七星（ナナセ）とネコと宇宙の始まり

未知の物質が作る原始重力波

藤田智弘(Tomohiro FUJITA)　早稲田大学高等研究所 (WIAS)

あらすじ

七星(ナナセ)は宇宙論専攻の研究室に通う修士一年生。はじめての研究として指導教官から「原始重力波の生成」というテーマを貰った。

しかし、全然分からないので論文を投げ出し、いきつけの猫カフェに行くことにした。

うーん・・、論文は難しすぎて無理！
とりあえずいつもの猫カフェでリラックスしよう。あー、猫達はいいなぁ、
論文読まなくていいから。

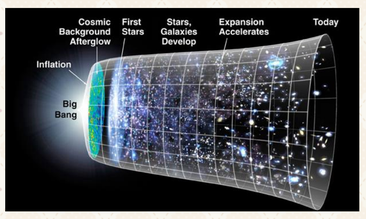
私は猫カフェで１番の博学として知られる白ネコ「インフラトン」だ。
お嬢さんのお悩み、相談に乗ろうか？

ありがとう。「**原始重力波**」ってテーマを研究してるんだけど難しくって。
でも、白ネコちゃんに分かるかなぁ。。。

ほう、「原始重力波」か。日本のLiteBIRD衛星(2030年代打ち上げ)に期待が集まっているな。お嬢さん、宇宙のビックバンは知っているね？ そのさらに前には**インフレーション**が起きたと考えられているんだ。

コラム①：インフレーションとは？

インフレーションとは極初期宇宙において宇宙が加速膨張した期間のこと。そして、インフレーションでは星や銀河の元となる構造形成の種（ゆらぎ = 密度のムラムラ）が作られたと考えられている。このときの宇宙膨張は指数関数 $a(t) \propto e^{Ht}$ で表される。



その「**ゆらぎの生成**」が分からないの。なんで、インフレーションでは何にもないところから揺らぎができるの？

簡単に説明しよう！量子力学で**零点振動**は学んだな。量子論によると真空状態であっても場の値（ここでは密度と思ってくれていい）は零点振動しているのだが、宇宙が加速膨張していると ①振動に摩擦が生まれる ②振動周期が伸びる という２つの効果で振動が止まってしまう。振動は場所によってランダムな場の値（密度）で止まるから、ゆらぎが生成されるのだ。

コラム②：ゆらぎの生成

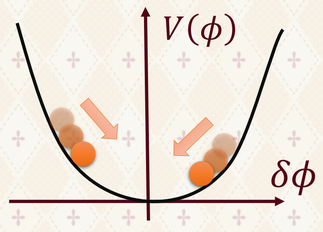
インフレーション中の場の値は摩擦のあるバネと同じようなふるまいをする。ただし宇宙膨張の効果が入る。

摩擦のあるバネ：

$$\ddot{x} + \gamma\dot{x} + k^2 x = 0$$

インフレ中の場：

$$\ddot{\delta\phi}_k + 3H\dot{\delta\phi}_k + a^{-2}k^2\delta\phi_k = 0$$



宇宙膨張は振動数を減らし、一定の摩擦を与える。従って、大体振動数≒摩擦 ($aH \simeq k$) になったときに振動は止まるが、その値は場所によってランダムである。

加速膨張宇宙では零点振動が実在のゆらぎになるのね。これが宇宙背景放射（CMB)で見えてるムラムラか。よし、次は重力波を教えて！

それはだね・・[リンリン！(鈴の音)]
いかん、もう食事の時間だ。失礼するよ。

そもそも重力の波ってよく分からないよね。重力波って何なんだろう…？
あっ、黒猫さん！こんにちは。

初めましてお姉さん。僕は「グラビトン」。そんなに急いでどこ行くの？

研究室っていう楽しくない場所に行くのよ。ねぇ、黒猫君。重力波について詳しかったりしない？？

重力波なら僕詳しいよ。重力波は「**重力場のゆがみが波として伝わる現象**」のことだよ。

コラム③：重力波とは？

アインシュタインの一般相対性理論によると、重力は物質のエネルギー（質量）によって時空（重力場）が歪むことで現れる。さらに質量の運動があると、その歪みは波となって伝わっていく。

[出典: KAGRA Home page]

重力波は「**重力場のゆらぎ**」とも言えるのね、それならインフレーションで作られそう。でも原始重力波って何がすごいの？初期宇宙の観測ならすでにCMBがあるよね。

それは、原始重力波を見るとインフレーションのエネルギースケール（簡単には温度と思っていいよ）が分かるからだよ。

コラム④：原始重力波

インフレーション起源の重力波を背景重力波と呼ぶ。宇宙背景放射（CMB）は密度のゆらぎだが、背景重力波も観測できれば新しいことが分かる。

- 密度ゆらぎの振幅 ： $\mathcal{P}_\zeta \propto \epsilon^{-1}\rho_{\rm inf}$
- 背景重力波の振幅： $\mathcal{P}_h \propto \rho_{\rm inf}$

