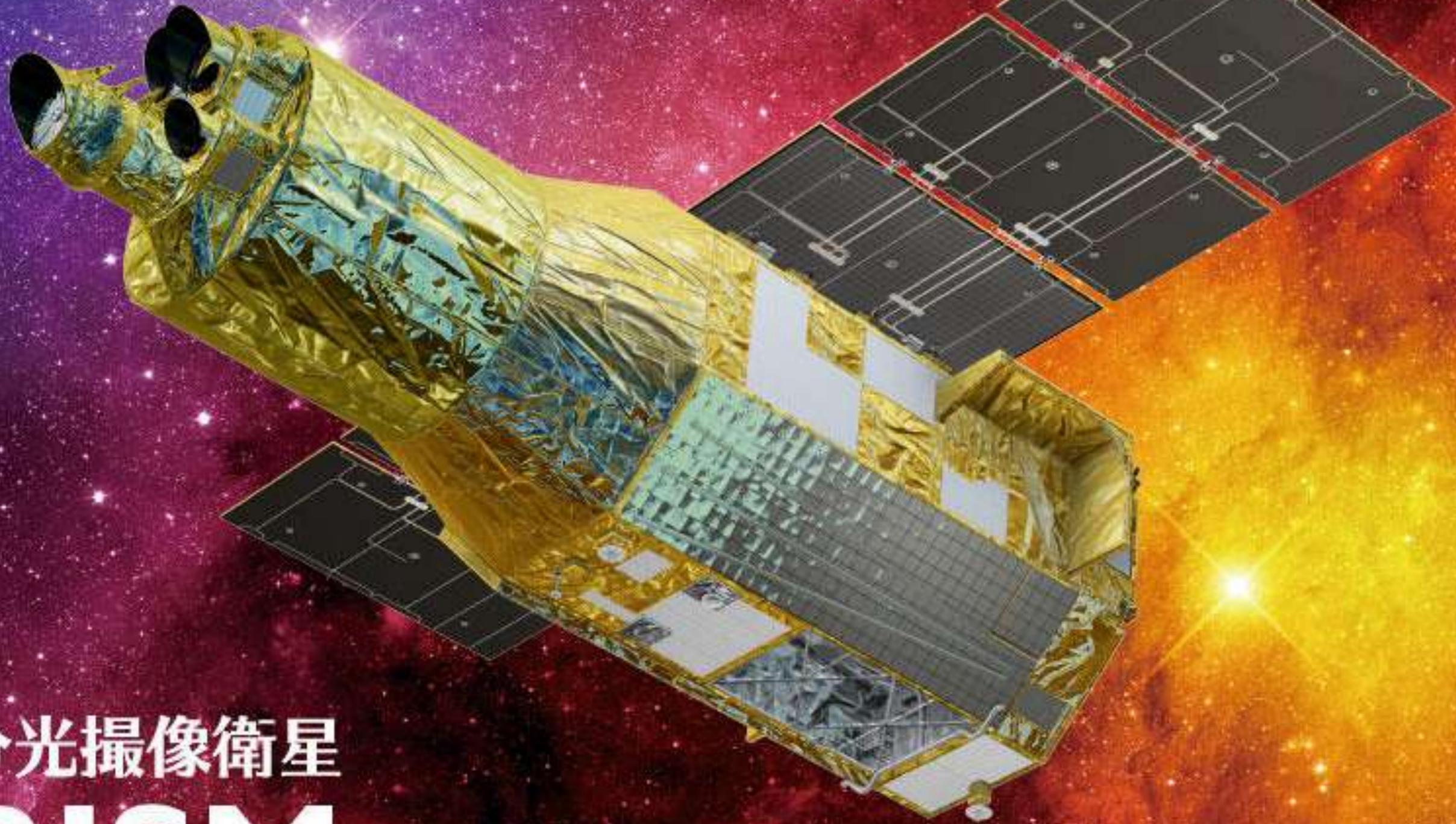


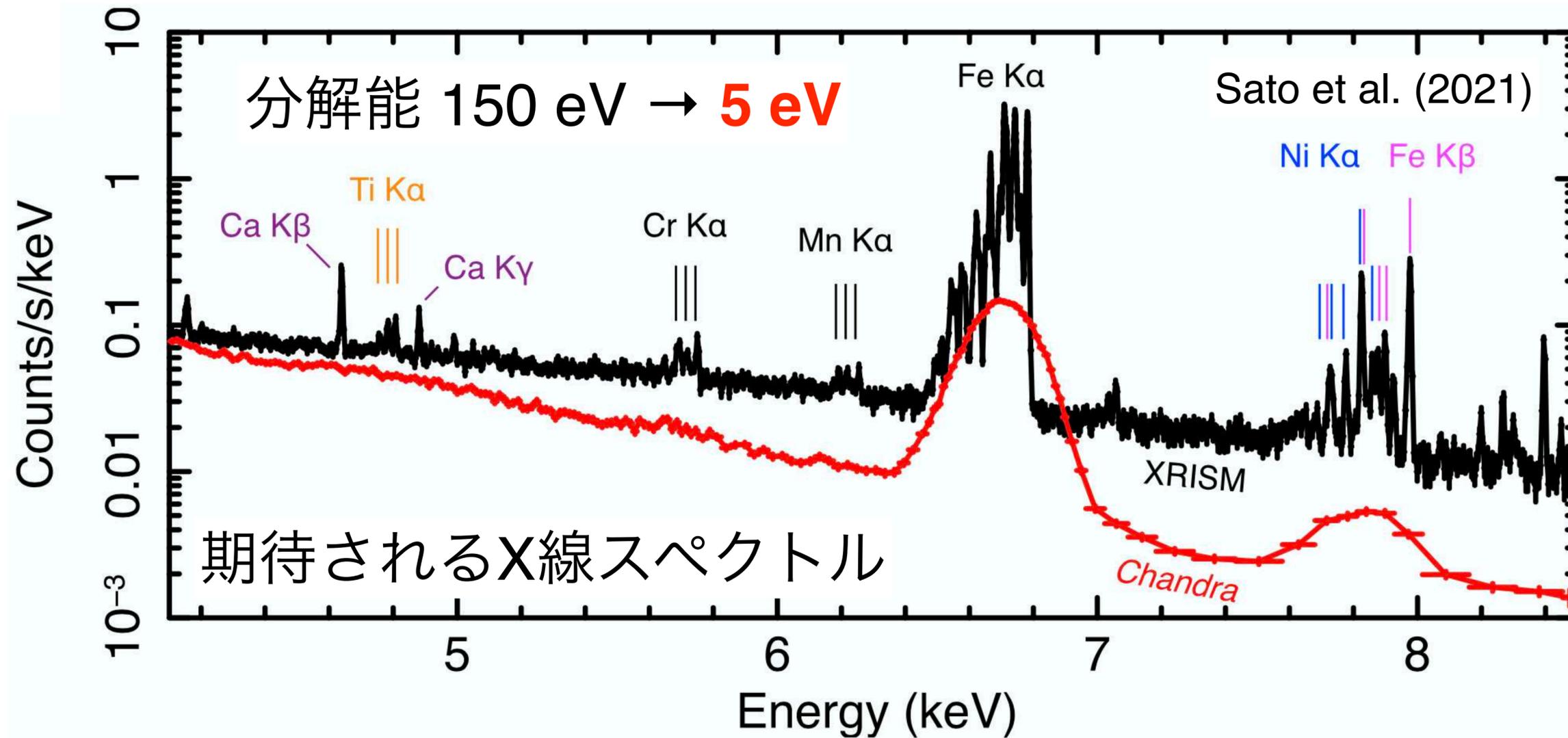
XRISM 衛星打ち上げ！



X線分光撮像衛星
XRISM

XRISM 衛星について

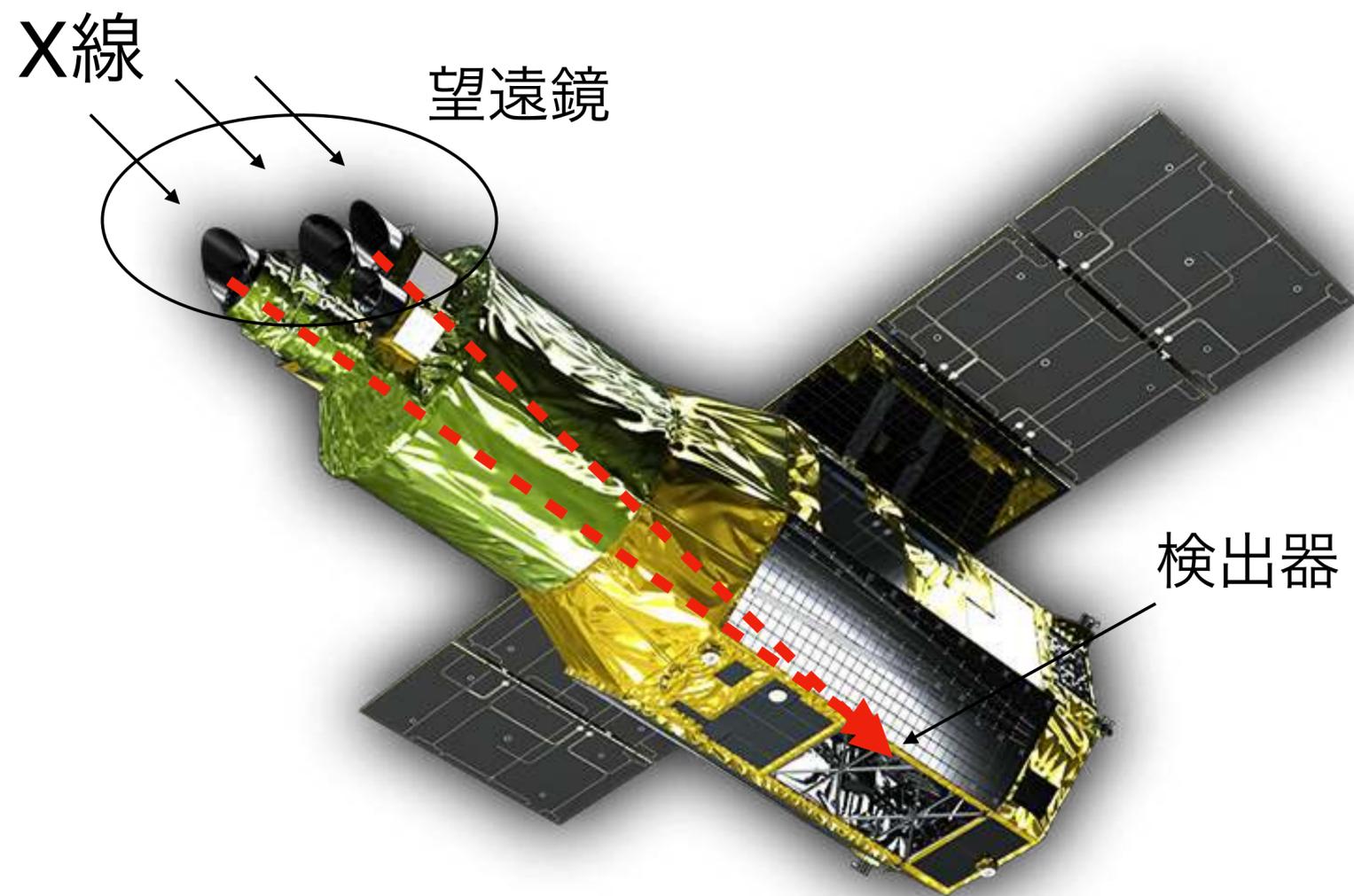
宇宙における原子核物理を更に開拓 → 超精密X線分光衛星「XRISM」



希少元素感度が桁違い → 元素合成研究が飛躍的に進歩

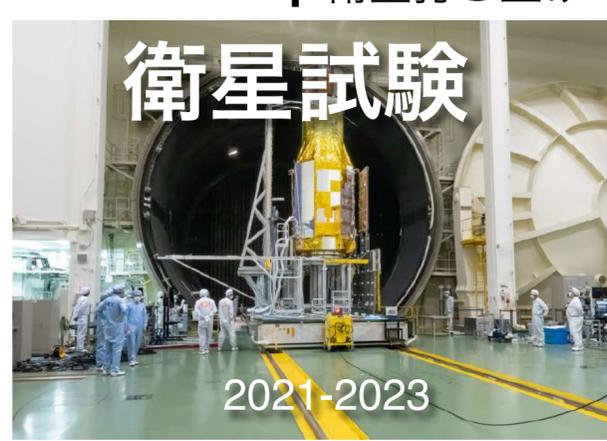
XRISM 衛星の「宇宙X線望遠鏡」

精密X線分光に必要な“目”を作る (2016年 ひとみ衛星 2023年 XRISM衛星)



望遠鏡開発に必要なプロセス

観測成果

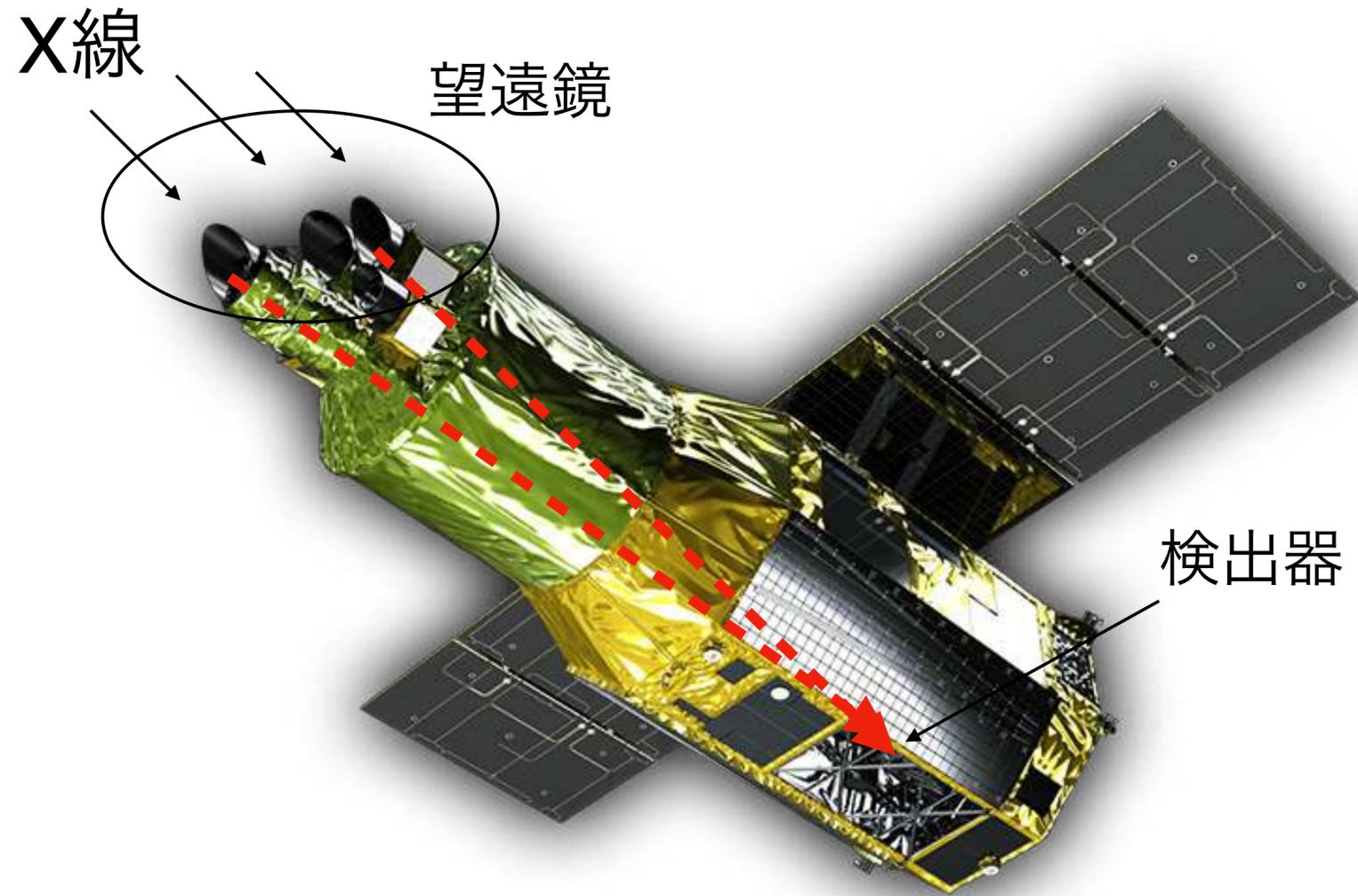


↑ 衛星打ち上げ

学部生の頃から(2012年~)の悲願 → 元素合成研究を更に発展!

XRISM 衛星の「宇宙X線望遠鏡」

精密X線分光に必要不可欠な“目”を作る (2016年 ひとみ衛星 2023年 XRISM衛星)



JAXA 筑波宇宙センターでの試験の様子



学部生の頃から(2012年~)の悲願 → 元素合成研究を更に発展！

XRISM 衛星の「宇宙X線望遠鏡」

X線の集光・結像にはレンズ(直入射光学系)は使えない

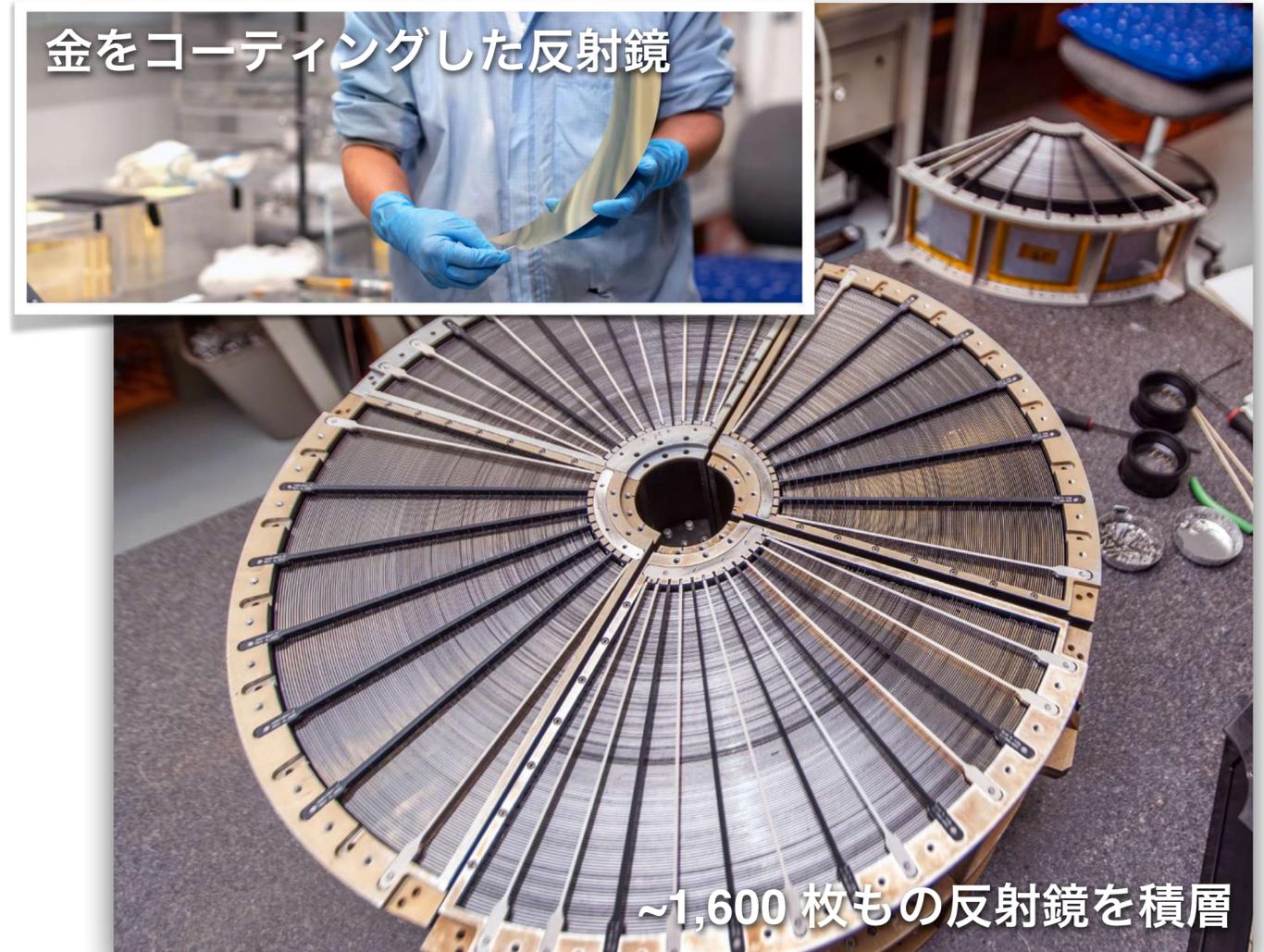
X線帯域: 物質の屈折率が1よりわずかに小さい

プラズマ中の電磁波の屈折率 プラズマ周波数

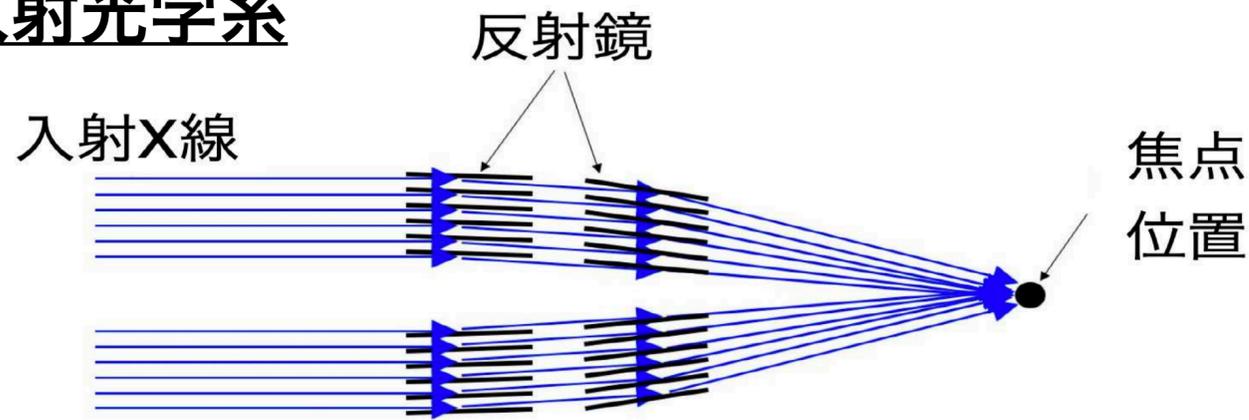
$$n = \sqrt{\epsilon} = \sqrt{1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}} < 1$$

