

# カナダ，トンプソンにおける オーロラ X 線気球観測

オーロラ X 線 Source 領域の決定

山上隆正・藤井正美・西村 純・村上浩之\*  
平島 洋\*・奥平清昭\*・梶原正男\*\*・小玉正弘<sup>+</sup>

## 概 要

トンプソン（地磁気緯度  $66.9^{\circ}$  N）でオーロラ X 線の気球観測を1975年4月8日 UT，9日 UTに行った。観測装置としては天頂方向を向いた全視野角  $70^{\circ}$  の NaI(Tl) カウンタ，天頂角  $17.5^{\circ}$  に傾いた全視野角  $35^{\circ}$  の NaI(Tl) カウンタ，および天頂方向で  $10^{\circ}$  の transmission band 幅をもった modulation collimator 付き NaI(Tl) カウンタを用いた X線のエネルギー範囲は  $15 \sim 85$  KeV である。カウンタをとりつけたゴンドラを 3 rpm で回転させ，方位角を GA で測定した。バックグラウンド X線の  $10 \sim 10^4$  倍に達する活発なオーロラ X線バーストを多数回観測した。特に4月9日 UTの観測では LT で真夜中頃，特長あるオーロラ X線バーストの 2 events が観測され，それらの events の詳しい解析が行われた。0532 UTに観測した event では直径 20 km のオーロラ X線源が 16 秒間， $2 \text{ km s}^{-1}$  の速さで北西から南東に移動した。もう一つの event では 0613 UT から 2 分間にわたって真南の方向からのオーロラ X線を観測した。この場合は，オーロラ X線源として円板型と arc 型の二通りのモデルを仮定して simulation 計算を行い，観測と比較しオーロラ X線源の方向と大きさをきめた。

## 1. はじめに

オーロラ X線の観測および研究について言えば，オーロラ X線の空間分布および時間変化の研究で，空間分布については気球観測又はロケット観測により一次元的見地から三次元的見地へと一歩ずつ進められてきた。先ずはオーロラ帯の特定の場所で気球による観測が R. Brown [1] により行われた。次にオーロラ X線源の空間分布を詳しく調べるのに方向性をもった二つ以上の X線カウンタを用いた方法によって J. T. Gosling [2]，G. K.

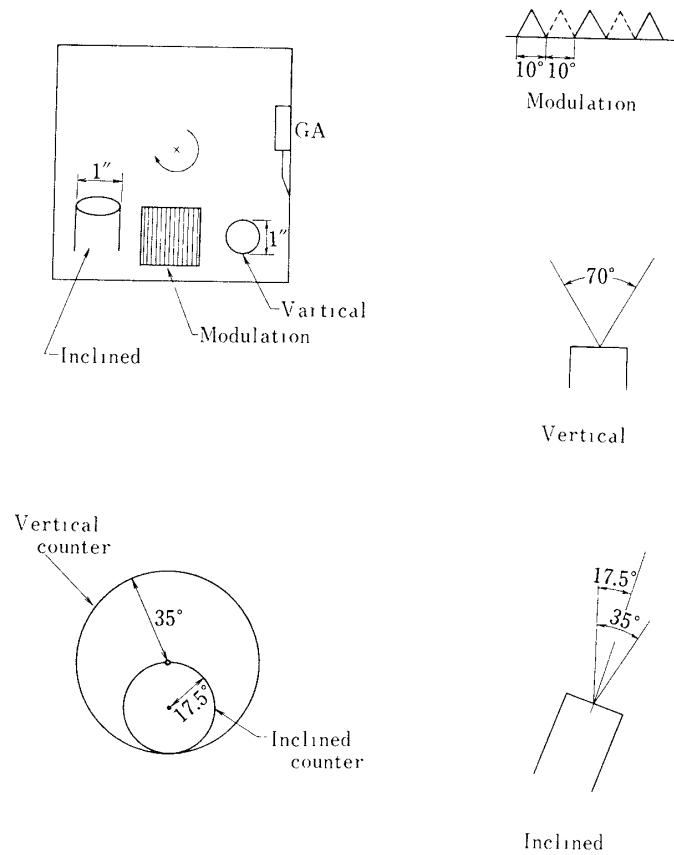
---

\* 立教大学理学部

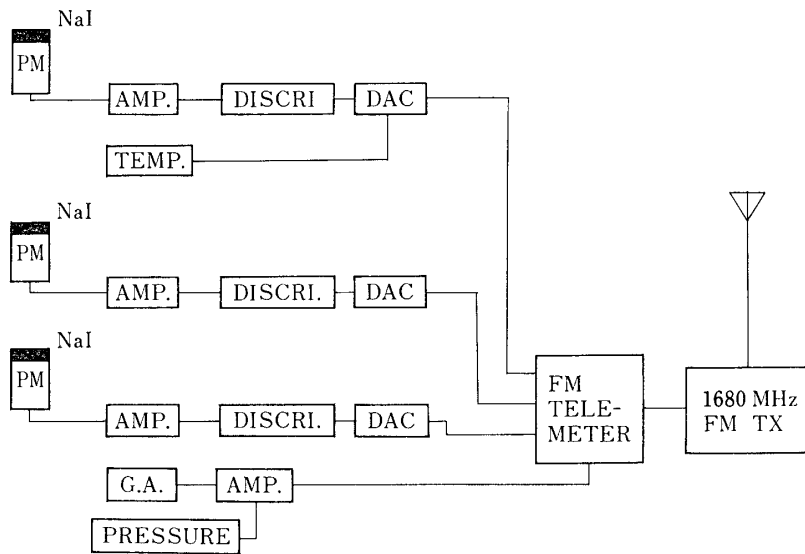
\*\* 桐蔭学園高等学校

<sup>+</sup> 理化学研究所

Parks [3] が観測を行った。また同様にオーロラ X 線源の空間分布を詳しく調べるのに、ロケットのスピンの運動を利用し方向性をもった X 線カウンタを回転させ、空間を survey する方法を用いて M. Kodama and T. Oguti [4] が観測を行った。われわれはオーロラ X 線源の空間分布をさらに三次元的に詳しく調べるために、天頂方向を向いた視野の広い X 線カウンタ、天頂方向から傾いた方向からの X 線を観測する視野の狭い X 線カウンタ、および X 線天文学でよく用いられる modulation collimator を用いた X 線カウンタ [5][6]、の 3 種類のカウンタを使用した。これらの 3 種類のカウンタを気球のゴンドラに搭載し、このゴンドラを 3 rpm で回転させて空間を survey させた。われわれの観測の目的は以上のような観測装置を用いてオーロラ X 線の空間分布と時間変化をさらに詳しく知ることにあつた。また気球による観測地点としてカナダのトンプソン (地理的緯度、経度  $55.8^{\circ}$  N,  $97.9^{\circ}$  W) を選んだ。トンプソンの地磁気緯度は  $66.9^{\circ}$  N である [7]。これはトンプソンが、高エネルギー電子、陽子および磁場の観測等を行っている静止衛星 ATS-6 (Applications Technology Satellite -6) と地磁気共役な地点であり、後にこの ATS-6 による観測とトンプソンにおけるオーロラ X 線観測とを比較してオーロラ X 線の発生機構とオーロラ X 線の親



