

## SN2023ixf は重力波放出を検出できるほど近かった？

### はじめに

星の重力崩壊は、最もエネルギーの大きな天体物理現象の1つです。恒星の内部では、水素が核融合してヘリウムになり、次にヘリウムが核融合して炭素になり、…という反応が続きますが、その最後の段階で、質量が太陽の約8倍以上ある大質量星が一生を終えつつあるときに星の重力崩壊が起こります。核融合で生じる電子ガスは、**パウリの排他原理**<sup>1</sup>によって生じる圧力を持ち、それが重力による崩壊を支える形で星を構成します。星の温度と密度は、内部のコアの主成分が鉄になるまで上昇していきます。コアの質量が**チャンドラセカール限界**である太陽質量 ( $M_{\odot}$  で表記) の1.4倍を超えると、**縮退電子圧**は重力に耐えられなくなり、コアは一瞬にして重力崩壊します。このとき、中性子とニュートリノが生成されます。そして密度が原子核と同じくらいになると崩壊が止まり、落下してきた物質が跳ね返ることで衝撃波が発生しますが、それはやがて止まってしまう。ですが、ニュートリノの加熱、物質対流、および**定在降着衝撃波不安定性 (SASI)**により、衝撃波が再び復活すると、星の外層が吹き飛ばされ、光学望遠鏡で観測できる超新星が誕生します。このタイプの超新星は、**コア崩壊型超新星 (CCSN)**と呼ばれます。

星の重力崩壊は、重力波の波源になりうると長年にわたり考えられています。重力崩壊の起源となる物理的プロセスがかなり複雑なため、重力波の放出を予測するのは難しく、もし検知できれば重力崩壊のダイナミクスに関する沢山の情報を与えてくれるでしょう。しかし、重力波信号の大きさは、連星中性子星や連星ブラックホールの合体によって放出される信号よりも桁違いに弱いと予測されています。私たちの銀河系か**局所銀河群**で生じるコア崩壊型超新星のみが、アメリカのLIGO、イタリアのVirgo、日本のKAGRAで構成される地上の重力波検出器ネットワークによって観測可能になると見込まれています。残念なことに、コア崩壊型超新星の発生率はとても低く、平均して1つの銀河で1世紀あたりわずか数回だと考えられています。近年観測できた私たち銀河近傍のコア崩壊型超新星は、大マゼラン雲 (50キロパーセク、163,000光年) で生じたSN1987Aです。多くの潜在的な発生源を見つけるために、LIGO-Virgo-KAGRA

(LVK) 共同研究チームは、より遠くの、隣のアンドロメダ銀河までの約10倍の距離に相当する約3000万光年の範囲まで、コア崩壊型超新星から放出される重力波の探索を行っています。

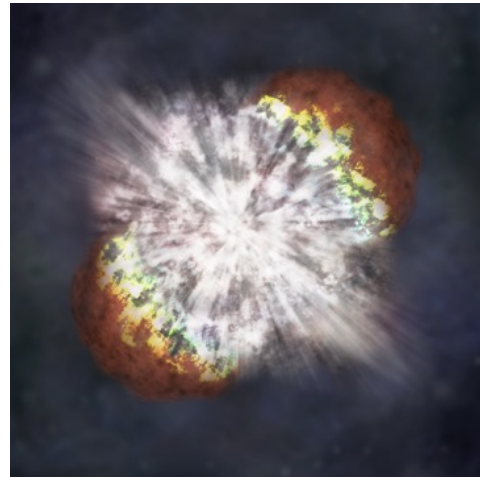


図1: 大質量星の行く末である、宇宙で最もエネルギーに満ちた現象の1つの超新星爆発の芸術的イラスト。Image credit: NASA/CXC/M.Weiss

### なぜ SN2023ixf は重力波天文学にとって興味深いのか？

SN2023ixf は**II型超新星**で、アマチュア天文学者の板垣公一さんによって2023年5月19日に発見されました。ホスト銀河はメシエ101、風車銀河 (Pinwheel galaxy) の別名でも知られています。SN2023ixf が興味深い理由は相対的な近さです。距離は6.7メガパーセク (2180万光年) であり、これはLVKの検出器がデータを取得している間に発見された最も近距離にあるコア崩壊型超新星の一つです。これによって、対応する重力波を探索する絶好のチャンスが得られました。SN2023ixf は、ほぼ同じ距離にある銀河で発見されたSN2017eaw とに匹敵します。しかし、2017年当時は、LIGOの2つの検出器の感度は2023年と比べて2~3倍低い状態でした。

