

日本物理学会2016年秋季大会, 2016/9/21, 宮崎大学, 21pSA1

シンポジウム：J-PARC重イオン衝突実験が拓く高密度・稀現象の物理



北沢正清（大阪大学）

# 趣旨説明： 重イオン衝突実験と 高温高密度QCD

シンポジウム

# J-PARC重イオン衝突実験が拓く 高密度・稀現象の物理

## 開催趣旨

J-PARC将来計画に関する  
宣伝・意見交換・協力要請

# J-PARC

Japan **Proton** Accelerator Research Complex



詳細な計画・  
準備状況  
2. 佐甲

**J-PARC-HI** = J-PARC Heavy-Ion Program  
J-PARCを重イオン加速・衝突実験に使う計画  
実験開始目標：2025年

# J-PARC-HIとは？

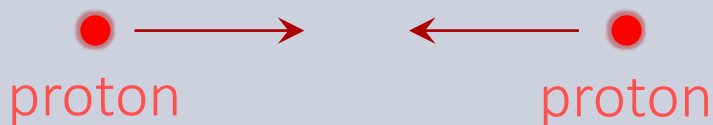
世界最強度ビームで探る宇宙最高密度

## 3つの重要課題

- 極微の中性子星衝突
- 物質による真空の破壊
- レア粒子捕獲場

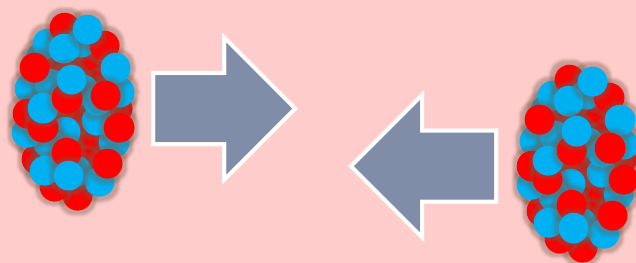
# 相対論的重イオン衝突実験

## 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

10GeV

$10^2$  GeV

1TeV

$\sqrt{s_{NN}}$

AGS  
-1996

SPS  
1994-2000

RHIC  
2000-

LHC  
2010-

RHIC-BES  
2010-

FAIR  
2022-?

NICA  
2025-?

