
物理学特論I (中性子星と原子核物理)

京都大学・基礎物理学研究所 大西 明

新潟大学集中講義 (2017/12/11-13)

<http://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~akira.ohnishi/LecNiigata2017/>

物理学特論I (中性子星と原子核物理)

1. 序論: 中性子星とは

2. 中性子星の質量と半径
 3. 中性子星に関連する原子核・ハドロン物理学1
- 原子核の大きさと散乱の量子力学
 4. 中性子星に関連する原子核・ハドロン物理学2
- 原子核の質量と核物質状態方程式
 5. 中性子星に関連する原子核・ハドロン物理学3
- クォークとハドロン
 6. 中性子星核物質の状態方程式
 7. 中性子星の最近の話題と課題 - 中性子星の最大質量とハイペロンパズル
- セミナー: 最適化問題としての符号問題

序論の序論：原子核物理学の広がり

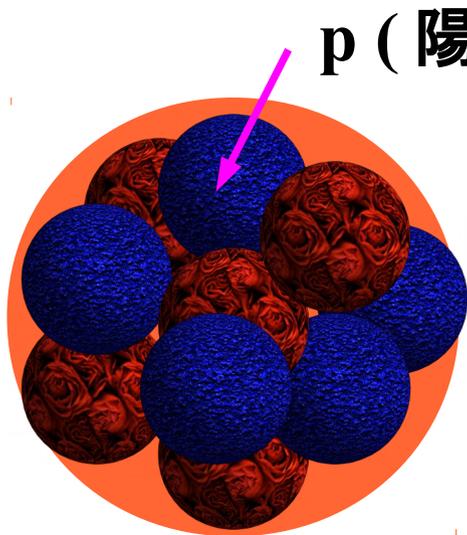
原子核物理学の広がり

■ 天然に存在する原子核

- 中性子数 (N) \approx 陽子数 (Z) (軽い原子核の場合)

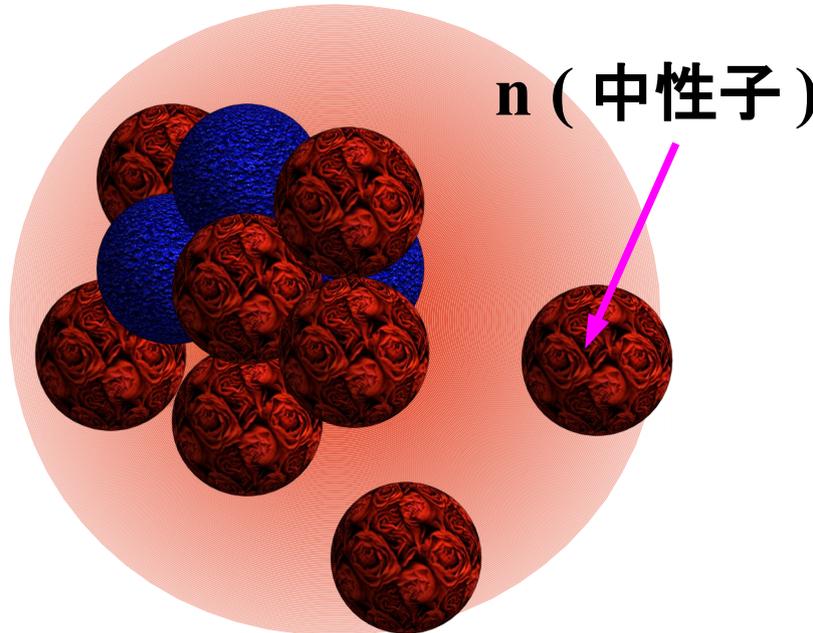
■ エキゾチックな原子核

- 不安定原子核 (中性子過剰核、陽子過剰核、超重元素)
- ハドロン核 (核子以外のハドロンを含む原子核)



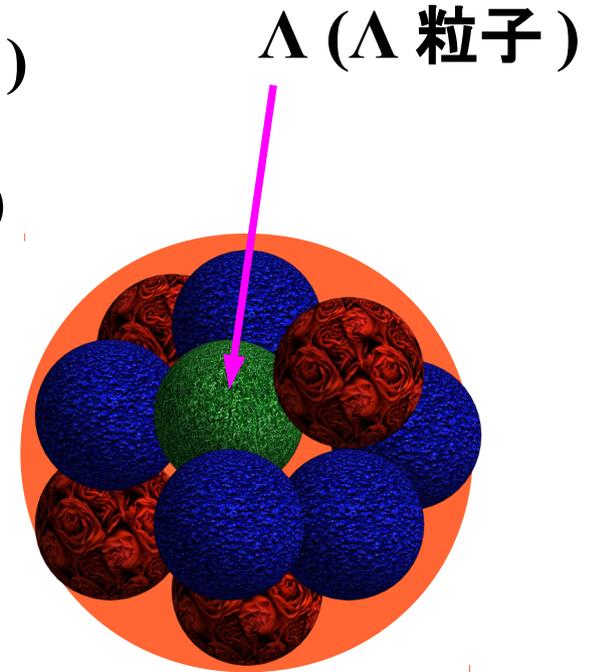
$$N \approx Z$$

例: ^{40}Ca (N=Z=20)



中性子過剰核 $N \gg Z$

例: ^{11}Li (Z=3, N=8)

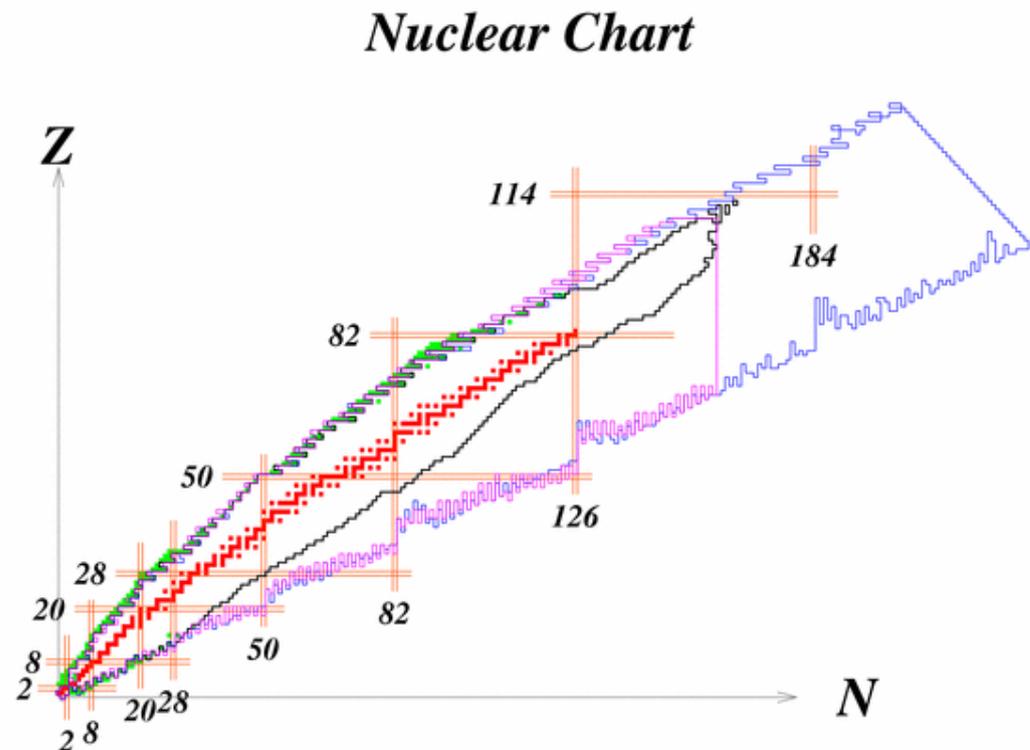


ハイパー核

例: $^{12}_{\Lambda}\text{C}$ (Z=6, N=5 と Λ)

Nuclear Chart (核図表)

- これまでに見つかっている原子核 ~ 2000 種類
- 存在が期待されている原子核 ~ 6000 種類
- 理研 RIBF で、未発見の 4000 種のうち、1000 種程度見つかる予定。
- ストレンジネスを含む原子核はもっとある
→ KEK + 原研の次期加速器で 3次元核図表作成
- 中性子数・陽子数がある特別な値 (魔法数) となるとき原子核は特に安定 (~希ガス)



ニホニウムの作り方 (^{278}Nh)

■ 新元素 Z=113 の発見：理化学研究所 (2004/09/28)

