

球状星団と X 線源

田 中 靖 夫*

1. はじめに

呼び名が示すように、星の球状な集まりである球状星団は、銀河系内に現在のところ 120 個ほどが知られ、球状にハローに分布している。恒星内部構造論は、球状星団内の星が種族 II の古い星であることを明らかにしてきた。最近では、光度関数や H-R 図上の星の分布等と星団の年令、構成している星の化学組成の関係などの詳しい検討がすすめられている（有本、天文月報 1978 年 8 月号参照）。しかし、数年前までは、球状星団が約 10 万個の星からなる集団であり、中心部に比較的高い星の集中がみられることなどは、あまり注意をひかずり過ぎてきた。これらの点に注意がむけられることになった要因の一つは、X 線源と球状星団の関係の発見にある。

X 線星とその時間変動については、松岡氏ら（天文月報 1976 年 12 月、1977 年 12 月、1980 年 2 月）によって紹介されている。ここでは球状星団内の X 線源を中心的に観測と理論の現状を紹介する。

2. X 線源としての球状星団

2.1 発見の過程

1970 年に打上げられたウフル衛星による X 線源の観測結果は、1974 年に 3U カタログとしてまとめられた。そのうち 4 個の X 線源について球状星団と一致している可能性が高いことが指摘された。それらは NGC 6441, 6624, 7078 と M92 である。1971 年に打上げられた第

7 太陽観測衛星の X 線観測装置により、1974 年に NGC 1851 も X 線を放出していることが明らかにされた。NGC 1851 では X 線強度の不規則な時間変動も観測され、以後球状星団と X 線源の特殊な関係が注目されるようになる。3U カタログでは、観測誤差範囲のすぐ近くにあった M92 の同定が再検討された結果、代わりに NGC 6440 が X 線を放出する球状星団に加わった。

1975 年末には、NGC 6624 からの X 線が短時間に強度を増すバースト現象が発見された。球状星団以外のバースターも発見されると同時に、異常に短かい間隔でバーストを繰返す X 線源 MXB 1730-335 も観測された。この X 線源付近を赤外線により観測した結果、これまで知られていなかった球状星団と同定された（1977 年）。

1976 年には、球状星団 NGC 6712 と同定される新しい X 線源がみつかり、銀河系に属する X 線源をもつ球状星団は 7 個となった。1978 年、南米チリにある汎アメリカ天文台の光学観測結果とこれまでの X 線源の比較から銀河中心付近の星団 Ter 2 が X 線源である可能性が強まった。

1978 年末に高性能 X 線望遠鏡を搭載して打上げられた X 線観測衛星 “アイソ・シュタイン” の結果によれば、47 Tuc (NGC 104) が弱い X 線源であることが示唆されている。

現在までのところ、銀河系に 9 個、小マゼラン銀河に 1 個、アンドロメダ銀河に約 11 個の X 線源をもつ球状星団が報告されている。表 1 に、銀河系と小マゼラン銀

表 1 X 線源をもつ球状星団とその性質

球状星団 (NGC カタログ)	X 線源 (4U カタログ)	距離 (キロパーセク)	X 線光度 (エルグ/秒)	r_e/r_t (パーセク)	星の中心密度 (太陽質量/パーセク ³)	バースト
Kron 3	0026-73	66	3.4×10^{37}	5 /	10^2	無?
104		4.9	10^{35}	0.7 /71	4×10^4	?
1851	1513-40	10.6	5.8×10^{36}	0.37/25	10^5	有
Ter 2	1722-30	.7	9.6×10^{35}	0.2 /	5×10^4	有
Liller I	MXB 1730-335	10		0.32/	4×10^5	有
6440	1743-19	6.0	1.5×10^{37}	0.17/	8×10^5	無?
6441	1746-37	9.3	9.9×10^{36}	0.41/21	3×10^5	多分有
6624	1820-30	8.3	6.3×10^{37}	0.19/	10^5	有
6712	1850-08	6.8	1.2×10^{36}	1.6 /	10^3	多分有
7078	2131+11	10	1.3×10^{36}	0.7 /61	4×10^4	無?

