

## 重力レンズ効果と宇宙背景輻射の非等方性について

渡辺 一也\*・佐々木 節\*・富田 憲 二\*

宇宙背景輻射の非等方性に対する観測からは現在のところ、その上限しか見つかっていません。一方、理論的には宇宙背景輻射の非等方性は、宇宙の大域構造の起源に深くかかわりを持ち、特に、数分での小角度の非等方性の上限は、銀河形成の理論から予想される値よりもはるかに小さく、銀河形成のいろいろな理論的モデルに対して厳しい制限を与えています。従来の立場では、宇宙背景輻射の非等方性の観測からの上限と、理論から予想される値とを比べることによって、背景輻射からの制限を銀河形成のモデルに対するテストとして使ってきました。しかし、私たちが遠くの天体、例えば QSO を見るとき、観測される QSO の形や明るさがその視線にある銀河などによって本来の姿から大きく変わってしまうことがあります。いわゆる重力レンズ効果です。もし同じように宇宙背景輻射にも重力レンズ効果が働いて、私たちが観測しているのは、すっかり変形されてしまった背景輻射の姿だとしたら…。ここでは重力レンズ効果を取り入れることで、なぜ、宇宙背景輻射の非等方性が見つからないか？ という、わりと古くからある問いに対して、少しばかり新しい答えの可能性を考えてみたいと思います。

### 1. 重力レンズ効果とは

まず、重力レンズ効果についてのお話からはじめましょう。1919年、イギリスの天文学者 Eddington は皆既日食を利用して、太陽の表面近くを通過する光が重力によってどれくらい曲がるかを測定しました。その結果、曲がり角は一般相対性理論から予測される値とほぼ一致したのです。太陽がつくる重力場には、その外側では Schwarzschild 時空が良い近似で使えます。一般相対性理論では太陽の表面近くを通過する光の経路は、Schwarzschild 時空での光測地線として記述されます。太陽をかすめる光の近日点での距離(衝突係数)を  $b$  としますと曲がり角  $\Delta\theta$  は、太陽の質量を  $M$ 、Newton の重力定数を  $G$ 、真空中での光の速度を  $c$  として  $\Delta\theta = 4GM/(bc^2)$  となります。ここで重力場は十分弱いこと、つまり曲がり角は微小であることを仮定しました。太陽の場合ですと曲がり角は数分程度になります。このように重力場によって光の経路が曲げられる現象を、広い意

味で重力レンズ効果と呼ぶことにしましょう。

天体がつくる重力場が単に光を曲げるだけでなく、文字通りレンズの働きをしてしまう可能性については Einstein 自身(1936)や Zwicky(1937)によって議論されてきました。つまり銀河や銀河団などがレンズとなつて、遠くの天体からの光を曲げることによって、本来レンズがなければ観測者には届かない光まで集めてきて明るい像をつくったり、場合によってはふたつ以上の像が観測されるかもしれないということです。あるいは天体の像を何本もの光の束(光測地線束)とみなすならば、像をつくる個々の光の曲がり角はそれらの衝突係数によって異なりますので、結果として、例えば本来まろく見えるはずの像が歪んだりします。今回お話しする宇宙背景輻射に対する重力レンズ効果は、どちらかといいますと像の変形という意味での重力レンズ効果に近いでしょう。つまり宇宙背景輻射の揺らぎという像の変形です。重力レンズ効果による明るさの変化や像の変形を一般相対論の枠内で議論するのには、すこし専門的な知識を必要としますので詳しいことは省略しますが、結果として次のことが導かれます。測地線束内に物質(レンズ)がありますと、それぞれの光はレンズの方に曲げられますからレンズによるフォーカスがおきます。この効果によって、本来レンズなしでは観測者にとどかなかつた光まで観測することができますので、像は明るくなります。一方、像の歪みは先に言いましたように、光の経路から見た物質分布の非対称性によって引き起こされます。

重力レンズ効果による QSO の多重像はその候補も含めてすでにいくつか見つかっています。代表的なものは 1979年、Walsh らが発見した双子の QSO 0957+561 の A と B で、レンズと思われる銀河も見つかっています。双子の QSO の赤方偏移は 1.41 で、ふたつの像の角度は 6.2 秒、レンズ銀河の赤方偏移は 0.39 です。また単純な多重像ではなく、像の一部あるいは全部が三つ葉形やリング状に変形してしまっている場合も、最近になって次々と見つかってきました。重力レンズ効果は、観測の対象としてそれ自体おもしろい問題ですが、一方宇宙論の問題として多くの人たちが議論してきました。例えば双子の像をつかって、それらの到着時間の差を測定することによって、宇宙論的パラメータをきめる試みや、像の性質から私たちの観測にかかっていない“見えない物質=ダークマター”の分布を推定しようとする試みがなされています。

\* 広大理論研 Kazuya Watanabe, Misao Sasaki, Kenji Tomita:

