

# 宇宙背景放射と大規模構造

吉岡 諭\*・池内 了\*\*

## 1. はじめに

地球上はテレビやラジオを伝える電波や無線電波など様々な電波で満ち満ちている。また、微弱なものではあるが、天体からの電波も検出されている。太陽の表面から、また、かに星雲やオリオン大星雲などからも電波が検出されている。マイクロ波領域で、そのような源のわかっている電波の成分を観測される電波の強度から差し引いて行っても、決して電波の強さがゼロにならないことに気付いたのがアメリカのベル研究所のベンジアスとウィルソンであった。彼らは、この源のわからない成分が一日毎・季節毎の変化がないことを確かめ、宇宙背景放射であると結論した。この宇宙背景放射の発見は、宇宙論の考え方に大きな影響を与えることになった。そのころ、宇宙は過去も未来も永遠にその姿を変えないとする定常宇宙論と、宇宙は高温の火の玉から始まったとする火の玉（ビッグバン）宇宙論が対立していた。ベンジアス達が発見した宇宙背景放射は、昔、宇宙が火の玉のように熱かった頃に出した光の名残であると解釈され、ここにビッグバン宇宙の考えが確立した。

宇宙背景放射はその後いろいろな面で観測され、宇宙論に大きな影響を与え続けている。そのスペクトルを決めようとする観測が数多くなされ、波長が長い側では、ほぼ 2.7K の黒体放射のスペクトルと良く合うことがわかっている。また、放射強度の方向性、等方性を決めようとする観測もなされている。特に 180° のスケールでの方向性、すなわち双極成分がみつき、これは宇宙の中での銀河系の特異運動を示しているものと考えられている。しかし、もっと小さなスケールでは（数度～数分）宇宙背景放射の強度は非常に一様で、その非等方性については上限値が定められているのみである。この小さなスケールでの背景放射の等方性は後に触れるように銀河や宇宙の大構造の形成の議論に大きな制限を与えている。

背景放射の波長が短い方のスペクトル（もし黒体放射だとするとウィーン領域のスペクトル）はこれまで良く知られていなかった。しかし、1987 年 2 月に打ち上げられた名古屋大学とカルフォルニア大学バークレー校との共同のロケット観測で、ウィーン側のスペクトルを決め

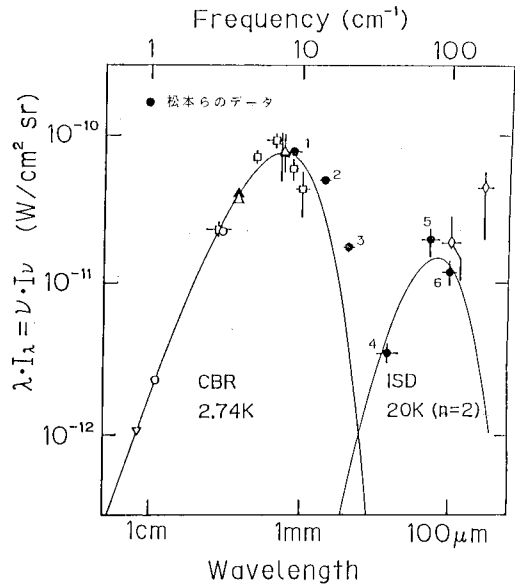


図1 宇宙背景放射のスペクトル  
名古屋大学・バークレーのロケット観測の結果にはチャンネル番号が示されている (Matsumoto ら, 1988, *Ap. J.*, 329, 567).

ることに成功した。この観測によって得られたスペクトルが図1に示されている。観測は6チャンネルで行われた。チャンネル4～6は、星間空間中のダスト（塵）によると考えられるのでここでは議論しない。チャンネル1は 2.7K の黒体放射から予想される強度と一致するが、2と3は黒体強度よりも大きくなっていることがわかる。宇宙の初めが火の玉だったとすると、そこから出た放射は黒体放射になると考えられる。そうするとこの観測された放射強度の黒体放射からのずれはどう解釈すればよいのだろうか？

