

Cyg X-1 をめぐって

小 田 稔*

はじめに

私達はこのところX線源, Cyg X-1 にとりつかれたようになっていて*, それはこの天体が, 星が最も極限的に圧縮される結果として, 常識的には何とも奇妙な天体, ブラックホールではないのかと想像されるからである. そしてこれが他のX線星とはきわだって異なる特徴として激しい時間変動をともなっていて何かブラックホール自身か, あるいはその周辺の空間の性質を反映しているかと考えられるからである.

ブラックホールに対する興味のもち方は, いわば2通りあると思う. 1つは, 勿論, 本当にブラックホールが実在するのかということである. もう1つは, それがどんな物理的性質をそなえたものか, つまりその周辺でどんなことが起きているのかという問題である. これは中性子星周辺の問題ともある程度共通した極限状態での物質(プラズマ?)や空間の問題だろう.

仮に Cyg X-1 をブラックホールとみとめるとすると, その時間変動の様子 (Variability とよぶことにしよう) はこのブラックホールまたはその周辺の物理について何かの手掛りを与えることになるだろう. というより, 今のところそれしか手掛りがない. そういうわけで, これまでに Variability について得られている数少ないデータは必ずしもすべて良質の, 十分な統計精度をもつものではないが, 今のところ, かけがえのないデータとしていじりまわしているのである**. そうしてその結果を1まつも2まつもの不安を残しながら, Suggest とか Indicate とかずるい表現をつかって幾度か公表してきた.

この辺のいきさつ, 楽屋ばなしをしてみようと思う. 研究はまとまった成果だけが問題にされるのであって, 途中のいきさつや苦心談などをしゃべってはいけなことはない. 若い頃に先生から何度も教わったところである. それは重々承知しているのだが, ブラックホールという話題は物理学にとって大変重要なことだと, 私は思うし, しかもすっきりした実験やその解析までまだ時間がかかると思うので, ここでやや宣伝を試みて, なるべく多くの方々の関心をひき, 考えて戴きたいと思うのである. 或いは, 仲々すっきりした文句のない形にまともでないことの悲鳴だとして戴いても結構である.

* 宇宙航空研究所
M. Oda: On Cyg X-1

1. Cyg X-1 は近接連星だった

まず, Cyg X-1 がブラックホールかと考えられるに至ったいきさつを復習してみよう. もともと, 2年程前に Uhuru 衛星にあってその奇妙な Variability を見つけたときに, Giacconi と一緒にこんな奇妙なことはブラックホールでもなければ起きないのではないかと言ったことがある. もう少し理屈らしいものはつけたが, 本質的にはその程度の話だった. それがもっとしつかりした根拠からブラックホールといわれだしたのである.

Cyg X-1 の位置を精密に決めようという努力は 1966 年以来, ASE (Giacconi の一統が MIT と協力して X 線天文学を生み育ててきたところ. Giacconi 達は最近 Harvard に移った.) グループによるロケット, 東大宇宙研による数次の気球観測, ASE による Uhuru 衛星, そして MIT によるロケットによってなされてきた. そして 1971 年春頃には Uhuru, 宇宙研の気球, MIT のロケットの結果が一斉に煮つまって Ap. J. Letter の同じ号に出たのである. こうしてきまった Cyg X-1 の位置を Leiden Observatory (Westerbork) の干渉計がそう索した結果, 1971年4月に $16^{\text{h}}56^{\text{m}}28^{\text{s}}.8 \pm 0.15^{\text{s}}$ に 1415 MHz で 20 m f.u. 程の強度の電波源を発見した. しかもそれはその2ヶ月程前には存在しなかったというのである***. この電波源はまた NRAO の Hjelming によ

* 宇宙研の宮本重徳, 小川原嘉明, 松岡勝, 高岸邦夫, 理研の和田雅美が折にふれ集まってきて, 手を出したり口を出したりしている.

** 今のところ使えるデータは Uhuru 衛星による時分解能 96 msec のデータ, MIT ロケットによる分解能 1 msec の 80 秒間のデータ, 東大宇宙研のカッパ10型による分解能 0.62 msec 約30秒間のデータである. 仮に Uhuru の分解能が, 1 msec であり, MIT や宇宙研の X 線計数管の面積が4倍程も大きかったらもっとはっきりものが言えるだろう. そういう実験は今後なされなければならないが技術的に易しいことではない.

