Primordial Black Holes
原始ブラックホール〜宇宙最初の1秒間に生まれるブラックホール

川崎雅裕　（東京大学宇宙線研究所）

今日の話

1. 原始ブラックホールとは
2. LIGOの発見と原始ブラックホール
3. インフレーション宇宙
4. 原始ブラックホール生成
5. 原始ブラックホールと背景重力波
6. まとめ

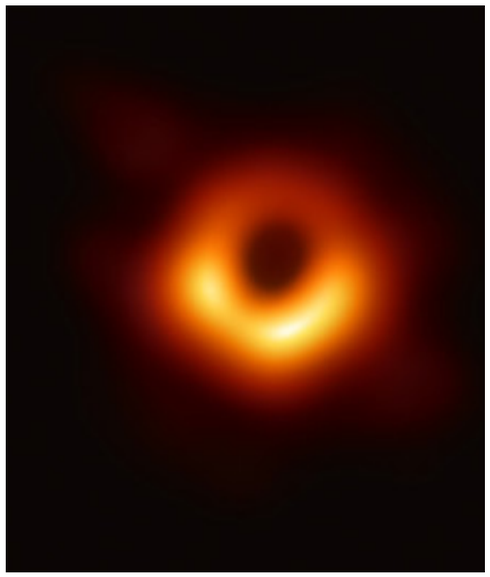
雑誌ニュートンから

1. 原始ブラックホールとは

雑誌ニュートンから

ブラックホール (Black Hole = BH)

https://www.nao.ac.jp

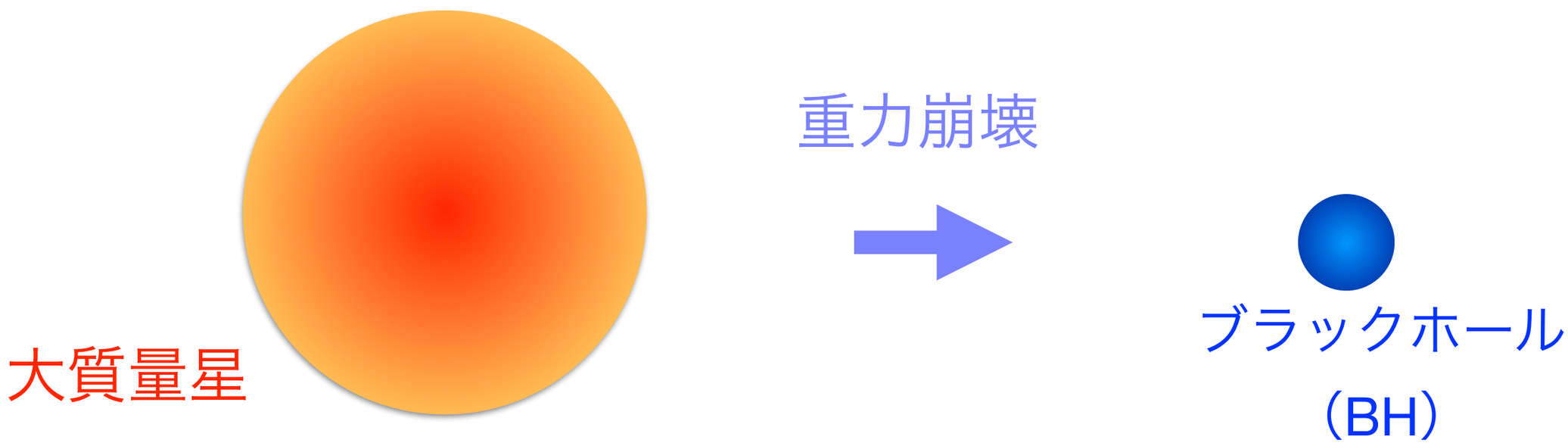


- ブラックホール
  強い重力によって光さえも脱出できない領域

- BHの大きさ＝シュバルツシルド半径 R_S
  - BHの質量に比例　太陽質量のBH: R_S = 3km
  - 狭い領域に質量が集中

(太陽の半径　約70万km)

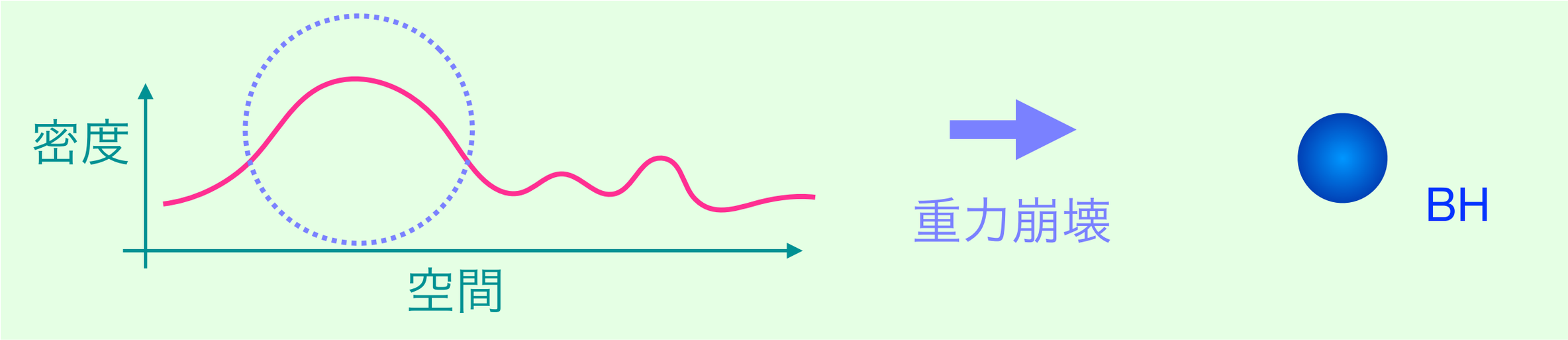
- 大質量の星（太陽の30倍以上）が進化し、その最終段階で重力崩壊を起こして作られる



原始ブラックホール

<1秒

- 宇宙初期に大きな密度揺らぎがあるとその領域が重力崩壊してブッラックホール(BH)が生成される可能性



- 宇宙初期に作られるBH＝原始ブラックホール
  - ホーキング(S. Hawking)が1971年に予言
  - 星の進化の最終で作られるBHと異なり 10^{-5} gから数100太陽質量まで様々な質量を持つ可能性

2. LIGOの発見と原始ブラックホール

雑誌ニュートンから

LOGOよる重力波の観測

- 2015年重力波検出器LIGOがブラックホール連星の合体による重力波を史上初めて観測

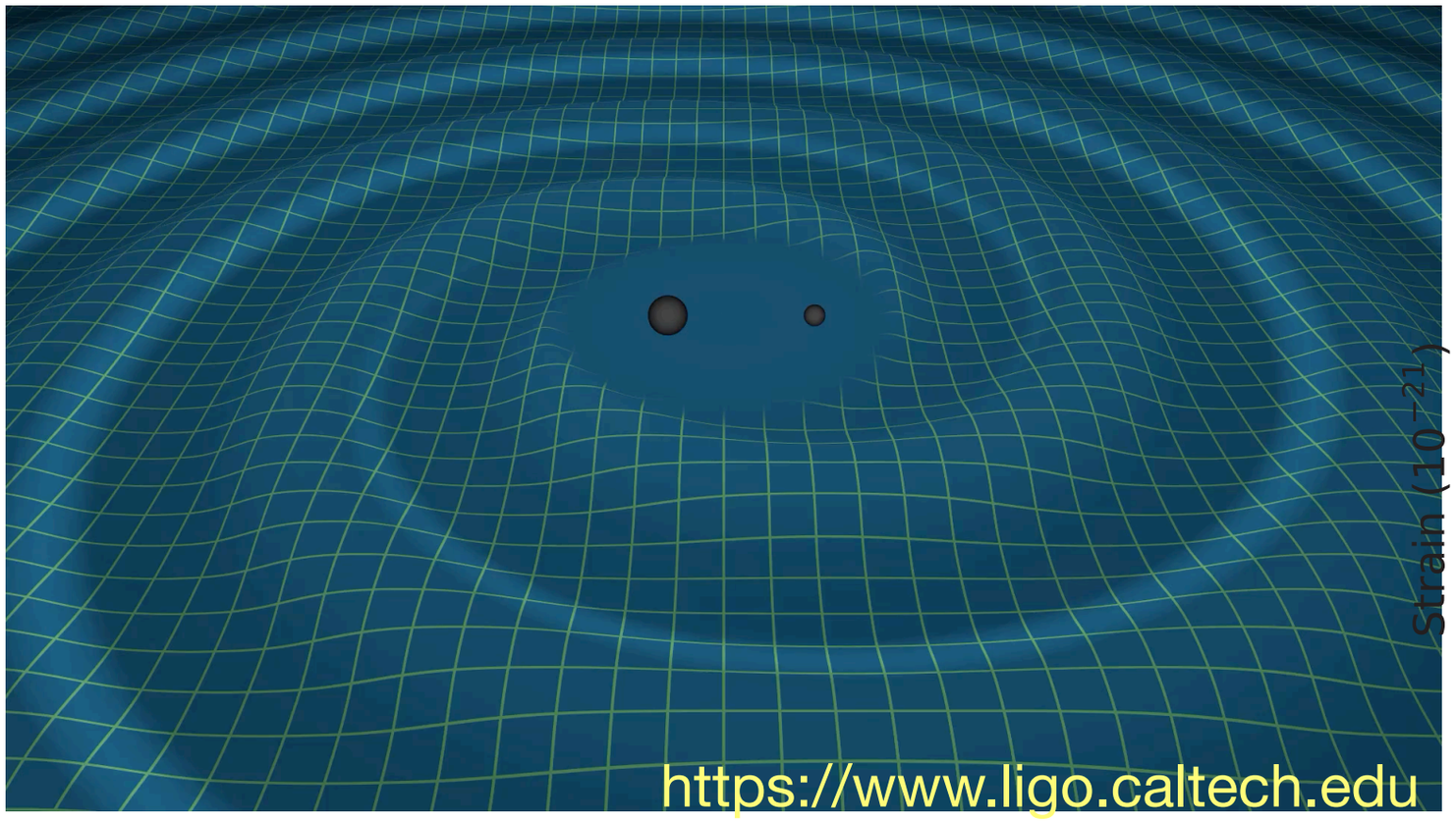
  LIGO = Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory

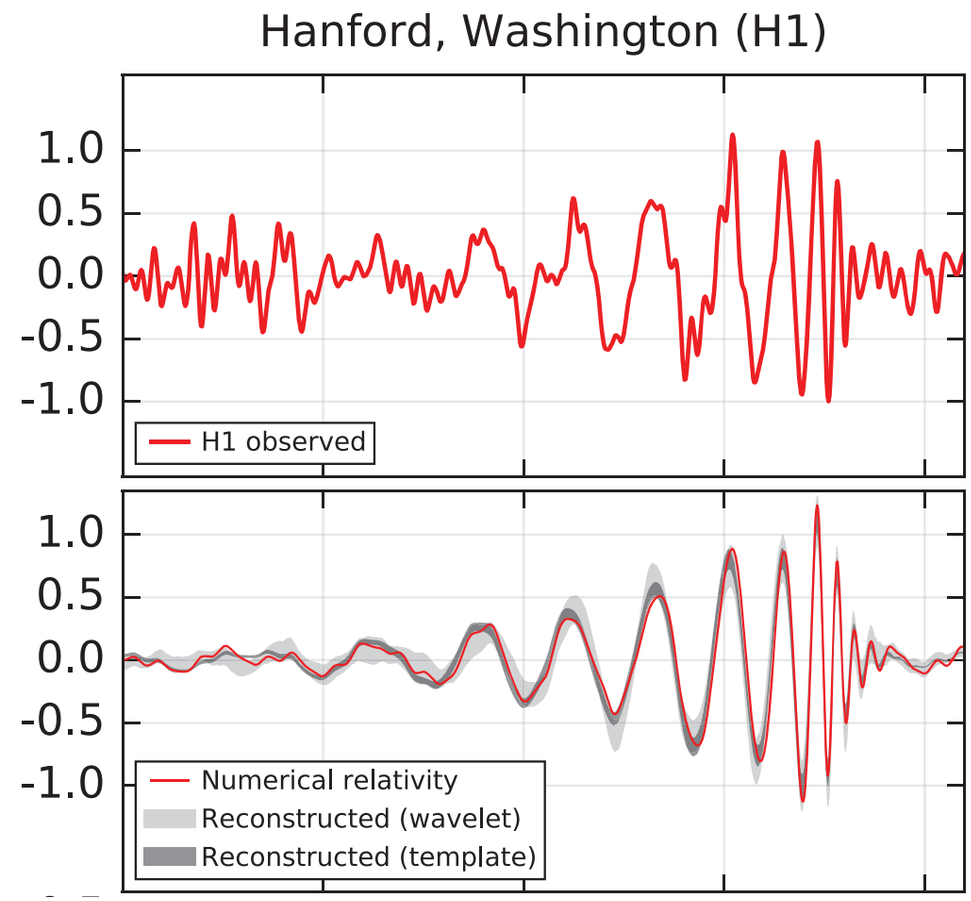
- 重力波

  アインシュタインの一般相対性理論で予言される時空を伸び縮みさせて伝搬する波

重力波の発生源

- 重力波はブラックホール連星が合体する時に発生した





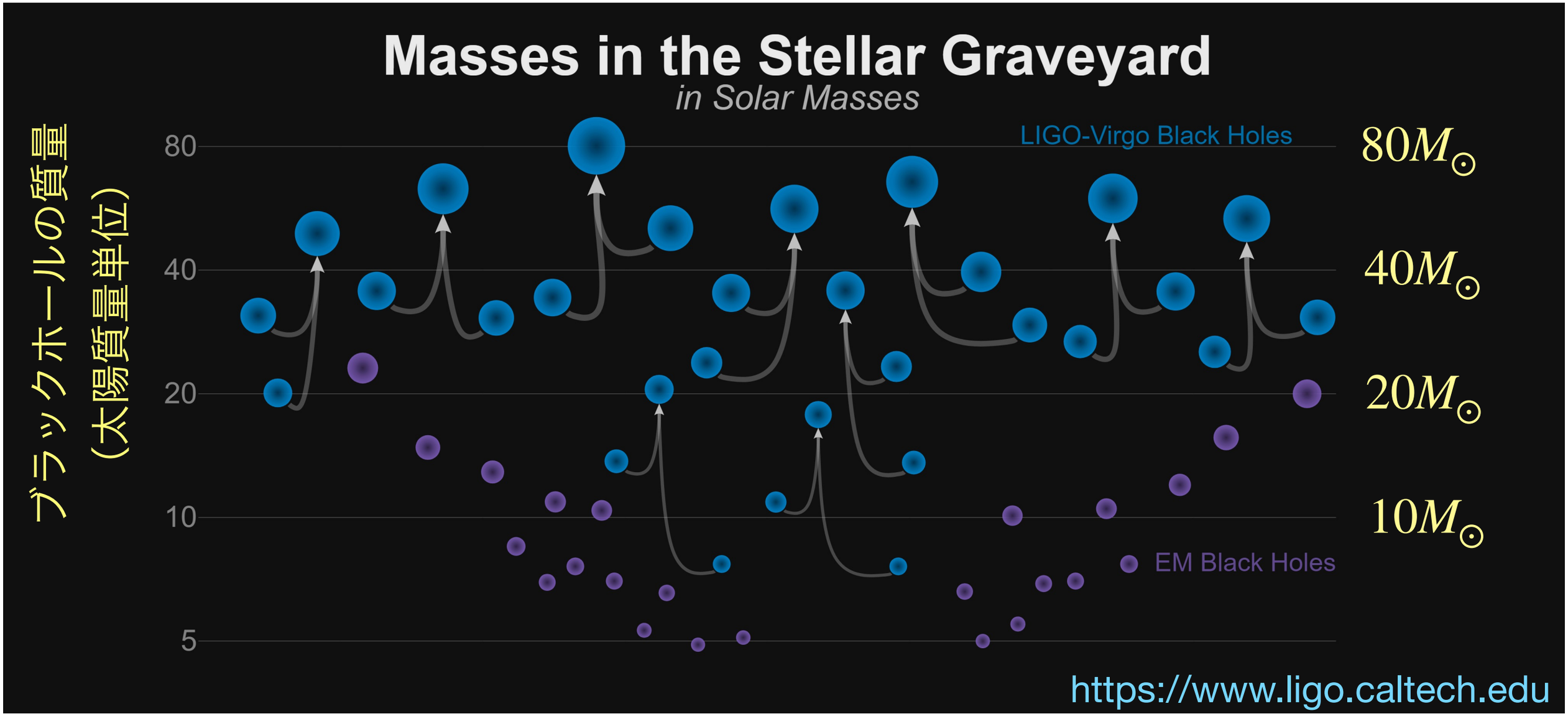
Phys. Rev. Lett 116,061102 (2016)

