

重力波観測で測る宇宙の曲率

永野陽菜子^{1)*}・端山 和大¹⁾

(令和2年5月27日受理)

Measuring the curvature of the universe using the gravitational wave observation

Hinako NAGANO^{1)*} and Kazuhiro HAYAMA¹⁾

(Received May 27, 2020)

Abstract

There are cosmological models proposed for describing the beginning and end of the universe. These cosmological models predict the curvature of the universe. The measurement of the curvature of the universe is therefore important to refine the cosmological models. So far there are measurements of the curvature using the observation of the cosmic microwave background by the COBE, WMAP, and the results of the observation prefer the negative curvature of the universe.

In this paper, we propose a novel method to measure the curvature of the universe by observation of gravitational waves, that will provide independent results of conventional observations such as the CMB observations. The proposed method is to measure the sum of interior angles of the triangle which consist of two observed gravitational wave sources and the earth. We selected GW151012 and GW170818 as sources of gravitational waves and compared the distance between GW151012 and GW170818 with expected distance with the assumption of a simple model of the flat universe. Although we need more sophisticated cosmological model, our result using suggests a negative curvature.

Keywords: curvature of the universe, gravitational wave

1. はじめに

20世紀初頭までの宇宙論は、宇宙を定常的なものとして考えていた。しかし E. Hubble による「宇宙はどの方向を見ても遠方の銀河ほど速い速度で銀河系から遠ざかっており、その後退速度は銀河までの距離に比例する」という発見により定常宇宙論は否定され、宇宙の膨張が強く示唆されるようになった [1]。

膨張宇宙を説明する理論として代表的なものがビッグバン理論である。膨張宇宙では、昔にさかのぼれば高温高密度の時代が存在することになる。ビッグバン理論では宇宙が高温高密度だった名残として、初期宇宙で放たれた光子がマイクロ波の波長域にピークを持つ黒体放射として現在の宇宙を満たしていることを予言していた。1965年には宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) が発見され [2,3], CMB 観測衛星 COBE によって、このマイクロ波のスペクトルが約 3K の黒体放射

に一致することが判明し、ビッグバン理論の観測的証拠となった [4,5]。また、近年 I a 型超新星爆発の観測から膨張が加速していることも示唆されている [6]。

宇宙が定常的でないという観測結果を受けて、膨張・収縮を含む宇宙モデルを用いた研究がさかんに行われるようになった。ロバートソン・ウォーカー計量は一般相対性理論の厳密解で、膨張・収縮をする宇宙モデルを表すものの1つである。ロバートソン・ウォーカー計量の線素 ds は次のように書ける。

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + a^2(t) \left[\frac{dr^2}{1 - Kr^2} + r^2 (d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2) \right]$$

ここで c は光速、 $a(t)$ は時刻 t でのスケール因子、 r , θ , ϕ は 3 次元球座標における動径、偏角である。定数 K は 0 または ± 1 の値をとり、 $K = +1$ では正の曲率、 $K = -1$ では負の曲率、 $K = 0$ では平坦を表す。

宇宙論や観測技術の発展により、定常宇宙にはな

1) 福岡大学理学部物理科学科 〒814-0180 福岡県福岡市城南区七隈八丁目19-1

Department of Applied Physics, Faculty of Science, Fukuoka University, Nanakuma 8-19-1, Jonan-ku, Fukuoka 814-0180, Japan.

*Corresponding author: H. Nagano (e-mail: sd201003@cis.fukuoka-u.ac.jp)

かった「宇宙がどのように始まり、どのような終焉を迎えるのか」を記述するさまざまな宇宙モデルが提案されている。宇宙の進化は曲率の変化としても表れるので、曲率を観測的に求めることは、さまざまな理論モデルの正当性を評価する基礎となる研究となる。

宇宙論的なスケールで曲率を測定する方法として、CMBの温度異方性スペクトルを用いるものがある。宇宙の晴れ上がり以前の宇宙では放射は光子とバリオンがカップルした相対論的流体として振る舞う。この光子-バリオン流体のもつ温度異方性スペクトルを、平坦宇宙を仮定したモデルと比べることで曲率を調べるものである。CMB観測衛星WMAPによって曲率が測定された結果、観測誤差の範囲内で平坦宇宙モデルと矛盾しないという結果が得られた[6]。しかし、使った宇宙モデルの違いや放射がWMAPに届くまでに受ける影響にも依存することから、今後さらなる測定が必要となる。また、観測にはその観測手段や装置特有の雑音や不確かさが含まれているため、観測結果の評価のためにはCMBとは独立した観測による曲率の測定が重要である。

