

さそり座 X 線星 Sco X-1 の性質

松 岡 勝*

1970年末に打ち上げられたX線天文衛星（ウフル）はそれまでのロケットや気球観測で得られた結果を集大成し、更にいくつかの新しい発見によってX線天文学が天文学の中で大きな役割をはたすことを示してきた。

ここでは筆者が最近までたずさわってきたさそり座X線源 Sco X-1 のX線と光の同時観測で得られた結果にウルフその他のデータを折りまぜながら Sco X-1 についてはこの種のX線星の物理的性質を考えてみる。

1. X線源の種類とコンパクトX線星

X線源の数は最近出されたウルフの観測による第3カタログに161個が整理されている。X線源の大半は銀河面方向に集中し、銀河中心近くに最も多い。そしてこれらの分布の様子を調べてみるとX線源はわが銀河のスパイラルアームの中に存在すると言う仮設に矛盾しない。わが銀河内のX線源としては超新星の名残りといわゆるX線星としてはじめてみつかった天体（以下コンパクトX線星と呼ぶ）とに分けることが出来る。この他X線源のいくつかはわが銀河系外のものがあってこれらは光や電波でそれまでに知られていたセイファート銀河、電波星雲、恒星状天体（QSO）そして銀河のクラスターなどと一致している。

さてコンパクトX線星の中にはX線による発見後、光や電波で同定されたものも現在では10個程度ある。超新星の名残りや光や電波で同定されたコンパクトX線星はそれらの距離を使って数 keV のX線の絶対強度が $10^{36} \sim 10^{37}$ erg/sec と推定される。ウルフの観測では天空のほぼ90%が走査されていることからわが銀河系内のX線源の強度が $10^{36} \sim 10^{37}$ erg/sec ならばX線の全数もせいぜい100~200個となる。つまりX線星はわが銀河系内にある 10^{11} 個の星のうちわずか 10^2 個しかないきわめて稀な特異星であると言うことが出来る。これには爆発後 10^4 年以下の超新星の名残りであるX線星も含まれているがコンパクトX線星に比べて少ないと考えられる。

コンパクトX線星の多くはいろいろなモードの変動をしている。即ち

- (1) 典型的な二重星の時間変動をもち、その周期は1日から数日である。
- (2) 周期的または不規則な短時間変動をいろいろな振

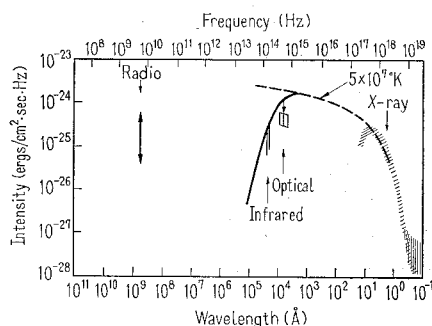
幅で行なっている。その時間スケールは0.01~1秒、分、時間など多様である。

コンパクトX線星のうち Cen X-3, Her X-1, Cyg X-1 など数個は1~6日の周期をもつ二重星に同定されている。Cyg X-3のように電波で20倍もの爆発的変動をし、X線では4.8時間の周期のものもある。Sco X-1 や Cyg X-2などは光でみえる天体と同定されているが二重星と言う明らかな証拠がまだにみつかっていない。しかし、コンパクトX線星は全て二重星と言う仮設は大きな矛盾を生じないばかりか以下にみるように物理的性質を理解する上に都合が良い。そしてコンパクトX線星の出現は他のX線星と異なりX線天文学がもたらした全く新しく天文学上に登場した天体であり、この性質を知ることがX線天文学の最も本質的な側面を解明することになる。

2. Sco X-1 の一般的性質

コンパクトX線星はX線による観測によってはじめて知ることが出来る性質をもっている。このうち Sco X-1 は最も強いX線源であるためこれまで精しい観測がなされてきた。1962年X線天文学の誕生とともにこの星も登場し、1966年には約12.5等星の青い星に同定され、このときからX線天文学が光による天文学と密接に結びつく契機を作った。ついで1969年には電波による観測もなされた。

