

[I] 宇宙視を楽しむ (その1)

皆の広場

素人の宇宙考③

[C] 宇宙誕生秘話

Riv1 2024年12月13日

ドラフト 2018年8月22日

永野 徹

[C] 宇宙誕生秘話

約137億年前に起きたビッグバンにより、超高温・超高密度の宇宙が誕生し、光速を遙かに超えるスピードで急膨張して急激な温度降下の過程で元素を生成して今日の宇宙が誕生。

[1] 宇宙誕生総論

- (1) 宇宙誕生ストーリー
- (2) 宇宙形成プロセス
- (3) 宇宙論の原点(素粒子論)
- (4) 新・旧宇宙誕生論

[2] 宇宙誕生メカニズム

- (1) 宇宙誕生概論
- (2) 宇宙誕生前 (無空間)
- (3) トンネル効果 (初期宇宙誕生)
- (4) インフレーション
- (5) ビッグバン

[1] 宇宙誕生総論

(1) 宇宙誕生ストーリー

1. 全般

約137億年前に起きた大爆発により、超高温・超高密度の宇宙が誕生し、光速を遙かに超えるスピードで急膨張して急激な温度降下の過程で元素を生成して今日の宇宙が誕生。

2. 宇宙誕生前

- ①トンネル効果: トンネル効果によりエネルギー密度ゼロの状態から宇宙が誕生。
- ②非対称性: プラスとマイナスの素粒子がひっきりなしに誕生。但し素粒子は正・反ペアで生まれ相殺を繰り返していた。

3. 宇宙の誕生

- ③インフレーション: 誕生した宇宙は対称の破れと相転位で輻射熱を放出。
- ビッグバン:** 10^{-33} 秒後、1cm程度の宇宙はビッグバンで大爆発。ビッグバンとは1ミリの大きさが一瞬にして1000億光年の大きさに膨張して今の宇宙が誕生した。

(2) 宇宙形成プロセス

- 1. 宇宙誕生前 (量子論では)
量子論ではエネルギー密度ゆらぎのある無の空間からトンネル効果で宇宙が誕生。
- 2. インフレーション (誕生後)
誕生後自発的対称性が破れて真空の相転移が起き真空エネルギーが光と輻射熱に転換されて宇宙は超高温・高密度となりビッグバンへ。
- 3. ビッグバン (大爆発)
超高温・高密度の火の玉状状態からビッグバン起きる。
- 4. 星の誕生: 温度降下により
- 5. 銀河誕生
- 6. 現在の宇宙



(3) 宇宙論の原点：素粒子論 (佐藤勝彦博士)

3人の日本人ノーベル物理学者の「素粒子論」がヒント

素粒子論を宇宙論へ展開：3人のノーベル賞 (2008年：素粒子論)

1. 南部陽一郎博士：素粒子の「自発的対称性の破れ」「真空の相転移」
 - ・素粒子世界 (宇宙誕生前) では自発的対称性の破れが起きる。
 - ・無空間に粒子と反粒子が同時に誕生し、両者が接触すると対生滅して光だけの世界になるはずが10億分の1の割合で粒子が残り物質世界 (現在宇宙では星・銀河) が誕生。
2. 小林誠、益川敏英博士：「CP対称性の破れ」

南部博士の「対称性が破れ」が生じる条件を提示。クォークは3種類でなく6種類なければ対称性の破れ生じないと提言し新たに3種類のクォークが発見された。
3. 佐藤勝彦博士：世界的宇宙天文学の権威者

「インフレーション理論」を世界で初めて提唱。
佐藤博士は上記3人の素粒子理論から、無空間のインフレーションにより超高温・超高压環境が達成されてビッグバンが始まると。

 - ① 南部博士の理論をインフレーションに適用してビッグバンに必要な超高温・高压環境が達成できたのは対称性の破れにより「真空の相転移」が起きてインフレーションが始まると提唱。
 - ② 小林・益川理論「CP対称性の破れ」を超新星爆発解明に適用。

(4) 新旧宇宙誕生論 (1 現説と2 新説)

1. 宇宙誕生論 (現説): トンネル効果により誕生 (量子論)

