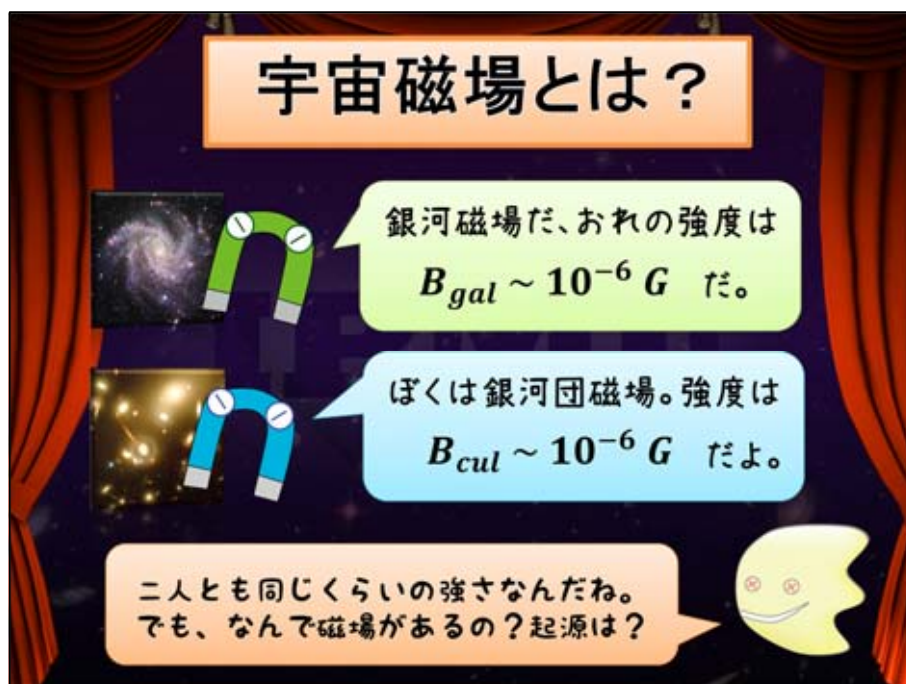


第41回天文天体物理若手夏の学校 集録用ファイル

東京大学 IPMU M2 藤田智弘

参加者の投票によるポスターアワードで1位を頂きました。

このポスターは初期宇宙、特にインフレーションになじみがない人でも分かりやすいようにキャラクターの会話形式で作成しています。



このポスターのテーマである宇宙磁場について説明します。ここでは宇宙に存在する磁場を広く宇宙磁場と読んでいます。中でも銀河や銀河団には磁場があることが観測からわかっています。その強度はどちらもマイクロガウス程度です。(実際は銀河団の方は不定性が大きく、オーダー評価で  $\mu$  G 程度です) しかし、これらの磁場の起源は長らく謎のまま残っています。

# 宇宙磁場の起源

## 宇宙磁場の起源には、2つの説がある

- 天文学的モデル: 銀河内のプラズマの運動によって磁場ができた。よって磁場があるのは銀河近傍だけであるはず。
- 初期宇宙モデル: 初期宇宙において宇宙全体に弱い磁場が作られた。それが種磁場になって銀河(団)内で増幅された。よってボイドにも弱い磁場はある。

どっちなの？



宇宙磁場の起源としては上に挙げた2つのモデルがあります。特に重要なのは2つのモデルでボイド領域での磁場の有無が異なるということです。

3

# 新しい観測結果

Fermi衛星

ボイド

見つかったか、  
ぼくはボイド磁場、  
Mpcスケールで強度は  
 $B_{void} \geq 10^{-16} G$   
弱いけど大きいよ。

見えたっ

銀河のないボイド領域にも磁場がある  
んだから、初期宇宙モデルだね！



昨年(2010年)の4月にFermi/Lat衛星の観測によって、ボイド領域に存在する磁場に初めて下限がつけました。その論文はScienceに載っています。A. Neronov and I. Vovk, Science, 328, 73 (2010) この観測結果より、宇宙磁場の起源としては初期宇宙モデルが支持されます。(簡単のため、初期宇宙モデルで決定かのように書きましたが、勿論ボイド磁場は初期宇宙で作られ、それとは別に銀河・銀河団磁場は天文学的モデルで作られた可能性もあります。)

