

# 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)

# 本講義の内容(4/11, 18, 25)

- 4/11
  - 宇宙物理とは
- 4/18
  - 宇宙の基本構成要素
- 4/25
  - ブラックホールの役割 +  $\alpha$
- 質問などあれば授業中いつでも質問してください。

# 宇宙物理とは

# 宇宙

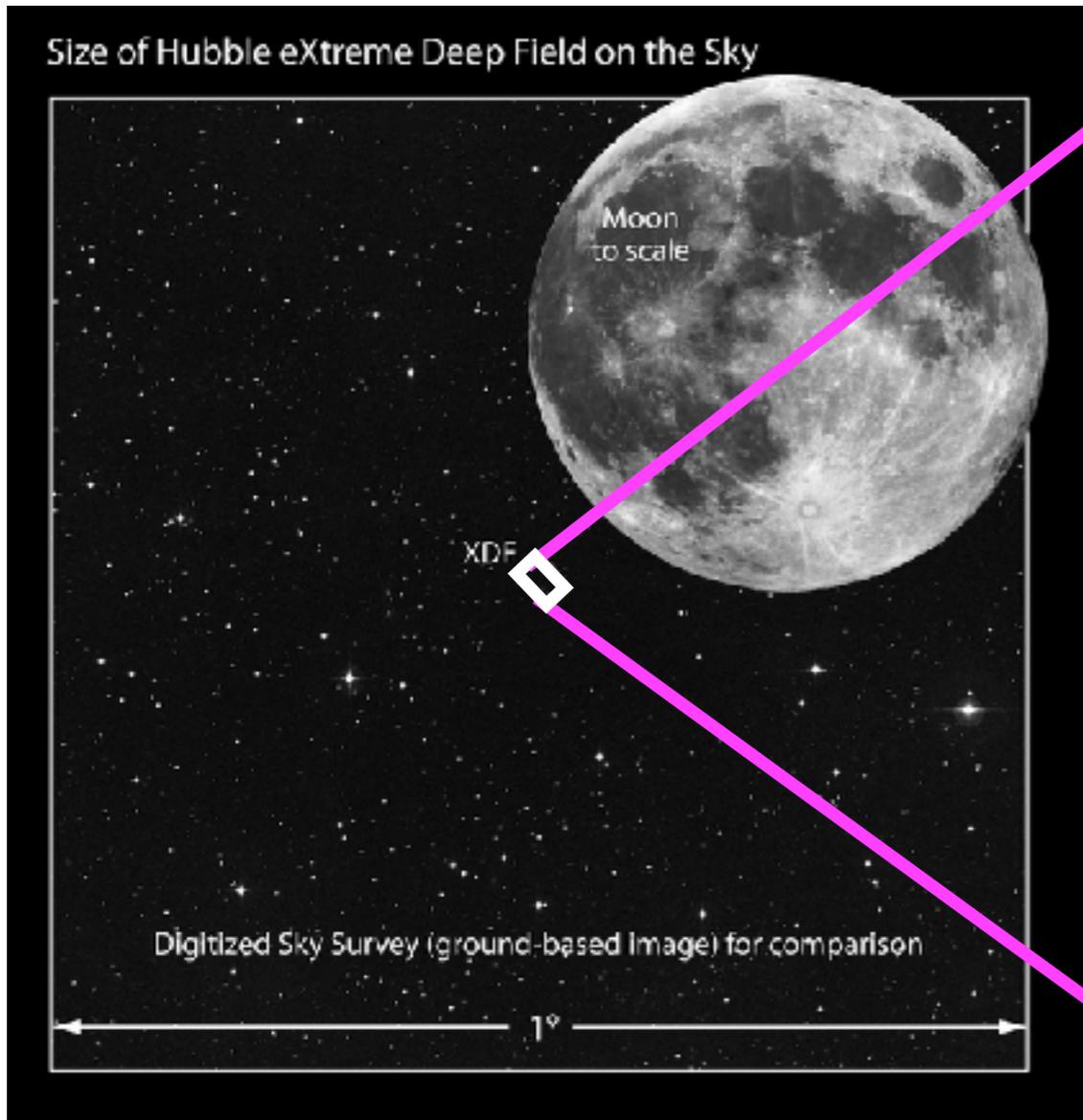


Illustration Credit: NASA; ESA; and Z. Levay, STScI; Moon Image  
Credit: T. Rector; I. Dell'Antonio/NOAO/AURA/NSF



