

Introduction to Cosmology 2nd Edition

C1SB2064 辻 勇吹樹

2023 年 12 月 21 日

From 9.5 Baryon-Antibaryon Asymmetry[1]

1 ビッグバン元素合成はとんでも現象か

9.2 節での中性子と陽子が同じだけ存在していた $t \sim 0.1\text{s}$ での温度 $T \approx 3 \times 10^{10}\text{K}$ や、9.3 節での重水素の核融合が起きた $t \sim 200\text{s}$ での温度 $T \approx 7.6 \times 10^8\text{K}$ は非常に高温である。しかし、ビッグバンの直後しか生み出せないような温度というわけではなく、例えば大質量星が最後に中心で ^{56}Fe のコアを作り出すのは $5 \times 10^9\text{K}$ に達したときである [4]。この温度を当時の光子のエネルギーに換算すれば $2.7kT \approx 0.18\text{MeV}$, 7.0MeV となる。これも X 線治療と同程度であるようである。この温度やエネルギーを宇宙全体で引き起こしていたことはとんでもないことだが、スケールを小さくすれば今の宇宙に存在し、人工的に作り出すことさえできている。そうして実際に再現することによってビッグバン元素合成の理解は進んでいる。

一方でバリオン-光子比 η やバリオンと反バリオンの比には謎に満ちた強い偏りが見られる。反バリオンについて今までの章であまり触れてこられなかったが、例えば陽子は uud 、反陽子は $\bar{u}\bar{u}\bar{d}$ のクォークで構成される。u はアップクォークで $2e/3$, d はダウンクォークで $-e/3$ の電荷を持ち、 \bar{u}, \bar{d} はそれぞれの -1 倍の電荷を持つ。クォークと反クォークの反応は $\gamma + \gamma \rightleftharpoons q + \bar{q}$ で記述され、もし反物質でできた銀河があれば物質と衝突したときに強いガンマ線が一带を飛ぶことになる。そのような検出はなく、観測から現在は反粒子に比べて粒子が圧倒的に少ないと考えられている。

しかし今まで見てきた理論で反粒子の存在を押さえつけるような反応はなく、特に宇宙が 1 兆度を超えるような温度だったときは上の反応でクォーク、反クォークの対生成と対消滅が絶えず行われていたと考えられている。「クォークのスープ」とも呼ばれるよ

うに、バリオンの中に閉じ込められずにクォークや反クォークが自由に飛び回っていて、アップやダウン、粒子や反粒子や光子はほぼ同数だけ存在していたことは想像に難くない。ここから現在の $n_\gamma \gg n_{bary} \gg n_{antibary}$ という状態を引き起こすためには、実はほんの少しの個数の非対称があればよい。スープでいられないほどに温度が下がってくると対生成が行われなくなり、残った粒子と反粒子は対消滅を起こす。クォークが 8 億 3 個、反クォークが 8 億個あったとすればそこから 16 億個の光子が作られる。クォークは 3 個だけ残り、反クォークは消えてしまう。そうすればバリオン-光子比 η はおよそ現在の値である 6×10^{-10} となり、反クォークが存在しないことにも合理性を与える。したがって現在、謎に包まれたバリオン-反バリオン-光子の比に大きく偏りが見られている問題はほんのわずかのバリオン-反バリオンの比のずれによるものと考えられる。前の章で「ゆらぎ」の話もしたことからここでもそのようなズレはあっても良いように思われるが、それを理論的に構築するにはまだ至っていない。

2 Sakharov の 3 条件

「宇宙論 I: 宇宙のはじまり [3]」「ワインバーグの宇宙論: ビッグバン宇宙の進化上 [2]」を参考にしている。1967 年にサハロフは粒子-反粒子の比が釣り合っていないために必要な 3 つの条件を提示している。