4


## 初期宇宙モデル

初期宇宙において種磁場を作るモデルには大まかに3つのタイプがある

- ① インフレーション
- ② 相転移
- ③ リコンビネーション

このうちのどれなのかは分かってないのね・・・。

でも、ポイド磁場はMpcと大きかったから、インフレーションで作るのが良いのかも。



初期宇宙モデルの中でも、初期宇宙のいつに磁場が作られたかで大まかに3つに区別することができます。ただし、どの区分に属するモデルでも決定的なモデルはないことに注意して下さい。私はインフレーションでの磁場生成に注目しました。その理由として、他の2つの先行研究では観測されているようなMpcスケールの磁場が作れないことが問題となっているためです。


## 磁場生成インフレーションモデル

インフレーションにおいて磁場を生成すると提唱されたモデル


- Turner & Widrow (1988)
- Carrol & Field (1991)
- Retra (1992)
- Dolgov (1993)
- Dimopoulos (2001)
- Davis et al. (2001)
- Giovannini (2003)
- Bamba & Yokoyama(2005)
- Bamba & Sasaki (2007)
- Mukhanov et al (2009)

沢山あるね～

あー、ムリムリ!



V.Mukhanov



先行研究では多数のモデルが提唱されてきました。しかし、2009年にMukhanovらがかなり一般的な仮定のもとでインフレーション磁場生成が成り立たないことを示しました。V. Demozzi, V. Mukhanov and H. Rubinstein, JCAP. 0908, 025 (2009) それ以降、私の知る限り磁場生成インフレーションモデルは発表されていません。(一つだけダークエネルギーと同時に説明するものが発表されましたがインフレーションエネルギースケールが低すぎて現実的ではありません。)

## インフレーションとは？

なんで!?

まずはインフレーションを復習しな

V. Mukhanov

**インフレーションはゆらぎを生成する**

小さな量子ゆらぎ

CMBのゆらぎ

インフレ~

大きな古典ゆらぎ

インフラトン

Mukhanovの制限を説明する前に、インフレーションを復習しましょう。インフレーションは宇宙の加速膨張期です。なじみがない人でも天文・宇宙分野の人なら聞いたことはあると思います。ただし、「宇宙初期に急激に宇宙が膨張した時期」という理解が多くされています。それに加えてインフレーションは量子ゆらぎを引き伸ばし、構造形成の種になるスカラーゆらぎを生成するという重要な性質を持っています。

## フォトンのゆらぎ

インフレーションで私、フォトンのゆらぎが作られれば磁場が生成するのね。

フォトン場と磁場の関係

$$B = \text{rot } A$$

上式より、フォトン場(ベクトルポテンシャル)Aの空間微分がノンゼロなら磁場が存在することになる。

Aの値の場所による違い  
=ゆらぎがあればいい。

構造形成の種として一般的に考えられているのは「スカラー場のゆらぎ」です。(そのスカラー場はインフラトンと呼ばれます) 一方で、磁場を生成したいとするとインフレーションでフォトン場のゆらぎを生成すれば良いです。何故なら、フォトン場のrot、すなわち微分が磁場であり、ゆらぎがある=場所によって値が異なる、のであれば微分値はノンゼロになるからです。

## コンフォーマルシンメトリー

でも私インフを感じないよ。

フレッ!?

### フォトン加速膨張の影響を受けない

フォトンのアクション

$$S = \int d\eta d^3x \sqrt{-g} g^{\mu\nu} g^{\rho\sigma} F_{\mu\rho} F_{\nu\sigma}$$

よって、  
フォトン  
はインフ  
を感じず  
ゆらぎは  
生成され  
ない。

$a^4$   
 $a^{-2}$   
 $a^{-2}$

キャンセル  
してしまう

しかし、ナイーブにはインフレーションでフォトン場のゆらぎを生成することはできません。何故なら、フォトンのアクションを書くとスケールファクターがキャンセルしてなくなってしまいます。これは、宇宙膨張(収縮でも)はフォトンのふるまいに対して影響を与えないことを意味しています。よりフランクに言えば、フォンはインフレーションが起きていると感じない訳です。

## 作用の修正

ムリヤリ感じさせてやるフレ!