現在このずれの解釈として提出されているアイデアは3つある。1つ目は逆コンプトン散乱説、2つ目はダスト放射説、3つ目は崩壊粒子説である。1番目の逆コンプトン説では、まず、何らかの原因で銀河間ガスが高い温度に熱せられる。背景放射の光子は高温ガス中の自由電子に散乱される（逆コンプトン散乱）ことによって波長が変わり、全体としてスペクトルが変形する。ダスト放射説では、初代の天体が放出した放射がダストによって吸収され、赤外光として再放出され、その放射が宇宙背景放射と重なって見えていると考える。3番目の説では、宇宙初期に質量を持った不安定な粒子があったと仮

\* 東京大学理学部 Satoshi Yoshioka, \*\* 国立天文台 Satoru Ikeuchi; Cosmic Background Radiation and Large Scale Structure in the Universe

定する。その粒子が崩壊するときに放出された光子が、再結合前のプラズマと相互作用することによって、背景放射のスペクトルが変形される。これら3つの説のうちどれが正しいのか、それとも他に原因があるのかは現在までのところはっきりしないが、ここでは逆コンプトン散乱説に重点をおいて説明してゆく。

2. 逆コンプトン散乱説

宇宙の歴史の中で、最初に形成された天体は何だったのか、またいつごろ形成されたのかという問題は依然なぞである。それはクェーサーかもしれないし(少なくとも現在観測されている天体のうち最も遠くすなわち最も過去にさかのぼって観測されているのはクェーサーである)、銀河かもしれないし、未知の種族 III とも言うべき天体かもしれない。何れにせよそのような初代天体の形成・進化の過程で、激しい活動を行った結果、大きなエネルギー解放をして、まわりのガスを熱しイオン化した可能性が考えられる。そのようなガス中の電子が、背景放射の光子を逆コンプトン散乱することによって、光子はより高いエネルギーを得て、背景放射のスペクトルが変形される。

コンプトン散乱によってスペクトルがどのように変形されるかはカンパニエツ方程式に従う。背景放射がもともとプランク分布(黒体放射)だったとすると、どのようなスペクトルになるかは、次に示すコンプトンの  $y$  パラメーターによって決定される。

$$y = \int (kT_e/m_e c^2) n_e \sigma_T dl \quad (1)$$

ここで、 $k$  はボルツマン定数、 $T_e$  はガス(電子)の温度、 $m_e$  は電子の質量、 $c$  は光速、 $n_e$  は電子密度、 $\sigma_T$  はトムリン散乱の断面積で、積分は視線方向に沿って行うものとする。 $y$  パラメーターは、(1)式からわかるように、逆コンプトン散乱による熱エネルギー輸送のめや

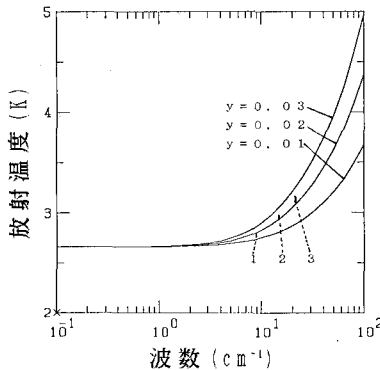


図 2 逆コンプトン散乱の結果得られる等価な放射温度  
名古屋大学・パークレーのロケット観測の結果にはチャンネル番号が示されている。

すである。果して、逆コンプトン散乱で、観測されたスペクトルの形は説明できるだろうか? また、説明できるとして、どれくらいの  $y$  パラメーターが必要とされるのだろうか? いくつかの  $y$  パラメーターの値に対して計算したスペクトルをそれに対応する黒体の温度の形で図 2 に示す。これから、 $y \sim 0.02$  とすると観測されたスペクトルをほぼ再現できることがわかる。ただし、波長の長い方(レイリー・ジーンズ側)では、他の観測から得られているよりも少々低い温度を与える。

