



## Ferromagnetic neutron stars: axial anomaly, dense neutron matter, and pionic wall

Minoru ETO\*, Koji HASHIMOTO†, and Tetsuo HATSUDA+

\* *Department of Physics, Yamagata University, Yamagata 990-8560, Japan*

†*Mathematical Physics Lab., RIKEN Nishina Center, Saitama 351-0198, Japan and*

+*Theoretical Research Division, RIKEN Nishina Center, Saitama 351-0198, Japan*

We show that a chiral nonlinear sigma model coupled to degenerate neutrons exhibits a ferromagnetic phase at high density. The magnetization is due to the axial anomaly acting on the parallel layers of neutral pion domain walls spontaneously formed at high density. The emergent magnetic field would reach the QCD scale  $\sim 10^{19}$  [G], which suggests that the quantum anomaly can be a microscopic origin of the magnetars (highly magnetized neutron stars).

**Magnetars and high density neutron matter.** — The phase diagram of QCD is a mystery to be uncovered. Even though the QCD Lagrangian reveal a specific region at low temperature

One of the promising systems where such a high density region is realized in nature is the deep interior of compact stars, such as the neutron stars. Observations of various properties of these stars should give us crucial constraint on high density matter. In particular, the magnetars, which are considered to be neutron stars with very strong magnetic field  $\sim 10^{15}$ [G] at their surface, are of particular interests [2, 3]. The mechanism

magnetization. If this mechanism takes place inside the core of the neutron stars above certain threshold density, they become magnetars. — Neutral pion domain walls. — We study neutral pions and nucleons with the weinberg parametrization [9]:

$$\mathcal{L} = \bar{N} [i\gamma^\mu (\partial_\mu + i\tau \cdot V_\mu + i\gamma_5 \tau \cdot A_\mu) - m_N] N + \frac{1}{2} |D_\mu \phi|^2 - \frac{1}{2} (m_\pi^2 + \sigma_{\pi N} \bar{N} N) \frac{\phi^2}{1 + \phi^2/4f_\pi^2}. \quad (1)$$

Here  $N$  is the nucleon field (isospin  $SU(2)$  doublet),  $\phi$  is the pion (triplet),  $f_\pi$  is the pion decay constant,  $g_A$  is the axial charge of the nucleon, and  $m_\pi$  is the pion mass.

