

平成30年6月5日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K13479

研究課題名（和文）非自明な時空でのQCD真空構造の探求

研究課題名（英文）Research on the QCD vacuum structure with nontrivial spacetime geometry

研究代表者

福島 健二（Fukushima, Kenji）

東京大学・大学院理学系研究科（理学部）・教授

研究者番号：60456754

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,400,000円

研究成果の概要（和文）：相対論的なフェルミ粒子系に強い外部磁場が印加されている状況で、回転、膨張など時空の効果を取り入れた研究を行った。このような研究は相対論的重イオン衝突実験をはじめとして、中性子星内部の状態や、物性実験の理論的な記述にも必須である。回転を適切に取り入れるためには有限サイズ系に境界条件を課すことが重要であることを指摘し、そのとき境界表面に異常に磁場の効果を感じるような波動関数の堆積が見られることを明示的な計算によって示した。

研究成果の概要（英文）：We made investigations on relativistic Fermi particle systems under strong external magnetic field, taking account of rotation, expansion, and such nontrivial geometrical effects. This research should have essential importance for theoretical understanding on relativistic heavy-ion collision experiments, internal structures of the neutron star, and table-top experiments with condensed matter materials. We pointed out that it is crucial to impose proper boundary condition on surface of a finite-size system in order to describe rotation effects correctly. Then, we explicitly demonstrated that the wave-functions are accumulated near the surface and they effectively respond to the magnetic field very strongly.

研究分野：原子核理論

キーワード：カイラル対称性 クォーク多体系 回転座標系 膨張座標系 真空の構造

1. 研究開始当初の背景

クォークとグルーオンからなる強相関系の相関を明らかにすることは、クォークとグルーオンの相互作用を記述する基礎理論である「量子色力学 (QCD)」における最大の未解決問題のひとつである。高温状態の QCD 物質については、格子 QCD 数値計算によってカラー非閉じ込めや、カイラル対称性の回復が確認されており、相対論的重イオン衝突実験によっても現象論的な研究が精力的になされてきた。実験的にカラー非閉じ込めやカイラル対称性の回復を実証することは容易ではないが、熱的フィットなど、格子 QCD 数値計算と整合性のある現象論的解析が成功を収めてきた。その一方、高バリオン密度では符号問題のため格子 QCD 数値計算が機能しない。そのため QCD 相関には理論的不定性が大きく、仮定によらない結論を導き出すことが極めて難しい。

重イオン衝突実験では、衝突の幾何学的配置によって高強度の磁場が発生することが予想されており、これは古典電磁気学的な考察から一般に結論されるものである。そこで格子 QCD 数値計算の困難な高バリオン密度状態を考える代わりに、まず符号問題のない強磁場中のクォークの振る舞いについて、格子 QCD 数値計算を始めとする様々な研究がなされるようになった。その昔、バリオン化学ポテンシャルの代わりに、符号問題のない類似量 (例えばアイソスピン化学ポテンシャルなど) を導入することが流行ったものだった。磁場の導入は、このような過去の研究の流れを受けるものであると同時に、実験的にその存在がほぼ確実である点が、アイソスピン化学ポテンシャル等とは大きく異なる。重イオン衝突実験だけでなく、中性子星の内部構造や初期宇宙、あるいは実験室中の物性実験を考えても、磁場によって誘起される重要な物理的効果の例を挙げれば、きりが無い。

磁場については、ここ 10 年間ほどで新規参入する多くの研究グループが数えきれないほどの理論研究を行った結果、磁気触媒効果だけでなくいわゆる逆磁気触媒効果など、当初は予想されていなかった新発見も含めて多くの有意義な知見が得られた。

このように強磁場物理の研究が一段落した現在、もしも磁場と同じような、符号問題がなく、実際の実験環境と (原理的にでも) 密接な関係があり、さらにトポロジ的に非自明な効果など豊富な物理を内在するような「外場」があれば、磁場研究で得た経験を生かして、新たな「外場」効果を取り入れた新しい研究を始めるべきであろう。本研究ではこのような「外場」の候補として特に「非自明な計量」の効果に注目する。重イオン衝突実験で実現される高温物質はほぼ光速で膨張しており、膨張系では (曲率はフラットだが) 計量が非自明となる。同様に、重イオン衝突実験では、強磁場を生じるような衝突条件下では、高温物質は軌道角運動量を持つ