Sco X-1 のX線は高温プラズマの熱輻射によってほぼ説明することが出来る。可視光から赤外線のスเปクトルが自己吸収つまりレリー・ジーンズ輻射のスเปクトルに近づくことからこのプラズマは高温高密度で、しかもサイズが小さいと考えられている。その大体の量は温度



第1図 Sco X-1 の硬X線から電波までのスเปクトル

* 東大宇宙研

M. Matsuoka: A Model for Sco X-1

が約 $5 \times 10^7 \text{ K}$, 電子密度は $10^{16} \sim 10^{17} \text{ 個/cm}^3$, 大きさは $10^8 \sim 10^9 \text{ cm}$ である. X線と光の強度は不規則ないろいろな時間変動をしていることからこれらの物理量も変動していると考えられる. X線から赤外線までが同じ高温のプラズマから出ているのに対して電波の強度はこの熱放射の延長上よりもはるかに強く, 分の程度の時間スケールで大幅に変動している. しかもこの電波源は Sco X-1 の光の星と一致する点状源とその北東および南西にそれぞれ 1.3 分角と 2 分角離れた所に中心をもつ弱い源からなっている. 変動しているのは中心の電波源で両側の電波源はほとんど動かない. 電波の発生源は光やX線を発生している高温プラズマの外にあってシンクロトロン放射によって放出されていると考えられる. 第1図には Sco X-1 のX線から電波に至るスペクトルを示した.

Sco X-1 の物理的状態を知るためにX線, 光, 電波で各々精しく測定するばかりでなくこれらの同時観測によってより高度な成果が得られるものと想像することは難しくない. こうしてこれまでロケット, 気球または人工衛星と地上の光学望遠鏡との同時観測がなされた. このうち気球による硬X線と光の同時観測は日本とインドの共同観測により過去3年間にわたって行なうことが出来た.

3. Sco X-1 の X線と光の同時観測

一口に同時観測と言っても観測手段の違うものを同時に行なうことは時間的にも空間的にもうまくゆくチャンスが少ないものである. ロケットと光の同時観測はウフル以前に約 10 回行なわれている. 人工衛星による同時観測はロケットに比べて圧倒的に時間が長く多量の成果が得られている. しかしこれらはX線のエネルギーとしては $1 \sim 20 \text{ keV}$ のX線と光の同時観測であった.

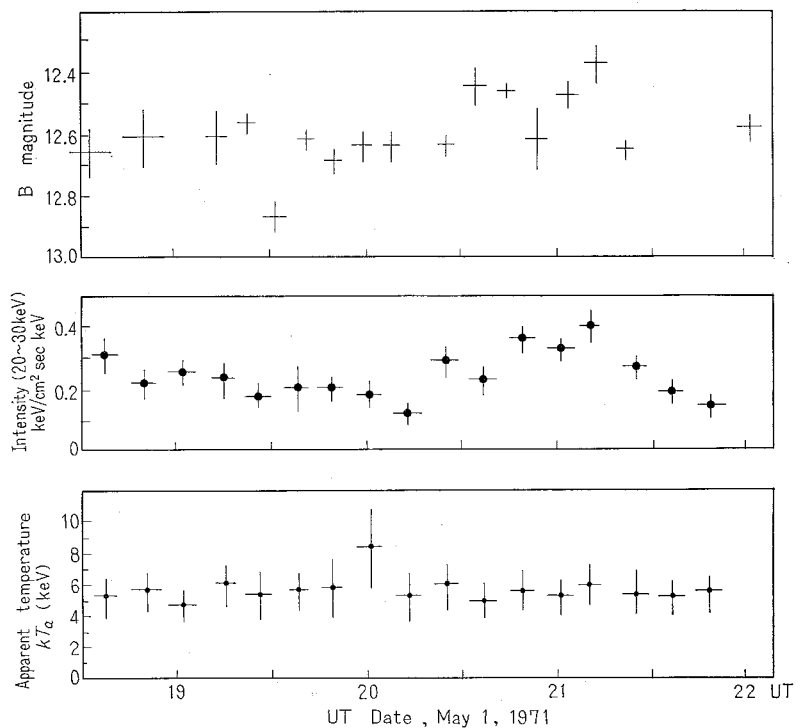
我々はウフルによる観測の全盛時代の 1971 年, 1972 年ウフルで行なえなかった硬X線と光の同時観測を 3 回にわたって成功することが出来た. その結果ウフルと違ったエネルギーバンドの測定であったことが幸いして以下で述べるように Sco X-1 について新しいことがわかった.