2. 宇宙背景輻射とその非等方性

1965 年の 7 月, Penzias と Wilson は宇宙背景輻射の発見をアメリカの天文雑誌 “The Astrophysical Journal (ApJ)” に次のように発表しました。「観測精度内で、この輻射は等方的で偏光はなく、季節変動も観測されなかった。」すぐさま, Dicke, Peebles, Roll, そして Wilkinson はこの発見に対する解釈を同じく ApJ に、「この輻射こそ、かつて宇宙が熱かった頃のなごりであり、数百億年前にビッグバンがあったことを裏づける確かな証拠である。」と発表しました。

一般相対性理論から宇宙の一様性と等方性を仮定すると、宇宙が膨張していること、そして過去にさかのぼるとかつて宇宙は非常に高温高密度にあったことが導かれます。さらに過去にさかのぼると、ついには有限の時間で温度も密度も無限大になってしまいます。この時空の特異点をビッグバンと呼びます。ビッグバンモデルによりますと宇宙初期には水素原子は電離しており、輻射は電子と Thompson 散乱を通じて強く相互作用をして熱平衡状態にありました。やがて宇宙が膨張するにつれて宇宙の温度も下がってゆき、4000 度から 3000 度くらいの間に電離ガスの中性化(再結合)が急速にすすみます。これより温度が下がりますと物質は熱平衡からはずれてゆき、輻射はそれ以後、黒体輻射のスペクトラムを保ったまま物質から自由になります(輻射と物質の解離)。0.1 cm から 10 cm ぐらいまでの波長の光にたいしては、その現在での平均自由行程が現在の宇宙の地平線の大きさを越えてしまっているからです。この輻射は宇宙全体をみだし、やがて宇宙が膨張するにしたがってその温度も下がってゆきます。Penzias と Wilson が見つけた宇宙背景輻射はまさに、かつて宇宙が熱かったころの名残だったわけです。

さて、Penzias と Wilson の発見をうけて、背景輻射のスペクトラムと角分布の測定がなされました。現在までに 0.1 cm から 12 cm までの、さまざまな波長での測定がおこなわれ、その結果、背景輻射のスペクトラムは数パーセントの誤差内で確かに黒体輻射の形(プランク分布)をしていて、輻射の温度は  $T=2.75 \pm 0.02K$  であることがわかりました。一方、角分布(非等方性)のテストもさまざまな角スケールにおいてなされてきました。しかし、観測精度は年々向上しているにもかかわらず、非等方性の双極子成分(180 度の非等方性)以外は上限が報告されているだけで有意な非等方性は観測されていません。それどころか上限も年をおうごとに下がってゆく一方で、最近では非等方性の観測は一種の“空結果競争”(否定的結果、つまり非等方性がある上限以上で存在しないこと、をもって成果とすること)の様相をおびて

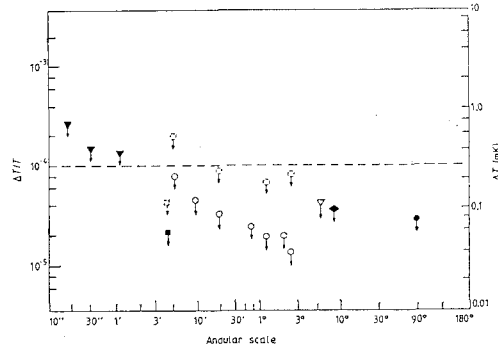


図 1 宇宙背景輻射の非等方性に対する観測からの上限。Partridge のレビュー(1988)からの引用。R. B. Partridge “The angular distribution of the cosmic background radiation”, *Rep. Prog. Phys.*, 51, p. 686, Figure 16.

きました。図 1 はいろいろな角スケールでの背景輻射の非等方性に対する現在の上限です。

観測されている双極子成分は、波長域によって多少の差はありますが、 $\Delta T=3 \text{ mK}$  で揺らぎの大きさが  $\Delta T/T \approx 10^{-8}$  です。この双極子成分は、私たちの宇宙背景輻射に対する相対運動で生じた、いわゆるドップラー効果と解釈されています。背景輻射に対する相対速度を  $v$  としますと、 $\Delta T/T=v/c$  として  $v \approx 350 \text{ kms}^{-1}$  となります。

さて、読者の中には「さあ、これでビッグバンモデルから予想されるように、宇宙背景輻射の存在は確立して、さらに宇宙の等方性も確かめられました。いったい何が問題なのですか?」と思われるかたもいるでしょう。実はあまりにも“等方的すぎる”ことが問題なのです。問題はおもに二つあります。一つめが、いわゆる地平線問題です。さきほど宇宙の年齢はビッグバンモデルによりますと有限であるといいました。いま、宇宙が時刻  $t=0$  のときに生まれたとし、輻射と物質の相互作用が切れる時刻(解離時刻)を  $t_{dec}$  としましょう。相対論によりますと、相互作用は光の速さよりも速く伝わることはできません。ですから時刻  $t_{dec}$  までに互いに相互作用しあえる領域(地平線)の大きさ  $l_H$  は有限で、 $l_H \leq ct_{dec}$  です。この地平線の大きさは現在、私たちから見るとおよそ角度にして 1 度くらいにあたります。ですからこれより大きなスケールでの等方性は宇宙の初期条件として、はるか昔に神様が与えてくださったものとしてありがたく受けとめるか、さもなければ、たとえばインフレーションモデルのように一様等方性を説明できる機構を考えるしかないでしょう。近ごろ宇宙論の業界では神様を信じる人はめっきり減ってしまったようです。地平線問題をかりにうまく克服できたとしても、なお、さけて通れない問題があります。それは、いま現在銀河がある

