

Heavy Hadrons in Nuclear Matter

Ref. arXiv:1811.07286 [hep-ph]

YASUI Shigehiro
Keio University

Contents

1. Charm nucleus
2. Λ_c in nuclear matter
3. HQS formalism (Λ_c binding energy)
4. Conclusion

1. Charm nucleus

Flavors

HiggsTan.com

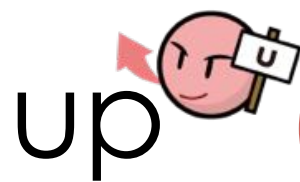
electric charge

1st

2nd

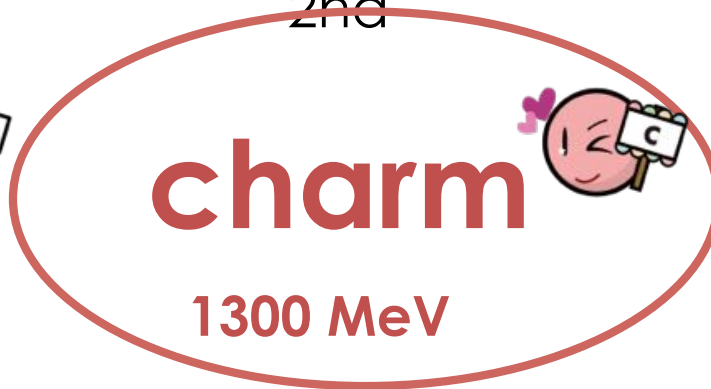
3rd

$Q=+2/3$



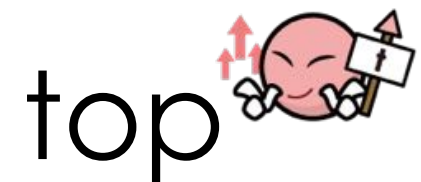
up

2 MeV



charm

1300 MeV



top

173000 MeV

$Q=-1/3$



down

5 MeV



strange

100 MeV



bottom

4200 MeV

Exotic Hadrons (X, Y, Z, Pc)

1. Charm nucleus

Flavors

HiggsTan.com

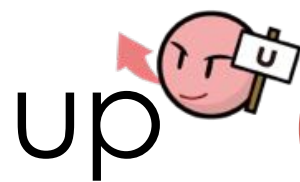
electric charge

1st

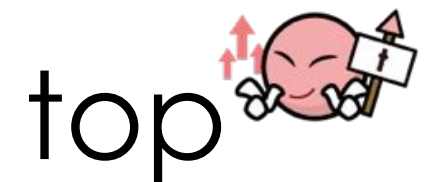
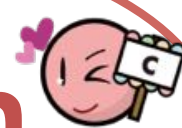
2nd

3rd

$Q=+2/3$



2 MeV



173000 MeV

$Q=-1/3$



5 MeV



100 MeV



@Nuclear Medium

1. Charm nucleus

Booklet: "70 problems in physics" (JPS)

"物理学70の不思議" (日本物理学会)

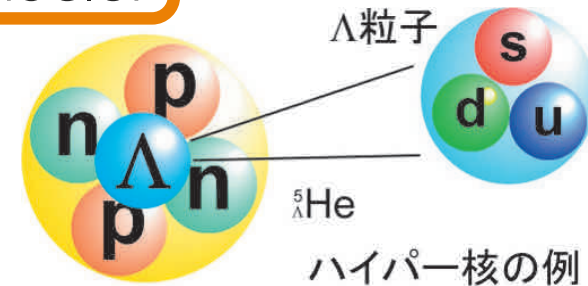
58

ストレンジな原子核, Charming nuclei

物質はクォークからなるという事実は、20世紀物理学の1つの到達点である。しかし、クォークが物質を形づくる仕組みは単純ではなかった。通常クォークは単独では存在せず、おおむね2つや3つの組(ハドロンという)で現れる。実際、u(アップ)、d(ダウン)クォークが集まりuudとuddという塊になったものが、ハドロンのなかでも安定な陽子と、ほぼ安定な中性子(半減期11分)である。クォークにはほかに4種類、u、dに次いで軽いほうから順にs(ストレンジ)、c(チャーム)、b(ボトム)、t(トップ)クォークがあり、これらを含んだ3つの組も不安定ではあるがハドロンを形成する。

sクォークを1つ含むudsの塊は Λ 粒子とよばれ、陽子や中性子とともに原子核を構成することが以前から知られている。この Λ 粒子、つまりsクォークを含む「ストレンジな原子核」は、通常の原子核と区別してハイパー核とよばれ、 π 中間子、陽子、中性子を放出して崩壊する。