て回転しているはずである。回転系では (やはり曲率はフラットだが) 非自明な計量が必要である。また曲率が効いてくる例としては、初期宇宙における粒子生成の問題等が挙げられる。このような膨張系、回転系、大きな曲率のもとでの QCD 物理研究は、本研究の開始当初では手本とすべき先行研究もほとんど見当たらない状況であった。

2. 研究の目的

膨張系、回転系、曲がった空間など、非自明な時空における QCD 真空構造の変化を研究する。例えば de Sitter 空間における曲率は、有限サイズ効果と同様の働きをするはずで、それは即ち、有限温度効果と同様の働きであることも意味している。de Sitter 空間で NJL 模型を平均場近似で解いた先行研究はあるものの、特殊関数を駆使した表式の中から単純な物理的解釈を読み取ることは容易ではない。本研究では、単に技巧的な計算を遂行するだけでなく、ときには見通しを良くするための近似や極限操作等を組み合わせ、複雑な計算の背景にある「物理」を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

曲がった時空、より一般に非自明な計量を持つ時空上の場の量子論の取り扱いが理論的に良く知られている。熱核展開など近似処方も確立している。しかし例えば回転系を考えた場合には、因果律を破らないようにするためには系のサイズを有限にする必要があり、単に計量を入れた計算をするだけでは不十分である。前述したように強磁場中での QCD 研究はここ 10 年間ほどで爆発的に理解が進んだのだが、系の有限サイズ効果を取り入れた先行計算はほとんど存在しない。これは計算が技術的に難しくなる割には、小さな補正効果しかないだろうと考えられていたためだが、回転の場合には因果律という強い拘束が要請されるため、有限サイズ効果は避けて通れない問題である。本研究では全ての効果を取り入れた理論研究を遂行する。

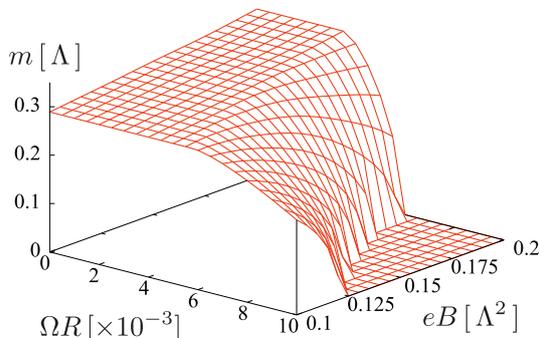
4. 研究成果

【回転する量子フェルミ粒子系】

回転系の扱いは原子核物理学ではクラッキング項としてよく知られている。実際、回転系の計量を入れて真面目に計算すると、ハミルトニアンにクラッキング項を入れるのと同じ結果になる。それは即ち、回転の効果は、ハミルトニアンを角運動量に比例する項だけシフトさせることで取り入れられることを意味する。一方、有限化学ポテンシャルの入った系も同じように、エネルギーのシフトによって記述される。この考察から、回転効果と有限密度効果とのアナロジーが自然と予想される。

我々はこの予想を定量化するために、回転と磁場が共存するフェルミ粒子系で、平均場

近似を用いてカイラル凝縮を計算し、磁気触媒効果について研究した。ゼロ密度では通常、カイラル凝縮は外部磁場とともに大きくなり、これは「磁気触媒効果」の発現だと考えられている。一方、高密度では、カイラル凝縮は磁場とともに小さくなり、このような特殊な振る舞いは「逆磁気触媒効果」と呼ばれている。



上図は、回転角速度 Ω と磁場の大きさ B の関数としてカイラル凝縮をプロットしたものである。 Ω が大きい領域では、 B を大きくするとともにカイラル凝縮が融けて小さくなる様子を見てとることができる。これは正しく逆磁気触媒効果に他ならず、回転と密度とのアナロジーの正当性を示す結果となっている。