という事実です。標準的な銀河形成の理論によりますと、銀河は宇宙初期に存在していた物質分布の小さな揺らぎが重力的に成長したものだと考えられています。観測より赤方偏移が4以上の QSO がみつかっていますので、すくなくともそれ以前には揺らぎは非線形な段階にはいっているはずで、仮に赤方偏移が10のときに密度揺らぎの大きさ  $\Delta\rho/\rho$  が1程度になったとしますと解離時刻  $t = t_{dec}$  には  $\Delta\rho/\rho \approx 10^{-2}$  であったこととなります。解離時刻以前では輻射は物質と強く相互作用をしていましたから、解離時刻での密度揺らぎが背景輻射に反映しているはずで、たとえば、銀河のスケールは解離時刻にさかのぼりますと、数分程度になります。ですから小角度での背景輻射の揺らぎは銀河形成論と深く結びついているのです。

従来の立場では、逆に宇宙背景輻射の非等方性を銀河形成論のモデルに対するテストとして使ってきました。しかし、さきに言いましたように背景輻射の制限は厳しくなる一方で、それをクリアさせるためにモデルの方はどんどん複雑になってきました。通常よく知られた物質だけではうまくゆかないため、近ごろでは正体不明な物質をダークマターとして取り入れるのが業界の常識になりつつあり、さらには宇宙項入りのモデルも研究されています。今回の私たちの研究は、こうした宇宙モデルの複雑化・特殊化ではなく、別の新しく、より自然な解決法の可能性を探ったわけです。つまり、背景輻射にたいする重力レンズ効果です。もし、宇宙背景輻射の揺らぎに対しても重力レンズ効果が有効に働いたとしたら、“等方的すぎる”背景輻射の観測結果を説明できるのではないかと。前節およびこの節での予備知識をもとに次の節では、いよいよ主眼であるこの問題についてお話ししたいと思います。

### 3. 宇宙背景輻射と重力レンズ効果 (定性的振舞い)

まず最初に重力レンズ効果が背景輻射に影響を及ぼすとしたら、どの様な効果が期待できるかを直感的に説明しましょう。レンズ効果によって像の変形がおきる角度スケールを  $\theta_g$  とします。これは、余程多重回レンズ効果が起こらない限り、一個の重力レンズによる光の経路の平均的曲がり角にほぼ等しい考えられます。銀河によるレンズ効果を例にとりますと、 $\theta_g \approx 0.1 \sim 1$  分となります。レンズ効果は、 $\theta_g$  程度の、小さなスケールの温度の揺らぎのパターンを変えることはできても、大きなスケールにまで影響を及ぼすことはできません。また、輻射の平均の温度をレンズ効果によって上げることもできません。レンズ効果は、宇宙背景輻射に対して、小さなスケールの揺らぎを変形する働きだけをもっているのです。したがって数分程度の、小角度の非等方性に着目す

ることにします。

ところで、二つの異なった方向から来る光の間の関係は、レンズ(たとえば銀河)がどのように分布しているかで色々変わると考えられます。そこで、レンズ同士の間隔距離に対応した角度スケールも考慮する必要があります。この角度スケールを  $\theta_D$  とします。すなわち、この角度より小さな角度では像が同じような変形の仕方をする、という角度です。このスケールはだいたいレンズ物体の角度の二点相関関数が1になるスケールです。 $\theta_D$  の値は具体的なレンズ物体に対するモデルによるでしょうし、また、 $\theta_D$  と何らかの関係をもっているでしょうが、銀河同士の相関の場合では数分程度の大きさであると期待されます。

さて、レンズ効果が観測に大きく影響するかはさておいて、効果そのものは非等方性に対してどちらの方向に働くかを考えてみましょう。ある人は、レンズ効果で背景輻射の小角度の揺らぎの情報が失われて、非等方性の制限を緩めてくれることを期待するでしょう。またある人は、逆にレンズ効果によって新たな揺らぎがつけられて、制限はきつくなると考えるでしょう。実は両者ともある意味では正しいのです。すなわち、正確には“重力レンズ効果は角度のスケールによって異なる”のです。このことは、Sasaki (1989) によって初めて指摘されましたが直感的には次のように理解できます。