- 30太陽質量のブラックホール連星
  - 星の進化で作られるブラックホールにしては重い？？

→ 原始ブラックホールが有力な候補

ブラックホール連星による重力波イベント

- 現在まで10個のブラックホール連星による重力波イベントが観測されている

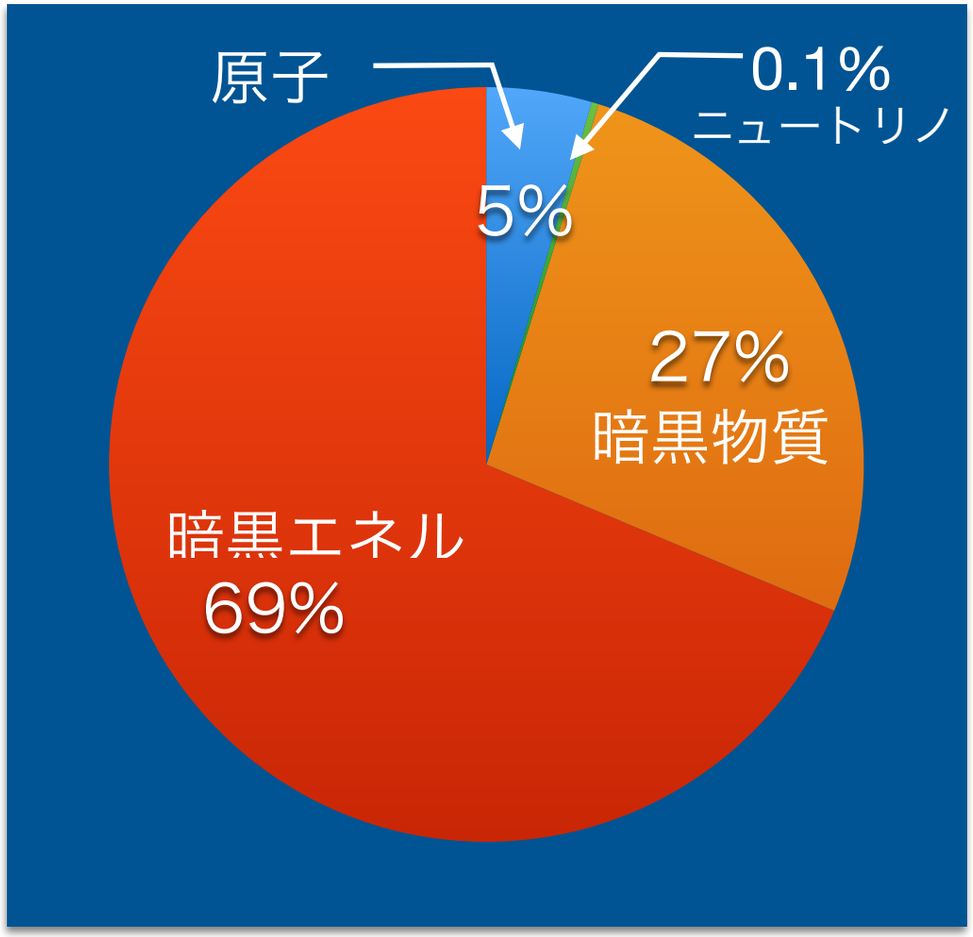


3. 原始ブラックホールと暗黒物質

雑誌ニュートンから

暗黒物質

- 暗黒物質とは？
  - 「暗黒」＝光を出さない
  - 「物質」＝質量を持った粒子
- 通常の物質（原子）の約5倍存在
- 暗黒物質の性質
  - 寿命が宇宙年齢より長い
  - 他の物質と弱い相互作用
  - 冷たい＝速度が小さい



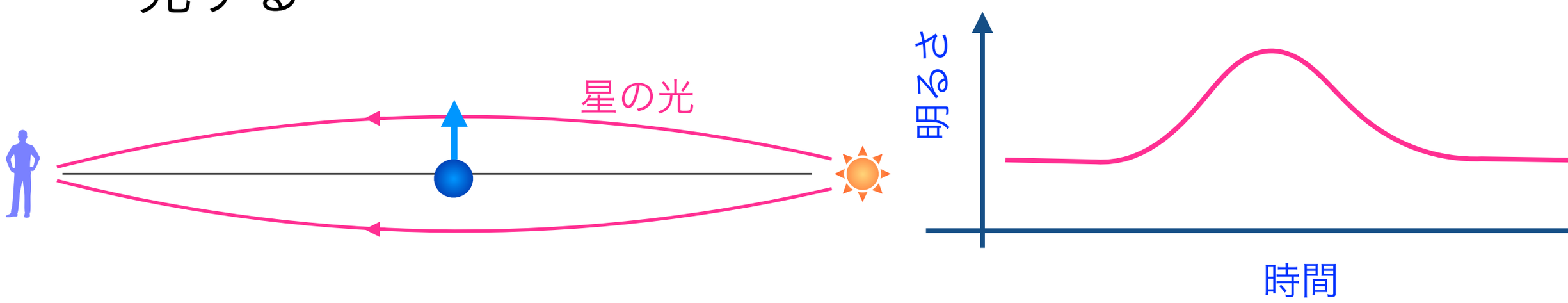
暗黒物質としての原始ブラックホール

- 原始ブラックホールが暗黒物質を説明できる？
- 長寿命：10^{15} g以上のBHは安定（10^{15} g以下の質量のBHはホーキング放射で現在までに蒸発）
- 弱い相互作用：重力でしか相互作用しない
- 冷たい：ほぼ止まった状態で作られる

→ 宇宙初期に十分作られれば暗黒物質の有力な候補

原始ブラックホールの観測

- 原始ブラックホールが暗黒物質だと観測できる？
- マイクロレンジング
  - 質量の大きなBHは重力レンズ効果を利用して探索
  - 星と観測者を結ぶ線上をBHが通過すると星の光が増光する

