

## S 520-8 CN 号機による乙女座銀河団の紫外線撮像観測\*

小平 桂一\*\*・渡辺 鉄哉\*\*・山口 朝三\*\*・中桐 正夫\*\*  
渡部 潤一\*\*・田中 濟\*\*\*・尾中 敬\*\*\*\*

(1988年7月15日受理)

### 概 要

乙女座銀河団の中心領域の遠紫外撮像観測を絶対較正された2機の望遠鏡と紫外域二次元検出器を用いて行ない、今までに遠紫外(波長 1500 Å) 輻射量の測られていなかった9個を含む15個の銀河の絶対測光を行なった。また観測中に視野内に入った紫外天体の同定と測光を行なった。

## Far UV Imaging of the Virgo Cluster with the S520-8CN Rocket

By

Keiichi KODAIRA, Tetsuya WATANABE, Asami YAMAGUCHI,  
Masao NAKAGIRI, Jun-ichi WATANABE, Wataru TANAKA,  
and Takashi ONAKA

**Abstract:** Far ultraviolet ( $\lambda$  1500 Å) images of 15 galaxies in the central part of the Virgo cluster were taken by two metallic mirror telescopes with CsI coated microchannel plates aboard the S520-8 rocket. Absolute fluxes of 9 galaxies among them are newly determined. UV objects in the observed fields are identified together with their fluxes.

---

\* 宇宙研特別事業費による研究論文 \*\*国立天文台 \*\*\*東京大学理学部

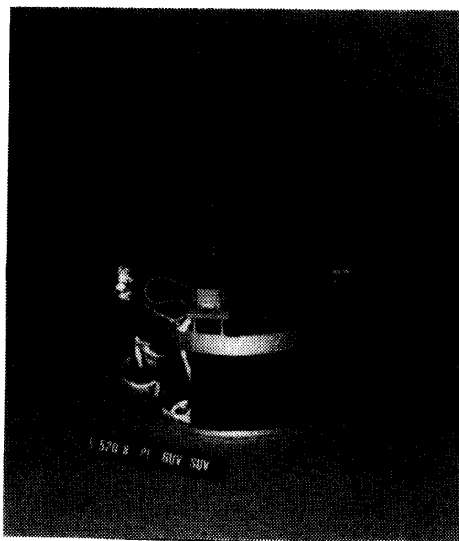


図1 S-520-8/GUV

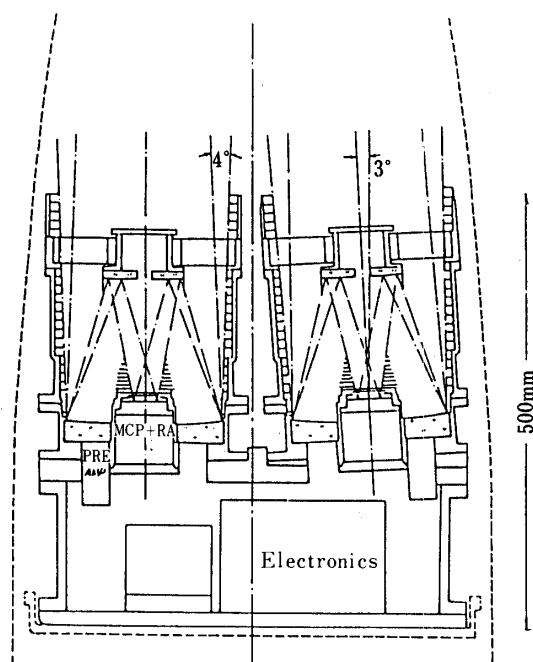


図2 S-520-8/GUV 光学系

姿勢制御の絶対精度が $\pm 1$ 度であること、検出器の大きさがおよそ1インチ程度であること、ロケットに搭載可能な大きさであること等により光学系に対する要求が決定されている。主鏡・副鏡は金属鏡である。アルミニウム合金を切削して製作している。

このロケットにはSUVと称する同じく紫外線の観測をフォトマルを使い更に広視野(直径10度角)で行なう機器が搭載されており、銀極方向の紫外背景光分布の測定と姿勢の

決定を目的としている。

## 2.1 光学系

表2に光学系の仕様を示す。東大理学部的设计を基本にして日本光学(株)が最適化を行なった。主鏡(図3)・副鏡とも双曲面でありかなりきついいリッチ・クレチエン系となっている。金属鏡はまずアニールされたアルミニウム合金の素材にNC切削を行ないだいたいの形状を整える。その後その表面にニッケル電解液を施し(厚み0.1mm)更にNC切削を行ない約半分0.05mm程度を削って整形された。触針による測定結果も仕様の精度を満足して

表2 GUV 光学系

主鏡：口径	176 mm	副鏡：口径	80 mm
厚み(円周で)	26 mm	厚み(円周で)	9 mm
中央穴径	80 mm	中央穴径	20 mm
主鏡-焦点間距離	-27 mm		
面精度 粗さ：R <sub>max</sub>	20 nm	うねり：	200nm / 2 mm
形状：	5000 nm 以下	焦点位置精度：	5 mm 以下
寸法精度：	0.5mm 以下	鏡裏面精度：	0.2mm 以下



図3 GUV 主鏡(金属鏡)

