

円盤になったのか、 丸呑みされたのか

～ブラックホール・中性子星合体(GW230529)をシミュレーションしてみた～



自己紹介

- さめ (めーさく)
 -  VRChat 物理学集会の主催
 -  社会人学生として通信制大学在学中
- 得意分野:
 -  コンピュータビジョン (画像認識 / 点群処理)
 -  空間情報処理 (地理情報 / リモートセンシング)
 -  クラウドインフラ設計 / IaC (AWS, GCP)
- 学生時代は地球物理学を専攻
- 地球観測技術のエンジニアとして活動中



お久しぶりです！

- 7～9 月のお休みから帰ってきました！
 - **約 3 ヶ月ぶり**の開催です 🎉
 - お休みの間も、裏では3つ自由研究を進めていました
 - 3回LTのネタはあるのですが、4回目以降は白紙なのでLTの応募はいつでもお待ちしております！
-
- 第1部よりパワーアップした第2部にしたいです！
 - 柱の男たちとの戦いのように盛り上げたい！

前回やり残したこと

- 前回 (BH + BH) は**解像度を下げて**自宅 PC で完走
 - 本当は**中性子星**もやりたかった
 - **物質も動く**ので、粗くすると再現できないと思っていた
 - 公式と同じ解像度だと大きな計算機を借りる必要があり、通して回すと**約 300 USD**
 - 自由研究には高すぎる.....と断念
-
- 今回、その**半額以下 (136 USD)** で完走できた
 - インフラ側の工夫で安く抑えました！

今日話すこと

- 前回の続編: **ブラックホール + 中性子星 (GW230529)**
 - 中性子星が**ブラックホール**に引き裂かれる様子を計算する
 - **公式と同じ解像度**で、計算は**クラウド**で
 - ただし計算機は**途中で止められる** (安さの代償)
- 公開されている計算例の**追試 (自由研究)**
- 筆者は数値相対論の専門家ではない

はじめに

GW230529 と 「質量ギャップ」

前回と今回

	前回 (GW150914)	今回 (GW230529)
天体	BH + BH	BH + 中性子星
質量	$36 + 29 M_{\odot}$	$3.6 + 1.4 M_{\odot}$
解くもの	時空だけ (真空)	時空 + 物質
計算機	自宅 PC (16 コア)	クラウド (192 コア)
解像度	公式より粗くした	公式と同じ

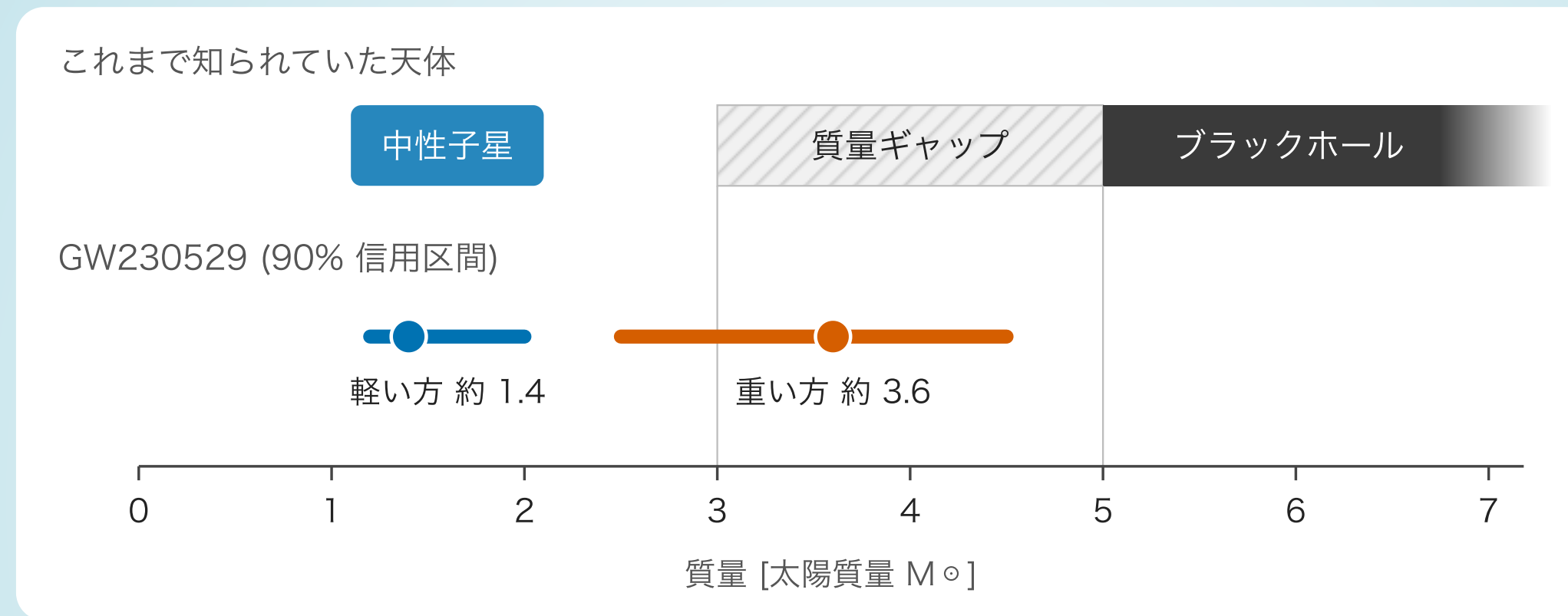
※ BH = ブラックホール、 $M_{\odot}$ = 太陽質量

GW230529 とは？

- **2023 年 5 月 29 日**に検出された重力波
- 観測できたのは **LIGO Livingston の 1 台だけ**
 - 到来方向が絞れず、光では見つかっていない
- 2 天体の質量 (90% 信用区間)
 - **$2.5 \sim 4.5 M_{\odot}$ と $1.2 \sim 2.0 M_{\odot}$**
- 最有力の解釈: **軽い BH + 中性子星**

LIGO-Virgo-KAGRA, Astrophys. J. Lett. 970, L34 (2024)

重い方は「質量ギャップ」の中



- **3~5 $M_{\odot}$** の重さの天体はこれまでほとんど見つかっていなかった
- 重い方は 99% の確からしさで 5 $M_{\odot}$ 未満
- 中性子星の重さの上限 (TOV 限界) は約 3 $M_{\odot}$ 以下