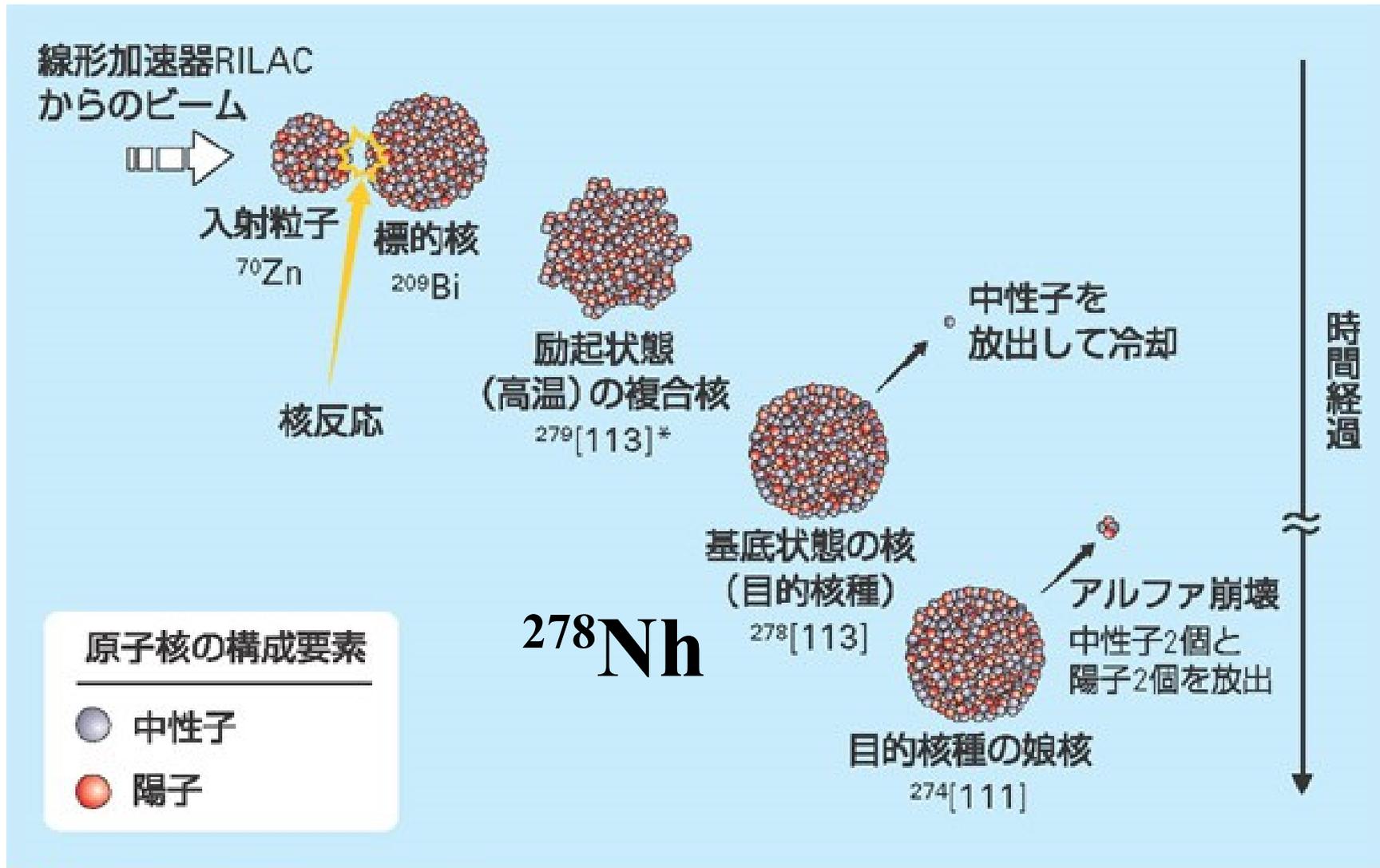
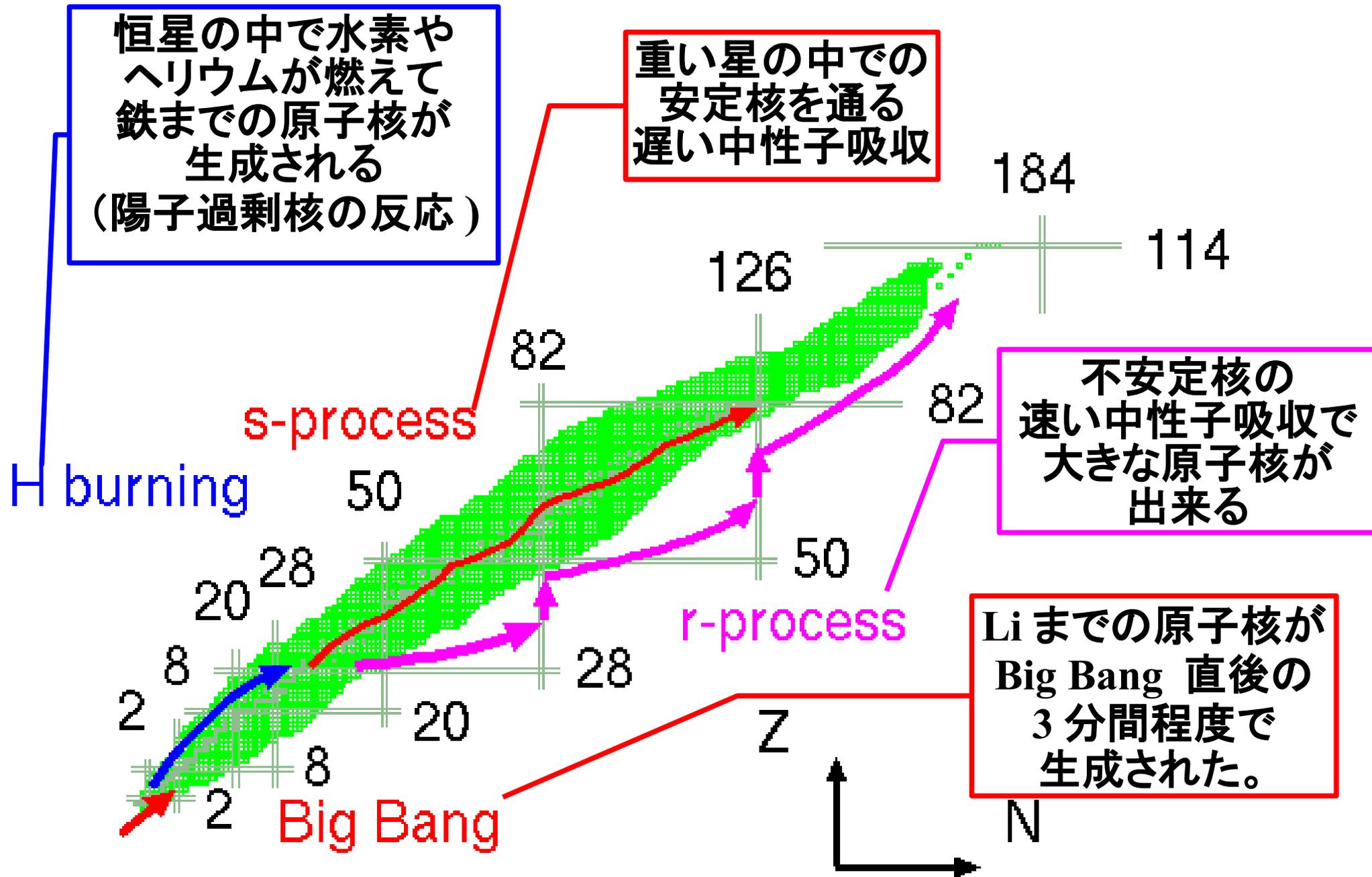


