

X線天文衛星「ぎんが」によるI型セイファート銀河の観測*

山内 誠**

(1989年2月14日受理)

Observations of Type-I Seyfert Galaxies with X-ray Astronomy Satellite "GINGA"

By

M. YAMAUCHI

Abstract: Ginga observed two Type-I Seyfert galaxies NGC4051 and MCG-6-30-15 with Large Area Counter (LAC) to study the nature of Seyfert galaxies and clarify the physical states. New results have been obtained from this observation as follows. (1) Large amplitude changing by a factor of 3-4 and short timescale of 100-300 sec. have been detected in 2-20 keV band. This time scale is shortest that has been detected in these two objects. (2) Spectral variability has been obtained in both objects. This spectral variation is explained by increasing of photon spectral index by about $\Delta \alpha \approx 0.4-0.5$ around $\alpha \approx 1.7$ correlate with the 2-10keV flux. (3) X-ray spectrum of MCG-6-30-15 shows an evidence of a very thick ($N_H \approx 6 \cdot 10^{24} \text{cm}^{-2}$) absorber covering about 60% of the central source. This absorber is probably located nearby the central object.

概 要

セイファート銀河の物理的状态を明らかにするために、2つのI型セイファート銀河、MCG-6-30-15とNGC4051が「ぎんが」衛星に搭載された低バックグラウンドの大面积比例計数管により観測された。今回の観測により、以下に記すような3つの新しい結果を得ることが出来た。

* 宇宙科学研究所特別事業による研究論文

** 大阪市立大学理学部

(1)50%を越えるような大きな振幅の変動が100~300秒の短時間でも見つかった。これは今までの観測結果と比べ最も短時間での変動である。(2)両方の天体でスペクトル変動が見つかった。これはX線強度が増すとそのスペクトルの傾きが急になるというものである。このスペクトル変動は2-10keVの光度が約3~4倍増加するのに相関して、光子スペクトル指数が $\alpha \approx 1.7$ の付近で $\Delta \alpha \approx 0.4 \sim 0.5$ 増加するということで説明できる。(3)MCG-6-30-15のX線スペクトルは、X線源の約60%を覆うような、非常にコラム密度の高い($N_H \approx 6 \cdot 10^{24} \text{cm}^{-2}$)吸収物質が存在するということを示している。このような物質は、多分、中心核の近くにあると考えられる。

1. 序 論

活動銀河核 (AGN) の最初の精度のよいスペクトル研究が HEAO-1 の A-2 により、2-30 keV の範囲でなされ、セイファート銀河のスペクトルの相似性が発見された (Mushotzky 1982; Mushotzky 1984a)。X 線の光度は4桁の範囲に広がっているのに、対応するスペクトルは、光子スペクトル指数が $\alpha = 1.7$ から余り変わらない値を持つべき関数でうまく表される。以下ではこれを標準値と呼ぶ。これらのスペクトルのいくつかにみられる吸収は一樣な吸収物質を使ったモデルでよく再現される。

X線検出器の感度が上り、観測できるエネルギー範囲が広がるにつれて、X線源の詳細な構造が解るようになった。いくつかの天体では、一樣な吸収のモデルはもはや適当ではなくなり、データからは非一樣な吸収物質が要求されるようになった (Holt et al. 1980; Reichert et al. 1985)。

また標準値というスペクトルの描像も修正され、スペクトル指数が標準値と違った値を持つ天体が多く見つかった (Lightman and Zdziarski 1987; Wilkes and Elvis 1987)。しかしそれらはかなり小さな範囲内 ($\alpha \approx 1.4-2.0$) にとどまっている。また、いくつかの AGN ではスペクトル指数の変化の証拠が見つかった。これら全ての天体 (3C120, Halpern 1985; NGC4151, Perola et al. 1986; NGC7314, Turner 1987; NGC5548, Branduardi-Raymont 1986) において、スペクトル指数はエネルギー強度と正相関しており、エネルギー強度の3-4倍の変化に対して $\alpha \approx 1.7$ の周りに $\Delta \alpha \approx 0.3-0.4$ 程度変化する。

「ぎんが」衛星に搭載された LAC (Large Area Counter) は、大きな面積を持っており、かつ低バックグラウンドであるので、このようなスペクトル変化を研究するのに有効である。この論文で「ぎんが」衛星による観測結果について考察する NGC4051 と MCG-6-30-15 は、X線強度で大きな振幅の変動を示しており、変動の時間スケールは1時間か、またはそれ以下である (NGC4051, Lawrence et al. 1985, Lawrence et al. 1987; MCG-6-30-15, Pounds et al. 1986a, Pounds and Turner 1986)。さらに NGC4051 の EXOSAT による観測 (Lawrence et al. 1985) では、スペクトル変動が示唆されており、X線強度が強くなると、スペクトルの傾きは急になる。従って、これらの天体は、「ぎんが」衛星によりスペクトル変動を研究するのに適した天体である。

また、AGN の X 線スペクトル中にみられる鉄の K-X 線領域での構造を調べることによ

て、中心核を取り巻くガスの分布を知るための手がかりが得られる (Matsuoka et al. 1986). この論文では、吸収ガスに対する観測結果も述べ、その状態について議論する.

2. 観測とデータ解析

2-1 観 測

2つのI型セイファート銀河, NGC4051, MCG-6-30-15が, 「ぎんが」衛星に搭載されたLACにより観測された. LACは8台の比例計数管で構成されており, 全有効面積は 4000 cm^2 , エネルギー分解能は 6 keV で18% (FWHM) である (Turner et al. 1988). 観測におけるLACのモードはMPC-1モードというモードで, これは8台の検出器それぞれの2つの層のデータについて16秒の時間分解能で48分割されたエネルギー・チャンネル毎の情報を得ることが出来る. また観測の間姿勢はそれぞれの天体の方向に固定し, その安定精度は約 0.1° であった. 一方, 各天体に対するバックグラウンドは, その天体を観測した時の直前, もしくは直後に, その天体の近くで既知のX線源が存在しないところを観測することにより得られた. これは衛星の軌道上の位置からみても, 時間的にもX線源観測時に近いバックグラウンドを得るためである. バックグラウンドの計数率は37日周期で大きく変化する成分がある (Turner et al. 1988; Hayashida et al. 1988). この周期は「ぎんが」衛星が楕円軌道を描いて地球の周りを周回するとき, その近地点が地球に対して回転するときの周期である. さらにバックグラウンドは天空上の方向によってもわずかながら変化する.

NGC4051は, 1987年6月3日から5日にかけて3日間観測された. これに対するバックグ

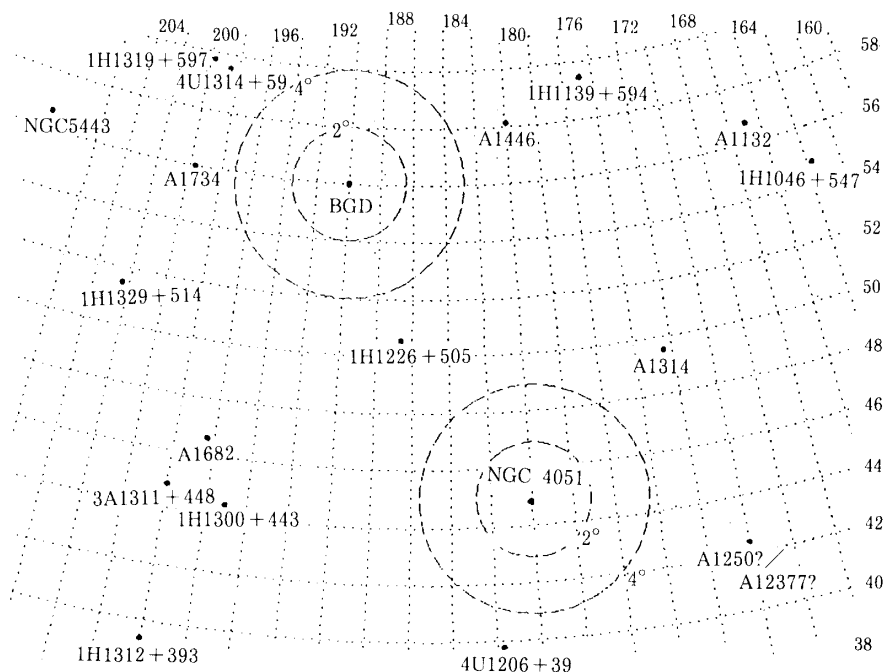


図1 NGC4051を観測している時と, それに対するバックグラウンドを観測している時のLACの視野中心方向を天球上に表したものの. 図には視野中心から 2° と 4° の円で示されている.

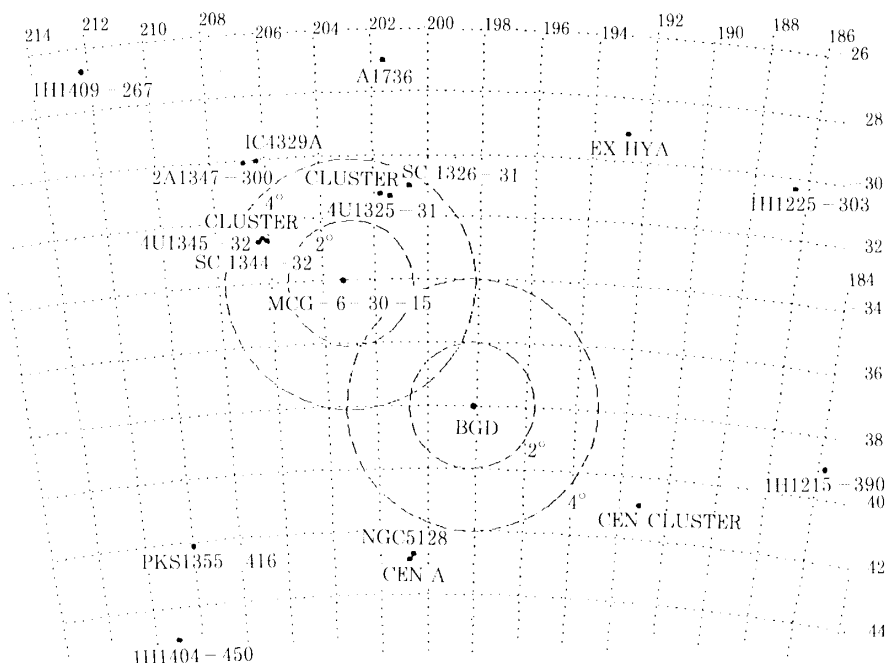


図2 MCG-6-30-15を観測している時と、それに対するバックグラウンドを観測している時のLACの視野中心方向を天球上に表したものの、図には視野中心から2°と4°の円で示されている。

ラウンドの観測は、6月6日から7日にかけて行われた。図1にNGC4051とバックグラウンド観測時におけるLACの視野方向を、視野中心から2°と4°の円で示す。

MCG-6-30-15は、1987年9月8日から11日にかけて4日間観測された。対応するバックグラウンド観測は、9月7日から8日にかけて行われた。図2にMCG-6-30-15とバックグラウンド観測時のLACの視野方向を、視野中心から2°と4°の円で示す。MCG-6-30-15は、観測の開始から9月9日17:45 (UT) まではLACの視野中心からかなりずれていたためにコリメータ透過率が0.3以下であったので、この部分のデータを解析から除外した。従ってこの時のLACの視野方向は、図2には示されていない。また、8台のLACの内の2台 (LAC-0, LAC-4) にはコリメータで反射した太陽X線の混入がみられる。この混入した太陽X線の計数率は、1検出器当たり約0.8cts/secであるが、X線源の強度 (約1-3cts/sec) がこの計数率に比べて十分には大きくないので、正確を期すためにLAC-0とLAC-4のデータは解析には用いなかった。

2-2 データ解析

KSCから高速の伝送回線によって伝送されたデータは、一旦渕野辺のコンピュータのデータベースに格納される。このデータを使って、まず衛星の姿勢が決定され姿勢ファイルとして格納される。さらに元のデータと姿勢ファイルとを使ってFRF (First Reduction File) と呼ばれるファイルが作られ、コンピューターに格納されると共に、磁気テープにも保存される。このFRFにはLACデータの他に、他の観測器 (ASM, GBD) のデータおよび環境 (HK) データ、姿勢データ、衛星の軌道要素が入っており、全てのデータは元の時間分解能

を保持している。従って各研究者は、各自必要なFRFを持ち帰ることにより、それぞれの研究機関で解析を行うことができる。

今回のX線スペクトルや時間変動の解析は以下の手順で行った。

(1) 使用するデータの選択

先に述べたように、今回解析した各天体のX線強度は数mCrabと低いので、注意深いデータの取捨選択が必要である。従って、バックグラウンドの高い領域に相当する所、すなわち宇宙線の地磁気切断運動量が10GeV/cより低い所や、SUD(37keVより高いエネルギーに対応するデータ)の計数率が60cts/secより高いところで得られたデータを除外した。またGBDやASMの計数率に同期して計数が変化しているものを、地球起源の放射線帯粒子の混入であるとして除外し、LAC方向と太陽との間の角度が90°以下の時に、一部のLACだけに計数の増加がみられるものを太陽X線の混入であるとして除外した。さらに観測装置や伝送系に原因があると思われる雑音を含むデータも除外した。

バックグラウンドの計数からの、X線源のX線超過分は主に2-10keVの範囲でみられる。LACの内部はX線の検出に有効な部分が、X線入射窓に接する上層とその下にある中間層の2つに分けられており、このエネルギー範囲ではLACの中間層の検出効率が低い上に、中間層のバックグラウンドは上層のバックグラウンドと同程度であるので、S/N比を上げるために、上層のデータだけを解析に用いた。

(2) 光度曲線用バックグラウンドの決定

バックグラウンドデータを使い、興味のあるエネルギー範囲について、指定した検出器の指定した層に対するバックグラウンドの計数率とSUDの計数率との間の関係を

$$\text{BGD (cts/sec)} = A + B \times \text{SUD (cts/sec)} \quad (1)$$

のような一次式で表し、係数A、Bを求める。この場合、バックグラウンドは衛星の周回毎に大きく異なっている。特にSAA(南大西洋地磁気異常地帯)を通過する周回ではその差が大きくなっているため、二つの係数は各周回毎に決定しなければならない。X線源を観測した時のデータから、そのSUDの計数率を求め、そのデータが得られたときの衛星の軌道状況に対応する周回のバックグラウンドで求めた係数A、Bを使ってバックグラウンドを差し引く。ここで、衛星の軌道状況は連続してSAAを通過する回数を反映するものである。

(3) エネルギー目盛りの決定

衛星打ち上げ前のエネルギーの較正や、衛星の初期運用でのエネルギーの較正により求められている標準のエネルギー目盛りを使って、観測された直接データから図3の様にパルス波高分布を作る。このパルス波高分布には、コリメーター内側に塗布した銀が、硬X線や荷電粒子と相互作用して生じる22.1keVの輝線(銀のK-X線)が現れているので、それを含む狭いエネルギー範囲でべき関数(連続成分に対して)とガウス関数(輝線に対して)の和として χ^2 最小法により関数の形を決める変数の値を決定する。これにより求められた輝線のエネルギーと22.1keVとのずれを補正して正しいエネルギー目盛りを決定する。

(4) スペクトル用バックグラウンドの差引

全てのデータは、衛星の周回毎に分けられている。以下の操作は、ある周回でのX線源観測時のデータに対して対応する周回でのバックグラウンドデータを使う。バックグラウン

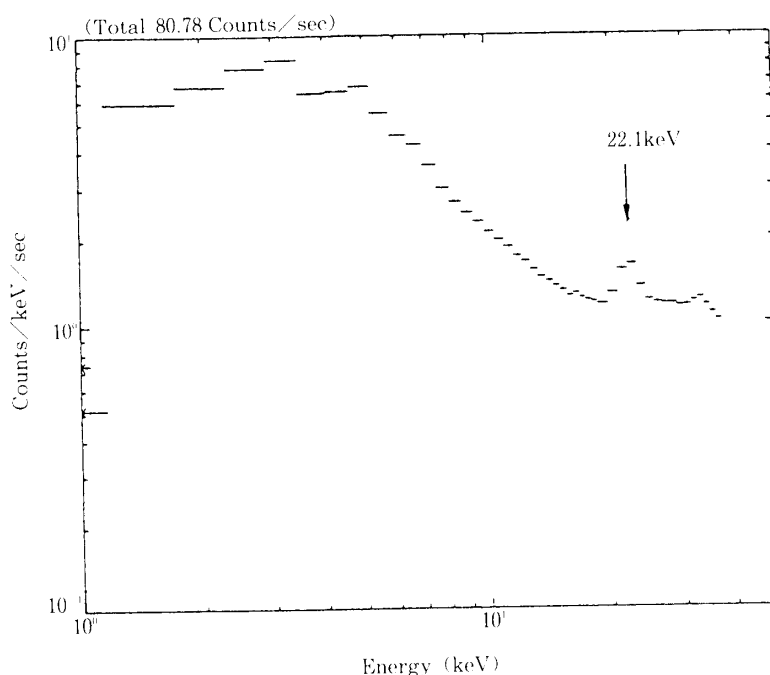


図3 標準のエネルギー目盛りを使って、直接データのスペクトルを求めたもの。このエネルギー目盛りは衛星の地上での校正や、初期運用での校正により既に求められているものである。このスペクトルには銀の K_{α} -X 線 (22.1 keV) の輝線が現れている。

ドデータからは、SUD 計数率によりいくつかの準位に分類されたバックグラウンドスペクトルを作る。ここで i 番目の準位に分類されたバックグラウンドのスペクトルを b_i とする。X 線源観測時のデータからは、SUD 計数率が、分類された各準位にあるときの観測時間を求める。ここで SUD 計数率が i 番目の準位にあったときの観測時間を t_i とする。これらの b_i と t_i の組から全体のバックグラウンドスペクトル B を

$$B = \frac{\sum b_i \cdot t_i}{\sum t_i} \quad (2)$$

により求める。ここでバックグラウンドデータ中には、X 線源観測時のデータと同じ SUD 計数率のデータが存在するように、データを選択をしておく。このようにして求められたバックグラウンドスペクトルを、X 線源観測時の生スペクトルから差し引く。

(5) バックグラウンドの選び方によって生じるバックグラウンド差引における系統的な誤差の見積り

同一の天体に対するバックグラウンドが複数日にわたり観測されている場合は、対応する周回で違う日のバックグラウンドスペクトル相互間で差引を行い、剰余のスペクトルからバックグラウンドの選び方によって生じるバックグラウンド差引誤差を見積る。また、同じ日のバックグラウンドで隣り合う二つの周回間でもスペクトルの差引を行い、バックグラウンドの選び方による差引誤差を見積る。

(6) コリメータ透過率に対する補正

バックグラウンドを差し引いたデータについて、コリメータ透過率に対する補正を行う。

(7) スペクトル解析

スペクトル解析には、各周回毎に分かれているスペクトルの内、統計的に十分なもの（2-20keVで集積した計数が1500カウント以上のもの）で、バックグラウンド差引（Hayashida et al. 1988）における系統的な誤差を大きく受けないもの（2-20keVで計数率が3cts/sec以上のもの）だけを用いる。また、各周回毎のスペクトルは、統計精度を向上させるために次章で述べるような基準に従って足し合わせ平均のスペクトルを作って、いろいろなモデルで χ^2 最小法によりデータに合う最適の自由変数の値を求める。

3. 結 果

3-1 MCG-6-30-15

(a) 光度曲線

図4-(a)にエネルギー範囲1.2-22keVにおけるMCG-6-30-15の光度曲線をSUDの変化と共に128秒の時間幅の強度として示す。正味の全観測時間は約25,000秒である。データ点の示されていない領域は、天体が地球によって隠されているか、もしくはバックグラウンドの高い領域であったために除外した部分に対応している。図から解るようにこの天体からのX線計数率は大きく変動しており、1時間またはそれ以下の時間で約8cts/secから約24cts/secまで変動しており、その変動の幅が約3倍にも及んでいる。しかもこの変動は図に示されているSUDの変動とは同期していないことから、MCG-6-30-15自身のX線の変動であることが解る。同様な時間変動はEXOSAT衛星のME検出器（1-20 keV観測用のArガス比例計数管と5-50keV観測用のXeガス比例計数管で構成されている）によりMCG-6-30-15に既に見つけられている（Pounds et al. 1986a）。しかし図4-(b)には図4-(a)中に(b)と示されて

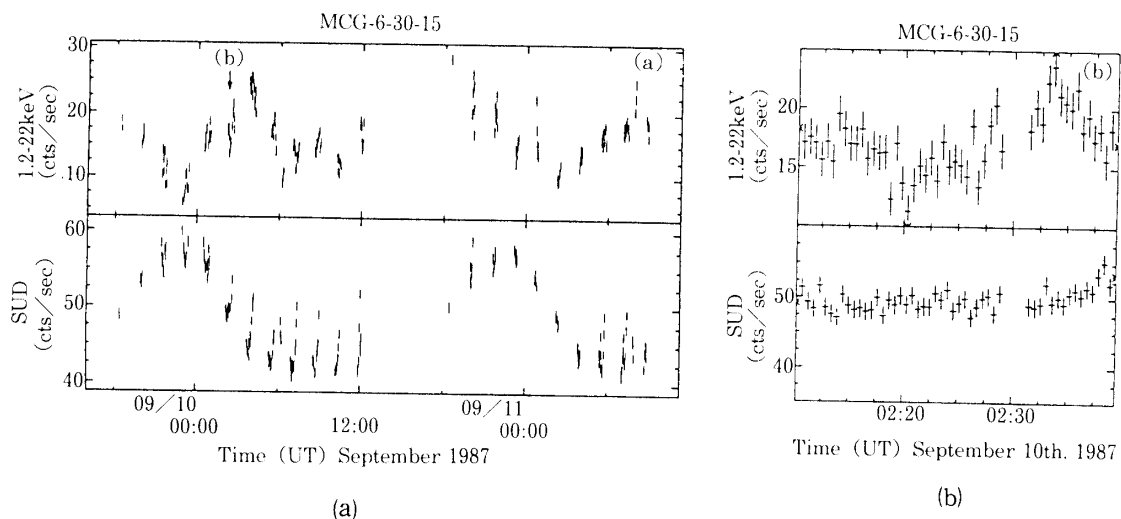


図4 (a)エネルギー範囲1.2-22keVにおけるMCG-6-30-15の光度曲線とSUDの計数を6台の検出器について足し合わせ、128秒の時間幅の強度として表したもの。
(b)(a)図中に(b)と示されている部分を拡大し32秒の時間幅の強度として表したもの。

