KAVLI IPMU INSTITUTE FOR THE PHYSICS AND MATHEMATICS OF THE UNIVERSE

我孫子サイエンスカフェ
2019年5月19日

宇宙の暗黒物質

— 正体は原始ブラックホール？—

東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構
佐々木節

暗黒物質とは

宇宙の構成要素

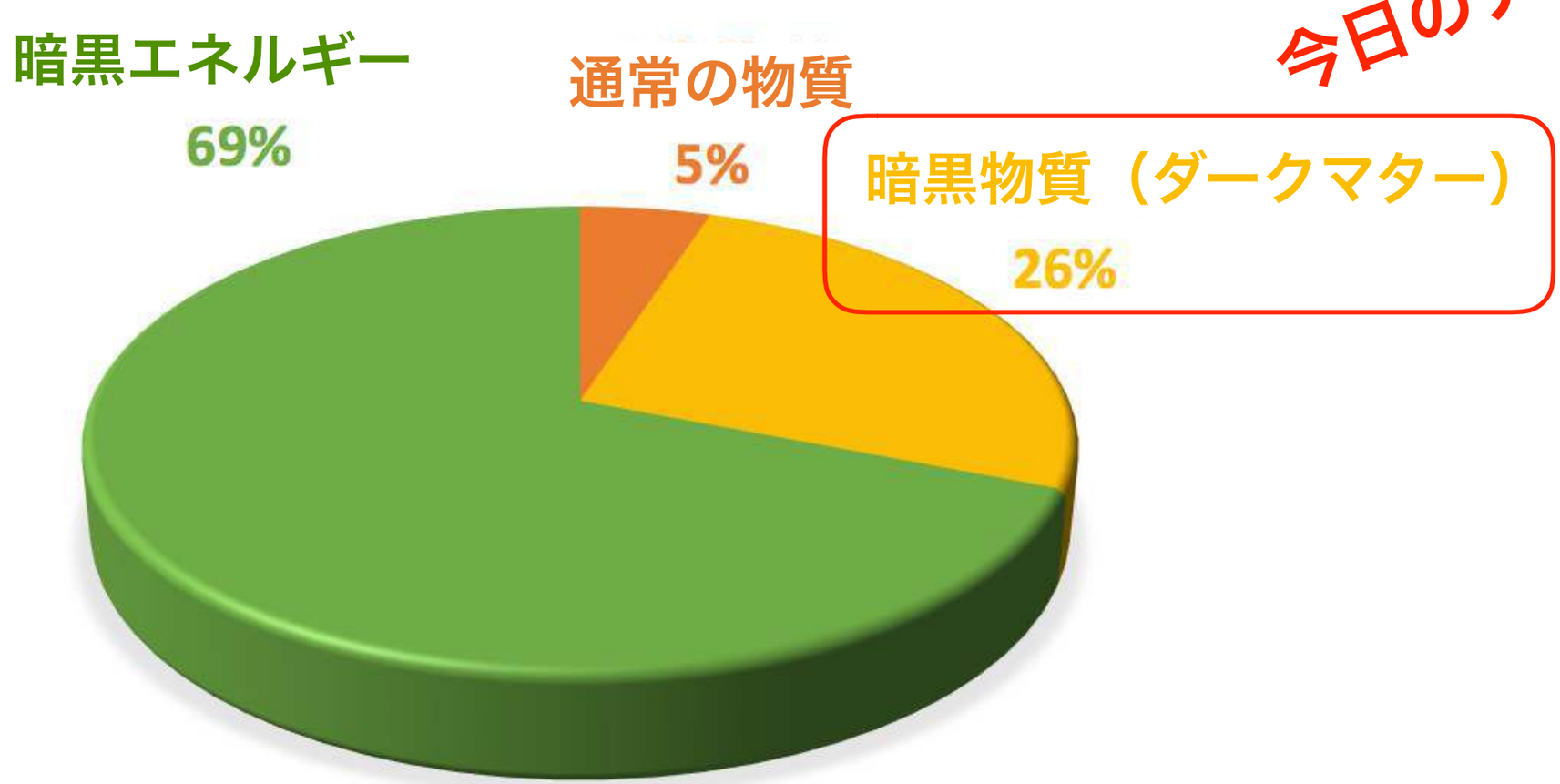
・星や地球などを作る通常の物質はわずか５パーセント

・宇宙の大半を占めるのは未知の暗黒エネルギー：正体は全く不明

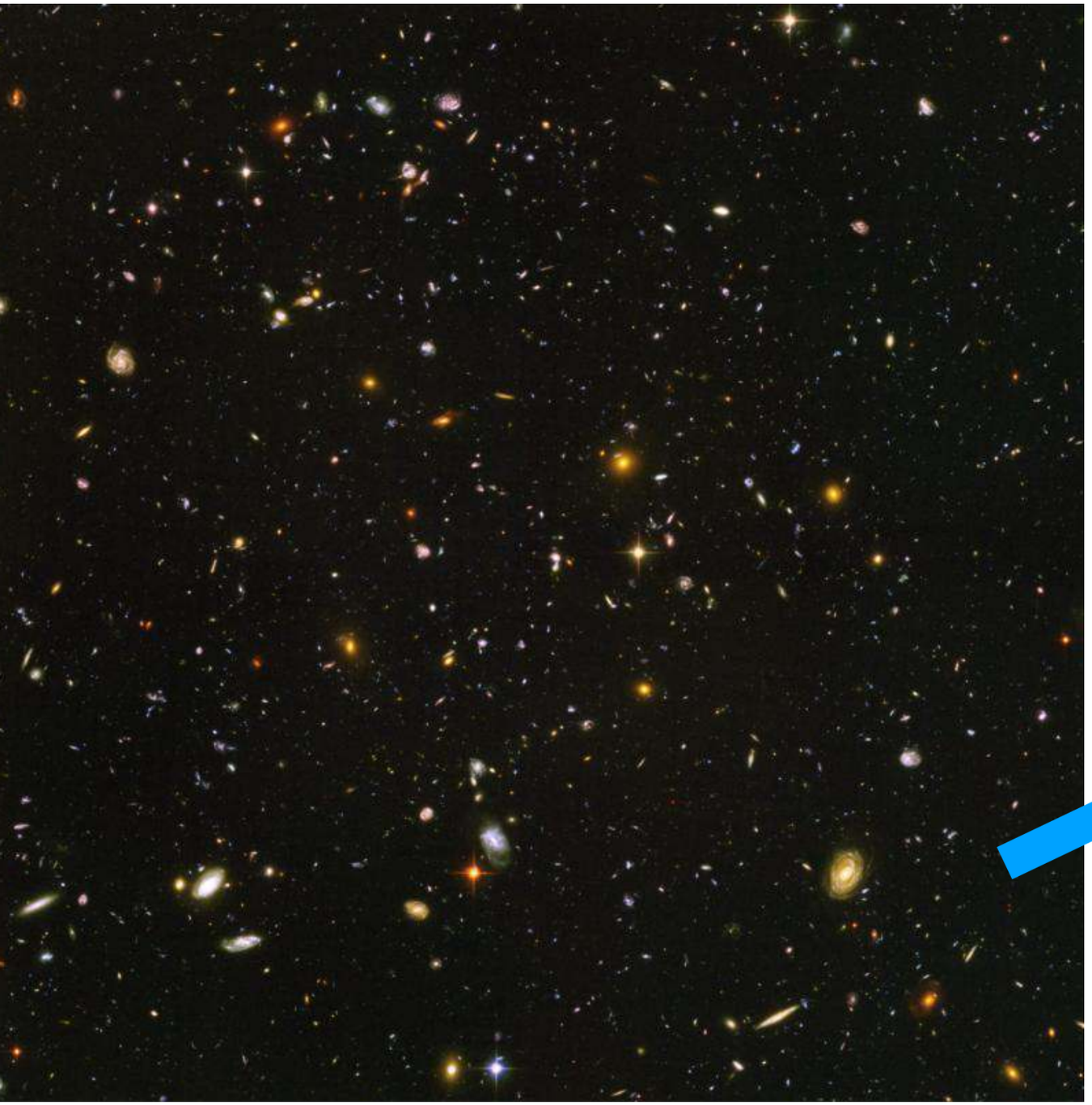
→ 今後の課題

・次に大きな割合を占めるのが暗黒物質：素粒子？ブラックホール？

今日のテーマ

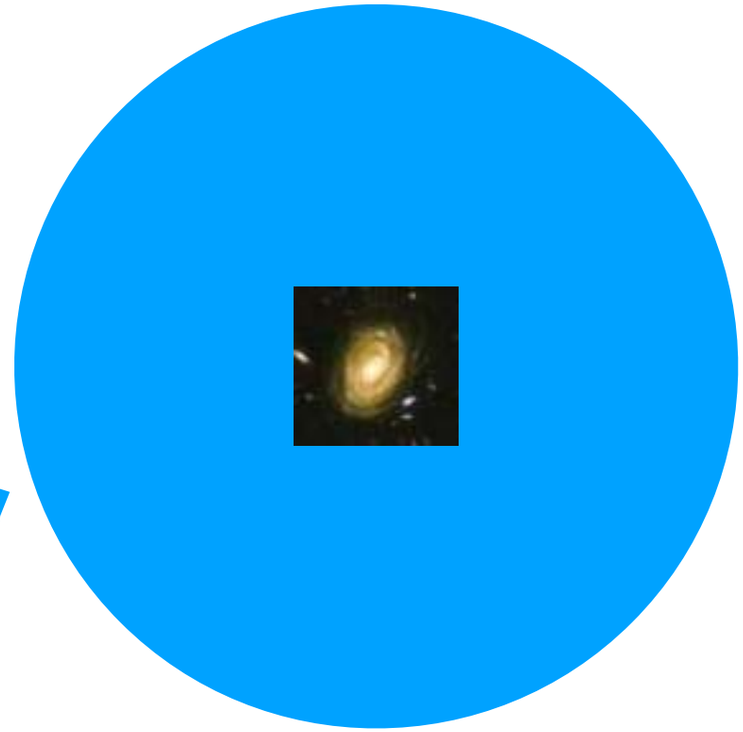


暗黒物質はどこにある？



すばる望遠鏡で見た深宇宙

宇宙には我々の銀河（天の川銀河）
のような銀河が無数にある



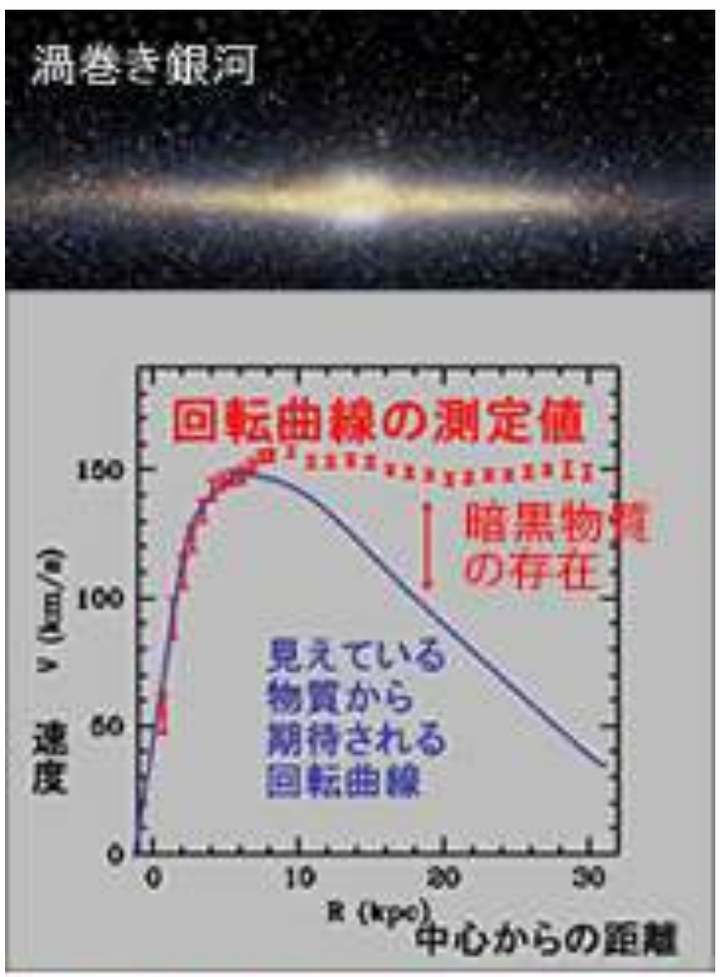
銀河の周りに膨大な量の「暗黒物質」

どうやって分かる？(1)渦巻き銀河の回転曲線

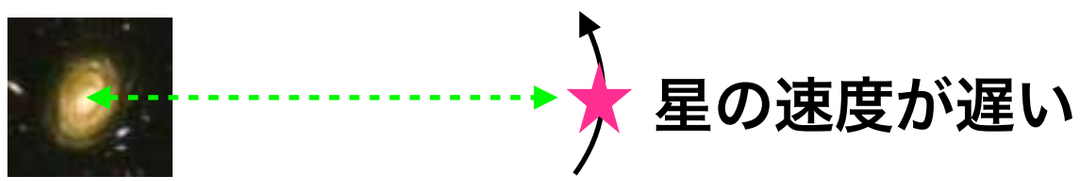
重力の法則 ⇨ 星の速度 v の2乗は中心物体の質量 M に比例し距離 r に反比例

$$v^2 = \frac{GM}{r}$$

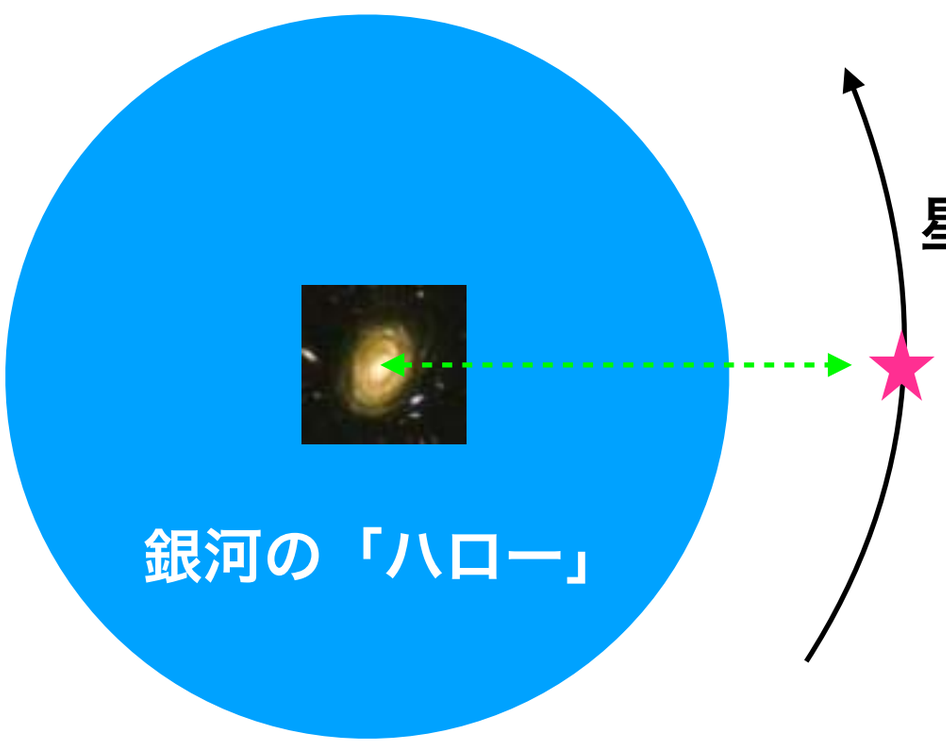
G: 重力定数



http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/xmass/darkmatter/index.html