*** この観測には, 実は主に MIT の結果, そして Uhuru の結果が使われたようで, 同時に公表されているながら宇宙研の結果は使われていないようである. 宇宙研の結果は Uhuru の最初の結果の誤りを直すのに使われたので無駄ではなかったとは思いますが, やや空しいような気がしないでもない. 何とんでも欧米のグループに比べて情報の流通の遅い我々としてはもっと aggressive に我々の知ったことは早く流さなければならぬという気がする.

っても確認された。

所がまさにその位置に明るい ($m_v \approx 9.1$) B_{01b} 型の星, HDE 226868 が居るのである。これは、正常な Super giant の特性をそなえている星である。通常の星が輻射するエネルギーの 1000 倍以上ものエネルギーを X 線として放出するという性質をもつとは考えにくい。そうするとこの X 線星は HDE 226868 と近接連星を形成しているのではないかという考え方が出てくる。この星の話を聞いて筆者が天文台に話をもちこんだのは 7 月末になっていたと覚えている。筆者に話が聞えてくるのにも若干の時間があつたが、また筆者もしばらくこの情報を暖めたままにしていたように思う。ともかくこうして天文台では 2 つの観測が行なわれた。

その 1 つはその秋 9 月に大沢氏の指示によって、市村氏等によって、宇宙研が三陸にある気球観測所で行なつた Cyg X-1 の気球観測に合せて行なわれた測光観測である。これは観測は両方ともちゃんと行なわれたが特別な相関を見ることは出来なかつた。もう一つは寿岳氏によって行なわれた HDE 226868 のドブラー効果の観測である。これは、もし余り軽くない X 線星が HD 226868 と近接連星になっているならば、この星から周期的なドブラー効果が認められる筈である、という発想によるものであつた。観測は 9 月に行なわれたが、天候および日数の制限のためにドブラー効果の周期性を発見するには至らなかつた。

丁度この頃、寿岳氏の発想と全く同じ考え方で独立に Toronto と Greenwich の天文台がこの観測をやっていた。そして、5.6 日という周期、そして最高視線速度 64 km/秒を発見したのである。筆者がもうひと月話を早くもちこんでいたら、とは毎度寿岳氏に責められる話である。

2. Cyg X-1 はブラックホールか?

この近接連星の周期と視線速度とから、われわれがこ

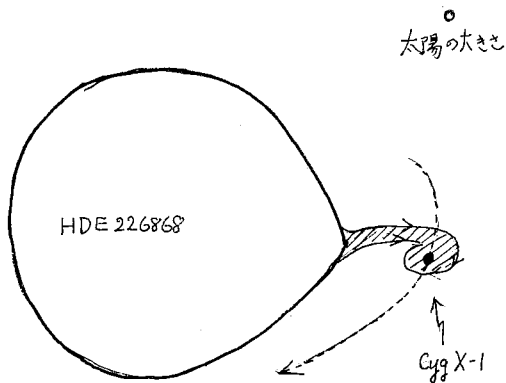


図 1 Cyg X-1 は HDE 226868 と近接連星をつくっている。

の連星系をみる inclination i を与えれば、その重心から星の中心までの距離と $\frac{m^3 \sin^3 i}{(m+M)^2}$ (M, m はそれぞれ今測定した星とその相手の星の質量) を計算する事ができる。更に今 X 線星が放出する多量のエネルギーの源が、HDE 226868 から X 線星に落ちていく物質の重力エネルギーだと考えると、HDE 226868 は Roche lobe 一ぱいに出してあふれている筈である。また、X 線星がこの 5.6 日周期で、このふくれ上がった星にえんべいされている形跡は全くない。このことからインクリネーションに条件がつく。これだけの条件から、X 線星の重さ、 m を $2M_\odot$ 以下におさえることが大へん難かしいという議論をすることが出来る。 $m < 2M_\odot$ にしようすると、 $M < 3M_\odot$ でこれが太陽半径の 8~9 位にふくれ上つてしかも、B₀ 星の特徴をそなえるというありそうもないことになるからである。星の進化の理論からは、 $M \sim 20M_\odot$, $m \sim 10M_\odot$ とするのが最も自然なことになる。ところで、X 線星を高密度星とすると、(後にのべる極めて早い時間変動から X 線星は大へん小さな天体であることが明らかである。) $m > 2M_\odot$ ならば、一般相対論の必然的な帰結として、これは重力崩壊をする、いわゆるブラックホールになるということである*。

