

エポックⅡ：宇宙の晴れ上がり

～輻射と物質の時代の終わり & 暗黒時代の始まり（中編）

福江 純（大阪教育大学）

3. 宇宙の熱史

最初は粒子の説明に続けて、力の分離や物質の誕生を書いた方が流れがいいかと思っただが、物質の誕生をあらかじめ書いてみると、その前に、やはり宇宙の温度変化が必要なことがわかったので、ここで宇宙の熱史について、先にまとめておきたい。ここで「宇宙の熱史 (thermal history of the Universe)」というのは、宇宙の断熱膨張に伴う、物質と輻射の温度変化のことである。宇宙膨張が時空という入れ物の変化であるのに対し、その内容物の変化と言ってもいい。

3.1 時空構造の進化（おさらい）

膨張宇宙を記述する（アインシュタイン方程式から導いた）フリードマン＝ルメートル方程式のさまざまな解については、「エポックⅠ：宇宙の誕生」の後編で詳述した（本誌2007年9月号）。とくに宇宙の熱史について必要になるのは、宇宙のスケールファクターの時間変化である。といっても、ぼくも細かいことは忘れてしまったので、実際の宇宙に係わる基本部分だけおさらいしておこう。

まず、現在の宇宙年齢 t_0 、宇宙の膨張速度を表すハッブル定数 H_0 、そして開いた宇宙と閉じた宇宙の境界値となる宇宙の臨界密度 $\rho_{c,0}$ は、それぞれ、

$$t_0 = 137 \text{ 億年} \quad (1)$$

$$H_0 = 72 \text{ km/s/Mpc} \quad (2)$$

$$\rho_{c,0} = \frac{3H_0^2}{8\pi G} = 1.0 \times 10^{-29} \text{ g/cm}^3 \quad (3)$$

だった。さらに、宇宙の内容物の密度を臨界密度で規格化したものを密度パラメータと呼んだ。内容物には、輻射と物質（通常物質＋暗黒物質）とダークエネルギーがあって、それぞれの密度パラメータの現在の値は、

密度パラメータ

$$\Omega_0 \equiv \frac{\rho(t_0)}{\rho_{c,0}} = \frac{\rho_0}{\rho_{c,0}} \quad (4)$$

$$\Omega_{r,0} \sim 8.4 \times 10^{-5} \quad (5)$$

$$\Omega_{m,0} \sim 0.3 \quad (6)$$

$$\Omega_{\Lambda,0} \sim 0.7 \quad (7)$$

$$\Omega_0 = \Omega_{r,0} + \Omega_{m,0} + \Omega_{\Lambda,0} = 1 \quad (8)$$

程度だと考えられている。現在の輻射エネルギー密度の密度パラメータはほぼ0だが、より正確には、3K 宇宙背景放射（および相対論的ニュートリノ）などから、上記ぐらいの値になるようだ。

このようなわれわれの宇宙において、スケールファクター $a(t)$ の時間変化を順に追っていくと、以下ようになる。

1) インフレーション期

宇宙が量子状態だったプランク時間の直後、真空エネルギーか何かのせいで宇宙項が優勢となり、宇宙は指数関数的に超膨張した。

インフレーション解

$$a(t) \propto e^{\sqrt{\Lambda c^2/3} t} \quad (9)$$

2) 放射優勢期

現在の宇宙では輻射エネルギー密度は無視できるくらいに小さい。しかしインフレーション期が終わった直後、宇宙のごく初期には、

輻射エネルギー密度が物質エネルギー密度やダークエネルギー密度よりも卓越していた。そのような放射優勢宇宙のスケールファクターは時間の平方根に比例して大きくなった。

放射優勢宇宙

$$\frac{a}{a_0} = \sqrt{2\sqrt{\Omega_{r,0}}H_0t} \quad (10)$$

3) 物質優勢期

輻射エネルギー密度の密度パラメータはほぼ0に近いので、宇宙のごく初期以外では効いてこない。宇宙膨張が進むと物質エネルギー密度が他を卓越するようになる。そのような物質優勢宇宙ではスケールファクターは時間の2/3乗に比例して大きくなる。

物質優勢宇宙

$$\frac{a}{a_0} = \left(\frac{3}{2}\sqrt{\Omega_{m,0}}H_0t\right)^{2/3} \quad (11)$$

4) 加速膨張期

現在の宇宙では、正体は皆目わからないものの、ダークエネルギーと呼ばれる斥力として働くある種のエネルギーが支配的で、数学的には宇宙項が優勢な状態で、宇宙はふたたび指数関数的に加速膨張をし始めている。

ダークエネルギー優勢宇宙

$$\frac{a}{a_0} = e^{\sqrt{\Omega_{\Lambda,0}}H_0t} \quad (12)$$

3.2 移行時期の評価

宇宙の内容物のどれが卓越しているかによって、時空構造の変化の仕方は違ってくる。移行時期を見積もっておこう（表1参照；本誌2007年11月号49～50頁）。

まずインフレーション期から放射優勢宇宙へ移行した時期だが、インフレーションはプランク時間程度で起こったろうから、実質的にはプランク時間と考えていいだろう。

つぎに、放射優勢期から物質優勢期への移行時期だが、そのときのスケールファクター

は、エポックⅠの(84)式：

$$H_0t = \int_0^y \frac{dy}{\sqrt{\Omega_{r,0}\frac{1}{y^2} + \Omega_{m,0}\frac{1}{y} + \Omega_{\Lambda,0}y^2 + (1-\Omega_0)}} \quad (13)$$

