
中性子星を支える力

京都大学基礎物理学研究所 大西 明
Akira Ohnishi (YITP, Kyoto Univ.)

市民講座「物理と宇宙」第2回
2014/11/29

主催

京都大学大学院理学研究科物理学・宇宙物理学専攻
京都大学基礎物理学研究所



略歴

■ 大西 明 (おおにし あきら)

- 現職：京都大学 基礎物理学研究所 教授

■ 履歴書

- 1964年神戸生まれ
- 1988年京都大学理学部卒
- 1992年京都大学博士
- 大阪大学学振特別研究員、
北海道大学助手・講師・
助教授・准教授を経て
2008年より現職

■ 専門分野

- 原子核理論

講演の内容

■ 中性子星ってどんな星？

- 中性子星は大きな原子核
- どうやって見つかったのか？
- 質量・大きさ(半径)はどうやって測るか？

■ 中性子星の不思議

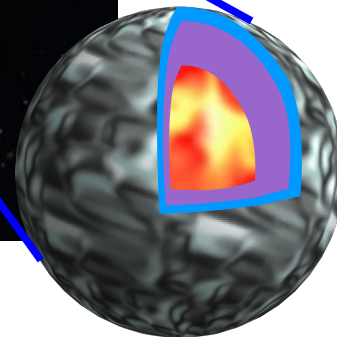
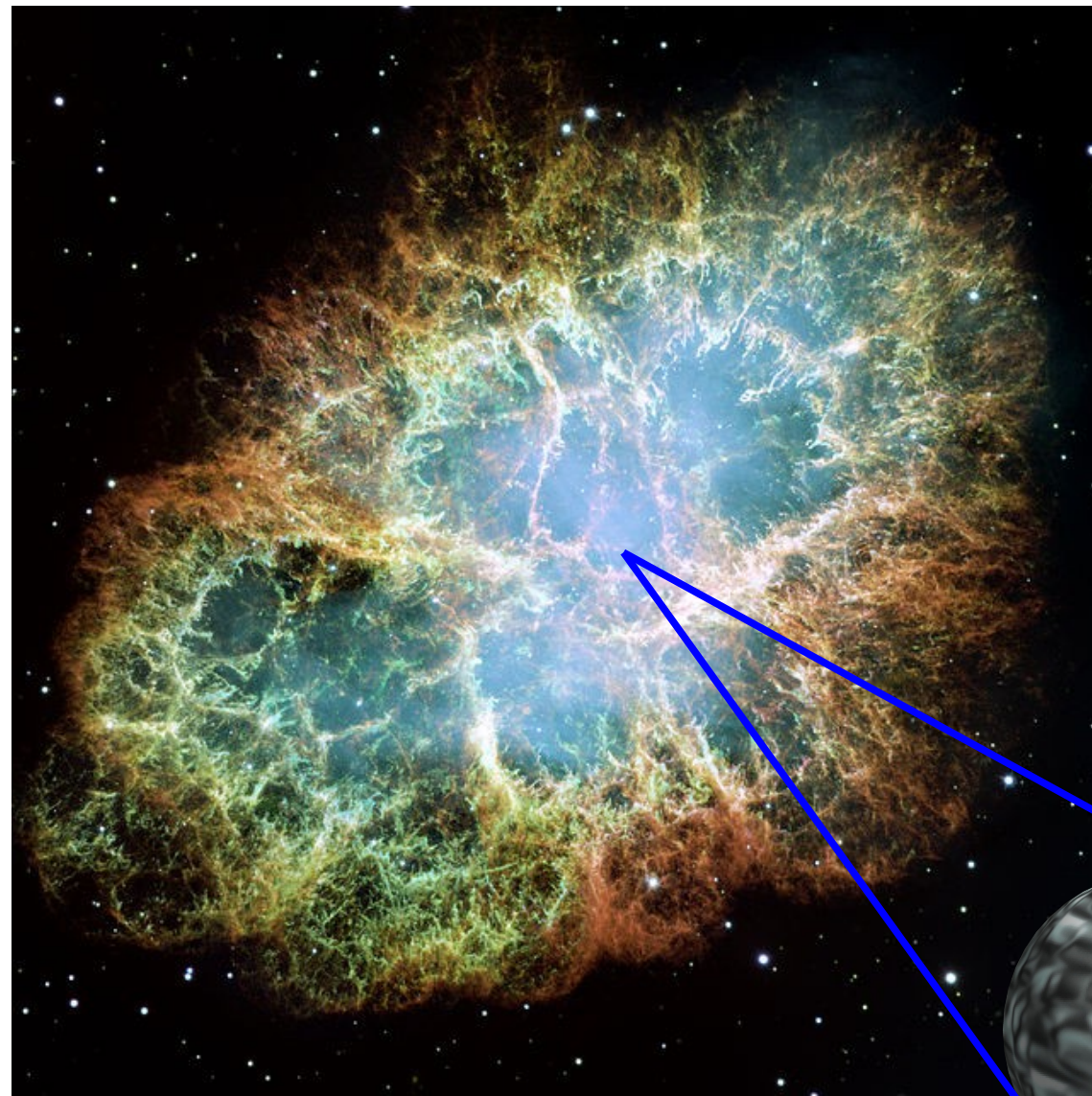
- 中性子星はどんな物質で出来ているのか？
- 中性子星の内側をどうやって知るのか？
- 中性子星の質量はどのような「力」が支えているか？

■ 中性子星物理学のこれから

- 実験と観測で解き明かす中性子星物質
- 中性子星の合体と元素の起源

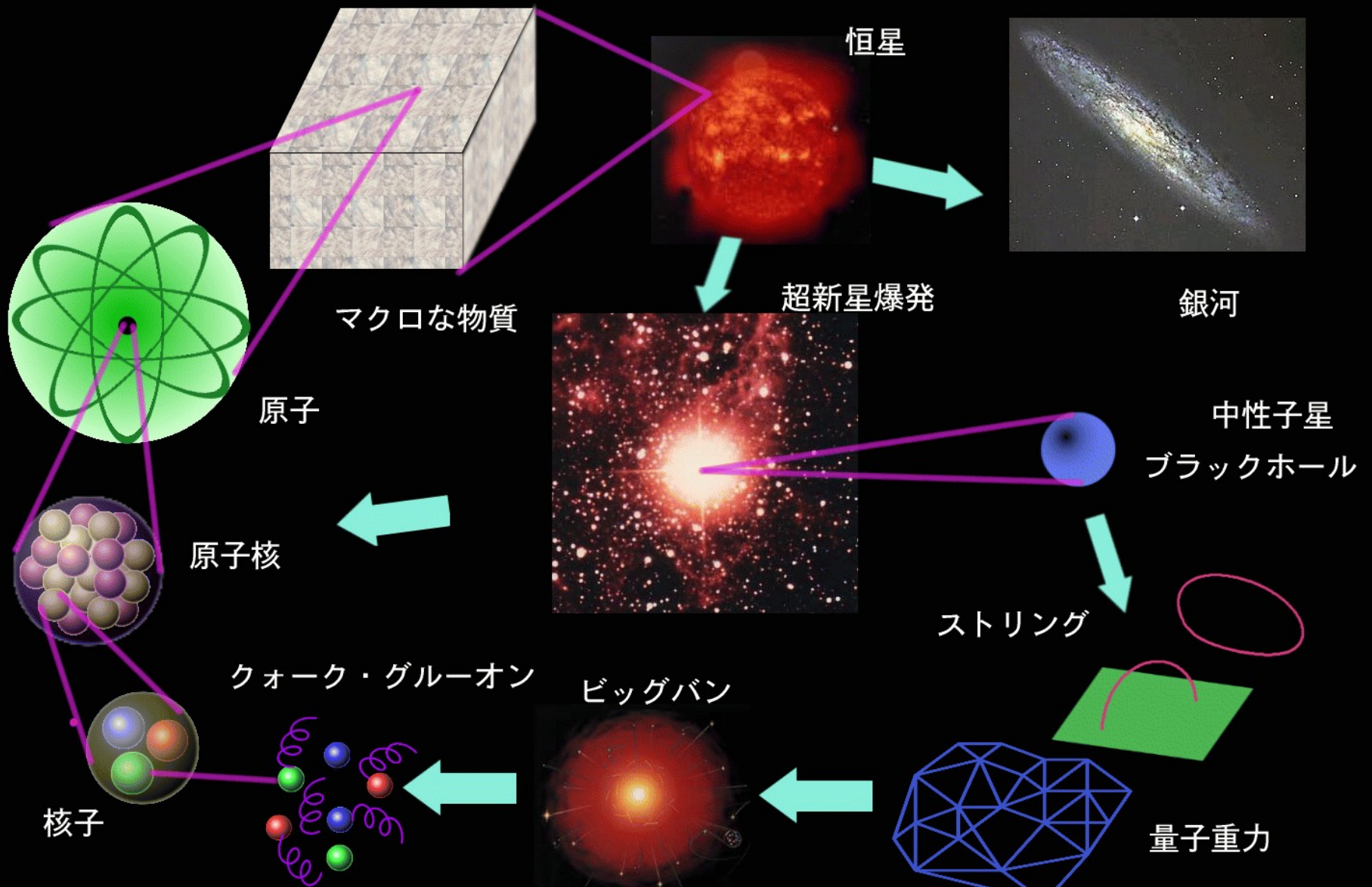
京都と中性子星

- 明月記 (藤原定家)
かに星雲超新星を含む
3つの超新星の記録
SN1054, SN1009, SN1181
- かに星雲超新星残骸に
パルサーを発見 (1968)
Crab pulsar
(PSR J0534+2200)
- 京都と中性子星は
1000年近くの歴史



Hubble space telescope

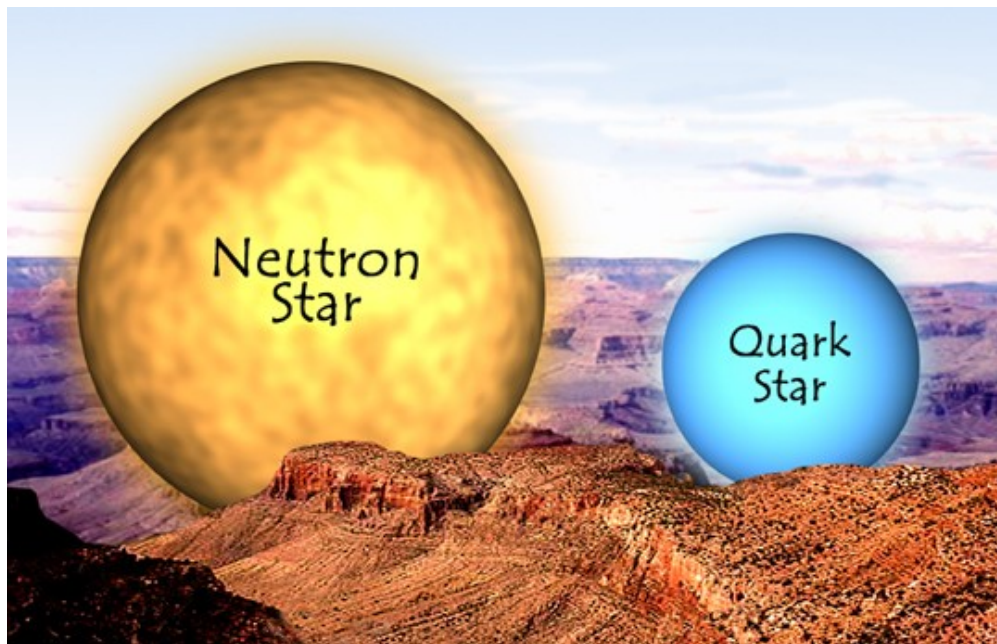
宇宙における物質の歴史と循環



(Supernova and Galaxy: photographed by D.F.Malin, Anglo-Australian Telescope Board, 1987)

中性子星の基本的性質

- 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 $R \sim 10 \text{ km}$)