【回転に対する有限サイズ効果】

上述の我々の結果を受けて、類似の研究を追従するグループが現れた。しかしその中には非物理的な主張も含まれていた。即ち、回転は有効的に化学ポテンシャルを誘起するのだから、量子的な真空を回転させることで有限密度が出てくる、というような主張である。ボーズ粒子系について、回転だけでボーズ・アインシュタイン凝縮を生成できないことは古くから知られており、この説明のためには系の有限サイズ効果を取り入れなければならない。

ボーズ粒子系の理論的な扱いをフェルミ粒子系にあてはめるのは、実はそれほど容易ではない。何故なら、フェルミ粒子はスピノルなのでスピンの異なる状態が並んでおり、スピノルの全ての成分を同時にゼロにするような離散運動量は存在しないからである。我々はこの困難を克服するために、波動関数の全成分を境界でゼロにする条件ではなく、波動関数による境界外側へのフローが消えるような条件を採用した。これによりフェルミ粒子系に対しても、ボーズ粒子系と同等の運動量離散化条件を導くことができた。

運動量の離散化の特徴的なスケールは、系のシリンダー半径の逆数で与えられる。換言すれば、フェルミ粒子は運動量の量子程度の質量を持っているようなものであり、有効的な化学ポテンシャルがこの質量の閾値を超えない限り、回転は何も起こさないのである。有効的な化学ポテンシャルは、全角運動量と

角速度の積で与えられており、いま、シリンダーの外周部が光速を超えないことより、角速度の上限は、系のサイズの逆数に比例する。面白いことに、離散運動量の量子と、有効的な化学ポテンシャルの大きさは、どちらも同じ系のサイズ分の1、となる。我々は Bessel 関数のゼロ点の性質から、離散運動量の量子が常に有効的な化学ポテンシャルよりも大きい、ということを実証した。これはつまり、(量子揺らぎの詰まった)真空を回したとしても、勝手に密度が出てきたりはしないことを意味している。

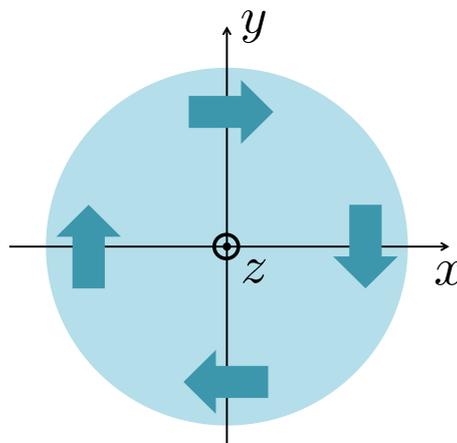
【膨張する時空上のカイラル運動理論】

回転と並行して、1次元縦膨張する時空での時間発展方程式について研究し、新しいトポロジ的な効果を見出した。

1次元膨張系での運動論(ボルツマン方程式)は良く理解されており、重イオン衝突実験の熱化シミュレーションにも頻繁に活用されている基本方程式である。近年、ボルツマン方程式にスピンの自由度を取り込んだ「カイラル運動理論」が盛んに議論されており、我々は将来の応用に向けて、1次元膨張系におけるカイラル運動理論の定式化、という問題に挑んだ。

ここで最も厄介な問題は、普通のボルツマン方程式とは違って、ローレンツ変換のもとでの変換性が複雑な点である。実際、分布関数がローレンツ・スカラーではないことを反映して「サイド・ジャンプ」と呼ばれる余分な座標変換を施さないと、理論をローレンツ不変にできないのである。

我々は試行錯誤の末、サイド・ジャンプを正しく取り入れた膨張系のカイラル運動理論を構築することに成功した。その結果、サイド・ジャンプの影響により、膨張に対して横向きに粒子分布を見ると(下図参照)縦方向の座標に依存して、カイラルなズレが生じることを見出した。我々はこの効果を「カイラル回転変位」と命名した。