いた。搭載光学系は鏡筒に装着できるハルトマン板を製作し焦点の内外像を撮影して光学性能を行なった。この結果 GUV 金属鏡カセグレン系の最小錯乱円は光軸上で40秒角、2度軸外で60秒程度でありほぼ設計通りの性能が確認された。くわしくは文献[5]を参照されたい。鏡の支持の方法は、主鏡に関してはS-520-3号機と同様シリコンゴムによるフローティング法を採用した。また、副鏡に関しては、軽量であることを考え合わせ、ヴィグネッティングの影響を少なくするため中央穴から中心部を支持する方法を採用した。

紫外域の反射率の向上のためにガラス鏡材との蒸着パラメータの比較測定が東京天文台で行なわれた(図4)。種々の蒸着のパラメータの金属鏡テストピースを作製し数回に亘り

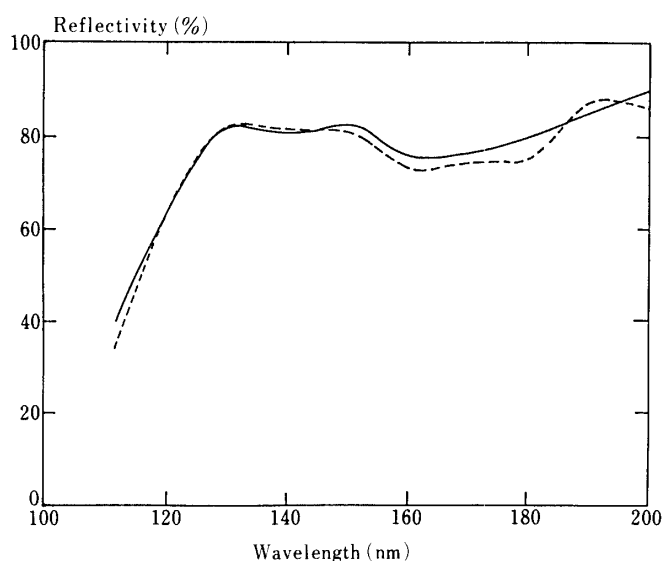


図4 金属鏡面の紫外域分光反射率 (実線：GUV 1, 破線 GUV 2)

測定が繰り返された。この結果、Al：700 Å，MgF<sub>2</sub>：250 Åの組合せがガラス鏡材と同様に最適であることが判明した。この試験測定は更に金属面における蒸着膜の剝離，再蒸着の試験も兼ねており，この作業により再蒸着された膜面も特に反射率の低下は見出せなかった。Al蒸着と同時にMgF<sub>2</sub>の保護膜を真空を破らずに連続して蒸着すれば真空紫外域の反射率の経年変化は小さいことが知られている。最終的な光学系の反射率はカセグレン系に組み上げた後打ち上げ前一ヵ月に測定を行なった。その結果は蒸着直後に比較すれば劣化(約10%)が見られるものの，目標の1400-2000 Åにおける反射率70%以上を達成することができた。

## 2.2 検出器系

検出器にはMCPを使用した。S-520-5号機の太陽極紫外域ヘリオグラフの観測を行なった際やはりMCPを使用した。真空紫外域の本格的二次元検出器として使用するの今回が最初である。浜松ホトニクス(株)により二段増幅のMCP(浜松ホトニクス(株)製・F 1552-21 X)をRAと共にアセンブルした。波高分布の性質としては三段のMCPのほうが扱い易いが，電力の制限等の理由によりS-520-5号機と同様の二段のタイプのものにした。波高の切れ味は多少悪いが，十分に波高分布にヴァレー(谷)が存在することは確認している。検出器は真空容器に収納して飛翔実験までの多くの時間は真空(10<sup>-4</sup> Torr)を維持した。飛翔実験においては，真空容器はタイマーにて強制排気を行なうこととした。

図5に電気系のブロック図を示す。RAの4端より取り出された信号はプリアンプ・シェーパンプにより増幅され，電荷分割の方法により位置の情報になおされメモリに貯えられる。2.5秒間蓄積された画像情報はテレメータに出力される。像の蓄積とテレメータへの送出とを連続的に行なうために二面のメモリをトグリングしながら使用している。今回の観測は従来に較べて更に微弱な紫外線の測定を行なうことになっているので，搭載電気系

