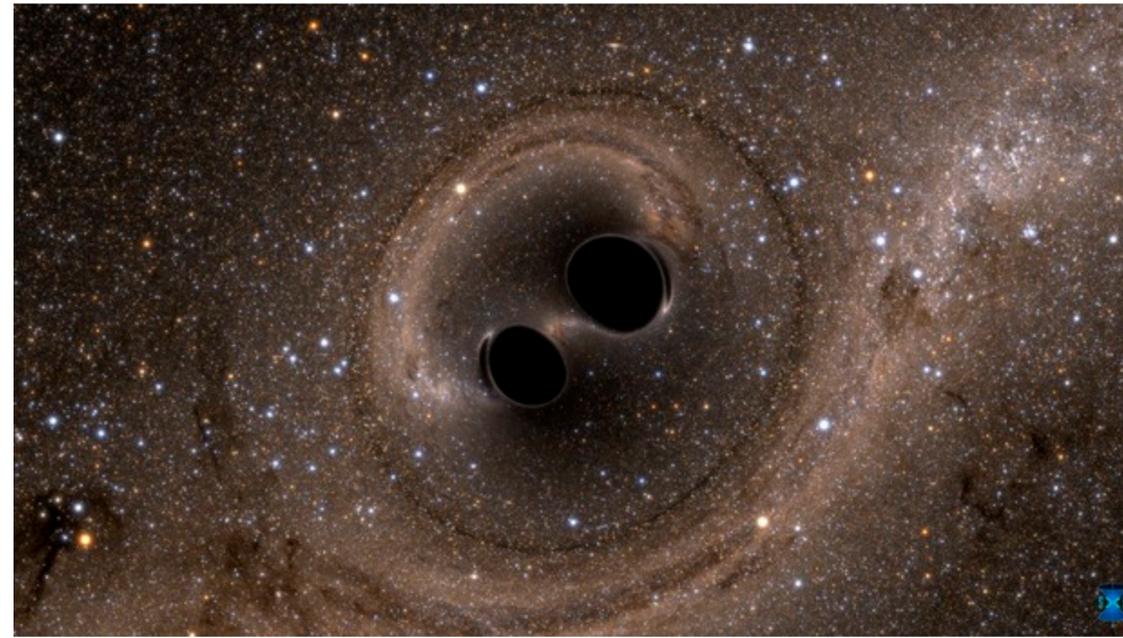


credit: SXS, Simulating eXtreme Spacetimes project
(<http://www.black-holes.org>)



天文学

理工・総合情報学部講義 月曜5限



日本の重力波レーザー干渉計KAGRA

credit: 東京大学宇宙線研究所 重力波観測研究施設

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

東京大学理学系研究科 鈴木昭宏

講義のアウトライン

- 第1回: ~~天文学への導入と様々な時間・空間スケールの天体~~
- 第2回: ~~電磁波による宇宙の観測~~
- 第3回: ~~太陽系内天体と天体の運動~~
- 第4回: ~~天体の距離、明るさ、色~~
- 第5回: ~~恒星1 - 恒星のエネルギー源と核反応-~~

講義のアウトライン

- 第6回: ~~恒星2 -恒星の分類と進化-~~
- 第7回: ~~星の誕生と星間物質~~
- 第8回: ~~銀河1 -銀河系の構成要素-~~
- 第9回: ~~銀河2 -銀河の分類と進化-~~
- 第10回: ~~超新星爆発と元素の起源~~

講義のアウトライン

- 第11回: ~~白色矮星、中性子星、ブラックホール~~
- 第12回: ~~ニュートリノ天文学と高エネルギー天体~~
- 第13回: **重力波天文学と中性子星・ブラックホール**
- 第14回: 宇宙膨張の発見と宇宙の歴史
- 第15回: 系外惑星の世界

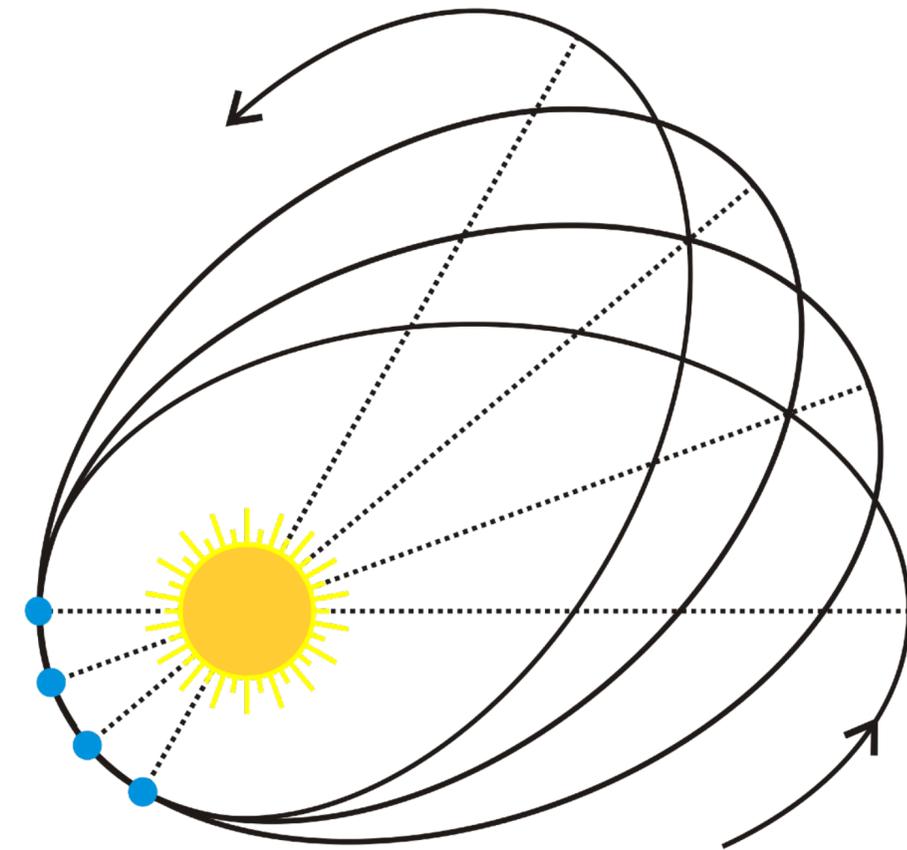
第13回:

重力波天文学と 中性子星・ブラックホール

- 重力波とその検出
- ブラックホールと重力波
- 中性子星-中性子星連星合体からの重力波

重力波とは何か

- ニュートン重力の限界
- ニュートン重力は太陽系天体の軌道などを高い精度で記述できるが、強い重力場などは記述しきれない
- ニュートン重力の破れ、あるいは一般相対性理論の正しさはいくつかの観測事実によって証明されてきた: 水星の近日点移動など(100年に約574秒角. このうち約43秒角が一般相対論効果)



惑星軌道の近日点移動の模式図

credit: Wikipedia,

https://en.wikipedia.org/wiki/Apsidal_precession

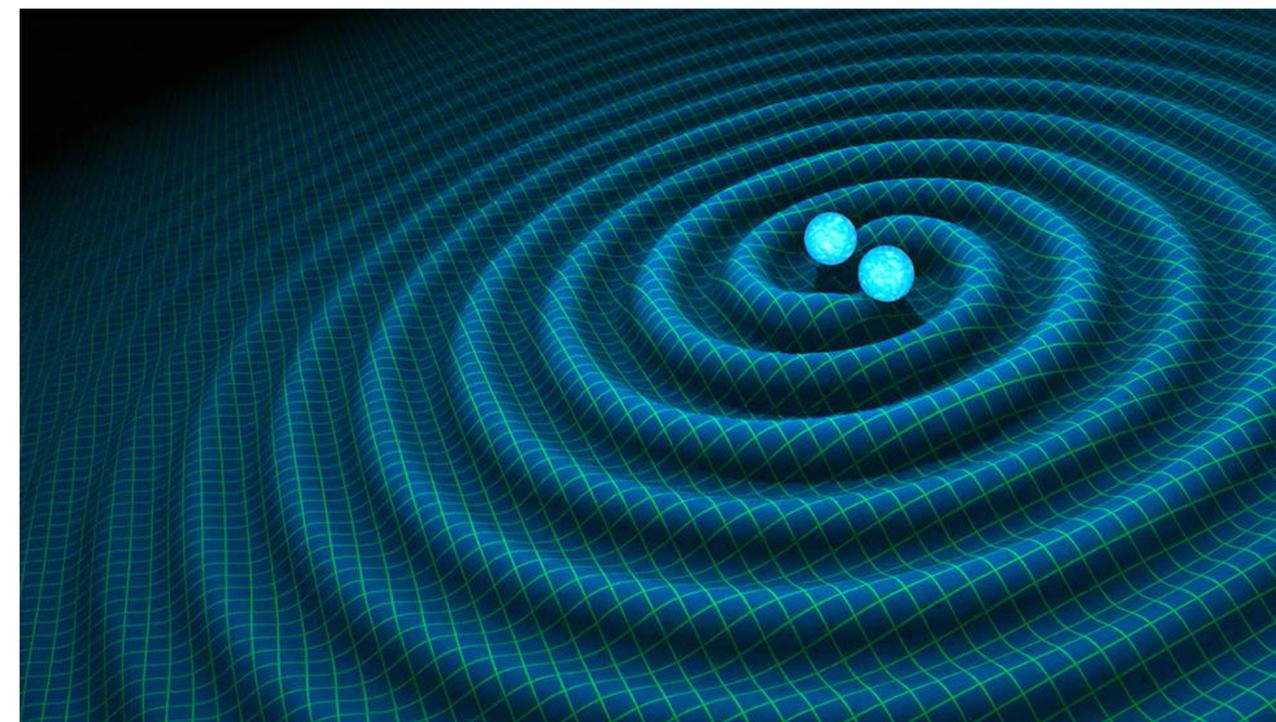
重力波とは何か

- 重力波 (gravitational wave): アインシュタイン方程式の波動解で、時空の歪みが光速で伝搬する現象
- 例えるなら、水面に石を投げ込んだときにできる波紋とその広がり
- 石を投げ込む = 強い重力源の激しい運動
- 水面の波紋 = 時空の歪み

コンパクト連星合体と重力波伝搬のイメージ図

credit: R. Hurt/Caltech-JPL

<https://www.nasa.gov/feature/goddard/2016/nsf-s-ligo-has-detected-gravitational-waves>



$$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

アインシュタインテンソル

エネルギー運動量テンソル

宇宙項 x 計量テンソル

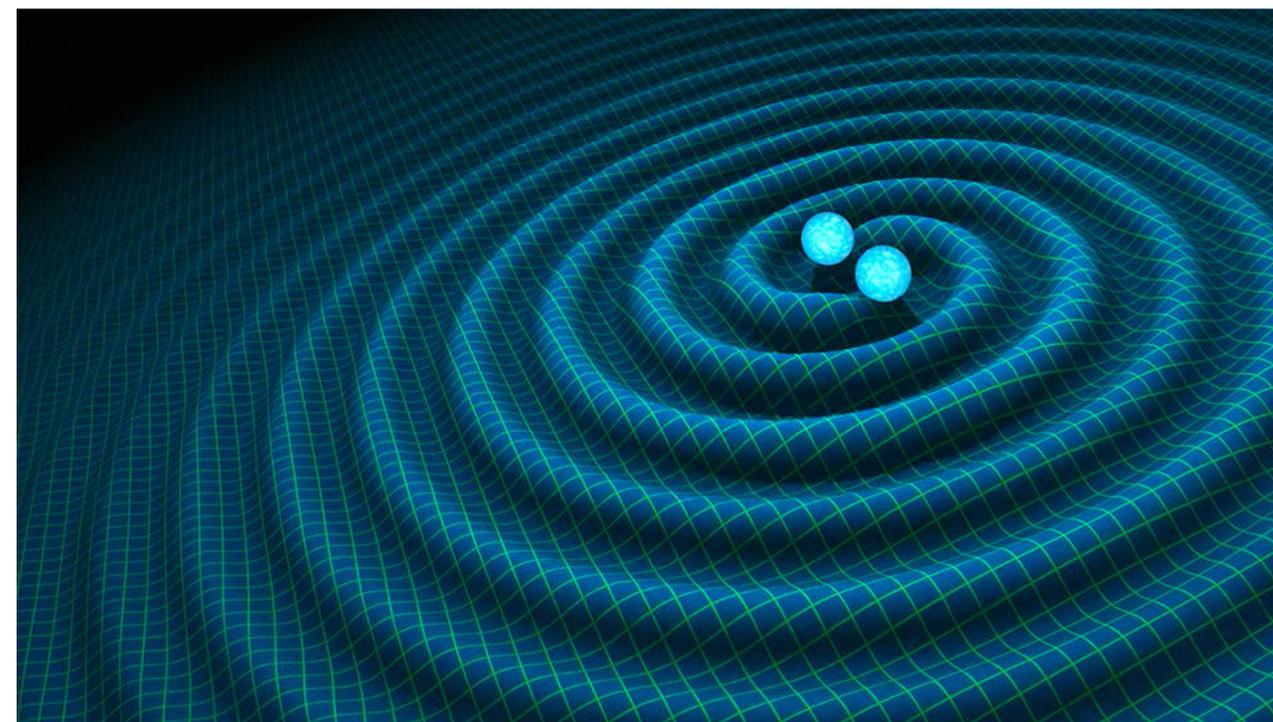
重力波とは何か

- 重力波が通過すると、空間が伸び縮みする
- しかし、日常生活でそんな現象を意識することはない
- 伸び縮みの程度(振幅)は極めて小さい(例えばGW150914では $h=10^{-21}$)
- どうやって微妙な違いを検出するのか？

コンパクト連星合体と重力波伝搬のイメージ図

credit: R. Hurt/Caltech-JPL

<https://www.nasa.gov/feature/goddard/2016/nsf-s-ligo-has-detected-gravitational-waves>



$$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

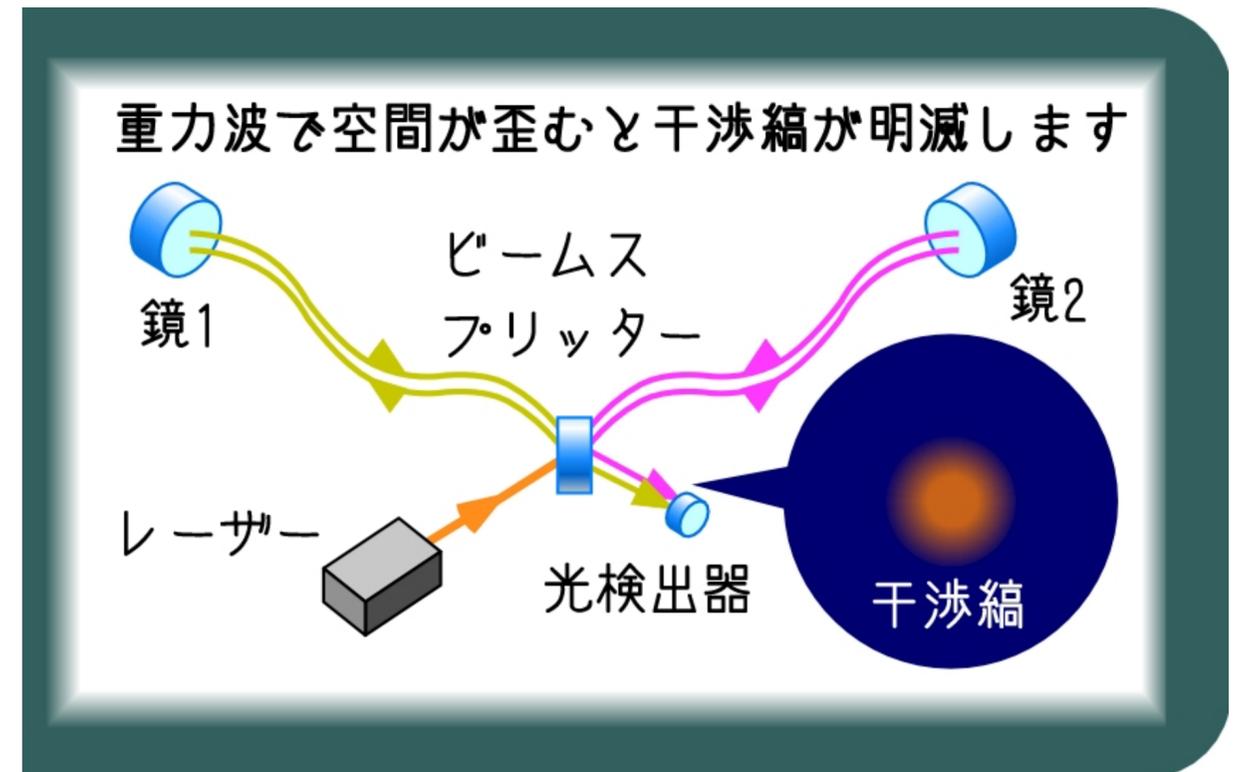
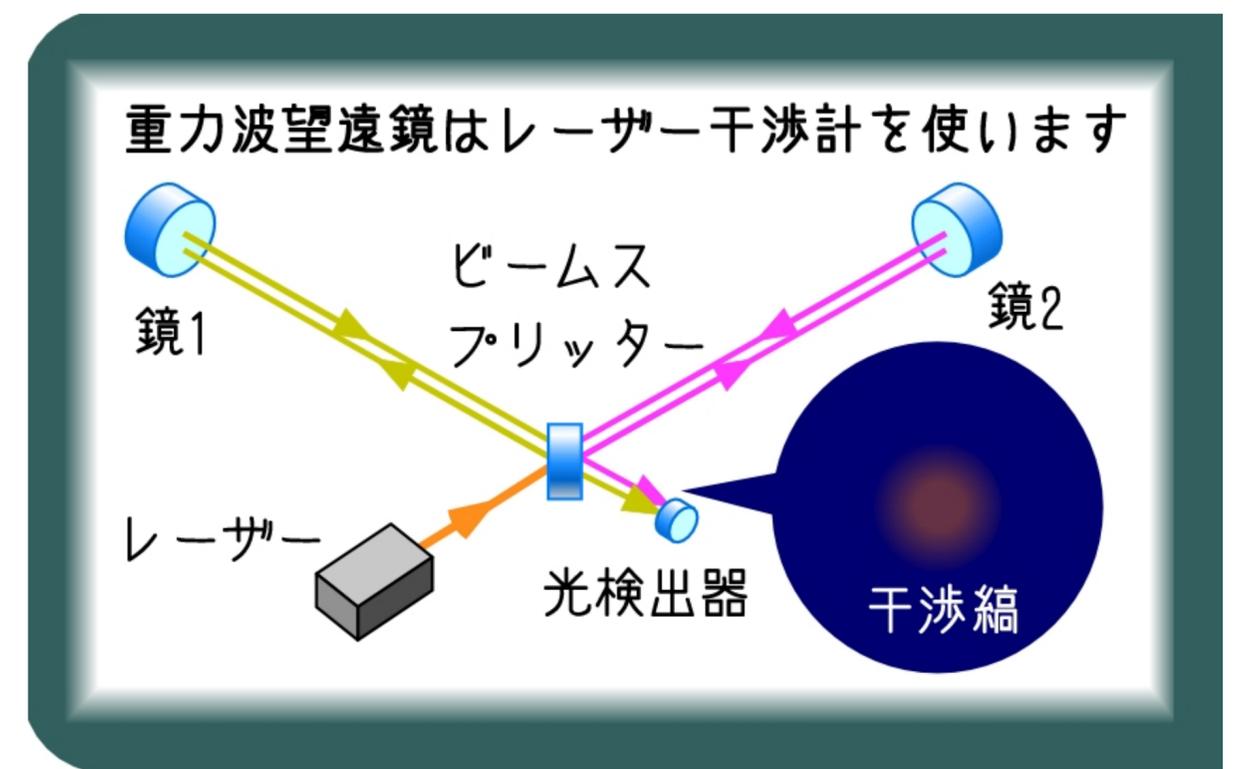
アインシュタインテンソル

エネルギー運動量テンソル

宇宙項 x 計量テンソル

重力波の検出

- 重力波レーザー干渉計: 重力波通過に伴う微妙な「長さ」の変化を検出する
- 2つのレーザー光を別方向に分割し、鏡に反射して戻ってきた光を干渉させる
- ある方向と別の方向の光路差を比べることに対応
- 長さが変わると干渉縞が変わる