* 茨城大・教育 Yasuo Tanaka: Globular Clusters and X-ray Sources

河に含まれる球状星団とそのX線源名をあげて、それの大よその性質をまとめた。

2.2 持続的X線光度について

表1のX線源名は天文衛星“ウフル”による第4カタログに記載されているものを主として採用した。球状星団名には主としてNGCカタログ名をのせた。クロンのカタログ3番目に記載されている星団(Kron 3)は小マゼラン銀河内にある。表の第4列には、星団までの距離がキロペーセク単位で与えている。これらの星団のうち、4個だけがピータスンとキング(1975年)によって編成されたカタログ中で距離が判明している。その他は、1975年以後数人の観測者によって決定されたものを使いた。

星団までの距離と4UカタログのX線強度からX線源の持続的X線光度が求められる。但しLiller Iについてはバースト状X線のみであるため空欄となっており、NGC 104については個人的情報をのせたので詳細は不明である。総じてX線の光度は毎秒 10^{36} エルグと 10^{38} エルグの間にある。“AINSHUTAIN”的予備的結果として、NGC 104からは弱い 10^{35} エルグ/秒程度のX線光度が示唆されている。

平均して 2×10^5 太陽質量の全質量をもつ球状星団が、銀河系内に約120個存在し、そのうち約10個からX線が観測されている。従って球状星団の単位質量当たりのX線源存在率は約 5×10^{-7} であり、この値は銀河系全体のX線源存在率に比べて約100倍大きいのである。このことは球状星団に特有の事情がX線源存在率を高めていることを示している。この事情は3Uカタログの作成直後から問題とされ、中心部で星の密度が高いこと、ガスが少ないことを考慮して、球状星団内のX線源の正体を解明する努力が続けられている。

1974年末テーラーとウッドは球状星団内の星が赤色巨星から水平分岐へ進化する時、平均0.2太陽質量のガスを星団内へ放出するとして、その全ガス量を観測値と比較している。その結果星団内にガスが捕獲されているとすれば、全ガス量の理論値は観測されるガス量の上限より大きくなることを示した。彼らは放出されたガスの行方と星団内に存在するかもしれないブラックホールとの関係を示唆している。

3. 球状星団X線源のモデル

X線源のモデルは、球状星団X線源が発見される以前から、中性子星、ブラックホールを含む連星モデルが熱心に検討されている。このモデルでは、伴星から高密度星へ質量の流入と降着が起こり、高いエネルギーが発生すると考えられている。

単位質量が高密度星に降着する時に期待される発生エ

ネルギーを E とし、単位時間当たりの質量の降着率を \dot{M} とすると、おおよそのX線光度 L_x は

$$L_x \sim \epsilon E \dot{M}$$

と表わされる。ここで ϵ は発生エネルギーのX線への変換効率である。降着する物体がブラックホールの場合は $E=c^2$ (c は光速度)、中性子星又は白色矮星の場合は $E=GM_e/R_e$ (G は万有引力常数、 M_e, R_e はそれぞれ高密度星の質量と半径)と表わされる。

球状星団中心部に単独のブラックホールがあり、これに物質が降着して持続的X線が放射されるという説は、上で述べた星団内にガスが少ないと、つまり \dot{M} が小さいことを考慮に入れている。その結果約1000太陽質量のブラックホールがあれば、まわりの星から放出されたガス又は近づき過ぎて破壊された星を吸着して、高いX線光度を示すことがわかった。このブラックホールは、星団の初期にあった大質量星がその一生を終った段階で形成されたブラックホールが何個か中心部に寄り集って形成されたと考えられている。大質量ブラックホールの存在は、星団の光度分布が中心部で持ち上っていることと矛盾しないことが、いくつかのX線源をもつ星団で確かめられている。

中性子星を含む連星モデルはクラークによって提唱されている。彼の連星モデルでは、球状星団形成時につくられた連星がX線源になる可能性は排除される。実際、表1の第5列にみられる r_0 (星団中心部への星の集中を示す目安)は二つの星団(Kron 3, NGC 6712)を除いて、全部が0.7ペーセク以下である。 r_0 は星団の限界半径である。X線源をもたない星団の大部分の r_0 が0.5から10ペーセクまでひろがっていることと対照的である。また、星団中心部の星の密度を表1の第6列に示した。星の中心密度もX線源をもつ星団では大きい傾向を示している。従って、もしX線源となる連星が星団形成時から存在するものとすれば、特に星が中心部へ集中している星団にX線源がみられる傾向を説明しえない。連星モデルでは、質量の大きい星の進化によってできた中性子星が、星のしゅう密な星団中心部において主系列星を伴星として捕獲し、その伴星の進化に際して充分大きな質量の流入(\dot{M})が期待されることになる。

これら二つの立場は、星団のもつX線源光度 L_x が比較的高く、それに対して \dot{M} が星団自体では小さいことが予想されるために導入されてきている。しかし、もし球状星団全体に分布する赤色巨星が進化する時に放出されるガスが中心部へ流入すれば、比較的大きな \dot{M} が期待される。もしそうであれば、 E は比較的小さくてもよく、具体的には単独の中性子星又は白色矮星でもよい。X線源の光度が毎秒 10^{36} エルグ以上であったころは、白色矮星の可能性は否定されていたが、NGC 104で毎

