

観測的宇宙論の進展: 最新の解析結果の紹介と宇宙論の今後

松原 隆彦

At 研究室

概要

池内氏の講演を受け、具体的にどのようにして WMAP などの観測結果から宇宙論的パラメータが決定されているのかを比較的やさしく解説した (つもりである)。また最後に、宇宙論の今後についての主観的感想を記しておく。

1. はじめに

宇宙の構造形成のシナリオとして次のようなものが考えられている。すなわち、何らかの量子重力的な効果により宇宙が始まる。そして何らかの力学的 (スカラー場的) 真空エネルギーによるインフレーションを経て、ビッグバン宇宙が始まる。その中で物質が形成され、また初期に作られた物質の密度のゆらぎが成長して天体が形成される、というものである (図 1)。

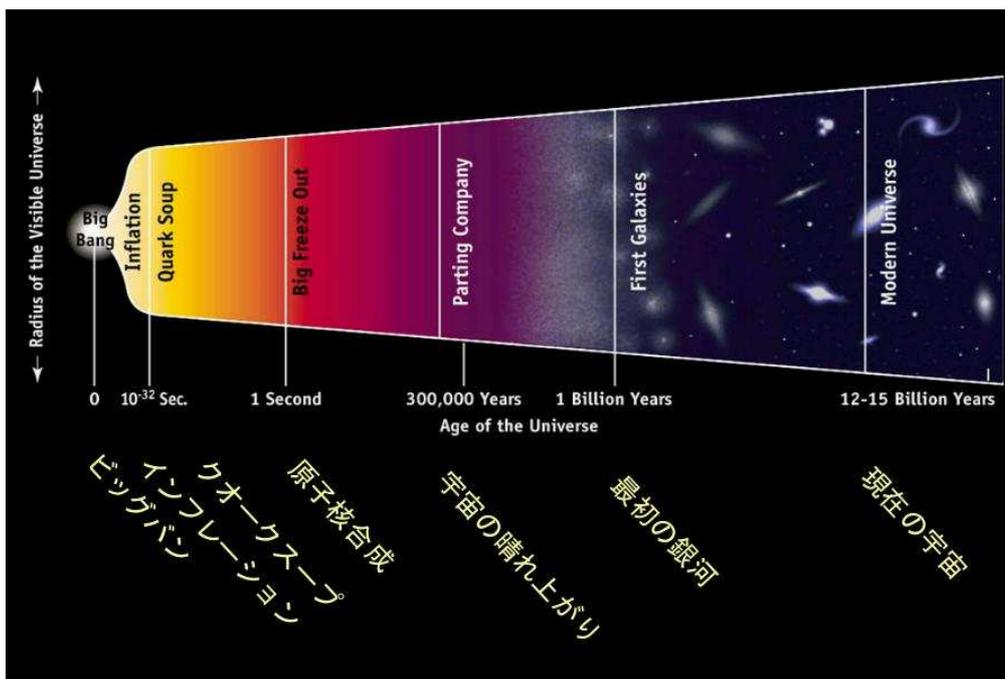


図 1. 宇宙の進化の模式図

このシナリオには不定性もかなり多い。とくに時間が前になればなるほどかなり信頼性は落ちてくる。矛盾のない量子重力理論というものはいまだ存在しないし、インフレーションを起こすための具

E-mail: taka@phys.nagoya-u.ac.jp

体的な場がなにかについての理論的決め手もない。インフレーション期に場の量子ゆらぎが密度場の初期ゆらぎをつくると考えられているが、なぜ量子ゆらぎが古典的ゆらぎに転化できるのか不明である。この世の中になぜ反物質よりも物質のほうが多いのか、かなり以前から研究されているが、いまだによくわかっていない。

だが、いったん宇宙のエネルギー成分が固定し、初期ゆらぎも与えられたとするならば、宇宙原理にしたがって宇宙モデルを構成することにより、原理的にその後の宇宙の振る舞いは完全に一意的に予言できる。とくにゆらぎが線形領域にある間の振る舞いは完全にわかるといってよい。天体を作るためにはゆらぎが非線型になる必要があり、非線型系の取り扱いの難しさから天体形成の詳細はまだよくわかっていないが、宇宙背景放射や大規模構造は線形系あるいは準線形系として扱えるため、理論と観測を直接比較して宇宙モデルを決定していくことが可能である。

こうして、宇宙の真の初期状態に対して我々は無知であるにもかかわらず、背景放射のゆらぎや大規模構造などの観測により、宇宙のエネルギー成分や初期ゆらぎという基本的な宇宙の性質について驚くほど詳細にわかるのである。池内氏の講演にあるように、その結果わかってきた宇宙の姿は異様なものである。我々のよく知っている重い物質であるバリオンは宇宙のエネルギー成分の4%にしか過ぎず、23%は重力相互作用しか認められないダークマター、そして残りの73%は真空エネルギー、あるいは負圧力となるような見たこともないエネルギー成分で占められているということになっている。宇宙が本当にそのような姿をしているのかもしれないし、あるいは何かまだ知られていない根本的な物理があって、見掛け上そのように見えているだけなのかもしれないが、ひとまずこれらのエネルギー成分をパラメータとして扱う限りにおいて、これらパラメータの数よりもはるかに多い宇宙の観測事実は驚くほど正確に再現されるのである*

以下では、具体的にどのようなしくみでこれらのパラメータを決定できているのか、とくに最近発表されたWMAP(Wilkinson Microwave Anisotropy Probe)¹の観測を中心にしながら説明する。これまで、遠方超新星の観測や、背景放射ゆらぎ、大規模構造などの観測によって宇宙パラメータに制限がつけられてきたが、WMAPはこれまでになく正確に宇宙の背景放射ゆらぎを観測した。これにより、宇宙パラメータの値はこれまでになく正確に制限されることになった。だが、WMAPのみからはそこまでの正確さを出ないことには注意する必要がある。他の観測と合わせて考察することにより、発表されたような正確な値になるのである。

2. 宇宙のゆらぎ

3K 背景放射のゆらぎは赤方偏移 $z \sim 1000$ の宇宙の温度ゆらぎをほぼ直接示している。このゆらぎを初めて見つけたのは COBE による観測である。1992 年以降、本年(2003 年)はじめまで、このゆらぎの全天地図はこの COBE による角度分解能 7° のピンぼけ地図だけであった(図 2)。その後部分的な領域についてはさらに大きな分解能の観測がいくつも行われた。そして本年(2003 年)2 月、WMAP によって 0.5° スケールの分解能におけるゆらぎの全天地図が発表された(図 3)。

また、 $z \sim 1000$ の高赤方偏移の宇宙のゆらぎを示すのが 3K 背景放射ゆらぎとすれば、現在に近い宇宙のゆらぎを示すのが宇宙の大規模構造である。1980 年代からボイド構造、フィラメント構造など、100Mpc 以上のスケールの構造が明らかになってきたが、昨年(2002 年)2dF サーベイ³という、これまでになく詳細な大規模構造の観測が完了した(図 4)。さらに現在全天の四分の一近くを覆い尽くして銀河サーベイを行うための SDSS 計画が進んでいる。このように、宇宙のゆらぎが比較的初期の時刻と現