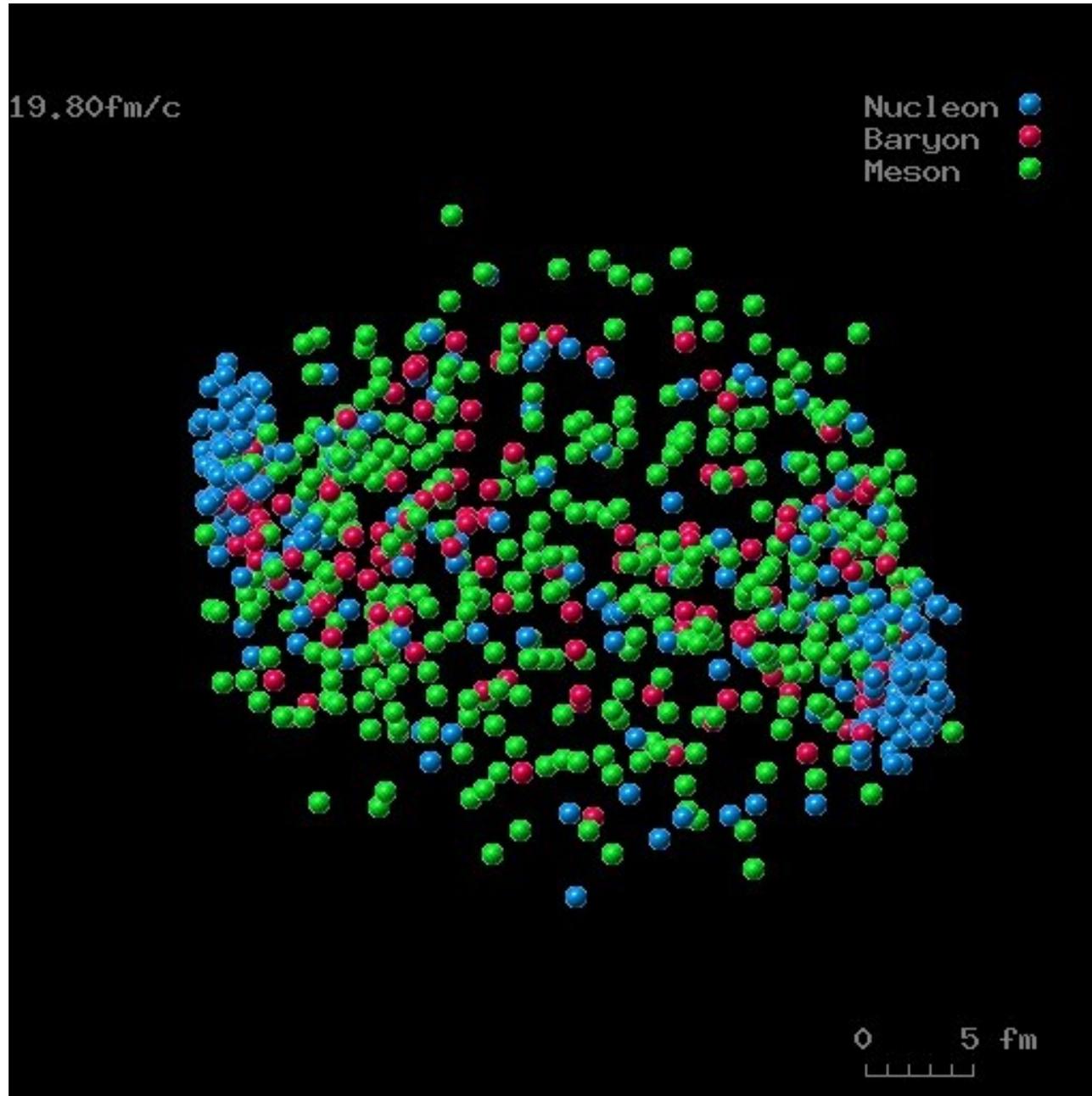
図1 原子番号113元素の合成と崩壊連鎖

3 例目を見つけて命名権獲得。ニホニウムへ。

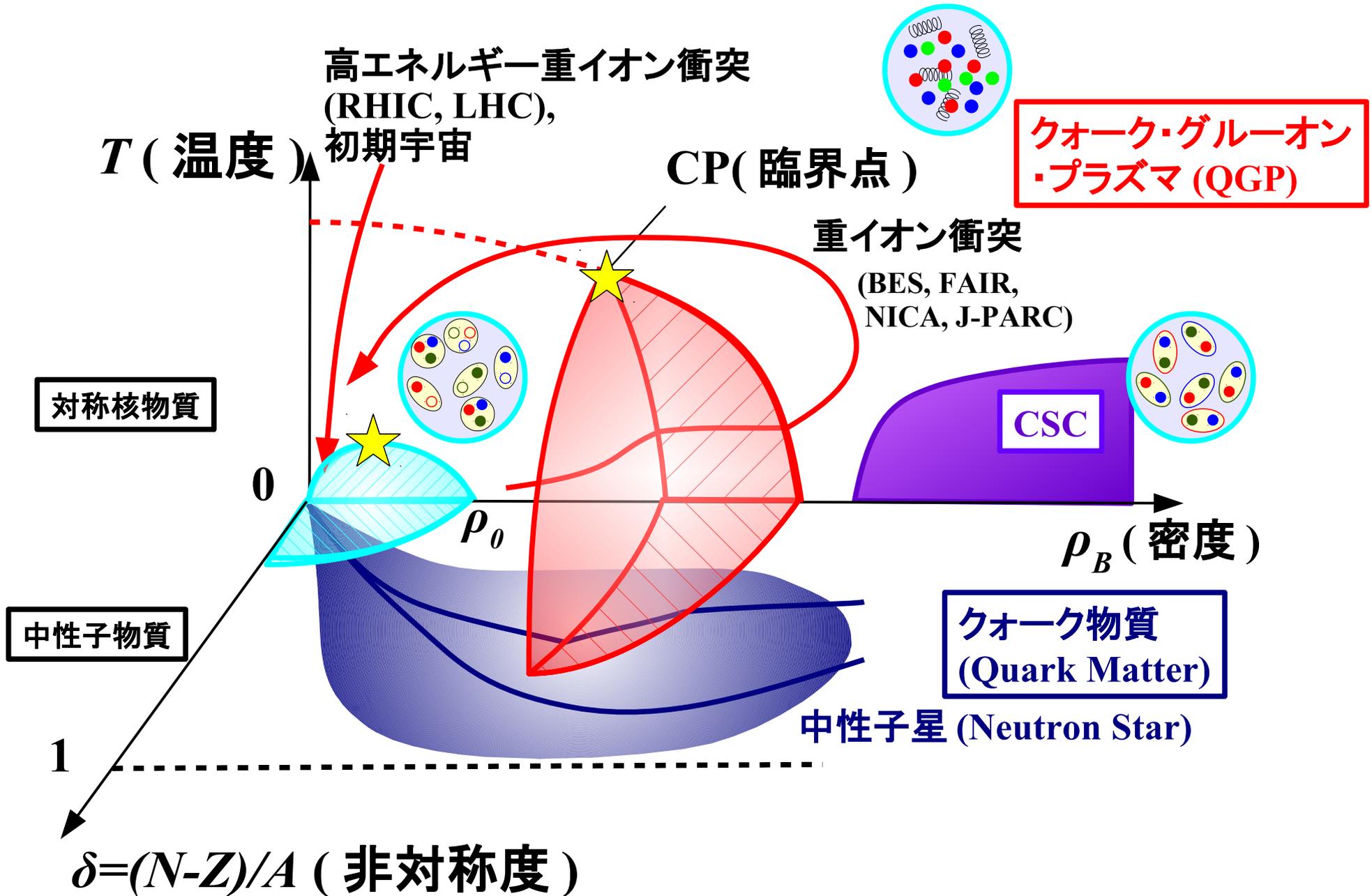
元素の起源：不安定な多くの原子核がかかわる！



高エネルギー重イオン衝突



高温・高密度核物質の相図 (QCD Phase Diagram)

