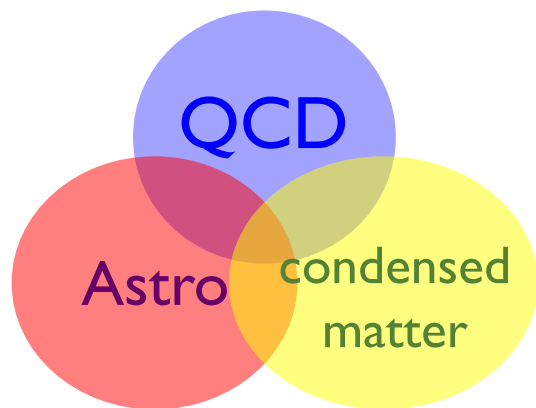


中性子星観測と高密度QCD

古城 徹

(東北大 → KEK)



目次

- 1, 中性子星をひと眺め (~ 10mins)
- 2, **M-R**と**EOS** (~ 10mins)
- 3, **M-R**観測の現状 (~ 15mins)
- 4, 柔らかい核物質 ⇒ 硬いクォーク物質 (~ 15mins)

星とは [ref. 天文学辞典]

恒星 (star)

「天体内部の核融合によりエネルギーを作りだし、**自ら輝いている天体**」

例) 太陽 (**高温・高圧**：水素 → ヘリウム + 熱)

惑星 (planet)

「**恒星を周回する天体のうち**、内部の核融合反応によるエネルギー放出のない天体」

例) 地球

但し、“star” はより広い意味で使われることが多い。

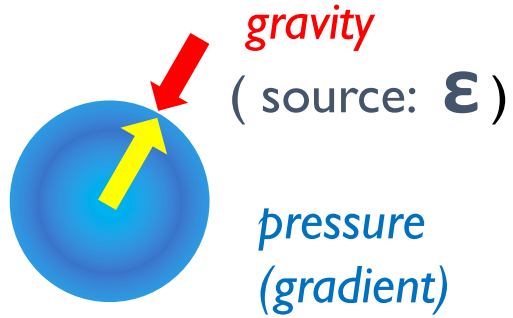
例) 中性子星 (中心部で**核融合の燃料は使い果たしている**)

自己重力と状態方程式

Einstein eq.: $G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$

重力

物質の状態方程式 (EOS)



熱力学量：
エネルギー、圧力、
物質密度、エントロピー、...

自己重力 = 物質の圧力 (勾配)

源) 星内部のエネルギー

源) 熱的ガス圧、斥力、フェルミ縮退圧、...

自己重力が勝つと星はつぶれる

行き先) ブラックホール、中性子星

例) ガス圧で釣り合う恒星

自己重力による圧縮

(高圧環境の実現)

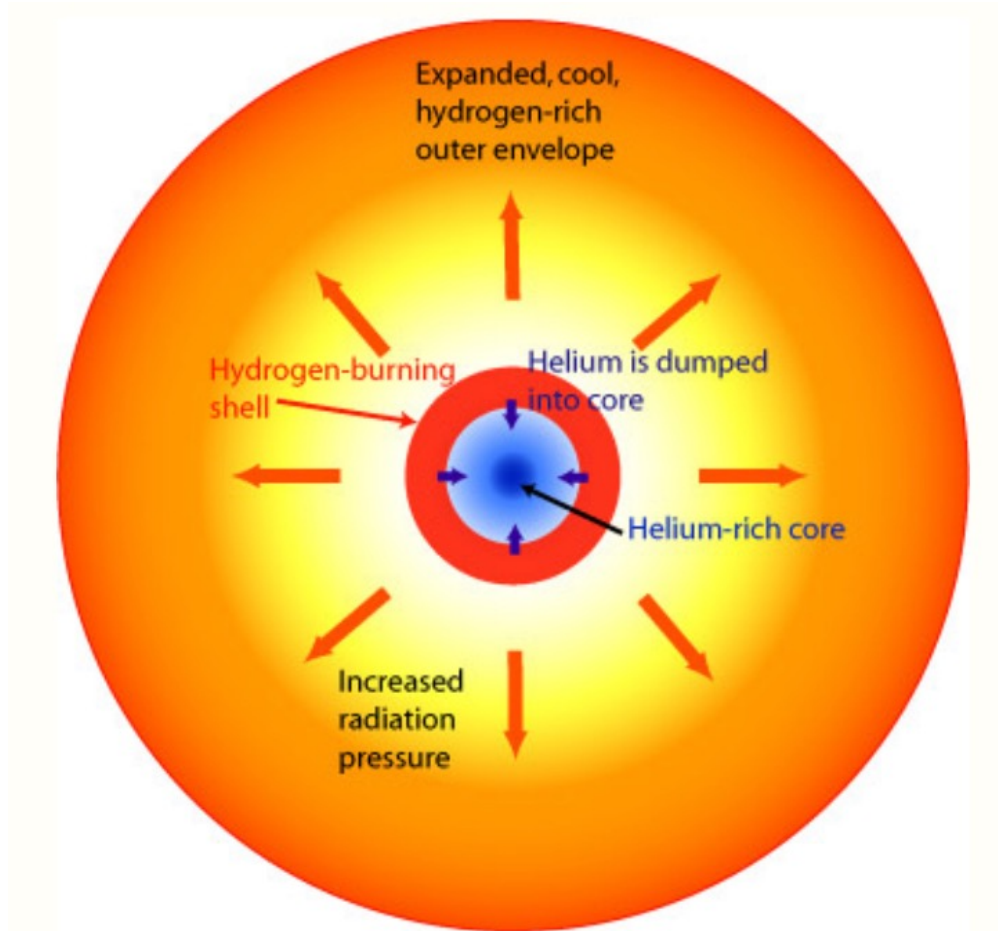
中心で核融合反応 → 熱発生

例) pp-chain ($4\text{H} \rightarrow \text{He} + \text{energy}$)

CNO-cycle, triple α

熱的ガス圧と重力の釣り合い

質量大 → 半径大



太陽、主系列星、巨星

重い星ほど最後まで燃料を使い切る

初期質量/太陽質量

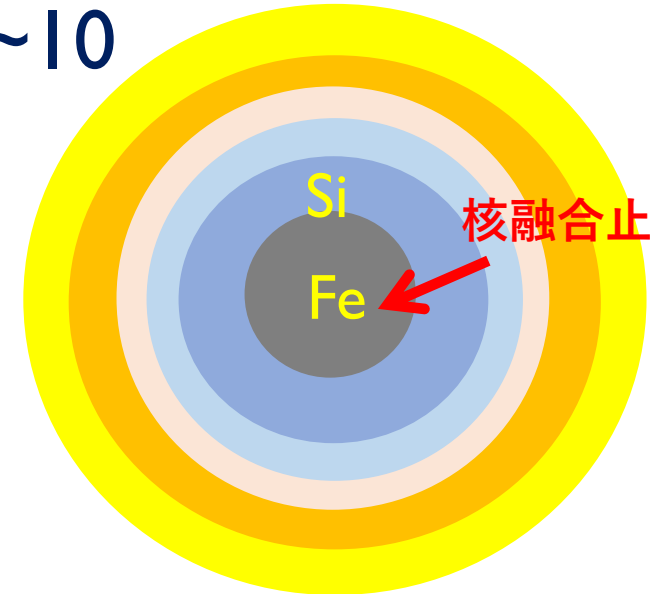
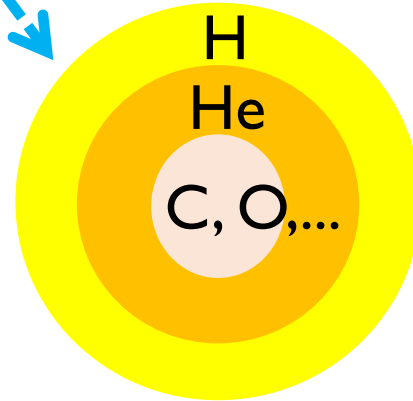
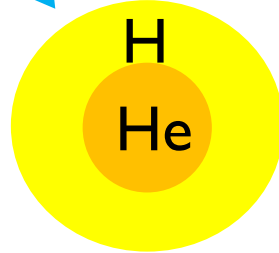
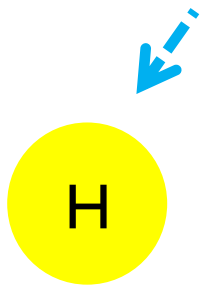
$$M_{\text{IC}}/M_{\odot}$$

$$< \sim 10^{-3}$$

$$\sim 10^{-3} - 10^{-1}$$

$$\sim 10^{-1} - 10$$

$$> \sim 10$$



惑星

褐色矮星

白色矮星

重力崩壊

超新星爆発

残骸

中性子星

ブラック

ホール

クーロン斥力

電子のフェルミ縮退圧

核子の縮退圧

中性子星 (Neutron Stars: NS)

周期 : $P \sim 1\text{ms} - 1\text{s}$ ($\sim 10^{-9} - 10^{-6} P_{\odot}$)

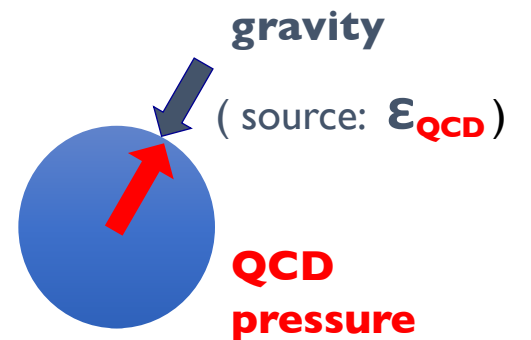
Mass : $M \sim 1-2 M_{\odot}$

Radius : $R \sim 11-13\text{ km}$ ($\sim 10^{-6} R_{\odot}$)

n_p/n_B : $Y_p \sim 0.05$ (neutron rich)

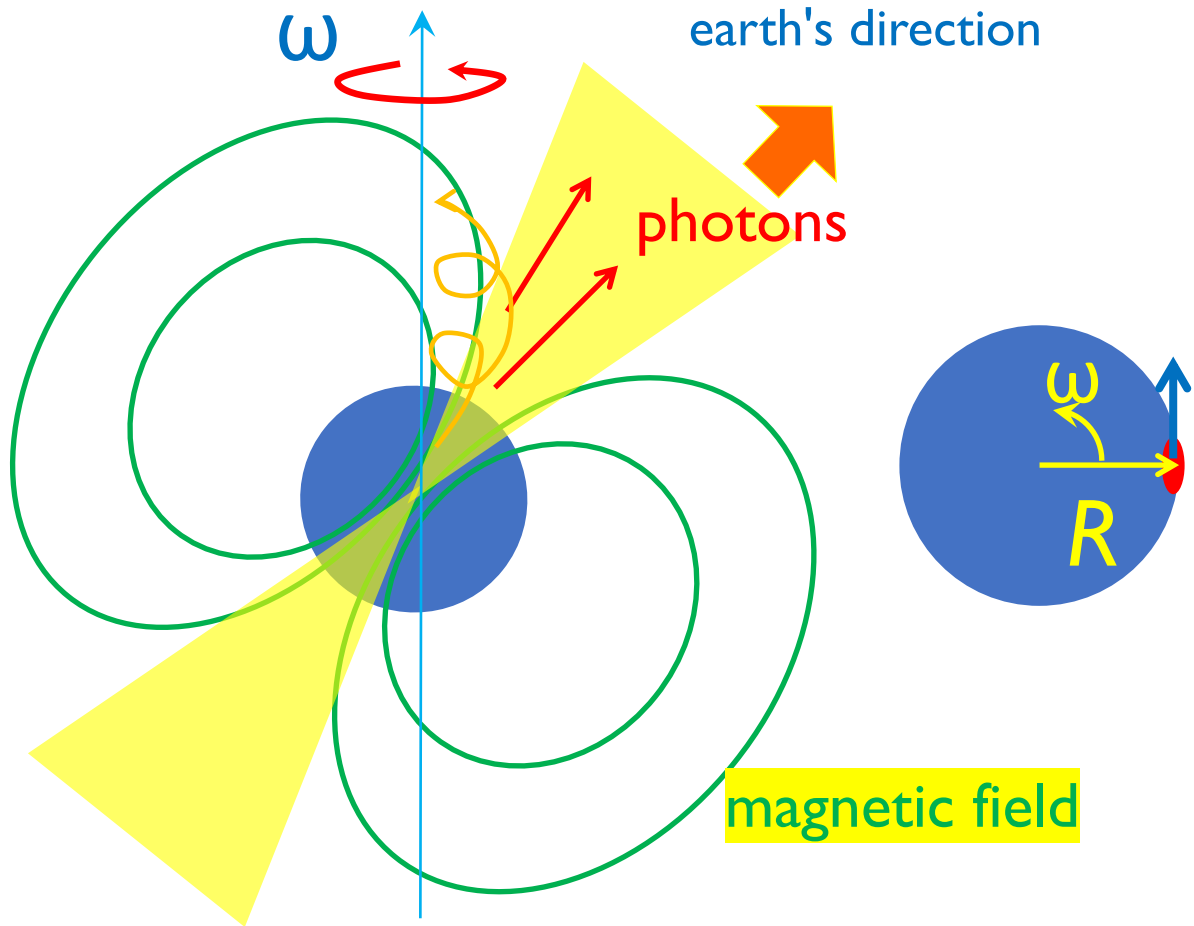
温度 : $T \sim \text{KeV}$ ($\ll p_F$ of nucleons)

磁場 : $B \sim 10^6 - 10^{15} \text{ Gauss}$ ($\sim 10^5 - 10^{11} B_{\odot}$)



これらのスケールをざっくり見る

高速回転するパルサー



観測事実：

1) パルス周期 $< 1\text{s}$

2) 周期は超正確

表面の速度

因果律

$$v_{\text{surf}} = \omega R < c \quad (\text{光速 } c = 1)$$

➡ $R \sim 10\text{-}100\text{ km (!)}$

+ 高速回転で物質が吹き飛ばない

➡ 重力強い (M 大きい)