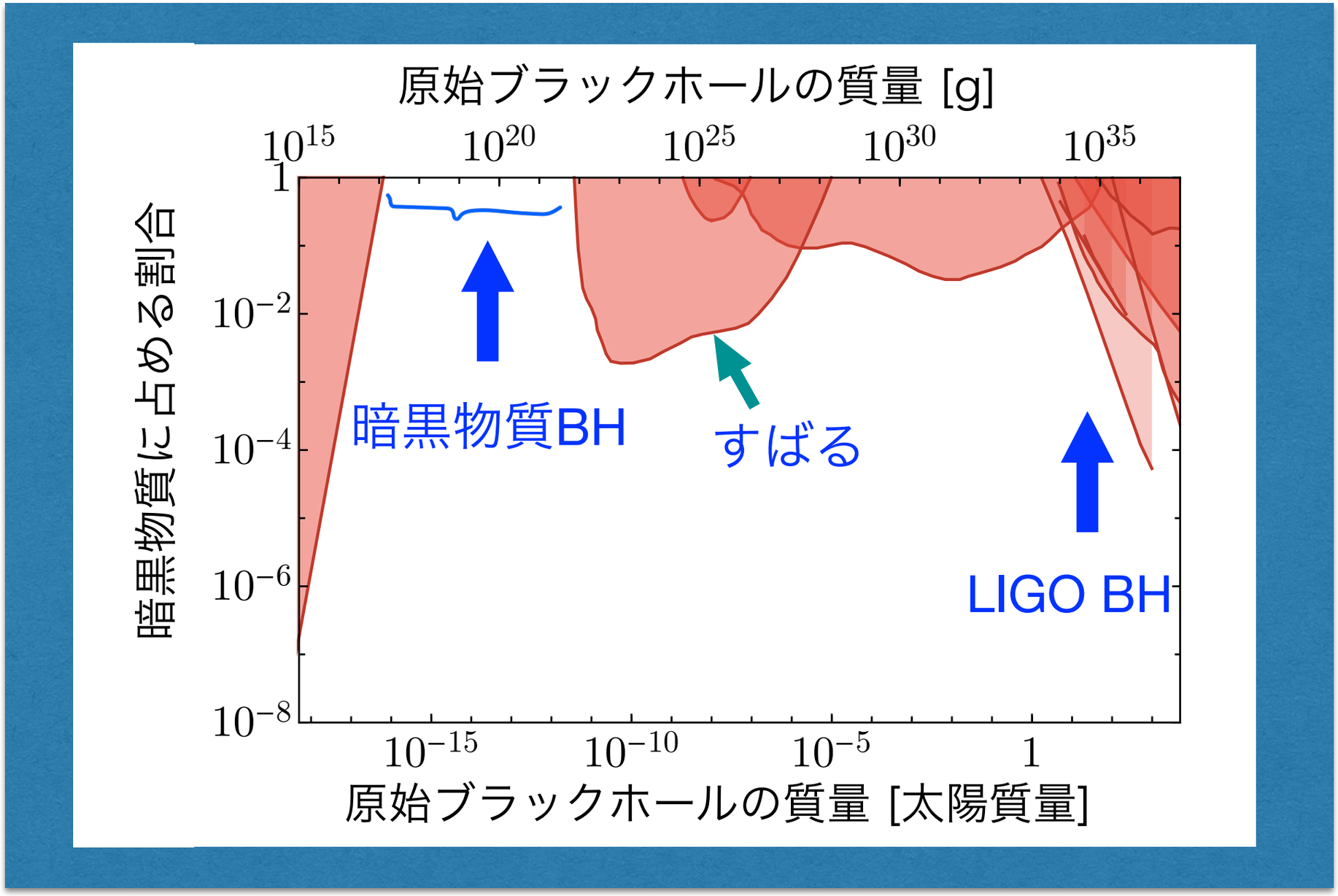


- 最近、すばる望遠鏡を使った観測がおこなわれた

→ ブラックホールは発見されなかった

新倉, 高田 et al. (2019)

- マイクロレンジングを使った探索
  - BHは発見されていない → BHの存在量に制限
- 現状の制限



- 10^{17}g-10^{22}g 程度の質量の原始BHが暗黒物質の可能性

今までのまとめ

- LIGOで観測された重力波イベントは原始ブラックホールの合体によるものかもしれない
- 宇宙の暗黒物質の正体は原始ブラックホールかもしれない

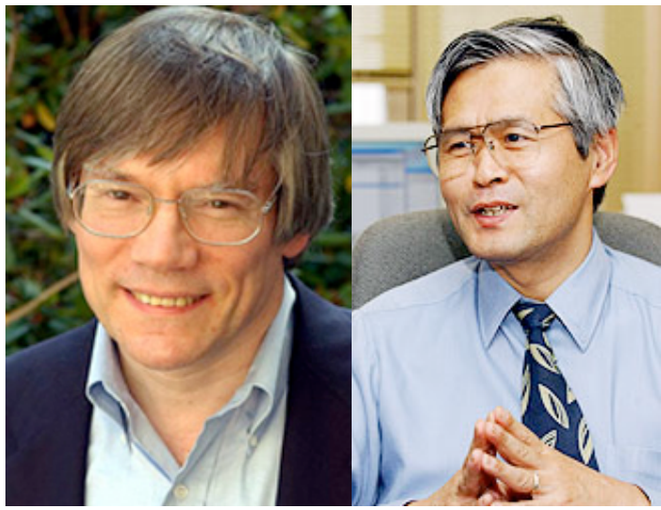
そうだとすると・・・

- 原始ブラックホールを作る揺らぎはどうやってできる？
- 宇宙の構造(銀河・銀河団)の元となる密度揺らぎはインフレーションによって作られる
- 原子ブラックホールもインフレーションで作られる？

4. インフレーション宇宙

雑誌ニュートンから

インフレーション宇宙



- 1980年にグース・佐藤が提唱

- 宇宙が誕生して10^{-36}秒程度のごく初期に起きる

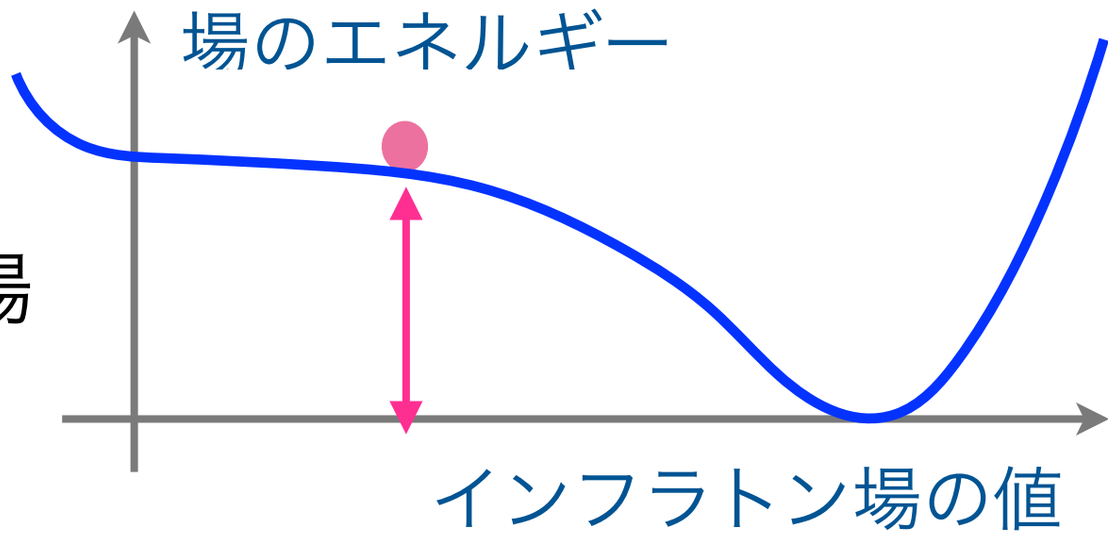
  宇宙が加速度的に膨張（インフレーション）

  約10^{-36}秒の間に宇宙の大きさが10^{26}倍以上になる

  （バクテリアが銀河系の大きさになるような膨張）

- インフレーションを引き起こすのは

  “真空のエネルギー” ＝インフレーションを起こす場（インフラトン場）のエネルギー

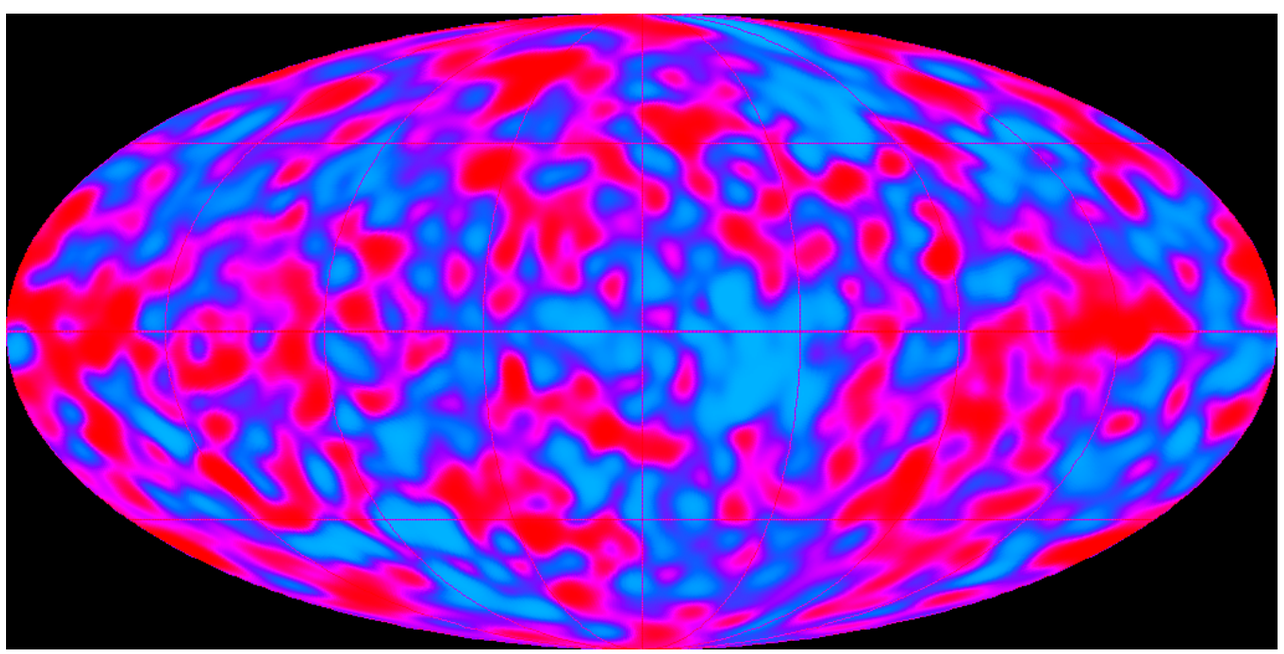


- インフレーション後インフラトン場のエネルギーが熱になり熱い宇宙（ビッグバン）になる

インフレーション宇宙の成功

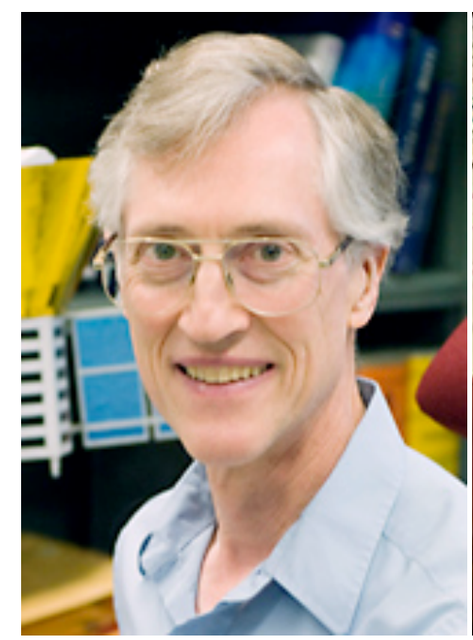
- インフレーション宇宙はビッグバン宇宙モデルの欠点を補い、宇宙の構造の種となる密度揺らぎを生成