第1図 The Essential Parts of the Instruments



第2図 The Block Diagram of Electronic Circuits

の粒子である高エネルギー電子の precipitation の様子を三次元的に解明することを可能にするためである。われわれの観測器による気球観測は1975年4月8日 UT および1975年4月9日 UT の二日のオーロラ時に行われ、バックグラウンド X 線の  $10 \sim 10^4$  倍に達する活発なオーロラ X 線バーストを観測した。特に1975年4月9日の観測では特色のあるオーロラ X 線バースト events が二つ発見された。この二つの events についてオーロラ X 線の空間分布、時間変化を調べたので以下の節に記述する。

## 2. 観測装置

気球に搭載された観測装置の主要部分を第1図に示し、観測装置には以下に示す3種類の NaI (TI) シンチレーション・カウンタ（それぞれ 'vertical counter', 'inclined counter', 'modulation collimator counter' と呼び以下ではこの名前を用いる。）を使用した。

### (a) Vertical Counter

円筒形の collimator の中心軸が天頂方向に向いて全開口角  $70^\circ$  の  $1 \text{ in} \phi \times 1 \text{ mm}$  NaI (TI) シンチレーション・カウンタで collimator は厚さ  $1 \text{ mm}$  の錫および  $1 \text{ mm}$  の真鍮である。

### (b) Inclined Counter

幾何学的寸法および配置以外は vertical counter と同様な構成である。円筒形 collimator の中心軸が天頂角  $17.5^\circ$  の方向に傾いており、全開口角が  $35^\circ$  の  $1 \text{ in} \phi \times 1 \text{ mm}$  の NaI (TI) シンチレーション・カウンタである。

### (c) Modulation Collimator Counter

空間分解能については天頂方向付近で  $10^\circ$  transmission band 幅 ( $10^\circ$  pitch) を持った

modulation collimator を用い、中心軸が天頂方向に向いた NaI (TI) シンチレーションカウンタである。4月8日の気球飛揚では  $1\text{ in}\phi \times 1\text{ mm}$  NaI (TI) で、2段 stages grids 式 modulation collimator を用いた。各 grid の stage は直径 2 mm の真鍮棒を 2 mm の間隔で 30 本平行に並べたものである。2段の stages の間隔は 20 mm である。視野は  $70^\circ$  である。4月9日の2回目の気球飛揚では  $3\text{ in}\phi \times 3\text{ mm}$  NaI (TI) で3段 stages grids 式の modulation collimator を用いた。この場合には 3 stages の間隔はそれぞれ 30 mm である。視野は  $90^\circ$  である。modulation collimator を用いると、X線光学的な多数の三角形 transmission band を持つが、band 幅は三角形の底辺で  $10^\circ$  (天頂方向付近について) であり、2 stages grids の時は三角形の transmission band は継続しているが、3 stages grids の時は一つ置きに現われる。

以上3種の検出器を一組のゴンドラに組み込み、天頂方向を回転の中心軸として 3 rpm の回転速度でゴンドラを回転させ GA (geomagnetic aspectometer) で地磁気方位がわかるようにした。ただし GA は、inclined counter が地理的に北の方向を向いた時 GA からの信号が極値をとるように地磁気の偏角を考慮してゴンドラにとりつけた。観測されたオーロラ X線のエネルギー範囲は検出器により第1表に示されたように僅かに異なるが大体 15 ~ 85 KeV である。

電子回路のブロック図を第2図に示した。15 ~ 85 KeV のエネルギー範囲に対応するように discriminator の上限と下限を設定した。各 X線 counter からの pulse を Y. Ogawara and T. Hayashi [8] により開発された step-count scaler の方法を用いてカウントした。われわれの場合、vertical counter および inclined counter については  $1/2^3$  に、また modulation collimator counter については  $1/2^5$  に scale down してカウントした。これを step-count scaler によってアナログの信号にし、1680 MHz の RIG 規格の FM/FM テレメーターで送信した。

### 3. 気球観測およびオーロラ X線 Activity

気球飛揚の状況については第1表に示されている。1975年4月8日 UT および 1975年4月9日 UT の2回の観測について vertical counter, inclined counter の計数率の変化を第3図、第4図に示した。図には UT と共に LT (local time) も示した。第3図、第4図に示されたように非常に活発な X線バーストが何度も観測された。第4図中、特に 2-1 2-5 と記してあるのが以後に説明される特長のある 'events 2-1', 'event 2-5' と名づけられたものである。なお、これらの図で vertical counter の計数率 V と inclined counter の計数率 I の比  $V/I$  も一緒に書いてある。これはオーロラ時には全体にわたってオーロラ X線が増加するだけでなく、ある特定の方向からのオーロラ X線が増加するため、天頂方向に軸対称な開口角の大きい vertical counter と中心軸が傾いて開口角の小さい inclined counter との比に意味があり、以後、空間分布および時間変化を問題にする場合には主としてこの比が問題になるからである。

また、一般に point 源からの X線が大気に入った時には散乱を受ける。このような大気中における X線の散乱の効果については K. Okudaira [9] により詳しい定量的な計算が

第1表 QUANTITIES ABOUT AURORAL X-RAY DETECTORS

FLIGHT	DATE	LEVEL FLIGHT	DETECTOR	DETECTOR SIZE *	ZENITH ANGLE OF COLLIMATOR AXIS	OPENING ANGLE**	ENERGY
No. 1	1975. 4. 8 0346 UT	13 mb 10 hrs	NaI (T1)	① 1" $\phi$ $\times$ 1 mm	0° (vertical)	70°	15~85 keV
				② " "	17.5°	35°	"
				③ " "	0°	70°	15~84
				10° pitch Mod Coll			
No. 2	1975. 4. 9 0354 UT	6 mb 10.8 hrs	NaI (T1)	① 1" $\phi$ $\times$ 1 mm	0°	70°	15~85 keV
				② " "	17.5°	35°	"
				③ 3" $\phi$ $\times$ 3 mm	0°	90°	10~84
				10° pitch Mod Coll			

