

円偏光から探る GW170817 の時空のダイナミクス

作野 優理枝¹⁾・端山 和大^{1)*}

The dynamical properties of the rotation of GW170817 by circular polarization

Yurie SAKUNO¹⁾ and Kazuhiro HAYAMA^{1)*},

Abstract

Gravitational wave astronomy has become a reality after the first detection of the gravitational wave GW150914. So far almost all gravitational waves detected were originated from BH-BH binaries except GW170817, which was from the binary neutron star coalescence. The multimessenger observation of GW170817 has been performed and astrophysical parameters such as the mass of the stars, the distance and source type have been estimated, but properties of the rotation were not constrained. In this research, in order to unveil the dynamical properties of the rotation of GW170817, we analyzed the Stokes parameters and found the sign of the circular polarization was flipped in the last one second before merging the stars for the first time. This may indicate the time evolution of the axis of the rotation such as transitional precession. To understand our result clearly, we need to increase statistics by further observations of gravitational waves.

Keywords: gravitational wave, GW170817, Stokes parameters, binary neutron star coalescence, circular polarization

1. はじめに

アインシュタインの一般相対性理論によれば、重力波とは、質量をもった物体が加速度運動することでゆがんだ時空が、波動として光速で伝わる現象である。重力波は赤外線や X 線といった電磁波より物質との相互作用が小さく、減衰も小さい。そのため重力波を調べることは、アインシュタインの一般相対性理論の検証だけでなく、初期宇宙を知る鍵になると期待されている。また重力波の発生源である強重力場の観測は時空の構造という物理学の一大テーマを理解するために本質的であり、従来の観測では得られなかった新しい宇宙の描像を知る手段になる。

重力波の発生源の一つに、コンパクト星連星の合体がある。2015年、アメリカの重力波望遠鏡 LIGO によって初めて重力波が直接検出された [1-14]。この重力波はブラックホール連星の合体によるものであった。1915年にアインシュタインの一般相対性理論により予測され、ちょうど 100 年後に重力波は現実のものとなった。それから 2 年後、2017 年 8 月 17 日にイタリ

アの VIRGO、アメリカの LIGO によって中性子星の連星の合体によって生じた重力波である GW170817 が検出された。重力波の検出が始まってから 5 例目である [15-21]。

また、GW170817 に対して、重力波とともに電磁波、宇宙線やニュートリノなどによる観測—マルチメッセンジャー観測—が行われ、天体現象の多角的な解明がなされた [22-24]。GW170817 以前に検出された重力波はいずれもブラックホール連星の合体によって生じた重力波であり、重力波以外には何も検出されなかった。しかし GW170817 の検出後に、新星の約 1000 倍の明るさに達する爆発現象で、鉄より重い元素が合成される天体現象の一つであると考えられているキロノバが電磁波のすべての波長で観測された [23]。このことから中性子星連星合体で、速い中性子星捕獲と β 崩壊によって鉄より重い元素を形成する過程である r 過程により、鉄よりも重い元素が生成された可能性が示された。

GW170817 の到来から約 2 秒後には、ヨーロッパ宇宙機構の天文衛星インテグラルと NASA のガンマ線

1) 福岡大学理学部物理科学科, 〒814-0180 福岡市城南区七隈8-19-1

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

*Corresponding author: K. Hayama (e-mail: hayama@fukuoka-u.ac.jp)

天文衛星フェルミが小規模なガンマ線バーストを観測した [21]. ガンマ線バーストとは、宇宙でもっとも大きなエネルギーを放つ現象の一つであり、高エネルギーの電磁波を大量に放射したあとに急激に暗くなる現象である。継続時間から2つに分けられるうち、ロング・ガンマ線バーストは超新星爆発が起源であると考えられている。もう一つのショート・ガンマ線バーストの起源は、中性子星の合体やマグネターなどが考えられたが、光学的に対応する天体が見られなかったため、多波長での観測が待たれていた。そんな中、今回の観測によって継続時間の短いガンマ線バーストが連星中性子星の合体から発生するというモデルの妥当性が高まった。

