

〈前回の復習〉

・多波長観測による星形成率の決定：様々な波長の観測を組み合わせ、統合的な観測を行う。

- ・紫外線…星形成領域を占める若い O 型星や B 型星は紫外で明るく光る。
- ・遠赤外線…星形成領域からの紫外線は周囲のダスト（シラス）に吸収され、遠赤外で再放射される。
- ・電波…超新星爆発は星形成を引き起こすと同時に粒子を加速し、シンクロトン放射（電波）で光らせる。

これら 3 つの波長での光度は互いに相関しており、特に電波-遠赤外線相関は厳密に成り立っている。他にも、

- ・H α 線…O 型星や B 型星はそのエネルギー放射によって周囲の物質を電離させ、Balmer 線などを作る。
- ・中間赤外線…多環式芳香族炭化水素 (PAH) のスペクトルから紫外線光度が分かる。
- ・X 線…大質量 X 線連星 (HMXB) は X 線を放射し、寿命が短い。

・星の総質量：星の総質量密度を時間で微分すれば星形成史になるはずなのに、実際は一致しない。

・Downsizing：大質量の銀河は小質量の銀河よりも昔にできた。

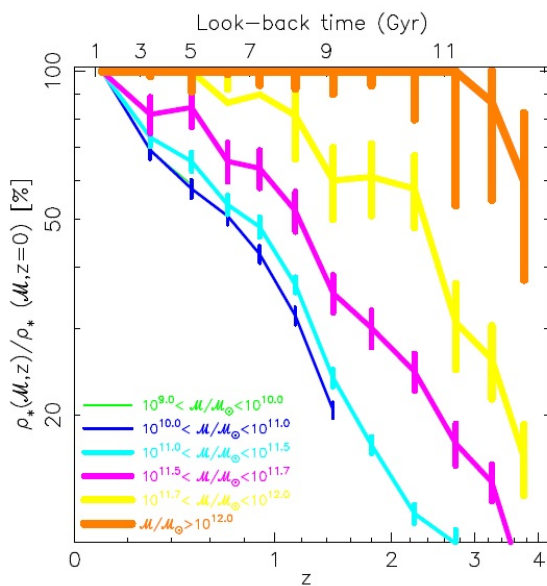


図 5.18 現在の値に対する質量密度。例えば $10^{12} M_{\odot}$ の銀河は $z = 3$ には現在とほぼ同じ密度になっていた。

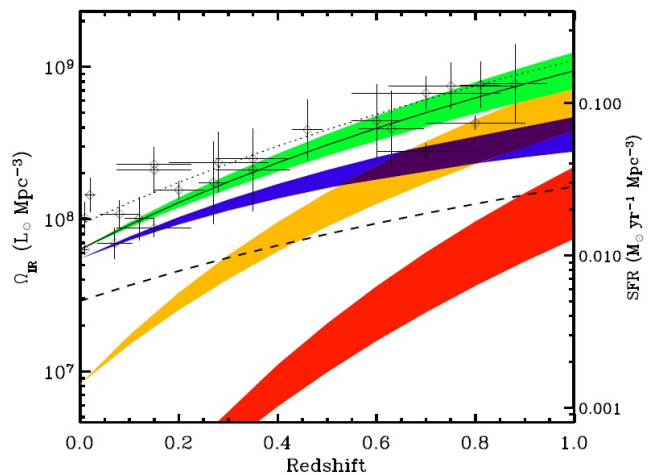


図 5.19 星形成率の進化。赤は $> 10^{12} L_{\odot}$ の銀河、橙は $> 10^{11} L_{\odot}$ 、青は $< 10^{11} L_{\odot}$ 、緑は合計。

・銀河形成にかかる負のフィードバック：星形成が盛ん → クェーサーや超新星から放出されたエネルギーが星間物質を吹き飛ばす → 星形成が阻害される。

・エネルギーの受け渡し：AGN は周囲の物質に輻射と力学作用（波）の両方を通してエネルギーを渡している。この過程をそれぞれ輻射モード（クェーサーモード）、力学モード（電波モード）という。

私はすべてが理解できる世界よりも、謎だらけの人生を生きたい。

Harry Emerson Fosdick (アメリカの牧師)

2 宇宙マイクロ波背景輻射

この章では1章で論じた Olbers のパラドクスに立ち戻り、もっとも古く、もっとも有名な輻射を用いて説明しなおそう。さらにこの輻射によって、宇宙論がどれだけ精密科学に近づいているのかを見ていこう。

2.1 CMB の発見

ビッグバン宇宙モデルを支える根拠は①宇宙膨張、②CMB、③初期種族合成の3つ（と④宇宙の大規模構造）である。天文学の進歩した今では宇宙のモデルは（むしろ詳しすぎるほど）正確に制限されており、宇宙論は精密科学と見なされるようになった。その精密宇宙論を代表するのが、CMB の理論である。

