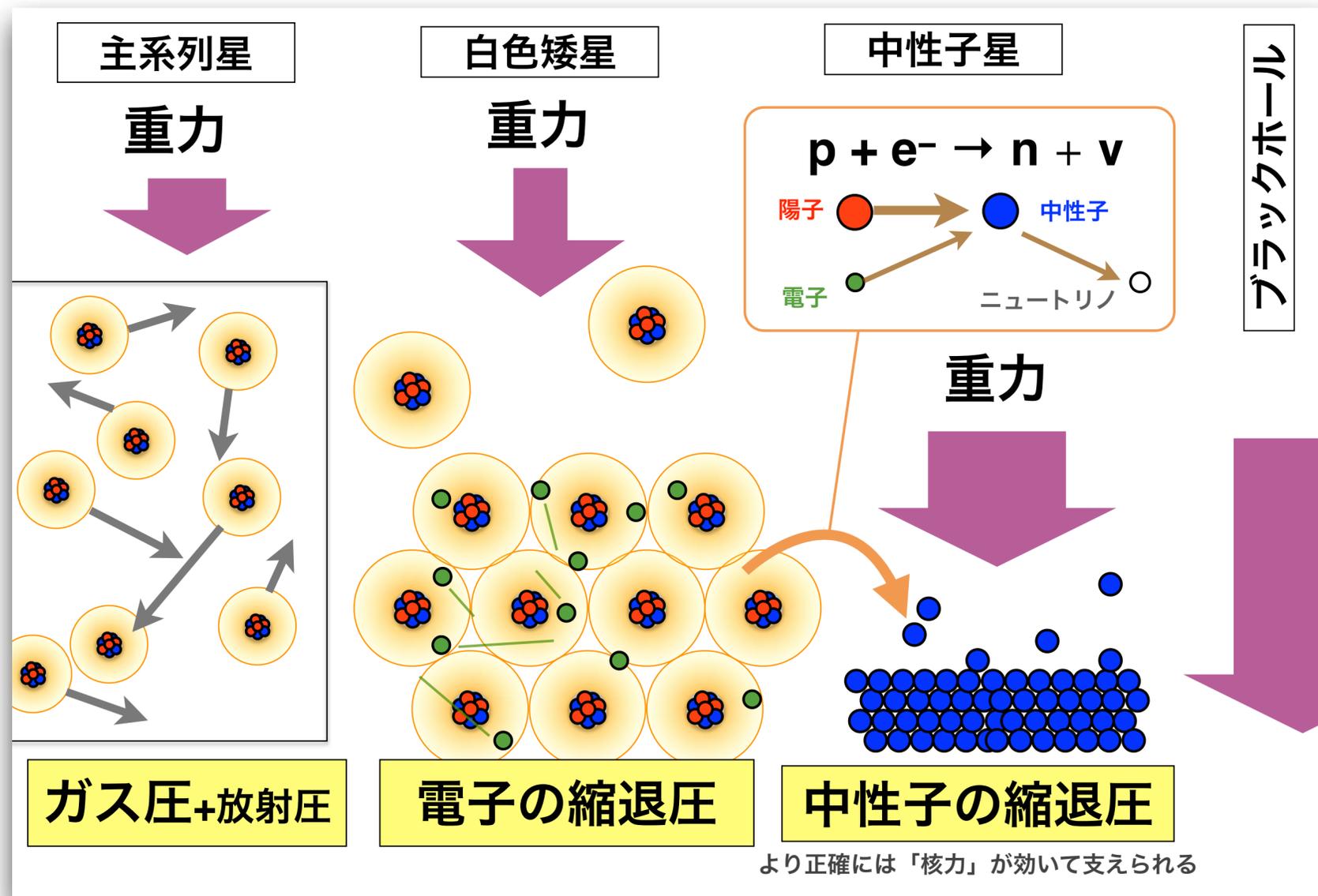


# 宇宙物理学特論

## コンパクト天体の予言と発見

# 星の死とコンパクト天体形成

星の中心で熱源 (核融合反応) が無くなる → 重力で潰れ高密度天体を形成



ミクロな力でマクロな重力を支える

軽い星: ~0.8–8 太陽質量

電子縮退圧で支える **白色矮星**

重い星: 10–20 太陽質量

中性子縮退圧+核力で支える **中性子星**

更に重い星?: >20 太陽質量

光も逃げきれない **ブラックホール**

# 星の限界質量 「チャンドラセカール質量」

星には限界の質量がある → 白色矮星や大質量星の鉄コアは、これを越えられない

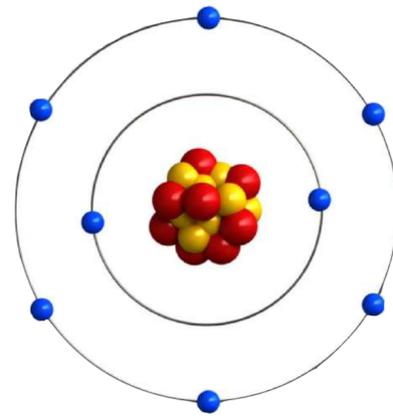
## パウリの排他原理

「二つ以上のフェルミ粒子は、同一の量子状態を占めることはできない」

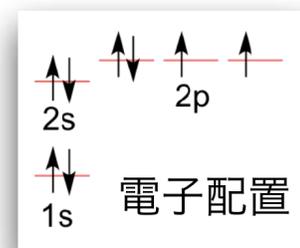
チャンドラセカール



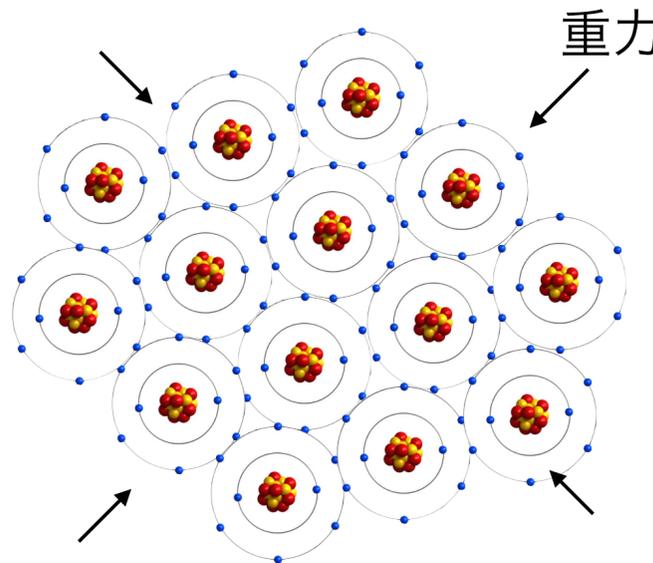
1983年ノーベル物理学賞



例: 酸素原子



重力で潰していくと  
量子力学的な反発力  
= **電子の縮退圧**



## 重力 > 電子の縮退圧

重力エネルギー

縮退した電子の総エネルギー

$$\frac{GM^2}{R} \approx \left(\frac{3}{4\pi}\right)^{1/3} \left(\frac{M}{\mu_e m_p}\right)^{4/3} \frac{c\hbar}{R}$$

$$\Rightarrow M_{\text{Ch}} \sim \frac{1}{\mu_e^2} M_{\odot}$$

限界質量の詳しい導出

[https://github-nakasho.github.io/compact/chandrasekhar\\_limit](https://github-nakasho.github.io/compact/chandrasekhar_limit)

中心に熱源の無い星は ~1 太陽質量を  
超えると最終的に崩壊してしまう

限界質量の考え方は、ブラックホールの実在可能性にも繋がった

# 重い星の死後に残される中性子星とブラックホール

これらは、もともと空想上の天体だったが実際に宇宙に存在した



中性子星 (想像図)



© EHT グループ

銀河中心の超大質量ブラックホール

「人間が想像できることは実現できる」？ → どのように予言され発見されたのか？