超弦理論で中性子星？

# 中性子星とハドロン高密度相、 そして超弦理論

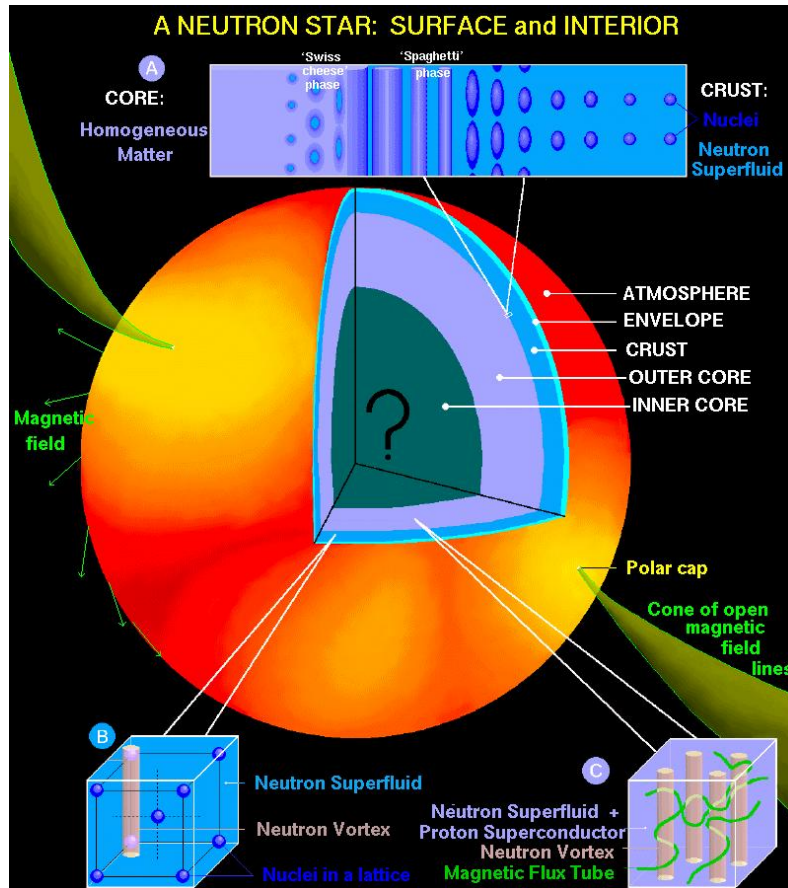


橋本幸士

大阪大学

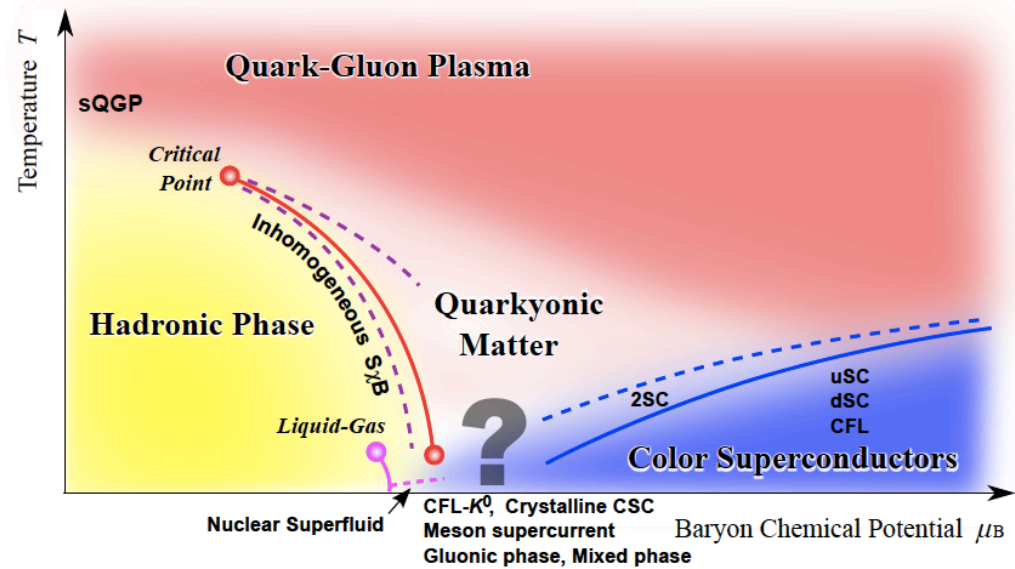
理化学研究所  
橋本数理物理学研究室

# 中性子星の中心部には何があるのか？



[D.Page]

## QCDの相図

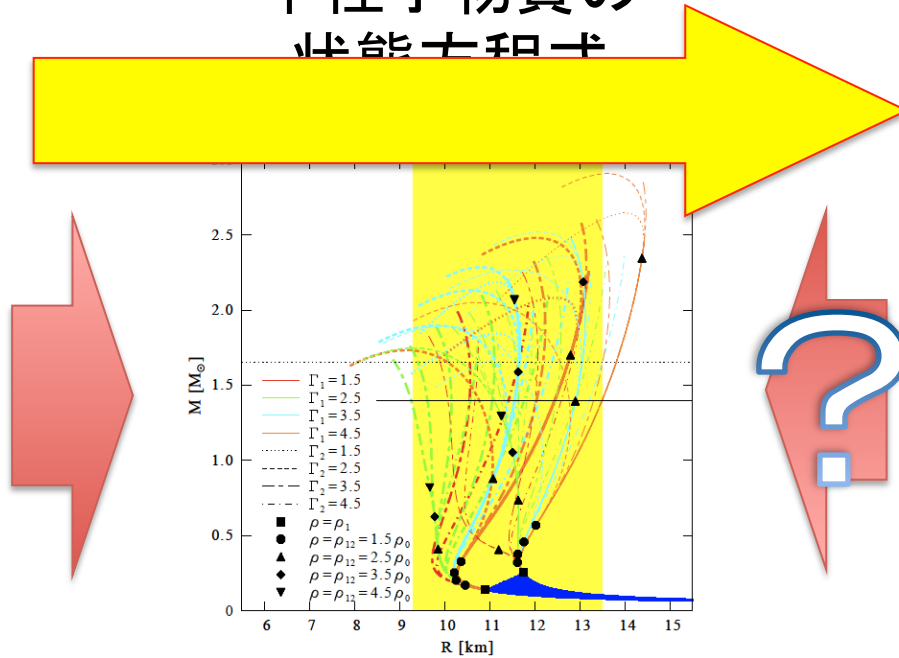


[Fukushima, Hatsuda 1005.4814]

# 観測と理論の接点

観測

中性子物質の  
状態方程式



理論  
(QCD)

[Hebeler et.al (2010 PRL)]

## 超弦理論の数理が、中性子星の理解に役立つ

ロードマップ	1. 超弦理論は役に立つか？	5ページ
	2. 理論をまたぐ数理「双対性」	3ページ
	3. 中性子星への挑戦	5ページ

# この7年ほどで超弦理論は役に立つようになった

私の出版論文  
(ほぼ全てhep-th)