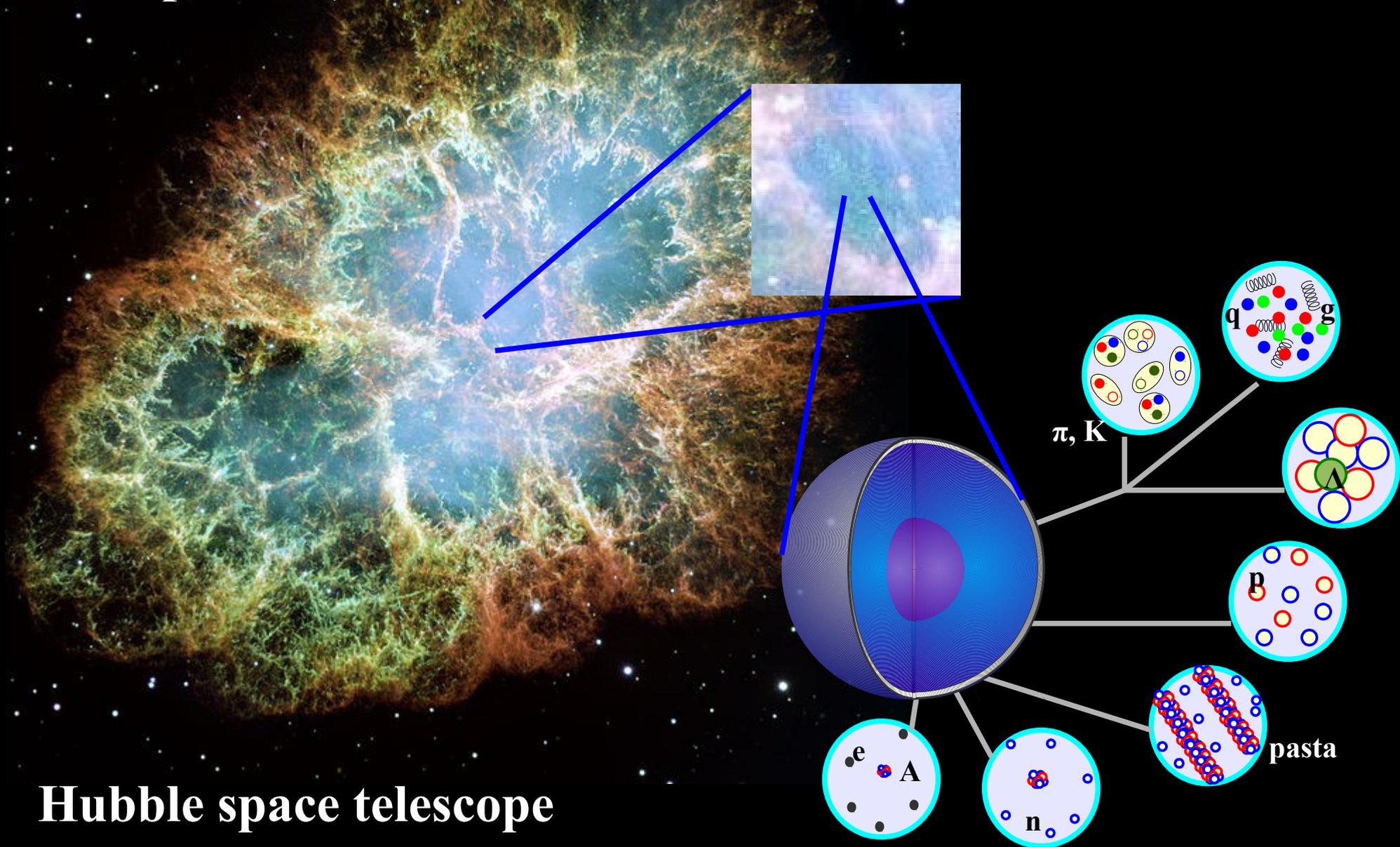


序論：中性子星とは

Crab Nebula

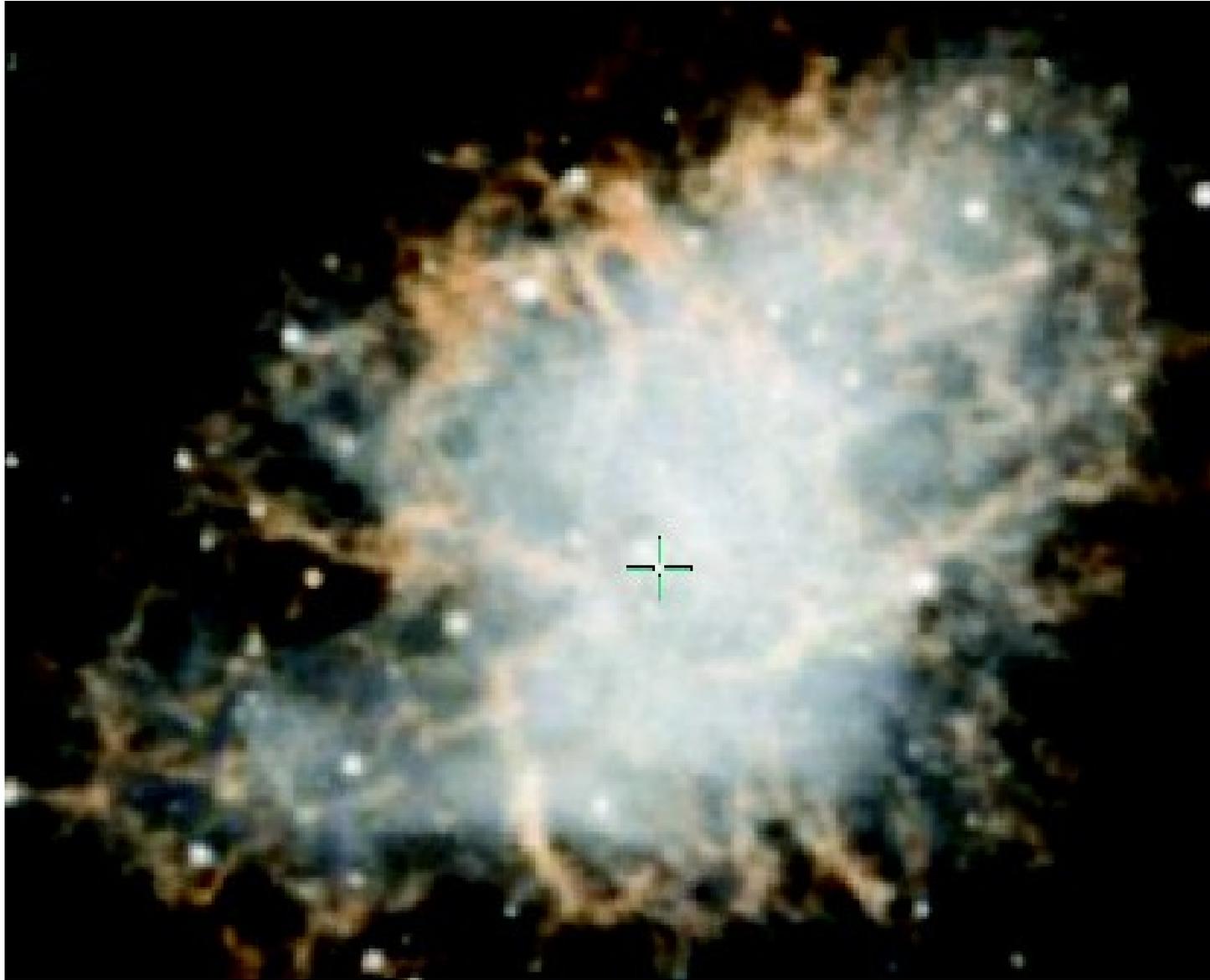
SN1054 (e.g. Meigetsu-ki, Teika Fujiwara)

Crab pulsar (PSR J0534+2200), discovered in 1968.



Hubble space telescope

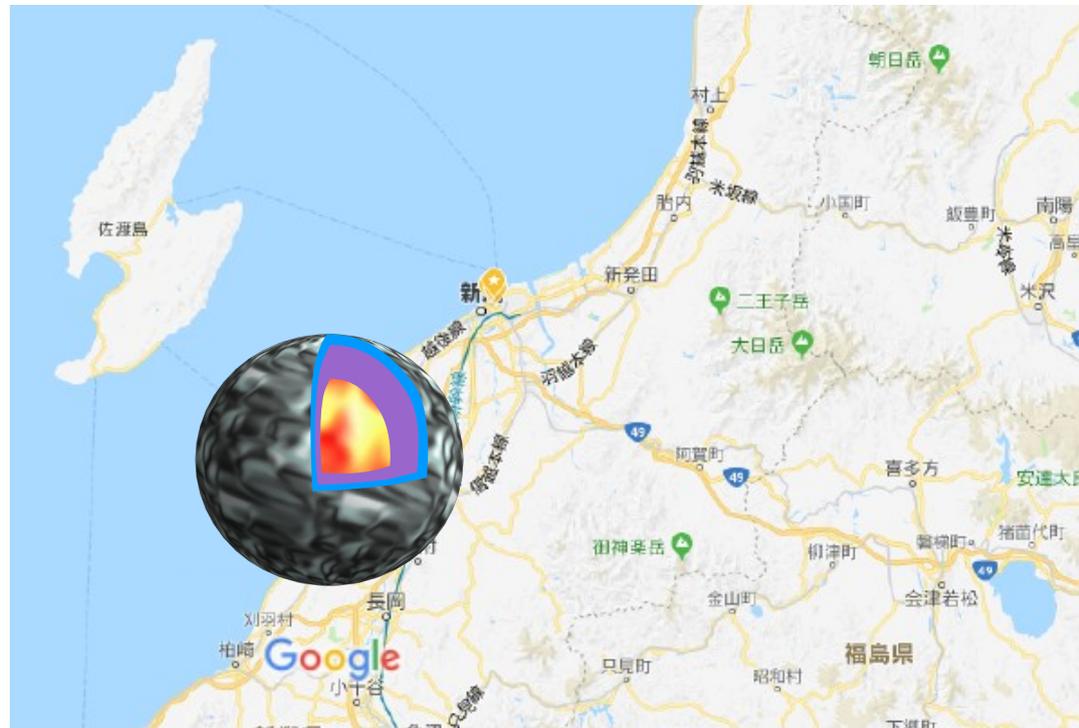
Pular position



<http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/sim-id?Ident=Crab+Pulsar>

