

中性子星は 我々に何を語りかけているのか？



初田哲男
iTHES研究推進グループ
理化学研究所

“体型”

- ・ 質量 $\sim (1-2)M_{\odot}$
- ・ 半径 $\sim 10\text{km}$
- ・ 表面重力
 $\sim 10^{11} \times \text{地表}$
- ・ 温度 $\sim 10^9 - 10^6 \text{K}$
- ・ 表面磁場
 $\sim 10^6 - 10^{15} \text{G}$

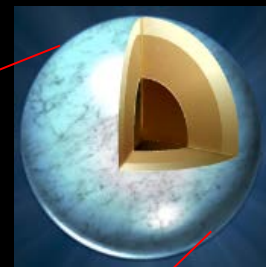


“体内”

- ・ 原子核
- ・ 中性子と陽子
- ・ π 中間子, K 中間子
- ・ ハイペロン
- ・ クォーク (u, d, s)
+ レプトン



中性子星の中心を大阪城に置くと



素粒子の標準理論

物質粒子

	第1世代	第2世代	第3世代
クォーク	 アップ	 チャーム	 トップ
	 ダウン	 ストレンジ	 ボトム
レプトン	 eニュートリノ	 μニュートリノ	 τニュートリノ
	 電子	 ミューオン	 タウ

ゲージ粒子

<p>強い力</p>  グルーオン
<p>電磁力</p>  光子
<p>弱い力</p>  W ボゾン Z ボゾン




 ヒッグス粒子

Plan of this Talk

1. 中性子星の基礎
2. 中性子星の質量
3. 中性子星の冷却
4. 中性子星の磁場
5. 格子ゲージ理論と中性子星
6. まとめと展望

Plan of this Talk

1. 中性子星の基礎
2. 中性子星の質量
3. 中性子星の冷却
4. 中性子星の磁場
5. 格子ゲージ理論と中性子星
6. まとめと展望

中性子星観測小史

1932 中性子の発見 J. Chadwick

1934 中性子星の予言 W. Baade and F. Zwicky

We have tentatively suggested that the super-nova process represents the transition of an ordinary star into a neutron star.

1968 パルサーの発見 S. J. Bell and A. Hewish

1974 連星中性子星の発見 R. A. Hulse and J.H. Taylor

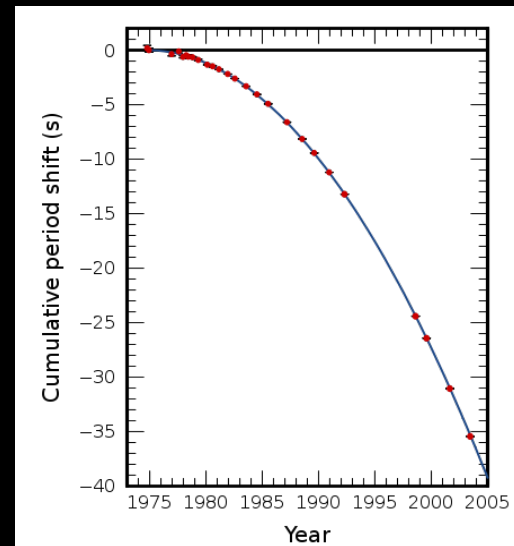
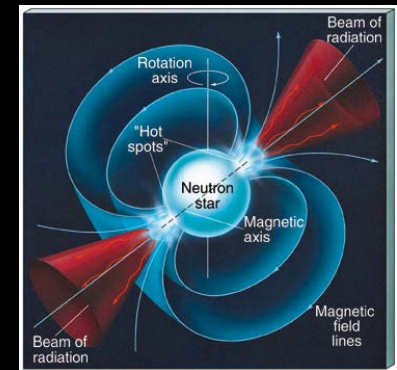
1979 SGR(マグネター?)の発見

1982 ミリ秒パルサーの発見 D. Backer et al.

2010 大質量中性子星の発見 P. Detmorest et al.

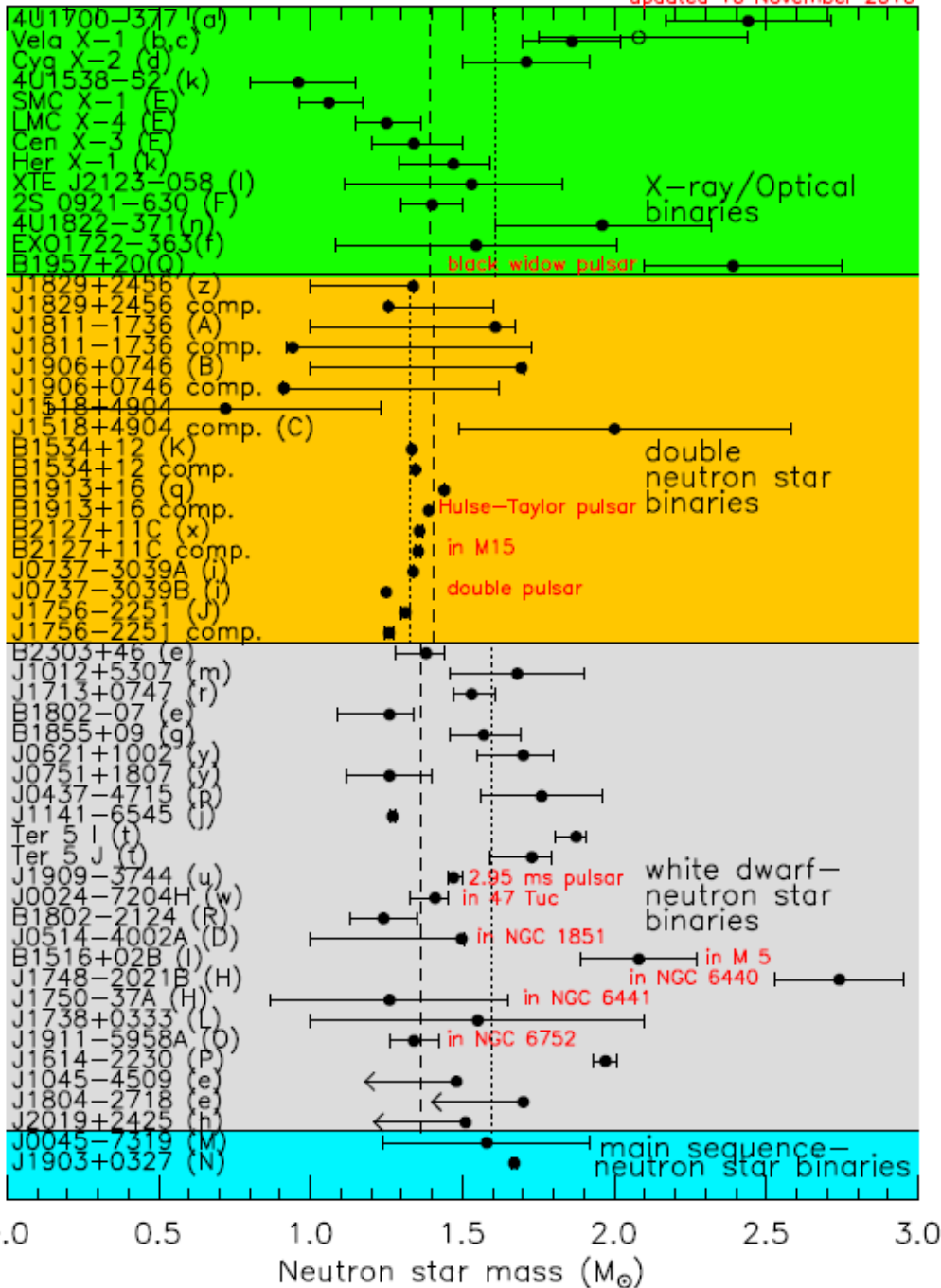
2010 CAS-A中性子星冷却曲線 C.O.Heinke and W.C.G.Ho

(201X 中性子星合体からの重力波発見)



中性子星の 質量分布

updated 10 November 2010



Lattimer and Prakash,
 arXiv:1012.3208 [astro-ph.SR]

中性子星構造の基本方程式

1. Tolman–Oppenheimer–Volkoff 方程式 (TOV) ← 一般相対論

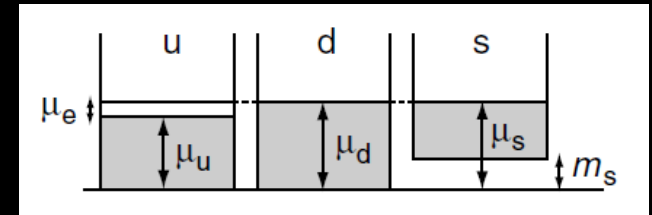
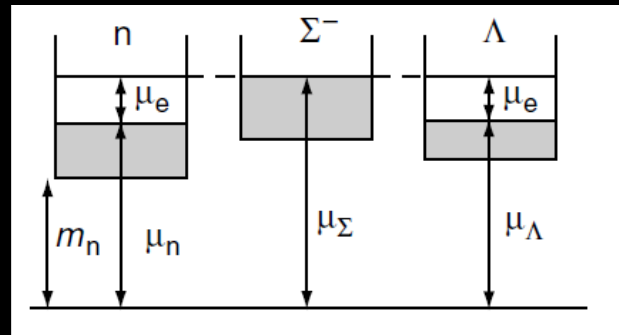
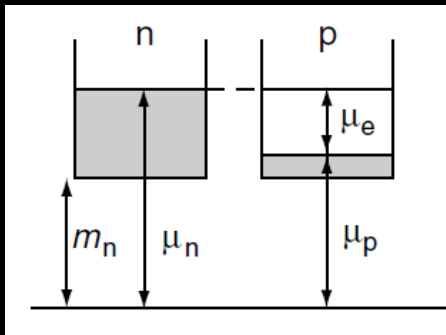
$$\frac{d\mathcal{M}(r)}{dr} = 4\pi r^2 \varepsilon(r),$$

$$-\frac{dP(r)}{dr} = \frac{G\varepsilon\mathcal{M}}{r^2} \left(1 - \frac{2G\mathcal{M}}{r}\right)^{-1} \left(1 + \frac{P}{\varepsilon}\right) \left(1 + \frac{4\pi r^3 P}{\mathcal{M}}\right),$$

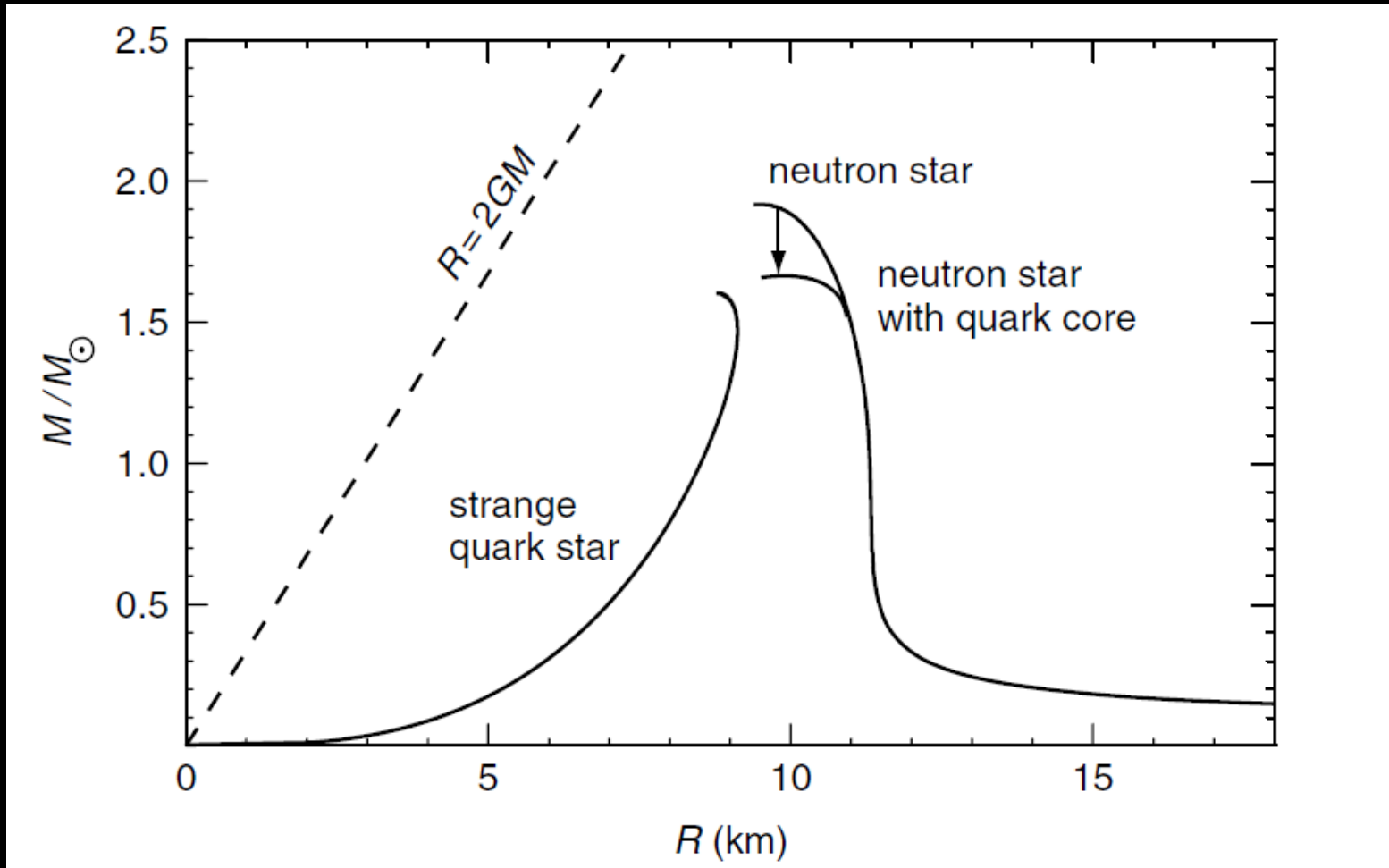
2. 状態方程式 $P=P(\varepsilon)$ ← 強い相互作用

(EOS)

電磁相互作用 (電荷中性条件)
弱い相互作用 (β 平衡条件)



“質量(M)と半径(R)関係”の模式図



From Yagi, Miake and Hatsuda,
“Quark-Gluon Plasma”, Cambridge Univ. Press (2008)

中性子星内部の諸相

- 原子核

原子核 pasta

- 中性子と陽子

超流動, 超伝導

- π 中間子, K中間子

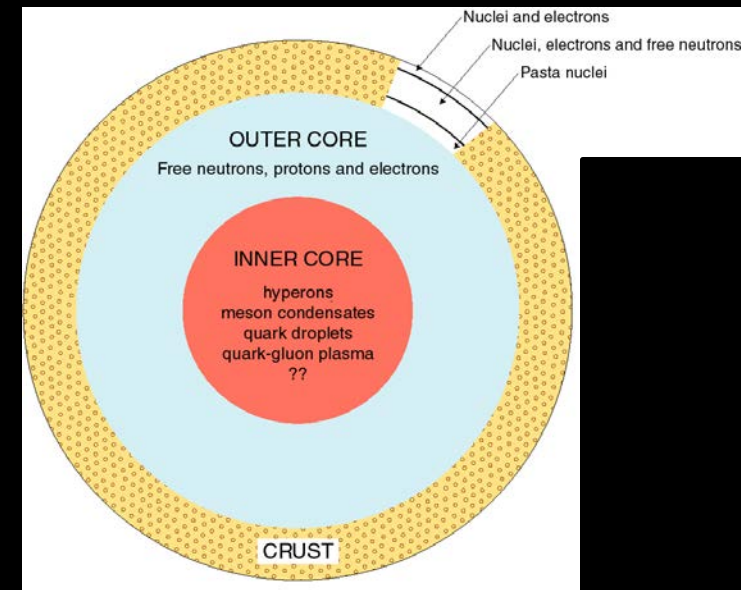
ボース・アインシュタイン凝縮

- ハイペロン

超流動

- クォーク (u,d,s)

カラー超伝導



存在の必然性 ○
理論の定量性 △

観測の進歩

現在:

$M = (1.97 \pm 0.04) M_{\odot}$ (Nature 2010)

$M = (2.01 \pm 0.04) M_{\odot}$ (Science 2013)

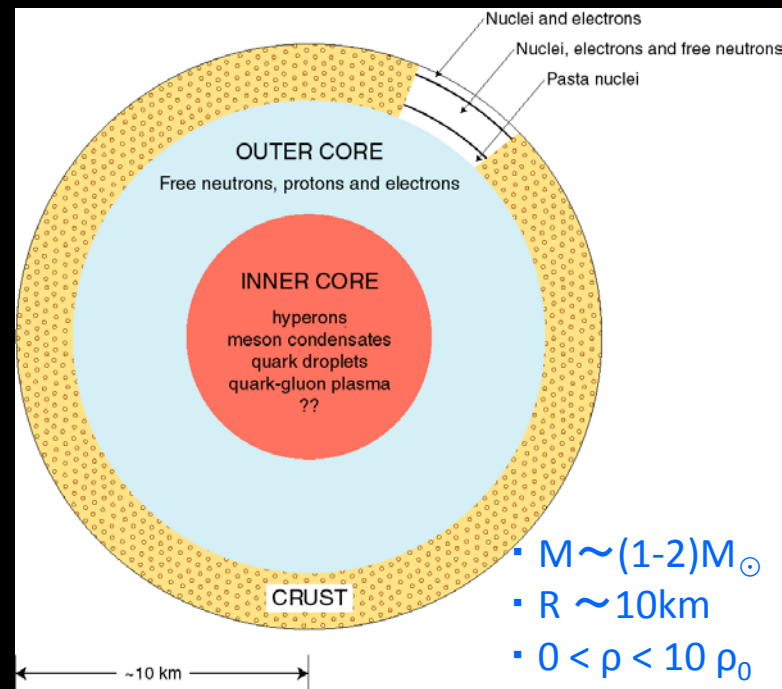
X線バースト
CAS-A冷却
マグネター

- ⇔ 冷いEOS
- ⇔ 冷いEOS
- ⇔ 3P_2 超流動?
- ⇔ 強磁性コア?

