

ブラジルにおける大気球実験

1991年度の報告とまとめ

釜江 常好^{*1}・高橋 忠幸^{*1}・田村 忠久^{*1}
宮崎 聡^{*1}・関本裕太郎^{*1}・山岡 典子^{*1}
平山 昌治^{*1}・田中 光明^{*1}・郡司 修一^{*2}
矢島 信之^{*3}・山上 隆正^{*3}・藤井 正美^{*3}
太田 茂雄^{*3}・並木 道義^{*3}・能町 正治^{*4}
村上 浩之^{*5}・中川 道夫^{*6}・西村 純^{*7}

Abstract: A review of activities by the Japan-Brazil collaboration is presented. The collaboration work started in 1988 and launched 8 balloons in total. A new detector featuring low background environment (Welcome-1 detector) has been developed for the experiment. Using the detector Crab nebula can be observed with S/N ratio around unity between 100 and 200keV. In 1990, we succeeded in observing SN1987A and obtained an upper limit to the ^{57}Co 122keV line flux at $1.0 \times 10^{-4} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ which corresponds to 3.4 times of the solar $^{57}\text{Co}/^{56}\text{Co}$ abundance ratio. We subsequently observed Crab, Vela Pulsar (SNR), Cen-A (AGN), PSR1509-58 (SNR) and GX339-4 (BHC) in 1991. We will present preliminary results for these observations.

1. はじめに

我々のグループは1988年からブラジルにおいて気球を用いた天体からの硬X線・ガンマ線の観測を行ってきた。1990年までは大マゼラン星雲で爆発した超新星1987Aに焦点をあててきた。1991年度は11月19日、12月3日の2回のフライトでCrab Nebulaの他、Crab-like

*1 東京大学理学部

*2 山形大学理学部

*3 宇宙科学研究所

*4 高エネルギー物理学研究所

*5 立教大学理学部

*6 大阪市立大学理学部

*7 神奈川大学工学部

パルサー (Crab Pulsar, Vela Pulsar, PSR1509-58), 活動銀河各 (Cen A), ブラックホール候補 (GX339-4) の観測を行った。

本報告では, 1991年度の観測報告を中心に, ブラジルにおける気球実験のまとめをおこなう。

2. WELCOME-1検出器

WELCOME-1検出器 (WELl-type COMpound Eye detector) は1989年から開発, 実験を重ねてきた40 keV~850 keVの硬X線ガンマ線観測用の検出器である¹⁾。その特徴及び性能についてはすでに高橋の報告²⁾に述べられているので, ここではその概要と1991年度に行った変更箇所について述べる。検出器の主な性能を表1に示す。

Table 1: WELCOME-1 検出器の性能

エネルギーレンジ	40keV~850keV
検出器のタイプ	フォスウィッチ型 (GSO(Ce)3.4×3.4×1.0cm ³ +CsI(Tl))
エネルギー分解能(FWHM)	28% (122keV) 12% (511keV)
時間分解能	32μsec
シールド	アクティブ
有効面積	740cm ³ (122keV)
開口角	67mstr (幾何学的開口角)

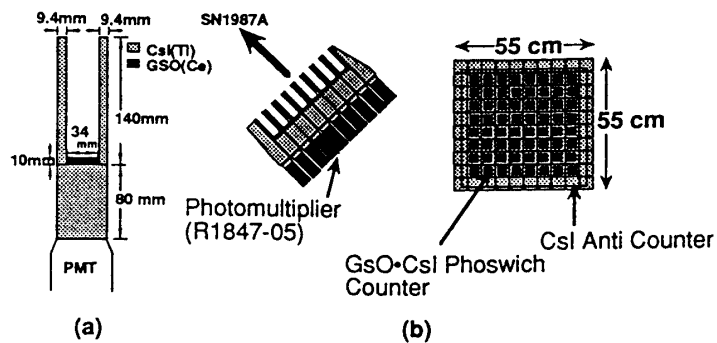


Figure 1: 井戸型フォスウィッチカウンタを用いた硬X線望遠鏡:(a)一ユニットの断面図,
(b) Welcome-1 検出器.

