

Cygnus X-1 の硬 X 線領域におけるスペクトル

内田 正美^{*1}・中川 道夫^{*2}・東 茂^{*2}
村上 聡^{*2}・櫻井 敬久^{*3}・山内 誠^{*4}
山上 隆正^{*5}・野口 達也^{*6}・杭 恒栄^{*7}

Hard X-ray Spectrum of Cygnus X-1

By

Masami Uchida, Michio Nakagawa, Shigeru Higashi,
Satoshi Murakami, Hirohisa Sakurai,
Makoto Yamauchi, Takamasa Yamagami,
Tatuya Noguchi, and H. R. Hang

Abstract: As the B50-C6 Balloon launched from Kagosima Space Center on Aug. 23, 1988 and was flying across the East China Sea, we observed Cyg X-1 in low state. A narrow and a wide NaI (Tl) phoswich detector system with field of view of $4^\circ \times 15^\circ$ and $8^\circ \times 15^\circ$ in FWHM, are installed on the slant angle of 4° and 5° from zenith. The effective areas are 110cm^2 and 115cm^2 .

The energy spectrum in 30~80 keV is obtained from both detectors with 2100s data. It is fitted with single power law model and thermal model. Either model gives acceptable fits. The spectrum is well fitted by single power law model with the index of 1.87 ± 0.10 . It is consistent with the expected spectrum from HEAO 3. The soft X-ray flux of Cyg X-1 seems to have been normal low. Furthermore, our results show that Cyg X-1 exhibits the low flux in the hard X-ray regions.

*1 大阪信愛女学院

*2 大阪市立大学理学部

*3 山形大学理学部

*4 理化学研究所

*5 宇宙科学研究所

*6 神戸製鋼

*7 紫金山天文台

概 要

1988年8月23日に日中共同気球実験の一環として鹿児島宇宙センターから放球されたB50-C6は東支那海を横断し、ゴンドラは翌8月24日南京郊外で回収された。その間、天頂から 4° と 5° の傾きを持って搭載された2台のNaI (T1) phoswitch 検出器によりCyg X-1の観測を行った。それぞれの検出器は最大有効面積 110cm^2 と 115cm^2 を持ち、視野は半値幅で $4^\circ \times 15^\circ$ と $8^\circ \times 15^\circ$ である。

約2,100秒のデータから得られた30~80keVのenergy spectrumはHEAO 3が1987年の秋に観測したspectrumとよく一致している。また、single power law model, thermal modelともに適合しており、single power law modelのindexは 1.87 ± 0.10 である。同じ頃に観測された軟X線領域では普通の低fluxであったことより、観測時のCyg X-1のfluxは軟硬両X線領域とも低かったといえる。

1. はじめに

Cyg X-1のX線強度の時間変動は、激しい変動と、広範囲にわたる様々なtime-scaleを持っていることで特徴づけられる。その短時間変動は百数十秒から数ミリ秒にまで及んでおり[1, 2, 3, 4, 5]、数ミリ秒の変動はCyg X-1がblack-holeの候補であるとする根拠の一つとなっている[1]。

周期的な変動としては、Cyg X-1は主星HDE 226868と連星系をなしており、5.6日の公転運動に伴うX線強度の小さな変化がみられるが、食は観測されていない[6]。このことより、連星系のinclinationは大きいと予想されている。

また、absorption dipも観測されている[7, 8]。それらは少数の例を除いてbinary phase 0の付近で観測されていることから、連星系の運動と関係づけられたモデルも出されている[7]。

過去の観測では、ほとんどがlow stateであり、この状態はCyg X-1の‘normal’な状態であると考えられている。その、low stateにあるCyg X-1が十数日から数ヶ月にわたってhigh stateに変化する。さらに、lowからhighへの遷移も観測されている[9, 10]。一方、high stateでは、そのfluxが、low stateのfluxと比較して、軟X線領域(1~10keV)では数倍に増加し、硬X線領域(10~100keV)では逆に少し減少することで特徴づけられている。また、過去に観測されたCyg X-1のエネルギー・スペクトルはpower-lawによく一致しており、その傾きは軟X線領域ではhigh stateがlow stateより急俊になっている。しかし、硬X線領域では両stateとも、その傾きはほぼ同じとなっている[11]。

1979年の秋にHEAO 3は、Cyg X-1の硬X線領域で通常のlow stateのfluxと比較してfactorで2.7低いfluxを観測した。その後、硬X線領域のfluxは徐々に増加し40日ほどで、1977年のlow stateのlevelに戻っていった。同じ時期に行われていたAriel VのAll Sky X-ray Monitor (ASM)による軟X線領域の観測では、通常のlow stateのfluxを維持していた。このような軟硬両X線領域で低いfluxが観測されたのは始めてであった[12, 13]。

我々は、日中共同気球実験の一環として1988年8月に硬X線領域においてCyg X-1の観

測を行った。そのデータの解析結果を、実験装置、実験経過とともに報告する。

2. 観測装置

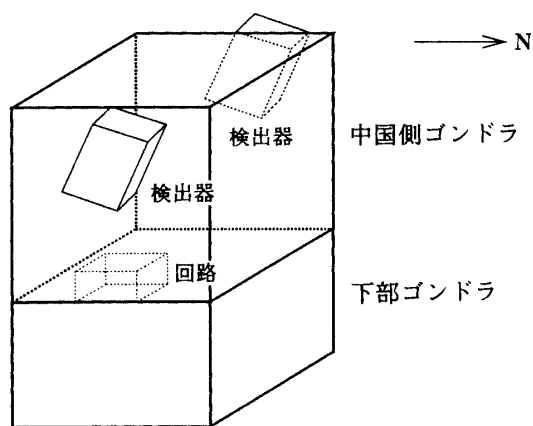
ゴンドラの全体図を第1図(a)に示す。このゴンドラの上部は、中国側のグループにより作成されたもので中国側の検出器、方向制御装置などが搭載されている。また下部には送信機やバッテリー、バラストなどが格納されている。我々の2台の検出器は中国側ゴンドラの側面に取り付けられている。Narrow 検出器と呼ばれる Cyg X-1 を専門に観測する検出器は、ゴンドラの天頂から 4° 傾けられており、もう一方はCyg X-1とカニ星雲を続けて観測するためにWide 検出器と呼ばれ、その傾きは 5° である。