比誘電率 (X線帯域では $\omega \gg \omega_p$)

NASA での望遠鏡作製風景



斜入射光学系



反射鏡に臨界面角(~1°)未満でX線を当て全反射

我々の独自の技術 「安い・軽い・集光力大」

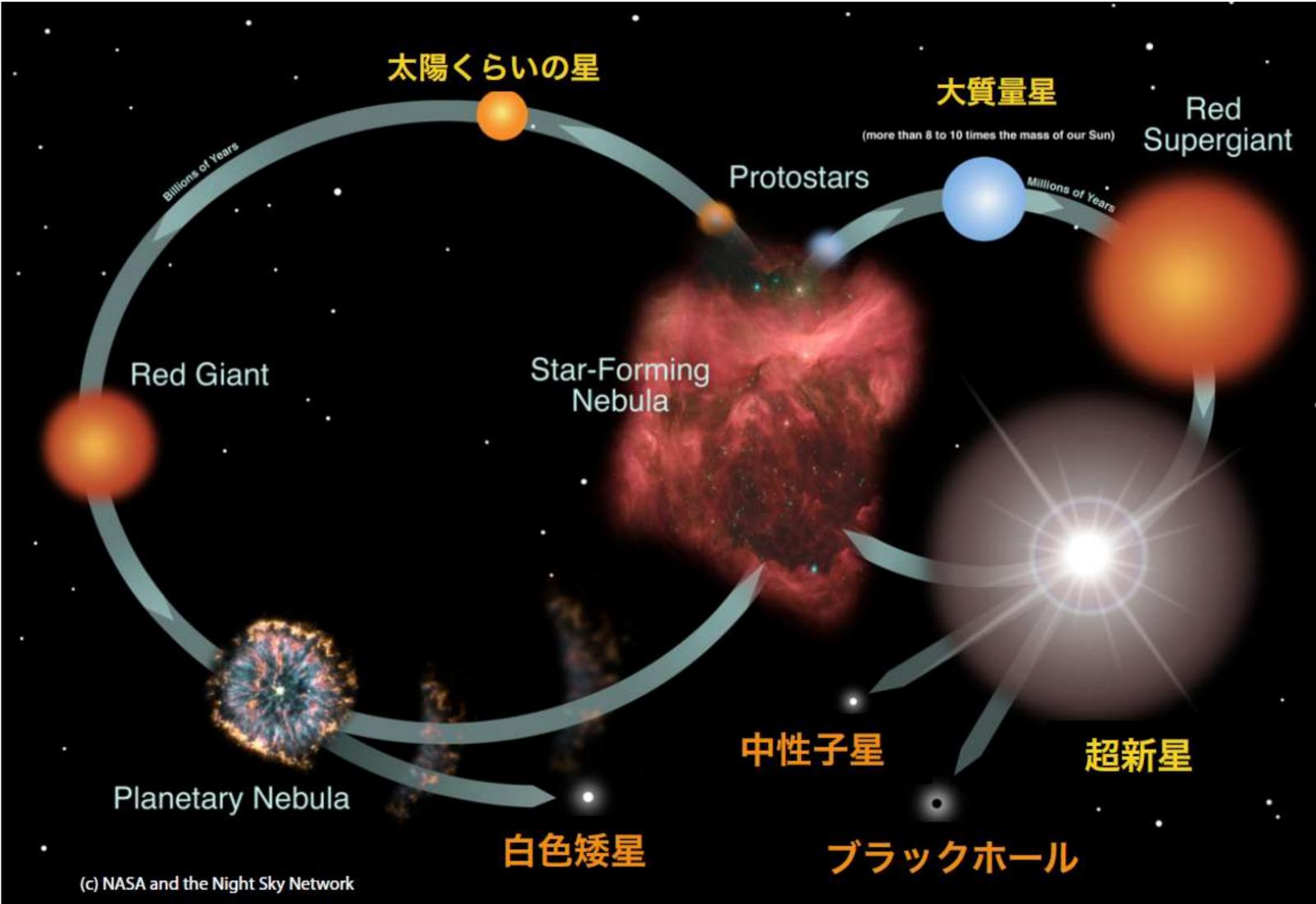
明治大学 宇宙物理ゼミ 第二回

恒星進化とコンパクト天体

星の輪廻転生で豊かになった宇宙

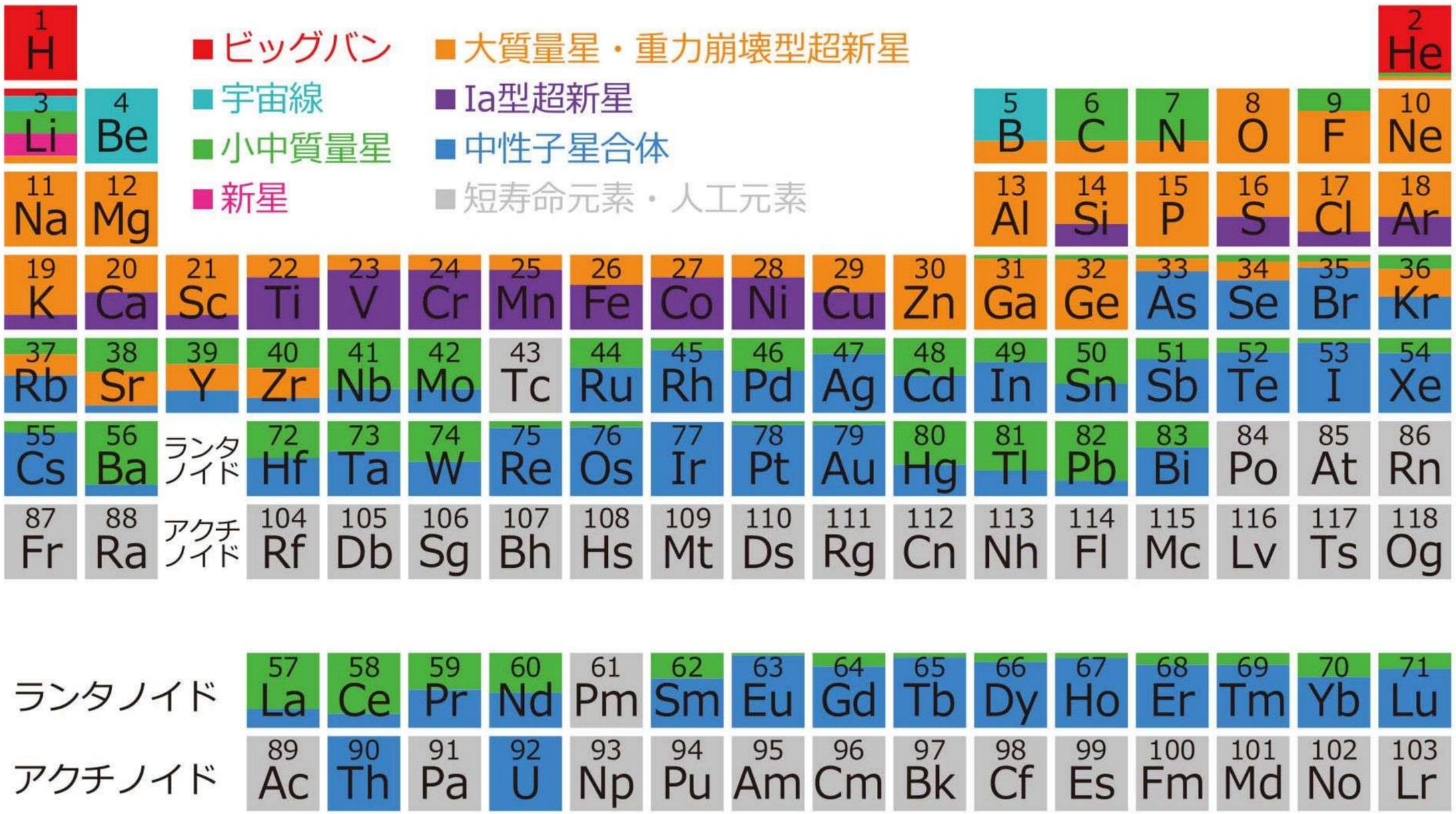
星の輪廻転生で豊かになった宇宙

前回の復習: ビックバンだと水素・ヘリウムぐらいしか作れない → **現在の宇宙の形成に星が必要**



星の輪廻転生で豊かになった宇宙

身の回りの元素は、もともと宇宙の天文現象で作られている → **天体物理から生命の起源へも**



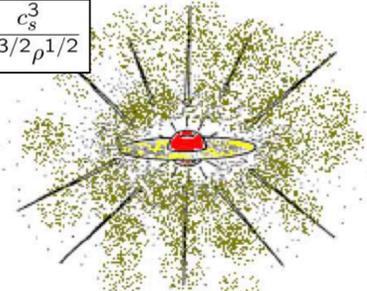
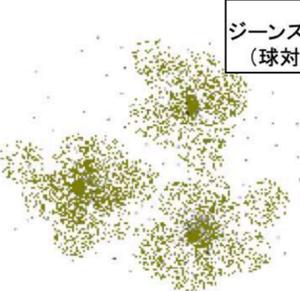
まず、星はどうやって誕生するか？

星の作り方に関する未解決問題が多く、大きな研究領域: **冷たいガスを重力的に潰す**

星形成の標準シナリオ

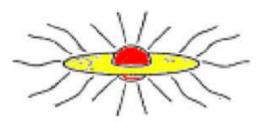
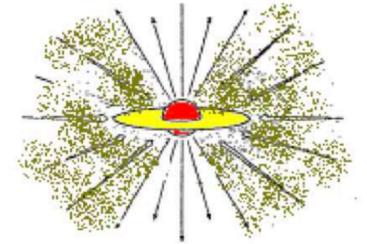
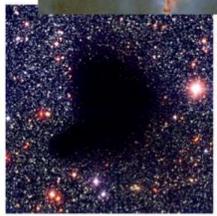
ジーンズ質量: $M_J = K \frac{c_s^3}{G^{3/2} \rho^{1/2}}$
(球対称)

林, Larson, Shuら
により80年代に確立



① 分子雲中の高密度部分 (~太陽質量) の重力崩壊

② 原始星の形成と 原始星への質量降着

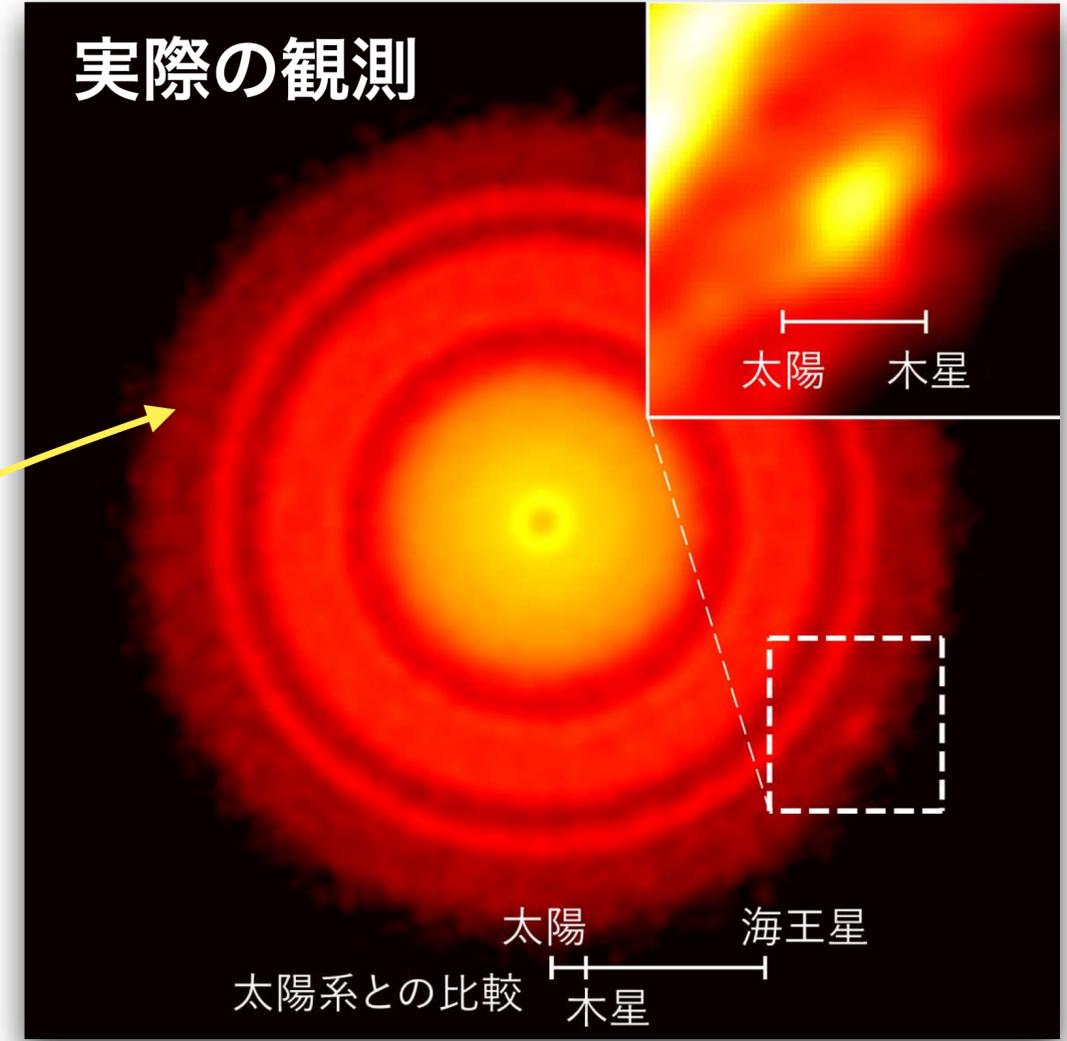


③ 星からのフィードバック による降着の終了

④ 降着円盤の残骸で 惑星系形成へ



実際の観測



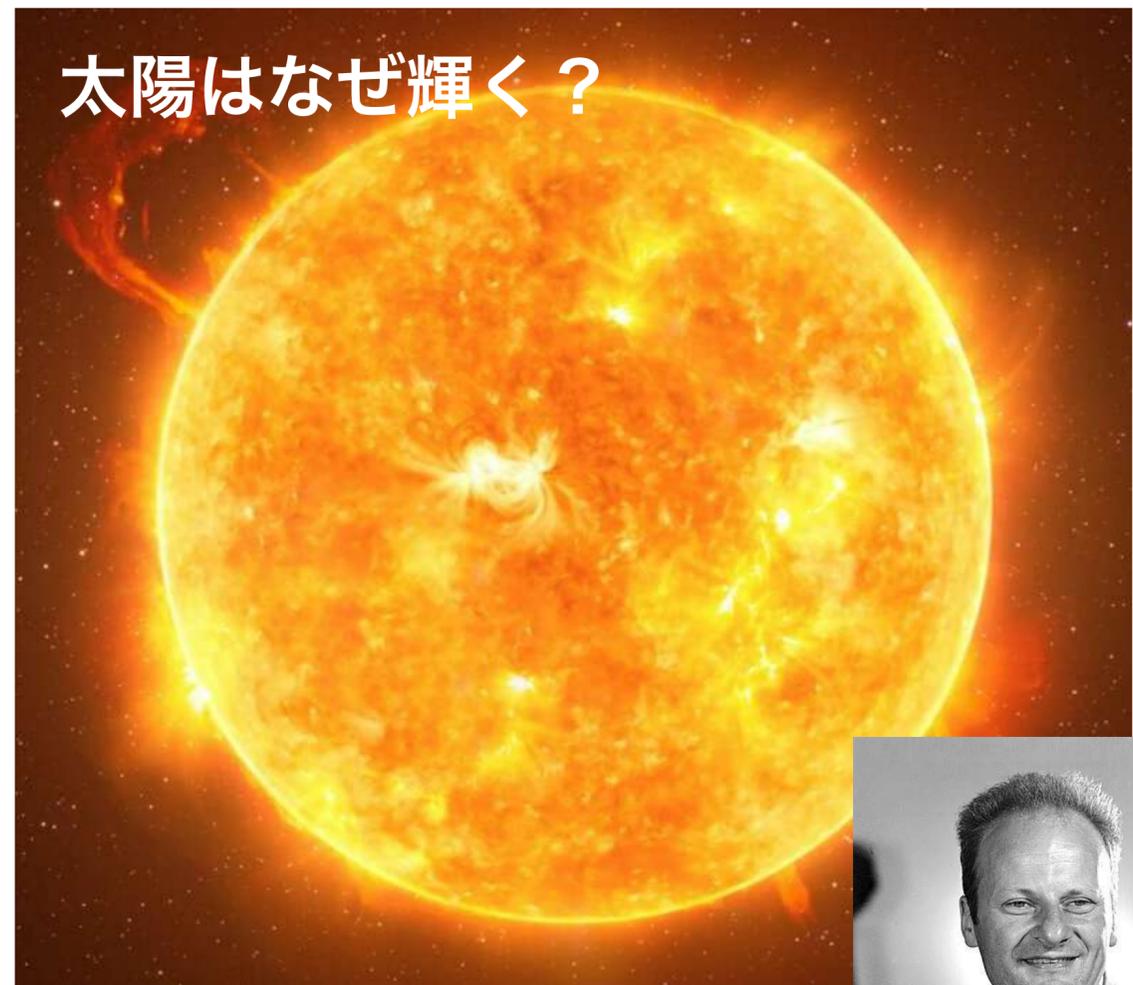
細川隆史「現在と初期宇宙での星形成」2013 若手夏の学校 http://astro-wakate.sakura.ne.jp/ss2013/web/invited/star_hosokawa.pdf

国立天文台プレスリリース「アルマ望遠鏡、惑星誕生の現場をピンポイントで特定」

数値シミュレーション(理論)と観測(主に電波)から、星・惑星がどのように誕生するかを明らかに

星のエネルギー源は？

星(恒星)は、重力で潰された中心の量子トンネル効果+核融合反応で輝く



太陽はなぜ輝く？

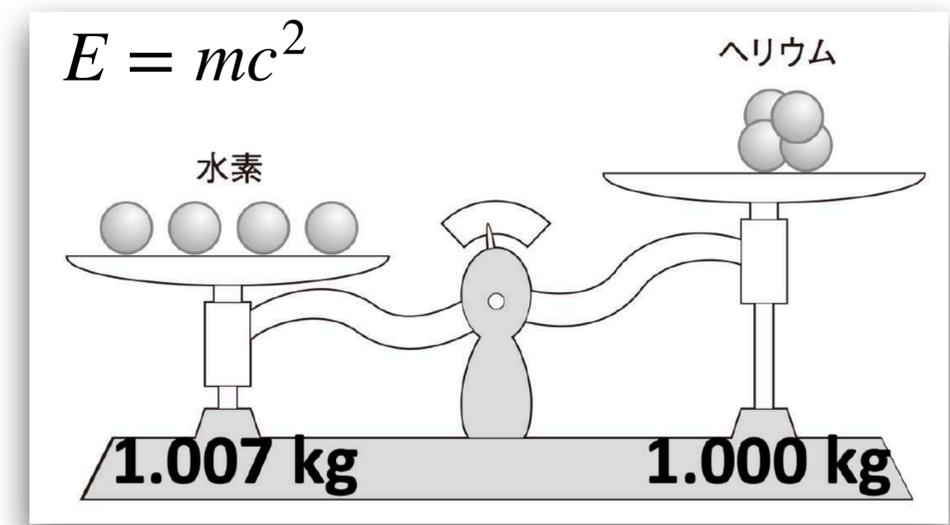
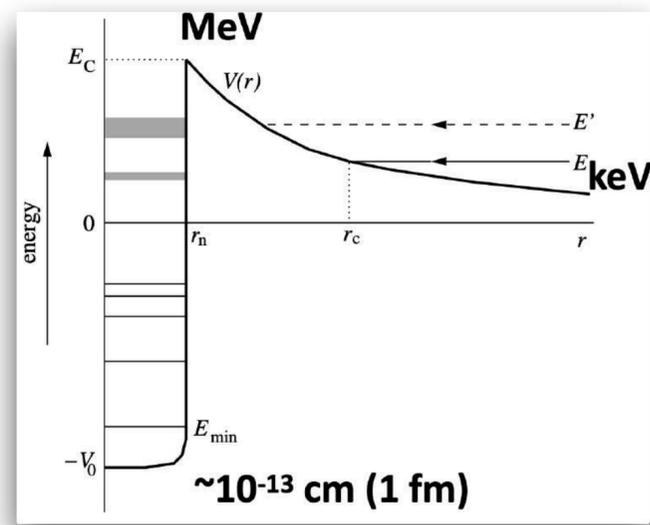
- 太陽の明るさ = 4×10^{26} J/s (= W) = 4×10^{33} erg/s
- 太陽の質量 / 化石燃料の燃焼率 (化学反応) $\sim 6 \times 10^3$ yr
- 太陽の年齢 $\sim 4.6 \times 10^9$ yr \rightarrow 燃え尽きていない
- 太陽中心温度 ~ 1 keV だが、量子トンネルで ~ 1 MeV のクーロン障壁を越えて融合 \rightarrow 膨大なエネルギー供給