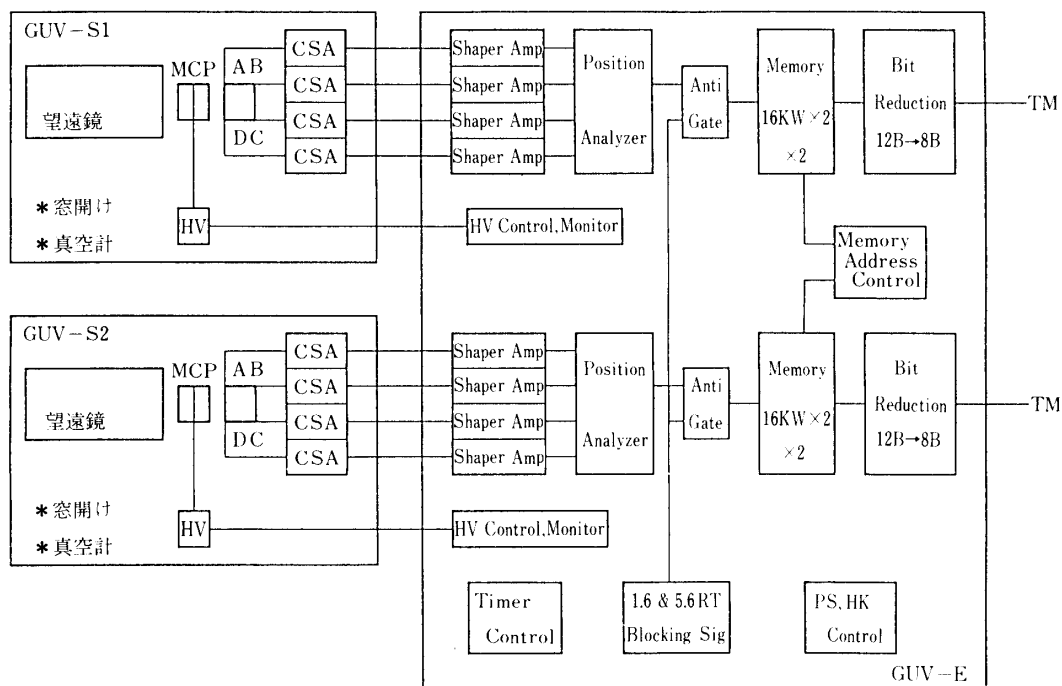
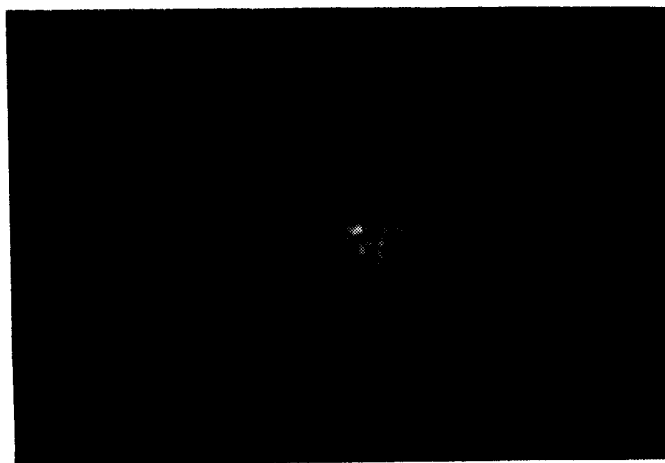


図5 GUV 電気系ブロック図

図6 マイクロコンピュータを利用したの取得イメージ・ディスプレイ。  
直径4mmの実験室光源の像。

と地上支援装置 (GSE) であるマイクロコンピュータを直接実験室に於いて接続することにした。このため観測装置の絶対較正に於いても精度の向上が図られたといえよう。

MCP を真空紫外域 ( $\lambda 1500 \text{ \AA}$ ) に感度を伸ばして使用するため MCP 管内に CsI を塗布して用いることとした。これにより MCP は  $\lambda 2000 \text{ \AA}$  程度まで量子効率 1% 以上を確保できるといわれている。増感の様子を調べるために CsI の表面での厚さをパラメータにした

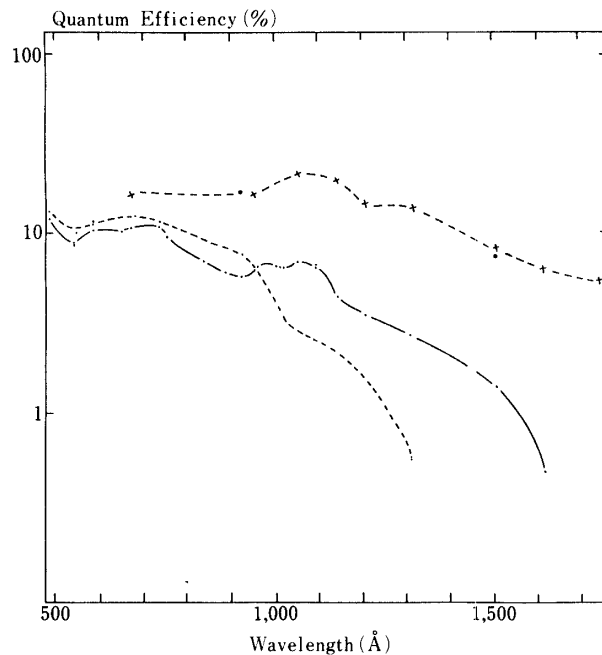


図7 MCPの量子効率(荒い破線:CsI 1 $\mu$ m, 一点鎖線:CsI 1000Å, 細かい破線:ベア)

試作を行ない評価を行なった。CsIの厚みは1000Åより出発したがこれでは不十分であることがわかったためその厚みを1 $\mu$ mに増加させた。その結果真空紫外域に於いても量子効率10%程度を達成することができた(図7参照)。当然表面での厚さというパラメータは決して適当なパラメータではなく塗布方法や蒸着槽に固有のものとなるが、時間の制約等で今回は止むを得なかった。実際にMCPの管内にどの厚さで、どの深さまでCsIが蒸着されているかを知ることは大変難しい。また量子効率の経年変化をある程度調べることができたが、残念なことに最終測定時の効率はピークで3%程度に低下していた。