単位なし

超弦理論

1997

単位あり

役に立つ超弦理論

2012

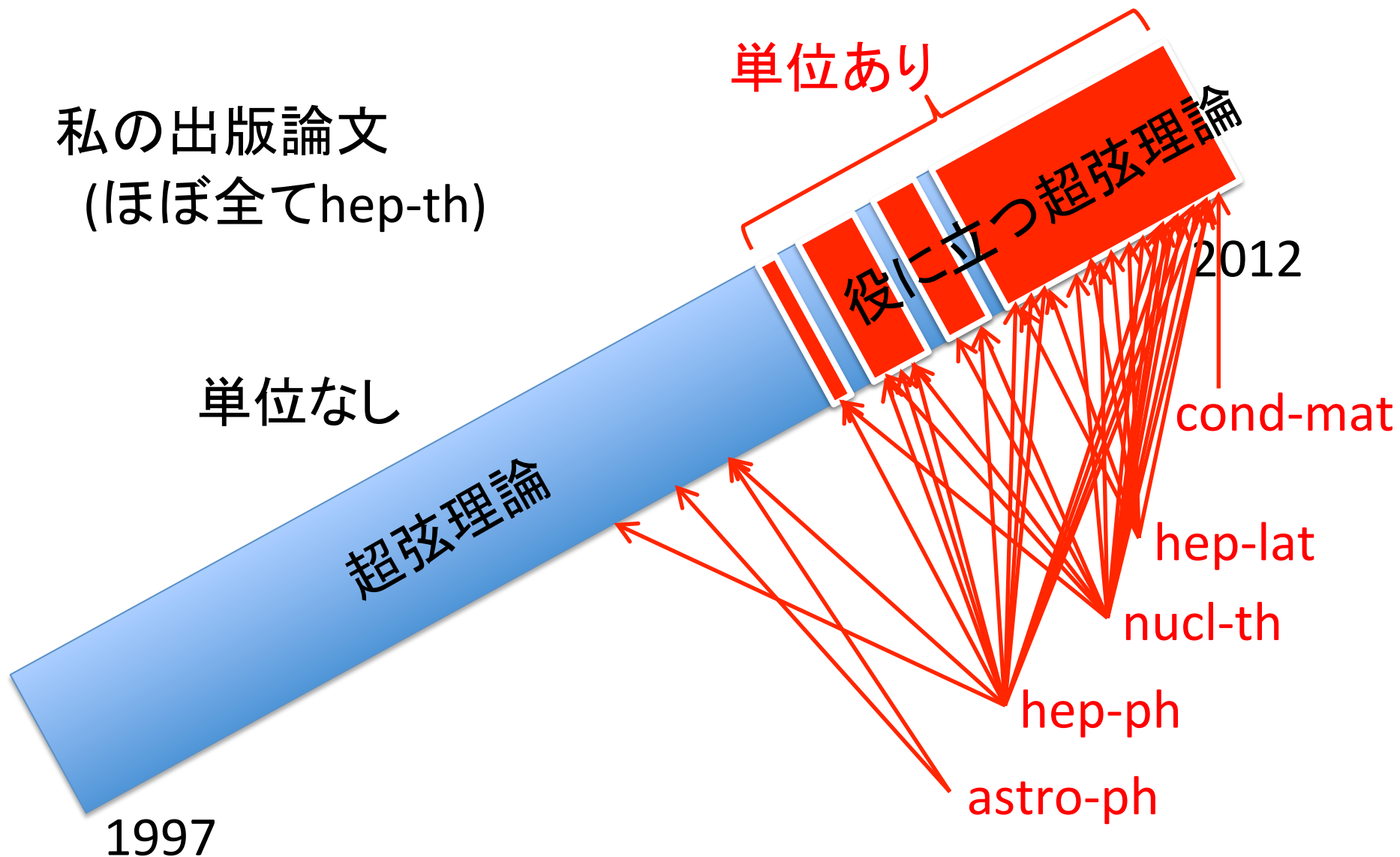
cond-mat

hep-lat

nucl-th

hep-ph

astro-ph



# 数理的フレームワークとしての超弦理論の有用性

等価だが別の物理系に問題を移し替えて(幾何学的に)解く

問題 : 強相関係系、多自由度系、ソリトンなど

注意: 素粒子や場の理論が「ひも」であることは仮定しない

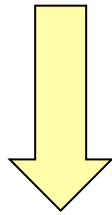
QCD	仮想高次元重力理論
グルーボール メソン バリオン	高次元時空内の 重力励起 高次元時空内の $U(N_f)$ ゲージ理論 高次元時空内の Dブレーン
非閉じ込め相 有限温度 カイラル対称性の破れ 有限バリオン密度	ブラックホール ホーキング温度 $U(N_f)$ 対称性のヒッグス機構 $U(N_f)$ ゲージ理論の電場



# 素粒子と原子核をつなぐ



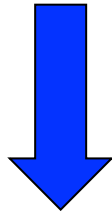
クォーク・グルーオン



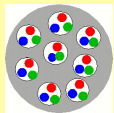
格子QCD



核子、ハドロン

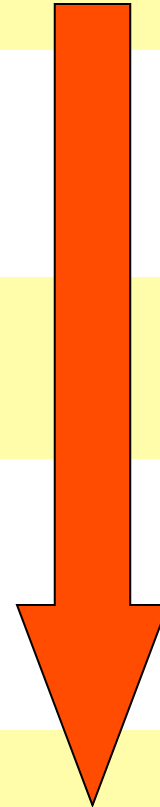


原子核物理



原子核、中性子星

AdS/CFT対応  
(超弦理論)