# 中性子星と物理学 ①中性子星の予言

物理学「中性子の発見」 → 宇宙物理学「中性子星の予言」

ジェームズ・チャドウィック  
中性子の発見 (1932年)



中性子を見つけたよ

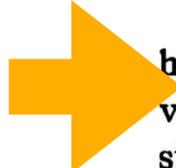
中性子だけの星作れない? (1934年)

*COSMIC RAYS FROM SUPER-NOVAE*

BY W. BAADE AND F. ZWICKY

MOUNT WILSON OBSERVATORY, CARNEGIE INSTITUTION OF WASHINGTON AND CALIFORNIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY, PASADENA

Communicated March 19, 1934



happenings in a super-nova now confronts us. With all reserve we advance the view that a super-nova represents the transition of an ordinary star into a *neutron star*, consisting mainly of neutrons. Such a star may possess a very small radius and an extremely high density. As neutrons can be packed much more closely than ordinary nuclei and electrons, the “gravitational packing” energy in a *cold* neutron star may become very large, and, under certain circumstances, may far exceed the ordinary nuclear packing fractions. A neutron star would therefore represent the most stable configuration of matter as such. The consequences of this hypothesis will be developed in another place, where also will be mentioned some observations that tend to support the idea of stellar bodies made up mainly of neutrons.