中性子星の基本的性質

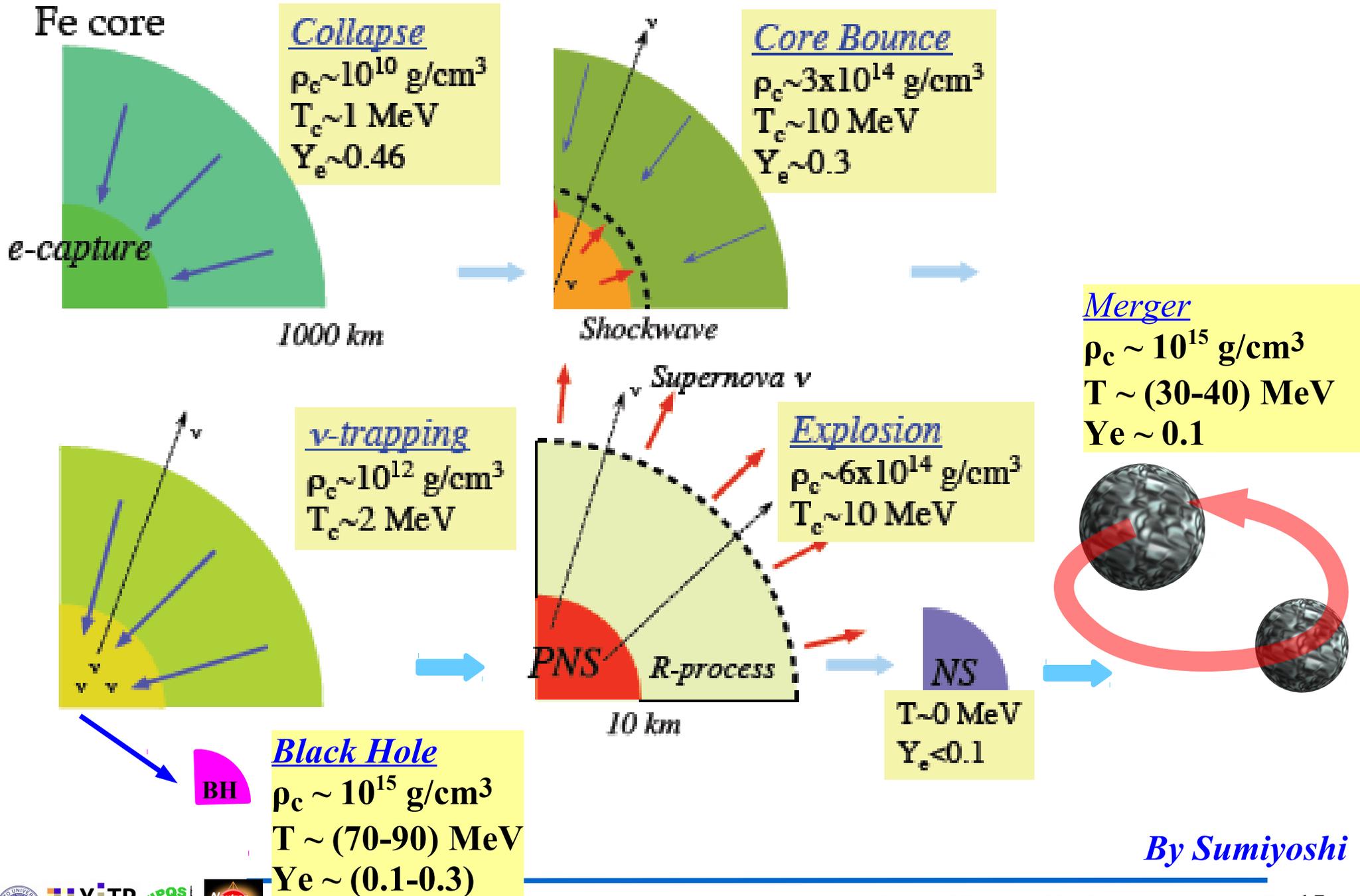
- 質量 = 太陽質量の (1-2) 倍 : $M = (1-2) M_{\odot}$ ($M \sim 1.4 M_{\odot}$)
- 半径 = $5 \text{ km} < R < 20 \text{ km}$ ($R \sim 10 \text{ km}$)
→ 太陽程度に重い、一つの県よりも小さい。
- ほぼ温度ゼロ
($T \sim 10^6 \text{ K} \sim 100 \text{ eV}$)
中性子のフェルミ・エネルギー
~ 数 10 MeV
- 多彩な構成要素
 $n, p, e, \mu, Y, K, \pi, q, g, qq, \dots$
- 中性子星物質
= 核力 (強い相互作用) で
支えられており、
多彩な構成要素を含み得る
高密度物質



地図データ ©2017 Google, ZENRIN 20 km

google & zenrin

中性子星の誕生と終焉



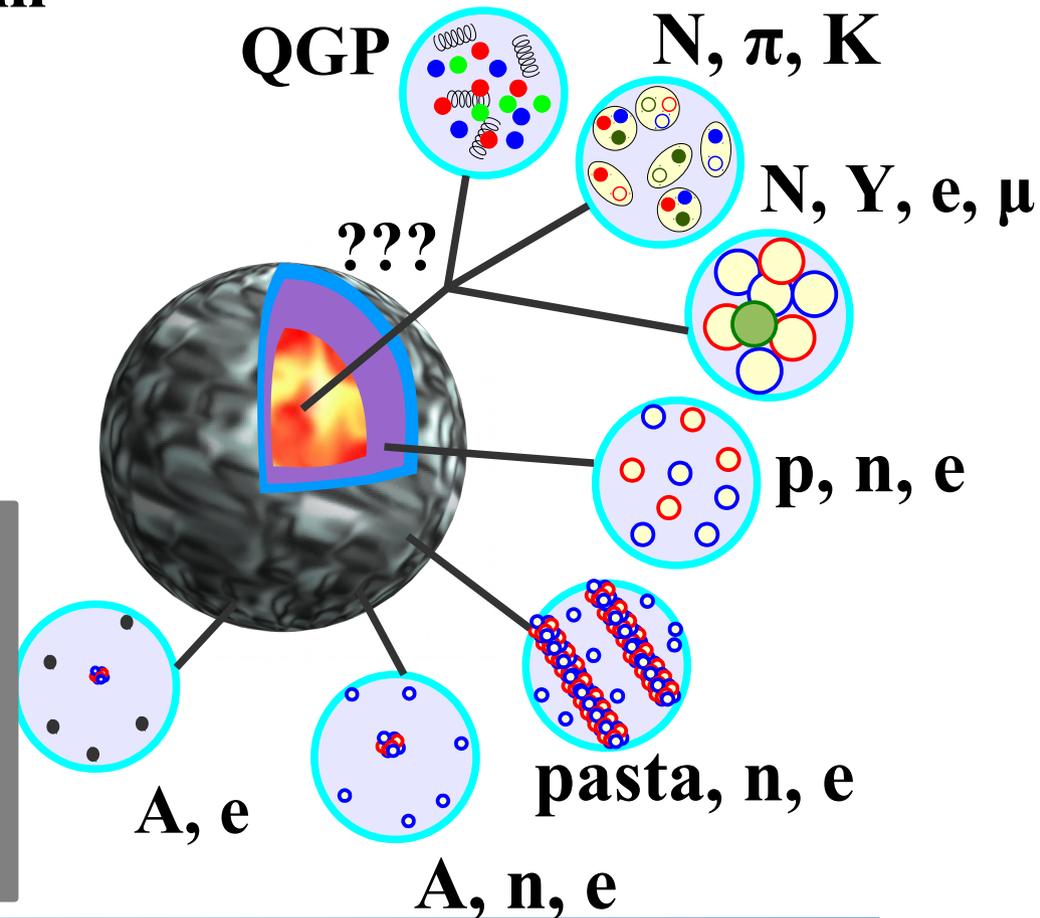
By Sumiyoshi

中性子星の構造と組成

- 質量：太陽質量 (M_{\odot}) の 1-2 倍 (代表的には $M \sim 1.4 M_{\odot}$)
- 半径： $5 \text{ km} < R < 20 \text{ km}$ (代表的には $R \sim 10 \text{ km}$)
- 中性子星の密度 = $(2-7) \times 10^{14} \text{ g / cm}^3$ ($M \sim 1.4 M_{\odot}$, $R = 10-15 \text{ km}$)
- 原子核の密度 $\sim 2.5 \times 10^{14} \text{ g / cm}^3$

中性子星の平均密度は
原子核の 1~3 倍！

中性子星コア(中心部分)は、
宇宙に現存する観測可能な
「最高密度物質」
→ 様々な構成粒子が
現れると期待！

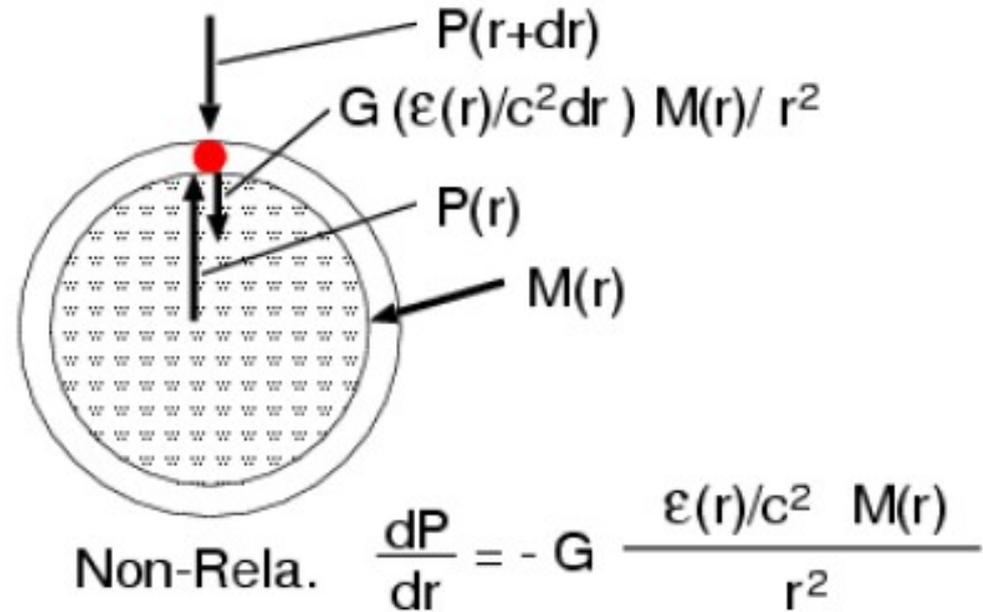


質量 - 半径曲線と状態方程式

- 質量 - 半径曲線 (M-R curve) と中性子星物質状態方程式は 1 対 1 対応

- 静水圧平衡 = 圧力差と重力の釣り合い

- 圧力差からの力
= $S (P(r+dr) - P(r)) \sim S dr dP/dr$
- 重力 = $- S dr G \epsilon(r)/c^2 M(r) / r^2$



- TOV 方程式 = 一般相対論的静水圧平衡 (Tolman-Oppenheimer-Volkoff equation)

$$\frac{dP}{dr} = - G \frac{(\epsilon/c^2 + P/c^2)(M + 4\pi r^3 P/c^2)}{r^2 (1 - 2GM/rc^2)}$$

