

K-9 M-80 号機によるサブミリ波宇宙背景放射光の観測

松本敏雄*, 早川幸男*, 松尾 宏*, 村上 浩, 佐藤紳司*
A. Lange** and M. L. Richards**

(1987年12月25日受理)

Observation of the Cosmic Background Radiation in the Submillimeter Region by Means of K-9M-80 Rocket

By

T. MATSUMOTO, S. HAYAKAWA, H. MATSUO, H. MURAKAMI,
S. SATO, A. LANGE, and P. L. Richards

Abstract: The diffuse brightness of the sky has been measured in six submillimeter passbands, using liquid helium cooled absolute radiometer onboard the sounding rocket K-9M-80. The flux measured at 1160 μm is in good agreement with the average of longer wavelength measurements of the cosmic background radiation. The fluxes measured at 709 and 481 μm decrease rapidly towards shorter wavelength, but correspond to significantly higher temperature. The flux measured at 262 μm is even lower than at 481 μm . These data significantly constrain cosmological model which postulate redshifted dust emission, inverse Compton scattering, or the decay of massive particles in the early universe. Data at 262, 137 and 102 μm are consistent with emission from interstellar dust at high galactic latitude.

1. はじめに

宇宙はかつて一点から爆発し現在に至っているというビッグ・バン宇宙論は現代の宇宙論の基本的命題とされている。このビッグ・バン宇宙論、膨張宇宙論は2つの観測事実によって支えられている。一つはハッブルによる宇宙膨張の発見であり、いま一つはペンジ

* 名古屋大学理学部

** University of California, Berkeley

アスとウィルソンによる 3 K 宇宙背景放射の発見である。前者は近傍宇宙の運動を、後者は高温のプラズマが再結合した宇宙初期の様子を示していると考えられている。

3 K 宇宙背景放射は赤方偏移, z , が 1000 に相当する宇宙初期を直接観測できるため、宇宙論研究の上ではとりわけ重要である。このため最初の発見以後多くの人たちによって様々な観測が行われてきた。大角度異方性（双極分布）からは局所銀河団の運動が、温度のフラクチュエーションの観測からは宇宙初期の密度ゆらぎの上限値が得られ、これらの結果は宇宙の進化の研究に重要な役割を果たしている。3 K 背景放射のスペクトルについても多くの観測が行われ、スペクトルが黒体放射（プランク分布）で表されるかどうか、黒体放射からのずれがあるかどうか、について広い波長範囲にわたって調べられてきた。その結果、これまでのところに 3 K 背景放射は単一温度 (2.74 ± 0.02 K) の黒体放射として矛盾がないとされてきた (Smoot et al. 1987)。しかしこれらの観測は大気の影響が少ない長波長域に限られ、一方各種理論からはスペクトルの黒体からのずれは 1 ミリより短波長側に存在することが予測されてきた。標準的な理論によれば 3 K 宇宙背景放射は $z = 1000$ の時代以後、全く独立に進化し、厳密にプランク分布にしたがう。したがって、もし黒体からのずれが存在するば、それは宇宙の進化のある時期にスペクトルを歪ませる物理過程が存在したことを意味している。とりわけスペクトルの詳しい観測は、プラズマが再結合して銀河が形成されるまでの観測上の空白期を調べるのに貴重な情報をもたらすことが理論からは期待されている。

スペクトルの観測には絶対測光が不可欠であり、このための大気の影響が大きい短波長側での観測はより困難である。気球高度でも 1 ミリより短い波長での観測は難しく、大気圏外での観測が望ましい。また観測装置からの熱放射の影響も相対的に大きくなるための装置全体の冷却が必要となり、高度な実験技術が要求される。

我々名古屋大学赤外グループはカリフォルニア大学バークレー校と協力し、液体ヘリウム冷却放射計をロケットに搭載し 100 ミクロンから 1 ミリまでの空の明るさを測ることを試みた。その結果、サグミリ波領域では宇宙背景放射は予想されたよりかなり明るいことを見いだした (Matsumoto et al. 1988)。観測の内容とその宇宙論への影響について以下に述べる。