いま、地球上のほとんど完全に一樣な背景輻射の上に数分程度の小さな温度の非一樣性のシミがあるとします。このシミの大きさの下限には、密度揺らぎの成長についての研究から制限がついています。解離時刻の非一樣性の空間的広がりを  $l$  とします。先に言いましたように、解離時刻以前までは輻射は自由電子と相互作用をしています。解離時刻での輻射の平均自由行程を  $l_f$  とします。もし  $l$  が  $l_f$  よりも小さければ、輻射のエネルギーはその領域内で混ざりあって、その差を縮めようとします。結果として背景輻射の揺らぎのうち、ある臨界値よりも空間的に小さなスケールのものは減衰してしまうのです。この臨界スケールを Silk スケールといい、モデル依存性はありますが、だいたい角度にして臨界値  $\theta_c$  は数分程度の大きさをもっています。すなわち、地球上のシミのほとんどは、角度にして  $\theta_c$  程度かそれ以上の大きさを持っているのです。言い変えますと、背景輻射の  $\theta_c$  より小さな領域内では、十分な相互作用の結果強い相関があり、非一樣性は小さいのです。

この様な(角度にして  $\theta_c$  程度)のシミに対してレンズ効果が働くとはなりません。レンズ効果はシミの全体の明るさを変えることはできません。シミの変形のみがおこります。簡単のため、 $\theta_D < \theta_c < \theta_g$  としましょう。すると、例えば半径  $\theta_c$  の円形のシミを考えると、それが面

積を変えずにアメーバのような複雑な形に変形したり、細かく分裂したりします。この変形・分裂したシミが天球上に占める全体的大きさはもとの大きさに比べて重力レンズによる像の変形のスケール  $\theta_g$  程度大きくなると考えられます。しかし一方、シミは元比べてより細かい模様を作ります。このシミの変形によって細かくなった部分の特徴的スケールは重力レンズの相関角度  $\theta_D$  程度であると考えられます。

シミがもとの形に比べてより細かい模様になったということは、背景輻射が本来持っていた角度  $\theta_c$  以内の相関が減少し、より細かいスケールで温度が異なる領域が生じたことを意味します。すなわち、背景輻射の非等方向性が大きくなるわけです。一方、シミは全体としては角度  $\theta_g$  の範囲に広がるわけですから、 $\theta_c$  より大きなスケールではもともと無関係であった領域同士に、重力レンズ効果によってある程度の相関が生まれたことになります。すなわち、非等方向性が小さくなるのです。結局重力レンズの効果は、 $\theta_c$  以下の小角度での非等方向性を大きくし、 $\theta_c$  以上での非等方向性を小さくするのです。

ここで背景輻射へのレンズ効果を議論する時に現われる、特徴的なスケールについてまとめておきましょう。まず、もともと背景輻射にある揺らぎの特徴的スケールとして、Silk スケール  $\theta_c$  があります。次に、個々の天体から受けるレンズ効果の強さに対応した、平均的な光の経路の曲がり角  $\theta_g$  というスケールがあります。さらに、レンズ同士の角度相関のスケール  $\theta_D$  がありました。

理論的には、これら三つのスケールは宇宙モデルを決めると決まり、それに応じて重力レンズの背景輻射に対する影響が判るわけですが、さらに、実際の観測と理論的予測とを比べる時には、具体的な観測方法を考慮する必要があります。特に、観測に使われるアンテナの角度分解能は重要です。理論と観測を比べる時は、たとえば、アンテナの感度をガウシアンと見なしてその効果を取り入れます。つまりある方向  $\vec{\theta}$  を観測するときに、別の方向  $\vec{\phi}$  からの信号を拾う確率  $P(\vec{\phi}, \vec{\theta})$  を

$$P(\vec{\phi}, \vec{\theta}; \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{|\vec{\phi} - \vec{\theta}|^2}{2\sigma^2}\right)$$

としてとりいれます。ここで  $\sigma$  は (ガウシアン) アンテナビーム幅です。ビーム幅の影響で、 $\sigma$  より小さなスケールの情報は失われてしまいます。ですから、重力レンズ効果によって、かえって厳しくなってしまったように見える小角度での制限を、逆にゆるめることができる可能性があるので、つまり、重力レンズ効果によって小角度での揺らぎが変形され、背景輻射の“見かけの”相関角度が  $\sigma$  よりも小さくなってしまえば、非等方向性は見えなくなってしまふわけです。そこで、私たちが最初に持った期待、つまり、重力レンズ効果による“背景輻射の等方

化”の可能性を詳しく調べるのが重要になるのです。

以上が、背景輻射に対して重力レンズ効果が及ぼすと思われる影響の定性的説明ですが、実際の観測に対する影響を定量的に議論するためには、最終的にはやはり数値計算に頼らざるを得ません。次の節では、私たちの数値計算の結果を紹介します。

