



Title	ブラックホールと重力波天文学
Author(s)	長峯, 健太郎
Citation	高大連携物理教育セミナー報告書. 2017, 28
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/60516
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

ブラックホールと 重力波天文学

大阪大学大学院

理学研究科地球科学専攻

長峯健太郎



今日のトピック

- ・ブラックホール(BH)とは何か？
- ・ブラックホール連星系, 巨大ブラックホール
- ・重力波とは何か？
- ・LIGOによる重力波の直接検出
- ・その宇宙物理学的な意味
- ・（大質量星と超新星爆発）
- ・原始重力波とインフレーション

ブラックホールとは？

Black Hole (BH)

Laplace



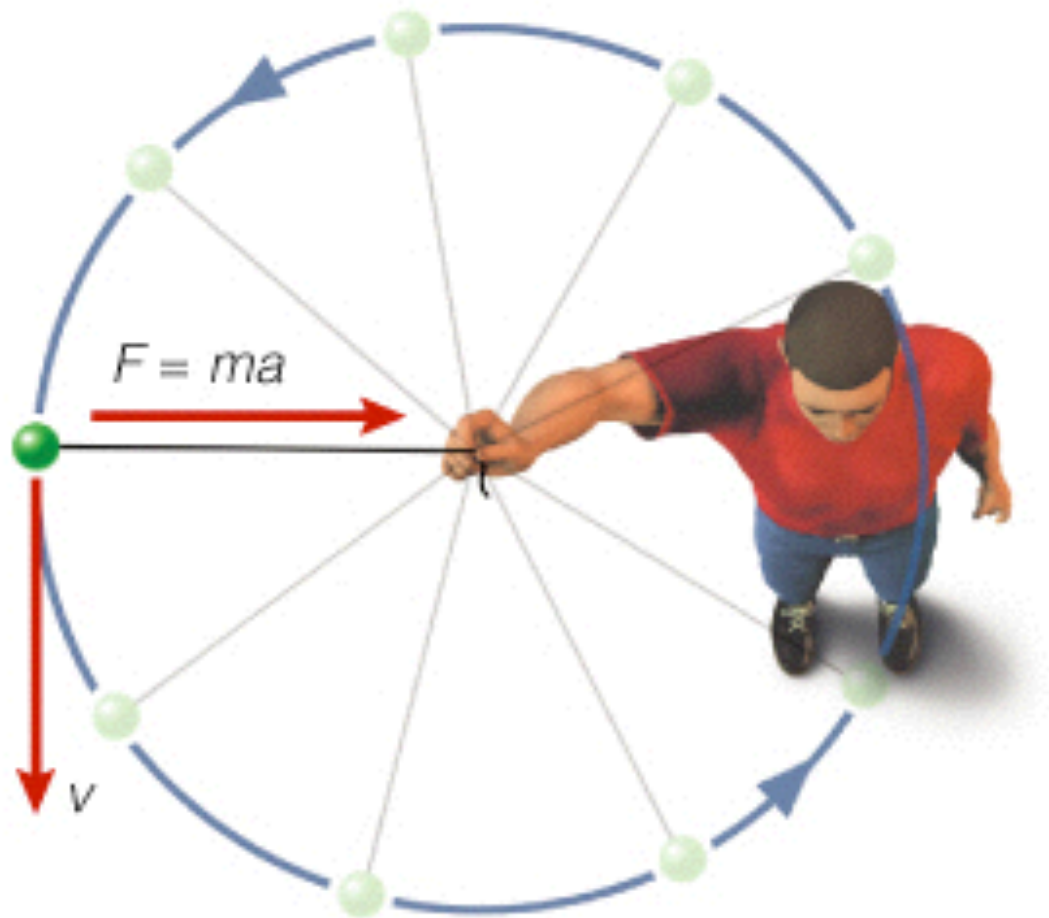
- 最初の提案: 17世紀後半, イギリスの哲学者 *John Mitchell* と、フランスの物理数学者 *Pierre Laplace*
- *John Wheeler* が “black hole” と命名
- BHとは、その重力が強すぎるために光すらも抜け出せない天体である→すなわち 真っ黒 (black)!!



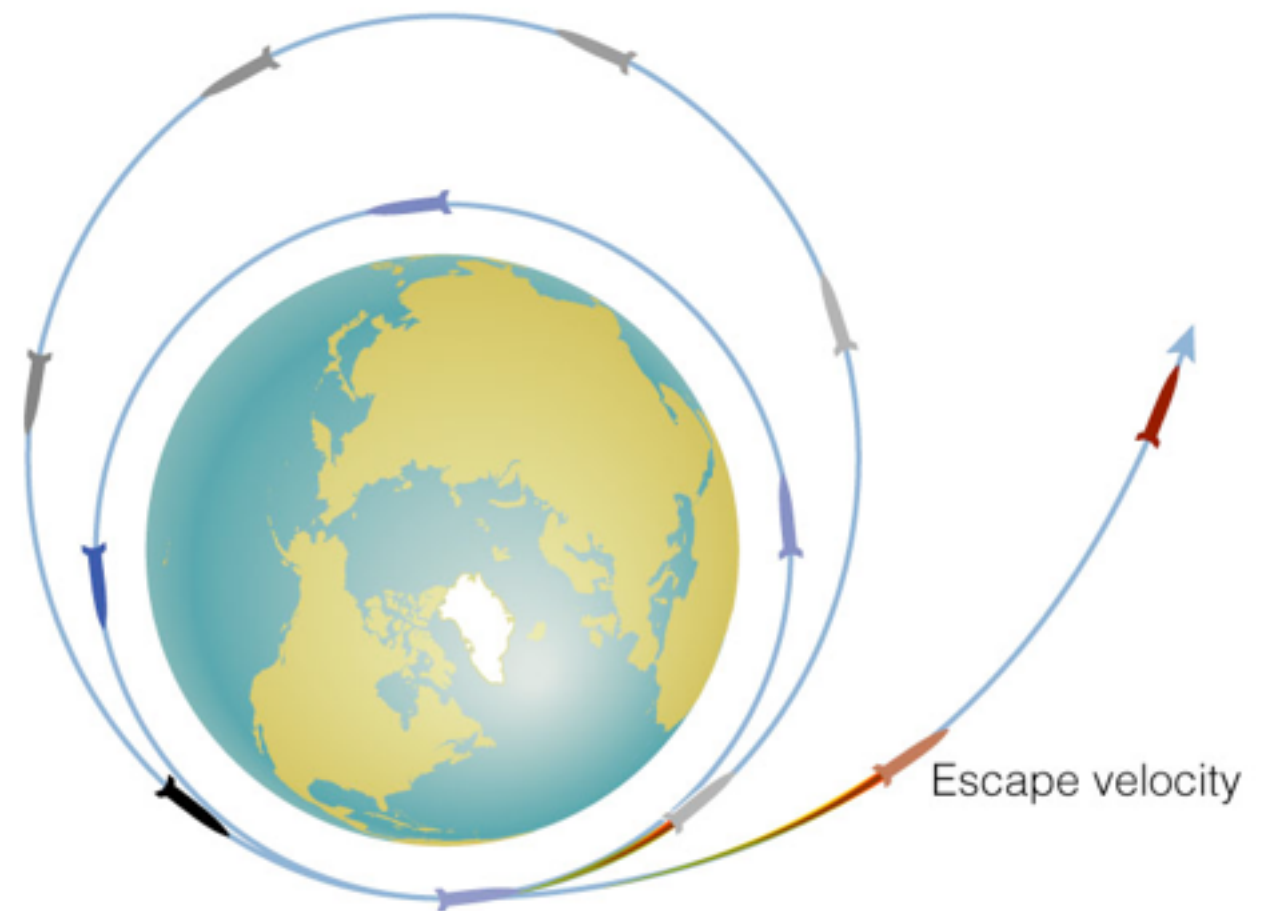
Wheeler

Escape Velocity 脱出速度

円運動



円軌道から抜け出す臨界速度

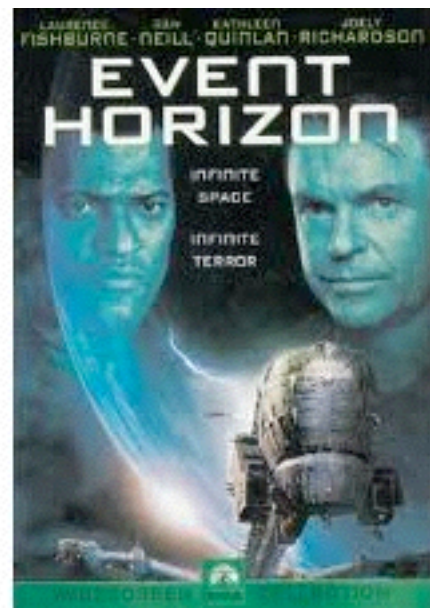


$$v_{\text{esc}} = \sqrt{\frac{2GM}{r}}$$

Event Horizon

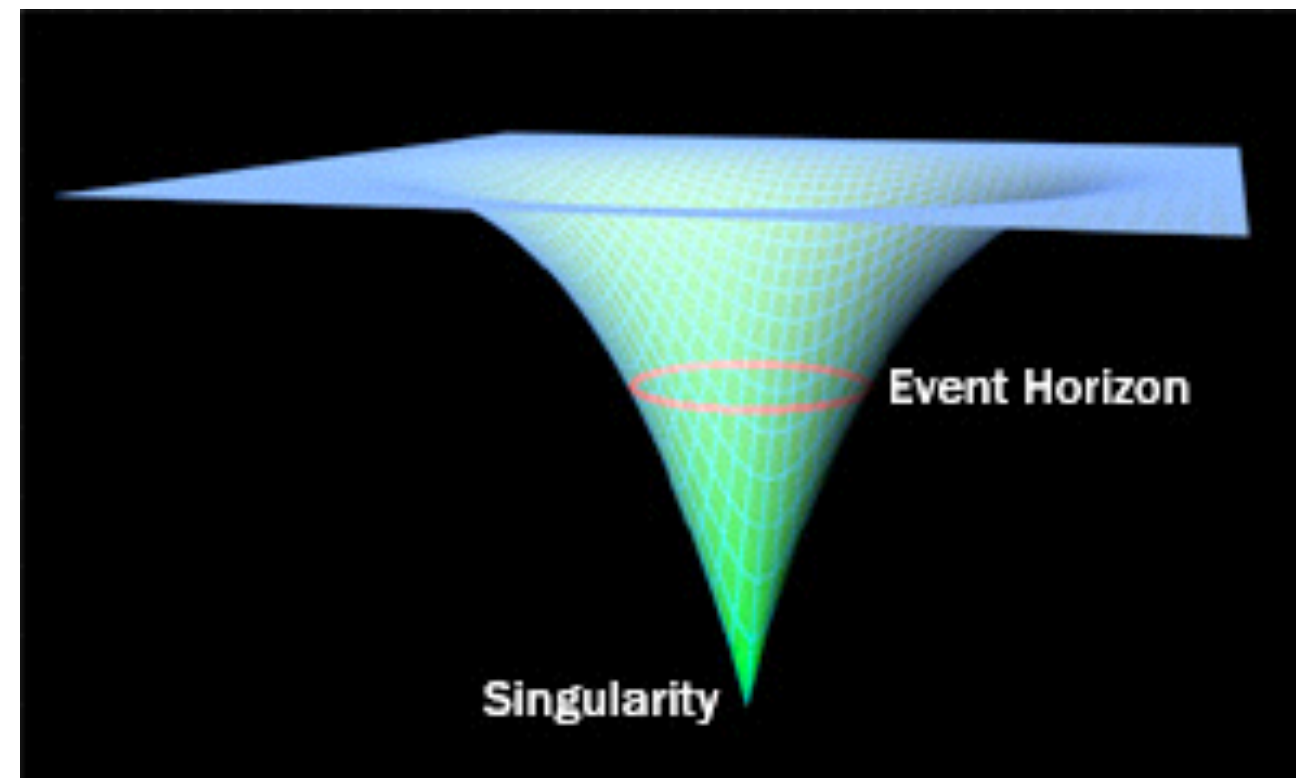
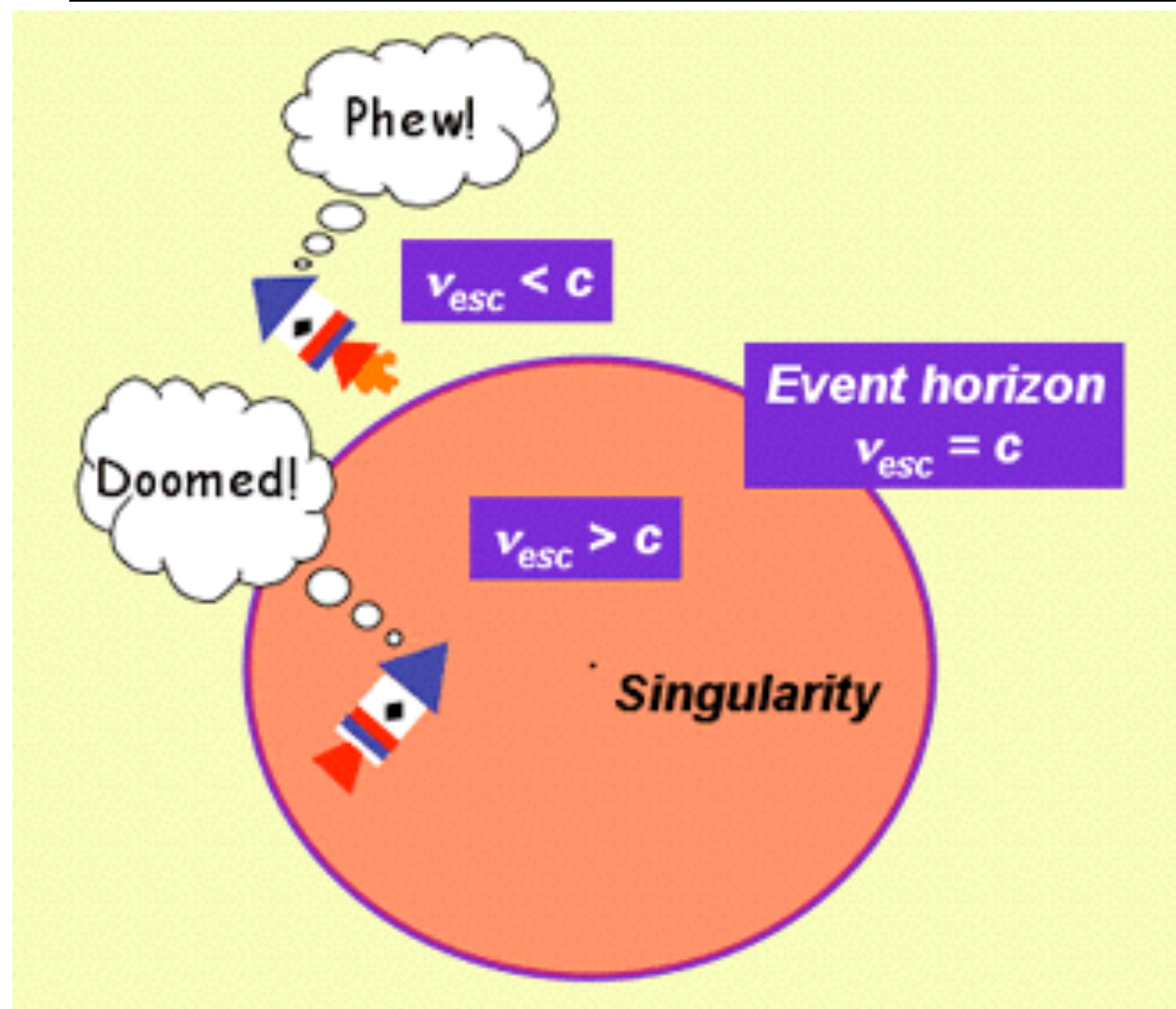
事象の地平線

BHのサイズはどのように決めるか？



Event horizonとは:

「**脱出速度** = **光速**」となる半径



特異点

Schwarzschild Radius

シュバルツシルド半径

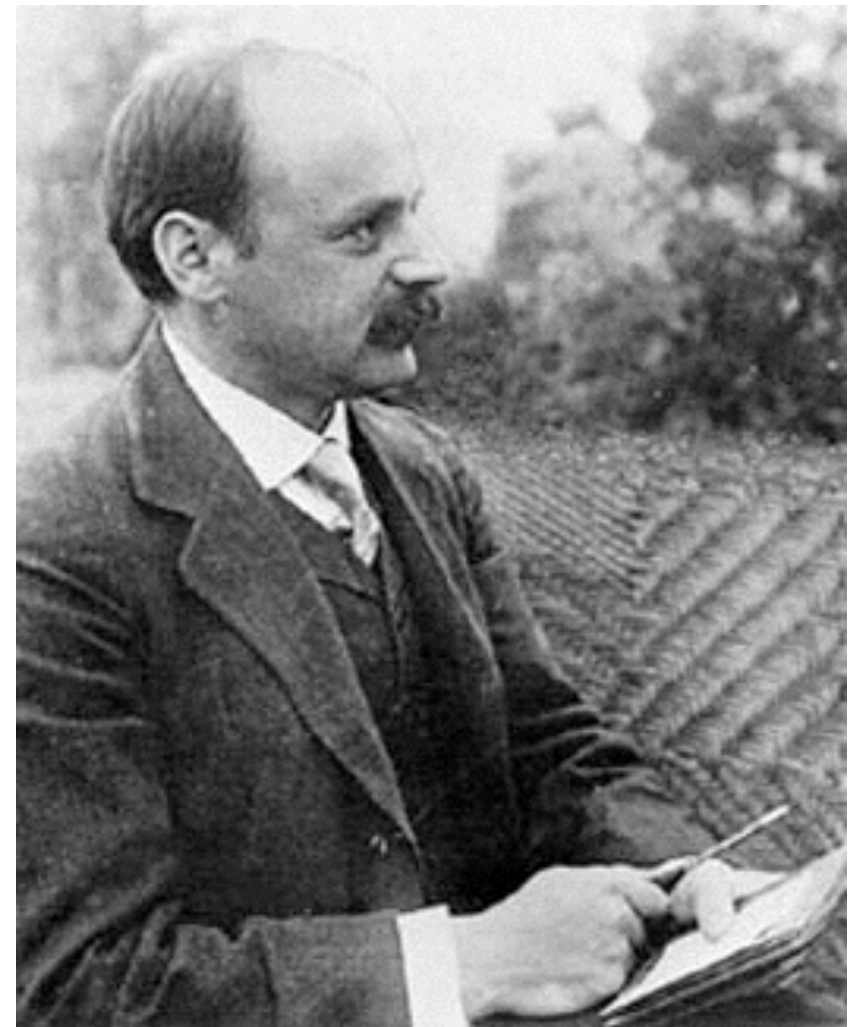
回転していない物体の
事象の地平線の大きさ

$$R_s = \sqrt{\frac{2GM}{c^2}}$$

太陽質量をもし3 kmの大きさに閉じ込めることができれば、BHになる！

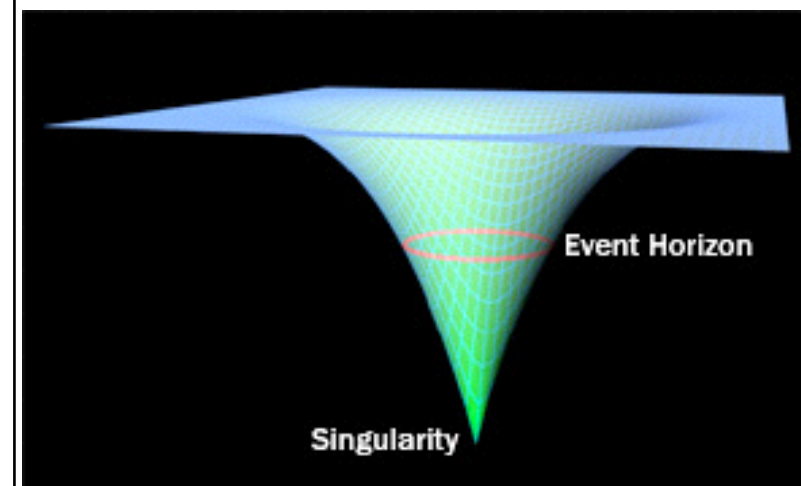
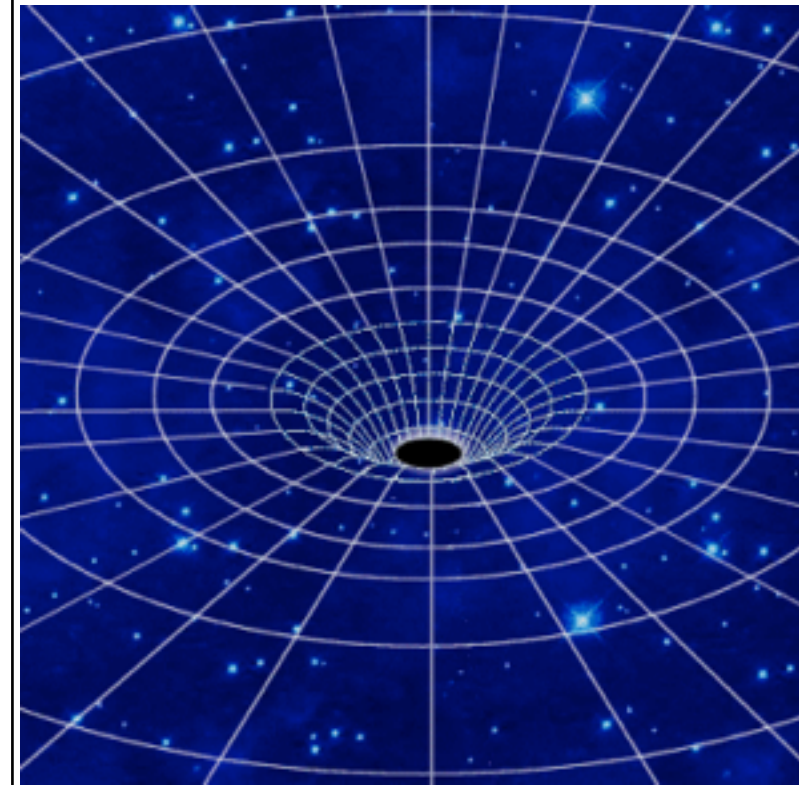
$$R_s = 3 \text{ km} \times (M/M_\odot)$$