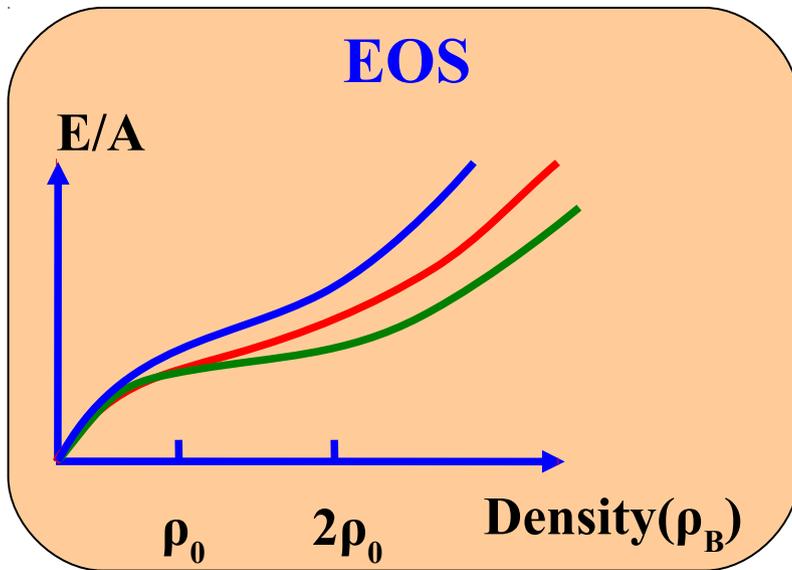
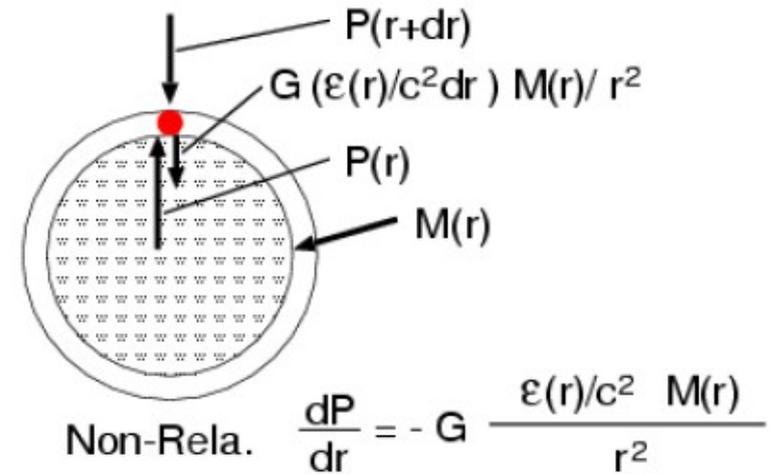
$$\frac{dM}{dr} = 4\pi r^2 \epsilon/c^2, \quad P = P(\epsilon) \quad (\text{EOS})$$

質量 - 半径曲線と状態方程式

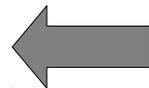
TOV equation

$$\frac{dP}{dr} = -G \frac{(\epsilon/c^2 + P/c^2)(M + 4\pi r^3 P/c^2)}{r^2(1 - 2GM/rc^2)}$$

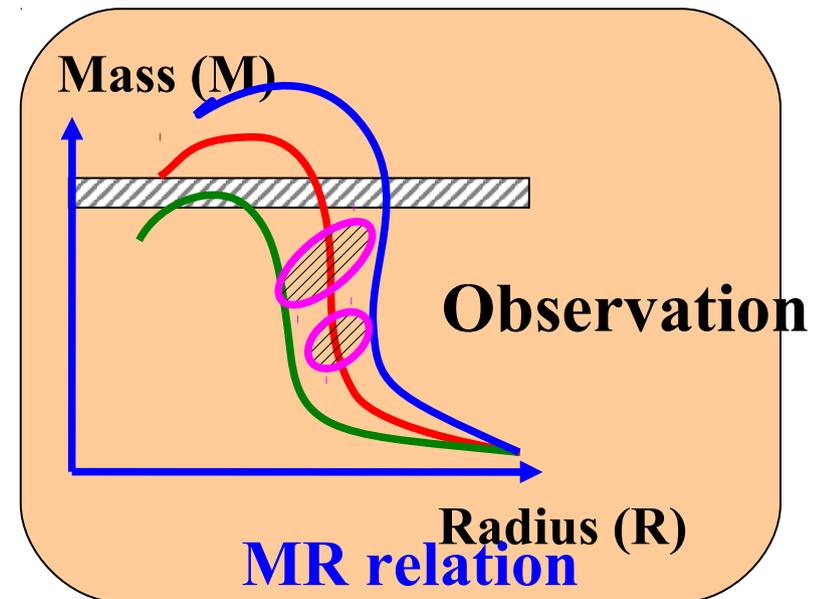
$$\frac{dM}{dr} = 4\pi r^2 \epsilon/c^2, \quad P = P(\epsilon) \quad (\text{EOS})$$



prediction

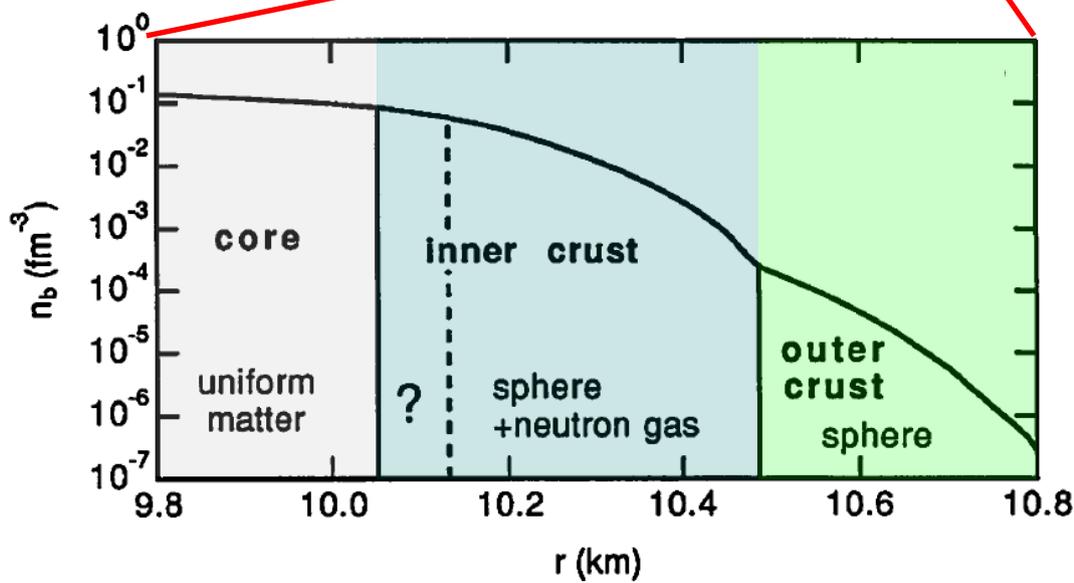
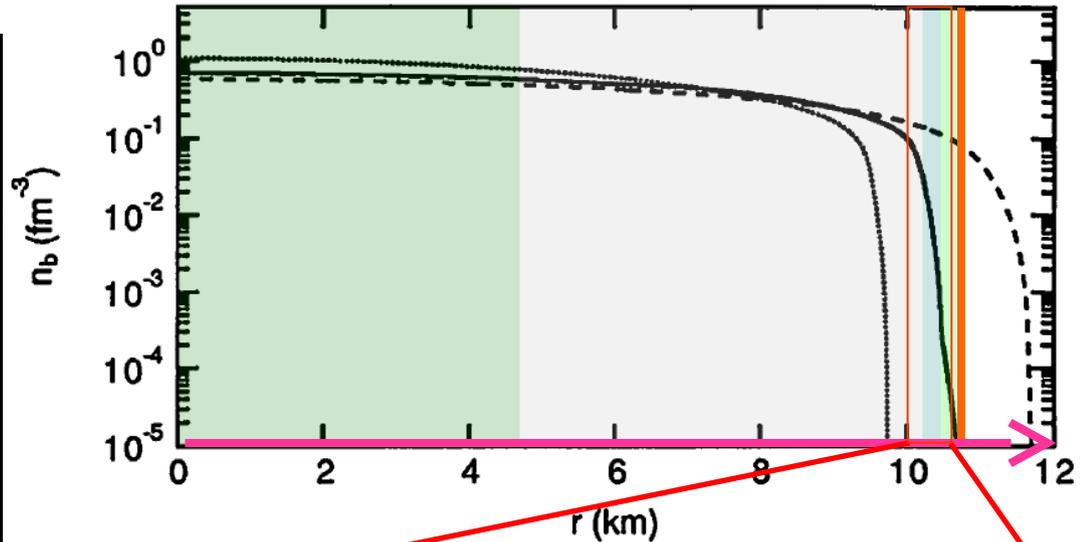
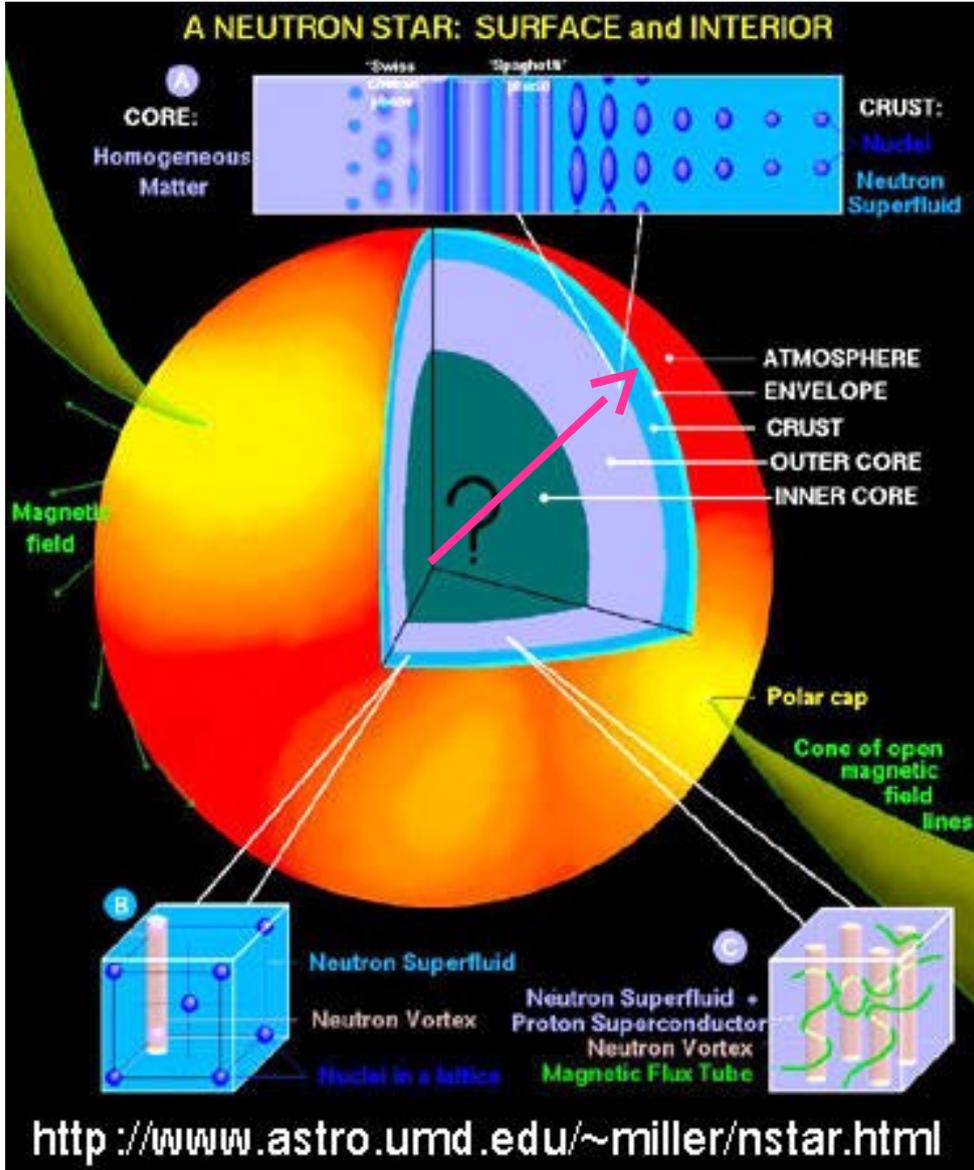


