

赤外線による宇宙初期の観測

松本 敏雄*

1. はじめに

我々が住むこの宇宙には様々な物がいろいろな形態を持って存在している。地球、更には我が銀河系は宇宙の中でも特殊な場所であり、物質密度、放射密度が特に高い所に属する。宇宙全体でならしてしまえば我が銀河系の寄与は微々たるものにすぎない。この広い宇宙にどれだけの物質或いは光がどのようにして存在しているかは宇宙を研究する上で大変重要な問題である。

物質密度は通常デンスティ・パラメーター Ω で表わされ、 $\Omega=1$ (この時の密度は臨界密度と呼ばれ $\sim 10^{-29}$ g/cm³ に対応する) を境にして宇宙が開いているか、閉じているか、或いは宇宙がこのまま膨脹を続けるか将来収縮に転ずるか、に関係する重要な量である。この物質密度を決定するためにいろいろな手段で観測が行われてきたが、未だ決定的な値は出ていない。

物質と並んで観測可能な重要なものとして放射場がある。宇宙初期には放射場のエネルギー密度の方が物質のエネルギー密度より優勢であった時代もあったが、現在ではエネルギー的には物質よりはるかに小さな寄与でしかない。しかしながら放射場は各々の波長領域に対応して宇宙の昔又は現在の状況を反映しており、宇宙の進化を研究する上で重要な意味を持つ。このように宇宙に満ちている放射場は観測的には背景放射——様かつ等方的な表面輝度を持つものとして検出される。この種の背景放射として最も有名なものは3K宇宙黒体放射であろう。これは1965年にペンジラスとウィルソンによって発見されたもので、宇宙初期に物質と放射が分離した時期の名残りとしての放射と考えられている。3K宇宙黒体放射の存在はビッグ・バン宇宙、熱い初期宇宙の描像を定着させたものでありこの発見は宇宙研究の上で大変重要な出来事であった。

X, γ 領域でも等方成分の観測が行なわれ、背景放射の存在が示唆されている。アインシュタイン衛星による観測によれば、個々のX線源を重ね合わせても等方成分の20%程度しか説明できず、残りについては宇宙初期における高エネルギー現象等の原因を考慮せねばならない。

紫外線領域では銀河間の高温プラズマからの光が背景放射として観測される可能性があり、ロケット、人工衛

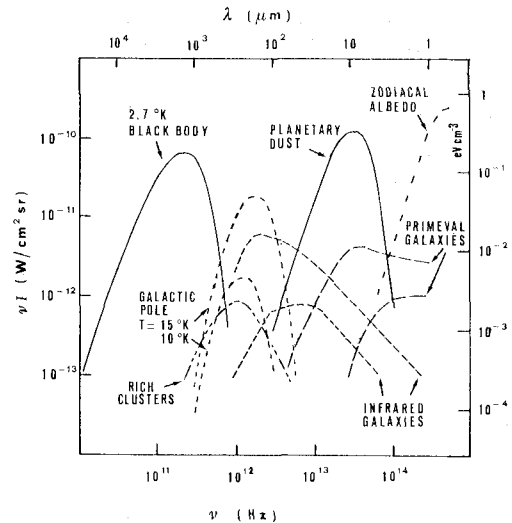


図1 可視から電波にかけての背景放射及び手前の銀河、惑星間空間成分を示した。(但し推定値を含む)

星等による観測がいくつか試みられている。しかし紫外線領域では銀河系内の星の光及びその散乱光からの寄与が大きく、銀河系外からの紫外放射として確立したデータはまだないようである。

可視域では遠方の銀河からの光を重ね合わせたものが背景放射をなし、銀河の進化をさぐる上で重要なものとされている。しかし、これも手前の強い大気光、黄道光、星夜光等にかくされて上限値しか得られていない。

図1に可視域から電波領域にかけての背景放射の観測値、予想値、又背景放射と競合する手前の成分——黄道光、銀河光等を示した。波長 $10\mu\text{m}$ 前後は惑星間空間塵からの熱放射が非常に強く太陽系外をみることは困難であるが、近赤外とサブミリ波の両端において背景放射を観測できる可能性がある。我々はこの赤外領域での背景放射が宇宙研究の上で重要な意味を持つと考え、一部は既に観測を試み、一部は装置の開発を行ないつつ計画の具体化を急いでいる。現在までの結果と将来の展望について以下述べることにする。

