

平成 30 年 5 月 23 日現在

機関番号：34304

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26400234

研究課題名(和文) 恒星の磁極反転

研究課題名(英文) The polarity reversals in the stars

研究代表者

中道 晶香 (NAKAMICHI, Akika)

京都産業大学・神山天文台・研究員

研究者番号：30356125

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：理論研究では、マクロ・スピンモデルの次元を上げた3次元マクロ・スピンモデルを提案し、磁極を反転させ易くするものは何かを明らかにした。結果は論文を投稿中である。
装置開発では、京都産業大学神山天文台の偏光分光観測装置VESPoIAに新たに円偏光モードを入れ、分解能をR=8,000からR=25,000へ上げ、効率的なデータ解析の手法を確立した。
観測研究では、10天体を試験観測し、4天体の磁場極性の長期間モニター観測を継続中である。

研究成果の概要(英文)：In the theoretical research, we have proposed the three-dimensional macro-spin model that describes the essence of the dynamo-effects in planets and stars. This is a generalization of our previous macro-spin model. We have clarified the conditions in which the magnetic poles have high possibility to reverse. We submitted a paper to a journal.
VESPoIA is a high dispersion spectro-polarimeter, mounted on the 1.3m Araki telescope at Koyama Astronomical Observatory of Kyoto Sangyo University. In the device development, we introduced a new circular polarization mode to the VESPoIA and raised the resolution from R = 8,000 to R = 25,000. Thus we have established a novel method which enables very efficient data analysis.
In the observational research, ten target stars have been tested, and the long-term observation of the magnetic field polarity for the four targets is now continuing.

研究分野：理論天体物理学

キーワード：磁極反転 恒星 マクロ・スピン 円偏光観測

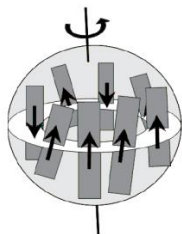
1. 研究開始当初の背景

地球では不規則な長周期での地磁気反転が観測されている一方、太陽では約 22 年の規則的な短周期での磁極反転が観測され、弱い長周期の変動も確認された。しかし、磁極反転を起こすきっかけは解明されておらず、数値シミュレーションから反転のトリガーに迫ろうとする研究が世界では主流だが、計算機の制約のため、非現実的な値のパラメーターを使わざるを得ないし、再現可能な反転の回数が少ない。そこで、反転の物理的なエッセンスを抽出したモデルを提唱して反転のトリガーを明らかにする研究が必要とされていた。

私達は磁極反転のエッセンスを抽出した理論モデルとして、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 2 次元平面上を動くマクロなスピンを表し、小さな複数のダイナモ要素に対応するスピんたちが同期するモデルを考え、地球と太陽の両方の磁極反転を同じモデルで再現していた。

当時は、太陽以外の恒星の磁極反転を捉えた観測報告が無く、恒星磁場における磁極反転現象の普遍性は未だ確認されていないという認識であった。

恒星の磁極判定を検出するための長期モニターには、観測時間が豊富なホーム望遠鏡と高精度の高分散偏光分光装置が必要だが、両方の研究環境を整えているのはフランスの Donati のグループと本学神山天文台のみである。なお、強磁場星では短期のモニター観測が行われ、速い自転に伴う磁極の揺れは Donati らによって観測されていた。



2. 研究の目的

研究の第一の目的は、理論モデルの正しさを観測的に検証するため、ターゲットの恒星の磁極反転に関して予言力を持つ理論モデルへと拡張することである。

同期現象のマクロ・スピン理論モデルが正しいかどうかを、観測的に検証することが本研究の第二の目的である。

3. 研究の方法

研究代表者がこれまで研究してきた同期現象のマクロ・スピンモデルを進展させ、反転が起こるまでの時間間隔を精査し、磁極反転の起こりやすさを決める物理を明らかにするとともに、磁極反転が起こりやすい恒星のスペクトル型につ

いて予言する。

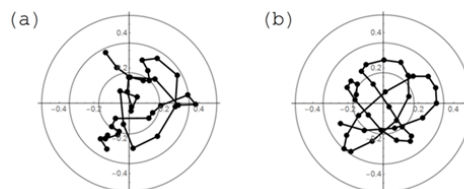
VESPo1A に 1/4 波長板と高分散モード (R=20,000) を入れる改修作業を行う。恒星の磁場極性を SN1,000 で観測できるように調整することを目指す。

ターゲットの恒星の磁場極性を長期モニター観測する。磁極反転する恒星の発見の頻度が予想と異なった場合は、理論モデルへフィードバックをかけるか、SN を上げる観測条件について再検討する。