本論文はCMB観測とは独立した、重力波観測によって宇宙の曲率を推定する方法を初めて提案するものである。重力波観測は天体単体の検出可能距離としては現時点で最遠であり[8]、将来的に重力波望遠鏡の高感度化によって重力波の晴れ上がりまで観測することができれば、電磁波での宇宙の晴れ上がりよりも若い宇宙を観測できる可能性を持っているという、他の観測手段にはない特徴がある。本論文では、単体の天体からの重力波を用いて、宇宙の曲率を測定する方法を提案し、実際に現在までに観測されているブラックホール連星合体からの重力波を用いて曲率に制限を付ける。

2. 重力波観測による曲率の測定

CMB観測による曲率の測定では、三角形の1辺の長さはCMB光子の最終散乱面での宇宙のスケールとした。本論文で提案する重力波観測を用いた曲率の測定では、三角形を2つの重力波源と地球で構成し、その内角の和を測定する。

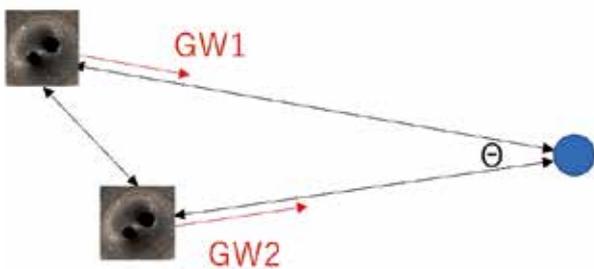


Fig.1 A triangle consisting of GW170818, GW151012 and the earth

重力波の検出は重力波望遠鏡による観測のみで行われ、他の天体観測での情報を必要としない。そのため重力波天体までの距離は、従来の複数の天体観測手段を用いて天体の距離を決めていく距離はしごのように観測とモデルによる不確かさが累積していくことがなく、原理的には重力波観測による不確かさのみによって精度が決まる。したがって重力波望遠鏡の高感度化とともに精度が向上していく。

地球から2つの重力波源までの距離と天球位置が重力波観測によって決まるので、平坦宇宙を仮定した場合の波源間の距離 D_0 を推定することができる。この D_0 と、平坦宇宙の進化モデルによる波源間距離の理論値 D_t とを比較することで、宇宙の曲率を求めるのである。 $D_0 = D_t$ であれば平坦宇宙、そうでなければ仮定が違っているために曲率をもつ宇宙ということがわかる。

本論文では2組の初代星起源の連星を考える[9,10]。初代星の質量はおおよそ $30M_{\odot}$ で、現在の宇宙年齢よりも早い段階でブラックホール連星になる。その後ブラックホール連星が合体することでLIGO, Virgoといった現在の重力波望遠鏡で検出可能となる。ここでは初代星連星の候補であるブラックホール連星合体からの重力波GW151012とGW170818を用いた[11]。これらの光度距離はGW151012が 1060^{+540}_{-480} Mpc, GW170818が 1020^{+430}_{-360} Mpcであり、地球-波源間の距離が同程度であるため同時期に誕生した天体現象と考えることができる。

2.1 宇宙進化のモデル

初代星連星は、宇宙の進化の過程で宇宙に存在する暗黒物質や銀河、他の天体といった物質の重力の影響を受けないという仮定をする[12,13]。すると2組の初代星起源の連星がそれぞれ連星合体したときのお

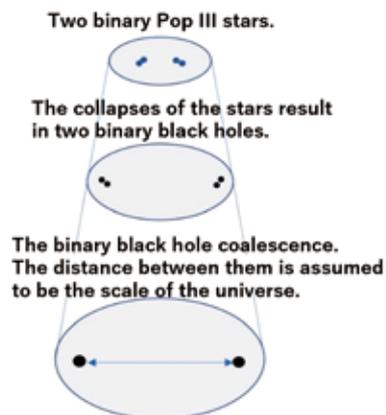


Fig.2 The evolution of the distance between two Population III stars. The distance is assumed to evolve according to the expansion of the universe without any gravitational interaction with other objects.