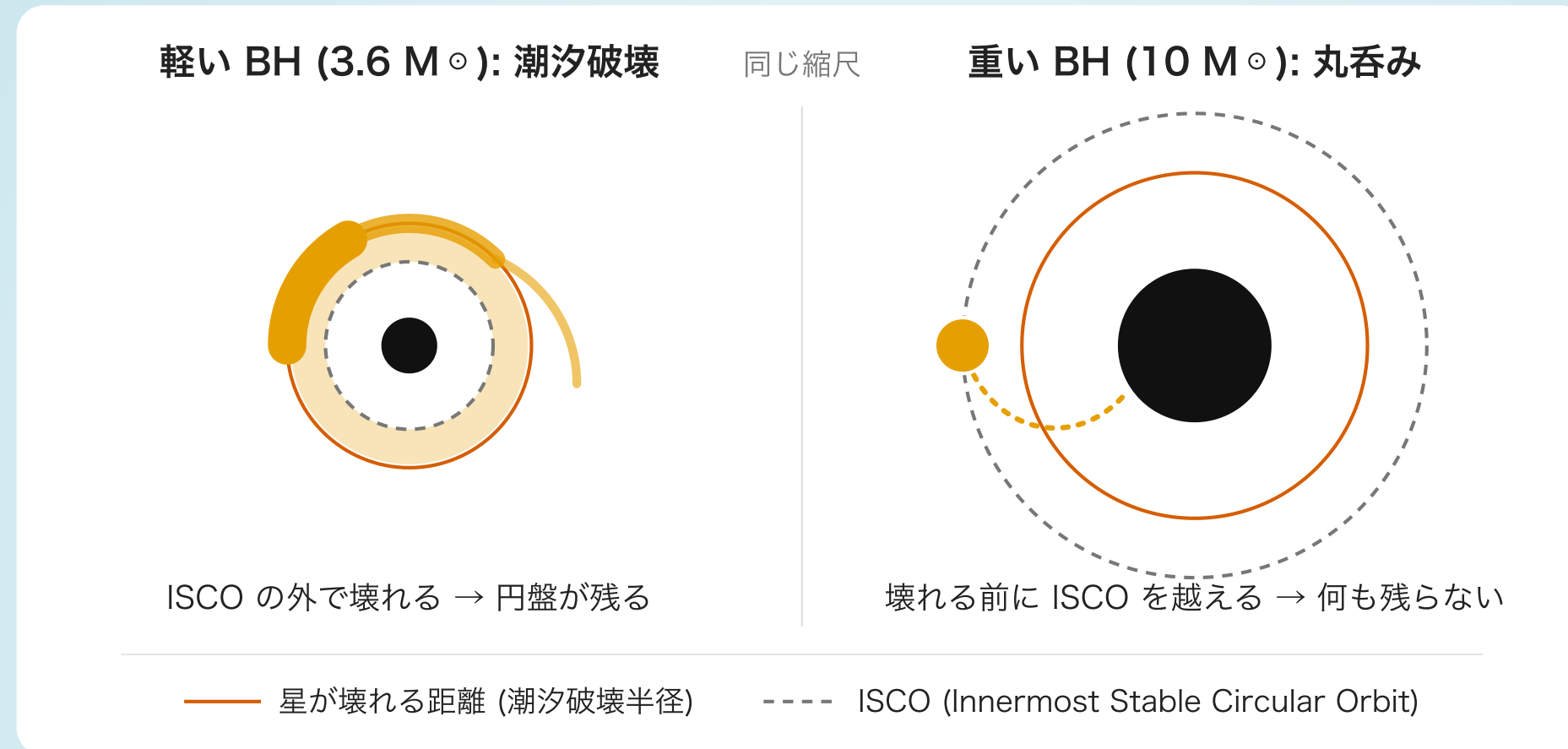
過去の BH + 中性子星との違い

	GW200105	GW200115	GW230529
BH	$8.9 M_{\odot}$	$5.7 M_{\odot}$	$3.6 M_{\odot}$
中性子星	$1.9 M_{\odot}$	$1.5 M_{\odot}$	$1.4 M_{\odot}$
星の結末	丸呑み	丸呑み	1 割の確率で破壊

- BH が軽いほど、星を飲み込む前に引き裂きやすい
- 引き裂かれた星は**円盤**になり、**光る**かもしれない

※ 質量は中央値、結末は LVK の見積り。GW230529 は光では未確認

BH と中性子星の合体: 2つの結末



- **ISCO**: この内側では安定に回れず、落ちる一方
- 破片は人工衛星のように回り続けて**円盤**に
- 円盤が残れば、**電磁波でも光る**可能性がある
- 決め手は **質量比・BH の自転・星の大きさ**

ISCO: 人工衛星の直感が破れる

人工衛星 (ニュートン)

- 重力と遠心力の釣り合いで回る
- 速さを合わせれば、**どの高さでも**回れる
- 少しずれても、楕円軌道になるだけ

BH のそば (一般相対論)

- 回る仕組みは同じ
- 近づくと重力が逆 2 乗より**急に強まる**
- ISCO より内側には**安定な円軌道が無い** → 落ちていく

- ISCO の半径は BH の**質量に比例する**
 - $3.6 M_{\odot}$ なら 32 km

なぜ軽いBHだと壊れるのか

- **潮汐力**: 星の手前と奥で、BHの引力の強さが違う
 - 星を引き伸ばす力。地球の潮の満ち引きと同じ
 - 距離の **3乗** で弱まる
- BH を $3.6 \rightarrow 10 M_{\odot}$ (2.8 倍) にすると
 - 星が壊れる距離: 2.8 の 3 乗根 = **1.4 倍**
 - ISCO: 質量に比例して **2.8 倍**

- 重い BH は、星を壊す前に ISCO の内側へ飲み込む
- 軽い BH は外で壊し、破片は回り続けて円盤に

※ 自転していない BH の場合の、桁の見積り。式は Appendix D

計算の設定

公開されている計算例を追試する

追試する計算

- **Einstein Toolkit** 公式ギャラリーの例題
 - Matur et al. (2026), [arXiv:2603.07374](https://arxiv.org/abs/2603.07374)
 - 論文の計算は英国のスーパーコンピュータで2ノード・256コア・メモリ 140GB
- BH $3.6 M_{\odot}$ + 中性子星 $1.4 M_{\odot}$ 、自転なし
- **44 km** 離れた位置から、約 **1.5 周**で合体
- 設定・初期データ・結果が**すべて公開**

同じ設定を別の計算機で回して、答えを比べる

前回との違い: 物質が入る

- **BH** は実は**質量と自転**だけで決まるシンプルな天体
 - 前回 (BH + BH) は**時空のゆがみ**だけを計算
- **中性子星**は物質のかたまり → **物質の流れ**も同時に計算
 - 時空が物質を動かし、物質が時空をゆがめる
- 本物の中性子星では**流体の力と電磁気力**の両方が効く (磁気流体)

- 今回の計算は簡単のため電磁場なしで流体力だけ

星の中身と、星の外

- **中身:** いちばん単純なモデル (ポリトロープ)
 - 圧力は密度の 2 乗に比例
 - 本物の中性子星の中身は、まだよく分かっていない
- **外:** 真空をごく薄い人工の大気で埋める
 - 流体の計算は密度ゼロ (真空) を扱えないため
 - 物理ではなく**計算の都合**。濃さは星の中心より 7 桁薄い
 - 薄くても領域が広いので、集めると $0.25 M_{\odot}$
 - 残った物質を数えるときに差し引く

格子とスケール感

計算領域	一辺 約 1,985 km の立方体
格子	細かさを 7 段階に変える (AMR)
最も細かい格子	222 m
BH の地平面の半径	10.6 km
星の中心密度	$7.8 \times 10^{17} \text{ kg/m}^3$ (原子核の約 3 倍)
計算する物理時間	8.62 ミリ秒