この話の筋書をもっとクリチカルに見て、必ずしも $m > 2M_\odot$ ではなくてもよいとする話 (例えば、近藤洋二氏のプレプリント) もないではないが、これはかなり無理な、きわどい議論で上のすじみちを逃げなければならぬようである。

3. Uhuru の見た時間変化

さて、この少くともブラックホールの疑いが極めて濃い Cyg X-1 の variability の話に移っていこう。この星の X 線強度はあらゆるタイムスケールで激しく変動している。もともと Cyg X-1 は X 線天文学のごく初期からその明るさについていくつかの矛盾する報告があつて、これが長期間の時間変化によるものかという疑いはあつたが、はじめてはっきりした形で変動をとらえたのは Uhuru 衛星である。図 2 は Uhuru がとらえた数ヶ月間の変動を示している。縦の棒はそれぞれの月の中での変動の幅を示している。Uhuru の主目的は全天をサーベイして X 線源の完全なカタログをつくることだつた。この衛星は、主軸のまわりを自転することによって軸に直角な検出器の視野が天空をスキャンするようになっている。その出力を自転の周期で長時間にわたって重ね合わせることで、それまでのロケット観測では検出出来なかつた弱い X 線源までとらえ、その位置を決定する

* 筆者はそう断定するだけの素養をもたないが、これについては、林、佐藤、杉本、浜田、諸先生の御意見を引用させていただく。

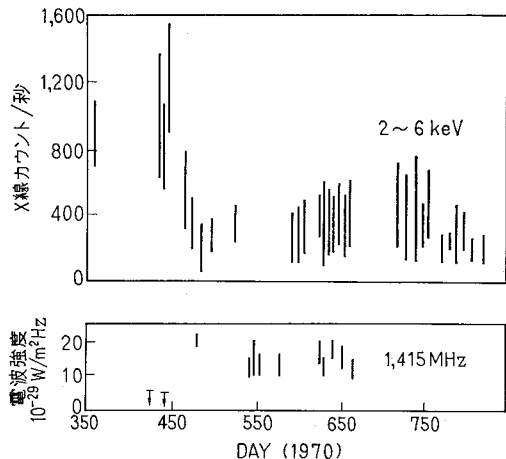


図2 Cyg X-1 の X 線強度，電波強度の変動

というプログラムが出来ていた。

X線源の時間変化については，パルサーを検出するプログラムはあったが速い不規則な変動は用意されていなかった。ここで1つだけ自慢話をさせて戴くことにする。1970年暮に Uhuru が観測を開始して間もなく，この観測に立合うことになった筆者は Giacconi とともに，ひょっとすると極めて速い変動があるかもしれない，そして Variability とでもいうものが X 線源の特性を記述するパラメータの1つになるかもしれないと感じはじめたので，プログラムの一部を変更したのである。こうして多数の X 線星が変動していることがわかってきた。

まずしらべたのが Cyg X-1 である。その結果，衛星の自転ともなって1度見て，次に見える12分間に強度がしばしば大きく変化するほかに，星を一回スキャンする秒の間にも激しい変動が見られた。それは時々強くもえ上ったり鋭いスパイク状の変化を見せたりした。

4. 変動は周期的か？

あるスキャンには変動が不規則ではなく周期性がみられる場合がしばしばあった。厄介なことにはスキャンによって周期が異なるように見える場合があった。もともと Uhuru のデータの送りがたは 384 msec 幅のビン毎に X 線のカウントを蓄えて送るというものである。この10個のスキャンをその中の目立つピークに合せて重ねて見ると図のように(図3) 1.4 秒という周期らしいものが見られた。この20秒ほどのスキャンは衛星の自転による分ほどの間隔でとびとびになっているので長い期間を通してある周期が保たれているかどうかをしらべることは，大へん難しいことだった。(はじめのうち私達は天文の方で使われていた Cooley-Tukey の簡略化されたフーリエ解析法を知らなかった。)

