

ブラックホールを通して 紐解く宇宙の歴史

井上 芳幸
(理化学研究所数理創造プログラム)

数理科学の研究フロンティア @ 東京大学, 2020-04-22

目次

- 宇宙物理とは
- 一般相対性理論の予言
- 星を支える力
- 星の進化
- ブラックホールをみよう
- まとめ

宇宙物理とは

宇宙

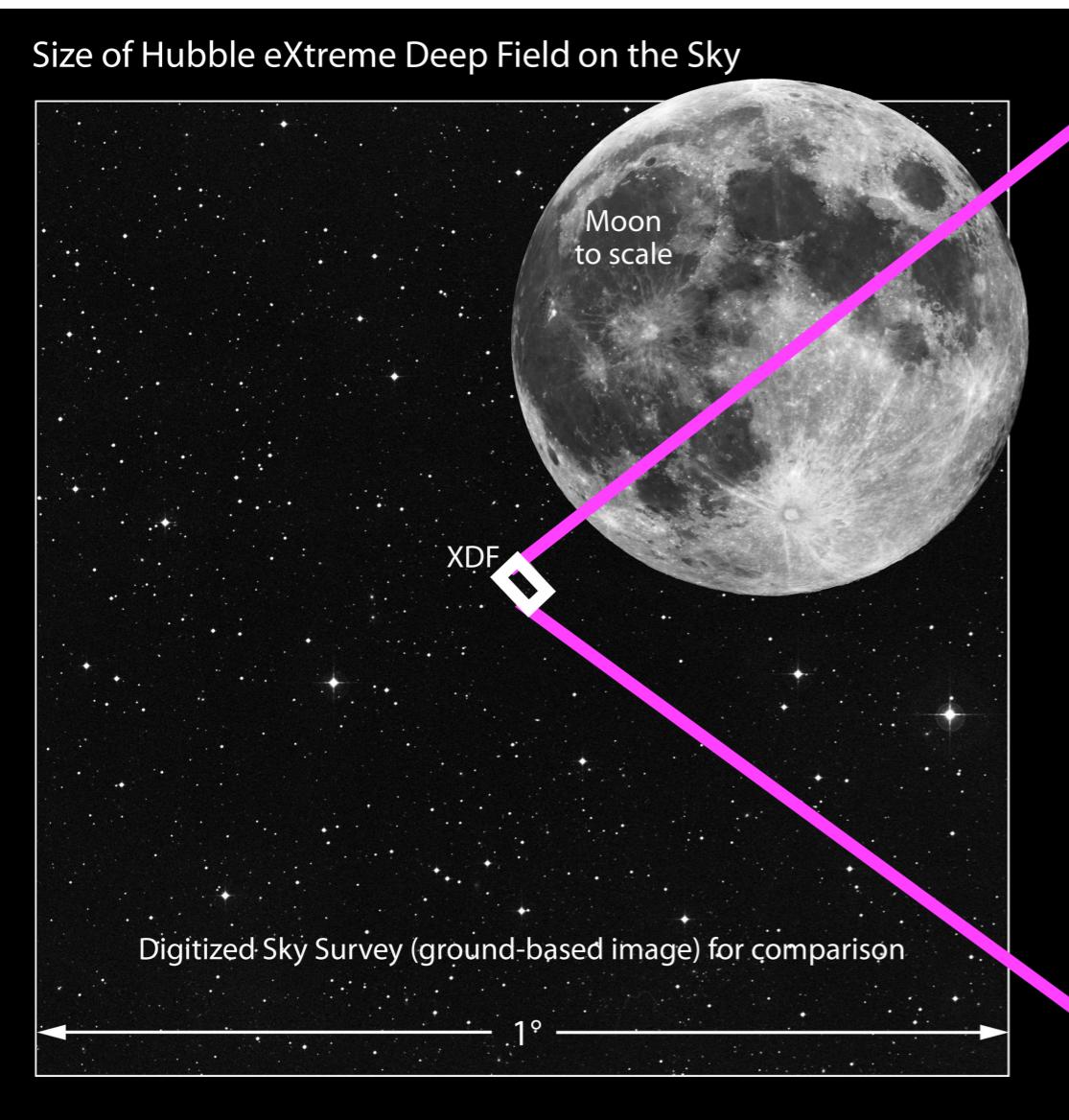


Illustration Credit: NASA; ESA; and Z. Levay, STScI; Moon Image

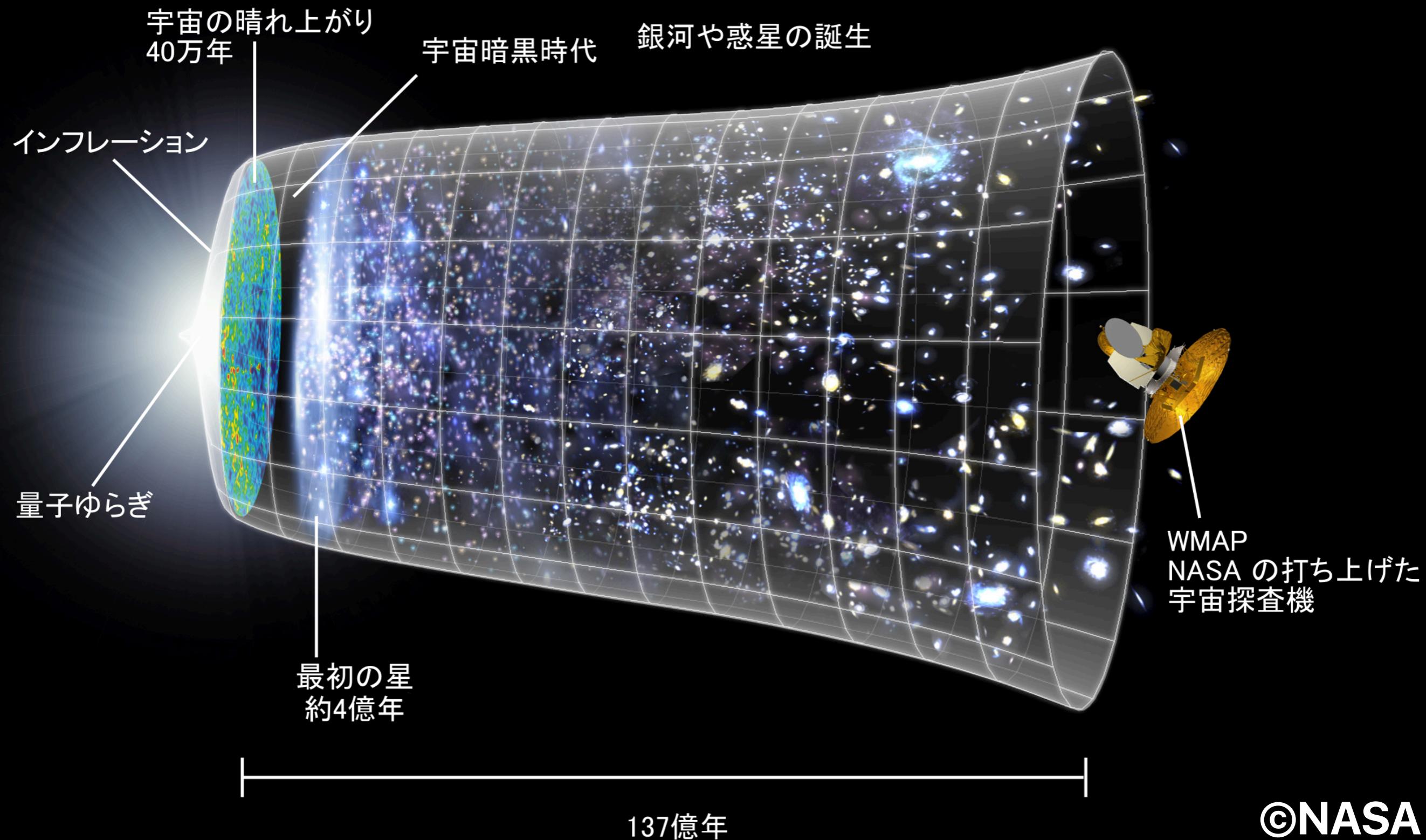
Credit: T. Rector; I. Dell'Antonio/NOAO/AURA/NSF



Credit: NASA; ESA; G. Illingworth, D. Magee, and P. Oesch, University of California, Santa Cruz; R. Bouwens, Leiden University; and the HUDF09 Team

宇宙の歴史

ダークエネルギーによる
宇宙の加速膨張

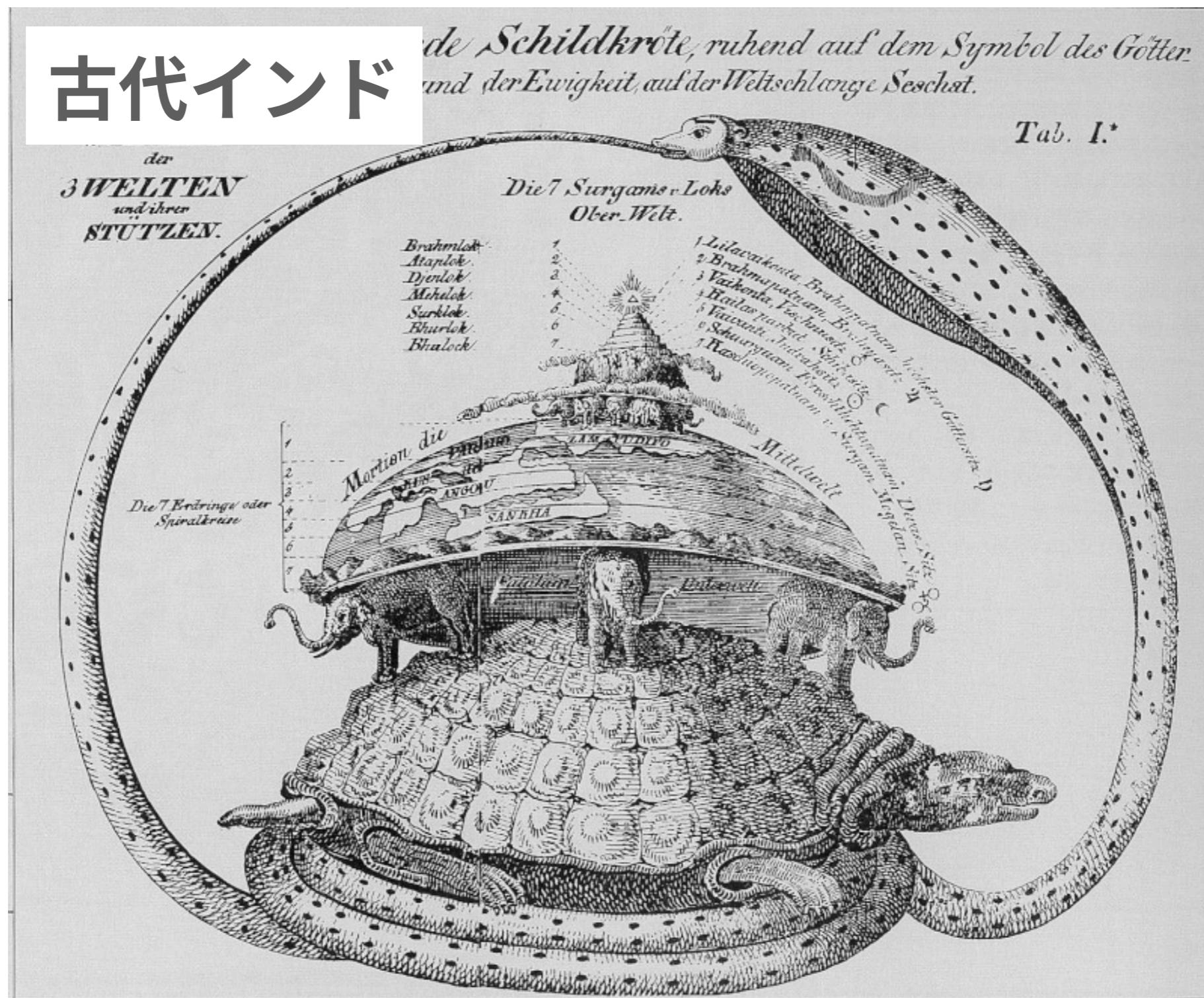


137億年

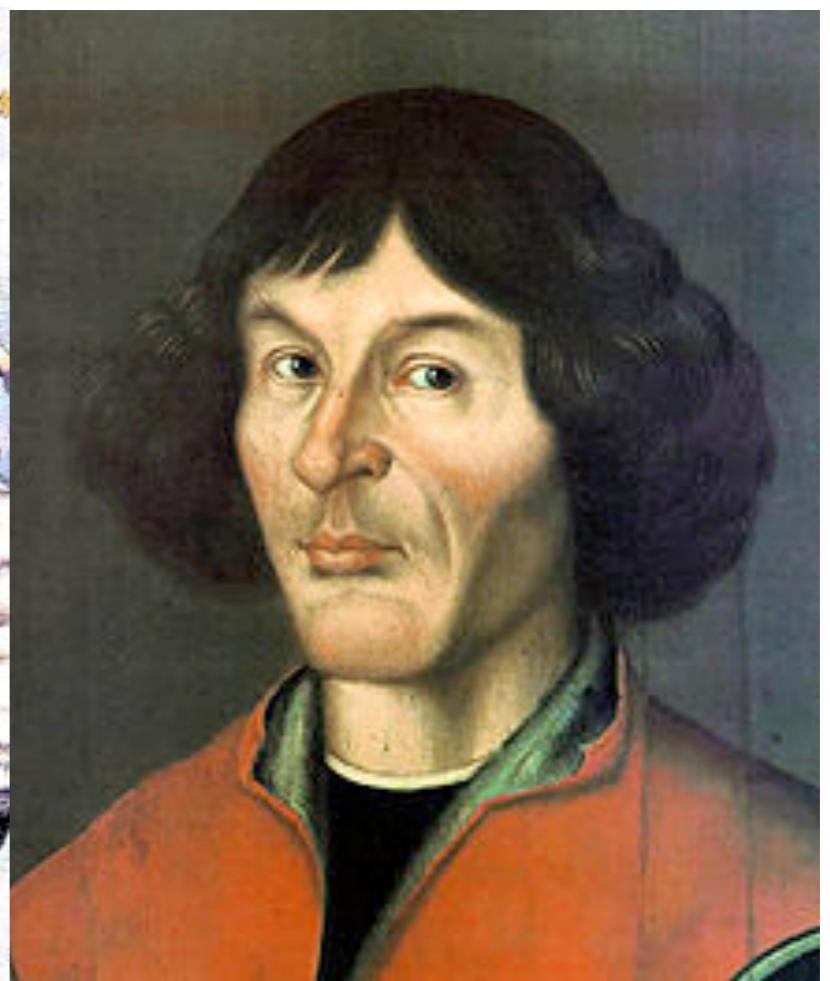
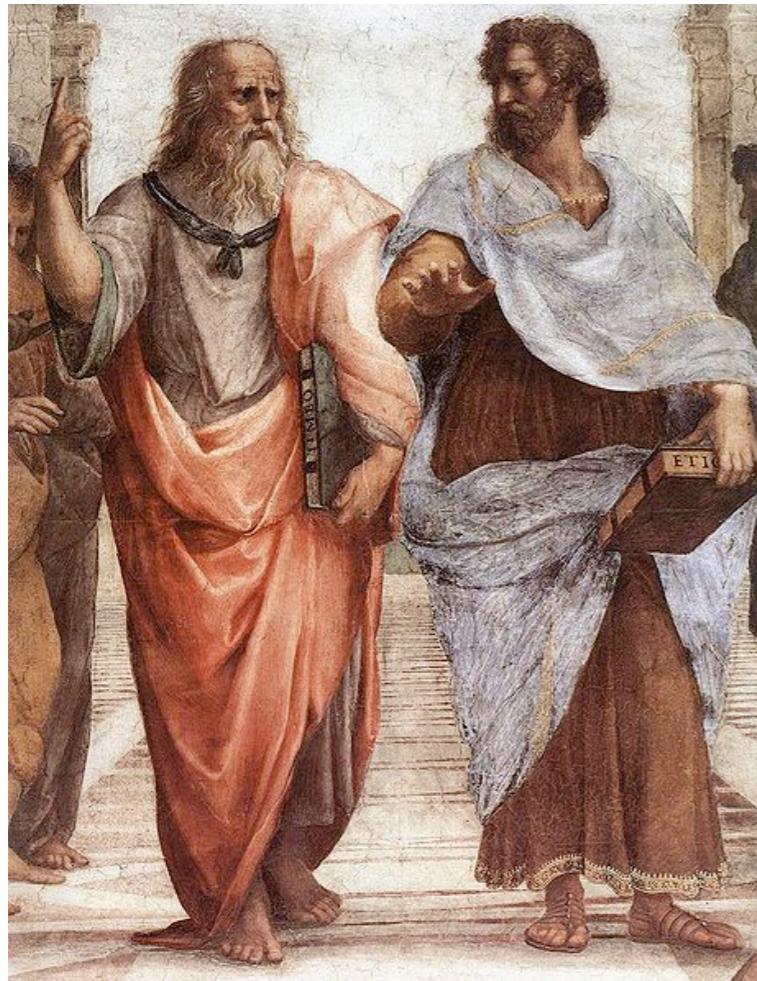
©NASA

人類の宇宙観

古代インド



哲学から天文学へ



ソクラテス (BC469-BC399)
プラトン (BC427-347)
アリストテレス (BC384-322)
自然哲学、天動説

ピトロマイオス
(AD83-AD168)
『アルマゲスト』
天動説

コペルニクス
(1473-1543)
地動説
※太陽中心説はアリストタルコス(BC310-BC230)が最初

地動說 vs. 天動說

地動說

Heliocentrism



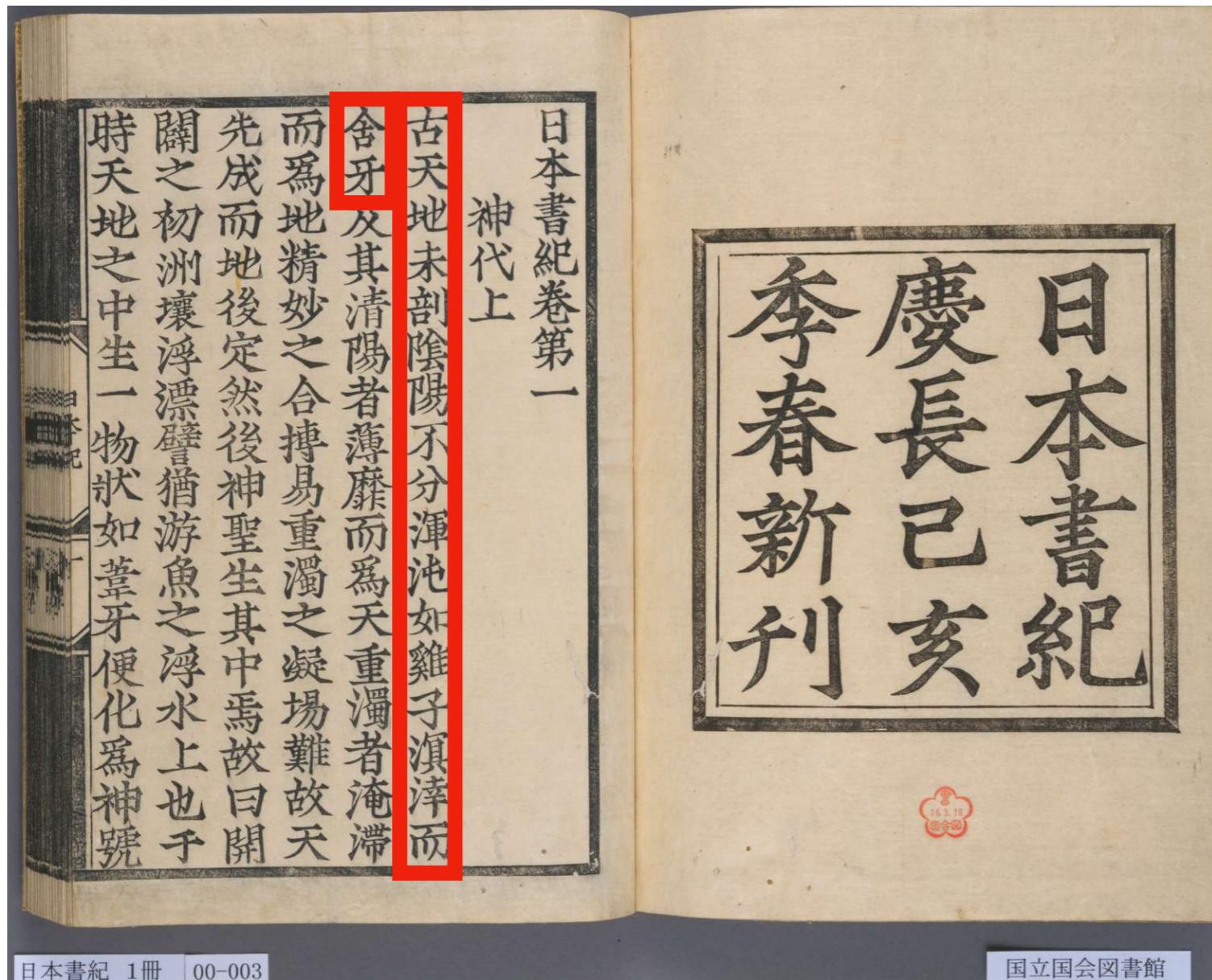
天動說

Geocentrism



<https://i.imgur.com/AReqgfP.mp4>

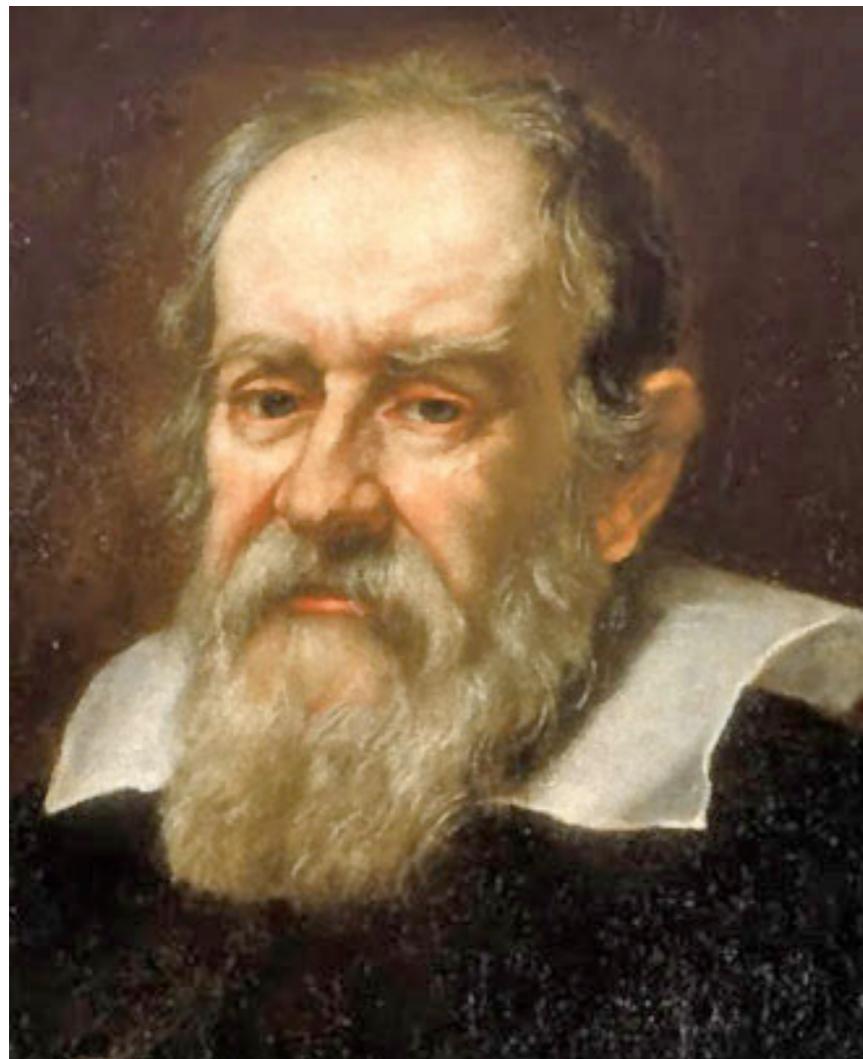
古代日本人の宇宙観



- 混沌から宇宙が始まる



天文学から物理学へ



ガリレオ・ガリレイ

(1564-1642)