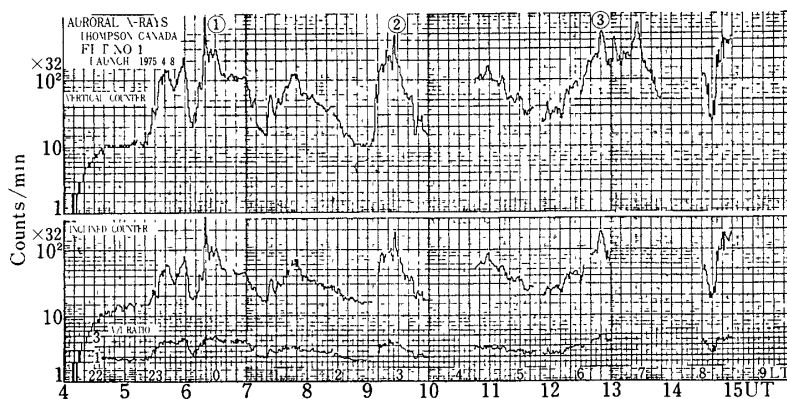
\* Modulation collimator

Flight No. 1 2 - Stages

" No. 2 3 - Stages

\*\* ①②の Collimator

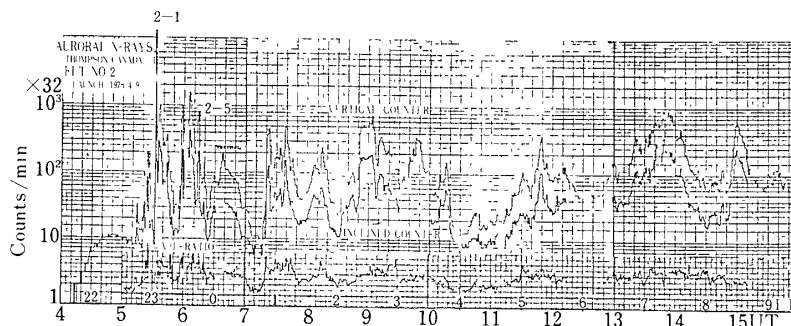
Sn: 1 mm, Brass: 1 mm



第3図 The Time Profiles of 1 - Minutes Counting Rates in the Flight on April 8

行われた。われわれが興味ある events を観測した1975年4月9日の気球飛揚高度は  $6\text{g cm}^{-2}$  であり、この高度で観測したとき散乱の結果X線源が広がってぼけることはない。例えばX線が大気へ垂直に入射する場合、比  $I/V$  の変化は3%であり小さい。

次に、バーストのない時のバック・グラウンドX線の影響について評価した。バック・グ



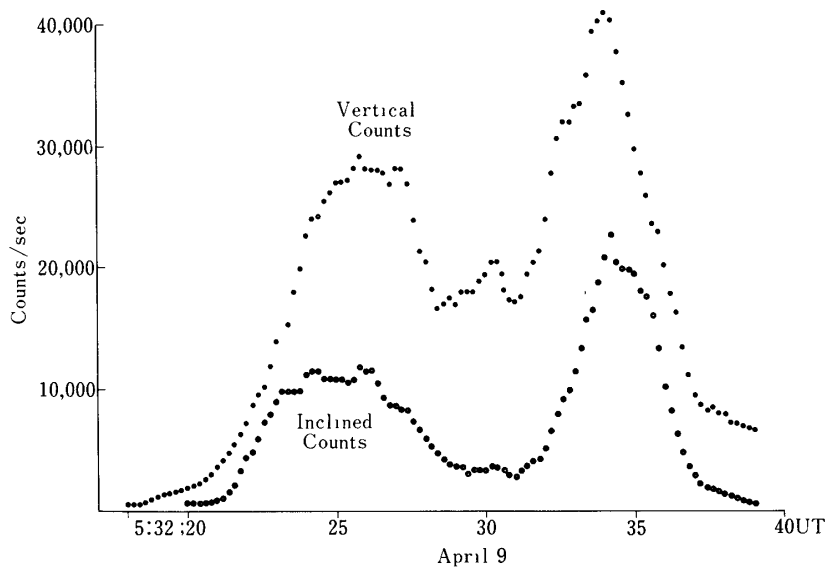
第4図 The Time Profiles of 1-Minutes Counting Rates in the Flight on April 9

ランドX線としては、大気中の宇宙線電子がゴンドラまたは collimator 等で制動輻射を起して生じたX線、およびゴンドラ外部からバック・グラウンドとして入射する cosmic diffuse X線、大気X線が考えられる。ここで1975年4月9日の気球飛場の場合、水平飛行時中、オーロラX線の activity の落ちた時のバック・グラウンドX線の計数率は vertical counter では  $5.4 \text{ counts s}^{-1}$  である。vertical counter について検出器有効面積  $S$  と全開口立体角  $\Omega$  の積は  $S\Omega = 2.2 \text{ cm}^2 \text{ sr}$  であり、従ってわれわれの観測によれば  $15 \sim 85 \text{ KeV}$  のバック・グラウンドX線強度は  $2.5 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$  になる。diffuse cosmic X線については多くの研究が行われているが、例えば H. M. Horstman et al [10] による総合報告をもとにして diffuse cosmic X線による寄与を評価すると vertical counter でカウントされるものは  $6 \text{ gcm}^{-2}$  の高度で  $0.5 \text{ counts s}^{-1}$  となり、ゴンドラ外部からの全体のバック・グラウンドX線の9%に当る。次に collimator 中で高エネルギー電子が制動輻射を起してX線を出す場合について評価した。大気中の電子のエネルギー・スペクトルは、K. P. Beuerman [11] により  $4 \text{ MeV}$  以上のエネルギー領域で理論的に計算され、トンブソンの近くのフォート・チャーチルで静穏時に観測され実験的に確かめられたものから外挿された値を用いた。計算によれば vertical counter の collimator 中での制動輻射によるX線は約  $10^{-2} \text{ counts s}^{-1}$  程度の計数率になり、全体のバックグラウンドX線の計数率  $5.4 \text{ counts s}^{-1}$  に比較して小さく、無視できる。一方、L. E. Peterson [12] による地磁気緯度  $40^\circ \text{ N}$ 、高度  $3.5 \text{ gcm}^{-2}$  での観測によれば、 $15 \sim 85 \text{ KeV}$  のエネルギー範囲ではバック・グラウンドX線強度は  $1.6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  であり 前述したようにわれわれの観測では、 $2.5 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$  である。従って、緯度効果、高度変化を考えれば両者による観測値は大体において矛盾しない値を与えていると考えられる。