いる部分の拡大を一例として示してあるが、約3～5分の時間で、約10cts/secから約20cts/secまで50%程度の変動が現れている。ここで1 mCrabの計数率は約7.5cts/sec（6台のLACによる計数率）に相当する。このように、より短い時間での変動が、低バックグラウンド化された大面積のLACにより、今回新しく見つけられた。

(b) X線スペクトル

個々の周回軌道から得られたスペクトルの内、第II章で述べた基準により、統計的に意味のあるものだけ、17個のスペクトルを解析に用いた。次項で述べるように、この天体のスペクトルは変動しており、強度が強くなるとスペクトルの傾きは急になる。従って、強度の異なるスペクトルを足し合わせて平均のスペクトルを作ると、傾きの異なるスペクトルの合成になって、にせの構造を持つスペクトルを作ってしまう恐れがある。この効果を避けるために各周回のスペクトルを3つの強度準位: low (10-14cts/sec), middle (14-18cts/sec),

	Low	Middle	High
強度範囲 (cts/sec) ¹⁾	10-14	14-18	18-24
平均強度 (cts/sec) ¹⁾	12.4	16.2	20.4
有効観測時間 (sec)	4350	7180	3574
エネルギー強度 (2-10keV) ²⁾	3.7	4.8	6.1

注:

- 1) 6台の検出器の合計計数
- 2) 吸収の効果を補正したエネルギー強度 $10^{-11} \text{erg cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$ 単位

表1 MCG-6-30-15の強度準位による分類

強度準位	C ¹⁾	α ²⁾	N _H ³⁾	χ^2_ν ⁴⁾
Low	21.4 ± 2.9	1.50 ± 0.07	0.6 ^{+0.4} _{-0.2}	2.7
Middle	32.7 ± 3.0	1.61 ± 0.05	0.4 ^{+0.2} _{-0.1}	3.5
High	53.0 ± 5.6	1.77 ± 0.06	0.5 ^{+0.3} _{-0.2}	1.5
平均	---	1.63 ± 0.03	0.5 ^{+0.1} _{-0.1}	--

注: 合わせたデータのエネルギー範囲は2-37keV, 誤差は、90%有意水準を表す。

- 1) 規格化定数 $10^{-3} \text{photons cm}^{-2} \text{sec}^{-1} \text{keV}^{-1}$ 単位
- 2) 光子スペクトル指数
- 3) コラム密度 10^{22}cm^{-2} 単位
- 4) 自由度 $\nu=20$

表2 MCG-6-30-15のスペクトルに、べき関数と一様な吸収物質のモデルを合わせたときの最適値

high (18-24cts/sec) に分類し、それぞれの準位で足し合わせ平均のスペクトルを作った。各準位の強度範囲、平均計数率、全有効時間、及び平均入射エネルギー強度を表 1 に与える。

強度準位毎の 3 つのスペクトルに対して 2-37keV の範囲で最適のモデルを求めた。まず最初に、次式で与えられるように、べき関数と、一様な物質による吸収項を含むモデルを使っ

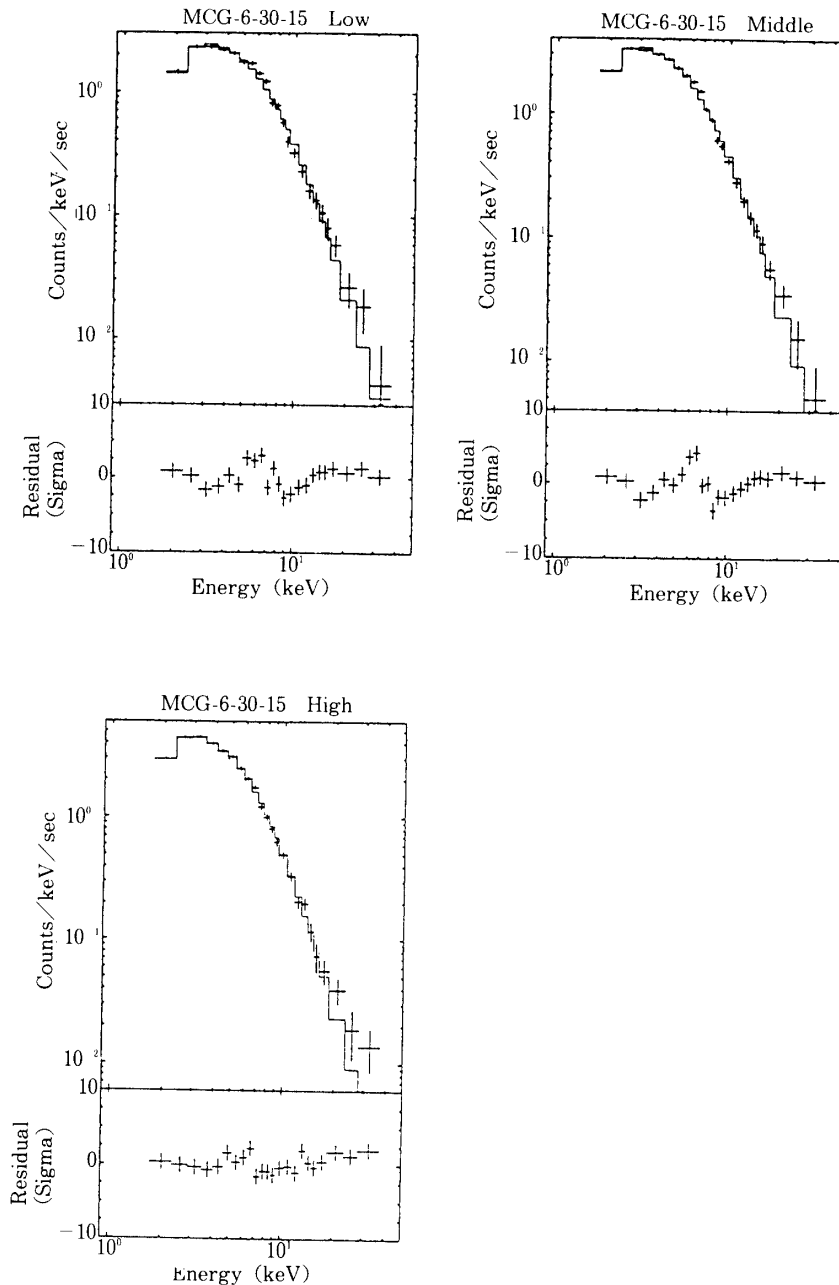


図 5 MCG-6-30-15 の各強度準位のスペクトルに対して、べき関数と一様な物質による吸収を使ったモデルを合わせたもの。データ点は十字で示されており、最適値でのモデルは実線で示されている。このモデルは十分にはデータに合っていない。残差の分布は標準偏差の単位で示されており、鉄の構造が存在することを表している。

てデータに合わせみた。この吸収物質の化学組成として、太陽組成値を使い、中性元素による吸収の断面積は (Morrison and McCammon 1983) によった。

$$F(E) = CE^{-\alpha} \cdot \exp(-\sigma(E) \cdot N_H) \text{ photons sec}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ keV}^{-1} \quad (3)$$

ここで規格化定数 C とスペクトル指数 α 、及び吸収のコラム密度 (column density) N_H を自由変数とした。データに合う最適のモデルの結果を図5に残差と共に示す。また、最適値は表2に χ^2 と共にまとめてある。各強度準位での χ^2 を見ると解るように、このモデルが受け入れられる確率は high 準位で10%以下、low 準位と middle 準位では0.1%以下である。実際、図5の残差の分布をみると、鉄の輝線と吸収端の存在が明らかである。従って、前のモデルに広がりを持たない鉄の輝線と吸収端を加えたモデルでデータに合わせ直した。このモデルは、

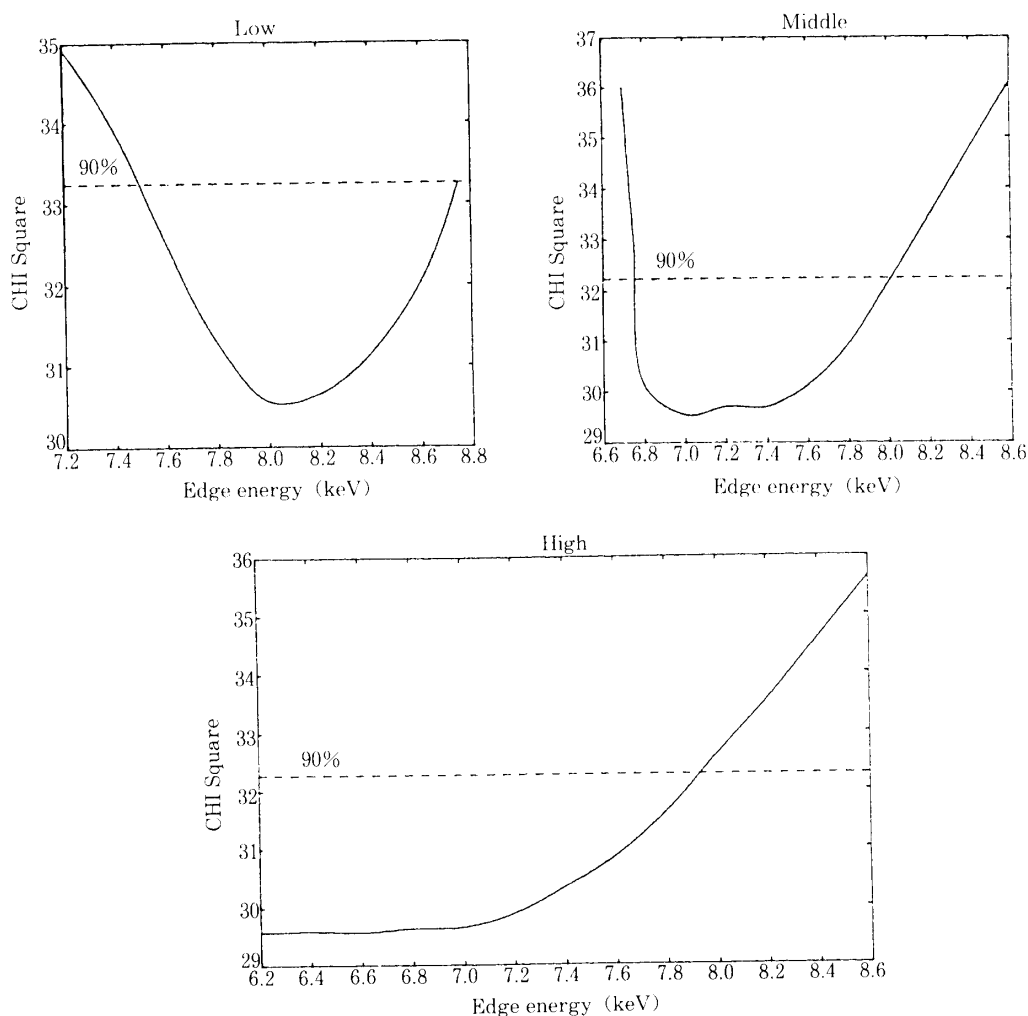


図6 MCG-6-30-15の各強度準位のスペクトルに対して、べき関数と一般的な物質による吸収、及び鉄の輝線と吸収端を使ったモデルで、吸収端エネルギーをいくつかの値に固定してデータに合わせ、そのそれぞれの値に対応する χ^2 を求めて、 χ^2 を吸収端エネルギーに対して表したもの。破線は1変数での有意水準を90%として $\chi^2_{\min} + 2.7$ の範囲を表す。

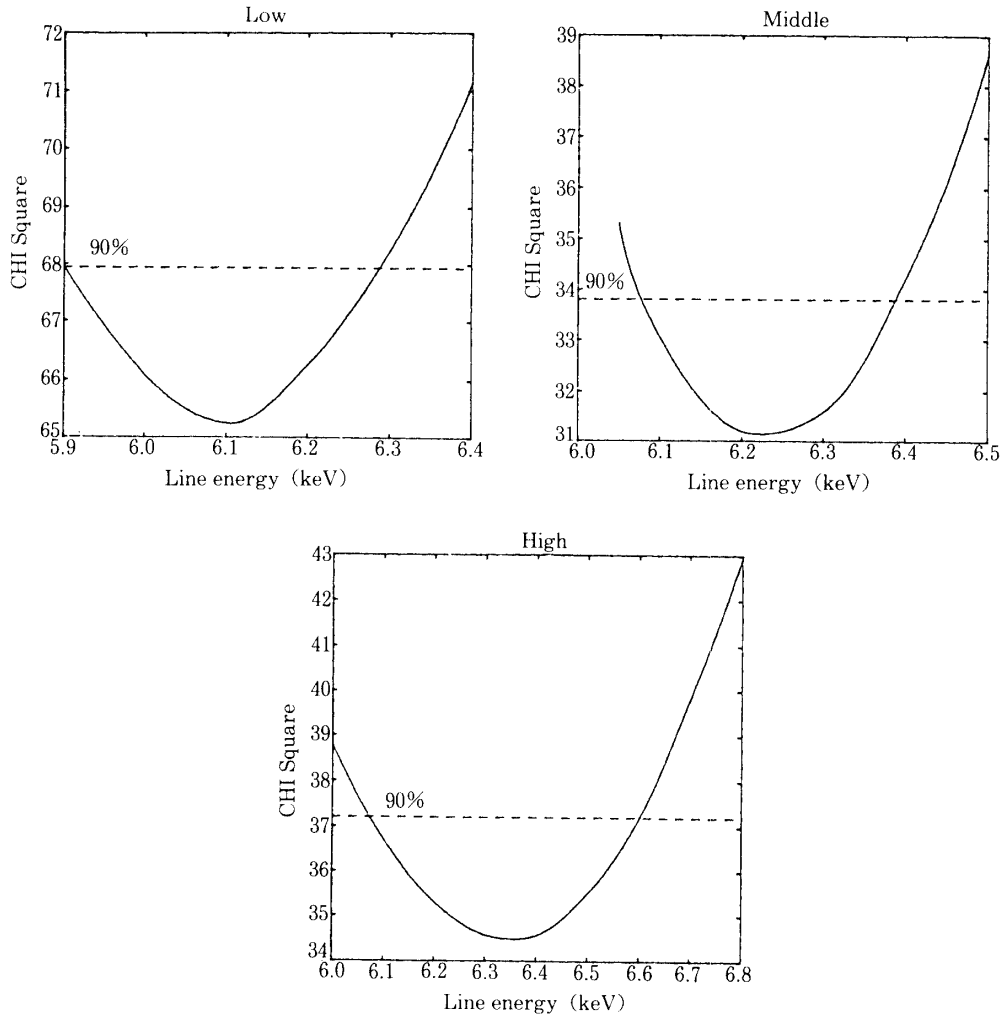


図7 MCG-6-30-15 の各強度準位のスペクトルに対して、べき関数と一様な物質による吸収、及び鉄の輝線と吸収端を使ったモデルで、鉄輝線のエネルギーをいくつかの値に固定してデータに合わせ、そのそれぞれの値に対応する χ^2 を求めて、 χ^2 を鉄輝線のエネルギーに対して表したもの。破線は1変数での有意水準を90%として $\chi^2_{\min} + 2.7$ の範囲を表す。

$$F(E) = (CE^{-\alpha} + \text{Line}) \cdot \exp(-\sigma(E) \cdot N_H) \cdot \exp(-\sigma_{\text{Fe}}(E) \cdot N_{\text{HFe}}) \quad \text{photons sec}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ keV}^{-1} \quad (4)$$

で与えられ、 N_{HFe} というのは鉄元素のコラム密度 N_{Fe} の水素での等価な値で、 $N_{\text{HFe}} = N_{\text{Fe}} \cdot 10^4 \cdot 48$ である。ここで $N_{\text{HFe}} = 0$ の場合、鉄の存在度が太陽組成値に一致することを意味する。また、

$$\text{Line} = I_{\text{Fe}} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \Delta E} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{E - E_{\text{line}}}{\Delta E} \right)^2 \right] \quad \text{photons sec}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ keV}^{-1} \quad (5)$$

であるが、今の場合広がりを持たない輝線ということで計算の都合上 $\Delta E = 0.1 \text{ keV}$ としてい

る。データに合わせるときの他の変数は、鉄輝線のエネルギー E_{line} 、輝線強度 I_{Fe} 、鉄の吸収端のエネルギー E_{edge} 、吸収端の吸収コラム密度 N_{HFe} 、および C 、 α 、 N_{H} で、全部で7個である。まず、鉄の吸収端のエネルギーを詳しく調べるために、7個の変数の内、 E_{edge} をいくつかの値に固定し、そのほかの変数は自由変数として各強度準位毎にデータに合わせた。

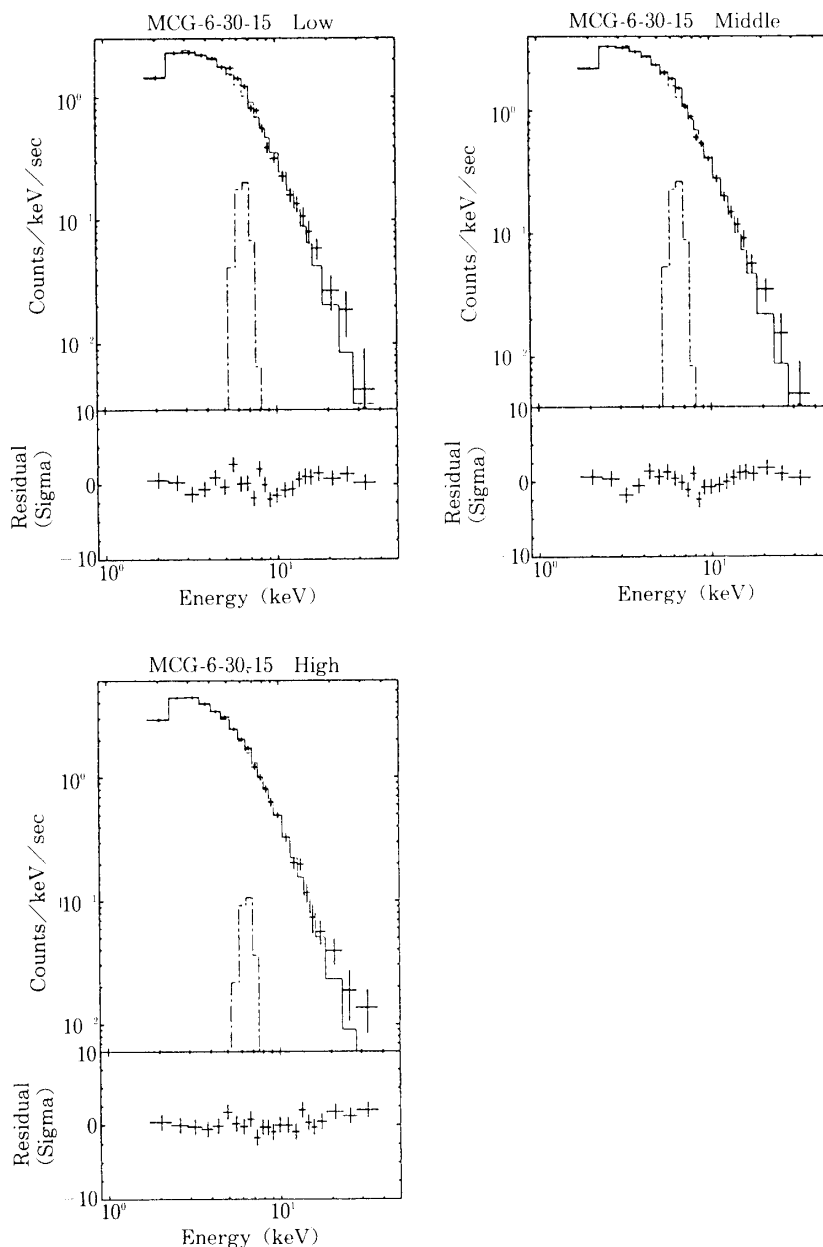


図8 MCG-6-30-15 の各強度準位のスペクトルに対して、べき関数と一様な物質による吸収、及び鉄の輝線と吸収端を使ったモデルでデータに合わせたもの。ただし、鉄輝線のエネルギーは $E_{\text{line}}=6.35\text{keV}$ に、輝線の幅は 0.1 keV に、また吸収端エネルギーは $E_{\text{edge}}=7.05\text{keV}$ に固定してある。データ点は十字で示されており、最適値でのモデルは実線で示されている。またモデルの各成分も示されており、破線はべき関数成分、一点鎖線は鉄輝線を表している。

図6には、それぞれの強度単位毎で、各吸収端エネルギーの値に対する χ^2 が、示されている。1変数での有意水準を90%として $\chi^2_{\min}+2.7$ の範囲をとると、3つの強度単位での吸収端エネルギーの荷重平均値は (7.35 ± 0.48) keVである。次に鉄輝線のエネルギーについても同様の操作を行った。その結果は図7に示されており、平均値は $E_{\text{line}}=(6.23\pm0.12)$ keVである。中性の鉄に対するそれらの値は、K-X線が6.4keVで、K-吸収端は7.1keVである。ま

強度単位	C ¹⁾	α ²⁾	N _H ³⁾	N _{HFe} ⁴⁾	I _{Fe} ⁵⁾	χ^2 ⁶⁾
Low	7.0 \pm 0.8	1.50 \pm 0.06	0.0 ^{+0.4} _{-0.0}	4.0 ^{+3.0} _{-2.0}	1.13 \pm 0.43	1.9
Middle	1.0 \pm 0.9	1.63 \pm 0.04	0.0 ^{+0.3} _{-0.0}	3.0 ^{+3.0} _{-2.0}	1.43 \pm 0.37	1.5
High	7.5 \pm 1.6	1.76 \pm 0.04	0.0 ^{+0.6} _{-0.0}	4.0 ^{+2.0} _{-1.5}	0.60 \pm 0.50	1.2
平均	---	1.66 \pm 0.02	0.0 ^{+0.25} _{-0.0}	3.8 ^{+1.4} _{-1.0}	1.13 \pm 0.25	--

