



J-PARC-HIの物理 ～理論～

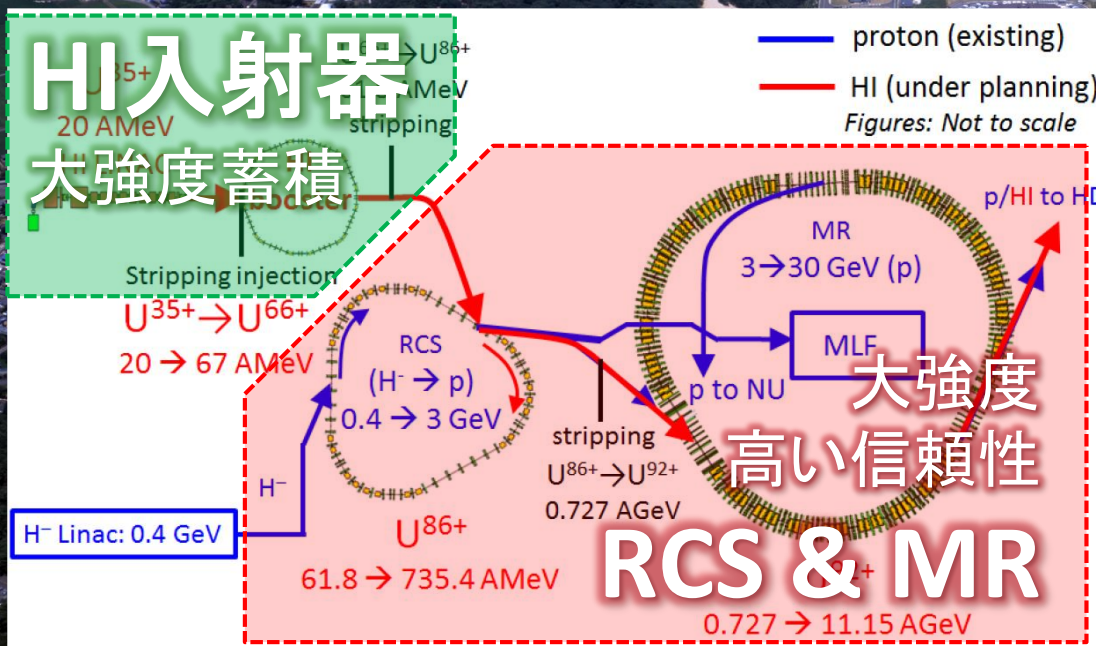
北沢正清
(阪大理)

J-PARC-HIが切り拓く物理, 2018年12月15日、東海

J-PARC-HI

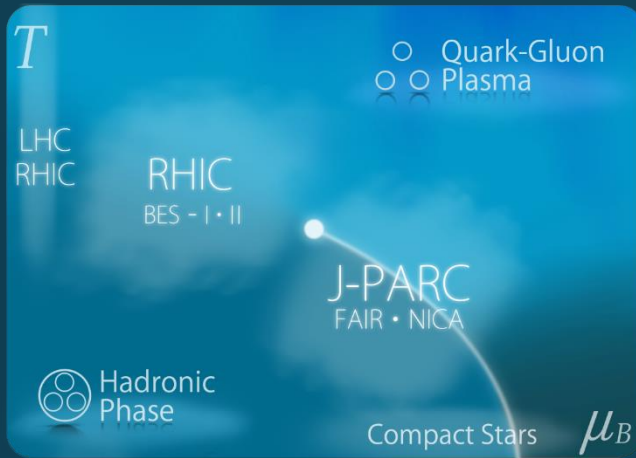
J-PARC Heavy-Ion Program

J-PARC加速器(RCS/MR)を用いた
世界最強度・低コストの重イオン加速・衝突実験



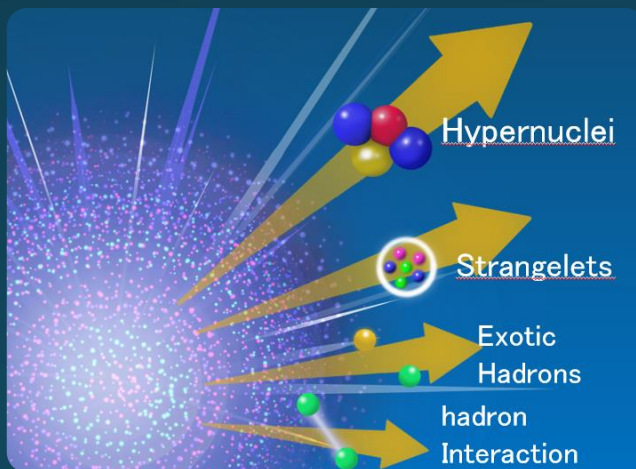
- $E_{\text{lab}} \sim 11 \rightarrow 19 \text{ AGeV}$
- $\sqrt{s_{\text{NN}}} \sim 4.9 \rightarrow 6.2 \text{ GeV}$
- 衝突レート: $\sim 10^8 \text{ Hz}$
- 実験開始: 2026~?

2つの物理目標



宇宙最高密度の探索

- 超高密度QCD物質
- 一次相転移・QCD臨界点
- 中性子星状態方程式

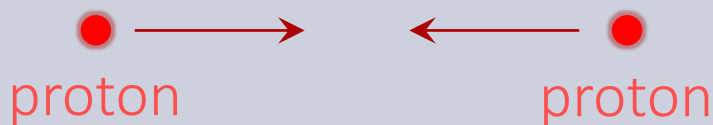


稀事象の生成工場

- ハイパー核物理
- エキゾチック粒子
- ハドロン相互作用

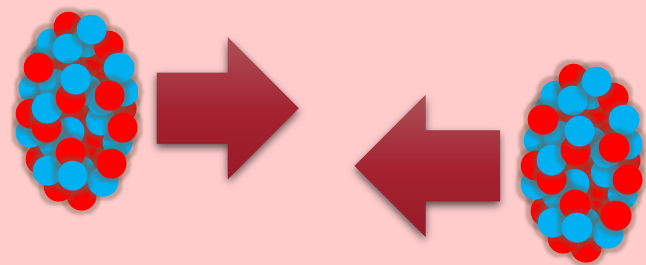
相対論的重イオン衝突実験

陽子・陽子衝突



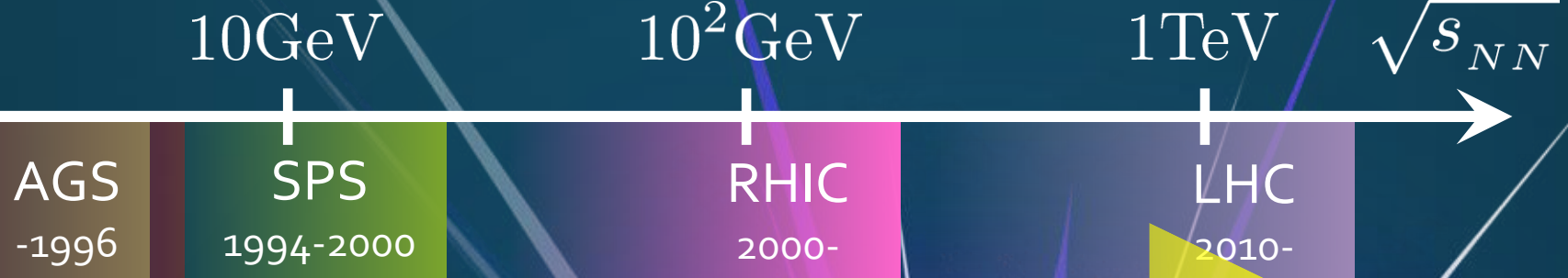
素過程の重ね合わせ
粒子探索
粒子の性質の測定

重イオン衝突



熱力学系の生成
高温物質の物性研究
多粒子が関与する問題

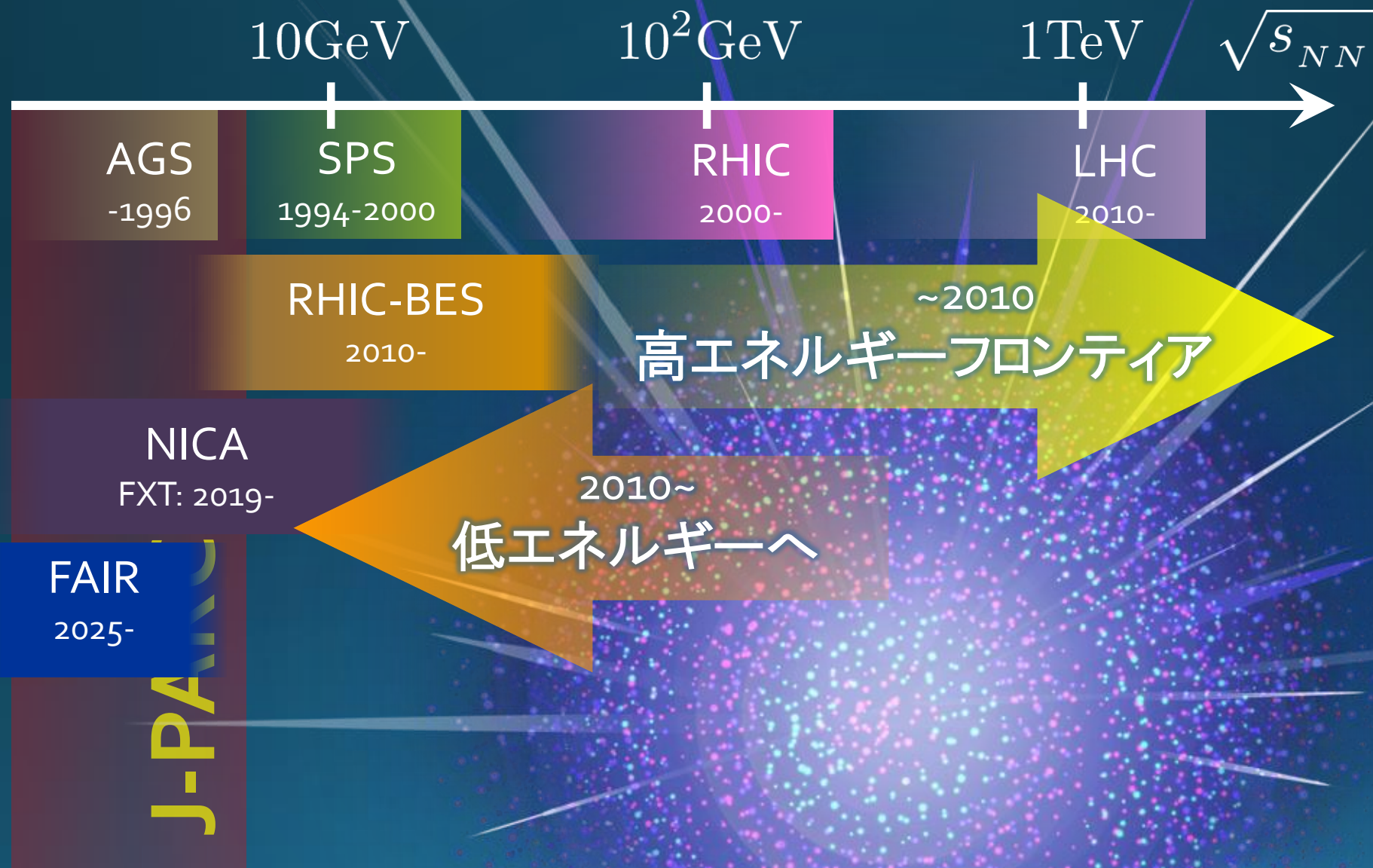
重イオン衝突の歴史



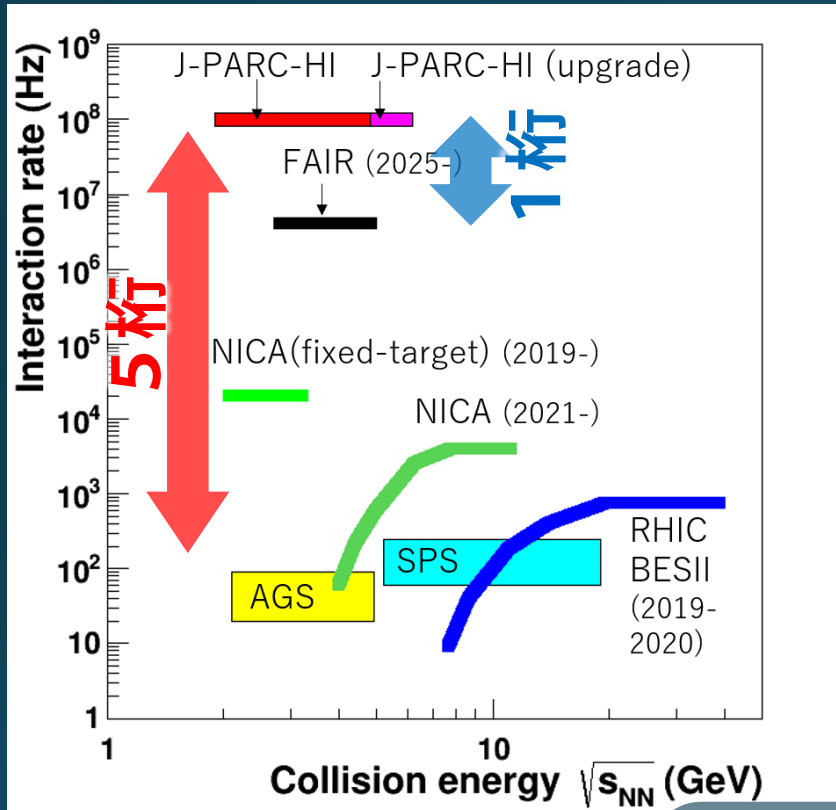
~2010
高エネルギーフロンティア

J-PARC-HI

重イオン衝突の歴史



衝突率



提案書より

J-PARC-HI:

超高強度ビーム×固定標的
→世界最高衝突率 $\sim 10^8$ Hz

□ AGS, SPSを**5桁**上回る

AGS, SPS = J-PARC-HI
1年間 = 5分

□ FAIR(2025~)を1桁凌ぐ

高統計を活かした物理の推進

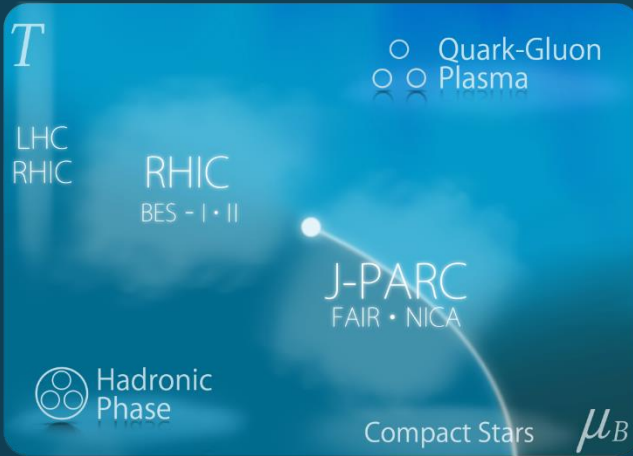
- 各種物理量の高統計測定
- 高度なイベント選択・高次相関・ゆらぎ
- 稀現象の探索

