

銀河系外 X 線源

——クエーサーと活動的銀河中心核——

高 原 文 郎*

はじめに

昨年来の天文学の大きな話題の一つはインシャタイン衛星と名づけられたアメリカの人工衛星、日本の「白鳥」衛星などによるX線天文学の活躍である。前者は反射望遠鏡を使ってこれまでの 10^8 倍の高分解能高精度の観測を行ない銀河系外X線源の研究に大きな力を發揮している。現在の所ごく一部の観測結果しか発表されていないが、既にクエーサーや銀河集団について興味深い観測がいくつか報告されている。

ここではクエーサーや活動的銀河中心核のX線源を中心に簡単な紹介を行ない、今後続々と発表されるであろう観測データのみどころや検討すべき理論的问题にふれたい。銀河系外X線源は①ほぼ等方なバックグラウンドX線、②クエーサーおよびセイファート銀河などの活動的銀河中心核、③銀河集団、④M31などの普通の銀河に分類される。③は高温銀河間ガスからの熱制動輻射、④は銀河内の個々のX線源の和としてよく理解されている。インシャタイン衛星の観測によるとVirgo銀河集団のいくつかの銀河はまわりの銀河間ガスをひきつけてやや強めのX線を放出しており、このことから銀河に大質量ハローが存在することが示唆されている。③、④についての今後のみどころの中心は高分解能の観測によってガスの分布から銀河ハローや銀河集団の隠れた質量を探ることにあるだろう。またX線の線輻射から重元素量の分布を調べ銀河の化学進化との関連を調べることも興味深い。一方、①、②についてはその輻射機構やモデルそのものの検討が中心的課題となっている。以下でそれらについて述べよう。

バックグラウンドX線

かなり強い等方なバックグラウンドX線が存在していることは1962年のX線天文学の開始以来よく知られている。現在までに観測されたエネルギー領域は keV から 150 MeV にわたっており、スペクトルは 30 keV および MeV 付近に 2 つの折れ曲がりを含むべき型スペクトルでよく近似される。エネルギースペクトルのべき指数 α は 30 keV 以下で約 0.4, 40 keV~MeV で約 1.4, MeV 以上では約 2 であり、高エネルギーになる程急に

なっている。

このようなバックグラウンドX線の起源については①一様な銀河間物質からの輻射、②分解されない個々の源の重ね合わせという二つの考え方がある。この 20 年間相争ってきた。最近でも人工衛星 HEAO-1 の実験データを基に 60 keV 以下の成分は宇宙を一様にみたす $T \sim 5 \times 10^8 K$, $\rho \sim 0.3 \rho_{cr}$ (ρ_{cr} は宇宙の臨界密度) の高温ガスの熱制動輻射によるという説が発表されたり、インシャタイン衛星のサーベイによって多数のクエーサーがX線源に同定され、クエーサーが大部分の寄与をしているという説に強い根拠を与えていた。セイファート銀河、銀河集団がそれぞれ 10~20% の寄与をしていることから考えても②の立場の方が分が良さそうである。バックグラウンドX線の大部分は未分解のクエーサーや活動銀河が担うことになる。

この問題の鍵は 2 つあると思われる。1 つは強度であって、既に観測されている種類の天体の現在の数密度でバックグラウンドが説明できるとすると、宇宙論的進化や他種の天体からのX線放出量に大きな制限をおよぼすことになる。例えば最近原始銀河や原始銀河集団からのX線輻射が盛んに論じられているが、この時バックグラウンドX線への寄与が小さいように銀河形成の時間や初期活動度を決めなければならないことになる。クエーサーの宇宙論的進化についても強い制限がつくことになるであろう。

