

宇宙磁場：初期宇宙における密度ゆらぎの化石

高橋慶太郎
市来浄興
杉山直

〈プリンストン大学 Department of Physics, Princeton University, Princeton, NJ 08540, USA e-mail: ktakahas@princeton.edu〉

〈東京大学初期宇宙研究センター 113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1 e-mail: ichiki@resceu.s.u-tokyo.ac.jp〉

〈名古屋大学大学院理学研究科 464-8602 名古屋市千種区不老町 e-mail: naoshi@a.phys.nagoya-u.ac.jp〉

宇宙の様々な系に存在する磁場がいつ・どのようにして生成されたのかは宇宙論の大きな謎の一つである。我々はこれまで小さいために無視された効果を考慮することによって宇宙初期の密度ゆらぎが磁場を生成することを示した。ゆらぎの時間発展を数値計算で追うことによって磁場スペクトルを精密に評価した結果、宇宙のあらゆるスケールで磁場は生成されることを示した。これこそが、銀河に普遍的に存在する磁場の起源であるかもしれない。

1. 宇宙における磁場

宇宙における磁場というとなまず地球磁場や太陽磁場が思い浮かぶ。地球の表面磁場はだいたい 0.5 G くらい、太陽の表面では数 G 、黒点においては数千 G にも及ぶことが知られている。太陽磁場はフレアやコロナといった激しい太陽活動において重要な役割を果たしているが、地球外で見つかった初めての磁場という意味で歴史的にも意義深い。

もっと大きなスケールに目を向けてみると、宇宙には至る所に磁場が存在していることがわかる。例えば我々の銀河系は数 μG という固有の磁場を持っている。銀河系の中には恒星や分子雲など、磁場を持つ天体がたくさん含まれているが、ここで言う銀河系固有の磁場とは個々の天体の磁場の重ね合わせではなく、銀河系全体にわたって広がる磁場のことである。数 μG というものすごく小さな磁場のように思えるが、銀河系ガスの粒子密度が 1 個/cc 、乱流速度が 10 km/s くらいなので実は磁場のエネルギーはガスのエネルギーに匹敵する。特に 100 pc ($1 \text{ pc} = 3.3 \text{ 光年} = 3.1 \times 10^{18} \text{ cm}$) 程度のスケールのガス運動のダイナミクスに磁場は大きく影響している。銀河よりさらに大きなスケールの銀河団にも数 μG 程度の磁場が存在し、やはりガスの運動エネルギーに近いエネルギーを持つ。

このように宇宙にはさまざまなスケールのシステムにそれぞれ固有の磁場が存在している。では宇宙でも最も大きなスケールすなわち宇宙そのものはどうだろうか。現在我々が知ることができる宇宙の大きさは 14 Gpc ($3 \times 10^9 \text{ pc}$) 程度であるが、このような大きなスケールにわたる磁場が存在しているのかどうか今のところわかっておらず、だいたい 1 nG という上限値だけが得られている。

「地球磁場の起源は現代物理学最大の謎である」と言ったのはかのアインシュタインであるが、これは容易に「宇宙磁場の起源は何か」という問いに拡張される。宇宙磁場の起源についての研究は多岐にわたるが、その紹介の前にまず宇宙磁場の基本的な物理を説明しておく。

宇宙においては第ゼロ近似として理想磁気流体力学が用いられる。これはプラズマガスの流体方程式+マックスウェル方程式の系でガスの電気抵抗がゼロという近似を取ったものである。電気抵抗がゼロというのは磁場の発展方

式で見たときには磁場が散逸しないということと等価であるが、この近似では磁場はガスに凍結、つまりガスとともに運動する。そのため系のダイナミクスは直感的に非常に理解しやすく、例えば磁場が凍結しているガスが重力によって等方的に収縮する状況を考えてみると、磁場はガスとともに収縮してその分強くなる。このとき重要なのは、磁場はその磁力線方向に収縮しても磁束密度が変わらないので系の大きさの2乗で変化するということである。一方、ガスの粒子密度はもちろん大きさの3乗で変化する。

