

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)

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

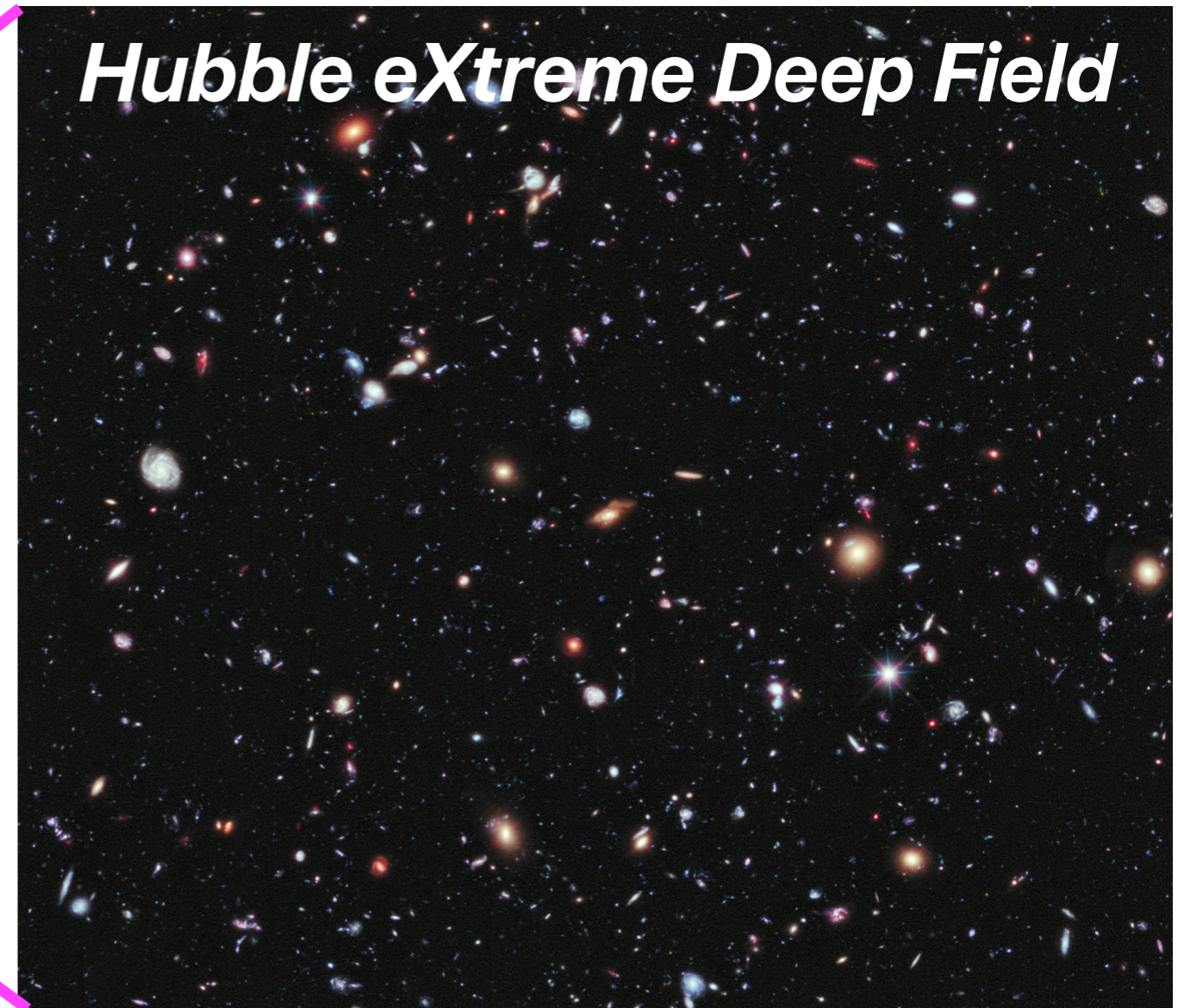
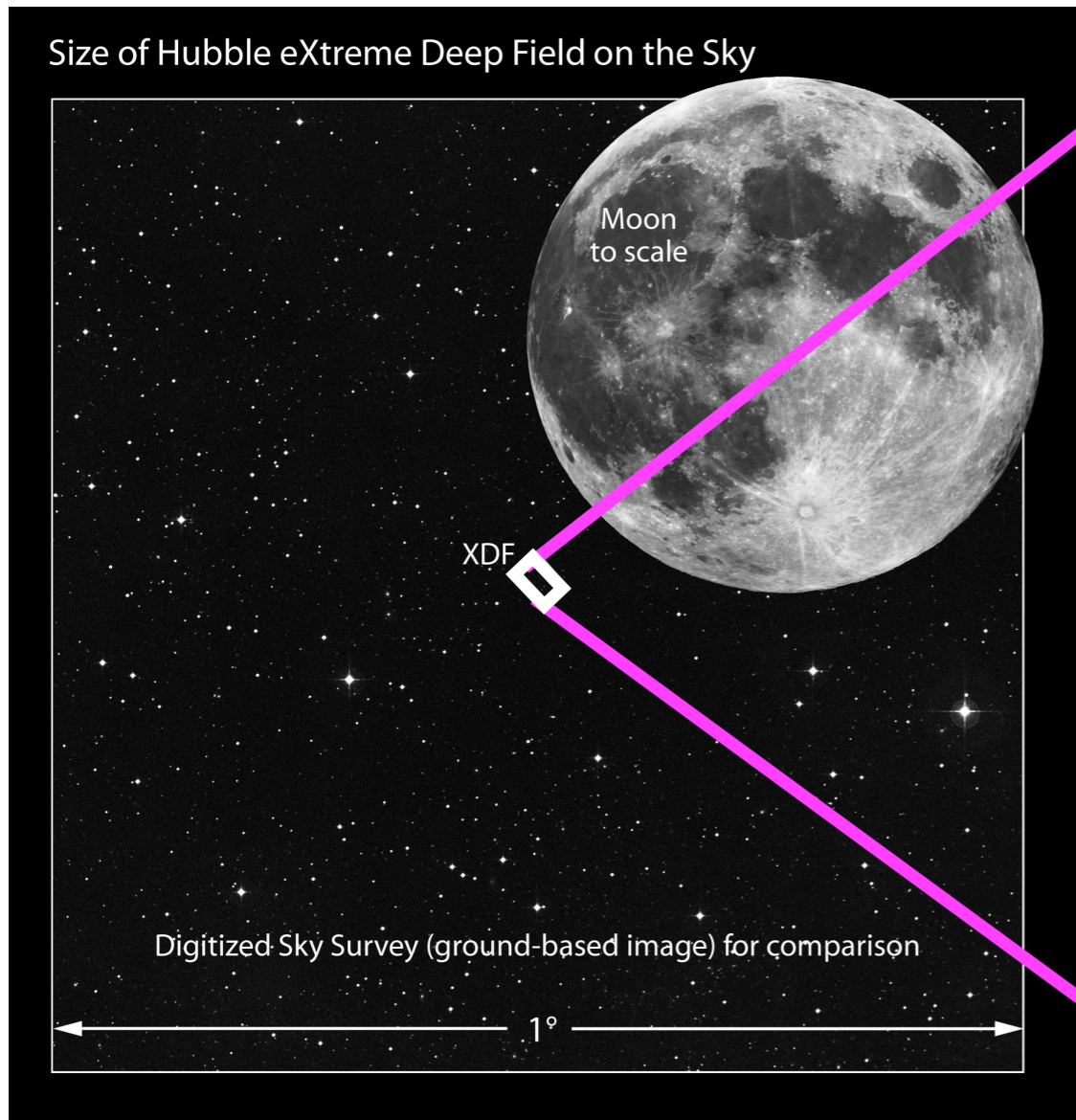
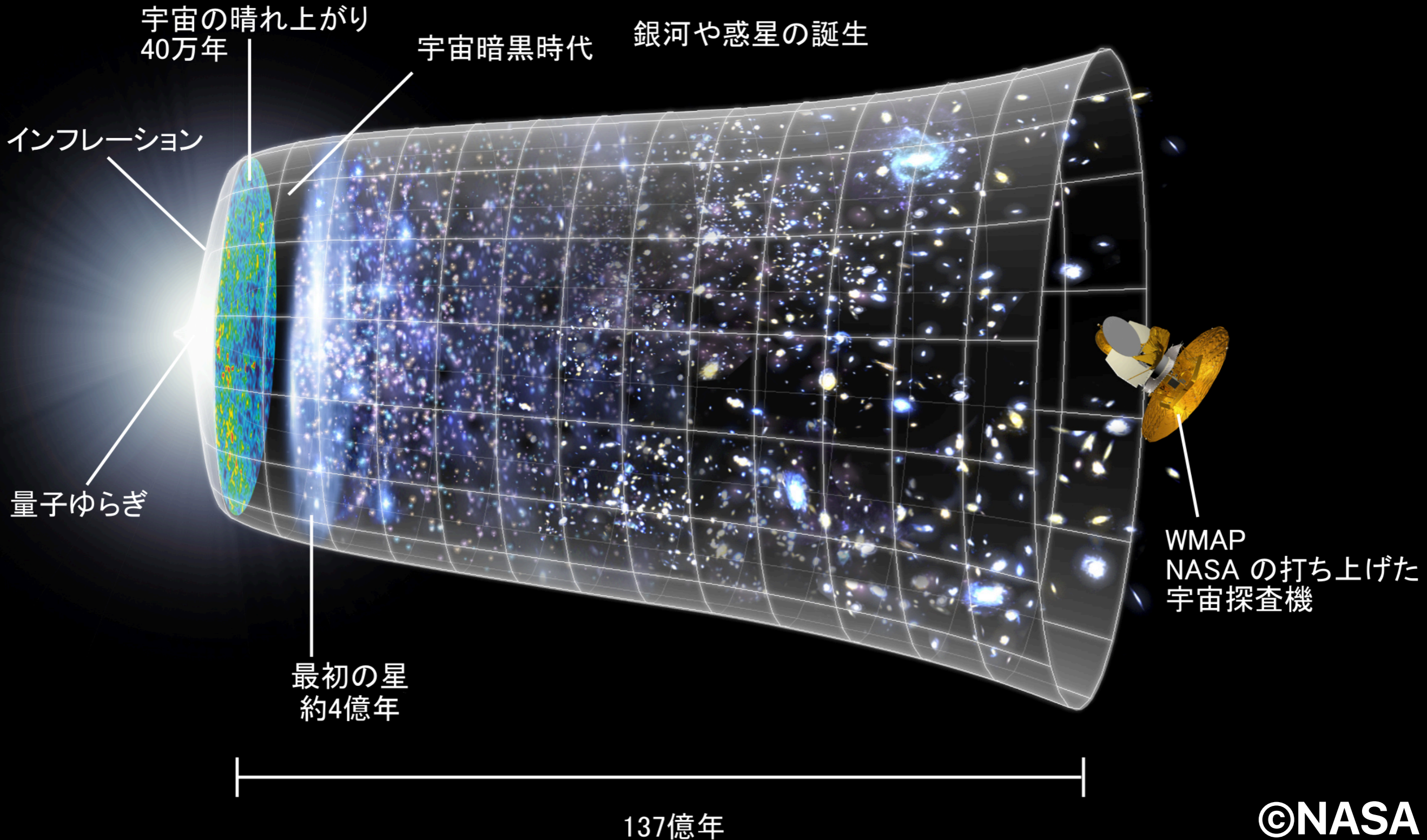


Illustration Credit: NASA; ESA; and Z. Levay, STScI; Moon Image
Credit: T. Rector; I. Dell'Antonio/NOAO/AURA/NSF