*ダークマターの間接的証拠は数多いが、ダークエネルギーに関してはそこまで多くはない。もっとも直接的にダークエネルギーの存在を示すと考えられている観測は遠方の超新星によるものである。

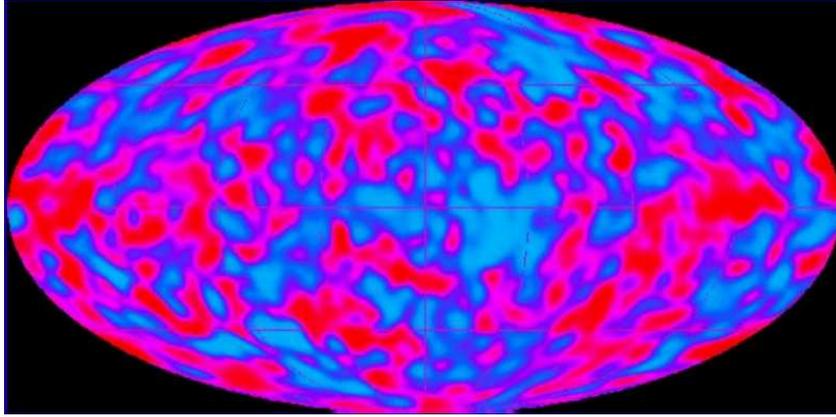


図 2. COBE DMR による 3K 背景放射の温度ゆらぎ地図²

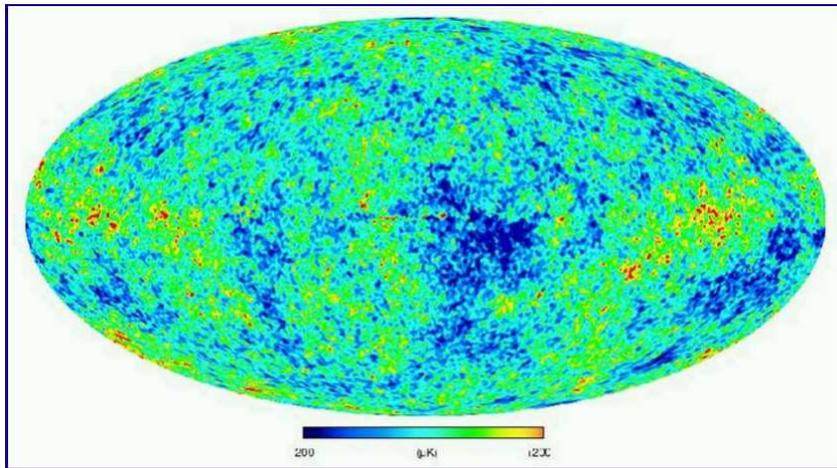


図 3. WMAP による 3K 背景放射の温度ゆらぎ地図¹

在に近い時刻の両方向から観測されることによって得られる情報は大きい。さらに、その間を結ぶような遠方超新星や $\text{Ly}\alpha$ 吸収線の観測など、さまざまな観測を用いることにより、宇宙論的パラメータの数よりもずっと多い独立な情報を得ることができるのである。つまり、単なるパラメータ合わせではなく、宇宙モデルそのもののチェックができる時代に入ってきているのである。

3. 宇宙の構造の定量化

宇宙のゆらぎを定量化するには、ゆらぎのスペクトル解析を用いる。つまり、ゆらぎの分布をスペクトル分解し、その係数の振幅からパワースペクトルにより、定量化するのである。背景放射の温度ゆらぎ $\Delta T/T$ は天球面上の 2 次元分布、大規模構造の密度ゆらぎ $\Delta\rho/\rho$ は 3 次元的空间分布であることから、そのスペクトル分解はそれぞれ

$$\frac{\Delta T}{T}(\theta, \phi) = \sum_{l,m} a_l^m Y_l^m(\theta, \phi), \quad \frac{\Delta\rho}{\rho}(\mathbf{x}) = \sum_{\mathbf{k}} \delta_{\mathbf{k}} e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{x}} \quad (1)$$

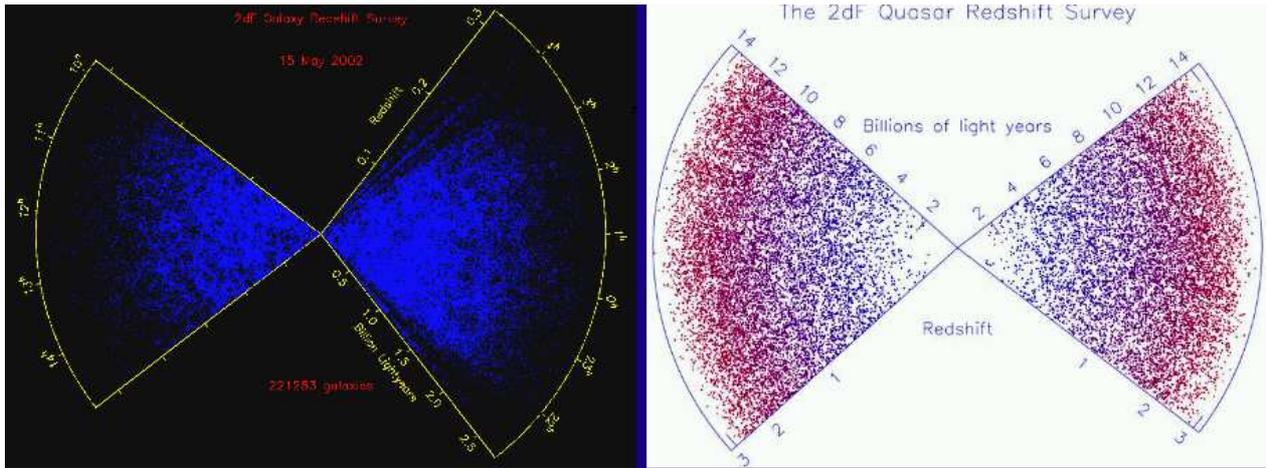


図 4. 2dF サーベイ。左図は銀河の空間分布を、右図はクェーサーの空間分布をそれぞれほぼ示している。
である。この分解からパワースペクトルはそれぞれ

$$C_l = \langle |a_l^m|^2 \rangle, \quad P(k) = \langle |\delta_k|^2 \rangle \quad (2)$$

により定義される。ここでスペクトル分解のモード関数において l および k はゆらぎのスケールを表しているのだから、パワースペクトルは C_l が角度スケール $\theta \sim \pi/l$, $P(k)$ が空間的スケール $x \sim 2\pi/k$ のゆらぎがどのくらい大きいかということを表す。初期ゆらぎが標準的なランダムガウス分布であるとき、線形領域では分布の統計的情報はパワースペクトルのみで尽くされる。つまり、この場合どんな統計的性質もパワースペクトルのみで表されることになり、重要な統計量である。非ガウス分布の場合にはパワースペクトルだけでその統計的性質のすべては表せないが、依然重要な量であることには変りない。ここで、平均の記号 $\langle \dots \rangle$ は数学的には統計力学で考えられるアンサンブル平均を表すが、宇宙は一つしかないので、厳密にこの平均を行うことはできないが、インデックス l または k を区間で平均する、つまりピン分けすることにより、実質的にアンサンブル平均したのとほぼ同じことになる。