バーデ



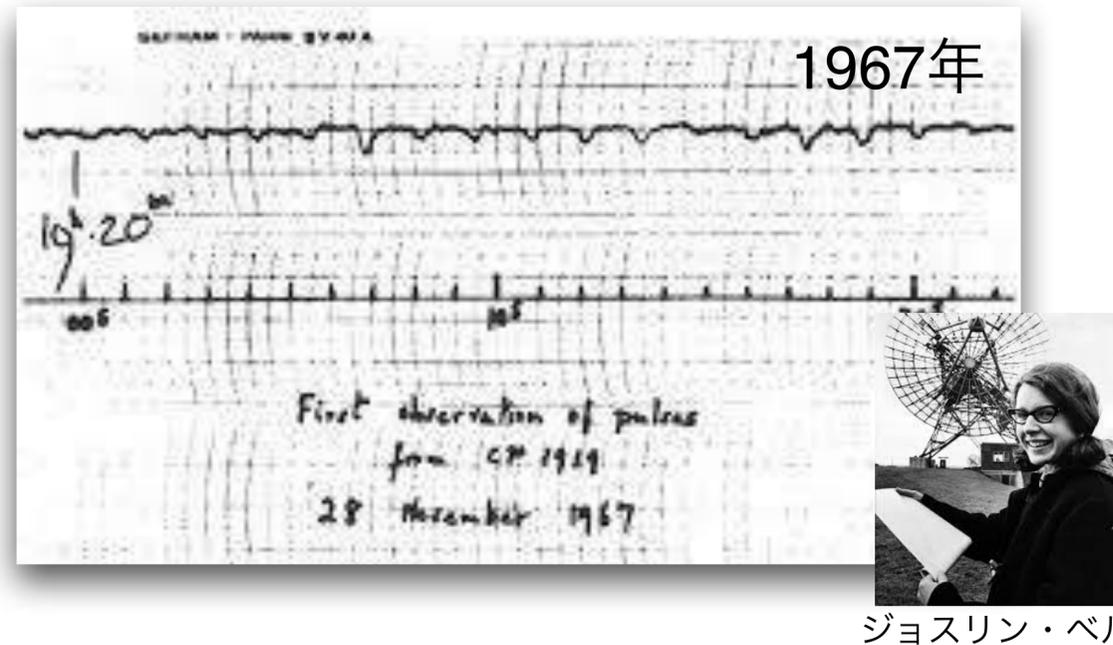
ツビッキー



“超新星”は普通の星が中性子を主成分とする“中性子星”に変化したものでは？

中性子は電子や原子核と比べると遥かに密に詰められる = 強重力の小さな天体が作れる？

# 中性子星と物理学 ②電波パルサーの発見



宇宙からの**不自然なほど規則的な電波信号**を発見

→ 周期 1秒程度

**地球外生命体 or 非常に小さな天体 !?**

(後に、“指導教官のみ”がノーベル物理学賞)

## 力のつり合い

遠心力  $F_c = mr\omega^2$

重力  $F_g = G\frac{Mm}{r^2}$

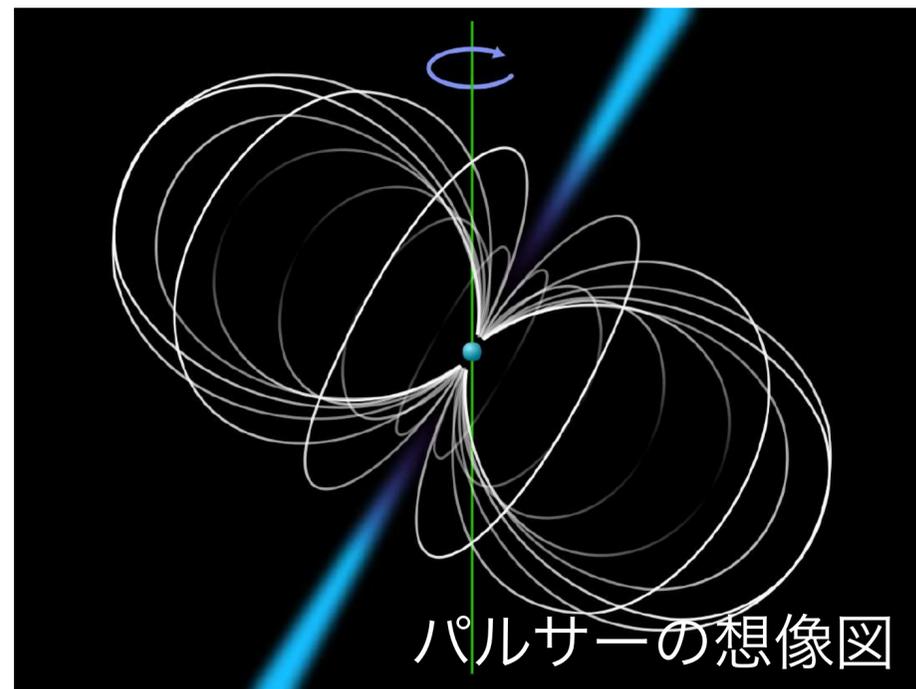
## 天体半径の上限

$$r_{\max} = \left( \frac{GM}{\omega^2} \right)^{1/3}$$

$$r_{\max}(P = 1 \text{ s}) \approx 1,500 \text{ km} \quad r_{\max}(P = 1 \text{ ms}) \approx 15 \text{ km}$$