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

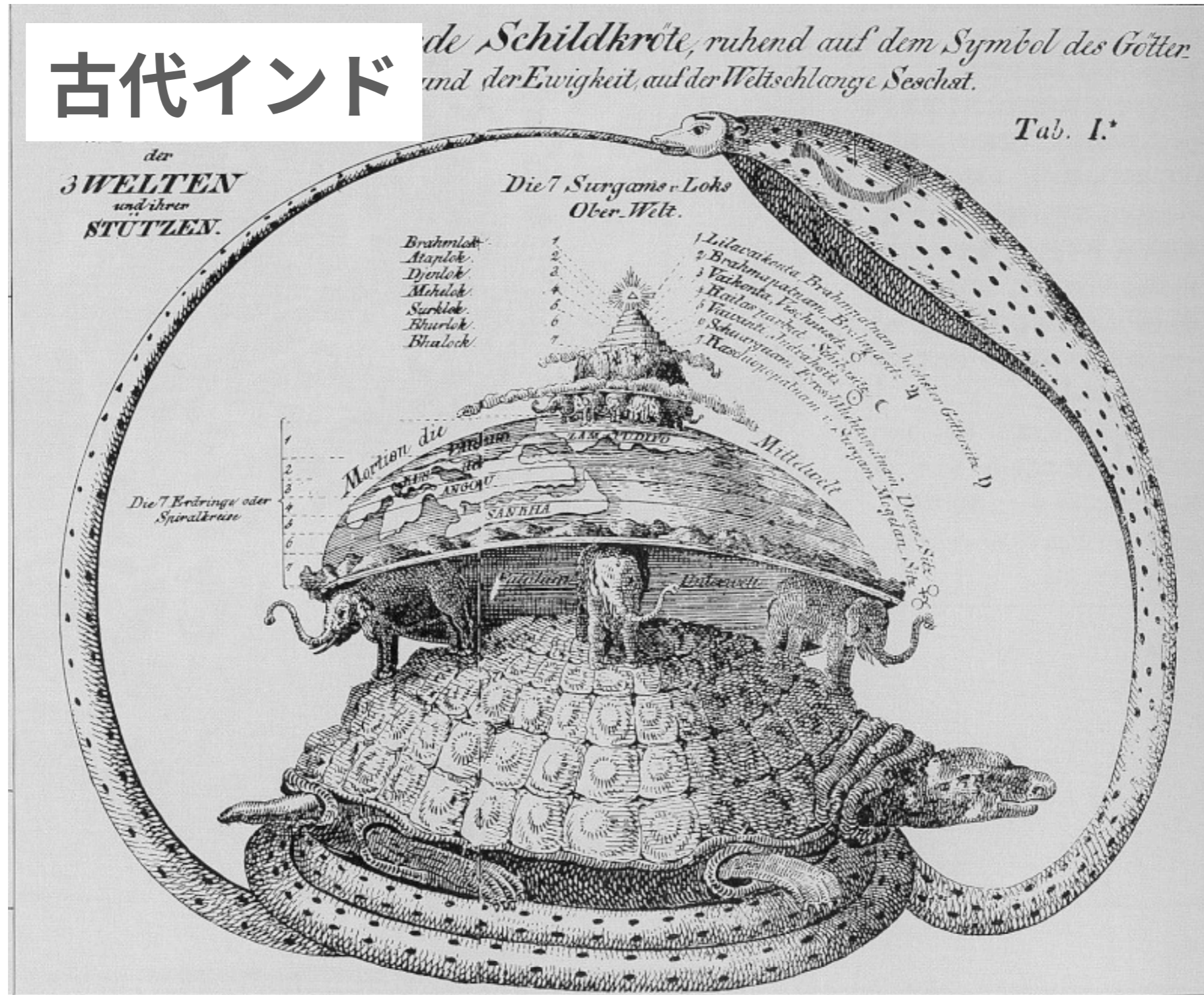
宇宙の歴史

ダークエネルギーによる
宇宙の加速膨張



人類の宇宙観

古代インド



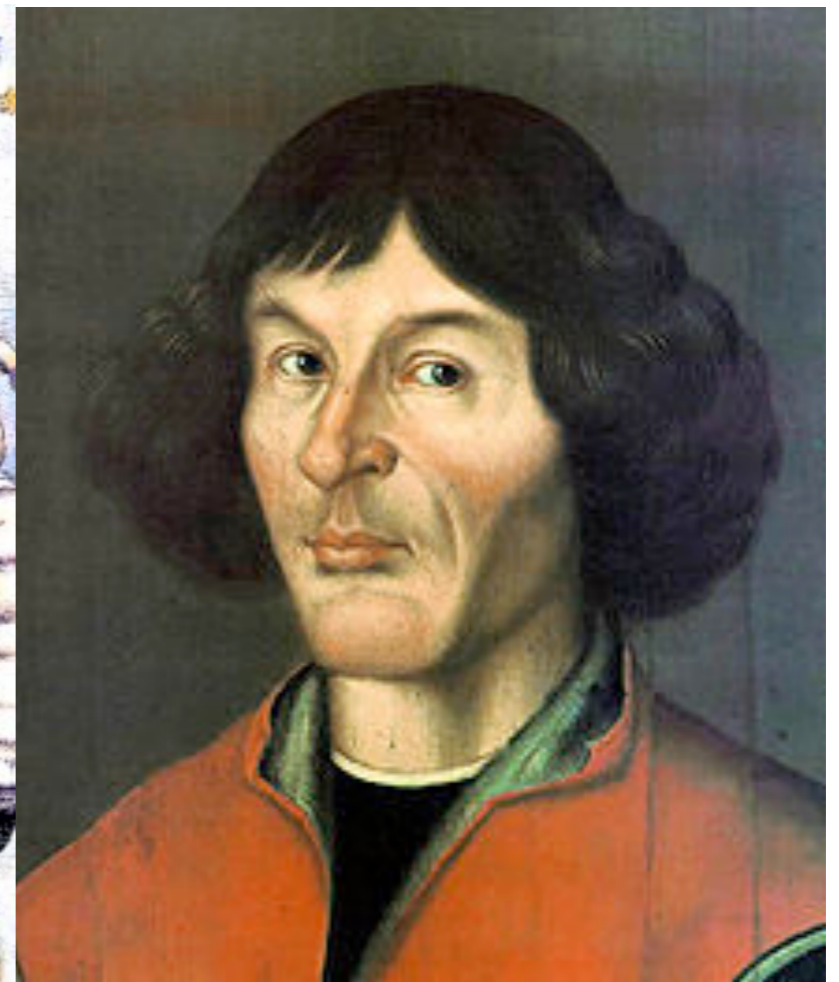
哲学から天文学へ



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



プトレマイオス
(AD83-AD168)
『アルマゲスト』
天動説

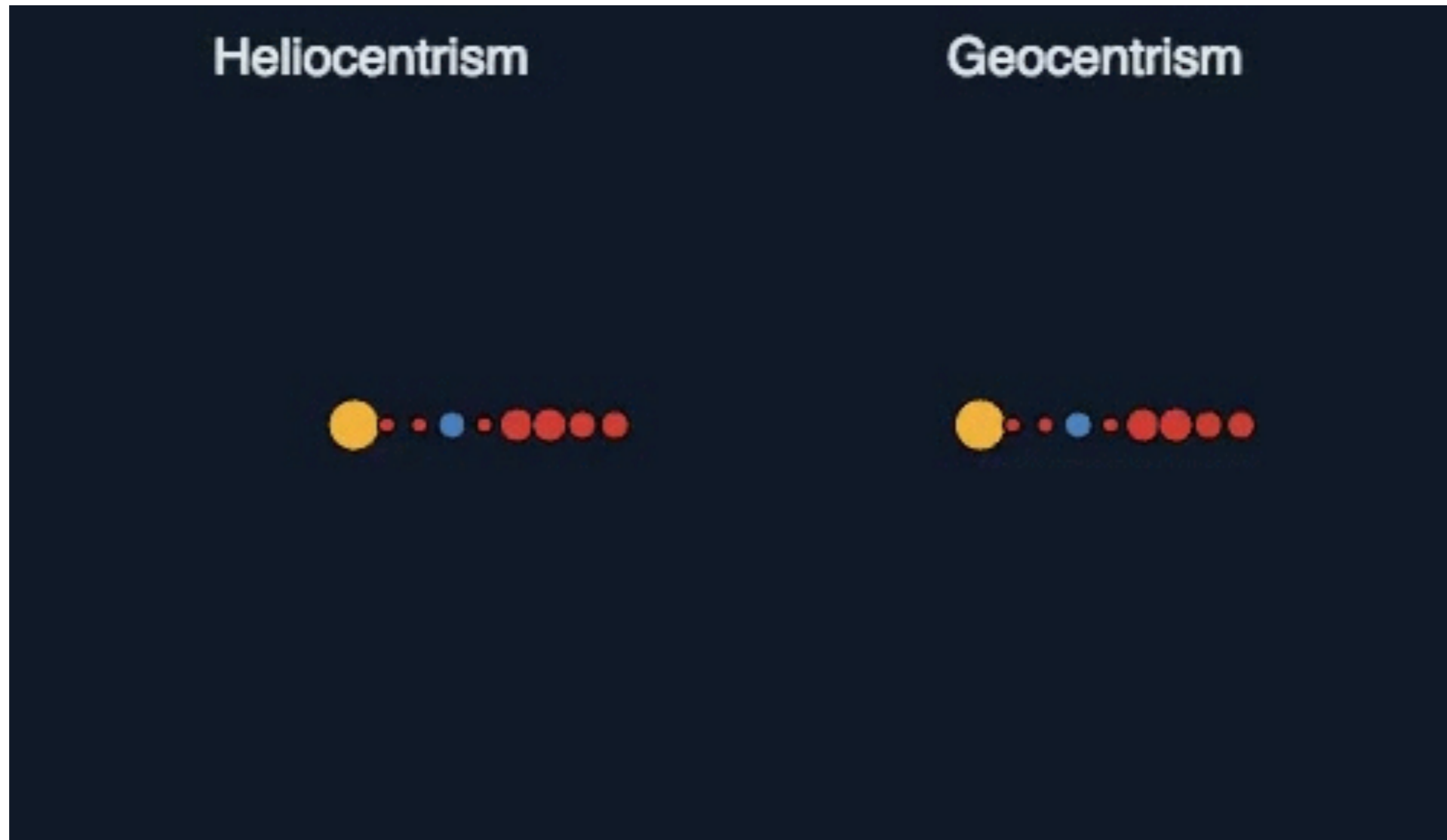


コペルニクス
(1473-1543)
地動説
※太陽中心説はアリストタルコス(BC310-BC230)が最初

地動説 vs. 天動説

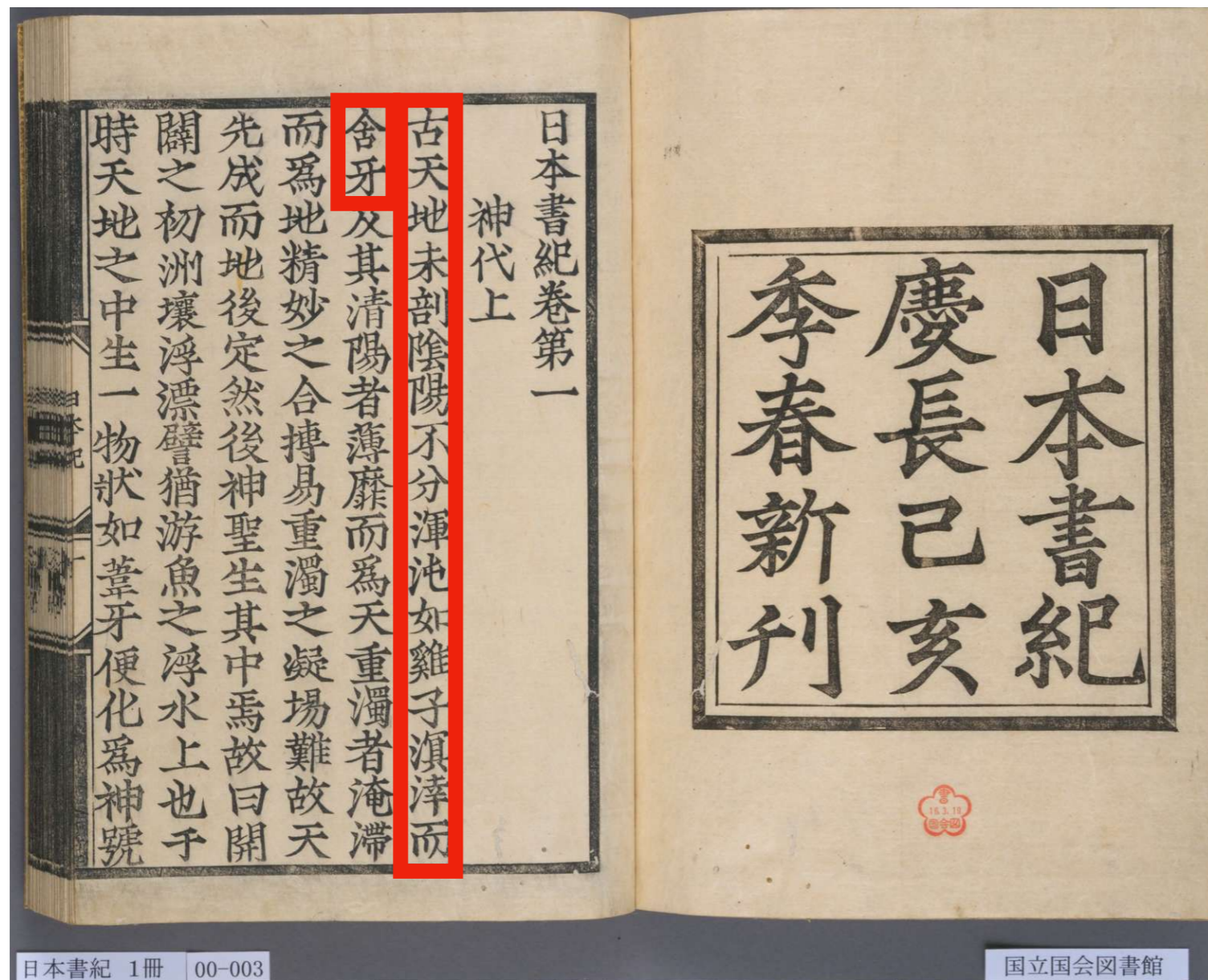
地動説

天動説



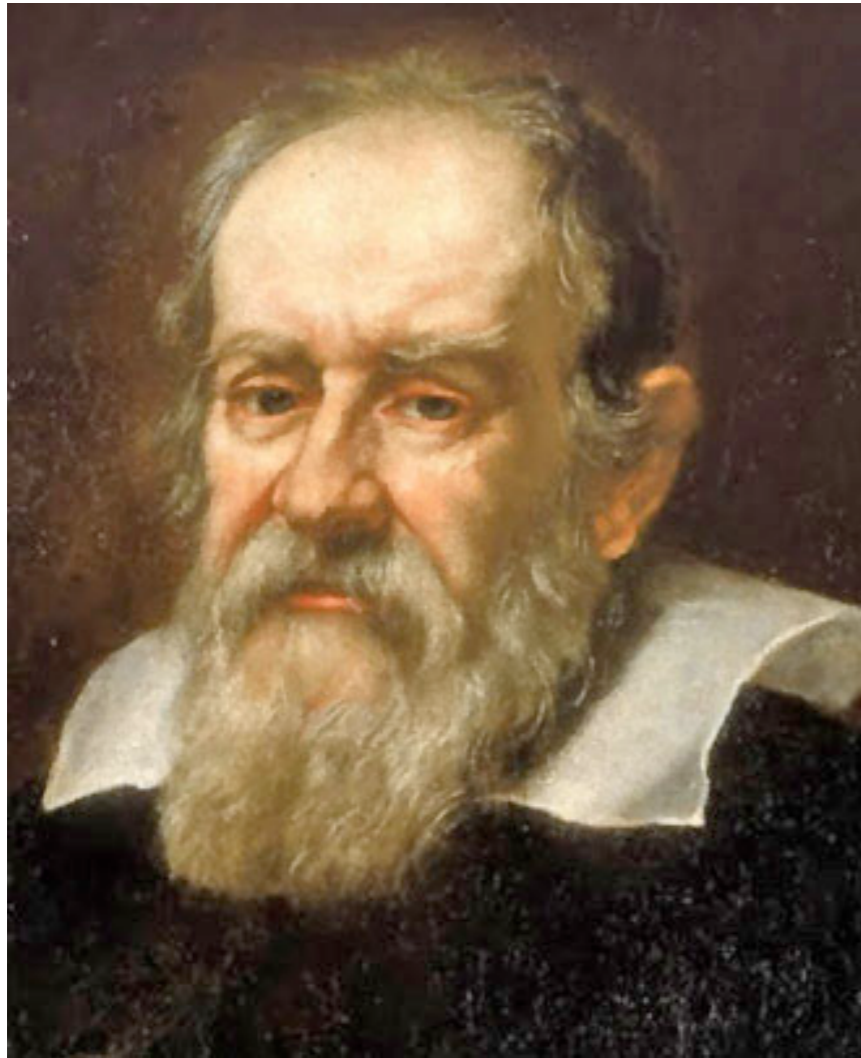
<https://i.imgur.com/AReqgfP.mp4>

古代日本人の宇宙観



- 混沌から宇宙が始まる

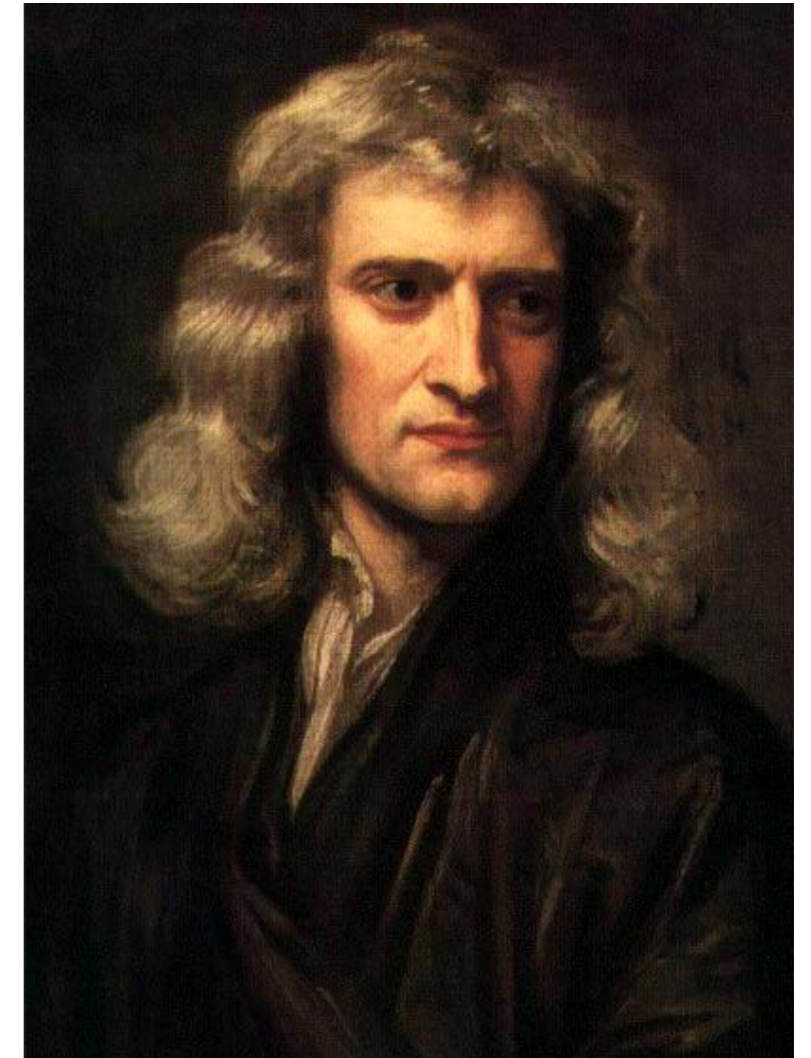
天文学から物理学へ



ガリレオ・ガリレイ
(1564-1642)
望遠鏡の改良
地動説、落体の法則

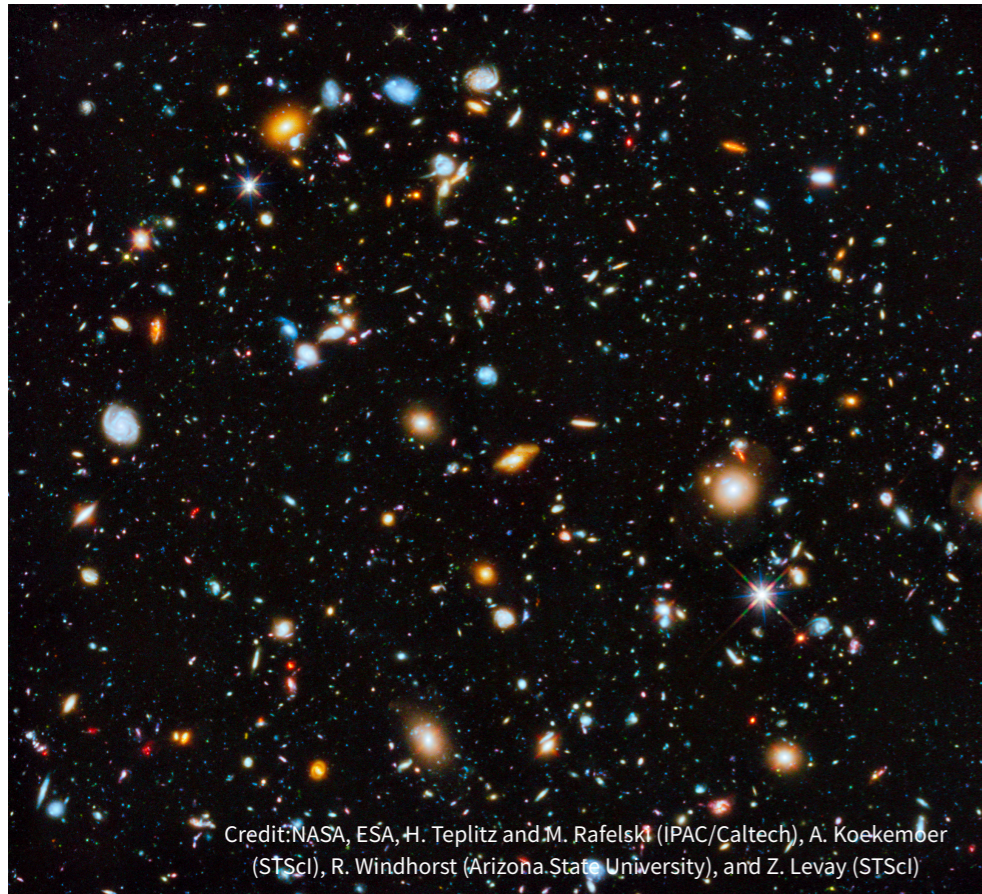


ケプラー
(1571-1630)
ケプラーの法則
楕円軌道の導入



ニュートン
(1642-1727)
万有引力
近代物理学の祖

宇宙物理



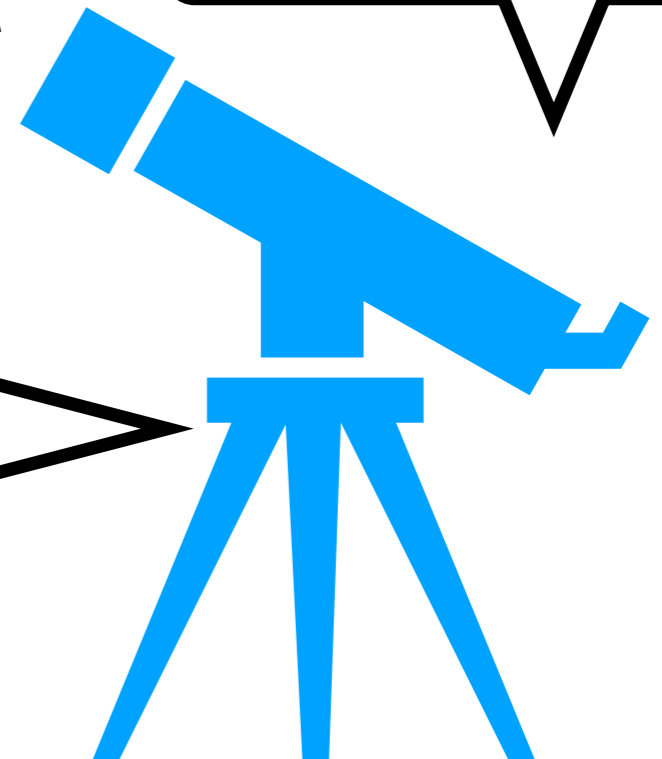
電磁波(光)
宇宙線

重力波

イメージ
天体の位置
明るさ
時間変動

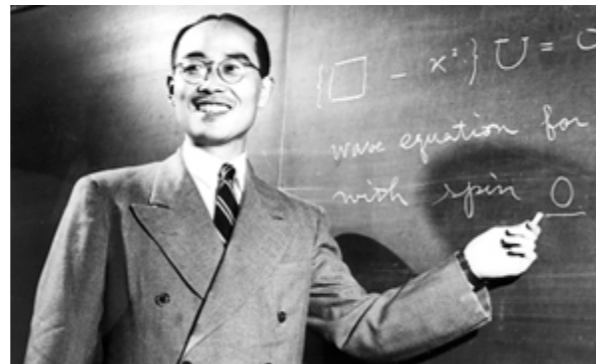
~138億光年
~ 10^{23} km
遠い

+物理 =
宇宙の解明
予言
新しい科学

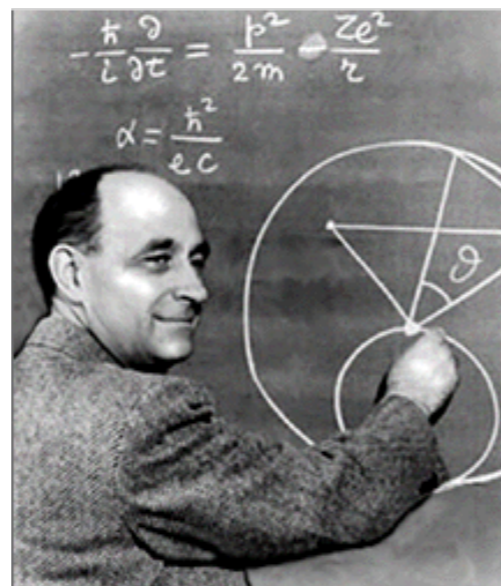


4つの力

- 強い力
- 電磁気力
- 弱い力
- 重力



湯川(1935)



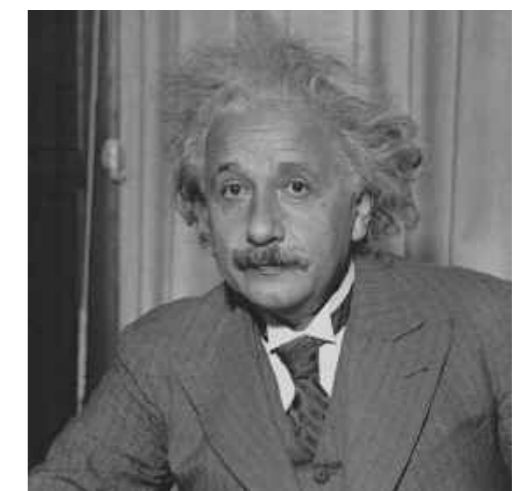
Faraday
(1830s)



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

太陽系

太陽

地球

人間

微生物

DNA

原子
分子

原子核

クォーク

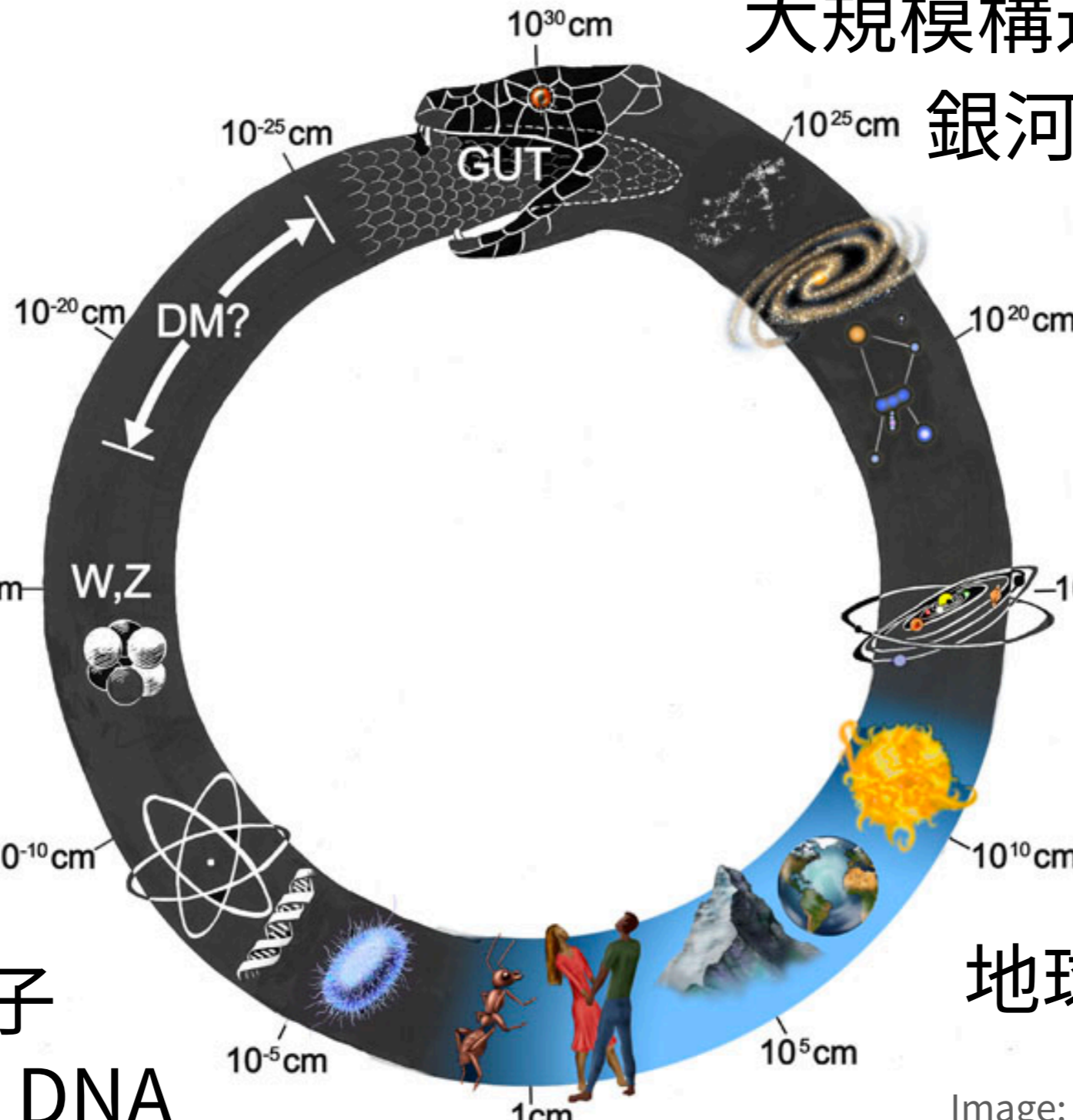


Image: Glashow's Snake rendered by Nancy Ellen Abrams and Joel R. Primack, (c) Abrams, Primack 2006

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



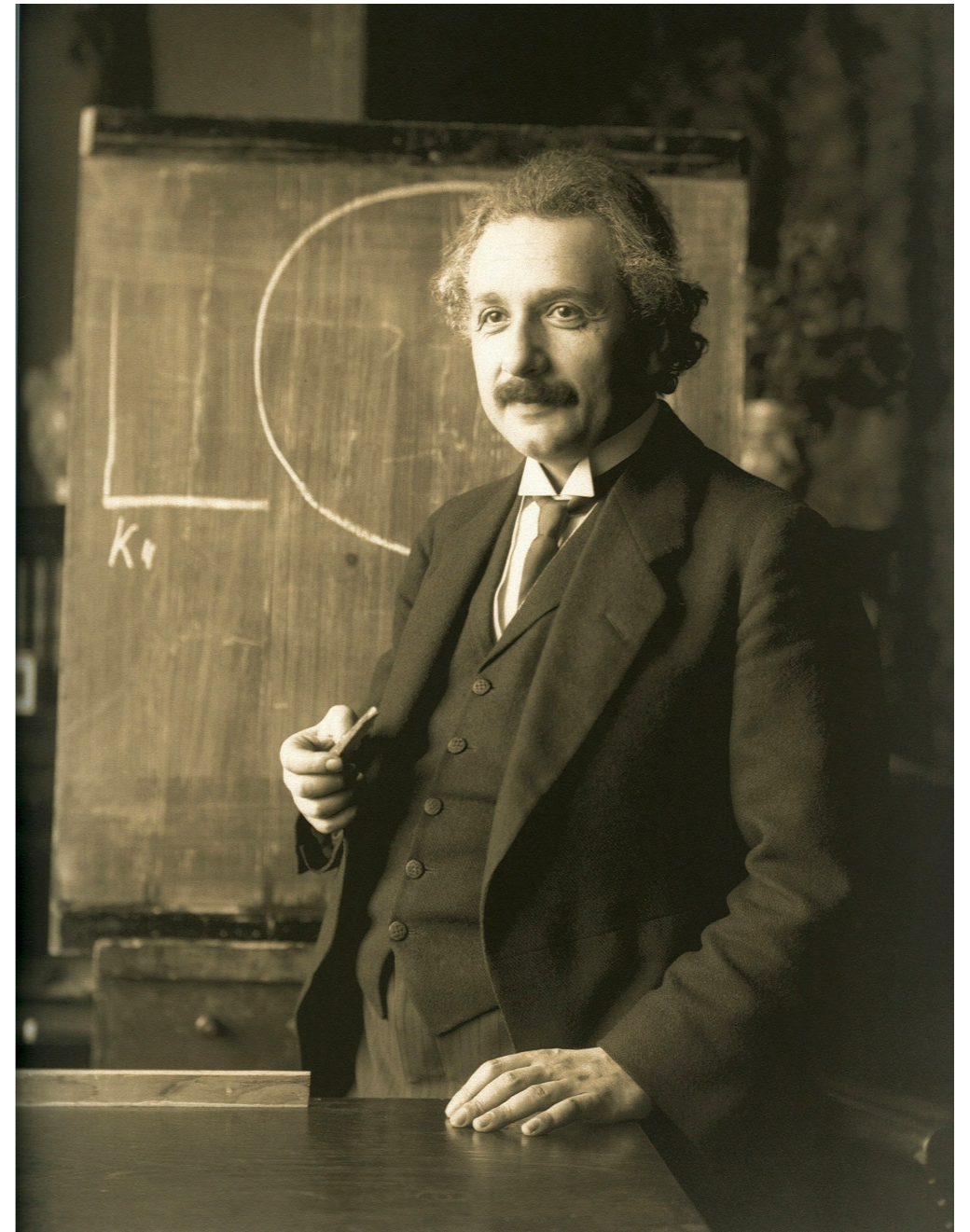
<http://isaacnewton272.weebly.com/gravity-and-motion.html>