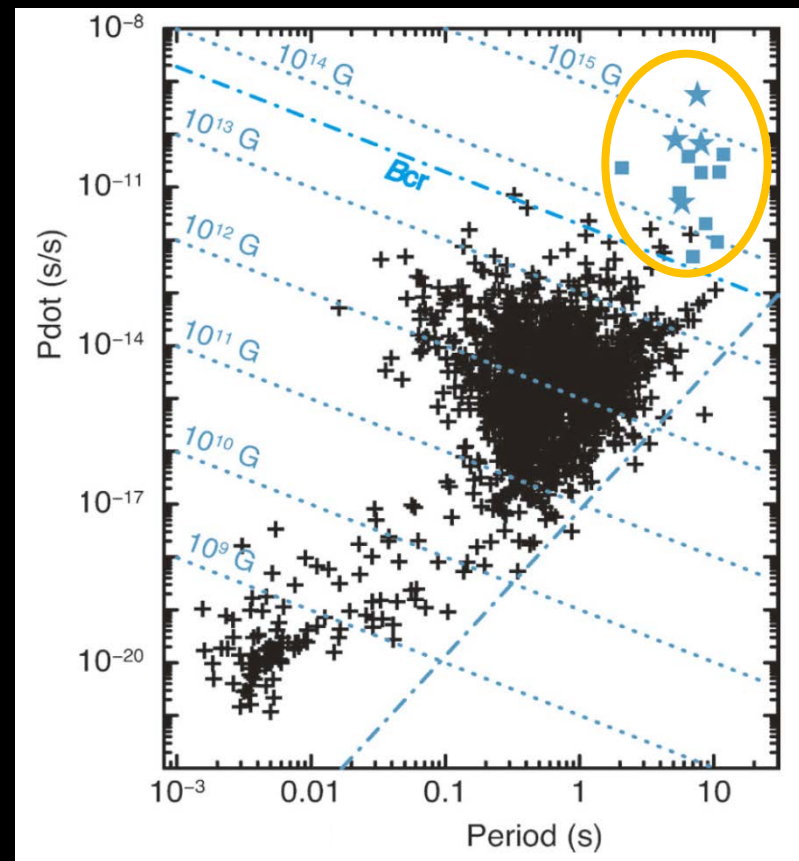
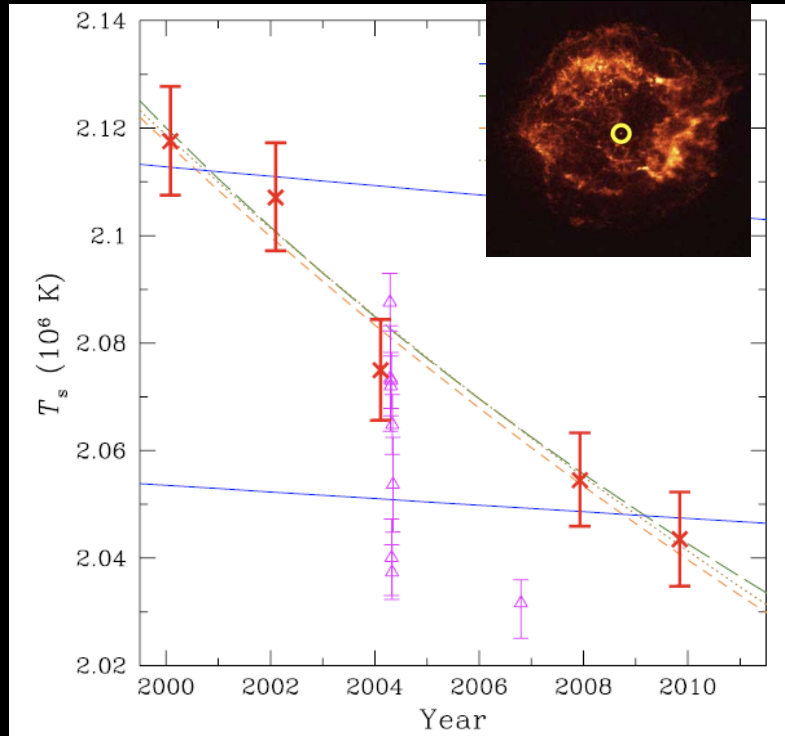
将来:

合体からの重力波
星振学

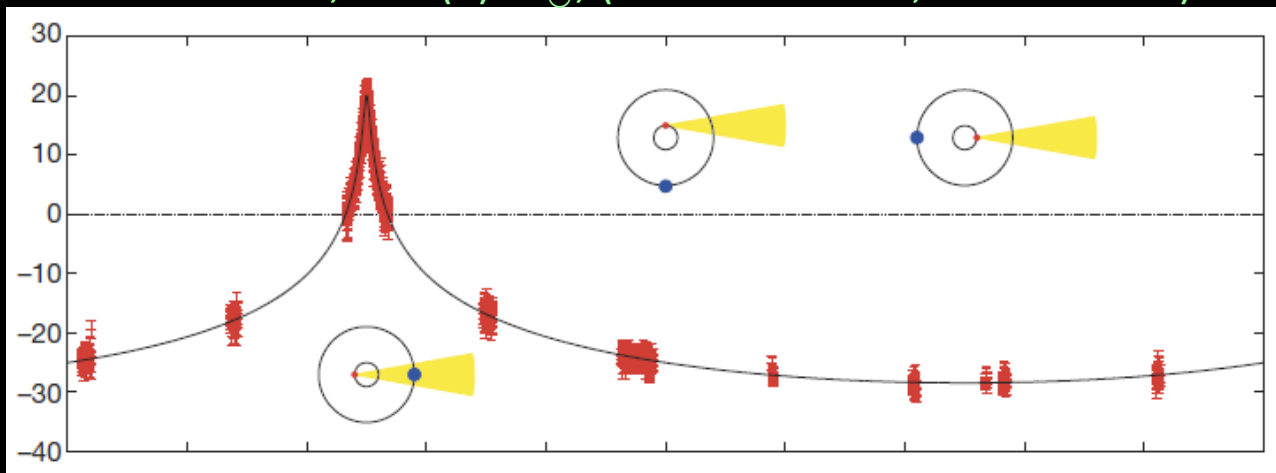
- ⇔ 熱いEOS
- ⇔ クラスト構造



Cassiopeia A Cooling, 4% decrease in 9 years
(Heinke & Ho, ApJ 2010)



PSR J1614-2230, $1.97(4) M_{\odot}$, (Demorest et al., Nature 2010)



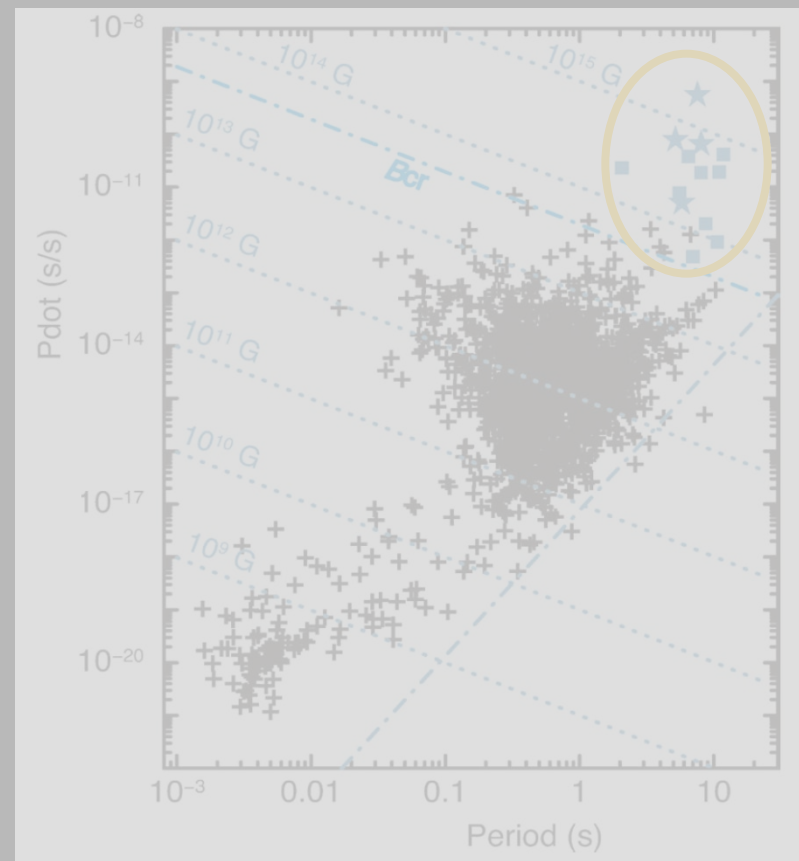
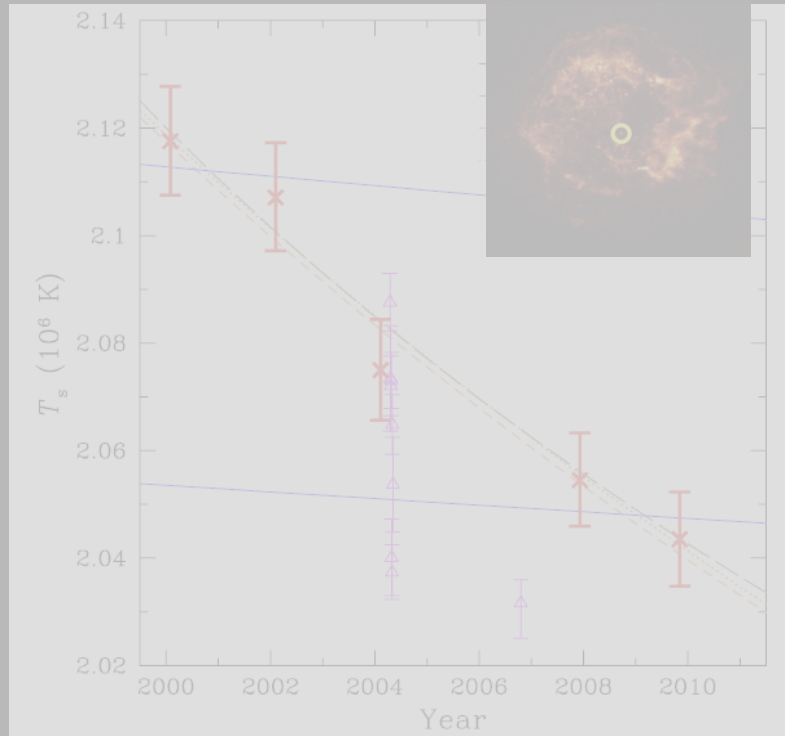
Magnetars
(from Enoto, 2012)
 $B_s = 3.2 \times 10^{19} \nu(P\dot{P})$ [G]

M, T, B

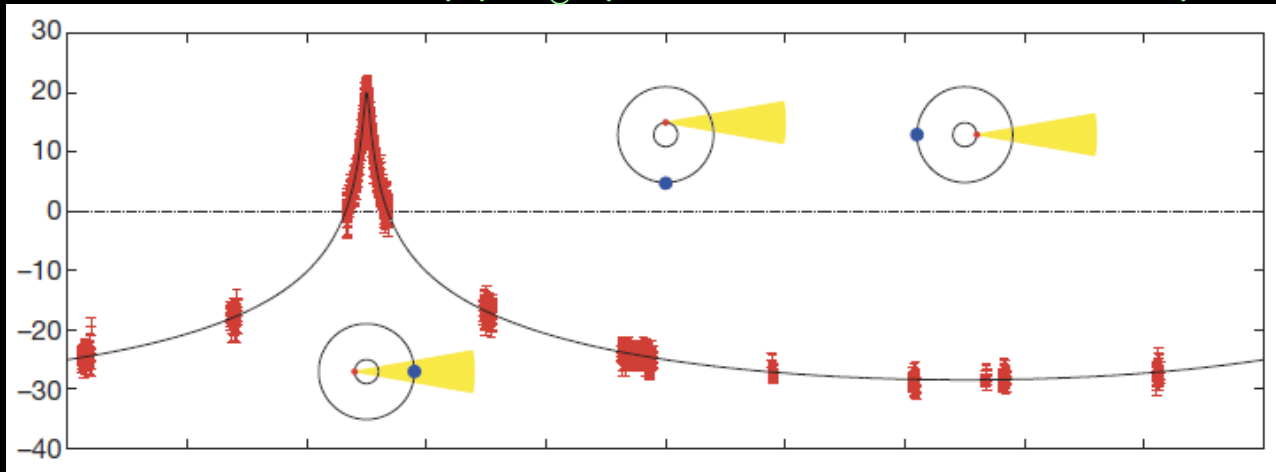
Plan of this Talk

1. 中性子星の基礎
2. 中性子星の質量
3. 中性子星の冷却
4. 中性子星の磁場
5. 格子ゲージ理論と中性子星
6. まとめと展望

Cassiopeia A Cooling, 4% decrease in 9 years
(Heinke & Ho, ApJ 2010)



PSR J1614-2230 , $1.97(4) M_{\odot}$, (Demorest et al., Nature 2010)

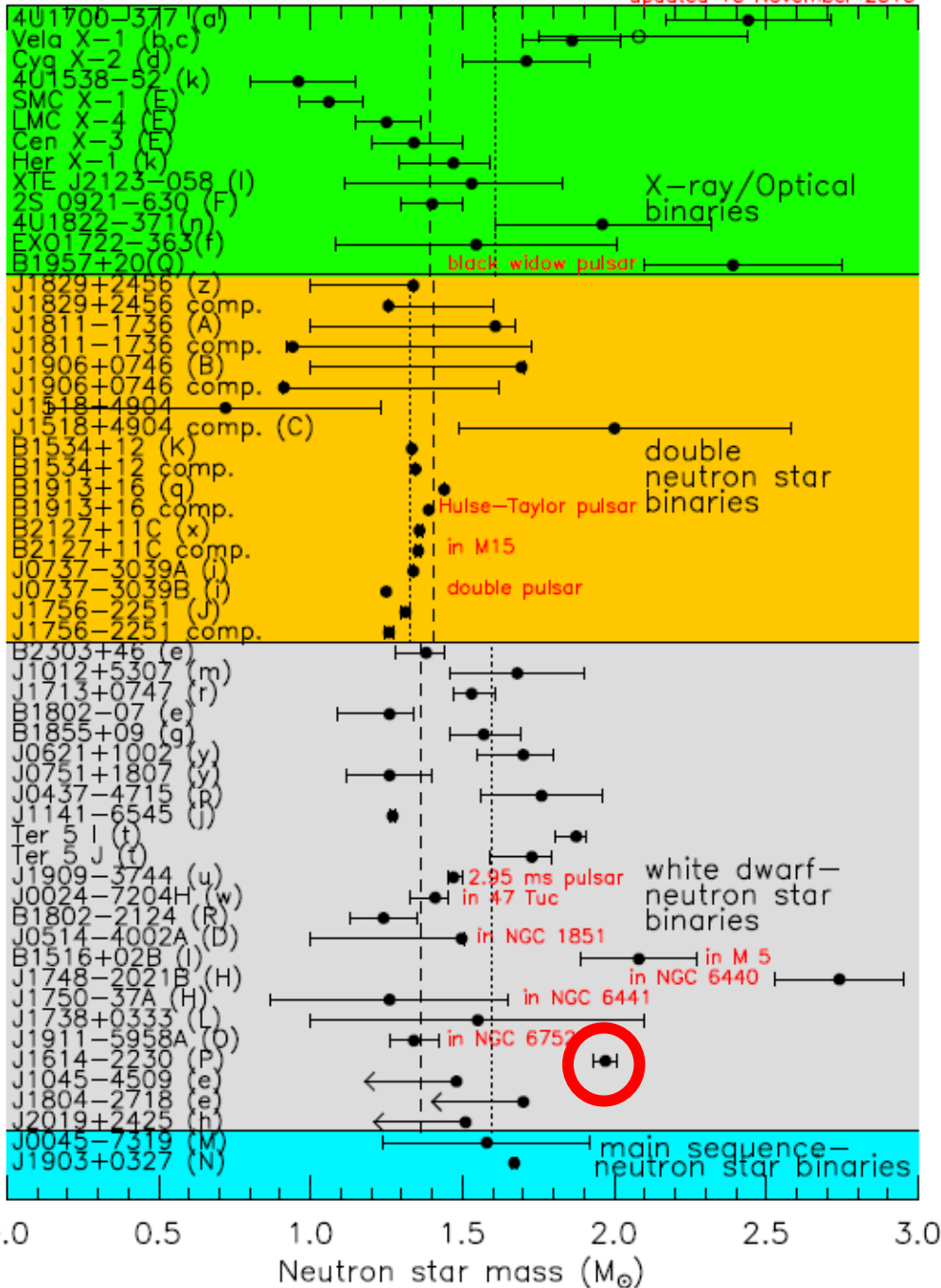


Magnetars
(from Enoto, 2012)
 $B_s = 3.2 \times 10^{19} \nu(P\dot{d}ot)$ [G]

T, B, M

中性子星の 質量分布

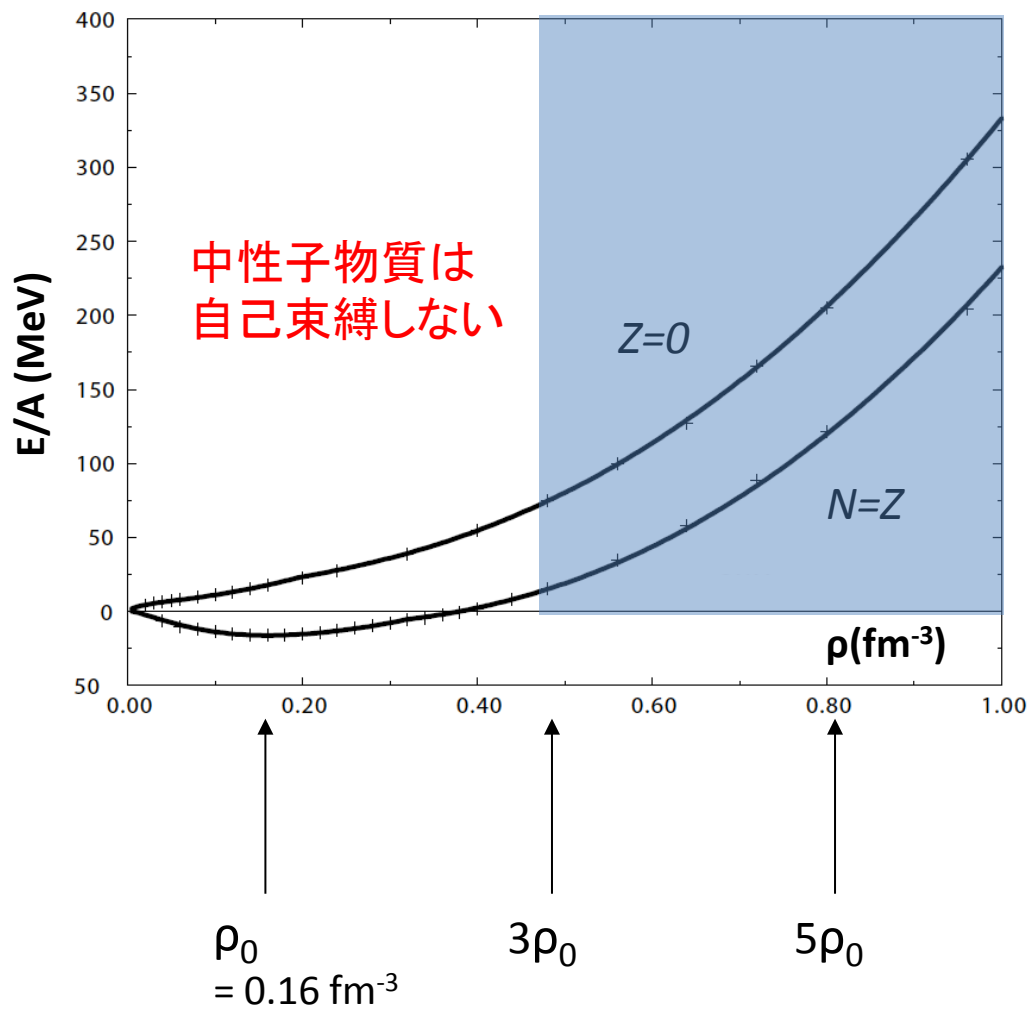
updated 10 November 2010



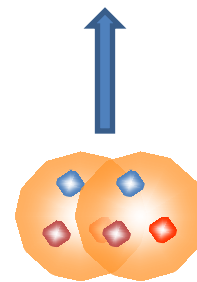
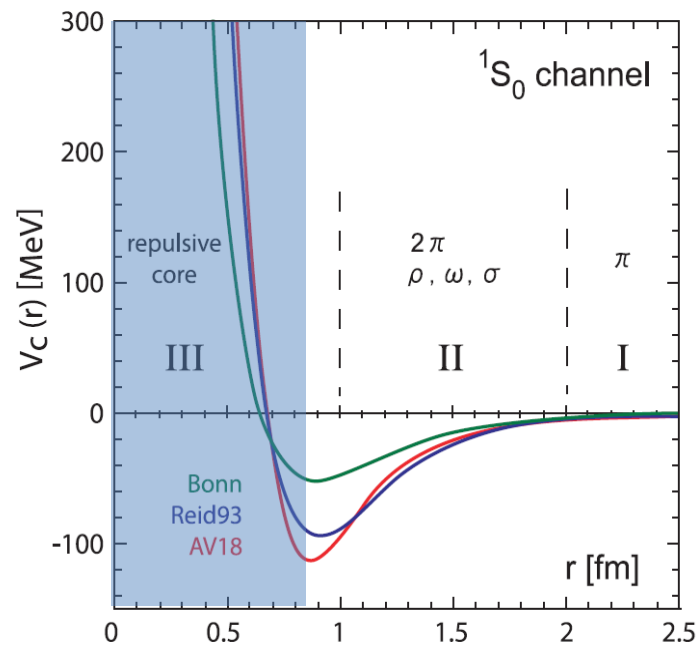
Lattimer and Prakash,
 arXiv:1012.3208 [astro-ph.SR]

高密度状態方程式と核力 (中性子・陽子のみの場合)

Akmal, Pandharipande & Ravenhall, PRC58 ('98)



現象論的核力(30-40パラメータ)



核力の斥力芯

Phys. Rev. 81 (1951) 165

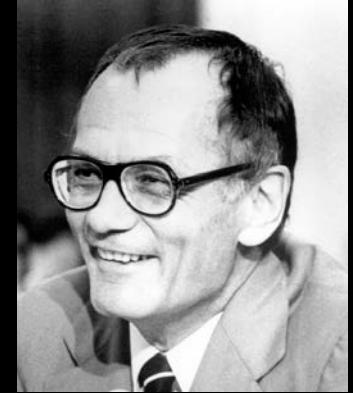
On the Nucleon-Nucleon Interaction*

ROBERT JASTROW**

Institute for Advanced Study, Princeton, New Jersey

(Received August 18, 1950)

A charge-independent interaction between nucleons is assumed, which is characterized by a short range repulsion interior to an attractive well. It is shown that it is then possible to account for the qualitative features of currently known n - p and p - p scattering data. Some of the implications for saturation are discussed.



