

【参考文献】

- Hasinger 1987, preprint, submitted to A&A.  
Ikegami 1987, Ph.D.thesis, University of Tokyo.  
北川 1987、宇宙圏シンポジウム（昭和61年度）収録、P47。  
Makishima 1986, in Symposium on X-ray Time Variability, Inuyama Japan,  
ed. by Hayakawa and Nagase, ISAS R.N. 313.  
正木・他 1986, 宇宙圏シンポジウム（昭和60年度）収録、P32。  
McHardy & Czerny 1987, *Nature* 325, 696.  
満田・池上 1986、宇宙圏シンポジウム（昭和60年度）収録、P34。  
Mitsuda 1984, Ph.D.thesis, University of Tokyo, ISAS R.N.254.  
Mitsuda et al. 1987, in COSPAR/IAU Symposium on the Physics of Compact  
Objects: Theory versus Observations, Sofia Bulgaria, ed. by White.

『ぎんが』による白鳥座 X-1 の時系列解析

阪大理 北本俊二・宮本重徳

1. 序

白鳥座 X-1 (Cyg X-1) は、ブラックホール候補として知られる X 線星である。大ざっぱなモデルとして、O 型の超巨星とブラックホールが 5.6 日の周期で互いに公転しており、O 型の超巨星からブラックホールに物質が流れ込んでいると考えられている。流れ込んだ物質は、回転しながら円盤状にブラックホールに落ち込んでいき、その時に重力エネルギーが物質同士の摩擦で熱エネルギーに変換され、高温となって X 線を放射しているというわけである。

ブラックホール候補と呼ばれる X 線星は、いくつかあるが、それらの現象論的特徴の一つが、数秒からそれ以下の時間スケールでのカオス的な X 線強度の変動である。

我々は、その変動の特徴を調べて、それが、どのような機構で起こっているのかを研究している。ここでは、その時間変動のフラクタル的振舞いとカオス的な振舞いについて調べた結果を報告する。

2. 観測

X 線天文衛星『ぎんが』は、Cyg X-1 を 1987 年 8 月 5 日から 8 月 8 日の間観測した。特に 8 月 5 日は、短時間での振舞いを調べるために、表-1 に示すようなエネルギーバンドと時間分解能で約 8580 秒観測を行った。ここで報告するデータは、このデータを用いた解析である。

表 - 1

エネルギーバンド	最小時間分解能
1.2- 5.7 keV	1 msec
1.2-15.8 keV	1 msec
5.7-24.4 keV	2 msec
15.8-24.4 keV	2 msec

### 3. 解析と結果

#### 3-1. ライトカーブとフラクタル

図-1は、四つのエネルギーバンド各々で、横軸を時刻、縦軸を62.5ミリ秒当たりの検出した光子数を示してある(この様な図をライトカーブと呼ぶ)。いろいろな時間スケールでの変動がみられる。図-2は、1ピン当たりの時間を2ミリ秒、20ミリ秒、200ミリ秒として、四つのエネルギーバンドの光子数の合計を縦軸に示した。各々の時間スケールで変動がみられる。2ミリ秒ピンのライトカーブでは、ポアソンノイズによるゆらぎが大きくてはっきりしないが、比較的変動が少ないように