#### 4. 宇宙背景輻射と重力レンズ効果 (定量的解析)

この節では宇宙背景輻射に対する重力レンズ効果の影響を解析的あるいは数値的に議論します。

まず、輻射と物質の分離時刻 ( $z=1000$ ) における温度揺らぎのパワースペクトラムは、すでに与えられているものとして、Silk スケール  $\theta_c$  で特徴づけられる、次の形を仮定しました。

$$\left|\frac{\Delta T}{A}(k)\right|^2 = A \exp\left(-\frac{1}{2}k^2\lambda^2\theta_c^2\right)$$

ここで  $\lambda$  は現在から  $z=1000$  までの光の (conformal) アフィンパラメータ距離、 $A$  は規格化定数です。背景輻射の温度  $T$  の (小角度) 角相関関数は、重力レンズ効果によって次のようになります。

$$\begin{aligned} C_g(\theta) &\equiv \langle T(\theta)T(0) \rangle \\ &= C_g(0) \left(1 + \frac{\Delta(\theta)}{\theta_c}\right)^{-1} \exp\left(-\frac{\theta^2}{2(\theta_c^2 + \Delta(\theta))}\right) \end{aligned}$$

ここで天球上の点  $\vec{\phi}$  の方向から来る光線の曲がり角を  $\delta\vec{\theta}(\vec{\phi})$  として

$$\Delta(\theta) \equiv \langle (\delta\vec{\theta}(\vec{\theta} + \vec{\phi}_0) - \delta\vec{\theta}(\vec{\phi}_0))^2 \rangle$$

は、曲がり角の異なる視線方向に対する差の相関関数です。重力レンズ効果として曲がり角  $\delta\vec{\theta}$  が直接現われなくて、その角度に対する差の相関として入ってくるのが特徴で、前の節で言いました“揺らぎの変形”の意味がわかるでしょう。つまり、たとえ重力で個々の光の経路が曲げられたとしても、それぞれの“曲がり方”の差がなければ、単に (揺らぎの) 像の位置が変わるだけで、結果として観測者に背景輻射の揺らぎの方向を見誤らすにすぎません。

一般的考察から、曲がり角の相関関数に対して簡単なモデル化をすると、重力レンズ物体による平均的曲がり角  $\theta_g$  と重力レンズ同士の相関角  $\theta_D$  を用いて  $\Delta(\theta)$  は次のように表わせます。

$$\Delta(\theta) = 2\theta_g^2 \left(1 - e^{-\frac{\theta^2}{2\theta_D^2}}\right) \approx \begin{cases} \frac{\theta^2}{2\theta_D^2} & \theta \ll \theta_D \\ 2\theta_g^2 & \theta \gg \theta_D \end{cases}$$

前の節で言いました、背景輻射に対する重力レンズ効果の定性的性質は、この公式からも示すことが出来ます。

さらに実際の観測と対応させるために、ビーム幅  $\sigma$  を考慮に入れると背景輻射の相関関数は次のようになります。

$$C_{\alpha}(\theta; \sigma) = \frac{1}{2\sigma^2} \int_0^{\infty} \phi d\phi C_g(\phi) \exp\left(-\frac{\theta^2 + \phi^2}{4\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{\theta\phi}{2\sigma^2}\right)$$

ここで  $I_0(x)$  は 0 次の変形ベッセル関数です。

ではここで、数値計算で用いた私たちの非一様宇宙モデルの構成の方法を順をおって説明します。

(1) 簡単化のためバックグラウンドモデルは平坦で、物質の圧力は無視できるとします。

(2) 物質はすべて(同じ規格の)銀河団として存在していて、銀河団間には物質はありません。レンズ物体として銀河団を選んだ理由は、前の節で与えた  $\theta_g$  の見積りから、銀河では少し重力が弱くて、数分程度のスケールでの背景輻射の揺らぎにはあまり影響を与えることができないと考えられるからです。実際の数値計算からもこのことは示されました。但し、銀河がレンズとして働いた場合もっと小さな、例えば 1 分以下の角度スケールの観測にかかる可能性はあります。

(3) 銀河団をさらに半径  $r_0$  の球で近似して、銀河団同士の現在での平均間隔を  $20 \text{ Mpc } h^{-1}$  とします。ここで  $h$  はハッブル定数を  $100 \text{ km sec}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$  で規格化したもので  $h=0.5\sim 1$  です。これより条件(1), (2), (3)より銀河団の質量が  $2 \times 10^{15} h^{-1} M_{\odot}$  と決まります。半径  $r_0$  の一つの銀河団による曲がり角は  $\theta_g \approx 1.5 (2 \text{ Mpc } h^{-1} / r_0) \text{ arc min}$  となります。

(4) 銀河団は赤方偏移  $z_L$  まで存在し、それ以前では宇宙は完全に一様等方でレンズ物体はないとします。

(5) 銀河団の運動は膨張宇宙における粒子の運動方程式で解きます。現在での粒子の相関距離を  $r_D$  とします。銀河団の相関距離についてはまだ確立した値はありませんが、今回の計算では  $r_D = 10 \sim 30 \text{ Mpc } h^{-1}$  としました。このスケールは  $z_L \approx 2$  とすると角度にして  $\theta_D \approx 20 (r_D / 10 \text{ Mpc } h^{-1}) \text{ arc min}$  程度になります。