いまなぜ中間エネルギー？

低エネルギー実験 \neq 高E実験の下位互換

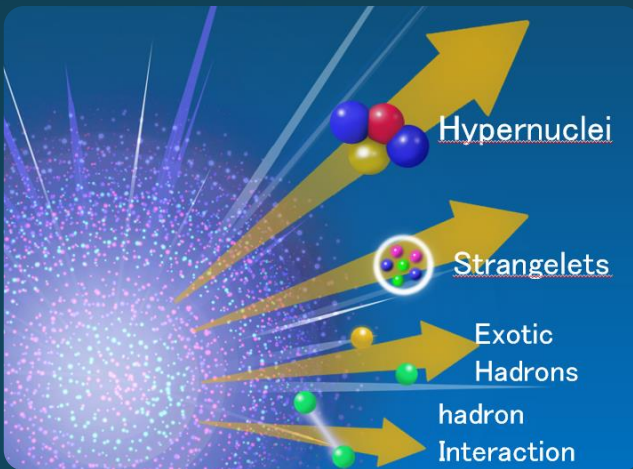
J-PARC-HI: 高バリオン数密度フロンティア

2つの物理目標



宇宙最高密度の探索

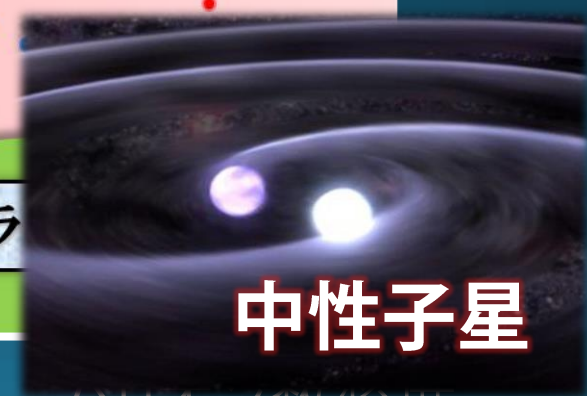
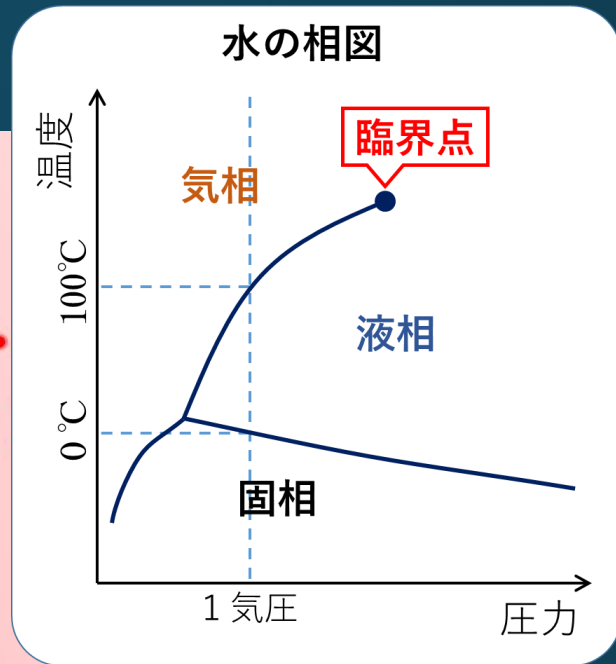
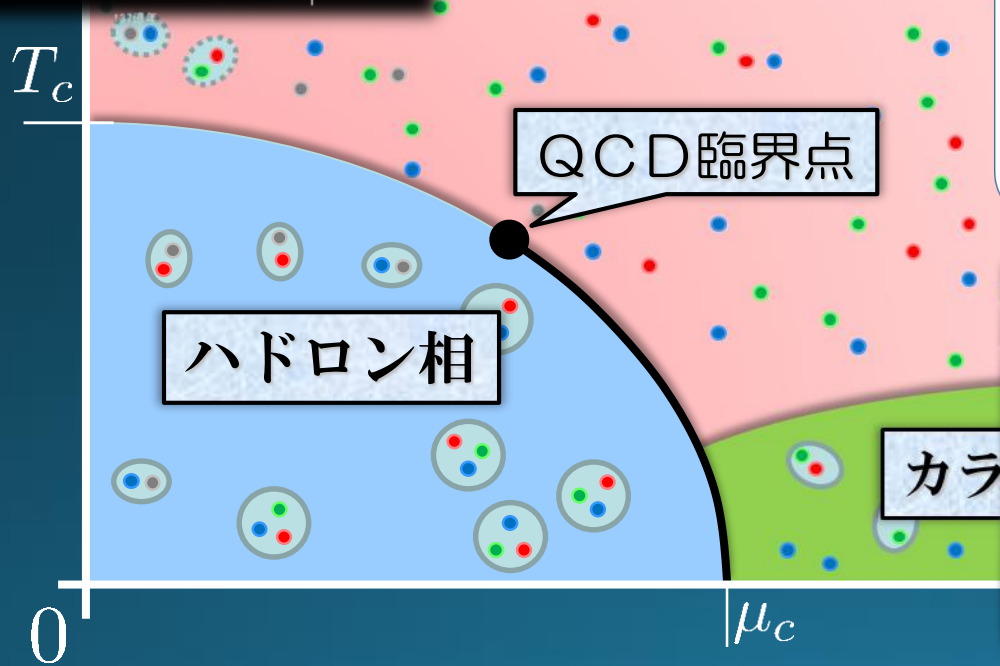
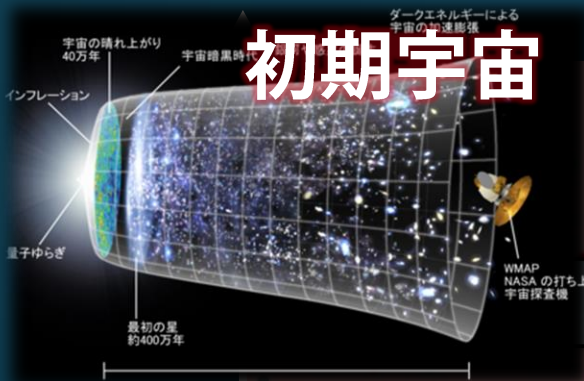
- 超高密度QCD物質
- 一次相転移・QCD臨界点
- 中性子星状態方程式



稀事象の生成工場

- ハイパー核物理
- エキゾチック粒子
- ハドロン相互作用

QCD相図



バリオン数密度
(化学ポテンシャル)

最高密度の一次相転移

= 物質による真空の破壊

QGPの生成@RHIC
格子QCD数値実験

○ Quark-Gluon
○○ Plasma



南部理論の
直接的検証

クロスオーバー
転移

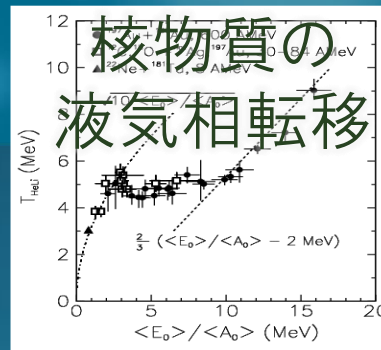
QCD臨界点

一次相転移



水の沸騰

1g/cm^3

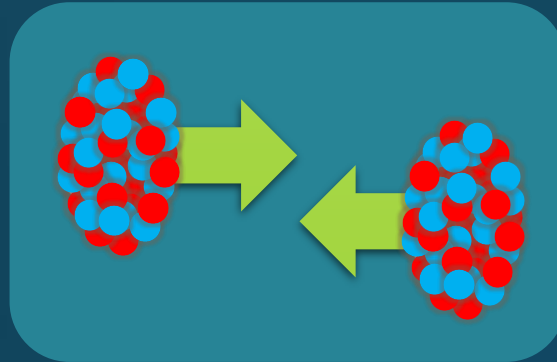


10^{14}g/cm^3

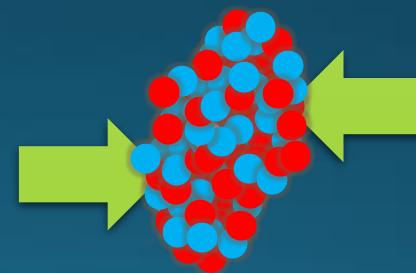
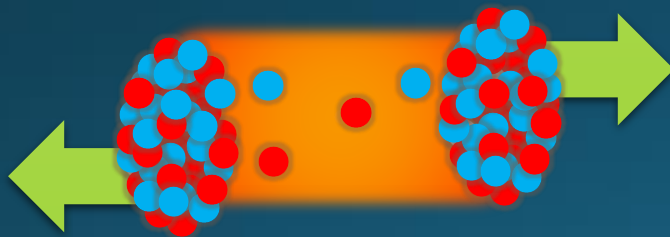
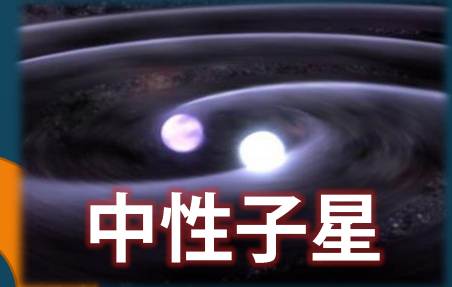
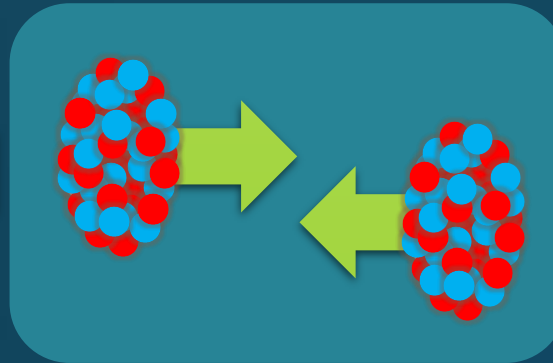
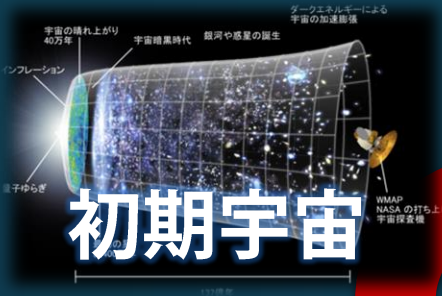
真空の
相転移
(カイラル転移)

10^{15}g/cm^3

バリオン減速



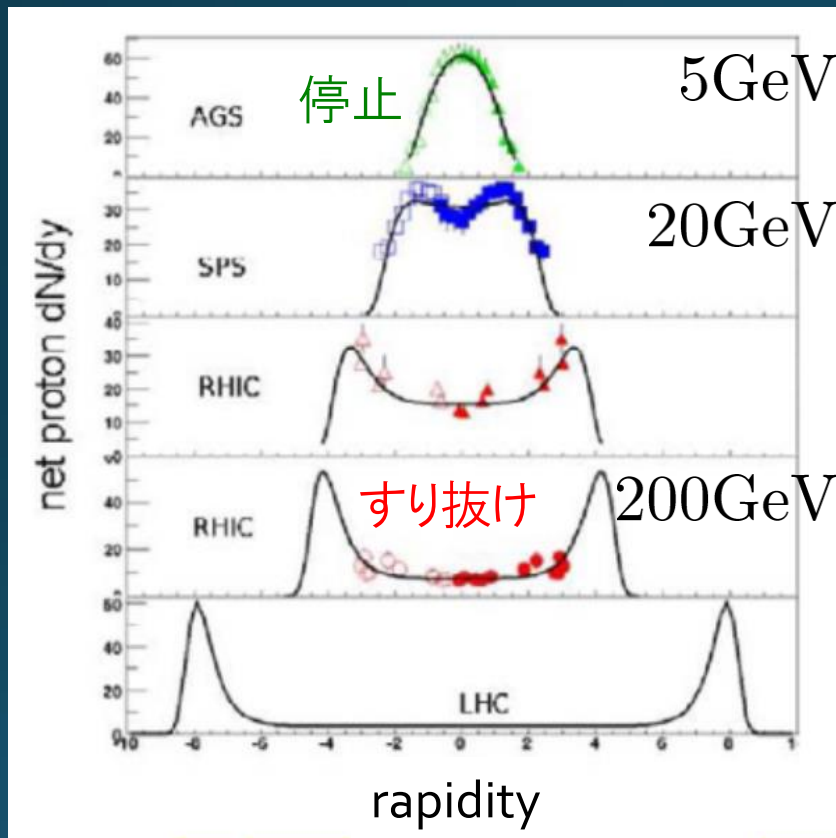
バリオン減速



バリオン減速

正味陽子数の y 依存性

正味陽子数($N_{\text{陽子}} - N_{\text{反陽子}}$)



$$\sqrt{s_{NN}} \simeq 4 - 6 \text{ GeV}$$

程良く圧縮して、止まる

$$\sqrt{s_{NN}} > 10 \text{ GeV}$$

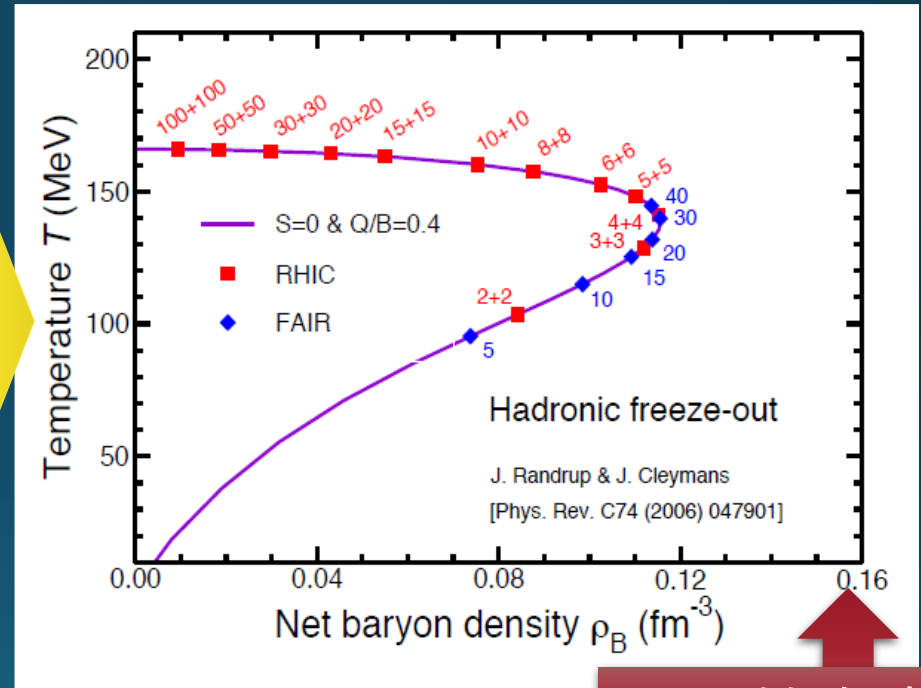
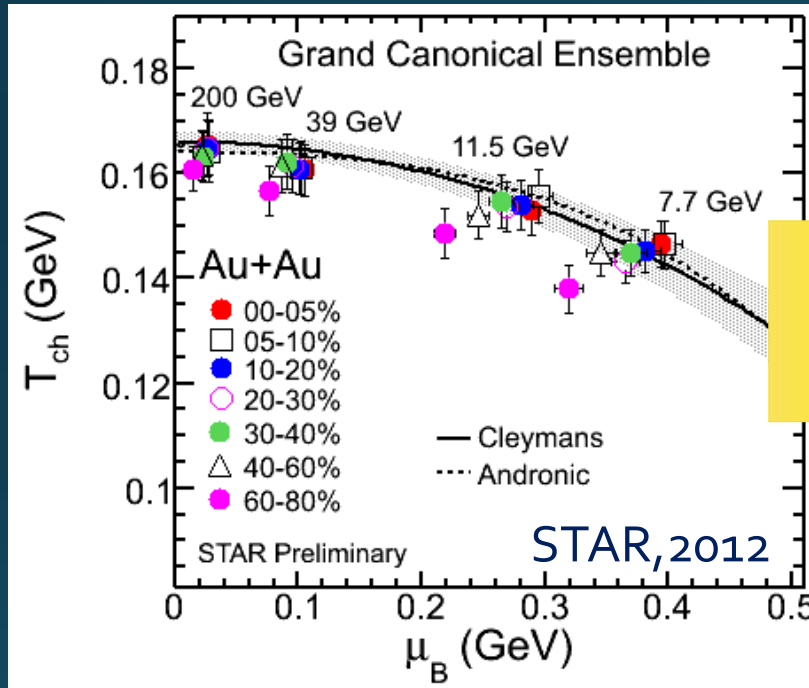
核子は、突き抜ける

