

## 修正重力理論で迫る宇宙磁場の起源

嵯峨 承平 (名古屋大学大学院 理学研究科)

### Abstract

近年、宇宙のさまざまなスケールにおいて磁場が観測されている。例えば銀河や銀河団スケールの領域においては、およそ  $10^{-6}$  ガウスの磁場が確認されている。また、宇宙で銀河がほとんど存在しない領域における銀河間磁場も観測されている。このように、宇宙には多様なスケールの磁場が存在しており、特に銀河以上のスケールの磁場を「宇宙磁場」と呼ぶ。しかし、宇宙磁場の起源は未だ解明されていない。これは、1. 通常のフリードマン宇宙における、2. 線形摂動論の枠組みで磁場を自然に生成する機構は存在しないためである。本講演では、1 の条件を変更することで宇宙磁場の起源を説明することを試みた。すなわち、修正重力理論の下で磁場を生成することが可能かを調べた。その結果、宇宙磁場のもととなる種磁場として十分な大きさの磁場が自然と作られることが分かった。

## 1 Introduction

現在観測されている、銀河以上の大きな相関長を持った磁場を「宇宙磁場」と呼びその起源は不明瞭なままである。一般的に考えられているシナリオとして、初期宇宙に存在した種磁場がダイナモ機構により増幅されたと考えられている。この種磁場の大きさとして、再結合期に  $10^{-30} \sim 10^{-20}$  ガウスの種磁場が存在していると現在観測されている宇宙磁場の候補となりうるという先行研究がある。この種磁場を作ることが非常に困難であることが問題である。種磁場の起源の候補はいくつか考えられている。一つ目の候補は、インフレーション中に磁場を生成する方法である。インフレーションを起こすスカラー場とベクトル場が相互作用している場合磁場が生成される。この状況で作られた磁場は非常に大きな相関長を持つため、宇宙磁場の候補となりうる。しかし、理論的ないくつかの問題が付随しており未だにうまく行くモデルは提案されていない。また、インフレーションのエネルギースケールによって磁場の大きさも制限されるという研究もなされており、インフレーション中に磁場を生成することは非常に難しい。二つ目の候補は、宇宙の相転移で磁場を生成する方法がある。この場合は、その時期のホライズンスケールの磁場しか生成されず候補として有力ではない。

そして今回注目する候補は、初期宇宙のプラズマ

中において強結合している光子とバリオンにわずかなズレがありこの効果によって磁場が生成されるという方法である。この手法は宇宙が発展する中で自然に生成されるためよい候補といえる。ところが線形摂動論のもとで、このズレから引き起こされる磁場のソースとなるのはベクトル型摂動である。ベクトル型摂動は、標準的な宇宙論において膨張に従い減少する解しか持たず通常無視されるため磁場は生成されない。

しかし、修正重力理論の候補である Einstein-Aether 理論 (T. Jacobson and D. Mattingly 2001) ではベクトル場である“エーテル場”が導入されており、この新しい場によってベクトル型摂動が存在する。このベクトル型摂動による宇宙論的な効果は例えば宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) にも影響を与える。今回は、このベクトル型摂動における磁場の生成に注目し解析を行った。

## 2 Magnetogenesis

膨張宇宙における磁場の発展方程式は、バリオンの運動方程式であるオイラー方程式とマクスウェル方程式を組み合わせることで得られる。

$$\frac{d(a^2 B^i)}{dt} = \frac{4\sigma_T \rho_\gamma a}{3e} \epsilon^{ijk} \partial_k (v_{\gamma j} - v_{bj}), \quad (1)$$

ここで、 $\sigma_T$  はトムソン散乱断面積、 $\rho_\gamma$  は光子のエネルギー密度、 $v_{\gamma j}$ 、 $v_{bj}$  はそれぞれ光子の速度、バリオンの速度である。磁場のソースとして、光子とバリオンの相対速度が必要となる。加えて  $\epsilon^{ijk}$  のためにベクトル型摂動が必要であることも分かる。つまり、スカラー型摂動である場合

$$\begin{aligned} \epsilon^{ijk} \partial_k v_j &\sim \epsilon^{ijk} \partial_k \partial_j v \\ &\sim 0 \end{aligned} \quad (2)$$

