

# 宇宙磁場：初期宇宙における密度ゆらぎの化石

市 來 淨 與

〈東京大学大学院理学系研究科付属ビッグバン宇宙国際研究センター 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1〉

e-mail: ichiki@resceu.s.u-tokyo.ac.jp

高 橋 慶 太 郎

〈Department of Physics, Princeton University, Princeton, NJ08544, USA〉

宇宙では星・銀河・銀河団などさまざまなスケールで磁場が存在することが知られています。宇宙での磁場はこれらの天体の構造を形成する過程において、また天体からの X 線やガンマ線放射の元となる高エネルギー粒子の加速機構などにおいて重要な役割を果たしています。しかし、「宇宙磁場がいつ・どのようにして生まれたのか」という問題はこれまで宇宙の大きな謎の一つでした。この謎に対し、私たちは宇宙初期の物質分布のむらである密度ゆらぎが、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、あらゆるスケールで磁場を生成していることを示しました。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ません。

## 1. 宇宙は磁場に満ちている

「地球磁場の起源は現代物理学最大の謎である」とアインシュタインは言ったそうですが、これは容易に「宇宙磁場の起源は何か」という問いに一般化できるでしょう。宇宙には地球・太陽といった比較的身近なところから、銀河系、銀河団などの大きなスケールの天体まで、至る所に磁場があることが観測されています。そして、重力と並んでさまざまな天体活動・現象において重要な役割を果たしています。しかしこの磁場が「いつ」・「どのようにして」生成されたかということは宇宙物理学における未解決の謎の一つです。

この謎に挑む前に、まず宇宙磁場の観測事実について概観してみたいと思います<sup>1)</sup>。宇宙における磁場というとまず地球磁場や太陽磁場が思い浮かびます。地球の表面磁場はだいたい 0.5 ガウスくらい、太陽の表面では数ガウス、黒点においては数千ガウスにも及ぶことが知られています。太陽磁場はフレアや質量放出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て、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のです。

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ります。例えばわれわれの銀河系は数マイクロガウスという固有の磁場をもっています。数マイクロガウスというとてもすごく小さな磁場のように思えるかもしれませんが、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運動エネルギーに匹敵します。銀河よりさらに大きなスケールの銀河団にも数マイクロガウス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もっています。

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ます。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でしょう。現在われわれが知ることができる宇宙の大きさは 10 ギガパーセク ( $10^{10}$  パーセク)

程度ですが、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ナノガウスという上限値だけが得られています。

## 2. 宇宙磁場の起源（特に銀河磁場の必要条件について）

ここでは宇宙磁場の起源、特に銀河磁場の起源に関するこれまでの研究について少し紹介します。現在の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す。ダイナモは磁場の増幅・維持機構で、物理的にはさまざまな流体力学的・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ます。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ていると考えられています。われわれの銀河系のような渦巻銀河も角運動量をもっているため同様の現象が起こればと考えられ、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できます。

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す。オーダー評価を超えたダイナモの理解は簡単ではありませんが、銀河が形成される100億年ほど前から現在までで磁場は $20 \pm 5$ 桁ほど増幅されると見積もられています<sup>2)</sup>。現在の銀河磁場の強さが $10^{-6}$ ガウスなので、 $10^{-30} \sim 10^{-20}$ ガウス程度の種磁場があればよい計算になります。

磁場の強さとともに、その性質を特徴づける上でもう一つの重要なのはその相関長<sup>\*1</sup>もしくはスペクトルです。ダイナモの理解が完全でないので

これも確定的ではありませんが、おおよそ銀河スケールである10キロパーセク程度の相関長をもつ磁場が主に増幅されると考えられています。以上をまとめると、 $10^{-30} \sim 10^{-20}$ ガウスくらいの強さ、10キロパーセク程度の相関長をも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ります。

### 種磁場の生成機構

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ます。一つはプラズマ物理的生成、もう一つは量子論的生成です。プラズマ物理的生成については、非熱的な現象が起こるとピアマン機構と呼ばれるメカニズムで磁場が生まれることが知られています<sup>3)</sup>。ピアマン機構とは、ガスの圧力勾配と密度勾配が平行でないときに層状の電流が発生して磁場が生成されるというものです。このような機構が働く系として、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<sup>4)</sup>、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<sup>5)</sup>、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<sup>6)</sup>などが考えられています。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ればという報告もあります。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言えない状況です。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はよくわかりません。