Phys. Rev. 106 (1957) 1366

Possible Existence of a Heavy Neutral Meson*

YOICHIRO NAMBU

*The Enrico Fermi Institute for Nuclear Studies,
The University of Chicago, Chicago, Illinois*

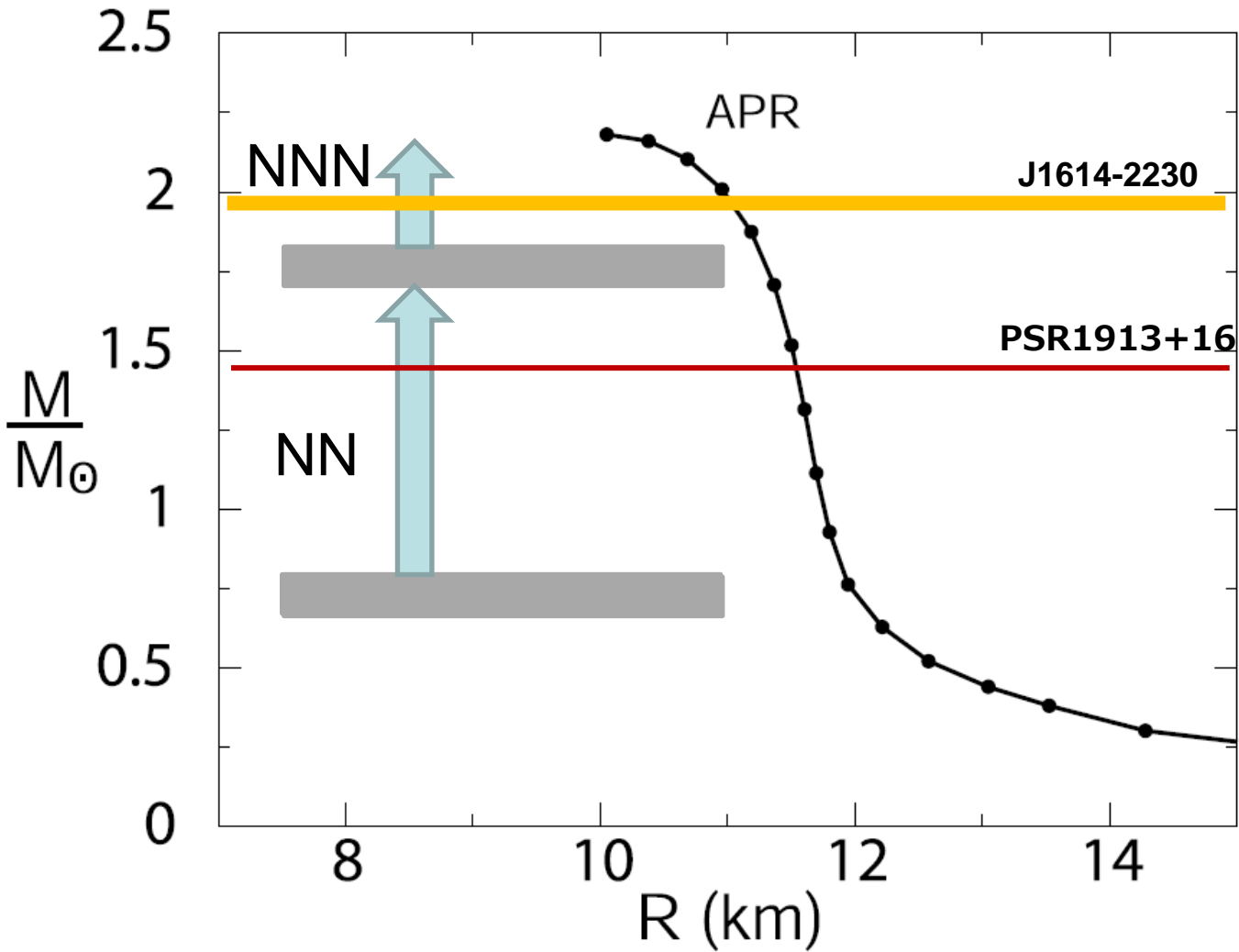
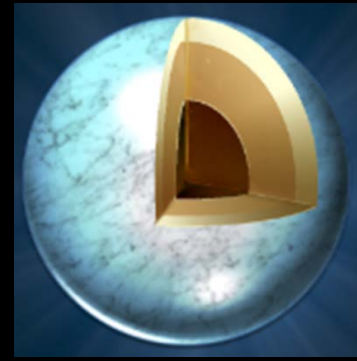
(Received April 25, 1957)

ρ^0 would contribute a repulsive nuclear force of Wigner type and short range ($\lesssim 0.7 \times 10^{-13}$ cm), more or less similar to the phenomenological hard core.

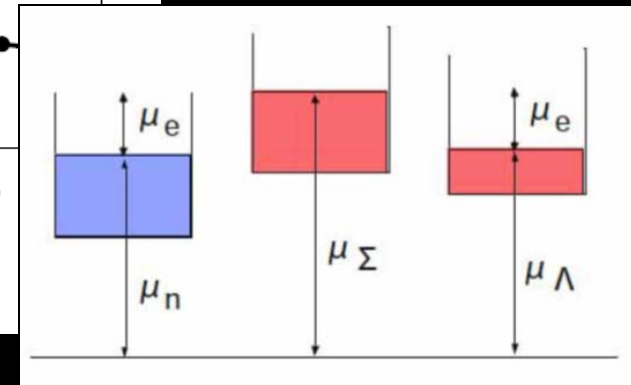
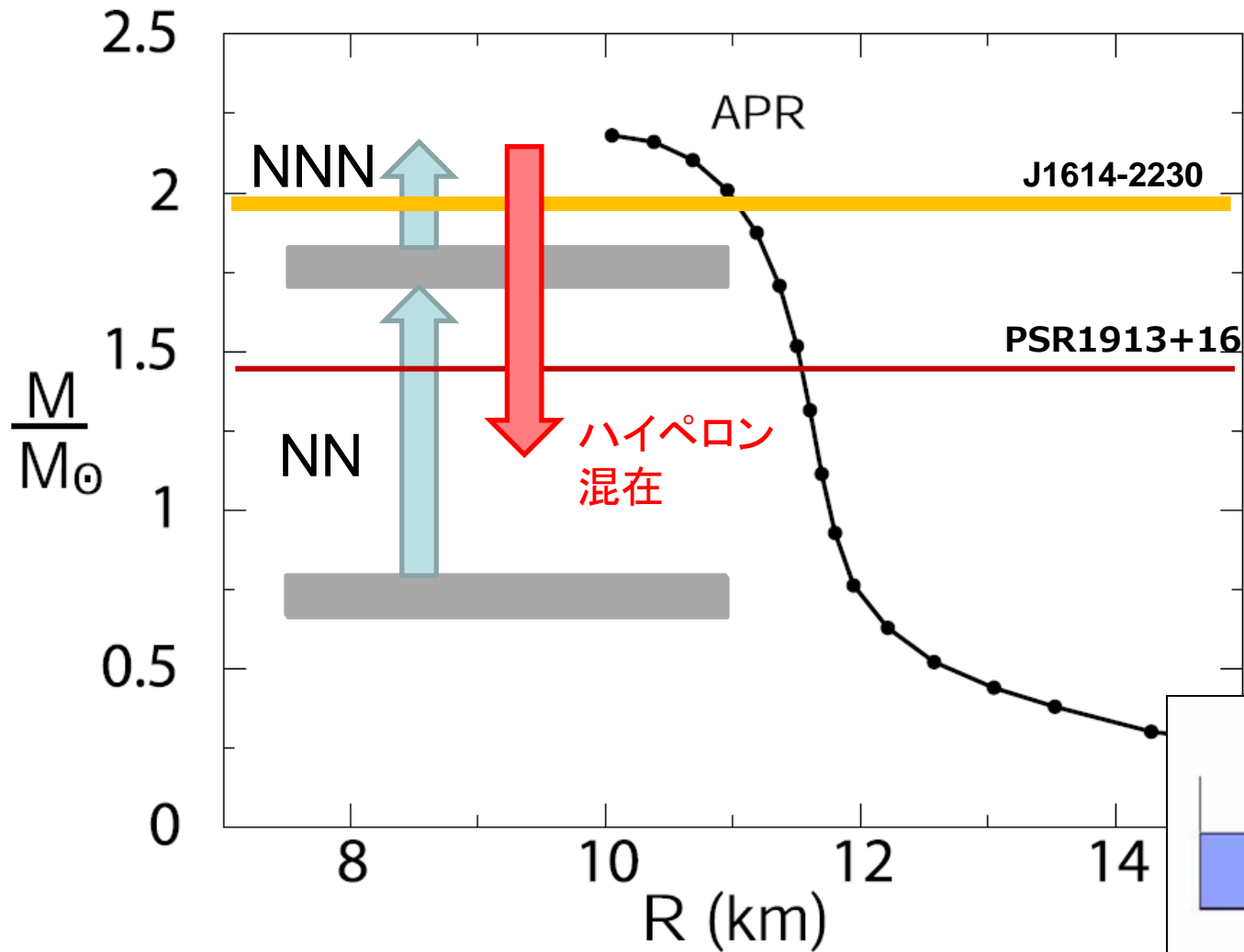
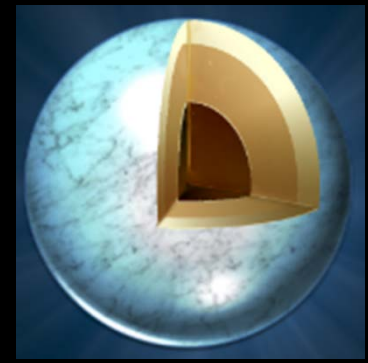
ω -meson



高密度状態方程式と核力（中性子・陽子のみの場合）

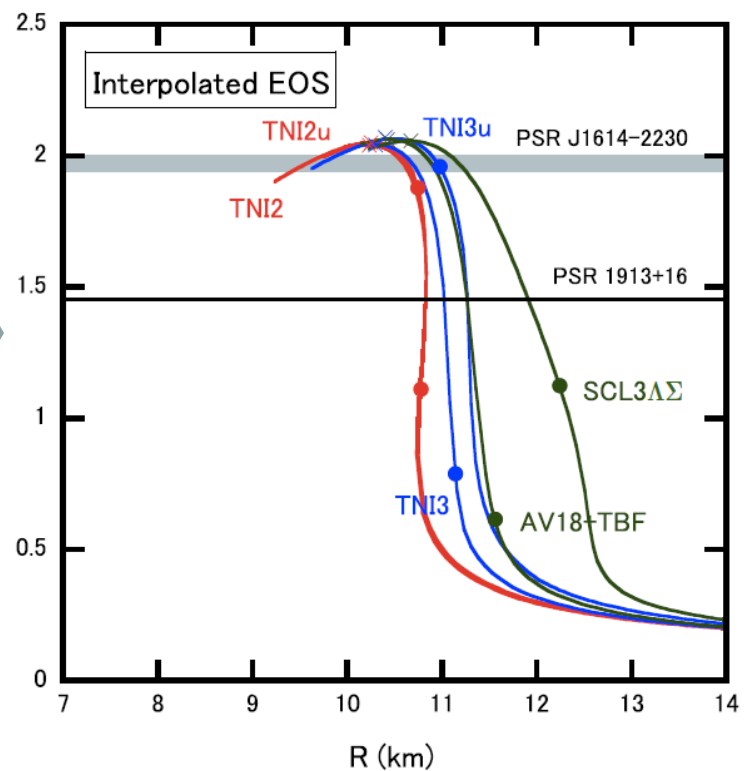
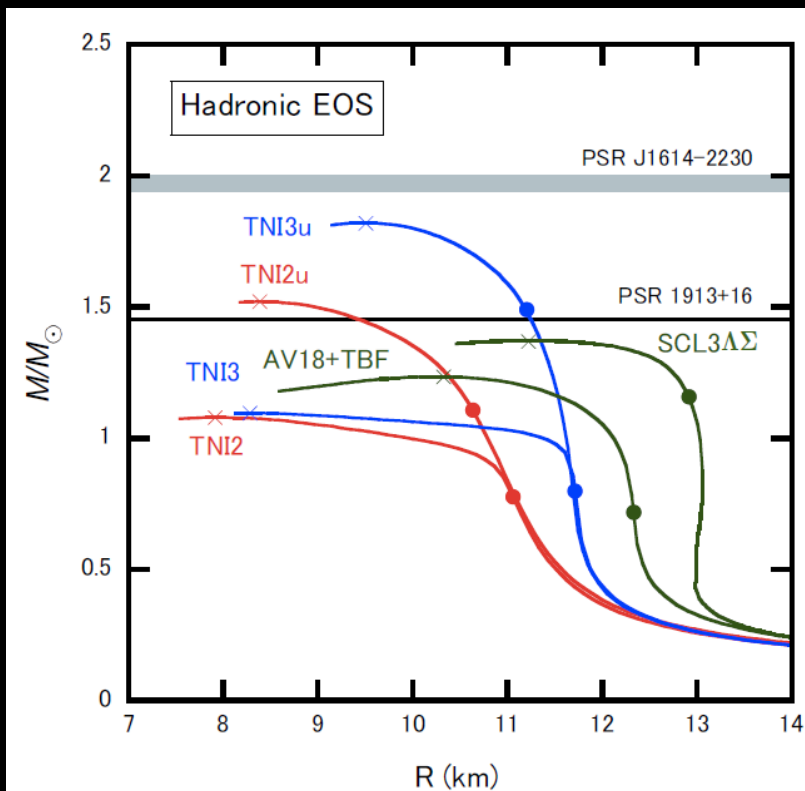
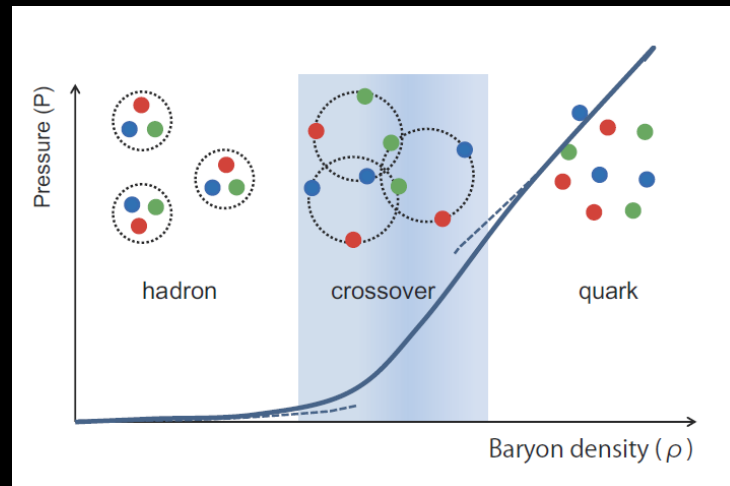


ハイペロン問題 (高塚問題)

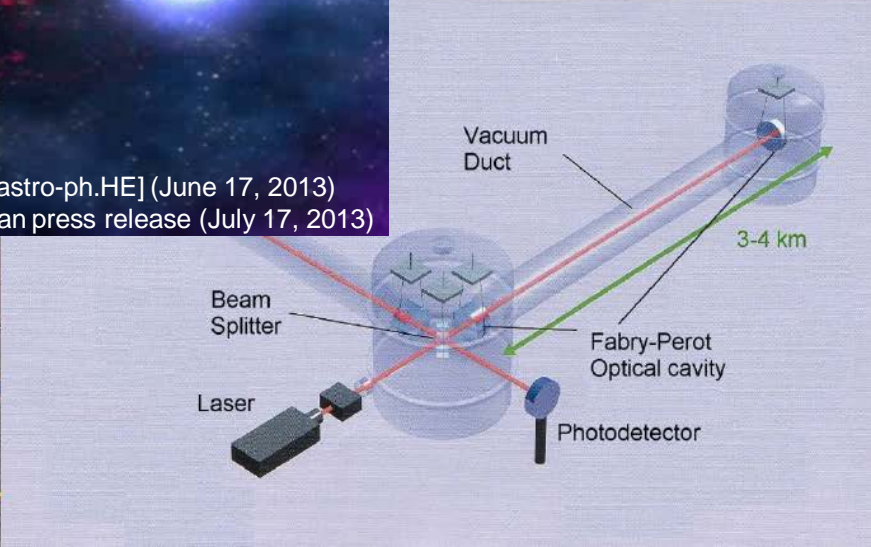
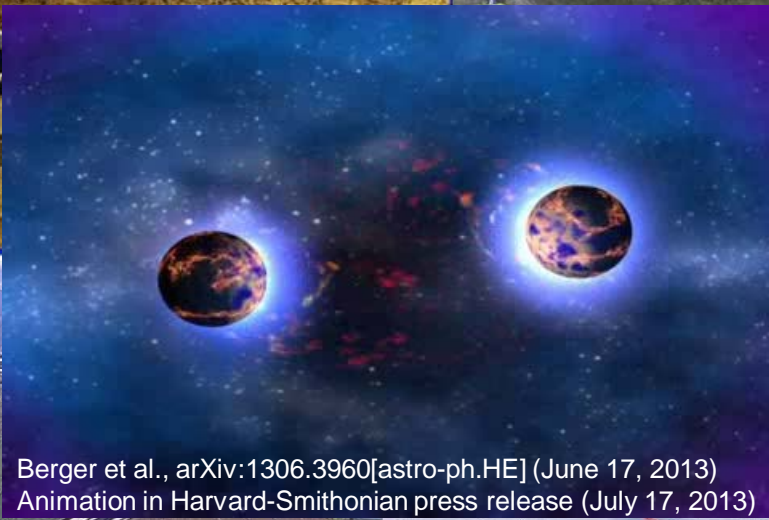


強相関クォークコアへの クロスオーバー?

