

高密度 QCD

初田哲男¹

東京大学大学院理学系研究科

有限温度や有限バリオン密度における量子色力学の相構造は、格子 QCD 数値シミュレーションや QCD 有効理論など様々な理論的アプローチにより研究され、3つの主要な相（低温かつ低バリオン密度でのハドロンの相、高温でのクォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) 相、低温・高バリオン密度でのカラー超伝導相）の存在が明らかになってきた [1]。

しかし、これら3相の相境界の構造は未だに不明な点が多く、逆にそこに豊富な物理が存在すると考えられている。例えば、BNL で稼働中の RHIC(相対論的重イオン衝突型加速器) で探索されている高温・低バリオン密度領域においては、ハドロンの相から QGP 相への転移点付近に、強相関 QGP と呼ぶべき新しい領域が広がっている可能性が、実験・理論の両面から示唆されている。一方、低温・高バリオン密度領域におけるハドロンの相からカラー超伝導相への転移領域においても、BEC-BCS クロスオーバー、擬ギャップ、ハドロンクォーク連続性、多種多様なカラー超伝導相、などが理論的に示唆され [2]、中性子星やクォーク星の物理との関連に興味を持たれている [3]。また、有限温度密度における QCD の相構造と高温超伝導物質の相構造の類似、高密度 QCD とフェルミ粒子からなる冷たい原子気体凝縮の類似は、背後に強相関するフェルミ粒子系としての共通の論理構造の存在を示唆している。

中性子星の構造に基本的な高バリオン密度での状態方程式 (EOS) に目を転じれば、核子散乱データを再現する現代的2体核力と、少数核子からなる原子核の結合エネルギーを再現するように導入された現象論3体力、さらに高バリオン密度での相対論的補正、を考慮した変分法に基づく第一原理計算による EOS が構築されている [4]。飽和原子核密度の数倍から発現すると予想されるハイペロンの混入や、より高い密度でのクォーク物質への相転移は未だ信頼できる取り扱いが難しいが、少なくとも核子多体系に限った範囲で、第一原理による EOS が確立されつつあることは大きな進展である。この方向での次のステップは、J-PARC などの実験施設を用いて今後理解が進むと期待されるハイペロン核子相互作用の情報をもとに、ハイペロンまで含めた第一原理計算を確立することであろう。

飽和原子核密度付近の EOS は、すでに実験から知られている飽和密度・飽和結合エネルギー・非圧縮率などのデータにより強い拘束を受ける。上述のような、核子系の第一原理計算による EOS はもちろんこの拘束を満たしている。一方、原子核密度の数倍の領域の EOS の情報は、SIS, AGS, SPS 領域の重イオン衝突実験による高バリオン密度核物質の生成と、そこでの観測量（例えば集団フローや閾値以下での K 中間子生成など、EOS に敏感な量）をボルツマン-ヴラゾフ型の輸送方程式や量子分子動力学を用いて解析することで間接的に得ることができる。信頼できる EOS は、このテストを通過しなければならず、一部の硬い EOS は排除できると考えられている [5]。

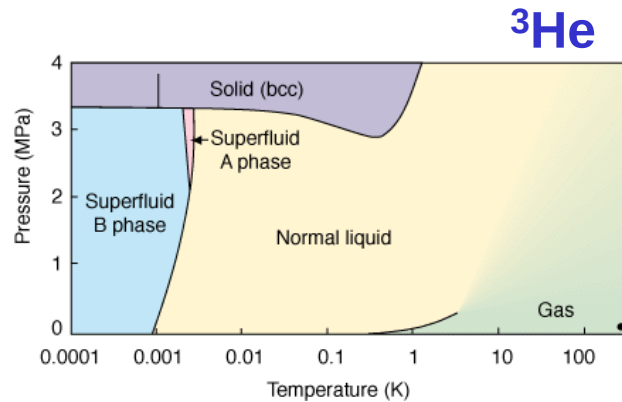
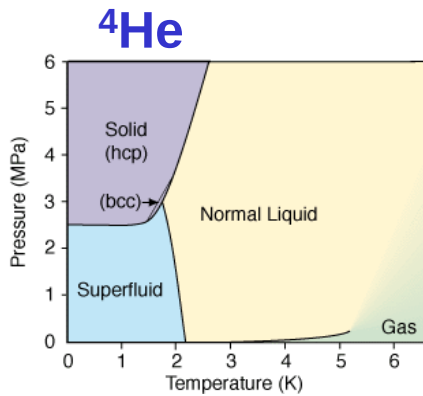
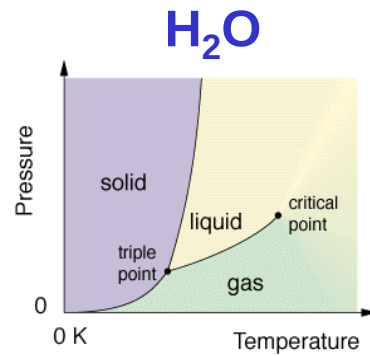
¹ e-mail: hatsuda@phys.s.u-tokyo.ac.jp

一方、究極の第一原理計算である格子 QCD シミュレーションは、低温・有限バリオン密度においては、複素行列式問題と呼ばれる困難のために信頼できるモンテカルロシミュレーションが行えない。ハドロン相からカラー超伝導相に至る高密度 QCD の相構造と状態方程式を得るに、QCD における本質的に新しい第一原理手法の発見が待ち望まれている [6]。

参考文献

- [1] K. Yagi, T. Hatsuda and Y. Miake, Quark-Gluon Plasma, [Cambridge Monographs on Particle Physics, Nuclear Physics and Cosmology, No. 23] (Cambridge Univ. Press, London, 2005).
- [2] H. Abuki and T. Kunihiro, hep-ph/0509172.
K. Fukushima, hep-ph/0510299.
- [3] F. Weber, Prog. Part. Nucl. Phys. 54 (2005)193.
- [4] A. Akmal, V.R. Pandharipande and D.G. Ravenhall, Phys. Rev. C58 (1998) 1804.
H. Heiselberg and V. Pandharipande, Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 50 (2000) 481.
- [5] P. Danielewicz, R. Lacey and W. G. Lynch, Science 298 (2002) 1592.
C. Fuchs and H.H. Wolter, nucl-th/0511070.
C. Fuchs, Prog. Part. Nucl. Phys. 56 (2006) 1.
- [6] S. Muroya, A. Nakamura, C. Nonaka and T. Takaishi, Prog. Theor. Phys. 110 (2003) 615.