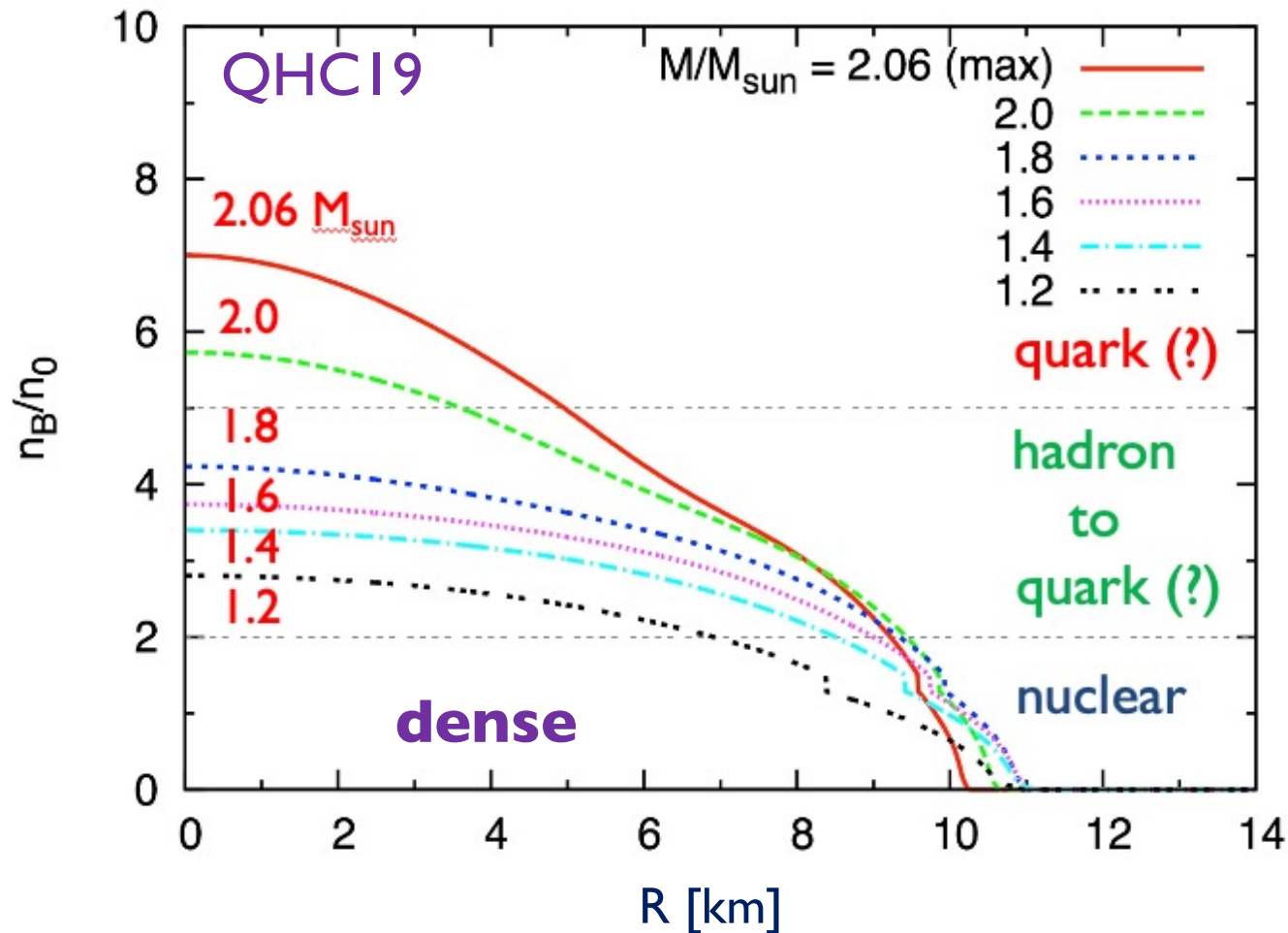
(➡ 外部摂動に対して安定)

どれだけ高密度か

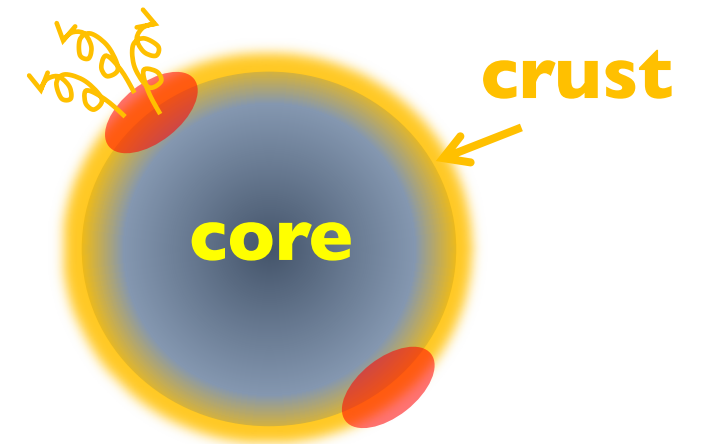
very dense

For $M \sim M_{\text{sun}}$ & $R \sim 10 \text{ km}$ $\Rightarrow n_B \sim M/(4\pi R^3 \times m_N) \sim O(0.1-1) \text{ fm}^{-3}$

QCDスケール



バリオン密度分布は
ほとんどの領域で高密度
(低密度領域は簡単につぶれる)



なぜ「中性子」星か： 電気中性な核物質 (@ $\sim n_0$)

$$n_p (=Y_p n_B) = n_e \quad \text{or} \quad p_F^p = p_F^e$$

何故「電子密度＝陽子密度」を下げる方が圧倒的に得か？

電子のエネルギー $\Rightarrow$ 密度を上げるとすぐ上がる $(E_F^e \sim p_F)$

中性子のエネルギー $\Rightarrow$ 密度を上げててもすぐ上がらない $(E_F^n \sim m_N + p_F^2/2M_N)$

電子密度を下げて中性子のエネルギーを上げてても損は少ない

$$\beta\text{-平衡 } (\mu_n = \mu_p + \mu_e) \rightarrow \underbrace{(p_F^n)^2/2M_N}_{\text{large scale}} \sim p_F^e \longrightarrow p_F^n \gg p_F^e = p_F^p$$

$$Y_p \sim 0.03\text{-}0.1 \quad (\text{for } < n_0)$$

中性子星観測：過去と現在

1934) Zwicky & Baade (予言) "超新星: 恒星→ 中性子星" [1931: 中性子の発見 (Chadwick)]

1967) Bell & Hewish: 周期1.337s のパルサーの発見 "中性子星の存在証明"

1974) Taylor & Hulse: 連星中性子星系の発見 & 軌道減衰の観測

"重力波の存在の間接的証明"

2010) Demorest+: 2 倍太陽質量を持つ中性子星の発見

"状態方程式への強力な制限"

2017) LIGO-Virgo: 連星中性子星からの重力波 (+ 電磁波観測)

"マルチメッセンジャー天文学の始まり"

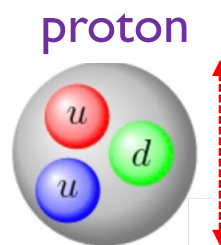
2019-) NICER: 中性子星半径の精密測定

M-RとEOS

QCDと核物理のスケール

dynamical scale

- $\Lambda_{\text{QCD}} \sim 200 \text{ MeV} \sim 1 \text{ fm}^{-1}$



$$\sim \Lambda_{\text{QCD}}^{-1}$$

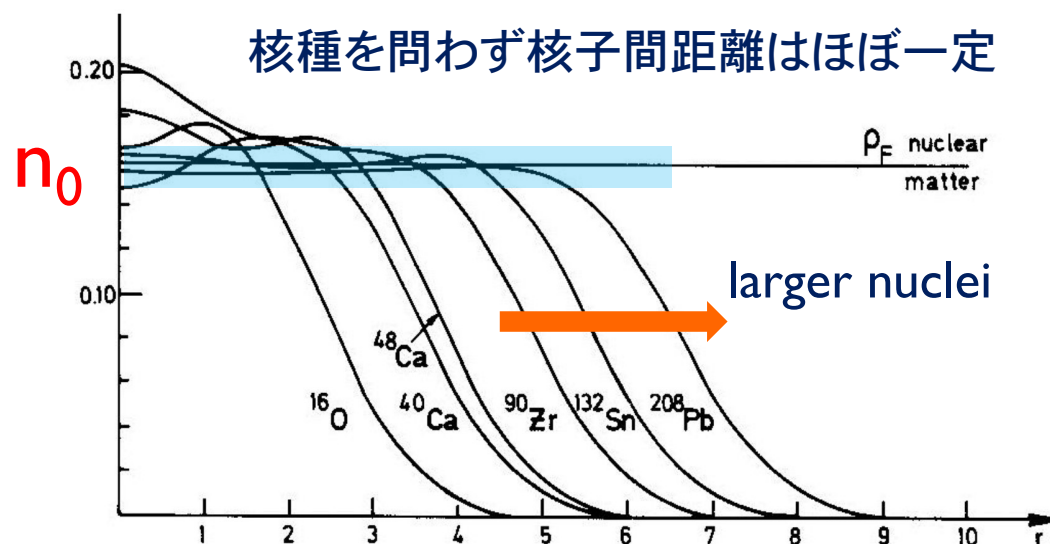
mass

“large”

$$M_N \sim N_c \Lambda_{\text{QCD}} \sim 1 \text{ GeV}$$

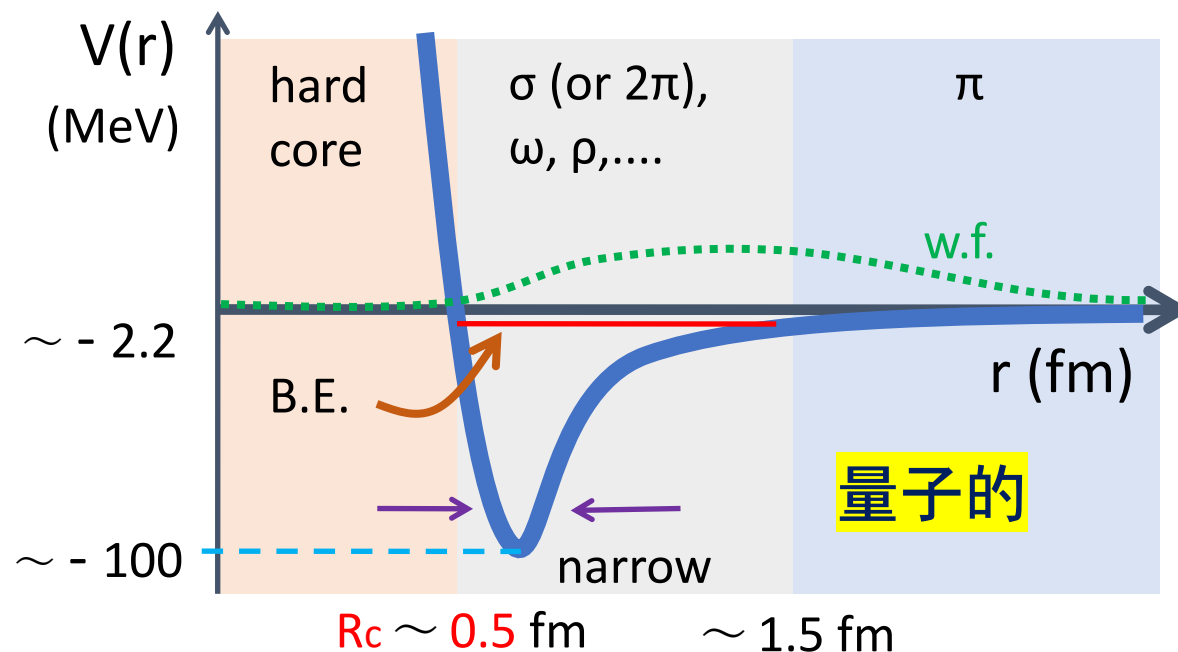
- 飽和密度: $n_0 = 0.16 \text{ fm}^{-3}$

($\sim$ 原子核の中心密度)



- nuclear binding E: $O(1-10) \text{ MeV}$

(unnaturally small !!)



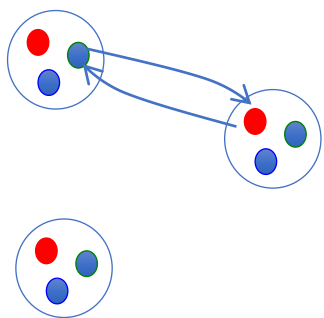
高密度QCD概観

($n_0 = 0.16 \text{ fm}^{-3}$)

[Masuda-Hatsuda-Takatsuka '12
TK-Powell-Song-Baym '14]

14/40

- 少数中間子交換

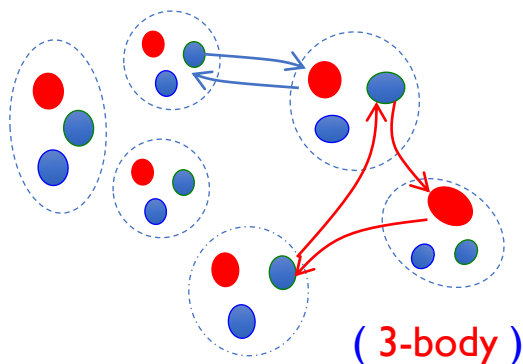


第一原理計算

原子核実験

steady progress

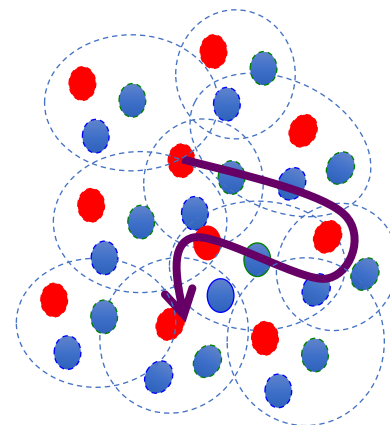
- 多体力
- 核子構造変化,... (?)
- hyperons, Δ ,... (?)



most difficult

(自由度??)

- バリオンの重なり
- Quark Fermi sea



強相関

(d.o.f : 準粒子描像??)

not explored well



(pQCD)

[Freedman-McLerran,
Kurkela+, Fujimoto+...]

$\sim 1.4 M_\odot$

$\sim 2 M_\odot$

n_B

$\sim 2n_0$

Hints from NS

$\sim 5n_0$

$\sim 40n_0$

Mass-Radius (M-R) 関係式と EOS

Tolman-Oppenheimer-Volkoff (TOV) eq.