このことを用いて銀河と星の磁場を比較してみる。銀河系の粒子密度 1 個/cc 、磁場 $1 \mu\text{G}$ のガスを太陽の平均密度 10^{24} 個/cc まで収縮させてみよう。すると 10^{10} G というとても大きく大きな磁場が出てくる。ガスが散逸なしの断熱的な変化をするという条件のもとでは、銀河は太陽よりも相対的に大きな磁場を持つということになる。一見非常に弱い銀河系の磁場であるが、系として巨大なために、寄せ集めてみれば太陽よりもはるかに強くなるのである。

2. 宇宙磁場の起源

ここで宇宙磁場の起源、とくに今のところ最もよく理解されている銀河磁場の起源に関するこれまでの研究について紹介する。¹⁾ 現在標準的なシナリオは、まず何らかの機構で銀河磁場の元となる種磁場が生成され、これが銀河ダイナモによって増幅されて現在の銀河磁場になるというものである。

ダイナモというのは磁場の増幅・維持機構で、物理的には様々な流体力学的・磁気流体力学的不安定性によって引き起こされ、太陽や地球内部で働いていることがよく知られている。例えば地球では液体の外部コアが運動することによって環状電流が流れ双極子磁場が誘起される。我々の銀河系のような渦巻銀河も角運動量を持っているので同様の現象が起こると考えられ、おおざっぱには銀河回転の時間スケール(太陽付近で2億年程度)で磁場は指数関数的に増幅されると期待される。

ここで重要なのはダイナモはもともとある磁場を増幅するが、ゼロから作り出すことはできないということである。そのため、何らかの機構によって種磁場が生成され、それ

がダイナモによって増幅されると考えるのである。オーダー評価を超えたダイナモの理解はなかなか難しいが、銀河が形成される100億年ほど前から現在までで磁場は 20 ± 5 桁ほど増幅されると見積もられている。現在の銀河磁場の強さが数 μG なので、 $10^{-30} \sim 10^{-20} \text{ G}$ 程度の種磁場があればよい。

種磁場を特徴づける上でもう一つの重要なのはその相関長もしくはスペクトルである。ダイナモの理解が完全でないのもこれも確定的ではないが、だいたい銀河スケールである10 kpc程度の相関長を持つ磁場が主に増幅されると考えられている。以上をまとめると、 $10^{-30} \sim 10^{-20} \text{ G}$ くらいの強さ、10 kpc程度の相関長を持つ磁場が銀河形成期前後もしくは以前に生成されていればその後ダイナモで増幅されて現在観測されている銀河磁場を説明できるということになる。

次に、種磁場の起源についてのこれまでの研究を紹介する。種磁場の生成機構についてはその物理的性質によって大きく二つに分類することができる。一つはプラズマ物理的生成、もう一つは量子論的生成である。プラズマ物理的生成については、まず先ほど述べたように宇宙論でよく用いられる理想磁気流体力学の適用範囲では磁場はゼロから生まれ得ないことを簡単に示すことができる。したがってこの近似の適用外の現象が必要になるが、例えば衝撃波や輻射によるプラズマの加熱がある。このような非熱的な現象が起こるとピアン機構と呼ばれるメカニズムで磁場が生まれる。ピアン機構とは、ガスの圧力勾配と密度勾配が平行でないときにシア状の電流が発生して磁場が生成されるというものである。

宇宙において衝撃波は様々な系で現れる。種磁場生成という文脈では、例えばガスが収縮して銀河や銀河団が形成されるとき、第1世代星の超新星爆発やその爆風と周りのガスが衝突するとき、宇宙が一度中性化した後何らかの天体から放出された紫外線によってまたイオン化されるときなどが考えられる。各々の場合について磁場の生成が議論されており、銀河の種磁場として十分な磁場生成が起こるといふ報告もある。しかしこれらの現象自体が理論的にも観測的にもまだよく理解されていないため、そこで起こる磁場生成についても確定的なことはわかっていない。また、一般に天体起源の種磁場は相関長が短く、銀河磁場の種磁場として働くかどうかともよくわかっていない。

一方量子論的生成は、初期宇宙のインフレーションと呼ばれる加速膨張期に微小な量子論的ゆらぎが引き伸ばされるというアイデアに基づいている。実際現在の宇宙の構造の種となる密度ゆらぎはこのようにしてできたと考えられているが、磁場も同じようにして生成された可能性があるのである。ただし我々がよく知っている通常の電磁場は宇宙が膨張すれば薄まるだけなので、何か特殊な電磁場を考えなければならない。例えば重力やインフレーションを起こすスカラー場と特殊な相互作用を持たせることにより磁