ところでもう一つ大きな問題が生じた。それはMCPの感度の入射角に対する依存性である。考えてみれば当然であるがMCPは物理的に管状をしており、管の方向から入射してくる光子を増幅することは不可能である。このためこの方向の感度は極端に悪化する。従来MCPはイオンの逆ドリフトを防ぐためある程度のバイアス角がついていたが、その範囲は5-13度ぐらいのものが多かった。今回この範囲の入射角はGUVの光学系で最も利用する角度範囲に相当するため、このタイプのMCPを使用することは感度の較正の上で非常に手間のかかる困難な作業を要することとなる。そこでCsIの塗布の厚さと同様にMCPのバイアス角についても試作を行なった。初めCsIの塗布状態を厚くしてやれば上記のような状態を回避できるのではないかと考えたが、既に1 $\mu$ mÅの蒸着を行なってもあまり改善は見られなかった。これ以上の厚さではCsIが剝離を起こす可能性がある。光学系がカセグレンであるので入射角0度の光子はあまり多くはないことを利用してバイアス角0度の試作も行なったが、感度の大きく変化する領域は全半値幅にして10度近くになるため採用できなかった。そこでバイアス角30度のMCPの試作を行ない、最終的に

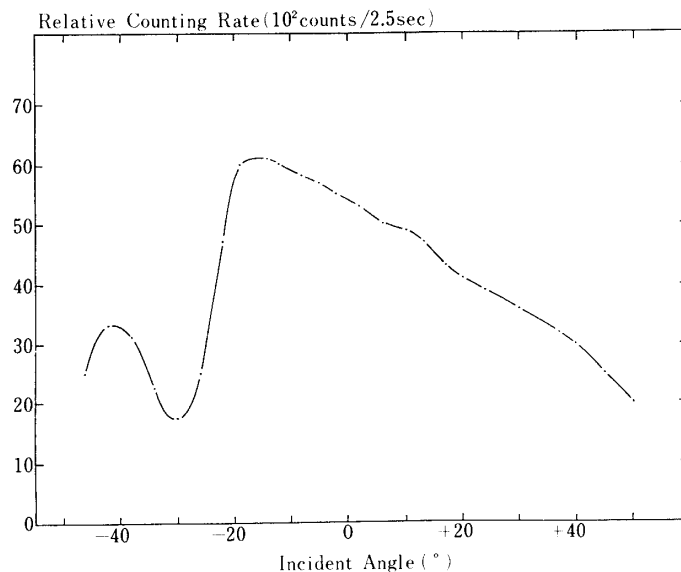


図8 MCP 感度の入射角依存性 (バイアス角 30 度, 波長 921 Å)

はバイアス角 27 度という MCP を採用した。30 度という角度はこれまでの経験の範囲の中では最も大きなバイアス角であり、製作としても限界に近い。図 8 に見る通りバイアス角に応じて感度変化を生じる場所は平行移動する。このバイアス角の MCP を用いてもまだかなりの角度依存性が残っているので結果の整約の際には補正を行なうこととした。今後多段加速の MCP を用いればこのような状況は改善の方向と考えられるが今後の問題と言える。

### 2.3 観測装置の絶対較正

紫外域の観測には確立された標準星が存在せず、また過去の観測結果の誤差も大きな範囲を持っているので、われわれは常に観測装置を絶対較正して実験に望んできている。今回は今までにも増して目的の天体が微弱であるので細心の注意を払った。

金属鏡の反射率の測定は蒸着槽において主鏡・副鏡と同時に蒸着されたテストピースを用いた。このテストピースは常に搭載用の光学系と同じ環境に曝しその経年変化を追跡している。前述のごとく凡そ半年間で約 10% (紫外反射率 80% から 70%) の劣化があった。飛翔実験一ヵ月前の測定を最終としているが、飛翔実験の後も確認のためテストピースの測定を行なった。その結果この一ヵ月の変化は認められていない。

検出器系の窓材には BaF<sub>2</sub> を使用した。窓材を必要とするのは短波長側のカットのためである。MCP は軟 X 線領域まで感度が伸びており、またロケット高度においては地球大気の夜光特に OI λλ 1305, 1356 Å が存在するからである。当初サファイア (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) を予定していたが、入手可能なものの中には残念ながら期待のもてるものが存在しなかった。そこで(株)オプトロンのご好意により BaF<sub>2</sub> を提供戴き最終的に搭載することにした。BaF<sub>2</sub> の問題点は重量に対する硬度である。厚さ 3 mm, 直径 40 mm の結晶を支えるためにオーリングを用いている。単体の振動試験を行なった際に支持法に問題のないことを確認した。