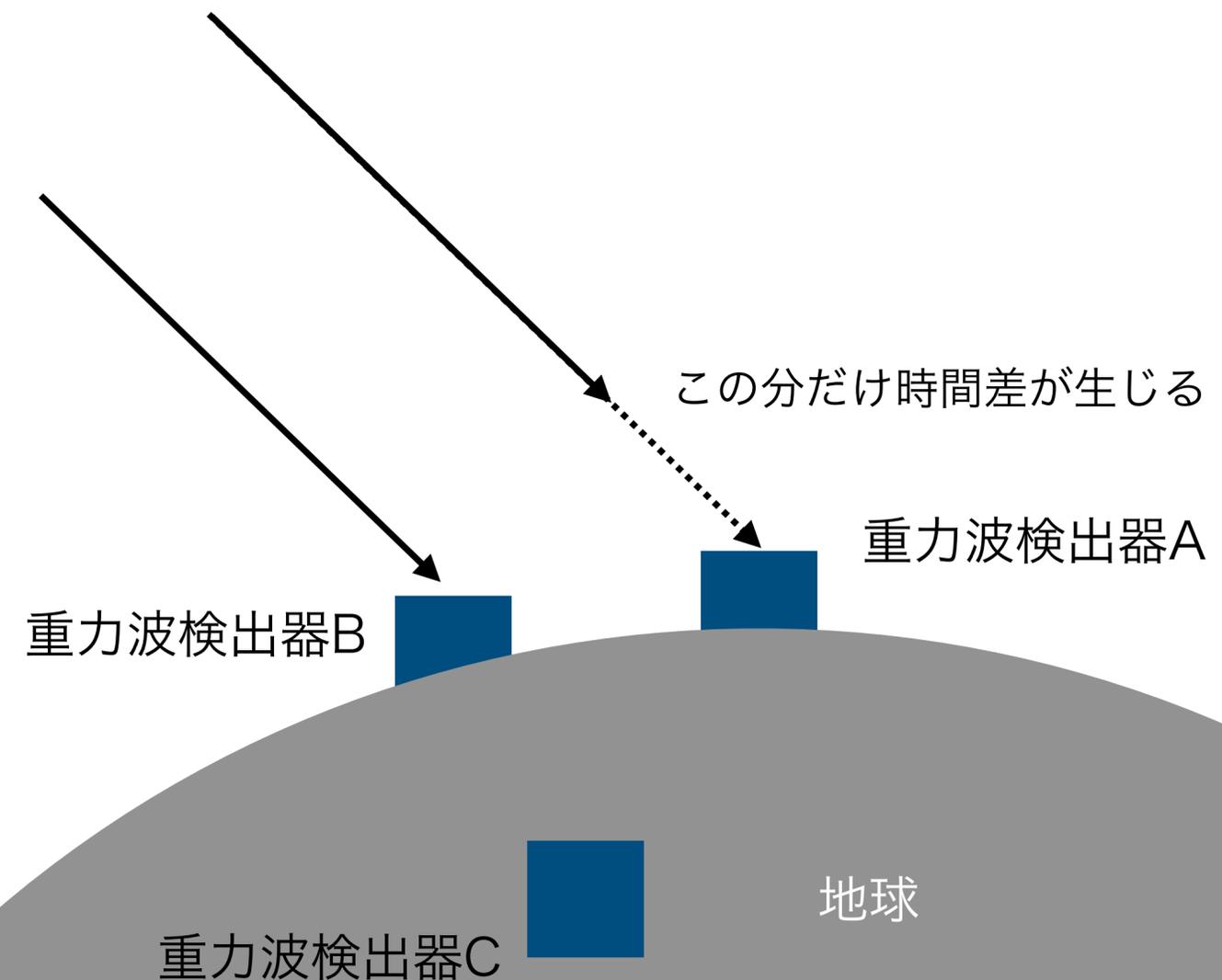
レーザー干渉計による重力波検出の原理

credit: Kagra, 東京大学宇宙線研究所

<https://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/plan/aboutu-gw/interferometer>

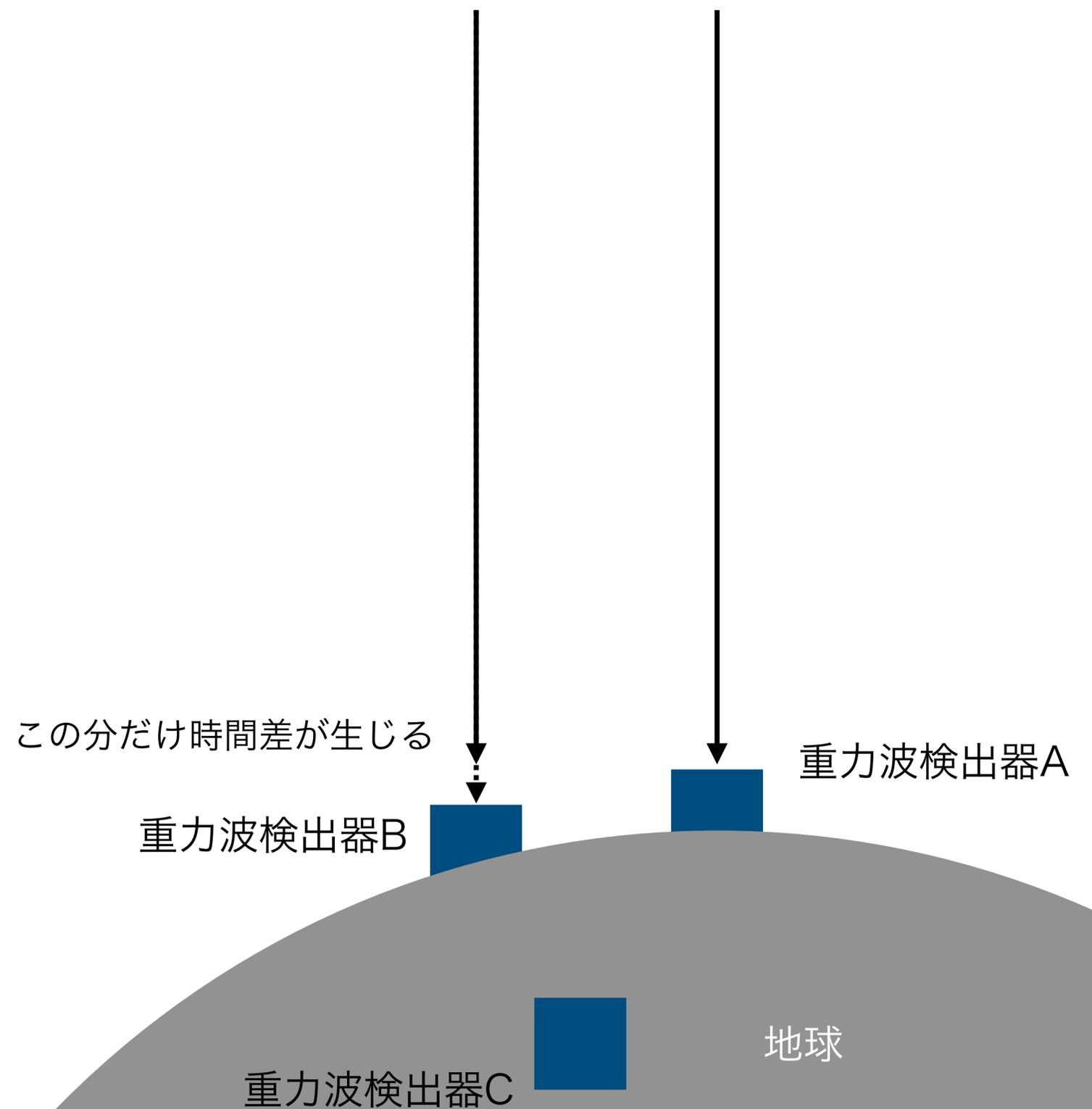
重力波の検出

- 検出は大変
- 加えて、重力波源の特定には地球上の複数箇所での検出が必要
- 原理は三角測量
- 重力波が検出された時に、その到来時刻の差を利用して空のどこから来た信号なのかを推測する(重力波は光速 c で伝搬する)



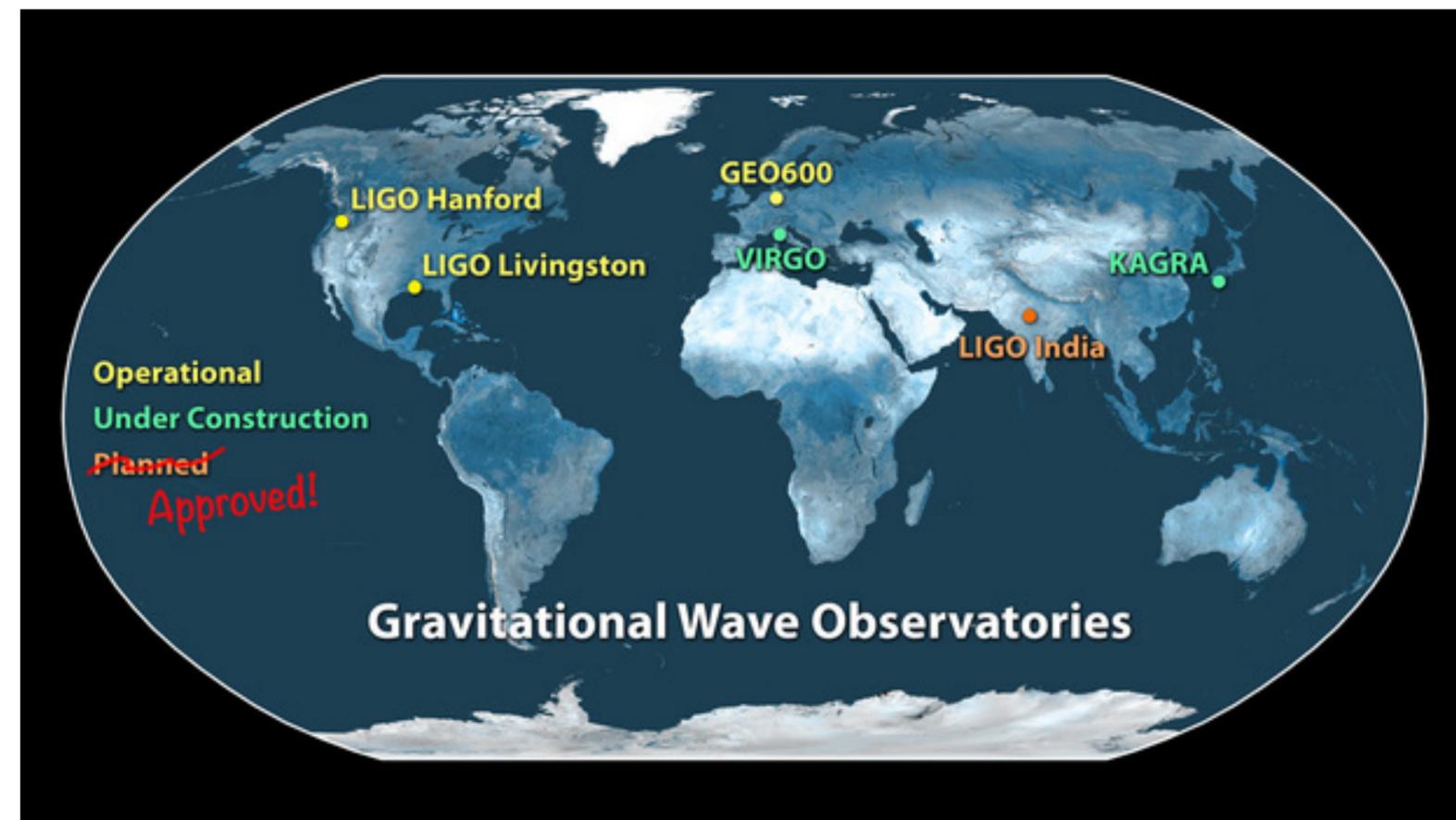
重力波の検出

- 検出は大変
- 加えて、重力波源の特定には地球上の複数箇所での検出が必要
- 原理は三角測量
- 重力波が検出された時に、その到来時刻の差を利用して空のどこから来た信号なのかを推測する(重力波は光速 c で伝搬する)



重力波の検出

- LIGO: アメリカ合衆国の重力波検出器, LIGO Hanford(ワシントン州)と LIGO Livingston(ルイジアナ州)
- Virgo: ヨーロッパの重力波検出器
- KAGRA: 日本の神岡鉱山(岐阜県)にある重力波検出器



世界の重力波検出装置

credit: LIGO Laboratory, Caltech, MIT

<https://www.ligo.caltech.edu/news/ligo20160217>

重力波の検出



- LIGO: アメリカ合衆国の重力波検出器, LIGO Hanford(ワシントン州)と LIGO Livingston(ルイジアナ州)
- Virgo: ヨーロッパの重力波検出器
- KAGRA: 日本の神岡鉱山(岐阜県)にある重力波検出器



日本にある重力波レーザー干渉計KAGRA
credit: 東京大学宇宙線研究所 重力波観測研究施設
<https://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/kagra-gallery>

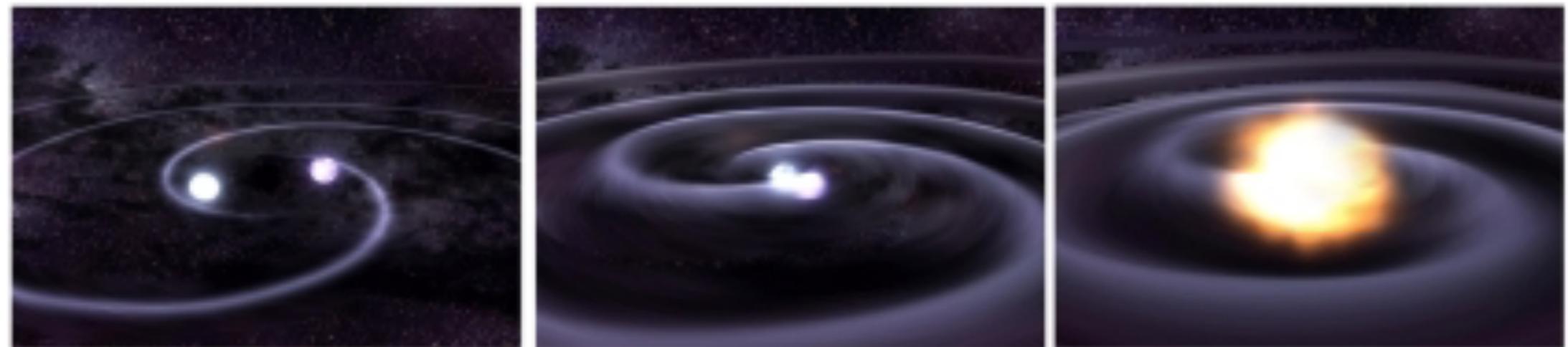
天体からの重力波

- コンパクト天体連星からの定常重力波
- コンパクト天体連星合体: BH-BH, NS-NS, BH-NS
- 大質量星の重力崩壊(超新星爆発)
- 初期宇宙起源

コンパクト天体連星合体の模式図

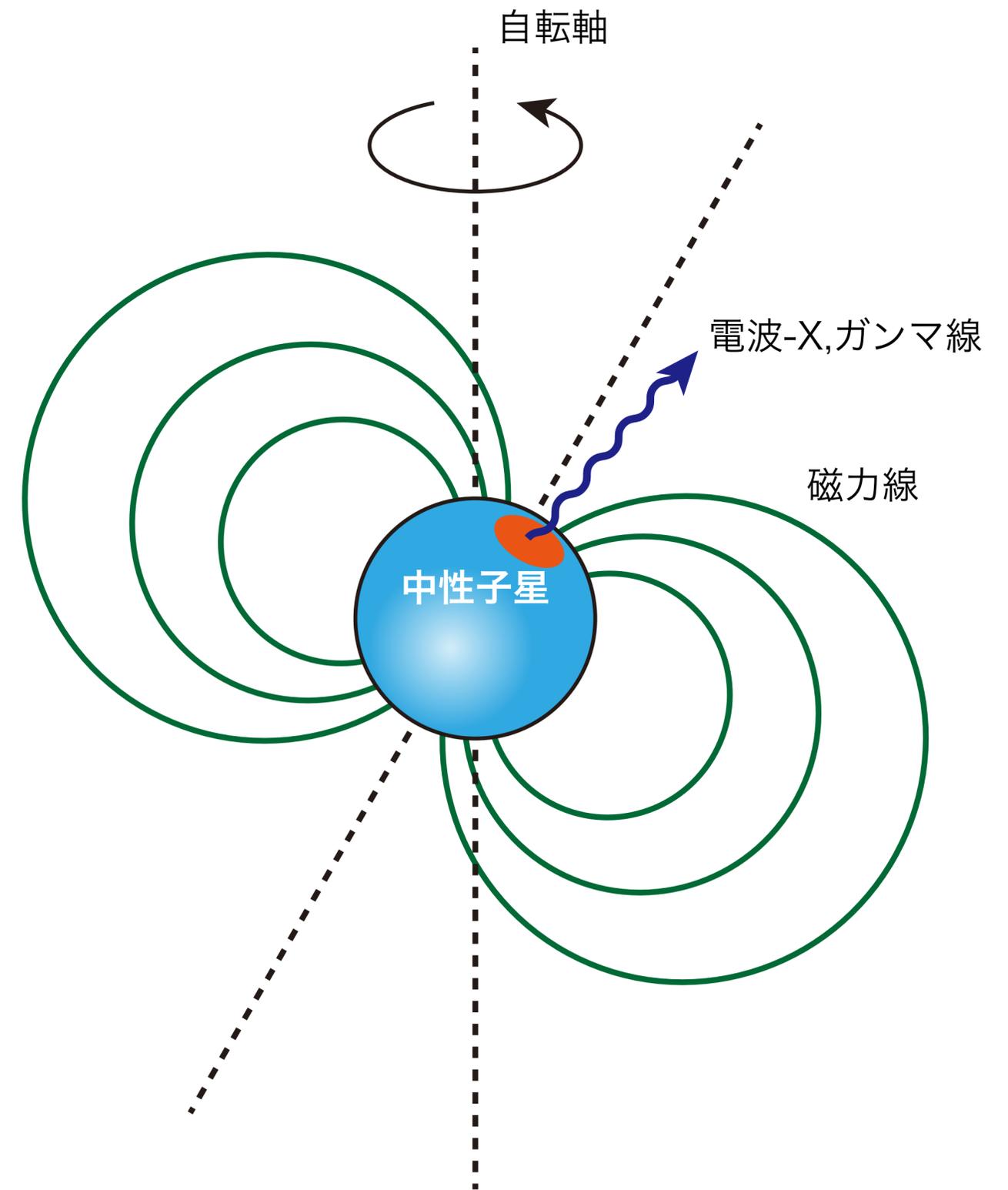
credit: NASA/CXC/GSFC/T.Strohmayer

<https://www.ligo.org/science/GW-Inspiral.php>



中性子星とは

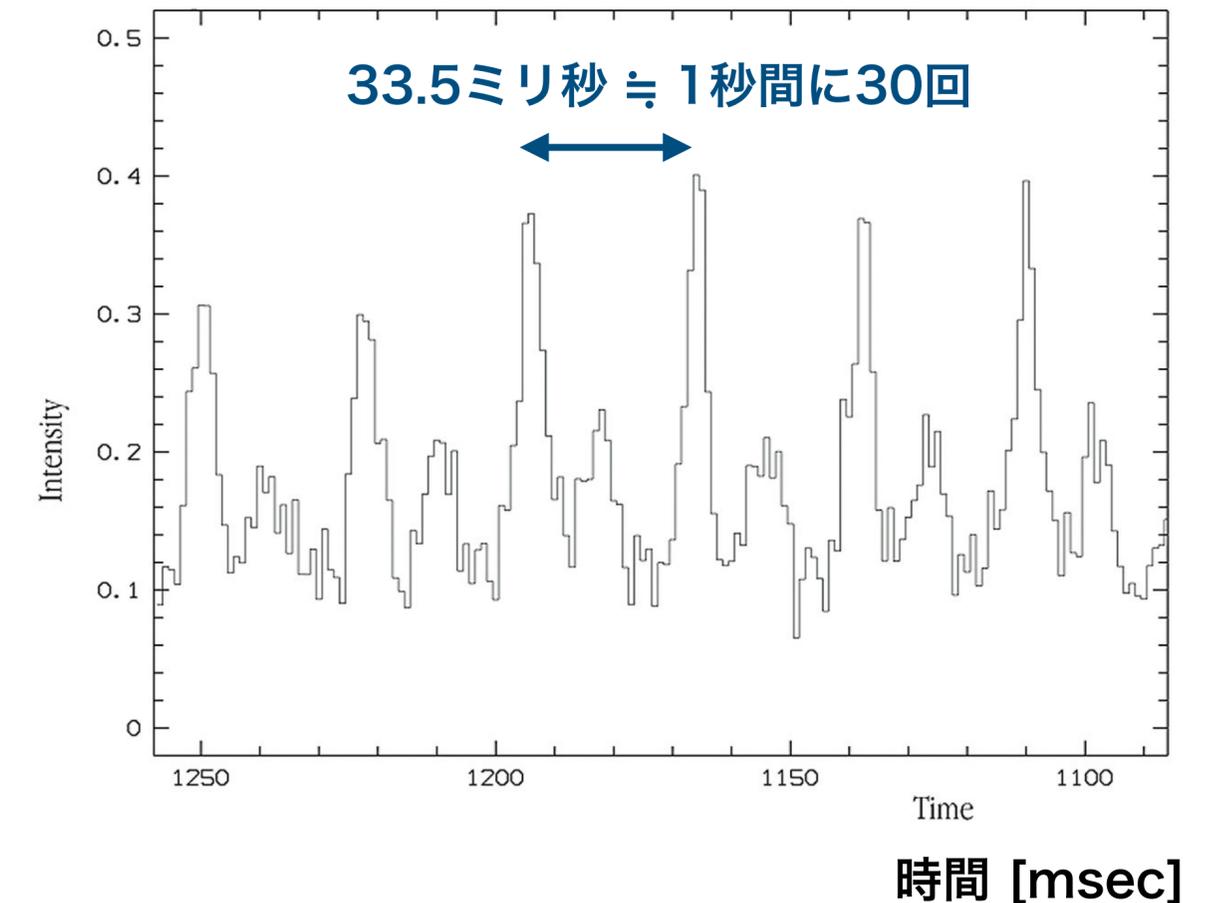
- 半径 約10kmに1-2M \odot 程度の質量が詰め込まれた天体
- 通常の星のように核融合は行なっておらず、中性子の核力(反発力)で重力に対抗し、星として存在している
- 速い自転: 10^{-3} -数10 [s]
- 強力な磁場: 10^7 - 10^{11} [T]