一方量子論的生成は、初期宇宙のインフレーション<sup>7)</sup>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ます。この場合では、小さいスケールも膨張

\*1 磁力線の典型的な長さのこと。ここでは、磁力線の向きがどの程度のスケールに渡って揃っているかが重要です。

によって大きく引き延ばされますから、相関長については問題がありません。ただしわれわれ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りません。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もたせることにより<sup>8),9)</sup>磁場が生成されますが、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もたせるかに強く依存します。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でしょう。

これら二つの生成機構に加えて、第三の機構が存在します。それがこれから述べる宇宙密度ゆらぎからの磁場生成です。この生成機構は、私たちのよく理解している物理で記述できる、また、さまざまな相関長をもった磁場が生成されるという上記二つの生成機構の利点を合わせたような特徴があります。この生成機構を説明する前に、まずは宇宙密度ゆらぎについて触れておきたいと思えます。

### 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、さまざまなスケールで構造が存在しています。これらの構造は、宇宙誕生時に生成され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ます。宇宙誕生時に周囲と比べてたまたま密度が大きかった場所が、重力によって周囲から物質を集めて星を形成し、さらに重力を強くして周囲の星や物質を集めて銀河を作り……というようにして、構造を進展させていくのです。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真空の量子ゆらぎを元にして生成されたと考えられています<sup>10)</sup>。

さて、インフレーションで生成された密度ゆらぎの現在までの進化を追うためには重力を記述するアインシュタインの一般相対論が必要です。しかし、アインシュタイン方程式は一般的には複雑な非線型方程式になってしまい厳密に解くことはほぼ不可能なものです。幸運なことに私たちの宇宙はおおざっぱに見ると一様等方であり、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、例えば宇宙背景放射の温度ゆらぎの観測からわかっています<sup>11)</sup>。したがって、一様密度の宇宙からの小さな密度ゆらぎを摂動として扱うことで、宇宙初期における構造の進化を線形理論（ゆらぎの2次以上の項を無視して式を単純化した理論）によって記述することができます。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さまざま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ます。

宇宙の階層構造の形成に関する標準理論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ます。また、観測と比較することによって、ゆらぎの統計的性質なども決定できます。すなわち、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す。したがって、後で述べるように、もし密度ゆらぎから磁場が生成されるのであれば、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、宇宙論的摂動論に従って精密に予言可能なものです。

### 4. 密度ゆらぎからの宇宙磁場生成

宇宙誕生後間もない若い宇宙は現在に比べ高温であったため、宇宙全体が陽子、電子、光子で満ちたプラズマ状態にあり、これらの粒子は自由に運動していました。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種類の流体はおおまかには一つの混合流体として考

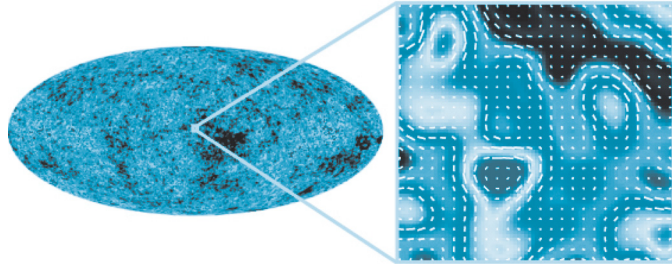


図1 宇宙観測衛星 WMAP によって観測された、宇宙誕生 38 万年後に存在した温度（密度）ゆらぎと、そこから生成された磁場の想像図（右図；白線が磁場）色が濃い部分が温度の低いところに対応する。温度の勾配が大きいところは強い光の風が吹き、大きい磁場ができる<sup>14)</sup>。

えることができます。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ますから、電流は流れず磁場も生成されることはないでしょう。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大切です。

インフレーションを初期条件とした標準的な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す。この運動は次のように理解できます<sup>12)</sup>。宇宙初期においても重力源として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ゆっくり成長させていきます。非相対論的な流体となっている電子と陽子と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きます。その際光子もコンプトン散乱を通じて電子に引きずられて一緒に重力ポテンシャルへ落ち込んでいきます。ところが光子は相対論的な流体で非常に大きな音速をもつため、線型的な密度ゆらぎに対してほぼ安定で、ある程度圧縮したところで反発し振動を始めます。すると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ります。宇宙背景放射ゆらぎの地図における1度という角度スケールの温度の高低は、この音波振動に

