

# 宇宙黒体放射

佐藤 文隆

〈京都大学理学部 〒606-01 京都市左京区北白川追分町〉

昨年4月にCOBE(宇宙背景放射探査衛星)が宇宙黒体放射強度の異方性を発見したという発表があり、ほぼ一年たった。その後の検討では一時期待されたような素粒子宇宙論好みの単純でスッキリした宇宙像はまだ見えてきていない。この宇宙黒体放射の波長スペクトルと異方性が語る意味を考える。

## 1. 原始火の玉残光の発見

1965年にペンジラスとウィルソンは天空のあらゆる方向からほぼ一様にやってくるマイクロ波を発見した。この発見物語は一読に値する<sup>1)</sup>。46年から、ガモフは“原始火の玉”に関し数多くの論文を書いていた。動機は元素起源だが、他に銀河形成や現在への影響も論じた。そうした中に宇宙黒体放射が残存するという予言もある。50年の林忠二郎の陽子・中性子比の論文があり、このガモフ説は日本ではよく知られていた。またサイエンス・ライター元祖のガモフは一般向きの本にもこれを書いている。78年にペンジラスとウィルソンはこの発見でノーベル賞を授賞したが、残念ながらガモフは68年にすでに亡くなっていた。

ガモフは“原始火の玉(primeval fireball)”という表現を好んだが、最近では“ビッグバン”説と言われる。この名は定常宇宙論(46年)のホイールがライバルのガモフ説をひやかして“ビッグバン”(自爆してしまうような理論という意味とのかげ言葉?)と呼んだのに始まるという<sup>1)</sup>。

原始火の玉の黒体放射は現在に残存して、一様に宇宙空間を満たしている。この予言の検証には、きびしく言えば地球近傍での観測だけでは不十分で、何処にもあることも示さねばならない。この

種の証拠としては、星間分子の励起がある。また銀河外空間での検証手段として高エネルギーガンマ線の吸収効果が指摘されているがまだ確認はない。しかし、この観測はガモフ説以外で説明するのが「理論」的に不可能であり、地球近傍での観測だけで全宇宙に満ちていることがすでに実証されたとみなされている。ここで「理論」とはミリ波からマイクロ波にかけて黒体的に振る舞う宇宙塵(高分子、マイクロクラスター、等)に関するものである。星間空間の超真空では実験室で出来ない塵がある可能性もあり、まだ完全に分かったわけではない。しかしCOBEが完全な黒体スペクトルを確認したことで「他の説明」の可能性はなくなったと断言できよう。

1965年の観測は波長7.35 cmのマイクロ波帯、強度は3.3 Kだったから、「マイクロ波背景放射」とか「3 K放射」と呼ばれた。しかし温度はその後2.7 Kで、スペクトルの全貌も明らかになった。これらは「他の説明」に余地を残した現象論的な呼び名であって、現状では、その実体を表現する「宇宙黒体放射」が最適と思う。

宇宙黒体放射の検出は膨張する空間領域の観測を画期的に広げ、そこに一様空間を確認した。この事実と一般相対論を前提にすると、収縮から膨張への反転はあり得ず、事実上無限に収縮した状態から膨張を続けてきたといういわゆる“ビッグバン”説の必然性が証明される。これの一般相対



論の部分が66年頃に出されたペンローズとホーキングの特異点定理である。

## 2. COBEでの観測

宇宙黒体放射強度が最大のミリ波帯は地上からは大気が邪魔して観測できない。したがって、衛星観測が早くから構想された。ワイスのCOBE構想を1975年に聞いた記憶がある。その後進行状況がトンと聞こえず、学界でも「つぶれた」という噂も一時あった。確かに難題が多かったらしいが、ともかく89年11月に打ち上げられた。COBE衛星の解説は多くあるので省略する<sup>27)</sup>。COBEはFIRAS, DMR, DIRBEの三つの観測を行うものだという全体像を指摘しておく。90年1月にFIRASの結果が発表され、続いて92年4月に例の有名なDMRの発表があり、そしてDIRBEの解析は途中のようだ。