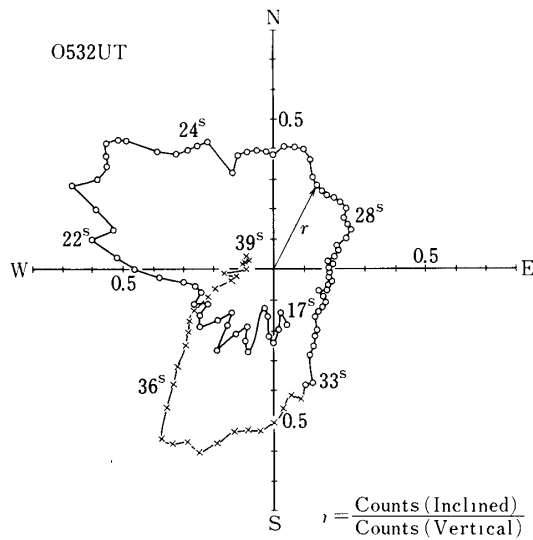
4. 観測結果及び解析

(1) 1975年4月9日UTのEvent 2-1

1975年4月9日5時32分17秒UTから5時32分39.4秒UTにわたってさらに細かく



第5図 Counting Rates of the Event 2-1

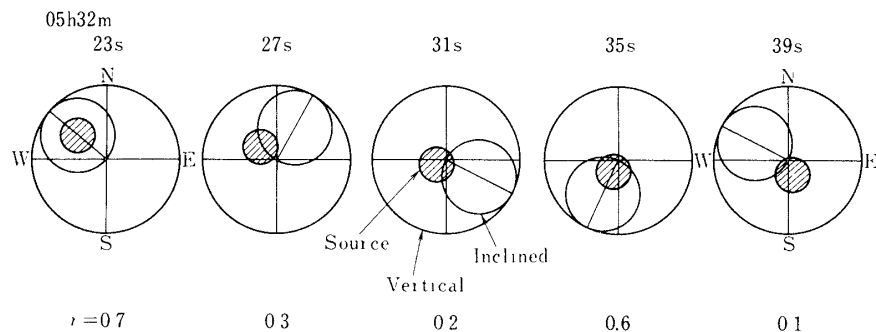


第6図 The Variation of the Counting Rate Ratios in the Event 2-1

0.2秒間の計数の時間的变化を示したものが第5図である。前節で述べたようにここで vertical counter の計数に対する inclined counter の計数の比  $r = \text{counts (inclined)}/\text{counts (vertical)} = I/V$  を問題にする。modulation collimator 付カウンタについては計数が多過ぎたために飽和して計数できなかった。inclined counter は天頂角を  $17.5^\circ$  に保ちながら、ゴンドラと共に 3 rpm の回転速度で方位角方向に回転している。この比  $r$  を動径の大ききで表わし、方位角との関係を示したものが第6図である。図中の  $N$  は地理的北極を意味する。以下本論文ではことわらない場合は地理的な方位を意味する。5時32分23秒 UT に約  $310^\circ$  の方向（北西）と5時32分35秒 UT に約  $210^\circ$  の方向（南南西）との2回、 $r$  の値が極大になっている。この結果に対して二つの解釈が可能である。一つの解釈は別の方向にある X線源が別の時刻に光ったとするものであり、もう一つの解釈は X線源が移動したとするものである。この二通りの解釈について検討するために4秒おきの代表的な時刻での計数率及び計数比（それぞれ四捨五入して一桁の数値を示してある。）を第2表に示した。X線源の方向も同時に示した。この第2表を見てわかるように計数率の方は factor 2 程度の変化しかしていないのに対して、計数比の方は factor 7 も変化している。

第2表 The Representative Observed Data in the Event 2-1

Time (U. T)	05h 32 m 23 s	27s	31s	35 s	39 s
$r = \frac{\text{Counts (Inclined)}}{\text{Counts (Vertical)}}$	0.7	0.3	0.2	0.6	0.1
Vertical Counts (counts $s^{-1}$ )	$2 \times 10^4$	$3 \times 10^4$	$2 \times 10^4$	$4 \times 10^4$	$4 \times 10^4$
Azimuthal Angle	$310^\circ$	$30^\circ$	$120^\circ$	$205^\circ$	$295^\circ$

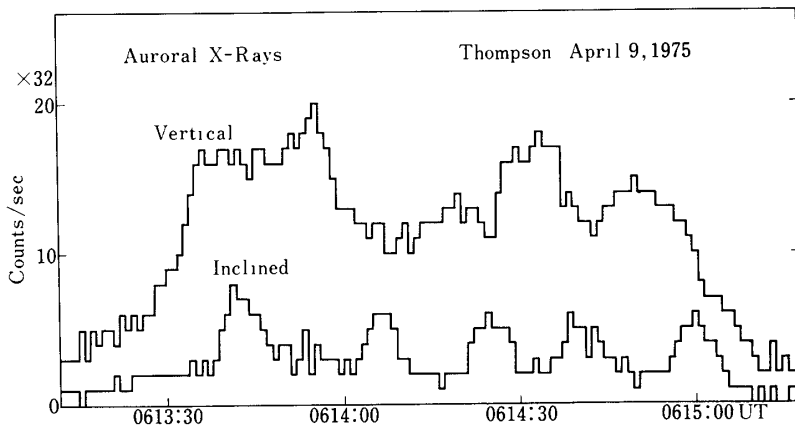


第7図 Drift of the Auroral X-Ray Source in the Event 2-1

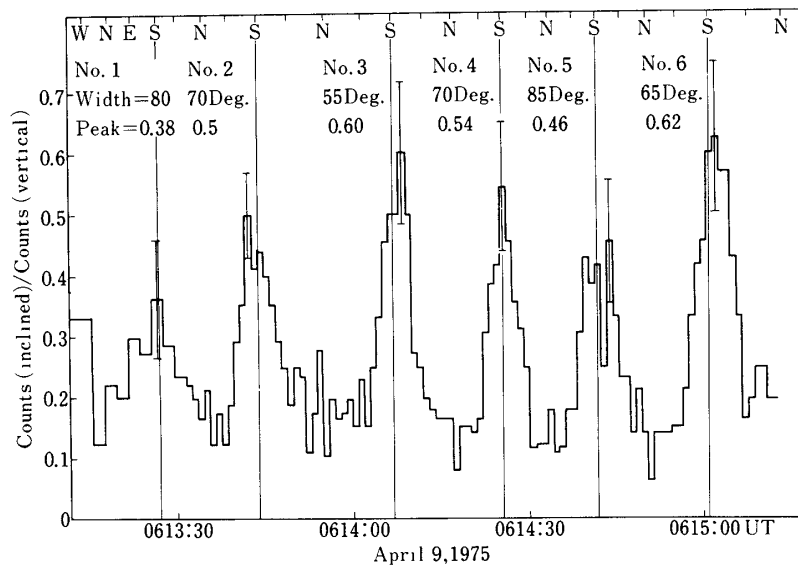


inclined counter の中心軸の方向はゴンドラと共に 3 rpm で回転しているの、このことを考慮して図示したものが第7図である。斜線で hatch した部分がX線源である。この第7図を見るとオーロラX線源はほぼ一定の速さで同じ方向に移動していると考えても矛盾はなく、上述した二通りの解釈のうちで二番目のオーロラX線源移動の可能性の方が強いと考えるのが妥当であろう。

(2) 1975年4月9日 UT の Evnt 2-5



第8図 The Counting Rates of the Inclined Counter and the Vertical Counter in the Event 2-5



第9図 The Time Variation of the Counting Rate Ratios about the Inclined Counter r in the Event 2-5

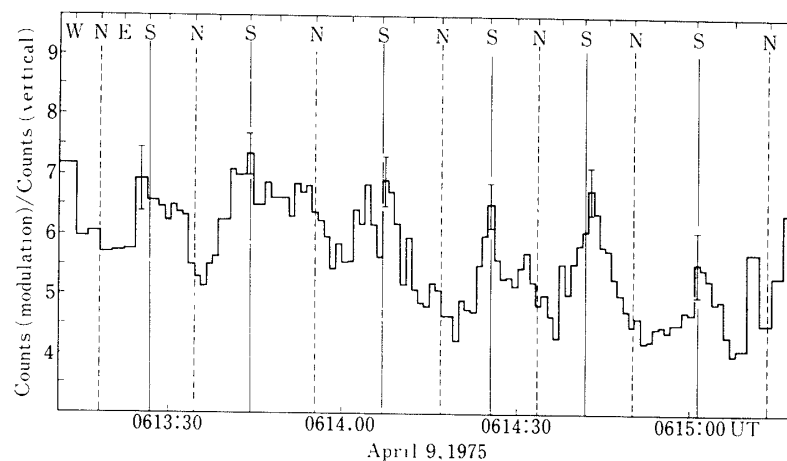
## (a) 観測結果

1975年4月9日6時13分12秒UTから6時15分12秒UTまでについて vertical counter と inclined counter の計数率の時間的変化を第8図に示した. ここでも event 2-1の場合と同じく計数比  $r$  をとり, この  $r$  の時間変化, 従って方向による  $r$  の変化を第9図に示した. ここでも方位は前に述べたように地理的方位を意味する. ここで非常に特長なことは, この event の時間内では inclined counter が南の方向を向く度に計数比  $r$  が必ず明確な peak 値を示すことである. また, modulation collimator counter についても, modulation collimator counter の計数と vertical counter の計数との比  $r_m \equiv \text{counts (modulation)}/\text{counts (vertical)}$  についての時間変化を第10図に示し  $r_m$  について同様に南の方向を向いた時 peak が認められる. 北の方向を向いた時 peak が顕著ではないが, もし modulation collimator の軸が気球放球後天頂方向からずれたとすればこのようなことも起り得る.