1967年ノーベル物理学賞

「原子核反応理論への貢献、特に星の内部におけるエネルギー生成に関する発見」

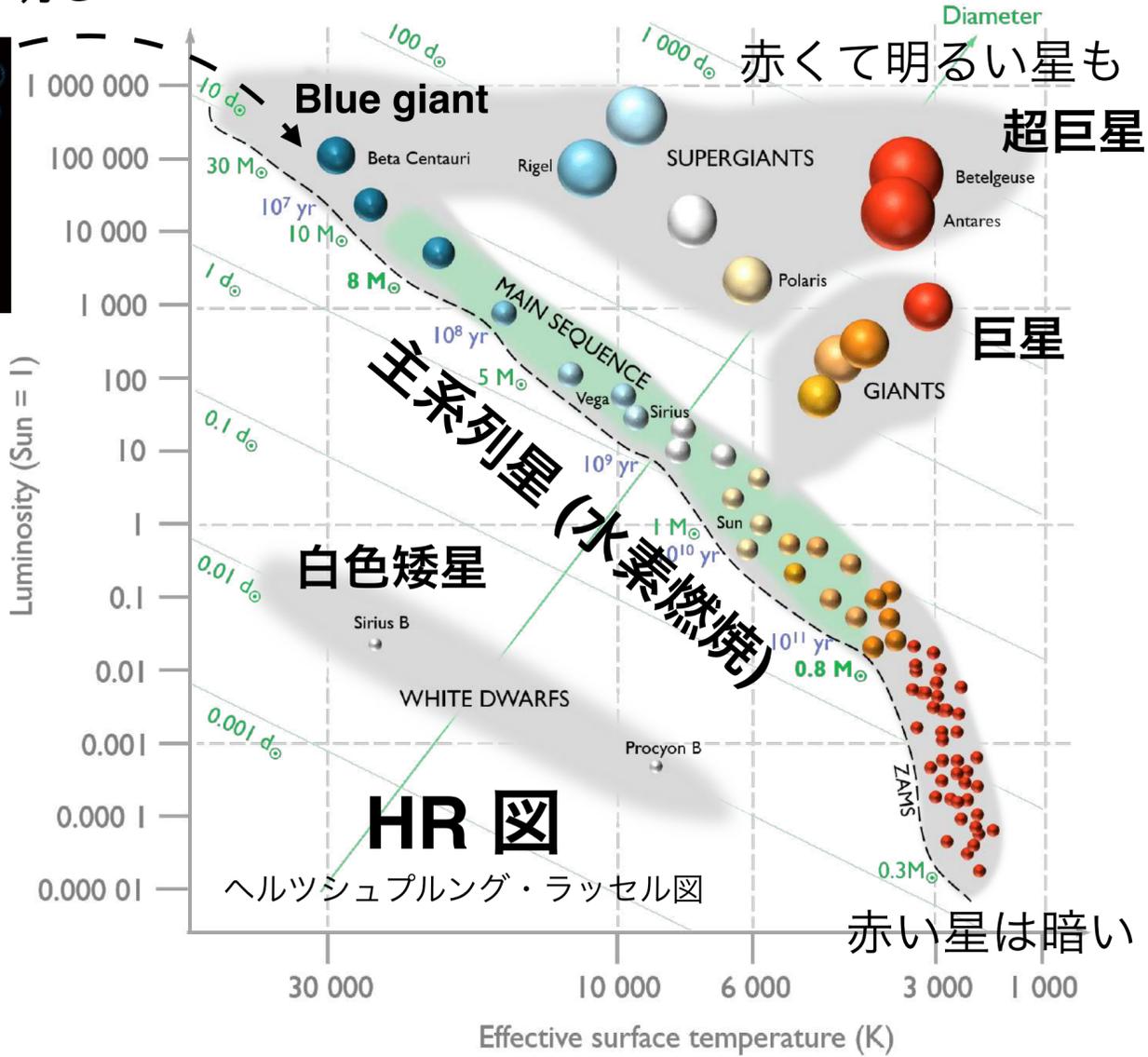
ハンス・ベータ



星の分布: HR 図から見る恒星の分類と進化

もともと、星の分類は「切手集め」的な研究 → 現代はこれが物理学に

青い星は明るい



赤くて明るい星も

シュテファン・ボルツマンの法則

$$L = 4\pi R^2 \times \sigma T^4$$

明るさ 星の表面積 温度

熱輻射によって黒体から放出されるエネルギー

主系列星 (普通の星) = 中心で水素を燃やす星

- 重い星ほど青い = 温度が高い
- 重い星ほど明るい
- 重い星ほど寿命が短い
 - ~3000万年 @ 10 M_☉
 - ~100億年 @ 1 M_☉

本気でやると、恒星進化の記述には「強い力・弱い力・電磁気力・重力」の全てが密接に絡む

星の色/明るさ/寿命の推定 = 簡単な次元解析

質量保存 $M \sim \rho R^3$

力学平衡 $\frac{p}{R} \sim \frac{GM\rho}{R^2}$

ガス圧優勢 $p \sim \frac{\rho kT}{m_H}$

中心温度は、水素燃焼でリミットされてると考えれば、ほぼ一定なので

$$R \propto M \quad \rho \propto M^{-2} \quad p \propto M^{-2}$$

半径は質量と共に増加するが、密度・圧力は急激に減少

エネルギー輸送式 (輻射平衡)

$$L_r = -4\pi r^2 \left(\frac{\overset{\text{輻射定数}}{4acT^3}}{\underset{\text{吸収係数}}{3\chi\rho}} \right) \frac{dT}{dr}$$

星の大部分では輻射平衡

$$L \sim \frac{acT^4 R}{\chi\rho}$$

質量がある程度あれば、電子散乱優勢で
吸収係数は一定とみなせるので上式を使って

$$L \propto M^3 \quad T_{eff} \propto M^{1/4}$$

(シュテファン・ボルツマン則使って)

0.5 < M/Msun < 20 の範囲では、近似式として $L \propto M^{3.5}$ なので、これで質量を割って、主系列星の寿命は $t_{MS} \propto M^{-2.5}$

主系列星から赤色巨星・赤色超巨星への進化: 太陽の場合

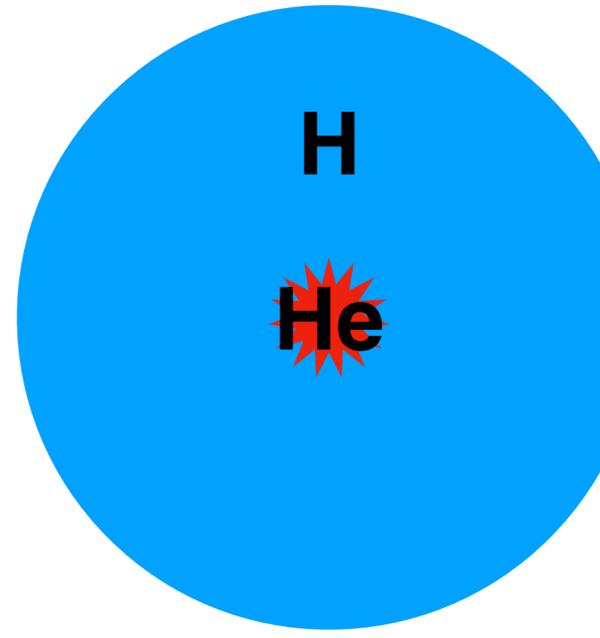
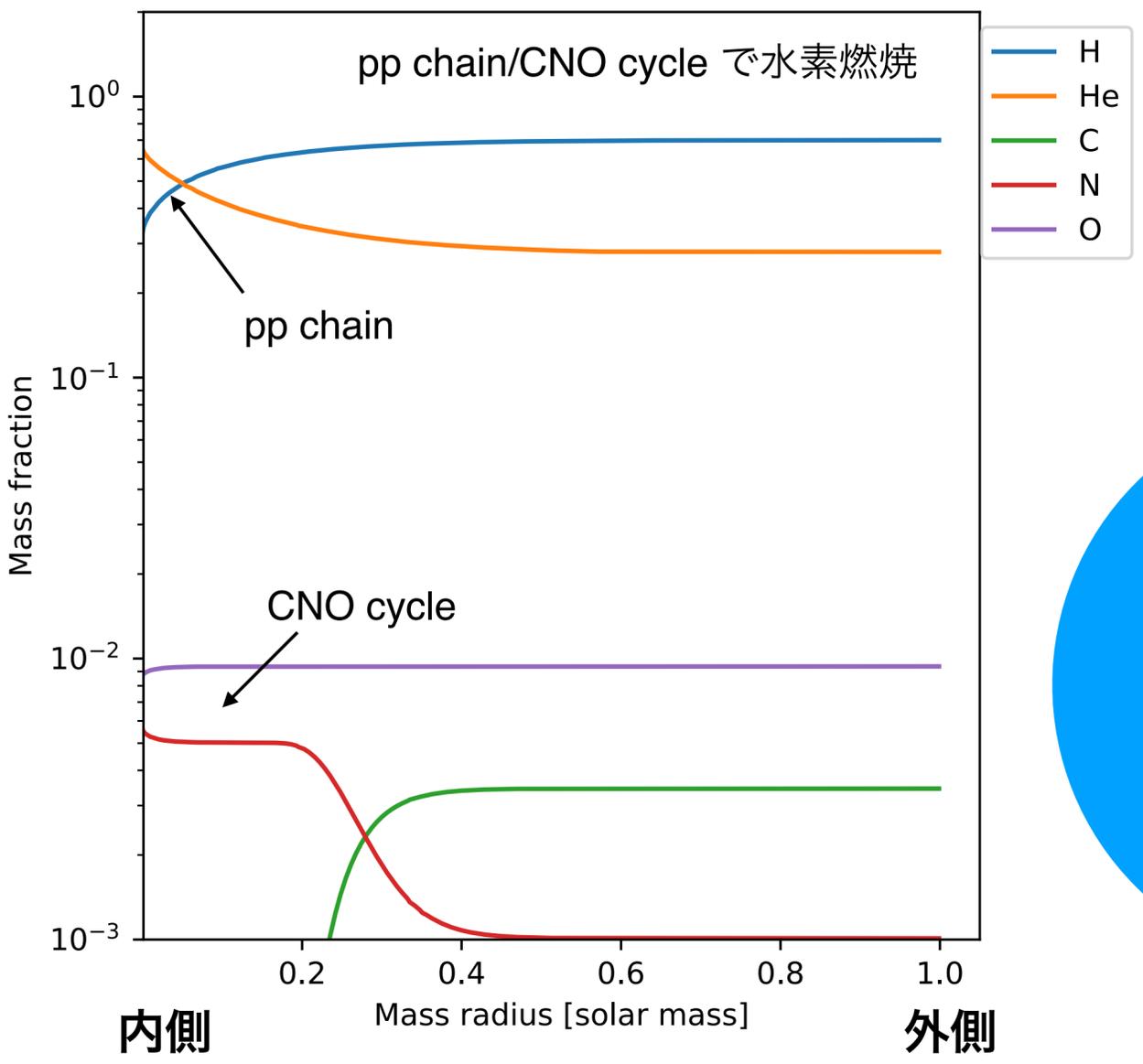
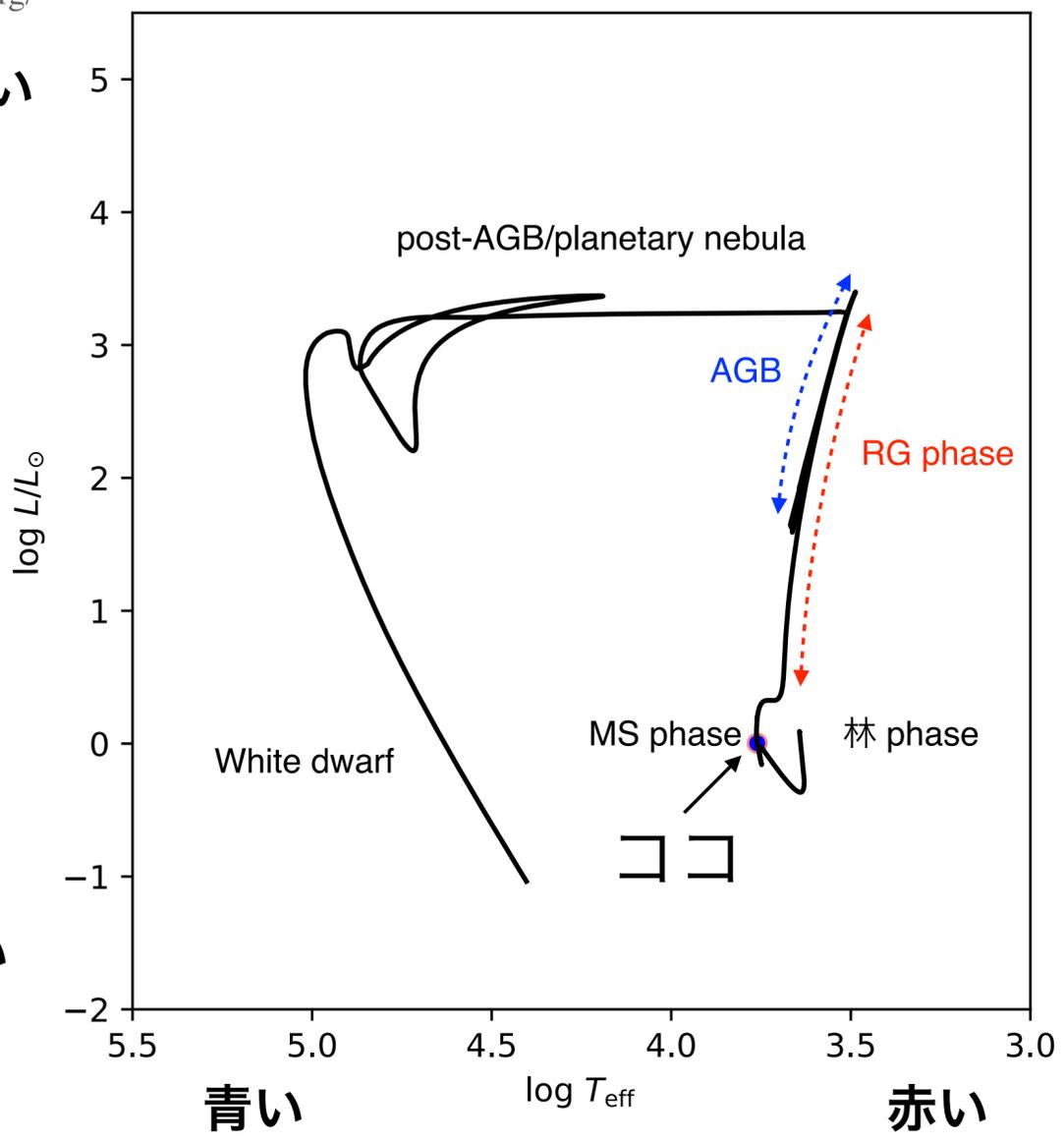


<https://docs.mesastar.org/>

我々人類は、太陽系に永遠に住む事は不可能だと物理でわかる

明るい

暗い



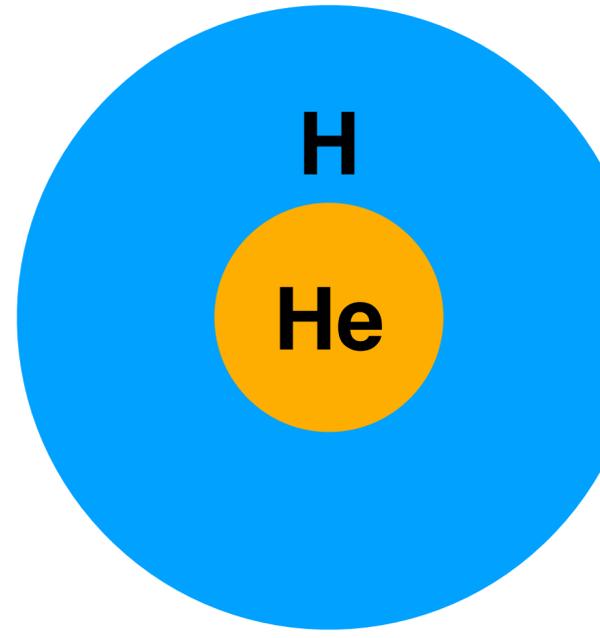
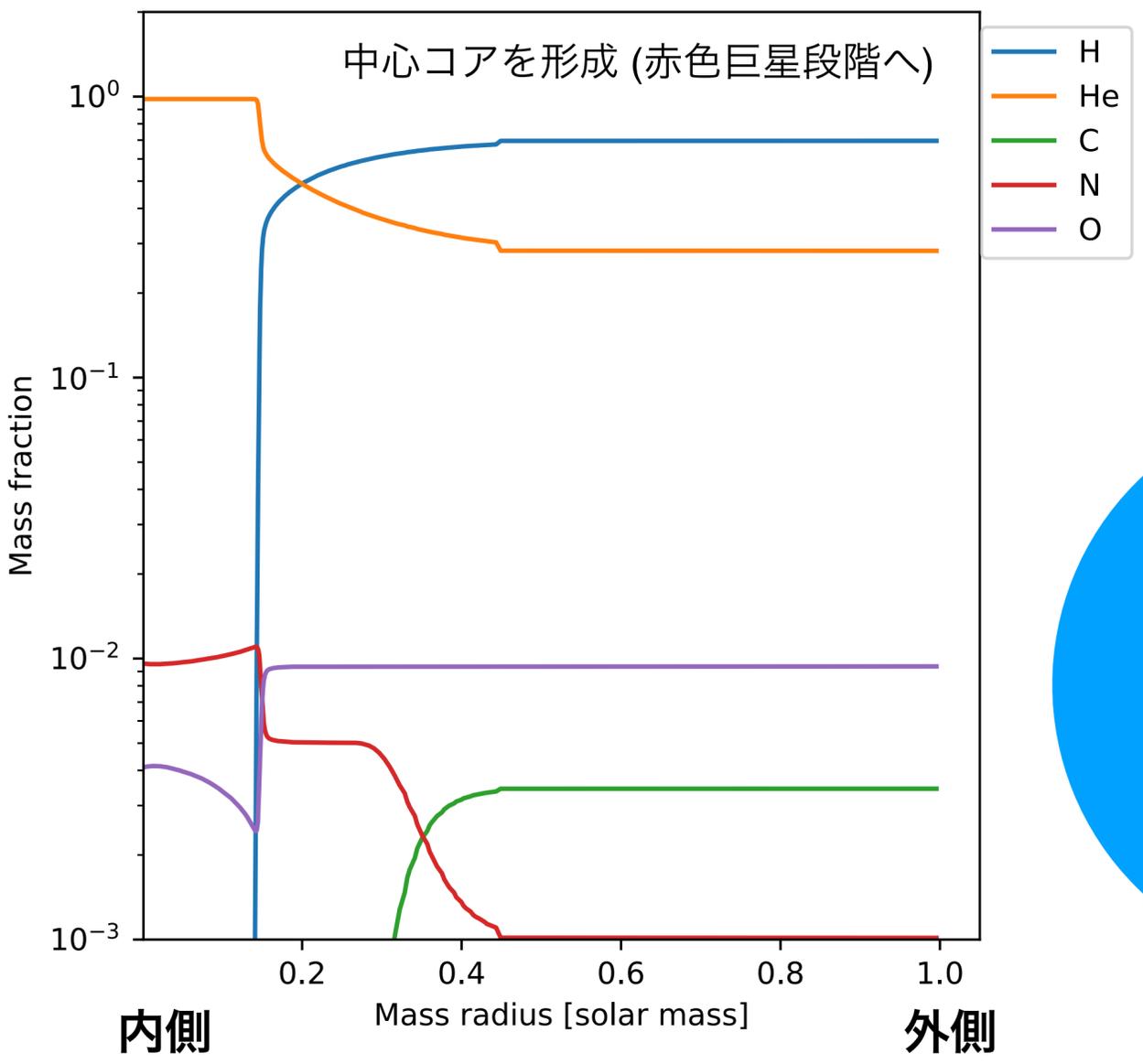
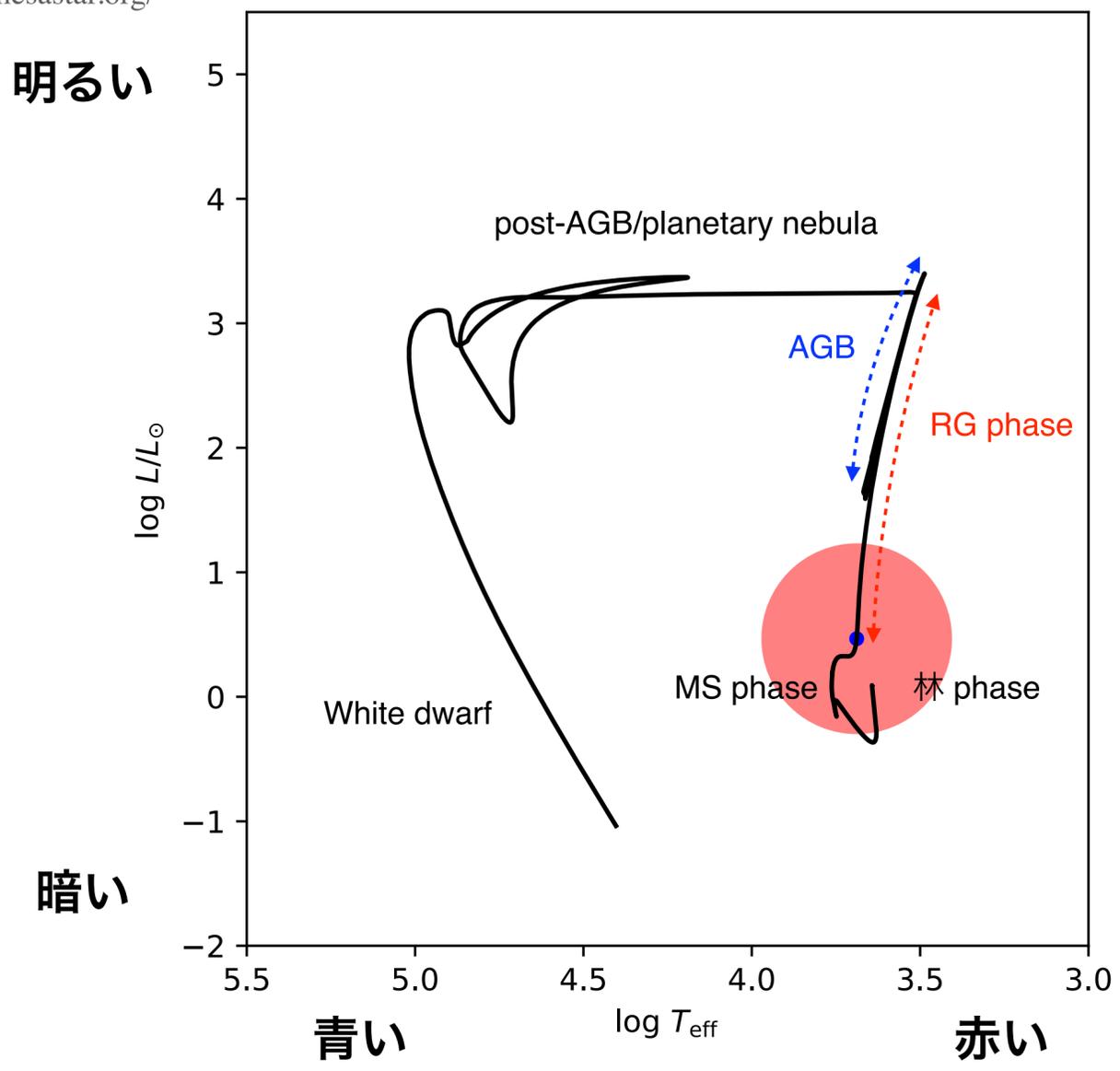
多くの星の観測結果と数値シミュレーションで、星の進化を物理で紐解く