望遠鏡の改良

地動説、落体の法則

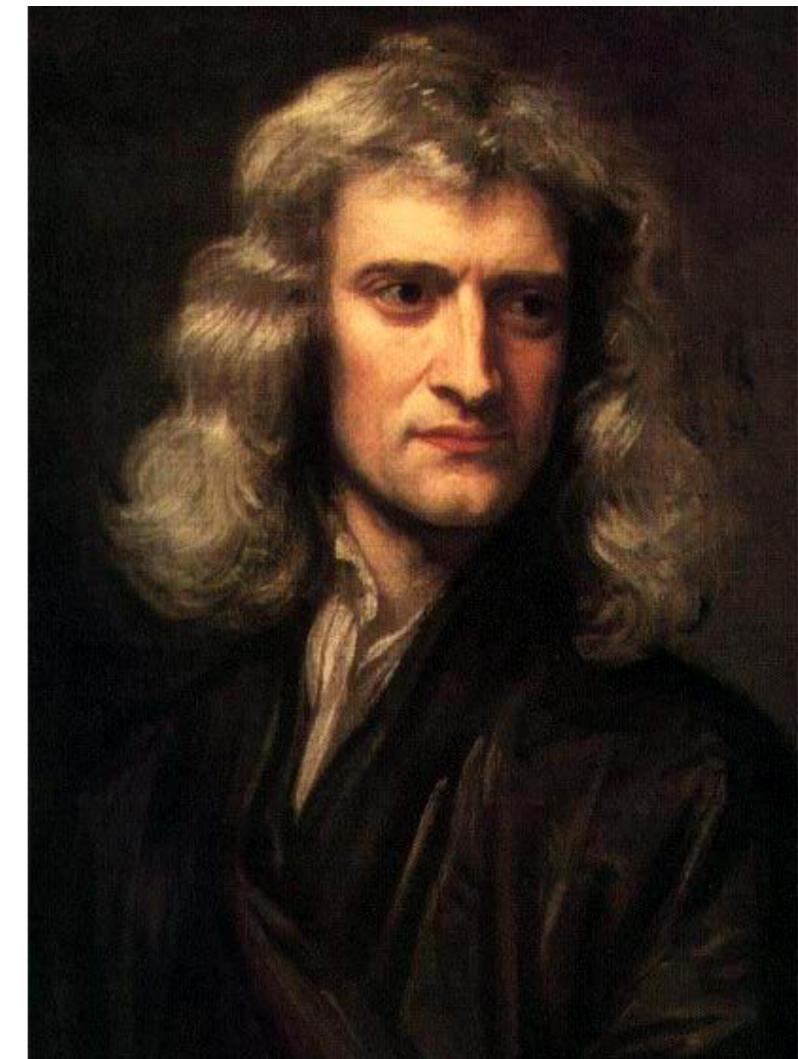


ケプラー

(1571-1630)

ケプラーの法則

橍円軌道の導入



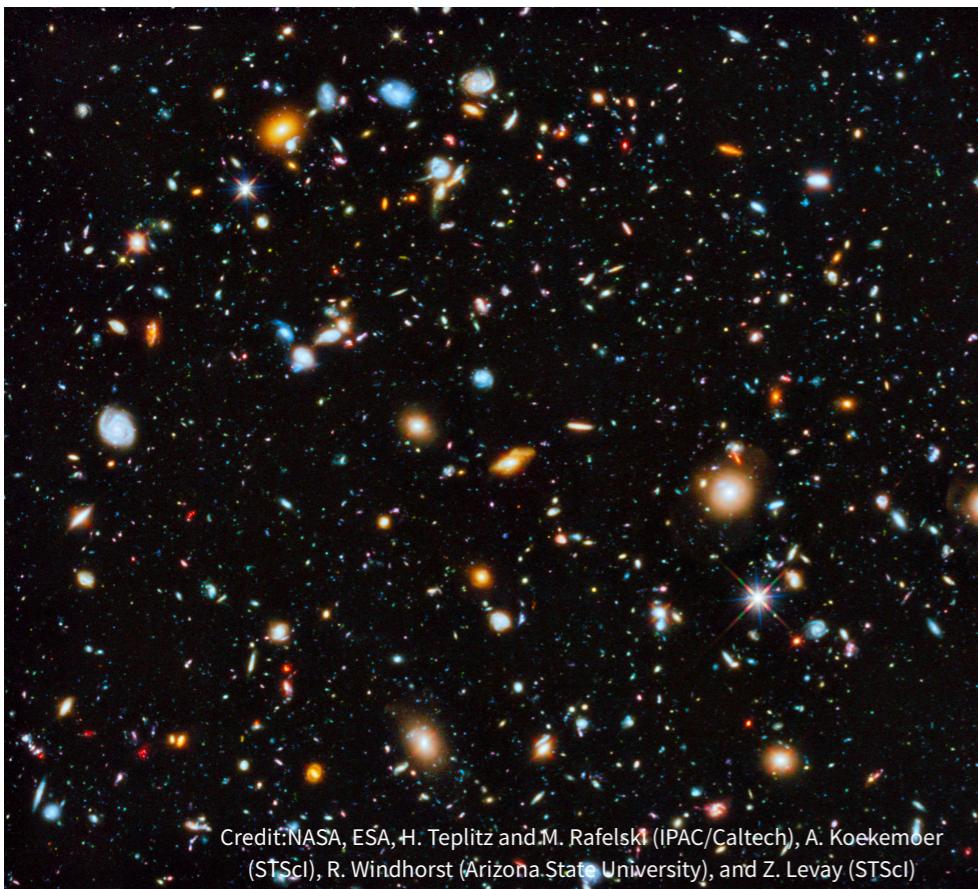
ニュートン

(1642-1727)

万有引力

近代物理学の祖

宇宙物理

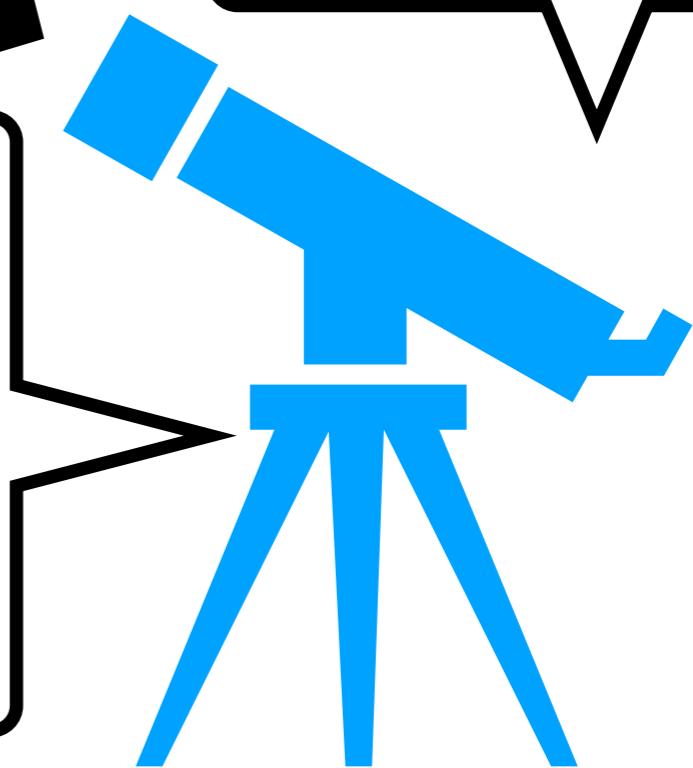


~138億光年
~ 10^{23} km
遠い

電磁波(光)
宇宙線
重力波

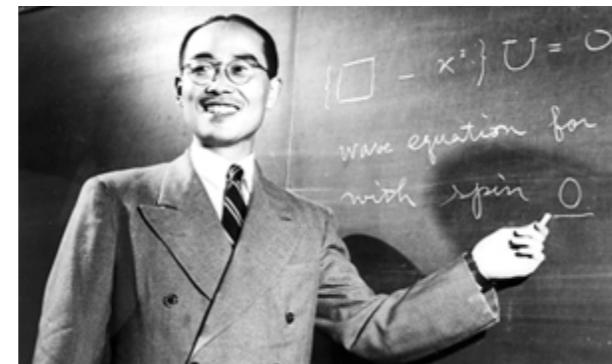
+物理 =
宇宙の解明
予言
新しい科学

イメージ
天体の位置
明るさ
時間変動

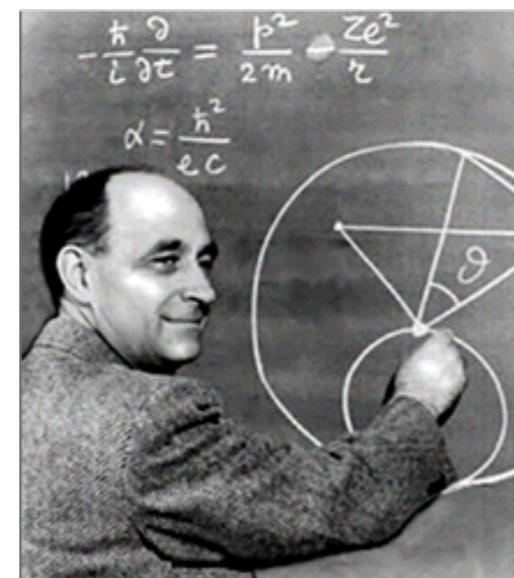


4つの力

- 強い力
- 電磁気力
- 弱い力
- 重力



湯川(1935)



Fermi
(1930s)

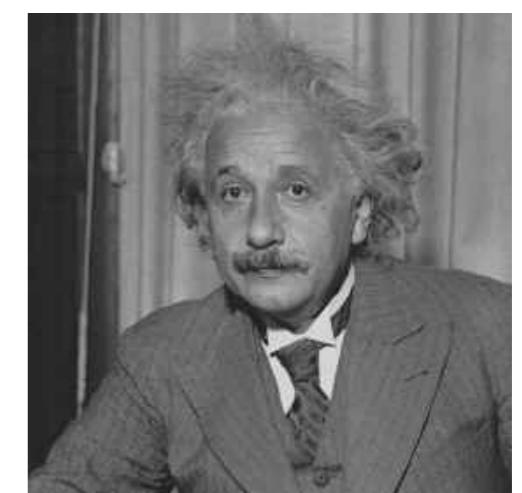
Faraday
(1830s)



Maxwell
(1864)



Newton
(1687)



Einstein
(1915)

宇宙と素粒子：ウロボロス

大規模構造

銀河団

銀河

クオーク

原子核

原子分子

DNA

微生物

人間

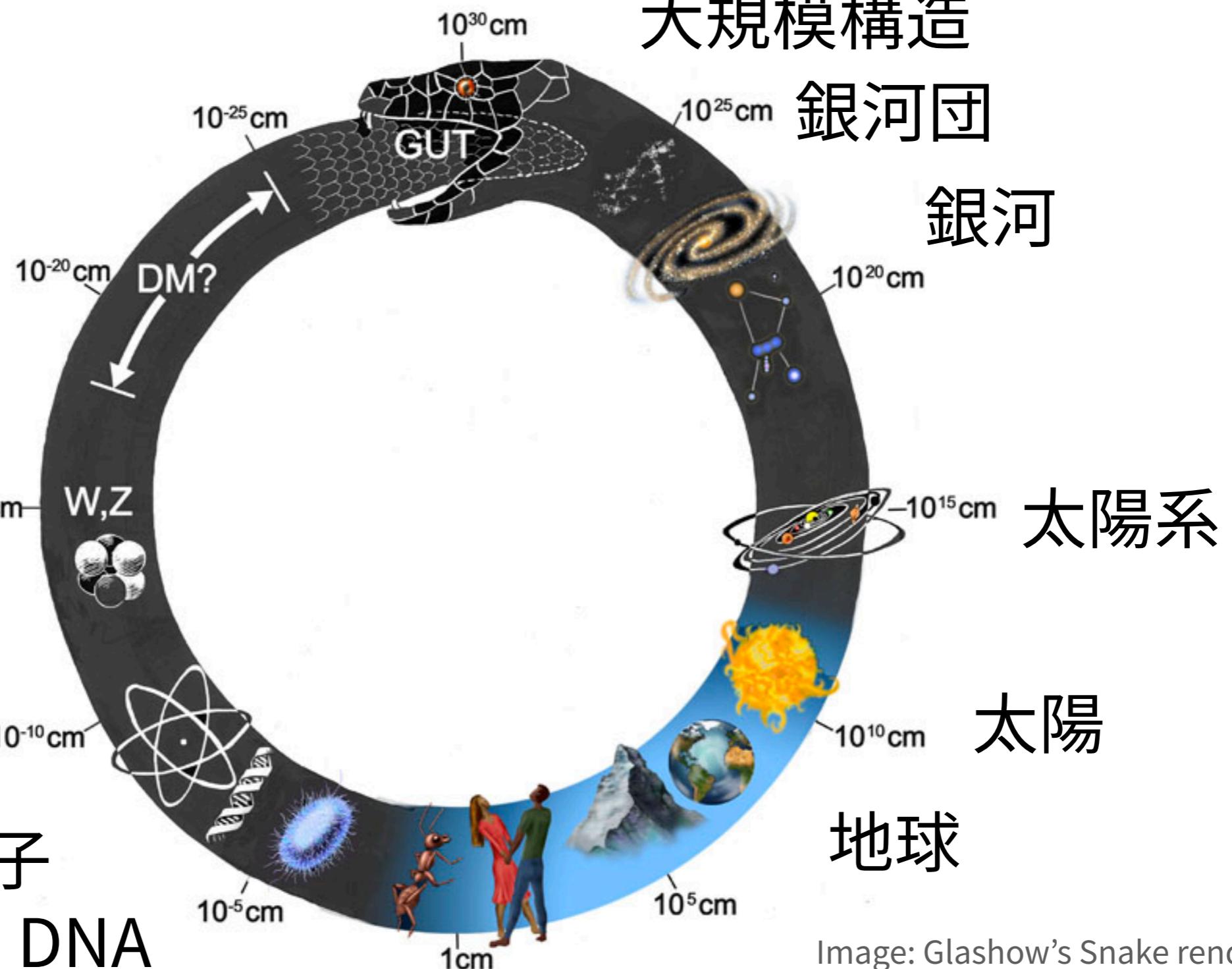


Image: Glashow's Snake rendered by
Nancy Ellen Abrams and Joel R.
Primack, (c) Abrams, Primack 2006

一般相対性理論の予言

ニュートン力学

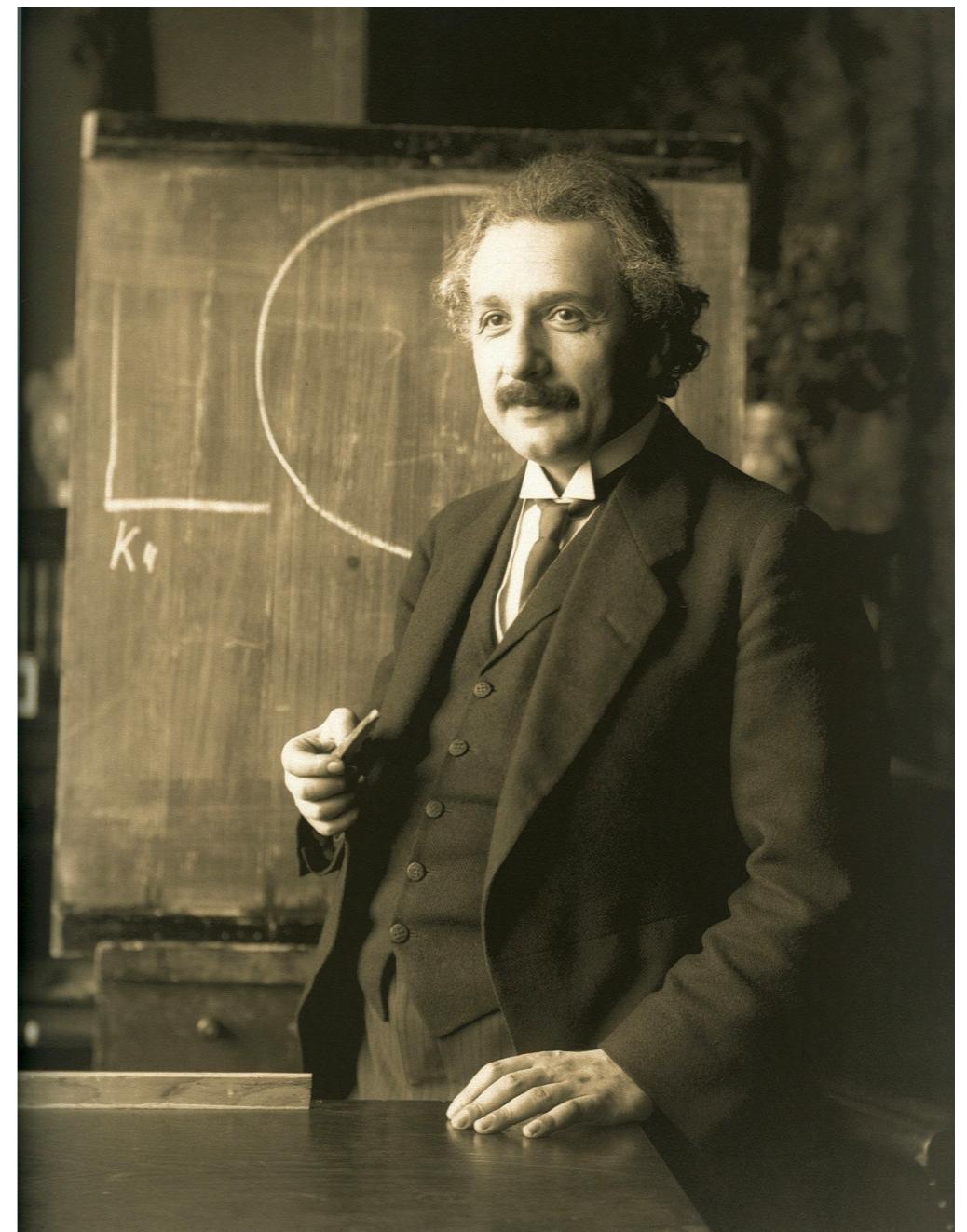
- “Philosophiae Naturalis Principia Mathematica”
(プリンキピア), I. Newton, 1687
- 重力の法則(万有引力)を数学で記述
- 惑星運動の理解
- 古典力学
 - 現代物理学へ



<http://isaacnewton272.weebly.com/gravity-and-motion.html>

一般相対性理論

- Albert Einstein (1879-1955)
- 時空の幾何学としての重力理論
- Einstein 方程式 (1915)
$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$
- 古典重力理論の完成
- 近代宇宙物理の始まり

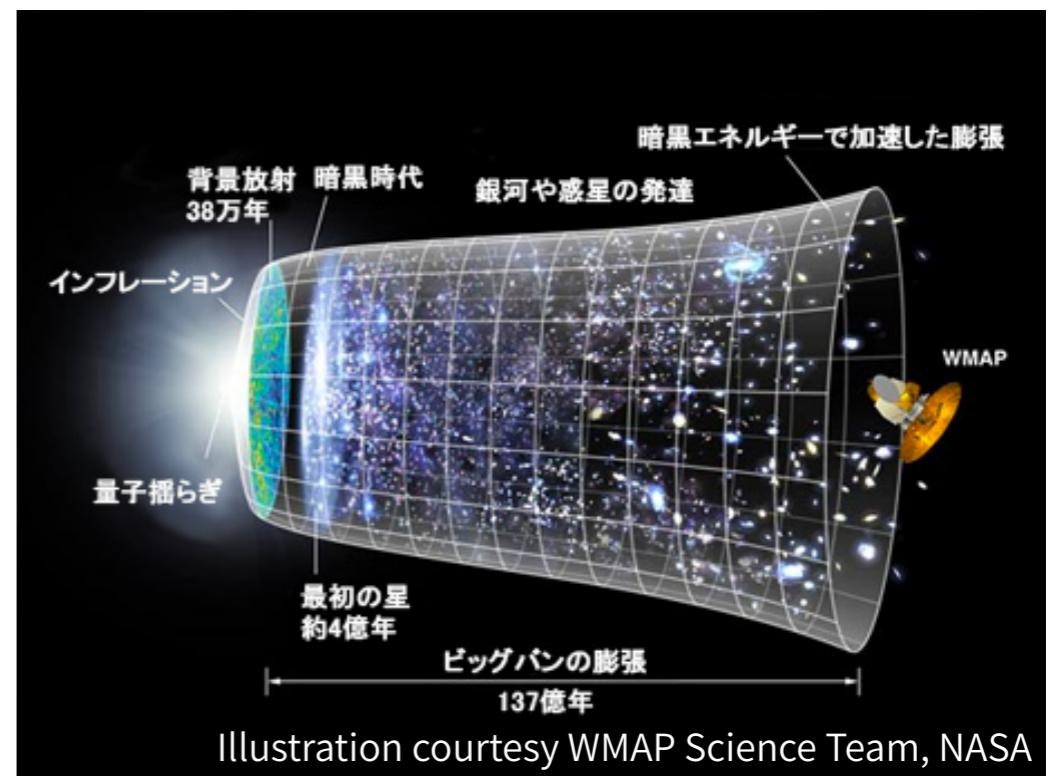


一般相対性理論の予言

ブラックホール



膨張宇宙



星の進化の終末

天体物理

Astrophysics

ビッグバンの根幹

宇宙論

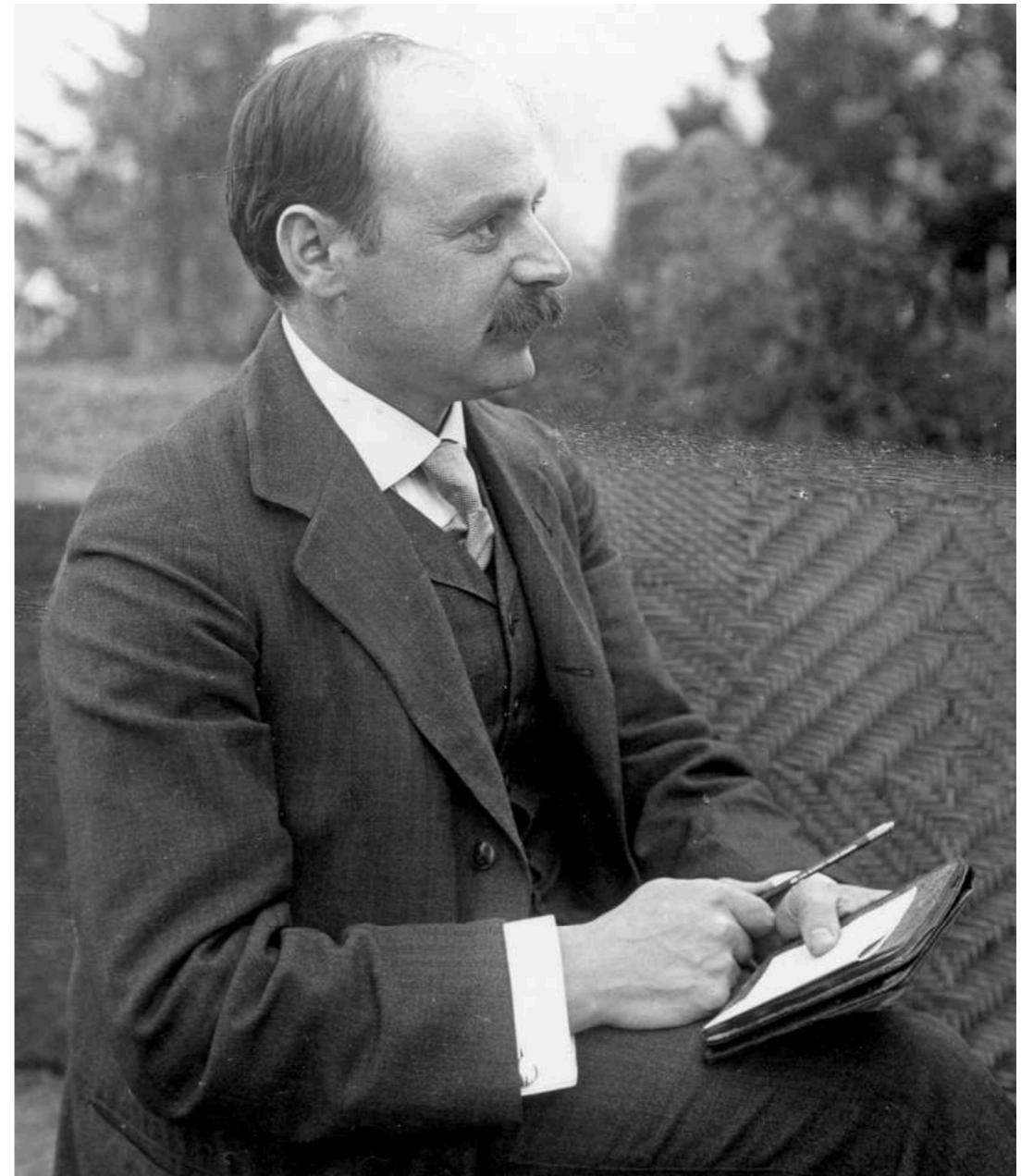
Cosmology

Schwarzschild black hole

- シュワルツシルト(1873-1916)
 - 第一次大戦従軍中
 - アインシュタイン方程式の球対称真空解 (1916)

$$ds^2 = -\left(1 - \frac{2M}{r}\right)dt^2 + \frac{dr^2}{1 - \frac{2M}{r}} + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2)$$