互いの距離は宇宙の大きさを近似することができる (Fig.2).

宇宙モデルとして標準的な、平坦宇宙のロバートソン・ウォーカー計量

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + a^2(t) [dr^2 + r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2)]$$

を用いる。スケール因子 $a(t)$ がビッグバンから時刻 t 経過したときの宇宙の大きさを表しているの、 $a(t)$ を求めれば連星合体時の宇宙の大きさがわかる。 $a(t)$ は赤方偏移 z との関係式

$$\frac{a(t)}{a_0} = \frac{1}{1+z}$$

によって観測的に求めることができる。ここで a_0 は現在のスケール因子を示しており、1である。

今回用いた重力波の赤方偏移は GW151012 は 0.21, GW170818 は 0.20 である [11]。関係式にこれらを代入すると、 $a(t) \sim 0.8$ となる。宇宙開闢から現在までの時刻を t_0 とすると、 t_0 でのスケール因子 $a(t_0)$ は 1 である。したがってこの結果は、重力波発生当時の宇宙は、現在の宇宙の 8 割程度の大きさであったことを示している。ゆえに、波源間の距離の理論値 D_l は

$$D_l = 138 \text{ 億光年} \times 0.83 \sim 114 \text{ 億光年} = 3495 \text{ Mpc}$$

と求まる。

2.2 重力波観測による重力波源間の距離の推定

2つの重力波源と地球で構成される三角形において、波源間の距離を A 、重力波源-地球間の距離をそれぞれ B , C 、2つの波源のなす角を θ とする。重力波観測によって B , C , θ が推定されると、余弦定理

$$A^2 = B^2 + C^2 - 2BC \cos \theta$$

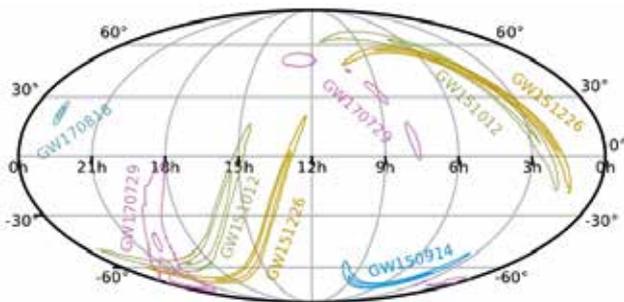


Fig.3 Plots of the sky location estimation of the gravitational waves detected during 2015-2017. The contours show 90% and 50% credible regions for the sky locations of the gravitational wave events in a Mollweide projection. See [11] in detail.

を用いることによって A を推定することができる。

Fig.3 は 2015 年から 2017 年にわたって 2 度行われた LIGO, Virgo による観測で検出された重力波の到来方向の確率マップである [11]。ここでは GW151012 と GW170818 の確率マップが載っている図を引用している。図中の島領域の内側と外側の実線は、タグが付された重力波源が存在する確率がそれぞれ 90% 以上、50% 以上である領域を示している。90% 領域の中で到来方向を正確に決定することは現在の重力波望遠鏡の感度が不十分なこともあり、困難である。本論文では、この確率マップの中で最も存在確率が高い点を重力波源の天球位置とした。但し、その確率は高く 10^{-4} 程度である。到来方向の精度を上げるためには、重力波望遠鏡のさらなる高感度化や他の天体観測を援用したマルチメッセンジャー観測が重要となる [14]。GW151012 と GW170818 の到来方向はそれぞれ、緯度 125° ・経度 246° 、緯度 68° ・経度 341° の位置で重力波源の存在確率が最も高いことわかった。これらより $\theta = 103^\circ$ と求まる。余弦定理より波源間距離 D_o は $D_o = 1633 \text{ Mpc}$ となる。次に D_o の誤差範囲を考える。誤差要因は、この場合波源-地球間距離の誤差と GW151012 と GW170818 の到来方向の誤差となる。そこでこれらの誤差の取りうる範囲での D_o を考えると、下限は 180Mpc、上限は 3039Mpc となった。以上から

$$D_o = 1633^{+1406}_{-1453} \text{ Mpc}$$

となる。

3. 結果と考察

本論文で用いた宇宙進化モデルを仮定すると、波源間の理論値 $D_l = 3495 \text{ Mpc}$ 、観測値 $D_o = 1633 = {}^{+1406}_{-1453} \text{ Mpc}$ という結果は、2つの重力波源が確率マップの島内であればどこに存在していても観測値より理論値のほうが常に大きいことを示しており、負の曲率をもつ宇宙を示唆するという結果となった。この結果は AdS/CFT 対応での負の曲率をもつローレンツ多様体である反ド・ジッター空間上でのアインシュタイン方程式の厳密解である弦理論と矛盾しない [15]。