宇宙マイクロ波背景輻射 (Cosmic Microwave Background: CMB) とは、宇宙が生まれて初めて透明になった瞬間 ($t = 38$ 万年, $z = 1090$) に発せられた光のことである。宇宙膨張の理論より、この光は宇宙のあらゆる方向から等方にやってくるように見える。CMB について驚くべきはそのスペクトルが黒体輻射とほとんど完全に一致していることであって、現在知られている中では CMB はもっとも黒体輻射に近いものである (図 2.1)。

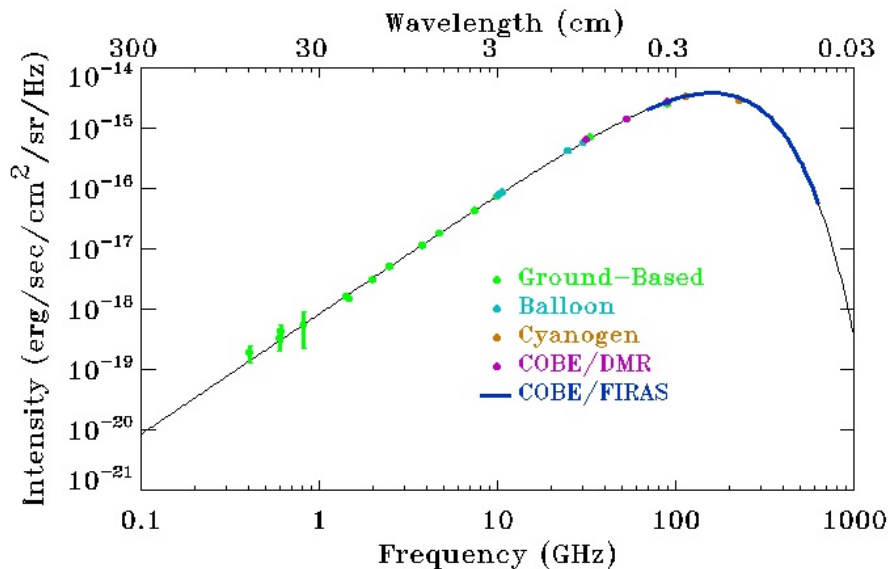


図 2.1 CMB のスペクトル。データ点が黒体輻射スペクトルの上に綺麗に並んでおり、特に COBE については誤差棒がもはやデータ点よりも小さい。

宇宙ははじめ高温・高密度で原子はすべてプラズマ化されており、光子は自由電子によって激しく散乱されていた。その後宇宙が膨張とともに低温・低密度になっていくに従って自由電子は陽子に捕獲され、光子は電子に邪魔されずにまっすぐ飛べるようになった。この瞬間を宇宙再結合、または宇宙の晴れ上がりという^{*1}。ちなみに、 $z \simeq 1000$ のときのイオン化されたガスの割合は

$$x \simeq 2.4 \times 10^{-3} \frac{\sqrt{\Omega_{m,0} h^2}}{\Omega_{b,0} h^2} \left(\frac{z}{1000} \right)^{12.75} \quad (2.1)$$

であったという。

^{*1} 宇宙再結合とは言うが、原子が形成されたのはこのときが初めてである。また本文の事実から、CMB は“最終散乱面”とも呼ばれる。

CMB は古くは McKellar (1934 年) や Gamow, Alpher & Herman (1948 年) によってその存在が予言され、1964 年、Bell 研究所の Penzias と Wilson によって発見された。彼らは電波通信のためのアンテナを調整している最中、空のどの方向からも一様に飛んてくる安定なノイズがあることに気がついた。彼らはその原因を突き止めることはできなかったが、ちょうど同じ頃、Dicke 率いるグループが CMB を検出する実験を計画中であったことを知り、ノイズの正体が CMB であることを発見したのである。この業績により、Penzias と Wilson には 1978 年にノーベル章が授与された。

問 2.1 原子核が電子と再結合すると 13.6 eV の光子を放出して他の原子をイオン化してしまい、再結合は進まないように思われる。それなのに、なぜ宇宙全体が再結合できたのか？

解答 電子が必ずしも $n = 1$ の準位 ($E = 13.6$ eV) に捕まる訳ではないため。電子が $n \geq 2$ の準位から落ちると、放出されるエネルギーは 13.6 eV よりも小さいので他の原子をイオン化できず、宇宙再結合は確かに進行する。■

問 2.2 現在における CMB の温度は

$$T = 2.725 \pm 0.001 \text{ K}$$

である。この値を元に、現在における CMB の輻射エネルギー密度が $\Omega_{r,0}h^2 = 2.5 \times 10^{-5}$ で与えられることを示せ。

解答 Stefan-Boltzmann の法則より、現在における CMB の輻射エネルギー密度は

$$\rho_{r,0}c^2 = aT^4 = (7.56 \times 10^{-16} \text{ J/m}^3/\text{K}) \times (2.725 \text{ K})^4 = 4.17 \times 10^{-14} \text{ J/m}^3 \quad (a \text{ は輻射密度定数})$$