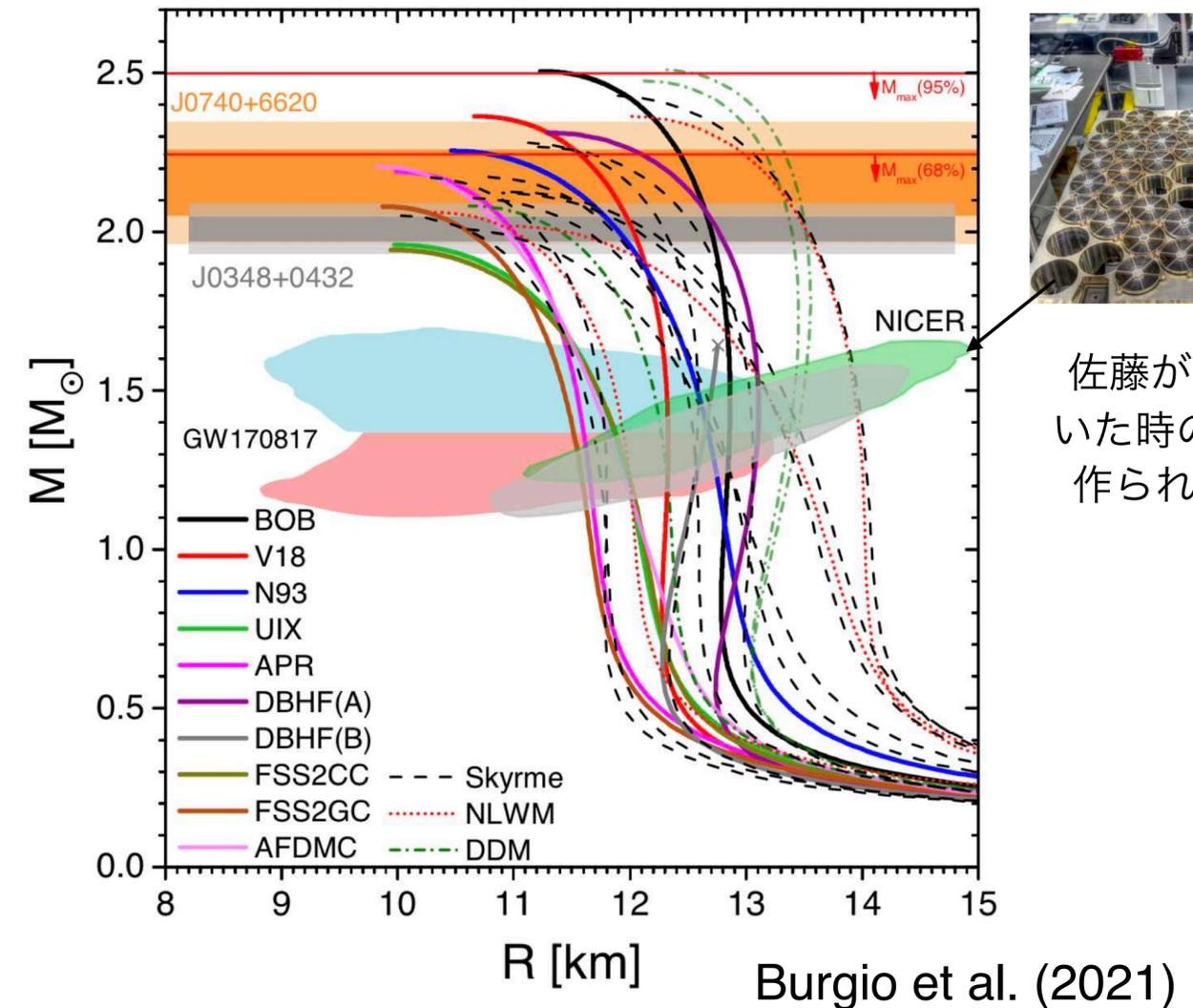
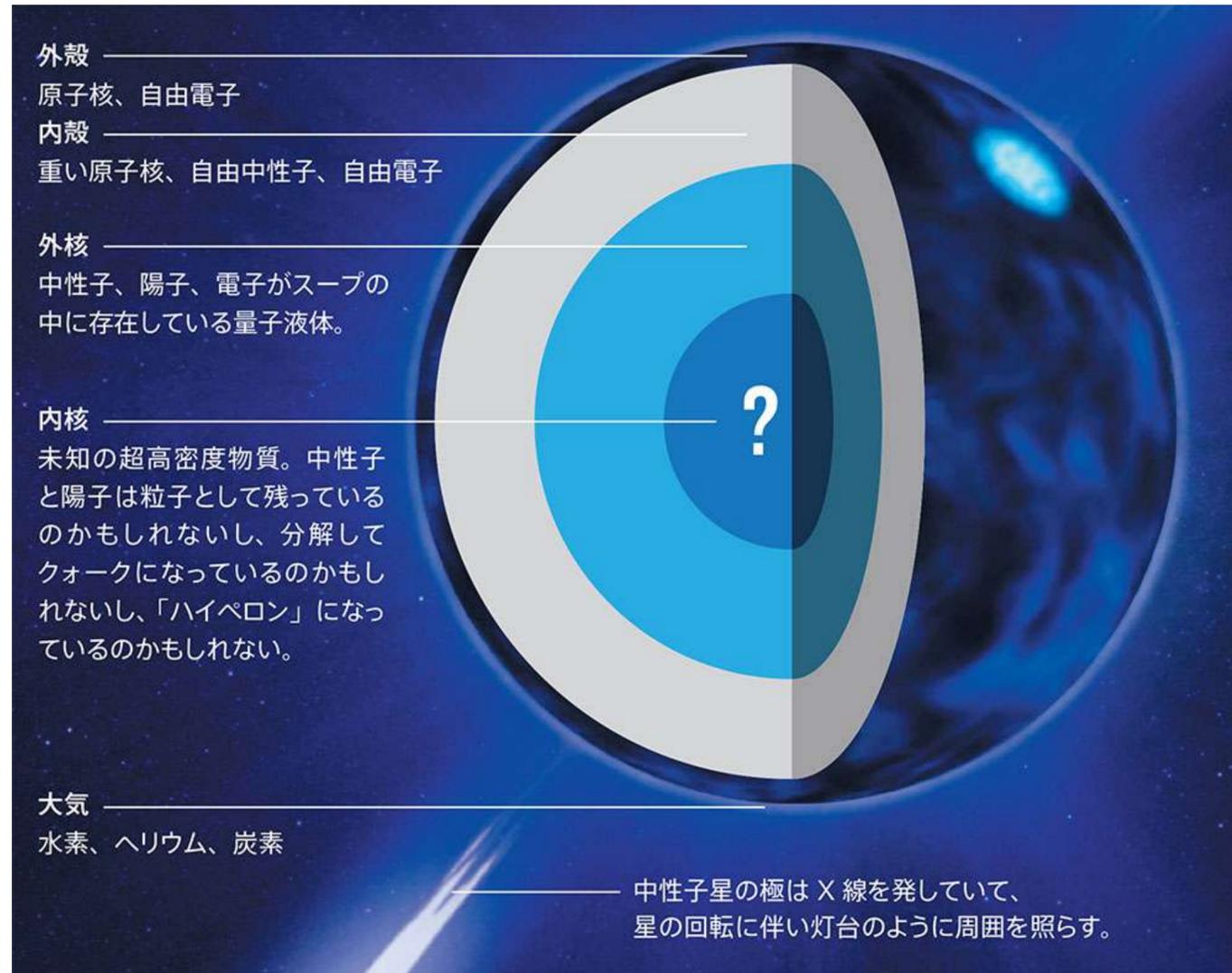
地球(≈ 白色矮星)半径 ≈ 6,400 km