現在までに GW170817 は、中性子星の合体であることを含め、星の質量やスピンといったパラメータが推定された。これらはマッチドフィルタ解析と呼ばれる、理論的に予測された波形をテンプレートとして実際のデータとの相関を調べる方法によって調べられた [19]. マッチドフィルタ解析は、波形がよく計算されている重力波については検出効率が最適である一方、波形予測が難しいときは有効ではなくなる。したがって合体直前の回転軸の変動といった非線形性が強く、かつテンプレート波形に反映されていない微小な変動は捉えられず、GW170817 では回転軸の変動については制限を付けることができなかった。

本研究では我々が開発した新しい手法を用いてマッチドフィルタ解析ではうかがい知ることができない連星合体の回転のダイナミクスについて調べた。我々が提案する手法は、理論波形を用いず、重力波の観測データとマルチメッセンジャー観測の結果を用いて重力波が持つ2つの偏光 h_+ 、 h_\times を再構成することにより、円偏光 [25,26] を計算し、合体直前の回転の時間発展を調べていくものである。

2. 重力波の円偏光解析

2.1 円偏光

電磁波から類推して、重力波の2つの偏光 h_+ 、 h_\times からストークスパラメータを考えることができる。重力波におけるストークスパラメータは (1) のように示される。

$$\begin{aligned} & \begin{pmatrix} \langle h_R(f, \hat{n}) h_R(f', \hat{n})^* \rangle \langle h_L(f, \hat{n}) h_L(f', \hat{n})^* \rangle \\ \langle h_R(f, \hat{n}) h_L(f', \hat{n})^* \rangle \langle h_L(f, \hat{n}) h_R(f', \hat{n})^* \rangle \end{pmatrix} \\ &= \frac{1}{4\pi} \delta_D^2(\hat{n} - \hat{n}') \delta_D(f - f') \\ & \times \begin{pmatrix} I(f, f', \hat{n}, \hat{n}') + V(f, f', \hat{n}, \hat{n}') & Q(f, f', \hat{n}, \hat{n}') - iU(f, f', \hat{n}, \hat{n}') \\ Q(f, f', \hat{n}, \hat{n}') + iU(f, f', \hat{n}, \hat{n}') & I(f, f', \hat{n}, \hat{n}') - V(f, f', \hat{n}, \hat{n}') \end{pmatrix} \quad (1) \end{aligned}$$

ここで $\langle \cdot \rangle$ はアンサンブル平均を表し、 f 、 f' は周波数、 \hat{n} 、 \hat{n}' は回転軸方向にとった法線ベクトルを表す。Vモードは円偏光を表す。なお、Iモードは強度、Qモード、Uモードは共に直線偏光を示す。この式からVモードは以下ようになる。

$$\begin{aligned} V &= \frac{1}{2} \times \frac{4\pi}{\delta_D^2(\hat{n} - \hat{n}') \delta_D(f - f')} \\ & \times (\langle h_L(f, \hat{n}) h_R(f', \hat{n}')^* \rangle + \langle h_R(f, \hat{n}) h_L(f', \hat{n}')^* \rangle) \end{aligned}$$

h_R と h_L はそれぞれ右回転、左回転を表す。 h_R と h_L は次のように定義される。

$$h_R = \frac{h_+ - ih_\times}{\sqrt{2}} \quad h_L = \frac{h_+ + ih_\times}{\sqrt{2}} \quad (2)$$

ここで h_+ 、 h_\times はコヒーレントネットワーク解析によって観測データから推定する [27].

2.2 コヒーレントネットワーク解析

重力波が含まれている場合、 i 番目の望遠鏡の観測データ x_i は h_+ と h_\times に対する干渉計のアンテナパターン F_{i+} 、 $F_{i\times}$ で重みづけされた重力波と、望遠鏡のもつ雑音 η_i の和として、望遠鏡3台の場合について以下のように行列で書ける。

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{1+} & F_{1\times} \\ F_{2+} & F_{2\times} \\ F_{3+} & F_{3\times} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_+ \\ h_\times \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \\ \eta_3 \end{bmatrix}$$