- 宇宙の密度揺らぎが存在することは宇宙背景放射（宇宙が誕生して38万年後に放出された光）の観測から確かめられた → 10万分の1程度の密度揺らぎ

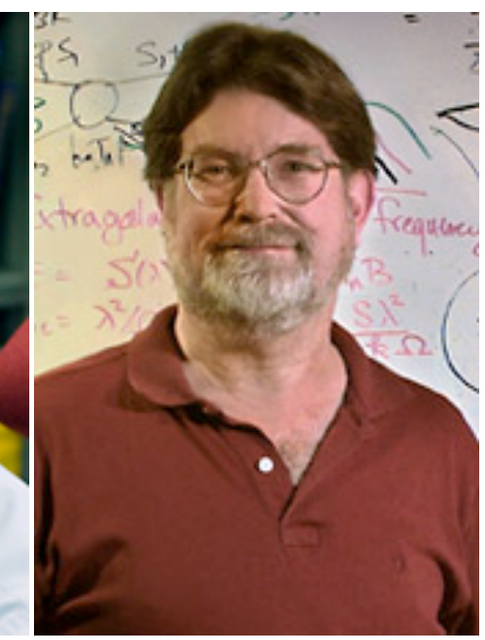


COBEの観測　[1992]

http://lambda.gsfc.nasa.gov



John C. Mather



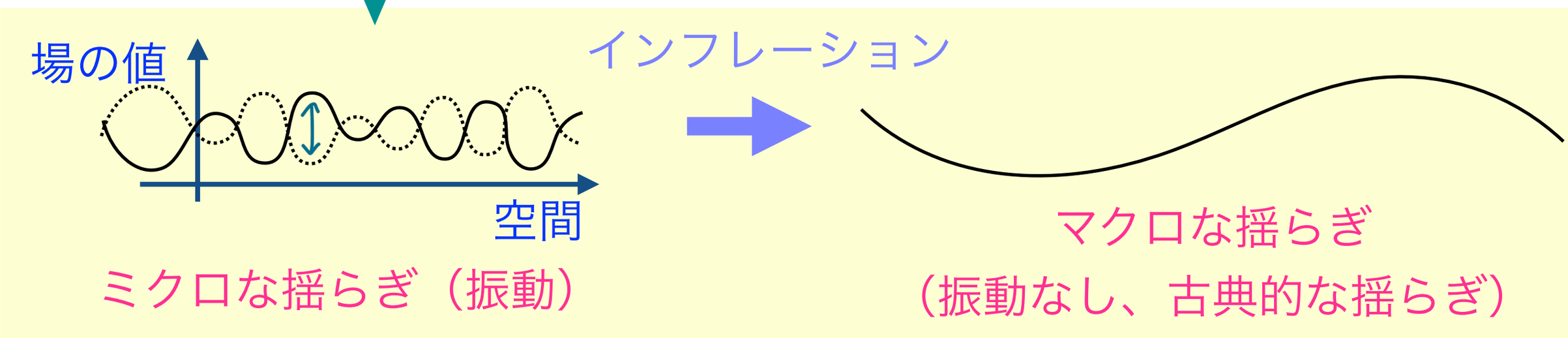
George Smoot

2006年ノーベル賞

密度揺らぎの生成

- インフレーションを起こすインフラトン場

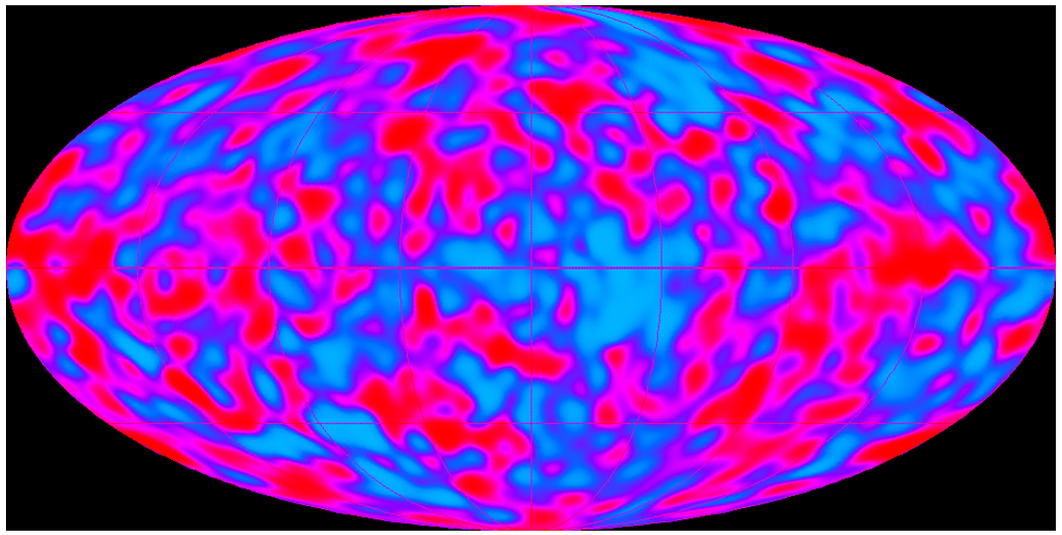
量子論から（不確定性関係）予言される場の揺らぎ



密度揺らぎ

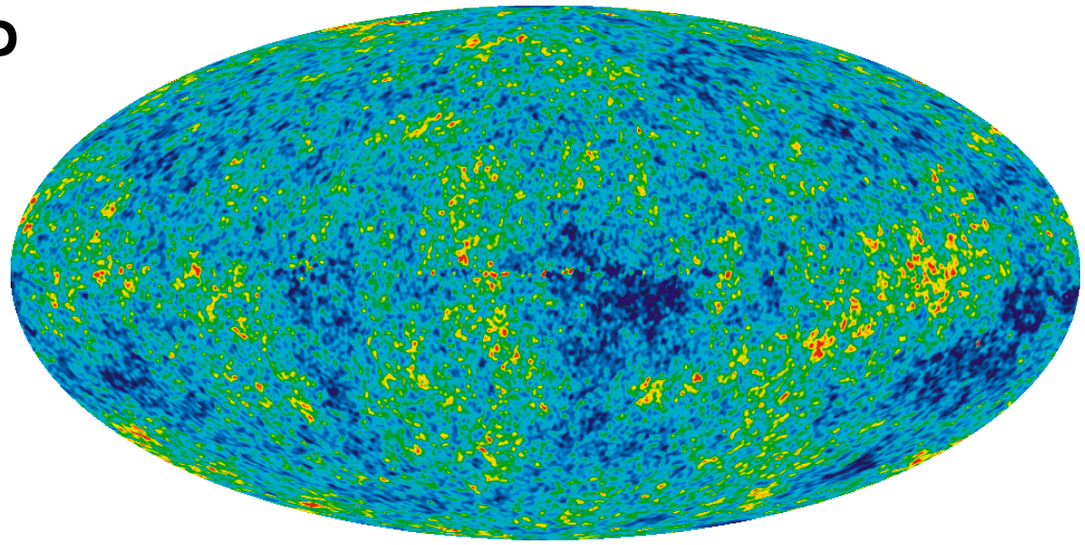
- インフレーションは特徴的な密度揺らぎを予言
- 宇宙背景放射の強度の揺らぎから観測からその正しさが確かめられた [COBE衛星、WMAP衛星、Planck衛星]