この event 2-5の観測結果を説明するために, オーロラX線源について以下に述べるように二通りのモデルを仮定して解析を行った.

## (b) 一様な Source 強度をもった円板型 Source Model — Model 1 —

このモデルではオーロラX線の source の形として円板のものを考えその円板の内部では一様な source 強度をもつとした. 即ち, 中心の天頂角  $\theta$ , 半径角  $\phi_0$  の一様な source 強度の円板を考え, その外部では source 強度は零とした.  $\theta$ ,  $\phi_0$  をパラメータとして simulation 計算を行って観測値に最もよく合う場合をとってオーロラX線源の大きさと方向を決定した. modulation collimator counter の観測結果については後で述べるとして, ここでは inclined counter の計数と vertical counter の計数の比  $r$  についての解析を主に述べる. NaI(Tl) の半径を  $r_1$ , collimator の内のりの半径を  $r_2$ , colli-



第10図 The Time Variation of the Counting Rate Ratios about the Modulation Collimator  $r_m$  in the Event 2-5

mator の高さを  $h$  とし, collimator の中心軸が  $\eta$  傾いていたとする. 天頂角  $\theta$ , 半径角  $\phi_0$  の一様な円板の X 線源が collimator 軸に対して方位角  $\varphi$  の方向にあったとき, このカウンタのレスポンス関数を球面三角法を用いて求めると次のようになる. 一般の場合  $\beta$  を collimator 軸からの角とするとレスポンス関数  $R(\theta, \varphi, \phi_0)$  は

$$R(\theta, \varphi, \phi_0) = \frac{2}{\pi r_1^2} \int_{\beta_1}^{\beta_2} s(\beta) \cos(\beta) \cdot a(\beta) \sin \beta \cdot d\beta \quad (1)$$

ただし

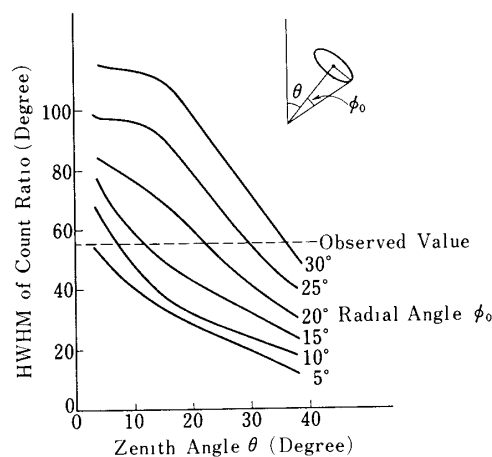
$$s(\beta) = \frac{\pi}{2} (r_1^2 + r_2^2) - x_1 \sqrt{r_1^2 - x_1^2} + (x_1 - x_0) \cdot \sqrt{r_1^2 - (x_1 - x_0)^2} \\ - r_1^2 \sin^{-1} \frac{x_1}{r_1} + r_2^2 \sin^{-1} \frac{x_1 - x_0}{r_2}, \\ \left( x_0 = h \tan \beta, x_1 = \frac{r_1^2 - r_2^2 - x_0^2}{2x_0} \right),$$

$$a(\beta) = \cos^{-1} \left\{ \frac{1}{\sin \beta \cdot \tan \chi} \left( \frac{\cos \phi_0}{\cos \chi} - \cos \beta \right) \right\}$$

$$(\chi = \cos^{-1} (\cos \theta \cos \eta + \sin \theta \sin \eta \cos \varphi)),$$

$$\beta_1 = \cos^{-1} (\cos \theta \cos \eta + \sin \theta \sin \eta \cos \varphi) - \phi_0,$$

$$\beta_2 = \cos^{-1} (\cos \theta \cos \eta + \sin \theta \sin \eta \cos \varphi) + \phi_0,$$



第11図 The Simulation Calculations about the Disc-Shaped Model 1

で与えられる. 式 (1) による simulation 計算の結果を第 11 図に示した. 縦軸には vertical counter の計数に対する inclined counter の計数の比  $r$  が半分になる時の方位角  $\varphi$  の半幅 (half width of half maximum : HWHM) を度を単位として示してある. 観測結果としては第 9 図に示されたように  $r$  値が 6 回ピークになるが, これらのピークの  $r$  値の HWHM の平均値をとると  $55^\circ$  となり, 第 11 図には破線で示してある. 破線に対応する天頂角  $\theta$ , 半径角  $\phi_0$  が可能な値である. 一方, 観測から得られる別の量として計数比  $r$  のピーク値と valley 値が観測値から得られ, simulation 計算と比較してこのピーク値と valley 値とが合う場合を選び出すと, 天頂角  $\theta$ , 半径角  $\phi_0$  に対して可能な次の二組の場合が選び出される. X 線源の中心の方位角はいずれの場合でも  $\varphi = 180^\circ$  (真南) である.

$$(i) \quad \theta = 35^\circ \pm 5^\circ, \quad \phi_0 = 30^\circ \pm 5^\circ, \quad \varphi = 180^\circ \pm 5^\circ$$

$$(ii) \quad \theta = 10^\circ \pm 10^\circ, \quad \phi_0 = 10^\circ \pm 5^\circ, \quad \varphi = 180^\circ \pm 5^\circ$$

詳しくは後述するが, modulation collimator counter の結果を同カウンタについての simulation 計算と比較すると (i) の場合の方がより可能性が強い.

次に, 第 9 図の観測結果で方位角について平均すると (平均値であることに注意),

$$\left. \begin{aligned} \frac{N_I}{N_V + S_V} &= 0.15, \\ \frac{S_I}{N_V + S_V} &= 0.10, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ただし

$N_I$ : inclined counter によるバック・グラウンド X 線 flux,

$N_V$ : vertical " " "

$S_I$ : inclined counter によるオーロラ X 線 flux,

$S_V$ : vertical " " "

となる.