となりソース項が存在しないため、スカラー型摂動を考えているだけでは磁場が生成されることはない。この事実は極めて自然で、磁場が生成されるためには  $\nabla \times \mathbf{E} = -\dot{\mathbf{B}}$  から回転成分(渦)が必要である。スカラー型摂動は勾配から構成されているため、回転成分を作ることはないのである。

### 3 Einstein-aether theory

Einstein-aether 理論は、もともと量子重力理論の候補であるホジヤバリフシツツの低エネルギー極限の理論であり、ローレンツ対称性が破れている特徴を持つ。また、加速膨張を説明することもできる理論でもある。Einstein-aether 理論は次のような作用で記述される。

$$S = \frac{1}{16\pi G} \int d^4x \sqrt{-g} [R + \mathcal{L}_A] + \int d^4x \sqrt{-g} \mathcal{L}_m, \quad (3)$$

ここで  $\mathcal{L}_A$  は次のように書かれる。

$$\mathcal{L}_A = K + \lambda(A^\alpha A_\alpha + 1), \quad (4)$$

$$K \equiv K^{\alpha\beta}_{\mu\nu} (\nabla_\alpha A^\mu) (\nabla_\beta A^\nu), \quad (5)$$

$$K^{\alpha\beta}_{\mu\nu} \equiv c_1 g^{\alpha\beta} g_{\mu\nu} + c_2 \delta^\alpha_\mu \delta^\beta_\nu + c_3 \delta^\alpha_\nu \delta^\beta_\mu - c_4 A^\alpha A^\beta g_{\mu\nu}. \quad (6)$$

ただし、 $A_\mu$  がエーテル場で、 $c_i (i = 1, 2, 3, 4)$  は理論パラメーターである。エーテル場と通常の物質は直接相互作用することはないが、重力を通して間接的に影響を与えあう。

このもとで、線形摂動を加えてベクトル型摂動だけ書き出すと、エーテル場の運動方程式は

$$\begin{aligned} c_{14} (\ddot{V} + 2\mathcal{H}\dot{V}) - (\alpha - c_{14}) \mathcal{H}\dot{V} \\ + (\alpha + c_{14}) \mathcal{H}^2 V + c_1 k^2 V + \frac{1}{2} c_{13} k^2 \sigma = 0. \end{aligned} \quad (7)$$

となり、アインシュタイン方程式は

$$\dot{\sigma} + 2\mathcal{H}\sigma = -\frac{c_{13}}{1+c_{13}} (\dot{V} + 2\mathcal{H}V) - \frac{16\pi G a^2 p \pi}{(1+c_{13})k}, \quad (8)$$

$$k^2 \sigma = \frac{1}{1+c_{13}} [16\pi G a^2 q - c_{13} k^2 V], \quad (9)$$

となる。ただし、 $V$  がエーテル場の摂動、 $\sigma$  が計量の摂動であり、エーテル場の理論パラメーターは

$$\begin{aligned} \alpha &= c_1 + 3c_2 + c_3, \\ c_{123} &= c_1 + c_2 + c_3, \\ c_{13} &= c_1 + c_3, \\ c_{14} &= c_1 + c_4. \end{aligned} \quad (10)$$

とそれぞれ定義されている。これらの理論パラメーターは観測的・理論的制限が既になされており、本研究ではそれらの制限内でパラメーターを動かした。

各摂動量の発展は図 1 に示した。エーテル場は音速が定義され、その音響ホライズンに入るまではベキで発展し、音響ホライズンに入った後は振動する振る舞いとなる。特に、光子とバリオンの相対速度  $\delta v$  は磁場のソースであり、ベクトル型摂動を考えているのでゼロにならず増幅されているのが分かる。