図1(a)に示すように, 5.5×5.5×220 mm, 深さ140 mmの井戸型CsI(Tl)シンチレータ(開口角~70ミリ・ステラジアン)の中心に, 主検出部としての34×34×10 mm³のGSO(Ce)シンチレータ(Ce付活Gd₂SiO₅)を固定し, 光電子増倍管(浜松ホトニクスR1847-05)を組み合わせたカウンタを開発した。検出部のGSO(Ce)と遮蔽部のCsI

(Tl) からの蛍光を1本の光電子増倍管で読み出すので、その信号がどちらの結晶によるのかを弁別する必要がある。それには GSO (Ce) と CsI (Tl) の蛍光減衰時定数が異なることを利用する (それぞれ60ナノ秒, 900ナノ秒)。我々は、蛍光減衰時定数によって主検出部 (GSO (Ce) 結晶部) だけにエネルギー損失のあった事象を弁別する電子回路を開発した³⁾。遮蔽部 (CsI (Tl) 結晶部) にエネルギー損失があると弁別回路がバックグランド事象と判定するので、井戸型 CsI (Tl) シンチレータはアクティブシールドかつアクティブコリメータとして働く。このように、蛍光減衰時定数の異なるシンチレータを組み合わせたカウンターをフォスウィッチ (phoswich: phosphor sandwich) カウンターと呼ぶ。我々が開発したのは、遮蔽部がアクティブでしかもコリメータの役割も果たす井戸型フォスウィッチ・カウンターである。

検出器の有効面積を増すために、この井戸型フォスウィッチカウンター64本を8×8本のマトリックス状に並べ、その回りを CsI (Tl) シンチレータを光電子増倍管で読み出す36本のアクティブ・シールドで囲んだ大面積 (~700 cm²) 複眼型フォスウィッチカウンターの検出部を組み上げた (図1(b)参照)。井戸型フォスウィッチカウンターは各々独立ではあるが、1本のカウンターからの信号と同時に、回りのカウンターからのバックグランド信号の有無も記録されるので、後の解析でさらにバックグランドを低減させることが可能である。各カウンターからのデータは、気球搭載用に設計された VME (Versa Module Europe) 計算機システムにより収集される。収集されたデータは気球に搭載されたデータ・レコーダ (8mmVCR) に記録されると共に、地上へのデータ転送のために PCM (pulse code modulation) ユニットに送り出される。

1991年度の変更点は、

- ・ADC モジュール内のピークホールド回路のリカバリーを改善
- ・過大信号による誤動作から回路系が回復したかどうかを判断するために、過大なプリアンプ出力の有無を記録するようにした
- ・スケーラーモジュールを1台減らして ADC モジュールを1台増やし、TAC (蛍光減衰時間) の信号を読み込むチャンネル数を8チャンネル増やして16チャンネルにしたなどである。特に上二つの項目は、平成三年度三陸における気球実験 WET の実験結果がおおいに参考になった⁴⁾。

データを取り込むシステムの他に WELCOME-1 検出器の姿勢制御に必要な星カメラのシステムも VME 計算機で構成されている⁵⁾。星カメラに関するシステムの大きな変更点は、太陽カメラの搭載である。今回、夜間だけでなく日中にも観測を行うために、スターカメラに加えて太陽カメラを搭載し、GA による方向規正の確認を行った。この太陽カメラはフィルター¹と広角レンズ²と CCD カメラ³を組合わせたものである。星・太陽カメラシステムを構成する VME バス上にはビデオモジュールが1台積まれており、このモジュールの2つの影像入力には星カメラと太陽カメラからの影像が入力される。影像の切り換えはコマンドシステムによって地上から行うこともできるが、通常は ROM 上に書き込まれたプログラムに

¹ KENKO ND400を2枚

² TOKINA TELEVISION LENS3.8 mm f1.8

³ 浜松ホトニクス C3077

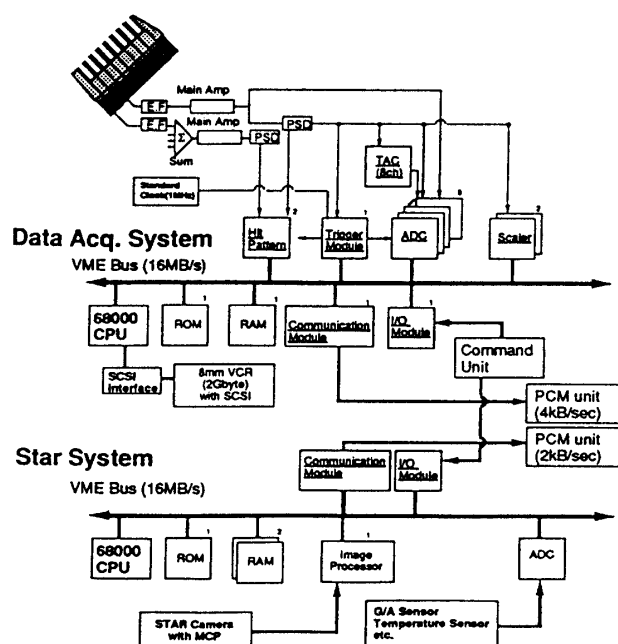


Figure 2: Welcom-1 検出器のオンラインシステム

よって、設定した時刻に切り換えられる。星カメラ、太陽カメラからの映像は数秒に1画面が地上に送られ、その画面をモニターしながらGAによる検出器の姿勢制御を行う。VME計算機システムの概略を、図2に示す。

