

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 24 日現在

機関番号：12611

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2023

課題番号：18K18765

研究課題名（和文）原初超巨大ブラックホールが作る多様な銀河たち

研究課題名（英文）diverse galaxies from early formed supermassive black holes

研究代表者

森川 雅博（Morikawa, Masahiro）

お茶の水女子大学・基幹研究院・教授

研究者番号：90192781

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,200,000円

研究成果の概要（和文）：原初超巨大ブラックホール(SMBH)と銀河の研究は以下のように広がっている。SMBH形成問題の核心は、SMBHとダークハロー-DHの分離である。アクシオン暗黒物質のボース・アインシュタイン凝縮を考察した。そこから、どのように秩序変数を生成するかを提案した。そこから、惑星構造の二分法を示した。銀河形成とジェット：SMBHからのジェットが星や銀河の形成に不可欠であることを提案した。ノット構造の普遍性を確率共鳴からの磁極反転によって示した。1/fゆらぎの起源は振幅変調であることを提案した。以上の検証として、音楽、地震、火山噴火、太陽フレア、変光星、FRB、QPO、BH/DISK系にまで議論を広げた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

以下の通り、定説と対立する考えをたくさん提案したことに学術的意義がある。

銀河や星より先にSMBHができたという提案（先にできた星が超新星爆発を起こしBHに至ったなどの定説と対立する） DMがBEC状態でSMBH形成を促したという提案（DMは速度分散を持つガス状態として存在するという定説と対立する） 秩序変数はスクイーズド状態を経て現れるという提案（その記述はできないという定説と対立する） ジェットは磁場の磁極反転からプラズモンとして生成（ジェットはBZ機構から生成するという定説と対立する） 1/f揺らぎの起源は振幅変調である（起源は自己組織化臨界だとする定説と対立する）

研究成果の概要（英文）：The study of supermassive black holes (SMBH) and galaxies has advanced significantly. The core of the problem is the separation of SMBHs from dark halos (DHs). The issue of dark matter (DM) is also crucial in this context, with the Bose-Einstein condensation (BEC) of axions being considered. I proposed a system described by quantum fundamental theory that generates order variables, leading to a demonstration of the dichotomy of planetary structure. In the realm of galaxy formation and jets, I proposed that jets from SMBH are essential for star and galaxy formation. The universality of jet acceleration/collimation and knot structure is illustrated by magnetic pole reversal from stochastic resonance. Additionally, we proposed that the origin of 1/f fluctuation is amplitude modulation. To verify the above propositions, we extended our discussion to include various phenomena such as music, earthquakes, volcanic eruptions, solar flares, variable stars, and systems like FRB, QPO, and BH/DISK.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：超巨大ブラックホール ボースアインシュタイン凝縮 量子相転移 宇宙ジェット 間欠的磁極反転 確率共鳴（カオス共鳴） 1/f揺らぎ 振幅変調・復調

1. 研究開始当初の背景

赤方偏移が大きな初期宇宙に、超巨大ブラックホール(SMBH)が複数発見されつつあった。通常のシナリオでは、まず銀河ができ星ができ、超新星爆発を起こしBHができ、それが合体やガス降着で成長する。しかしこの進行過程は遅く、観測された時期には間に合わない。この困難に対して、直接崩壊モデル、超大質量星モデル、超エディントン限界高効率降着、多数の小ブラックホール合体などの議論が盛んだった。しかしこれでもまだ間に合わない。

そこで我々はこれらとは本質的に異なるシナリオを提案しようとしていた。つまり、量子凝縮BECした暗黒物質DMの重力崩壊である。その研究のためには、多数の数値計算や、同時に変更を余儀なくされる関連問題の解決、さらには様々な検証が必要だった。この検証可能性を求めて、周辺分野(量子論、ダイナモ磁場、ジェット、ノット構造、星形成、惑星構造、揺らぎ、地震、フレア、雑音、個体物理、生体物理、芸術など)の専門家と議論したり、国際会議に出席したりするなど、SMBH早期形成の視点から隈なく探求する必要があった。