Phase structures of H_2O , 4He and 3He



<http://boojum.hut.fi/research/theory/typicalpt.html>

Origin of each "phase"

strong residual force
→ **pre-formed pairs**

Hatsuda & Kunihiro,
Phys.Rev.Lett. 55 (1985)

Asymptotic freedom
+ Debye screening
→ **deconfinement**

Collins & Perry,
Phys.Rev.Lett. 34 (1975)

QGP

χ_{SB}

CSC

μ_B

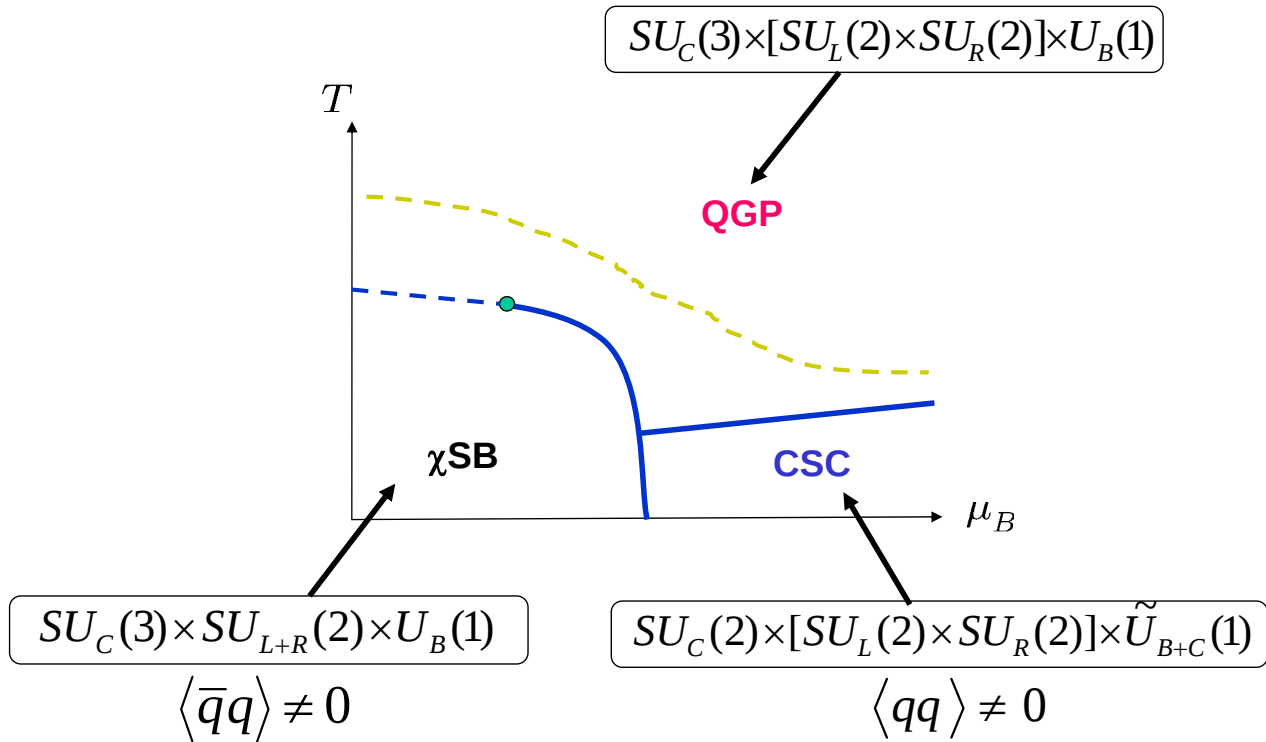
quark - anti-quark pairing
→ **chiral instability**

Nambu & Jona-Lasinio,
Phys.Rev. 122 (1961)

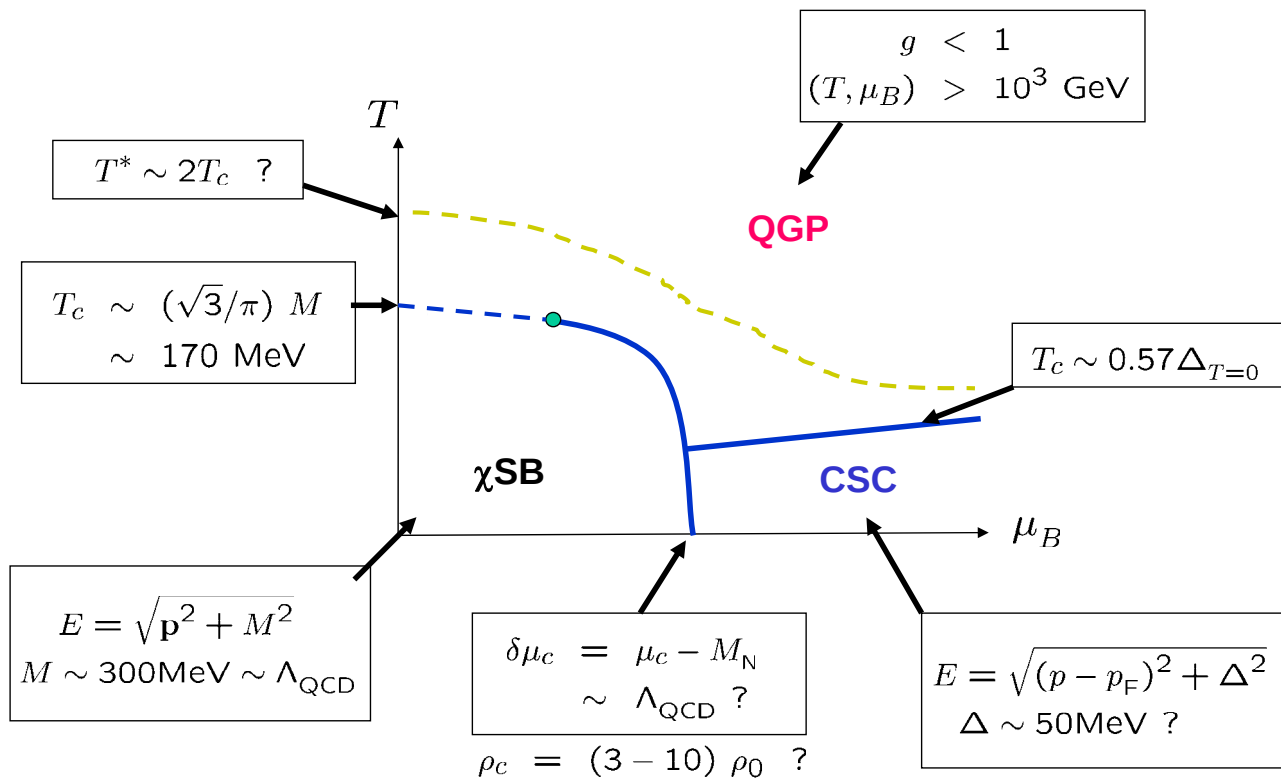
quark-quark pairing
→ **Cooper instability**