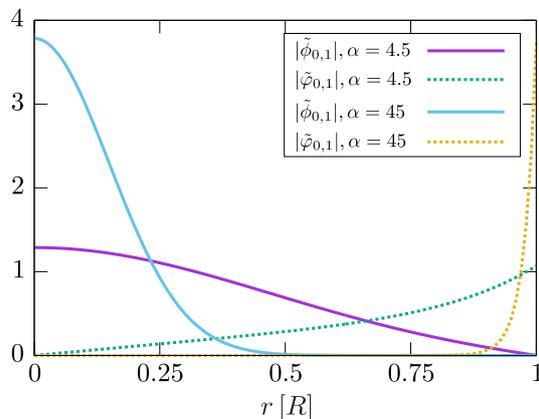
【有限サイズ系における磁気触媒効果】

すでに回転と磁場が共存する系について論文を発表していたが、そのときにはまだ境界条件の重要性に気付いていなかった。そこ

で境界を取り入れた計算をするための準備として、まず、有限半径のシリンダー内部に閉じ込められた物質について、磁気触媒効果がどのように変更されるのか調べた。

境界の効果を無視すると、ランダウ縮重度は系のサイズ（あるいは系全体に印加された磁束）に比例する。このような近似的な扱いは、小さい半径や弱い磁場に対して破綻する。我々は正確に解いた波動関数で完全系を張り、境界に関しては近似を入れない計算を完遂した。具体的には、運動量積分は、Bessel-Fourier 展開のモード和に置き換えられる。

計算の結果、系の驚くべき挙動を発見した。下図で、 α は系の半径 2 乗と磁場に比例する無次元パラメータである。 α が大きいときにはゼロモード（青い実線）がシリンダー中央付近で支配的になっている。励起モード（黄色い点線）は境界に押し付けられており、もし境界が遙か遠くにあれば、このモードの寄与は無視できると考えられる。ここで注目すべきは、この無視できるように思われるモードの重みが非常に大きくなっていることである。この重みは Bessel-Fourier 展開に付随する重みであって、単純に数学的に導かれるものである。この重みの効果により、無視できると考えられた波動関数は、境界の直上では非常に大きな振幅を持っており、表面状態に大きな効果が見えることを示唆している。



波動関数の挙動から示唆される効果を検証するために、局所密度近似（密度の微分項を無視する近似）を用いてカイラル凝縮の値を半径の関数として求めた。その結果、磁場中の有限系は、シリンダー中心付近では通常の磁気触媒効果を感じ、境界付近では、励起モードの蓄積によって実質的に強い磁場を感じるようになることを見出した。

その後、表面効果は、トポロジ的なカレント期待値に対して通常とは逆の寄与を出すことを発見し、現在、論文として発表するための準備を進めている。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 19 件）

他に現在投稿中の論文が 3 件

① Hao-Lei Chen, Kenji Fukushima, Xu-Guang Huang, Kazuya Mameda, Surface magnetic catalysis, Phys. Rev. D96, 054032 (2017) [DOI: 10.1103/PhysRevD.96.054032]、査読有り

② Shu Ebihara, Kenji Fukushima, Shi Pu, Boost invariant formulation of the chiral kinetic theory, Phys. Rev. D96, 016016 (2017) [DOI: 10.1103/PhysRevD.96.016016]、査読有り

③ Hao-Lei Chen, Kenji Fukushima, Xu-Guang Huang, Kazuya Mameda, Analogy between rotation and density for Dirac fermions in a magnetic field, Phys. Rev. D93, 104052 (2016) [DOI: 10.1103/PhysRevD.93.104052]、査読有り

〔学会発表〕（計 40 件）

① Kenji Fukushima, "Extreme Matter in Strong External Electromagnetic Fields", Nuclear Physics School in Erice, Erice, Italy, 2016 年 9 月 19 日発表（招待講演）

② Kenji Fukushima, "Magnetic shift of the chemical freezeout and electric charge fluctuations", Workshop on Magnetic Fields in Hadron Physics, Sao Paulo, Brazil, 2016 年 5 月 9 日発表（招待講演）

③ Kenji Fukushima, "Dynamically and Spatially Assisted CME", QCD Chirality Workshop 2016, Los Angeles, USA, 2016 年 2 月 23 日発表（招待講演）

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕

6. 研究組織

(1) 研究代表者

福嶋 健二 (FUKUSHIMA, Kenji)

東京大学・大学院理学系研究科・教授

研究者番号：60456754

(4) 研究協力者

Antonino Flachi

Xu-Guang Huang

豆田 和也 (MAMEDA, Kazuya)