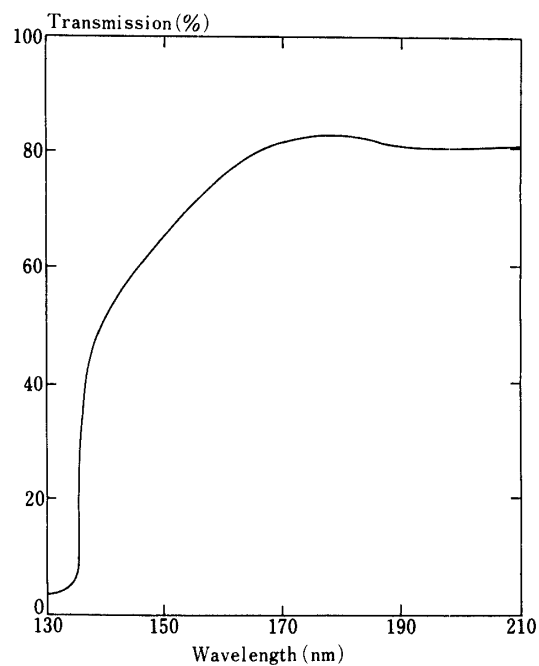


図9 BaF<sub>2</sub>結晶（直径40 mm，厚さ3 mm）の紫外域分光透過率

図9にBaF<sub>2</sub>の透過率をしめす。サファイアよりも短波長まで伸びているが夜光のカットには問題なく，また1700Åより長波長側の透過率は3 mm厚を有しながら80%に達している。

検出器系の較正は以下のように行なった。高圧の設定は計数率の電圧に対する特性を測

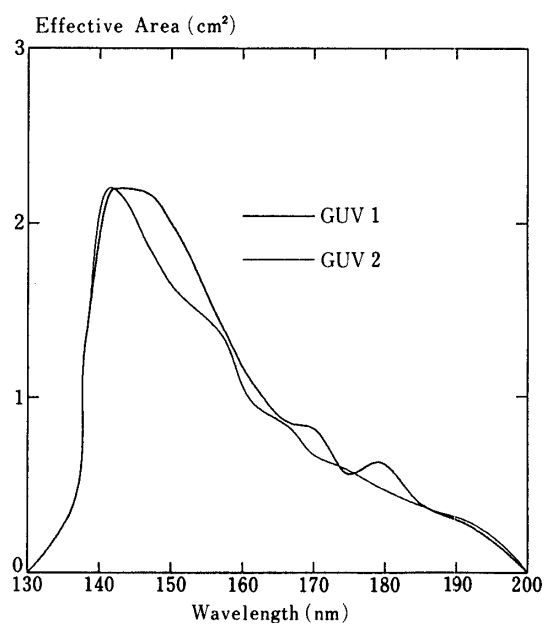


図10 GUV望遠鏡系の有効面積



定し 2100 V を採用した。波高分析器を用いて増幅系のゲイン、ディスクリ値の設定を行なった。その後実験光源の像をマイクロコンのディスプレイに表示し、位置解析回路の較正を行なった。空間分解能として 50-100  $\mu\text{m}$  を得ている。また像の重心を詳細に調べることにより RA 及び電気系による像の歪みに関しても解析を行なった。前述の入射光の角度依存性また MCP 面上のピクセルによる感度ムラの補正のためには 3 次元的な膨大なデータが必要であるが、われわれはピクセルごとの入射角に対する相対的な感度は同じと仮定して、MCP 面上 8 方向の面ムラと対応する方向の入射角に対する相対感度を測定した。そしてこれらの測定の基準となる点 (MCP 中心, 入射角 0 度) に対して絶対値付けをおこなった。MCP 使用領域の紫外光の強度はサリチル酸ソーダ付きのフォトマルで較正を中継しても非常に微弱である。このため測定は慎重に繰り返し行われた。またこのフォトマルと較正されたフォトダイオードの比較も慎重を期した。

これらの各構成要素に対するデータを全てまとめて GUV 望鏡系の有効面積という形にした。図 10 に MCP 中心における有効面積を示す。またこれに対応するような MCP 上の各点における有効面積が計算できる。

### 3. 観測経過・結果

S 520-8 号機は昭和 62 年 2 月 22 日午前 1 時 15 分、鹿児島宇宙空間観測所から方位角 141 度、高度 77.6 度で打ち上げられ、270 秒後に高度 285 km に達した。GUV 関係のタイ