指令電波を衛星に送ってカウントを集積するビン幅を

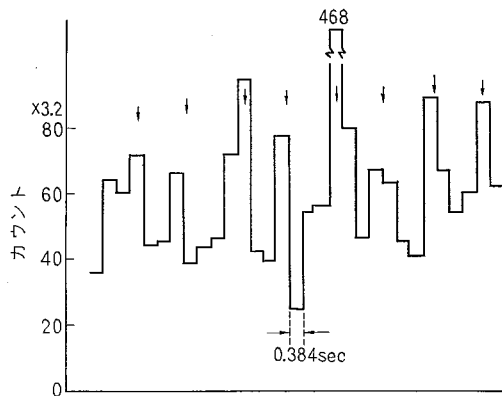


図3

96 msec に変えてみると，今度は，300 msec 程の周期が目立ってきた。そのうちに私達も Cooley-Tukey 法を会得し沢山のスキャンをこなすことは出来るようになってきたが，Uhuru は全天のカatalog 造りに忙しく，個々の星の観測は二の次になっていた*。こうしてスキャンの数が少ないこと，そしてビン幅が大きいことが解析を複雑にしていた。

こうして到達した結論は，この変動がもし一定周期によるものだとすれば，我々が見ているものは，それが一定の幅のビンで区切られていることによるビートだろう，そう解釈するならばその一定周期は，73 msec またはその(4以下の)整数倍だろうということだった。

その頃，1971年3月 MIT の Rappaport がロケット観測を準備していた。これはデータを送るビン幅が1 msec に設計されていた。この観測は，もともと別の目的をもっていたが，何とかこれを Cyg X-1 の観測にまげさせようと熱心に説得したものである。説得が功を奏し，3月末には観測が行なわれて，1 msec ビン連続80秒というデータが得られた。また Uhuru は全天サーベイが一段落した後に，衛星の姿勢のコントロールを失なう危険をおかしながら，自転をゆるめて100秒程のスキャンを数個得たりした。

一方，この話が公表されると，それぞれ40秒，8秒ほどのロケットによる観測データをもっていた，NRL，NASA の GSFC の人達が解析を追試してみた。NRL

* 結果的には Uhuru は大へん長生きしたが，軌道によって間もなく機上のテープレコーダが止ったり，送信機がしばらく働かなくなったり，いつ死んでしまうかわからなかったので，何の観測に Priority を与えるかというのは大事な問題だった。蛇足ながら日本で数年後に Variability を主眼にする衛星をとばすが，その時も何をどの順で観測するかが大へん難しい決定になる。尚，Uhuru につづく，X線天文学衛星 SAS-B ははるかに短命で数ヶ月をまたずに死んでしまった。

は 73 msec の周期は見つからぬと言ひ、GSFC はデータの Power spectrum にあらわれる多数のピークが 73×4 msec, 1.1 sec の2つの周期の振動のビートによると結論した。

MIT のデータと Uhuru の長いスキャンを解析してみると、これからは一定の周期は得られなかった。このようにして一定周期の長く続く振動はない事は明らかになってきた。にもかかわらず、データを部分的に見るとある規則性、あるいは周期性があるという強い印象はさけられなかった。Giacconi 達は、Uhuru のデータを更に解析して、一時的に振動が現われ、消えていくつまり temporal oscillation があるのだという結論を出した。

5. Temporal oscillation を探す

筆者達のグループは、10 msec で区切られた MIT の全データを詳しく解析してその dynamic spectrum をつくってみた。解析の方法としては、Cooey-Jukey 法(振幅の自乗、パワーをもとめる)、色々な振幅の振動の best fit をもとめる(振幅をもとめる)、データをテープレコーダに入れて音声の解析をする Sonograph にかける(振幅の log で表現する)等が試みられた。dynamic spectrum の1つのスケッチを図に示す。(図4) 例えば 400 msec, 800 msec 附近に振動が**出やすい**、さらにもっとこじつけるならば、矢印に示すように周期が変化するようにも見られる。MIT のデータは1秒にほぼ 600 カウント、従ってその統計的変動は1秒について2-30 である。今、見えて居る振幅は 100~200 という程度である。図にスケッチした等高線は 2.5 シグマだが、このような dynamic spectrum の中にある規則的なパターンを指摘することの統計的有意性の推定が大へん微妙なことであることが想像されよう。この図の中に、たとえば、