←→
ビーム軸

ビームエネルギー走査

粒子収量から決めた温度、 μ

温度、バリオン密度への換算



原子核密度

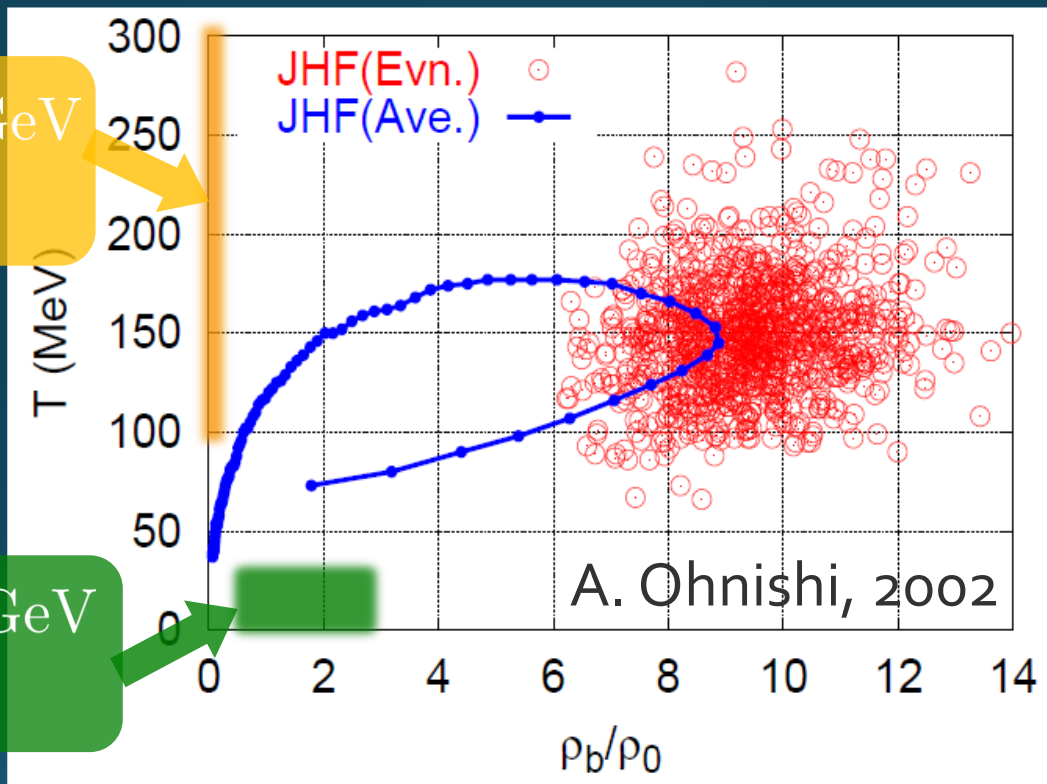
最高バリオン数密度

$$\sqrt{s_{NN}} = 4 \sim 10 \text{ GeV} \quad (E_{\text{lab.}} = 10 \sim 100 \text{ A GeV})$$

最大密度

T - ρ 平面上の時間発展 by JAM

$\sqrt{s_{NN}} > 100 \text{ GeV}$
RHIC・LHC



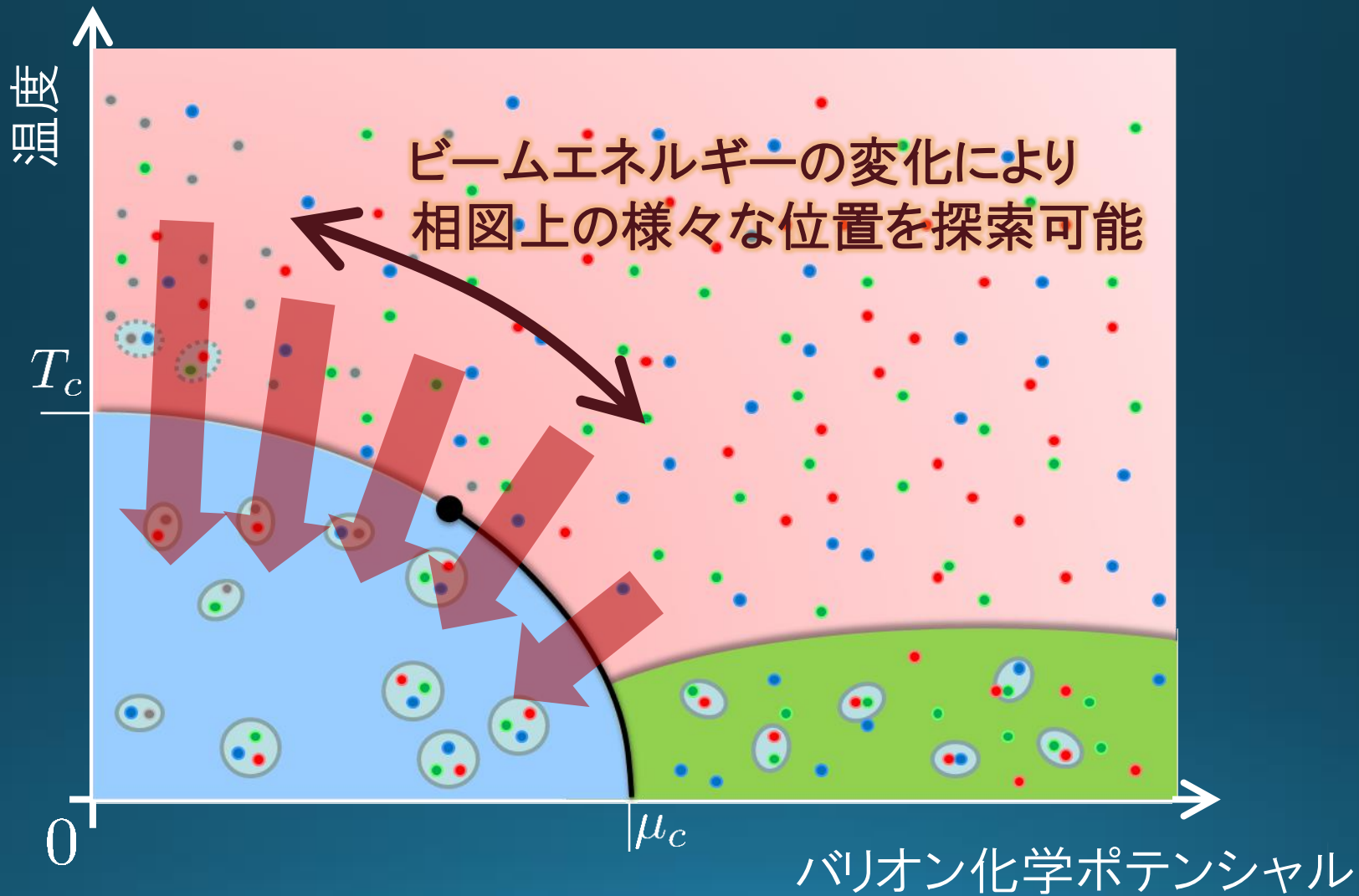
$E/A = 20 \text{ GeV}$

$\sqrt{s_{NN}} \simeq 6 \text{ GeV}$

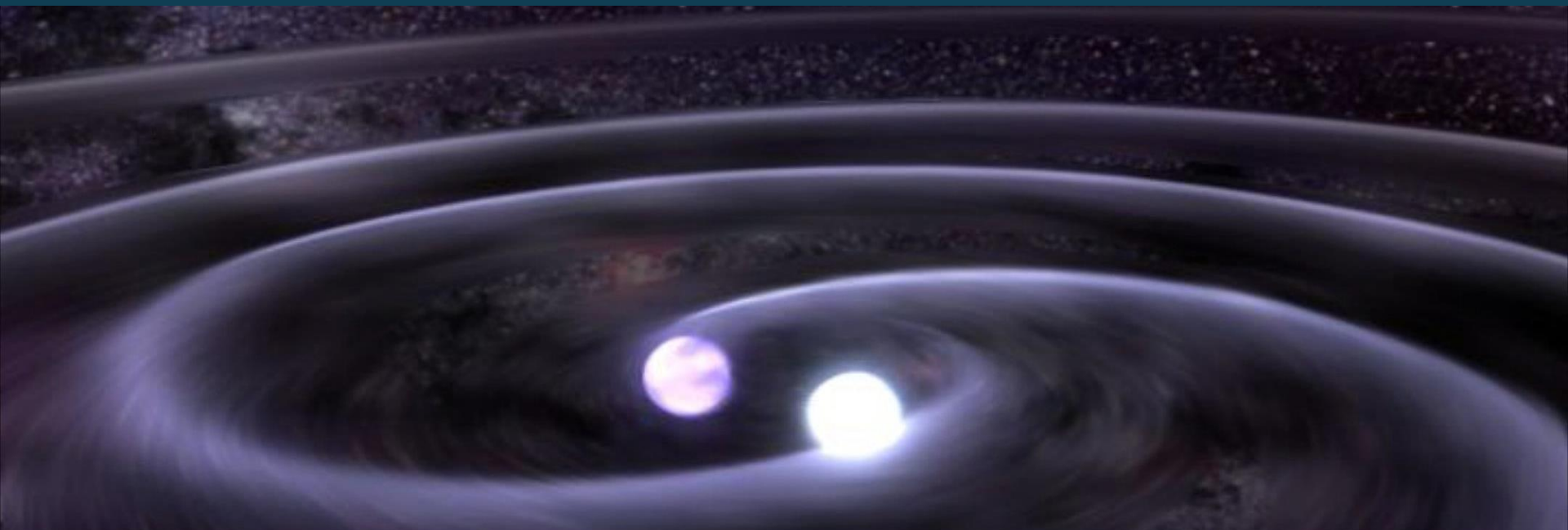
$E/A < 1 \text{ GeV}$
RIBFなど

- 最高密度 $\sim 5\rho_0$ @ $E/A \sim 20 \text{ GeV}$
- 中性子星中心部をも凌ぐ宇宙最高密度
- 最高密度は、大きなイベント毎ゆらぎ？

ビームエネルギー走査



極微の中性子星合体



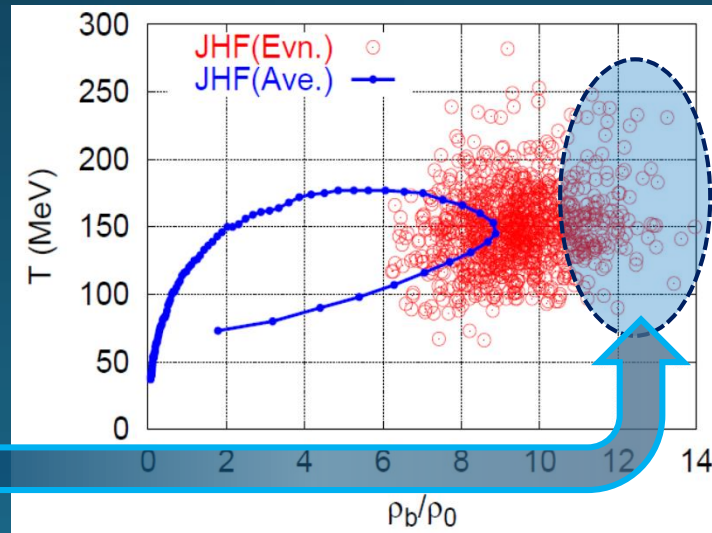
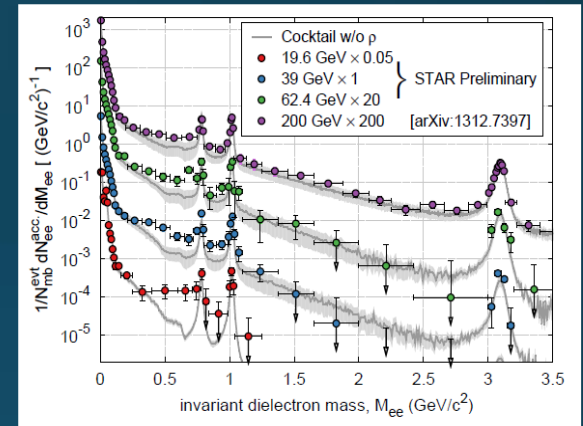
J-PARC-HI

中性子星合体の**温度・密度・磁場**に地上で迫る唯一の手段

状態方程式・輸送・強い場への応答などの貴重な情報

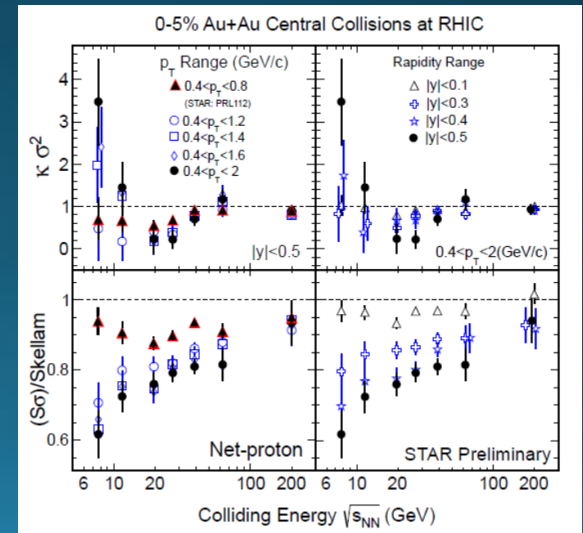
様々な観測量

- 大域的流れの異方性(フロー)
- 保存電荷の非ガウスゆらぎ
- 光子・レプトン
- Ξ, Ω, \dots
- 高度なイベント選択
- 様々な高次相関



これら
の事象のみ
を選択可能か??