中性子星とは

- 半径 約10kmに1-2M \odot 程度の質量が詰め込まれた天体
- 通常の星のように核融合は行なっておらず、中性子の核力(反発力)で重力に対抗し、星として存在している
- 速い自転: 10^{-3} -数10 [s]
- 強力な磁場: 10^7 - 10^{11} [T]

電波の強さ



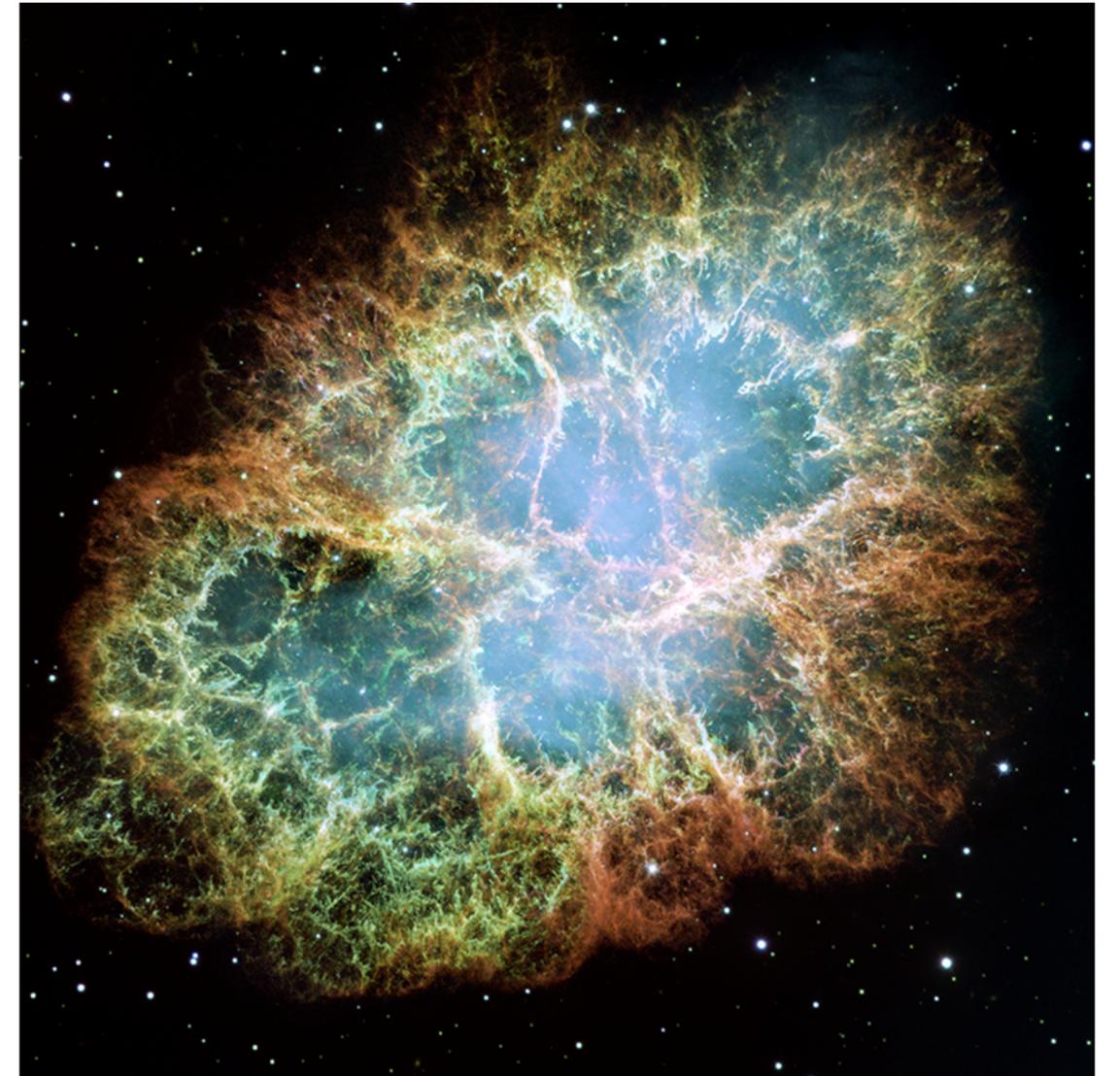
パルサーの光度曲線の例(かにパルサー)

credit: ESO

<https://www.eso.org/public/images/eso9948i/>

中性子星とは

- 半径 約10kmに1-2M \odot 程度の質量が詰め込まれた天体
- 通常の星のように核融合は行なっておらず、中性子の核力(反発力)で重力に対抗し、星として存在している
- 速い自転: 10^{-3} -数10 [s]
- 強力な磁場: 10^7 - 10^{11} [T]

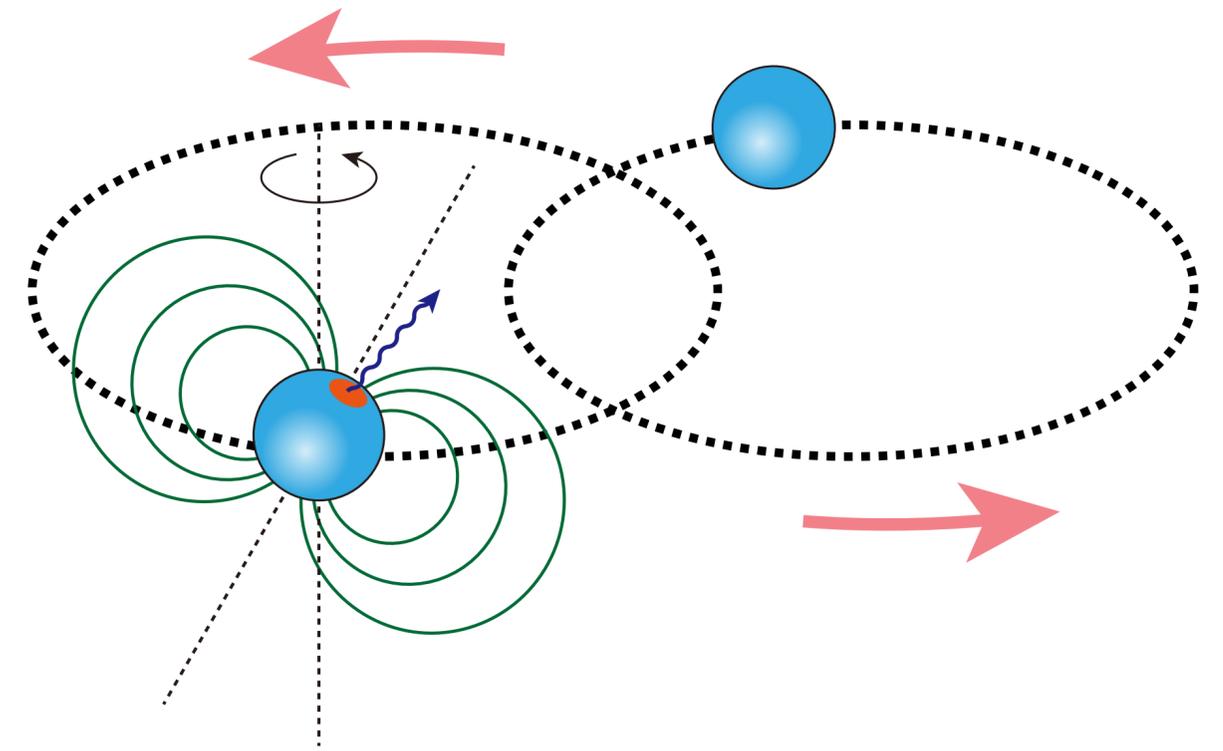


かに星雲のハッブル宇宙望遠鏡での観測画像

credit: NASA, ESA, and the Hubble Heritage Team (STScI/AURA)

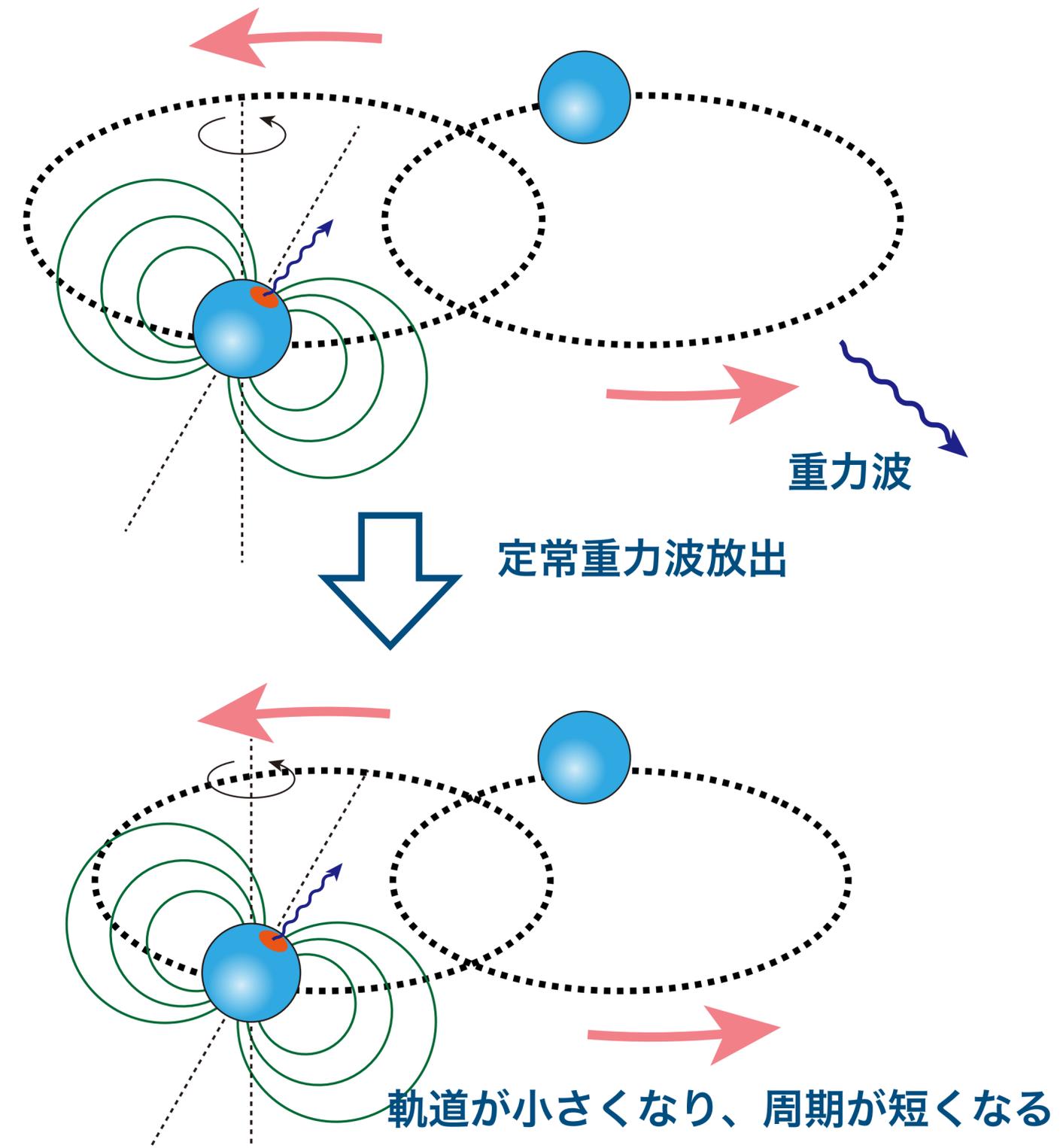
連星パルサーからの(間接的)重力波検出

- **パルサー(pulsar)**: 自転する中性子星からの規則的な電磁波放射
- Hulse-Taylor連星(1975発見): パルサー(PSR B1913+16)と中性子星の連星(お互いの周りを回っている)
- PSR B1913+16: 約59秒の自転周期+7.75時間の公転周期
- どうやら重力波は**実在する**



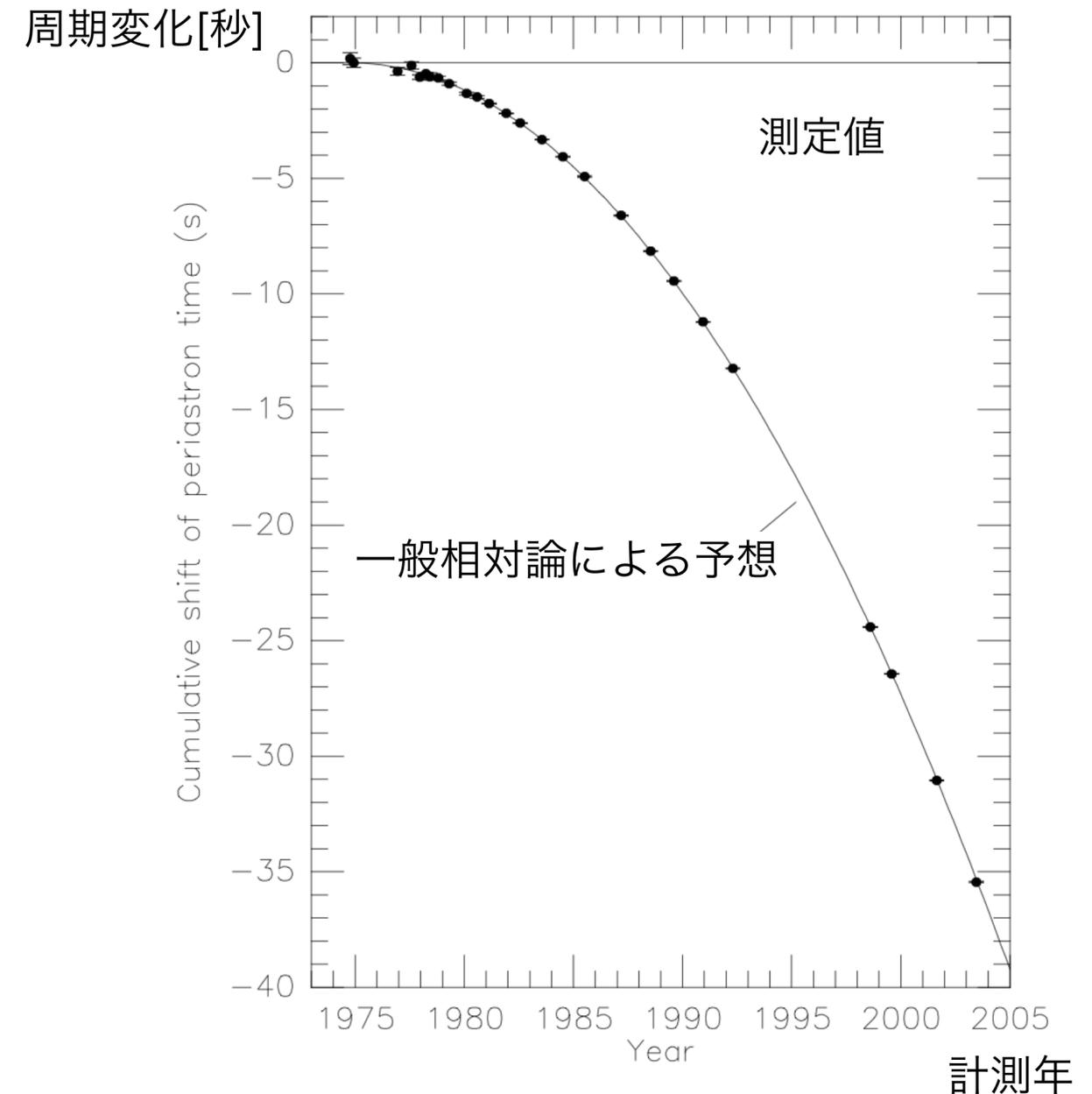
連星パルサーからの(間接的)重力波検出

- **パルサー(pulsar)**: 自転する中性子星からの規則的な電磁波放射
- Hulse-Taylor連星(1975発見): パルサー(PSR B1913+16)と中性子星の連星(お互いの周りを回っている)
- PSR B1913+16: 約59秒の自転周期+7.75時間の公転周期
- どうやら重力波は**実在する**



連星パルサーからの(間接的)重力波検出

- **パルサー(pulsar)**: 自転する中性子星からの規則的な電磁波放射
- Hulse-Taylor連星(1975発見): パルサー(PSR B1913+16)と中性子星の連星(お互いの周りを回っている)
- PSR B1913+16: 約59秒の自転周期+7.75時間の公転周期
- どうやら重力波は**実在**する



Hulse-Taylor連星の公転周期の時間変化

credit: Weisberg&Taylor(2005) ASP Conference Series, Vol. 328

連星パルサーからの(間接的)重力波検出

- **パルサー(pulsar)**: 自転する中性子星からの規則的な電磁波放射
- Hulse-Taylor連星(1975発見): パルサー(PSR B1913+16)と中性子星の連星(お互いの周りを回っている)
- PSR B1913+16: 約59秒の自転周期+7.75時間の公転周期
- どうやら重力波は**実在**する



Hulse氏とTaylor氏. 1993年ノーベル物理学賞受賞.
credit: Nobel foundation archive
<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1993/summary/>

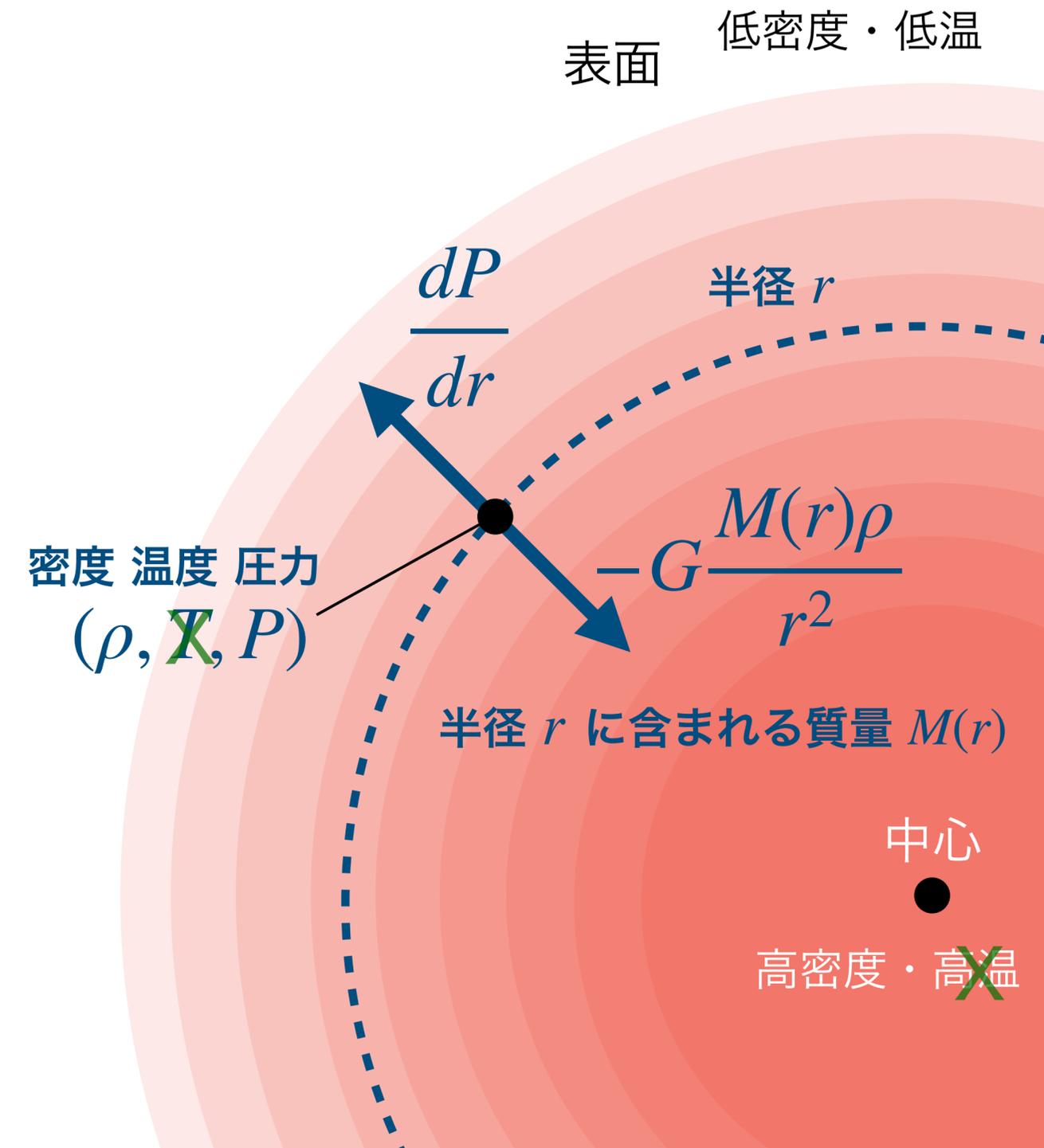
第13回:

重力波天文学と 中性子星・ブラックホール

- 重力波とその検出
- **ブラックホールと重力波**
- 中性子星-中性子星連星合体からの重力波

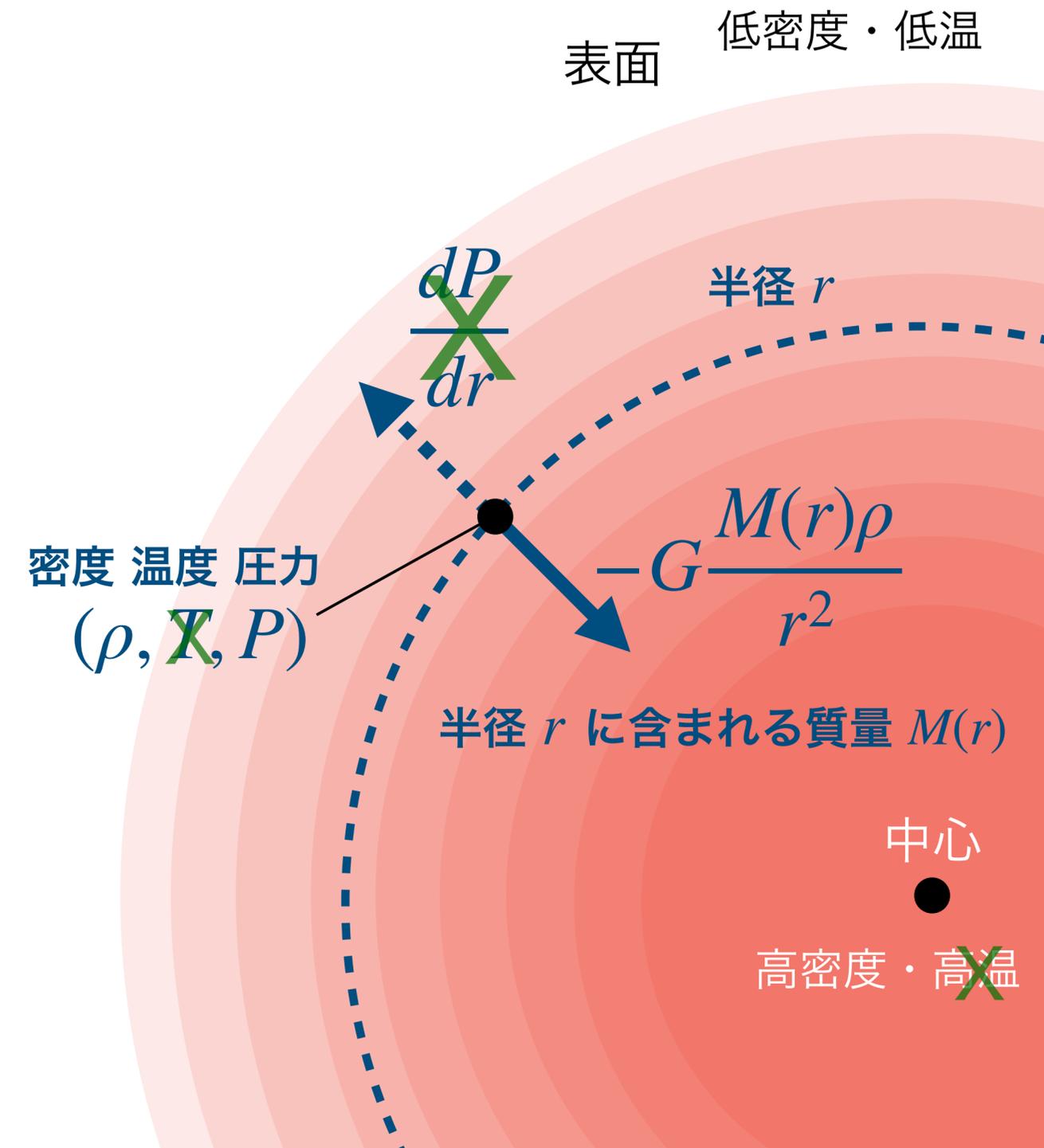
一般相対性理論とブラックホール

- 中性子星は高密度だが、核子の反発力が星を支えることで存在していた
- $3M_{\odot}$ くらいが核力で支えられる限界だと思われている
- それ以上の質量を持ったコンパクトな星はあるのか？
- それ以上は潰れる(例えば $10M_{\odot}$ が1点に集中しようとする)



一般相対性理論とブラックホール

- 中性子星は高密度だが、核子の反発力が星を支えることで存在していた
- $3M_{\odot}$ くらいが核力で支えられる限界だと思われている
- それ以上の質量を持ったコンパクトな星はあるのか？
- それ以上は潰れる(例えば $10M_{\odot}$ が1点に集中しようとする)



ブラックホールとは

- 強力な重力によって、いかなる物質や光さえもその重力を脱出できない時空の特異点
- 脱出速度: $v_{\text{esc}} = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$
- **シュバルツシルト半径(Schwarzschild radius)** $r_g = 2GM/c^2$: この半径内だと光であっても重力を振り切って脱出できない(脱出速度=c)
- 例えば、 $M=1M_{\odot}$ に対して、 $r_g=3\text{km}$

$$E = \frac{1}{2}mv^2 - G\frac{Mm}{r}$$

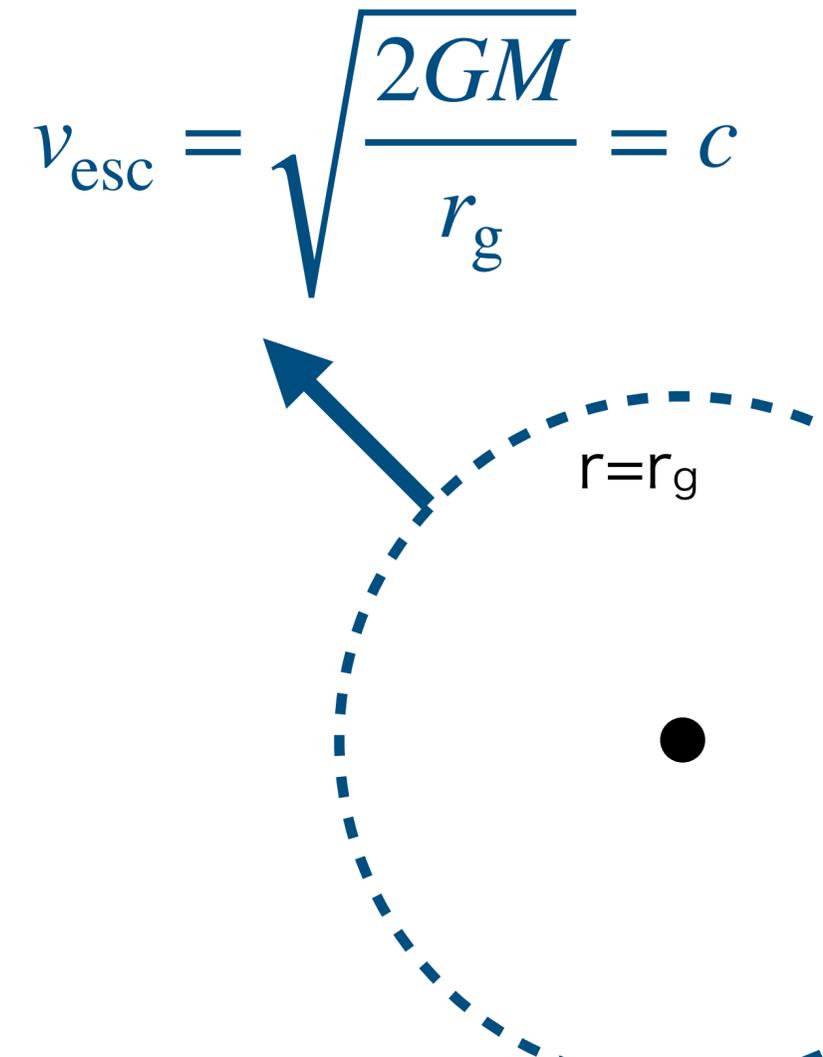
$$v_{\text{esc}} = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$

表面

中心

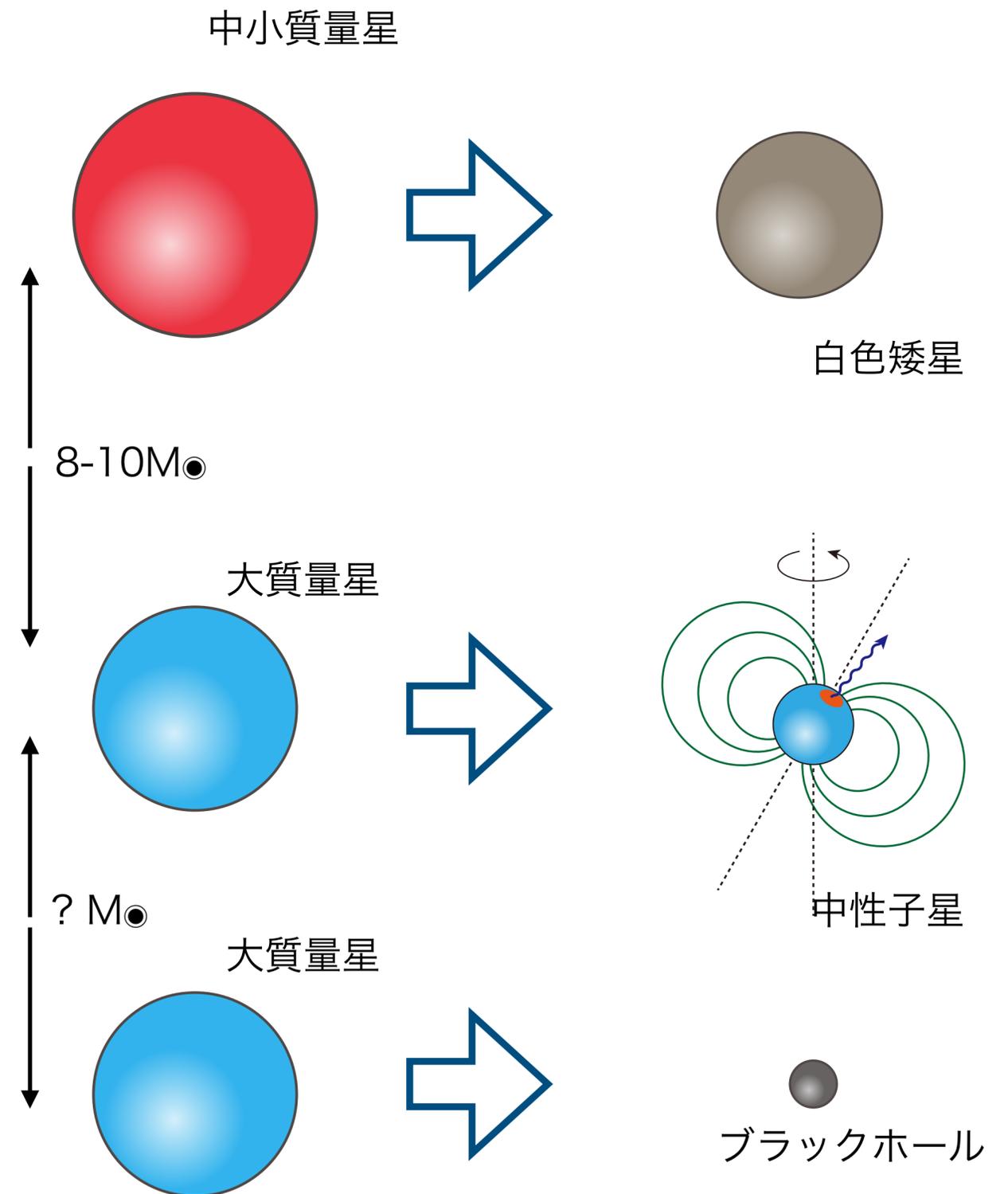
ブラックホールとは

- 強力な重力によって、いかなる物質や光さえもその重力を脱出できない時空の特異点
- 脱出速度: $v_{\text{esc}} = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$
- **シュバルツシルト半径(Schwarzschild radius)** $r_g = 2GM/c^2$: この半径内だと光であっても重力を振り切って脱出できない(脱出速度=c)
- 例えば、 $M=1M_{\odot}$ に対して、 $r_g=3\text{km}$



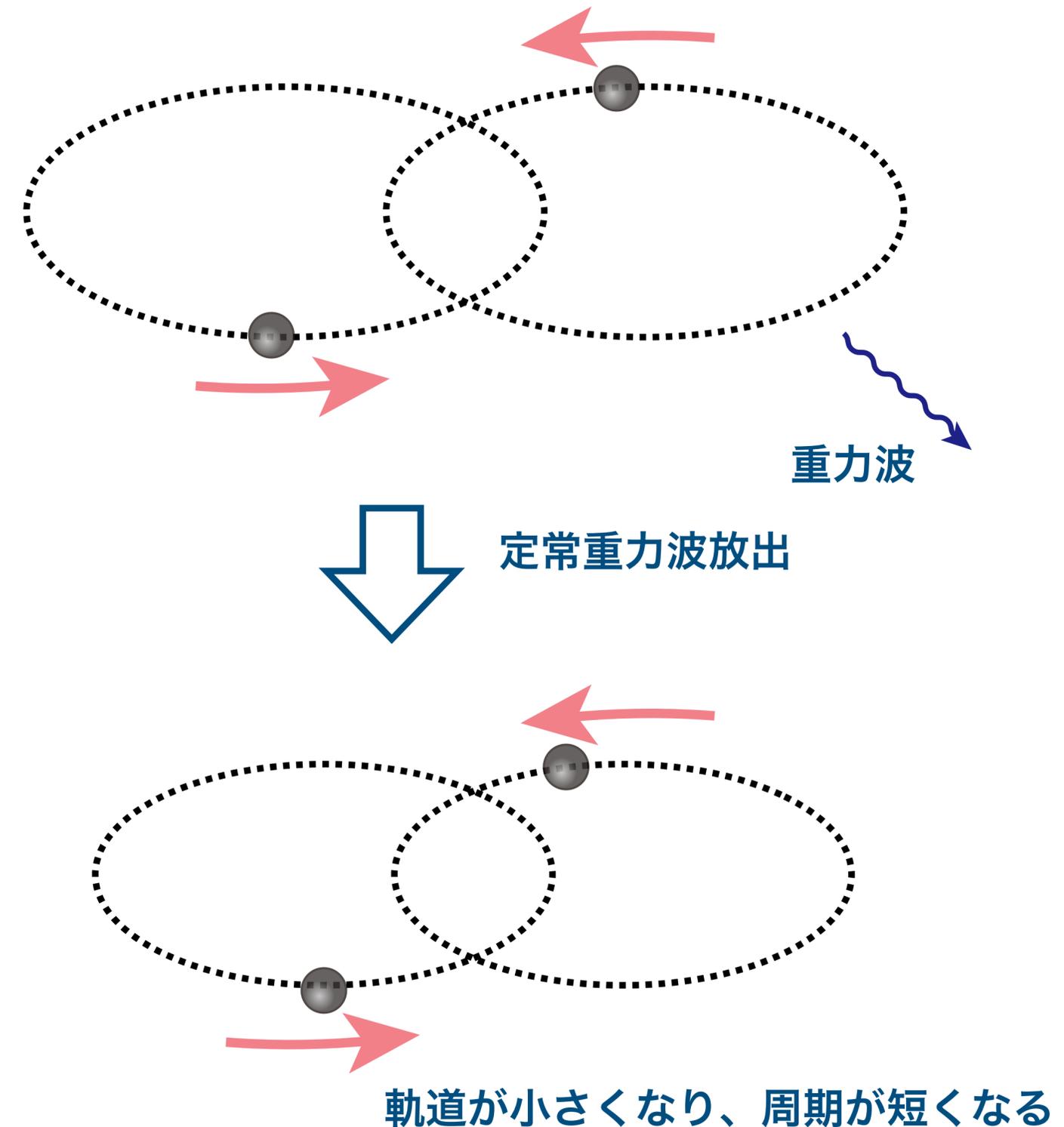
ブラックホールの形成

- 恒星質量ブラックホールは、中性子星と同じく大質量星の重力崩壊によって形成されると考えられる
- おそらくより重い星がブラックホールに崩壊すると考えられているが、中性子星形成とブラックホール形成の境目はまだよく分かっていない



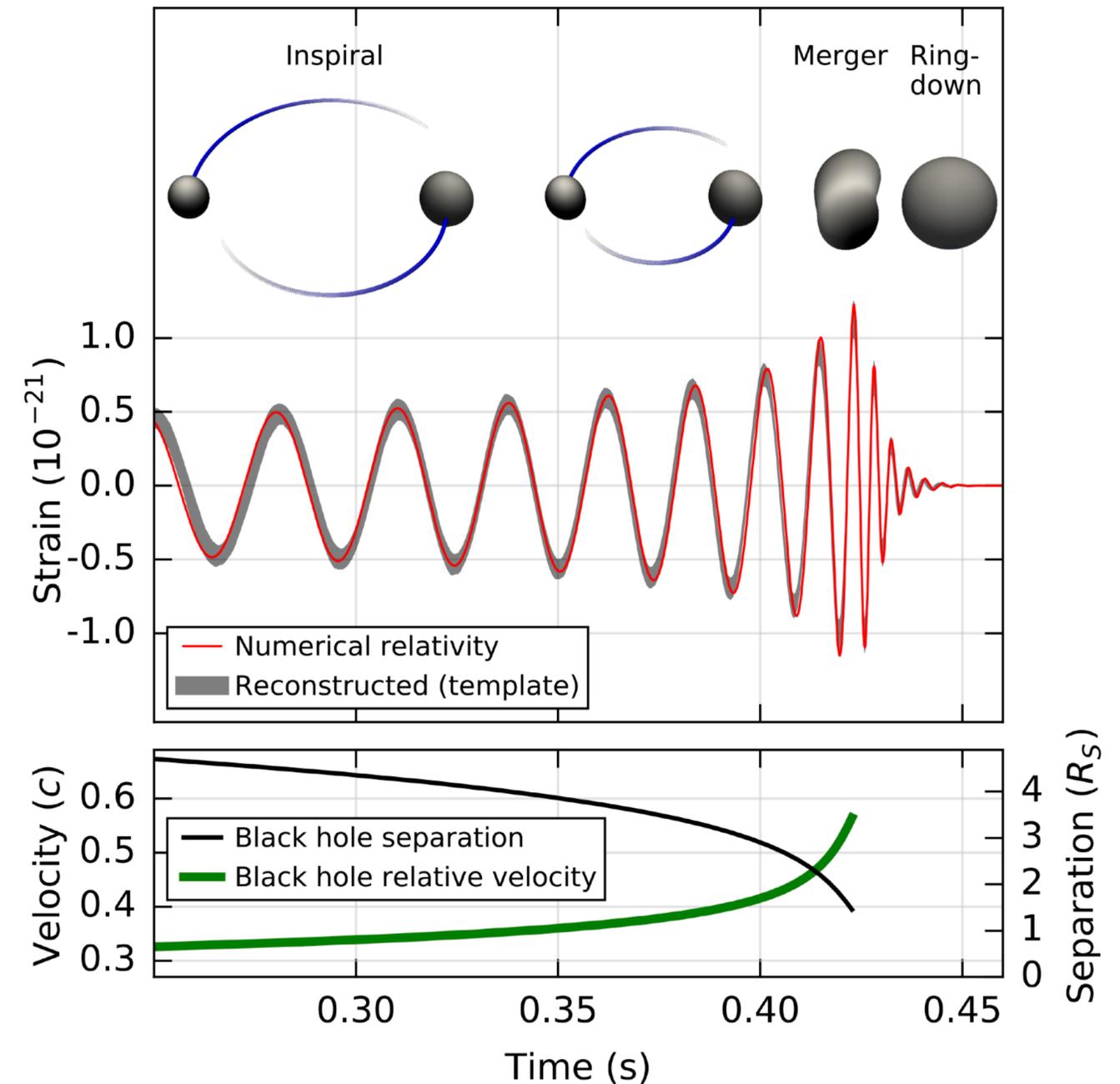
ブラックホール連星合体

- 大質量星同士の連星からは、ブラックホールとブラックホールの連星が形成されると考えられる
- ブラックホールとブラックホールの連星も定常的に重力波を放出し、次第に連星間距離を縮めていき、宇宙年齢以内に合体することもある
- 重力波の放射源になり得る



ブラックホール連星合体

- ブラックホール連星合体は強力な重力波放射源
- 昔から、合体に伴う重力波の「波形」が計算されてきた
- アインシュタイン方程式を数值的に解く「**数値相対論(numerical relativity)**」