($M_\odot = M_{\text{sun}} = \text{太陽質量}$)



Karl Schwarzschild
1873-1916

- 光すらも脱出できず、外部とのコンタクトを失う
- ある臨界点(TOV limit)を越えると、どんな力も重力に打ち勝つことができなくて、潰れる。
- Gravity（重力）はすべての物質を singularity（特異点）の一点に集中させて潰してしまふ。

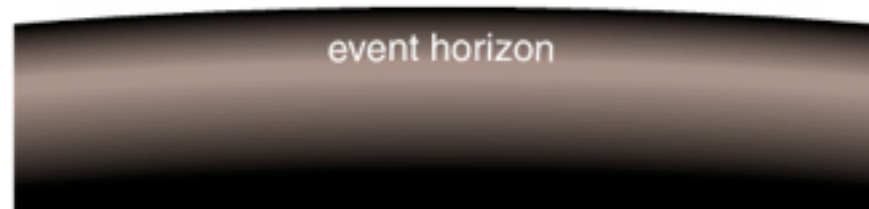
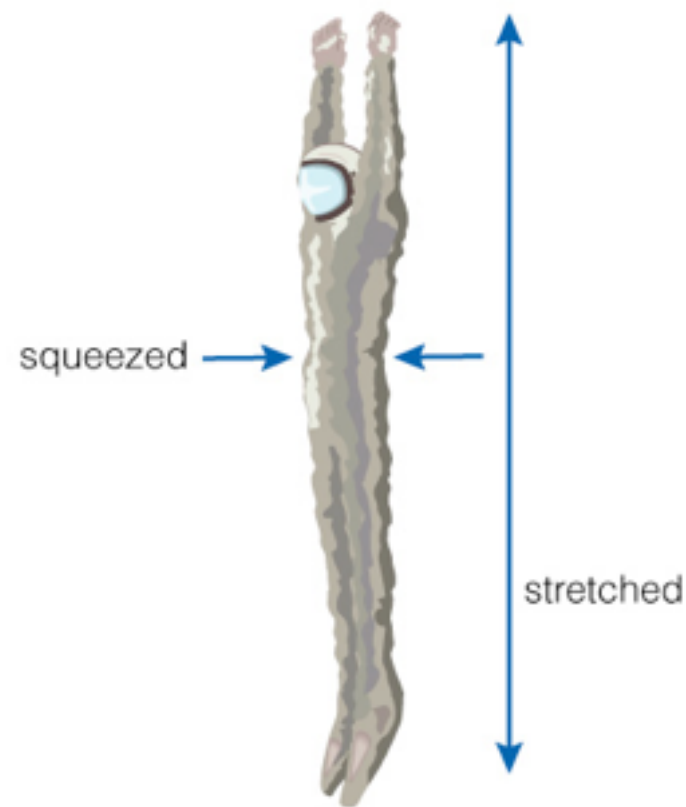


BHを訪問したらどうなる？

Andrew Hamilton's page: <http://casa.colorado.edu/~ajsh/>

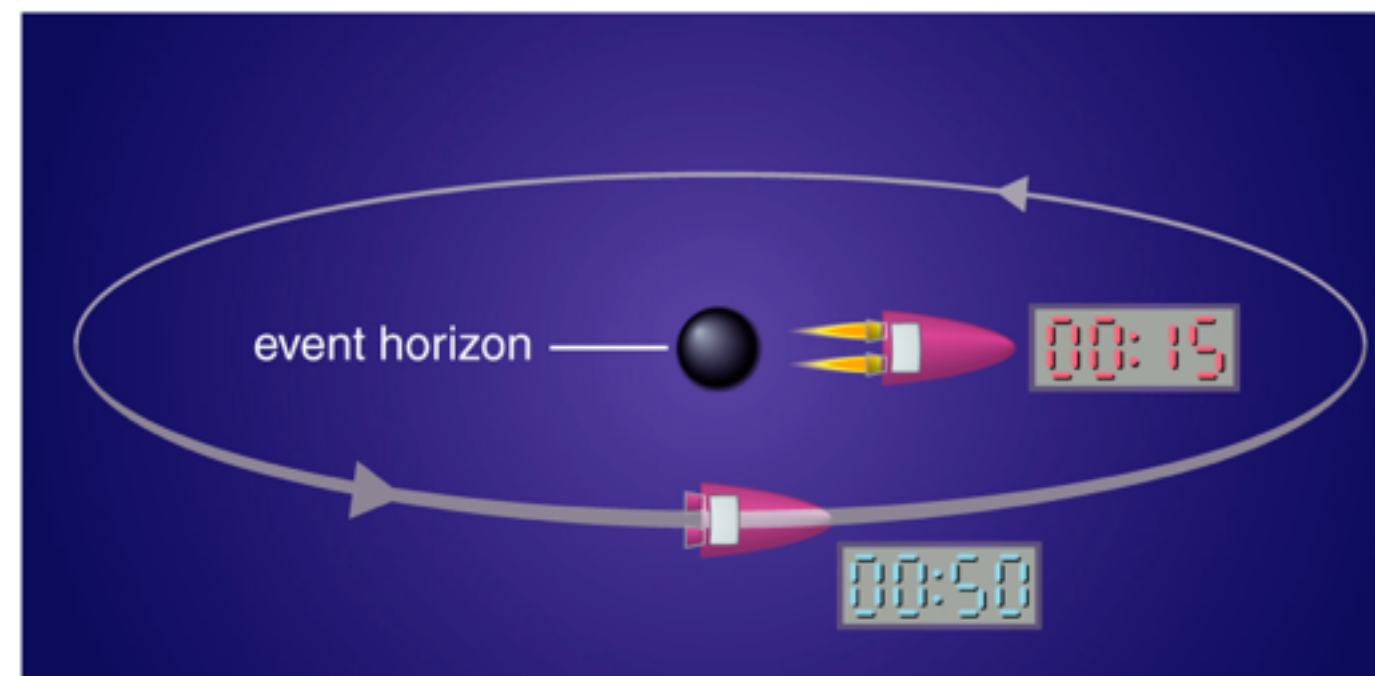
足が頭よりも強く引っ張られる

→ 体が **tidal force** (潮汐力) に
よって引き延ばされる



時間の遅れ (Time dilation)

強い重力場においては、
時計はゆっくり進む



Black Hole の観測的証拠

- **Mass**(質量)を測定する必要あり.
- 連星系の軌道 (**Kepler's 3rd law**)
- BH周辺のガスの運動を測る
- もし星ではなくて、質量がTOV limit ($\sim 3 M_{\odot}$)を越えていれば、BHに違いない.

X-ray Binary (X線連星系)

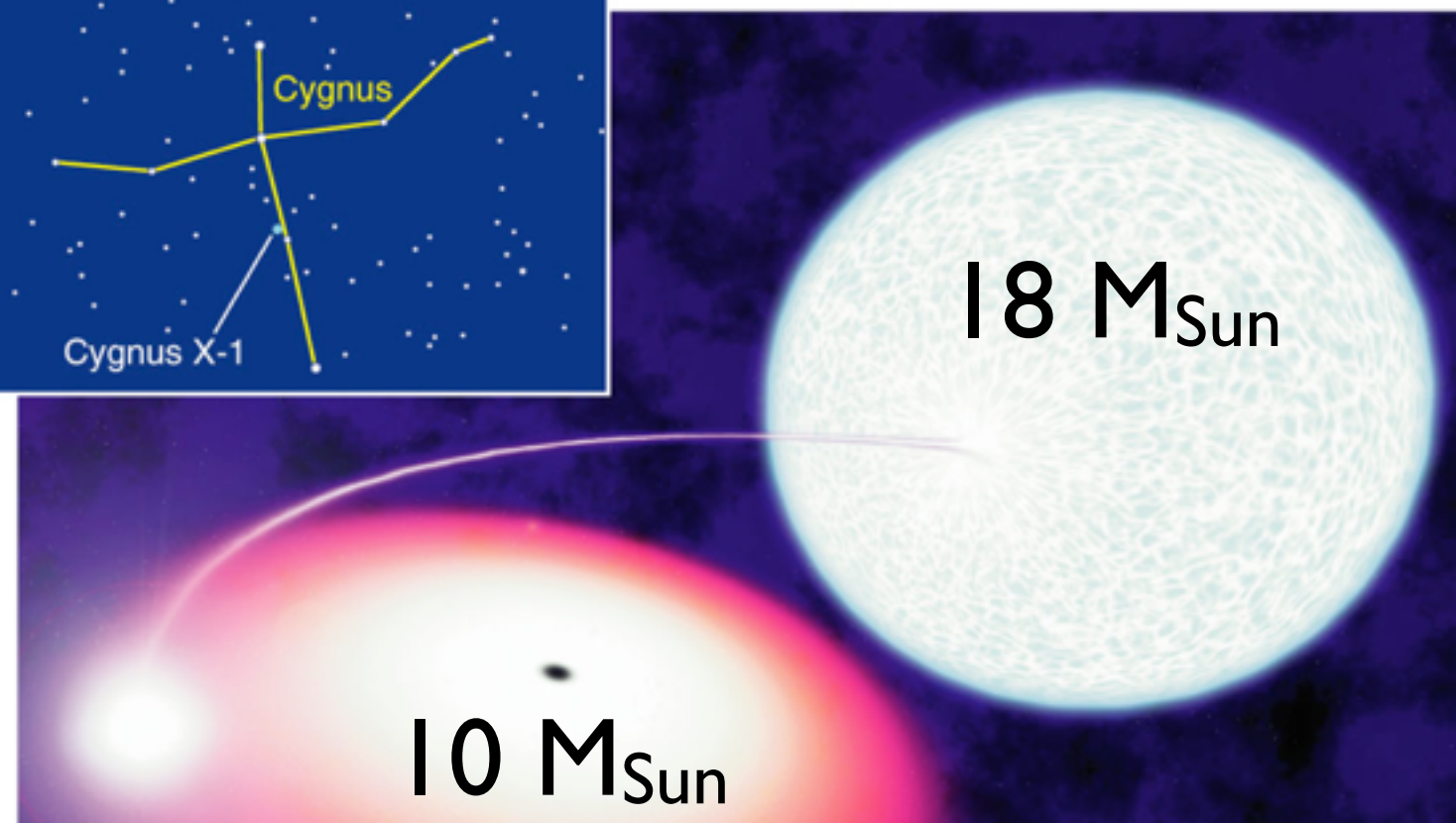
X線連星系の中に3 M_{\odot} を超える質量を持つものがある → **BHである可能性が高い。**

見えない伴星は10 M_{\odot} と見積もられている。

TOV limitを超えているので中性子星ではない

BHに違いない！

X-ray binary: Cygnus X-1

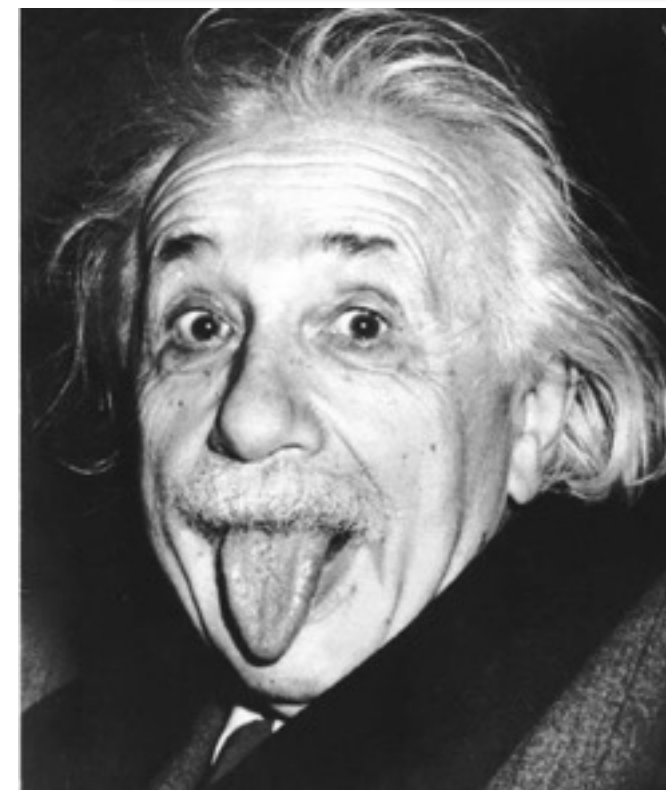


重力波とは何か？

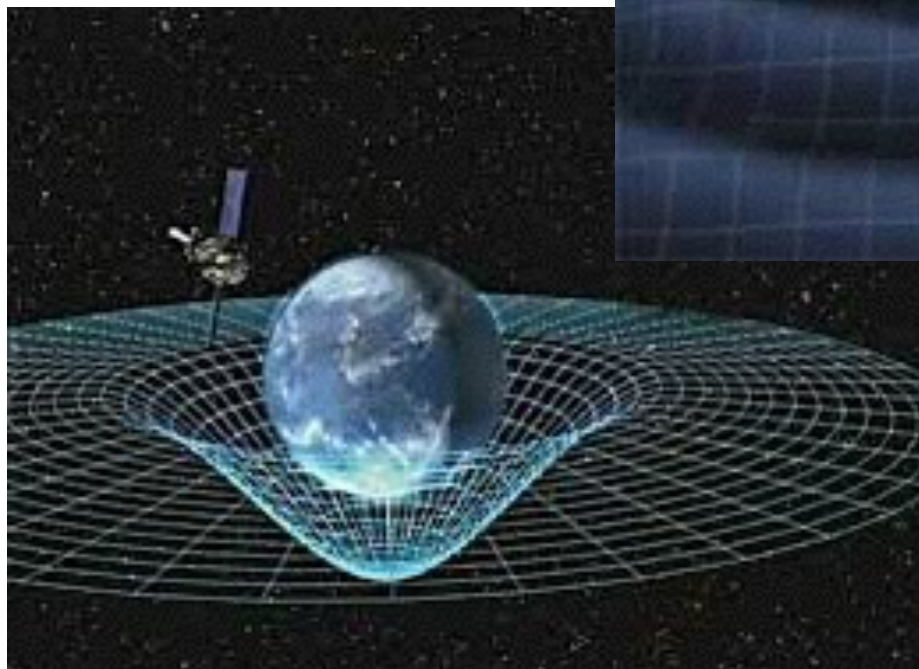
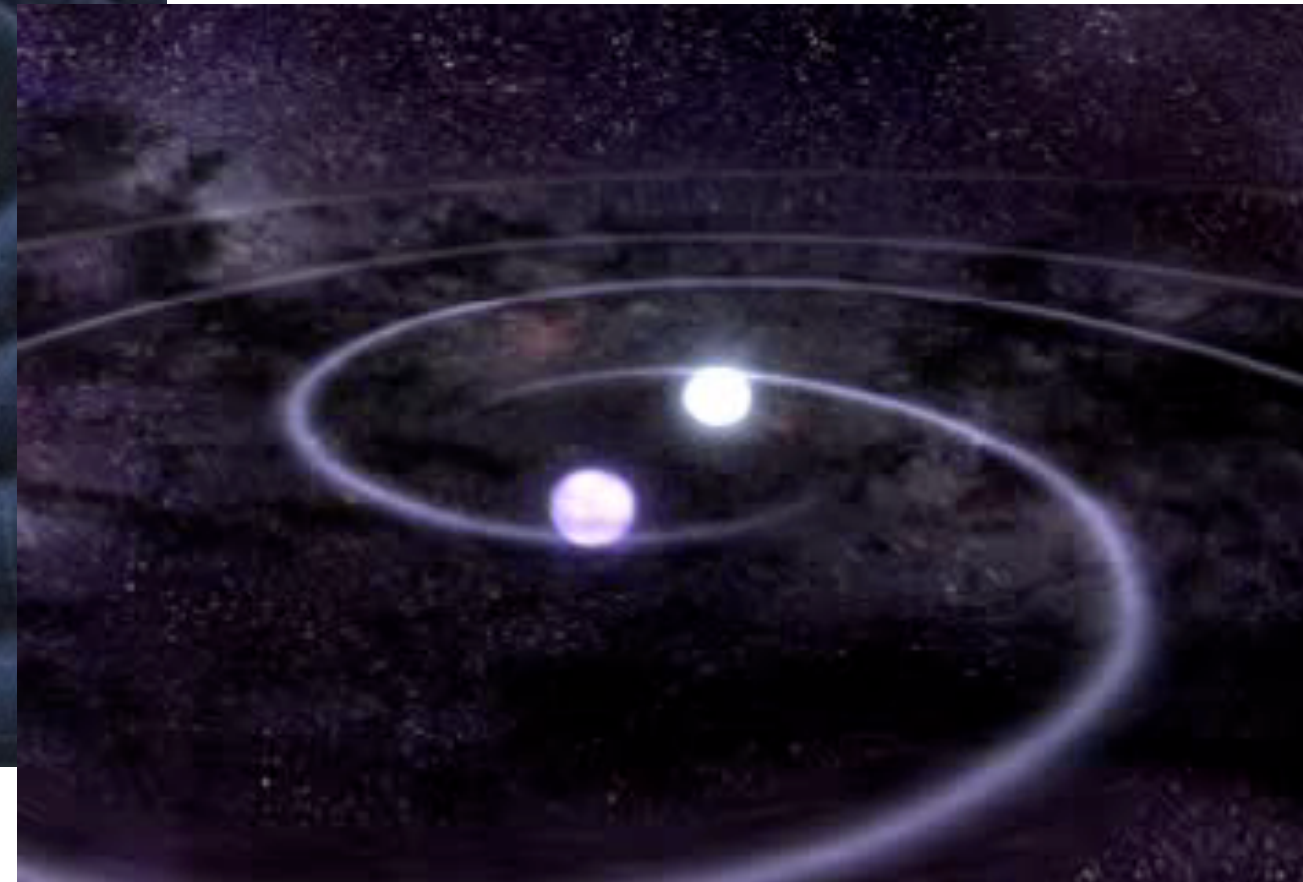
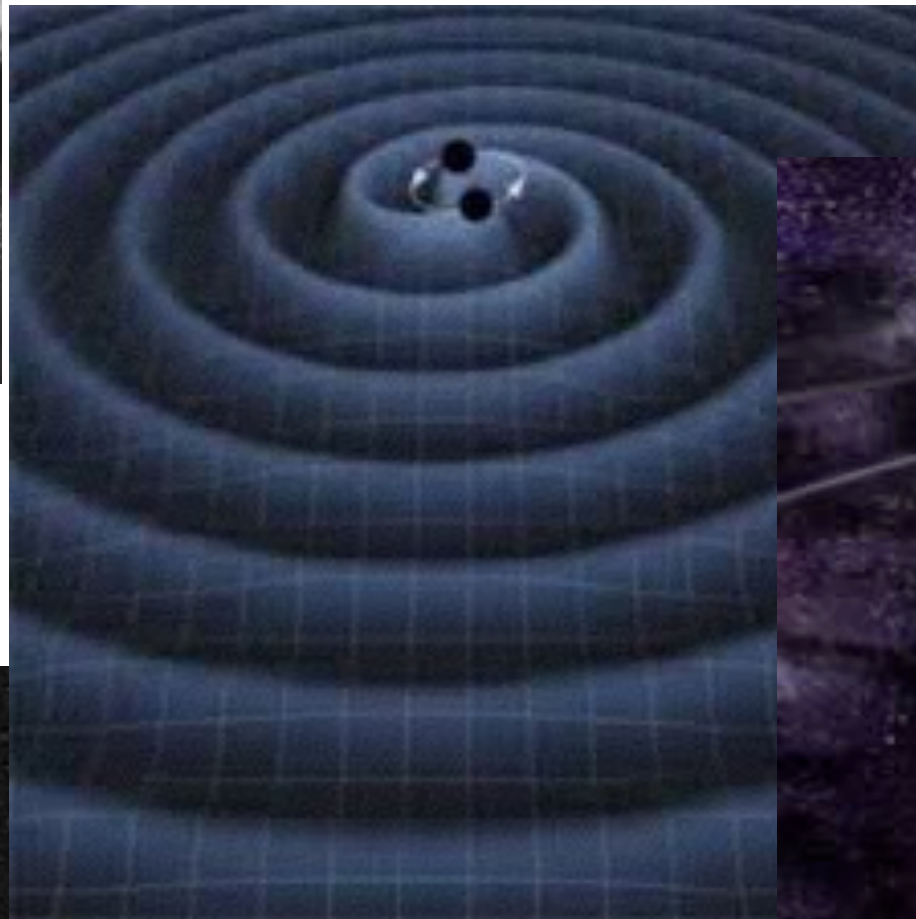
一般相対論 (General Relativity):