クォークグルオンプラズマの生成  
強く相互作用したQGP

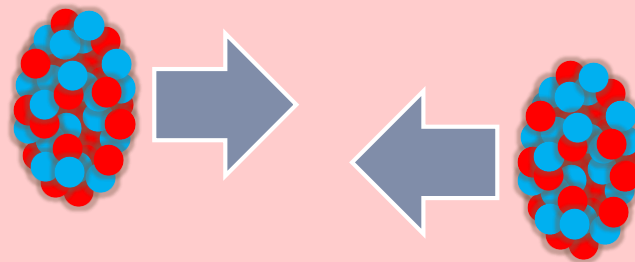
~2010

相対論的重イオン衝突実験の歴史  
= 高エネルギー化の試み

2010~  
低エネルギー  
領域の探索へ

J-PARC-HI  
2025~?  
2-6.2 GeV

重イオン衝突実験



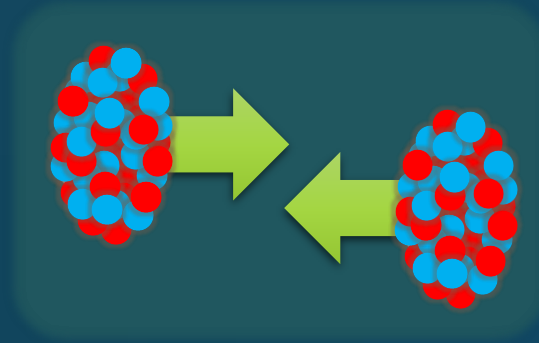
何故いま、低エネルギー？

答

J-PARC-HI = 高バリオン密度への最前線

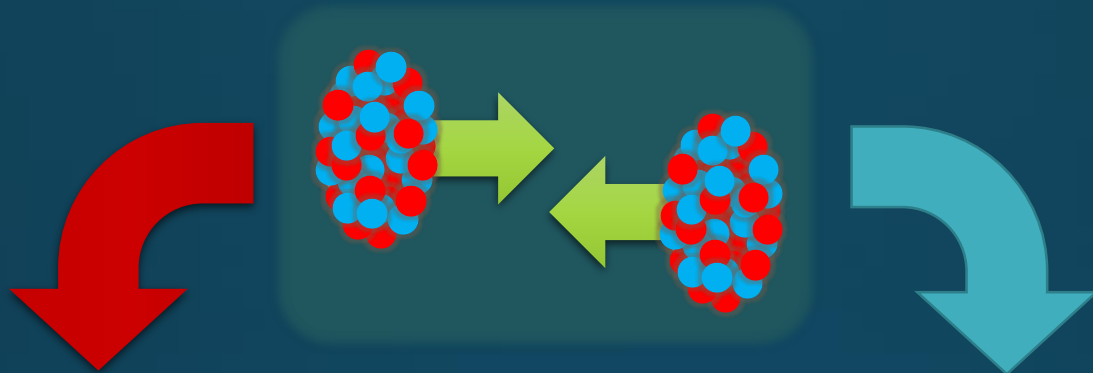
※高E ≠ 低Eの上位互換

何故いま、低エネルギー？



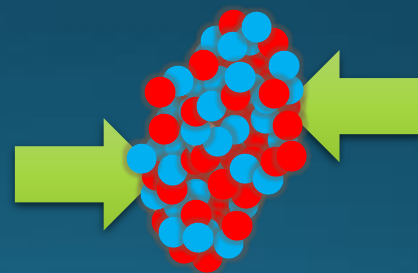
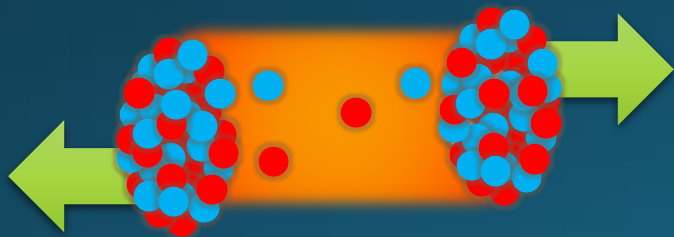


