

X 線 天 文 学

松 岡 勝*

大気圏外域から宇宙を探ることによっていくつかの新たな分野がひらけつつある。X線天文学こそその最も顕著な例であろう。

§ 1. ま え が き

最近の天文学上で最も画期的な話題として、準星の観測を中心とした銀河系の爆発の問題とX線天文学の発展があげられるだろう。この2つは2~3年の差はあったが、ほとんど時期を同じくしてわれわれに宇宙の複雑さと深みを思い知らせた問題である。今の所両者は観測的に結びついていないが、共通していえることはエネルギーの発生方式がこれまでの常識ではなかなか説明しきれないことである。

準星についての解説は本誌(守山史生, 1965年1月号)でもとりあげられているのでここではX線天文学についてふれてみたい。X線天文学についての解説もこれまで他誌(小田稔, 自然 1965年1月号; 松岡勝, エレクトロニクス 1965年8月号)でなされているので多少の重複する所はあるが、できるだけ最近の問題をひらいてみる。

X線天文学の観測手段はいうまでもなく天体からふり注ぐX線領域の電磁波をとらえることである。

X線は健康診断でおなじみのものであるが医療用に使用されているのは波長にして $0.3 \sim 0.4 \text{ \AA}$ 程度である。これをエネルギーの単位であらわすと $20 \sim 30 \text{ keV}$ 程度になる。一方これまで天体で観測されているX線は波長にして $0.2 \sim 20 \text{ \AA}$, エネルギーの単位では $600 \text{ eV} \sim 60 \text{ keV}$ 程度になる。

ここでわれわれはX線をあらわすのに波長を使ったりエネルギー単位を使ったりした。これはX線測定器が波長を基準にした方が便利な場合と、エネルギーを基準にした方が便利な場合とがあるからである。この様子は丁度電波天文学で周波数を単位にしたり波長を単位にしたりして考えているのに似ている。

さてX線は医療用に使われていることから想像すると一見物質を通過しやすいように思われるが、物によっては決してそうはいえない。天体観測で問題になる空気層に関しては、X線は可視光線や電波に比べてはるかに透

過しにくい。星からの光が地上までほとんど減衰されずにやってくるのに対して、 10 \AA 程度のX線は地上より高度 100 km ぐらいの所までしかとどかない。このため地球外からやってくるX線を測るにはどうしてもこの高さ以上にあげらざるを得ない。この手段としてわれわれはロケットや人工衛星を使うことができる。このようにロケットや人工衛星の発展は空気にさざぎられて地上までやってこれない宇宙からの到来者をとらえることによって、天文学に大変革を起しつつあるのである。

§ 2. 発展の経緯

1960年5月スミソニアン天文台でX線天文学に関する小さな研究会が催された。ここに集った天文学者はアメリカに在住する20人余りの少人数であったが、そこでは2年後の発展のいとぐちになるいくつかの議論がたたかわされた。とはいえ今日の発展を誰れも予想するものはいなかった。

この会議に出席した人たちのうちジャコニー (Giacconi) やロッシー (Rossi) とその協力者たちは、1962年6月の会議で提案した通り $2 \sim 8 \text{ \AA}$ の領域に感度をもつガイガー計数管をロケットに載せて月が太陽のX線を受けて出す蛍光X線を観測しようとした。その結果予想していた月からのX線は観測にかからず、銀河中心近くに強いX線源のあることを発見した。この発見はかなりラッキーであったといえよう。なぜならばたまたま観測の時期が最も強いX線源のあるときになされたことと、方向性を調べて明らかにX線源からきたピークをとらえたからである。これより先1960年フリードマン (Friedman) らは夜の空からくるX線をとらえようとしてガイガー計数管をロケットに載せて測定したが、方向性をはっきりさせずに等方的なX線のバックグラウンドの上限値を出しただけだったので、あまり注目されなかった。