※ 数値相対論の単位 ($G = c = M_{\odot} = 1$) を km とミリ秒に直している

自宅PCからクラウドへ
止められる計算機を使いこなす

自宅 PC で解像度を落として試走

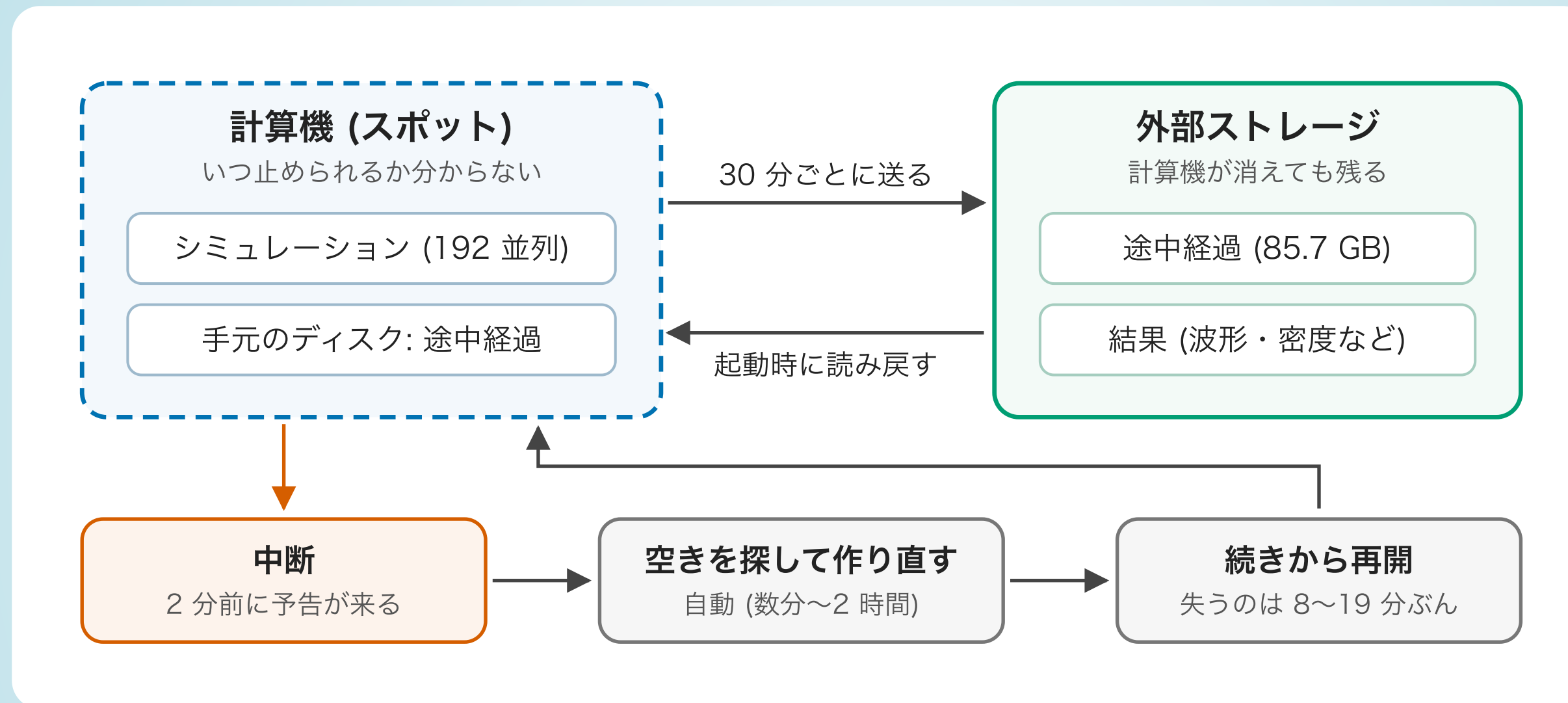
- 自宅 PC: **16 コア / メモリ 93 GiB**
- フル解像度に必要なメモリ: **約 137 GiB** → **×**
- 解像度を落とせば載る (最細 222 m → 323 m)
 - 4.4 ミリ秒 (合体の少し後) までの計算に **4.8 日**
 - それでも星が崩れていく時刻は参照と**ほぼ同じ**
(ずれ 0.01 ミリ秒ほど)
- 粗くても合った。でもこのままでは前回 (BH + BH) の焼き直し

- 自宅で粗く検証、本番はクラウドでフル解像度で

クラウドで計算機を借りる

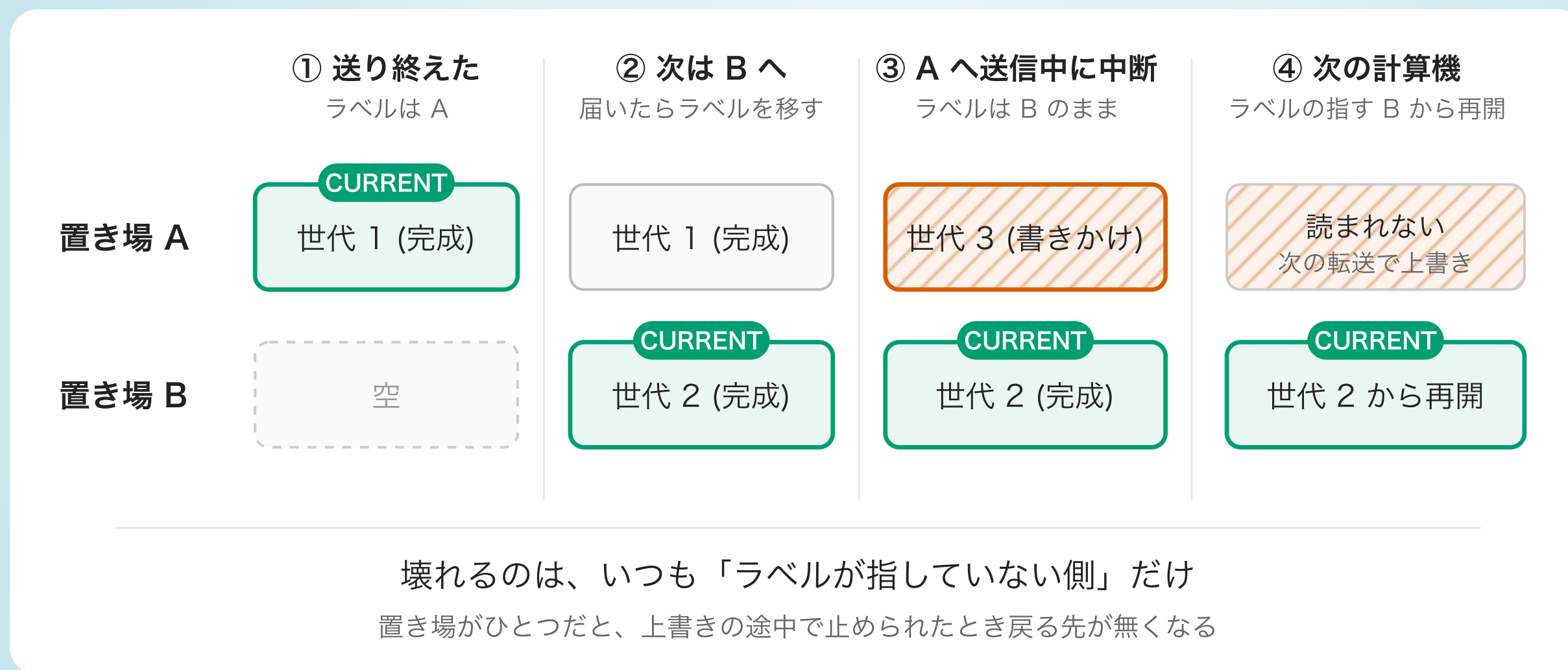
- クラウド (AWS, Amazon Web Services) は計算機を**時間貸し**する
 - 借りたのは **192 コア / メモリ 384 GiB 以上**を 1 台
 - 通常料金なら 31 時間で**約 305 USD** (試算)
 - **スポットインスタンス**なら半額以下
 - 誰も使っていない計算機を安く借りる仕組み
 - 代償: **2 分前の予告で止められる**
-
- 中断されても再開できる仕組みが必要
 - その仕組みさえ用意できれば**安く計算できる**

