

# SCOX-1 の モ デ ル

北村 崇\*・松岡 勝・宮本 重徳  
中川 道夫\*・小田 稔・小川原嘉明  
高岸 邦夫\*

## 1. 序 論

Giacconi ら[1]により X線を出す天体 SCOX-1 が発見されて以来、その時間的变化等を観測するために多くのロケット実験が行なわれた。

これらの観測により SCOX-1 からの X線のエネルギースペクトルは 2~20keV の領域では、熱いすいプラズマのスペクトルとよく合致することが知られている。またこの X線強度は、時間的に変動していることも知られている。Sandage らによる SCOX-1 の光学的同定[2]以後は Hiltner と Mook ら[3]によりくわしい SCOX-1 の光学的観測が行なわれており、その結果によれば、SCOX-1 の光の強度は、blue magnitude で、12.5 m から 13.4 m の間を数時間かかって変動しており、その明かるい phase においてはときどき 0.2m ぐらい明かるく輝くことがある (flare up する) ことが知られている。

われわれは SCOX-1 の変動を詳しく観測し、この X線星の X線発生メカニズムを調べる目的で K-9M-27 号機および S-210-2 号機によるロケット観測を行なった。この結果とこれまでほかのグループにより得られている data とを総合することにより SCOX-1 がどのようなものであるかを考えてみたい。

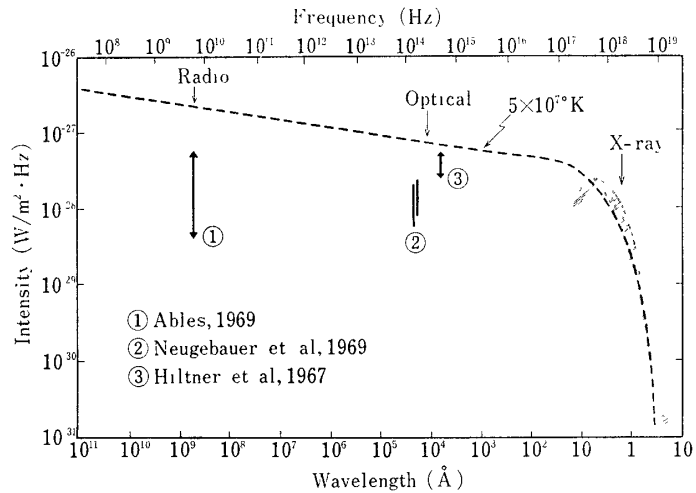
## 2. SCOX-1 からの radiation

SCOX-1 が光学的に同定されてから光、赤外、電波の領域における観測が行なわれるようになり、SCOX-1 からの radiation が、広いエネルギー領域にわたって明らかになった。そのエネルギースペクトルの様子を図 1 に示す。この図より明らかなように、X線領域ではそのスペクトルはうすい(透明な)熱いプラズマからの radiation としてよく表わすことができるが、光より波長の長い領域では、うすい熱いプラズマのスペクトルと比較するとその強度は少し弱く、熱いプラズマ自身による吸収がそのスペクトルに影響を与えているようにみえる。すなわち光より波長の長い領域では gray body radiation の様子を示しているらしいことがわかる。また電波領域の radiation はこのようなモデルでは説明できず、何かほかの別のメカニズムによるものと考えられる。

このような観測データを元にして次のような仮定をたてそのモデルを検討したい。すなわち赤外線領域から X線領域 (2~20keV) にわたって SCOX-1 からの radiation は熱い球

---

\* 大阪市立大学理学部



第1図 SCOX-1 からの radiation のスペクトル

状のプラズマからの radiation であると仮定する. そしうすい熱いプラズマからの radiation spectrum より optical region でずれているのは, 熱いプラズマの自己吸収に基因すると考えるのである. このように考えるとその吸収の様子からプラズマの密度, 大きさなどが推定でき, SCOX-1 が時間的にどのように変動しているかを推定することができる. 球状の熱いすいプラズマからの radiation は

$$I(E)dE = 1.68 \times 10^{-10} \times \frac{n^2 r^3}{3d^2} [e^{-E/2kT} K_0(E/2kT)] \frac{dE}{\sqrt{kT}} \quad (1)$$