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



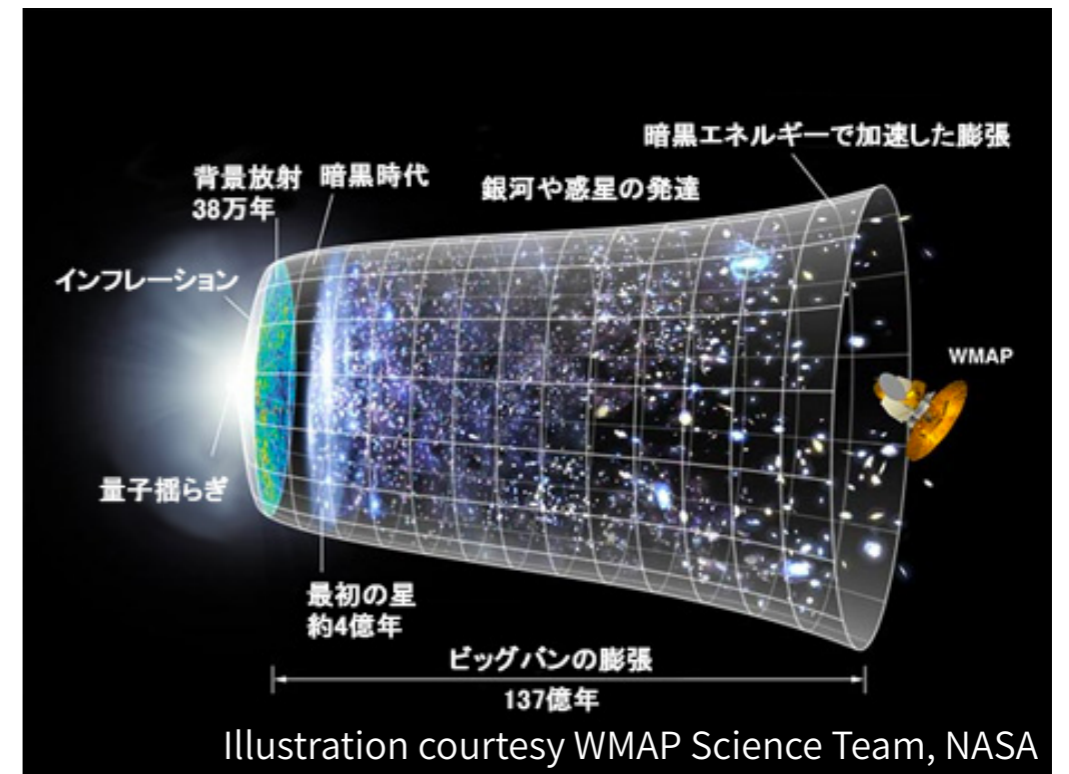
一般相対性理論の予言

ブラックホール



星の進化の終末
天体物理
Astrophysics

膨張宇宙



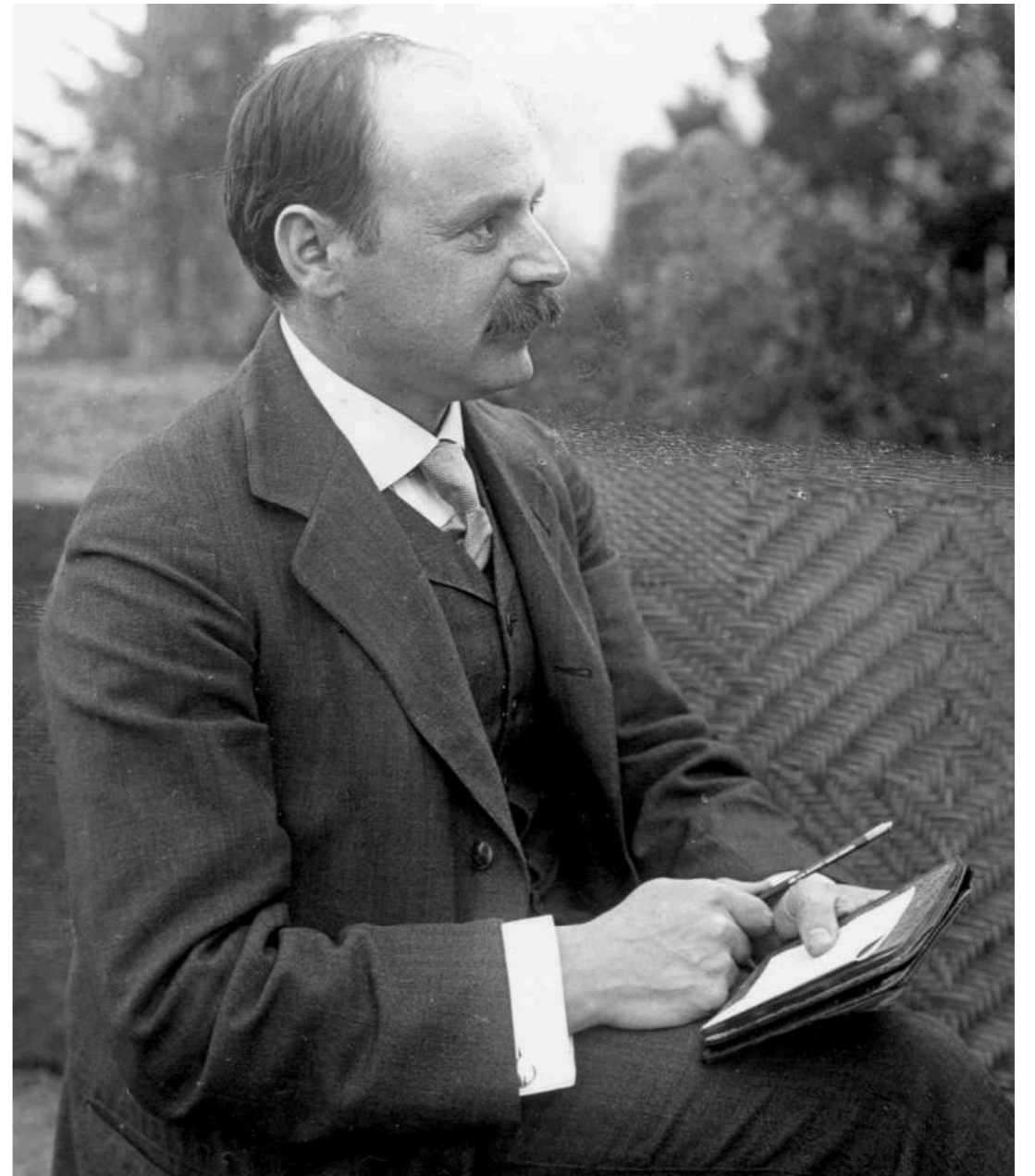
ビッグバンの根幹
宇宙論
Cosmology

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)

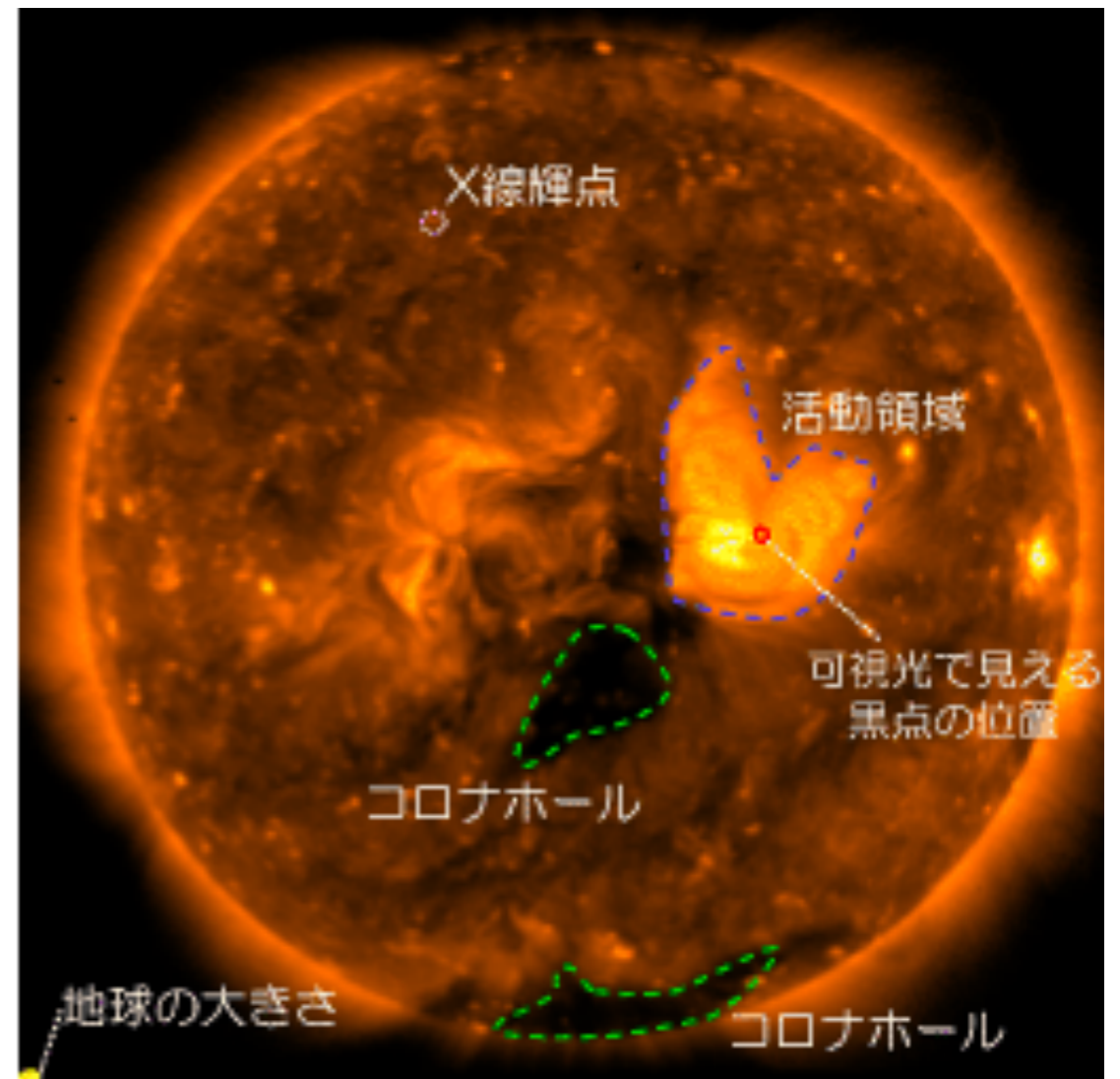
- $v_{\text{esc}} = c$
 $\Rightarrow R = 2GM / c^2$
 $= 3 \text{ km for } M = M_{\odot}$
- シュバルツシルト半径



太陽

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

ひので衛星によるX線画像



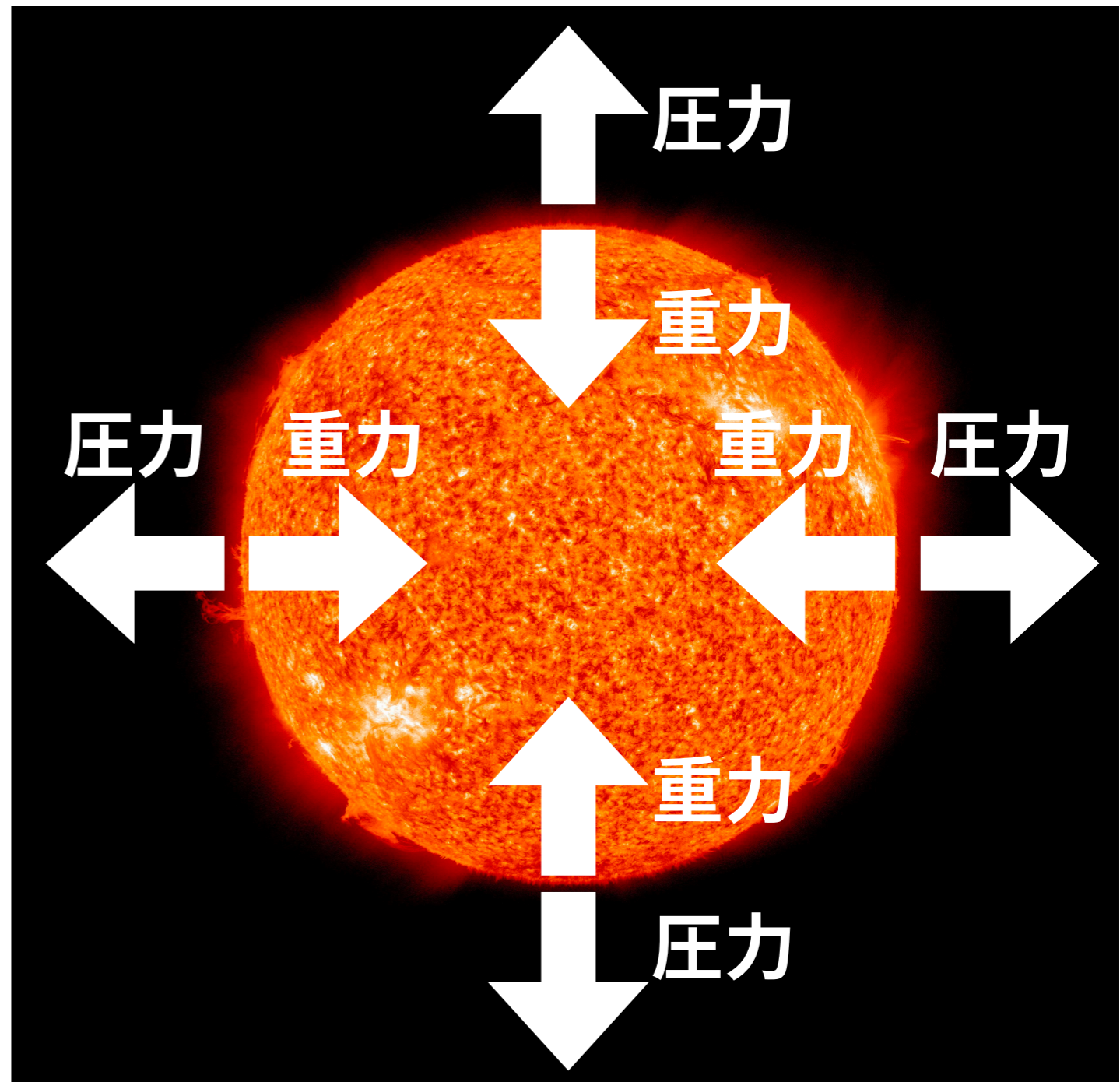
国立天文台

ブラックホールになると、 ~ 3 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？
- 圧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

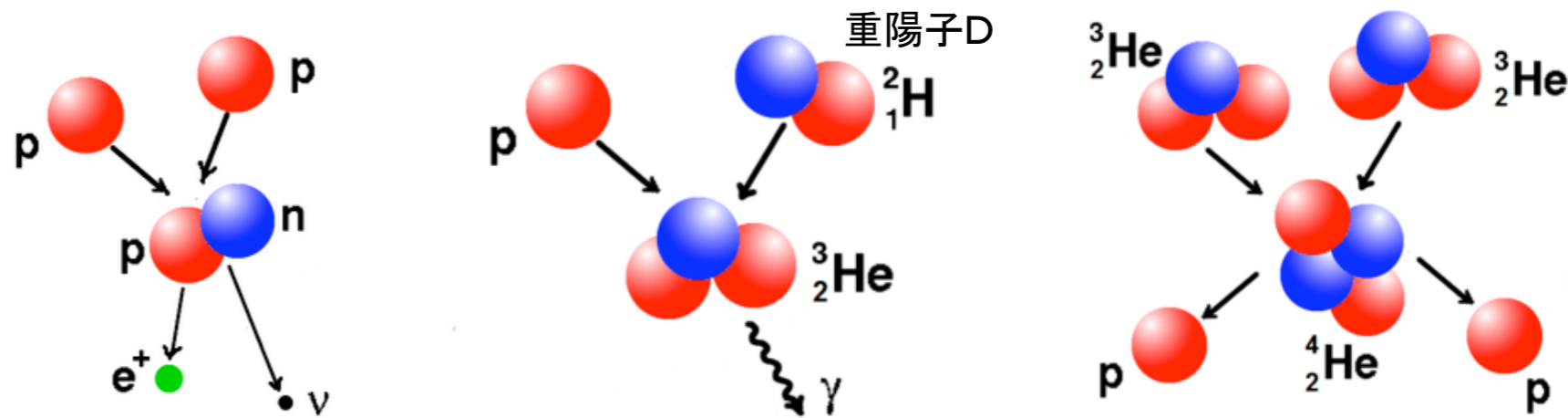
- 半径 $R_{\odot} \sim 7 \times 10^{10}$ cm, 質量 $M_{\odot} \sim 2 \times 10^{33}$ g, 光度 $L_{\odot} \sim 4 \times 10^{33}$ erg/s
- 単位質量あたり ~ 2 erg/s/g
- 重力エネルギー説(ヘルムホルツ, 19世紀)
 - $E_G = -G M_{\odot} / R_{\odot} = -2 \times 10^{15}$ erg/g
 - 太陽の寿命は？
- 隕石の放射線年代測定 ~ 45.5 億年
- ダーウィン「種の起源」 数億~数十億年
- 重力エネルギー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

$E=Mc^2$

- 静止エネルギー説(エディントン, 1920)
 - $M_{\odot}c^2/M_{\odot} = 9 \times 10^{20} \text{ erg/g} \Rightarrow$ 太陽の寿命~10兆年
 - 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)
 - $6.6 \text{ MeV/陽子} \sim 6.6 \times 10^{18} \text{ erg/g} \Rightarrow$ 太陽の寿命~1000億年

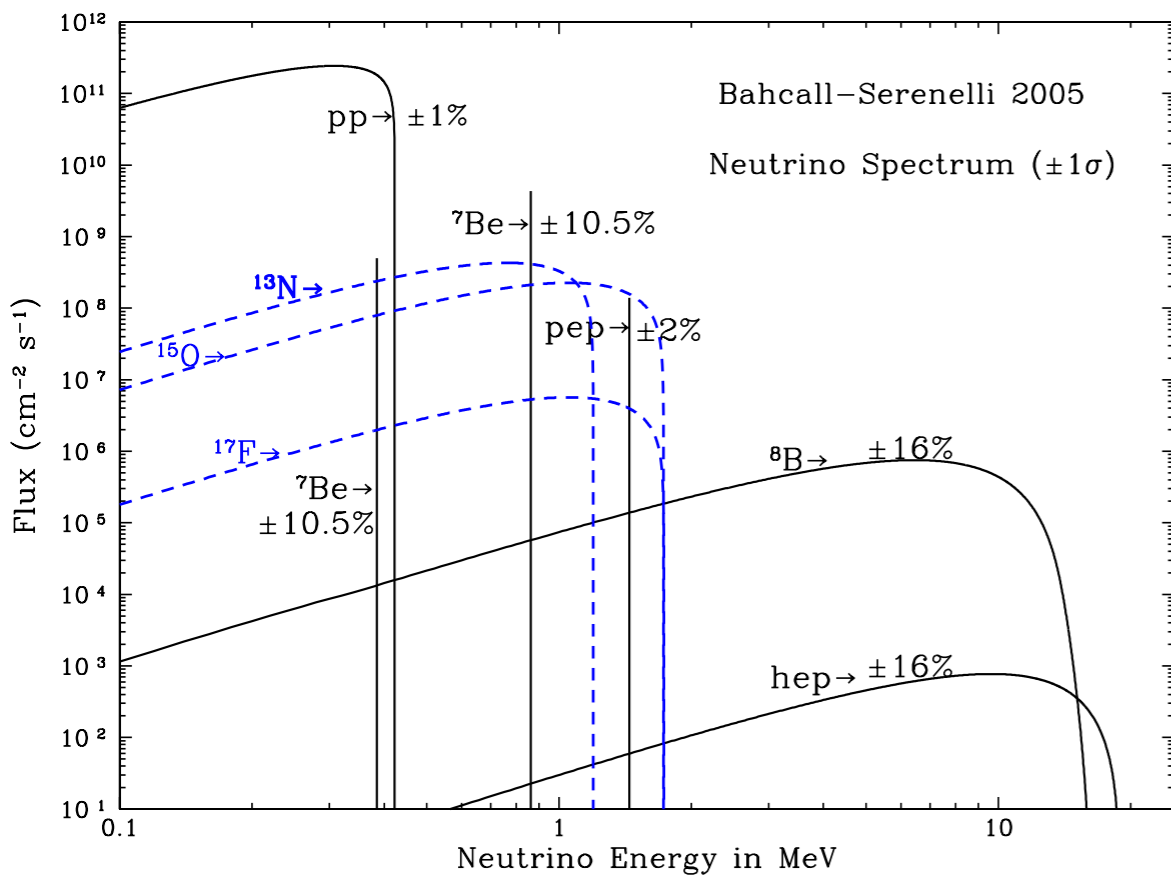
- 太陽は潰れない

- ベーテ
ノーベル賞 (1969)

