

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月19日現在

機関番号：34304

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2012

課題番号：21540287

研究課題名（和文） 乱流と磁場の普遍性～太陽から銀河団まで～

研究課題名（英文） Astronomical Turbulence and Magnetic field --- From Sun to the Clusters of Galaxies

研究代表者

中道 晶香 (NAKAMICHI AKIKA)

京都産業大学・神山天文台・専門員

研究者番号：30356125

研究成果の概要（和文）：自己重力無衝突ダークマターが非線形領域において乱流状態になることに着目して理論を構築し、球状星団から銀河団までの速度分散、天体の質量・光度の関係とサイズ、角運動量と質量、密度ゆらぎ、磁場と天体のサイズ、の5種類のスケーリングの観測結果を全て説明しました。また、地球と太陽の磁極反転を同じマクロ・スピンモデルで表し、反転のタイム・スケールの違いがローカルなダイナモ要素の数の違いであることを明らかにしました。

研究成果の概要（英文）： We propose the collision-less dark matter fluid turns into a turbulent state. We first derive Kolmogorov scaling laws from the gravitational Navier-Stokes equation. Then we apply this to several observations such as the scale-dependent velocity dispersion, mass-luminosity ratio, magnetic fields, and mass-angular momentum relation, power spectrum of density fluctuations. They all conclude a single value for a constant energy flow. On the other hand, we have proposed a coupled macro-spin model based on the idea that the whole dynamo mechanism is described by the coherent interactions of many local elements. This model describes polarity reversals and fluctuations of geomagnetism and also our Sun. Furthermore we have obtained a scaling relation for the magnetism for planets, satellites, and the Sun.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：宇宙物理学理論

科研費の分科・細目：物理学、素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：宇宙物理（理論）、ダークマター、乱流、磁場、スケーリング、太陽、地球

1. 研究開始当初の背景

(1) 宇宙規模での乱流について

宇宙規模での乱流の研究は、Gamov (1952) からのバリオンによる銀河の乱流起源説から始まりましたが、CMB の等方性と散逸など

の困難により消滅しました。その後、星間雲が示すスケーリングが乱流特性を示すことが判明し、乱流の散逸が星形成の始動条件だと示されました。一方、ダークマターが乱流流体になるアイデアはそれまでに無く、私達の完全なオリジナルなアイデアです。

(2) 天体の磁場の強さについて

太陽黒点、中性子星、白色矮星、AGN、超新星残骸、銀河ディスク、銀河ハロー、銀河団、銀河間物質という様々な天体や活動領域の磁場の強さと系の大きさとの間に成り立つスケーリング則 (Hillas, 1984) については、牧島一夫氏が宇宙規模の電場の役割を指摘されましたが (日本物理学会誌 Vol.63 No.8)、包括的な研究はまだこれからという段階でした。

2. 研究の目的

(1) 乱流について

星から銀河団までの広いスケールに渡って宇宙に存在する様々な天体が持つ構造を、形成し維持していく基本機構として、広い意味の乱流に着目します。広い意味の乱流は、流れが乱雑に絡み合い、小スケールから大スケールまで自律的でスケール・フリーな角運動量の動力学が支配し、特徴ある構造を作ります。乱流を作る流れは、プラズマであっても中性ガスでもダークマターでさえ可能です。特に自己重力無衝突ダークマターは、非線形領域において流線が重なり合い乱流状態となる可能性があり、これと太陽フレアやプロミネンス、コロナ、太陽風などの太陽活動を支配するプラズマ物理系の乱流理論による記述を統括し、幅広く分野横断的な乱流理論を構築していくのが本研究の第一の目的です。

(2) スケーリング則について

第二の目的は、その理論に基づいて太陽・分子雲・自己重力系が呈する様々なスケーリング則を説明することです。太陽フレアの出現率とピーク時のフォトンのフラックスおよびフレア持続時間との関係や、太陽コロナのループの大きさと磁場の強さに現れるスケーリングや、自己重力系における密度、角運動量と質量との関係に現れるスケーリング、さらに様々な天体や活動領域の磁場の強さと系の大きさとの間に成り立つスケーリングを、乱流の統一理論から導き、観測結果を統合的な視点から説明することを目指します。