ハイパー核の構造を調べると、核内で Λ 粒子が陽子や中性子から受ける力がわかる。この情報は、陽子・中性子間に働く力(核力)をより根源的なクォークに基づいて理解するうえで大いに役立ち、この宇宙でなぜクォークが原子核を



形づくったのかを深く理解することにつながる。最近ではsクォークを複数個含んだ、さらにストレンジな原子核を多数つくる実験も進んでいる。さて、超高密度の代表格である中性子星の中心部には、たくさんのsクォークが安定に存在し、中性子星が巨大なハイパー核になっていることが予想されている。つまりハイパー核の研究は、いまだ謎の多い中性子星の性質を理解する鍵になると考えられる。

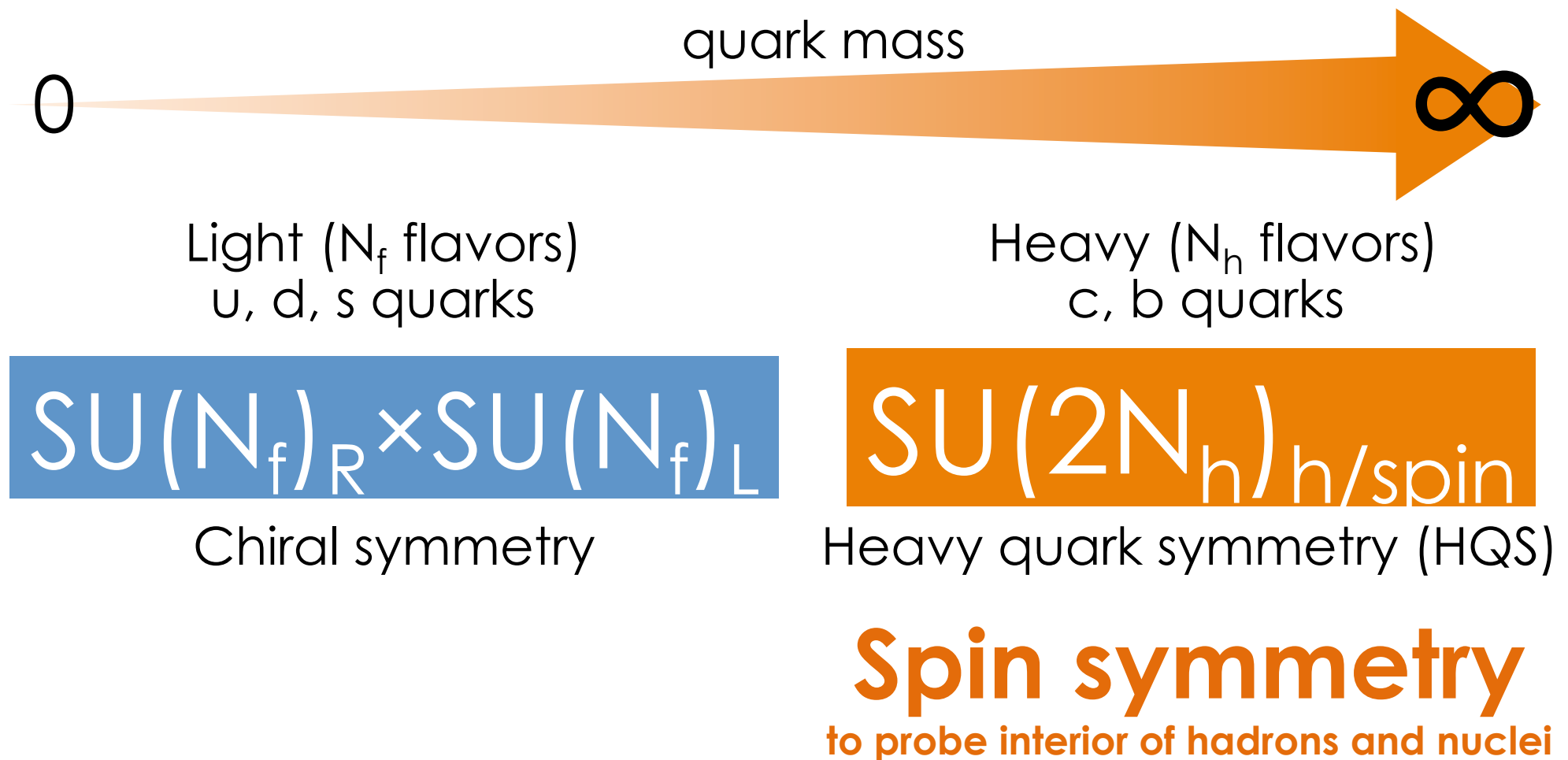
ストレンジな原子核が実験で観測されることがわかると、sクォークの次に重いcクォークを含む「チャームな原子核」もあるかもしれない。 Λ 粒子は陽子や中性子に比べて20%重いだけなのに対し、cクォークを含むudcからなる Λ_c^+ 粒子は2倍以上重い。そんな「チャームな原子核」があるとすれば、どんな性質をもっているのだろうか？