2. 観測装置

観測装置の全体図を図 1 に示す。K-9 M 型ロケットに搭載するため大きさに対する制限がきつく、直径 22 センチのコンパクトな設計となっている。(Lange et al. 1987)

クライオスタットは液体ヘリウムタンク 2 つによりなる。HeI タンクは外部からの熱侵入を遮る役割を、HeII タンクはホーン、およびフォトメーターを冷却する役割を果たしている。HeII タンクは He I タンクによって冷却されるチャコールポンプによって減圧され、光学系全体を約 1.0 K に冷却する。一般に検出器（ボロメーター）の性能を上げるためにはより低温が望ましいが、1.0 K でも今回の観測目的には十分であり、装置からの熱放射は全く無視できるレベルになっている。クライオスタットの保持時間はチャコールの発熱によって決まり約 3 時間と短いがロケット観測には十分な長さである。低温部は打ち上げ時

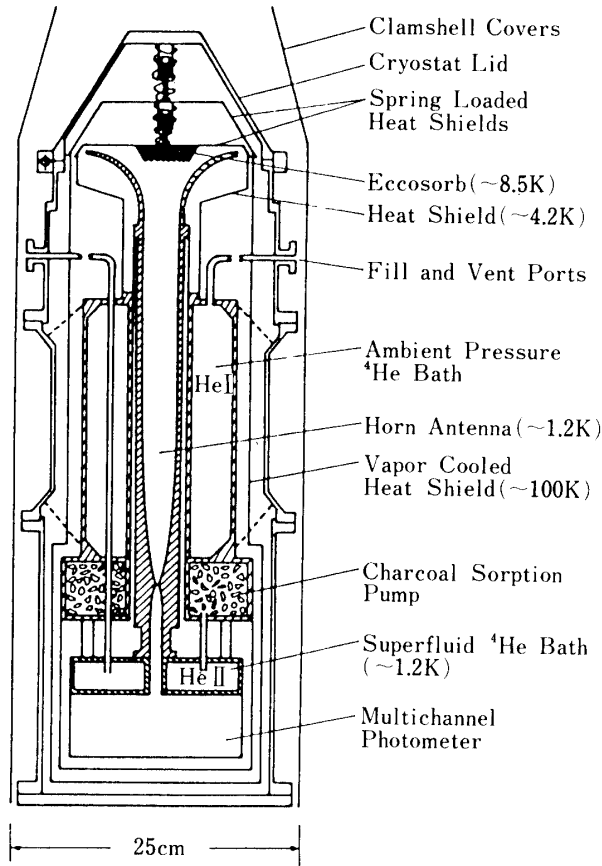


図1 クライオスタット断面図

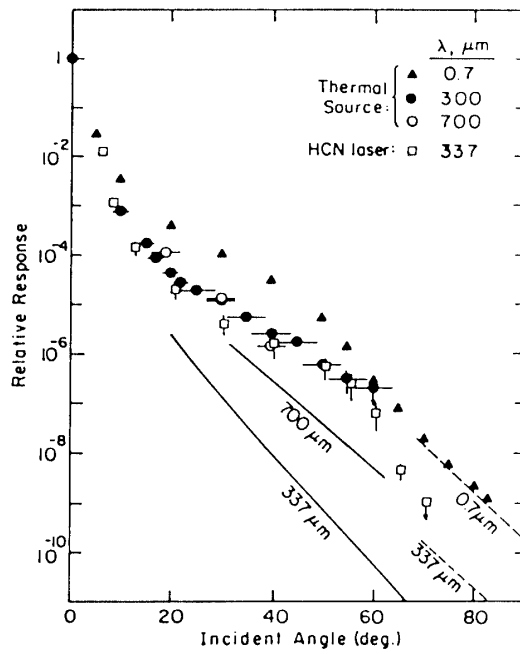


図2 ホーンのサイドローブレスポンス。実線は回折からの予測値をしめす。

の振動，衝撃に耐えるように，強度が高く，かつ熱伝導率の小さな GFRP によって四方から支持され，いわゆる Tension support の構造となっている。

集光ホーンは視野角 7.6° ，有効径 4 cm のウィンストン型ホーンと，トランペット型のバツフルよりなる。ホーンの性能としては，光を効率よく集めることと共に，強い地球からの放射光を避けるためにサイドローブ・レスポンスが極めて低いことが要求される。図 2 はホーンのサイドローブ・レスポンスを各種波長帯で測定した結果を示している (Sato et al. 1987)。10 ミクロンより長波長では結果がほとんど変わらないこと，又実線に示した回折から予想されるサイドローブより測定結果が悪いことから，サイドローブの原因は表面の散乱によるものと思われる。この結果から，地球からの放射光の影響は短波長側の方が大きい，視線方向が地球表面から 70 度以上はなれば観測に問題ないことがわかった。