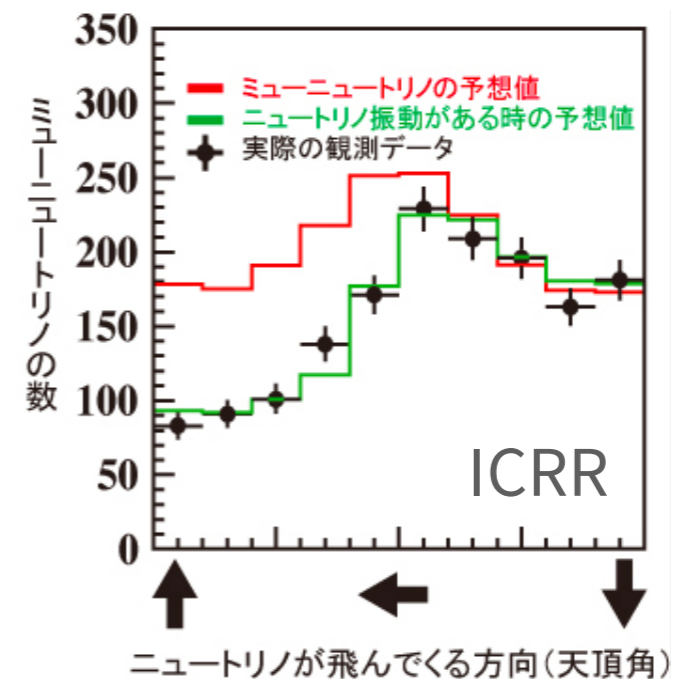


太陽ニュートリノ

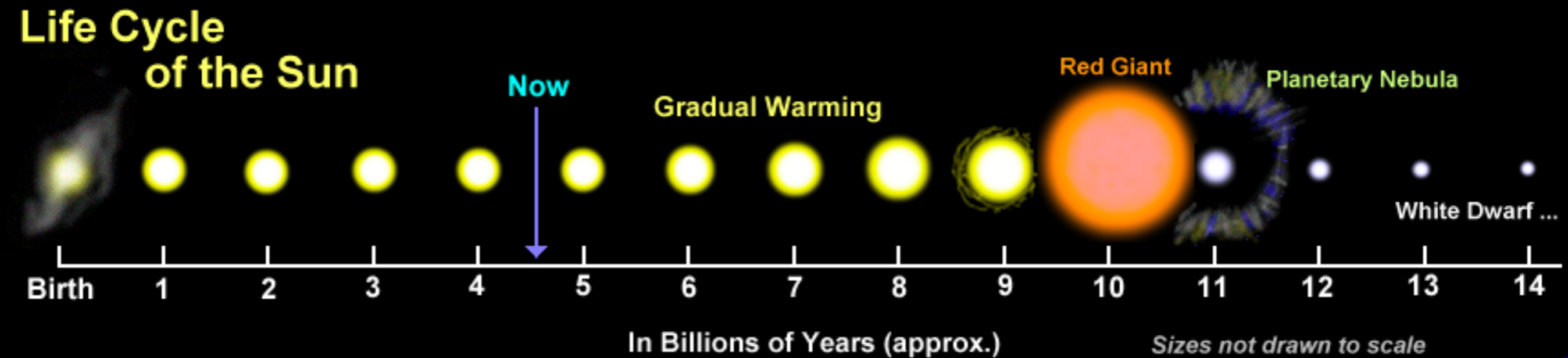
- 核反応 ⇒ ニュートリノ
- Davis らが初めて測定
- ノーベル賞(2002)
- 予想の1/3



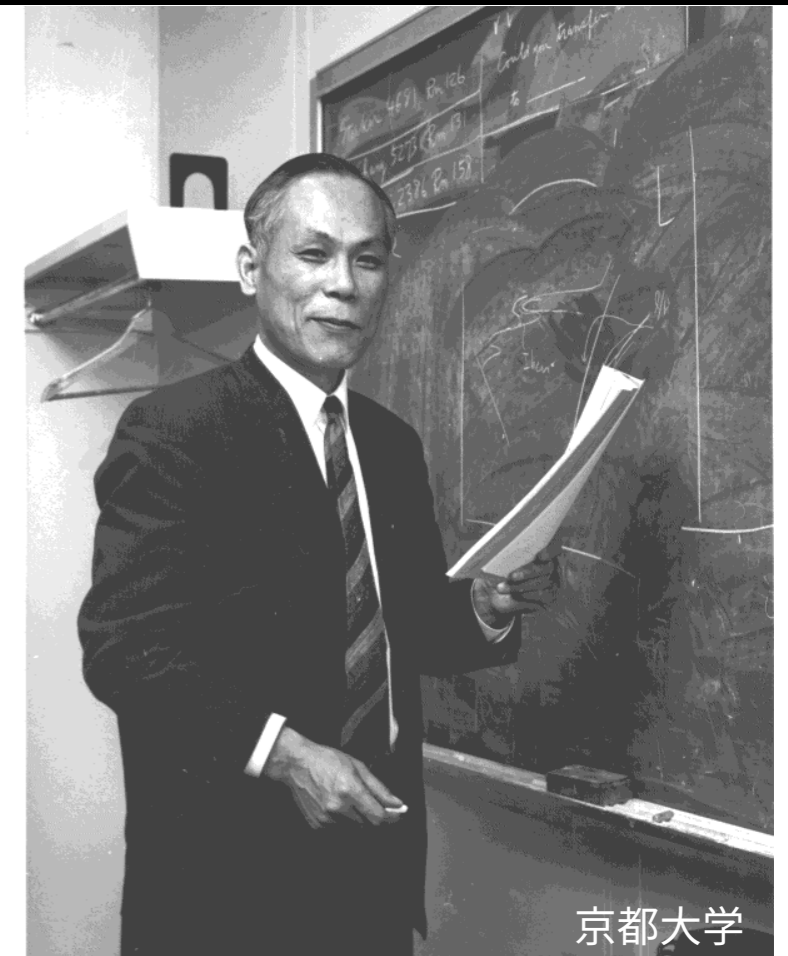
- ニュートリノ振動の発見
- ノーベル賞(2015)
- 梶田・マクドナルド²⁵



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



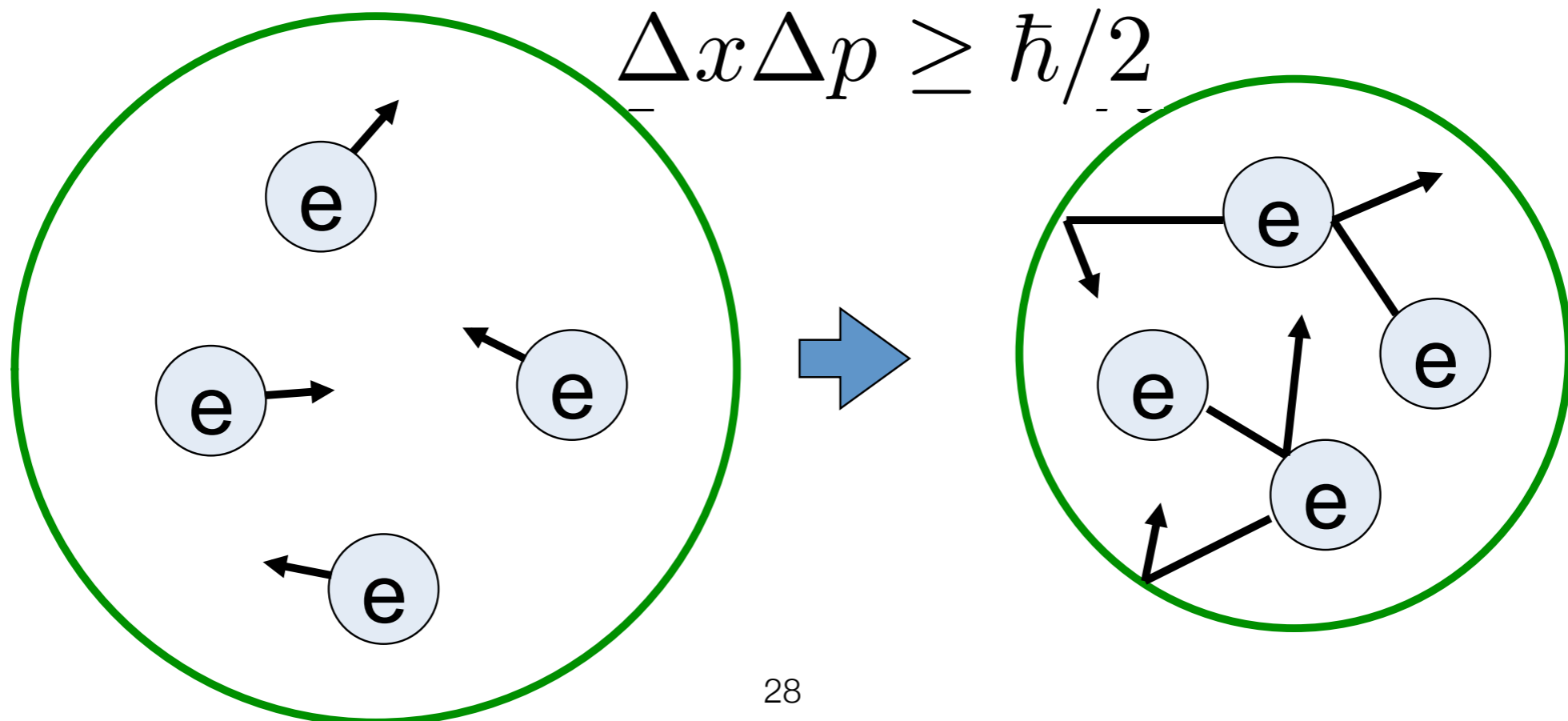
- 粒子 = 波
- 1925年 Heisenberg の行列力学
- 1925年 Pauliの排他律
- 1926年 Schrödingerの波動力学
- 1927年 Heisenberg の不確定性原理



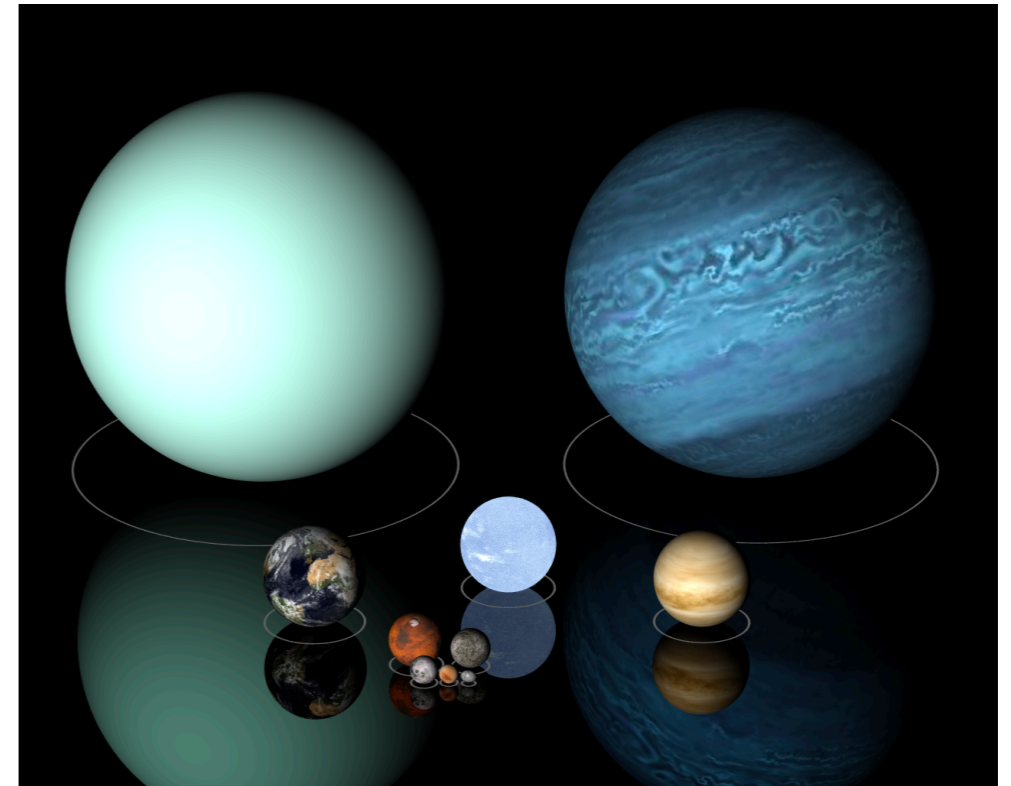
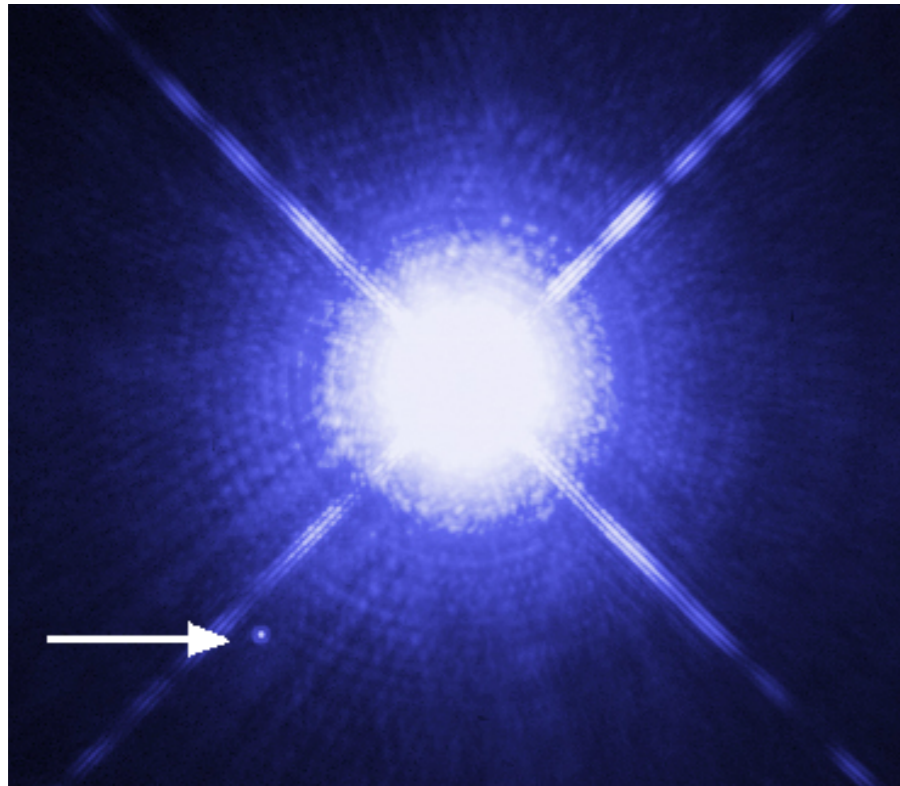
$$\Delta x \Delta p \geq \hbar/2$$

縮退圧

- 核燃料を使い果たす \Rightarrow 収縮 \Rightarrow 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：

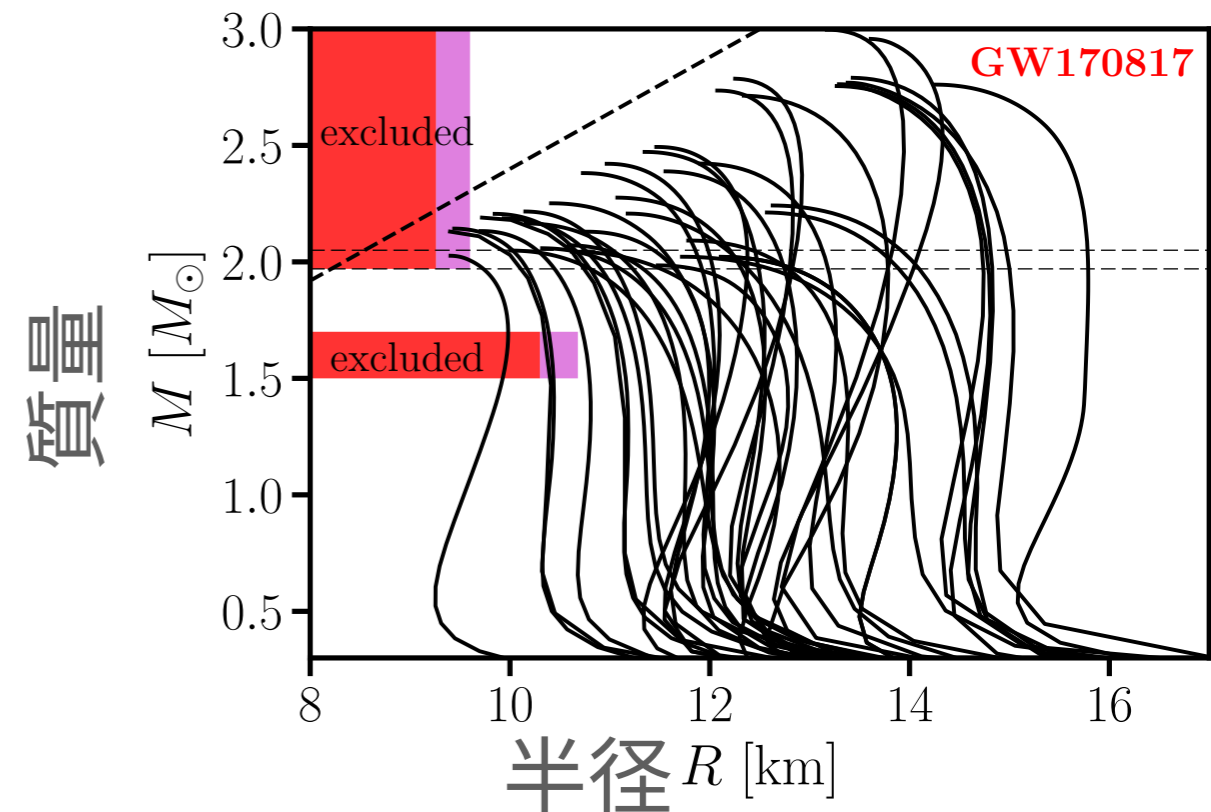
$$cp \geq mc^2$$

- 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)