3. 研究の方法

(1) 宇宙規模での乱流について

まず、無衝突のダークマターを研究対象として、潮汐トルクによって角運動量を獲得し、磁場のエネルギーを生成する機構を明らかにし、磁場の強さと系の大きさとの間のスケーリングを導きます。

(2) 天体の磁場の強さについて

宇宙での磁場の生成の研究では、宇宙初期には流線が交差することから乱流状態が自然に実現していると考えられるので、まず乱流が生成する潮汐トルクを計算します。次に、ダークマターに対する新しいダイナモ機構を提案し、磁場のエネルギーへの変換効率を求め、天体の磁場と系の大きさとの間のスケーリング則を導きます。新しい機構の提案の際には、あらゆる観測事実と矛盾しないように精査します。得られた結果を、観測と比較するだけでなく、ナイーブなダイナモ機構が普遍的に成立することを仮定する新しい理論モデルを提案し、ダークマター乱流から得たスケーリング則と比較し、ダイナモ機構の適用可能範囲も明らかにします。

なお、申請者が平成21年度の年度途中で異動のため研究場所を変更したため、当初はぐんま天文台の太陽望遠鏡にて自分で観測したデータを用いる予定でしたが、太陽に関しては、『ひので』衛星とチューリヒ天文台の観測データを使用しました。

(3) 宇宙磁場の起源について

宇宙磁場の起源についての研究を進める中で、宇宙誕生後間もない時期のインフレーション膨張の時期に種磁場の生成を考察する必要が出て来ましたので、申請時には予定していませんでしたが、新しいインフレーション宇宙モデルを提唱し、生成される物理量の見積りを行う研究も並行して行うことになりました。理論モデルの不安定性に着目して数値シミュレーションを行いました。

4. 研究成果

(1) 宇宙規模での乱流について

自己重力無衝突ダークマターが非線形領域において乱流状態になることに着目し、自己重力系の乱流理論を構築しました。この理論に基づき、以下の5種類の観測結果 (1. 球状星団から銀河団までの速度分散のスケール依存性、2. 質量と光度の関係と天体のサイズのスケーリング、3. 角運動量と質量のスケーリング、4. 密度ゆらぎのパワースペクトル、5. ダイナモ機構で生成される磁場と天体のサイズとのスケーリング) を全て説明

しました。また、交付申請時には予定していませんでしたが、乱流理論の正当性を示すため、1次元モデルにて数値シミュレーションを行いました。その結果、「エネルギーが一定の流れ」の仮定を用いた乱流理論から導いた結果と、仮定を使わずに数値的に乱流の式を解いたシミュレーションの結果が一致することが確かめられ、仮定の正当性を示す根拠が得られました。

結果は査読付論文に発表しました。ダークマターが乱流状態になるという観点は、私達のオリジナルです。実際に5種類もの観測結果を同じ理論で説明できたところに意義があります。