- 1. バリオン数、レプトン数の保存の破れ
- 2. C, CP 対称性の破れ
- 3. 熱の非平衡状態

それぞれについて詳細を見た後、実際にこの 3 条件を満たす理論について触れる。

1 は自明であるが、インフレーション後に粒子と反粒子が同数存在していたところから、何らかの反応によってその保存が破れたと考えられている。

2 は簡単な例を見よう。1 で述べられるようなバリオン数が破られる反応が起きたとする。この反応を簡単に $A \rightarrow B$ としてバリオン数が増えるとする。もし C 対称性があったとすればその反応にかかわる粒子をすべて C 変換した反応も同じように起こることになる。これは $A^C \rightarrow B^C$ と書けるのでバリオン数は先程の反応と同数だけ減ることになる。それでは全体としてバリオン数が変わらないので C 対称性は破れていることになる。これは同様に CP 対称性でも成り立つ。(CPT は理論的に対称性を持っており、T は宇宙膨張から破れている。)

3 は熱平衡状態では先程のバリオン数を変える反応の逆反応も起こることになるので熱

平衡ではいけないことになる。また熱平衡状態での分布関数 n_x は

$$n_x dp = g_x \frac{1}{h^3} \frac{4\pi p^2 dp}{\exp\left\{(\sqrt{p^2 + m_x^2} - \mu_x/kT) \pm 1\right\}} \quad (1)$$

で与えられることを 8 章の非相対論における計算から発展して考えることができる。粒子と反粒子の縮退度や質量は同じであり、熱平衡状態では双方向の反応が同じだけ起こるので化学ポテンシャルは双方向の反応でゼロになる。バリオン数が変化する場合粒子の種類も変化しているので結局全ての粒子で化学ポテンシャルがゼロでなければならない。したがって分布関数は同じ形になり同じ量だけ生成されることになる。

この 3 条件を揃えた理論は、例えば大統一理論やワインバーグ＝サラム理論、超対称性理論などから提示されている。大統一理論からのアイデアを簡単に述べると、重い粒子が崩壊したときに C, CP 対称性の破れのために粒子と反粒子の崩壊比が異なる状態を作り出せるというものである。考えはシンプルだが、重い粒子を作り出すだけの高温の状態はインフレーション後には難しい。いずれにしてもバリオン-光子比 η を予言できればその理論の信憑性が高まるが、今のところはまだ解決されていない。

表 1 ビッグバン元素合成から宇宙の晴れ上がりまで

時間	温度	光子のエネルギー	現象
0.1s	$3 \times 10^{10}\text{K}$	10MeV	$\gamma + \gamma \rightleftharpoons e^- + e^+$ $n + \nu_e \rightleftharpoons p + e^-$ $n + e^+ \rightleftharpoons p + \bar{\nu}_e$
0.8s	$1.5 \times 10^{10}\text{K}$	3.4MeV	$n_p > n_n$
1.0s	$9 \times 10^9\text{K}$	3MeV	freezeout time $n_n/n_p \approx 0.2$
200s	$7.6 \times 10^8\text{K}$	0.18MeV	重水素合成 $n_D \approx n_n$
1000s	$3 \times 10^8\text{K}$	0.3MeV	ビッグバン元素合成の終わり He, Li の生成
		赤方偏移 z	
0.05Myr	9390K	3440	等密度時 a_{rm}
0.25Myr	3760K	1280	再結合 $n_p = n_H$
0.37Myr	2970K	1090	晴れ上がり $\Gamma = H$

参考文献

- [1] Barbara Ryden. *Introduction to Cosmology*. Cambridge University Press, 2 edition, 2016.
- [2] Steven Weinberg and 英一郎 小松. ビッグバン宇宙の進化. Number 上 in ワインバーグの宇宙論. 日本評論社, 2013.
- [3] 二間瀬 敏史. 宇宙論 *I*(シリーズ現代の天文学第 2 巻). 日本評論社, 2007.
- [4] 定金 晃三. シリーズ 現代の天文学 第 7 巻 恒星. 日本評論社, 2009.