

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 6 月 7 日現在

機関番号：34506

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22540295

研究課題名（和文） 初期天体の輻射による宇宙論的種磁場形成の研究

研究課題名（英文） Research on the generation of cosmological magnetic field by the radiation from first objects

研究代表者

須佐 元(SUSA HAJIME)

甲南大学・理工学部・教授

研究者番号：00323262

研究成果の概要（和文）：

1. 2次元の輻射流体計算によって初代星のホストであるミニハロー近傍に発生する磁場の強度を計算した。その結果、これらの星からの輻射によって出来る種磁場の大きさは 10^{-17} - 10^{-18} G程度であることがわかった。またこれに加えて、原始初代星の回りに生まれる降着円盤上で発生する磁場を見積もった。その結果、上記の磁場強度よりもさらに一桁程度強い磁場が生まれることがあきらかとなった。

2. 初期宇宙に存在する微弱な種磁場はやがて増幅されてその後の星形成に重要な役割を果たすことが期待される。我々は、初期宇宙での星形成プロセスを理解する為に、金属量の少ない分子雲コアが収縮していく過程で、ガスと磁場の結合の様子をしらべた。その結果、金属量が太陽の1000万分の1以下であれば、磁場はガスと常に結合しているが、それ以上の金属量では星形成途中のある範囲の密度で磁場が散逸することがわかった。

研究成果の概要（英文）：

1. We perform two dimensional radiation hydrodynamics simulations to assess the magnetic field in the neighbor of the minihalos which host population III stars. As a result, we find that the seed magnetic field strength generated by the radiation from these stars is 10^{-17} - 10^{-18} G. In addition, we estimate the magnetic field generated on the accretion disk formed around population III protostars. Consequently, we obtain an order of magnitude stronger field strength than those found in the above calculation. 2. Seed magnetic field generated in the early universe is amplified with time, and will play important roles in the subsequent star formation process. In order to understand the effects of magnetic field on star formation in the early universe, we investigate the coupling between gas and magnetic field in the course of the collapse of molecular cloud core of low metallicity. As a result, magnetic field couple with gas during the collapse if the metallicity is less than 10^{-7} solar, otherwise the magnetic field dissipates from the gas in a certain range of densities.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
2012年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	1,900,000	570,000	2,470,000

研究分野：数物系科学

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）、宇宙論

1. 研究開始当初の背景

宇宙には様々なスケールに磁場が存在するが、その起源についてはよくわかっていない。これに関してクエーサーや初代星などの明るい天体からの輻射による力によって、ごく微量の電荷の分離が起き、それによって電流が流れ、磁場が発生するというモデルが提案されている。このモデルでは輻射の「影」になる部分の存在が重要となるが、これまでは線形理論の範囲内でかつ定常の場合しか調べられていなかった。実際にこのプロセスによって磁場が発生するのかどうかを明らかにするためには、輻射輸送と流体計算を統合的に取り扱う、より詳しい解析が必要であった。

2. 研究の目的

本研究では宇宙初期に生まれる明るい天体によって作られる種磁場の強度を調べ、その宇宙論的意義を明らかにすることを目的とする。宇宙の磁場は様々なスケールで確認されており、その起源については諸説がある。そのうち、輻射の異方性に起因する生成メカニズムについてはこれまで深く調べられてこなかった。特に初代星やクエーサーといった明るい天体は比較的強い磁場を作ると考えられる。この研究では現実的な物質分布を用いて輻射流体計算を行い、明るい初期天体からの放射がどの程度異方性を持つか調べ、その結果生まれる種磁場の大きさを見積もる。また輻射以外の生成プロセスも併せて考慮し、現実的にどの程度の磁場が生成されるのかを計算する。

また初期宇宙で生成される磁場は、初期宇宙の星形成プロセスに大きな影響を与える。求められた磁場の強度が星形成に影響を与えるかどうかは磁場と始原ガスとのカップリングの程度に強く依存する。この点も併せて研究していく。