もう一つの鍵はスペクトルである。後述するようにバックグラウンドX線のスペクトルと個々の天体のスペクトルとは同じではない。NGC 4151, Cen A 等のスペクトルは keV~MeV にわたってほぼ单一のべきスペクトルを示し $\alpha \sim 0 \sim 0.7$ とかなり平坦である。 α の大きい例もあるが異なったスペクトルのものを重ね合わせて 30 keV 附近にきれいに折れ曲がりをつくることはかなり困難だと思われる。この点で銀河集団や高温銀河間ガスの寄与は 10~50 keV の指指数型スペクトルを加えることになるので 30 keV の折れ曲がりの再現にとって重要なかも知れない。MeV 以上の領域では個々の天体のスペクトルはほとんどわかっていないが、SAS-2 による 35 MeV での上限値から 100 keV~10 MeV の範囲にスペクトルの折れ曲がりがなければならないことがわかる。この点はバックグラウンドX線の MeV 附近の折れ曲がりと一致しており興味深い。

以上のようにバックグラウンドX線が個々の未分解源

* 京都大学基礎物理学研 Fumio Takahara: Extra-galactic X-Ray Sources—Quasars and Active Galactic Nuclei—

の重ね合わせによると思われ、今後それぞれの成分の混合比とスペクトルの再現が興味深い問題となろう。

クエーサー・活動的銀河中心核からのX線

これまでのX線観測で全部で約80個のクエーサーや活動銀河がX線源として同定されている。アインシュタイン衛星の打ち上げ以前に発見されていた1型セイファート銀河26個、アインシュタイン衛星で急増したクエーサー35個が主なものであるが、BL Lac型天体、電波銀河、N銀河、輝線銀河等ほとんどの活動銀河が強いX線源となっている。以下にその全体的特徴をまとめよう。

(1) X線光度は2~10 keVの範囲で $10^{42} \sim 10^{47}$ erg/sと非常に大きい。この光度は他の波長域での光度と少なくとも同程度、多くの場合それよりかなり大きい。10 keV以上の硬X線や γ 線が検出されたNGC 4151, Cen A, 3C273等では硬X線、 γ 線の光度は2~10 keVの光度よりも更に一桁程度大きくなっている。

(2) 従ってスペクトルはかなり平坦であり α は0~0.7程度となる。しかし最近HEAO-1で α の大きい急なスペクトルをもつBL Lac型天体の例も報告されているので、これがどの程度一般的であるかは今後にまたねばならない。図1にはNGC 4151の数スペクトルの観測を示しておく。但しこの天体のMeV付近の観測値はいくつかのグループによってかなり異なっているので

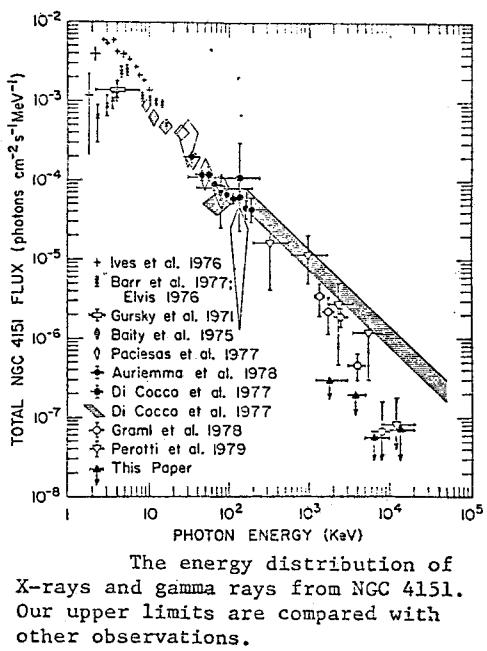


図1 E. M. Zanrosso et al. 16th ICRC, 1979による

注意を要する。

数keV以下の範囲で吸収による強度減少が見られるかどうかはX線源の性質を調べる上で重要である。図1からもわかるようにNGC 4151やCen Aでは強い吸収がみられ、X線源の周囲に $N_H \sim 10^{22} \sim 10^{23}$ H原子/cm²の冷たいガスが存在していることがわかる。しかし他の多くの天体では吸収はほとんどみられず、 N_H はかなり小さいことが明らかになっている。NGC 4151, Cen Aは我々の近傍にある比較的光度の低い天体であり、光度の大きい源ではまわりの冷たいガスの量がかなり少なくなっているか、 N_H が小さくなるように非一様に分布していると考えられる。