フォトメーター部の断面図を図 3 に示した。ホーンによって集められた光は鏡によって 90 度曲げられた後，チョッパーによって交流信号に変換される。入射光はビームスプリッ

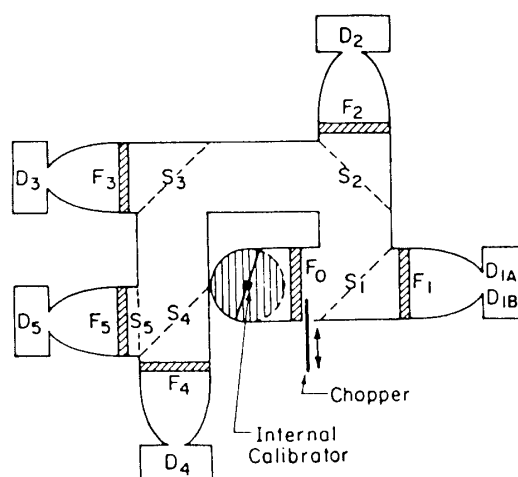


図 3 フォトメーターを上からみた断面図。S, F, D はそれぞれ，ビームスプリッター，フィルター，検出器を表す。

表 1 Bandcenters and Bandwidth

Channel	$\frac{\lambda_0}{\mu\text{m}}$	$\frac{\nu_0}{\text{cm}^{-1}}$	$\frac{\Delta\lambda/\lambda_0 = \Delta\nu/\nu_0}{\%}$
1	1160	8.6	30
2	709	14.1	21
3	481	20.8	19
4	262	38.2	36
5	137	72.9	35
6	102	98.2	21

ター (S), フィルター (F) によって短波長側から順番に5つのチャンネルに分けられキャビティに導かれる。最初のキャビティには通常の Ge:Ga と Stressed Ge:Ga と2つの検出器がおかれ、その波長感度のちがいにより更に2つの波長帯に分割されている。そのほかのキャビティには各1個のボロメーターが置かれている。その結果、表1にまとめられているように、100 ミクロンから1ミリの波長域で6チャンネル同時測光が可能となった。

この種の観測に於て絶対値の較正は観測精度を決める重要な要素である。各チャンネルの相対的波長感度はシステム全体についてフーリエ分光器によって測定され、その結果は各光学部品から予測される結果と良い一致を示した。絶対値についてはホーン前面に黒体面を置き、その温度を色々と変えて絶対感度を測定した。黒体の温度と感度の関係は波長感度とプランク分布から期待されるものと矛盾がなく、較正結果が信頼できることを示している。ロケット観測中は上記較正は不可能なため、チョッパー前面に置いたゲルマニウムチップ (図3の Interanl Calibrator) を間欠的に点灯し、実験室における較正時、及びロケット飛揚中での標準光源とした。

3. 観測とその結果

第一回目の観測は K-9 M-78 号機によって 1985 年 8 月に行われたが、クライオスタットの蓋が開かず、観測に失敗した。このため観測装置を再製作し、2 回目の実験を K-9 M-80 号機によって行った。