数十ミリ秒のパルサーの解析を行うためには、光子の到来時刻を正確に記録する必要がある。WELCOME-1検出器は常温での周波数精度が $\sim 10^{-9}$ の水晶発振器を搭載しており、この水晶発振器の精度を補正するために昨年受信基地に原子時計を設置した。しかしパルサーの解析結果を他のグループの結果や電波や光などエネルギーの異なる領域の結果と比較するためには時計の精度を補正するだけではまだ不十分で、さらに世界標準時で補正した絶対時刻を知る必要がある。絶対時刻がわかれば、各観測結果の位相を比較することが出来るのである。このため今回はGPSでこの原子時計と世界標準時の差をモニターするシステムを設置した⁶⁾。

3. 1991年度観測経過

気球は内陸の方に流して陸地で回収することになっているので、放球時期は風が東風から西風に完全に反転するのを待たなくてはならない。さらに風が反転してから徐々に風速が大きくなるので、受信限界内で観測時間を稼ぐためには、ラバーバルーンを飛ばして風の反転を見極め、風速が小さいうちに速やかに放球が可能かどうか判断することが必要である。さらに確実な回収を行うために、つまり気球が受信限界を越えた場合、有視界飛行しかできない飛行機で追跡ができるように、気球の切り離しは夕刻前に行うようにとの要請がブラジル側から出ていた。以上のような状況と、放球は日没後から日の出頃までの間に行うという条件から、観測対象候補の仰角の時間変化を示す図3を参考に観測計画を立てた。この図の11月14日の場合、3時頃南中するCrabから観測を始めると、12時30分頃南中のPSR1509-58

Table 2: 1991年度1回目の観測進行状況

時刻	観測対象
18日23時55分	放球
19日2時35分	方向規正 ON (高度37.2km 4.2mb)
19日3時00分	バックグラウンド観測
19日3時20分	Crab Pulsar ON 観測
19日3時40分	Crab ON/OFF 観測 (ON:20分, OFF:30分)
19日4時30分	Crab から同じ仰角で360度スキャン (5時まで)
19日5時20分	Vela Pulsar ON 観測
19日7時00分	バックグラウンド観測
19日7時25分	太陽の位置による GA ポテンシヨの補正
19日7時40分	Cen A ON/OFF 観測 (ON:100分, OFF:100分)
19日11時00分	PSR1509-58 ON 観測
19日12時40分	PSR1509-58 ON/OFF 観測 (ON:25分, OFF:25分)
19日13時30分	PSR1509-58 ON 観測
19日14時09分	気球切り離し

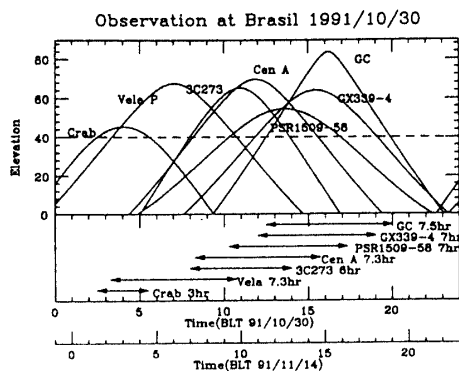


Figure 3: 観測可能な天体

の観測まで約15時間の観測時間が必要である。受信限界が約500 km なので、10～15時間の観測観測時間を得るためには、～50 km/h の風速でなければならない。しかし何しろ相手は自然現象なので、放球後の風速に応じて3通りの観測計画を用意した。

放球はサンパウロとリオデジャネイロの中間に位置するブラジル宇宙研究所 (INPE) Cachoeira Paulista 支所 (西経45度00分34秒, 南緯22度39分44秒) の気球基地で行われた。一回目は雨などにより放球中止が10日ほど続いたこと以外は、一回目二回目とも見事な放球が行われ、翌日中に回収も無事完了した。