Narrow 検出器の概略を第1図(b)に示す。21×19×40(単位; cm)とコンパクトな中に、5inch NaI (T1) phoswitch 検出器、高圧電源、傾斜計が組み込まれており、構造はすべてアルミ製で1台の重量は約20kgWである。

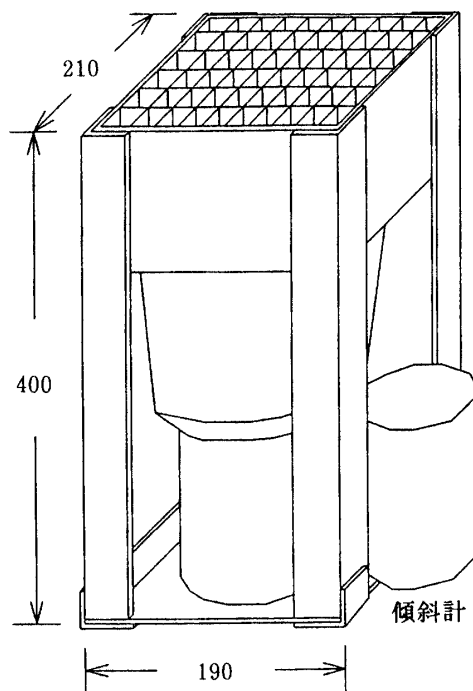
また第1図(a)に示されているようにデータ処理回路は、発砲スチロールのケースに格納されて中国側ゴンドラ内に設置された。

2.1 X線検出器

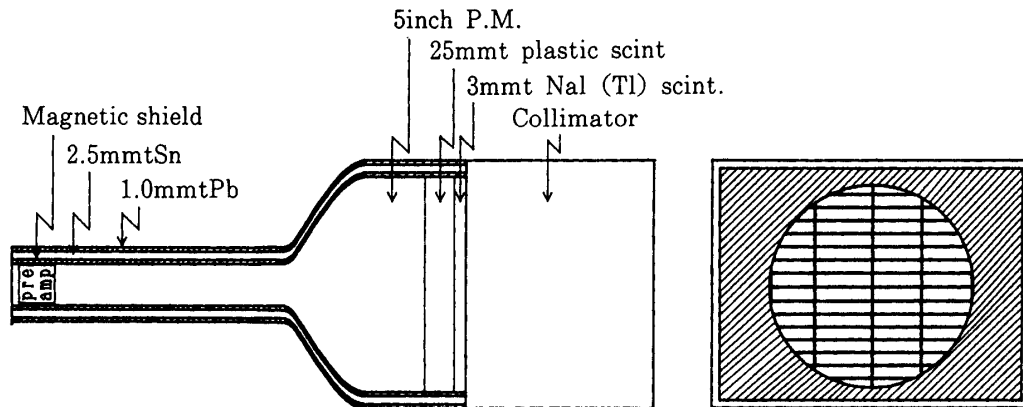
NaI (T1) Phoswitch 検出器を第2図(a)に示す。この検出器は、直径5inch厚さ3mmのNaI (T1) scintilator, 荷電粒子成分を除去するための同じ直径で厚さ25mmのplastic scintilator, 直径5inchの光電子増倍管から成り、それぞれの間には光学的に一体化するためにシリコン樹脂が充填されている。検出器の入射面を除く他の面は、地球磁場の影響を減少させるためにmagnetic shield材で覆われている。さらにその外側は、側面から入射する



第1図(a) ゴンドラの全体図



第1図(b) Narrow 検出器の概略



第2図(a) 5inch NaI (Tl) phoswich 検出器

第2図(b) コリメータ

放射線を吸収するための厚さ1.0mmの鉛、鉛で発生する2次成分を吸収するために厚さ2.5mmのスズで覆われている。

検出器の入射面には、第2図(b)に示されている格子状をしたコリメータが置かれている。それらは厚さ1mmのリン青銅で作られており、視野は半値幅で東西×南北が、 $15^\circ \times 4^\circ$ と $15^\circ \times 8^\circ$ である。それぞれは、Narrow 検出器、Wide 検出器に設置されている。各々の検出器の最大有効面積は 109.7cm^2 、 115.0cm^2 である。

2.1 HK センサー

HK データを得るために合計11個のHK センサーが用いられた。

まず、ゴンドラの高度を知るために半導体気圧計2個（低圧用、高圧用）、さらに微少な高度変化を見るために精密気圧計が取り付けられている。また、ゴンドラの方位角方向の回転角を知るために、地磁気姿勢（GA）センサーが中国側ゴンドラに取り付けられた。2台の検出器には、それぞれ傾斜計と高圧電源モニターが、中国側ゴンドラ内に置かれている電気回路と Narrow 検出器内には温度計が取り付けられている。

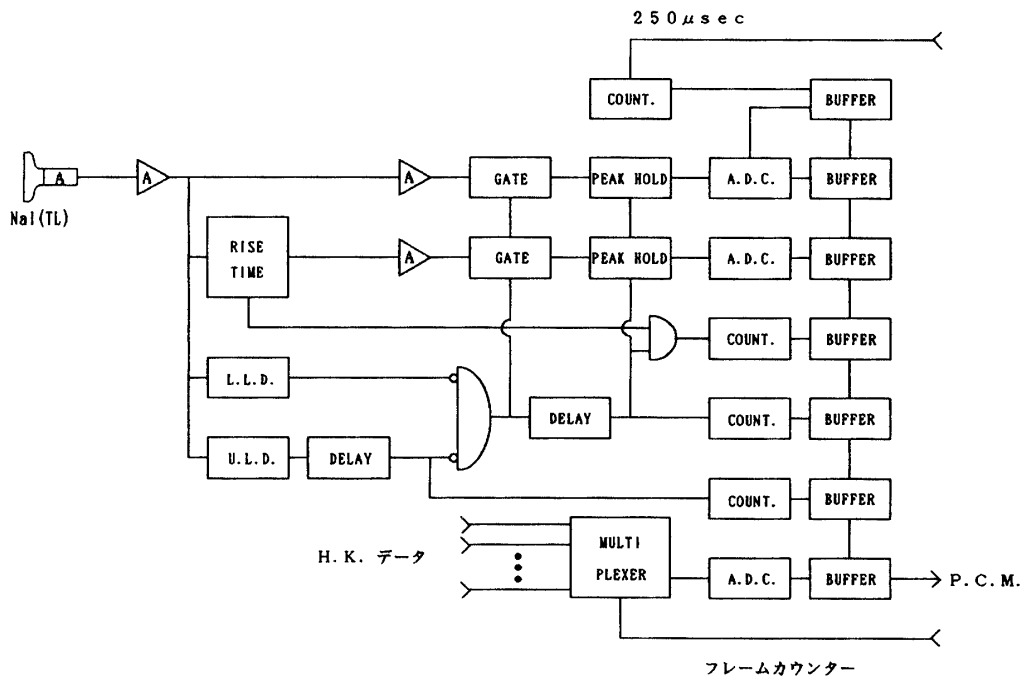
後のデータ処理に、より詳細なデータが必要な精密気圧計、GA センサー、Narrow 検出器用傾斜計と温度計のデータは96ミリ秒毎に、その他のHK データとカッター応答は、768ミリ秒毎に取り込まれて地上に送られてきた。

