

令和 5 年 5 月 16 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K21874

研究課題名（和文）回転とカイラリティの誘起する新奇物性現象の探索

研究課題名（英文）Search for anomalous phenomena induced by rotation and chirality

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） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：強い相互作用をする物理系、より具体的にはクォークとグルーオン、またそれらの束縛状態であるメソン、バリオン的高温状態が、超高速で回転している場合に、相転移に与える影響を理論的に解析した。その結果、質量の起源であるカイラル相転移だけでなく、物質の成り立ちにとって本質的である閉じ込め・非閉じ込め相転移に対しても、回転は相転移温度を押し下げることが確認された。また計算ステップで虚数角速度を導入する必要があり、虚数回転している場合には高温極限の弱結合であっても常に閉じ込めが成立していることを示すことができた。これは全く新しい閉じ込め機構の発見である。挑戦的萌芽研究にふさわしい成果を上げることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

回転は身近な現象である。しかし決して易しい学問対象ではない。その理由は、特に高速回転は、一般相対論的な効果だからである。我々は高温グルーオン物質に対して回転の効果を取り入れたが、非アーベル的なゲージ場およびゴースト場が混在するような状況で、正しく回転を取り入れた計算は、手本とすべき先行研究もなく、まさに萌芽的な研究そのものだった。我々の結果は原子核がずれ衝突する場合や、回転する中性子星などに応用できるものであり、なおかつ基礎科学研究としても、カラー閉じ込めという未解決問題に果敢に挑む新たな切り口を提供することができた。単に計算して結果を出しただけでなく、新しい考え方を切り拓くことに成功した。

研究成果の概要（英文）：In heavy-ion collision experiments and also in neutron stars, hadronic matter made from quarks and gluons, elementary particles feeling the Strong Interaction, can rotate rapidly. Then, the interesting question is how the rotation could affect the phase transition temperatures; the chiral phase transition associated with the origin of the mass, and the deconfinement phase transition where meson and baryons melt into dissociated quarks. We found that the phase transition temperature is lowered by the rotation effect. On top of it, we discovered that the imaginary rotation, which is necessary as an intermediate step in theoretical calculations, could induce confinement even in a weakly coupled regime at arbitrarily high temperatures. We believe that our achievement is innovative enough, and is well in accord with this research project.

研究分野：原子核理論

キーワード：相対論的回転 クォーク閉じ込め 量子色力学 カイラル対称性 QCD相図 強磁場

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

いわゆる QCD 相図研究と呼ばれる研究分野がある。身の回りの物質を構成する素粒子のなかでも、クォークとグルーオンは「強い相互作用」の主役であり、原子核を形作っている。さらに面白いことに、クォークとグルーオンはもともと質量を持たない（あるいは非常に軽い）素粒子であり、これらの相互作用エネルギーが物質の質量をもたらしていることも分かっている。温度やバリオン密度を核子（原子核の構成要素である陽子・中性子の総称）のサイズの逆数と同程度のスケールまで大きくすると、核子のようにクォークの閉じ込められたハドロンから、クォークの自由度が解放される「非閉じ込め相転移」が起こるものと期待される。具体的には温度を 2 兆度程度まで上げるとクォークの自由度が見えてくる。密度については符号問題という理論上の困難のためにまだ確定的なことは分かっていないが、原子核の中心部の密度（標準核密度）の 2～5 倍程度でクォーク物質へと転化するものと考えられている。前述のように閉じ込めを引き起こす強い相互作用は質量の起源にもなっており、そのため、非閉じ込め相転移を実現させるような極限環境下では質量も大きく変化すると考えるのが自然である。このような質量に関する相転移を「カイラル相転移」と呼ぶ。温度とバリオン密度を変数にとったときの非閉じ込め相転移・カイラル相転移の様相を詳しく調べる試みが、QCD 相図の研究である。