（本誌2007年9月号41頁）で、分母の√の中の第1項（輻射エネルギー密度の寄与）と第2項（物質エネルギー密度の寄与）が等しくなる条件から、

$$\begin{aligned} y_{rm} &\equiv \frac{a(t_{rm})}{a_0} \\ &= \frac{\Omega_{r,0}}{\Omega_{m,0}} \\ &= \frac{8.4 \times 10^{-5}}{0.3} \\ &= 2.8 \times 10^{-4} \end{aligned} \quad (14)$$

のようになる。これを放射優勢期（あるいは物質優勢期）の解へ入れると、時刻としては、表1にあるように、

$$t = 47000 \text{ 年}$$

が出てくる（実際に入れてみたら80000年ぐらいになってしまったけど；；、標準的な値を挙げておく）。

最後に、物質優勢期から加速膨張期への移行時期のスケールファクターは、エポックⅠの(84)式で、分母の第2項（物質エネルギー密度の寄与）と第3項（宇宙項の寄与）が等しくなる条件から、

$$\begin{aligned} y_{m\Lambda} &\equiv \frac{a(t_{m\Lambda})}{a_0} \\ &= \left(\frac{\Omega_{m,0}}{\Omega_{\Lambda,0}}\right)^{1/3} \\ &= \left(\frac{0.3}{0.7}\right)^{1/3} \\ &= 0.75 \end{aligned} \quad (15)$$

となる。これを物質優勢期（あるいは加速膨張期）の解へ入れると、98億年ぐらいの値が

出てくる。

宇宙の熱史に関してとくに重要なのは、放射優勢期と物質優勢期の境目だ。

輻射の時代の終わりで物質の時代の始まりでもあるこの時刻を「等密度時」と呼んでいる。

等密度時 4万7000年

赤方偏移 3570

宇宙温度 9700K

なお、等密度時の宇宙の温度は、現在の宇宙背景放射の温度 2.7K に等密度時の赤方偏移 3570 をかけて得られる（後述）。なお、参考までに、

再結合時：24万年、1370、3700K

晴れ上がり時：38万年、1088、3000K
である。

3.3 断熱膨張に伴う温度変化

膨張の仕方（スケールファクターの時間変化）と移行時期がわかったので、これで宇宙膨張に伴う温度変化を考えることができる。

宇宙膨張のようす（スケールファクターの時間変化）がわかってしまえば、温度変化などの導出には相対論はもう要らない。後は、高校理系レベルの熱力学などの問題になってしまうのだ。

この段階で一番重要な仮定は、宇宙が、外界から完全に独立した「孤立系」だという点である。すなわち、宇宙の“外”などというものではなくて、“外界”との物質の出入りはなく、また熱やエネルギーの出入りもないという仮定だ。なお、物質の誕生や元素の生成などを念頭に置いた熱史では、放射優勢期から物質優勢期あたりを考えればいいので、伝統的なビッグバンモデルの範囲で扱える。ごく初期のインフレーション期や最近の加速膨張期は、宇宙項のために孤立系という仮定が成り立たないかも知れないが、宇宙の熱史ではとりあえず気にしなくていい。

以下で温度変化などを考えるときには、ハッブル定数や密度パラメータなどの具体的な数値は必要ないことが多い。そこで、スケールファクターの時間依存性だけ改めて書いておくと、放射優勢期と物質優勢期とでは、それぞれ、以下のような時間変化をする。

放射優勢宇宙

$$a(t) \propto t^{1/2} \quad (16)$$

物質優勢宇宙

$$a(t) \propto t^{2/3} \quad (17)$$

3.3.1 密度変化

まず、輻射エネルギー密度／物質エネルギー密度の時間変化を考えよう。宇宙は孤立系だと仮定したので、“外界”との間で物質の出入りはない。したがって、膨張する間も物質の総量は変わらない。そのとき、エポック I の(71)式あたりで示したように（本誌 2007年9月号40頁）、輻射エネルギー密度と物質エネルギー密度は、宇宙膨張と共に、それぞれ、以下のように変化する。

放射エネルギー密度

$$\rho_r(t) = \frac{a_0^4}{a^4(t)} \rho_{r,0} \quad (18)$$

物質密度

$$\rho_m(t) = \frac{a_0^3}{a^3(t)} \rho_{m,0} \quad (19)$$

前に述べたように物質エネルギー密度の変化は単純で、宇宙が膨張するにつれて、空間の体積はスケールファクターの3乗で増加するので、物質密度はその逆数で減少する。輻射エネルギー密度の方でスケールファクターの4乗が出てくるのは、光子数の密度がスケールファクターの3乗に反比例して希薄になることと、光子1個のエネルギーがスケールファクターに反比例して減少するためだ。

ここで、放射優勢期と物質優勢期のスケ-

ルファクターの時間変化を入れると、それぞれの時期での輻射エネルギー密度と物質エネルギー密度の時間変化は、以下のように表されることになる。

放射優勢宇宙

$$\rho_r(t) \propto t^{-2} \quad (20)$$

$$\rho_m(t) \propto t^{-3/2} \quad (21)$$

物質優勢宇宙

$$\rho_r(t) \propto t^{-8/3} \quad (22)$$

$$\rho_m(t) \propto t^{-2} \quad (23)$$

式だけ眺めても、わかるっちゃわかるのだが、折角なので、グラフにしてみた（図 15）。考えてみると、宇宙論の専門家にとっては式を見れば当たり前のことなので、図 15 のような“当たり前の”グラフは案外と描いてないかも知れない。