システム	大きさ	密度 (個/cc)	磁場 (G)
地球	10^4 km	10^{24}	0.5
太陽	10^6 km	10^{18}	1
銀河	10 kpc	1	10^{-6}
銀河団	1 Mpc	10^{-3}	10^{-6}
宇宙	14 Gpc	10^{-6}	$< 10^{-9}$

場が生成されるが、このようにしてできる磁場は一般に銀河の種磁場としては弱く、またそのでき方はどのような相互作用を持たせるかに強く依存する。したがってそのような相互作用があることが他の方法からわからない限り、磁場に関してもやはり確定的なことは言えない。

まとめると、これまでの磁場生成についてさまざまな研究がなされており、そのいくつかは銀河の種磁場として十分な磁場を生成する。しかしプラズマ物理的生成ではその舞台となる天体自体についての理解がまだ十分でなく、相関長が短いという欠点もある。量子論的生成については我々の知っている電磁場を超えた未知の物理が介在してくる。どちらにしても今のところ確定的なことは言えず種磁場の起源として満足なものとは言えない。

ここまで銀河磁場の起源について述べてきたが、銀河団についても同様なシナリオが考えられている。しかし銀河団ダイナモについてはまだほとんど理解されていないので定量的な議論をするのは今のところ難しい。

3. 密度ゆらぎの存在と宇宙論的摂動論

宇宙には、星、銀河、銀河団、大規模構造など、様々なスケールの構造が存在している。これらの構造は、宇宙初期に存在した宇宙論的な密度ゆらぎが、重力によって成長して形成されたものだと考えられている。宇宙誕生時に周囲と比べてたまたま密度が高かった場所が重力によって周囲から物質を集め、さらに重力を強くして構造を発展させていくのである。

先に述べたように、このような現在の宇宙の構造の種となる宇宙論的な密度ゆらぎは宇宙初期の加速膨張期、インフレーションの時代に量子ゆらぎを元にして生成されたと考えられている。これまで様々なインフレーションモデルが提唱されているが、真空の量子ゆらぎから生成するという点では共通している。またゆらぎのスペクトルはどの場合でも、ほぼスケール不変、すなわちすべての波長についてその振幅がほとんど同じであるという著しい特徴を持つ。実際、観測されている宇宙背景輻射の温度ゆらぎは、ほとんどスケール不変なゆらぎを初期条件に持つことがわかっている(図1左)²⁾。銀河分布から得られる物質密度のゆらぎについても、同様にほぼスケール不変な初期条件を示唆しており、このことは過去にインフレーションが起こったことを証拠立てるものである。

宇宙の大規模構造の形成を支配する重力は本質的に非線型である。しかし構造の元となる宇宙論的密度ゆらぎの大きさは宇宙初期には10万分の1程度であったことが、宇宙

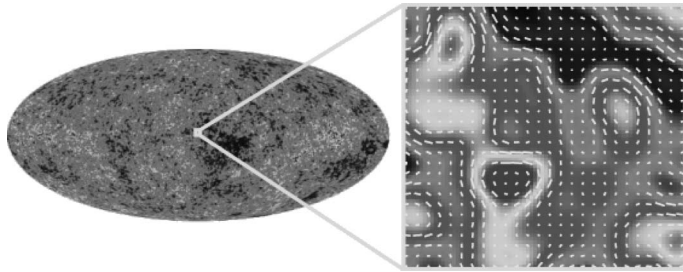


図1 宇宙観測衛星 WMAP によって観測された、宇宙誕生37万年後に存在した温度(密度)ゆらぎとそれから生成された磁場の想像図(右図; 白線が磁力線)。色が濃い部分が温度が低いところ。(Science 誌2006年2月10日号に掲載)

背景放射の温度ゆらぎの観測からわかっている。したがって、一様密度の宇宙からの小さな密度ゆらぎは摂動として扱うことができ、宇宙初期における構造の進化を線形理論(ゆらぎの2次以上の項を無視する)によって記述することができる。このような「宇宙論的摂動論」は、宇宙背景放射の温度ゆらぎや銀河分布をはじめとする様々な天文学的な観測を高い精度で説明することに成功している。

