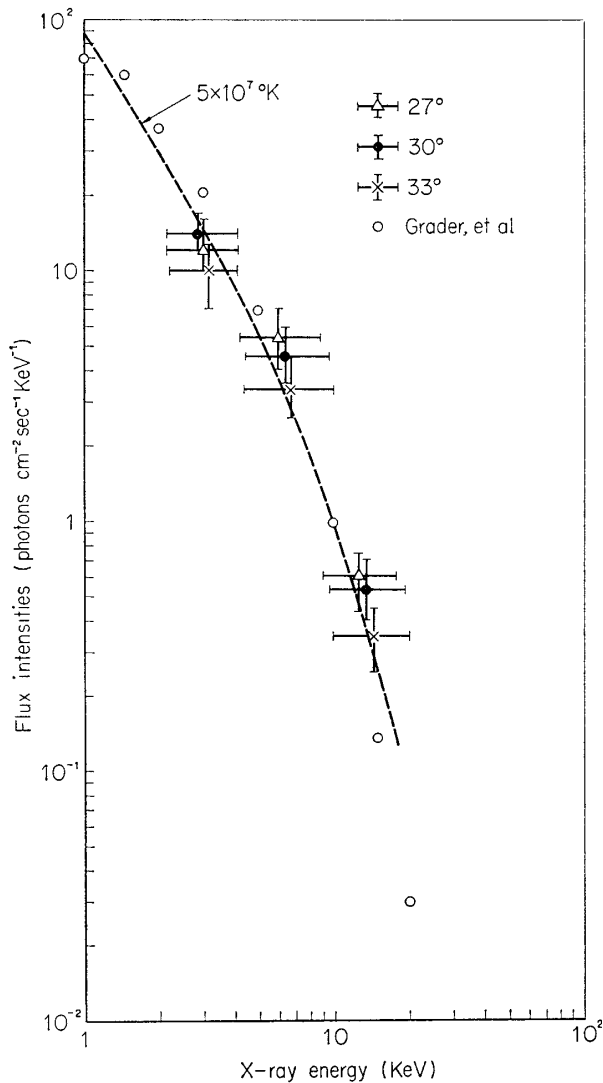
第 6 図 銀河 X 線の等方成分とアルベド X 線のスペクトル



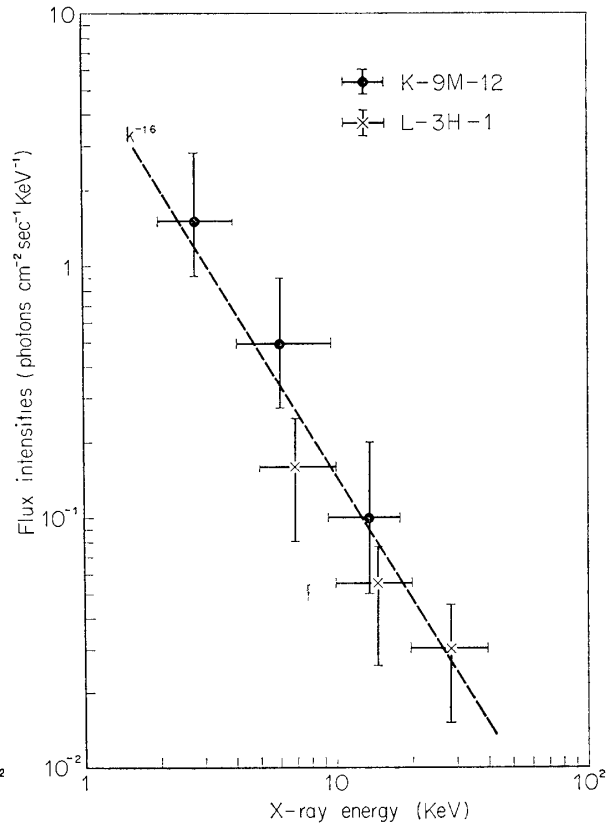
第 7 図 K-9M-12 の比例計数管が走査した空の領域



第 8 図 プレセッションのある時期でのスピンの回転による計数率の変化



第9図 K-9M-12で得られた Sco X-1 のエネルギースペクトル. 図に示した角度はカウンター軸とX線源とのなす角度



第10図 Cyg X-1(Cyg Aも含む)のエネルギースペクトル

査した方向を知らば角度による効率の補正をしてX線源のエネルギースペクトルを出すことができる. われわれが K-9M-12 で使用した比例計数管は文献[5]で詳しく述べてあるように電極の端の影響がきいてきて斜に入射した場合は正面入射より同じエネルギーのX線でもパルスは小さくなる. このことはいろいろな角度でX線源をみたとき各々で角度とエネルギーの補正をしなければならぬことを意味する. こうして出したエネルギースペクトルは第9図に示した. ここにはX線が入射した3種の角度について求めた値が示されているがいずれも誤差内で合っている. ここに示した誤差は単なる統計的誤差の他入射角度で効率を出すときにも入ってくるものも含む. 図中に○で示した値は Grader et al [8] が測定した1部の値をわれわれと同じ強度の単位にやき直したものである.