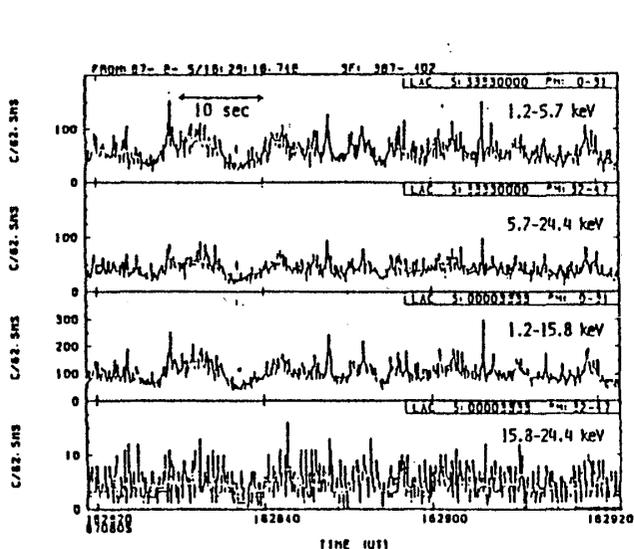


図-1。四つのエネルギーバンド各々の、62.5ミリ秒ピンのライトカーブ。いろいろな時間スケールでのカオス的変動がみられる。

見える。

このことを別の見方で調べるために、パワースペクトルによる解析を

行った。図-3は、三つのエネルギーバンドでのパワースペクトルである。大ざっぱには、巾の値が-1の巾関数である。このことは、ライトカーブのフラクタル次元がほぼ2であることを意味する。しかしながら、15.8~24.4keVのエネルギーバンドを除くと、パワースペクトルは、明らかに単一の巾関数からずれている。

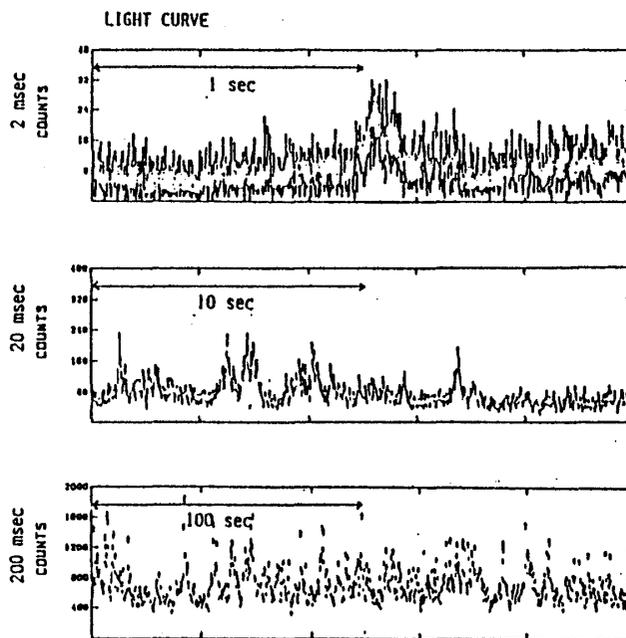


図-2。2ミリ秒、20ミリ秒、200ミリ秒ピンでの四つのエネルギーバンドを加算したライトカーブ。2ミリ秒ピンでは、ポアソンノイズが大きいが、変動のしかたが単純になっている。