本論文で、我々は重力波観測を用いて宇宙の曲率を測定する方法を初めて提案し、研究のフレームワークを構築した。そして最も基礎的な宇宙進化のモデルを用いて宇宙の曲率を評価した。今後は構築したフレームワークを基として、曲率に影響を与える効果を順次加えていくことで、より正確性を高めていくことが重要である。本論文では理論値を求めるとき、ブラック

ホール連星がどちらも初代星起源かつ他の天体の影響を受けずに、宇宙膨張とともにお互いの距離が広がっていくと仮定した [16]. 今後は、今回用いたブラックホール連星が初代星なのかどうかを明らかにすることが重要である. 現在、重力波で観測されたブラックホール連星が初代星かどうかを明らかにする研究は始まったばかりであるが、今後の研究成果を組み込むことで、我々のモデルはさらに正確になると期待できる [17-19]. また、本論文では考えなかった、他の天体から与えられる影響やダークマターの存在について考慮した波源間の広がり方を組み込んでいくことは、より精密なモデリングのために重要である.

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP19K03896 の助成を受けたものである.

This research has made use of data, software and/or web tools obtained from the Gravitational Wave Open Science Center (<https://www.gw-openscience.org>), a service of LIGO Laboratory, the LIGO Scientific Collaboration and the Virgo Collaboration. LIGO is funded by the U.S. National Science Foundation. Virgo is funded by the French Centre National de Recherche Scientifique (CNRS), the Italian Istituto Nazionale della Fisica Nucleare (INFN) and the Dutch Nikhef, with contributions by Polish and Hungarian institutes.

参考文献

- [1] E. Hubble, PNAS, **15**, 168 (1929).
- [2] A. Penzias, R. Wilson, Astrophys. J., **142**, 419 (1965).
- [3] R. Dicke, P. Peebles, P. Roll, D. Wilkinson, Astrophys. J., **142**, 414 (1965).
- [4] P. Roll, D. Wilkinson, Phys. Rev. Lett., **16**, 405 (1966).
- [5] D. Fixsen, Astrophys. J., **707**, 916, (2009).
- [6] A. Riess and et al., Astrophys. J., **560**, 49 (2001).
- [7] D. N. Spergel and et al., Astrophys. J., Suppl., **148**, 175 (2003).
- [8] A. Gupta, D. Fox, B.S. Sathyaprakash and B.F. Schutz, The Astrophys. J., **886**, 1 (2019).
- [9] T. Kinugawa and et al, Mon. Not. R. Astron. Soc. **442**, 2963 (2014).
- [10] T. Kinugawa and et al, Mon. Not. R. Astron. Soc. **456**, 1093 (2016).
- [11] B.P. Abbott et al., Phys. Rev. X, **9**, 031040 (2019).
- [12] V. Bromm, N. Yoshida, C. McKee and L. Hernquist, Nature, 459, 49 (2009).
- [13] V. Bromm and N. Yoshida, Annual Reviews of Astronomy and Astrophysics, **49**, 373 (2011).
- [14] LIGO Scientific Collaboration, Virgo Collaboration, Astrophys. J. L., **848**, 59 (2017).
- [15] I. Klebanov and M. Maldacena, Physics Today, **62**, 1, 28 (2009).
- [16] A. Miyamoto and et al., Phys. Rev. D, **96**, 6, id.064025 (2017).
- [17] M. Dominik and et al., Astrophys. J. **759**, 52 (2012).
- [18] M. Dominik and et al., Astrophys. J. **779**, 72 (2013).
- [19] K. Belczynski, V. Kalogera and T. Bulik, Astrophys. J. **572**, 407 (2002).