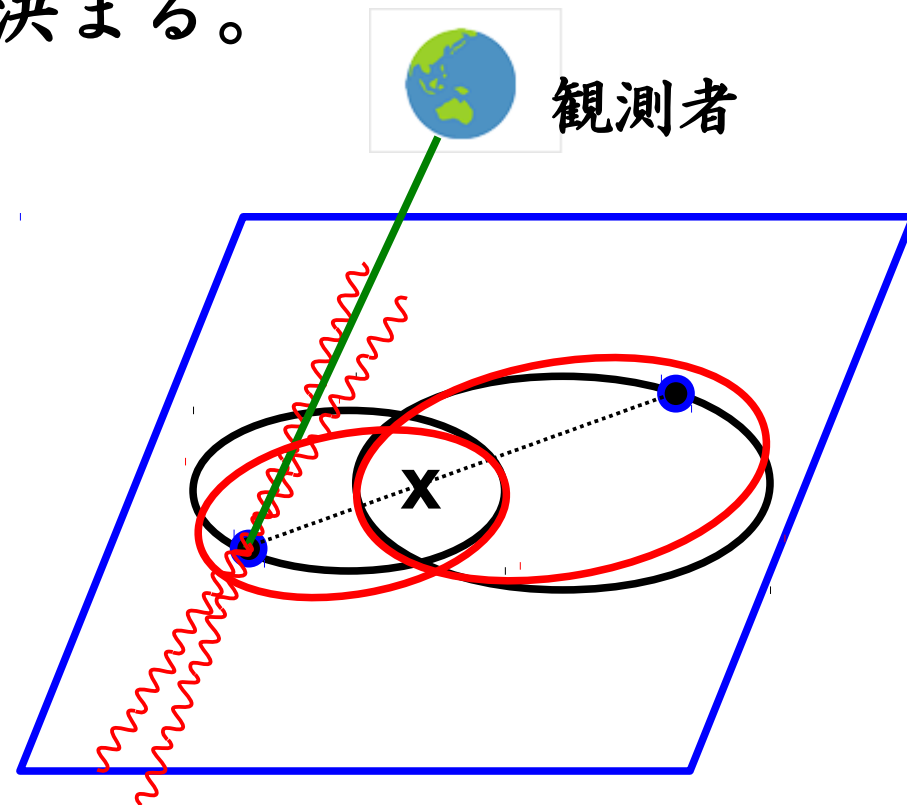
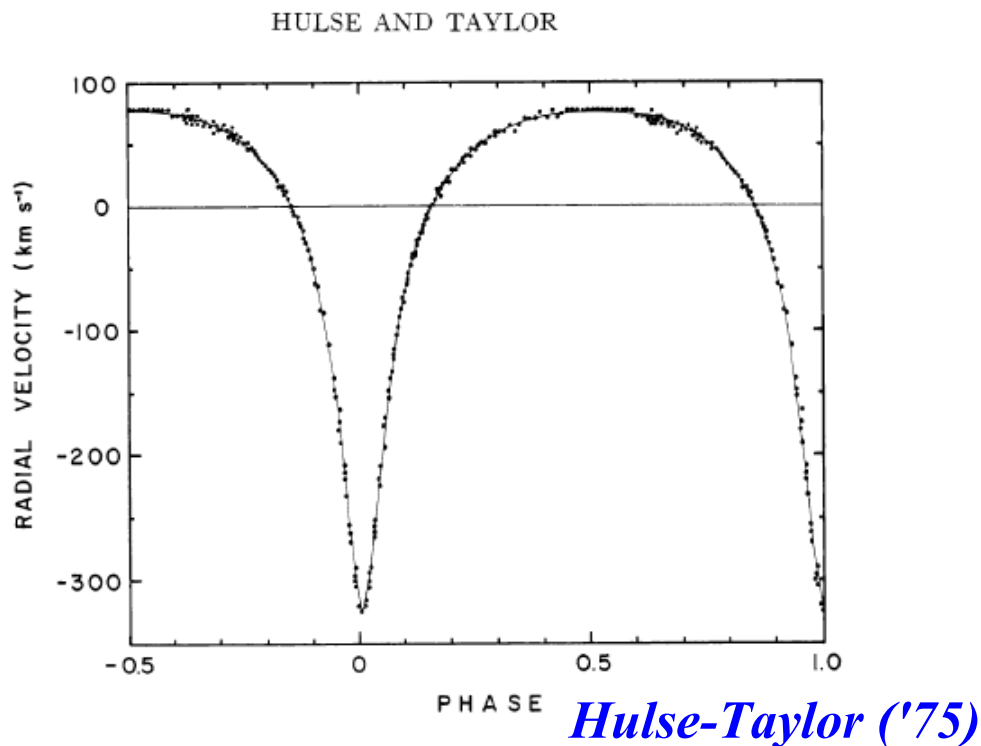
<http://chandra.harvard.edu/>



google & zenrin

中性子星質量の測り方

- 2 中性子星連星は重心の周りを楕円 (ケプラー) 運動
- ドップラーシフト (*) やタイミングから軌道がわかる
(* 動いている源からの波の周波数変化)
- 近日点移動などの一般相対論効果から
質量・軌道半径などが正確に決まる。



中性子星質量の観測結果

■ 精度よく測れる中性子星連星では $1.4 M_{\odot}$ に集中

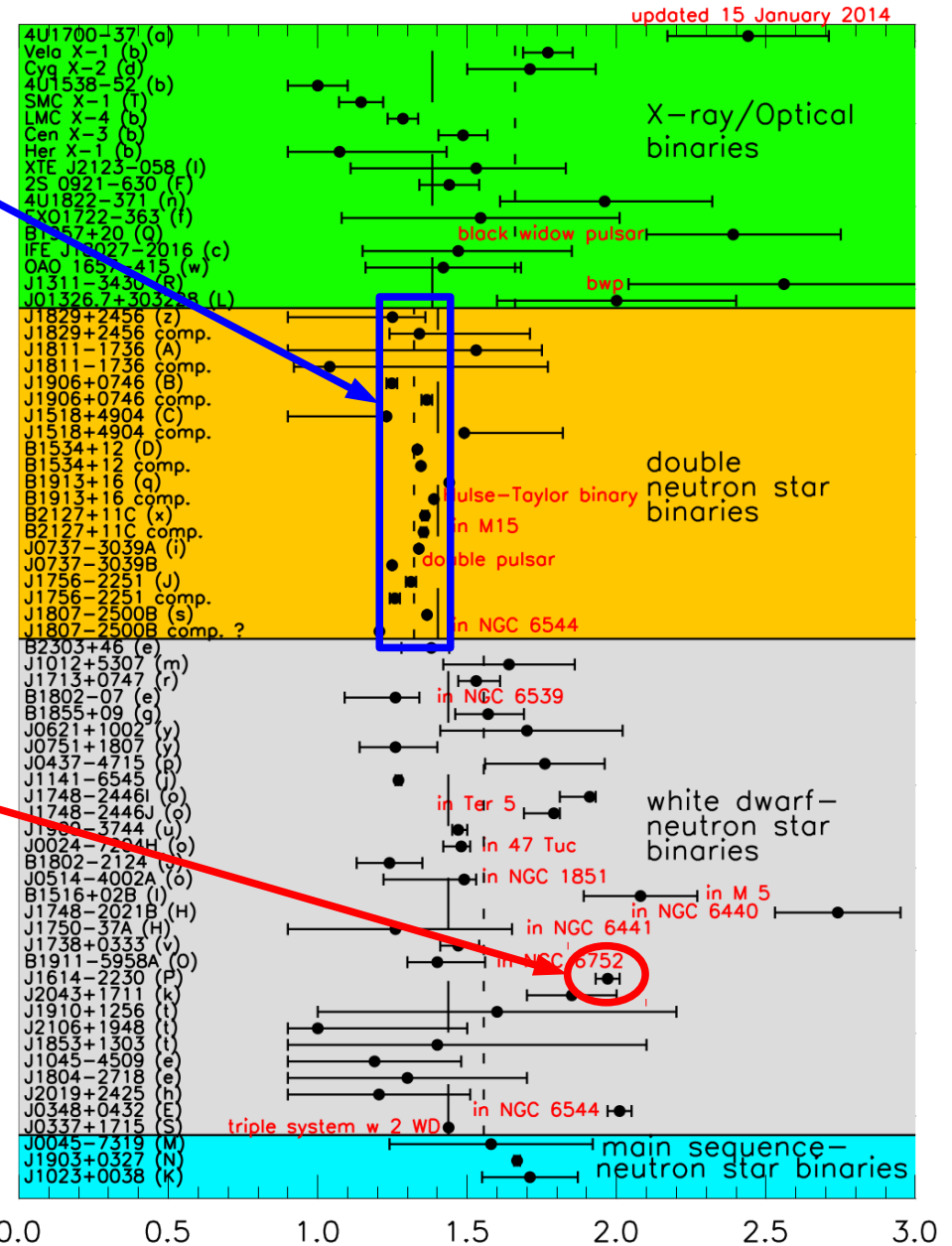
■ 通常の星や白色矮星との連星の場合には誤差が大きい。

■ 最近 (2010 年)、重い中性子星の質量が精度よく観測された

$$M_{NS} = 1.97 \pm 0.04 M_{\odot}$$

Demorest et al. ('10)

中性子星の質量は
 $M_{NS} = (1-2) M_{\odot}$



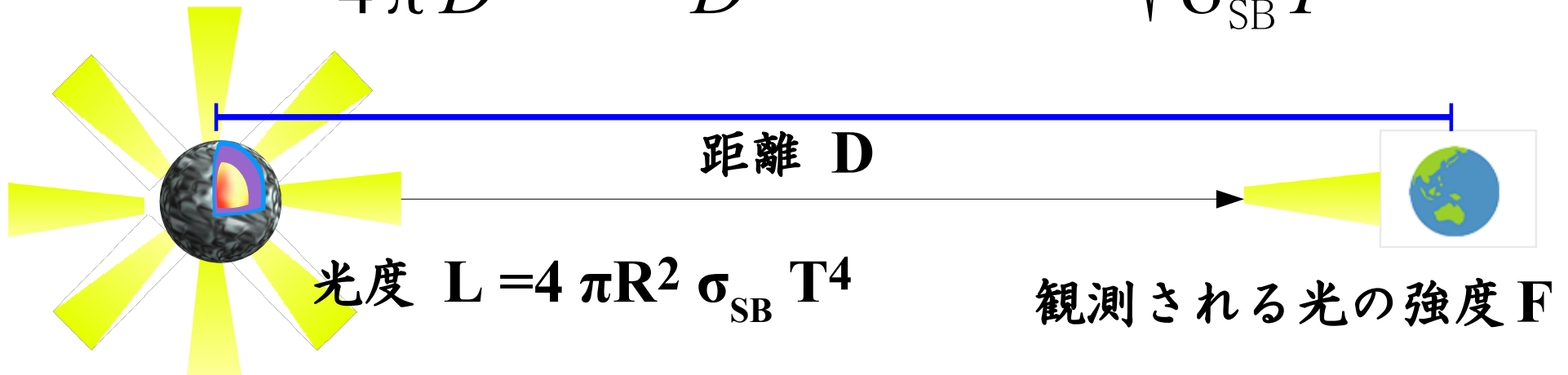
Lattimer ('14)