と求められる。これを Ω による表記に直すと、

$$\rho_{\text{crit},0} \equiv \frac{3H_0^2}{8\pi G} = \frac{3 \times (100h \text{ km/s/Mpc})^2}{8\pi \times (6.67 \times 10^{-11} \text{ N m}^2/\text{kg}^2)} = 1.88 \times 10^{-26} h^2 \text{ kg/m}^3$$

を用いて

$$\Omega_{r,0} \equiv \frac{\rho_{r,0}}{\rho_{\text{crit},0}} = \frac{(4.17 \times 10^{-14}) / (3 \times 10^8 \text{ m/s})^2 \text{ kg/m}^3}{1.88 \times 10^{-26} \text{ kg/m}^3} = 2.5 \times 10^{-5} h^{-2}$$

となる。ただし実際にはニュートリノの寄与が (3 種類それぞれについて) この 68 % 程度あるために、

$$\Omega_{r,0}h^2 = 2.5 \times 10^{-5} \times (1 + 3 \times 0.68^4) = 4.0 \times 10^{-5}$$

になる。■

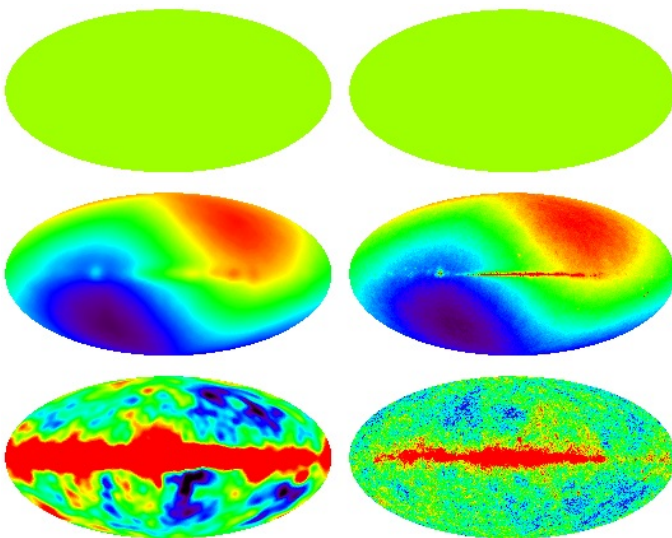


図 2.2 COBE (左) と WMAP (右) による CMB の温度分布。

(1 行目) 0 K を青色, 4 K を赤色とした場合 : 分布は完全に一樣。

(2 行目) 2.721 K を青色, 2.729 K を赤色とした場合 : CMB の静止系に対して地球が動いているために、分布は太陰大極図に似ている。

(3 行目) 2 行目の画像から双極子的な異方性を除いた場合 (青色と赤色の温度差は 18 μ K) : 中心の赤色は銀河面。その上下には双極子状でない異方性が僅かに残っているが、その原因はまだよく分かっていない。

2.2 CMB の温度

前節で CMB が完全な黒体輻射であることを紹介したが、これを証明してみよう。黒体輻射は Planck の式

$$B_\nu(T)d\nu = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{\exp(h\nu/k_B T) - 1} d\nu \quad (2.2)$$

で与えられるが、これは宇宙膨張による周波数の変化 $\nu \rightarrow \nu' = \nu/(1+z)$ に対して

$$B_{\nu'}(T)(1+z)d\nu' = \frac{2h[\nu'(1+z)]^3}{c^2} \frac{1}{\exp[h\nu'(1+z)/k_B T] - 1} (1+z)d\nu',$$

すなわち

$$B_{\nu'}(T)d\nu' = (1+z)^3 \frac{2h\nu'^3}{c^2} \frac{1}{\exp[h\nu'/k_B T'] - 1} d\nu' \quad (T' \equiv T/(1+z))$$

と変化する。これは式 (2.2) と定数を除いて同じ形なので、黒体輻射は宇宙膨張によってその形を変えないことが示された。これは CMB が宇宙膨張に関わらず、黒体輻射のまま我々に届くことと等価である。

また CMB 光子の周波数が $(1+z)$ の割合で縮むことに加えて宇宙の体積も $(1+z)^3$ の割合で大きくなるので、光子のエネルギー密度は $(1+z)^4$ の割合で小さくなる。Stefan-Boltzmann の法則よりエネルギー密度は温度に対して T^4 の依存性があるので、結局

$$\frac{T_{\text{CMB}}(z)}{T_{\text{CMB}}(0)} = 1+z \quad (2.3)$$

が成立する。要するに CMB は遠くに行くほど（時間を遡るほど）高温になる訳であるが、これは遠方にある冷たい天体が CMB によって熱せられるために温度の下限が存在するという事実によって確認されている。