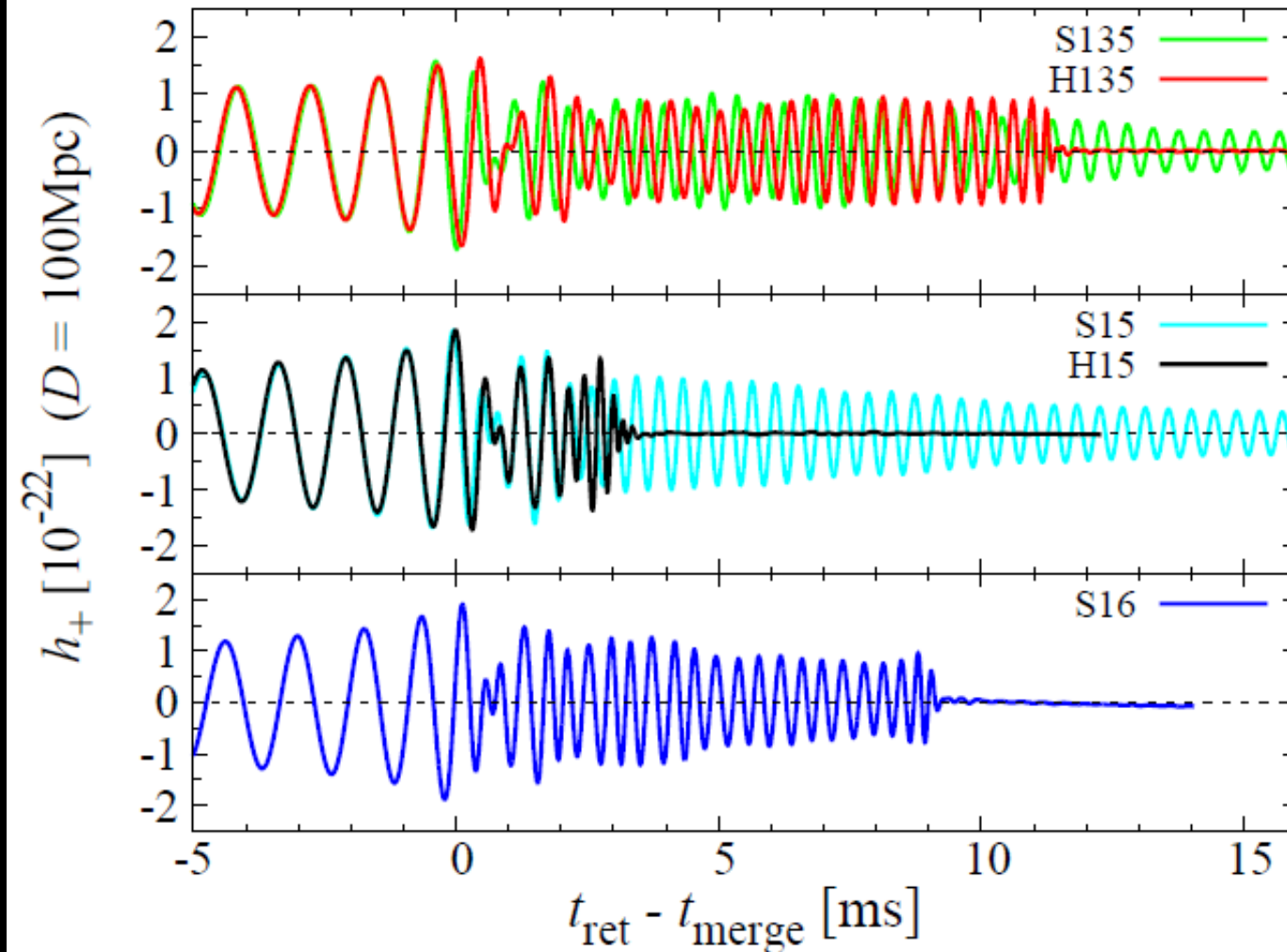
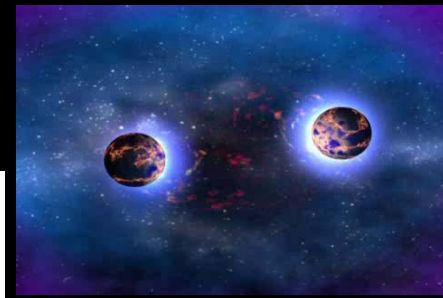
Masuda, Hatsuda & Takatsuka,
Astrophysical Journal Letters 764 (2013) 12



中性子星合体からの重力波検出



中性子星合体時の重力波 → EOS



1pc=3.26光年
100Mpc=3.26億光年

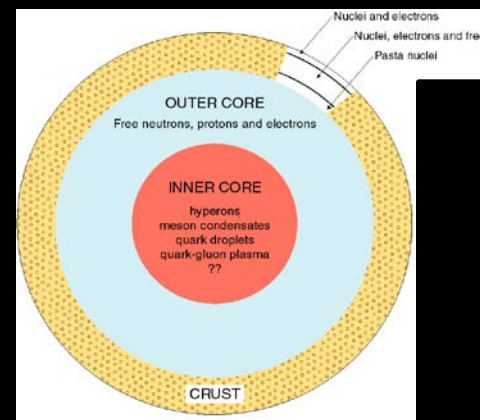
わが銀河の直径
30Kpc=10万光年

アンドロメダ銀河まで
0.78Mpc=254万光年

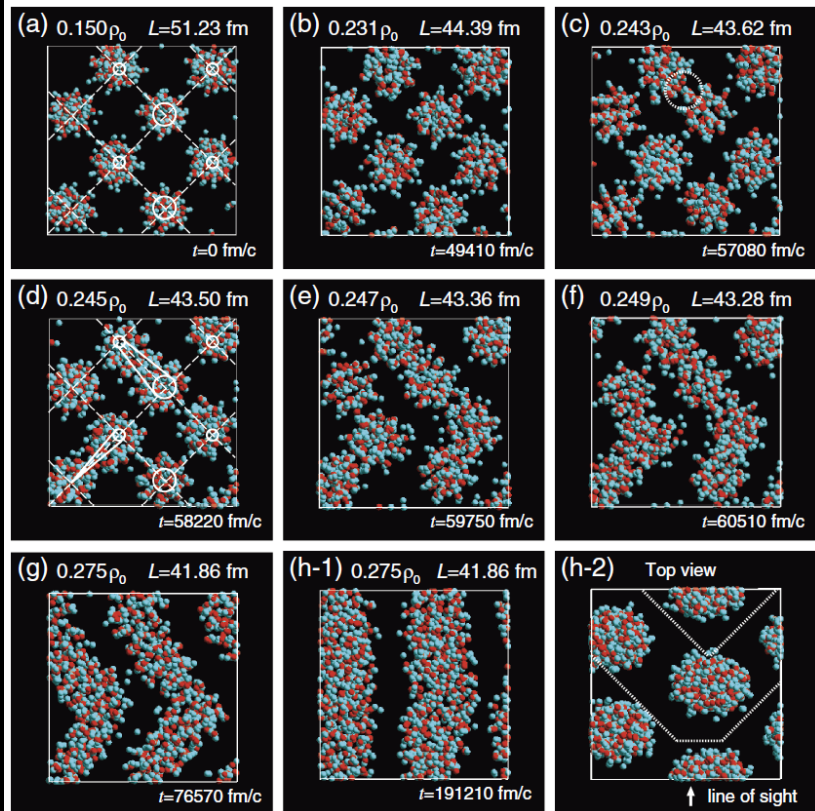
Sekiguchi, Kiuchi, Kyutoku & Shiata,
PRL 107 (2011); PTEP (2013)

クラストにおける原子核パスタ

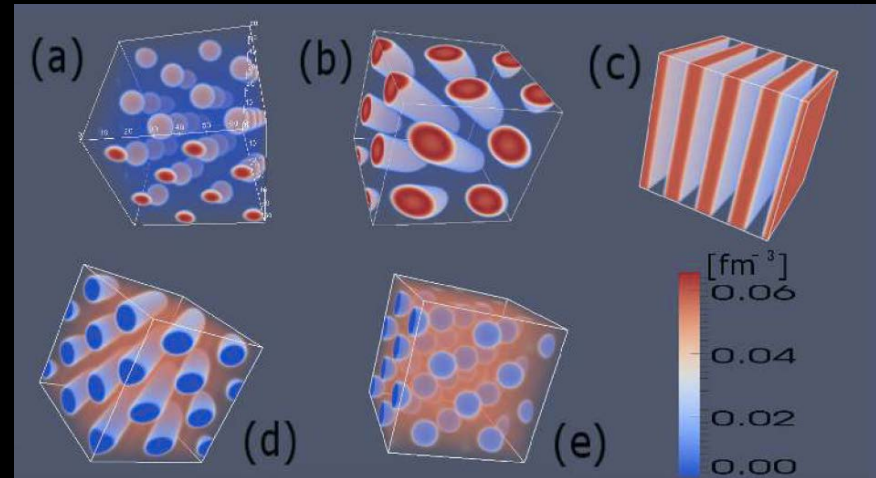
星振学とクラスト状態方程式



Quantum Molecular Dynamics
(Maruyama et al., PTEP 2012)



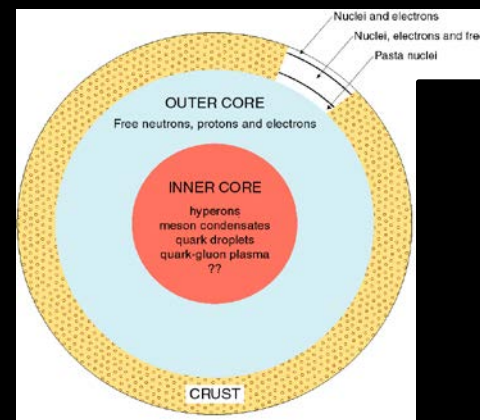
Relativistic MFT (Okamoto et al., PLB 2012)



Sotani, Nakazato, Iida
& Oyamatsu, PRL (2012)

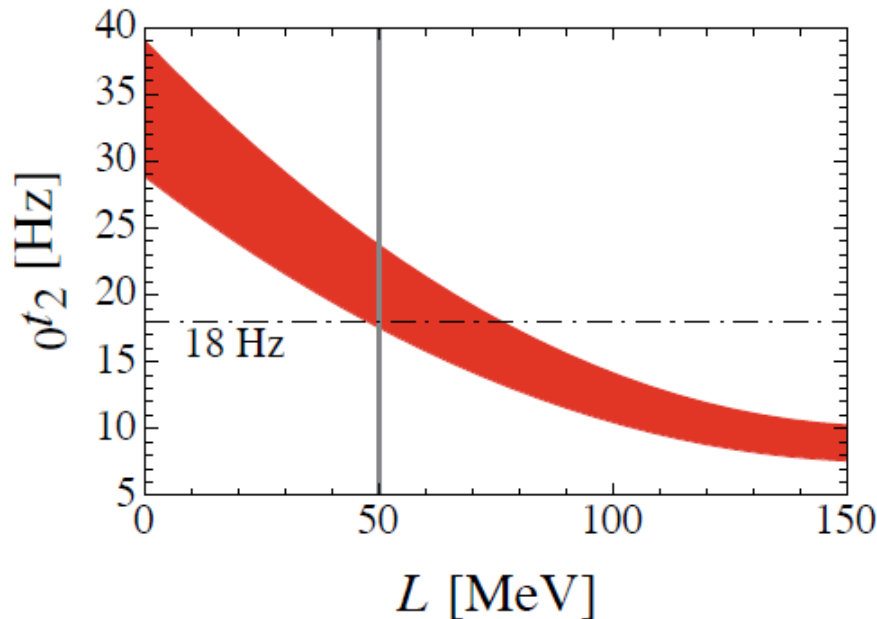
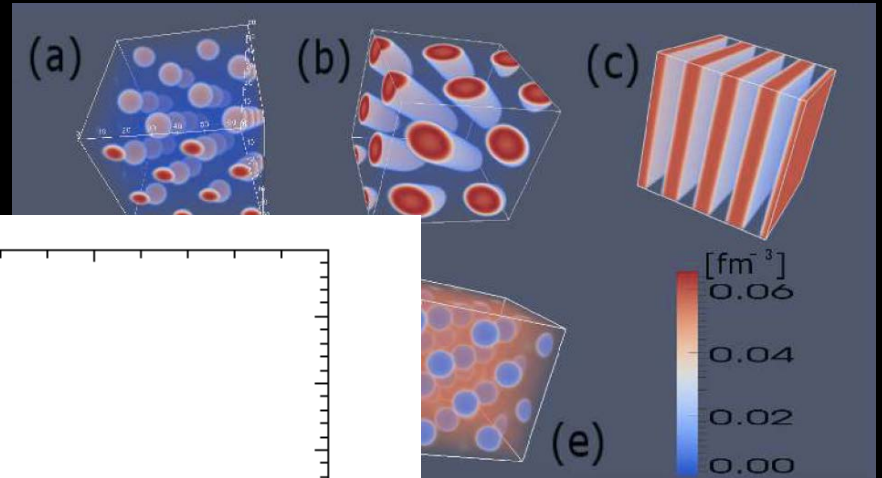
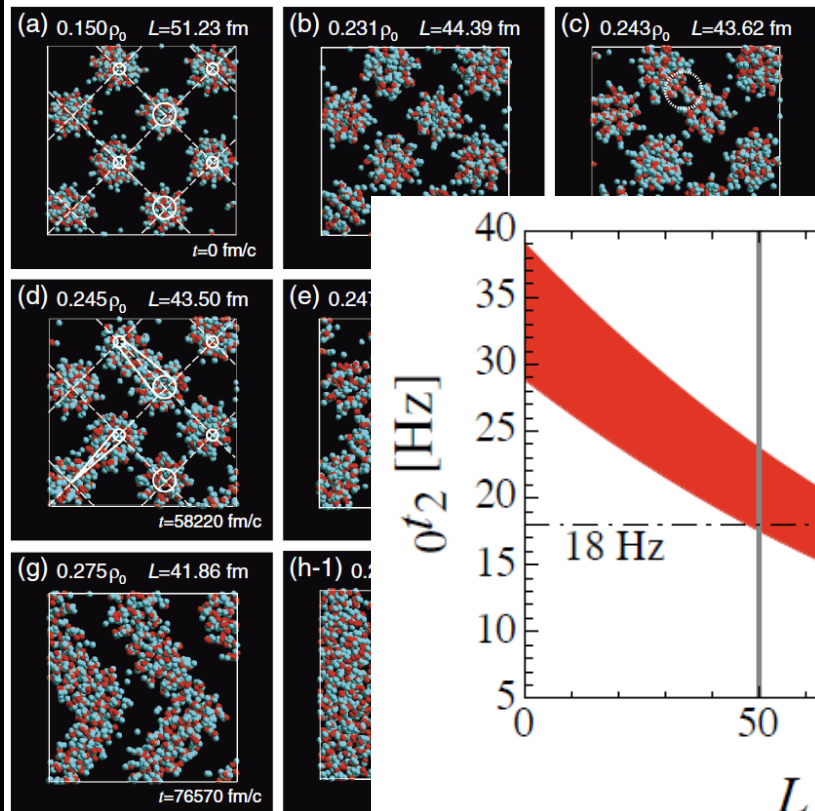
クラストにおける原子核パスタ

星振学とクラスト状態方程式



Quantum Molecular Dynamics
(Maruyama et al., PTEP 2012)

Relativistic MFT (Okamoto et al., PLB 2012)

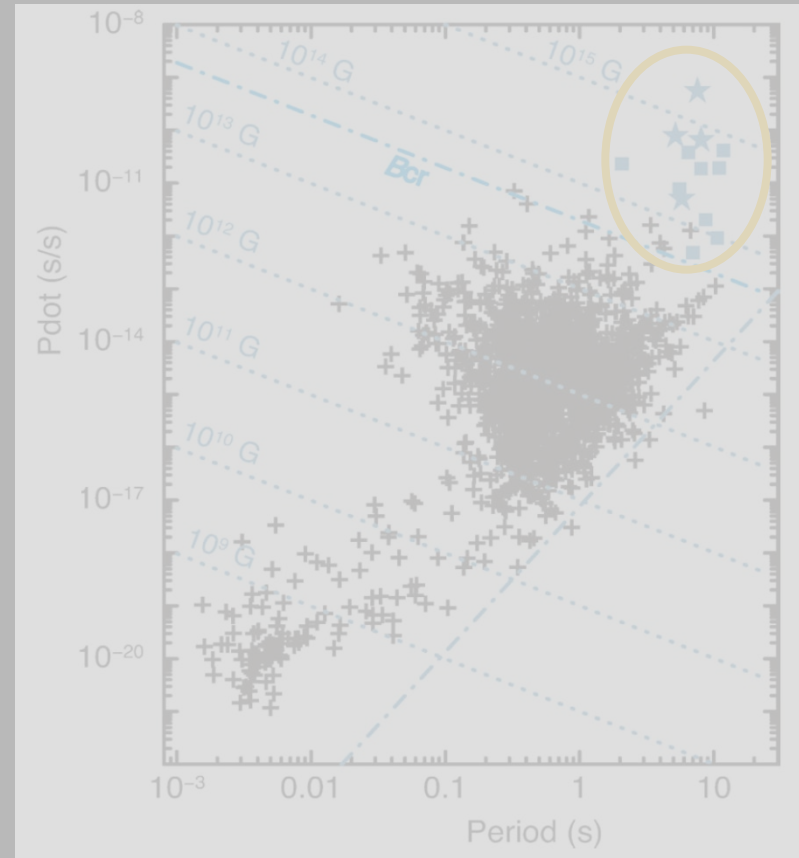
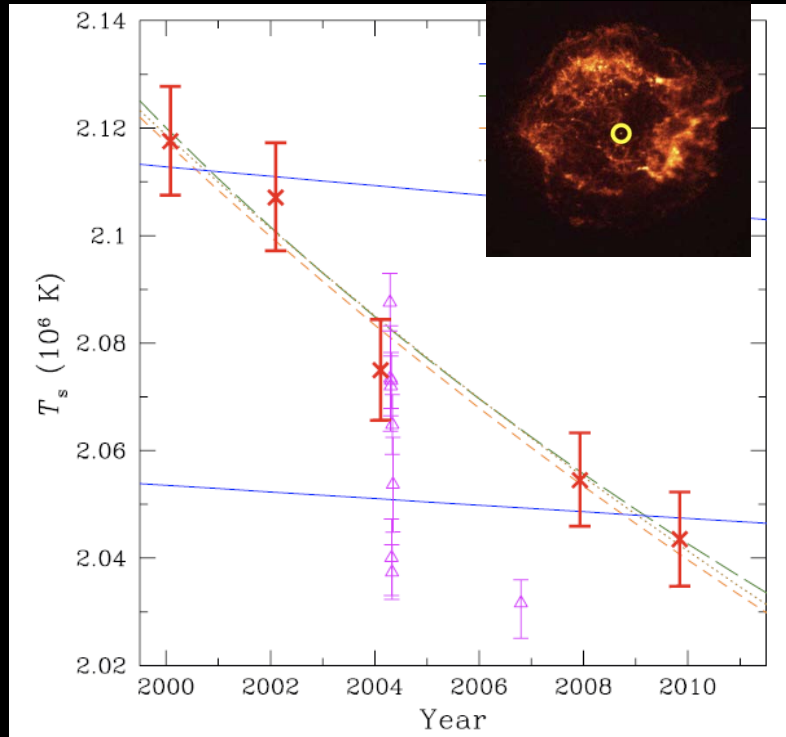