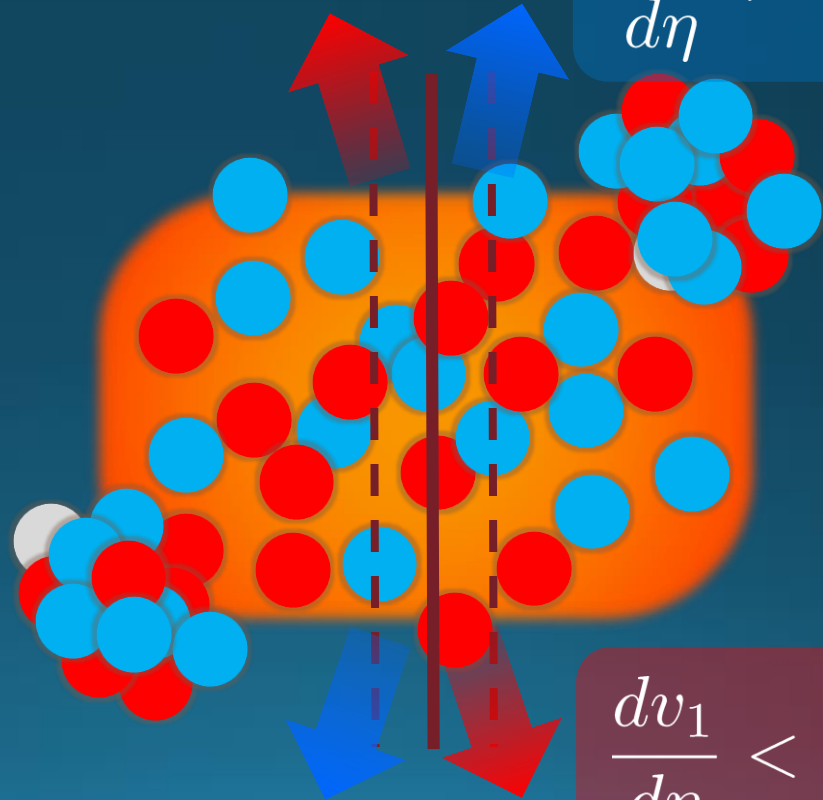
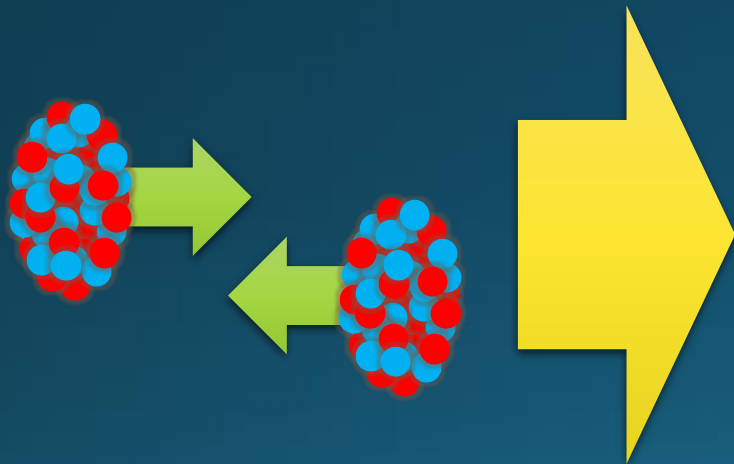
MK, Sakaguchi, Sako,
Nara, Ohnishi, ...



非自明な動的過程

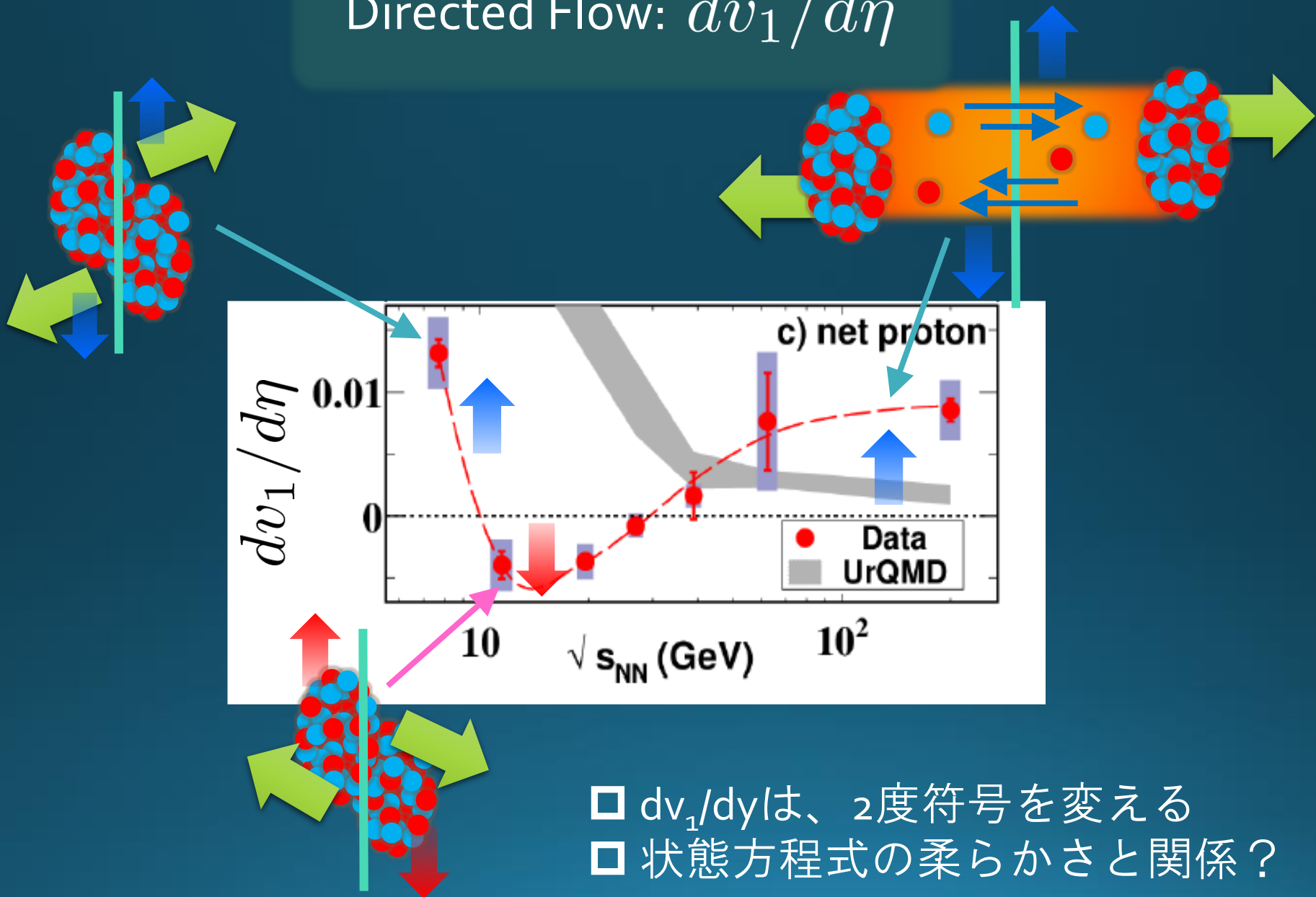
Directed Flow: $dv_1/d\eta$

$$\frac{dv_1}{d\eta} > 0$$



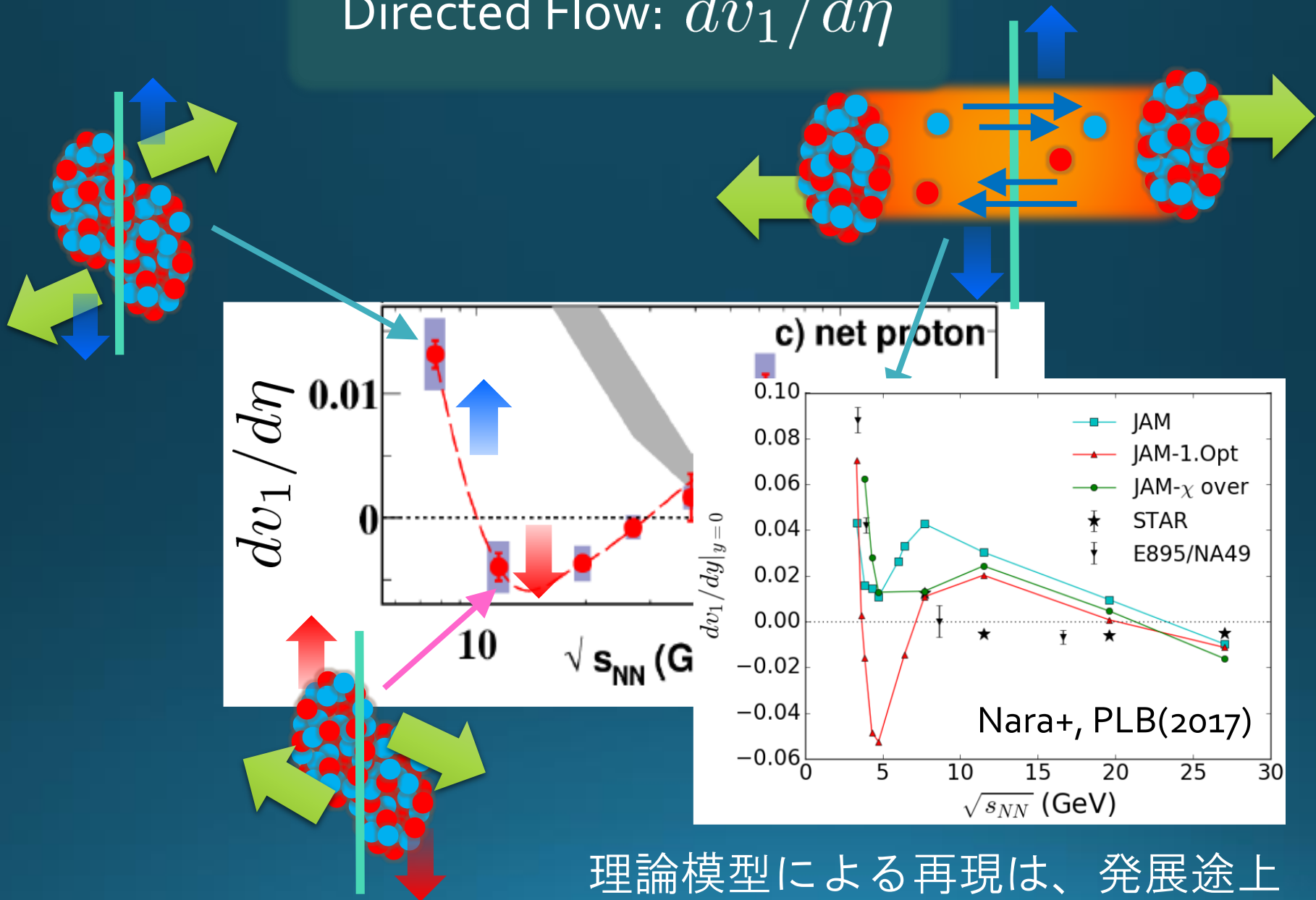
$$\frac{dv_1}{d\eta} < 0$$

Directed Flow: $dv_1/d\eta$



- dv_1/dy は、2度符号を変える
- 状態方程式の柔らかさと関係？

Directed Flow: $dv_1/d\eta$



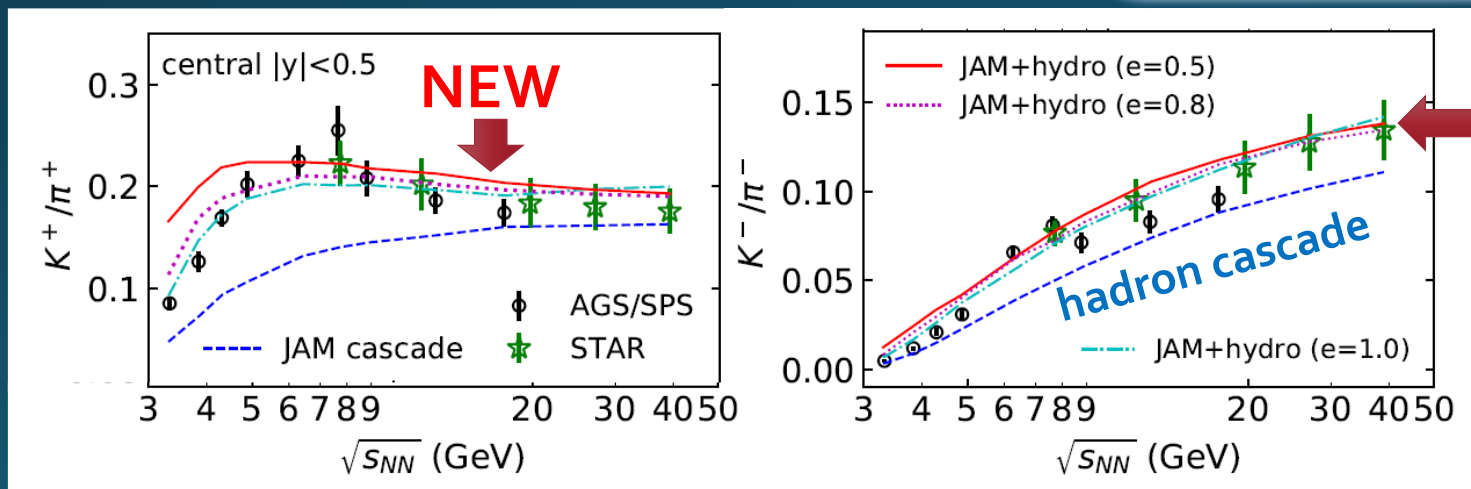
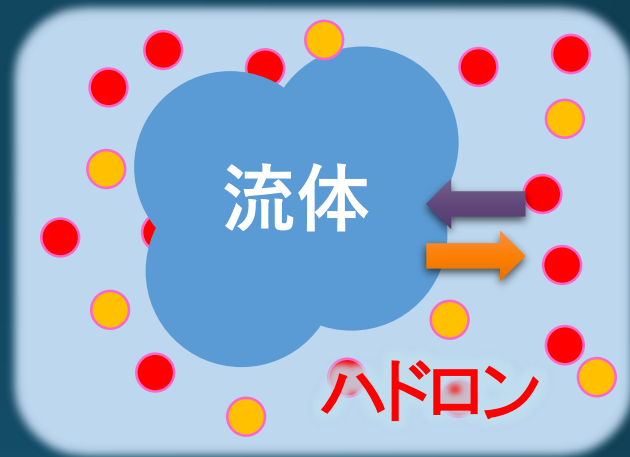
理論モデルによる再現は、発展途上

流体+ハドロンカスケード

Akamatsu, ..., Nara, ..., PRC98 (2018)