5~6 秒でくりかえすパターンを認めるという大たんな見方もある。電波の Bok 先生はこの図を見て、昔 21 cm 波の観測から銀河系の構造を出した頃のことを思い出すといわれたが、これが皮肉なのか激励なのかは、ちょっとわからない。

1971年末頃 Los Alamos の Terrell は Uhuru による Cyg X-1 の変動の Power spectrum は不規則に現われる多数の鋭いパルスで simulate 出来ること、そして、ある限られた長さのスキャンから得られる Power Spectrum に有意な高いピークがあってもそれだけでは振動の有無を議論出来ないことを示した。更にこのパルスの幅が 300 msec 位だろうと推定した。しかし、このことは、一時的な振動がないという証明ではない。

そこで MIT の生データ、1 msec ビンで区切られたカウントの全部と、Uhuru が取りためた Cyg X-1 のスキャンの全部が宇宙研に送られてきた。MIT のデータはあとにも先にも80秒間だけのものである。これをどうひねくりまわしても、すでにのべたようなダイナミックスペクトルの特徴もその有意性もそうかわりようもない。

もっとも、いろいろいじっている間に妙な副産物があった。それは、247 Hz ほどの周波数をもつ振動に気づいたことである。一時は一同大へん興奮したものだが、よく調べてみると、これはどうも NASA のロケットのもつテレメーター系統のくせかもしれない。また、75 ビン毎の一つカウントがぬける、という大へんなことに気がついた。つまり、NASA のロケット観測の欠陥がみえてきたのである。これだけならば、今あつかっている現象には影響はないと思うが、とも角わずかなきずかも知れないが、欠陥商品である。もっと気づかない欠陥が

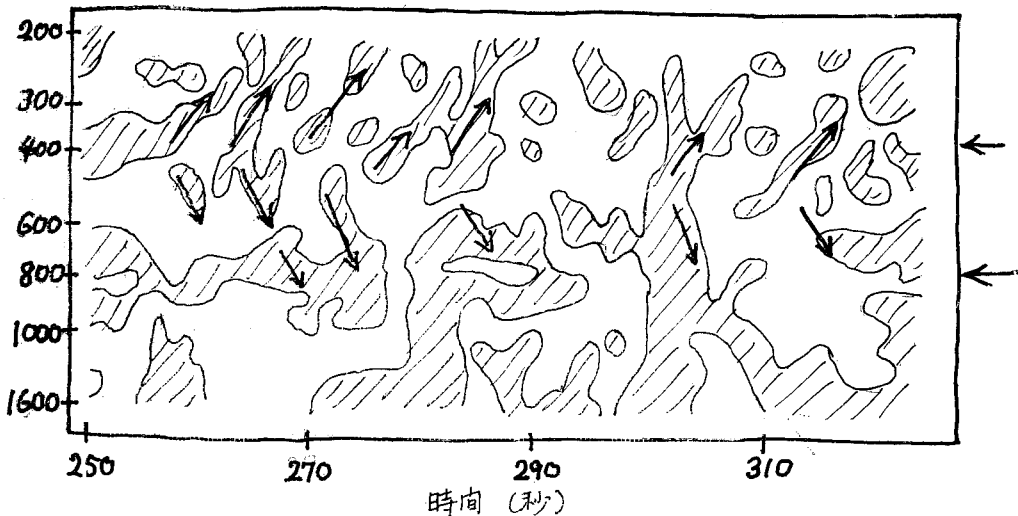


図 4

ないという保証にはならない。要するに、もっと良質のデータがほしいのである。

そこで、計画されたのが、今年2月と9月のK-10-9, K-10-10, ロケットによる観測である。この観測のためには Cyg X-1 をじっと連続して見てやる必要がある。それには、飛翔中のロケットの姿勢を制御して、カウンターの視野の中に Cyg X-1 を連続して入れてやれば、300 秒程のデータがとれることになるが、この姿勢制御が大へん高価につく。ロケット2基分の値段がする。