Sotani, Nakazato, Iida & Oyamatsu, PRL (2012)

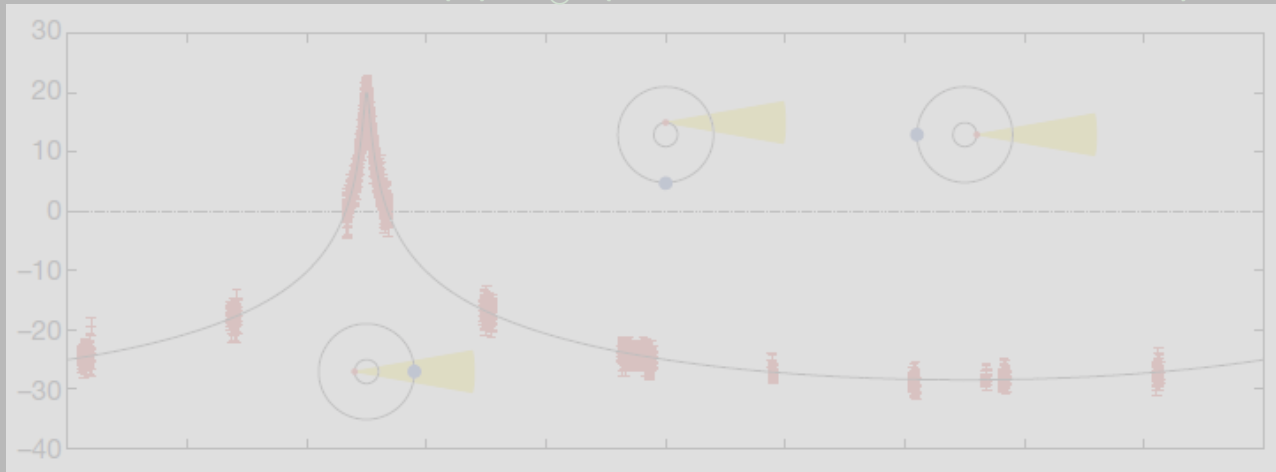
Plan of this Talk

1. 中性子星の基礎
2. 中性子星の質量
3. 中性子星の冷却
4. 中性子星の磁場
5. 格子ゲージ理論と中性子星
6. まとめと展望

Cassiopeia A Cooling, 4% decrease in 9 years (Heinke & Ho, ApJ 2010)



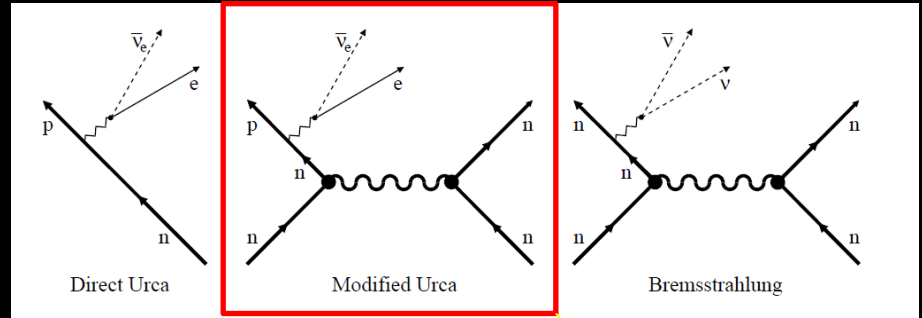
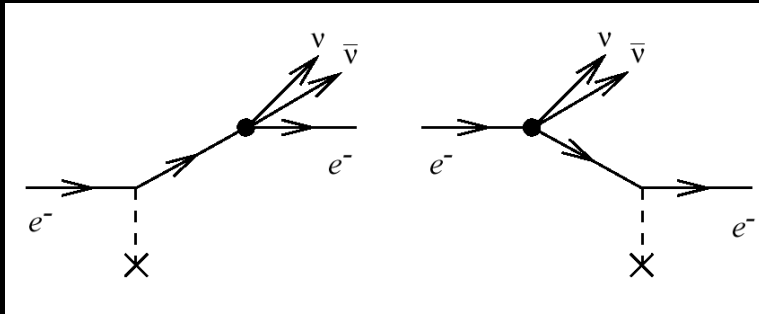
PSR J1614-2230 , 1.97(4) M_{\odot} , (Demorest et al., Nature 2010)



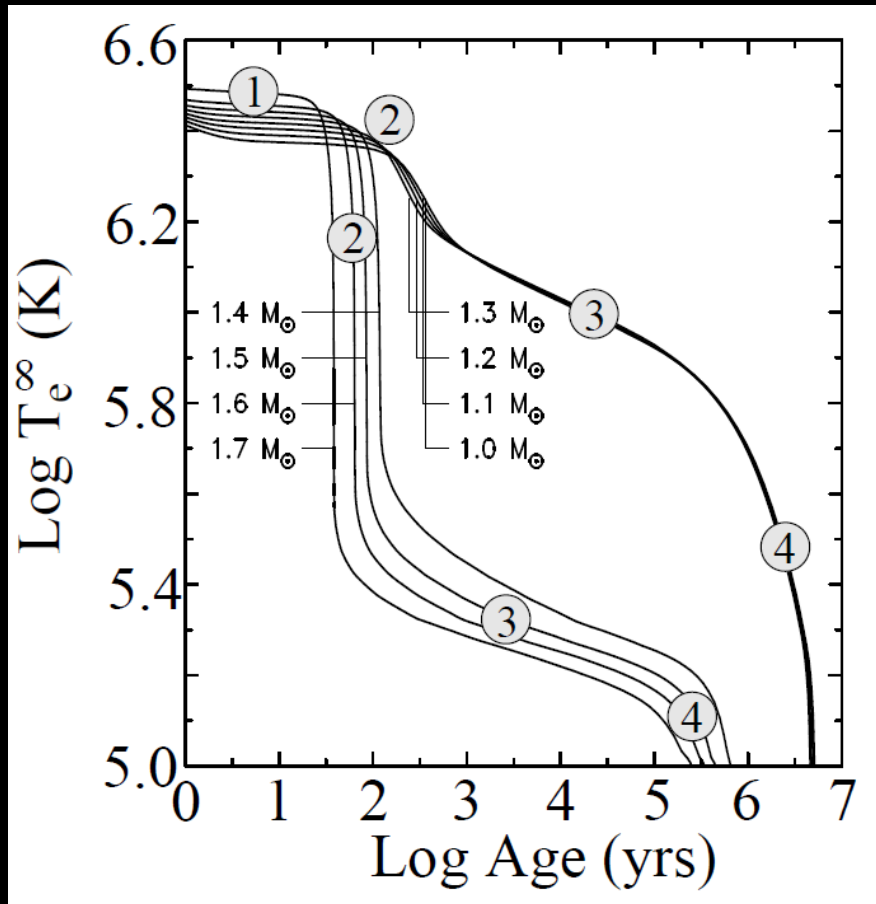
Magnetars
(from Enoto, 2012)
 $B_s = 3.2 \times 10^{19} \nu(P\dot{P})$ [G]

T, B, M

中性子星のニュートリノによる冷却



クラスト
制動放射



修正URCA過程

Name	Process	Emissivity (erg cm ⁻³ s ⁻¹)	
Modified Urca (neutron branch)	$n + n \rightarrow n + p + e^- + \bar{\nu}_e$	$\sim 2 \times 10^{21} R T_9^8$	Slow
	$n + p + e^- \rightarrow n + n + \nu_e$		
Modified Urca (proton branch)	$p + n \rightarrow p + p + e^- + \bar{\nu}_e$	$\sim 10^{21} R T_9^8$	Slow
	$p + p + e^- \rightarrow p + n + \nu_e$		
Bremsstrahlungs	$n + n \rightarrow n + n + \nu + \bar{\nu}$	$\sim 10^{19} R T_9^8$	Slow
	$n + p \rightarrow n + p + \nu + \bar{\nu}$		
Cooper pair	$p + p \rightarrow p + p + \nu + \bar{\nu}$	$\sim 5 \times 10^{21} R T_9^7$ $\sim 5 \times 10^{19} R T_9^7$	Medium
	$n + n \rightarrow [nn] + \nu + \bar{\nu}$		
Direct Urca (nucleons)	$p + p \rightarrow [pp] + \nu + \bar{\nu}$	$\sim 10^{27} R T_9^6$	Fast
	$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$		
Direct Urca (Λ hyperons)	$p + e^- \rightarrow n + \nu_e$	$\sim 10^{27} R T_9^6$	Fast
	$\Lambda \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$		
Direct Urca (Σ^- hyperons)	$p + e^- \rightarrow \Lambda + \nu_e$	$\sim 10^{27} R T_9^6$	Fast
	$\Sigma^- \rightarrow n + e^- + \bar{\nu}_e$		
π^- condensate	$n + e^- \rightarrow \Sigma^- + \nu_e$	$\sim 10^{27} R T_9^6$	Fast
K^- condensate	$n + \langle \pi^- \rangle \rightarrow n + e^- + \bar{\nu}_e$	$\sim 10^{26} R T_9^6$	Fast
Direct Urca cycle (u-d quarks)	$n + \langle K^- \rangle \rightarrow n + e^- + \bar{\nu}_e$	$\sim 10^{25} R T_9^6$	Fast
	$d \rightarrow u + e^- + \bar{\nu}_e$		
Direct Urca cycle (u-s quarks)	$u + e^- \rightarrow d + \nu_e$	$\sim 10^{27} R T_9^6$	Fast
	$s \rightarrow u + e^- + \bar{\nu}_e$		
	$u + e^- \rightarrow s + \nu_e$	$\sim 10^{27} R T_9^6$	Fast

Cassiopeia A cooling (9 years CHANDRA data)

Onset of 3P_2 superfluidity ?

Heike & Ho, ApJ Lett. 719 (2010) L167

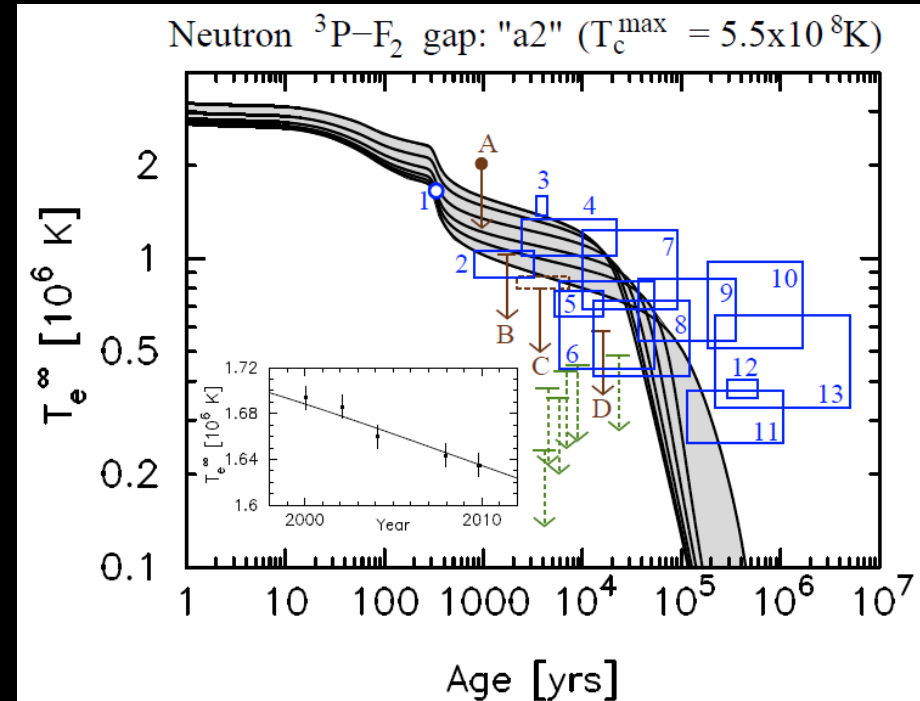
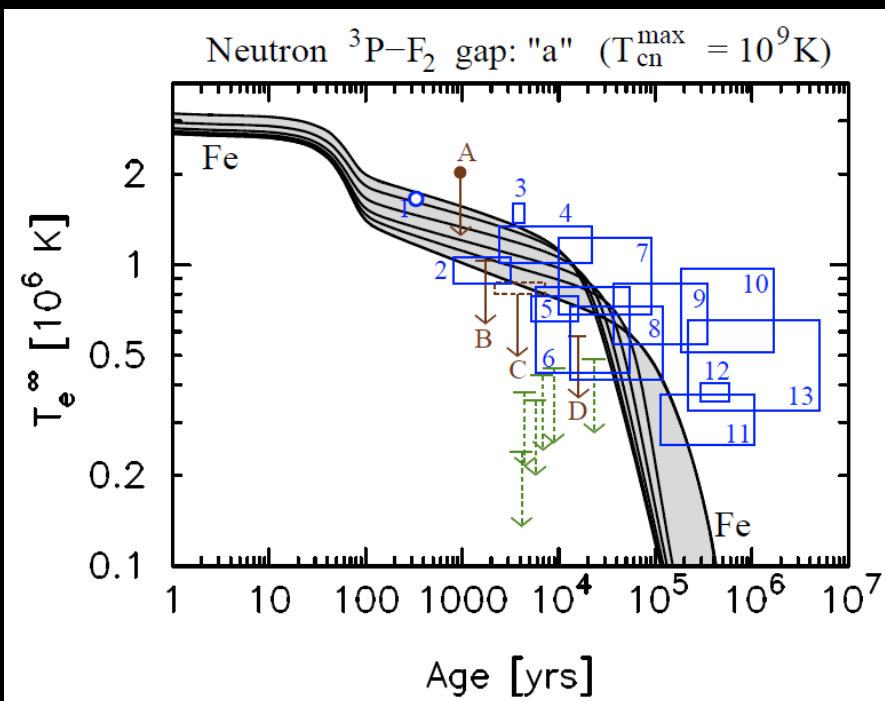
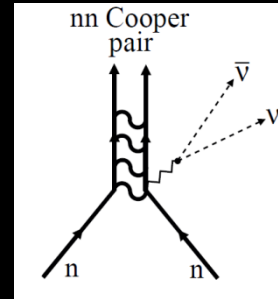
Shternin et al., Mon. Not. Astr. Soc. (2010)

Page et al., PRL (2011)

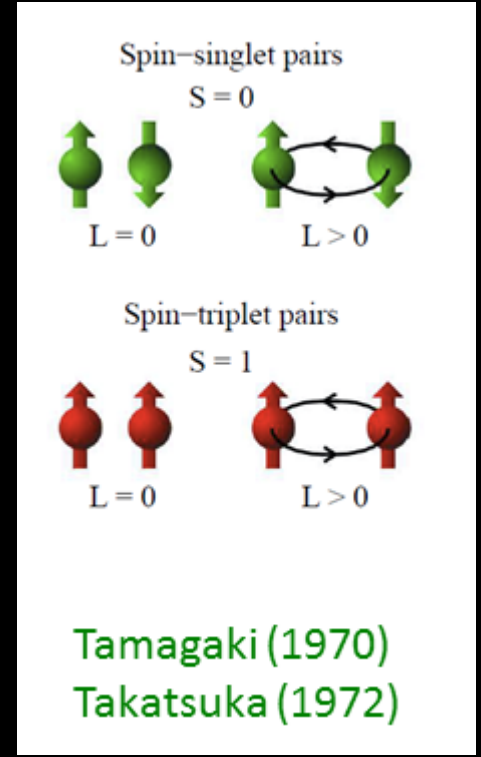
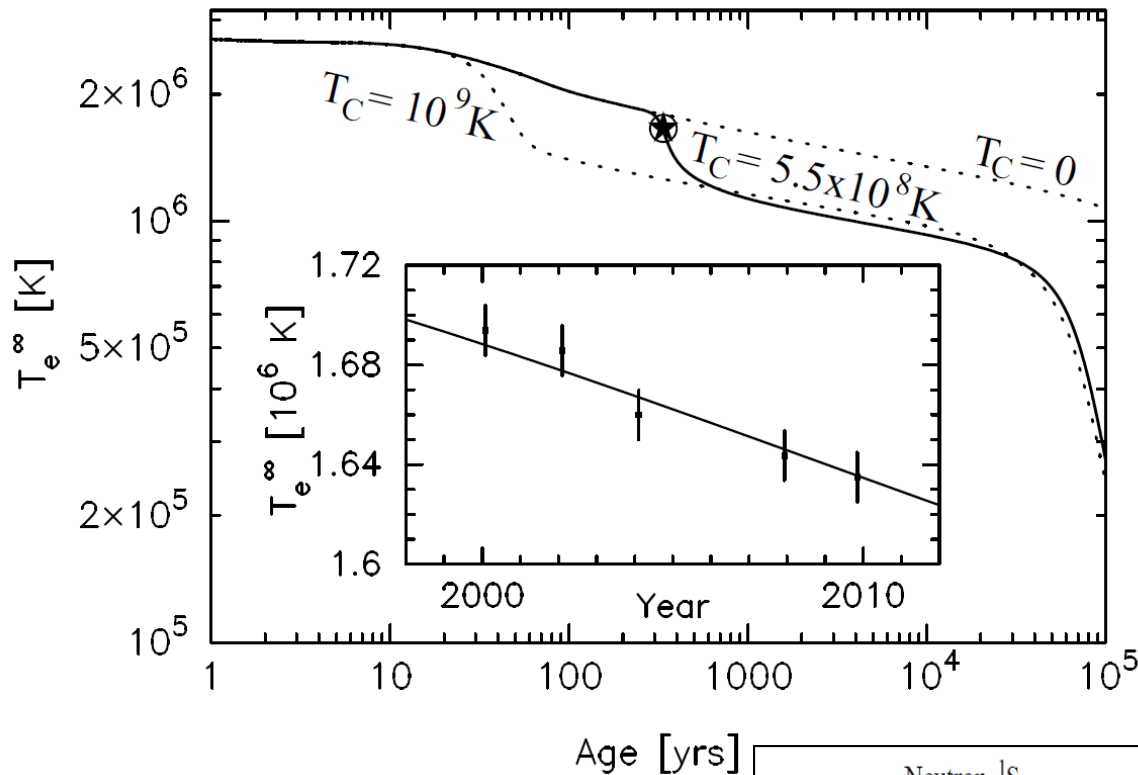
Simple thermal relaxation ?