2. 近赤外背景放射

a) 観測

前節で述べたように $1\sim 5\mu\text{m}$ の近赤外領域には黄道光の散乱成分と熱放射成分との間に多少すけた太陽系の「窓」が存在する。星夜光もこの波長域ではかなり暗く

* 名大理 Toshio Matsumoto: Early Universe Observed in Infrared Radiation

なるため、背景放射の観測には可視域より有利である。

近赤外領域での背景放射をなすものは可視域と基本的には同じ遠方の銀河、星であるが、近赤外領域では赤方偏移がより大きな天体が観測できる可能性がある。可視域での背景放射がかなり暗いことから、銀河がかつて明かかったとすればそれは赤方偏移がかなり大きな時代であったと予想されているが、近赤外域での背景放射の観測はこの銀河、宇宙の進化を研究する上で大きな意味を持っている。

近赤外領域は地上からの観測も可能と思われるかもしれない。しかし通常の地上望遠鏡による天体観測では視野を十分にしぼりかつ強い大気光の上ののったほんの少しの星の光を検出しているのであってこの方法で背景放射を観測することは極めて困難である。赤外観測における今一つの一般的困難さとして装置自身からの熱放射の存在がある。地上観測においても鏡等からの熱放射が雑音の原因となり検出能率が落ちることはよくあることであるが、背景放射を観測する時には熱放射の存在は致命的である。これをのがれるためには装置全体を熱放射が問題とならない程度に十分冷却せねばならない。以上のことから赤外領域で背景放射の信頼できるデータを得るためには大気上空に冷却望遠鏡を上げて観測せねばならないことがわかる。このような観測を手軽に行えないこともあってか、これまで本格的に近赤外背景放射の測定を試みた例はなく、他の観測のバイ・プロダクトとして上限値が得られているにすぎない。我々は最新の低温技術と高感度赤外線検知器を組み合わせた測定器をロケットに搭載し、「真面目」にこの背景放射を観測することを試みた。幸い、宇宙科学研究所のロケット K-9M-75号機に搭載する機会にめぐまれ興味あるデータを得ることができた。

観測装置は極く単純なものである。一樣に広がった成分を観測するのであるからなるべく広い視野で沢山の光を集める方が効率が良い。このため口径は 26mm と小さいが、視野角は 4° と大きくとったシリコンレンズによる集光系を5個用い、各々がフィルターにより特定の波長域に対応するようにした。5個の望遠鏡は全てロケット軸に平行にロケット先端部におかれ、ロケットのプリセッションによって掃天を行なった。測光器の中心波長(波長巾)は $1.6\mu\text{m}$ ($0.3\mu\text{m}$)、 $2.2\mu\text{m}$ ($0.4\mu\text{m}$)、 $3.8\mu\text{m}$ ($0.7\mu\text{m}$)、 $4.2\mu\text{m}$ ($0.7\mu\text{m}$)、 $4.7\mu\text{m}$ ($0.6\mu\text{m}$)であった。全光学系は液体窒素を更に減圧した固体窒素(50K)によって冷却され、装置からの熱放射が全く無視できる状態が実現された。(観測装置の外形の写真1を参照されたい)

観測ロケット K-9M-75号機は1982年9月13日午後9時30分に内ノ浦の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、発射後280秒後に最高高度322km

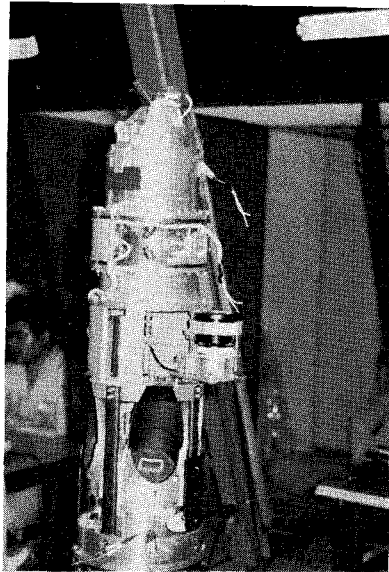


写真1 K-9M-75号機搭載近赤外背景放射観測装置の外形。

に達した。発射後80秒後に観測装置のふたを開いて観測を始め、280秒後にはデスビンによってプリセッション角を大きくして、より広い空の掃天を行なった。幸いにして観測装置は飛行の全期間を通じて正常に動作し、「空の明るさ」を測定することができた。又観測中明るい星が視野に入り、統計値の補正についても実験室の測定値とよく一致した値を得ることができた。