会誌編集委員会

1. Charm nucleus

Symmetry

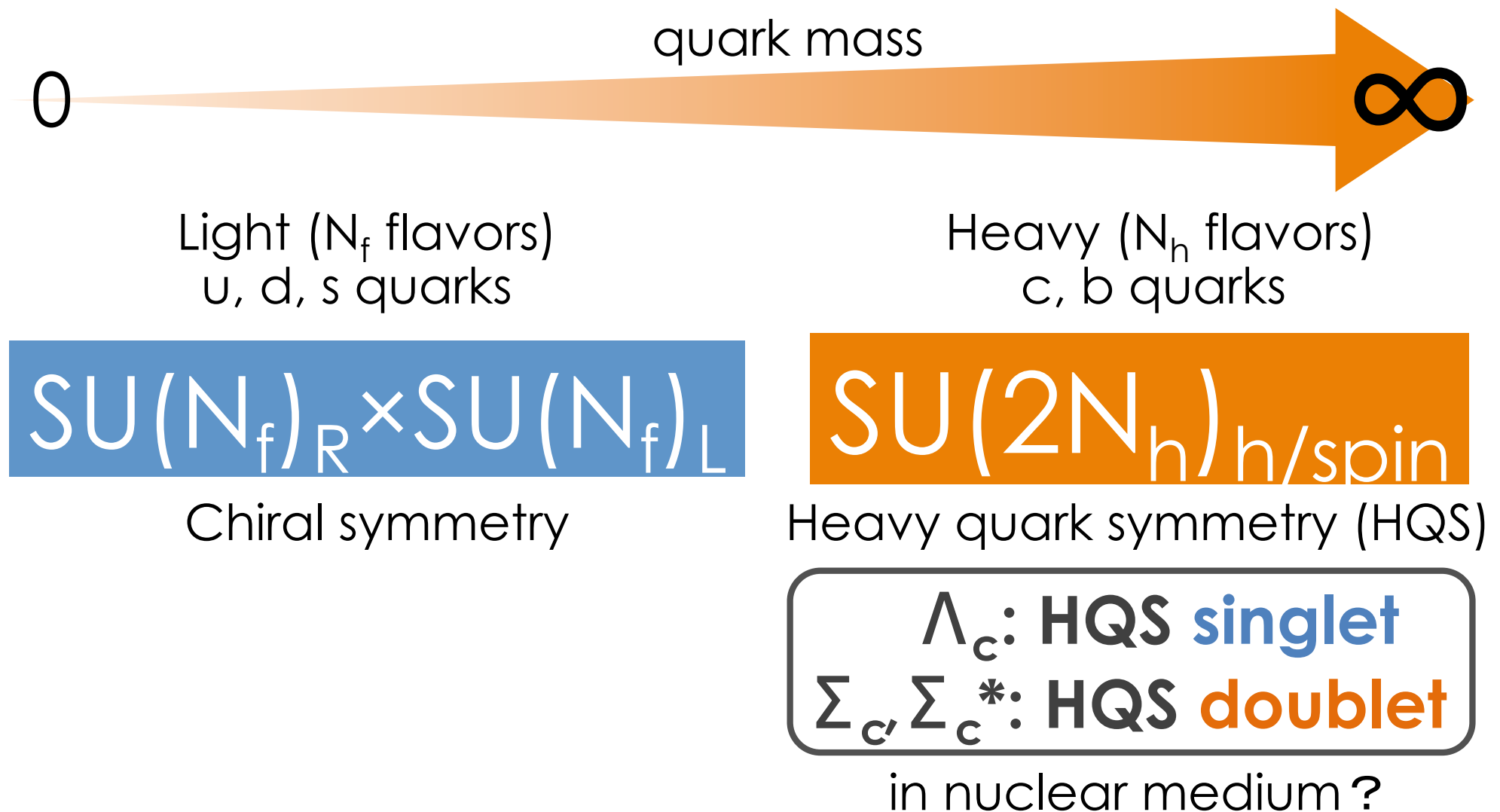
Spin of light components (light quarks and gluons) is approximately decoupled from spin of heavy quark.



