

重イオン衝突と中性子星

– ハドロン相関とハドロン間相互作用を中心に –

京都大学基礎物理学研究所 大西 明

高密度ハドロン・クォーク物質の諸相と
中性子星の構造・進化

May 25-26, 2019, Kyoto, Japan



高塚さんと中性子星

■ 中性子星について多くを学ばせていただきました。

- 普遍的な3バリオン斥力が存在するはずである。
- 最大質量とともに冷却についても同時に解かなければ、問題を解決したことにはならない。
- いきなり現象論的な状態方程式を使っても信頼できない。
-



2017/12/01-03, RIKEN



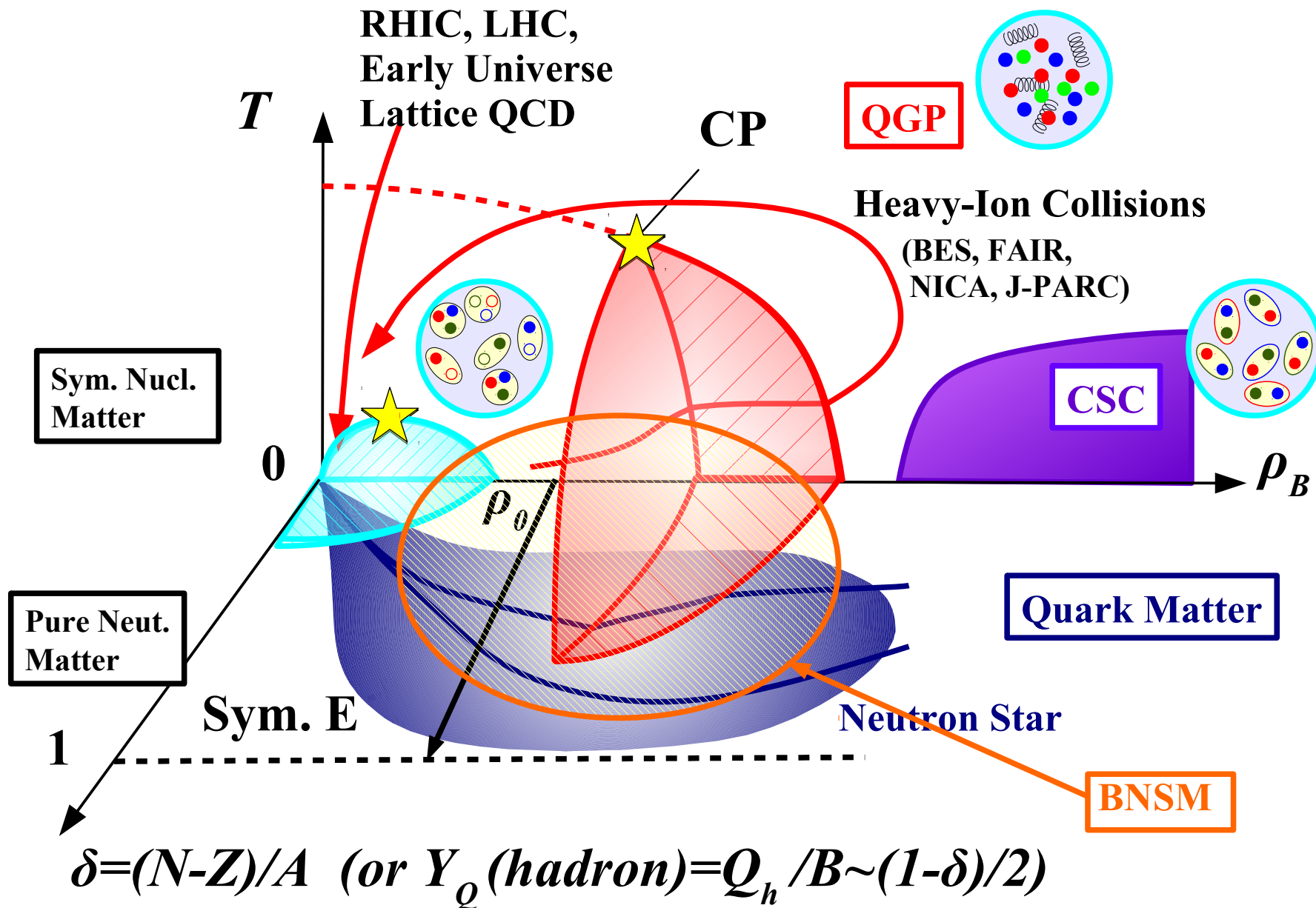
2012 年学会
中性子星シンポ

新学術領域「中性子星核物質」研究会



2017/12/01-03, RIKEN

QCD 相図における重イオン衝突と中性子星



QCD 相図における重イオン衝突と中性子星

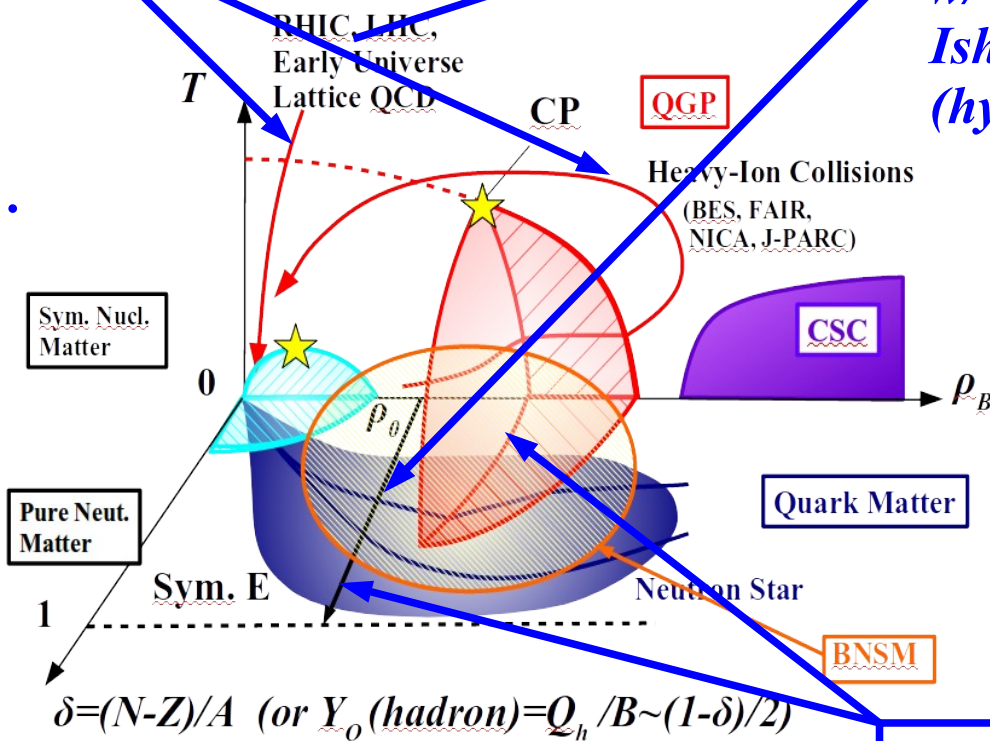
重イオン衝突

w/ Morita, Kamiya, Hyodo, Hatsuda, .. (hh correlation)

ストレンジネス核物理

*w/ Matsuda, Kunihiro, Takahashi (init. cond.)
w/ Nara, Hirano, Akamatsu, Kitazawa, ... (J-PARC-HI collab)*

w/ Tsubakihara, Harada, Ishizuka, Hirata, Isaka, ... (hypernuclei)



QCD 相図と符号問題

w/ Mori, Kashiwa

非対称物質の物理

w/ Tews, Lattimer, Kolomeitsev, Wu, Shen, ...

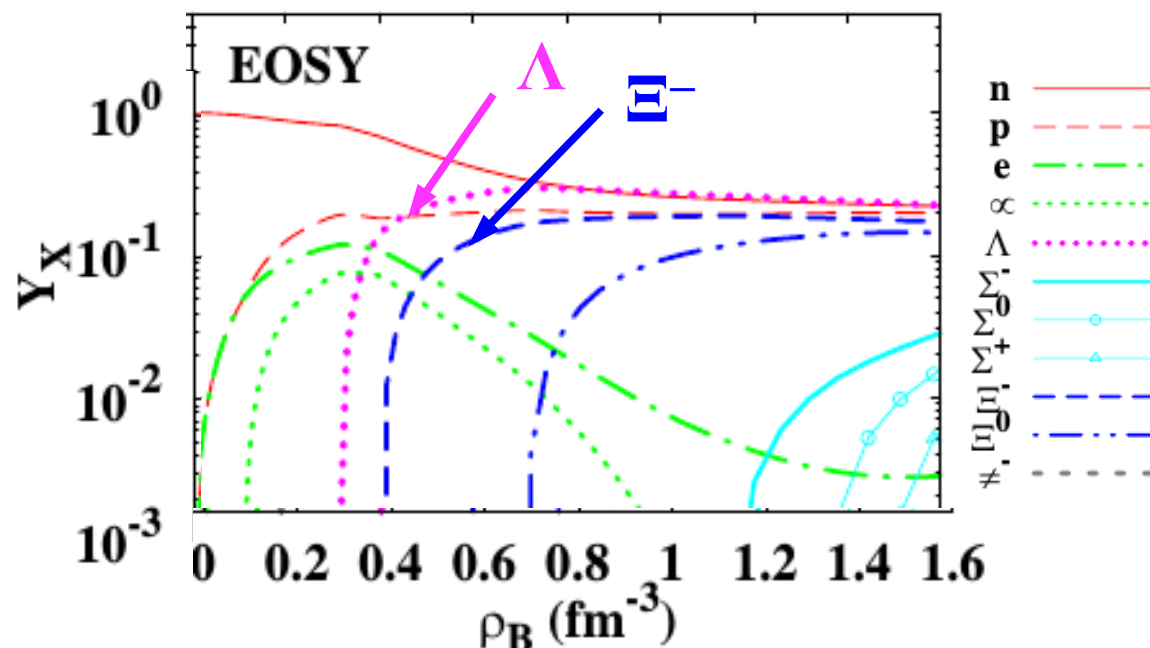
ハイペロン・パズル

■ 中性子星中のハイペロン

- $U_{\Lambda}(\rho_0) \sim -30 \text{ MeV}$, $U_{\Xi}(\rho_0) \sim -15 \text{ MeV}$, $U_{\Sigma}(\rho_0) > +15 \text{ MeV}$
- 中性子星中では $(2-4)\rho_0$ でハイペロンが現れ、EOS を軟化させる
→ $2 M_{\odot}$ の中性子星を支えられない (ハイペロンパズル)
- Σ が斥力的なので、現れるのは Λ , Ξ^{-} , Ξ^0 , ... の順

■ ハイペロンを含むバリオン間相互作用を実験的に調べるには？

- 散乱実験、ハイパー核、
2 粒子運動量相関、 ...



*Ishizuka, AO, Tsubakihara,
Sumiyoshi, Yamada ('08)*

Contents

■ Introduction

- 高塚さんと中性子星
- 重イオン衝突と中性子星
- ハイペロンパズル

■ ハドロン相関関数で探るハドロン間相互作用

- 2粒子運動量相関関数から2粒子間相互作用へ
- $\Lambda\Lambda$ 相関による $\Lambda\Lambda$ 相互作用の制限
- 格子 $\Xi^- p$ 核力と $\Xi^- p$ 相関
- 格子 $\Omega^- p$ 核力と $\Omega^- p$ 相関
- カイラル $\bar{K}N$ 力と $K^- p$ 相関

■ まとめ

ハドロン相関関数から ハドロン間相互作用へ

星の半径を測るには？

■ 2光子強度相関

Hanbury Brown & Twiss, Nature 10 (1956), 1047.

- ボーズ相関のため、運動量の近い2光子の強度は強め合う
→ シリウスの角直径 (angular diameter) = 0.0063”

A TEST OF A NEW TYPE OF STELLAR INTERFEROMETER ON SIRIUS

By R. HANBURY BROWN

Jodrell Bank Experimental Station, University of Manchester

AND

DR. R. Q. TWISS

Services Electronics Research Laboratory, Baldock

NATURE November 10, 1956 Vol. 178

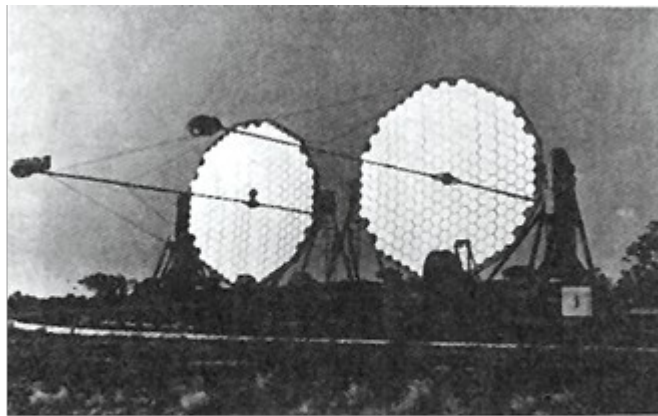


Figure 2. Picture of the two telescopes used in the HBT experiments. The figure was extracted from Ref.[1].

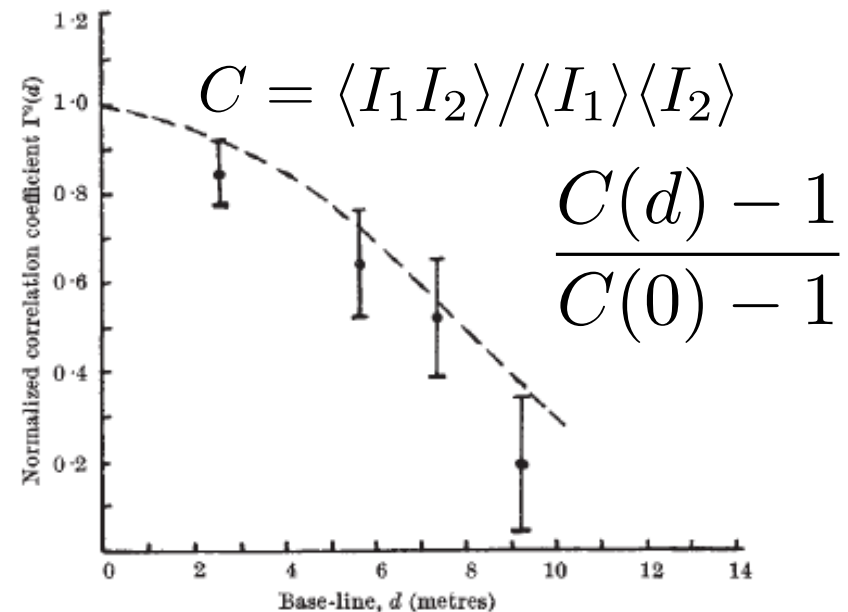


Fig. 2. Comparison between the values of the normalized correlation coefficient $\Gamma^2(d)$ observed from Sirius and the theoretical values for a star of angular diameter 0.0063". The errors shown are the probable errors of the observations

HBP telescope (from Goldhaber, ('91))

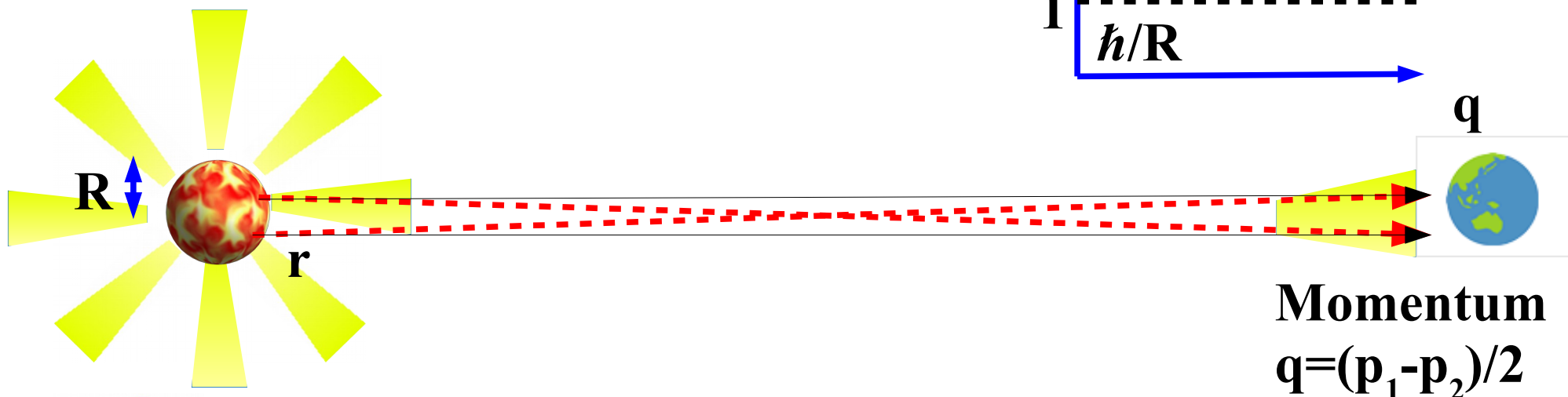
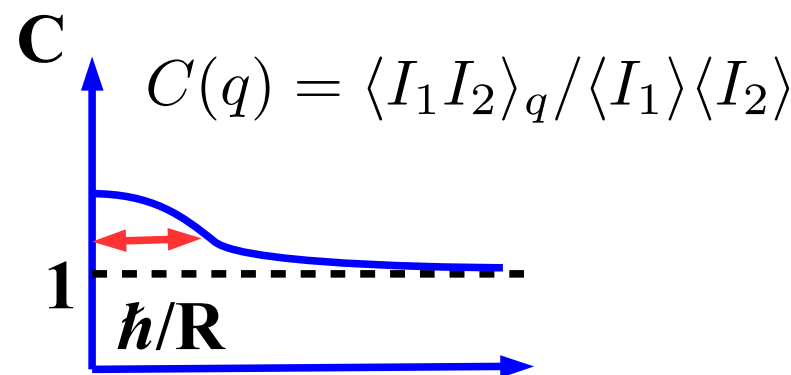
HBT ('56)