Einstein eq. **QCD EoS**

$$G_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$$



静的

& 球対称な場合

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP(r)}{dr} = - \frac{GM(r)\varepsilon(r)}{r^2} \left(1 + \frac{P}{\varepsilon}\right) \left(1 + \frac{4\pi r^3 P}{M(r)}\right) \left(1 - \frac{2GM(r)}{r}\right)^{-1} \\ \frac{dM(r)}{dr} = 4\pi r^2 \varepsilon(r) \end{array} \right.$$

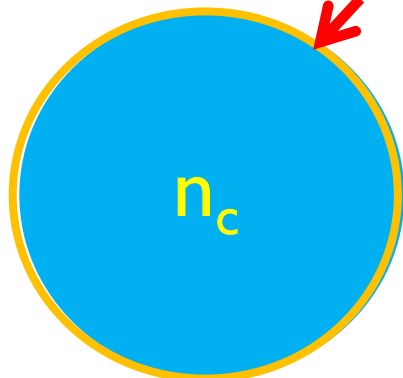
一般相対論効果(> 1)

r 方向に積分



$$n_c = n_B(r=0)$$

手で初期条件を与える



$$P(r=R) = 0$$

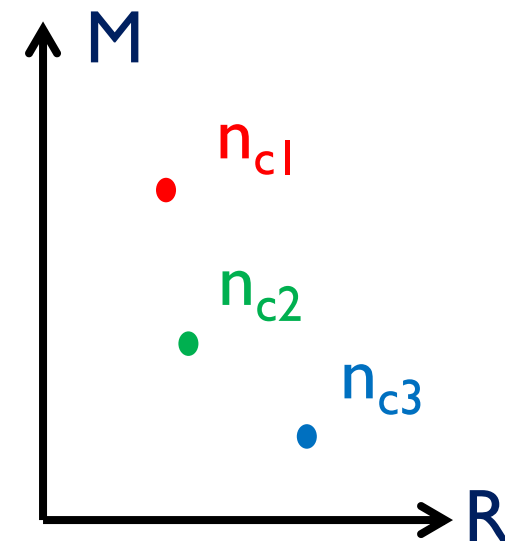
(def. of R)



$$M(n_c)$$

$$R(n_c)$$

at given n_c

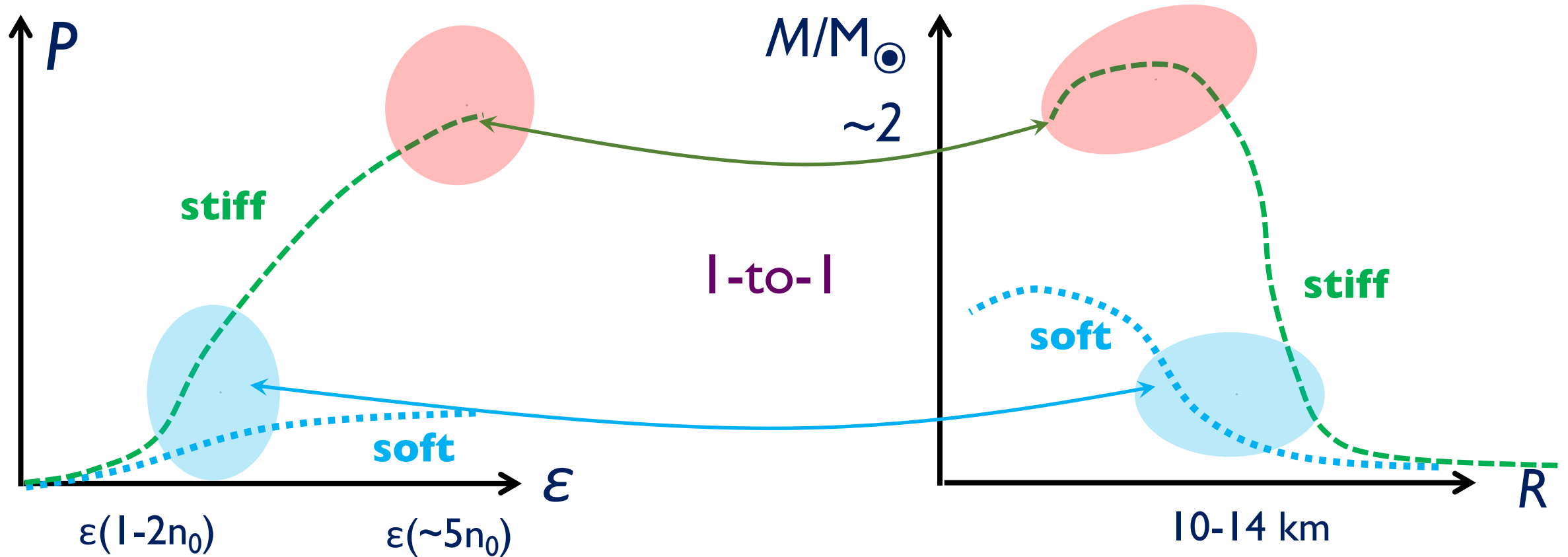
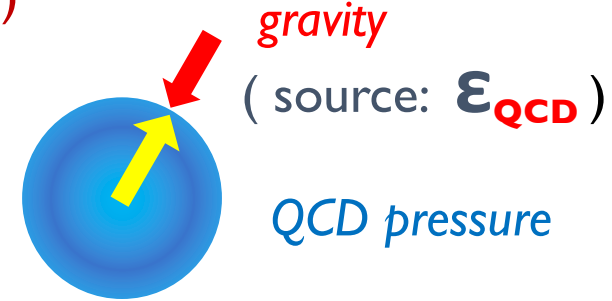


EoSの"硬さ" & M-R

Ref) Lattimer & Prakash (2001)

指標: P vs ϵ

(音速: $c_s^2 = dP/d\epsilon$ もよく使われるが...)

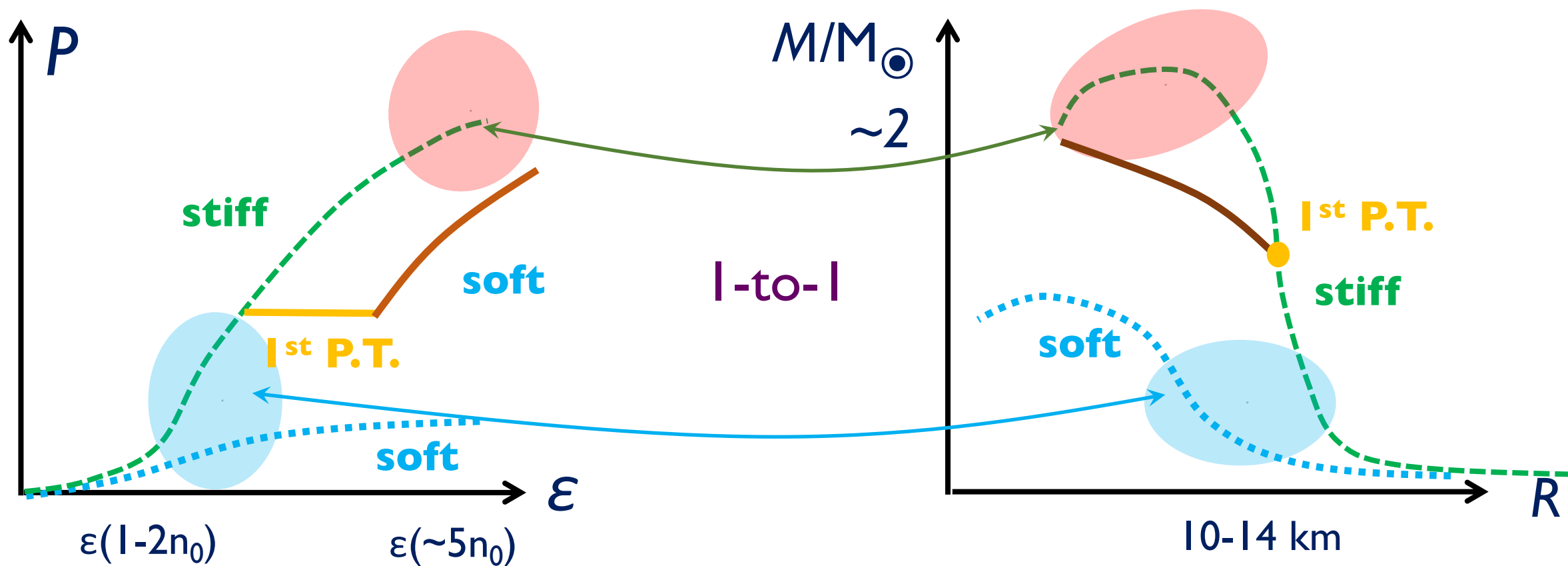


EoSの"硬さ" & M-R

Ref) Lattimer & Prakash (2001)

stiff-to-soft EOS

例) ハドロン・クォーク 1 次相転移模型

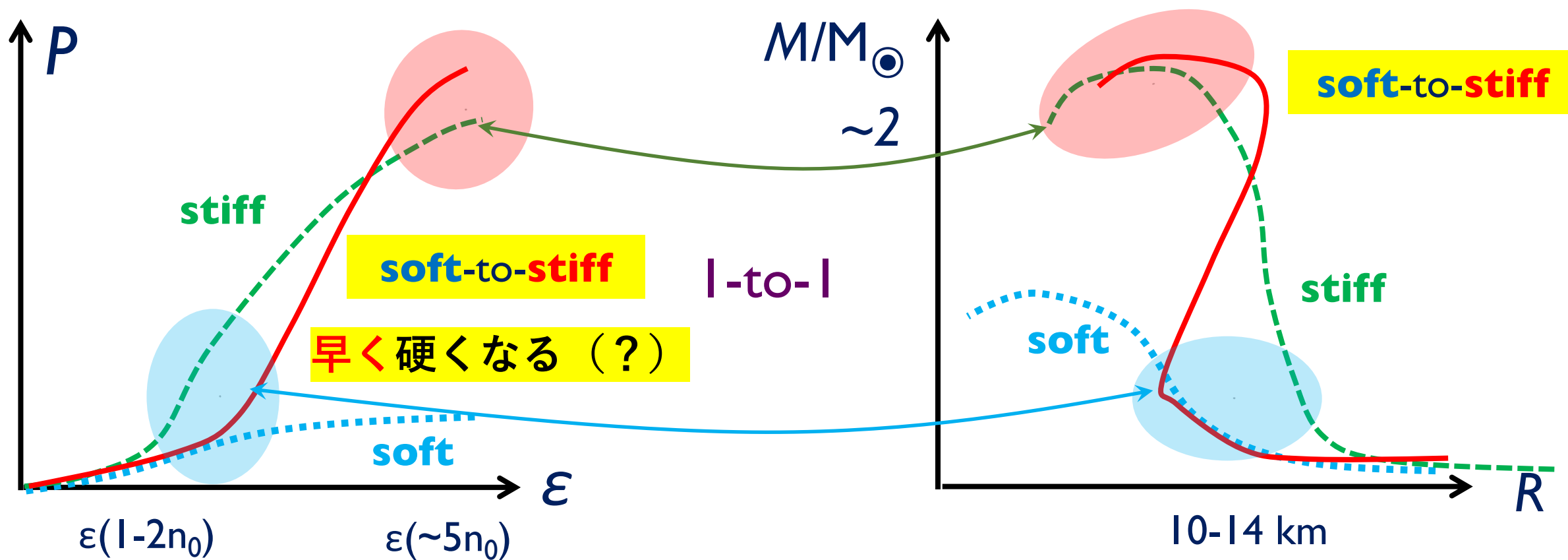


EoSの"硬さ" & M-R

Ref) Lattimer & Prakash (2001)

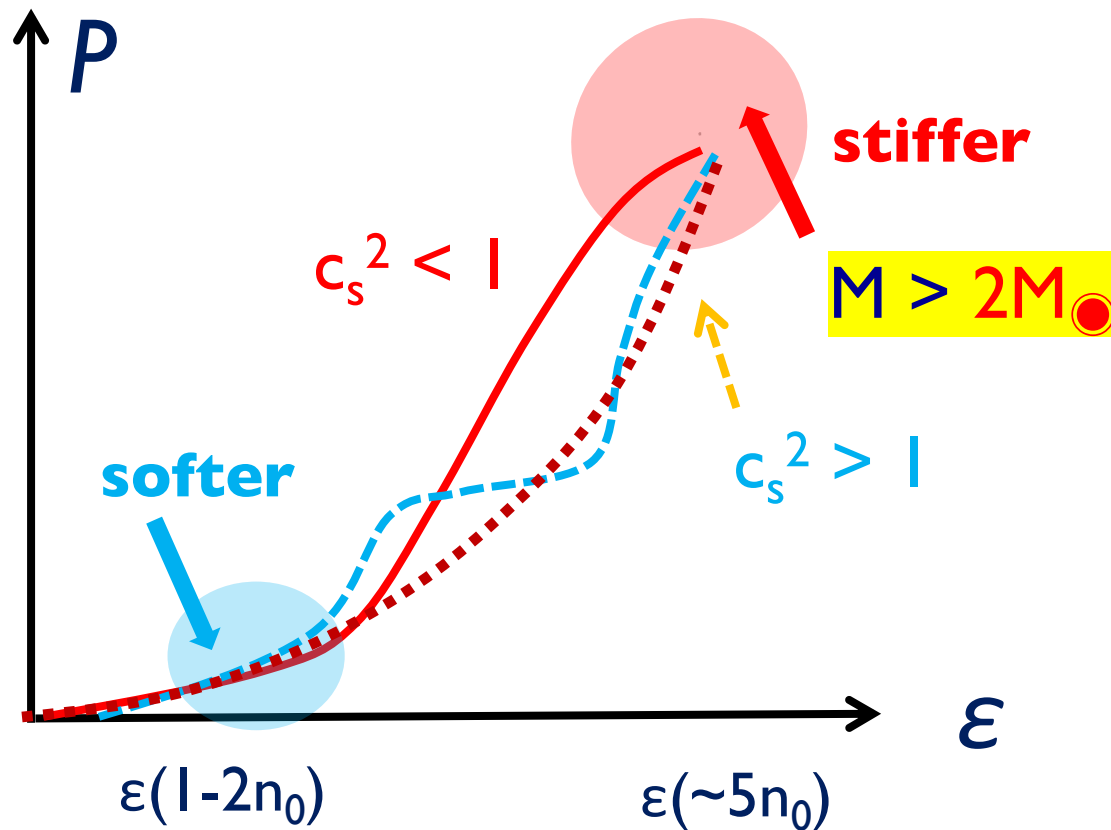
soft-to-stiff EOS

例) クォーク・ハドロン・クロスオーバー模型



Correlating **low** ($< \sim 2n_0$) & **high** ($> \sim 5n_0$) density EOS

音速: $c_s^2 = dP/d\varepsilon < 1$ (因果律: 音速 $<$ 光速)



急激に硬くなり過ぎると駄目

⇒ $2-5n_0$ のEOSに強い制限

・1次相転移模型は難易度大

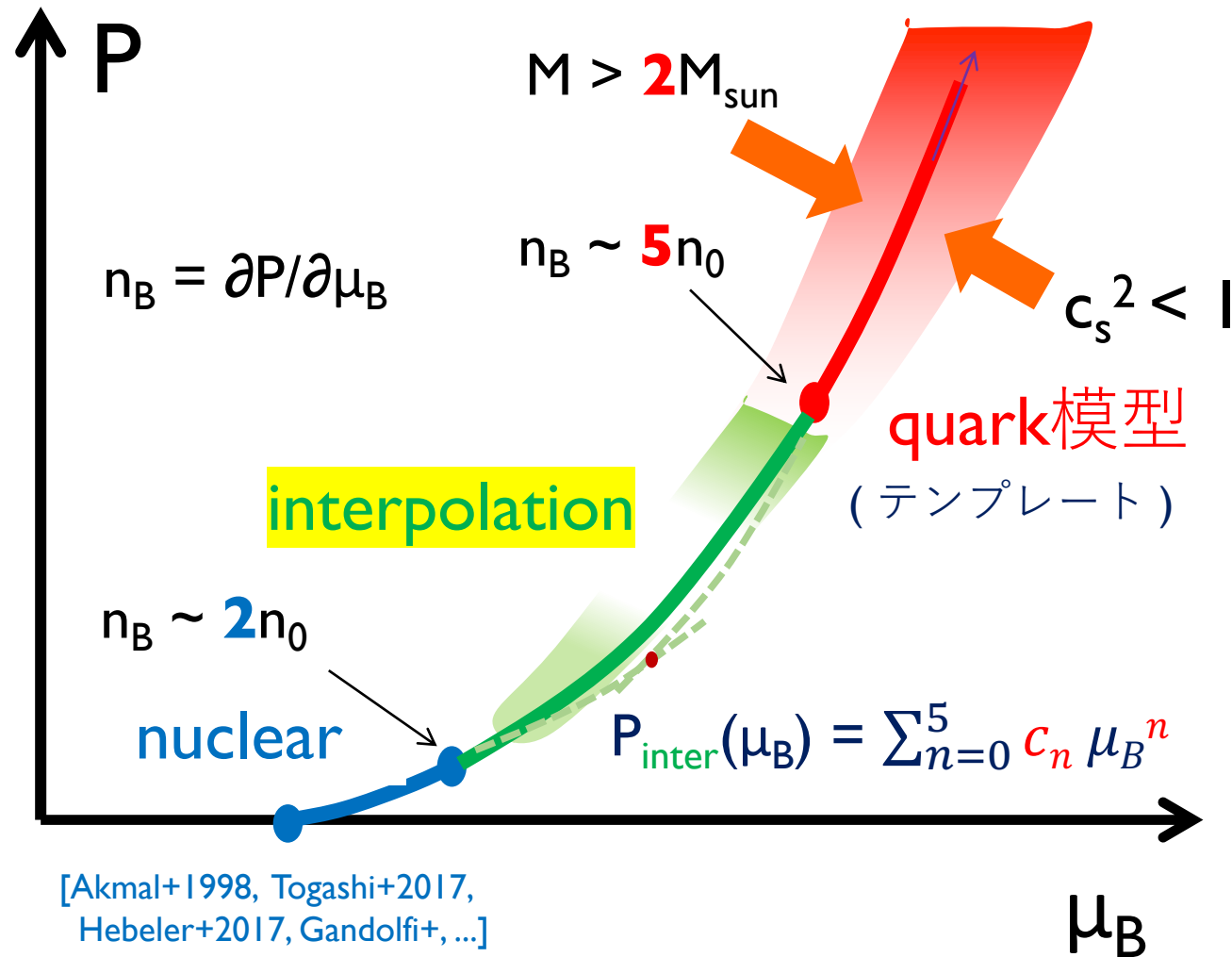
・核物質 $w N(>2)$ 体力は高密度で因果律を破る

クロスオーバー？

微視的物理は??