➡ 中性子星の予言：Baade & Zwicky 1934

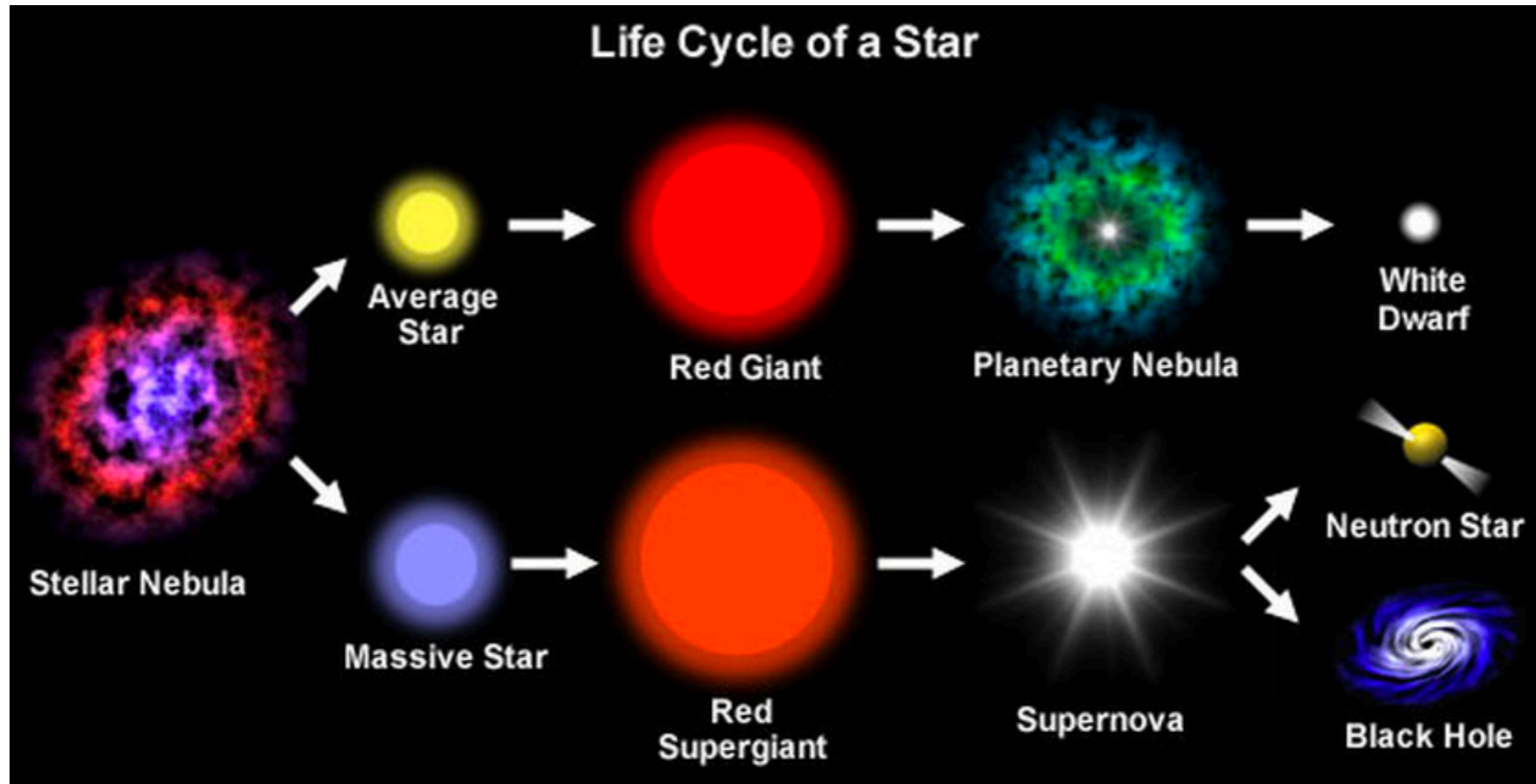


余談

- 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

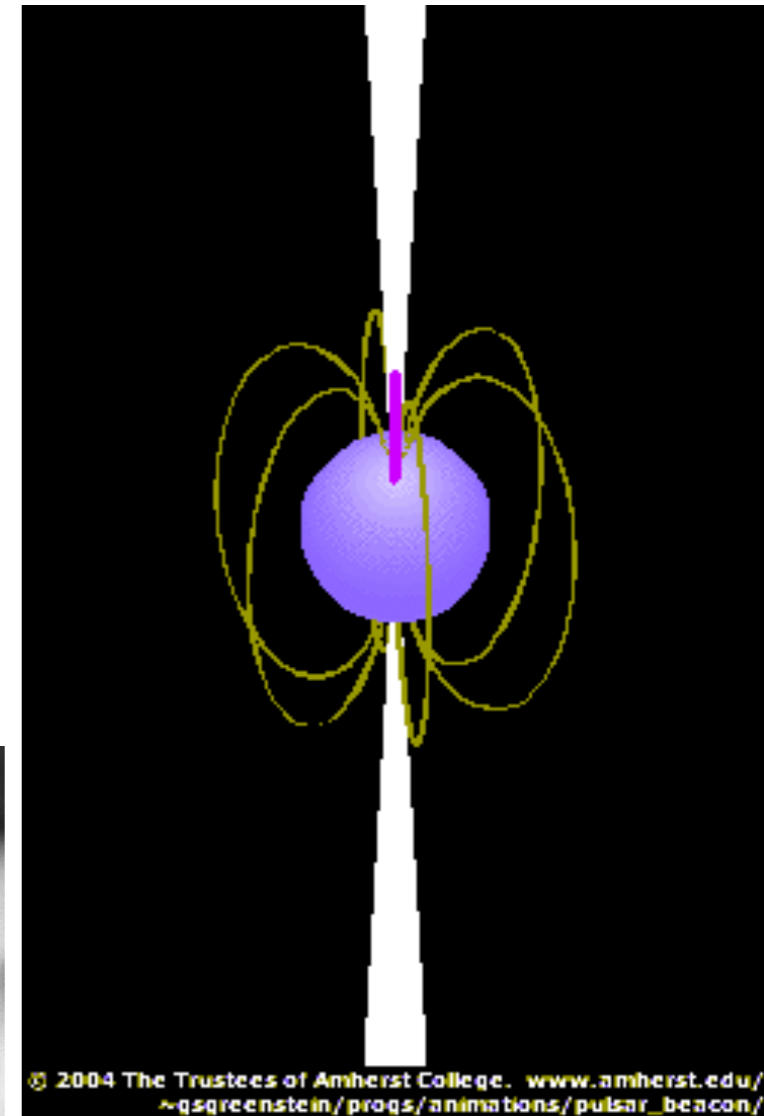


Knight '97

- 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

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



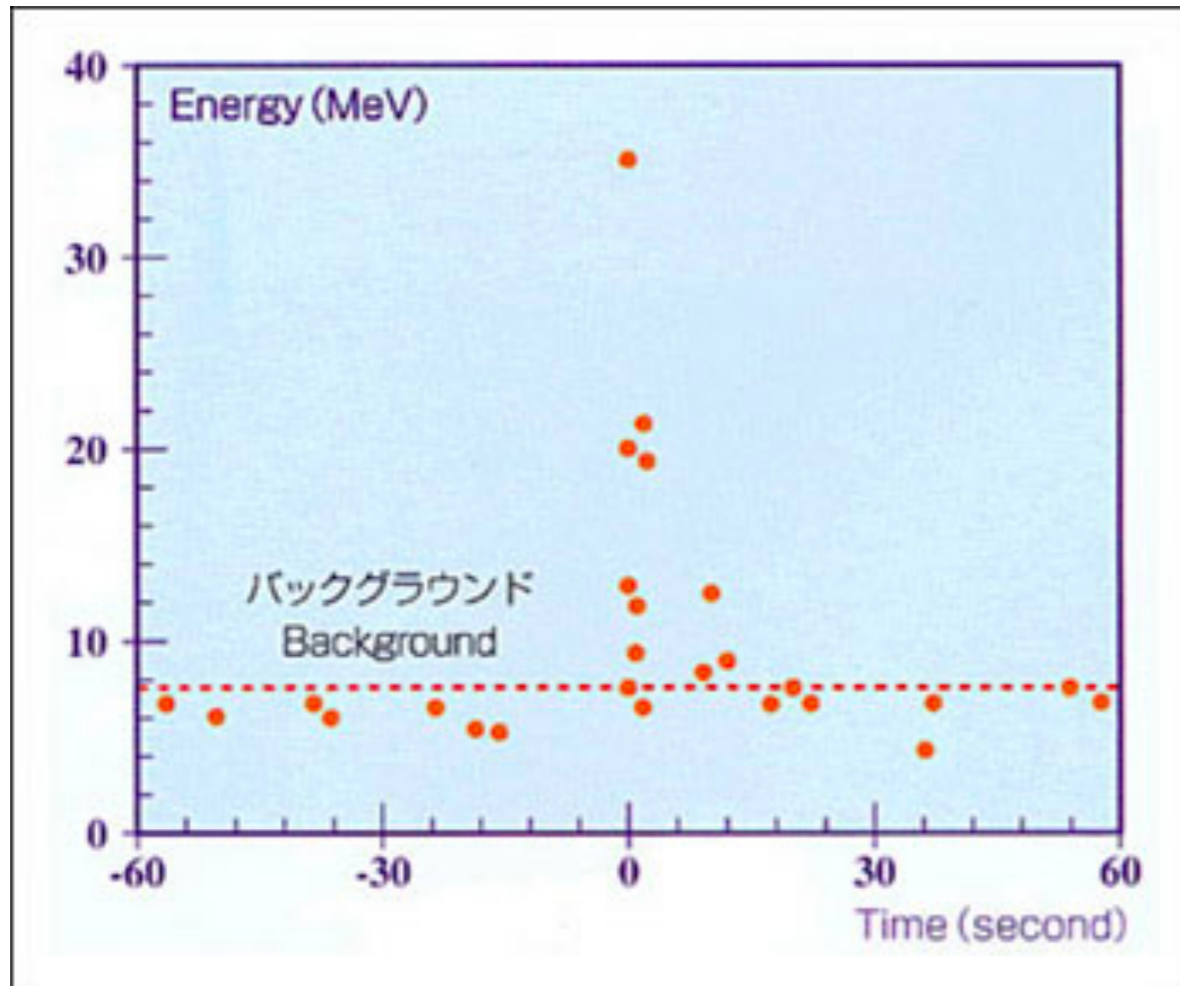
(重力崩壊型)超新星爆発

- 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
- $E \sim 10^{53}$ 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