見える物質による重力 << **暗黒物質による重力**



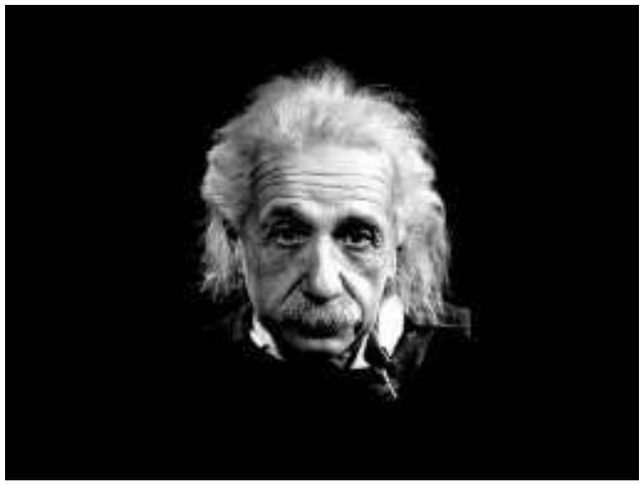
ハロー＝後光

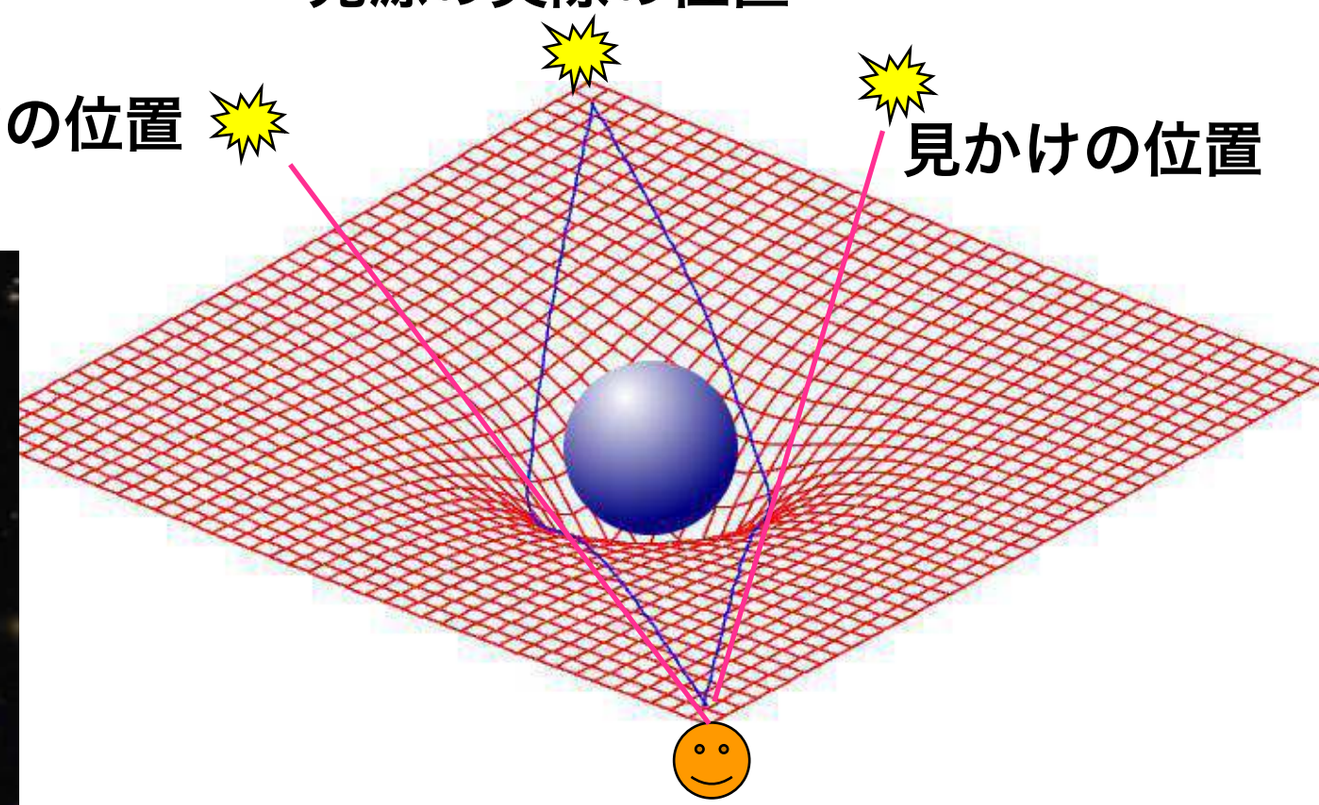
どうやって分かる？(2)重力レンズ

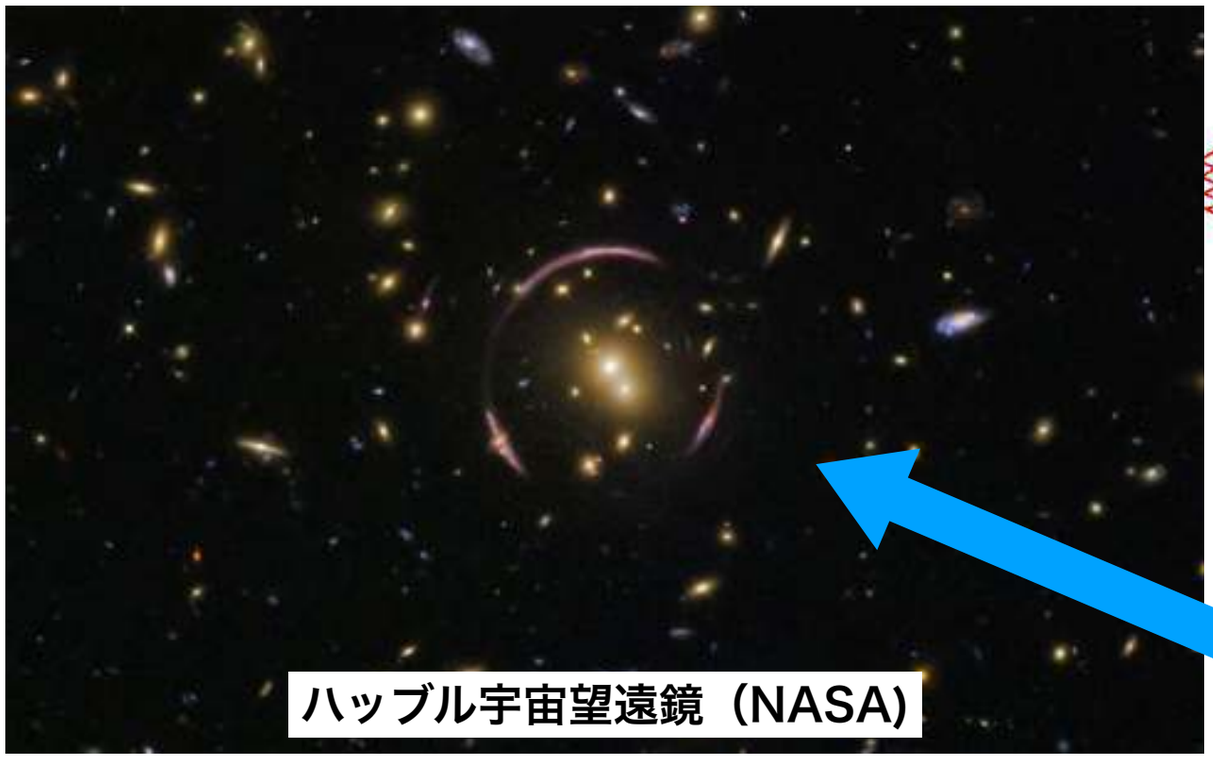
アインシュタインの一般相対論 ⇒ 物質（＝エネルギー）があると時空が曲がる

⇒ 物質の重力（時空の曲がり）で光の経路も曲がる

質量が大きいほど曲がり方も大きい



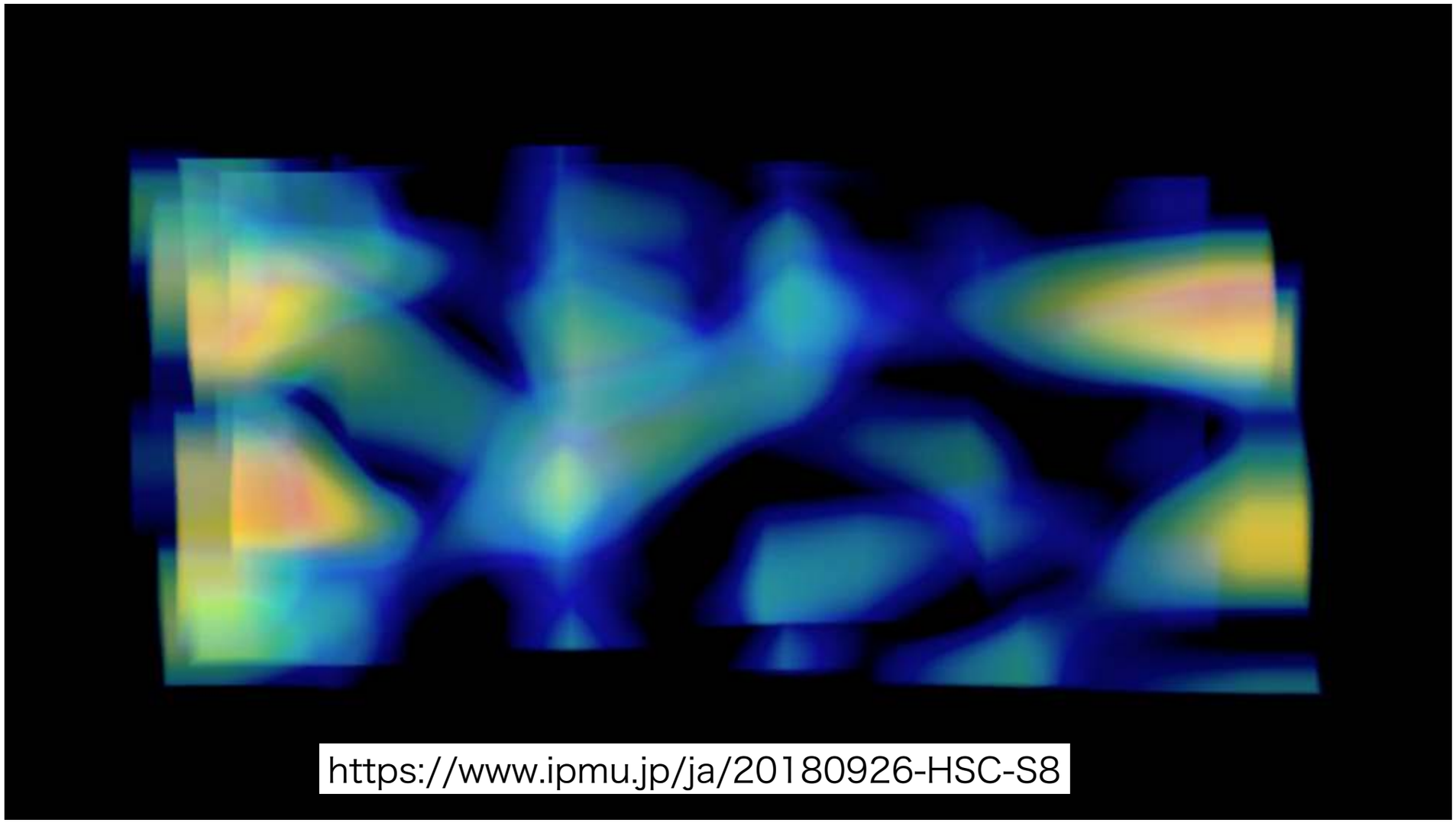




多量の暗黒物質による
重力レンズ現象