# 例) 陽子・中性子の半径、モーメント

[Sakai,Sugimoto,KH (0806.3122)]

	超弦理論	実験値	
$\langle r^2 \rangle_{E,p}$	$(0.74 \text{ fm})^2$	$(0.875 \text{ fm})^2$	
$\langle r^2 \rangle_{E,n}$	0	$-0.116 \text{ fm}^2$	
$\langle r^2 \rangle_A^{1/2}$	0.54 fm	0.674 fm	
$\mu_p$	2.2	2.79	
$\mu_n$	-1.3	-1.91	
$g_A$	0.73	1.27	
$g_{\pi NN}$	7.5	13.2	
$g_{\rho NN}$	5.8	4.2 - 6.5	格子QCD数値計算
$\mu_{\Delta^{++}}$	4.4	3.7 - 7.5	4.99
$\mu_{\Delta^+}$	2.3	-	2.49
$\mu_{\Delta^0}$	0.20	-	0.06
$\mu_{\Delta^-}$	-1.9	-	-2.45

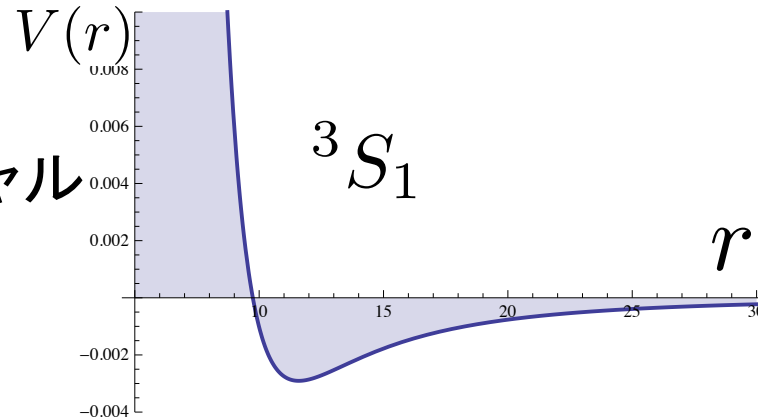
インプット:  $m_\rho, f_\pi$

# 例) 核力

[Sakai,Sugimoto,KH (0901.4449)]

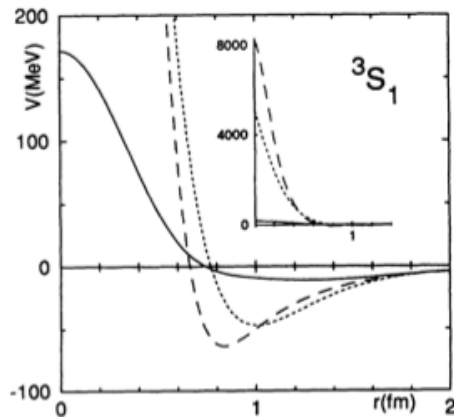
超弦理論:

核子間  
ポテンシャル

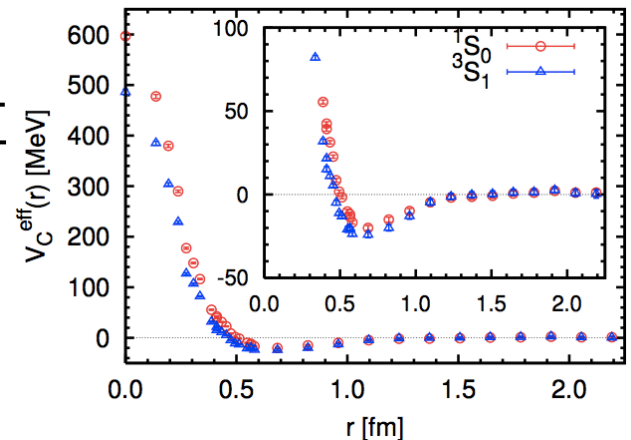


$r$  (核子間距離)