1. Charm nucleus

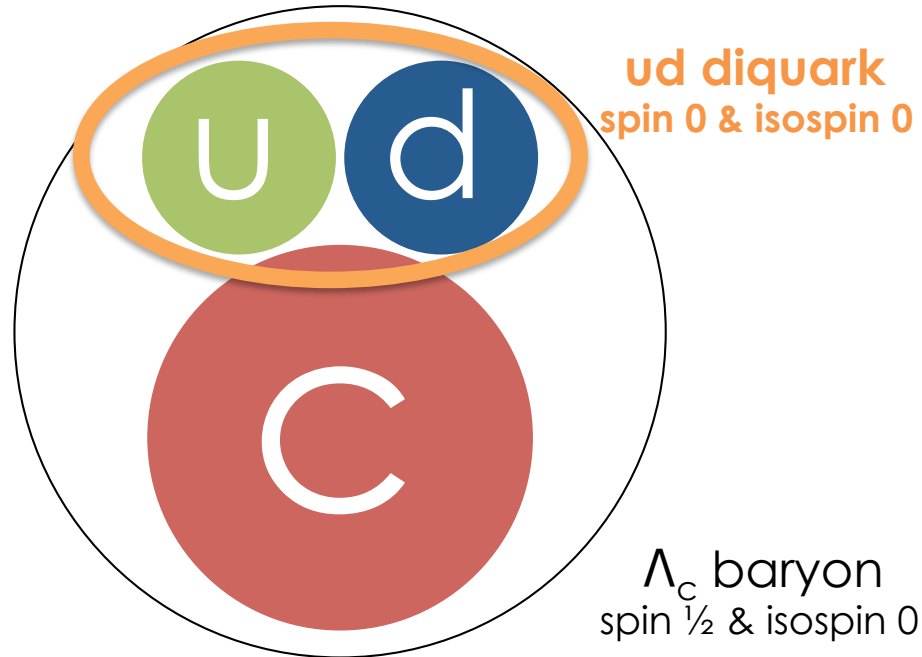
Symmetry

Spin of light components (light quarks and gluons) is approximately decoupled from spin of heavy quark.



2. Λ_c in nuclear matter

Simple
system !



@Nuclear Matter

2. Λ_c in nuclear matter

Early works in 1970's

LETTERE AL NUOVO CIMENTO

VOL. 19, N. 17

27 Agosto 1977

On Supernuclei.

S. IWAO

Department of Physics, College of Liberal Arts, Kanazawa University - Kanazawa

(ricevuto il 2 Dicembre 1976)

VOLUME 39, NUMBER 24

PHYSICAL REVIEW LETTERS

12 DECEMBER 1977

Possibility of Charmed Hypernuclei

C. B. Dover and S. H. Kahana

Brookhaven National Laboratory, Upton, New York 11973

(Received 10 August 1977)

IL NUOVO CIMENTO

VOL. 46 A, N. 3

1 Agosto 1978

Stable Charmed Hyperfragments (*).

R. GATTO and F. PACCANONI (**)

Département de Physique Théorique, Université de Genève - CH-1211 Genève 4, Suisse

2. Λ_c in nuclear matter

Progress of Theoretical Physics, Vol. 69, No. 2, February 1983

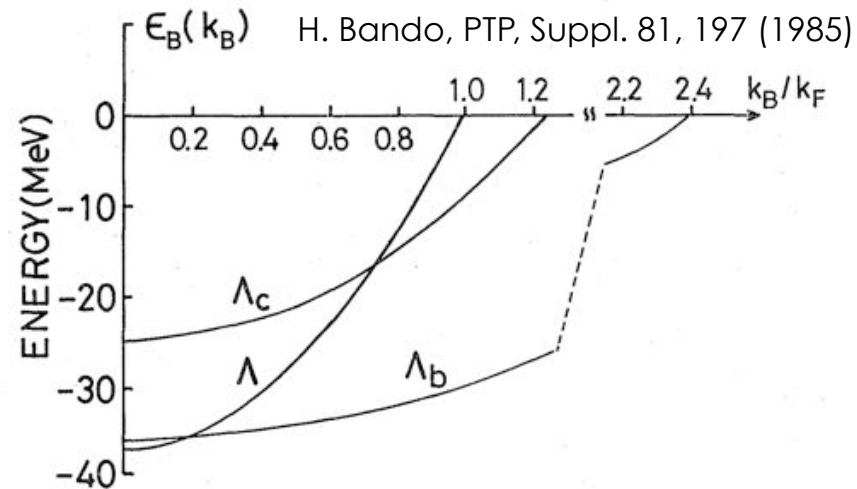
Flavor Nuclei and One-Boson-Exchange Potentials