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

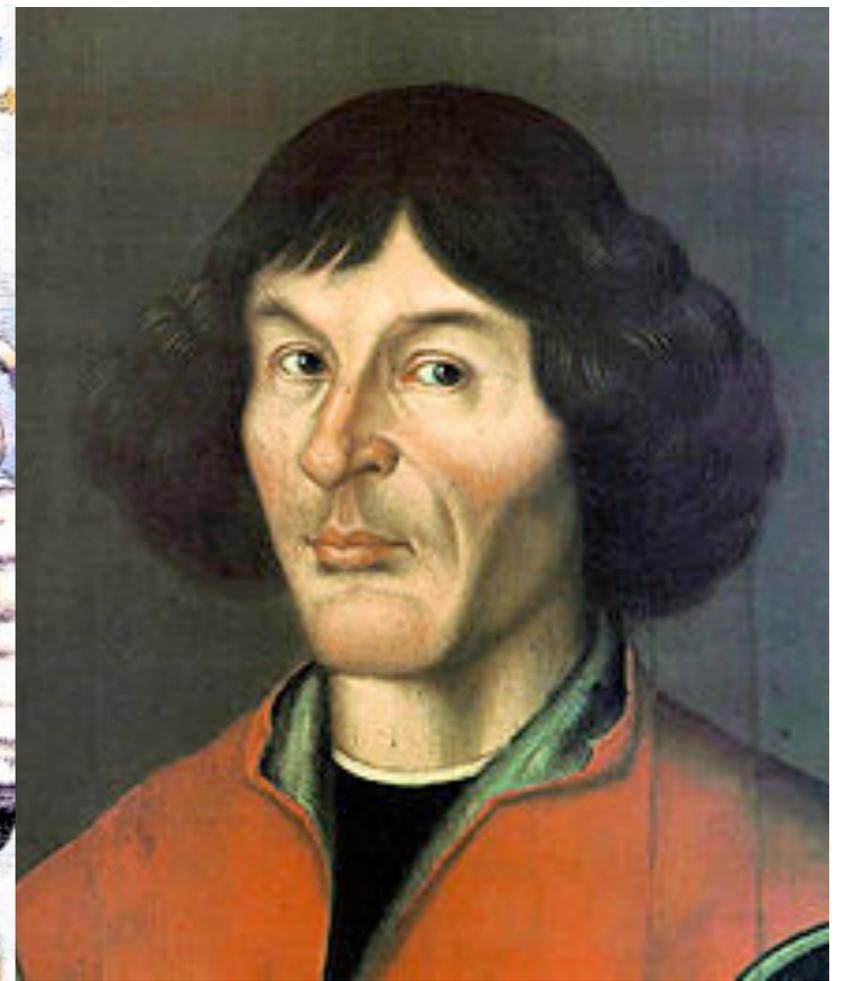
# 哲学から天文学へ



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

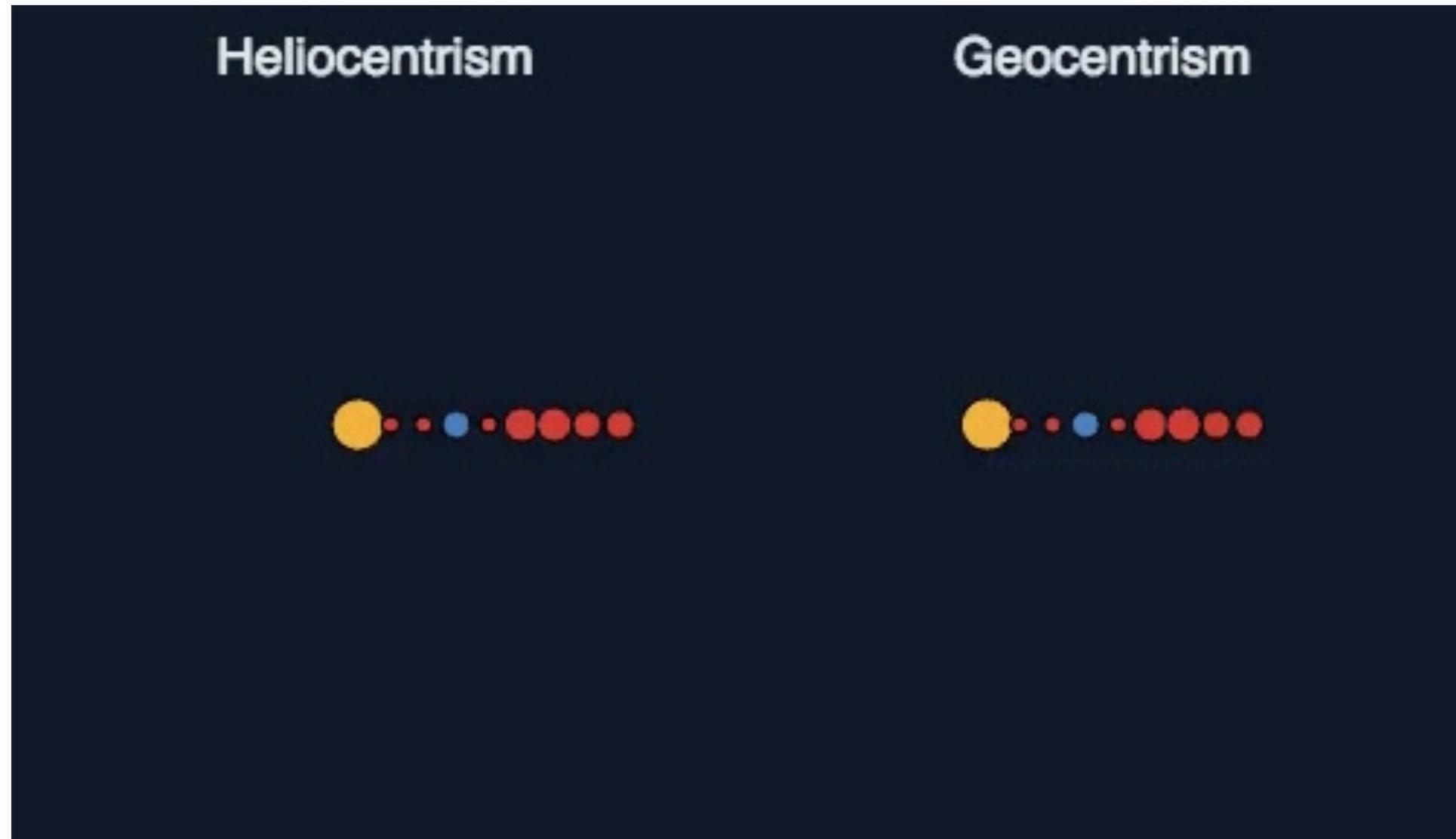


コペルニクス  
(1473-1543)  
地動説  
※太陽中心説はアリストタルコス(BC310-BC230)が最初

# 地動説 vs. 天動説

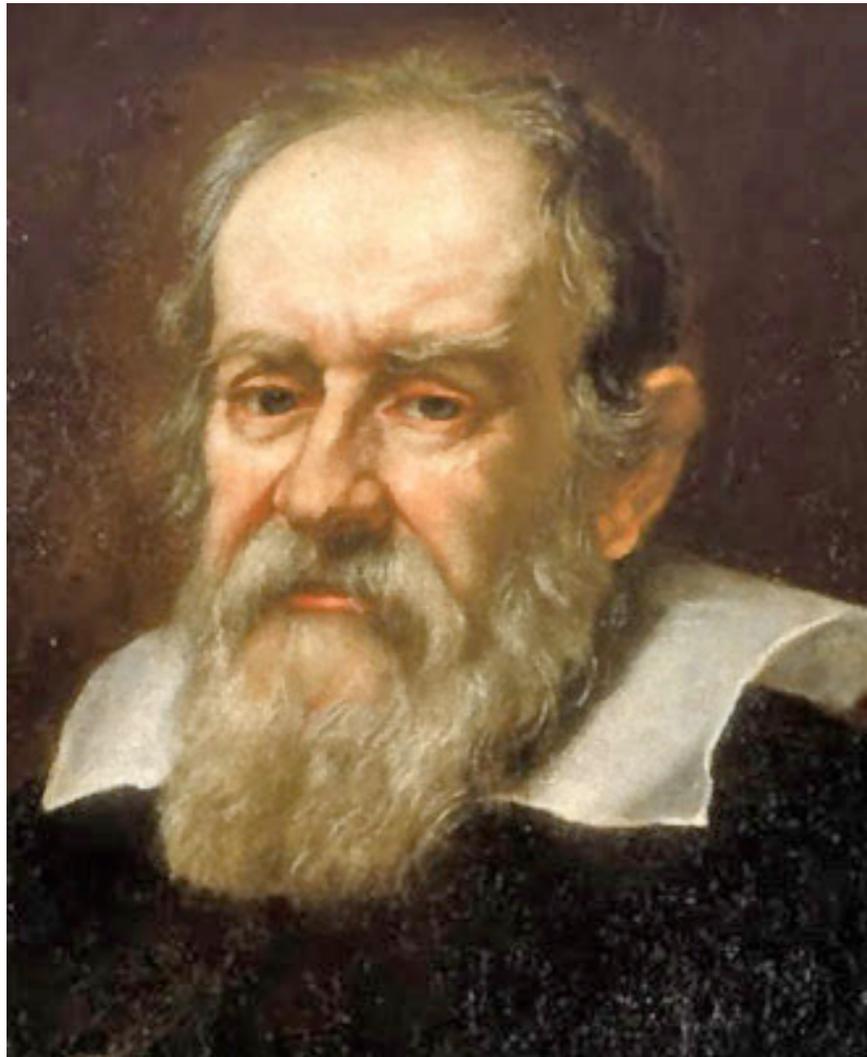
地動説

天動説



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

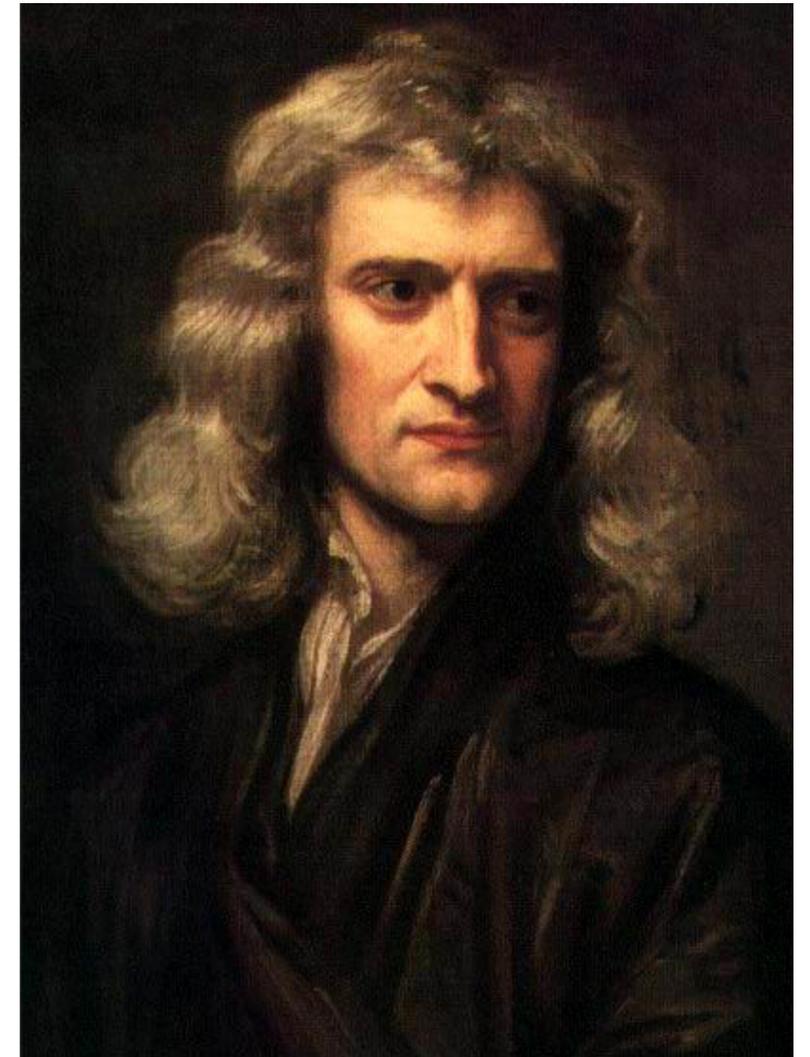
# 天文学から物理学へ



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

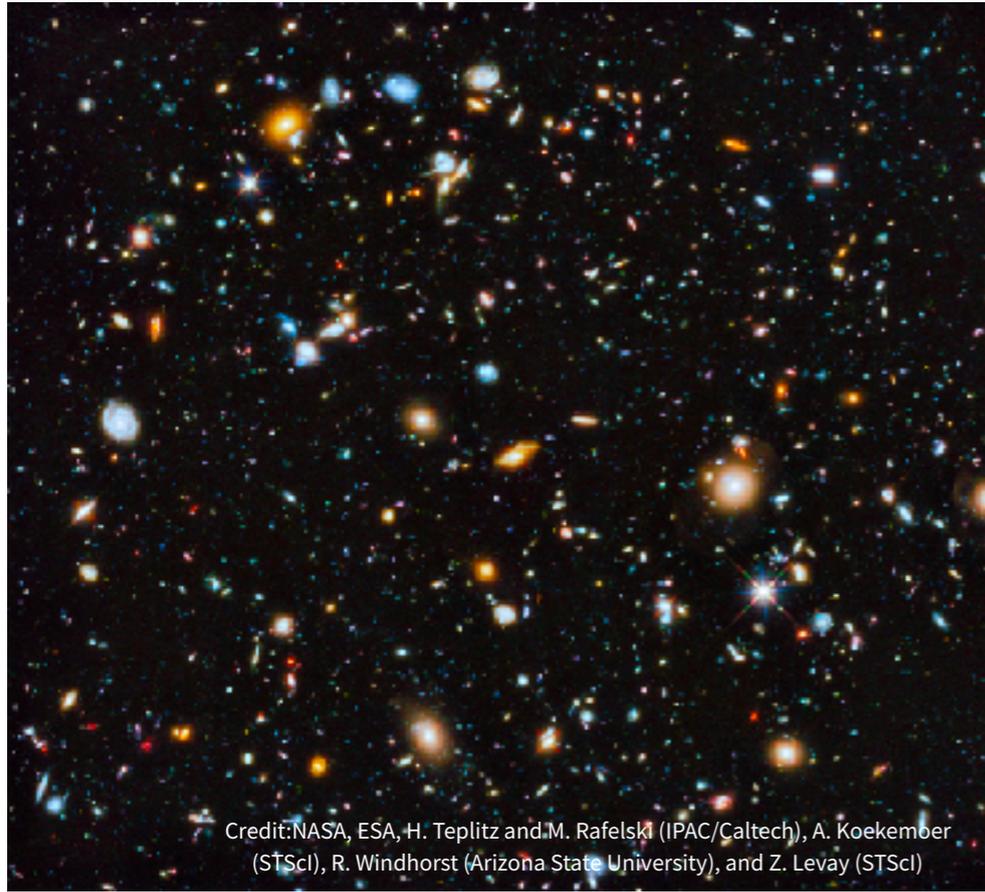


ケプラー  
(1571-1630)  
ケプラーの法則  
楕円軌道の導入



ニュートン  
(1642-1727)  
万有引力  
近代物理学の祖

# 宇宙物理

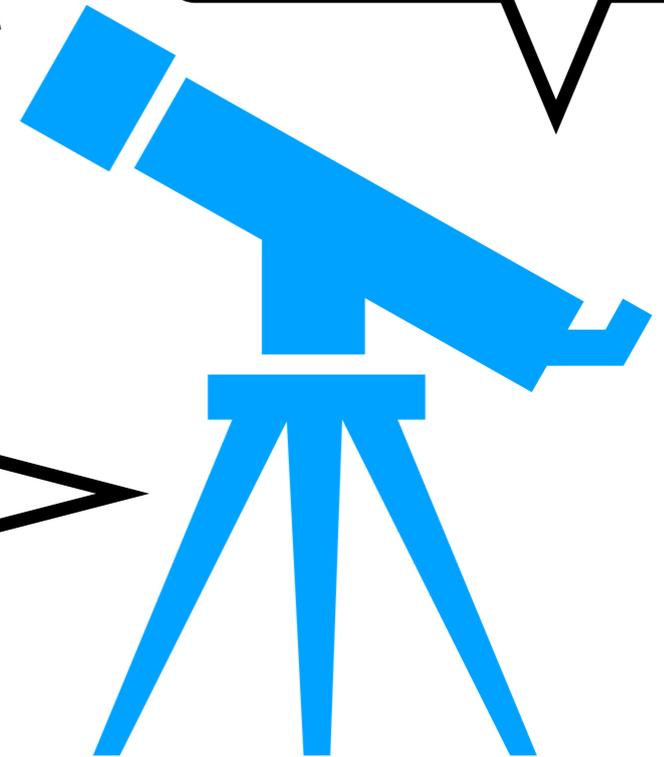


電磁波(光)  
宇宙線  
重力波

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

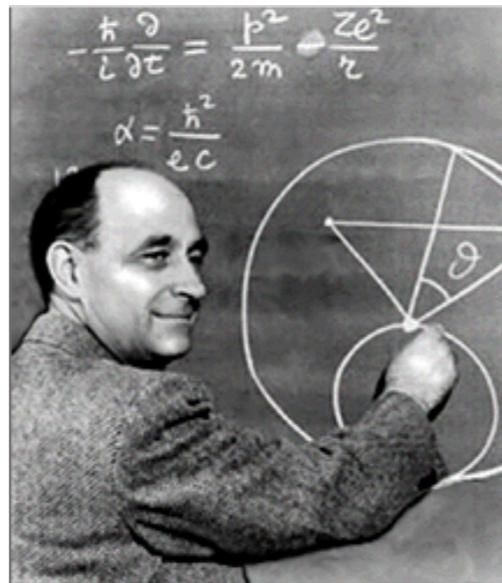


# 4つの力

- 強い力
- 電磁気力
- 弱い力
- 重力



湯川(1935)