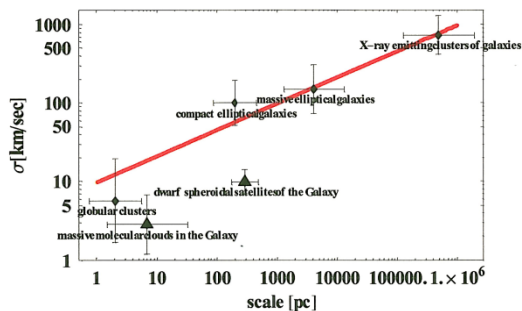


図1 速度分散のスケール依存性
大きなスケールほど分散（温度）が高いことを示しています。

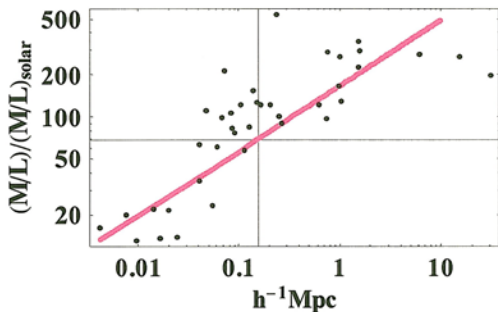
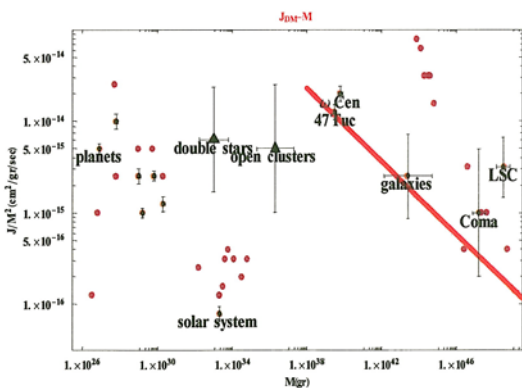


図2 天体の質量/光度比
大きなスケールほどダークマターの割合が大きいことを示しています。



(左欄下) 図3 天体の運動量と質量の関係
銀河団、銀河、球状星団は、観測結果と理論値（赤線）が合っています。

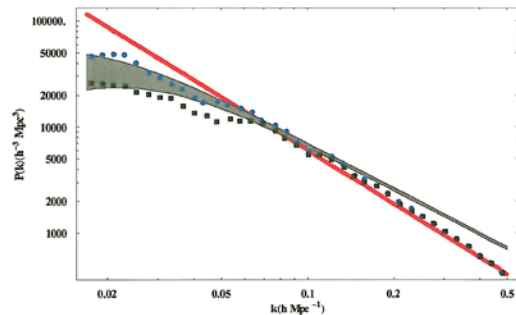


図4 密度ゆらぎのパワースペクトルのk依存性
2dF（青丸）とSDSS DR5（黒■、灰色）の観測値と理論値（赤線）は合っています。

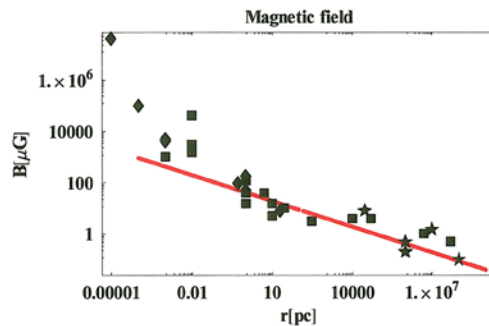


図5 宇宙の磁場のスケール依存性
ダークマター乱流の議論を適用できる最小サイズ1pcより大きなスケールにおいては、理論値と観測値が合っています。

(2) 天体の磁場の強さの時間変動について

前節の最後の図5で見たように、宇宙磁場の強さにスケール依存性があることを理論的に再現できましたので、次に磁極反転の（非）周期性についても再現できる理論モデルを新たに提案しました。

地磁気の最近の反転は78万年前でした。その後も、磁極が自転軸から45度以上傾くエクスカッションは18回以上起きています。このような地磁気の磁極反転は、1億6千万年で数百回も不規則に起きています。反転にかかる時間は、磁極が安定している時間に比べて非常に短く、数千年です。また、磁束斑や逆磁束斑があることが特徴です。

一方、太陽は、ほぼ規則的に22年という短い周期で磁極反転を繰り返しています。

地球や太陽の磁極反転は、何がきっかけで、どのようなメカニズムで起きるのか、共通の物理のエッセンスを探りたいというのが、本研究の動機です。

地球の場合は、外核の鉄が流体となっているため、非圧縮で密度一様な流体では、流れは回転軸方向に一様になることが知られていました。(Taylor-Proudmanの定理) 実際、先行研究のMHDシミュレーションでは、流体鉄の柱構造またはプリューム・シート構造が見られ、柱構造の場合は、電流が柱に巻き付きます。私達は、電流の巻き付きによって生成された磁場をモデル化してマクロなスピンのように表しました。これらのモデルは、角運動量から磁場を生成するダイナモ機構が、ローカルなダイナモ要素に分けられるというアイデアに基づきます。