- 地平線の存在：ブラックホール
- 一般相対性理論発表から 1 ヶ月後



古典的(Newton的)理解

- ラプラス (1799)
- 脱出速度 (Newton重力)

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

~11 km/s (地球)

- $v_{\text{esc}} = c$
 $\Rightarrow R = 2GM / c^2$
 $= 3 \text{ km for } M = M_{\odot}$

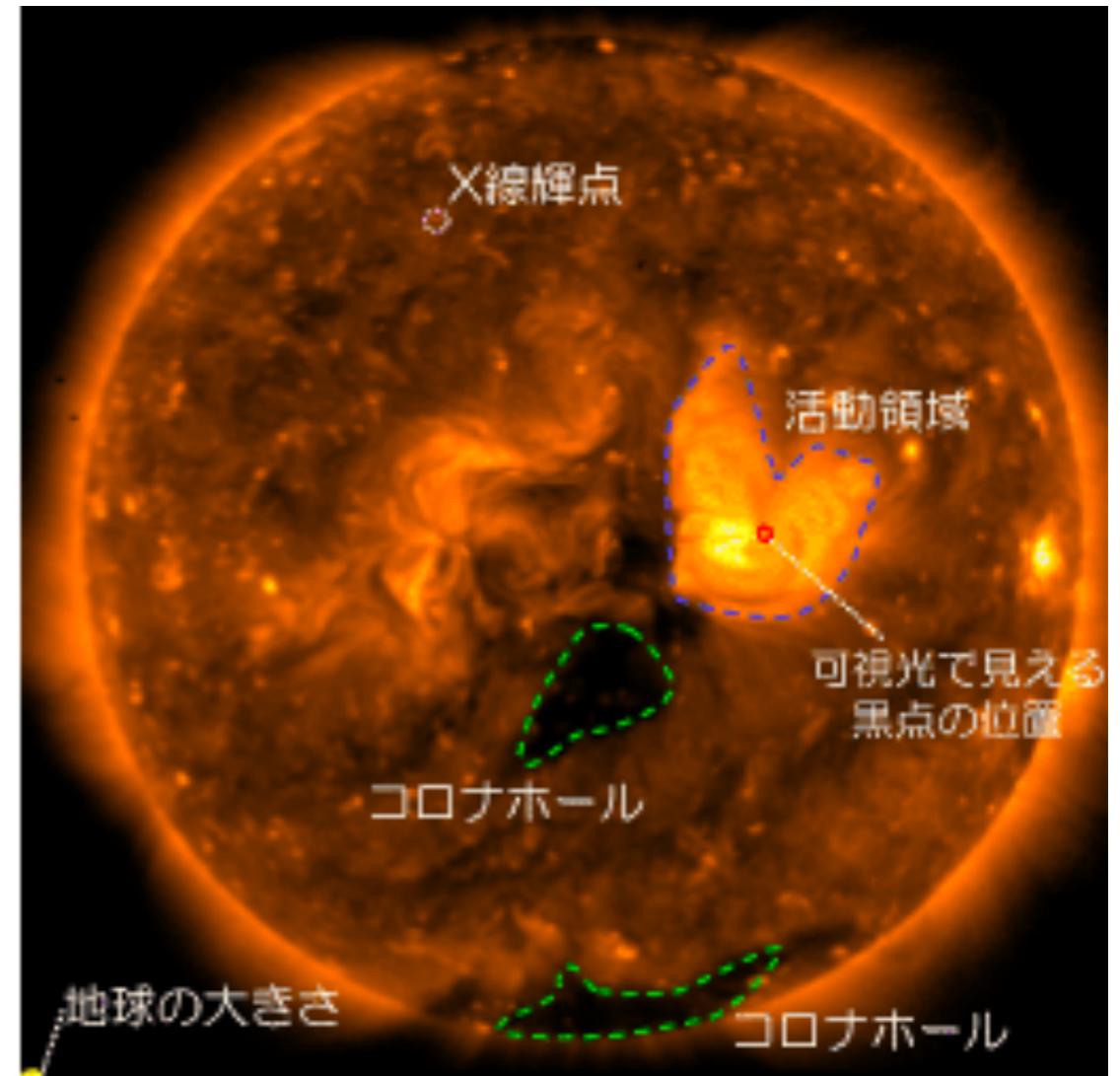
- シュバルツシルト半径



太陽

- 半径 $R_{\odot} \sim 7 \times 10^{10} \text{ cm}$
- 質量 $M_{\odot} \sim 2 \times 10^{33} \text{ g}$
- 光度 $L_{\odot} \sim 4 \times 10^{33} \text{ erg/s}$
- 表面温度 $\sim 6000 \text{ K}$
- 中心温度 $\sim 1.6 \times 10^7 \text{ K}$
- 年齢 $\sim 46 \text{ 億年}$
- 距離 $1 \text{ AU} \sim 1.5 \times 10^{13} \text{ cm} \sim 500 \text{ 光秒}$

ひので衛星によるX線画像



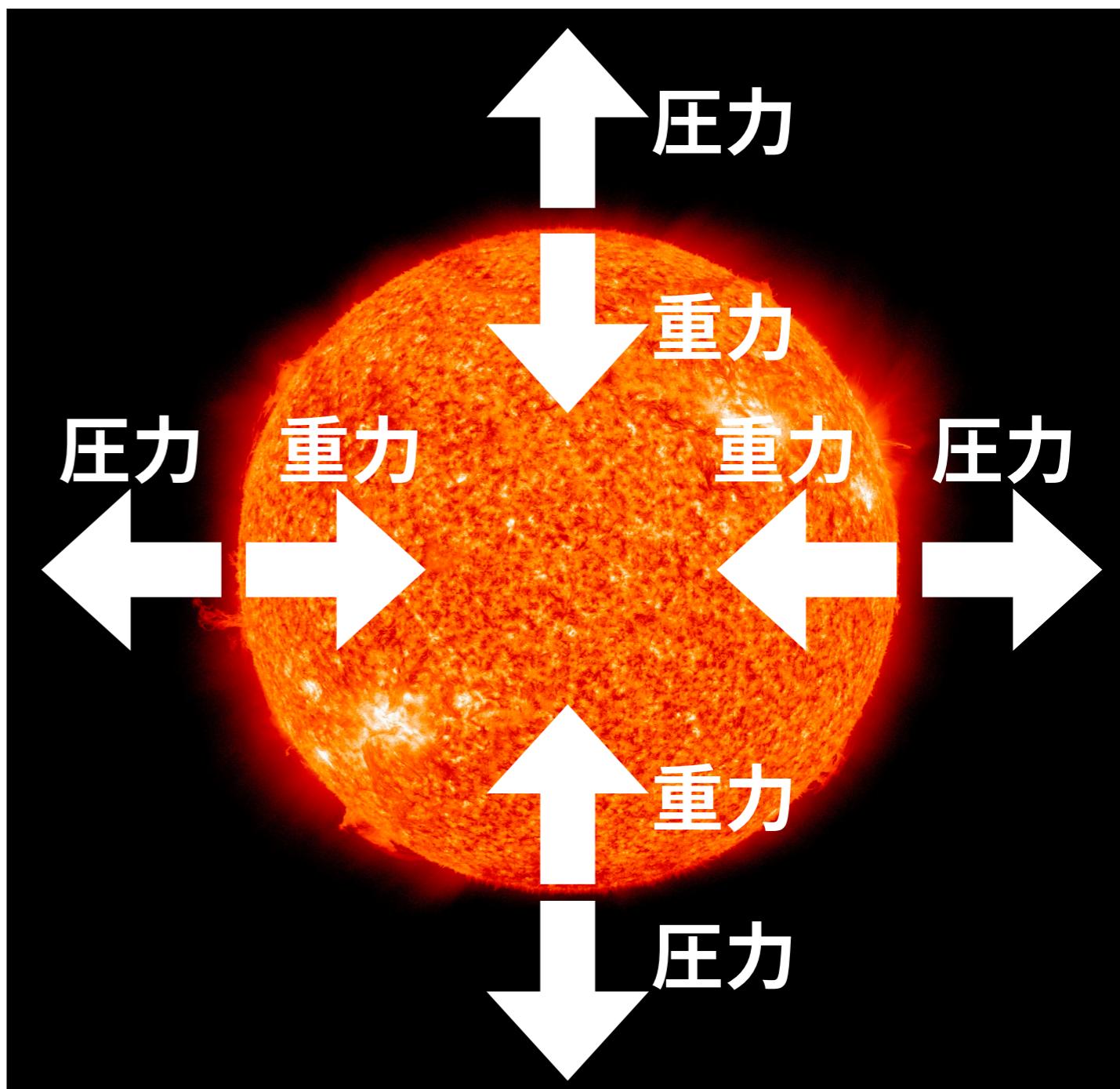
国立天文台

ブラックホールになると、 $\sim 3 \text{ km}$ に潰れる

星を支える力

星の平衡

- 星はどうやって形を保ってる？
- 壓力と重力の釣り合い
 - 例：風船(圧力-張力)
 - 釣り合いが保たれていれば、ブラックホールにならない
- 表面から光 ⇒ エネルギーを失う ⇒ 温度が下がる ⇒ 圧力が減る ⇒ 重力で潰れる



太陽のエネルギー源

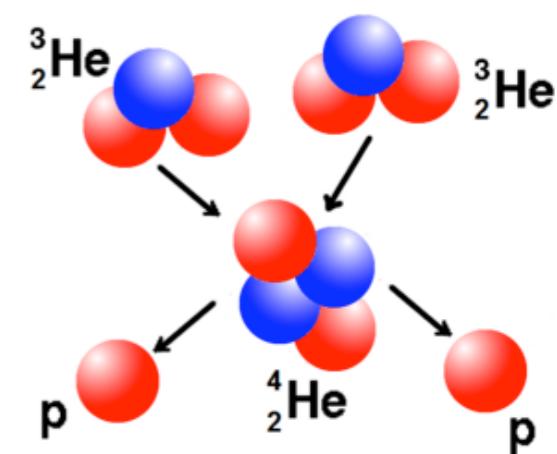
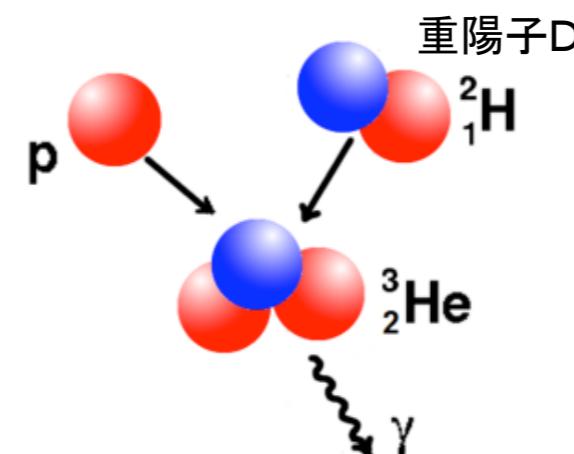
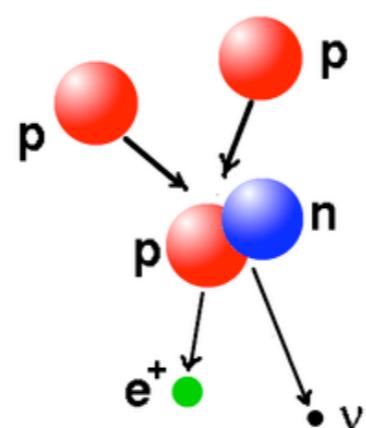
- 半径 $R_{\odot} \sim 7 \times 10^{10} \text{ cm}$, 質量 $M_{\odot} \sim 2 \times 10^{33} \text{ g}$, 光度 $L_{\odot} \sim 4 \times 10^{33} \text{ erg/s}$
- 単位質量あたり $\sim 2 \text{ erg/s/g}$
- 重力エネルギー説(ヘルムホルツ, 19世紀)
 - $E_G = -G M_{\odot} / R_{\odot} = -2 \times 10^{15} \text{ erg/g}$
 - 太陽の寿命は?
- 隕石の放射線年代測定 ~ 45.5 億年
- ダーウィン「種の起源」 数億~数十億年
- 重力エネルギーでは足らない

$$E=Mc^2$$

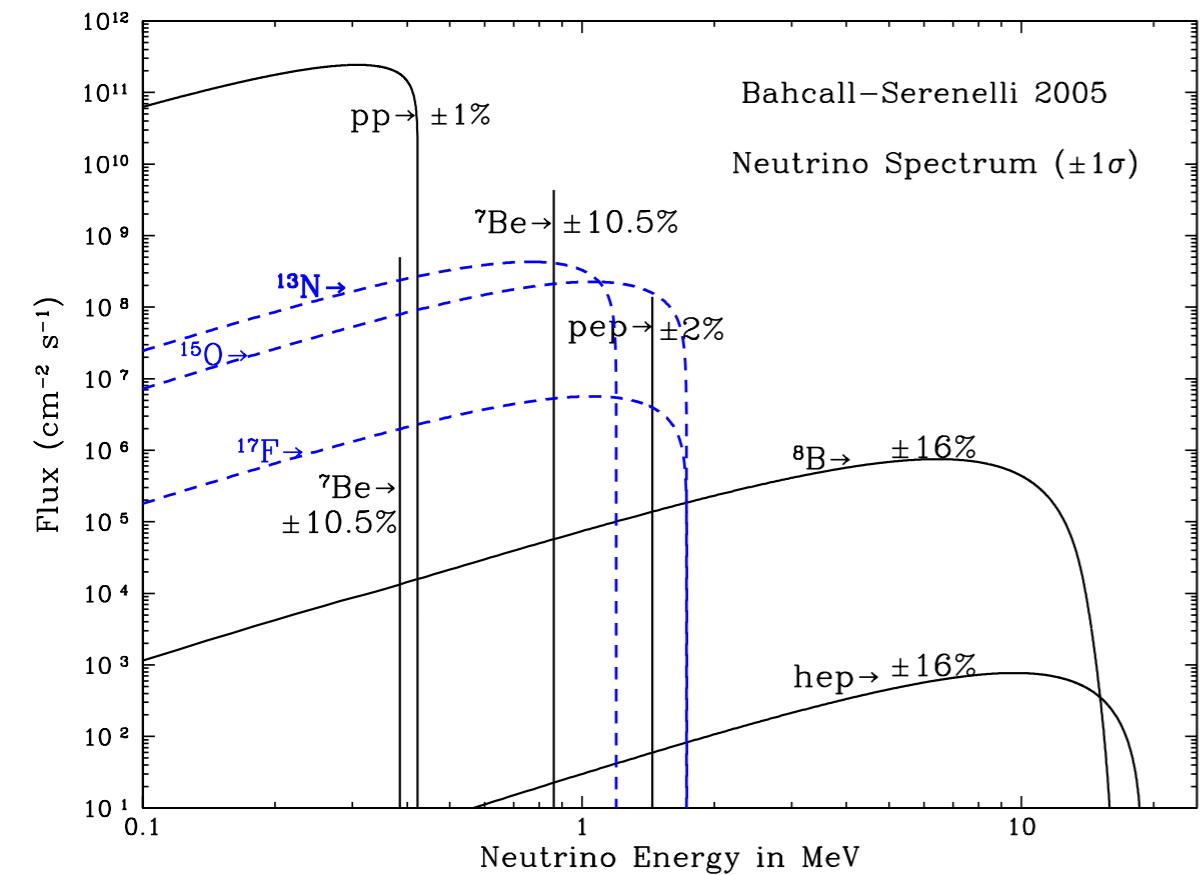
- 静止エネルギー説(エディントン, 1920)
 - $M_{\odot}c^2/M_{\odot} = 9 \times 10^{20} \text{ erg/g} \Rightarrow \text{太陽の寿命} \sim 10 \text{ 兆年}$
 - 静止エネルギー \Rightarrow 輻射エネルギーへの転換は？
- 核融合エネルギー説 (Bethe, 1939)
 - $6.6 \text{ MeV}/\text{陽子} \sim 6.6 \times 10^{18} \text{ erg/g} \Rightarrow \text{太陽の寿命} \sim 1000 \text{ 億年}$

• 太陽は潰れない

• ベーテ
ノーベル賞 (1969)

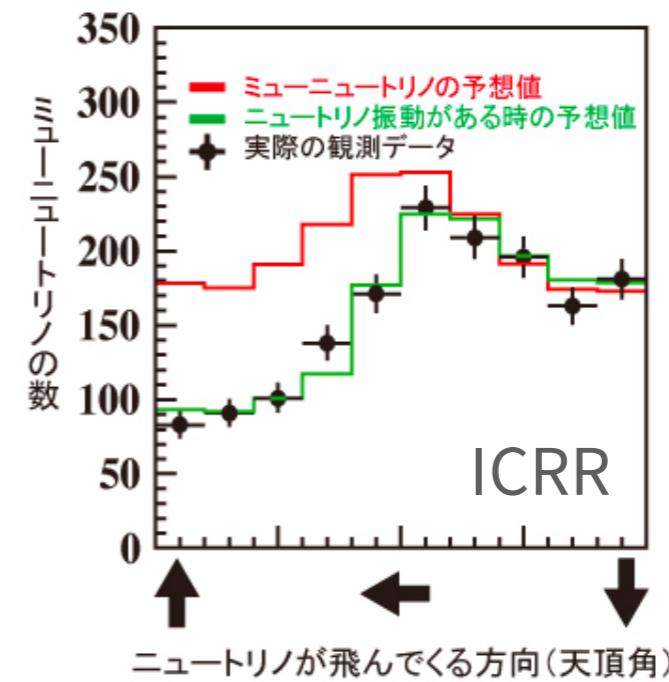


太陽ニュートリノ

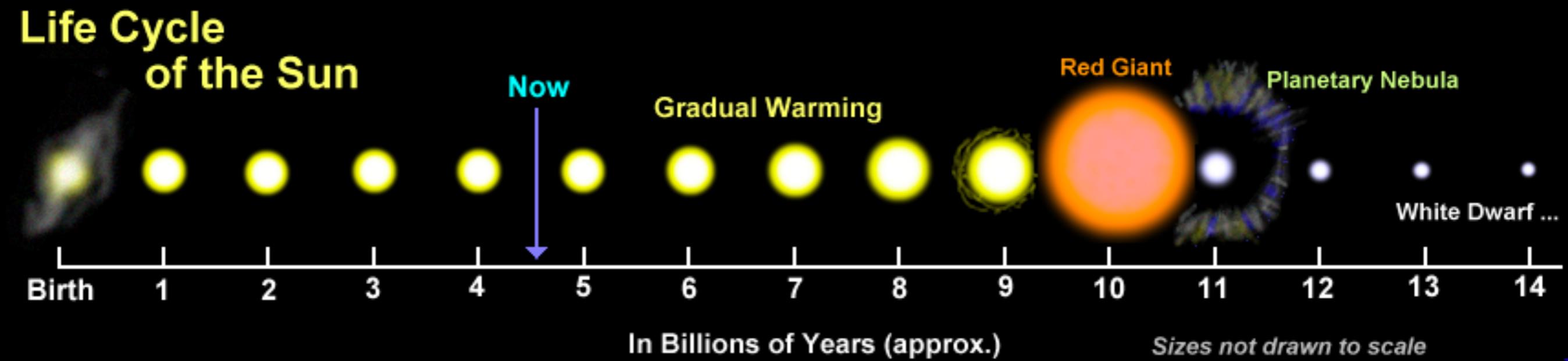


- ニュートリノ振動の発見
- ノーベル賞(2015)
- 梶田・マクドナルド₂₅

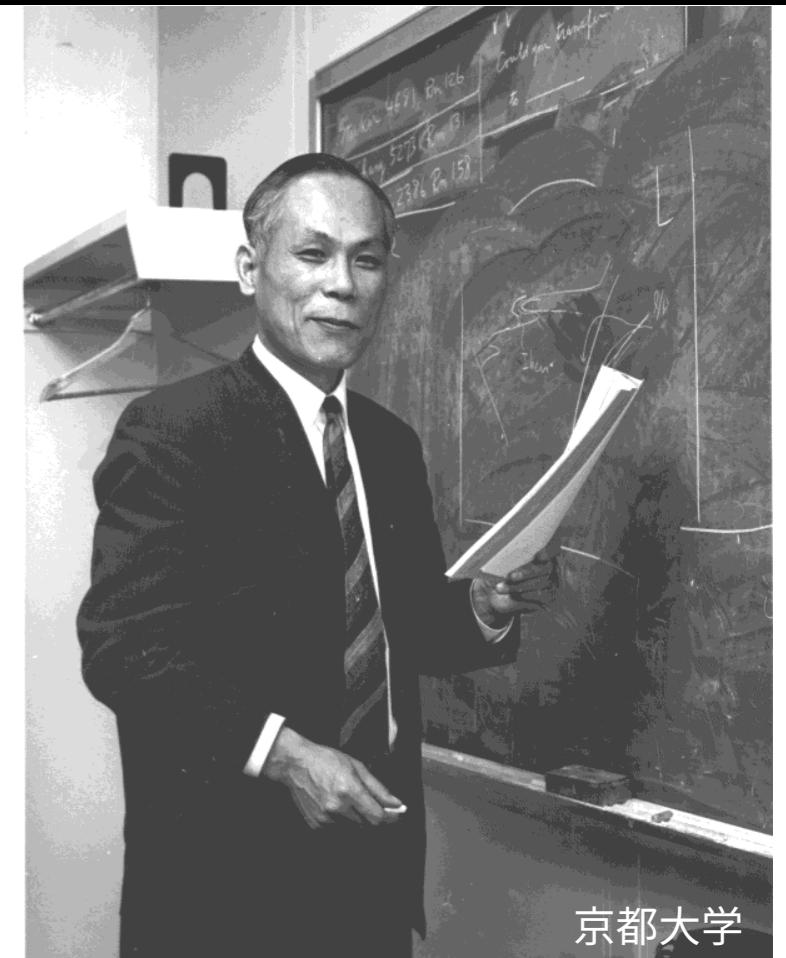
- 核反応 ⇒ ニュートリノ
- Davis らが初めて測定
- ノーベル賞(2002)
- 予想の1/3



巨星



- 太陽は白色矮星になる
- 白色矮星コア+外層大気 ⇒ 巨星
 - 外層部では重力が弱まりより膨らむ
- 林フェイズにより大きさが制限される
- ~50億年後には、地球は飲み込まれる