# 何故いま、低エネルギー？



高エネルギー衝突

低エネルギー衝突

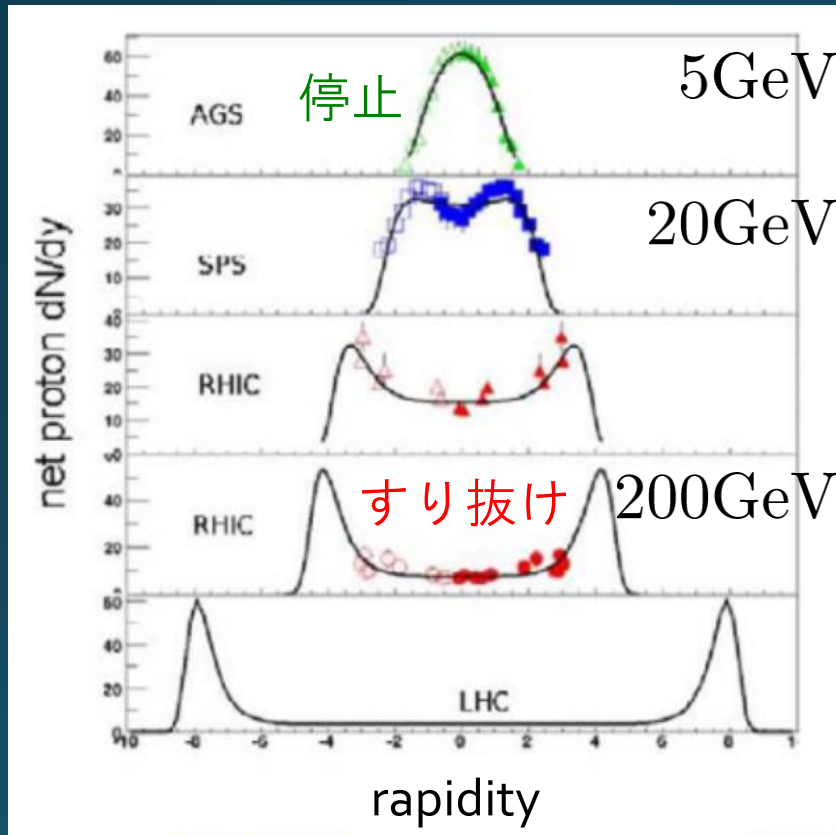


核子は突き抜ける  
正味バリオン数：小

核子が止まる  
正味バリオン数：大

# バリオン減速

正味陽子数の $y$ 依存性



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

程良く圧縮して、止まる

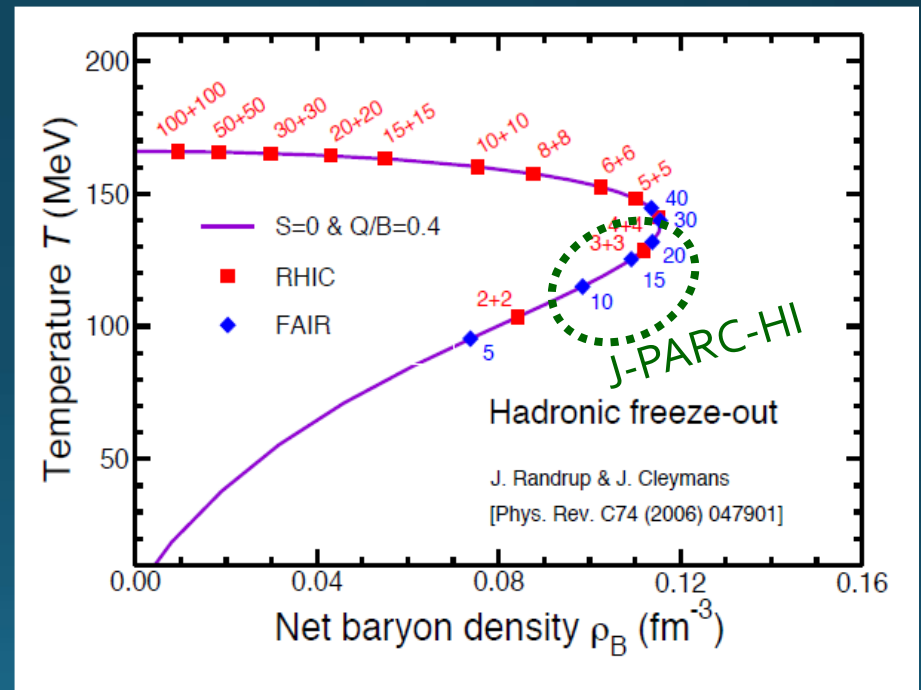
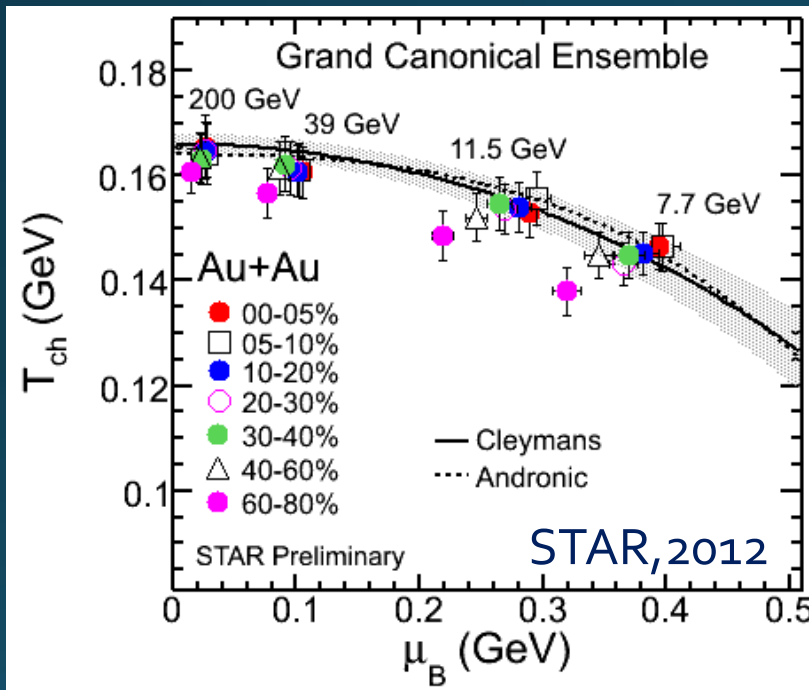
$$\sqrt{s_{NN}} > 10 \text{ GeV}$$