DIRBEは0.001-0.3 mの波長域(宇宙黒体放射と黄道光の間のスペクトルの谷間)で空の地図を描くもので、近くは太陽系塵、星間塵、原始惑星系から遠くでは原始銀河までの様々な情報を重ねて写す。まさに天文学のオールスター登場で、分離が大変である。宇宙の深部探索の意味では宇宙論にも関係するが、宇宙黒体放射を避けた観測であり他の二つとは目的が違う。

## 3. FIRASでのスペクトル観測<sup>3)</sup>

この結果によると、1 cm-0.5 mmの波長域で $2.735 \pm 0.06$  Kのプランク分布に1% (ピーク域では0.1%)の精度で一致する。これまでの観測は主にこれより長波長域であり、またこれ程の精度は初めてである。この結果は一年程前の名古屋・パークレーグループのロケットでの観測が指摘していたプランク分布からのずれを否定し、一時的に高まっていた「他の説明」の試みを一掃した。

この余りに単純な結果は改めてこの放射の発生過程の吟味を迫る。黒体放射は物質と光子の放出

吸収が熱平衡であれば成立する。一方膨張宇宙では温度は刻々と変化するから、ある温度での熱平衡が成立するには、放出吸収が膨張の時間より素早く起こらねばならない。放出吸収過程は制動放射( $e+p \leftrightarrow e+p+\gamma$ )と二重コンプトン効果( $e+\gamma \leftrightarrow e+2\gamma$ )である。膨張時間と制動放射時間との比(図1)の変遷をみるとピーク波長域の光子は10°K以下ではもう平衡は保たれていない<sup>4)</sup>。両過程を考慮し、宇宙モデルを少し替えても10<sup>7</sup>K以下で平衡は保てない。

では物質との熱平衡が切れるとプランク分布は崩れるのかといえば、そうではない。一旦出来た黒体放射はそれを崩す作用が働かない限りプランク分布の形は保ったまま、温度パラメーターが膨張スケール因子に逆比例して小さくなっていく。「熱平衡が切れた」以後の作用は原子(水素、ヘリウム)がイオン状態か中性状態かで違う。エネルギーの出し入れがなければ約4000 Kまで下がった時期に中性化する。そして10<sup>7</sup>Kから4000 Kまで

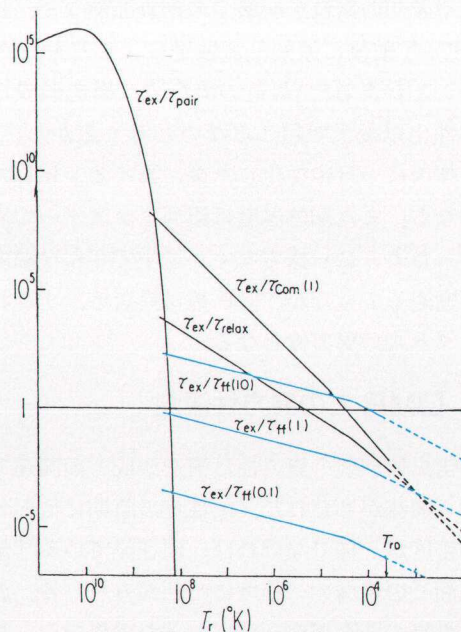


図1 宇宙膨張の時間  $\tau_{ex}$  と制動放射の時間  $\tau_{ff}(x)$ <sup>4)</sup>。ここで  $x = h\nu/kT$ 。



の間はコンプトン効果で光子と物質は自由電子を介してエネルギー交換はするが、コンプトン効果は散乱だから光子数は保存する。一方、プランク分布では温度が決まればエネルギー量も光子数も一義的に決まっている。従って光子数を保ってエネルギーを出し入れした平衡分布はプランク分布ではあり得ない。統計力学はこうした分布は化学ポテンシャル  $\mu$  がゼロでないボーズ・アインシュタイン分布になることを教えている。

