

超弦理論で物性を解く

橋本幸士(阪大／理研)

Preprint typeset in JHEP style - HYPER VERSION

OU-HET-790
RIKEN-MP-75

Vacuum Instability in Electric Fields via AdS/CFT: Euler-Heisenberg Lagrangian and Planckian Thermalization

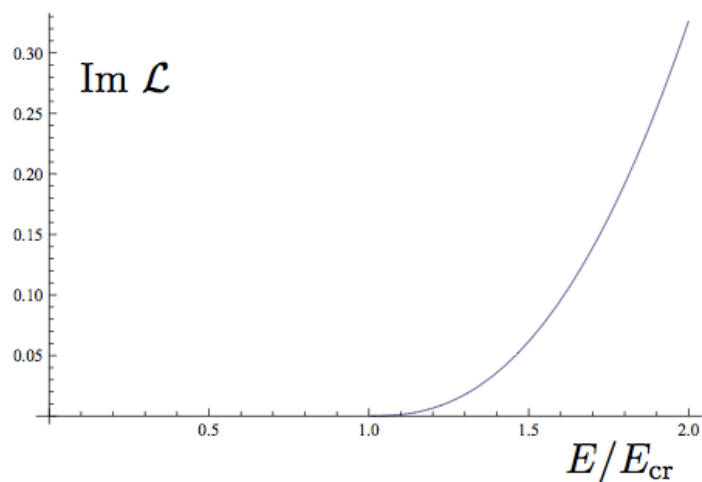
Koji Hashimoto^{1*} and Takashi Oka²

¹ Department of Physics, Osaka University, Toyonaka, Osaka 560-0043, Japan
E-mail: [koji\(at\)phys.sci.osaka-u.ac.jp](mailto:koji(at)phys.sci.osaka-u.ac.jp)

² Department of Applied Physics, University of Tokyo, Tokyo 113-8656, Japan
E-mail: [oka\(at\)ap.t.u-tokyo.ac.jp](mailto:oka(at)ap.t.u-tokyo.ac.jp)

h] 17 Sep 2013

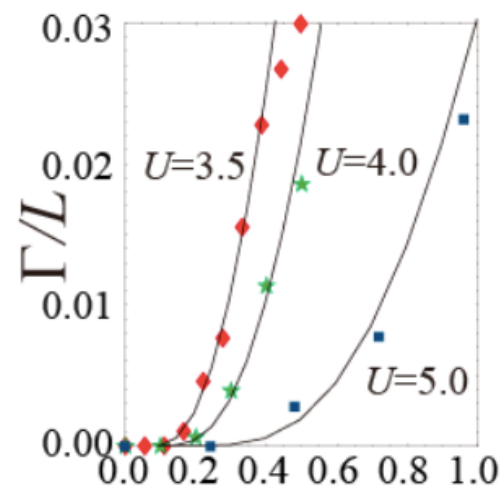
超対称QCD



[Oka, KH to appear]

QCD物性の問題

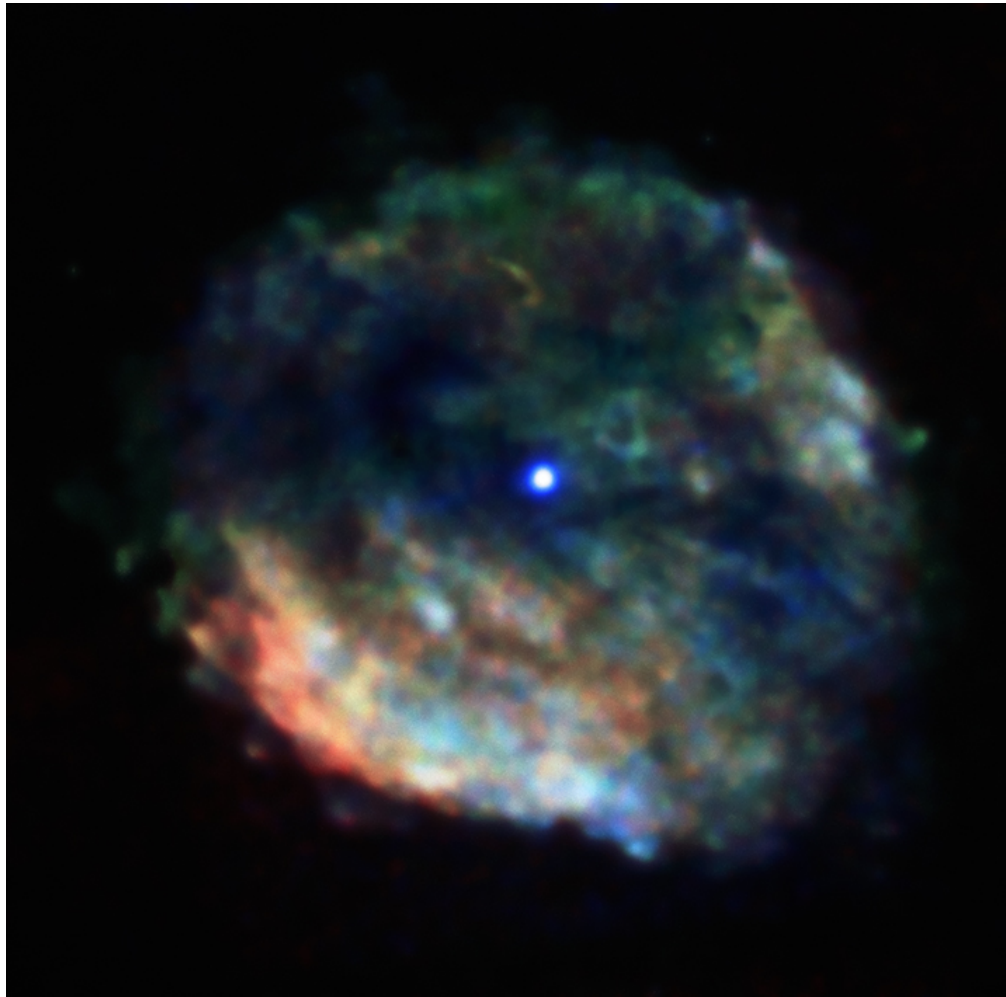
1次元モット絶縁体



[Oka, Aoki, PRL 95 (2005) 137601]