実験



格子QCD  
数値計算



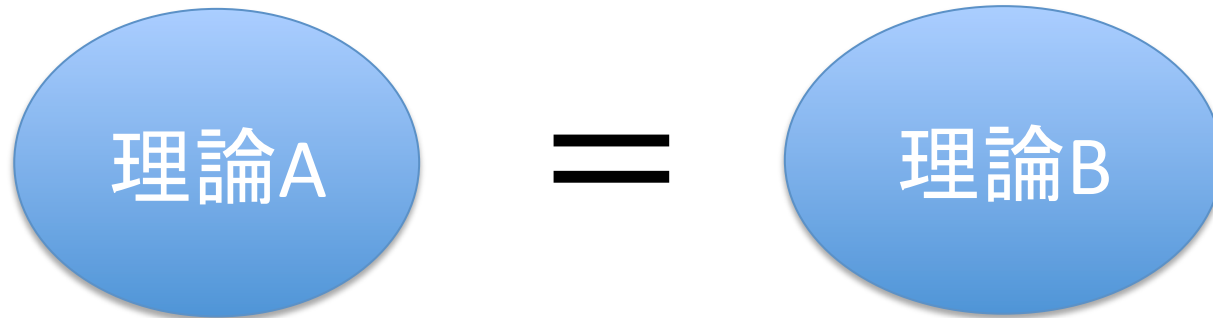
[Stoks,Klomp,Terheggen,deSwart ('94)]

[Aoki,Ishii,Hatsuda ('07)]

## 超弦理論の数理が、中性子星の理解に役立つ

ロードマップ	1. 超弦理論は役に立つか？	5ページ
	2. 理論をまたぐ数理「双対性」	3ページ
	3. 中性子星への挑戦	5ページ

# 双対性 : 異なる理論の等価性



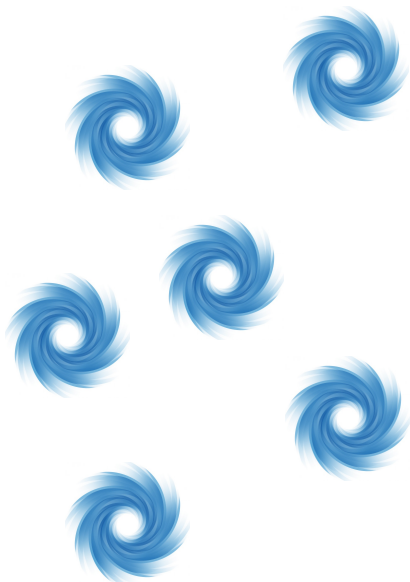
量子論的に強結合(強相関)

非線形が強く摂動展開不可

多自由度で本質的自由度が不明

弱結合、解ける

# 次元の異なる理論の等価性



多数の渦の力学を記述するためには..

A) 秩序変数の場の理論

$$S = \int d^3x (|\partial_\mu \phi(x, y, t)|^2 - V(|\phi|))$$

B) 点粒子的な渦の理論

$$S = \int dt \left[ \sum_k (\dot{X}_{(k)}^i(t))^2 + \sum_{k_1 \neq k_2} V(|X_{(k_1)}(t) - X_{(k_2)}(t)|) \right]$$

完全に等価になるためには？

渦数(トポロジカル数)を固定

渦の近傍のみを観察する？

渦をたくさん持ってきて重ね合わせる？

低エネルギー一励起のみを考える？

具体例:

インスタントンのADHM構成

モノポールのNahm構成

# 超弦理論の双対性: AdS/CFT 対応

Dブレーン: 超弦理論における渦のようなもの

- ・ 外から見ると、質量や電磁荷を持つ
- ・ Dブレーン上の自由度はゲージ理論

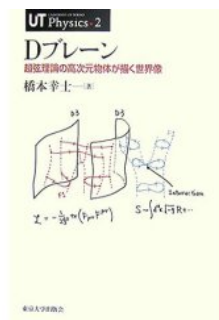
AdS/CFT対応(ゲージ重力対応):

A) ゲージ理論 強結合、ゲージ群の階数は大きい

$$S = -\frac{1}{2g^2} \int d^4x \operatorname{tr} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + \dots$$

B) 重力理論 弱結合、曲がった高次元時空

$$S = \frac{1}{16\pi G_N} \int d^5x \sqrt{-g} (R + 2\Lambda) + \dots \quad [\text{Maldacena '98}]$$