3. データ処理

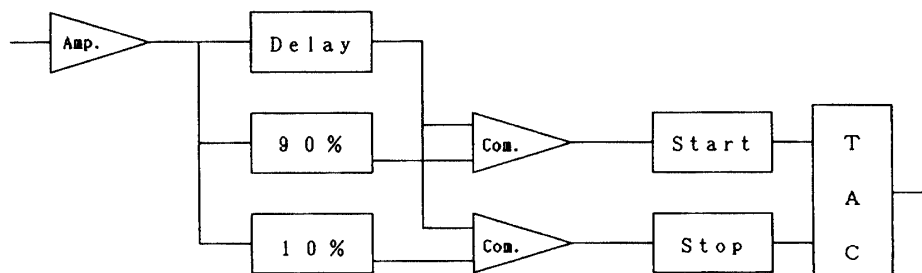
3.1 処理回路

X線検出器で発生した各eventについて、次の6種類の情報を得た。

- (1) 各パルスの波高値 (Pulse Height)
- (2) 各パルスの立ち上がり時間 (Rise Time)
- (3) フレームの開始時刻から計った、パルスが発生するまでの時間 (Pulse Time)
- (4) 20~80keV のエネルギーに相当する波高値をもつ、1フレーム中のパルスの総数 (Total Pulse Counts)
- (5) 立ち上がり時間で弁別された1フレーム中のX線の総数 (X-Ray Counts)
- (6) 1フレーム中のU. L. Dを越えたパルスの総数 (U. L. D Counts)



第3図(a) データ処理回路のブロック図



第3図(b) Rise Time 処理系のブロック図

データ処理回路のブロック図を第3図(a)に示す。

X線検出器で発生したパルスは処理回路の初段増幅器に入る。増幅されたパルスは4系統に分かれ、Pulse Height, Rise Time, Upper Level Discrimination (ULD), Lower Level Discrimination (LLD) の各信号処理系に伝わる。

ULDでは設定された値よりも高い波高値のパルスが入力したときに、LLDでは設定された値よりも低い波高値のパルスが入力したときに、信号が発生するようになっている。ULDでは80keVの、LLDでは20keVのX線に相当する波高値に設定されている。anti-ULD信号とanti-LLD信号の論理積をとった信号が、(4)のデータとしてカウントされる。また、この信号はPulse Height処理系とRise Time処理系でGate信号として使われる。ULDからの信号は(6)のデータとなる。

Pulse Height処理系ではLinear Gateで弁別された20~80keVのエネルギー範囲にある信号がPeak Holdされたのち、A/D変換を受け、(1)のデータとなる。

Table 1 フレーム フォーマット

	D ₁₅	D ₁₄	D ₁₃	D ₁₂	D ₁₁	D ₁₀	D ₉	D ₈	D ₇	D ₆	D ₅	D ₄	D ₃	D ₂	D ₁	D ₀	
W ₀	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0	1	1	1	
W ₁	FRAME COUNTER															LSB	
W ₂	MSB			H. K.				MSB			FRAME COUNTER						
W ₃	0	0	FLAG	MSB			N. TIME ₁			MSB					N. PULSE HEIGHT ₁		
W ₄	0	1	FLAG	MSB			N. TIME ₂			MSB					N. PULSE HEIGHT ₂		
W ₅	FLAG		MSB			N. RISE TIME ₁			FLAG		MSB					N. RISE TIME ₂	
W ₆	1	0	FLAG	MSB			W. TIME ₁			MSB					W. PULSE HEIGHT ₁		
W ₇	1	1	FLAG	MSB			W. TIME ₂			MSB					W. PULSE HEIGHT ₂		
W ₈	FLAG		MSB			W. RISE TIME ₁			FLAG		MSB					W. RISE TIME ₂	
W ₉	N. X-RAY COUNT				N. TOTAL COUNT				N. ULD COUNT								
W ₁₀	W. X-RAY COUNT				W. TOTAL COUNT				W. ULD COUNT								
W ₁₁	1	中国 SCALER 3				中国 SCALER 2				中国 SCALER 1							

Rise Time 処理系は、コンスタント・フラクシオン方式をとっており、Time to Amplitude Converter (TAC) により、信号の Rise time を波高値に変換する。第3図(b)は、Rise Time 処理系のブロック図である。まず、入力信号から、その最大波高値の10%と90%の波高値をもつ2個の信号が作られる。遅延された入力信号はこれら2個の信号を参考にして、その波高値が最大波高値の10%になったときに時間計測を start させ、90%になったときに stop させる。このようにして計測された入力信号の立ち上がり時間は、TAC により波高値に変換された後、Pulse Height 処理系の信号と同様に扱われ(2)のデータとなる。また、Rise Time 処理系では、Rise Time Discrimination (RTD) が設定されており、RTD で弁別された信号と(4)の信号との論理積をとった信号が、(5)のデータとしてカウントされる。