核子は、突き抜ける

# バリオン減速

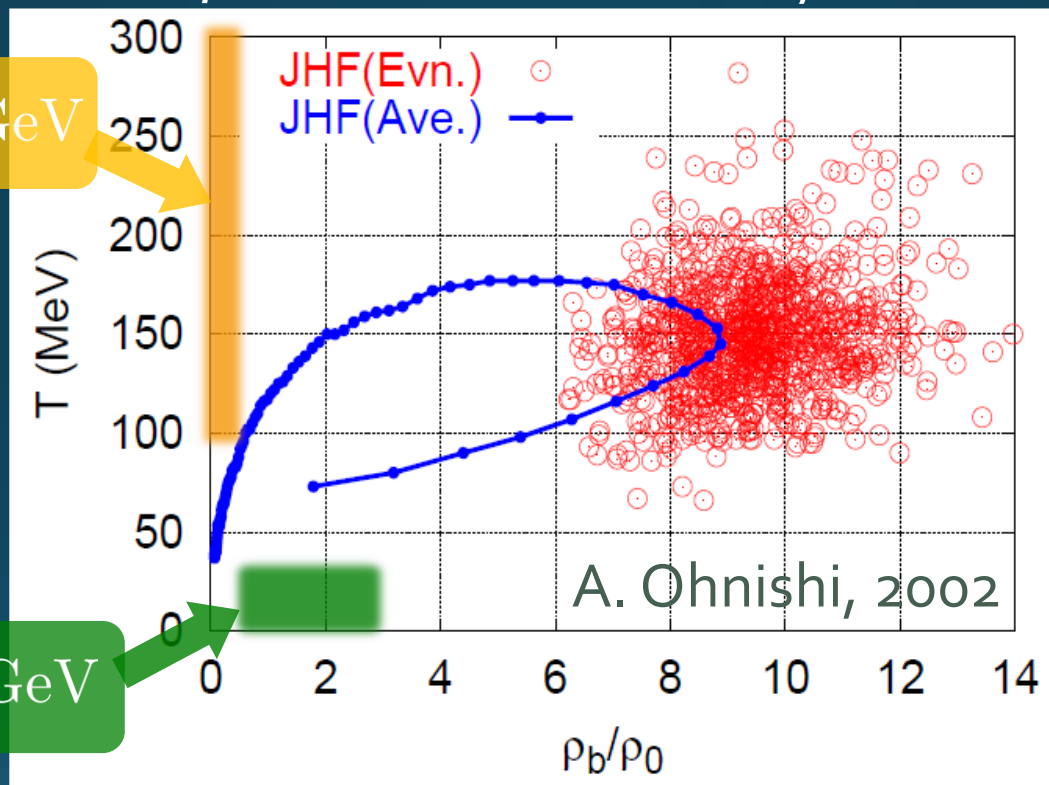
粒子収量比から定義した  
温度・化学ポテンシャル

バリオン密度への焼き直し



# 最高密度は？

T- $\rho$ 平面上の時間発展 by JAM



$\sqrt{s_{NN}} > 100 \text{ GeV}$


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

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