一回目は星カメラが4時頃まで不調であったが夜明け前に回復し GA による制御の確認

を行うことができた。日の出後は太陽カメラおよび太陽センサー（太陽電池を利用したセンサー）による確認を行いながら GA センサーで検出器の姿勢を制御した。気球が受信限界の円に徐々に近付きながらも孤を描くように飛揚したおかげで観測時間が稼げ、観測計画は適宜最善のものへと変更していくことができた。二回目は風速が大きくなっているという予測をもとに安全策を取り、明け方近くの放球を選択した。Cen A 観測中の9時すぎに仰角制御が不能になったが、そのままの仰角で観測可能な天体に目標を変更して予定時刻まで観測を続けることが出来た。一回目二回目の観測の進行状況をそれぞれ表2、表3に示す。

4. 観測結果

1990, 1991年度に行われた観測の解析結果のいくつかについて簡単に報告する。

SN1987A 我々は、1990年に爆発後1375日後の超新星残骸 SN1987A を2.7時間観測した。放射性同位元素 ^{57}Co からの放射 (122 keV) に対して、 1.0×10^{-4} photons/cm²/s という、上限値を得た。これは、光学領域における光度曲線の減衰がゆるやかになっていることからその存在が示唆されている、内部に隠されたエネルギー源にたいして非常に強い制限を与えた⁷⁾。

Crab. 1991年度の1回目の観測では、気球が水平浮遊にはいると同時に Crab の観測を行った。図4左にいろいろな周期に対する Folding 解析の結果を示す。電波観測から予想される周期33.3974 ms に一致するパルス周期の信号を検出したことを確かめた。また、X線パルスのピークの位相と Welcome-1検出器で観測された硬X線パルスのピークの位相もほぼ一致した。検出器に積んだ高精度の水晶時計と、地上に設置した Rb 原子時計及び GPS を利用したシステムにより、絶対時刻（世界標準時）による観測を行うことができたことを確

Table 3: 1991年度2回目の観測進行状況

時刻	観測対象
3日4時56分	放球
3日6時53分	方向規正 ON
3日7時20分	360度スキャン
3日8時06分	Cen A ON/OFF 観測 (ON: 20分, OFF: 20分)
3日9時00分	太陽を追尾して方向規正の補正
3日9時10分	Cen A Transit 観測 (仰角69度から動かなくなる)
3日10時00分	Cen A ON/OFF 観測 (ON: 15分, OFF: 15分)
3日11時00分	仰角制御回復を試みる
3日11時45分	銀河中心 ON/OFF 観測 (ON: 20分, OFF: 20分)
3日12時43分	GX339-4 ON/OFF 観測 (ON: 10分, OFF: 10分)
3日14時05分	GA 補正のため360度スキャン
3日14時47分	方向規制 OFF, 観測終了
3日15時01分	気球切り離し

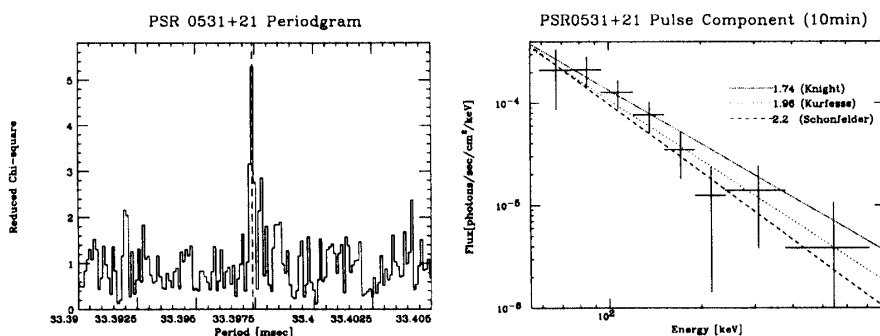


Figure 4: Crab パルサーの観測結果. 左: Periodgram. 破線は電波観測から予想される太陽系質量中心での周期. 右: Crab パルサーのエネルギースペクトル (10分間のデータ). それぞれの破線は他の観測結果を示す.

認した. 図4右は, スターカメラによって検出器の方向が確認できている, 10分間のデータによる Crab のパルサーのエネルギースペクトルである.

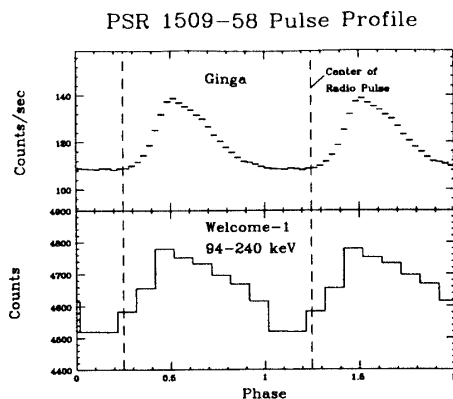


Figure 5: PSR 1509-58のパルス波形. X線(上, 「ぎんが」の解析結果)と硬X線(下, Welcome-1の解析結果)の比較. 破線は電波観測から予想される電波パルスの位相.