(3) これらのX線源の最も驚くべき特徴はその時間変動である。これまで様々な天体について10³秒以下から数日スケールのフレア、数ヶ月から数年スケールの変動が報告されている。これらの例のなかにはデータの信頼性に問題がある可能性のあるものもあるが大部分は確かなものと考えられる。また変動の振幅は大きく平均値の数倍におよぶことが多い。図2にはアインシュタイン衛星によって報告されたクエーサーOX 169の10⁴秒程度の変動の例を示しておく。

このような変動があることからX線源の大きさが少なくとも光速×数日~ 10^{16} cm以下であることがわかる。この大きさは電波や可視光による観測の結果と齊合的であり、非常にコンパクトな天体が活動性を担っていることになる。

(4) アインシュタイン衛星はCen AのX線源の構造を分解した。Cen Aは双対電波源であり、その2つ目玉構造は2重であり約400 kpc離れた外側の2つ目玉と約5 kpc離れた内側の2つ目玉がある。これらは一直線上に並んでおり、その中心に中心核の電波源が存在して

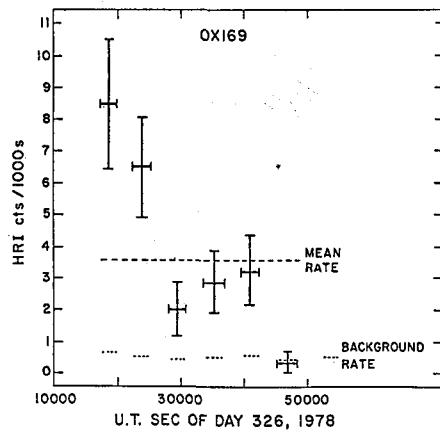


図2 クエーサーOX 169のX線光度の時間変動。H. Tananbaum et al., Ap. J. 234, Lett. (1979)による

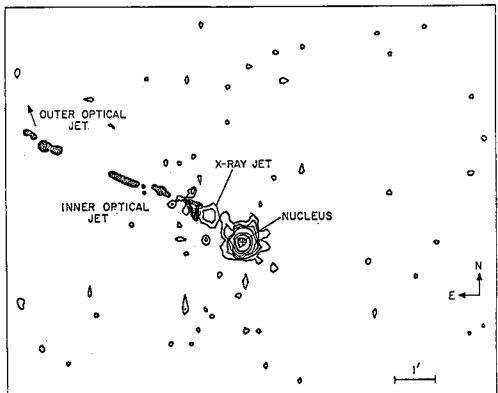


図 3 X線でみた Cen A の構造。E. J. Schreier et al., Ap. J. 234, Lett. (1979) による

いる。アインシュタイン衛星でも中心核そのものは分解されえないが、北東側の内側の目玉、その目玉と中心核を結ぶ方向のジェット構造、中心核周辺の拡がった成分の3つが分解された。図3には HRI による観測結果を示す。(HRI は分解能が高いので目玉そのものは HRI ではなく、より分解能の低い IPC で検出されており、この図には示されていない。) これら各成分の光度は中心核の光度に比べ 10^{-2} から 10^{-3} の程度にすぎないが、X線ジェットの発見は中心核から2つ目玉へのエネルギー輸送の機構に大きな示唆を与えることになる。

(5) 最後に諸種の活動銀河は電波や可視光での性質が大きく異なっているにもかかわらず、いずれも強いX線源であることを強調しておこう。これらの天体はエネルギー的にはX線光度が主であり、他の性質はエネルギー収支の上では第二義的なものとみなさなければならぬ。もちろんこれらの諸天体を総合的に理解する上には電波、赤外、可視光、紫外さらにはニュートリノ等の観測事実が重要であることはいうまでもない。

では上述のような諸性質はどのように説明されているのだろうか。現在までの理論的研究はエネルギー源とX線輻射の機構の2つに焦点がおかれてきたので以下の2つを論じよう。