4. 3K 背景放射のパワースペクトル

WMAP 以前にも細かなスケールの温度ゆらぎのパワースペクトルが得られてはいた (図 5)。だが、観測領域の狭さからくる値の不定性が結構大きかった。これに対して、WMAP によって決められたパワースペクトルの不定性は $l < 800$ に関する限り飛躍的に小さくなった (図 6)。

これらパワースペクトルに含まれる宇宙論的情報は多様である。 $z \sim 1000$ の宇宙におけるホライズンサイズより大きなスケール、すなわち小さな l では、物質間の相互作用の影響があり得ないので、初期ゆらぎをそのまま見ていることになる。重力ポテンシャルの低いところから上ってくる光子は赤方偏移して、温度はより低く見える。ポテンシャルが低いと密度が大きく温度は多少高いが、赤方偏移の効果のほうがより強く効く。これをザックス-ヴォルフェ効果といい、重力ポテンシャルを Φ とすると

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{1}{3} \Phi \quad (3)$$

で表される。パワースペクトルで左の方、ほぼ平らになっているところがそれである。

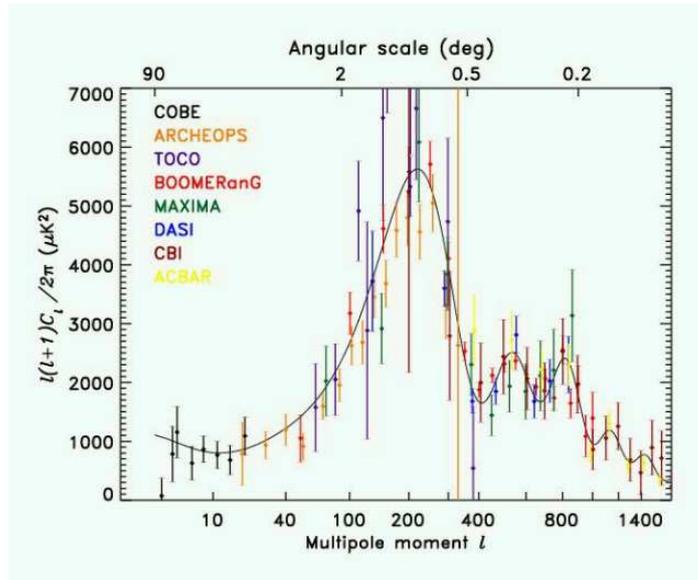


図 5. WMAP 以前の温度ゆらぎパワースペクトル¹

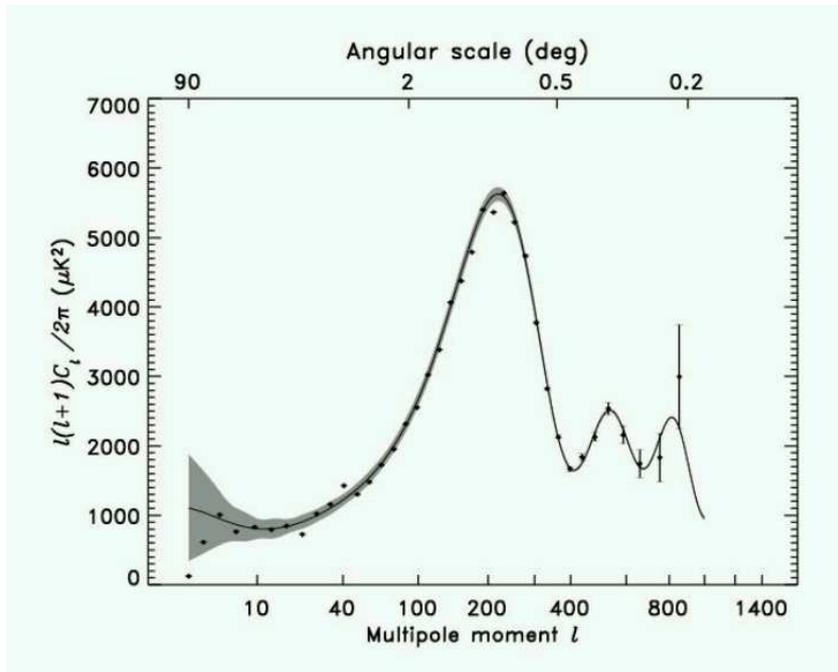


図 6. WMAP の温度ゆらぎパワースペクトル¹

ホライズンよりも小さなスケール、つまりより大きな l では、物質間の相互作用が重要になってくる。その顕著なものは、光子とバリオンが光子の最終散乱以前まで一体となって流体として振る舞うために、音波モードとしてゆらぎが振動する、音響振動によるものである (図 7)。重力によりポテンシャルの底に流体が落ち込むと圧力が増して反発し、十分反発するとまた落ちるといふプロセスを繰り返すが、この振動周期はゆらぎの空間スケールによって異なり、空間スケールが長いほど、その周期は長くなる。

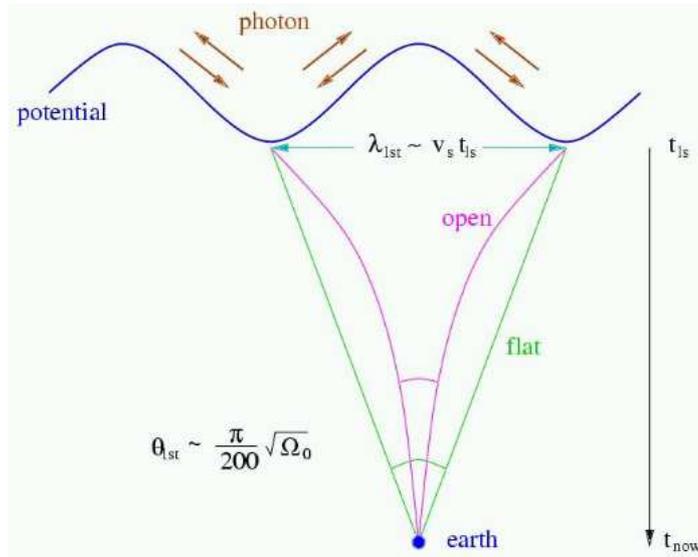


図 7. 音響振動と宇宙の曲率

光子の最終散乱の時刻でほぼ一斉に温度ゆらぎは固定され、その時点で丁度圧縮しきった位相にあるゆらぎのモードでは温度ゆらぎの振幅が増幅される。また、ザックス-ヴォルフェ効果により $\Delta T = 0$ の基準点は多少流体が圧縮したところにあるので、丁度反発しきった位相にあるゆらぎのモードでもやはりゆらぎの振幅が増幅する。最終散乱までに丁度一度圧縮する位相になるスケールがもっとも大スケール、つまり一番左にあるパワースペクトルのピークとなり、丁度振動が 1 サイクルして反発した状態で最終散乱を迎えたスケールは左から 2 番目のピークとなる。同様に左から奇数番目のピークは圧縮状態、偶数番目のピークは反発状態を示している。これらのピークをアコースティックピークと呼ぶ[†]。