4. 研究成果

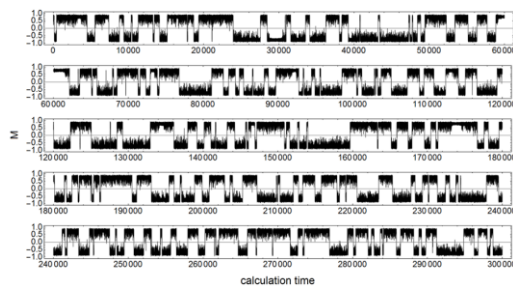
(1) マクロ・スピンモデル

研究代表者が研究してきた磁極反転を記述するマクロ・スピンモデルを拡張し、方位角を導入して 3 次元化を行った。これにより、マクロ・スピンは球面上を運動できるようになり、地球と太陽へ理論モデルを適用したシミュレーションの結果、地磁気の磁北が歳差運動を行いながらふらつく様子や、太陽の逆磁束斑が太陽面上に広く分布している様子も新たに再現できるようになった。

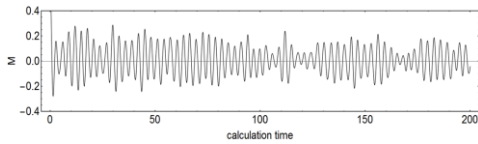


図：地磁気の磁北がふらつく様子
(a) 観測結果 (b) マクロ・スピンモデルによるシミュレーション

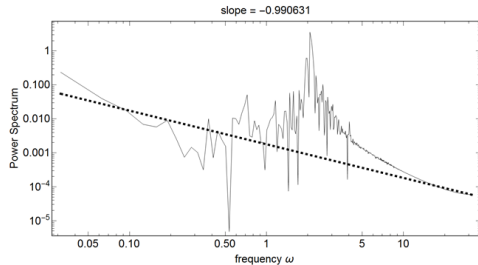
このモデルは、マクロ・スピンの数が 9 の場合に、地球の不規則な磁極反転の観測データ (磁極が反転するのに要する平均時間、クロンの継続時間、磁化のパワースペクトルのべき指数、クロンでのパワースペクトルのべき指数) と非常に良く合い、マクロ・スピン数を 300 へ増やした場合に、太陽の規則的な磁極反転の観測データ (11 年周期、マウンダー極小期のような長周期、パワースペクトルの 1/f ゆらぎ) を非常に良く再現した。



図：マクロ・スピンモデルによる地磁気の時間変動シミュレーション



図：マクロ・スピンモデルによる太陽磁化の時間変動シミュレーション



図：マクロ・スピンモデルによる太陽磁化のパワースペクトル

さらに地磁気の場合、磁極の移動は Levy 分布や Log-Normal 分布に従うという先行研究があるため、我々の磁極反転理論モデルに従う統計について調べ、先行研究で提案されていた分布関数との比較を行った。

何が反転し易さを決めているのかについて、当初は運動エネルギーとポテンシャルエネルギーとの大小関係に着目していたが、両者の比よりも、和、つまり全エネルギーの値が反転し易さを決めていることを発見し、この部分のシミュレーションをやり直して精査し、投稿論文を改訂した。

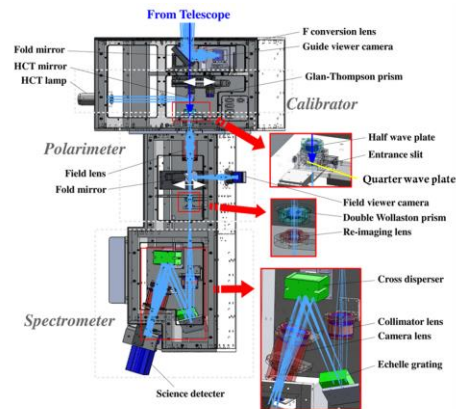
(2) 恒星磁場の起源の理論、及び観測可能性の見積

恒星磁場がダイナモ起源なのか、それとも星形成時の星間磁場が凍結された化石場起源なのかを区別できる可能性を持つ新しいアプローチとして、実視連星の磁場を検討した。この研究は、研究開始当初には着想していなかった内容である。恒星の質量放出率を仮定し、恒星風のラム圧と磁気圧が釣りあう磁気圏半径以内を、恒星磁場の影響下と考える。実視連星間の距離が磁気圏半径の内側に入っていることを確認し、京都産業大学神山天文台におけるシーイング 4 秒角以上の離角で 6 等級より明るい観測候補天体を選定した。想定される磁場強度から、神山天文台の VESPo1A を用いた観測における偏光スペクトルのシミュレーションを行った結果、VESPo1A に波長分解能 $R = 20,000$ 円偏光モードを追加することにより、実視連星の磁場の極性を検出可能であることを示した。

