

# 原始重力波とは何か？ その検出がなぜ大事なのか？

**Keyword:** 原始重力波

## 1. はじめに

2016年2月、LIGO Scientific CollaborationとVirgo Collaborationにより、ブラックホール連星からの重力波が観測された、との報告があった。<sup>1)</sup> 日本のKAGRA Collaboration等と併せて重力波の観測体制が整備され、いよいよ本格的に重力波天文学が始まることになる。詳細については物理学会誌の記事<sup>2)</sup>等を見て頂きたいが、本稿ではこのような天体起源の重力波ではなく原始重力波と呼ばれるものについて解説を行いたいと思う。原始重力波とは、その名の示す通り、宇宙の極めて初期、インフレーションと呼ばれる宇宙が加速膨張をしていた時期に生成された重力波である。<sup>3)</sup> 本稿では、この原始重力波とは何か？その検出がなぜ大事なのか？そして、観測の現状について触れたいと思う。

## 2. インフレーション

まず、原始重力波が生成された時期と考えられているインフレーションについて簡単に述べたいと思う。<sup>4)</sup> 宇宙の始まりを記述する理論としてはビッグバン理論が有名であり、宇宙はビッグバンという大爆発から始まったというものであるが、残念ながら宇宙の本当の始まりについては理論的にも観測的にも何も分かっていない。現代的には、ビッグバン理論とは、宇宙の十分初期では宇宙は非常に小さく高温高密度の状態であり、膨張とともに温度が下がり現在の状態になった、というものである。この理論は、ハッブルによる宇宙膨張の発見、ヘリウム等の軽元素の存在量の予言と観測の一致、そして熱い状態であった直接の痕跡である宇宙背景放射の発見により観測的に強く支持されている。しかしながら、ビッグバン理論には、なぜ宇宙背景放射がどの方向を見てもほぼ同じ温度なのか(地平線問題)、宇宙の空間的な曲率半径がなぜ現在でもホライズンサイズよりも大きいのか(平坦性問題)、大統一理論で予言されるモノポールがなぜ観測されていないのか(モノポール問題)等の問題点がある。インフレーション理論とは、ビッグバン、つまり、宇宙の熱い時期の前に、宇宙は急激な加速膨張の時期を経験した、というものであり、ビッグバン宇宙論のこれらの諸問題を解決し補完する理論である。このような宇宙の加速膨張はスカラー場の真空のエネルギーにより支えられ、インフレーション終了後にそのエネルギーが熱として開放され、熱い宇宙、つまりビッグバン宇宙に繋がる。

## 3. インフレーション理論の予言

インフレーション理論の予言として最も重要なことは原始密度揺らぎと原始重力波の存在を予言することである。宇宙が急激に膨張するという事は、原子核のサイズよりも遥かに小さいマイクロのスケールが極短時間に星や銀河のようなマクロのスケールにまで引き伸ばされることを意味する。そのようなマイクロのスケールでは、量子力学による不確定性原理の効果が顕著に現れ、インフレーションを起こす場自身や時空を記述している計量自身も不確定性原理により揺らいでいる。これらの揺らぎが引き伸ばされたものが原始揺らぎと呼ばれるものであり、その起源に応じて二種類ある。インフレーションを起こす場自身の揺らぎに起因するものは原始密度揺らぎと呼ばれ、宇宙のエネルギー密度の濃淡を引き起こし、星や銀河の存在、また、観測されている僅かな宇宙背景放射の非等方性の種となる。一方、計量自身の揺らぎに起因するものが、原始重力波と呼ばれ、時空自身の揺らぎを表すものである。前者の原始密度揺らぎの大きさは、インフレーション中のハッブルパラメータ(エネルギースケール)とインフレーションを起こす場自身の速さの両方の組み合わせで決まる。このような原始密度揺らぎは宇宙背景放射の温度揺らぎの大部分を生成し、その観測から一様な温度との相対的な大きさが $10^{-5}$ 程度でほぼスケールに依らないスペクトルを持つことが分かっている。この情報から、インフレーションを起こすモデルについて強い制限が得られるが、原始密度揺らぎの大きさはインフレーションのエネルギースケールだけでなく、インフレーションを起こす場の速さにも依存しているため、エネルギースケールだけを正確に決めることはできない。

## 4. 原始重力波

これに対して、原始重力波は時空自身の揺らぎが起源であるため、インフレーションを起こす場自身のダイナミクスとは直接関係しない。従って、その大きさは、インフレーション中のハッブルパラメータ、すなわち、エネルギースケールのみで決まる。このことが、原始重力波の検出が、インフレーションが起きた証拠であるとともに、そのエネルギースケール・時期を決めるという観点からも重要である理由である。