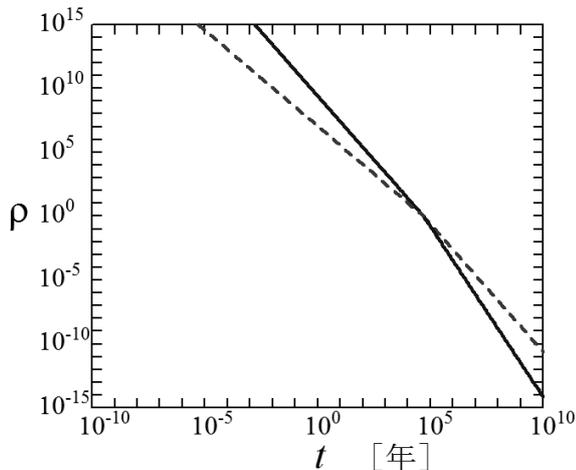


図 15 輻射エネルギー密度（実線）と物質エネルギー密度（破線）の時間変化
定義により、約 5 万年の等密度時に両者は等しくなる。

図 15 のグラフは、横軸が年で計った時間の対数、縦軸が等密度時の密度を単位とした密度の対数である。実線は輻射エネルギー密度で、破線が物質エネルギー密度を表している。約 5 万年の等密度時には両者は等しい（定

義）が、等密度時より以前では輻射エネルギー密度が物質エネルギー密度を凌駕しており（放射優勢期）、等密度時より以降は物質エネルギー密度の方が輻射エネルギー密度を卓越する。

ああ、推敲中に気づいたが、放射優勢期の輻射密度と物質優勢期の物質密度は、ともに、 t^{-2} で変化するから、両方の和は、結局、

$$\rho_r(t) + \rho_m(t) \propto t^{-2}$$

になる（図 15 の上側の線を結んだら、対数座標で傾きが -2 の直線になる）。

3.3.2 温度変化

続いて、熱史にとって重要な宇宙の温度変化を考えよう。宇宙は孤立系だと仮定したので、“外界”との間で熱の出入りはない。したがって、膨張は「断熱的 (adiabatic)」に起こると考えよう。

最初に、輻射温度と物質温度のスケールファクター依存性を出してみよう。まず輻射の方だが、もし輻射場が黒体放射で近似されるなら、そして実際にも宇宙背景放射で知られているように宇宙全体の輻射場では黒体放射はきわめていい近似なのだが、(24) 式のように輻射エネルギー密度は温度の 4 乗に比例する（ステファン・ボルツマンの法則）。それを逆に解いて、輻射エネルギー密度のスケールファクター依存性を考えると、結局、輻射エネルギー密度はスケールファクターに反比例することがわかる [(25) 式]。

赤方偏移を z として、スケールファクターが $(1+z)$ に反比例することを思い出せば、輻射場の温度が $(1+z)$ に比例することがわかる。あるいは、現在の温度 T_0 を用いると、

$$T(t) = T_0 (1+z)$$

と書くことができる。最近の加速膨張の影響は無視しているが、赤方偏移から輻射場の温

度を出すのに使える関係だ。

つぎに、物質の温度だが、輻射優勢期には、輻射と物質は完全な熱平衡にあるので、物質と輻射の温度は等しい。一方、物質優勢期では、物質と輻射の熱平衡はなくなり、物質は自分自身の断熱膨張で冷えていく。そのような断熱膨張においては、物質の温度と密度の関係は、比熱比を Γ として、(26) 式のようになる(ポワソンの式)。さらに、水素原子やヘリウム原子のような単原子分子では、比熱比 $\Gamma=5/3$ なので、物質密度のスケールファクター依存性を考えると、結局、物質温度は(27) 式のようになる。

輻射温度

$$\rho_r(t) \propto T_r^4(t) \quad (24)$$

$$\begin{aligned} T_r(t) &\propto [\rho_r(t)]^{1/4} \\ &\propto [a(t)]^{-1} \end{aligned} \quad (25)$$

物質温度

$$T_m(t) \propto [\rho_m(t)]^{\Gamma-1} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \Gamma &= \frac{5}{3} \\ T_m(t) &\propto [\rho_m(t)]^{2/3} \\ &\propto [a(t)]^{-2} \end{aligned} \quad (27)$$

ここまで出してみても自分でも驚いたが、輻射の温度と物質の温度のスケールファクター依存性はかなり違う。等密度時に同じ温度でスタートしたら、物質の方が輻射よりもはるかに早く冷えてしまうことがわかるだろう。

なお、ここらへんの時代の話で、“輻射”と言っているのは、宇宙全体に遍く存在するビッグバン残存光子のことで、3K 宇宙背景放射として現在の宇宙にも存在するものだ。これはいいとして。一方、“物質”と言っているのは、この時代の宇宙全体に遍く存在したであろう“一様なバリオン物質”のことであって、星や銀河に構造化してしまった物質ではない。後でも述べるが、この時代の“物質”と同じ様相のものは、いまの宇宙にはおそろくほとんど残っていない。