$E/A < 1 \text{ GeV}$

- J-PARCエネルギーで、最高密度  $5 \sim 10\rho_0$ 。
- 密度は大きなイベント毎ゆらぎ？

# 極微の中性子星衝突



中性子星の物  
理との関連  
6. 大西

J-PARC-HI

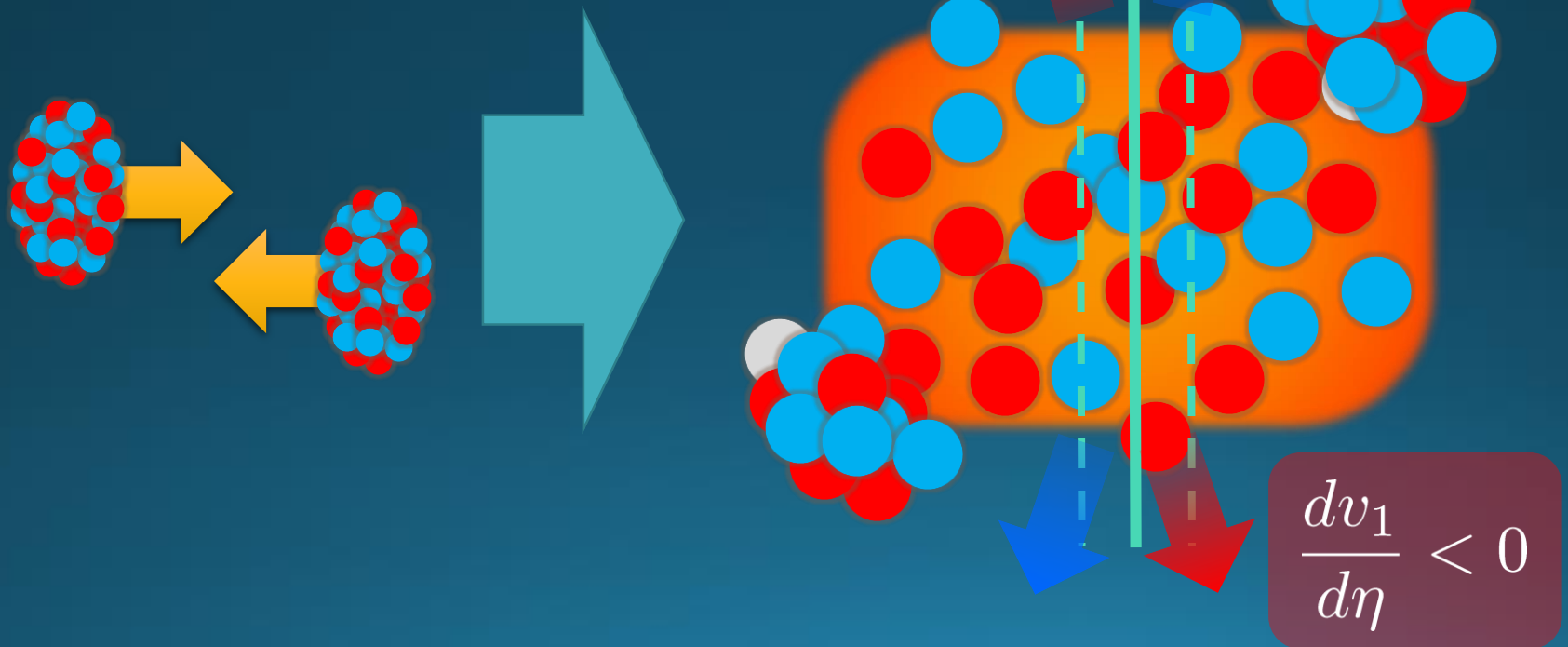
中性子星衝突の**温度・密度・磁場**に地上で迫る唯一の手段

状態方程式・輸送・強い場への応答などの貴重な情報

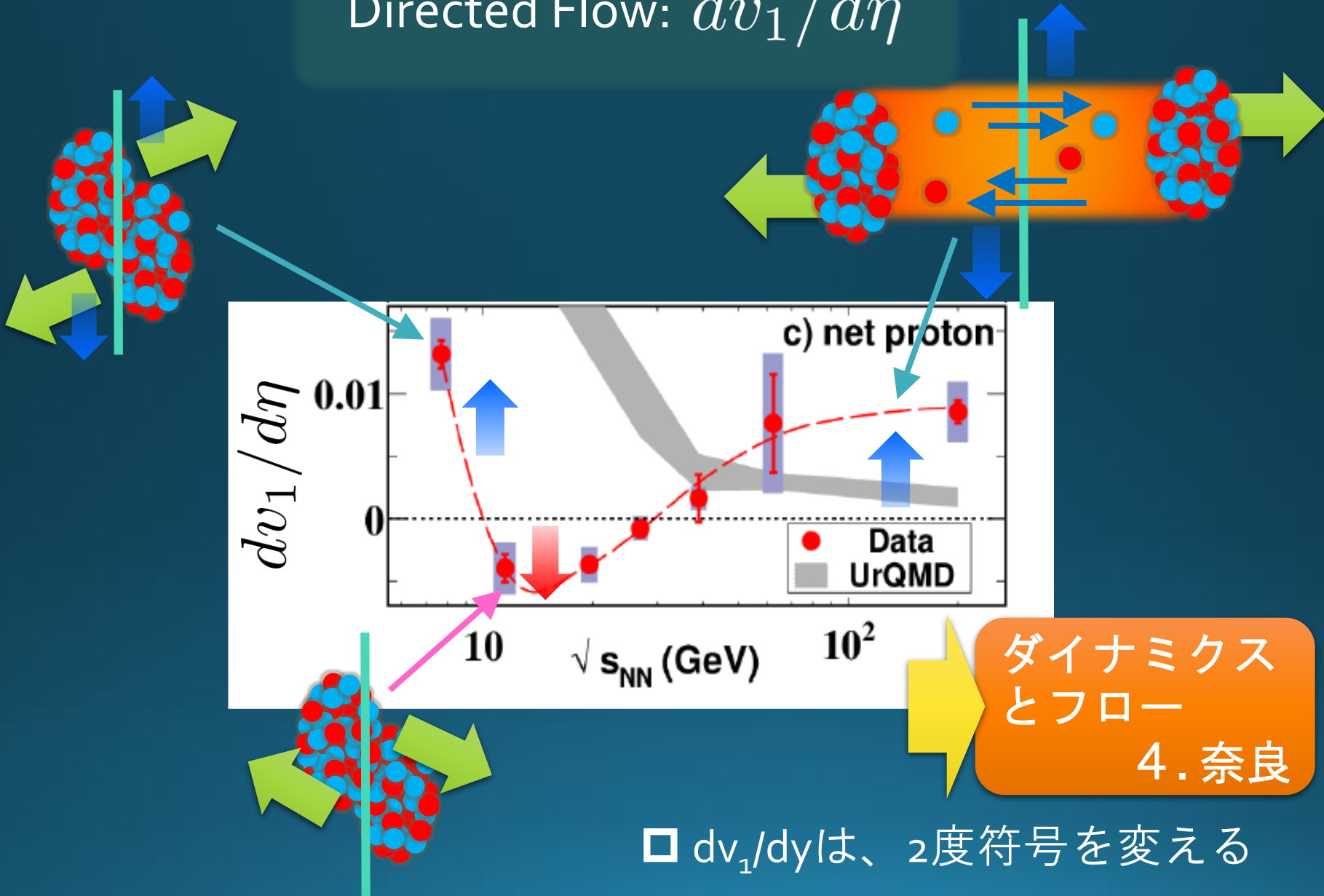
# 非自明な動的過程

Directed Flow:  $dv_1/d\eta$