しかし QCD 相図はなにも温度とバリオン密度のみに限定されるものではない。最近大きな話題となった進展は、強磁場の効果によってもたらされた。磁場はグルーオンとは直接結合せず、電荷を持つクォークを通してその効果が見えるので、理論上は、有限密度系と似た側面を持っている。様々な理論研究によって、磁場によるカイラル相転移温度の変化が予言されていたのだが、強磁場中の格子 QCD 計算技術が進展した結果、理論予想が間違っていたことが明白となった。このことは同様の理論的枠組から予言されていた有限密度系の性質についても疑義を喚起することになり、旧来の理論研究が見直される契機となったのだ。同様のパラダイム・シフトが、回転効果を考えることによって、再びもたらされようとしている。回転を入れた相転移温度の変化について、様々な理論予言と格子 QCD 計算に定性的な食い違いが報告されている。研究開始当初の段階ではどちらが正しいのかまだ分からない状況だった。

2. 研究の目的

- (1) 回転を取り入れた QCD 相図研究の理論的枠組を整備し、特に、クォークだけでなく、グルーオンも一緒に回転するときの閉じ込め・非閉じ込め相転移の様子を明らかにする。
- (2) 熱化した相対論的物理系に回転を取り入れたときの流体理論、すなわちスピン流体力学について、理論的な不定性を解消する。
- (3) カイラル性の効果を考慮して、強磁場中や回転系において、有限密度とカイラル性のトポロジ的な関係を明らかにする。

3. 研究の方法

研究目的の (1)～(3) に対応して、以下に、それぞれ具体的な方法を述べる。

- (1) 従来は有効模型としてカイラル模型を使った研究しかなかったのだが、これではクォークの回転効果しか調べることができない。グルーオンセクターの変化を定量化するためには、明示的にグルーオンを含む物理系を記述する枠組の中で非閉じ込め相転移と回転を取り扱わなければならない。これは一般的に難しいのだが、我々は (ア) ハドロン共鳴ガス模型による圧力の急上昇を非閉じ込めと同定する。(イ) 高温非閉じ込め相で摂動計算を用いて非閉じ込め相転移の秩序変数あるいはその有効ポテンシャルを計算する。というアプローチで、この難問に挑戦する。
- (2) スピン流体力学をエントロピー原理から定式化し、対称なエネルギー運動量テンソルを用いた場合でもスピン自由度がなくなってしまうわけではないことを確認する。このために必要なのは、非対称成分を持つエネルギー運動量テンソルに基づく流体力学の定式化を出発点として、それをあからさまに擬ゲージ変換することで、対称な定式化へと対応付けることである。
- (3) カイラル性と磁場、回転、密度の全てを取り入れた最も QCD に近い理論形式は、スキーム模型である。スキーム模型は QCD でカラー数を無限大にしたときに得られる理論形式で、バリオン数（密度）はトポロジ的な巻きつきによって実現している。この模型で再現されたバリオンの性質をもとに、磁場や回転を取り入れることで、信頼できる理論予言が可能となる。

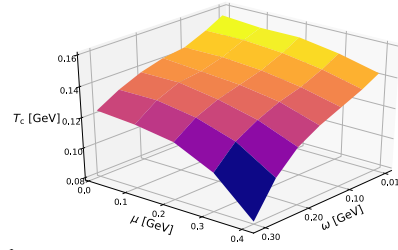
4. 研究成果

研究の目的・方法の (1)～(3) に対応して、以下に、それぞれ主要な成果を述べる。

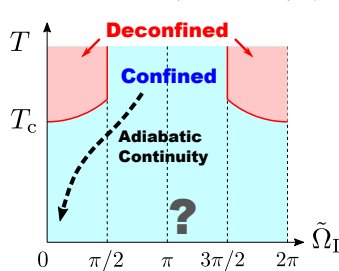
(1) ハドロン共鳴模型は、相互作用しないハドロンや共鳴状態のガスを考えると、励起を通して全ての相互作用が取り入れられていると仮定される模型であり、逆に言うとそれ以外に恣意的な仮定が入っていない。模型の勝手なパラメータが入っていないので、未知のパラメータを適