ここで、放射優勢期と物質優勢期のスケールファクターの時間変化を入れると、それぞれの時期での輻射エネルギー密度と物質エネルギー密度の時間変化は、以下のように表されることになる。

放射優勢宇宙

$$T_r(t) \propto t^{-1/2} \quad (28)$$

物質優勢宇宙

$$T_r(t) \propto t^{-2/3} \quad (29)$$

$$T_m(t) \propto t^{-4/3} \quad (30)$$

あるいは、 $t=$ 約 5 万年の等密度時の温度が $T=$ 約 1 万 K であることを使って、それぞれの変数を規格化すると、以下のように表すこともできる。

放射優勢宇宙

$$T_r(t) = 10^4 \left(\frac{t}{5 \times 10^4 \text{ yr}} \right)^{-1/2} \text{ K} \quad (31)$$

物質優勢宇宙

$$T_r(t) = 10^4 \left(\frac{t}{5 \times 10^4 \text{ yr}} \right)^{-2/3} \text{ K} \quad (32)$$

$$T_m(t) = 10^4 \left(\frac{t}{5 \times 10^4 \text{ yr}} \right)^{-4/3} \text{ K} \quad (33)$$

ここでやっと、エポック II の最初の図 1 が出てくるわけだ。この稿も分割して連載するので、図 16 に再掲しよう。

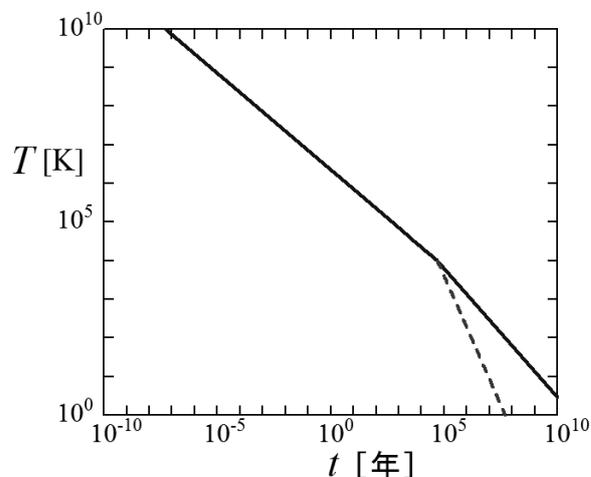


図 16 (説明は次ページ)

図 16 宇宙開闢時から計った時間（年）の関数として表した物質（プラズマ）および輻射（光）の温度（K）のグラフ

宇宙の晴れ上がりより少し前の等密度時（約 5 万年で約 1 万 K）までは、物質と輻射は熱平衡になっていて温度は等しく、共に時間の $-1/2$ 乗で減少する（実線）。等密度時以降は、輻射の温度は時間の $-2/3$ 乗で減少するが（上の実線）、物質の温度は時間の $-4/3$ 乗で減少する（下の破線）

なお、先にも書いたように、宇宙のごく初期や現在に近い加速膨張期では、宇宙項が効いているので、熱史は違っているはずである。また初代の星が形成されて宇宙が再電離した時期も、外部からは断熱でも内部の熱源（初代の星）があったことになるので、断熱近似は成り立たないと思う。

といった問題はあるが、まあ、現在まで以上の話が成り立つとして、(32) 式や (33) 式を延長してみよう。そうすると、現在の宇宙年齢 137 億年を (32) 式へ入れると、現在の輻射の温度として、2.4K となった。実際の 2.7K とは微妙に違うが、約 5 万年とか約 1 万 K などと数値を丸めているので、まあ、こんなものだ（実は、もう少し正確な数値でも試してみたが、あまり改善されなかった。やはり加速膨張などが効いているのか、それほど単純ではないようだ）。

また同様に、現在の物質の温度としては、0.00056K となった。輻射の温度の方はほぼ正しい値が出ているが、こちらの物質の“温度”はおそらくあまり意味はない。このとても低い温度は、等密度時に宇宙全体に一樣に存在していたであろうプラズマ物質が、等密度時以降も完全に一樣で断熱膨張したときの計算上の数値にすぎないからだ。

実際には、その後、物質の一部（多く？）は星や銀河などに凝集し、一部は銀河間ガス

として残り、分離構造化した。星はもちろん原子核反応によって高温状態になったし、銀河間ガスも星（初代の天体）によって熱せられて電離してしまった。したがって、現在の宇宙に存在する物質の温度は、天体や場所ごとに、上の計算上の数値とはまったく違うだろう。もしかしたら、星も銀河もほとんど存在しない宇宙の空虚な領域に原初のガスが残されていれば、その原初ガスの温度は 0.00056K ぐらいかもしれないが。

4. 力の分離と物質の誕生

最初に無色透明とは書いたが、そこに至るまで、38 万年ほどは、純白の時代を引きずっている。

時空の誕生、時空のインフレーション的膨張、そしてより緩やかなビッグバンの膨張といった、宇宙の時空構造の変化と並行して、入れ子入れ子に、力の分離や物質の誕生も起きていった。