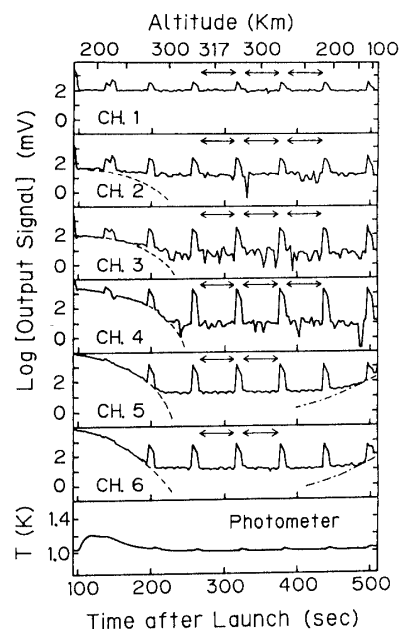


図4 飛行中の信号及び、フォトメーターの温度の変化。周期的に現れるピークは標準光源 (Internal Calibrator) によるものである。矢印で示した部分は、地球起源及びロケット周囲の放射成分はないとしてデータ解析に使われた期間を表す。

観測ロケット, K-9 M-80 号機は 1987 年 2 月 23 日午前 0 時に宇宙科学研究所, 鹿児島宇宙空間観測所から打ち上げられた。クライオスタットの蓋は 100 秒後に開けられ, 観測が始まった。150 秒後に観測機部はエンジン部から速度 3.8 m/sec で切り離され, その結果, ロケット軸は周期 10 秒, フルコーンアングル $30 \pm 3^\circ$ のプリセッション運動を行い, これにともなって放射計による天空のスキャンが行われた。スキャン・パスは天頂を通り, コーンを中心方向は $l=203 \pm 3^\circ$, $b=33 \pm 3^\circ$ であった。ロケットは 287 秒後に最高高度 317 km に達した。

観測中フォトメーターの温度は図 4 に示したように, エンジン燃焼中及び開頭直後にやや上昇したが, 何れの場合もすぐに回復し観測中の温度は 1.02 ± 0.01 K とほぼ一定であった。ホーンの温度もほぼ同様な変化を示したがスキャン中に地球の放射光が周期的にホーンに直接当たるため, 温度がプリセッションと同期して変化した。しかしその温度は 1.2 K 以下にとどまりホーンからの熱放射は全く無視できるレベルであった。

各チャンネルの飛行中の信号を図 4 に示した。周期的に現れるピークは標準光源によるものでこれを基準にして絶対値の補正が行われた。上昇中ロケット周囲のガスからの放射に起因すると思われる急激に減少する成分(鎖線)がみられたが 240 秒までに全チャンネルで消失した。280 秒から 510 秒までの間に高度は 317 km から 105 km まで変化した, 長波長側の 4 チャンネルではこれによる有為な信号の変化は見られなかった。これはこの間大気の影響が無視できるほど小さかったことを意味している。一方チャンネル 5 と 6 では高度 200 km から信号が急激に増加した(一点鎖線)。これは中性酸素 OI の 148 と 63 ミクロンにある原子線によるものと思われる。これまでの観測と理論を考慮し, チャンネル

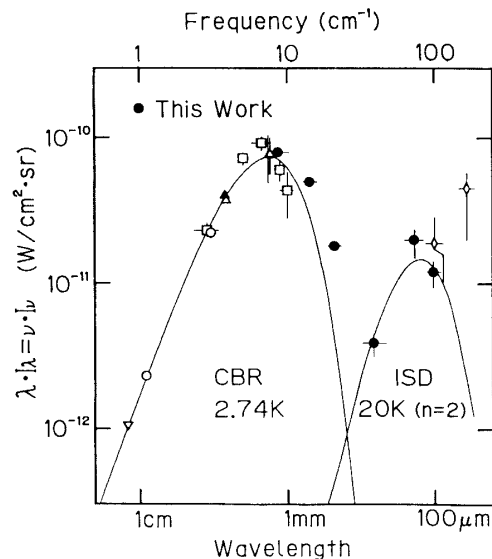


図 5 観測された領域の空の平均的表面輝度。黒丸は我々の観測結果を表し, 横棒, 縦棒はそれぞれ, バンド巾, 測定誤差を示す。

5に対してのみ信号の10%をOIによる残留大気成分の上限値とした。地球光は観測の最後に地平線が視野から65°まで近づく時、チャンネル6に3回だけパルス状の信号として観測された。以上の考察から、前景成分が無視できると思われる、図4の矢印で示した期間に付いて信号を平均化し、地球外からの放射成分と見なした。この様にして得られた空の平均表面輝度をこれまでの他の観測結果とともに図5に示した。黒丸の横棒、縦棒はそれぞれバンド幅、測定誤差を示している。測定誤差はチャンネル1-3に付いては検出器の雑音、チャンネル5,6では較正時の誤差が主となっている。チャンネル4には長波長側に小さなリークがあり、その値の不確定さのため誤差がやや大きくなっている。