Bailin & Love,
Phys.Rep.107 (1984)

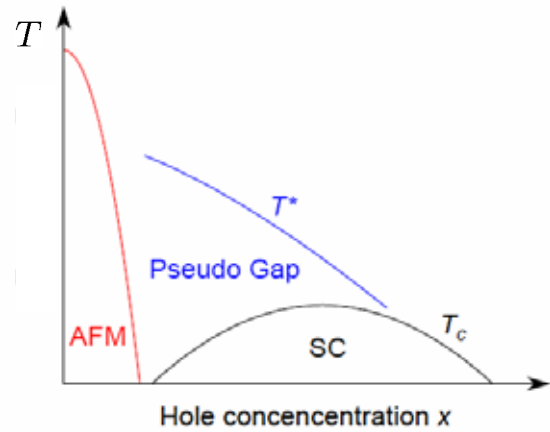
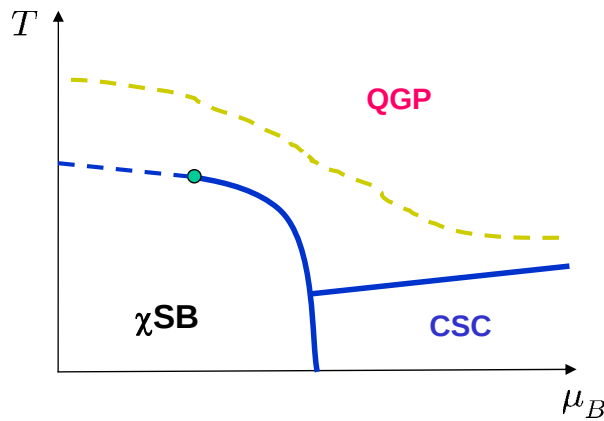
Symmetry of each “phase” (case for small m_{ud} with $m_s = \infty$)



Scale of each “phase”



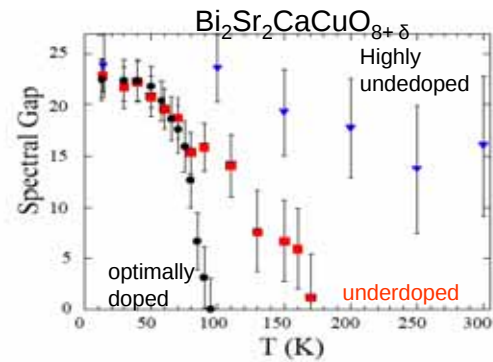
Similarity with high T_c superconductors



1. insulator – superconductor transition
2. strong coupling $\rightarrow$ pre-formed pairs?
3. similar physics in “cold-atoms” too

HTS – BEC – QCD connection ?

- Babaev, PRD ('00)
- Abuki, Itakura & Hatsuda, PRD ('02)
- Kitazawa, Koide, Kunihiro & Nemoto, PRD ('02)
- Chen, Stajic, Tan & Levin, Phys. Rep. ('05)



Experimental/Observational probes

Heavy ion collisions

- low energies : (1-20) GeV/A, SIS (GSI), AGS (BNL), SPS (CERN)
SIS100/300 (GSI), J-PARC (Japan)

$\rightarrow$ dense matter

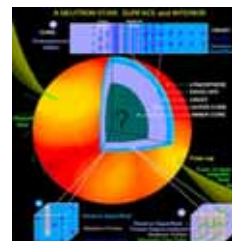


- high energies : (200-) GeV/A, RHIC (BNL), LHC (CERN)

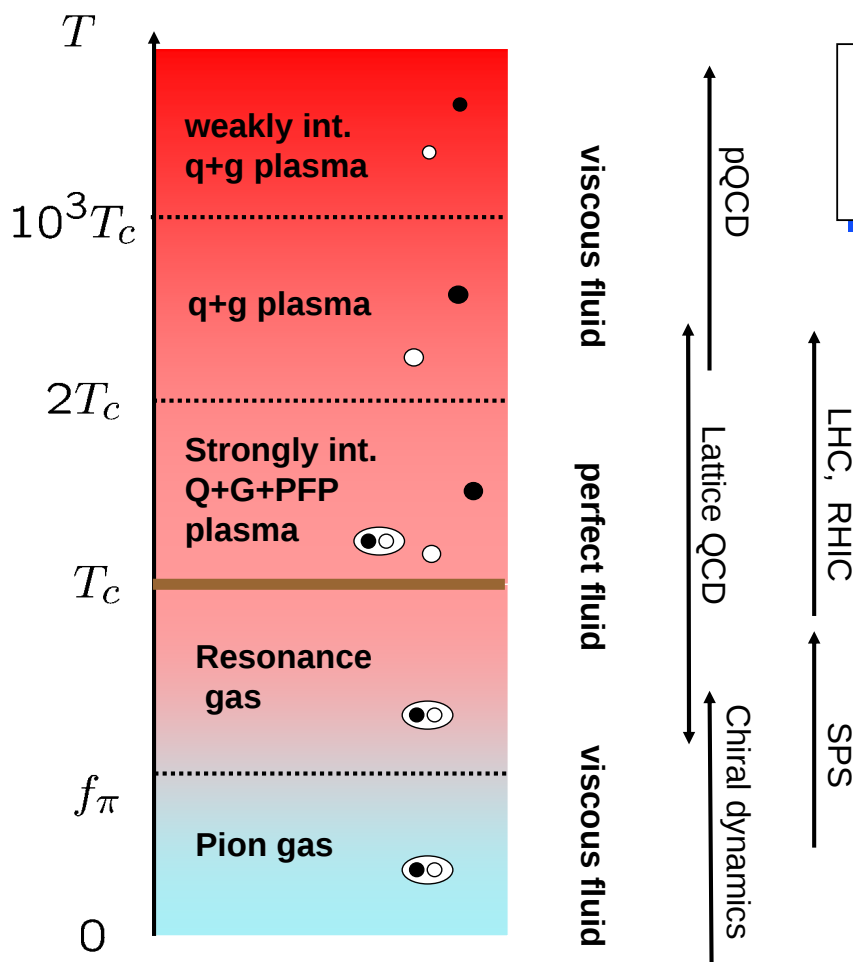
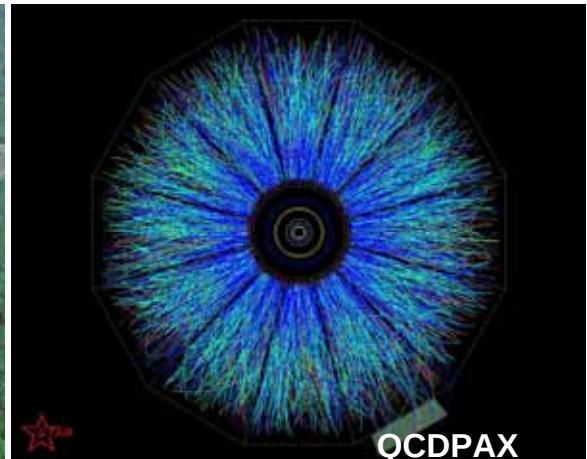
$\rightarrow$ hot matter