中性子星質量 / 30

中性子星半径の測り方

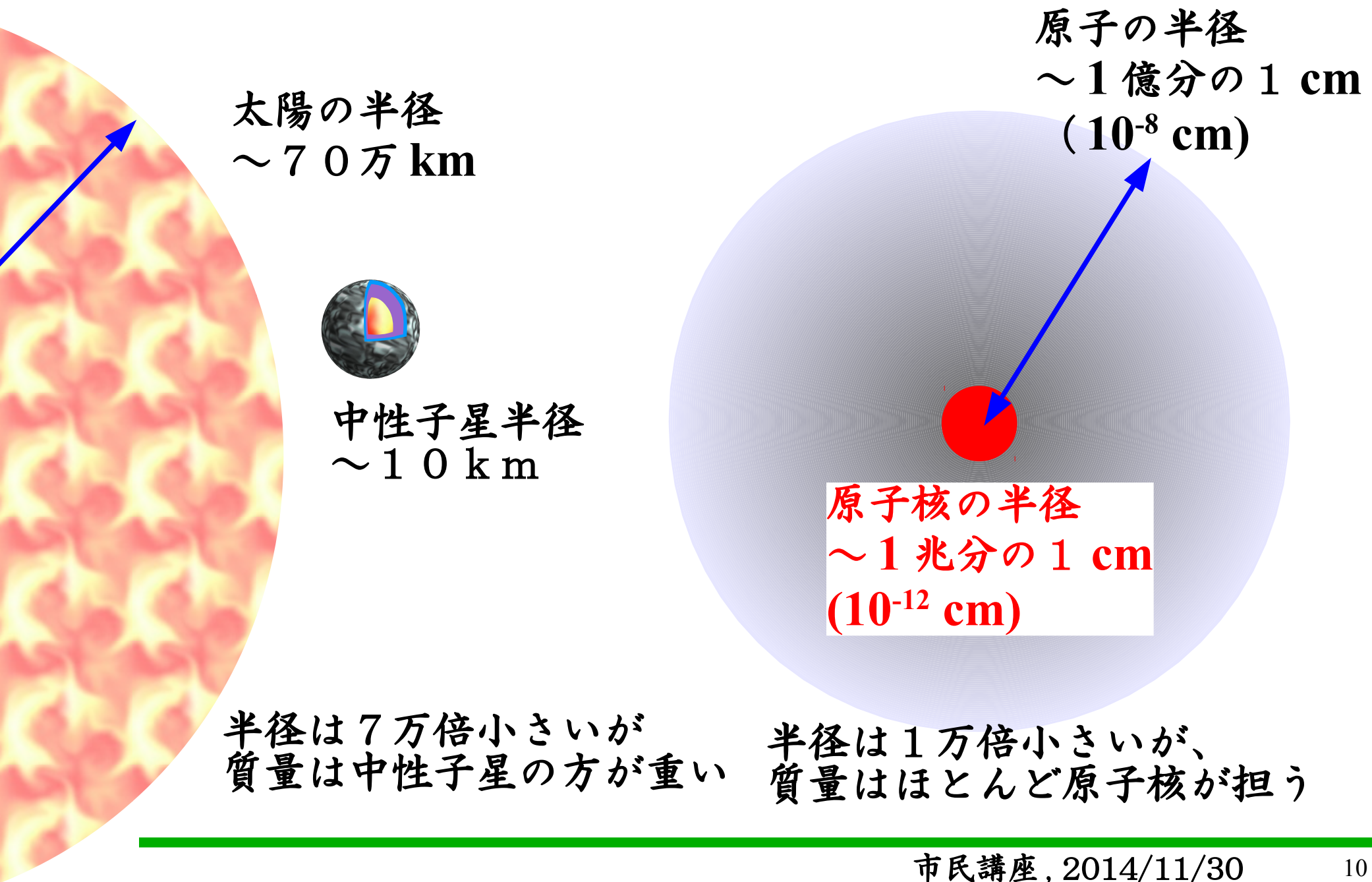
- 数千～数十万光年離れた半径 10km 程度の星の大きさなんて測れるの？
→ 難しいけれども方法はあります。
- 黒体放射（光度は温度の 4 乗に比例）を仮定し、中性子星までの距離がわかると、

$$F = \frac{L}{4\pi D^2} = \frac{\sigma_{\text{SB}} R^2 T^4}{D^2} \rightarrow R = D \sqrt{\frac{F}{\sigma_{\text{SB}} T^4}}$$



中性子星の半径は $9 \sim 15 \text{ km}$

中性子星の大きさ



中性子星の密度

■ 中性子星の密度

半径を 10 km とすると、

$$\text{太陽の密度 (1.4 g/cm}^3\text{)} \times \text{質量 1.4 倍} \times \text{半径比 (7 万)}^3 \\ = 7 \times 10^{14} \text{ g/cm}^3$$

(1 cm³ に=7億トン！、半径 15 km とすると 2億トン)

■ 原子核の密度

鉛 (²⁰⁸Pb、原子量 208) 原子核の半径は $R_A = 7 \times 10^{-13} \text{ cm}$

$$208 \text{ (g/mol)} / (6 \times 10^{23}) / (4 \pi R_A^3 / 3) = 2.5 \times 10^{14} \text{ g/cm}^3$$

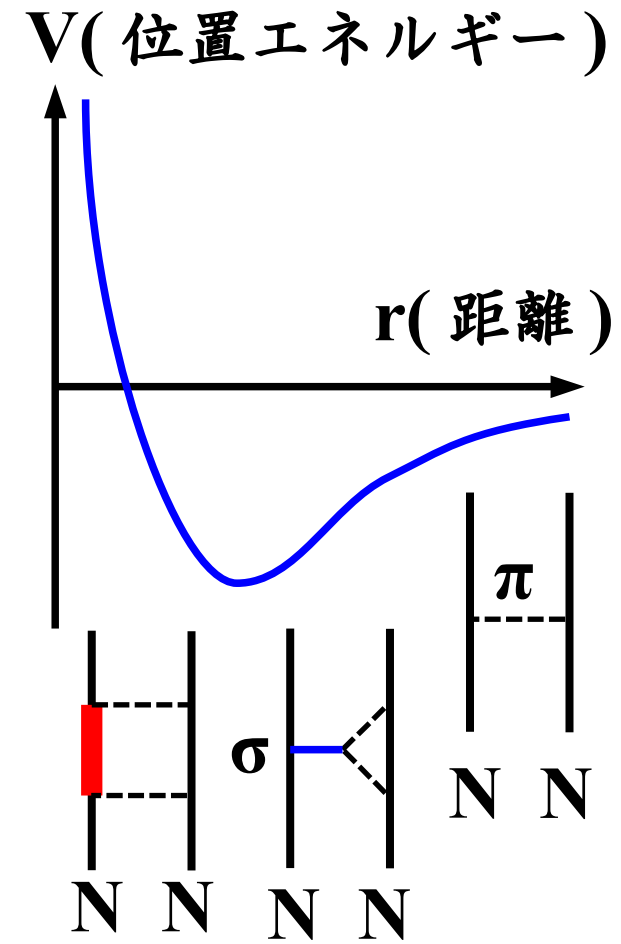
中性子星の平均密度は原子核の 1~3 倍！

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」

さて、どんな力が支えるのか？

中性子星を支える力

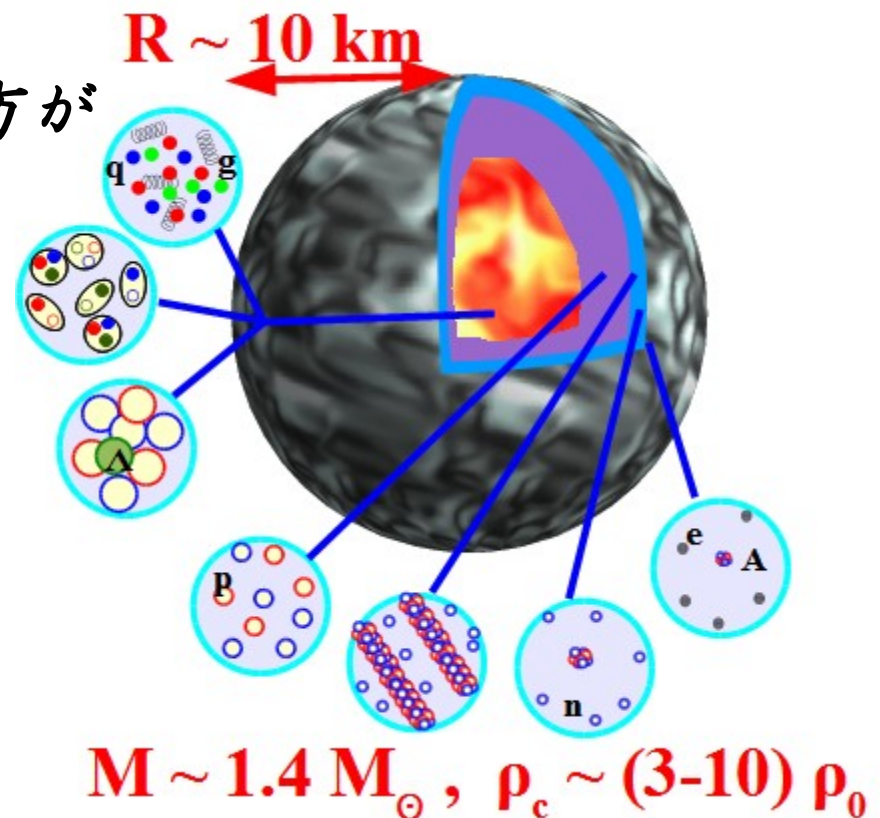
- 中性子星は原子核密度の数倍程度まで
→ 原子核を作る核子(陽子・中性子)の間に働く力、
「核力」で支えられている。
- 核力研究には多くの日本人が貢献！
 - 遠方： π 中間子交換(湯川, 1935)
 - 中間領域引力： 2π 交換、 σ 交換
(σ の意味：南部, Jona-Lasinio, 1961,
初田, 国広 ('94))
 - 短距離斥力：
クォーク間のパウリ排他率、
グルーオン交換、....
(岡, 矢崎 ('81),
青木, 初田, 石井 ('07))



中性子星の不思議

中性子星の組成 (1)

- 中性子星って中性子だけからできているんですか？
→ いや、いろいろな粒子が混ざっています。
- 中性子星表面：通常の物質 = 鉄などの原子核と電子
- 中性子星の外殻 (クラスト)
 - 電子密度が増えてくると、
「電子+陽子」よりも中性子の方がエネルギーが低くなる
→ 中性子過剰な原子核と電子
 - さらに密度が上がると、
原子核の中で中性子がこぼれだす
→ 原子核と中性子と電子
(neutron drip, $4 \times 10^{11} \text{ g/cm}^3$)
 - 原子核が一系列に融合した
「パスタ」ができるかも。



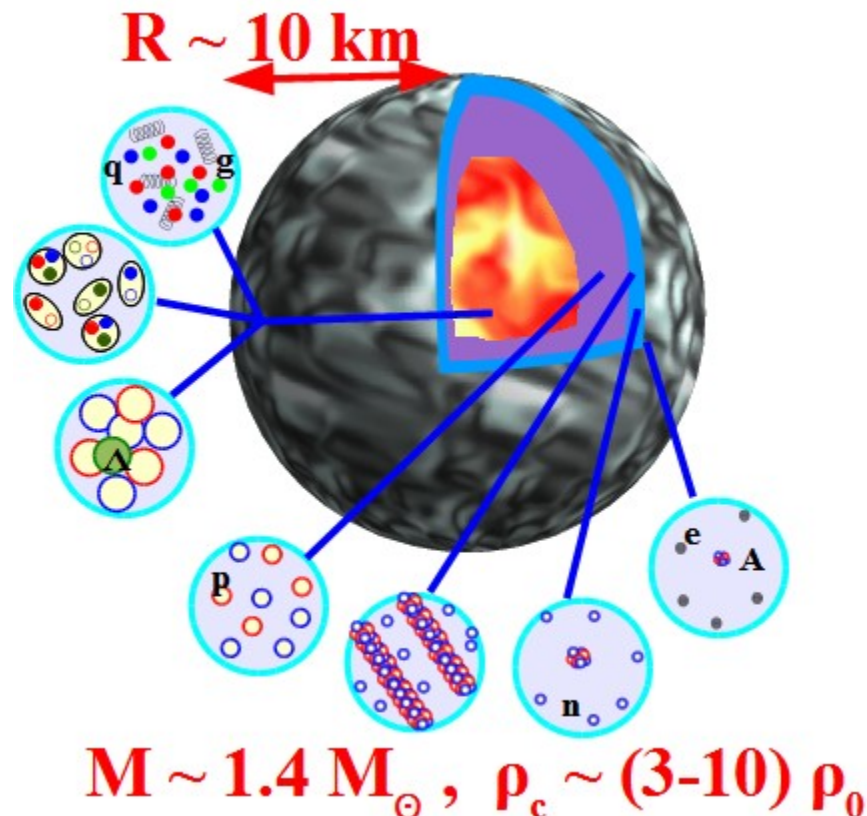
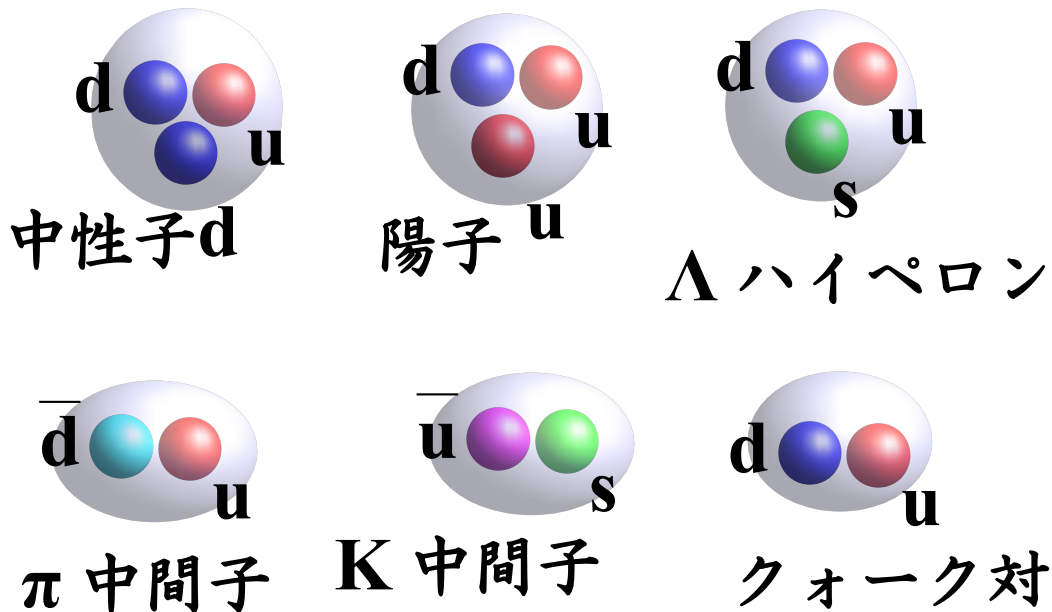
中性子星の組成 (2)