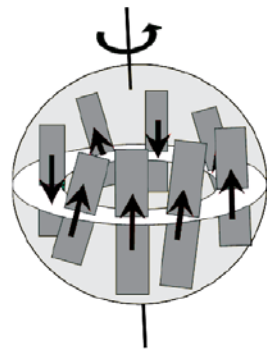


図6 マクロ・スピンが地球外核に並ぶ様子

マクロ・スピン・モデルに関して2種類のモデルを提案しました。隣同士のスピンしか相互作用しないshort-range coupled spin model (SCSモデル)ではランダム力によって磁極反転が起きますが、全てのスピンが長距離相互作用するlong-range coupled spin model (LCSモデル)ではランダム力が無い場合にも反転を起こすことがわかりました。数値シミュレーションを担当した結果、反転のタイムスケールとパワースペクトルの冪は、SCSモデルよりもLCSモデルの方が観測結果をより正確にフィットできることを見出しました。

陰山氏(神戸大)らによる地磁気の磁気流体力学(MHD)方程式を解く数値計算においても、ローカル・ダイナモと考えられる小さなプリューム・シートが多数形成されていますし、『ひので』衛星が観測した太陽の磁場においても、ローカル・ダイナモと考えられる要素が発見されているため、我々のモデルは現実的です。また、MHD方程式を解くために、パラメーターの値を現実とかけ離れた値にしなければ解けないため、我々のモデルは、何が磁場反転を起こしているかという物理的なエッセンスを抽出しているという点で重要です。

また、過去200年間の黒点数の時間変動の観

測結果を解析したところ、 $1/f$ のパワースペクトルを示すという結果も得ました。

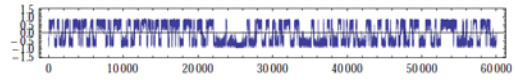


図7 地磁気の不規則な反転を再現した計算結果

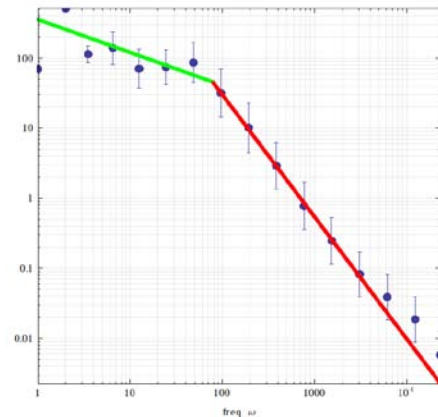


図8 地球の磁化に関するオーダー・パラメーターのパワースペクトル
地磁気の観測結果を再現しています。

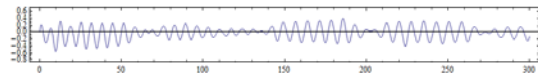


図9 太陽の磁極反転を再現した計算結果
規則的な短周期(11年周期)と長周期の変動の両方を再現しています。

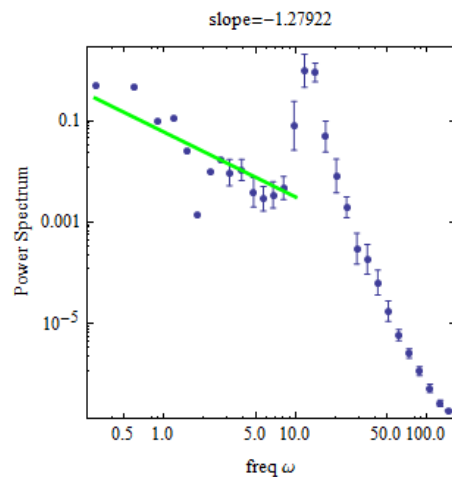


図10 パワースペクトルも観測結果を再現

まとめると、地球の場合のスピン数は9、太陽の場合のスピン数は501でフィットすれ

ば、両者を同じマクロ・スピン・モデルで記述できるという結果が得られました。

さらに、他の太陽系天体についてコリオリ力とローレンツ力とのつりあいをを用いると、天体の質量とマクロ・スピンの数に関してスケーリング則が成り立つことを発見しました。

