

(続紙 1)

京都大学	博士 (理学)	氏名	阿部 慶彦
論文題目	Scalar Sector Extension and Physics Beyond Standard Model (スカラーセクターの拡張と素粒子標準模型を超えた物理)		
(論文内容の要旨)			
<p>素粒子標準模型は、数多くの実験事実を高い精度で説明する、最も成功した物理理論の一つである。しかしながら、理論・実験双方から現在では標準模型だけでは不十分であると考えられており、正しい理論の正体を明らかにすることは、素粒子物理学における最重要の課題の一つとなっている。本論文では、こうした「標準模型を超えた物理」の一つの方向性として、スカラーセクターの拡張に注目し、そこに現れる擬-南部-ゴールドストーンボソン(pNGB)とその現象論的帰結を多角的に調べている。なお、このpNGBは、理論の持つ対称性を反映して低エネルギーで普遍的に現れる自由度であり、その相互作用やポテンシャルの構造を理解することは、理論的にも現象論的にも極めて重要であると考えられている。本論文の構成は以下の通りである。</p> <p>第2章と第3章では、このpNGBがWIMPと呼ばれる暗黒物質の候補粒子となる模型を考え、ゲージ群への埋め込みによる紫外完全化を議論している。これまでの直接探索実験からWIMPと標準模型粒子との結合には強い制限があるが、pNGBは微分結合の相互作用を持つために、この制限を自然に回避することができる。本論文では、とくにゲージ化されたU(1)B-L模型へ埋め込むことで、pNGBの質量の起源が自然に説明できる新しい模型を提案している。なおこの暗黒物質は、新しいゲージ場などとの相互作用を通じて不安定になるが、本論文では、寿命や観測からの制限を満たしながら、現在の残存量を熱的残存量として説明可能なパラメーター領域を議論している。また、この模型と大統一理論との関係を調べることで、pNGB暗黒物質の起源と力の大統一との関係を議論し、力の大統一と整合的な暗黒物質の質量の領域を示している。</p> <p>第4章と第5章では、pNGBが非常に大きな真空期待値を持つパラメーター領域を考え、「インフレーションやtype-Iシーソー模型などの他の物理との関係」と「暗黒物質の生成機構」について議論している。一般に、この領域におけるpNGBの相互作用は大きな真空期待値によって強く抑制されてしまい、低エネルギーでは小さな有効相互作用しか持てない。このとき、pNGBは典型的なFIMPの候補粒子となり、freeze-in機構によってその残存量が説明される。本論文では、対称性を破るスカラー場がインフラトンとして振る舞う場合について調べ、freeze-in機構による生成とインフラトンからの直接生成の寄与を評価することで、現在の残存量を説明可能なパラメーター空間があることを示している。また、右手型ニュートリノと結合するような場合についても調べ、ニュートリノとのYukawa結合や、スカラーポテンシャル中のポータル結合を通して暗黒物質が生成されるシナリオを解析している。</p> <p>第6章では、DFSZ模型において、スカラー場がPeccei-Quinn電荷を持ち、pNGBがアクシオンとなる場合に、新しいタイプのアクシオンストリング解を構成している。このアクシオンストリングは、中心部に非常に細いコア上のストリングを持ち、その周りを標準模型ゲージ場のフラックスが囲む、という新奇な構造を持つ。さらに、あるパラメーター領域では、コア近傍で電磁対称性が破れることにより、このアクシオンストリングは超伝導ストリングとなりうる。こうしてできる超伝導ストリング間には電磁気力による大きな引力が働く可能性があり、本論文では、Y-shaped junctionと呼ばれる束縛状態を作りうることも議論している。</p>			

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

擬-南部-ゴールドストーンボソン(pNGB)は、低エネルギーにおける重要な力学自由度であり、とくに、理論の持つ対称性を反映してスカラーセクターを拡張する際に普遍的に現れる。本論文では、このpNGBのダイナミクスに注目し、素粒子標準模型の1重項スカラー場による拡張とその現象論について極めて多角的な解析を行うことで、以下の重要な成果を挙げている。

本来南部-ゴールドストーンボソンは質量項を持たないため、pNGBの質量項は、多くの場合、何らかの機構によって生じたものとして人為的に導入する。本論文の第一の成果は、ゲージ対称性にスカラーセクターの対称性を埋め込むことで、対称性の破れを通して望ましい形のpNGBの質量項を与える、紫外完全な模型を提案したことである。また、模型を丁寧に解析することで、大統一理論との関係や低エネルギー現象論への影響、さらには、暗黒物質の寿命から模型のパラメーターに大きな制限が与えられること、などを議論している。

第二の成果は、このスカラー場が非常に大きな真空期待値を持つ場合について、インフレーションやニュートリノ振動の側面から解析を行い、pNGB暗黒物質模型のパラメーターに興味深い制限を付けたことである。とくに、対称性を破るスカラー場がインフラトンとなる場合の暗黒物質の質量について、結合が弱いにも関わらず、非常に軽い領域のみが許されるという重要な指摘をしている。

第三の成果は、DFSZアクシオン模型において、標準模型ゲージ場のフラックスをまとった新奇な構造を持つアクシオンストリングの存在可能性を初めて指摘し、実際に解を構成したことである。さらに、このアクシオンストリングがパラメーターによっては超伝導ストリングとなる可能性を指摘し、その場合には、大きな電磁的引力によってY-shaped junctionと呼ばれるストリングの束縛状態が宇宙の歴史の中で生成されうる、という興味深い議論も行っている。

よって、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。また、令和4年1月18日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

要旨公表可能日： 年 月 日以降