中断を「日常」として扱う



- 途中経過を外に送り続ければ、いつ止められても再開できる
- 中断・再開時の処理もスクリプトで自動化

書きかけから再開しないために

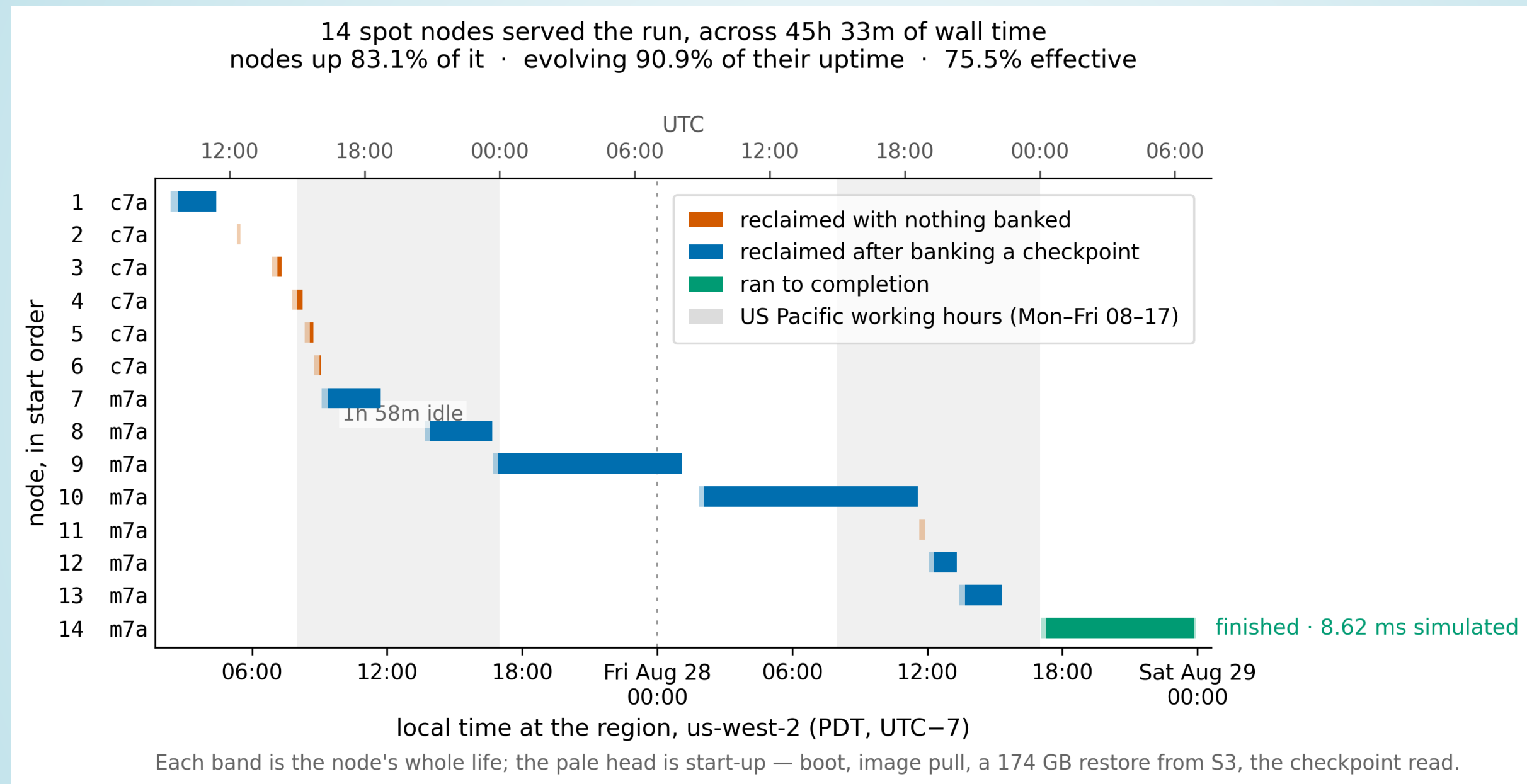


85.7 GB を送るには数分かかる。その途中で止められることもある

実行結果

14 台の計算機によるリレー

13 回止められて、14 台目で完走



1 本が 1 台。青 = 途中経過を残せた、橙 = 残せず、緑 = 完走

数字で見る本番の計算

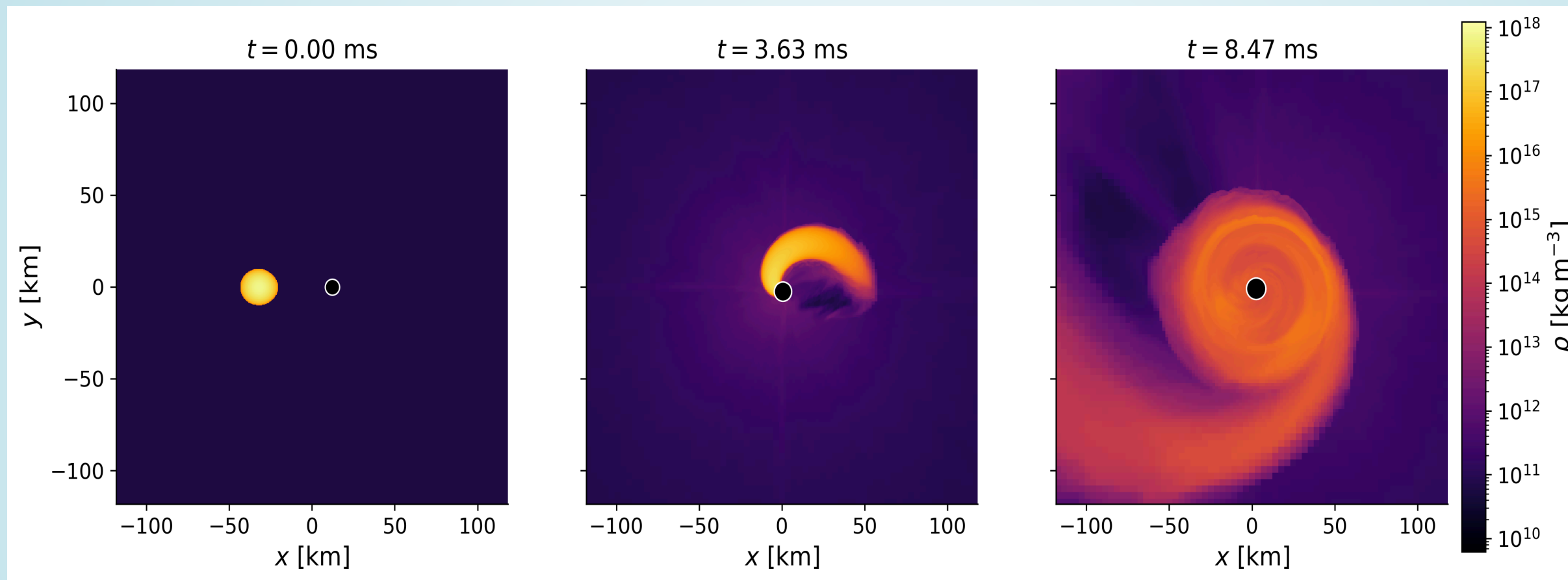
かかった時間	45 時間 33 分
使った計算機	14 台 (中断 13 回)
計算していた割合	75.5%
計算し直した分	全体の 9.6%
計算機の費用	136 USD (通常料金の約 55% 引き)