現象論的 3-window 模型: QHC

[Masuda+'12, TK+'14, Baym+'17, '19, TK+'21;]



- 微視的nuclear EOS → 低密度BC
- ハドロン物理の quark 模型
- 観測的・原理的拘束条件



- 有効相互作用 → 10-20%の範囲で制限
(クォーク) (強相関性の確認)
- c_s^2 のピークの発見 [Masuda+'12]
- 核物理とクォーク物理の相関
- QCD相図への新たな興味

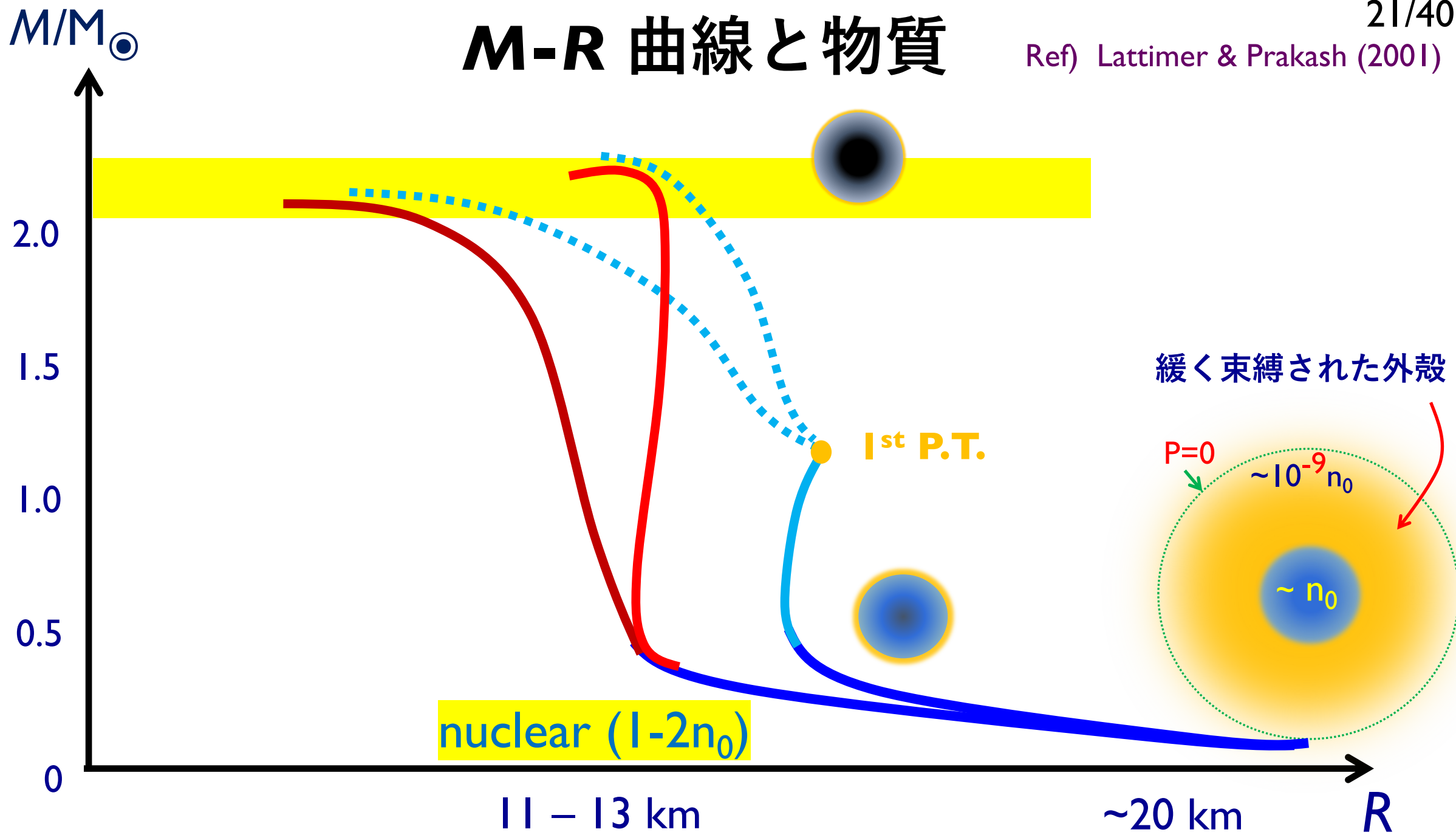
内挿的アプローチの色々

- 1) matter at $> \sim 2n_0$ の「微視的物理」を探る
- 2) pQCD at $\sim 40n_0$ & ChEFT at $\sim 1.1n_0$ から **EOS**を拘束(予言)
- 3) NS観測・原子核実験から **nuclear EOS at $\sim 2n_0$** を制限

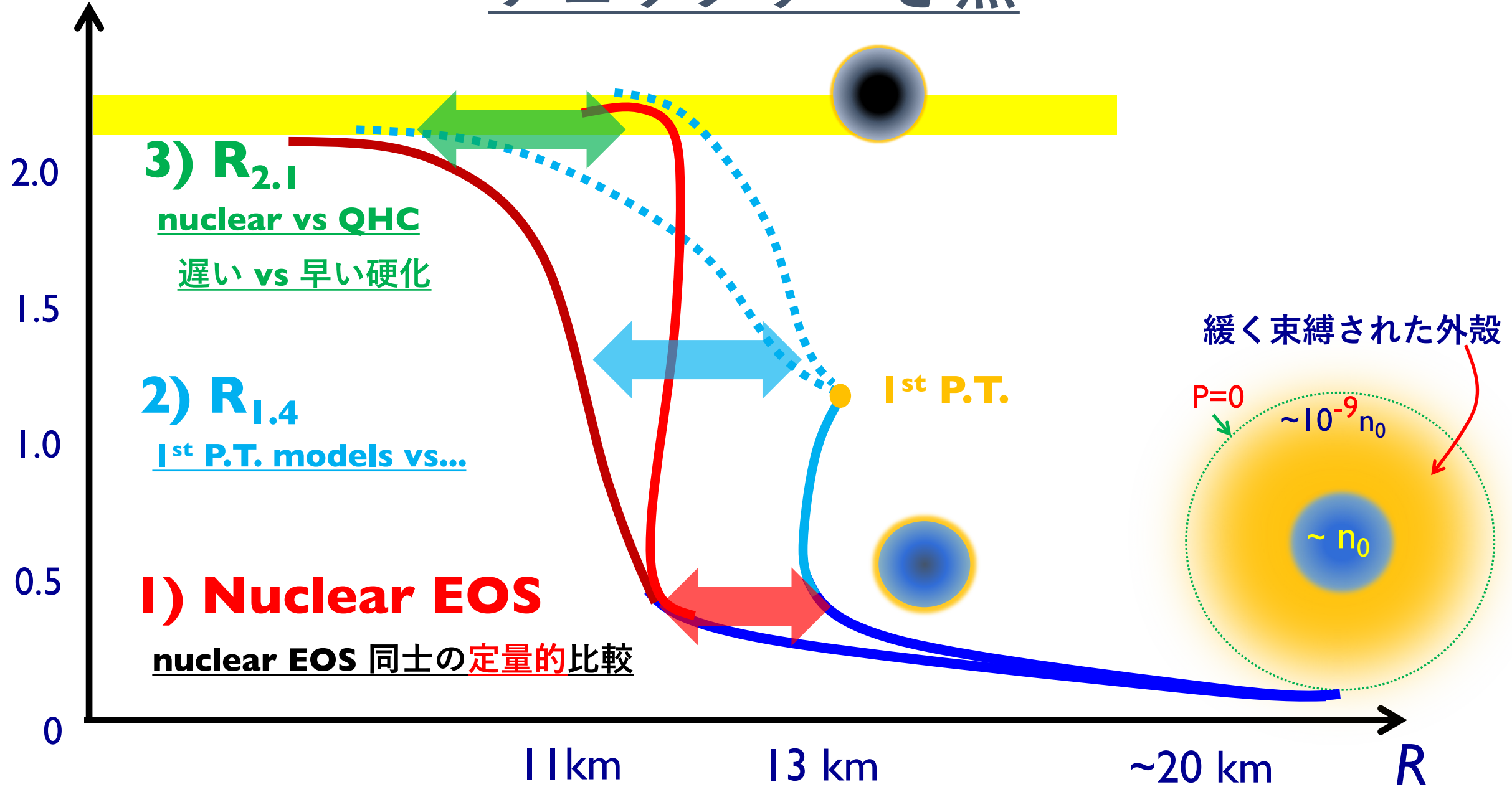
M-R観測の現状

M - R 曲線と物質

Ref) Lattimer & Prakash (2001)



チェックすべき点

 $M/M_{\odot}$


M-R観測

M：かなり高精度に測定できている

- 1) 連星系にいるパルサーの公転を観測する
- 2) 中性子星合体 $\Rightarrow M_{\max}$ の下限（上限）

R：測定はMよりはるかに難しい

- 1) 表面の温度分布の時間発展を用いた推定 (2019-NICER)
- 2) 連星中性子星の潮汐率を使う推定 (2017 GW170817)

連星系を用いた質量評価 (片方がパルサーの場合)

測定量: **パルス周期** (公転運動中の各時刻で)

未知量

m, M

4つ

a_{orb} : 軌道半径

Θ : 観測者に対する角度

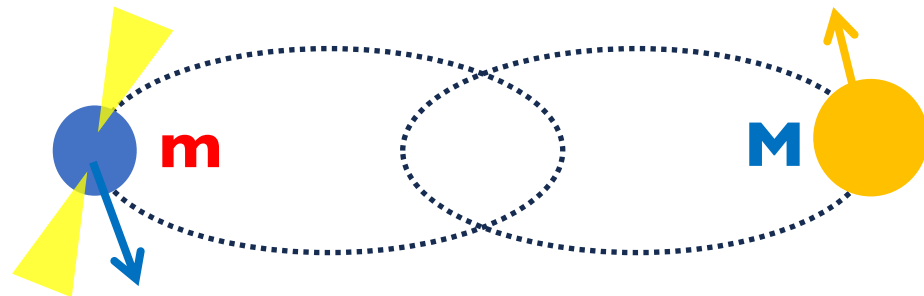
観測量

$P_{\text{公転}}$ → **1) a_{orb} と $(m+M)$ の関係**

$P_{\text{pulse}}(t)$ → **2) ドップラー効果**
見かけの速度

3) 赤方偏移 (時間の遅れ)

伴星がパルサーの位置に
作る重力場の影響



あと一つ情報があればよい

The **first** (established) $\sim 2M_{\odot}$ NS : **PSR J1614-2230**

NS – **WD** (*white dwarf*) *binary*

[v1) Demorest+ (2010); v2) Fonseca+ (2016)]

自転周期 = 2.15 ms; 公転周期 = 8.7 days

角度 = **89.17** $\pm$ 0.02 ; edge on

$$M_{\text{NS}} = \mathbf{1.928} \pm 0.017 M_{\odot}$$

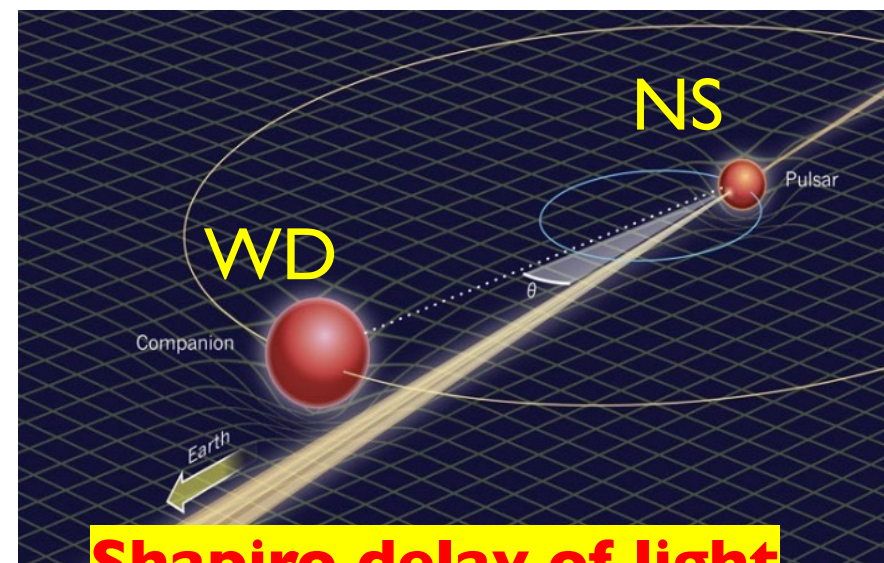
$$M_{\text{WD}} = 0.500 \pm 0.006 M_{\odot}$$

パルスが WD の領域を通過 (!)