またエネルギー平衡が成立しない場合にはエネルギー空間での輸送方程式（カンパニエーツ方程式）を解いてスペクトルは与えられる。エネルギーが注入された場合を考えると光子はエネルギーを得て移動するので、レイリー・ジーンズ波長域で見るとそこでの温度は下がって見える。この程度を表すのがスニャーエフ・ゼルドビッチ係数  $y$  と呼ばれるものである。

FIRAS はこうしたスペクトルを「崩す」作用について  $\mu/kT < 710^{-3}$ ,  $y < 410^{-4}$  の制限を与えている。「崩す」作用とは原始天体形成でのエネルギー発生や未知の素粒子崩壊での物質加熱など、我々は1970年前後に原始乱流散逸による加熱を考察したことがある<sup>4)</sup>。最近の流行では構造形成は原子中性化以後まで起こらないと考えるから、「崩す」作用は一旦中性化した後に再イオン化した場合となる。また加熱温度は銀河クラスターで高いといったように一様でなく、途中でどんな温度領域を通過してきたかで  $y$  係数は異なる。すなわちスペクトルの異方性となる。

#### 4. DMR での異方性観測<sup>5)</sup>

宇宙黒体放射の異方性は構造形成との関連で早くから興味もたれた。中性化の時期に放射と物質の密度が一様でなければ、現在見ている「最終散乱面」の場所での強度に凸凹がみられる。温度と重力場のゆらぎが一緒になった効果でむらむらが観測される。ゆらぎの大きさは当初  $\delta T/T \sim 10^{-3}$  程度と予想されたが、観測が進んでもなか

なか有限値が見つからず、1980年代に入って小角度での上限値がどんどん下がった。ただし、地球の宇宙黒体放射に対する相対速度に起因する（ドップラー効果）2重極分布は有限値が観測されている。（DMR では  $369 \pm 11$  km/s）DMR 以外の観測はマイクロ波の望遠鏡を用いたもので、相関を見る角度は  $10''$  から  $10^\circ$  である。地上観測の特徴は天空の小領域、小角度相関で、これに対して DMR は大領域、大角度相関である。分解能は  $7'$  で  $10^\circ - 180^\circ$ （全天）を見ており、全天の強度分布図が DMR の強烈な主張である。

ここでこの分布図を見る際の注意点を2つ述べておく。まづ、生の観測図から先に述べた2重極（ $10^{-3}$ のオーダー）を差し引くが、この図には銀河面が強く写っており、分布図（銀河面が赤道になるように描いてある）は銀河源（シンクロトロン放射、制動放射、星間塵放射など）を差し引いて作った「修正写真」である。

もう一つはあのカラーで表現された強度の等高線図は必ずしも現実の分布ではないことである。（等高線の高低差は  $\pm 2.710^{-5}$  K）この等高図の一部は測定器ノイズによるむらむらである。正確にはこうである。期待される測定ランダム・ガウシアンなノイズだけで図をかかしても一見区別出来ないような図ができる。それと観測図とを比較するとランダム・ガウシアン分散が測定ノイズより約倍大きいというのである。紛らわしいことにシグナル自体もランダム・ガウシアン分布であり、これでもって測定ノイズを差し引いても有限なシグナルが残ると主張出来る。しかし、COBE の中心人物の一人であるマーサーが言ったように、あの模様の中でどれが“まやかし”でどれが本物かは特定できないのである<sup>2)</sup>。本物と“まやかし”が混じった図だということである。

膨大なデータを処理すると確かにガウス分布を再現し、角度相関もあるので、これでシグナルが発見されたと言うのには問題がない。 $10^\circ$ 離れた角度での変分が  $\delta T/T \sim (1.1 \pm 0.2) 10^{-5}$  である。若