Two particle intensity correlation

■ 波動関数の対称化 → 相関関数

$$C(\mathbf{q}) = \int d^3r S(\mathbf{q}, \mathbf{r}) \left| \frac{1}{\sqrt{2}} (e^{i\mathbf{q}\cdot\mathbf{r}} + e^{-i\mathbf{q}\cdot\mathbf{r}}) \right|^2 \simeq \frac{1 + \exp(-4q^2 R^2)}{\text{ガウスソースの場合}}$$

ソース関数
(r =relative coordinate)
波動関数



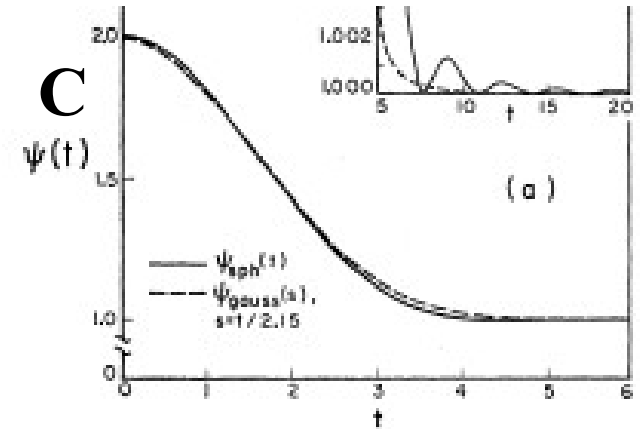
原子核反応で粒子源の大きさを測るには？

■ 2 π 粒子 interferometry

G. Goldhaber, S. Goldhaber, W. Lee, A. Pais, Phys. Rev. 120 (1960), 300

- Two pion emission probability is enhanced at small relative momenta

→ Pion source size $\sim 0.75 \hbar / \mu c$



q (relative momentum)

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 120, NUMBER 1

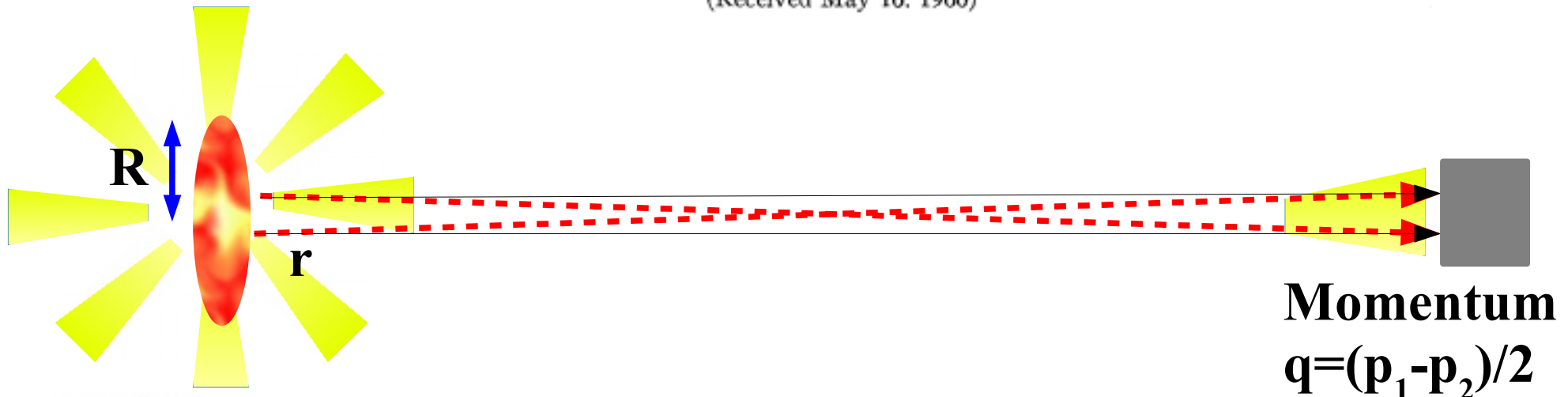
OCTOBER 1, 1960

Influence of Bose-Einstein Statistics on the Antiproton-Proton Annihilation Process*

GERSON GOLDHABER, SULAMITH GOLDHABER, WONYONG LEE, AND ABRAHAM PAIS†

Lawrence Radiation Laboratory and Department of Physics, University of California, Berkeley, California

(Received May 16, 1960)



ハドロン間相関からハドロン間相互作用へ

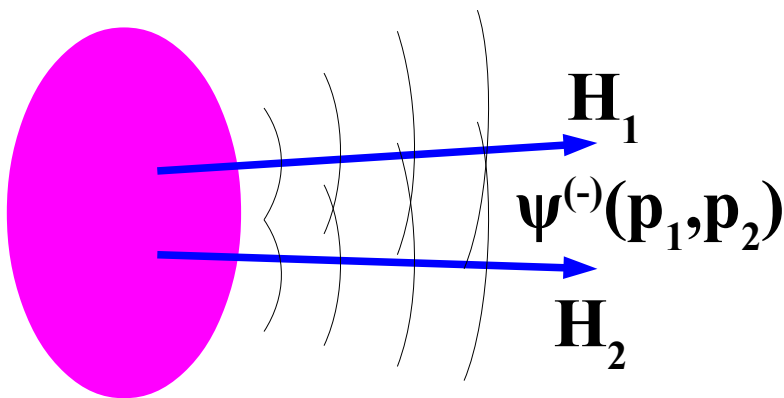
■ 2 粒子相関関数

*Koonin ('77); Pratt+('90); Lednicky+('82)
Morita, Furumoto, Ohnishi ('15)*

$$C(q) = \frac{E_1 E_2 dN_{12}/dp_1 dp_2}{(E_1 dN_1/dp_1)(E_2 dN_2/dp_2)}$$

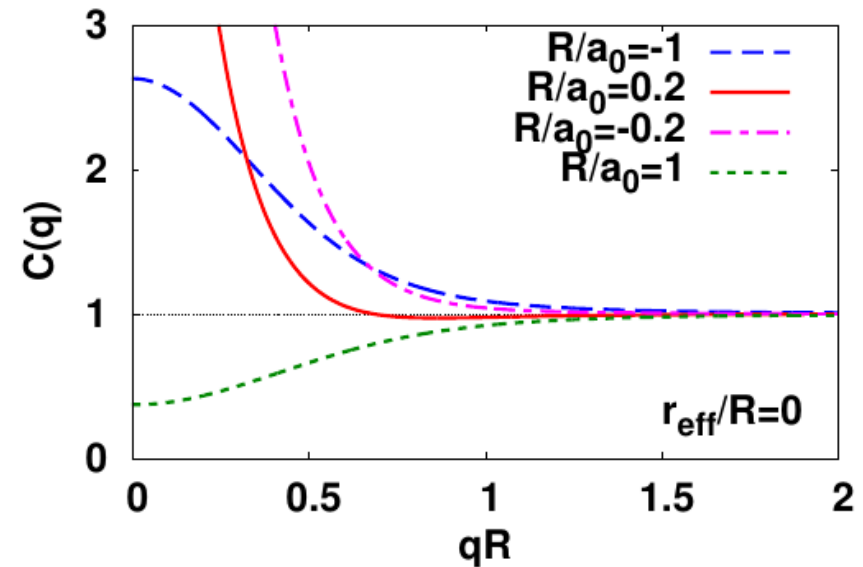
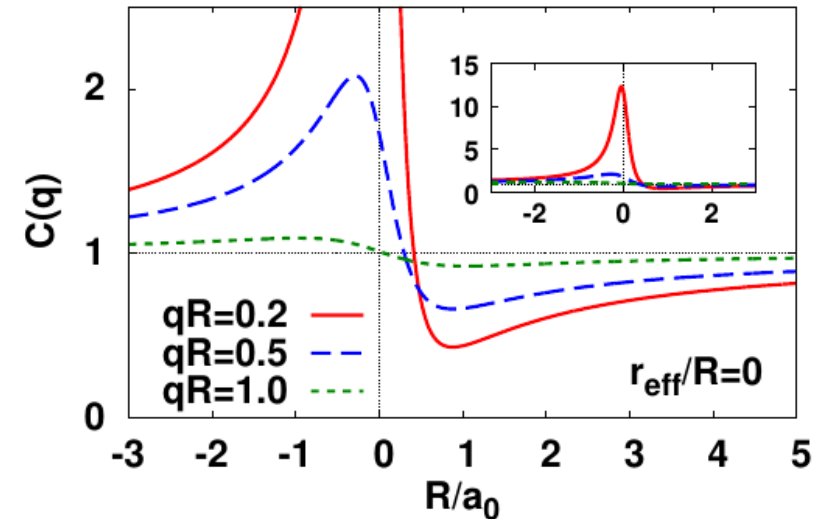
$$\simeq \int dr \underbrace{S_{12}(r)}_{\text{Source fn.}} \underbrace{\left| \psi_{12}^{(-)}(r, q) \right|^2}_{\text{int.} \rightarrow \text{rel. w.f.}}$$

q: 相対運動量



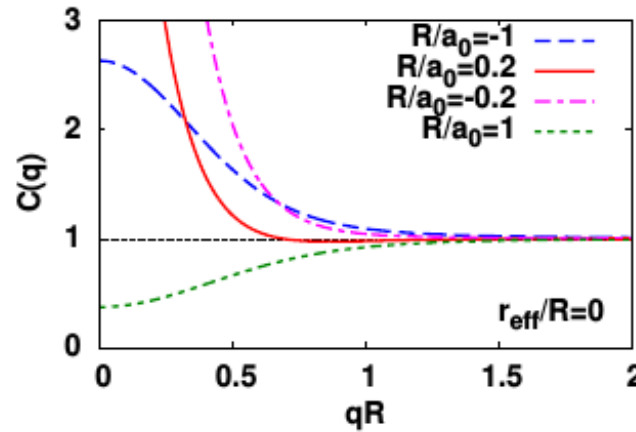
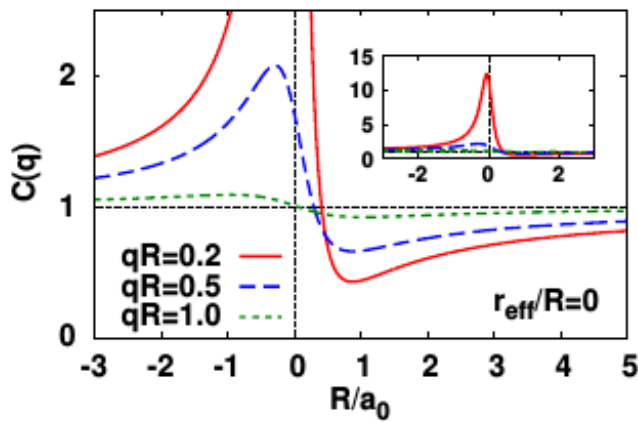
静的なガウス源

$$q \cot \delta = -1/a_0 + r_{\text{eff}} q^2/2 + \mathcal{O}(q^4)$$



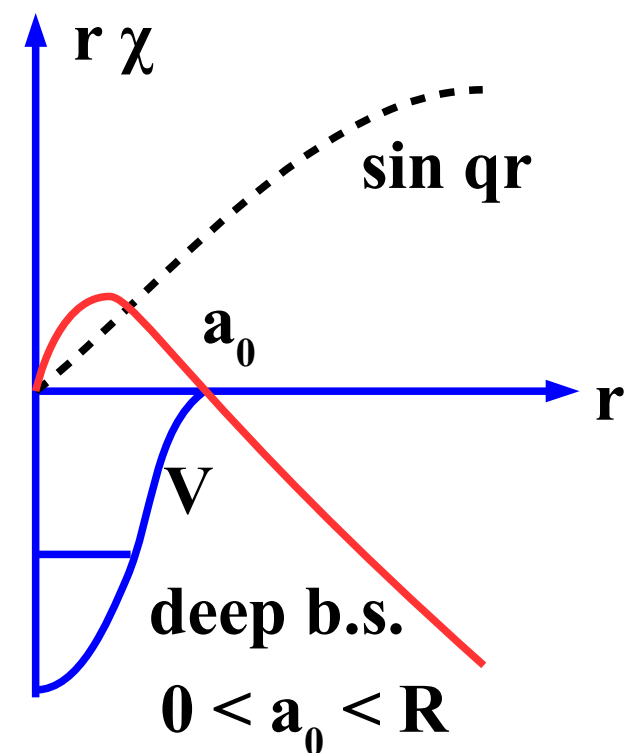
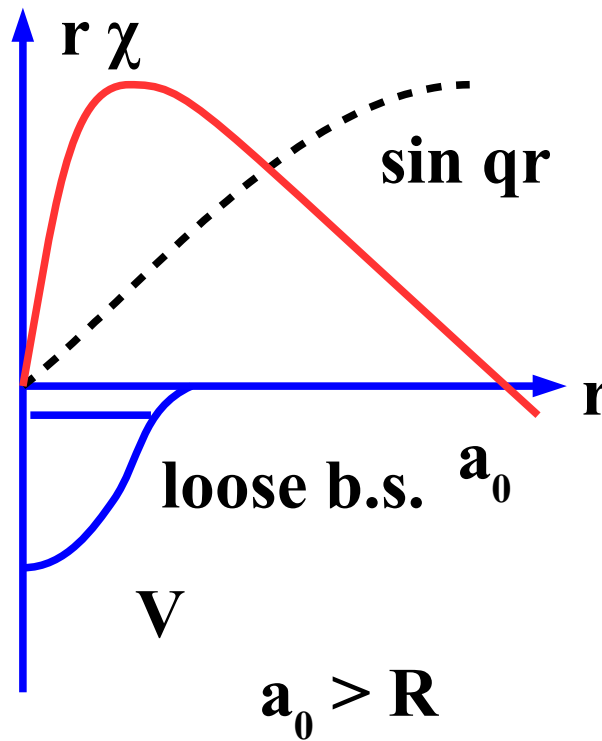
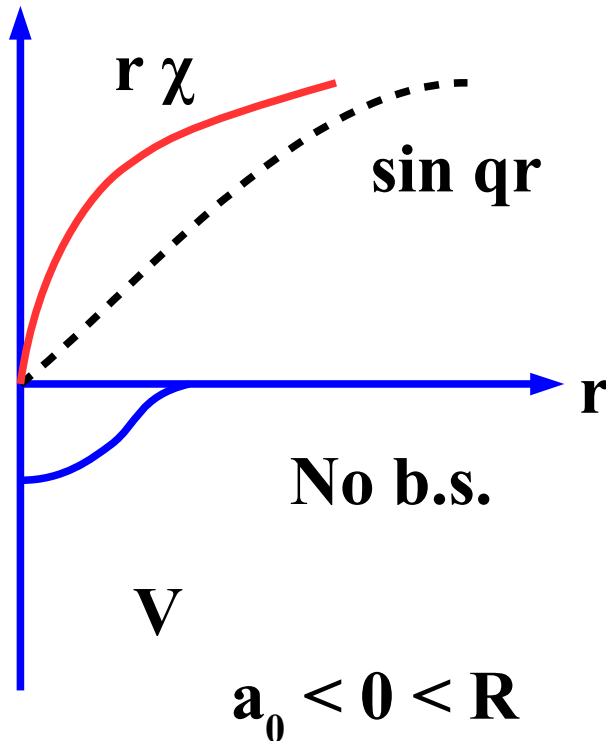
散乱長の大きさによって相関関数は大きく変化

Interaction Dependence of Correlation Function



$$q \cot \delta = -1/a_0 + r_{\text{eff}} q^2/2 + O(q^4)$$

w.f. node suppresses CF



ハドロン相関関数からハドロン間相互作用へ

■ $\Lambda\Lambda$ 相関

- 理論 [AO+('00), C.Greiner, Muller ('89), Morita+('15)]
- 測定 [STAR ('15), ALICE ('19, arXiv:1905.07209)]

■ $\Xi^- p$ 相関

- 格子核力 [K.Sasaki+('16-'18)], 相関関数 [Hatsuda+('17)]
- ALICE での測定 ('18)

■ $\Omega^- p$ 相関、 $\Omega\Omega$ 相関

- 核力 [Etiminan+('14), Iritani+('19), Gongyo+('19)], 相関 [Morita+('16, in prep.)]
- STAR ('19), ALICE ('18, in prep.)

■ $K^- p$ 相関

- カイラル動力学 [Ikeda+('11,'12), Miyahara+('16)], 相関 [AO+('16), Cho+('18), Haidenbauer ('19), Kamiya+(in prep.)], ALICE ('18)

$\Lambda\Lambda$ correlation at RHIC

- STAR collaboration at RHIC measured $\Lambda\Lambda$ correlation !