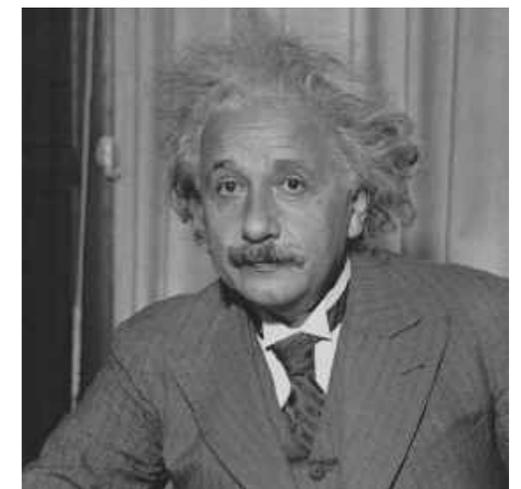
Faraday  
(1830s)



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

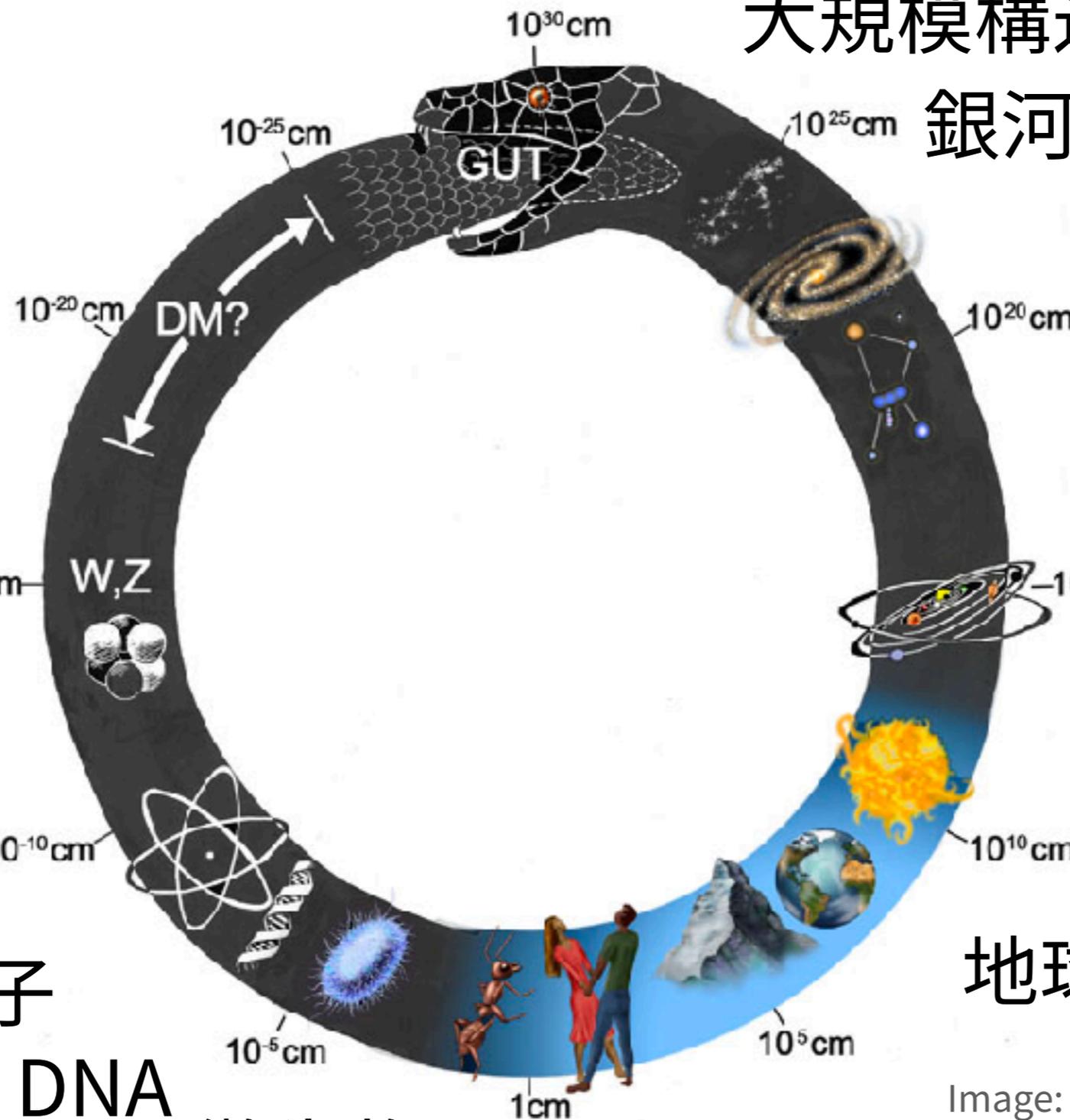


Image: Glashow's Snake rendered by Nancy Ellen Abrams and Joel R. Primack, (c) Abrams, Primack 2006