注: 合わせたデータのエネルギー範囲は2-37keV, 誤差は90%有意水準を表す

1) 規格化定数 10^{-3} photons cm⁻² sec⁻¹ keV⁻¹ 単位

2) 光子スペクトル指数

3) コラム密度 10^{22} cm⁻² 単位

4) 鉄のコラム密度 $N_{\text{HFe}} = N_{\text{Fe}} \cdot 10^{4.48}$, 10^{22} cm⁻² 単位

5) 鉄の輝線強度 10^{-4} photons cm⁻¹ 単位

6) 自由度 $\nu=18$

表3 MCG-6-30-15のスペクトルに、べき関数と一様な吸収物質、及び鉄の輝線、鉄の吸収端を含むモデルで合わせたときの最適値

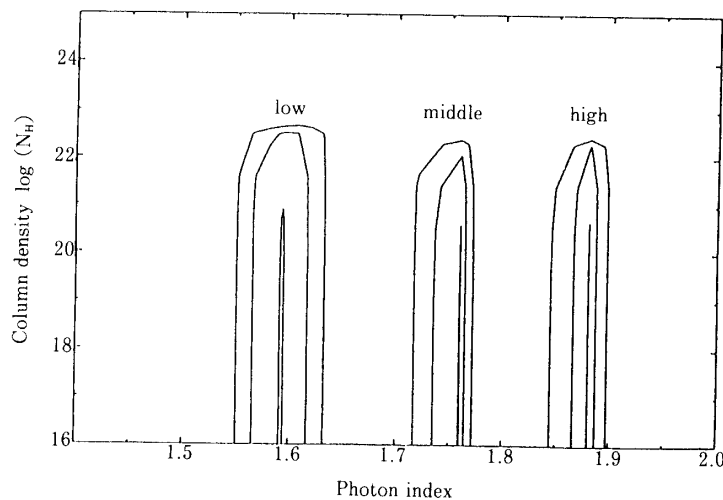


図9 MCG-6-30-15の各強度単位のスベクトルに対して、べき関数と一様な物質による吸収、及び鉄の輝線と吸収端を使ったモデルでデータに合わせたときの光子スペクトル指数 α と吸収コラム密度 N_H に対する有意水準の等高線図。各強度単位について3%, 60%, 90%の有意水準を表す。

た、この銀河の赤方偏移の大きさを表す z 値 ($z = \Delta \lambda / \lambda_0$) は 0.008 であるので、この銀河に対して期待される中性の鉄からの赤方偏移したエネルギーはそれぞれ 6.35 keV, 7.05 keV であり、データに合うモデルの最適値の結果はこれらの値と一致する。従って次に、この鉄の輝線と吸収端のエネルギーを、 z 値から期待されるこれらの値 ($E_{\text{line}} = 6.35 \text{ keV}$, $E_{\text{edge}} = 7.05 \text{ keV}$) に固定して同じモデルでデータに合わせた。その最適値でのモデルの結果を図 8 に、最適値を表 3 に与える。鉄のコラム密度の平均値が $N_{\text{HFe}} = 3.8 (+1.4, -1.2) \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ であるのに対して、低エネルギーでの吸収は上限値 $N_{\text{H}} < 0.25 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ が与えられるだけで、ゼロとしても矛盾しない。実際、図 9 には各強度準位のスペクトルで N_{H} と α の 2 つの自由変数に対して、モデルをデータに合わせたときの χ^2 の等高線図が示されており、 N_{H} に対して上限値だけしか与えられていないことが解る。また、表 2 と表 3 を比べると解るように、スペクトルの低エネルギーでの吸収は、鉄の L 殻による光電吸収のためにおよそ $N_{\text{HFe}}/10$ のコラム密度に相当するので、実際の鉄の光学的厚さはもっと増える。 L 殻での吸収を無視してデータに合わせると、これらの値の平均値は $N_{\text{HFe}} = 16.5 (+6.5, -2.5) \cdot 10^{23} \text{ cm}^{-2}$, $N_{\text{H}} = 0.25 (+0.38, -0.12) \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ となる。 $(N_{\text{H}} + N_{\text{HFe}})/N_{\text{H}}$ が太陽組成値を基準とした鉄の存在度を意味する。この結果、鉄の存在度は太陽組成値よりも一桁以上多いことになるが、このようなものは今までに他の天体でも観測されたことがない。これらは、中心核から放射される紫外線から X 線等の高エネルギーの連続成分によって、鉄よりも軽い原子が光電離されるためにその吸収率が減少する (Krolic and Kallman 1984) ということでも説明は出来る。しかし次の章で詳しく述べるように、鉄の吸収端前後のエネルギーにおける吸収率の比を説明するには、吸収物質は高電離状態になければならないのに、観測された鉄の輝線と吸収端のエネルギーは、低電離状態を示しているので、この可能性は除外できる。

別の方法として考えられるのは、一様な吸収物質に修正を加えることで、部分吸収モデル (partial covering model もしくは leaky absorber model) という名で呼ばれているものである。このモデルは、吸収物質が一様に分布していないために、X 線源の一部は吸収物質に覆われているが、残りの部分からの放射は吸収を受けずに通り抜けてしまうというモデルである。これを使って鉄の存在度を太陽組成値に固定したままでうまくデータに合わせることができるかどうかを調べた。このモデルは次式で表される。

$$F(E) = [CE^{-\alpha} \{1 + A \cdot \exp(-\sigma(E) \cdot N_{\text{Hcov}})\} + \text{Line}] \cdot \exp(-\sigma(E) \cdot N_{\text{H}}) \quad (6)$$

photons $\text{cm}^{-2} \text{ sec}^{-1} \text{ keV}^{-1}$

ここで、

$$A = f_{\text{cov}} / (1 - f_{\text{cov}})$$

f_{cov} : 吸収体の隠ぺい率

である。モデルをデータに合わせるときの変数は、全ての吸収を受ける前の連続成分のスペクトル指数 α , 吸収を受けない成分の規格化定数 C , 吸収を受けない鉄の輝線強度 I_{Fe} , X 線源の一部だけを覆う吸収物質のコラム密度 N_{Hcov} , それによって覆われている X 線源の割合 f_{cov} , これら全ての成分を一様に覆うガスのコラム密度 N_{H} の 6 個である。最適値でのモデルを図 10 に、また変数の最適値を表 4 に示す。それぞれの χ^2 の値をみると、このモデルが十分にデータに合っていることが解る。さらに、前のモデルで合わせたときの χ^2 と今

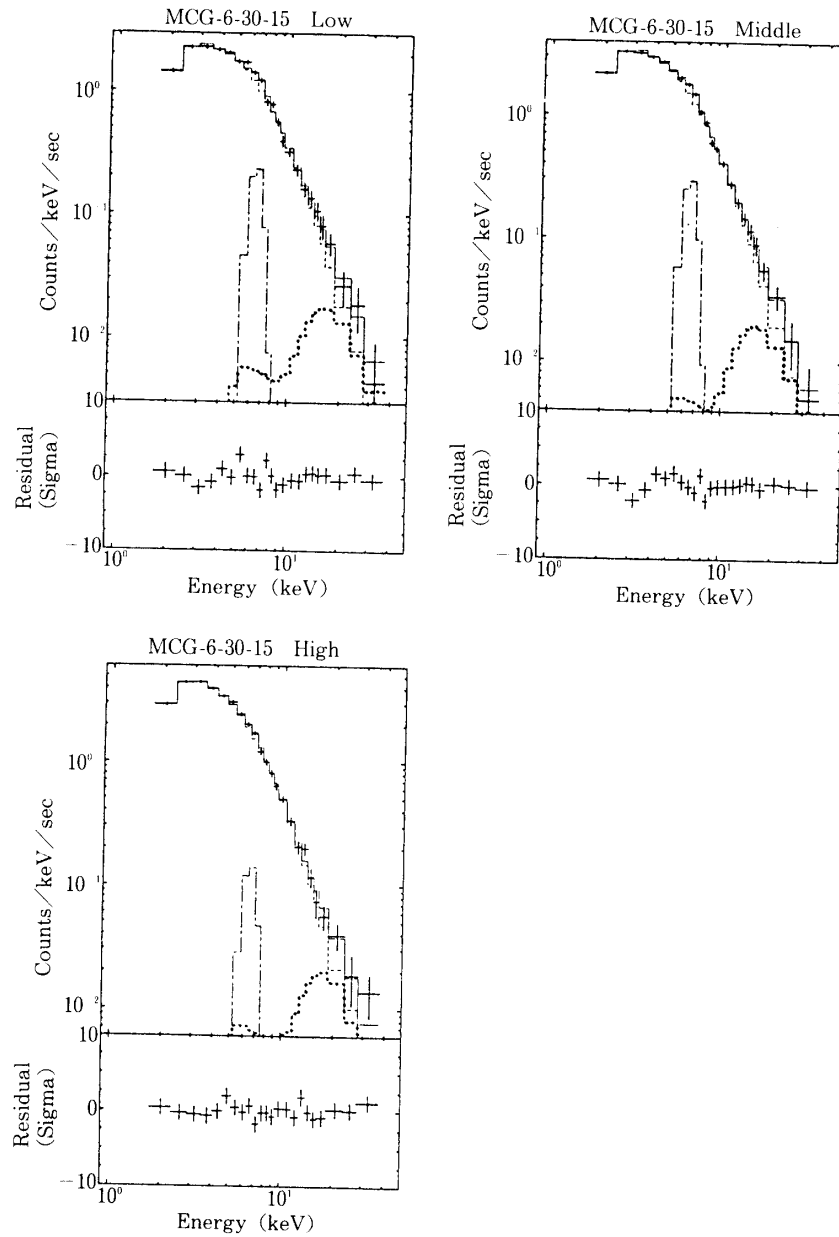


図10 MCG-6-30-15の各強度準位のスペクトルに対して、部分吸収モデルでデータに合わせたもの。固定した変数は、鉄輝線のエネルギー ($E_{\text{line}}=6.35\text{keV}$)、輝線幅 (0.1keV)、吸収端エネルギー ($E_{\text{edge}}=7.05\text{keV}$)、及び鉄の存在度(太陽組成値)である。データ点は十字で示されており、最適値でのモデルは実線で示されている。またモデルの各成分も示されており、破線は吸収を受けない成分、点線は吸収を受けた成分、一点鎖線は鉄輝線を表している。

回のものとは比べても、Low, Middle, Highの準位に対して、それぞれ95%, 99%, 99%の有意性で改善されている。この結果によると、X線源の約60%の部分が、非常に高いコラム密度 $N_{\text{Hcov}} = 6 (+4, -2) \cdot 10^{24}\text{cm}^{-2}$ を持つ吸収体で覆われていることを示している。図10には最適値のモデルとその各成分も示されており、このことがはっきりと解る。 N_{Hcov} で

強度準位	$C^{1)}$	$\alpha^{2)}$	$N_H^{3)}$	$N_{H_{cov}}^{3)}$	$I_{Fe}^{4)}$	$f_{cov}^{5)}$	$\chi^2_{\nu}^{6)}$
Low	8.1 ± 1.5	1.60 ± 0.10	$0.7^{+0.5}_{-0.3}$	600^{+800}_{-300}	1.26 ± 0.47	0.64 ± 0.24	1.6
Middle	12.2 ± 1.5	1.70 ± 0.07	$0.5^{+0.3}_{-0.2}$	550^{+450}_{-250}	1.60 ± 0.40	0.60 ± 0.22	1.1
High	19.6 ± 2.4	1.84 ± 0.07	$0.6^{+0.4}_{-0.2}$	1000^{+2000}_{-800}	0.77 ± 0.53	0.70 ± 0.20	0.9
平均	---	1.74 ± 0.04	$0.57^{+0.22}_{-0.13}$	600^{+400}_{-200}	1.29 ± 0.26	0.65 ± 0.13	--

注: 合わせたデータのエネルギー範囲は 2-37keV, 誤差は90%有意水準を表す

- 1) 吸収を受けない成分の規格化定数 $10^{-3} \text{ photons cm}^{-2} \text{ sec}^{-1} \text{ keV}^{-1}$ 単位
- 2) 光子スペクトル指数
- 3) コラム密度 10^{22} cm^{-2} 単位
- 4) 吸収を受けない鉄の輝線強度 $10^{-4} \text{ Photons cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ 単位
- 5) 吸収体の隠ぺい率
- 6) 自由度 $\nu = 17$

表4 MCG-6-30-15のスペクトルに, 部分吸収モデルで合わせたときの最適値

強度準位	$C^{1)}$	$\alpha^{2)}$	$N_H^{3)}$	$N_{Hc}^{3)}$	$I_{Fe}^{4)}$	$\mu^{5)}$	$\chi^2_{\nu}^{6)}$
Low	24.3 ± 7.0	1.60 ± 0.10	$0.7^{+0.5}_{-0.3}$	500^{+350}_{-200}	1.26 ± 0.46	1.1 ± 0.3	1.6
Middle	34.7 ± 8.0	1.71 ± 0.07	$0.5^{+0.3}_{-0.2}$	500^{+250}_{-200}	1.60 ± 0.40	1.0 ± 0.2	1.1
High	51.3 ± 1.0	1.82 ± 0.07	$0.6^{+0.2}_{-0.2}$	600^{+700}_{-300}	0.77 ± 0.50	1.0 ± 0.4	1.0
平均	---	1.74 ± 0.04	$0.58^{+0.18}_{-0.13}$	500^{+200}_{-100}	1.29 ± 0.25	1.0 ± 0.15	--

注: 合わせたデータのエネルギー範囲は 2-37keV, 誤差は90%有意水準を表す

- 1) 中心核から放射されている正味の成分の規格化定数 $10^{-3} \text{ photons cm}^{-2} \text{ sec}^{-1} \text{ keV}^{-1}$ 単位
- 2) 光子スペクトル指数
- 3) コラム密度 10^{22} cm^{-2} 単位
- 4) 吸収を受けない鉄の輝線強度 $10^{-4} \text{ photons cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ 単位
- 5) 視線にある塊の平均の数
- 6) 自由度 $\nu = 17$

表5 MCG-6-30-15のスペクトルに, ポアソン分布吸収体モデルで合わせたときの最適値

覆われている部分の成分は, 15keV 以上のエネルギー領域では吸収を受けない成分と同程度の強度になっている。

より複雑な部分吸収モデルはポアソン分布吸収体モデル (Poissonian absorber model) である。これは吸収物質が雲状の塊により形成されているときには, より適したモデルである。この場合, 視線にある塊の数によって X 線源の覆われる部分の割合 (付録 A) が決

まり, その塊の数はポアソン分布に従う. このモデルにおける変数は, 視線上の平均の塊の数 μ , 1 つの塊のコラム密度 N_{HC} , 全ての吸収を受ける前の X 線源自身の連続成分の規格化定数 C , 及び, 単純な部分吸収モデルで使われたのと同じ α , I_{Fe} , N_{H} である. このモデル

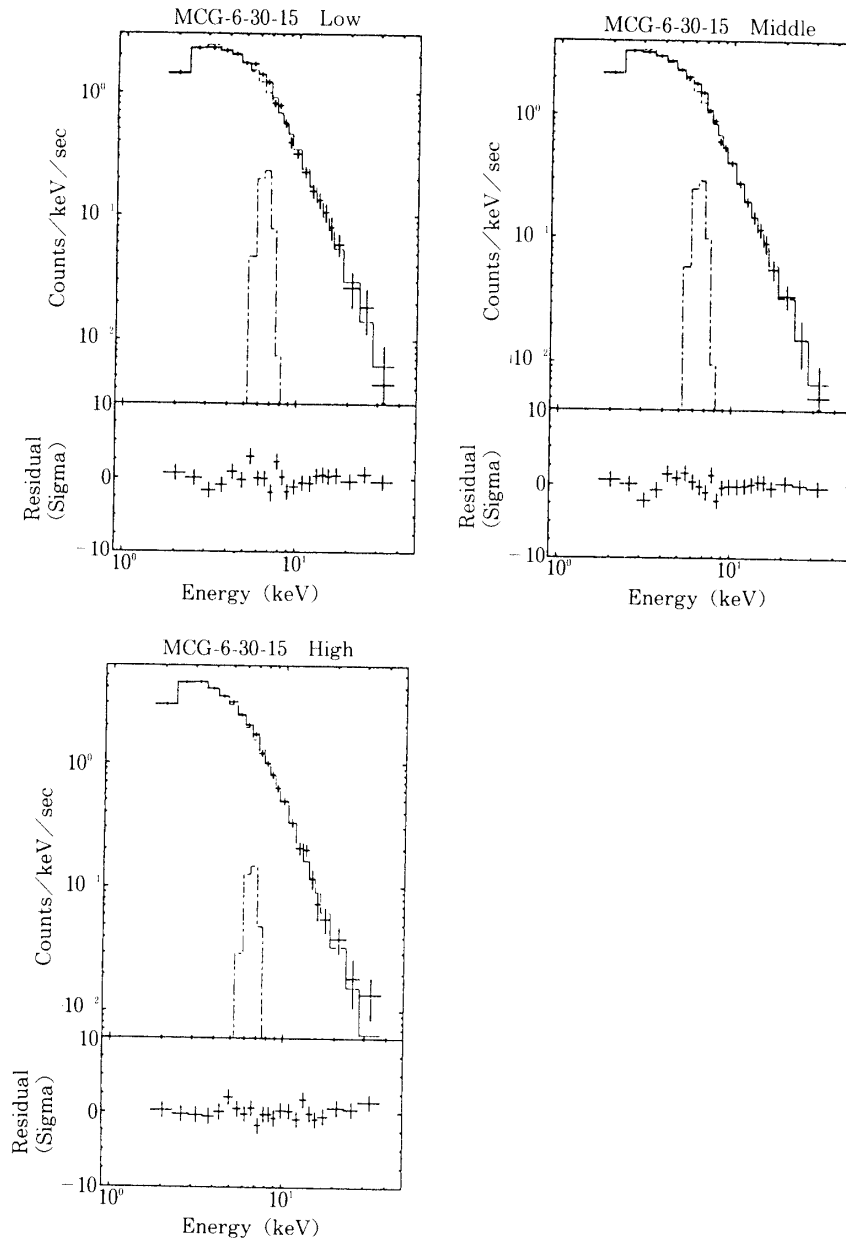


図11 MCG-6-30-15 の各強度単位のスペクトルに対して, ポアソン分布吸収体モデルでデータに合わせたもの. 固定した変数は, 鉄輝線のエネルギー ($E_{\text{line}}=6.35\text{keV}$), 輝線幅 (0.1keV), 吸収端エネルギー ($E_{\text{edge}}=7.05\text{keV}$), および鉄の存在度 (太陽組成値) である. データ点は十字で示されており, 最適値でのモデルは実線で示されている. またモデルの各成分も示されており, 破線はポアソン分布吸収体によって吸収を受けたべき関数成分, 一点鎖線は鉄輝線を表している.

をデータに合わせた結果を表5と図11に示す. 部分吸収モデルによる結果(表4, 図10)と比べると, どちらのモデルも MCG-6-30-15 の X 線スペクトルをよく再現しているのが解る. 特に吸収物質についてみると, 1つの塊のコラム密度が $N_{\text{HC}} = 5(+2, -1) \cdot 10^{24} \text{cm}^{-2}$ で

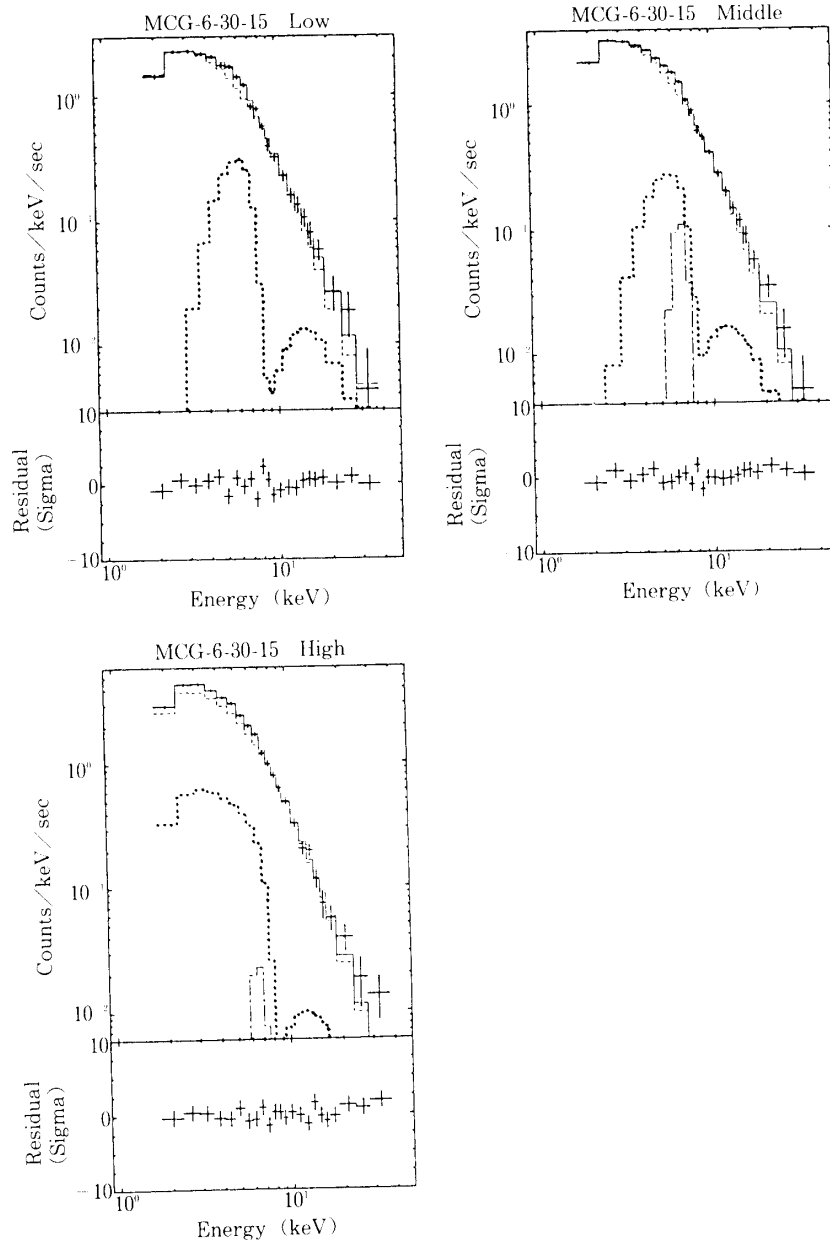


図12 MCG-6-30-15 の各強度準位のスペクトルに対して, 鉄の存在度も自由変数にして部分吸収モデルでデータに合わせたもの. ただし, 鉄の吸収には K 殻による吸収だけを使っている. データ点は十字で示されており, 最適値でのモデルは実線で示されている. またモデルの各成分も示されており, 破線は吸収を受けない成分, 点線は吸収を受けた成分, 一点鎖線は鉄輝線を表している. 吸収を受けた成分が幅広い輝線の形になっているのが解る.