主系列星から赤色巨星・赤色超巨星への進化: 太陽の場合



<https://docs.mesastar.org/>

我々人類は、太陽系に永遠に住む事は不可能だと物理でわかる



多くの星の観測結果と数値シミュレーションで、星の進化を物理で紐解く

主系列星から赤色巨星・赤色超巨星への進化: 太陽の場合

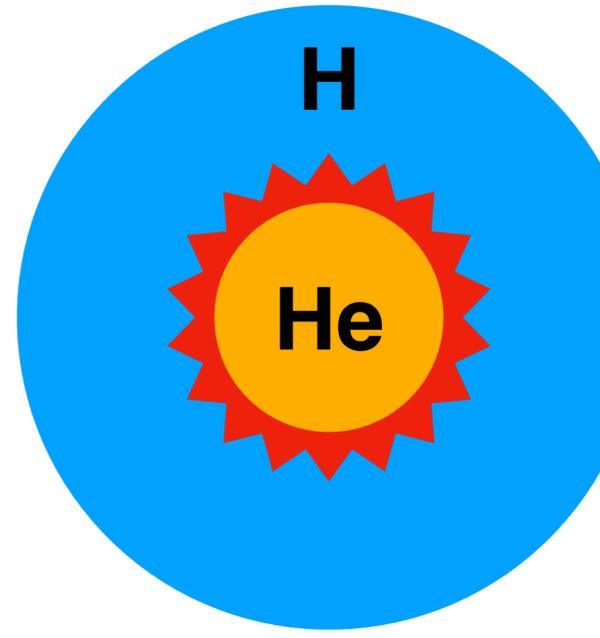
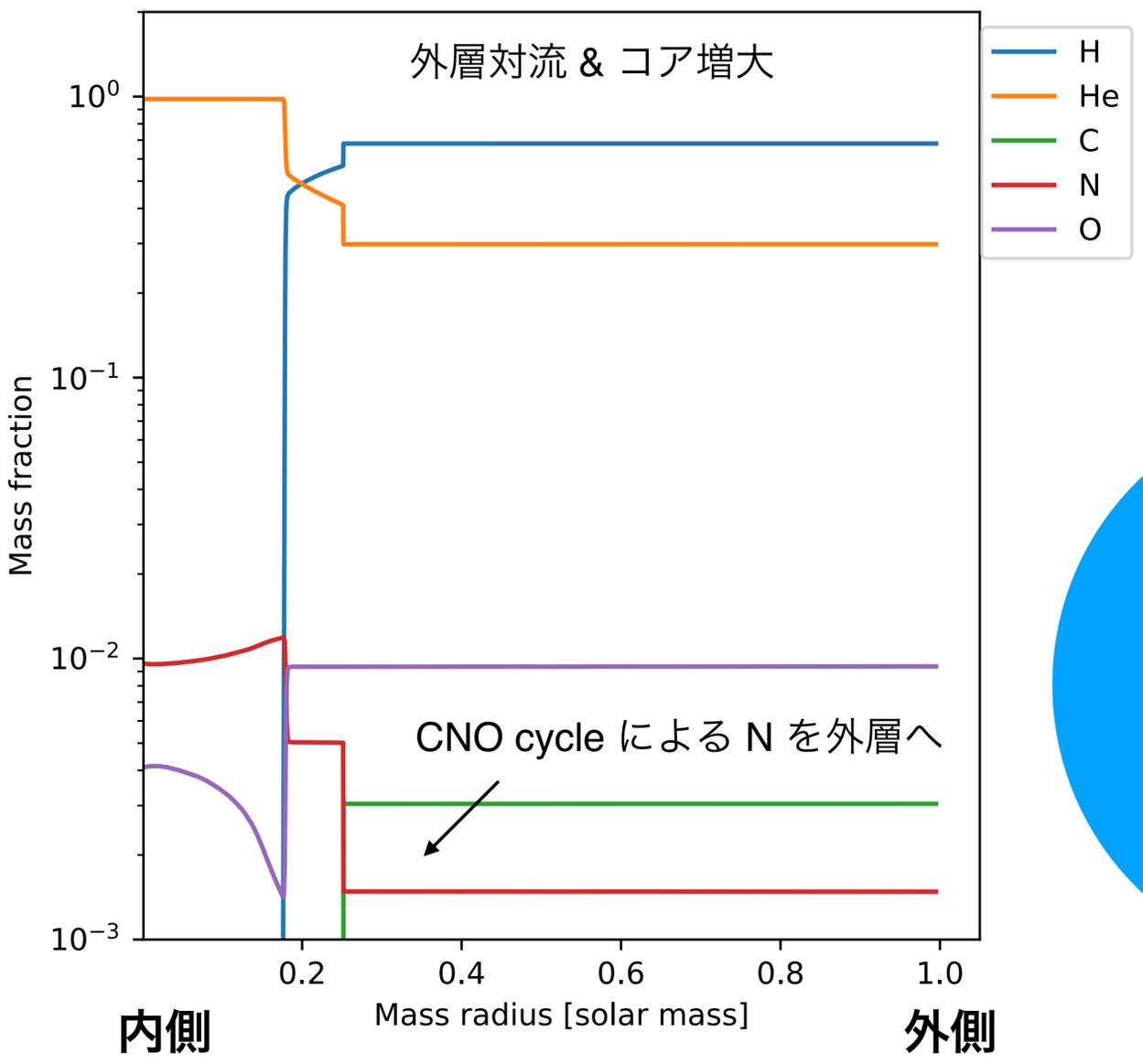
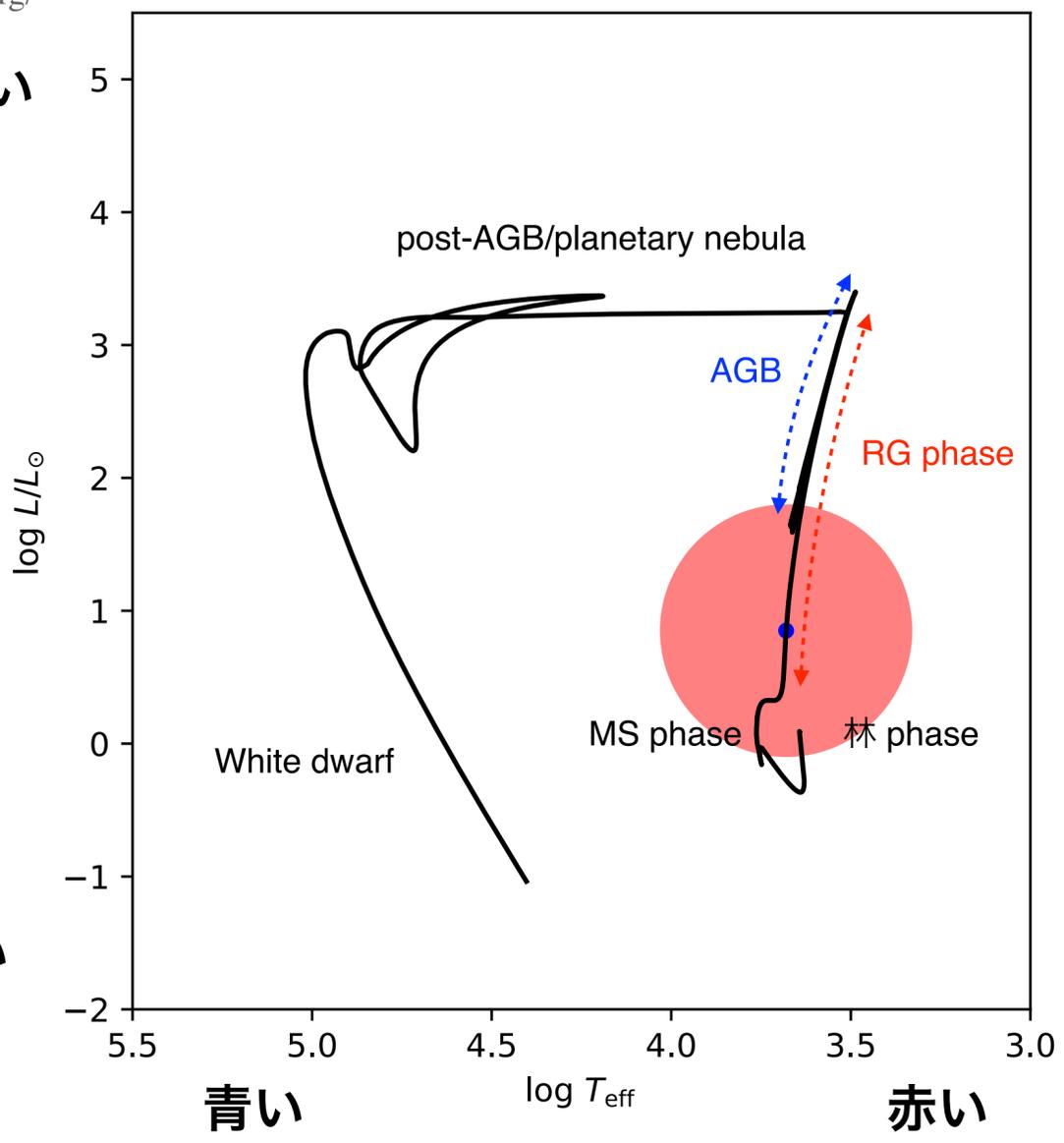


<https://docs.mesastar.org/>

我々人類は、太陽系に永遠に住む事は不可能だと物理でわかる

明るい

暗い



多くの星の観測結果と数値シミュレーションで、星の進化を物理で紐解く

主系列星から赤色巨星・赤色超巨星への進化: 太陽の場合

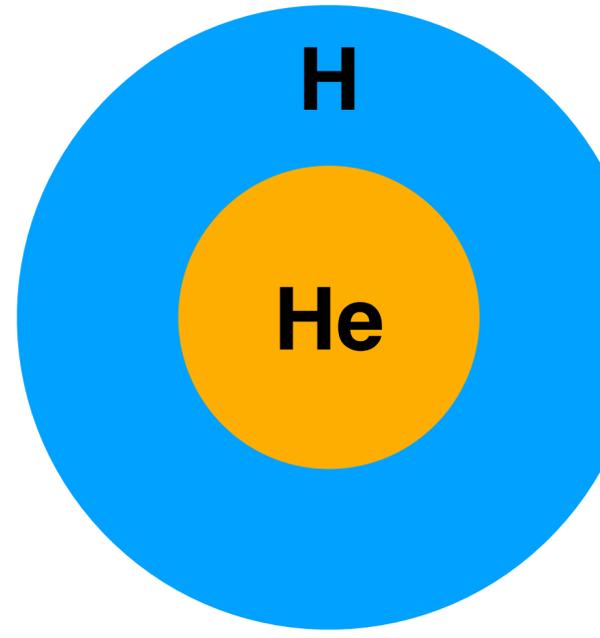
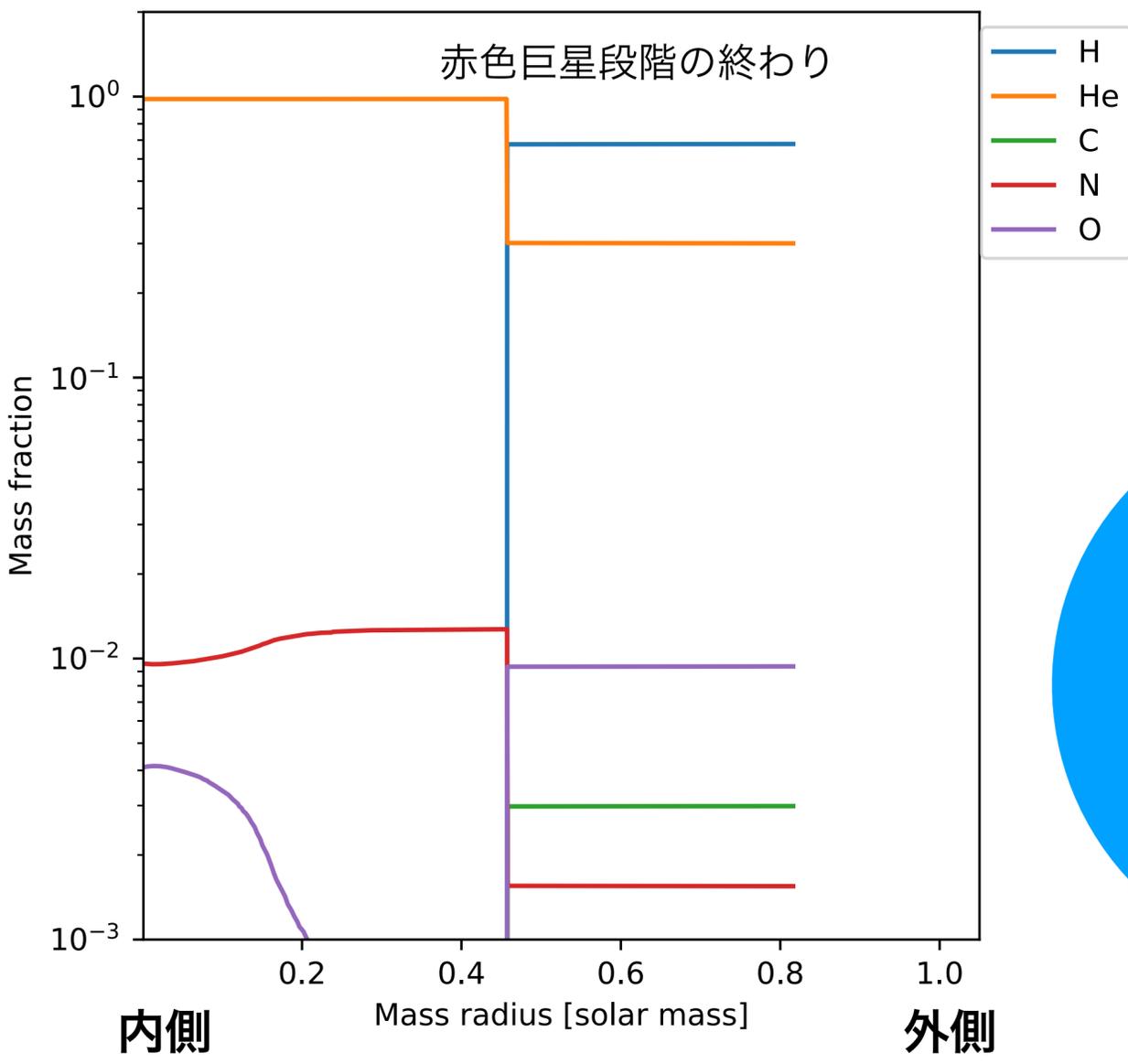
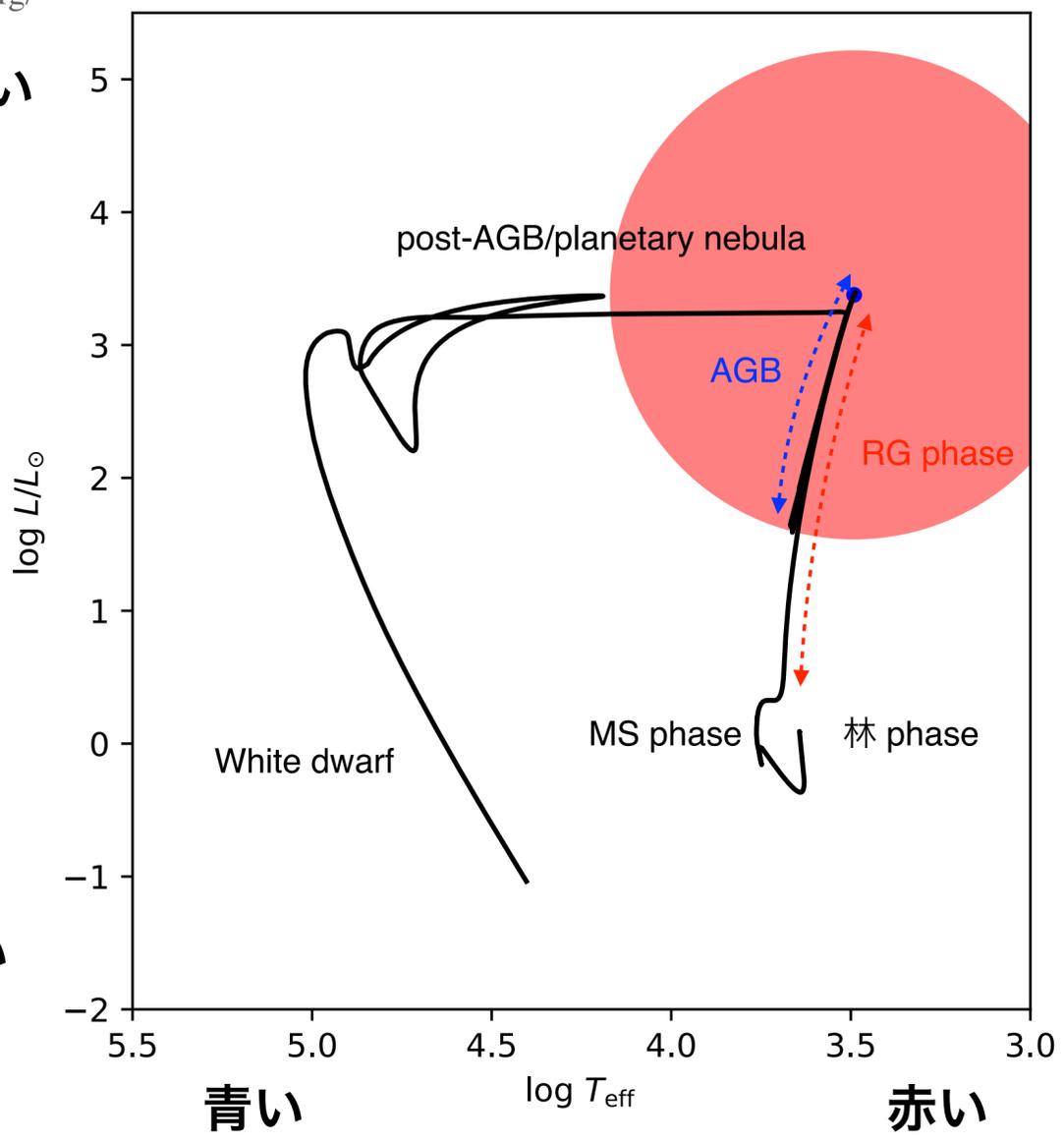


<https://docs.mesastar.org/>

我々人類は、太陽系に永遠に住む事は不可能だと物理でわかる

明るい

暗い

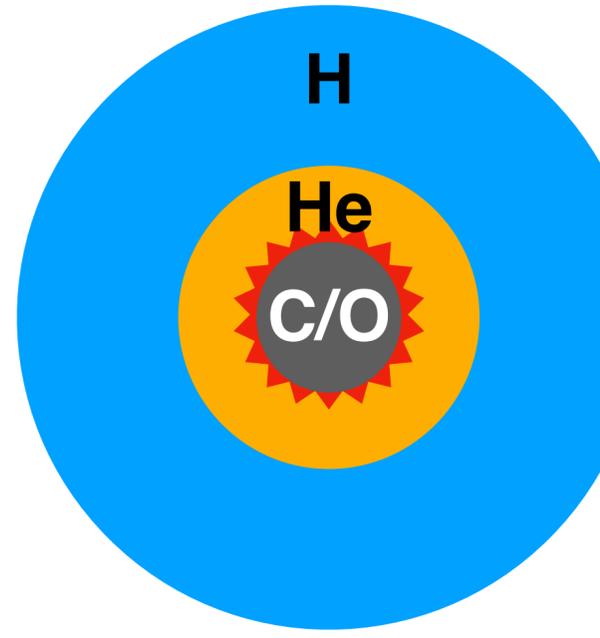
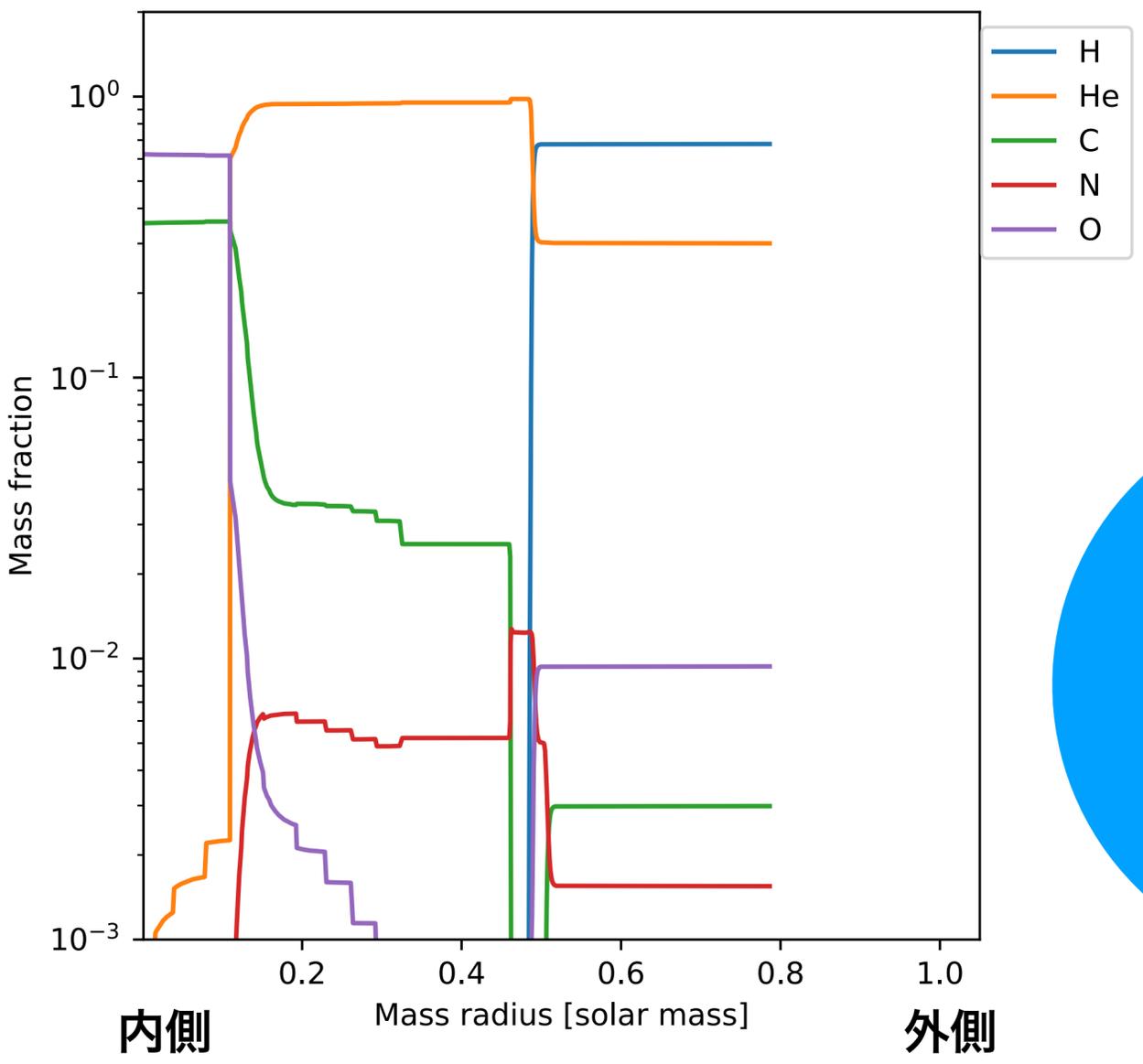
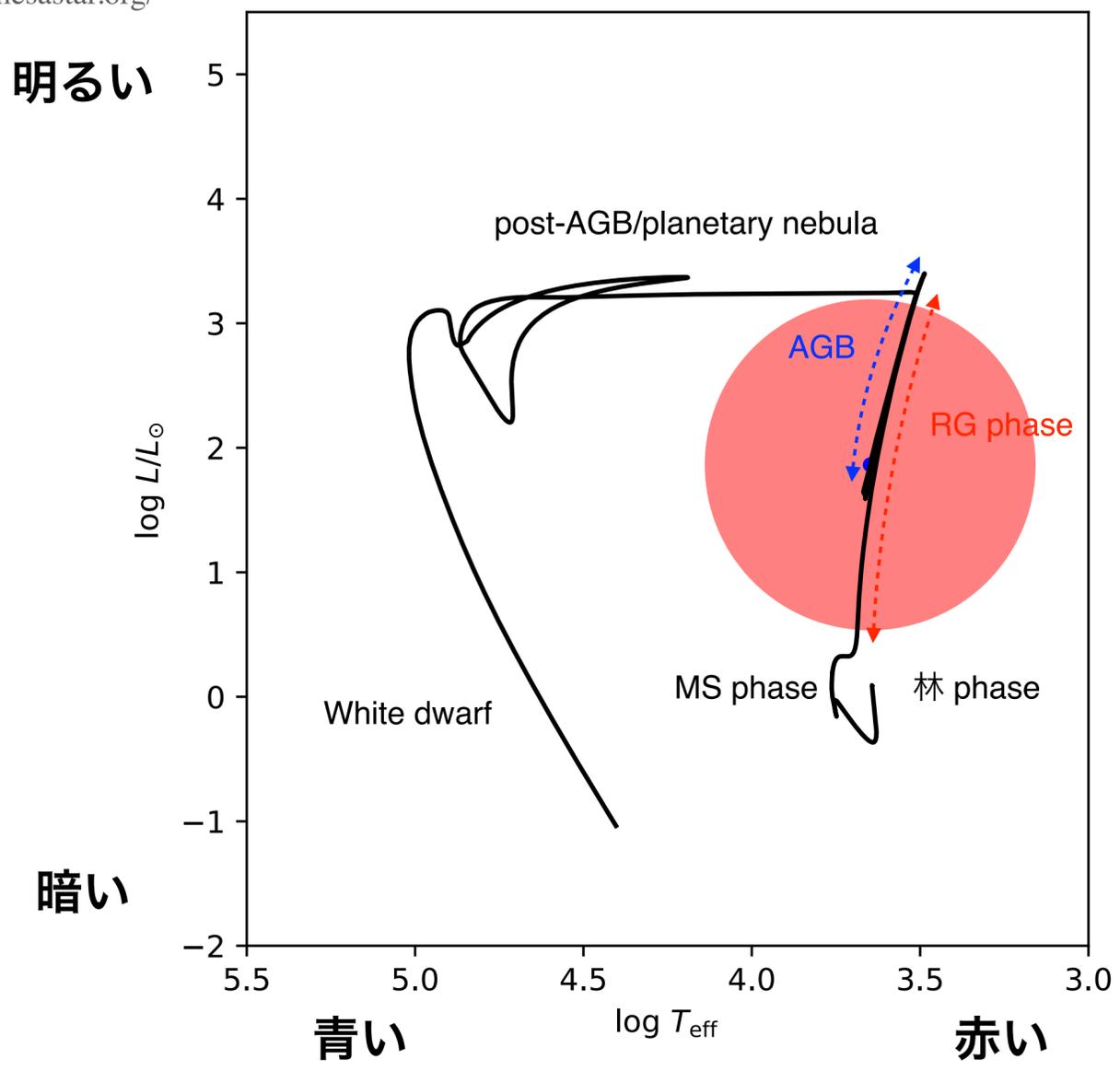