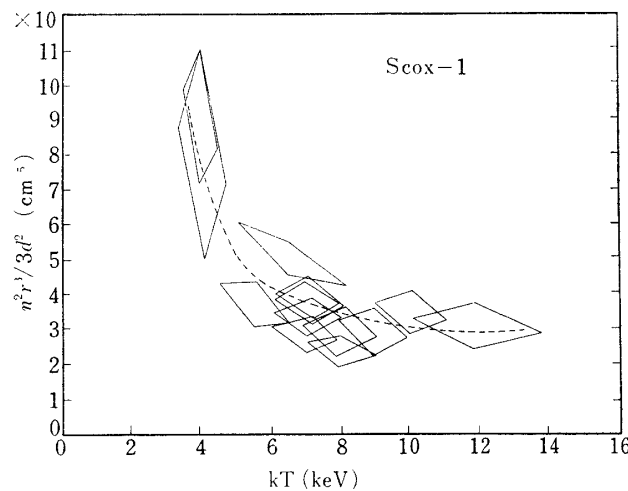
で表わされる[4]. ただし  $I(E)$  は radiation の強度 ( $\text{keV}/\text{keV sec cm}^2$ ) であり,  $n$  はプラズマの電子またはイオンの密度 ( $\text{cm}^{-3}$ ),  $r$  は球の半径 ( $\text{cm}$ ),  $d$  はプラズマまでの距離 ( $\text{cm}$ ),  $E$  は photon のエネルギー ( $\text{keV}$ ),  $kT$  はプラズマの温度,  $K_0$  は modified Bessel function of the second kind である. したがってロケット観測により行なわれたX線のエネルギースペクトルを(1)式と比較することにより球状プラズマの温度  $kT$  を推定することができ, またその強度より  $n^2 r^3 / 3d^2$  の値を推定することができる. 表1にはこれまでロケット観測により得られた SCOX-1 からのX線のエネルギースペクトルより推定したこれらの値を示す. なお  $B$  はロケット観測と同時に行なわれた SCOX-1 の光学観測による blue magnitude の値である. この data より明らかなように SCOX-1 の  $kT$  は  $4 \text{ keV}$  から  $12 \text{ keV}$  の間変動しており blue magnitude  $B$  は  $12.5 \text{ m}$  から  $13.5 \text{ m}$  の間を変動している. われわれが K-9 M-27 号ロケットにより観測したときの SCOX-1 [19]はそのプラズマが一番高い温度 (約  $12 \text{ keV}$ ) であり, しかもその光での明るさは一番暗い phase であったことが分る[9].

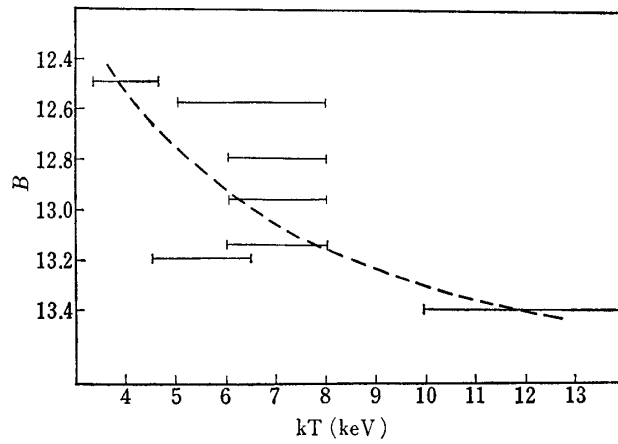
図2には  $n^2 r^3 / 3d^2$  の値と  $kT$  の値との関係を示し, 図3には SCOX-1 のX線と光との同時観測のデータを用いた  $kT$  と blue magnitude との関係を示す. これら観測データは誤差も大きくまたばらつきも大きい,  $kT$  と  $B$  との間および  $n^2 r^3 / 3d^2$  と  $B$  との間には点線で示したような関係があるように思われる.