話が少し脇道に逸れるが、構成分子のエネルギー準位はガスの温度に依存する。例えば $\sim k_B T$ のエネルギー準位を占めるのは主に分子であり、その個数密度はその分子の構造（単原子分子/2 原子分子など）によって決まる。このような分子による輝線や吸収線を調べれば分子の種類を特定できるし、静止波長からのずれから赤方偏移を求めることもできる。さらには輝線強度比が温度に依存するので、強度比の観測から高 z 天体のガスの温度、ひいては CMB の温度を制限することもできる。実際の観測でも $z = 2.418\,37$ での温度が一酸化炭素の回転遷移を利用して $T = 9.15 \pm 0.32\, \text{K}$ と求められており、理論値の $T = 9,315 \pm 0.007\, \text{K}$ と良く一致している。

さて、宇宙膨張のために CMB 光子の周波数が $(1+z)$ の分だけ減っているならば、その減った分のエネルギーはどこに行ってしまったのだろうか？ これを説明するためによく用いられるのが、光子ガスの断熱膨張である。すなわち光子ガスを体積 V の箱の中に閉じ込めると、箱の膨張によって光子ガスの温度は $(1+z)$ の分だけ低くなる（前述）。この減った分のエネルギーは、箱に対する $p dV$ の仕事で消費され则认为るのである。

しかし実際の宇宙では、光子ガスのする仕事は極めて小さい。それにそもそも一般相対論の枠組みではエネルギーが座標系に依存するので^{*2}、エネルギーは 非相対論的な意味では 保存しないという問題も残っている。

問 2.3 宇宙ははじめ輻射が優勢であった ($\Omega_r \simeq 1$) が³、その後物質が優勢になった ($\Omega_m \simeq 1$)。輻射と物質の関係が逆転したときの赤方偏移 z_{eq} が、

$$1 + z_{\text{eq}} = 4.0 \times 10^4 \Omega_{m,0} h^2 \left(\frac{T_{\text{CMB},0}}{2.725\, \text{K}} \right)^{-4} \quad (2.4)$$

で与えられることを示せ。

解答 本文より Ω_m は $(1+z)^3$ で、 Ω_r は $(1+z)^4$ で変化するので、

$$\frac{\Omega_r}{\Omega_m} = (1+z) \frac{\Omega_{r,0}}{\Omega_{m,0}}$$

^{*2} 粒子の静止質量を m 、個数密度を n とすると、エネルギー密度は $mc^2 \times n$ で与えられる。これは座標変換（Lorentz 変換）に対して

$$mc^2 n \rightarrow (\gamma mc^2) \times (\gamma n) = \gamma^2 mc^2 n$$

と変換するので、明らかに観測者の座標に依存する。

である。ここで問 2.2 を一般の $T_{\text{CMB},0}$ に対して解き直すと

$$\Omega_{\text{r},0} = 2.5 \times 10^{-5} h^{-2} \left(\frac{T_{\text{CMB},0}}{2.715 \text{ K}} \right)^4$$

なので、 $z = z_{\text{eq}} (\iff \Omega_{\text{r}} = \Omega_{\text{m}})$ のとき確かに

$$1 + z_{\text{eq}} = \frac{\Omega_{\text{m},0}}{\Omega_{\text{r},0}} = \frac{\Omega_{\text{m},0}}{2.5 \times 10^{-5} h^{-2} (T_{\text{CMB},0}/2.715 \text{ K})^4} = 4.0 \times 10^4 h^2 \left(\frac{T_{\text{CMB},0}}{2.715 \text{ K}} \right)^{-4}$$

を得る。■

問 2.4 問 1.4 では $\Omega_{\text{m}} = 1$ の宇宙が

$$a(t) \equiv \frac{R(t)}{R_0} \propto t^{2/3} \quad (a(t) \text{ はスケール因子}) \quad (1.35)$$

に従うことを示した。同様に、 $\Omega_{\text{r}} = 1$ の宇宙が

$$a(t) \equiv \frac{R(t)}{R_0} \propto t^{1/2}$$

に従うことを示せ。

解答 まず 1.6 節で登場した式

$$\left(\frac{H}{H_0} \right)^2 = (1+z)^2 (1 + z\Omega_{\text{m},0}) - z(2+z)\Omega_{\Lambda,0} \quad (1.33)$$

を、 $\Omega_{\text{m},0}$ でなく $\Omega_{\text{r},0}$ を入れた式に書き換える。以前は

$$H^2 = \frac{8\pi G(\rho_{\text{m}} + \rho_{\text{r}})}{3} + \frac{\Lambda c^2}{3} - \frac{kc^2}{R^2} \quad (1.14)$$

で $\rho_{\text{r}} = 0$ とした訳であるが、今回は逆に $\rho_{\text{m}} = 0$ として

$$-kc^2 = H^2 R^2 - \frac{8\pi G\rho_{\text{r}} R^2}{3} - \frac{\Lambda c^2 R^2}{3}$$