さて、この  $y \sim 0.02$  という値をどのように考えたら良いのだろうか。今、単純なモデルとして、赤方偏移  $z_i$  に宇宙全体に分布しているガスが温度  $T_i$  に熱せられたとしよう。もし、ガスからの放射冷却などの冷却過程が効かなければ、ガスの温度  $T$  は  $(1+z)^2$  に比例して下がって行き、電子密度  $n_e$  は  $(1+z)^3$  に比例して下がっていくので、(1)式は積分できて、宇宙が平坦なとき(密度パラメーター  $\Omega = 1$ )、

$$y = 2.9 \times 10^{-12} T_i \Omega_g (1+z_i)^{3/2}$$

宇宙が十分開いているとき ( $\Omega \ll 1$ )、

$$y = 2.5 \times 10^{-12} T_i \Omega_g (1+z_i)^2$$

となる。ここで、 $\Omega_g$  はガスの密度の臨界密度に対する今の現在の値である。これは、 $z = z_i$  の時刻でほとんど  $y$  が決まっているという近似となっている。この式から、ガスを  $T_i \sim 10^8$  K のようにかなりの高温まで熱しななければならないことがわかる。式だけを見ると  $z_i$  を十分大きくすれば、あまり高温にしなくても良いように思えるが、 $z$  が大きいところでは、高温ガス中の電子と背景放射中の光子との逆コンプトン散乱による冷却過程が急速に効いて、 $y$  パラメーターを稼ぐことができなくなってしまふ。一番効率的なのは  $z_i \sim 10$  位で、 $T_i \sim 10^8 \Omega_g^{-1}$  K が必要となる。

さて、そんな昔に宇宙全体に拡がるガスを高温に熱するようなことが可能であったのだろうか? 簡単な推算を試みよう。宇宙にある物質(すべてバリオンだとする)のうち割合で  $f$  が効率  $\epsilon$  でエネルギー解放を行ったとすると、そのとき解放されたエネルギー密度は、

$$\begin{aligned} \Delta E_m &= f \epsilon \rho_m c^2 \\ &= 2 \times 10^{-11} (f \epsilon / 10^{-3}) \Omega_g (1+z)^3 \text{ erg} \cdot \text{cm}^{-3} \end{aligned}$$

で表される。その全てが逆コンプトン散乱の結果背景放射のゆがみに使われたとすると、

$$\Delta E_r = \Delta E_m$$

背景放射のゆがみの成分は、もともと放射のエネルギー密度の  $\beta$  倍(観測から  $\beta \sim 0.1$ )だとすると、

$$\begin{aligned} \Delta E_r &= \beta E_r \\ &= 4 \times 10^{-14} (\beta / 0.1) (1+z)^4 \text{ erg} \cdot \text{cm}^{-3} \end{aligned}$$

$$\therefore f \Omega_g = 2 \times 10^{-2} (\beta / 0.1) ((1+z)/10) (\epsilon / 10^{-3})^{-1}$$

宇宙初期の元素合成の計算から  $\Omega_g \leq 0.1$  であると考え

られ、また、核反応によるエネルギー解放の効率は高々  $10^{-8}$  程度と考えられているから、 $1+z=10$  とすると、宇宙に存在するバリオンのうちのほとんどすべてがエネルギー解放を行ったと考えざるを得ない。以上の議論は、エネルギー考察なので逆コンプトン説でもダスト放射説でも成り立つ。観測されたスペクトルのずれを説明することが、いかに困難であるかわかるであろう。

### 3. 宇宙の大構造

前章では、観測された背景放射のプランクスペクトルからのずれがコンプトン散乱説で説明できるかということに重点を置いて述べた。ここでは、視点を変えてみたい。背景放射をゆがめるためには、例えば初代の天体からの膨大なエネルギー解放が必要とされる。そのエネルギーが背景放射のスペクトルの変形だけではなく、宇宙の構造の形成にも利用できないだろうか。特にボイドや超銀河団などの宇宙の大構造 (数十 Mpc スケール) の形成に役立たないだろうか。

宇宙の大構造は、近年大規模に行われている銀河の赤方偏移のサーベイで明らかにされつつある。銀河は、三角視差などの方法で距離を求めることができないから、その天球面上での位置しか知ることができない。すなわち天球面上に射影された2次元分布しか知ることができない。しかし、銀河のドップラー効果による赤方偏移から後退速度を求め、ハッブルの法則を仮定すると、銀河までの距離を推定することが出来る。ハーバード大学の天体物理学センターによって数千個の銀河の赤方偏移が測定され、銀河の3次元分布がかなりはっきりとわかってきた。その結果が図3に示されている。この図は、3次元分布をスイカのようなスライス状に切り取り、赤道面上に投影した奥行き分布である。これを見ると、銀河の分布は決して一様ではないことがわかる。銀河がほとんど存在していない穴 (ボイド) がいくつも散らばり、その間に挟まれるようにして銀河が分布している。この様子は、生物の細胞構造のようにも、また、泡がぶつかり合っているようにも見える。ボイドの平均的なサイズは約 20 Mpc で、最大のものは 50 Mpc ほどもある。