3. 研究の方法

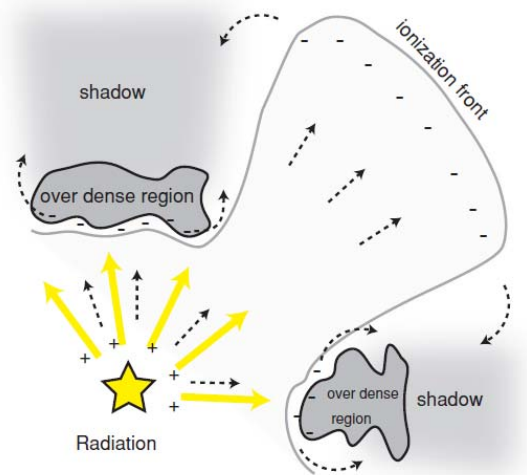
当初、本研究を行うにあたって、電子とイオンを2流体として解くというアイデアであったが、ローカルにはプラズマが中性になっているとしても問題はないので、一流体でその中の化学種（電子、イオン、中性粒子）を輻射輸送とカップルさせて解くことにした。数値計算の手法としては、2次元の輻射流体計算（流体はCIP法・輻射はRay-Tracing）

コードを作成して計算を行った。

また磁場と始原ガスとのカップリングに関しては、低金属量で収縮する自己重力ガス雲を1-zone近似で取扱い、化学種の計算を詳細に行った。それによって電離度を計算し、電気伝導度を計算することができるので、磁場とガスのカップルの強さを求めることができた。

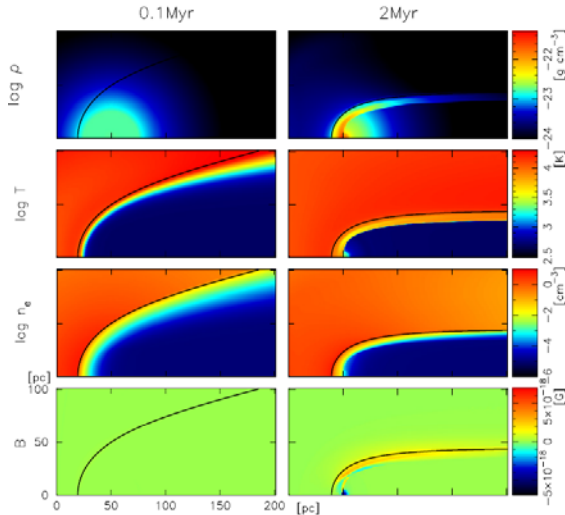
4. 研究成果

(1) 最初に考えた状況設定は、赤方偏移が10以上で生まれる明るい初代星の周りの領域である。このような初代星は100万太陽質量以下のミニハローで誕生すると考えられている。ここではミニハロー自身の内部の密度の分布や、近傍の別のミニハローなどによる高密度領域が作る初代星の輻射の異方性（影）でどのような磁場が生まれるかを考えた（下図）。

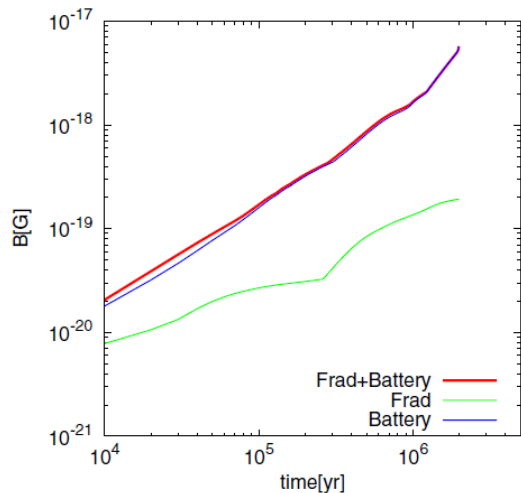


実際の計算は、影をモデル化して軸対称な高密度領域を置き、軸の方向から紫外光が当たって周りのガスが電離するという状況を設定した。次の図はその一つのモデルを表している。左のカラムは星が輝きだしてから0.1Myr、右が2Myrで、星の光は左から入射している。上から順に、密度、温度、電子個数密度、磁場の空間分布の様子を表している。横軸は軸対称の対称軸、縦軸は対称軸に垂直な座標である。温度や電子密度の図を見ると、高密度領域が後ろに濃い影を作っていることがわかる。密度の図からは、電離に伴う衝