した温度・密度依存性による不定性がなく、信頼できる理論予言が可能である。

この模型では、ある温度で圧力が急速に上昇することが知られており、物理的には非閉じ込め相転移と解釈することができる。ここで面白いのは、模型はあくまでハドロンという閉じ込められた自由度で定義されているのに、有効的に閉じ込めによる自由度の解放が、励起状態を通して取り込まれている点である。右図に示したのが、こうして評価された非閉じ込め相転移温度の、バリオン密度（化学ポテンシャル）と回転角速度に対する依存性である。この結果では明らかに非閉じ込め相転移温度が、高密度、高速回転で、小さくなっている。つまり回転と密度の効果は非常に似たものになっている。従来のカイラル模型でも、非閉じ込め相転移ではなくカイラル相転移に対してではあるが、同じ傾向を示す結果が得られており、格子 QCD 計算とは整合しない。（文献[1]）



更にこの問題を深掘りするために、格子 QCD 計算と全く同じ状況、すなわちクォークのない純粋のグルーオンだけの理論で、摂動展開計算を遂行した。もともとの動機は非閉じ込め相転移を特徴付ける秩序変数であるポリアコフープの有効ポテンシャルの振る舞いから、回転が非閉じ込めを助けるのかそうでないのか、定性的に調べることだった。ところが実際に計算を実行したところ、格子 QCD 計算で実装されているように回転角速度を純虚数で取り入れると、予期していなかった閉じ込め相転移が起こることが分かった。（文献[2]）

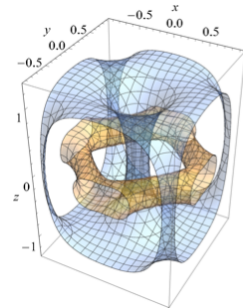


左図が相転移の様子を模式的に図示したものである。横軸が虚数角速度であり、縦軸が非閉じ込め相転移温度を表している。相転移温度は虚数角速度とともに上昇しており、それは即ち、実角速度の増加に対しては、減少関数であることを意味している。つまり、この計算結果は、ハドロン共鳴模型とコンシステントになっていることが分かる。それ以上に驚くべきことは、どんなに高温であっても、虚数角速度がある臨界値を超えると、閉じ込め相が実現するという点である。高温なので摂動論が信頼できる領域であり、そのような弱結合の摂動領域で、本来は非摂動的な

現象である閉じ込めが起きていることになる。これはカラー閉じ込め研究全体に一石を投じる衝撃的な結果であり、本研究プロジェクトで得られた最大の成果の一つに数えられる。

(2) スピン流体力学については技術的な詳述を避け、成果のみを述べる。流体力学の根幹をなすものはエネルギー運動量テンソルの保存則であり、スピン流体力学の困難は、エネルギー運動量テンソルの定義が一意でないことに起因している。従来はいわゆる、ネーターの定理によって得られる非対称成分を含むエネルギー運動量テンソルで定式化が与えられていたのだが、我々はベリンファンテ修正を受けた対称なエネルギー運動量テンソルに対する解析を行った。これは単に技術的な修正ではなく、ゲージ理論を扱う際には、観測量がゲージ不変であるべきだという要請から、対称化されたエネルギー運動量テンソルの方が本質的である。我々は対称化した場合にも従来の結果が再現されることを示してみせただけでなく、その副産物として、熱流や圧力、内部エネルギー等にスピン密度から補正項が出てくることを見出した。これはとりもなおさず、系がゼロでないスピン密度を持つときには、スピンの誘起される熱流等が出てくることを意味しており、従来の計算では見落とされていた効果である。（文献[3]）

(3) 最後にスキーム模型による磁場と回転（内部空間での回転によるスピン・アイソスピン自由度の導入）について成果を報告する。これまで強磁場中のメソン質量の変化等は格子 QCD 計算で先行研究がなされてきたが、バリオンの性質変化についてはまだ研究の端緒にすらついていない。我々はメソン場のソリトンで実現されるバリオン（スキルミオン）を外部磁場中で解き、右図のようにメソン場の巻き付きが磁場でほどけることがないことを数値的に確認した。またこのソリトンを回転量子化し、陽子と中性子の質量や磁気モーメントの性質変化を初めて理論的に予言した。面白いことに陽子中のエネルギー運動量テンソルも計算することが可能で、圧力バランスから、閉じ込めメカニズムが磁場から受ける影響を定量的に明らかにすることにも成功した。近い将来、格子 QCD 計算が我々の予言を確かめてくれるだろう。（文献[4]）