と書き直す。これを現在の表式と比較すると

$$H^2 R^2 - \frac{8\pi G\rho_{\text{r}} R^2}{3} - \frac{\Lambda c^2 R^2}{3} = H_0^2 R_0^2 - \frac{8\pi G\rho_{\text{r},0} R_0^2}{3} - \frac{\Lambda c^2 R_0^2}{3}$$

が成り立つので、これを $\rho_{\text{r}} = \rho_{\text{r},0} \times (R_0/R)^4$ (3 乗でなく 4 乗!) を用いて変形していく。すると、前回と同様の計算により

$$\left(\frac{H}{H_0} \right)^2 = (1+z)^2 [1 - \Omega_{\text{r},0} + \Omega_{\text{r},0}(1+z)^2] - z(2+z)\Omega_{\Lambda,0}$$

を得る。

この式で $\Omega_{\text{r},0} = 1$, $\Omega_{\Lambda,0} = 0$ とすると

$$\left(\frac{H}{H_0} \right)^2 = (1+z)^4$$

なので、

$$H = \frac{-1}{1+z} \frac{dz}{dt} \quad (1.1)$$

と合わせて

$$\left(\frac{dz}{dt} \right)^2 = H_0^2 (1+z)^6, \quad \therefore \frac{d(1+z)}{dt} = \frac{dz}{dt} = -H_0 (1+z)^3$$

となる。ここでスケール因子の定義 $a \equiv 1/(1+z)$ を思い出すと

$$\frac{da^{-1}}{dt} = -H_0 a^{-3}, \quad \therefore ada = H_0 dt$$

なので、これを積分して

$$a = \left(\frac{t}{t_0} \right)^{1/2} \propto t^{1/2}$$

を得る。■

2.3 CMB は黒体輻射か？

前節では CMB が宇宙膨張に関わらず黒体輻射の形を保つことを示したが、そもそもなぜ CMB が黒体輻射なのかには答えなかった。それどころか直感的には、CMB の時代には宇宙がまだ若く、粒子が熱平衡に達せていなかった（ $\iff$ 黒体放射できていなかった）とさえ思ってしまう。しかし実は宇宙の若さは関係がなく、初期の粒子も黒体放射できたのである。このことを証明しよう。ただし簡単のために (?) 非相対論的な場合は考えず、粒子が熱放射すればそれはすなわち黒体放射と思うことにしている。

高速で膨張している初期の宇宙では主に重力が効き、その典型的な時間スケールは次元解析より $\tau_{\text{dyn}} \propto (G\rho)^{-1/2}$ である。このときの宇宙は輻射優勢であったので $\rho \propto R^{-4}$ であり、ゆえに典型的なイベントの回数のスケールは

$$\frac{1}{\tau_{\text{dyn}}} \propto \frac{1}{G^{-1/2} R^2} \propto R^{-2}$$

となる。一方で熱運動による粒子どうしの衝突回数のスケールは、粒子の個数密度を n として

$$\frac{1}{\tau_{\text{col}}} \propto n^2 \propto (R^{-3})^2 = R^{-6} \gg R^{-2}$$

と表されるので、宇宙誕生から間もない時代であっても $1/\tau_{\text{col}}$ がすぐに卓越し、粒子は熱せられる。したがってこの時代の粒子は黒体輻射できていたのである。この過程をふつうの意味でのビッグバンと区別して、**熱いビッグバン**という。

ところで、CMB が黒体輻射に近いという事実は**定常宇宙モデル**（ビッグバンが起きなかったとするモデル）に対する反例になる。定常宇宙モデルは CMB を星からの輻射によって温められたダストからの熱放射として説明するが、そうだとすると CMB はいろいろな星の温度を反映していることになり、単一温度の黒体輻射として再現できなくなってしまう。この他にも定常宇宙モデルでは説明が苦しくなることが多く、1960 年代の終わりには非標準的と見なされるようになった。

2.4 バリオン数生成問題

現代物理学の抱える大問題の一つが、なぜ物質（バリオン）の個数が**反物質**（**反バリオン**）の個数よりも多いのかである。これを**バリオン数生成問題**という。現在の素粒子標準モデルによると、バリオンと反バリオンはバリオン数^{*3}を厳密に保存しながら対生成・対消滅を繰り返すはずである。しかし現実には、宇宙はそのほとんどがバリオンで満たされている。ただし宇宙誕生直後にバリオン/反バリオンの対生成・対消滅があっても、宇宙膨張とともにその頻度は下がっていくので、我々は高温宇宙が終わったときのバリオン数の非対称性（バリオン：反バリオン = $(1 + 10^{-9})$ 個：1 個）を現在になって観測していることになる。

バリオン数生成問題は現在の物理の枠組みでは解決できておらず、**大統一理論 (Grand Unified Theory: GUT)** が解決策の有力候補として挙げられている。GUT によれば、3 つの力の融合する $\gtrsim 10^{15}$ GeV の領域での反応が現在のバリオン数の非対称の由来になっているかもしれないという。しかし宇宙のインフレーションは元々あった非対称性を消してしまい、終わったときの宇宙は GUT のスケールを大きく下回っているので、GUT による説明が正しいかを検証する術はない。