Compact stars : dense matter



Phases in hot QCD

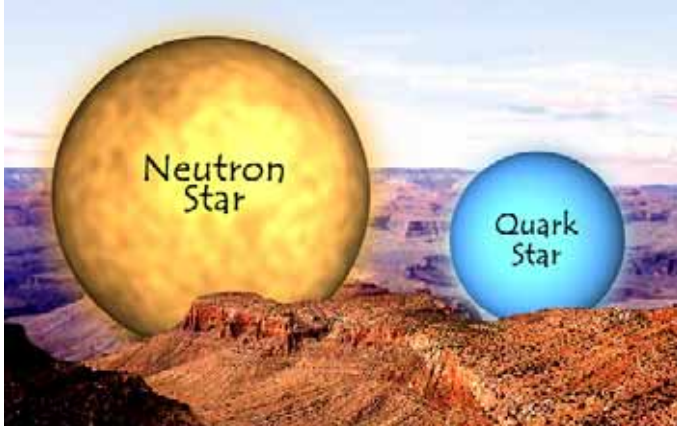


A modern “picture”
of hot QCD
from lattice QCD

- Asakawa & Hatsuda, Phys. Rev. Lett. ('04)
- Nakamura & Sakai, Phys. Rev. Lett. ('05)

Phases in dense QCD

<http://chandra.harvard.edu/resources/illustrations/neutronStars.html>

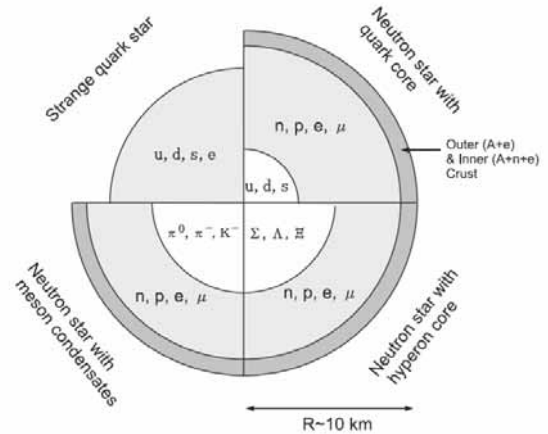


Baade-Zwicky ('34)

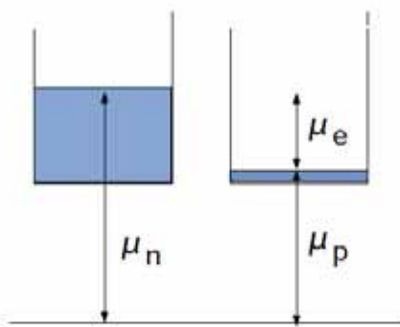
N. Itoh ('70),
E. Witten ('84)

Yagi, Hatsuda, Miake,

Quark-Gluon Plasma, (Cambridge Univ. Press)



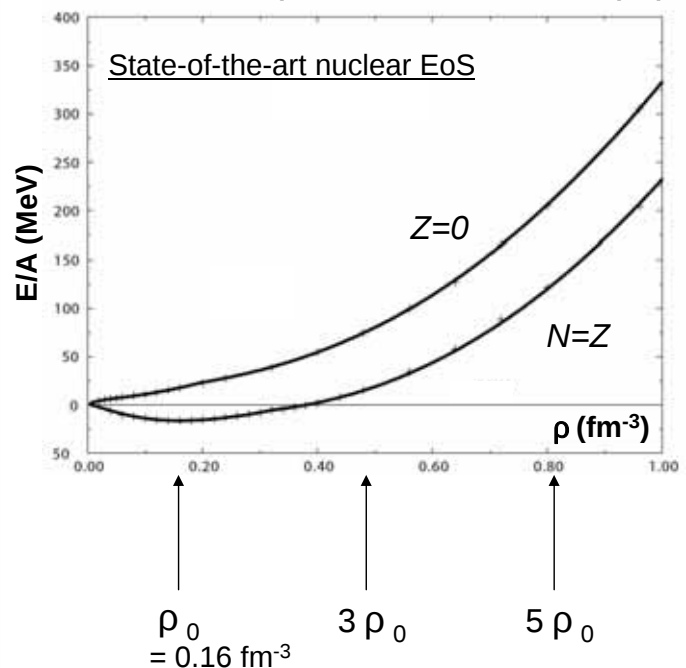
Standard neutron star matter : n, p, e^- with $n \rightleftharpoons p + e^-$