流体+ハドロン分子動力学(JAM) 同時時間発展模型

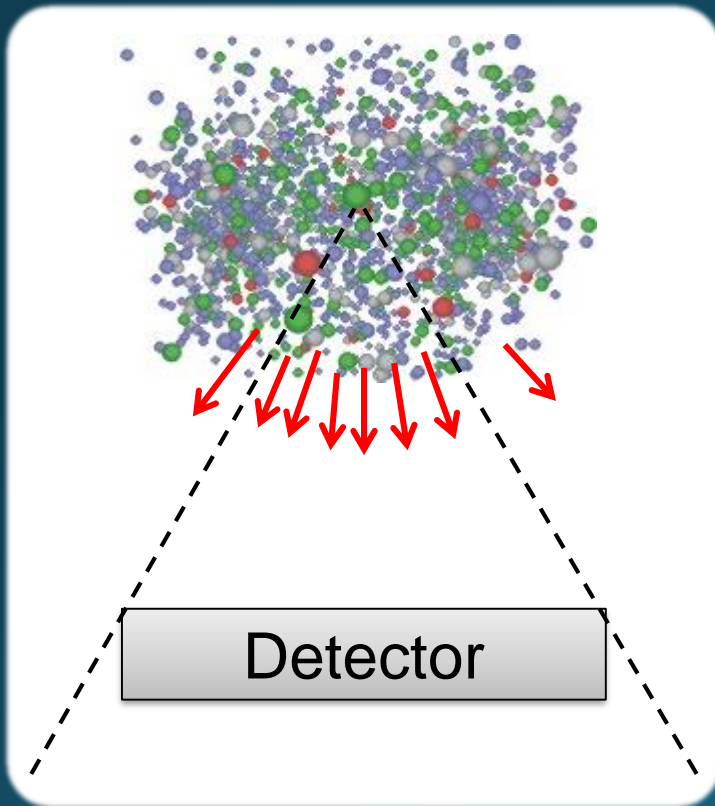
- 高密度ハドロン → 流体化
- 流体の希薄部 → ハドロン化



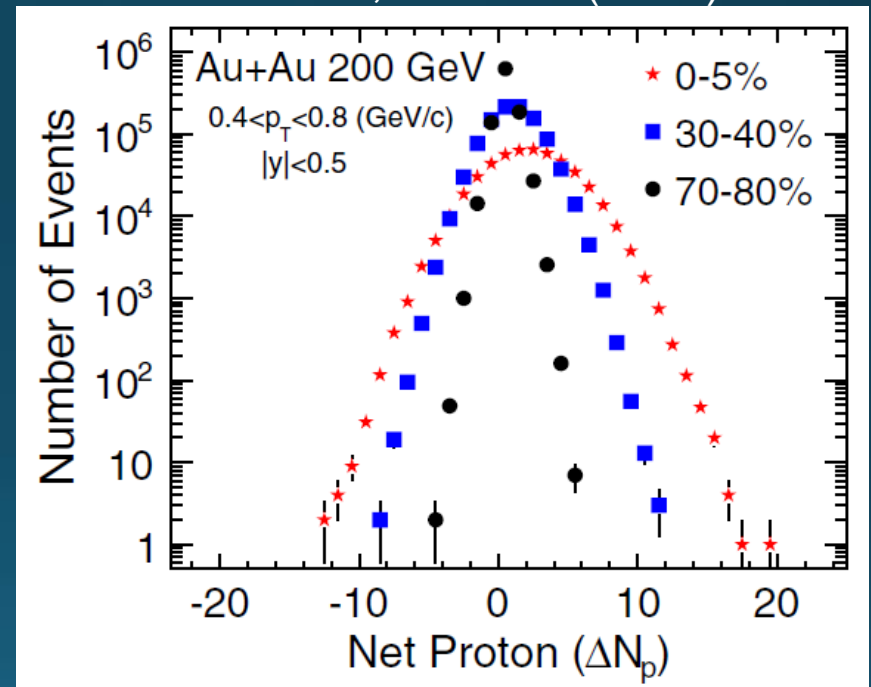
新しいアプローチでは、従来記述不能だった粒子収量比を再現

イベント毎ゆらぎ = QCD臨界点のシグナル

Review: Asakawa, MK, PPNP 90 (2016)



STAR, PRL105 (2010)



キュムラント

$$\langle \delta N_p^2 \rangle, \langle \delta N_p^3 \rangle, \langle \delta N_p^4 \rangle_c$$

非ガウスゆらぎの符号

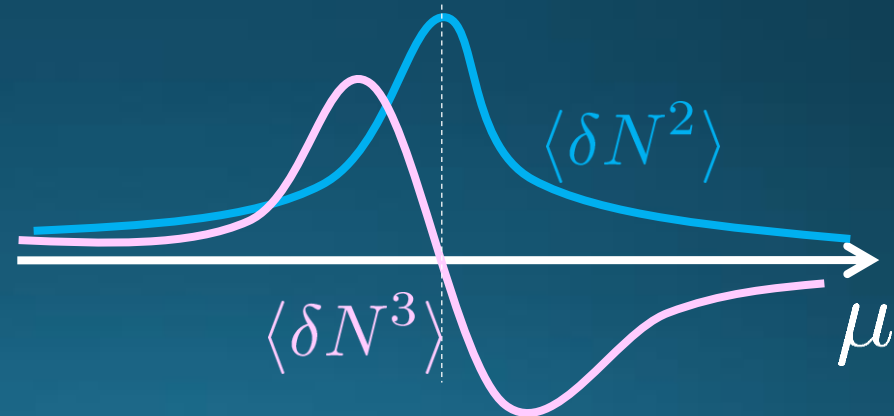
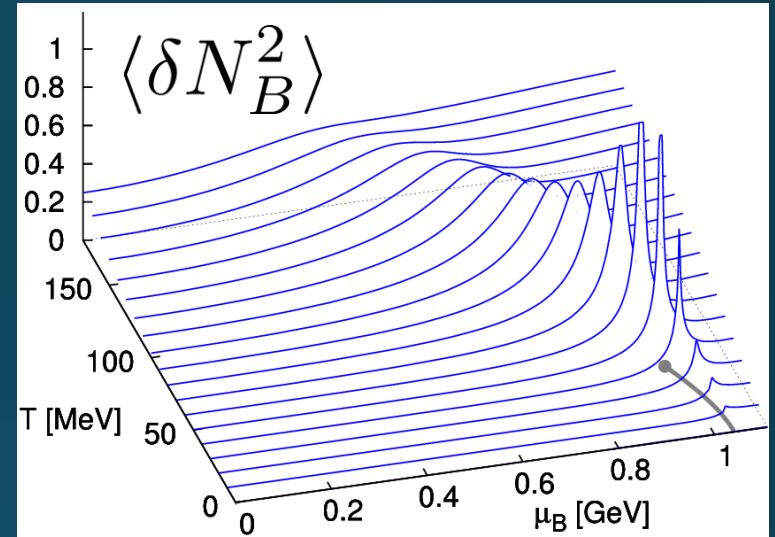
ガウスゆらぎはQCD
臨界点で発散



- 非ガウスゆらぎは、QCD臨界点で符号を変える

$$\langle \delta N^3 \rangle = T \frac{\partial \langle \delta N^2 \rangle}{\partial \mu}$$

Asakawa, Ejiri, MK, 2009



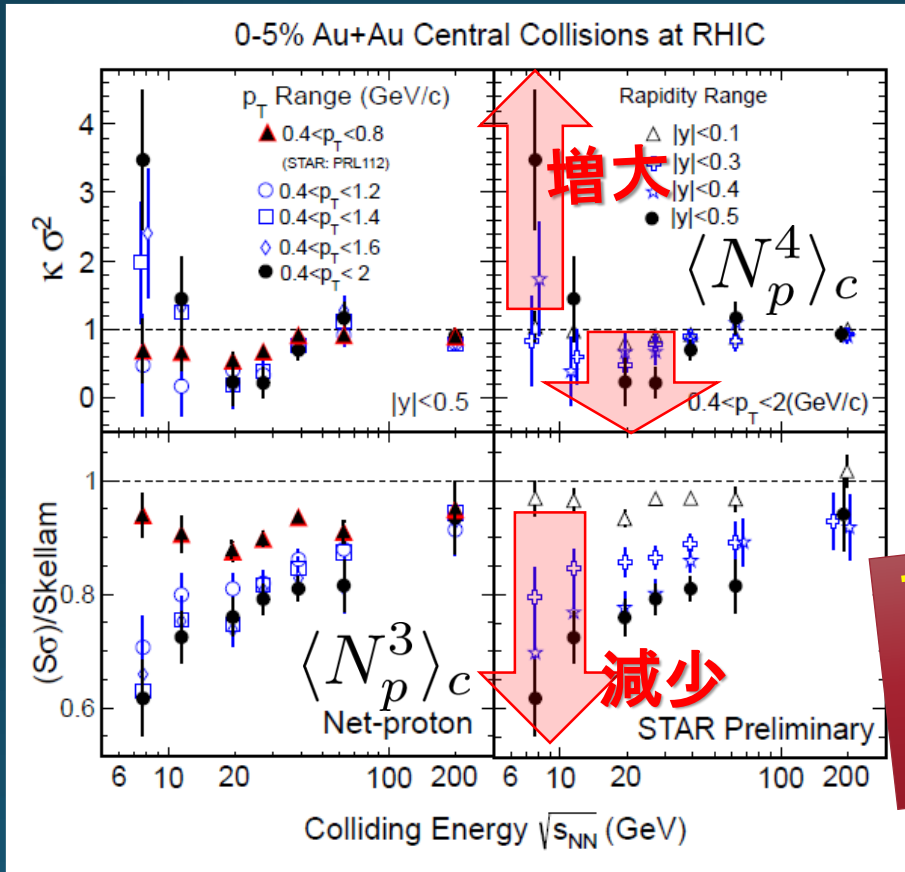
- 高次ゆらぎは、QCD臨界点でより強く発散

Stephanov, 2009

実験結果@STAR-BES ('10~'15)

4次ゆらぎ

$$\frac{\langle N^4 \rangle_c}{\langle N^2 \rangle_c}$$



STAR Collab.
2010~

3次ゆらぎ

$$\frac{\langle N^3 \rangle_c}{\langle N \rangle_c}$$

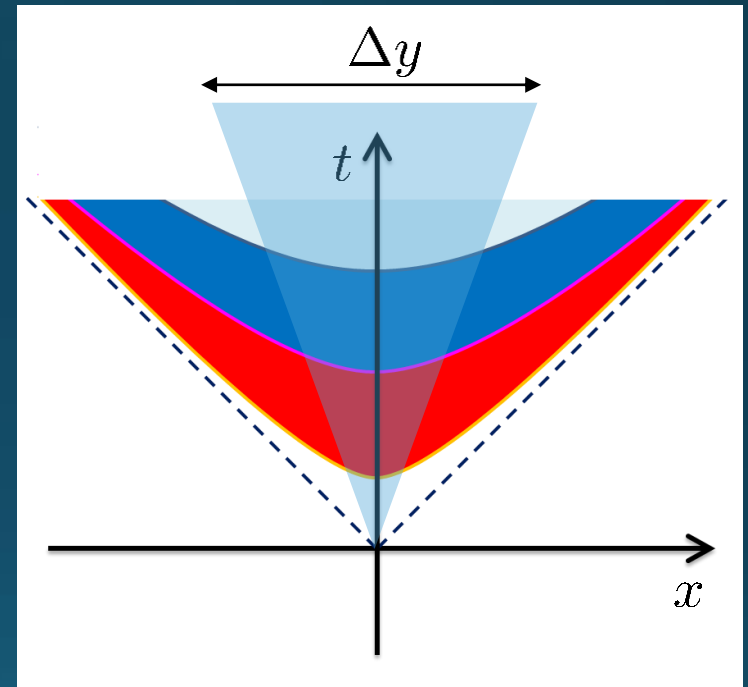
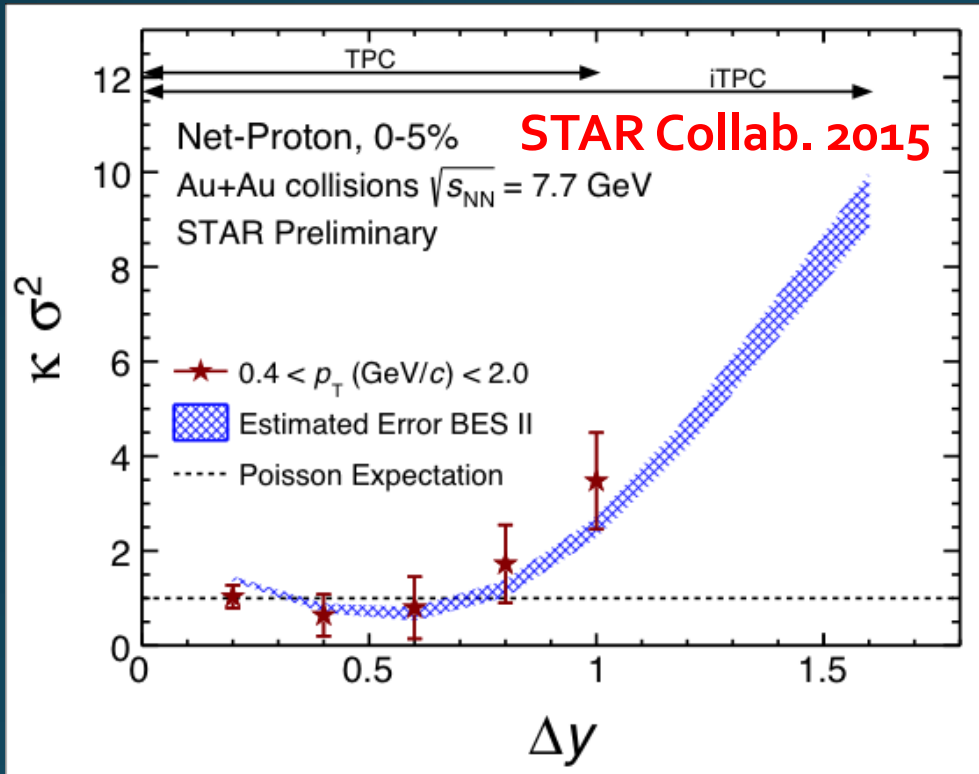
高次熱ゆらぎの測定
 □ 超高統計実験
 □ 物理学として希少

非ガウスゆらぎに、
非自明な**増大**と**減少**



QCD臨界点の
シグナル？

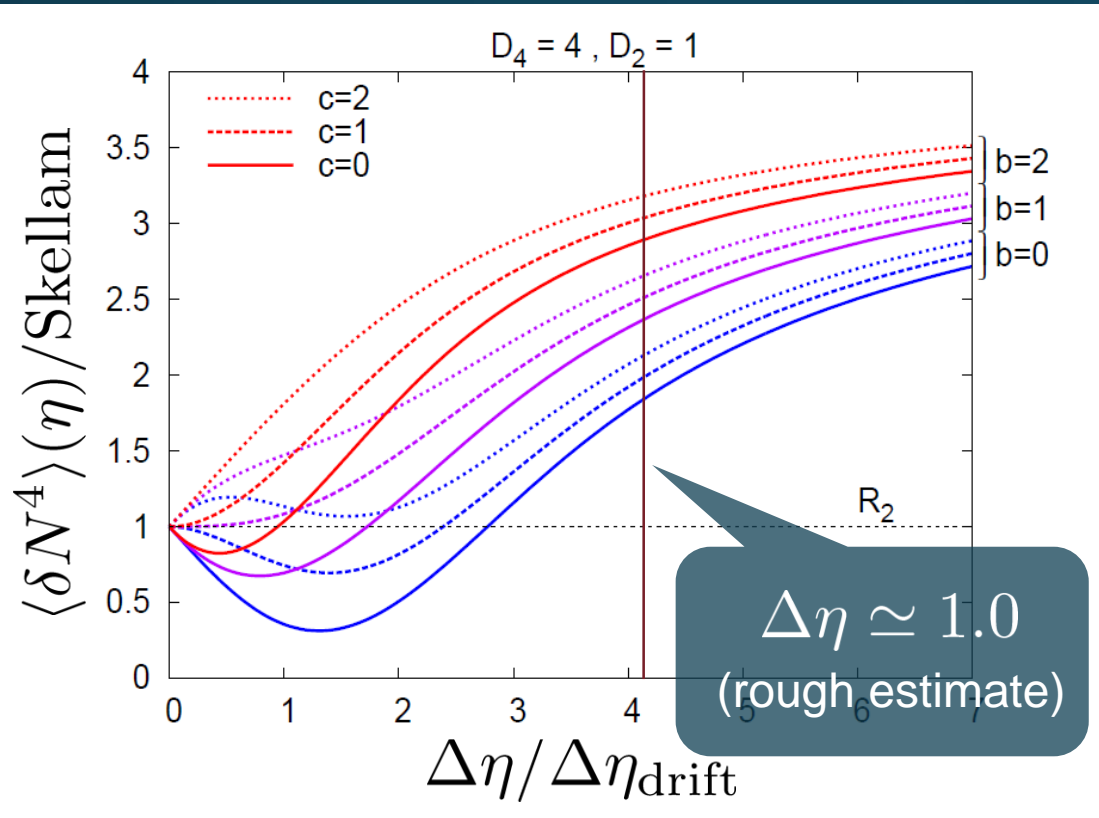
ラピディティ幅依存性



非ガウスゆらぎは、ラピディティ幅 Δy の関数として非単調に振る舞う場合がある

4次ゆらぎの $\Delta\eta$ 依存性 in 拡散モデル

MK+ (2014); MK (2015)