ここで観測データ、干渉計のアンテナパターン、重力波、望遠鏡の雑音を表す行列項をそれぞれ x 、 A 、 h 、 η とおく。重力波が天球方向 (ϕ, θ) から到来したと仮定し、重力波が地球中心を伝播した時刻を t とすると、重力波が望遠鏡を伝播する時間差は (ϕ, θ) の関数となることに注意し、各望遠鏡を伝播した時間を時刻 t でそろえると、望遠鏡の応答は以下のように表せる。

$$x(t|\phi, \theta) = A(\phi, \theta)h(t) + \eta(t|\phi, \theta)$$

さらに L を

$$L(\phi, \theta) = \|x - Ah(t)\|^2$$

と定義し、 L を最小とする最尤法で h_+ 、 h_\times を推定した。最尤法によって ϕ 、 θ が決まると h_+ 、 h_\times は観測データから

$$\begin{aligned} h_+ &= H_+ \cdot x \\ h_\times &= H_\times \cdot x \end{aligned}$$

$$H_+ = \frac{1}{|K|^2} F_\times \times K$$

$$H_\times = \frac{-1}{|K|^2} F_+ \times K$$

のように再構成される。GW170817の場合、マルチメッセンジャー観測で重力波の到来方向の情報を用いることができ、その情報も用いることでより正確に波形を再構成することが可能となった。

3. 観測データの解析結果

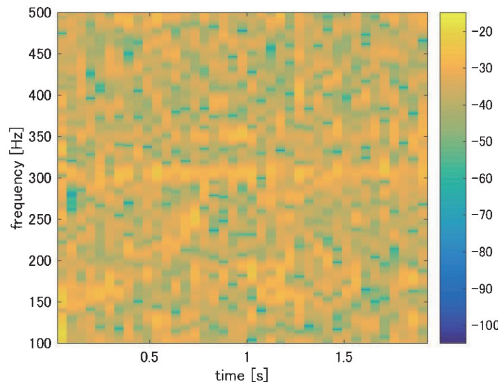


図1 GW170817のスペクトログラム

LIGOのホームページよりオープンデータ [28] となっている重力波の観測データより、マージタイムの前後1秒の2秒間を切り取った。サンプリングレートは4096 Hzである。図1は観測データのスペクトログラムである。時間分解能が98 ms、周波数分解能が10.2 Hzで、時間方向に99%オーバーラップさせて作成した。カラーはスペクトログラムをdBの単位で表した量である。時間領域0~0.8 sで150~300 Hzにわたって周波数が上昇していることが見て取れる。

図2は円偏光のスペクトログラムである。図1と同様の条件で作成した。重力波の振幅は10の-24乗程度であるが、この円偏光の強さは10の4乗であり、28桁大きくなっている。これは、再構成された h が

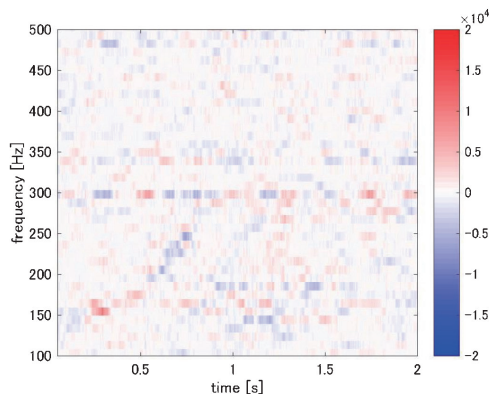


図2 GW170817のVモードのスペクトログラム

再構成の際に雑音の周波数特性の影響を低減するためにホワイトニングされているからである。

カラーはVモードの絶対値にその符号をかけたものである。正の符号は反時計回り、負の符号は時計回りに対応している。図1のスペクトログラムで0~0.8 sに見られる右肩上がりになっている領域は、図2の円偏光のスペクトログラムで右肩上がりになっている領域に対応している。Vモードのスペクトログラム上で重力波に対応する0~0.2 s、0.2~0.5 s、0.6~0.8 sに対応する領域をそれぞれI、II、IIIとする。