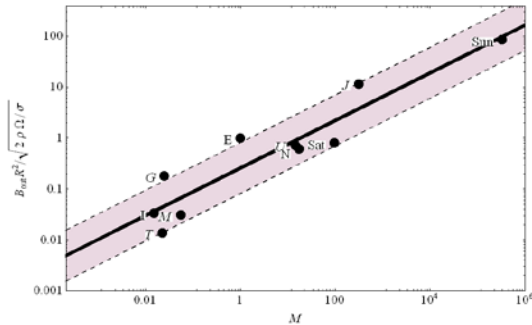


図 1.1 太陽系の惑星、衛星に成り立つスケーリング則

マクロ・スピンの数は、天体の質量の 0.5 乗に比例するという結果を得ました。

このマクロ・スピンは、各天体の小さなダイナモ要素に対応していると推測されます。

これらの結果は、2本の査読論文に発表しました。

(3) インフレーション宇宙モデルについて

研究の最終目的に設定した「宇宙規模のスケールに存在する磁場を、初期宇宙のインフレーション理論から導く」研究テーマです。

先行研究により、一様なスカラー場はインフレーション膨張を起こすが、微調整が無ければ一般にポテンシャルに負の領域があり、やがて宇宙膨張が止まり (stagnant)、スカラー場が急激に変化することが知られていました (stagflation)。私達は、多くのインフレーション・モデルに対して数値シミュレーションを行い、負のポテンシャル領域と stagflation が普遍的な現象であることを明らかにしました。

もし、一様なスカラー場が不安定ならば、スカラー場は崩壊して真空のエネルギーが無くなるため、微調整の必要が無くなり、我々が目指した理論モデルが得られたこととなりますが、安定ならば、stagflation を起こした後もスカラー場が残ってしまいます。そこで、線形ゆらぎの式からスカラー場の不安定性を調べたところ、粒子生成に伴って重力ポテンシャルのエネルギー密度が負になるにつれ、より不安定になるという結果を得て、日本物理学会と国際会議などで発表しました。

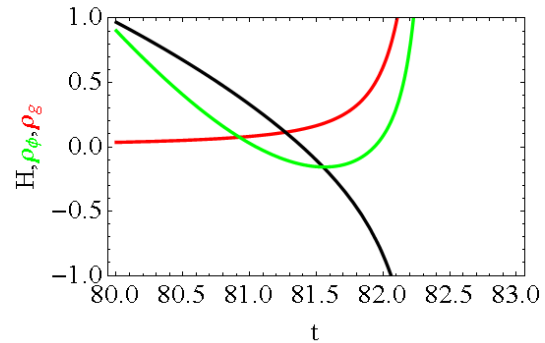


図 1.2 ハップル・パラメーター (黒色) とスカラー場 (緑色)、及びガス (赤色) のエネルギー密度との関係

粒子生成によって、少しでもガスが存在すれば、ガスのエネルギー密度が正のため、stagflation ($H=0$) 付近でスカラー場のエネルギー密度が負になっています。このことを解析的にも数値的にも確かめ、普遍的な性質であることを明らかにしました。

