
将来計画 *WG* からの提案について
and
QCD からハドロン物質・原子核の密度汎関数へ

北大理 大西明

- 将来計画 *WG* からの提案の概要
- *QCD* から原子核へ – Another Way –
- まとめ



将来計画 WG からの提言の概要



将来計画WGからの提言について

■ 経緯

- 梶野レポート：eA collider
Hadron ビームのエネルギーが
高くないと luminosity が低い。
→ 別の計画の必要性
- 2004.02 研計委
将来計画検討WG設置
の立ち上げを決定
- 2004.08 研計委
WGを立ち上げ
- 2005.11 研計委への中間報告
- 2006.04 提言の提出

2006年4月28日

大阪大学 核物理研究センター
センター長
土岐 博 殿

2004年8月の核物理研究センター研究計画検討専門委員会において将来計画ワーキンググループ（大西 明 委員長）に付託された審議事項を答申いたします。

当ワーキンググループは、核物理において日本および世界のセンターとして重要な役割を果たしてきた大阪大学核物理研究センター（RCNP）の将来像を議論するため、2004年2月に開催されたRCNP 研究計画検討専門委員会（研計委）において同委員会が主体となってこれを立ち上げることが決定されました。さらに同年8月の委員会においてRCNP 内部からのメンバーを半数としたワーキンググループが発足し、約1年半にわたって議論を重ねていただきました。その間、研計委においてもワーキンググループの途中経過報告を受け、研計委の委員による質疑や批判に対してさらにワーキンググループで議論を進めてもらうというプロセスを繰り返しました。その結果として、「Photon beam と Hadron beamを活用し、原子核構成要素の実体を明らかにすることによって、クォーク多体系としてのハドロン物理、ハドロン・核子多体系としての核物理を追求する」という最終提言に至りました。本研計委はこの提言を尊重し、これを基礎としてより具体的なRCNP の将来像が描かれることを希望します。本研計委としまして、今年度中にはRCNPの将来計画に関するワークショップ等を開催し、将来計画に対する機運を、RCNP・研計委が協力して盛り上げていくことを提案させていただきたいと思っております。

2006年度 RCNP 研究計画検討専門委員会、委員長
中村隆司



将来計画WGからの提言(2006/04/10)

■ WGメンバー

保坂、中野、酒見、堀田、二宮、民井、
大西*、櫻木、與曾井、上坂、澤田

- 本将来計画WGは、RCNPが **photon beamとhadron beamを活用し、原子核構成要素の実体**を明らかにすることによって、クォーク多体系としてのハドロン物理、ハドロン・核子多体系としての核物理を追及することを提言する。

- 中間子・バリオン多体系としての原子核の性質をハドロンビームによって解明する。例えば、核内に実在的、あるいは仮想的に存在する π 粒子をはじめとする様々な中間子の分布・性質を核内での有効核力・核子の波動関数と関連づけて明らかにする。また、これを実現するための実験施設について検討する。
- ハドロンというクォークが閉じ込められた状態の実体と、その複合性に起因するハドロン構造と相互作用の多様性を理解するため、反応機構を押さえた上でハドロン分光を展開する。そのために、レーザー電子光ビームラインの増設拡充を図る。
- 上記の物理を確実に推進するため**実験理論共同研究体制**を拡充する。ここでは、RCNPが中核となって全国の研究者との共同研究を進める。



RCNP 将来計画WGからの提言(2006/04/10)

歴史的に有効核力の和として記述されてきた原子核の「平均場」は、ハドロン物理から見れば「仮想的な中間子の場」、QCD からは「真空中で凝縮した $\bar{q}q$ の場の変化」等の様々な言葉で説明されてきた概念である。しかしながらそれらに対する首尾一貫した理解はこれまでの研究によっても十分に解明されていない。

理論と実験の連携のもとその実体を解明し、「クォーク・ハドロン多体系」としてハドロン物理・原子核物理の Grand Design を作り直すことは、クォーク・グルーオン, ハドロン, 原子核のそれぞれの階層の関連を明らかにすることを通じて, QCD のレベルから原子核を統一的に理解することとなり、現在の原子核物理学の重要な課題である。このことは様々な階層で普遍的にみられる、現代物理の最も本質的な概念である対称性の自発的破れに関する理解を飛躍的に深めることになる。

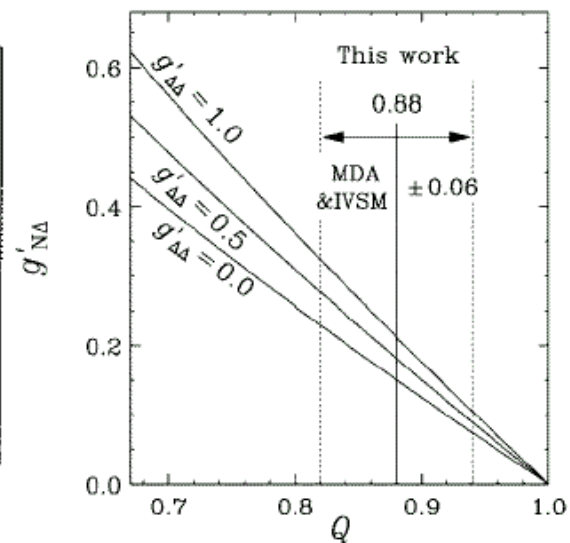
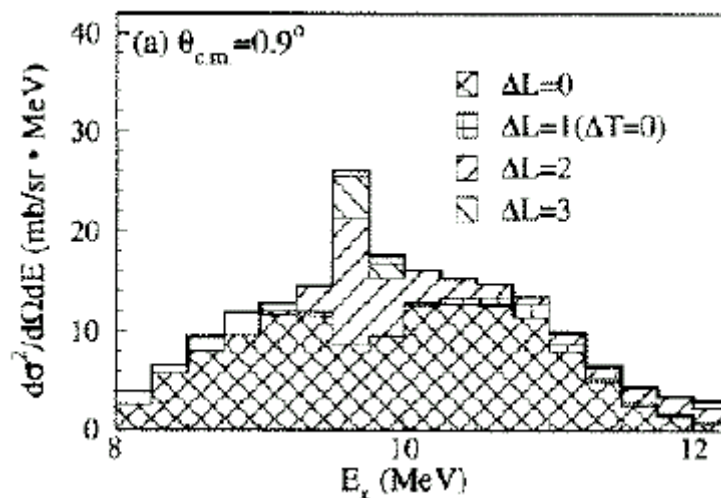
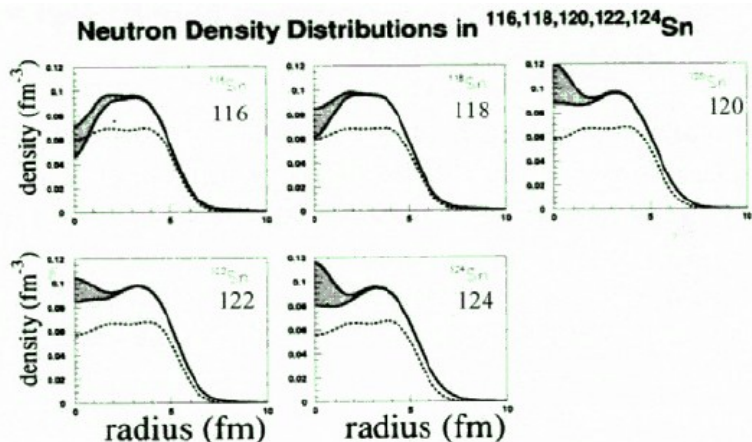
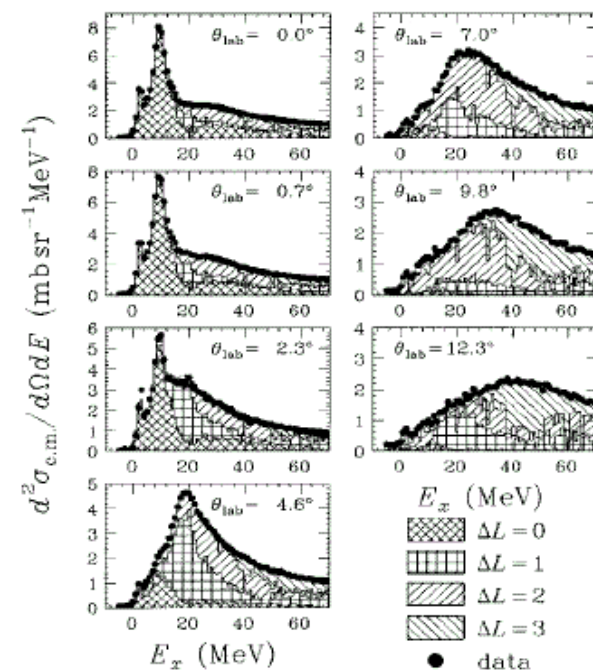
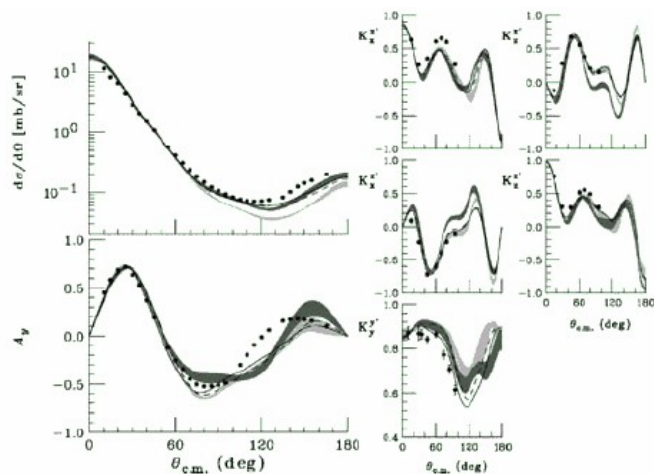
ここでは、上の3つの方向での展開を進めることを提言する。さらに若手の育成を含めて、関連分野まで含めたコミュニティーの発展に寄与できる研究センターとなることを合わせて提言とする。