また、右に行くほどパワースペクトルの振幅が落ちていくが、これは光子の最終散乱直前に、光子の拡散距離が長くなり、まだ相互作用をしているバリオンを引きずってゆらぎがならされてしまうことによる。このゆらぎの減衰現象はシルク減衰と呼ばれている。

このように、温度ゆらぎの物理はたいへん明確であり、定量的にもほぼ完全に理解されている。一般相対論的摂動論とボルツマン方程式を組み合わせることによって得られる一組の(巨大な)線形連立微分方程式を数値的に解くことにより、現在ではゆらぎのパワースペクトルを極めて正確に予言することが可能になっている。その微分方程式は宇宙論的パラメータを不定パラメータとして持つ。主な宇宙パラメータを変えたときにどのようにパワースペクトルが変化するかを図 8 に示す。

宇宙の曲率を小さくすると光子の最終散乱面を見込む角度が小さくなる(図 7)。したがって、ピーク的位置は一樣に右にずれることになり、さらに空間の幾何学の変化により曲率スケールのパワースペクトルが変形されると共にポテンシャル自体が減衰するので、大スケールの振幅が大きく変形する(図 8a)。また、曲率を一定にしたまま宇宙定数を大きくしても、宇宙定数は初期ほどその効果が小さいために、大スケールを除いてあまり影響はない(図 8b)。バリオンの量を増やすと、より強く圧縮する反面、十分反発しなくなり、一番目のアコースティックピークが大きくなり、2 番目のピークは小さくなってしま

[†]これはドップラーピークと呼ばれることもあるが、これは以前ドップラー効果がこのピークの主要原因であると(誤って)考えられていたことがあったからである。その効果もあるにはあるが、音響振動の効果に比べて小さいことがわかっているため適切な用語ではない。

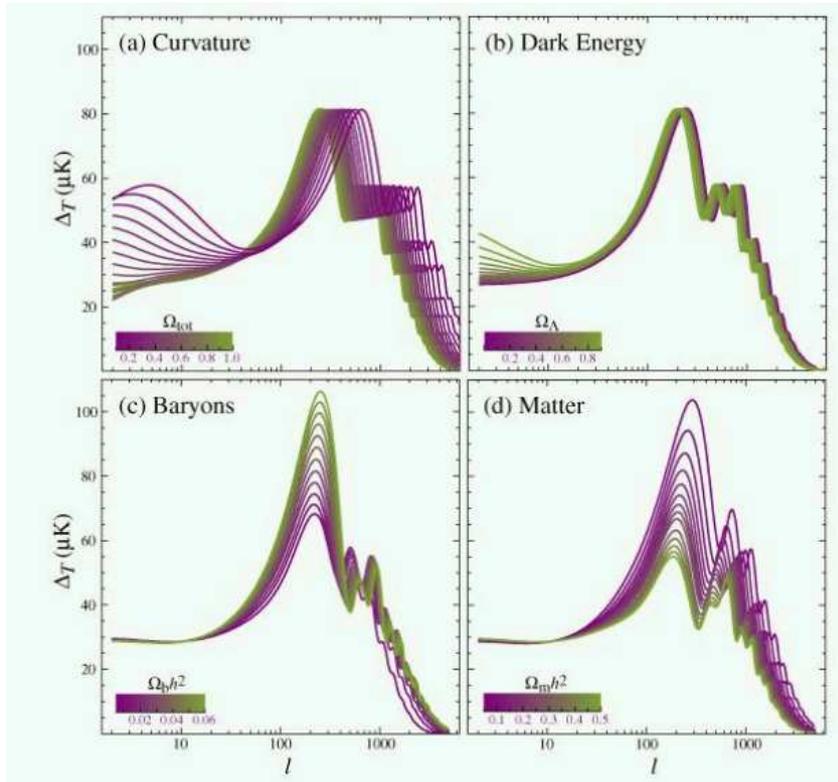


図 8. 温度ゆらぎパワースペクトルの宇宙論パラメータ依存性⁴

う(図 8c)。ダークマターの量を増やすと物質と放射のエネルギー密度が等しくなる等密度時刻がより昔に遡ることになるが、放射優勢期には圧力の影響で密度ゆらぎの成長が鈍り、ポテンシャルゆらぎが減衰する。このとき、よりポテンシャルの高いところに初期条件がくるため、かえって音響振動がより強くなる(図 8d)。このように、背景放射の温度ゆらぎは、宇宙の曲率、バリオン量、物質量の3つに特に強く依存する。つまり、これらの量は温度ゆらぎを詳細に観測することにより極めて強く制限できるのである。

5. 背景放射の偏光ゆらぎ

光子の最終散乱時のエネルギーは 3000K 程度の十分低エネルギー領域で、トムソン散乱で表される。散乱前の光子の偏光ベクトルを $\tilde{\epsilon}$ 、散乱後のそれを $\tilde{\epsilon}'$ とすると、その微分断面積は

$$\frac{d\sigma_T}{d\Omega} = \frac{3}{8\pi} \sigma_T (\tilde{\epsilon}' \cdot \tilde{\epsilon})^2 \quad (4)$$

である。ただし、右辺の σ_T は全散乱断面積である。偏光ベクトルは光子の進行方向に垂直な横成分のみであるから、前方散乱と後方散乱の場合を除き、常に散乱面に垂直な方向の偏光成分が生まれる確率が少ないことになる。たとえば、散乱角が 90° の場合、図 9 をみるとわかるように、偏光成分は散乱前に光子のやってきた方向を覚えている。光子の密度にゆらぎがあるため、こうして最終散乱された光子には偏光が生じることになる。この偏光の異方性は、もともと温度ゆらぎから生じているため温度ゆらぎが与えられればほぼ一意的に決まる。

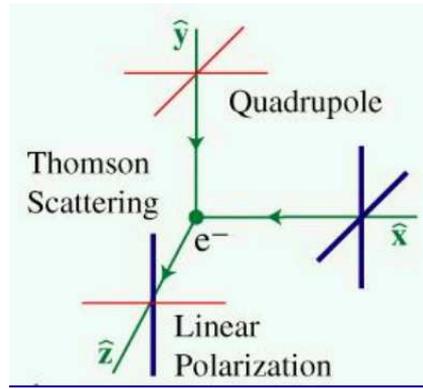


図 9. トムソン散乱による非等方偏光⁴

温度ゆらぎの波数ベクトルに対して平行および垂直方向の偏光に対応する偏光成分を E-mode と呼ぶが、それと温度ゆらぎそのものとのクロス相関のスペクトル、すなわち TE クロススペクトルが WMAP の観測から求められている。その結果は、 $l > 10$ においては温度ゆらぎから推測されるものにまさに一致している (図 10)。

