

宇宙創成物理学概論 第9回 レポート

C3SM2016 木村佑斗

2023年7月16日

1 宇宙最初の3分間

まずは宇宙の「誕生」について言及する。そもそも宇宙において「誕生」という事象があったのかどうかは解明されていない。私がよく耳にするのは「宇宙は無からビッグバンによって誕生した」という説明である。しかし無から生まれたなどという根拠もないし、必要性もない。むしろ、宇宙は有限の大きさをもつものがインフレーションし始めたのかもしれないし、元から無限の大きさの宇宙が何らかの機構でインフレーションし始めた可能性も否定できないはずである [1]。インフレーションの前の状態は現時点では不確定すぎるのでこれ以上は述べないことにする。

ということで、ここでは「誕生」という言葉は避ける。宇宙はある時点 $t = 0$ から 10^{-43} 秒の間はプランク時代といわれる時期があったとされる。この時間はまさにプランク時間 t_P のオーダーであり、

$$t_P = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^5}} = 5.391\ 16(13) \times 10^{-44} \text{s}$$

である [2]。 t_P この時間内では4つの相互作用が全て統一されていたと考えられる。この状態は超高温で不安定だったとされるので、何らかの機構により、このあと膨張(ビッグバン)が始まった。すると宇宙が冷却し始め、 10^{-36} 秒後まで重力とその他の3つの相互作用は分離する。この後にインフレーションと呼ばれる、超急激な膨張が起きた。インフラトン場がインフレーションを引き起こしたとされる*1。

インフレーションにより宇宙は冷却され、 $10^{-32} \sim 10^{-12}$ 秒後の間は温度が 10^{28}K 程度だった。また、WボソンやZボソン、ヒッグス粒子が生成され、さらに強い相互作用と電弱相互作用が分離した。この後、エネルギーが粒子に変換され、クォーク・グルーオン・プラズマ状態になった。最後に電弱超対称性が破れ、ヒッグス粒子が真空期待値を獲得した*2。 $10^{-12} \sim 10^{-6}$ 秒後に、粒子はヒッグス機構によって質量を獲得し、相互作用は現在のように4つに分離した。

$10^{-6} \sim 1$ 秒後、宇宙はさらに冷え、温度 $kT \simeq 100 \text{MeV}$ となる [5] とようやくハドロンが形成された。また0.1秒後にニュートリノが時空を自由に移動できるようになった [4]。そして、ハドロンと反ハドロンが対消滅したが、未だ謎の機構バリオン数生成によって少量のハドロンが残った。これによって相対的にレプトンが多くなり、レプトン時代が到来した(1~10秒後)。10秒後になると宇宙の温度的にレプトン-反レプトン対は生成されなくなり、対消滅とつい生成の平衡は終わり、ほとんどが対消滅しわずかにレプトンが残った。10秒後からは光子が宇宙のエネルギーを支配した。3分後から原子核が合成され始めた。

2 The mass of hadrons without the Higgs boson

ヒッグス粒子は自発的に対称性が破れたヒッグス場の励起状態として現れる。ヒッグス場の非自明な真空期待値によってゲージ対称性が自発的に破れ、同時に W^\pm ボソンと Z^0 ボソンが質量を持つように

*1 これは宇宙平坦問題や地平面問題などを説明する理論モデルであり、現在様々な観測結果で正当化することができている。

*2 実際、現在の加速器はビッグバン後 10^{-10} 秒後の宇宙に相当するエネルギー領域 (TeV 領域) に進出しており [3]、その成果としてヒッグス粒子が発見されている。

なった。またヒッグス場とクォーク・レプトン場の湯川相互作用によりクォークとレプトンが質量(カレント質量^{*3})を得た。よって、ヒッグス粒子が無ければ、同時にヒッグス場も存在し得ず、クォークなどの質量はゼロとなる。質量がゼロのディラック粒子のラグランジアンはカイラル対称性がある。QCD 真空では(ヒッグス場の存在の有無に関わらず)、カイラル対称性が自発的に破れる [6]。これによって、南部-ゴールドストーンの定理により質量ゼロの粒子が生まれる。これが π 中間子である^{*4}。

ここで一旦話を W^\pm, Z^0 の質量獲得機構に移す。自発的に対称性が破れれば質量ゼロの粒子が生まれるが、それが観測可能な物理的状态とは限らない。実際、低エネルギーではその影響は W^μ ^{*5} に現れ、結果ゲージ場 W^μ が質量を獲得する。これをヒッグス機構という [7][8]。このことを踏まえると、完全に質量ゼロの π はヒッグス機構と同じ役割をする可能性がある。すると、 π 中間子は観測にかからない代わりにクォークが質量を獲得し、現在と似たようなハドロンの質量になるかもしれない。実際にはヒッグス機構の対象がベクトルボソンとフェルミオンとで粒子の種類が違うので、このようなアナロジーが妥当なのかはわからない、が、あくまで考察なので。

参考文献

- [1] 日本科学未来館制作 3D ドーム番組「9次元から来た男」上映会および講演会「超弦理論ってなんだろう」 大栗博司 橋本幸士 <https://www.youtube.com/watch?v=cJw1c6r2TNE>
- [2] “CODATA Value: Planck time”. NIST.
- [3] 大宇宙の誕生 福井康雄 <https://www.nagare.or.jp/download/noauth.html?d=23-6-s03.pdf&dir=159>
- [4] 日本評論社『私達は暗黒宇宙から生まれた』24頁 福井康雄
- [5] 『素粒子・原子核物理入門』329頁 B. ポップ/K. リーツ/C. ショルツ/F. サッチャ 著 柴田利明 訳
- [6] 『クォーク・ハドロン物理学入門 真空の南部理論を基礎として』39頁 国広悌二 著
- [7] 『場の量子論(II) ファインマン・ダイアグラムとくりこみを中心として』415頁 坂本真人 著
- [8] 『改訂 物理学事典』p.1710 「ヒッグス機構」

*3 ラグランジアンに現れる質量

*4 実際の世界では $u \cdot d$ クォークが僅かだがカレント質量を持つので π は質量ゼロではない

*5 W^\pm, Z^0 のもと