やめてえ~

### 手でアクションを修正する


$$S = \int d\eta d^3x \sqrt{-g} g^{\mu\nu} g^{\rho\sigma} F_{\mu\rho} F_{\nu\sigma}$$

$a^n$

手でスケールファクタを入れる。  
これはディラトン場とフォトン場のカップリングを仮定している。  
また、フォトンにマスタームをもたせる方法もある。

そこで、(強引に感じますが)フォトンのアクションに手でスケールファクターのn乗を加えます。これによってゆらぎが生成するようになります。理由付けとしては、インフレーション期だけに存在した場(ディラトン場など)とのカップリングを考えて、それが近似的に $a^n$ と表わせるような状況を考えます。他にもフォトンにマスタームを持たせる方法もありますが、ゲージ対称性を破ってしまうのであまり好まれません。

## ムカノフの制限



でも、それもムリだね

V. Mukhanov

確かに  $a^n$  を入れれば磁場は作られる。  
しかし、他の問題が生じてしまう。

- $n > 0$  : 理論が強結合になる
- $n < 0$  : インフレーションが持続しない

ムカノフらが制限したのはこの  $a^n$  を加えるアプローチです。(マスを加える場合も制限されていますがここでは割愛します。) それによると  $n$  を正にとっても負にとっても、それぞれ異なる問題が生じてダメになってしまいます。ここでは非常に簡単化して説明してありますが、実はもう少し複雑です。詳しくは数スライド後に図があります。

## 強結合理論

**結合定数が大きくなりすぎる**

$\mathcal{L}_p = F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} \rightarrow I^2 F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}$

と修正したとき、キネティック項は  
 $A'^2 = I^2 A^2$   
 となる。カノニカルにするには  
 $\bar{A} = IA$  と定義して  $\bar{A}$  を使う。

このときカレントとのカップリングは  
 $e A_\mu \bar{\psi} \gamma^\mu \psi \rightarrow \frac{e}{I} \bar{A} \bar{\psi} \gamma^\mu \psi$   
 よって、 $e/I$  が有効カップリングコン  
 スタントになる。

インフレーション後は  $I = 1$  に戻って  
 欲しいので、インフレーション中は  
 $n > 0 \rightarrow I$  は増える  $\rightarrow I$  は小さかった  
 $n < 0 \rightarrow I$  は減る  $\rightarrow I$  は大きかった  
 従って、 $n > 0$  のときは、インフレーション中の有効カップリングコン  
 スタントが非常に大きくなりうる。

実際、 $I = a^{n/2}$  とおいたときは非常に  
 早く動き、 $e/I$  はすぐに1を超える。

↓

摂動論が使えず、  
 正当な計算ができない！  
 (カレントを無視できない)

まず  $n$  が正の場合は理論が強結合になってしまうという問題が生じます。つまりはカップリン  
 ンスタントが1よりはるかに大きくなってしまふのです。このとき例えば光子と電子の相互作用は摂動論が使えず計算することができません。つまりその効果が無視していいのか評価  
 することができないのです。インフレ中は電子密度は十分低いから大丈夫という人もいますが、  
 シュウィンガー効果(強い電場から電子対が生成する現象)などが関わる可能性が否めません。

## インフレーションが持続しない

じゃあ、 $n < 0$  にしなよ

**電磁気エネルギー密度の増加**  $\epsilon_{inf} < \epsilon_{EM} = \int E^2 + B^2 dx^3$

$n < 0$  では磁場よりも電場の方が多く作られてしまう。

十分な磁場を作ろうとすると、  
 電磁場エネルギーがインフラトン  
 エネルギーを超えて放射支配になる

私の方が多いよ

ぐぬぬ

逆に $n$ が負の場合はインフレーションが持続しないという問題が発生します。これはフォトン場のゆらぎを生成すると磁場だけでなく電場もできてしまうことが原因です。 $n$ が負のときは磁場よりも電場が多くできるので、観測的下限を超える磁場を作ろうとすると非常に強い電場もできることになってしまいます。そうすると電磁場エネルギーがインフラトンエネルギーを超えてしまい、Radiation Dominantになってインフレーションが終わってしまうのです。

13


## ここまでのまとめ

- 宇宙磁場は長らく起源が分かっていない宇宙論の大問題！
- 観測先行で理論がない  
→ Hotな分野
- インフレーションモデルを構築するのは結構難しい  
→ 良い制限になる！？


ここまでのまとめです。以降はインフレーションモデルの詳細に入るので、素粒子論の知識が必要となります。天文学専攻の方はここまで理解して下さればOKだと思います。

14

## より詳しい解析

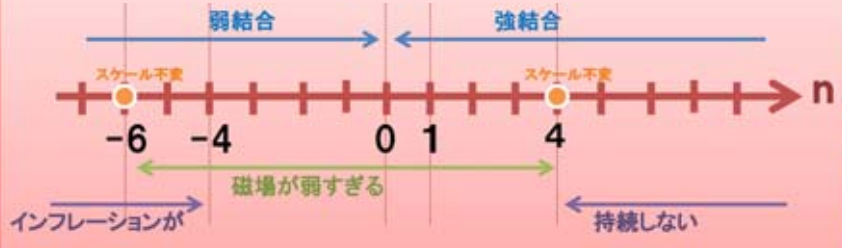


ど～すんの～?