クエーサー・活動的銀河中心核のエネルギー源

10^{16} cm 以下の領域から $10^{48} \sim 10^{47}$ erg/s のエネルギー放出率をもつこれらの天体として何を考えるかはクエーサー発見以来の大問題であった。この点同じ 60 年代に発見されたパルサーや大部分の銀河X線源が中性子星という実体を早期に確立したのに比べよい対照をなしている。さてクエーサーの放出する全エネルギーは上の光度が宇宙年令 10^{10} 年続くとすると最大 3×10^{44} erg、質量にして $10^{10} M_{\odot}$ が全て消えることに対応する。實際には核エネルギーの場合最大限静止質量エネルギーの 1%，

重力エネルギーの場合 10% 程度しか利用できないので中心物体の質量は $10^{11} \sim 10^{12} M_{\odot}$ という莫大なものになる。しかし活動期の長さは様々の間接的証拠(通常の銀河と活動銀河の統計、双対電波源の間隔、電波源密度の宇宙論的進化等々)からかなり短かく 10^8 年程度と考えるのがよい。従って中心物体の質量は $10^9 \sim 10^{10} M_{\odot}$ となる。もしエネルギー源として核エネルギーを考えると $10^{10} M_{\odot}$ の質量が 10^{16} cm の領域にはいることになる。しかしこの時利用できる核エネルギー 3×10^{62} erg に対し重力エネルギーは 3×10^{63} erg となり核エネルギーを超えてしまう。このことからクエーサーのエネルギー源は重力エネルギーであることがわかる。クエーサーの元素組成がほぼ正常であることも核エネルギーが主な源となりえないことを示している。 $10^9 M_{\odot}$ の質量に対するエディントン光度は 10^{47} erg/s であり、観測値と一致していることにも注意しておこう。

このような質量の単一の天体は超大質量星、超大質量ブラックホールということになる。前者はしかし安定には存在できず一般相対論的不安定のためにきわめて短い時間でブラックホールになってしまふ。回転や磁場を考えても 10^6 年以上の寿命をもつことは困難であり、やはり最終的にはブラックホールになる。中心物体が $1 M_{\odot}$ 程度の星の多体系であるという考えもあるが、この場合恒星系を 10^{16} cm まで収縮させるのに必要な時間は宇宙年令をこえることなど形成過程上の困難がある。また一旦星と星との衝突が盛んに起こりはじめるとやはり最終的には単一の超大質量ブラックホールになると思われる。従って中心物体の実体としては大質量ブラックホールを考えるのが最も妥当という結論に達する。

銀河X線源 Cyg X-1 のモデルが示すように、この場合のエネルギー源はガスがブラックホールにふりつもって重力エネルギーを解放することにより得られる。ガスの降積率を \dot{M} と表わすと光度 L は $L = \eta \dot{M} c^2$ (η は効率、 c は光速) と表わされる。ガスが角運動量をもっておりアクリションディスクを形成する場合、 η はシュワルツシルトブラックホールに対し 0.057、カープラックホールに対し最大で 0.42 となる。一方ガスが角運動量をほとんどもっていない時には球対称に近いアクリションとなるが、ブラックホールは中性子星と異なりガスの運動をとめる壁をもたないので衝撃波の発生のような大きな散逸が期待できず、 η は $10^{-5} \sim 10^{-3}$ 程度の小さな値になってしまう。

以上のように約 $10^8 M_{\odot}$ のブラックホールへの $1 M_{\odot}/\text{yr}$ 程度のディスクアクリションという描像が現在の到達点といえよう。これはクエーサーの寿命 10^8 年と齊合している。問題は銀河中心でこのようなガスの供給がどのような機構でなされるかにある。ブラックホールの周囲の

星の潮汐破壊、中心核の星間ガスの落下等々様々な説が提唱されているが、いづれも一長一短があり解決は今後の検討にまたねばならない。

クエーサー・銀河中心核のX線輻射機構

次の問題はブラックホールへのアクリションで解放されたエネルギーがどのようにしてX線や γ 線に転換されるかということである。X線輻射機構についてはシンクロトロン・コンプトンモデルと不飽和コンプトン化モデルの2つの考え方がある。