Vモードの信号雑音比を考えるために、Vモードの雑音マップの作成をした。

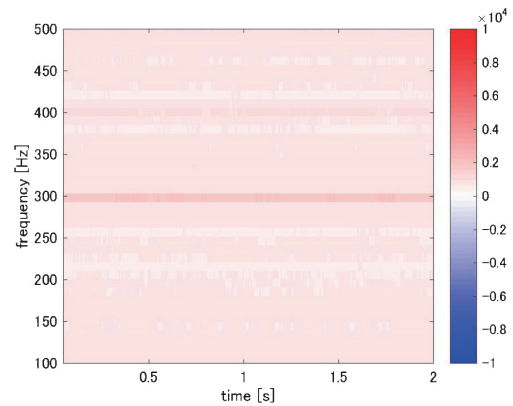


図3 雑音で作成したVモードのスペクトログラム

図3はVモードの雑音マップである。このデータに含まれる主な雑音として、干渉計を構成する装置の熱振動による熱雑音、地面の振動、レーザーの周波数雑音やレーザー強度雑音が考えられる。また300 Hzに雑音があり、これは干渉計のミラーを吊るすワイヤーの固有振動による雑音であると考えられる [29,30]。雑音マップを作るのに使ったデータは、観測された重力波信号の前後合わせて2046秒である。2秒ずつの1023個のデータに分け、それぞれのVモードを求め、1023個の雑音から計算したVモードの標準偏差をとった。

SN比を(3)のように、 (t, f) でのVモードを対応する (t, f) での標準偏差で割ったものとして定義した。SN比は通常正の値を取るように定義されるが、Vモードの場合は符号が重要な意味を持つので、Vの絶対値は取っていないため、SN比に符号が加わることに注意する。図4は図2を図3で割り、信号雑音比(SN比)を求めたものである [28]。