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

credit: NASA

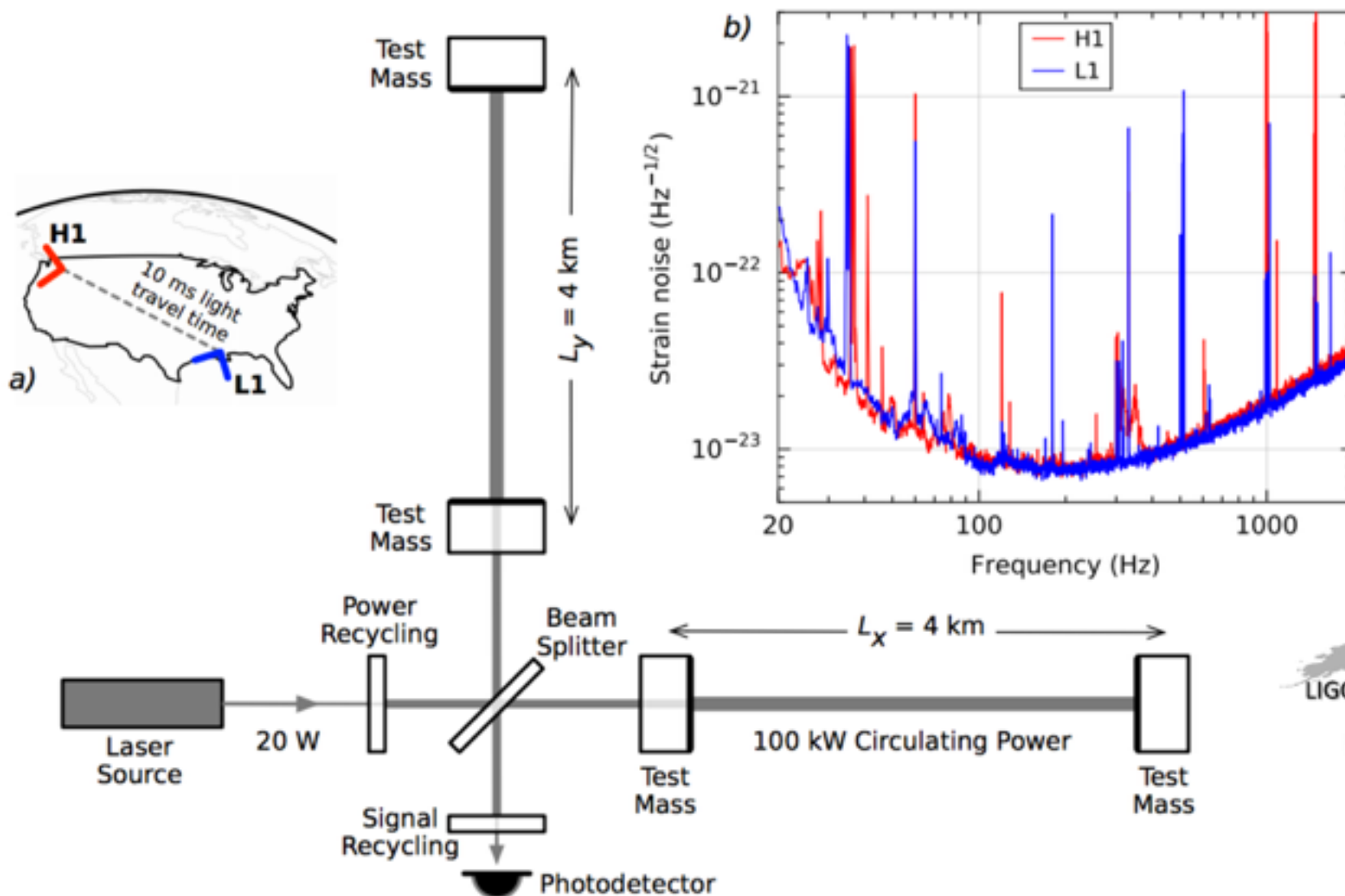


Albert Einstein
(1879~1955)



**時空間(space-time)の揺らぎが
波として伝播していく現象**

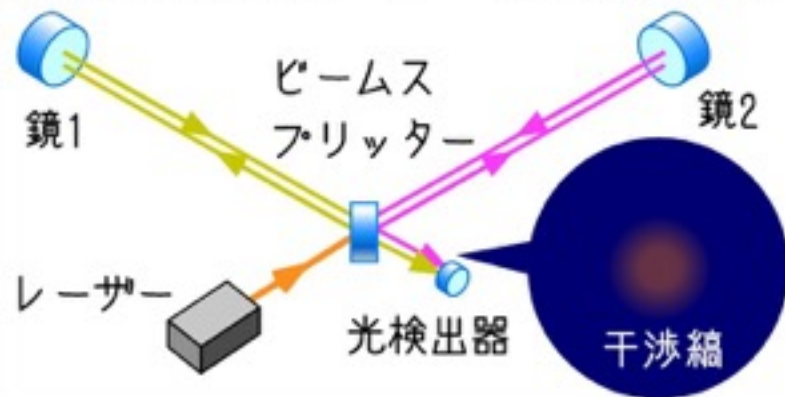
LIGO (Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory)



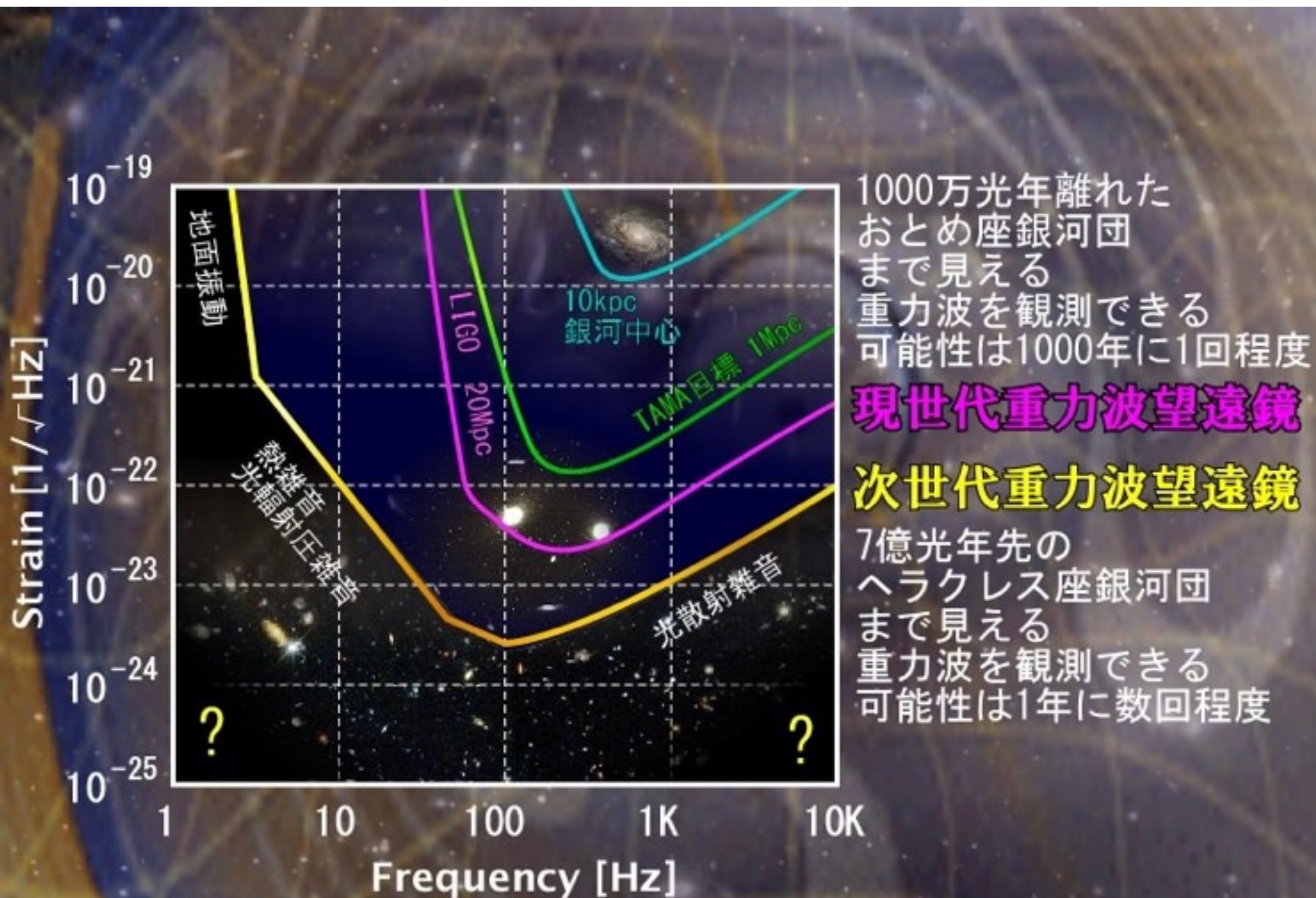
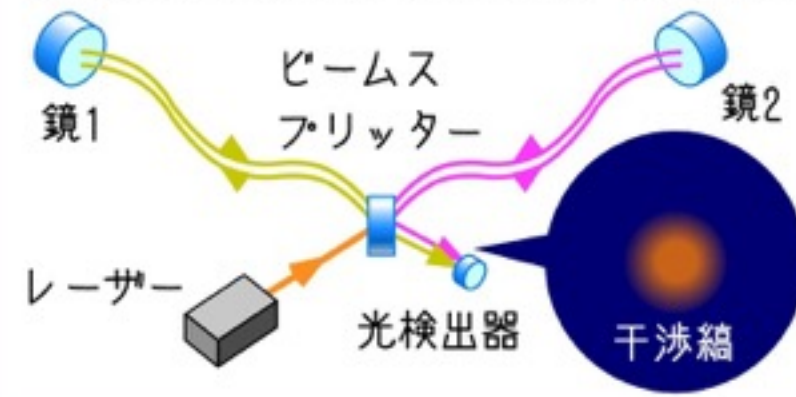
時空の揺らぎを
レーザー干渉計
で捉える