RCNP でのこれまでの成果

Ring のこれまでの大きな成果

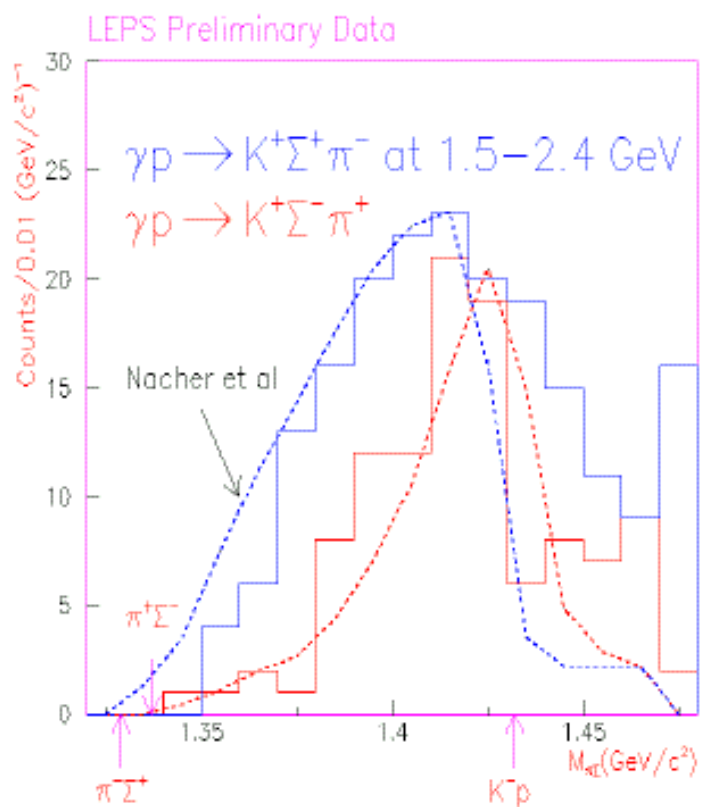
- スピン・アイソスピン励起, 有効核力, π 凝縮
- 原子核のクラスター構造, 変形核構造



RCNP でのこれまでの成果

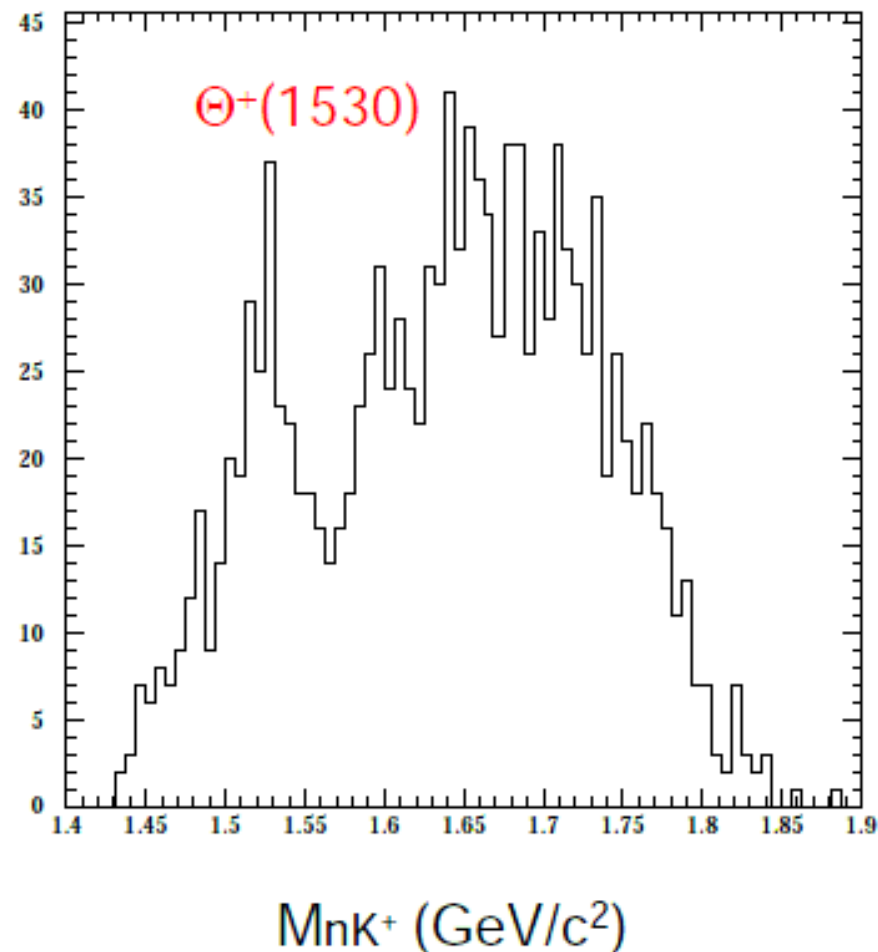
LEPS のこれまでの大きな成果

- ペンタ・クォーク Θ^+ の存在
- 中間子, $\Lambda(1405)$ の性質



J. K. Ahn

$$|p_{\min}| < 50 \text{ MeV}/c$$



Nakano @ Sendai 07 (Tokutei)

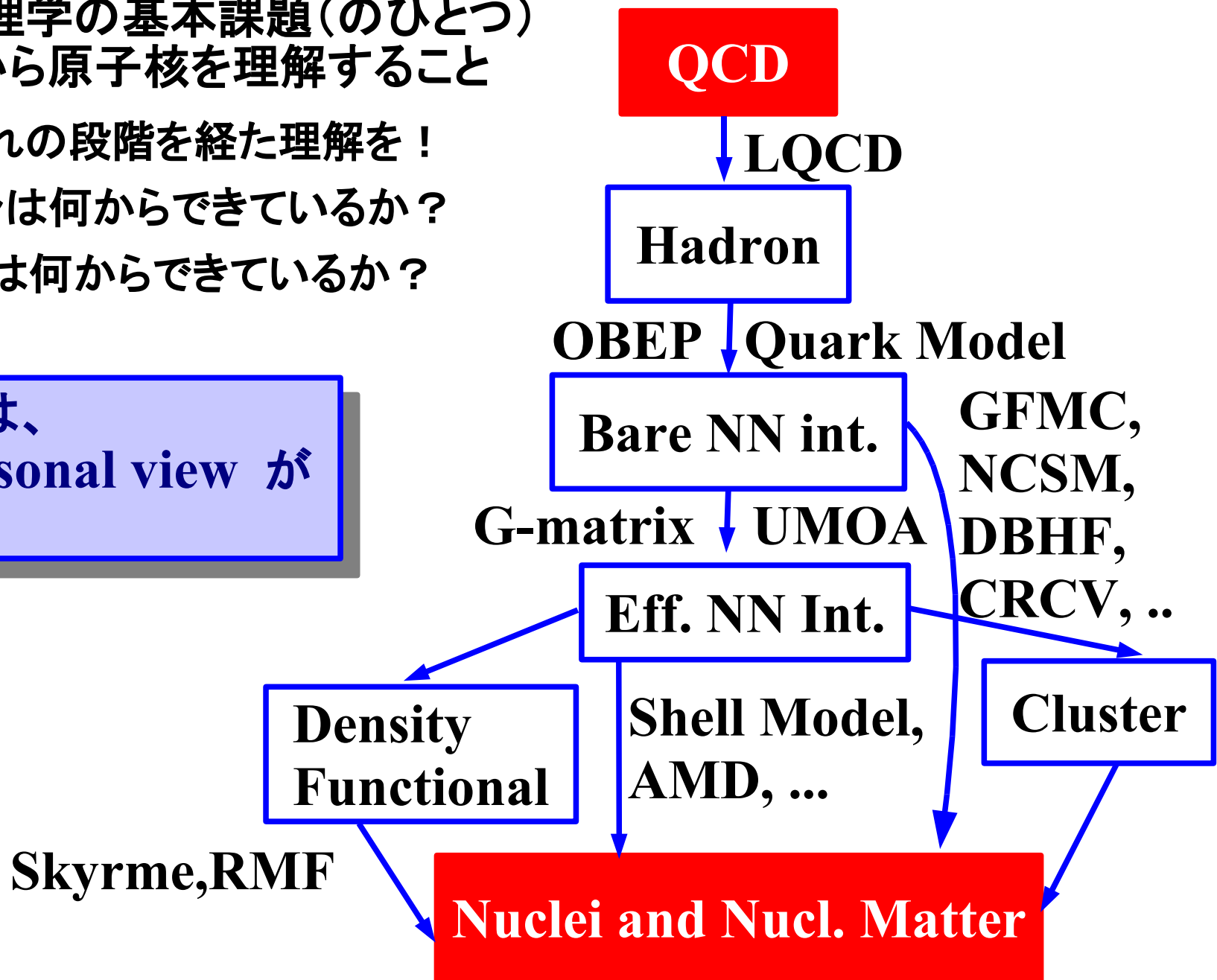


RCNP が目指すべき物理

- 原子核物理学の基本課題(のひとつ)
= QCD から原子核を理解すること

- それぞれの段階を経た理解を！
- ハドロンは何からできているか？
- 原子核は何からできているか？

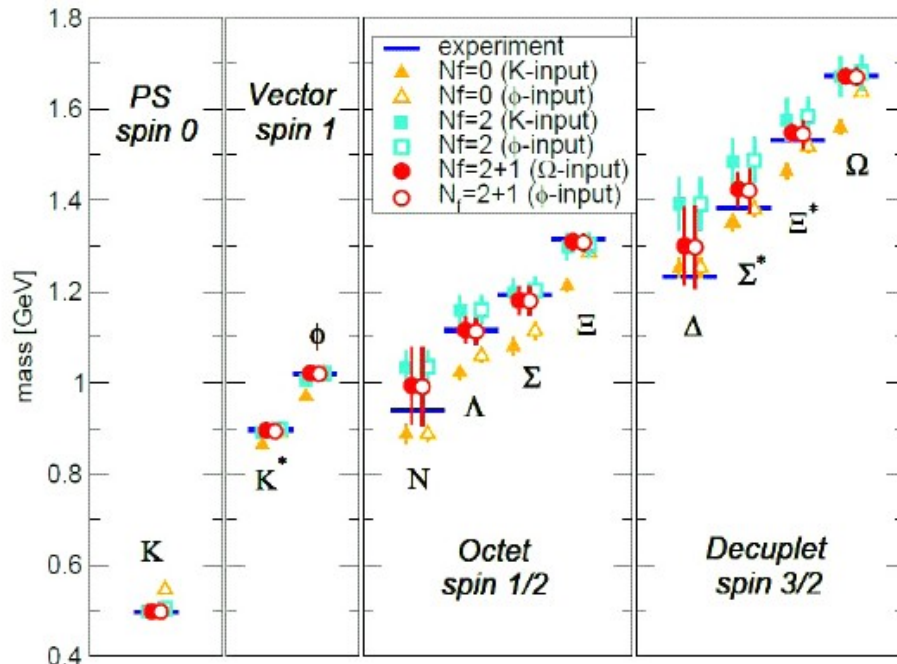
ここから先は、
かなり personal view が
入ります。



LQCD: QCD \rightarrow Hadron \rightarrow Nuclear Force

- LQCD can access not only Single Hadron Properties but also Hadron-Hadron Int.

- Equivalent Local Pot. \rightarrow Mechanism is not yet clear except for OPEP.