我々の成果の話に入る前に同時観測によって温度, 密度, 大きさ

などの物理量を距離のパラメーターとして求める方法を述べておく.

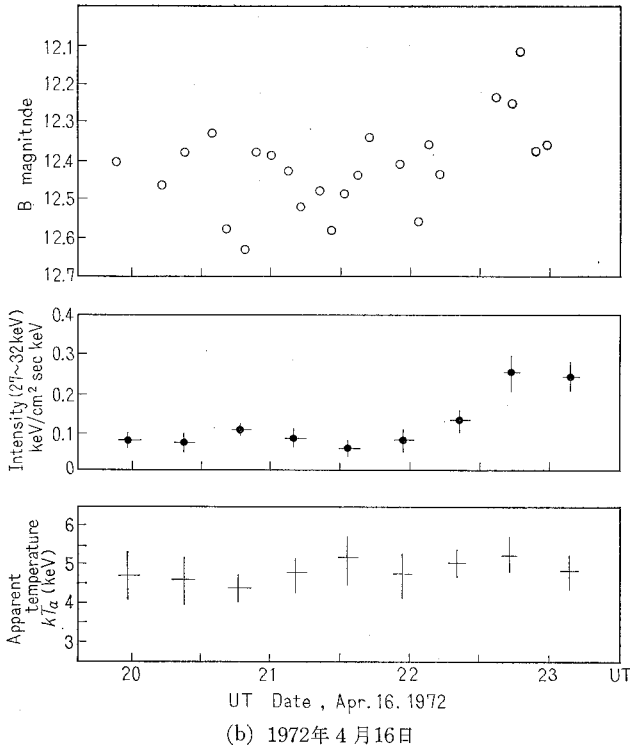
Sco X-1 のX線も光も高温プラズマの熱放射によると仮定すると (1) X線のスペクトルからプラズマの温度 (T) がわかる. (2) 光の自己吸収から光学的深さ即ち, プラズマの大きさと密度をかけた量 (nr) がわかる. 更に (3) X線の強度から電子密度の二乗と体積をかけた量 ($n^2 r^3 / d^2$) が距離 (d) のパラメーターとしてわかる. こうして Sco X-1 の距離を仮定すればプラズマの大きさと密度を一意的に求めることが出来る. ここで Sco X-1 の距離は諸説に分かれているが $200 \text{ pc} \sim 500 \text{ pc}$ と考えられる. こうして求めた密度と大きさは前節で述べた値になる.

さてここで一つ困ったことが起ってくる. X線光子の熱電子とのコンプトン散乱は意外に大きいことである. つまりコンプトン散乱の光学的厚みは $\tau_{es} = nr\sigma_{Th} \approx 5 \times 10^{16} \times 5 \times 10^8 \times 7 \times 10^{-25} \approx 18$ となる. τ_{es} が大きいと X線の光子のスペクトルが熱電子による散乱で大きくゆがむことが知られている. 従って単純な自由-自由遷移による薄いプラズマの熱放射にX線と光のスペクトルが合うとした上の議論は少しあやしくなってくる. ローとゲーマイヤはこのX線と電子のコンプトン散乱の効果をモンテ・カルロ法によって計算しX線のスペクトルがゆがむことを明らかにした. このゆがみは τ_{es} を十分大きく

