The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	Position space formulation for Dirac fermion on honeycomb lattice
Author(s)	弘津, 晶輝
Citation	大阪大学, 2015, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/52292
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

様式３

論　文　内　容　の　要　旨

氏　名　（　弘津　晶輝　）	
論文題名	Position space formulation for Dirac fermion on honeycomb lattice (蜂の巣格子上でのディラックフェルミオンの実空間定式化)

論文内容の要旨

場の量子論を摂動論によらず数学的に厳密に定義する唯一の方法である格子場の理論に於いて、ニールセン-二宮の定理と抵触せず、より効率的な格子フェルミオン作用を定式化することは、今もなお重要な課題である。近年、グラフェンを含めて様々な低次元物性系に於いて、無質量のディラックフェルミオンが低エネルギーで出現する物質が発見されている。

我々は、グラフェンの電子系と格子場の理論におけるスタガードフェルミオンの間の類似性に着目し、蜂の巣格子上でのディラックフェルミオンの実空間に於ける定式化について議論した。スタガードフェルミオンとの類推から、蜂の巣格子点の自由度の新しいラベリングを行い、六角形単位セルからなる新しい基本格子を導入することで強束縛模型の再定式化を行った。この定式化において、単位セル内の６個の頂点自由度は３フレーバーフェルミオンのスピン自由度として解釈され、ハミルトニアンはそれらの運動項と２階差分項で構成されることが示された。この定式化においては、運動量空間におけるディラック点の構造は簡略化され、次隣接間ホッピングの項を加えても遷移振幅がある値に留まる限り電子構造は安定に保たれることが容易に理解された。

この定式化に基づき、我々はまた蜂の巣格子上での隠された厳密な対称性の具体的表式を与えた。連続極限で存在するフレーバーカイラル対称性は、有限な格子間隔に対してあらわに破れてしまうが、連続極限で消失する格子間隔に比例する項まで許すことで格子上の厳密な対称性が導かれることを示した。この厳密な対称性は連続極限に於いて、連続理論のフレーバーカイラル対称性と一致する。この対称性によりディッラクフェルミオンの質量項は禁止され、単層のグラフェンの電子系に於けるギャップレスの分散構造が、従来の説明とは別に理解されることが示された。また、単層のグラフェンの電子系に対するこの定式化を層間のホッピングが存在する二層グラフェン系に拡張した場合において、この対称性は厳密に残ることが示された。

単層のグラフェンの電子系に於いて、ディラックフェルミオンのもつフェルミ速度が光速に比べて小さいことに起因して、電子間の実効的なクーロン相互作用が強くなる可能性のあることが指摘されている。この定式化は、単層のグラフェンの電子系に於ける非摂動物理の解析において、重要な役割を果たすことが期待できる。

一方、格子場の理論の観点からは、この定式化は２次元の離散格子上に於ける格子フェルミオンの一つとみなすことができる。格子フェルミオンの研究において、近年ではCreutzにより、グラフェンの蜂の巣格子上での定式化を高次元へ拡張した、４次元の超ダイアモンド格子上での格子フェルミオンの定式化が提唱されている。この定式化において、フェルミオンダブリングは最小に抑えることができ、また格子作用が局所性をもつことから高速の数値計算が可能となることが示唆されている。我々の定式化は、このような高次元への拡張への第一歩として位置づけられ、また広い意味において、格子構造を正方格子から非正方格子へ拡張した新しい格子フェルミオンの構成に寄与すると期待できる。

様式 7

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏　名　（　弘津　晶輝　）		
論文審査担当者	（職）	氏　名
	主 査　教授	細谷　裕
	副 査　教授	大野木　哲也
	副 査　准教授	山口　哲
	副 査　准教授	浅野　建一
	副 査　助教	深谷　英則

論文審査の結果の要旨

格子場の理論は場の量子論を摂動論によらず厳密に定義する。近年、様々な低次元物性系に於いて、零質量のディラック・フェルミオンが出現することが知られている。本論文「Position space formulation for Dirac fermion on honeycomb lattice（蜂の巣格子上でのディラックフェルミオンの実空間定式化）」では、グラフェンの電子系と格子場の理論におけるスタガード・フェルミオンの間の類似性に着目し、蜂の巣格子上でのディラック・フェルミオンを実空間において定式化した。蜂の巣格子点を、六角形単位セルからなる新しい基本格子に分解し、６個の自由度を３種のフェルミオンのスピン自由度と同定し、グラフェン電子系の強束縛模型を再定式化、零質量ディラック・フェルミオンの起源を明らかにした。特に、蜂の巣格子上での厳密な離散対称性を新たに発見し、この対称性が連続極限でフレーバー・カイラル対称性となることを示した。この定式化は、単層グラフェン電子系だけでなく、層間のホッピングが存在する二層グラフェン系にも拡張され、この厳密な離散対称性は二層グラフェン系でも残ることが示された。本論文における蜂の巣格子上でのディラック・フェルミオンの定式化は、格子場の理論の観点からも重要な展開点を与える。これまで、素粒子物理学における格子ゲージ理論では、２次元、３次元、４次元の正方格子上で定義され、高度な数値シミュレーションがなされてきた。しかし、この手法ではフェルミオン・ダブリング問題やカイラル・フェルミオン問題が生じ、現実世界の記述や高速の数値計算に困難があった。本論文の蜂の巣格子上での定式化は、ディラック・フェルミオンの非正方格子へ拡張として斬新なアプローチを与え、今後、この分野の発展に大きく寄与すると予想される。よって、本論文は博士（理学）の学位論文として十分価値のあるものと認める。