# 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

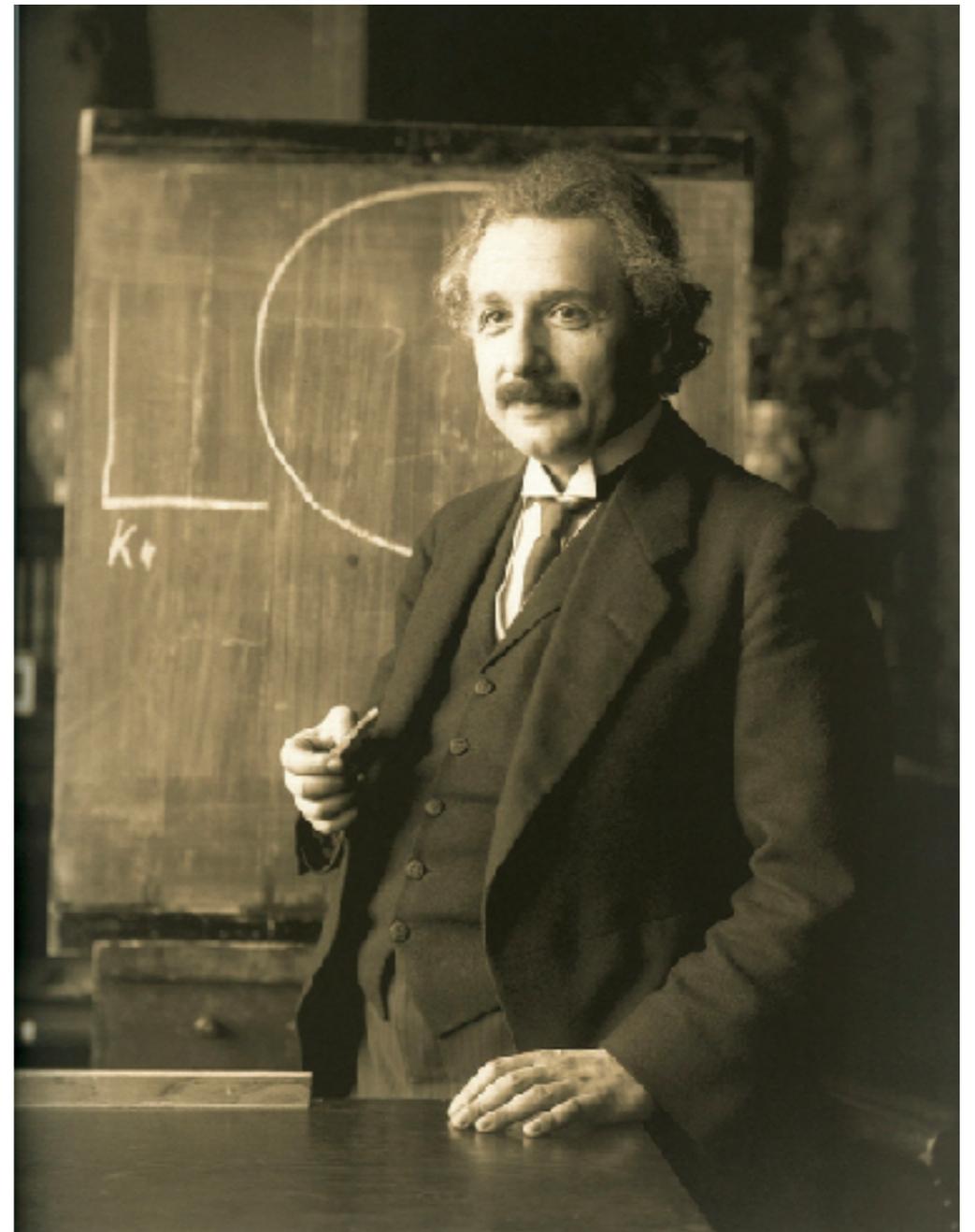


# 一般相対性理論

- 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



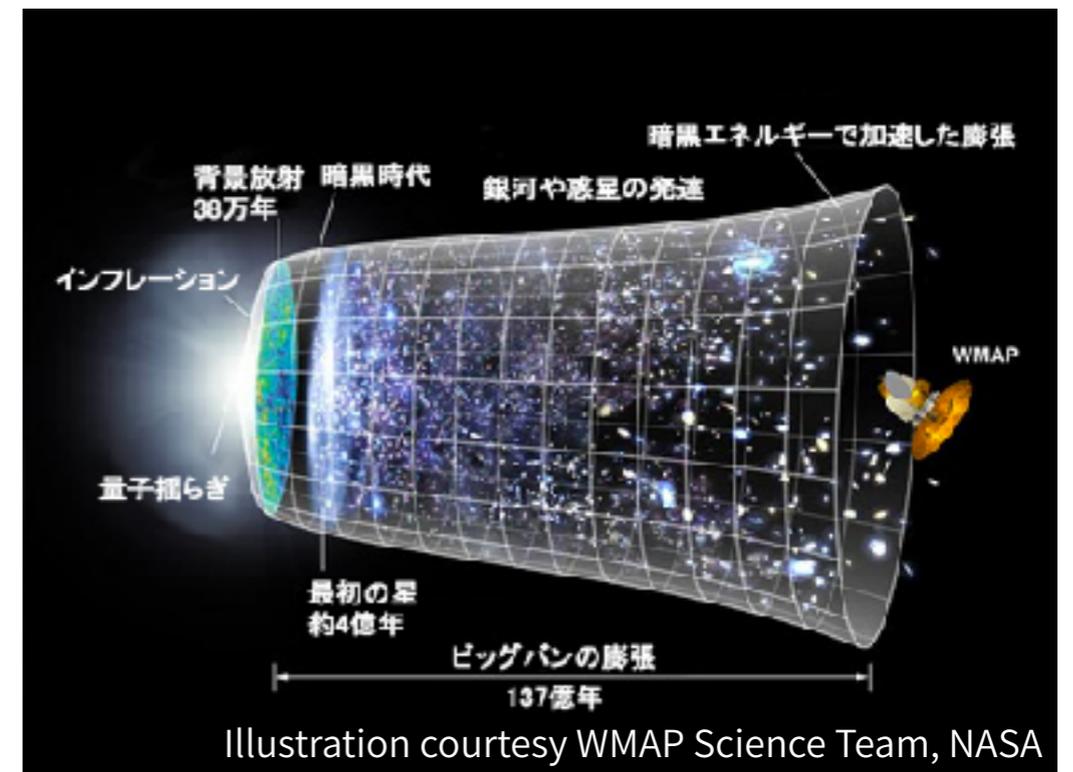
# 一般相対性理論の予言

ブラックホール



星の進化の終末  
天体物理  
Astrophysics

膨張宇宙



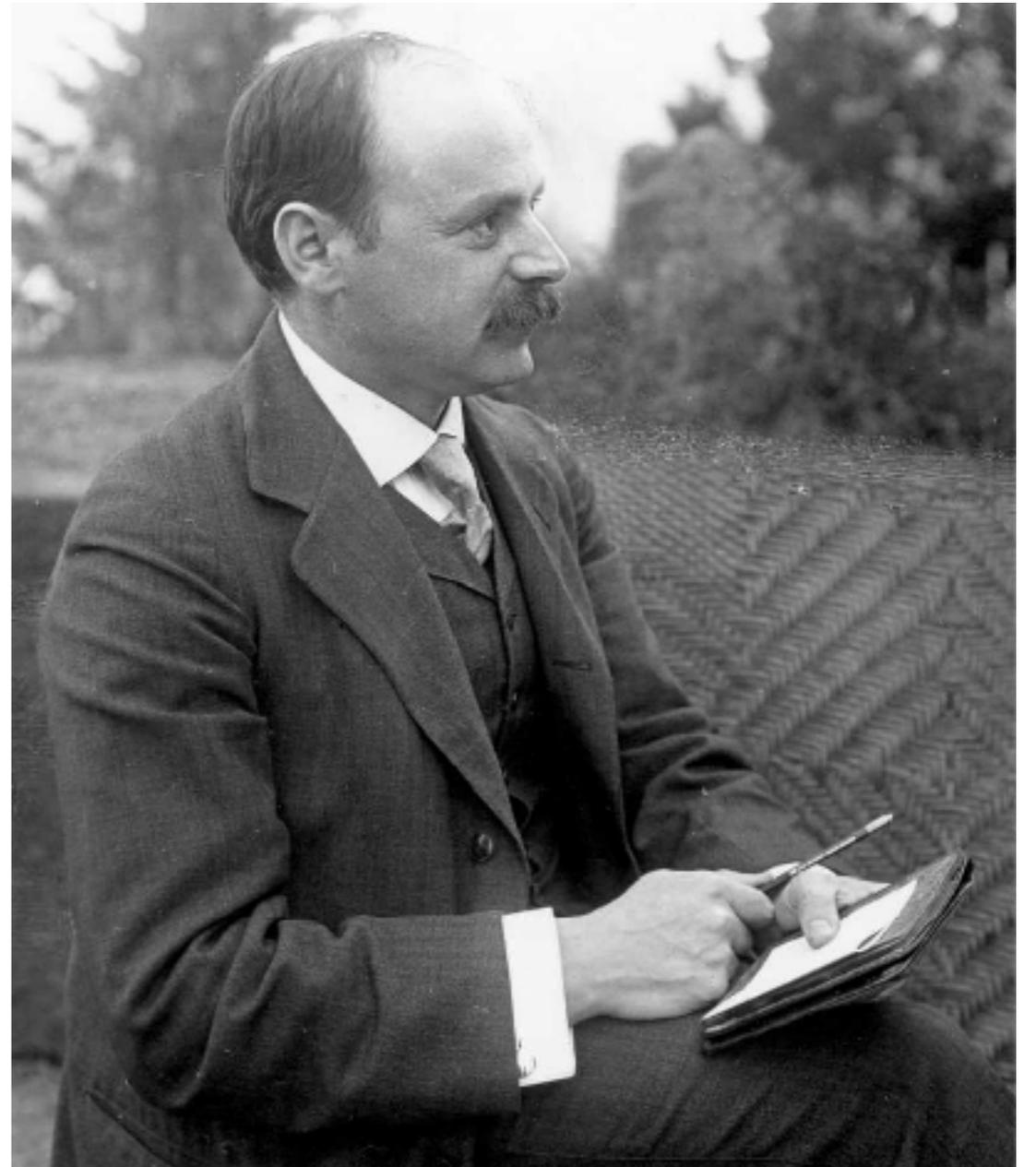
ビッグバンの根幹  
宇宙論  
Cosmology

# 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

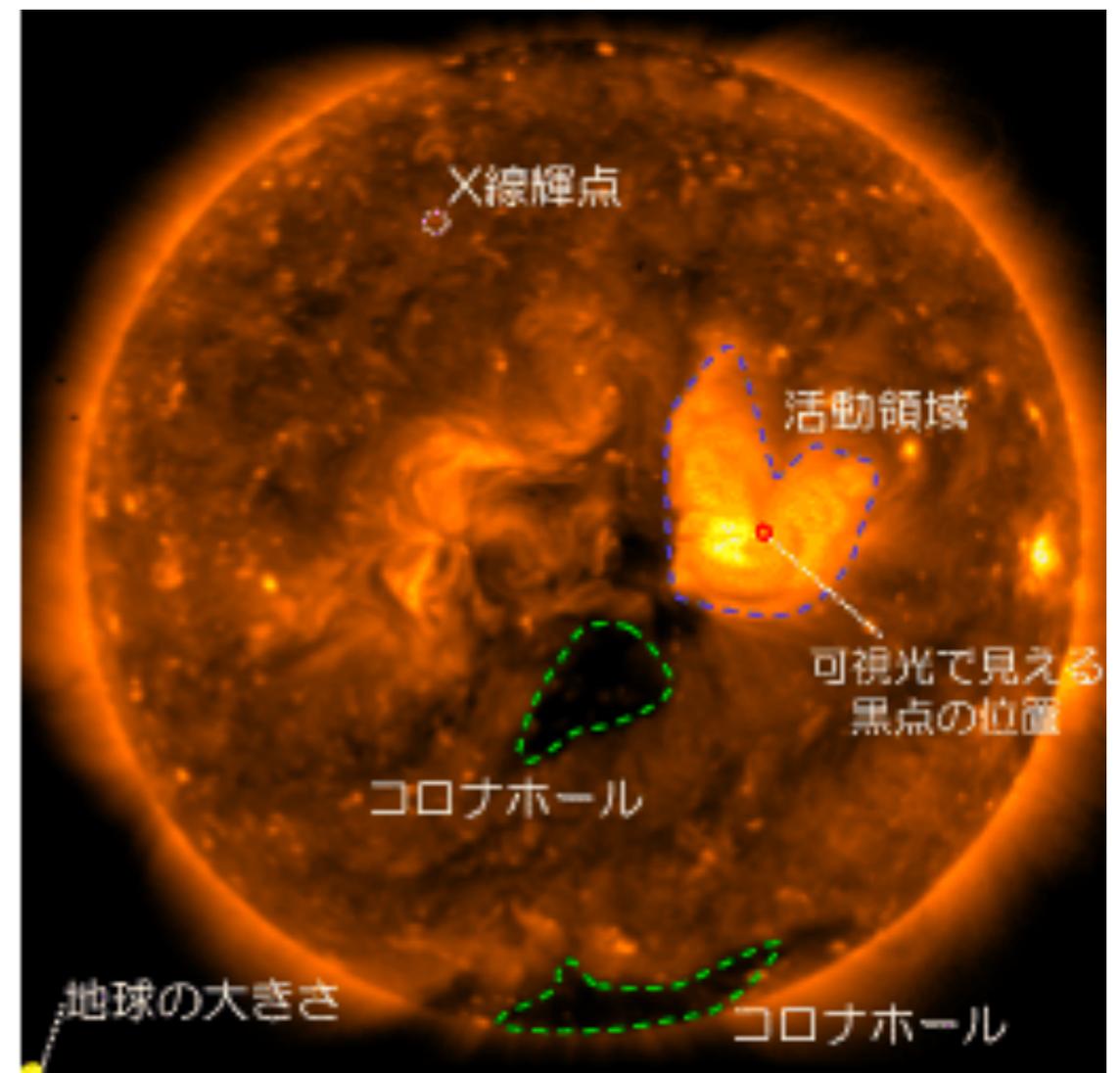


Image credit: NASA/Jerry Cannon, Robert Murray

# 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  $\sim 6000$  K
- 中心温度  $\sim 1.6 \times 10^7$  K
- 年齢  $\sim 46$  億年
- 距離 1 AU  $\sim 1.5 \times 10^{13}$  cm  $\sim 500$  光秒

