

新たな宇宙創成

— 宇宙の2大謎を解き明かす —

河野 誠公 著

はしがき

等方かつ一様な宇宙におけるアインシュタイン重力場の方程式に基づく宇宙膨張の動力学と天体観測結果により、加速膨張する宇宙が描かれる。宇宙を構成する3つの要素である真空エネルギー、冷たい物質及び放射物質の各エネルギー密度の宇宙に占める割合が得られる。全宇宙の約3/4を真空エネルギー（ダークエネルギー）が占め、残る1/4の大半を冷たい物質が占める宇宙像が得られた。マイクロ波背景放射の観測により宇宙の等方性が確認され、冷たい物質の内、観測される天体（星や銀河）を構成するバリオン物質はその1/5にも満たず、残る4/5以上を暗黒物質（ダークマター）が占めることも明らかとなってきた。

更に、宇宙を構成する各物質エネルギー密度の一次の摂動を扱うことで、銀河や星形成の由来となる宇宙の一様性と等方性からのずれ（ゆらぎ）の進化を調べることができる。摂動の方程式解とマイクロ波背景放射の温度ゆらぎの観測結果との対比により、ダークエネルギーとダークマターの宇宙に占める割合が再確認された。

このように加速膨張する宇宙像が確かなものとなってきたが、一方で得られた真空エネルギー密度と素粒子論で扱う真空期待値との間に天文学的な大きさの違いがあること、ダークマターとは何か、未知の粒子なのかといった大きな謎が生じている。

本書では、観測の未だ届かない放射優勢期の始まる以前の宇宙に着目し、新たな真空の概念の導入等により2つの大きな謎の解明を試みる。本書の前半（第1章～第3章）では、スピン空間（真空）からの4次元宇宙空間の形成を論じ、その4次元宇宙空間へ真空エネルギーが解放される過程で既知の全ての素粒子が生成され湧き出してくる新たな宇宙創成期を描いた。第1章ではこの宇宙のはじまりの描像の中でダークエネルギーの謎の解明を図った。4次元宇宙空間の元となる真空と4次元宇宙空間自体の真空の2つの真空を考えることで素粒子論の真空期待値が導けることを見出した。第3章では真空エネルギーが解放されるいわゆるインフレーション期から

放射優勢期への移行期を考え、全ての素粒子の中で最初に平衡状態から離脱する t -クォークが地平線を越えダークマター由来の候補となり得ることを新たに見出した。

本書の後半（第4章～第7章）では、「ワインバーグの宇宙論」^{1),2)}に則し、従来の宇宙論を私なりに簡潔にまとめ、前半部分と矛盾なくつながることを確認した。第4章では、第3章で論じた t -クォーク、Higgs, W ボソンを除く素粒子が放射優勢期に熱平衡状態から脱する過程を1つ1つ確認した。第6章ではダークマターの摂動が地平線の内側へ戻る解を確認し、 t -クォークがダークマター由来の候補として矛盾がないかを確認した。第5章では銀河や星の材料となる元素が生成する平衡期の過程を、最終章の第7章ではダークマターとバリオン物質のゆらぎの成長が銀河の形成へ発展する過程を簡潔にまとめ、本書として宇宙創成から銀河形成までの過程を一通り読み通せるようにした。

本書の執筆に当たり、「ワインバーグの宇宙論」を常に片手に宇宙論を学びつつかつ参照させていただいた。また、第2章で展開した素粒子生成の議論の出典となる「標準モデルを超える新たな素粒子論」^{3),4)}の執筆においても「ワインバーグの場の量子論」を幾度となく参照させていただいた。これらの本は私の素粒子論と宇宙論の真の先生であった。S.ワインバーグ教授の数々の偉大な功績に心より感謝致したい。

2015年11月

河野 誠公

目 次

第1章 スピン空間(真空)から4次元宇宙空間の形成	1
1-1 時間軸の出現と膨張空間	
1-2 2つの真空とダークエネルギー (命題1)	
第2章 真空エネルギーの解放と素粒子の生成	6
2-1 4次元ローレンツ対称性とスピノール粒子	
2-2 スカラー場 (Higgs 粒子) の生成	
2-3 物質粒子 (3世代クォーク, レプトン) の生成 (命題2) 第3世代レプトンスピノール表現の変則次元	
2-4 ベクトルボソン(γ , W ボソン, グルーオン)の生成	
2-5 計量場の生成	
第3章 真空エネルギー解放期から放射優勢期へ	19
3-1 真空エネルギー解放期 (インフレーション期)	
3-2 真空エネルギー密度の摂動解	
3-3 熱力学的法則の適用による遷移時間の導出	
3-4 地平線を超えるtクォークとダークマター候補	
第4章 放射優勢期の始まり	26
4-1 bクォーク, τ 粒子の熱平衡期	
4-2 クォーク-反クォーク熱平衡状態から核子の生成	
4-3 ニュートリノ μ , e電子の熱平衡期	
第5章 平衡期の始まりから物質優勢期へ	31
5-1 元素合成の始まり	
5-2 再結合と最終散乱時の温度	