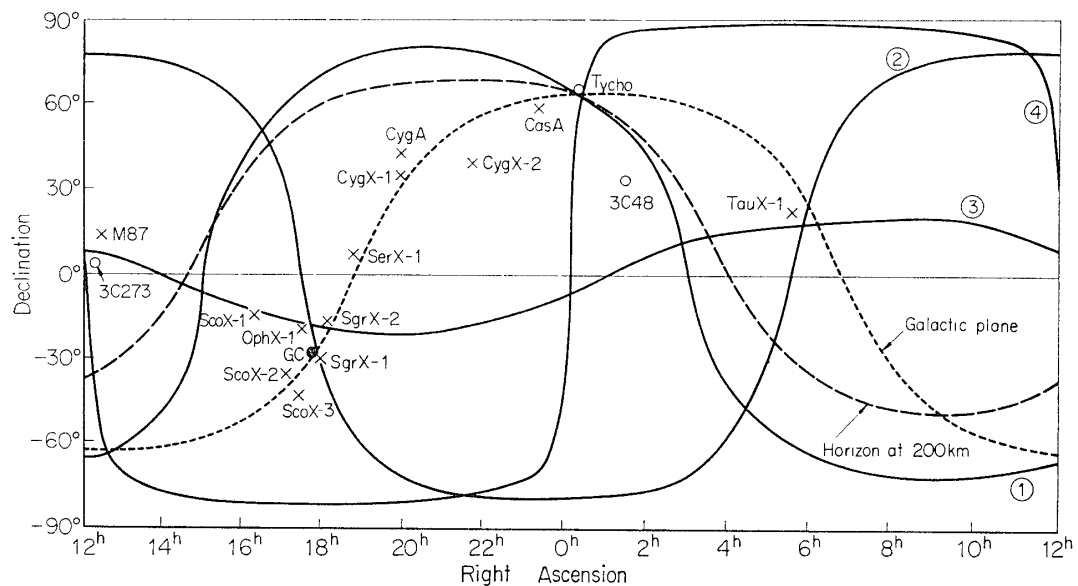
ここに得られた値からスペクトル形の best fit を出すと指数関数形では $T = (5 \pm 1) \times 10^7 \text{K}$

の高温プラズマからの熱X線によく合い、べきエネルギー分布では、その負べきは $\gamma=2.5\pm 0.5$ として求まる。このうちどちらかと言うと熱X線の方がよく合う。

次に Cyg X-1 のエネルギースペクトルを求めると第 10 図のようになる。ここには L-3H-1 の side-counter から得られた値も示してある。ここに出した値はいずれも大きな角度分解を持つカウンターの都合上 Cyg X-1 と Cyg A との分離はできなかった。また Cyg X-2 についても実際には分離できなかったが 1965 年に Bowyer et al [7] が与えた Cyg X-1 と Cyg X-2 の強度の比によって Cyg X-2 の影響を差し引いた。こうして Cyg X-1 (+Cyg A) のエネルギースペクトルを得ることができた。ここに得た値はいろいろな角度でみたときに求めた平均的な結果である。これから得られるスペクトル形の best fit としてはべきエネルギー分布では $\gamma=1.6\pm 0.5$ であり、指数関数とすると $T=(1.0\pm 0.5)\times 10^8\text{K}$ の熱ふく射が合う。これだけでは誤差が大きいのでいずれとも決着つけがたいがべきエネルギー分布の方がよく合うようである。