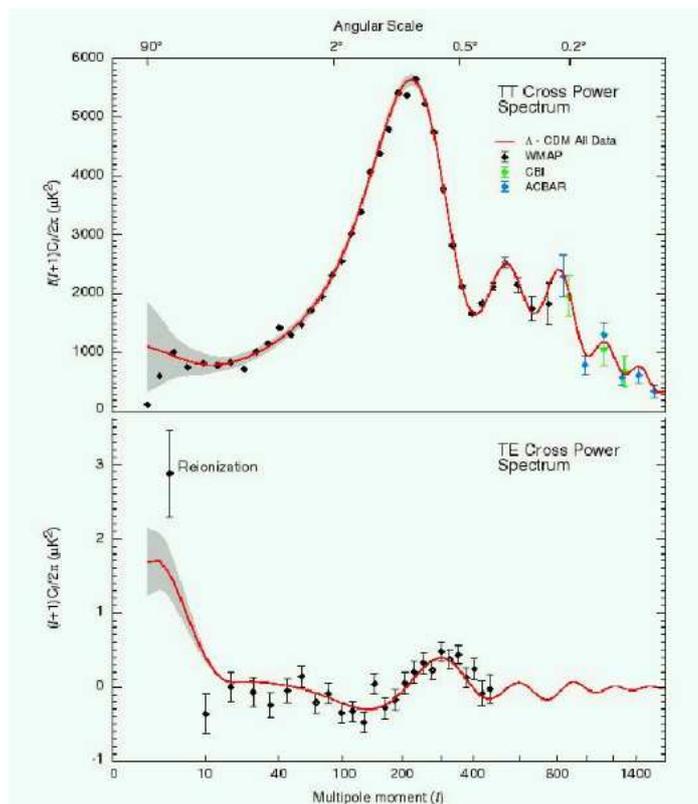


図 10. 温度ゆらぎのスペクトルと TE クロススペクトル¹

大きな角度スケールでの TE クロススペクトルが理論よりも大きくなっているが、これは比較的最近の宇宙で再イオン化が起きたためであると解釈できる (図 11、スケール l が前の図よりも拡大している

ことに注意)。再イオン化があると、背景放射が比較的最近の自由電子によって散乱され、大角度スケールに再び偏光の非等方性を生み出す。現在の宇宙の原子はほとんどイオン化しているが、宇宙の再結合時には宇宙は中性だったはずである。それが天体からの UV 輻射によりイオン化してしまったのである。天体形成の詳細が不明であることから、いつどのようにイオン化が進行したのかもまたよくわかっていない。WMAP のチームの解析では、とりあえず一瞬でイオン化が進行したと仮定したとき、再イオン化による散乱は光学的深さにして $\tau \sim 0.17$ であること、したがって $z \sim 17$ でイオン化が起きたとするとデータによくフィットすることを見いだした。このような早い時期でのイオン化は天体形成のモデルに強い制限を与えることになる。

6. WMAP による宇宙論パラメータの決定

上のようにして、WMAP によるデータに合うように宇宙論パラメータを決められる。図 8 をみるとわかるように、全エネルギーパラメータ Ω_{tot} 、バリオン密度 $\Omega_b h^2$ 、物質密度 $\Omega_m h^2$ への依存性はそれぞれ全く異なる。一方、ダークエネルギーパラメータ Ω_Λ への依存性は弱く、はじめの 3 つのパラメータを固定したときにはほとんど決まらない。だが、ダークエネルギーパラメータは $\Omega_\Lambda = \Omega_{\text{tot}} - \Omega_m$ で与えられるから、もしダークエネルギーパラメータを決めれば Ω_{tot} と Ω_m を決めればよい。だが、 $\Omega_m h^2$ は独立にきまるが、 h の不定性がある。つまり、 Ω_{tot} 、 Ω_Λ 、 h で作られる 3 次元パラメータ空間において、温度ゆらぎから正確に決めることができるのは 2 次元分のみであって、縮退しているのである。

WMAP のチームでは、審美性に訴えると考えたのであろうか、平坦モデルを仮定して上のパラメータとは異なるコンビネーションの 3 つのパラメータ $\Omega_b h^2$ 、 $\Omega_m h^2$ 、 h を決定するというを行っている。こうしてダークエネルギーパラメータも間接的に決めることができるのである。

温度ゆらぎを決める因子としては他に初期ゆらぎスペクトル $P_{\text{init}}(k)$ の自由度がある。これを無限の自由度を持っているので全く自由に変えれば宇宙論パラメータは縮退してどれも決まらなくなるが、これについては単純な巾則スペクトル $P_{\text{init}}(k) = Ak^{n_s}$ を仮定することが一般的であり、インフレーション理論とも近似的に符合して、現在のところ通常のパラダイムとなっている。するとパラメータとして、全体の振幅 A およびスペクトルインデックス n_s が加わるが、どちらも温度ゆらぎに関しては宇宙論パラメータと独立な効果を持つため、これらの新たなパラメータについては他のパラメータとの縮退は起こさない。

これらのパラメータに加えて、大角度偏光スペクトルから決まる再イオン化による光学的深さ τ で、都合 6 パラメータが背景放射ゆらぎのみから正確に決まることになる。その結果は図 11 である。これら基本的な宇宙論パラメータにより、他の宇宙論的パラメータの種々が 2 次的に決まり、その結果は、図 12 である。

こうして定められた宇宙モデルは、以前から様々な観測を統一的に説明する concordance model というものに一致している。concordance model とは、宇宙はほぼ平坦で、宇宙の主要成分はダークエネルギーで 7 割を占め、残りが物質であるが、そのうちほとんどはダークマターでできているというモデルである。WMAP の観測により、このモデルがますます正しい可能性が高くなり、また、このモデルの範囲内でのモデルパラメータがこれまでになく正確に定められることになった。

上でも強調したように、WMAP のみでは宇宙パラメータのすべてを定めることはできない。上の図に示したパラメータの値は曲率をゼロに固定しているが、この仮定を緩めるとパラメータ間に縮退が現れる。例えば、WMAP とより小スケールの温度ゆらぎのデータ (WMAPext) を用いて、曲率を固定せずにダークエネルギーの量と物質量についてパラメータの取りうる範囲を示すと図 13 の左上の灰色の

Table 1. Power Law Λ CDM Model Parameters- WMAP Data Only

Parameter		Mean (68% confidence range)	Maximum Likelihood
Baryon Density	$\Omega_b h^2$	0.024 ± 0.001	0.023
Matter Density	$\Omega_m h^2$	0.14 ± 0.02	0.15
Hubble Constant	h	0.72 ± 0.05	0.68
Amplitude	A	0.9 ± 0.1	0.80
Optical Depth	τ	$0.166^{+0.076}_{-0.071}$	0.11
Spectral Index	n_s	0.99 ± 0.04	0.97
	χ^2_{eff}/ν		1431/1342

