

論文内容の要旨

論文題目:

Origin and Evolution of Large Lepton Asymmetry

(大きなレプトン非対称性の起源と進化)

氏名 高橋 史宜

標準ビッグバンモデルは、軽元素の存在比、宇宙背景輻射(CMB)の存在、ハッブルの法則という現象を見事に説明する。そして標準ビッグバン宇宙モデルが確立して以来、その枠組みを超える現象の探索が数多く行われてきた。COBE人工衛星による宇宙背景輻射の揺らぎの発見はその最たる成果である。では軽元素の存在量を通じて我々は何を知ることができるのであろうか。もし標準元素合成理論を超える物理の存在が明らかになれば、背景輻射の揺らぎの発見同様、宇宙の昔の姿にまた一步近づくことができるはずである。

標準元素合成理論は 4He 、 D 、 7Li などの軽元素の存在量を一つのパラメーター（バリオンフォトン比 η ）の関数として予言する。また宇宙背景輻射の揺らぎの角度スペクトルの形はバリオンの存在量に依存しており、その形からバリオンフォトン比を決定できる。もし標準元素合成理論に新たな物理が関与していなければ、全ての軽元素の観測量および輻射揺らぎの観測から導かれるバリオンフォトン比は全て一致するはずである。しかしながら、現在の観測結果には不一致が存在する。特に CMB と D の示唆するバリオンフォトン比と、 4He および 7Li から導かれるバリオンフォトン比との間には統計的

に有意な不一致がある。もちろん最も保守的な立場は、この様な不一致の原因は観測、特に 4He および 7Li の観測に大きな系統誤差が含まれているとする事である。一方で、この様なバリオンフォトン比の不一致こそが標準元素合成理論を超える新しい物理の存在を示唆すると考えることもできる。この論文では後者の可能性を追求する。

元素合成理論の最も簡単な拡張は大きなレプトン非対称性を導入することである。実際大きなレプトン非対称性が存在すれば 4He の予言値を観測量に一致させることが可能である。これは主に電子ニュートリノの正の非対称性が陽子と中性子の間のベータ平衡を陽子の方向へずらす為である。ところが、正の大きなレプトン非対称性は、スファレロンと呼ばれるプロセスを考慮にいれると小さなバリオン非対称性の存在と矛盾する事がわかる。なぜなら、スファレロンはレプトン非対称性から同じ程度の大きさ且つ反対符号のバリオン非対称性を生成してしまう為である。従って、大きなレプトン非対称性を生成する無矛盾な宇宙論的シナリオを構築する必要があり、これがこの論文の目的の一つである。

ここではレプトン非対称性の起源として、超対称性標準理論の平坦方向を用いるアフレックダイク機構を利用する。特に eLL 平坦方向を用いることで、大きなレプトン非対称性の生成が可能である。一般に平坦方向の運動には空間的不安定性が存在し、 Q ボールと呼ばれるノントポロジカルソリトンが生ずる事が知られている。そして Q ボールに全てのレプトン非対称性が取り込まれてしまう為、 Q ボールは崩壊するまでの間レプトン数をスファレロンから守る役割を果たす。そして周囲のプラズマとの相互作用によって僅かに蒸発したレプトン数によって、スファレロンを通じて現在のバリオン非対称性を説明する事ができる。また、相対符号の問題は eLL 平坦方向の世代を適当に選択する事より回避できる。

レプトン非対称性の大きさには観測から制限がつけられている。その制限にはフレーバー間に若干階層性があり、電子ニュートリノの非対称性に関する制限の方がミューおよびタウニュートリノのそれよりも10倍ほど厳しい。これは、電子ニュートリノの非対称性はベータ平衡に直接関与するが、ミューおよびタウニュートリノの非対称性は宇宙膨張の速さを変える効果しか持たず、前者の影響の方が強いためである。しかしながら近年、ニュートリノ振動によってビッグバン元素合成前に全てのフレーバーのレプトン非対称性が等しくなってしまう事が指摘された。もしこのフレーバー平衡が実現すると、全てのフレーバーのニュートリノ非対称性に関する制限は、実質上電子ニュートリノの非対称性の制限で与えられる事になる。もしこの制限が正しければ、ニュートリノの非対称性の元素合成理論に与える影響は電子ニュートリノの非対称性によるもの

だけになり、特に宇宙膨張の速さを変える効果は殆ど無視できる。従って、仮に CMB の観測によって余分な輻射の自由度が示唆された場合には、これは標準理論に含まれない軽い粒子の存在を意味する事になってしまう。また、上述の我々の提唱したレプトン非対称性生成機構の中で、バリオン非対称性との相対符号を解決するシナリオが働かない事になる。そこで、我々はニュートリノ相互作用を拡張することでビッグバン元素合成前にニュートリノ振動を抑制する可能性について追求した。そして、マヨロンと呼ばれるスカラー場との相互作用を導入することで、実際にニュートリノ振動を抑制することを解析的・数値的に示した。これによって、宇宙膨張への影響が無視できない程の大きなレプトン非対称性の存在が許される様になった。また CMB および軽元素の存在量の観測における不一致を解消する自由度が増えた事になる。特に、CMB の観測によって余分な輻射の自由度が示唆された場合にも、標準理論以外の粒子を導入せずに説明が可能である。

ここまでレプトン非対称性の与える元素合成理論への影響に触れてきたが、レプトン非対称性は単に観測間の不一致を解消する為だけの道具ではない。レプトン非対称性はバリオン非対称性と密接に関連している為、それを通じてバリオン生成機構、ひいてはその基礎となる素粒子理論や初期宇宙シナリオに大きな知見を生む可能性を秘めている。この論文ではそのレプトン非対称性の起源およびそれに関連した諸問題、その解決法、またレプトン非対称性の進化について議論する。