一方, それぞれバック・グラウンド X 線とオーロラ X 線について, vertical counter と fluxes の関係は簡単に

$$\left. \begin{aligned} N_I &= \kappa N_V, \\ S_I &= \gamma S_V, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

と表わされる. X 線の point source を考えた時  $\kappa, \gamma$  は共に天頂角  $\theta$  の関数であり, 計数比についてのカウンタのレスポンス関数の方位角方向についての平均値である. 即ちこのレスポンス関数を  $\alpha(\theta, \varphi)$  とすると

$$r = \int_0^{360^\circ} \alpha(\theta, \varphi) d\varphi / 360^\circ = \bar{\alpha}(\theta) / 360^\circ \quad (4)$$

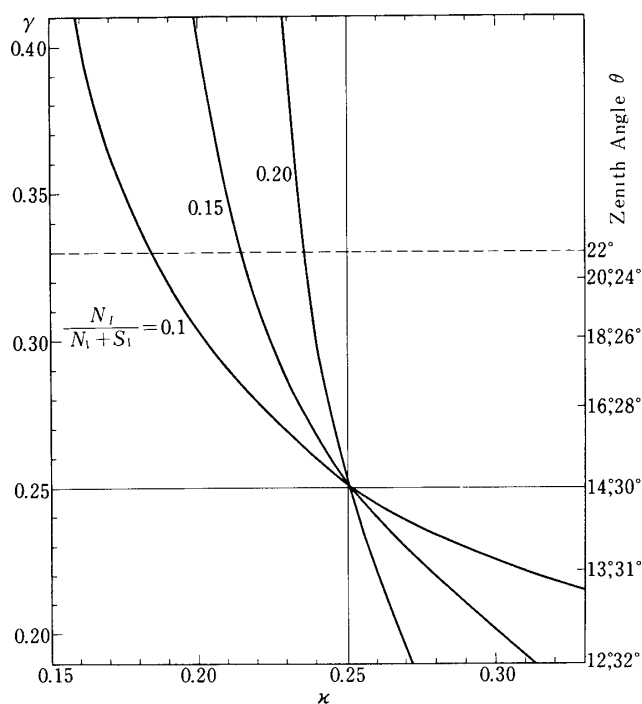
である、 $\kappa$  及び  $\gamma$  の上限は  $\bar{\alpha}(\theta)$  の極大値を  $360^\circ$  を割ったものであり、0.33 である。 $\kappa$  及び  $\gamma$  の下限は point source が inclined counter の視野から外れたときで零である。式 (2) から  $(N_I + S_I)/(N_V + S_V) = 0.25$  である。 $N_I/(N_V + S_V)$  の異なる 3 つの値をパラメータとして  $\kappa$  と  $\gamma$  の関係を示したものが第 12 図である。式 (4) でわかるように  $\gamma$  は天頂角  $\theta$  の関数であり、 $\gamma$  と  $\theta$  の関係を第 12 図の左右の縦軸に示した。point source の場合のレスポンス関数  $\alpha(\theta, \varphi)$  については後に再び触れる。前述した如く円板型の source model で大きさや方向について二通りの可能性 (i), (ii) が考えられたが、simulation 計算の結果 (i) の場合は  $\kappa = 0.3$  であり、(ii) の場合は  $\kappa = 0.4$  となる。上述の議論で  $\kappa$  の上限は 0.33 であるため、この点から (i) の場合の方が妥当性がある。

(c) ガウス関数型の強度分布をもった Arc 型の Source Model— Model 2—

このモデルでは、オーロラ X 線源の強度は、天頂角  $\theta$ 、方位角  $\varphi$  の関数としてガウス関数型の

$$f(\theta, \varphi) = f_0(\theta) \exp\left\{-\frac{\varphi^2}{b(\theta)^2}\right\} \quad (5)$$

で与えられるとする。ここでは source 強度が最大になる方向を方位角  $\varphi$  の原点としてとっている。カウンタのレスポンス関数は幾何学的に計算できる。その結果以下の式 (6) のように近似することができる。



第 12 図 The Allowed Region of  $\kappa$ ,  $\gamma$ , and Corresponding Zenith Angle

$$\alpha(\theta, \varphi) = \alpha_0 \exp\left\{-\frac{\varphi^2}{a(\theta)^2}\right\} \quad (6)$$

この時, vertical counter と inclined counter との計数比  $r$  はガウス関数のたたみ込み (convolution) により,

$$r(\theta, \varphi) = r_0 \exp\left\{-\frac{\varphi^2}{c(\theta)^2}\right\} \quad (7)$$

となり, 計数比  $r$  は  $\theta, \varphi$  の関数であり, この  $r$  が直接観測値に関する量である. ここで  $r = r(\theta, \varphi)$  とレスポンス関数  $\alpha(\theta, \varphi)$  から, オーロラ X 線源についての情報を得ることになる. 勿論,  $r$  の値がピークになる時が, 方位角方向について inclined counter が X 線源の中心の方向に向いた時である. ここでたたみ込みの結果

$$c(\theta)^2 = a(\theta)^2 + b(\theta)^2 \quad (8)$$

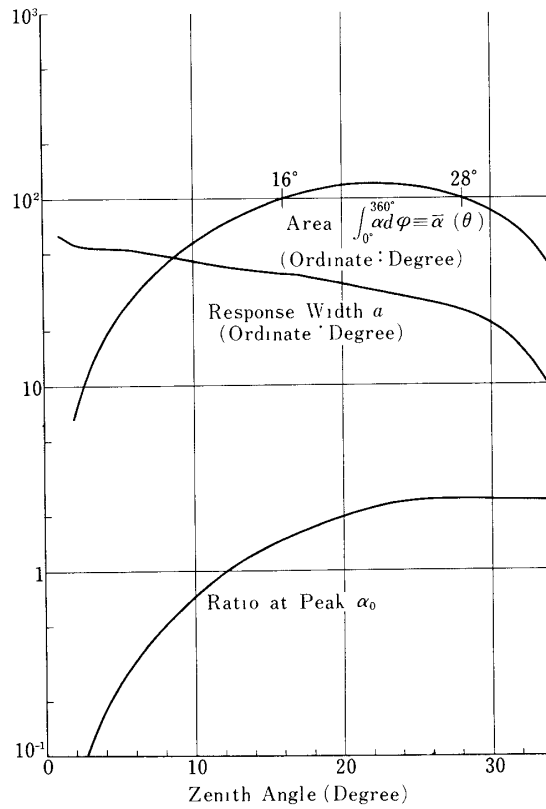
であるから, この式 (8) から X 線源の強度が  $1/e$  になる幅  $b(\theta)$  を求めることができる. いま計数比  $r$  は

$$r = \frac{\int_{0^\circ}^{360^\circ} \alpha(\theta, \varphi' - \varphi) f(\theta, \varphi) d\varphi}{\int_{0^\circ}^{360^\circ} f(\theta, \varphi) d\varphi} \quad (9)$$

であるから  $\varphi'$  で積分すると

$$\int_{0^\circ}^{360^\circ} r d\varphi' = \int_{0^\circ}^{360^\circ} \alpha(\theta, \varphi') d\varphi' \equiv \bar{\alpha}(\theta) \quad (10)$$

となる.  $\bar{\alpha}(\theta)$  の値はレスポンス関数に関する量  $a(\theta), \alpha_0(\theta)$  と共に第13図に示された.  $a(\theta), \bar{\alpha}(\theta)$  の数値は縦軸 (ordinate) に示されているが, 単位は度である. 一方  $\bar{\alpha}(\theta)$  の観測値は第9図のピークの面積から得られ, 従って第13図の  $\bar{\alpha}(\theta)$  の計算値と比較することにより, arc 型の X 線 source model (model 2) について可能な天頂角  $\theta$  の範囲が得られる. 即ち, 第9図の6つのピークに対応して  $\theta = 16^\circ \sim 28^\circ$  と決定され, その中央値は  $\bar{\theta} = 22^\circ$  である. 天頂角  $\bar{\theta} = 22^\circ$  について方位角方向について強度が  $1/e$  にレスポンス関数の幅の半分は, 第13図から  $\theta$  の中央値  $\bar{\theta} = 22^\circ$  について  $\bar{\alpha}(22^\circ) = 32^\circ$  となる. ここで,  $c(\theta)$  は観測値のピークの幅から求められ, 式 (8) を用いれば方位角についてオーロラ X 線源の強度が  $1/e$  になる幅の半分  $b(\theta)$  が求められる.  $c$  の観測値は第9図の6つのピーク値についてそれぞれ  $80^\circ, 70^\circ, 55^\circ, 70^\circ, 80^\circ, 65^\circ$  となり, 従って  $b$  の値はそれぞれ  $73^\circ, 62^\circ, 45^\circ, 62^\circ, 73^\circ, 57^\circ$  となる. 式 (8) で計算する時,  $a$  の値としては  $\theta = 22^\circ$  の時の  $\bar{\alpha}(22^\circ) = 32^\circ$  を用いた.  $b$  の平均値は  $\bar{b}(22^\circ) = 62^\circ$  である. 天頂角方向の可能な範囲は  $\pm 6^\circ$  であり, 方位角方向の誤差は約  $5^\circ$  である. また X 線源の方向の誤差は