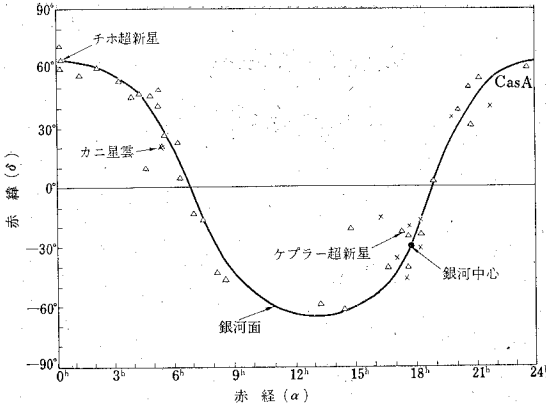
1962年6月の観測だけではまだX線源の存在を疑う人が多かったが、その後ジャコニーらのグループ (ASE-MIT), フリードマンらのグループ (NRL), フィッシャーらのグループ (Lockheed), それに筆者らのグループ (Nagoya) は今日まで合せて20回近い観測によってX線源の数も10個にふえ、いよいよX線天文学は一つの確乎とした分野をしめるに至ったのである。

* 名古屋大学理学部物理学教室
M. Matsuoka: X-Ray Astronomy

第1表 X線源とその強度*

X線源	位置 (1950)		2~8 Å の X線強度 (photons cm ⁻² sec ⁻¹)
	赤経	赤緯	
Tau X-1	05 ^h 31.5 ^m	22.0°	2.7
Sco X-1	16 ^h 15 ^m	-15.2°	18.7
Sco X-2	17 ^h 08 ^m	-36.4°	1.4
Sco X-3	17 ^h 23 ^m	-44.3°	1.1
Oph X-1	17 ^h 32 ^m	-20.7°	1.3
Sgr X-1	17 ^h 55 ^m	-29.2°	1.6
Sgr X-2	18 ^h 10 ^m	-17.1°	1.5
Ser X-1	18 ^h 45 ^m	5.3°	0.7
Cyg X-1	9 ^h 53 ^m	34.6°	3.6
Cyg X-2	21 ^h 43 ^m	38.8°	0.8

* ここにあげた位置は NRL グループのものであるが、ASE-MIT や Lockheed らのグループの出した位置とは食い違ふ所もある。



第1図 X線源の位置. ×: NRL グループによってきめられた位置. Δ: 超新星の残骸の位置.

§ 3. 観測結果の現状

§ 3.1. 局所的X線源

X線源は NRL グループの蜂の巣型コリメーターを使ったカウンターによって 10 個もの位置が決定された。その様子は第1図と第1表に示してある。しかしこのX線源の位置は他のグループ (ASE-MIT と Lockheed) がきめたのと多少食い違ふ点がある。これはロケット観測からきめる位置は地上観測とは違つてはなはだむつかしいことと、まだ観測が十分すすんでいないせいでもある。この食い違いはここ 1~2 年で解決するであろうし、さらにいくつかのX線源が発見されるであろう。いづれにしてもX線源についていえることは、

- 1) 1~2 の例外は別として銀河面に近いところにある。
- 2) とくに銀河中心方向に多くが集中している。
- 3) 超新星の残骸の1つとしてよく知られたカニ星雲 (Tau A) はX線源である。
- 4) カニ星雲以外の X 線源は光でも電波でもみえない。
- 5) エネルギースペクトルは各々で多少異なるが、かなり高いエネルギーまでのびているようである。

このうちカニ星雲からのX線源については NRL グループによってかなり詳しく調べられた。1964 年 7 月アメリカのロケット発射基地ホワイツサンズあたりではカニ星雲の月によるえんべい (掩蔽) が起ることが知られていた。月の掩蔽を利用して隠される天体のサイズや微細構造を知る方法は電波観測でよくなされていることである。もしこの方法をX線観測に利用すればX線発生領域の大きさがきわめられることになる。これを実行したのが NRL グループであった。この実験はコントロールがよくきくエアロビーという観測ロケットによってなされた。いくらコントロールがきくとはいへ上げの時刻

にしるカウンターの方向付けにしる非常に精度の要求される実験であった。しかしこれが運良く成功してカニ星雲のX線発生領域は1分の広がりをもっていることがわかった。もしこの実験が失敗していたら 1972 年の次の機会まで待たなければならなかったであろう。