パラメータ

$$D_4 = \frac{\langle Q_{(\text{net})}^4 \rangle_c}{\langle Q_{(\text{tot})} \rangle} = 4$$

$$D_2 = \frac{\langle Q_{(\text{net})}^2 \rangle_c}{\langle Q_{(\text{tot})} \rangle} = 1$$

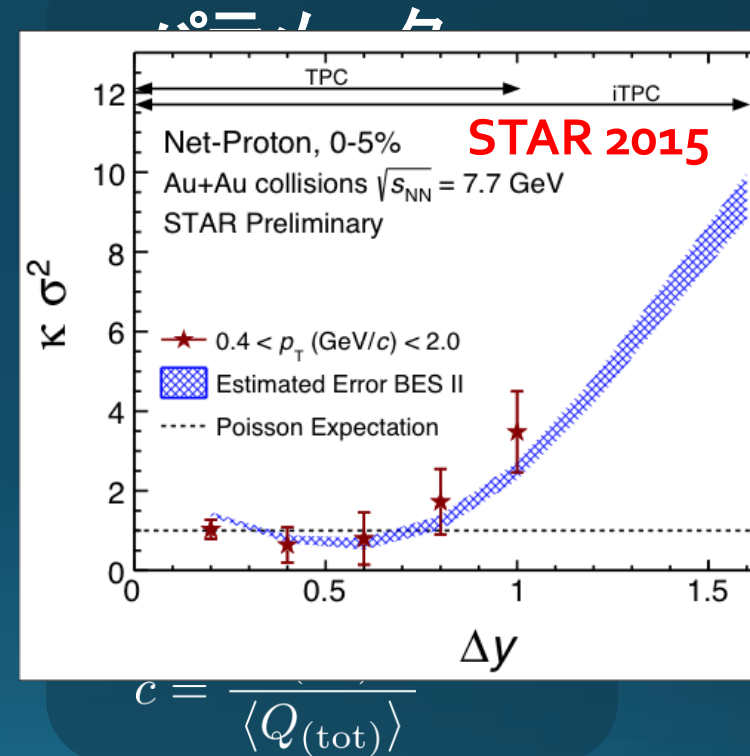
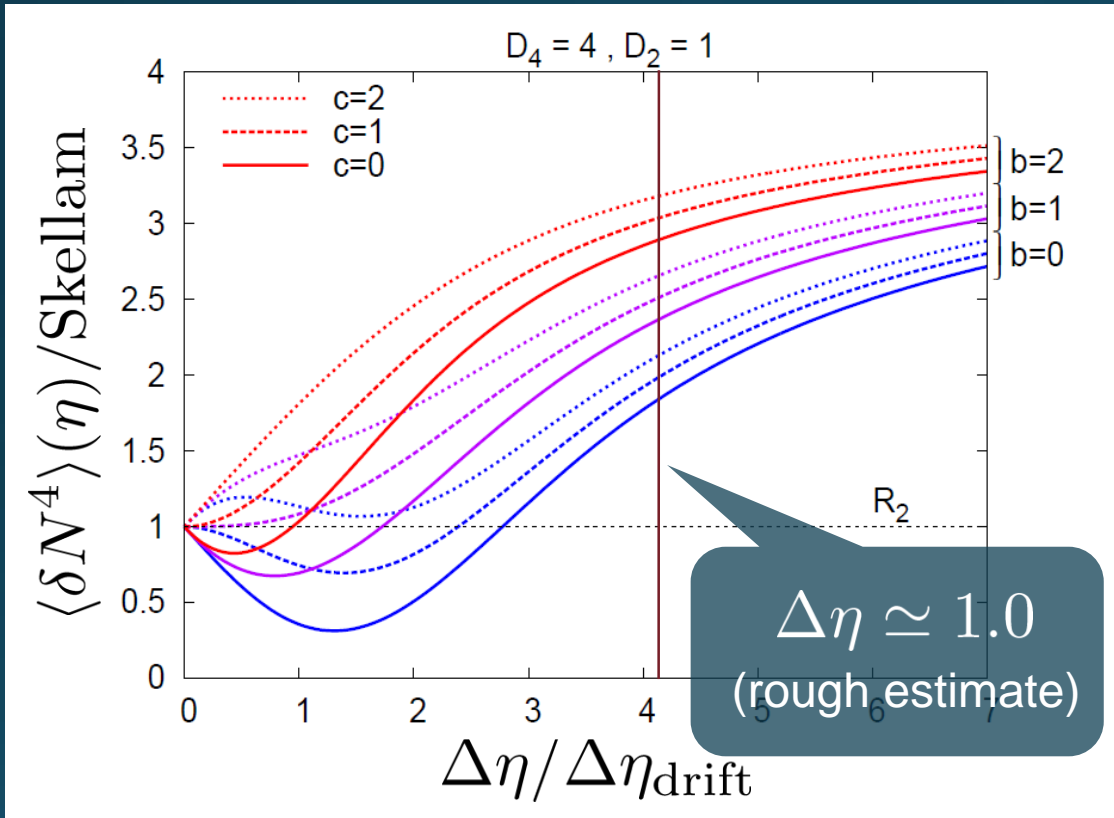
$$b = \frac{\langle Q_{(\text{net})}^2 Q_{(\text{tot})} \rangle_c}{\langle Q_{(\text{net})} \rangle}$$

$$c = \frac{\langle Q_{(\text{tot})}^2 \rangle_c}{\langle Q_{(\text{tot})} \rangle}$$

- 高次ゆらぎには、非単調な $\Delta\eta$ 依存性が現れうる。
- $\Delta\eta$ 依存性から、ゆらぎの物理的性質が理解可能！

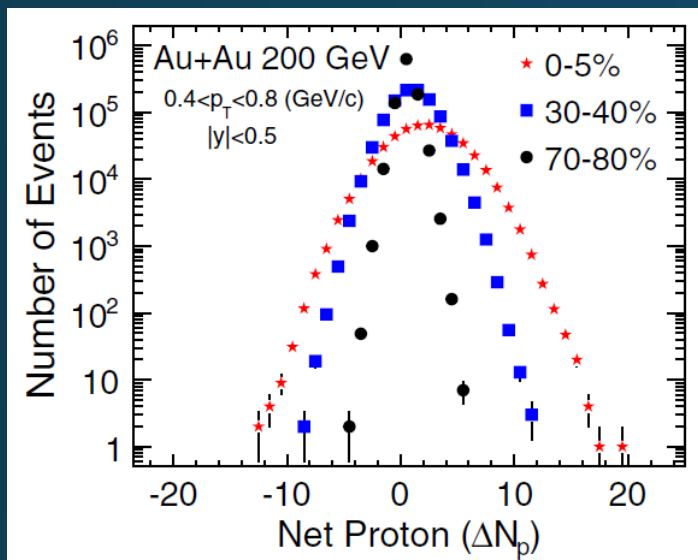
4次ゆらぎの Δy 依存性 in 拡散モデル

MK+ (2014); MK (2015)



- 高次ゆらぎには、非単調な $\Delta\eta$ 依存性が現れうる。
- $\Delta\eta$ 依存性から、ゆらぎの物理的性質が理解可能！

検出器効率補正の問題



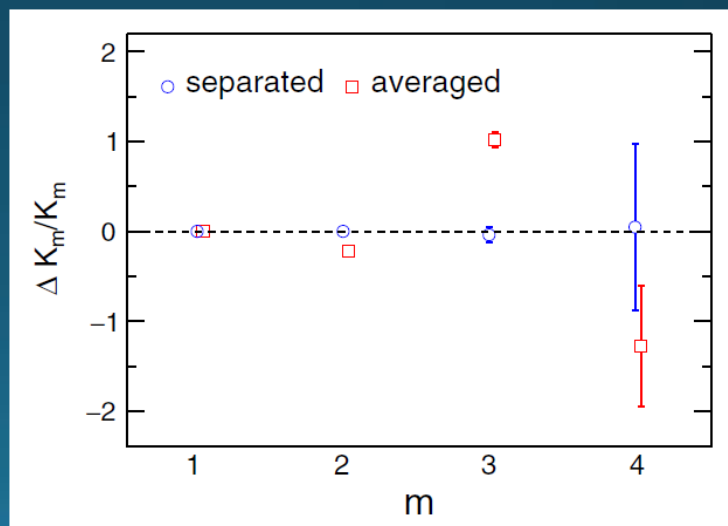
キュムラント

$$\langle \delta N_p^2 \rangle, \langle \delta N_p^3 \rangle, \langle \delta N_p^4 \rangle_c$$