そこで、パワースペクトルを800 $\mu$ 秒より周期が長い成分と、短い成分で各々の巾を求めた。

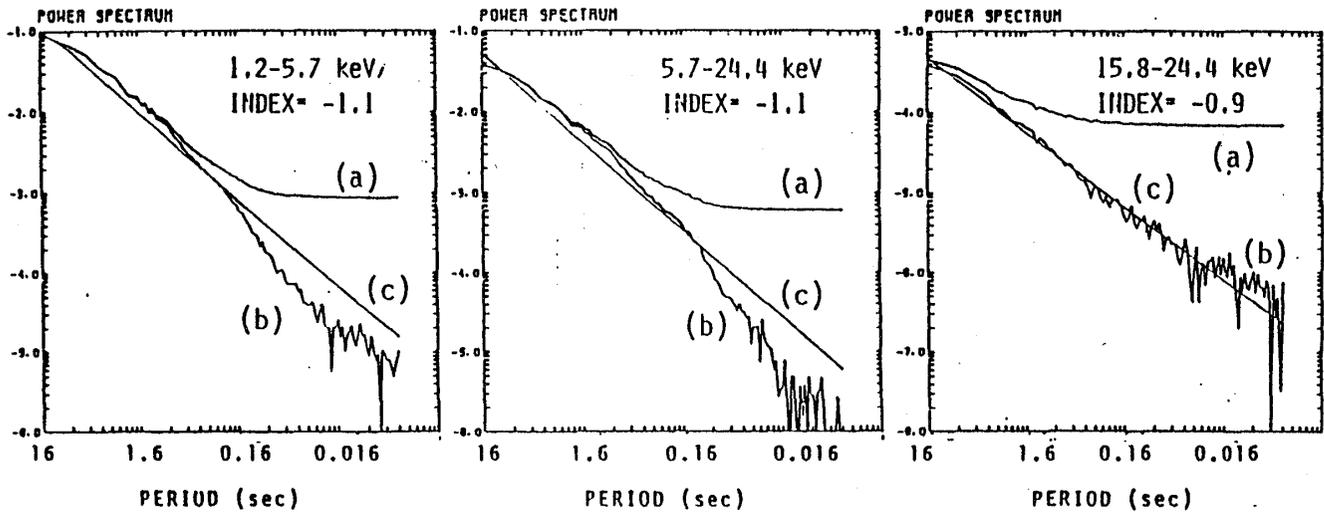


図-3. 三つのエネルギーバンドでのパワースペクトル。(a)は、データのパワースペクトル。(b)は、データのパワースペクトルから、ポアソンノイズによる寄与を差し引いたパワースペクトル。(c)は、もっとも良く合う巾関数。

エネルギーバンド、1.2~5.7、1.2~15.8と15.8~24.4keV各々で、周期が800 $\mu$ 秒より長い成分では、-0.85、-0.84、-0.82、短い成分では、-1.41、-1.45、-0.97であった。即ち、15.8~24.4keVのバンドを除くと、約800 $\mu$ 秒より周期の長い成分では、フラクタル次元は約2かそれより大きく、それより短い成分では、約1.8の次元となる。

次に、変動の特徴的時間スケールを調べるために変動率関数を用いた。変動率関数とは、次式で定義される(Ogawara et al.1977,Nature,270,154)。

$$\eta(\Delta t) = (\sigma^2 - \langle D \rangle)^{1/2} / (\langle D \rangle - B)$$

ここで、 $\Delta t$ は、計算するとき使ったデータの1ピン当たりの時間で、 $\sigma$ と $\langle D \rangle$ は、その時の標準偏差と平均であり、 $B$ は、バックグラウンドである。即ち、変動率関数とは、バックグラウンドはポアソンノイズ以外の変動はないと仮定して、信号自身の変動の標準偏差を、データの分散からポアソンノイズによる分散の寄与を引くことにより求め、それを、信号の大きさに割ったものである。この関数を $\Delta t$ を横軸に書いたのが図-4である。この関数の傾斜がその時間スケールでの変動の大きさを示している。図-4から、15.6~24.4keVのエネルギーバンドを除くと、時間スケールが小さくなるほど変動の大きさが小さくなり、数十 $\mu$ 秒以下では変動が殆どなくなっていることが判る。

まったく別の観点で時間変動の解析をした例として、2種類のエネルギーバンドの時系列データの間のカロススペクトルを計算し各周波数での時間のずれを図-5に示す。この図から、高エネルギー側のX線が遅れていることは、明らかである。また、周期の長い成分ほど長い時間のずれを示し、時間のずれは、数秒の

周期の成分で数 $10^3$ 秒にも及ぶ。それより長い周期の成分は、ほぼ一定値を示している。更に長い周期の成分は、時間のずれが小さくなる（図には示していない）。また、エネルギーバンドの離れた、データほど、時間のずれが大きい。もし、ふたつのエネルギーバンドの時系列データがまったく同じ様なフラクタル的な時系列データであれば、時間の遅れは、周期に比例して大きくなる。図-5のデータは、約1秒以下の時間スケールでは、ほぼ時間のずれは、周期に比例しているが、それより長い周期の成分では、比例性は崩れている。このことは約1秒の時間スケールの前後で変動の物理的原因が違っているか、または、約1秒の時間スケールの機構によって影響を受けていると推定される。（北本、宮本、1987、宇宙圏シンポジウム）