以上のようにして作られたモデル宇宙のなかを、現在から過去に向けて等方的に数千本の光を飛ばします。

非一様宇宙モデルを特徴づけるパラメーターを次のように変えて、それらについてのいくつかの組合せについて数値計算をおこないました。

$$r_D = \begin{cases} 15 \\ 30 \end{cases} \text{ Mpc } h^{-1}, \quad r_0 = \begin{cases} 1.2 \\ 2.4 \\ 3.6 \end{cases} \text{ Mpc } h^{-1},$$

$$1+z_L = \begin{cases} 3 \\ 10 \end{cases},$$

$$\theta_c = \begin{cases} 2 \\ 5 \\ 8 \end{cases} \text{ arc min}, \quad \sigma = \begin{cases} 0 \\ 1.25 \end{cases} \text{ arc min}$$

定性的振舞いはすでに予想されていたとおりですが、レンズ効果が十分に背景輻射の揺らぎに影響がでるかどうかは、どのようなパラメータの組を現実的と思うかに大きく依存しています。ここではアンテナビーム幅  $\sigma$  以外

のパラメータについて

$$\theta_c = 5 \text{ arc min}, \quad r_D = 15 \text{ Mpc } h^{-1}, \\ z_L = 2, \quad r_0 = 2.4 \text{ Mpc } h^{-1},$$

の組を“標準的”なケースとみなし、背景輻射の温度揺らぎを角度の関数としてレンズが無い場合と比較して図 2 に示します。(ここで図 2 (b) 中のバーは観測する方向によるばらつきを表わします。)

この場合、実際に観測する時のビーム幅にもよりますが、レンズ効果で背景輻射の非等方性を消せる可能性は少ないと結論せざるをえません。しかしながら、これらのパラメータの値は確立したものではなく、不確かさが残っていて、特に、いつ頃密度揺らぎが非線形になったか、つまり  $z_L$  の値はまだ、はっきりとわかっていません。また、揺らぎのスペクトラムを特徴づける Silk スケール  $\theta_0$  も結果に大きく影響しています。先の  $z_L$  とあわせて、これらの重要なパラメータの決定については、密度揺らぎの起源とその成長に関する、より詳しい研究が待たれます。また、平均としての効果は確かに小さい

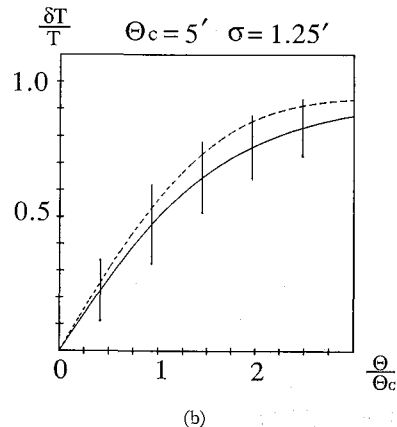
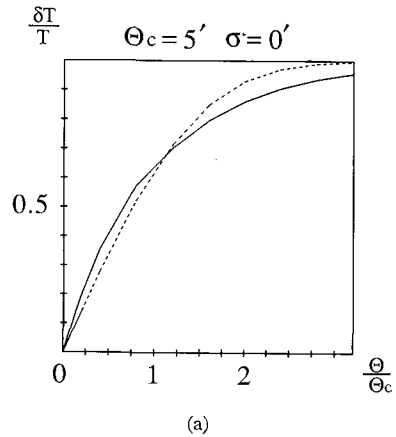


図 2 “標準的”な場合での、重力レンズ効果の背景輻射への影響。実線はレンズ効果を取り入れた場合、波線はレンズ効果を無視した場合。(a)  $\sigma=0$ , (b)  $\sigma=1.25 \text{ arc min}$

$Z_L = 2$		$\theta_c$		
		2	5	8
$r_0$	1.2	⊗	⊗	×
	2.4	⊗	×	×
	3.6	×	×	×

$\theta_c$  ( arcmin )  
 $r_0$  ( $h^{-1}$ Mpc)  
 ♥ 可能性あり  
 ⊗ 微妙  
 × ダメ

$Z_L = 9$		$\theta_c$		
		2	5	8
$r_0$	1.2	♥	♥	⊗
	2.4	♥	⊗	×
	3.6	⊗	×	×

$\theta_c$  ( arcmin )  
 $r_0$  ( $h^{-1}$ Mpc)  
 ♥ 可能性あり  
 ⊗ 微妙  
 × ダメ

図 3 重力レンズ効果が有効か否かの星取表

のですが、図 2 から判りますように、レンズ効果の効き方は観測する角度依存性が大きいので、いろいろな方向での背景放射の非等方性の観測がなされて、それでもなお、上限しか観測されないことが確かめられるまでは、最終的な結論をだすのは待った方が良くもしません。