最近 OSO III[20] および Vella 5号衛星[21]によって光学的にまたはX線的に flare up しているときのX線の強度とスペクトルが観測された. 図4, 図5にはこれらの data を示

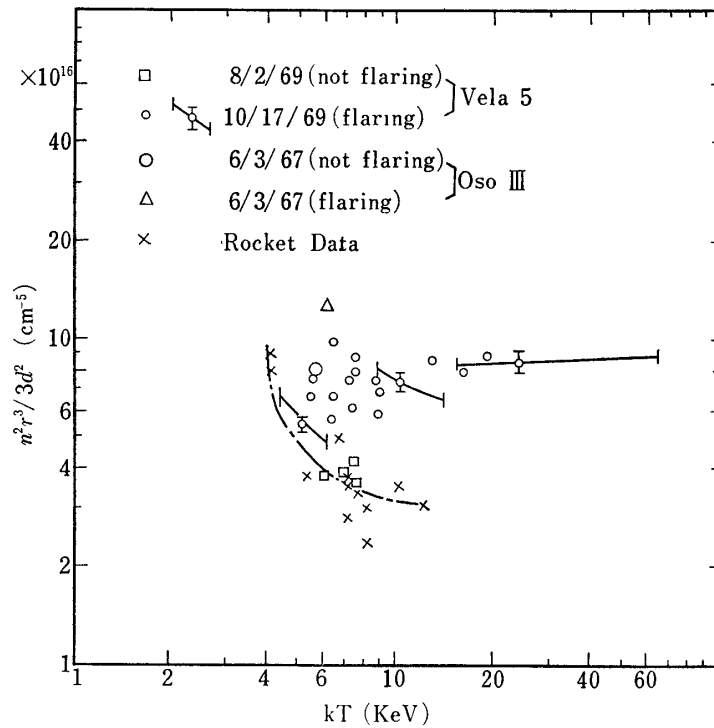
表1 ロケットによる SCOX-1 の観測データ

| date        | $B$   | $kT$<br>(keV) | flux at<br>3keV | keV/keV<br>sec cm <sup>2</sup><br>at 7keV | computed<br>(cm <sup>-5</sup> )<br>$n^2 r^3 / 3d^2$<br>$\times 10^{-15}$ | reference                |
|-------------|-------|---------------|-----------------|---|--|--------------------------|
| 65 Jun. 12  | /     | 7.5±1         | 60±9            |   | 68±10  | Chodil et al('65)[5]     |
| 65 Oct. 28  | /     | 4±0.5         | 61±12           |   | 90±18  | Grader et al('70)[6]     |
| 66 Mar. 8   | /     | (10)          | (29±5)          |   |  | Gorenstein et al('68)[7] |
| 66 July 28  | /     | (5)           |                 | (18±3)                                    |  | Chodil et al('67)[8]     |
| 66 Oct. 11  | /     | (4)           | (38)            |   |  | Gorenstein et al('68)[7] |
| 67 Feb. 6   | /     | (5~8)         |                 | (11)                                      |  | Matsuoka et al('69)[10]  |
| 67 May 18   | 12.83 | 7±1           | 31.5±5          |   | 37±6   | Chodil et al('68)[11]    |
| 67 July 7   | /     | 10±1          |                 | (16±3)                                    | 35±6.6   | Rappaport et al('69)[12] |
| 67 Sept. 8  | /     | 8±1           | 21±3            |   | 24±3.4   | Meekins et al('69)[13]   |
| 67 Sept. 29 | 12.49 | 4±0.7         | 54±13           |   | 80±29  | Chodil et al(1968)[11]   |
| 67 Oct. 2   | /     | (8)           | (33±5)          |   |  | Hill et al('68)[14]      |
| 68 May 9    | 13.14 | 7±1           |                 | 10±2                                      | 28±5.6   | Mark et al('69)[15]      |
| 68 May 15   | 12.47 | 12±4          | (32±5)          |   | 34±5.3   | Grader et al('70)[6]     |
| 68 May 19   | 13.21 | 5.2±0.7       | (30±5)          |   | 38±6.3   | Grader et al('70)[6]     |
|             | 13.21 | 5.5±1         |                 | 10±1                                      | 36   | Mark et al('69)[15]      |
| 68 Aug. 22  | 12.97 | 7±1           | 33±5            |   | 38±5.8   | Toor et al('69)[16]      |
| 68 Nov. 3   | /     | 7.5±1.5       | 30±6            |   | 34±6.8   | MacGregor et al('69)[17] |
| 69 May 17   | 13.19 | (8)           | (21±4)          |   | 23.5±4.5   | Burginyon et al('70)[18] |
| 69 May 24   | 12.56 | 6.5±1.5       | 42±4            |   | 50±4.7   | Burginyon et al('70)[18] |
| 69 Aug. 7   | 13.4  | 12±1<br>(10)  |                 | 16±3<br>16±3                              | 31.5±6<br>34.6±6   | Kitamura et al('70)[19]  |
| 69 Aug. 8   | /     | 8±1           |                 | 12±3                                      | 30±8   | Kitamura et al('70)[19]  |