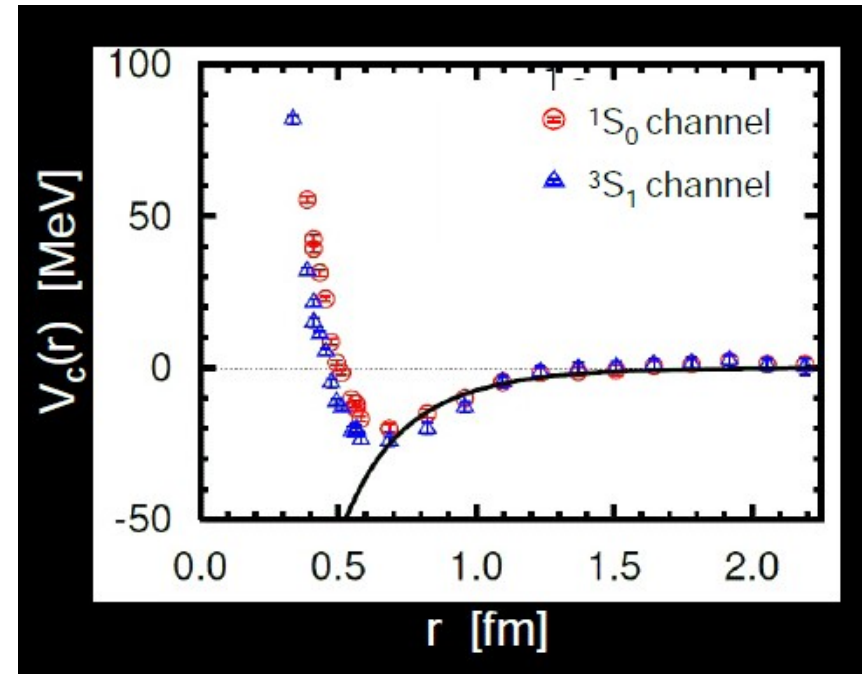
Improved-Wilson, $N_f=2+1$

$m_{ud} \sim 6$ MeV ($m_\pi \sim 210$ MeV),

$a \sim 0.1$ fm, $32^3 \times 64$

Kuramashi, talk at Lattce2007

ArXive: 0710.3462 [hep-lat]



*Ishii, Aoki & Hatsuda,
PRL 99, 022001 ('07)*

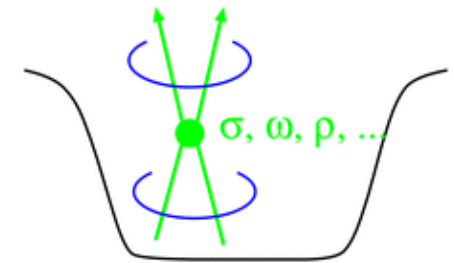
Hatsuda @ Chiral 07



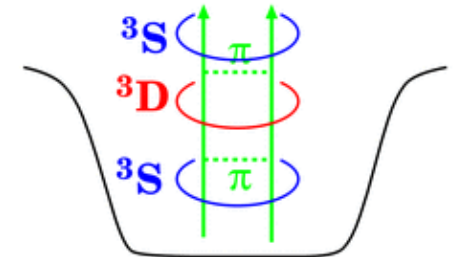
「核力 → 原子核」は核子多体系の問題か？

■ 原子核の平均場は何でできているか？

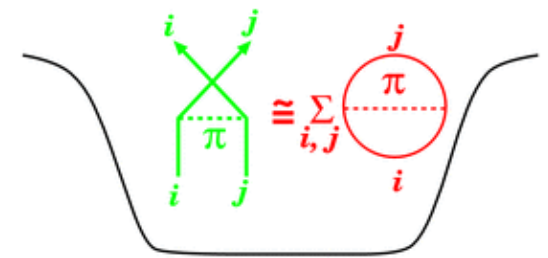
- Skyrme HF: 有効中心力、有効 LS 力
 RMF: スカラー・ベクトル中間子
 → 有効中心力は Tensor 力から現れる
 RMF での σ, ω などは "Effective" Meson
 中性子過剰核では違う有効核力が必要
 (e.g. ^{28}O が束縛)
- Tensor 力
 → 中間状態での核子対状態も重要
 Shell Evolution に大きく関与
 LS-like role をもつ
 (Otsuka, Myo, Sugimoto, Toki, ...)
- π 中間子
 → パリティの異なる一粒子状態を結合
 jj closed 核で大きな寄与
 (Ring, Ogawa, Sugimoto, Isshiki-Naito, AO, ...)
- Δ バリオン (Otsuka, Next page)



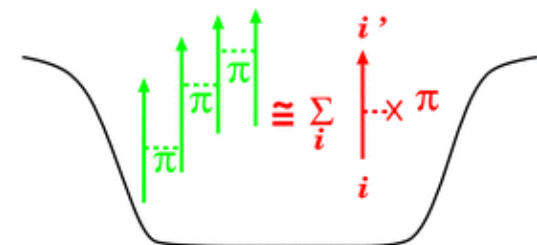
Effective



Coupling



Fock (Exch.)



Hartree (Direct)



Effective Single-Particle Energy for Oxygen isotopes

Final correction

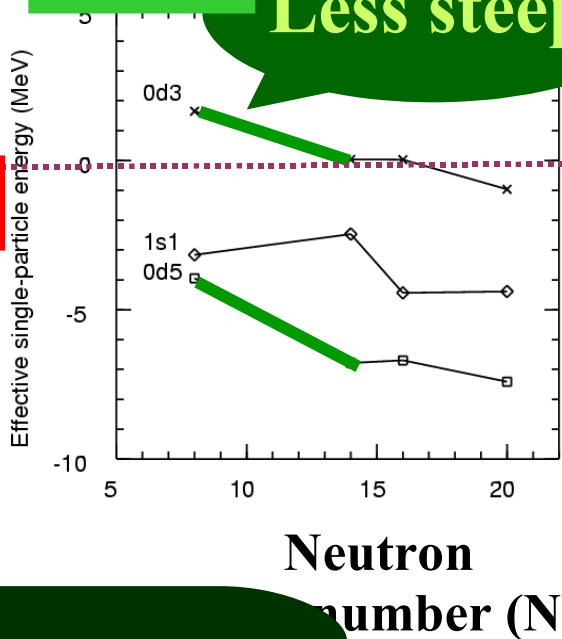
SDPF-M



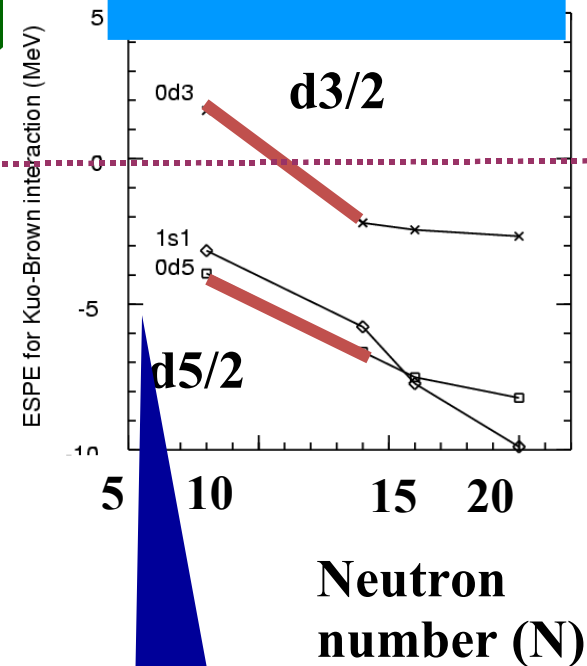
Empirical correction

USD

Less steep



Kuo-Brown
G-matrix
+ core-pol.



Neutron number (N)

Y. Utsuno, T.O., T. Mizusaki, and M. Honma,
Phys. Rev. C 60, 054315 (1999).

by Otsuka @ Chiral07

Δ -hole Effects on Shell-Evolution

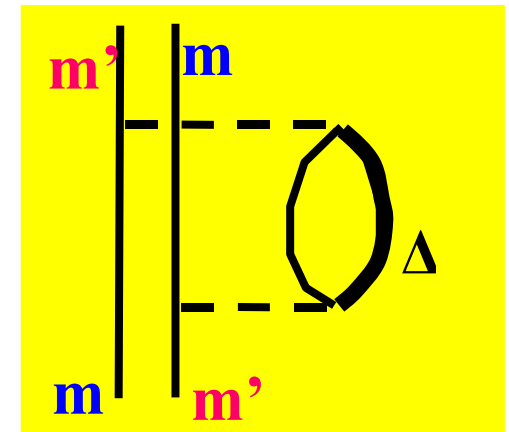
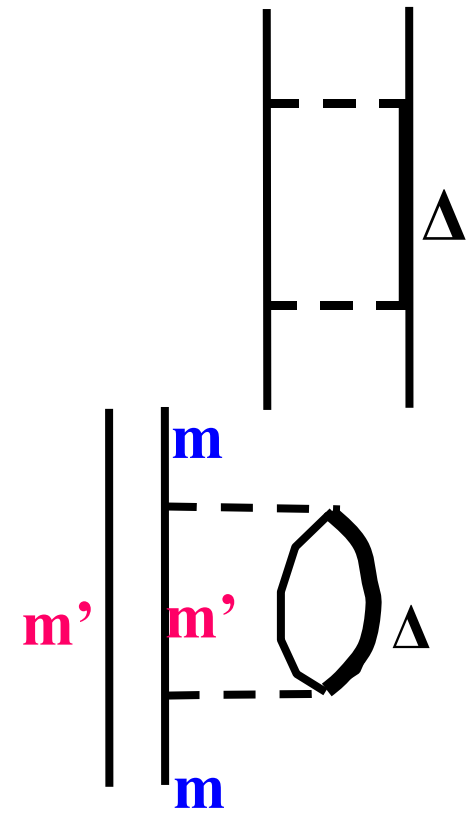
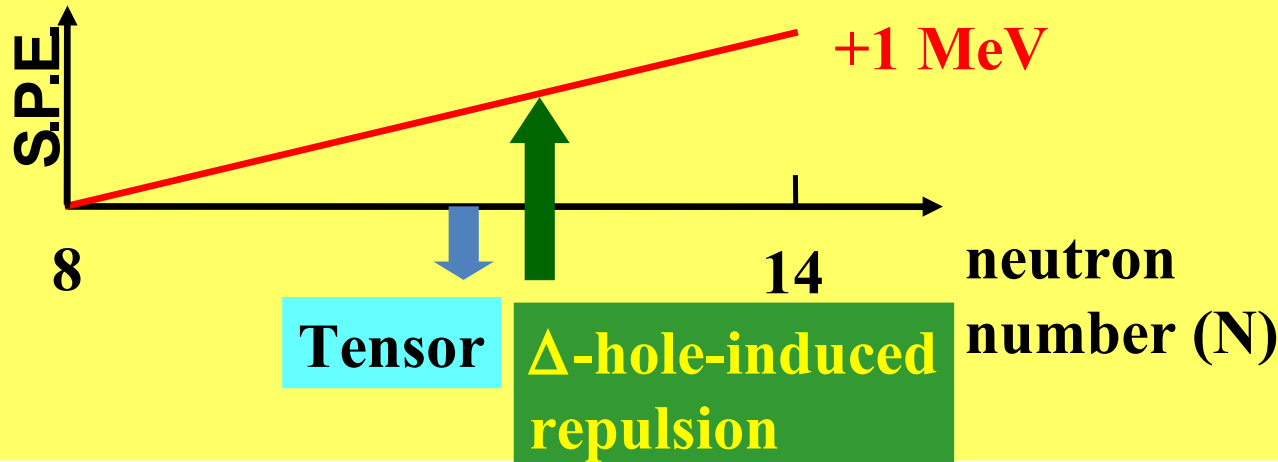
■ Possible origin of global T=1 repulsion (T. Otsuka, Chiral07)

