

論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称	博 士 (理 学)	氏名	Apriadi Salim Adam
学位授与の要件	学位規則第4条第①2項該当		
論文題目			
Particle Number Asymmetry Generation in the Universe (宇宙の粒子数非対称性の生成)			
論文審査担当者			
主 査	准教授	両角 卓也	
審査委員	教 授	小 瀧 康史	
審査委員	教 授	深澤 泰司	
審査委員	教 授	稲垣 知宏 (情報メディア教育研究センター)	
〔論文審査の要旨〕			
<p>宇宙における物質反物質の非対称性の起源は素粒子論や宇宙論において未解決の問題である。本論文では、この問題を解決するために、いくつかの興味深い特色を持ったモデルを提案し、これを用いて新たな粒子数生成機構を提唱している。さらに提案したモデルに対して、時間に依存した場の量子論の計算法を適用することで、粒子数非対称度がゼロである初期状態から始めて、相互作用により時間経過とともに粒子数が生成することを示している。</p> <p>本論文の主要な点は次のとおりである。</p> <ol style="list-style-type: none"> (1) 2種類のスカラー場（複素スカラー場と中性スカラー場）が相互作用をしているモデルを提案した。このモデルにおける粒子数は、複素スカラー場の持つ電荷に対応する。電荷の保存は、複素場の位相変換に対するハミルトニアンの不変性に関係しており、粒子数を生成するため、位相変換に関する対称性を破る相互作用項や質量項を導入している。 (2) 粒子数の時間発展を振動する中性スカラー場の期待値の下で計算し、これと結合する複素スカラー場の量子的効果により粒子数が生成する事を示している。 (3) 粒子数の時間発展を実時間形式の量子場の理論に基づいて計算している。 (4) 粒子数生成に関わる環境のパラメーター（宇宙膨張の効果および初期宇宙温度）やモデル固有のパラメーターに粒子数の時間変化がどのように依存するのかを示している。 (5) 輻射優勢の宇宙の下で、どの程度の粒子数非対称度が生じるかを数値計算で示し、粒子数生成の条件であるサハロフの3条件を満たしているかを論じている。 <p>上記の中で特に（3）に関しては、場の量子論に基づいて粒子数の実時間発展を追うためにシュウィンガーやケルディッシュらによって展開された密度行列の方法と場の期待値や実時間グリーン関数を生成汎関数から導く 2PI 有効作用 (Two-particle irreducible Effective Action) の方法を採用し、場の真空期待値と量子場のグリーン関数の寄与を統一的に扱い粒子数非対称度に対する両方の寄与を計算している。</p> <p>宇宙膨張の効果は宇宙のスケールファクターの時間に関する一階微分までを保つ近似で</p>			

計算されている。この場合、近似が有効な範囲は限られているが、一方で膨張率が小さく膨張が始まってからの経過時間があまり長くない場合は、異なる時間依存性を持つスケールファクターの下でも膨張の効果を取り入れられる形式になっている。このようにして、非対称度の時間発展に、宇宙の体積膨張による粒子数密度の減少、相互作用の凍結、および赤方偏移による粒子のエネルギーの減少の効果を見出している。

(5) の粒子数生成に関するサハロフの 3 条件に関しては、粒子数の破れと CP 対称性の破れの相互作用が導入されており、粒子数非対称度もこれら対称性の破れを引き起こす結合定数に比例している。一方 3 番目の非平衡条件に関しては、粒子数非対称度が時間とともに振動する状況を示しているため、振動周期よりも十分短い時間でのみ非平衡条件がなりたつ。本研究では振動が時間経過とともに凍結し非対称度が一定値に漸近することは示されておらずこの点に関しては今後の課題として残っている。

以上のように本研究は、振動する場の真空期待値と相互作用する量子場によって粒子数非対称性が生じるという新しいタイプの粒子数生成機構を提案している。これは、非平衡の場の量子論を模型に適用することで、自然に生じる効果である。本論文は技術的にも高度な方法を用いており、複雑な計算過程をよくまとめている。これらに基づき、本論文は、宇宙の粒子数生成問題の解明にとって意義のある研究であると考えられる。

以上審査の結果、本論文の著者は博士（理学）の学位を授与される十分な資格があるものと認める。

公表論文

A New Mechanism for Generating Particle Number Asymmetry through Interactions
Takuya Morozumi, Keiko I. Nagao, Apriadi Salim Adam, and Hiroyuki Takata
Advances in High Energy Physics, Volume 2019, 6825104(2019)