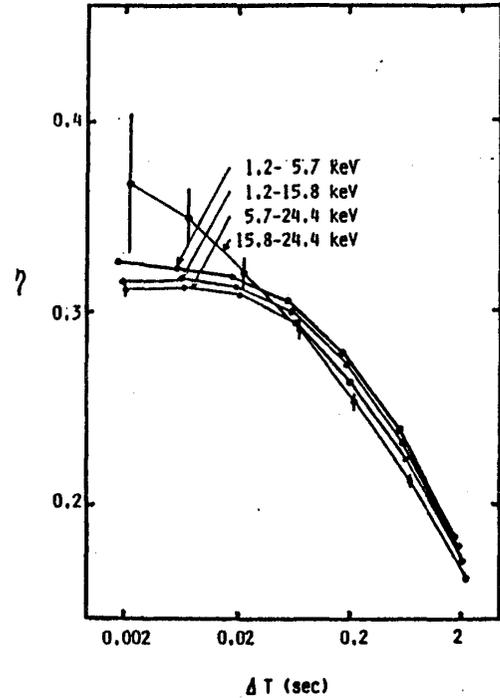


図-4. 四つのエネルギーバンドでの変動率関数。15.8-24.4keVのバンドを除くと、数 $10^3$ 秒以下の時間スケールでの変動は小さくなっている。

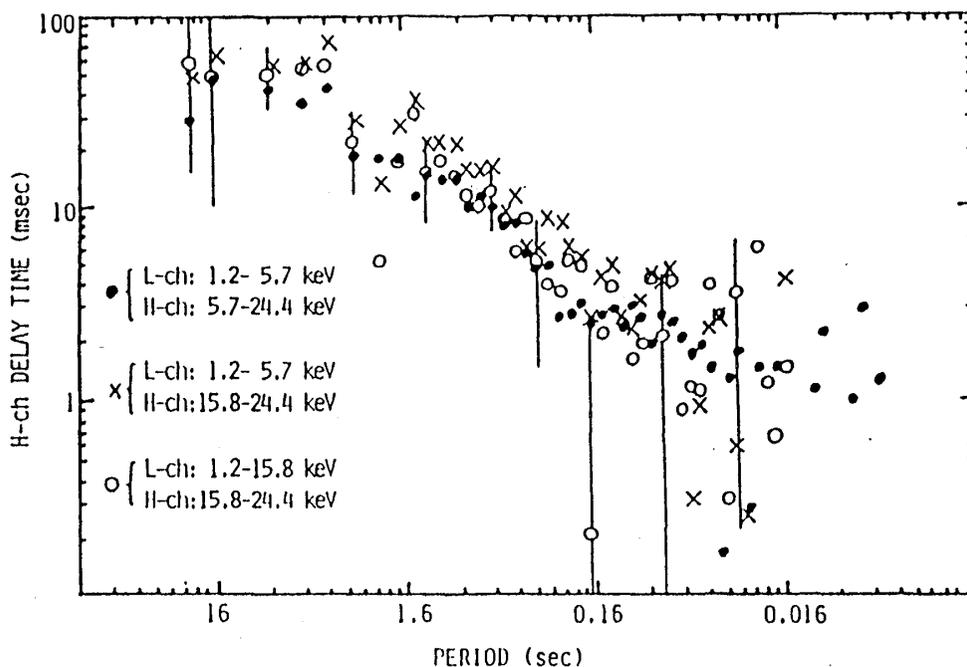
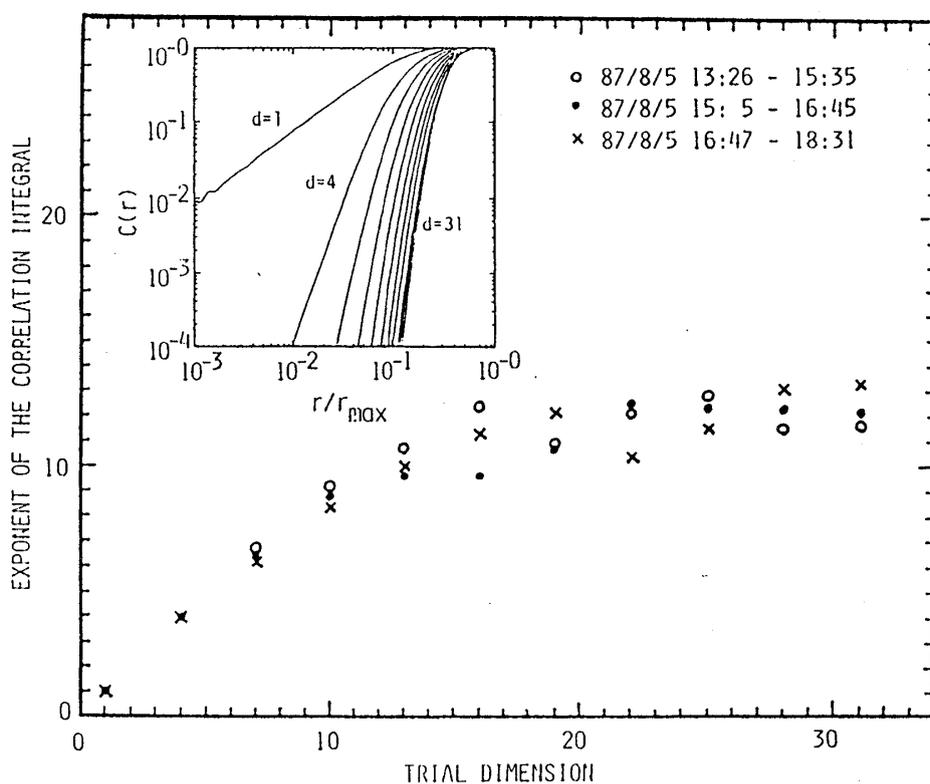