Hiroharu BANDŌ and Sinobu NAGATA*

Division of Mathematical Physics, Fukui University, Fukui 910

**Department of Applied Physics, Miyazaki University, Miyazaki 880*

(Received August 9, 1982)



Mean field
QCD sum rules
 $\Lambda_c N$ int. by LQCD

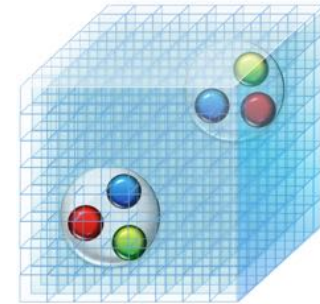
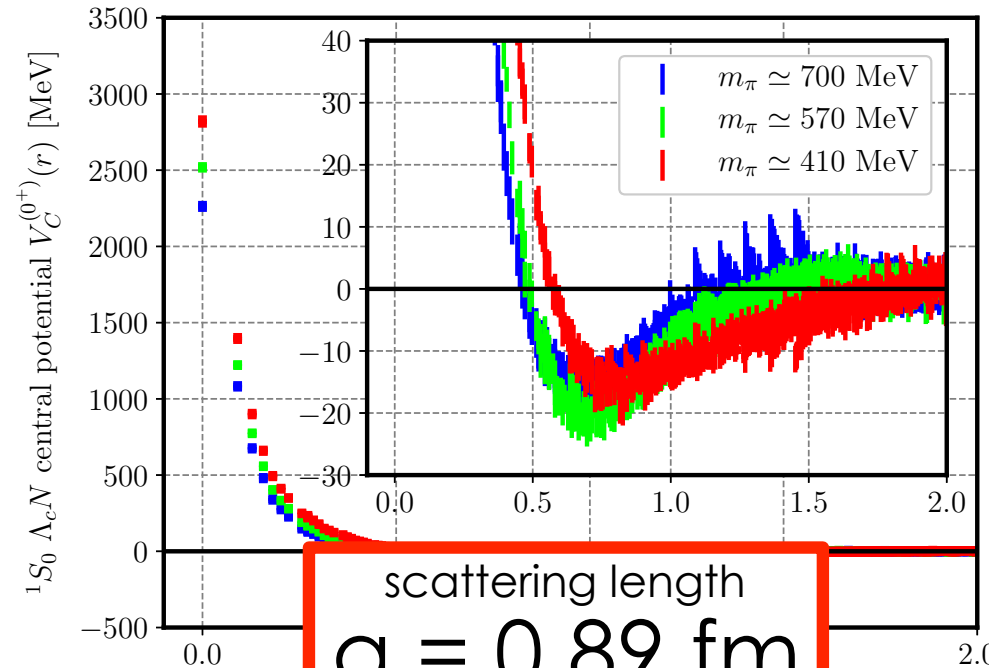
...

2. Λ_c in nuclear matter

Lattice QCD

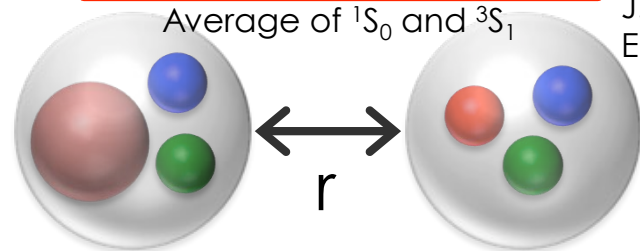
$\Lambda_c N$ potential

T. Miyamoto (HAL collaboration)
Nucl. Phys. A971, 113 (2018)



<https://www.jicfus.jp/jp/promotion/pr/mj/2013-2/lattice/>

Chiral perturbation
J. Haidenbauer, G. Krein,
Eur. Phys. J. A54 (2018) 199



Λ_c

Nucleon


3. HQS formalism

Λ_c -nucleon Lagrangian

φ : nucleon field (mass m)

Ψ_v : Λ_c baryon field (mass M)

Heavy quark limit ($M \rightarrow \infty$)