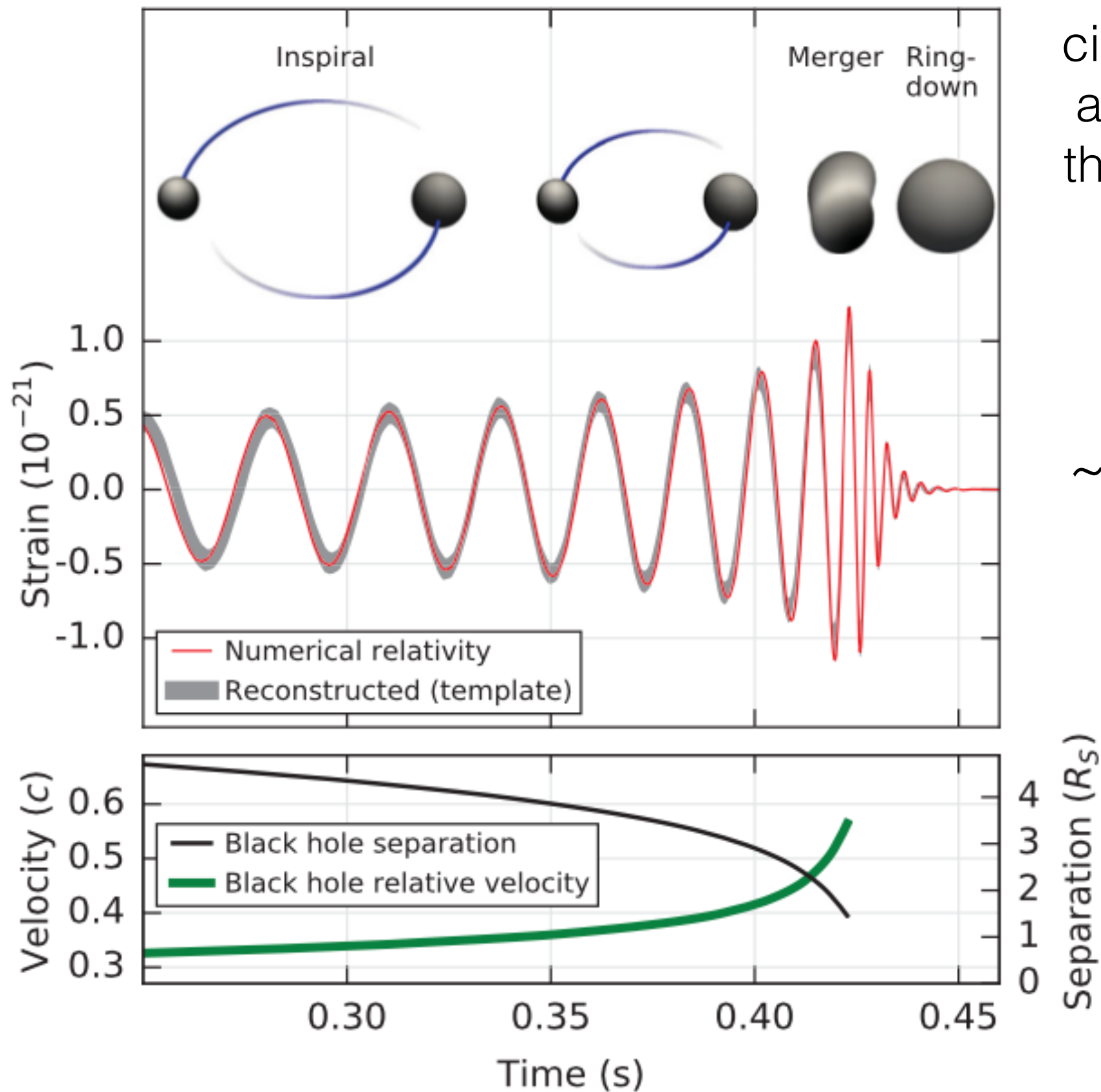
重力波望遠鏡はレーザー干渉計を使います



重力波で空間が歪むと干渉縞が明滅します



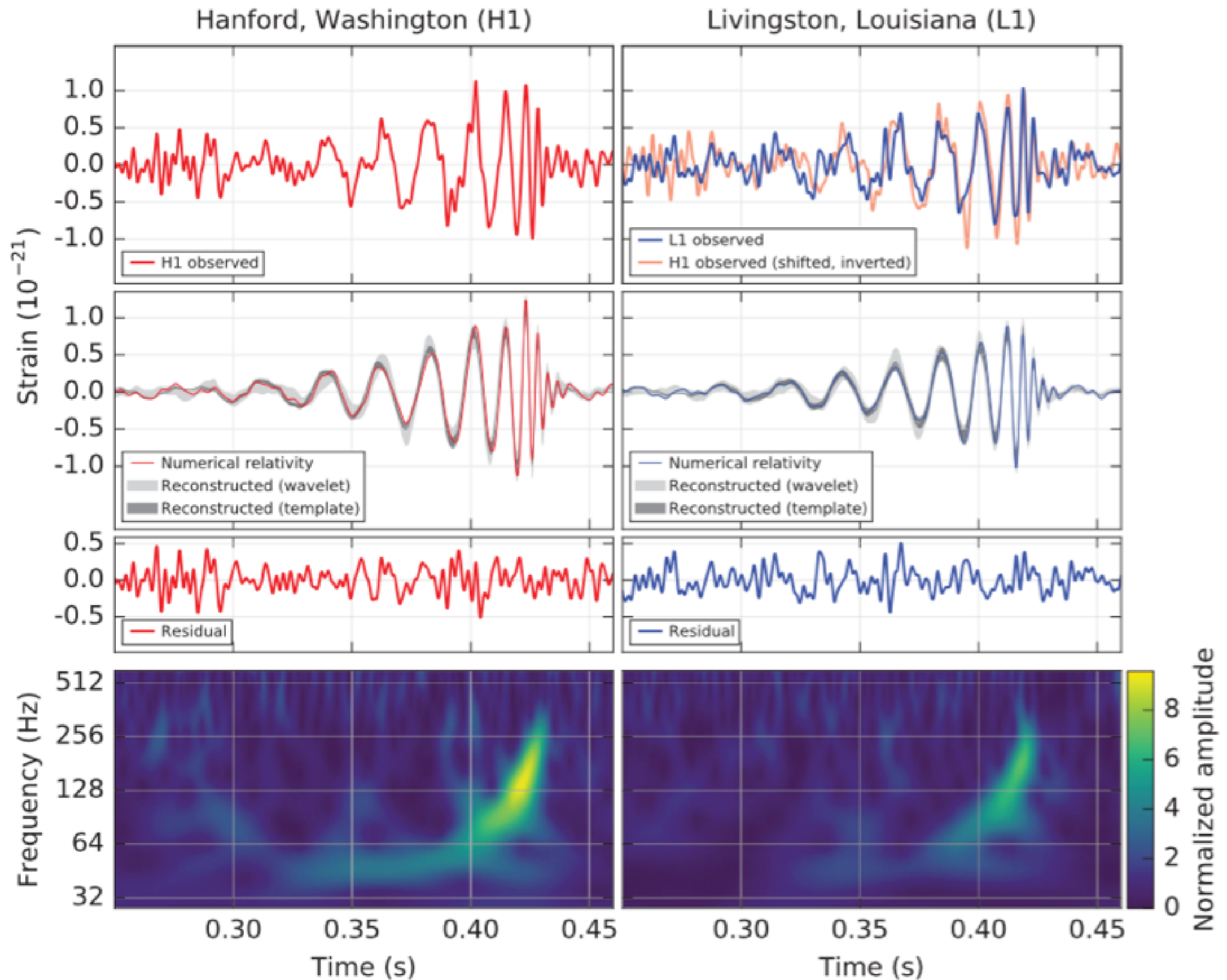
phase &
amplitude
important



circular orbits
assumed for
the waveform

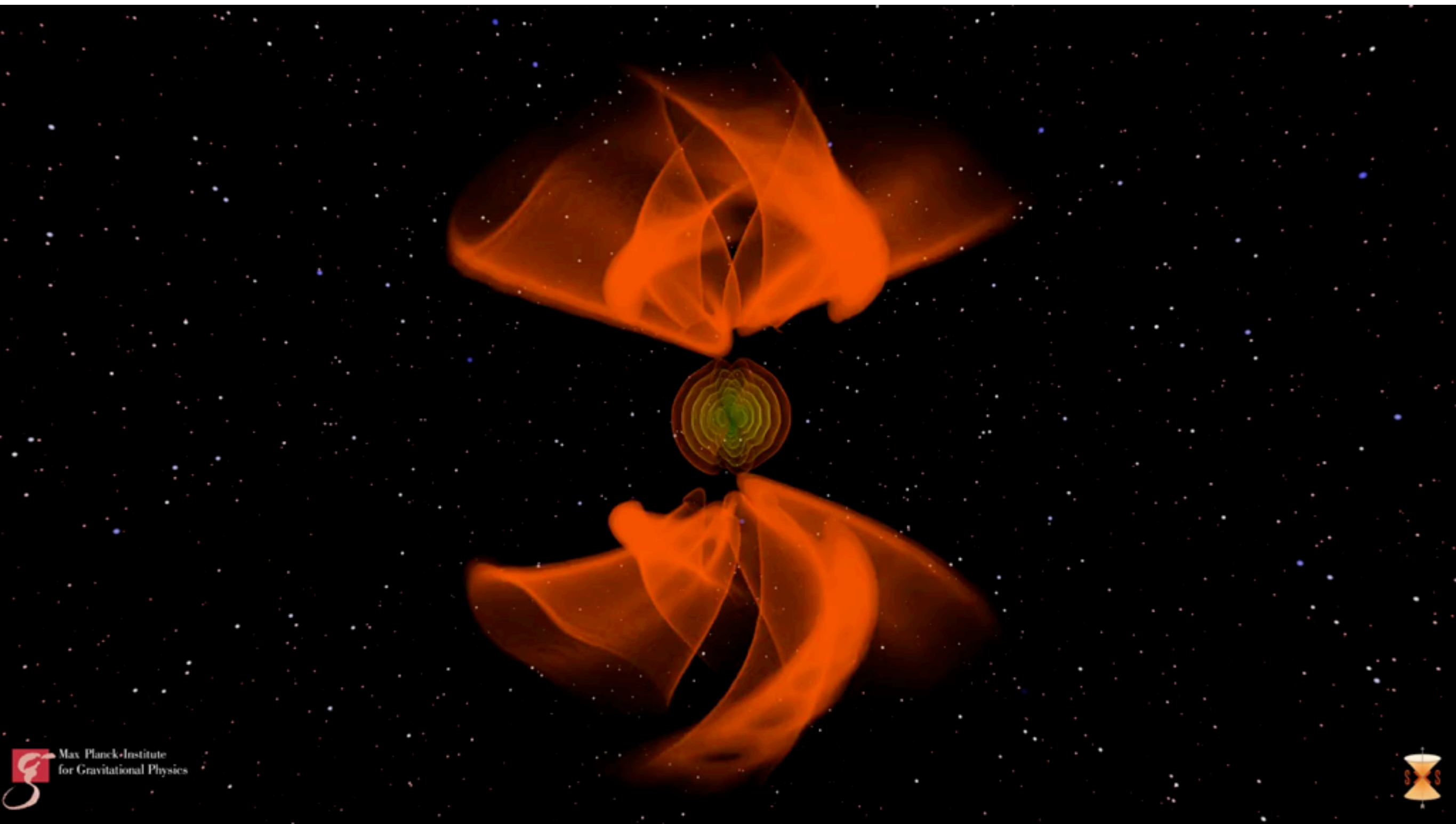
~10 cycles
followed

GW150914 (Sep 14, 2015)



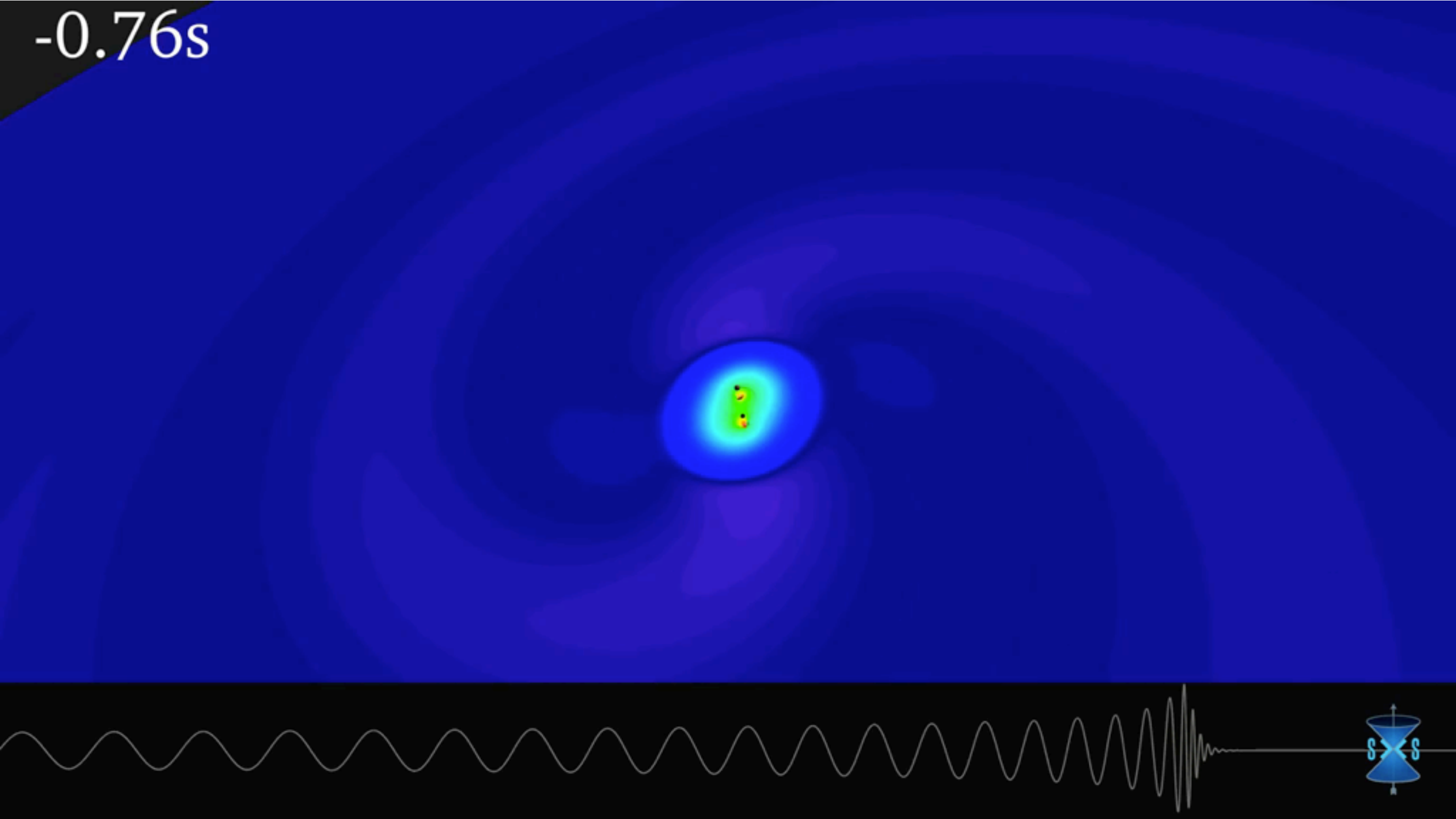
基本的な結果

- Initial BH masses: $36^{+5}_{-4} M_{\odot}$ and $29^{+4}_{-4} M_{\odot}$
- Final BH mass: $62^{+4}_{-4} M_{\odot}$ (source frame)
- Distance: 410^{+160}_{-180} Mpc redshift $z = 0.09^{+0.03}_{-0.04}$.
- Radiated energy in GW: $3.0^{+0.5}_{-0.5} M_{\odot} c^2$
- Source localization: 590 deg²
- final spin: $0.67^{+0.05}_{-0.07}$ Dim-less spin param:
 $a = c|\mathbf{S}|/(Gm^2) \leq 1.$



<http://www.black-holes.org/>

-0.76s



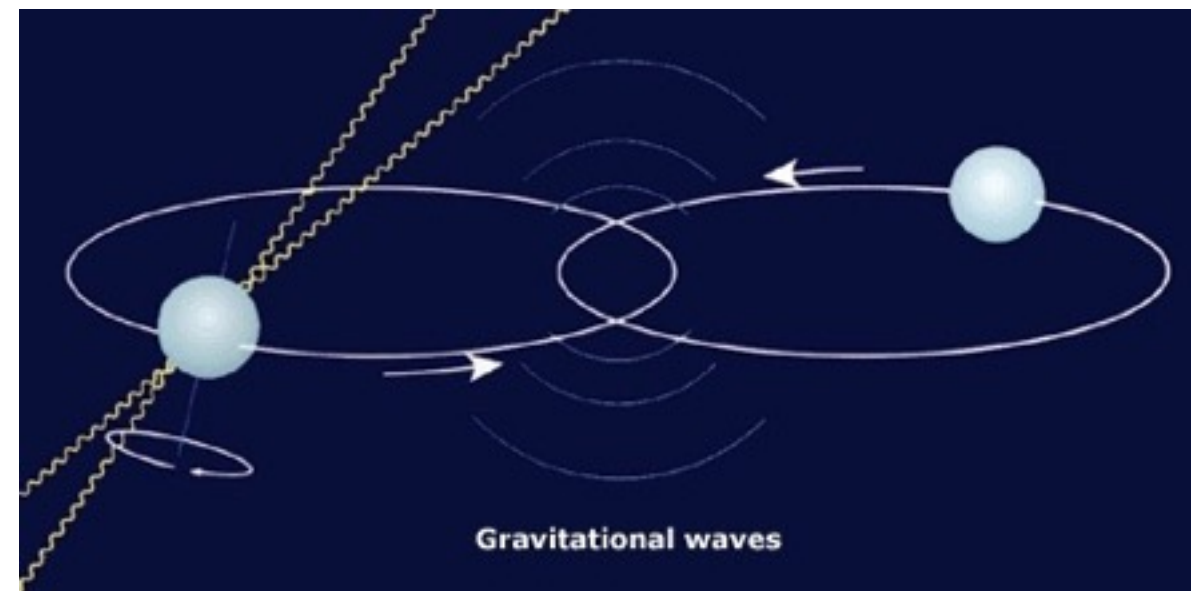
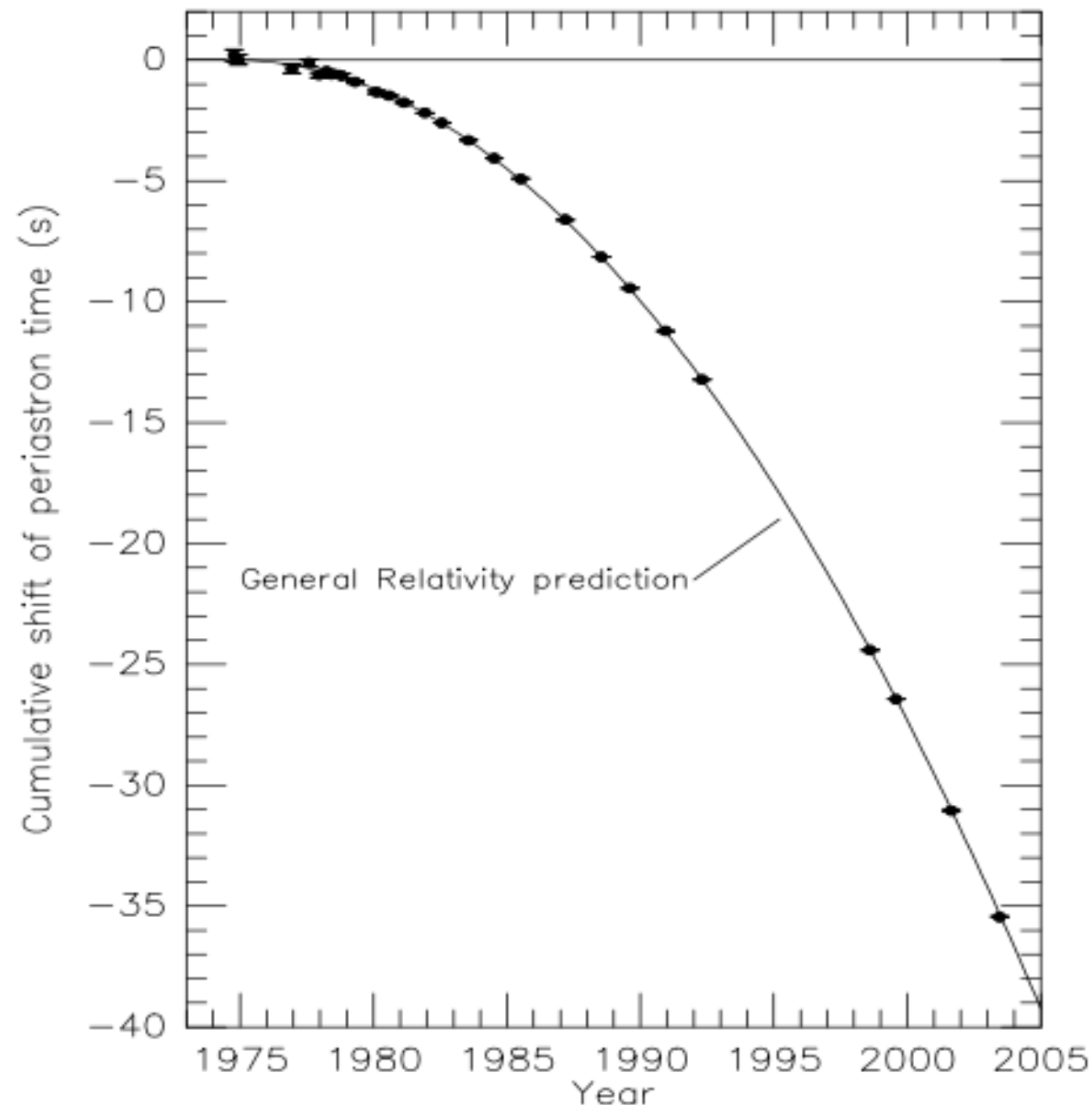
<http://www.black-holes.org/>

PSR B1913+16

Orbital decay of binary pulsar (neutron star)

(Hulse & Taylor '75)

(Taylor & Weisberg '82)



source: Nobel Foundation '93

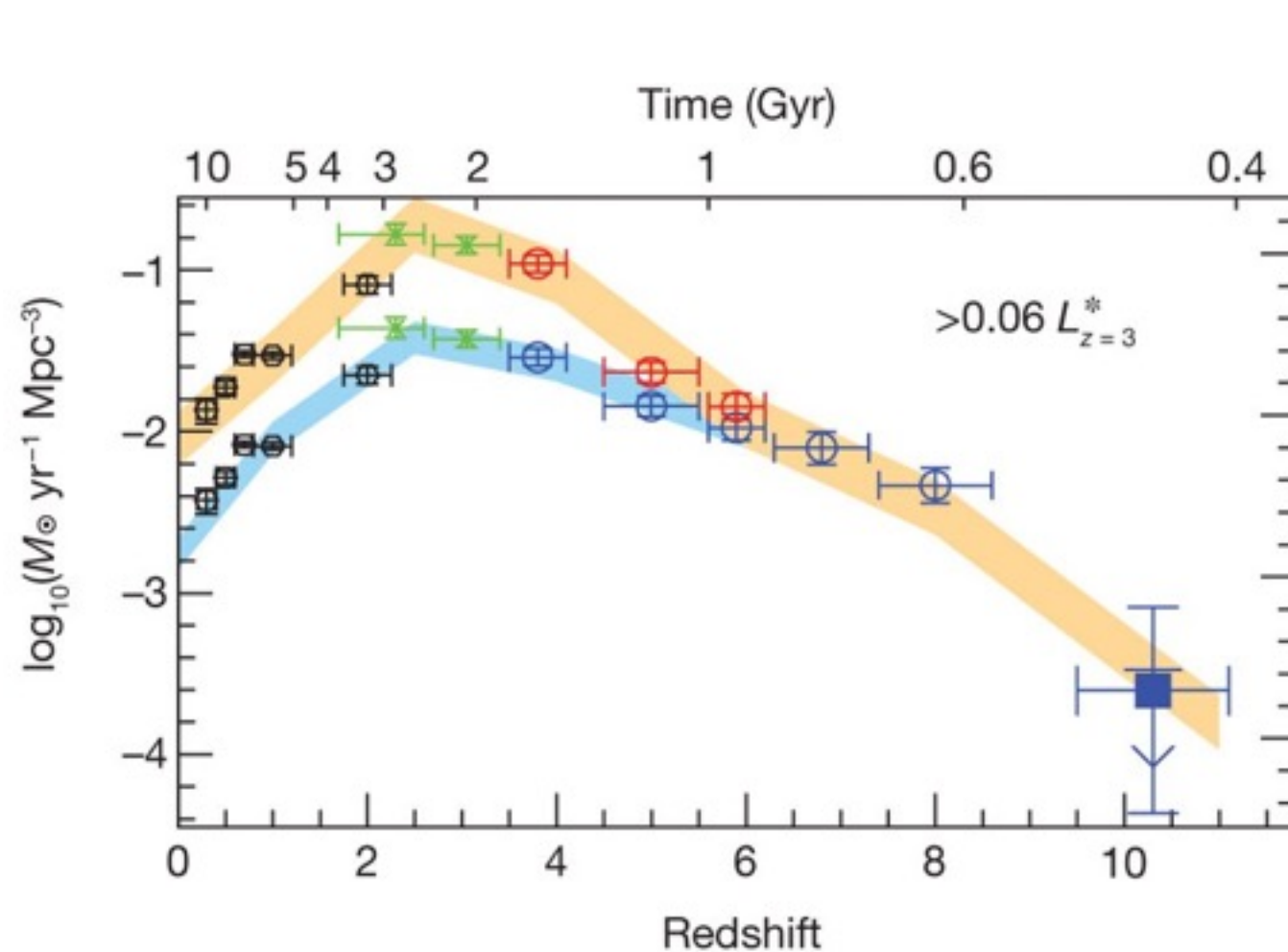
**First *indirect* evidence
of GW emission**