さて、得られた観測データから宇宙起源の背景放射の成分を求めるためには既知の手前の成分を空の明るさから差し引かねばならない。近赤外領域の場合、第1に地球起源——大気光、地球からの強い光の迷光、第2に惑星間空間起源——黄道光、宇宙塵の熱放射、第3に銀河系起源——星夜光、の寄与を差し引かねばならない。これらの手前の成分の差し引きはこの種の観測にとっては本質的に重要な問題であるがここでは簡単に要点だけ述べる。

大気光は夜光層($\sim 100\text{km}$)よりある程度高くなったところで無視できるようになり、観測可能なロケット高度に制限を与える。パッフルを通して入ってくる地球の赤外光の迷光は、光軸と地球表面とのなす角に強く依存する。この角度が 80° より大きいところでは(最大値は 100° に達する)地球の影響を無視することができる。

黄道光は惑星間塵による太陽光の散乱光であるが、近赤外領域でのスペクトルは太陽スペクトルとほぼ同じということがわかっている。一方可視域では多数のデータの蓄積によりかなり信頼できるデータがあるので、これを近赤外領域まで外挿して必要な表面輝度を推定することができる。しかし惑星間空間塵からの熱放射の観測例

は少なく、それも又信頼できるデータとはいえない。このためこれまでの2例の観測結果、コーネル大、AFGLの両者に対応する二つの推定値を別々にとりあげた。今回観測された天域においては太陽離角、黄緯による信号の変化は見出されなかったため、太陽離角 $\sim 130^\circ$ 、黄緯 $\sim 25^\circ$ の値を代表値として採用した。

最後に銀河系内からの光、星夜光を考える。ロケット観測中、銀経 60° 付近で銀河面を横切り銀緯 30° 付近までの銀河面のプロファイルが得られた。この結果と、太陽付近の星の分布によるモデルと比較することにより銀河系外からの成分を推定することができた。

図2に上記の結果を簡単に示すために、観測中での最

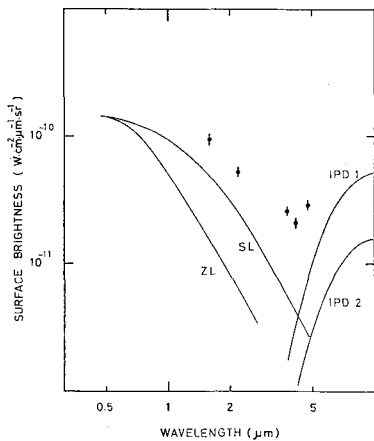


図2 ロケット観測中で一番暗かった空 ($l=53^\circ$, $b=-23^\circ$) のスペクトル。推定された手前の成分—黄道光 (ZL), 星夜光 (SL), 惑星間塵の熱放射 (IPD 1, IPD 2) を実線で示した。

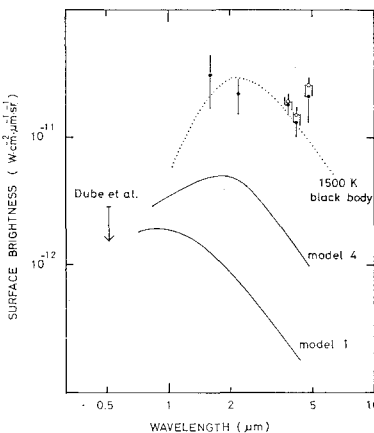


図3 今回の観測で得られた銀河系外からの背景放射成分を示す。長波長側での黒丸、白丸は惑星間塵の熱放射成分の2種の推定値に対応する。Dube et al. は可視光での背景放射の上限値を示す。モデルはパートリッジとビーブルスによる値を示した。