**白色矮星よりコンパクトである必要 = 中性子星 !?**



# 中性子星と物理学 ③未知の内部構造

ブラックホールになる一歩手前のこの世界で一番高密度な物質「中身は未知」



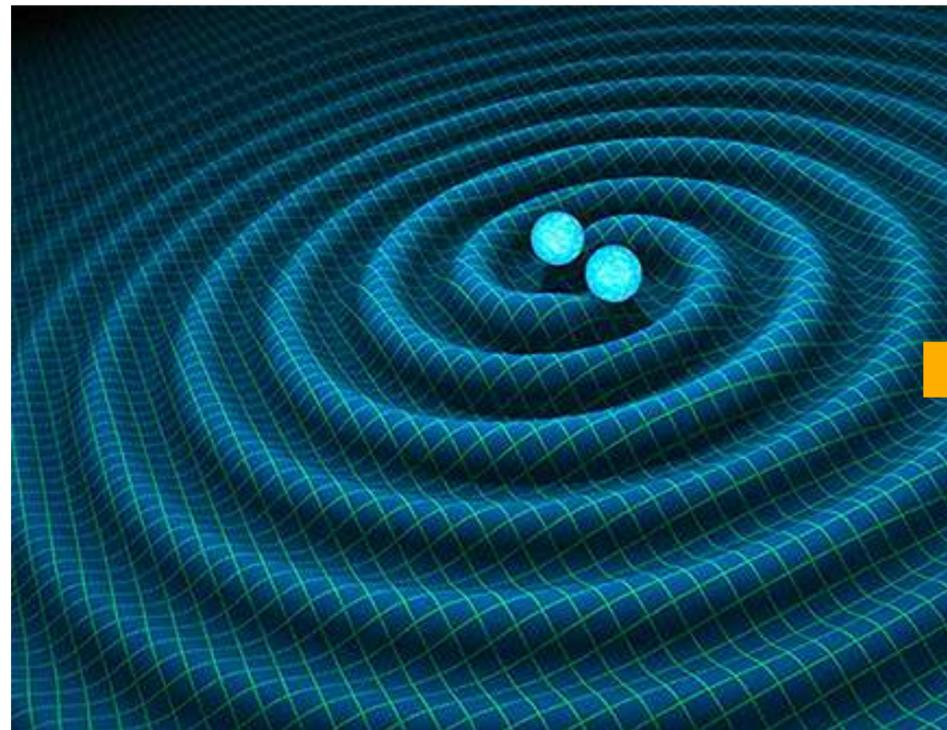
佐藤が NASA にいた時の研究室で作られた望遠鏡

観測的に質量と半径を求められれば、中性子星の中身 (状態方程式) を予測できる

# 中性子星と物理学 ④重力波天文学へ

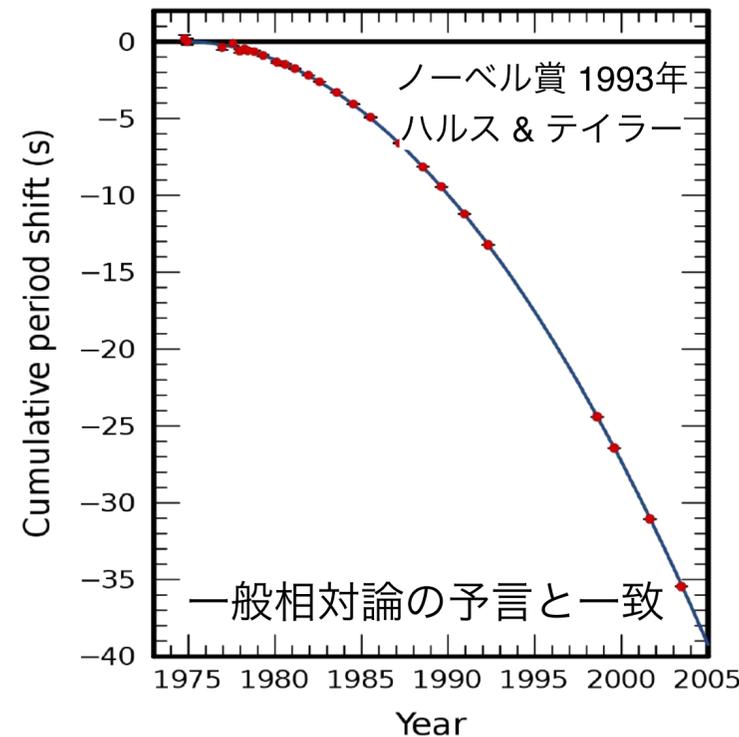
中性子星合体と重い元素の起源 → マルチメッセンジャー天文学へ

中性子星連星は重力波源



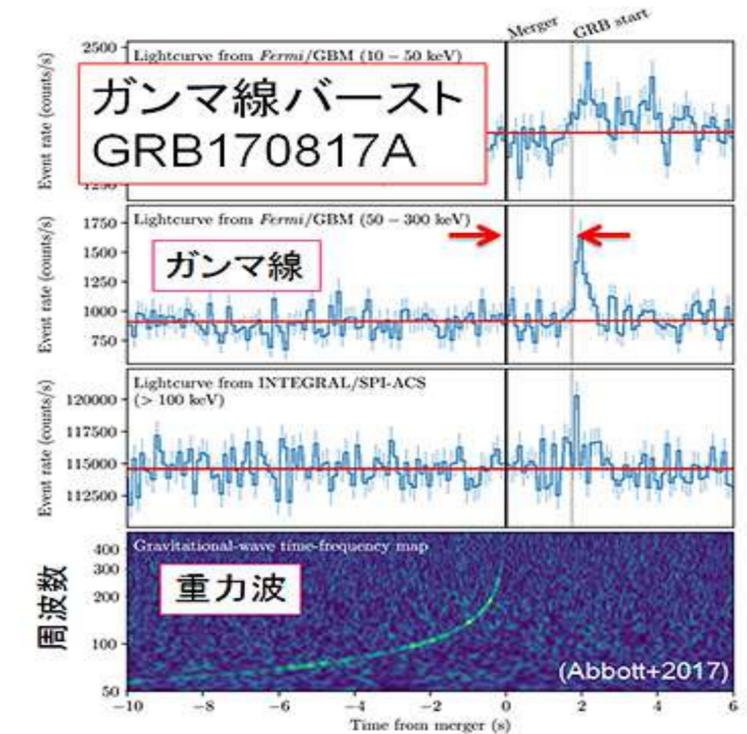
重力波放出で徐々に近づく

連星パルサーの軌道周期変化



間接的に重力波検証 (1975年)

中性子星合体の観測



重力波の直接観測 (2016年)

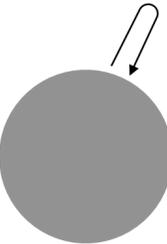
中性子星合体は、**金などの重い元素の主要供給源**として宇宙の化学進化にも重要

電磁波・ニュートリノ・重力波などを使ったマルチメッセンジャー天文学が現在開拓されている

# ブラックホールと物理学 ①ブラックホールの予言

理論的に考えることができる「光も脱出できない」空想の天体

ニュートン力学からの予言



光でも脱出できない?

$$\frac{1}{2}mv^2 = G\frac{Mm}{r} \rightarrow r_g = \frac{2GM}{c^2}$$

脱出速度 = 光速度とすると

1700年代にミッチェルやラプラスによって指摘  
→ 小さく重い天体からは光は出れない?  
→ 非現実的で、あまり重要視されていなかった

一般相対論からの予言

シュヴァルツシルト計量(ブラックホール解)