■ 中性子星コア (outer core)

- 原子核密度の 1~2 倍程度：原子核が融けて、一様な物質へ
→ 中性子・陽子・電子 (陽子・電子は中性子の 10% 程度)

■ 中性子星中心部 (inner core)

- 原子核密度の 2 倍以上
- 何が現れるかわかっていない



中性子星の構造

- 中性子星の内側は見えないのに、
どうやって組成がわかるのですか？
→ 質量や半径からある程度推測できます。

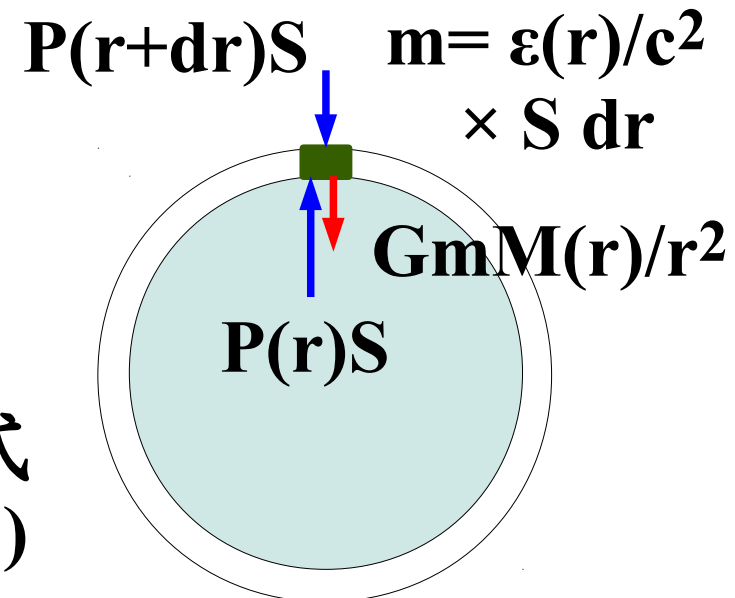
- 静水圧平衡
小さな箱を考えて、
外の圧力 + 重力 = 内の圧力

$$\frac{dP}{dr} = -G \frac{M \epsilon / c^2}{r^2}$$

- Tolman-Oppenheimer-Volkoff 方程式
(一般相対論補正を含む静水圧平衡)

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

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



$M(r)$: r までの質量
 $\epsilon(r)$: エネルギー密度
 $P(r)$: 圧力

中性子星物質の状態方程式

■ TOV 方程式を解くには状態方程式 (*) が必要

(* 圧力とエネルギー密度の関係式)

■ 参考：理想気体の状態方程式： $PV=Nk_B T \rightarrow P = \rho k_B T$

(圧力、体積、粒子数、ボルツマン定数 (=R/N_A)、温度、 $\rho=N/V$ ：数密度)

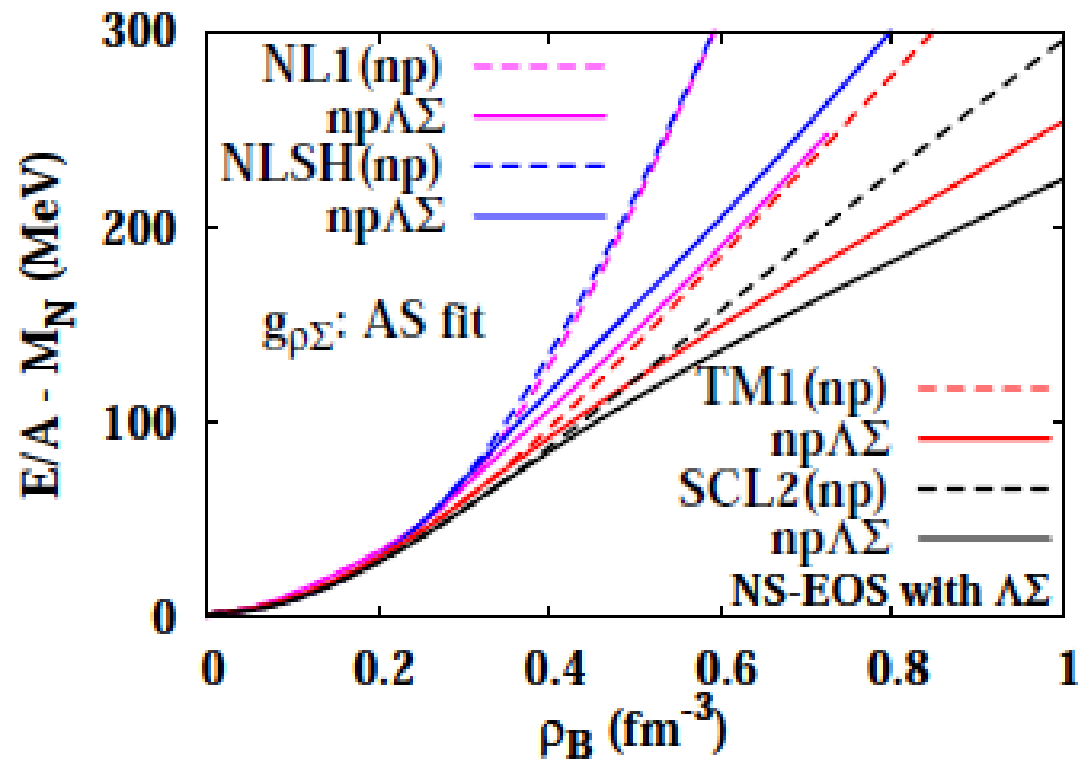
■ 中性子星物質の圧力

= 電子の縮退圧

+ 核子などの縮退圧

+ 相互作用からの圧力

■ 高密度での相互作用は大きな不定性

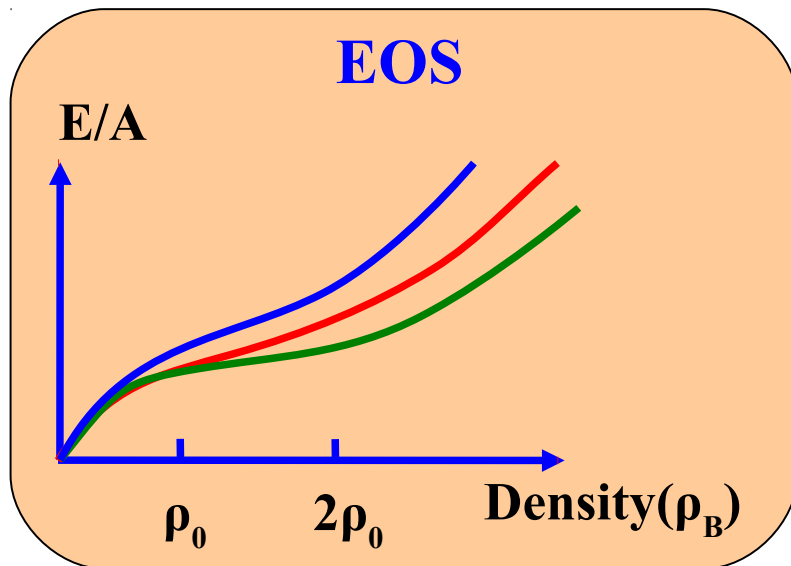


$$P = \rho^2 \partial(E/A) / \partial \rho$$

Tsubakihara, Ohnishi, Harada ('14)