よって圧縮された場所と希薄な場所です。

この運動をさらに細かく考えてみましょう。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を上に述べました。これはちょうど地上で高気圧から低気圧に向かって空気の風が吹くように、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す。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します。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ことはできるのは主に電子のみのはずです。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す。

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ことになるのでしょうか？ 実際にはそうはなりません。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ります。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ありません。この誘導電場は一般化したオームの法則を用いて評価できますが、マックスウェル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ます。これが密度ゆらぎ

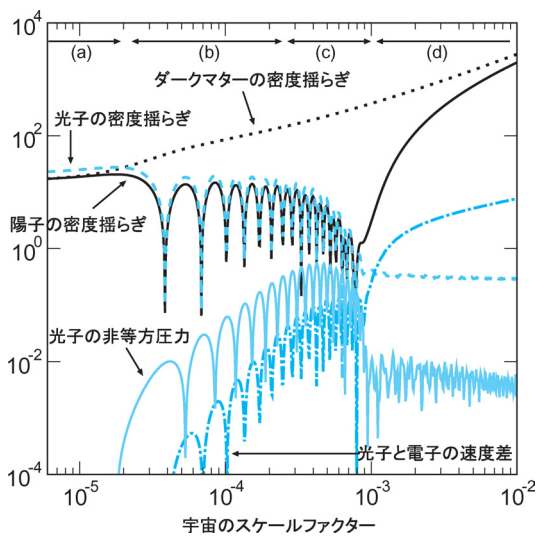


図2 宇宙密度ゆらぎの成長の例 (ゆらぎの波長はおよそ1メガパーセク). 横軸は現在の宇宙の大きさを1に規格化したスケールファクター (時間の流れは左から右.) 縦軸はゆらぎの大きさ (線形理論なので、ここでは大きさの絶対値には意味がない.) 宇宙の密度ゆらぎの成長は主に四つの時期に分類できる.  
 (a) 宇宙の地平線に入る以前: インフレーションで生成された揺らぎを保持している.  
 (b) 音響振動: 宇宙の地平線の中に入って因果関係をもった光子流体と陽子流体のゆらぎは、音波振動をする。磁場を作る源となる、光子の非等方圧力と光子電子の速度差は、膨張によって密度が下がり流体近似が悪くなるにつれて成長していく。  
 (c) 拡散減衰: さらに膨張によって密度が下がると、光子の拡散の影響でゆらぎが均される。ゆらぎがならされてしまうと、磁場の生成は終わる。  
 (d) 自由運動: スケールファクターが  $10^{-3}$  の頃、陽子と電子は再結合し光と陽子 (水素) 流体は自由に運動するようになる。

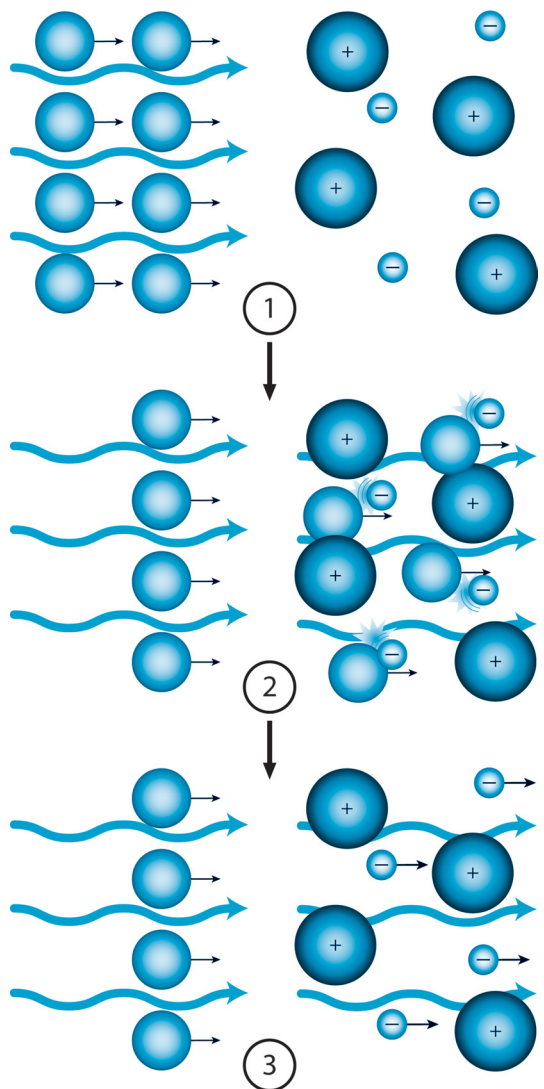


図3 光の風による電流生成の概念図. (1) 音波振動 (図2の (b) の状態) している状態では、密度の高いところ (圧力の高いところ) から低いところへ光子流体の風が吹く. (2) 光の風はコンプトン散乱によって電子のみを選択的に散乱する. (3) 陽子と電子との間に速度差が生まれて電流が発生し、磁場が生成される。