超新星ニュートリノ

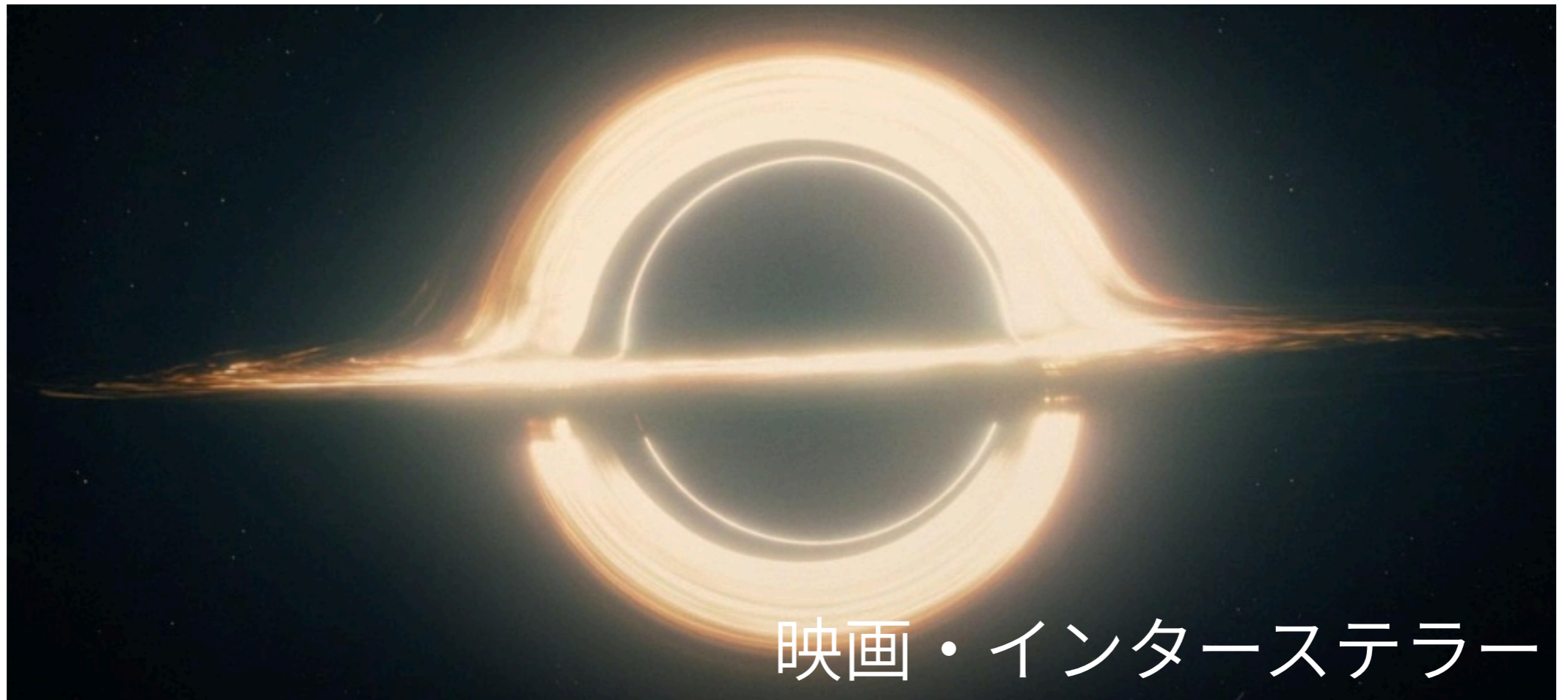


宇宙線研究所

- 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

ブラックスホールを見よう

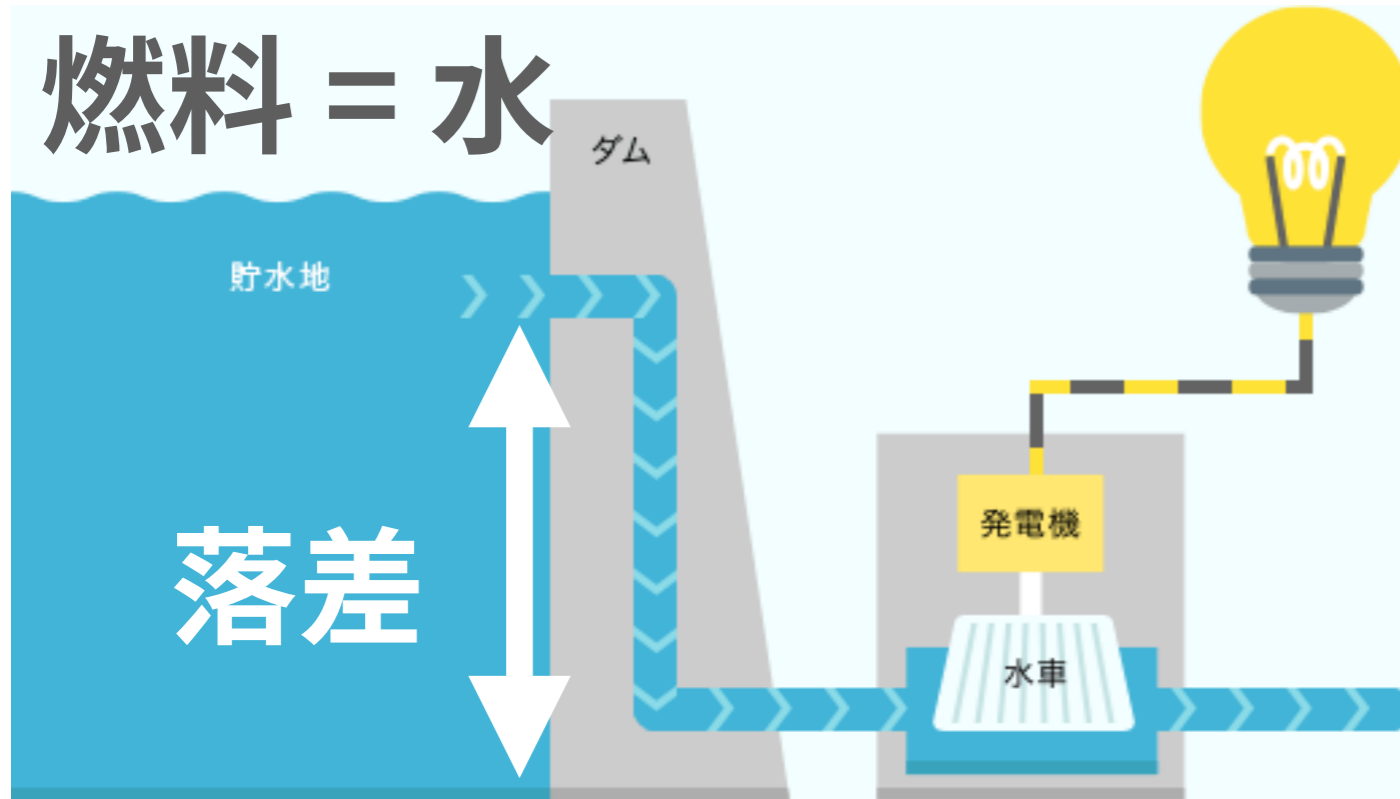
ブラックホール



- 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

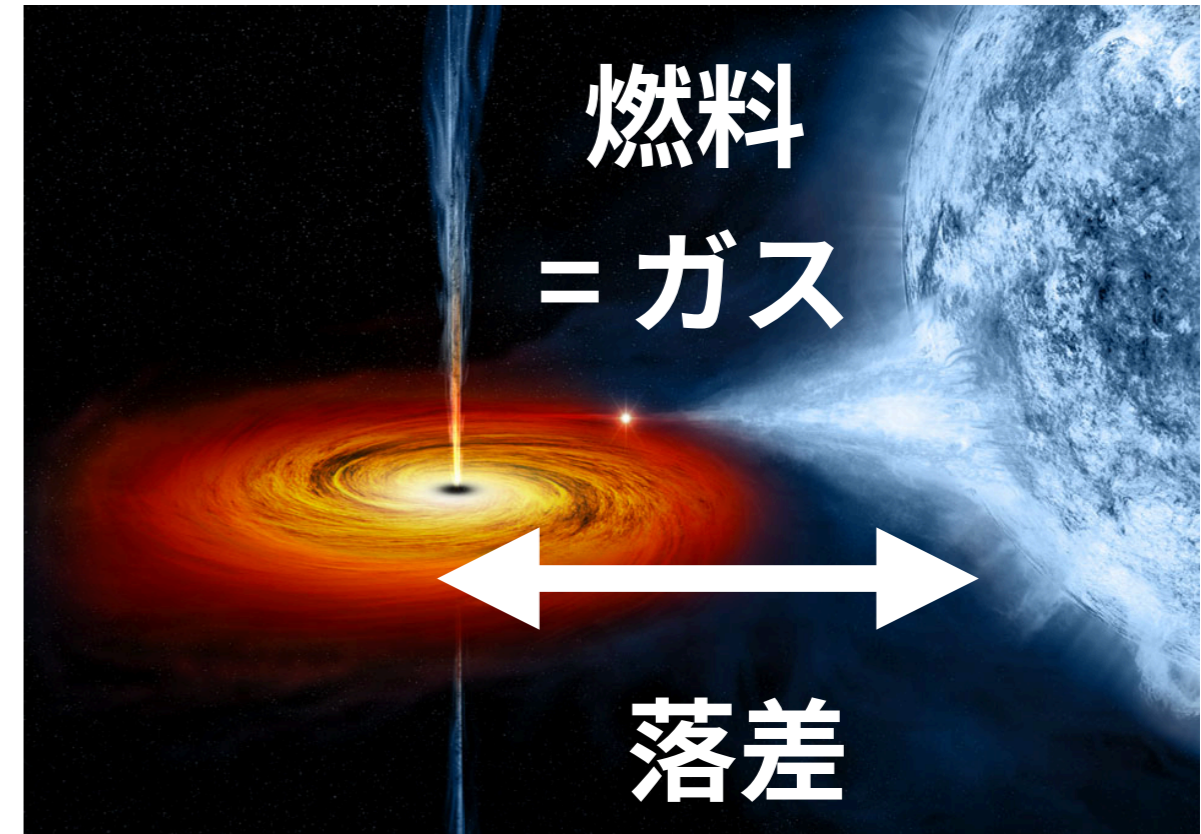
ブラックホールは光る？

水力発電



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

ブラックホール発電

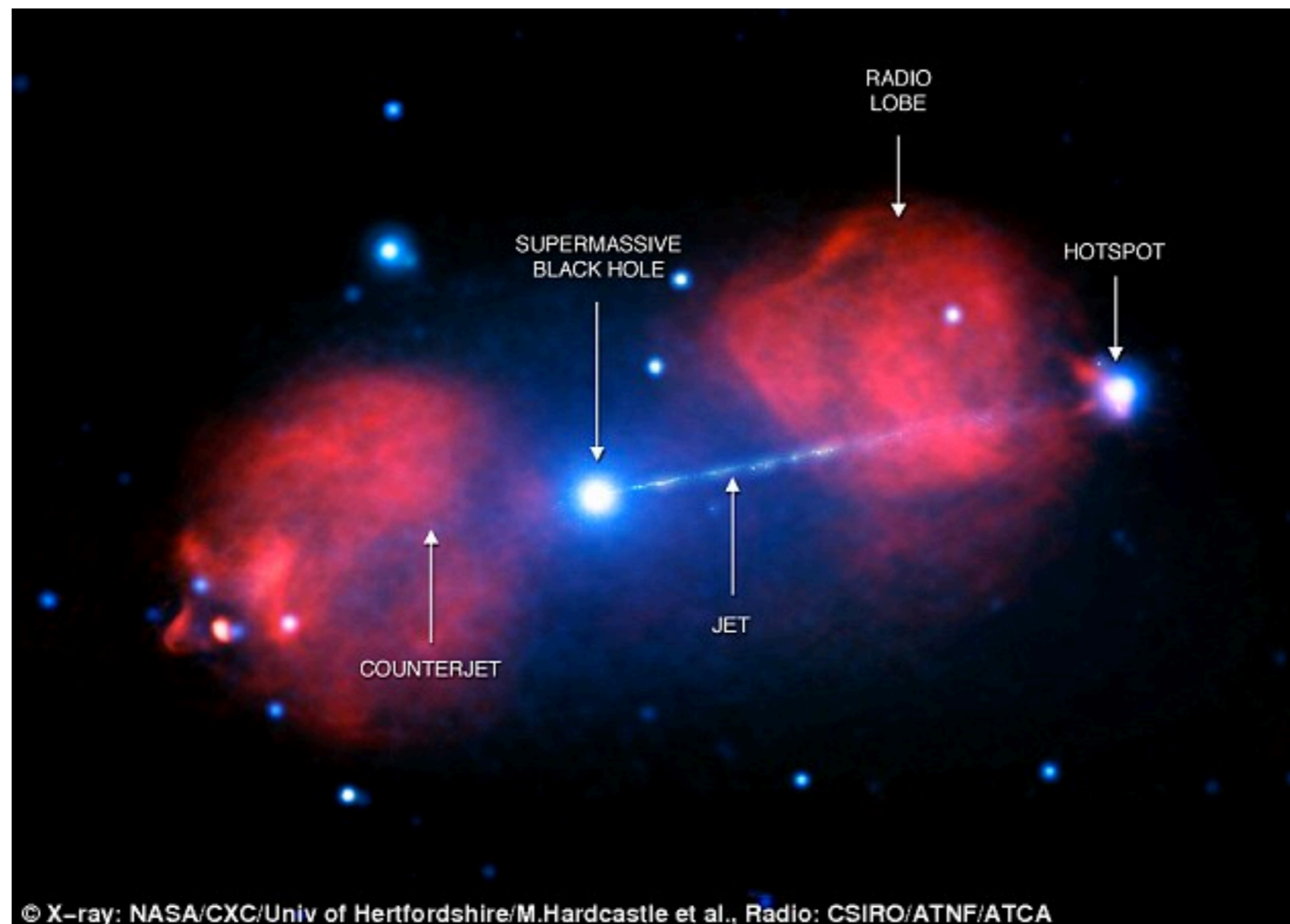


<https://apod.nasa.gov/apod/ap131120.html>

- 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

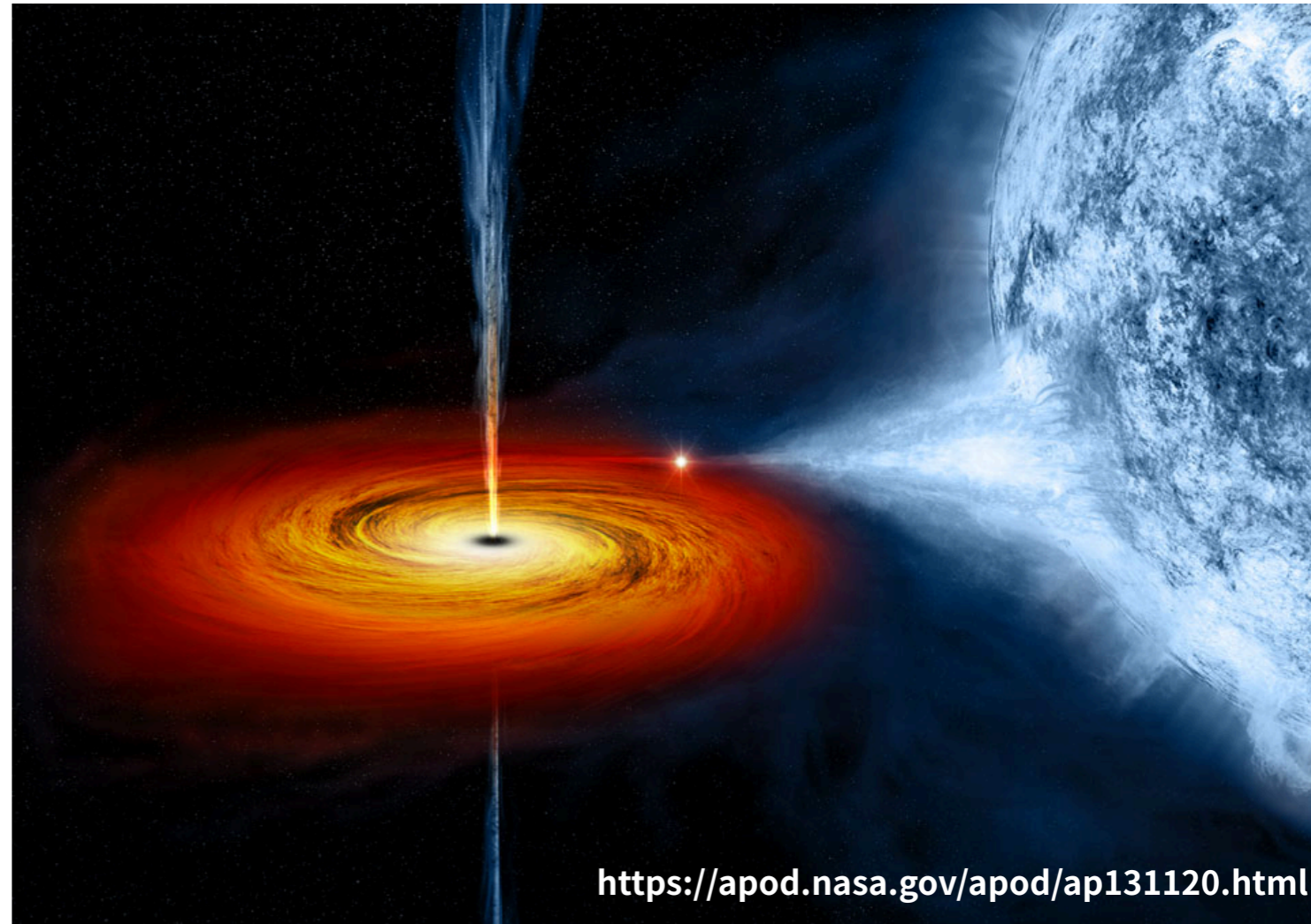


http://www.isas.jaxa.jp/j/japan_s_history

小田稔

近接連星系ブラックホール

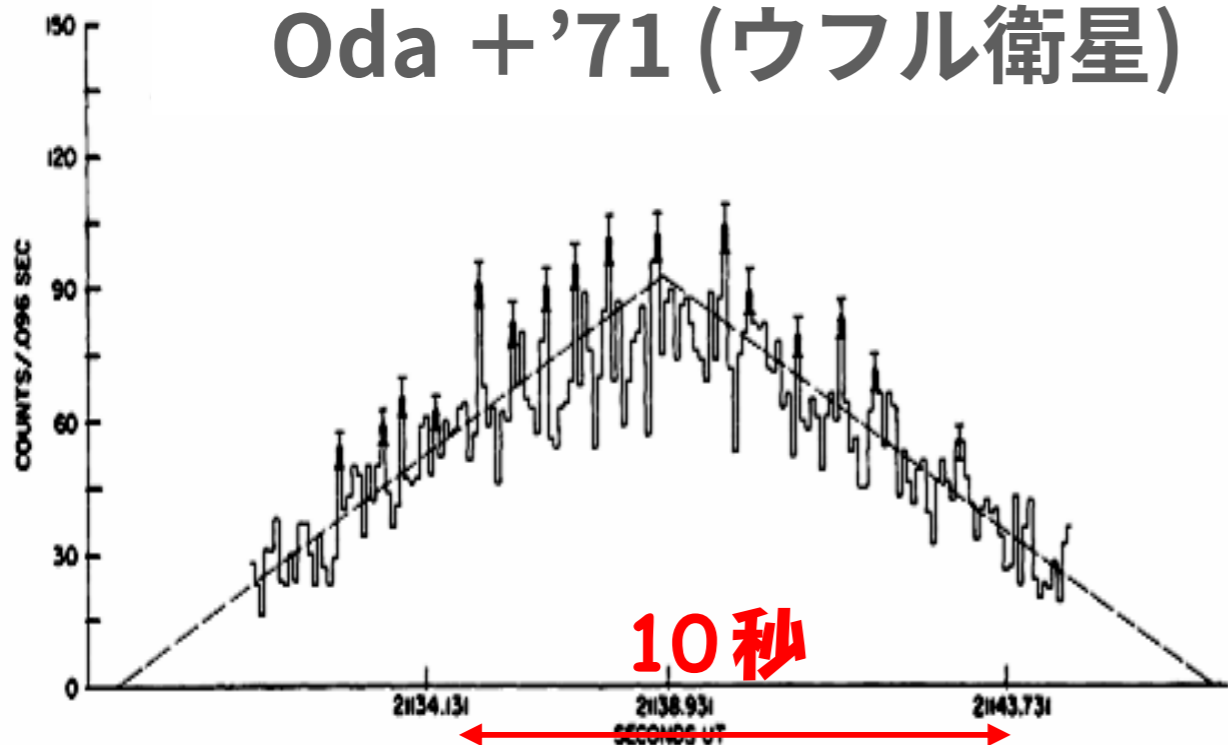
- ふつうの星とブラックホールからなる連星系
- お互いの回りをくるくる回る
- 周期~1日程度
- 距離~太陽半径の数倍程度



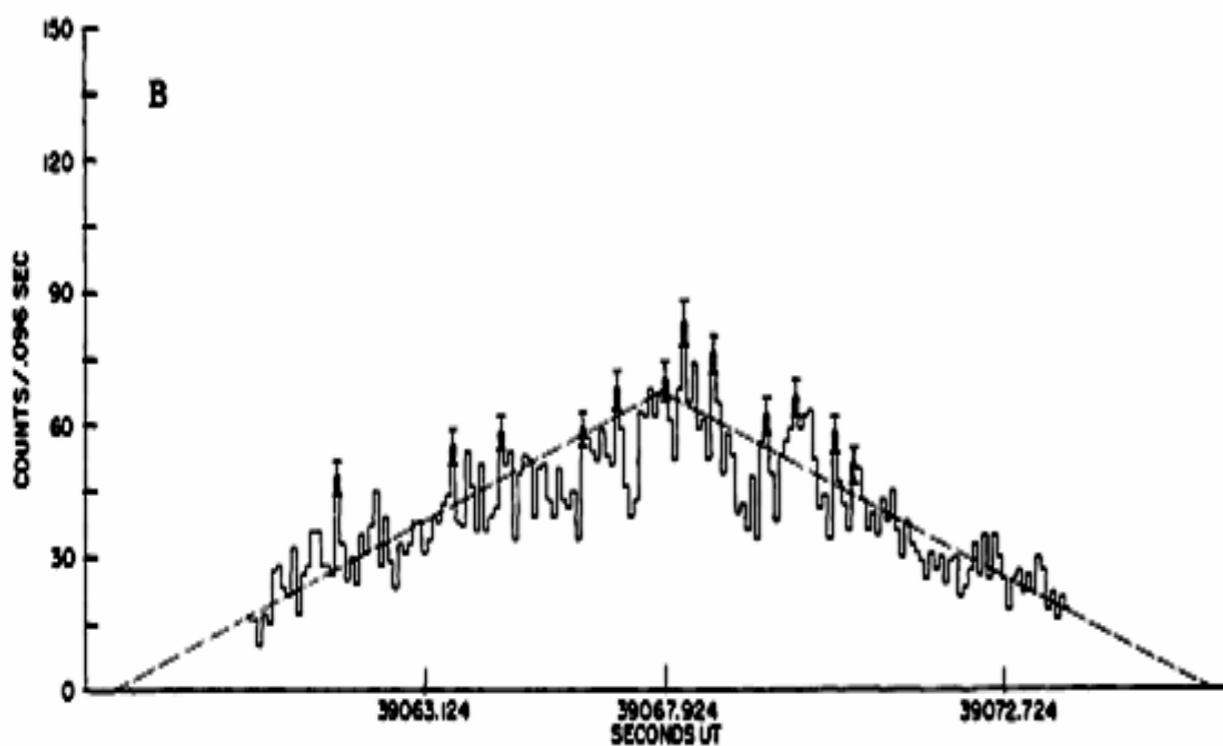
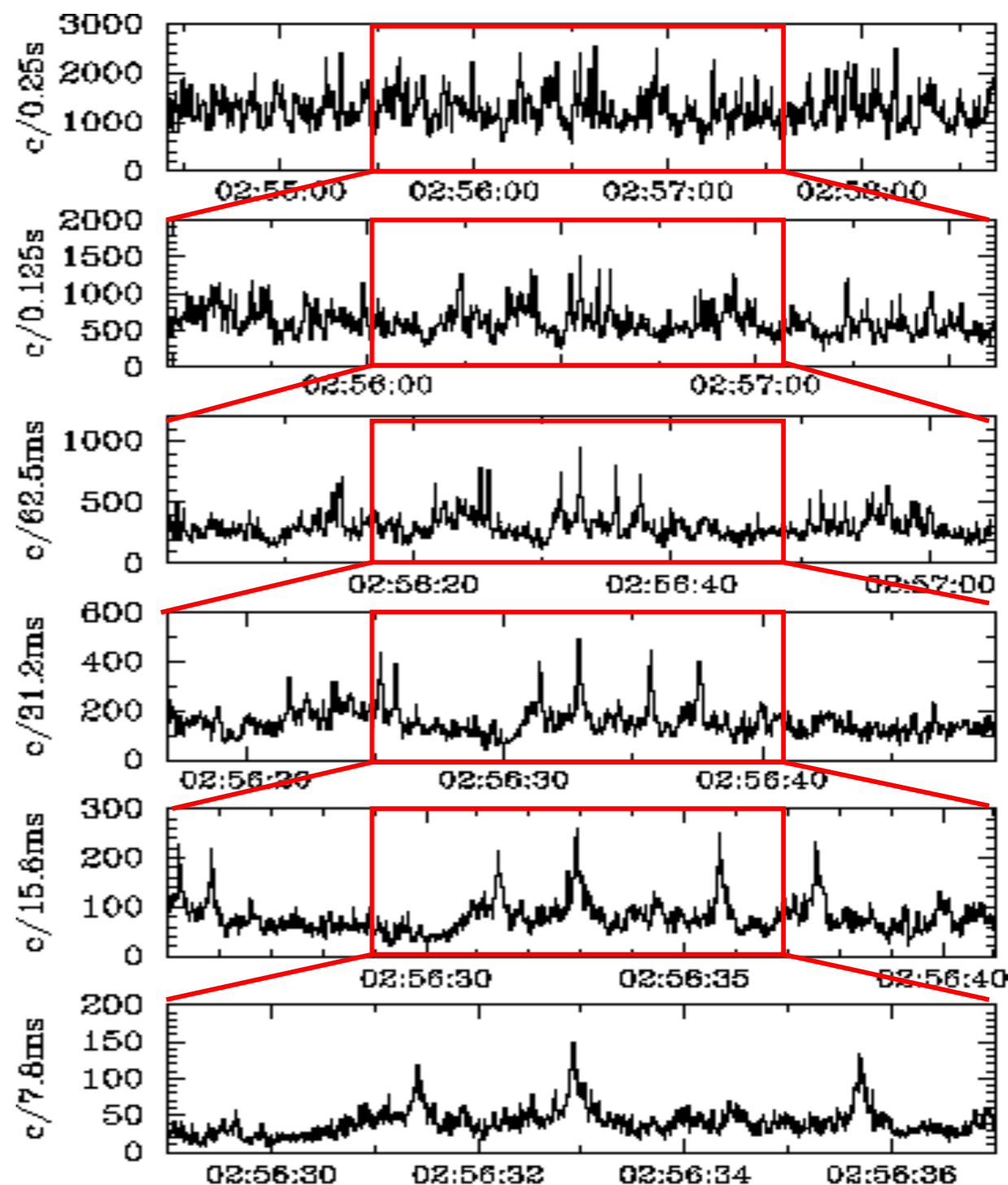
<https://apod.nasa.gov/apod/ap131120.html>

激しい時間変動

Oda +'71 (ウフル衛星)



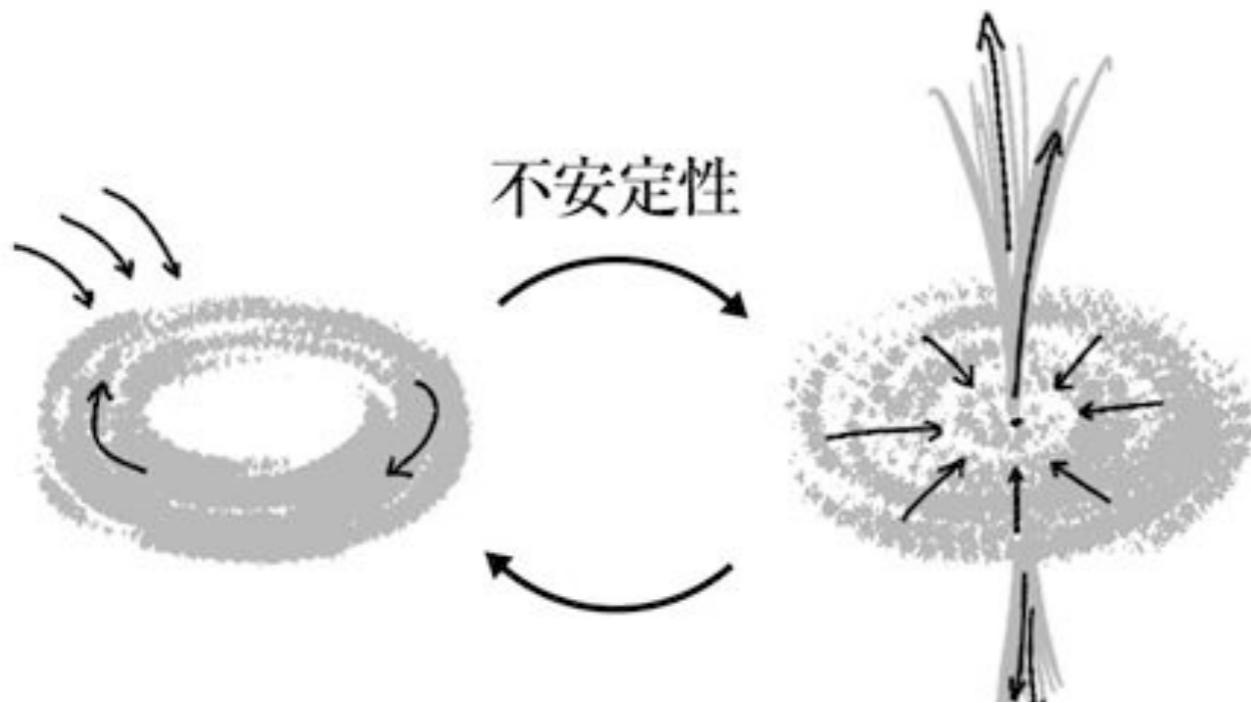
Negoro+'95 (ぎんが衛星)



← Line (00/05/9) 4秒 →

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)

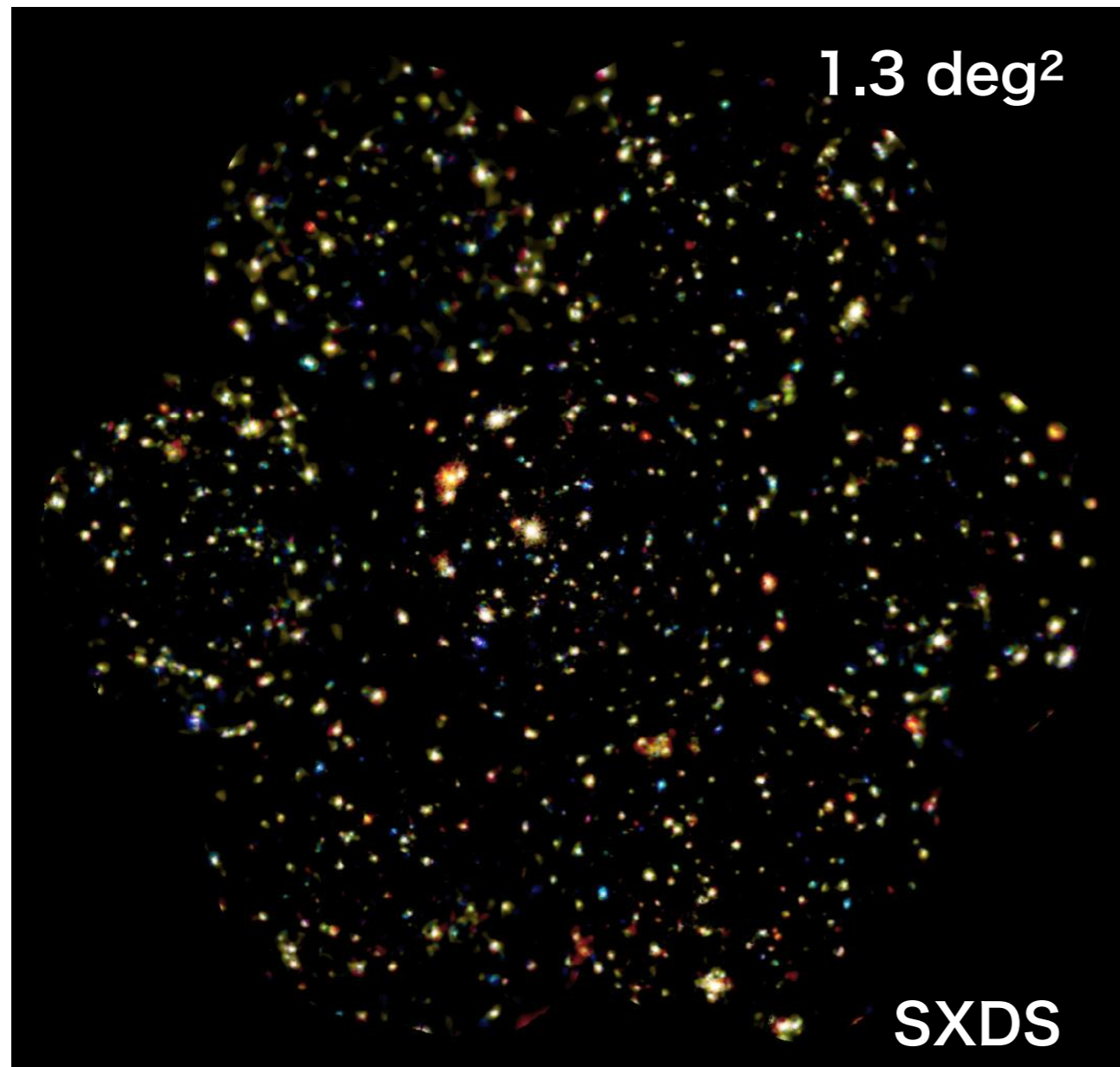
ガスを落として明るい状態(フレア期)