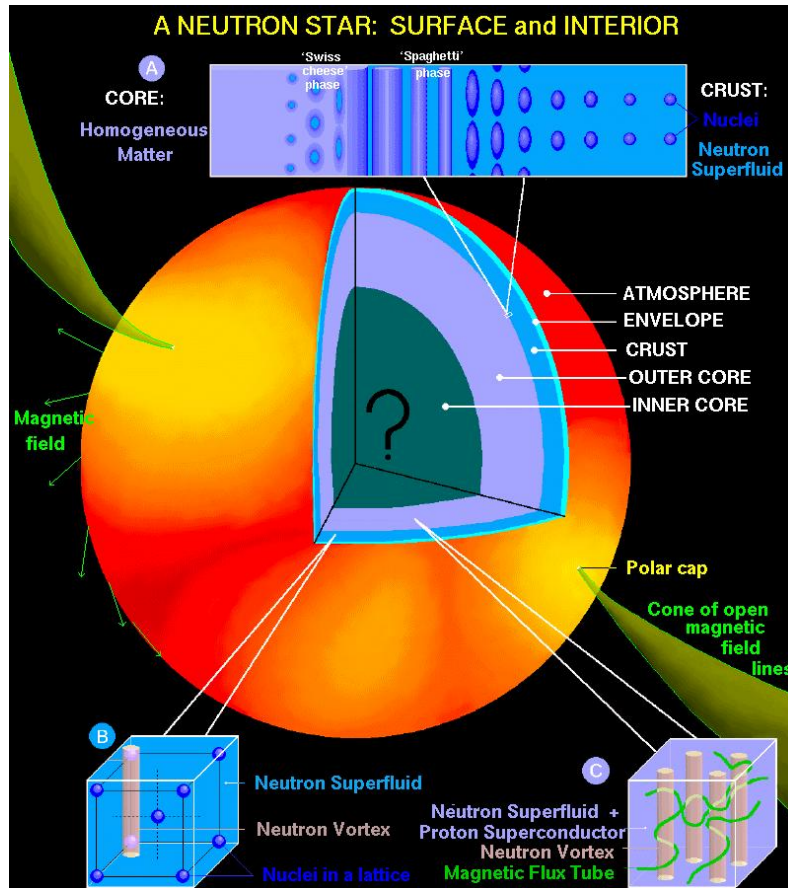


## 超弦理論の数理が、中性子星の理解に役立つ

ロードマップ	1. 超弦理論は役に立つか？	5ページ
	2. 理論をまたぐ数理「双対性」	3ページ
	3. 中性子星への挑戦	5ページ

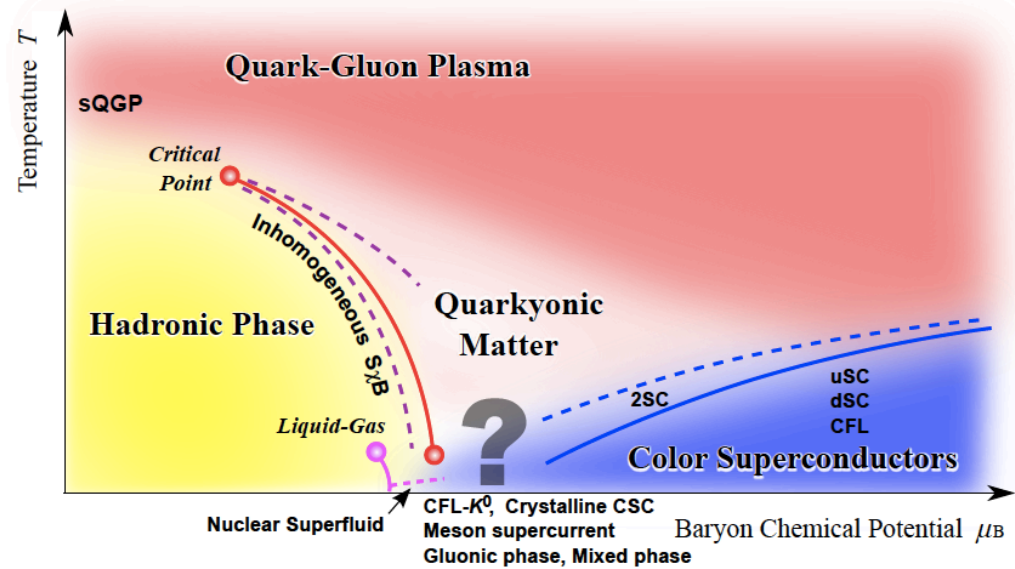


# 中性子星の中心部には何があるのか？



[D.Page]

## QCDの相図



[Fukushima, Hatsuda 1005.4814]

# 仮想QCD から 現実QCD へ

(1) 超対称性が4つあるゲージ理論 (N=4 Super Yang-Mills)



(2) 超対称性が2つあるゲージ理論 + クォーク (N=2 Super QCD)



(3) 超対称性がない SU(N) ゲージ理論 + クォーク (Large N QCD)



(4) 超対称性がない SU(3) ゲージ理論 + クォーク (QCD)

# 仮想QCD から 現実QCD へ (1)

(1) 超対称性が4つあるゲージ理論 (N=4 Super Yang-Mills)

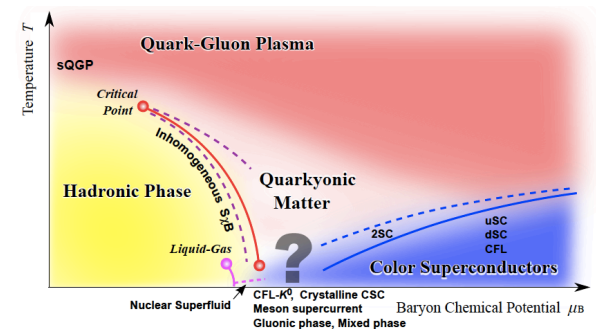
グルーオンセクタ: グルーオン + 4グルイーノ + 6スカラー

クォークセクタ: 入れられない

温度

グルーオン  
プラズマ相

バリオン数 化学ポテンシャル(密度)