45 時間かけて解いたのは **8.62 ミリ秒**。現実の約 **1,900 万倍**スロー

実行結果

中性子星が引き裂かれる

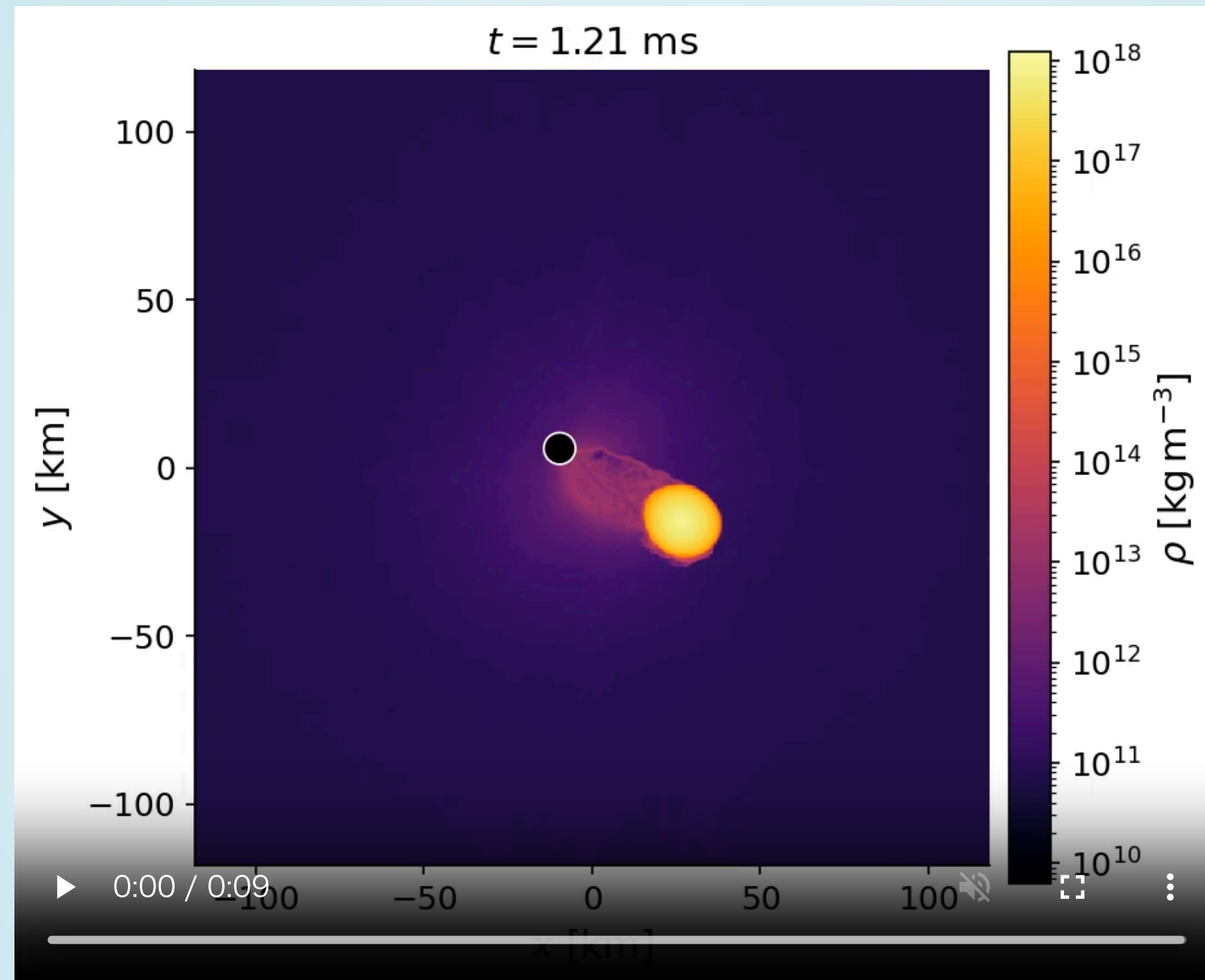
中性子星が引き裂かれる



軌道面での密度。丸が BH、左の明るい塊が中性子星

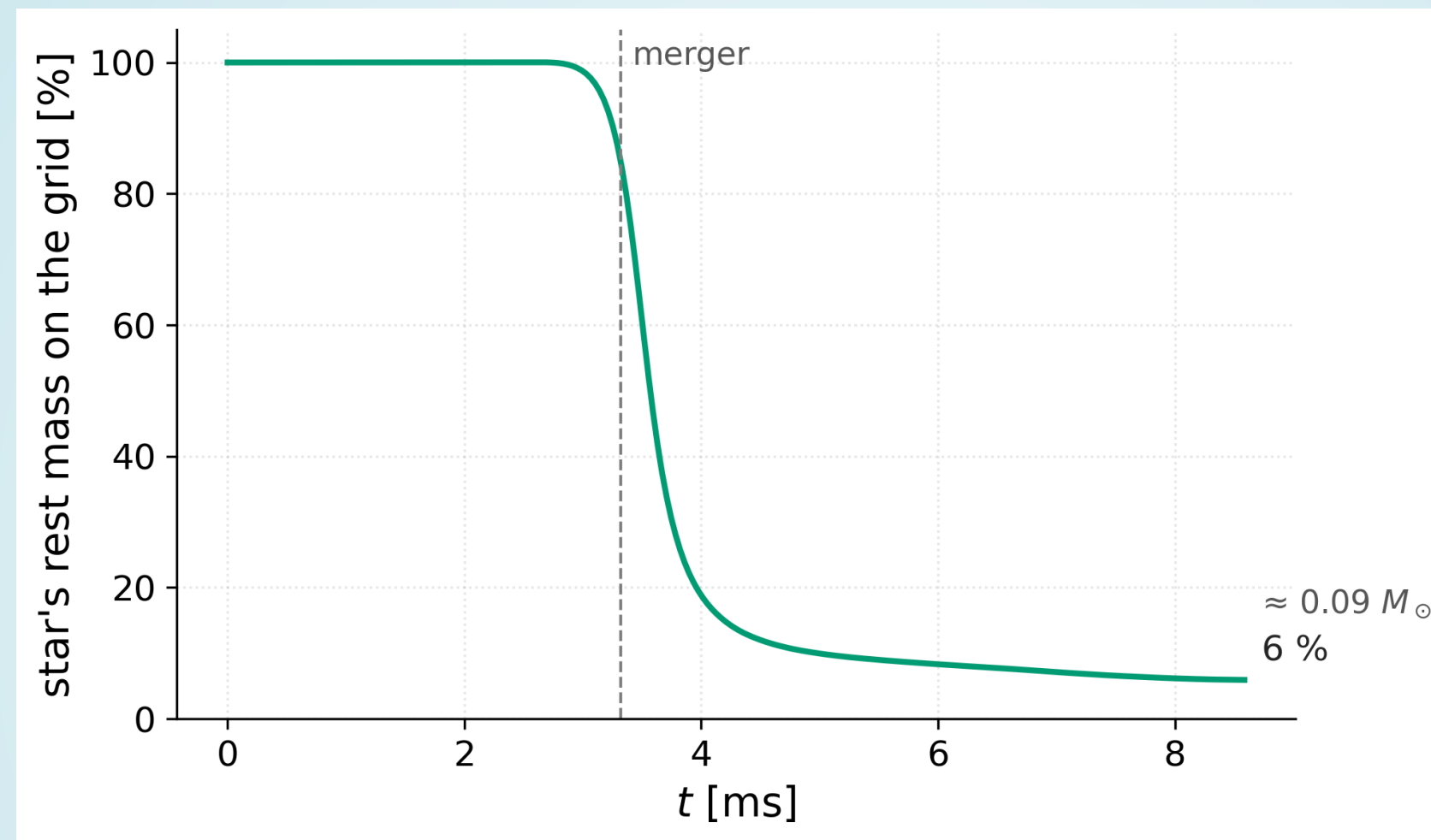
- 星は引き伸ばされ、グルグル BH に巻きつく
- 合体後も BH の周りに円盤が残った