磁場があるからには理論もあるはずフレ

より詳しく調べると、 $a^n$  を挿入したときは



— 見磁場を作るのは不可能に見えるが…

$a^n$  を挿入した際の制限をより詳しく見てみましょう。前のスライドでは簡単に  $n$  が正と負だけに分けて説明しましたが、実際は上のようになっています。なにも制限がかかっていない領域はなく、一見するとインフレーションでの磁場生成は不可能なように見えます。

## 新しいアイデア

1つのブレイクスルー

強結合と弱結合を組み合わせることで

3つの制限

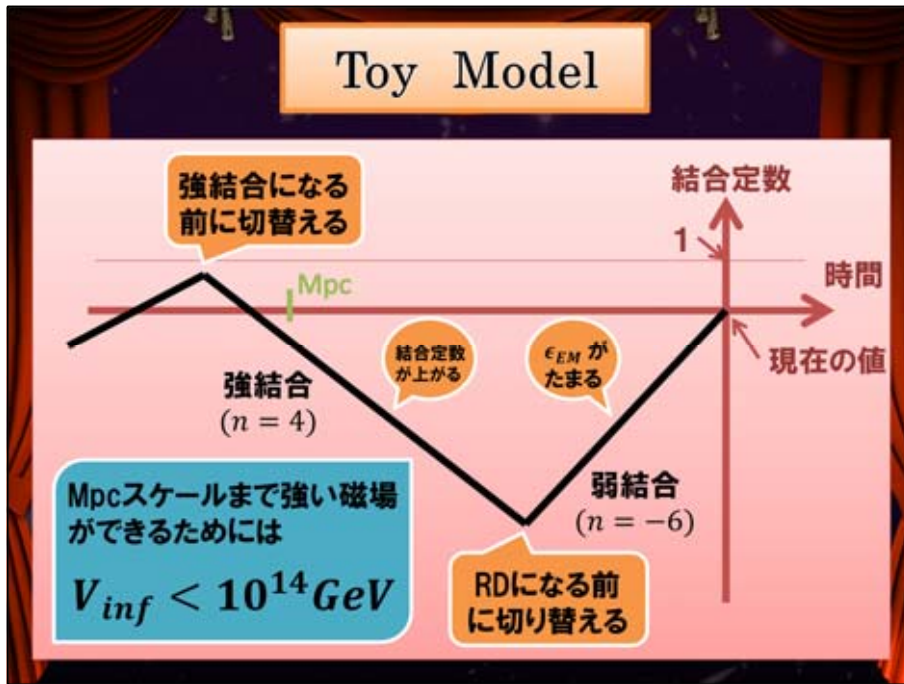
}

- 強結合理論にならない
- インフレーションが持続する
- 十分な強度の磁場を作る

を満たすモデルを作れる。

しかし、前スライドの結果を見てダメだと言うのは無意識的に「 $n$  が定数である」という前提が入っています。もし  $n$  が時間変化すると考えれば、制限を回避できるモデルを構築できるかもしれません。つまり  $n$  が正と  $n$  が負を組み合わせるのです。





非常に簡単なモデルとして、 $n=4$ から $n=-6$ に移行する場合を考えました。タイミングよく切替えることで、強結合になることも、電磁場エネルギー密度が大きくなりすぎることなくインフレーションを続けることができます。そして $n=4$ と $n=-6$ では生成される磁場はフラットスペクトルになり、Mpcスケールでも十分な強度の磁場が得られます。ただし、その期間中にMpcスケールがホライゾンから出る必要があり、そこからインフレーションのエネルギー密度に制限が付きま