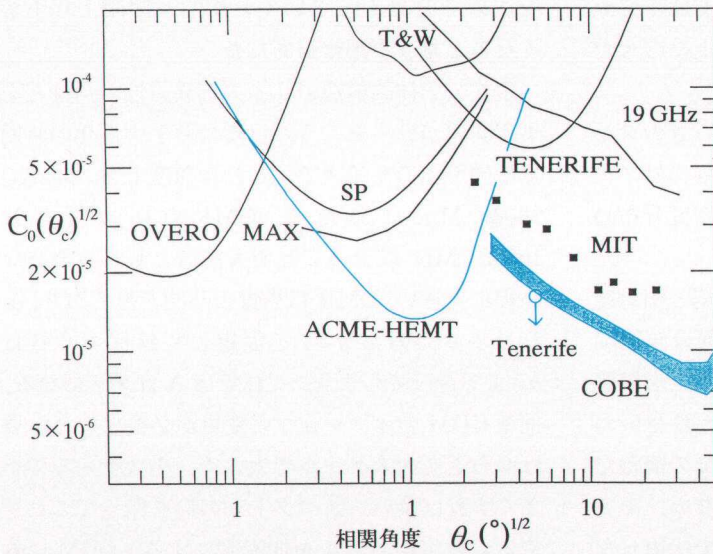


図2 いろいろな角度での異方性観測の現状. COBE以外は上限値.

干, 不安を感じるのは銀河面の差引である. 3波長での観測データを駆使して意味のあるように差し引いていると主張している. しかし, この部分(赤道上下 $20^{\circ}$ )は全天の中で相当な割合であり, 四重極などの大角度での異方性の評価には強引さを感じる. 総じて,  $10^{\circ}$ 辺りのゆらぎの有限値は信頼しても, 四重極やスペクトルなどの統計サンプルが少ないものは信頼の程度を低く見ておくのが常識的であろう.

## 5. その他の異方性観測

その後COBEは観測時間延長で更新した結果を発表しているが, 大きな変化はない. 一方, 1992年10月に異方性の新データが, 波長8-12mm, 相関角度 $1.2^{\circ}$ で南極で観測しているグループから, 発表された<sup>6)</sup>. 南極はこの波長域の放射を吸収する水蒸気が少ないから観測に適している. 観測は90-91年のもので, 結果は $\delta T/T < 1.410^{-5}$ という上限値であった.

図2にこれまでの異方性観測の現状を示した. ここで統計上の説明がある. いま問題にしている統計変数は $\Delta = \delta T/T$ である. そして出現の確率は正規分布(分散が $\sigma$ )に従うとする(ランダム・ガウシアン). 一方, 角度相関関数 $C(\theta)$ は

$$C(\theta) = \langle \Delta(\alpha + \theta) \Delta(\alpha) \rangle_{\alpha}$$

という統計平均で与えられる. 更にここで $C(\theta) = C_0(\theta_c) \exp(-\theta^2/\theta_c^2)$ なる正規分布を仮定すると $C_0(\theta_c) = \sigma^2$ となる. 従って $\theta_c$ をきめてデータから $C_0(\theta_c)^{1/2}$ を計算して図の縦軸にプロットする. 実際には観測器のビーム幅辺りで最小になる.(ビーム幅を考慮するとCOBE以外は正確には $\theta_c$ が相関角ではない)COBE以外は全て上限値である. 従って単純に言えばTenerife( $4^{\circ}$ )というのはもう互いに矛盾しかかっているし, 今日の結果ACME-HEMTもそれに近い. もっとも統計処理を余りせずに意味のある比較は, COBEは $10^{\circ}$ , ACME-HEMTは $1^{\circ}$ での値である. また, データの量からいってCOBEは他を圧倒しており, これは信じて他の結果の改良を待つという権威主義の態度で見べきかも知れない. 何れにせよCOBE以外の小角度での観測値更新が待たれる状況になった.