も暗い空 ($l=52^\circ$, $b=-23^\circ$) のスペクトルと、推定された手前の各種成分を示した。星夜光のスペクトルはモデルフィッティングによるものを用い、可視域での観測ともよく一致している。図2でわかるように観測された空の明るさは推定された既知の成分に比してはるかに明るく、 $2.2\mu\text{m}$ では2~3倍、 $3.8\mu\text{m}$ では~5倍に達する。図3は観測値から既知の成分を各々の誤差を考慮して差し引いた結果であり、十分な有意さを持って「未知」の成分が観測されていることがわかる。この成分は観測された空の領域では大変一様であり宇宙背景放射としての特徴を十分に備えている。

この未知の成分を宇宙背景放射に帰する際には、他の成分を差し引くという「消去法」の不確定性を再検討しなければならない。しかしながら他の成分が近赤外領域に異状があるとしても図2の観測値を説明することは簡単ではない。例えば図2に示されている星夜光のスペクトルは $V-K=3.0$ であり橢円銀河の最も赤いものに相当する。星夜光で観測値を説明しようとするならば我が銀河系のディスクの色は $V-K\sim 4.0$ 程度でなければならぬことになる。又長波長側では惑星間空間塵の熱放射が最も不確実性が大きい、これが $3.8\mu\text{m}$ より短波長側まで説明することは温度、熱収支から考えて大変困難である。いずれにしても長波長側、短波長側の両者を一つの源で説明することは宇宙起源を別にすれば簡単ではない。従って我々は図3で示された表面輝度は銀河系外からくるものとみなすが現在では一番もっともらしいと考えている。

b) 近赤外背景放射と宇宙の進化

観測された背景放射と理論を比較するために図3にパートリッジとビーブルスによる予想値を一緒に示した。モデル1は銀河の明るさが一定、即銀河の進化を考慮しない場合、モデル4は銀河の進化が激しく初期には極めて明るかったとした場合に相当する。モデル4では現在観測されるヘリウムが全て銀河形成初期に形成されたと仮定している。近赤外域での観測は図3で示したようにモデル4よりはるかに明るく、そのエネルギー密度は3K宇宙黒体放射のそれと同じ程度の値を示す。従って近赤外背景放射を説明するためには通常の銀河の進化を考慮するだけでは足りず宇宙初期の激しい活動源、エネルギー源を考えねばならない。この一つの可能性として「種族Ⅲ」の考えがある。

周知のように種族Ⅰ、Ⅱは我が銀河系内の星の年代によるちがいであり、種族Ⅱは球状星団、高速度星よりなり最も古い星ということになっている。種族Ⅲはこれより更に古い、宇宙が始まって「初代の星」である。この種族Ⅲの星が近赤外背景放射の源と考えると宇宙初

期の進化のシナリオは次のようになる。

ビッグ・バン以後 $Z \sim 1000$ で物質と放射は分離する。3K 宇宙黒体放射はこの時の名残りであるが一方の物質は再結合により中性化する。この水素とヘリウムよりなる物質は重元素を含まないため冷却能率が低く、最初にかなり大質量の星が形成される。これらの大質量星は表面温度が 10^5K に達し 10^6 年で燃えつきる。最近の星の進化の研究によれば $200 M_{\odot}$ より大きな星はコラップスしてブラック・ホールになり、これより小さい星は爆発して超新星となる。種族 II の星の重元素を余り増させないことから種族 III の星のほとんどは $200 M_{\odot}$ より大きな質量を持つと推定されるが、これは理論的予想とも矛盾しない。種族 III の時代の終りには、ほとんどの質量はブラック・ホールになり、わずかの質量が高温、高電離ガスとして残される。前者のブラック・ホールは現在の宇宙では「見えない質量」又はミッシング・マスとして銀河団、銀河のハロー等で影響を及ぼしている。現在の銀河は、後者の残存ガスから更に形成されたものである。今回のロケット観測で得られたスペクトルからこの種族 III の時代の赤方偏移 Z は $50 \sim 100$ であり、又そのエネルギー収支から密度パラメーター Ω は 1 前後の値をとることがわかる。