第2図 SCOX-1 の特性.  $n^2 r^3 / 3d^2$  と  $kT$  との関係

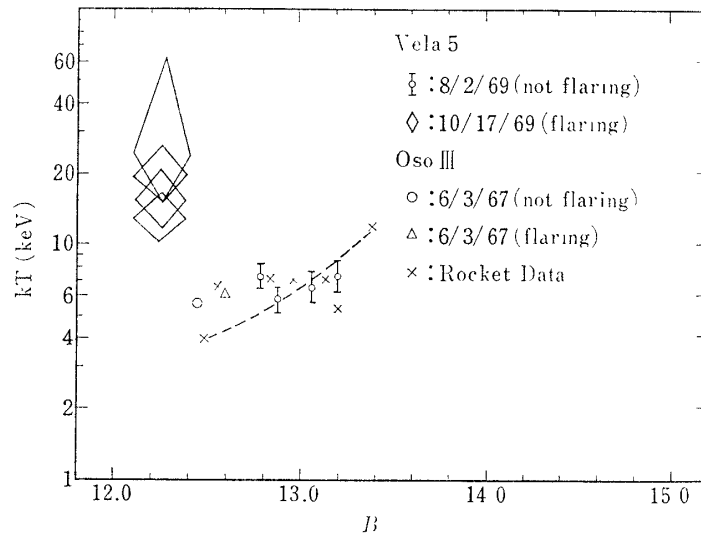


第3図 SCOX-1 の特性.  $B$  と  $kT$  との関係



第4図 SCOX-1 の flaring mode と not flaring mode.  $n^2 r^3 / 3d^2$  と  $kT$  との関係

す. なお比較のためにロケットにより観測された data も誤差を付けずに×印で示した. これらの図より明らかのように SCOX-1 には二つの mode すなわちゆるやかな変動をしている mode と flare up している mode とに分けられ, この二つの mode での  $kT$  と  $B$  および  $n^2 r^3 / 3d^2$  と  $B$  間の関係は互いに全く異なった様子を示すことが分る. そしてロケット観測のデータはその大部分がゆるやかな変動をしている mode の data と考え得ることが分かる. 今ここでは, ゆるやかな変動をしている mode での SCOX-1 の変動をロケット観測のデータを用いて考えてみたい.



第5図 SCOX-1 の flaring mode と not flaring mode.  $kT$  と  $B$  との関係

### 3. 高温プラズマと考えたときの SCOX-1

SCOX-1 の X線での観測データより得られた  $kT$  と  $n^2 r^3 / 3d^2$  の値をうすい熱いプラズマの式 (1) に代入してその時期に得られる SCOX-1 の blue magnitude の値を算出し、これを観測データと比較すると観測値は計算値の約 1/5 位の値を示す。これは SCOX-1 からの radiation が光の領域ではもはや透明であると考えることができず、プラズマ自体の自己吸収の効果を考えねばならぬことを示している。

このような半透明のプラズマからの radiation のエネルギースペクトルは近似的には

$$I_G(E) = \frac{1 - \exp(-\tau_{ff})}{\tau_{ff}} I(E) \quad (2)$$

であらわされる。ただし  $\tau_{ff}$  は free-free absorption による optical depth であり  $E/kT$  が小さいときには

$$\tau_{ff} = 7.7 \times 10^{-48} g (kT)^{-3/2} E^{-2} n^2 r \quad (3)$$

であらわされる。ただし  $g$  は Gaunt factor である。

今この gray body からの radiation の式 (2), (3) を用いて SCOX-1 の観測データを調べるにあたっては光の星間空間での吸収を考慮しなければならない。星間空間での blue region および visual region での吸収を  $A_B$ ,  $A_V$  とすれば、これら  $A_B$  と  $A_V$  との間には

$$A_V / (A_B - A_V) = 3 \quad (4)$$

の関係が知られており、SCOX-1 の color excess ( $B - V$ ) の値は常にほぼ 0.2 であることが光学観測よりわかっている。

そこで (4) 式を次のように用いて星間空間での吸収を補正することにする。すなわち観測された  $B$  の値と  $B - V = 0.2$  を元にして星間空間での吸収  $A_V$  をいろいろな値に仮定しこの補正をしたときの  $V$ ,  $B$  region でのスペクトルを求め、これと X線のスペクトルより