唯一、結果にほとんど影響しなかったパラメータは銀河団同士の相関距離  $r_D$  (または  $\theta_D$ ) でした。この理由は次のように理解できます。今の場合  $r_D$  に対応する角度  $\theta_D$  は  $z=2$  で数十分あり、 $\theta_D > \theta_c$  となっているのです。したがって、いま私たちが着目している小角度 ( $\theta \approx \theta_c$ ) の非等方性に対しては、 $r_D = 15 \text{ Mpc } h^{-1}$  と  $30 \text{ Mpc } h^{-1}$  の差は影響しないのです。

モデルを決めるパラメータのいろいろな組について、レンズ効果で背景放射の非等方性を消せるかどうかを、ビーム幅  $\sigma = 1.25 \text{ arcmin}$  の場合について、星取表の形にして図 3 にまとめてみました。背景放射の非等方性をどれくらい、抑えることができるかを、(1) 半分近く、もしくはそれ以上、(2) 15% 程度、(3) 10% 以下、の 3 グループに分けてあります。

### 5. おわりに

重力レンズ効果によって、宇宙背景放射の非等方性の観測的上限からくる銀河形成論への制限を緩めようという、私たちの試みは  $1 + z_L \leq 5$  と考える限りは、結局うまく行かないと結論せざるを得ないようです。観測的に

は、 $z \approx 4$  の天体がいくつか見つかっていますので、銀河ぐらゐのスケールの非一様性ならば、 $z \approx 10$  ぐらゐで非線形の段階に入ったとしても矛盾は無いでしょう。銀河団の場合、現在見られるような銀河団が  $z > 2$  で存在していたとは考え難いですが、銀河団の形成過程もレンズとして効く可能性があるので、 $z_L = 9$  の場合も評価してみました。しかし、 $z \approx 10$  で密度揺らぎが既に非線形の段階に入っている可能性は小さいでしょうから、この場合が重力レンズ効果の有効性の上限を与えていると考えて良いでしょう。

また、私たちの非一様宇宙モデルにも、いくつか問題点があります。まず、全ての質量が非線形な天体として存在しているとしました。これは、明らかに重力レンズ効果を過大評価していることになります。さらに、銀河団をレンズとして扱っていますので、このことにより、例えば銀河をレンズとしたときよりも、ここでも重力を過大評価している可能性があります。ですから、前の節の終わりで見せました星取表の正しい解釈は、特に  $1 + z_L = 10$  の場合についてですが、「重力レンズ効果が十分働けば、もしかしたら有望ではないか?」ではなく「まったく可能性が無いわけではないが、常識的には、背景放射に対する制限が重力レンズ効果で緩められることは、ほとんどありえないと考えるのが妥当だろう。」だと思います。ただし、残されている可能性として、観測している方向に銀河団の密集する領域があって、レンズ効果が異常に強められている場合があります。現在の観測は天の北極方向の比較的狭い領域に限定されていますので、この可能性は確率的には小さいでしょうが、否定することできません。

では、背景放射の揺らぎは、どうして観測されないのでしょうか? それは、たとえ非常に小さなものであっても、必ずあるはずで。もし、観測屋さんたちが、うそを言ってなければ、つまり、「実は揺らぎらしいものはあったのですが、どうも自信がなくて、雑音ということにしてしまったのです。」ということになれば、宇宙論は、ますます窮地に追い込まれてしまっているのです。理論屋としては銀河形成および途中にあるレンズ物体に関するモデルにいろいろと小細工をして、解決方法を捜すのも確かにひとつの方法でしょうが、しかし、小細工から引き出せるのはせいぜい、「ここまで不自然な仮定を使っても、解決できませんでした。」というたぐいの、否定的な結論だけだと思います。やはり、私たちに、理論屋も観測屋も含めて、なにか決定的な(特に観測に関する)知識が欠けているのでしょう。なにしろ、背景放射から現在観測されている最も遠方の天体までの、その途中まで ( $z \approx 5 \sim 1000$ ) の情報は皆無に等しく、いわばブラックボックスなのです。したがって結局のところ、

少しずつでもより遠方へと観測を広げてゆく地道な努力を積み重ねるのが、もしかしたら最終的には最良の方法なのかも知れません。そういうわけで、現在計画が進行中の JNLT や VSOP などの天文観測に関する大型計画の早期実現が切に望まれます。

一方、理論屋による様々な試みもまた、尊重されるべきものです。常識に捕らわれない自由な物の見方こそ理論屋の特権ですし、たとえ観測屋たちから陰口をたたかれても、そこにわずかな可能性がある限り、例えば背景輻射の非等方性の問題の場合ですとダークマスターをモデルに取り入れることもしますし、電離ガスなどの存在を仮定したりもします。また、今回のように、重力レンズ効果を考慮する試みもその一例でしょう。たとえ得られた結果が否定的であってもなお、そこから得られた結論はそれなりの価値を持つと信じます。重力レンズ効果が背景輻射に対してどのように働くかを、一般的な場合について解明できたのは一つの成果でしたし、数値的に