- T=1 attraction from Δ -hole excitation is reduced by the Pauli blocking in nuclei.
- Fujita-Miyazawa 3-body Force generate T=1 monopole repulsion

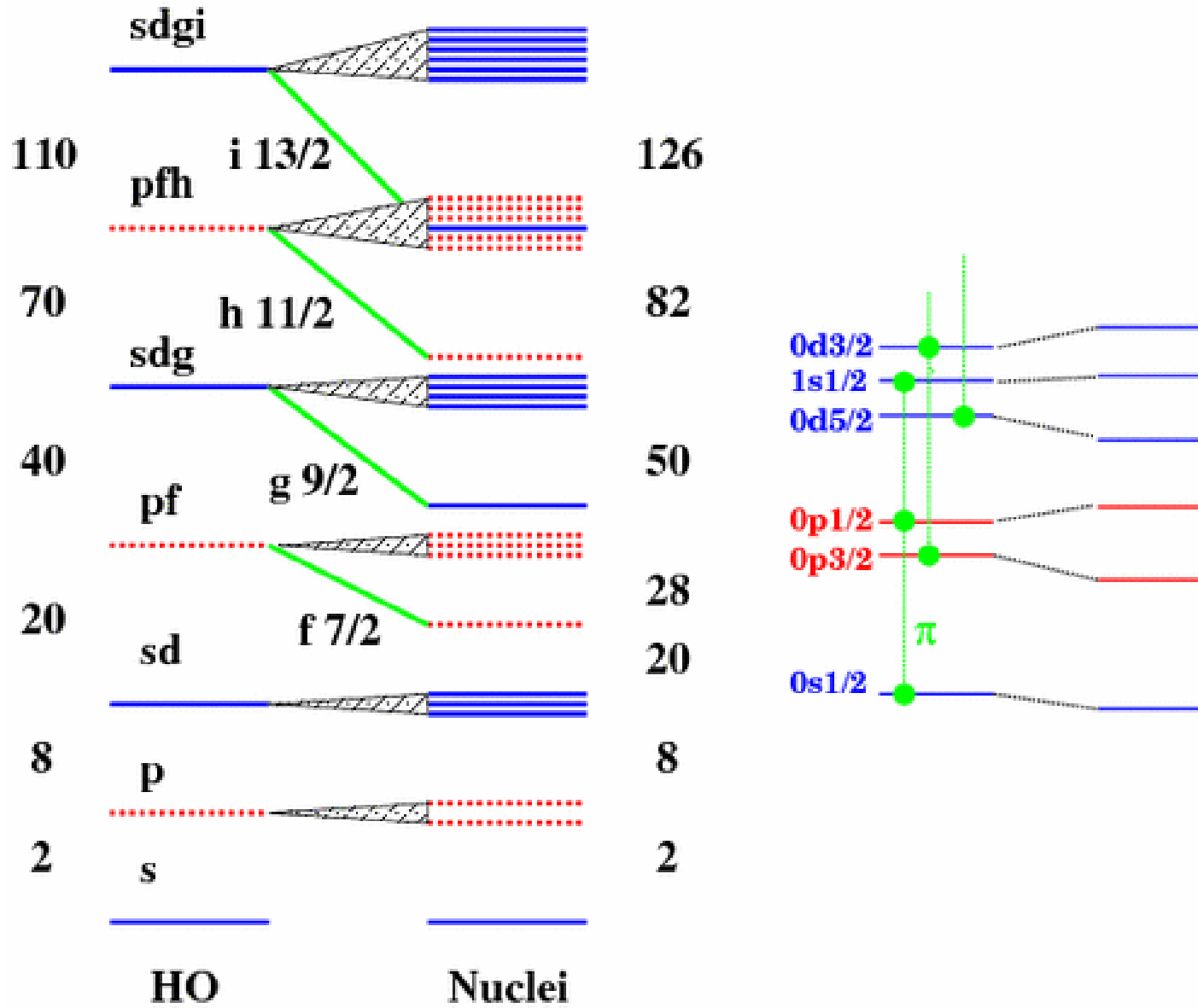
→ d_{3/2} is pushed up in O-isotopes

→ Shell Evolution ! (Magic Number 20 → 16)

$d_{3/2}$ single-particle energy relative to N=8



How about pions ?



LS like role of pions

Isshiki, Naito, AO, PTP114('05)573 [nucl-th/0407085]

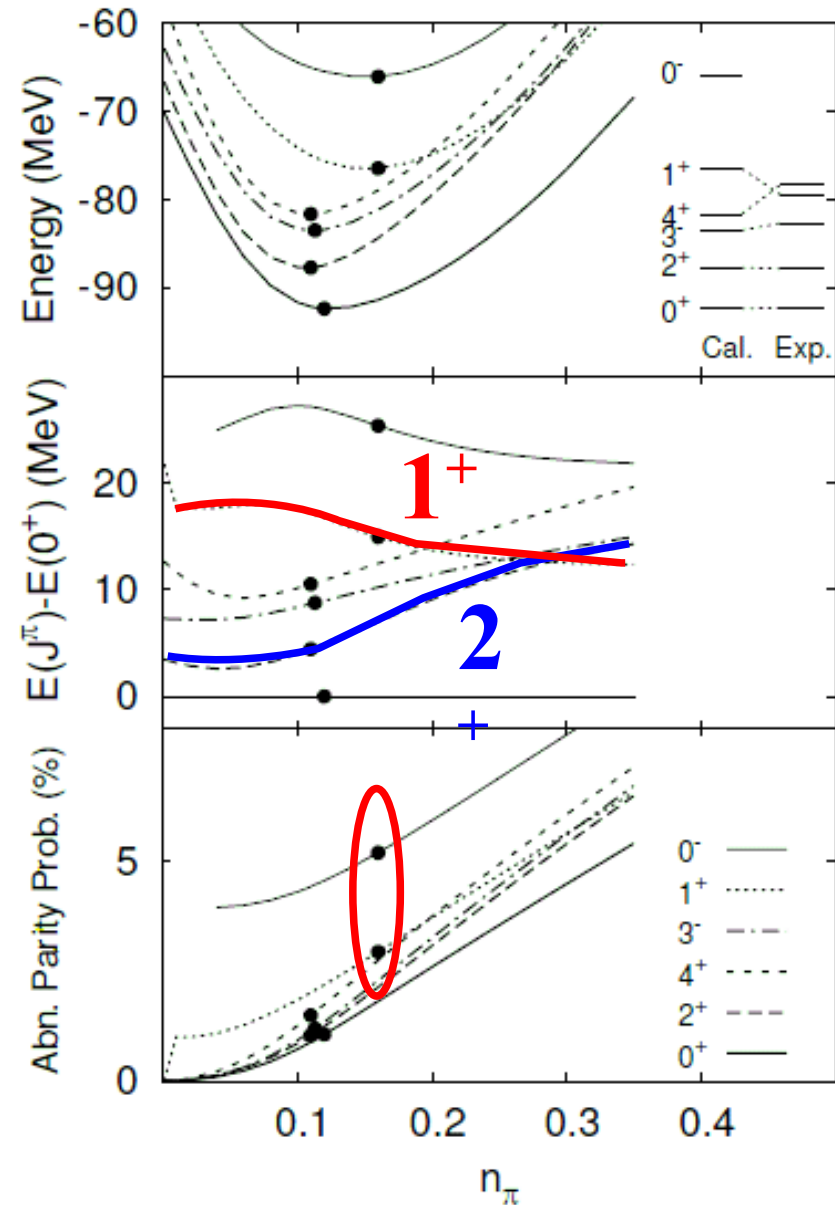
Pion Number Deps. of ^{12}C Energy

■ AMD with coherent state pions

$$|\Psi(Z, f)\rangle = |\Psi_{\text{AMD}}(Z)\rangle \otimes |\Phi_{\pi}(f)\rangle$$

→ ^{12}C level structure

- 2^+ (1^+) is pushed up (down) relative to 0^+ by pions
- **Abnormal Parity State Prob.** (Nucleon's Parity \neq Total Parity) **amounts to a few %** in 1^+ and 0^- states.
- LS interaction sometimes acts inversely. (Next page, $1/2^+ - 1/2^-$ coupling)



*RMF with π については、
小川さんに任せます。*



LS like role of pions

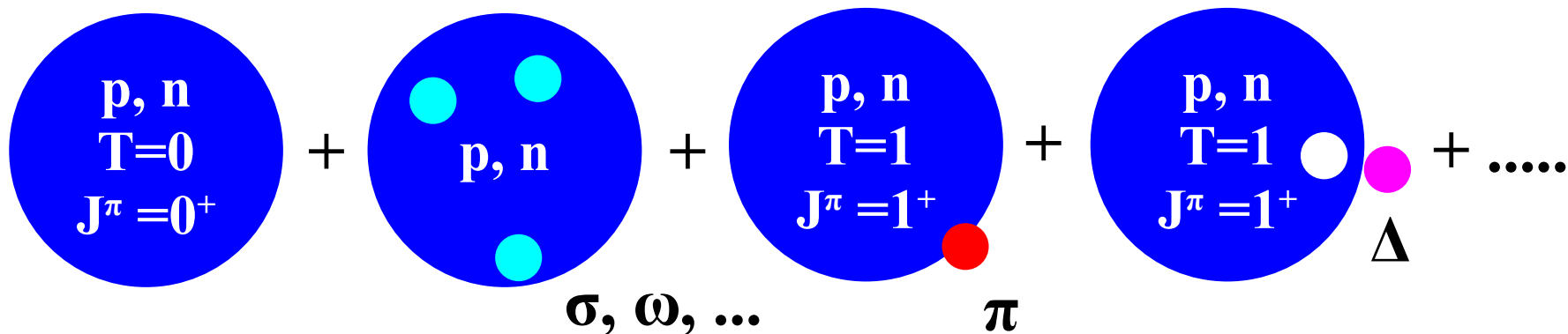
Isshiki, Naito, AO, PTP114('05)573 [nucl-th/0407085]