重力レンズ効果を使って暗黒物質の分布を再現

すばる望遠鏡 Hyper Suprime-Cam（世界最大級のデジタルカメラ）の成果

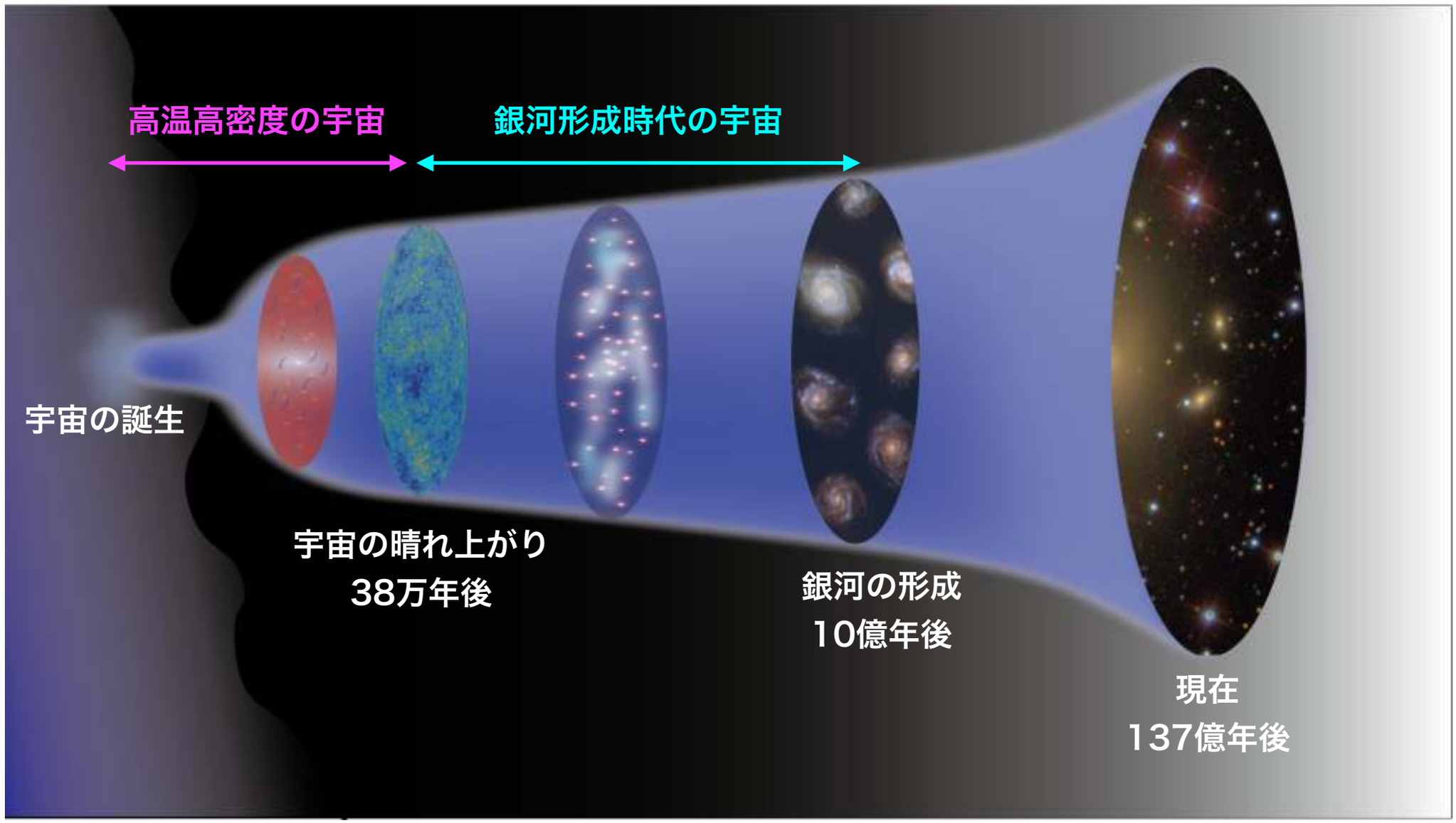


約70億光年

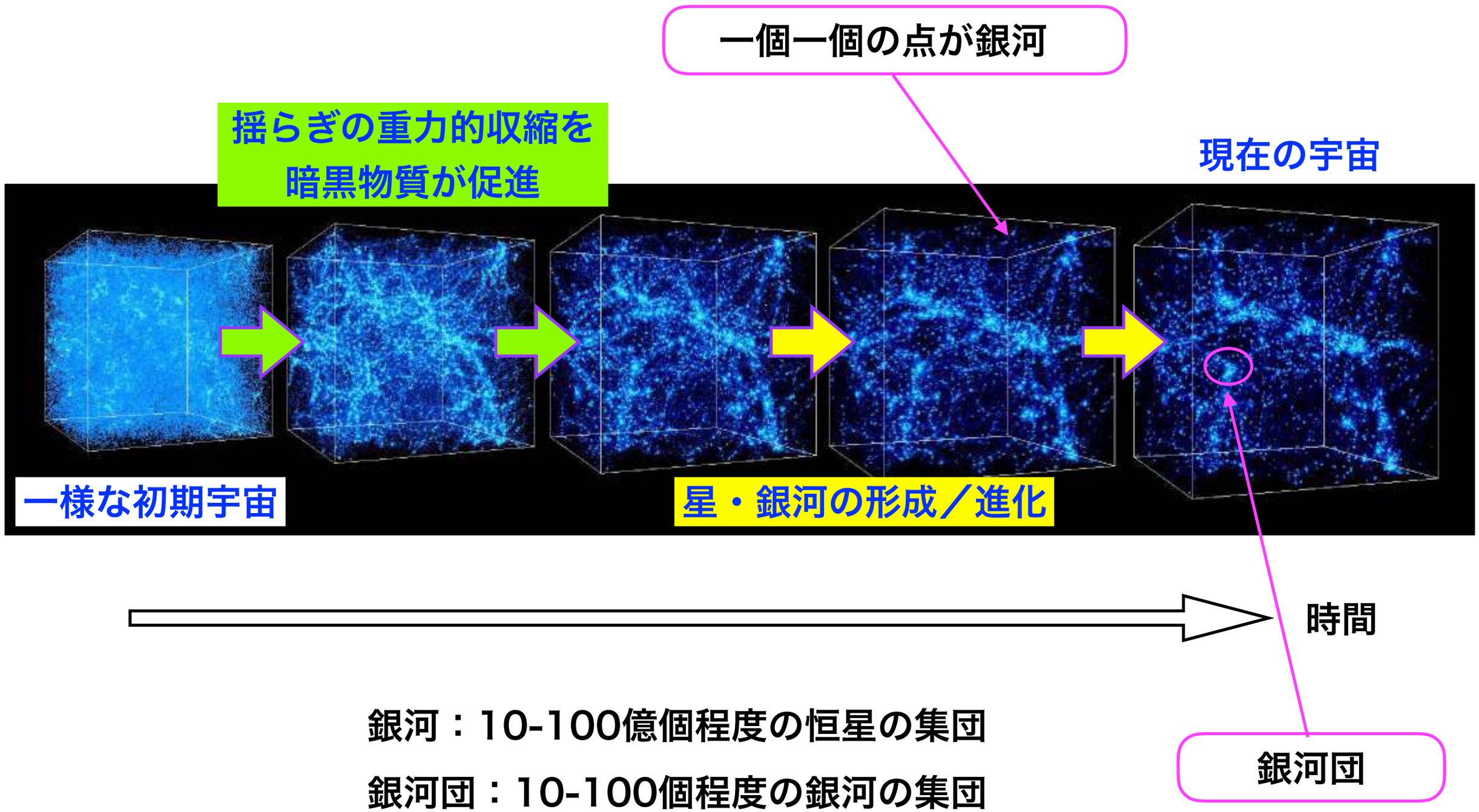
どうやって分かる？ (3)宇宙の構造形成

- 宇宙初期の小さな密度揺らぎが重力で潰れて成長して星や銀河ができた
- 10億年で星や銀河を作るためには，通常物質だけの重力では間に合わない

⇒ 暗黒物質の重力が必要



宇宙の大規模構造の形成



銀河：10-100億個程度の恒星の集団

銀河団：10-100個程度の銀河の集団

暗黒物質の正体？