その可能性についてはっきりさせたこともまた、意味があると思います。今回の研究から得られました成果の一つとして、重力レンズ効果はビーム幅が十分小さくできるならば、背景輻射の小角度の非等方性を増幅する方へ働くことが分かりました。今回は数値計算をしません、「銀河が重力レンズとして働けば、(数分のスケールでの効果は期待できませんが) 1分以下の角度スケールでの背景輻射の揺らぎを増幅して、その結果 VLBI を用いた観測で角度分解を高めれば、ひょっとしたら揺らぎが見つかるのでは？」という、望みを持ちつつ、私たちのお話を終わりたいと思います。

#### 参考文献

- Partridge, R. B., 1983, *Rep. Prog. Phys.*, **51**, 647.  
 Sakaki, M., 1989, *Mon. Not. R. astr. Soc.*, **240**, 415.  
 Tomita, K. and Watanabe, K., 1989, *Prog. Theor. Phys.*, **82**, 533.

### 学会だより

#### 「天文学用語集の改訂」について (2)

本会では用語集係において、昭和 49 (1974) 年に刊行された用語集の改訂作業を進めている (天文月報 1989年 11号 297ページ参照)。その後、1989年 8月 25日に第二回会議(注 1)、10月 16日には第三回会議(注 2)を開催した。また多くの会員のかたにご協力をいただいた(注 3)。

用語集係の作業手順は次のように進んでいる。

- 1) (学術論文に使用されている)用語を約 12,000 語採集して、1989年 3月第一次資料、8月第二次資料に印刷。
- 2) 重要な専門的概念に対応している用語約 6000 語を目安として選んで、1990年 3月第三次資料印刷 (予定)。
- 3) 第三次資料をもとに用語の和語を選んで、8月第四次資料印刷 (予定)。
- 4) 発音を記入して、1991年 3月第五次資料印刷 (予定)。

本事業は昭和 49 (1974) 年に刊行された用語集の改訂作業である。従って、手続きとしては、1974年の用語集に載っている用語をそのまま認め、改め、あるいは削除し、更に追加する用語を新規に選定することになる。1974年の用語集 (丸善出版、学術振興会発行) は、1989年 3月増刷され書店で販売されているので入手は容易である。できるだけ多くの会員の方々から、検討を要する用語の和語について、日本天文学会事務所用語集係にご意見をいただきたい。(石田恵一)

(注 1) 1989年 8月 25日に第二回会議を東大山上会館地下会議室で開いた。出席は、小暮智一、高窪啓弥、佐藤文隆、堀源一郎、小平桂一、松岡勝、石黒正人、平

井正則、沢武文、福江純、青戸邦夫、家正則、桜井隆、藤本真克、神田泰、石田恵一。配布資料は、(1) 第二次資料第一分冊アルファベット順と第二分冊分野別アルファベット順 (会議時に間に合わず後日郵送) (2) 学術用語制定の歴史(青戸)、(3) 他の学協会の用語集の例言(化学、地学、気象、機械工学)、(4) 「例言」の案について(世話人)、(5) 第三部の内容について(小暮)、(6) 星座名「はい」座について(沢木)。

(注 2) 1989年 10月 16日には第三回会議を、福岡県宗像市宗像ユリックス内会議室で開いた。出席は、坂下志郎、高窪啓弥、小平桂一、尾崎洋二、山崎篤磨、青戸邦夫、石黒正人、小暮智一、沢武文、福江純、平井正則、家正則、藤本真克、神田泰、石田恵一。配布資料は、(1) 第二次資料(回覧)、(2) 第二次資料の第二分冊分野別アルファベット順作業中ファイルのプリント(回覧)、(3) 「学術用語集」の改訂・増加の方針について(文部省)、(4) 電波関係追加約 200 用語(石黒)、(5) 銀河関係追加約 170 用語(高窪)、(6) 第三部の内容の案「主な研究機関・組織とその略称」(小暮)、(7) 「常用漢字表」にない漢字の使用について(青戸)、(8) 用語採否の判定(神田)。

(注 3) 1989年 8月から 12月に用語集改訂の作業に協力した主な方がたは、水野孝雄、海野和三郎、吉田春夫、堀源一郎、横山紘一、吉沢正則、福江純、小暮智一、坂下志郎、沢武文、松本敏雄、高窪啓弥、小平桂一、日江井栄二郎、清水幹夫、水谷仁、山下卓也、井上允、成相恭二、加藤万里子、蜂巢泉、渡部潤一、中村士、長沢工、新美幸夫、木下宙、石黒正人、松岡勝、佐藤文隆、山崎篤磨、尾崎洋二、齋尾英行、岡村定矩、椿都生夫、杉本大一郎 (以上敬称略順不同) ほか、及び世話人。