このような構造 (宇宙の大構造) がどのように形成されたかは、銀河そのものの形成とともに現在の天文学にとって非常に重要な課題の一つである。もちろん、いろいろなシナリオが提出されている。それらのシナリオの大部分は、基本的には“重力による構造の形成”である。重力の形成論は大きく言って2つの流れに分けることができる。1つは、まず最初に比較的小さい天体 (球状星団や銀河) ができて、それらが重力的にクラスタリング (集団化) することによって銀河団や超銀河団などの大きなスケールの構造が形成されたとするもの (ボト

ムアップまたはクラスタリング説)。もう1つは、初めに超銀河団などの大きなスケールの天体ができて、それらが重力的にフラグメント (分裂) することによって銀河が形成するという考えである (トップダウンまたはフラグメント説)。どちらの説も、宇宙に存在するダークマター (見えない物質) の候補として相互作用の弱い粒子 (WIMPs) を導入しその性質と関連して描かれるシナリオである。しかし、実際の銀河の分布が説明できるか、特に巨大なボイドを作ることができるか、最近発見された宇宙の大規模流が説明できるか、宇宙背景放射の等方性と矛盾しないか、など問題も多い。そもそも考えられているような粒子が存在しているかどうかも確かめられていない。このような現状にあって認識されつつあるのが、非重力的効果が重要な役割を果たしているのではないかということである。初期に形成された天体の活動によって、その後のまわりの天体の形成が影響を受けたり (バイアス説)、宇宙初期の相転移の結果生じた宇宙ひもが銀河などの天体の形成を促しているなどの考えが提唱されている。その様な考えの中で非重力的効果を最大限に利用したと言えるのが爆発説である。

爆発説では、まず初期に少数の天体が形成されたと仮定する。(これは重力的にであろう。) それらの天体は球状星団みたいなものかもしれないし、銀河かもしれないし、クェーサーかもしれない。それらが進化し、爆発的にエネルギーを解放したとする。その結果、衝撃波ができ、宇宙空間を拡がって行く。まわりの物質は衝撃波に掃き集められシュルを形成する。シュルは放射などの過程によって冷却し、重力的に分裂をする。このようにして初めの天体よりもずっと大きな構造が形成される。分裂の結果できた天体は、さらに爆発するかもしれない。爆発の結果、衝撃波が拡がり、さらに大きな構造ができる。このようなサイクルがどんどん進んで行けば、巨大なボイドも形成可能ではないだろうか。最終的にシュル同士がぶつかり合ったとすれば、赤方偏移サーベイによって得られた銀河分布に見られるような、泡状の構造も自然に造り出せる。一方、拡がって行くシュルの内側は、高温の電離ガスで満たされているであろう。そのガス中の電子と背景放射の光子とが逆コンプトン散乱を起こし、背景放射のスペクトルが変形する。すなわち、宇宙の大構造の形成と背景放射のゆがみを同時に説明できるのである。まさに一石二鳥である。しかし、二兎追う者は、一兎も得ずともいう。果して、そんなにうまく行くのだろうか。我々はそれを検討してみた。

方法は以下の通りである。まずは、膨張宇宙の中で大きな爆発が起こって形成された衝撃波の力学的・熱的進化を計算する。この計算は、衝撃波のシュルが十分薄いという近似のもとで、シュルの運動方程式を解くことで

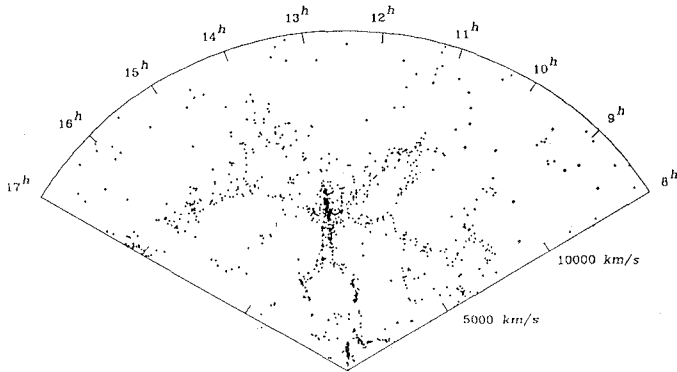


図 3 銀河の分布

ハーバード大学天体物理学センターの赤方偏移サーベイによって得られた河銀の3次元分布を2次元面に投影したもの (de Lapparent ら, 1986, *Ap. J.*, 302, L1).