量子力学



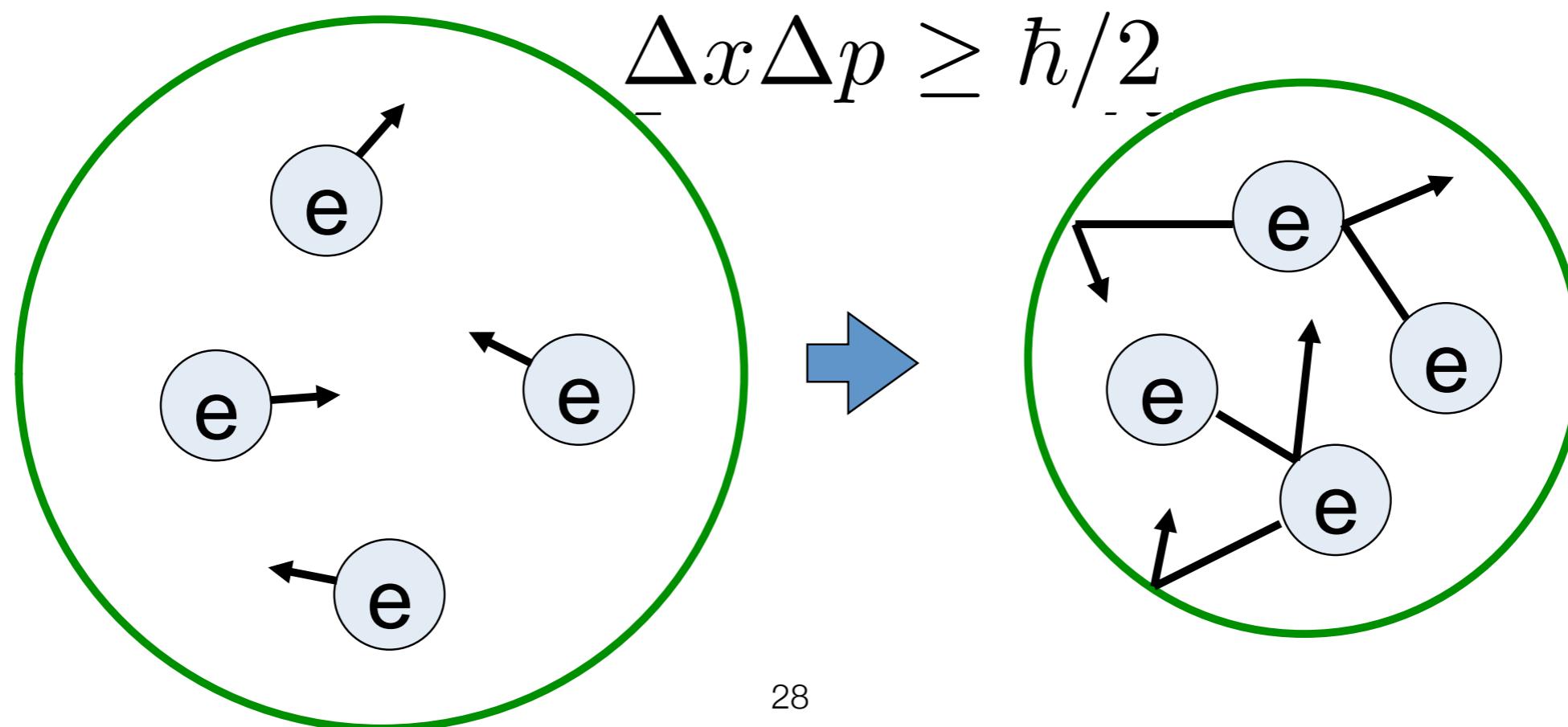
- 粒子 = 波
- 1925年 Heisenberg の行列力学
- 1925年 Pauliの排他律
- 1926年 Schrödingerの波動力学
- 1927年 Heisenberg の不確定性原理



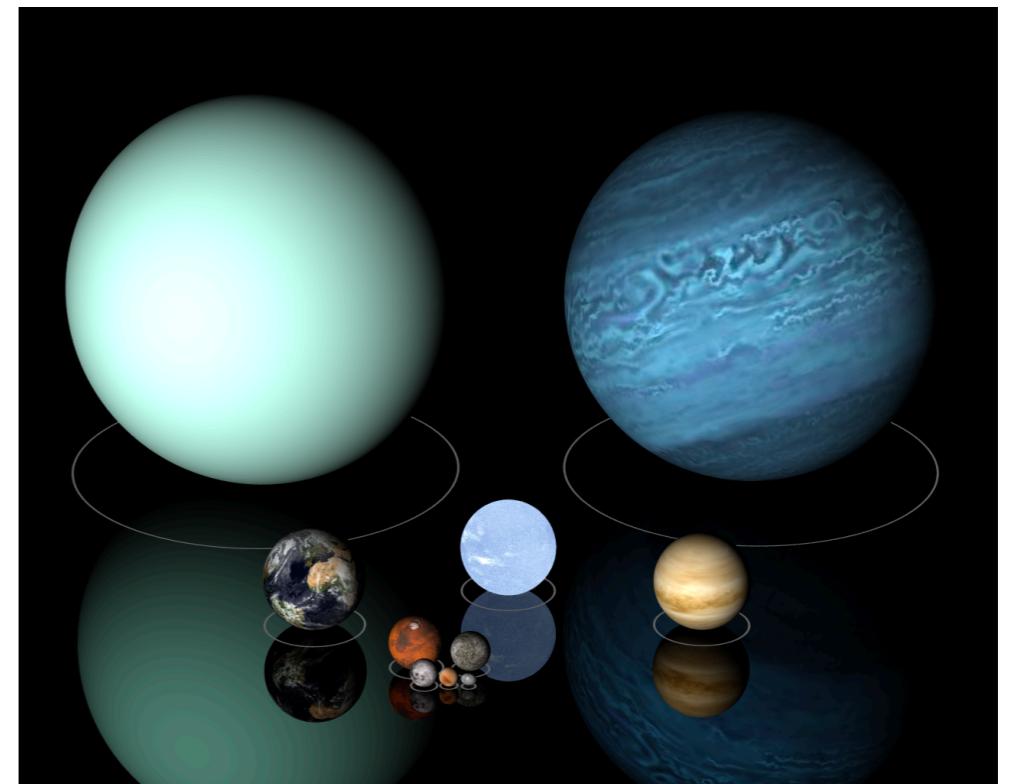
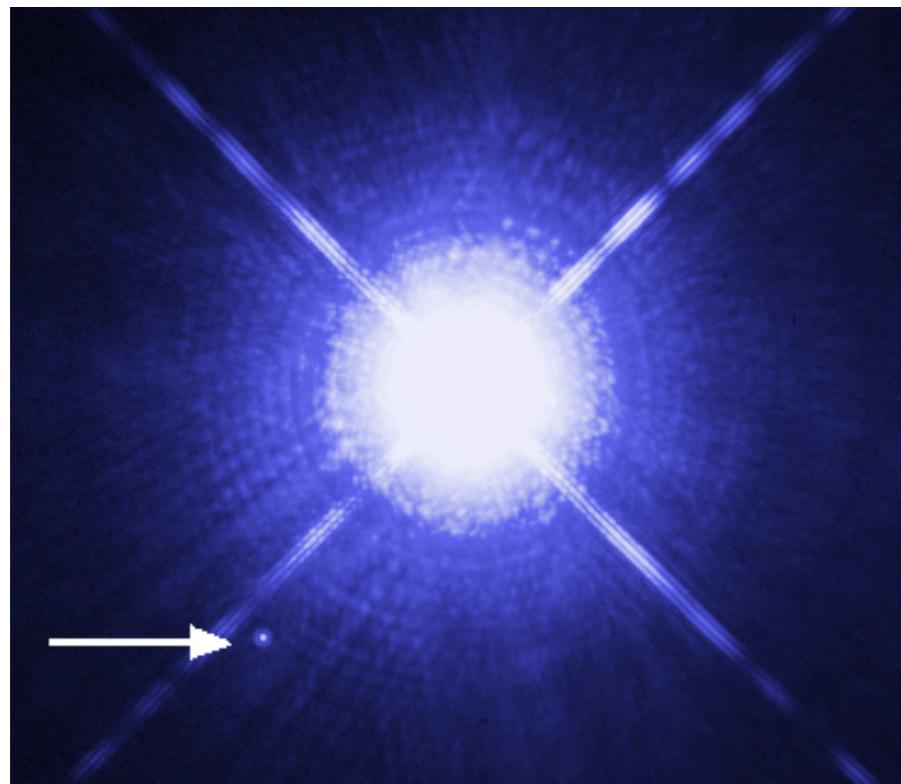
$$\Delta x \Delta p \geq \hbar / 2$$

縮退圧

- 核燃料を使い果たす ⇒ 収縮 ⇒ 縮退圧
- Pauliの排他律 + 不確定性原理
- せまいところへ閉じ込めるほど圧力が上がる



白色矮星



©wikipedia

- 電子の縮退圧で重力を支える
- 白色矮星の質量 ~ 太陽の質量 (~地球の質量の30万倍)
- 白色矮星の半径 ~ 地球の半径
- 白色矮星の密度 ~ 1トン / cc (~角砂糖一個が1トン)

チャンドラセカール限界

- 縮退圧で支えられる質量には限界あり
(チャンドラセカール 1931, 1983年ノーベル賞)
 - 不確定性原理 + 相対論
- 縮退エネルギー(相対論的)： $E_F \sim \hbar n^{1/3} c$
- 重力エネルギー：
$$E_G \sim -\frac{GMm_p}{R} \sim -\frac{GNm_p^2}{R}$$
- 最大質量： $M_{\max} \sim N_{\max} m_p \sim 4 \times 10^{33} \text{ g}$

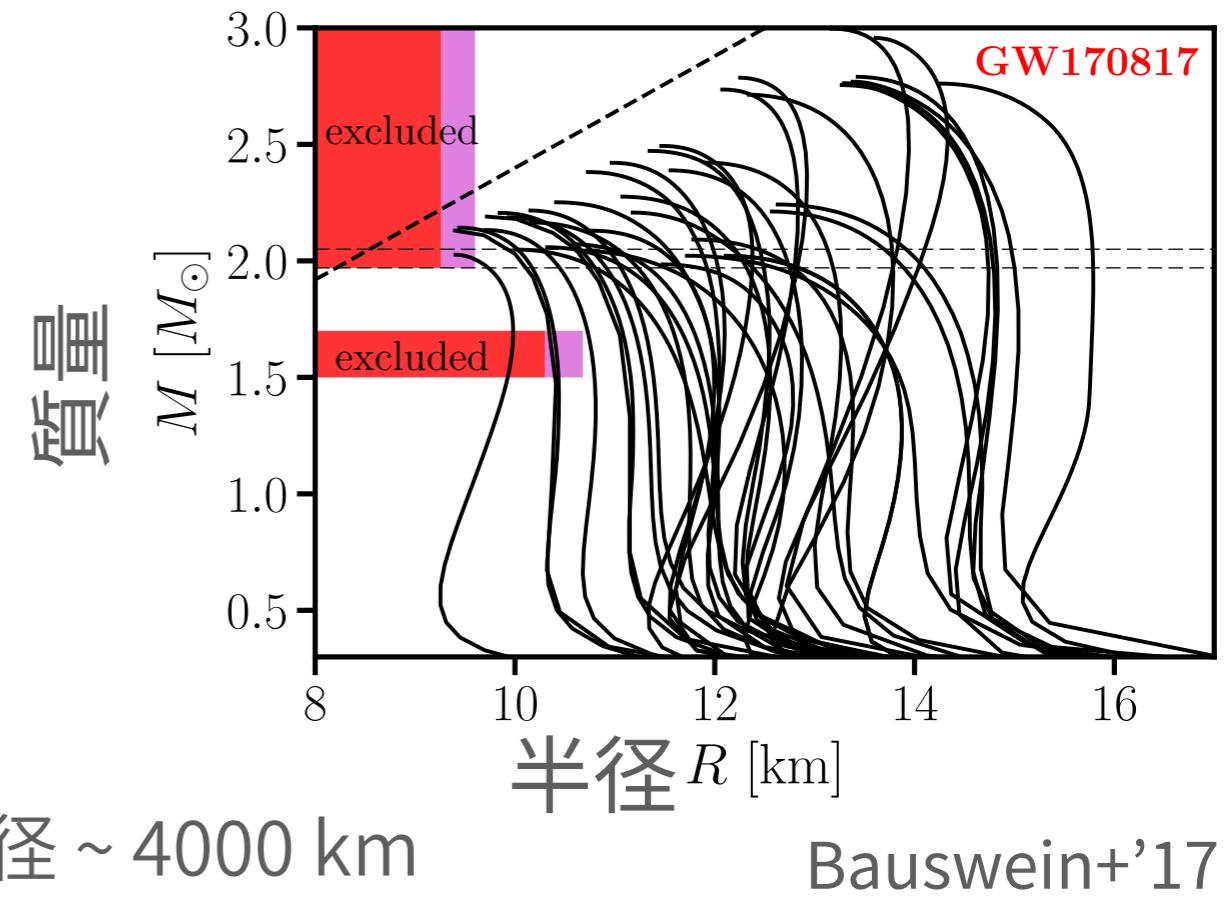


中性子星

- 白色矮星：電子の縮退圧
- 中性子星：中性子の縮退圧
- 粒子が相対論的になる条件：

$$cp \geq mc^2$$

- 白色矮星のとき ($m=m_e$) \Rightarrow 半径 ~ 4000 km
- 中性子星のとき ($m=m_n$) \Rightarrow 半径 ~ 10 km
 - 中性子の発見：Chadwick 1932 (1935 ノーベル賞)



Bauswein+’17

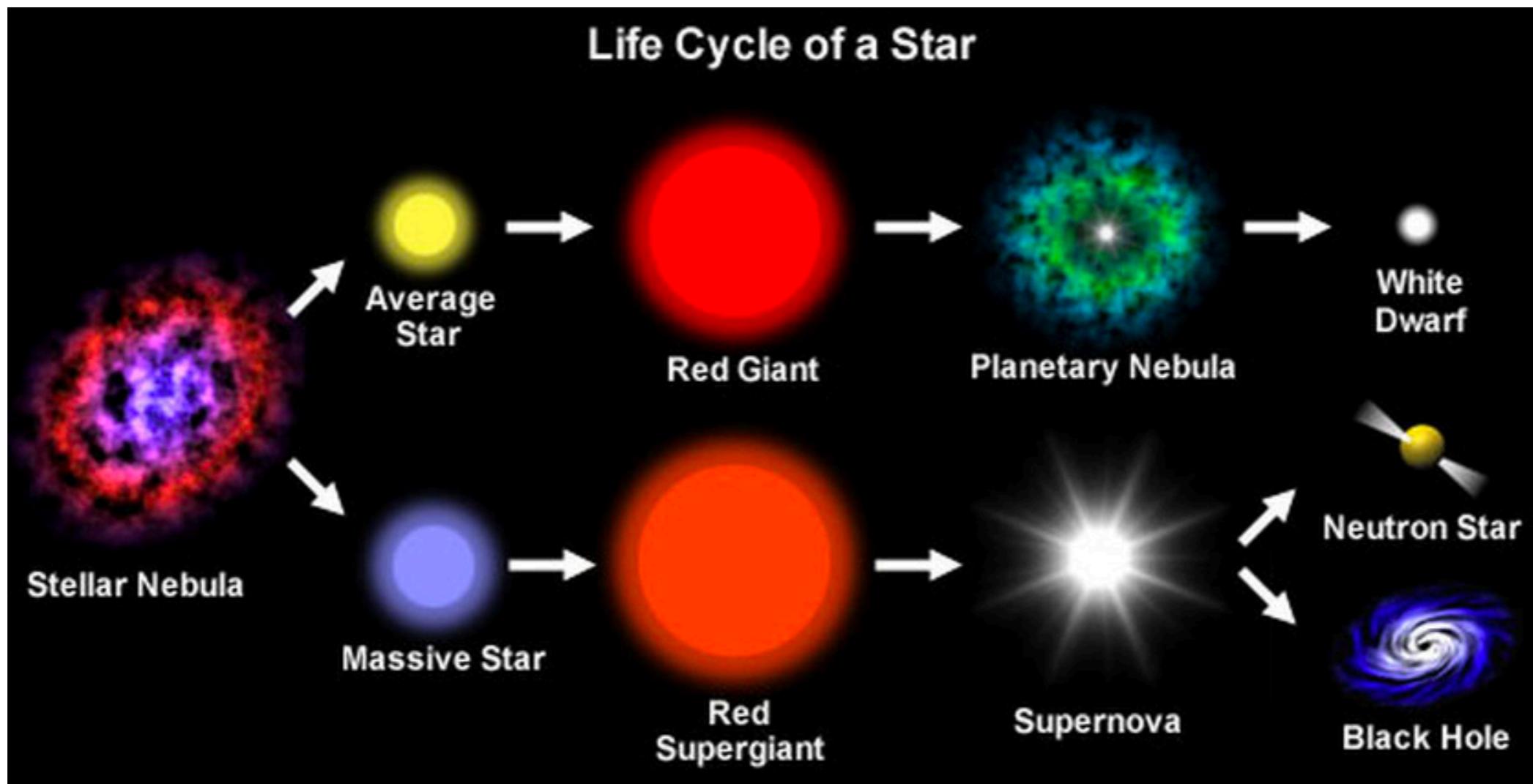
→ 中性子星の予言：Baade & Zwicky 1934

余談

- 宇宙物理学において「オーダー評価」は非常に重要
 - 小さいスケールから大きいスケールまで扱う。
 - 複雑な物理が入り組んでいる。
 - オーダー評価で、重要な物理を見抜く。
 - 興味のある人は、<https://arxiv.org/abs/1401.1814>など読むと面白い。
- 実生活でも役立つかもしれない。
 - フェルミ推定が有名な例。

星の進化

星の進化

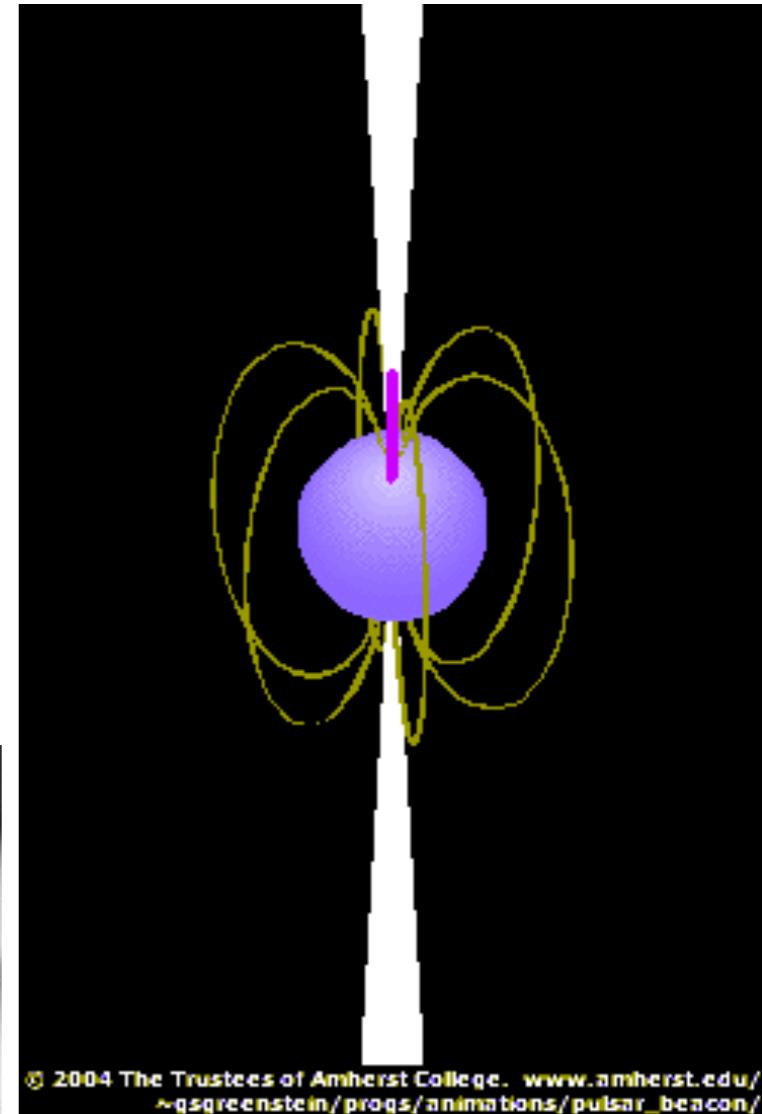
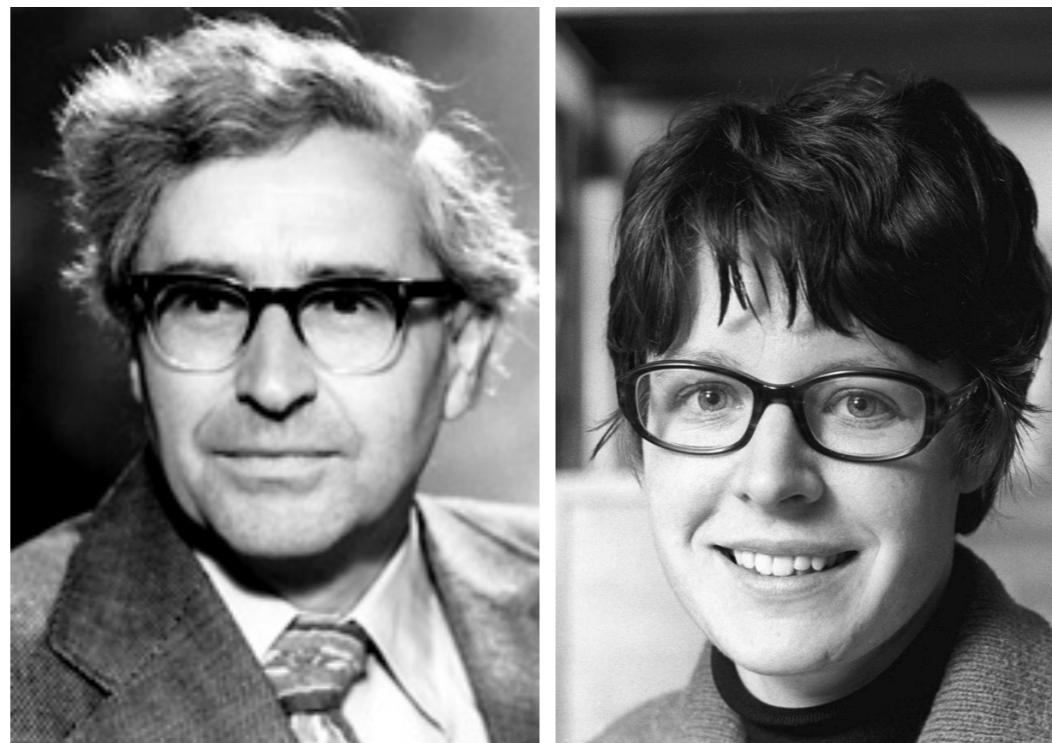


- 中心で核融合 ($H \rightarrow He \rightarrow C \rightarrow \dots \rightarrow Fe$)
- 質量で星の進化は決まる

Knight '97

パルサー

- 規則的な電波源：高速回転する中性子星
- Little Green Men
- ヒューイッシュ
1974 ノーベル賞
- ベル
第一発見者



© 2004 The Trustees of Amherst College. www.amherst.edu/~gsgreenstein/progs/animations/pulsar_beacon/