「正しい」補正の必要性

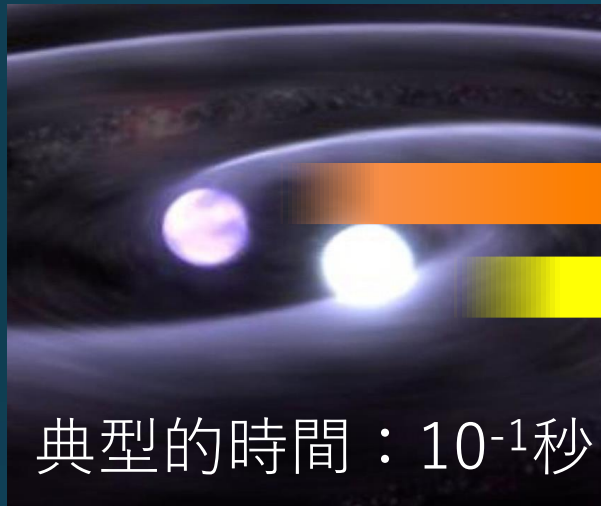
分布関数は、検出器の不完全な測定で歪む

高次キュムラントは、非自明な変更を受ける



MK, 2016; Nonaka, MK, Esumi, 2017; 2018

レプトン対：観測量の階層性



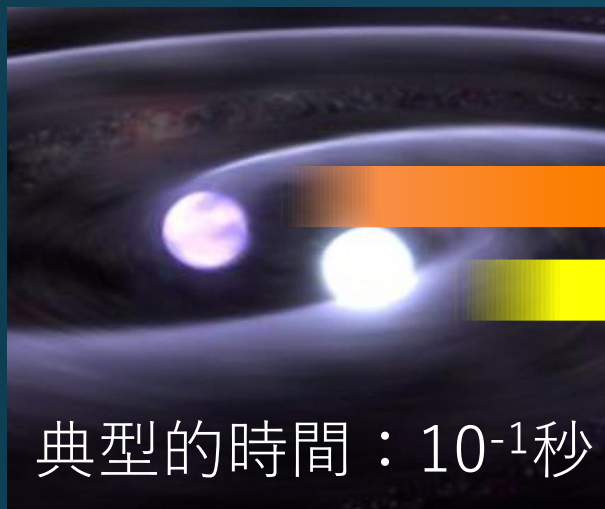
典型的時間：10⁻¹秒

重力波

深部の情報の
の担い手

電磁波

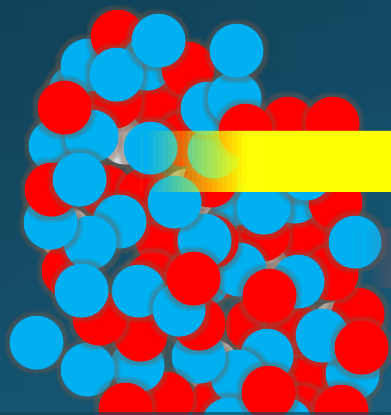
レプトン対：観測量の階層性



重力波

深部の情報の担い手

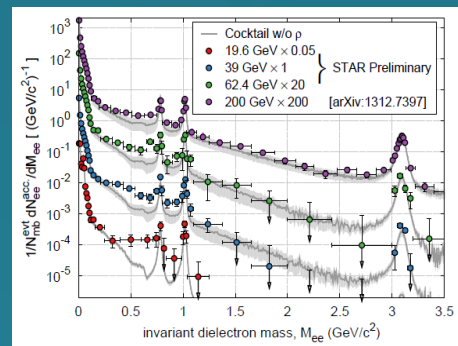
電磁波



電磁波

ハドロン観測量

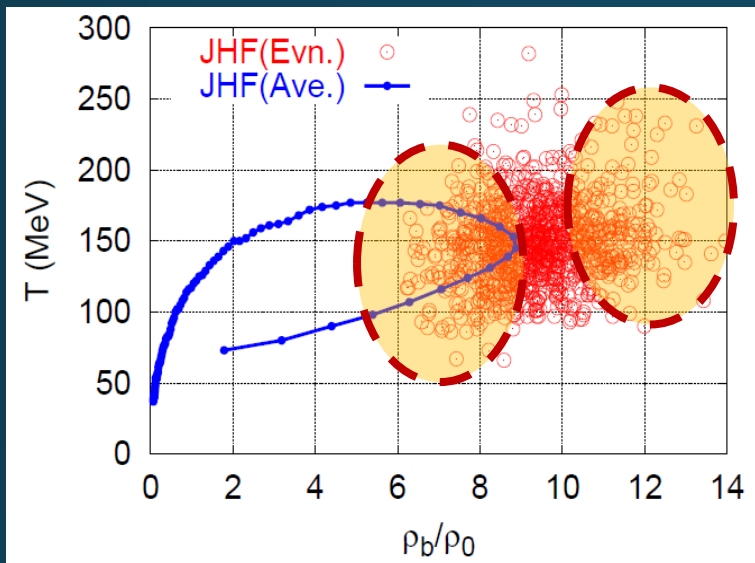
レプトン対生成



- 初期温度
- 媒質中ハドロン

J-PARC-HIエネルギーでの解析はJ-PARCが初

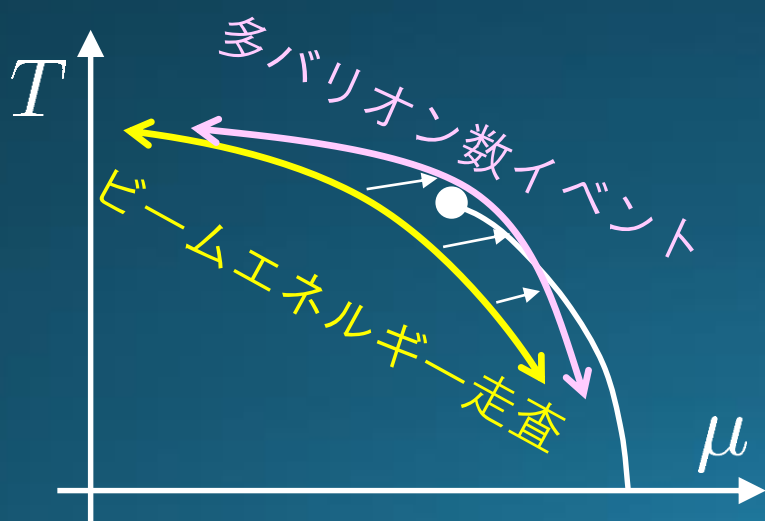
最高密度走査実験？



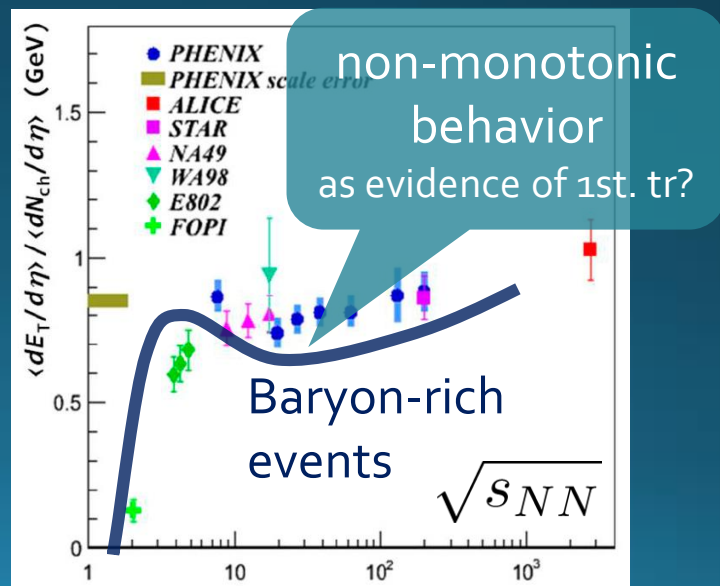
最高密度は大きな
イベント毎ゆらぎを持つ



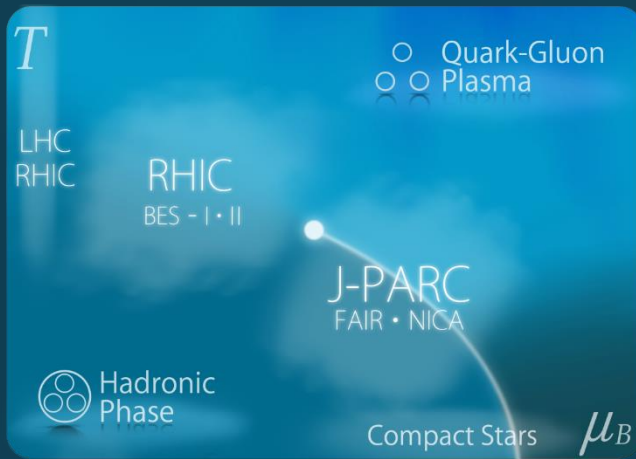
高密度イベントの選択で
観測量の密度依存性を探索？



平均横方向エネルギー

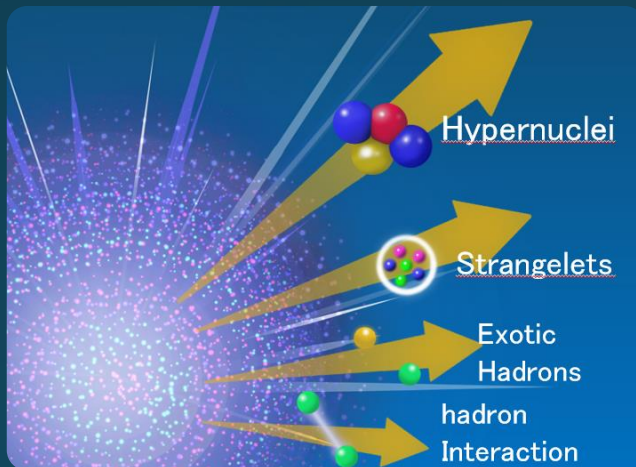


2つの物理目標



宇宙最高密度の探索

- 超高密度QCD物質
- 一次相転移・QCD臨界点
- 中性子星状態方程式



稀事象の生成工場

- ハイパー核物理
- エキゾチック粒子
- ハドロン相互作用

ストレンジ粒子生成工場

Hypernuclei



Strangelets



Exotic
Hadrons



hadron
Interaction



- 高密度
- 高強度
- ストレンジバリオン生成に適した環境



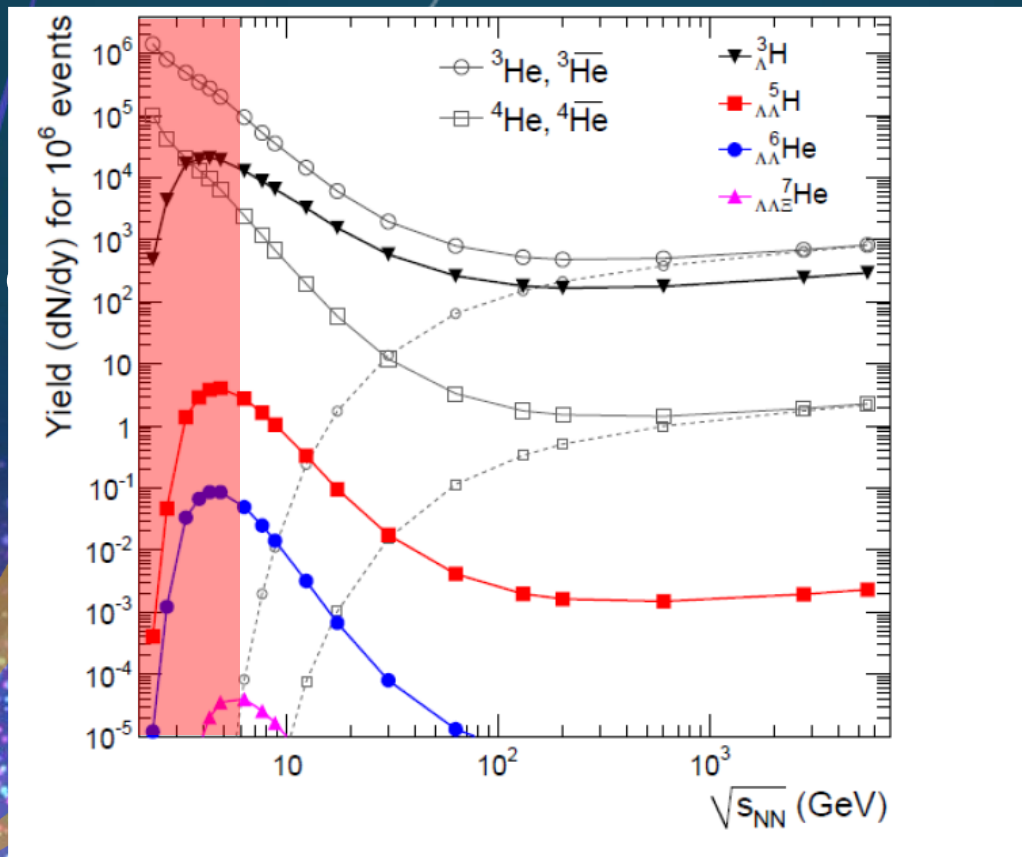
稀事象生成工場



- 生成
- 性質
- 相互作用

ハイパー核生成工場

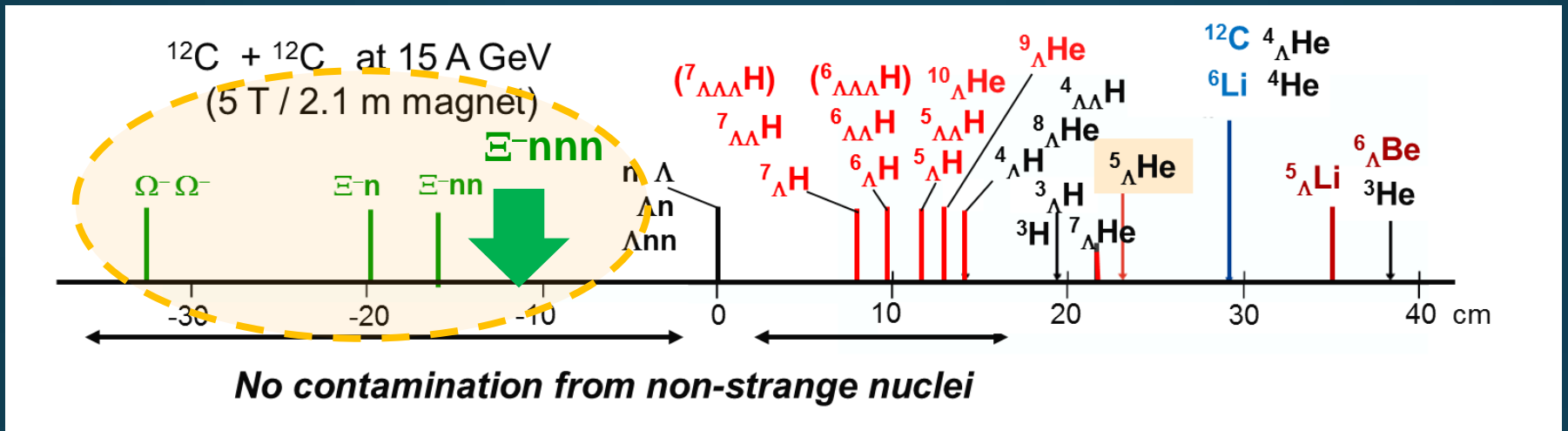
Hypernu



ハイパー核の生成量はJ-PARC-HIエネルギーで最大値を取る

Interaction

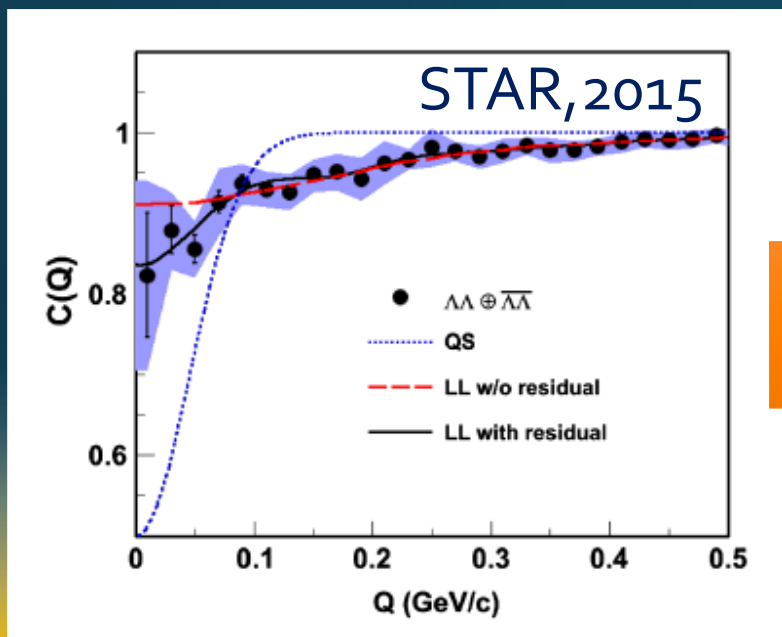
Hyper-Nuclear Physics @ J-PARC



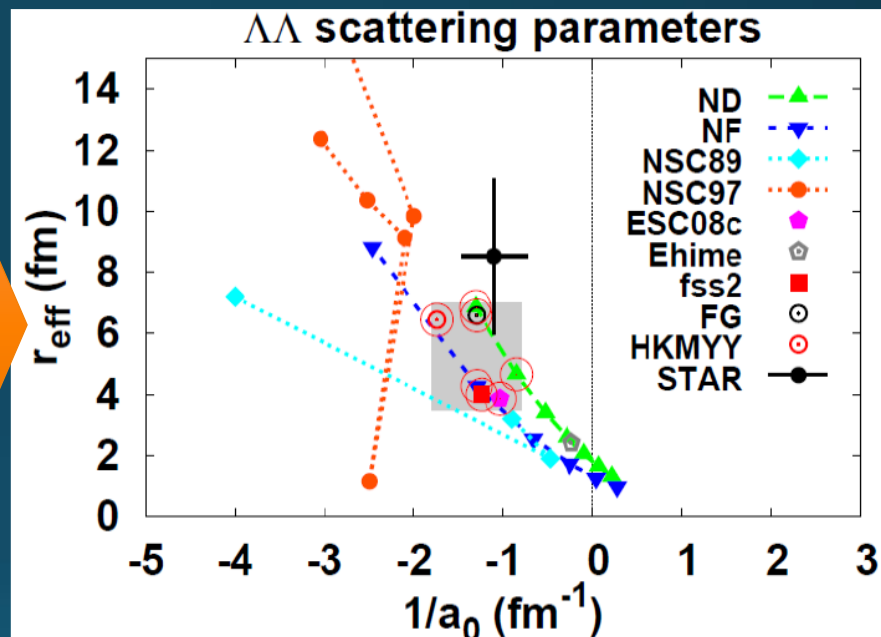
- 負の原子番号を持つハイパー核 ($\Xi\text{-n}$, $\Xi\text{-nn}$, ...)
- $s=-2, -3, \dots$ のハイパー核
- 束縛状態の有無
- スレンジレット?
- 磁気モーメントの測定

ハドロン相互作用

$\Lambda\Lambda$ 相関関数



散乱パラメータ

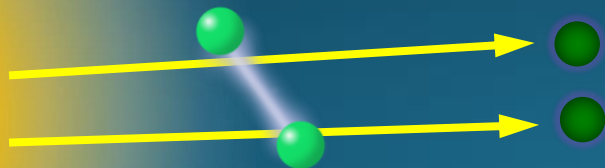


相関関数 → 相互作用

emission source
func.

+

relative
wave func.



まとめ

J-PARC-HI

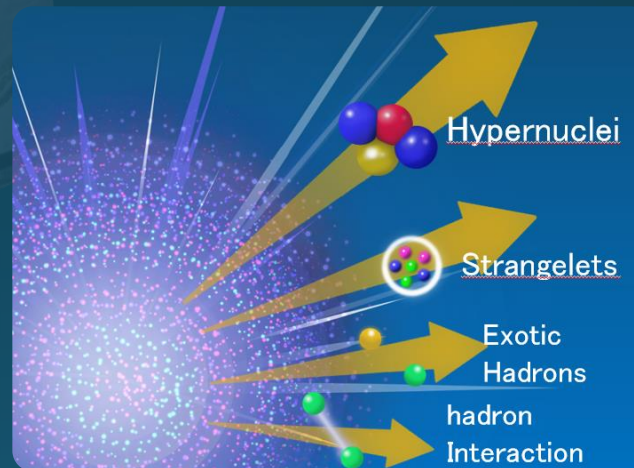
- 既存のJ-PARC加速器を活用した大強度実験
- 大強度フロンティア・高密度フロンティア