撃波が生成されていることも見て取れる。これらの電離構造、密度構造ができると、影と日向の境界付近で強い磁場が発生する。これはその近辺で電場のシア ($\nabla \times E$) が強くなり、マクスウェル方程式の関係により磁場の時間微分がゼロでなくなり、磁場が生成するからである。同時に温度と電子密度の様子を見ると、この境界面付近では温度勾配と電子密度勾配のいずれも大きくなり、ピアマンバッテリー効果によって磁場が発生する。



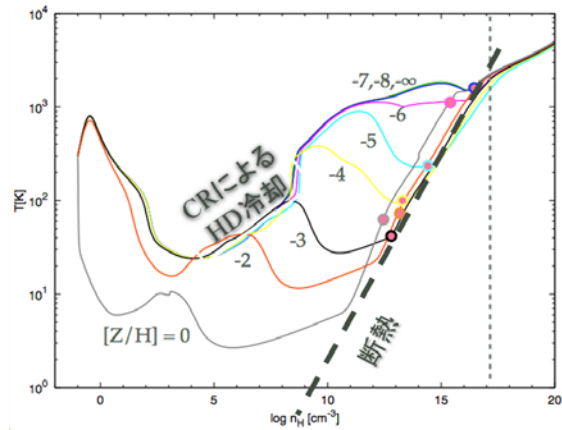
次の図はこのモデルで最も磁場強度の強いグリッドでの磁場の時間発展を表している。縦軸は磁場強度、横軸は初代星が輝きだしてから時間を表す。初代星の寿命 (2 百万年程度) で磁場強度は $10^{-17} G$ に達している。またその内訳をみると、輻射の力によるものも無視できないが、ピアマンバッテリー効果によるものが最も重要な寄与であることが明らかとなった。この強度はこれまで文献で提唱されてきた種磁場のモデルの中ではこのスケール (100pc-10kpc) で最大に近い。したがってこのようなメカニズムで作られる種磁場がその後の宇宙磁場に何らかの寄与をしていると考えられる。



(2) この磁場生成のメカニズムでは、一般に光源の天体に近いほど生成される磁場は強くなる。そこで初代星形成時に原始星周りに生まれる降着円盤での磁場生成を調べた。降着円盤は 10AU-10000AU のスケールの円盤であり、これまでのミニハロースケールに比べるとはるかに光源の原始星に近いところにある。この問題の研究には大学院生 1 名を配置し研究を行った。降着円盤周りの電離構造はすでに東京大学の細川氏らによって 2 次元の輻射流体計算で得られているので、細川氏に協力を得、計算データを再処理することで磁場の成長を計算した。その結果、1) 降着円盤の付近で 10G 程度の磁場が発生すること、2) 発生した磁場は極方向のアウトフローに乗って低密度領域に拡散し、銀河間空間の値ではこれまで調べられてきた宇宙の種磁場の値を一桁程度上回ることをしめた。

この研究は大学院生の修士論文となり、現在査読付き学術論文誌へ投稿直前の段階となっている。

(3) 次にこのような微弱な磁場が、初期宇宙の環境での星形成にどのような役割を果たすのかを調べるために、低金属量の環境での磁場とガスの結合の様子を調べた。下の図は様々な金属量のガスが自己重力で収縮していくとき、密度-温度面上でどのような進化をするのかを表している。またそれぞれの曲線の上に描かれた●は、その密度以上でガスと磁場の結合が切れる位置を示している。



わかったことをまとめると① $Z < 10^{-7} Z_{\text{sun}}$ ではガスは常に磁場に凍結している。② $10^{-2} Z_{\text{sun}} > Z > 10^{-7} Z_{\text{sun}}$ では磁場はガス雲の収縮が断熱的になった (すなわち First core になった) 直後にガスとの結合が切れる。③ $Z > 10^{-2} Z_{\text{sun}}$ では断熱になってしばらくしてから結合が切れる。①と②③の境目は非常に金属量が少ないほぼ原始組成の時に起きるので、磁場が完全に凍結しているような場合はほぼ原始組成での星形成に限られること