宇宙の階層構造の形成に関する標準モデルである宇宙論的摂動論に基づけば、密度ゆらぎの膨張宇宙での時間発展は完全に確定できる。観測と比較することで、ゆらぎの統計的性質なども決定できる。理論的あいまいさがほとんどなしで、構造の発展を記述できるのである。したがって、もし密度ゆらぎから磁場が生成されるのであれば、宇宙論的摂動論にしたがって、磁場の大きさや統計的性質も温度ゆらぎや大規模構造と同様に、精密に予言可能となる。

現在の宇宙論の標準モデルは、主要な構成要素として光子、電子、バリオン(主に陽子と少量のヘリウム核)、ニュートリノ、ダークマター、ダークエネルギーという「6種類の物質」と、「6種類の宇宙論パラメータ」(標準的にはダークマターの密度、バリオンの密度、現在の宇宙の膨張率、トムソン散乱の光学的厚み、初期密度ゆらぎの大きさと、そのパワースペクトルの形(波数に対する振幅の依存性))および「宇宙論的摂動論」から成り立っている。このようなシンプルな理論モデルで WMAP²⁾ による宇宙背景放射の1,400以上にも及ぶ独立な観測データを説明できるというのは非常に驚くべきことである。

4. 密度ゆらぎからの宇宙論的磁場の生成

ここで、現在の標準的な宇宙論の枠組内で磁場が自然に生成されることを示す。³⁾ 宇宙誕生後間もない若い宇宙は現在に比べ高温・高密度で、宇宙全体がプラズマ状態にあったと考えられている。宇宙誕生後38万年以前においては電子は陽子に束縛されずにそれぞれが自由に運動している。しかし流体としては電子と陽子はクーロン力で、また光子は電子とコンプトン散乱を通じて強く結びついていたため、この3種類の流体はおおざっぱには一つの混合流体として考えることができる。ところがこのように考えてしまうと電子流体と陽子流体が全く同じように運動することになり、

電流は流れず磁場も生成されることはない。すなわち磁場の生成を考えるためには、この3流体をそれぞれ別々に考え、それぞれの間のわずかな運動の差を評価することが必要である。

インフレーションを初期条件とした宇宙論的摂動論によれば、当時の電子・陽子・光子流体の運動は密度ゆらぎに起因する音波振動であった。この運動は次のように理解できる。宇宙の重力源として最も重要な存在であるダークマターは他の粒子と(重力以外に)相互作用をすることなく、主に自身の重力によって密度ゆらぎを成長させていく。非相対論的な流体となっている電子と陽子は一緒にこのダークマターの重力ポテンシャルへと落ち込んでいくが、その際光子も電子に引きずられて一緒に重力ポテンシャルへ落ち込む。ところが光子は相対論的な流体で非常に大きな音速を持つため、線形的な密度ゆらぎに対してほぼ安定であり、ある程度圧縮したところで反発し振動を始める。今度は逆に電子と陽子の流体がこの振動に引きずられ、結局3流体は一緒に音波振動をすることになる。宇宙背景放射ゆらぎの地図における 1° という角度スケールの温度の高低は、この音波振動の圧縮フェーズと希薄フェーズなのである。

この運動をさらに細かく考えてみる。重力ポテンシャルに落ち込んだ光子、陽子、電子の流体は、密度が最大になったところで光子の圧力によって反発することは上に述べた。これはちょうど密度の高い領域から低い領域へ「光子流体の風」が吹いているような状況である。3種類の物質を一つの混合流体とみなす近似では、この風に沿って陽子と電子も運動することになる。ところが、実際にコンプトン散乱を通じてこの風を感じるのは主に電子である。これは、電子の質量は陽子の質量と比較して3桁大きく、散乱断面積は質量の2乗に反比例するからである。