### 具体的なモデル

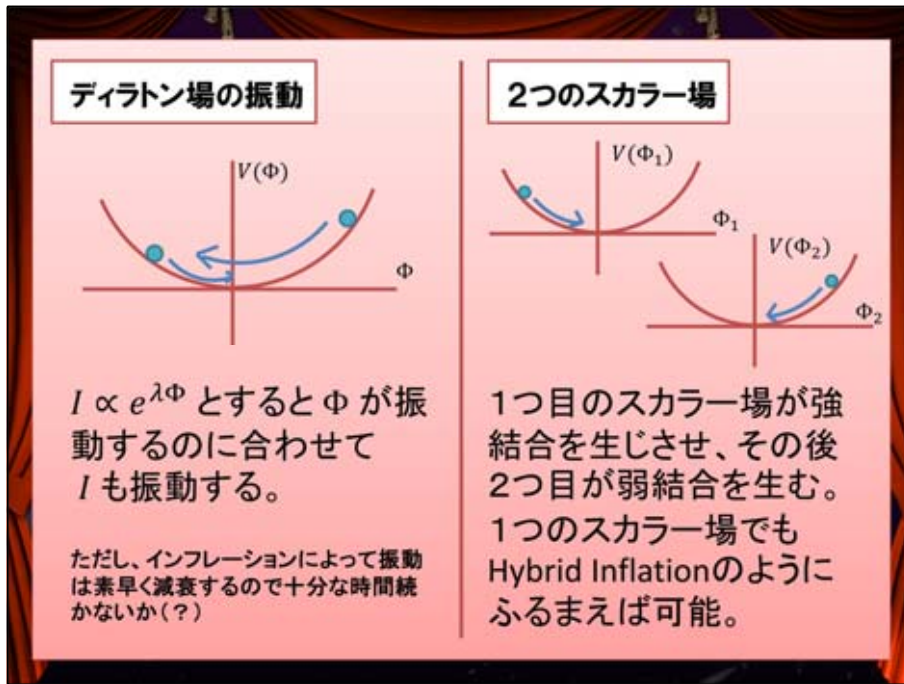
でもなんで結合定数が増減するの？

#### 現実的なモデルの構築

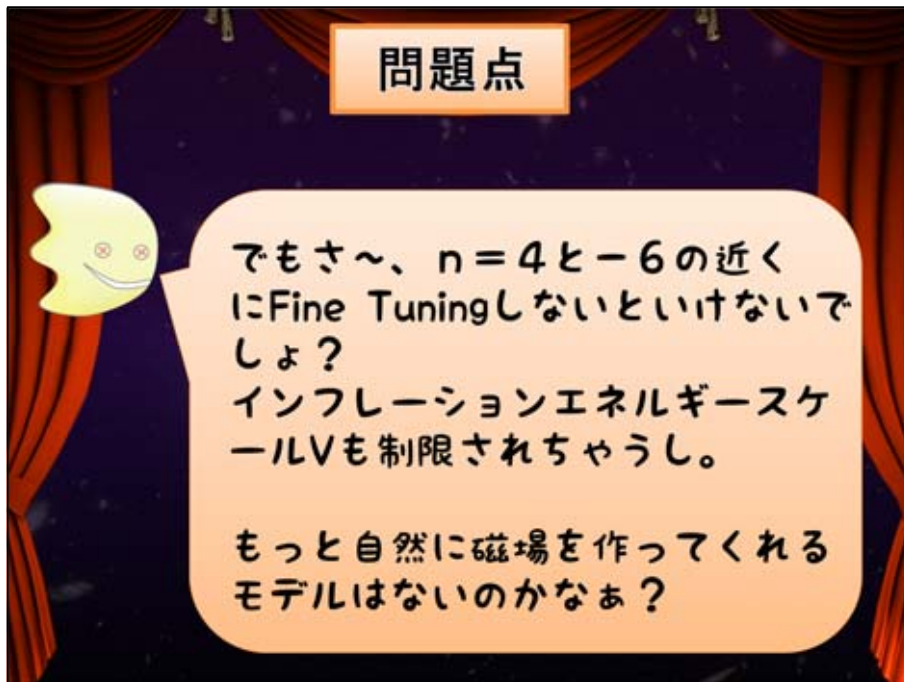
結合定数の増減を説明するようなモデルとして以下のようなものが考えられる

- ディラトン場の振動
- 2つのスカラー場
- ワインバーグ角の振動
- ....and more ( **Please Advise!** )