① トンネル効果により宇宙誕生
量子論によれば、宇宙誕生前の無空間でエネルギー密度にゆらぎが有りトンネル効果で宇宙が誕生したと言う。

② インフレーションが起こる: (対称性の破れ) ⇒ その後 (真空の相転移)

誕生した宇宙に対称性の破れでインフレーション膨張が起きる。更に真空の相転移で真空エネルギーが光と熱に変換されて超高温超高压の火の玉状態でビッグバンへ突入。

2. 宇宙誕生論 (新説): インフラトンにより誕生

1. インフラトン粒子のエネルギーで宇宙が誕生。続いて
2. 対称性の破れでインフレーション膨張が起きる。光速を遙かに超える瞬間膨張 (インフレーション) により10⁻²⁴cmから10cmまで100桁以上の瞬間膨張がおきる。
瞬間膨張により一時的に温度低下が生じるが、真空相転移による輻射熱で温度は10³⁰⁰倍と桁外れの増加で超高温・超高压状態となりビッグバンが始まる。

3. ビッグバン (インフレーションによる超高温・高密度でビッグバン開始)

137億年前、真空の相転位による光と輻射熱により超高温・超高密度でビッグバンが始まる。素粒子大の大きさからいきなり現在宇宙の1/3程度の大きさに(※1)瞬間膨張して急激な温度低下により光から物質を生成して今日の宇宙が誕生したと言う。超高温のプラズマスープ状態で正粒子と反粒子がペアで誕生しては生滅を繰り返していたが、約10億分の1個の割合いで相殺されずに正粒子が1個残る対称性の破れが生じて光だけの世界でなく物質(星・銀河)がある現在宇宙が誕生した。(※1) 1ミリの大きさが一瞬に100億光年程度の大きさに膨張した事に等しい)

[2] 宇宙誕生メカニズム

(1) 宇宙誕生概論

- * ① 宇宙の誕生 (量子論によるトンネル効果で)
量子論によれば宇宙誕生前の無の空間にはエネルギー密度にゆらぎが有り、トンネル効果により高温の初期宇宙が誕生した。
- * ② インフレーション
誕生した宇宙は相転移の輻射熱により超高温状態となり、10⁻⁸⁸秒後、誕生した宇宙は対称性の破れにより爆発的な瞬間膨張が起き膨張による温度低下は有るものの、その後の真空の相転移で真空エネルギーが光と輻射熱として放射されて初期宇宙は急激に加熱され超高温の火の玉状態を呈してビッグバンへ。超高温のプラズマスープ状態で素粒子は正・反ペアで生まれては生滅・相殺を繰り返していたが約10億分の1個の割合いで相殺されずに正素粒子が1個残と言う非対称性が現れて物質世界が誕生。
- * ③ ビッグバン :
インフレーションで生成された超高温状態で宇宙は素粒子程度の大きさから一瞬にして、現在宇宙の3分の一程度の大きさに瞬間膨張して超高温超高压状態となり超新星爆発解明に適用。

(2) 宇宙誕生前 (無空間のイメージ)

無空間とは言いながらエネルギーの密度ゆらぎは存在



(3)トンネル効果:(初期宇宙誕生:量子論)

提唱者:「無から宇宙の創成」ピレンケン(1982)

エネルギーゆらぎが有る無空間にトンネル効果で初期宇宙誕生
(トンネル効果:江崎ダイオード) 江崎玲於奈(ノーベル物理学賞1973)

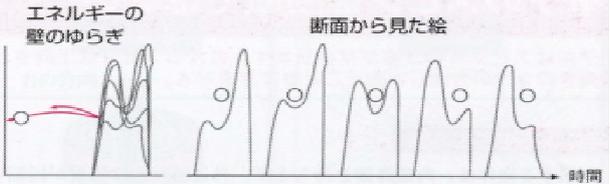


* 宇宙が誕生する前の粒子ポテンシャルは、図で(0)の場所にあります。宇宙が誕生するためには、山を登って転がっていく必要がありますが、最初はエネルギーがゼロなので山を登ることができません。しかし量子力学の世界には、「トンネル効果」というものがあります。どういものかという、「物質やエネルギーは、ポテンシャルの壁を通り抜ける確率がある」というものです。これは素粒子大の超ミクロの世界で起きる不思議な現象です。