シュヴァルツシルトが得たアインシュタイン方程式の解

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

↑

$r=0$ で特異点

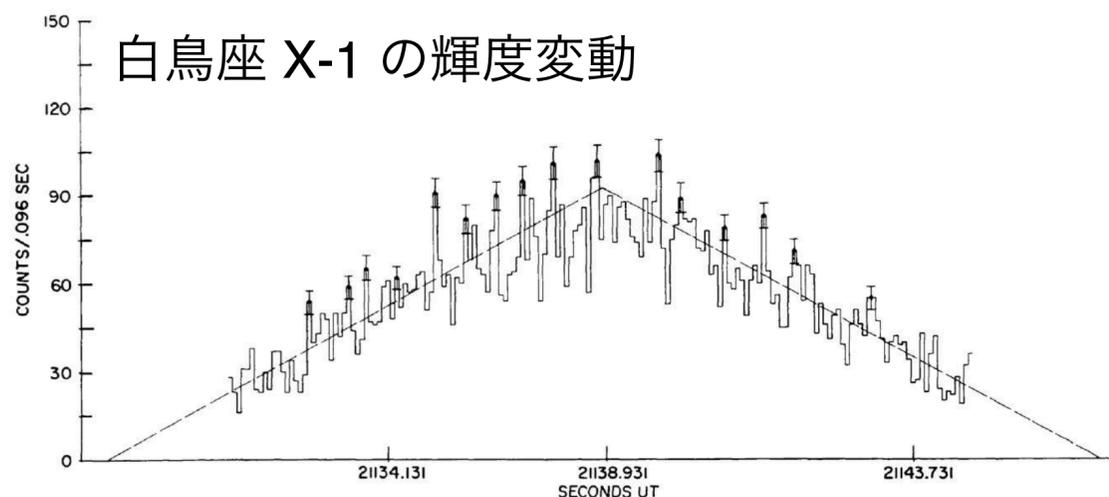
↑

$r=r_g = \frac{2GM}{c^2}$ で特異点

1917年にカール・シュバルツシルトによって導出  
→ この時、そもそもチャンドラセカール限界も未発見  
→ 天文学との関連性はほぼ無いと考えられていた

# ブラックホールと物理学 ②ブラックホール(候補)の発見

強烈なX線を放ちながら高速で時間変動する謎の天体の発見



**X線天文学の誕生** → 超高温天体が見つかり始める

- X線 = 数100万度以上の高温天体から放射
- 星は熱くてもせいぜい数万度
- 皆んな「X線星なんて存在しないでしょ...」



小田稔先生



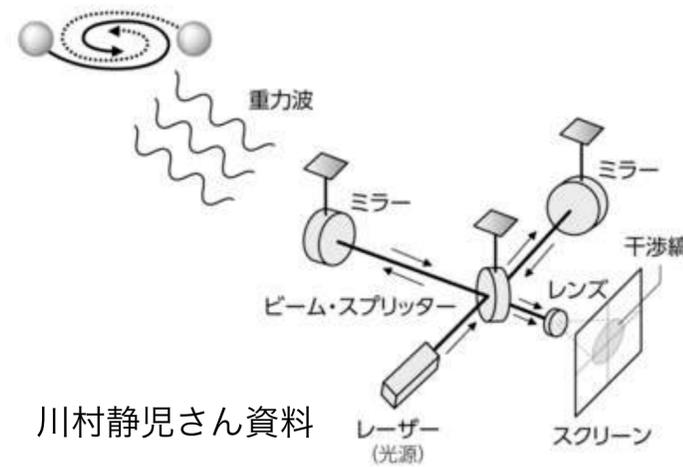
- 白鳥座方向に強いX線源を発見
- しかも、短い時間で変動 → 小さな天体
- 20 太陽質量程度の青い星が隣に
- その星の動きから、少なくとも太陽の10倍は重い重力源(可視光では見えない)が必要