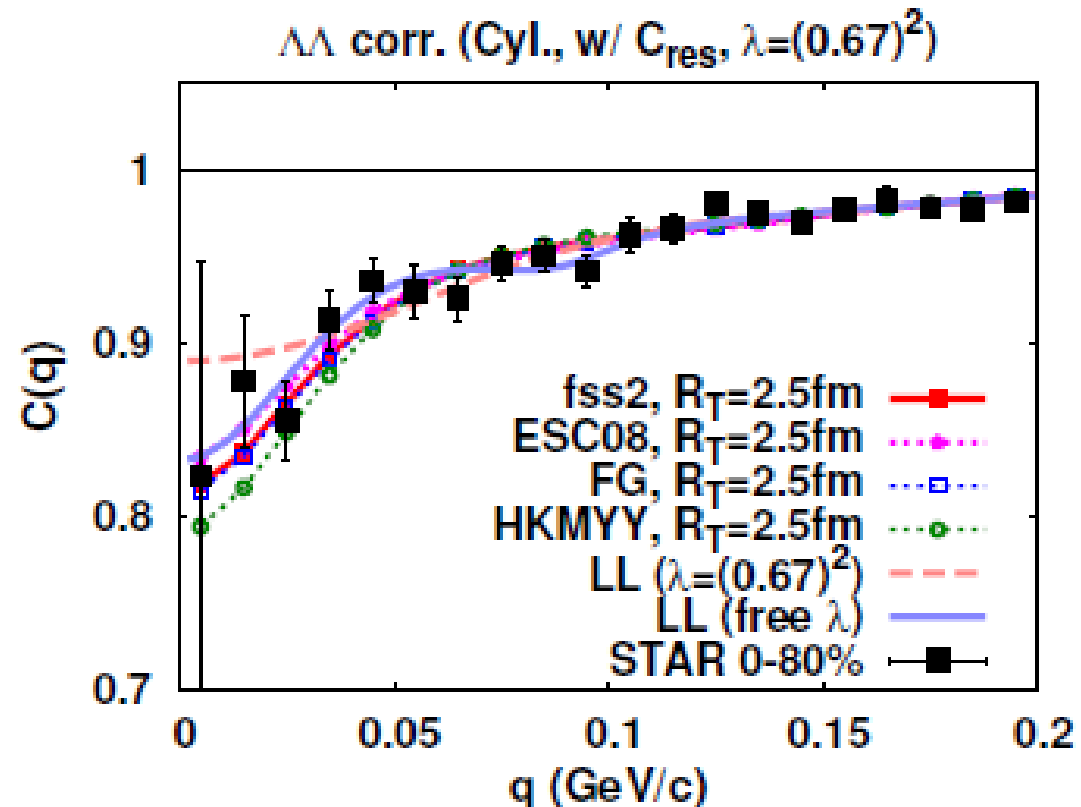
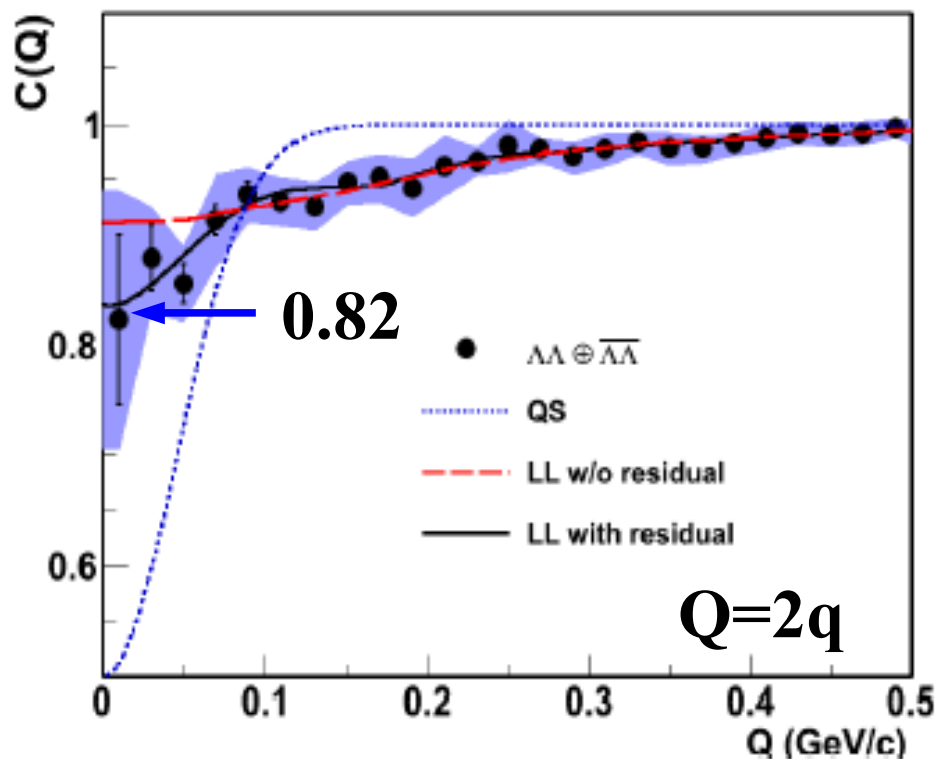
Adamczyk et al. (STAR Collaboration), PRL 114 ('15) 022301.

- RHIC, Au+Au ($\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV), Weak decay vertex analysis.

- Theoretical Analysis well explains the data

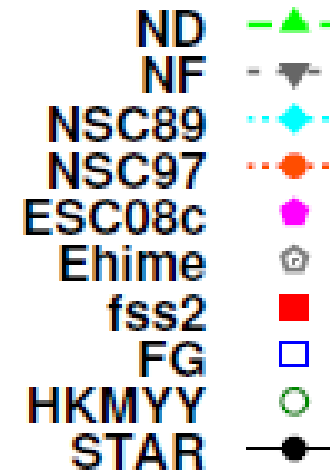
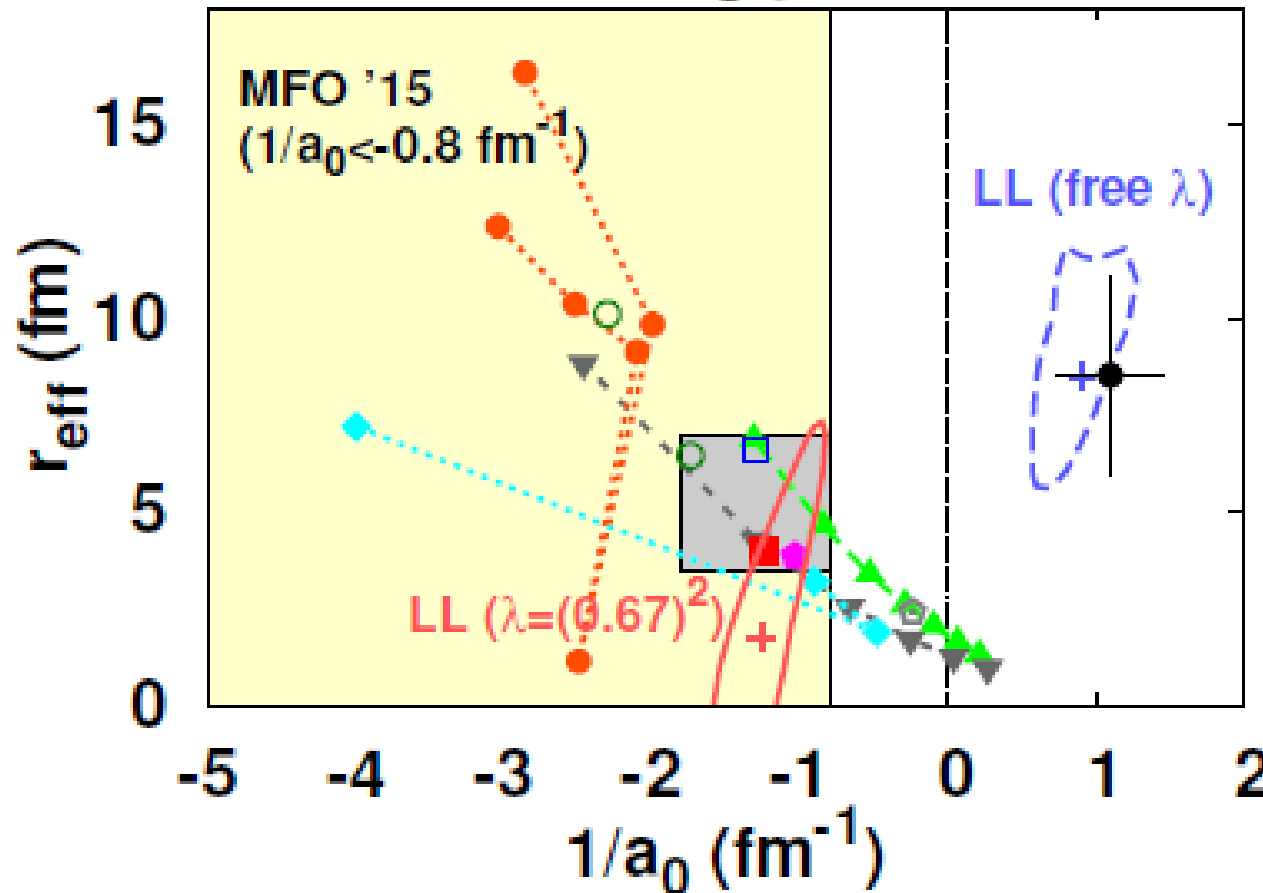
K.Morita et al., T.Furumoto, AO, PRC91('15)024916;

AO, K.Morita, K.Miyahara, T.Hyodo, NPA954 ('16), 294.



$\Lambda\Lambda$ interaction from $\Lambda\Lambda$ correlation

$\Lambda\Lambda$ scattering parameters

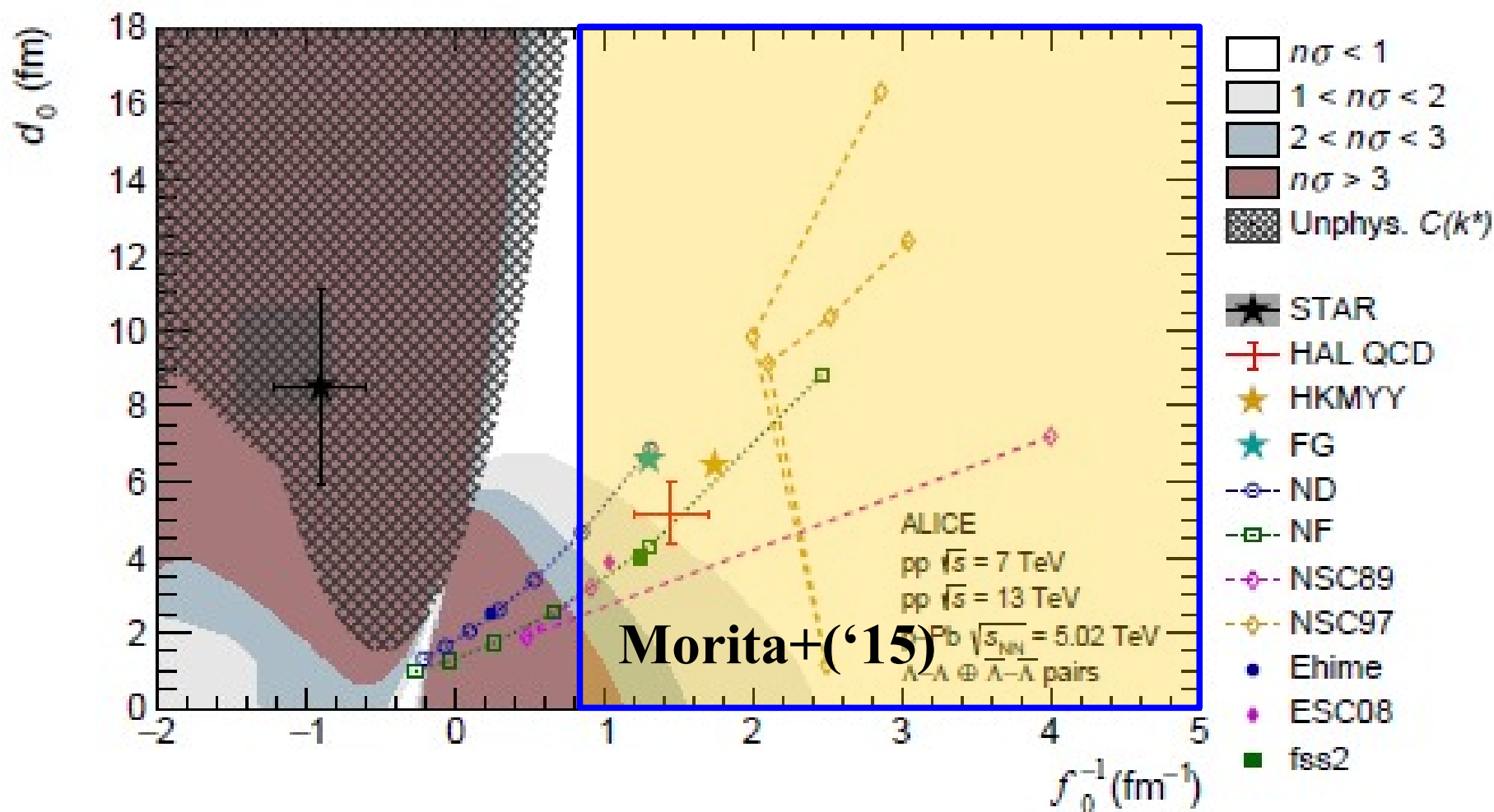


- Nijmegen potentials
(ND, NF, NSC89, NSC97, ESC08)
*Nagels+('77, '79), Maessen+('89),
Rijken+('99, '10)*
- Ehime *Ueda et al. ('98)*
- Quark model interaction:
fss2 *Fujiwara et al.('07)*
- Potential fitted to Nagara
*Filikhin, Gal ('02) (FG),
Hiyama et al. ('02, '10)(HKMYY)*

$$q \cot \delta = -1/a_0 + r_{\text{eff}} q^2/2 + O(q^4)$$

New Data from LHC-ALICE

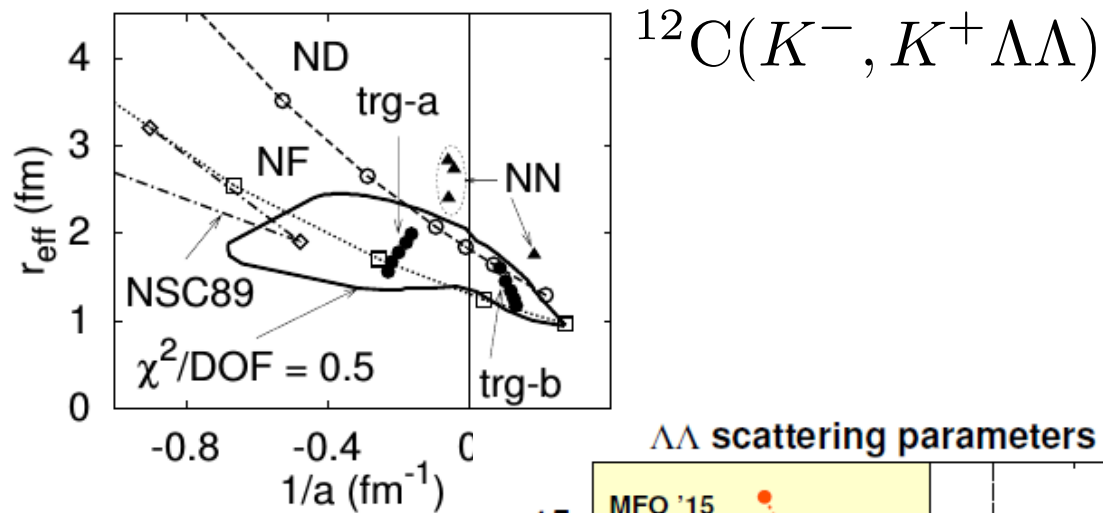
ALICE (arXiv:1905.07209)



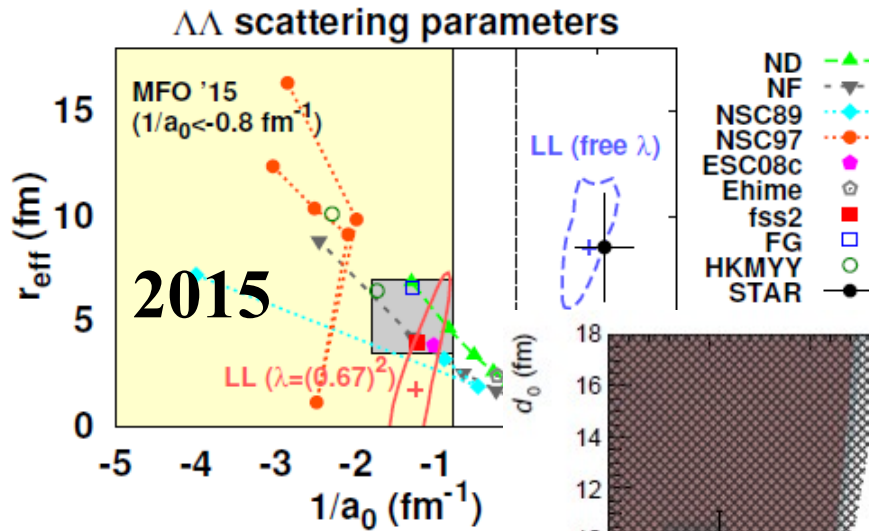
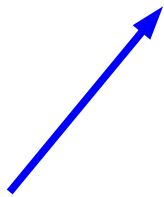
$\Lambda\Lambda$ 相互作用は弱い引力。