それでは、この電子だけに働く光子からの風圧によって、陽子と電子の間には加速的に速度差が生じていくのであろうか? 実際にはそうはならない。先に述べた理想電磁流体力学を考えると、初期宇宙のプラズマは非常によい導電体と考えることが可能であり、この場合この風圧と釣り合うだけの誘導電場が瞬時に発生することになる。ゆえに、陽子と電子の流体の間にはある程度以上の速度差を生じることはない。この誘導電場は一般化したオームの法則を用いて評価することができるが、マックスウェルの方程式によるとこの誘導電場の回転(ローテーション)から磁場が誘起される。これが密度ゆらぎから、磁場が発生するメカニズムである。誘導電場はだいたい光子の風と同じ向きであるためその回転である磁場は風と垂直の向き、つまり光子密度の等高線に沿うような感じになる(図1右)。

このような単純な物理過程が今までなぜ議論されてこなかったのか? それは、この「風」は非常に小さい密度ゆらぎから生じる弱い風であるために、無視されてしまっていたのである。もう少し正確に言うと以下ようになる。

この風は密度ゆらぎから生じる風であるという性質から、線形摂動理論の範囲内ではスカラー型のものである。つまりあるスカラー関数の勾配で風場の速度場が記述できる。それゆえ、単純にこの風に沿って生じた電場の回転を考えると恒等的にゼロとなってしまう磁場は生じない。したがって有限の磁場を発生させるためには風の吹く先に存在する電子の小さな密度ゆらぎまで考慮して、回転型の電場が発生する効果を考えなくてはならない。これは、摂動理論の言葉では、密度ゆらぎの摂動2次の効果を考えるということに対応する。先に述べた通り、宇宙初期の密度ゆらぎは10万分の1と非常に小さく、観測を説明するのに線形、すなわち1次の理論で十分な精度があるため、2次の効果は無視していたのである。しかし、磁場生成という観点では摂動2次の効果を考えることこそが本質的であったのだ。

以上のようにこの研究で重要な点は以下の3点である。

1. 電場の回転成分を生み出す2次摂動論
2. 電場を評価するための電子と陽子の別々な取り扱い
3. 電子と陽子の運動の差を生む光子風の評価

このうち1.の観点から磁場生成を論じる研究はこれまでいくつも行われてきたが、2.と3.の要素が欠けていたため物理的に曖昧で精密な評価もできなかった。⁴⁻⁶⁾ 上記の3点をすべて取り入れて磁場を正確に曖昧さなく評価している点が今回の研究の独創的な点である。

5. 磁場の発展方程式とスペクトル

電子と光子の相互作用を密度ゆらぎの摂動2次まで考慮した磁場の発展方程式は以下のようなものである。³⁾

$$\frac{\partial B^i}{\partial t} = \frac{4\sigma_T\rho_\gamma}{3e} \varepsilon^{ijk} \left[\frac{1}{\rho_\gamma} \frac{\partial \delta\rho_\gamma}{\partial x^k} (v_{ej} - v_{\gamma j}) + \frac{\partial}{\partial x^k} (v_{ej} - v_{\gamma j}) + \frac{1}{8} \frac{\partial}{\partial x^k} (v_{ei} \Pi_{\gamma j}^l) \right], \quad (1)$$

ここで、 B^i は磁場、 σ_T はトムソン散乱断面積、 e は素電荷、 ε^{ijk} はレヴィ・チビタテンソル、 ρ_γ は光子のエネルギー密度、 $\delta\rho_\gamma$ はその密度ゆらぎ、 v_{ej} 、 $v_{\gamma j}$ は電子および光子の流体速度、そして $\Pi_{\gamma j}^l$ は光子の非等方圧力である。この方程式の意味するところは、「光子流体と電子流体に速度差がある場合」、および「光子流体の非等方圧力が存在する場合」に光子が電子を散乱して陽子との速度差を生み出し、磁場を生成するということである。とくに宇宙論的磁場生成に対する非等方圧力による寄与は、我々が初めて指摘したものである。これらをそれぞれ、「光子-電子スリップ項」および「光子の非等方圧力項」と呼ぶことにする。「光子-電子スリップ項」のうち、2番目の項は純粋に摂動2次で渦型の速度差である。渦型の速度ゆらぎは摂動1次の範囲では宇宙膨張とともに減少していきただけであることが知られている。実際には、やはり密度ゆらぎの2次結合の効果として生み出されている可能性もあり、単純ではないが、ここでは無視することにする。