になることがわかった。また、②と③の境目を挟んで、低金属量の場合には、金属量が高い場合に比べて、First Core で収縮がゆっくりとなっている間に磁場が早くガスとカップルしなくなるので、磁場のねじりによる角運動量の輸送やジェット生成が起きにくくなることがわかった。

この研究も大学院生の修士論文となり、国際学会等で研究成果を発表している。また現在査読付き学術論文誌へ投稿準備中の段階となっている。

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 8 件)

①Umemura, Masayuki; Susa, Hajime; Kenji, Hasegawa, "Formation and Radiative Feedback of First Objects and First Galaxies", Progress of Theoretical and Experimental Physics, 査読あり, Vol.1, 2012, 01A306

Doi:10.1093/ptep/pts018

② Doi, Kentaro, Susa, Hajime, "Dissipation of magnetic fields in low-metallicity clouds", FIRST STARS IV - FROM HAYASHI TO THE FUTURE -. AIP Conference

Proceedings, 査読なし, Vol 1480, 2012, 349-351

Doi: 10.1063/1.4754383

③Susa, Hajime, "Radiative feedback from proto-first-stars", FIRST STARS IV - FROM HAYASHI TO THE FUTURE -. AIP Conference Proceedings, 査読なし, Vol 1480, 2012, 67-70

Doi: 10.1063/1.4754330

④ Susa, Hajime, "SPH Radiative Hydrodynamics Methods", Computational Star Formation, Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium, 査読あり, Vol 270, 2011, 195-202

Doi: 10.1017/S1743921311000366

⑤Doi, Kentaro, Susa, Hajime "Generation of a Seed Magnetic Field around First Stars: The Biermann Battery Effect" The Astrophysical Journal, 査読あり, Vol 741, 2011, article id. 93

Doi: 10.1088/0004-637X/741/2/93

⑥ Susa, Hajime; Ando, Masashi; Doi, Kentaro, "Generation of Magnetic Fields by Radiation Pressure from the First Stars", THE FIRST STARS AND GALAXIES: CHALLENGES FOR THE NEXT DECADE AIP Conference Proceedings, 査読なし, Vol 1294, 2010, 291-292

Doi: 10.1063/1.3518883

⑦ Ando, Masashi; Doi, Kentaro; Susa, Hajime, "Generation of Seed Magnetic Field around First Stars" TOURS SYMPOSIUM ON NUCLEAR PHYSICS AND ASTROPHYSICS-VII. AIP Conference Proceedings, 査読なし, Vol 1238, 2010, 133-135

Doi: 10.1063/1.3455916

⑧ Ando, Masashi; Doi, Kentaro; Susa, Hajime, "Generation of Seed Magnetic Field Around First Stars: Effects of Radiation Force", The Astrophysical Journal 査読あり, Vol 716, 2010 1566-1572

Doi: 10.1088/0004-637X/716/2/1566

[学会発表] (計 4 件)

①Doi, Kentaro "Dissipation of magnetic fields in low-metallicity clouds", The low-metallicity Ism: Chemistry, turbulence and magnetic fields, 2012年10月11日, ドイツ・ゲッチンゲン

②須佐 元, "PopIII.1星の質量降着期における光解離の影響について", 初代星・初代銀河研究会, 2011年12月20日, 福岡県福岡市九州大学・視聴覚ホール

③土井健太郎 "低金属量ガス雲からの磁場の散逸", 日本天文学会, 2011年9月21日, 鹿児島大学

④土井健太郎 "さまざまな重元素量をもったガス雲からの磁場の散逸", 日本天文学会, 2011年3月17日, 筑波大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

須佐 元 (SUSA HAJIME)

甲南大学理工学部・教授

研究者番号: 00323262

(3) 連携研究者

富永 望 (TOMINAGA NOZOMU)

甲南大学理工学部・准教授

研究者番号: 00550279