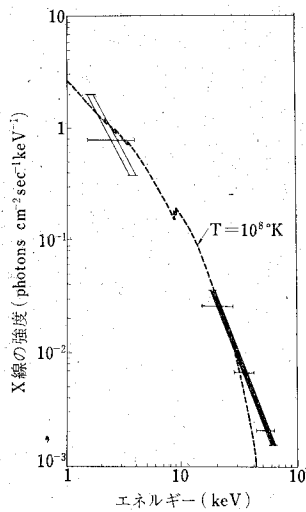
それはともかくとして、1分の広がりカニ星雲の距離が 1.1 kpc であることを考慮すると、X線源は実に 1 光年の広がりを持っていることになる。しかもその発生率は約 10^{36} erg/sec というぼう大な量であることがわかった。さらに MIT のクラーク (Clark) は気球によって 15~60 keV のX線を測定した所、観測可能な程度強いことがわかった。15~60 keV の X 線では気球高度の 30 km 以上にまであまり吸収されずに到達することができるのである。このようなエネルギーの高いX線は気球によっても観測がすすめられている。

いろいろなエネルギー範囲のX線の強度と、X線源のサイズを知ることはその発生機構を知る上にきわめて重要である。

これまで測定されているカニ星雲からのX線のスペクトルをまとめると第2図のようになる。

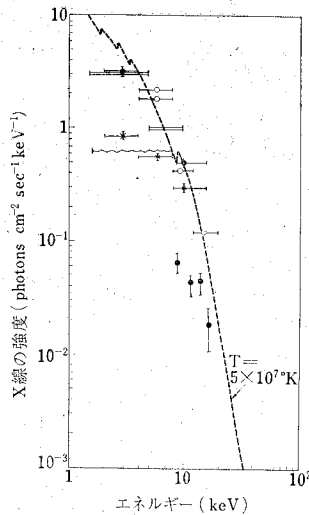
さてカニ星雲以外のX線源についてはまだそれらのサイズは上限しかきめられていないが、MIT に滞在中の小田稔氏の発案によるすだれ型コリメーターによって 1/10 分程度の大きさまで分解する観測がすすめられている。それにアメリカではロケットが回収できるという利点を利用して写真撮影による較正も計画されている。これらの観測は非常に近い将来になされ、X線源の位置とそのサイズが1分以下の精度で正確にきめられるであろう。

またエネルギースペクトルはどうかというと、今の所 Tau X-1 の他は Sco X-1 と Cyg X-1、それに銀河中



中白：NRL グループの観測結果。
 中黒：クラークの観測結果。

第2図 カニ星雲からのX線スペクトル。



	ASE-MIT	NRL	Nagoya
Sco X-1	縦棒	横二重	横棒
Cyg X-1		波線	十字

第3図 Sco X-1, Cyg X-1 のX線スペクトル。

心近くのX線源の集りのスペクトルのおおよそがわかっているにすぎない。Sco X-1 と Cyg X-1 のエネルギースペクトルの観測結果は第3図に示した。第4図にはこれらのスペクトル観測で筆者らが本年7月にカプタ9型12号機に搭載した比例計数管をつけたX線測定装置が示してある。

§ 3.2. X線の等方成分

X線の観測をすると、あるX線源からやってくるX線の他に多分ような分布をした成分のX線をとらえることができる。これはまだ分解されていないX線源であるか、それとも宇宙空間にほぼ一様に発生源をもつものであるか、今までの観測だけでははっきりしない。もう一つ気になることは、今まで使われているX線測定器がX線以外の荷電粒子の影響や測定器付近で二次的に生ずるX線をすっかりとり除いていないということである。

それはともかくとして、これまで測定されたX線の等方成分の強度をまとめると第2表のようになる。これらをグラフに書いてみると第5図になる。このスペクトルが第2図、第3図に示したスペクトルに似ていることは注目すべきであろう。