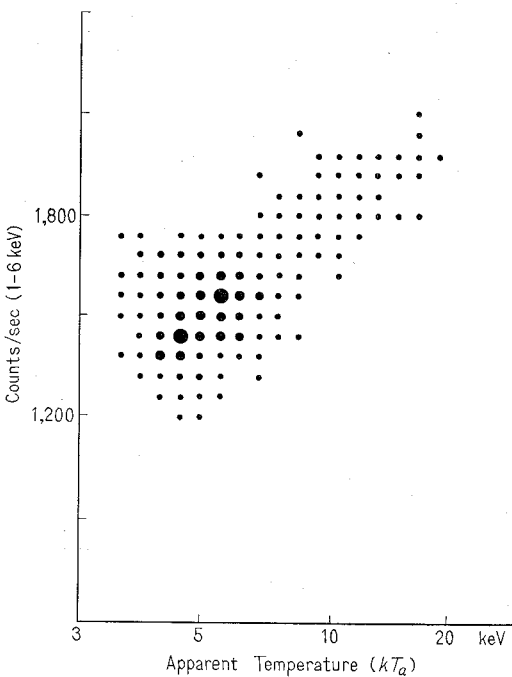


(a) 1971年5月1日

第2図 インドで行なわれた Sco X-1 の硬X線と光の同時観測の結果.



第2図 インドで行なわれた Sco X-1 の硬 X 線と光の同時観測の結果。



第3図 人工衛星 OSO VII で測られた Sco X-1 の X 線強度とスペクトルの形 (みかけの温度) の関係。丸の大きさは観測された頻度の大きさを意味する

することにより黒体放射のスペクトルになる。Sco X-1 の場合は黒体放射と自由-自由遷移のスペクトルとの中間的なものによく合うようである。この効果が観測データにどのような結果をもたらすかはだんだんと明らかになってきた。このとき我々が行なった硬 X 線と光の同時観測が重要な役割を演じたことを次に述べる。