## 6. 天文学的宇宙の大構造との関係

構造形成論は多岐にわたる. 勿論本当は一本の筋な筈だが, 絞り込むほどに観測も理論も進歩してない. 現在は, 各要素で幾つものオプションがあり, 非排除の組み合わせだけでも膨大な数にの



ぼる。そこで1980年代に流行した標準CDMシナリオなるオプションのあるセットを組上にのせた検討が進行している<sup>7)</sup>。

要素としては宇宙モデル、物質、ゆらぎのタイプと初期スペクトル（の形のことで振幅にはノーコメント）、銀河（光る点）分布と物質密度分布の関係で、表にまとめた。

比べる観測事実としては(A)銀河相関と相対速度分散（ $\sim 1h^{-1}\text{Mpc}$ ）、(B)大規模銀河分布相関（ $100h^{-1}\text{Mpc}$ 以上）、(C)局所銀河団での大規模流（ $\sim 50h^{-1}\text{Mpc}$ ）が引き合いに出される。Bはいわゆるボイドを幾つも含むような大構造での情報だが、奥行きを含む地図はまだ出来ていない。そこで、天空に投射された観測図そのもので代用したり、銀河団相関、IRAS銀河相関などが用いられる。宇宙黒体放射の異方性は物質密度分布の非一様性と関連するが、物質があっても星が出来なければ光らないから、物質と光る点（銀河）の分布の関係は一義的でない。物質全体の分布を知るには重力場を見るのがよく、その中をテスト粒子として動く銀河の速度が情報をもたらす。前記のAとCはそういうものだが、Cはサンプルが少ないからまだ一般性に欠ける。

まずAから物質密度の凹凸は銀河分布のそれより小さい（ $1/b$ ）とせねばならず、バイアス係数 $b(\sim 2)$ なるものを持ち込む。AとBでは問題にしてるサイズが2桁以上違うがCDMではスペクトル型が決まっていて関連がつく。そして振幅をA

で決めてBにもっていくと相関が観測より小さくなると言う不都合があった。

現在の天体的構造のサイズと異方性の角度とをまず関連づけておこう。目安は原子中性化の時期での地平線のサイズで、これは角度で $2^\circ$ 、現在の $200h^{-1}\text{Mpc}$ にあたる。DMRの $10^\circ$ 以上とは $1000h^{-1}\text{Mpc}$ 以上のことで大構造ともかみ合わない程に大きい。DMRは物質の凸凹を見ており、それを小さい方に $n=1$ を仮定して延ばすとBは $b=1$ で合ってしまう。これではAはダメになる。標準CDMのオプションに変更が必要になる。要はゆらぎを大スケールで大きく、小スケールで小さくすれば良い。スペクトルの形を保ってこれをやるには宇宙モデルを低密度にする、CDM以外に大スケールでのみゆらぎがあるHDMとCDMを混合さす、などの手がある。またはあっさりスペクトルの傾きを $n < 1$ に変更すれば良い。

しかし $1^\circ$ 辺りの観測結果を信用するとこれでも解決出来ない。 $10^\circ$ で見つけたDMRの有限値が $1^\circ$ での上限値と不釣り合いに大きい。 $1^\circ$ を下げる新手のアイディアは「 $10^\circ$ 以上の大角では実は宇宙サイズ波長の原始重力波(T)による異方性を見る」と言うものである<sup>8)</sup>。勿論物質密度(S)の凸凹も混じっているが、DMRで見たゆらぎの大半は構造形成と切り放したものとなる。これでは発見当時は構造形成の救い手と思われた発見を厄介者扱いにしてるようなものだ。

$1^\circ$ での値を下げるもう一つの手は再加熱によっ

表

要素	標準CDM	他のオプションの例
宇宙モデル	$\Omega=1$	$\Omega < 1, \Lambda \neq 0$
物質成分	CDM <sup>a)</sup> , バリオン	HDM <sup>c)</sup> , バリオンのみ
ゆらぎのタイプ	断熱ガウス型	等曲線, 非ガウス型 <sup>d)</sup>
スペクトル	$n=1$ <sup>a)</sup>	$n \leq 1$ , 短波長カット型
バイアス係数	$b \sim 2$	

a)  $P(k) \propto k^n$ , b) コールド・ダークマター, c) ホットダークマター, d) コスミックストリングなど。



て小角の異方性が消えたとするものであるが、これには  $z \sim 50$  以前に天体を作って加熱が必要でこれまた天体が出来ているのだから DMR の異方性はこの構造形成と関係なくなる。