Astrophysical Implication

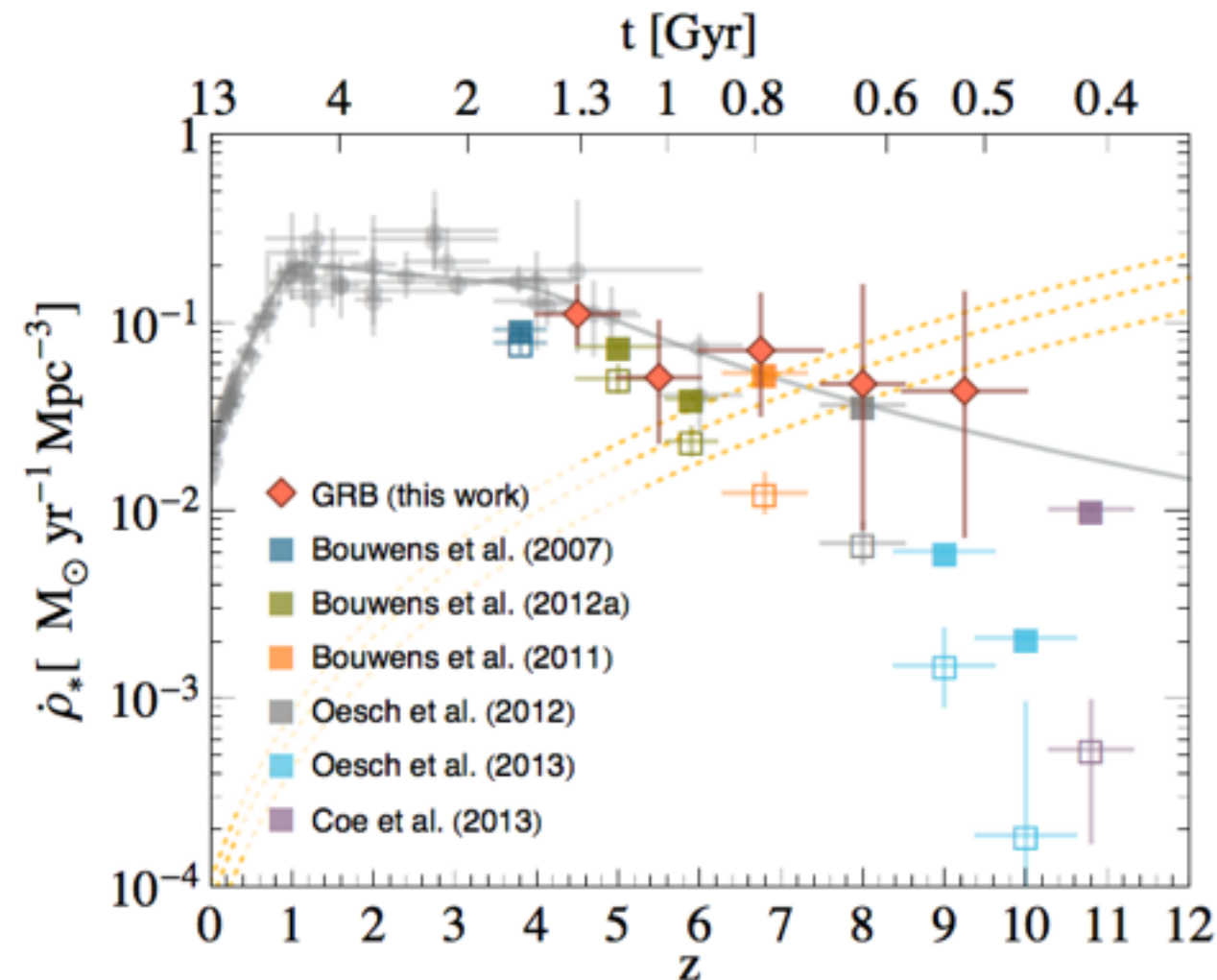
宇宙物理学的な意味

- 重力波の最初の直接検出
- 結構重い ($\geq 25M_{\odot}$) 星質量BHsがこの宇宙に存在する.
- 宇宙年齢(~ 10 Gyr)のうちに合体することができる.
- 銀河、星団などの中でそれらが形成されるのだろう.
- 比較的 弱い星風 と 低い金属量($\text{metallicity} \lesssim 0.5Z_{\odot}$)
- BH連星の合体率: $2 - 400 \text{ Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$ (comoving)

宇宙論的な星形成率密度



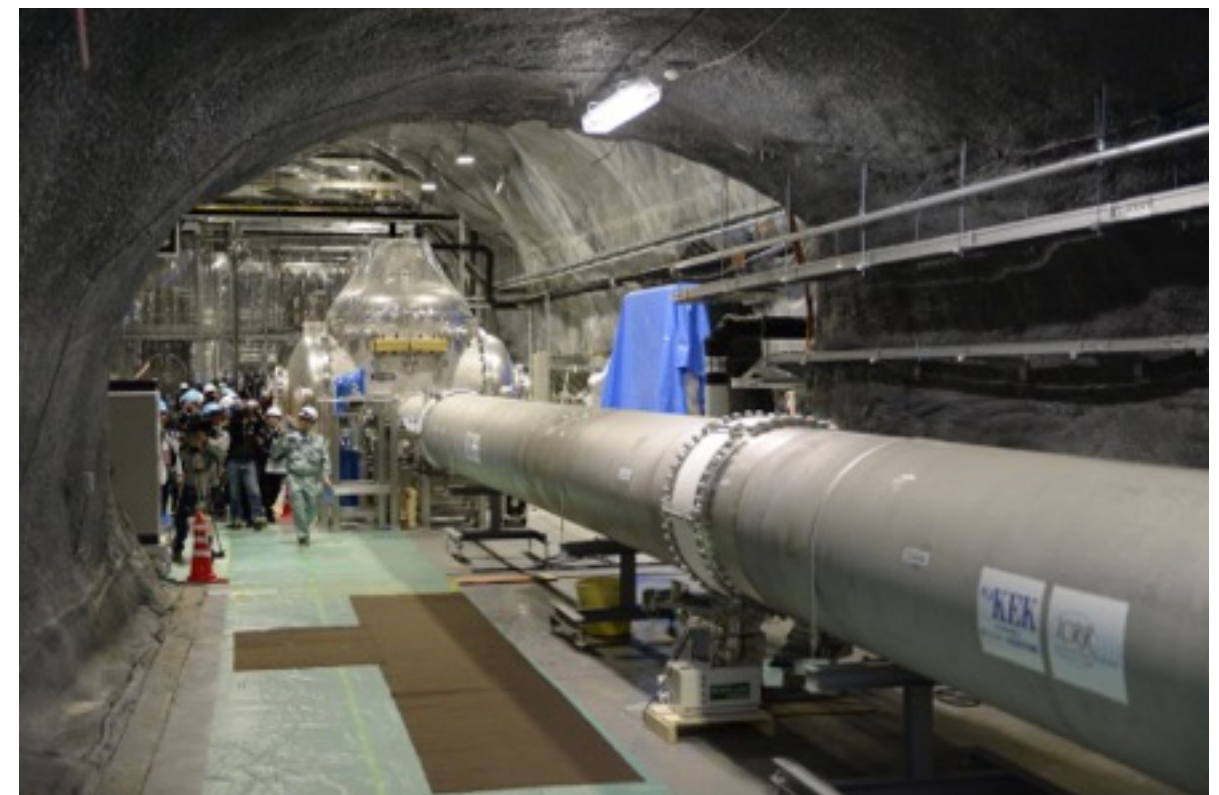
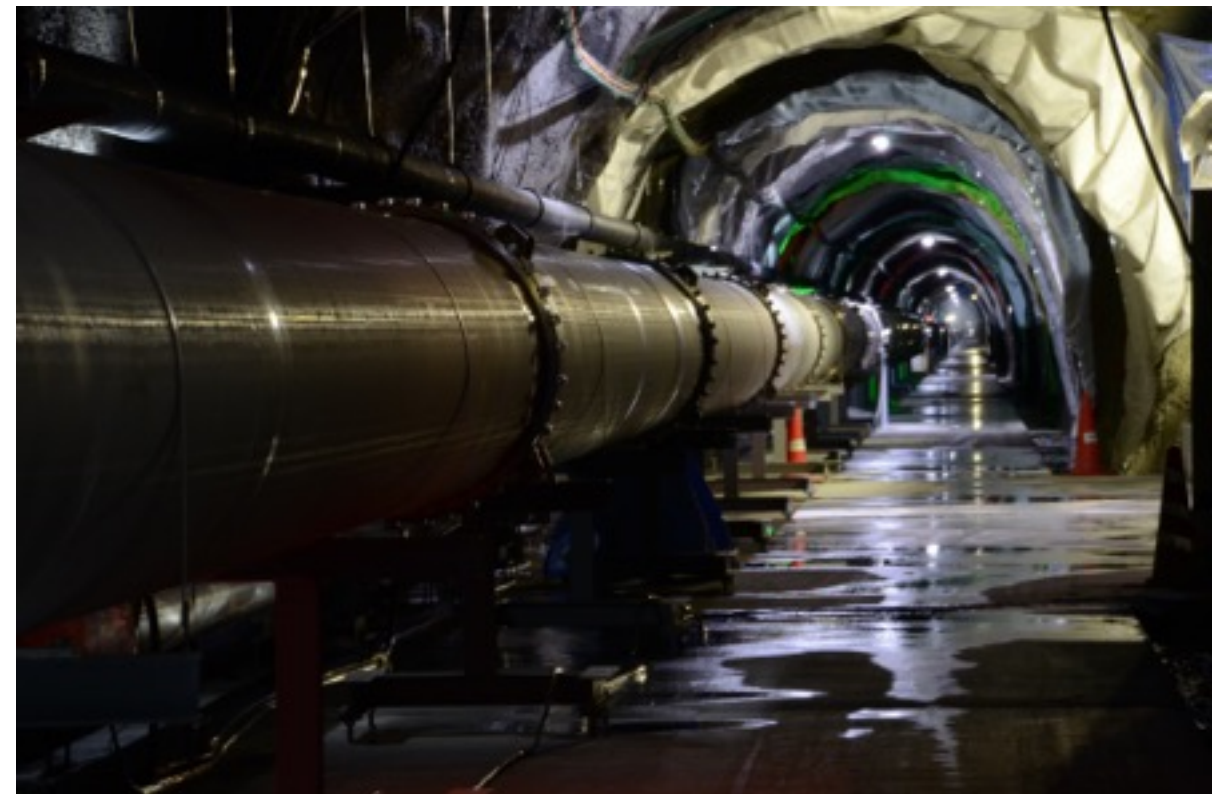
Bouwens+'09



Kistler+ '13

単位体積あたり、単位時間あたり、この宇宙で
どのくらいの星が生まれているのか？

KAGRA



How does a high-mass star die?

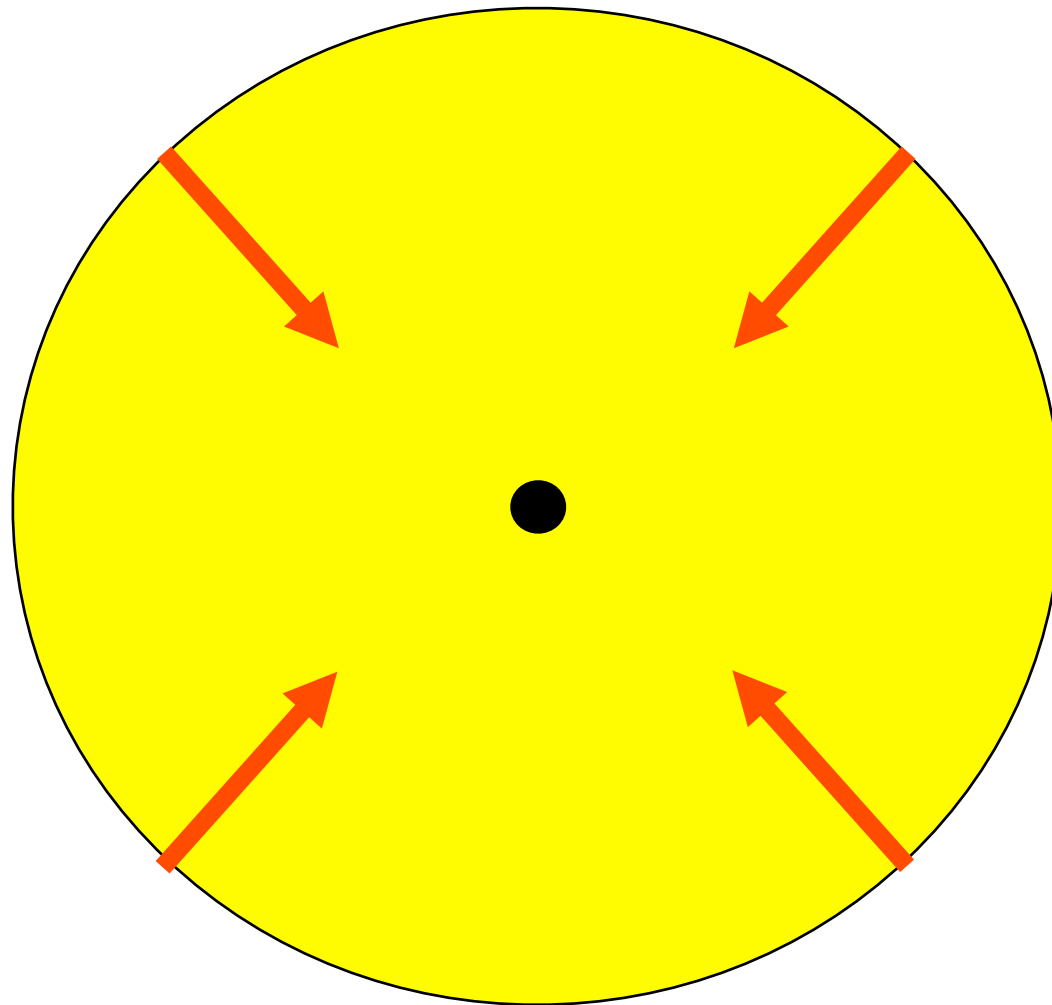
大質量星はどのように死ぬのか？



Core runs out of fuel!

核融合の燃料がなくなると.....

Gravity (←) wants to collapse the star!



Death of High-Mass Stars

- The core and outer layers run out of fuel.
燃料が枯渇すると.....
- The star then collapses, due to gravity.
重力によって星が潰れ始める
- The mass is high enough that nothing (even the **degeneracy pressure**) can balance the gravitational collapse.

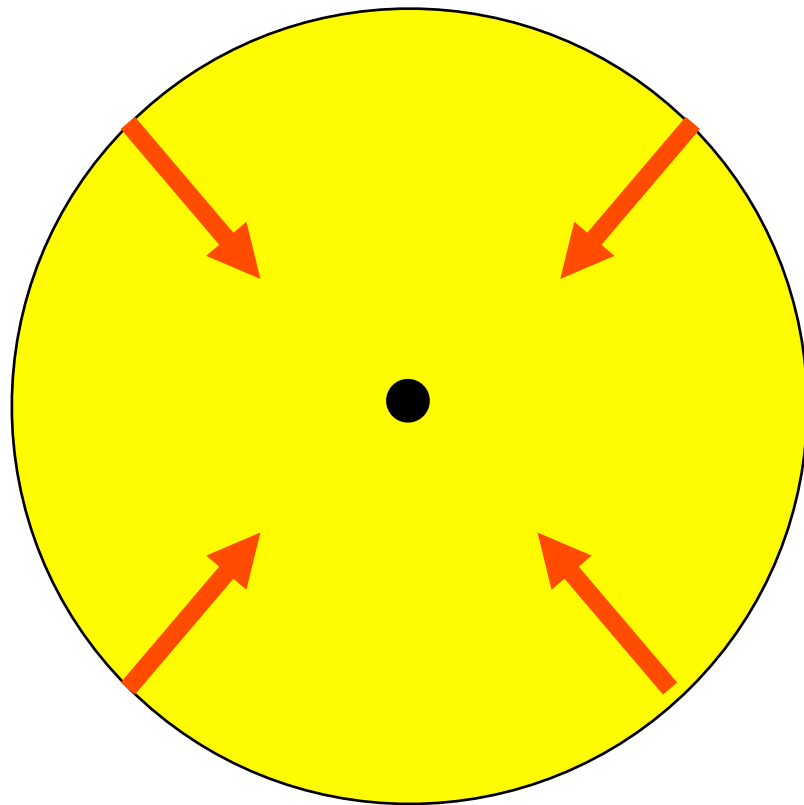
どんな縮退圧でも、もはや支えきれなくなる

Death of High-Mass Stars

Gravity (←) wants to collapse the star

No outward pressure = **implosion**

(内部崩壊)



Rebound of outer
layers against the
core = **supernova**

外層が崩壊した内核にリバウ
ンドして爆発が起きる。

Supernova 1987A

The closest supernova in the last four centuries was seen in 1987.



Before. The arrow points to the star observed to explode in 1987.



After. The supernova actually appeared as a bright point of light. It appears larger than a point in this photograph only because of overexposure.

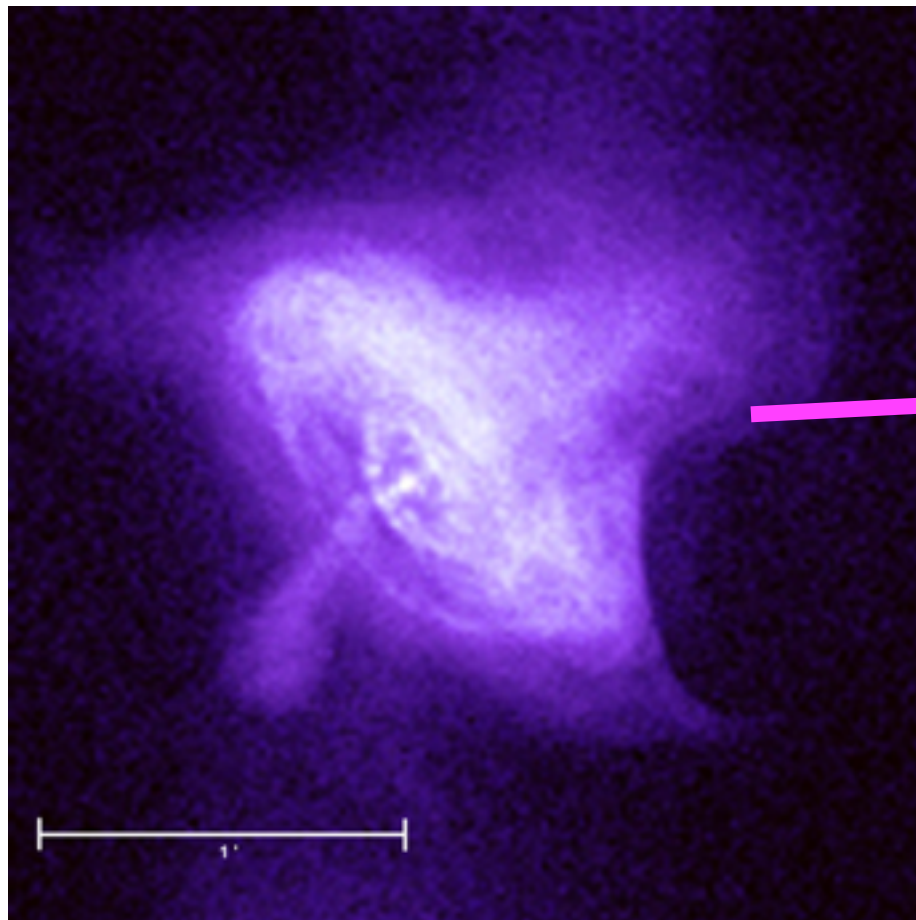
超新星は銀河全体と同程度の明るさになる！

Supernovae Remnants 超新星残骸

- Energy released by core collapse drives the outer layers into space

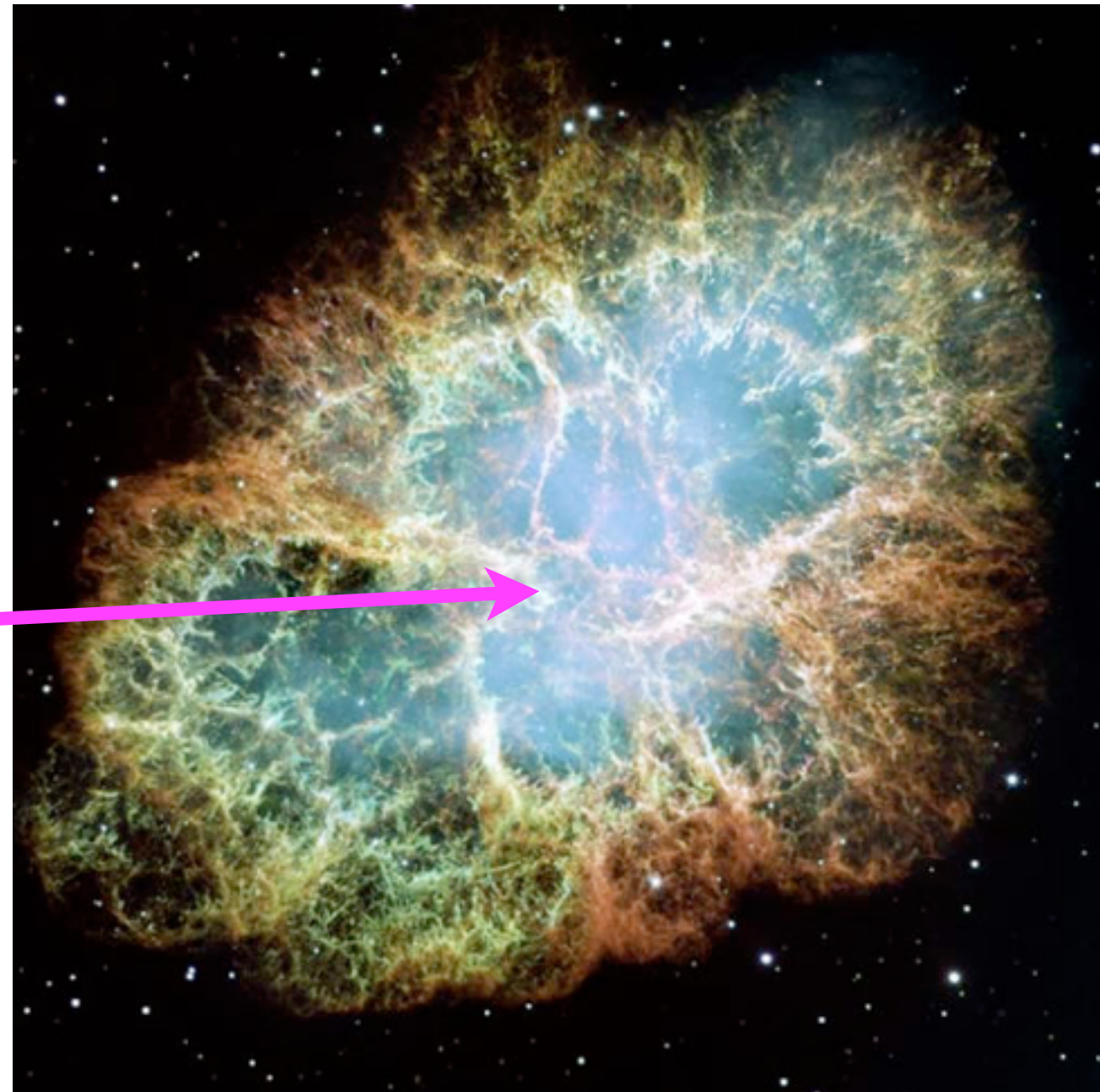
neutron star in the center

Xray
view



the “Crab nebula” かに星雲

Remnant of the supernova
seen in A.D. 1054



What happens to the core after a supernova?