ちなみに非対称性はバリオンだけでなく、宇宙初期のレプトン^{*4}や陽子にもあったはずである。というのも GUT ではバリオンやレプトンは同じ粒子が違う状態にあるものと見なされており、バリオン数 B とレプトン数 L は保存するからである。実際の観測では、レプトン数の非対称性は宇宙背景ニュートリノの観測により確認されるだろう。

^{*3} バリオンなら $B = +1$, 反バリオンなら $B = -1$ 。というクォークなら $B = +1/3$, 反クォークなら $B = -1/3$ 。

^{*4} 強い相互作用を受けない、スピン 1/2 の Fermi 粒子。 e^- , μ^- , τ^- とそれらのニュートリノの 6 種類。

2.5 バリオンあたりのエントロピー

バリオン/反バリオンの対消滅が大量のバリオン だけ を残して終わると、それ以降の共動体積におけるバリオン数密度は保存される。するとその次に起こる対消滅は

$$e^- + e^+ \rightarrow \gamma + \gamma$$

であり、これが終わると最初の星が輝き始めるまで光子数は保存される。そこで、バリオン数の非対称性を

$$\eta \equiv \frac{n_b - n_{\bar{b}}}{n_\gamma} \quad \left(\begin{array}{l} n_b, n_{\bar{b}}, n_\gamma \text{ はそれぞれバリオン,} \\ \text{反バリオン, 光子の個数密度} \end{array} \right) \quad (2.5)$$

という量で記述しよう。粒子のエントロピーは個数密度に比例するので、この η はバリオンあたりのエントロピーと呼ばれる。また η は現在のバリオン数密度 $\Omega_{b,0}$ と

$$\Omega_{b,0} h^2 = \frac{\eta}{2.74 \times 10^{-8}} \quad (2.6)$$

で関係しているのでこれを用いて η を求めてもよいし、光子ガスの単位質量あたりのエントロピー η_γ が

$$\eta_\gamma = 1.09 \times 10^{12} (\Omega_{m,0} h^2)^{-1} \text{ J/K/kg}$$

で与えられることを利用してもよい。宇宙全体のエントロピーはほとんどが CMB のエントロピーであり、それゆえに宇宙膨張は断熱（かつ可逆）と見なされている。

2.6 初期種族合成

2.6.1 火の玉宇宙における freeze-out

CMB が飛び出した宇宙の晴れ上がりを出発してさらに時代を遡ると、宇宙は高温・高密度になる（火の玉宇宙）。するとその時代には、太陽内部のように核融合が起こっていたのだろうか？ この時代の宇宙は物質よりも輻射が優勢だったので、宇宙が誕生してからある程度時間が経ってしまうと核融合は起こり得ない。しかしもっと初期の、温度が 10^9 K を超えるような時代には核融合が確かに起こっていた。これを初期種族合成といい、ビッグバン理論から核反応率や元素量を計算できる（しかも計算結果は観測と良く一致している）。そしてこの理論で重要になるのが、次に説明する **freeze-out** という現象である。

宇宙初期にあった陽子と中性子は、

$$p + e^- \rightleftharpoons n + \nu_e, \quad p + \bar{\nu}_e \rightleftharpoons n + e^+$$

という2つの弱い相互作用によって関係していた。その反応率 v は理論により計算することができて、

$$\frac{1}{v} = \left(\frac{10^{10.135} \text{ K}}{T} \right)^5 \text{ s} \quad (2.8)$$

という強い温度依存性をもつ。一方でこの時代の宇宙は $\Omega_r \simeq 1$, $\Omega_\Lambda \simeq 0$ より $a \propto t^{1/2}$ に従って膨張し（問 2.4）、温度は $T \propto 1/a$ に従って下がるので、宇宙膨張の時間スケールは

$$t = \left(\frac{10^{10.125} \text{ K}}{T} \right)^2 \text{ s} \quad (2.9)$$

となる。これらは最初は相互作用の反応率の方が大きい $t = 1/v$ ($\Leftrightarrow T = 10^{10.142} \text{ K}$) で一致し、その後は宇宙の膨張率の方が大きくなって、陽子と中性子は相互作用できなくなる。するとその後は $t = 1/v$ の状態のまま固定されることになり、これを freeze-out というのである。この時点での陽子と中性子の個数密度 n_p , n_n は

$$\frac{n_n}{n_p} = \exp \left(-\frac{\Delta m c^2}{k_B T} \right) \simeq \exp \left(-\frac{10^{10.176} \text{ K}}{T} \right) \quad \left(\begin{array}{l} \Delta m \text{ は陽子と} \\ \text{中性子の質量差} \end{array} \right) \quad (2.7)$$