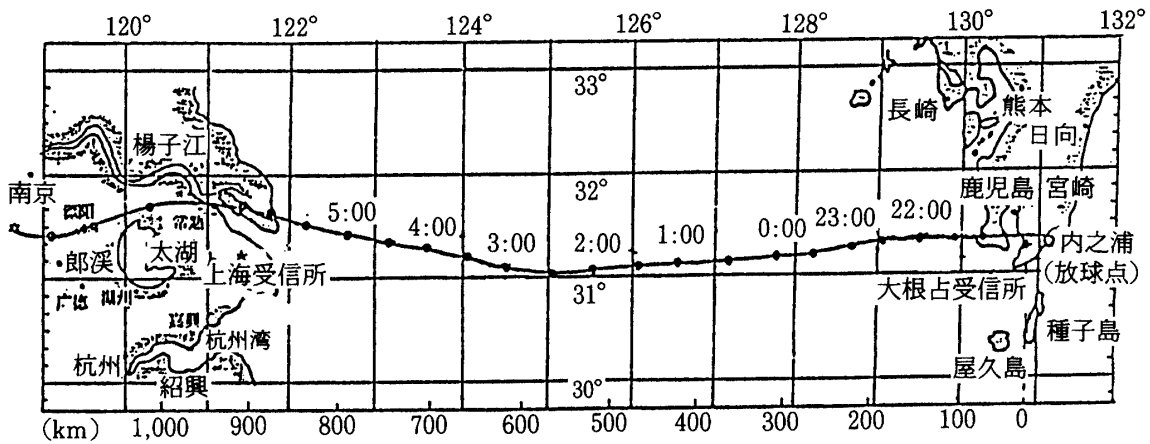
3.2 データ構成

処理されたデータはフレーム同期方式により地上に送信される。Table 1 に frame format を示す。1 frame は12 words からなり1 word は16 bits である。word 0 は、frame の先頭を示す word で特定のコードとなっている。word 1 の16 bits と、word 2 の下位8 bits の計24 bits は frame counter であり、送信される frame の時刻をあらわしている。検出器からのデータは、Pulse Height 7 bits, Rise Time 7 bits, Pulse Time 7 bits, X-ray counts 5 bits, Total pulse counts 5 bits, ULD counts 6 bits の bit 数からなる。HK データは8 bits である。また、word 11 は中国側データの back up に使用している。12 ミリ秒で1 frame を送信している。

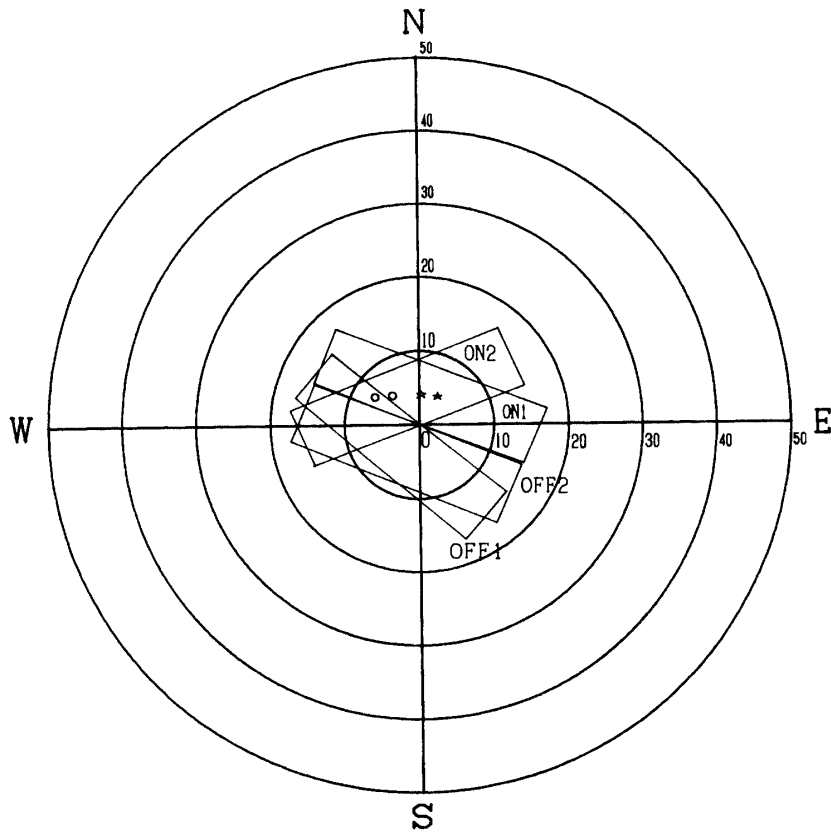
4. 観 測

日中大洋横断気球 (B50-C6) は、1988年8月23日18時57分 (JST) に鹿児島県肝属郡内之浦町より放球され、毎分300m の速度で上昇して21時30分に内之浦町西方80km の海上上空、

高度 34.7km において水平浮遊状態に入った。その後、気球は時速 90km で西に向かって進み、翌 8 月 24 日 4 時 36 分内之浦町の西方約 760km の地点で日本側の受信限界に達し中国側に引き継がれた。東史那海をわたり 6 時 00 分に上海市北方 50km の長江河口上空において中国大陆に上陸し、10 時 4 分に南京の南南西 70km の上空に達した。そこで、ゴンドラは切り離され、パラシュートで地上に降下した。測距のデータによる気球の航跡図を第 4 図に示す。