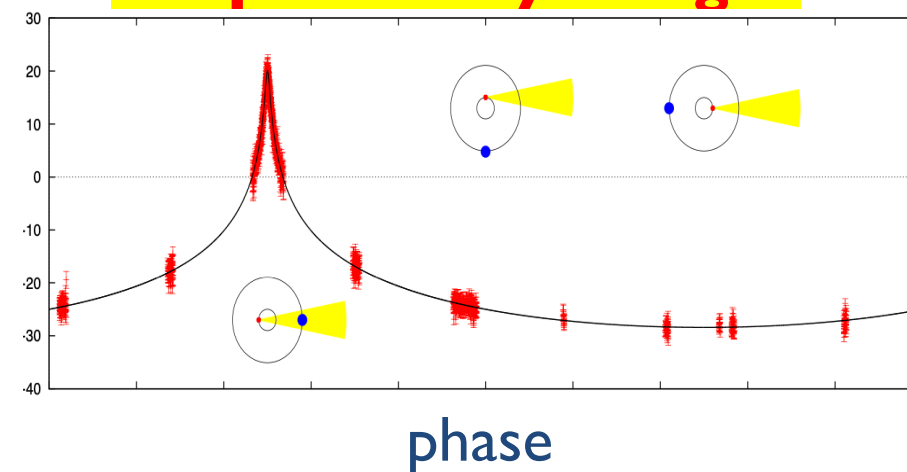
光の到達時間の遅れ (**4 つ目の情報**)

ほぼ同じ例 : **PSR J0740+6620**

$$M_{\text{NS}} = \mathbf{2.08} \pm 0.07 M_{\odot}$$

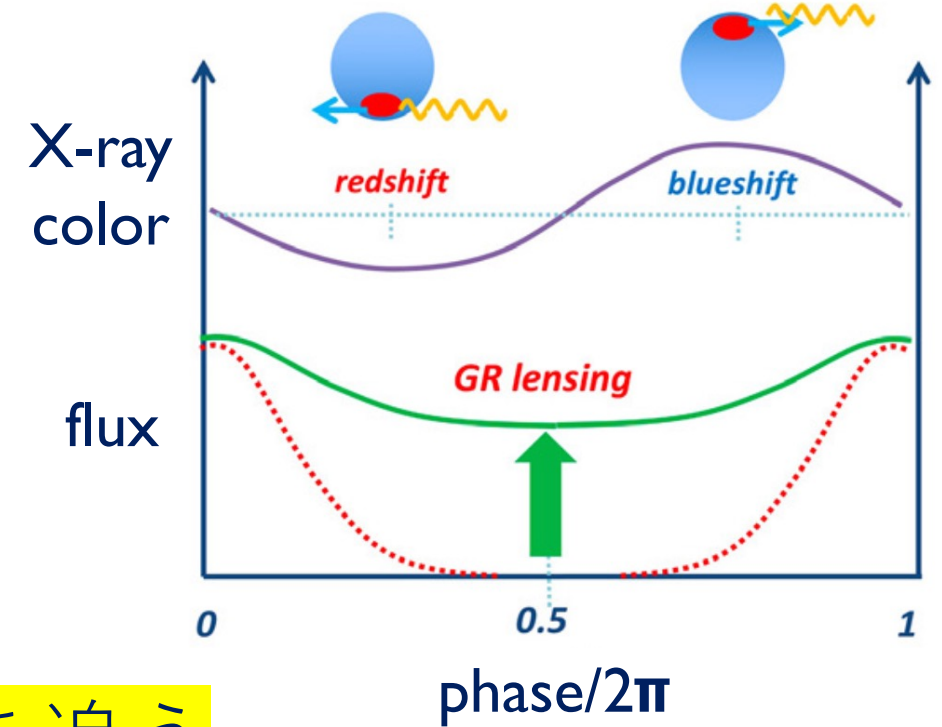
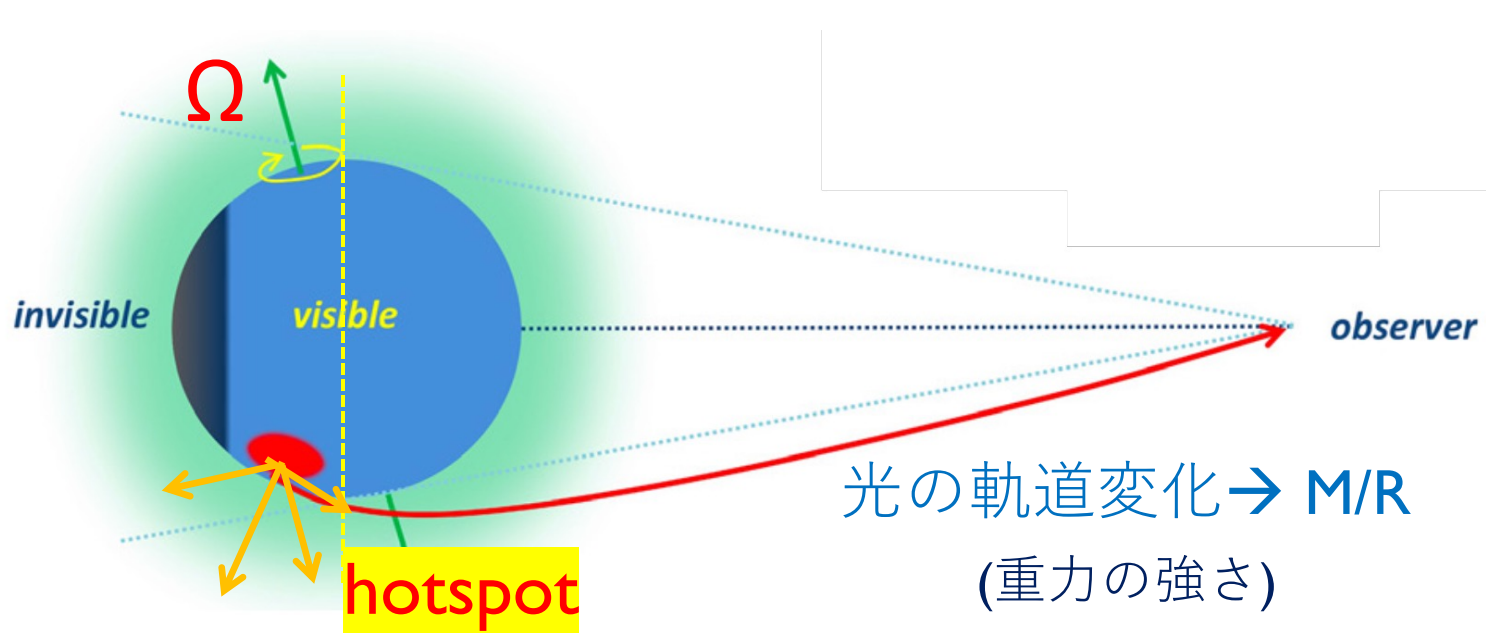


Shapiro delay of light



NICER

(**N**eutron star **I**nterior **C**omposition **E**xplorer, 2017-)



hot spot の時間変化を追う

period

Ω (パルス周期)

Doppler shifted spectra

$R\Omega$ (表面速度)

GR lensing

(in principle)

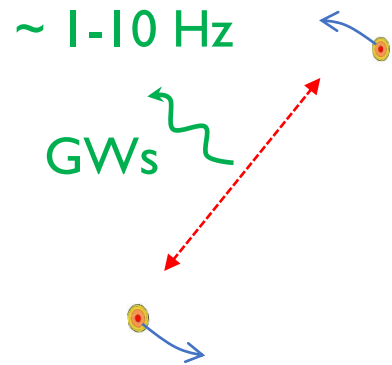
M/R (質量/半径)

重力波 (GW170817 case)



Early inspiral

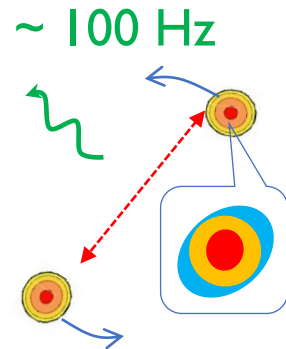
~ - Myrs-Gyrs



点粒子的

Tidally deformed

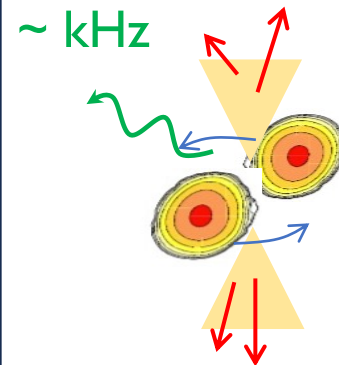
~ - 10 ms



有限体積効果

Merger

$t = 0$



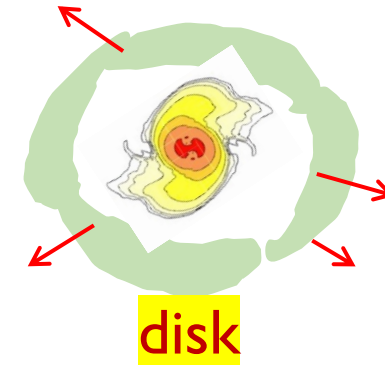
life time, f_2 -frequency

1-3kHz → 見えてない

(観測困難)

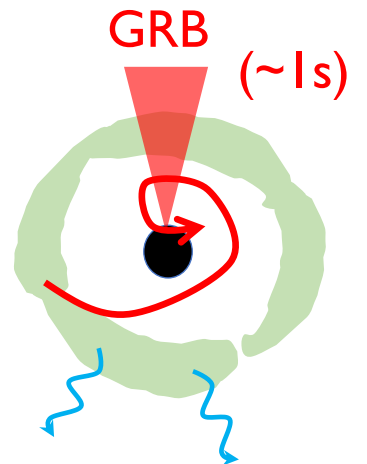
HMNS, SMNS

~ 1-10 ms



BH

> ~ 1s



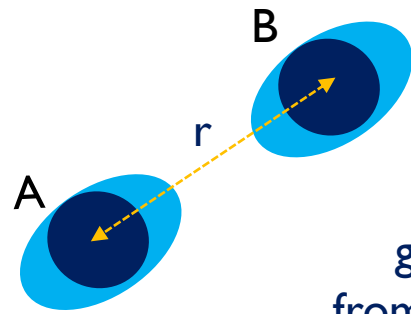
kilonova (days-weeks)

観測済

M_1 & M_2

$R_{\sim 1.4}$

Tidally deformed phase



quadrupole
moment

polarizability

$$Q_{ij} = -\lambda(M) E_{ij}$$

external
field

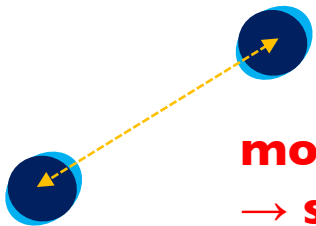
$$E_{ij} = -\frac{\partial^2 V}{\partial x_i \partial x_j}$$

grav. pot.
from the star A

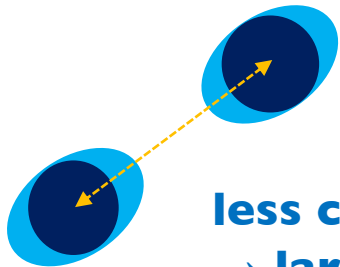
$$V_A(r) \simeq -\frac{GM_A}{r} - \frac{GQ_{AB}}{r^3}$$

deformation of A by B

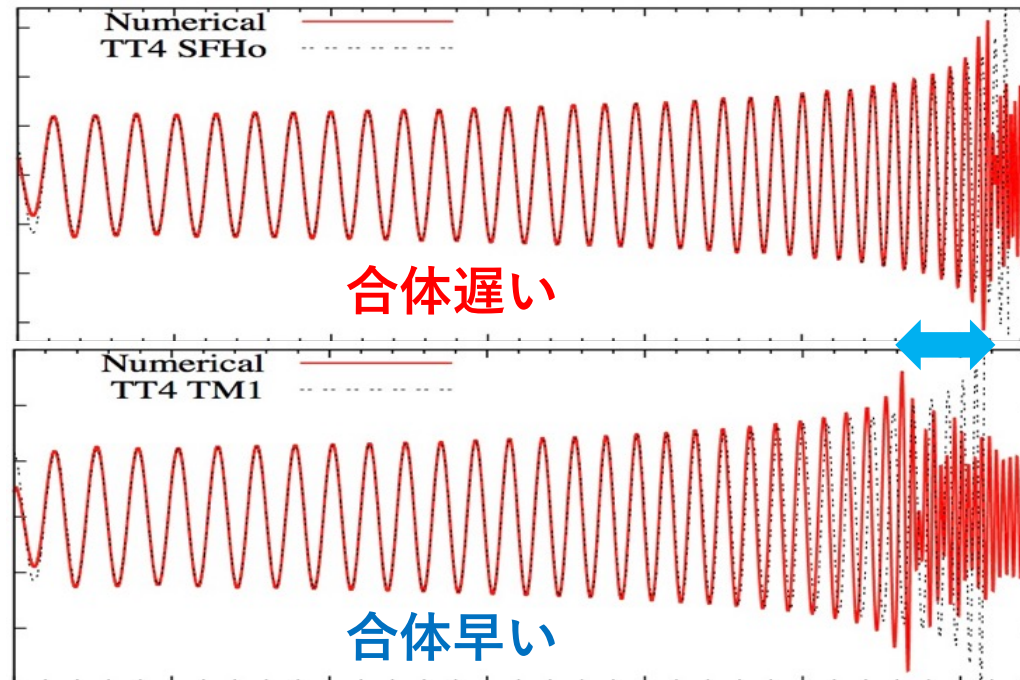
付加的な**引力** → **合体が早まる**



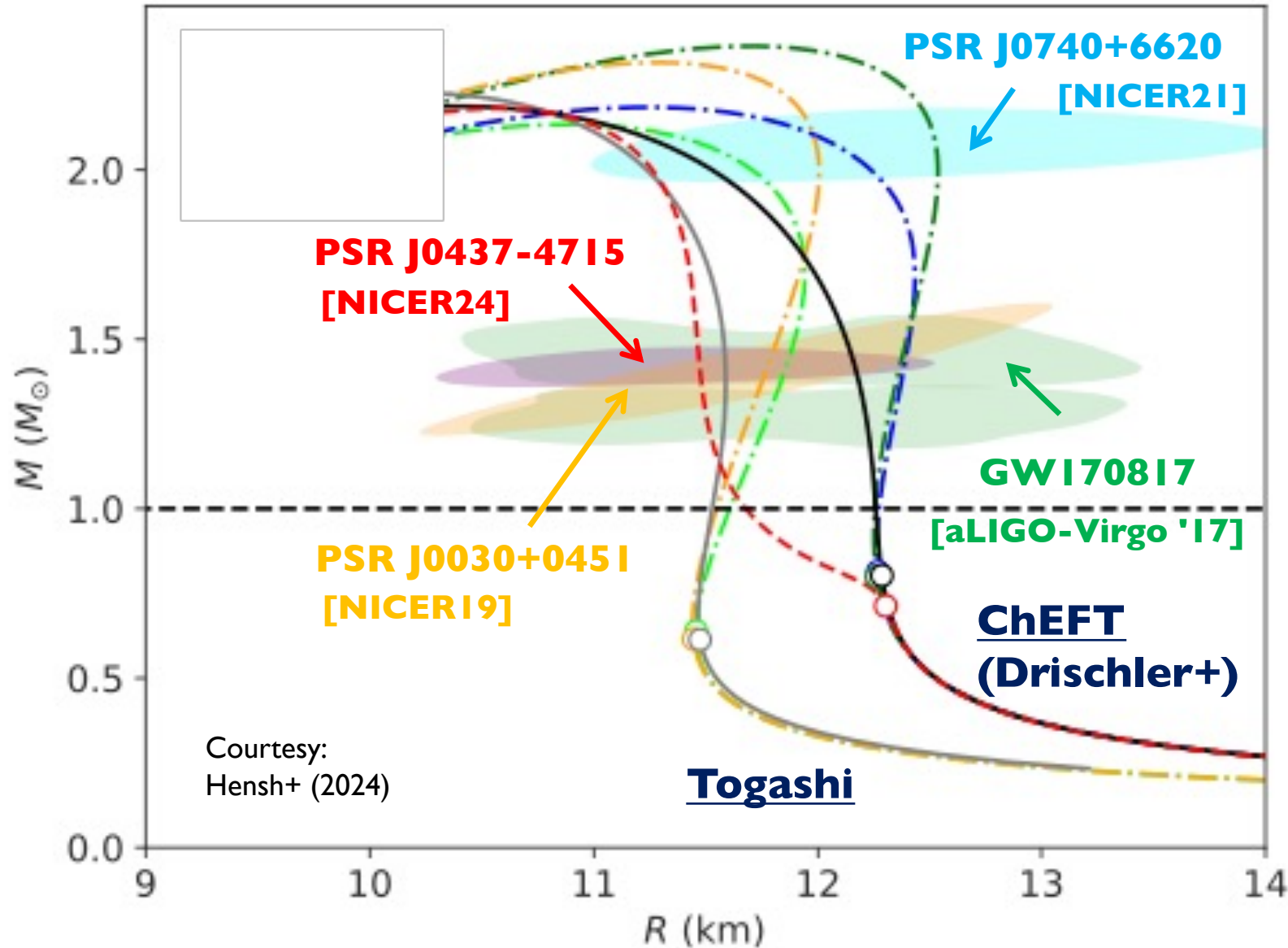
more compact
→ **smaller Q**



less compact
→ **larger Q**



M-R観測の現状



- QHC21Ch-soft
- QHC21Ch-stiff
- QHC21T-soft
- QHC21T-stiff
- Togashi
- ChEFTex
- 1PT-NQS

$$R_{2.1} \sim R_{1.4}$$

または

$$R_{2.1} > R_{1.4} \quad (?)$$

soft-to-stiff EOS ?