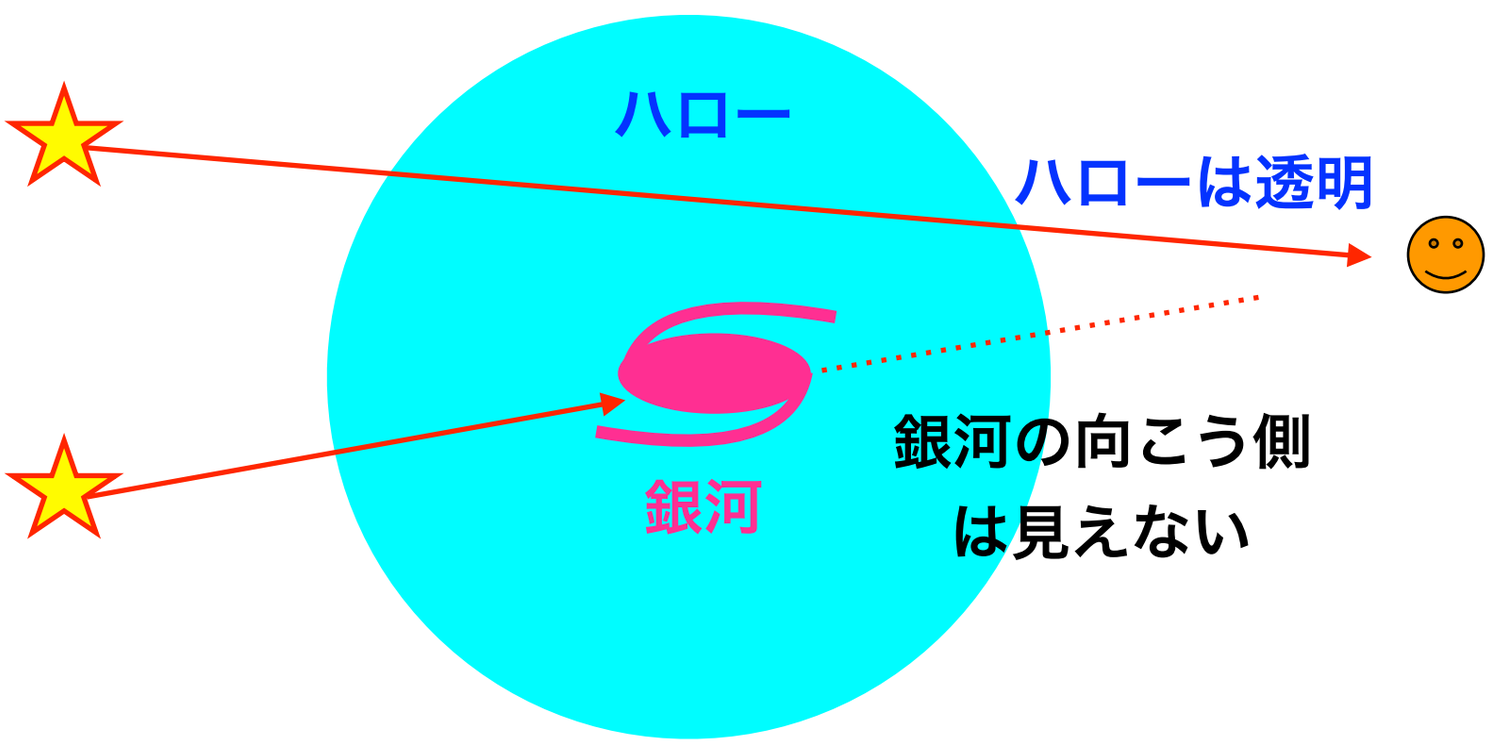
暗黒物質に必要な性質

- 光に対して透明で見えない（⇨暗黒物質というより透明物質と呼ぶべき！）

  通常の物質（電子や電磁波，原子・分子など）との相互作用が極めて弱い

- 重力的に引き合ってハローを形成

  重力に抗する圧力が小さい＝冷たい ⇨ 冷たい暗黒物質



その正体は？

- 未知の素粒子？
- ブラックホール？

今日のテーマ

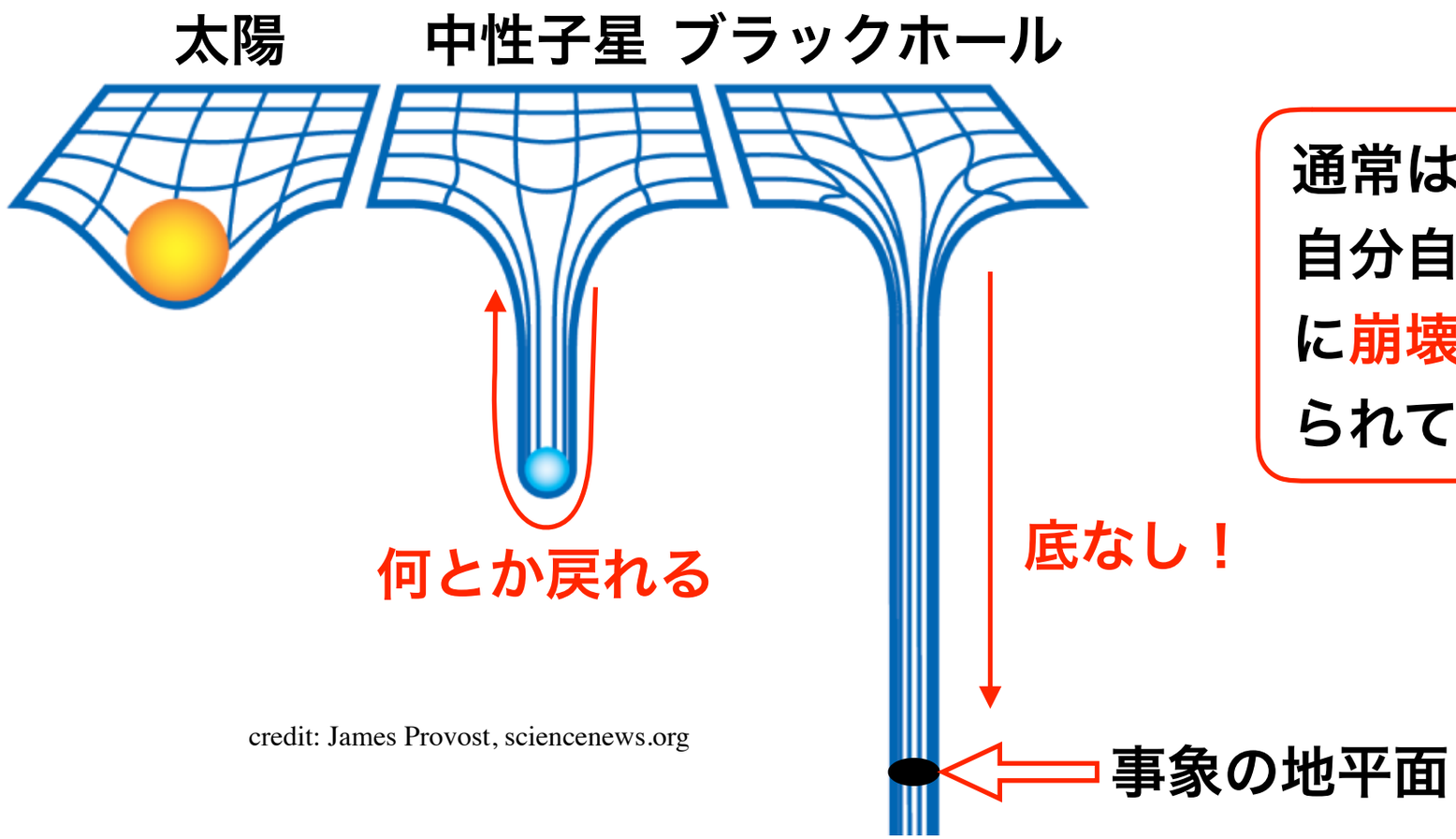
ブラックホール

ブラックホールとは

時空が非常に大きく曲がった極限で現れる時空の構造

ブラックホールの表面＝事象の地平面(イベント・ホライゾン)