まず前者について論じよう。このモデルは多くのクエーサーが電波から可視光にわたるシンクロトロン輻射による非熱的スペクトルで特徴づけられることに着目する。このようなコンパクトな源ではシンクロトロン光子を放出する相対論的電子が再びその光子を逆コンプトン散乱することによってX線や γ 線を作ることができる。このモデルに従えば源の一様性を仮定すると観測されたシンクロトロン輻射のスペクトルと源の大きさから一意に磁場の強さや電子のスペクトルが決定され、X線強度も計算できる。この点非常に便利なのでこれまで観測結果の解析やモデル作りに広く使われてきた。しかしこのモデルは解析上源の大きさへの依存性が非常に大きいので得られた結果はそれだけ大きな不定性をもつことになる。またエネルギー解放と電子加速の間の関連は全く説明されていないので理論的には不完全なものであることも強調しておこう。

観測上でもいくつかの難点があげられる。第一に1型セイファート銀河のように電波の非常に弱い源でも強いX線輻射がみられること、第二にいくつかの天体では上のようにして計算されたX線強度より一桁程度低いX線強度の上限値が観測で得られていること、第三に強度やスペクトルがほぼ説明される場合でも電波や可視光とX線の時間変動の間にははっきりとした相関はみられないことなどである。以上のことからこのモデルでクエーサーを解析することは少し簡便にすぎると思われる。しかしクエーサーの構造はかなり複雑であってその一部分でこの機構の働いている可能性はある。

では次に不飽和コンプトン化モデルについて論じよう。このモデルは元々 Cyg X-1 からの硬X線輻射を説明するために提唱され、アクリションディスクモデルと密接に関連している。標準的なアクリションディスクモデルに従えば大部分のエネルギーが解放されるブラックホール近傍の領域ではディスクは輻射圧優勢となり $10^5 \sim 10^6$ K の温度になる。このためこの部分からの輻射は紫外線がほとんどでX線は非常に少なくなってしまう。硬X線を放出するためには 10^9 K 程度の高温プラズマをつくらなければならない。このような高温プラズマ

の形成機構としては二温度ディスクモデル、コロナモデル等が提案されている。

前者は標準モデルが熱的にまたは永年に不安定であることから、ブラックホールの近傍では幾何学に厚く光学的に薄いふくれ上がった状態が実現されることを主張する。このような状態ではイオンと電子は熱的に緩和しておらずイオンは約 10^{11} K、電子は約 10^9 K の二温度状態となる。この時電子はプラズマの外部から入射する低エネルギー光子をコンプトン散乱することにより冷却し、イオンから衝突により加熱されることになる。散乱された光子は多重散乱の結果硬X線領域まで達する。この時プラズマの散乱に対する光学的厚さ τ が十分大きければ放出される光子の分布は温度が T_e で化学ポテンシャルをもったウィーン分布になる。 $(T_e$ は電子温度) しかし大抵の場合 τ は 1 度程であり、この時は入射する低エネルギー光子のエネルギーを $h\nu_0$ とすると $h\nu_0$ から kT_e の範囲にわたるべき型のスペクトルが形成されると予想されている。この状況を不飽和コンプトン化と呼んでいるのである。

コロナモデルの方はエネルギーの最終的散逸がディスク内部ではなくディスク表面で起こるとしてディスク上部に高温コロナが形成されると考えるモデルである。このモデルは二温度ディスクモデルに比べて今の所理論的に明らかにされていない所も多いが、太陽や恒星コロナのX線観測が示すように磁場が関与する場合には高温コロナの形成は非常に起こりやすい過程だと考えられる。この場合ディスクそのものはかなり低温であり、そこから輻射された低エネルギー光子がコロナを通過する際に不飽和コンプトン化によってX線スペクトルが形成されると考えられる。