物性の問題

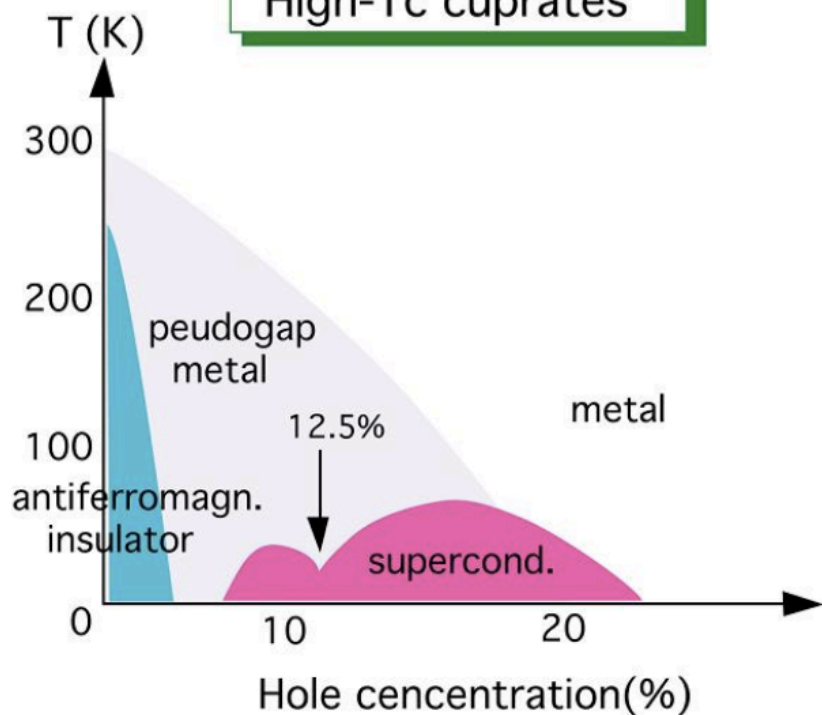
中性子星の中心部には何があるのか？



超新星残骸RCW103

QCD物性：クォーク物理のフロンティア

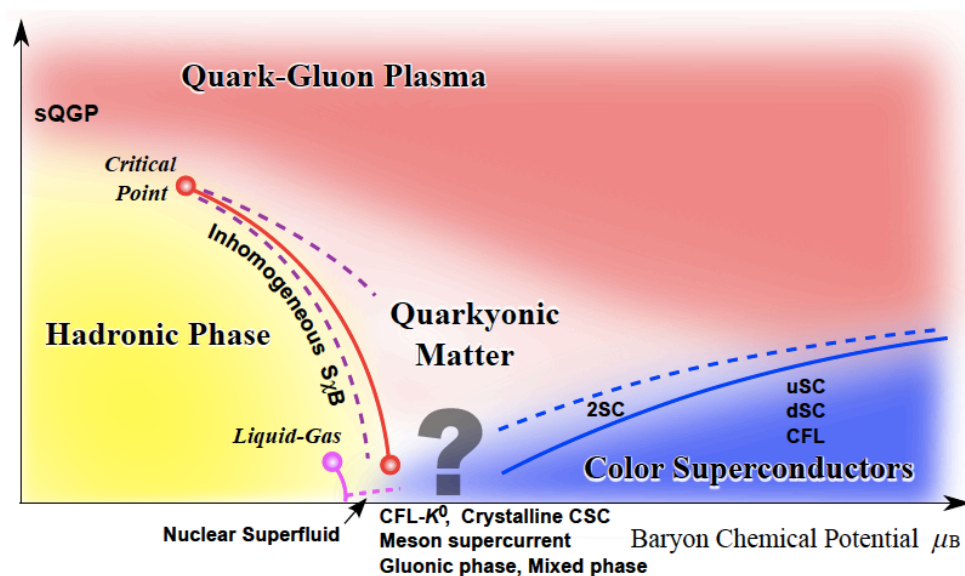
Phase diagram of High-Tc cuprates



[東大藤森研講義録]

$$\mathcal{L}_{\text{QCD}} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu}^a F^{a\mu\nu} + \bar{\psi}_i (i\gamma^\mu D_\mu - m_i) \psi_i$$

QCD(量子色力学)の相図

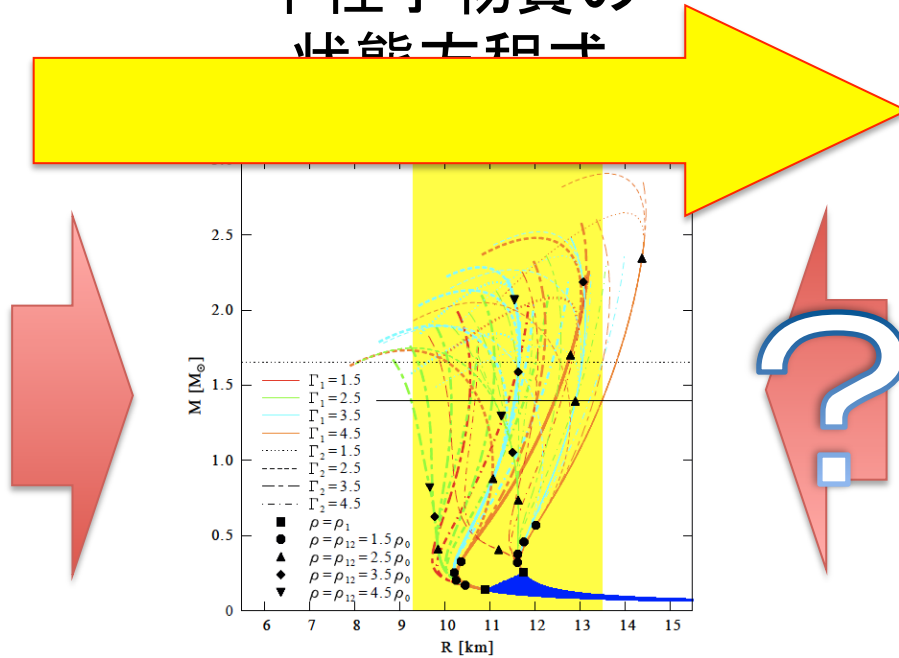


[Fukushima, Hatsuda 1005.4814]

観測と理論の接点

観測

中性子物質の
状態方程式



理論
(QCD)