無視した項を除く残り二つの項は、二つの1次摂動量の

積の形をしている。したがって、すでに確立した宇宙論的摂動論を用いて厳密に計算することができる。3節で述べたように密度ゆらぎの大きさおよびそのスペクトルは、宇宙背景放射の観測から精緻に求められている。ゆえに、その観測・理論に基づいて計算された磁場の大きさ・スペクトルも精密なものである。

ここで考えた磁場の生成過程が働くための条件は、自由電子が宇宙空間に多く存在して光子とトムソン散乱を通じて相互作用していることと、陽子と電子はクーロン相互作用を及ぼし合っていることである。しかし、宇宙誕生後38万年が経過すると陽子と電子が結びつき、水素原子が形成される。再結合、または宇宙の晴れ上がりと呼ばれる。この時以降、もはや磁場は密度ゆらぎからは新たに生成されず、再結合の時期のスペクトルを保ち、大きさは宇宙の膨張の結果、断熱的に小さくなっていく。以後示す磁場の大きさは、膨張による効果を考慮し、生成された時期の大きさではなく現在の値に直してある。

6. 結果

以上のようにして宇宙論的ゆらぎによって生成された磁場のスペクトルは図2のようになっている。⁷⁾ ここでは三つの寄与のうち簡単に計算できる二つの寄与だけを書いてあるので、厳密にはここで与える磁場は下限ということになる。まずわかることは銀河の典型的な大きさに対応する100 kpcから宇宙全体の大きさ(地平線)をしのぐ10 Gpcに至るまでの広範囲のスケールで磁場が生成されているということである。

スペクトルは100 Mpcと1 Mpcを境にして三つの領域に分けて考えられる。1 Mpc以上の大スケールでは光子スリップが卓越しているが、再結合時の地平線スケールである

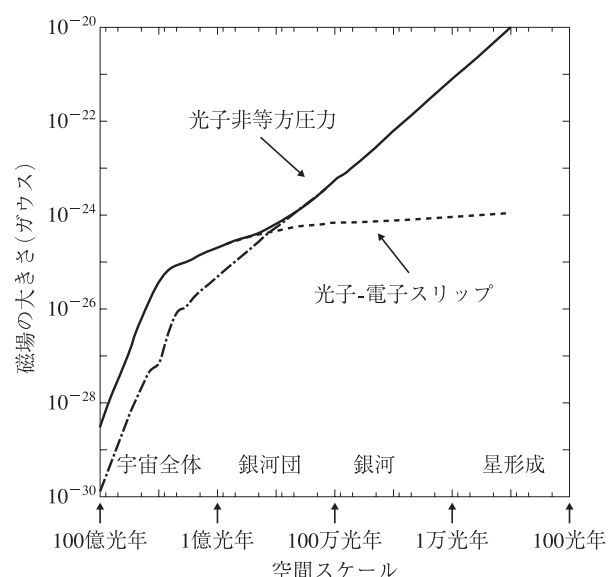


図2 宇宙論的ゆらぎによって生成される磁場のスペクトル(再結合時). 光子-電子スリップ(破線), 光子非等方圧力(1点鎖線), それらの合計(実線)が描かれている。またスケールに対応する系も書いてある。(Science誌2006年2月10日号に掲載。)

100 Mpc 以上で磁場はスケールの 3.5 乗で小さくなり、100 Mpc 以下ではスケールにほとんどよらない。銀河団のスケール 1 Mpc での磁場の強さは 10^{-24} G であるが、銀河団ダイナモの効率がまだほとんどわかっていないこともあってこれが銀河団の種磁場として十分かどうか現時点では不明である。

光子の非等方圧力が大きくなる 1 Mpc 以下では磁場はスケールに反比例して大きくなる。この小スケールの振舞いは解析的に示せるので、もっと小さなスケールまで外挿することができる。すると例えば銀河のスケール 10 kpc では 10^{-21} G となり、銀河の種磁場として十分な強さであることがわかる。またもっと小さなスケールの磁場は第 1 世代の星形成を効率的にするということが議論されている。

以上のように宇宙論的ゆらぎから生成される磁場はあらゆるスケールにわたる。ここで注意すべきことは、銀河団よりも大きなスケールではまだ磁場が観測されていないので、本研究は宇宙論的スケールの磁場の存在を予言しているということである。2 節で紹介した磁場のプラズマ物理的生成説のほとんどのモデルでは磁場は何らかの天体に付随して宇宙論的スケールの磁場は生成されないし、インフレーション起源であったとしてもその磁場の強さやスペクトルはここで考えたものとは異なるであろうから、もしこの研究で予想する大きさの磁場が観測できればその磁場生成機構の正しさを証明できる。