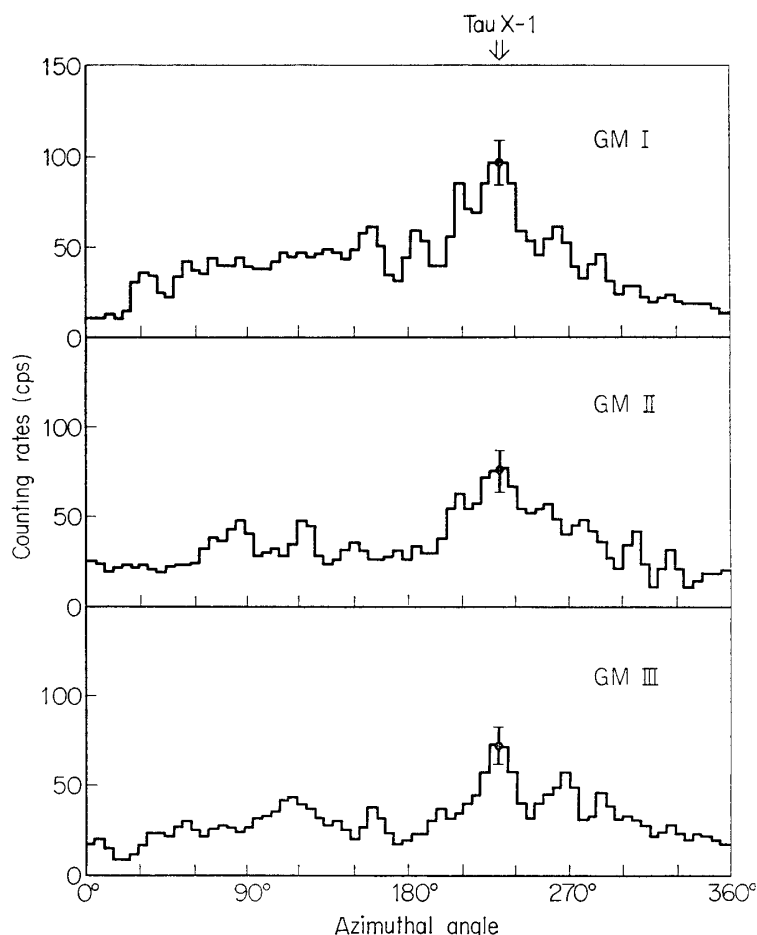
3.2. K-9M-15

最後に述べる K-9M-15 のロケット観測は計画としては Sco X-1 や Cyg X-1 のスペクトルを GM カウンターでとらえようとしたものである。しかし打上げがいろいろな都合で半年も延期になったため、走査できる空の都合上計画を変更して Tau X-1 のエネルギースペクトルを得ることになった。第 11 図には K-9M-15 が実際に走査した天空を示す。この図



第 11 図 K-9M-15 の GM カウンターが走査した空の領域。丸で囲んだ番号はプレセッションの違う時期でのスピン 1 回転で走査する領域を意味する

からわかるようにプレセッションのある時期でカウンターは Tau X-1 をまともに見ている。このときスピンで走査する方向に対する計数率を補正なくそのまま示すと第 12 図のようになる。ここにあらわれた一番大きいピークは Tau X-1 をみたときに相当する。ほかに統計誤差以上はいくつかの山があるがいままでわかっている X 線源とははっきりと対応がつけに



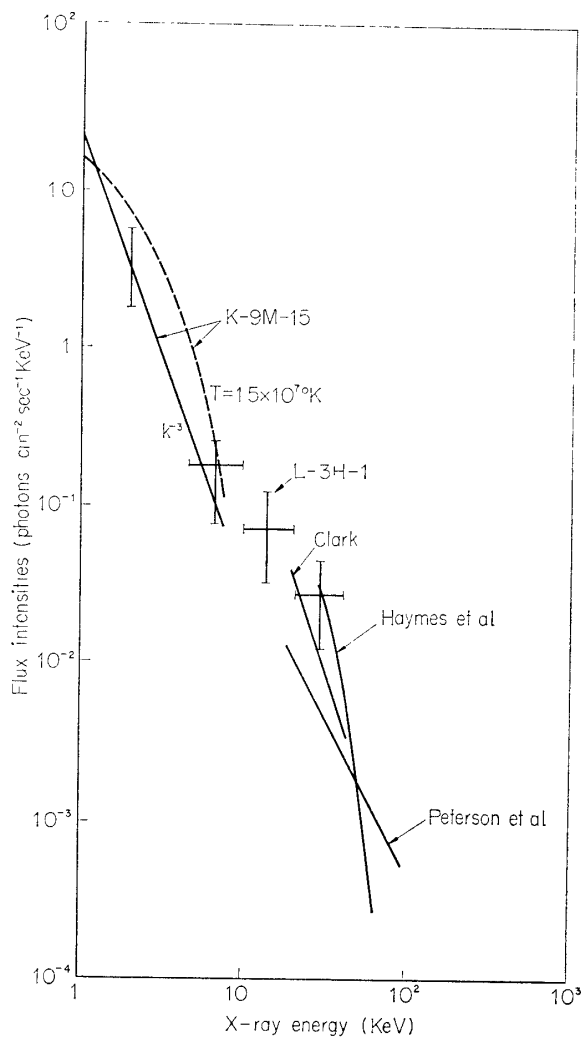
第 12 図 X線強度の方位による変化. ピークはカウンターが Tau X-1 をみたときに相当する

くい. Tau X-1 に関して等方成分を差引いた値からべきエネルギー分布と指数関数とを仮定して, best fit を求めると負べきとして $\gamma=3\pm 1$ 指数関数としては $T=(1.5\pm 0.5)\times 10^7\text{K}$ の熱ふく射が得られる. この結果は他のグループの結果とともに第 13 図に示した. L-3H-1 の結果も同図に示してある. いくつかの実験で多少食い違う結果も出ているが, エネルギースペクトルの実験のむずかしさと統計誤差以外の誤差を考え合すと大体の傾向がうかがえる.