簡単化する。また、それと同時にいろいろな冷却過程を考慮してシュルのエネルギー変化の方程式も解く。このようにして、ある赤方偏移  $z_i$  に、エネルギー  $E_i$  の爆発が起こったときに、どれくらいのシュル (ボイド) ができるかを知ることができる。その一方で、シュル内のガスの温度変化も得られるので、これを用いてコンプトンの  $y$  パラメーターを式 (1) に従って計算することができる。ただし、その際には爆発天体の宇宙の中での個数密度が必要となる。これは、いろいろな場所で起こった爆発でできたシュルがある時期 ( $z=z_{over}$ ) にオーバーラップするとして決めることにする。計算の結果を図 4 に示す。この図は、いろいろな  $z_i$  と  $E_i$  の組に対して、どれ位の大きさのシュル (ボイド) ができ、どれ位の  $y$  パラメーターが得られるかを示したものである。これから、以下のことがわかる。① 観測された背景放射のゆがみを説明する  $y$  パラメーター ( $\sim 0.02$ ) は、 $z_i$  には余り依らず、爆発のエネルギー  $E_i$  が  $10^{64-65}$  エルグのときに得ることができる。② そのような爆発の結果半径で 10~20 Mpc のシュル (ボイド) が形成される。これは観測されるボイドの大きさにほぼ匹敵する。すなわち、所期の目的は達成されたことになる。

ところが実は、この爆発説には大きな弱点がある。背景放射に大きな空間的非等方性 (ゆらぎ) を残してしまうのである。爆発によってできたシュル内のガス中の電子によって背景放射のスペクトルがゆがめられるのは前述した通りで、短波長側 (ウィーン領域) では放射強度は強くなるが、その一方で、長波長側 (レイリー・ジーンズ領域) では強度は弱くなる (スニヤエフ・ゼルドヴィッチ効果)。爆発天体が完全に一様に分布していれば、空のどの方向を観測しても、放射強度は一定であろう。しかし、実際には爆発天体の分布はランダムに近いであろうから、観測する方向によって背景放射の強度にゆらぎができてしまう。このようにして生じる背景放射のゆらぎを計算した結果、 $10^{-8}$  以上の大きな非等方性が生じてしまうことがわかった (図 4)。これは現在までに

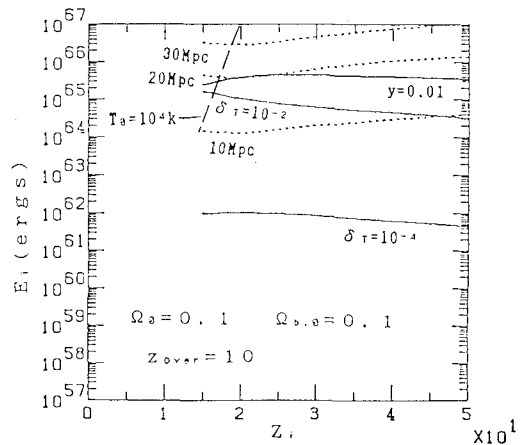


図 4 爆発説に対する制限

いろいろな  $z_i$ ,  $E_i$  の爆発によって得られた、 $y$  パラメーター、ボイドの大きさ、背景放射の非等方性の大きさ  $\delta\tau$  を示している (Yoshioka & Ikeuchi, 1987, *Ap. J.*, 323, L7).