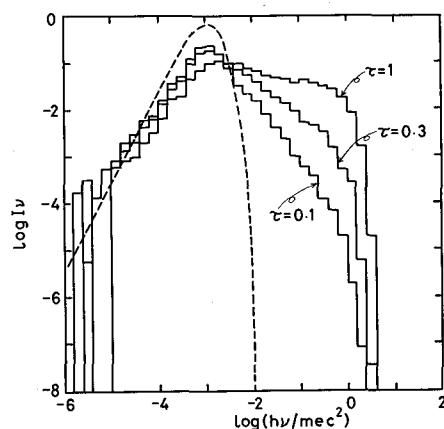


図 4 2 温度ディスクによる不飽和コンプトン化のエネルギースペクトル
 $kT_e = 0.25 \text{ mec}^2$
 $kT_{ph} = 4 \times 10^{-4} \text{ mec}^2$

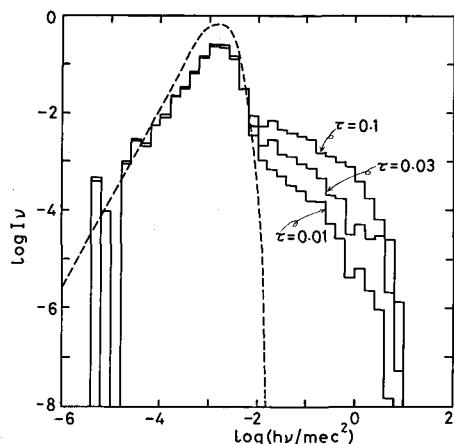


図 5 高温コロナによる不飽和コンプトン化のエネルギースペクトル
 $kT_e = m_e c^2$
 $kT_{ph} = 6 \times 10^{-4} m_e c^2$

不飽和コンプトン化の結果生じるスペクトルを計算するには、拡散近似の下でカンパニエッ方程式と呼ばれる方程式を解く方法があるが、 $\tau \sim 1$ で相対論的效果が重要な場合にはモンテカルロ法によるシミュレーションが最も適当である。筆者はいくつかの場合についてこの計算を行なっているので、その一例を図 4 と 5 に示しておく。この計算結果と観測されたスペクトルを比較することにより、高温プラズマの温度や光学的厚さ、低エネルギー光子の入射量を推定することができる。うまく行けば二温度ディスクとコロナのどちらかをとるべきかが決定できると期待しているが今の所そこまでは到っていない。

カットはウラニ
ボルグ東面。
佐藤直宣氏の文
(p. 192) 参照

おわりに

以上述べたようにクエーサーや活動的銀河中心核からのX線輻射は超大質量ブラックホールへのガスのアクリションとそれに伴って生じた高温プラズマでの不飽和コンプトン化によって基本的には理解されうる。またこれらの天体がバックグラウンドX線の大部分を担っていることも定性的には確かである。最後にアクリションモデルで解決すべきいくつかの問題をあげておこう。

第一の問題は Cos B 衛星で発見された 3C273 からの 100 MeV 領域の強い γ 線輻射の問題である。100 MeV γ 線は数 keV のエネルギーの X 線と衝突して電子・陽電子対を作る断面積が大きい。そのためこの γ 線源または X 線源の少なくとも一方の輻射領域の大きさは 10^{17} cm 以上と推定される。アクリションディスクで大部分のエネルギーが解放されるのは $10^{14} \sim 10^{15}$ cm の大きさの領域であるから、解放されたエネルギーをより広い領域へ輸送しなければならないという問題がおこる。Cen A の X 線ジェットや電波銀河の 2 つ目玉構造等も中心核からのエネルギー輸送の必要性を示しておりこの問題は興味深い。

第二の問題はアクリションディスクモデルで X 線領域以外の輻射をどう説明するかという問題である。この点はガスの供給機構、ディスクにおける散逸とプラズマ加熱、粒子加速の具体的な機構と密接に関連しており、今後詳細な検討が必要となっている。

今後の観測の進展や理論的検討で本文で述べた描像が基本的に正しいとなるか、それとも全く異なった描像が必要となってくるのか、その解明は大変興味深い。