第 4 図 気球の航跡図

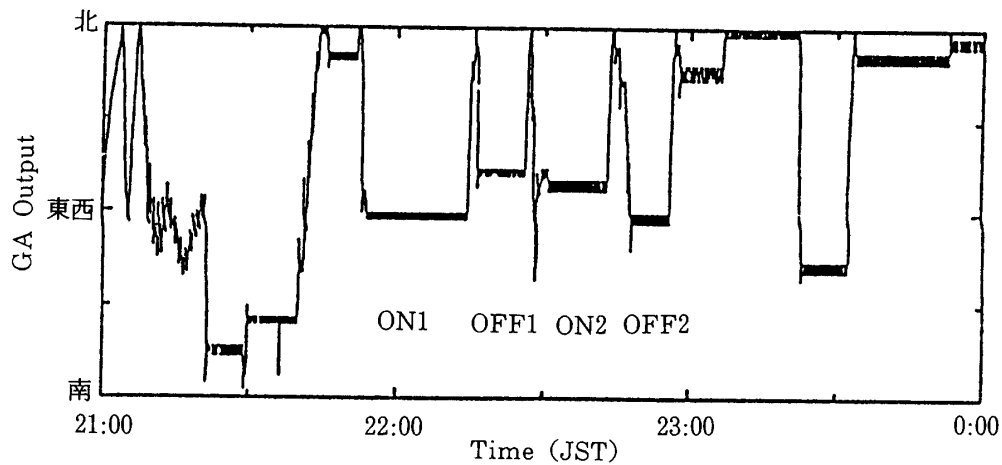


第 5 図 観測中コリメータの視野と Cyg X-1 の位置
 ☆印は on 1, ○印は on 2 のときの Cyg X-1 の位置を示す。

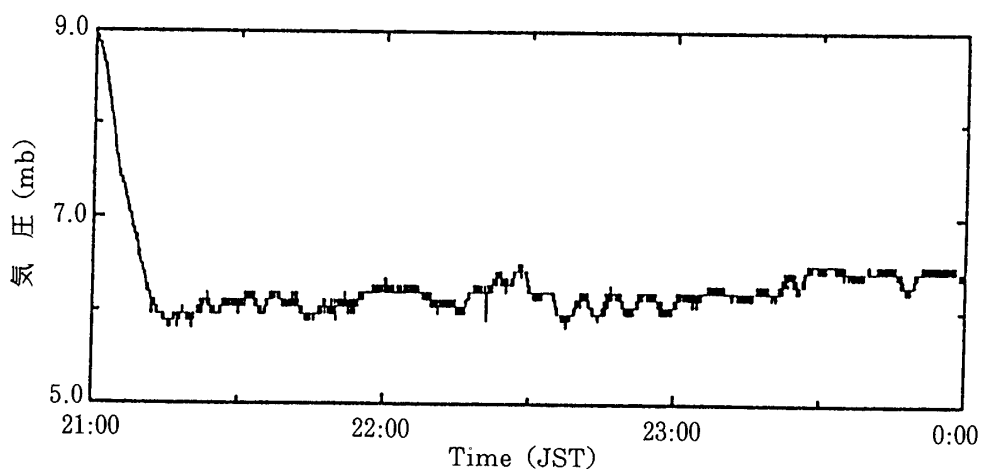
Cyg X-1 の観測は、23日の22時54分から22時14分の20分間と、22時30分から22時42分の12分間の2回行われた。また、Background の測定も22時16分から22時25分の9分間と、22時47分から22時56分の9分間の2回行われた。これら4回の観測におけるコリメータの視野とCyg X-1の天球上の位置を第5図に示す。図中on1, on2はCyg X-1を観測しているときであり、off1, off2はBackgroundを測定しているときである。on2では方位方向に Gondola を回転させ、Cyg X-1の動きに合わせてコリメータの向きを変えた。この操作により検出器の有効面積は固定した場合より約15% 広くなった。