	J^π	E^*	T_N	V_c	V_{Coul}	V_{LS}	E_π
W.O. π	Volkov 0^+	(-92.4)	234.3	-320.6	8.9	-15.0	-
	2^+	4.2	234.5	-320.6	8.8	-11.1	-
	4^+	12.0	235.4	-317.5	8.8	-7.2	-
	3^-	19.5	244.5	-314.1	8.7	-12.0	-
With π	BBO π 0^+	(-92.4)	187.5	-228.8	7.2	0.01	-58.2
	2^+	4.6	190.9	-233.3	7.2	-0.03	-52.5
	4^+	10.6	196.3	-224.9	7.1	-0.15	-60.1
	1^+	17.0	198.1	-195.3	7.0	0.25	-89.6
	0^-	27.0	204.0	-183.5	7.0	0.48	-89.1
	3^-	8.7	194.7	-228.9	7.2	-0.04	-56.5



原子核の構成要素の実体は？

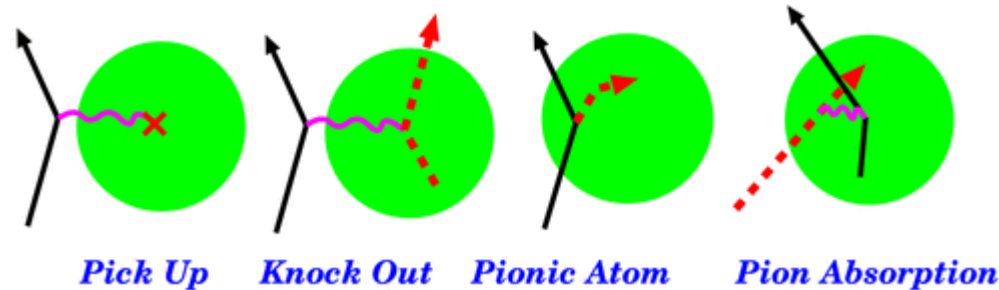
- 原子核の構成要素
= 核子、"有効" 中間子 (σ, ω, \dots)、 π 中間子、 Δ 共鳴、.....



- 有効相互作用 = 注目する波動関数の空間 (P 空間) 以外 (Q 空間) を消去した相互作用
→ 消した空間は「隠れて」いるだけ。消えてはいない。
- 理論の進展 → 空間を広げた研究が可能になりつつある。
- 実験の進展 → 安定核の基底状態近辺で決めた有効相互作用の破綻が明らかになりつつある。
- どれが本物？
E.g. σ 中間子は correlated 2π のみか？

ハドロンビームによる研究の提言

- Virtual and Real Meson を通じた
バリオン・中間子多体系としての原子核の理解
= 「核内での π 中間子場の増大」に代表される、
スピン・アイソスピン核物理の自然な発展



- Virtual (space-like) meson のソフトな叩きだし (coherent meson 生成)
→ 核内中間子分布 (axial charge 分布等)、核子状態との結合
- 中間子生成 (素過程、および素過程に近い) 反応の分析による
ハドロン物理の展開
→ η 生成反応を通じた $N(1535)$ の性質の解明
→ Roper 共鳴、 Δ 共鳴と合わせてバリオンのカイラル対称性の解明
- 実中間子の束縛状態 (Mesic Atom, Mesic Nucleus)
→ 中間子・原子核の相互作用の確定
- 核子多体系におけるクラスター構造, α 凝縮状態の発現, 原子核の密度分布, 核力の媒質効果, 少数核子系物理, ダイバリオン探索...

ハドロンの構成要素は？

■ Penta Quark Θ^+ : 謎だらけ

● 構成要素は？

Penta Quark ($uudds^{\text{bar}}$), Diquark: ($[ud][ud]s^{\text{bar}}$), $NK\pi$,

● 狭い幅の Mechanism は？

角運動量効果 ($J=3/2, \dots$), Phase space ($NK\pi$), 何らかの対称性？

■ バリオン共鳴

→ qqq or 基底状態ハドロンの共鳴

● $\Lambda(1405)=qqq + NK\text{bar} + \Sigma\pi + \dots$

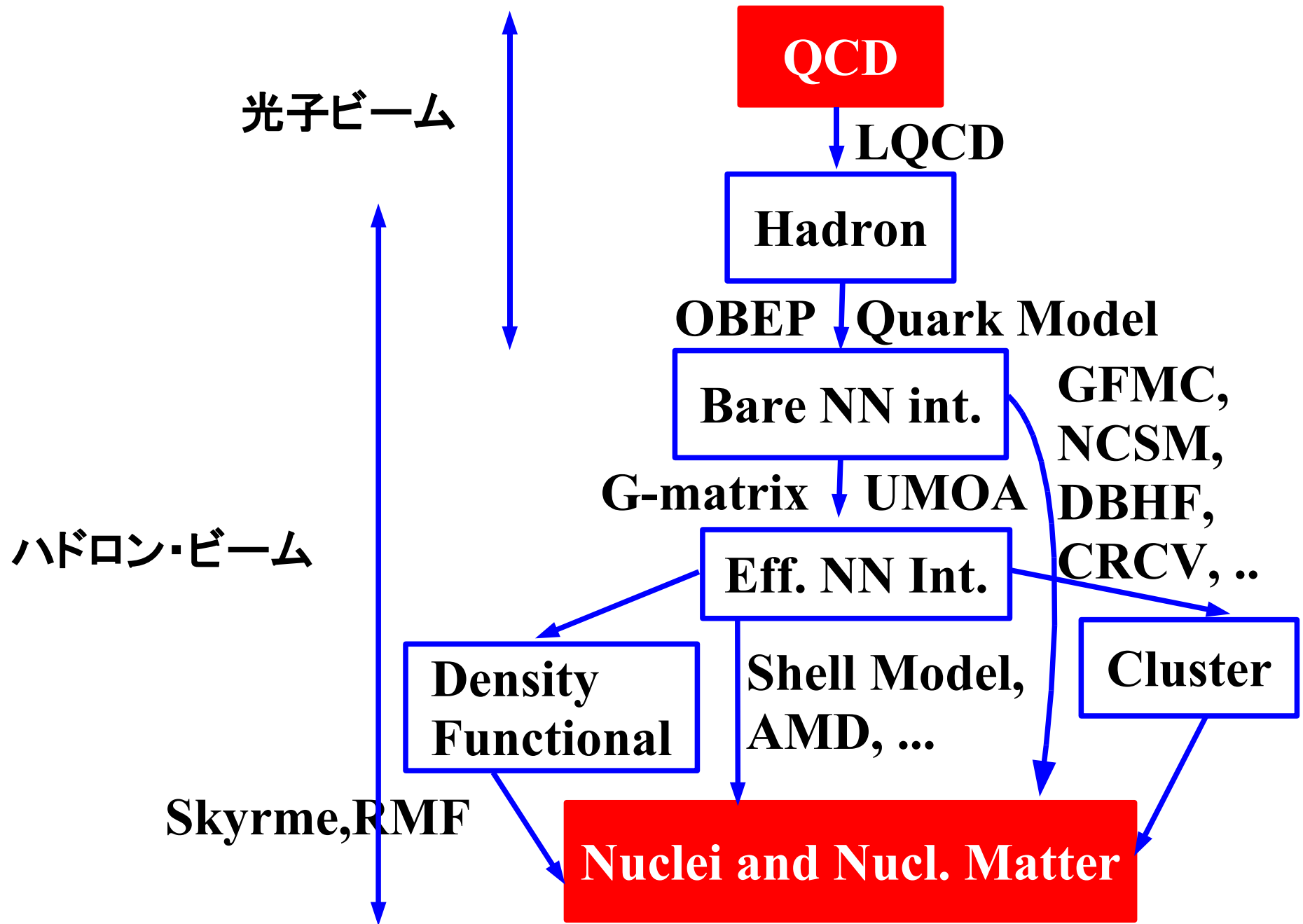
● $N(1535)=qqq(\text{chiral partner of } N)+N\eta + \dots$

● $N=qqq + qqq(qq^{\text{bar}})+qqq(ss^{\text{bar}})+\dots$

生成・崩壊機構、運動学的条件の依存性等を
丁寧に調べることが重要！



RCNP が目指すべき物理



必要な施設・人材・体制

■ ハドロンビーム施設

- π , σ , ω 中間子を生成できる可変エネルギー陽子ビーム
- p , d , ${}^3\text{He}$, ${}^4\text{He}$, 偏極陽子、偏極重陽子 (偏極 ${}^3\text{He}$ 、偏極 ${}^6\text{Li}$)
- 高分解能, 超前方を含む 4π 測定, Exclusive 測定
- 現有施設および現有の土地に拘らない。
(有効利用できることは望ましい)

■ 光子ビーム施設

- 光子ビームのアップグレード:
高エネルギー化, 大強度化, 質の向上
- 検出器アップグレード:
超前方を含む実質的な 4π 検出・データ収集システム

■ 人材・体制

- プロジェクトの数を絞り、人的資源の集中的な投入を！
- 外部とのより強い強力体制を！
(外部理論グループ、スクール開催、RCNP 奨学生、プロジェクト研究)