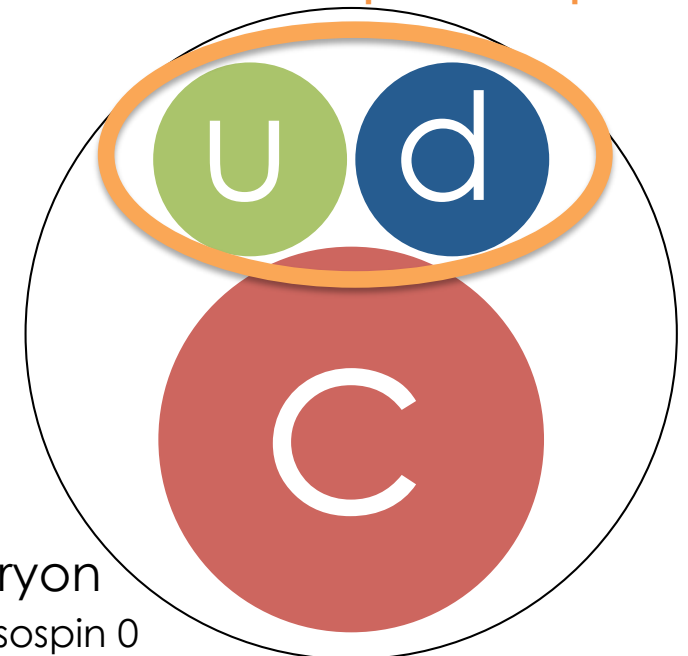

spin non-flip interaction

$$\mathcal{L}_{\text{int}}^{\text{rel}} = c_1 \bar{\psi} \psi \bar{\Psi}_v \Psi_v + \frac{c'_1}{M} \bar{\psi} \psi \bar{\Psi}_v \Psi_v + c_2 \bar{\psi} \gamma^\mu \psi \bar{\Psi}_v \left(v_\mu - \frac{i \overleftarrow{D}_{\perp \mu}}{2M} + \frac{i D_{\perp \mu}}{2M} \right) \Psi_v + \frac{c'_2}{M} \bar{\psi} \gamma^\mu \psi v_\mu \bar{\Psi}_v \Psi_v$$

$$+ \frac{1}{M} \left(c_3 \bar{\psi} \sigma^{\mu\nu} \psi \epsilon_{\mu\nu\rho\sigma} v^\rho + c_4 \bar{\psi} \gamma_\sigma \gamma_5 \psi \right) \bar{\Psi}_v S_v^\sigma \Psi_v + \mathcal{O}(1/M^2),$$

spin flip interaction
(S_v^k : spin operator)

ud diquark
spin 0 & isospin 0



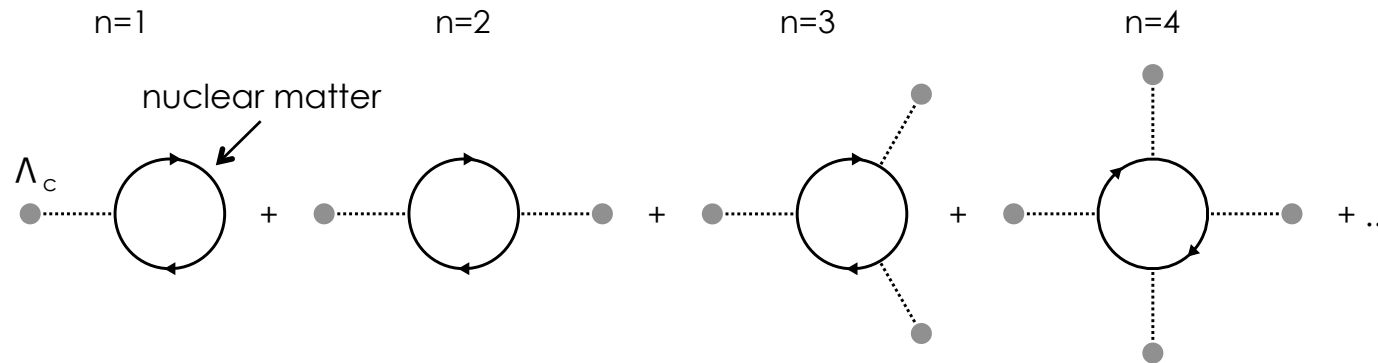
Λ_c baryon
spin $1/2$ & isospin 0

parameter	(a)	(b)	(c)
Λ (GeV) $1/\Lambda \sim$ hadron size	0.3	0.4	0.5
c_1 (GeV^{-2})	16.2	14.0	12.4

Scattering length $a = 0.89$ fm
J. Haidenbauer, G. Krein, Eur. Phys. J. A54 (2018) 199

3. HQS formalism

Effective potential
(binding energy)