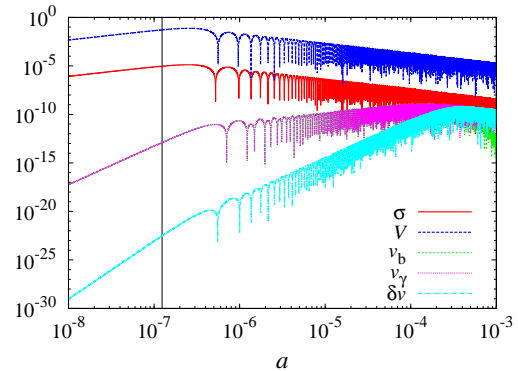


図 1: 各摂動量の時間発展。縦軸に平行な実線はエーテル場の音速の音響ホライズンを表す。

また、エーテル場が引き起こすベクトル型摂動は CMB にも影響を与える。(M. Nakashima, T. Kobayashi 2011) その CMB の結果をさらに詳細に解析することで、エーテルの理論パラメーターとエーテル場の初期振幅に新たな制限を加えた。こ

の新たな制限のもとで宇宙磁場として可能な磁場が生成されるかどうかを検証した。

## 4 Results

磁場の発展方程式を積分し、アンサンブル平均を取ることによって磁場の大きさを求めることができる。現在 Einstein-aether 理論になされている制限のもとで生成される最大限可能な磁場の大きさを持ったスペクトルが図 2 である。このスペクトルについて述べる。

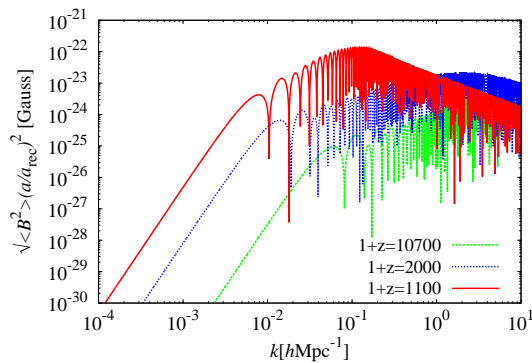


図 2: 異なる時刻における磁場のスペクトル。

まず、ピークの位置はホライズンが決める訳ではなく、エーテル場の音速によって決まるサウンドホライズンが決めるということが分かった。また、エーテル場がサウンドホライズンに入ると振動するが、その振動が重力であるメトリックを介して matter sector に影響を及ぼす。これにより、磁場のスペクトルも特徴的な振動を持つことになる。

また、時間発展を見ると再結合期である  $1+z=1100$  においてスペクトルの持ち上がりが見られる。これは、再結合期に近づいてくると強結合が破れて光子とバリオンの相対速度が大きくなるためである。

## 5 Conclusion

私は Einstein-aether 理論におけるベクトル型摂動の新たな可能性を検証した。ベクトル型摂動を持つ理論では、磁場が自然に生成される。このベクトル型摂動は CMB に影響を与えるが、CMB にどのよう

に理論パラメーターが影響を及ぼすのかを解析的に導いた。その下で、初期振幅と理論パラメーターに制限を与えた。

私はこの制限のもとで、エーテル場が引き起こすベクトル型摂動によって得られる種磁場の最大限の大きさを求めた。磁場のスペクトルの理論パラメーター依存性も解析的に求めることができたため磁場を大きくするためのパラメーターの選択が可能となった。その結果、生成される最大の磁場の大きさは  $k = 0.1 \text{Mpc}^{-1}$  で  $10^{-22}$  ガウス程度が得られるということが分かった。これは、種磁場として十分可能な大きさであり、修正重力理論の付加的な効果として磁場の生成があり得ることを意味する。将来的に磁場が詳細に観測されると磁場を通して修正重力理論に制限をかけることも可能になる。

## Reference

- M. Nakashima and T. Kobayashi, Phys. Rev. D84, 084051 (2011), 1103.2197.
- T. Jacobson and D. Mattingly, Phys. Rev. D64, 024028 (2001), gr-qc/0007031.