秒 10^{35} エルグであることが示唆されているので白色矮星の可能性も強くなったといえよう。

4. 球状星団内のガス

球状星団内で放出されたガスが、全部星団内にたまっているとすれば、その量は上に述べたように観測値を大幅に越える。しかし、1968年に、パークは連続的に分布する質量の湧出口を考慮した場合に恒星風の理論を拡張した。この理論を銀河、銀河團に応用することが1970年代初めの頃に行われ始めていた。現在では、銀河風の理論は二次元・三次元に拡張されている。球状星団では球対称の近似が適用できるので有用である。

表1にある r_c , r_t , 星の中心密度 ρ_0 等を用いて重力分布、星の密度分布を求め、赤色巨星からの質量放出率をティラー・ウッドに従ってきめ、放出ガスの温度を星の分散速度からきめる。さらにガスは水平分枝星によってイオン化し熱せられ、適当な形で輻射冷却していくものとする。このような方法で NGC 7078 内部のガスの流れの時間的変化を描いたのが図1である。中心から4パーセクの範囲で流れが中心方向を向いている。その外側ではガスは外向きに流れ出す。このような内向きの流れが存在することは、上述の中性子星、白色矮星もX線源の候補となりうることを示している。

流れにそったガスの密度は計算方法の限界とも関連して信頼に欠ける部分もあるけれども、NGC 7078 では、図2のように時間と共に中心部のガス密度が増加する。一部のガスが内向きに流れ中心部に溜っても、大部分は星団外へ流れ出るので、ある時点で星団全体のガス量をはかれば観測の上限値と矛盾しないように見える。図3には横軸にそれぞれの星の r_t と r_c の比、縦軸に星団内のガス量（太陽質量単位）をとて、ガス量の上限が観測されている星団を描いてある。線で結んだ白丸は理

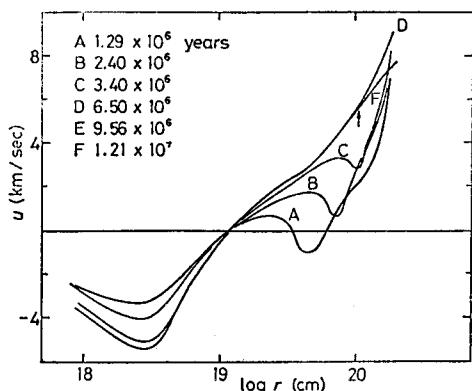


図1 NGC 7078 内におけるガスの流れの一例。十分時間がたつと流れは定常に近づく。矢印は流速が音速をこえる点を表わしている。

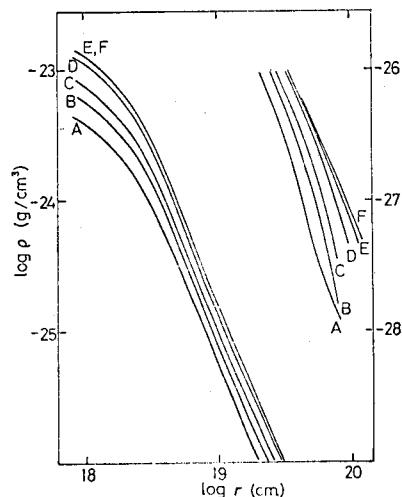


図2 NGC 7078 内におけるガスの密度分布の時間的変化。時刻は図1の符号と一致している。右側の曲線に対しては右側の尺度を適用する。

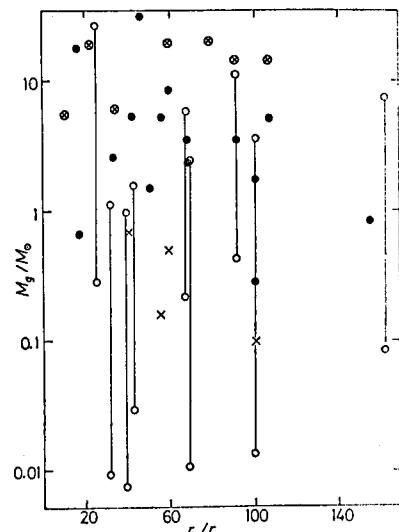


図3 球状星団内のガス量の比較。線で結ばれた白丸は計算値であり他は観測による上限値である。上の白丸は \otimes 印と較べられ、他は下の白丸と比較されるべき量である。

論値で、上が星団全体のガス量で \otimes 印と比較されるべき量であり、下の白丸は r_c 内のガス量で黒丸印および \times 印と較べられるべきものである。

5. X線バーストとモデルの問題点

三つのモデルの考え方には、共通の問題点がある。表1のKron 3 および NGC 6712 の r_c , ρ_0 は共に他の星団にくらべて中心部への星の集中度が低いにもかかわらず