$$SN = \frac{V(t, f)}{\sigma(t, f)} \quad (3)$$

重力波が含まれている領域I、II、IIIの代表的なSN比は、それぞれ-2.0、4.2、-3.3になった。

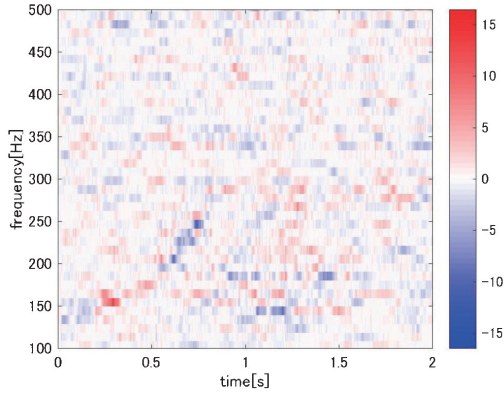


図4 SN比のスペクトログラム

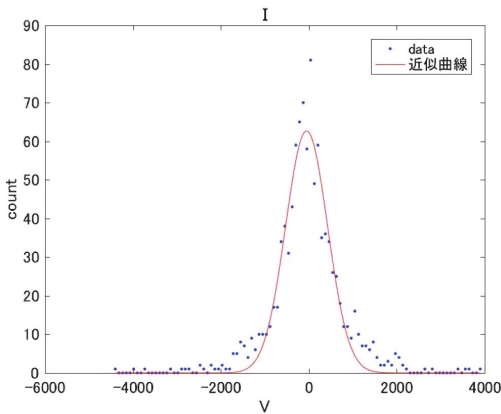


図5 領域IのVモードのヒストグラム

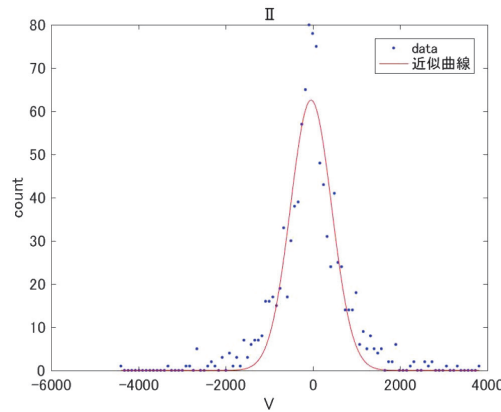


図6 領域IIのVモードのヒストグラム

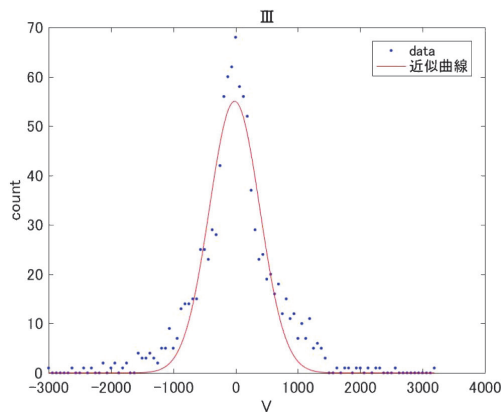


図7 領域IIIのVモードのヒストグラム

定義したSN比の統計的な性質を調べるために、重力波が含まれている各領域において一番重力波が強かった領域に対応する領域の雑音のVモードのヒストグラムを作成した。図5、図6、図7はそれぞれ領域I、II、IIIのヒストグラムである。ヒストグラムにはテイルは見られるが、ガウス分布から大きく外れてはいない。テイルがガウス分布より厚い原因は、観測データの非ガウス性に起因するものと考えられる。

それぞれの標準偏差 σ とばらつきは表1のようになる。この表より、SN比の絶対値が2以上の場合を検出すると定義する。いま、Iの領域で重力波を含む時間周波数領域ではSN比の絶対値が2以上の領域が支配的になっていることより、雑音の可能性は低いと統計的に判断することができる。II、IIIの領域においても同様のことを言うことができる。

以上より、I、II、IIIの各領域において重力波に対応する領域のSN比の絶対値が2以上になることが確認され、Vモードの支配的な符号がI、II、IIIの領域でそれぞれ負、正、負になることが分かった。変化する領域の時間スケールは200~300msである。

表1. ヒストグラムの標準偏差とばらつき

	領域I		領域II		領域III
σ (=443)	48.5 %	σ (=560)	62.2 %	σ (=577)	66.3 %
2σ	86.0 %	2σ	87.7 %	2σ	87.2 %
3σ	94.5 %	3σ	95.6 %	3σ	95.7 %

4. まとめと考察

GW170817の回転のダイナミクスを調べるために、観測データから再構成した h_+ 、 h_\times から得たVモードの時間発展を調べた。その結果、衝突前の1秒はI、II、IIIの領域に分かれ、符号が逆転することが分かった。Vモードの符号が時間と共に変化する現象を突き止めたのは本研究が世界初である。これは円偏光の向きが時間とともに変動していることを示している。この現象を説明するモデルとして、トランディショナルプリセッションが考えられる [31]。これは星のスピンと軌道角運動量のバランスで、Vモードの符号が時間変化する現象である。トランディショナルプリセッションが起こる条件をGW170817の推定値を用いて調べた。

$$\hat{\mathbb{L}} = \left(2 + \frac{3M_2}{2M_1} \right) \frac{\mathbb{J}}{r^3} \times \hat{\mathbb{L}}$$

$$\hat{\mathbb{S}} = \left(2 + \frac{3M_2}{2M_1} \right) \frac{\mathbb{J}}{r^3} \times \hat{\mathbb{S}}$$

ここで、 L は軌道角運動量を、 S はスピン角運動量を表す。 $\mathbb{J} = \mathbb{L} + \mathbb{S}$ である。2つの星の質量をそれぞれ M_1 , M_2 として、軌道半径を r とする。 S が常に軌道内にあり、 L が常に \sqrt{r} に比例するとき、 $\mathbb{L} \gg \mathbb{S}$, $\mathbb{J} \approx \mathbb{L}$ のとき、シンプルプリセッションをする。その後 \mathbb{S} が大きくなり、 $\mathbb{J} \ll \mathbb{S}$, \mathbb{L} になるとき、歳差運動をする。 $\mathbb{S} \gg \mathbb{L}$, $\mathbb{J} \approx \mathbb{S}$ になるとき、シンプルプリセッションに戻る。

トランディショナルプリセッションが起こるには、 L と S が164度以上離れているという条件を満たしている必要があり、GW170817の推定されたパラメータを用いると、起こりうることが分かった。

また、プリセッションを調べるための一つの方法として、理論波形をモード分解して瞬間軌道軸を抽出する方法が提案されており [32]、波形情報を用いずに観測データのみから回転軸の時間発展を調べる我々の手法とは相補的な研究である。現在のところ、観測されたコンパクト連星合体からの重力波の円偏光の符号が時間とともに変動する現象はGW170817以外に見つからない。今後検出統計を稼ぐことにより、合体直前の典型的な時空の変動がより正確に理解され、強重力場での物理の研究が発展すると期待される。

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.