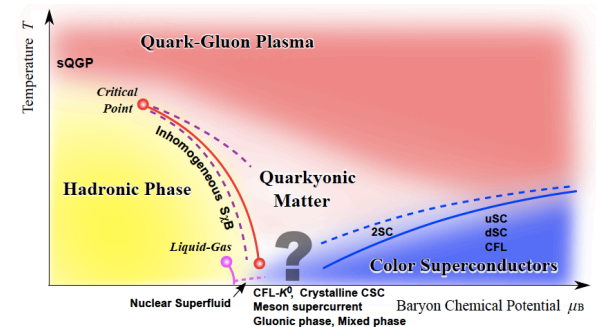
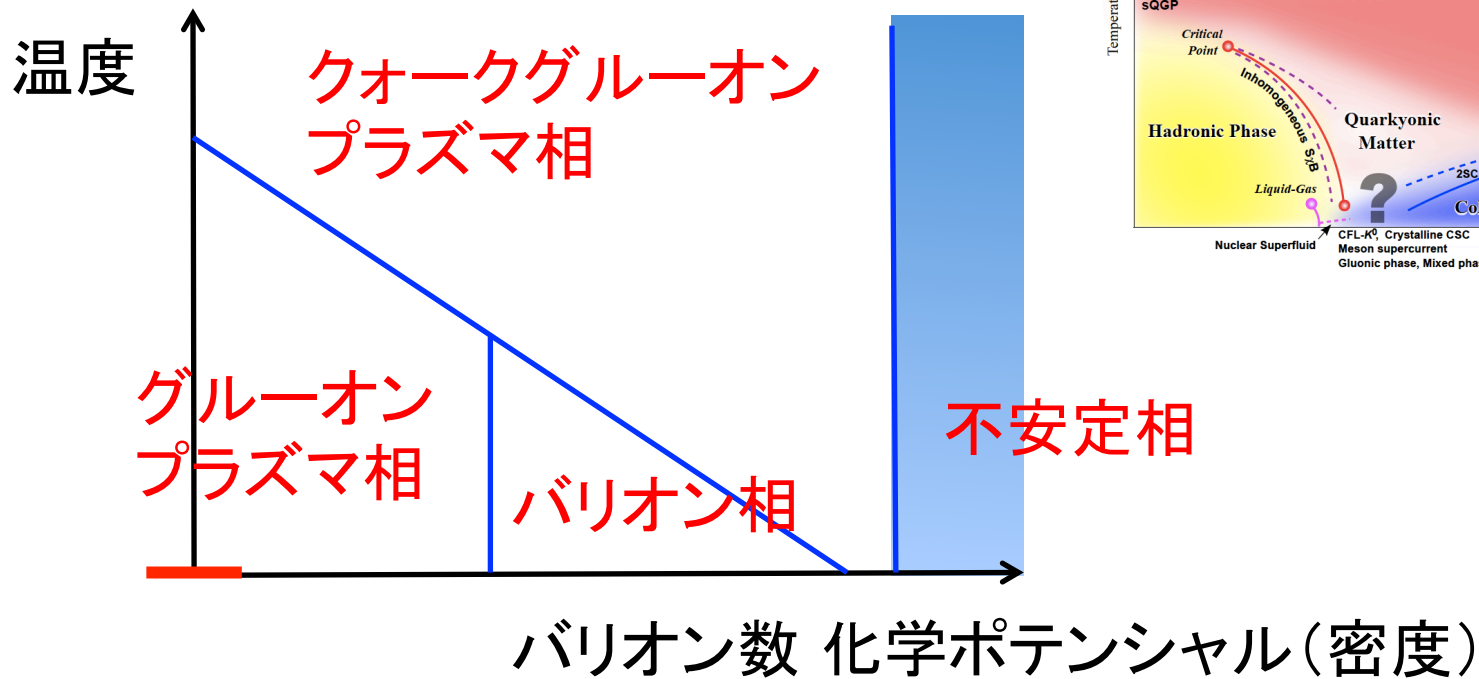


# 仮想QCD から 現実QCD へ (2)

(2) 超対称性が2つあるゲージ理論 (N=2 Super QCD)