- COBE

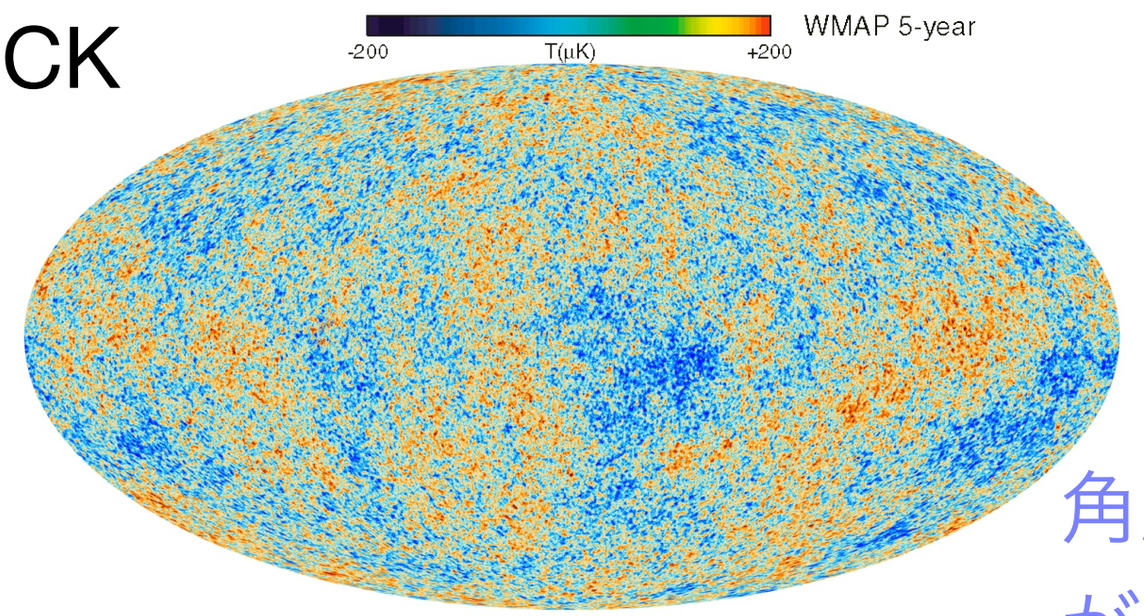


http://lambda.gsfc.nasa.gov

- WMAP



- PLANCK



https://www.cosmos.esa.int/web/planck

インフレーションの予言と一致した密度揺らぎ

ビッグバン宇宙モデルを拡張した新たな標準宇宙モデル

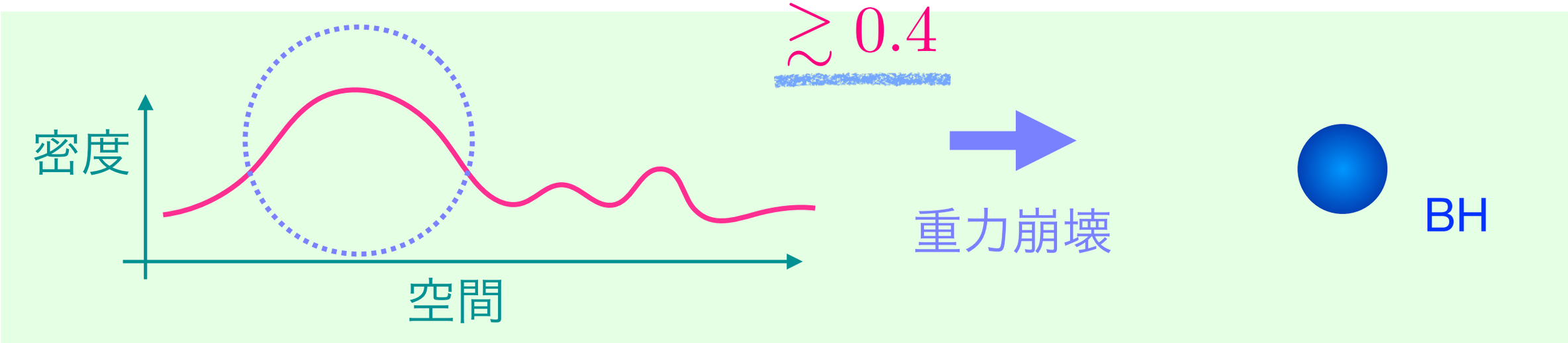
角度分解能が高い

5. 原始ブラックホール生成

雑誌ニュートンから