(重力崩壊型)超新星爆発

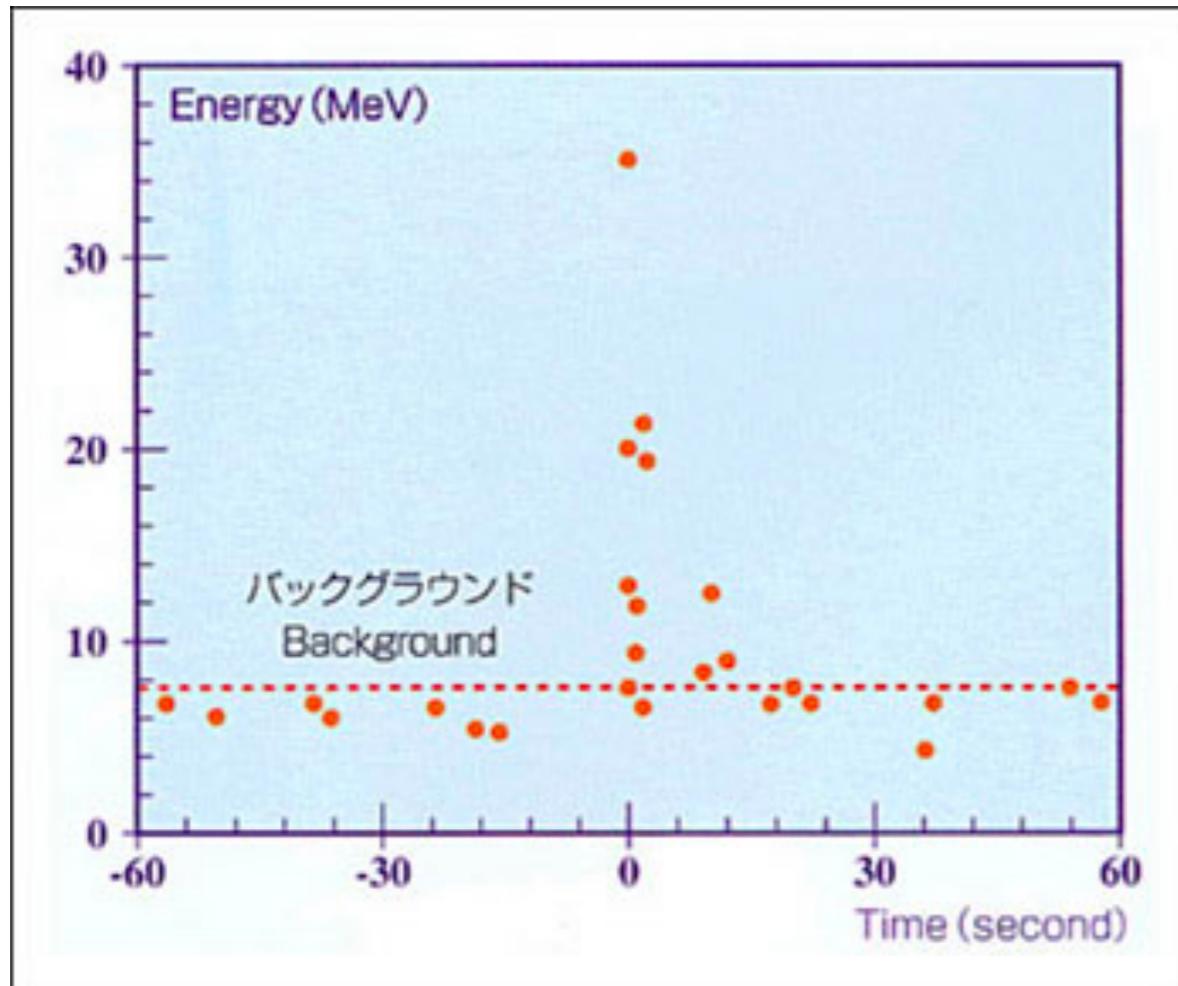
- 星の最後を迎えて爆発する現象
- 鉄の光分解 → コアの圧力が低下 → 星の崩壊 → 反動で大爆発
- $E \sim 10^{53} \text{ erg}$ (99% はニュートリノ)
- 最新の研究でも、超新星爆発の再現はまだ不完全

超新星1987A



Angulo-Australian Observatory

超新星ニュートリノ

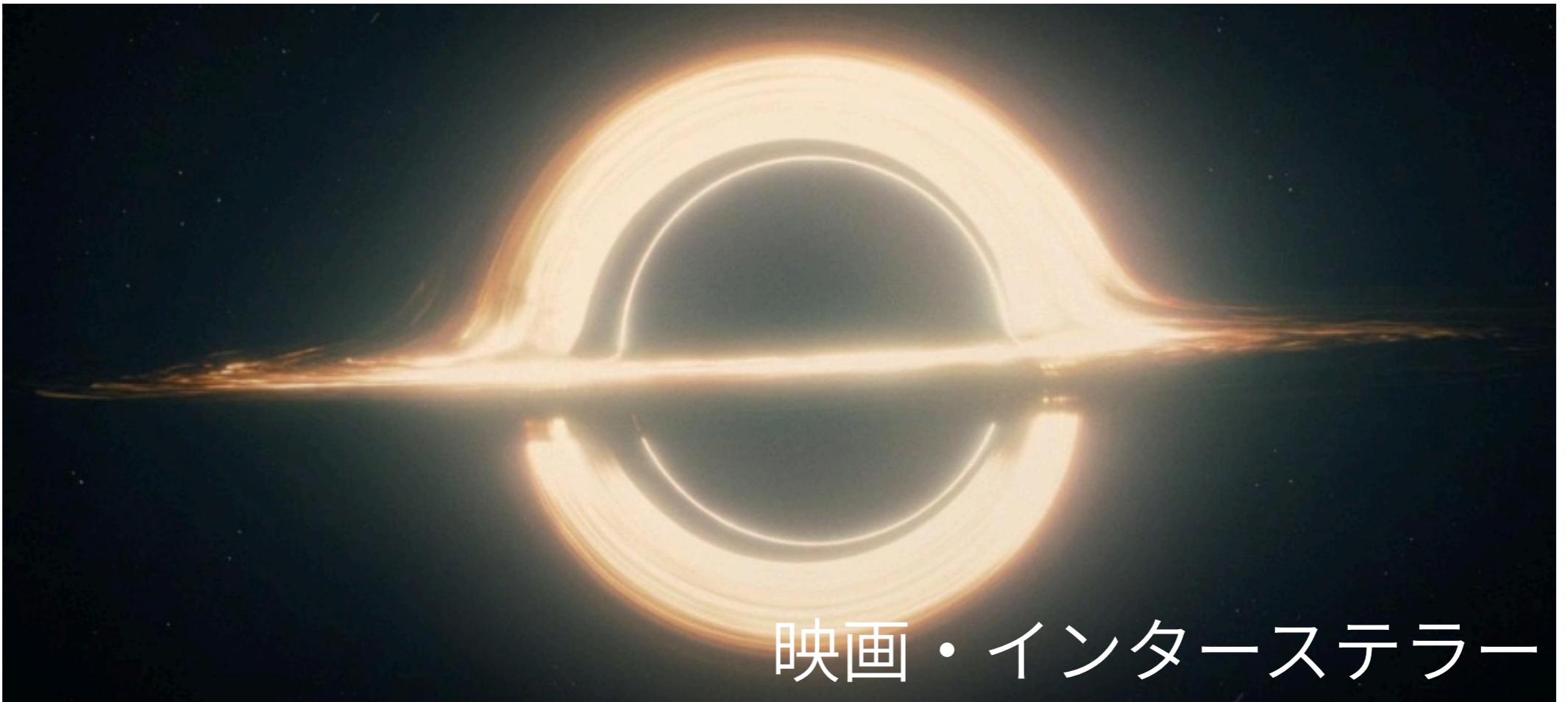


宇宙線研究所

- Kamiokande, IMB で 1987A 超新星ニュートリノの検出 (REF)
- 小柴 2002 ノーベル賞

ブラックホールを見よう

ブラックホール

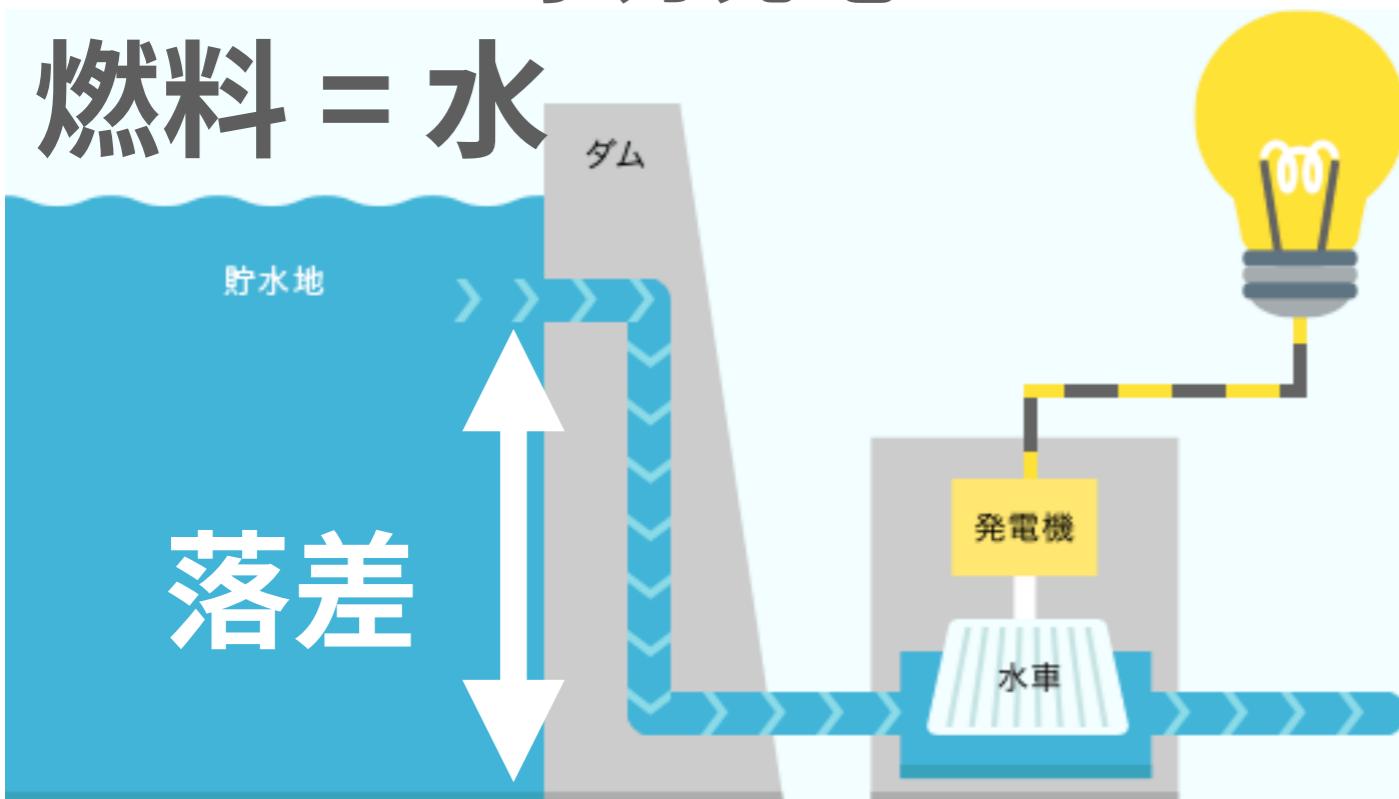


映画・インターステラー

- ・光すら脱出できない天体
- ・周囲の物質の運動や放射を通して発見可能
- ・太陽程度の重さのブラックホールは重い星の爆発により生成

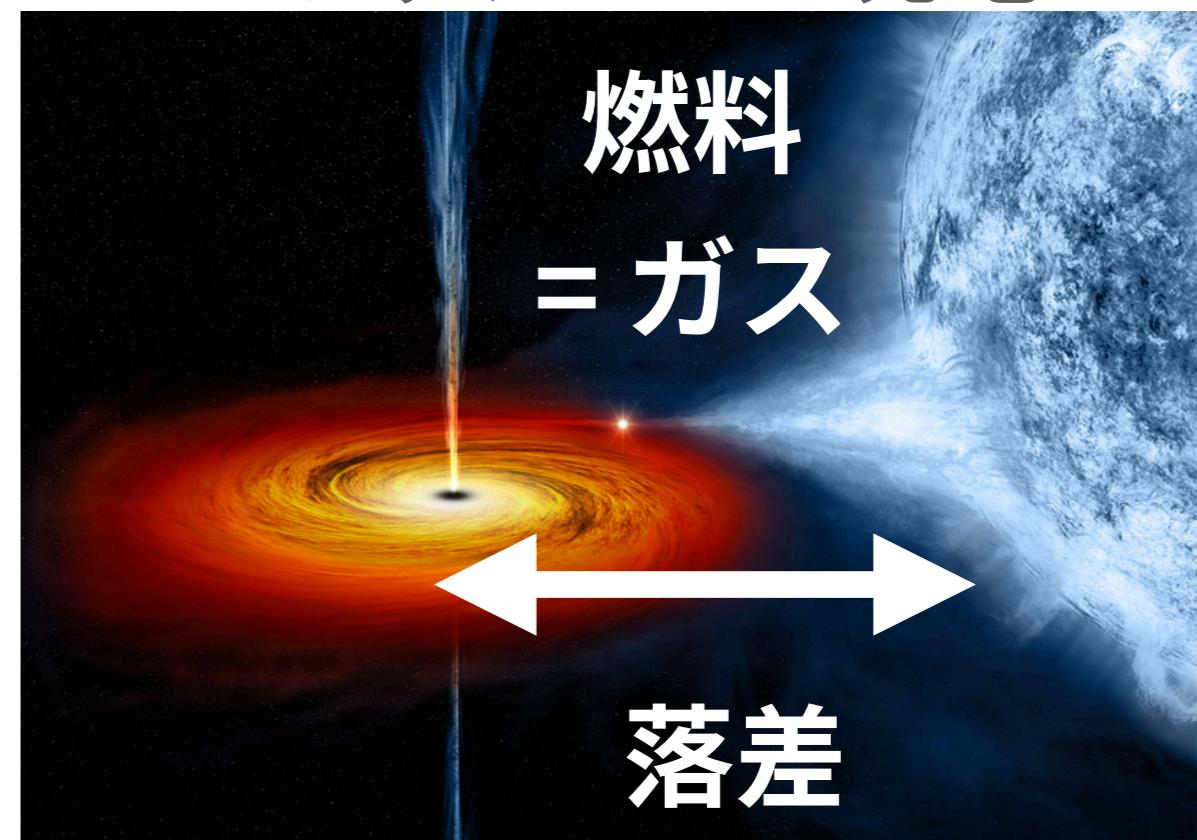
ブラックホールは光る？

水力発電



<https://www.sbenergy.jp/study/illust/water/>

ブラックホール発電

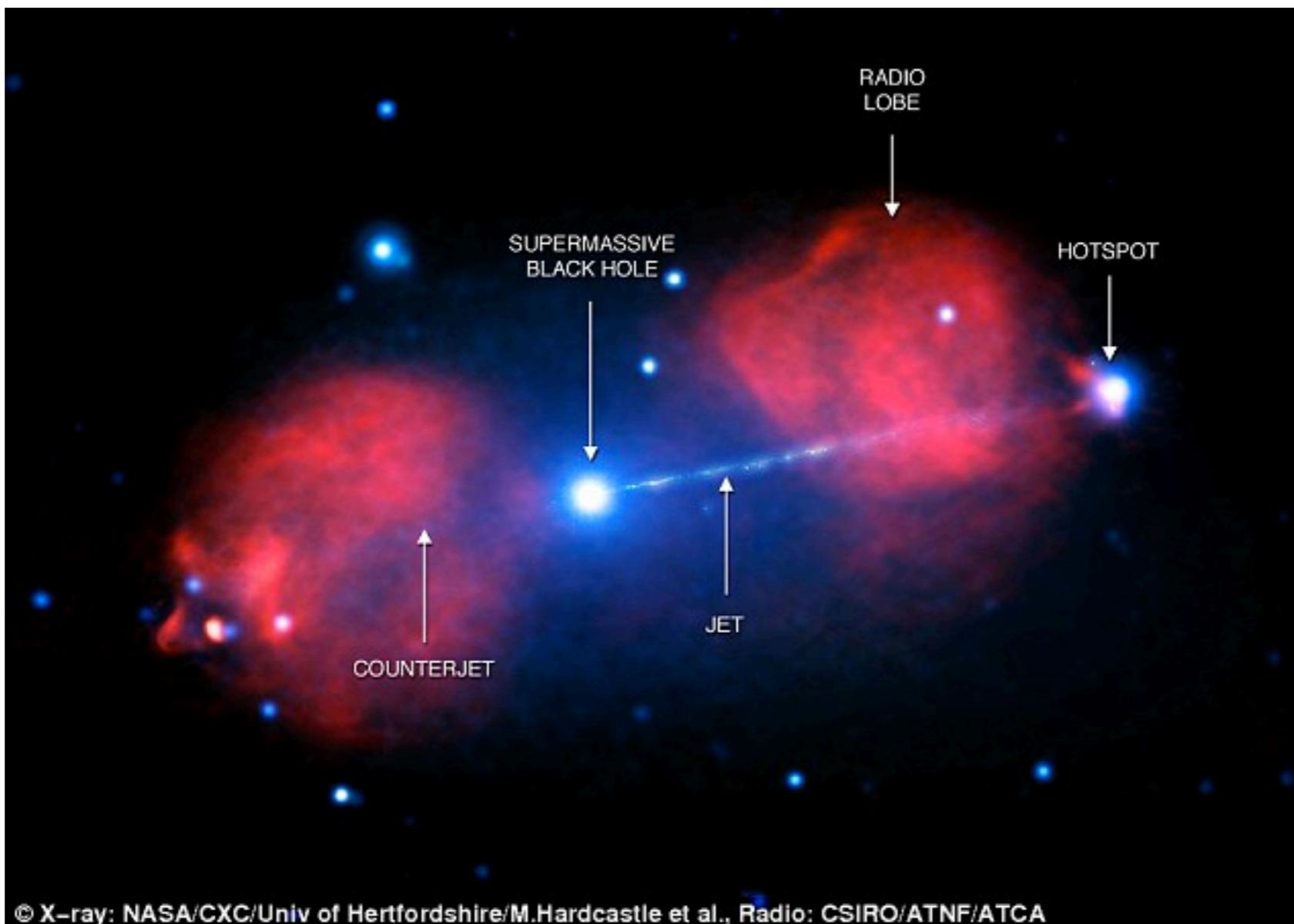


<https://apod.nasa.gov/apod/ap131120.html>

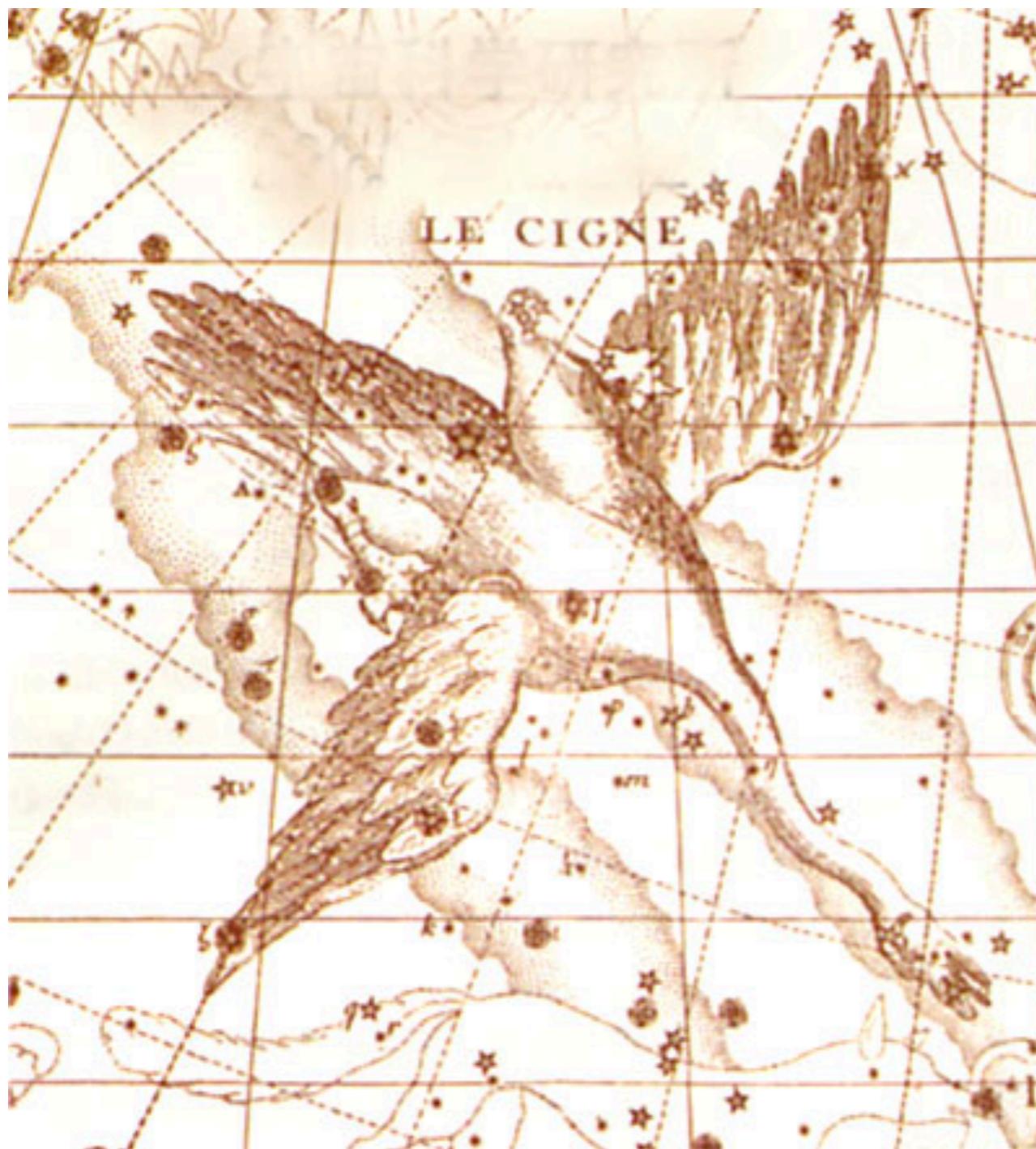
- ブラックホールそのものは光らない。
- 周囲のガスがブラックホールに落下し、重力エネルギーを解放。
- 解放されたエネルギーが摩擦熱によって光る。