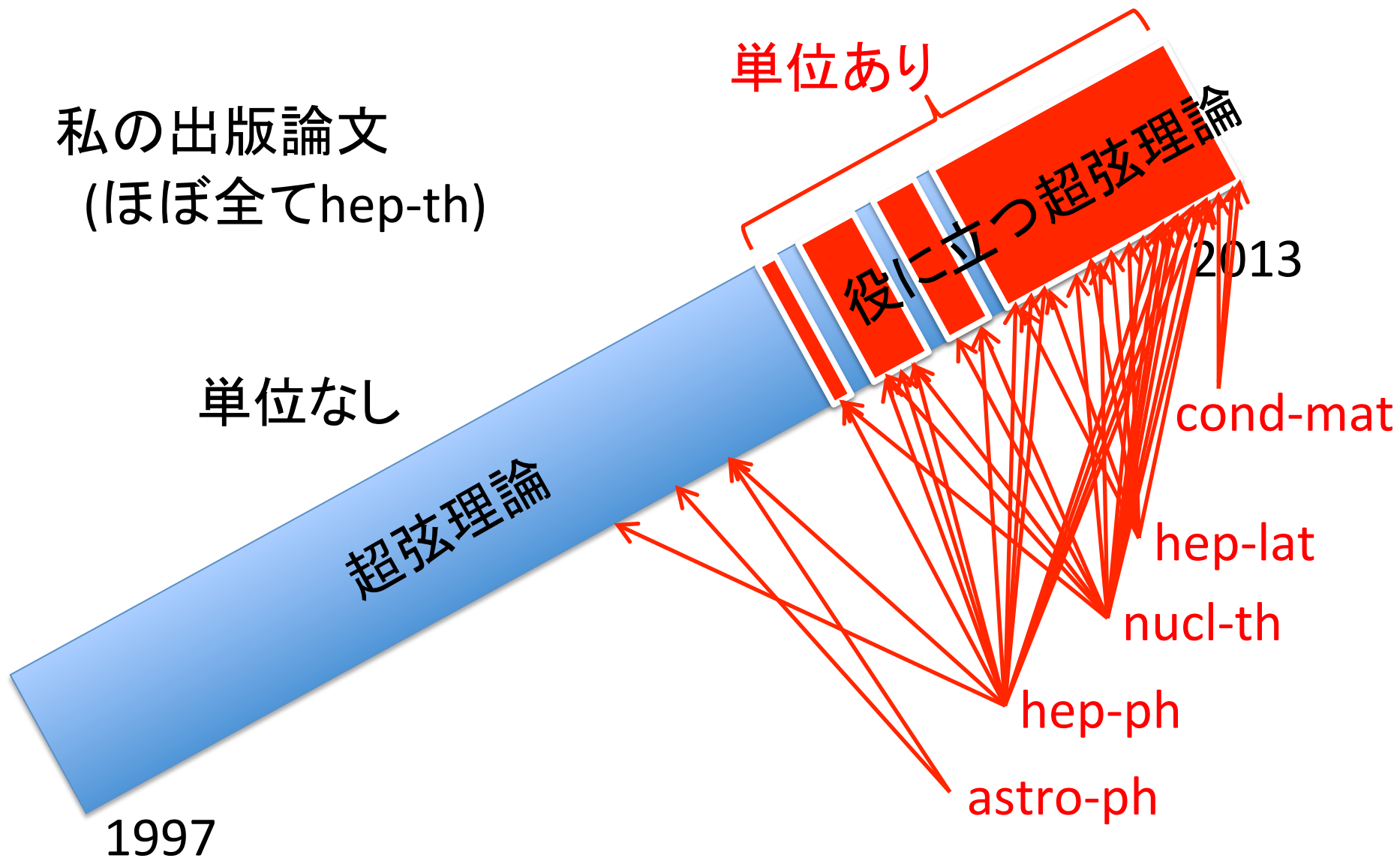
[Hebeler et.al (2010 PRL)]

超弦理論の数理が、強相関系を解明する

ロードマップ	1. 超弦理論は役に立つか？	7ページ
	2. 理論をまたぐ数理「双対性」	4ページ
	3. 中性子星への挑戦	7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

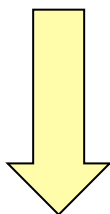
私の出版論文
(ほぼ全てhep-th)



素粒子と原子核の断絶



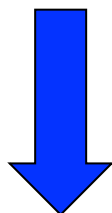
クォーク・グルーオン



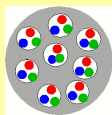
格子QCD



核子、ハドロン

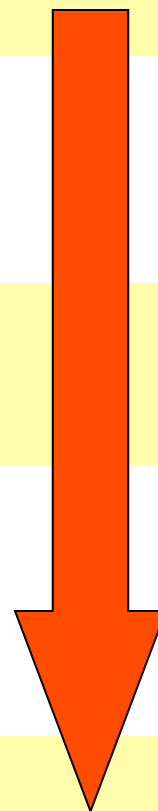


原子核物理



原子核、中性子星

超弦理論



断絶の原因：QCDが強結合で計算できない

クォーク・グルーオンを記述するQCDの作用は、単純だが**非線形**

$$\mathcal{L}_{\text{QCD}} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu}^a F^{a\mu\nu} + \bar{\psi}_i (i\gamma^\mu D_\mu - m_i) \psi_i$$

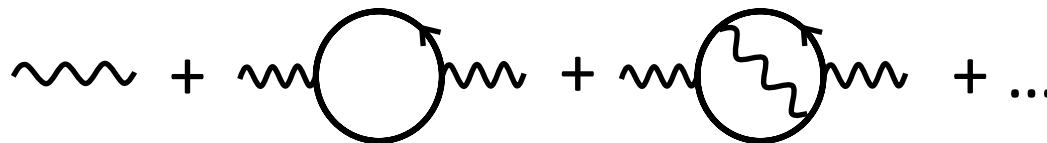
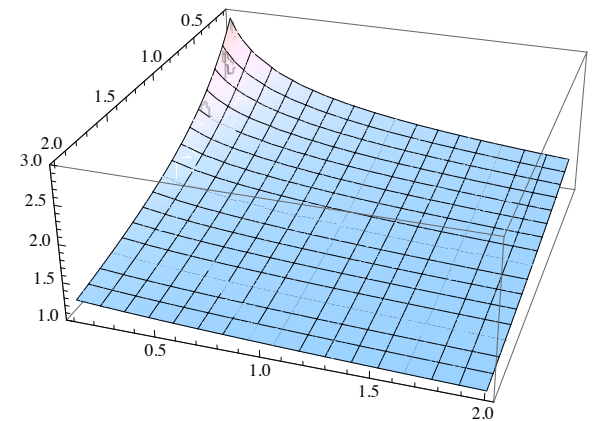
非線形性が強いと(強結合)、摂動計算が不可能

線形 $\int_{-\infty}^{\infty} dx e^{-mx^2} = \sqrt{\frac{\pi}{m}}$

非線形 $\int_{-\infty}^{\infty} dx e^{-mx^2 - gx^4}$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} dx e^{-mx^2} \left(1 - gx^4 + \frac{g^2 x^8}{2} + \dots \right)$$
$$= \sqrt{\frac{\pi}{m}} \left(1 - \frac{3g}{4m^2} + \frac{105g^2}{32m^4} + \dots \right) \quad \text{摂動}$$