## 7. インフレーション説との関係

DMR の発表の際に強調されたことの一つにインフレーション説の確立がある。私は天文学的な宇宙とインフレーションの宇宙とは距離があり過ぎ、素粒子物理の押さえが無い勝手な理論と直結して論じることに疑問を呈した<sup>9)</sup>。その後の検討はイ説の優等生である標準 CDM シナリオの崩壊に向かっており、イ説は指数関数膨張をやめるなどの大幅な改ざんを余儀なくされている。しかし、「確立」も「崩壊」も早計であって、両者はそれ程近くはないというのが私の見方である。

課題は次のように整理されよう。(A) 宇宙黒体放射の異方性だけを問題にする、(B) この異方性と構造の天文学的情報と関連させる。この内 B は星形成を含む銀河形成という天文学的問題と絡んだもので現状では「関連づけ」にはもろもろの仮定を挟み込まねばならない。バイアス係数などはデータ分析の便法に過ぎない。またこの問題は、大構造だけでなく、クエーサー、銀河タイプ、球状星団、元素、背景及び拡散 X 線源、等等の“局所的”天文学とも密接に絡む。

これに対して A は狭雑物の比較的少ない問題である。小角度は再イオン化説や準銀河状天体の早期形成などで影響され B になるが、DMR の大角度のは原始ゆらぎだからイ説向きの話題になる。観測でスペクトルや S か T か等が分かればすばらしい。イ説は振幅推定に無力で、ゆらぎとの結び付きはスペクトルの形である。ときどき地平線を越えたゆらぎの存在がイ説の得点だなどと言われるが、ゆらぎ一般は存在しないことの説明の方が難しいぐらいである。イ説の核心はスケールの違うゆらぎの間に特定の関係をつけることである。すなわちスペクトル形の情報である。例えば

地平線内でのゆらぎのスペクトルを地平線より大きいサイズにまで延ばしたところにゆらぎが観測されたなら、イ説が得点を得たことになる。

1) 以上で A の問題を検討すると、観測を信用すれば、 $n=1$  は不可能である。べき関数膨張まで拡張すれば  $n < 1$  も可能だという修正イ説が賑やかであるが、こうなるとイ説とは何んであったかを定義し直さなくてはならない。私は原始火の玉の励起と平坦性の説明に絞るのがよいと考えている。前者はまさに宇宙黒体放射の起源である。後者は空間のダイナミクスを支配する真空のエネルギーとはどの基準から測ったものかという問題で、場の量子論自体には解答があるはずはなく、重力を絡ませないと解決はない。

イ段階とは火の玉の無励起状態と規定される。そしてその先では場だけでなく、時空も量子状態であった。地平線は古典概念であり、また古典時空上でもそれを越えて量子相関はある。従って「どんなものでも一様に整形された」ではなく「一様なものが選択された」という筋書きも有り得る。

何れの筋書きにせよ、大角異方性は量子真空のゆらぎをみている可能性は高い。これが構造の起源のたねかどうかを証明するのは天文学的研究の課題である。

## 参考文献

- 1) ライネス編 1976, ジョージ・ガモフ (共立出版); ブラッシュ 1992, 日経サイエンス, **22**(10), 78.
- 2) マーサー 1993, 科学, **63**(1), 26.  
佐藤勝彦, 杉山 直 1993, *BUTSURI*, **48**(1), 2.
- 3) Mather, J. C., et al. 1990, *Astrophys. J. Letters*, **354**, L37.
- 4) Sato, H., Matsuda T., and Takeda, H. 1971, *Prog. Theor. Phys. Supple.*, **49**, 11.
- 5) COBE, 1992, *Astrophys. J. Letters*, **396**, L1; L7; L13.
- 6) Gaier, T., et al. 1992, *Astrophys. J. Letters*, **398**, L1.
- 7) 須藤 靖 1993, ダークマターと銀河宇宙 (丸善).
- 8) Sasaki, M. 1993, *Prog. Theor. Phys.* **89**, 1183.
- 9) 佐藤文隆 1992, 天文月報, **85**(11); 佐藤文隆 1992, 科学 (岩波), **62**(7), 403.