第6図はCyg X-1 観測中のHK データである。

(a) GA センサーの出力で、on1, on2, off1, off2, とも安定したレベルを保っている。

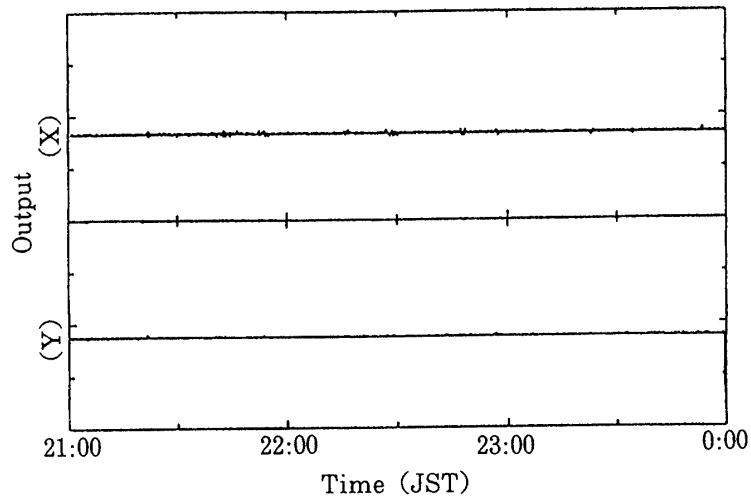


(a) GA センサー

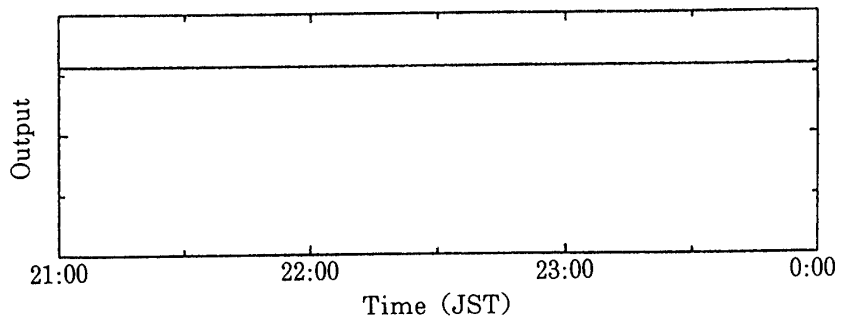


(b) 精密気圧計

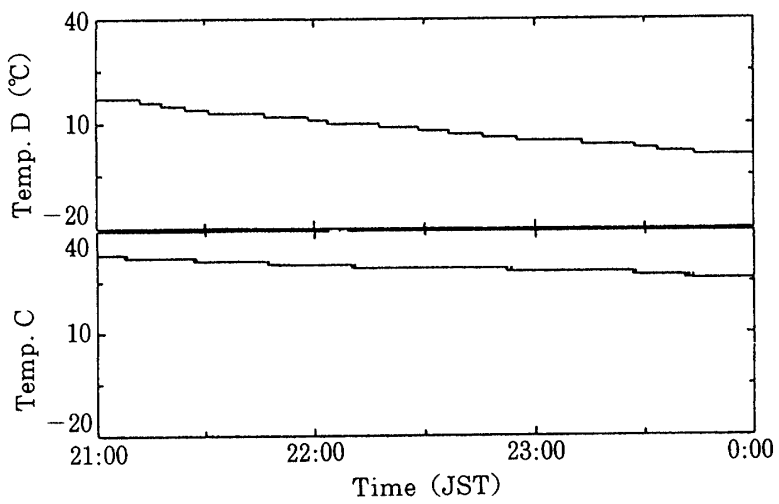
第6図 Cyg X-1 観測中のHK データ



(c) Narrow 検出器内の傾斜計



(d) Narrow 検出器内の H. V. モニター



(e) 温度計

第6図 つづき

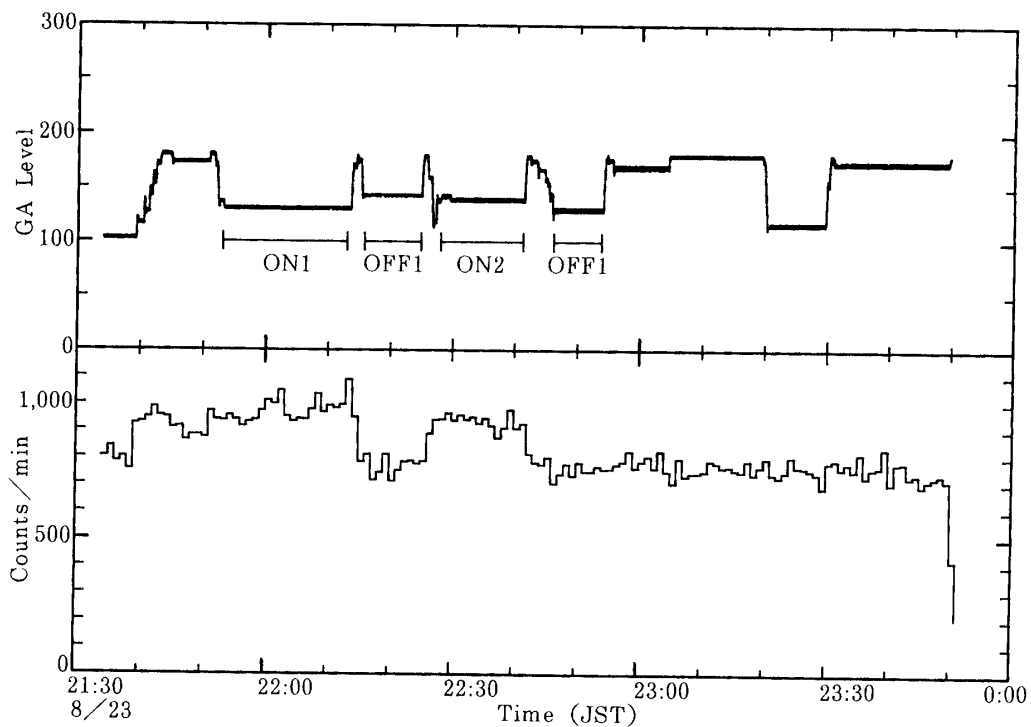
- (b) 精密気圧計の出力で、ほぼ一定レベルを保っていることから気球の高度が安定していたといえる。
- (c) 傾斜計出力の例で、Narrow 検出器に取り付けられた傾斜計の東西方向、南北方向の出力である。一定レベルを維持していることより、ゴンドラの姿勢は安定していたといえる。Wide 検出器内に取り付けられた傾斜計も同様であった。
- (d) Narrow 検出器の H. V. モニター出力である。光電子増倍管にかかる電圧は、ほぼ 1,100V で安定している。
- (e) Narrow 検出器と回路に取り付けられた温度計の出力である。この温度領域において、カウンター及び回路は安定に動作することが温度テストにより確認されている。
- 以上のことより、Cyg X-1 観測中に測定装置は安定した姿勢と状態を保っていたといえる。

5. 結果と議論

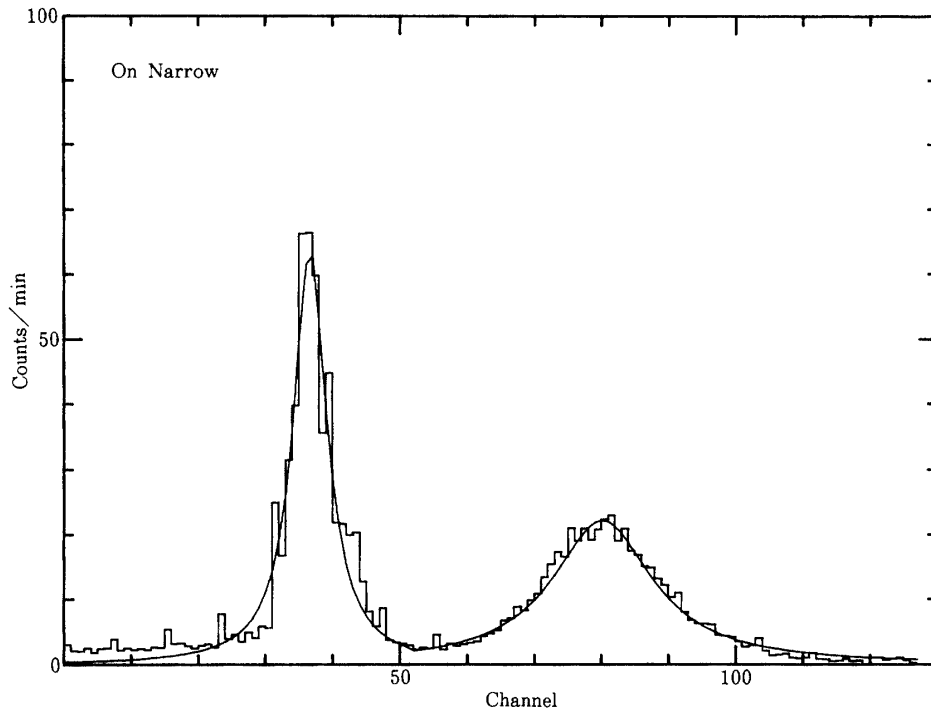
エネルギー・レンジ 20~80keV の X 線の 1 分間当たりのカウント数の推移を第 7 図に示す。図中、on-mode (on 1, on 2) に明らかな excess が見られる。今回の解析にはこれらのデータを用いた。