<sup>1</sup>太字の言葉は、最後の用語集に解説があります。

SN2023ixfが発生した時、2つのLIGO検出器は稼働していましたが、LIGO-Virgo-KAGRAの第4期観測が公式に5月24日から始まる直前の調整段階でした。そのため、SN2023ixfの重力崩壊が起こった時刻は、2つのLIGO検出器は常時観測を行っていませんでした。

それでは、重力崩壊がいつ起こったのかをどのように調べられるのでしょうか？ SN2023ixfは多くの光学望遠鏡、X線望遠鏡、電波望遠鏡によって追跡観測されました。典型的なコア崩壊型超新星として、その光度曲線は、超新星発見から約5日後に最大に達する上昇を示し、その後約1か月間平坦期が続きました(図2を参照)。豊富な観測データのおかげで、光が最初に現れる際の衝撃波がいつ発生したのか(ショック・ブレイクアウトと言われる現象)はかなり正確に推定されています。しかし、これだけでは重力崩壊がいつ起きたかはわかりません。なぜなら、重力崩壊と衝撃波の間には遅延があり、その遅延は重力崩壊した星の性質によって異なるからです。地上の望遠鏡、ハッブル宇宙望遠鏡、スピッツァー宇宙望遠鏡から得られたM101の発見前の多くの観測結果から、SN2023ixfの前駆星(元の星)がダストを多く含んで変光する**赤色超巨星**であり、推定質量は太陽質量の8倍から20倍の範囲にあるものと考えられます。この質量に関する大きな不確実性は、重力崩壊が衝撃波の発生最大5日前に起こった可能性があることを意味します。この時間帯では、LIGOのハンフォード(H1)とリヴィングストン(L1)の2つの検出器は、総観測時間のわずか15%の間のみ同時観測をしていました。

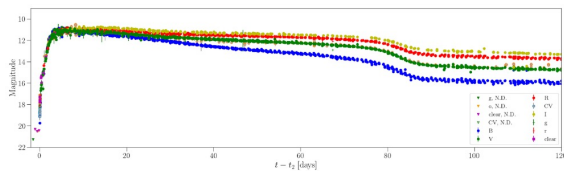


図 2: 120 日間にわたるさまざまな測光バンドでの SN 2023ixf の光度曲線。

## 何を発見した？

コア崩壊型超新星の重力波信号は複雑で、一般相対性理論を重力の枠組みとして考慮する流体力学シミュレーションコードによってのみ予測ができます。そしてその予測は、前駆星の未知であるパラメータに依存します。そのため、**整合フィルタ**(マッチド・フィルタ)法は重力波検出に使えません。代わりに、同時バースト波検出法(コヒーレント・ウェーブバースト法)を用いました。これは、信号が短く最大で約1秒程度であり、周波数が約20 Hzから2 kHzの範囲に広がっていると仮定して、少なくとも2つの検出器のデータ内で相関を検索するアルゴリズムです。

重力崩壊が起こった可能性のある5日間の時間内で、興味深い重力波候補は見つかりませんでした。より具体的には、最も有意な候補イベントの偽警報率は76%であ

り、そのイベントはノイズによる可能性が高いです。重力波信号が見つけれなかった理由として、重力崩壊が2つのLIGO検出器が観測モードでない時に起こった可能性(カバー率15%)が考えられます。もう一つの説明は、放出された重力波信号の弱さです。数値相対性理論に基づく最も楽観的なモデルでさえ、検出可能な重力波信号は約15万光年離れた大マゼラン星雲で生じるものまでに限られる、と予測しています。これはSN2023ixfよりも2桁近い距離です。

## 何がわかった？

SN2023ixfに関連する重力波信号は観測されませんでした。もし重力崩壊がLIGOの2つの検出器が観測モードにあるときに発生したと仮定すれば、重力波検出器で検出可能なレベルを考えることで、この重力崩壊がどれほどのエネルギーを持っていたのかを推定することができます。もちろん、詳細は超新星爆発メカニズムによって異なります。前駆星は回転していたのでしょうか？物質対流は**原始中性子星**の基底モードを励起するのに十分に強かったのでしょうか？定在降着衝撃波不安定性がニュートリノ加熱を促進させたのでしょうか？磁場が重力波信号を強める可能性はあったのでしょうか？これらの答えが分からないため、私たちは、重力波放出モデルとして、三軸楕円体が単純に回転する天体を考え、その(ラグビーボールに似た)非対称性によって、コア崩壊シミュレーションに時折現れる**バー・モード不安定性**が発展していくモデルを考えました。