図-5. 3種類にエネルギーバンドの組合せでの、クロススペクトルにより求めた、時間のずれ。高エネルギー側が、遅れており、長い周期を持つ成分は、長い時間の遅れを持つ。数秒の周期の成分辺りで、数十 $10^3$ 秒の時間のずれを示し、それより遅い成分では、時間のずれは大きくなる。また、エネルギーが離れたバンドの組合せが、平均的に長い時間のずれを示す。



図一六。ライトカーブのアトラクターの次元。試行次元を横軸に取り、相関関数の距離に対する増加具合を相関関数としたときのものを縦軸に書いてある。ポアソンノイズの影響は考慮されていない。小さい図は、距離に対する相関関数の図である。図の中に示した  $d$  は、試行次元である。

この解析により、Cyg X-1のX線強度の時間変動に関して、パワースペクトルと変動率から、短い時間スケールほど変動のしかたが小さい（フラクタル次元が小さい）ということが判った。また、二つのエネルギーバンドの時系列データ間の周波数空間における時間のずれは、約1秒の時間を境に変化していることが判った。これらの変動の大きさや、時間スケールが物理的にどのような機構と関係しているのか調べるのが今後の課題である。

### 3-2. カオスの振舞い

図一六のライトカーブにみられるように、Cyg X-1のX線強度は非常に複雑な時間的変動を示している。そこで、相関関数を用いて、アトラクターの次元を導出した。相関関数とは、データ  $\{d_i\}$  を使ってある試行次元  $k$  でのベクトル  $\mathbf{x}_i = \{d_i, d_{i+1}, \dots, d_{i+k}\}$  を作り、二つのベクトルの距離  $r$  の関数として次のように定義する。

$$C(r) = (1/(N*(N-1))) \sum \sum \Theta (r - |x_i - x_j|),$$

$$\begin{aligned} \text{但し } \Theta(x) &= 1 & (x > 0) \\ &= 0 & (x < 0) \end{aligned}$$

もしデータのアトラクターが次元  $k_0$  であったとすると、 $k < k_0$  では、ベクトルは、その  $k$  次元空間を埋め尽くすので、 $C(r) \propto r^k$  となる。また、 $k > k_0$  では、アトラクターは  $k$  に関係なく、 $C(r) \propto r^{k_0}$  となる。

図-6 は、横軸に試行次元を書き縦軸に相関関数の距離に対するデータの増加する割合を巾関数と仮定してその巾を示した。データは、1ピン195 $\mu$ 秒で3種類の時系列データについて計算したものである。図の中に書いた小さな図は、距離に対する相関関数のグラフである。大きな試行次元での計算では、巾が非常に急になり、正しく巾を求めることは難しい。ここでは、相関関数が、 $10^{-4}$  から  $10^{-3}$  の間での平均の巾を求めた。その結果、大きな試行次元で計算したときおよそ1/2の巾が求められる。しかし、大きな試行次元では、巾の値は計算する範囲により大きく変化し、相関関数は、距離に対する単一の巾では表わすことができないことが判った。現在のところ、アトラクターの次元を決定することはできていない。

#### 4. 結論

ここでは、Cyg X-1のX線強度のフラグタル的振舞いとカオス的振舞いについて調べた結果を報告した。今後、これらの概念やテクニックを使って、なんらかの物理的描像やパラメーターの導出が出来ることを期待している。