参考文献

- [1] Y. Fujimoto, K. Fukushima, Y. Hidaka, Phys. Lett. B816, 136184 (2021).
- [2] S. Chen, K. Fukushima, Y. Shimada, Phys. Rev. Lett. 129, 242002 (2022).
- [3] K. Fukushima, S. Pu, Phys. Lett. B817, 136346 (2021).
- [4] S. Chen, K. Fukushima, Z. Qiu, Phys. Rev. D105, L011502 (2022).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計16件（うち査読付論文 16件 / うち国際共著 3件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Chen Shi, Fukushima Kenji, Shimada Yusuke	4. 巻 129
2. 論文標題 Perturbative Confinement in Thermal Yang-Mills Theories Induced by Imaginary Angular Velocity	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 242002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.129.242002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Fujimoto Yuki, Fukushima Kenji, McLerran Larry D., Praszalowicz Micha?	4. 巻 129
2. 論文標題 Trace Anomaly as Signature of Conformality in Neutron Stars	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 252702
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.129.252702	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Fujimoto Yuki, Fukushima Kenji, Hotokezaka Kenta, Kyutoku Koutarou	4. 巻 130
2. 論文標題 Gravitational Wave Signal for Quark Matter with Realistic Phase Transition	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 91404
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.130.091404	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Chen Shi, Fukushima Kenji, Qiu Zebin	4. 巻 105
2. 論文標題 Skyrmions in a magnetic field and 0 domain wall formation in dense nuclear matter	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 L011502
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.105.L011502	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Fukushima Kenji, Okutsu Akitoshi	4. 巻 105
2. 論文標題 Electric conductivity with the magnetic field and the chiral anomaly in a holographic QCD model	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 54016
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.105.054016	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Fukushima Kenji, Shimazaki Takuya, Tanizaki Yuya	4. 巻 2022
2. 論文標題 Exploring the η -vacuum structure in the functional renormalization group approach	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 40
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP04(2022)040	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Fukushima Kenji, Shimazaki Takuya, Wang Lingxiao	4. 巻 102
2. 論文標題 Mode decomposed chiral magnetic effect and rotating fermions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 14045
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.102.014045	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Chen Shi, Fukushima Kenji, Nishimura Hiromichi, Tanizaki Yuya	4. 巻 102
2. 論文標題 Deconfinement and CP breaking at $\theta=\pi$ in Yang-Mills theories and a novel phase for SU(2)	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 34020
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.102.034020	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Fukushima Kenji, Kojo Toru, Weise Wolfram	4. 巻 102
2. 論文標題 Hard-core deconfinement and soft-surface delocalization from nuclear to quark matter	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 96017
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.102.096017	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Fujimoto Yuki, Fukushima Kenji, Murase Koichi	4. 巻 2021
2. 論文標題 Extensive studies of the neutron star equation of state from the deep learning inference with the observational data augmentation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 273
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP03(2021)273	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Fujimoto Yuki, Fukushima Kenji, Hidaka Yoshimasa	4. 巻 816
2. 論文標題 Deconfining phase boundary of rapidly rotating hot and dense matter and analysis of moment of inertia	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 136184 ~ 136184
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2021.136184	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Abe Yuya, Fukushima Kenji, Hidaka Yoshimasa, Matsueda Hiroaki, Murase Koichi, Sasaki Shoichi	4. 巻 2020
2. 論文標題 Image-processing the topological charge density in the $\mathbb{C}P^{N-1}$ model	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 013D02
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptz134	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Fukushima Kenji	4. 巻 107
2. 論文標題 Extreme matter in electromagnetic fields and rotation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Progress in Particle and Nuclear Physics	6. 最初と最後の頁 167 ~ 199
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.pnpnp.2019.04.001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Fukushima Kenji, Hidaka Yoshimasa	4. 巻 4
2. 論文標題 Resummation for the field-theoretical derivation of the negative magnetoresistance	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 162
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP04(2020)162	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Fukushima Kenji, Imaki Shota, Qiu Zebin	4. 巻 100
2. 論文標題 Anomalous Casimir effect in axion electrodynamics	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 45013
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.100.045013	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Fukushima Kenji, Shimazaki Takuya	4. 巻 415
2. 論文標題 Lefschetz-thimble inspired analysis of the Dykhne-Davis-Pechukas method and an application for the Schwinger Mechanism	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Annals of Physics	6. 最初と最後の頁 168111 ~ 168111
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.aop.2020.168111	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