ブラックホールの見え方

- ブラックホール近傍は極限世界
 - 高温ガス・高エネルギー粒子→X線・ガンマ線も放射

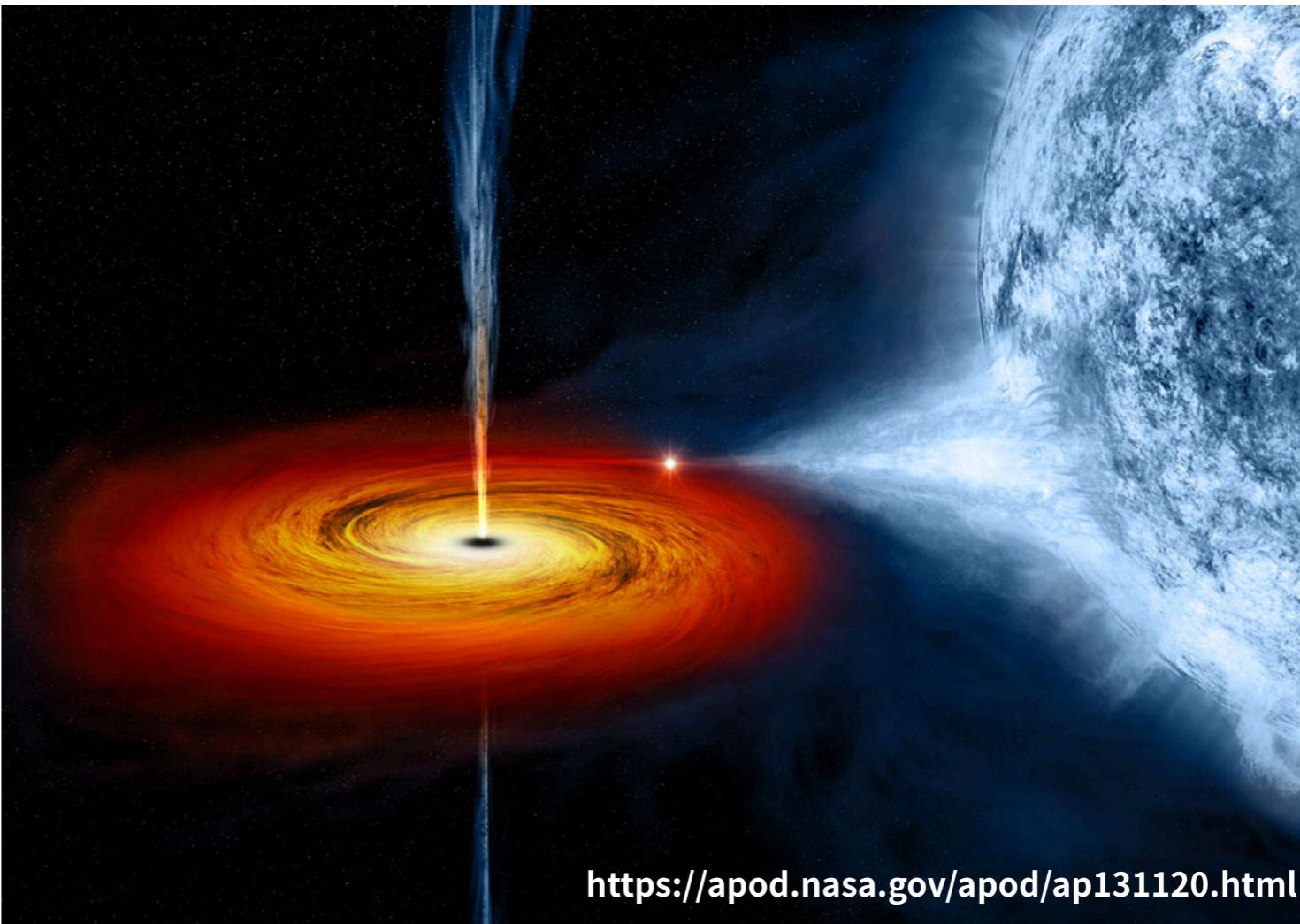


はくちょう座X-1:最初のブラックホール



近接連星系ブラックホール

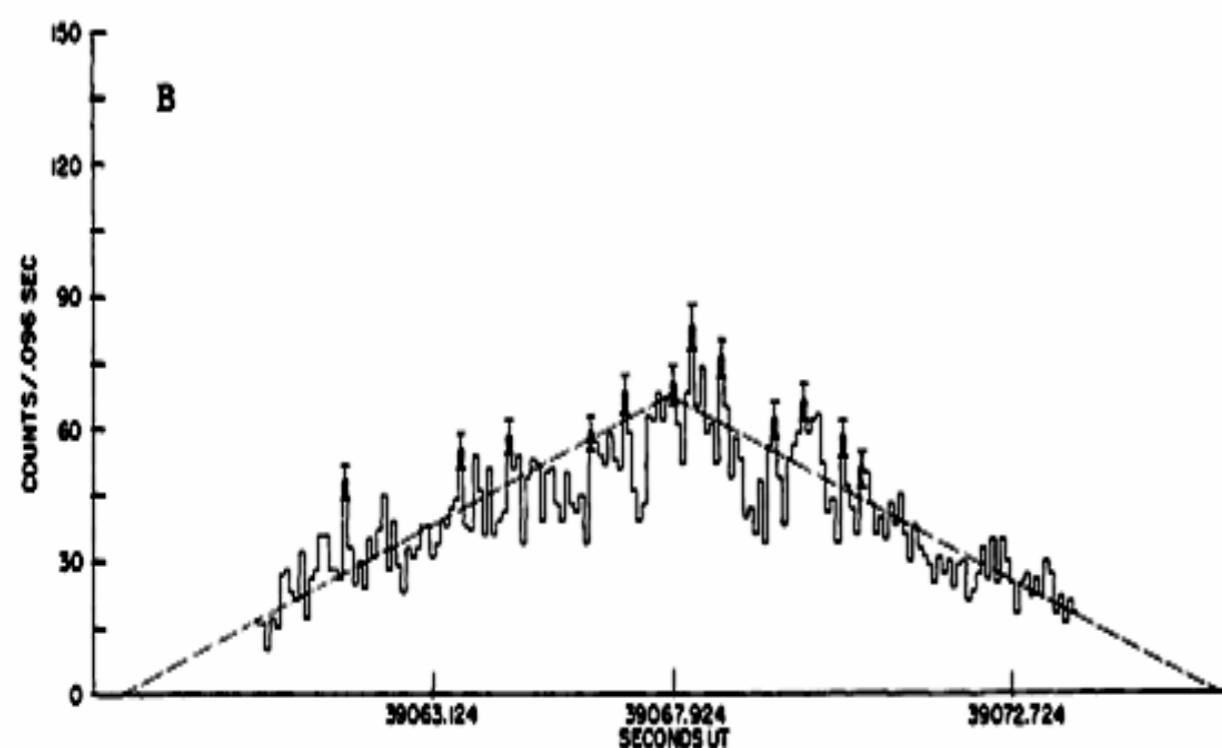
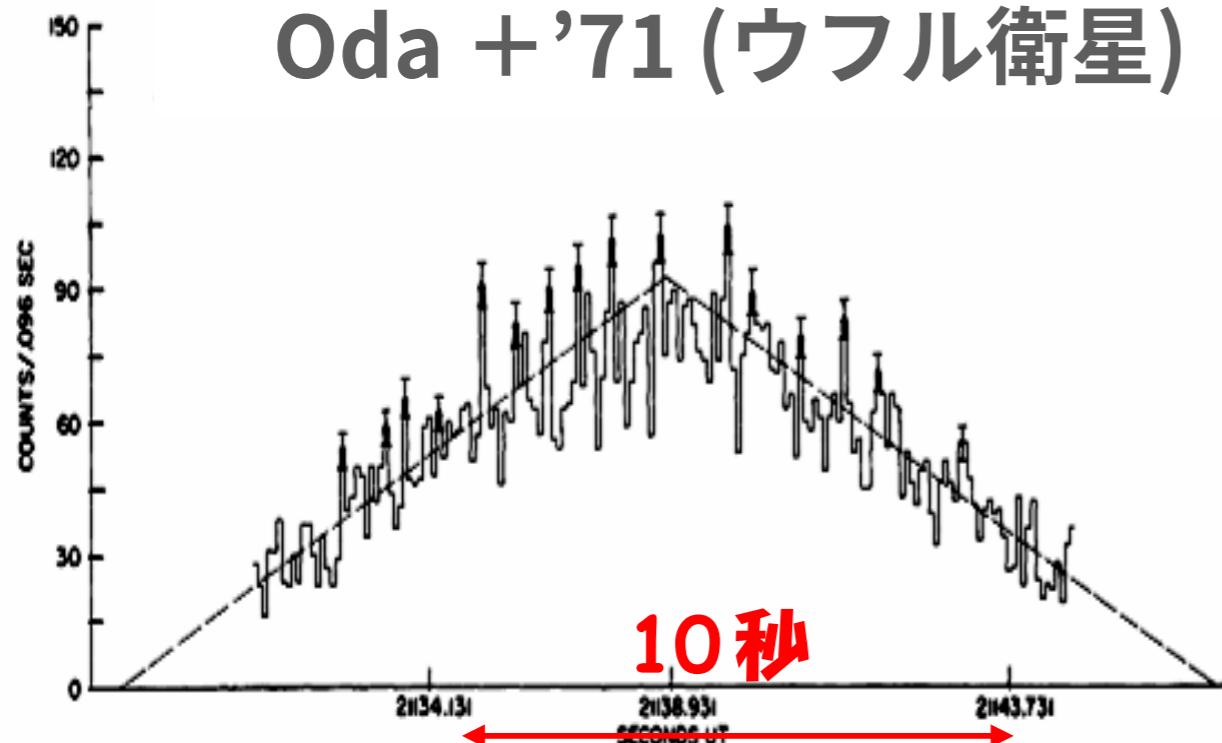
- ふつうの星とブラックホールからなる連星系
- お互いの回りをくるくる回る
 - 周期~1日程度
 - 距離~太陽半径の数倍程度



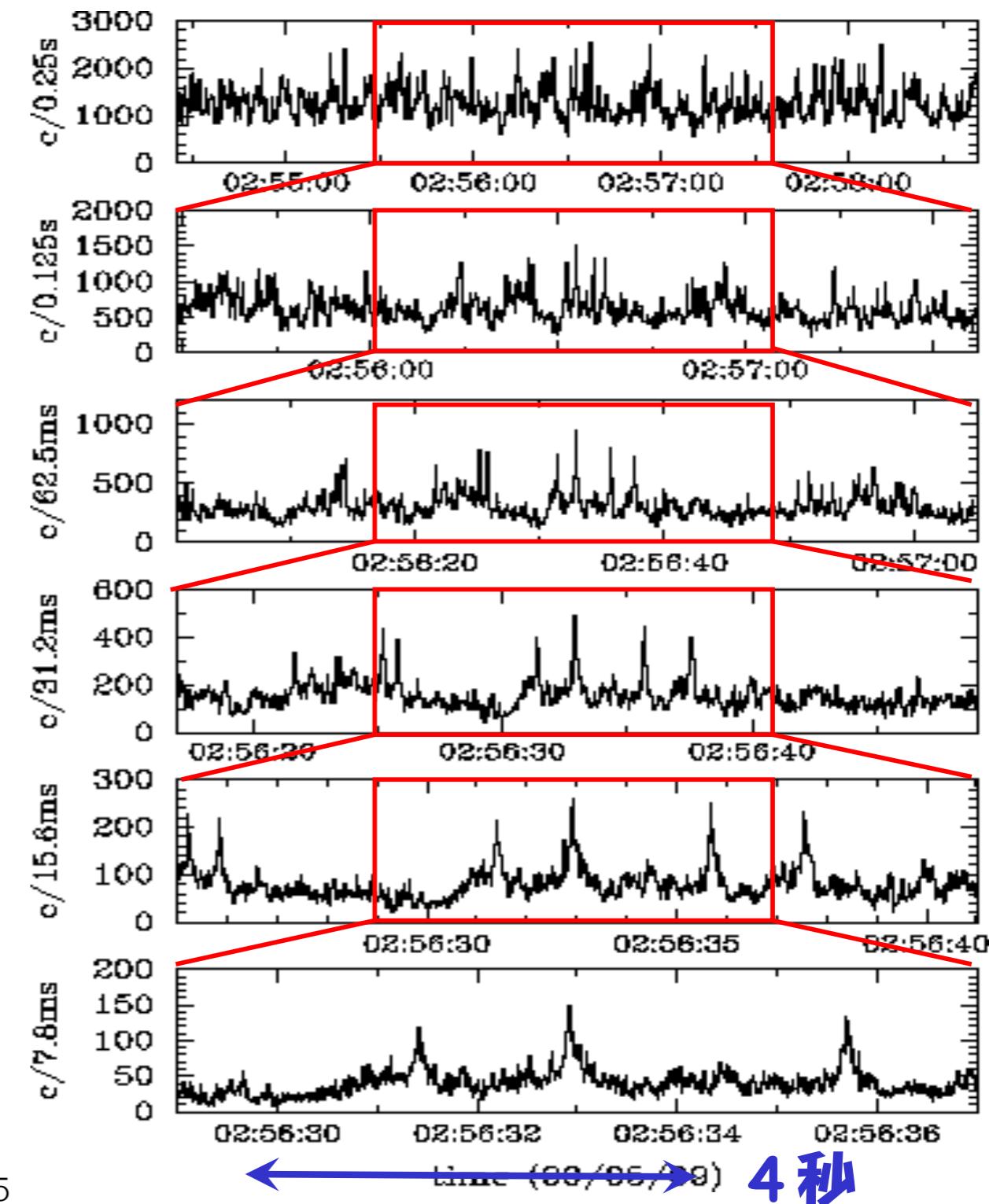
<https://apod.nasa.gov/apod/ap131120.html>

激しい時間変動

Oda + '71 (ウフル衛星)

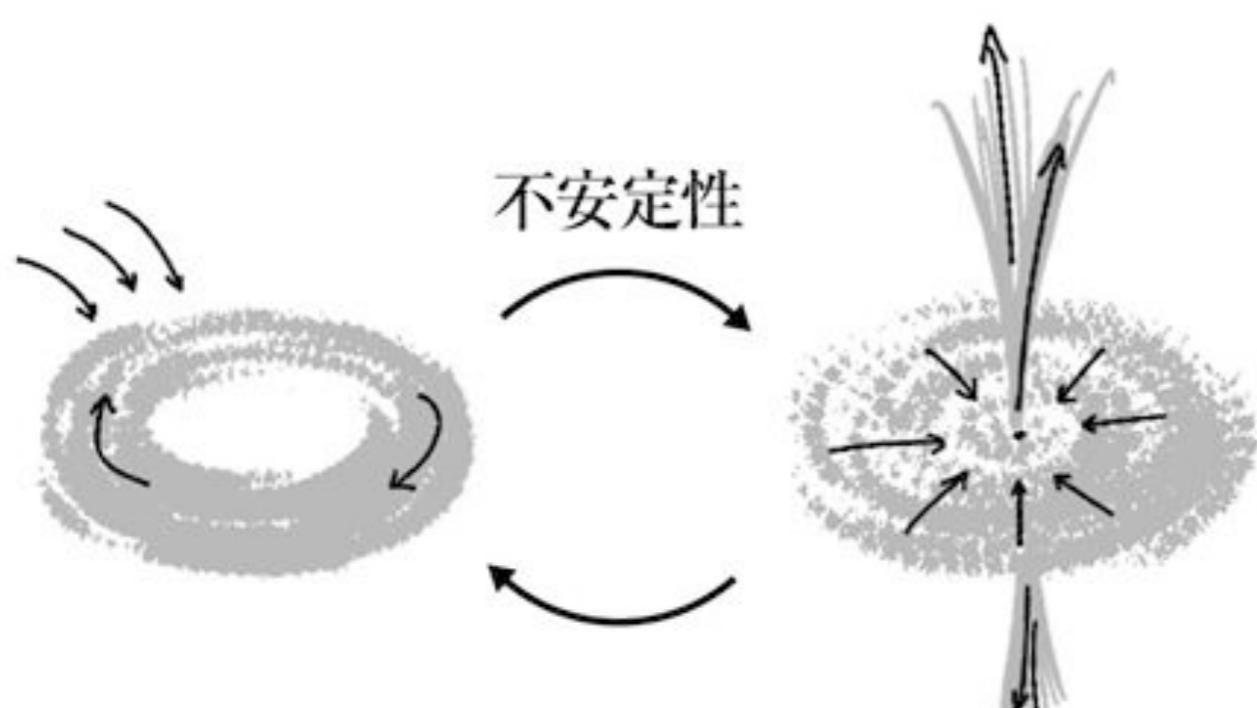


Negoro+ '95 (ぎんが衛星)



円盤不安定モデル

- ・ブラックホール降着円盤は2つの異なる状態間を行来



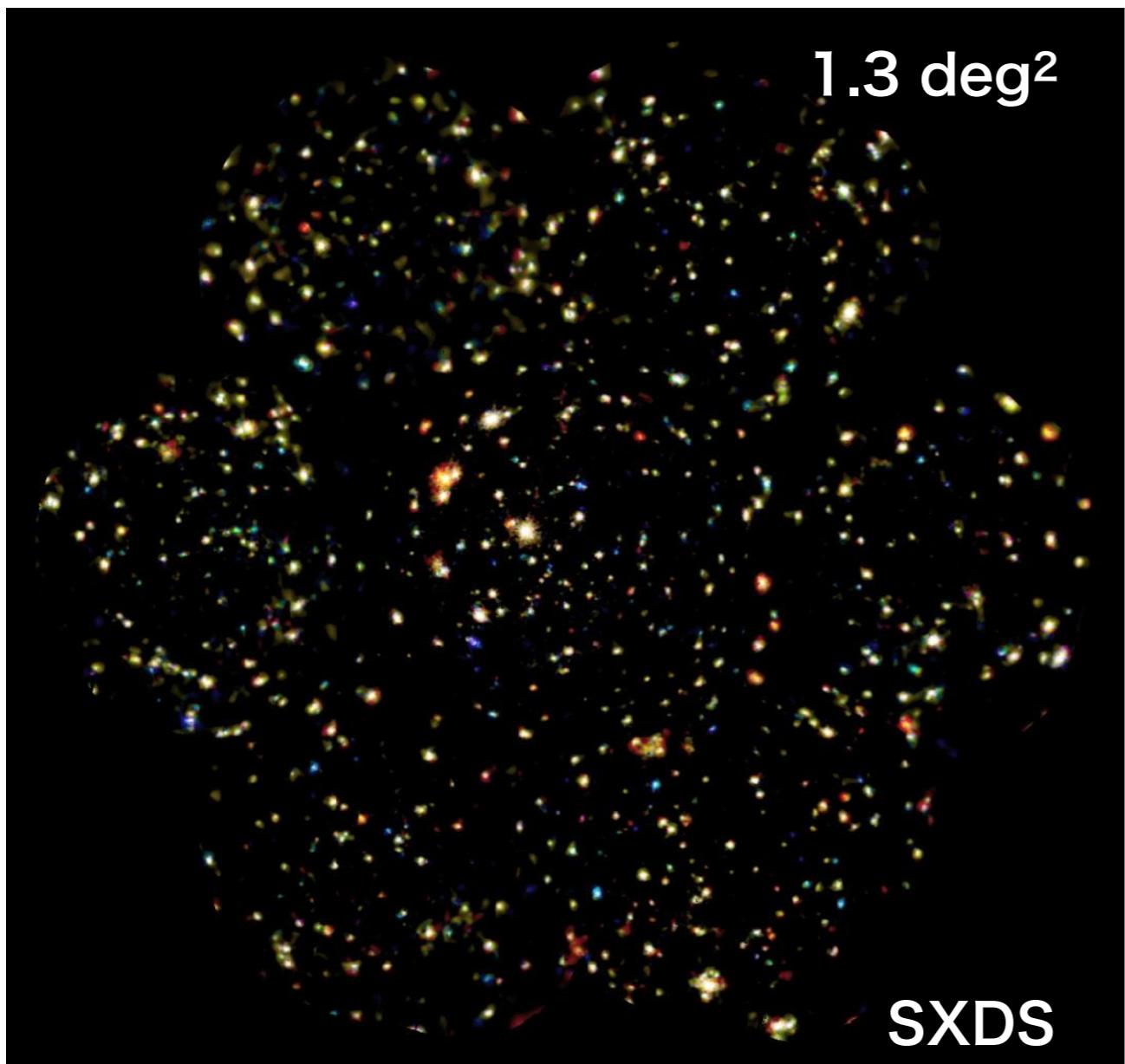
ガスを貯める暗
い状態(静穏期)

ガスを落として明
るい状態(フレア期)



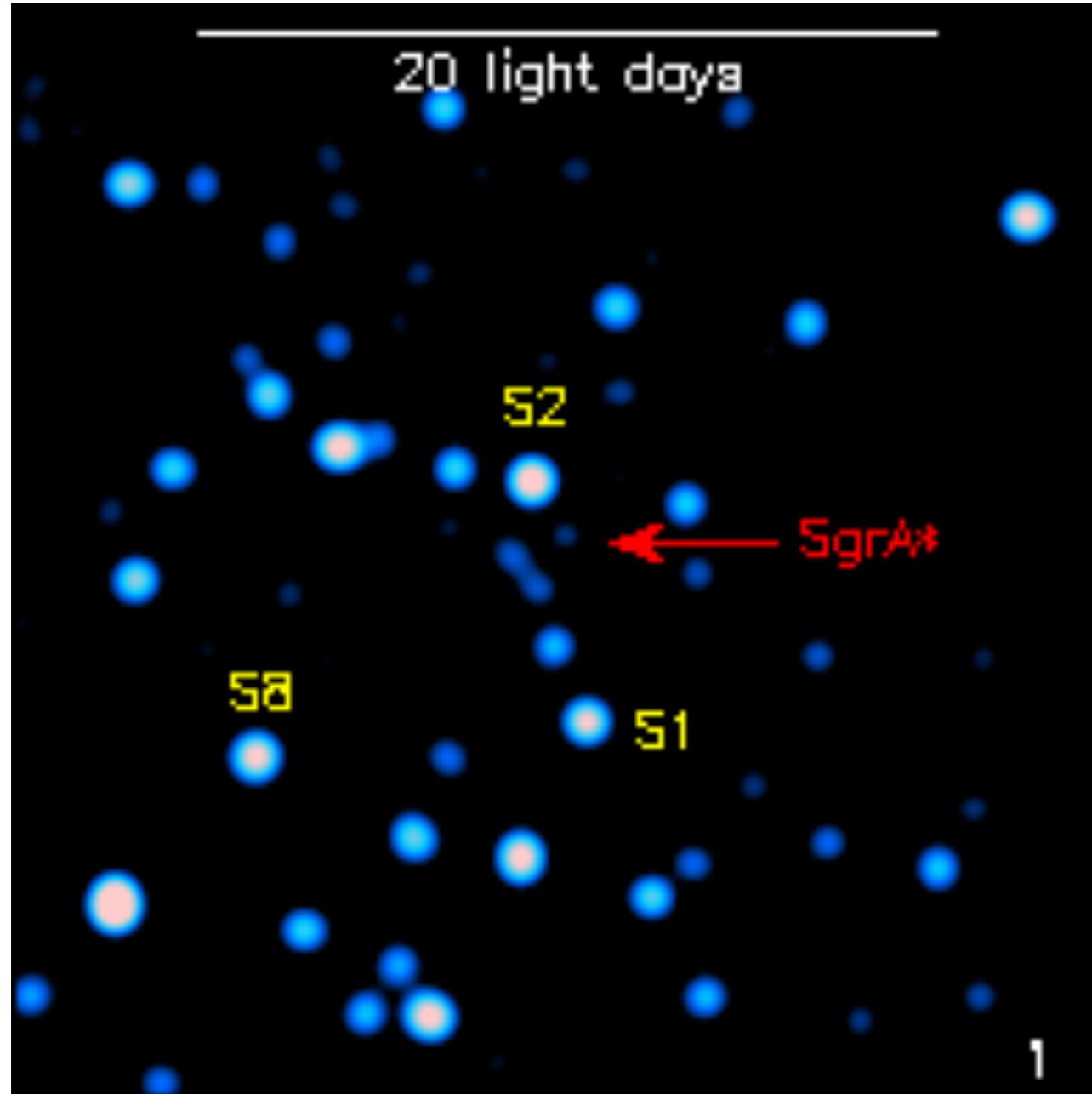
<https://www.youtube.com/watch?v=qKq2OGG7m68>