＝一旦事象の地平面の中に入ると二度と外に出られない



credit: James Provost, sciencenews.org

通常は太陽の数十倍重い星が自分自身の重力を支えられずに崩壊して形成されると考えられている

⇩

太陽質量より重い
(10^{30} kg 以上)

ブラックホールはすごく小さい！

地球をブラックホールにすると半径は約１cm！

ブラックホールの「観測」

ブラックホールの質量＝太陽の65億倍

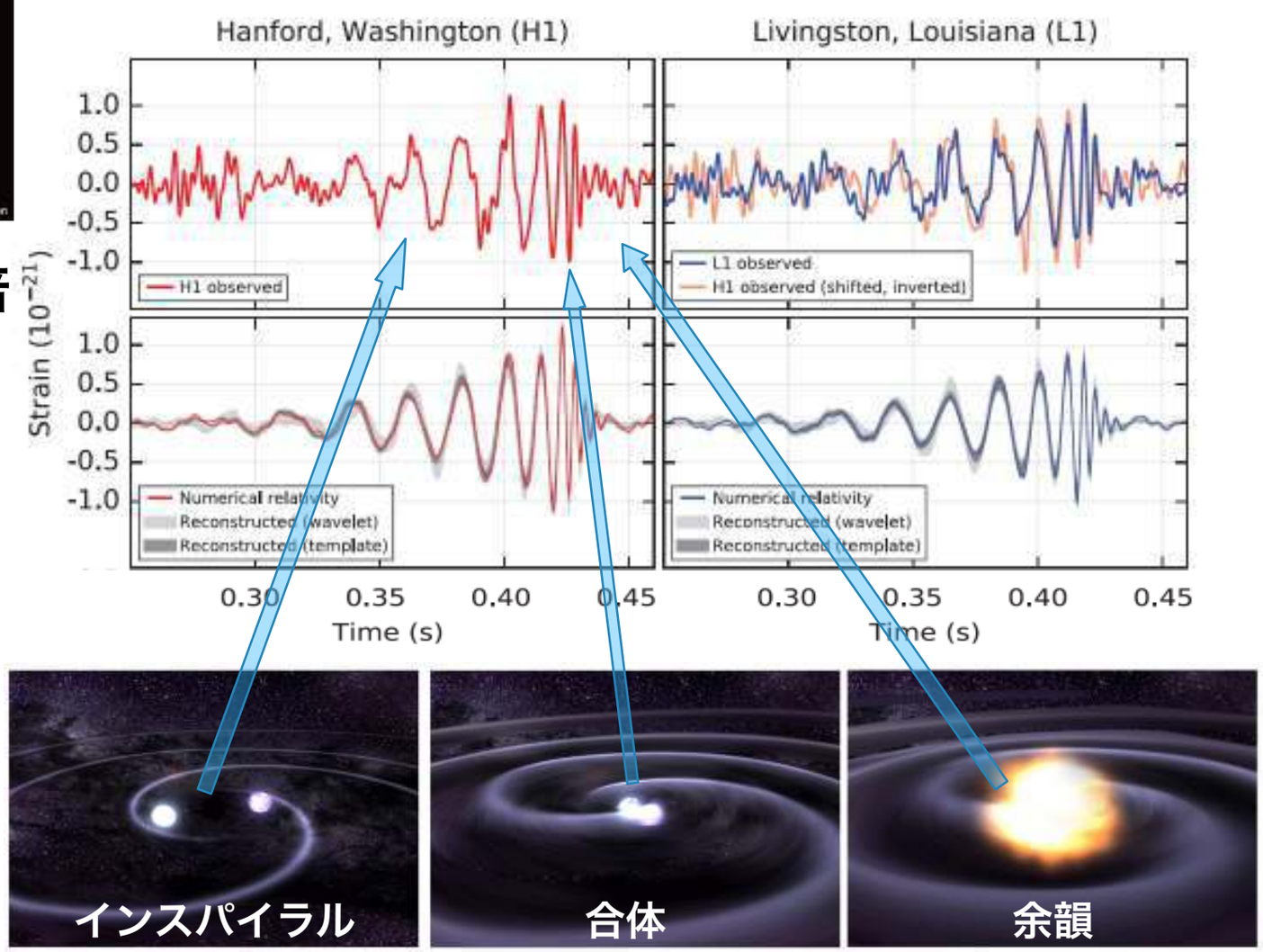
サイズ=太陽と地球の距離の100倍

超巨大ブラックホール

巨大ブラックホール

ブラックホールの質量＝太陽の30倍x2

サイズ＝300km程度



GW140914: LIGO重力波検出器

これらのブラックホールの起源は

大質量星の重力崩壊？

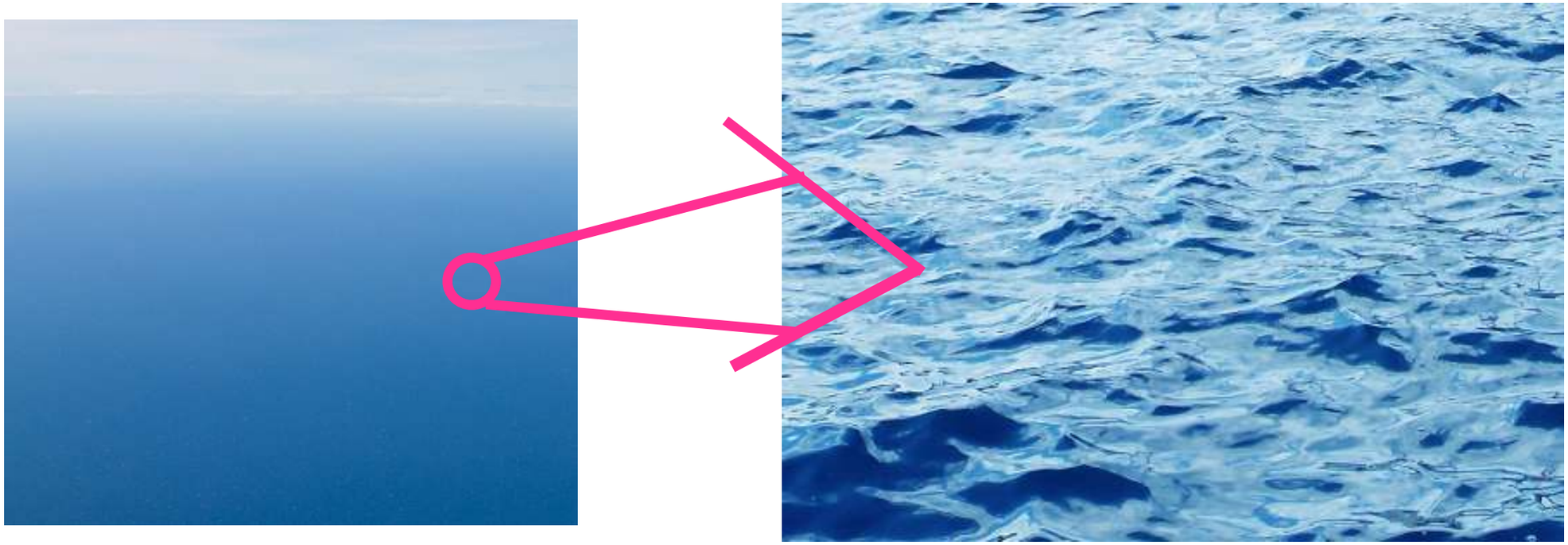
原始ブラックホール？

原始ブラックホールとは

宇宙のインフレーション時期の時空の大きな揺らぎに起因

インフレーション宇宙の量子揺らぎ

- 真空は量子論的には何もない静かな空間ではない
- ミクロの世界では素粒子が激しく生成消滅を繰り返している



上空から（マクロで）見た海は平らに見えるが，近づくと（ミクロに見ると）波打っている