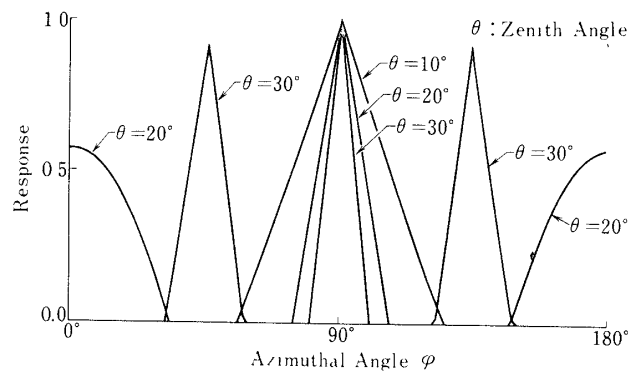
第13図 The Quantities Relating to Auroral X-Ray Response Function about Arc-Shaped Model 2

約5°である。この arc 型の model 2 の場合、オーロラ X線源の方向と大きさについての値は、

$$\left. \begin{aligned} \varphi &= 180^\circ \pm 5^\circ \text{ (真南)} \\ \theta &= 22^\circ \pm 6^\circ \\ b &= 62^\circ \pm 5^\circ \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

で与えられる。

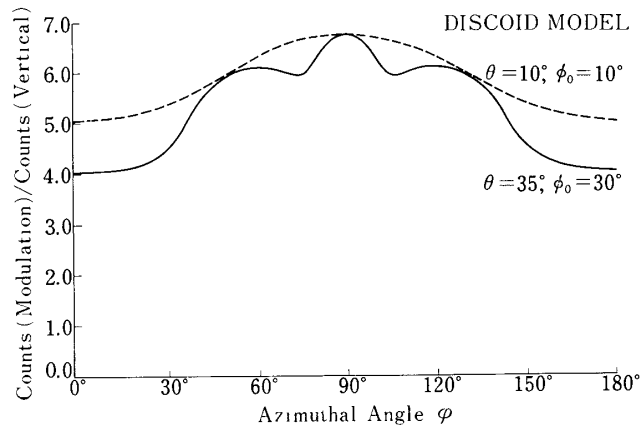
(d) Modulation collimator counter の観測結果についての解析 point source の X線の場合について、我々の modulation collimator 付き coun-



第14図 The Response Functions of the Modulation Collimator Counter

ter のレスポンス関数が計算された。これを第14図に示した。ここでは modulation collimator の grids の真鍮棒に直角な方向を方位角  $\phi$  の原点にとってある。今迄の解析で arc 型の model 2 についてはオーロラ X 線源の方向と大きさは (11) のように決定された。しかしながら円板型の model 1 については (i)  $\theta = 35^\circ \pm 5^\circ$ ,  $\phi_0 = 30^\circ \pm 5^\circ$  と (ii)  $\theta = 10^\circ \pm 10^\circ$ ,  $\phi_0 = 10^\circ \pm 5^\circ$  の二通りの場合が可能であることを (2)(b) のところで述べた。その後  $\kappa$  の上限 (式 (3) を参照) の議論で (i) の場合が妥当であることを述べたが、さらに modulation collimator counter の解析で (i) の場合と (ii) の場合の可能性の優劣を検討する。modulation collimator counter についての計数比  $r_m \equiv \text{counts (modulation)}/\text{counts (vertical)}$  の値を円板型オーロラ X 線源 (model 1) の場合について考える。(b) の時と同様に source の中心の方向の天頂角  $\theta$ , source の大きさを表わす半径角  $\phi_0$  をパラメータとしてとり、 $r_m$  の値を simulation 計算した。(b) で選ばれた (i), (ii) の二通りの場合についての simulation 計算の結果を第15図に示した。この simulation 計算の結果と第10図の  $r_m$  の観測結果とを比較すると (b) で述べた二通りのうち (i) の場合の方がよく合う。即ちオーロラ X 線源モデルとして円板型 (model 1) を考えた場合、オーロラ X 線源の方向と大きさについて、方位角  $\phi$ , source 中心の天頂角  $\theta$ , 大きさを表わす半径角  $\phi_0$  の値は





第15図 The Simulation Calculations about the Modulation Collimator Counter

$$\left. \begin{array}{l} \varphi = 180^\circ \pm 5^\circ \text{ (真南)}, \\ \theta = 35^\circ \pm 5^\circ, \\ \phi_0 = 30^\circ \pm 5^\circ, \end{array} \right\} \quad (12)$$