質量によって結果が異なる！

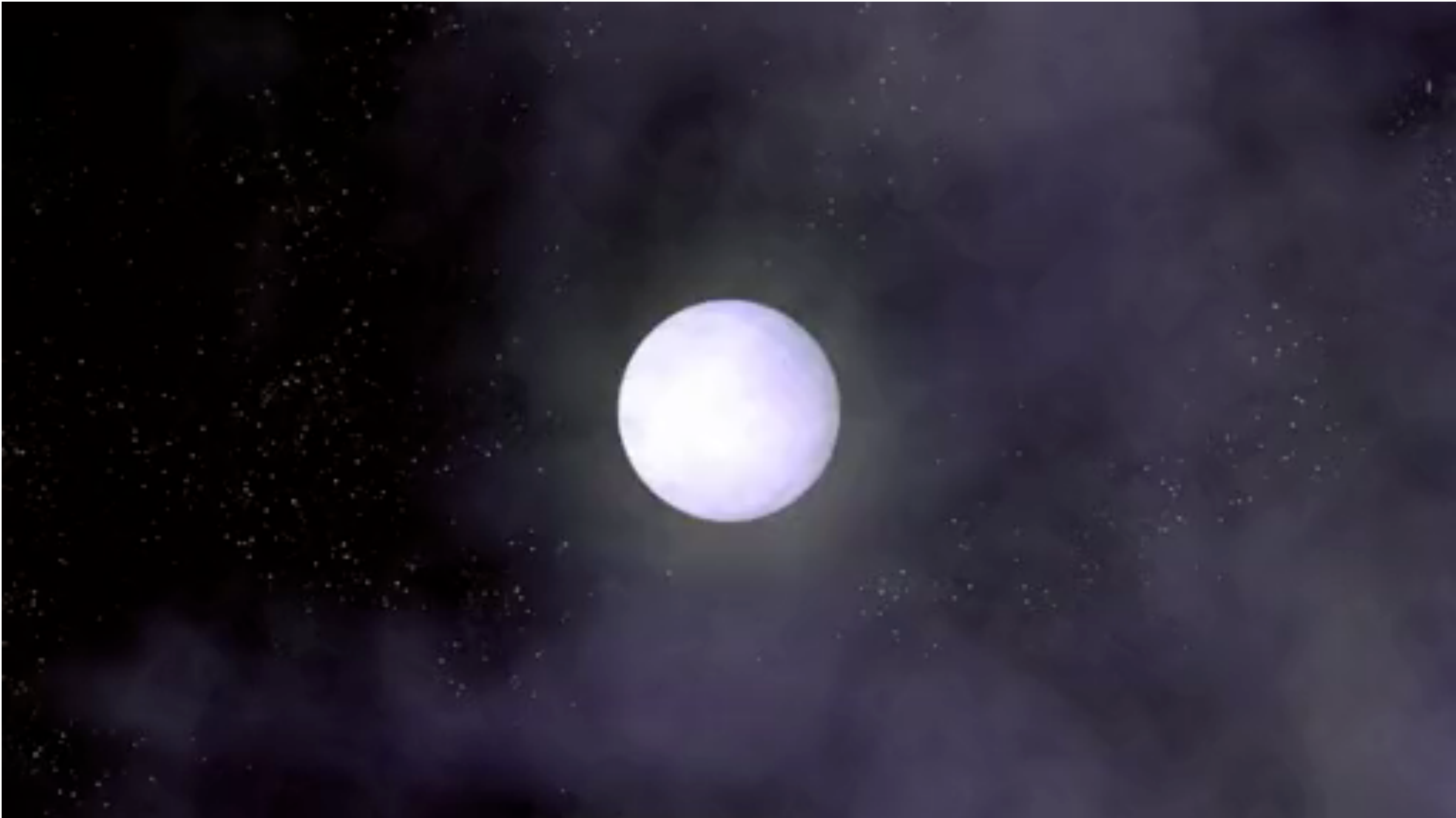
- **Neutron Star**

- heavy stars: remaining mass of $1.4 M_{\odot}$ to about $3 M_{\odot}$

- **Black Hole**

- really heavy stars: remaining mass greater than $3 M_{\odot}$ (残骸がTOV limitを超えている場合)

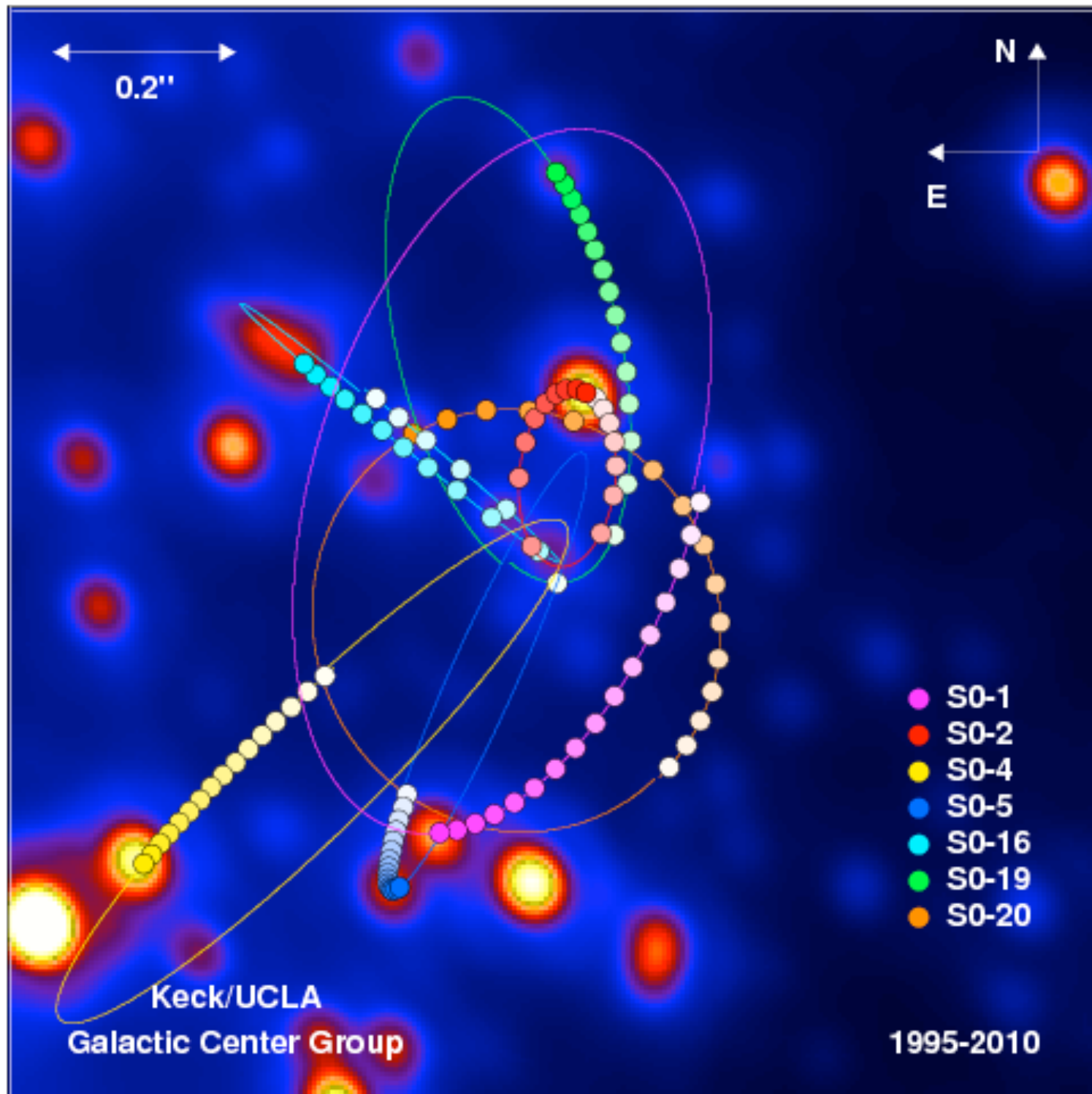
Some supernova explosions produces black holes as a remnant. (movie)



巨大ブラックホールの 証拠はあるか？

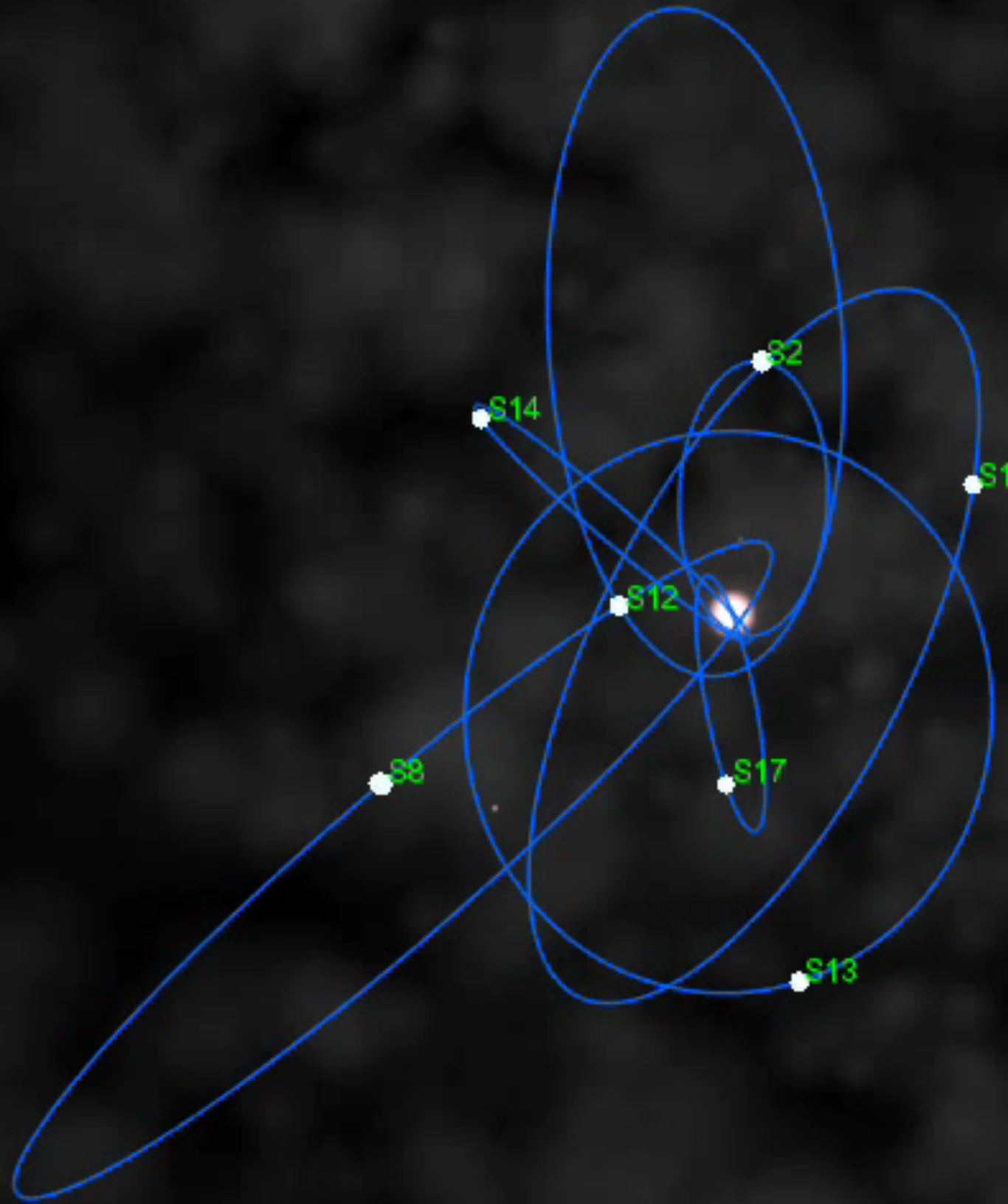
Supermassive Black Hole (SMBH)