ブラックホール候補天体に関しては、ホーキングも否定的、それぐらい想定外の発見

# ブラックホールと物理学 ③重力波天文学の幕開け

2015年、ブラックホール同士の合体からの重力波 (一般相対論から予言) を検出

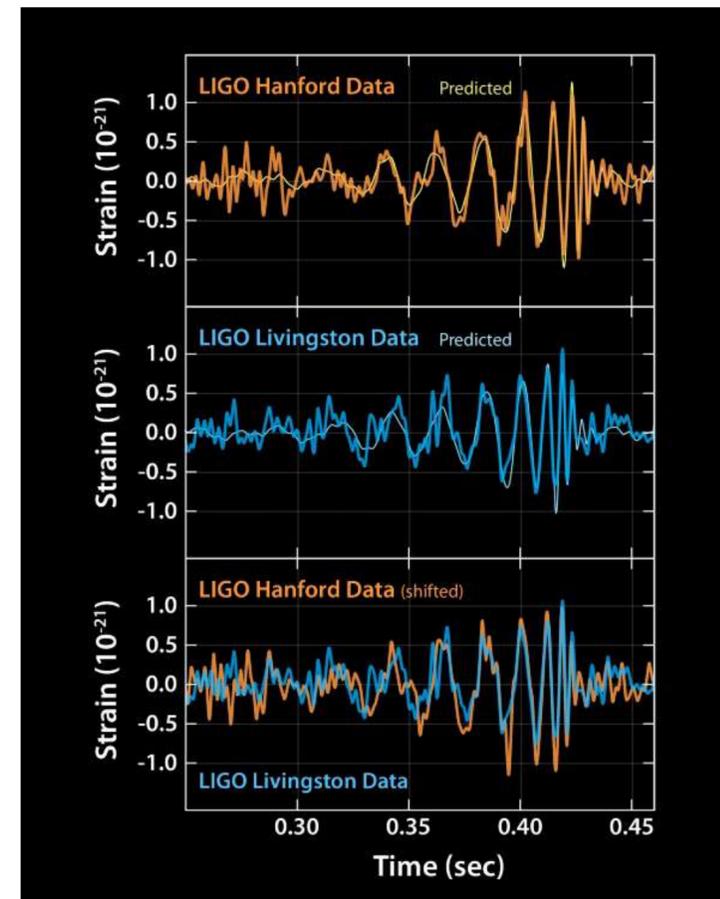
レーザー干渉計による重力波検出の原理



川村静児さん資料

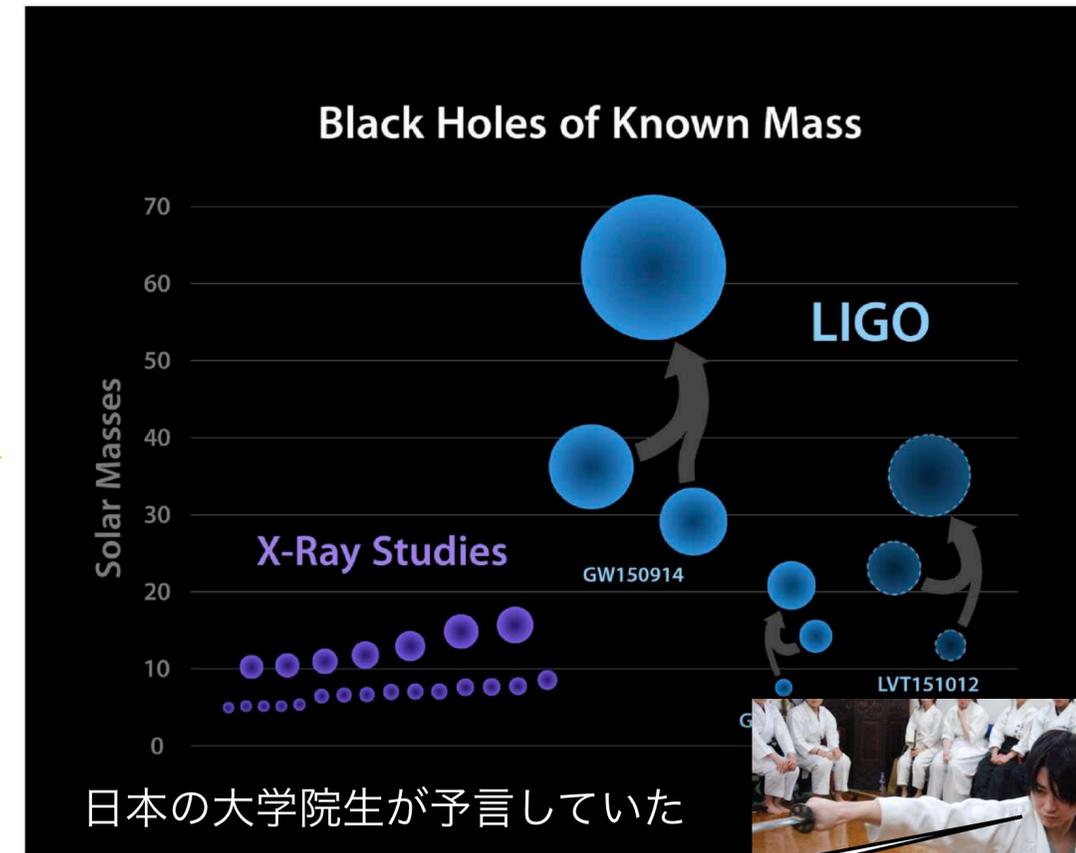


~30 太陽質量 BH 同士の合体



2017年 ノーベル物理学賞

なぜ、こんな重い BH 同士が合体？



初代星 BH 合体見えるはず!!

衣川さん (現在 信州大)

一般相対論の検証のみならず、宇宙初期の天体形成を探るプローブに

# ブラックホールと物理学 ④超巨大質量ブラックホールの発見

2020年ノーベル物理学賞: 「銀河中心にある超巨大コンパクト天体の発見」