求めた  $n^2r^3/3d^2$  の値を用い(2)(3)式を用いて計算した  $V, B$  regionでのスペクトルとをその強度まで含めて比較し、これが合致する  $n^2r$  と  $A_V$  を求める。こうして求めた  $n^2r$  の値と前の  $n^2r^3/3d^2$  の値を用い、SCOX-1 までの距離  $d$  を仮定して  $n$  および  $r$  の値を算出するのである。 $d$  としては 0.3kpc と 1 kpc とを用いて上記計算を行なった。その結果を表2に示す。

表 2

| $kT(\text{keV})$ | $A_V(\text{mag})$ | $d=0.3\text{kpc}$ |                     |             | $d=1.0\text{kpc}$ |                     |             |
|------------------|-------------------|-------------------|---------------------|-------------|-------------------|---------------------|-------------|
|                  |                   | $r(\text{cm})$    | $n(\text{cm}^{-3})$ | $\tau_{es}$ | $r(\text{cm})$    | $n(\text{cm}^{-3})$ | $\tau_{es}$ |
| 4                | 1.2               | $2.9 \cdot 10^8$  | $9.1 \cdot 10^{16}$ | 17.6        | $9.7 \cdot 10^8$  | $5.0 \cdot 10^{16}$ | 32.4        |
| 6                | 1.1               | $2.2 \cdot 10^8$  | $9.7 \cdot 10^{16}$ | 14.3        | $7.4 \cdot 10^8$  | $5.3 \cdot 10^{16}$ | 26.3        |
| 8                | 1.0               | $1.4 \cdot 10^8$  | $1.6 \cdot 10^{17}$ | 15.2        | $4.8 \cdot 10^8$  | $8.8 \cdot 10^{16}$ | 27.9        |
| 10               | 1.0               | $1.2 \cdot 10^8$  | $2.1 \cdot 10^{17}$ | 16.8        | $4.0 \cdot 10^8$  | $1.2 \cdot 10^{17}$ | 30.8        |
| 12               | 1.0               | $1.0 \cdot 10^8$  | $2.7 \cdot 10^{17}$ | 18.1        | $3.4 \cdot 10^8$  | $1.5 \cdot 10^{17}$ | 33.2        |

この表より、SCOX-1 のプラズマの雲の大きさは  $10^8 \sim 10^9 \text{cm}$  位であり、その密度は  $10^{16} \sim 10^{17} \text{atoms/cm}^3$  程度であることがわかる。これは Chodil らの計算[4]ともよく一致する。またその雲は温度が高くなればなるほど大きさは小さくなり、密度は高くなることわかれる。また  $A_V$  は仮定した距離  $d$  での期待される  $A_V$  の値よりはやや大きい値となっているが、これは仮定した距離が実験より小さすぎるのかまたは SCOX-1 をとりかこむちりの雲による extinction によるものであると考えられる。

上記計算では、photon は plasma の中で free-free absorption により吸収されると考えたが、photon は plasma の雲の中では電子と衝突して散乱され、このためにそのスペクトルが free-free radiation によるものとは少し異なってくる。このような条件の下で解析的にこの問題を取り扱うことは困難であるので、Chodil ら[4]はこの効果を diffusion theory を用いて推定している。

最近 Loh と Garmire はこの効果によるスペクトルのひずみをモンテカルロ法により推定した[22]。この計算によれば、X線のスペクトルより推定されるみかけの温度  $T$  はプラズマの本当の温度  $T_0$  よりは、かなり大きな値になる。Loh らの計算は限られたパラメータでのモンテカルロ計算であるので、いろいろなパラメータでの値を計算するためにわれわれはその結果を次の式で近似した。

$$T = T_0(1 + 0.00475 \times T_{es}^{2.5}) \quad (5)$$

$$I'_G(E) = \frac{1 - \exp(-\tau_a)}{\tau_a} I(E) \quad (6)$$

$$\tau_a = (3[\tau_{ff}(T_0)]^3 \tau_{es})^{1/4} r \quad (7)$$

$$\tau_{es} = \delta_r n r \quad (8)$$

ただし、 $\delta_r$  は Thomson scattering の cross section である。この数式を用い、前と同様の手法で SCOX-1 の観測データを用いて  $n, r, T$  を推定した。この値を表3に示す。