大きな有効レンジ→高エネルギーですぐに斥力的に。

Time dependence of $\Lambda\Lambda$ interaction



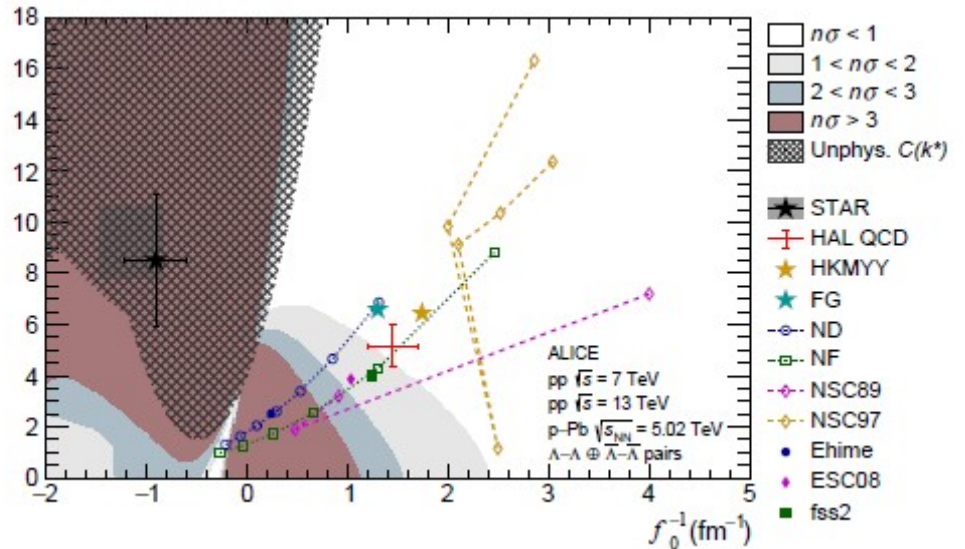
2000



2015

2019

Nagara (2001)



Relevance of ΞN interaction to physics

- H-particle: 6-quark state (uuddss) may be realized as a loosely bound state of ΞN ($I=0$)

K. Sasaki et al. (HAL QCD, '16, '17)

- Repulsive ΞN interaction ($I=1$) may help to support $2 M_{\odot}$ Neutron Star

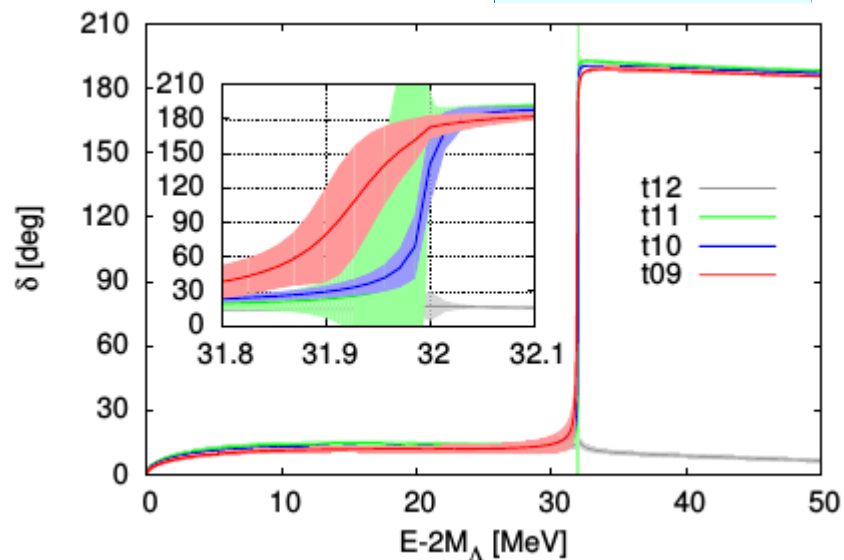
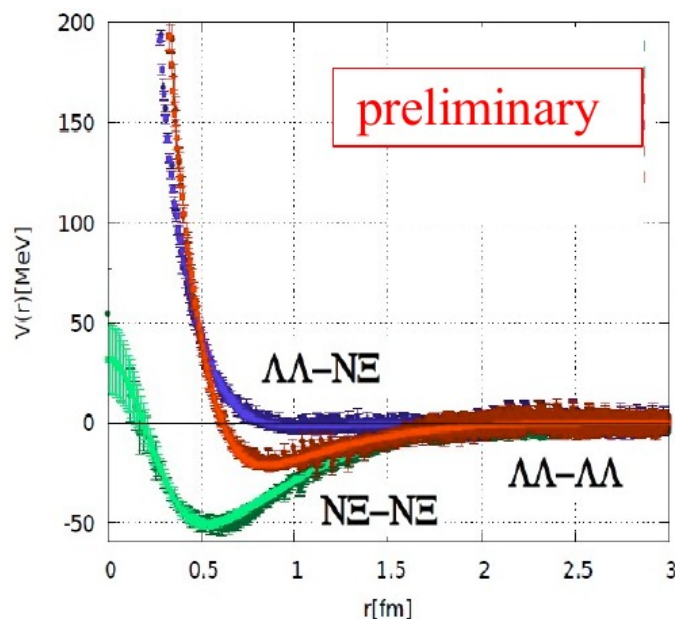
Weissborn et al., NPA881 ('12) 62.

ΞN

E522 ('07)

$\Lambda\Lambda$

HAL ('16)



K. Sasaki et al. (HAL QCD Collab.), EPJ Web Conf. 175 ('18) 05010.

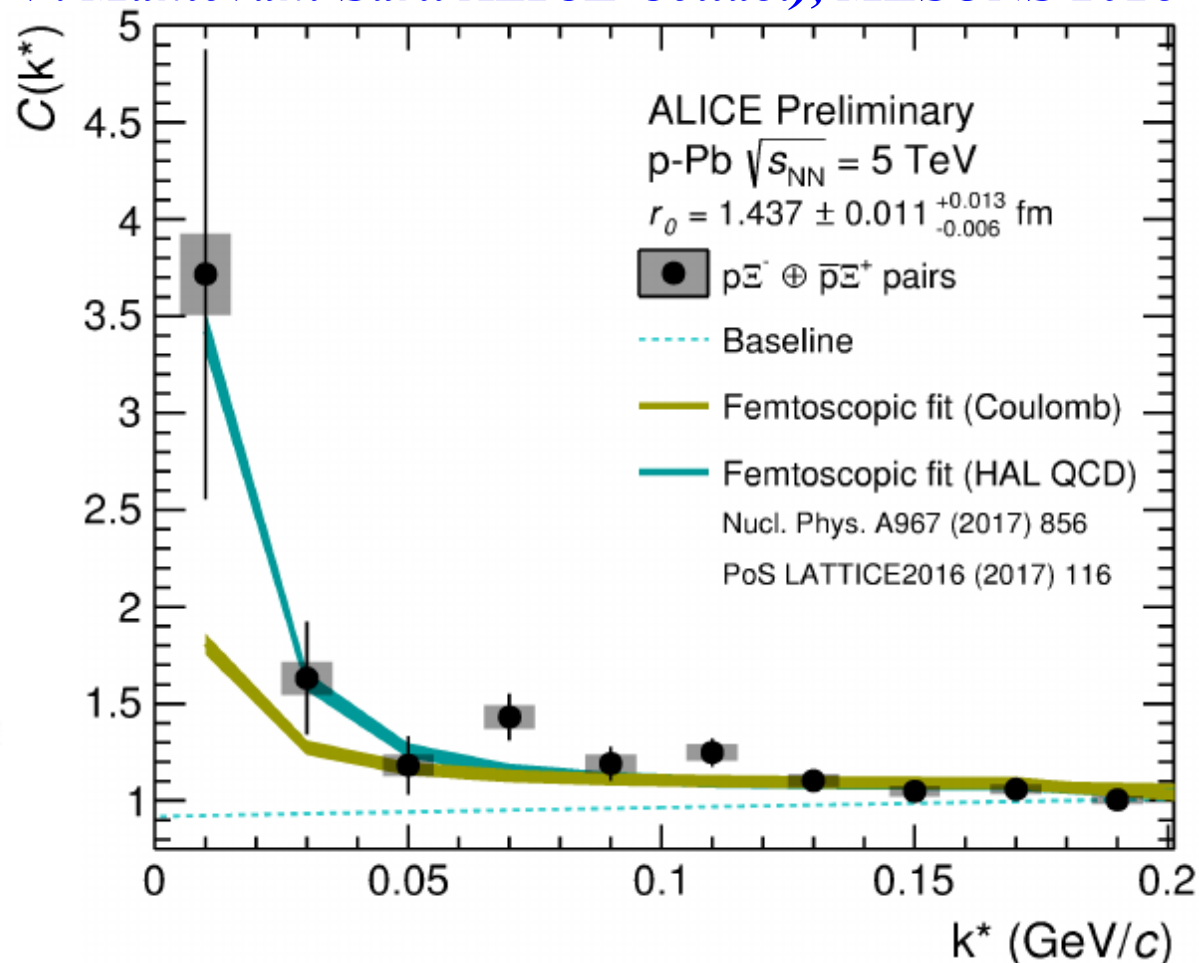
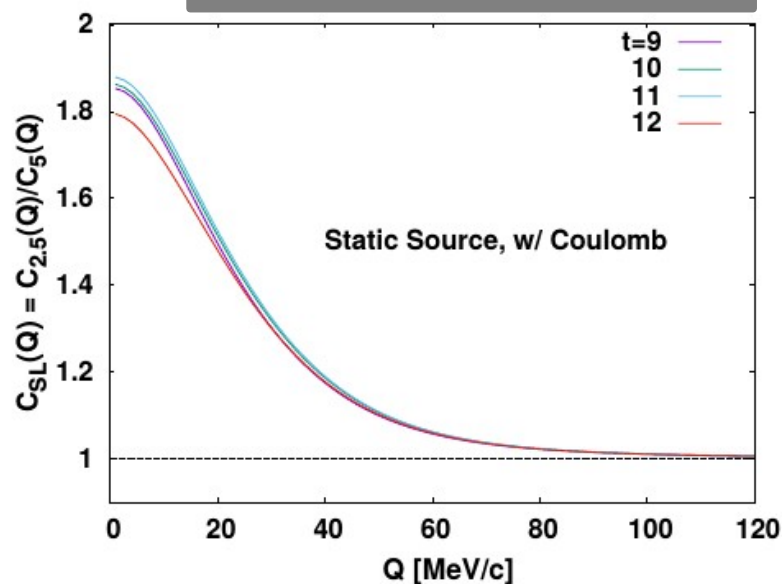
$\Xi^- p$ correlation

- Prediction of the correlation function by using ΞN potential (HAL QCD Collab.) + Coulomb potential

$$|\psi|_{\text{spin av.}}^2 = \frac{1}{2} \sum_{I=0,1} \left[\frac{1}{4} |\psi_I^{J=0}|^2 + \frac{3}{4} |\psi_I^{J=1}|^2 \right]$$

HAL prediction is examined!

V. Mantovani-Sarti ALICE Collab.), MESONS 2018



*T. Hatsuda, K. Morita, AO,
K. Sasaki, NPA967('17), 856.*

Ω^- p interaction

■ Ω^- : quark content=sss, $J^\pi=3/2^+$, $M=1672$ MeV

■ Ω^- p bound state as a $S=-3$ dibaryon ?

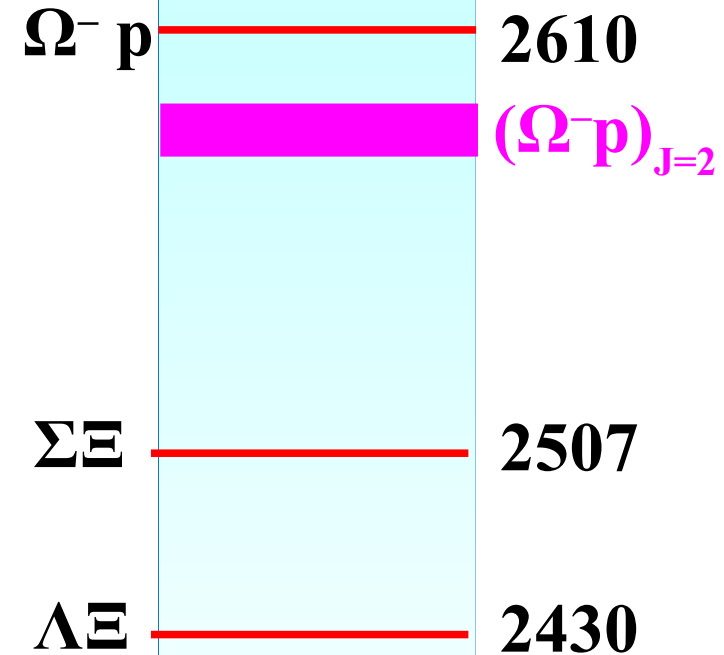
F.Etminan et al. (HAL QCD Collab.),

NPA928('14)89.

- No quark Pauli blocking in ΩN , $H=uuddss$, and $d^*=\Delta\Delta$ channels.
Oka ('88), Gal ('16)

- $J=2$ state (5S_2) couples to Octet-Octet baryon pair only with $L \geq 2$
→ Small width is expected.
Etminan et al. (HAL QCD)('14)

- Correlation is measurable at RHIC !
Neha Shah (STAR), private commun.



*Let us try to discover the first(?) dibaryon (after deuteron) !
(First dibaryon with $S < 0$!)*

$\Omega^- p$ potential from lattice QCD

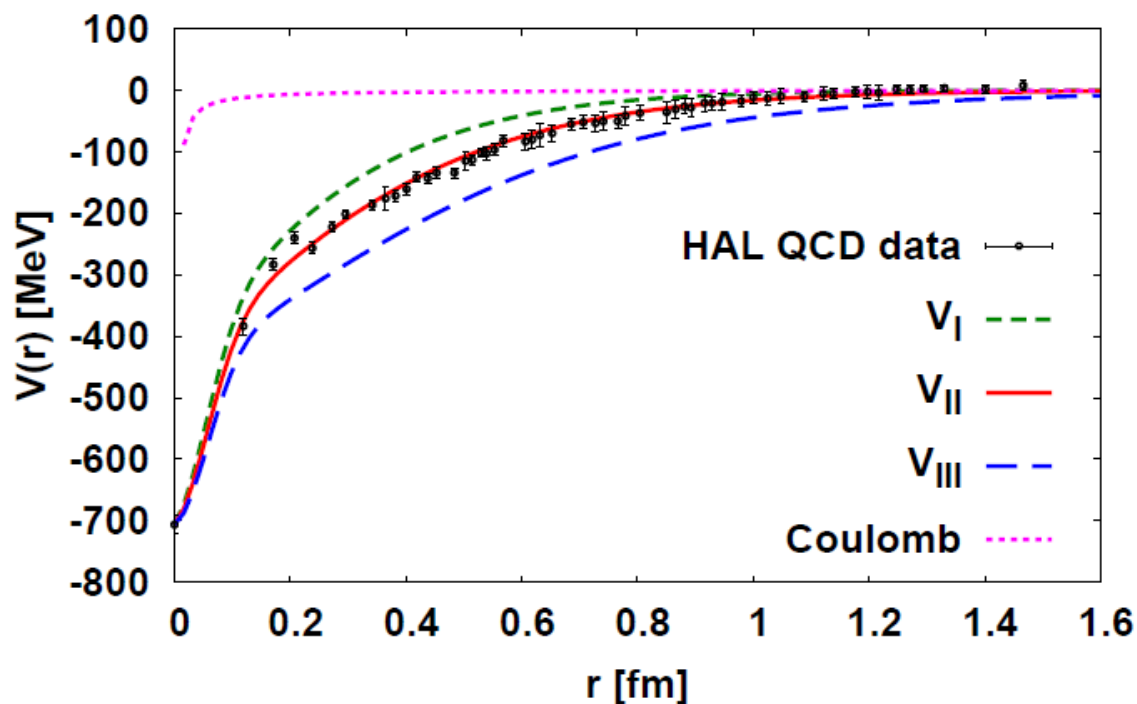
- Lattice QCD predicts $\Omega^- p$ bound state at large quark mass, $m_\pi=875$ MeV (B.E. ~ 19 MeV) in 5S_2 channel.