動画で見る



保存していた断面は 0.3 ミリ秒ごとの 29 枚

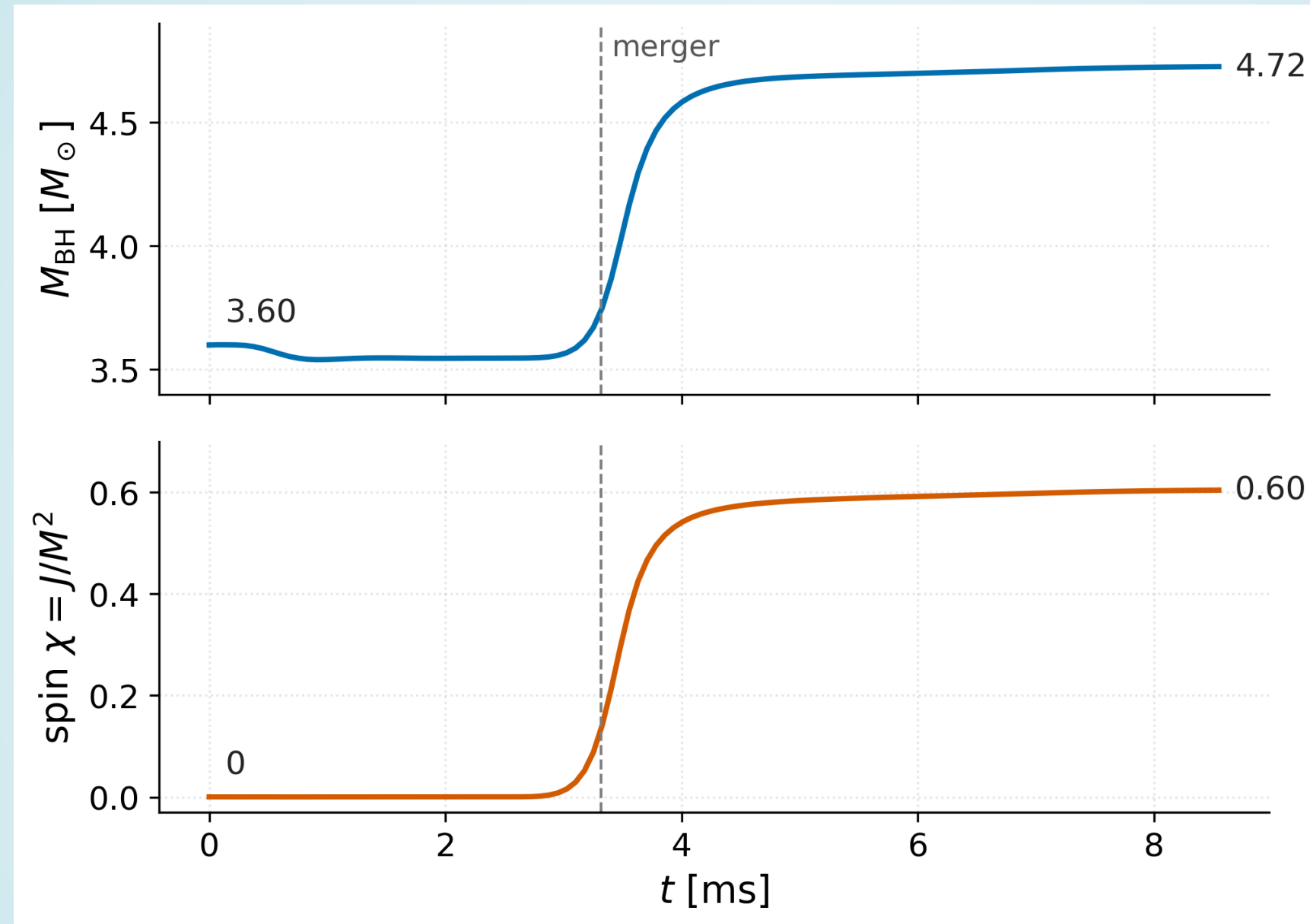
中性子星の 94% は飲み込まれた



- 合体の 5 ミリ秒後、残る物質は星の約 **6%**
- 最大密度は 2 桁下がった

※ 6% は真空を埋める人工の大気を差し引いた上限 (Appendix C)