本科費はこれらすべてを実現するのに本質的に重要であった。

2. 研究の目的

既存の、銀河・SMBH形成シナリオでは観測を説明できないので新しい理論を提案し検証する。

3. 研究の方法

項目1にあるような、SMBH早期形成問題に、単独の問題から出発したのでは、せいぜい既存パラダイムの空いたところに何かを足しただけにしかならない。これでは研究の向かうべき方向が定まらない。問題の本質的な解決のためには、複数の関連問題をすべて考え合わせることで解決の方向を絞って方向性を見出していくのが有効だと考えた。この「複数問題の抱き合わせ」が我々の方法であった。

我々は関連する未解決問題をできるだけ多く集めていった；取捨選択ではない。そしてそれらの「背景にある単純な物理」を推測していった。

この時、問題の広がりや自分の専門分野を離れていっても躊躇せず素直に進んだ。実際、宇宙天体物理から出発したが、太陽物理、地球物理、海洋物理、個体物理、生物物理、量子物理基礎論、統計力学基礎論、生体物理、医学、音楽、芸術、にまで広がった。

具体的な未解決問題は以下のようなものである。

- SMBHの起源は何か。
- SMBH形成が早すぎる($z=10, 11, \dots$)。GN-z11などガス降着では遅すぎる。
- DMはBHを作らないのか
- 中間質量BHが欠如しているのはなぜか
- BEC相転移の機構は何か
- 量子測定装置を量子論からどう記述するか
- 量子測定における不可逆性の起源は何か
- ブラックホールジェットの十分な加速機構は何か
- ジェットの驚異的な収束の起源はなにか
- BHジェットの多様性(活動的銀河角AGN, 原始星, 晩期星)を決定づけるものは何か
- ジェットの内部によく観察されるノット構造の起源は何か
- $1/f$ 揺らぎの普遍的起源は何か
- 地震や太陽フレア、変光星などが $1/f$ に揺らぐのはなぜか
- 半導体・導体中の電流が $1/f$ に揺らぐのはなぜか
- 生体の中で $1/f$ 揺らぎがよく見つかるのはなぜか

そしてこれらの未解決問題の中に、統一的で簡単な物理を見出していった

4. 研究成果

様々な未解決問題がお互いに関連し、背後に共通の物理が隠れていることを見出した。初めの原初超巨大ブラックホール SMBH と銀河の研究は、以下のように広がっていった。

観測から要求される早い SMBH 形成問題は、BEC-DM の崩壊と考えるよりほかにない。ここで、量子論的な基礎が必要になる：BEC 相転移はいかに可能か。また SMBH 形成後の星・銀河形成では宇宙ジェットのダイナミクスが必須となる。しかも強力なジェットを得るためには磁場エネルギーが直接運動エネルギーに転化する磁気再結合しかない。大規模な磁気再結合のためには磁極反転しかない。この背景となる磁場の活動性になかに $1/f$ 揺らぎが隠れている。 $1/f$ 揺らぎの起源を知る必要があり、それを振幅変調であると帰結した。その検証としていろいろな天体を探っていく過程で、共鳴・同期している実体を同定していった。これらの詳細は以下の通り。

1. SMBH 形成問題

- SMBH は DM の崩壊から、銀河や星形成以前に形成される。特に、DM が宇宙膨張から切り離されるとき角運動量獲得具合によって、ダークハロー-DH と SMBH の分離率が決まることを示した。
- DM は BEC の状態である。速度分散があるガス状態の DM はバリオン同様固まりにくい。従って BEC 状態になっていることが必須である。
- BEC 条件から、DM はアクシオンの BEC である可能性が高いことを示した。この場合の DH、SMBH の分離率や生成 BH の質量関数を求めた。