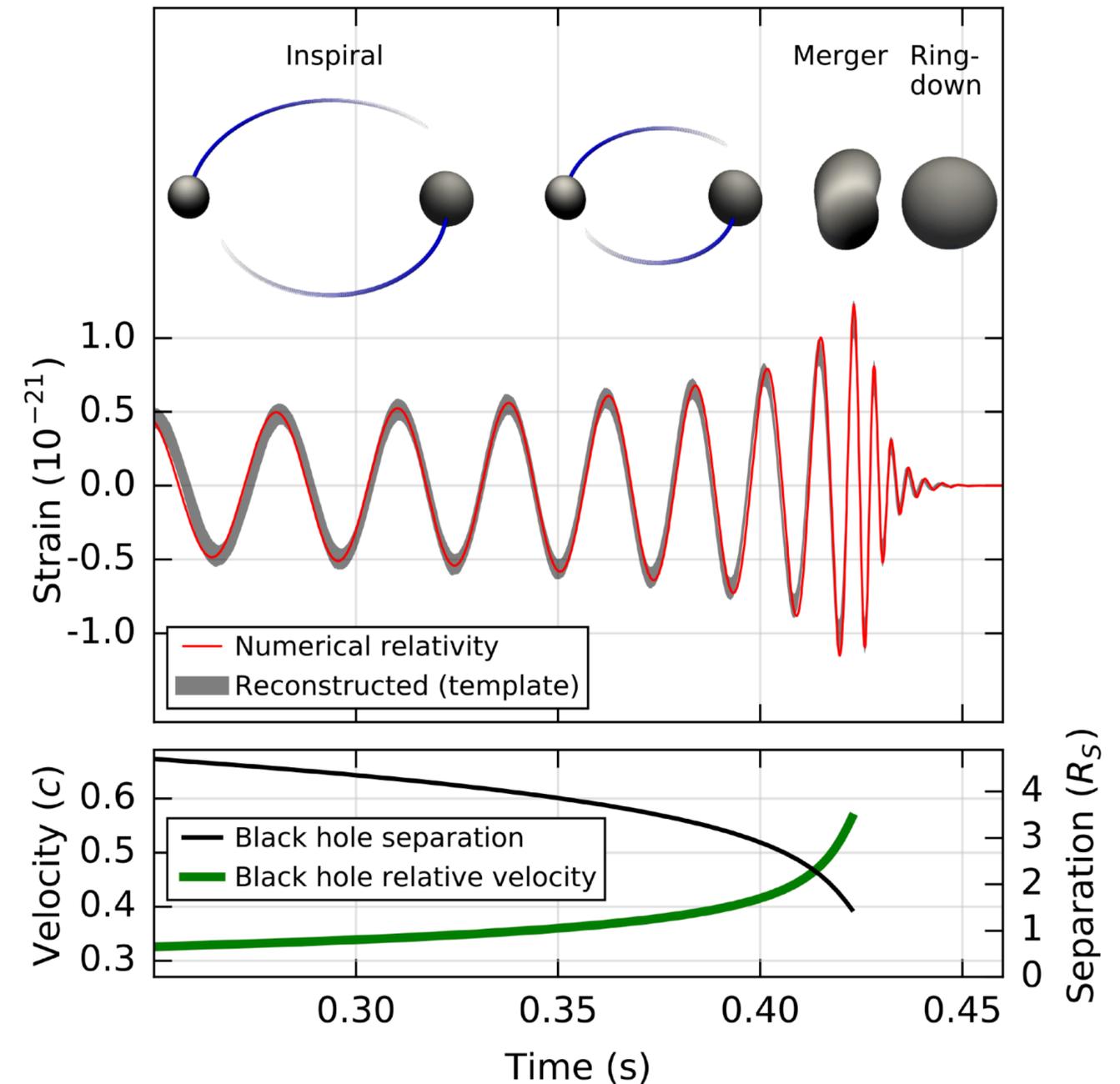
BH-BH連星合体からの重力波波形

credit: LIGO scientific collaboration

<https://www.ligo.org/science/Publication-GW150914/>

ブラックホール連星合体

- 2つのブラックホールがお互いの周りを回るInspirational段階
- 2つのブラックホールが合体するmerger段階
- 合体した1つのブラックホールが定常に落ち着いていくRing-down段階



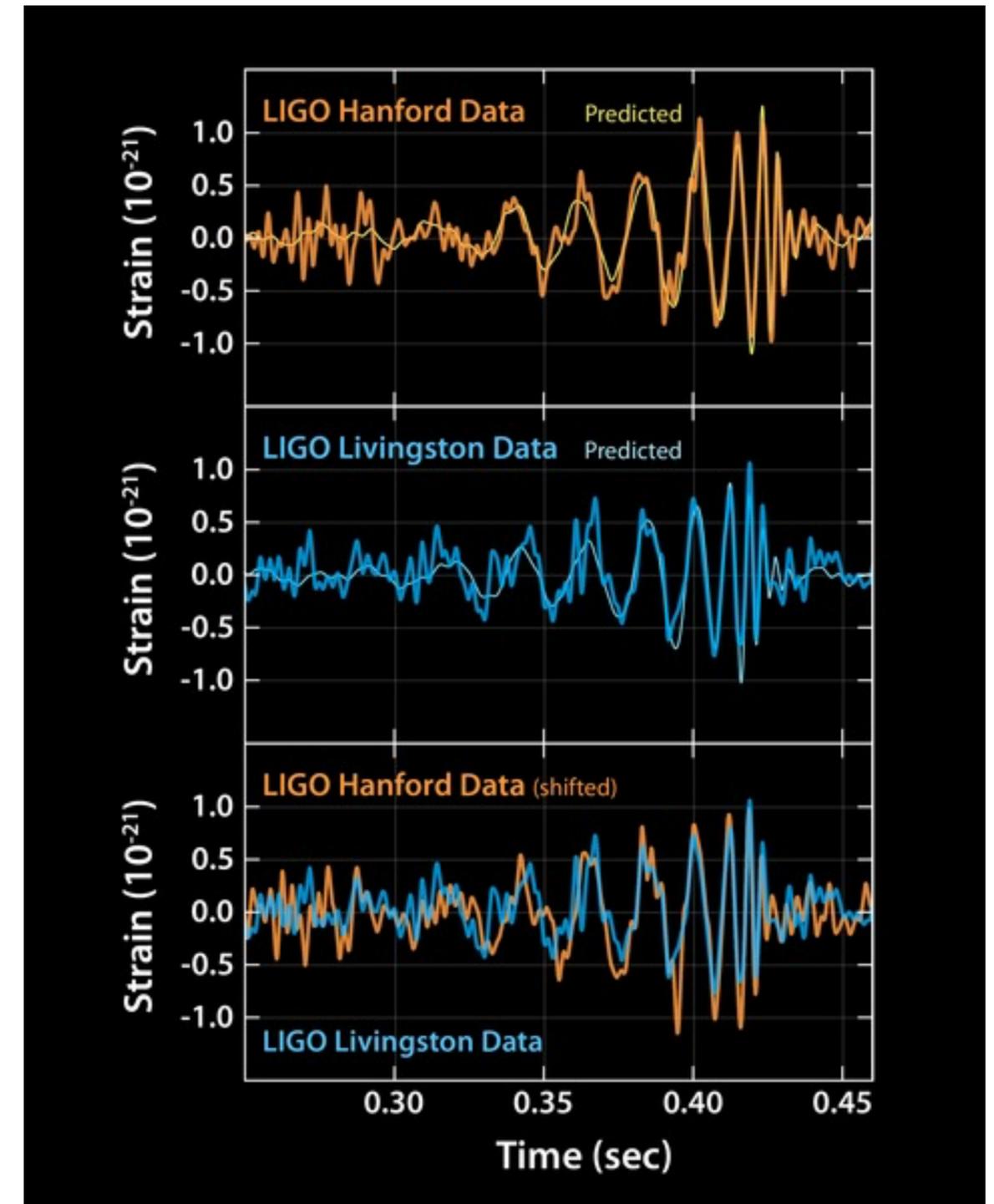
BH-BH連星合体からの重力波波形

credit: LIGO scientific collaboration

<https://www.ligo.org/science/Publication-GW150914/>

GW 150914

- 2015年9月14日、アメリカ合衆国の重力波検出器LIGO
- 初の確かな重力波検出(LIGO HanfordとLIGO Livingstonの両方で確認)
- GW 150914と名付けられた
- 一般相対性理論を基にした理論的な重力波の波形とそっくりな信号を検出した



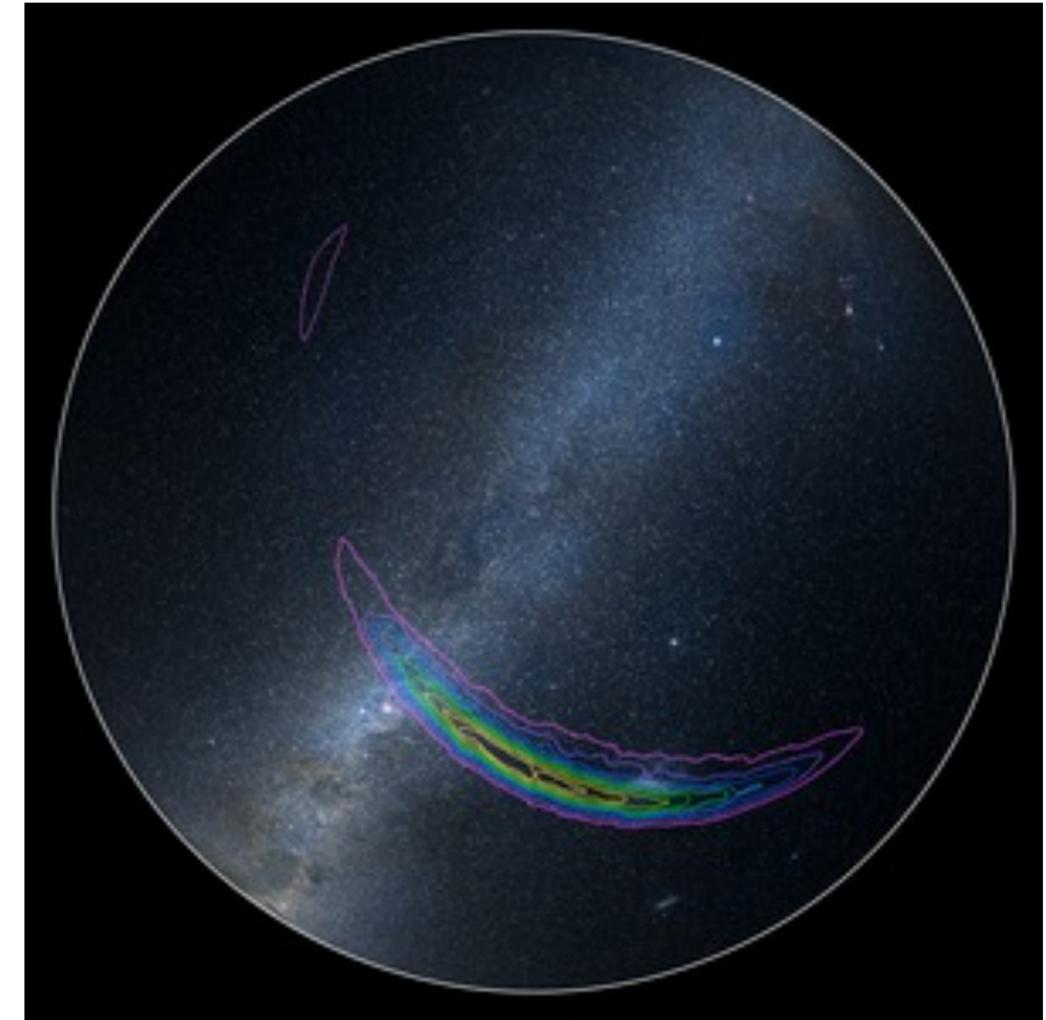
LIGOが検出したGW 150914の重力波波形

credit: LIGO scientific collaboration

<https://www.ligo.org/science/Publication-GW150914/>

GW 150914

- 2015年9月14日、アメリカ合衆国の重力波検出器LIGO
- 初の確かな重力波検出(LIGO HanfordとLIGO Livingstonの両方で確認)
- GW 150914と名付けられた
- 一般相対性理論を基にした理論的な重力波の波形とそっくりな信号を検出した



LIGOが検出したGW 150914の到来方向

credit: LIGO scientific collaboration

<https://www.ligo.org/science/Publication-GW150914/>

GW 150914

- 2015年9月14日、アメリカ合衆国の重力波検出器LIGO
- 初の確かな重力波検出(LIGO HanfordとLIGO Livingstonの両方で確認)
- GW 150914と名付けられた
- 一般相対性理論を基にした理論的な重力波の波形とそっくりな信号を検出した



LIGOによる検出報告の記者会見の様子(2016/2/11)

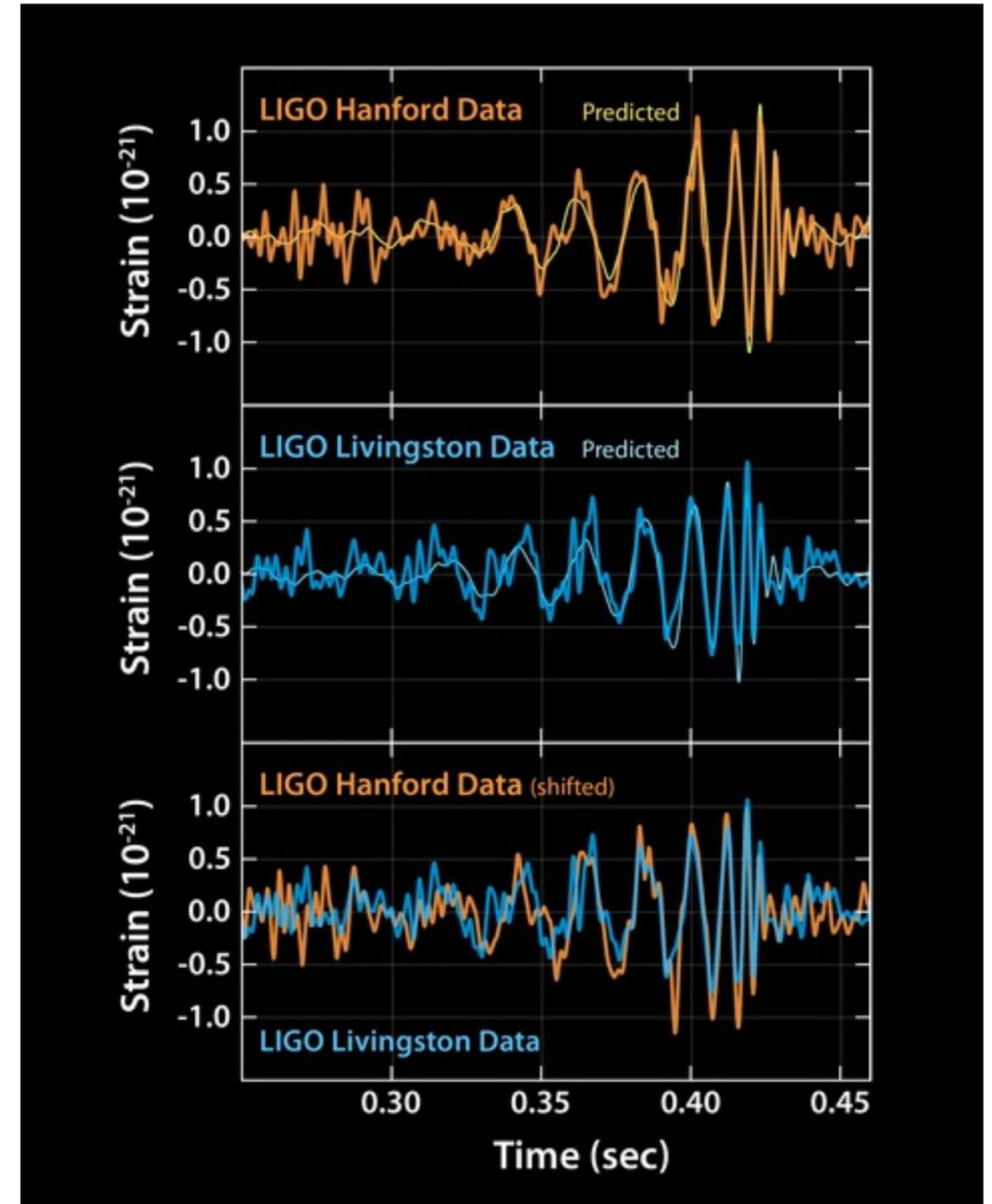
credit: Saul Loeb/Getty Images

<https://slate.com/technology/2016/02/>

[carlo-rovelli-reflects-on-the-gravitational-waves-announcement.html](https://slate.com/technology/2016/02/carlo-rovelli-reflects-on-the-gravitational-waves-announcement.html)

GW 150914

- 理論的な重力波波形との比較により以下のことが分かった
- 35M \odot BHと30M \odot BHの合体によって62M \odot BHが形成
- 差分の ~ 3 M \odot に対応するエネルギー ($mc^2 \sim 5 \times 10^{47}$ J)は重力波として放射
- 440Mpcの距離で起こった



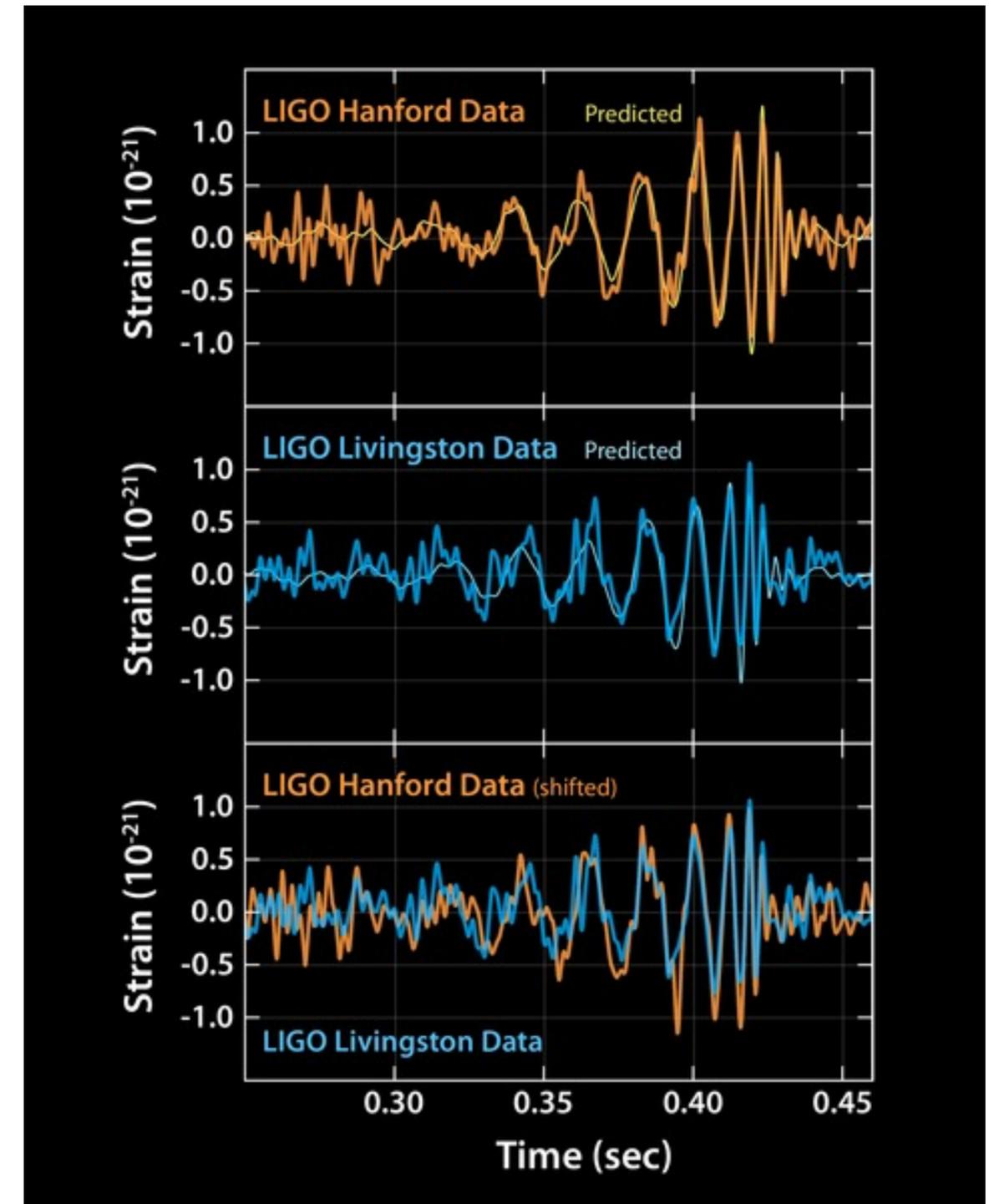
LIGOが検出したGW 150914の重力波波形

credit: LIGO scientific collaboration

<https://www.ligo.org/science/Publication-GW150914/>

GW 150914の意義

- **ブラックホール連星の存在証明**
- **重力波の直接的存在証明:** 予言から100年かかって、直接的に重力波を捉えた
- **一般相対性理論の検証:** BH連星合体からの重力波は一般相対性理論の予想と一位しており、一般相対性理論の「破れ」は見つからなかった