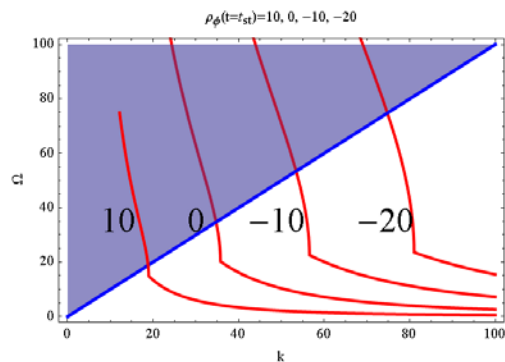


図 1.3 崩壊の時間スケールの逆数
赤線は、左からそれぞれ k が 10, 0, -10, -20 の場合

粒子生成に伴ってスカラー場のエネルギー密度が負になるにつれ、より不安定になる様子を表しています。

従来のインフレーション膨張モデルでは、インフレーションを終わらせることができなかつたり、現実と合わせるためには真空のエネルギーの微調整が必要ですが、我々の理論モデルでは、一様なスカラー場が不安定になり自然に崩壊するため、インフレーションは自然に終わり、真空のエネルギー量を調整する必要も無いことが重要です。

これらの結果は、現在、論文にまとめているところです。

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4件)

- ① 森希, D. Schmitt, A. Ferriz-Mas, J. Wicht, 毛利英明, 中道晶香, 森川雅博, Domino model for geomagnetic field reversals, 査読有 Physical Review E, Vol. 87, PP. 012108 (2013)
- ② 中道晶香, 毛利英明, D. Schmitt, A. Ferriz-Mas, J. Wicht, 森川雅博, Coupled spin models for magnetic variation of planets and stars, 査読有 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol.423, PP. 2977-2990 (2012)
- ③ 中道晶香, 森川雅博, Acquired scaling relations in dark matter turbulence, Journal of Cosmology and Astroparticle Physics 査読有 (JCAP) Vol.1, PP.1 (2010)
- ④ 中道晶香, 森川雅博, Cosmic dark turbulence, 査読有 Astronomy & Astrophysics, Vol.498, PP. 357-359 (2009)

〔学会発表〕(計6件)

- ① 中道晶香, 森川雅博, 負のポテンシャルと宇宙項微調整問題、日本物理学会 2012 年秋季大会、2012 年 9 月 12 日、京都産業大学
- ② A. Nakamichi, M. Morikawa, Inflation and stagflation --- Robust inflation and cosmological constant problem without fine tuning ---, 47th Rencontres de Moriond, Cosmology, 2012 年 3 月 12 日-17 日, La Thuile, Val d'Aosta, Italy
- ③ 中道晶香, 毛利英明, 森川雅博, ダイナモ要素に対応するマクロ・スピン・モデル、日本天文学会 2011 年秋季年会、2011 年 9 月 21 日、鹿児島大学
- ④ 中道晶香, 森希, 森川雅博, 毛利英明, A. Ferriz-Mas, D. Schmitt, J. Wicht, マクロ・スピンモデルによる磁場反転の物理～地球、太陽、惑星～、日本物理学会 2011 年秋季大会、2011 年 9 月 16 日、弘前大学
- ⑤ 中道晶香, 森希, 森川雅博, 毛利英明, A. Ferriz-Mas, D. Schmitt, J. Wicht, マクロ・スピンモデルによる磁場反転の物理～地磁気、太陽・惑星磁場～、日本地球惑星科学連合 2011 年大会、2011 年 5 月 24 日、幕張メッセ
- ⑥ 中道晶香、他、磁場反転を記述するモデル、日本天文学会 2011 年春季年会、2011 年 3 月 17 日、筑波大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中道 晶香 (NAKAMICHI AKIKA)
京都産業大学・神山天文台・専門員
研究者番号：30356125

(2) 研究分担者

森川 雅博 (MORIKAWA MASAHIRO)
お茶の水女子大学・理学部・教授
研究者番号：90192781
(H22→H24: 連携研究者)

(3) 連携研究者

立川 崇之 (TATEKAWA TAKAYUKI)
(独) 日本原子力研究開発機構・システム計算科学センター・博士研究員
研究者番号：60350477
(H21→H23: 連携研究者)