グルーオンセクタ: グルーオン + 2グルイーノ + 2スカラー

クォークセクタ: クォーク + スクォーク

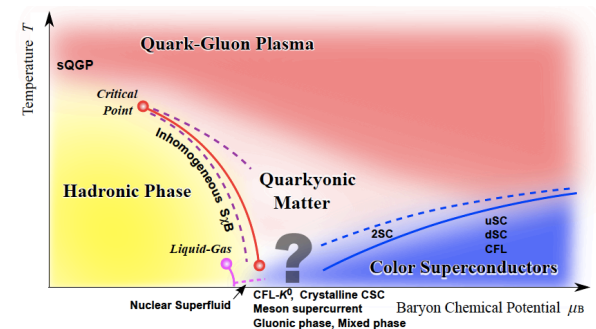
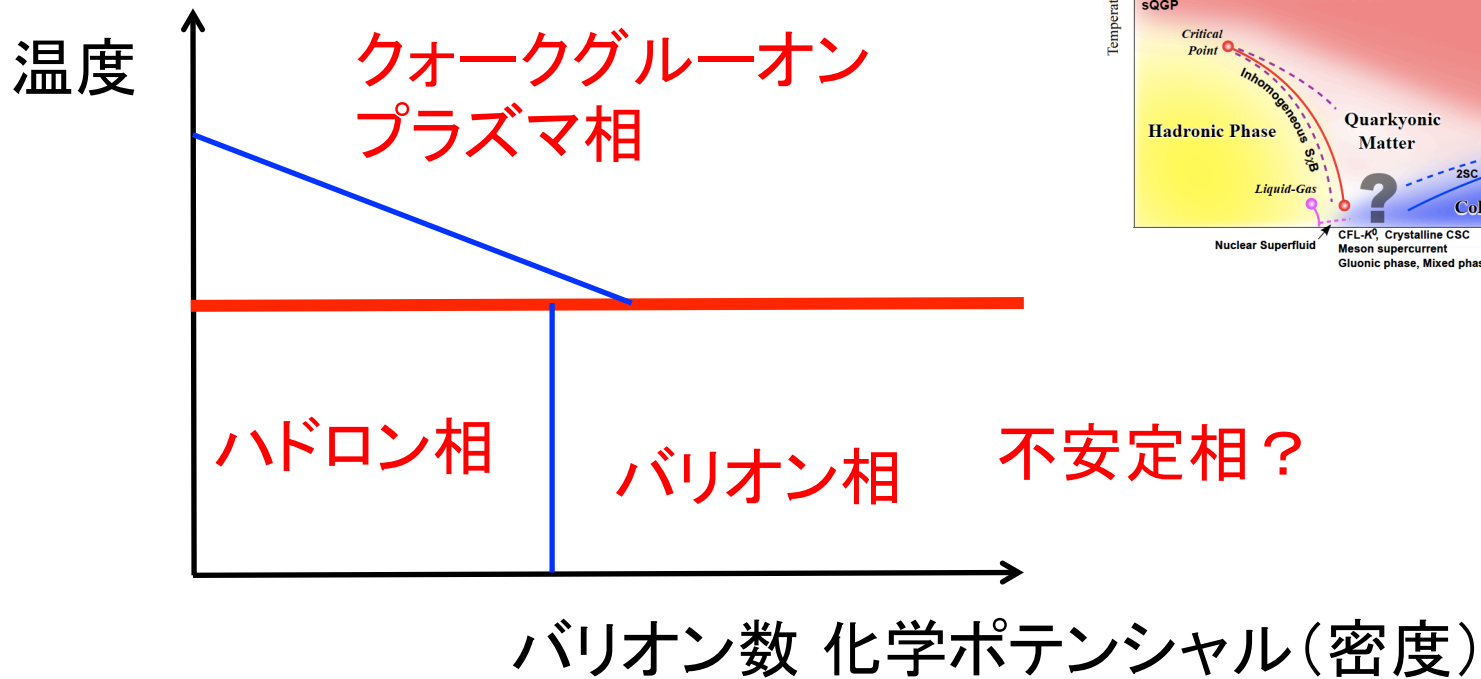


# 仮想QCD から 現実QCD へ (3)

(3) 超対称性がない SU(N) ゲージ理論 + クォーク (Large N QCD)

グルーオンセクタ: グルーオン

クォークセクタ: クォーク



# 仮想QCD から 現実QCD へ (4)

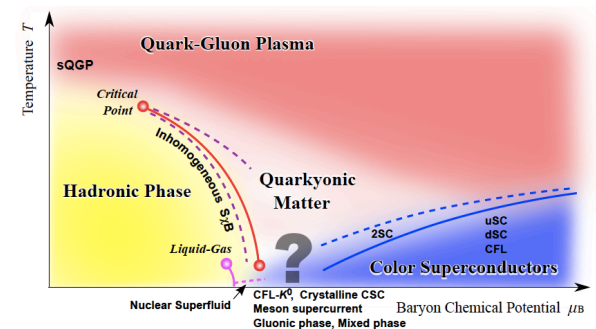
(4) 超対称性がない SU(3) ゲージ理論 + クォーク (QCD)

グルーオンセクタ: グルーオン

クォークセクタ: クォーク



挑戦



バリオン数 化学ポテンシャル (密度)



## この数理が、中性子星の理解に役立つ

### ロードマップ

1. 超弦理論は役に立つか？ 5ページ
2. 理論をまたぐ数理「双対性」 3ページ
3. 中性子星への挑戦 5ページ