このような銀河形成以前の宇宙初期に活動的な時期があったとすれば他の観測結果にも当然影響を及ぼす。X, γ 領域での背景放射はこの時期のものと考えたと説明可能であるし、又種族 III の重元素分布についても好ましい結果を与える。3K 宇宙黒体放射についても種族 III 時代以後の電離ガス中の電子によるトムソン散乱により、非等方性、フラクチュエーションが消されている可能性もある。更には、近赤外背景放射と 3K 宇宙黒体放射が同程度のエネルギー密度を持っていることから、3K 宇宙黒体放射を種族 III の時代の宇宙塵からの熱放射として説明することも不可能ではない。この場合、これまでのビッグ・バン宇宙、熱い宇宙モデルそのものが再検討されることになる。

種族 III の考えは核エネルギーによって観測を説明しようとするものであるが、重力エネルギーを考えればより効率的にエネルギーを取り出すことができる。これは京大基研の佐藤文隆氏等によってその可能性が指摘されたもので、巨大質量のブラック・ホールへ物質が落下することによって光を発生させるものである。この場合には密度パラメーター Ω は 0.1 程度でよく、赤方偏移は 10 程度となる。

このように今回の観測結果は宇宙の進化を研究する上で大変重大な問題を含んでいるが、残念ながら限られた空のただ一度の観測結果であり、今回の結果を確認することを含めて今後の観測に待つところが多い。より波長

分解能、空間分解能を高めた観測によって、宇宙初期に何が起きたかが解明されるであろう。

3. 遠赤外, サブミリ波背景放射

最初に述べたように、 $100 \mu\text{m}$ から 1mm までの広い波長範囲では観測がほとんどなく信頼できるデータは全くないといってよい。この波長域では銀河系内の宇宙塵による熱放射が手前の成分として存在しているはずであるがこれについてすら理論的推定しかないのが現状である。この波長帯において背景放射を構成する要素として次の三つが考えられる。

第 1 に個々の銀河が出す遠赤外線を重ね合わせたものとしての背景放射がある。周知のように我が銀河系は遠赤外線の強力な放射源であり、セイファート銀河、クエーサー等の寄与も考えればかなりの表面輝度に達する。

第 2 は種族 III の星の光を吸収し、再放射する宇宙塵からの光である。前節で述べたように 3K 宇宙黒体放射がビッグ・バンの名残りかどうかを知る上で大変重要である。

第 3 は長波長側での 3K 宇宙黒体放射自身である。1 mm より短い波長域では高エネルギー電子による逆コンプトン効果によるスペクトルのゆがみが観測される可能性があり、又温度の非等方性、フラクチュエーションもこの波長域でより見出しやすい。

実際に観測される空の明るさは上記の成分が混じったものであり分離できるかどうか不明であるが、とにもかくにも測ってみることが第 1 に必要である。気球高度ではこの波長域の背景放射の観測は不可能なため、アメリカでは COBE, ヨーロッパでは CIRBS と呼ばれる人工衛星計画がこの波長帯でのスペクトル、空間分布を測定することをめざして進んでいる。我々はロケットでもこの分野ではかなりの成果を上げることができると考えており、装置の開発、計画の具体化をいそいでいる。この分野で既に先駆的業績をあげているカリフォルニア大バークレーの P. リチャーズのグループとの共同研究として国際協力を進めており、できるだけ早い時期にロケット観測を行いたいと考えている。

4. おわりに

宇宙の進化は天文学の最重要課題の一つであるが、最近では物理、特に素粒子の分野との結びつきが深い。大統一理論を検証する超高温、超高密度の世界として爆発直後の宇宙が想定され、核子と反核子の非対称性、核子と光子の比、インフレーション宇宙等の興味ある成果が出されている。しかし観測的に宇宙の進化を研究する点については、特に放射と物質が分離して以後銀河の形成に至るまでの期間には観測的事実は何もないといってよ

い、赤外線観測はこの分野で将来重要な役割を果すものと我々は考え、その一步を踏み出しつつあるのが現状である。この種の背景放射の観測を行う上での技術的向上に加えて、スピニングではあるがロケットが割に利用しや

すいという日本の特殊事情を生かして今後の研究を進めて行きたいと考えている。幸い日本には宇宙論の優秀な理論家も多いので今後とも協力しつつ重要な成果を上げるように努力したい。