インフレーション宇宙では急激な膨張により
ミクロの世界がマクロの世界に引き伸ばされ
ミクロの揺らぎはそのまま凍結する

⇒

銀河・星・生命など
宇宙の全ての「構造」の起源

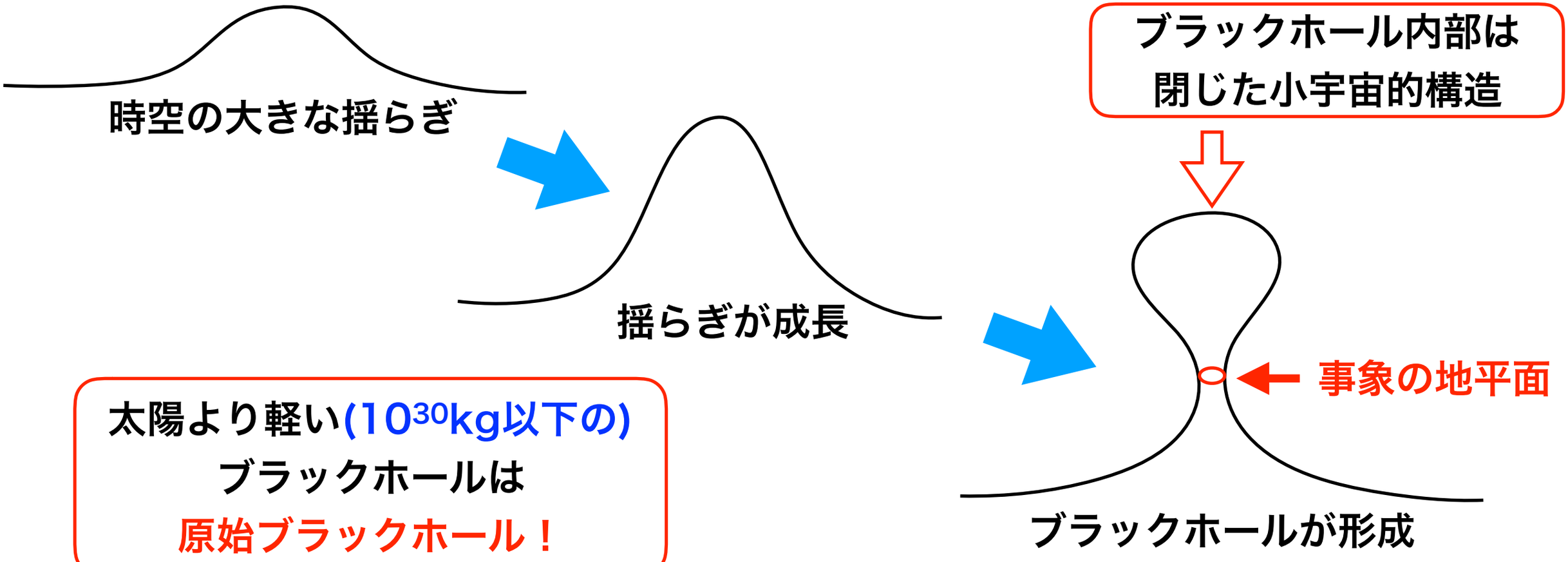
原始ブラックホール

宇宙の**極めて初期**に時空の**大きな揺らぎ**が成長して形成される

宇宙誕生から1秒も経たない頃

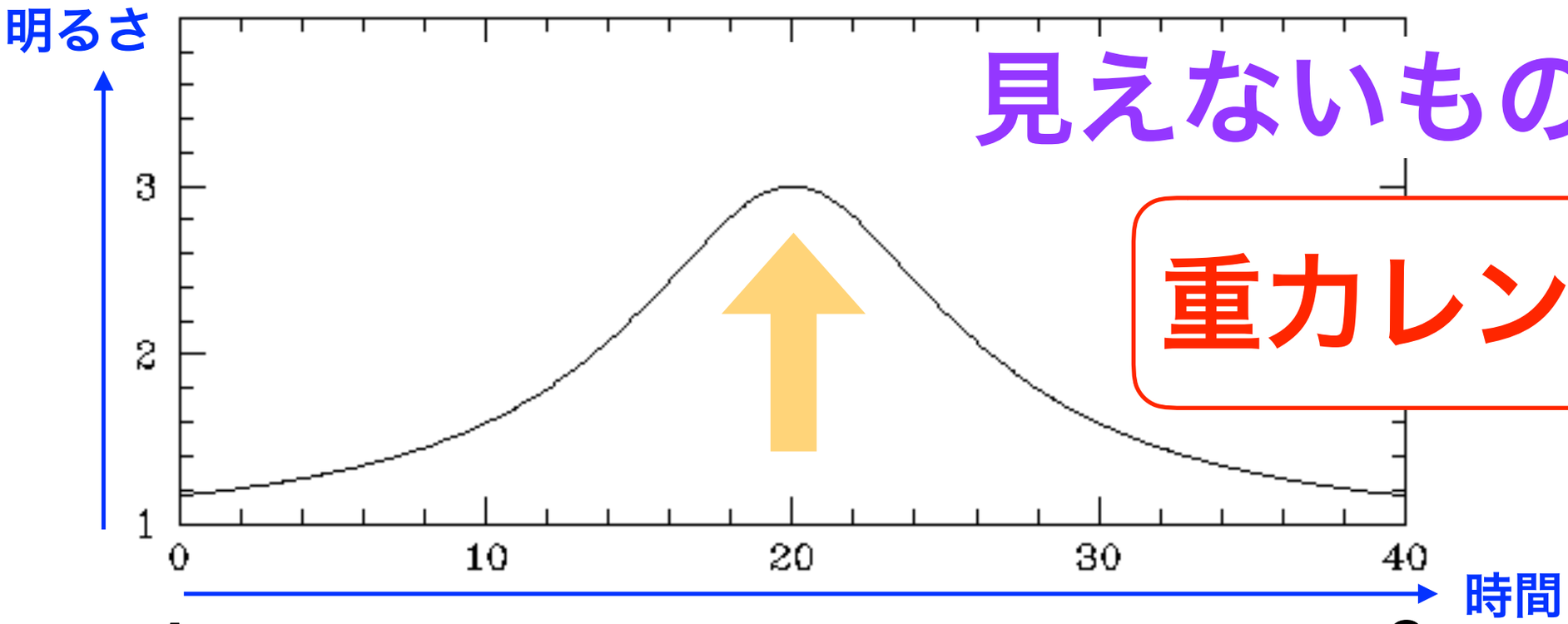
インフレーション宇宙の量子揺らぎ

- 多分10^{-20} ～ 1 秒の間に形成
- 原始ブラックホールの質量は小惑星程度のものから太陽の10万倍くらいまで様々
  (~10^{15} kg) (~10^{35} kg)



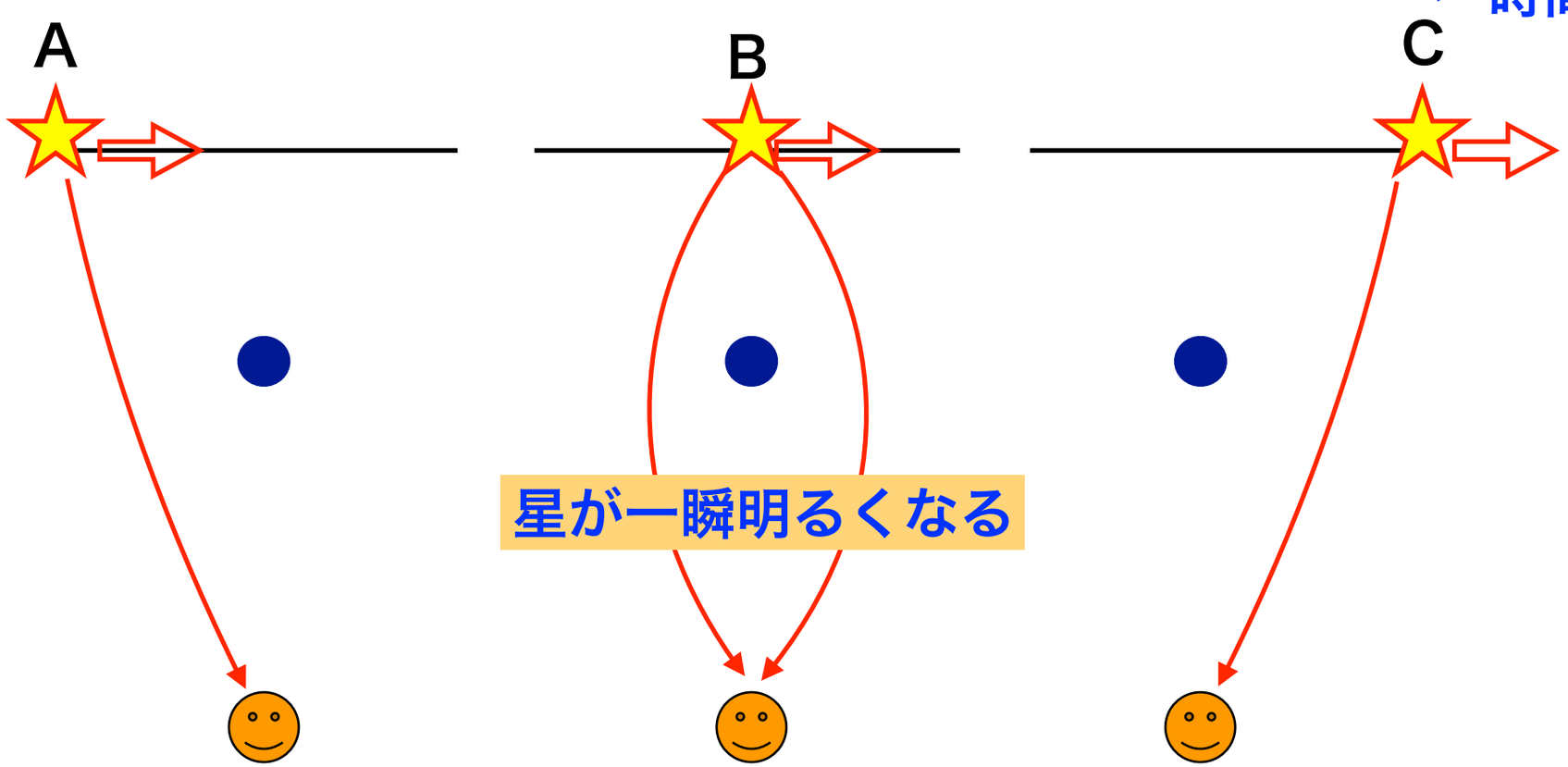
太陽より軽い(10^{30}kg以下の)
ブラックホールは
原始ブラックホール！

原始ブラックホール探索



見えないものを見る!

重力レンズ効果！

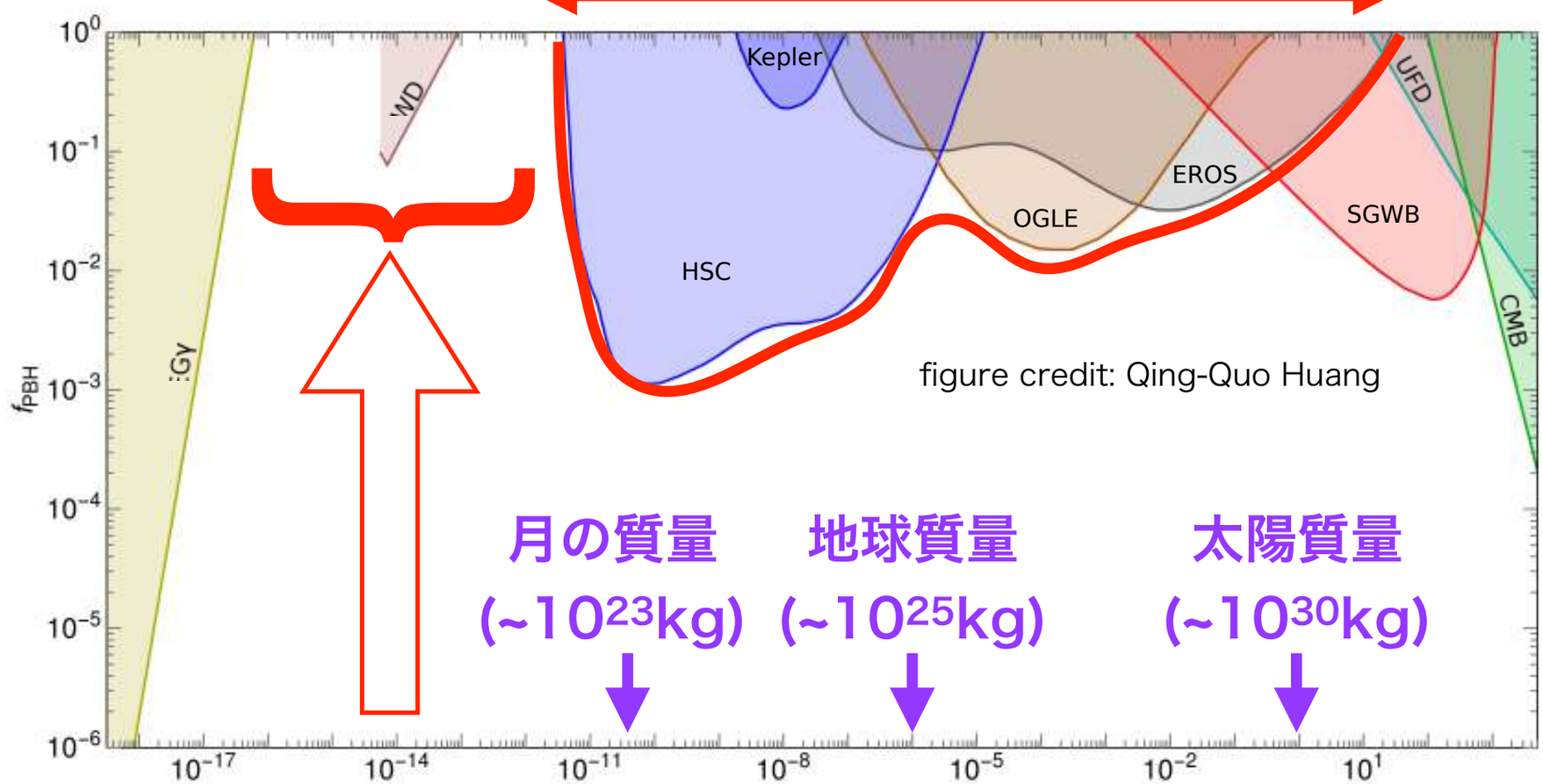


原始BH(ブラックホール)=暗黒物質？

原始BHの物質に対する割合（%）

重力レンズ観測から強い制限

10^{18} - 10^{31}kgの原始BHは暗黒物質ではない



月の質量 (~10^{23}kg)