§ 4. X線源の解釈

§ 4.1. X線源となる天体

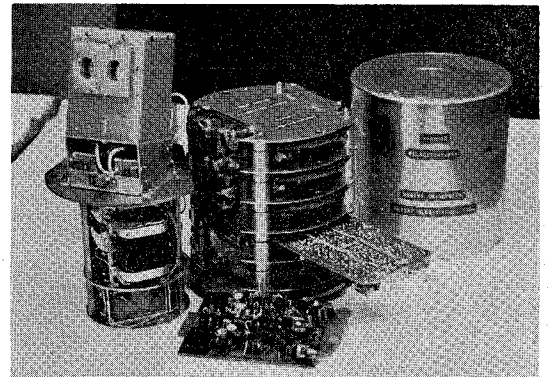
前節で述べたように観測データはまだ十分集積されていないし、精度の足りない点も多い。しかしこれまでの結果からX線源としてどんな天体が考えられ、どんな発

生機構で大部分のエネルギーをX線に転化しているかを考えてみることは天文学上きわめて興味あることである。

§ 3.1 で述べたX線源の特長から判断して、これまで発見されているのは多分われわれの銀河系内に存在する特殊な天体であろう。そしてそれはエネルギー的に最も活発な超新星の残骸と関係があると想像される。所で超新星の残骸はカニ星雲以外に、過去の歴史とか現在の電波源とか光学的に特殊な天体などから、われわれの銀河系内ではまだいくつか知られている。それらの確らしいものを天球図に書き込んでみると第1図のようになるが、このうちX線源と一致するのはカニ星雲しかない。それでもなおX線源がある種の超新星の残骸であると推定するのは、次のような根拠からである。

超新星はわれわれの銀河系では50年に1回とか、300年に1回とかの割合でぼう大なエネルギーを出して爆発している。この統計的な解析をもう少しすすめると超新星の爆発後、電波的、光学的、X線的に活発な期間はそれぞれ 10^8 年 4×10^4 年、 4×10^4 年程度が適当である。このように考えるとわれわれの銀河系にはX線的に活発なものは約 10^8 個存在することになる。このうち発見されているX線が10個だけということは、現在の観測手段で可能な距離は約1 kpc 以内だとすると納得がゆく。

以上のことを簡単にまとめてみると、超新星の残骸ではX線の発生している期間は一般に電波や光よりもずっと長く、今みている大抵のX線源は 10^4 年ぐらいの年齢をもったものであるため光でも電波でもみえないと考えられる。距離は大体1 kpc ぐらいであろう。ただし銀河面から約 20° はなれた Sco X-1 はもっと近くにあるの



第4図 名古屋グループが使用した比例計数管を用いたX線観測装置。これを搭載したロケット(K-9M-12号機)は1965年7月26日2101 JST に打ち上げられた。

第2表 X線の等方成分の強度

エネルギー あるいは波 長領域	強度	測定グループ
2~8Å	6 photons cm ⁻² sec ⁻¹ sr ⁻¹	ASE-MIT
2.5~8Å	6 //	NRL
4~8keV	3.0 photons cm ⁻² sec ⁻¹ sr ⁻¹	Lockheed
5~10	0.48 photons cm ⁻² sec ⁻¹ sr ⁻¹ keV ⁻¹	Nagoya
10~15	0.25 //	//
15~20	0.08 //	//

かも知れない。

§ 4.2. X線の発生機構

それではこのような天体はどういう発生機構でX線を発生しているだろうか。カニ星雲からのX線発生率が太陽の全エネルギーに比べても3桁程も大きいことからわかるように、はなはだ説明が困難である。

他のX線源がカニ星雲の場合とそんなに変わらないとすれば、X線発生領域の大きな広がりは一頃盛んに議論された中性子星のような小さな天体では説明できない。そのため薄い高温プラズマ状態からの熱X線とか、シンクロトン輻射によるX線とかを考えなければならない。その他いろいろなX線発生機構が考えられるが、詳しく解析してみるとどれも困難にぶつかる。

そこでまずシンクロトンによるX線を考えてみよう。超新星の残骸からの電波のスペクトルの解析によると、年令がたつにしたがってスペクトルはフラットになり、場合によっては逆転するようになる。つまり高い周波数の方が上っているものもある。このことをX線までのぼして考えてみると、年令の古い超新星の残骸はX線領域のシンクロトン輻射を出しているが、電波や光の領域ではずっと弱くなっていると考えてみる。すると電波や光でみえないがX線でみえてもおかしくない。しかしこのX線を出す高エネルギー電子の寿命は1年程度であるため、X線源の寿命が10⁴年もつには、電子の加速能率がはなはだよくなければならないことになる。もし電子の加速が都合よく説明できたとすれば、シンクロトンはX線発生には効率のよい利点をもっているため、必ずしも捨てたものではない。