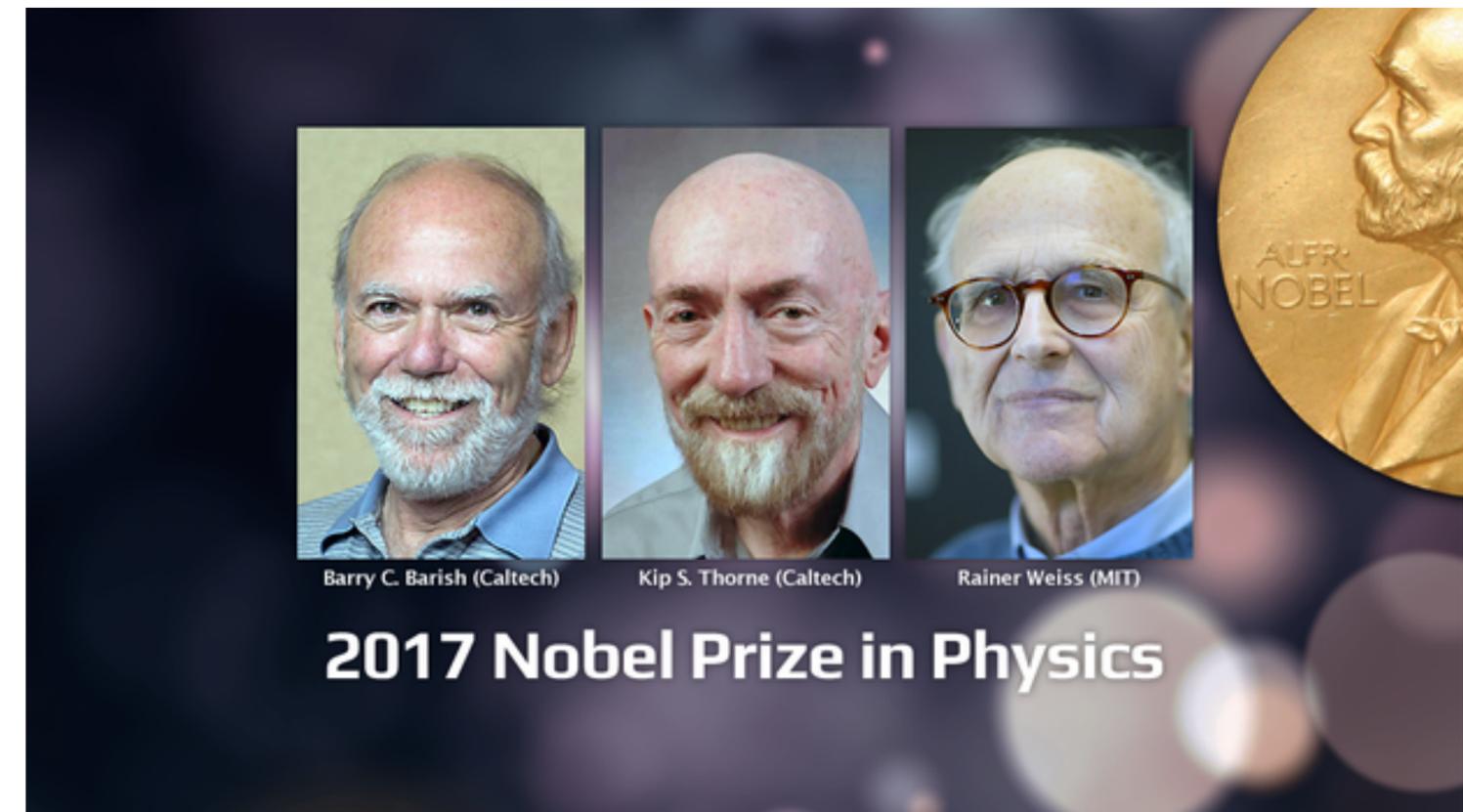
LIGOが検出したGW 150914の重力波波形

credit: LIGO scientific collaboration

<https://www.ligo.org/science/Publication-GW150914/>

GW 150914の意義

- **ブラックホール連星の存在証明**
- **重力波の直接的存在証明:** 予言から100年かかって、直接的に重力波を捉えた
- **一般相対性理論の検証:** BH連星合体からの重力波は一般相対性理論の予想と一位しており、一般相対性理論の「破れ」は見つからなかった

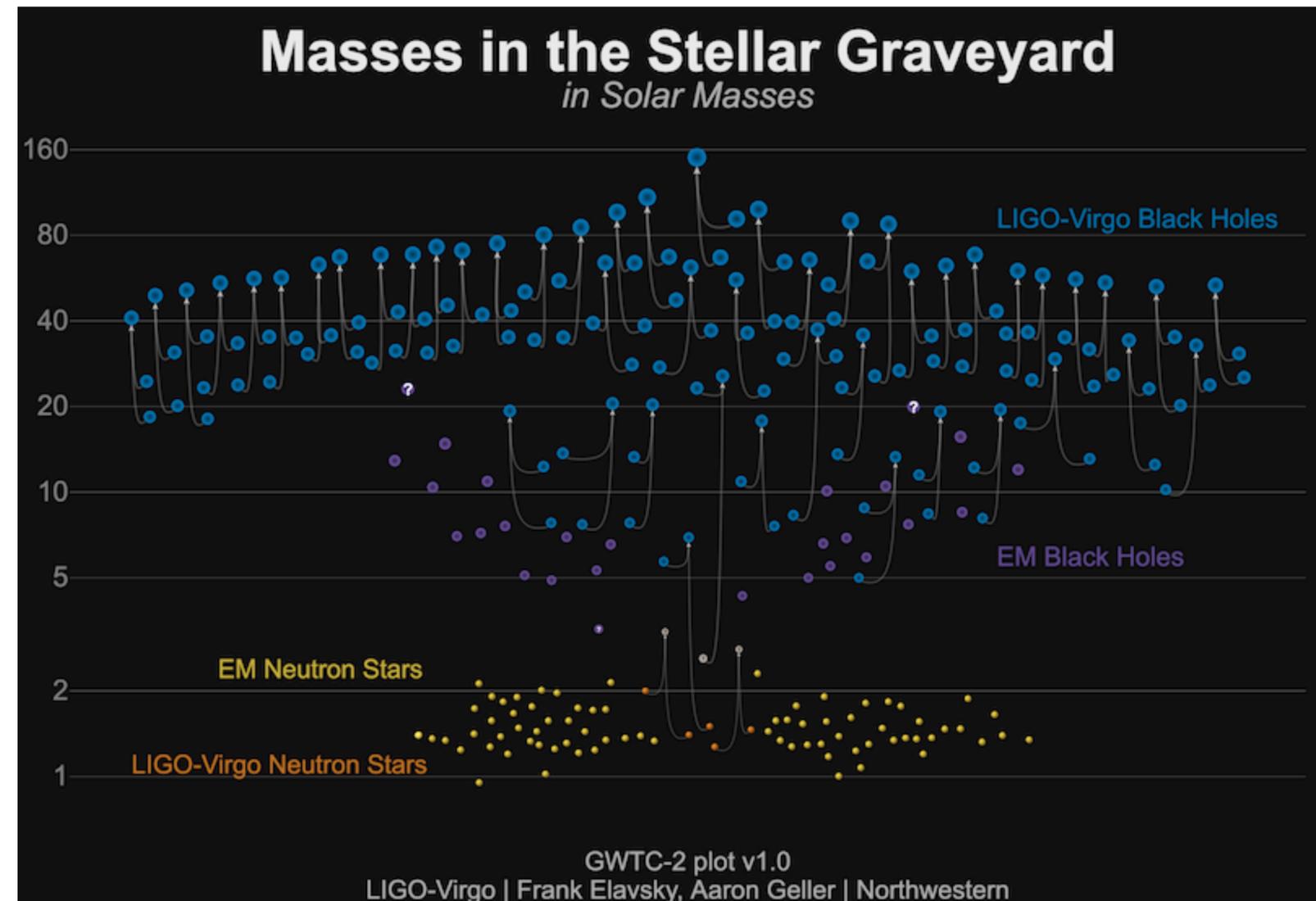


Barish氏、Thorne氏、Weiss氏. 2017年ノーベル物理学賞受賞
credit: LIGO scientific collaboration

<https://www.ligo.caltech.edu/news/ligo20171003>

現状とこれから

- 重力波天文学が幕を開けた
- LIGO-Virgo collaborationはすでに30を超えるBH-BH合体を検出
- 連星BHはどれくらいあるのか？
- 連星BHの質量分布はどうなっているのか？
- 連星BHを作るための経路は？



LIGO-Virgoが検出した重力波天体
credit: LIGO/Virgo/Northwestern Univ./Frank Elavsky
<https://www.ligo.org/detections/O3acatalog.php>

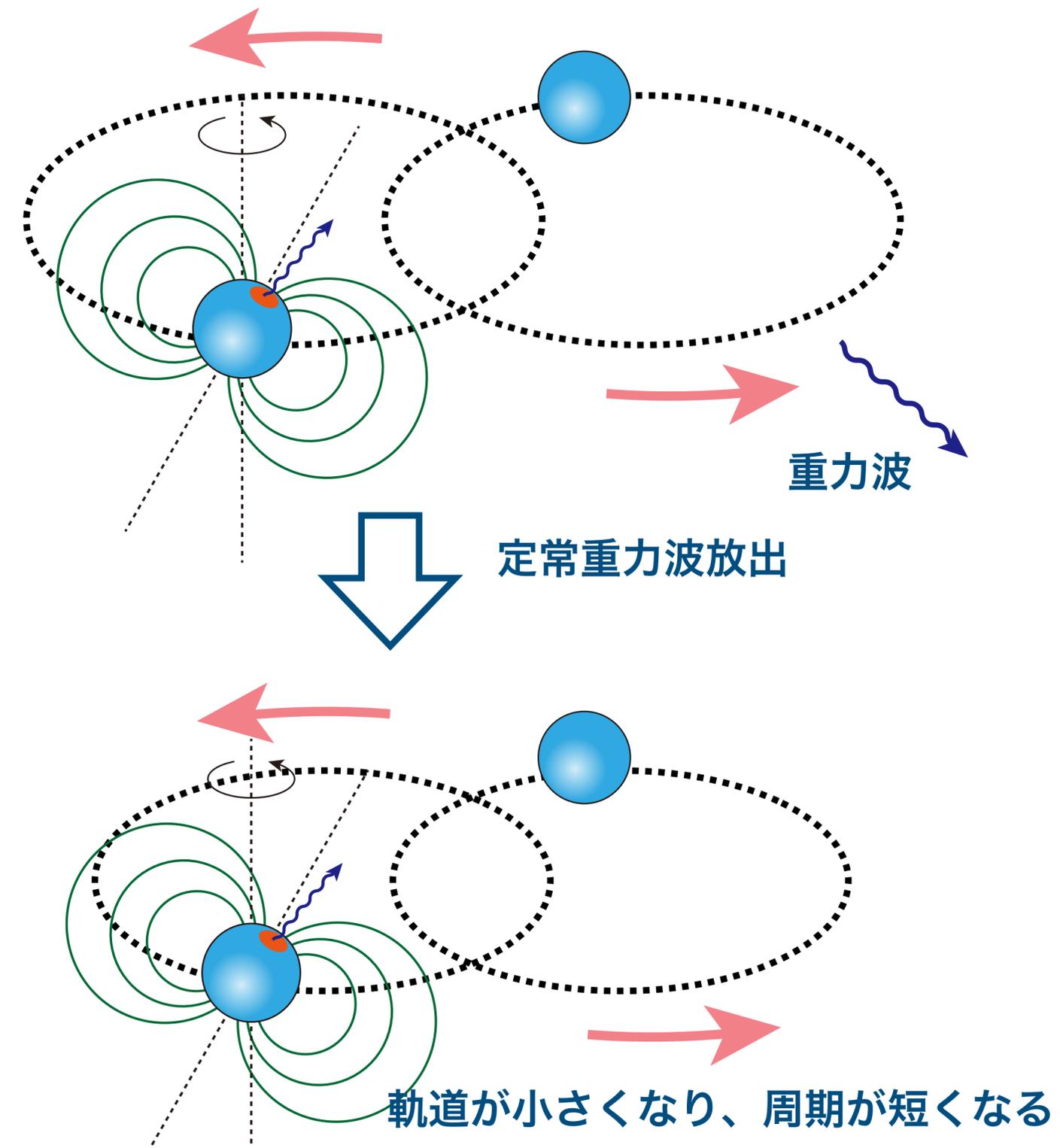
第13回:

重力波天文学と 中性子星・ブラックホール

- 重力波とその検出
- ブラックホールと重力波
- **中性子星-中性子星連星合体からの重力波**

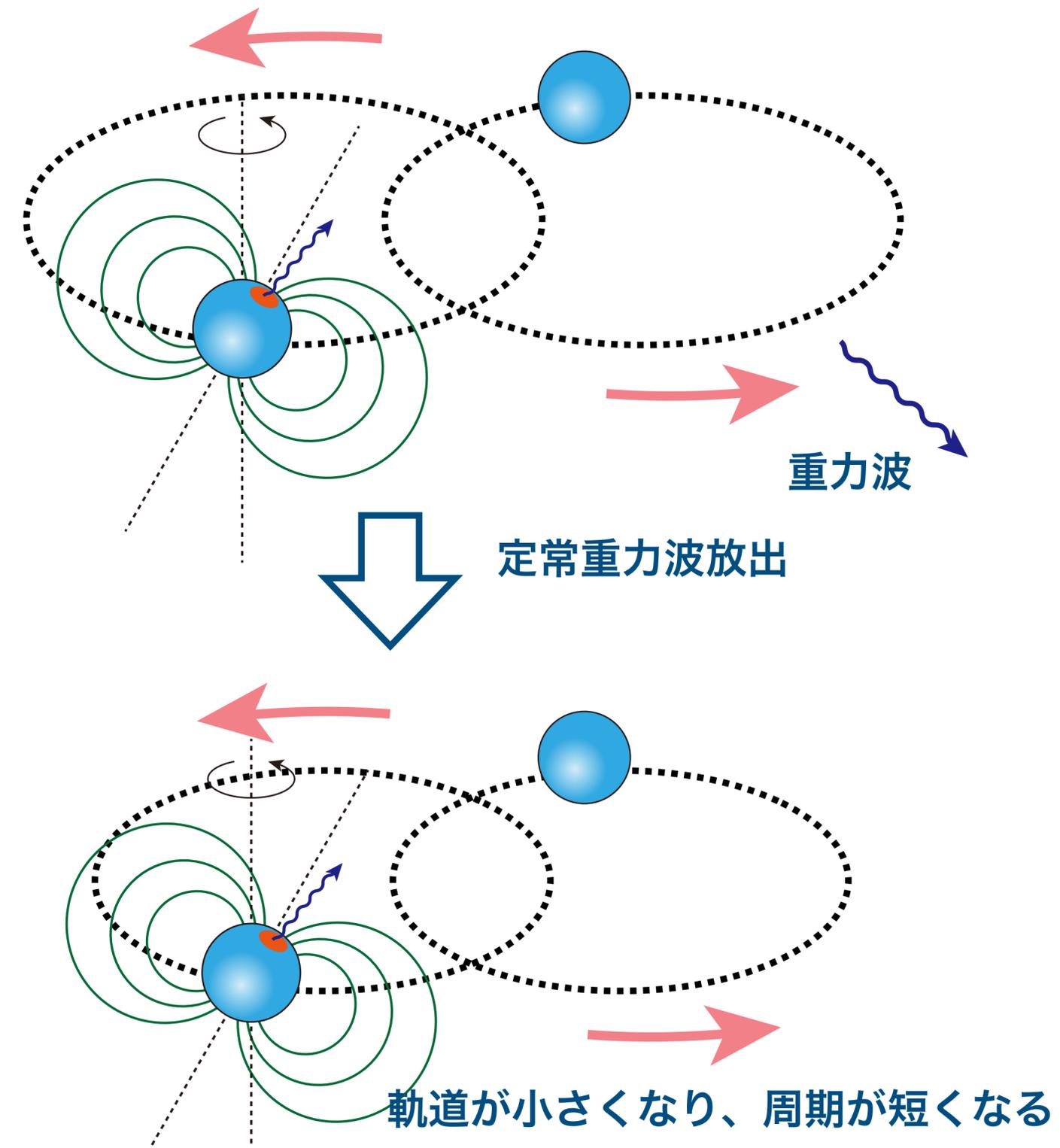
連星パルサーからの(間接的)重力波検出

- **パルサー(pulsar)**: 自転する中性子星からの規則的な電磁波放射
- Hulse-Taylor連星(1975発見): パルサー(PSR B1913+16)と中性子星の連星(お互いの周りを回っている)
- PSR B1913+16: 約59秒の自転周期+7.75時間の公転周期
- どうやら重力波は**実在**する



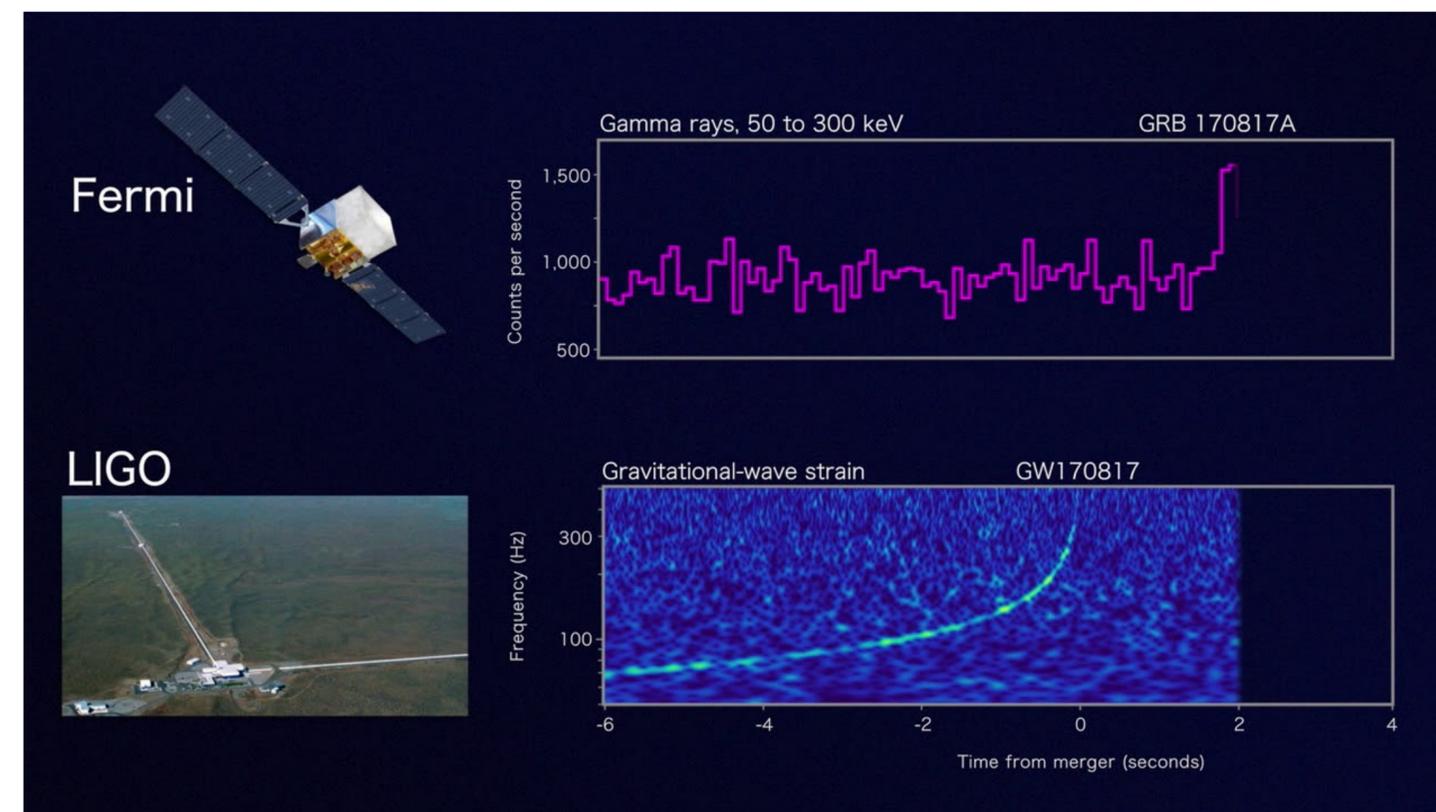
連星パルサーからの(間接的)重力波検出

- Hulse-Taylor連星は3億年程度(<宇宙年齢)で合体する予想
- それなら、今合体している中性子星連星もいそうである
- 実は昔からBH-BH合体以上に有力な重力波天体だと思われていて、実際に観測された(GW 170817)