SN2023ixfは、爆発によって放出されるエネルギーの上限値を約1桁制限することになりました。低周波数帯での仮想的な重力波放出に対して、私たちは約 $10^{-5} M_{\odot} c^2$ の感度でのエネルギーを測定できる能力を持っています(図3参照)。この感度は、エネルギー放出効率が50%の重力波源からの重力波信号が、76%の誤警報確率として検出されるエネルギー量に相当します。この結果をコア崩壊型超新星の数値シミュレーションの結果と比較すると、放出されるエネルギーの範囲は非常に広く、エネルギーが少ない非回転前駆体では $10^{-10} M_{\odot} c^2$ から、高速回転する重力波源では $10^{-6} M_{\odot} c^2$ に達します。ここでのエネルギーは、アインシュタインの有名な公式 $E = mc^2$ を使って太陽質量を単位にして表しています。放出されたエネルギーの制限値を見ると、SN2023ixfのようなコア崩壊型超新星爆発では、小さい爆発メカニズムが予測するものよりもさらに数桁開きがあることがわかります。

バー・モードの重力波信号の大きさは、非対称性因子(楕円率とも呼ばれる)を使って表すことができます。図4では、さまざまな重力波信号の周波数と継続時間に対する楕円率を示しています。楕円率に対する最も厳しい制限は、最も長い信号から得られていて、その範囲は、最低の探索周波数では $10^3$ 、最も高い2kHzでは1.04という値になっています。これは、第3期観測で発見されたSN 2019ejjに基づくこれまでの制限を上回るものです。

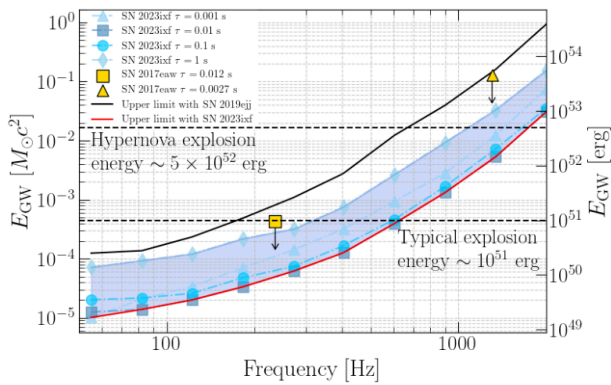


図 3: 重力波のエネルギーを太陽質量 × 光速の二乗 (またはエルグ単位) で表したもの。横軸は、パー・モード信号の周波数で、検出効率 50%, 誤警報率を 2.1 日あたり 1 回として計算したもの。青く塗られた部分は、数ミリ秒から 1 秒までの異なる継続時間のパー・モード信号による結果を含んでいる。信号の継続時間は、凡例に示された  $\tau$  パラメータで表される。黄色の四角と三角のマーカーは、SN2017eaw のデータを用いて制限された重力波エネルギーを示している。黒線は、SN2019ejj で得られた最も厳しい制限を示す。水平方向の破線は、標準的な超新星および極超新星が放出する典型的な電磁エネルギーを示している。

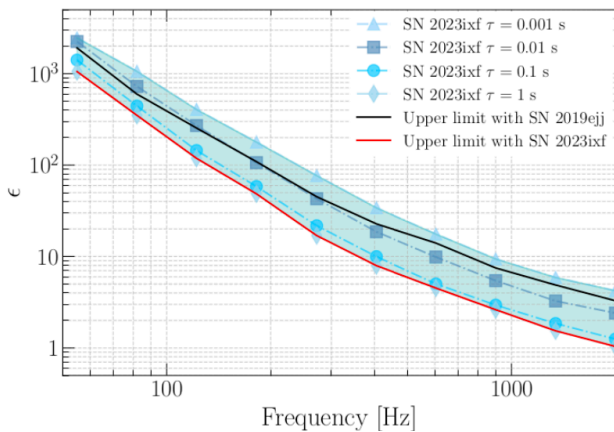


図 4: 検出効率 50%, 2.1 日あたり 1 回の偽警報率を用いて計算された、原始中性子星 (PNS) の楕円率に対する制約をパー・モード信号の周波数の関数として示す。水色の領域は、凡例に記載された  $\tau$  パラメータで表される、さまざまな重力波信号の継続時間の結果を含む。楕円率パラメータは、重力波源となる中性子星の形状が完全な球形からどれだけずれているかを示す。最も厳しい制限は、高周波の重力波信号から得られている。