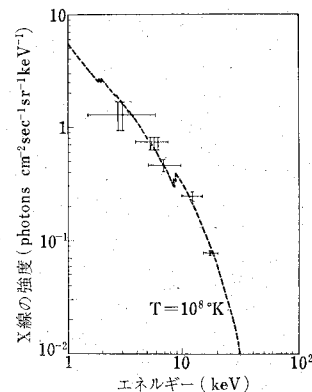
次に薄いプラズマからのX線源について調べてみる。超新星の爆発後高温プラズマは次第に拡がり、その中では何度かのショックなどで加熱が繰り返されて10⁴年ぐらゐの間は10⁷°K~10⁸°Kの高温に保たれている。この現象は超新星に限らず爆発する銀河系などでも同様なことが起っていると思われる。したがって準星などは十分強いX線を出していると予想されるが、それがX線源としてまだ観測にかかっていないのは距離が遠いからであろう。高温プラズマを形成している元素の成分は超新

星が宇宙線の起源になる最も有力な天体ということから宇宙線とほぼ同成分であろう。したがってSi, Feなど比較的重い元素が多いはずである。重い元素が多い高温プラズマからのX線は自由-自由遷移 (free-free transition) 以外に、自由-束縛遷移 (free-bound transition)、束縛-束縛遷移 (bound-bound transition) などが有効なX線の発生機構になる。第2図、第3図は宇宙線の起源での元素の成分を仮定した高温プラズマからの熱X線のスペクトルを計算した値が書き込んである。この発生機構によるスペクトルを光と電波にのぼしてみても現在の観測の下限以下にしかならないため、X線でみえても光でも電波でも見えない天体ということになる。ただカニ星雲のようにエネルギーの高い所までのびたスペクトルを得るためには、プラズマの一部が高いエネルギーの方にかかりのびていなければならない。

所でX線の発生率が10³⁶ erg/sec程度というぼう大なエネルギーをどこから供給されるかはきわめてむづかしい問題である。

一つの推定として超新星の爆発のとき中性子捕獲など早い過程でできた放射性元素が崩壊するときに出るエネルギーが10⁴年程度の加熱を持續していると考えことは可能である。このときCm²⁵⁰などは重要な放射性元素になるだろう。しかしこの場合の加熱が高温プラズマを形成するようにきわめて有効に使われなければならない、精密な議論はまだ十分されていない。

今まで述べてきた局所的X線源の他に等方成分がどうして発生しているかはこれまた臆測の域を脱していない。第5図に示したようなスペクトルを出すX線の発生機構は、星間空間や銀河系間空間ではかなり乱暴な仮定をしない限り、納得いくものがない。そこで一様な空間からでなく、まだ発見されていないX線源がわれわれの



縦二本: NRL, ASE-MIT グループの結果

縦三本: ロッキード・グループの結果

縦一本: 名古屋グループの結果

第5図 X線の等方成分強度の観測結果

銀河系内にも、また他の銀河系内や準星のような特殊な銀河系にその起源をもち、その1個1個は今の測定器ではまだ分解されていないのだと考えてみる。すると結果的にはこれが一様成分として測定されることになる。これを他の銀河系のX線源の数もわれわれの銀河系内にある数とあまり変わらないと仮定して粗っぽい勘定をしてみると、どうにか説明できそうである。それにラジオギャラクシーや準星のような活発な銀河系も今考えた等方成分に重要な寄与をするであろう。

X線源の説明はこれまでいろいろ出されて来たが観測とともに出てはつづれ、つづれては出るという繰返しの経過をたどってきた。上述した熱X線やシンクロトロン輻射は現在最も有力であるが、これとても観測がすすみ精密な理論的解釈をしてみればもっと違ったものになってしまう。それにしても加熱あるいは加速のもとになるエネルギー供給の問題、そして得たエネルギーをX線放出に効率よく使うという問題は、これまでわれわれが常識的に考えているよりもっと違ったルートで能率よく進んでいるのかも知れない。

