

(続紙 1)

京都大学	博士 (理学)	氏名	山本 順二
論文題目	Moduli Fields in String Phenomenology		
(論文内容の要旨)			
<p>超弦理論は10次元時空上の理論であるため、我々の宇宙を表す4次元時空以外に6次元空間が余剰に存在する。この余剰空間はコンパクト化される必要があるが、そのコンパクト化に際して、余剰空間の連続変形に対応する自由度であるmoduli場と呼ばれる場が現れる。余剰空間としては、4次元の超対称性を残すことからCalabi-Yau(CY)多様体がよく考えられる。CY多様体によるコンパクト化においてmoduli場は3つに大別され、それぞれKähler moduli, complex structure moduli, axio-dilatonと呼ばれる。4次元有効理論を構築するうえで、これらの場は適切な真空期待値・質量を持つように固定されなければならない。なぜなら、moduli場の真空期待値は4次元有効理論における物理パラメータを決定し、また低エネルギーまでmasslessで残ったmoduli場は第五の力として現れ、観測と矛盾するからである。</p> <p>本論文では、このmoduli場を中心として、超弦理論の低エネルギー有効理論の性質を研究した。特に本論文における研究は大きく3つに分かれている。第一は、moduli場をinflationを引き起こすinflatonと考えることができるかという研究である。ここでは、Kähler moduliの虚部に含まれるaxionをinflatonと見なし、inflationを起こせるかを研究した。特に、D-brane instantonなどの非摂動効果を複数考えた際に、それらの間に生じるpoly-instanton効果と呼ばれる非摂動論的な相互寄与を考慮すると、moduliポテンシャルがflatな領域を自然に持ち得ることを示した。つまり、fine-tuningを必要とせずslow-roll inflationに適したポテンシャルが得られる。第二は、Kähler moduliの固定と、真空エネルギーの持ち上げに関連した研究である。Kähler moduliは他のmoduli場と異なり、treeレベルのポテンシャルでは固定されないことが知られている。そのためα'補正と非摂動効果を用いたLarge Volume Scenario(LVS)などが先行研究で提唱されてきた。ただし、このLVS解では真空エネルギーの持ち上げを行わないと真空エネルギーが負の値となる。本論文では、chiral multipletの寄与を考えることによって、Kähler moduliを固定できること、更に、負となるLVSの真空エネルギーの持ち上げを実現できることを示した。特に、このchiral multipletによる固定と持ち上げの実現には、superpotentialに現れるchiral multiplet 依存の項に制限がかかることが分かった。第三は、超弦理論の有効理論に現れると期待される高次元の超対称$U(1)$ gauge理論に関する研究である。高次元の超対称$U(1)$ gauge理論では、余剰空間がorbifoldのとき、loop補正によりその固定点にFayet-Iliopoulos (FI)項が生じ得ることが知られている。そしてこのFI項の影響で、SUSYを保つ真空解が変化し、その変化した真空ではスカラー場が余剰空間内で局在することが明らかにされてきた。本論文では、その局在化を引き起こす真空がloop補正により不安定になるということをS^1/Z_2, T^2/Z_2の場合に示した。特にこの不安定性は、固定点に住む4次元の場が対称な配位を持つような場合に生じないことを発見した。またT^2/Z_2においては、このFI項による安定性と関連付けてcomplex structureを固定できることを示した。本論文は、以上の3つの研究を通し、超弦理論の低エネルギー有効理論に対し、moduli場を中心として重要かつ有用な現象論的知見と示唆を与えた。</p>			

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

標準模型は現在の実験や観測と非常に整合性の良い理論として知られている。しかし、一方、標準模型は無矛盾な量子重力理論を包含せず、低エネルギーにおける有効理論であると考えられている。そこで、重力の量子化までも含んだ理論の有効候補として超弦理論が研究されている。しかしstring scale M_s は一般的に 10^{10}GeV 程度かそれ以上が自然と予想されており、現在観測で到達できるTeV scaleに対して非常に大きな隔たりが存在する。また超弦理論は莫大な数の真空解を持つ。そのため、我々の宇宙に対応する真空解が本当に存在するか、あるいはどのようにその真空が実現されるかが非常に重要な問題である。

本論文は、超弦理論の低エネルギー有効理論として標準模型に対応する理論を導くことを目指し、moduli場を中心において研究を行ったものである。前述の論文内容の要旨にある通り、研究は大きく3つの分野に分かれている。具体的には、inflationの実現に関するもの、Kähler moduliの固定と真空解のupliftingに関するもの、SUSY解の不安定性に関するものとなっており、それぞれにおいてstring-derivedなモデルに対する知見や示唆が得られている。

inflationモデルでは、poly-instanton効果を考慮することでinflationに適したaxionポテンシャルが自然に得られることを明らかにした。またKähler moduliの固定と真空エネルギーのupliftingには、superpotentialに現れるchiral matter依存の項に制限がかかった。この項は摂動効果・非摂動効果によって生じるため、その起源に制限を与える。inflationのより自然な形での実現や、Kähler moduliの固定・真空エネルギーのupliftingはモデル構築において重要な課題であるので、これらの研究は超弦理論においてモデル構築を行う際に有力な指標や制限を与えると期待される。

不安定性の議論では、固定点に存在するbrane modeの配位が対称となるような場合にSUSYを保つ真空解が安定になることを発見した。この議論は、低エネルギー有効理論としての立場から、5次元・6次元の超対称 $U(1)$ gauge理論を対象にしたものであるが、10次元の場合まで拡張できれば、より超弦理論に関係づけられるだろう。特に、この真空解の安定性と関連付けて、complex structureの固定についての機構も提唱している。これによりそれぞれの固定点に住むbrane modeの配位に対して対称となるようなものが実現されると期待されるだけでなく、orbifoldの幾何構造に対しても対称な構造を持つようになることが期待される。orbifoldは、CY多様体における何らかの幾何的極限であると考えられているため、この研究は超弦理論が低エネルギーで実現する真空解について重要な示唆を与えるであろう。

以上で述べたように、本論文はmoduli場を通じて超弦理論の低エネルギー有効理論に対して重要かつ有用な知見と示唆を与えたものである。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2年1月17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