2. 量子基礎論

- BEC が如何にして可能かという問題に取り組んだ。BEC (量子凝縮状態) は古典量としての秩序変数を持っている。完全に量子論の記述の中から、そのような秩序変数が現れる機構を提案した。それによると、不安定性からスクイーズド状態が成長し、これは閉じた時間経路の場の理論から、統計揺らぎとして分離される。この機構は、インフレーション時期に作られるインフラトンがスクイーズして赤外発散を作り出す機構と同じである。これは、量子論で記述される体系が、どのように秩序変数を作り出すかという量子相転移物理の提案である。(これによって、量子測定の物理的過程が明らかになる。)
- 量子論から不確定性原理を用いて、形成される古典構造の典型として惑星を考えた。惑星は、非金属(水素・ヘリウム)から構成される水素玉と金属から構成される金属球に二分される。前者、後者の典型はそれぞれ木星と海王星である。このように惑星構造の普遍性を記述すると、それらの質量と半径は、物理定数で書ききることができる。(水素原子構造が電磁気力と不確定性原理で決まったように、惑星構造は重力と不確定性原理で決まるのである。)

3. 銀河形成とジェット

- SMBH が最初にできるなら、その構造をもとに、星や銀河はあとから形成される。その形成を促すのは、SMBH からのジェット以外にない。ジェットが、落下するバリオンガスに衝撃波を作り星形成を促す。それら一部が SMBH 周辺に集積してバルジとなる。残りは落下せず自己重力で固まり球状星団となる。バルジも球状星団も起源が同じなので属性も基本同じである。
- そのような活動的ジェットが形成するためには、BZ 機構のような定常過程では難しい；もっと非定常で活動的な過程が必要である。そこでまず、降着円盤中のダイナモをマクロスピンモデルで記述した。スピン数が有限なので、確率共鳴(カオス共鳴)から磁極反転が必然となる。これは天体の磁場構造、特に太陽磁場や惑星磁場が磁極反転を繰り返すのと同じ物理である。この磁極反転により大規模な磁気再結合が起こり、大きなプラズモンが生成され加速する。これは塊なので基本的に拡散せずジェットのコリメーションを保证する。同時にこの間欠的な塊構造は(すでに観測されている)ノット構造を必然とする。つまり、すべての宇宙ジェットの中に見えるノット構造は普遍的であり自転軸上下に対称に噴出することを示した。

4. 長周期揺らぎ ($1/f$ 揺らぎ)

- SMBH 形成を検証する可能性のある観測データを見ていると、超長周期の揺らぎが普遍的に存在することに気づいた。パワースペクトラム密度 PSD がちょうど周波数 f の逆数なので $1/f$ 揺らぎと呼ばれる。
- この $1/f$ 揺らぎの起源が不明だったので、まずそれを特定した：振幅変調である。

つまり、多数の波の周波数が系統的に集積し、うなることによって $1/f$ 揺らぎが出現するのである。

- この、系統的な周波数集積機構として、同期、共鳴、赤外発散があることを突き止めた。振幅変調説を検証するために、これらの機構をいろいろな系で調べた。
- まず地球。50年間にわたる全世界の地震データは $1/f$ に揺らぐことを見出した。
- その起源として、岩石圏で常時励起している地球自由振動 (EF0) の振幅変調であることを検証した。つまり EF0 の固有振動を重ね合わせ PSD に $1/f$ 揺らぎを見出したのである。これが断層破壊を介して地震の発生に $1/f$ 揺らぎを与えているのである。
- もし地球全体の EF0 が $1/f$ に揺らぐなら、それは火山噴火もトリガーするだろうし、地球自転軸の超長周期揺らぎも誘起するだろう。実際それらに $1/f$ 揺らぎを見出した。
- 地球という惑星が $1/f$ に揺らいでいるなら、太陽はどうだろうか。そこで、ここ20年間の太陽フレアデータを解析し、それが $1/f$ に揺らいでいることを見出した。これが太陽5分振動 (SF0) の共鳴に由来することを、SF0 の固有振動を重ね合わせて検証した。
- では、ほかの恒星はどうだろうか。そこで、変光星の光度曲線を解析し、脈動変光星は $1/f$ に揺らいでいることを見出した。この場合は星の外層が広がっているので、固有振動の共鳴ではなく、外層で形成される対流たちの同期であると考え、結合ローレンツモデルを作り検証した。このモデルからも $1/f$ 揺らぎが得られた。
- では、中性子星ではどうか。現在高速電波バースト FRB と準周期的振動 QPO の関係を中性子星の固有振動やグリッチから研究している。
- せっかく $1/f$ 揺らぎの起源を同定したのだから、その検証を広く求めてみた。音楽は確率蔵本モデルから、半導体中の電流は、電子波束に対して QED 軟光子放出の赤外発散を取り入れたランジュバン方程式から、 $1/f$ 揺らぎが生成することを確認した。現在生体内の $1/f$ 揺らぎに関して、電流からの閾値を通した伝播か細胞たちの同期か、という視点で探索中である。