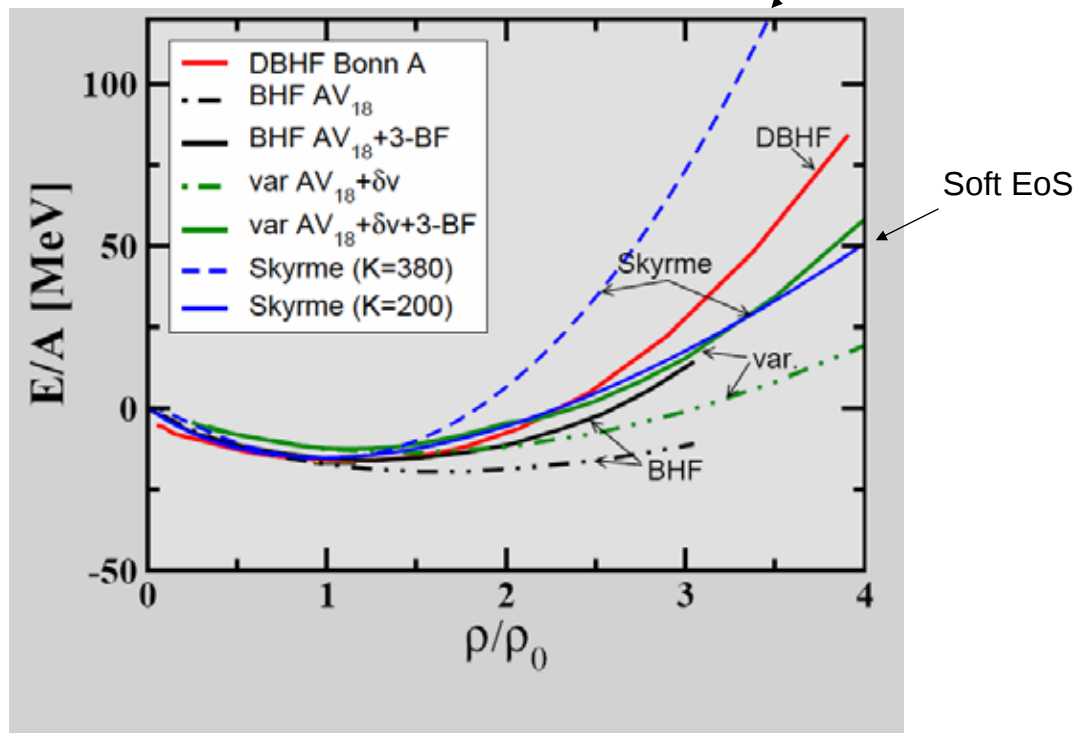
APR's EoS

- modern N-N int. (> 1994)
(4301 N-N data fitted with $\chi^2/\text{dof} \sim 1$)
- relativistic corrections
- N-N-N interactions
- Variational method

Akmal, Pandharipande & Ravenhall, PRC58 ('98)



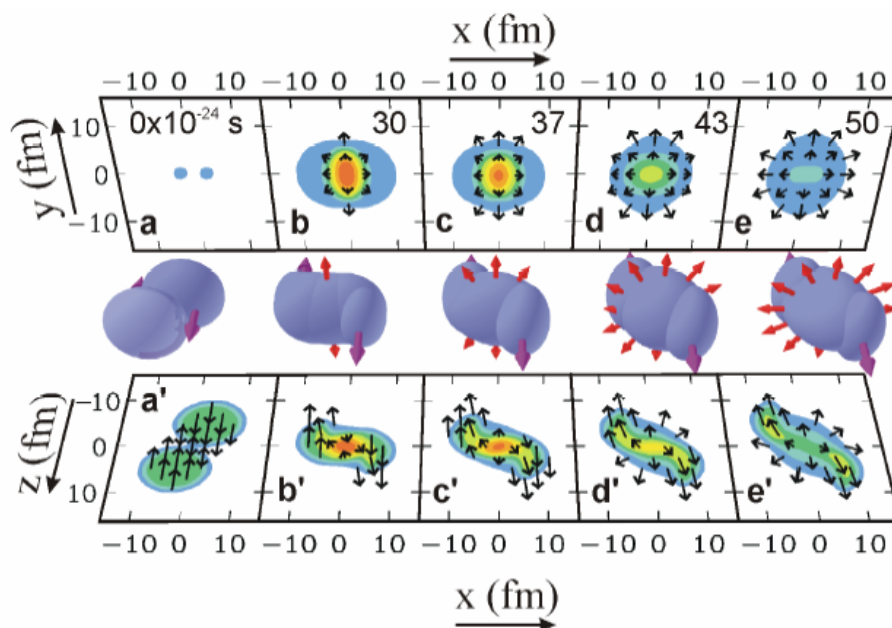
EoS of nuclear matter (N=Z) from ab initio calculations



Fuchs and Walter, nucl-th/0511070

Collective flow in low-energy heavy ion collisions and EoS semi-classical Boltzmann-Vlasov approach

$$D f(x,p,t) = C[f] \quad \rightarrow \quad dN/d\varphi = 1 + v_1 \cos \varphi + v_2 \cos 2\varphi + \dots$$

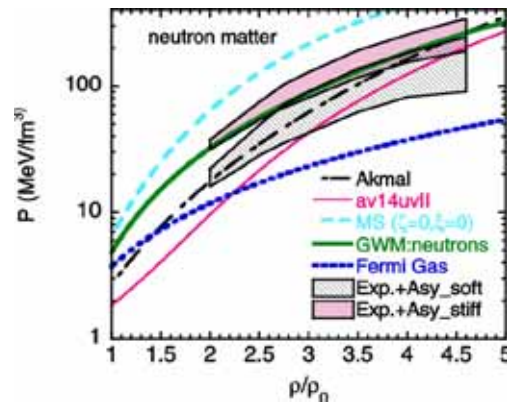
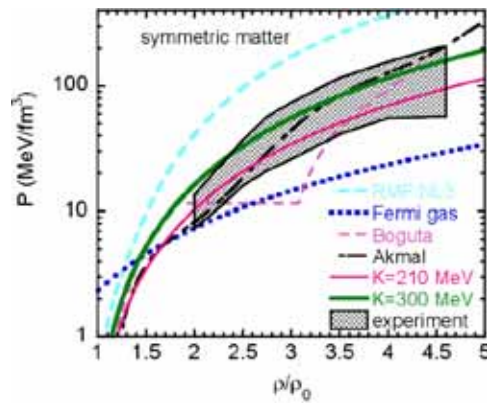


Au + Au, $E_{lab} = 2 \text{ GeV/A}$
Danielewicz et al, Science 298 (2002)

Constraint from Flow Data in SIS-AGS energies



Soft EOS is preferred

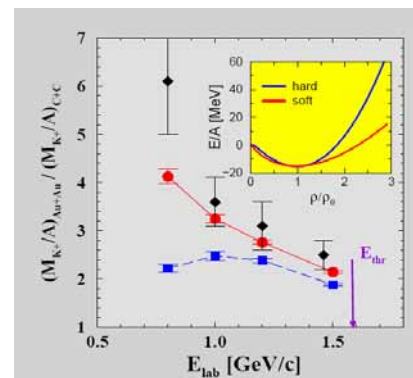


Danielewicz et al,
Science 298 (2002)