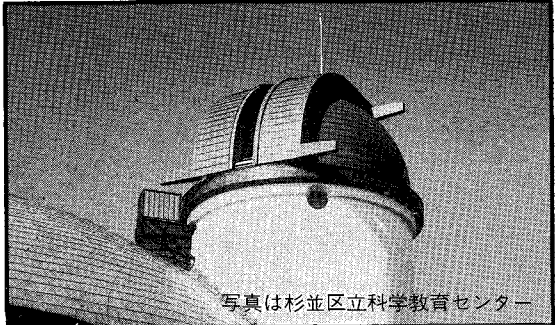
得られている非等方性の大きさの上限値 ( $3 \times 10^{-5}$ ) に比べてかなり大きい。要するに背景放射のゆがみが説明できる代償に、大きなゆらぎが生じてしまうというわけである。これはかなり致命的な弱点と言える。しかし、この非等方性を消してしまう方法がないわけではない。背景放射の光子がさらに、一様な電離ガス中の電子によって散乱されて、ゆらぎがならされてしまった可能性が考えられる。これは、擦りガラスを通しては、その向こうの景色が良く見えないのと同じ理屈である。

一方、 $10^{64} \sim 10^{65}$  エルグという大きなエネルギー解放のメカニズムも問題となる。このエネルギーは、超新星爆発で  $10^{13} \sim 10^{14}$  発分に当たる。これは銀河団が全体で爆発したようなものである。最近、宇宙初期の相転移の際にできた超伝導の宇宙ひもがそのような巨大なエネルギーを出すというモデルが提出されている。

4. ま と め

宇宙背景放射は、宇宙が火の玉のように熱かった頃の様子を我々に伝えてくれるが、そればかりではなく、宇宙が晴れ上がってから現在までの銀河間空間についての情報を与えてくれる。名古屋・パークレーグループによって発見されたスペクトルのゆがみは、銀河ができる前あるいはできた直後に何か激しい現象が起こったことを意味しているように見える。それが何かは現在までのところよくわからないが、ここでは、その解釈の一つとして逆コンプトン散乱説を取り上げてみた。さらに、初代の天体の爆発によるエネルギー解放によって、このスペクトルのゆがみに加えて、宇宙の大構造（特に巨大なボイド）が形成される可能性を考えてみた。

今のところ全ての観測事実をうまく説明できるようなモデルは存在していない。銀河ができるまでの宇宙の空白の歴史を埋めるには、さらに詳しい観測と理論モデルの研究が進められていかなければならない。特に、スペクトルの黒体からのずれと異方性をさらに調べる観測が重要であろう。



写真は杉並区立科学教育センター

◆ 営業 ASIS 品 目 ◆  
**天体望遠鏡と双眼鏡  
 ドームの設計と施工**

◆ 主な天体ドーム納入先 ◆

東京大学宇宙科学研究所／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／駿台学園一心荘（北軽井沢）駿台学園高校／熊本東海大学／栃木県こども総合科学館／土佐市公民館／刈谷市中央児童館／日原文台／大分総合コミュニティセンター／宇美青少年育成センター（福岡）等の他、日本全国に100余基の実績。

**ASTRO 光学工業株式会社**  
 東京都豊島区池袋本町2-38-15 ☎03(985)1321

天体観測専門誌

**天文ガイド**

10月号 特別定価520円＋90 9月5日発売／

特集 『火星を見よう!!』

火星の位置、望遠鏡の種類などを小学生にもわかるようにやさしく解説。「火星と星座の早見表」付。

太陽の表面で何が起きているか

皆既日食の時起きた疑問、プロミネンスの色、コロナと太陽風の関係など、太陽の疑問に解答。

ニューフェイス・テストレポート

宇宙を覗くという感じで最近人気の大型双眼鏡。その使いかた、性能をテストし、詳細にレポート。

- 10月のスター・ウォッチング ● 10月の観測資料
- 観測ガイド ● 情報ボックス…など情報満載!!

新刊・案内

チロの天文シリーズ  
**藤井旭の 星座ガイド夏**

夏の星座、2時間ごとの動き、見つけ方を初めての人にもわかるようにやさしく図を中心に解説。



- 藤井旭著
- 定価950円＋250



切りとる本 **天体観測野帖**  
 1988～1990年版

3年間の主な天文現象を観測するための詳しいガイドと観測記録用紙、星図類がついた便利な本。  
 ● 好評発売中! 藤井旭・企画構成 定価780円＋250

誠文堂新光社

東京都千代田区神田錦町1-5  
 電03(292)1221 振替東京7-128