この結果を前の electron scattering の効果をいれたものと比較すれば、その plasma の温

表 3

| $kT(\text{keV})$ | $A_V(\text{mag})$ | $d=0.3\text{kpc}$  |                  |                     |              | $d=1.0\text{kpc}$  |                  |                     |              |
|------------------|-------------------|--------------------|------------------|---------------------|--------------|--------------------|------------------|---------------------|--------------|
|                  |                   | $kT_0(\text{keV})$ | $r(\text{cm})$   | $n(\text{cm}^{-3})$ | $\tau_{e,s}$ | $kT_0(\text{keV})$ | $r(\text{cm})$   | $n(\text{cm}^{-3})$ | $\tau_{e,s}$ |
| 4                | 1.1               | 1.5                | $9.3 \cdot 10^8$ | $1.6 \cdot 10^{16}$ | 9.9          | 0.9                | $4.8 \cdot 10^9$ | $4.5 \cdot 10^{15}$ | 14.5         |
| 6                | 0.9               | 2.7                | $5.6 \cdot 10^8$ | $2.4 \cdot 10^{16}$ | 9.1          | 1.5                | $3.0 \cdot 10^9$ | $6.3 \cdot 10^{15}$ | 12.9         |
| 8                | 0.9               | 3.7                | $4.3 \cdot 10^8$ | $3.1 \cdot 10^{16}$ | 8.9          | 2.1                | $2.4 \cdot 10^9$ | $8.0 \cdot 10^{15}$ | 12.7         |
| 10               | 0.9               | 4.4                | $3.8 \cdot 10^8$ | $3.7 \cdot 10^{16}$ | 9.4          | 2.5                | $2.1 \cdot 10^9$ | $9.7 \cdot 10^{15}$ | 13.5         |
| 12               | 1.0               | 4.8                | $3.5 \cdot 10^8$ | $4.3 \cdot 10^{16}$ | 9.9          | 2.6                | $1.9 \cdot 10^9$ | $1.1 \cdot 10^{16}$ | 14.0         |

度が前の 4~12keV より低い 2~6keV ぐらいになり, プラズマの雲の大きさは少し大きく (~4倍) その密度はやや小さく (1/7) なる. しかしその order of magnitude は free-free emission の spectrum を用いた値と同様であることがわかる.

以上の計算の結果とくに注目すべきことは, SCOX-1 のプラズマの雲の大きさが大変小さく, 白色矮星またはそれ以下の大きさであるということである. そしてこの大きさは, 太陽程度の質量がこのような高温のガス体を重力で閉じ込めるのに丁度 consistent な大きさでありしかもその温度に対する大きさの変化の傾向は熱いプラズマの重力による閉じこめと consistent な方向であるということである.

#### 4. 結 論

以上の解析の結果 SCOX-1 からの radiation が球形の高温のプラズマにより発生したものであるというモデルを考えたとき次のようなものであると結論することができる.

(1) SCOX-1 には二つの異なった mode がある. それは flaring mode と non-flaring mode である. この二つの mode での SCOX-1 の振舞いは異なっている. (その様子は図 4, 図 5 に示す).

以下では non-flaring mode での変化についてのみ述べることにすると,

(2) SCOX-1 の状態はその温度で特長づけることができる. そして温度と密度と大きさとの間には単純な関係が存在する.

(3) SCOX-1 の光と X線との同時観測の結果を高温プラズマのモデルを用いて解析すると, その温度は  $10^7 \sim 10^8$  °K でありその密度は  $10^{16} \sim 10^{17} \text{cm}^{-3}$ , その大きさは  $10^8 \sim 10^9 \text{cm}$  ぐらいである.

(4) Source の大きさと温度は逆比例の関係にある.