宇宙が生まれて約 10^{-44} 秒後（プランク時間）、宇宙の大きさが 1000 分の 1cm ぐらいになったとき、現在の宇宙の巨視的な構造を支配している「重力」が生まれた。さらに約 10^{-36} 秒後、宇宙が 1cm ほどになったときには、原子核の中で陽子や中性子を結びつけている「強い力」が生まれた。さらに約 10^{-11} 秒後、宇宙が 100 天文単位ほどまで膨張したときに、中性子を崩壊させる「弱い力」と電荷をもった粒子の間に働く「電磁力」が生まれた（図 17）。こうして宇宙が膨張し相互作用の力が分化していく間に、陽子や中性子や電子などの素粒子ができていったが、100 秒後ぐらいに、陽子や中性子の一部は融合して、ヘリウムの原子核や重水素そしてリチウムなどの軽元素が合成された。

宇宙を構成している物質の変化について、もう少し詳しく述べていこう。基本的には、最初に超高温超高密度だった宇宙が、断熱膨

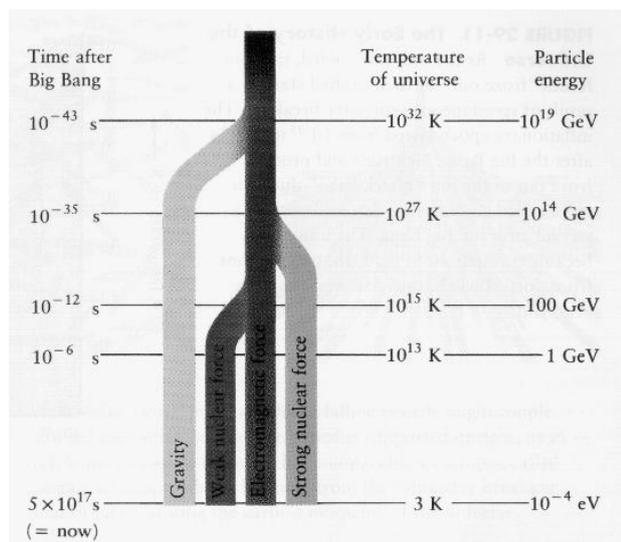


図 17 4つの力の分離

(出典：<http://ircamera.as.arizona.edu/NatSci102/NatSci102/lectures/eraplanck.htm>)

張によって温度が下がるにしたがい、どう変化するかを辿ることは、物質の温度をどんどん上げていけばどんな反応が起こっていくかを考えて、それを逆回しすればいい。

なお、以下では、時刻 t は宇宙誕生時以来の時間で、秒または年で計る。また物質（輻射）の温度 T (K; ケルビン) はしばしばエネルギー $(3/2)k_B T$ (eV; 電子ボルト) で測る (k_B はボルツマン定数)。換算としては、

$$1 \text{ eV} = 1.60219 \times 10^{-12} \text{ erg} = 7736.5 \text{ K}$$

になる。また、 $1 \text{ keV} = 10^3 \text{ eV}$ 、 $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$ 、 $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$ 、 $1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$ である。

4.1 重力と強い力の分離：第1の相転移

宇宙の誕生 ($t=0$; $T=\infty$) からプランク時間 ($t=10^{-44}$ 秒、 $T=10^{32}\text{K}=10^{19}\text{GeV}$) までは、量子重力理論（重力場の量子化）ができていないため、宇宙の状態を取り扱うことができない。

この最初期の時代は「プランク時代 (Planck Era)」と呼ばれることもある (図 18)。

プランク時間 ($t=10^{-44}$ 秒、 $T=10^{32}\text{K}=\infty$)

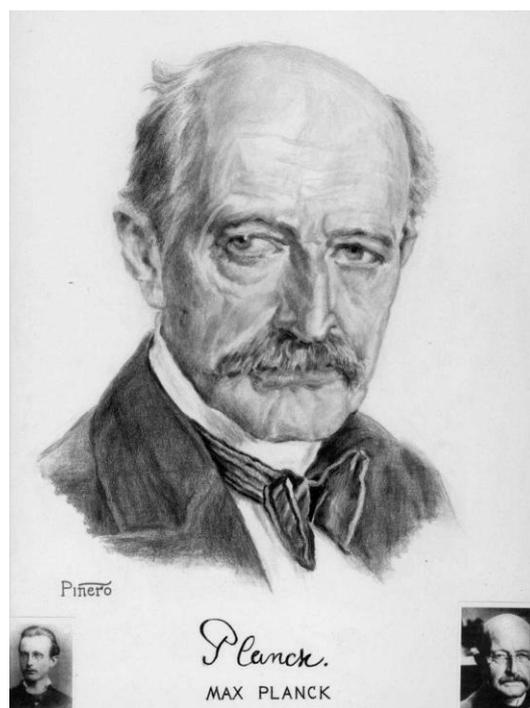


図 18 プランク (Max Planck ; 1858~1947)

ドイツの物理学者で、黒体放射を表すプランク分布を導いたり、量子力学の草創期に多くの重要な仕事をした。量子力学の創始者と呼んでもいいだろう。1918年のノーベル物理学賞を受賞している。写真はよく見るが、似顔絵というのが面白かった。出典先のホームページは初めてみたけど、科学者の伝記ページみたいで (es だからスペインかなあ、でもプエルトリコという地名も見えるし; いずれにせよ、全然読めない)、ダヴィンチ、ニュートン、ガリレオ、ダーウィン、フランクリン、テスラ、フェルミ、アイシユタイン、ハッブル、セーガンらもあった。

(出典：http://www.uam.es/personal_pdi/ciencias/depaz/adi/pinero.htm)