①トンネル効果のイメージ(超ミクロ世界特有)

(量子論) 超ミクロ無空間では「粒子がエネルギーの壁を通りぬける」と言う不可思議な現象が起きる。

ボーム流のトンネル効果

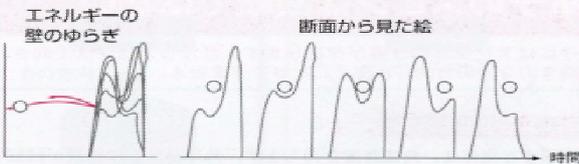


「空間」であるエネルギーの壁はゆらいでおり、実在する粒子は、「タイミングが良ければ」通り抜けることができる。これは、結果的には実証論の確率的解釈と同じになる

②トンネル効果の詳細(量子論)

エネルギーの壁はゆらいでいる

ボーム流のトンネル効果



「空間」であるエネルギーの壁はゆらいでおり、実在する粒子は、「タイミングが良ければ」通り抜けることができる。これは、結果的には実証論の確率的解釈と同じになる

③日常生活では起こり得ないことがミクロ(量子)の世界では起きる(素粒子の世界)

左下図(日常世界:ボールは壁を越えられない)

右下図(ミクロ世界:粒子は壁を乗り越えられる)

ボール玉(容器壁)と電子(エネルギー壁) エネルギーのゆらぎ壁

トンネル効果

マクロの世界

コップの縁より高い位置にあって落ちて外に飛び出すことができない

ボール

コップ

行ったつもりなので、ボールが外に落ちてくることはない

量子の世界

通常時にエネルギーの壁を通り抜け、外に飛び出す

電子

エネルギーの壁

ボーム流のトンネル効果

「空間」であるエネルギーの壁はゆらいでおり、実在する粒子は、「タイミングが良ければ」通り抜けることができる。これは、結果的には実証論の確率的解釈と同じになる

4) 続いて: 初期宇宙の変化 インフレーション〜ビッグバンへ



(4) インフレーション

1) インフレーションのメカニズム

(自発的対称性の破れ⇒真空の相転移)

量子論では宇宙誕生前の無空間でエネルギー密度ゆらぎが有リトンネル効果によって初期宇宙が誕生する。その後インフレーションと言う「光速より遙かに速いスピードの瞬間膨張」が生じて、真空エネルギーが光・輻射熱に変換されて超高温・超高密度状態となりビッグバンが始まる。

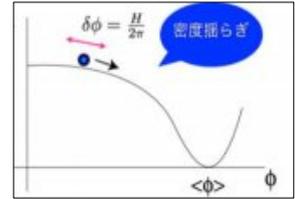
1. インフレーションとは:

宇宙誕生時に真空エネルギーゆらぎ (or インフラトン) によって励起された急激な膨張。

2. インフラトンのゆらぎ証し

インフラトン量子ゆらぎの存在証しとして現在観測されるものには
①宇宙背景放射ゆらぎ、
②銀河の大規模構造などがある。

宇宙誕生前のエネルギー密度ゆらぎ



2) インフレーションによってビッグバン開始

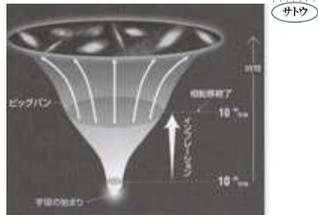
○誕生したばかりの宇宙は対称性の破れで瞬間膨張(インフレーション) 続いて真空の相転移により超高温・高密度状態となる。

トンネル効果で誕生した宇宙に「対称性の破れ」発生して、「光速より遙かに速いスピードの瞬間膨張(インフレーション)」が起き、続いて「真空の相転移」により真空エネルギーが熱と光に変換され超高温・超高密度状態が誕生。

1. インフレーションとは:

誕生した赤ちゃん宇宙で自発的対称性の破れ (or インフラトン) で瞬間膨張 (インフレーション) が起きる 続いて真空の相転移により超高温・超過密状態が形成される。