第6章	ダークマター，バリオン物質のゆらぎの成長	35
6-1	宇宙論的ゆらぎの運動学的理論	
6-2	非断熱解（長波長領域）	
6-3	非断熱解（短波長領域）	
第7章	ダークマター，バリオン物質収縮による銀河の形成	45
7-1	再結合後の線形近似摂動論	
7-2	銀河を囲むハローの形成	
参考文献		53
付録A	真空エネルギー密度 ρ_v の推定	55
付録B	スピノール代数と超対称代数	59
付録C	11次元スピノール表現の構成	64
付録D	古典近似によるアインシュタイン重力場の導出	65
付録E	マイクロ波背景放射の異方性観測との対比結果	75

第1章 スピン空間(真空)から4次元宇宙の形成

1-1. 時間軸の出現と膨張空間 *)

$n+1$ 個の2次元スピン空間 S_i で構成される $(2n+2)$ 次元スピン空間を全ての源の「真空」と定義し以下に表現する。

$$S_{VAC} \subseteq S_0 \otimes S_1 \otimes \cdots \otimes S_n \quad (1-1)$$

各2次元スピン空間 S_i は実軸と虚軸とで2次元空間を張る。まず、1つの2次元スピン空間 $S_i(x_i, it_i)$ の実軸 x_i に対する鏡映 $S_i'(x_i, it_i')$ を考える。

$$S_i' \begin{pmatrix} x_i \\ it_i' \end{pmatrix} \otimes S_j = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_i \\ it_i \\ (S_j) \end{pmatrix} = S_i' \begin{pmatrix} x_i \\ -it_i \end{pmatrix} \otimes S_j \quad (1-2)$$

ここに、空間 S_i は他の2次元スピン空間 S_j ($j \neq i$) と直積で結合しているので、その結合を $\otimes S_j$ で表現した。

次に元の空間 $S_i(x_i, it_i)$ と鏡映後の空間 $S_i'(x_i, -it_i)$ の x_i 軸対称の合成 (内積: \circ) を考える。(図1-1)

$$S_i(x_i, it_i) \circ S_i' \begin{pmatrix} x_i \\ -it_i \end{pmatrix} = S_i'' \begin{pmatrix} x_i \\ ti^2 \end{pmatrix} \equiv S_i'' \begin{pmatrix} x_i \\ T_i \end{pmatrix} \quad (1-3)$$

ここに、 $T_i \equiv ti^2 \geq 0$

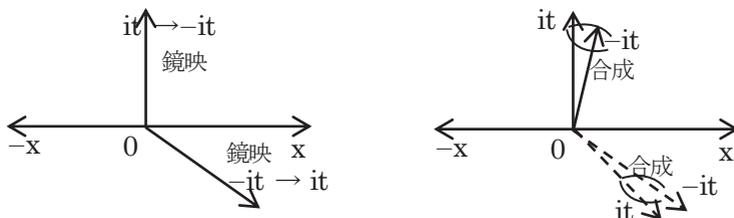


図1-1 x_i 軸対称の鏡映と合成

1つの2次元スピン空間 $S_i(x_i, it_i)$ の虚軸: it_i の反転対称性が破れ、実の時間軸 T_i が現れたものと考え、時間 $T_i \geq 0$ の進行に伴い膨張する1次元空間 x_i が現れる。

同様に、3次元の膨張空間を得るために仮に S_1, S_2, S_3 の3つの2次元スピン空間に対して (1-2), (1-3)式で表現される各虚軸の反転対称性の破れと実の時間軸の出現を仮定する。

$$S_1 \otimes S_2 \otimes S_3 \otimes S_j$$

$$\Rightarrow S_1'' \left[\begin{array}{c} x_1 \\ T_1 \end{array} \right] \otimes S_2'' \left[\begin{array}{c} x_2 \\ T_2 \end{array} \right] \otimes S_3'' \left[\begin{array}{c} x_3 \\ T_3 \end{array} \right] \otimes S_j \quad (1-4)$$

$$\text{ここに、} j \neq 1, 2, 3, \quad T_1, T_2, T_3 \geq 0$$

複数の時間軸がある空間では因果律は保証できないので、これらの3つの時間軸が偶然に同軸化されたことを仮定する。

$$S_1'' \left[\begin{array}{c} x_1 \\ T_1 \end{array} \right] \otimes S_2'' \left[\begin{array}{c} x_2 \\ T_2 \end{array} \right] \otimes S_3'' \left[\begin{array}{c} x_3 \\ T_3 \end{array} \right] \otimes S_j$$

$$\Rightarrow S_{\text{space}} \left[\begin{array}{c} x_1 \otimes x_2 \otimes x_3 \\ t \end{array} \right] \otimes S_j \quad (1-5)$$

$$\text{ここに、} t \geq 0 \text{ は } T_1, T_2, T_3 \text{ の共通時間}$$

すると、共通時間 $t \geq 0$ の進行に従い膨張する3次元空間を、すなわち4次元時空間 S_{space} を得る。

このようにして誕生した4次元時空間は2次元スピン空間 S_0 を介して真空 S_{VAC} の他のスピン空間と結合していると仮定し以下に表現する：

$$S_{\text{VAC}} \subseteq S_0 \otimes S_1 \otimes \cdots \otimes S_n$$

$$\Rightarrow S_{\text{space}} \left[\begin{array}{c} x_1 \otimes x_2 \otimes x_3 \\ t \end{array} \right] \otimes S_0 \otimes S_4 \otimes S_5 \otimes \cdots \otimes S_n \quad (1-6)$$

*) あくまで1つの仮説として提案したが、1-2節以降の議論に必ずしも不可欠な議論ではない。