(5) Source の大きさは大変小さく白色矮星かまたはそれより小さい位である. Source の大きさが  $10^8 \sim 10^9 \text{cm}$  位であるということは, 高温プラズマが太陽質量程度の小さな中心核の動により閉じ込められていると考えて consistent である. また温度の上昇により source の大きさが小さくなることは, 重力による高温プラズマの閉じ込めのモデルと consistent である.

終わりにこのモデルについて discussion をして頂きまた未発表のモンテカルロ計算の結果を提供して下さった, カルフォルニア工科大 Garmire 教授に感謝の意を表する.

1971 年 1 月 28 日新設部(科学)

## 参 考 文 献

- [ 1 ] Giacconi, R., H. Gursky, F. Paolini and B. Rossi, 1962 Phys. Rev. Letters **9** 439.
- [ 2 ] Sandage, A. R., P. Osmer, R. Giacconi, P. Gorenstein, H. Gursky, J. Waters, H. Bradt, G. Garmire, B. V. Sreekantan, M. Oda, K. Osawa and J. Jugaku, 1966, Astrophys. J. **146** 316.
- [ 3 ] Hiltner, W. A. and D. E. Mook, 1970, Annual Rev. Astron. and Astrophys. Vol 8, 139
- [ 4 ] Chodil, G., H. Mark, R. Rodrigues, F. D. Seward, C. D. Swift, I. Turiel, W. A. Hiltner, G. Wallerstein and E. J. Mannery, 1968, Astrophys. J. **154** 645
- [ 5 ] Chodil, G., R. C. Jopson, H. Mark, F. D. Seward and C. D. Swift 1965, Phys. Rev. Letters **15** 605.
- [ 6 ] Grader, R., R. W. Hill, F. Seward and W. Hiltner, 1970 Astrophys. J. **159** 201.
- [ 7 ] Gorenstein, P., H. Gursky and G. Garmire Astrophys. J. **153** 885.
- [ 8 ] Chodil, G., H. Mark, R. Rodrigues, F. Seward, C. D. Swift, W. A. Hiltner, G. Wallerstein and E. J. Mannery, 1967 Phys. Rev. Letters **19** 681.
- [ 9 ] Ichimura, K. and T. Noguchi 1969, Tokyo Astronomical Bulletin, second series No.195, 2275.
- [10] Matsuoka, M., M. Oda, Y. Ogawara, S. Hayakawa and K. Kato 1969 Astrophys. Space Science **4** 44.
- [11] Chodil, G., H. Mark, R. Rodrigues, F. Seward, C. Swift, I. Turiel, W. Hiltner, G. Wallerstein, E. J. Mannery, 1968, Astrophys. J. **154** 645.
- [12] Rappaport, S., H. V. Bradt, S. Naranan, G. Spada, 1969 Nature **221** 428.
- [13] Meekins, J. F., R. C. Henry, G. Fritz, H. Friedman and E. T. Byram, 1969 Astrophys. J. **157** 197.
- [14] Hill, R. W., R. J. Grader and F. D. Seward, 1968 Astrophys. J. **154** 655.
- [15] Mark, H., R. E. Price, R. Rodrigues, F. D. Seward, C. D. Swift and W. A. Hiltner 1969 Astrophys. J. **156** 267.
- [16] Toor, A., F. D. Seward, L. R. Cathey and W. E. Kunkel 1970 Astrophys. J. **160** 209.
- [17] MacGregor, G. A., F. D. Seward, I. Turiel
- [18] Burginyon, G. A., R. J. Grader, R. W. Hill, W. A. Hiltner, E. J. Mannery, R. E. Price, R. Rodrigues, F. D. Seward and C. D. Swift, 1970 Astrophys. J. **161** 987.
- [19] 北村崇, 松岡勝, 宮本重徳, 中川道夫, 小田稔, 小川原嘉明, 島安治, 高岸邦夫, 1970 宇宙研報告 **6** 81.
- [20] Hudson, H. S., L. E. Peterson and D. A. Schwartz, 1976 Astrophys. J. **159** L 51
- [22] Evans, W. D., R. D. Belian, J. P. Conner, I. B. Strong, W. A. Hiltner and W. E. Kunkel, 1970, Astrophys. J. **162** L115
- [22] Loh, E. D. and G. A. Garmire, Preprint