5.1 Rise Time 分布

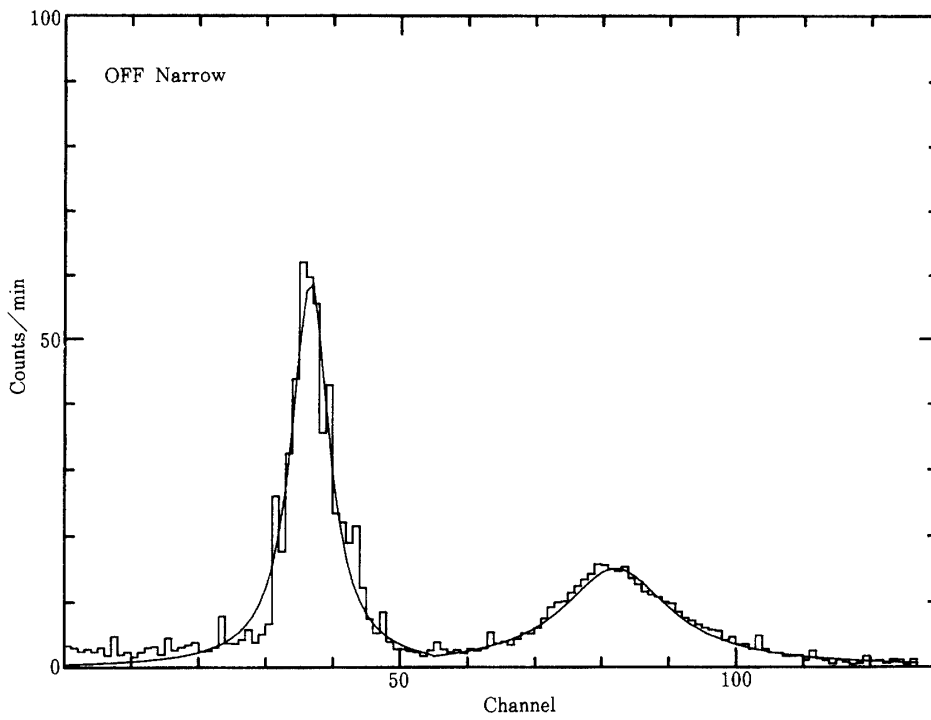
第 8 図は Narrow 検出器の Rise Time 分布で、横軸は Channel 数、縦軸は 1 分間当たりの平均 event 数である。(a) は on-mode, (b) は off-mode, (c) は比較のために、両者を重ねたものである。



第 7 図 カウント数の推移

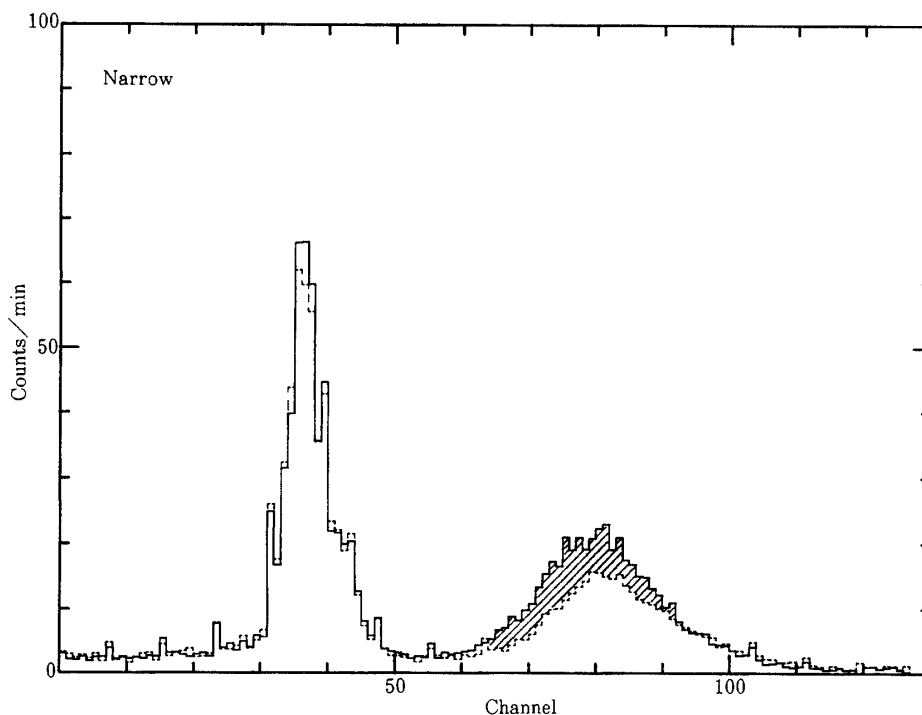


(a) on-mode



(b) off-mode

第 8 図 Narrow 検出器の Rise Time 分布



(c) 両者の重ね合わせ

35ch 付近のピークは荷電粒子の, 80ch 付近のピークは X 線の成分であり, また(c)の斜線の部分が Cygx-1 の成分である.

第8図 つづき

Table 2 Rise Time 分布のピーク波形の Fitting パラメータ

		Intensity	Position	Haif-Width
ON	peak 1	63.9	37.6	3.04
	peak 2	22.2	81.1	9.09
OFF	peak 1	59.4	37.5	3.36
	peak 2	15.1	83.1	9.82

各図において, 35ch 付近のピークはプラスチックシンチレータによる荷電粒子成分であり, 80ch 付近のピーク NaI (T1) シンチレータからの X 線成分である.

第8図(c)において, 荷電粒子成分を表すピークは on-mode, off-mode ともよく一致しており ($\chi^2=4.54$ 自由度 32), 両 mode の観測中に測定器系に変化が起きていないことを示している. したがって, 大気中の X 線の Background が等方的であるという仮定のもとに, X 線成分における on-mode の excess (第8図(c)の斜線部分) が Cyg X-1 からの X 線成分に相当しているといえる.

つぎに, それぞれのピークがローレンツ波形をしていると仮定して, Davidon-Fletcher-Powell (DFP) 法 [14] によりこの分布に最適な波形パラメータを推定した. その結果を Table 2 に表す. これらの値から得られる分布が第8図(a), (b)の実線である. 適合度がよ

いとはいえないが、これはピークが厳密な意味でローレンツ波形をしていないためであると考えられる。

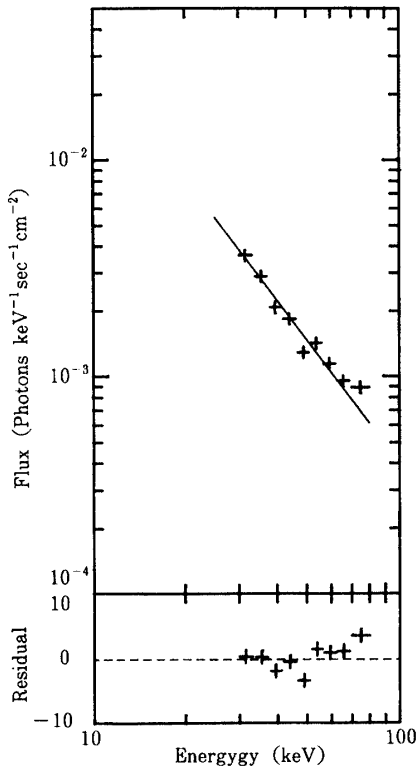
第8図(c)では50数chあたりから on-mode, off-mode の分布に差が出はじめている。そこで、55chで Discrimination を入れることにより X 線成分を取り出した。先に求めたパラメータをつかって推定すると、このとき on-mode では取り出した成分に 1.7% の荷電粒子成分が含まれ、元の X 線成分の 4.4% が失われたことになる。off-mode ではそれぞれ 2.1% と 2.8% である。また Wide 検出器では、on-mode では 0.78% と 5.2%, off-mode では 0.95% と 4.0% である。