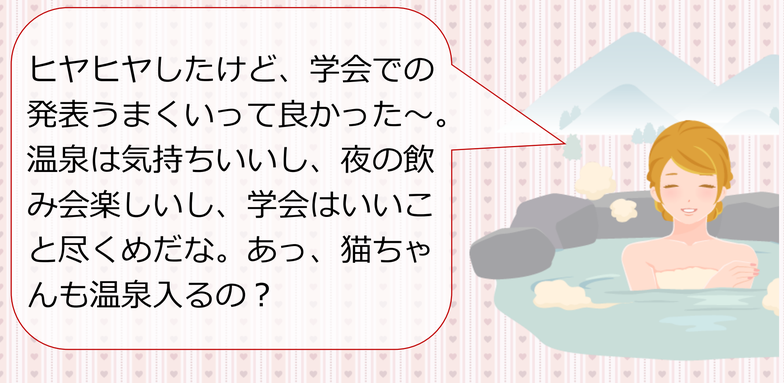
CMBではインフレーションのエネルギースケール$\rho_{\rm inf}$と未知のパラメータ ϵ ($\equiv -\dot{H}/H$) の比しか分からない。一方でインフレーションで作られた背景重力波の振幅は $\rho_{\rm inf}$ だけに比例するので、縮退を解くことができる。

宇宙が始まったときの温度が分かるのね、それは凄そう！この前白ネコさんが言ってたのだけど、背景重力波ってもう観測されたってホント？？

BICEP2実験のことだね。この種の実験はCMB光子の偏光を用いて間接的に重力波を観測するんだ。でもBICEP2実験がとらえたシグナルは我々の銀河の偏光、つまり全く別の信号だったと考えられているよ。

コラム⑤：さまざまな実験

2014年3月にBICEP2実験は背景重力波を初めて検出したと発表したが、誤りだと判明した。2023年6月にはNANOGrav実験がパルサーを15年間観測した結果を解析し、背景重力波を発見したことを示唆したものの、これはブラックホールからの重力波だと考えられている。いまだ原始重力波の初観測は達成されておらず様々な実験がしのぎを削っている。



ヒヤヒヤしたけど、学会での発表うまくいって良かった～。温泉は気持ちいいし、夜の飲み会楽しいし、学会はいいこと尽くめだな。あっ、猫ちゃんも温泉入るの？

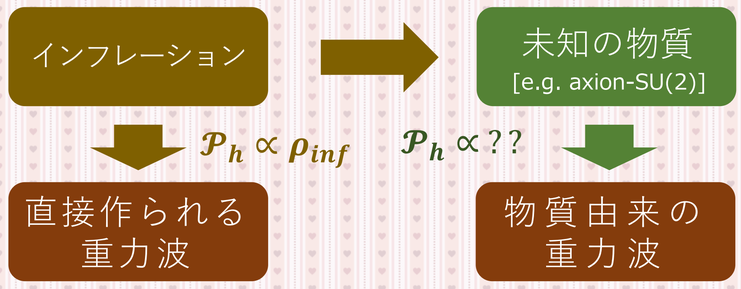
俺は「Axion-SU(2)」。君の発表を聞いていたけど、「原始重力波を観測できればインフレーションのエネルギースケールが分かる」というのは本当かい？

えっ！？だって、零点振動から作られた重力波振幅は$\rho_{\rm inf}$に比例するから…，逆算すれば$\rho_{\rm inf}$が求まるでしょ。

実は零点振動から作る以外にも、インフレーション中に**重力波を生成する別の機構はある**のだよ。そっちの重力波振幅の方が大きい場合、エネルギーを見積もる方法を変えなくちゃいけない。

コラム⑥：物質が作る重力波

インフレーション中には零点振動からあらゆる物質が作られる。作られた物質は重力波を放出するかもしれない。非常に大きな重力波を放出する仮想的な物質が理論的に知られている。



もし物質由来重力波が支配的になった場合、インフレーションエネルギーの見積もりは変更を受ける。

そうなんだ…。じゃあどういうときに物質由来の重力波が大きくなるの？

いくつかの例が知られているだけでまだ**ちゃんと解明されていない**んだ。でも、時空の対称性と物質の持つ対称性が関係していると考えられているよ。

コラム⑦：対称性とその破れ

宇宙は等方的である、つまり**宇宙に特別な方向はない**ことを数学的にはSO(3)対称性と呼ぶ。一方、ある種の物質はその内部にSU(2)という対称性を持っている。これらは物理的には別のものだが、SO(3)とSU(2)は同型(数学構造が同じ）である。インフレーション中に大きな重力波を出す可能性が理論的に指摘された物質は、SU(2)対称性を持っており、この点が本質的に重要なのだと考えられている。

まとめ

- **インフレーションは初期宇宙の加速膨張期間。零点振動から場のゆらぎが生成される。**
- **重力波は重力場のゆらぎ。インフレーションで直接つくられた重力波が観測できればインフレーションの温度が分かる。**
- **一方、物質から作られる重力波もある。どちらが支配的かで温度を求める式は変わる。**