Sub-threshold K^+ production at SIS

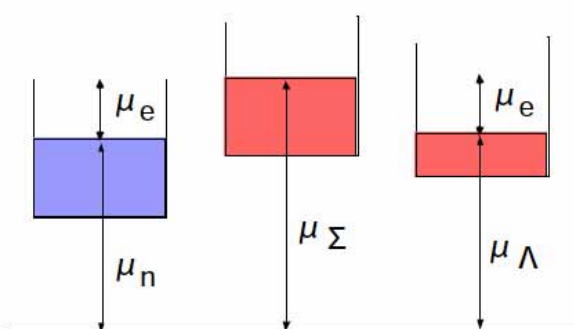


Soft EOS is preferred



Fuchs and Walter,
nucl-th/0511070

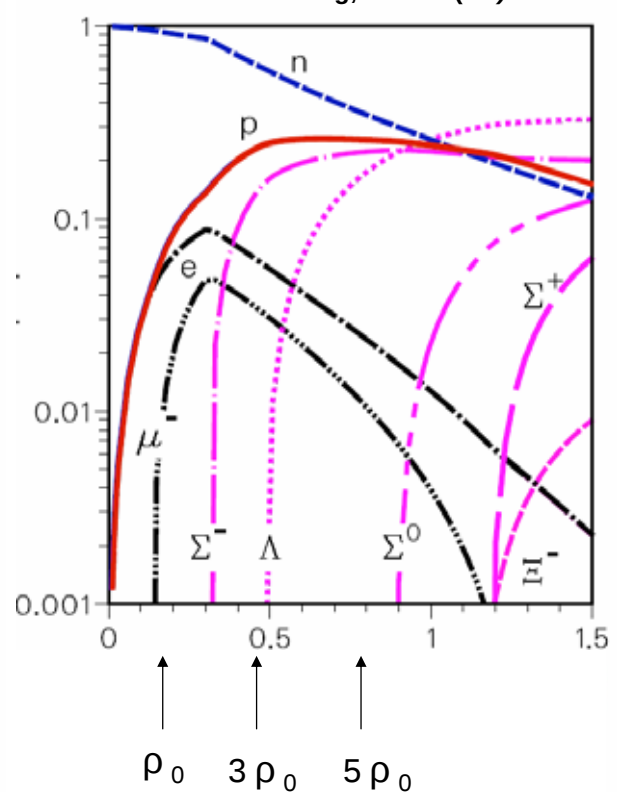
Hyperonic matter : $n, p, \Sigma^-, \Lambda, e^-$ with $\Sigma^- \rightleftharpoons n + e^-, \Lambda \rightleftharpoons n$



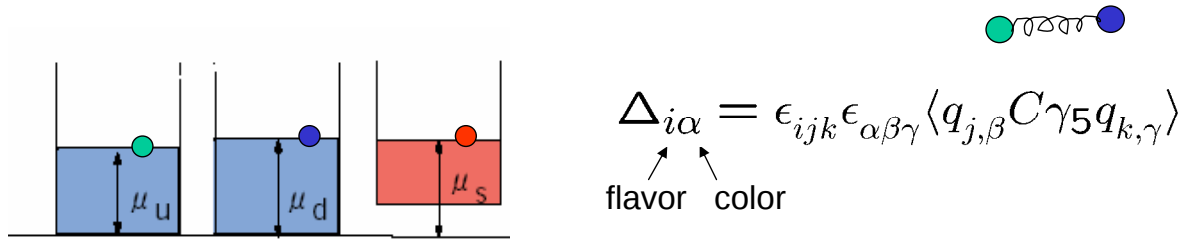
Remarks

- Hyperon mixing may start at $(2-3) \rho_0$
 - Y-N int. not well understood
- ↔ J-PARC ('08)

Glendinning, PRC64 ('01)



Origin of Color Superconductivity (CSC)



Major differences from BCS

1. Highly **relativistic**
Long range **magnetic int.**

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



High T_c superconductor

$$T_c/\varepsilon_F \sim 0.1$$

Compact Cooper pair

size $\sim 1-10$ fm

2. Color-flavor **entanglement**

$$\Delta_{i\alpha} = \begin{pmatrix} \Delta_1 & 0 & 0 \\ 0 & \Delta_2 & 0 \\ 0 & 0 & \Delta_3 \end{pmatrix}$$



Variety of phases

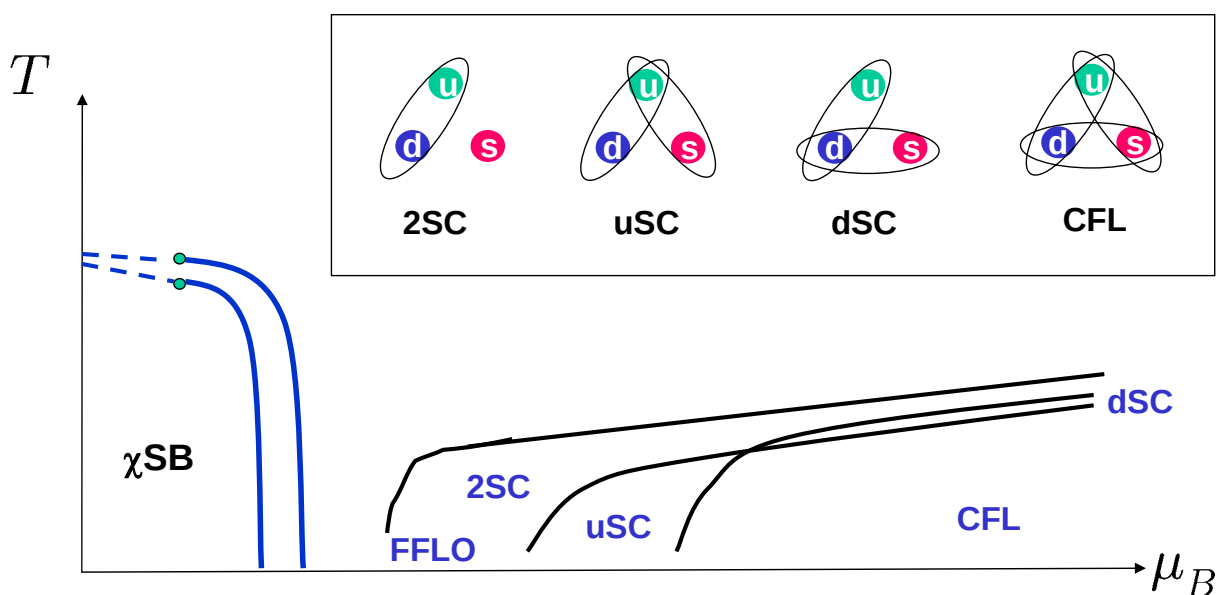
(such as ice and ^3He)

CFL, 2SC, dSC, uSC, etc

Phase structure relevant to compact stars

with charge-neutrality & β -equilibrium

$$n_d > n_u > n_s$$



2SC : Bailin and Love, Phys. Rep. ('84)

CFL : Alford, Rajagopal and Wilczek, NPB ('99)