地球質量 (~10^{25}kg)

太陽質量 (~10^{30}kg)

10^{15} - 10^{18}kg には制限がない！

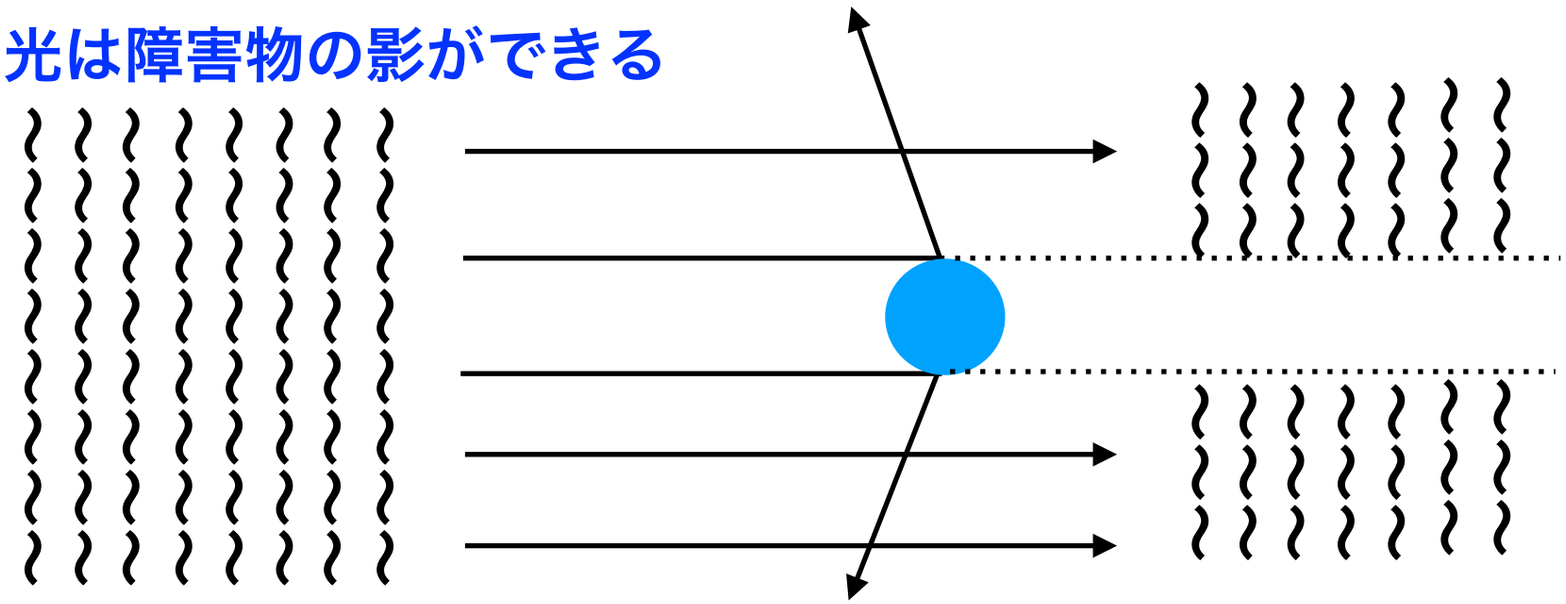
原始BHの質量 / 太陽質量

サイズが小さ過ぎて，可視光では重力レンズ効果が起こらない

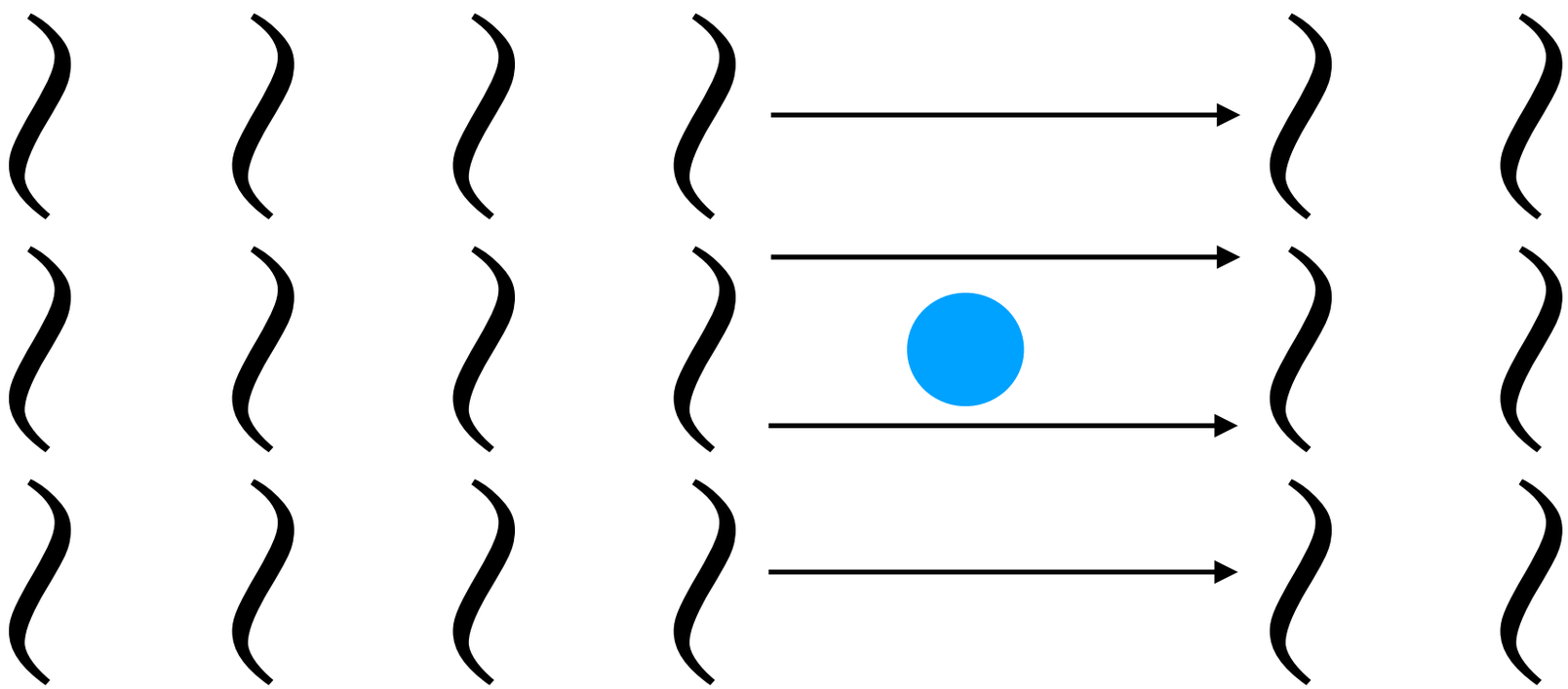
（BHの直径 << 光の波長） 光の回折現象

光の回折現象

短い波長の光は障害物の影ができる

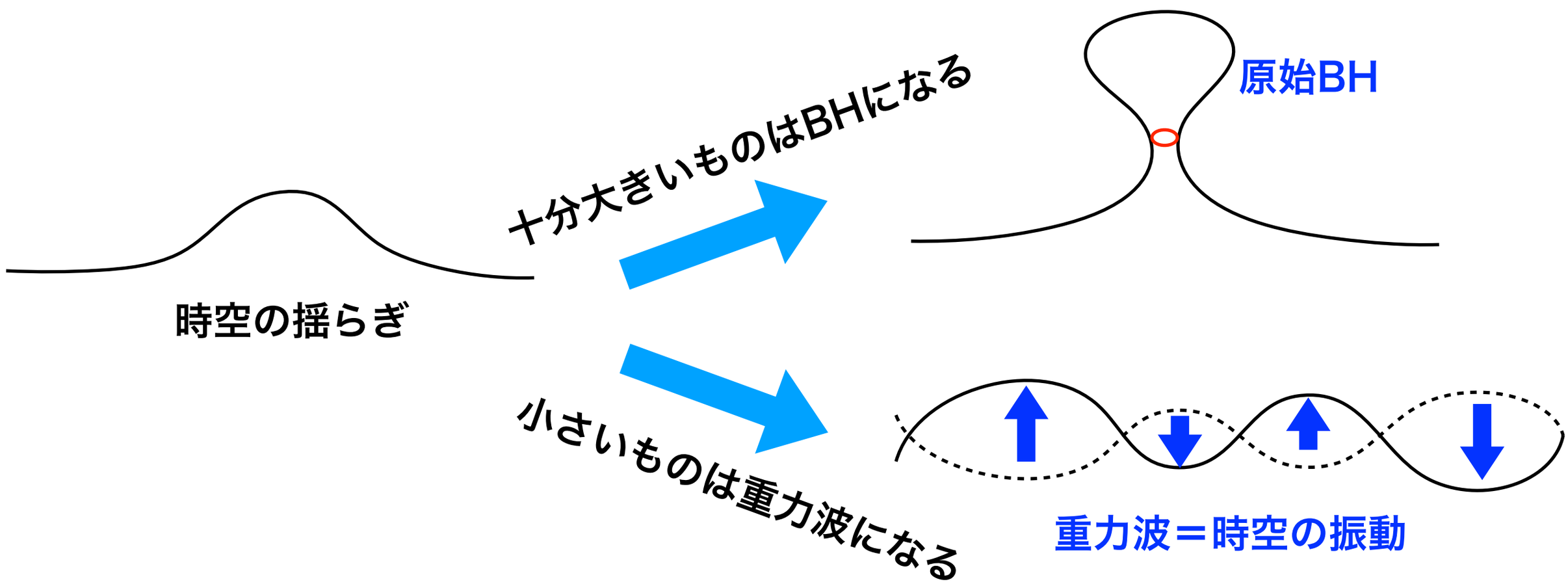


長い波長の光は障害物を回り込んで進む



重力波が極小原始BHを捉える！

サイズ 10^{-4} mm (0.1ミクロン)以下



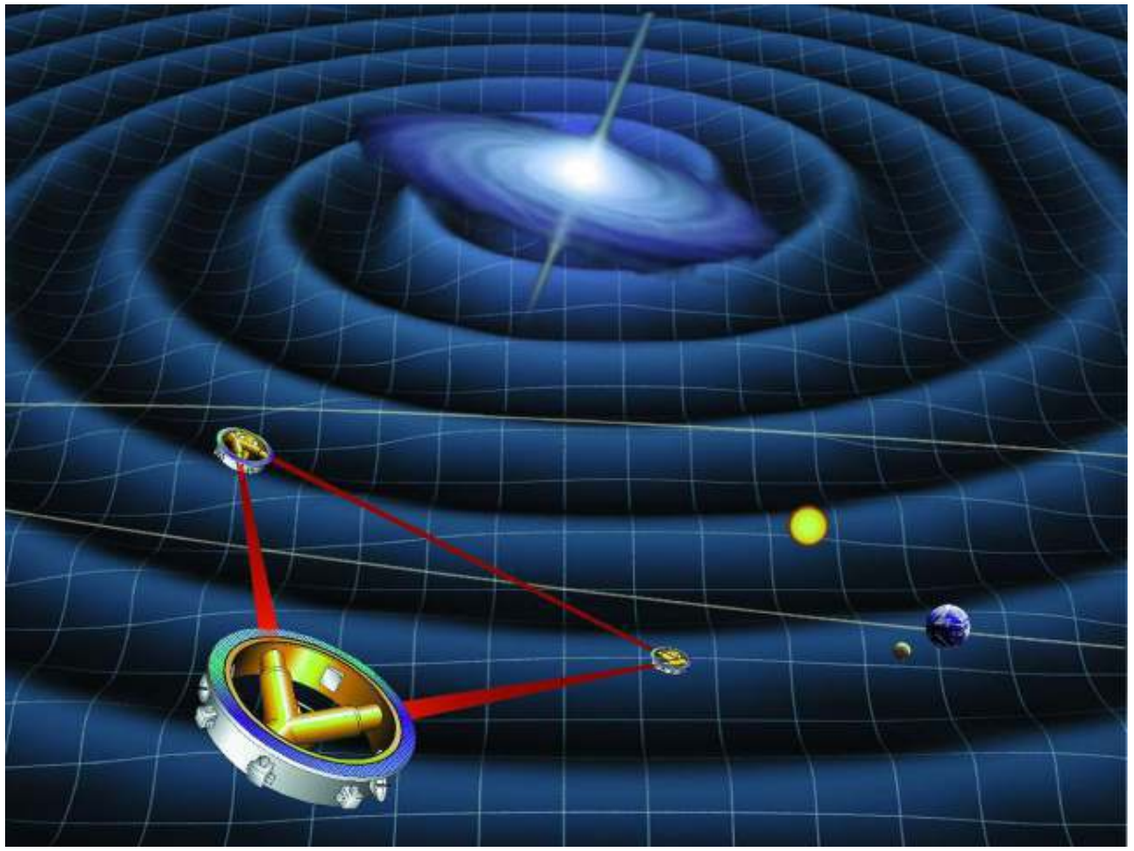
原始ブラックホールが形成されるのであれば
付随して多量の重力波が生成されるはず

⇨ **背景重力波を検出せよ！**

振動数〜10^{-3} Hz