引用文献

- [1] B.P. Abbott et al. *Phys. Rev. Lett.* **116**, 061102 (2016).
- [2] <https://www.gw-openscience.org/events/GW150914/>
- [3] The LIGO Scientific Collaboration, the Virgo Collaboration, *Phys. Rev.* **D 93**, 122004 (2016).
- [4] The LIGO Scientific Collaboration, the Virgo Collaboration, *Phys. Rev.* **D 93**, 122003 (2016).
- [5] The LIGO Scientific Collaboration, the Virgo Collaboration, *Phys. Rev. Lett.* **116**, 241102 (2016).
- [6] The LIGO Scientific Collaboration, the Virgo Collaboration, *Astrophys. J. Lett.* **833**, 1 (2016).
- [7] The LIGO Scientific Collaboration, the Virgo Collaboration, *Astrophys. J. Lett.* **818**, L22 (2016).
- [8] The LIGO Scientific Collaboration, the Virgo Collaboration, *Phys. Rev. Lett.* **116**, 221101 (2016).
- [9] The LIGO Scientific Collaboration, the Virgo Collaboration, *Phys. Rev. Lett.* **116**, 131102 (2016).
- [10] The LIGO Scientific Collaboration, *Phys. Rev.* **D 95**, 062003 (2017).
- [11] The LIGO Scientific Collaboration, the Virgo Collaboration, *Class. Quant. Grav.* **33**, 134001 (2016).
- [12] S. Adrián-Martínez et al. *Phys. Rev.* **D 93**, 122010 (2016).
- [13] The LIGO Scientific Collaboration, The Virgo Collaboration, *Phys. Rev. Lett.* **116**, 131103 (2016).
- [14] B. P. Abbott et al. *Astrophys. J. Lett.* **826**, L13 (2016).
- [15] B. P. Abbott et al. *Phys. Rev. Lett.* **119**, 161101 (2017).
- [16] The LIGO Scientific Collaboration, the Virgo Collaboration, *Astrophys. J. Lett.* **850**, L40 (2017).
- [17] B. P. Abbott et al. *Astrophys. J. Lett.* **848**, L12 (2017).
- [18] B. P. Abbott et al. *Astrophys. J. Lett.* **850**, L40 (2017).
- [19] B. P. Abbott et al. *Phys. Rev.* **X 9**, 011001 (2019).
- [20] The LIGO Scientific Collaboration, the Virgo Collaboration, *Phys. Rev.* **X 9**, 011001 (2019).
- [21] B. P. Abbott et al. *Phys. Rev. Lett.* **121**, 161101 (2018).
- [22] B. P. Abbott et al. *Astrophys. J. Lett.* **848**, L13 (2017).
- [23] B. P. Abbott et al. *Astrophys. J. Lett.* **850**, L39 (2017).
- [24] A. Albert et al. *Astrophys. J. Lett.* **850**, L35 (2017).
- [25] K. Hayama et al. *Phys. Rev. Lett.* **116**, 151102 (2016).
- [26] K. Hayama et al. *MNRAS Lett.* **477**, L96 (2018).
- [27] M. Rakhmanov *Class. Quant. Grav.* **23**, S673 (2006).
- [28] <https://www.gw-openscience.org/events/GW170817/>
- [29] J. Aasi et al. *Class. Quant. Grav.* **32**, 074001 (2015).
- [30] F. Acernese et al. *Class. Quant. Grav.* **32**, 024001 (2015).
- [31] T. A. Apostolatos et al. *Phys. Rev.* **D 49**, 6274 (1994).
- [32] K. Kawaguchi et al. *Phys. Rev.* **D 97**, 024017 (2018).