Heike & Ho, ApJ Lett. 719 (2010) L167

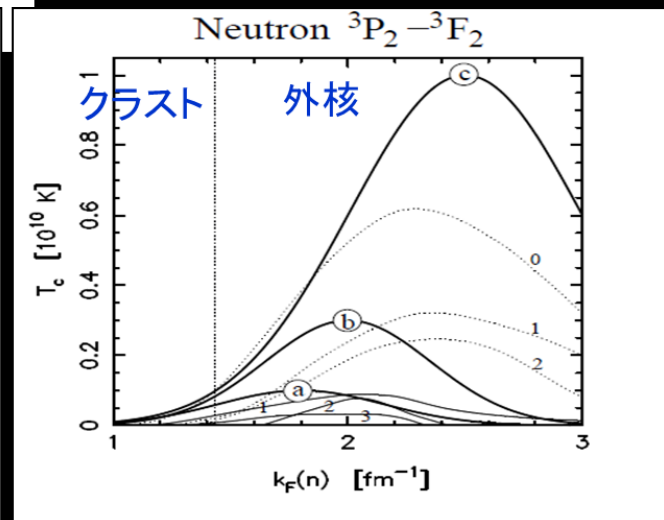
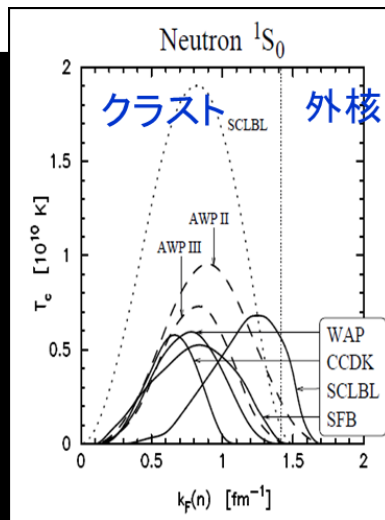
Tsuruta et al (2012)



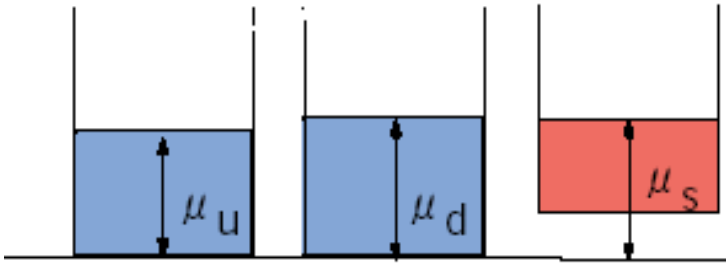
CAS-A 冷却曲線と内部構造: 3P_2 超流動と関連?



Shternin et al.,
Mon. Not. Astr. Soc. (2010)
Page et al., PRL (2011)



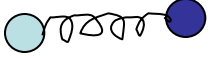
高密度クォーク物質でのカラー超伝導



$$(d_L)_{ia} \sim \epsilon_{ijk} \epsilon_{abc} (q_L)_b^j C(q_L)_c^k$$

$$(d_R)_{ia} \sim \epsilon_{ijk} \epsilon_{abc} (q_R)_b^j C(q_R)_c^k$$

↑ flavor ↑ color



通常の金属超伝導との違い

1. 相対論的システム

カラー磁気相互作用が主要な寄与 →

$$|d| \sim \epsilon_F e^{-c/\sqrt{\alpha_s}}$$

高温超伝導 : $T_c/\epsilon_F \sim 0.1$
コンパクトなペア : $r \sim 1-10 \text{ fm}$

2. カラー・フレーバー構造

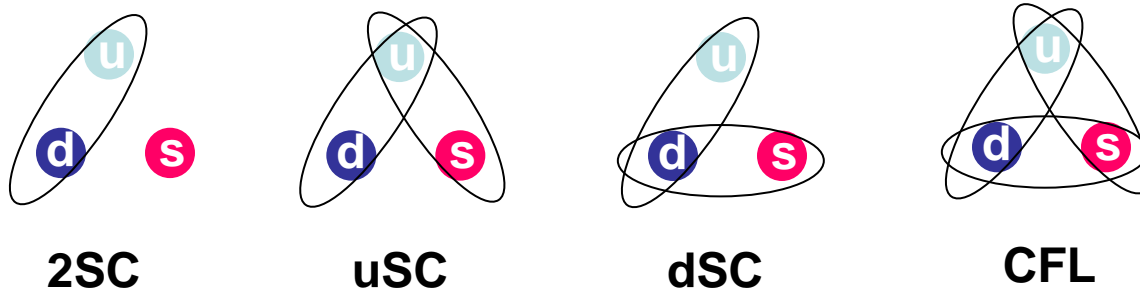
$$d_{ia}$$



様々な凝縮相 (c.f. ^3He)

2SC, uSC, dSC, CFL etc

高密度クォーク物質でのカラー超伝導



通常の金属超伝導との違い

1. 相対論的システム

カラー磁気相互作用が主要な寄与

$$|d| \sim \varepsilon_F e^{-c/\sqrt{\alpha_s}}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{高温超伝導 : } T_c/\varepsilon_F \sim 0.1 \\ \text{コンパクトなペアー : } r \sim 1-10 \text{ fm} \end{array} \right.$$

2. カラー・フレーバー構造

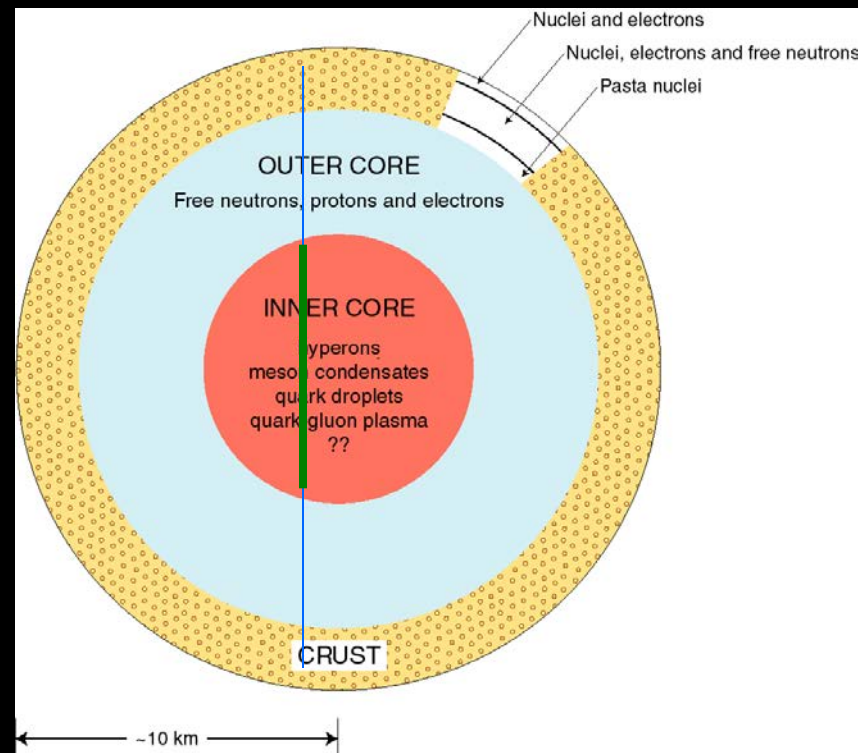
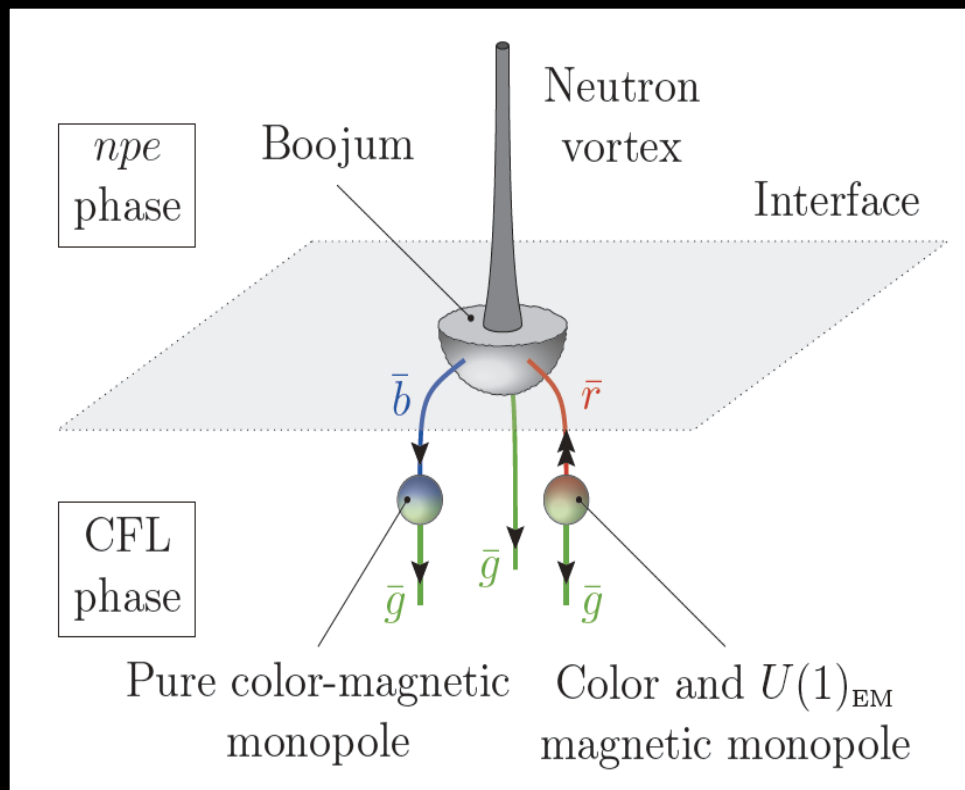
$$d_{ia}$$

様々な凝縮相 (c.f. ^3He)
2SC, uSC, dSC, CFL etc

中性子星内の量子渦

渦の大きさ ~ 10 fm

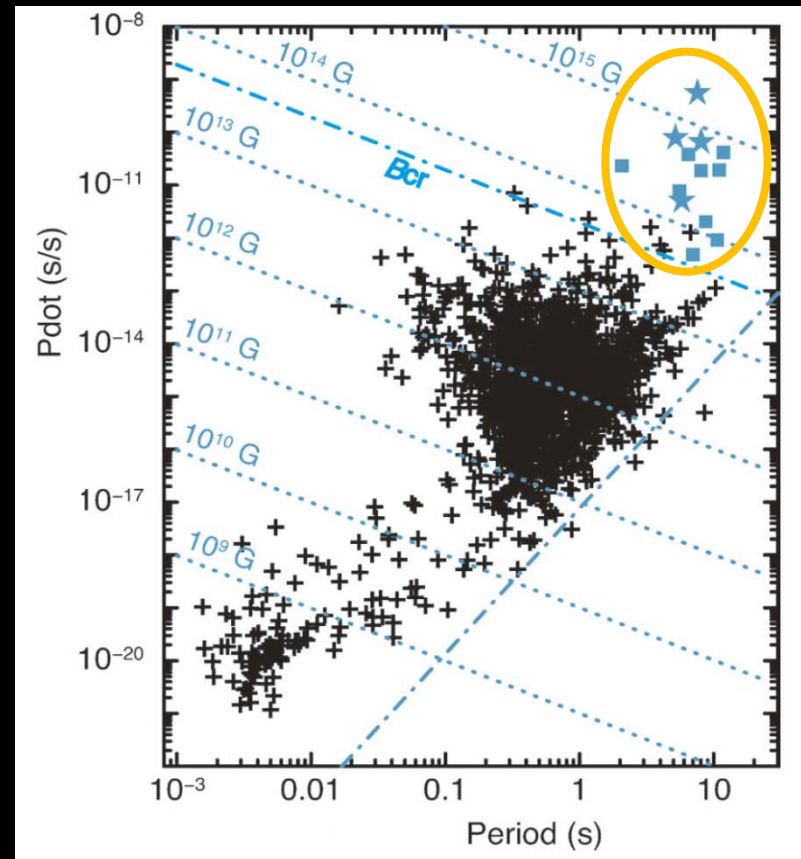
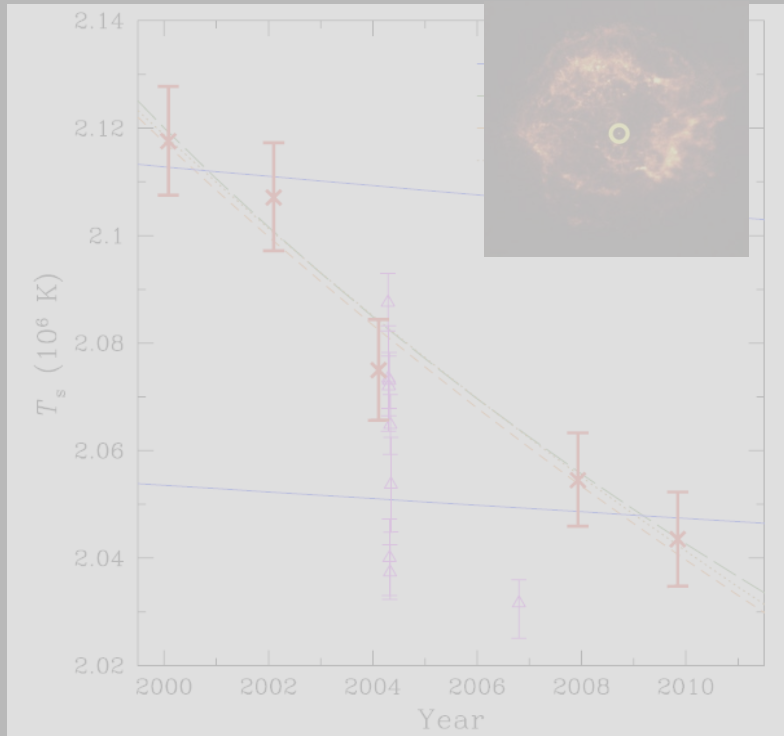
渦の間隔 $\sim 0.01P(s)^{1/2}cm$



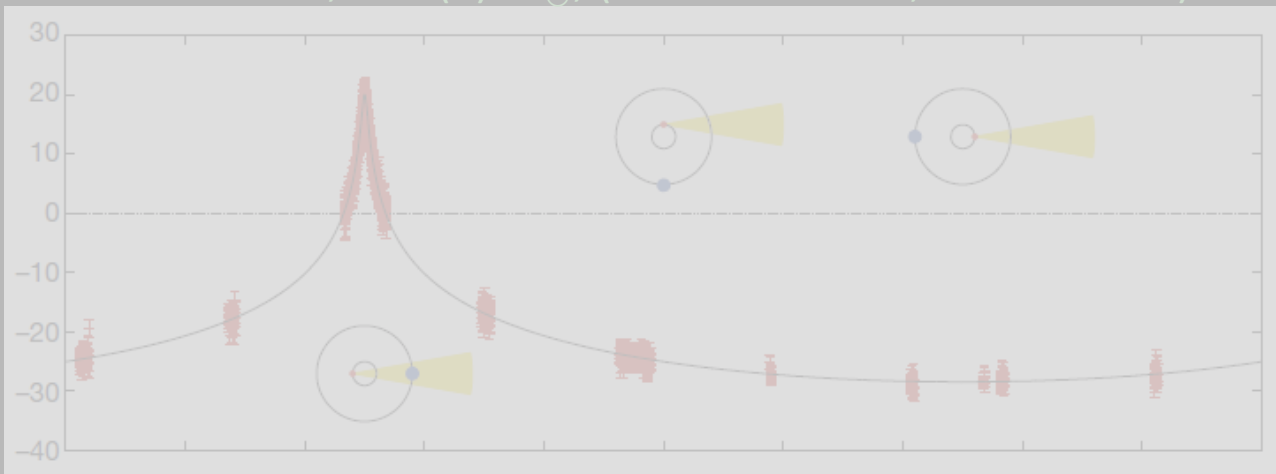
Plan of this Talk

1. 中性子星の基礎
2. 中性子星の質量
3. 中性子星の冷却
4. 中性子星の磁場
5. 格子ゲージ理論と中性子星
6. まとめと展望

Cassiopeia A Cooling, 4% decrease in 9 years
(Heinke & Ho, ApJ 2010)



PSR J1614-2230 , $1.97(4) M_{\odot}$, (Demorest et al., Nature 2010)



Magnetars
(from Enoto, 2012)
 $B_s = 3.2 \times 10^{19} \nu(P\dot{\nu})$ [G]

T, B, M

超強磁場をもつ中性子星 (マグネター仮説)

表面磁場 $\sim 10^{14-15}$ G

内部磁場 $\sim 10^{18-19}$ G ?



強い相互作用が起源？

- ・ 中性子物質の強磁性

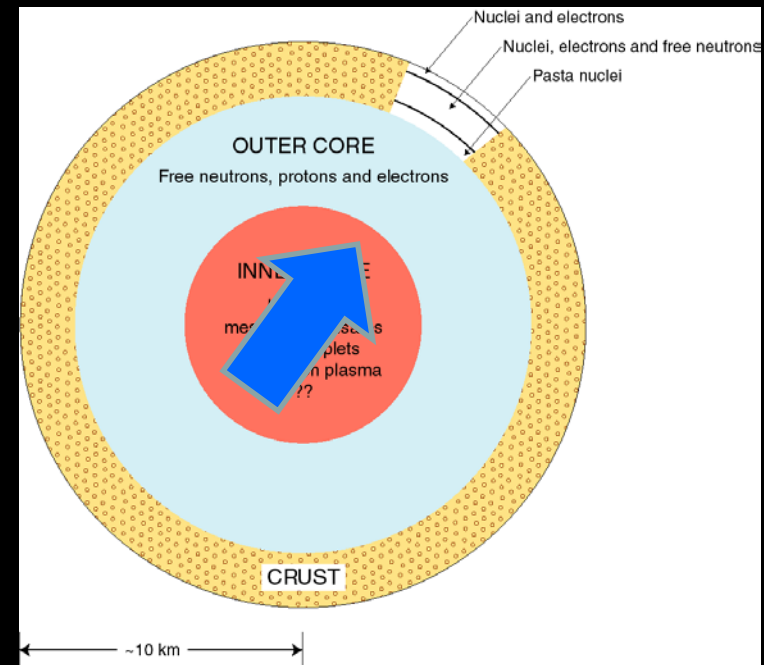
Brownell & Callaway (1969), Rice (1969), Silverstein (1969), Makishima (1999)
量子多体計算では否定的: Bordar & Bigdeli, PRC77 (2008) etc

- ・ クォークコアの強磁性

Tatsumi, Phys. Lett. B489 (2000); arXiv:1107.0807 [hep-ph].