柔らかい核物質EOS $\Rightarrow$ 硬いクォークEOS ?

with 音速ピーク $c_s^2 > 1/3$

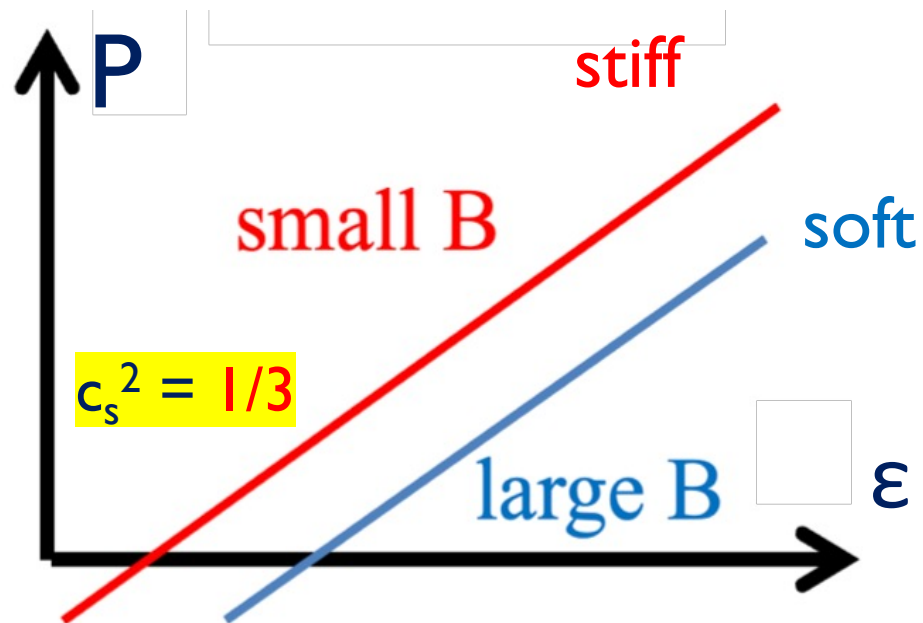
物性としてあり得るのか？

硬いクォークEOS?

e.g.) free massless quarks

$$P = \frac{\varepsilon}{3} - B'$$

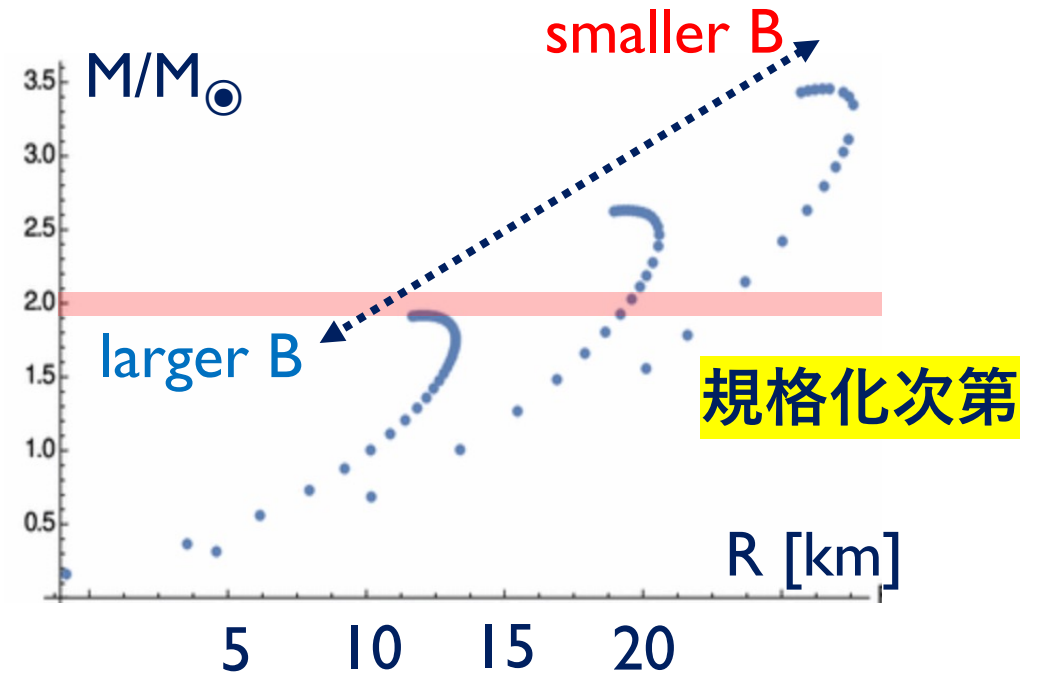
規格化



クォークの運動E >> バリオンの運動E

$O(N_c)$

$O(1/N_c)$



クォーク描像から始めたら硬いEOSを作りやすい??

クォーク EOS : 相互作用 (& 質量効果)

相対論的運動E 相互作用 相互作用

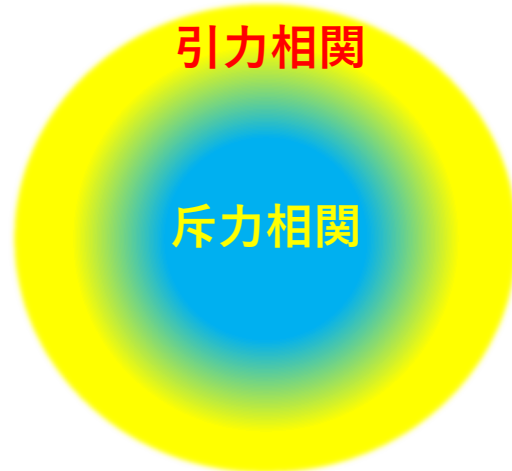
$$\varepsilon(n) = an^{4/3} + \underbrace{bn^{\alpha}}_{\text{相互作用}} \longrightarrow P = \frac{\varepsilon}{3} + \underbrace{b}_{\text{相互作用}} \left(\underbrace{\alpha}_{\text{相互作用}} - \frac{4}{3} \right) n^{\alpha}$$

(n : quark density)

硬いEOSを得るには:

for $\alpha > 4/3$:	$b > 0$	e.g. bulk repulsion, $\sim + n_B^2/\Lambda^2$
for $\alpha < 4/3$:	$b < 0$	e.g. BCS的引力相関, $\sim - \Lambda^2 n_B^{2/3}$

(質量項は符号逆⇒EOS軟化)



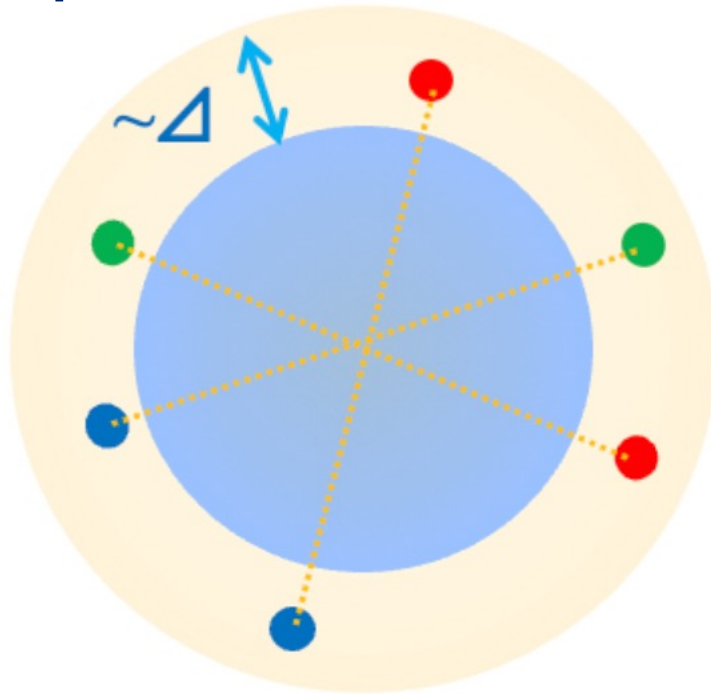
引力でもEOSは硬くなる

[TK-Powell-Song-Baym, '14]

フェルミ面付近の物理

2-particle correlation

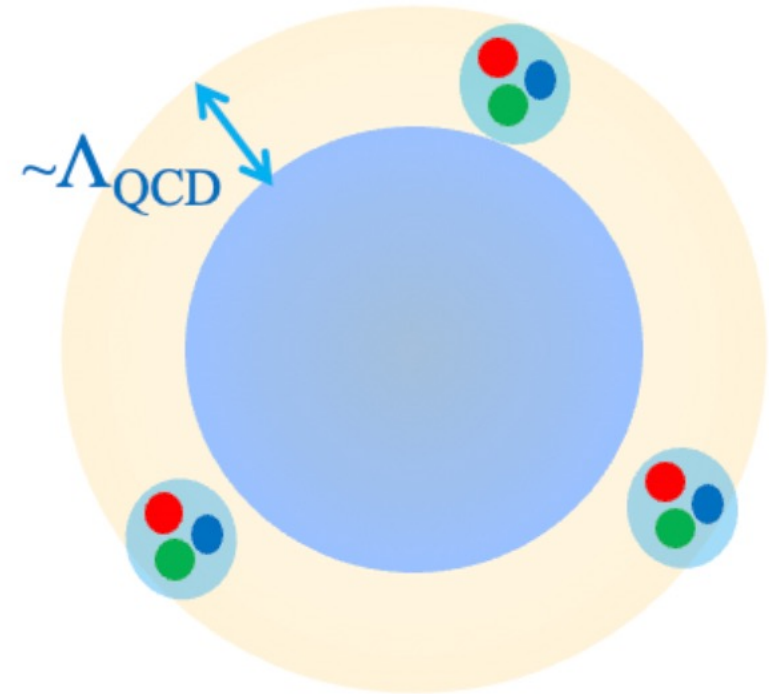
e.g.,
diquark
pairing



color-superconductor (CSC)

[Bailin-Love, Alford, Rajagopal, Wilczek, ...]

3-particle correlation



quarkyonic matter

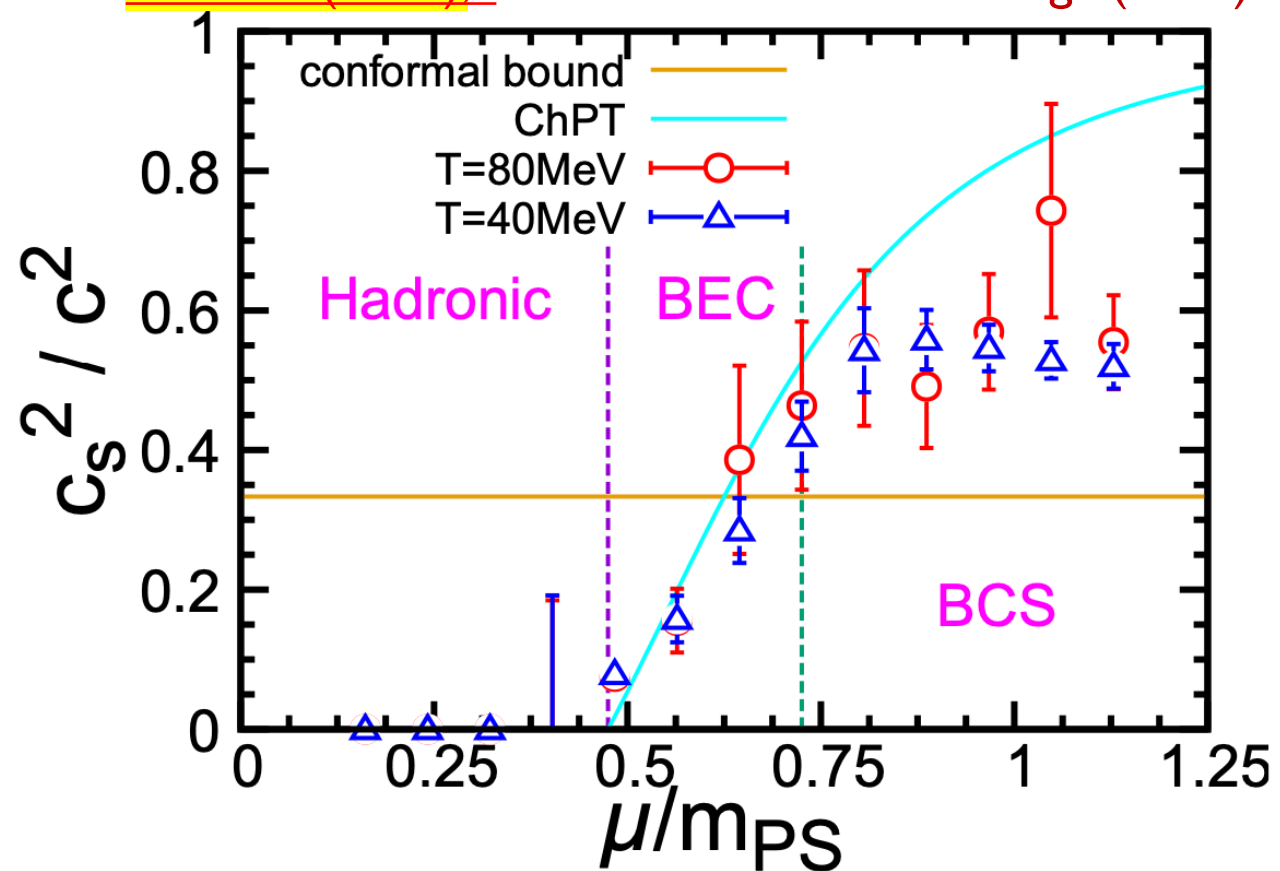
[McLerran-Pisarski '07, Hidaka, TK, ...]