書 評

計算物理 (II)

現代の数理科学シリーズ ②

藪下 信 著

(地人書館、昭和58年5月1日刊、2,600円)

計算物理 (I) の続編である。(I) では主に天文学の数値計算に必要な基礎的な知識が説明されたが、本書ではそれらを実際の問題においてどのように利用するかが解説されている。

物理の基本法則が一応確立された現在において、今後の研究目的は、複合系、つまり銀河や生物のように多数の要素から成る系がどのような性質をもつかを解明することであるという筆者の考えが冒頭で述べられ、複合系の研究における計算物理の重要性が強調されている。計算物理とは、筆者によれば、「基礎方程式は与えられてはいるが、数学解析を用いては解き得ない物理現象を、計算によって解き明かし、また簡単な方程式によっては、記述し得ない現象を、直接、計算によって解こうとする物理現象へのアプローチである」。

この観点に立って、本書では、銀河の渦状構造と彗星の力学進化の問題がとり上げられている。どちらも筆者自身が携わってきた問題だけに、数値計算の結果をたよりにいかに論理を構築していくかが具体的かつ明快に書かれている。歴史的背景や他の問題との関連も詳しく説明されているので、読み通すだけでも勉強になる。たとえば銀河の渦状構造の章では、重力不安定性理論の立場から、銀河がそれ自体として渦状構造を発生させる性質を持っていることが示されるが、これ以外の潮汐力起源説や、最近話題となっている超新星爆発の連鎖反応に起源を求める考え方も紹介・検討されている。ミッシング・マスとの関わりもよくわかる。

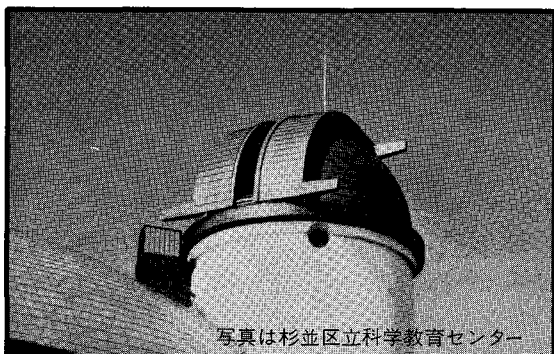
扱われているテーマはかなり特殊なものだから、天文の計算というと天体の位置計算や日食の予報を思い浮かべる人には奇異に映るかもしれない。また、わかりやすくされているとはいえ、レベルは原論文と大差ない。特殊関数なども頻繁に出てくる。したがって、筆者が望んでいるように、本書を理解した上で実際に計算を行なってみるには、かなりの力(特に体力!)が要求されると思う。しかし、天文解説書で天下りの知識を与えられるだけでは物足りず、自分でも何か研究的なことをやっ

てみたいという人には良い手引きとなるだろう。また、謎解きの魅力を天文学に求める人にもすすめられる本である。

一般に、ある物理現象が「理解」できたというのはどういことであろうか。天文学の研究において、数値計算がますます多用されるようになってきている今日、これは重要な問題である。ある人は、観測と合う数値モデルが作ればそれで良いと思うかもしれないし、数値計算はあくまでも道具であり、それをもとに原理的・思想的なものに到達することが必要であると考え人もいるだろう。本書は、複合系の理解における計算物理の重要性を説くという筆者の目的にはかなった内容となっているが、欲をいえば、今書いたような問題にも踏み込んでほしかったと思う。

ともあれ、日本語で読める本としては類書をみない。意欲的な実験作といえる。

(野口 正史)



写真は杉並区立科学教育センター

★営業 ASIBO 品 目★ 天体望遠鏡と双眼鏡 ドームの設計と施工

▶主なドーム納入先◀

東京大学宇宙航空研究所/東京大学教養学部/東京学芸大学/埼玉大学/福島大学/川崎市青少年科学館/杉並区立科学教育センター/駿台学園高校(北軽井沢)/船橋市立高校/高知学園/土佐市公民館/刈谷市中央児童館等の他、日本全国に100余基の実績。

ASIBO 光学工業株式会社

東京都豊島区池袋本町2-38-15 ☎03(985)1321