Judge



Neutron Star Structure

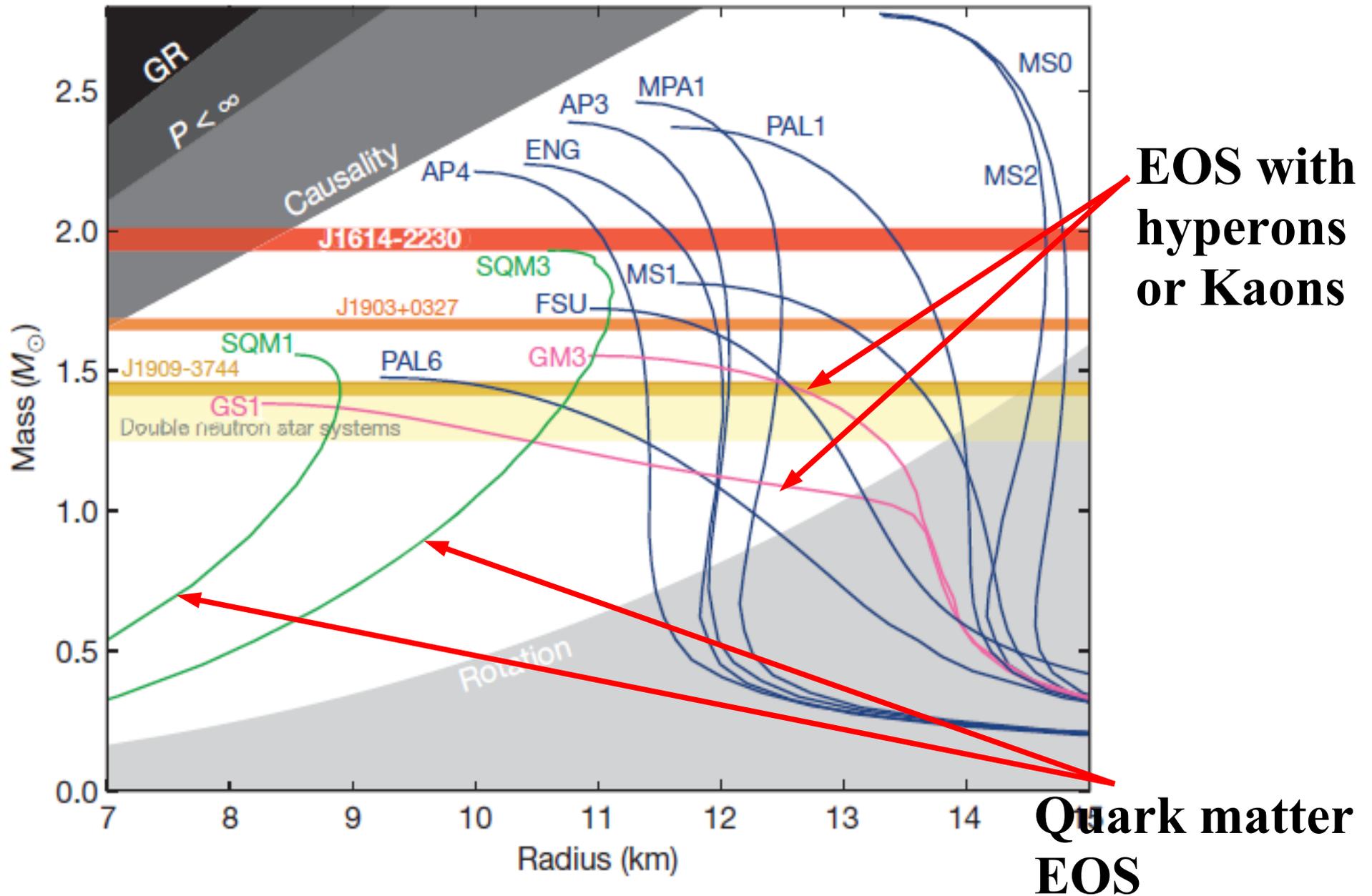
Dense core + Thin Crust



by Nakazato

Hyperon Puzzle

Demorest et al., *Nature* 467 (2010) 1081 (Oct.28, 2010).



EOS with hyperons or Kaons

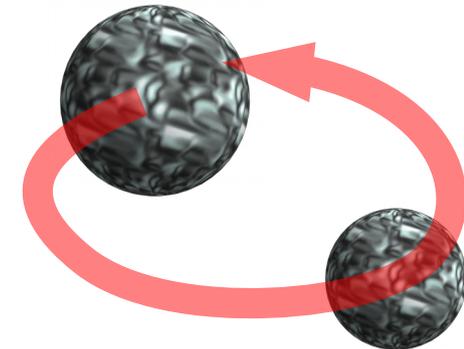
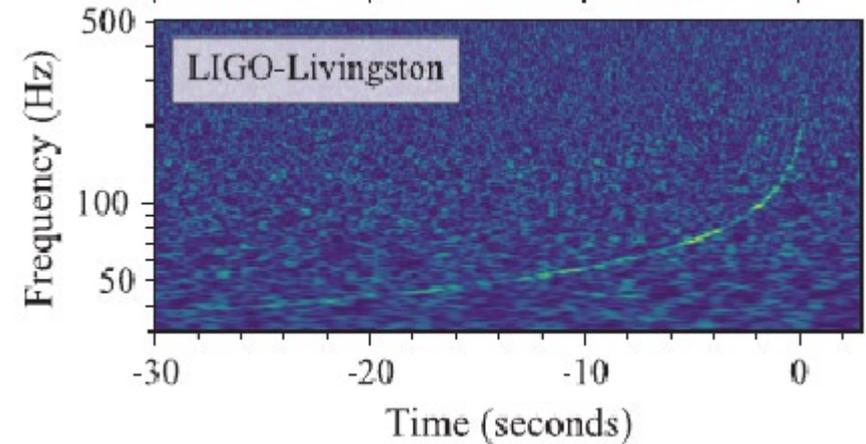
Quark matter EOS