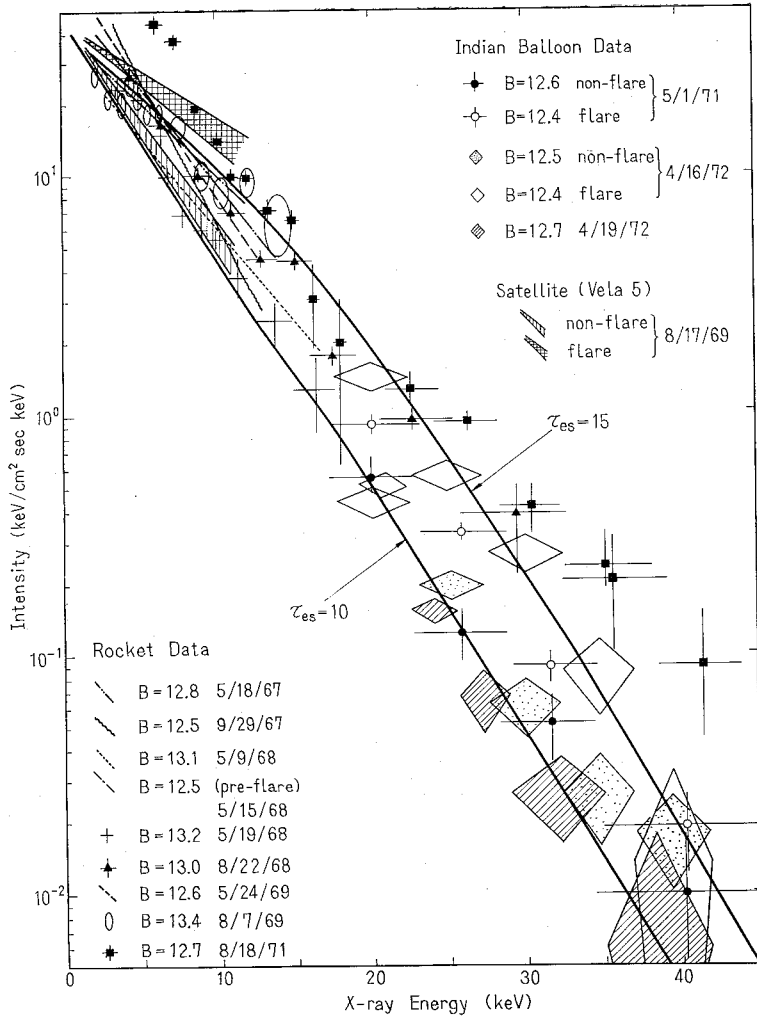
4. Sco X-1 の同時観測の結果

1971 年と 1972 年の Sco X-1 の硬 X 線光の同時観測は全てインドのハイデラバッドで行なうことが出来た (1971 年のいきさつは天文月報 1971 年 8 月号に詳しい)。

いずれも口径約 100 cm^2 のシチレーションカウンター 2 個からなる X 線観測装置を約 $85,000\text{ m}^3$ の気球に吊るして 40 km を越える高度から Sco X-1 からくる硬 X 線を観測した。

これと同時に進んだ光学観測は東京天文台の全面的な協力により 1971 年はハイデラバッドのニザミア天文台に東京天文台の畑中氏が出張され 8 インチアストログラフにより行なった。1972 年は東京天文台の 12 インチ反射望遠鏡をハイデラバッドの気球基地に持ち込み天文台の真鍋、三上両氏によって観測を逐行することが出来た。観測は 1971 年 5 月 1 日、1972 年 4 月 16 日、19 日の 3 回行ない 3 回とも同時観測と言う所期の目的を達成することが出来た。そして 1971 年 5 月 1 日と 1972 年 4 月 16 日はともに Sco X-1 では光の明るい時期にあたり、フレアー時の同時観測もすることが出来た。X 線と光の同時観測に時期を合わせて鹿島の電波研の河野氏等は Sco X-1 の電波の観測もすることが出来た。

第 2 図には 1971 年 5 月 1 日と 1972 年 4 月 16 日に行なわれた X 線と光の強度の様子を示したものである。両者とも観測の終り頃にフレアーと思われる 10 数分の時間スケールの光の強度の増加現象をとらえることが出来た。このとき X 線もほぼ良い相関で強度を増している。しかしここで注目すべきことは Sco X-1 の X 線は高温プラズマから放出されているとし、そのエネルギースペクトルから出したプラズマのみかけの温度が光や X 線の強度とともにほとんど変化しないことである。このことはこれまでロケットで行なわれてきた数 keV の結果によるとフレアー時ではそうでないときに比べてみかけの温度が大変大きくなるということと一見矛盾するようである。つまりこの例として第 3 図は人工衛星 OSO VII で得られたもので X 線の強度とともに $1\sim 10\text{ keV}$ でのみかけの温度が大変大きく変っていることが注目される。この図で強度が強い所はフレアーと考えられる。



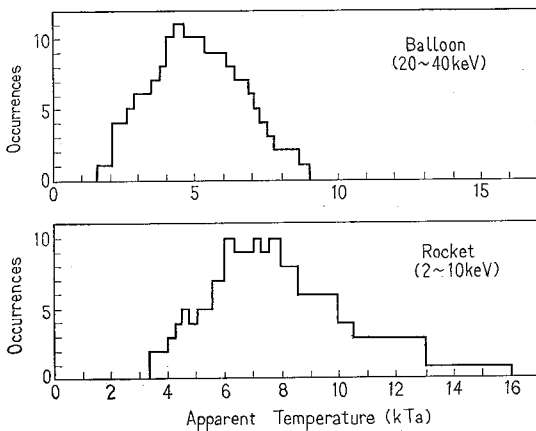
第4図 Sco X-1 のX線のスペクトル

そこでスペクトルをもう少し詳しく調べてみる。第4図はこれまでの同時観測で行なわれたスペクトルをまとめたものである。20 keV より高いエネルギー領域のスペクトルは我々が得た値であるがフレアとそうでない時期のスペクトルはそれぞれの形は変わらず全体として強度が増加していることがわかる。これに対する数 keV のスペクトルは第4図の人工衛星ヴェラ5の結果にあるようにフレア時では強度とスペクトルの形が変わっている。ウフルやOSO VII ではまだ詳しいスペクトルの結果が発表されていないが光の明るい時期でのフレアとそうでない時期でのX線スペクトルの性質はヴェラ5の結果と大体一致しているようである。