宮本重徳氏の苦肉の策で、ロケットに折りたたむ様にしまっておいた大きなカウンターを上空で展開し、ロケットの回転軸に平行な方向、つまり先端の方向をいつもみる様にして、ロケットはその軸が Cyg をみる頃にうつということにした。本当は Cyg X-1 を正確にねらいたいのだが、我が国では、ロケットの打ち方、季節、時間帯の選択は主に漁業の都合でがらめになっている。それで、視野をかなりひろげて、(それだけバックグラウンドが入って S/N 比はおちる) まあまあという観測を計画した。時間分解の 0.62 msec で MIT よりは、かなり良い。しかも観測時間は長いと思ったが、結果は惨たんたることになった。先ず K-10-9 は、K10 というのは安定した良いロケットなのだが、これに限って大きく姿勢をくずし首を振り、そのため、観測時間30秒ということになってしまった。おまけに K10-10 は装置にテレメータ電波をかぶるといふ今のところ原因不明な、実験者としては何ともお恥ずかしい事故に会ってしまった。こうして MIT データの様な欠かぬはないかも知れないが、細切れのデータしか手元には残らないことになった。

6. Temporal oscillation の特徴

一方 Uhuru からは、ピン幅が 96 msec という、早い現象の解析には致命的な制約はあるが、2年間にわたる沢山のスカンデータがきている。この各スカンについて Power spectrum を作ったり、Sonagram をつくったりして、全体を通じて何か共通の性質を求めて解析が行なわれた。全体を通して 1 Hz 以下の周波数でデータがざわざわしていることは明らかである。そこに何か規則的な変動があるかどうかを調べた結果が、図5である。1970年1月1日からかぞえて 486 日から 741 日に至る間に、とびとびに行なわれた20秒づつの観測の夫々の Power spectrum について、ある有意水準をこえたピークの周波数分布が(図 a)である。526-527 日には Uhuru の回転がゆるめられ1回100秒のスカンが得られている。これを10秒ずつに区切って、その夫々について同じようなことをした結果が(図 b)である。MIT の70秒のデータについても Sonagram を求めて同じようなことがしてあるのが(図 c)である。

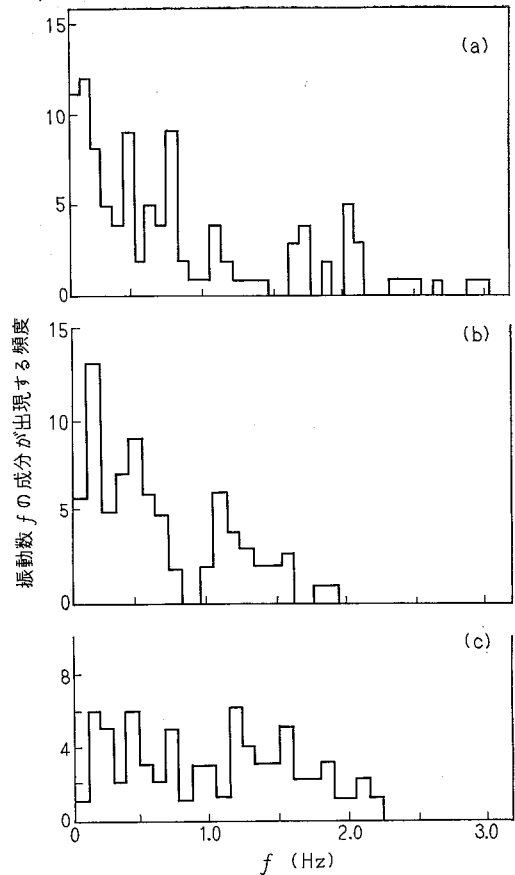


図 5

共通してみられることは、0.25, 0.5, 0.8, 1.2 Hz が高くなっている。即ち、こういう周波数の振動があらわれ勝ちだということである。即ち略 10 秒単位の light curve を調べると、その一つ一つは Terrell がいう様に、鋭いパルスの集積と区別はつかないのだが、その中にくつつかの特定の周波数が含まれているように見える。