F. Etminan et al. (HAL QCD Collab.), NPA928('14)89.

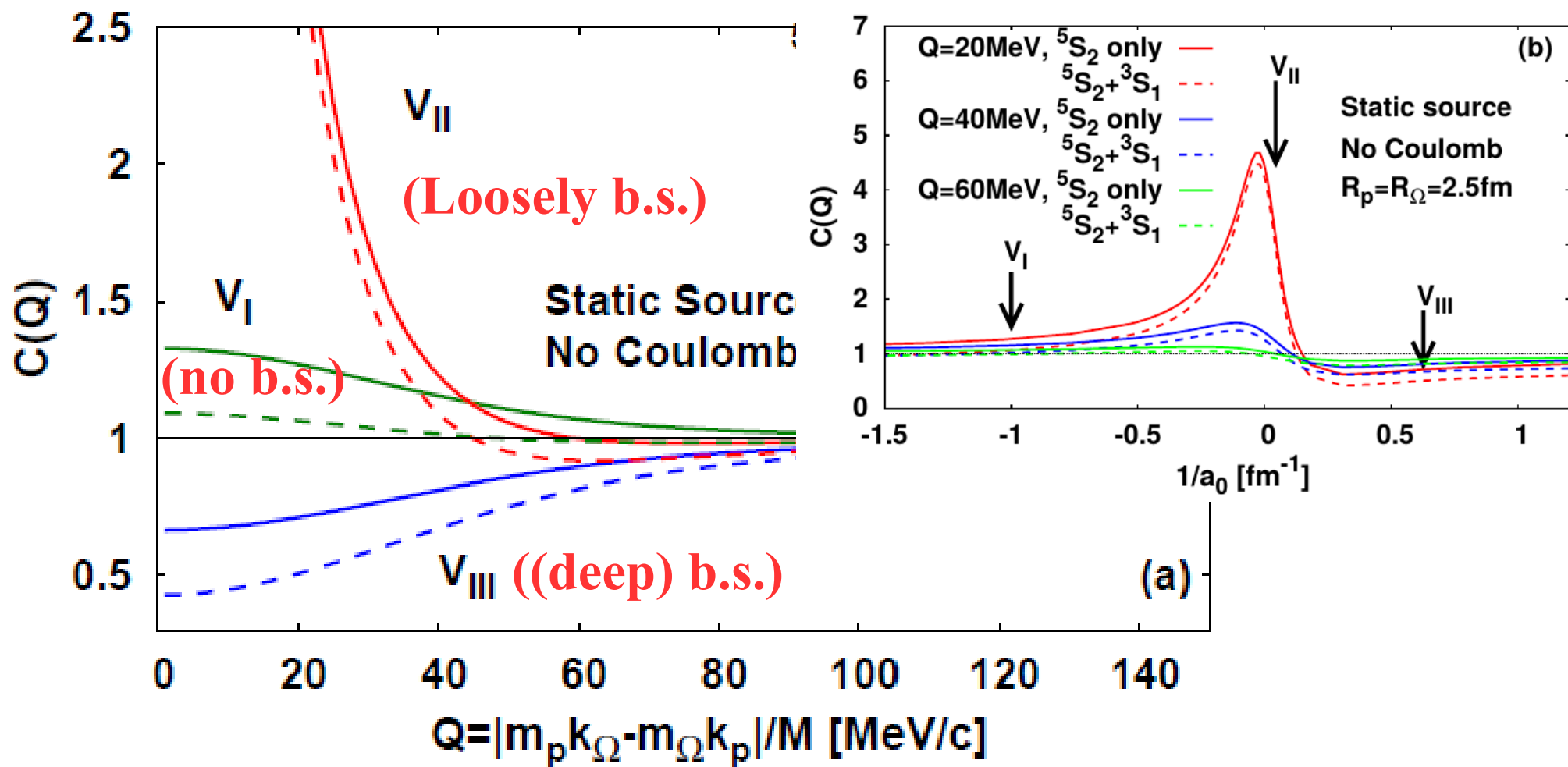
- Extrapolation to physical quark mass

- VI \rightarrow Weaker potential (no b.s.)
- VII \rightarrow Same potential (shallow b.s.)
- VIII \rightarrow Stronger potential (deep b.s.)

Spin-2 $N\Omega$ Potentials		V_I	V_{II}	V_{III}
without Coulomb	E_B [MeV]	–	0.05	24.8
	a_0 [fm]	–1.0	23.1	1.60
	r_{eff} [fm]	1.15	0.95	0.65
with Coulomb	E_B [MeV]	–	6.3	26.9
	a_0 [fm]	–1.12	5.79	1.29
	r_{eff} [fm]	1.16	0.96	0.65



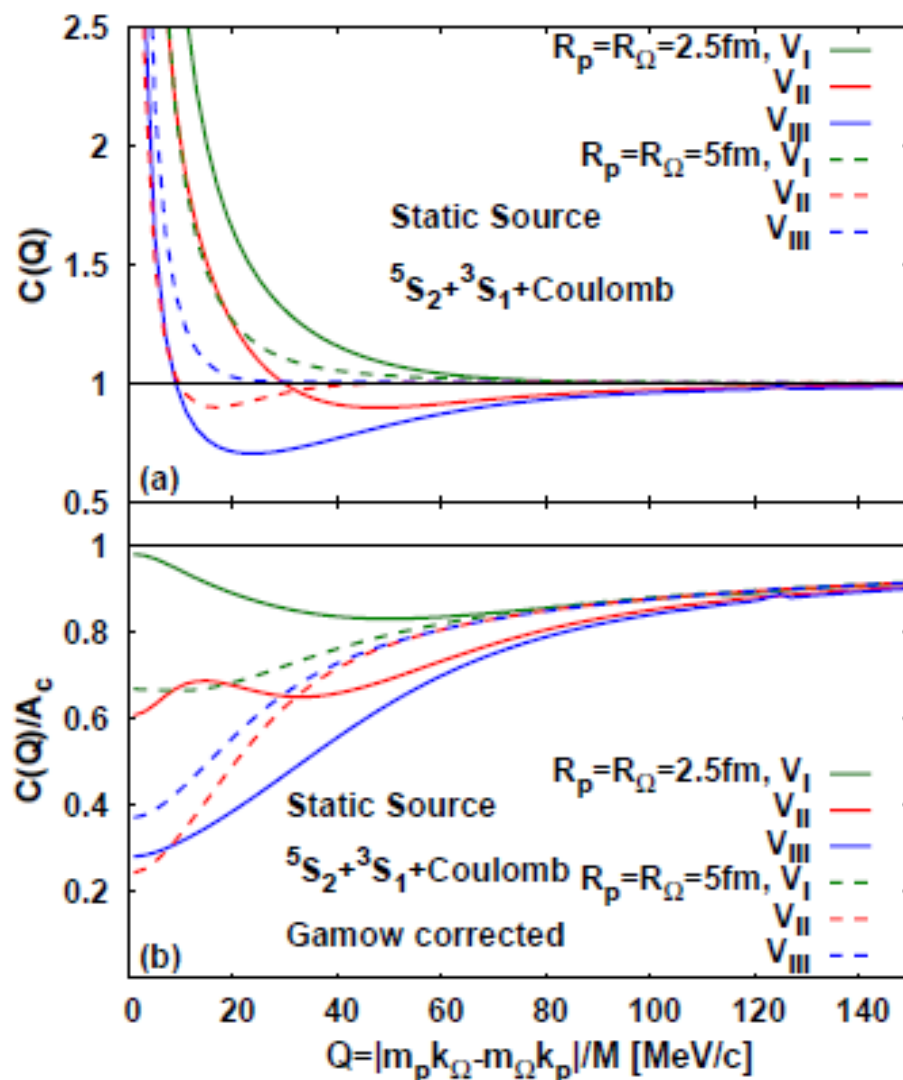
Ω - p correlation



(w/o Coulomb, Strong absorption at $r < 2$ fm in 3S_1 (decay to 8-8 in S-wave))

K. Morita, AO, F. Etminan, T. Hatsuda, PRC94('16)031901(R) [arXiv:1605.06765 [hep-ph]]

Ω - p correlation w/ Coulomb

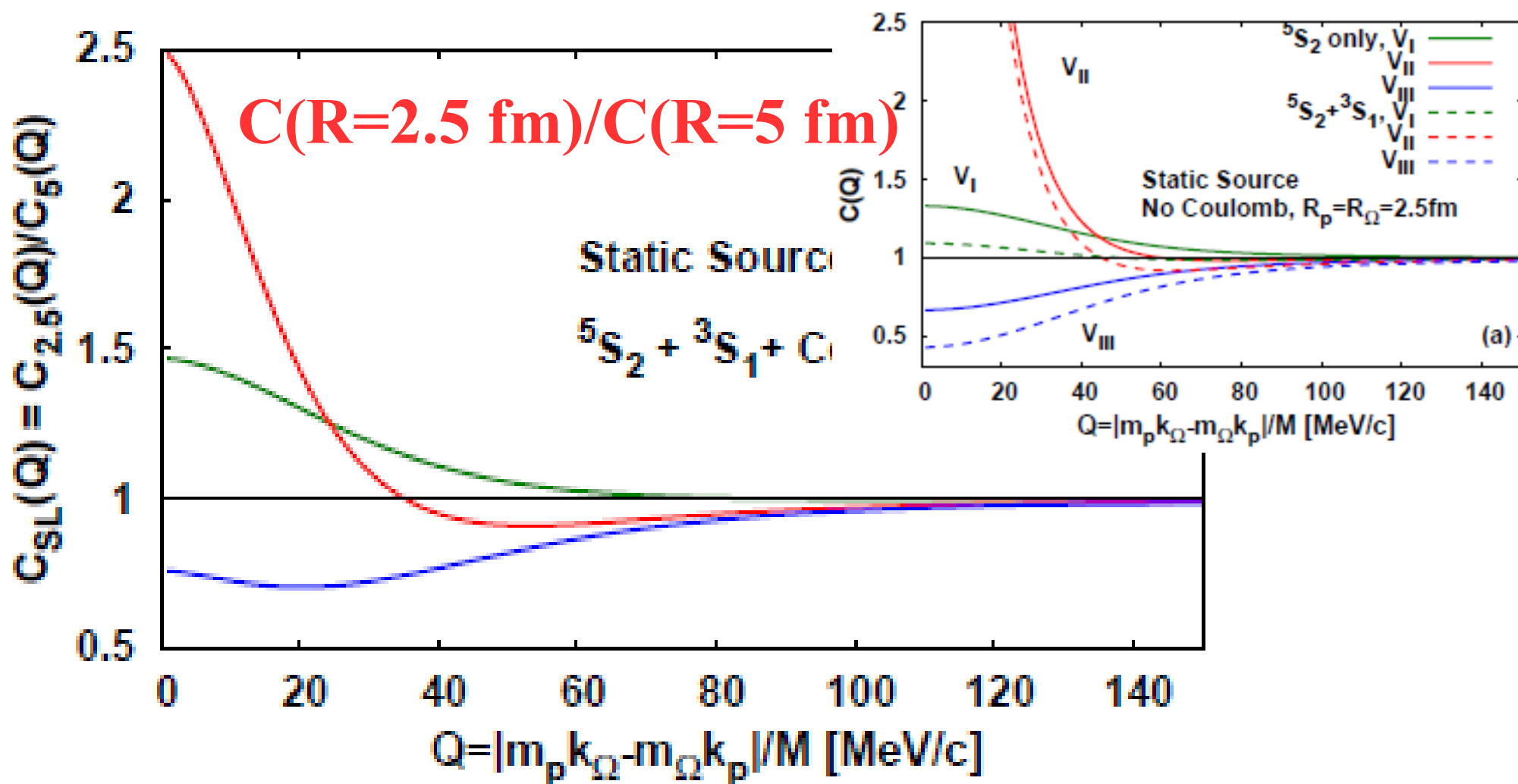


With Coulomb

Coulomb + Gamow corr.

Coulomb potential washes out the features of V_I , V_{II} , V_{III} , and Gamow correction is not enough.

Ω - p correlation: Small / Large Ratio

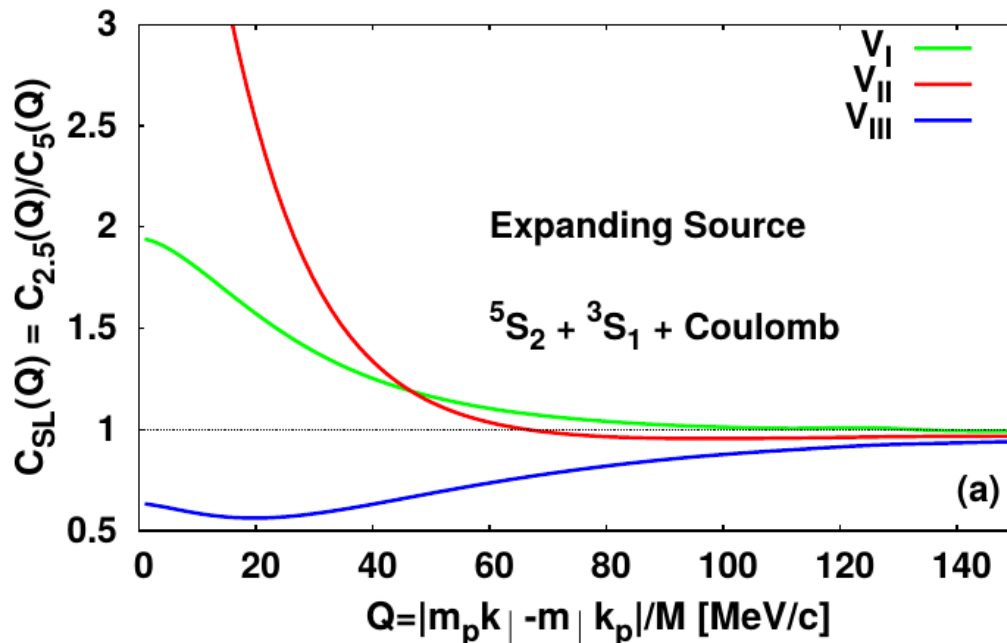


By taking small ($R=2.5 \text{ fm}$) / large ($R=5 \text{ fm}$) ratio, we approximately see the corr. fn. w/o Coulomb !

Data from STAR

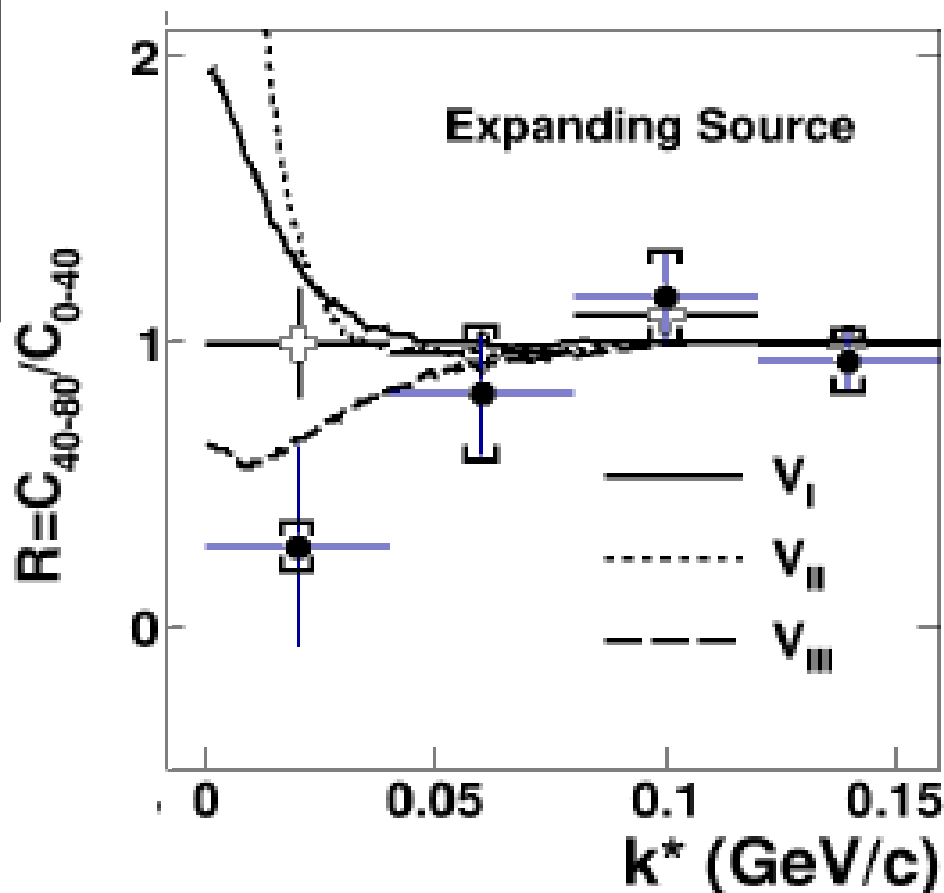
- Ωp 相関 (dibaryon の存在を期待。 HAL QCD+Coulomb.)