表 3 姿勢制御に対する要求精度

回転軸	絶対値	レート
ピッチ/ヨー	$\pm 1$ 度	0.02 度/秒
ロール	$\pm 6$ 度	0.15 度/秒

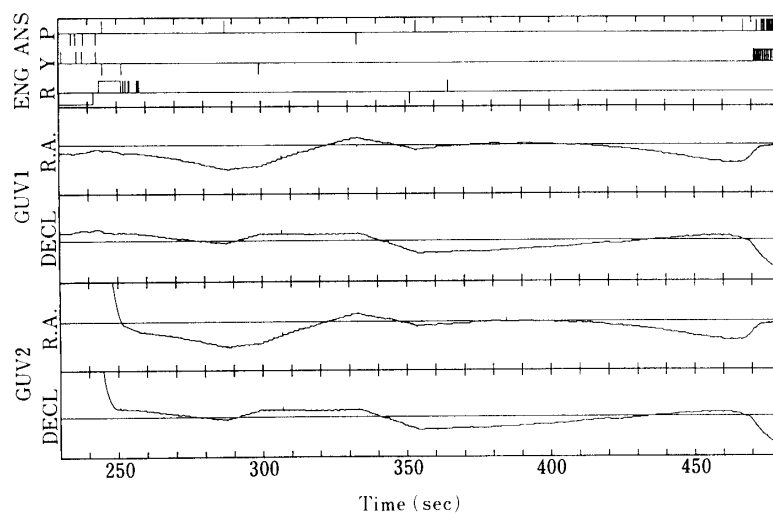


図 11 CN ジャイロから読み取った GUV 望遠鏡の視野中心及び CN エンジンの応答

マー項目は X+57:真空容器窓開け, X+117:HVon でいずれも順調に動作した。ロケットは凡そ 250 秒後ごろには三軸制御が効き乙女座銀河団中心の方向に固定したため目的の観測を行なうことができた。今回の観測モードは乙女座銀河団の中心の方向に三軸固定し、できる限り長い時間静止観測をするというものであった。姿勢制御に関する要求項目を表 3 に示す。詳細なコントロールを行なうためにスラスタの推力は 50 g 重/基となっている。打ち上げ時間が深夜に及んでいるのもノーズダイブポイントからファーストアクイジションポイントまでの距離を短くするための配慮からである。打ち上げ直後のスピンを有効に減ずるためにこのロケットはヨーヨーを 2 台搭載していたが、2 段目のヨーヨーが有効に働かずシミュレーションで予測したより姿勢制御がかかるまで長時間を要したものの実験結果はほぼ満足のゆくものとなっている。

### 3.1 恒星の同定と絶対測光

ジャイロによる CN の姿勢のデータからロケットの姿勢をだいたい決定することができる。図 11 に CN のデータから読み取った姿勢の様子と、図 12 にそのデータから推算した GUV 1 と GUV 2 の視野中心の軌跡を示す。GUV 2 の軌跡が円弧を描いているのは機軸に対して 3 度傾いて取り付けているためである。目的の乙女座銀河団の中心 (M 87) に到達するまでもに数多くの恒星を視野の中に捉えており、その数は 31 個 (S/N>10) に及ぶ。S-520-3 号機の経験に較べ、今回は顕著なジャイロのドリフトは存在していないが、現

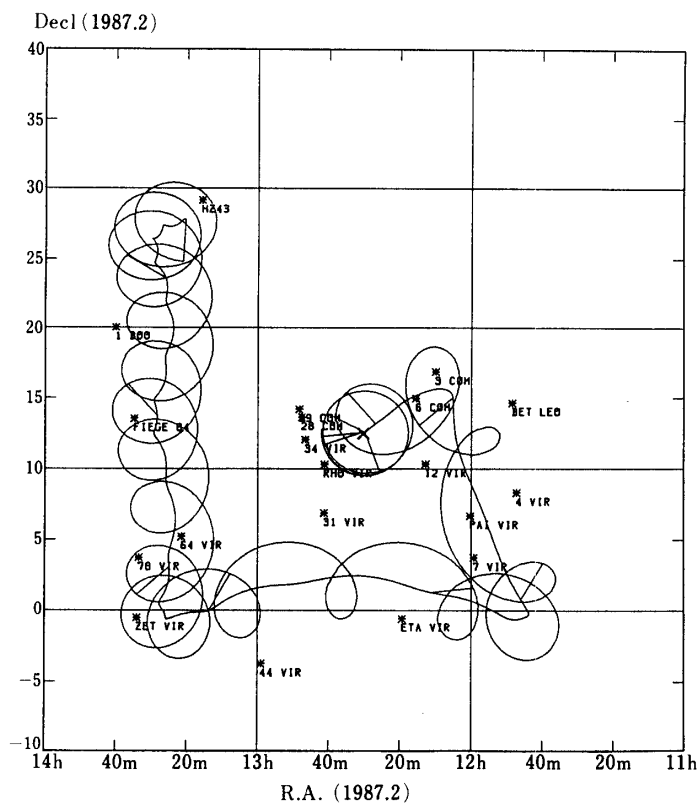


図 12 GUV 1 及び GUV 2 視野中心の天空上における軌跡。円弧の多い方の軌跡が GUV 2。

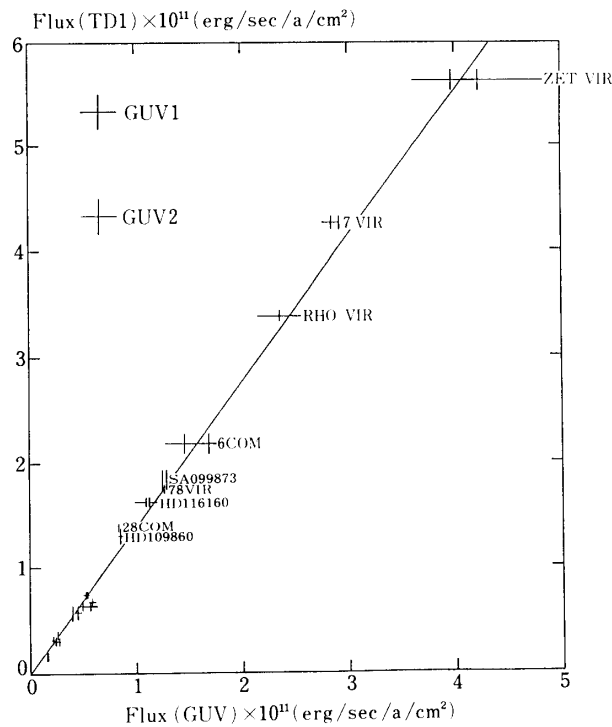


図13 TD-1 A カタログ記載の恒星による絶対放射量の比較

在同定された恒星を逆に使ってより精密な姿勢決定を試みている。これを今後更に利用して、銀河の北極方向の微弱で可視光でも暗い紫外天体の探査をすることが可能だと考えている。