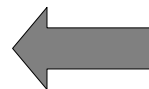
状態方程式と MR(質量 - 半径) 曲線

- 状態方程式が与えられると質量と半径の関係 (MR 曲線) が一意的に求まる。
→ 中性子星の MR 曲線は相互作用モデルを判別する

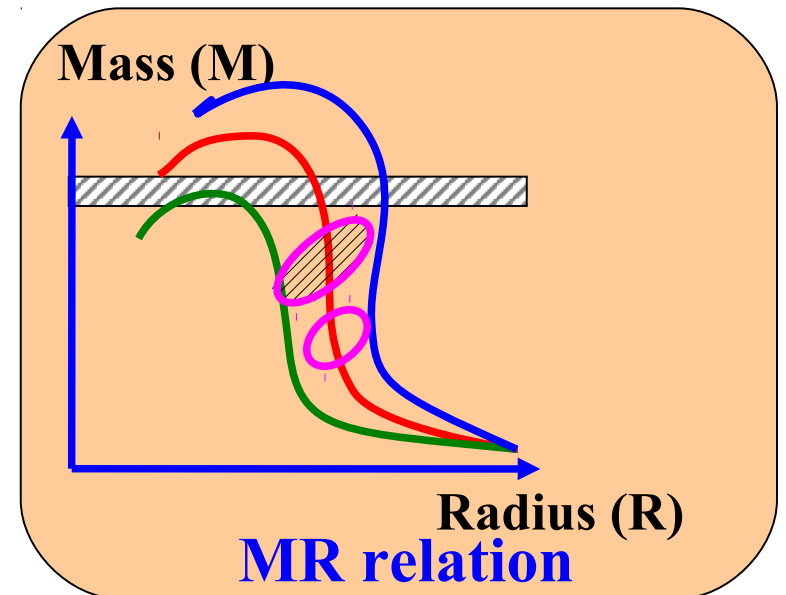


状態方程式

prediction



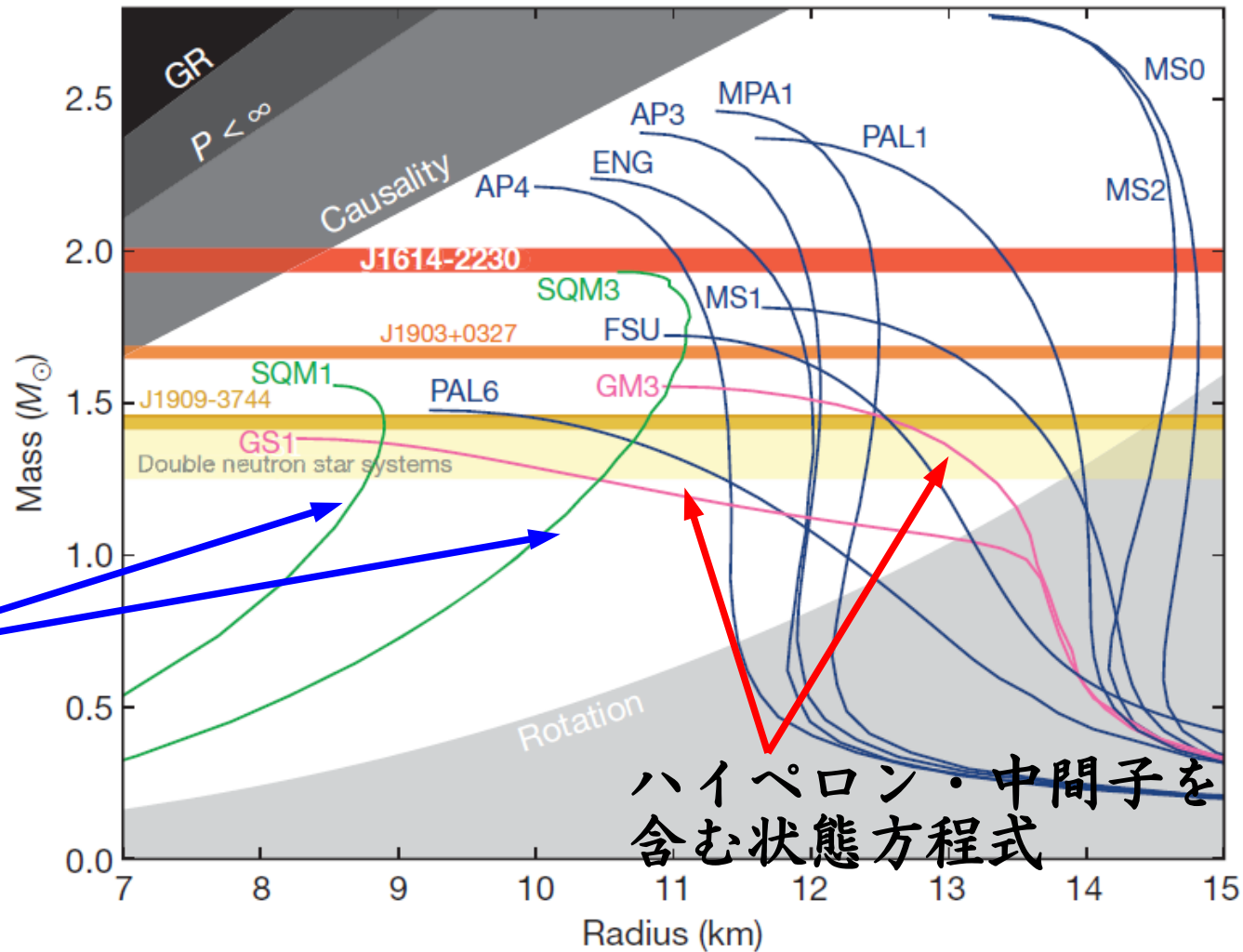
Judge



MR 曲線

重い中性子星パズル

- 2010年の大ニュース：重い中性子星の発見
→ 核子以外のハドロンを含む状態方程式を棄却(?)



クォーク物質
状態方程式

ハイペロン・中間子を含む
状態方程式

Demorest et al. ('10)

重い中性子星パズル

■ 重い ($\sim 2 M_{\odot}$) 中性子星パズル

- 核子以外のハドロンを考慮すると重い中性子星が支えられない！
- しかし実験データに基づいて理論計算すると、ハイペロンは現れる。

■ 高密度での斥力の起源は？

■ 3体斥力の導入

Nishizaki, Takatsuka, Yamamoto ('02), Tsubakihara, Harada, Ohnishi ('14)

■ 対称エネルギーを示す高次項の導入

Bednarek, Haensel et al. ('11)

■ Vector 結合に $SU(6)$ の破れを導入

Weisenborn, Chatterjee, Schaffner-Bielich ('11)

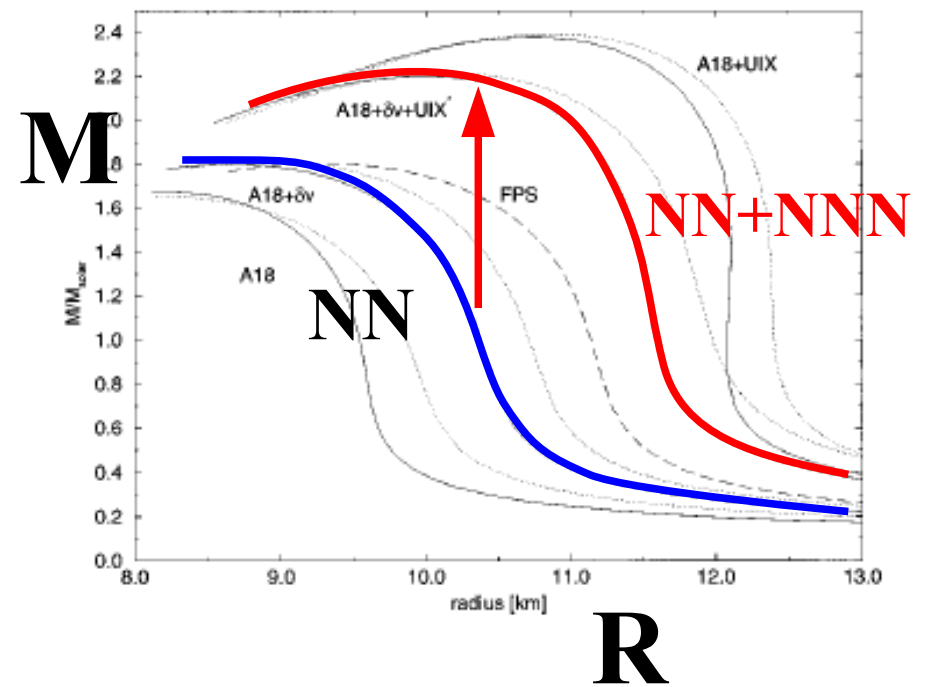
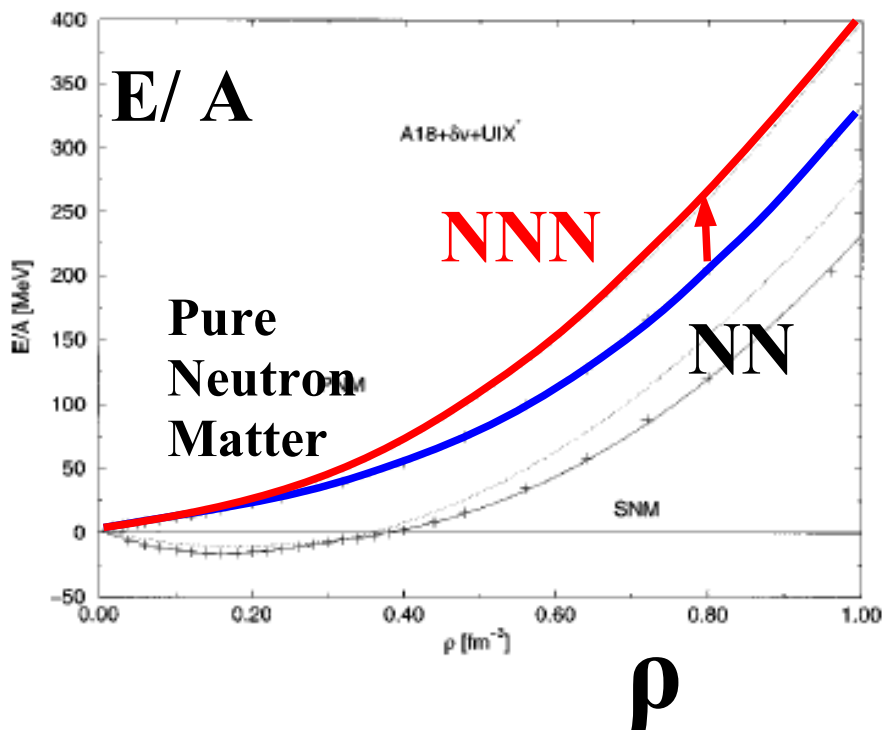
■ クォーク物質への相転移

Masuda, Hatsuda, Takatsuka ('13)

第一原理計算からの示唆

- 第一原理計算 (核力から出発した近似のない計算)
 - 2核子間の核力だけでは原子核は支えられない
 - 3核子間にまたがる力が必要

パズルを解くにはハイペロンを含む3体力が必要



Akmal, Pandharipande, Ravenhall ('98)

中性子星物理学のこれから

実験と観測で解き明かす中性子星の核物質

高密度領域 (A 班)

ハイパー核、K 中間子核、
YN, YY 相互作用、
有効相互作用、
(重イオン衝突)、

J-PARC

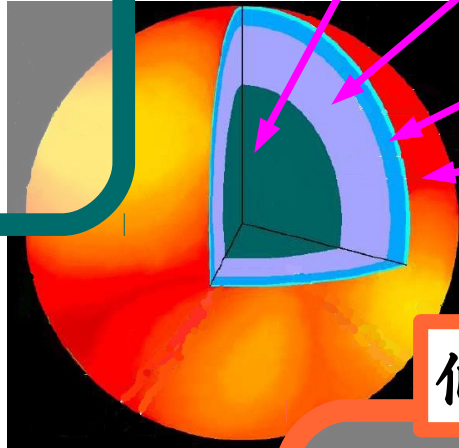


Hyperons, mesons, quarks

Asym. nuclear matter
+elec.+ μ

Nuclei+neutron gas+elec.

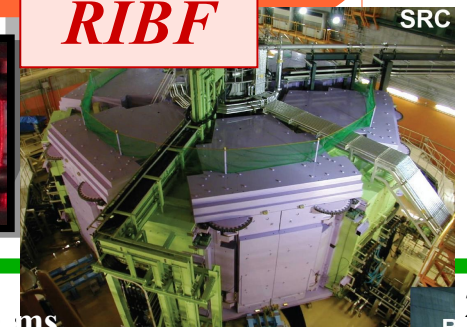
Nuclei + elec.



低密度領域 (B 班)

対称エネルギー、
対相関ギャップ、
BEC-BEC cross over、
冷却原子系とのつながり、

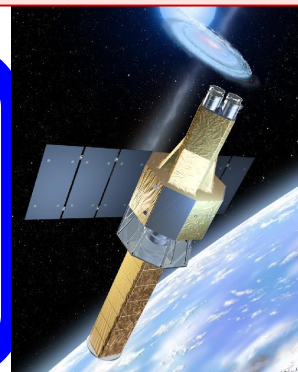
RIBF



天体現象 (C 班)

