

学 位 審 査 報 告 書

(ふ り が な) 氏 名	きくち とおる 菊池 徹
学位 (専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 号
学位授与の日付	平成 年 月 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研 究 科 ・ 専 攻	理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻
(学位論文題目) Relativistic zero-mode dynamics of solitons (ソリトンの相対論的なゼロモード・ダイナミクス)	
論 文 調 査 委 員	(主査) 畑 浩之 教授 青山 秀明 教授 川合 光 教授

理 学 研 究 科

京都大学	博士（理学）	氏名	菊池 徹
論文題目	Relativistic zero-mode dynamics of solitons		
(論文内容の要旨)			
本論文は、ソリトンのゼロモードの非相対論的な近似を超えた理解を目指し、スカーミオンと呼ばれるソリトンの相対論的な回転運動を研究したものである。 現実世界のソリトンに記述するためには、そのダイナミクスの解析手法を確立する必要がある。ソリトンの運動は振動運動と定常運動(ゼロモード)の2種類に大きく分けられる。後者は理論の対称性に直結しており、例えばソリトンの実空間における並進運動や回転運動が該当する。ゼロモードのダイナミクスは静的なソリトン解に集団座標を導入することによって記述される。$\phi(x)$を静的なソリトン解とした時、並進運動なら重心の位置Xを集団座標として$\phi(x-X)$、回転運動なら$SO(3)$行列Rを集団座標として$\phi(R^{-1}x)$、といった具合である。そしてこれらの集団座標を時間に依存する力学変数$X(t)$や$R(t)$などに見なして、そのダイナミクスを調べる。 ところが容易に見てとれるように、このように集団座標を導入された場は運動方程式を満たすものではない。周知のように、速度Vで(等速)運動する場はLorentz収縮をして$\phi((x-X)/(1-V^2)^{1/2})$という形をとる。回転運動に関しても、ソリトンは自身の回転運動による変形を受けるはずである。したがって$\phi(R^{-1}(t)x)$のような集団座標の導入は、ソリトンの運動が十分に非相対論的で変形が無視できるような場合にのみ、剛体近似として成り立つものである。このような集団座標の導入は60年代辺りから行われてきた。では、この剛体近似はいつでも妥当なものなのだろうか？妥当でない場合は、どのようにしてソリトン自身の変形を表すように集団座標を導入すればよいのだろうか？このテーマに対して本論文で調べられたものは、スカーミオンと呼ばれるソリトンの回転運動である。このソリトンは空間3次元のソリトンとしては最もシンプルで基礎的なものであると同時に、メソンの低エネルギー有効理論であるカイラル・ラグランジアンに自然に現れるソリトンであり、バリオンを表すソリトンとして知られる。 バリオンはスピンを持つので、バリオンのモデルとしてスカーミオンを考えるとときには、その回転運動を解析する必要がある。本論文では、非相対論的近似における等角速度回転するスカーミオン解に対して、角速度の最低次の相対論的補正を与えた。結果、$U(x)$を静的なスカーミオン解としたとき、回転するスカーミオン$U_{\text{rot}}(x, t)$は、$U_{\text{rot}}(x, t)=U(y)$という実に簡単な形で与えられることが分かった。ここで$y=y(R^{-1}x, (d/dt)R)$は$R^{-1}x$とRの時間微分$(d/dt)R$に依存する3次元ベクトルであり、その形を露わに求めることができた。次に本論文では、この回転集団座標の量子化を行い、バリオンの質量スペクトル、荷電半径、磁気モーメント、およびパイ中間子崩壊定数などの物理量への剛体近似からの相対論的補正を計算した。その結果、これらの物理量に対して、与えられた補正は数十%にもなり、スカーミオンの回転運動に対して剛体近似が適切な近似ではないことが分かった。また、高速回転運動によりバリオンがどのように変形するかの解析も行った。			

(論文審査の結果の要旨)

ソリトンとは、場の非線形性によって形成される局所的なエネルギーの塊のことである。代表的な例としては、水面上の孤立波、レーザー中の光パルス、超伝導体中の渦糸、Bose-Einstein 凝縮体、物質中の様々なスピン励起、統一理論におけるモノポール、量子色力学における BPST インスタントン、電弱統一理論におけるスファレロンなどがあり、ソリトンは物理学のあらゆる分野で理論的・実験的に現れる基本的対象である。

本論文はスカーミオンと呼ばれる、バリオンの模型であるソリトンの回転運動を調べたものである。先行研究では、この回転運動の解析が非相対論的近似の枠組みで行われてきた。ところが、本論文で述べられているように、スカーミオンの回転に対して非相対論的近似を用いるのはそもそも無理がある。なぜなら、スカーミオンがバリオンの質量スペクトルを再現するためには、 10^{23} ヘルツほどの非常に大きな角速度で回転する必要があり、この時、回転運動エネルギーの静止質量に対する比率は数十%に上るからである。非相対論的近似が成り立つのは、運動エネルギーが静止質量に対して十分に小さい場合であるから、この近似をスカーミオンの回転運動の解析に用いるのは適切ではない。

本論文では、非相対論的近似を超えた集団座標の導入の原理として、「集団座標の運動方程式が成り立つ時、場自身の運動方程式も成り立つように集団座標を導入すべき」ということが提唱されている。これは、集団座標のダイナミクスが、元々の場の理論のダイナミクスの一部として矛盾なく組み込まれるべきであると要請しているものである。元々の場の理論が相対論的ならば、このように導入した集団座標のダイナミクスも自動的に相対論的なものになる。このような原理に基づいて、本論文では回転するスカーミオンの解が求められた。その形 $U_{\text{rot}}(x, t)$ は、適当な 3 次元ベクトル $y(x, t)$ を用いて $U_{\text{rot}}(x, t) = U(y)$ と与えられる。ここで $U(x)$ は角速度がゼロの場合の静的なスカーミオン解である。この解の形は、自身の回転によって変形しているソリトン解が、剛体近似 $U(R^{-1}x)$ の自然な拡張として、静的なソリトン解の引数を座標変換 $(x \Leftrightarrow y(x, t))$ するだけで得られる、ということの意味している。これは、回転運動のような運動に対しても、並進運動における Lorentz 変換に対応するようなシンプルな幾何学的構造が存在する可能性を示唆している。

非相対論的近似を超えた無矛盾な集団座標の導入という問題意識、静的な解からの座標変換というアイデアや、運動する解を明示的に得られたという結果などは、スカーミオンに限らず、ソリトンのダイナミクスに関して本論文が初めて与えたものであり、更なる興味深い広がり期待できる研究になっている。

「実験値と 30% の誤差がある」ということが 30 年来の定説であったスカーミオンの定量的評価の再考を促す結果が得られたことも本論文の意義である。場の理論として無矛盾に、第一原理からこの結果を求められたことが評価される。

このように、本論文では、非相対論的近似を超えた集団座標の導入という、基本的でありながら未開である問題に挑み、ソリトンのダイナミクスについて新しく興味深い結果を得ることができた。

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、平成 24 年 1 月 17 日論文内容とそれに関連した口頭試問を行った。その結果合格と認めた。