$1/f$ 揺らぎの起源、という本質的な謎に行き着きいたのは、本科研費でサポートを受けたおかげです。その広範な検証研究を現在提案しているが、3年間なかなか受け入れられないのは、 $1/f$ 揺らぎが一般にうさん臭いと懸念されているからでしょう。この揺らぎの偏在に疑いの余地はないので、懸念払拭のためには、起源を明確に検証していく地道な努力しかないと思います。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Masahiro Morikawa	4. 巻 8(6)
2. 論文標題 Quantum Fluctuations in Vacuum Energy: Cosmic Inflation as a Dynamical Phase Transition	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Universe MDPI	6. 最初と最後の頁 295-305
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/universe8060295	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 Masahiro Morikawa and Akika Nakamichi	4. 巻 13
2. 論文標題 A simple model for pink noise from amplitude modulations	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 8364
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-023-34816-2	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 Masahiro Morikawa	4. 巻 8
2. 論文標題 Quantum Fluctuations in Vacuum Energy: Cosmic Inflation as a Dynamical Phase Transition	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Universe	6. 最初と最後の頁 295
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/universe8060295	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 Morikawa Masahiro	4. 巻 7
2. 論文標題 Supermassive Black Holes from Bose-Einstein Condensed Dark Matter?Or Black and Dark Separation by Angular Momentum	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Universe	6. 最初と最後の頁 265 ~ 265
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/universe7080265	査読の有無 無
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 Masahiro Morikawa	4. 巻 -
2. 論文標題 Low-Frequency Characterization of Music Sounds - Ultra-Bass Richness from the Sound Wave Beats -	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 arXiv:2104.08872v1	6. 最初と最後の頁 1-23
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 Masahiro Morikawa and Sakura Takahashi	4. 巻 13
2. 論文標題 Supermassive Black Holes and Dark Halo from the Bose-Condensed Dark Matter	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings	6. 最初と最後の頁 11 ~ 11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/proceedings2019013011	査読の有無 無
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 Masahiro Morikawa and Sakura Takahashi	4. 巻 -
2. 論文標題 Supermassive black holes and dark halo from the Bose-condensed dark matter	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 arXiv.org > astro-ph > arXiv:1903.02986	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 Masahiro Morikawa	4. 巻 -
2. 論文標題 Transient Dynamics from Quantum to Classical- From the Developed Coherent State via Extreme Squeezing	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 arXiv.org > quant-ph > arXiv:1810.11293	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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

[学会発表] 計24件(うち招待講演 0件/うち国際学会 6件)