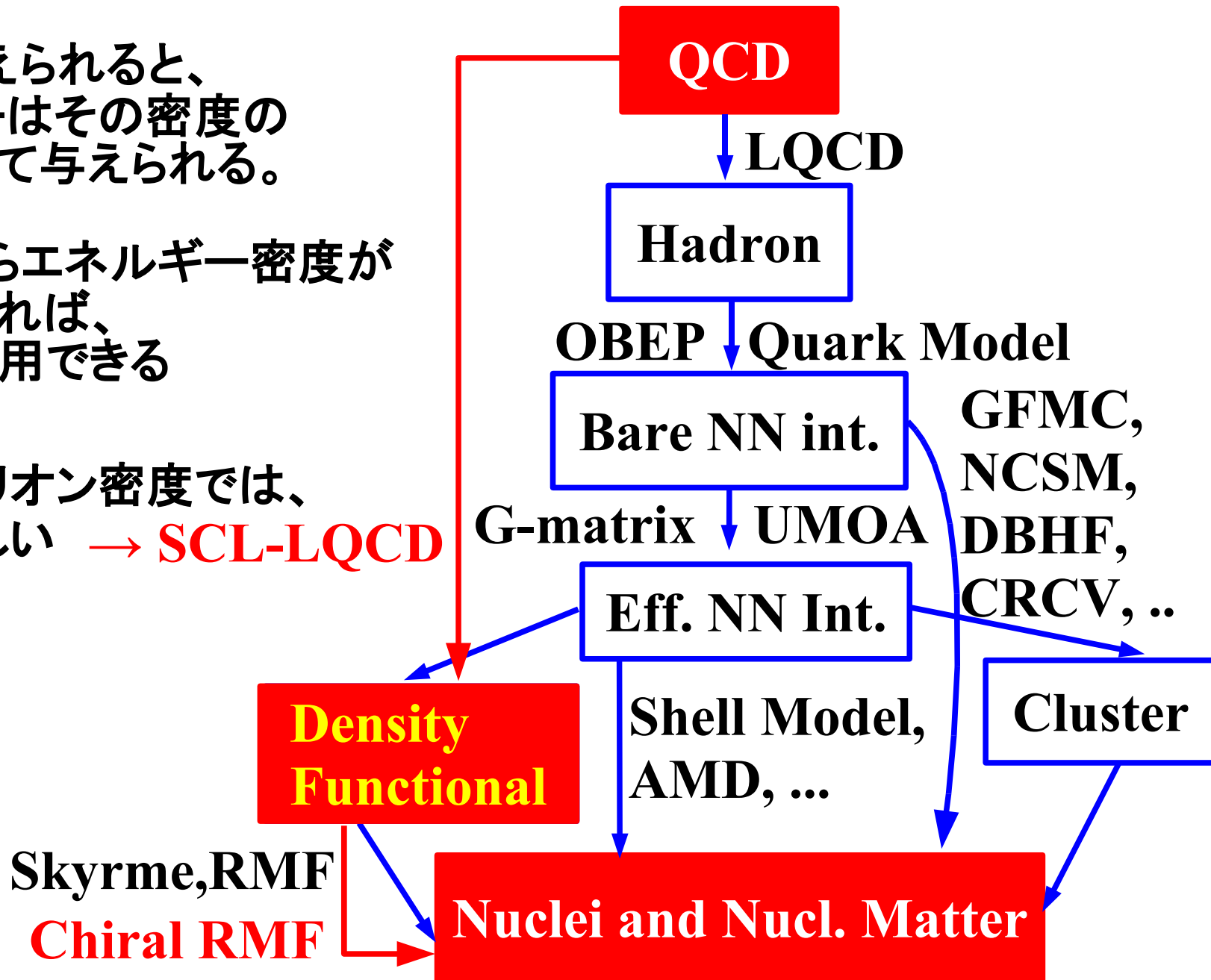


QCD から原子核へ
--- *Another Way* ---



QCD から原子核密度汎関数へ

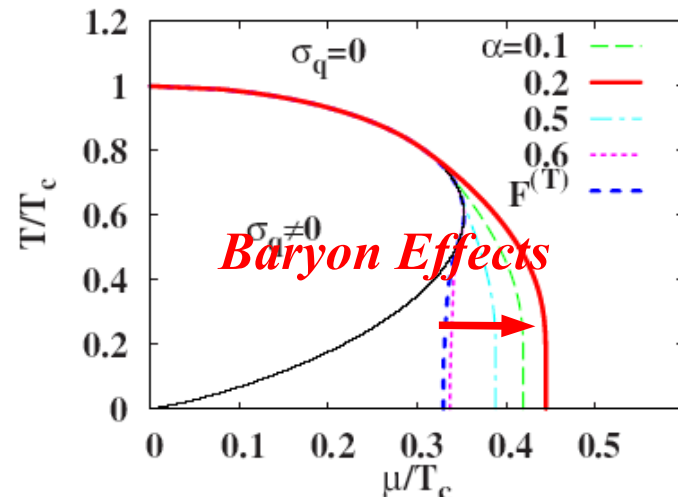
- 密度汎関数
= 密度が与えられると、エネルギーはその密度の汎関数として与えられる。
- QCD からエネルギー密度が与えられれば、それを採用できる
- 問題点
= 有限のバリオン密度では、MC が難しい → **SCL-LQCD**



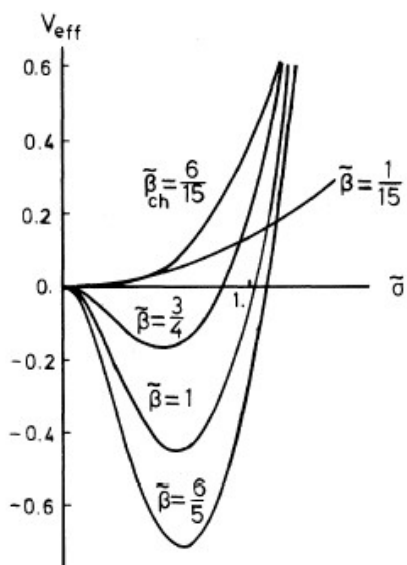
Strong Coupling Limit of Lattice QCD

■ SCL-LQCD has been a powerful tool in “phase diagram” study !

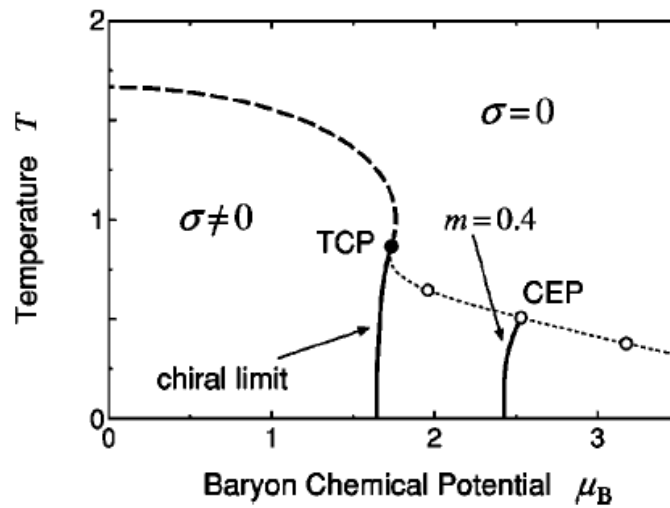
- Chiral restoration, Phase diagram, Baryon effects, Hadron masses, Finite coupling effects,



Kawamoto, Miura, AO, Ohnuma, PRD75 (07), 014502.



Damgaard, Kawamoto, Shigemoto, PRL53('84), 2211



Nishida, PRD69, 094501 (2004)



Strong Coupling Limit of Lattice QCD

- Strong Coupling Limit: Pure gluonic action disappears at $g \rightarrow \infty$

$$S_{\text{QCD}} = \cancel{S_G} + S_F^{(s)} + S_F^{(t)} + m_0 \bar{\chi} \chi$$

$$\cancel{S_G = -\frac{1}{g^2} \sum_{\text{plaq.}} \text{Tr} U_{ij}(x) + c.c.}$$

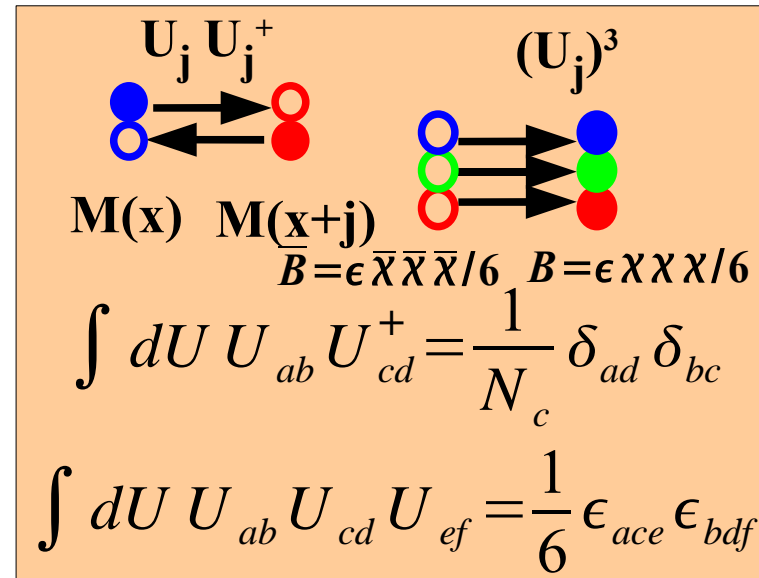
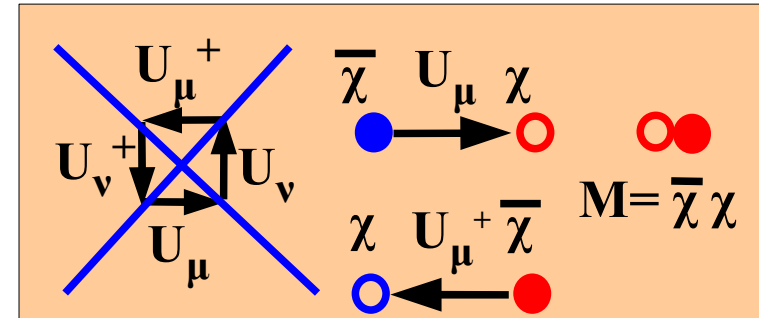
$$S_F^{(s)} = \frac{1}{2} \sum_{x, j>0} \left(\bar{\chi}_x U_j(x) \chi_{x+\hat{j}} - \bar{\chi}_{x+\hat{j}} U_j^+(x) \chi_x \right)$$

$$S_F^{(t)} = \frac{1}{2} \sum_x \left(e^\mu \bar{\chi}_x U_0(x) \chi_{x+\hat{0}} - e^{-\mu} \bar{\chi}_{x+\hat{0}} U_0^+(x) \chi_x \right)$$

- One-link integral leaves mesonic and baryonic action.

$$S_F^{(s)} \rightarrow -\frac{1}{2} (M V_M M) - (\bar{B} V_B B)$$

$$= -\frac{1}{4 N_c} \sum_{x, j>0} M_x M_{x+\hat{j}} + \sum_{x, j>0} \frac{\eta_j}{8} \left[\bar{B}_x B_{x+\hat{j}} - \bar{B}_{x+\hat{j}} B_x \right]$$



- Analytic Link Integral \rightarrow No Sign Problem at finite μ .