初期宇宙の爆発的膨張 (インフレーション)

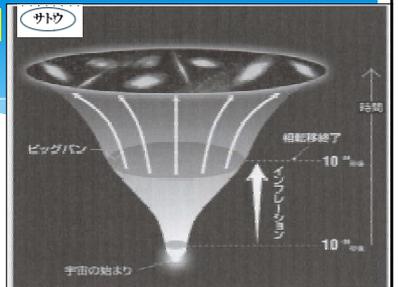


2. インフラトンのゆらぎ証し

インフラトン量子ゆらぎの存在証しとして現在観測されるものには
①宇宙背景放射ゆらぎ、
②銀河の大規模構造などがある。

3) インフレーション理論の検証

インフレーションモデルを予知する空間の揺らぎが COBE宇宙衛星により観測された



インフレーションモデルは誕生まもない、素粒子のように小さい宇宙が加速度的膨張をしてマクロな宇宙になったというモデルである。急激な膨張が終了し、ゆるやかな膨張に変わるとき、大量の熱エネルギーが発生し、宇宙は熱い火の玉となる。これが火の玉で始まったとするビッグバンの地味りである。宇宙が急激な膨張をしているとき宇宙に存在した量子論的な密度のゆらぎは、後で成長し銀河や銀河団を形成したと考えられる。後の章でも示すように、1992年、インフレーションモデルの予言するこの密度ゆらぎが米国の衛星・COBEによって発見された。このようにインフレーションモデルは、観測からも大きな支持が得られている。

4) 「自発的対称の破れ」イメージ

(無空間の自発的対称性破れでインフレーション誕生)

トンネル効果で誕生した宇宙に **事前:真空エネルギー-不安定状態**
自発的対称性の破れでインフレーション **事後:真空エネルギー-安定状態** が起きる。

a) 対称性の保持状態

- 無の空間で宇宙初期は対称性が保持されていたが不安定な状態。
- エネルギー密度ゆらぎにより自然に空間が急激に引き延ばされてインフレーションが起きる。

b) 対称性の破れと相転移

- 対称性が破れ高エネルギー状態から低いエネルギー安定状態へ瞬間的に移行。
- 安定状態に移行する間に真空が相転移して真空エネルギーの輻射熱で宇宙は超高温の火の玉状態となりビッグバンの準備が整う。

5) 真空の相転移

対称性の破れに続いて:

- 誕生した宇宙の状態
誕生したばかりの宇宙は真空状態とは言え粒子が絶えず生成・消滅を繰り返している。
- 真空の相転移
偽の真空から真の真空へ
量子論によれば宇宙膨張による温度低下で元の「偽の真空」が新しく誕生したエネルギーの低い「真の真空」へ移る真空の相転移があちこちで起きて宇宙膨張を加速させる。
- 初期宇宙の再加熱
インフレーションが終り真の真空状態になった宇宙では真空エネルギーが物質や光のエネルギーに転化されて初期宇宙の再加熱がおきる。

真空の相転移

インフレーション

真空の相転移はインフレーションを引起こし、宇宙の大きさを一瞬のうちに10²⁶倍以上に拡大する

6) 物質宇宙(現在の宇宙)の誕生(量子論)

正・反 μ 粒子が「誕生と生滅」で光のみ残る筈が量子論では百億分の1の割合で正粒子が残り物質宇宙誕生。

1. 正・反粒子の生滅均衡が破れる(量子論では)

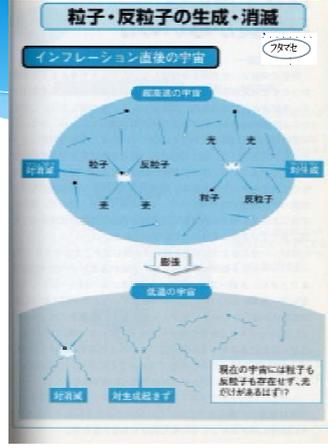
μ 粒子の誕生と合体生滅を繰り返すはずが均衡が破れて約10億分の1の割合で相殺されずに正粒子が1個残る

2. 現在は物質宇宙

(正粒子だけの世界
(対消滅の異常発生))