10^{19}GeV になって、重力が他の力（強い力、弱い力、電磁力）と分離する。別な言い方をすれば、これぐらいの超高エネルギー状態になると、重力など4つの力が区別できなくなるということである。

この重力の誕生を「第1の相転移 (phase transition)」と呼ぶ。

transition of the first kind)」と呼んでいる。アインシュタインの一般相対性理論が時空構造へ適用できるのは、このとき以降である。

第1の相転移の後、重力は分離したが他の3つの力はまだ同じであり、クォークも核子に閉じ込められておらずに自由に動いていて、電子・ニュートリノ・クォークは区別がつかない。この相転移の後の偽真空を、重力以外の3つの力を統一する理論を「大統一理論 GUT (the Grand Unified Theory)」と呼ぶことから、「大統一理論の真空」と呼ぶ。また重力が分離した以降、つぎの区切りまでの時期を「大統一時代 (GUT Era)」と呼ぶことがある。

4.2 強い力と弱い力の分離：第2の相転移

つぎに起こったのは、宇宙膨張に伴う温度の急激な低下によってグルーオンが生まれ、宇宙が1万倍くらい冷えたとき ($t=10^{-36}$ 秒、 $T=10^{28}\text{K}=10^{15}\text{GeV}$)、強い力（色の力）と電弱力（弱い力+電磁力）が枝分かれしたことだ。このときにクォークが生まれバリオン数が発生した。

この強い力の誕生を「第2の相転移 (phase transition of the second kind)」とか、大統一理論の相転移と呼んでいる。

第2の相転移の後も、電磁気力と弱い力はまだ同じで、電子の質量は0で、電子とニュートリノは区別がつかない。この相転移の後の偽真空を「電弱相互作用の真空」と呼ぶ。また、これ以降、つぎの区切りまでを、「電弱時代 (Electroweak Era)」と呼ぶことがある。

なお、上で「バリオン数 (baryon number)」という量は、

$$\begin{aligned} B &\equiv N_b - N_{\bar{b}} \\ &\equiv \frac{N_q - N_{\bar{q}}}{3} \end{aligned} \quad (34)$$

のように定義される量で、ずうーっと以前は、

バリオンの個数から反バリオンの個数を引いて定義していたが、バリオンが3つのクォークから構成されることが確定してからは、クォークの数から反クォークの数を引いたものを3で割ったものとして定義されるようだ。

このバリオン数は、素粒子反応においては、レプトン数や電荷や色荷などと共に、“保存”される量である。ただし、“保存”と“”がつくのは、現在の宇宙が物質できていて反物質が存在しないためには、バリオン数を保存しない素粒子過程があったはずだからだ。

すなわち、クォークが生まれたころの超高温の時代には、クォークと反クォークが対消滅して（2個の）光子になったり、2個の光子が衝突してクォーク・反クォーク対生成が起こったりして、物質（クォーク）と輻射は完全に熱平衡になっていた。そのころはクォーク（物質）と反クォーク（反物質）は等量あったと考えられる。したがって、バリオン数は0だったはずである。もし常にバリオン数が保存されるなら、現在の宇宙でも物質と反物質は等量存在しているはずである。小惑星の中には反物質小惑星もあるんだ、などという話もあったが、マーカーが対消滅しなかったことをみると、小惑星イトカワは通常の物質だったようだ。いまの宇宙には、反物質は存在しないように見える（太陽コロナや超新星残骸やブラックホール周辺では、電子と陽電子の対生成はよく起こる）。

とまれ、現在の宇宙には物質しかないのだから、どこかでバリオン数の保存を破る素粒子反応が存在したと考えられるのだ。そのような素粒子反応を起こす力の介在粒子として、「X粒子 (X boson)」という名称が与えられているが、名前を付けても中身がわかっているわけではないようだ。

$$n_b : n_{\bar{b}} : n_\gamma \sim 1 : 0 : 10^9 \quad (35)$$

$$n_b : n_{\bar{b}} : n_\gamma \sim (10^9 + 1) : 10^9 : 10^9 \quad (36)$$

ところで、現在の宇宙では、バリオンの個数密度と 3K 光子の個数密度は、(35) 式のように約 10 億倍異なると見積もられている。上のような宇宙初期の時代には、バリオンと反バリオンと光子はほぼ等量存在したはずなので、おおざっぱには、(36) 式のような比率だったと推定される。すなわち、宇宙初期には、10 億個の反バリオンに対して、10 億 + 1 個のバリオンが存在するという、ほんのわずかな非対称性があり、10 億個同士は対消滅して、残りのほんのわずかなバリオンでもって、今日の物質宇宙になったと考えられるのだ。

なお、バリオン数を保存しない過程があると（素粒子の大統一理論 GUT）、10 の 37 乗年後に、陽子が陽電子と中性 π 中間子に崩壊する、いわゆる「陽子崩壊 (proton decay)」が起こる。超新星 1987A のニュートリノをセレンディップに捉えたカミオカンデの目的は、そもそも陽子崩壊の検証だった。陽子の崩壊はいまのところ観測されていない。

4.3 弱い力と電磁力の分離：第 3 の相転移

さらに宇宙膨張によって冷却が進むと電子が生まれ、ずっとずっと時代は下がり、とはいっても、まだ 1000 万分の 1 秒ぐらいのとき ($t=10^{-11}$ 秒、 $T=10^{15}$ K = 200 GeV)、電磁力と弱い力が分離した。