半径、質量、
温度 (時間依存性)、
星震、パスタ、

ASTRO-H



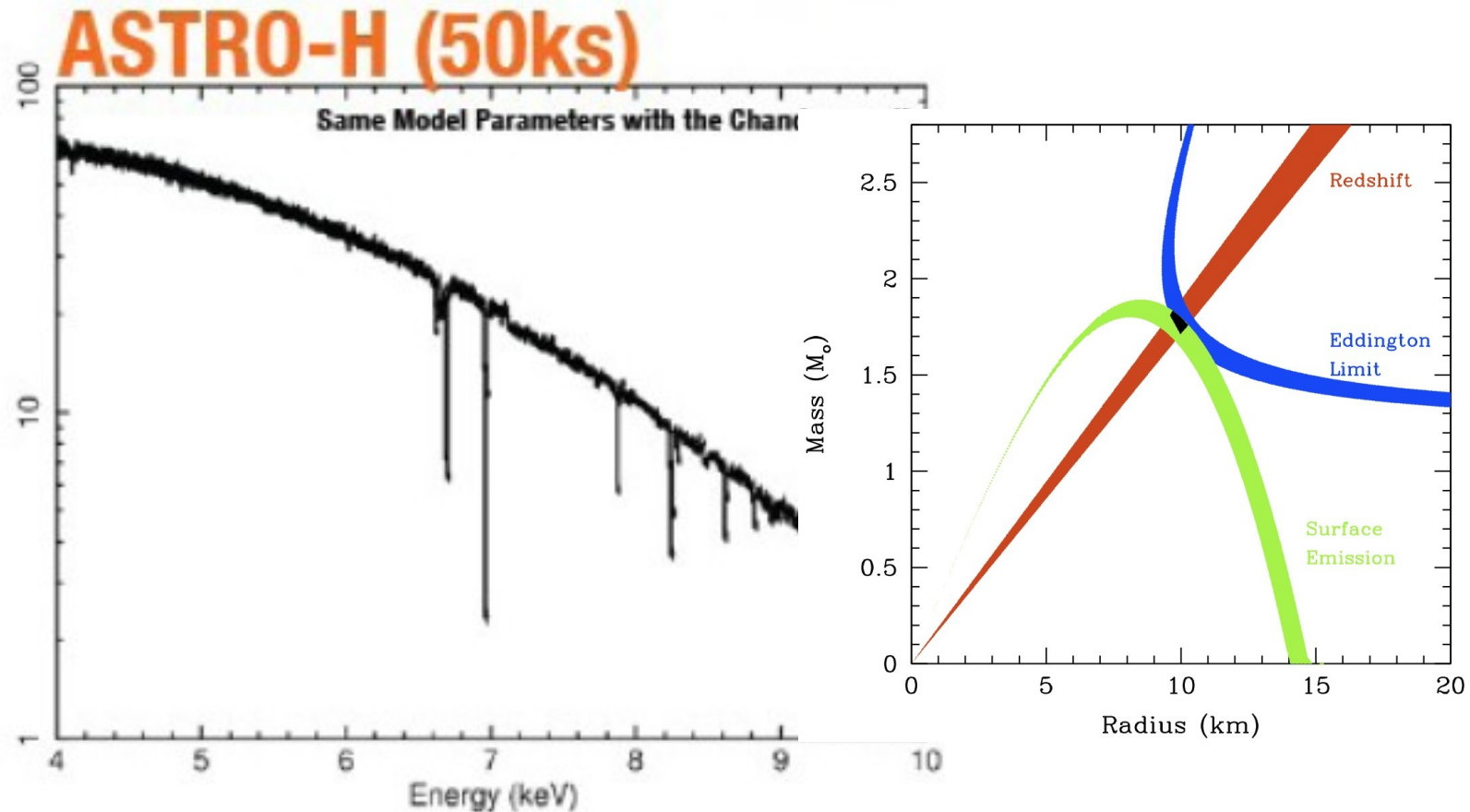
理論班 (D 班)

実験と観測で解き明かす中性子星の核物質

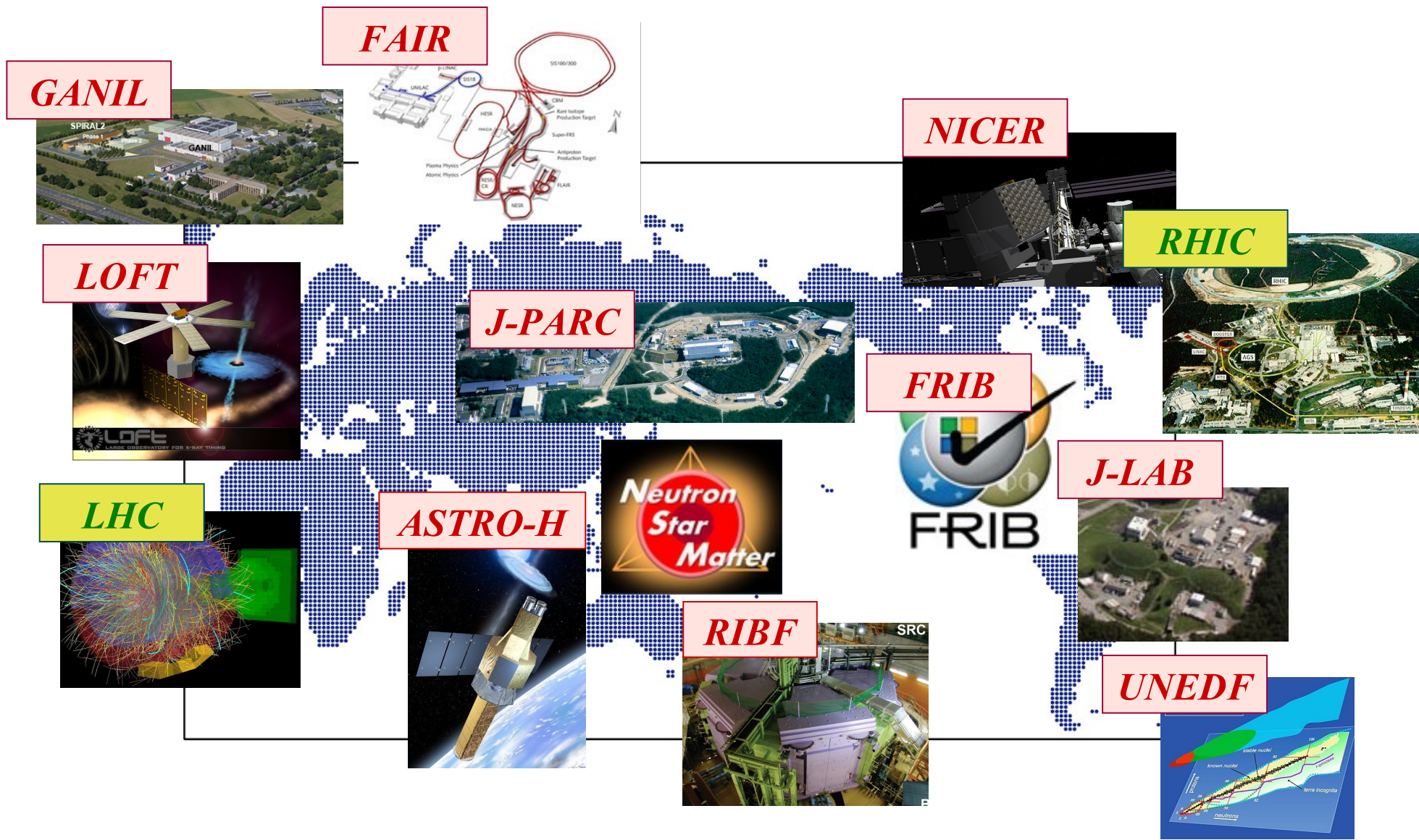
- 文科省新学術領域研究、領域代表 田村裕和
- 高密度領域 (A班, 代表 高橋(KEK), 田村(東北大))
 - 大強度陽子加速器(J-PARC)を用いた
ハイペロンなどストレンジネスを含む原子核の研究
- 低密度領域 (B班, 代表 村上(京大), 中村(東工大), 堀越(東大))
 - 理研RIBFを用いた中性子過剰核と対称エネルギーの研究
 - 冷却原子による中性子物質の量子シミュレーション
- 天体現象 (C班, 代表 高橋(JAXA))
 - 人工衛星ASTRO-Hによる中性子星の半径測定
- 理論班 (D班, 代表 大西(京大))
 - 実験・観測データと理論計算による状態方程式構築

人工衛星 ASTRO-H による半径測定

- 鉄の吸収線の赤方偏移を直接測定
→ 模型・仮定によらない半径測定が可能に！
(半径と質量の比 $R_{NS} / (2GM/c^2)$ を 1% の精度で測定)

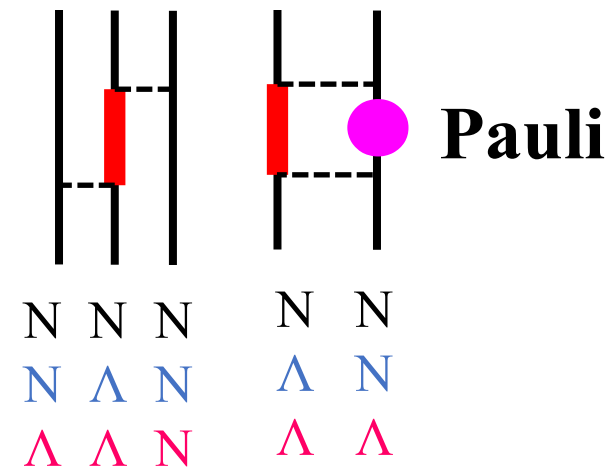
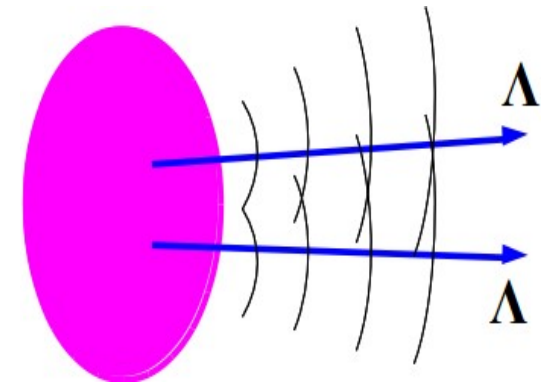
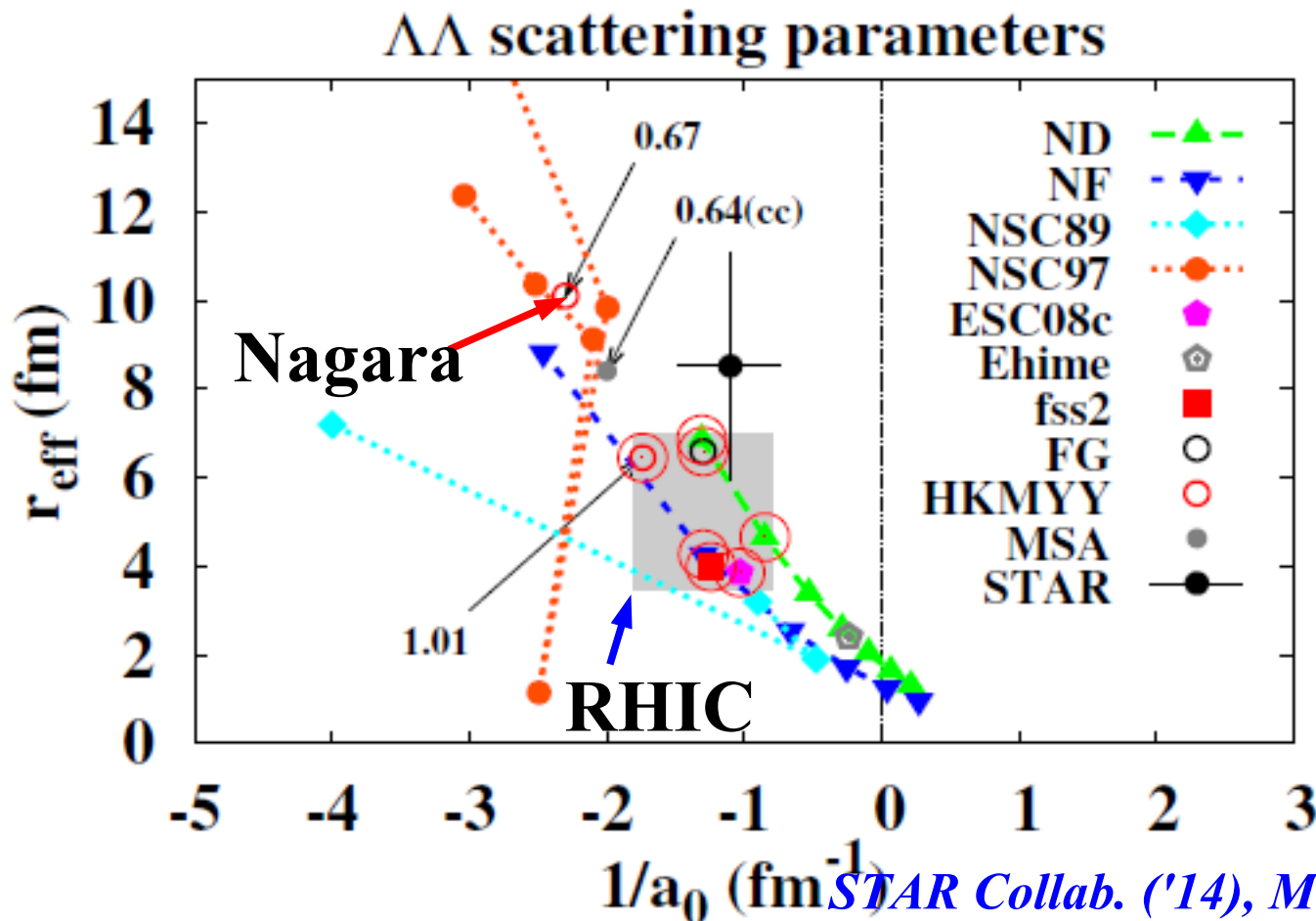