我々の銀河中心



Milky Way (天の川銀河) の中心部分の星の運動から $4 \times 10^6 M_{\odot}$ の質量をもつSMBHの存在が知られている

1993 09 09 13:58:59 UTC
45000000× faster

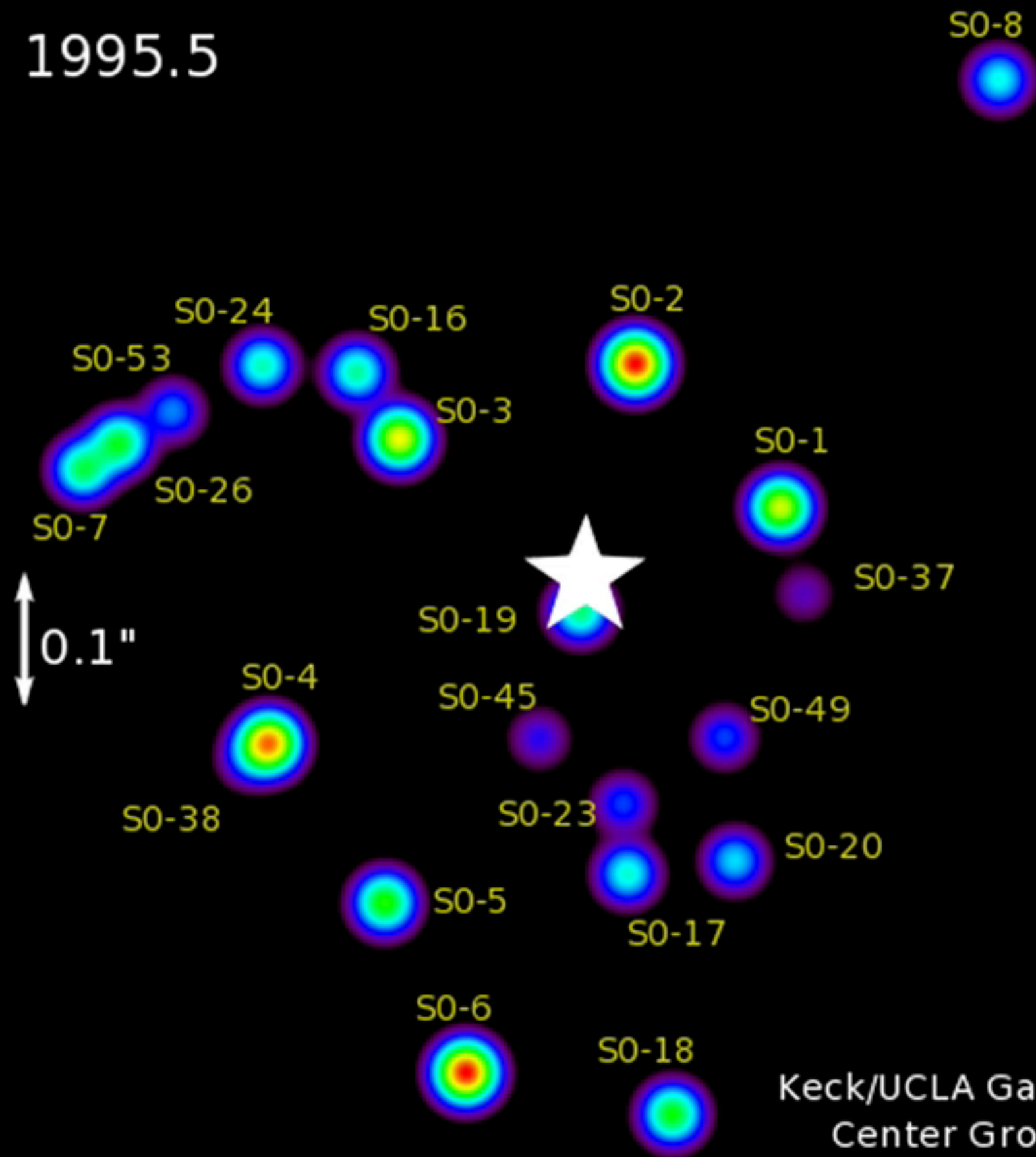


|-10 light days-|

Speed: 0.000 m/s

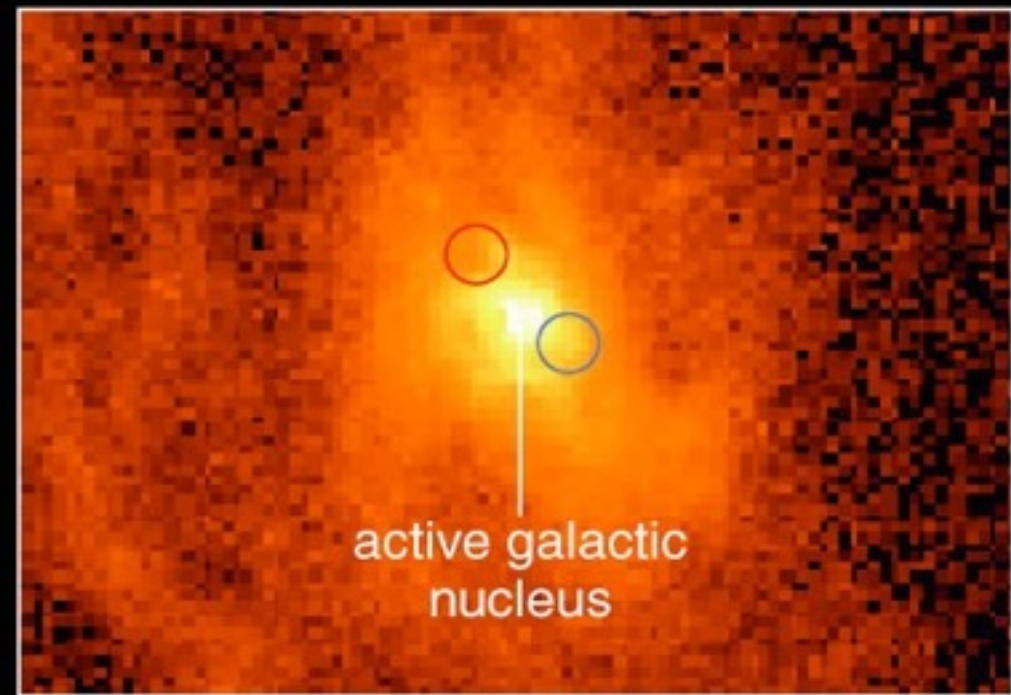
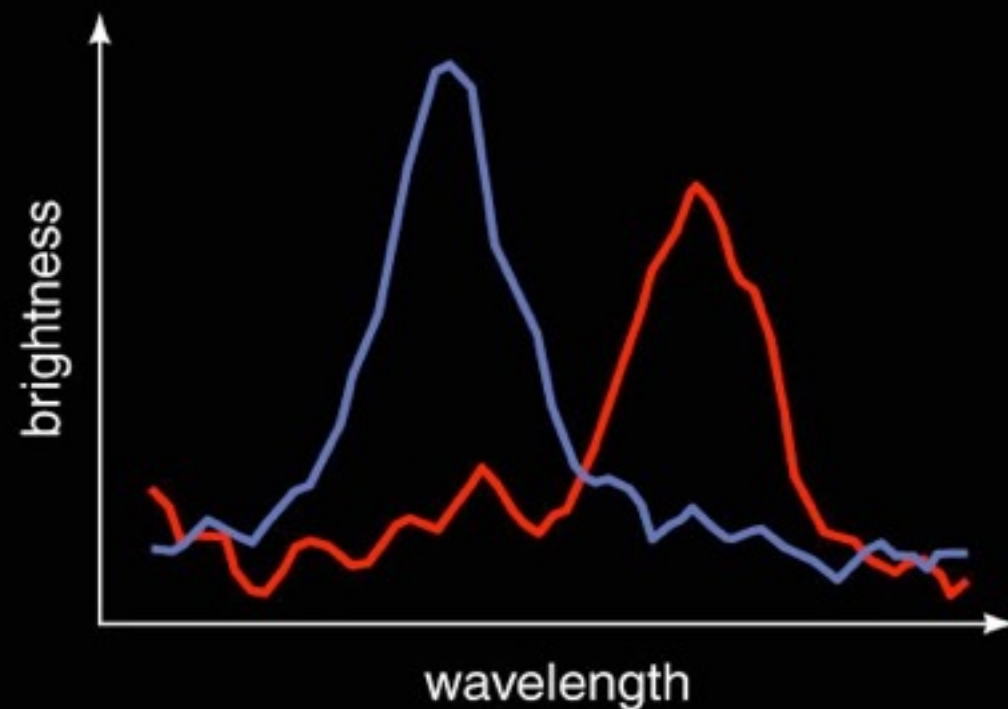
Follow GC
FOV: 13° 59' 60.0" (1.00×)

1995.5



Keck/UCLA Galactic
Center Group

More evidence for supermassive black holes



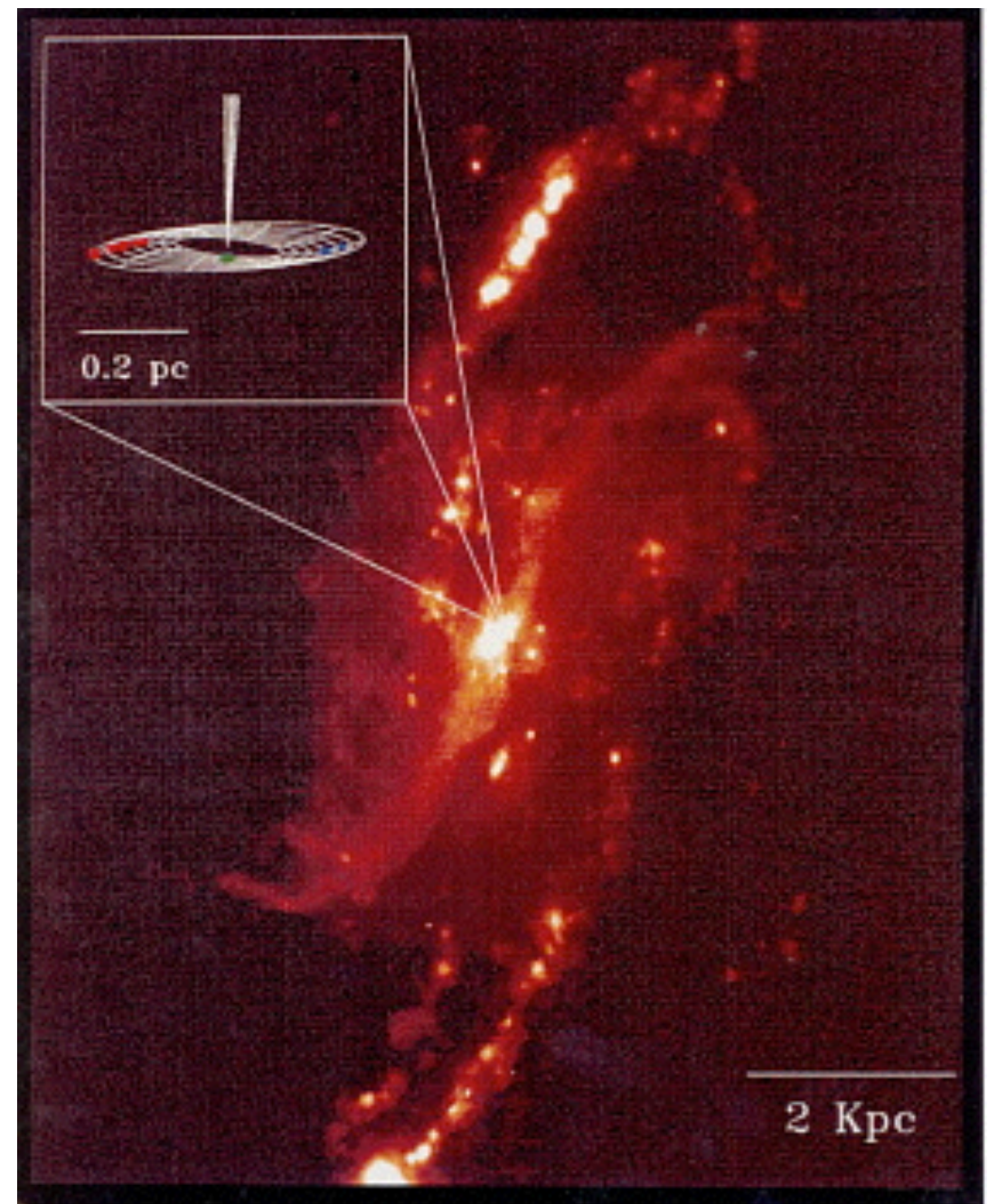
gas motion of ~ 100 s km/s at < 60 ly from the center

M87の銀河中心を運動するガスのスピードと距離から
 $3 \times 10^9 M_{\odot}$ のSMBHの存在が示唆されている。

More evidence

- 水分子の **water maser**
(microwave amplification
by stimulated emission by
radiation)の観測
- BH mass: **$3.9 \times 10^6 M_{\odot}$**

NGC 4258

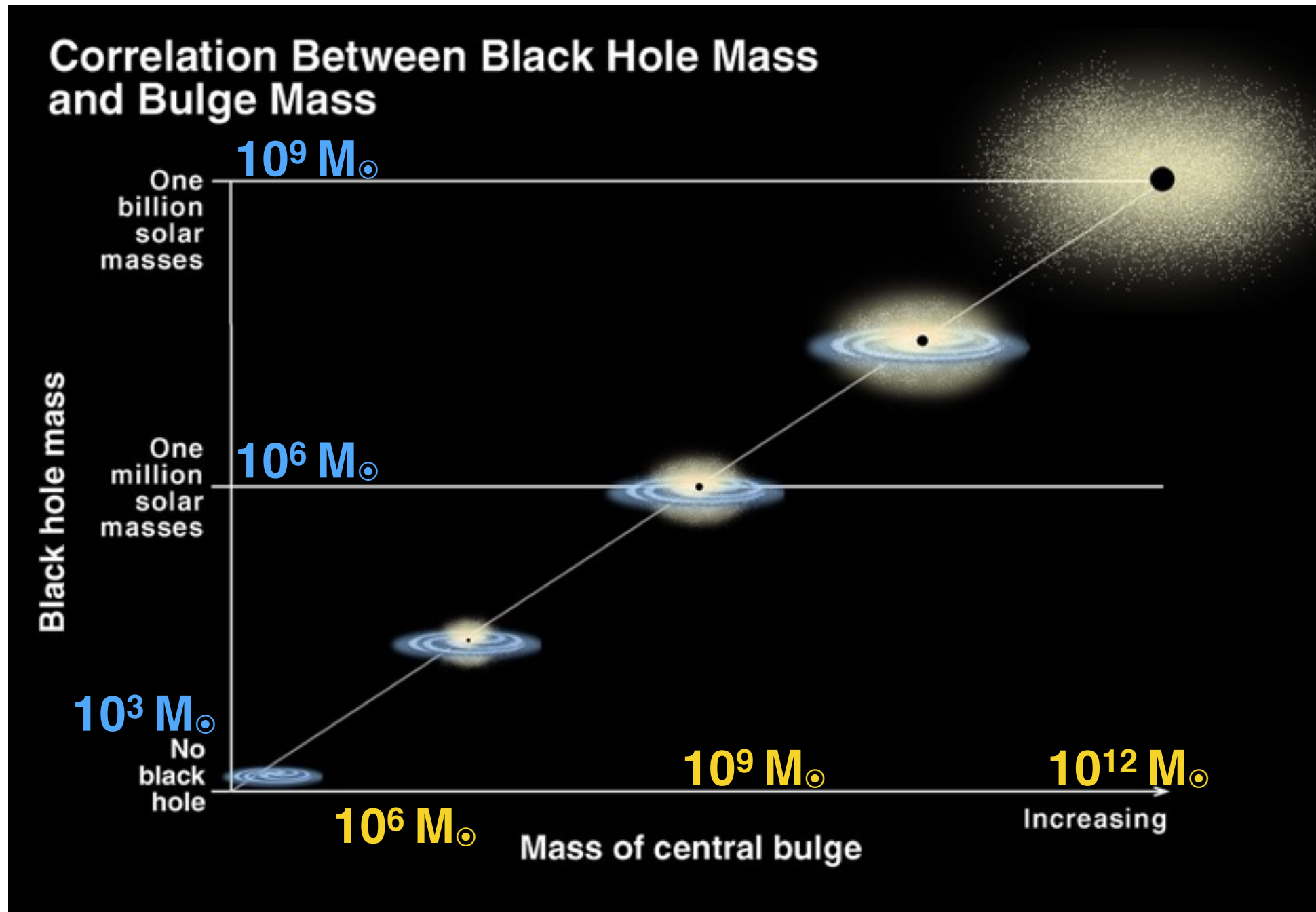


Black Holes in Galaxies

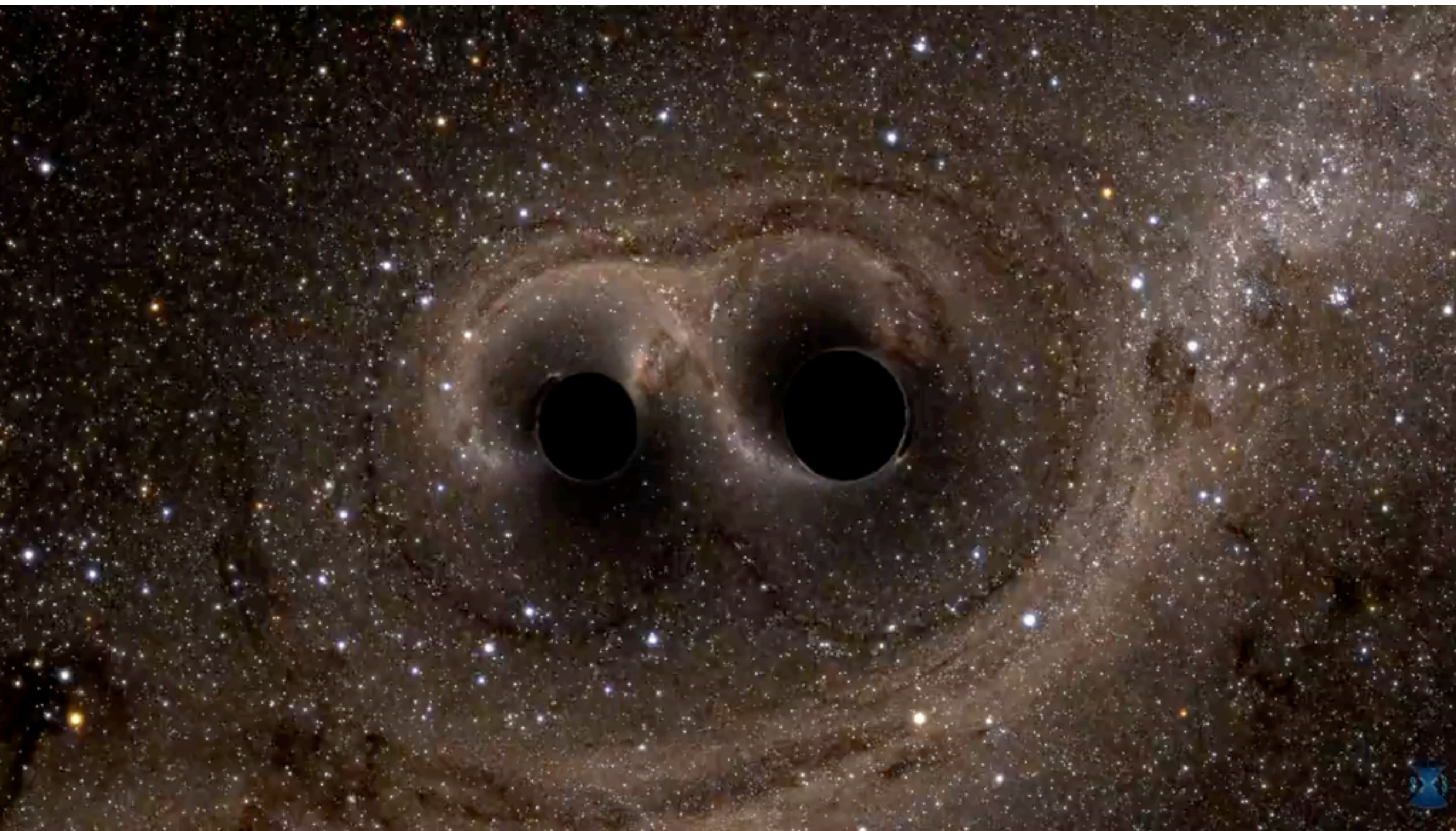
- 多くの近傍銀河の観測から、おそらくほとんどの銀河が **supermassive black holes** を中心に持っているようだ.
- ガスを降着せずに **dormant** (死んでいる) な SMBH もある.
- もしかすると全ての銀河が **quasar-like** な状態を一度は経験したのかもしれない.

Supermassive BH

超大質量ブラックホール



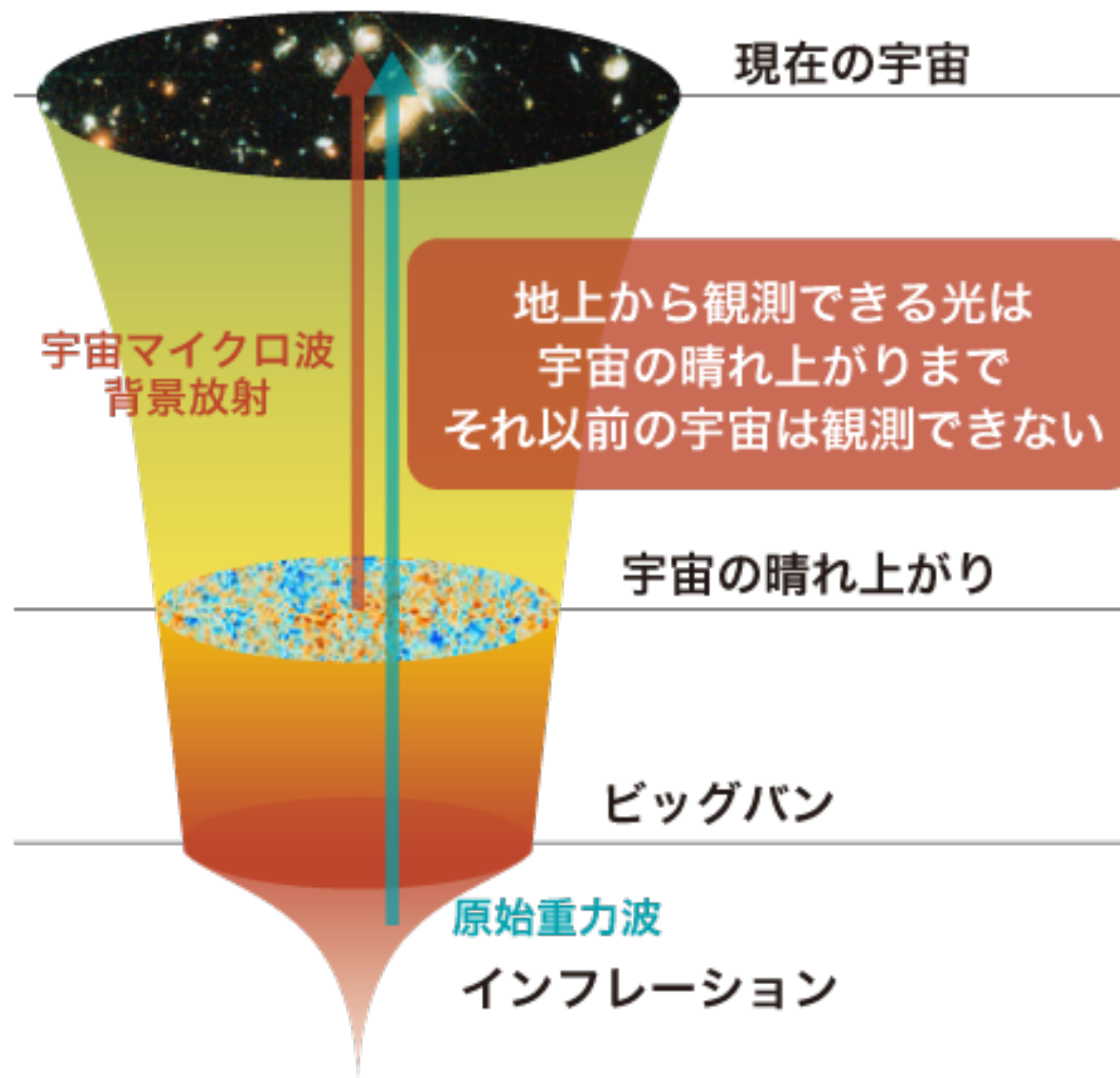
Magorrian relation; Ferrarese+'01;