ひので衛星によるX線画像

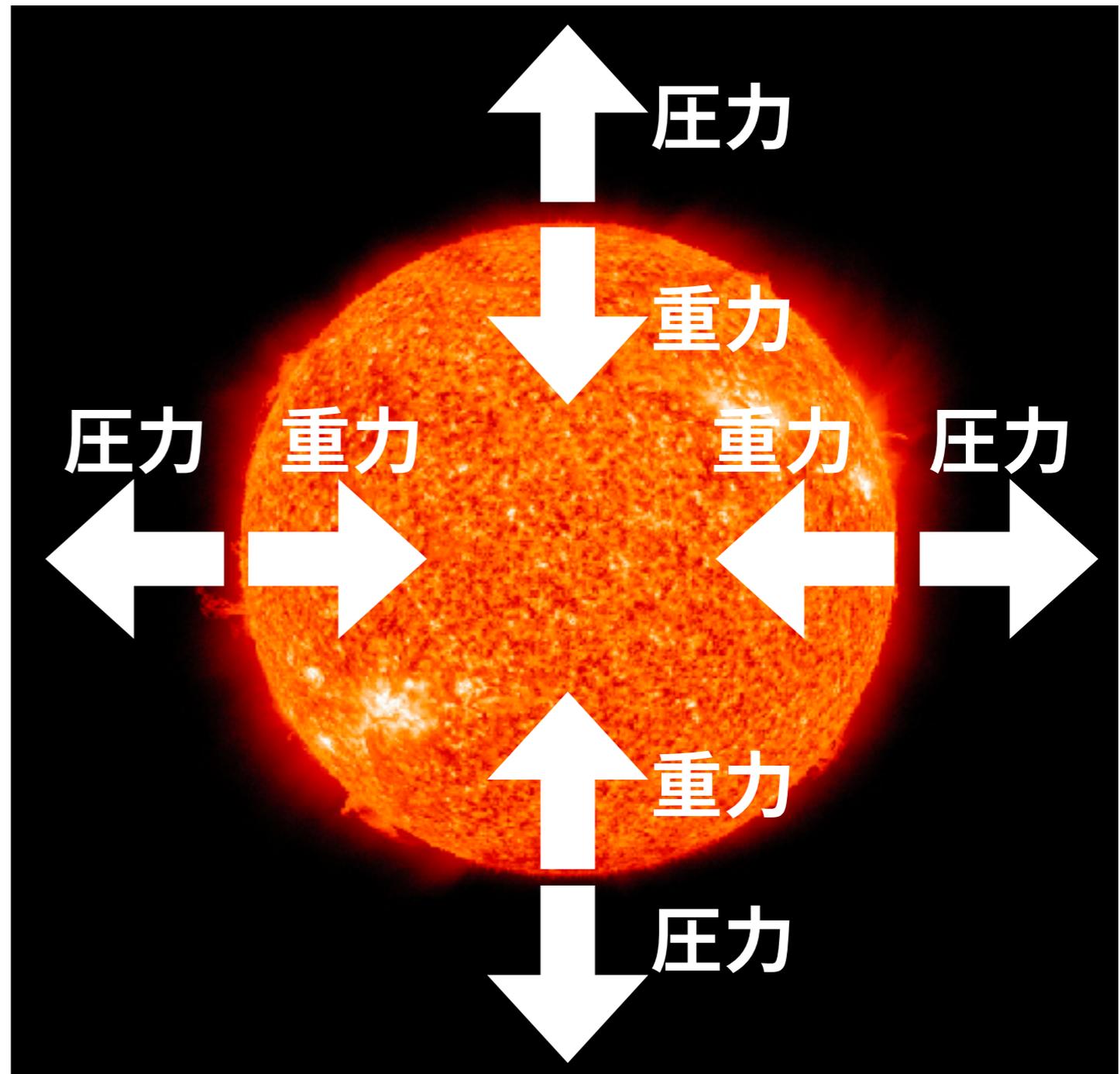


国立天文台

ブラックホールになると、、、 $\sim 3$  km に潰れる

# 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

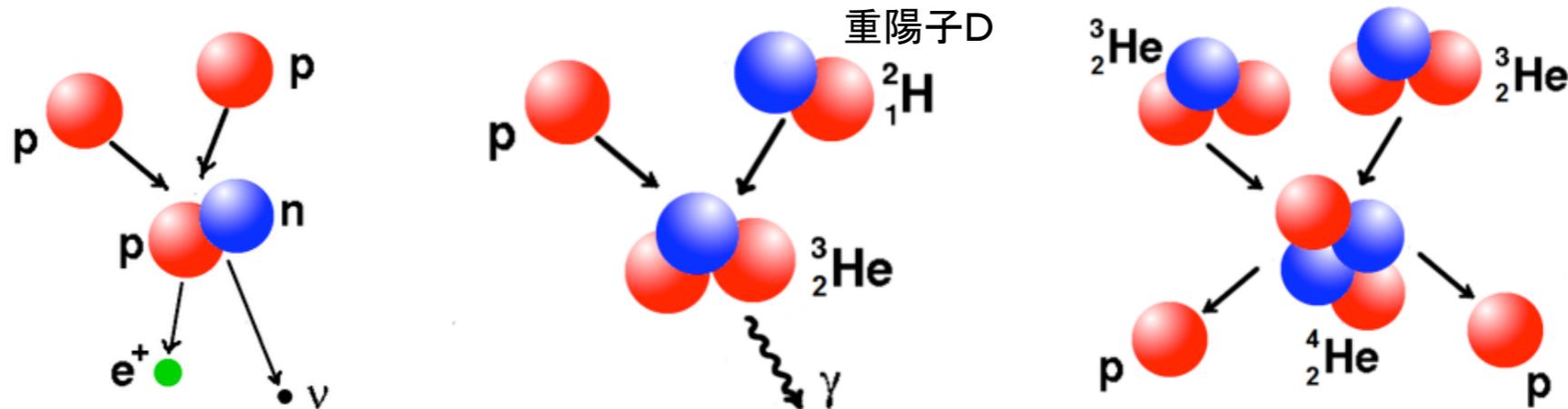
- 半径  $R_{\odot} \sim 7 \times 10^{10}$  cm, 質量  $M_{\odot} \sim 2 \times 10^{33}$  g, 光度  $L_{\odot} \sim 4 \times 10^{33}$  erg/s
- 単位質量あたり  $\sim 2$  erg/s/g
- 重力エネルギー説(ヘルムホルツ, 19世紀)
  - $E_G = -G M_{\odot} / R_{\odot} = -2 \times 10^{15}$  erg/g
  - 太陽の寿命は？
- 隕石の放射線年代測定  $\sim 45.5$  億年
- ダーウィン「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

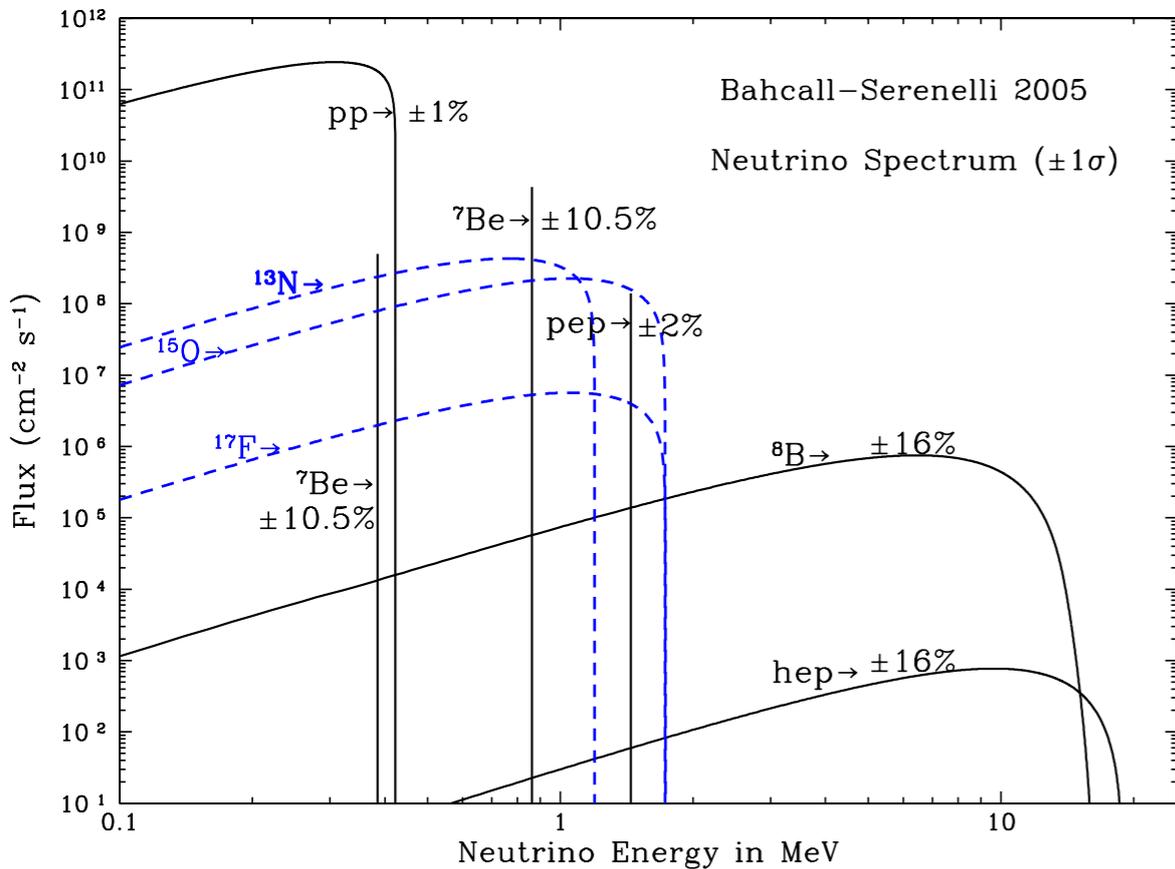
● 太陽は潰れない

● ベーテ  
ノーベル賞 (1969)

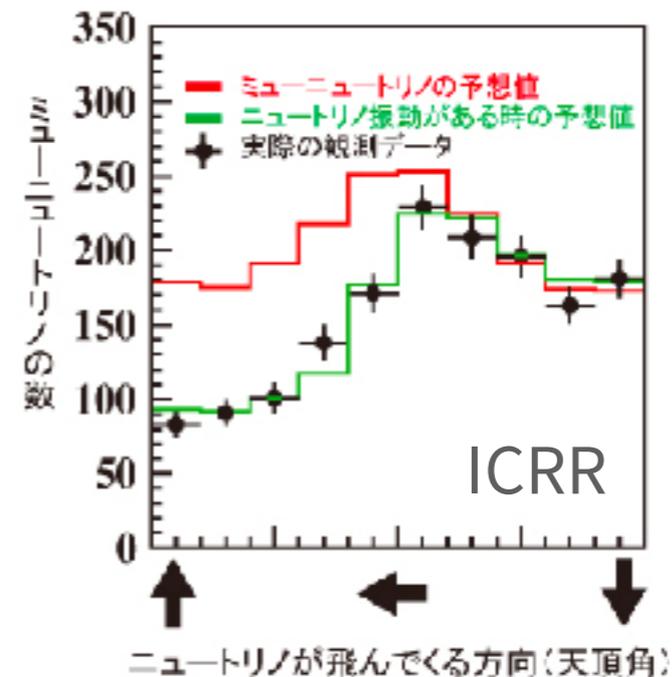


# 太陽ニュートリノ

- 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



# 量子力学



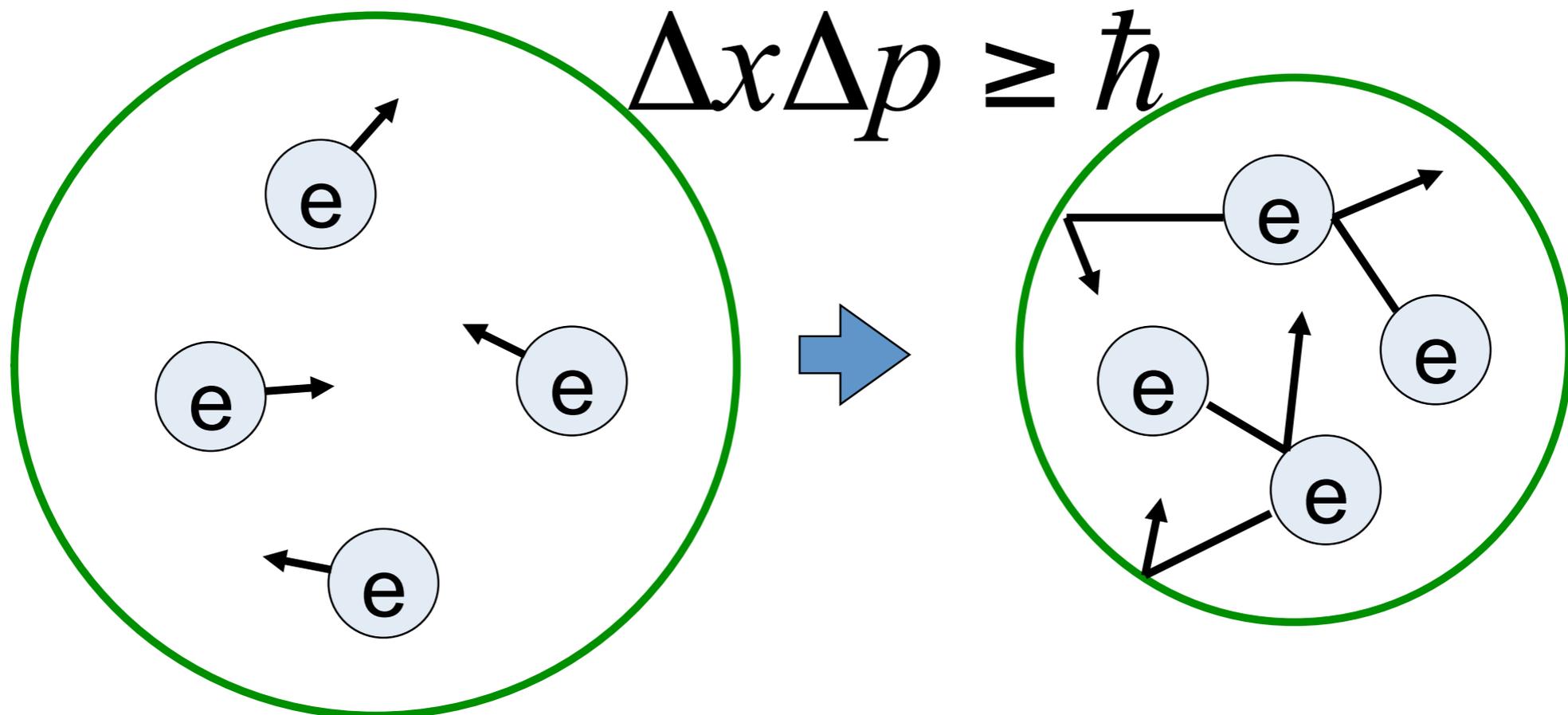
- 粒子 = 波
- 1925年 Heisenberg の行列力学
- 1925年 Pauliの排他律
- 1926年 Schrödingerの波動力学
- 1927年 Heisenberg の不確定性原理