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



# Directed Flow: $dv_1/d\eta$



ダイナミクス  
とフロー  
4. 奈良

□  $dv_1/dy$ は、2度符号を変える

J-PARC-HIは、AGSの焼き直し？  
他の実験施設との関係は？

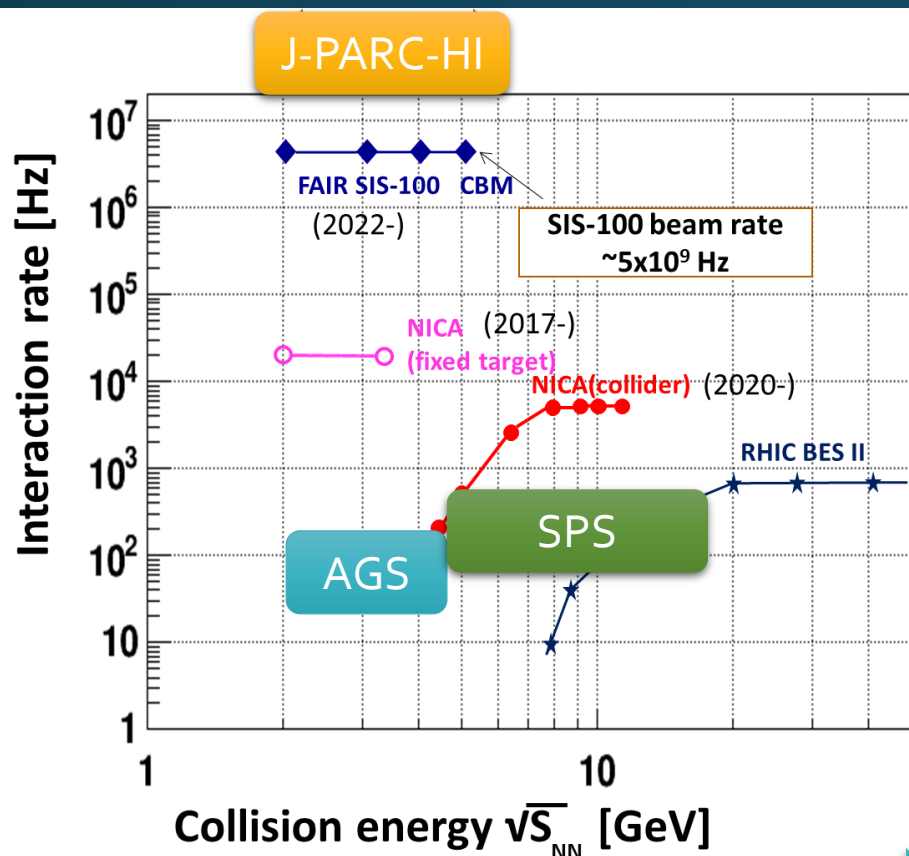
答

新しい視点に基づく、  
ユニークな超高統計実験



# 衝突率

J-PARC-HI加速  
器の性能  