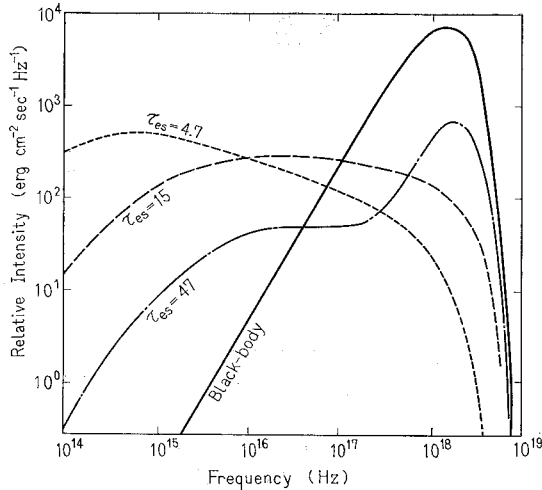
Sco X-1 はいろいろな変動があるが、これまでの結果で言えることは (1) 光の明るい時期にあってフレアとそうでないときのX線の強度はフレアのときはそうでないときに比べて2~3倍強くなる。これに対して光の強度は2~3割しか増えない。(2) そして数 keV X線のスペクトルによるみかけの温度はフレア時には $kT_a = 5 \text{ keV}$ から10数 keV に変動する。20~40 keV の硬X線では $kT_a = 5 \text{ keV}$ 程度でほとんど変化がない。以上2点はフレアとそうでない Sco X-1 の光の明るい時期で言えることであるが、(3) Sco X-1 の全ての状態を含めて数 keV で測定されたX線のスペクトルから出したみかけの温度は20~40 keV のスペクトルから出したみかけの温度より一般的に高い。この様子は第5図に示してある。第4図でわかるように Sco X-1 は大変複雑な変化をしていてこの3点の例外や、これ以外の問題点として光の強度が弱いからと言って必ずしもみかけの温度が低くなるわけではないこと、X線の絶対値が観測の手段で少し食い違うなどがある。ここではこれらの問題は時間変動だとして逃げ一般的に言える上の点の性質を説明するモデルを考えてみる。

5. Sco X-1 のひとつのモデル

先に Sco X-1 のX線と光が出る領域は高温、高密度でサイズの小さいプラズマであるとするのがほぼ妥当で



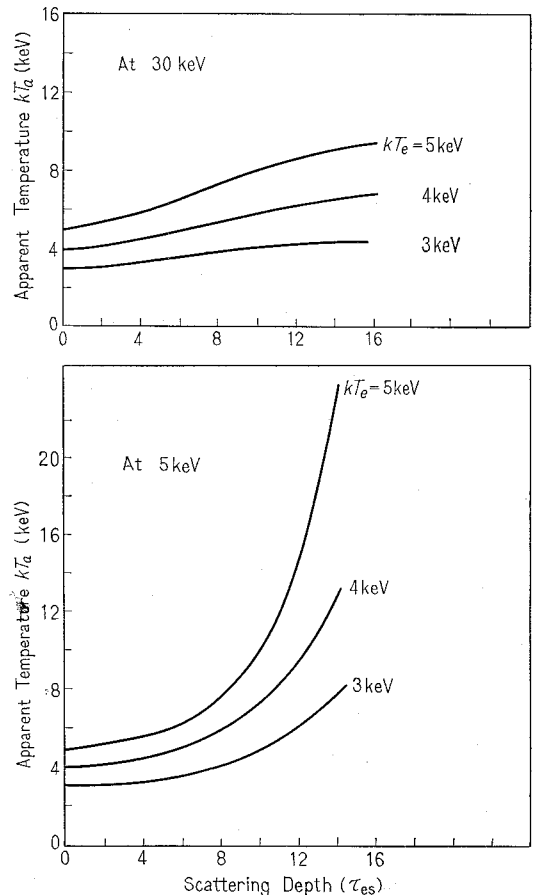
第5図 バルーンとロケットで行なわれたX線観測の結果(実験誤差をつけた)をみかけの温度の頻度分布としてまとめたもの



