

学位審査報告書

(ふりがな) 氏名	ふじた みつとし 藤田 充俊
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) Fractional Quantum Hall Effect in the Gauge/Gravity Correspondence (ゲージ/重力対応における分数量子ホール効果)	
論文調査委員	(主査) 畑 浩之 教授 國廣 悌二 教授 小林 達夫 准教授

理学研究科

京都大学	博士 (理学)	氏名	藤田 充俊
論文題目	Fractional Quantum Hall Effect in the Gauge/Gravity Correspondence		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、物性物理学における重要な現象である分数量子ホール効果に対して、超弦理論に基づいた「ゲージ/重力対応」の立場から研究を行ったものである。</p> <p>ゲージ/重力対応とは、超弦理論と超対称 Yang-Mills 理論の間の双対性 (等価性) であり、これにより、直接解析するのが難しい強結合の Yang-Mills 理論を弱結合の超重重力理論を用いて解析する事が可能となる。ゲージ/重力対応は近年活発に研究が行われ、その対象は、素粒子論・原子核物理学・流体力学・物性物理学、等々の多岐にわたり、特に、超伝導系や量子ホール系等の強結合電子系 (=強結合ゲージ理論) への応用が飛躍的に進みつつある。</p> <p>分数量子ホール効果とは、半導体のヘテロ接合面などで実現される2次元電子系に対して垂直に強い磁場をかけると、ホール伝導度のx-y成分が $\sigma_{xy} = -\nu (e^2/h)$ となり、係数 ν が分数の値に量子化されるという現象である。係数 ν は電子占有率 (=全電子数/全磁束数) に等しい。ここで、ホール電流は通常のホール効果の場合と同様に電場と磁場の両方に垂直な方向に流れる。しかし、2次元の量子ホール系において、電子はサンプルの端を除いて局在している。つまり、電子はこの端にそってサイクロトロン運動の方向に流れて行く。この運動の状態は端状態と呼ばれ、分数量子ホール系のトポロジカルな性質を反映するものとして注目されてきた。</p> <p>本論文では、ゲージ/重力対応を用いて分数量子ホール系を表すための超弦理論側のモデルを三種類提案し、それらの解析を行った。第一のモデルでは、分数量子ホール系の有効理論であるところの「端をもつ超対称 Chern-Simons-matter 理論」をゲージ理論側として考える。ここで、この端状態は IIA 型超弦理論のブレーン配置の言葉で表すと、(1+1)次元で交わる D2-D4 系 (または、D2-D8 系) を用いて実現する事ができる。本論文では、この端状態と双対な IIA 超弦理論を解析し、分数に量子化された伝導度を導出した。さらに、二つの異なる分数量子ホール系の境界面をゲージ/重力対応の同様の手法を用いて実現し、ホール伝導度を導いた。二つの異なる分数量子ホール系の境界面は、実験的にも観測されている興味深い系である。</p> <p>第二のモデルでは、ゲージ理論側として pure Yang-Mills-Chern-Simons 理論をとり、これをゲージ/重力対応を用いて解析した。IR 極限においては、ゲージ理論側の Yang-Mills 部分は分離し、分数量子ホール効果の有効理論でもある pure Chern-Simons 理論で記述できる。他方、超弦理論側は、D3-D7 系によって作られている。このモデルにもとづき、重力理論側から分数に量子化されたホール伝導度を導くことが出来た。</p> <p>最後に、第三のモデルでは、IIA 型超弦理論を用いて階層構造をもつ分数量子ホール系を導出する手法を提案した。階層構造をもつ分数量子ホール系とは係数 ν が連分数の形をしているものをいい、複数の準粒子が凝縮することで実現すると考えられている。この系は、超弦理論側として、余剰次元に巻きついた複数の D ブレーンを用いて説明する事ができることを示した。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

多くの分数量子ホール効果は、以前に Halperin 達によって発見された $U(1)$ Chern-Simons 有効理論を用いて容易に解析する事ができる。フェルミオンを自由度とする量子ホール系だけでなく、近年発見された回転する冷却原子系において実現する量子ホール系もまた $U(1)$ Chern-Simons 理論によって記述することができる。

このように、量子ホール系は物性物理の分野で Chern-Simons 有効理論による構成が成功している一方で、これをゲージ/重力対応を用いて解析することも、ゲージ側 (量子ホール系) および重力側 (超弦理論) の双方の理解を深めるために有用であると期待される。例えば、量子ホールプラトー転移はホール伝導度のプラトー間の相転移の事を言うが、プラトー転移近傍は量子臨界になる事が知られており、臨界指数や比熱等の強結合 CFT の物理量はゲージ/重力対応を用いて計算するのが容易であると考えられる。

一方で、量子重力理論としての超弦理論の立場から量子ホール系を見る事も興味深い。先に述べた量子ホールプラトー転移は、超弦理論においてはブレーンのチャージの変化、すなわち、ブレーンの生成/消滅に対応すると解釈できる。つまり、量子ホールプラトー転移は、時空のトポロジーの変化に対応すると考えられ、量子重力理論の深い理解につながると期待される。

本論文では、ゲージ/重力対応を用いて分数量子ホール系を表すための超弦理論側のモデルを三種類提案し、それらの解析を行った。これにより、端状態、階層構造、そしてトポロジカルエンタングルメントエントロピーのような分数量子ホール効果において重要な物理が、超弦理論と M 理論を用いて導出された。

第一のモデルでは、ゲージ理論側は分数量子ホール系の端状態、そして超弦理論側はアンチドジッター空間に巻きつく D ブレーンとして、両者の間の双対性に着目し、超弦理論側の D ブレーンを解析する事により量子化されたホール伝導度を導いた。さらに、二つの異なる分数量子ホール系の境界面をゲージ/重力対応の同様の手法を用いて実現し、ホール伝導度を導いた。二つの異なる分数量子ホール系の境界面は、実験的にも観測されている興味深い系になっている。

第二のモデルでは、超弦理論側として D3-D7 系をとり、量子化されたホール伝導度を導いた。特に、このモデルにおけるゲージ/重力対応が、Chern-Simons 理論の level と rank を入れ替える双対性に等しいという事を示した。この解析では、D7 ブレーンに対しバックリアクションを考慮しない近似を用いて扱ったが、続く別グループのより完全で興味深い解析につながる端緒となった。

第三のモデルでは、超弦理論側として余剰次元に巻きついた複数の D ブレーンをとることにより、階層構造をもつ分数量子ホール系をゲージ/重力対応から初めて導出することに成功している。

以上のように、本論文はゲージ/重力対応にもとづいた分数量子ホール効果に対する先駆的で独創的な研究であり、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 23 年 1 月 18 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。