強度準位	$C^{1)}$	$\alpha^{2)}$	$N_{HFe}^{3)}$	$N_{Hcov}^{3)}$	$I_{Fe}^{4)}$	$f_{cov}^{5)}$	$\chi^2_{\nu}^{6)}$
Low	6.1 ± 0.3	1.48 ± 0.02	610^{+520}_{-280}	36^{+26}_{-15}	0.00 ± 1.43	0.37 ± 0.09	1.3
Middle	10.1 ± 0.7	1.63 ± 0.05	360^{+580}_{-220}	26^{+47}_{-17}	0.60 ± 0.80	0.25 ± 0.18	0.9
High	11.7 ± 1.3	1.62 ± 0.06	450^{+1000}_{-310}	$1.0^{+150}_{-1.0}$	0.13 ± 0.39	0.16 ± 0.06	1.0
平均	---	1.51 ± 0.02	500^{+310}_{-190}	32^{+20}_{-12}	0.21 ± 0.34	0.22 ± 0.05	--

注: 合わせたデータのエネルギー範囲は 2-37keV, 誤差は90%有意水準を表す

1) 吸収を受けない成分の規格化定数 $10^{-3} \text{ photons cm}^{-2} \text{ sec}^{-1} \text{ keV}^{-1}$ 単位

2) 光子スペクトル指数

3) コラム密度 10^{22} cm^{-2} 単位

4) 吸収を受けない鉄の輝線強度 $10^{-4} \text{ photons cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ 単位

5) 吸収体の隠ぺい率

6) 自由度 $\nu=17$

表6 MCG-6-30-15 のスペクトルに, 部分吸収モデルでデータに合わせたときの最適値. N_H は固定で, 鉄による吸収は K 殻吸収のみ.

あり, 1 つ以上の塊によって覆われる X 線源の割合が $1 - \exp(-\mu) = 0.63$ であるというのは, 前のモデルで得られたコラム密度や吸収体の隠ぺい率 f_{cov} と一致する.

次に, 部分吸収モデルで, 全体を覆う様な吸収物質のコラム密度 N_H は固定して, 吸収を受ける成分について, 鉄の光電吸収には K-吸収端だけを使い, 鉄の存在度を自由変数としてデータに合うモデルを求めた. その結果は表 6, 図12に示されている. 全てのスペクトルは $N_{HFe} = 5 (+3, -2) \cdot 10^{24} \text{ cm}^{-2}$, $N_{Hcov} = 3.2 (+2.0, -1.2) \cdot 10^{23} \text{ cm}^{-2}$ を持つ物質によって, X 線源の22%が覆われているというモデルで説明できる. しかしこのモデルは, 次のような理由により適当ではないと思われる.

- 1) 鉄の吸収端より低いエネルギーでは, 吸収を受ける成分が, 6 keV を中心とした幅広い輝線の形になっているのに, このモデルで得られた鉄の輝線強度はゼロとしてよい.
- 2) さきに述べたように, このような鉄の存在度が太陽組成値に比べて多いのは, 鉄の吸収端エネルギーが 8.5keV 辺りに現れるような, 高電離物質によって説明できるが, 鉄の吸収端エネルギーを自由変数にしてデータに合う最適値を求めると, その平均値 $(7.0 \pm 0.3) \text{ keV}$ であった.

1) から, 鉄の輝線は幅広いという可能性が出てくる. そこで, 鉄に太陽組成値を使い部分吸収モデルで, 鉄輝線の幅を自由変数にしてデータに合わせると, 表 7, 図13のような結果を得た. low 準位のスペクトルだけが, χ^2 の改善が有意であり (F 検定で98%の有意性), 他のものには有意な改善はみられない. 輝線の存在が有意な low 準位と middle 準位の輝線幅の平均値は $0.7 \pm 0.3 \text{ keV}$ であり, ブラックホールの近くでケプラー運動をする物質に期待されるドップラー効果とも矛盾しない. これについては, 次の章でも述べる.

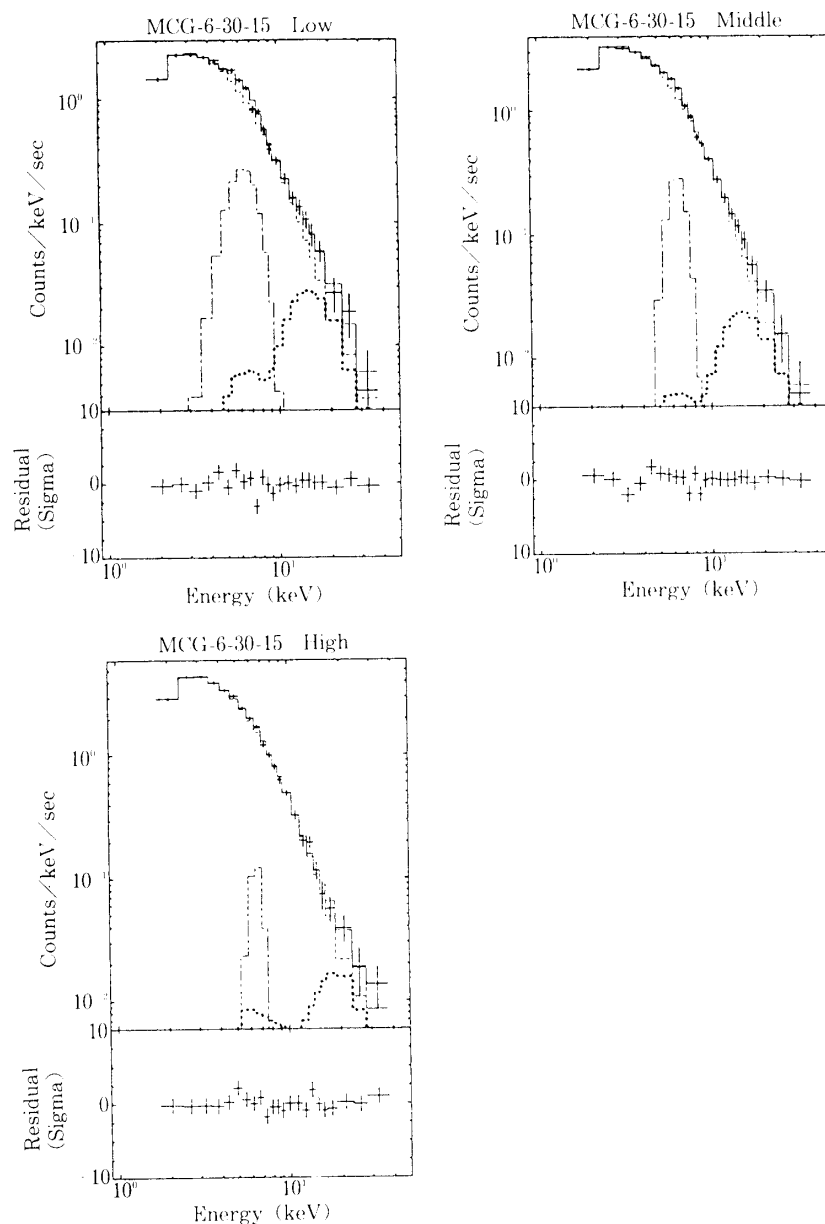


図13 MCG-6-30-15 の各強度準位のスペクトルに対して、鉄の存在度は太陽組成値のままで、鉄の輝線幅を自由変数にして部分吸収モデルでデータに合わせたもの。ただし鉄の吸収には K 殻による吸収だけを使っている。データ点は十字で示されており、最適値のモデルは実線で示されている。またモデルの各成分も示されており、破線は吸収を受けない成分、点線は吸収を受けた成分、一点鎖線は鉄輝線を表している。

(c) スペクトル変動

強度準位毎のスペクトルを相互に比べると、強度が増すとスペクトルの傾きが急になっている。図14には、それぞれのスペクトル間で各エネルギーチャンネル毎の比をとったものが示されており、この傾向が明らかに見えている。すなわち、強度の高い時のスペクトルは、

強度準位	$C^{1)}$	$\alpha^{2)}$	$N_{Hcov}^{3)}$	$I_{Fe}^{4)}$	$W_{Fe}^{5)}$	$f_{cov}^{6)}$	$\chi^2_{\nu}^{27)}$
Low	8.0 ± 1.0	1.63 ± 0.12	450^{+350}_{-200}	3.20 ± 1.96	1.06 ± 0.44	0.65 ± 0.15	1.3
Middle	12.5 ± 0.7	1.72 ± 0.04	490^{+400}_{-220}	2.10 ± 0.80	0.49 ± 0.34	0.59 ± 0.18	1.2
High	18.1 ± 0.8	1.79 ± 0.03	1000^{+2000}_{-670}	0.24 ± 0.57	0.00 ± 0.04	0.73 ± 0.11	1.0
平均	---	1.76 ± 0.02	520^{+240}_{-170}	0.99 ± 0.45	0.02 ± 0.04	0.68 ± 0.08	--

注: 合わせたデータのエネルギー範囲は 2-37keV, 誤差は90%有意水準を表す

1) 吸収を受けない成分の規格化定数 $10^{-3} \text{ photons cm}^{-2} \text{ sec}^{-1} \text{ keV}^{-1}$ 単位

2) 光子スペクトル指数

3) コラム密度 10^{22} cm^{-2} 単位

4) 吸収を受けない鉄の輝線強度 $10^{-4} \text{ photons cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ 単位

5) 鉄の輝線幅 keV 単位

6) 吸収体の隠ぺい率

7) 自由度 $\nu=17$

表7 MCG-6-30-15 のスペクトルに, 部分吸収モデルで合わせたときの最適値. 鉄輝線の強度と幅は自由変数とした.

強度の低い時のスペクトルにくらべて傾きが急である. 特に High/Low では一定値に対して換算 χ^2 が $\chi^2_{\nu}=5.5$ ($\nu=22$) であることから, 高い確率でスペクトル変動を示唆している. 以下では, このようなスペクトル変動が, スペクトル指数 α の変動によるものであって, 他の変数との関係でみかけ上導入されたものではないことを確かめる.

① べき関数に鉄の輝線と吸収端を含むモデル

前の節で述べたように, 3つの各スペクトルに対してべき関数に鉄の輝線と吸収端を加えたモデルをデータに合わせた時の結果 (図8, 表3) を見ると, スペクトル指数 α が, 強度と相関して変化しているのが解る. 2種類の吸収のコラム密度は一定であるとして良く, それぞれの平均値は $N_{HFe}=3.8 (+1.4, -1.0) \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-2}$, $N_H=0$ ($N_H < 0.25 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-2}$) であった.

これらの結果は, 17個の周回毎のスペクトル解析によっても確かめられる. 各周回の 2-37keV のスペクトルに対し鉄の輝線と吸収端を, エネルギーについてはそれぞれ 6.35keV, 7.05keV に固定し, 輝線強度 I_{Fe} と吸収端のコラム密度 N_{HFe} については強度準位毎の最適モデルで得られた値の平均値 (表3) に固定して, C , α , N_H を自由変数としたべき関数のモデルでデータに合わせた. 1周回毎のスペクトルは, 足し合わせたものに比べると統計が低いために, このモデルでもうまくデータに合う. この結果を見やすくするために, 図15, 図16にそれぞれ, 2-10keV の計数率と α , 及び 2-10keV の計数率と N_H の間の相関図を示す. スペクトル指数と計数率の間では, スペクトル指数が一定であるとする, 一定値 (平均値) に対して $\chi^2_{\nu}=1.7$ ($\nu=16$) となり, 96%以上の有意性でスペクトル指数が変化しているといえる. さらに相関係数は $r=0.67$ であって, このような値が無相関変数から確率的に生

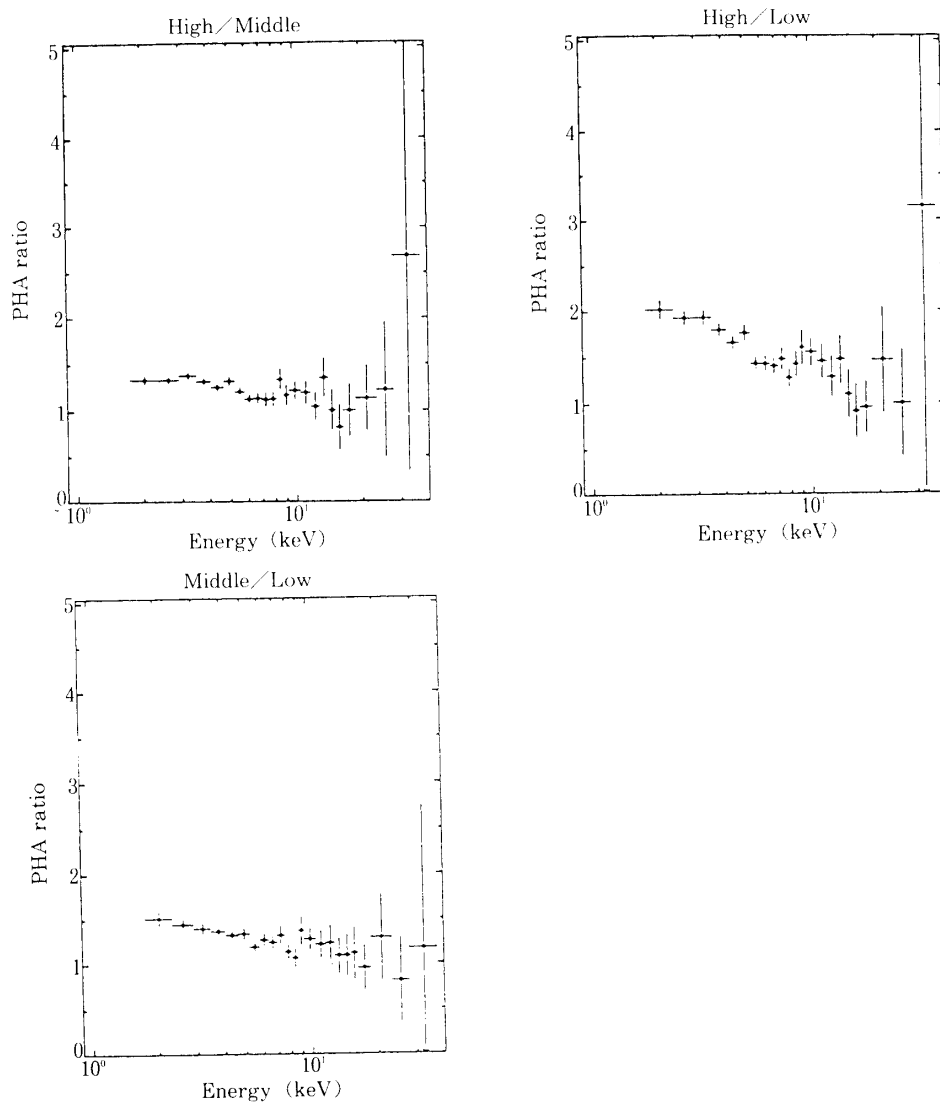


図14 MCG-6-30-15 の各強度準位のスペクトル間で、各エネルギーチャンネル毎に比をとったもの。X線強度が増すとスペクトルの傾きが急になっているのが解る。

じる確率は $P(|r| > 0.67) = 3.5 \cdot 10^{-3}$ である。従ってスペクトル指数が計数率と相関していることは0.35%の危険率でいえる。これに対して N_H と計数率との間では、 N_H が一定であるとして平均値に対して χ^2 を求めると、 $\chi^2_\nu = 0.1$ ($\nu = 16$) となるので99%以上の有意性で一定であるといえる。また相関係数は $r = -0.01$, $P(|r| > 0.01) = 0.97$ であり、 N_H と計数率との相関が認められない。

つぎに、それぞれの周回毎のスペクトルに対して、二種類の自由変数の組でモデルをデータに合わせた。一つは、 α と C を自由変数として、 N_H を平均値に固定したもの、もう一つは N_H と C を自由変数として、 α を平均値 1.66 に固定したものである。どちらの場合でも、鉄の存在度、吸収端エネルギー、鉄輝線のエネルギー、輝線強度はその平均値に固定して行っ

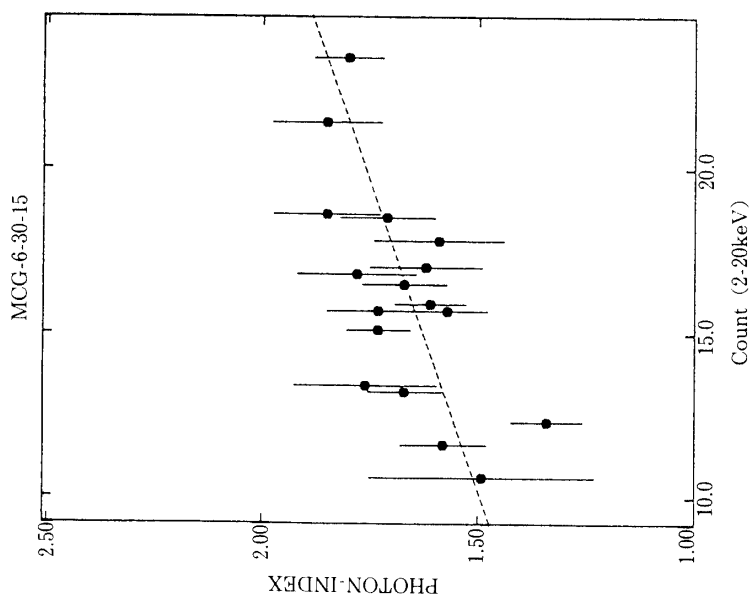


図15 MCG-6-30-15 の17個の周回毎のスペクトルに対して、べき関数と一様な物質による吸収、及び鉄の輝線と吸収端を使ったモデルでデータに合わせ、その結果から2-20keVのX線強度とスペクトル指数 α との間の相関図を示したもの。破線は最小自乗法で求めた一次式を表す。モデルをデータに合わせたときの自由変数は、規格化定数C、スペクトル指数 α 、吸収のコラム密度 N_H だけで、他の変数は強度単位毎のスペクトルに対してモデルを合わせたときの各最適値の平均値に固定した。

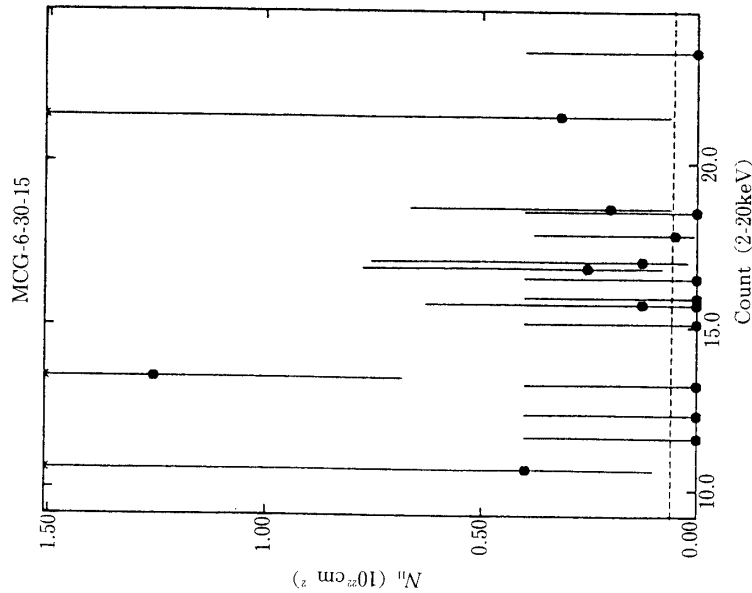


図16 MCG-6-30-15 の17個の周回毎のスペクトルにする最適値でモデルから2-20keVのX線強度と吸収のコラム密度 N_H との間の相関図を示したもの。破線は最小自乗法で求めた一次式を表す。モデルをデータに合わせたときの自由変数は、規格化定数C、スペクトル指数 α 、吸収のコラム密度 N_H だけ。

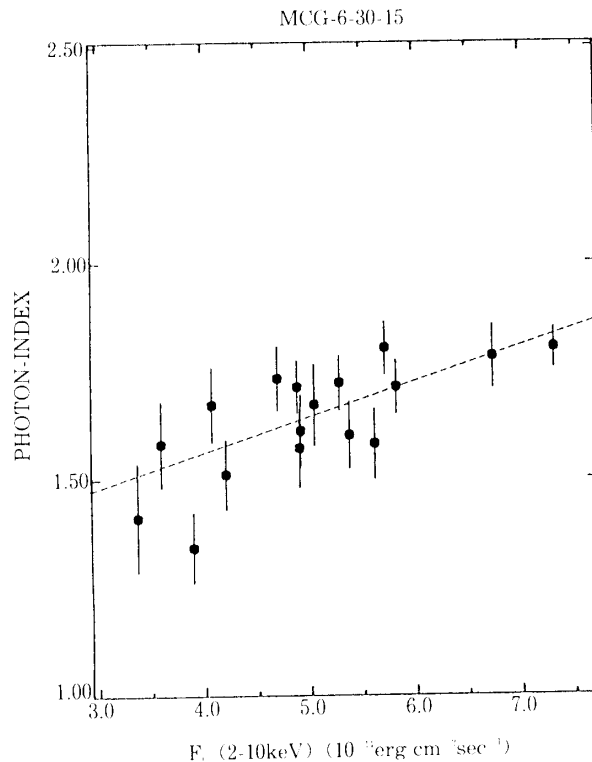


図17 MCG-6-30-15の17個の周回毎のスペクトルに対して、吸収のコラム密度もその平均値 ($N_H = 6 \cdot 10^{21}$) に固定してデータに合わせた結果から、吸収の効果を補正した2-10keVのX線エネルギー強度とスペクトル指数 α との間の相関図を示したもの。破線は最小自乗法で求めた一次式を表す。

た。各周回の χ^2 を比較するために、 χ^2 が十分に改善されていると判断するときの最低基準を $\Delta \chi^2 = 1$ とすると、 α を自由変数とした方が χ^2 が良いものは12個、 N_H を自由変数とした方が χ^2 が良いものは1個、 χ^2 に有意な違いのないもの4個であった。ここでもまた、観測されたスペクトルの変化はスペクトル指数の変化によることが示されている。