## 今後の見通し

SN2023ixf は、ここ数年で観測されたコア崩壊型超新星爆発のなかでも、重力波の放出を探るのに特に注目すべきイベントの一つです。ただ残念なことに、この爆発が起こったタイミングでは、地上の重力波検出器ネットワークがフル稼働しておらず、崩壊が起こり得た時間のわずかに 15% しかデータが取れませんでした。そのため、検出できる可能性がかなり制限されてしまいました。

もし 2 つの LIGO 検出器が観測モードの時に重力崩壊が起こったとすれば、SN2023ixf のおかげで重力波放出モデルのパラメータをより強く絞り込むことができたはずで、現在の重力波検出器で重力波を捉えるチャンスとして、近隣の銀河群内でコア崩壊型超新星が現れることを期待しています。

## さらに興味のある方へ

私たちのウェブサイトでニュースを更新しています。

<https://www.ligo.org/news.php>

<https://www.virgo-gw.eu/>

<https://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/>



本発表の論文

<https://dcc.ligo.org/P2400125/public>

あるいは <https://arxiv.org/abs/2410.16565>

(日本語訳: 土井夏海, 真貝寿明)

## 用語集

- **パウリの排他原理 (Pauli exclusion principle)**: 量子力学において、半整数の量子スピンを持つ (フェルミ粒子と言われる) 粒子は、同じ量子状態に同時に2つ以上存在できない、という原理。1925年に初めてヴォルフガング・パウリが電子について提唱した。
- **チャンドラセカール限界 (Chandrasekhar limit)**: 白色矮星の理論的な最大質量のことで、太陽質量の1.4倍の値。この質量を越えると、電子の縮退圧が重力を支えきれずに星は重力崩壊を起こし、中性子星かブラックホールに変化する。
- **縮退電子ガス (Degenerate electron gas)**: 有限体積の場所に高密度で閉じ込められた電子気体。
- **コア崩壊型超新星 (Core collapse supernova)**: 大質量星のコアが重力の影響で崩壊し、超新星となって莫大なエネルギーを放出する爆発的な現象のこと。多くの場合、中性子星やブラックホールが跡に残される。
- **定在降着衝撃波不安定性 (Standing Accretion Shock Instability)**: 重力崩壊後ほんの一瞬持続する衝撃波で、失速した衝撃波面の大規模なスロッシング運動をするため、対流に重大な影響を及ぼす。
- **局所銀河群 (Local group)**: 天の川銀河、アンドロメダ銀河、さんかく座銀河などを含む50以上の銀河の集団。重力的に結びついていて、およそ1000万光年の広さに及ぶ。
- **II型超新星 (Type II supernova)**: 恒星が燃え尽きたときに生じる爆発現象の1つ。水素輝線がスペクトルに見えることで区別され、重力波放出が伴うものと期待されている。
- **光度曲線 (Light curve)**: 天体が放出する光の強さを時間軸で表したグラフのこと。光の強度は通常特定の周波数帯で測光される。
- **ショック・ブレイクアウト (Shock breakout)**: 衝撃波が星の表面に到達し、光子が放出される現象で、コア崩壊型超新星が初めて電磁的に観測できる瞬間となる。
- **赤色超巨星 (Red supergiant)**: 宇宙において、体積的に最も大きな星の種類で、光の強度も圧倒する星。
- **整合フィルタ (Matched filter)**: 信号処理の方法の1つで、ノイズにまみれたデータから、相関を用いて特定のパターンや信号を抽出する方法。重力波のデータ検出では、コンパクト連星合体など波形が解析的に知られているものに対して使われる。
- **原始中性子星 (Proto-neutron star)**: 太陽質量の20倍より小さな質量の星が重力崩壊した跡に生じるコアのこと。密度は  $10^{14} \text{ g cm}^{-3}$  のオーダーであり、1バリオンあたり50MeVの高温状態となっている。
- **バー・モード不安定性 (Bar-mode instability)**: 高速で自転する星や重力崩壊した星の残骸で見られる現象で、回転不安定性の1つ。星の形状やコアの部分が球対称からずれ、棒状の構造となることから命名されている。