世界の「中性子星物理」実験・観測研究施設



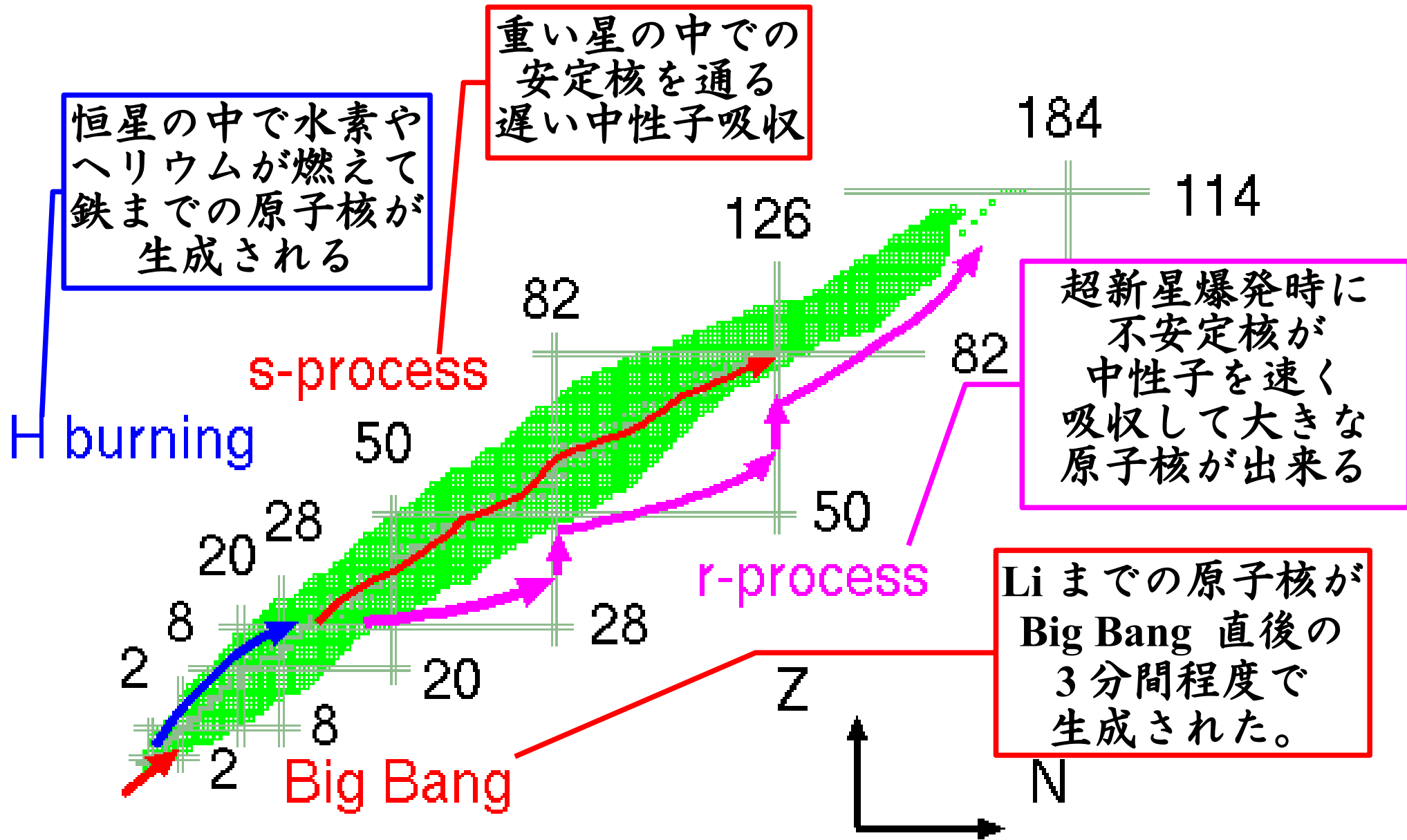
$\Lambda\Lambda$ 3 体力

- 高エネルギー重イオン衝突からの $\Lambda\Lambda$ 相関
 → 真空中の $\Lambda\Lambda$ 力
 ≠ ($\Lambda\Lambda$ 3 体力効果を含む) 原子核内での $\Lambda\Lambda$ 力



STAR Collab. ('14), Morita, Furumoto, Ohnishi ('14)

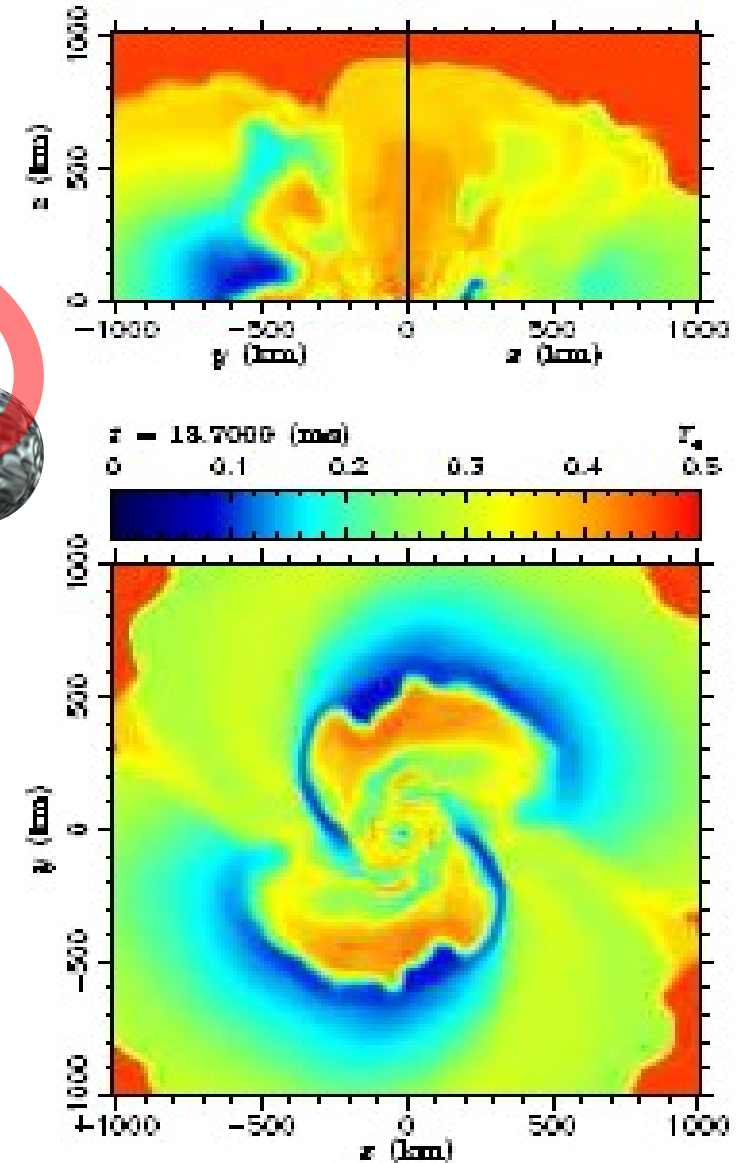
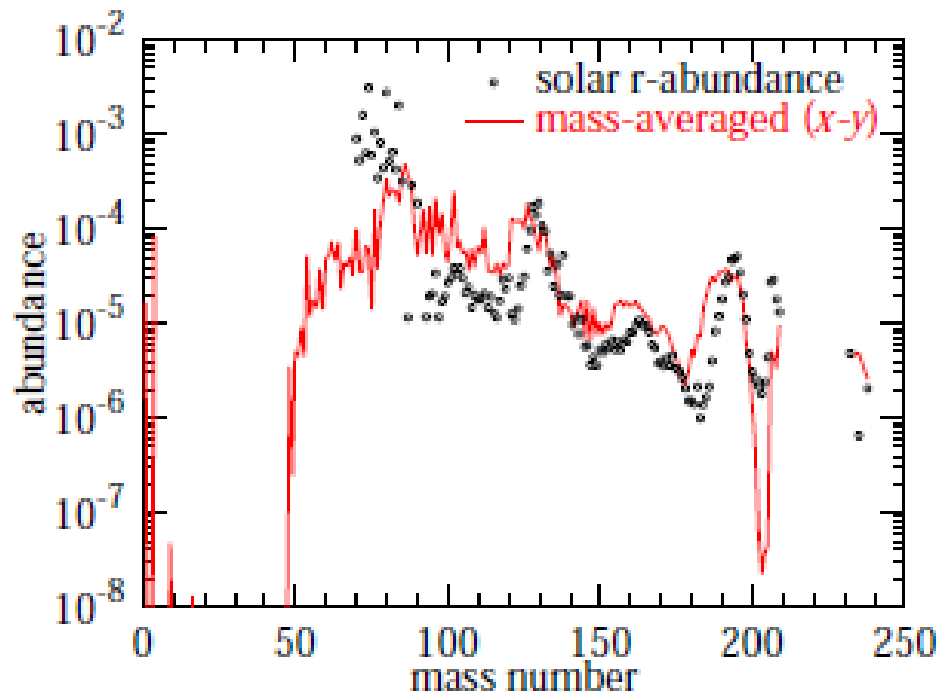
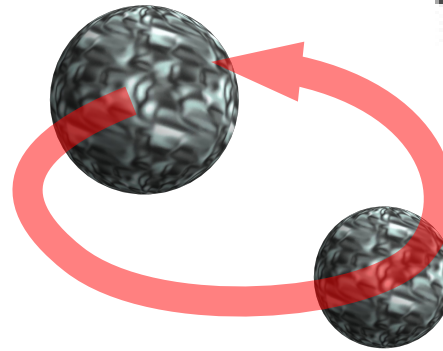
元素の起源



中性子星の合体と元素の起源

■ r-process の新しい可能性

- 中性子連星の合体により放出される元素が、太陽系の元素組成が説明可能



Wanajo, Sekiguchi ('14)

まとめ

- 中性子星は物理学として面白い問題の宝庫
 - 現在の宇宙での(観測可能な)「最高密度物質」
 - 低密度～高密度にわたり、多様な状態が現れる
 - もしかしたら元素生成への窓口かもしれない
- 状態方程式と質量・半径(MR)曲線は1対1対応
 - 中性子星の観測により、未知の高密度物質状態方程式が制限できる
 - 重い中性子星パズル：核子以外のハドロンを含む状態方程式では重い中性子星は支えがたい。
→ 様々なアイデアが出されている。
 - 他にも多くの課題(半径の謎、冷却、磁場、パスタ原子核、...)
- 中性子星物理学の展開
 - 「実験・観測・理論」が協力して研究遂行！

今回触れられなかった話題

- コンパクト中性子星パズル
- 中性子星の冷却と超流動
- 中性子星と冷却原子
- 中性子星中の磁場
- パスタ原子核

ご清聴ありがとうございました。

12月のサイエンスカフェの
紹介です。

2014.12.7 SUN 14:00-17:30
ナレッジシアター
[グランフロント大阪ナレッジキャピタル 4F]
<http://www.ko-space.jp/pace/zoom/theater/>

物質の起源を考える ～クォークからの挑戦～

1

物質の起源を考える
～クォークとハドロンの世界～



飯嶋 徹
Teuu AJIWA
名古屋大学
素粒子宇宙起源研究機構・現象物研究センター長 教授

2

風変わりな仲間たちをさがす
～クォークのカルテットやダブルデットの探索～



宮林 謙吉
Keiichi MIYABAYASHI
奈良女子大学研究員
自然科学系 准教授

3

クォークからの挑戦
～閉じ込められた粒子の追跡～



保坂 淳
Atsushi HOSAKA
大阪大学
新物質研究センター 教授

休憩

【実験装置のデモンストレーション】

サイエンスカフェ
【質問・議論】

司会 中野 貴志 [大阪大学・新物質研究センター員]

主催 文部科学省科学研究費補助金 新学術領域研究
[多様なフレーバーで探る新しいハドロン存在形態の包括的研究]