因みに、時空自身の揺らぎ、特に、量子揺らぎを起源としているため、原始重力波を検出すれば量子重力理論が完成し実験的に確かめられたことになるのか、という質問を

よく受けるが、残念ながらそうではない。ここで議論している原始重力波は、あくまでも背景時空が古典的に存在し、その周りでの揺らぎのみを量子論的に扱ったものである。また、実際には、一般相対論は繰り込み可能ではないため、量子効果をループまで含めて正しく取り入れる手法は確立していない。ここで評価しているのは、揺らぎについて作用を二次まで展開し、それを自由場として量子化したものである。このような近似は、真の量子重力理論が完成するまで完全に正当化されるわけではないが、フェルミの四点相互作用が電弱スケール以下では良い有効理論であったように、プランクスケール以下の有効理論として理解されるべきものである。もし、原始重力波が予言通り観測されれば、このような有効理論の取り扱いも正当化される、という観点からも原始重力波の検出は重要である。

## 5. 原始重力波の観測手段

では、この原始重力波をどのように観測・検出するかということが問題になる。代表的なものとして次の二つの方法がある。一つ目は、原始密度揺らぎの時と同じように宇宙背景放射の非等方性を使う方法、二つ目は、2016年2月に発表された重力波観測のように、干渉計を用いて直接重力波を観測する方法である。干渉計を用いた重力波検出の手法については物理学会誌の解説<sup>5)</sup>等を見て頂きたい。ここでは、宇宙背景放射の非等方性を使う方法について簡単に述べたいと思う。

原始密度揺らぎも原始重力波も両方とも、宇宙背景放射の温度の非等方性を生成するが、両者では作られる非等方性のパターンが異なるため、原理的には両者を観測結果から分離することは可能である。しかしながら、これまでの観測から既に、原始重力波の大きさは原始密度揺らぎの大きさに比べて小さいことが分かっており、温度の非等方性だけから原始重力波を検出することは既に非常に困難になっている。そこで、宇宙背景放射の偏光の情報を使うことが重要になってくる。宇宙背景放射は無偏光ではなく、最後に光子が電子に散乱された時に、その際の温度揺らぎを起源として偏光された情報が残っている。偏光の情報は、パリティ変換に対する変換性の違いから、Eモード(パリティ偶)とBモード(パリティ奇)の二つのモードに分けられる。ここで重要なことは、原始密度揺らぎはEモードだけしか生成できないが、\*1 原始重力波はEモードとBモードの両方を生成できることである。これは大雑把には、重力波には一般にプラスモードとクロスモードと呼ばれる二つの自由度があるが、一つはパリティ偶であり、もう一つがパリティ奇になっているからである。宇宙背景放射のBモード偏光を観測できれば、それは、原始密度

揺らぎの情報とは独立に、原始重力波の情報を引き出せることを意味する。これが、宇宙背景放射のBモードの観測が、原始重力波の情報、ひいては、インフレーションが起きたエネルギースケール・時期を決定するのに極めて重要な理由である。

## 6. 観測の現状

WMAP衛星により厳しい制限がつけられ、Planck衛星による偏光のデータの結果を皆が待っている中、BICEP2グループによる原始重力波検出の報告が2014年3月にあったことは記憶に新しいであろう。<sup>6)</sup> 残念ながら、その後のPlanckチームとの共同解析で、観測されたBモードは銀河内のダストからの輻射によりほぼ説明できることが分かった。<sup>7)</sup> 最新のPlanck衛星による原始重力波に対する制限は、テンソル・スカラー比と呼ばれる原始重力波と原始密度揺らぎのパワースペクトルの比、 $r$ を用いて $r < 0.11$ で与えられる。<sup>8)</sup> これは、インフレーションのエネルギースケールが $1.9 \times 10^{16}$  GeV以下であることを与える。原始重力波検出の努力は今も続けられており、日本でもLiteBIRD衛星計画が進んでいる。

## 7. おわりに

LHC実験でヒッグス粒子が見つかり素粒子標準模型の最後のワンピースが埋まったが、残念ながらニュートリノ振動を除いて、標準模型を超える物理は見つかっていない。この点からもインフレーションという新しい物理がどのエネルギースケールで起きたのかを知ることは、宇宙論の枠組みを超えて大変興味深い問題である。近い将来の観測が期待される。

## 参考文献

- 1) B. P. Abbott, *et al.* (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration): *Phys. Rev. Lett.* **116** (2016) 061102.
- 2) 田越秀行, 中村卓史: *日本物理学会誌* **71** (2016) 210.
- 3) A. A. Starobinsky: *JETP Lett.* **30** (1979) 682.
- 4) 例えば, 最近のreviewは, K. Sato and J. Yokoyama: *Int. J. Mod. Phys. D* **24** (2015) 1530025.
- 5) 川村静児: *日本物理学会誌* **70** (2015) 125.
- 6) P. A. R. Ade, *et al.* (BICEP2 Collaboration): *Phys. Rev. Lett.* **112** (2014) 241101.
- 7) P. A. R. Ade, *et al.* (BICEP2/Keck and Planck Collaborations): *Phys. Rev. Lett.* **114** (2015) 101301.
- 8) P. A. R. Ade, *et al.* (Planck Collaboration): *Astron. Astrophys.* **594** (2016) A20.

山口昌英 (東京工業大学理学院 gucci@phys.titech.ac.jp)

(2016年6月9日原稿受付)

\*1 正確には、重力レンズ効果により銀河や銀河団スケールではEモードが部分的にBモードに変換される。