^aFit to WMAP data only

図 11. 背景放射ゆらぎのみから決めた宇宙論パラメータ¹

Table 2. Derived Cosmological Parameters

Parameter	Mean (68% confidence range)
Amplitude of Galaxy Fluctuations	$\sigma_8 = 0.9 \pm 0.1$
Characteristic Amplitude of Velocity Fluctuations	$\sigma_8 \Omega_m^{0.6} = 0.44 \pm 0.10$
Baryon Density/Critical Density	$\Omega_b = 0.047 \pm 0.006$
Matter Density/Critical Density	$\Omega_m = 0.29 \pm 0.07$
Age of the Universe	$t_0 = 13.4 \pm 0.3$ Gyr
Redshift of Reionization ^b	$z_r = 17 \pm 5$
Redshift at Decoupling	$z_{dec} = 1088^{+1}_{-2}$
Age of the Universe at Decoupling	$t_{dec} = 372 \pm 14$ kyr
Thickness of Surface of Last Scatter	$\Delta z_{dec} = 194 \pm 2$
Thickness of Surface of Last Scatter	$\Delta t_{dec} = 115 \pm 5$ kyr
Redshift at Matter/Radiation Equality	$z_{eq} = 3454^{+385}_{-392}$
Sound Horizon at Decoupling	$r_s = 144 \pm 4$ Mpc
Angular Diameter Distance to the Decoupling Surface	$d_A = 13.7 \pm 0.5$ Gpc
Acoustic Angular Scale ^c	$\ell_A = 299 \pm 2$
Current Density of Baryons	$n_b = (2.7 \pm 0.1) \times 10^{-7} \text{ cm}^{-3}$
Baryon/Photon Ratio	$\eta = (6.5^{+0.4}_{-0.3}) \times 10^{-10}$

^aFit to the WMAP data only

^bAssumes ionization fraction, $x_e = 1$

^c $l_A = \pi d_A / r_s$

図 12. 背景放射ゆらぎのみから決めた宇宙論パラメータにより決められた種々の宇宙論パラメータ¹

部分になる。曲率を表す $\Omega_m + \Omega_\Lambda - 1$ のコンビネーションはよく定まっているが、 $\Omega_m - \Omega_\Lambda$ の方向がほとんど定まっていないことがよくわかるだろう。この縮退を解くには他の観測と組み合わせることが必要である。幸い、遠方の Ia 型超新星のハッブル図を用いるとまさにこの直行する方向にパラメータを制限できることが知られている。現在の超新星のデータを用いて決められる制限が実線で重ねてある。WMAP とこの超新星のデータを合わせて得た制限は図の右上の領域となる。さらに、ハッブル望遠鏡による観測から定められたハッブル定数に対する制限を合わせるともう少し制限され、図の右下のようになる。

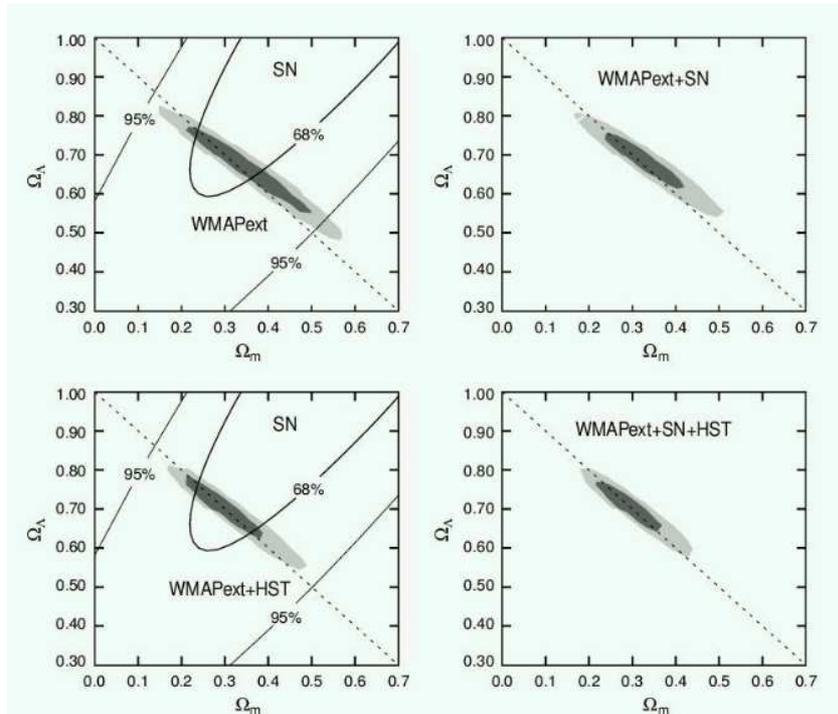


図 13. 非平坦宇宙を許したときの、 Ω_m - Ω_Λ についてのパラメータの制限¹

7. 大規模構造のパワースペクトルに含まれる宇宙論的情報

背景放射の温度ゆらぎでは比較的大スケールの宇宙の密度ゆらぎの情報が含まれているが、小スケールの一次的なゆらぎはシルク減衰により小さくなってしまっていて、そこからゆらぎのスペクトルを得るのは難しい。一方、そのようなスケールの密度ゆらぎの情報を直接得ることは、銀河やクエーサー、 $\text{Ly}\alpha$ 吸収線系、あるいは重力レンズなど、比較的現在に近い宇宙の密度ゆらぎをトレースすることにより行われる。ここで問題は、重力レンズを除けば天体の分布はダークマターを含む物質の分布そのものではないということである。弱重力レンズ効果により密度ゆらぎを得る方法はダークマターの分布を直接検出できるが、現在のところノイズはかなり大きい。幸い、線系スケールでは天体分布とダークマターの分布のゆらぎは比例関係にあるとしてもよい近似であることが知られている。非線形スケールでの関係は明らかではないが、シミュレーションなどの解析により、信頼できそうなモデルが提案されつつある。

密度ゆらぎのパワースペクトルの宇宙論パラメータ依存性を図 14 に示す。黒い実線は concordance model である。ただし、この図では規格化は任意であり、形のみが意味を持っている。大スケールでは $P(k) \propto k$ であり、これは等密度時刻においてホライズンよりも大きなスケールではスペクトルが変形しないことから、 $n = 1$ のハリソンゼルドビッチ型をそのまま保っているためである。右の方で振幅が下がっていくのは、放射優勢時にホライズンの中に入ったスケールのゆらぎの成長が圧力の効果で押さえられ、小スケールほどその期間が長いためである。また、スペクトルに振動が見られるのは背景放射のときに説明した音響振動の効果が現れているものである。

いくつか代表的な宇宙論パラメータを変化させたときのスペクトルの変化を同時にプロットしてある。青い線はダークマターの量を増やしたときのものである。このとき、等密度時刻がより昔に遡るため、そのときのホライズンサイズはより小さくなり、スペクトルの折れ曲がりはいより右へずれる。したがっ