連星中性子星合体

■ GW170817

B. P. Abbott et al. (LIGO and Virgo)
PRL 119, 161101 (2017)

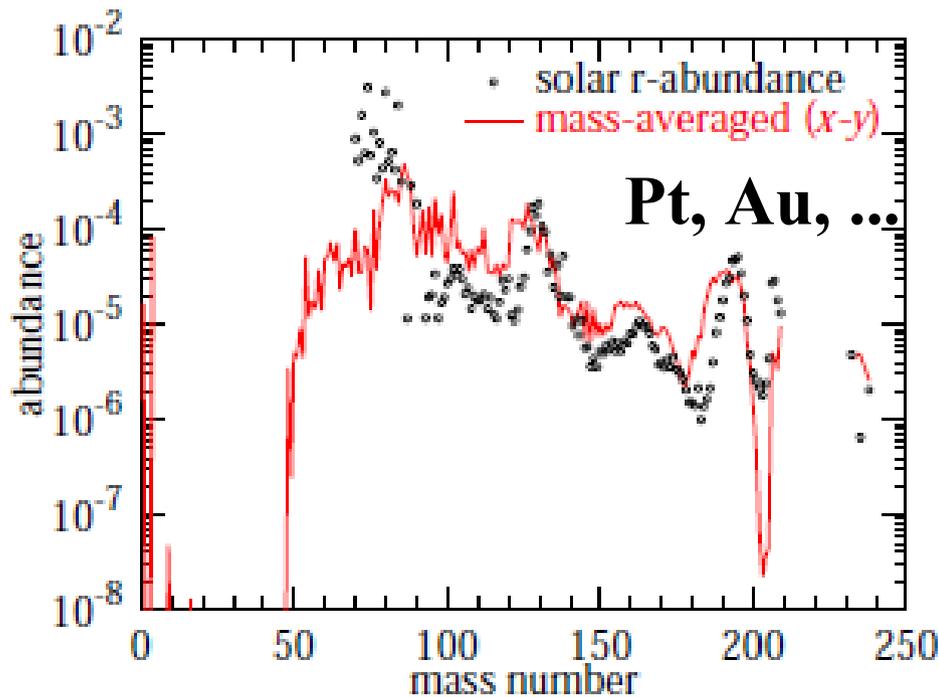
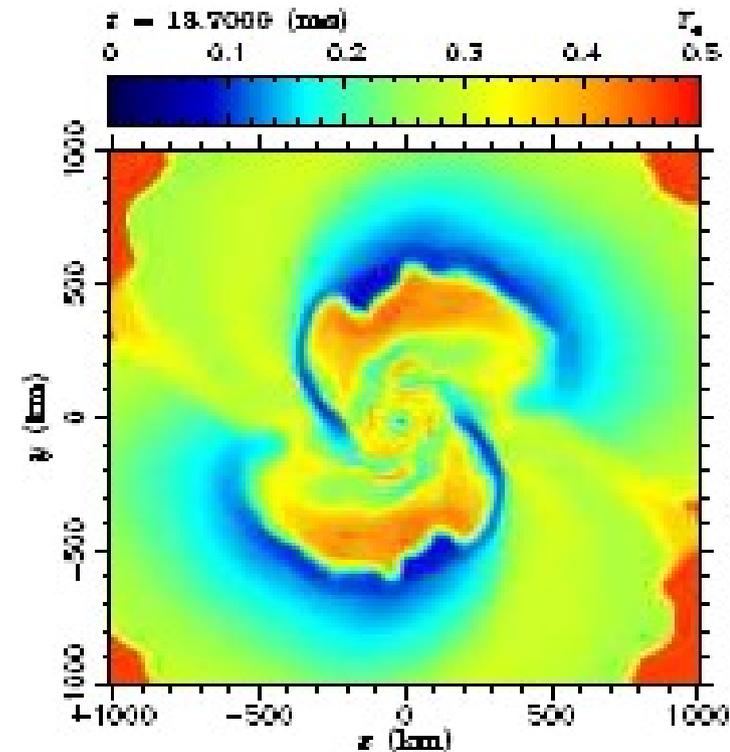
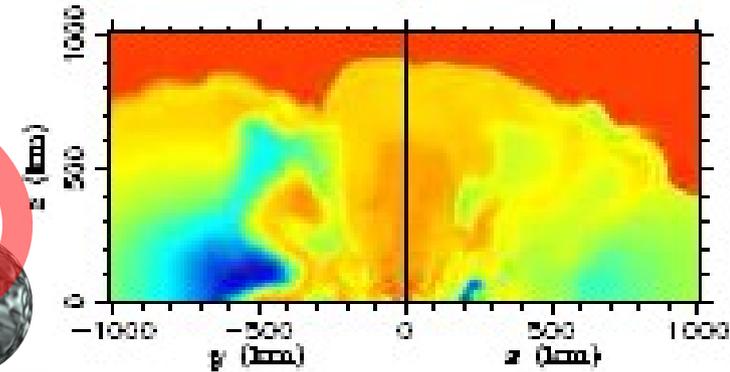
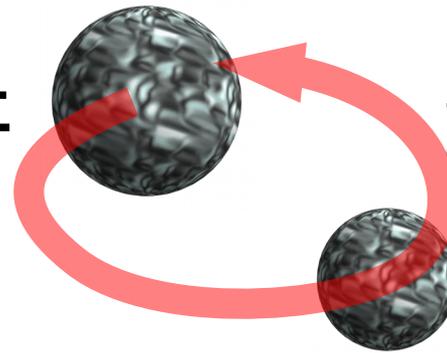
- 質量和 $M = 2.74^{+0.04}_{-0.01} M_{\odot}$
- それぞれの質量 1.17-1.60 M_{\odot}
→ 連星中性子星合体
(Binary Neutron Star Merger)
- Gamma Ray Burst (GRB170717A) が
1.7 s 後に起こる。
→ GRB の起源 (の一つ) を特定
- inspiral (徐々に近づいていく段階) における振動数変化を観測
→ 中性子星半径を制限
- 放出された物質の速度から中性子星の最大質量を制限
M. Shibata et al., 1710.07579
 $M_{\max} = (2.15-2.25) M_{\odot}$



連星中性子星合体と元素合成

■ 元素合成の新しい可能性

- 連星中性子星合体
→ 電子 / バリオン比 (Y_e) に
大きな広がり
- 小さな $Y_e \rightarrow r$ 過程ピーク
大きな $Y_e \rightarrow A < 130$
- 太陽系の元素組成をほぼ説明



Wanajo, Sekiguchi ('14)

中性子星が関わる物理の広がり

■ 高密度物質の状態方程式

- 核子以外の構成要素が作る安定な物質の実験室
- 核子以外のハドロンが存在しているか？
- 高密度での QCD 相転移は起こっているか？

■ アイスピン非対称物質の状態方程式

- 対称エネルギー = 中性子物質と対称物質のエネルギー差
→ 中性子過剰核実験と天体観測を結ぶ！
- 核密度を越える領域でのバリオン超流動 → 中性子星冷却過程
- 冷却原子でシミュレートされるユニタリ—気体がほぼ実現

■ コンパクト星の天体物理学

- 内側の構造は未解明
→ 質量・半径・温度・磁場などの測定による解明を待つ！
- 連星中性子星合体は有望な重力波源・元素合成 site

新学術領域「中性子星核物質」(2012-2017)

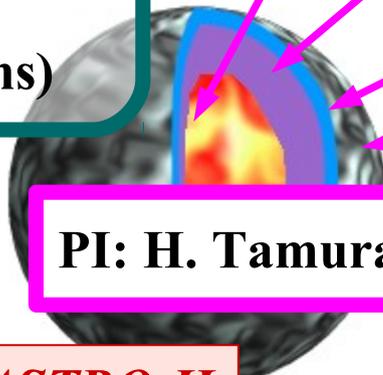
High ρ (Group A)
head: Tamura, Takahashi

Hypernuclei, Kaonic nuclei
YN & YY int.,
Eff. Interaction
(Heavy-ion collisions)

J-PARC



PI: H. Tamura



Hyperons, mesons, quarks

Asym. nuclear matter
+elec.+ μ

Nuclei+neutron gas+elec.

Nuclei + elec.

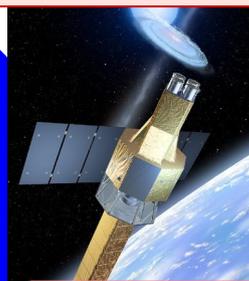
Low ρ (Group B)
head: Murakami,
Nakamura, Horikoshi

Sym. E, Pairing gap,
BEC-BEC cross over,
Cold atom, Unitary gas

NS Obs. (Group C)
head: Takahashi

Radius, Mass,
Temp. (Cooling),
Star quake, Pasta

ASTRO-H



RIBF



Theory (Group D)
head: Ohnishi

oled ⁶Li atoms