X線の問題、特に等方成分などは宇宙論と結びつけて議論する人もいる。例えばX線の等方成分のスペクトルは宇宙論で異なるし、遠い起源のX線の線スペクトルは赤色偏倚をする。いずれにしても宇宙のはるか彼方からくるX線は他の情報と同様宇宙論の発展にも寄与するに違いない。

§ 5. 今後の発展と問題点

X線天文学はまだはじまったばかりである。それだけに今後期待される問題が山積している。そこでX線天文学は今後どんな問題を観測的に解決しなければならないかを考えてみる。

これまでの議論ではX線源の発生領域はカニ星雲と同じようにならぬ程度に広がっているとしてきた。しかしカニ星雲以外はその広がりが本当に1光年もあるのか、あるいはもっと小さいのかははっきりしない。全てのX線源が点状でなく広がりを持っていることがわからなければ中性子星説は完全に否定し去るわけにいかない。ここでいう広がりとは観測的にはみかけの広がりしか測定できないが、さらにX線源がどれだけ空間的に広がりを持っているかは距離を知らなければならない。X線源の距離を知ることは観測的には実にむづかしいことである。例えばX線の星間空間での吸収スペクトルを知ることは一つの方法であろう。

これまで観測されているX線源はカニ星雲以外は電波的にも光学的にも何も見えない。例えば Sco X-1 の方向をパロマの大望遠鏡でのぞいても、今の所何らそれらしい天体が見つからない。しかし各X線源の位置を

はっきりきめてその方向を本格的に電波や光で詳細に探索することは価値ないことではなからう。とはいえもしX線源が高温プラズマからの熱X線であるとして他の電磁波の強度を勘定してみると、紫外線などは現在の観測手段でかろうじて観測にかかりそうであるが、電波や光ではちょっと望み薄いようである。紫外線による天体の観測はやはり大気圏外域に出てなされなければならない。すでに紫外線による星の観測はアメリカやイギリスで盛んに進められている。

X線源のスペクトルを紫外線を含めてできるだけ広い波長範囲にわたって観測することはX線発生機構の解明に最も必要とされることである。もし観測の精度をずっとよくしてX線の線スペクトルまで観測できれば、放出されるX線がシンクロトロンによるのか熱X線によるのか黒体輻射によるのかははっきりするであろう。そしてX線源での元素の存在量や温度などもわかるであろう。

これまで述べてきたようにX線源が素性のわかった超新星の残骸や準星などから出ているとすれば、現在光学的、あるいは電波的に観測されている類似の天体に感度の良いX線測定器を向けてみることは意味あることであろう。それに準星などは短い周期で変光していることからX線も何らかの時間変化が期待される。また感度の良い測定器はまだ発見されていないいくつかのX線源をみつけるであろう。そしていろんな星や銀河系と同様、これらのX線星（仮にそう名付ける）がどの星図にも書き込まれるのはそう速いことではなからう。

いろいろ考えてみるといずれもX線測定器の開発がきわめて必要になってくると、コントロールがきくロケット、人工衛星それにバルーンからの測定も要求される。このような超高層の乗り物で天文学を研究するには沢山の諸分野の研究者と協力しなければならないし、観測手段もますます複雑化してくる。天文学者が新しい分野を開拓してゆくためには、彼ら自らの手によって測定技術の開発をどんどんすすめてゆかなければならない。

X線天文学の観測方法はこれまでの天文学でなされてきたのとは異なり、従来の生粋の天文学者よりも少し毛色の変った人たちや分野を異にする人たちによってすすめられて来た。このことは自然科学の発展が最早一分野の狭い所を深くつくづくだけでなく、いろんな分野の人たちがお互いの領域を侵し合い進出することによって新しい事実をみつけてゆかなければならないことを示している。そこでみつかった事実はX線天文学が今日遭遇しているようにこれまでの一分野からの常識ではどうにも説明がつかないことが起ってくる。これを精密な観測と大局的な理論をうちたてることによって、自然科学の前衛はいつまでも活気のある発展を続けてゆくであろう。