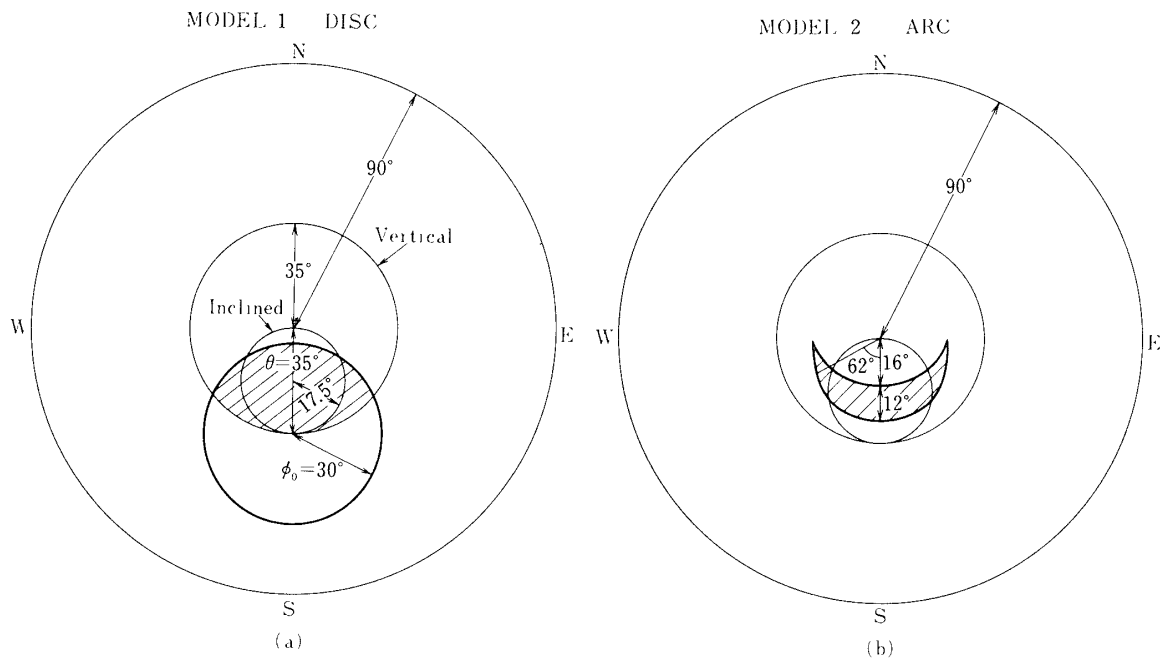
となる。

(e) Event 2-5 についての解析のまとめ

われわれが1975年4月9日6時13分12秒UTから6時15分12秒UTまでの間観測したオーロラX線バーストEvent 2-5の解析で、オーロラX線源について円板型とarc型の二通りのモデルについて、最も可能性のあるsourceの方向と大きさをそれぞれ図示すると第16図のようになる。斜線をした部分がわれわれの観測器の視野内にあるsourceの部分である。model 2ではX線源のうち天頂角 $35^\circ$ 以上の部分は視野外にある。考えた二通りのモデルによって視野内にあるsourceの中心は大体同じ方向にあり、形は異なるとしても大きさの程度は余り変わらない。またこの観測結果は細かい空間的なstructureについてはならした結果であるが、2分間にわたって真南の方向にオーロラX線源が持続して存在していたことを示している。

## 5. おわりに

われわれは1975年4月9日5時32分17秒UT(23時2分17秒LT)~5時32分39.4秒UT(23時2分39.4秒LT)(event 2-1)および1975年4月9日6時13分12秒UT(23時43分12秒LT)~6時15分12秒UT(23時45分12秒LT)(event 2-5)に特長あるオーロラX線バーストをトンプソンで観測した。この二つのeventsは異なった性質を示しているため、ここでも別々に考察する。



第16図 The Directions and Sizes of Auroral X-Ray Source in the Event 2-5 (a) Disc-Shaped Model 1. (b) Arc-Shaped Model 2

(a) Event 2-1 について

Event 2-1 の解析の結果，第7図に示されたように一定の速度で移動しているように見える．第7図で斜線で示したオーロラX線源の大きさは，高エネルギー電子が precipitate してオーロラX線の発生する高度が 100 km と考えると，直径約 20 km の円板と考えられる．オーロラX線源にはさらに細かい構造が考えられ得るが，われわれの観測器で観測された結果では，ならしてこの程度の大きさのオーロラX線源を考えればよいことになる．ここでこの event 2-1 について特長的なことは，16 秒間オーロラX線源が北西から南東の方向に一定の速度で移動していることである．移動速度の大きさは  $2 \text{ km s}^{-1}$  である．

(b) Event 2-5 について

Event 2-5 の解析ではオーロラX線源のモデルとして円板型と arc 型の二通りの場合を考え，その方向と大きさを求めた．その解析の結果が第16図に示された．いずれの場合もオーロラX線源の中心の方向は方位角  $180^\circ \pm 5^\circ$  (真南) の方向にある．円板型の model 1 では中心の天頂角は  $35^\circ \pm 5^\circ$  である．オーロラX線源の大きさは，半径角が  $30^\circ \pm 5^\circ$  であり，オーロラX線の発生する高度を 100 km とすると，半径  $40 \text{ km} \pm 6 \text{ km}$  である．次に arc 型の model 2 では中心の天頂角としては  $16^\circ \sim 28^\circ$  の角度が可能である．この arc 型のモデルではX線源の拡がりとしては方位角方向についてのみ考えられ，source 強度が  $1/e$  になる全幅は  $124^\circ \pm 10^\circ$  であり(前述の  $\bar{b}$  は半幅を示す.)，X線 source の高度を 100 km とすれば，この  $1/e$  になる全幅は  $57 \text{ km} \pm 5 \text{ km}$  になる．

オーロラX線源としてはさらに細かい空間分布の構造が考えられるわけであるが、われわれの観測の結果では、ならして、以上のような大きさのオーロラX線源が考えられる。この event 2-5 で非常に特長的なことは、2分間にわたって同じ方向からオーロラX線が来たことであり、従って2分間にわたって高エネルギー電子が precipitate して来ていることになる。ここで  $L \sim 6.5$  の赤道面では 30 KeV の電子の  $L$ armor 半径は 5 km である。トンプソンと地磁気共役な  $L \sim 6.5$  (activity によって静止衛星 ATS-6 の場所の  $L$  は変化する。) の赤道面から高エネルギー電子が precipitate すると考えられるが、オーロラX線の親となる高エネルギー電子群が赤道面で静止していると考えるのは不自然で、むしろ赤道面でトンプソンと地磁氣的に共役な領域に次々に高エネルギー電子群が2分間にわたって補給されていると考えるのが妥当である。第9図、第10図で示したように  $r, r_m$  の観測値の時間変化で時間の分解能は1秒であり、inclined counter は方位角方向について約20秒で1回転する。この程度の時間では分解できない速さで、トンプソンと地磁氣的に共役な領域にオーロラX線の親となる高エネルギー電子の補給が行われ、それが2分間にわたって持続していると考えることができる。

### 謝 辞

この研究事業を行うに当り K. C. Clark 教授の甚大な御配慮と御協力を感謝します。またトンプソンでの気球観測事業は G. K. Park 教授の大変な御尽力がなければ実現し得なかったことを深く感謝し、ワシントン大学のオーロラX線グループの御協力に謝意を表します。

G. K. Parks 教授の御指導、御助言に御礼を申し上げます。

この研究の計算で東京大学大型計算機センターおよび立教大学計算機センターを利用させていただいたことを謝し、それらのスタッフの方々に深く御礼を申し上げます。

宅間正博氏の御協力を感謝します。

この研究事業は東京大学宇宙航空研究所海外協力費で行われたことを特に記します。

### 参 考 文 献

- [1] R. R. Brown : Space Sci. Rev., **5** 311 (1966).
- [2] J. T. Gosling : J. Geophys. Res., **71** 835 (1966).
- [3] G. K. Parks : J. Geophys. Res., **72** 215 (1967).
- [4] M. Kodama and T. Oguti : Mem. Natl. Inst. Polar Res. Ser. A **14** 1 (1976).
- [5] H. Bradt, G. Garmire, M. Oda, G. Spada, B. V. Sreekantan, P. Gorenstein, and H. Gursky : Space Sci. Rev. **8** 471 (1968)
- [6] M. Oda : Space Sci. Rev. **8** 507 (1968).
- [7] Y. Hakura : Rep. Ionos. Space Res. Japan, **19** 121 (1965).
- [8] Y. Ogawara and T. Hayashi : Proc. 9th Intern. Symp. Space Tech. p 659 (1971)

- [9] 奥平清昭：昭和51年度大気球シンポジウム報告 p. 259  
昭和52年度物理学会春の分科会（佐賀大学），宇宙線分科1 p SE 9
- [10] H. M. Horstman, G. Galvallo, and E. M. Horstein : *Rivista Nuovo Cimento* 5 256 (1975)
- [11] K. P. Beuerman : *J Geophys. Res.* 76 4291 (1971).
- [12] L. E. Peterson : *Non Solar X -and Gamma-Ray Astronomy*, I A U  
Symposium No. 37 p 59 (1969).