この電磁力および弱い力の誕生を「第 3 の相転移 (phase transition of the third kind)」と呼ぶ。電磁力と弱い力を統一したのがワインバーグ＝サラム理論であることから、ワインバーグ＝サラム相転移と呼ぶこともある (図 19)。

この時点で、現在知られる 4 種類の力（重力、強い力、弱い力、電磁気力）はすべてが出揃ったことになる。また、このころの宇宙の主な構成粒子は、質量が 100 GeV 程度以下の素粒子（レプトン、クォーク、グルーオン、



図 19 ワインバーグ (Steven Weinberg; 1933~) アメリカの物理学者で、電磁力と弱い力を電弱理論として統一した業績で、パキスタンの物理学者サラム (Abdus Salam) およびアメリカの物理学者グラショウ (Sheldon Glashow) と共に、1979 年のノーベル物理学賞を受賞した。

(出典: <http://personales.ya.com/casanchi/ref/weinberg.jpg>)。

光子) である。第 3 の相転移の後に、真空は現在の「真真空」になった。また、素粒子が一通り揃ったので、これ以降から元素生成が起こり始める 100 秒くらいまでの時期を「粒子時代 (Particle Era)」と呼ぶことがある。

4.4 クォークがハドロンに：第 4 の相転移

さらに温度が下がり、1 万分の 1 秒ぐらいになると ($t=10^{-4}$ 秒、 $T=1$ 兆 K = 100 MeV)、それまで自由に動いていたクォークとグルーオンは、核子や中間子などハドロンの中に閉じ込められ、クォークからハドロン (バリオン + メソン) への変換が起こる。

このハドロンの形成が「第 4 の相転移 (phase transition of the fourth kind)」である。また量子色力学 QCD から QCD 相転移とも呼ぶ。

この QCD 相転移によって、宇宙に存在する物質は、レプトンとしては、大量の電子 (お

よび陽電子)、3種類のニュートリノ(および反粒子)、またバリオンとしては、わずかな陽子と中性子、そして大量の光子からなる、比較的単純なプラズマが残っている。

先にも触れたように、この時代よりも前に、陽子の大部分は反陽子と対消滅し、10億個に1個ぐらいの割合で陽子が残り、反陽子はすべて消滅してしまっている。

4.5 レプトンの凍結と消滅

ビッグバンから約100分の1秒後、宇宙の温度が約1000億Kになったとき($t=10^{-2}$ 秒、 $T=1000$ 億K=10MeV)、素粒子反応のスープからミューニュートリノ ν_μ が分離する。そして約3秒後、温度約100億Kで($t=3$ 秒、 $T=100$ 億K=1MeV)、電子ニュートリノ ν_e が分離する。この段階でビッグバンの高エネルギーファイアボールからニュートリノは分離し、ニュートリノの粒子数は“凍結”した。そしてその後の“低温の”宇宙では、いまにいたるまで、ニュートリノは物質とはほとんど相互作用しない粒子として振る舞うようになるのである。

そして約100秒後、約40億Kのとき($t=100$ 秒、 $T=40$ 億K=511keV)で、電子と陽電子が対消滅し、光(エネルギー)になってしまう。

電子(陽電子)の静止質量エネルギーは511keVなので、高温プラズマの温度が511keV(約40億K)を超えると、光子と光子の衝突や他の粒子間の衝突で、容易に電子と陽電子が対生成されるようになる。そして対生成された電子と陽電子は対消滅するので、結局、電子・陽電子対と光子は熱平衡になる。このような現象は、現在の宇宙でも、ブラックホールの周辺など高エネルギー領域ではいつも起こっていることだ(図20)。

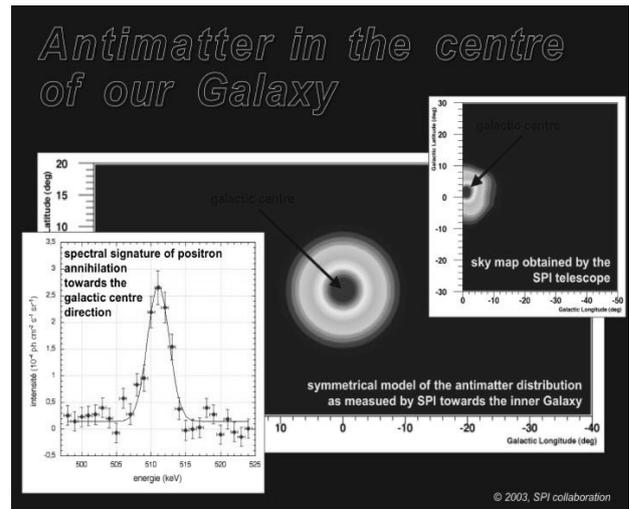


図20 INTEGRALガンマ線観測衛星で撮像された銀河系中心の電子陽電子対消滅源と511keVの電子陽電子対消滅スペクトル線(出典：http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/objects/heapow/archive/normal_galaxies/wmd_integral.html)

逆に、宇宙初期では、ファイアボールの温度が約50億Kという電子・陽電子対生成の閾値温度より少し下がってしまうと、もう電子・陽電子対生成は起こらなくなり、熱平衡から離れて、対消滅のみしていくのである。