<https://www.youtube.com/watch?v=qKq20GG7m68>

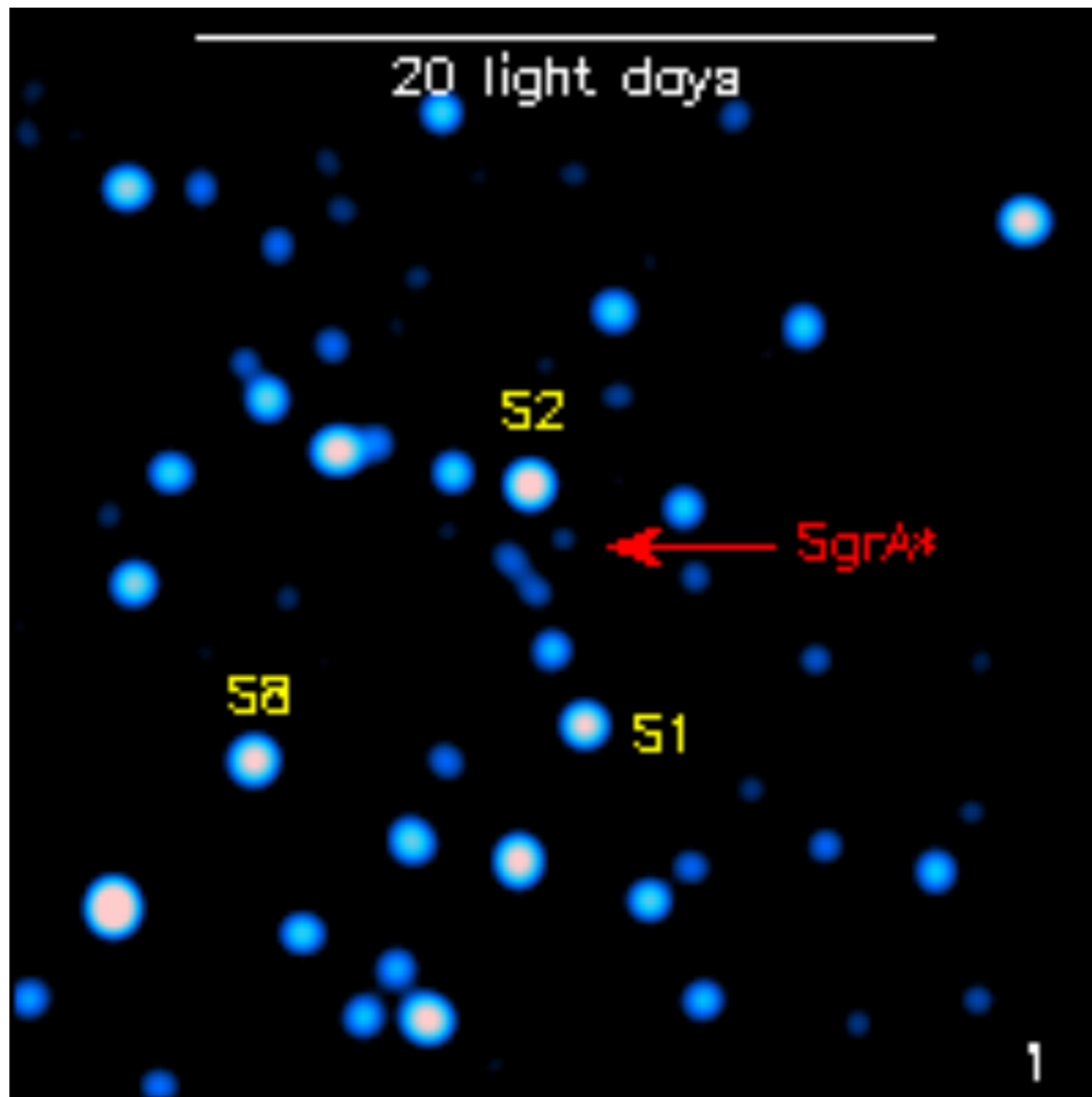
嶺重慎 ブラックホール天文学入門

X線で見えるブラックホール



- 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

赤外線で見えるブラックホール

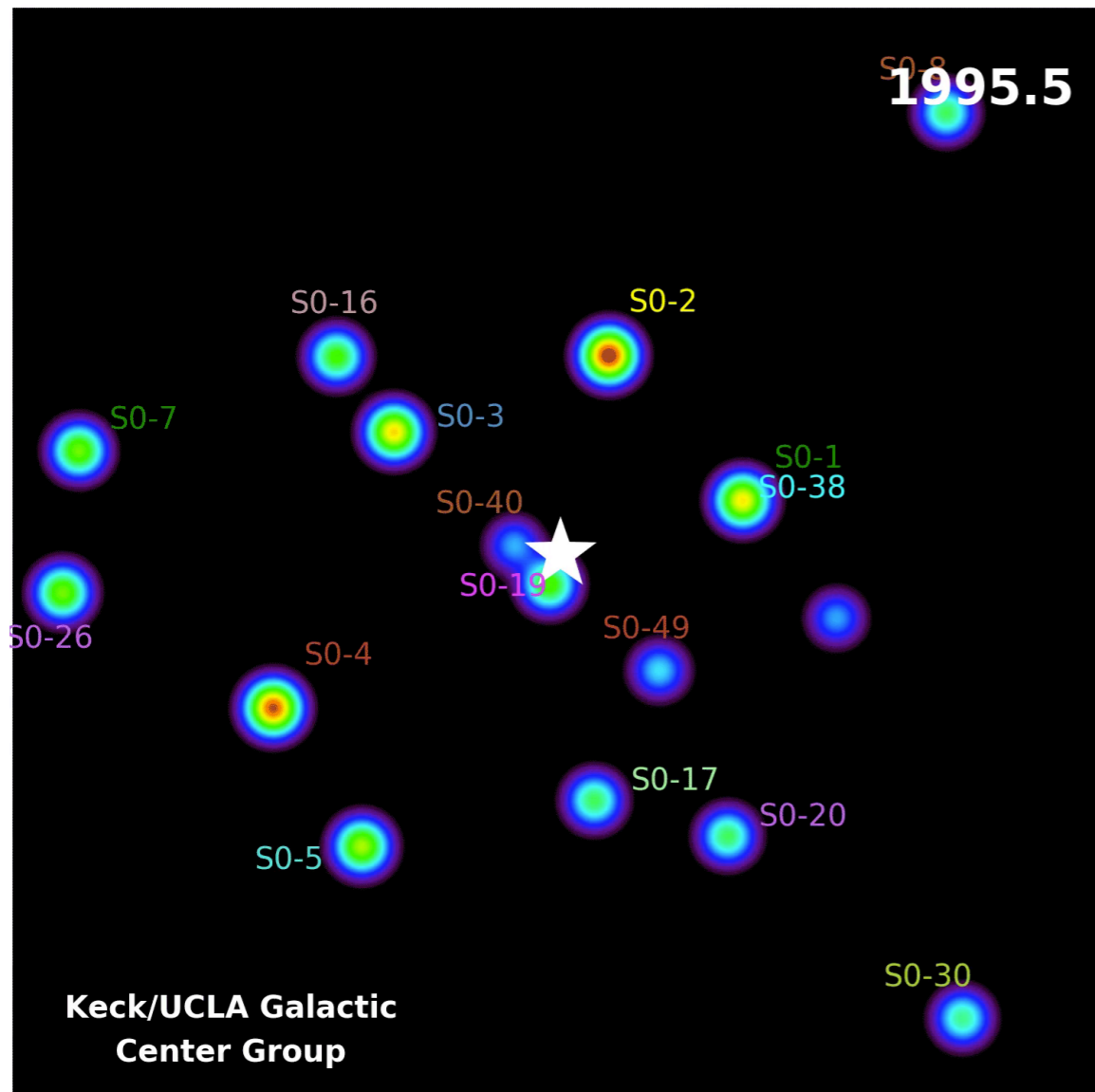


- 天の川銀河中心領域の近赤外線画像
- 中心で明滅してるのがブラックホール
- ~1 hr の動画

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

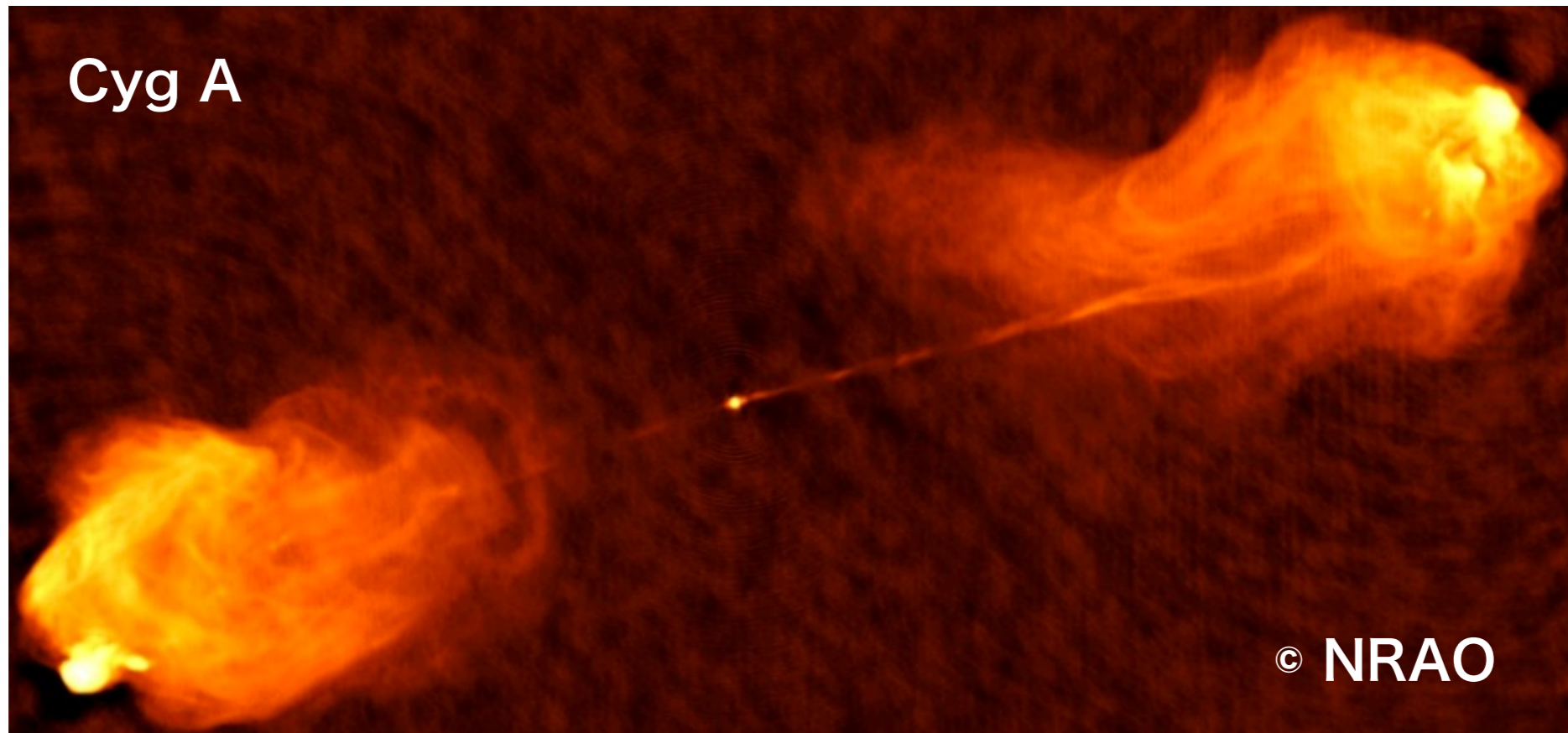
ブラックホール周囲の運動で見る

天の川銀河中心の巨大ブラックホール 周辺の星の運動



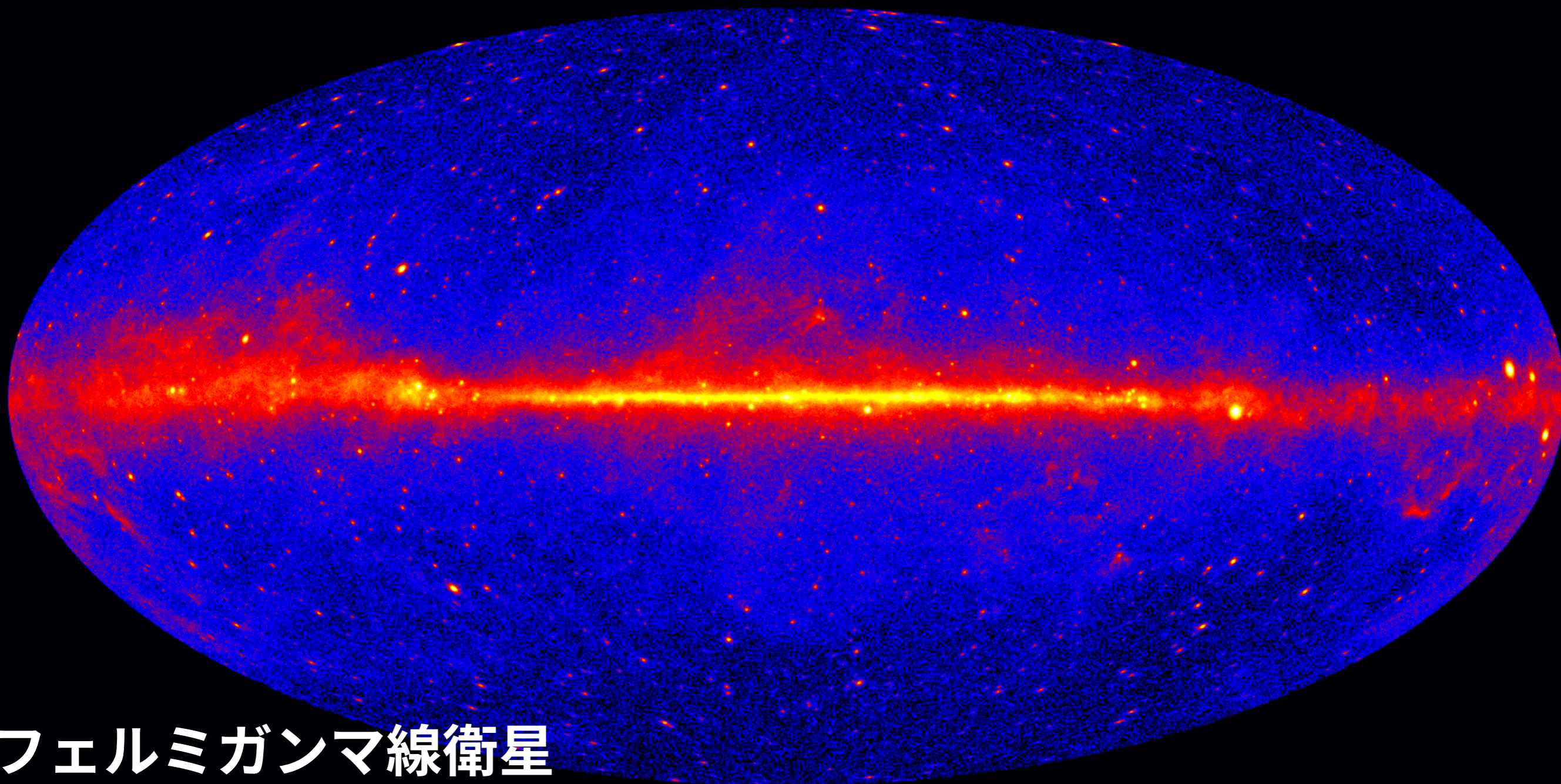
- ブラックホールが作る重力が天体の運動に影響
- 銀河の中心には、百万 - 百億太陽質量のブラックホールが存在
- 天の川銀河では、
 - 4百万太陽質量のブラックホール

ブラックホールから噴出するものを見る



- 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)

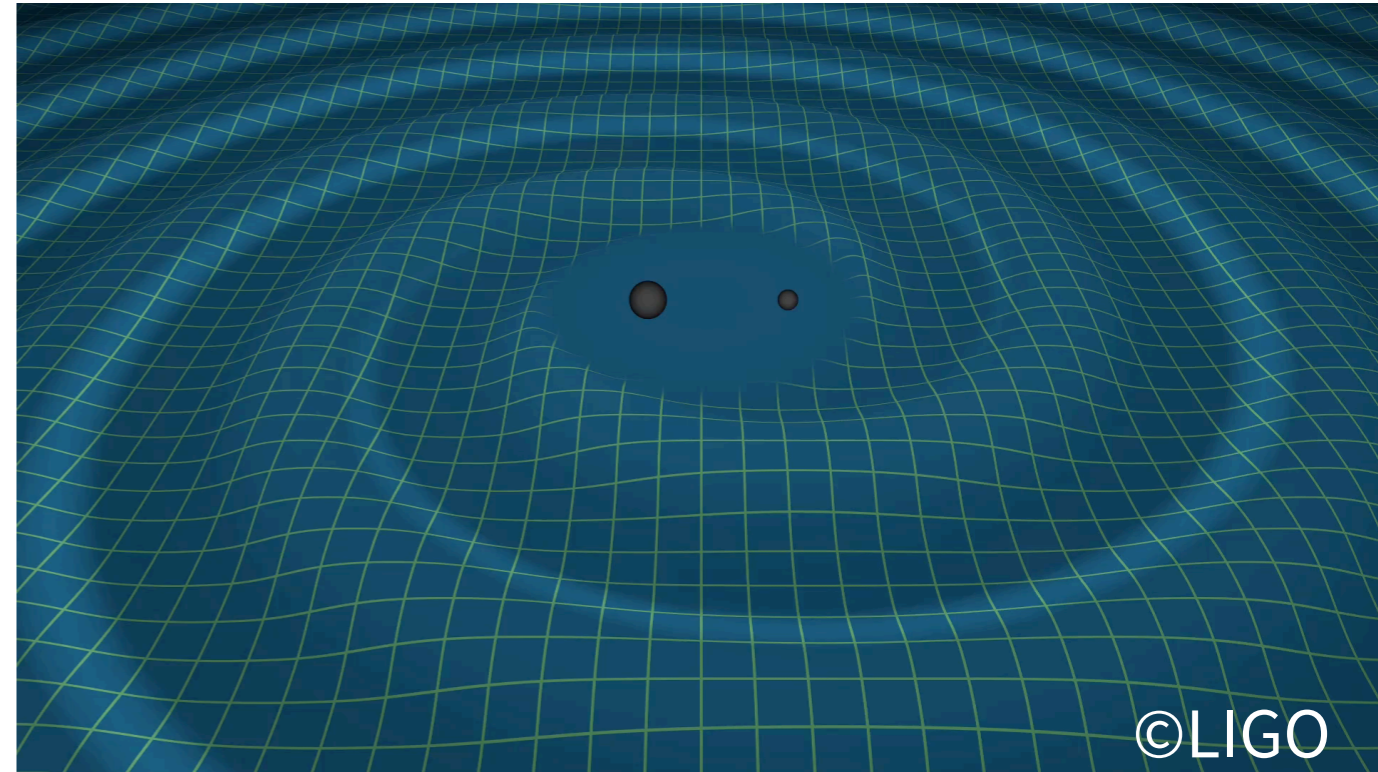
ガンマ線で見えるブラックホール



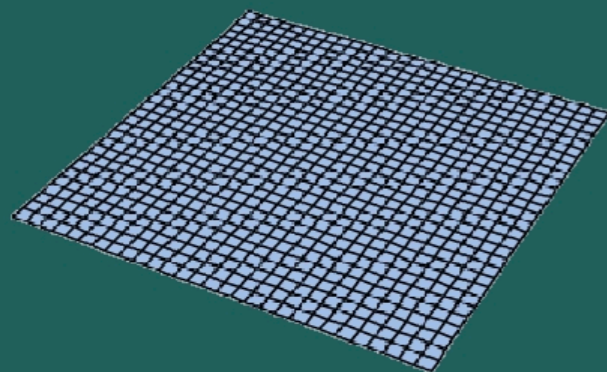
フェルミガンマ線衛星

重力波

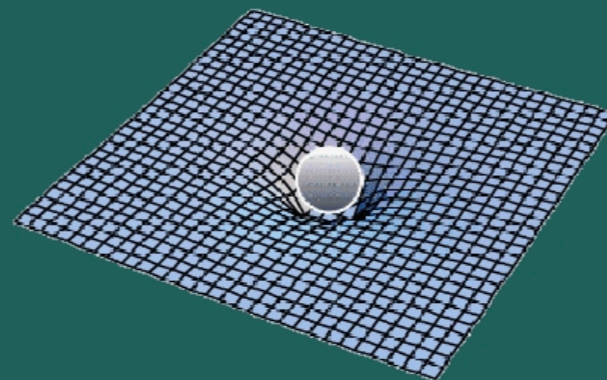
- 電荷が加速度運動⇒電磁波
- 質量が加速度運動⇒重力波
 - 一般相対性理論に基づいた
アインシュタインの予言
- 中性子星-中性子星などの合体が強力な
重力波源



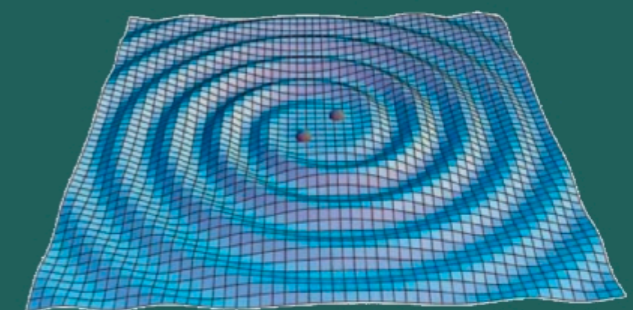
平坦な空間



星の重さで歪んだ空間

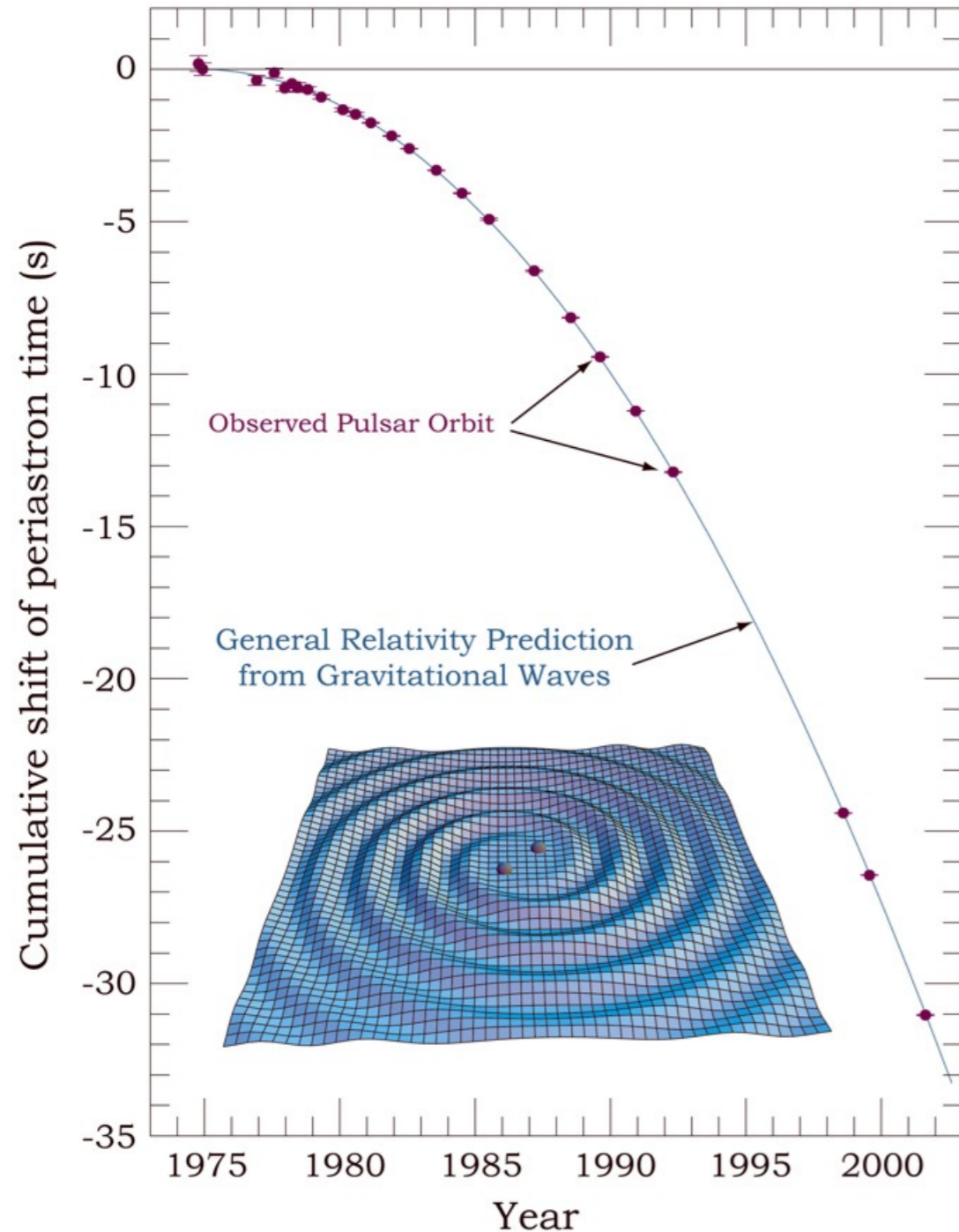


重い星が運動して重力波発生
(例：連星中性子星)