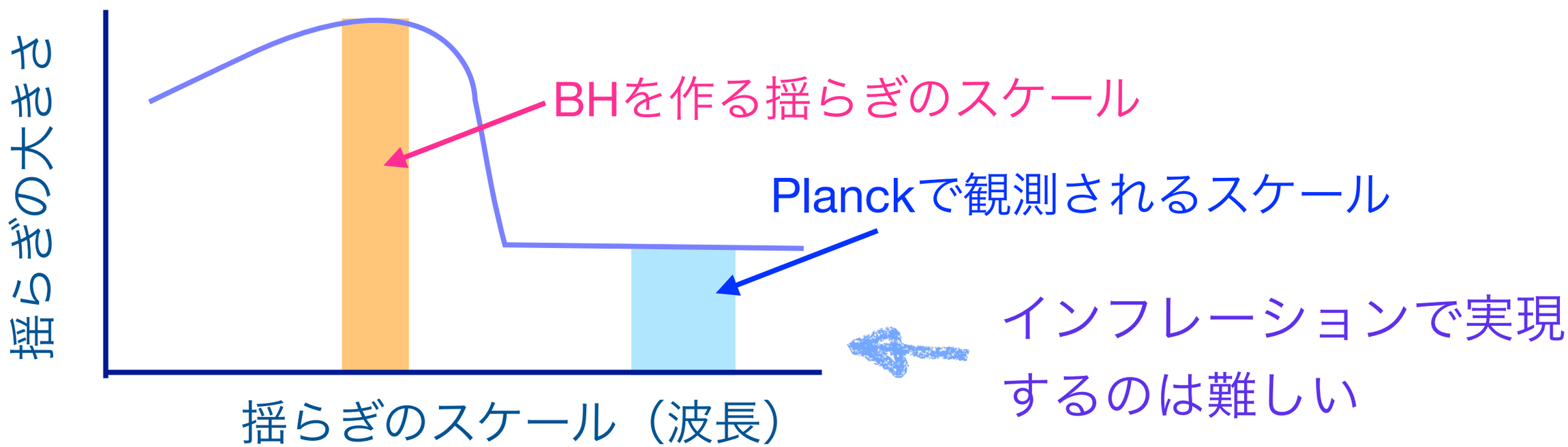
原始ブラックホールを作る密度揺らぎ

- 原始ブラックホールは大きな密度揺らぎから作られる

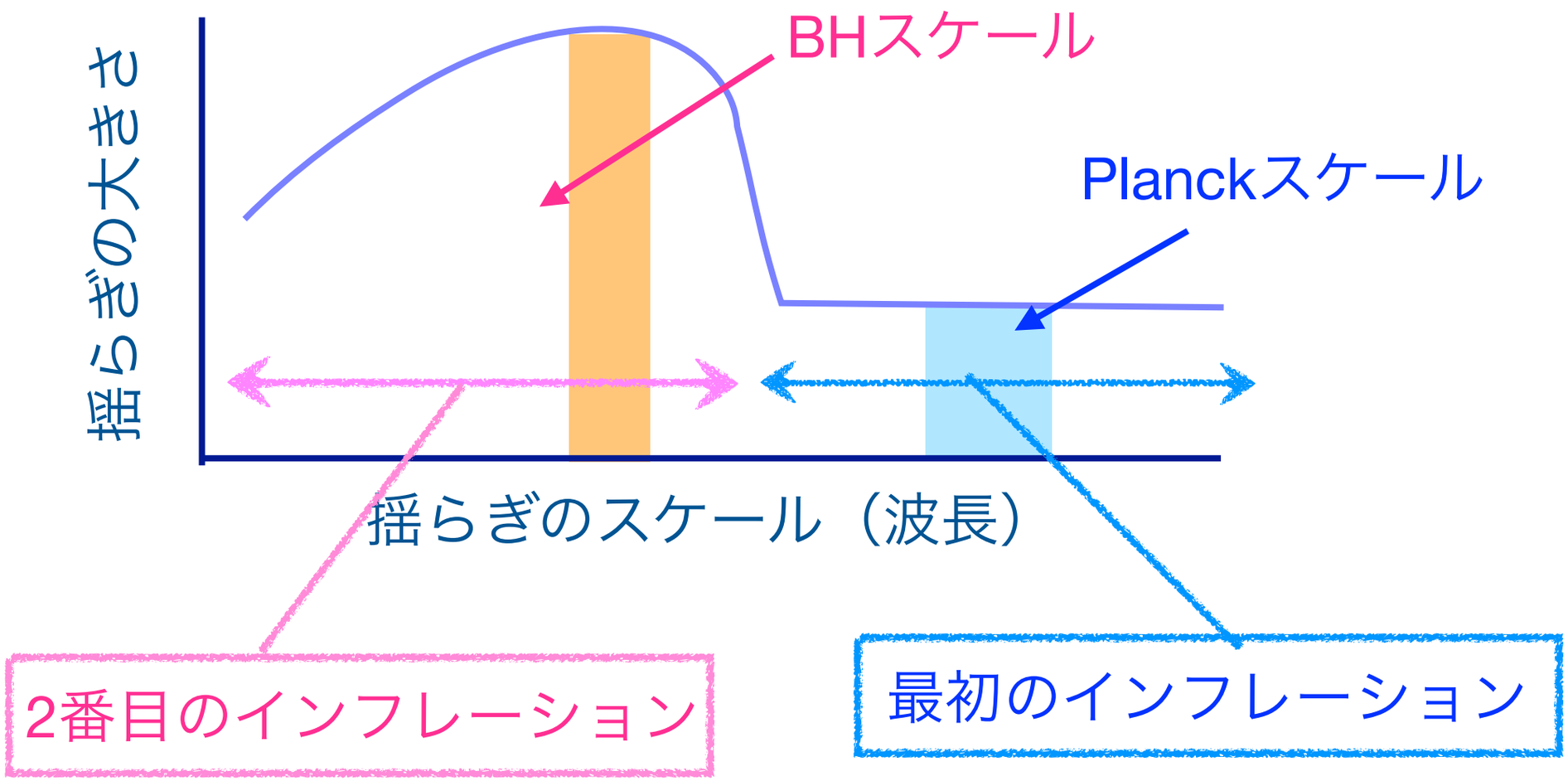


- 宇宙背景放射で観測される大スケールの揺らぎ $\sim 10^{-5}$

- インフレーションでそのような揺らぎが作られるか？



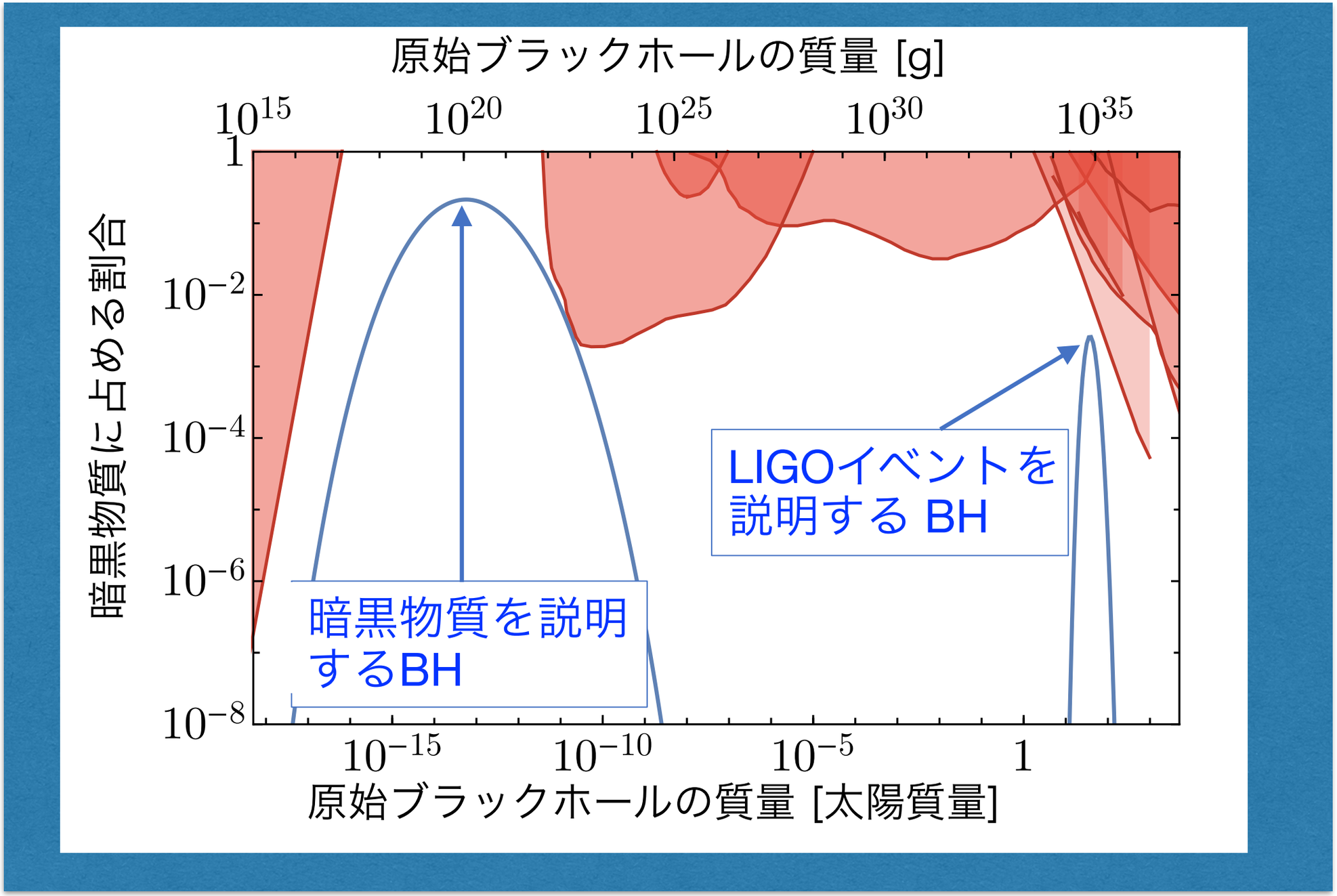
- 様々なモデルが提案されている
- 1つのアイデア：インフレーションが2段階で起こった
  ＝ダブルインフレーション