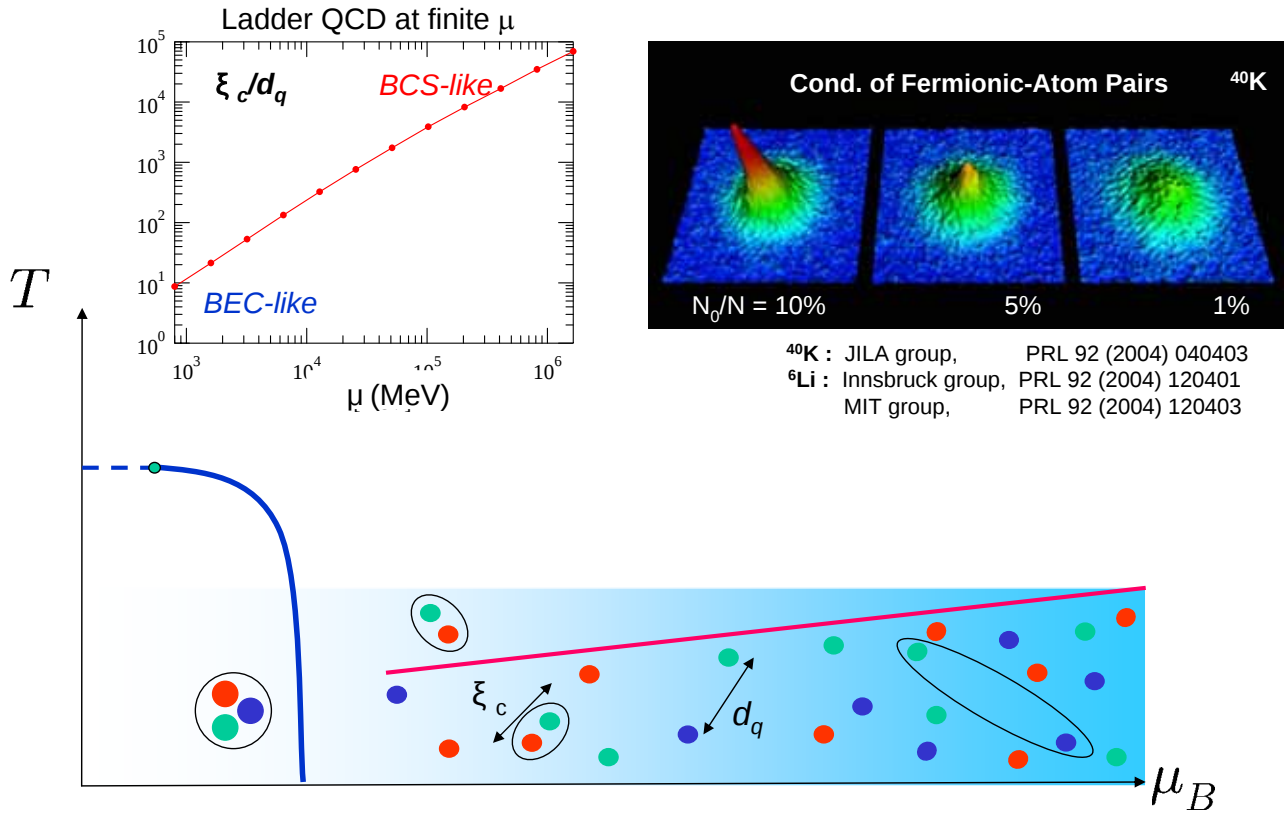
dSC : Iida, Matsuura, Tachibana and Hatsuda, PRL ('04)

uSC : Ruster, Werth, Buballa, Shovkovy and Rischke, PRD ('05)

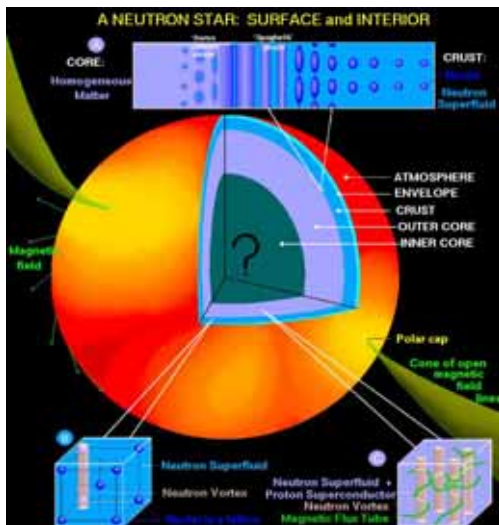
FFLO, gapless phase, CSL, K-cond. etc

BCS-BEC crossover ?

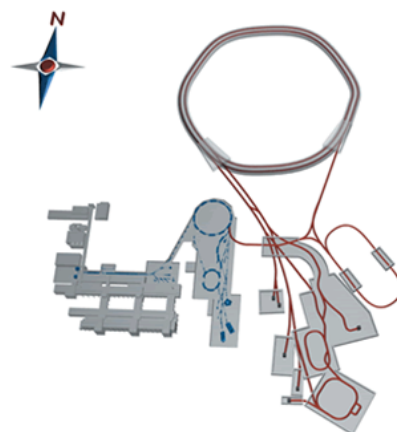
Abuki, Itakura & Hatsuda,
PRD65 ('02)