- ・ π 中間子ドメインウォールによる強磁性

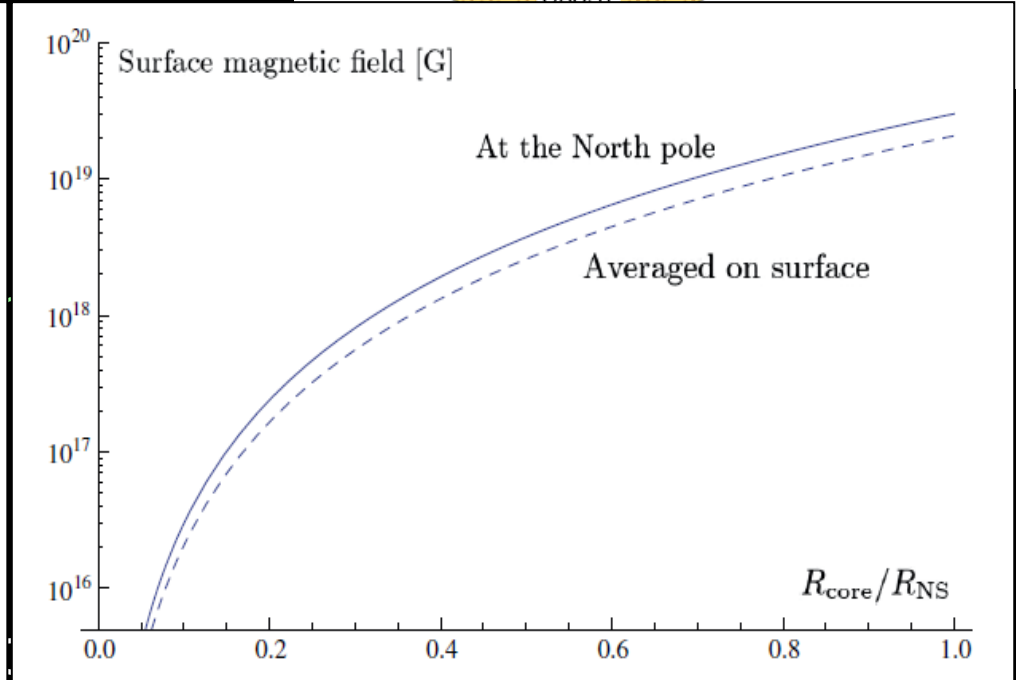
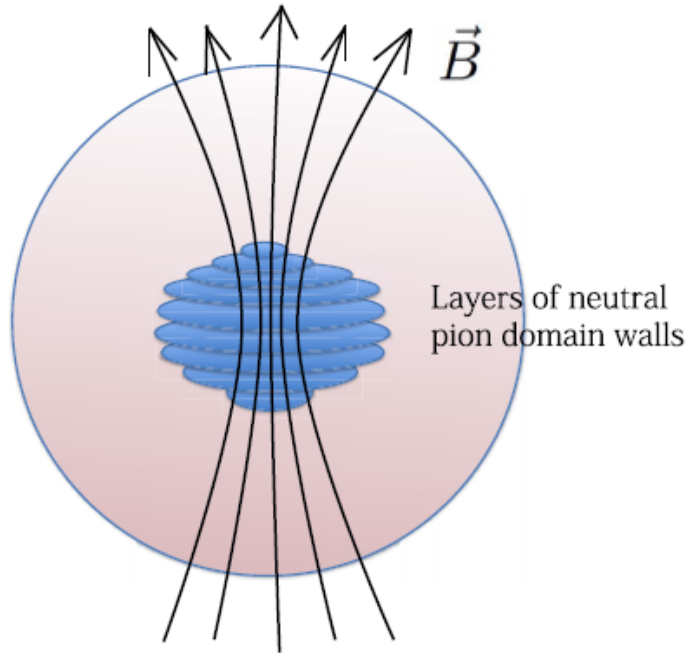
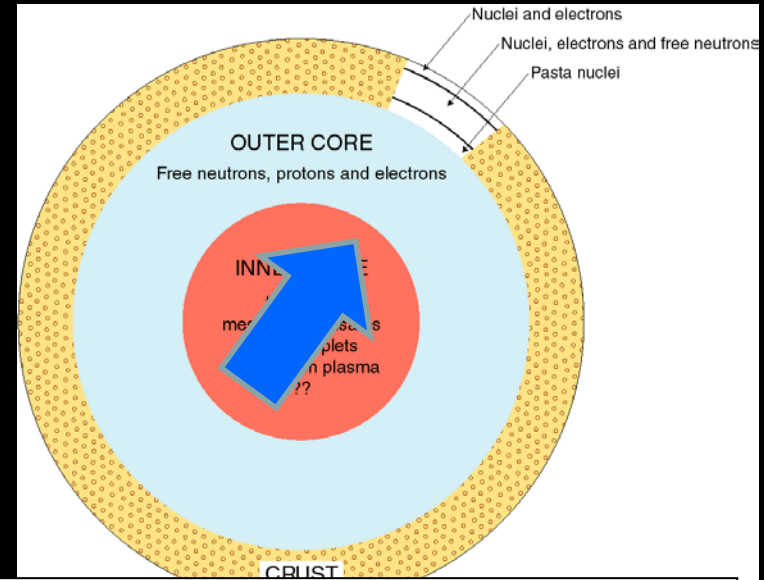
Eto, Hashimoto & Hatsuda, PRD88 (2013)



超強磁場をもつ中性子星 (マグネター仮説)

表面磁場 $\sim 10^{14-15}$ G

内部磁場 $\sim 10^{18-19}$ G ?



Eto, Hashimoto & Hatsuda, PRD88 (2013)

Plan of this Talk

1. 中性子星の基礎
2. 中性子星の質量
3. 中性子星の冷却
4. 中性子星の磁場
5. 格子ゲージ理論と中性子星
6. まとめと展望

量子色力学(QCD)

1966 強い相互作用のSU(3)ゲージ理論 (Y. Nambu)

1973 格子ゲージ理論 (K. Wilson)

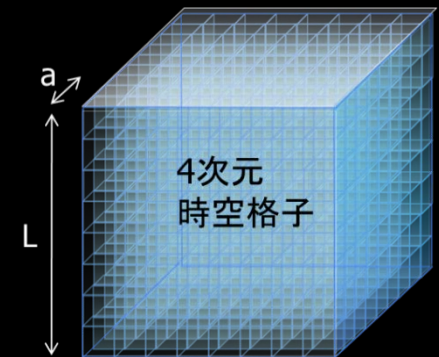


Y. Nambu

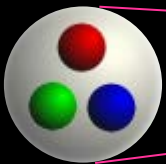


K. Wilson

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}G_{\mu\nu}^a G_a^{\mu\nu} + \bar{q}\gamma^\mu(i\partial_\mu - gt^a A_\mu^a)q - m\bar{q}q$$
$$G_{\mu\nu}^a = \partial_\mu A_\nu^a - \partial_\nu A_\mu^a + gf_{abc}A_\mu^b A_\nu^c$$

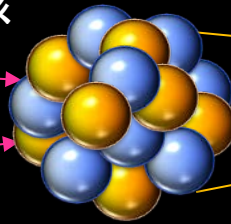


核子



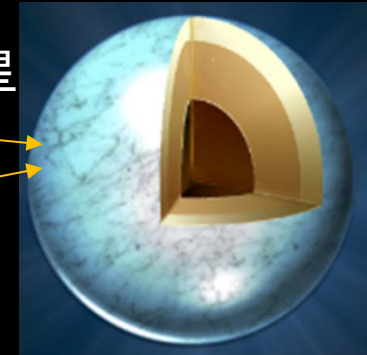
$r \sim 1$ [fm]

原子核



$r \sim 10$ [fm]

中性子星

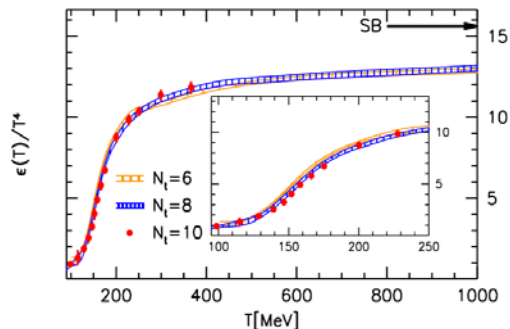


$r \sim 10$ [km]

クォークから中性子星へ

量子色力学

格子QCD



負符号
問題



格子QCD

バリオン相互作用

多体問題の手法

高温状態方程式

相対論的流体力学

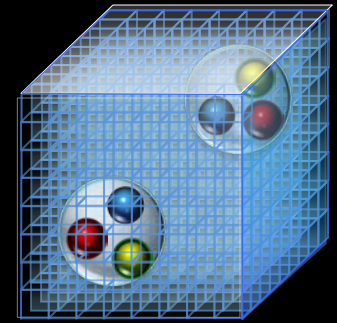
相対論的重イオン衝突

高密度状態方程式

一般相対論

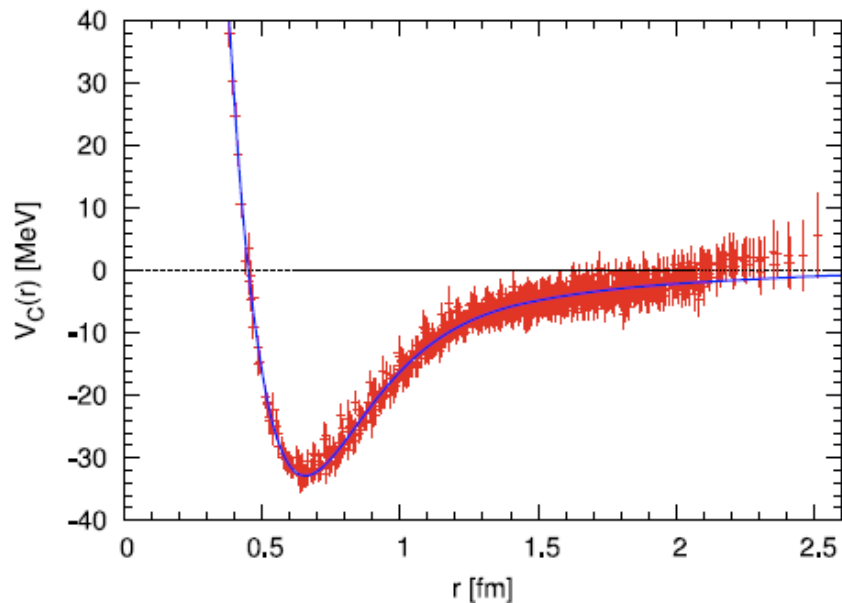
中性子星

格子QCDによる第一原理計算による核力

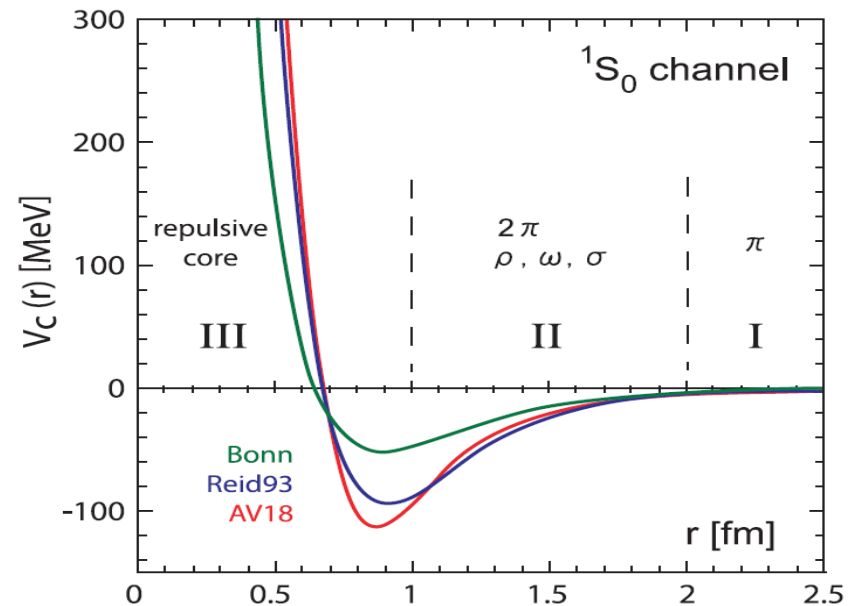


Ishii, Aoki & Hatsuda, Phys. Rev. Lett. 92 (2007) 022001
Ishii et al., [HAL QCD Coll.], Phys. Lett. 712 (2012) 437

1S_0 NN ポテンシャル (格子QCD計算)



現象論的核力 (30-40パラメータ)



m_π (現在) ~ 450 MeVでの核力

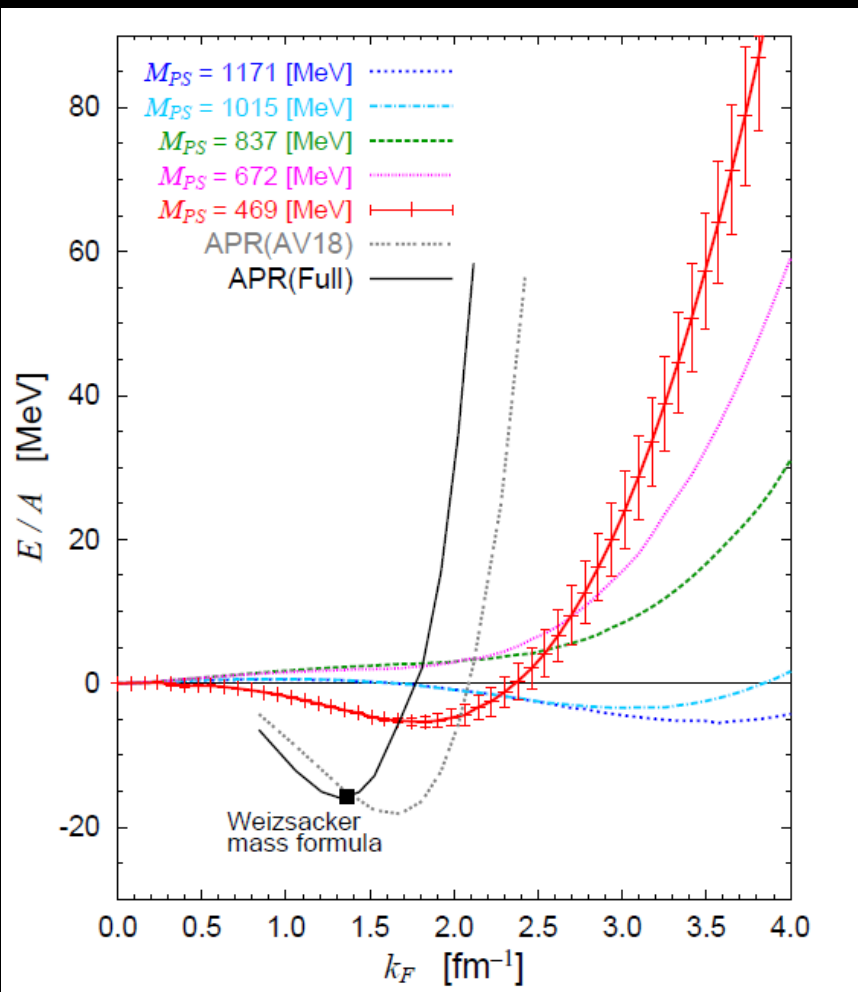
$\rightarrow m_\pi$ (数年後) = 135 MeVでの核力

格子QCD核力を用いた高密度状態方程式 (LQCD + BHF)

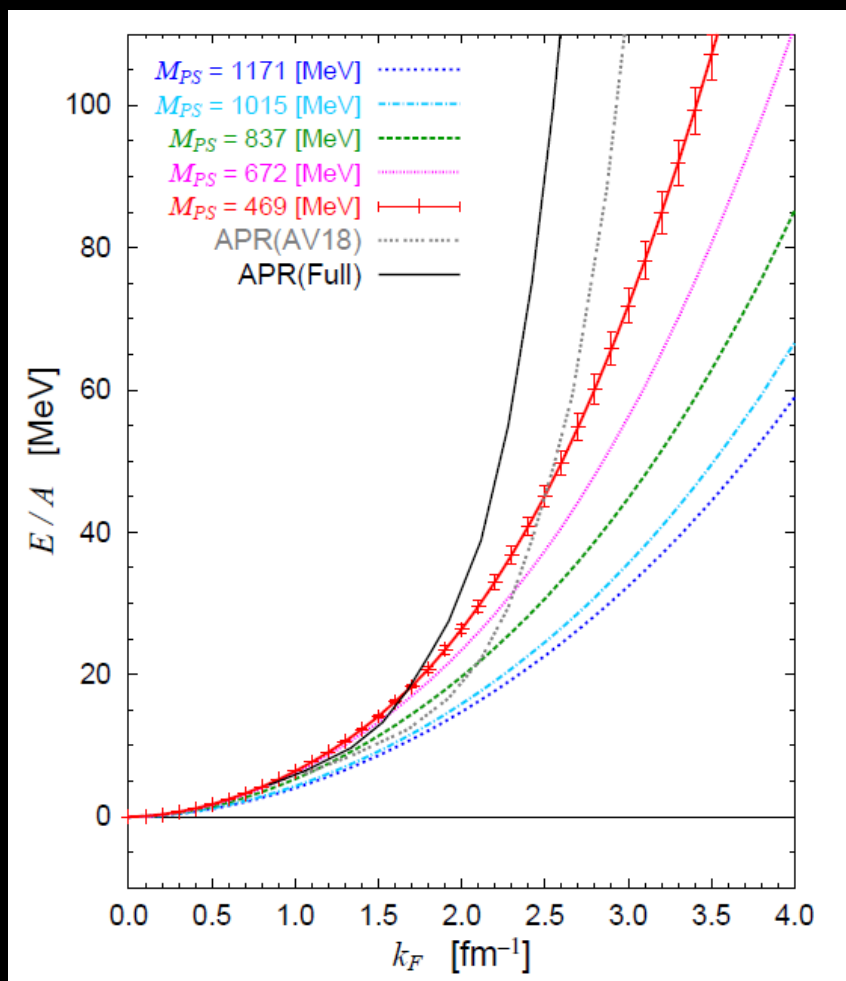
(NN force: 1S_0 , 3S_1 , 3D_1 channels only)