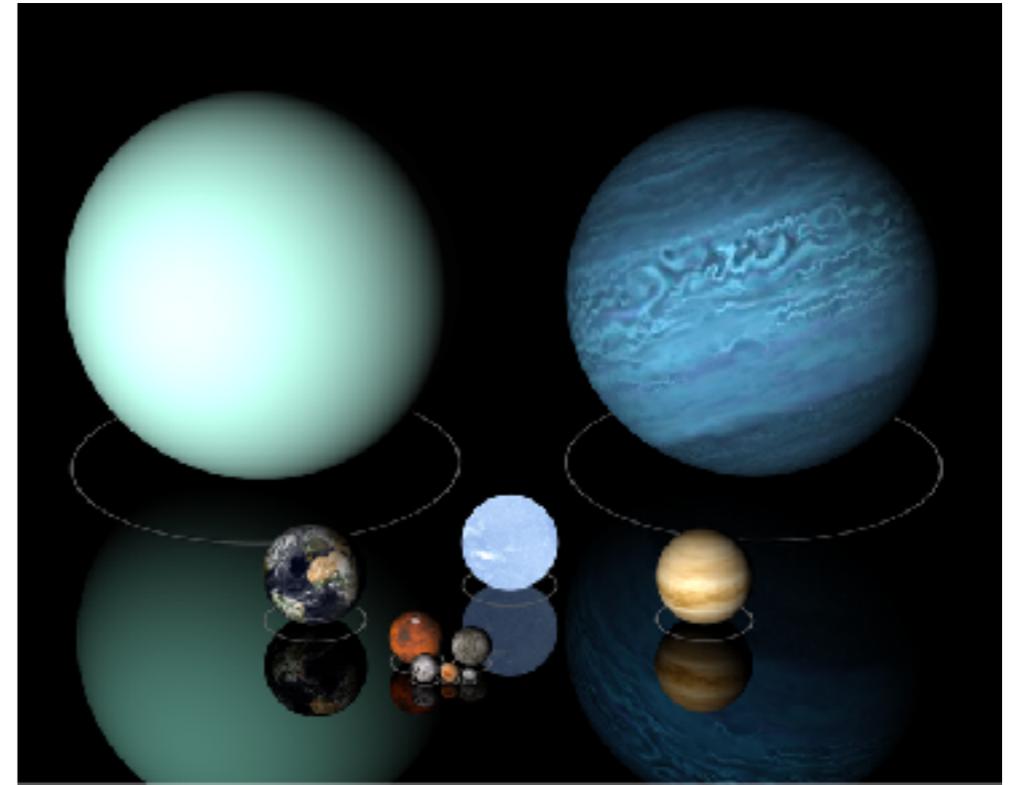
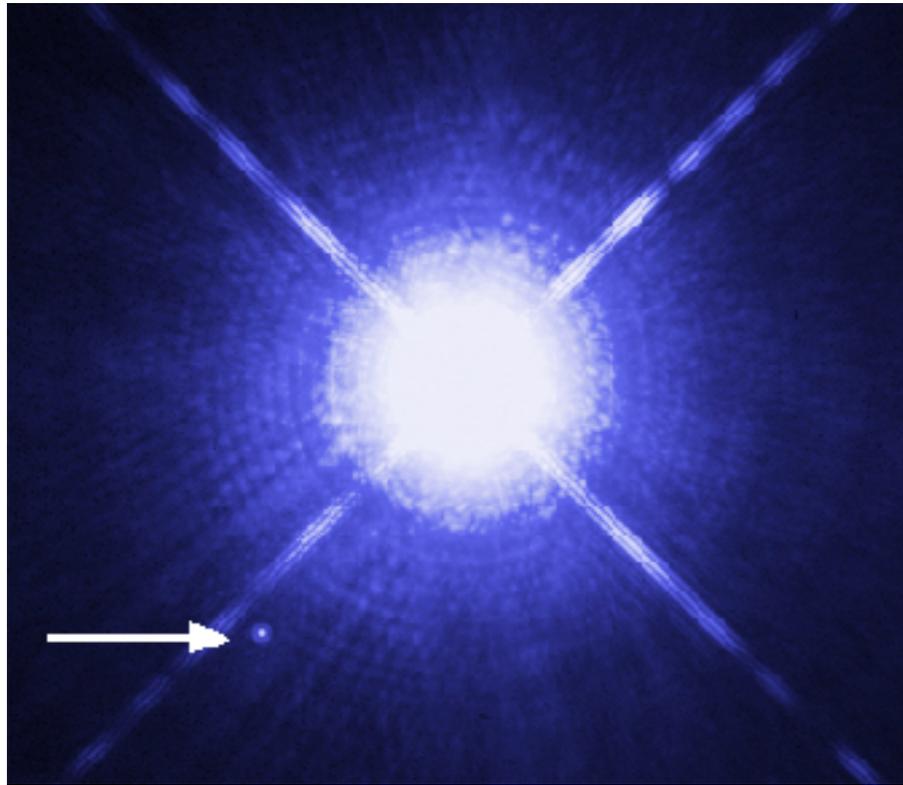
$$\Delta x \Delta p \geq \hbar$$

# 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



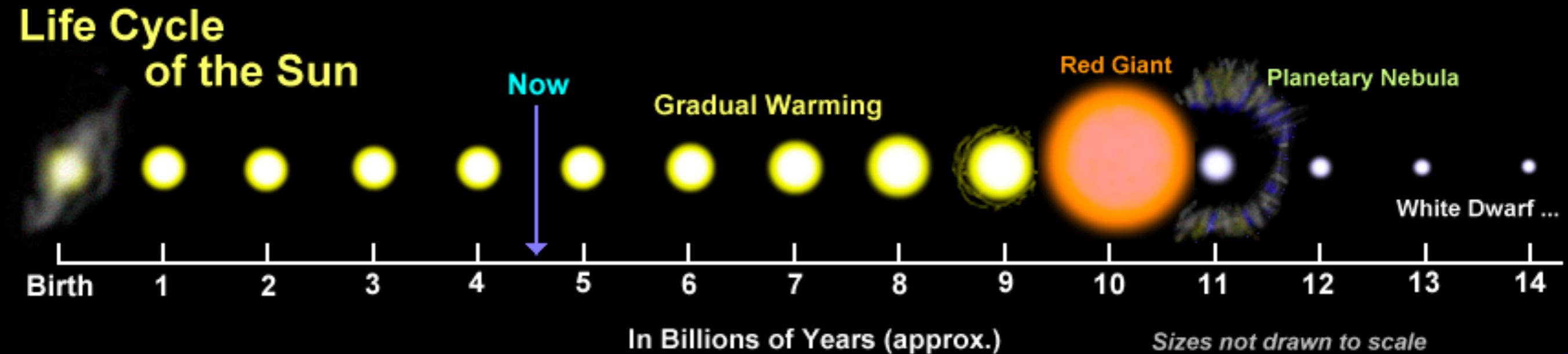
# 白色矮星



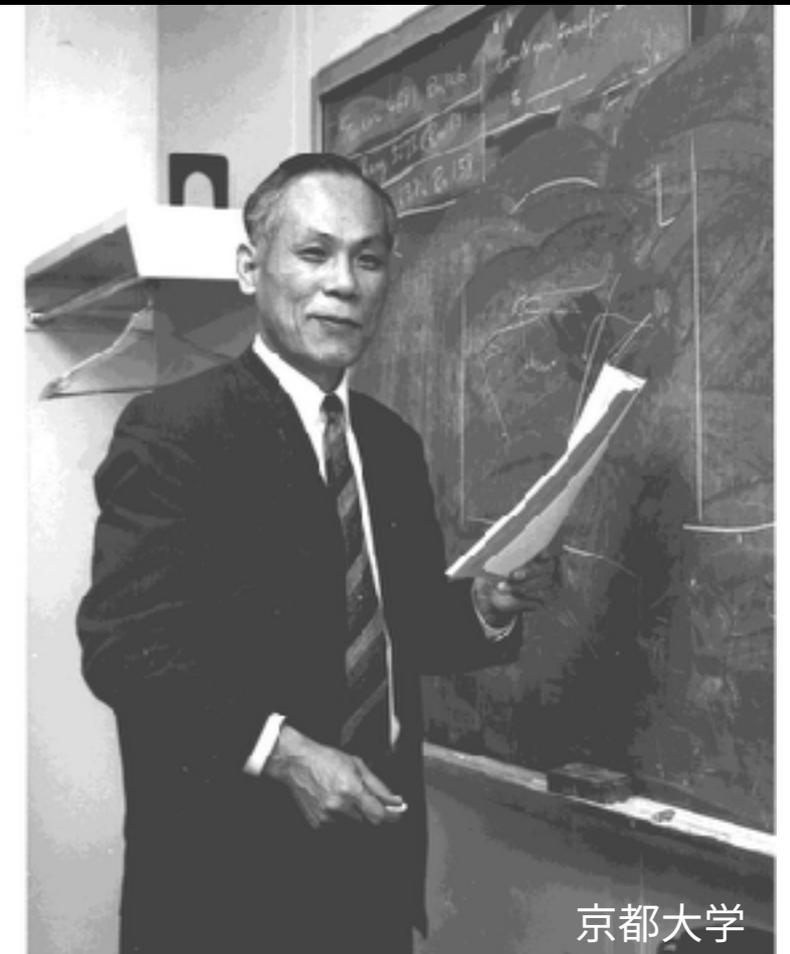
©wikipedia

- 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)