- このモデルの特色として大きな揺らぎのピークが2つある

ダブルインフレーションモデル

- 原始ブラックホールの質量分布



- 暗黒物質とLIGOイベントを両方説明できる

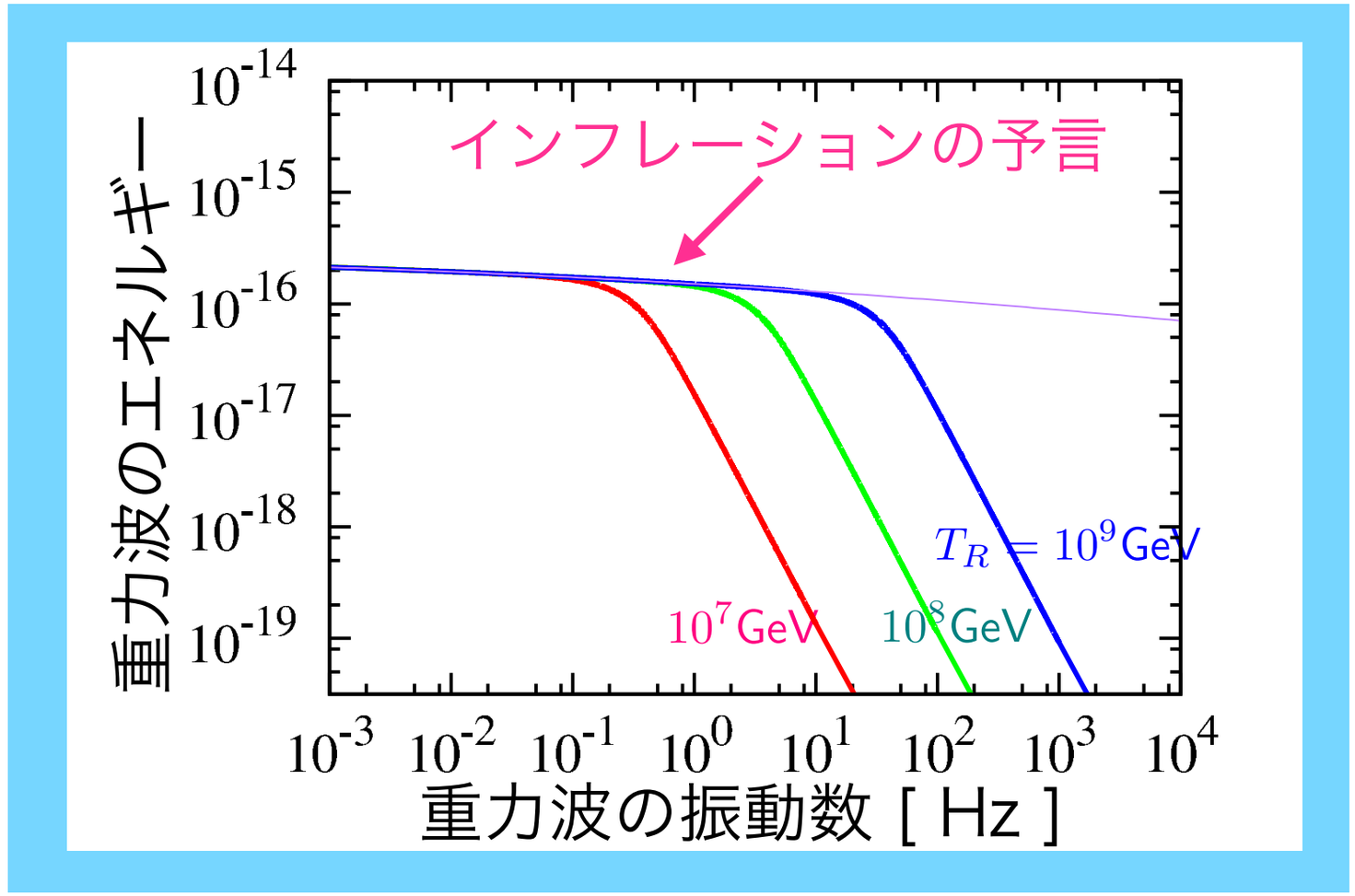
6. 原始ブラックホールと背景重力波

雑誌ニュートンから

インフレーションで作られる重力波

- インフレーションではインフラトン場の揺らぎと同時に重力場揺らぎも生成される → 長波長の重力波
- 重力波は小さくて直接検出は難しい
- 重力波は宇宙背景放射の偏光として観測される可能性

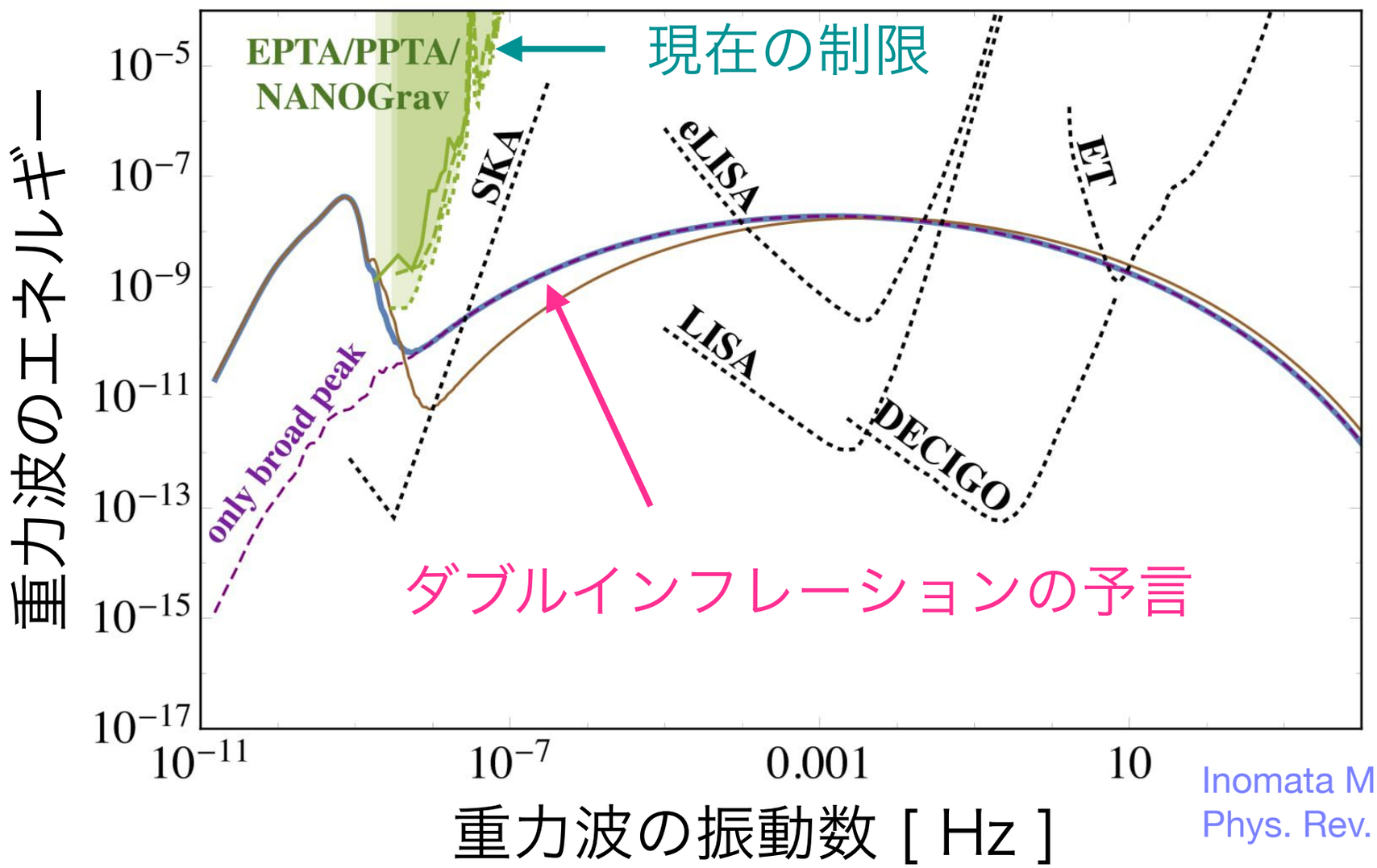
→ 菅井先生の話



Jinno, Moroi, Takahashi JCAP 1412, 006 (2014)

密度揺らぎが作る重力波

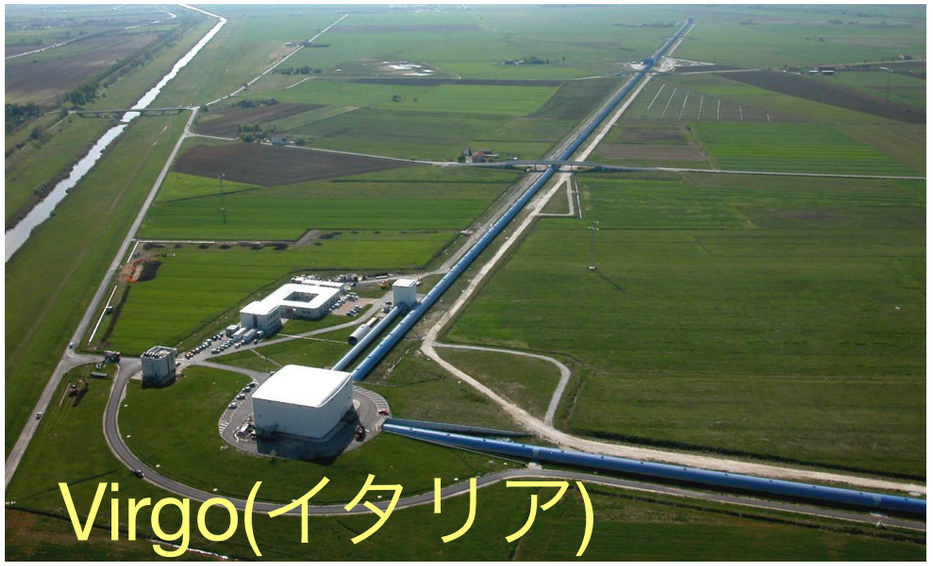
- 原始ブラックホールができるような大きな密度揺らぎがある場合、密度揺らぎから2次的に重力波が生成される
- LIGOイベント・暗黒物質を説明する密度揺らぎが作る重力波は将来の重力波検出実験(LISAなど）で検証できる



Inomata MK MukaidaYanagida
Phys. Rev. D97, 043514 (2018)

原始ブラックホールの発見に向けて

- 重力波イベントの観測
  - LIGOにVirgoとKAGRAが加わりによって多くのイベントが見つかることが期待
  - BHの質量、スピンの情報
  - スペースでの観測（LISA)
- マイクロレンジングの観測
  - 重力波イベントを起こす BHによる重力レンズ効果



https://www.ligo.caltech.edu

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

7. まとめ

- 原始ブラックホールはとても興味深い
- 近い将来見つかるかもしれない

雑誌ニュートンから