図の縦軸からよみとられるように、しかし、これは少数例の統計の話である。したがって、こういう場合の結論の有意さというものが、大へん微妙なことであることは容易に想像されよう。多分もっと知的なやり方もあるのだろうが、私達は、a priori には、分布がスムーズだとして、この少数のケースの分布を数千例計算機で作ってみた。こうしてこの結論の有意水準 99% を得た。

これは大へん微妙である。むかしから、私たちは99%以上の有意水準なら信用しろ、97%なら何をいったことにもならない、98%なら調べる値うちがある、と教わってきた。90%以上という良いようだが、私達は解析の途中に何か特異なことがあると、無意識にそこで立ち止まりがらだ、ということを考えに入れなければならないからである。今99%というところで首をひねっている

ころである。先にものべたように、我々が今使えるデータは大へん限られている。もっとデータがほしいと思う。

この様にいくつかの特定の周波数をもつ振動が、継続してではなく時々現われては消えてゆくということが今のところ最もありそうなことである。こういう現象がどんな時におきるのかよくわからないが、これが事実であるとすれば、近接連星で一方の星からオーバーフローした物質が、多分ブラックホールにふりかかってゆく時の物理にふかい関係をもつものなのであろう。いまここでは、この現象が疑いの余地のないほど確かめられたわけではないし、またそうだとしてもその特徴の本質が把握されていないので物理に立入ることは控えておこう。

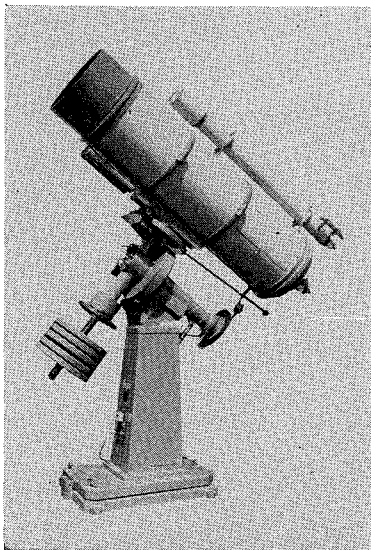
7. 鋭いパルスの意味するもの

Cyg X-1 の variability のもう一つの特徴は、鋭いパルス状の変動である。もともとパルスに気づいたのは、Uhuru の 384 msec ピンで区切られたデータだったが、MIT のデータを調べてみると、大へん鋭い多分 1 msec

よりも鋭いパルスが時々現われるように見える。このことは、この瞬間に 1 light msec より小さい源が強く輝いていることを意味する。数字をはめてみると、その瞬間に源が単位体積あたり放出するエネルギーが大へんなことになり、物理的に大へんむつかしいことを考えなければならぬことのようなのである。これも、多分ブラックホールの周辺の物理に何か有力な手がかりを与えているものと思われる。

8. あとがき

Cyg X-1 がげげしい変動をする事はたしかである。そして、その変動に鋭いスパイクが含まれていることもたしかである。そして変動にはある規則性がありそうである。しかし、その規則性の特徴が何であるかということが、データ不足で未だ完全につかみ切れたとは言えない。そこで四苦八苦している状況を記した。こういう話が読みものになるかどうかと思い乍らも編集者に対する永年の義理からつい書いてしまった。お聞き苦しいところは御容赦戴きたい。



天体望遠鏡
ドーム、製作

西村製の天体望遠鏡

40 cm 反射望遠鏡の納入先

- | | |
|--------|---------------------|
| No. 1 | 富山市立天文台 |
| No. 2 | 仙台市立天文台 |
| No. 3 | 東京大学 |
| No. 4 | ハーバート大学 (USA) |
| No. 5 | ハーバート大学 (USA) |
| No. 6 | 台北天文台 (TAIWAN) |
| No. 7 | 北イリノイズ大学 (USA) |
| No. 8 | サン・チェゴ大学 (USA) |
| No. 9 | 聖アンドリウス大学 (ENGLAND) |
| No. 10 | 新潟大学高田分校 |
| No. 11 | ソウル大学 (KOREA) |
| No. 12 | 愛知教育大学(刈谷) |

606 京都市左京区吉田二本松町 27

株式会社 西村製作所

TEL. (075) 771-1570
691-9580