この直後、元素合成が始まるが、それは次節で扱おう。

4.6 ニュートリノと光子の個数

その前に、ここでニュートリノ(と光子)の個数について少し触れておこう。上で書いたように、宇宙の温度がニュートリノの静止質量エネルギー(ミューニュートリノは約10MeV、電子ニュートリノは約1MeV)まで下がった段階で、素粒子反応の熱平衡スープからニュートリノは分離し、その個数は“凍結”する。

光子(エネルギー)と素粒子が完全に熱平衡になっているときは、共に同じ温度の熱分布になっていて、“比較的”簡単な式で表すこ

とができる。すなわち、ニュートン力学的な古典粒子だと「マクスウェル=ボルツマン分布 (Maxwell-Boltzmann distribution)」になるし、量子力学的素粒子だと、パウリの排他律にしたがう「フェルミ=ディラック分布 (Fermi-Dirac distribution)」またはパウリの排他律にしたがわない「ボース=アインシュタイン分布 (Bose-Einstein distribution)」となる。

さて、光子はボース粒子で、ボース=アインシュタイン分布の一種である「プランク分布 (Planck distribution)」すなわち「黒体放射 (blackbody radiation)」になる。一方、ニュートリノはフェルミ粒子なので、フェルミ=ディラック分布になる。分布を決めるパラメータは、温度 (と化学ポテンシャルと呼ばれるモノ) だけである (それで宇宙の熱史においては温度がとても重要になるのだ)。具体的な分布 (いろいろなエネルギーをもった粒子の個数分布) の式は書かないが (書けない? が)、分布がわかれば、その粒子の個数密度やエネルギー密度を計算することができる。

ここで「個数密度 (number density)」は、空間の単位体積に存在する (いろいろなエネルギーをもった) 粒子の個数である (単位は、個数/cm³)。一方、「エネルギー密度 (energy density)」は、その粒子の静止質量も含めた単位体積あたりの平均的なエネルギーである (単位は、erg/cm³)。個数密度に (静止質量エネルギーも含めた) 粒子の平均的なエネルギーをかけたものがエネルギー密度だと考えてよい。

で、実際にどれくらいになるかだが、まず光子についてはプランクの式から、個数密度とエネルギー密度は、それぞれ、

$$n_\gamma = 16\pi\zeta(3) \left(\frac{k_B T}{hc}\right)^3 \sim 60.42 \left(\frac{k_B T}{hc}\right)^3 \quad (37)$$

$$\rho_\gamma c^2 = 48\pi\zeta(4) \left(\frac{k_B T}{hc}\right)^3 k_B T \sim 2.700 k_B T n_\gamma \quad (38)$$

のようになる。ここで、 $\zeta(3)$ と $\zeta(4)$ はリーマンのゼータ関数と呼ばれるもので、具体的には、

$$\zeta(3) \sim 1.202$$

$$\zeta(4) = \frac{\pi^4}{90} \sim 1.082$$

という値をもつ。上の (37) 式と (38) 式では、個数密度が温度の 3 乗に比例し、エネルギー密度が温度の 4 乗に比例することと、個数密度に平均的なエネルギー ($2.7 k_B T$) をかけたものがエネルギー密度になっている点に注意して欲しい。

なお、エネルギー密度にゼータ関数を入れて (38) 式を書き直すと、

$$\rho_\gamma c^2 = a T^4 \quad (39)$$

$$a = \frac{8\pi^5 k_B^4}{15c^3 h^3} \quad (40)$$

という、黒体放射でよく出てくる表式に書き直すことができる (a は放射定数)。

また現在の宇宙に存在する 3K 宇宙背景放射の光子の場合は、(37) 式や (38) 式の温度に 2.7K を入れて値を計算すると、

$$n_\gamma = 411 / \text{cm}^3 \quad (41)$$

$$\rho_\gamma = 4.17 \times 10^{-13} \text{ erg/cm}^3 \quad (42)$$

となる。

つぎにニュートリノの方だが、こいつが、1、2 週間探したものの、手元の数冊の本やネットなどで見つけることができなかつた。

結果だけ書くと、ニュートリノの個数密度は 3K 宇宙背景放射光子の個数密度の

$$3/11$$

になるようだ。ニュートリノは 3 種類あるので、ニュートリノ全部では、9/11 倍となる。あるいは、単位体積あたりに、

$$n_\nu = 336 / \text{cm}^3 \quad (43)$$

だけの凍結ニュートリノが存在することになる。人間の体積あたりにすれば、数千万個もの残存ニュートリノが体内に存在することになるだろう。

もちろん、ニュートリノの個数が凍結したファイアボール直後の時代には、光子もニュートリノも 10 の 30 乗倍くらい個数密度が高かったが、その比率（3/11）は凍結直後から現在まで変わっていない。

時刻 1 分頃(温度 10⁹K)には中性子と陽子から作られた重水素が分解されずに残るようになり、それらが核融合反応を起こして、ヘリウム、リチウム、ベリリウムなどの軽い原子核が合成されはじめる。なお、この頃はまだ原子核だけであり、原子としての形は整って

いない。宇宙はプラズマに満たされた状態となるが、元素合成については、次回に。

・・・つづく・・・

参考文献

福江 純 (2005) 『100 歳になった相対性理論 -アインシュタインの宇宙遺産-』、講談社.

バーバラ・ライデン (2003) 『宇宙論入門』(牧野伸義 訳)、ピアソン・エデュケーション.

Gerhard Borner (1993) “The Early Universe”, Springer-Verlag.

福江 純 (大阪教育大学)