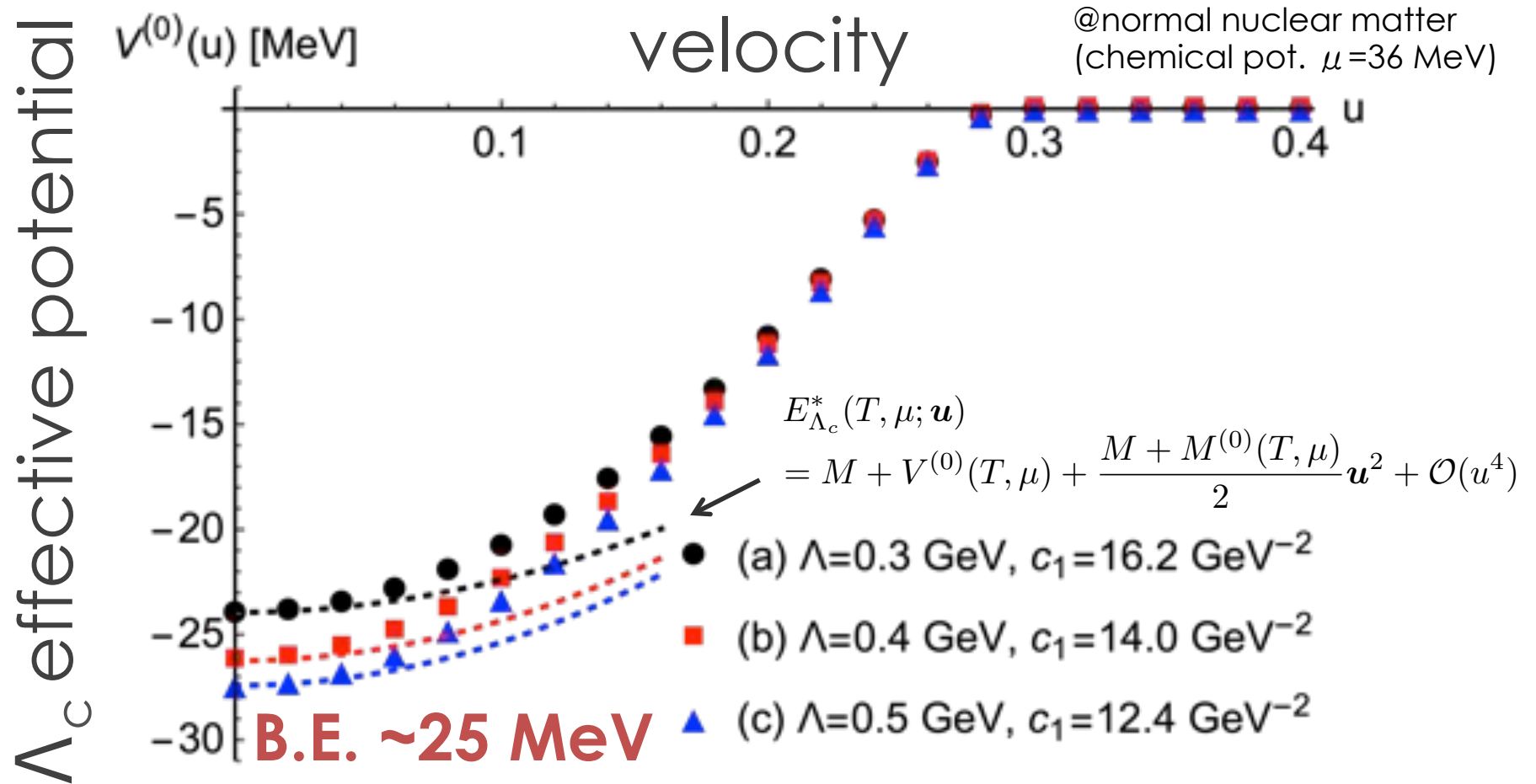
Summing up the multiple scattering

$$-iV^{(0)} = \int \frac{dp_0}{2\pi} \log \left(1 + c_1 \int \frac{d^3\mathbf{p}}{(2\pi)^3} \frac{1}{p_0 - E_{\mathbf{p}} + i\varepsilon} \right)$$

Matsubara sum for p_0
(including chemical potential μ)

3. HQS formalism

Velocity-dependence of effective potential

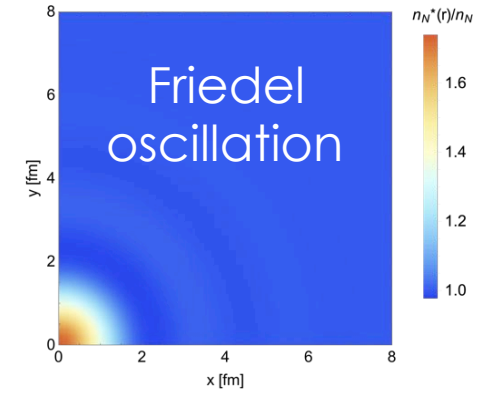


✓ The obtained values are consistent with QCDSR (-20 MeV). "four-quark condensate"
 K. Ohtani et al., Phys. Rev. C96, 055208 (2017)