しかし、前頁のモデルは $n$ が4と6にFine Tuningされており、その値の間で切り替わるメカニズムを用意しない限り自然なモデルとは言えません。いくつかアイデアはありますが、自然さに関して(Fine Tuning問題)は克服するのが難しい状況です。ポスターセッションでもアドバイスを頂けるようにお願いしました。



$n$ が途中で切り替わることを説明するのはさほど難しくありません。単純にディラトン場が振動しているだけでも、場の値が増える時(右に揺れている時)と減る時(左に揺られているとき)で対応する $n$ の値は変わります。カップリングを適切に選べば $n$ の正負も変わります。しかし振動はそれほど長く続かないので現実的ではありません。そこで2つのディラトン場を用意する方法があります。ただし、何故 $n$ が4と-6なのかという問いには答えられません。



前頁までに見たToy Modelにはフォトンがしゃべっている通りの問題点があります。

(ちなみにフォトンとZボソンのデザインはCERNが販売しているParticle Zooというぬいぐるみブランドから借用しました。絵は自分で書いています。磁場やインフラトンも自分でやりました。)

## SU(2) × U(1)


### Standard Model

素粒子理論の Standard Model に立ち返ると、フォトン場はSU(2)ゲージ場  $W^3$  とハイパーチャージU(1)ゲージ場Bの線形結合で書かれる。  
 ⇒つまりフォトンとZボソンは元々混ざっていた。

### Zボソン

$\mathcal{L}_Z \supset m_Z^2 Z_\mu Z^\mu$

Zボソンはマスタームを持つ  
 ⇒  $a$  が消えない  
 ⇒ ゆらぎができる！




呼んだかい？  
俺は重いぜ


Zボソン

ここからは現在研究中のアイデアを紹介します。基本的な考えは「上手く行かなかったのは簡単のためにフォトンだけしか考えなかったからで、ちゃんと関係する場を全て考慮に入れば問題なくなるのでは」というものです。素粒子標準模型に基づいて考えればフォトンだけでなくZボソンも考える必要があります。Zボソンはマスを持つので、アクションの中でもスケールファクターが消えず、手で $a$ を加えずとも自然とゆらぎが生成されます。

## ワインバーグ角の回転



一緒になってくれたら  
ゆらぎをあげるぜ



Zボソン!!!

### ゆらぎの移行

ワインバーグ角は SU(2)とU(1)の結合定数  $g, g'$  の相対的な変化を表す。  $\tan\theta_w = g'/g$  と定義。

AとZの混合: 
$$\begin{pmatrix} Z \\ A \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta_w & -\sin\theta_w \\ \sin\theta_w & \cos\theta_w \end{pmatrix} \begin{pmatrix} W^3 \\ B \end{pmatrix}$$

$\theta_w$  が回転するとAとZが混ざる！  
 ⇒ Zボソンのゆらぎがフォトンに渡される。

Zボソンのゆらぎができててもそのままでは磁場にはなりません。しかし、フォトンとZボソン両方のカップリンコンスタントが変化するとすれば(そしてその変化速度が異なれば)ワインバーグ角と言われるパラメータが動き、フォトンとZボソンの混合が起こります。そのためZボソンのゆらぎがフォトンに移行するのです。これは、フォトンのカップリンコンスタントを変化させることによるゆらぎ生成とは全く別の機構になります。

## 解析の困難

磁場の強度は足りるの？他の制限は？

### 計算の困難

モード関数の運動方程式は

$$\begin{cases} u'' + \frac{I'}{I}u' + k^2u + m^2(u - v) = 0 \\ v'' + \frac{I'}{I}v' + k^2v + m^2(v - u) = 0 \end{cases}$$

2解連立微分方程式になり、解析的に解けない。

⇒数値計算で調べるしかないか・・・？

マスによる混合

この効果を入れたときに、制限を回避して磁場を生成することができるのでしょうか？そのためには、磁場生成量などを計算しなければいけないのですが、場が2つになり、混合があるため解析的に解けません。数値計算で調べることは可能なので現在研究中です。

23

## 後半のまとめ

- 磁場が存在する以上、それを作る理論も必ずあるはず！
- インフレーションモデルを建てるのは難しいが**不可能ではない**。
- 具体的なモデル構築にはさらなる解析が必要。
- 将来的には**インフレーションモデルへの制限**をつけたい！

最後のまとめです。将来的には磁場を生成可能なインフレーションモデルとそうでないものを区別し、インフレーションモデルへの制限をつけることもできればいいと考えています。

24



お読み下さりありがとうございました。