から、磁場が発生するメカニズムです (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でしょうか? 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す。もう少し正確に言うと以下ようになります。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です。つまりあるスカラー関数の勾配で風の速度場が記述できます。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

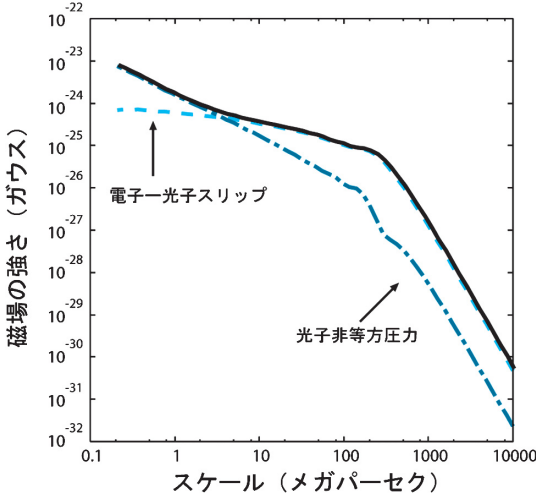


図4 宇宙論的密度ゆらぎから生成された磁場のスペクトル。横軸はスケール（メガパーセク）、縦軸は磁場の大きさ（ガウス）。光子-電子スリップによる寄与（点線）、光子非等方圧力からの寄与（一点鎖線）、それらの合計（実線）が描かれている。相対的に小さいスケールの磁場が強く生成される。またおよそ 10 Mpc 以下の小さいスケールでは非等方圧力の寄与が卓越する。

となってしまう磁場は生じません。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りません。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します。先に述べたとおり、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ました。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です。

### 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す。

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

ここで、 $B^i$ は磁場、 $\sigma_T$ はトムソン散乱断面積、 $e$ は素電荷、 $\varepsilon^{ijk}$ はレビ・チビタテンソル\*2、 $\rho_\gamma$ は光子のエネルギー密度、 $\delta_\gamma$ 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す。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す。特に宇宙論的磁場生成に対する非等方圧力による寄与は、われわれが初めて指摘したものです<sup>13)</sup>。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」と呼ぶことにします。「光子-電子スリップ項」のうち、2番目の項は純粹に摂動2次で渦型の数値差です。渦型の数値ゆらぎは摂動1次の範囲では宇宙膨張とともに減少してだけであることが知られています。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、単純ではありません。しかし、ここではこの項が他の項をちょうどきれいに打ち消すことはないかと仮定して無視することにします。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ます。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ます。先に述べましたが、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ます。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す。

ここで考えた磁場の生成過程が働くための条件

\*2  $\varepsilon^{ijk}=1$  ( $ijk$ が1, 2, 3の偶置換),  $-1$  ( $ijk$ が1, 2, 3の奇置換),  $0$  (それ以外) という値をもつ反対称量。ここでは外積を簡単に表現するために用いてあります。

は、自由電子が宇宙空間に多く存在していて光子とコンプト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す。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ます。これは再結合、または宇宙の晴れ上がりと呼ばれます。このとき以降、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と考えられます。ただし以後示す磁場の大きさは、この効果を考慮しない、生成された時期での磁場の大きさです。

### 6. 銀河磁場の起源として十分な種磁場が生成

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 のようになっています<sup>14)</sup>。ここでは三つの寄与のうち厳密に計算できる二つの寄与だけを書いてあるので、正しくはここで与える磁場は大きさの下限です。まず注目いただきたいことは、銀河の典型的な大きさに対応する 100 キロパーセクから宇宙全体の大きさ(地平線)をしのぐ 10 ギガパーセクに至るまで、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す。