[学会発表] 計22件(うち招待講演 20件/うち国際学会 19件)

1. 発表者名 Kenji Fukushima
2. 発表標題 Electric Conductivity and Chiral Anomaly -- perturbative and holographic perspectives
3. 学会等名 Holographic perspectives on chiral transport (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kenji Fukushima
2. 発表標題 A Possibility of Twisted Gauge Backgrounds and Chirality Production in the Heavy-Ion Collision
3. 学会等名 Chirality, Vorticity and Magnetic Field in Heavy Ion Collisions (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kenji Fukushima
2. 発表標題 Confinement induced by imaginary angular velocity and a conjectured phase diagram
3. 学会等名 QCD and Gauge/Gravity Duality (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kenji Fukushima
2. 発表標題 Crossover toward Quark Matter in Neutron Stars
3. 学会等名 XVth Quark Confinement and the Hadron Spectrum (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 KenjiFukushima
2. 発表標題 Gravitational Waves Probing Quark Matter Crossover
3. 学会等名 XXIXth Quark Matter 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kenji Fukushima
2. 発表標題 QCD/Quark equation of state for neutron stars
3. 学会等名 The 19th International Conference on Strangeness in Quark Matter (SQM) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 福嶋健二
2. 発表標題 高密度バリオン物質におけるダイクォーク
3. 学会等名 物質階層を横断する会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kenji Fukushima
2. 発表標題 QCD Phase Diagram
3. 学会等名 XIX Mexican School of Particle and Fields (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kenji Fukushima
2. 発表標題 Spin and Chirality in Hydrodynamics
3. 学会等名 The 6th Chirality, Vorticity and Magnetic Field in HIC (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kenji Fukushima
2. 発表標題 Hadron Spectroscopy Toward Dense Matter
3. 学会等名 2nd J-PARC HEF-ex Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 福嶋健二
2. 発表標題 Chiral and Vortical Matter in the Relativistic Heavy-Ion Collision
3. 学会等名 日本物理学会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kenji Fukushima
2. 発表標題 Extreme matter in electromagnetic fields and under rotation
3. 学会等名 Spin and hydrodynamics in relativistic nuclear collisions (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kenji Fukushima
2. 発表標題 Rotating Relativistic Matter and Angular Momenta
3. 学会等名 XXXII International Workshop on High Energy Physics "Hot problems of Strong Interactions" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kenji Fukushima
2. 発表標題 Magnetic Fields and Thermal QCD
3. 学会等名 Polarisation measurements in ee, ep, pp and heavy-ion collisions (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kenji Fukushima
2. 発表標題 Particle Pair Production and Quantum Anomaly
3. 学会等名 The Schwinger Effect and Strong-Field Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kenji Fukushima
2. 発表標題 Some Topics on Hadrons in Extreme Environments
3. 学会等名 Functional Methods in Strongly Correlated Systems (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kenji Fukushima
2. 発表標題 New Developments in Magnetic Field and Rotation Induced Effects
3. 学会等名 The 5th Workshop on Chirality, Vorticity and Magnetic Field in Heavy Ion Collisions (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kenji Fukushima
2. 発表標題 Photon and CGC
3. 学会等名 The 36th Heavy Ion Cafe (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kenji Fukushima
2. 発表標題 Quark Matter under Rotation
3. 学会等名 Theory of Hadronic Matter under Extreme Conditions (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kenji Fukushima
2. 発表標題 Chirality, Helicity, Anomaly in High-Energy Nuclear Physics
3. 学会等名 Quantum Systems in Extreme Conditions (QSEC2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kenji Fukushima
2. 発表標題 The decomposition and the interpretation of the orbital and the spin angular momenta
3. 学会等名 New Development of Hydrodynamics and Its Applications in Heavy-ion Collisions (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kenji Fukushima
2. 発表標題 RG-type flow diagram of the distribution and the scaling solutions
3. 学会等名 Turbulence of all kinds (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関