また、各強度準位のスペクトルで N_H と α の2つの自由変数に対する χ^2 の等高線図 (図9) を見ると、 α が N_H と相関していないことが解る。従って、図17には N_H を平均値に固定してデータをモデルに合わせたときの最適値をもとに、 α と吸収の効果を補正した2-10keVのエネルギー強度 F_c ($10^{-11} \text{erg cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$ 単位) の間の相関図が示されているが、これが N_H 固定による見かけの相関ではないといえる。相関計数は $r=0.74$ で、無相関なものから確率的に生じる確率は $P(|r| > 0.74) = 7 \cdot 10^{-4}$ である。また一定値 (平均値) に対する換算 χ^2 は $\chi_\nu^2 = 2.9$ ($\nu = 16$) であるが、最小自乗法により求めた一次式

$$\alpha = 1.23 (\pm 0.09) + 0.081 (\pm 0.016) \cdot F_c \quad (7)$$

(括弧内は1 σ 誤差)

に対しては、 $\chi_\nu^2 = 1.4$ ($\nu = 15$) である。F検定 (Bevington 1969) によると、この χ^2 の改善は99%の有意性となる。

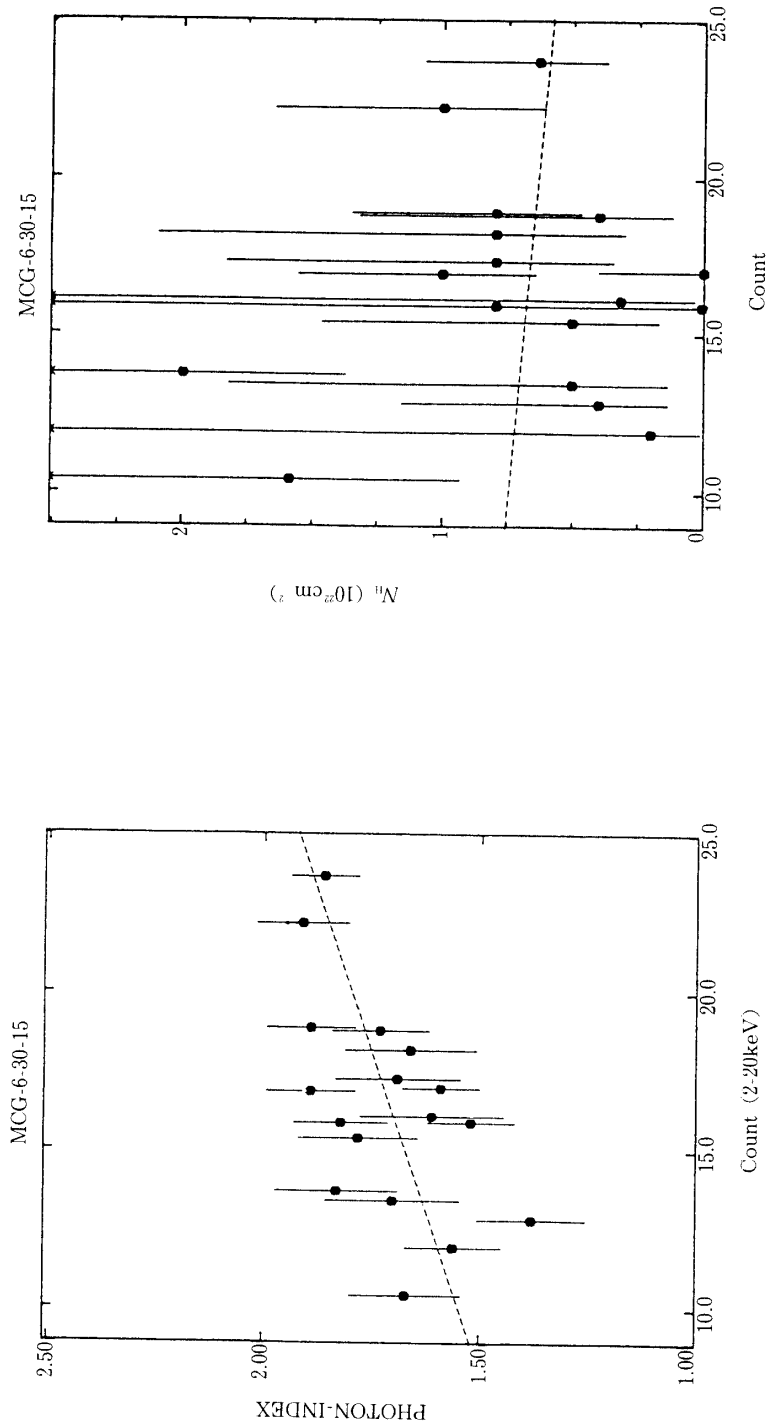


図18 MCG-6-30-15 の17個の周回毎のスペクトルに対して、部分吸収モデルでデータに合わせ、その結果から2-20keV の X 線強度とスペクトル指数 α との間の相関図を示したもの。破線は最小自乗法で求めた一次式を表す。モデルを データに合わせたときの自由変数は、規格化定数 C、スペクトル指数 α 、吸収のコラム密度 N_H だけで、他の変数は強度単位毎のスペクトルに対してモデルをデータに合わせたときの最適値の平均値に固定した。

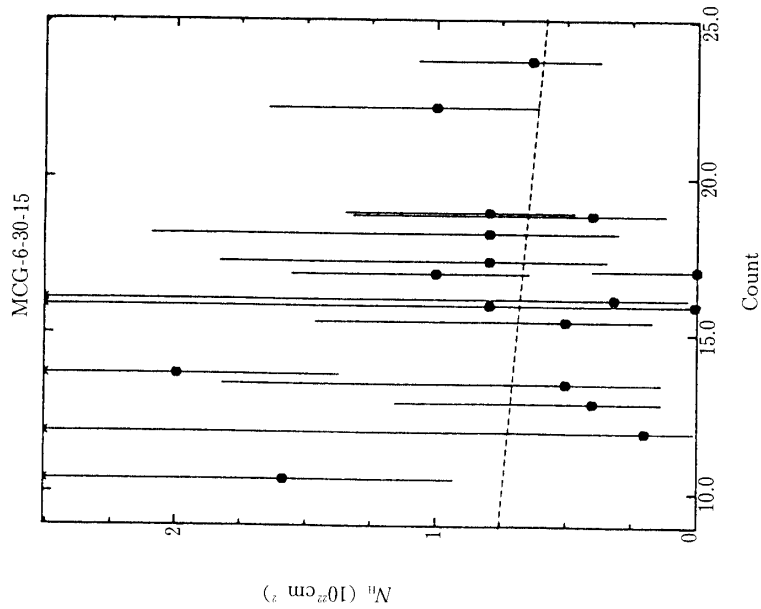


図19 MCG-6-30-15の17個の周回毎のスペクトルに対して部分吸収モデルで合わせたときの結果から2-20keV の X 線強度と吸収のコラム密度 N_H との間の相関図を示したもの。破線は最小自乗法で求めた一次式を表す。モデルをデータに合わせたときの自由変数は、規格化定数 C、スペクトル指数 α 、吸収のコラム密度 N_H だけ。

② 部分吸収モデル

α の強度依存性がこのモデルにおける吸収体の隠ぺい率 f_{cov} や、X線源の一部だけを覆うコラム密度 N_{Hcov} によらないことは、次のような理由により解る。図14に示されているエネルギーチャンネル毎のスペクトルの比によると、スペクトルの変動は10keV以下のエネルギー領域で顕著に見られるが、図10によると吸収を受けた成分の寄与は、この領域では1%以下なので無視できる。さらに、部分吸収モデルをデータに合わせたときの結果（表4、図10）をみても、強度と共に有意な変動を見せている変数はスペクトル指数だけである。

次に、 α の強度依存性が全体を覆う様な吸収物質のコラム密度 N_{H} によらないことを確かめるために、17個の周回毎のスペクトルに対しても、 N_{Hcov} と f_{cov} を強度準位毎のスペクトルで求めた値の平均値（ $N_{\text{Hcov}} = 6 \cdot 10^{24}$, $f_{\text{cov}} = 0.65$ ）に固定し、部分吸収モデルでデータに合わせた。この結果から2-10keVの計数率と α 、及び計数率と N_{H} の間の相関を、それぞれ図18、図19に示す。やはりスペクトル指数だけが2-10keVの計数率と相関しており、相関計数は $r = 0.61$, $P(|r| > 0.61) = 0.01$ である。これに対して N_{H} と計数率の間では、 $r = -0.08$, $P(|r| > 0.08) = 0.76$ であり、相関が認められない。

従って次に、個々の周回のスペクトルに対して、 N_{H} をその平均値に固定し C と α だけを

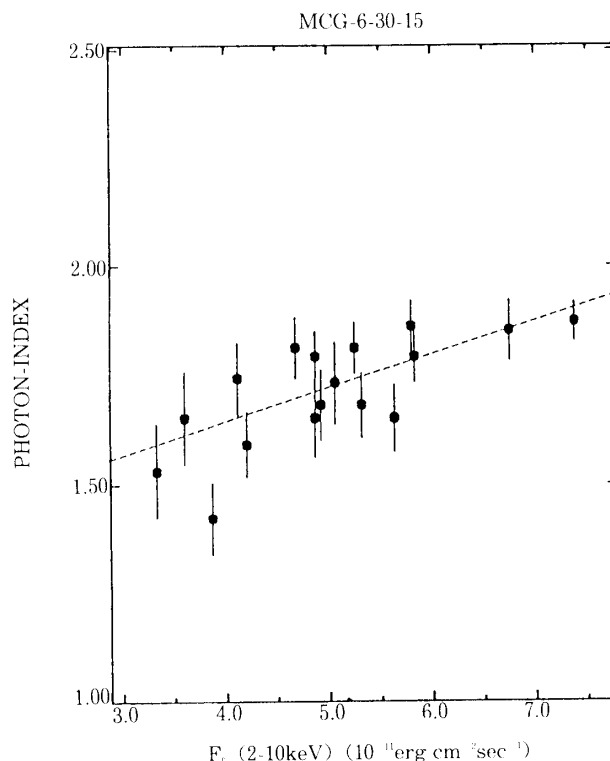


図20 MCG-6-30-15の17個の周回毎のスペクトルに対して、吸収のコラム密度もその平均値（ $N_{\text{H}} = 6 \cdot 10^{21}$ ）に固定して部分吸収モデルでデータに合わせた結果から、吸収の効果を補正した2-10keVのX線エネルギー強度とスペクトル指数 α との間の相関図を示したもの。破線は最小自乗法で求めた一次式を表す。

自由変数としてモデルをデータに合わせた。この結果から α と吸収の効果を補正した2-10 keVのエネルギー強度 F_c ($10^{-11} \text{erg cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$ 単位)との相関を見てみると、図20のようになり、相関計数は $r=0.73$ で $P(|r|>0.73)=1 \cdot 10^{-3}$ である。また一定値(平均値)に対する換算 χ^2 は $\chi^2_\nu=2.85$ ($\nu=16$)で、最小自乗法により求めた一次式

$$\alpha = 1.34 (\pm 0.09) + 0.076 (\pm 0.015) \cdot F_c \quad (8)$$

(括弧内は 1σ 誤差)

に対しては、 $\chi^2_\nu=1.40$ ($\nu=15$)である。 F 検定によると、この χ^2 の改善は99%の有意性となる。

3-2 NGC4051

(a) 光度曲線

図21-(a)にエネルギー範囲1.2-22keVにおけるNGC4051の光度曲線をSUDの変化と共に128秒の時間幅の強度として示す。NGC4051のX線強度はMCG-6-30-15に比べると約3分の1と低いが、時間変動はよく似ているのが解る。正味の全観測時間は約40,000秒であり、データ点の示されていない領域は、やはり天体が地球によって隠されているか、もしくはバツ

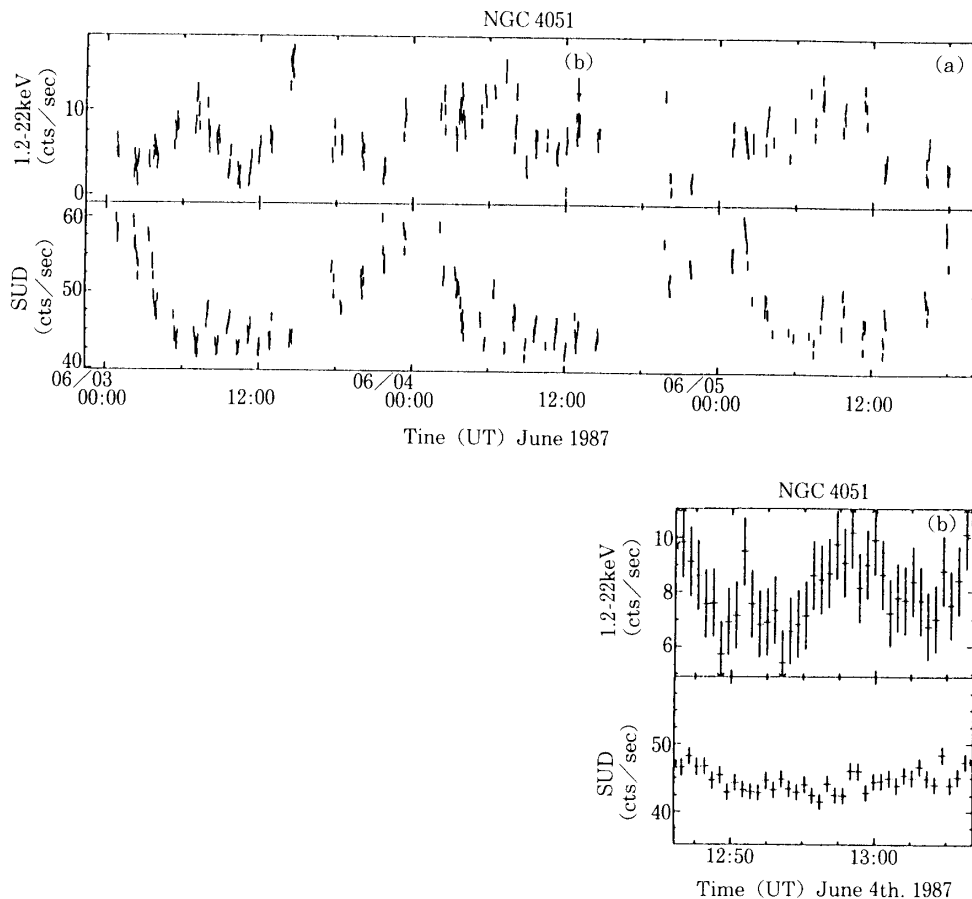


図21 (a) エネルギー範囲1.2-22keVにおけるNGC4051の光度曲線とSUDの計数を8台の検出器について足し合わせ、128秒の時間幅の強度として表したもの。
(b) (a)図中に(b)と示されている部分を拡大し、32秒の時間幅の強度として表したもの。

クグラウンドの高い領域であったために除外した部分に対応している。図から解るようにこの天体から放射される X 線の計数率は大きく変動しており、1 時間、またはそれ以下の時間で変動の幅が約 5 倍にも及んでいる。しかもこの変動は図に示されている SUD の変動とは同期していないことから、この天体から放射される X 線の変動であることが解る。実際、同様な時間変動が EXOSAT 衛星により NGC4051 に既に見つけられている (Lawrence et al. 1985)。しかし、MCG-6-30-15 同様、この天体でも、より短い時間での変動が新しく見つかった。一例として、図 21-(b)には図 21-(a)中に(b)と示されている部分の拡大を示してある。約 3～5 分の時間で、50%程度の変動が現れているのが解る。

(b) X 線スペクトル

	Low	Middle-low	Middle-high	High
強度範囲 (cts/sec) ¹⁾	3-5	5-7.5	7.5-10	10-15
平均強度 (cts/sec) ¹⁾	3.8	6.2	8.8	11.9
有効観測時間 (sec)	6569	10069	7623	4352
エネルギー強度 (2-10keV) ²⁾	0.9	1.5	1.9	2.7

注:

- 1) 8 台の検出器の合計計数
- 2) 吸収の効果を補正したエネルギー強度 10^{-11} erg cm⁻² sec⁻¹ 単位

表 8 NGC4051の強度準位による分類

強度準位	C ¹⁾	α ²⁾	N _H ³⁾	χ^2 ⁴⁾
Low	2.5 ± 1.2	1.67 ± 0.27	2.2 ^{+1.8} _{-1.5}	1.2
Middle-low	4.1 ± 0.8	1.73 ± 0.11	1.0 ^{+0.4} _{-0.5}	2.0
Middle-high	5.4 ± 1.1	1.79 ± 0.10	0.2 ^{+0.5} _{-0.2}	1.3
High	10.5 ± 1.7	1.96 ± 0.09	0.5 ^{+0.4} _{-0.3}	1.2
平均	--	1.83 ± 0.06	0.60 ± 0.25	--

注: 合わせたデータのエネルギー範囲は 2-37keV, 誤差は90%有意水準を表す

- 1) 規格化定数 10^{-3} photons cm⁻² sec⁻¹ keV⁻¹ 単位
- 2) 光子スペクトル指数
- 3) コラム密度 10^{22} cm⁻² 単位
- 4) 自由度 $\nu=19$

表 9 NGC4051 のスペクトルに、べき関数と一様な吸収物質のモデルで合わせたときの最適値

NGC4051では、37個の個々の周回軌道から得られたスペクトルの内、第II章で述べた基準により、統計的に意味のあるもの、31個のスペクトルを解析に用いた。この天体でも、MCG-6-30-15と同じようにスペクトル変動がみられ、X線の強度変動の幅が、より大きいので、個々の周回のスペクトルをその強度により4つの準位に分類し、準位毎に足し合わせ、平均

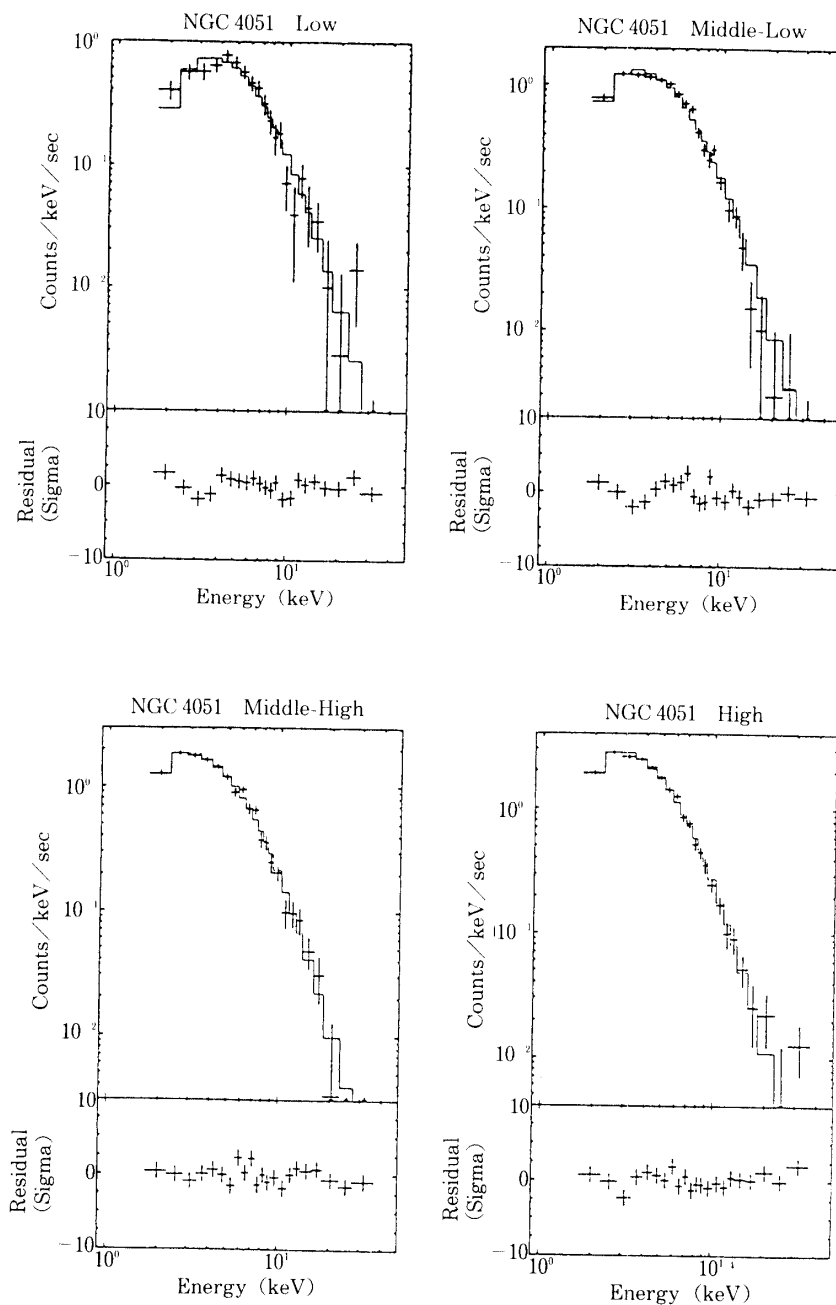


図22 NGC4051 の各強度準位のスペクトルに対して、べき関数と一様な物質による吸収を使ったモデルでデータに合わせたもの。残差の分布は標準偏差の単位で示されており、鉄の構造が存在しているようにも見える。