という Boltzmann 分布に従い、実際の値を代入すると

$$t \sim 1 \text{ s}, \quad \frac{n_n}{n_p} \simeq 0.34 \quad (2.11)$$

を得る。もう少し詳しい補正を加えると、現在の個数密度比は $n_n/n_p \simeq 1/7$ と計算できる。補正というのは例えば、相互作用にかかる時間や低温側での式 (2.8) の変化、 $p \leftrightarrow n$ の相互作用以外にも反応が起こる可能性などのことである。

Freeze-out は $p \leftrightarrow n$ の相互作用以外でも起こり得る。例えば

$$e^- + e^+ \rightleftharpoons \nu_e + \bar{\nu}_e \quad \text{や} \quad e^- + e^+ \rightleftharpoons \gamma + \gamma$$

は $t \sim 0.18 \text{ s}$ ($T \simeq 10^{10.5} \text{ K}$) で freeze-out し、 $t \sim 5 \text{ s}$ ($T \simeq 10^{9.77} \text{ K}$) になると残った $e^\pm$ が対消滅して大量の光子を作る。ニュートリノは他の物質とほとんど相互作用せず、freeze-out は CMB の時代 ($t \sim 38 \text{ 万年}$) よりもずっと早いので、CMB よりも古い “宇宙ニュートリノ背景放射” が存在するはずである。その存在は CMB の構造から間接的に確かめられてはいるものの、(SN1987A のように大きな出来事は除いて) ニュートリノ放射の直接観測にはまだ成功していない。

ところで、中性子は $\tau = 885.7 \pm 0.8 \text{ s}$ の半減期で崩壊する。それなのになぜ中性子は生き残っているのだろうか？ これは宇宙の温度がすぐに下がって $t \sim \text{数秒}$ で重水素の原子核が合成され、それがさらなる反応につながるためである。さらにそれに続く約 1000 秒の間には、ヘリウムやリチウムなどが合成される (表 2.1, 図 2.3)。

表 2.1 初期種族合成における代表的な反応のまとめ。

宇宙年齢 (s)	反応
< 1	$p + e^- \rightleftharpoons n + \nu_e, \quad n + e^+ \rightleftharpoons p + \bar{\nu}_e$
1-100	$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$
100-200	$p + n \rightleftharpoons D + \gamma$
200-1000	$D + n \rightarrow T + \gamma \quad \nearrow D + D \rightarrow {}^3\text{He} + n$
	$T + p \rightarrow {}^4\text{He} + \gamma \quad D + D \rightarrow T + p$
	$D + p \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma \quad T + D \rightarrow {}^4\text{He} + n$
	${}^3\text{He} + n \rightarrow {}^4\text{He} + \gamma \nearrow \quad {}^3\text{He} + D \rightarrow {}^4\text{He} + p$

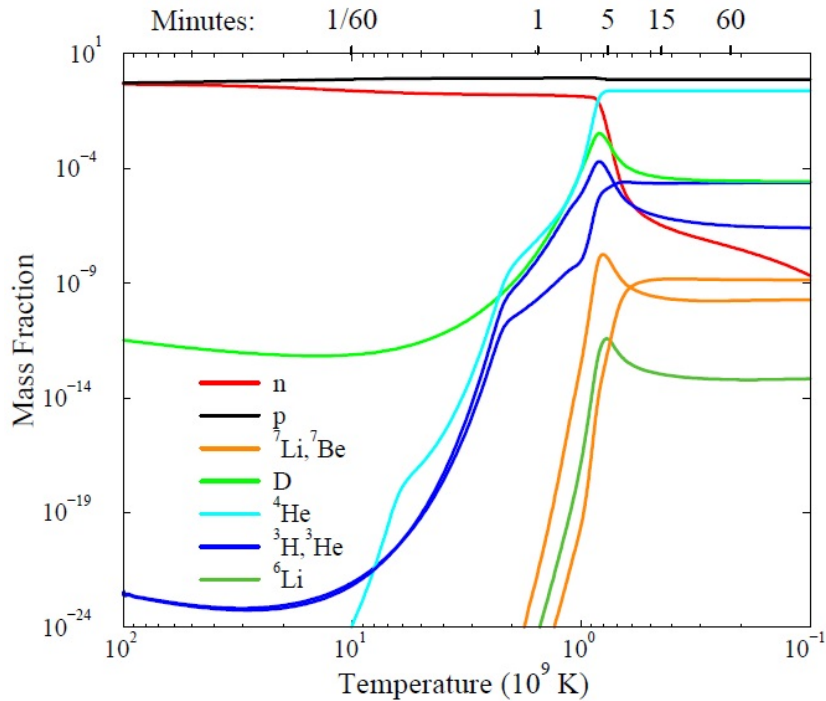


図 2.3 初期宇宙における種族合成の様子。横軸は宇宙年齢、縦軸は (質量) 存在比。

- ・宇宙マイクロ波背景輻射 (CMB) : 宇宙再結合のとき ($t = 38$ 万年, $z = 1090$) に発せられた光。宇宙のあらゆる方向から等方にやってくる。そのスペクトルは 2.725 ± 0.001 K の黒体輻射とほとんど完全に一致している。