3. 原田



## J-PARC-HI:

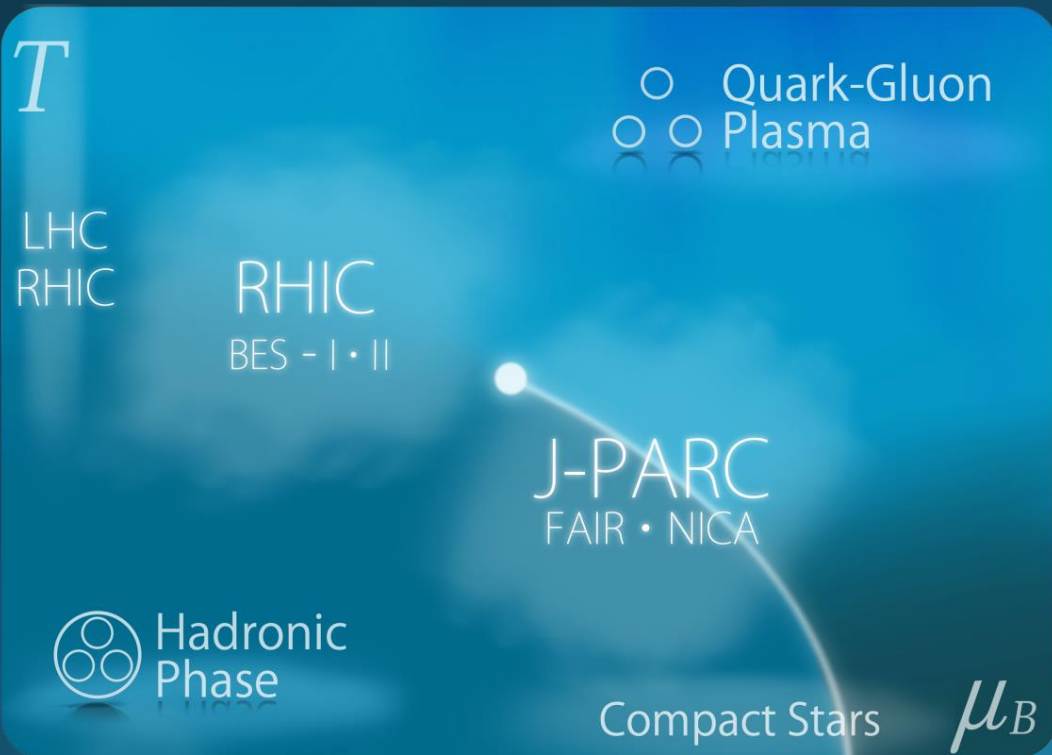
超高強度ビーム×固定標的  
→世界最高衝突率 $\sim 10^8$ Hz

AGS, SPSの衝突率を5桁上回る

AGS, SPS = J-PARC-HI  
1年間 = 5分

- 各種物理量の高統計測定
- 高度なイベント選択
- 高次の相関の測定
- 稀現象の探索

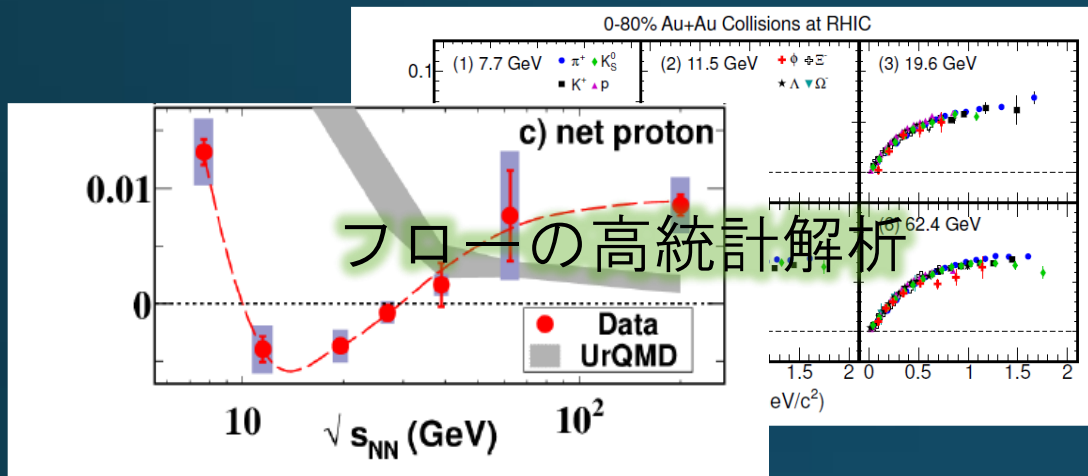
J-PARC-HIとは  
**世界最強度ビーム**  
 で探る  
**宇宙最高密度**