スペクトルはおよそ 100 メガパーセクと 10 メガパーセクを境にして三つの領域に分けて考えることができます。10 メガパーセク以上の大スケールでは光子-電子スリップによる寄与が卓越していますが、再結合時の地平線スケールである 100 メガパーセク以上では磁場はスケールの 3.5 乗で小さくなります。銀河団のスケール 1 メガパーセクでの磁場の強さは  $B \sim 10^{-24}$  ガウス程度です。

光子の非等方圧力が大きくなる 10 メガパーセク以下では磁場はスケールに反比例して大きくなります。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ます。すると例えば銀河のスケール 10 キ

ロパーセクでは  $B \sim 10^{-22}$  ガウスとなり、冒頭で述べたダイナモ効果を考えると、銀河の種磁場としておそらく十分な強さであることがわかります。

もちろん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、実際のところは先に紹介した他のいろいろな生成機構が卓越している可能性も否定はできません。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ありません。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でしょう。

### 7. 結 び に

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ります。ここで興味深いことは、いまだ観測的には証拠がない宇宙論的スケールの磁場の存在を本研究は予言しているということです。先に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いて宇宙論的スケールの磁場は生成されないでしょうし、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しょう。都合の良いことに(?)、最近の研究で宇宙の大部分の領域は天体現象による磁場生成・増幅の影響から逃れて宇宙初期に生成された磁場をそのまま化石として保持しているということが示唆されています<sup>15)</sup>。したがって、いまだ見つかってい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と期待しています。

最後になりましたが、本稿を執筆中、以前に発表した私達の結果(文献 13, 14)に定量的な誤りを見付けました。その修正により、磁場の大きさは 1 メガパーセクにおいて 5 桁程小さくなってしまいました。これは大変残念ですが、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) さまざまなスケールにおいて磁場が生成される
- (3) 銀河磁場の種の候補である

という点においては、本研究の意義は変わらないと考えています。

本稿に掲載した結果はこの修正を行った新しいものです。

## 謝 辞

本稿は、大野博司氏（株式会社東芝）、花山秀和氏（東京大学）、杉山 直氏（名古屋大学）との共同研究に基づいています。本稿用に図をきれいに変換してくれた浅井 歩氏（国立天文台）に感謝します。

## 参 考 文 献

- 1) Widrow L. M., 2002, Rev. Mod. Phys. 74, 775.
- 2) Davis A. C., Dimopoulos K., Prokopec T., Tornqvist O., 1999, Phys. Rev. D. 60, 021301
- 3) Biermann L., Schluter A., 1951, Phys. Rev. 82, 863
- 4) Kulsrud R. M., Cen R., Ostriker J. P., Ryu D., 1997, ApJ 480, 481
- 5) Hanayama H, Takahashi K., Kotake K., Oguri M., Ichiki K., Ohno H., 2005, ApJ 633, 941
- 6) Gnedin N. Y., Ferrara A., Zweibel E. G., 2000, ApJ 539, 505
- 7) Sato K., 1981, MNRAS 195, 467
- 8) Turner M. S., Widrow L. M., 1988, Phys. Rev. D. 37, 2743
- 9) Ratra B. 1992, ApJ 391, L1

- 10) Starobinsky A. A., 1982, Phys. Lett. B 117, 175
- 11) Bunn E. F., White M., 1997, ApJ 480, 6
- 12) 杉山 直, 2001, 膨張宇宙とビッグバンの物理 (岩波書店)
- 13) Takahashi K., Ichiki K., Ohno H., Hanayama H., 2005, Phys. Rev. Lett. 95, 121301
- 14) Ichiki K., Takahashi K., Ohno H., Hanayama H., Sugiyama N., 2006, Science 311, 827
- 15) Bertone S., Vogt C., Ensslin T., 2006, MNRAS, submitted (astro-ph/0604462)

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

*Research Center for the Early Universe, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 181-0033, Japan*

**Keitaro TAKAHASHI**

*Department of Physics, Princeton University, Princeton, NJ08544, USA*

Abstract: The origin of magnetic fields in galaxies and in even larger scales is yet unclear. Here we show that cosmological density fluctuations, which are responsible for large scale structure of the universe, can naturally source magnetic fields at such large scales if we take the second order couplings into account. By explicitly calculating evolutions of perturbations numerically, we obtain the spectrum of magnetic fields at cosmological recombination. These magnetic fields can act as seed fields for galactic magnetic fields observed today.