どうする？ 数値計算？



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

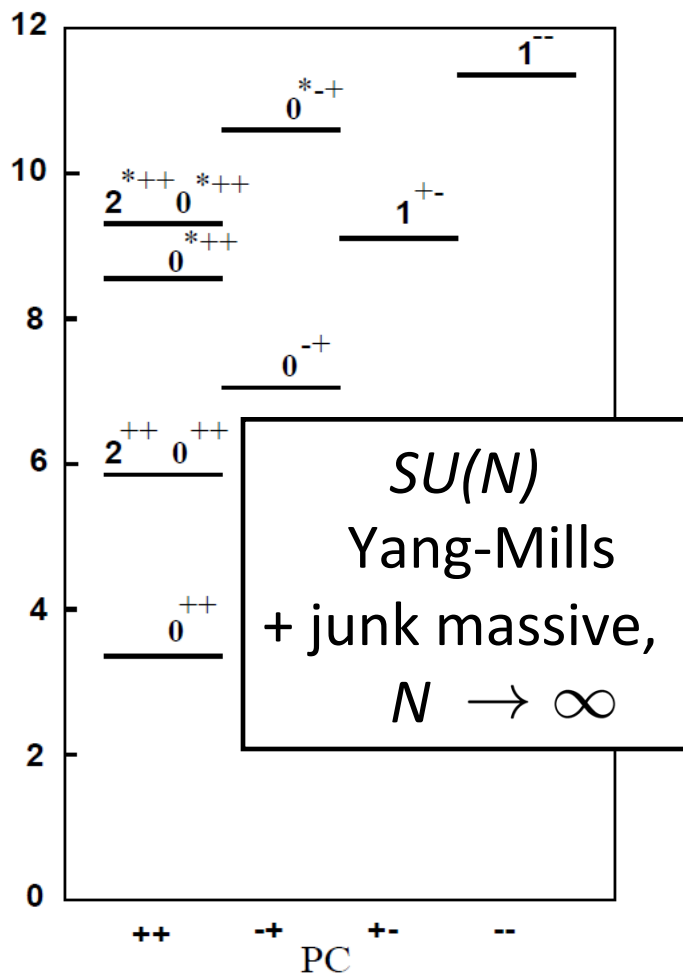
問題 : 強相関係系、多自由度系、ソリトンなど

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	絶縁体	仮想高次元重力理論
グルーボール メソン バリオン	フォノン エキシトン 不純物	高次元の重力励起 高次元の $U(N_f)$ ゲージ理論 高次元の Dブレーン
非閉じ込め相 有限温度 バリオン密度 プラズマ生成	伝導相 熱浴 電荷密度 熱化	ブラックホール ホーキング温度 $U(N_f)$ ゲージ理論の電場 事象の地平面の形成

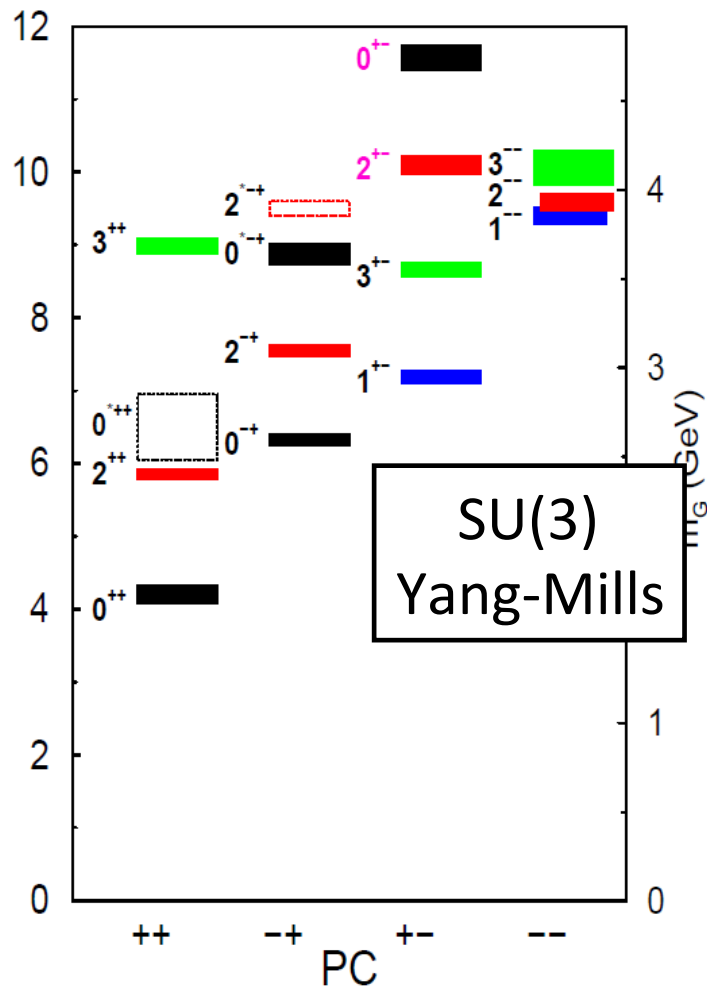
超弦理論の数理は スパコンと比肩

超弦理論



[Brower, Mathur, Tan (03)]

スパコン



[Morningstar, Peardon (99)]

例) 陽子・中性子の半径、モーメントが計算できる

[Sakai,Sugimoto,KH (0806.3122)]

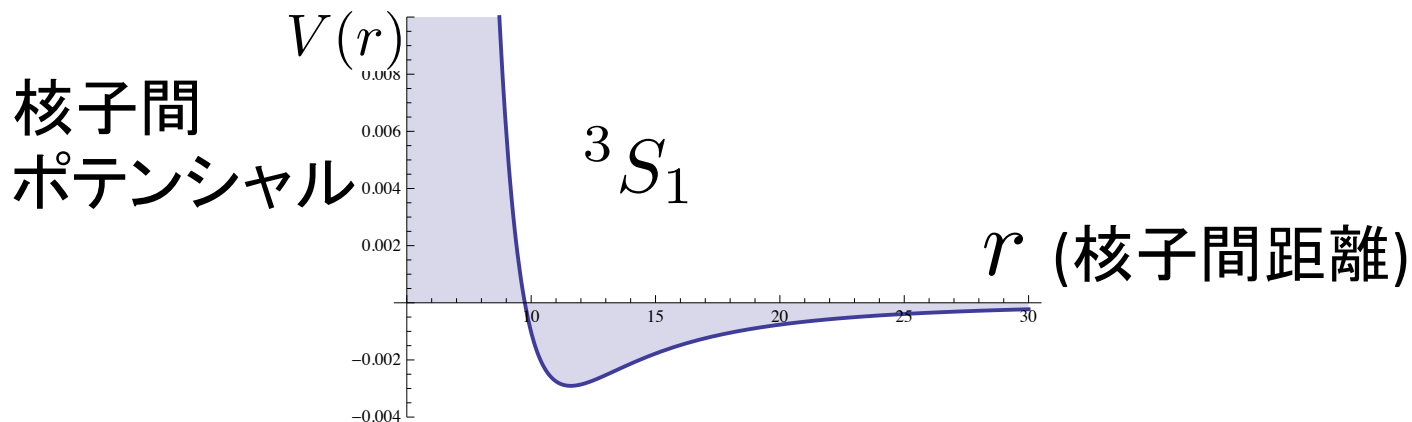
	超弦理論	実験値	
$\langle r^2 \rangle_{E,p}$	$(0.74 \text{ fm})^2$	$(0.875 \text{ fm})^2$	
$\langle r^2 \rangle_{E,n}$	0	-0.116 fm^2	
$\langle r^2 \rangle_A^{1/2}$	0.54 fm	0.674 fm	
μ_p	2.2	2.79	
μ_n	-1.3	-1.91	
g_A	0.73	1.27	
$g_{\pi NN}$	7.5	13.2	
$g_{\rho NN}$	5.8	4.2 - 6.5	格子QCD数値計算
$\mu_{\Delta^{++}}$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

インプット: m_ρ, f_π

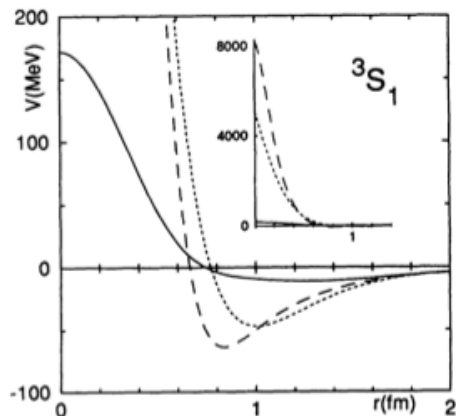
例) 陽子・中性子の反発力が計算できる

[Sakai,Sugimoto,KH (0901.4449)]

超弦理論:

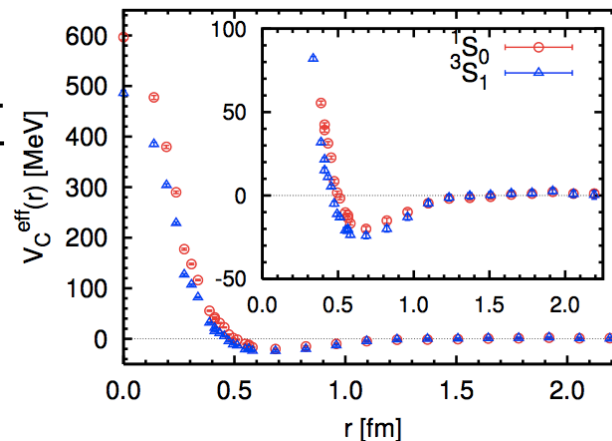


実験



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

格子QCD
数値計算

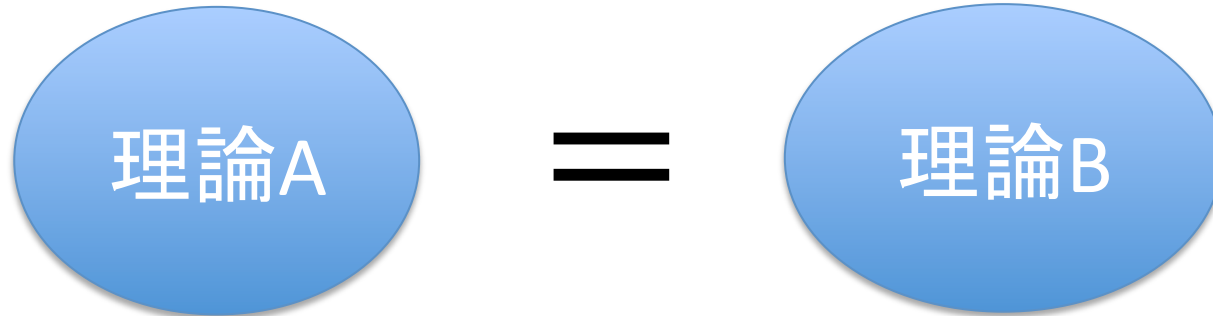


[Aoki,Ishii,Hatsuda ('07)]

超弦理論の数理が、強相関系を解明する

ロードマップ	1. 超弦理論は役に立つか？	7ページ
	2. 理論をまたぐ数理「双対性」	4ページ
	3. 中性子星への挑戦	7ページ

双対性 : 異なる理論の等価性



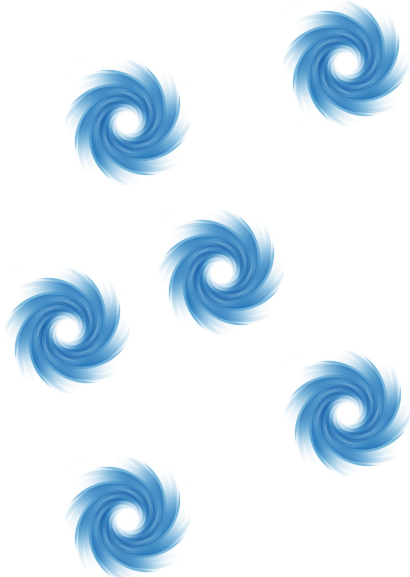
量子論的に強結合(強相関)

弱結合、解ける

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

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

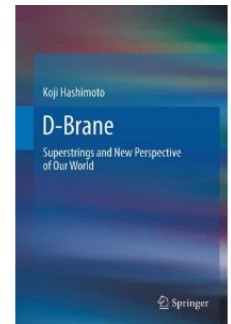
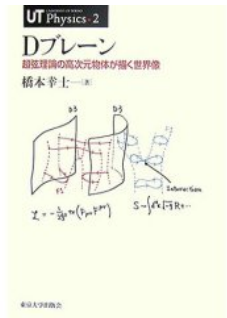
AdS/CFT対応(ゲージ重力対応):