GW 170817 / AT 2017gfo

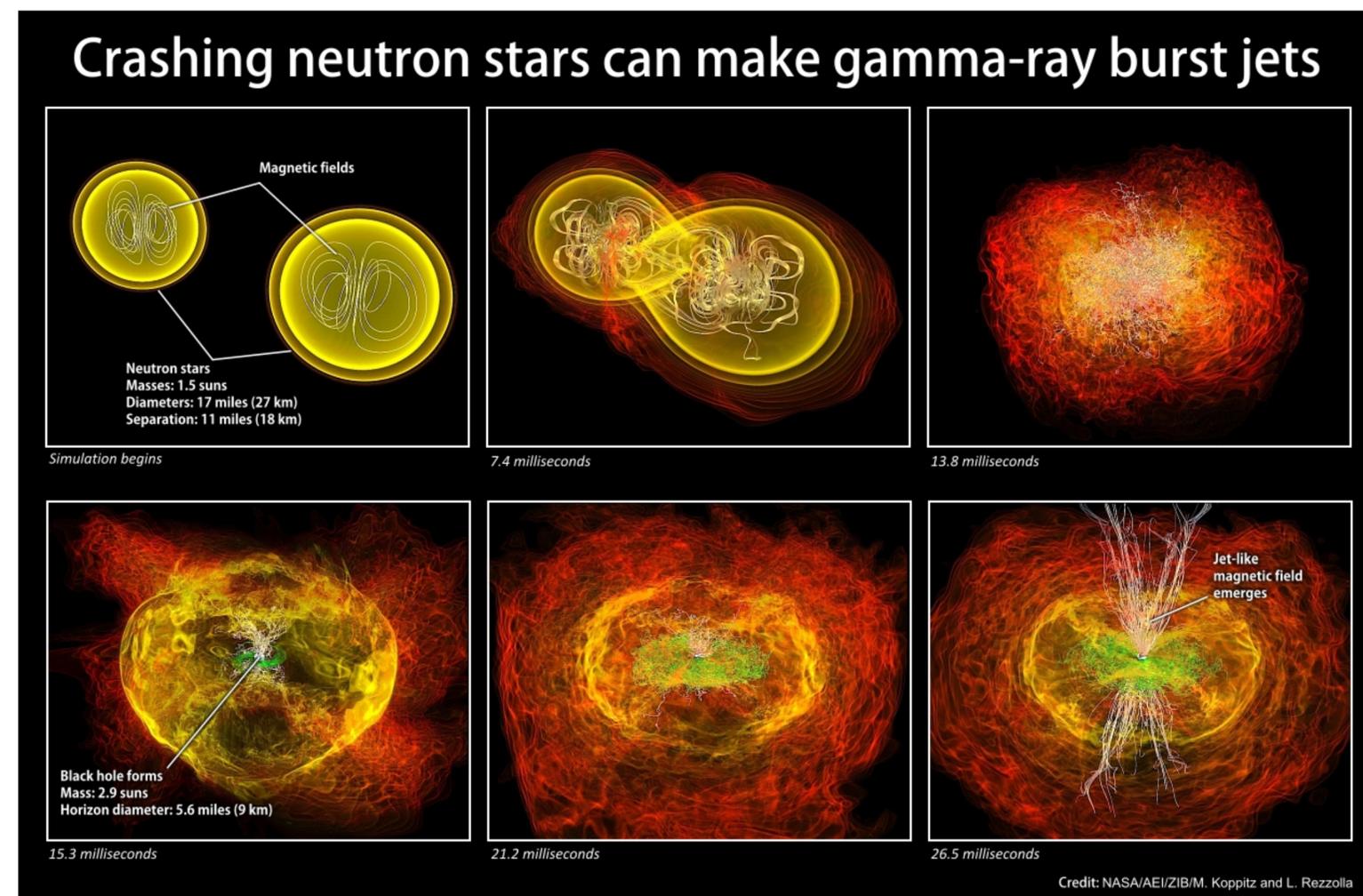
- 2017年8月17日、LIGO-Virgoの共同観測により、中性子星-中性子星連星合体からの重力波を初検出
- 1.4M \odot NS-1.4M \odot NSの合体
- BH-BH合体だったGW 150914と異なるのは、電磁波による追観測が行われ、「**電磁波対応天体(electromagnetic counterpart)**」が発見されたこと(AT 2017gfo)



LIGO-Virgoが検出したGW 170817とGRB 170817A
credit: NASA GSFC & Caltech/MIT/LIGO Lab
<https://www.ligo.org/detections/GW170817.php>

中性子星連星合体の電磁波対応天体

- BH-BH合体と違い、NS-NS合体では中性子星を構成していた物質が飛び散る
- 飛び散った噴出物中では重元素合成が進行し、できた物質が放射性崩壊することで可視光・赤外光で輝く (**キロノヴァ; kilonova**)
- また、合体の中心では光速近い速度のジェットが吹き出し、ガンマ線で光る (**ガンマ線バースト; gamma-ray burst**)



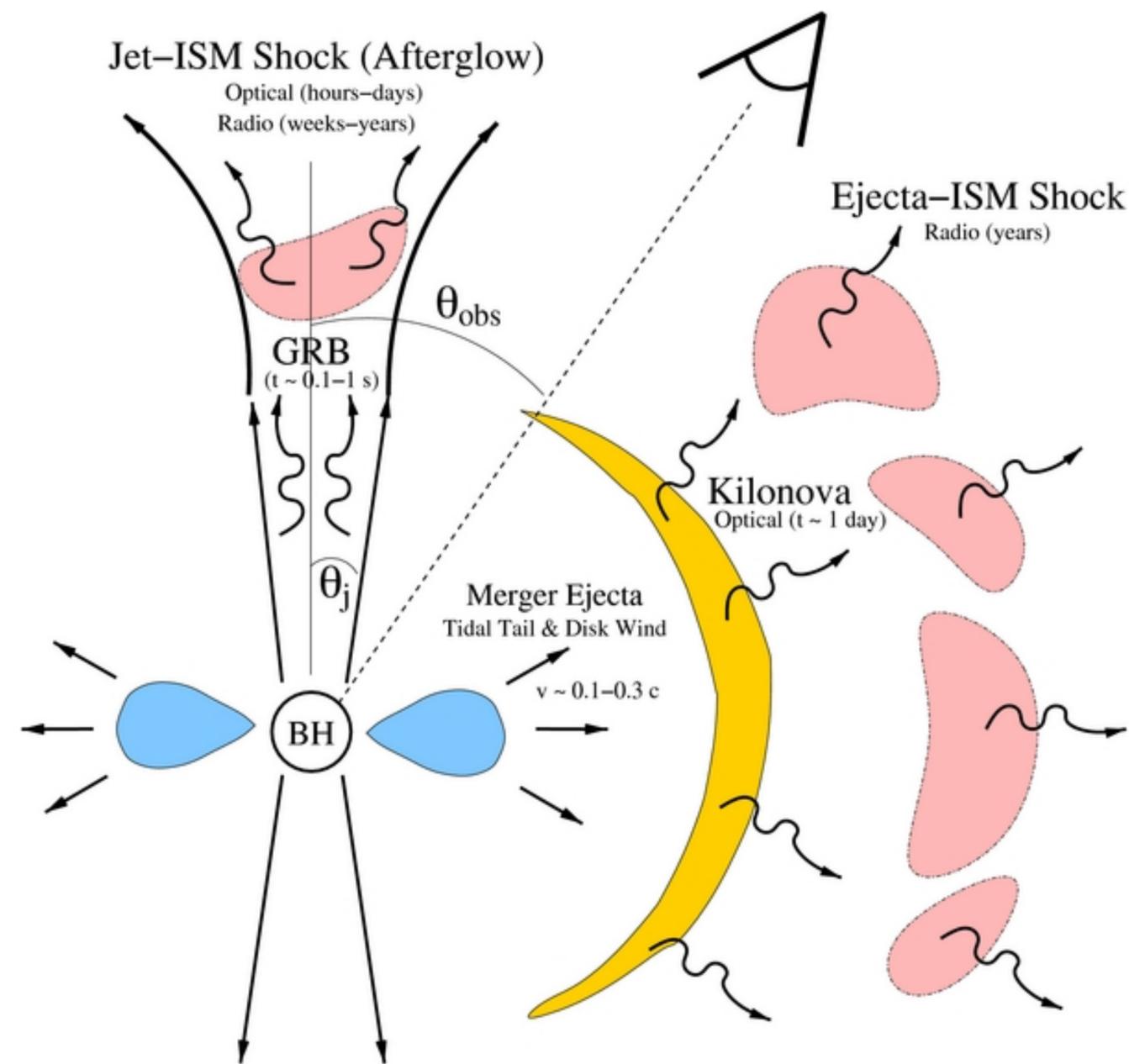
中性子星連星合体のシミュレーション

credit: NASA/AEI/ZIB/M. Koppitz and L. Rezzolla

<https://svs.gsfc.nasa.gov/10740>

中性子星連星合体の電磁波対応天体

- BH-BH合体と違い、NS-NS合体では中性子星を構成していた物質が飛び散る
- 飛び散った噴出物中では重元素合成が進行し、できた物質が放射性崩壊することで可視光・赤外光で輝く(**キロノヴァ; kilonova**)
- また、合体の中心では光速近い速度のジェットが吹き出し、ガンマ線で光る(**ガンマ線バースト; gamma-ray burst**)



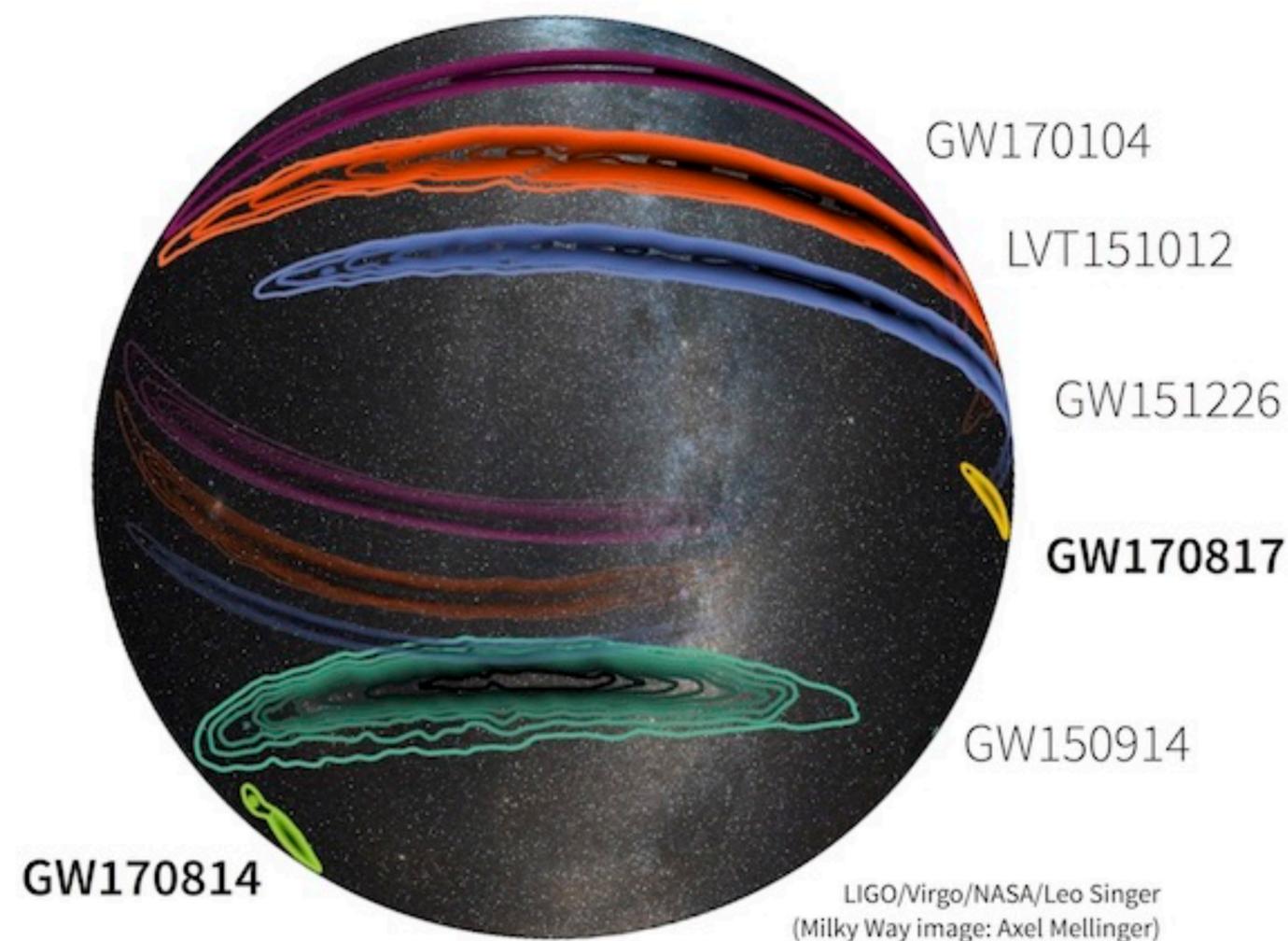
中性子星連星合体の電磁波対応天体

credit: Metzger & Berger (2012) ApJ, 746, 48

<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2012ApJ...746...48M>

中性子星連星合体の電磁波対応天体

- このような電磁波放射天体の検索が世界中の天文台で行われた
- ガンマ線バースト GRB 170817Aの発見(Fermi衛星, Integral衛星)
- 可視赤外光でのAT2017gfoの発見: 重力波検出前の画像にはいない天体を発見、その後暗くなっていった(キロノヴァ)

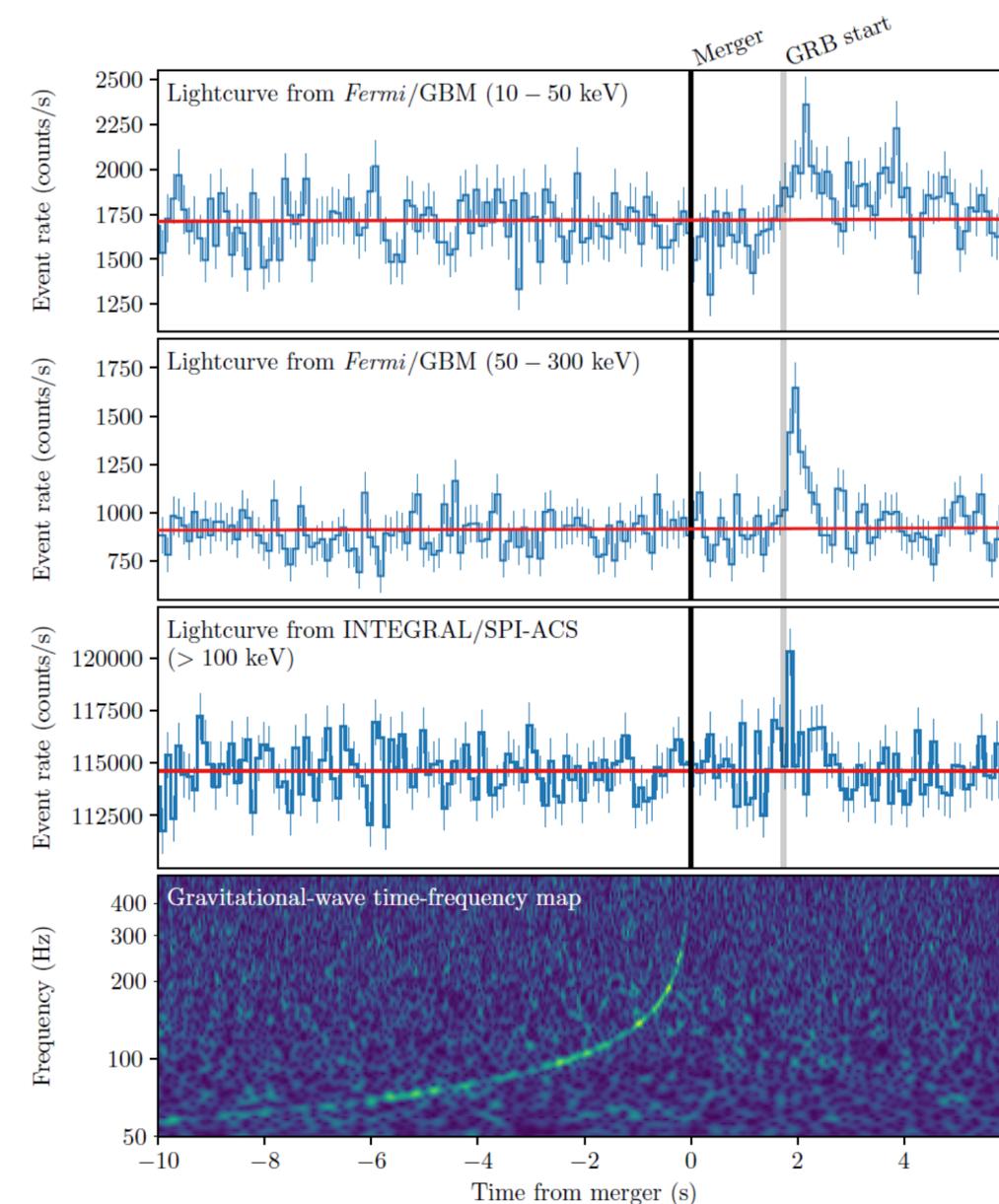


重力波検出による天球面上での位置特定

credit: LIGO/Virgo/NASA/Leo Singer (Milky Way image: Axel Mellinger)

中性子星連星合体の電磁波対応天体

- このような電磁波放射天体の検索が世界中の天文台で行われた
- ガンマ線バースト GRB 170817Aの発見(Fermi衛星, Integral衛星)
- 可視赤外光でのAT2017gfoの発見: 重力波検出前の画像にはいない天体を発見、その後暗くなっていった(キロノヴァ)



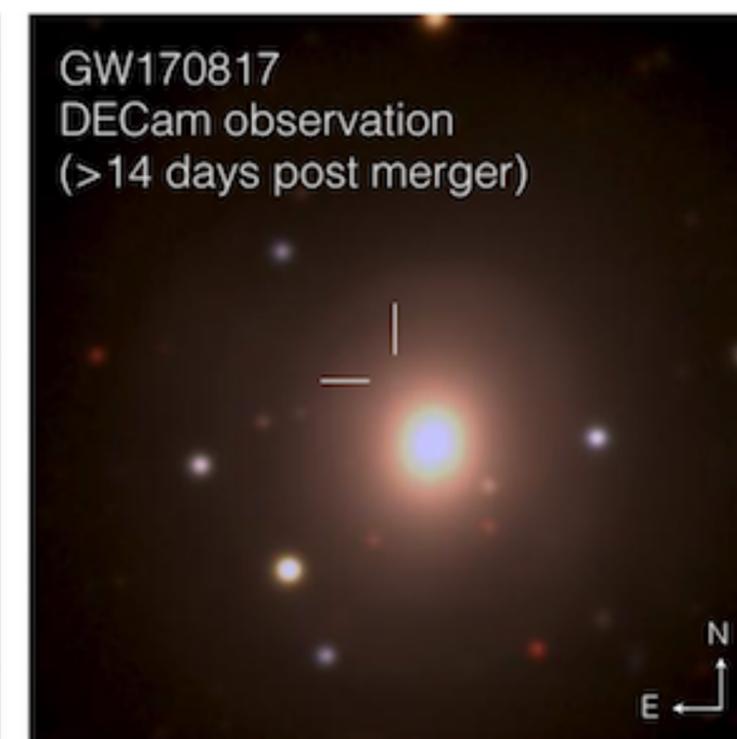
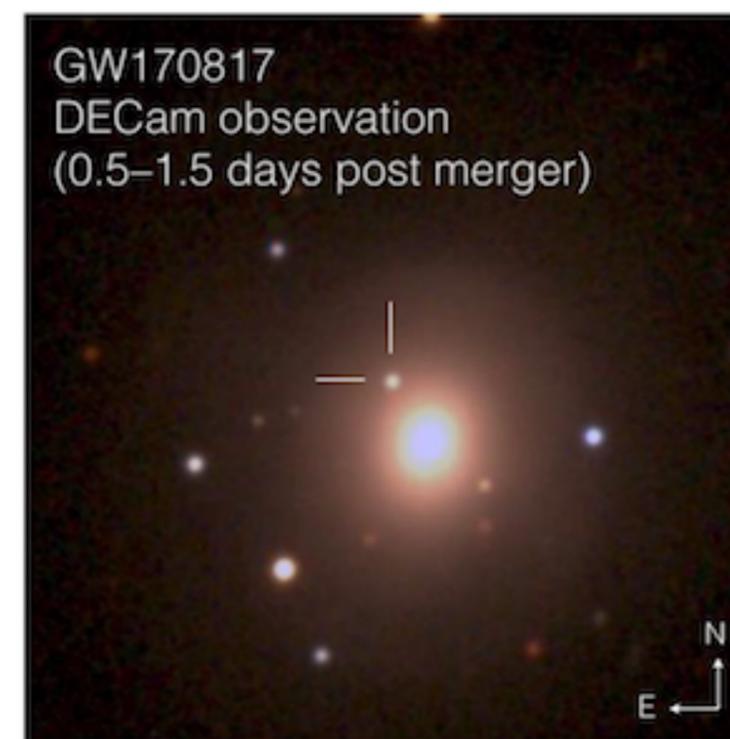
GW 170817とガンマ線バースト GRB 170817A

credit: Abbot et. al. (2017) ApJ, 848, L13

<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2017ApJ...848L..13A>

中性子星連星合体の電磁波対応天体

- このような電磁波放射天体の検索が世界中の天文台で行われた
- ガンマ線バースト GRB 170817Aの発見(Fermi衛星, Integral衛星)
- 可視赤外光でのAT2017gfoの発見: 重力波検出前の画像にはいない天体を発見、その後暗くなっていった(キロノヴァ)