図5のチャンネル4,5,6の信号成分はプリセッションと同期して信号が変調されており、かつその成分が中性水素HIの柱密度と良い相関があることが分かった。このことから、チャンネル4-6は星間空間塵の熱放射が主成分であり、惑星間空間塵の熱放射成分の寄与は少ないと結論される。我々は、この成分を、温度20 K、Emissivityのspectrum index, $n=2$, の宇宙塵からの熱放射で近似した(ISD)。これに対し、チャンネル1-3ではこの様な変調信号はみられず、その起源を宇宙論的なものとみなすことができる。その表面輝度をこれまでの観測で得られている2.74 Kの黒体放射と比べると、1ミリ付近では矛盾がないが、短波長になるにつれて明らかに上にずれていくことがわかる。チャンネル4に対する星間空間の熱放射成分の寄与は、 $5.1 \pm 0.5\%$ であり、これを差し引くと3つのチャンネルでの背景放射成分が得られる。それを更に黒体放射の温度として求めたものを図6に示した。

4. 議論

3 K背景放射がウィーン領域でプランク分布からずれることに付いては、これまで各種理論が出されていたが、観測されたのは今回の我々の結果が初めてである。ミリ波、マイクロ波領域でのこれまでの観測結果、2.74 Kプランク分布に対して約10%のエネルギーがサブミリ波領域で超過していることになる。このエネルギーは宇宙の進化のある時期に付け加わったはずであるが、これだけのエネルギーを生み出すことは量的に簡単ではない。宇宙での通常エネルギー発生過程はバリオンによるもので、水素がヘリウムに転換する際に発生する。水素の重量比、 ΔX が、赤方偏移、 z ,の時代にヘリウムに転換したとすると、エネルギー収支から次の式がなりたつ。

$$0.01\Omega_b(1+z)^3\rho_c c^2 \cdot \Delta X = 0.1a T_0^4(1+z)^4$$

これより $\Delta X \sim 4 \times 10^{-3}(1+z) \cdot h^{-2} \cdot (0.1/\Omega_b)$ が得られる。ここで Ω_b , ρ_c はバリオンの密度パラメーター、臨界密度、を、 T_0 は現在の背景放射の温度 (2.74 K) を表す。ハッブル常数は $100 \text{ km/sec. Mpc} \times h$ で規格化した。この結果はエネルギーが付け加わった時期を過去に遡ればそれにおおじてより多くのバリオンのエネルギーが必要なことをしめている。 z を10とすると、 ΔX が4%に達してしまい、ヘリウム量の過剰をもたらす、ビッグ・バンによる元素合成と矛盾する。これを解決するためには、生成されたヘリウムは全て暗黒物質に閉じ込められているとしなければならない。エネルギー源として未知の崩壊する粒子