# 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



# 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 :  $M_{\max} \sim N_{\max} m_p \sim 4 \times 10^{33} \text{ g}$

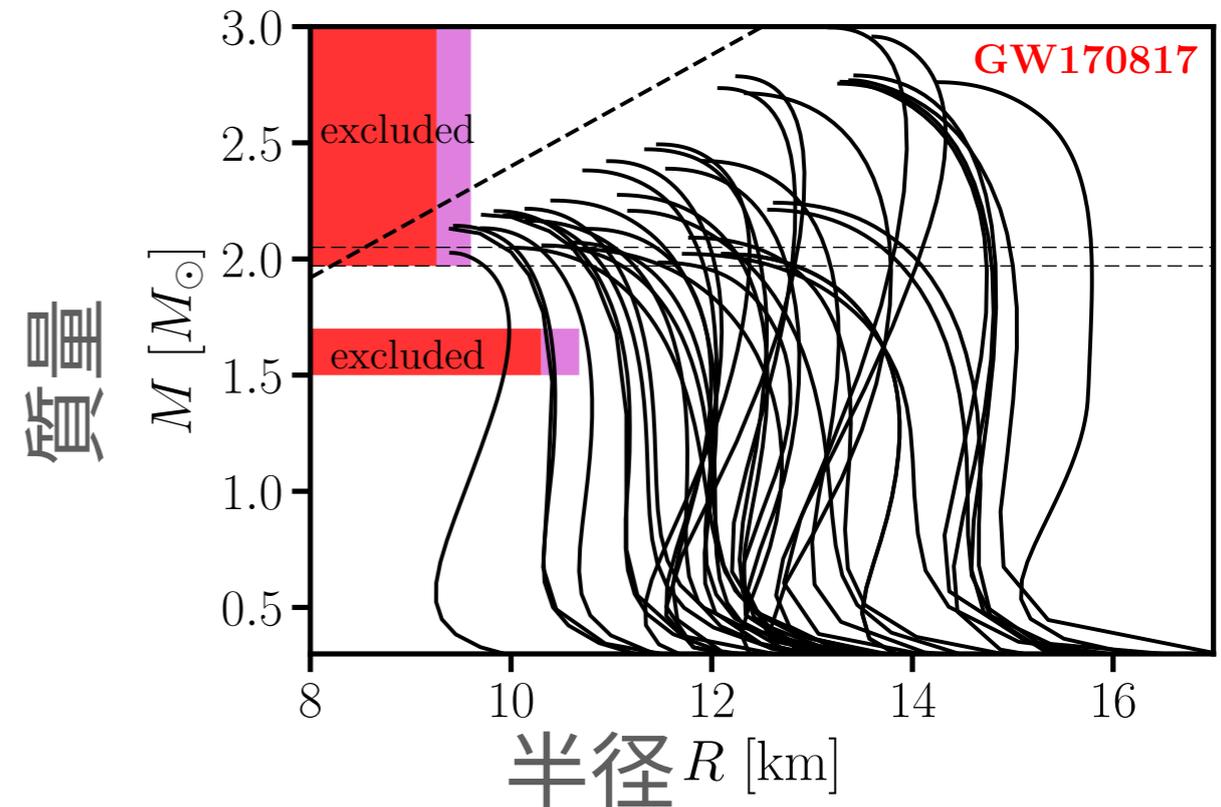
# 中性子星

- 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  $\sim 4000$  km
- 中性子星のとき ( $m=m_n$ )  $\Rightarrow$  半径  $\sim 2$  km
- 中性子の発見：Chadwick 1932 (1935 ノーベル賞)