多くの星の観測結果と数値シミュレーションで、星の進化を物理で紐解く

主系列星から赤色巨星・赤色超巨星への進化: 太陽の場合

MESA
<https://docs.mesastar.org/>

我々人類は、太陽系に永遠に住む事は不可能だと物理でわかる



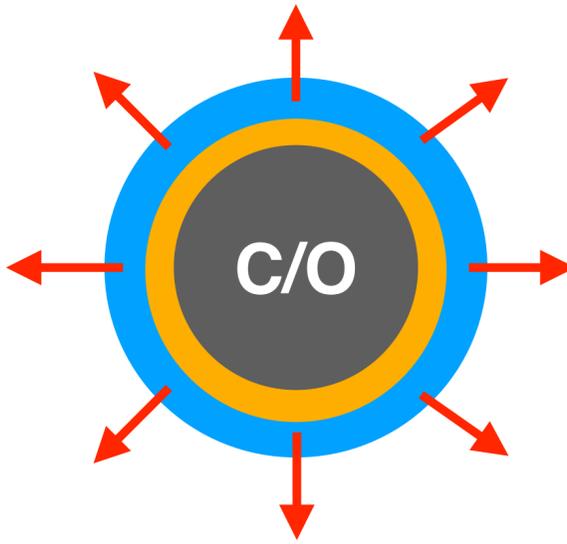
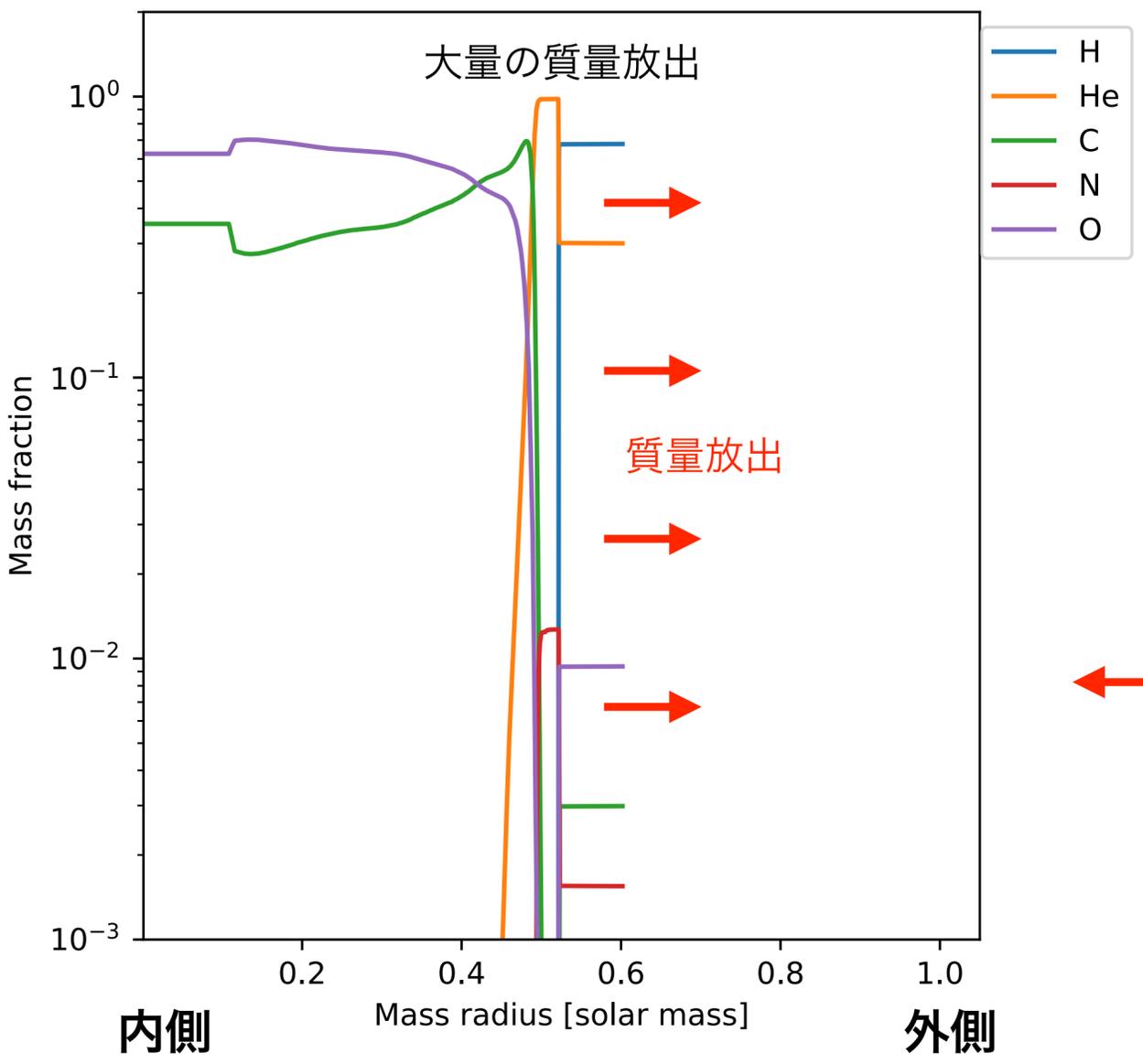
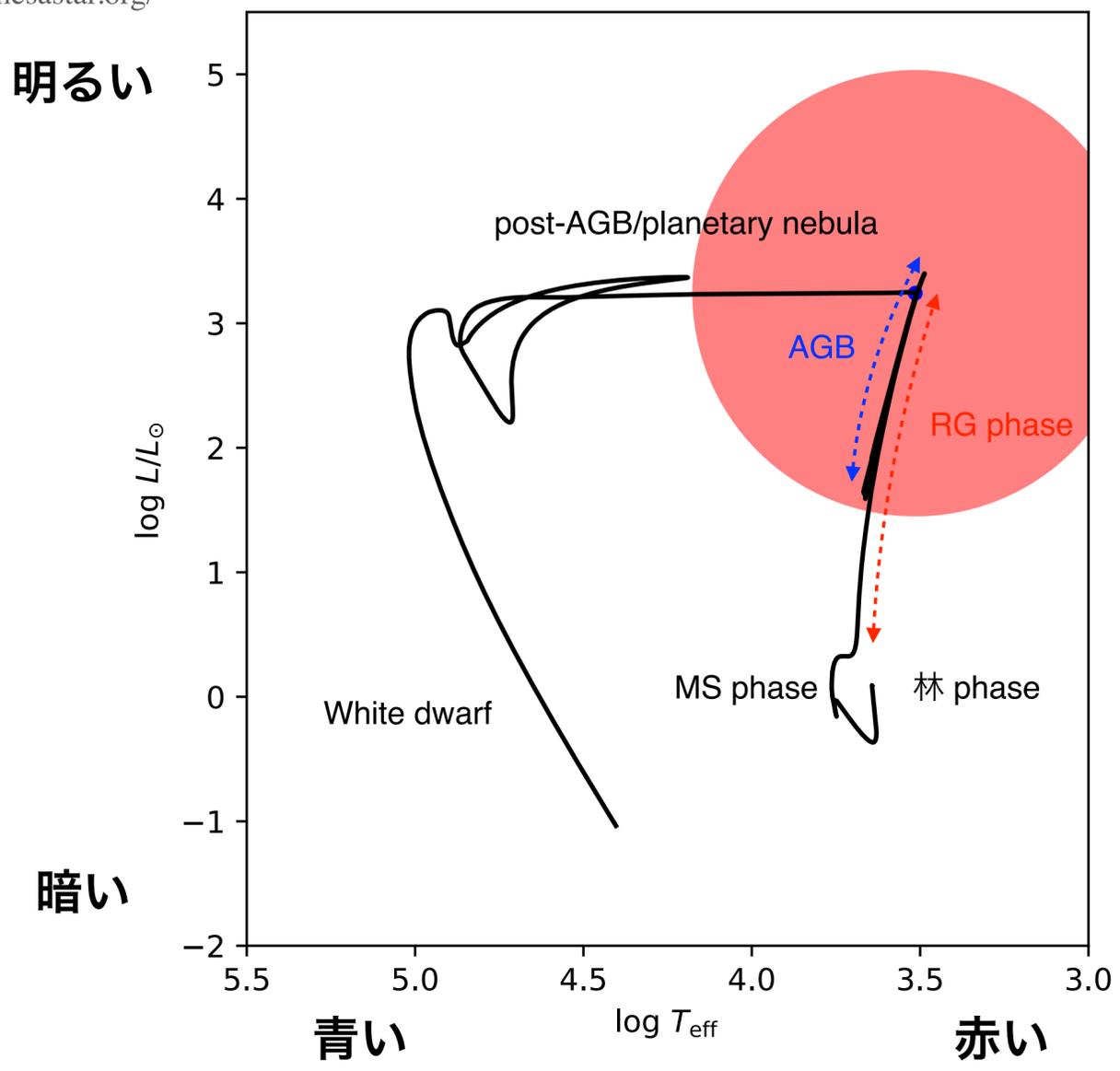
多くの星の観測結果と数値シミュレーションで、星の進化を物理で紐解く

主系列星から赤色巨星・赤色超巨星への進化: 太陽の場合



<https://docs.mesastar.org/>

我々人類は、太陽系に永遠に住む事は不可能だと物理でわかる

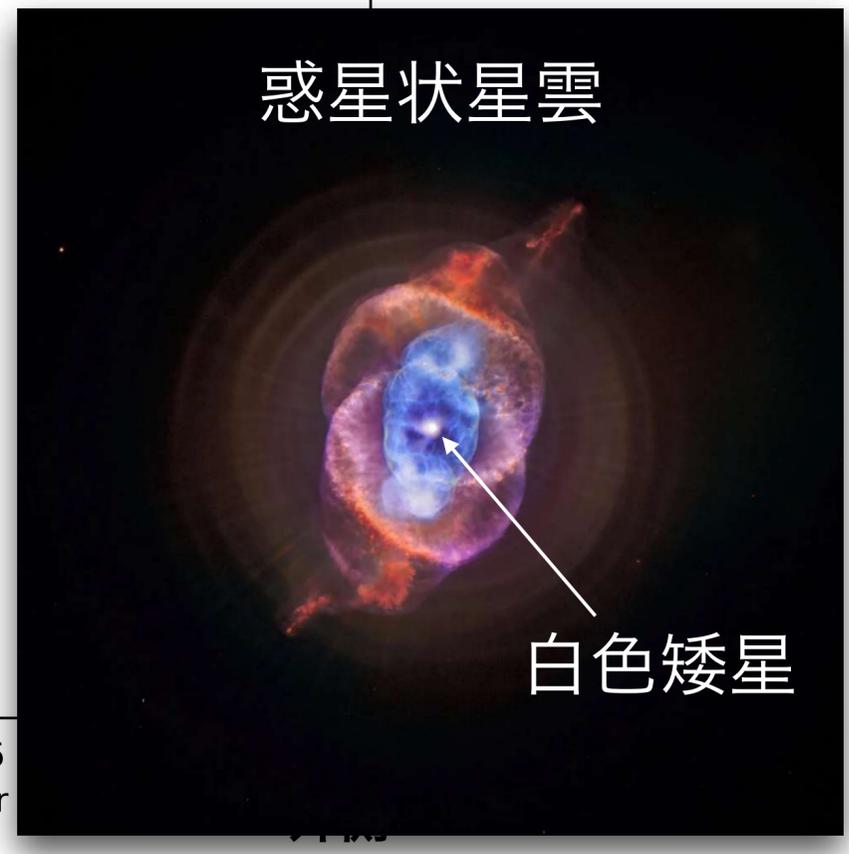
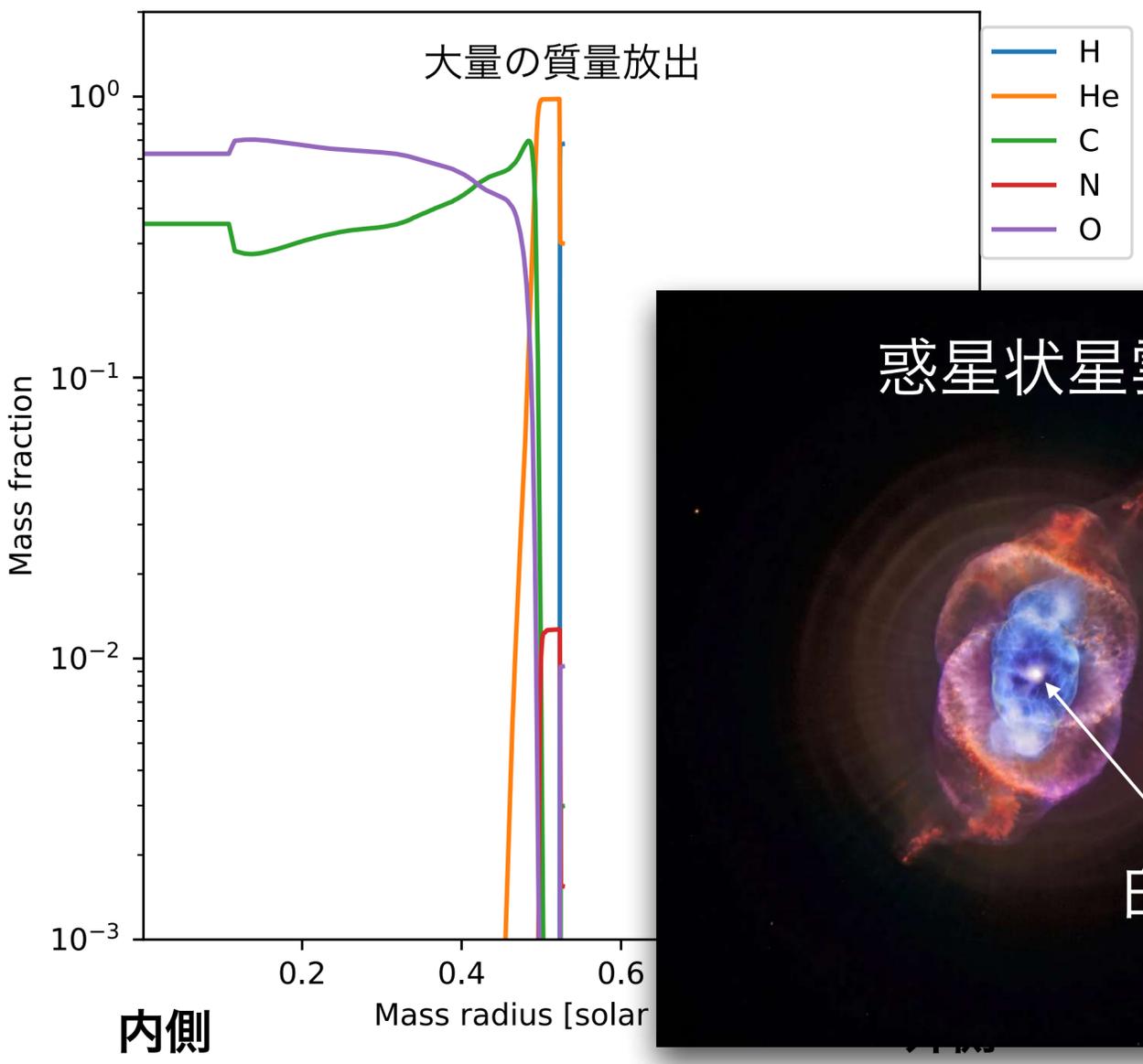
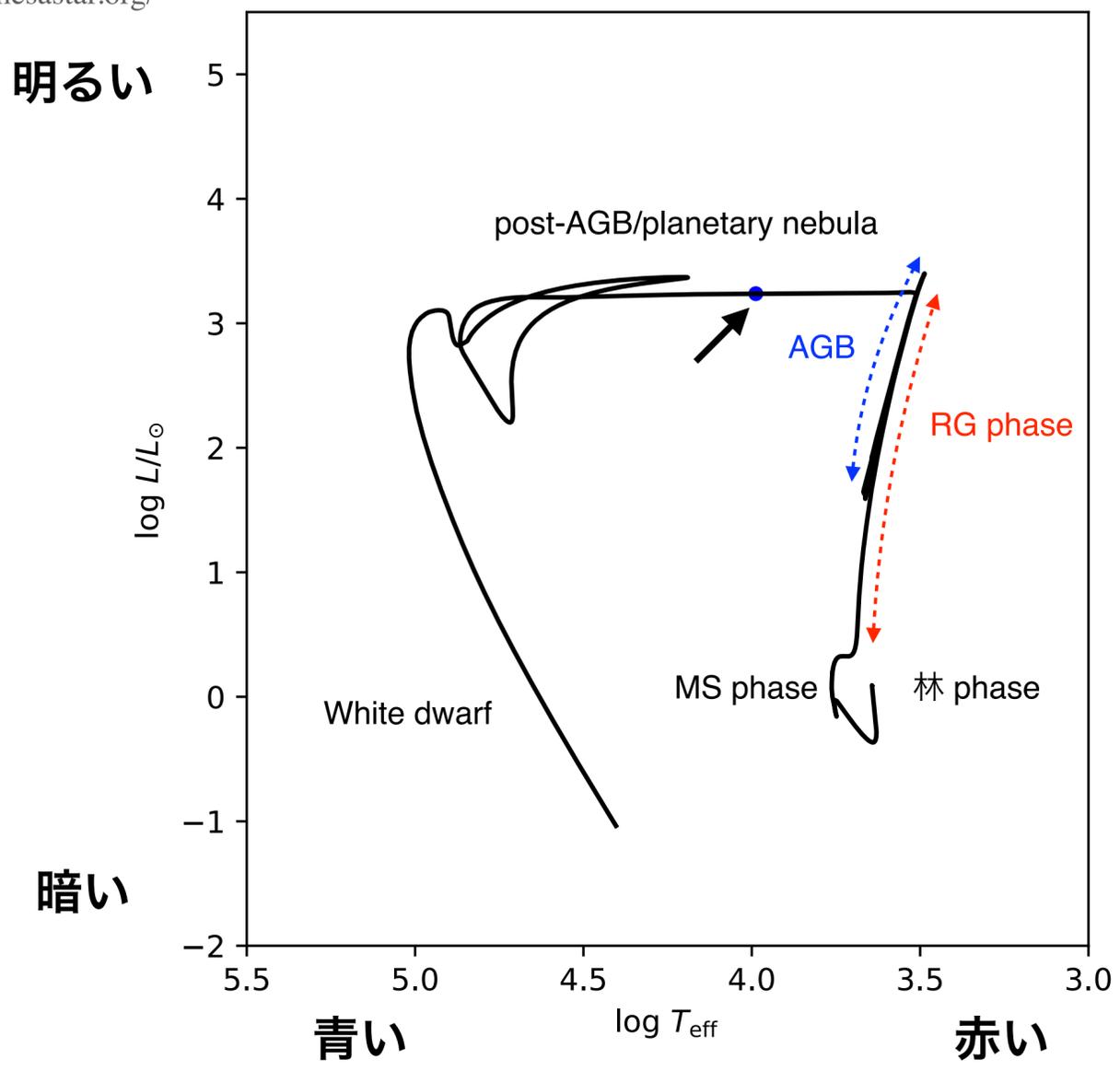