©KAGRA

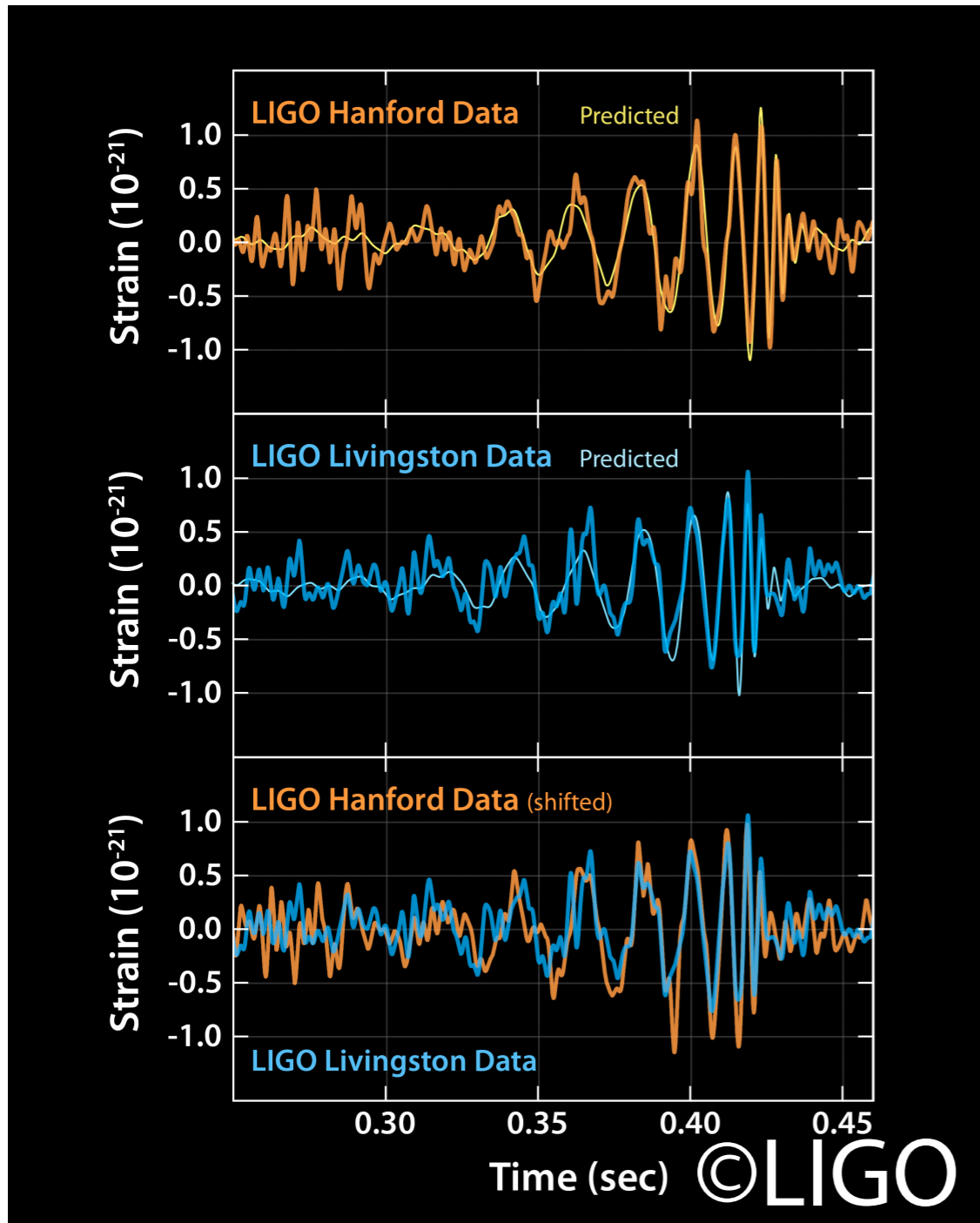
重力波の間接観測



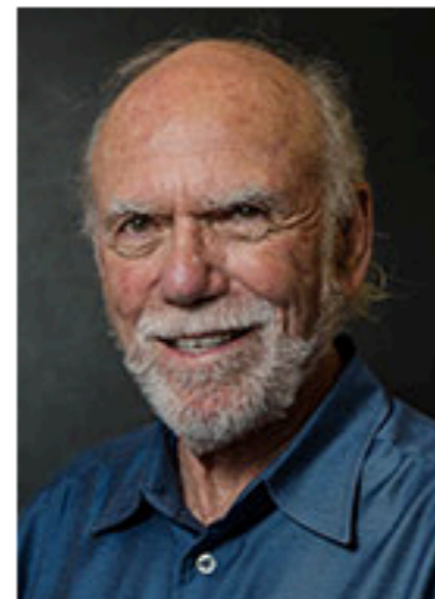
- 連星パルサー PSR B1913+16
- 重力波放出によって公転周期が変化
- ハルス、テイラー 1993 ノーベル賞



重力波で見るブラックホール

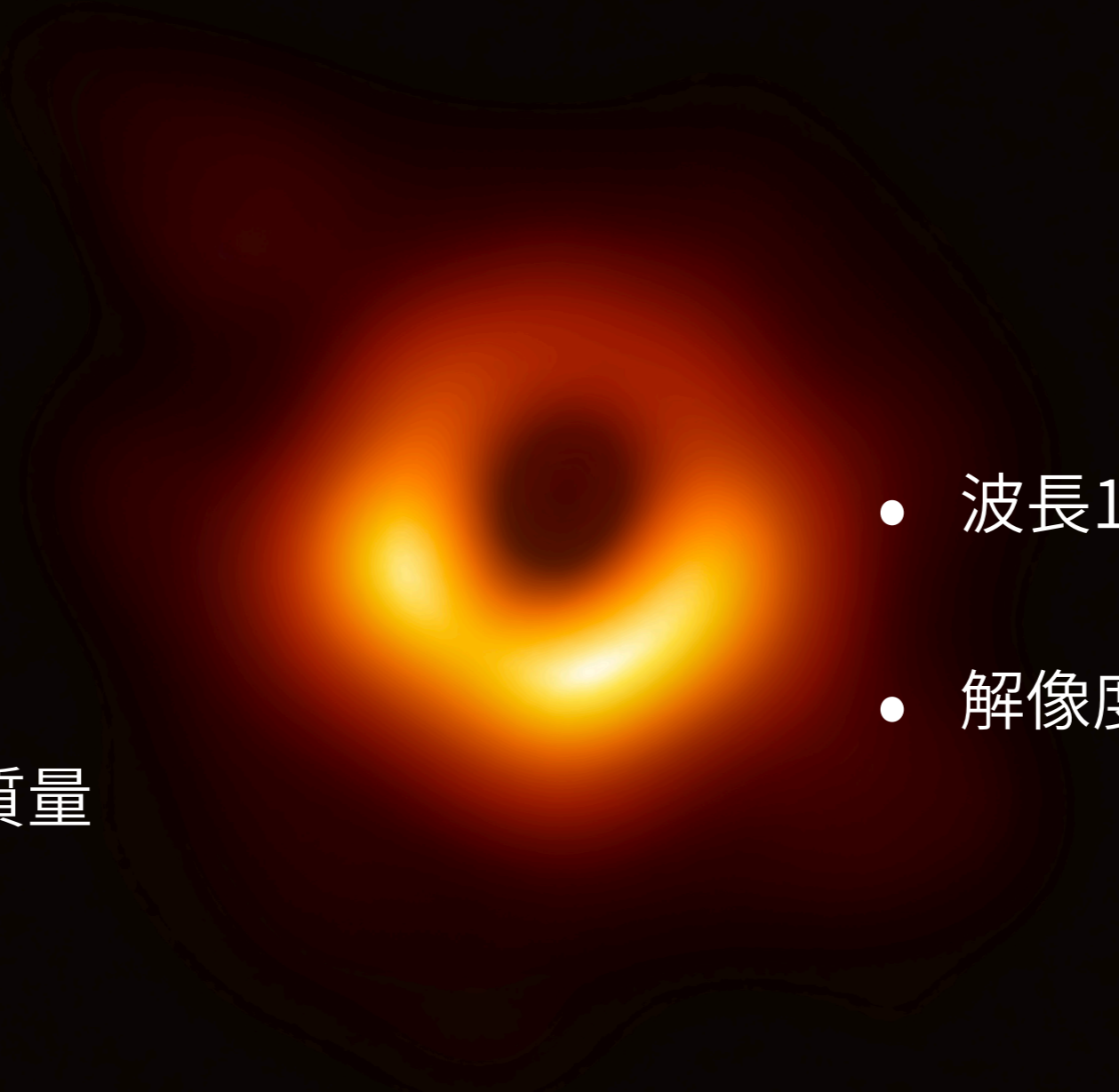


- 2015年ついに重力波直接観測
 - GW150914、BH-BH 連星
- ワイス、バリッシュ、ソーン
2017 ノーベル賞



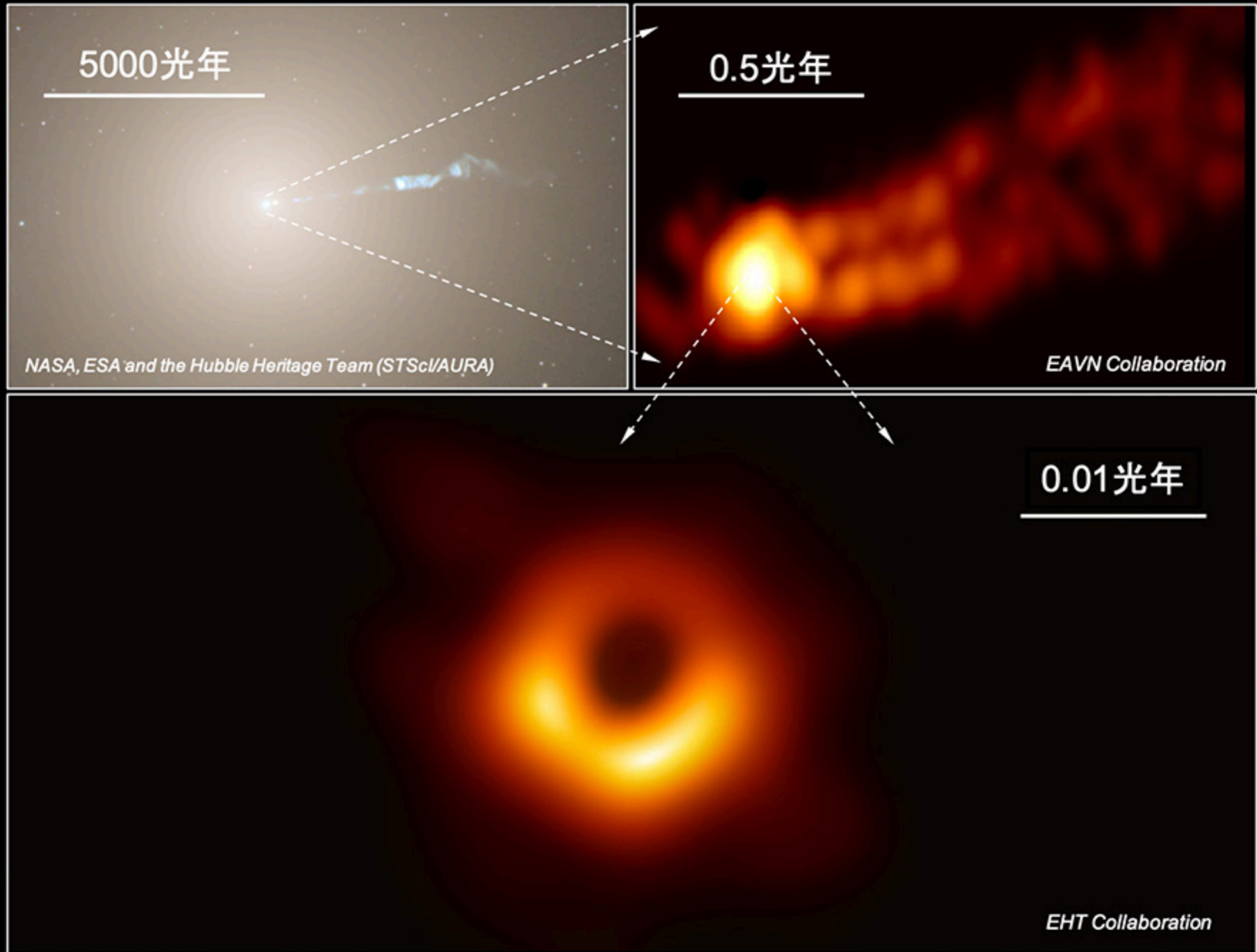
ブラックホールの写真？

- M87 銀河
- 5500万光年
- 太陽の65億倍の質量



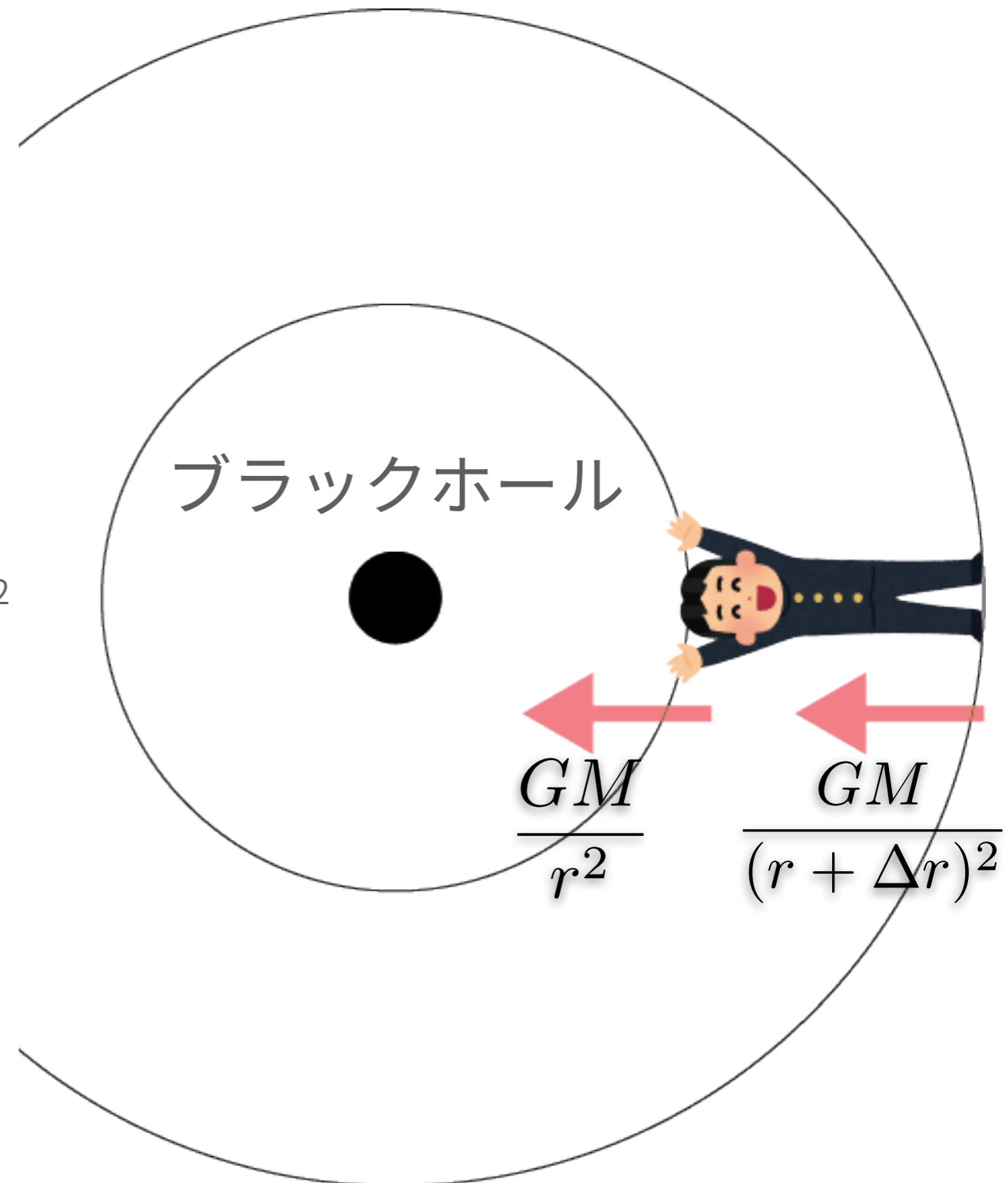
- 波長1.3 mm の電波
- 解像度：20 マイクロ秒角

M87

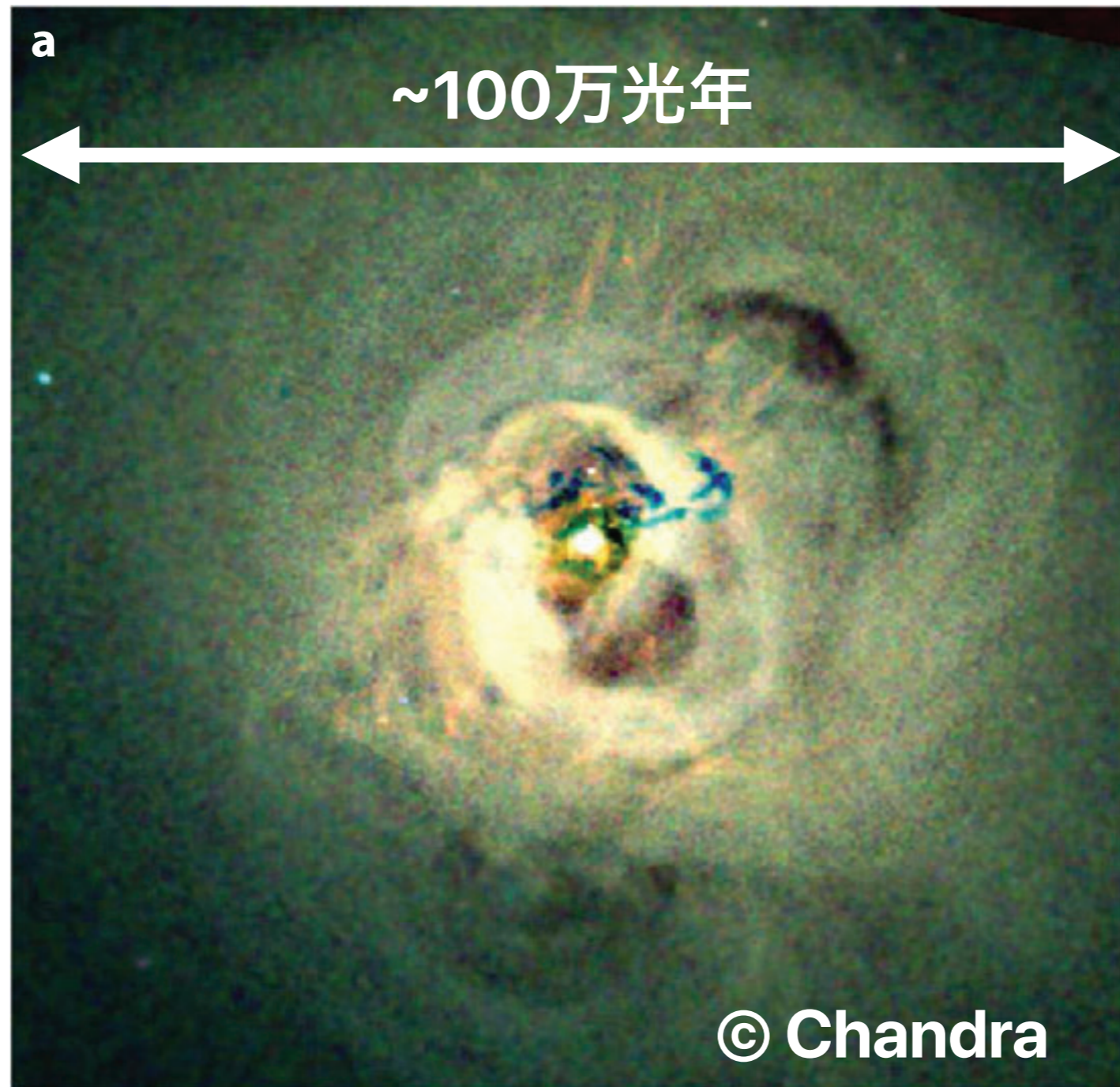


ブラックホールに落ち込むと？

- 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 $>10^4 G$
- 巨大ブラックホールの場合：潮汐力 $\sim 0.00005 G$



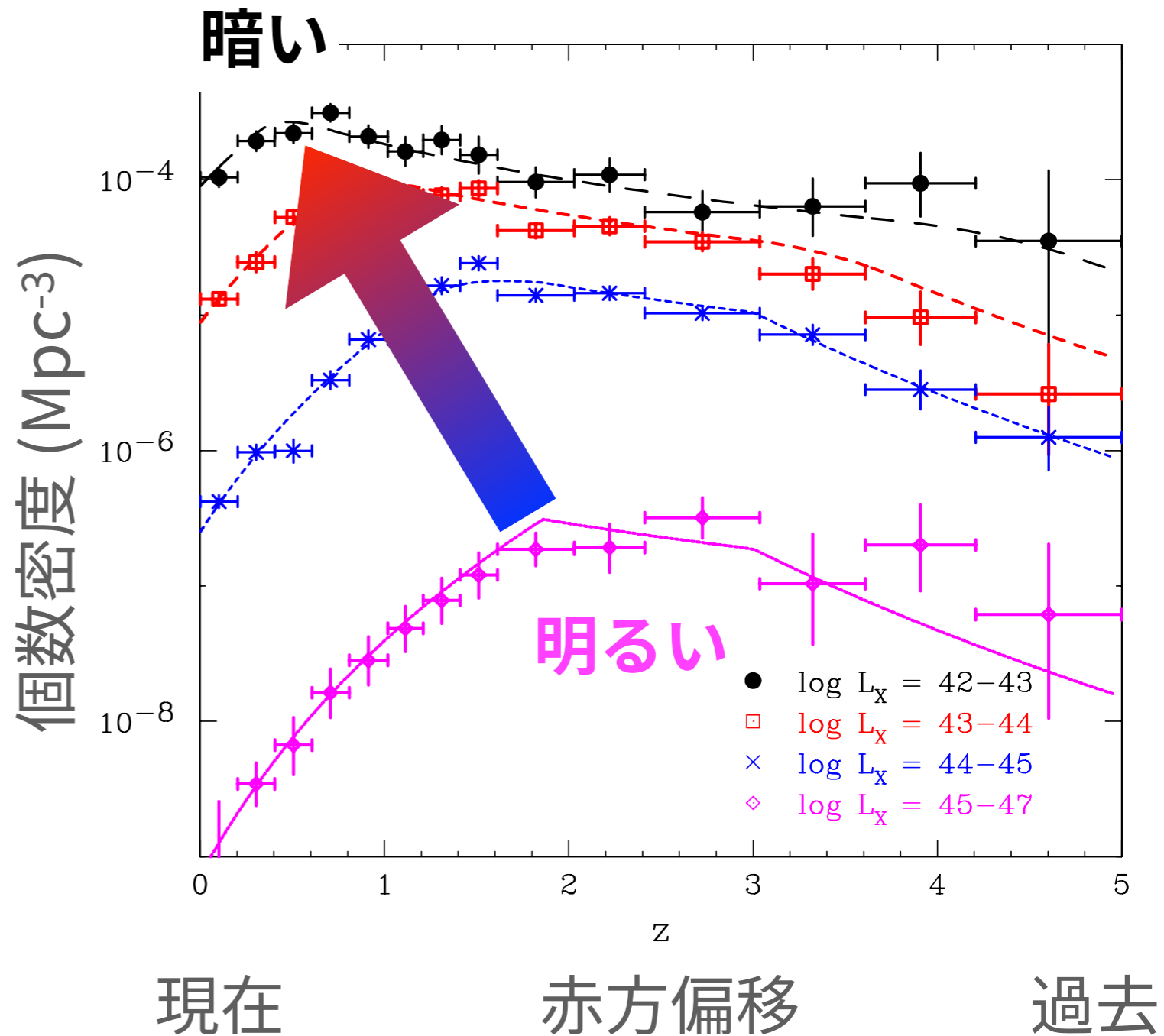
ブラックホールと宇宙



- ブラックホールの活動が周囲のガスを押しよける

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」