for the discovery of a **supermassive compact object** at the centre of our galaxy

ビリアル定理 を思い出そう

$$2\bar{T} = -\bar{U}$$

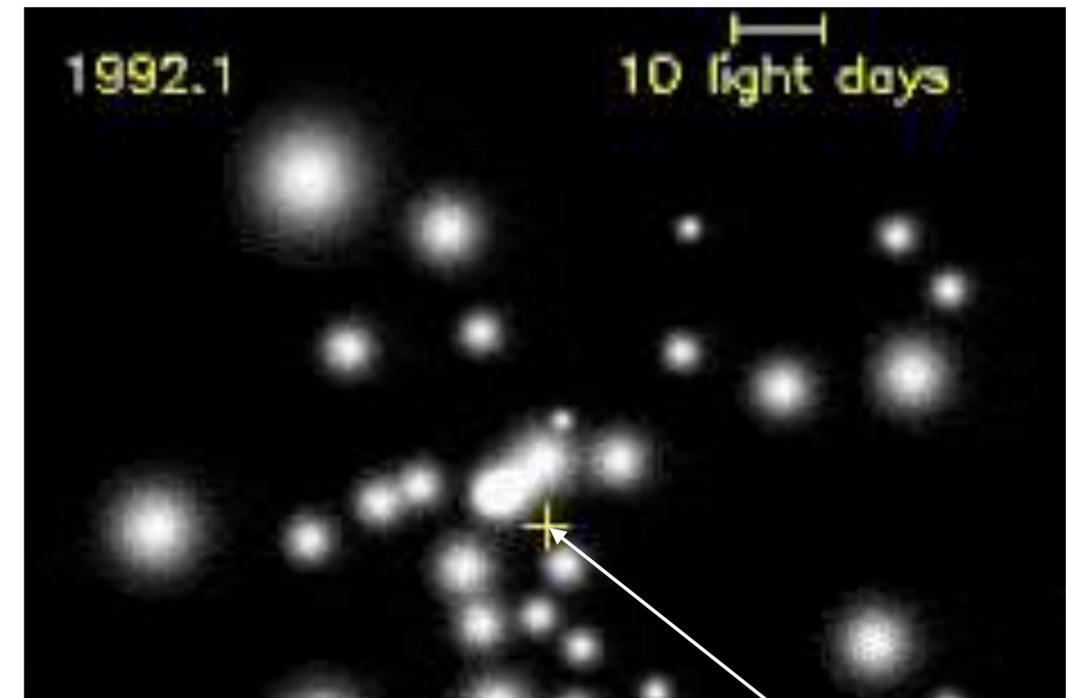
運動エネルギー (長時間平均)      ポテンシャルエネルギー (長時間平均)

運動が分かればポテンシャル(質量)がわかる

$$\frac{1}{2}m\bar{v}^2 = \frac{GM^2}{R^2} \Rightarrow M \simeq \frac{\bar{v}^2 R}{2G} \approx \underline{\underline{4 \times 10^6 M_{\odot} !!}}$$

運動エネルギー      重力ポテンシャル

周囲の天体の動きで、物凄い質量の見えない天体を発見



ゲッツ    ゲンツェル



EHT ブラックホール撮像

# ブラックホールと物理学 ④超巨大質量ブラックホールの発見