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(超弦理論) **弱結合**、曲がった高次元時空

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

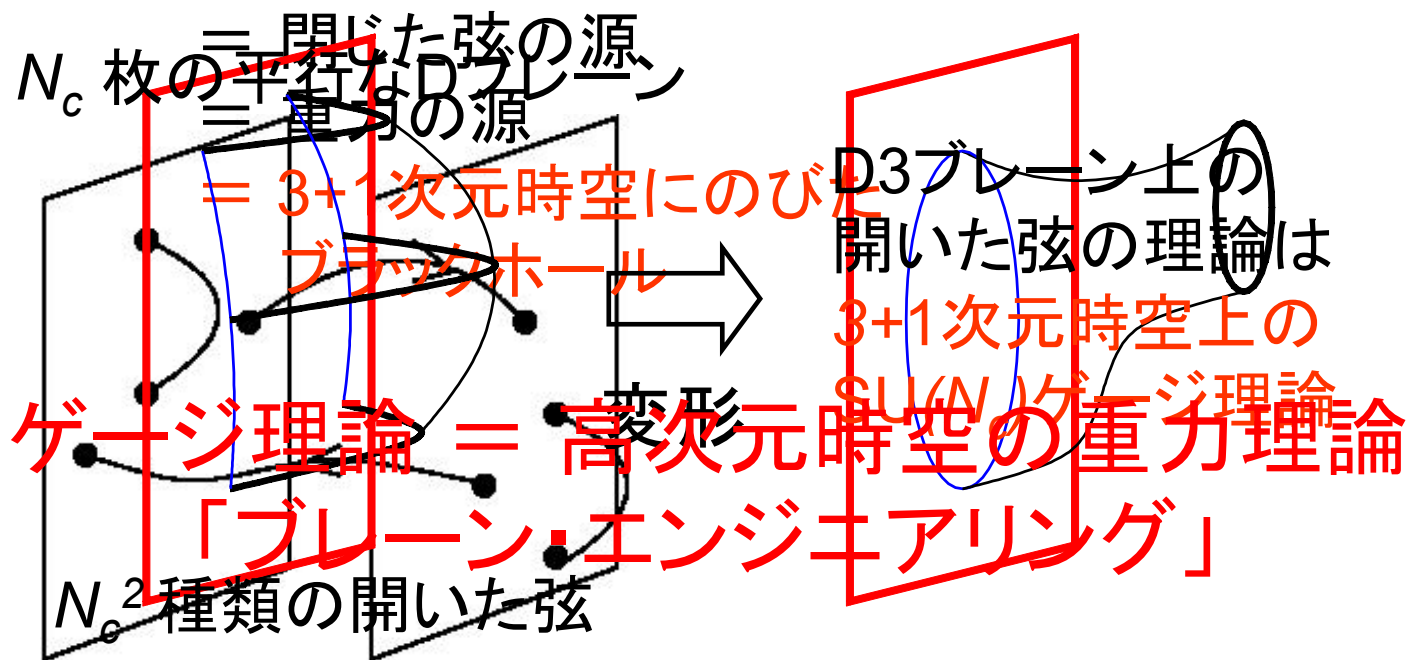


Dブレーンでつながる高次元重力理論

弦の振動を量子化すると、電磁気学と重力が出てくる

開いた弦 = 定在波 = 1偏極 = 光子(ゲージ場)
閉じた弦 = 回転波 = 2偏極 = 重力子

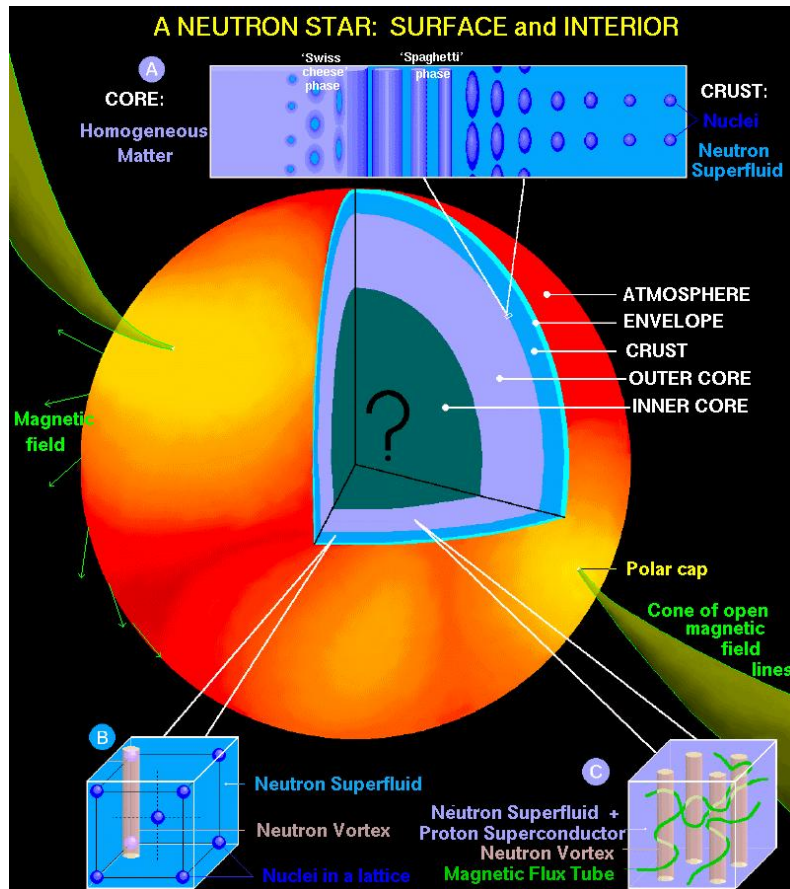
Dブレーン = 開いた弦が端を持てる板



超弦理論の数理が、強相関系を解明する

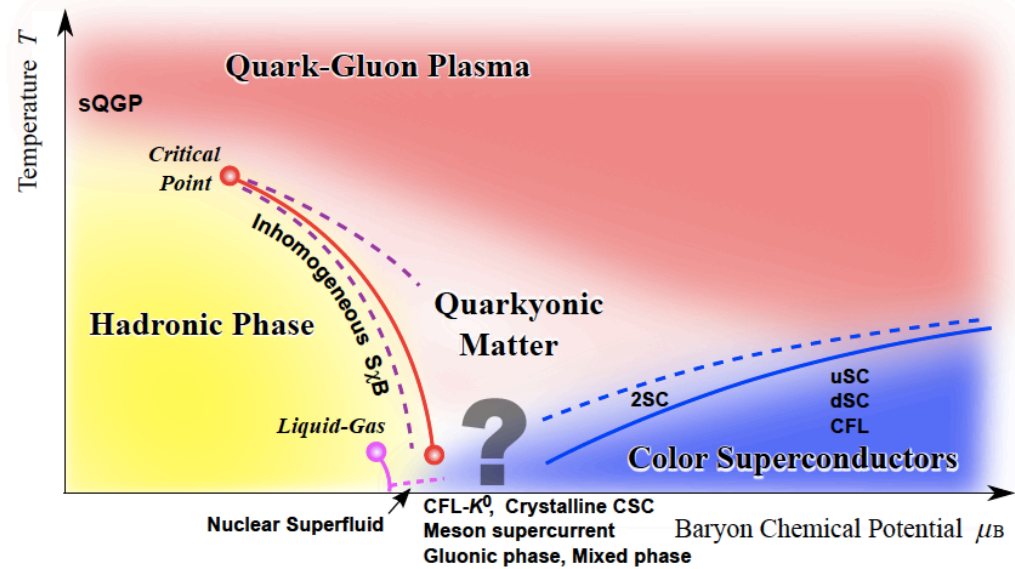
ロードマップ	1. 超弦理論は役に立つか？	7ページ
	2. 理論をまたぐ数理「双対性」	4ページ
	3. 中性子星への挑戦	7ページ

中性子星の中心部には何があるのか？



$$\mathcal{L}_{\text{QCD}} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu}^a F^{a\mu\nu} + \bar{\psi}_i (i\gamma^\mu D_\mu - m_i) \psi_i$$

QCD(量子色力学)の相図



[Fukushima, Hatsuda 1005.4814]

[D.Page]

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)

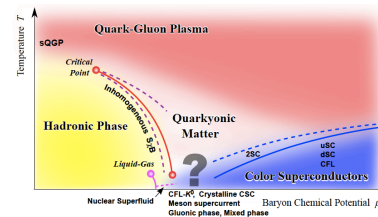


(3) 超対称性がない SU(N) ゲージ理論 + クォーク (Large N QCD)



(4) 超対称性がない SU(3) ゲージ理論 + クォーク (QCD)

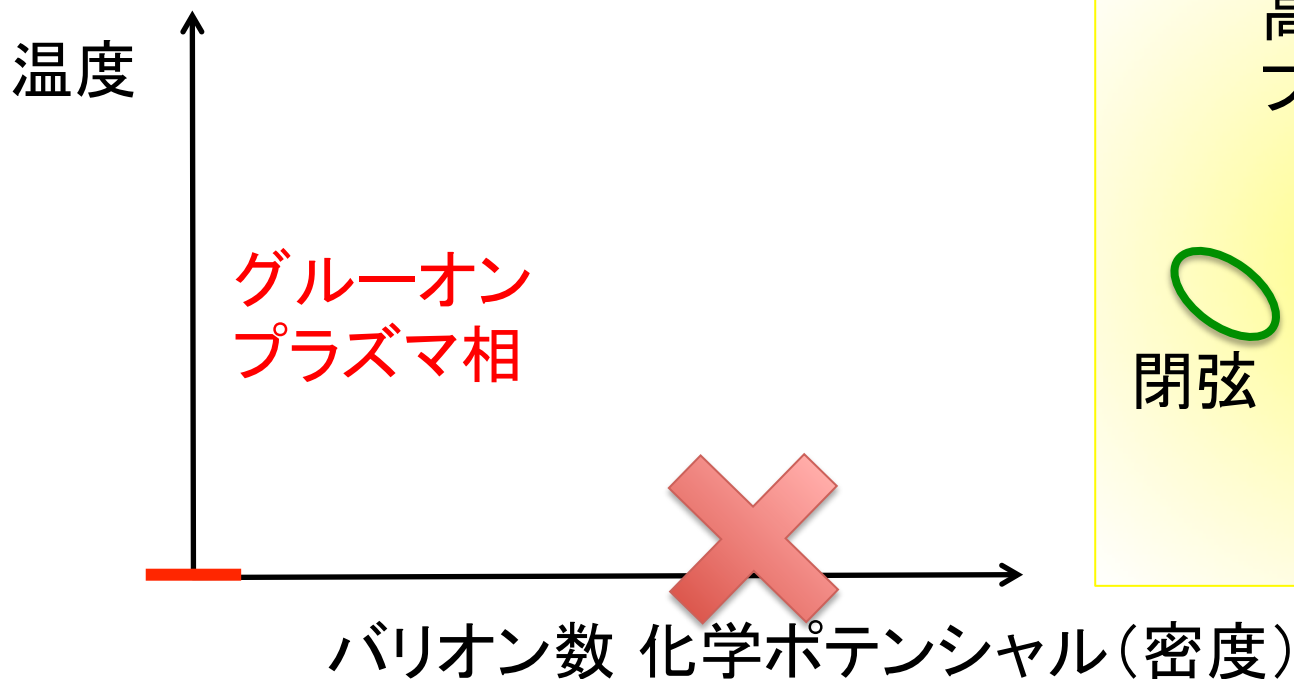
仮想QCD から 現実QCD へ (1)