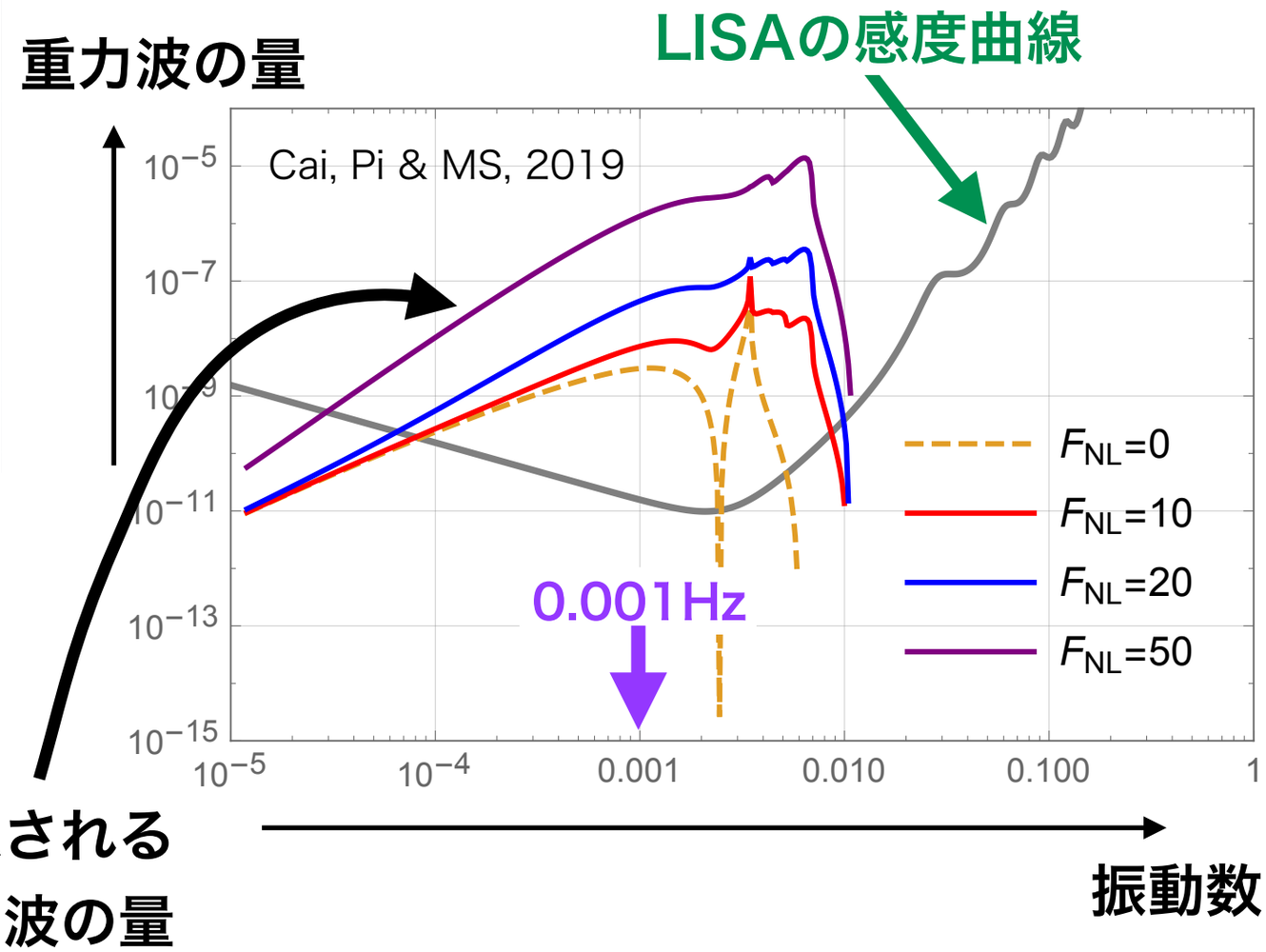
LIGOやKAGRAの振動数帯：10 - 1000 Hz

重力波宇宙アンテナ



LISA 2035年打上げ予定
（アメリカ・ヨーロッパ）
腕の長さ: 5,000,000 km

Taiji (太極) 203X ?
（中国＋？）
腕の長さ: 3,000,000 km

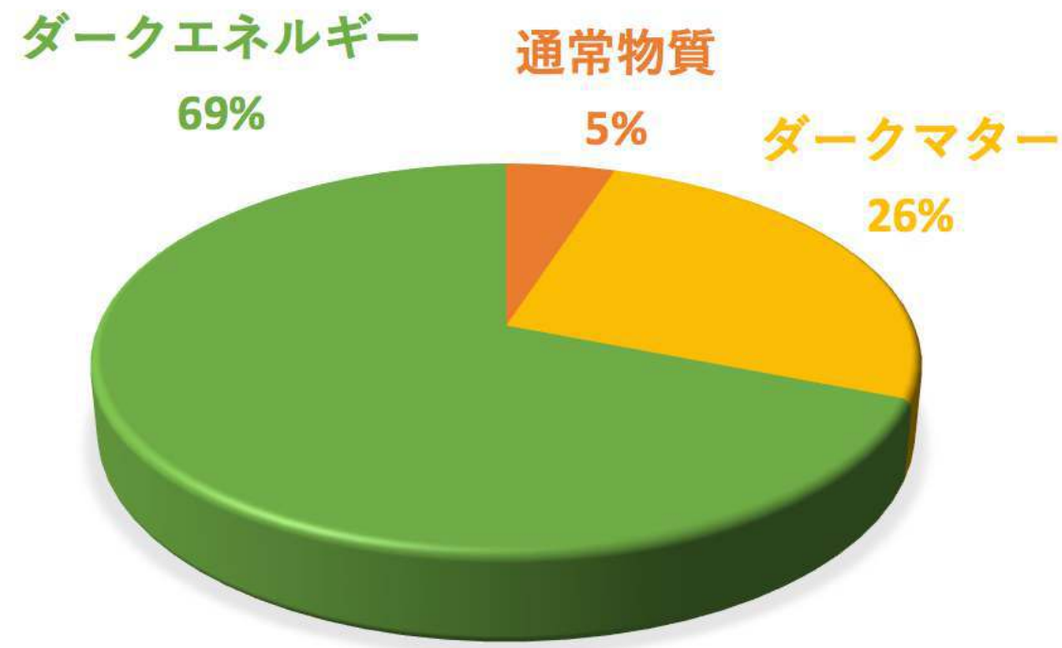


原始BH=暗黒物質ならばLISAが必ず検出！

まとめ

暗黒物質の原始ブラックホール説

- 通常の物質は宇宙の構成要素の5パーセント
  星や星雲など，銀河の見える部分を構成
- 69パーセントは暗黒エネルギー
  正体不明：これからの課題
- 26パーセントは暗黒物質
  正体不明：未知の素粒子？



⇕

極小サイズの原始ブラックホールの可能性

10^{-6} -10^{-4} mm

10^{18} -10^{20} kg

⇓

背景重力波の観測により検証

今後の発展に乞うご期待！