一方、銀河団以下のスケールでは本研究はさまざまな天体、特に銀河の磁場の起源を説明できる可能性がある。ただし銀河磁場の起源が宇宙論的ゆらぎにあるということはまだ確定できず、実際のところは 2 節で紹介した他のいろいろなプロセスが卓越している可能性も否定はできない。しかし、いずれにせよここで考えた磁場生成の機構は、宇宙での構造形成の結果として必然的に働くことだけは間違いがない。実際にこの機構だけで銀河の磁場を説明できるのかどうかは、今後の詳細な数値シミュレーションを待たねばならない。

7. 検証

最後にここで考えた磁場生成機構が本当に働いているかどうかの検証について簡単に述べることにする。銀河や銀河団に付随している磁場はすでにダイナモ機構などが働いたために、種磁場そのものがどれだけの強さであったかを知ることは難しい。しかし、前節でも述べたように銀河間空間の希薄なガスではダイナモ機構は働いておらず、種磁場が凍結して残されていると期待される。まだ見つからない銀河間空間での磁場を測定できれば、この生成機構の正しさを検証できるのである。しかし、この種磁場はあまりに弱すぎて直接観測はほとんど不可能である。これま

での磁場観測法の感度はせいぜい 1 nG であって、ここで与えた磁場はこれより 10 桁ほど小さいのだ。ところが近年このような弱い磁場でも測定できる可能性がある強力な方法がプラガ (Plaga) によって提唱された。⁸⁾ ガンマ線バーストなどの超遠方から飛来する光子が、途中で相互作用を起こし、一時的に陽電子、電子などの荷電粒子になり、対消滅によって再び光子に戻る過程を考える。荷電粒子でいるわずかな時間に、磁場から影響を受け、より長い距離を伝播することになり、地球への到達時刻に遅延が生じるのである。この方法で非常に弱い磁場を測ることができると考えられており、高エネルギーガンマ線の観測によって宇宙論的ゆらぎからの磁場について示唆が得られると期待される。

最後になったが、本稿を執筆中、以前に発表した結果に定量的な誤りが見つかった。その修正により磁場の大きさは全体的に小さくなり、例えば 1 Mpc において 5 桁小さくなってしまいが、本研究の主な結論である

- (1) 密度揺らぎから生成される磁場のスペクトルを決定した
- (2) 様々なスケールにおいて磁場が生成される
- (3) 銀河磁場の種となり得る強さである

という点には変わりはない。本稿に掲載した結果はこの修正を行った新しいものである。

参考文献

- 1) L. M. Widrow: Rev. Mod. Phys. **74** (2002) 775.
- 2) WMAP ホームページ: <http://map.gsfc.nasa.gov/>
- 3) K. Takahashi, K. Ichiki, H. Ohno and H. Hanayama: Phys. Rev. Lett. **95** (2005) 121301.
- 4) Z. Berezhiani and A. D. Dolgov: Astropart. Phys. **21** (2004) 59.
- 5) S. Matarrese, S. Mollerach, A. Notari and A. Riotto: Phys. Rev. D **71** (2005) 043502.
- 6) R. Gopal and S. Sethi: MNRAS **363** (2005) 521.
- 7) K. Ichiki, K. Takahashi, H. Ohno, H. Hanayama and N. Sugiyama: Science **311** (2006) 827.
- 8) R. Plaga: Nature **374** (1995) 430.

(2006 年 4 月 12 日原稿受付)

Cosmological Magnetic Field: A Fossil of Density Perturbations in the Early Universe

Keitaro Takahashi, Kiyotomo Ichiki and Naoshi Sugiyama

abstract: It is one of the greatest problems in cosmology when and how cosmological magnetic fields are generated. We show that density perturbations in the early universe generate magnetic field by considering an effect which is so tiny that it has been neglected so far. By following the evolution of perturbations numerically we give the spectrum of generated magnetic field and show the possibility that they act as seed fields for galactic magnetic fields.