Cooper triple [Tajima+]

ヒント：擬有限密度QCDの格子計算 (符号問題がない)

2カラーQCD → 末永さんのトーク

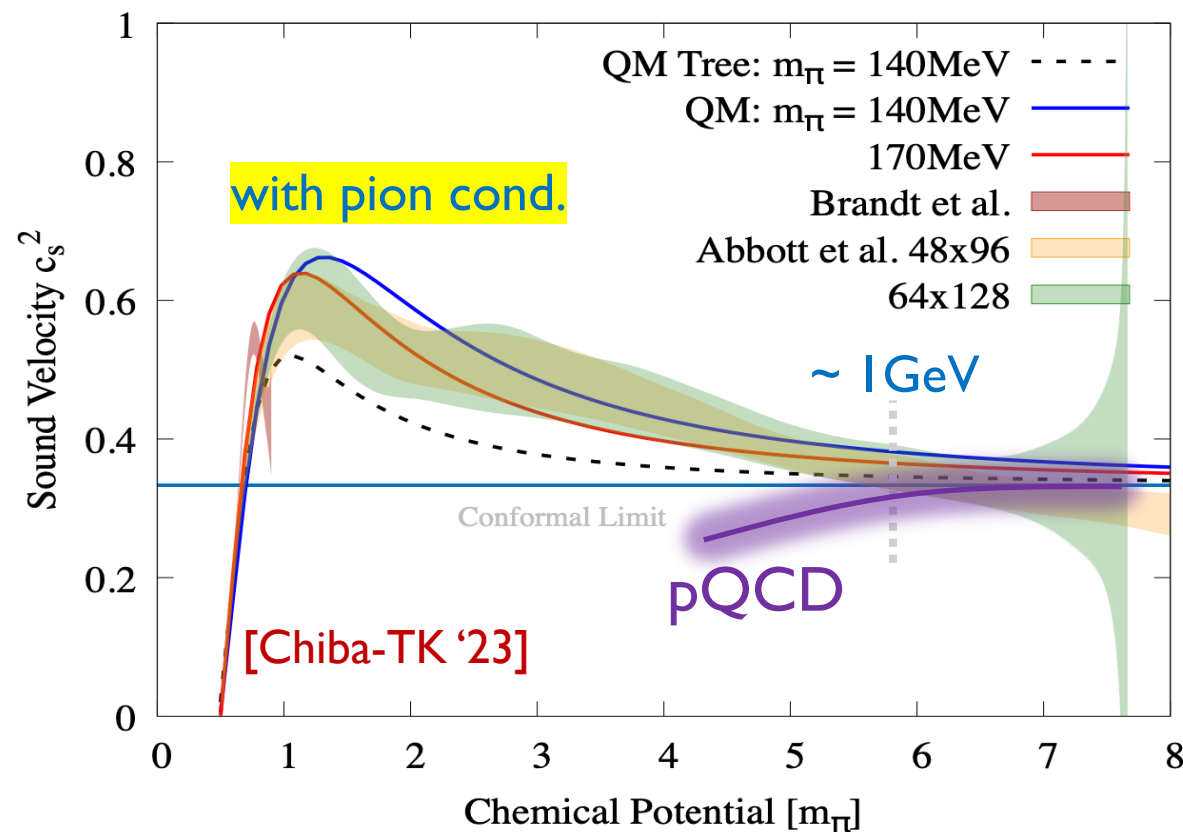
Iida-Itou (2022), Iida-Itou-Murakami-Suenaga (2024)

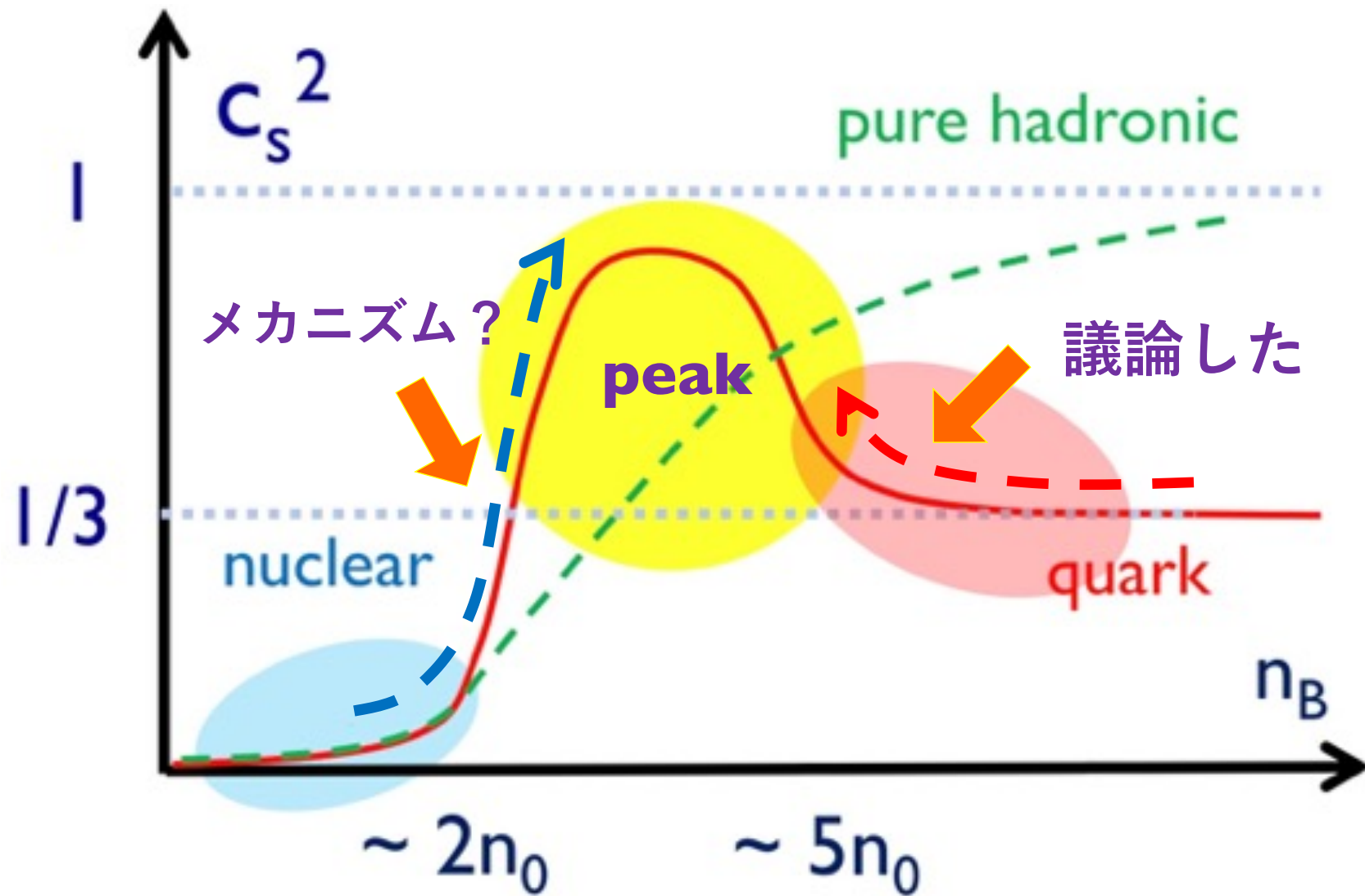


高密度でも 100-200 MeV の BCS gap がある(!)

アイソスピンQCD

Abbott+ (2023, 2044), Brandt (2023)

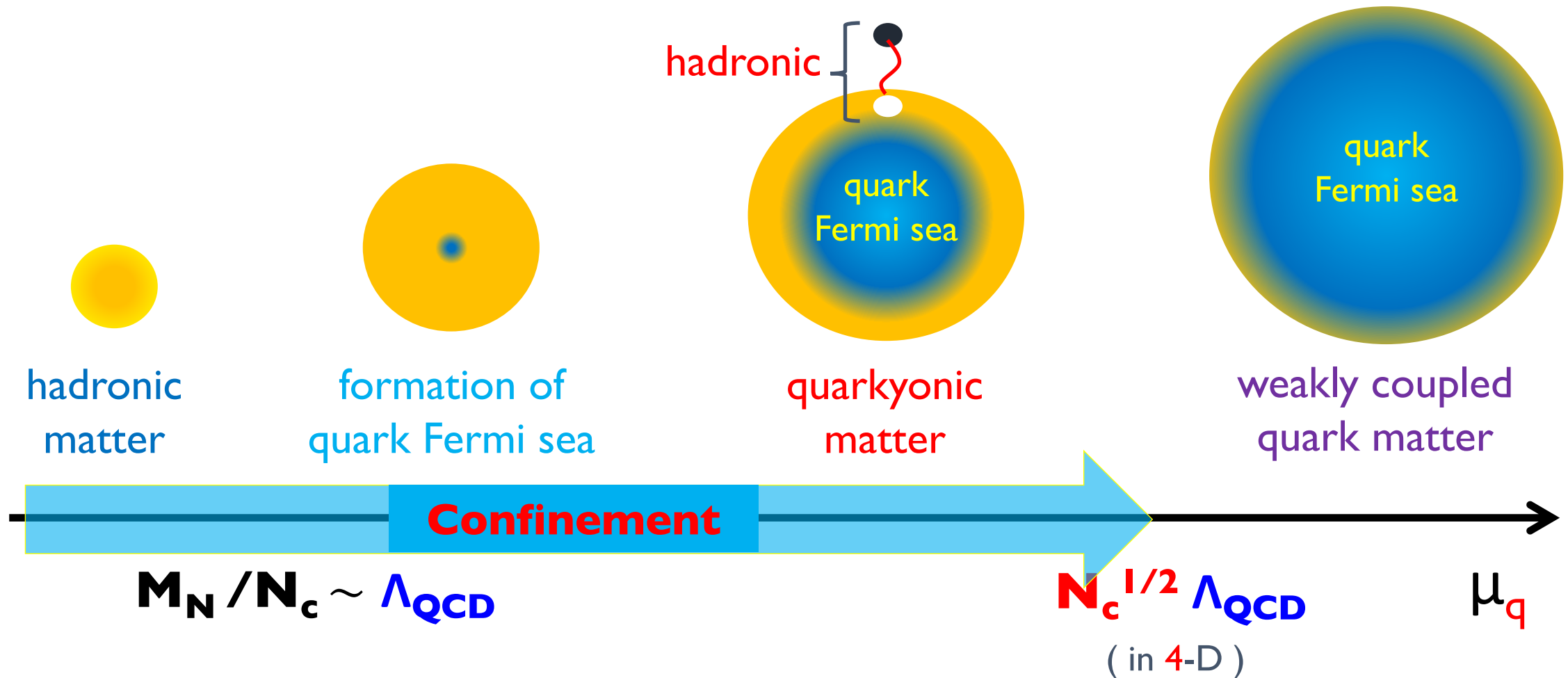




核物質とクォーク物質をどう繋ぐ?

Quarkyonic matter picture on confinement

[McLerran-Pisarski '07]



Sum rules for occupation probabilities cf) [TK '21]

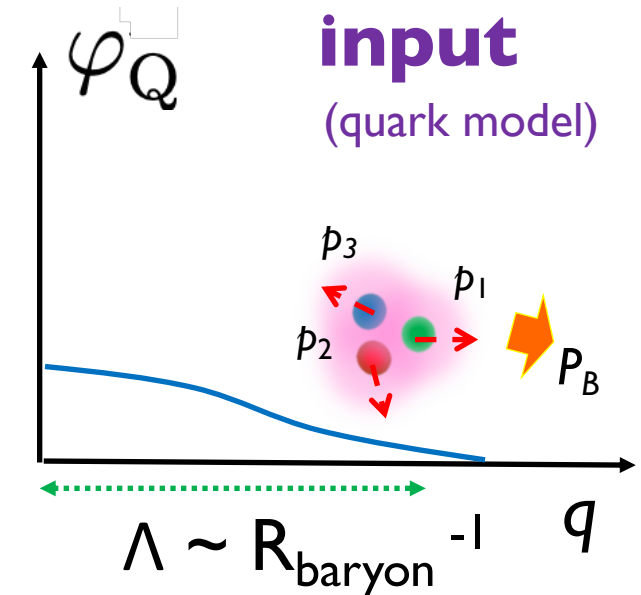
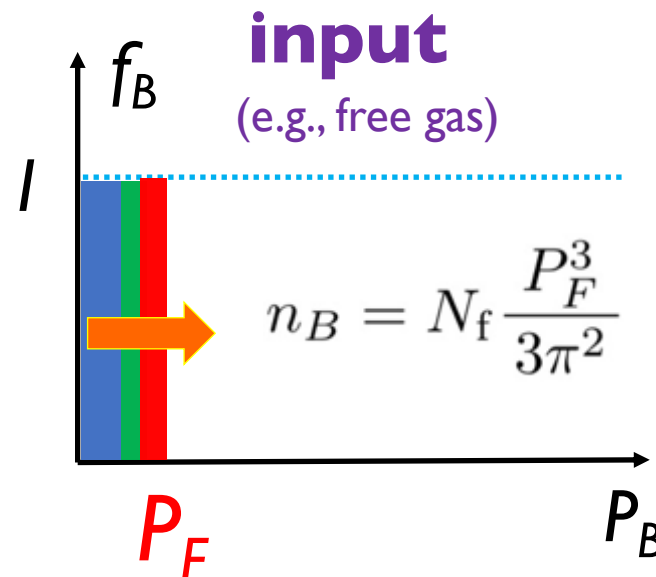
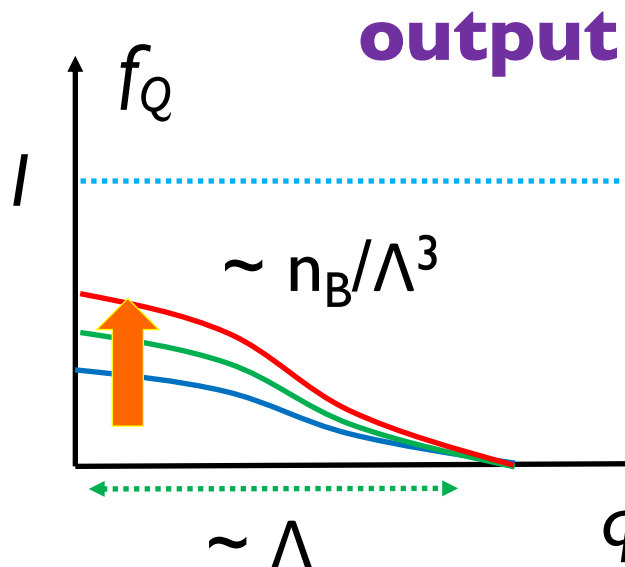
occupation **probability**
of **quark** state with p