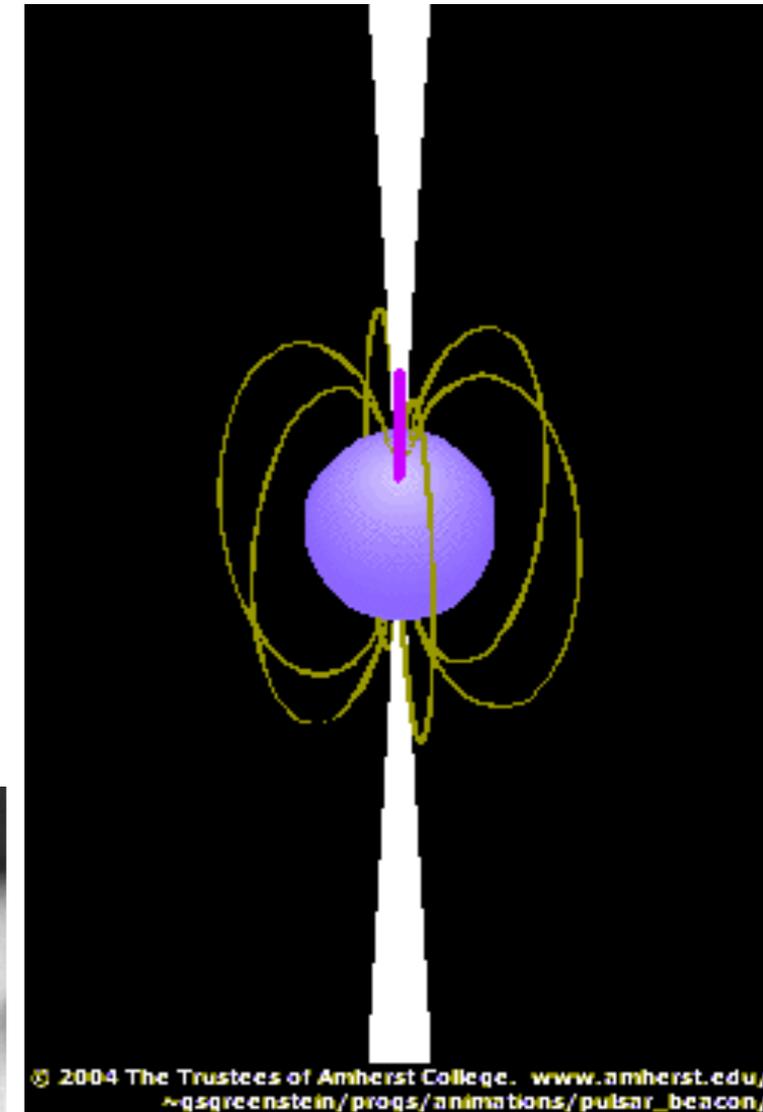
➡ 中性子の予言：Baade & Zwicky 1934



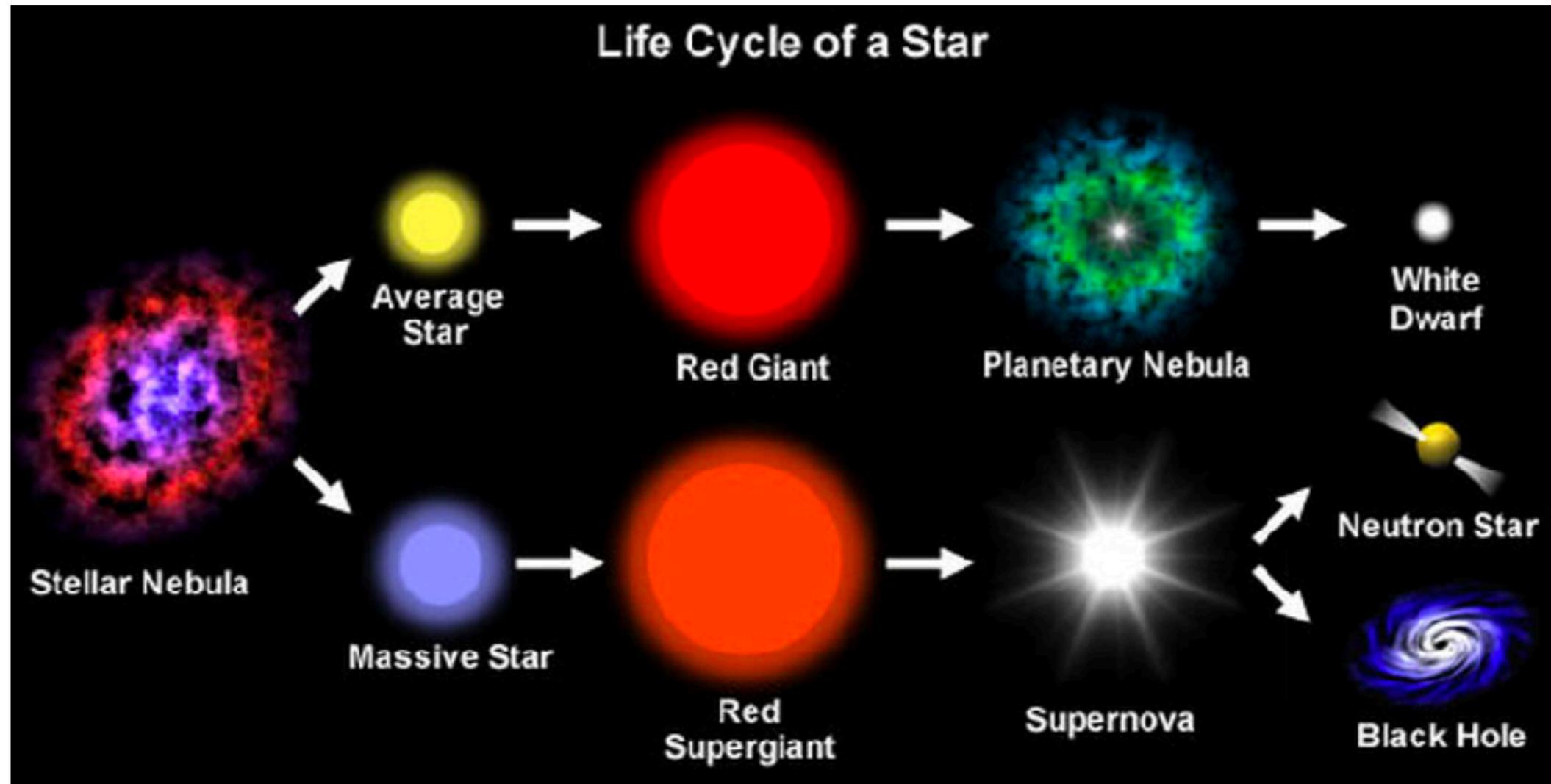
Bauswein+'17

# 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



# 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

# (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

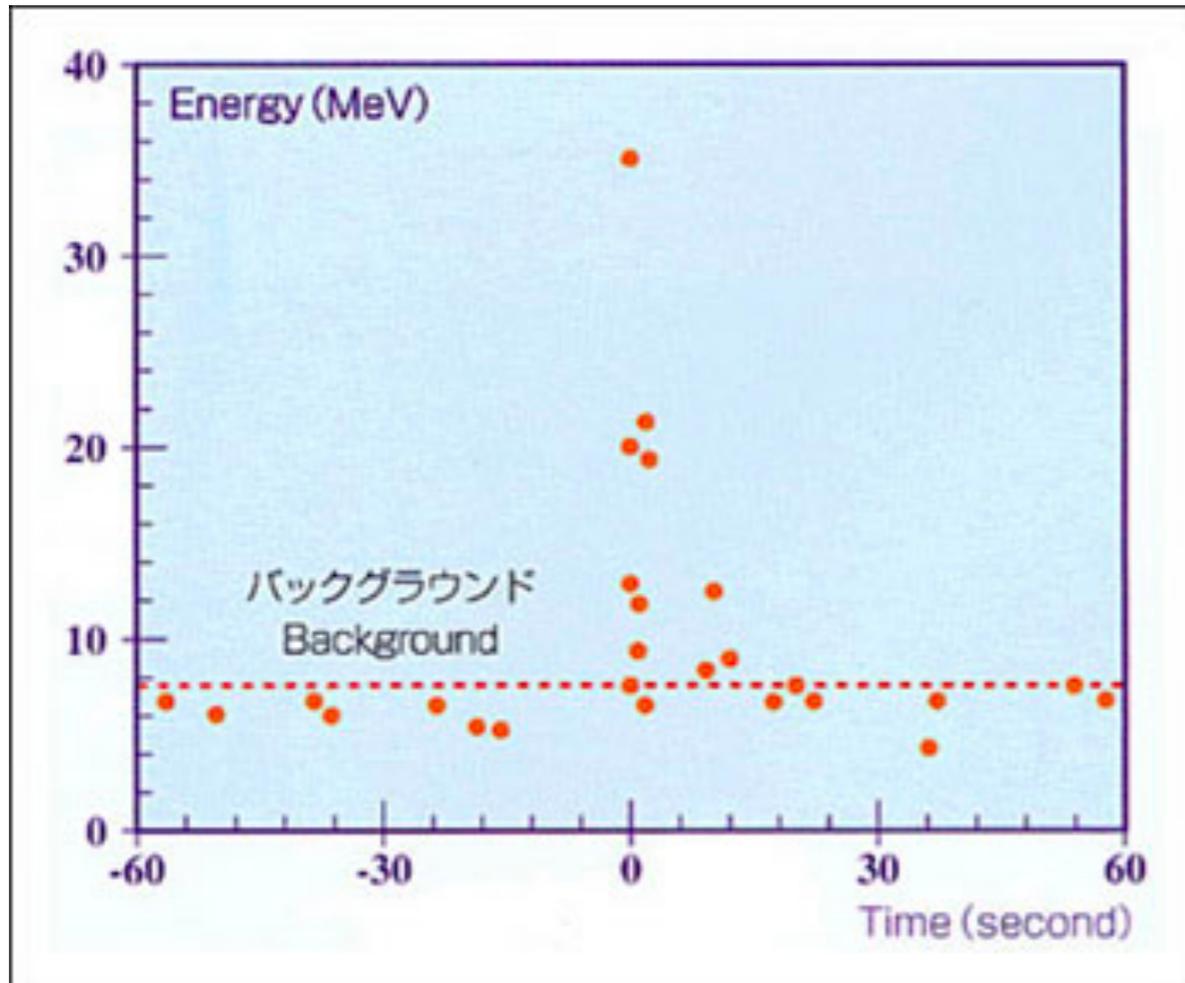
爆発後

爆発前



Angulo-Australian Observatory

# 超新星ニュートリノ

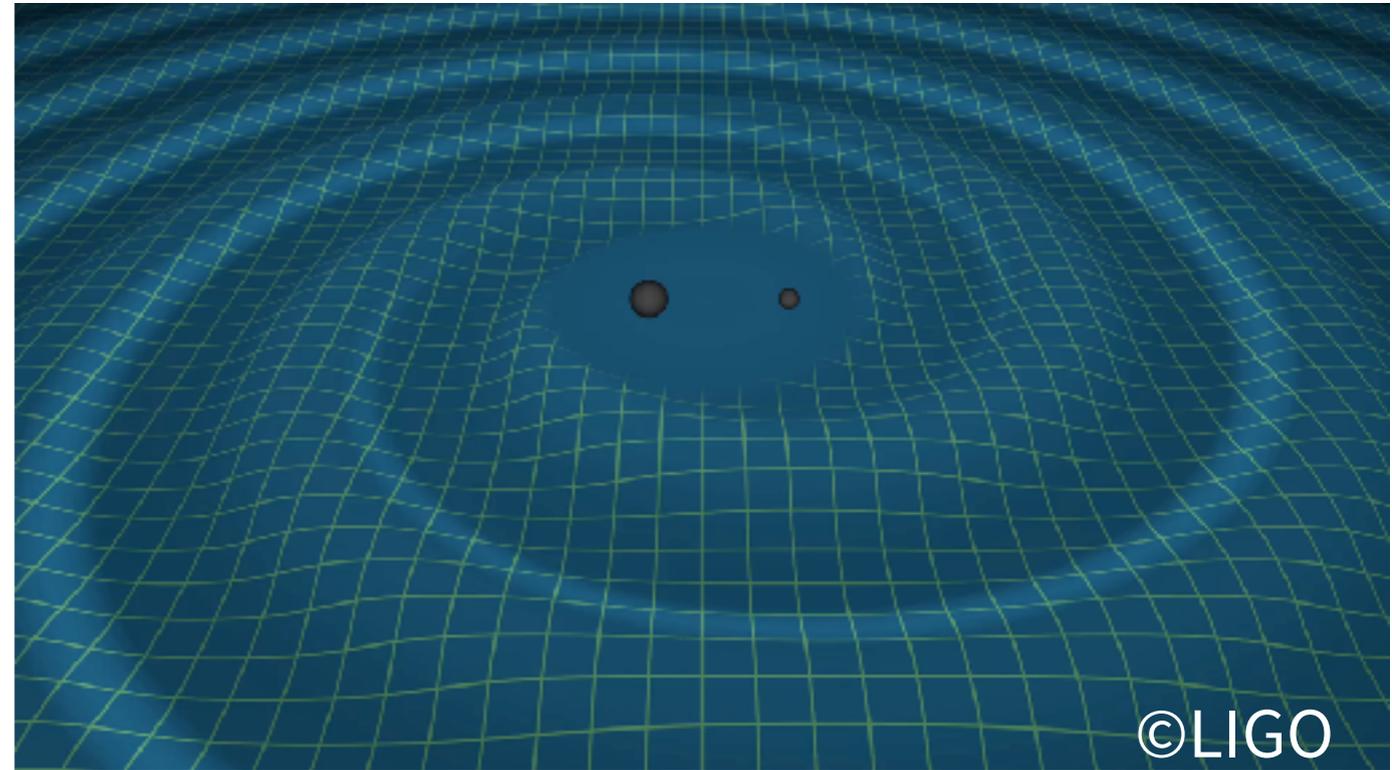


宇宙線研究所

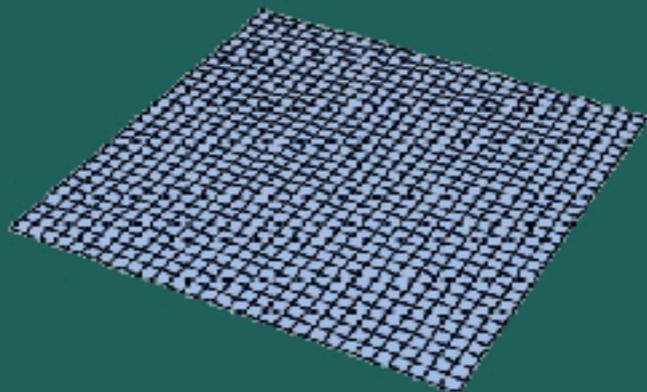
- Kamiokande, IMB で1987A 超新星ニュートリノの検出 (REF)
- 小柴 2002 ノーベル賞

# 重力波

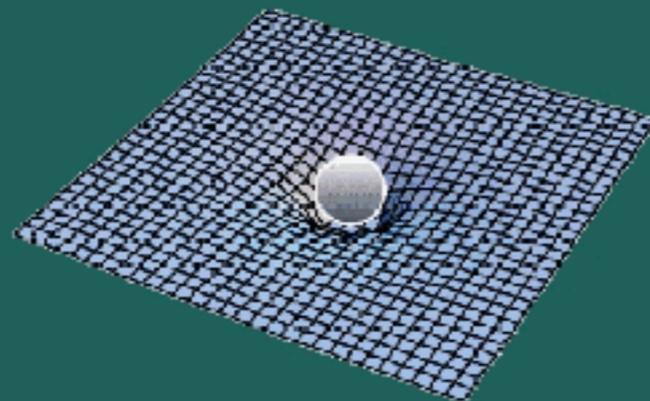
- 電荷が加速度運動⇒電磁波
- 質量が加速度運動⇒重力波
  - 一般相対性理論に基づいた  
アインシュタインの予言
- 中性子星-中性子星などの合体が強力な  
重力波源



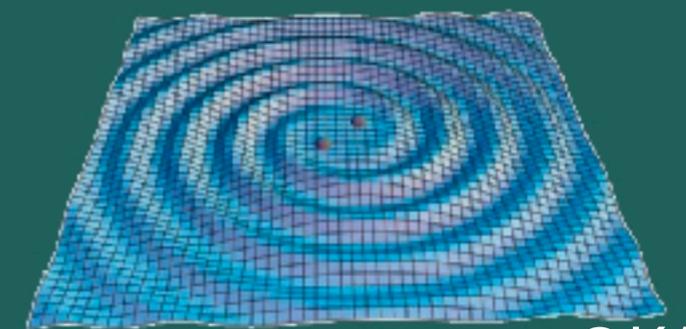
平坦な空間



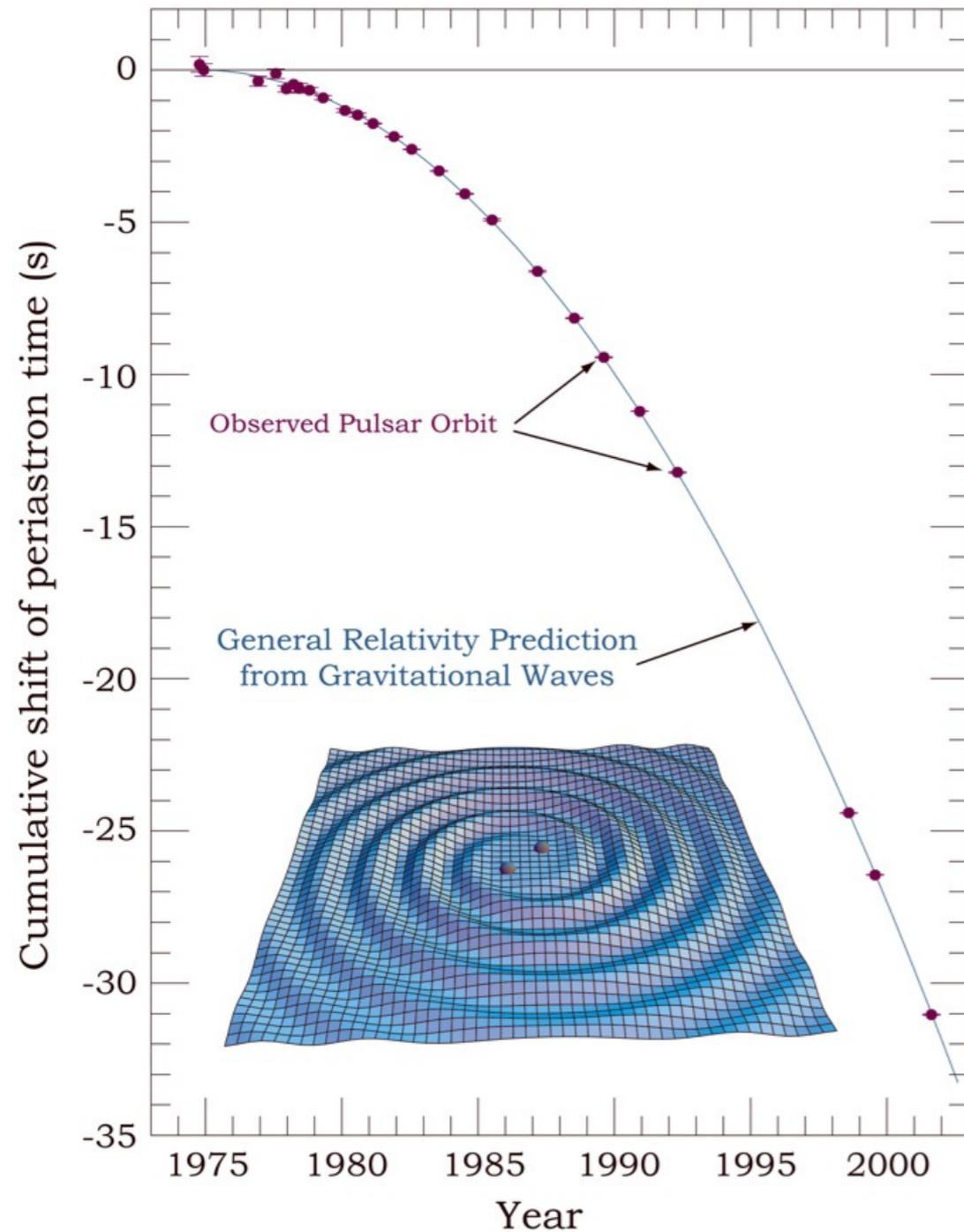
星の重さで歪んだ空間



重い星が運動して重力波発生  
(例：連星中性子星)



# 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



# 重力波の直接観測

- 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