第6図 コンプトン散乱の効果を入れて計算したスペクトル例。 $T=3 \times 10^7$ K, $n^2 r^3 = 10^{60}$ cm $^{-3}$ とし τ_{es} を変えて計算してある

あることを述べた。このとき τ_{es} が大きいため X 線の光子が外に出るにはコンプトン散乱で相当ゆがめられるらしいことも述べた。Sco X-1 の輻射の問題は正にこの点にあるため τ_{es} の効果を正確に入れた輻射の様子を調べる必要がある。Sco X-1 が問題になって以来この種の問題がいくつか考えられた。しかし単純な自由-自由遷移とプランク輻射の中間のスペクトルを正確に解くことは大変複雑でいろいろな計算が試みられている。第6図にはイラリオノフとシャニアエフによる近似計算の結果を示す。第4図には西村の計算結果のうち $\tau_{es}=10, 15$ が記入してある。いずれも τ_{es} が大きくなると単純な自由-自由遷移から大変大きくずれてしまうことがわかる。従って自由-自由遷移として合わせたみかけの温度も変わってしまう。第7図は τ_{es} に対するコンプトン散乱を入れたスペクトルを 5 keV と 30 keV で単純な自由-自由遷移のスペクトルに合わせたときのみかけの温度を示したものである。この2つの図から前節で述べた Sco X-1 の3つの性質を次のように説明出来る。Sco X-1 はプラズマそれ自身の温度はあまり変わらず、プラズマの量が増えるのだとすると同じ τ_{es} の変動でも数 keV の X 線のスペクトルでは 30 keV 付近の硬 X 線に比べて大きな変化を示す。これにより数 keV での X 線スペクトルからきめたみかけの温度は 20~40 keV の硬 X 線のときよりいつも高いことが理解出来る。そしてわれわれが観測した硬 X 線ではみかけの温度がほとんど変わらないこともわかる。そして第4図のスペクトルに書き込んだ $\tau_{es}=10, 15$ の理論曲線と実験データを比べてみると、2, 3の例外はあるもののほぼ説明出来るようである。こうして定量的には観測的にも理論的にもまだ問題があるが定性的には我々のこのようなモデルはうまくゆくようである。

蓬茨や会津は白色矮星を伴う近接連星で白色矮星に主星からガスが降り注ぐことにより重力エネルギーが放出され高温ガスを作って X 線を出す機構を詳しく計算した。このとき白色矮星の質量をきめてしまうとガスの落ち方であつためられたプラズマの温度はそんなに変化しないことが計算されている。こうしてコンパクト X 線星は近接連星で、そのエネルギー供給源は主星から白色矮星や中性子星またはブラックホールにガスが降り注ぐことによる重力エネルギーの放出であつて、そこに作られた高温、高密度のプラズマから X 線が出ているのだと考えることは一般性のあるモデルのようである。このとき主星は巨星や超巨星であつてガスがあふれ出す星であろう。Sco X-1 が二重星になっている明確な証拠はないが軌道面と直角の方向からみている近接連星で主星が赤色巨星のようなものであれば現在の観測と必ずしも矛盾しない。しかし最終的な結論はやはり X 線、光、赤外、電波などの広範囲の詳しい観測を待たなければならないだろう。



第7図 コンプトン散乱を入れたスペクトルを単純な自由-自由遷移のスペクトルに合わせて得たみかけの温度の τ_{es} との関係。 kT_e はプラズマの電子温度