occupation **probability**
of **baryon** state with P_B

quark mom. distribution
in a baryon

$$\underline{f_Q(\mathbf{q})} = \int_{\mathbf{P}_B} \underline{f_B(\mathbf{P}_B)} \underline{\varphi_Q^B(\mathbf{q} - \mathbf{P}_B/N_c)}$$

e.g.) in **ideal** baryonic matter



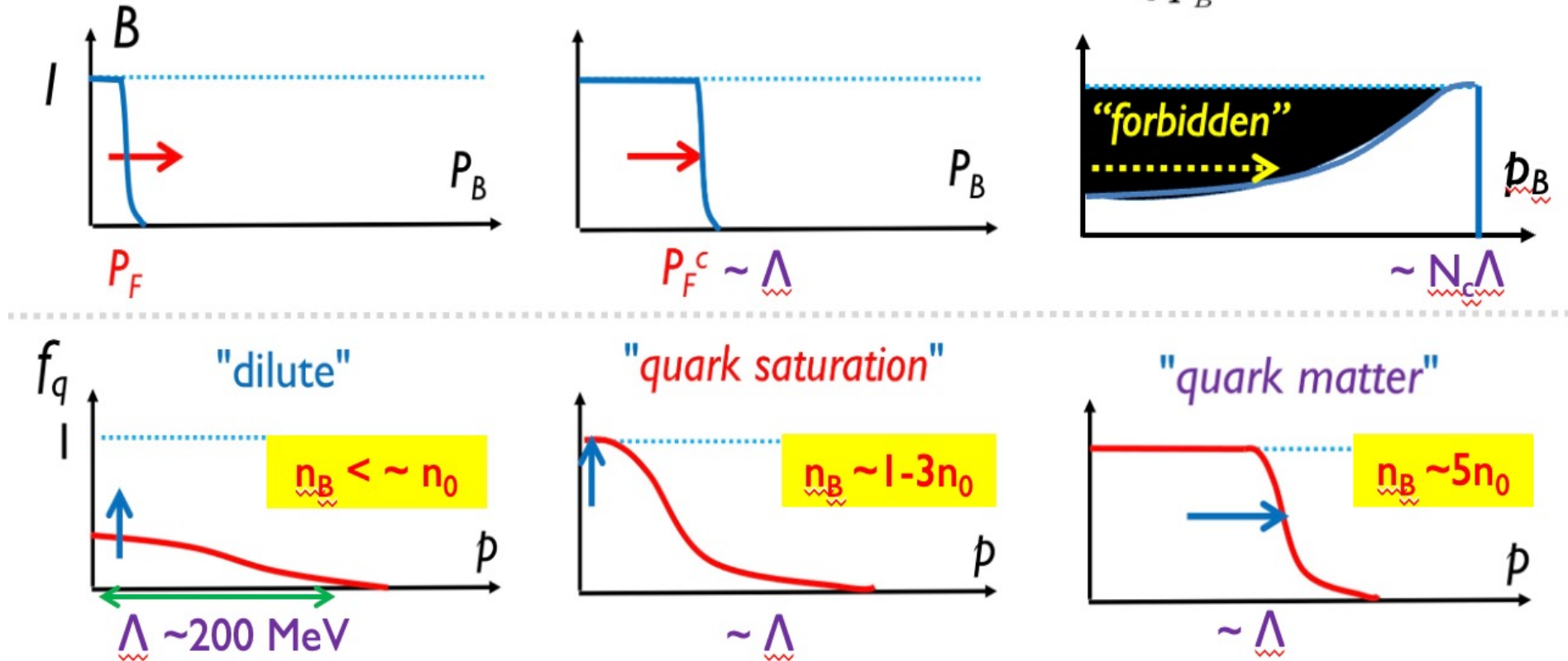
Evolution of **occ. probabilities**

$$f_q(p; n_B) = \int_{P_B} \mathcal{B}(P_B; n_B) Q_{\text{in}}(p, P_B)$$

**baryon
bases**

dual

**quark
bases**

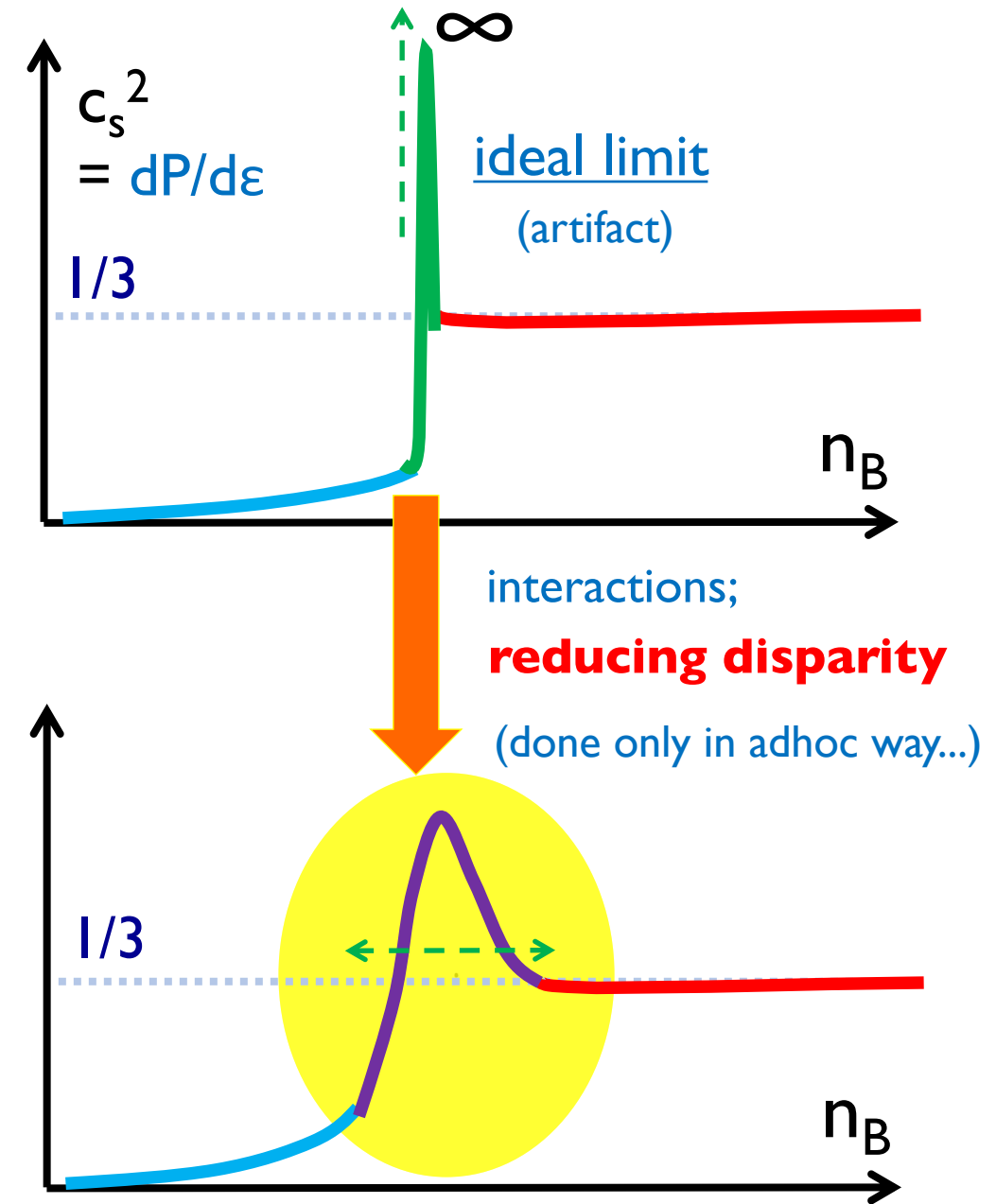
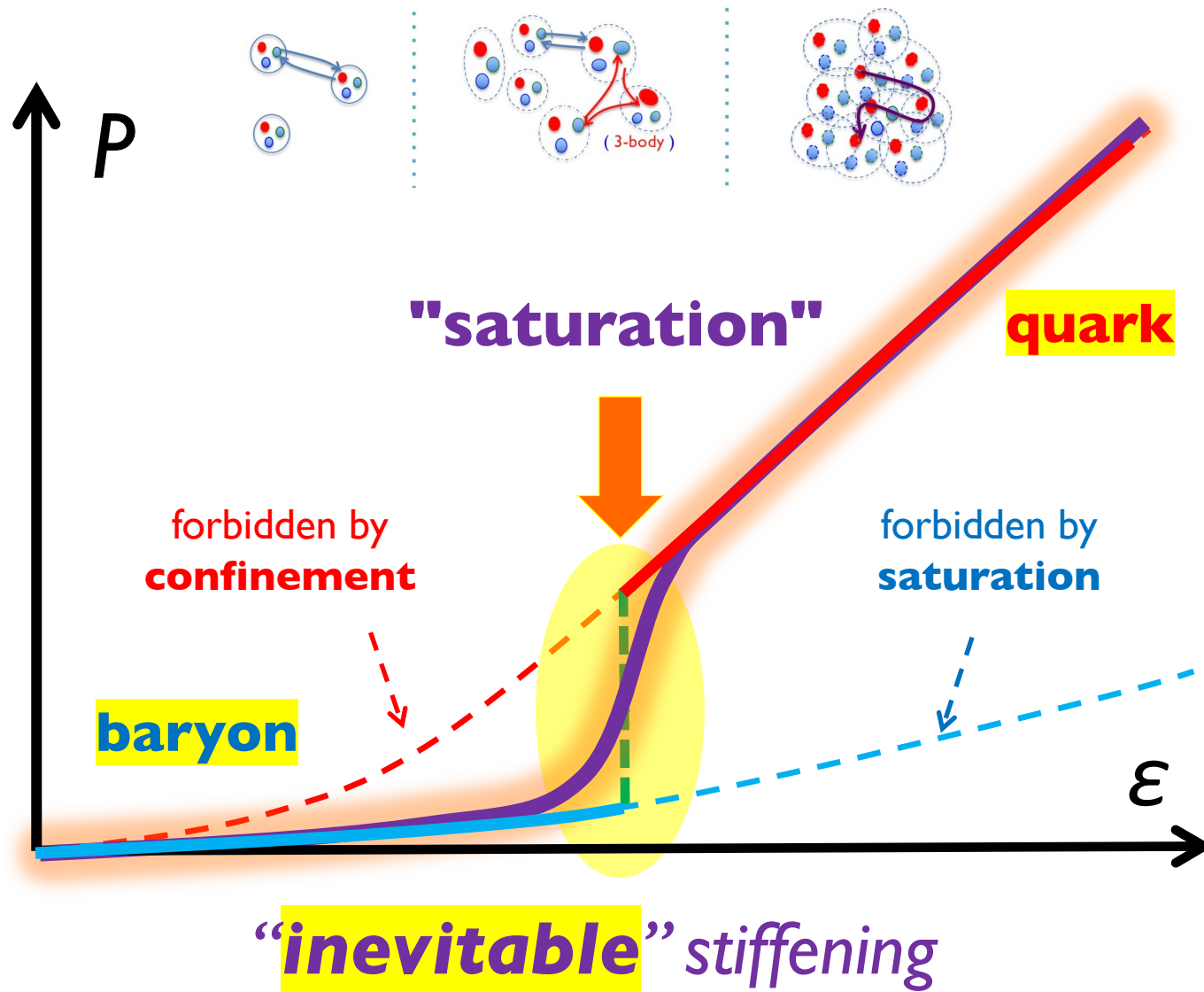


“quark saturation” constraint

→ **relativistic baryons at low density, $n_B \sim 2-3n_0$!**

cf) McLerran-Reddy model (2019); microscopic foundation, TK (2021); solvable dual model Fujimoto+ PRL (2023)

Peak in sound velocity



Multiple roles in color-magnetic interactions

1) **Coupling** $\propto$ **velocity** $\sim p/E$

become important in relativistic regime & high density

2) **Pairing**: strongly channel dependent

hadron mass ordering: N- Δ , etc. [DeRujula+ (1975), Isgur-Karl (1978), ...]

color-super-conductivity

[Alford, Wilczek, Rajagopal, Schafer, ... 1998-]

3) **Baryon-Baryon int.**: **short-range** correlation

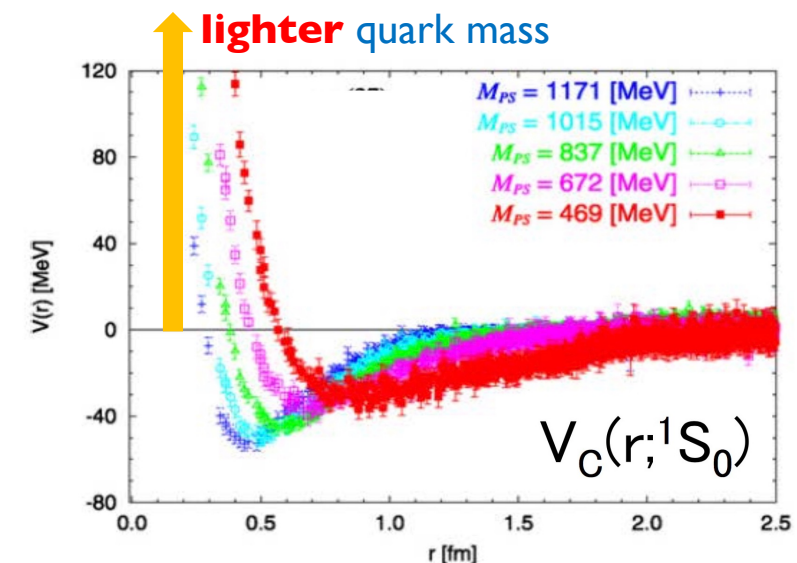
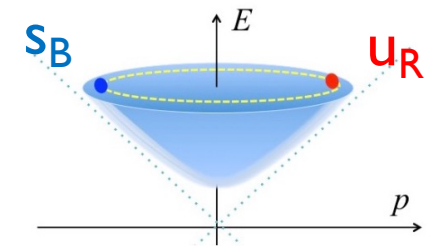
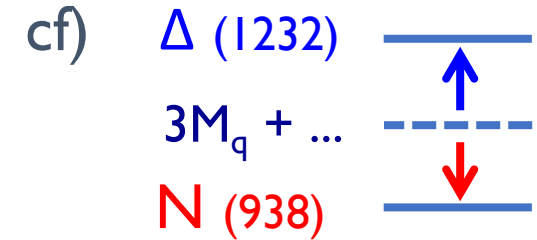
(**Pauli** + **color-mag.**)

[Oka-Yazaki (1980), ...]

channel dep. $\rightarrow$ non-universal hard core (some are attractive!)

mass dep. $\rightarrow$ stronger hard core in relativistic quarks

$\rightarrow$ **consistent with the lattice QCD** [HAL-collaboration]



まとめ

Relativistic matter of composite particles

M-R relation → sound velocity peak $c_s^2 > 1/3$

⇒ 湊さんのポスター

Interplay between nuclear & quark physics

Driving interests in numerical experiments

⇒ 西村さんのトーク

Driving conceptual interests in continuity

⇒ 末永さん、日高さんのトーク