$C(R=2.5 \text{ fm})/C(R=5 \text{ fm})$



Morita, AO, Etminan, Hatsuda ('16)

*STAR (1808.02511
PLB790 ('19) 490)*



*We may have a dibaryon state
in ΩN channel*

Results with updated HAL QCD potential

K. Morita, S. Gongyo, T. Hatsuda, T. Hyodo, T. Iritani, AO, K. Sasaki, in prep.

■ Updated HAL QCD $N\Omega$ potential

T. Iritani et al. (HAL QCD Collab.), PLB792 ('19)284 (1810.03416)

Almost physical point $m_\pi = 146$ MeV

t/a	a_0 [fm]	r_{eff} [fm]	E_B [MeV]
11	3.45	1.33	2.15
12	3.38	1.31	2.27
13	3.49	1.31	2.08
14	3.40	1.33	2.24

■ Cylindrical source with radial transverse flow

→ pT spectra of protons and Ω s

■ Small-Large ratio to suppress the Coulomb effects

& Absorptive potential in J=1 channel

K. Morita, AO, F. Etminan, T. Hatsuda, PRC94('16)031901(R) [arXiv:1605.06765

[hep-ph]]

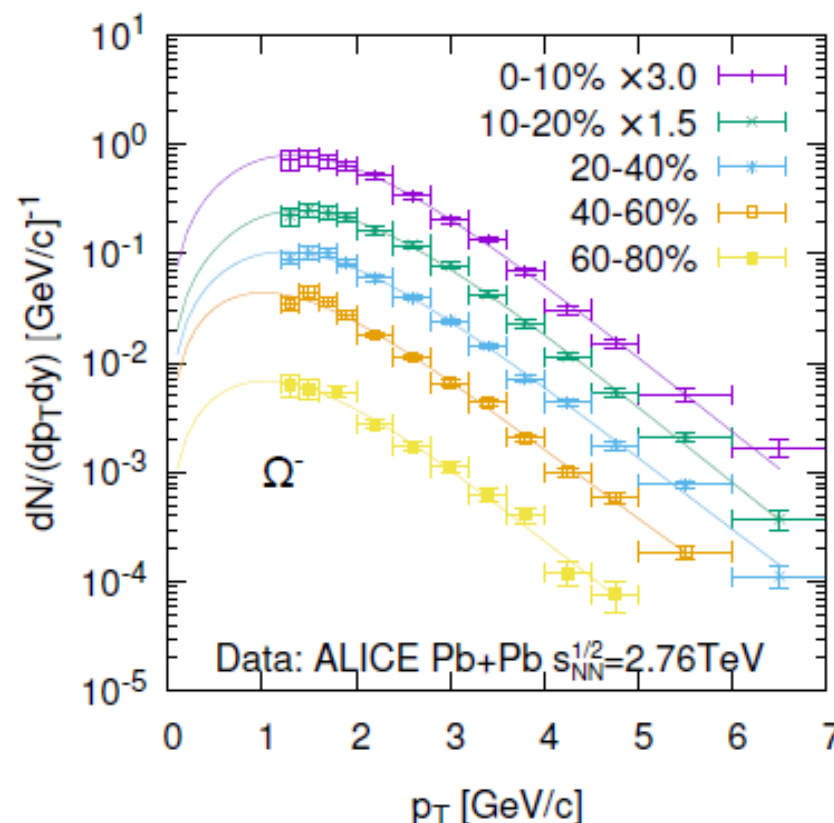
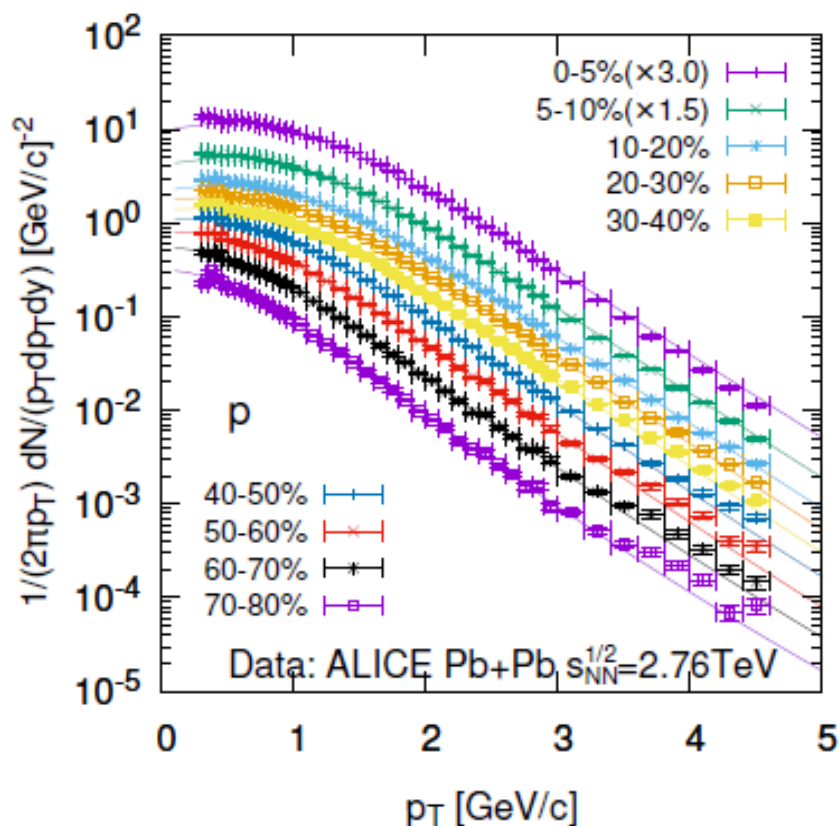
Source function

■ Blast wave model fit

Flow velocity

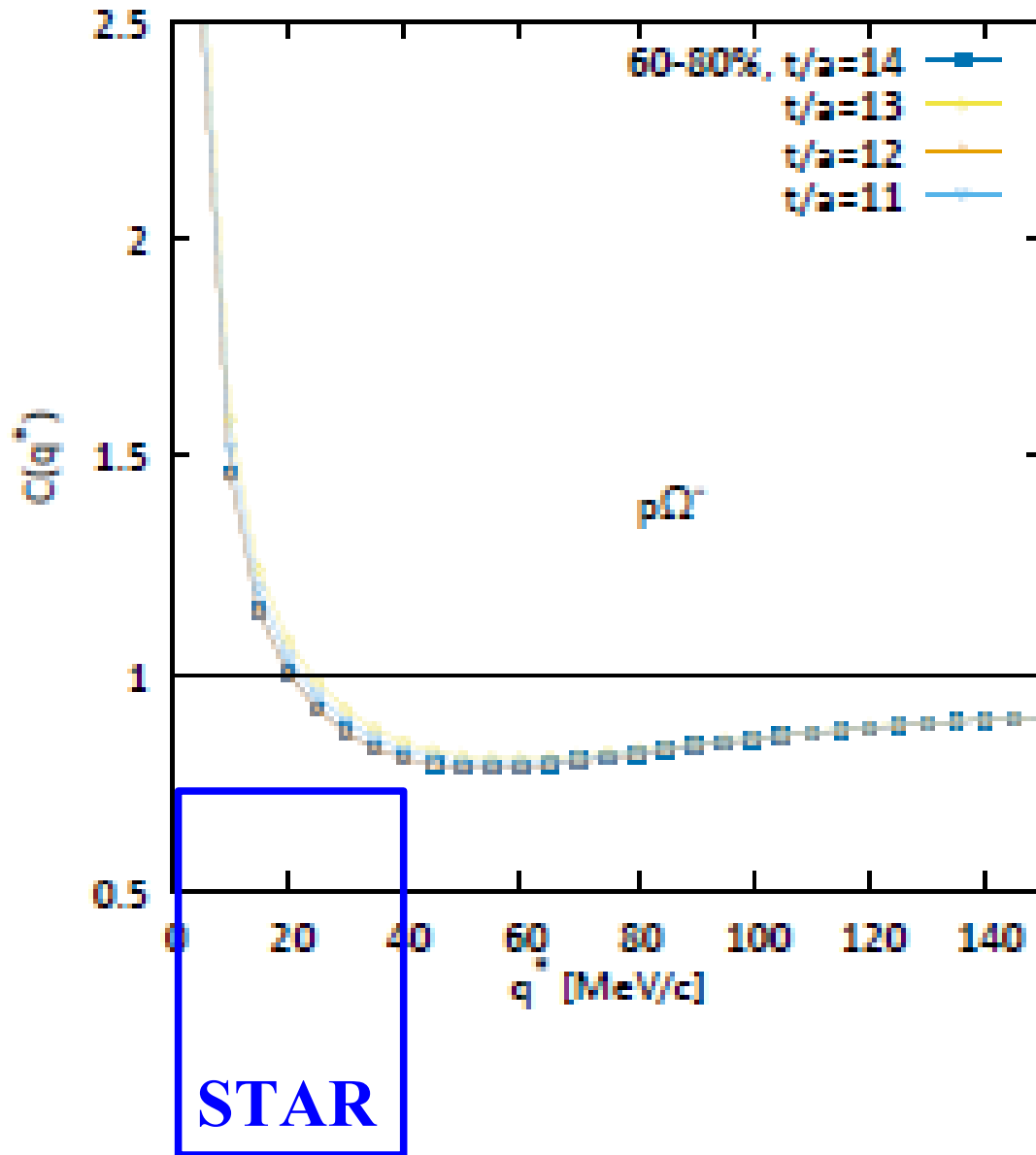
$$d^4 x S_i(x, \mathbf{p}) = \tau_0 d\eta_s d^2 r_T \frac{d}{(2\pi)^3} \underline{n_f(u \cdot p, T)} \exp\left(-\frac{r_T^2}{2R_T^2}\right)$$

Fermi dist.



K. Morita, S. Gongyo, T. Hatsuda, T. Hyodo, T. Iritani, AO, K. Sasaki, in prep.

Correlation function from heavy-ion collisions



Peripheral collisions

($R \sim (2-3)$ fm)

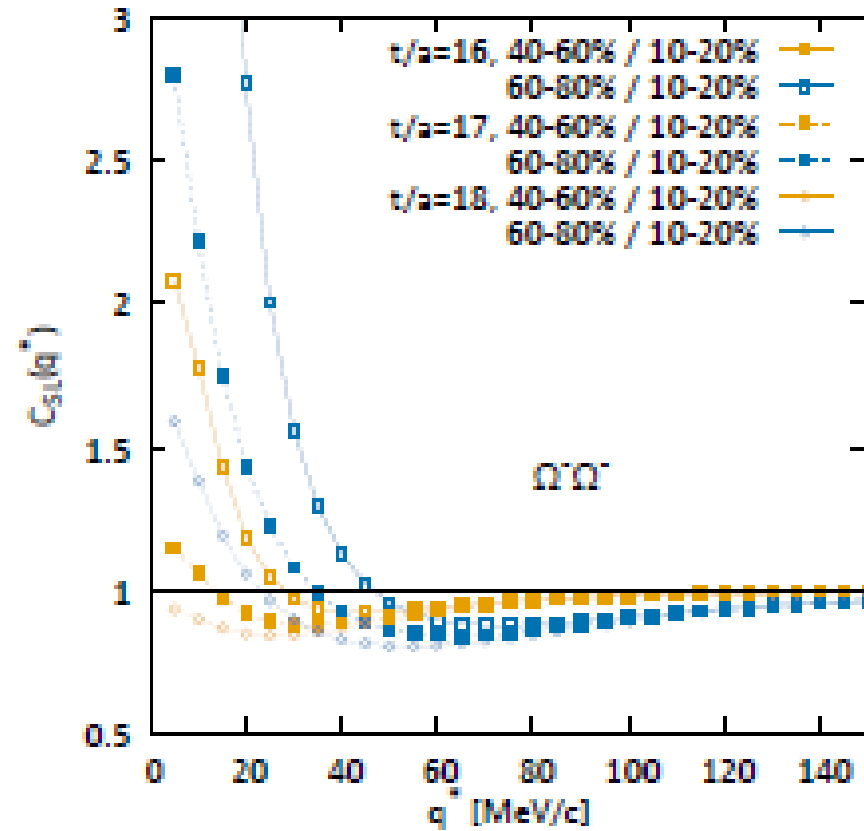
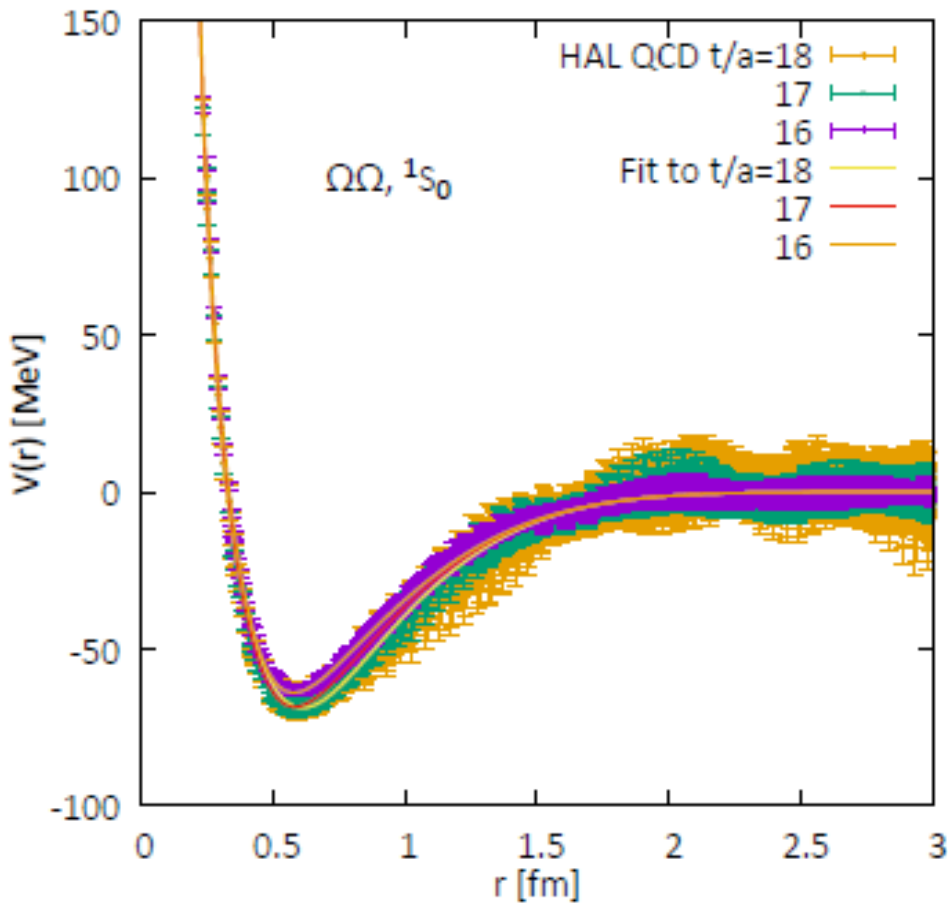
→ Strong enh. at small q ,
+ Suppression at finite q

Centrality	τ_0 [fm/c]	R_T^Ω [fm]	R_T^p	α^Ω	β^Ω	α^p	β^p
0 – 10%	10.0	8.0	6.8	0.584	0.628	0.759	0.421
10 – 20%	9.085	6.75	6.23	0.618	0.579	0.750	0.425
20 – 40%	7.5	5.88	5.2	0.546	0.692	0.707	0.466
40 – 60%	5.5	4.38	3.92	0.444	0.858	0.604	0.6
60 – 80%	3.62	2.12	2.66	0.456	0.812	0.456	0.82

K. Morita, S. Gongyo, T. Hatsuda, T. Hyodo, T. Iritani, AO, K. Sasaki, in prep.

$\Omega\Omega$ correlation

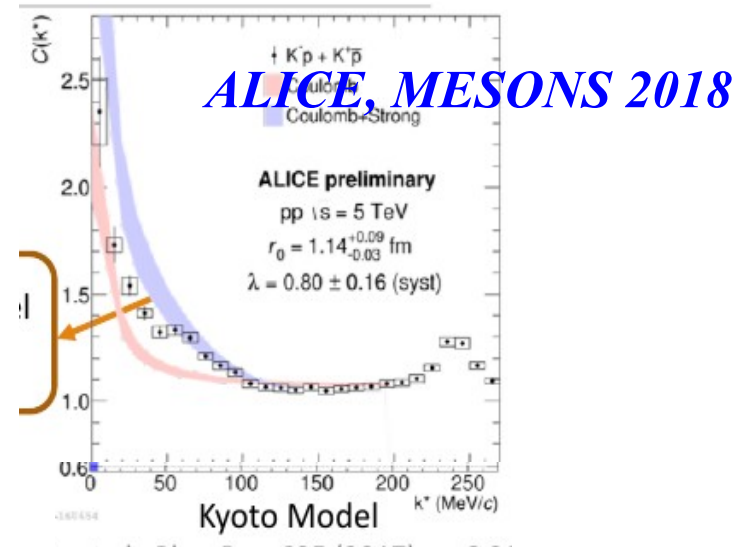
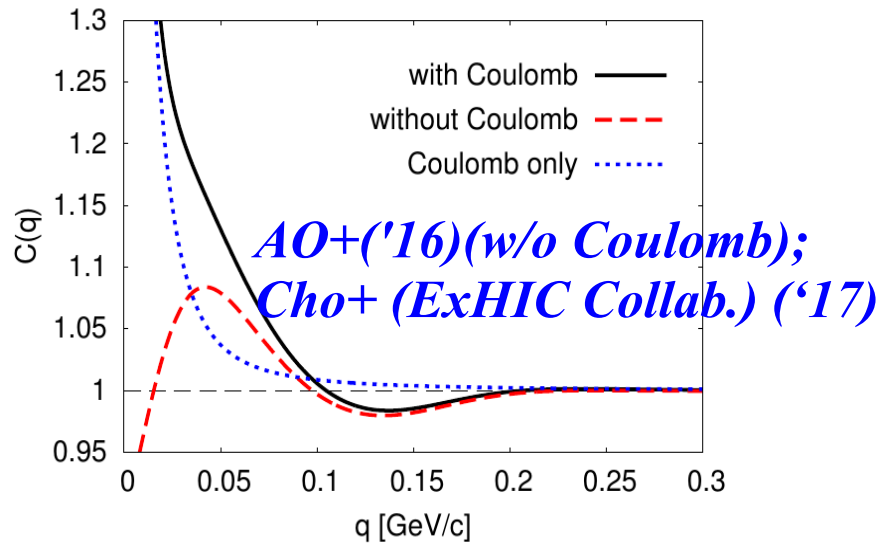
$\Omega\Omega$ potential: S. Gongyo et al. (HAL QCD Collab),
Phys. Rev. Lett. 120, 212001 (2017), 1709.00654.