Effective Potential in SCL-LQCD (Zero T)

QCD Lattice Action (Zero T treatment)

$$S = \cancel{S_G} + S_F + m_0 \bar{\chi} \chi$$

Strong Coupling Limit

$$\rightarrow -\frac{1}{2} (\bar{\chi} \chi) V_M (\bar{\chi} \chi) + m_q \bar{\chi} \chi$$

One-link integral
(1/d expansion)

$$\rightarrow \frac{1}{2} \sigma V_M^{-1} \sigma + \bar{\chi} (\sigma + m_q) \chi$$

Bosonization

$$\rightarrow \frac{1}{2} \sigma V_M^{-1} \sigma - N_c \sum_x \log(\sigma(x) + m_q)$$

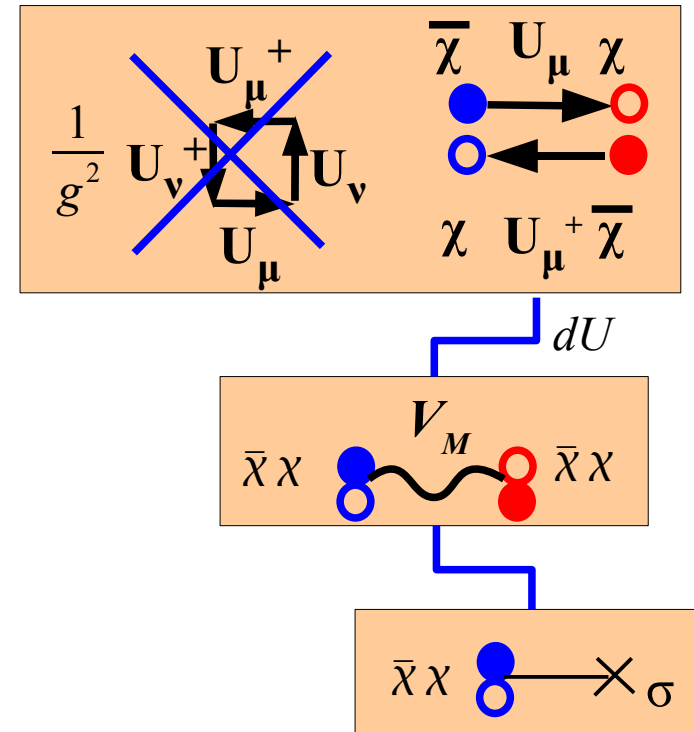
Fermion
Integral

$$= L^d N_\tau \left[\frac{N_c}{d+1} \bar{\sigma}^2 - N_c \log(\bar{\sigma} + m_q) \right]$$

Effective Potential

Effective Potential in SCL-LQCD

$$U(\sigma) = \frac{N_c}{d+1} \sigma^2 - N_c \log \sigma = \frac{1}{2} b_\sigma \sigma^2 - a_\sigma \log \sigma$$



RMF with Chiral Symmetry: Chiral Collapse

- Naïve Chiral RMF models → Chiral collapse at low ρ (*Lee-Wick 1974*)

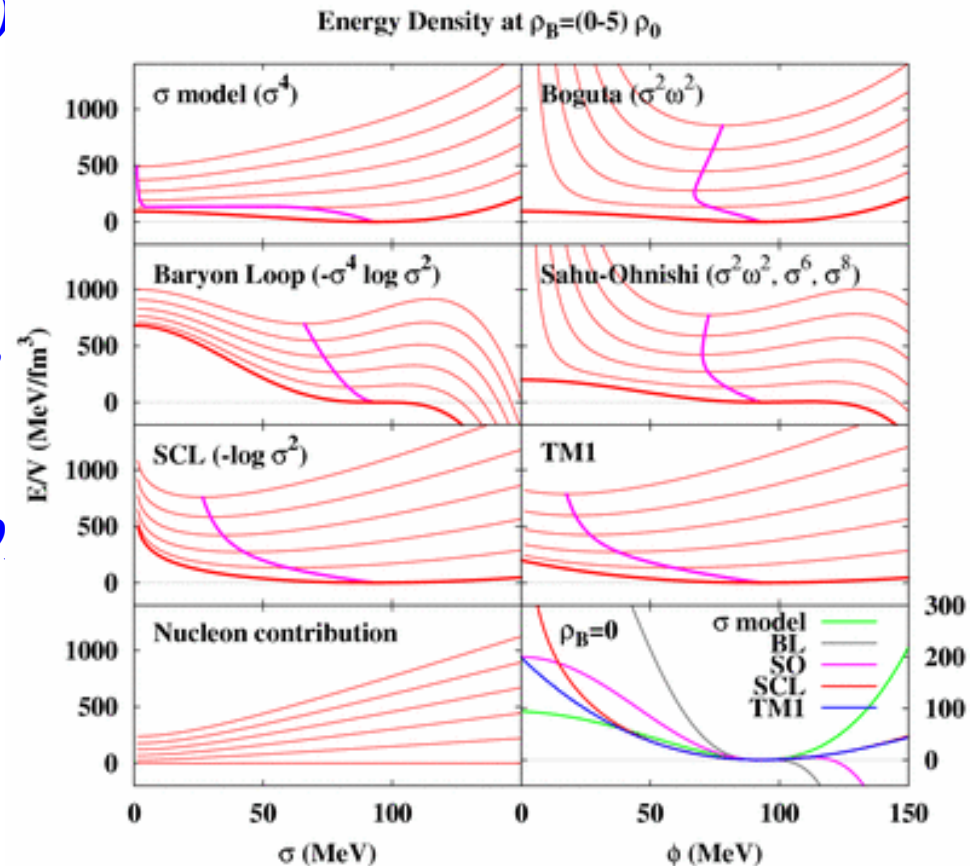
- Prescriptions

$$L = \frac{1}{2} (\partial_\mu \sigma \partial^\mu \sigma + \partial_\mu \pi \partial^\mu \pi)$$

$$- \frac{\lambda}{4} (\sigma^2 + \pi^2)^2 + \frac{\mu^2}{2} (\sigma^2 + \pi^2) + c \sigma$$

$$+ \bar{N} i \partial_\mu \gamma^\mu N - g_\sigma \bar{N} (\sigma + i \pi \tau \gamma_5) N$$

- $\sigma\omega$ coupling (too stiff EOS) (*Boguta 1983, Ogawa et al. 2004*)
- Loop effects (unstable at large σ) (*Matsui-Serot, 1982, Glendenning 1988, Prakash-Ainsworth 1987, Tamenaga et al. 2006*)
- Higher order terms (unstable at large σ) (*Hatsuda-Prakash 1989, Sahu-Ohnishi 2000*)
- **Dielectric (Glueball) Field representing scale anomaly** (*Furnstahl-Serot 1993, Heide-Rudaz-Ellis 1994, Papazoglou et al. (SU(3)) 1998*)
- Different Chiral partner assignment (*DeTar-Kunihiro 1989, Hatsuda-Prakash 1989, Harada-Yamawaki 2001, Zschesche-Tolos-Schaffner-Bielich-Pisarski, nucl-th/0608044*) → $SU_f(3)$ extention ?
- **Nucleon Structure** (*Saito-Thomas 1994, Bentz-Thomas 2001*)



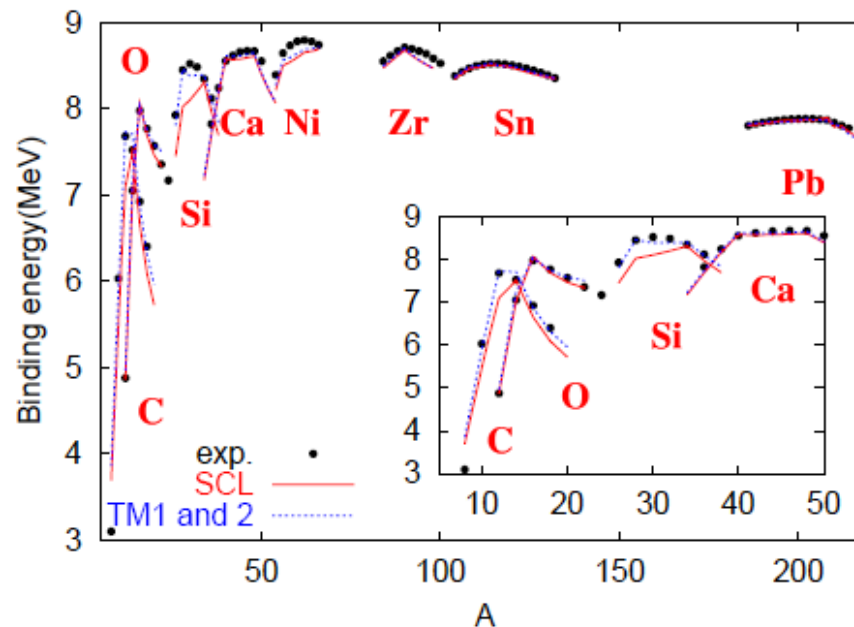
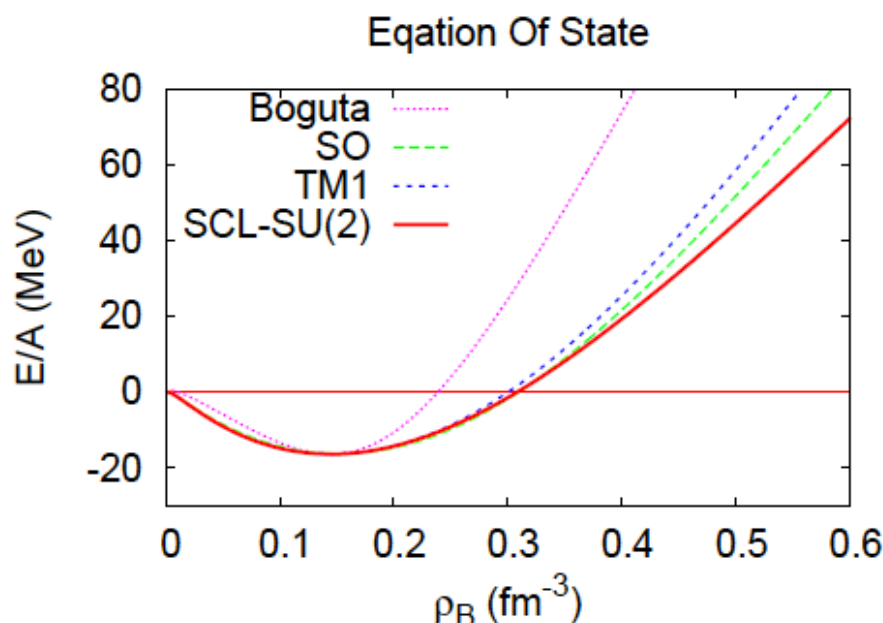
Chiral RMF based on SCL-LQCD

Tsubakihara, AO, PTP 117('07)903 [nucl-th/0607046]

■ 強結合格子 QCD に基づく Chiral RMF 模型

$$U_{\text{Linear } \sigma \text{ model}}(\sigma) = -\frac{\mu^2}{2}\sigma^2 + \frac{\lambda}{4}\sigma^4 \rightarrow U_{\text{SCL}}(\sigma) = \frac{1}{2}b_\sigma\sigma^2 - a_\sigma\log\sigma$$