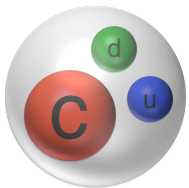
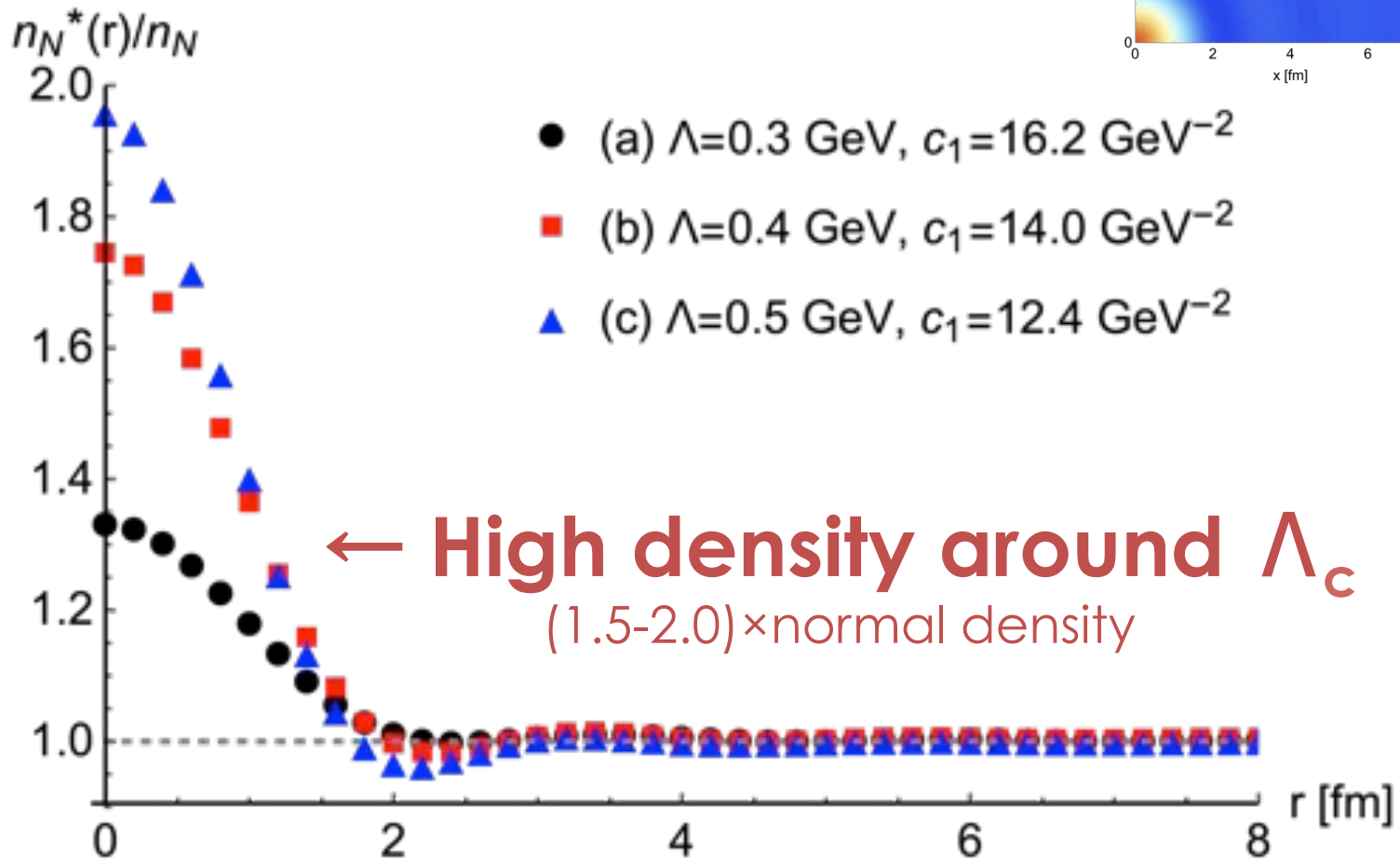
✓ $T\rho$ approximation: $\Delta M_{T\rho}^{(0)} = -2\pi n_N a \lim_{M \rightarrow \infty} \frac{m + M}{mM} = -39.4$ MeV

3. HQS formalism

Number density distributions



number density (ratio)



Λ_c

distance from Λ_c

5. Conclusion

- We discuss Λ_c baryon in nuclear matter.
 - **Binding energy ~ 25 MeV**
 - **Nuclear density $\sim (1.5-2.0) \times$ normal density**

Future problems:

- a) Production of charmed nuclei (proton, antiproton beams)
 - b) Observables (multiple processes)
 - c) Continuity/discontinuity to quark matter
 - d) Analogy to condensed matter systems
- ...