Probing Dense QCD



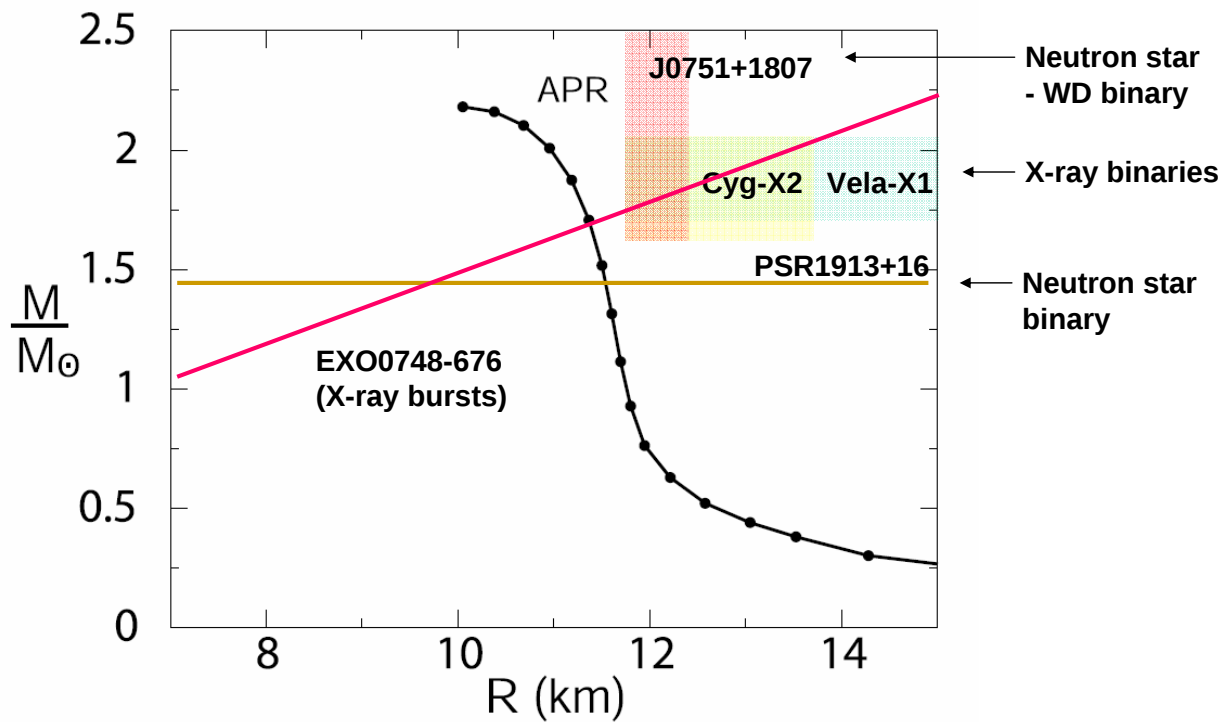
J-PARC



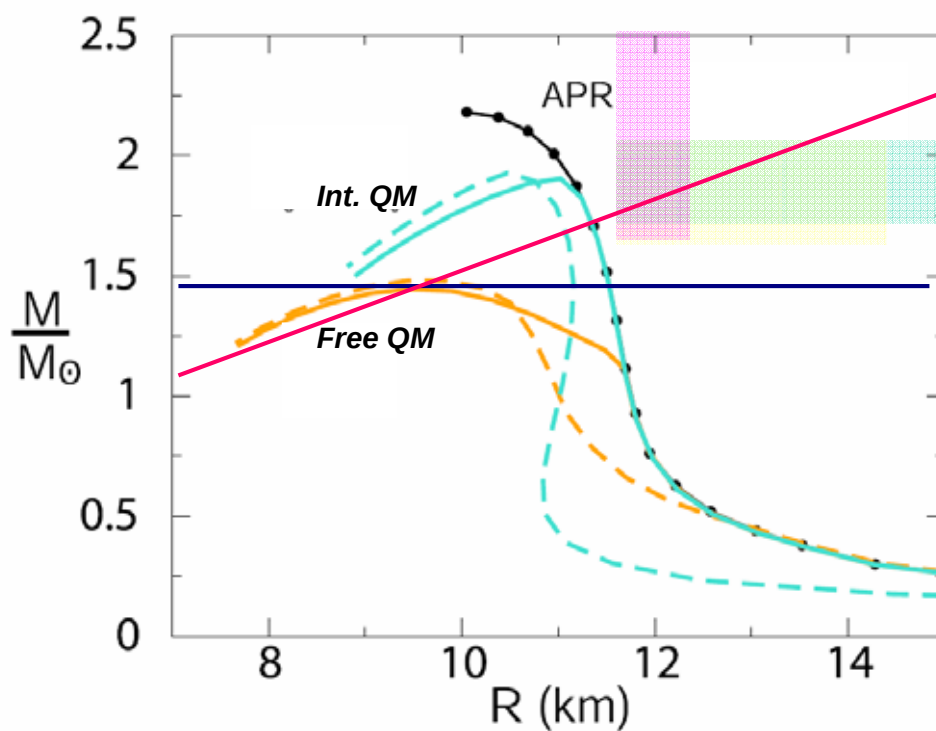
SIS100/300

M-R relation in APR EoS

($\rho_{\max} \sim 6\rho_0$)



M-R relation in APR EoS + CFL quark matter



Cooling of neutron stars

Standard

Name

Modified Urca

Direct Urca

Quark modified Urca

Exotic

Quark direct Urca

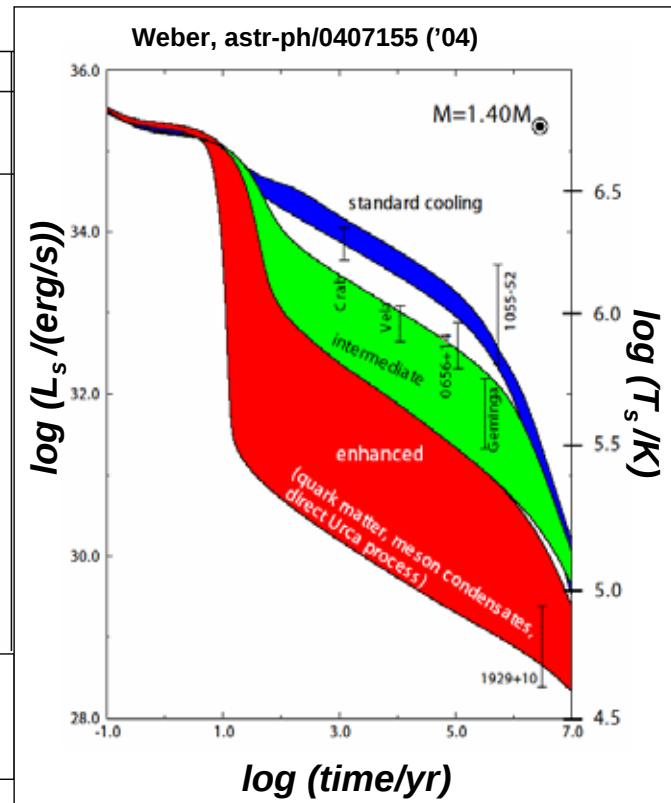
π^- condensate

K^- condensate

quenching

n superfluidity

Q color super



Summary

"phase"	theory	exp./obs.
χ SB (low T & low μ)	<u>Mature</u> (precision physics) lattice QCD effective theories	variety of data
QGP (high T)	<u>Developing</u> lattice QCD effective theories	data accumulation RHIC $\rightarrow$ LHC
QM and CSC (low T & high μ)	<u>Developing</u> effective theories Need lattice inputs	- Neutron stars (M-R) - SIS, J-PARC, Nuclotron
"PG" (intermediate T & μ)	<u>Not- fully explored</u> Interesting connection to HTS, cold atoms	Relevant region to RHIC, SIS, J-PARC, Nuclotron ?