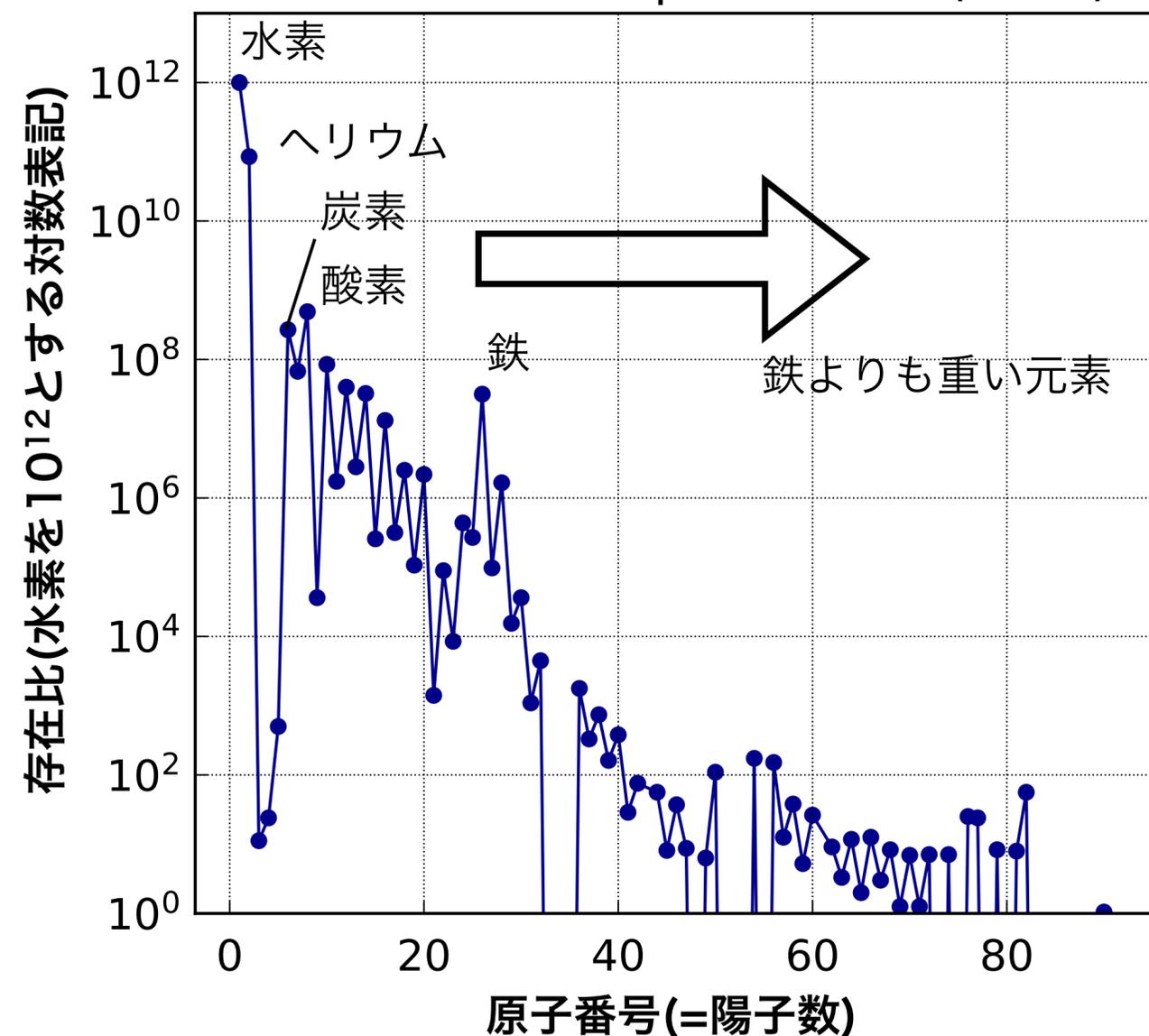
電磁波対応天体 AT 2017gfoとその母銀河
credit: Soares-Santos et al. and DES Collaboration
<https://www.ligo.org/detections/GW170817.php>

キロノヴァと重元素合成

- 元素周期表で鉄までの元素は星の中で作られ、超新星爆発で周囲にばら撒かれる
- 鉄より重い元素はどこでできるのか？
- ある種の元素(sプロセス元素)は同じく恒星内元素合成でできる
- 合体する中性子星の中では、それ以外の鉄より重い元素の合成(rプロセス元素合成)が進行すると思われていた

太陽表面(光球: photosphere)
での化学組成(Asplund et al. 2009)

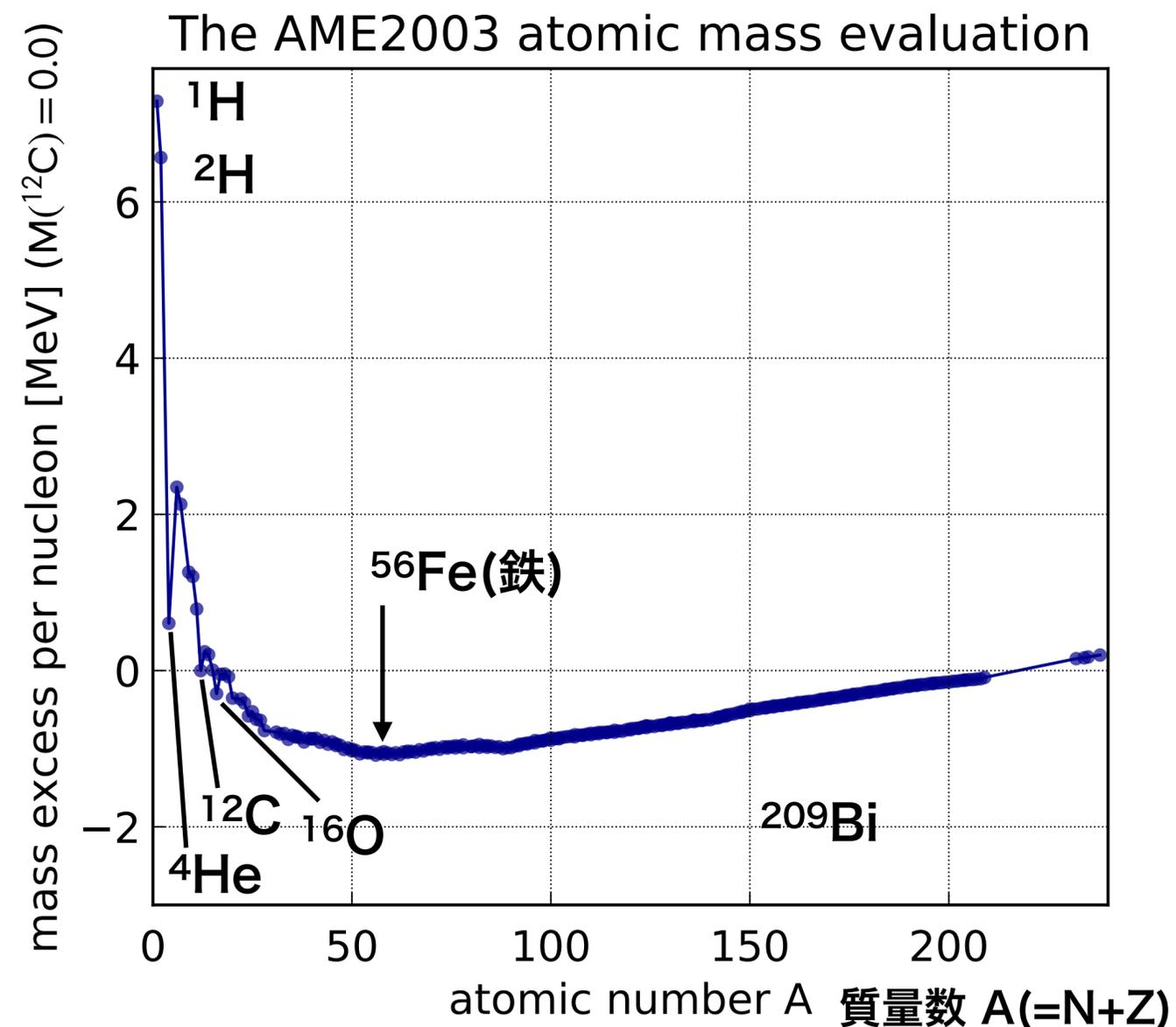
Solar photospheric abundance
Asplund et al. (2009)



キロノヴァと重元素合成

1核子あたりの質量エネルギー ($^{12}\text{C}=0$ を基準とする)

- 元素周期表で鉄までの元素は星の中で作られ、超新星爆発で周囲にばら撒かれる
- 鉄より重い元素はどこでできるのか？
- ある種の元素(sプロセス元素)は同じく恒星内元素合成でできる
- 合体する中性子星の中では、それ以外の鉄より重い元素の合成(rプロセス元素合成)が進行すると思われていた



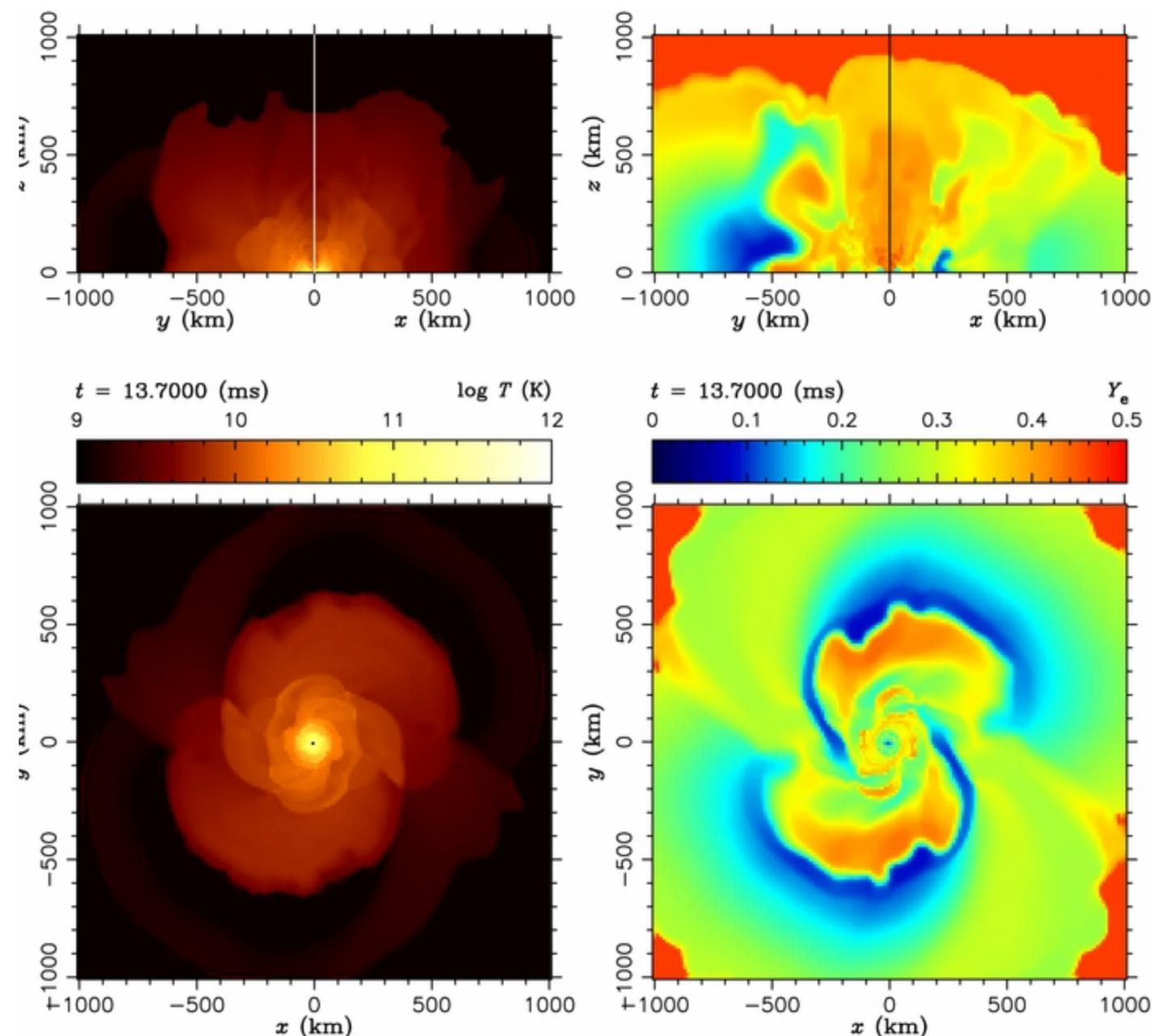
1核子あたりの質量の質量数依存性

data source: AME2003 atomic mass evaluation

<https://www-nds.iaea.org/masses/>

キロノヴァと重元素合成

- 元素周期表で鉄までの元素は星の中で作られ、超新星爆発で周囲にばら撒かれる
- 鉄より重い元素はどこでできるのか？
- ある種の元素(sプロセス元素)は同じく恒星内元素合成でできる
- 合体する中性子星の中では、それ以外の鉄より重い元素の合成(rプロセス元素合成)が進行すると思われていた



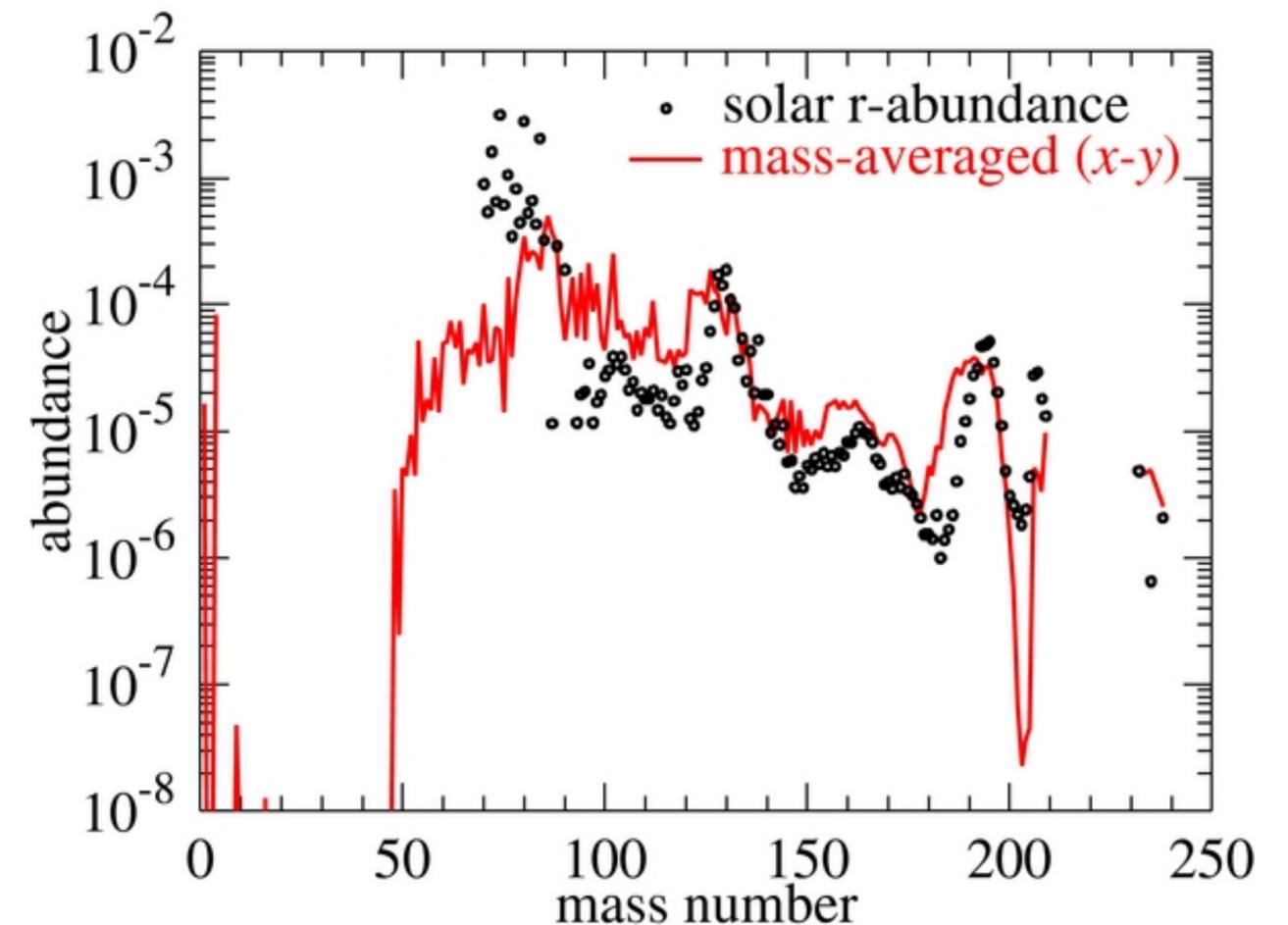
重元素の太陽組成とNS-NS合体での元素組成の予想

credit: Wanajo et. al. (2014) ApJ, 789, L39

<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2014ApJ...789L..39W>

キロノヴァと重元素合成

- 元素周期表で鉄までの元素は星の中で作られ、超新星爆発で周囲にばら撒かれる
- 鉄より重い元素はどこでできるのか？
- ある種の元素(sプロセス元素)は同じく恒星内元素合成でできる
- 合体する中性子星の中では、それ以外の鉄より重い元素の合成(rプロセス元素合成)が進行すると思われていた



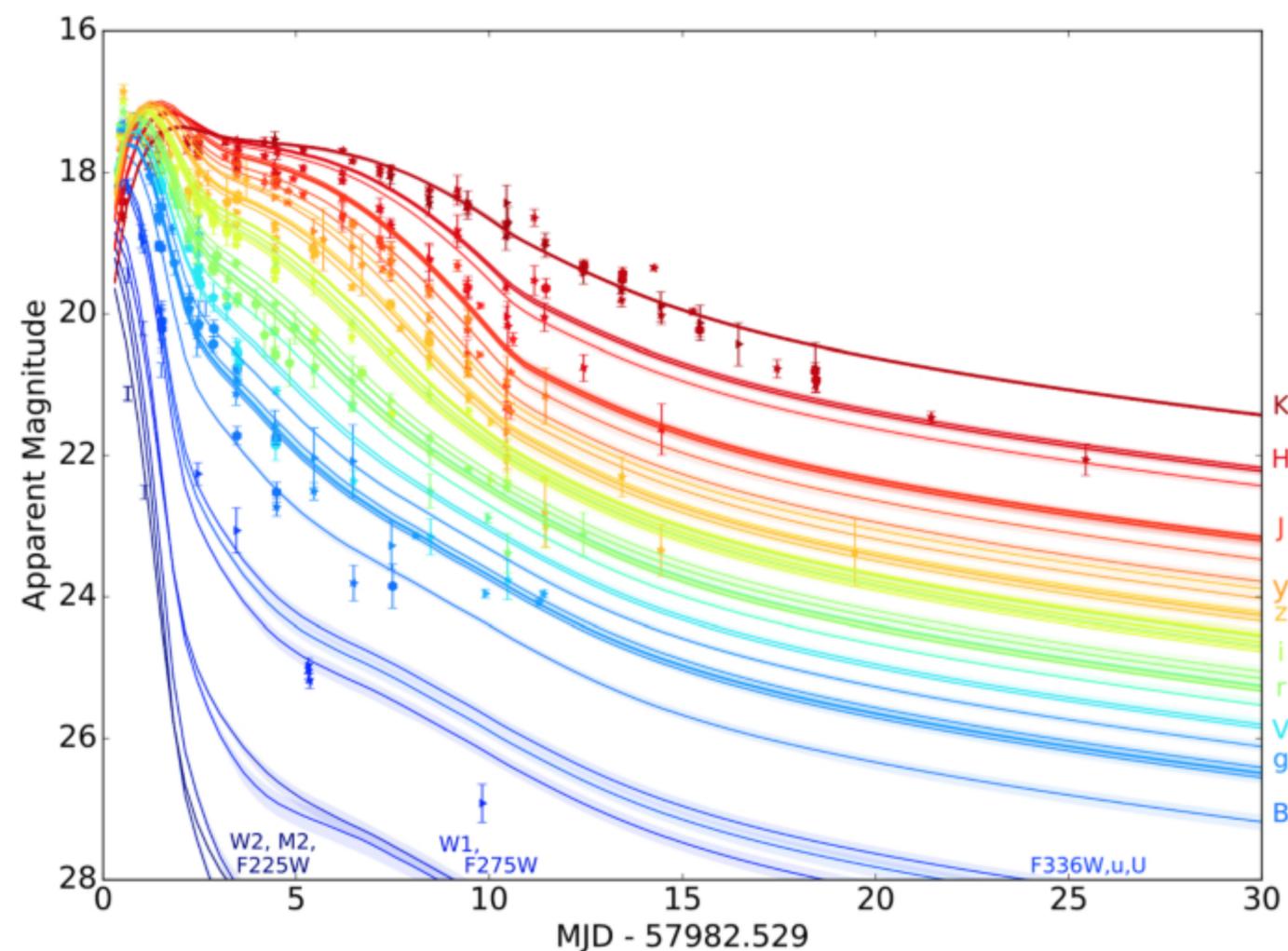
重元素の太陽組成とNS-NS合体での元素組成の予想

credit: Wanajo et. al. (2014) ApJ, 789, L39

<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2014ApJ...789L..39W>

キロノヴァと重元素合成

- 観測されたAT2017gfoは、NS-NS合体の際に生成した重元素(rプロセス元素)の放射性崩壊をエネルギー源とする変光天体キロノヴァの理論的光度曲線によってうまく説明される
- 少なくとも鉄より重い元素の一部はNS-NS合体によって生成される可能性が高い



AT2017gfoの光度曲線と理論予想

credit: Metzger (2020) Living Reviews in Relativity 23

<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2019LRR....23....1M>