X線源をもっていることを示している。大質量のブラックホールは中心部に星の高い集中をつくるはずであり、連星は星の集中部でつくられるはずであり、放出されたガスは星の集中している重力の大きい場所へ流入するはずである。星の系としての星団全体の構造とその変化の機構の検討が色々の形で行われている。

5.1 パースト

1975年NGC 6624中のX線源でパーストが発見されて以来、星団に属するものを含んで30個近くのパースターが検出されている。球状星団に一致するX線源でパーストを示すものは表1にみられるとおり10個中5~6個である。パーストはその持続時間、間隔等によりタイプIとIIに分けられ、Liller I内のMXB 1730-335を除いてタイプIのパーストに限られている。タイプIのパーストのスペクトルが黒体輻射のスペクトルによく一致することからパーストの輻射領域の拡がりが推定されている。その値は10~20kmであり、中性子星を示唆している。

タイプIのパーストは、持続的なX線強度が低い時だけみられ、持続的X線が強くなるとパーストは止まる。これらのタイプIパーストは、中性子星へ降着するガスによって間欠的にひき起されるヘリウムの急激な核反応によって説明されるように見える。

タイプIIのパーストは、数秒から数分の間隔で繰り返され、輻射領域は 2×10^6 Kで拡がりが16km位から数秒間に数kmまで減少する。エネルギー規模がタイプIに較べて100倍ほど大きいため、重力エネルギーの解放によるものと考えられる。しかし、このタイプIIパーストは球状星団ではMXB 1730-335にのみみられる。タイプIとIIが併存する唯一のX線源でもある。さらに“はくちょう”によって持続時間がより長いパーストの発見がつたえられており、問題は複雑になりつつある。

5.2 連星か単独星か

上にみるようにパースト現象はX線源について豊富な手がかりを与え、ブラックホールの可能性を除外している。さらに“アインシュタイン”衛星の高分解能によって、星団中心部でのX線源の位置がより精確にきめられるようになった。それによるといくつかの星団では中心より1秒角以上外側にX線源は位置している。このことはX線源が100太陽質量以上ではありえないことを示唆している。

単独な中性子星又は白色矮星の場合には、その周辺に十分濃いガスが集まっている必要がある。しかし星団中心部での観測結果はその証拠を与えていない。

一方、球状星団内のX線源にパルサー状の周期性、食変光性がみられないことは、中性子星を含む連星というモデルに問題を投げかけている。しかし、磁場をもたな

いか磁極と回転軸の一一致によりパルサー現象が起らず、軽い伴星であることから食が起きないと考えることも可能であろう。

従っていまのところ球状星団X線源のモデルとして十分完全なものではなく、今後の検討が待たれている。

6. おわりに

“アインシュタイン”衛星による観測結果で独占されたアストロフィジカル・ジャーナル・レターに統いて、“はくちょう”の結果も出はじめている時期にぶつかっているので、1979年秋までの理論と観測の整理に限ることにした。ただし、G.W.クラークが私信および彼らの総合報告で述べている“アインシュタイン”による観測結果を一部参考にした。1975年フェルミ記念夏の学校で彼の観測結果をきいて以来、クラークは時折観測資料、総合報告、短報を知らせてくれていた。記して感謝の意を表わしたい。

豆辞典

アモール(Amor)型小惑星

1932年にベルギーのウックル天文台で発見された同名の小惑星1221番を代表とする一群の特異小惑星である。その特徴は軌道が火星軌道と交叉していて、火星軌道の内側にまで入り込んでいることである。別名を Mars-Crosserとも呼んでいて、近日点距離が1.017~1.300の範囲にあるとされているが、摂動のため小惑星の軌道は変化するので、時と共にこの範囲も変化する。1979年10月までに、21個のアモール型小惑星が発見されているが、シューメーカーとヘリンは18等級(直径0.7~1.5km程度)より明るいものが500個ほどあろうと推定している。

(香西洋樹)

アポロ(Apollo)型小惑星

1932年に発見され、その後長い間行方不明であったが、1973年3月に再発見された同名の小惑星1862番を代表とする特異小惑星の一群で、1979年10月までに軌道が不確実なものを含めて27個が発見されている。その特徴は軌道が地球の軌道と交叉することで、別名Earth-Crosserともいう。

地球軌道の内側にまで入り込んで来ることから、地球に大接近することがある。特に1566番イカルス(Icarus)は近日点距離0.19、遠日点距離1.97、天文単位で、近日点においては水星より内側に入り遠日点では火星の外側に達する0.83という大きな離心率を持っている。この様に一見彗星と似た軌道を持つことからアポロ型小惑星などの特異小惑星の成因に大きな関心が持たれている。シューメーカーとヘリンは、18等級(直径=0.7~1.5km)までの総数は800±300個と推定している。

(香西洋樹)