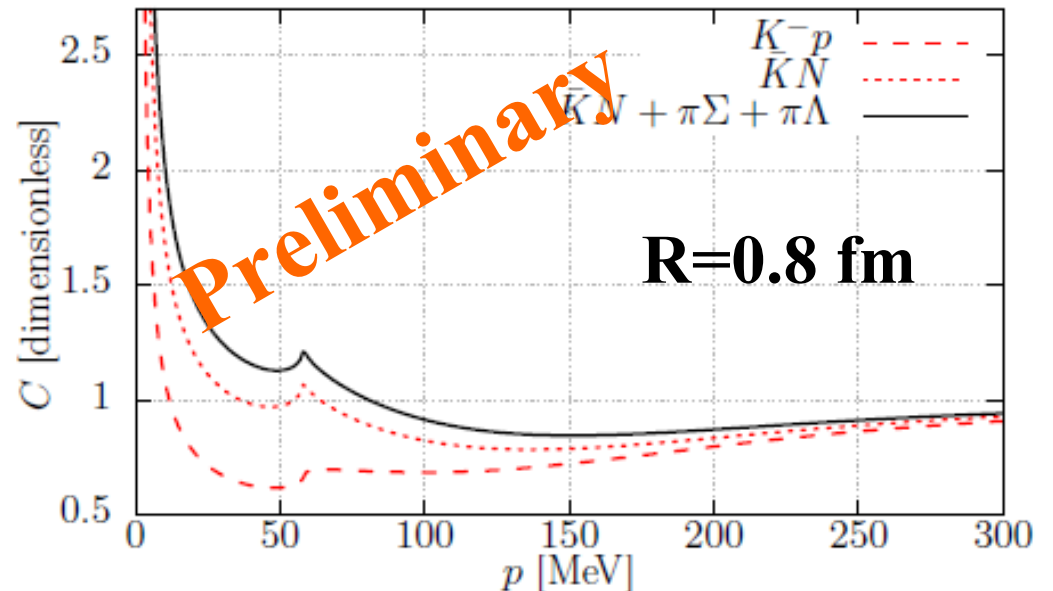
K. Morita, S. Gongyo, T. Hatsuda, T. Hyodo, T. Iritani, AO, K. Sasaki, in prep.

K^-p 相関と KN 相互作用

- K^-p 相関 (束縛状態 $\Lambda(1405)$ をもつ。Chiral dyn.+Coulomb)



- クーロン+結合チャネル
+ しきい値のずれ



Kamiya, Morita, Hyodo, AO (in prep.)

様々なハドロン間相互作用を
格子QCD (HAL QCD 法) で予言し、
相関関数から確かめられる段階となってきた。

$\Lambda\Lambda$ 相互作用では *Nagara event* と無矛盾。
 $\Xi^- p$ 、 $\Omega^- p$ 、 $K^- p$ 相互作用は大きな散乱長を持ち、
HAL QCD, *Chiral SU(3)* と無矛盾。

ハイペロン・パズルの解決には至らない...

Summary

- 中性子星の物理は核物理の多くの側面と関わり、多体問題の材料の宝庫である。
 - 対称エネルギー、ストレンジネス、QCD 相転移、パスタ、超流動、...
- 相関関数を用いて様々なハドロン間相互作用の情報が得られつつある。
 - 粒子源 (ソース) 関数 + ハドロン間相互作用 → 相関関数
 - 現象論的核力、格子 QCD、カイラル動力学からの核力のテスト
- Universal 3B repulsion → Ubiquitous 3B repulsion
 - 斥力コアの有無・強さはチャネルによる。
 - カラーสปิน相互作用は3体では常に斥力 (Su Houng Lee et al.; 仲本)
ハイペロンを含む場合 KMT 相互作用は斥力的 (AO+ ('17))

高塚さん、ありがとうございました。

■ 中性子星について多くを学ばせていただきました。

- 普遍的な3バリオン斥力が存在するはずである。
Universal → Ubiquitous
- 最大質量とともに冷却についても同時に解かなければ、問題を解決したことにはならない。
解けていません...
- いきなり現象論的な状態方程式を使っても信頼できない。
いまでも現象論的EOSが好きですが、生の核力も議論できるようになりました。
-

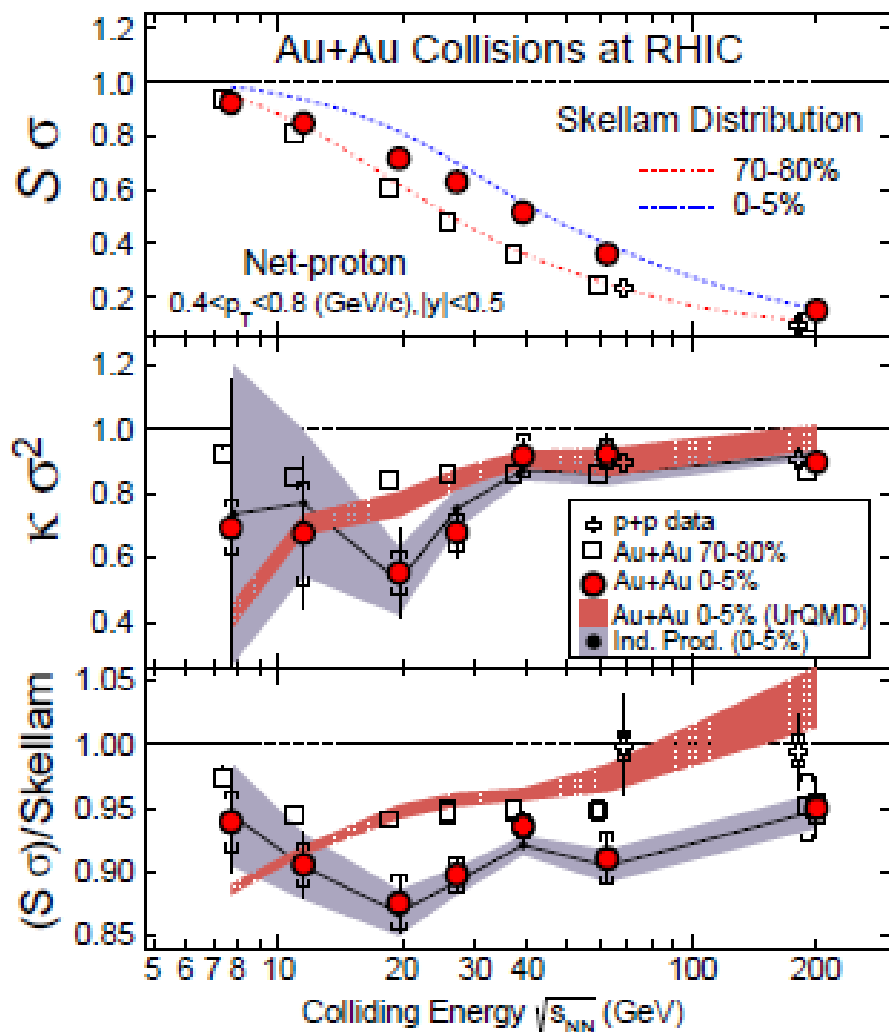


2012 年学会
中性子星シンポ

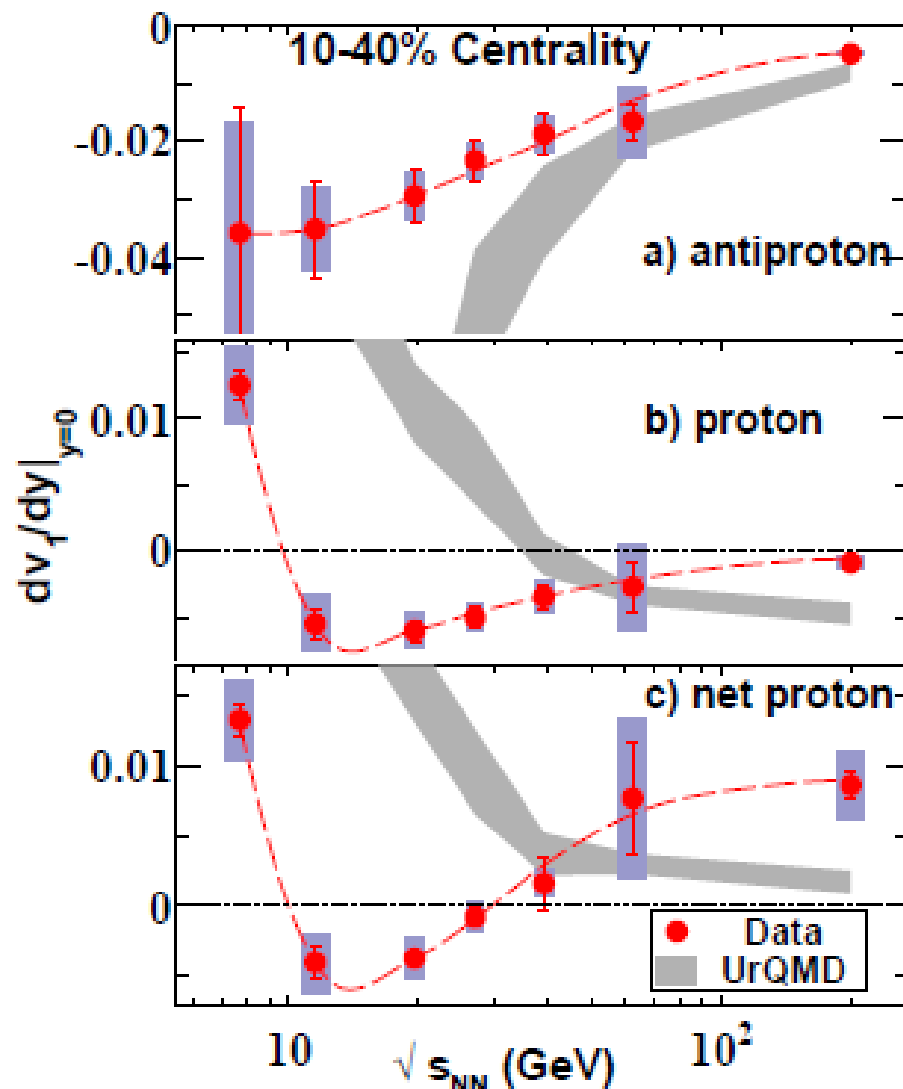
Thank you for your attention !

QCD 一次相転移は見たか？

- 衝突エネルギー関数として非単調性が見えている ($\kappa\sigma^2$, dv_1/dy)



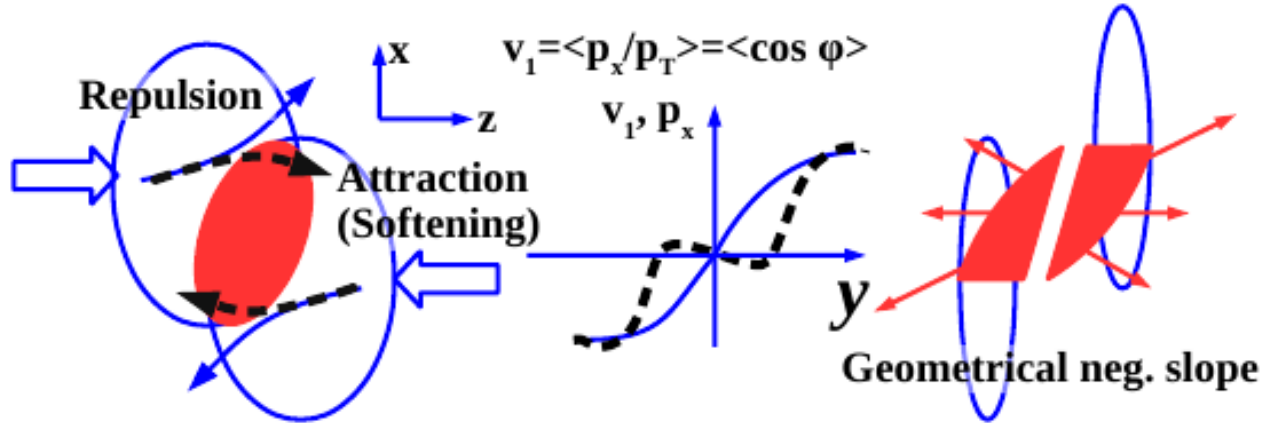
STAR Collab., PRL 112('14)032302.



STAR Collab., PRL 112('14)162301.

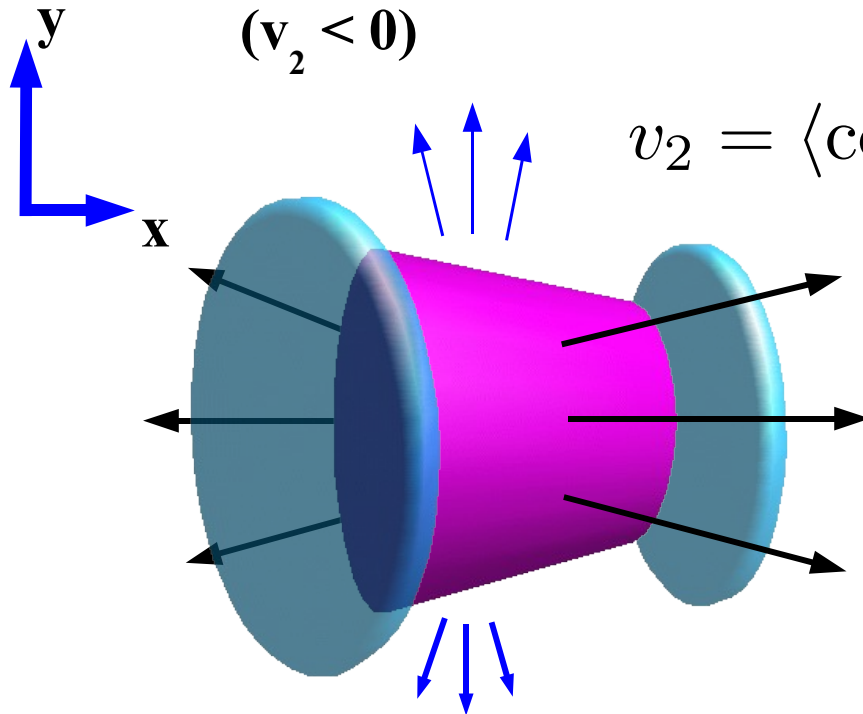
■ Directed flow ($v_1, \langle p_x \rangle$), Elliptic flow (v_2)

→ 衝突初期に作られ、高密度の状態方程式 (EOS) に敏感



Out-of-Plane Flow
($v_2 < 0$)

$$v_2 = \langle \cos 2\phi \rangle$$



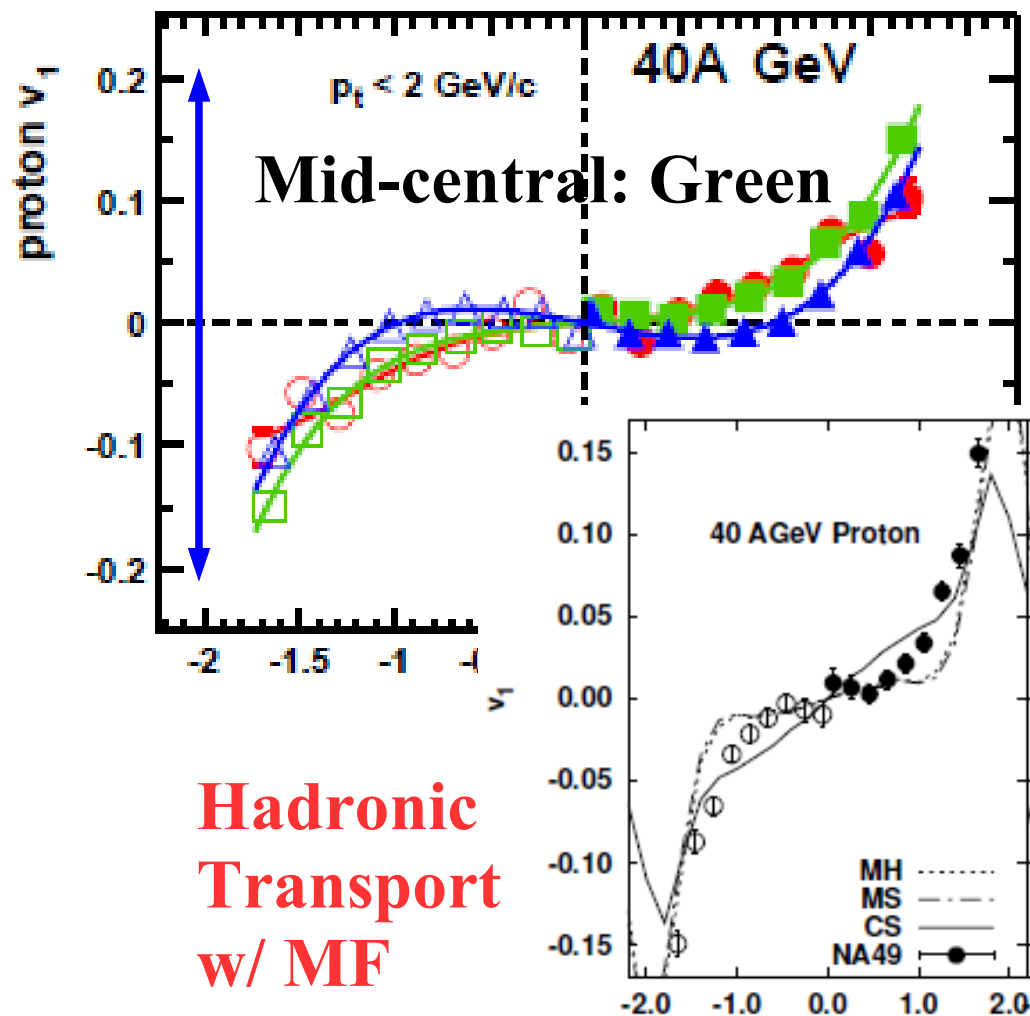
In-Plane Flow
($v_2 > 0$)

SPS(NA49) vs RHIC(STAR)