(3) 装置開発と円偏光分光観測

直線偏光を測定可能な高精度高分散偏光分光観測装置 VESPo1A にアクリル製 1/4 波長板を実装し、波長板方位角回転を制御する駆動系のインストール及び制御系の開発を行い、円偏光モードも観測できるようにする改修と、新たなスリットを搭載して現行の

$R=8,000$ から $R=20,000$ の高分散でも観測できるようにする改修作業を行った。なお、金属スリットは疑似偏光が発生するため、電気を通さず、かつ高精度の加工が可能な SiC 製のセラミック製のスリットを用いた。



図： VESPo1A の構造と光路

その後の工夫により分解能をさらに上げ、 $R=25,000$ の高分散モードでの円偏光観測と効率的なデータ解析の手法を確立した。VESPo1A を用いて 10 天体の候補ターゲットを試験観測した結果、まずは 4 天体に絞り偏光分光モニター観測を行い、年平均 30-40 夜程度の観測を継続した。同じターゲットを年 2, 3 回ずつ観測したが、磁極反転の兆候は未だ検出されないため、モニター観測を継続中である。

円偏光の観測方法が当時は確立されていなかったため、光学軸基準を事前に測定しておく観測方法と、未知のまま後で算出する観測方法との 2 種類の方法を検討し、両者ともシステムティック・エラーが小さいことを確認した。なお、光学軸基準が未知の場合の観測方法は世界に例が無く、また、円偏光観測の誤差の評価も前例が無かったため、これらは世界初の成果である。

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 5 件)

- ① Takayuki Arasaki, Yuji Ikeda, Yoshiharu Shinnaka, Chisato Itose, Akika Nakamichi, Hideyo Kawakita, "The Very precise Echelle Spectro-Polarimeter on the Araki-telescope (VESPo1A)", Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有 (2015) Vol. 67, Issue 3, 1-19, DOI 10.1093/pask/psv004
- ② Takayuki Arasaki, Yuji Ikeda, Akika Nakamichi, Hideyo Kawakita, "The upgrade of a high dispersion spectro-polarimeter, VESPo1A: New

circular polarimetry model and extremely high resolution mode” SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation 査読無 VOL 9147, (2014) 914788-914796

- ③ Akika Nakamichi, Masahiro Morikawa, “Fate of inflation and the natural reduction of vacuum energy” Proceeding of 2nd International Conference on New Frontiers in Physics, EPJ Web of Conferences, 査読無 Vol 71 (2014) 97
- ④ Masahiro Morikawa, Akika Nakamichi, “Physics of quantum measurement and its interdisciplinary applications”, Proceeding of 2nd International Conference on New Frontiers in Physics, EPJ Web of Conferences, 査読無 Vol 71 (2014) 93
- ⑤ 中道晶香、新崎貴之、池田優二、“恒星の磁極反転” 総合学術研究所所報 京都産業大学、査読無 Vol 9 (2014) 211-217 <http://hdl.handle.net/10965/00002966>

[学会発表] (計 8 件)

- ① 中道晶香、國友有与志、原哲也、「磁極反転を記述する3次元マクロスピンモデル」日本天文学会春季年会 (2018) 千葉大学
- ② 森川雅博、中道晶香、「ブラックホールから銀河へ」日本物理学会 第72回年次大会 (2017) 大阪大学
- ③ 中道晶香、森川雅博「原初巨大ブラックホールと銀河の活動性」日本天文学会秋季年会 (2016) 愛媛大学
- ④ 中道晶香、國友有与志、原哲也、「磁極反転を記述する高次元スピンモデル」日本地球惑星科学連合2016年大会 (2016) 幕張メッセ
- ⑤ 中道晶香、森川雅博、「超巨大ブラックホールと銀河の関係」日本天文学会春季年会 (2016) 首都大学東京
- ⑥ 國友有与志、中道晶香、原哲也、「磁極反転を記述する2次元結合スピンモデル」日本物理学会 第70回年次大会 (2015) 早稲田大学
- ⑦ Akika Nakamichi, “Coupled spin models for magnetic variation of planets and stars” Seminar on Dynamics in Our Solar System (招待講演) (2014) Data Analysis Center for Geomagnetism and Space Magnetism, Graduate School of Science, Kyoto University
- ⑧ Takayuki Arasaki, Yuji Ikeda, Akika Nakamichi, Hideyo Kawakita, “The upgrade of a high dispersion spectro-polarimeter, VESPOLA: New circular polarimetry mode and extremely high resolution mode” SPIE (2014) Palais des congress de Montreal,

Quebec, Canada

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・研究員 I
研究者番号：30356125