多くの星の観測結果と数値シミュレーションで、星の進化を物理で紐解く

主系列星から赤色巨星・赤色超巨星への進化: 太陽の場合

MESA
<https://docs.mesastar.org/>

我々人類は、太陽系に永遠に住む事は不可能だと物理でわかる



多くの星の観測結果と数値シミュレーションで、星の進化を物理で紐解く

主系列星から赤色巨星・赤色超巨星への進化: 太陽の場合

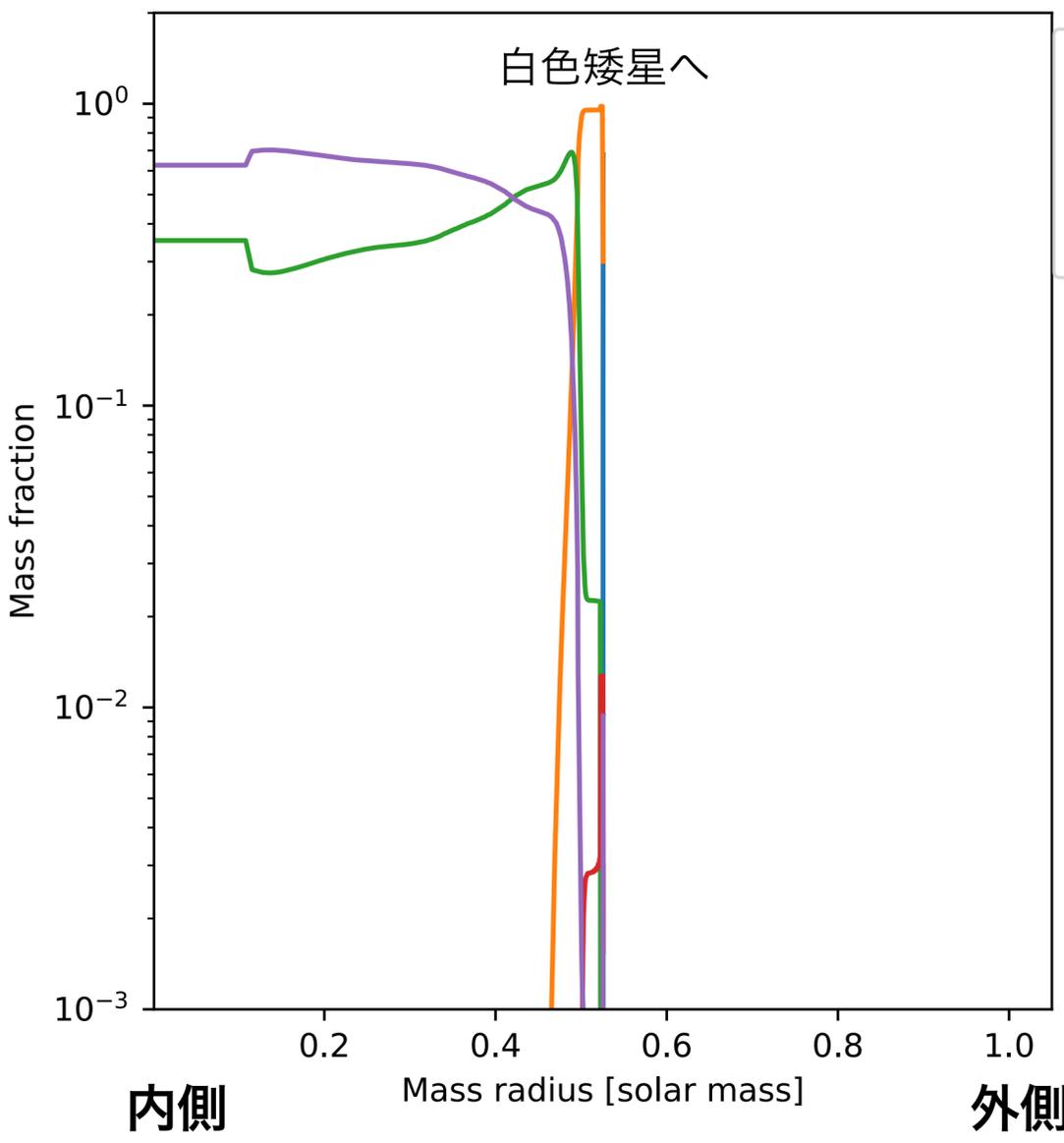
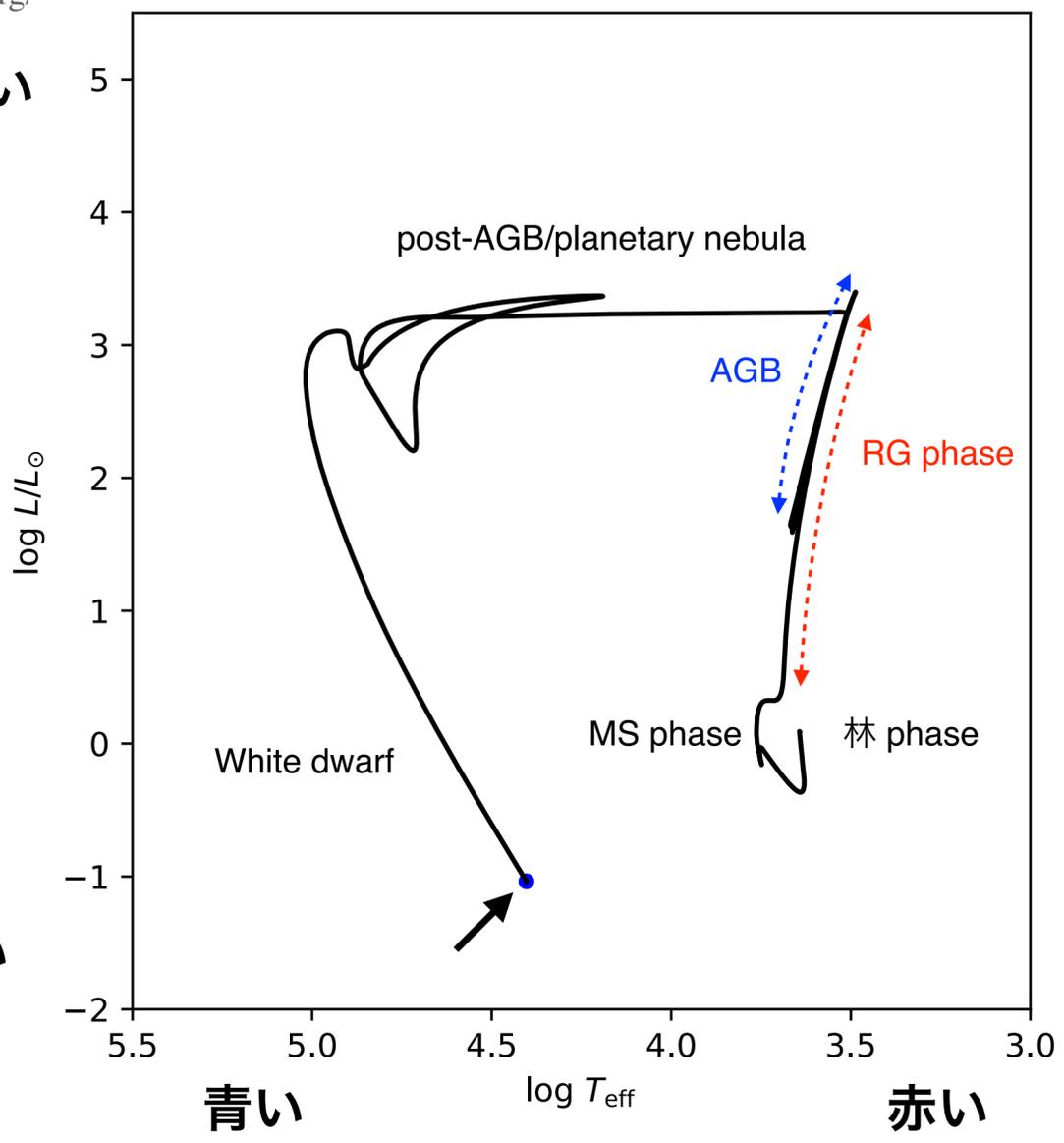


<https://docs.mesastar.org/>

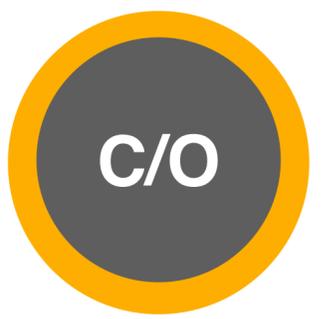
我々人類は、太陽系に永遠に住む事は不可能だと物理でわかる

明るい

暗い



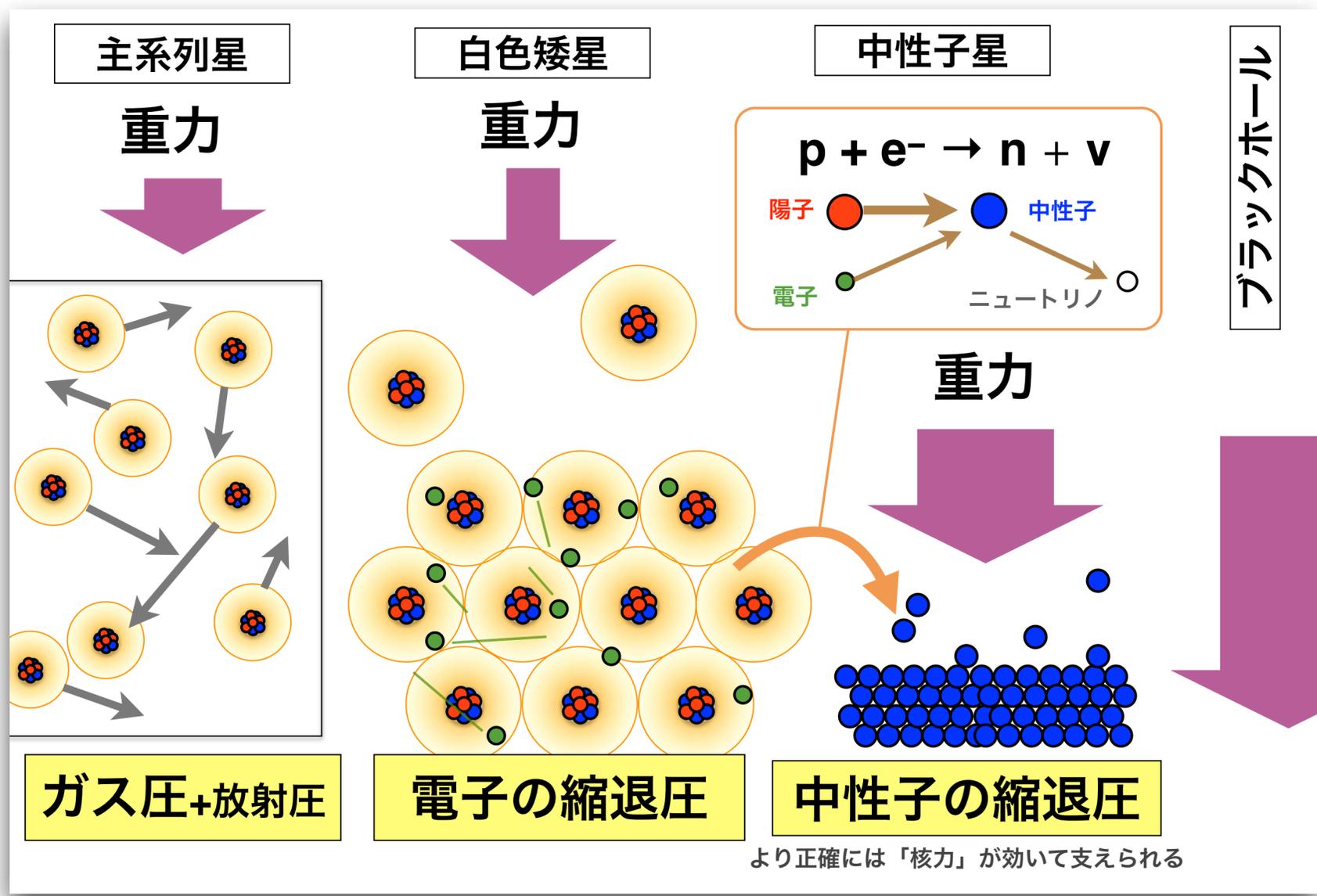
丸裸の白色矮星



多くの星の観測結果と数値シミュレーションで、星の進化を物理で紐解く

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、これを超えられない

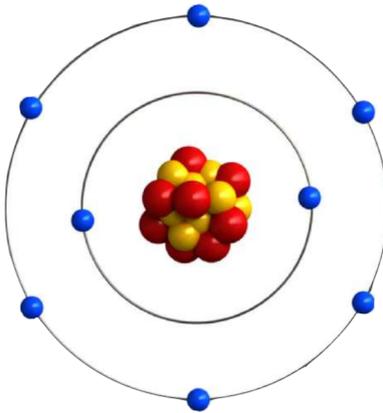
パウリの排他原理

「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」

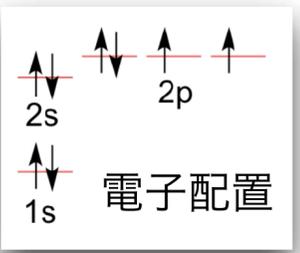
チャンドラセカール



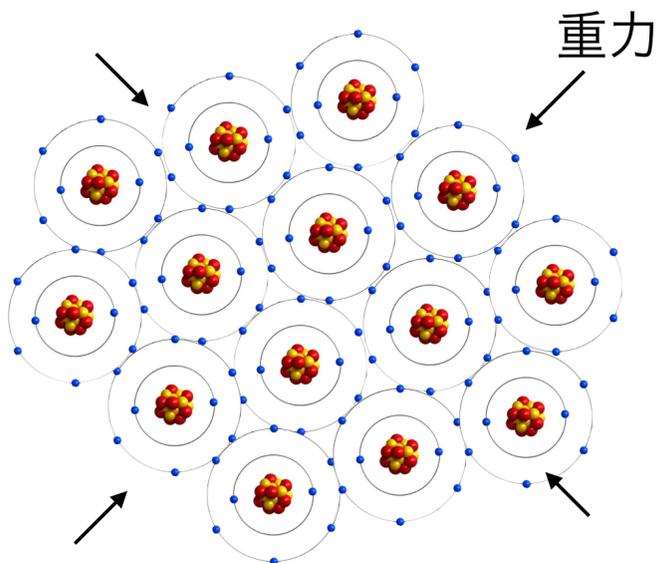
1983年ノーベル物理学賞



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

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

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

限界質量の詳しい導出

https://github-nakasho.github.io/compact/chandrasekhar_limit

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

チャンドラセカール質量と Ia 型超新星

限界質量を超えた白色矮星はどうか？ → 中心の暴走的核燃焼で超新星爆発

Ia 型超新星の残骸 (ティコの超新星)



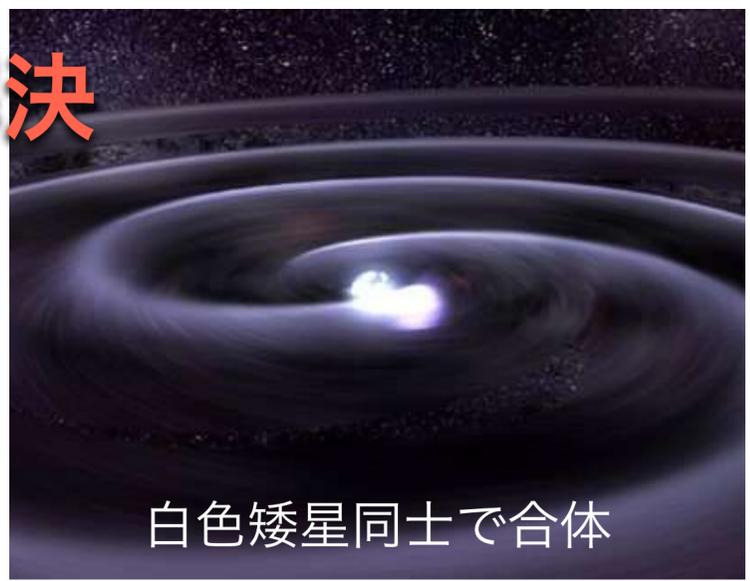
ティコ・ブラーエが 1572 年に超新星観測

一回の爆発で太陽1個分弱の鉄を作る

問題点: どうやってチャンドラセカール質量に達するか？



隣の星から質量もらう



白色矮星同士で合体

未解決

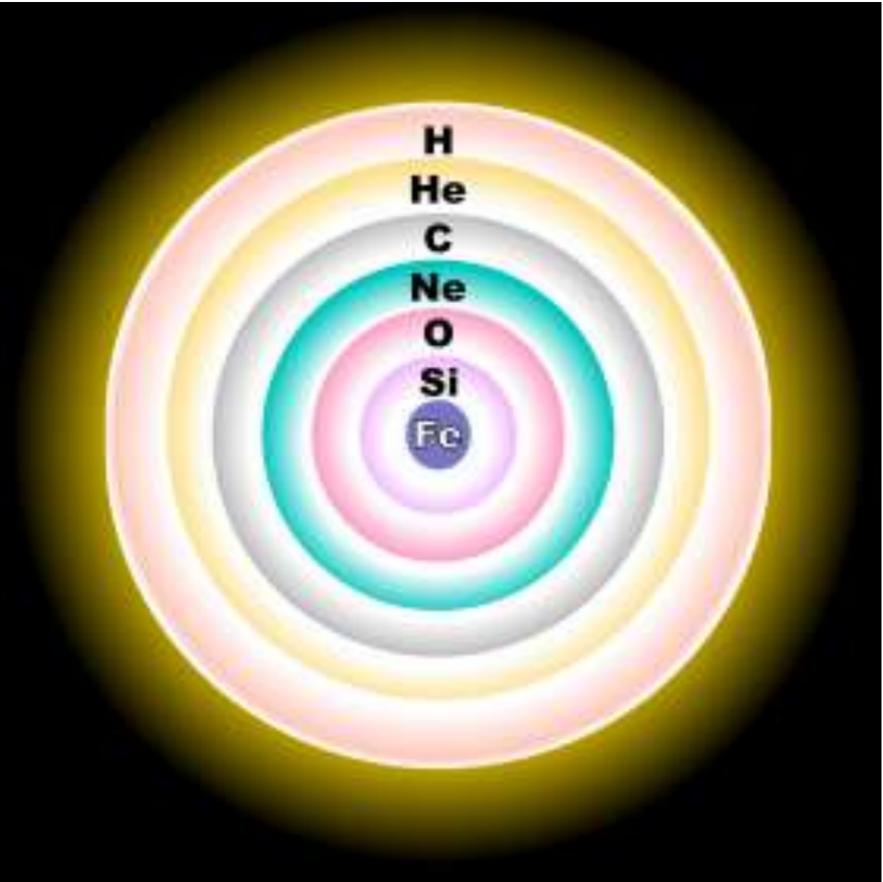
- 同程度の明るさで光るので、**宇宙膨張測定の標準光源**に使われて、加速膨張の発見 (2011年ノーベル賞) に繋がる
- 宇宙における**鉄族元素の主要供給源** → 化学進化に重要