- QCD に基づき、カイラル対称性をもち、不安定性はない。
- 少ない数のパラメータで、核物質・原子核のバルクな性質をよく説明



QCD から原子核の「密度汎関数」を与える第一歩！



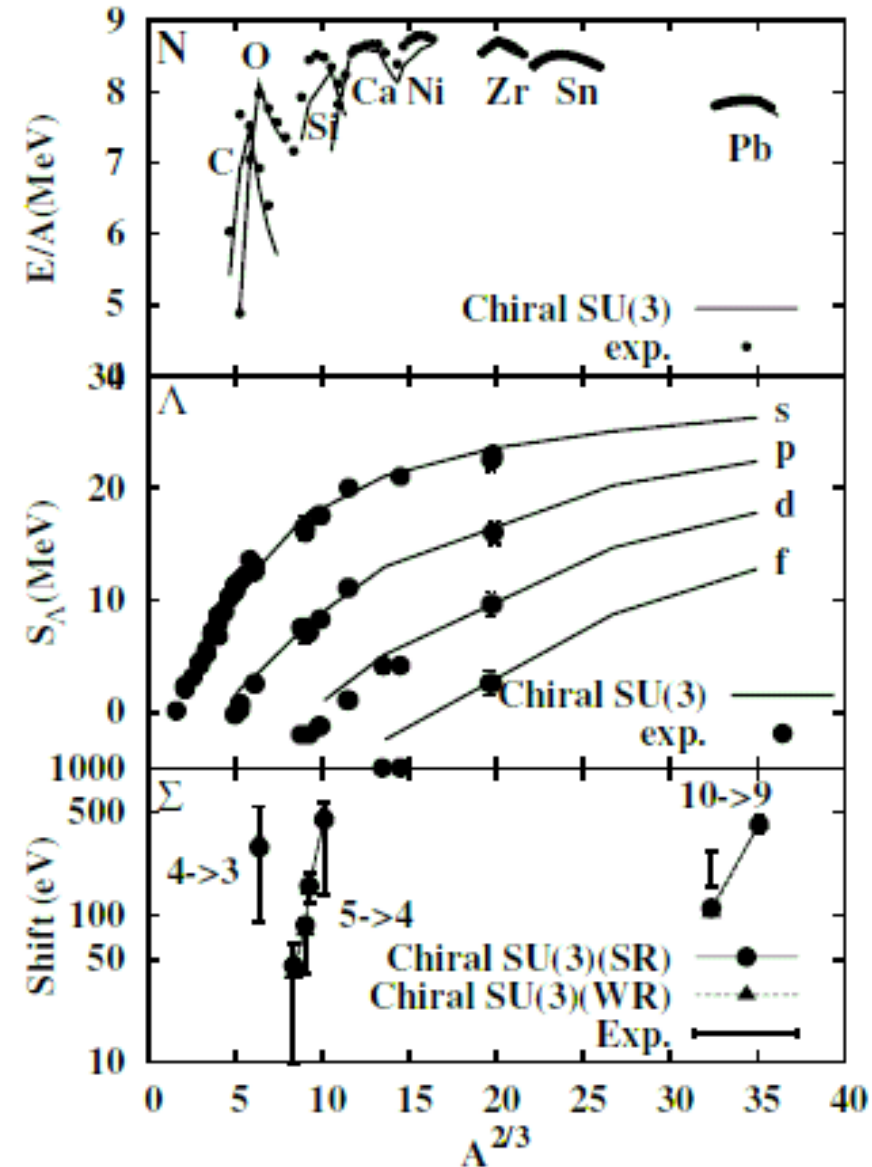
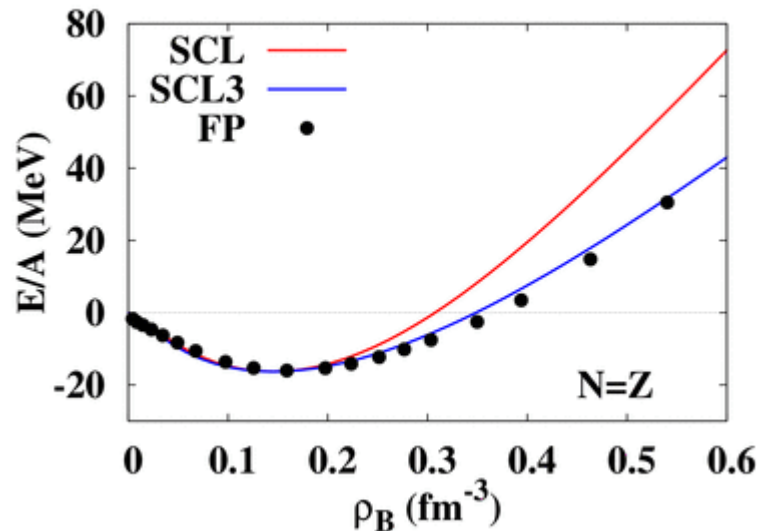
Chiral $SU_f(3)$ RMF

Tsubakihara, Maekawa, AO, EPJA33('07)295 [nucl-th/0702008]

- Extention to Flavor $SU(3)$
 - Chiral Potential from SCL-LQCD
 - + Determinant Int. ($U_A(1)$ anomaly)
 - + Explicit breaking term

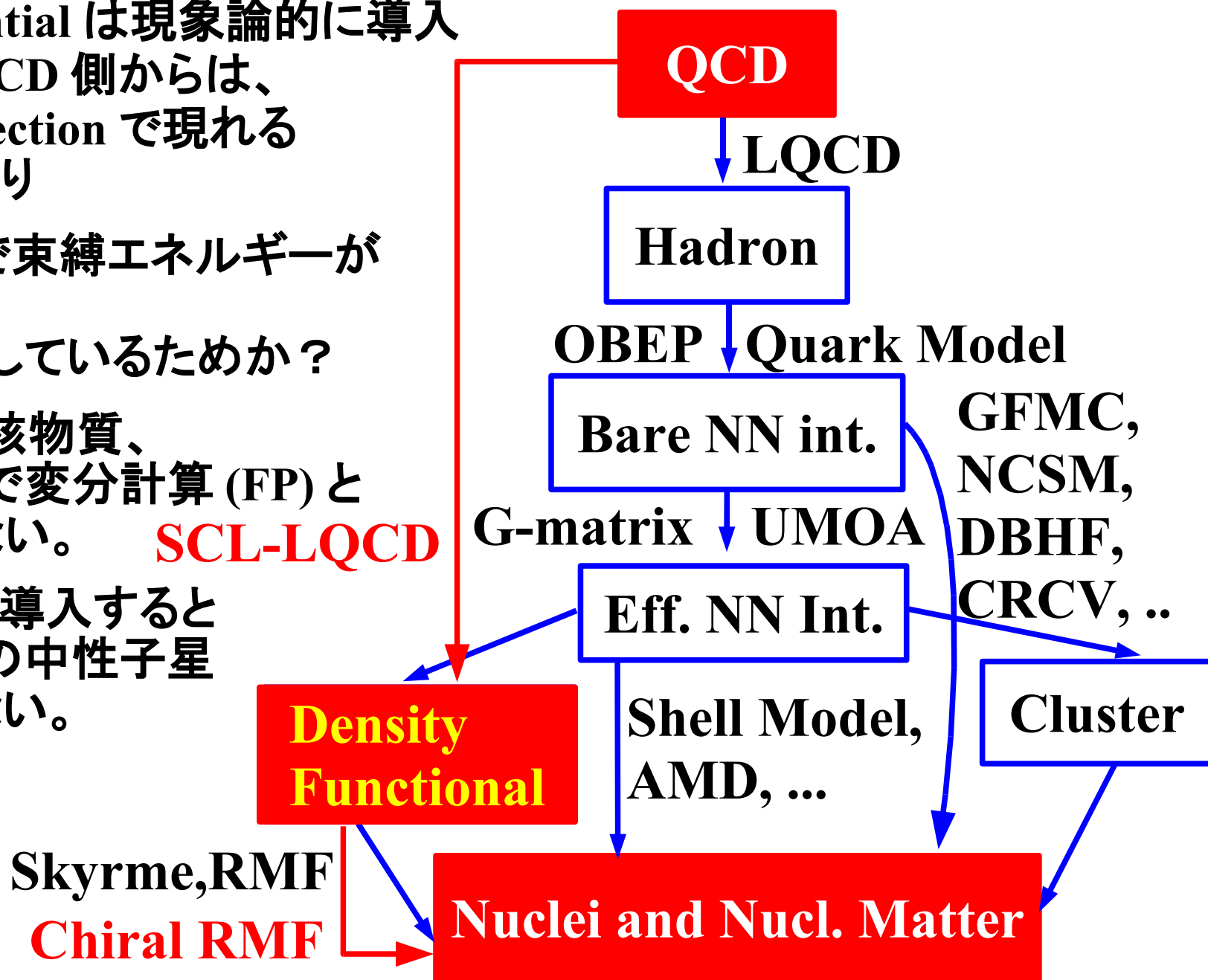
$$U_{\sigma\zeta} = -a \log(\det MM^\dagger) + b \text{tr}(MM^\dagger) + c_\sigma \sigma + c_\zeta \zeta + d(\det M + \det M^\dagger),$$

- Normal, Single & Double Λ , Σ atom, EOS (\sim FP),



Problems

- Vector potential は現象論的に導入
→ SCL-LQCD 側からは、
 $1/g^2$ correction で現れる
可能性あり
- jj closed 核で束縛エネルギーが
足りない！
→ π を無視しているためか？
- 高密度対称核物質、
中性子物質で変分計算 (FP) と
一致していない。 **SCL-LQCD**
- ハイペロンを導入すると
1.44 Msun の中性子星
を支えられない。



Summary

■ RCNP 将来計画 WG の提言

「**photon beam と hadron beam を活用し、
原子核構成要素の実体を明らかにする**」

- QCD から原子核にいたる最もおもしろい部分 (カイラル対称性の破れの動力学、隠れた自由度の顕在化) をやりましょう!
- Critical な観測量は何か? (この研究会の目的)
- 原子核物理学の Grand Design の再構築ができるか?

■ QCD から原子核へ

- 何本かの High Way ができつつある。(LQCD → 核力、核力 → 核構造) どの自由度が効いているかについては未解明部分多し。
- 「SCL-LQCD + Chiral RMF → 原子核密度汎関数」の試み
 - ◆ 30 年来の問題 (Chiral Collapse) を解決
 - ◆ jj-closed 核では underbinding
 - ◆ Chiral $SU_f(3)$ RMF EOS は高密度で too soft → Repulsion の起源は?

■ カイラル対称性 (π の物理)

→ 「核子多体系の物理」と「クォーク・ハドロン物理」の再会