X線で見るブラックホール



- ブラックホール円盤はX線で光る
- 巨大ブラックホールからの光

赤外線で見るブラックホール

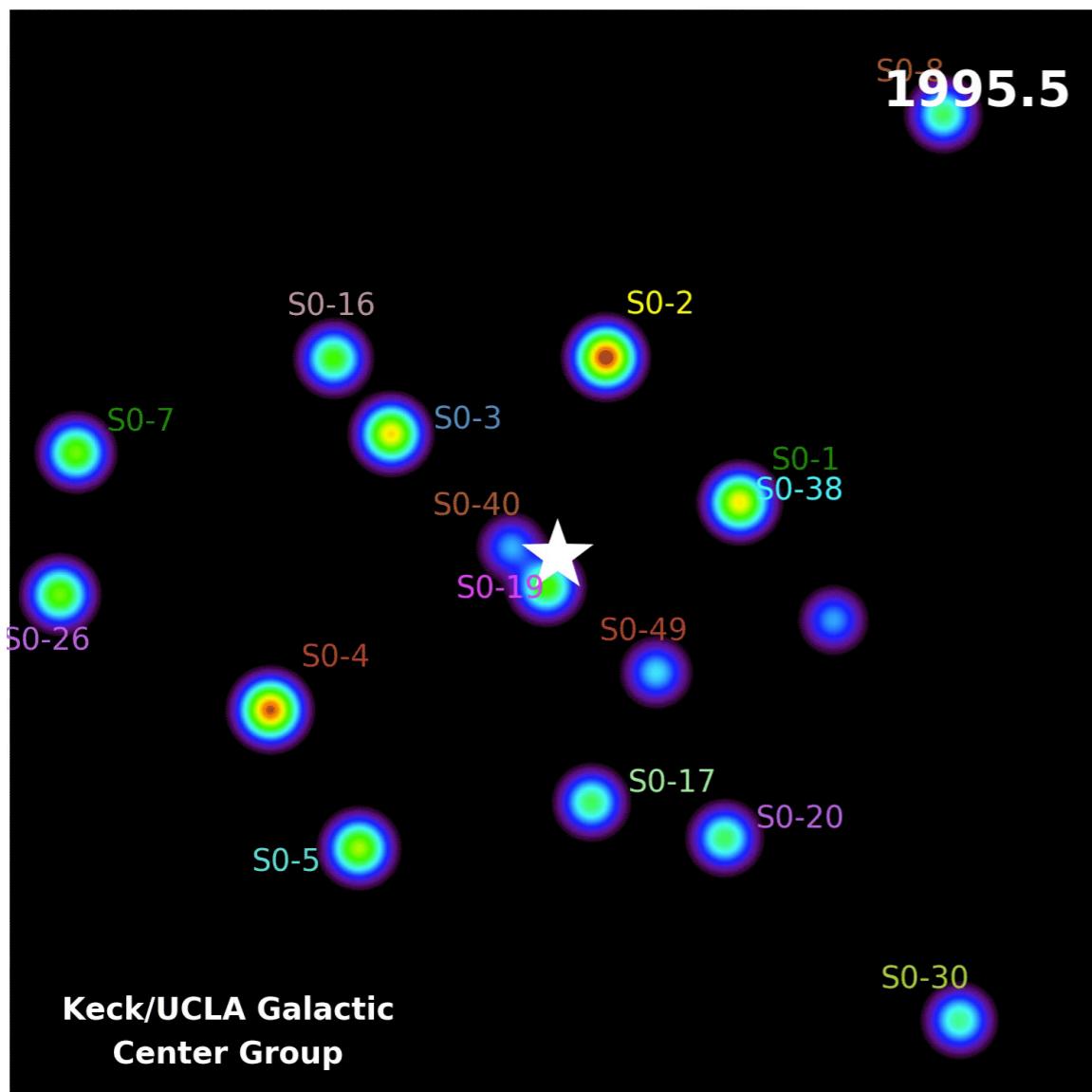


- 天の川銀河中心領域の近赤外線画像
- 中心で明滅するのがブラックホール
- ~1 hr の動画

<http://www.mpe.mpg.de/6591435/Flares-from-the-black-hole>

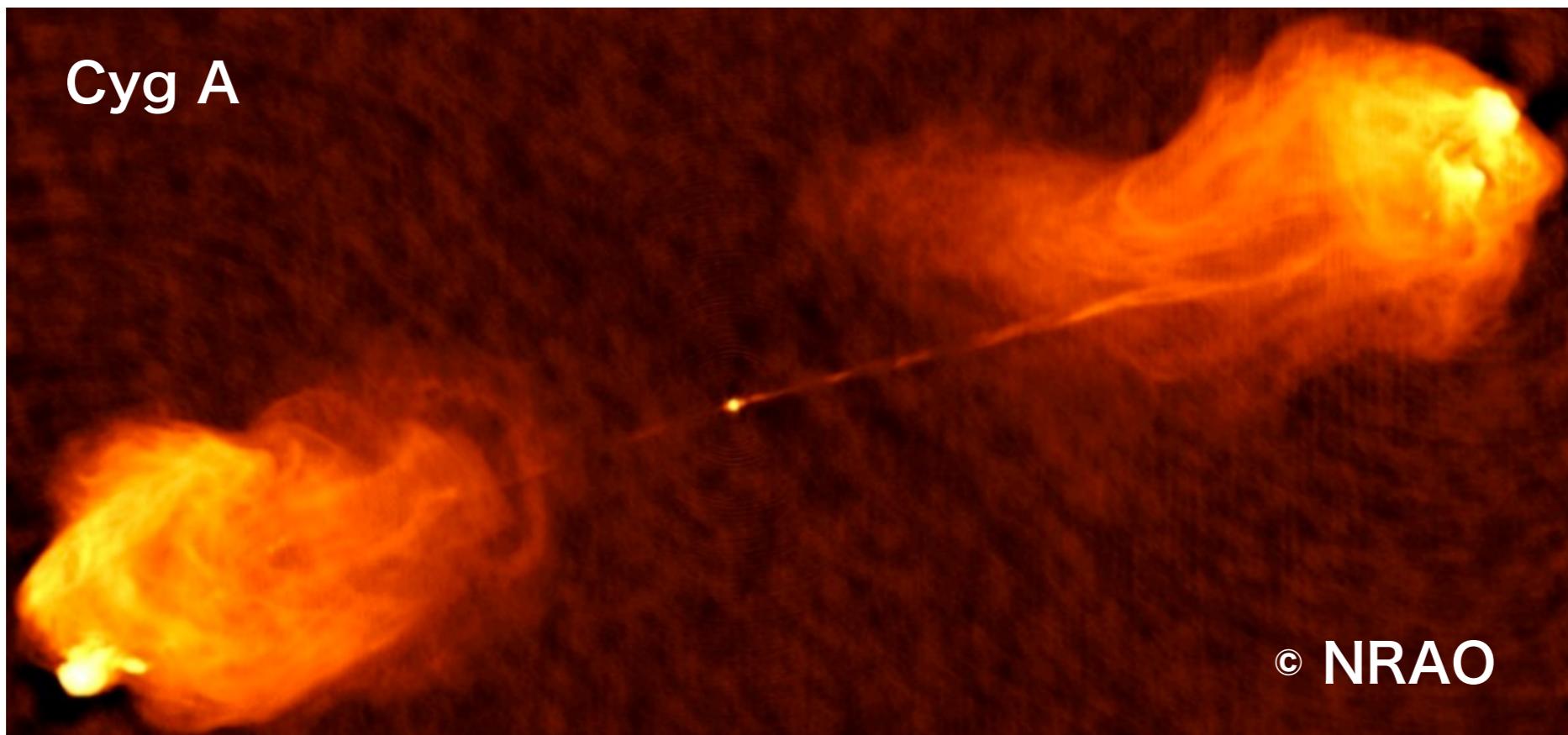
ブラックホール周囲の運動で見る

天の川銀河中心の巨大ブラックホール
周辺の星の運動



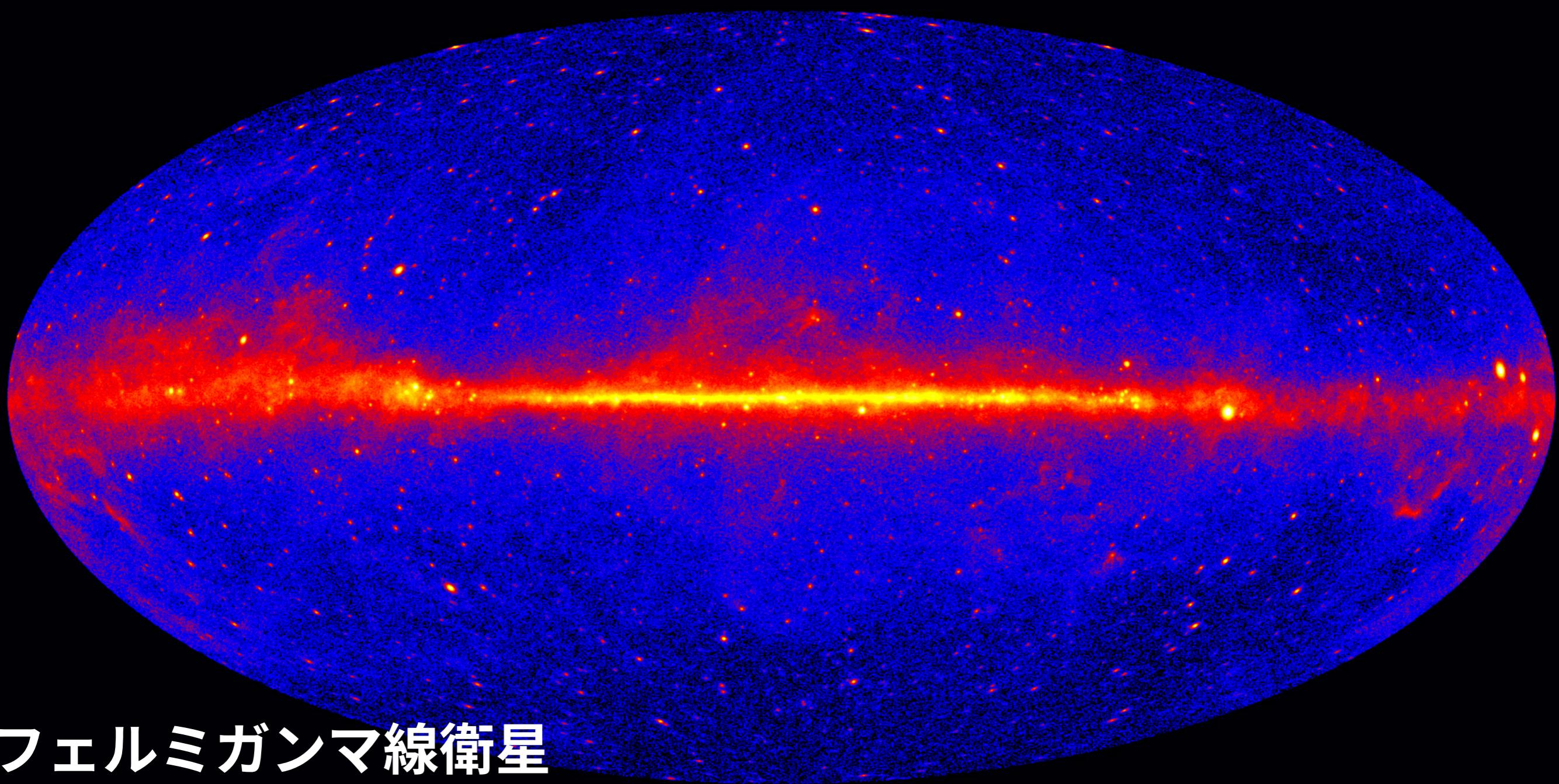
- ブラックホールが作る重力が天体の運動に影響
- 銀河の中心には、百万 - 百億太陽質量のブラックホールが存在
 - 天の川銀河では、
 - 4百万太陽質量のブラックホール

ブラックホールから噴出するもので見る



- 宇宙ジェット：ほぼ光速で噴き出すプラズマの流れ
- ~数百 kpc (一千万光年程度の大きさ)

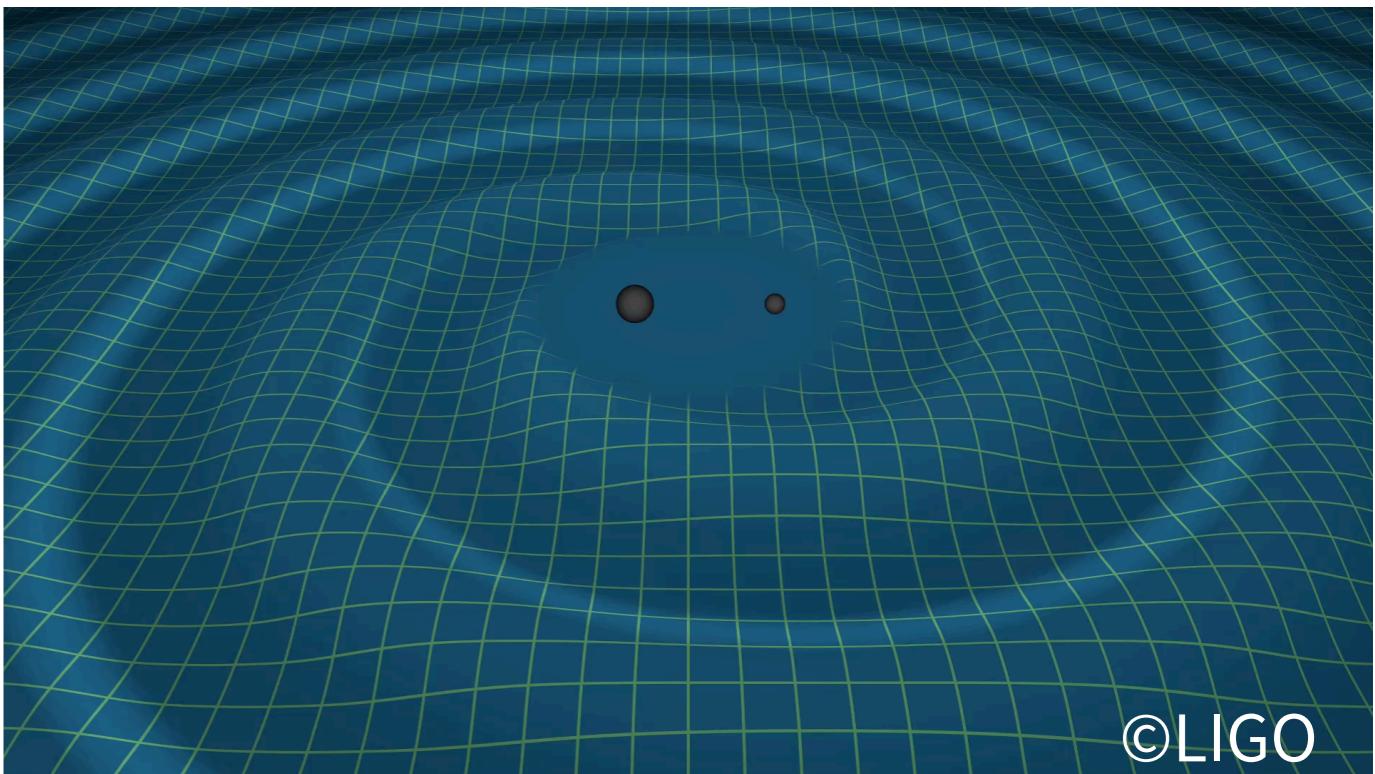
ガンマ線で見るブラックホール



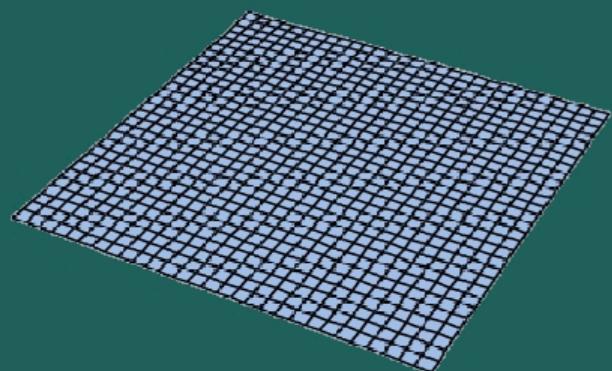
フェルミガンマ線衛星

重力波

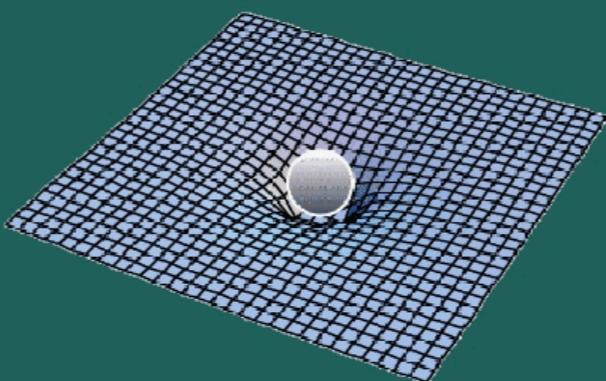
- 電荷が加速度運動⇒電磁波
- 質量が加速度運動⇒重力波
 - 一般相対性理論に基づいた
　　アインシュタインの予言
- 中性子星-中性子星などの合体が強力な
　　重力波源



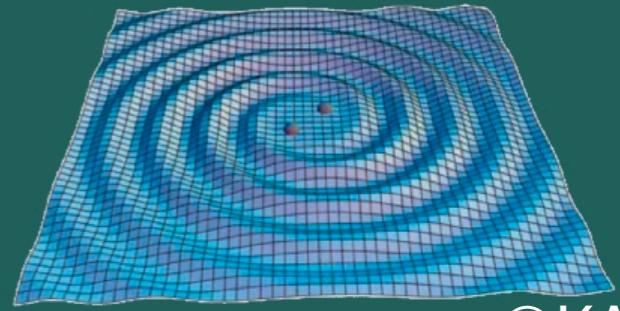
平坦な空間



星の重みで歪んだ空間

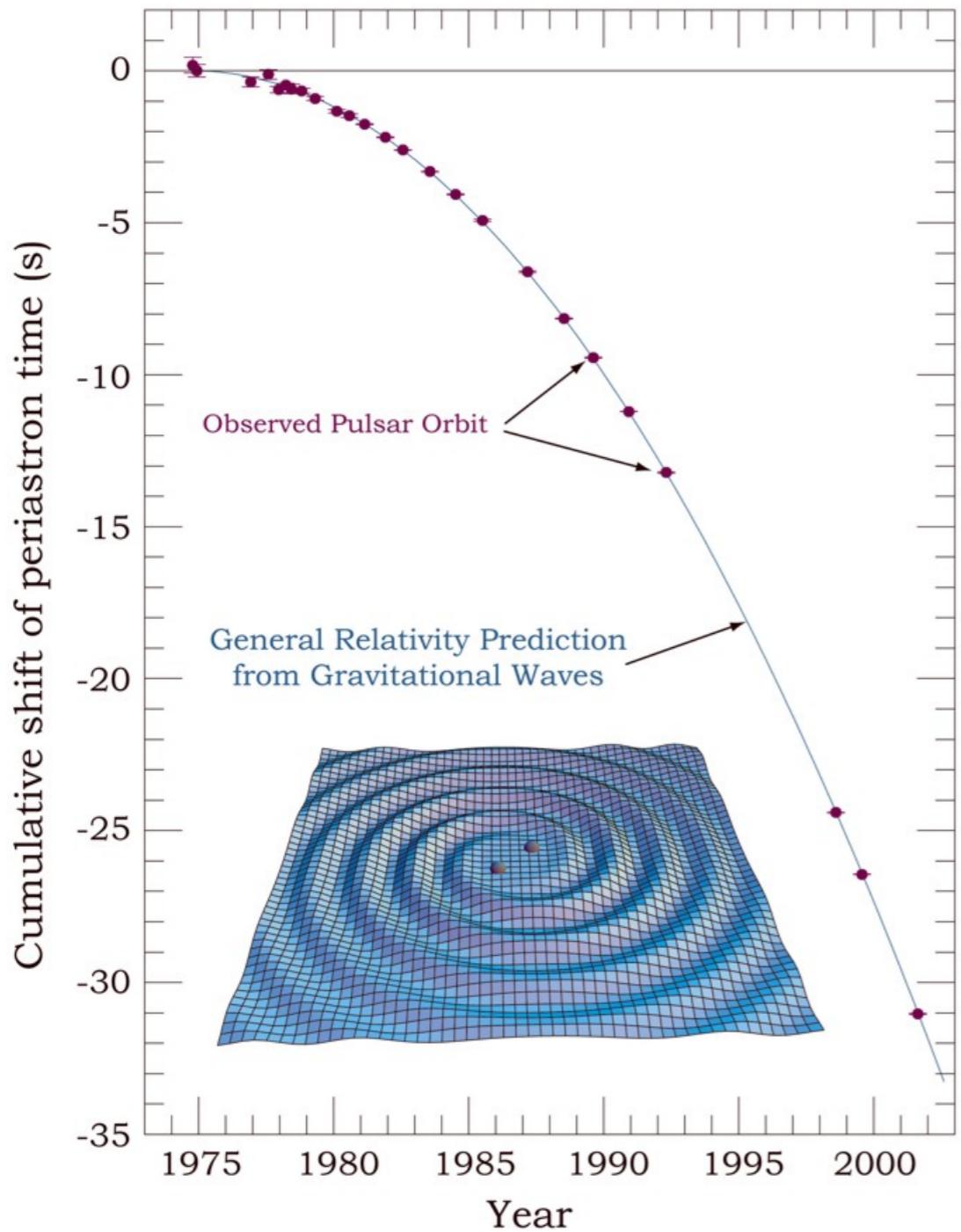


重い星が運動して重力波発生
(例：連星中性子星)



©KAGRA

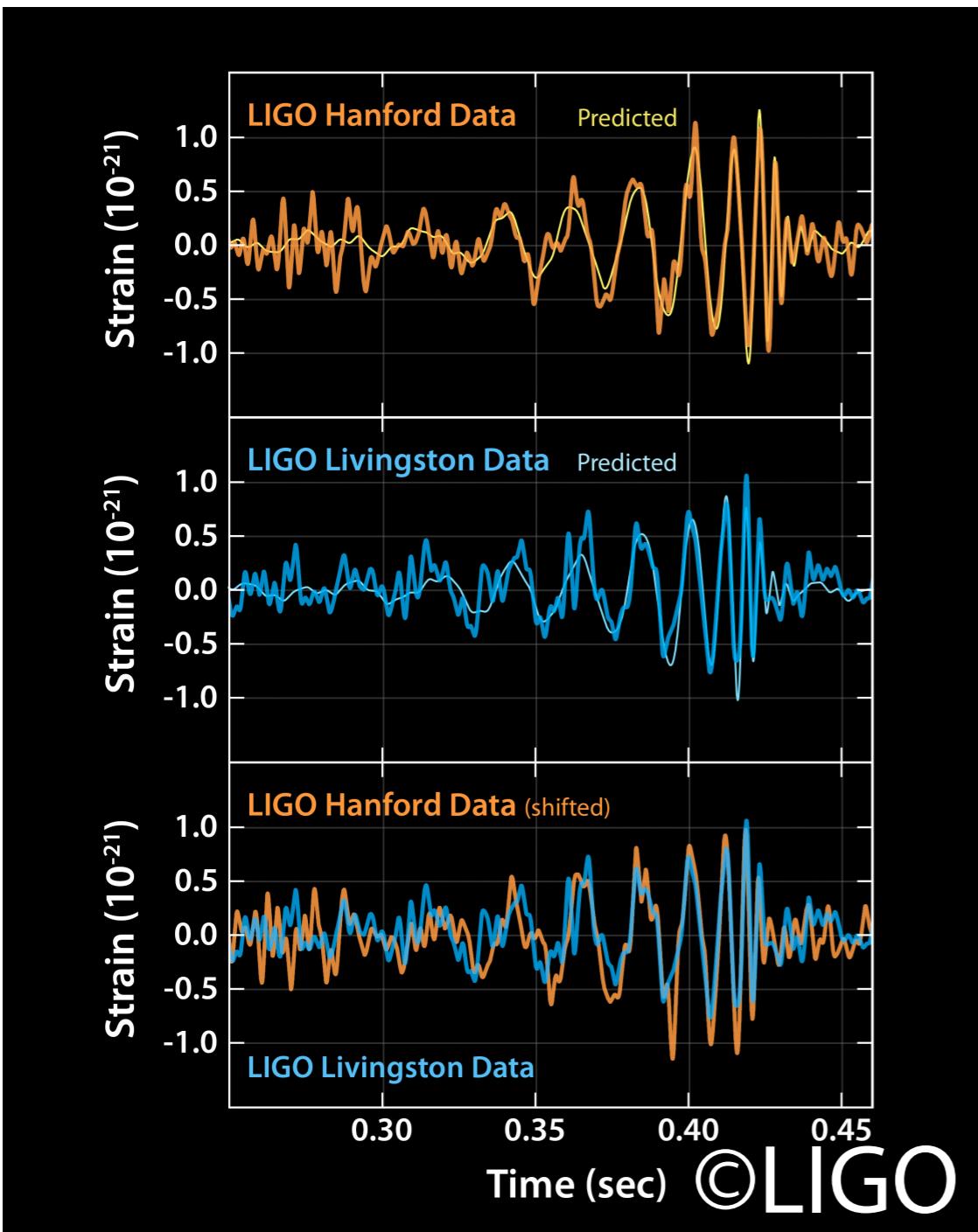
重力波の間接観測



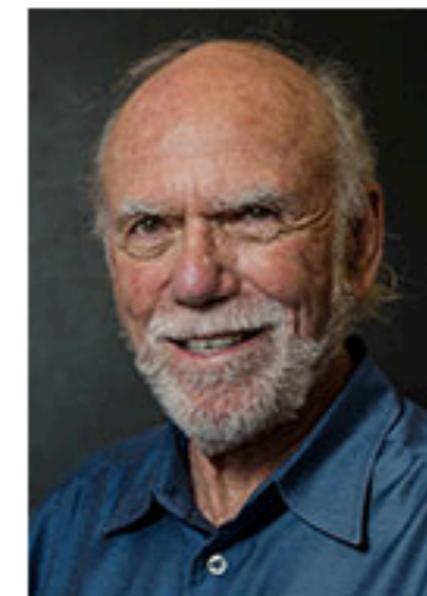
- 連星パルサー PSR B1913+16
- 重力波放出によって公転周期が変化
- ハルス、ティラー 1993 ノーベル賞