のスペクトルを作った。各準位の強度範囲、平均計数率、全有効時間、及び平均入射エネルギー強度を表8に与える。

ここでも強度準位毎の4つのスペクトルに対して2-37keVのエネルギー範囲でモデルをデータに合わせた。まずべき関数のスペクトルを持つX線源を一樣な吸収物質が覆っているとしたモデルを使ってデータがこのモデルに合うかどうかを調べた。このモデルは(1)式で表され、自由変数は C , α , N_H の3つである。この結果は表9と図22に示されている。残差の分布をみると、鉄の輝線や吸収端が存在しているようにも見えるが、MCG-6-30-15の時ほど明らかではない。このことについて調べるために、今のモデルに(4)式のように広がりを持たない鉄の輝線と吸収端を加えたモデルでデータに合わせ直した。ただしこの銀河では $z=0.0023$ であるので、鉄の輝線と吸収端のエネルギーは、それぞれ6.4keV, 7.1keVに固定した。従って、自由変数は、 C , α , N_H , N_{HFe} , I_{Fe} の5個である。最適値でのモデルを表10, 図23に与える。middle-low準位とmiddle-high準位のスペクトルについては χ^2_ν が改善されている。また鉄のコラム密度に着目してみると、4つの強度準位の平均値が $N_{\text{HFe}}=(4 \pm 2) \cdot 10^{22} \text{cm}^{-2}$ であるのに、低エネルギーでの吸収は上限値 $N_H < 0.3 \cdot 10^{22} \text{cm}^{-2}$ が与えられるだけで、やはりMCG-6-30-15同様、鉄の存在度が太陽組成値に比べて多いことが解る。このことからNGC4051の吸収物質の物理的、及び幾何学的状態がMCG-6-30-15の吸収物質と同様であると思われる。従って次に太陽組成値を用いて、(6)式で表される部分吸収モデルでデータに合わせてみた。自由変数は、 C , α , N_H , f_{cov} , N_{Hcov} , I_{Fe} の6個である。最適値でのモデルを表11, 及び図24に示す。MCG-6-30-15と特に違っているのは、NGC4051の吸収を受けた成分のコラム密度が $N_{\text{Hcov}}=14(+4, -2) \cdot 10^{23} \text{cm}^{-2}$ であり、MCG-6-30-15で観測された

強度準位	$C^{1)}$	$\alpha^{2)}$	$I_{\text{Fe}}^{3)}$	$N_H^{4)}$	$N_{\text{HFe}}^{5)}$	$\chi^2_\nu^{6)}$
Low	2.2 ± 1.0	1.62 ± 0.24	0.27 ± 0.35	$0.0^{+2.0}_{-0.0}$	16^{+12}_{-16}	1.1
Middle-low	4.0 ± 0.7	1.74 ± 0.11	0.40 ± 0.25	$0.0^{+1.0}_{-0.0}$	7^{+4}_{-3}	1.6
Middle-high	5.7 ± 1.1	1.82 ± 0.12	0.45 ± 0.27	$0.0^{+0.3}_{-0.0}$	2^{+3}_{-2}	1.1
High	10.4 ± 1.6	1.96 ± 0.09	0.10 ± 0.35	$0.0^{+0.5}_{-0.0}$	4^{+4}_{-3}	1.2
平均	---	1.84 ± 0.06	0.34 ± 0.14	$0.0^{+0.3}_{-0.0}$	4 ± 2	--

注: 合わせたデータのエネルギー範囲は2-37keV, 誤差は90%有意水準を表す

- 1) 規格化定数 $10^{-3} \text{ photons cm}^{-2} \text{ sec}^{-1} \text{ keV}^{-1}$ 単位
- 2) 光子スペクトル指数
- 3) 鉄の輝線強度 $10^{-4} \text{ photons cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ 単位
- 4) コラム密度 10^{22} cm^{-2} 単位
- 5) 鉄のコラム密度 $N_{\text{HFe}} = N_{\text{Fe}} \cdot 10^{4.48}$, 10^{22} cm^{-2} 単位
- 6) 自由度 $\nu=17$

表10 NGC4051のスペクトルに、べき関数と一樣な吸収物質、及び鉄の輝線、鉄の吸収端を含むモデルで合わせたときの最適値

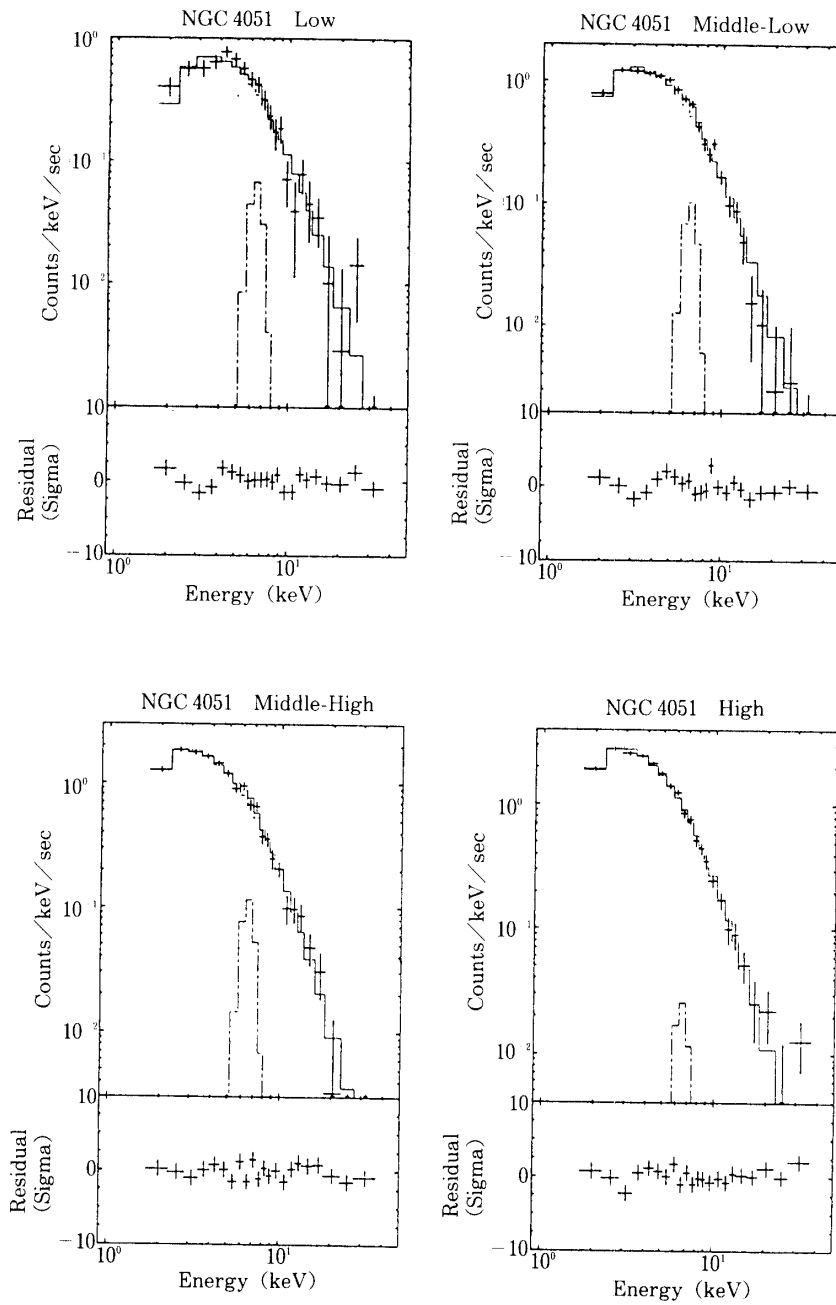


図23 NGC4051 の各強度準位のスペクトルに対して、べき関数と様な物質による吸収、及び鉄の輝線と吸収端を使ったモデルでデータに合わせたもの。ただし、鉄輝線のエネルギーは $E_{\text{line}}=6.4\text{keV}$ に、輝線の幅は 0.1keV に、また吸収端エネルギーは $E_{\text{edge}}=7.1\text{keV}$ に固定してある。データ点は十字で示されており、最適値でのモデルは実線で示されている。またモデルの各成分も示されており、破線はべき関数成分、一点鎖線は鉄輝線を表している。

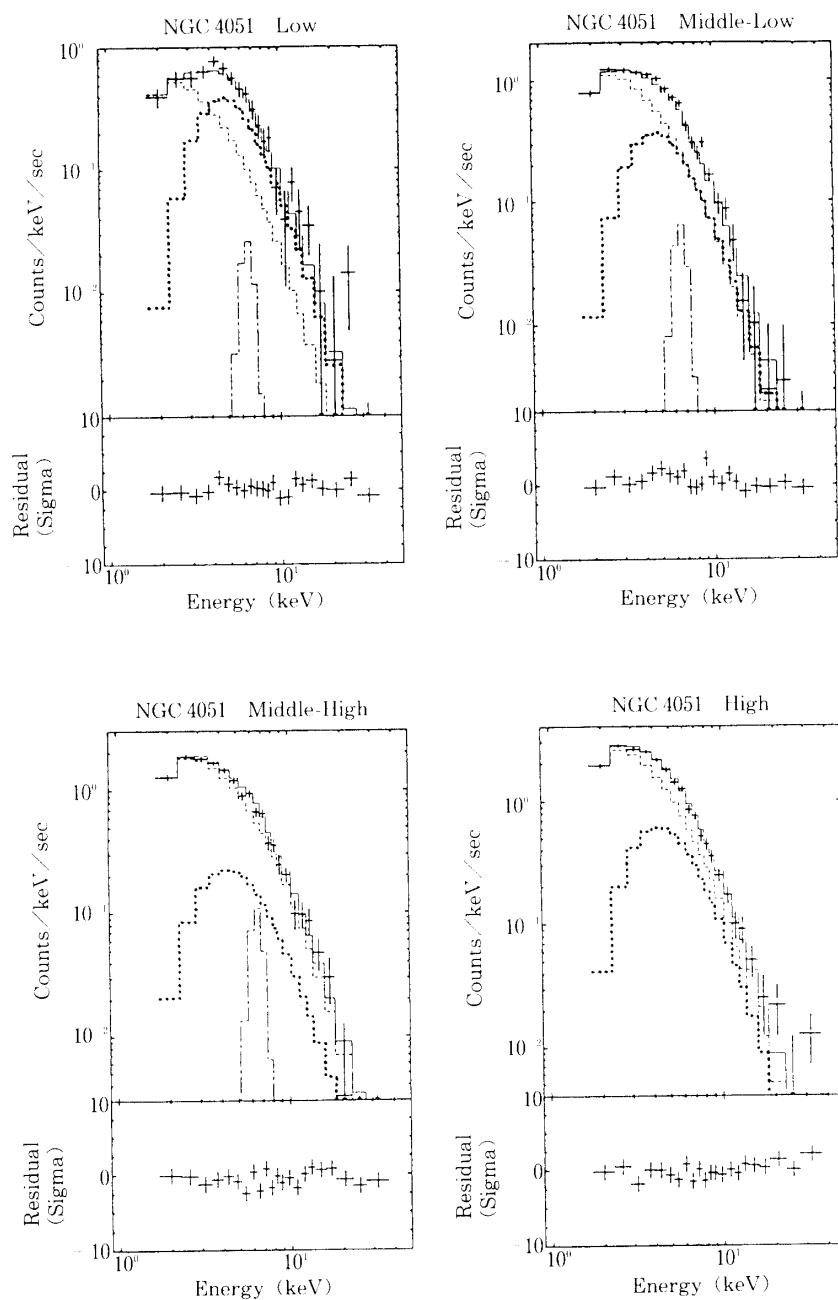


図24 NGC4051の各強度準位のスペクトルに対して、部分吸収モデルでデータに合わせたもの。固定した変数は、鉄輝線のエネルギー ($E_{\text{line}}=6.4$ keV), 輝線幅 (0.1keV), 吸収端エネルギー ($E_{\text{edge}}=7.1$ keV), および鉄の存在度(太陽組成値)である。データ点は十字で示されており、最適値でのモデルは実線で示されている。またモデルの各成分も示されており、破線は吸収を受けない成分、点線は吸収を受けた成分、一点鎖線は鉄輝線を表している。

強度準位	$C^{1)}$	$\alpha^{2)}$	$N_H^{3)}$	$N_{Hcov}^{3)}$	$I_{Fe}^{4)}$	$f_{cov}^{5)}$	$\chi^2_{\nu}^{6)}$
Low	2.5 ± 1.5	2.38 ± 0.45	$0.0^{+0.3}_{-0.0}$	16^{+5}_{-3}	0.10 ± 0.42	0.78 ± 0.10	0.8
Middle-low	4.8 ± 1.3	2.21 ± 0.28	$0.3^{+0.7}_{-0.3}$	13^{+12}_{-7}	0.25 ± 0.27	0.54 ± 0.20	1.1
Middle-high	5.7 ± 1.4	1.91 ± 0.26	$0.1^{+0.3}_{-0.1}$	8^{+22}_{-4}	0.42 ± 0.30	0.23 ± 0.26	1.1
High	11.5 ± 2.0	2.25 ± 0.22	$0.2^{+0.3}_{-0.2}$	10^{+9}_{-5}	0.00 ± 0.37	0.43 ± 0.19	1.0
平均	---	2.16 ± 0.14	$0.1^{+0.2}_{-0.1}$	14^{+4}_{-2}	0.23 ± 0.16	0.64 ± 0.08	--

注: 合わせたデータのエネルギー範囲は 2-37keV, 誤差は90%有意水準を表す

1) 吸収を受けない成分の規格化定数 10^{-3} photons cm^{-2} sec^{-1} keV $^{-1}$ 単位

2) 光子スペクトル指数

3) コラム密度 10^{22} cm^{-2} 単位

4) 吸収を受けない鉄の輝線強度 10^{-4} photons cm^{-2} sec^{-1} 単位

5) 吸収体の隠ぺい率

6) 自由度 $\nu=16$

表11 NGC4051のスペクトルに, 部分吸収モデルで合わせたときの最適値

ものに比べて低いことである。しかし, NGC4051の強度は MCG-6-30-15に比べて約1/3と暗かったために, 高いコラム密度の存在を示してくれる10keV以上の領域で, 統計が不十分であったということを考慮すると, より強く吸収を受けている成分が存在するという可能性を否定しきれない。

このことについて, NGC4051のX線強度がより強いときのデータを扱う機会を得たのでその結果について述べることにする。扱ったデータは1988年5月14日から5月16日にかけて観測されたものの内, 第II章で述べた基準を満たすもので, SAAを通過しないときに得られたものだけで, 全観測時間は約10,700秒である。平均強度は約1 mCrabあり, 我々の観測時に比べおよそ2倍強度が強かった。スペクトルの解析には, これらのデータをもとに時間平均したものを使った。このスペクトルに対し, これまで述べた3種類のモデルをデータに合わせた。その結果を図25と表12に示す。べき関数のスペクトルを持つX線源を一樣な冷たい吸収物質が覆っているとしたモデルを使った結果では, 残差をみると MCG-6-30-15同様, 鉄の輝線や吸収端の存在が明らかである。広がりを持たない鉄の輝線と吸収端を加えたモデルでデータに合わせた結果(鉄の輝線と吸収端のエネルギーは, それぞれ6.4keV, 7.1keVに固定)で, 鉄のコラム密度に着目してみると, $N_{HFe}=1.8(+3.5, -1.2) \cdot 10^{22} cm^{-2}$ であるのに, 低エネルギーでの吸収は上限値 $N_H < 0.37 \cdot 10^{22} cm^{-2}$ が与えられるだけで, やはり MCG-6-30-15同様, 鉄の存在度が太陽組成値に比べて多いことが解る。太陽組成値を用いて, 部分吸収モデルでデータに合わせた結果によると, 吸収体の隠ぺい率は71.1%で, 吸収を受けた成分のコラム密度が $N_{Hcov} = 4(+2, -1) \cdot 10^{24} cm^{-2}$ であった。これは MCG-6-30-15で観測されたものと同程度のものである。従って, 少なくともX線強度が強かった時には,

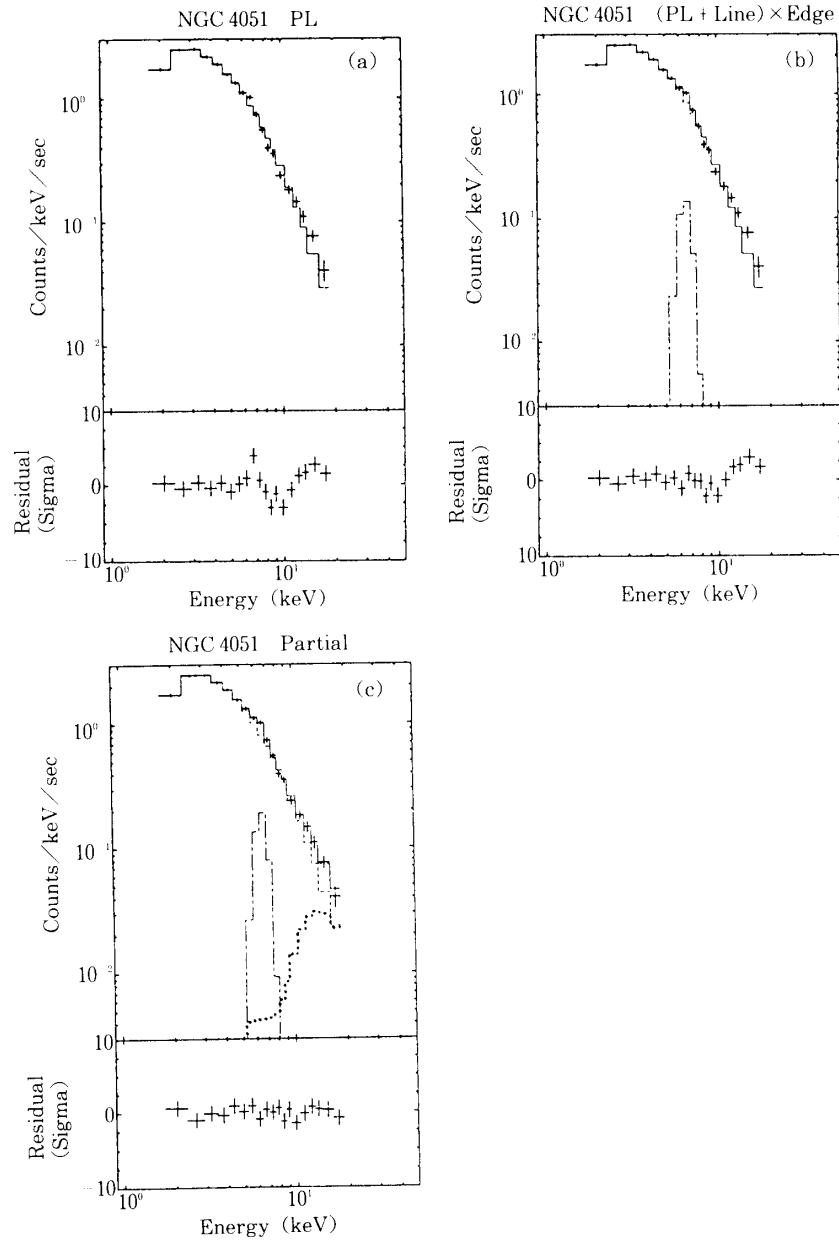


図25 NGC4051 の強度が強かったときのデータについて3種類のモデルを使ってデータに合わせたもの。データ点は十字で示されており、最適値でのモデルは実線で示されている。またモデルの各成分も示されており、破線、一点鎖線、点線の意味は3つのモデルに対してそれぞれ図22, 図23, 図24と同じ。(国枝氏の御好意による)

(a) べき関数に様な吸収物質を使ったモデル。

(b) (a)のモデルに、さらに鉄の輝線と吸収端を含めたモデル。ただし輝線と吸収端のエネルギー、及び輝線幅はそれぞれ $E_{\text{line}}=6.4\text{keV}$, $E_{\text{edge}}=7.1\text{keV}$, $W_{\text{line}}=0.1\text{keV}$ に固定。

(c) 部分吸収モデル。固定した変数は、鉄輝線のエネルギー ($E_{\text{line}}=6.4\text{keV}$), 輝線幅 (0.1keV), 吸収端エネルギー ($E_{\text{edge}}=7.1\text{keV}$), 及び鉄の存在度 (太陽組成値) である。

model	$C^{1)}$	$\alpha^{2)}$	$N_H^{3)}$	$I_{Fe}^{4)}$	$N_{HFe}^{3)}$	$N_{Hcov}^{3)}$	$f_{cov}^{5)}$	χ^2
(a)	6.9 ± 0.7	1.74 ± 0.06	$0.2^{+0.4}_{-0.1}$	---	---	---	---	3.2
(b)	7.2 ± 0.6	1.78 ± 0.06	$0.0^{+0.4}_{-0.0}$	0.56 ± 0.10	$1.7^{+0.4}_{-0.4}$	---	---	2.3
(c)	9.0 ± 1.3	1.92 ± 0.08	$0.5^{+0.3}_{-0.2}$	0.76 ± 0.24	---	280^{+490}_{-180}	0.71 ± 0.11	0.8

注: 合わせたデータのエネルギー範囲は 2-20keV, 誤差は90%有意水準を表す

1) 規格化定数 10^{-3} photons cm^{-2} sec^{-1} keV $^{-1}$ 単位

2) 光子スペクトル指数

3) コラム密度 10^{22} cm^{-2} 単位

4) 鉄の輝線強度 10^{-4} photons cm^{-2} sec^{-1} 単位

5) 吸収体の隠ぺい率

モデルは,

a) ベキ関数と一様な吸収物質 ($\nu=16$)

b) (a)のモデルに鉄の輝線と吸収端を加えたモデル ($\nu=14$) ただし, 鉄の輝線エネルギーと輝線幅, 吸収端エネルギーは固定

c) 部分吸収モデル ($\nu=13$) ただし, 鉄の輝線エネルギーと輝線幅, 吸収端エネルギーは固定

表12 強度が強いときの NGC4051 のスペクトルに, 3 種類のモデルで合わせたときの最適値
やはり NGC4051 にも強く吸収を受けている成分が存在していることが解る.