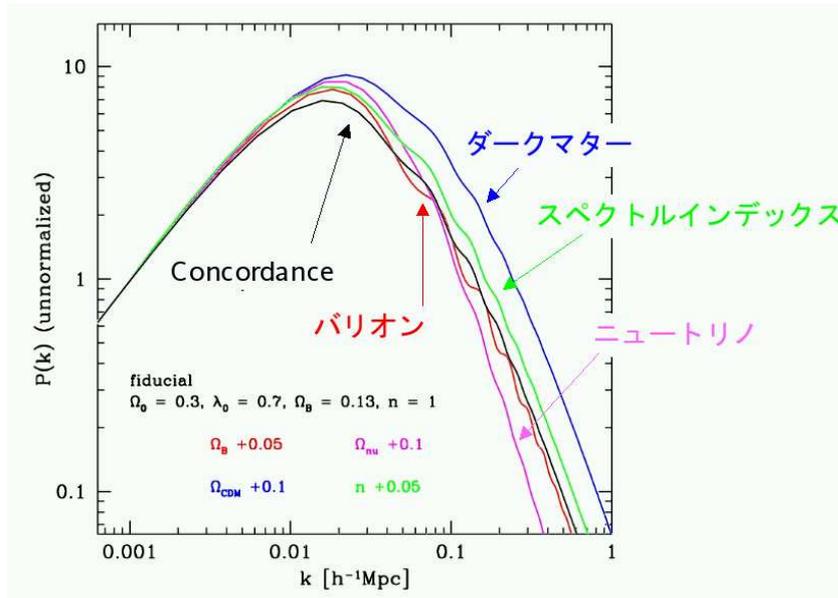


図 14. 密度パワースペクトルの宇宙パラメータ依存性

て、より小スケールでの振幅が大きくなる。赤い線はバリオンを増やしたときのものである。バリオンが増えると音響振動の効果がより顕著に現れ、スペクトルに特徴的な振動が強調される。それと同時に、シルク減衰によってダークマターのゆらぎもそれに引きずられ、小スケールの振幅が全体的に下がる。紫の線はニュートリノの質量を増やしたときのものである。ニュートリノは密度ゆらぎの無衝突減衰を強く引き起こし、小スケールほどその効果が大きい。したがって、小スケールの振幅が強く押さえられることになる。緑の線はスペクトルインデックスを増やしたときのものである。全体のゆらぎを右肩上がりにする効果がある。

このように、密度ゆらぎのパワースペクトルにも様々な宇宙の情報が織り込まれていて、各々の宇宙論パラメータは異なる効果をおよぼす。とくに、背景放射では決めることの難しいニュートリノの質量を決めることができる。また、大規模構造は赤方偏移により距離スケールが見積もられる。これは、距離スケールが $h^{-1}\text{Mpc}$ を単位にして測られることを意味する。するとダークマターの量によってきまるスペクトルのピークの位置はマターの密度 $\Omega_m h^2$ ではなく、 h だけ異なる $\Omega_m h$ という量によって決まることになる。さらに、この決定には曲率に関係しないため、温度ゆらぎとは全く異なる情報を与えていることがわかる。

とくにニュートリノの質量に関しては、温度ゆらぎなどから定まった宇宙パラメータの情報を使い、密度ゆらぎのパワースペクトルを用いることによって強い制限を得ることができる。図 15 はこうしてニュートリノの質量の取りうる値の確からしさを示すものである。これにより、 1eV を越すようなニュートリノは存在しないことがわかる。ニュートリノがダークマターの主成分となるためには少なくとも 10eV 以上なければならないが、これを満たしていない。この結果はニュートリノの質量のみならず、以前考えられていたようなホットダークマターによる構造形成が不可能であることを意味している。ダークマターがホットダークマターによって成り立っているとすると、密度ゆらぎのスペクトルが大きく変形され、観測的に決められたものと絶望的に全く合わない。ダークマターを現在我々が知っている粒子に同一視しようという試みには引導が渡されているのである。

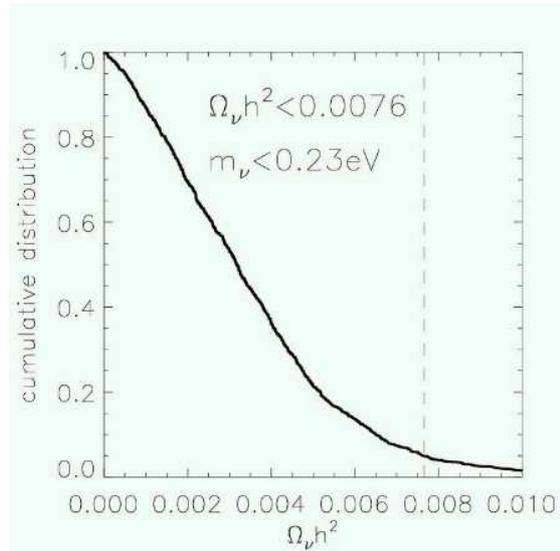


図 15. 大規模構造によって決まるニュートリノ質量に対する制限¹

大規模構造の観測は SDSS をはじめとしてこれから大きく進み、さらに遠方超新星の大観測プロジェクトである SNAP などもあり、これらは相補的に宇宙のさまざまな側面を探索するので、温度ゆらぎだけでは明らかになっていない宇宙論の側面についてもつぎつぎと明らかになるであろう。

8. ダークエネルギー

遠方 Ia 型超新星により約 70% は宇宙定数のような真空エネルギーによって満たされているとの示唆を得て以来、その性質を探ろうとする機運が大きく高まっている。宇宙定数は通常の物質との対応でいくと圧力 p が負になる物質に対応し、エネルギー密度 ρ との間に、 $p = -\rho$ の関係がある[‡]。だが、宇宙定数は宇宙的スケールではじめて顕著になってくるものである。そうでなければ我々のまわりの空間が大きく曲がってしまうが、実際にはそうはなっていないからである。すると、なにか素粒子論的な機構によって真空のエネルギーが宇宙定数の起源になっていると考えると、異常に値の小さいものでなければならぬことがわかる。自然の定数としてはあまりに不自然に小さいこの値は、昔から不思議がられてきた。このダークエネルギーというべき未知のエネルギー形態は何らかのスカラー場的な力学的機構によって現れているという可能性もある。このような場はクインテッセンスと呼ばれている。

クインテッセンスを単なる宇宙定数から区別するために、状態方程式のパラメータ $w = p/\rho$ を調べるという方法がある。宇宙定数では $w = -1$ の定数であるが、クインテッセンスでは $w \neq -1$ であるほうが自然である。もちろん、クインテッセンスであっても観測できる領域で近似的に $w = -1$ となっていれば区別はできないが、もし、 $w \neq -1$ を観測できれば自然の深遠な事実を見ることとなる。基本的に、 w の値は宇宙の膨張率の時間変化において観測できる現象に現れる。このことを用いているいろいろな観測を組み合わせると w の値に制限をつけた例が図 16 に示してある。平坦宇宙を仮定し、 w , Ω_m , および h のパラメータ空間の制限が示してある。図で 2dFGRS とあるのは 2dF サーベイにおける銀河のパワースペクトルから上で説明したように決められる Ω_m の制限を加えたものである。これをみてわかるよう