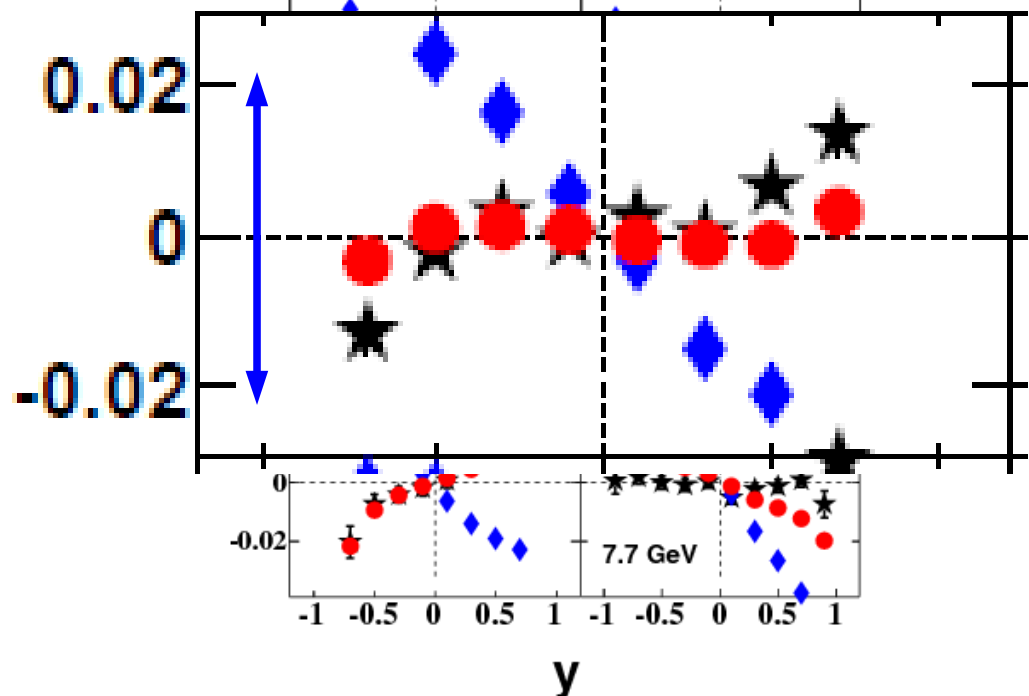
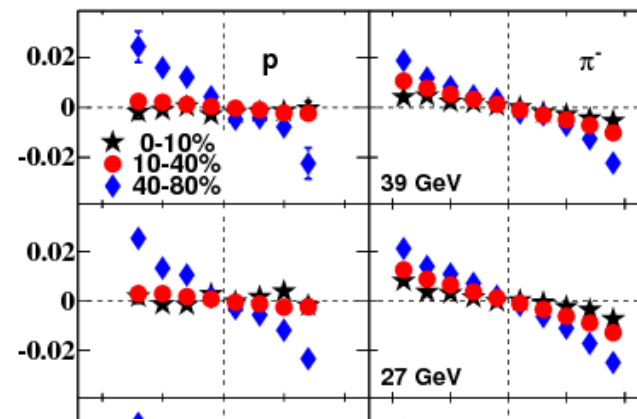
■ SPS (NA49), $\sqrt{s_{NN}} = 8.9$ GeV

■ RHIC(STAR), 7.7-39 GeV

C. Alt et al. (NA49), PRC68 ('03) 034903



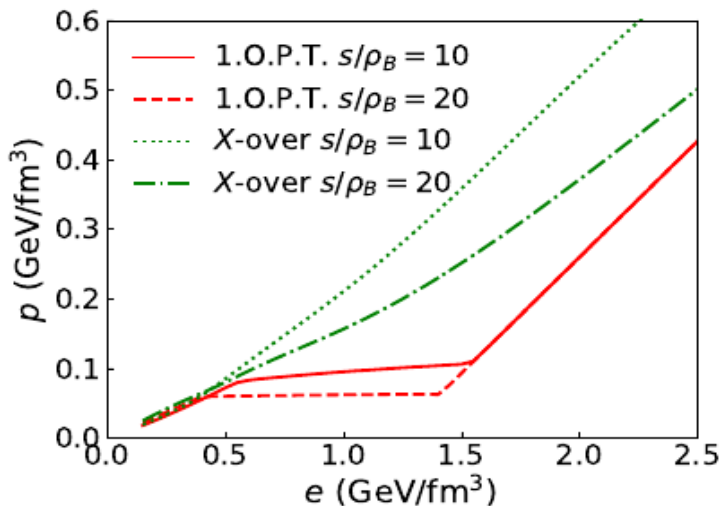
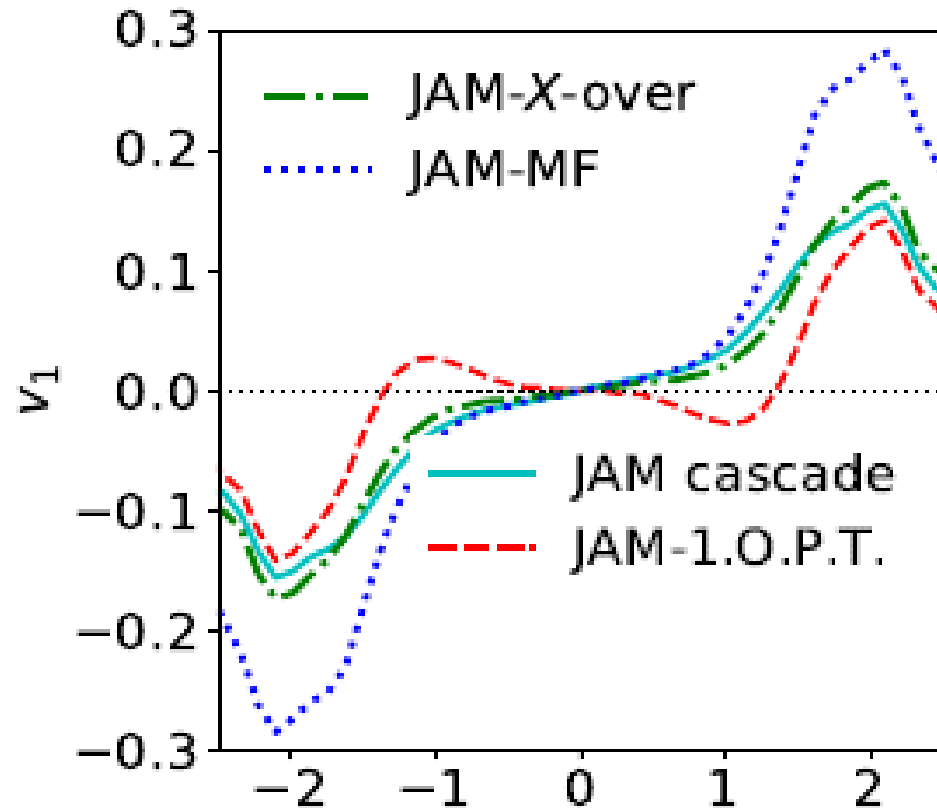
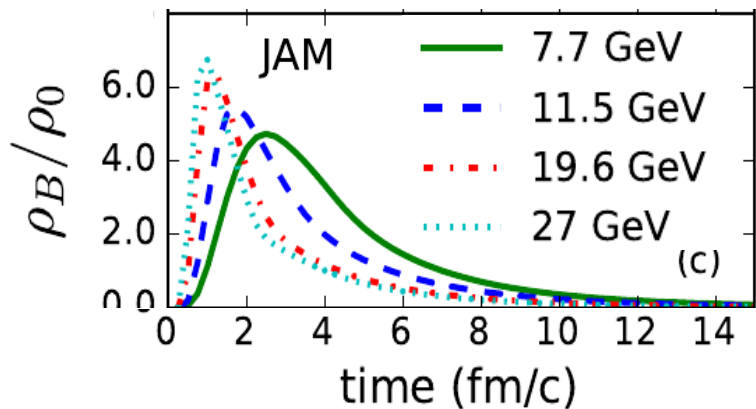
M.Isse, A.O., N.Otuka, P.K.Sahu, Y.Nara,
PRC72 ('05)064908



L. Adamczyk et al. (STAR),
PRL 112(2014)162301

負のフローとEOSの軟化

- ビリアル定理を使って任意の EOS を取り込めるように理論を拡張
- $\sqrt{s_{NN}} = 11.5$ GeV で見られる負のフロー ($dv_1/dy < 0$)
 → $(5-10)\rho_0$ において急激な EOS の軟化あれば説明可能



Y.Nara, H.Niemi, AO, H.Stoecker, PRC94('16)034906.
Y. Nara, H. Niemi, AO, J. Steinheimer, X.-F. Luo,
H. Stoecker, EPJA 54 ('18)18

TLOK+2M_⊙ constraints

TLOK 条件

- (S₀, L) は5角形内
- (K_n, Q_n) をTLOKの制限に従って選ぶ

- K₀=(190-270) MeV

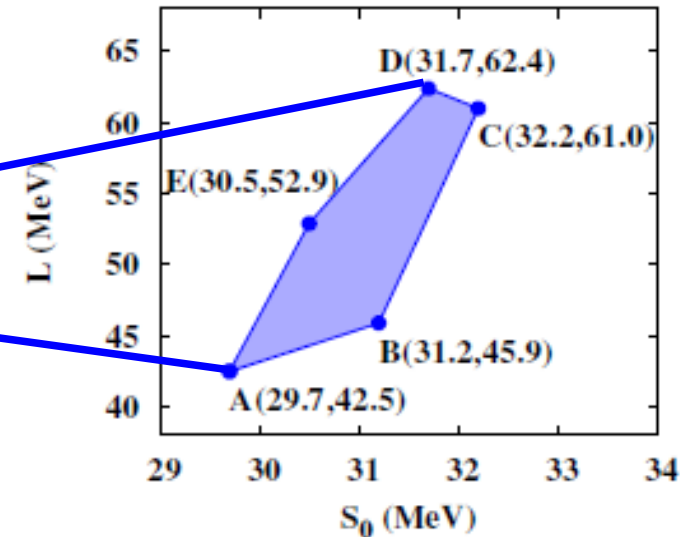
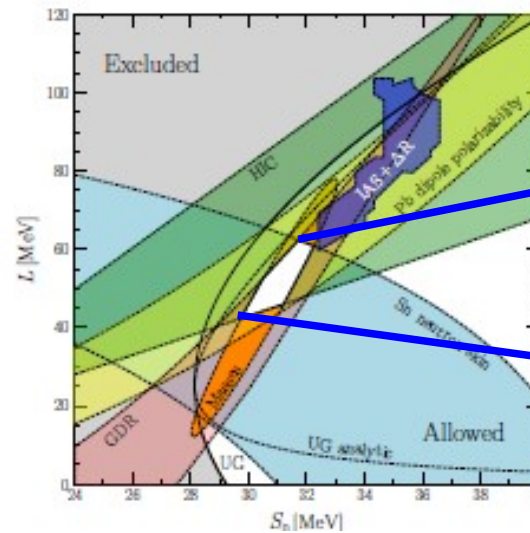
- (n₀, E₀) は固定

n₀=0.164 fm⁻³, E₀=-15.9 MeV (よく決まっている)

- Q₀ は対称核物質の密度2次項が消えるように選ぶ (u²項があると対称核物質は硬くなりすぎる)

2 M_⊙ 条件

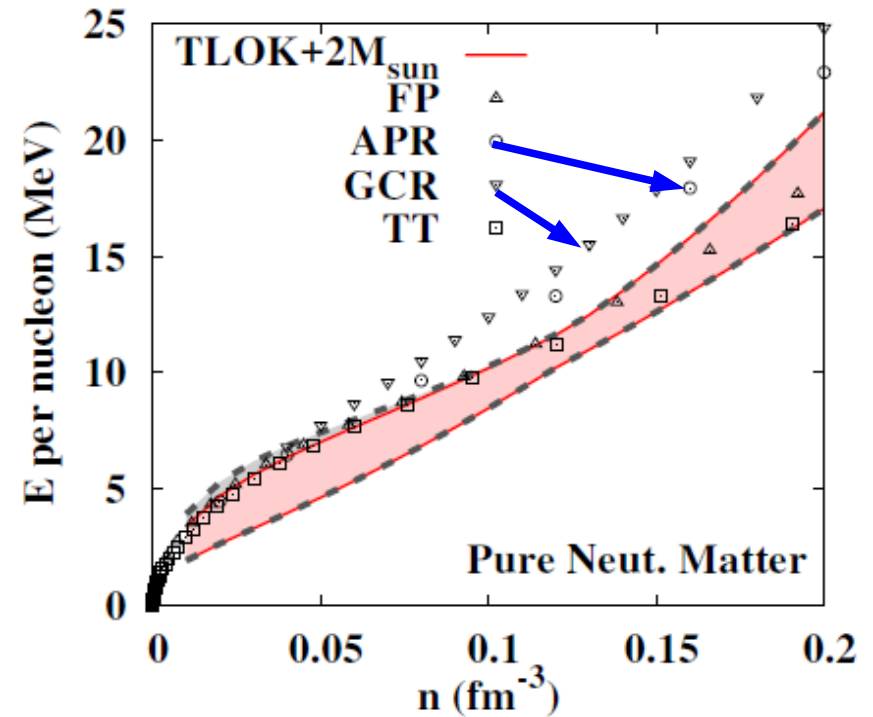
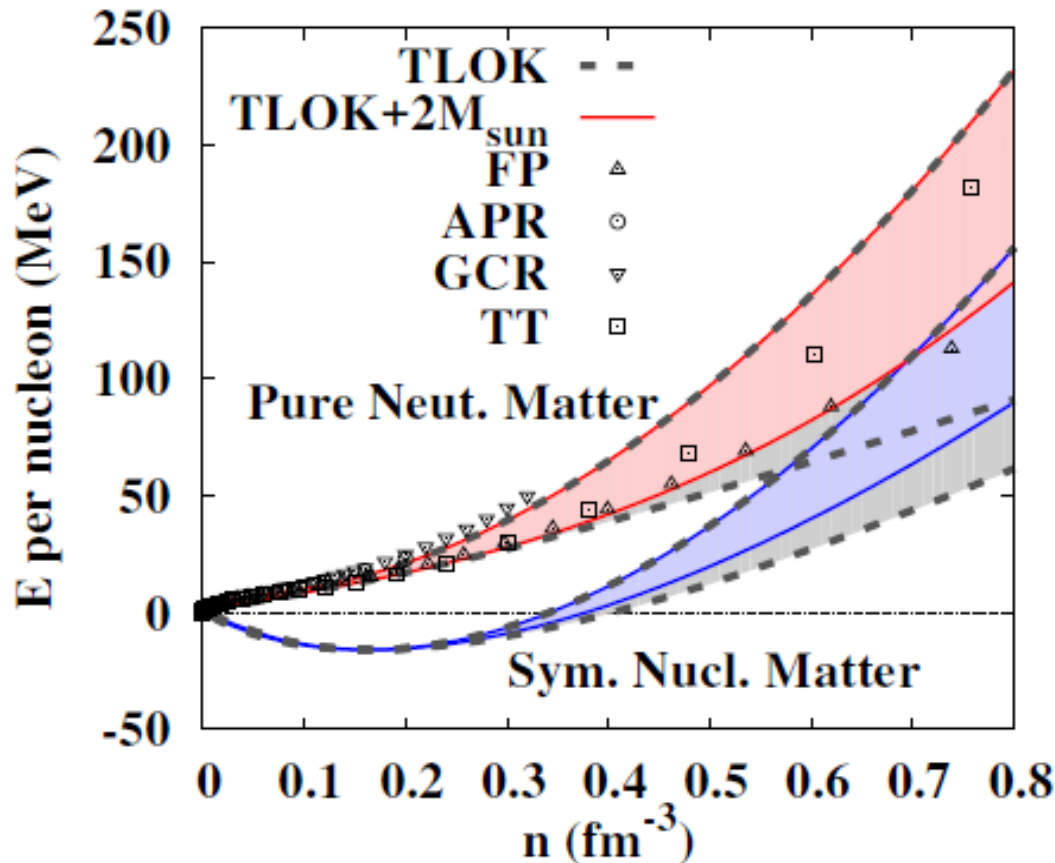
- EOS は2M_⊙ 中性子星をささえるべし



AO, Kolomeitsev, Lattimer, Tews, Wu (OKLTW), in prog.

$TLOK+2M_{\odot}$ 条件に基づく状態方程式

- $2M_{\odot}$ 条件を加えることで EOS の下限があがる
- 変分計算 (Friedman-Pandharipande, Togashi-Takano) と無矛盾
- APR, GCR 状態方程式は S_0 が 5 角形の外
→ 第一原理計算の選別へ (?)



OKLTW, in prog.

Neutron Star MR curve

OKLTW, in prog.

■ TLOK + $2 M_{\odot}$ 条件 $\rightarrow R_{1.4} = (10.6-12.2)$ km

■ 他の多くの結果と consistent

● LIGO-Virgo (Tidal deformability Λ from BNSM)

(10.5-13.3) km *Abbott+('18b)*

(9.1-14.0) km *De+('18) (Λ)*

● Theoretical Estimates

(10.7-13.1) km

Lattimer+, PRep.621('16)127

(10.0-13.6) km

Annala+, PRL120('18)172703

(9-13.6) km

Tews+, PRC98 ('18)045804

(12.0-13.6) km

*F.J.Fattoyev+(PREX),
PRL120 ('18)172702*

Parity violating obs.

Large error bar