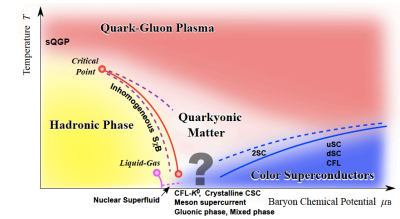
(1) 超対称性が4つあるゲージ理論 (N=4 Super Yang-Mills)

グルーオンセクタ: グルーオン + 4グルイーノ + 6スカラ

クォークセクタ: 入れられない



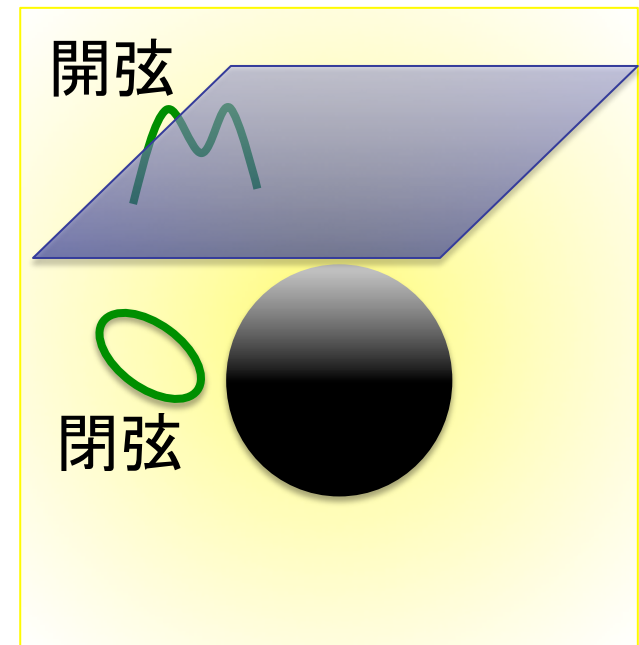
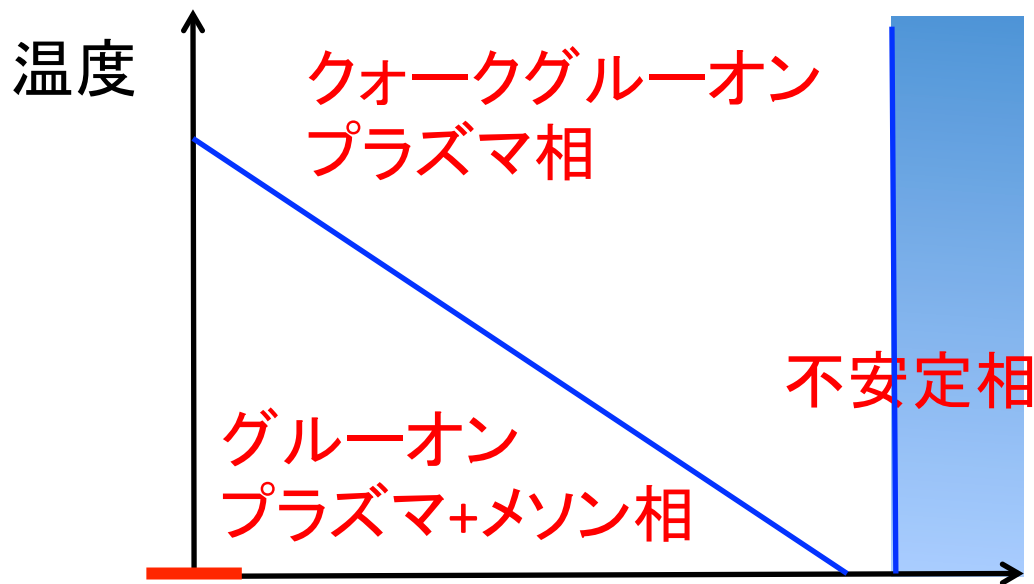
仮想QCD から 現実QCD へ (2)



(2) 超対称性が2つあるゲージ理論 (N=2 Super QCD)

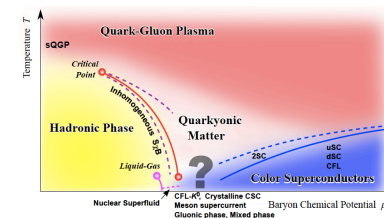
グルーオンセクタ: グルーオン + 2グルイーノ + 2スカラー

クォークセクタ: クォーク + スクォーク



バリオン数 化学ポテンシャル(密度)