[‡] $c=1$ の単位系をとっている。

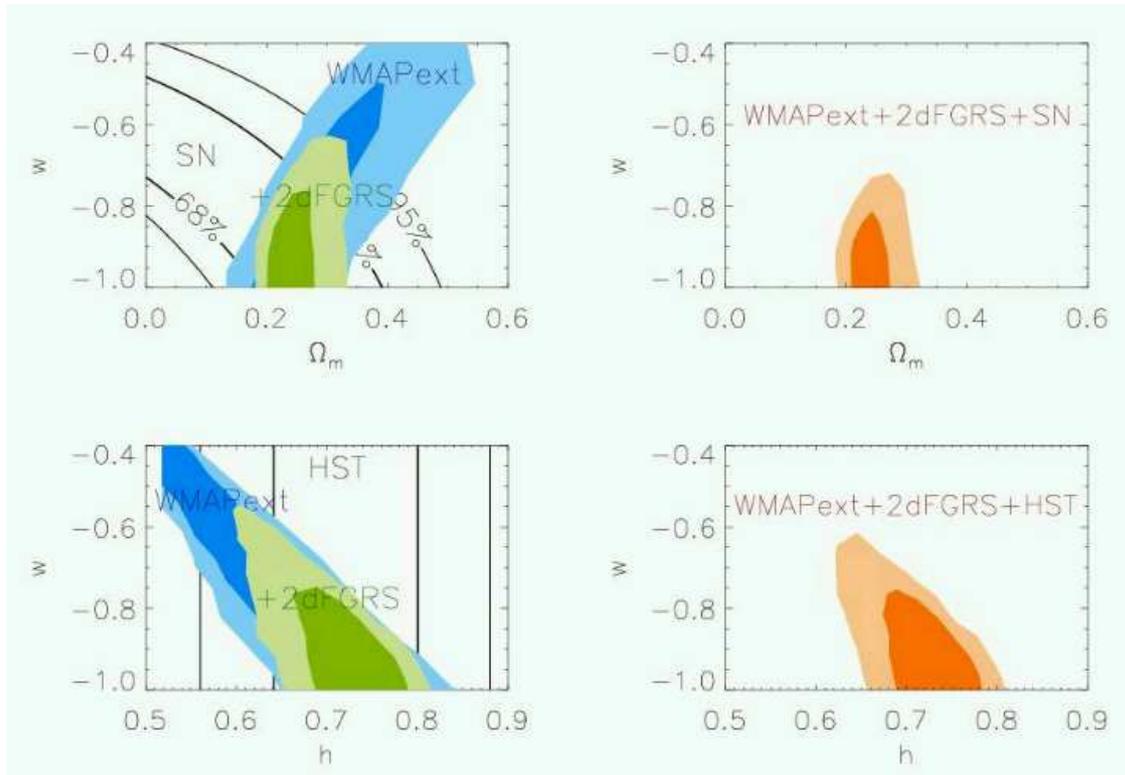


図 16. ダークエネルギーについての制限¹

に、現在のところ、ダークエネルギーが宇宙定数と異なるという兆候は見えていない。だが、まだその制限は緩く、今後さらに観測が進むにつれてこの問題に決着がつけられることが期待されている。

9. 今後の宇宙論：個人的随想

WMAPの観測などにより、いくつかの宇宙論パラメータがこれまでとはけた違いに正確に定まった。すこし以前までは、宇宙論は $10 \sim 100$ という近似でも全くかまわないような定量科学としてはかなりおおざっぱな議論しかできないようなものであったが、この10年ほどの観測的宇宙論の進歩により、飛躍的に状況が変化して、宇宙論は2桁以上の定量性を持った議論が可能な精密科学へと面目を一新した。以前はやたらに宇宙モデルが提案され、どのモデルが正当なのか区別できなかったが、可能なモデルはかなり絞り込まれてきている。まだまだ人類が観測できる未知の領域は広大であり、この流れは続くであろう。

宇宙論にはこの先なにが待っているのだろうか？現在の流れを延長して単純に考えると、宇宙論パラメータはほとんど決まってしまう、あとは細かい数値精度を上げていくなどの、細かい作業だけが残っているようにも見え、ときどき、そのような悲観論が聞かれることがある[§]。このような展開は明らかに面白いとは思えない。はたしてそうなのか？

私には、このような悲観論は科学が比較的順調に進んでいるように見えるときに出てくる、間違っただけの考えのように思われる。人間は物事がうまく行っているときにのみ良心が傷付く。たとえば、19世紀末

[§]実は私の大学院時代の指導教官がこの悲観論をかかげて宇宙論よりも惑星探査をすべし、という記事を学会誌に数回書いているのはすこし寂しい。

には基礎理論としてのニュートン力学とマックスウェル電磁気学が世界のすべてを説明するように錯覚されたことがあり、あと物理学に残されているのは個々の現象を力学と電磁気学で説明していただくだけの比較的つまらない作業しか残っていないのではないかとと言われることもあった。だが、もちろん自然はそう単純ではなく、はじめはちょっとしたほころびのように見えた空洞輻射のスペクトルの不可解な性質は、力学と電磁気学をもろくも近似理論の立場に追いやり、全く新しい思考形式を要求する量子力学を誕生させ、同時期に誕生した相対論とともに、物理学上の大パラダイムシフトを引き起こした。宇宙論もいまや concordance model により可能な観測をすべて説明するかのように思われつつある。そしてまた思われているのである、あとは今後得られてくるいろいろな観測を説明し、パラメータを細かく決めていただくだけの作業しか残っていないのではないかと、、、

宇宙論のこの concordance model はある意味極めて異常なものである。宇宙はその 96%までは我々が地上の観測で直接検出できないものから成っているというのだから、観測事実がなければ誰も採用したくないモデルであろう。だが、科学が進むときにはいつもそうであるように、さまざまな実験事実や観測事実をもっとも少ない仮定に基づいて説明するモデルが結局は真実にもっとも近いのである。というよりも、このことは科学的真実そのものであるとも言えるのである。端的には科学的真実とは自然現象のモデル化そのものでしかない。ダークマターやダークエネルギーはそのような種々の不可解な観測事実を統一的に説明するもっとも簡単な仮定となっている。

だが、これらは宇宙論的観測でのみ必要とされていて、他の物理学的な観点からは不自然な、ご都合主義的に導入されたものでしかない。確かにある、と思えるためには、ダブルチェック、トリプルチェックが必要である。そのためには、考え得る限りの可能なすべての観測を行い、どのような観点から見てもこの concordance model にほころびがないのかを調べていく必要がある。むしろ、ほころびが見えたほうが宇宙の真理に近づけるであろう。

これは単なる憶測であるが、ダークマター、ダークエネルギーのどちらかあるいは両方とも、通常の意味で物質が存在するというような理解のしかたを逸脱した、全く新しい思考形式を必要とするような概念なのかもしれない。ダークと名のつくもので満たされた、ある意味あらまほしくないモデルは、醜いアヒルの子なのかもしれない。白鳥になるのかそうでないのかを予断を持って語ってはいけない。まあ、いずれであろうとも科学者はその探求を止めはしないのだが。

参考文献

1. <http://map.gsfc.nasa.gov/index.html>
2. http://space.gsfc.nasa.gov/astro/cobe/cobe_home.html
3. <http://www.aao.gov.au/2df/>
4. W. Hu, & S. Dodelson. 2002, Annu. Rev. Astron. Astrophys., 40, 171