量子論では10億分の1の割合で正粒子のみが残る(対消滅に異常が起きる)

インフレーション膨張が終わった直後の超高温宇宙ではクォーク・電子ニュートリノ等の正・反粒子が飛び交い対消滅を、粒子質量以上の光衝突時は対生成を繰り返す。温度降下により光子は粒子生成の充分なエネルギーが無くなり質の重い粒子から順に消えてなくなり光だけの宇宙になるはずが現在は物質が残る。量子論では10億分の一の割合で対消滅せずに物質が残る。

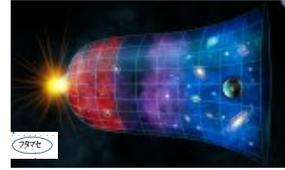


(4) ビッグバン (1946)

提唱者：ジョージ・ガモフ

インフレーションによって形成された超高温・過密状態が引き金となってビッグバンが始まったと言われる。

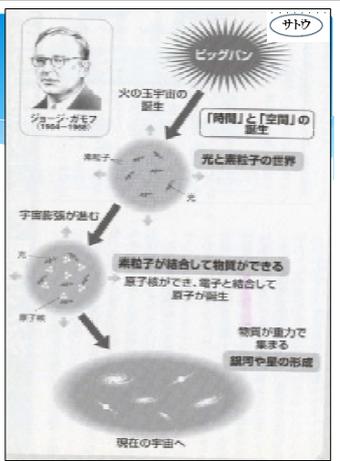
- * (宇宙はビッグバンで誕生): ビッグバン直前は超高温状態
- * 第一段階: 火の玉宇宙の誕生
- * 第二段階: 宇宙の膨張が進み素粒子の結合で物質が誕生
- * 第三段階: 物質が重力で集まり星や銀河を形成



1) ビッグバンとは

①ガモフの宇宙誕生論

- インフレーションにより膨大な真空エネルギーが取り込まれてそのエネルギーが放射熱に変換されて高温・高熱の火の玉宇宙状態でビッグバンへと。
- 火の玉宇宙はビッグバンを開始。「時間と空間」が誕生して「光と素粒子」の世界となる。
- 宇宙膨張の進展に伴い素粒子が結合して原子核ができ、電子と結合して原子が誕生して物質が誕生。
- 物質が重力で集まり星・銀河に成長。



2) ビッグバンによる宇宙形成

- インフレーション (超高温・高密度)
- ビッグバン (宇宙誕生大爆発)
- 1世の星誕生
- 銀河誕生
- 現在の宇宙



①ビッグバン直後と現在の相違

(現在宇宙) 137億年後

- 星・銀河が存在する
- 銀河団とボイドが存在
- 宇宙背景放射がある

(ビッグバン直後の宇宙) プラズマ状態の初期宇宙

水素とヘリウムの原子核と電子がむき出しで飛び回る**プラズマ状態**。

1. 元素(物質)の誕生

- 10⁻³⁴秒: 素粒子の重い光(プラズマ)スーフ状態**
宇宙間隔≦百億分の1秒: 1ccが1兆トン(クォーク、レプトン、グルーオン、光子のごった煮)
- 10⁻⁶秒: 陽子・中性子の誕生**
- 3分後: ヘリウムの原子核誕生**
- 38万年後: 原子誕生(水素原子~)**
- 2億年後: 星の誕生→銀河誕生→現在**

2. 力の誕生

(温度降下に伴い)

- 重力誕生 (≦ 10³² K) 与1000兆度**
- 強い力誕生 (≦ 10²⁸ K)**
- 弱い力・電磁気力誕生 (≦ 10¹⁵ K: 100兆度)**
- クォーク誕生 (≧ 1兆度)**
- 素粒子 (≦ 10億度) (H₂, Heの場合)**
- 原子核 (≦ 6000度)**
- 原子 (≦ 3000度) (ヘリウム原子誕生≦10億度)**
- 分子 (≦ 3000C)**
- (水素分子誕生≦3000度)**

宇宙は1つの力から始まった...力の進化

①物質の変化(温度依存性)

(物質は温度依存性あり): 分子→原子→素粒子(プラズマ)