4. 後 記

わが国のロケットを使用した銀河X線の観測の第一段階は, 上に述べた4回の結果のようになった. エネルギースペクトルをねらう実験としては, 各々の観測で誤差は大きいが矛盾のない結果が出せた. エネルギースペクトルの測定はどのグループもまだ決定的な結果を出していないし, X線天文学にとってサイズの決定[9]とともに重要な今後の課題にあげられている.

最後にこの実験では東京大学宇宙航空研究所, 明星電気株式会社, 日本無線医理学研究所



第 13 図 Tau X-1 のエネルギースペクトル

など多数の方々のご援助を賜った、ここに深く謝意を表します。

1966年7月23日

参 考 文 献

- [1] R. Giacconi, H. Gursky, F. Paolini and B. Rossi: Phys. Rev. Letters, **9** (1962) 439.
- [2] S. Hayakawa, M. Matsuoka and K. Yamashita: Proc. of 6th COSPAR Symp. at Mar del Plata, 1965 (in press).
S. Hayakawa, M. Matsuoka and K. Yamashita: Proc. of the International Conf. on Cosmic Rays at London, **1** (1965) 119
S. Hayakawa, M. Matsuoka, H. Ogawa and K. Yamashita: Proc. of the COSPAR Symp. at Vienna, May 1965 (in press).
- [3] 早川幸男, 松岡 勝, 山下広順: 宇宙研報告 Vol. 2, No. 2(A) (1966) 488.
早川幸男, 松岡 勝, 小川英夫, 山下広順: 宇宙研報告 Vol. 2, No. 3(A) (1966) 928.

- [4] S. Hayakawa, M. Matsuoka and D. Sugimoto: Space Science Reviews, **5** (1966) 109.
- [5] M. Matsuoka: Inst. of Space and Aeronautical Science Uni, of Tokyo, Report No. 403 (1966) 65.
- [6] M. Matsuoka: Jap. J. Appl. Phys. **5** (1965) 671.
S. Nakagawa, M. Tsukuda, A. Sasaki, K. Nagata and T. Doke: Rep. Ionos. Space Res. Japan, **19** (1965) 521.
- [7] S. Bowyer, E. T. Byram, T. A. Chubb and H. Friedman: Science, **147** (1965) 394.
E. T. Byram, T. A. Chubb and H. Friedman: **152** (1966) 66.
- [8] R. J. Grader, R. W. Hill, F. D. Seward and A. Toor: Science. **152** (1966) 1499.
- [9] H. Gursky, R. Giacconi, P. Gorenstein, J. R. Waters, M. Oda, H. Bradt, G. Garmire and B. V. Sreekantan: Astrophys. J., **144** (1966) 1249.

質 疑 討 論

- 西村: 空気からのアルベド X-ray と地球の外からの X-ray のエネルギーは 50 KeV くらいではほぼ等しいが, これは気球で X-ray を測定できる範囲が数 10 KeV どまりとすることを意味するのであるか.
- 早川: 気球高度で X 線を測ると確かに大気で発生する X 線がかぶる. しかし L-3H-1 による結果を田中氏が気球で測った等方 X 線の強度と比較すると両者が交わるのは 100KeV 程度である. したがって田中氏の測った X 線は大気外起源のものが多い. しかし大気起源の分の補正は重要である. なお気球高度で測られる大気起源の X 線はほとんど等方的と考えてよく, 大気圏外で測られるアルベド X 線の強度とほぼ等しい.
- 末元: 姿勢を決めるのに実際問題として GA プラスもう一つの information が必要か. GA だけでよいか. GA もなしで既知の source だけからでも可能か.
- 松岡: GA のデータだけではわれわれのカウンターの方向性を出すのは不定性があるとはっきり出ない. われわれのカウンターから方向をきめるには, その指向性程度にしかきまらない. しかも不正確である. 実際, 今までは相乗の zodiacal light や air glow のデータを利用して方向をきめていた.
今後は GA 以外に数分ないしはそれ以上の精度をもつ star sensor を利用する必要がある.