PSR1509-58. PSR1509-58は, すでに詳細な観測が行なわれているかにパルサー, 帆座パルサーに続いて注目されている150ミリ秒のかに型パルサーである. 「ぎんが」の行ったX線領域での電波との同時観測で, 60 keV までのスペクトルのべき指数が1.3と硬く, 電波パルスがX線パルスよりも37ミリ秒先行していることが明らかにされている⁸⁾. Welcome-1検出器によって硬X線領域では初めてのPSR1509-58の観測が行なわれ, 硬X線領域でも電波パルスが先行していることが確かめられた. またそのパルス波形は非対象な幅広な一つ山であった(図5).

Cen A. Cen Aは最も明るい電波銀河のひとつで, これまでに幅広いエネルギー領域で観測されてきた活動銀河核(AGN)である. AGNのエネルギースペクトルにおいては, 数100 keVから数MeVのあたりで折れ曲がるはずであるということが示唆されてきたが, これまで明らかな報告はなかった. 我々の観測結果を「ぎんが」衛星で取得されたデータとあわせてフィットすると図6に示したように有為に180 keV付近で折れ曲がり観測された.

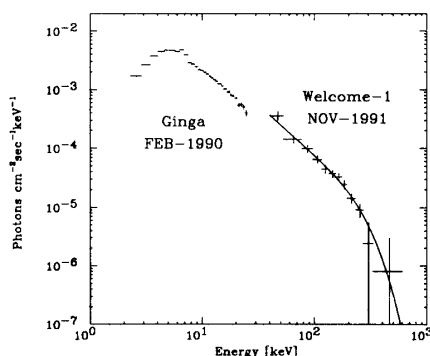


Figure 6: Welcome-1 により観測された Cen A のエネルギースペクトル (ON : 5040sec, OFF : 4800sec). “ぎんが” によるデータもあわせて示してある.

5. まとめ

ブラジルとの共同観測実験として1988年から1991年まで、硬X線/ガンマ線領域において気球による天体観測が行なわれた。我々は7個の気球を打ち上げ、新たに開発した Welcome-1検出器により7個の天体を観測することに成功した(表4)。

Table 4: ブラジルー日本共同気球実験のまとめ

Year	88		89	90		91	
Detector	Low Energy Gamma-ray Detector			Hard X-ray/Gamma-ray Detector Welcome-1			
Target	SN1987A ⁵⁶ Co		SN1987A ⁵⁷ Co	Crab Nebula Vela Pulsar Cen-A PSR1509-58		Cen-A GX339-4 GC	
Ground Station	Poços de Cardas W 46°00' S 21°51'			Cachoeira Pauista W 45°01' S 22°40'			
Flight	2		1	2		2	
Balloon [Mft ³]	20	20	6	6.6	8.8	8.8	8.8
Altitude [km]	40.0	0	36.5	36.0	37.0	37.8	38.2
Observation					2.7hr	9.6hr	5.5hr

参考文献

- [1] T. Kamae et al., A New Hard X-Rays/Gamma-Rays Detector to Study Low-Flux Source on Board Balloon, in: *17th International Symposium on Space Technology and Science*, Tokyo, 1990.
- [2] 高橋, 釜江, 山上他, ブラジルにおける超新星1987Aからの硬X線観測実験, 大気球シンポジウム平成2年度.
- [3] T. Takahashi et al., A Pulse Shape Discriminator and an Online System for Balloon-Borne Hard X-Rays/Gamma-Rays Detector, in: *17th International Symposium on Space Technology and Science*, Tokyo, 1990.
- [4] S. Miyazaki et al., Study of Background with a Hard-X-Ray/Gamma-Ray Detector, 大気球シンポジウム平成3年度.
- [5] 山岡他, MCPを用いた気球用高感度スターセンサーシステムの開発, 宇宙科学研究所報告特集第27号, 1990年2月.
- [6] 関本他, GPS衛星システムを利用した気球実験用高精度時計システムの開発, 大気球シンポジウム平成3年度.
- [7] S. Gunji. Study of the ^{57}Co line and continuum hard X-ray fluxes from SN1987A by a new detector, Doctor Thesis, University of Tokyo, 1992.
- [8] Kawai, et al., "X-RAY AND RADIO PULSE PHASE COMPARISON FOR PSR1509-58", 1991, *Astrophys. J., Lett.*, 383, L65