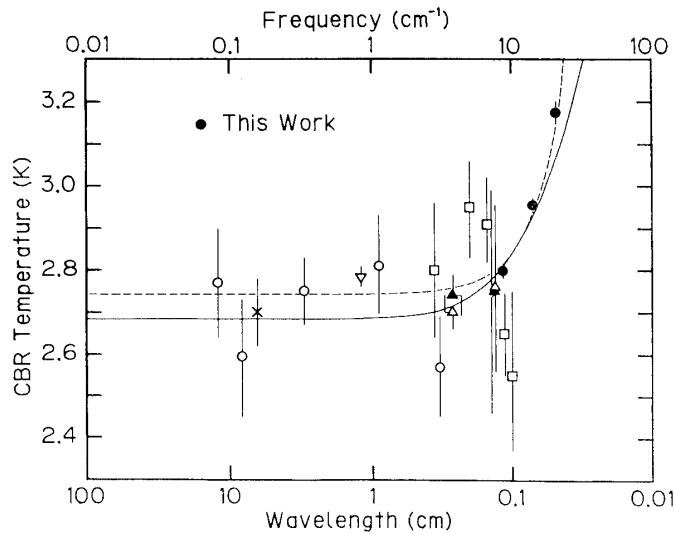


図6 チャンネル1-3で測定された背景放射の温度(黒丸)。実線はコンプトン散乱によるモデルを、破線は塵の放射によるモデルを、それぞれ表している。

(Decaying particles) を考えればこのような問題は起らないが、適当な粒子の存在の事実は確かめられていない。

スペクトルの変形をもたらす物理過程としてこれまでに提案されたもので最も知られているものは、高エネルギー電子によるコンプトン散乱である (Zeldovich and Sunyaev 1969)。コンプトン散乱を記述するパラメーターとしては、散乱がない場合の背景放射の温度、 T_0 、と散乱の程度を表すパラメーター、 $y = \int (kT_0/mc^2) dt$ 、の2つが必要である。チャンネル1と2に対して理論値と観測値を比較し、マイクロ波領域での温度が最も高くなるようなパラメーターの組を求めた。その結果、 $T_0 = 2.79$ K、 $y = 0.019$ が得られた。それによるスペクトルを図6の実線で示した。このモデルの難点は、マイクロ波領域での温度が2.68 K となりやや低過ぎることと、 y の値が大き過ぎることである。電子の温度を一千万度以上としてもプラズマの密度として $\Omega \sim 1$ が必要であり、現実的なモデルとはいえない。また電子の温度を上げると相対論的取扱が必要となるが、この場合のデータとの一致はあまり良くない。とりわけ、チャンネル4の低い値がモデルに強い制限を与える。(Hayakawa et al. 1987)

いま一つのモデルとして、サブミリ波領域での超過分を宇宙初期の塵の熱放射とする理論がある (Bond et al. 1986)。この理論では、塵は宇宙初期に最初に生まれた星(種族III)によって生成され、星からの紫外線で温められると考える。塵の温度を $3.55(1+z)k$ 、その放射率が波長の2乗に逆比例としたとこのモデルを図6の鎖線で示した。この時は、マイクロ波領域での温度を2.74 K としてかつ、チャンネル1-3のデータをうまく合わせることができる。Hayakawa et al. (1987) によれば、宇宙初期の塵が現在観測されている星

間空間塵と同じ性質をもつと仮定すると、塵の相対密度 $\Omega_d \sim 10^{-5}$ 、ヒートアップされた時期の赤方偏移、 $z=10\sim 40$ 、であれば観測結果を説明できる。宇宙初期にこのような塵が存在していたとすると、この塵は種族IIIの星の光をかなり吸収する。しかし一部は通り抜け、赤方偏移して近赤外線領域で背景放射として観測されるはずである。Matsumoto et al. (1987) によって観測された近赤外等方成分は、このモデルと良い一致を示し興味深い。

これらのモデルのどれが正しいかについては現在決定することはできない「しかし「宇宙論、特に宇宙の大構造の起源、および銀河の形成、についての理論はすべて今回観測されたサブミリ波のスペクトルと矛盾しないことが要求される。この点で今回の我々の観測結果は宇宙論研究の上で重要な意味をもつことになると思われる。

謝 辞

今回のロケット実験では、地上での操作、打ち上げ時間、エンジン部の切り離し等、PIからの要求がきつく、多くの方がたにご無理をお願いしたが、実験主任、奥田、小河原両教授をはじめとする実験班の皆様がたの御協力と御支援のおかげでやっと成功することができた。この場を借りて心からのお礼を申し述べる。

参 考 文 献

- Bond, J. R. et al. 1986, Ap. J., 306, 428.
Hayakawa, S. et al. 1987, PaH. Astr. Soc. Japan, 39, 941.
Lange, A. et al. 1987, Applied Optics, 26, 401.
Matsumoto, T., Akiba, M., and Murakami, H. 1987, submitted to Ap. J.
Matsumoto, T. et al. 1988, Ap. J. in press.
Sato, S. et al. 1987, Applied Optics, 26, 410.
Smoot et al. 1987, Ap. J., 317, L45.
Zeldovich, YA. B, and Sunyaev, R. A. 1969, Astrophys. Space Sci., 4, 301.