5.2 エネルギー スペクトル

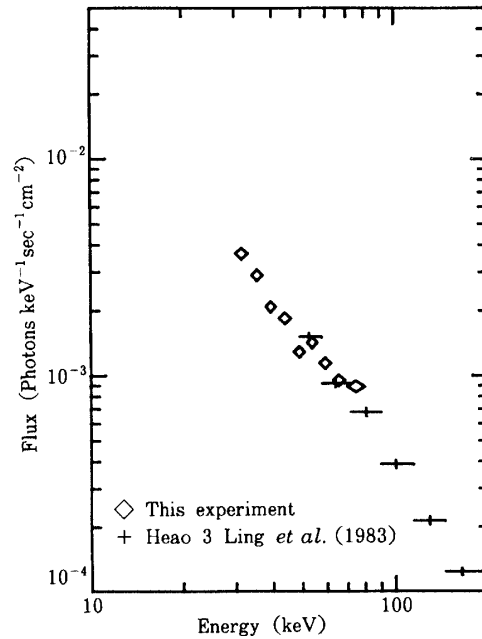
Rise Time Discrimination を利用して荷電粒子成分を除去した on-mode 約 30 分, off-mode 約 18 分の両検出器のデータを使用し、残存大気による X 線の吸収, NaI (TI) シンチレータの検出効率, 及びコリメータ・レスポンスを考慮して求められた、大気頂上でのエネルギー スペクトルを第9図に示す。

得られたスペクトルに Power law model と Thermal model を fit させたときの各パラメータの値が Table 3 である。 χ^2 の値は両モデルとも許容させる範囲である。Power law model から得られるスペクトルを実線で第9図に示す。

今回得られたスペクトルと、HEAO 3 が1979年秋に観測したときのスペクトル [13] を、第10図にまとめて示す。図中菱形は我々の、+印は HEAO 3 のデータである。両スペクトル



第9図 20~80keVにおけるエネルギー
スペクトル



第10図 今回の観測と1979年秋の HEAO 3 の
スペクトルの重ね合わせ

Table 3 エネルギー スペクトルの Fitting パラメータ

model	parameter	This exp.
Power Law $AE^{-\gamma}$	A	2.25 ± 0.62
	γ	1.87 ± 0.10
	χ^2/ν ($\nu=7$)	0.27
Thermal $\frac{A}{E} \exp\left(\frac{-E}{kT}\right)$	A	0.145 ± 0.017
	$kT(\text{keV})$	82.1 ± 17.2
	χ^2/ν ($\nu=7$)	0.40

はよく一致している。

1979年秋は硬 X 線領域で低 flux であったが、このとき Ariel V の観測によると軟 X 線領域でも低 flux であった。今回の観測の前後における「ぎんが」の観測結果より、軟 X 線領域における Cyg X-1 の X 線強度は低いことがわかっている (private communication)。Cyg X-1 は、いったん high state に移ると数週間以上その状態が続くことが多いので今回の観測中も軟 X 線領域で低 flux であったと考えられる。従って、短時間の観測ではあるが今回の観測中 Cyg X-1 は、1979年秋と同様に軟 X 線領域、硬 X 線領域とも低 flux であったといえる。

一方、Ling 達は 1983 年の最初の論文で、この軟 X 線領域、硬 X 線領域とも低 flux であったのを、従来の high state, low state に代わる新しい状態—super low state—と呼んだ [12] が、後の 1987 年の論文では、この新しい状態は低 flux から low state の level に遷移する過程であり一つの確立された level としての明らかな証拠は見い出せなかったとしている [13]。

従って、このことをより明らかにするためには、軟 X 線から硬 X 線にわたる広いエネルギー領域で長期間の観測が必要になる。

謝 辞

気球実験にあたり、宇宙科学研究所の西村研究室の皆様には大変お世話になりました。感謝の意を表します。

参 考 文 献

- [1] J. F. Meekins, K. S. Wood, R. L. Hedler, E. T. Byram, D. J. Yentis, T. A. Chubb, and H. Friedman, 1984: *Ap. J.*, **278**, 288.
- [2] P. G. Sutherland, M. C. Weisskopf, and S. M. Kahn, 1978: *Ap. J.*, **219**, 1029.
- [3] M. C. Weisskopf, P. G. Sutherland, J. I. Katz, C. R. Canizares, 1978: *Ap. J.*, **223**, L17.
- [4] P. L. Nolan, D. E. Gruber, J. L. Matteson, L. E. Peterson, R. E. Rothschild, J. P. Doty, A. M. Levine, W. H. G. Lewin, and F. A. Primini, 1981: *Ap. J.*, **246**, 494.
- [5] 内田正美, 中川道夫, 桜井敬久, 山内 誠, 1989: 宇宙研報告, **24**, 103.

- [6] S. S. Holt, E. A. Boldt, P. J. Serlemitsos, and L. J. Kaluzienski, 1976: *Ap. J.*, **203**, L 63.
- [7] R. A. Remillard and C. R. Canizares, 1984: *Ap. J.*, **278**, 761.
- [8] S. Kitamoto, S. Miyamoto, Y. Tanaka, T. Ohashi, Y. Kondo, Y. Tawara, and M. Nakagawa, 1984: *Publ. Astron. Soc. Japan*, **36**, 731.
- [9] H. Tananbaum, H. Gursky, E. Kellogg, R. Giacconi, and C. Jones, 1972: *Ap. J.*, **177**, L 5.
- [10] Y. Ogawara, K. Mitsuda, K. Masai, J. V. Vallerga, L. R. Cominsky, J. M. Grunsfeld, J. S. Kruper, and G. R. Ricker, 1982: *Nature*, **295**, 675.
- [11] E. P. Liang, and P. L. Nolan, 1983: *Space Sci. rev.*, **38**, 353.
- [12] J. C. Ling, W. A. Mahoney, W. A. Wheaton, A. S. Jacobson, and L. Kaluzienski, 1983: *Ap. J.*, **275**, 307.
- [13] J. C. Ling, W. A. Mahoney, W. A. Wheaton, and A. S. Jacobson, 1987: *Ap. J.*, **321**, L 117.
- [14] 南 茂夫編著, 1986: 「科学計測のための波形データ処理」CQ 出版社.