図13に今回の実験で同定された恒星の内既に遠紫外の放射量の知られているものを用いて機器の絶対較正の比較を行なった。既存の遠紫外域の放射量のカタログとしてTD-1 Aのもの[6]を採用した。図中の恒星は観測中に1回以上視野内に入り放射量の決定の精度の高いものである。まず図より明らかなことは、GUV1とGUV2の間に系統的な誤差が含まれていないこと、並びに双方の検出器系の直線性が確保されていることである。これらはMCP検出器面内の面ムラ、入射角依存性が正しく補正されていることを示す。絶対値そのものに関しては、われわれの観測はTD-1 Aに較べて凡そ38%程度明るく観測されている。既によく知られているように、真空紫外域、特に $\lambda < 2000 \text{ \AA}$ の絶対較正は1970年代の衛星観測で数多く行われてきているが、未だにその精度は10-20%のオーダーである。従って上記の差は像の惨みに起因する積分範囲の誤差、背景放射の差し引き方等を考え合わせれば十分に満足すべきものと思われる。この結果今回の観測装置は $10^{-15} \text{ erg/cm}^2 \text{ sec}$ 程度の明るさの紫外天体まで検出可能であり、この領域を観測したのものとしては最も高感度のシステムであったと言える。

実験室における位置分解能に比して得られた星像のボケが大きかったが、原因は目下究明中である。

### 3.2 系外銀河の紫外像

ロケットの姿勢が落ちついてからの画像を重ね合わせて乙女座銀河団の中心部の遠紫外像を作製した(図14)。実験後明らかになったことであるが望遠鏡系のバツフリングに問題があったと見え、明るい天体が視野方向に近づいた時に局部的に僅な背景光の増加が見受けられる。図14では一応その影響も取り除いてある。また主な銀河の位置同定表も添えてあるが、これから15個の系外銀河の紫外輻射量を有意に検出した。この内今までに観測の