(c) スペクトル変動

MCG-6-30-15で見られたのと同じく NGC4051 でもスペクトル変動がみられる. 強度単位毎の4つのスペクトルを比較するために, 図26にそれぞれの準位のスペクトル間でエネルギーチャンネル毎の比を示す. この比は強度が変わってもスペクトルの形が変わらなければ, 一

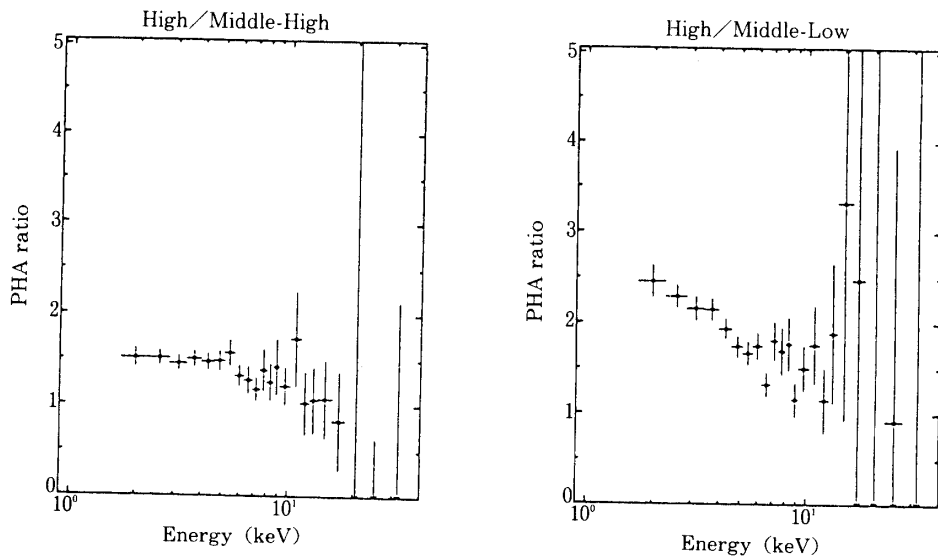


図26 NGC4051 の各強度準位のスペクトル間で, 各エネルギーチャンネル毎に比をとったもの. X線強度が増すとスペクトルの傾きが急になっているのが解る.

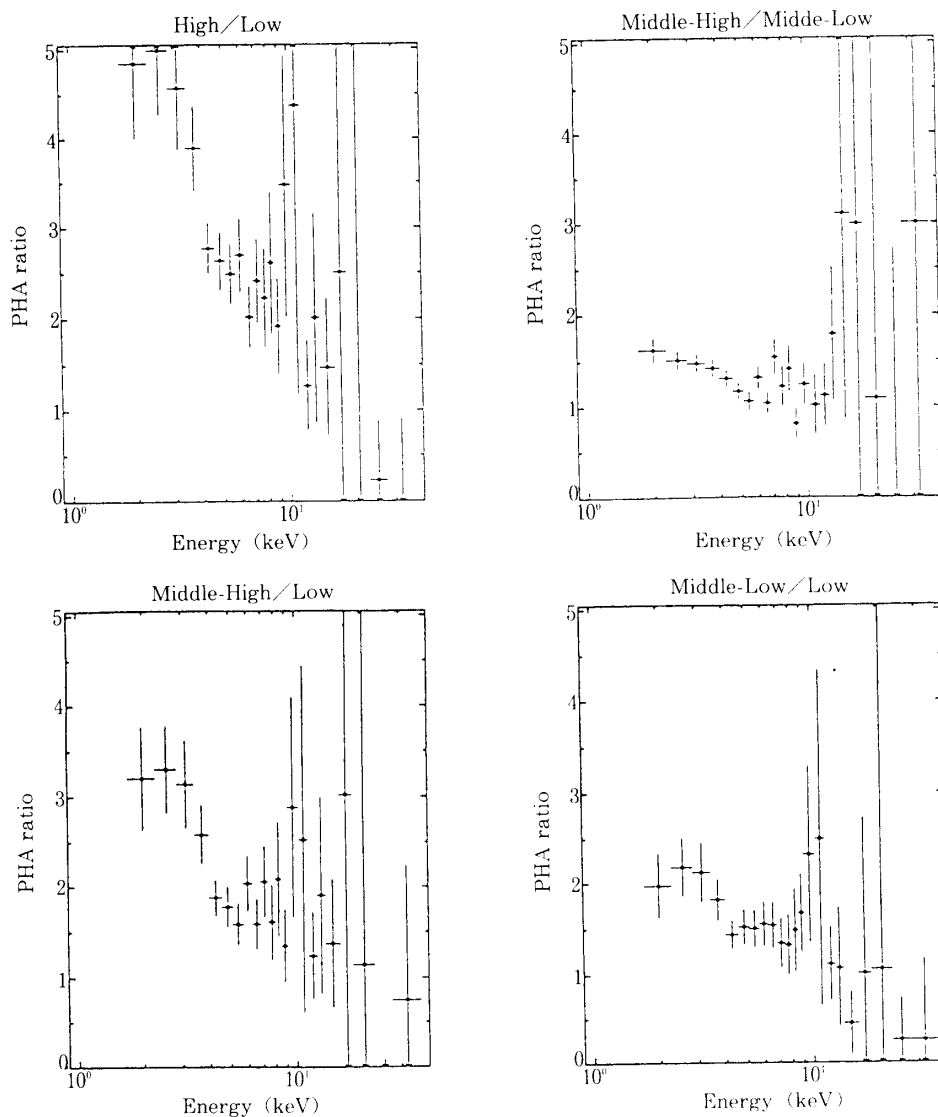


図26 (続 き)

定の値を持つのであるが、特に high/middle-low の図によると、一定値（平均値）に対する換算 χ^2 の値が $\chi^2 = 3.7$ であり、スペクトルが変動していることが解る。従ってこの図は、X線源から放射されるX線が明るくなると、スペクトルの傾きが急になることを示している。以下では、このスペクトル変動をもたらす変数が、スペクトル指数 α であるということを確かめる。

① べき関数と一様な吸収のモデル

前節で調べたように、強度準位毎の4つのスペクトルに対し、べき関数と一様な吸収の項を含んだモデルをデータに合わせた結果（表9）をみても、スペクトル指数 α だけが、強度と共に変化しているのが解る。これをさらに詳しく調べるために、31個の各周回毎のスペクトルについても先と同じモデル（3式）をデータに合わせた。但しここでは統計が落ちるので、扱うエネルギー範囲を 2-20keV にし、 C , α , N_H を自由変数とした。各周回毎のスペク

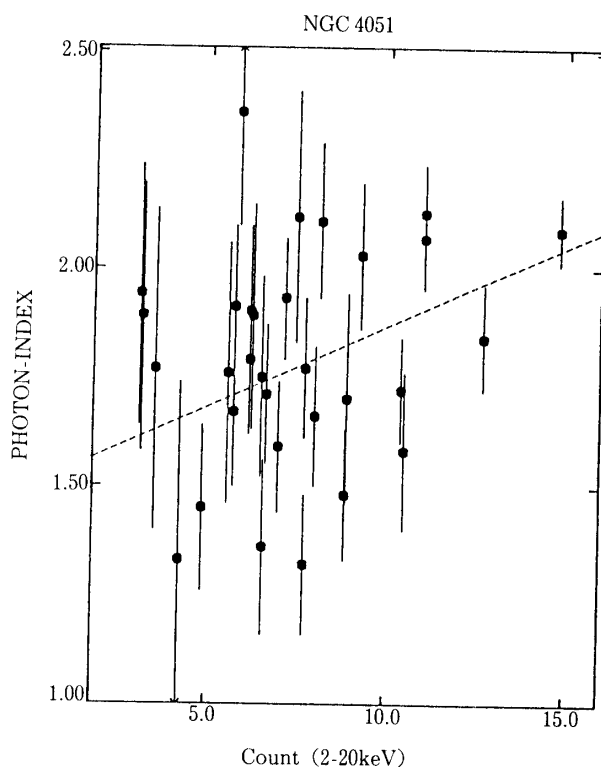


図27 NGC4051の31個の周回毎のスペクトルに対して、べき関数と一様な物質による吸収を使ったモデルでデータに合わせ、その結果から2-20keVのX線強度とスペクトル指数 α との間の相関図を示したもの。破線は最小自乗法で求めた一次式を表す。モデルをデータに合わせたときの自由変数は、規格化定数C、スペクトル指数 α 、吸収のコラム密度 N_H である。

トルに対して、このモデルで十分データに合っているので、最適値を使って、スペクトル指数 α と2-10keVの計数率の間の相関図(図27)、およびコラム密度 N_H と計数率の間の相関図(図28)を得た。 α と計数率の間では相関係数が $r=0.48$ となっており、このような値が確率的に生じる確率は $P(|r|>0.48)=5\cdot 10^{-3}$ であるので、相関があるといえる。これにたいして N_H と計数率の間では、 $r=-0.13$ 、 $P(|r|>0.13)=0.5$ となっており、相関は認められない。従って吸収のコラム密度は、強度単位毎のスペクトルにモデルを合わせたときの最適値の平均値 $N_H=(0.60\pm 0.25)\cdot 10^{22}\text{cm}^2$ としてよい。

さらに、周回毎のスペクトルに対し二種類の自由変数の組でモデルをデータに合わせて、このことを確かめた。一つは α とCを自由変数として、 N_H を平均値に固定したもので、もう一つは N_H とCを自由変数として、 α を平均値1.83に固定したものである。 χ^2 が十分に異なっているとするときの最低の基準を $\Delta\chi^2=1$ として、二種類の自由変数の組により得られた χ^2 を比較すると、31個の内11個は α を自由変数とした方が χ^2 が良く、4個は N_H を自由変数とした方が良かった。残り16個については χ^2 に十分な違いが見られなかった。このことから観測されたスペクトルの変動は、スペクトル指数 α の変化により再現されることが解る。

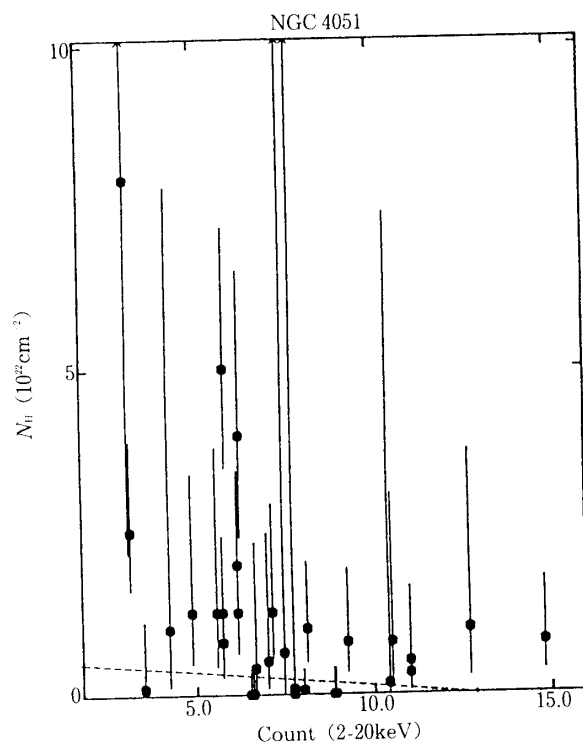


図28 NGC4051の31個の周回毎のスペクトルに対して合わせたモデルの最適値から 2-20 keV の X 線強度と吸収のコラム密度 N_H との間の相関図を示したもの。破線は最小自乗法で求めた一次式を表す。モデルをデータに合わせたときの自由変数は、規格化定数 C 、スペクトル指数 α 、吸収のコラム密度 N_H 。

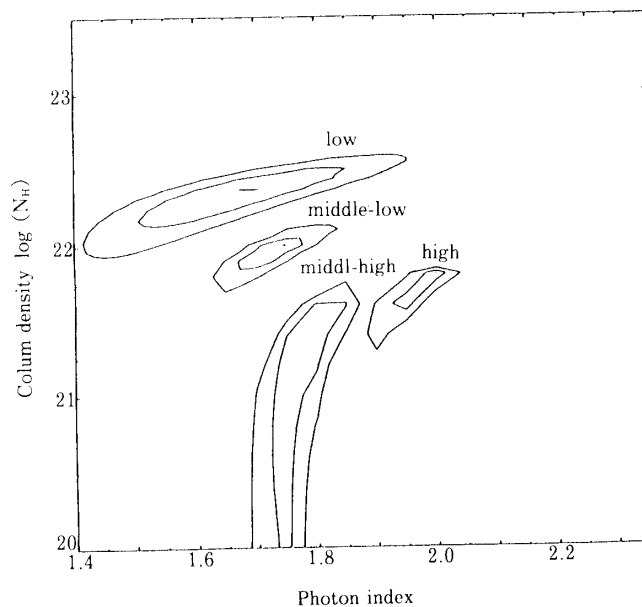


図29 NGC4051 各強度準位のスペクトルに対し、べき関数と一様な物質による吸収、及び鉄の輝線と吸収端を使ったモデルでデータに合わせたときの光子スペクトル指数 α と吸収のコラム密度 N_H に対する有意水準の等高線図。各強度準位について 3%, 60%, 90% の有意水準を表す。

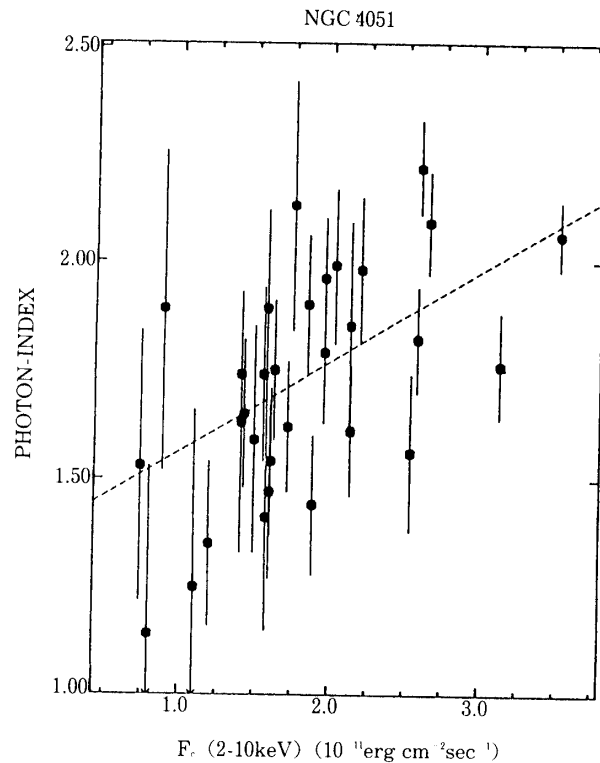


図30 NGC4051 の31個の周回毎のスペクトルに対して、吸収のコラム密度もその平均値 ($N_H = 6 \cdot 10^{21}$) に固定してモデルをデータに合わせた結果から、吸収の効果を補正した 2-10keV の X 線エネルギー強度とスペクトル指数 α との間の相関図を示したもの。破線は最小自乗法で求めた一次式を表す。

また、 α と N_H の 2 つの自由変数についてモデルをデータに合わせたときの χ^2 の等高線図をかいたのが図29である。NGC4051 の場合、 α が N_H と相関していないとは言えないが、これまでの議論から解るように N_H は強度と共に変化しているとは言えない。図30に N_H を平均値に固定して最適モデルを求めたときの最適値をもとに、 α と吸収の効果を補正した 2-20keV のエネルギー強度 F_c ($10^{-11} \text{ erg cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ 単位) の間の相関図を示す。相関係数は $r=0.62$, $P(|r| > 0.62) = 2 \cdot 10^{-4}$ である。さらに最小自乗法により求めた関係、

$$\alpha = 1.35 (\pm 0.1) + 0.21 (\pm 0.04) \cdot F_c \quad (9)$$

(括弧内は 1σ 誤差)

に対して $\chi^2_\nu = 1.4$ ($\nu = 29$) であるが、一定値 (平均値) に対しては $\chi^2_\nu = 2.2$ ($\nu = 30$) となっており、 F 検定によればこの違いは 99.9% 以上の有意性となる。

② 部分吸収モデル

この天体においては、スペクトル変動がこのモデルにおける吸収体の隠ぺい率 f_{cov} や、X 線源の一部だけを覆うコラム密度 N_{Hcov} によらないとは言いきれない。なぜなら、スペクトル変動が α の変動によるという結論を導いたときに、より複雑な X 線スペクトルの可能性 (例えば、部分吸収モデル) があるにも関わらず、単純なべき関数だけを使ったからである。MCG-6-30-15 では、吸収を受けた成分は 10keV 以下のエネルギー領域では無視できたが、

NGC4051 では吸収を受けた成分の吸収が少ないために、図24からも解るように、この成分が 10keV 以下のエネルギー領域でも十分に影響を及ぼす。そのために、スペクトルの変動は、吸収体の隠ぺい率 f_{cov} の変動や、吸収物質の物理的、幾何学的構造の変化が光度の変化と相関して生じることによって説明できる。実際に強度準位毎のスペクトルに対して部分吸収モデルを合わせたときの結果（表11）をみても、強度と共に変化している変数は見あたらない。しかしこの結果は、統計の低いものに対して、多くの自由変数を使ってモデルをデータに合わせようとした結果であるので、不思議なものではない。このことは、X線源がより明るいつき、もしくは高感度の観測によって明らかにされるであろう。

4. 議 論

4-1 MCG-6-30-15と NGC4051 の X 線吸収物質

MCG-6-30-15のスペクトル中に見つかった奇妙なことは、低エネルギーでの吸収で期待されるものと比べて鉄の吸収端が深いことである。今までにも EXOSAT による長時間観測 (Nandra et al. 1988) において、このように深い吸収端らしいものが見つかっているが、今回の「ぎんが」衛星によるデータと比べると、統計精度が悪かった。スペクトルを一樣で冷たい吸収物質を使ったモデルで合わせると、鉄の存在度は太陽組成値の10倍以上となる。これほど化学組成が異なるとは考えにくい。X線スペクトル中に鉄の吸収端の見られる AGN は他に二つある。それは Cen-A と NGC4151 で、Cen-A では鉄の存在度が太陽組成値に等しいとして矛盾しないが (Wang et al. 1986), NGC4151 では太陽組成値のほぼ 2-3 倍多いとしても矛盾が無い議論が得られている (Holt et al. 1980; Perola et al. 1986; Matsuoka et al 1986; Warwick et al 1988)。

鉄の存在度を太陽組成値に等しいとしたままで、スペクトルを定性的に再現する方法を考えてみる。まず、吸収物質が、X線連続成分によって光電離されている場合を考えてみる。このモデルをデータに合わせた結果は図8に与えられており、2-4keV 付近の低エネルギーに対する X 線吸収率と鉄の吸収端付近のエネルギーに対する X 線吸収率の比は、中性の吸収物質の場合の比と比べて、約10分の1である。吸収物質が光電離されると、軟 X 線に対する吸収率の方が硬 X 線に対する吸収率よりも大きく減少する。これは主に低エネルギーでの光電吸収を支配する軽い元素が、完全に光電離されるために起こる。従って、もし物質が十分に光電離されているなら、スペクトルを説明するために必要な低エネルギーでの X 線吸収率の低下は、このモデルで説明することが出来る。一方、光電離された物質の電離度の上限が、観測された鉄の吸収端と鉄の輝線のエネルギーから決めることが出来る。それによると、鉄の電離度は Fe XVIII 以下に対応し、光電離の度合は $\xi < 100 \text{ erg cm sec}^{-1}$, $T < 10^5 \text{ K}$ (Kallman and McCray 1982) である。ここで、光電離の度合は、

$$\xi = L / (nr^2) \quad (10)$$

で与えられ、 L はガスを電離する連続成分の全光度 (erg sec^{-1}), r は連続成分の放射源からの距離、 n はガスの密度である。いくつかの光電離の度合に対して、光電離されたガスによる X 線吸収率が (Krolic and Kallman 1984) により計算され、彼らの論文中的図4に示されている。今回の観測での上限値は、 $\xi = 13.3$, $T = 9.1 \cdot 10^4 \text{ K}$ ($\xi \approx 100 \text{ erg cm sec}^{-1}$) の曲線に対応するが、この場合の低エネルギーでの X 線吸収率の低下は、中性の吸収物質の

場合と比べて高々 2-3 倍の程度である。従って、MCG-6-30-15 の X 線の吸収に対して、鉄の存在度が太陽組成値に等しいような、光電離された吸収物質のモデルは適当ではないといえる。

次に、一様な中性の吸収物質を使ったモデルに少し修正を加えたものを考える。それは、吸収物質が一様ではなく、雲状の塊を作っており、連続成分を放射する領域を完全には覆っていないというものである。可視光での観測 (Kwan and Krolic 1981) により知られている broad line 領域 (BLR) は $10^{22} - 10^{23} \text{cm}^{-2}$ 程度のコラム密度を持っている。これは X 線で観測されるコラム密度と同程度であることから、雲状の塊は BLR のものであると考えられている (Mushotzky 1984b; Reichert et al. 1986)。この部分吸収モデルは、NGC4151 のスペクトルを Einstein の SSS で観測したときにみられた、一様な吸収のモデルに比べ 1 keV 以下の軟 X 線成分が異常に強い現象を説明するために、Holt et al. (1980) により唱えられたモデルで、その後 EXOSAT や「ぎんが」での NGC4151 の観測データにも適用されている (Perola et al. 1986; Pounds et al. 1986b; Warwick 1988)。また、他の AGN においても同様な結果が得られている (Reichert et al. 1985)。

MCG-6-30-15 のスペクトルに対して、部分吸収モデルを合わせたときの結果が図 11 に示されているが、X 線源の約 60% の部分が $N_H \approx 4 \cdot 10^{24} \text{cm}^{-2}$ という非常に厚い吸収物質で覆われている。さらに、それらを含め、X 線源全体が $N_H \approx 6 \cdot 10^{21} \text{cm}^{-2}$ の一様な吸収物質で覆われている。その銀河自身が持つ星間物質は、可視光での観測により $N_H = (4 - 10) \cdot 10^{21} \text{cm}^{-2}$ と求められており (Pounds et al. 1986a)、これが、その一様な吸収物質であると考えられる。ところが、厚い非一様な吸収物質は、BLR にくらべ 1 桁も大きなコラム密度を持つので、BLR が X 線の吸収物質であるとは考えにくい。

次に、このように大きなコラム密度を持つ吸収物質がどこにあるかについて考える。II 型セイファート銀河が厚いガスで隠された I 型の核を持っているというモデル (Lawrence and Elvis 1982) で、このように大きなコラム密度を持つ吸収物質はすでに導入されている。このモデルは、典型的な II 型セイファート銀河である NGC1068 の可視光および X 線の観測によって確かめられている (Antonucci and Miller 1985; Koyama et al 1988)。この天体では、活動的な核の視線方向は大きなコラム密度 ($N_H > 10^{24} - 10^{25} \text{cm}^{-2}$) を持つガスによって完全に隠されているために、中心核からの X 線は、核を取り巻く雲の中の電子によって散乱されるわずかな量だけしか観測することが出来ない。この観点からいえば、MCG-6-30-15 は中心核の一部分だけが厚いガスで覆われているというような、I 型と II 型の間のセイファート銀河なのかもしれない。しかしこの解釈によると、中心核の一部分だけが隠されて観測されるという確率は非常に低いはずである。なぜなら、II 型セイファート銀河には許容線のウィング成分がみられないことから、BLR もこの厚いガスで隠されているはずであるが、BLR は中心核よりもずっと大きいので、中心核の一部だけが、このガスで部分的に隠されて見えるような立体角は非常に小さい。