共催 大阪大学新物質研究センター、奈良女子大学、名古屋大学、高エネルギー加速器研究機構、理化学研究所



参加登録

<http://www.rcnp.osaka-u.ac.jp/~quark/>

参加ご希望の方は、上記サイトより「参加登録」してください。



核子超伝導状態と冷却曲線

■ 表面温度測定と冷却曲線

■ 超伝導状態 → ギャップ → ν 放出の抑制

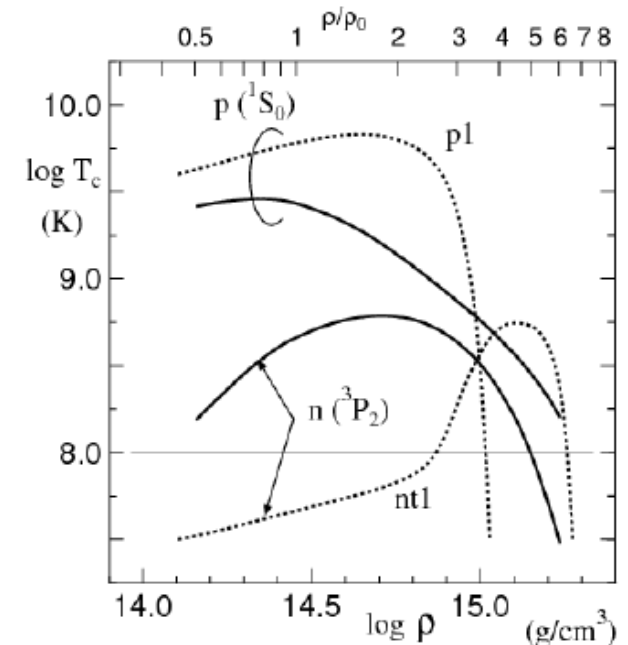
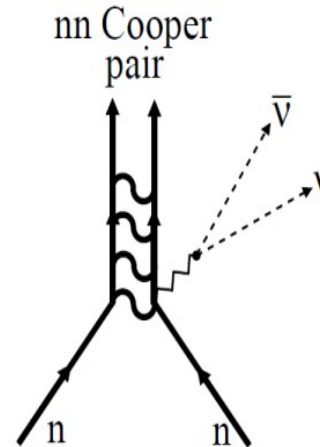
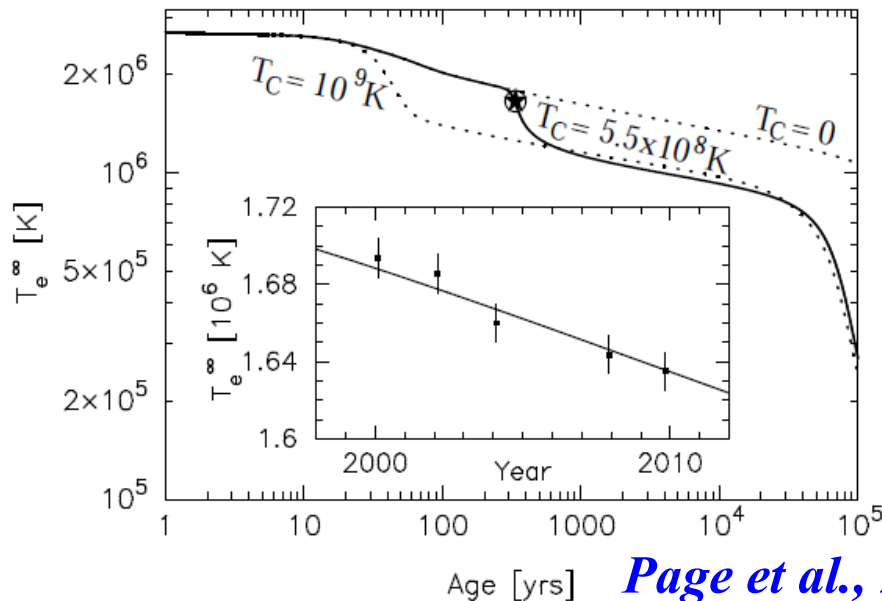
Onset of superfluidity → 急速な冷却

Cas A の正確な温度測定と冷却率の測定

Heinke, Ho, ApJ 719('10) L167 [arXiv:1007.4719]

Page et al., PRL 106 ('11) 081101 [arXiv:1011.6142]

■ 核物理への宿題： $5\rho_0$ 程度までのギャップを正確に測定・計算できるか？



Takatsuka

中性子物質と冷却原子

■ BEC-BCS crossover and unitary gas

- 散乱長 \gg 粒子間距離 \rightarrow EOS は普遍的 (unitary gas)

$$E^{\text{Unitary}} = \xi E^{\text{Free}} \quad \xi \simeq 0.4 \text{ (Bertsch parameter)}$$

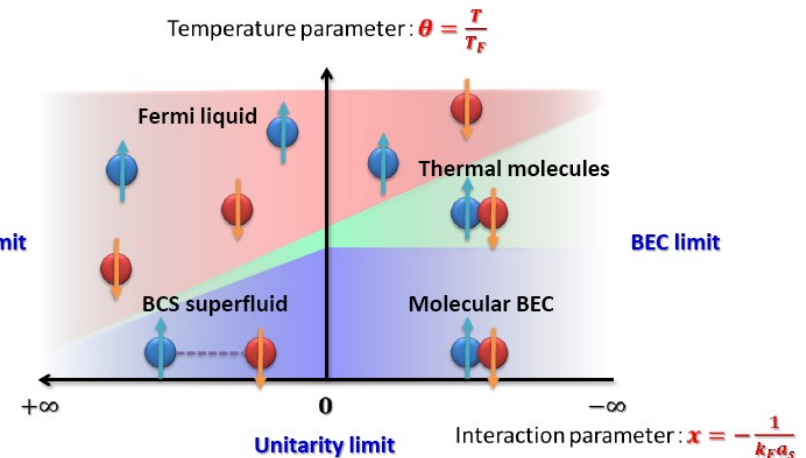
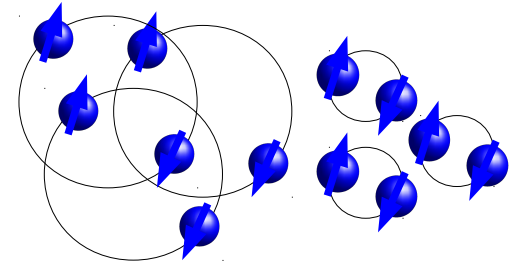
- nn 間の 1S_0 散乱長は長い! ($a_0 = -18.5 \text{ fm}$)
 \rightarrow Drip した中性子ガスは unitary gas とみなせる ($-1/k_F a_0 \sim 0.1$)

■ BEC-BCS 領域の相互作用エネルギー

- 核子あたりの相互作用エネルギー $\propto k_F^2 \propto \rho^{2/3}$

$$\frac{V^{\text{Unitary}}}{N} = (\xi - 1) \frac{3}{5} \frac{\hbar^2 k_F^2}{2m} \propto \rho^{2/3}$$

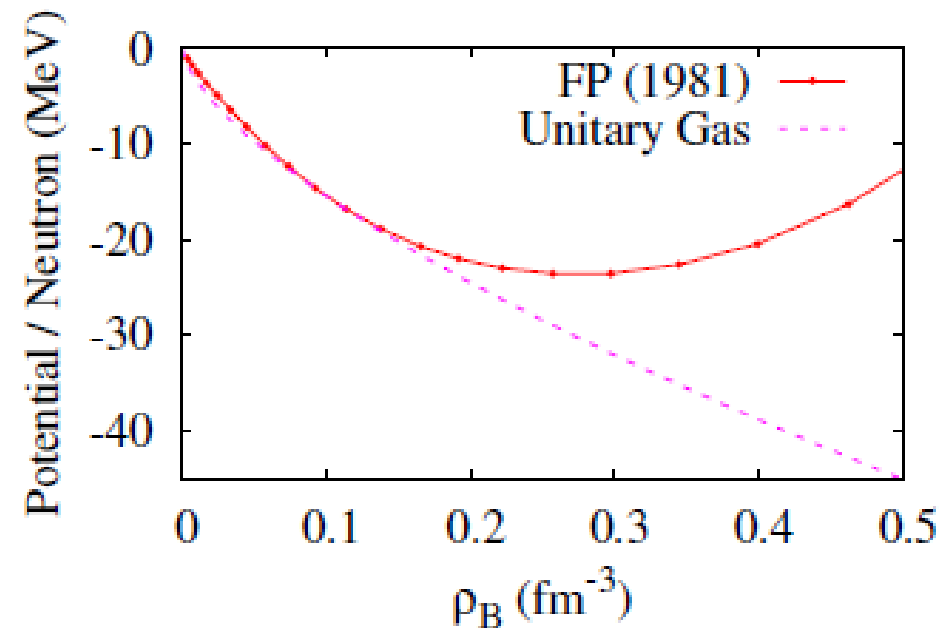
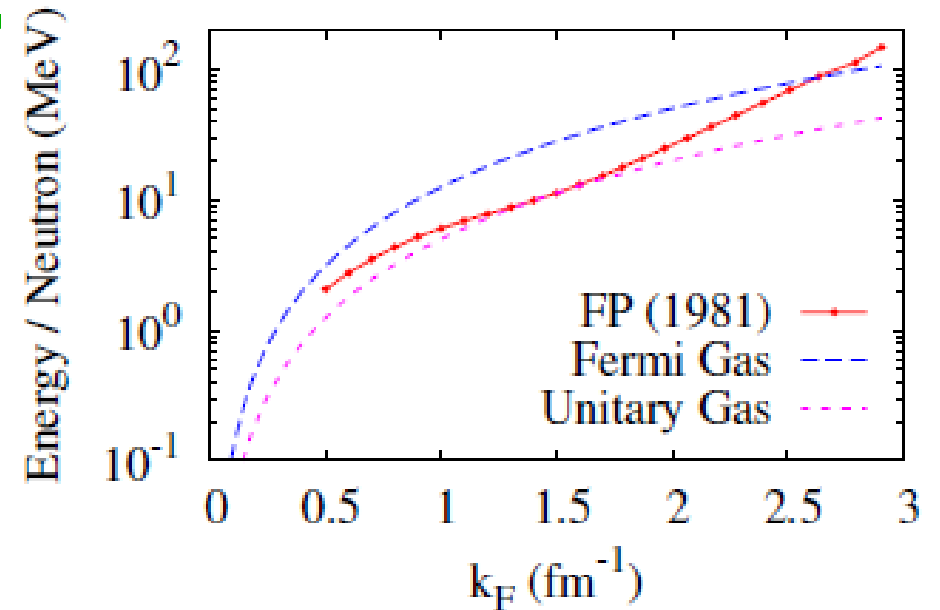
- (Hartree なら $\propto \rho$)
- unitary gas / BEC-BCS crossover は クラスト・原子核の性質に どのような影響を及ぼすか?



中性子星物質の状態方程式

■ 変分法による計算結果 Friedman-Pandharipande (1981)

- 広い密度領域において
 $E_{\text{unit}} < E_{\text{FP}} < E_{\text{Fermi}}$
- 低密度領域でポテンシャル
エネルギーは $\rho^{2/3}$ と振る
舞っているか？



中性子星の磁場の起源

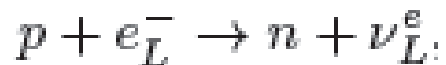
■ 中性子星中の磁場の強さ $10^{12} - 10^{15}$ G

- いかにして強い磁場を作るか？
- いかにして磁場を保持するか？

■ A new idea: Chiral Plasma Instability

AO, N. Yamamoto, arXiv:1402.4760

- Left-handed electrons are eaten in electron capture \rightarrow chiral chem. pot.



- Chiral plasma instability:

N_5 is converted to magnetic helicity

$$j_z = \frac{2\alpha}{\pi} \mu_5 B_z, \quad \frac{d}{dt} \left(N_5 + \frac{\alpha}{\pi} \mathcal{H} \right) = 0, \quad N_5 = \int dx n_5$$

$$\mathcal{H} = \int dx \mathbf{A} \cdot \mathbf{B}$$

- Finite magnetic helicity makes magnetic field stable.