1. 発表者名 森川雅博, 中道晶香
2. 発表標題 1/f揺らぎの簡単なモデル-同期・共鳴・赤外発散からの普遍性
3. 学会等名 物理学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 森川雅博, 松井愛弥, 上坂泉, 中道晶香
2. 発表標題 恒星・変光星が作る 1/f 揺らぎ 共鳴唸りの振幅変調・復調モデル
3. 学会等名 天文学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中道晶香, 森川雅博
2. 発表標題 浅い地震と地球の自由振動
3. 学会等名 物理学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中道晶香, 松井愛弥, 上坂泉, 森川雅博
2. 発表標題 太陽が作る1/f揺らぎ 固有振動との共鳴から
3. 学会等名 天文学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 森川雅博, 中道晶香
2. 発表標題 ユニゾンと同期・協同 耳に訴える揺らぎの物理
3. 学会等名 物理学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 森川雅博
2. 発表標題 聞こえる音・聞こえない音 耳に訴える揺らぎの物理
3. 学会等名 物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 森川雅博
2. 発表標題 インフレーション相転移の遷移過程 暗黒エネルギーとのつながり
3. 学会等名 物理学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中道晶香, 森川雅博
2. 発表標題 マクロ・スピン・モデルで記述する太陽の磁場変動
3. 学会等名 物理学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 森川雅博 中道晶香
2. 発表標題 量子凝縮体暗黒物質からの超巨大ブラックホール形成 初期角運動量と密度の相克から銀河形成へ
3. 学会等名 物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 森川雅博 天谷鈴華
2. 発表標題 Planetary System from the Outer Edge of the Inner Hole
3. 学会等名 惑星地球学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 経澤和見, 森川雅博
2. 発表標題 オリオン領域における位置天文衛星 Gaia のデータ解析と星形成
3. 学会等名 天文学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 森川雅博 天谷鈴華
2. 発表標題 内穴外縁からの多様な惑星形成
3. 学会等名 天文学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 morikawa masahiro
2. 発表標題 "VARIETY OF PLANETS FROM THE OUTER-EDGE OF THE INNER HOLE -PLANETS ARE EVERYWHERE"
3. 学会等名 Planet2 / RESCEU Symposium 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 morikawa masahiro
2. 発表標題 "Transient Quantum Processes toward Classical Structure - Through squeezed state and coherent state -"
3. 学会等名 StatPhys 27 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 morikawa masahiro
2. 発表標題 "Supermassive Black Holes from Quantum Condensate Dark Matter - Black Hole/Dark Halo Ratio from Rotation and Axion -"
3. 学会等名 15th International Workshop on Dark Side of the Universe 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 morikawa masahiro
2. 発表標題 FORMATION OF SUPERMASSIVE BLACK HOLES WHICH NURTURE STARS AND GALAXIES
3. 学会等名 14th Asia-Pacific Physics Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 森川雅博
2. 発表標題 太陽磁場変動の結合スピン格子モデルによる解析
3. 学会等名 天文学会2019秋
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 森川雅博
2. 発表標題 "量子から古典への過渡ダイナミクス -スクイズド状態を経由したコヒーレント状態の発展から -"
3. 学会等名 物理学会2019秋
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 森川雅博
2. 発表標題 内穴外縁からの多様な惑星形成
3. 学会等名 天文学会2020春
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 森川雅博
2. 発表標題 "量子凝縮体暗黒物質からの超巨大ブラックホール形成 初期角運動量と密度の相克から銀河形成へ "
3. 学会等名 物理学会2020春
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高橋さくら, 森川雅博
2. 発表標題 ボーズアインシュタイン凝縮体がつくる超大質量ブラックホール
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会 (2018年)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 森川雅博
2. 発表標題 量子から古典への過渡ダイナミクス -スクイーズド状態を経由したコヒーレント状態の発展から-
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会 (2019年)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masahiro morikawa and Sakura Takahashi
2. 発表標題 Supermassive black holes and dark halo from the Bose-condensed dark matter
3. 学会等名 7th International Conference on New Frontiers in Physics (ICNFP 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masahiro morikawa and Sakura Takahashi
2. 発表標題 Supermassive black holes from Bose-Einstein Condensate Dark Matter
3. 学会等名 Fifteenth Marcel Grossmann Meeting - MG15 (国際学会)
4. 発表年 2018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
---------	---------