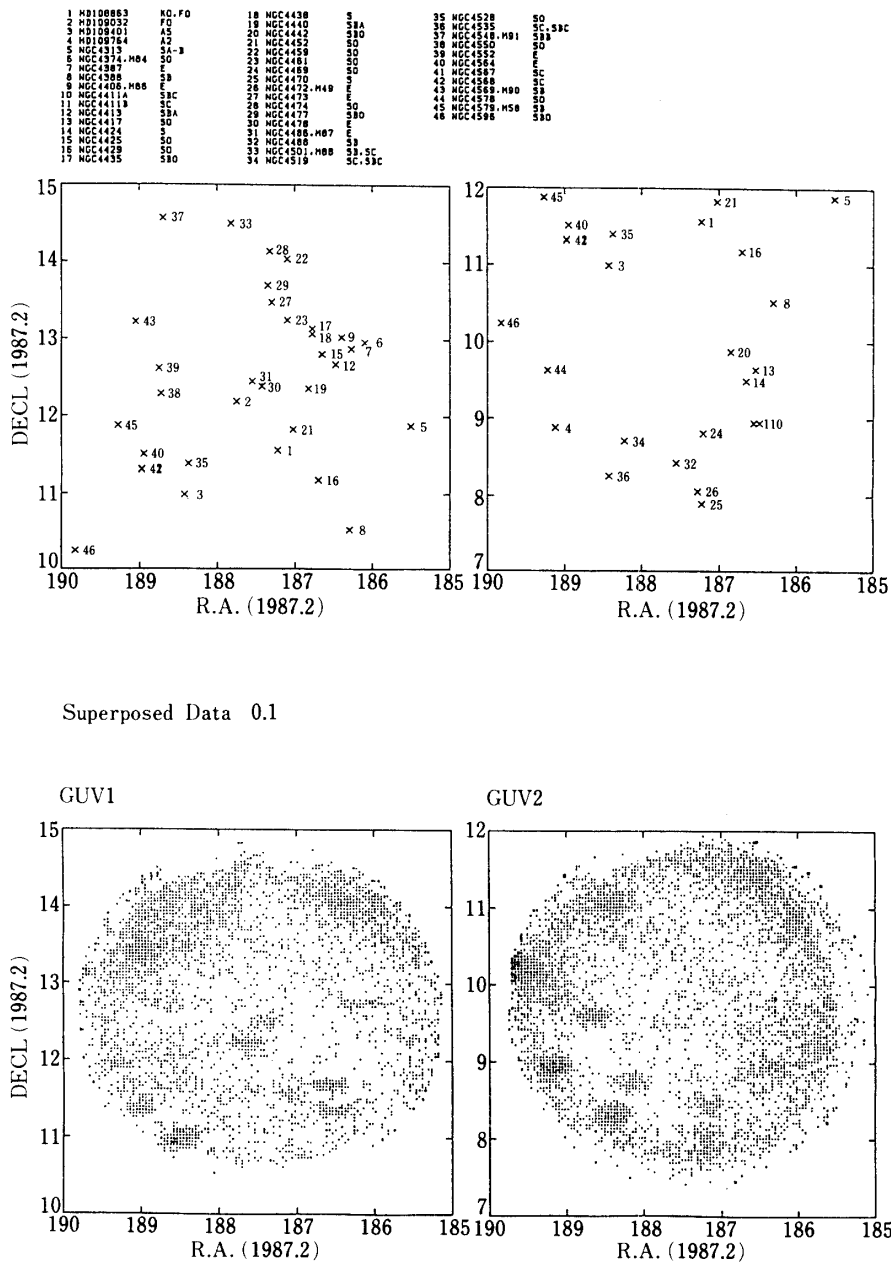


図14 乙女座銀河団中心方向の遠紫外像と対応する位置同定図

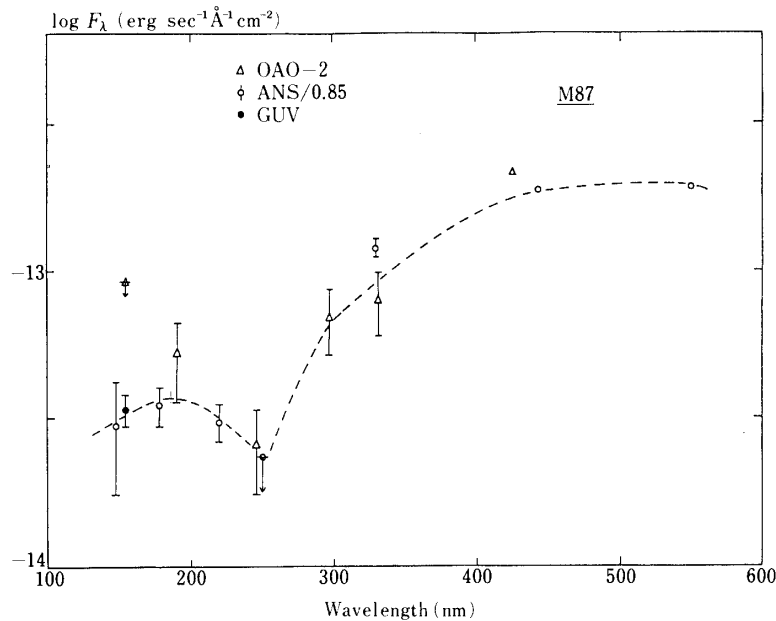


図15 M87のスペクトル

なく今回初めて測定されたものは9個である。図15にM87の可視・紫外スペクトルを示す。遠紫外 $\lambda$ 1500ÅではOAO-2とANSのものがある。OAO-2は上限を与える観測でしかなくANSでは銀河がダイナフラムから溢れていて補正を行なった値で表示してある。

得られている像が多少東西に長いように見えるが、これは現在ジャイロのみによる位置の重ね合わせを行なっているためであり、恒星の場合同様同定された銀河を使って更に精度の良い位置の決定を行なう予定である。また、二つの銀河の位置が多少ずれているが、恐らく姿勢の影響では説明ができないだろうと考えており、別の紫外天体の汚染があると考えられ興味を持てる。この辺の領域の深探査が皆無であるため貴重なデータになるものと考えられる。詳しくは別途報告の予定である。

われわれの検出器系のダークは数カウント/2.5秒程度であるので、紫外天体以外の部分は紫外背景光の寄与であり、0.3カウント/ピクセル・2.5秒程度の強度となる。このデータはSUVのデータと組合せて整約する予定である。

終わりにこの飛翔実験・観測の実験主任として終始有益な助言と助力を戴いた奥田治之教授に感謝の意を表します。また姿勢制御に関しては、中谷助教授研究室及び三菱プレジジョン(株)の多大なご協力を戴きました。更に、MCPの開発・製作については、浜松ホトニクス(株)MCP開発グループの松浦恵樹氏に、BaF<sub>2</sub>の結晶に関しては(株)オプトロン主幹研究員の井上久義氏のご尽力を賜りました。ここに心よりお礼申し上げます。最後にS-520-8号機ロケット実験班の皆様に深い感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] 田中 濟・渡辺鉄哉・沢村峰夫・尾中 敬・山口朝三・中桐正夫・秋田 亨・小平桂一・西惠三：宇宙科学研究所報告，特集第5号，35頁。
- [ 2 ] 渡辺鉄哉・山口朝三・中桐正夫・田中 濟：東京天文台報，第20卷，149頁。
- [ 3 ] 平山 淳・田中捷雄・浜名茂男・渡辺鉄哉・秋田 亨・桜井 隆・山口朝三・中桐正夫・西惠三：宇宙科学研究所報告，特集第9号，3頁。
- [ 4 ] UVSAT ワーキンググループ：UVSAT-紫外天文衛星第一次計画案-，宇宙科学研究所，SES-TD-82-003。
- [ 5 ] 中桐正夫・尾中 敬・田中 濟・山口朝三・河野嗣男：東京天文台報，第21卷，67頁。
- [ 6 ] Jamar, C., Macau-Hercot, D., Monflis, A., Thomson, G. I., Houziaux, L., Wilson, R. : Ultraviolet Bright Star Spectrophotometric Catalogue ESA SP-27.