他の考え方は、この天体の中に別の軟 X 線源がある (Pounds et al. 1986a) というもので、これは、アクリションディスクの存在を、スペクトルが示しているものであると考えられている (Arnaud et al. 1985)。もし、ディスク面と中心核への視線との間の角度が、ゼロではなくて十分小さく、ディスクの幾何学的な厚さが、中心の X 線源の大きさと同程

度なら、ディスクはX線源の約50%を覆うことが出来る。実際、 10^{24} - 10^{25}cm^{-2} のコラム密度を持つ冷たい ($T < 10^5\text{K}$) 物質が、比較的広い半径のレンジで、重いブラックホールの周りで見つかっている (標準的なブラックホール周辺のアクリションディスクのモデルは、Shakura and Sunyaev 1973)。また、もし鉄の輝線がこれと同じ領域から放射されているのなら、ケプラー運動のためにドップラー効果を受け、輝線幅が広がるはずである。シュバルツシルド半径の約10倍から50倍の領域から輝線が放射されているとすれば、この効果は約10-20%となり、今回の観測結果と一致する。

この他に、ブラックホール近傍の降着物質は、コラム密度が 10^{24}cm^{-2} 程度の値を持つ低電離の雲状の塊を形成しているという説 (Guilbert and Rees 1988) がある。また、(Lightman and White 1988) は、中心核の近くに温度が低くコラム密度の高い物質があり得ることと、それがX線スペクトルにどのような影響を及ぼすのかを議論している。今回の結果は、それによって期待されるスペクトル、特に10keV 辺りの盛り上りと、よく一致している。

このような、X線源の一部を覆う厚い吸収物質が MCG-6-30-15 にあれば、それがどこにあるにせよ、鉄の存在度が $N_{\text{HFe}} \approx 10^{23}\text{cm}^{-2}$ (Matsuoka et al. 1986) であるような一様なガスの蛍光現象では説明できないほど強い鉄の輝線 (等価幅 $\approx 200\text{eV}$) を説明することが出来る。

NGC4051においても、一様な吸収物質を使って、べき関数のモデルをデータに合わせた結果は、MCG-6-30-15で得られた結果と同様で、鉄の吸収端の存在を示しているにもかかわらず、それに対応する低エネルギー領域での吸収がない。このことは、この二つの天体においては吸収物質が、同じ様な状態にあるらしいことを示している。しかし今回、NGC4051の強度が低かったために、鉄の輝線や吸収端のエネルギーを正確に決めることはできなかった。さらに、部分吸収モデルをデータに合わせたときの結果によると、吸収を受けた成分の吸収はMCG-6-30-15の場合に比べて小さく、コラム密度は大体 10^{23}cm^{-2} であるので、BLR中の雲状の塊で説明できる。ただ、これらの結果は統計の悪い部分から得られたものであるために、より強く吸収を受けた成分があるという可能性を、否定することはできない。実際、図26で見たようにX線強度が強いときの結果では、明らかに強く吸収を受けた成分が存在している。従ってMCG-6-30-15とNGC4051で見られた、X線源を覆う厚い吸収物質の存在は両者で大変よく似た性質を持つものと結論できる。

4-2 スペクトルの変動

MCG-6-30-5とNGC4051において、そのX線スペクトルはX線強度と共に変化し、X線スペクトルはX線源から放射されるX線が強くなると、スペクトルの傾きは急になる。単純なべき関数型を持つX線スペクトルモデルでは、2-10keVのX線光度が3~4倍程度変化するのに伴い、スペクトル指数は $\alpha \approx 1.7$ を中心として、 $\Delta \alpha \approx 0.3$ -0.4だけ変化する。

これらのように、光度と正相関して1keV以上のスペクトルの形が変化するセイファート銀河は、他にも見つかっている。そして、それらのスペクトル変動もスペクトル指数の変化によって説明することが出来る。NGC4051自身もEXOSATの観測で、2-6keVのエネルギー強度と2つのエネルギー範囲間のX線強度の比 (0.05-2keV/2-6keV) との間の正相関が見つかっている (Lawrence et al. 1985)。これは2-6keVのエネルギー強度が4倍に増加した

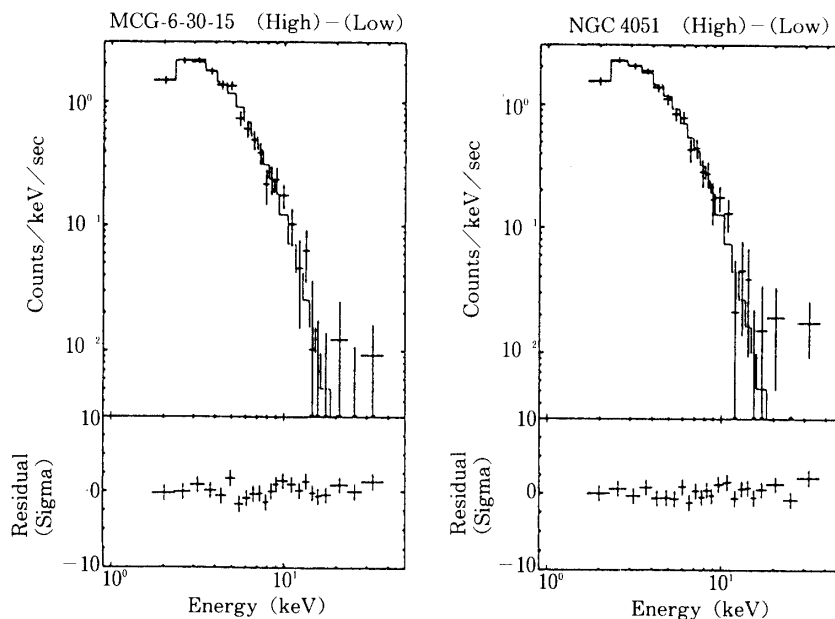


図31 MCG-6-30-15 と NGC4051 のスペクトルで、High 準位のスペクトルから Low 準位のスペクトルを差し引き、残ったスペクトルに対して制動放射モデルで合わせたもの。約 7 keV の温度を示している。

のに対し、スペクトル指数が $\Delta \alpha \approx 0.3$ だけ大きくなったことで説明できる。これは今回の結果と一致する。この他、スペクトル指数とエネルギー強度の正相関が観測されたものは、EXOSAT による NGC4151 (Perola et al. 1987) と NGC5548 (Branduardi-Raymont 1986), 及び Einstein による 3C120 (Halpern 1985) がある。また、統計精度は落ちるが、同様の相関が EXOSAT による NGC7314 の観測 (Turner 1987) でも見られた。さらに最近では、「ぎんが」衛星による NGC4593 の観測でも同様な相関が見つかった。

E1615+061 でも同様な相関をもつ、より激しいスペクトル変動がみられたが、その変動はスペクトル指数が標準値で表される硬成分に、変動の激しい軟成分が重ね合わさったものであると考えられている (Piro et al. 1988)。この天体では、強度が最も強いときには軟成分が 1 keV 以上でも支配的となる。しかしこの解釈は、より高いエネルギー領域でスペクトル変動を示す今回の MCG-6-30-15 と NGC4051 の観測には当てはまらない。このことを確かめるために、強度の高いときのスペクトルと強度の低いときのスペクトルの差をとり、それが軟 X 線の超過によるかどうかを見るために制動放射モデルでデータに合わせてみた (図 31)。すると、差のスペクトルはどちらの天体に対しても、温度が約 7 keV を示しており、今までに観測された軟 X 線の超過と比べて、約 2 桁温度が高い。

これら二つの天体でみられたのと同じ様なスペクトル変動は、中心からのエネルギー強度の変化によって、吸収物質の X 線吸収率が変わる (Halpern 1984) ということでも説明できる。もし光度が増えると、光電離の度合いが増加して、軟 X 線光子に対する吸収率が硬 X 線光子に対する吸収率よりも減少し、結果としてスペクトルの傾きが急になる。このモデルは、NGC4151 (Yaqoob et al. 1988) や、クェーサー MR2251-178 (Pan et al. 1988) に見られたスペクトル変動を説明するのに、スペクトル指数変化を使わないかたちで提案され

たものである。

しかし、既にみてきたように、MCG-6-30-15では吸収物質は低電離状態にあるので、このモデルを除外することが出来る。従って、少なくともMCG-6-30-15に関しては、スペクトル指数の変動がスペクトル変動に対するもっともよい説明であると考えられる。NGC4051では、統計が悪かった為に、はっきりしたことは言えないが、スペクトル変動の様子がMCG-6-30-15と同様、 $\Delta \alpha \approx 0.15 \Delta L / L$ であることから、スペクトル変動も同じ理由によると思われる。

今までの観測結果をまとめると、少なくとも7つのセイファート銀河が、2 keV以上のエネルギー領域でスペクトル変動を示しており、それが連続成分のスペクトル指数変化で説明できる。これら全ての天体は、2-10keVの光度が強くなると、スペクトルの傾きが急になる。またその変動の幅も同程度であり、 $\Delta \alpha \approx 0.15 \Delta L / L$ である。スペクトル指数の変化は、 $\alpha \approx 1.4-2.0$ の間にあり、 10^{41} から $10^{46} \text{ erg sec}^{-1}$ の範囲の光度を持つ異なる天体間で観測されるスペクトル指数の範囲 (Mushotzky 1984; Petre et al. 1984; Reichert et al. 1985; Pounds 1985; Urry 1986) と同じである。

最後に、MCG-6-30-15とNGC4051のそれぞれについて、図15、図27から解るように、30-50keVのあたりで強度の逆転があると考えられる。これは、スペクトルの傾きが急になると、50keV以上の光度が減少することを意味している。

このような観測事実にもとずいて、X線連続成分の輻射機構にどのような制約が与えられるであろうか。 α と光度の正相関を、AGNの光度の範囲である5桁に対して外挿すると、期待される α の範囲が、観測された α の範囲よりもずっと大きくなる。この見かけの矛盾は、スペクトル指数が光度と、異なる天体間で光度と平衡を保つ他のいくつかの変数の関数であることを示している。例えば、X線源の大きさを R とすると、多くのモデル (Lightman and Zdziarski 1987) で重要な変数となるち密度 (compactness parameter) l_x は次式で定義される。

$$l_x = L_x \sigma_T / (R m_e c^3) \quad (11)$$

ここで、 L_x は2-10keVの光度を表す。しかし、いくつかの異なるAGNで得られた L_x と α の分布には、きれいな相関はみられない (例えば Lightman and Zdziarski 1987)。ところがこのことに関しては、この分布を散らばらせるような、以下のような効果が考えられる。

- 1) l_x 以外の変数により、スペクトル指数が決まる。
- 2) X線源の大きさ R は、時間変動の最小の時間によっては、正しく測られない。この効果は、パワースペクトルが f^{-1} で表されるような天体では、特に重要である (Lawrence et al. 1987)。実際、MCG-6-30-15とNGC4051は、どちらもこのようなパワースペクトルを持っており、今までの観測で見つかったものよりも約一桁短い時間での変動が見つかった。この為に l_x は (Lightman and Zdziarski) が使ったものよりも、約10倍大きくなる。
- 3) MCG-6-30-15以外の天体も、10keV以下の光子を吸収してしまうような非常に厚いガスによって、部分的に覆われているなら、観測される2-10keVの光度 L_x は、本当の光度の一部 (f_{cov}) でしかない。従って、異なる天体間では、 f_{cov} が異なるために、観測される l_x の分布が広げられるのかも知れない。

観測された光度とスペクトル指数の正相関によって、放射のモデルに対して強い制約を与えることが出来る。例えば、低エネルギー光子が、温度が変化するような熱い電子によってコンプトン化される場合は、光度 L_x が増加すると、スペクトルの傾きは緩やかになる (Guilbert et al. 1982) ので、このようなモデルは除外することが出来る。つぎに、電子対生成モデル (Lightman and Zdziarski 1987) について考えてみる。まず、相対論的な電子が存在し、低エネルギー光子が継続的に供給されるような球状の X 線源を考える。低エネルギー光子や、より高次の光子のコンプトン散乱と、電子対生成を考慮して、定常状態に対する光子スペクトルが計算されている。このモデル計算で、X 線スペクトルの形を決める主な変数は、電子と低エネルギー光子のち密度、及び電子分布の形である、1つの天体内で起こるスペクトル変動について考えるために R を固定すると、ち密度が光度に定数をかけた形になる。変数の値を変えると、 α と l_x の間の関係も変わってくるが、どの場合も l_x が増加すると α も増加する。一方、低エネルギー光子の光度変化によって、スペクトルの変動が示されているものには、MCG-6-30-15やNGC4051で観測されたような30-50keVあたりでの強度の逆転がみられる。

最後に、3C120を除いて α と L_x の間の相関を示すものは、低光度活動銀河 ($L_x < 10^{43} \text{ erg sec}^{-1}$) である。このことも輻射モデルに対して別の重要な制限を与えるであろう。しかし同様な効果は、高光度活動銀河で一般的にみられるように、典型的な X 線観測時間よりも長い時間単位で変動する天体の場合は、観測する天体の選択性による効果としても説明できるであろう。

謝 辞

データ解析に不慣れな著者を研修生として快く受け入れてくださり、解析の基本から論文作成についてまで終始変わらぬ指導を賜り、貴重な議論をして頂いた理化学研究所・宇宙放射線研究室の松岡勝主任研究員に心より感謝致します。また同じく理化学研究所・宇宙放射線研究室の河合誠之研究員には、コンピュータの扱い方や、データの処理の仕方について丁寧に指導して頂き感謝しております。

AGN 全般についての豊富な知識と、データ解析に対する鋭いアイディアを提供して頂き、貴重な議論もして頂いた TE.S.R.E., C.N.R. の L. Piro 博士、および、この論文で扱った2つのセイファート銀河について最初に手がけ、多くの助言を頂きました宇宙科学研究所の村上敏夫博士、さらにこの研究の間にいくつかの批判的な議論もして頂いたイギリス・レスター大学の K. A. Pounds 教授、K. Nandra 博士、G. C. Stewart 博士に対し感謝の意を表します。

また、NGC4051について未公表のデータを扱うことを快く承認して頂きました名古屋大学の国枝秀世博士に深く感謝致します。

なお、この研究は「ぎんが」衛星の誕生なくしては達成し得ないものであり、この衛星を成功に導いて頂いた榎野文命教授をはじめとする宇宙科学研究所を中心とした「ぎんがチーム」の多くの皆様に感謝致します。

最後になりましたが、この論文に至るまでには、物理学の基礎的なご指導と暖かいご支援を頂き、また、理化学研究所に出入りすることを快く承諾して下さいました東茂教授、中川

道夫助教授に感謝致します。

付録 A ポアソン分布吸収体モデル

連続成分を放射する領域が、一定のコラム密度を持ついくつかの雲状の塊によって吸収を受ける場合で、視線にある塊の数がポアソン分布に従うと考える (Wachter et al 1988). すると、放射の連続成分は

$$T(E) = \sum_{i=0}^{\infty} f(i) \exp(-\sigma(E) \cdot i \cdot N_{\text{HC}})$$

の吸収を受けることになる。ここで、

$$f(i) = \frac{\mu^i e^{-\mu}}{i!} \quad : \text{ 平均値 } \mu \text{ を持つポアソン分布}$$

$$\sigma(E) \quad : \text{ エネルギー } E \text{ における吸収の断面積}$$

$$N_{\text{HC}} \quad : \text{ 1つの塊のコラム密度}$$

である。1つの塊の光学的厚さを

$$\tau_c(E) = \sigma(E) \cdot N_{\text{HC}}$$

とし、視線にある塊の平均の数を μ とすると

$$\begin{aligned} T(E) &= e^{-\mu} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{\mu^i}{i!} \exp[-\tau_c(E) \cdot i] \\ &= e^{-\mu} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{\mu^{\{1 - \tau_c(E)/\ln \mu\} \cdot i}}{i!} \\ &= \exp[-\mu \{1 - \mu(-\tau_c(E)/\ln \mu)\}] \\ &= \exp[-\mu \{1 - \exp(-\tau_c(E))\}] \end{aligned}$$

但し、途中の式の変形で

$$\exp(x) = \mu^{x/\ln \mu}$$

$$\exp(x) = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{x^i}{i!}$$

を使った。

従って、この結果は、一様な吸収物質と等価な光学的厚さが、

$$\tau_{\text{eq}}(E) = \mu \{1 - \exp(-\tau_c(E))\}$$

となることを示している。すると、 $\tau_c(E) \ll 1$ のときは

$$\tau_{\text{eq}}(E) \simeq \mu \cdot \tau_c(E)$$

また $\tau_c(E) \gg 1$ のときは

$$\tau_{\text{eq}}(E) \simeq \mu$$

となって

$$T(E) = \exp(-\mu)$$

であるから、連続成分の $\exp(-\mu)$ の割合だけが観測されることになる。逆に言えば、連続成分が、吸収物質によって覆われている割合は

$$f_{\text{cov}} = 1 - \exp(-\mu)$$

である。

参 考 文 献

- Antonucci, R. R. J. and Miller, J. S. 1985, *Ap. J.*, **297**, 621.
 Arnaud, K. A., et al. 1985, *M. N. R. A. S.*, **217**, 105.
 Barr, P. and Mushotzky, R. F. 1986, *Nature*, **320**, 421.
 Bevington, P., R. 1969, "Data Reduction and Error Analysis for the Physical Science", (New York: McGraw-Hill)
 Branduardi-Raymont, G. 1986, in "The Physics of Accretion onto Compact Objects", ed. s. K. O. Mason, M. G. Watson and N. E. White (Berlin: Springer-Verlag), p.407.
 Guilbert, P. W. and Rees, M. J. 1988, *M. N. R. A. S.*, **233**, 475.
 Halpern, J. P. 1984, *Ap. J.*, **281**, 90.
 Halpern, J. P. 1985, *Ap. J.*, **290**, 130.
 Hayashida, K. et al. 1988, *Publ. astron. Soc. Japan*, in press
 Holt, S. S. et al. 1980, *Ap. J. (Letters)*, **241**, L13.
 Kallman, T. R. and McCray, R. 1982, *Ap. J. Suppl.*, **50**, 263.
 Koyama K. et al. 1988, *Publ. Astron. Soc. Japan*, in press
 Krolik, J. H. and Kallman, T. T. 1984, *Ap. J.*, **286**, 366.
 Kwan, J. and Krolik, J. H. 1981, *Ap. J.*, **250**, 478.
 Lawrence, A. and Elvis, M. 1982, *Ap. J.*, **256**, 410.
 Lawrence, A., Watson, M. G., Pounds, K. A., and Elvis, M. 1985, *M. N. R. A. S.*, **217**, 685.
 Lawrence, 1987, *Nature*, **325**, 694.
 Lightman, A. P. and Zdziarski, A. A. 1987, *Ap. J.*, **319**, 643.
 Lightman, A. P. and White, T. R. 1988, *Ap. J.*, **335**, 57
 Makino, F. et al. 1987, *Astrophys. Letters and Communication*, **25**, 223.
 Matsuoka, M., Ikegami, T., Inoue, H., and Koyama, K. 1986, *Publ. Astron. Soc. Japan*, **38**, 285.
 Morrison, R. and McCammon, D. 1983, *Ap. J.*, **270**, 119.
 Mushotzky, 1982, *Ap. J.*, **256**, 92.
 Mushotzky, 1984a, *Adv. Space. Res.*, Vol. 3, No. 10-12, p157.
 Mushotzky, 1984b in "X-ray and UV emission from Active Galactic Nuclei", ed. W. Brinkmann and J. Trümper (Garching: Max Planck Institut), p. 108.
 Pan, H. C., Stewart, G. C., and Pounds, K. A. 1988 in "Physics of Neutron Stars and Black Holes", ed. Y. Tanaka (Tokyo: Universal Accademy Press), p. 375.

- Perola, G. C. et al. 1986, *Ap. J.*, **306**, 508.
- Petre, R., Mushotzky, R. F., Krolik, J. H., and Holt, S. S. 1984, *Ap. J.*, **280**, 499.
- Piro, L., Massaro, E., Perola, G. C., and Molteni, D. 1988, *Ap. J. (Letters)*, **325**, L25.
- Pounds, K. A. 1985 in "Japan-US Seminar on Galactic and Extragalactic X-ray sources", ed. Y. Tanaka and W. H. G. Lewin (Tokyo: ISAS), p. 261.
- Pounds, K. A., Turner, T. J., and Warwick, R. S. 1986a, *M. N. R. A. S.*, **221**, 7P.
- Pounds, K. A., Warwick, R. S., Culhane, J. L., and de Korte, P. 1986b, *M. N. R. A. S.*, **218**, 685.
- Pounds, K. A., and Turner, T. J. 1986 in "Variability of Galactic and Extragalactic X-ray sources", ed. A. Treves (Milano: Associazione Avanzamento Astronomia), p. 1.
- Reichert, G. A., Mushotzky, R. F., Petre, R. F., and Holt, S. S. 1985, *Ap. J.*, **296**, 69.
- Reichert, G. A., Mushotzky, R. F., and Holt, S. S. 1986, *Ap. J.*, **303**, 87.
- Shakura, N. I. and Sunyaev, R. A. 1973, *Astron. astrophys.*, **24**, 337.
- Turner, M. et al. 1988, *Publ. Astron. Soc. Japan*, in press.
- Turner, T. J. 1987, *M. N. R. A. S.*, **226**, 9P.
- Urry, C. M. 1986 in "Variability of Galactic and Extragalactic X-ray sources", ed. A. Treves (Milano: Associazione Avanzamento Astronomia), p.15.
- Wachter, K. W., Strauss, M. A., and Filippenko, A. V. 1988, *Ap. J.*, **330**, 91.
- Wang, B., Inoue, H., Koyama, K., Tanaka, Y., Hirano, T., and Nagases, F. 1986, *Publ. Astron. Soc. Japan*, **38**, 685.
- Warwick, R. S. et al. 1988, *Publ. Astron. Soc. Japan*, in press.
- Wilkes, B. and Elvis, M. 1987, *Ap. J.*, **323**, 243.
- Yaqoob, T. et al. 1988, *M. N. R. A. S.*, in press.