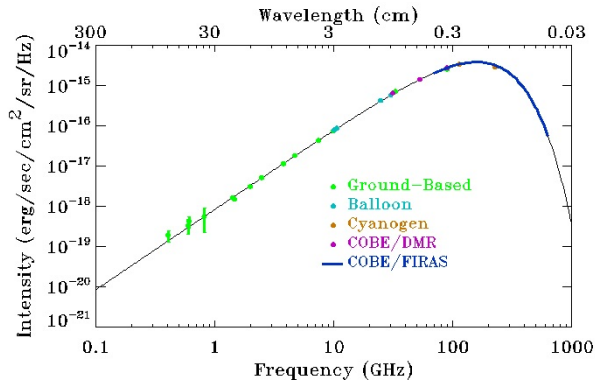


図 2.1 CMB のスペクトル。データ点が黒体輻射スペクトルの上に綺麗に並んでいる。

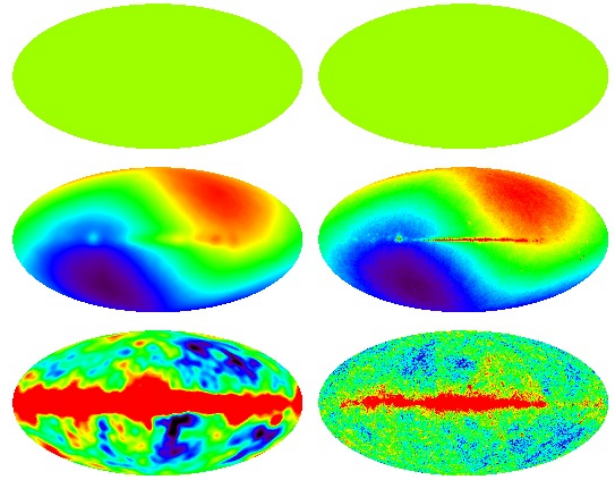


図 2.2 COBE (左) と WMAP (右) による CMB の温度分布。

- ・黒体輻射としての CMB :

$$\frac{1}{\tau_{\text{col}}} \propto R^{-6} \gg R^{-2} \propto \frac{1}{\tau_{\text{dyn}}}$$

より $1/\tau_{\text{col}}$ がすぐに卓越し、粒子は熱せられる $\Rightarrow$ 黒体輻射する。黒体輻射は宇宙膨張によって形を変えない :

$$B_{\nu'}(T)d\nu' = (1+z)^3 \frac{2h\nu'^3}{c^2} \frac{1}{\exp[h\nu'/k_B T'] - 1} d\nu' \quad (T' \equiv T/(1+z)).$$

- ・バリオン数生成問題: 物質 (バリオン) の個数が反物質 (反バリオン) の個数よりも多い。現在の非対称性 (バリオン : 反バリオン = $(1 + 10^{-9})$ 個 : 1 個) はインフレーション後のゆらぎの名残。その指標は

$$\eta \equiv \frac{n_b - n_{\bar{b}}}{n_\gamma} \quad \text{バリオンあたりのエントロピー。} \quad (2.5)$$

大統一理論 (GUT) が解決策の有力候補。

- ・freeze-out : 宇宙膨張率が $p \leftrightarrow n$ の反応率を上回ると相互作用が止まる。これに続いて初期種族合成が起こる。

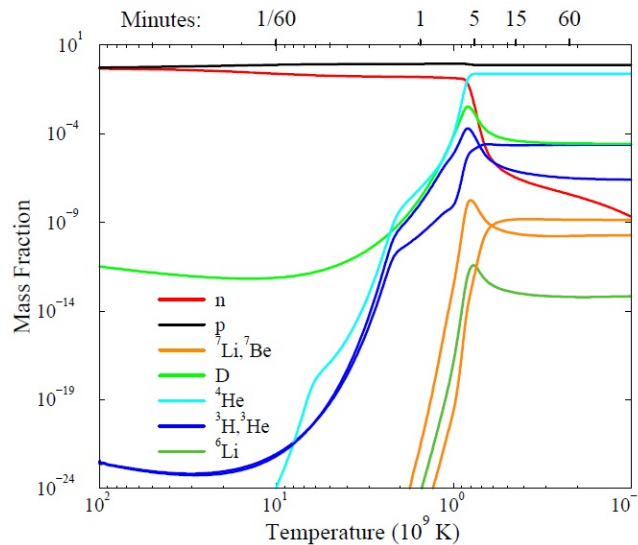


図 2.3 初期宇宙における種族合成の様子。横軸は宇宙年齢、縦軸は (質量) 存在比。

〈単語リスト〉

p.40

- disparate 「まったく異なる（ものを含む）」

p.41

- misnomer 「間違った名称」

p.42

- dielectric (adj.) 「誘電性の」 (n.) 「誘電体」

p.47

- reciprocal 「逆数」
- rewind 「～を巻き戻す、巻き取る」