BH は太り、回り始める



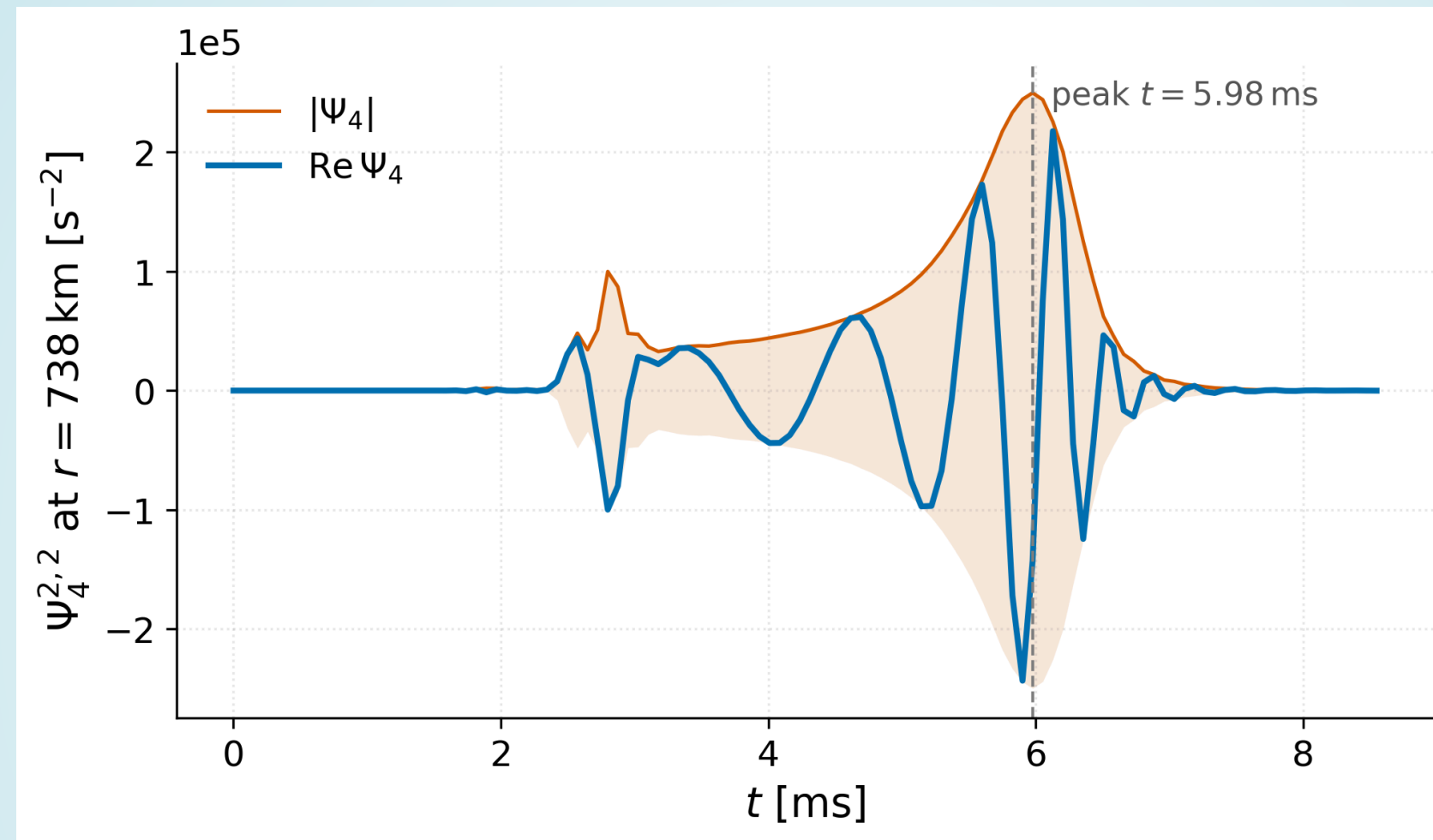
- 質量 $3.60 \rightarrow 4.72 M_{\odot}$ 、自転 $0 \rightarrow 0.60$
- 星の軌道の角運動量をもらって回り始めた

角運動量はどこへ行ったか

	角運動量 [$M_{\odot}^2$]	割合
はじめの連星	17.04	100%
合体後の BH	13.49	約 79%
重力波 (論文の値)	1.86	約 11%
残り (外の物質など)	約 1.7	約 10%

- 論文の最終値は $4.73 M_{\odot}$ ・ 自転 0.61 (今回は途中で打ち切り)
- 重力波のエネルギーは全質量の 0.70% (GW150914 は約 5%)

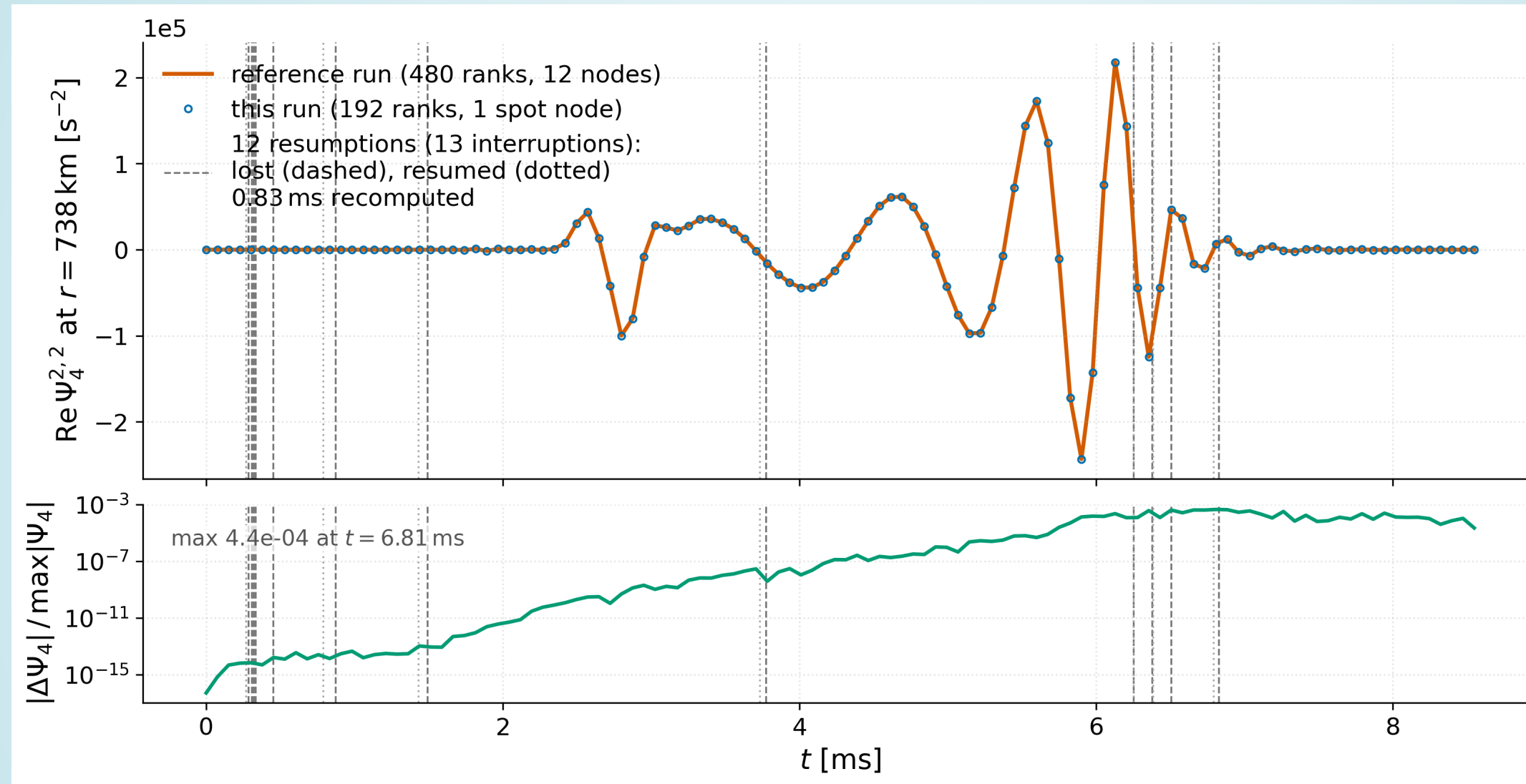
重力波の波形



- 738 km 先で測る。最初の 2.5 ミリ秒は波が未到着
- 周波数は **0.8** → **1.8 kHz** へ上がり、すぐ静まる

※ 縦軸 Ψ_4 は、時空のゆがみ h を時間で 2 回微分した量

公開データと重ねる



- 線 = 公開データ、丸 = 今回。差は最大 4.4×10^{-4}
- 縦線は 12 回の再開。どこにも段差が無い

トラブル集

止められる計算機ならではの話

初日: 5 台続けて止められる

- 初日、5 台続けて **10～28 分**で止められた
 - **3 時間 46 分**、進捗ゼロ
- **別の機種**には空きがあった → 切り替えて安定
- 中断は**米国西海岸 (今回の計算機の所在地)** の日中に集中
 - 機種の切り替えと重なり、原因は切り分け不能