超新星残骸の観測から、白色矮星時代の質量・中心密度を推定できたりもする

重い星の死と超新星爆発

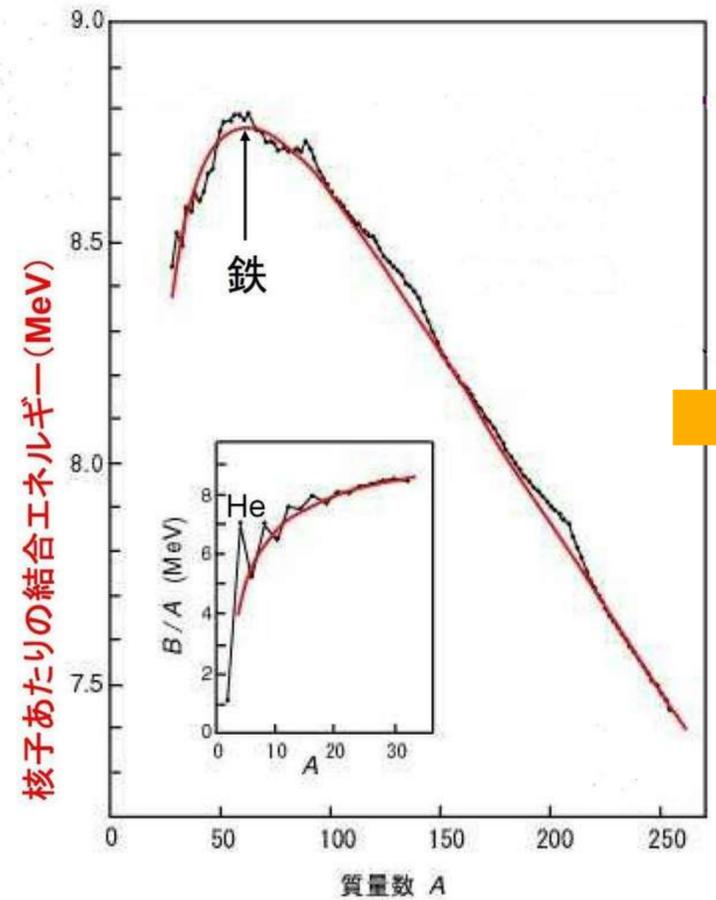
限界質量を超えた大質量星の鉄コアは？ → 中心コアが重力崩壊 & 超新星爆発

恒星は次々の重い元素を作る



大質量星は最終的に鉄コアを形成

鉄は宇宙で一番安定



星内部で鉄より重い元素作れない

中心が潰れて「重力崩壊型超新星」

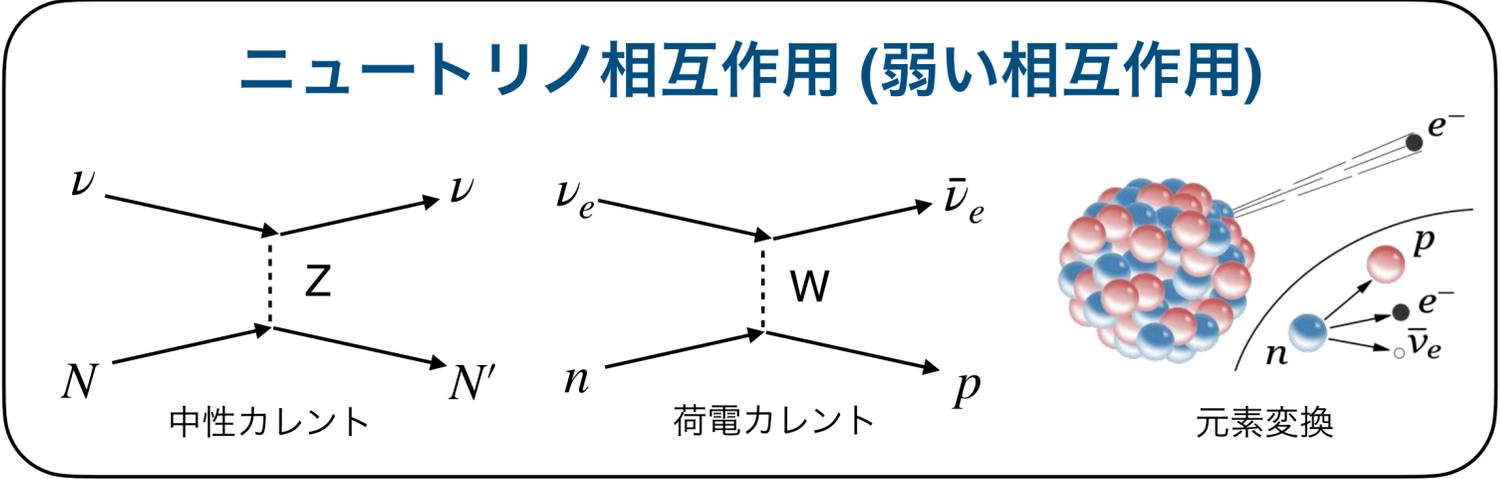
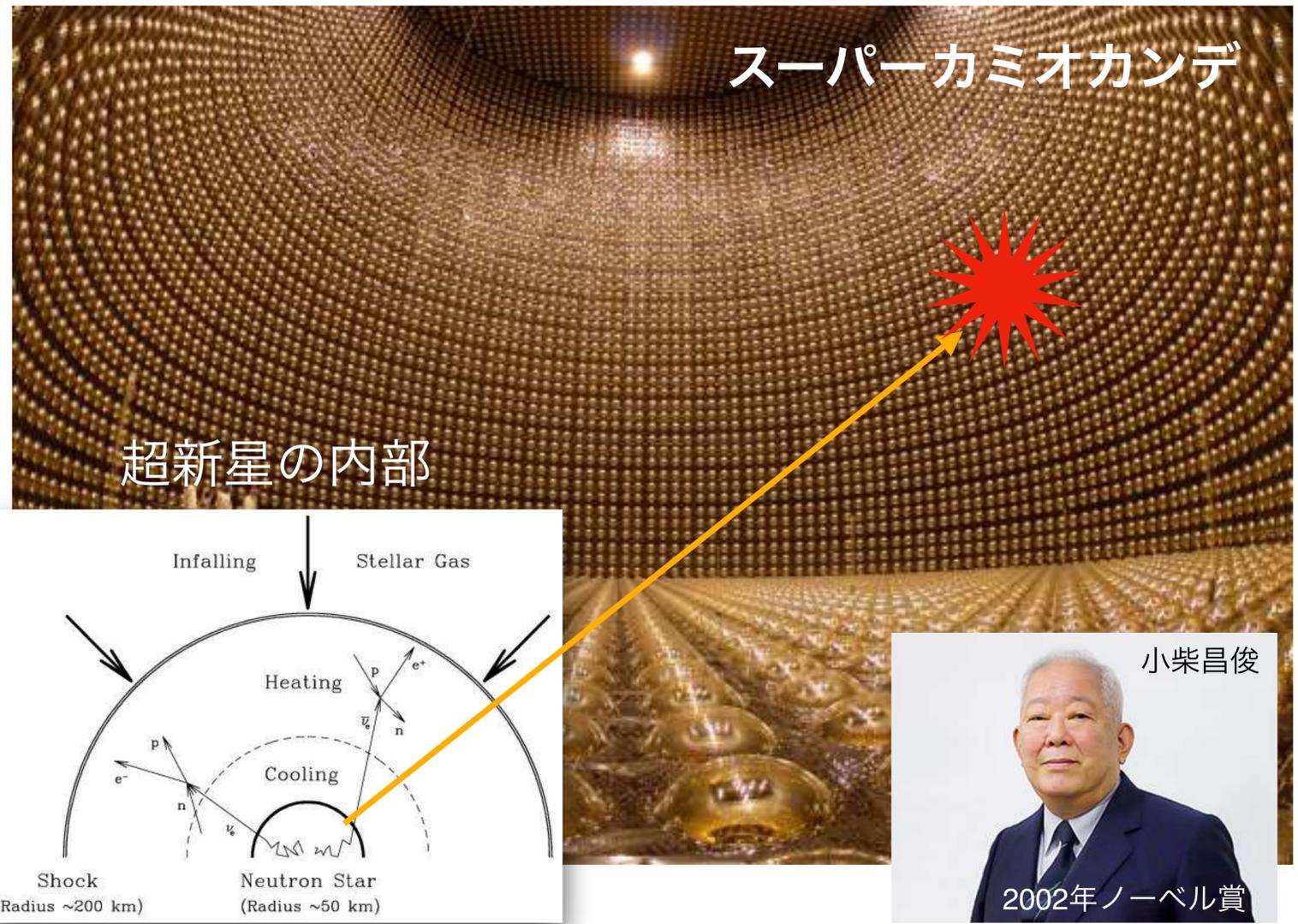


代表例: 超新星 1987A @ マゼラン星雲

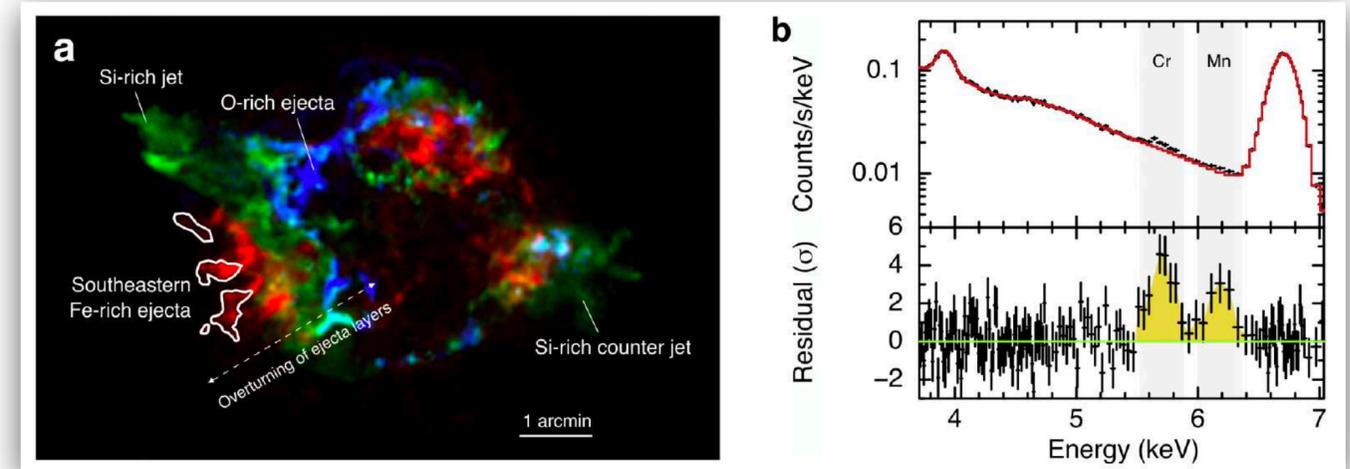
重力崩壊型超新星は、天体物理・原子核物理・素粒子物理の交差点！

重力崩壊型超新星爆発とニュートリノ

素粒子的反応 (弱い相互作用) が $\sim 10^{34}$ g もの巨大物質を吹き飛ばす主要因



私の研究: 残骸元素で相互作用の初検証 (Sato+2023)



ニュートリノは宇宙の様々な天体から放出される素粒子 → 素粒子実験の場にも宇宙はなり得る

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

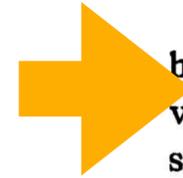
中性子だけの星作れない? (1934年)

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



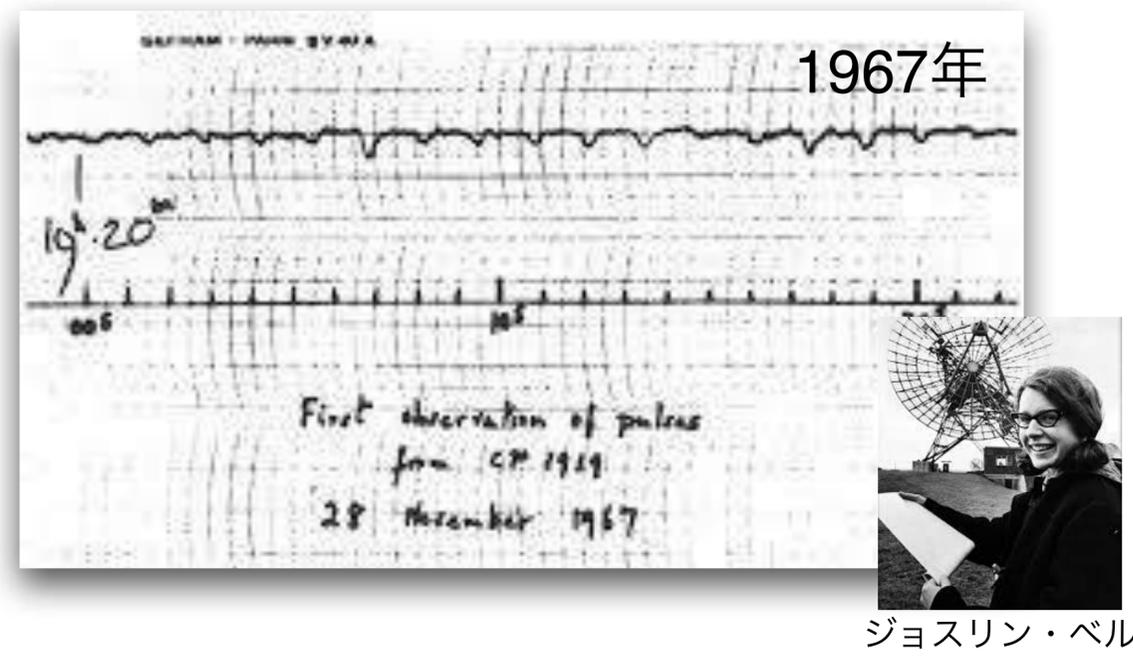
ツビッキー



“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)

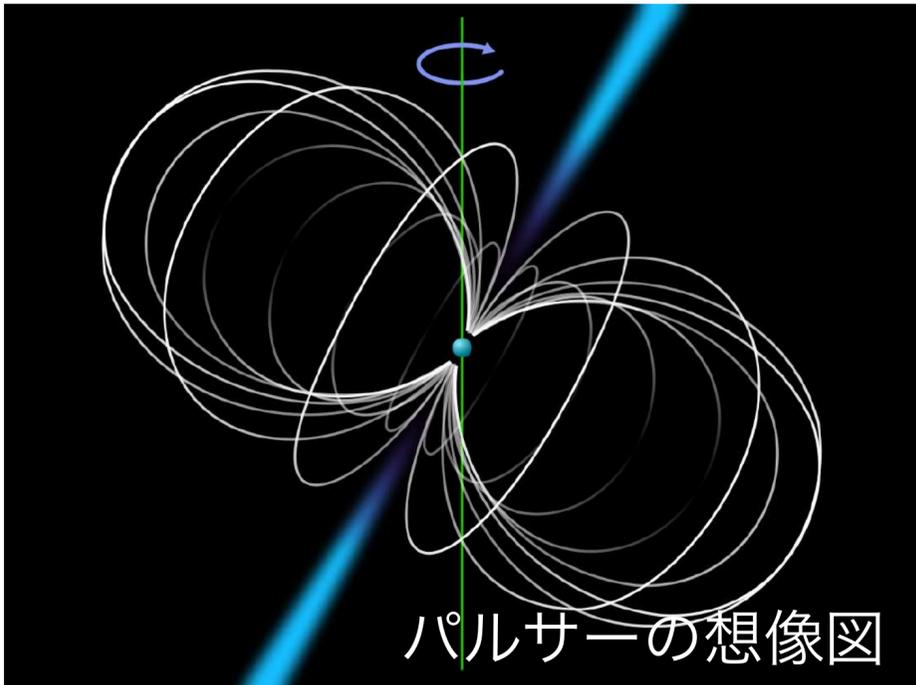
力のつり合い

遠心力 $F_c = mr\omega^2$
 重力 $F_g = G \frac{Mm}{r^2}$

天体半径の上限

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

$r_{\max}(P = 1 \text{ s}) \approx 1,500 \text{ km}$ $r_{\max}(P = 1 \text{ ms}) \approx 15 \text{ km}$
 地球(≈ 白色矮星)半径 $\approx 6,400 \text{ km}$

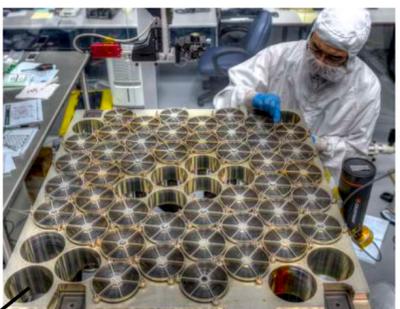
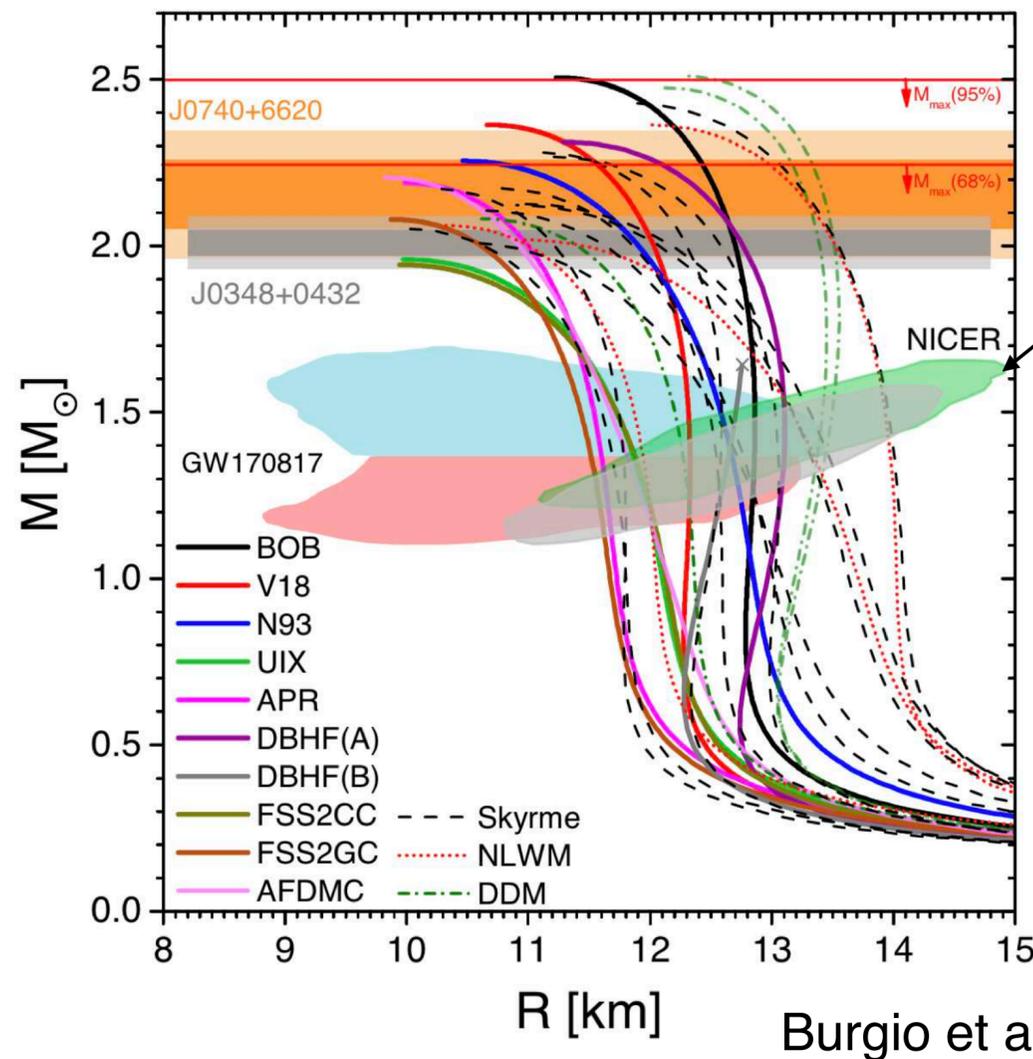
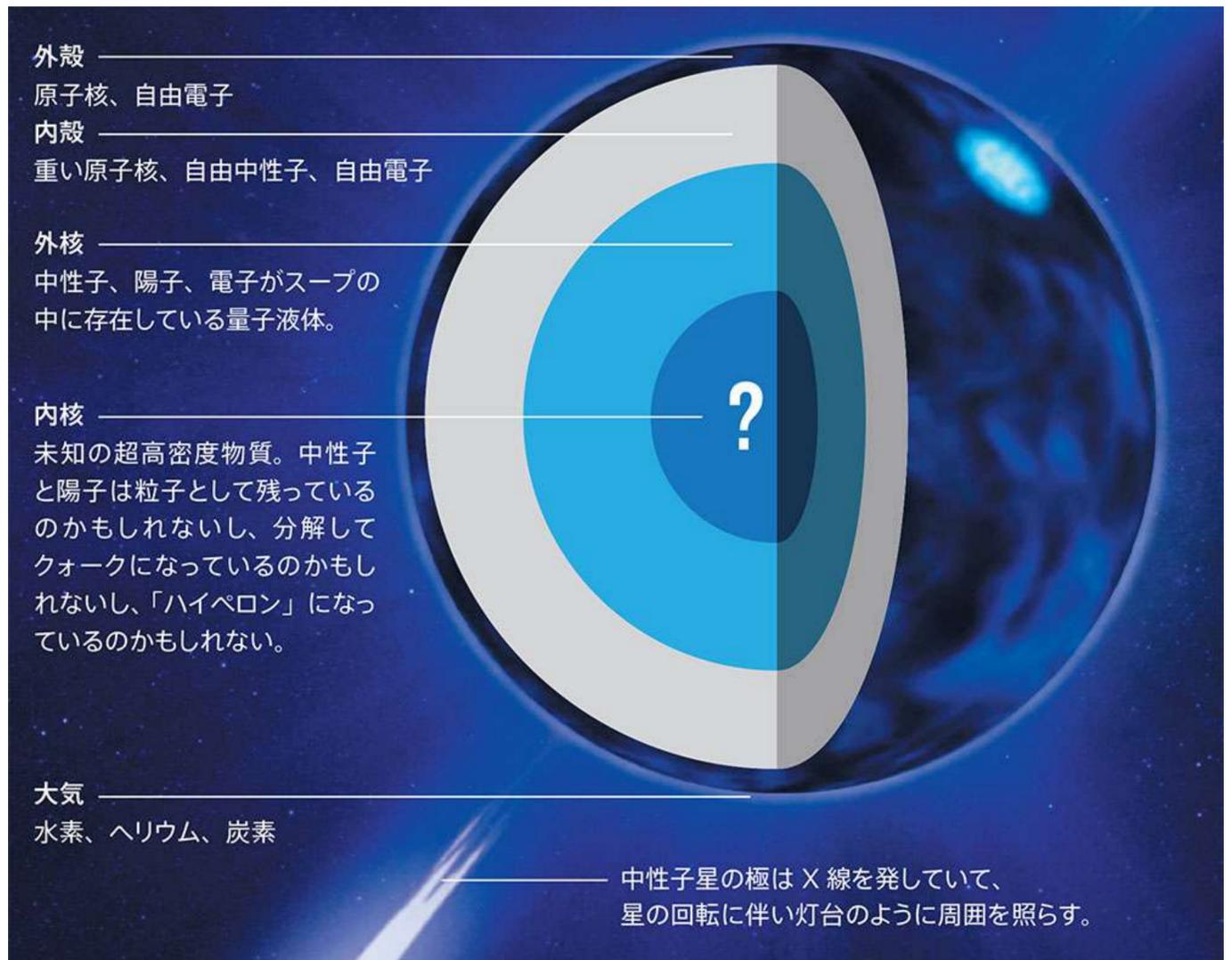