HAL QCD Coll., Phys. Rev. Lett. 111 (2013) 112503

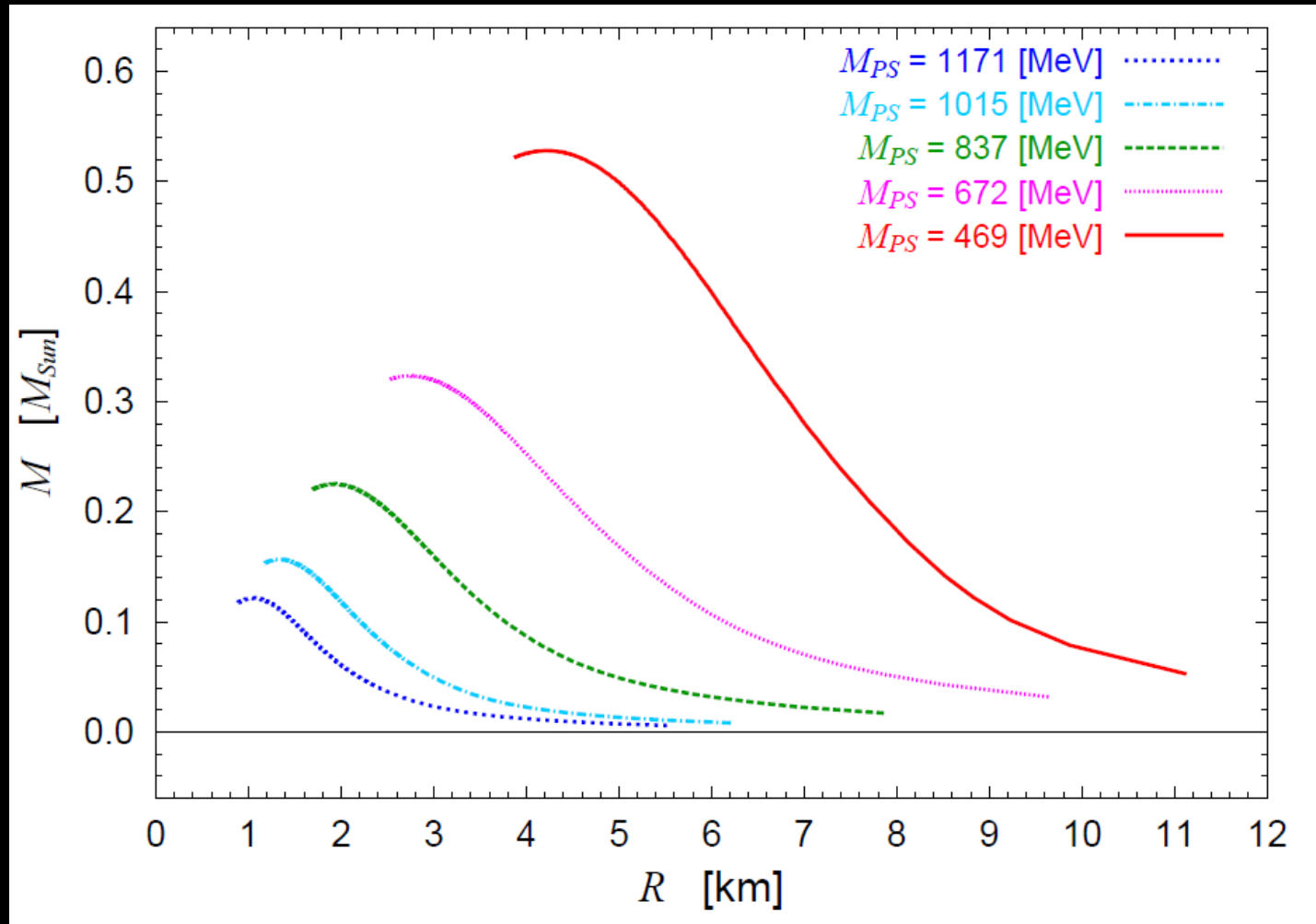
核物質



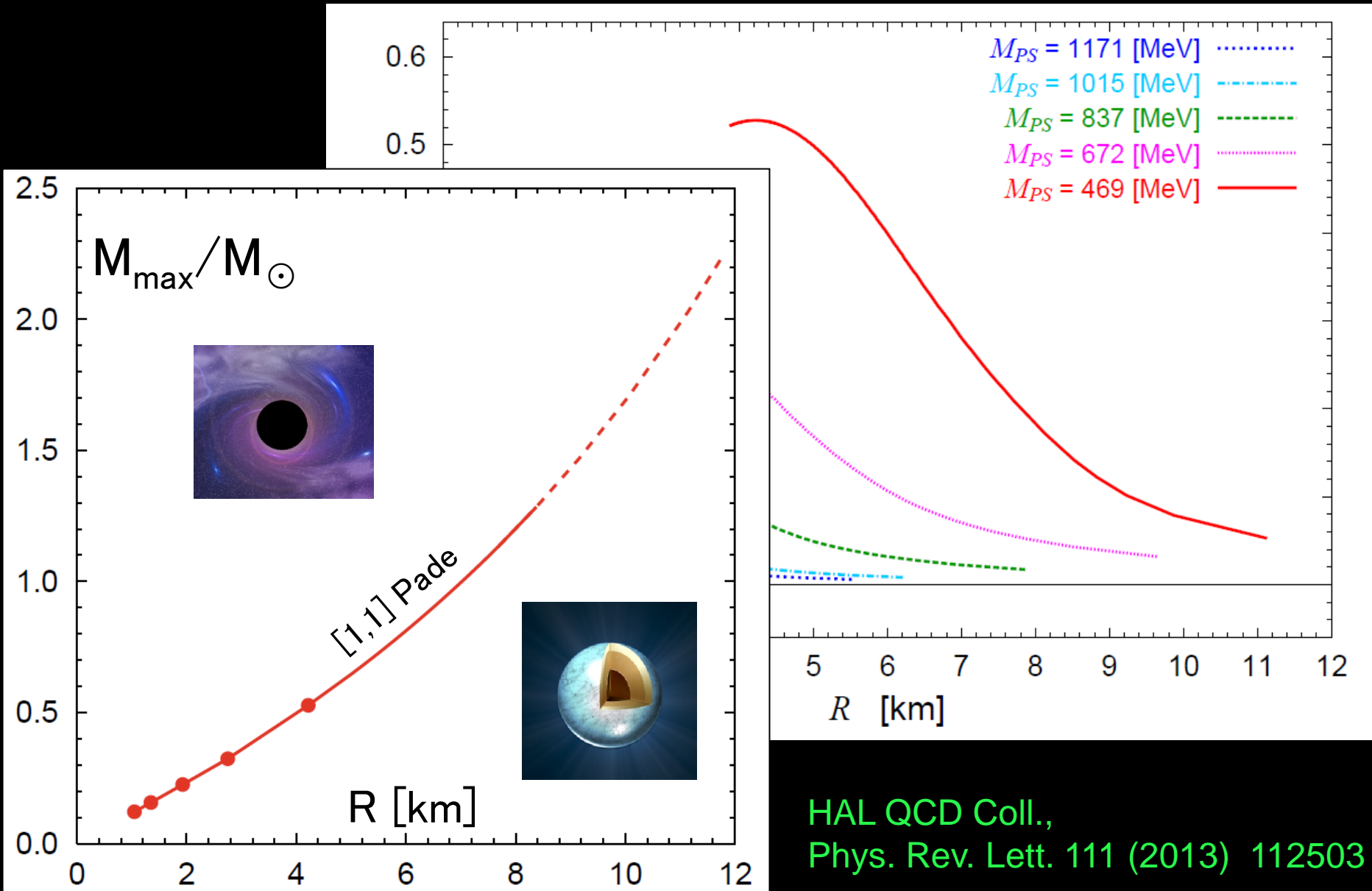
中性子物質



格子QCD計算結果に基づく中性子星



格子QCD計算結果に基づく中性子星

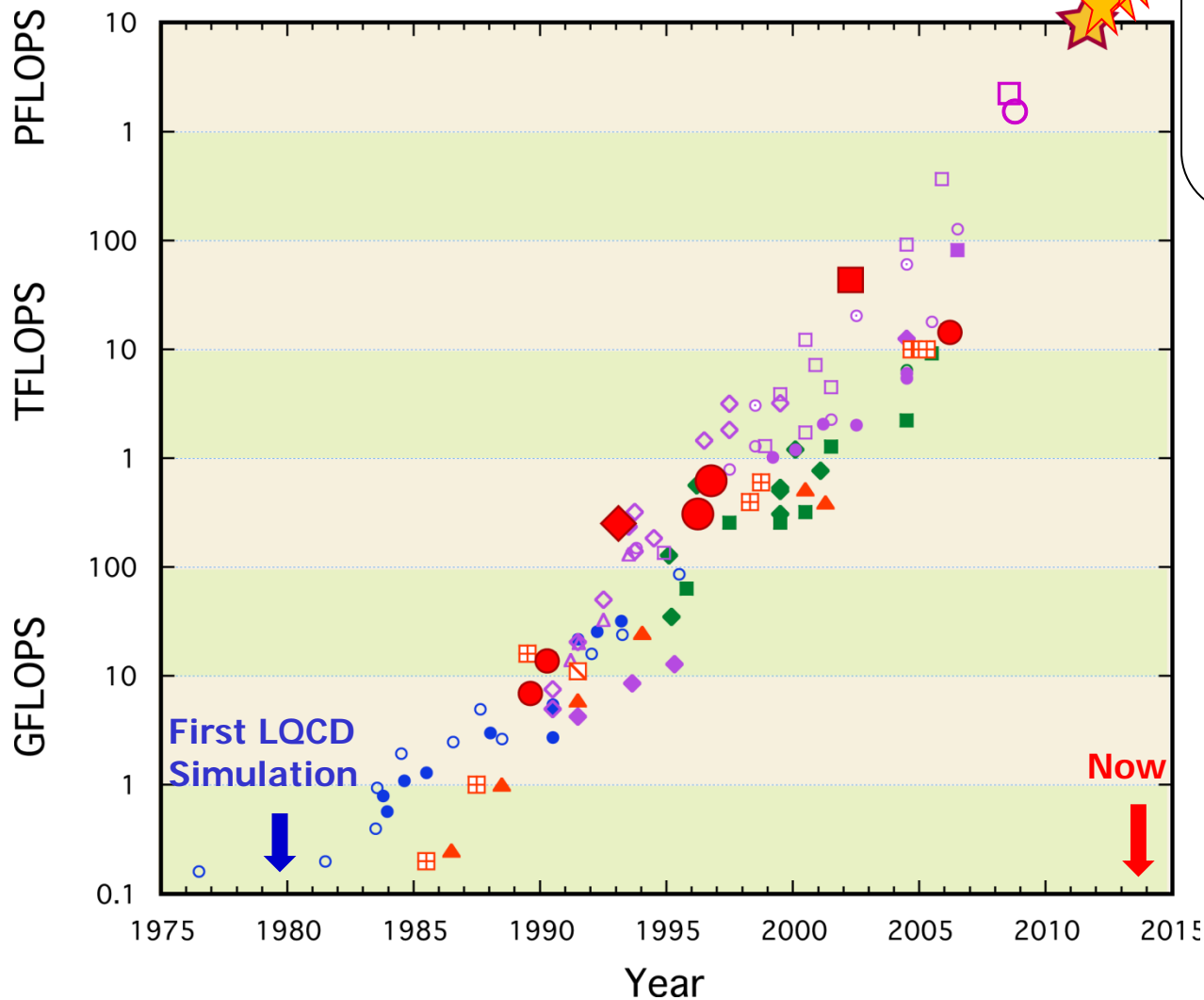


HAL QCD Coll.,
Phys. Rev. Lett. 111 (2013) 112503

高速計算機の進歩

2013 June top5

Tianhe-2 (34 PFlops)
Titan (18 PFlops)
Sequoia (17 PFlops)
K (11 PFlops)
Mira (9 PFlops)



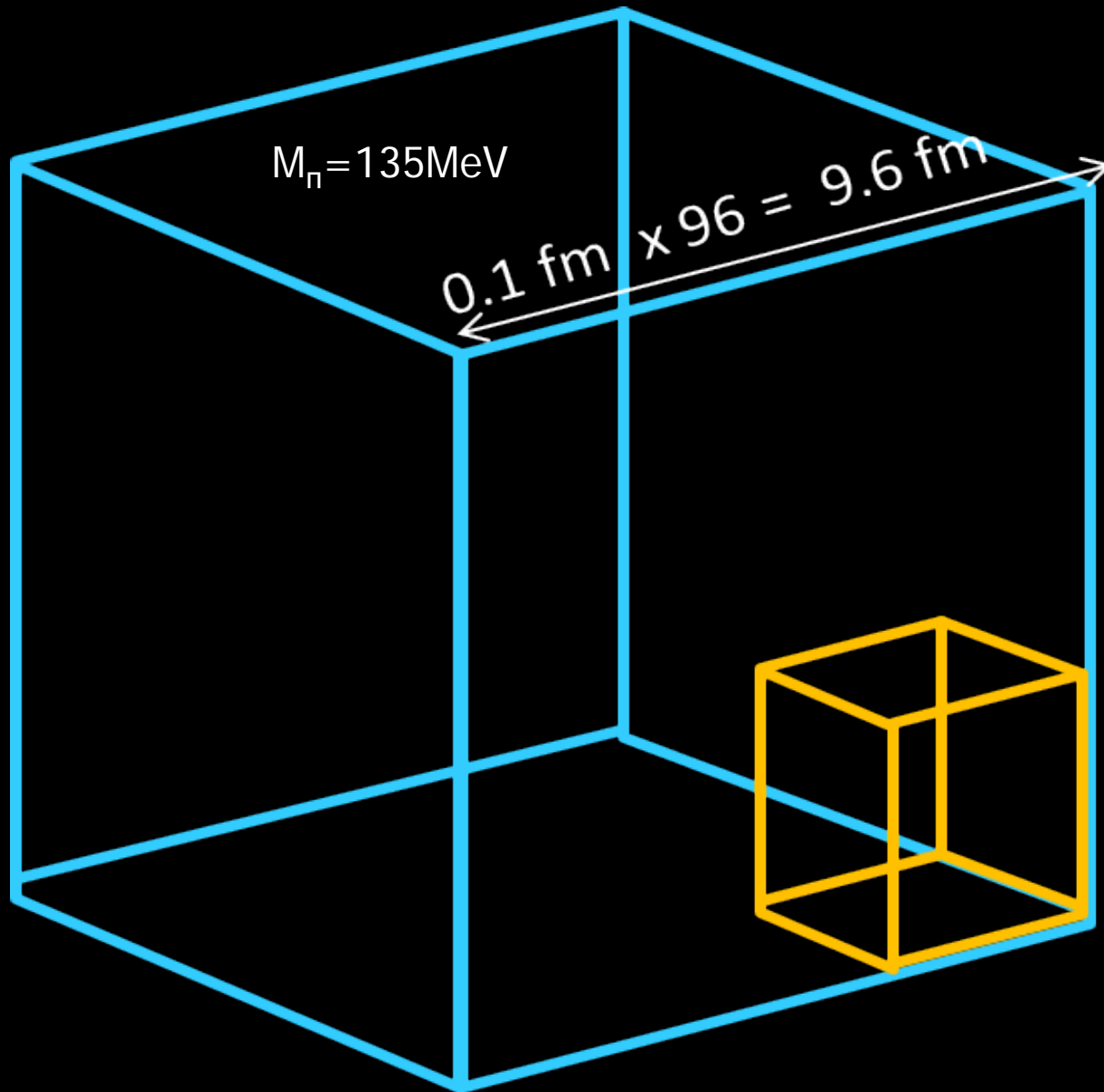
京コンピュータ

(11.28 PFlops, 80,000 CPUs x 8 = 640,000 cores)



京コンピュータ

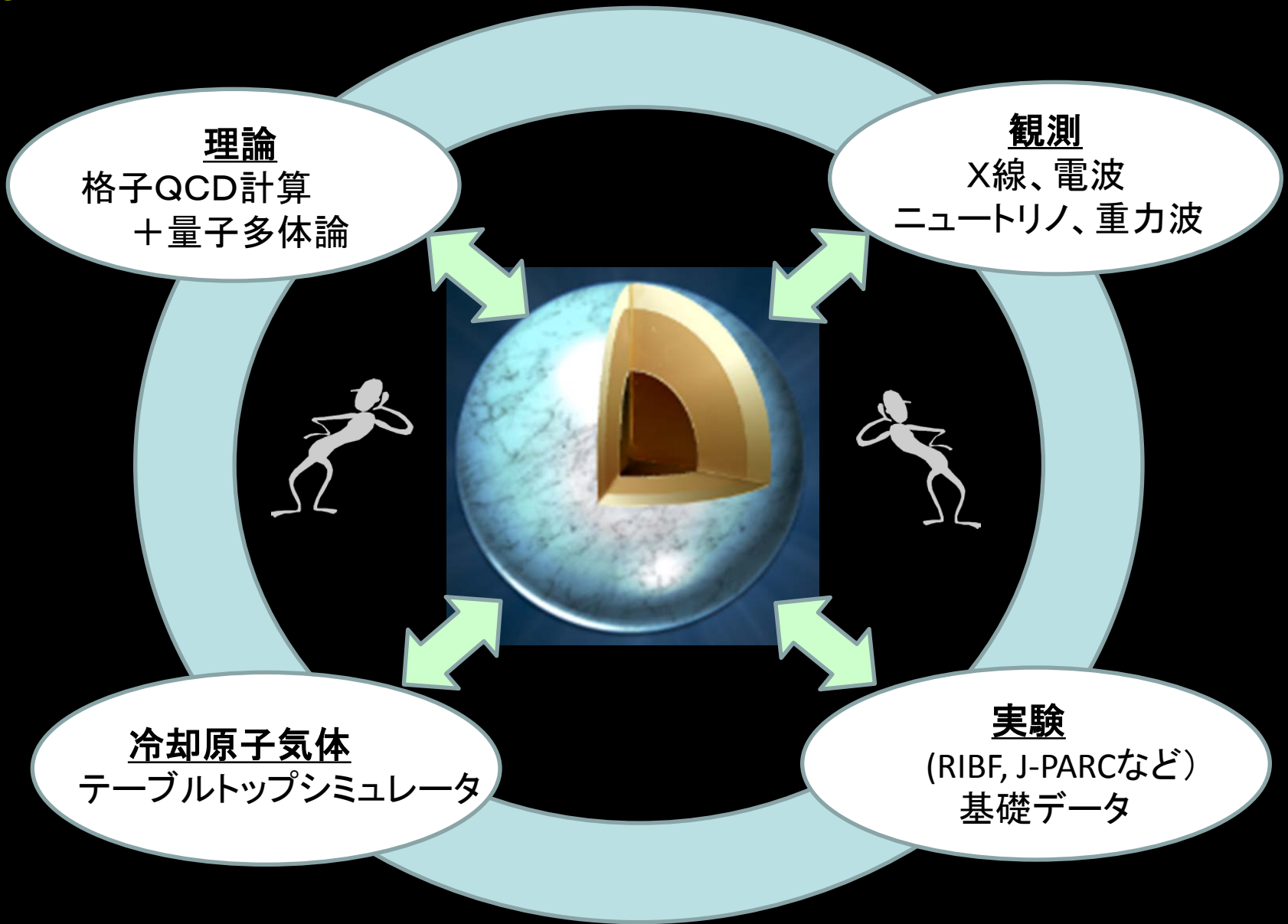
(11.28 PFlops, 80,000 CPUs x 8 = 640,000 cores)



Plan of this Talk

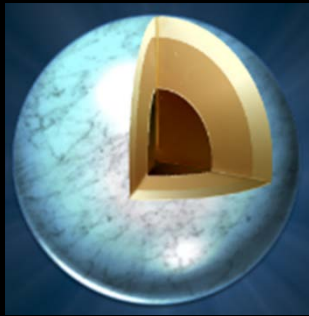
1. 中性子星の基礎
2. 中性子星の質量
3. 中性子星の冷却
4. 中性子星の磁場
5. 格子ゲージ理論と中性子星
6. まとめと展望

まとめ

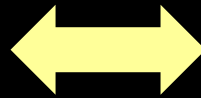


冷却原子を用いた 中性子星の実験室シミュレーション？

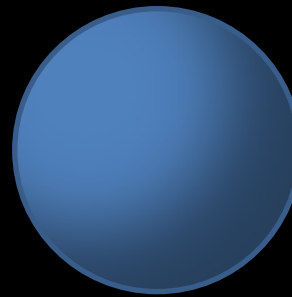
重力



~10km



MOT



~1 mm

- ハドロン相とクォーク相のクロスオーバー
⇔ 冷却 ボース原子-冷却フェルミ原子混合気体
Maeda, Baym & Hatsuda, *Phys. Rev. Lett.* 103 (2009) 085301
- π 中間子凝縮 ⇔ 冷却双極子原子(分子)気体
Maeda, Baym & Hatsuda, *Phys. Rev. A* 87 (2013) 021604(R)