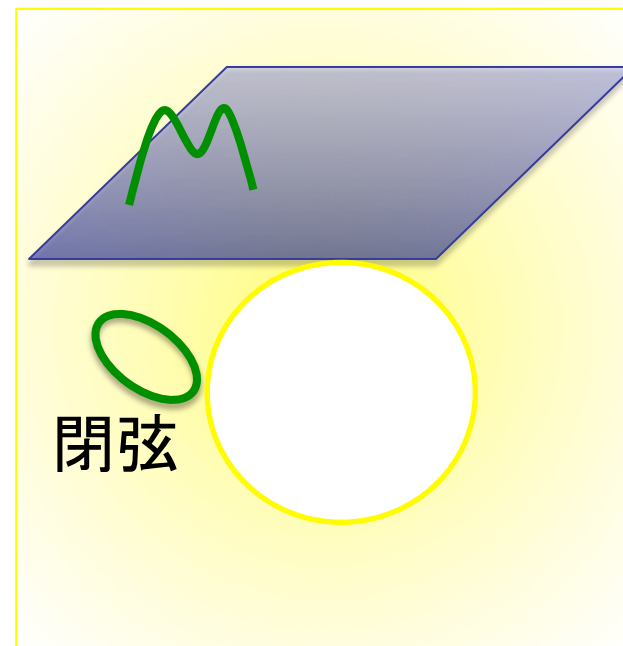
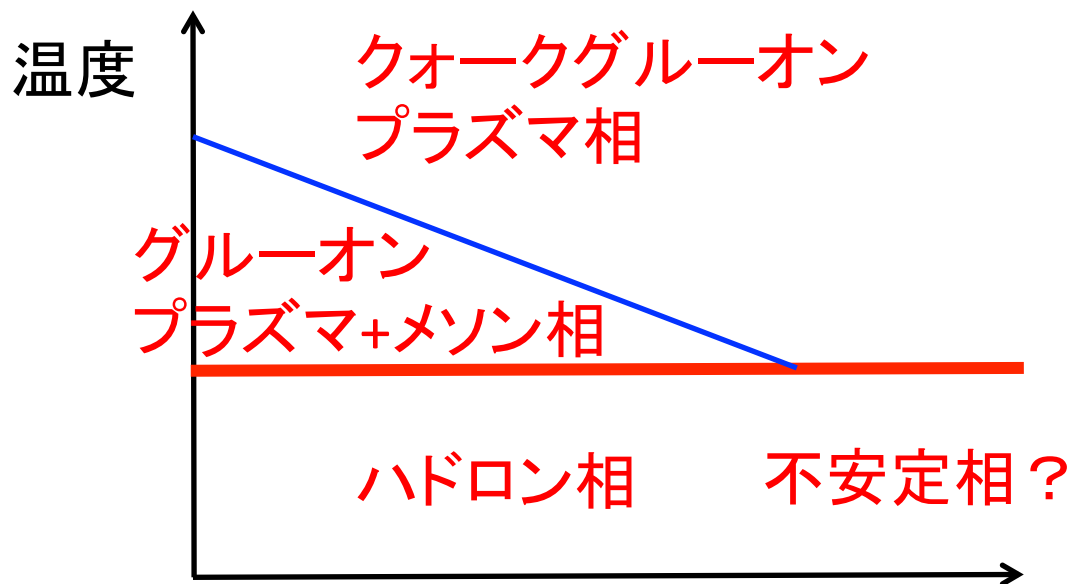
仮想QCD から 現実QCD へ (3)



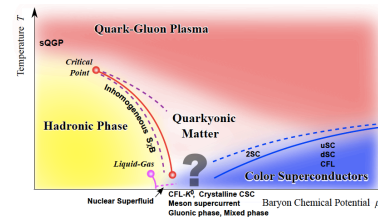
(3) 超対称性がない SU(N) ゲージ理論 + クォーク (Large N QCD)

グルーオンセクタ: グルーオン + 重いグルイーノ

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)

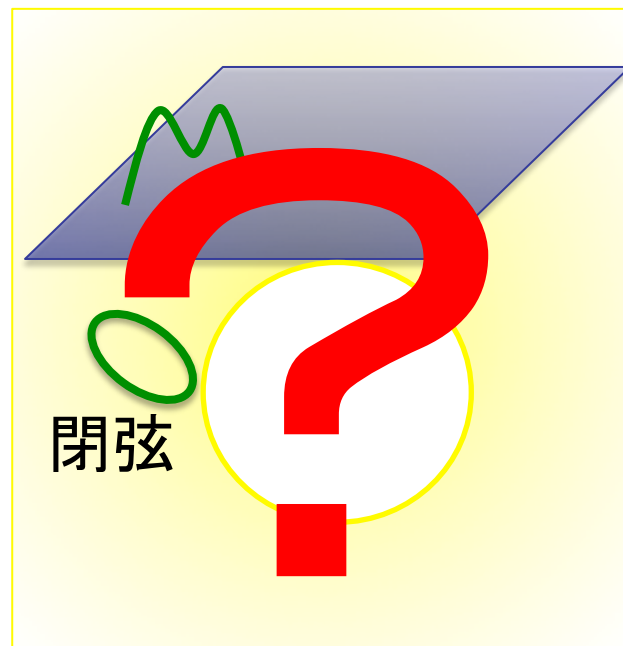
グルーオンセクタ: グルーオン

クォークセクタ: クォーク

温度



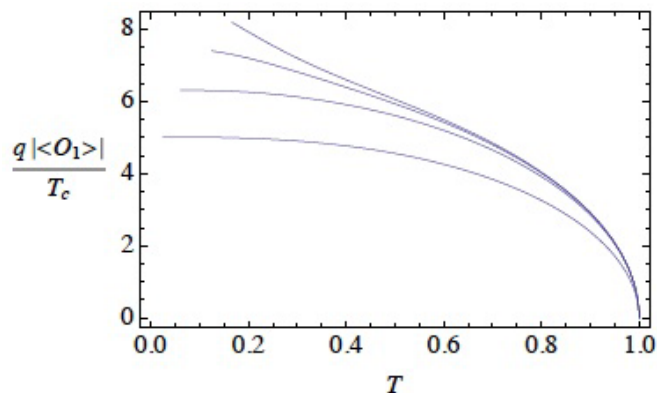
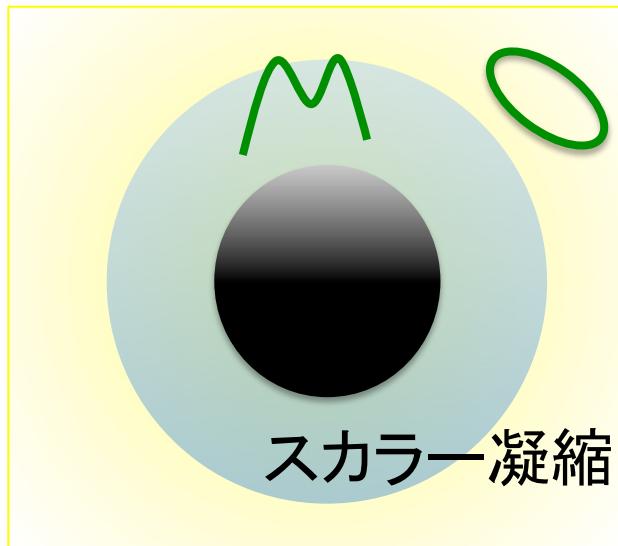
挑戦



バリオン数 化学ポテンシャル(密度)

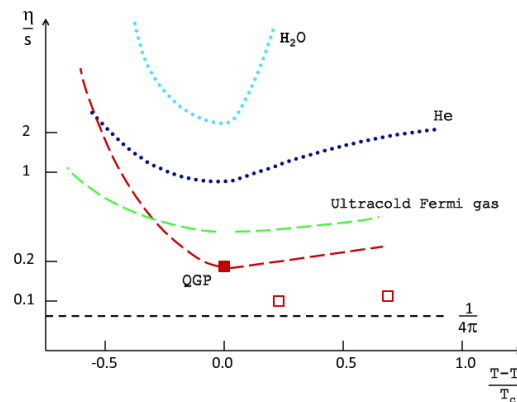
多様な物性応用

ホログラフィック超伝導



[Hartnoll, Herzog, Horowitz '08]

ホログラフィック粘性



[Kovtun, Son, Starinets '04]

超弦理論の数理が、強相関系を解明する

ロードマップ

1. 超弦理論は役に立つか？ 7ページ
2. 理論をまたぐ数理「双対性」 4ページ
3. 中性子星への挑戦 7ページ