パルサーの想像図

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」



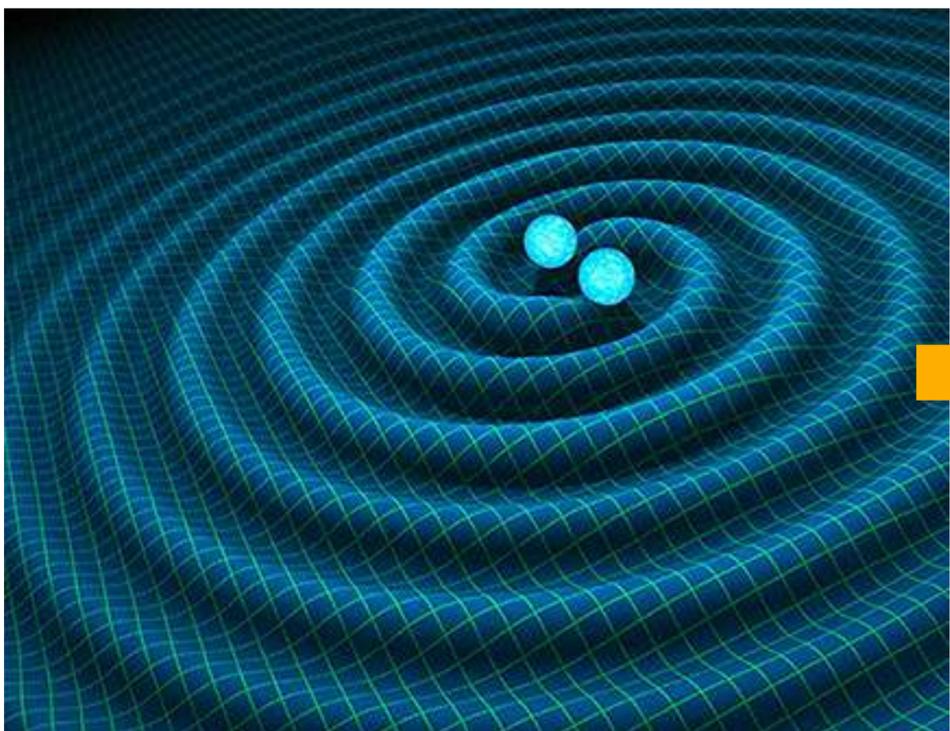
佐藤が NASA にいた時の研究室で作られた望遠鏡

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

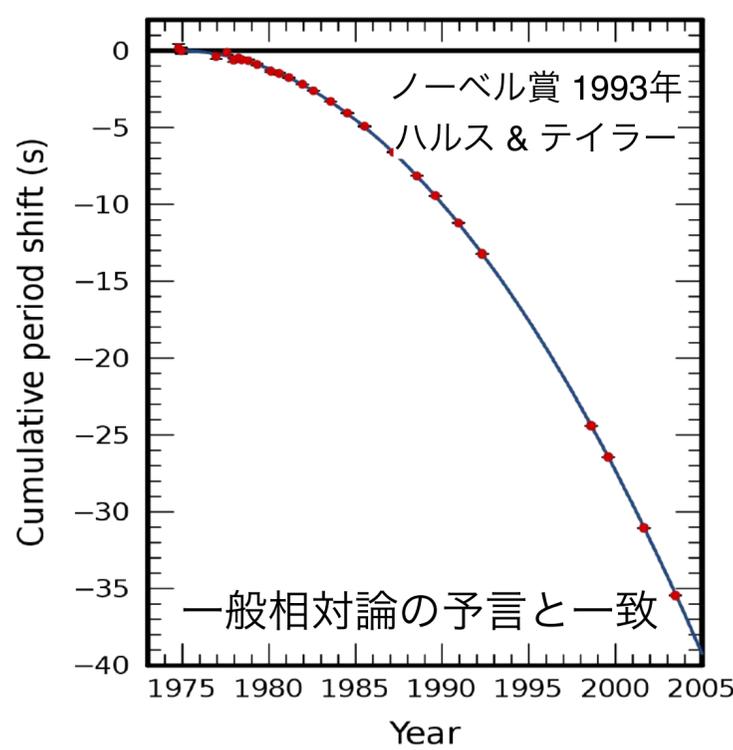
中性子星合体と重い元素の起源 → マルチメッセンジャー天文学へ

中性子星連星は重力波源



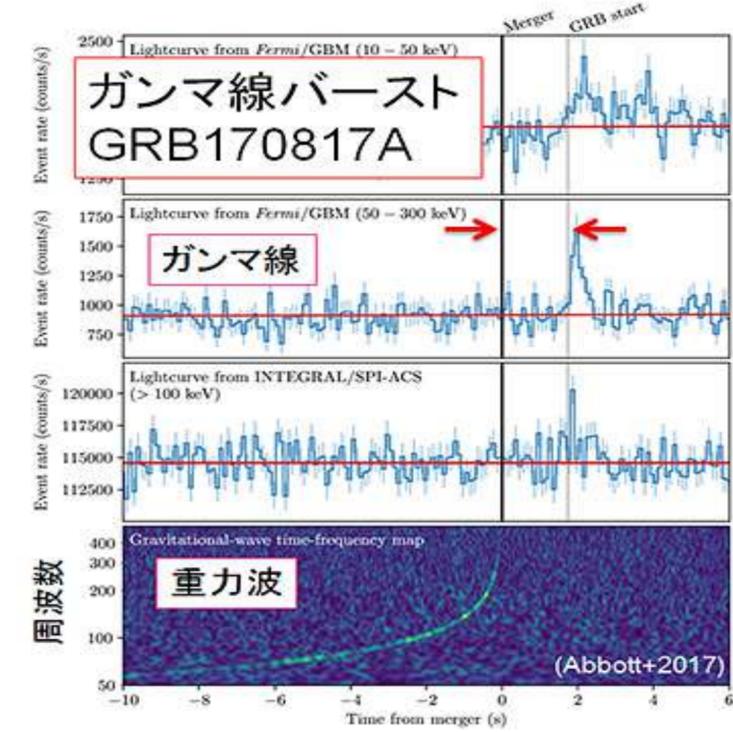
重力波放出で徐々に近づく

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



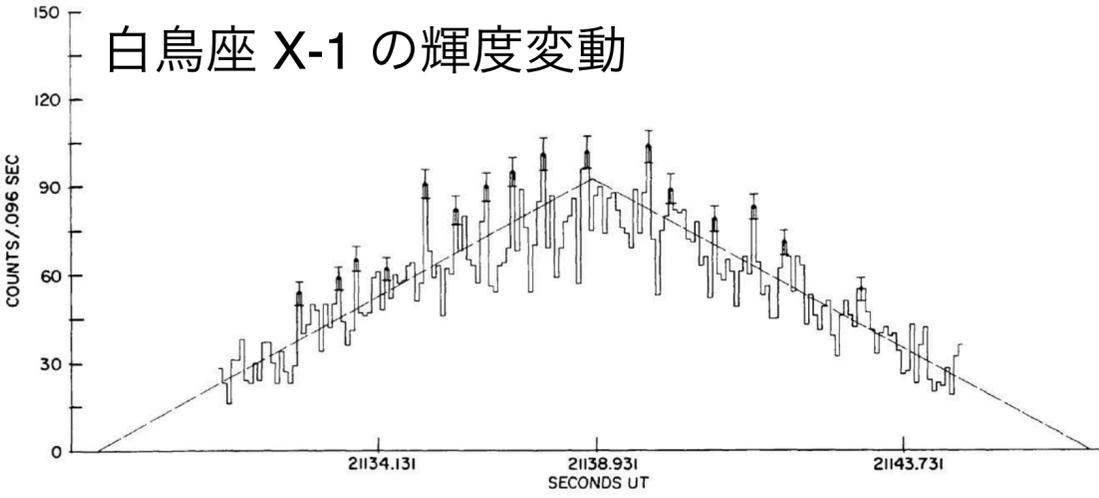
重力波の直接観測 (2016年)

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 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

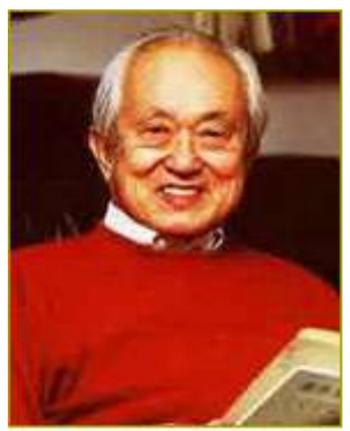


X線天文学の誕生 → 超高温天体が見つかり始める

- 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



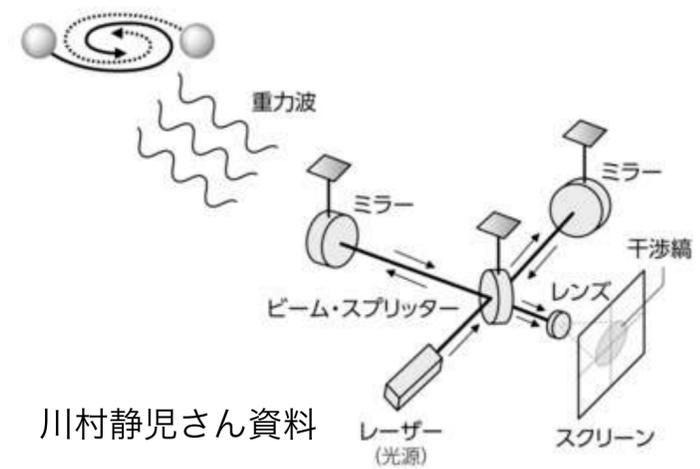
- 白鳥座方向に強いX線源を発見
- しかも、短い時間で変動 → 小さな天体
- 20 太陽質量程度の青い星が隣に
- その星の動きから、少なくとも太陽の10倍は重い重力源(可視光では見えない)が必要

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

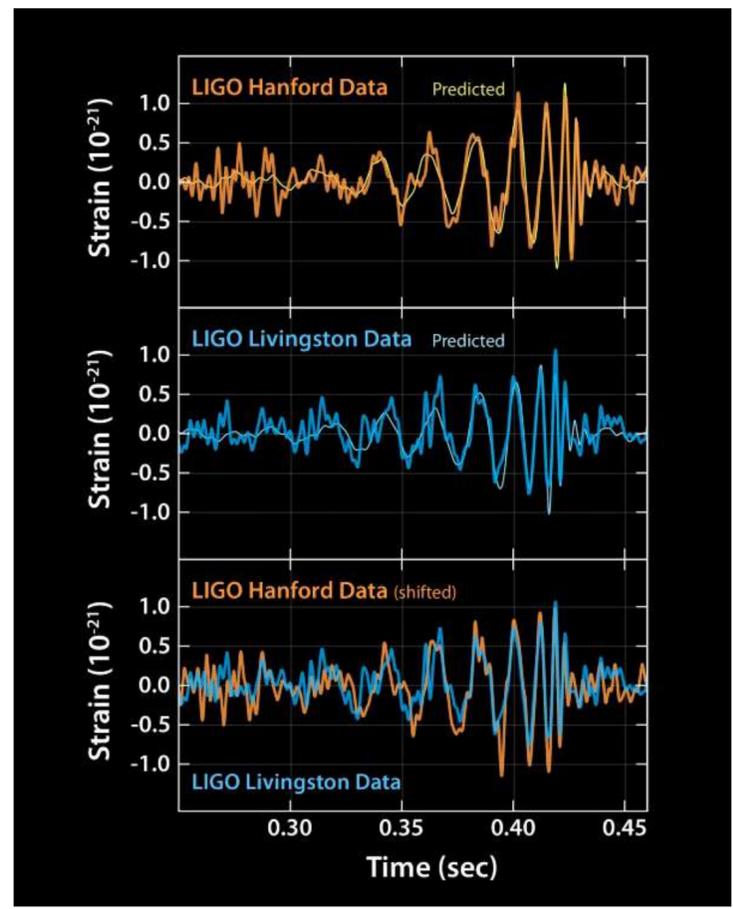
レーザー干渉計による重力波検出の原理



川村静児さん資料

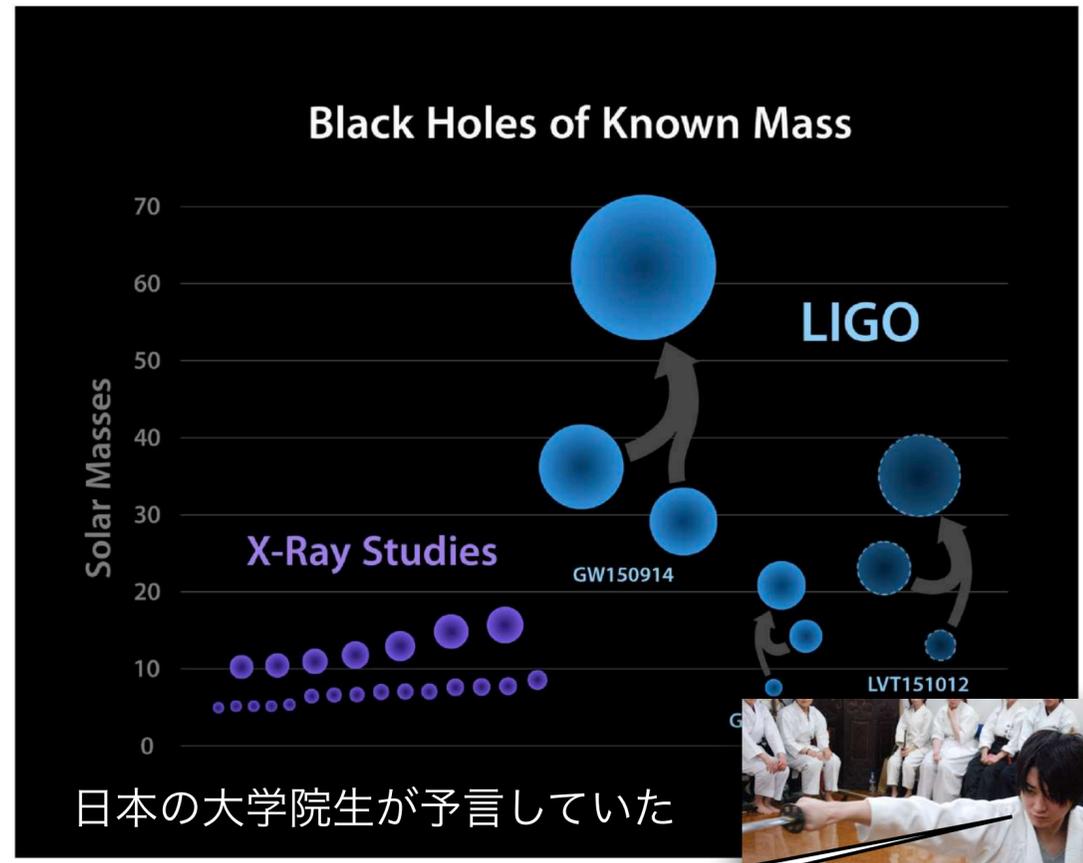


~30 太陽質量 BH 同士の合体



2017年 ノーベル物理学賞

なぜ、こんな重い BH 同士が合体？



日本の大学院生が予言していた

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

力学1でやった**ビリアル定理**を思い出そう

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

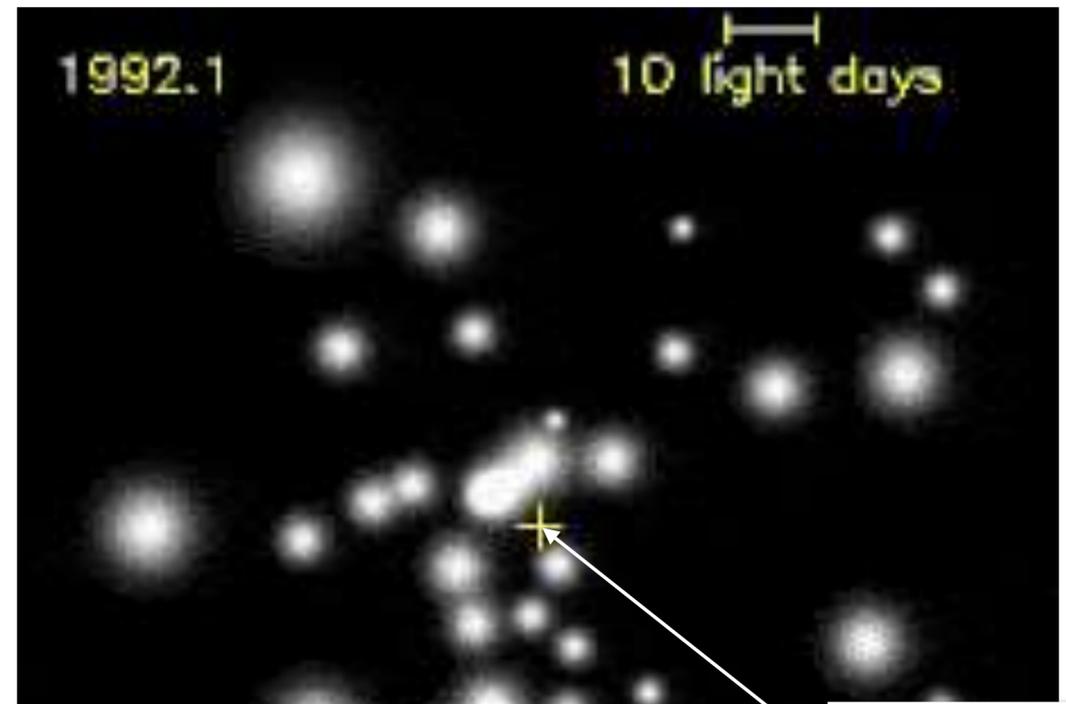
運動エネルギー (長時間平均) ポテンシャルエネルギー (長時間平均)

運動が分かればポテンシャル(質量)がわかる

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

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

超巨大質量ブラックホールの謎 (第三回にも関連?)

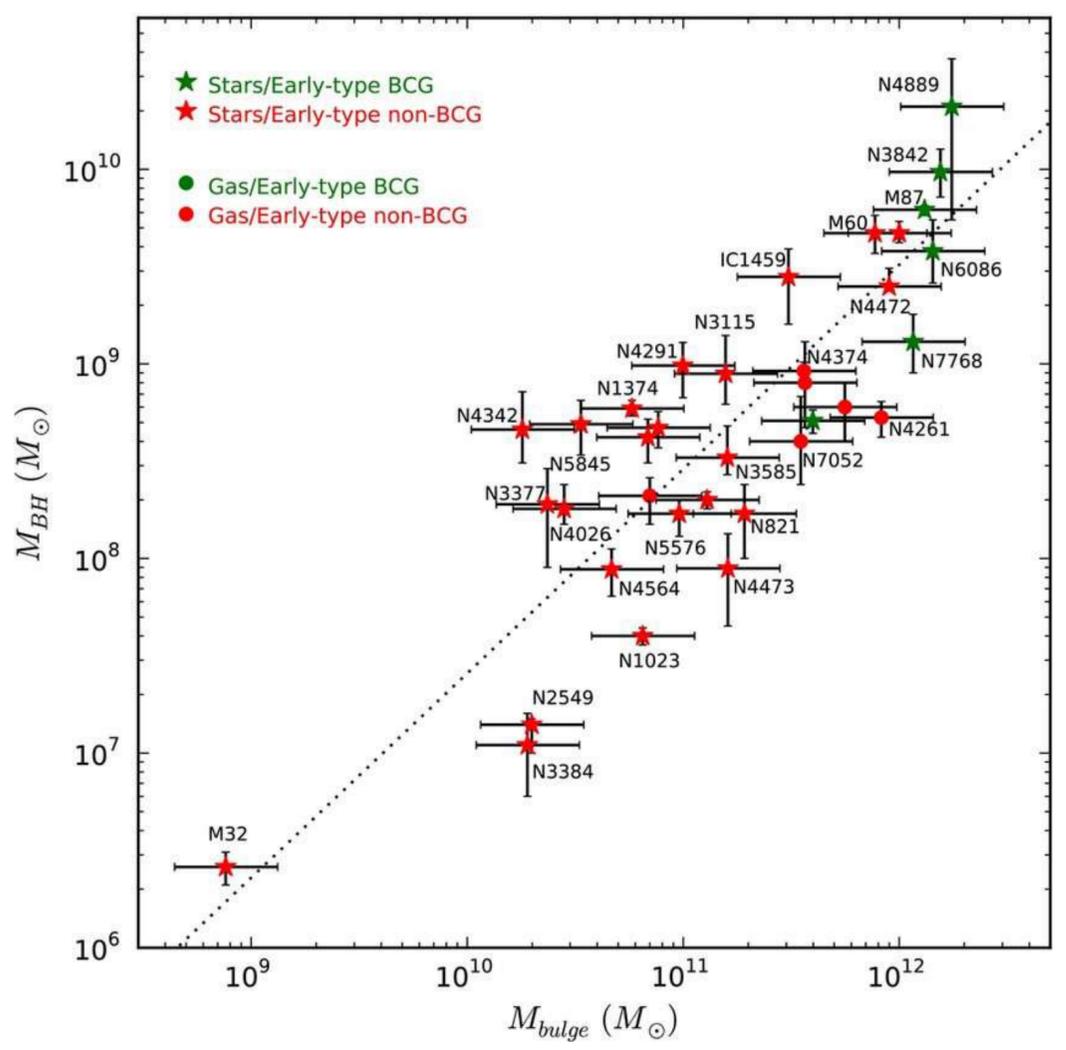
銀河の中心には巨大ブラックホール「どうやってこんな重い天体を?なぜ銀河と相関が?」

1. 宇宙初期にむちゃくちゃ重い星を潰そう

ちょっとでも角運動量持っていると太れない

2. ブラックホールを急速に太らせよう

- たくさん天体を合体させる?
- タイムスケールの的に難しそう?
- 周りからガスを沢山落とす?
- そこまで効率よく落とせる?



JWST の初期宇宙観測でSMBH/母銀河の質量比が大きいものも? → SMBH が先に育ってる?

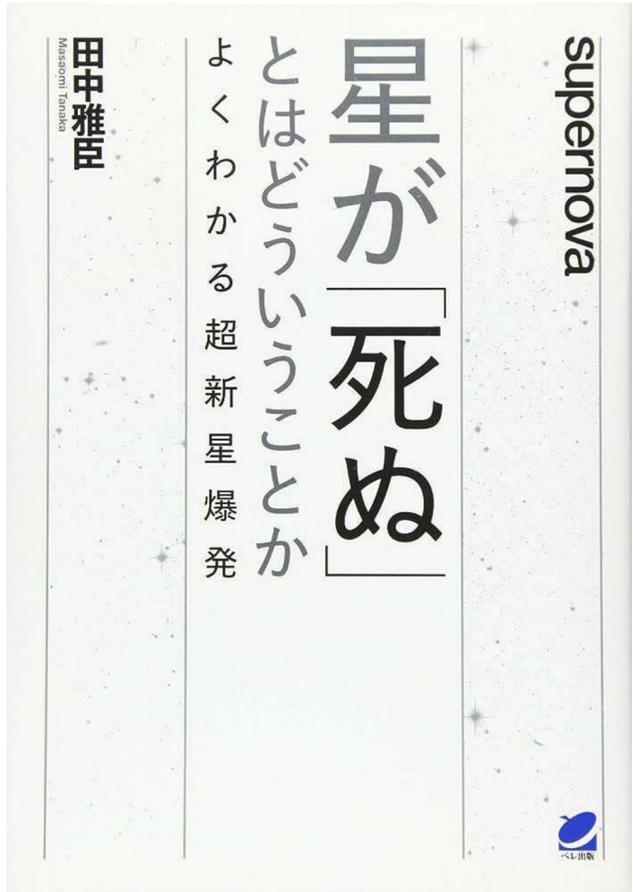
まとめ: 人類の空想天体を生み出してきた宇宙

1. ビックバン後、星の輪廻転生で宇宙は豊かに
2. 恒星は核融合をエネルギー源として、新しい元素を作りながら進化
3. 核燃焼が終わると「星は死ぬ」 → 超新星爆発 & コンパクト天体形成
4. 燃料を使い切った星には限界がある → チャンドラセカール限界
5. この世界には、中性子星/ブラックホールが実在した
6. 超巨大ブラックホールの作り方と銀河の関係? → 第三回ゼミへ

おすすめの入門書

読んでみたければ貸します

読み物として読める



左より詳しい



教科書一步手前



左より難しい