2つの物理目標

宇宙最高密度の探索

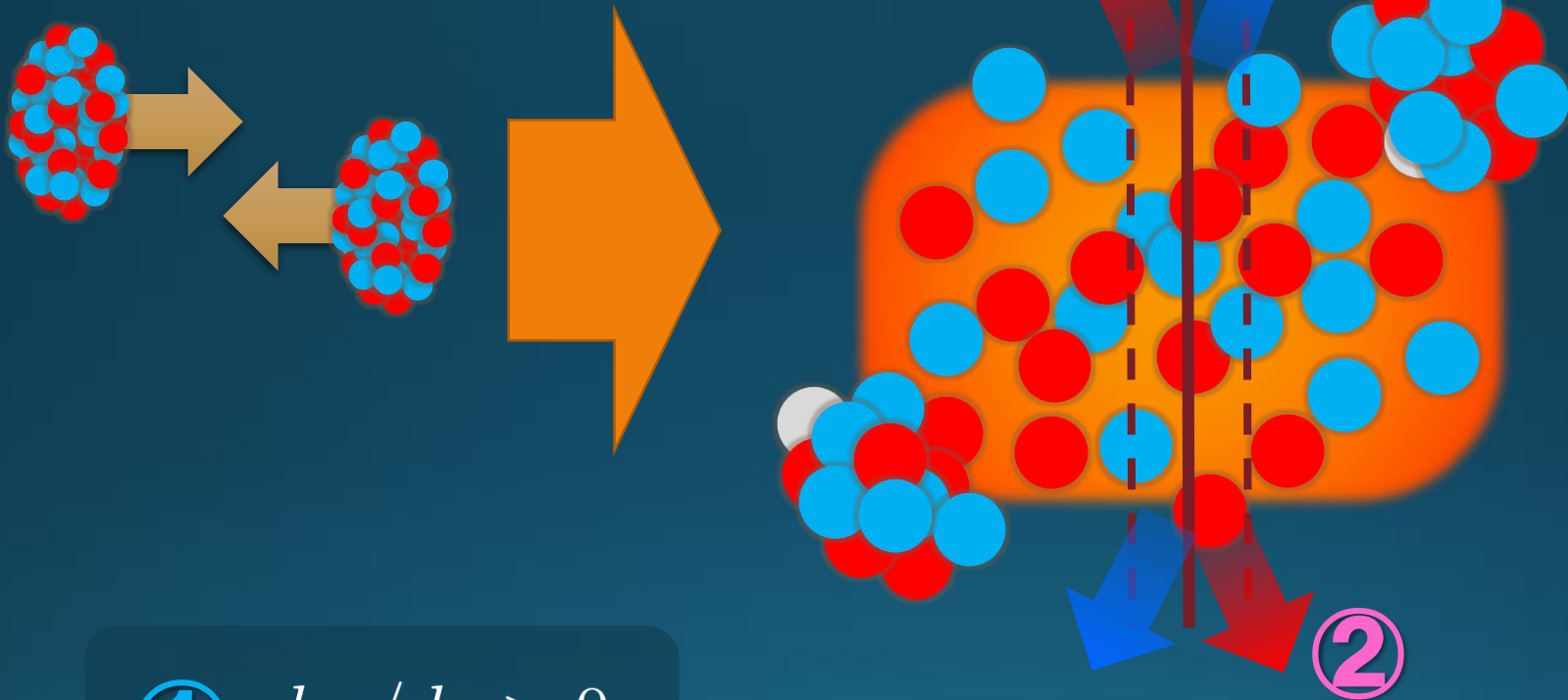


稀事象の生成工場



backup

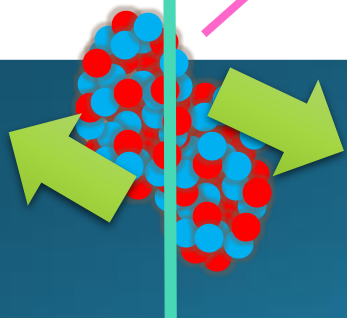
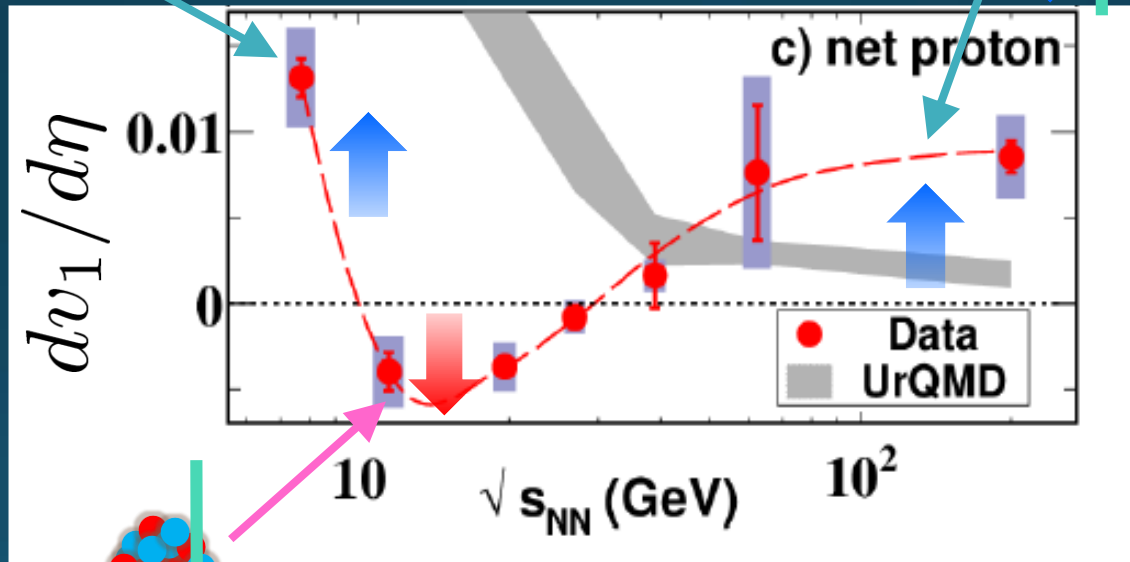
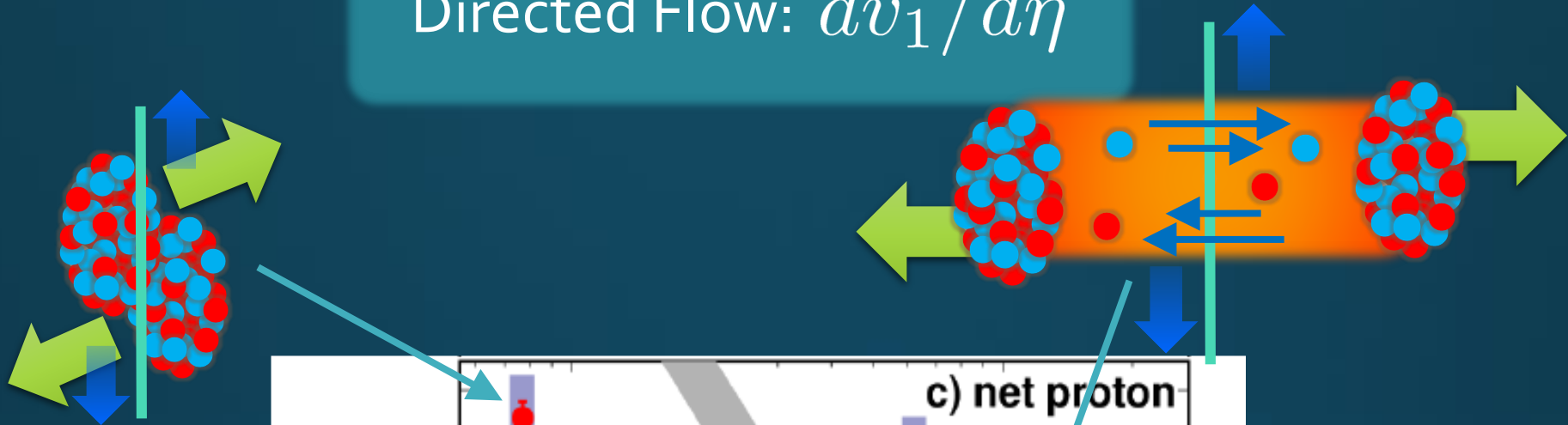
Radial Flow

$$dv_1/dn\eta$$


① $dv_1/dn\eta > 0$

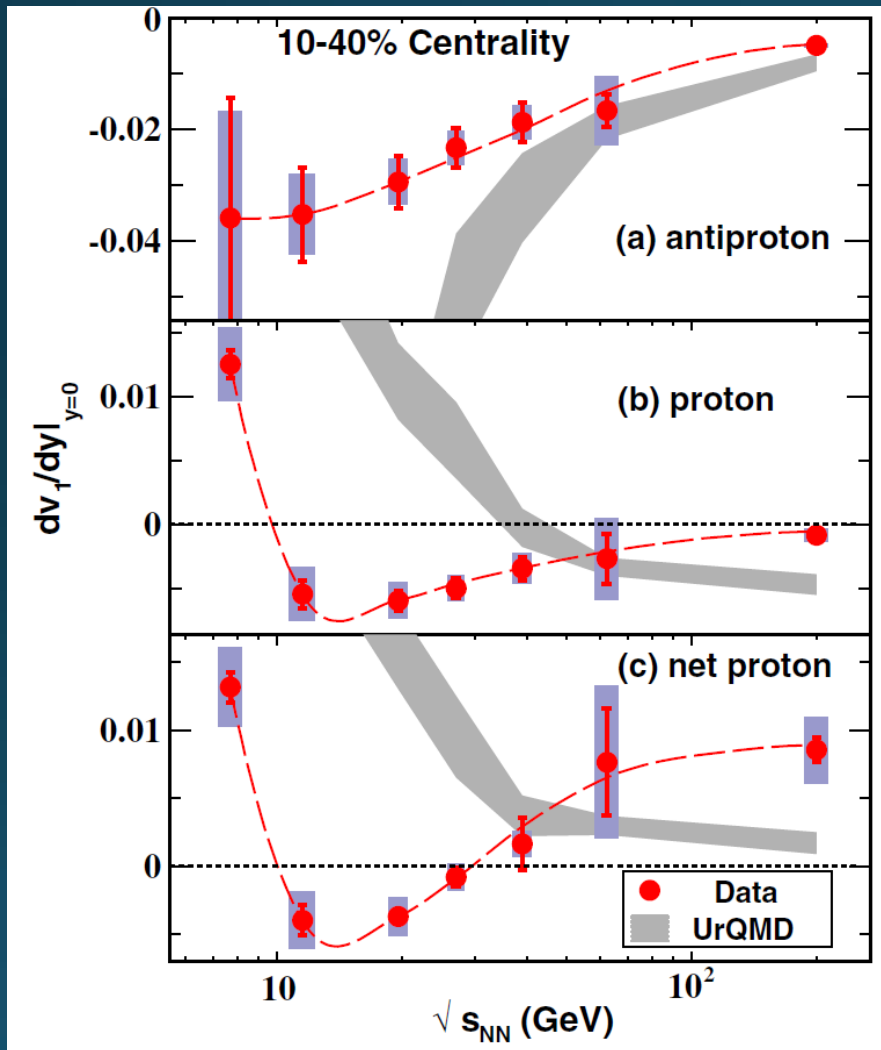
② $dv_1/dn\eta < 0$

Directed Flow: $dv_1/d\eta$

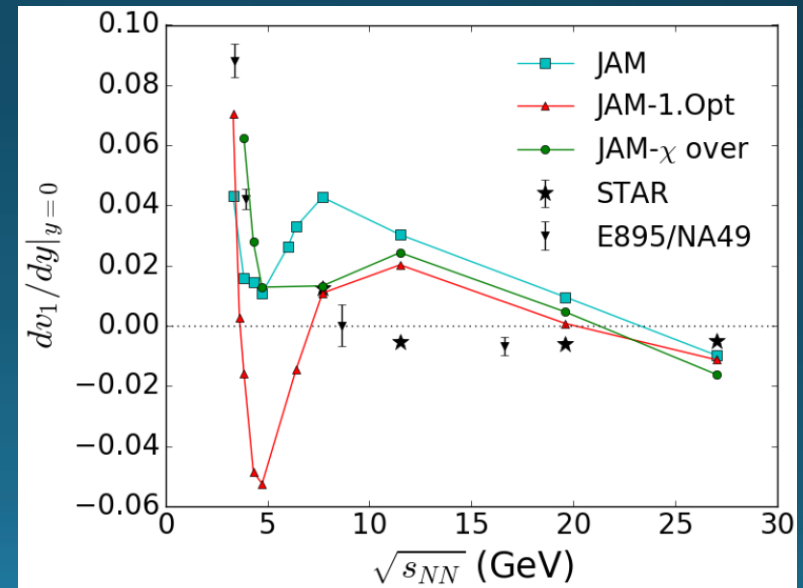


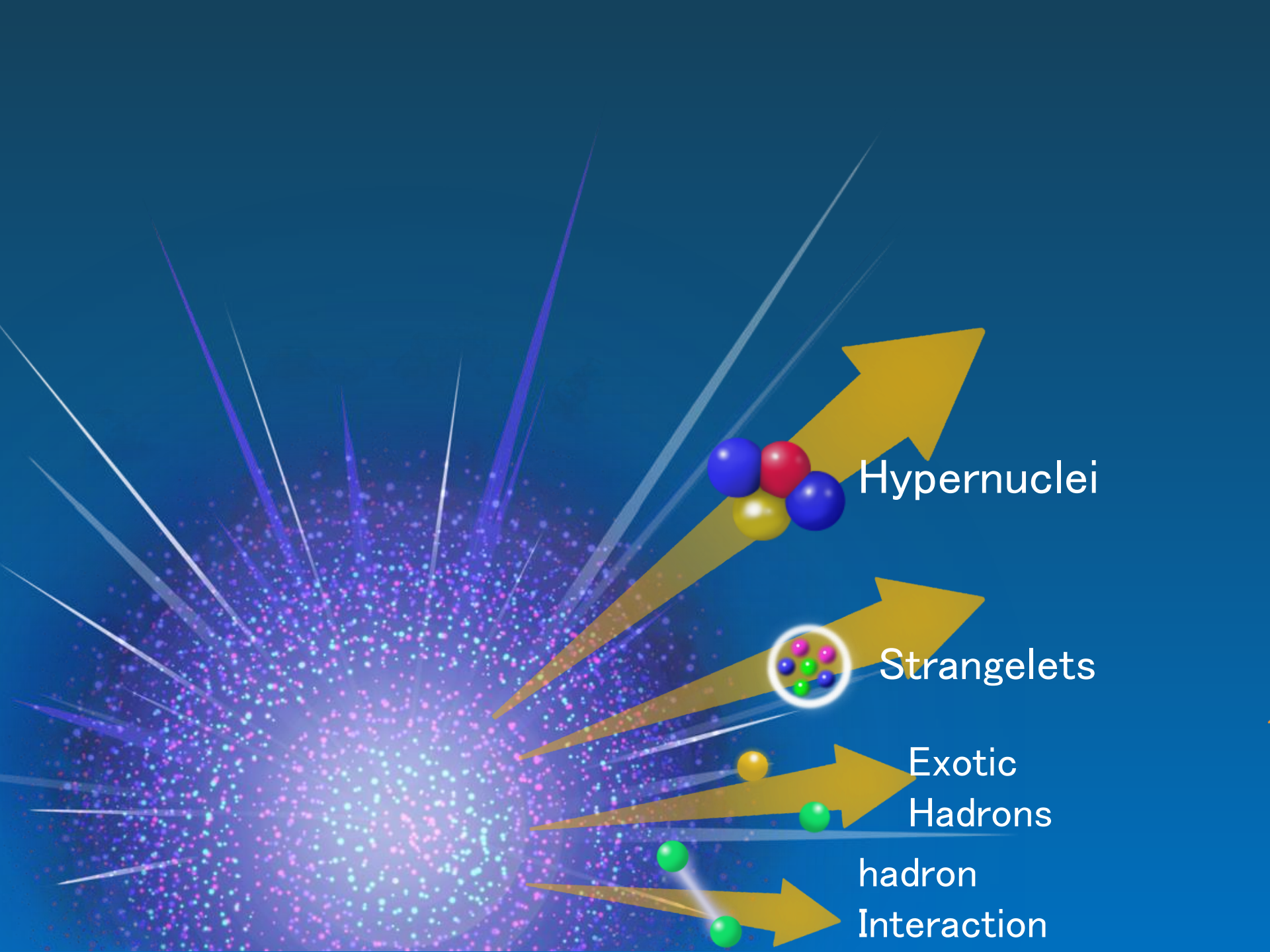
- dv_1/dy : two sign change
- No transport models can reproduce it quantitatively

dv_1/dy : Signal of 1st Phase Tr.?



Negative v_1
 = signal of softening
 \cong 1st order transition??





Hypernuclei

Strangelets

Exotic
Hadrons

hadron
Interaction