<http://www.black-holes.org/>

原始重力波と 宇宙背景放射の偏光

原始重力波が宇宙誕生の謎を解き明かすかも！



原始重力波が「直接」観測できれば
インフレーションのころの
宇宙を知るてがかりになる！

図の出典：日本未来科学館
福田 大展

2014年3月： インフレーションの証拠となる 偏光シグナルを宇宙背景放射の中に捉えた！？

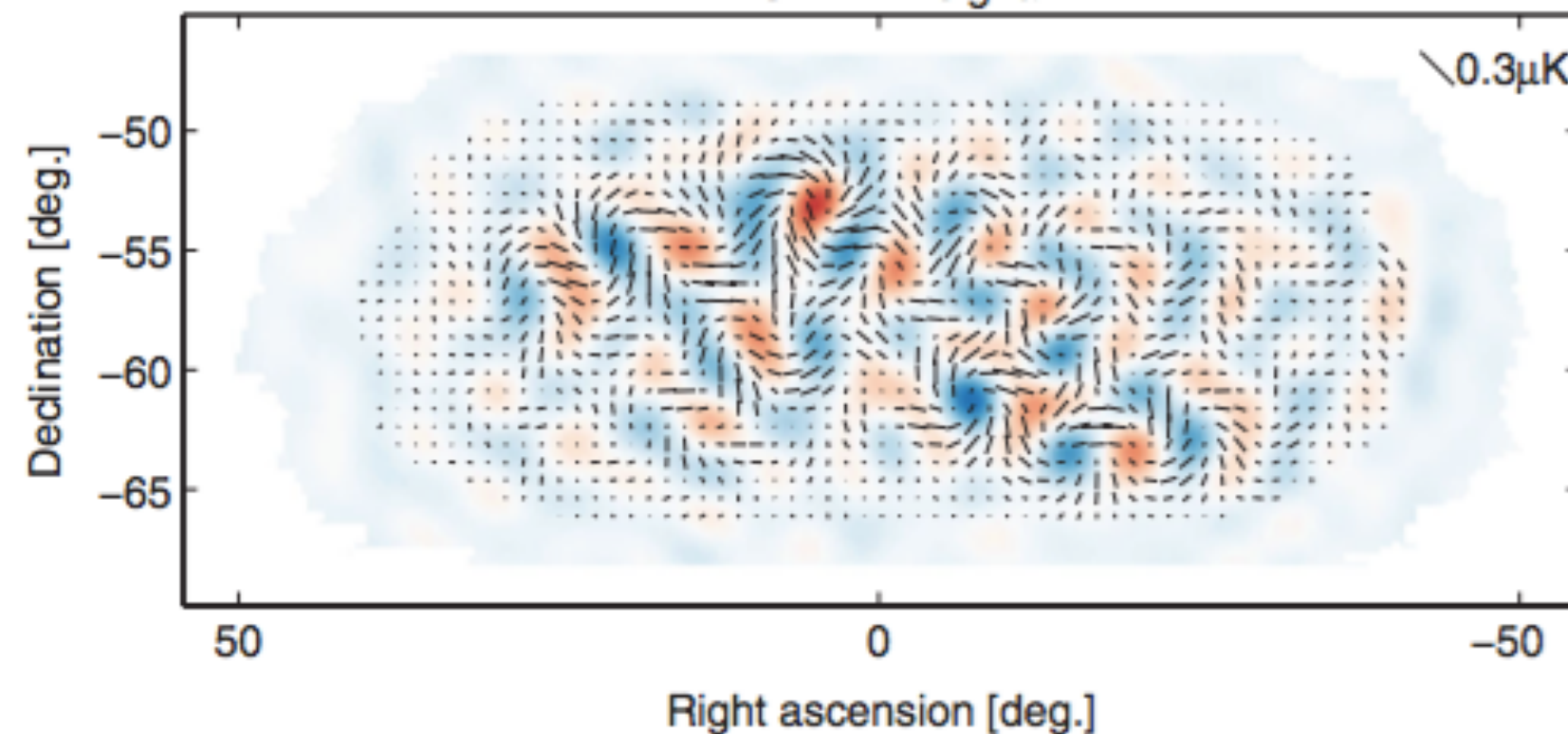
First Direct Evidence of Cosmic Inflation

Release No.: 2014-05

For Release: Monday, March 17, 2014 - 10:45am

BICEP2 collaboration

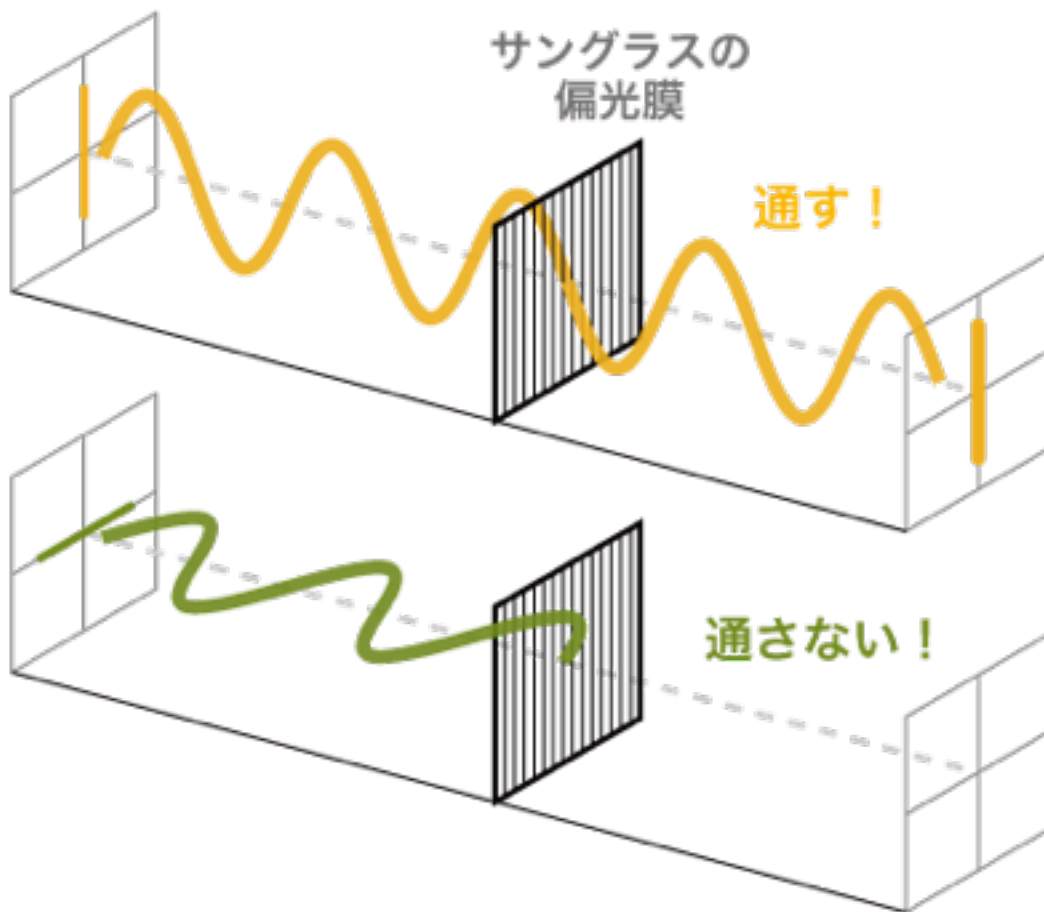
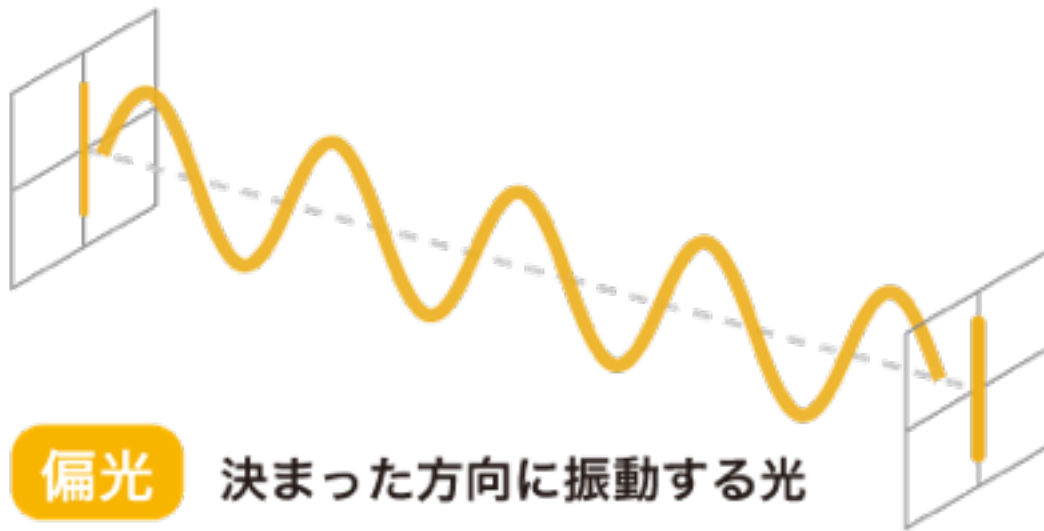
Bモード偏光シグナル



<http://bicepkeck.org/>

光の偏光

偏光サングラスが光を遮る仕組み



偏光膜 決まった方向に振動する光だけを通す

B モードは原始重力波でしかできない

E モード



原始重力波だけでなく
温度の“ムラ”でもできる

B モード

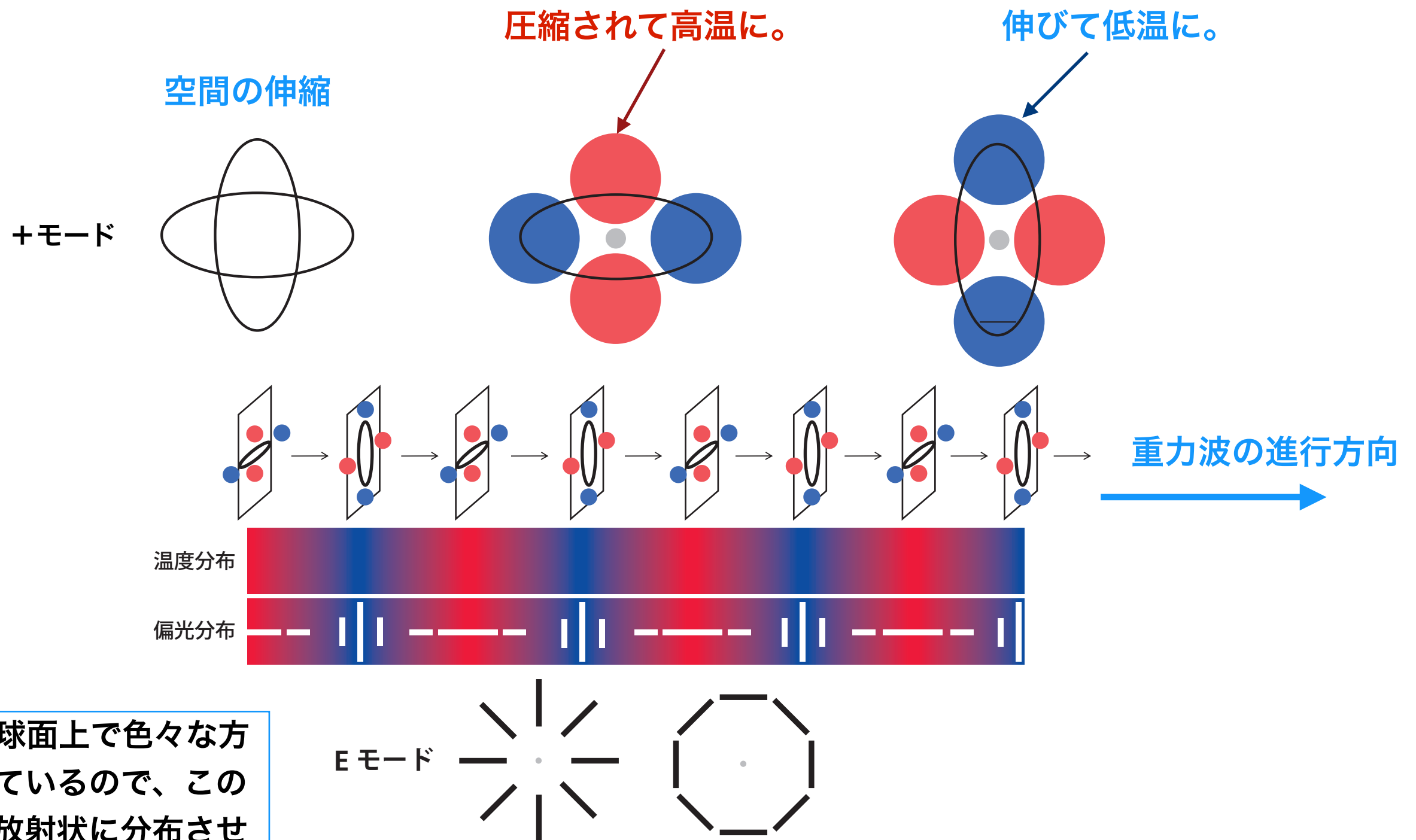


原始重力波でしかできない

(※ 宇宙の晴れ上がり後には E モードが
銀河の重力で曲げられてできることもある)

B モードの偏光パターンを発見すれば
原始重力波を「間接的に」観測したことになる!

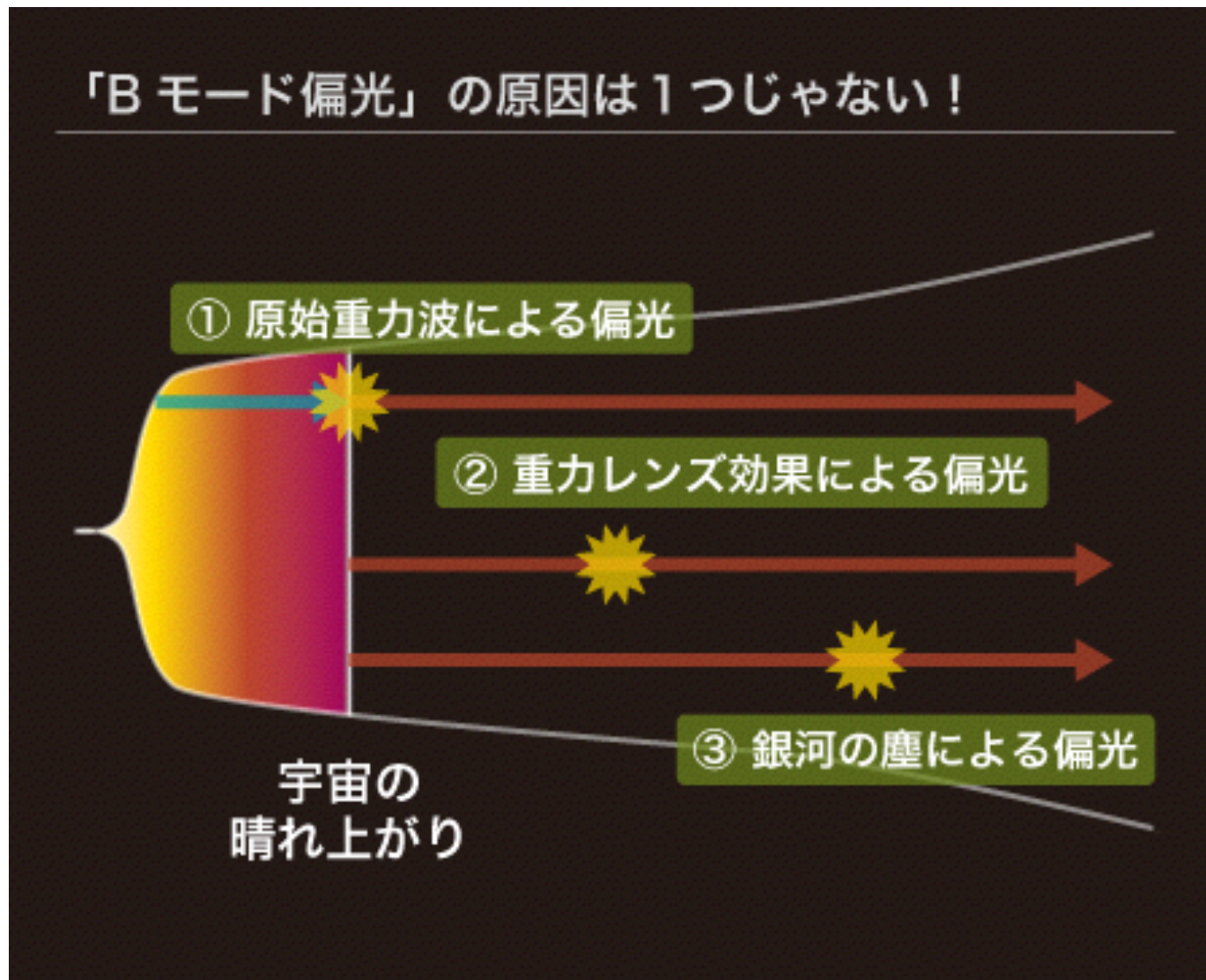
重力波による偏光



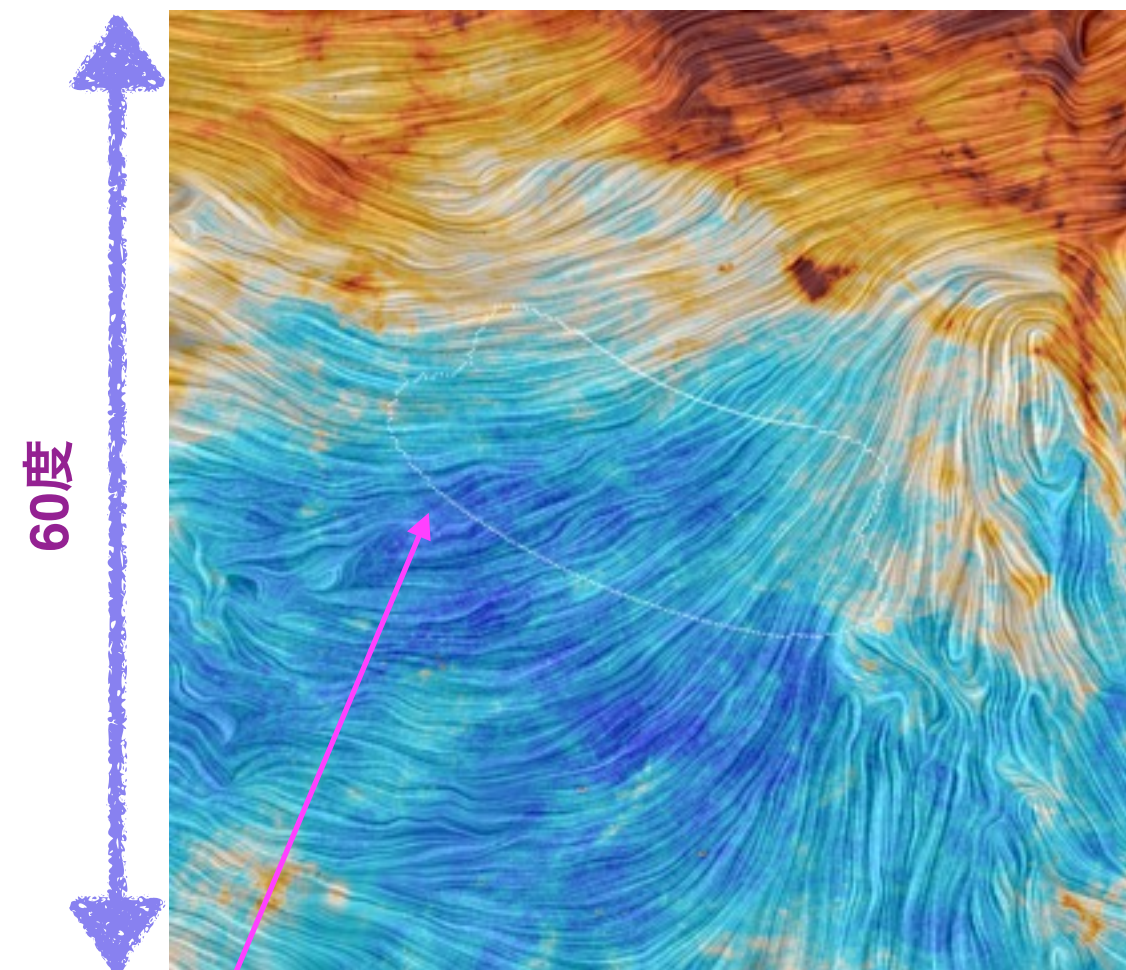
重力波は天球面上で色々な方向に伝播しているので、このパターンを放射状に分布させると、Eモードになる。

しかし、実はこの偏光は銀河の塵によるものだった、
ということがプランク衛星データとの比較からわかってきた。

2015年 2月



図の出典：日本未来科学館 福田 大展



プランク衛星による偏光データ

BICEPによる観測領域