この 3 時間 46 分は**請求もゼロ**だった

※ スポットインスタンスは開始 1 時間以内にAWS側の都合で止められた分は課金されない

再開した計算だけ 3 倍遅い

- 最初からの計算は 1 ステップ **4.16 秒**
 - 再開した計算は **12.36 秒**
 - CPU は全コア 100%。それなのに遅い
 - 原因は**メモリの置き場所**
 - 読み戻した 162 GiB が片側のメモリを占領
 - キャッシュを捨てる **1 行**で解決
 - 答えは同じでも、**時間も費用も 3 倍**になるところ
-
- 大きなデータを読み戻してから計算を始めるなら、**分野を問わず起こりうる**

今回の構成の利点と弱点

- **利点**

- なんととっても安い
 - 複数回計算できたり、少ない予算でも大きな計算ができる
- 中断と再開を前提とした構成はローカルマシンでの計算でも有用なはず

- **弱点**

- いつ終わるかわからない
- 納期がタイトだったり、速報性が求められる計算には不向き

今回の成果の応用性

- 仕組みに**数値相対論に固有の物理は無い**
 - 同じやり方が使える条件は 3 つ
 - 途中経過から**再開できる** (いちばん大事)
 - 計算機 **1 台に載る**
 - 途中経過を**外部ストレージに送れる**
 - **流体や構造** (天気や建物) の計算にも使えるはず
 - ただし、まだ試してはいない
-
- 再開できれば、分野を問わず「安く回す」選択肢に

おわりに

完走した感想 (激うまギャグ)

- 一度は諦めた BH + 中性子星をフル解像度で計算できたことはとても嬉しい
- 当初の想定より安く済んだ、と言ってもテストランの費用や他のサービスの利用料も併せてAWSの利用料金が3万円を超えた😭💸
 - 事業経費とはいえこんな浪費をしたのが家族にバレたら叱られが発生する
- 次は複数台をつないで、中性子星どうしの合体とかもチャレンジしたい
 - 誰か自腹でやってくれないかな、俺もやったんだからさ (同調圧力)

まとめ

1. GW230529 の公開例題を**公式と同じ解像度**で追試
2. 星は**潮汐破壊**され、約 6% が BH の周りに残った
3. BH は $3.60 \rightarrow 4.72 M_{\odot}$ 、**自転 0.60** に
4. 波形は公開データと 4.4×10^{-4} で一致
5. 13 回止められても **45 時間・136 USD** で完走
6. **AWSのご利用は自己責任で計画的に！**
 - ご自身の財布に深刻なダメージを引き起こす可能性があります

設定とインフラ構成は GitHub で公開 (Appendix E)

LT登壇者の募集

- 物理学集会ではLT登壇者を募集しています！
 - どんなジャンルでもOK！
- 興味のある方は物理学集会のDiscordサーバーまで！



APPENDIX

詳細データ

APPENDIX A: 本番の計算の内訳

計算機	192 コア・1 台 (前半 6 台は 384 GiB、後半 8 台は 768 GiB)
物理時間	8.62 ミリ秒 (29,167 ステップ)、うち合体後 5.3 ミリ秒
かかった時間	45 時間 33 分 (止められなければ 31.0 時間の見積り)
計算機が動いていた時間	37 時間 51 分 (83.1%)、課金は 36.0 時間
途中経過 (checkpoint)	85.7 GB・192 ファイル、30 分ごと、書き出し 76~86 秒
外部ストレージへの転送	1 回 171 GB、中央値 276 秒
中断 1 回で失う時間	8~19 分
費用	136 USD (通常料金での試算は 305 USD)

APPENDIX B: 延びた 14.6 時間

内訳	時間
次の計算機を待っていた	7.7 時間
起動と読み戻し (13 回)	3.1 時間
失った区間の計算し直し	3.0 時間
途中経過を頻繁に書くため	0.7 時間

- **半分以上は待ち時間** (計算は遅くなっていない)
- 1 回の実測で、計算機の空き具合しだいで変わる

APPENDIX C: 残った物質の数え方

- 流体のコードは真空を扱えない
 - 密度 10^{-10} の**人工の大気**で埋めている
- 領域が広いので、大気だけで **$0.25 M_{\odot}$**
 - 中性子星は $1.51 M_{\odot}$
- 大気を引くと、残りは **$0.09 M_{\odot}$** (約 6%)
 - 引かずに割ると 19% に見える

地平面の内側の分を含みうるので、**上限**として読む

APPENDIX D: 潮汐破壊と ISCO

- 星が壊れる距離: 星の表面で、潮汐力が自己重力に勝つところ

$$\frac{2GM_{\text{BH}}R_{\text{NS}}}{r^3} \sim \frac{GM_{\text{NS}}}{R_{\text{NS}}^2} \Rightarrow r_{\text{tid}} \sim R_{\text{NS}}(2M_{\text{BH}}/M_{\text{NS}})^{1/3}$$

- 自転しない BH の有効ポテンシャル (単位質量あたり、 L : 角運動量)

$$V_{\text{eff}}(r) = -\frac{GM_{\text{BH}}}{r} + \frac{L^2}{2r^2} - \frac{GM_{\text{BH}}L^2}{c^2r^3}$$

- 第 3 項が一般相対論の補正 (逆 2 乗より強い引力)
- 安定な円軌道は $r \geq 6GM_{\text{BH}}/c^2$ に限られる (ISCO)

$r_{\text{tid}} \propto M_{\text{BH}}^{1/3}$ 、 $r_{\text{ISCO}} \propto M_{\text{BH}}$ 。係数はモデル依存なので、比だけを使う

APPENDIX E: 公開物・参考文献

- インフラの構成一式: [gw230529-einstein-toolkit-aws-tf](#)
- 計算の設定と実行環境: [gw230529-einstein-toolkit](#)
- 前回の発表: [vrc-gw150914-einstein-toolkit-LT](#)
- 観測: LIGO-Virgo-KAGRA, *Astrophys. J. Lett.* 970, L34 (2024), [arXiv:2404.04248](#)
- 追試した計算: R. Matur et al., [arXiv:2603.07374](#)
- 公開データ: [doi:10.5281/zenodo.18940220](#)
- Einstein Toolkit ギャラリー: [einsteintoolkit.org/gallery/bhns](#)