重力波で見るブラックホール



- 2015年ついに重力波直接観測
 - GW150914、BH-BH 連星
 - ワイス、バリッシュ、ソーン
2017 ノーベル賞

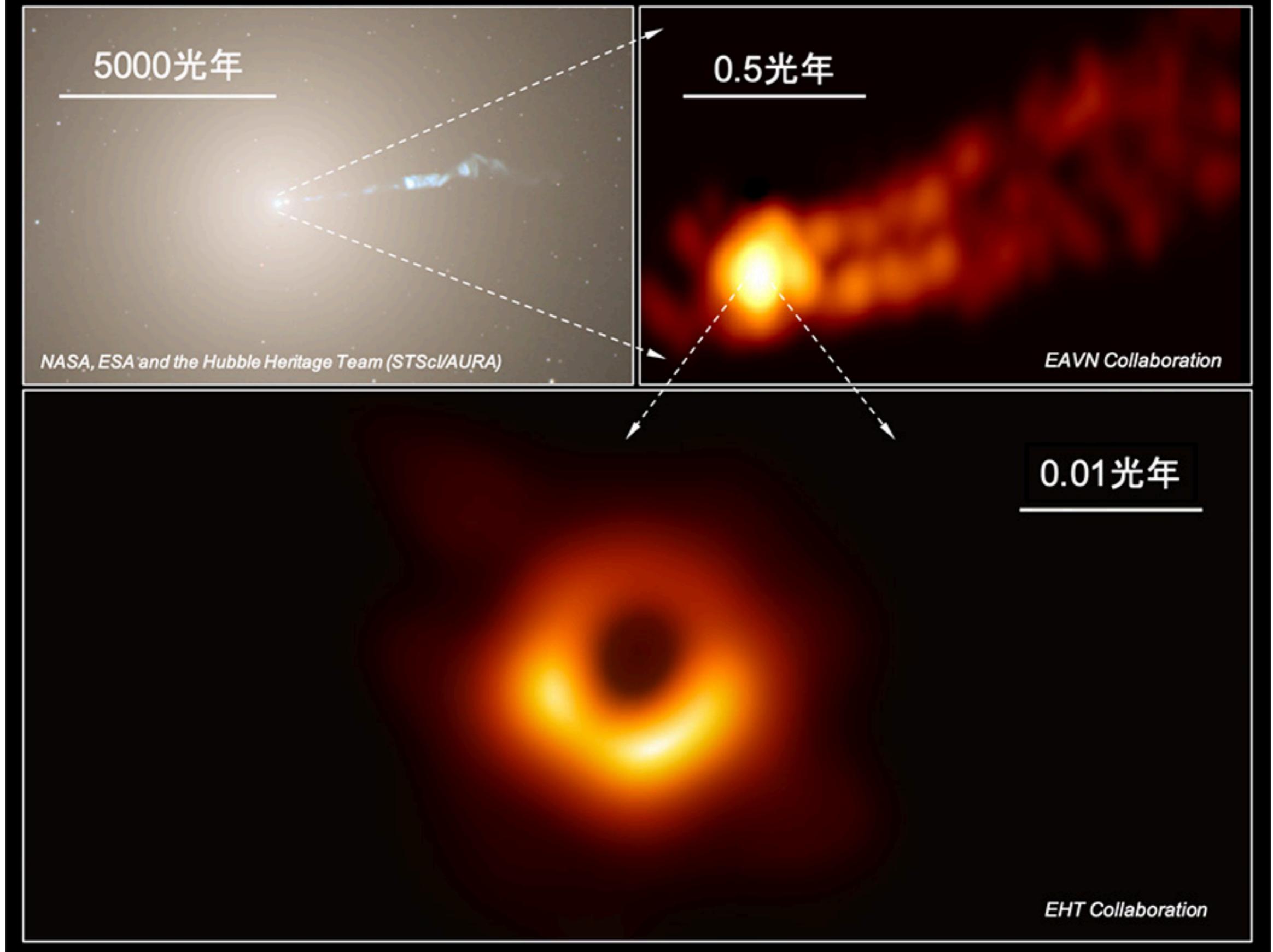


ブラックホールの写真？

- M87 銀河
- 5500万光年
- 太陽の65億倍の質量
- 波長1.3 mm の電波
- 解像度：20 マイクロ秒角

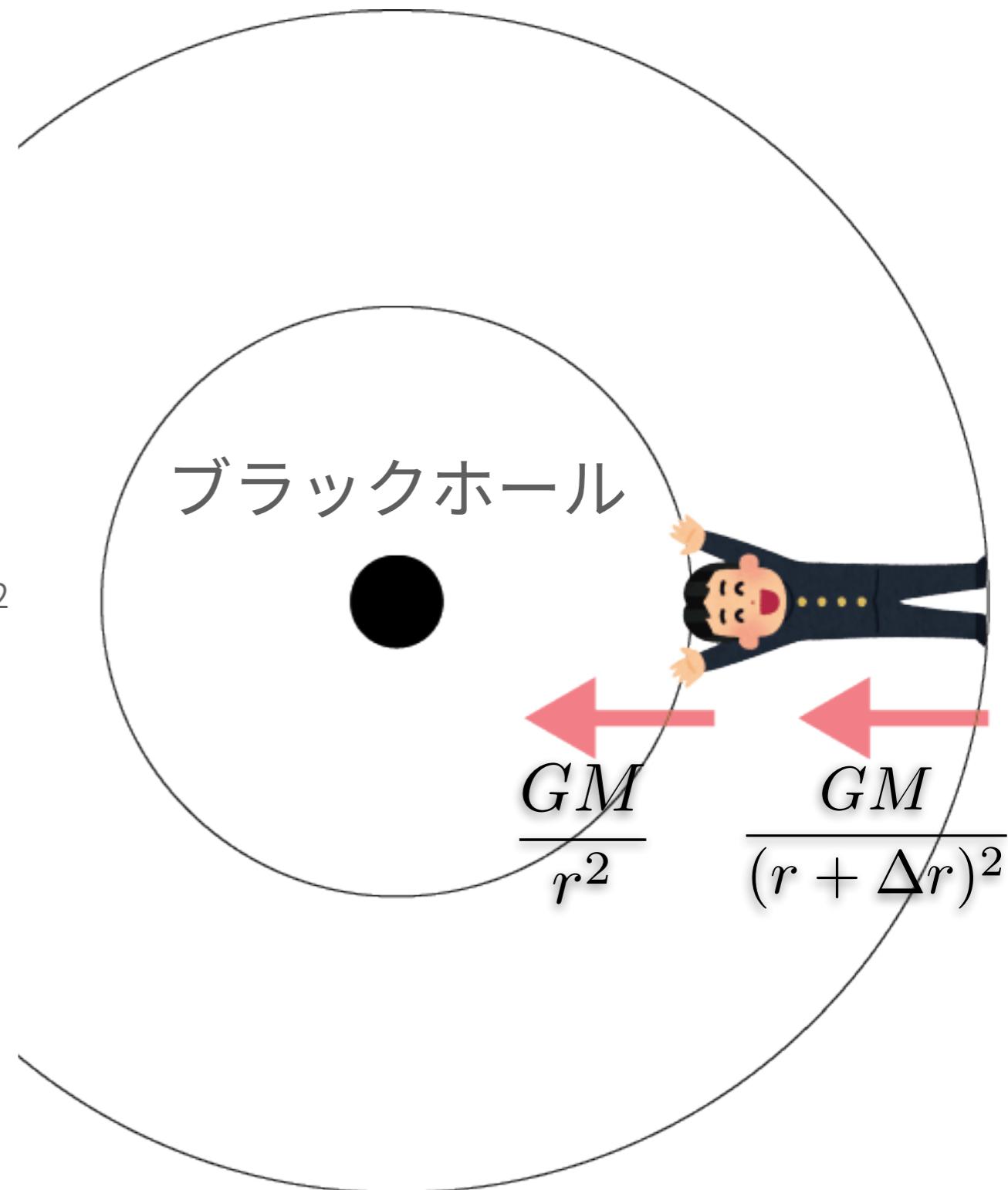
©EHT

M87

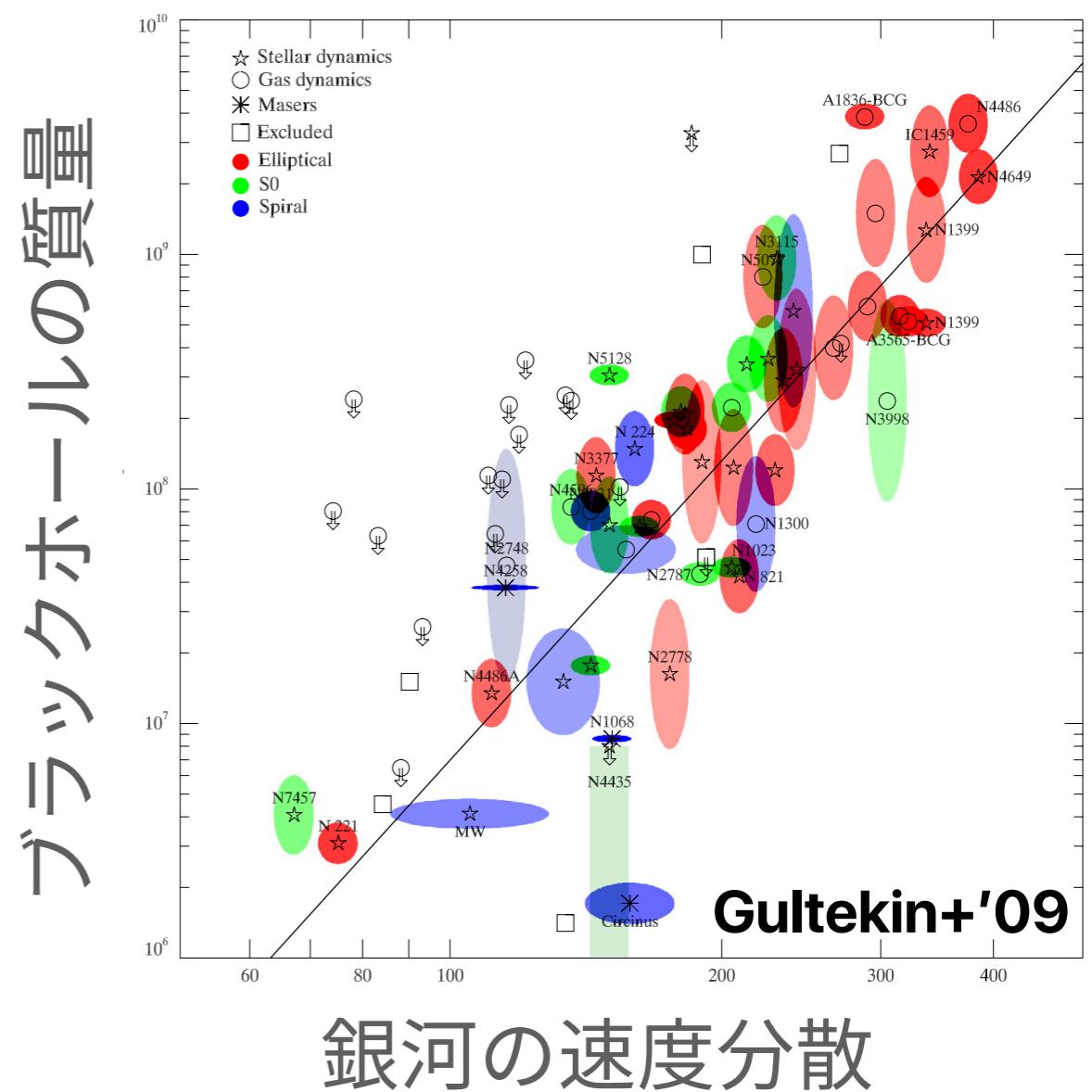
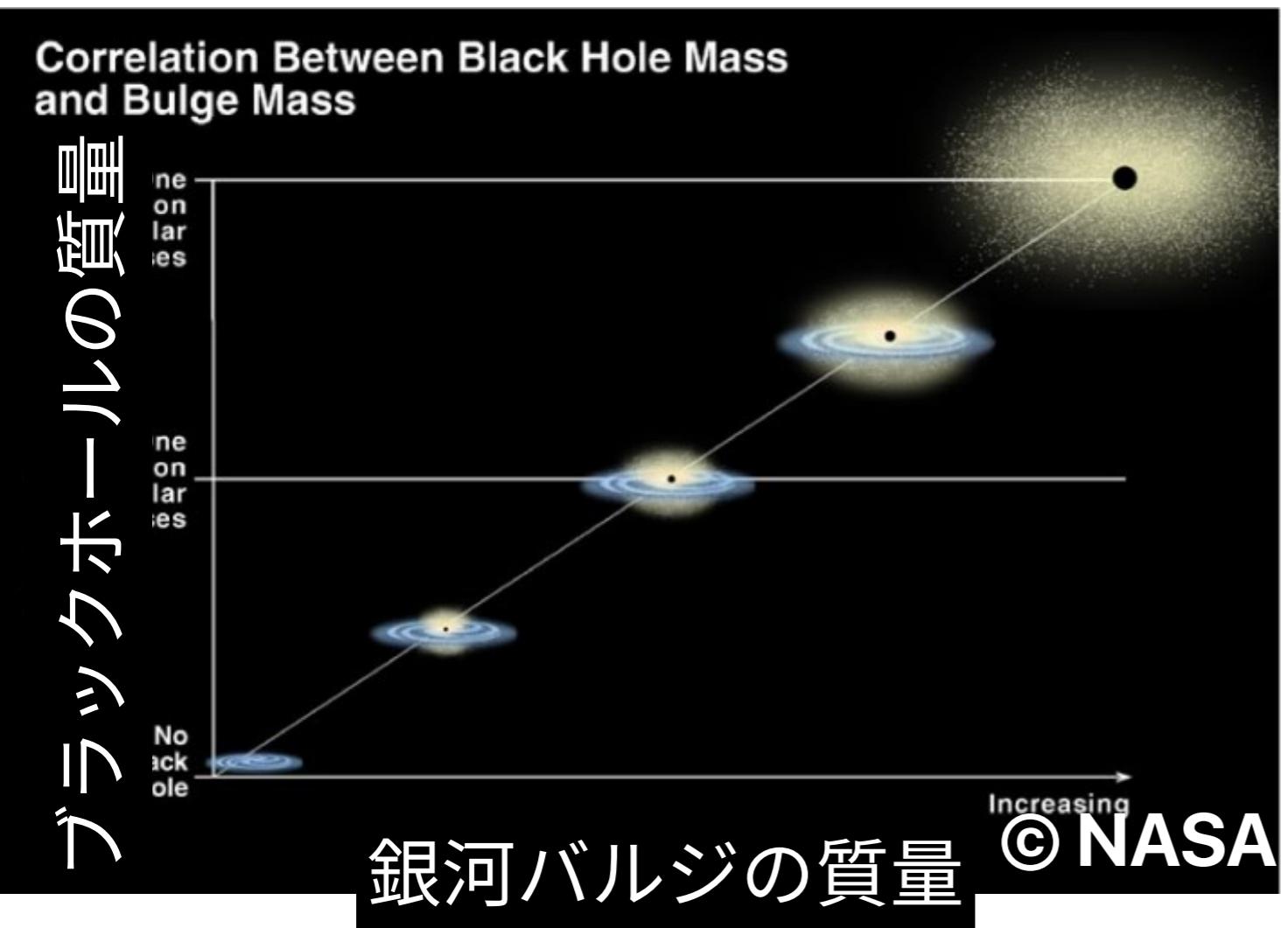


ブラックホールに落ち込むと？

- 潮汐力
 - 頭と足での重力の差
 - 中心までの距離の3乗に反比例
 - ブラックホールのサイズは $r = 2GM/c^2$
- 連星系ブラックホールの場合：潮汐力
 $> 10^4 \text{ G}$
- 巨大ブラックホールの場合：潮汐力 ~
0.00005 G

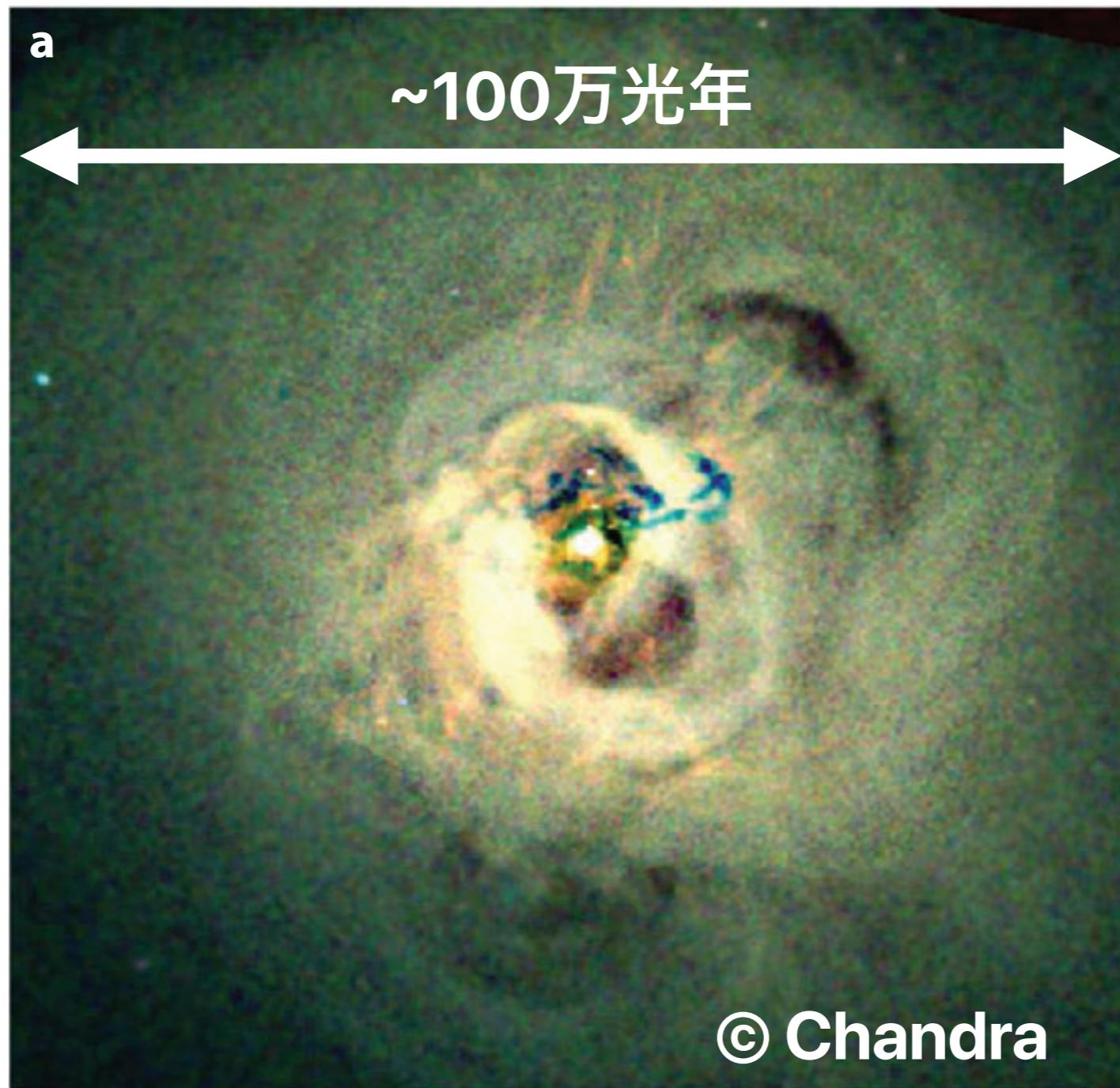


ブラックホールと銀河



- 重いブラックホールほど重い銀河に付随

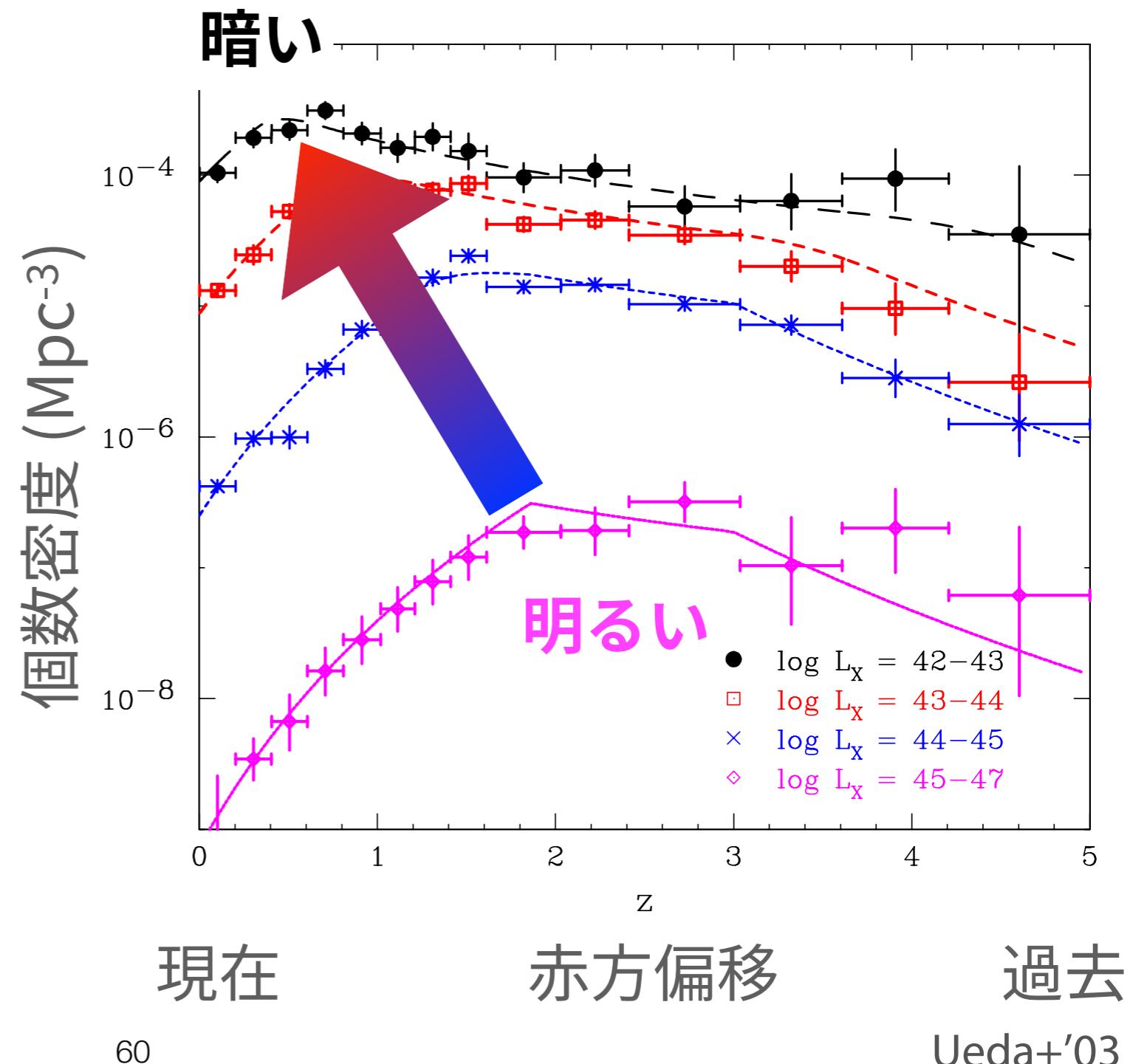
ブラックホールと宇宙



- ブラックホールの活動が周囲のガスを押しのける

ブラックホールの宇宙論的進化

- 明るいブラックホールほど昔にたくさん。
- 明るい～重い。



まとめ

- 宇宙物理学は様々なスケールの物理を用いる。
- 現代はブラックホール天文学の時代
- ブラックホールは「見える」