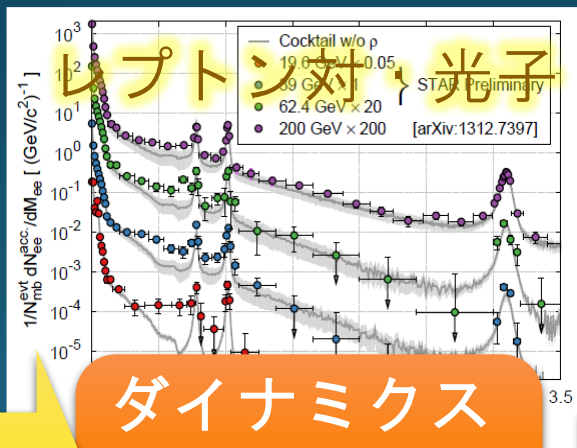
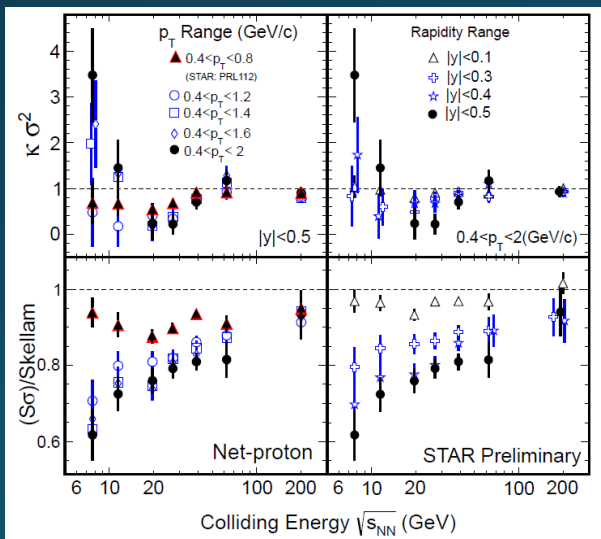
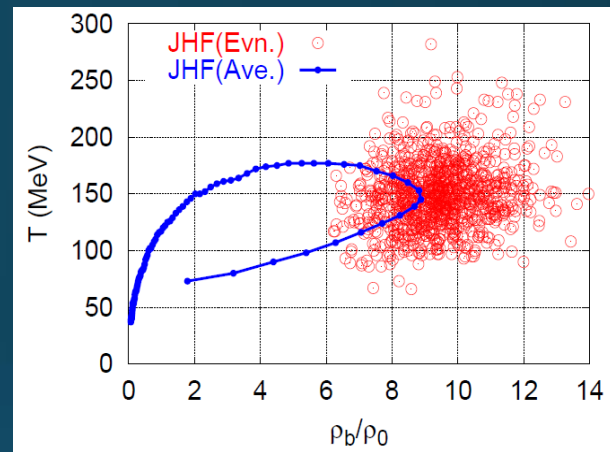
**BES=Beam Energy Scan**  
 による、  
**QCD相構造の探索**

figure from J-PARC-HI White Paper, 2016

# 様々な観測量・解析手法



フローの高統計解析



最高密度による  
イベント選択？

ダイナミクス  
とフロー

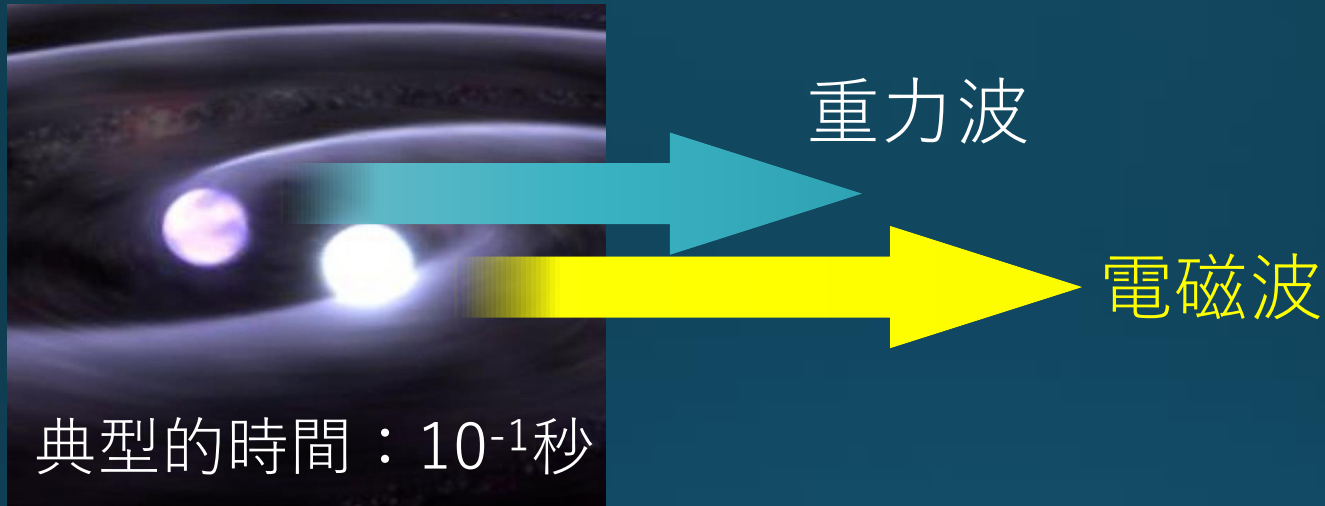
観測量と物理  
現象

4. 奈良

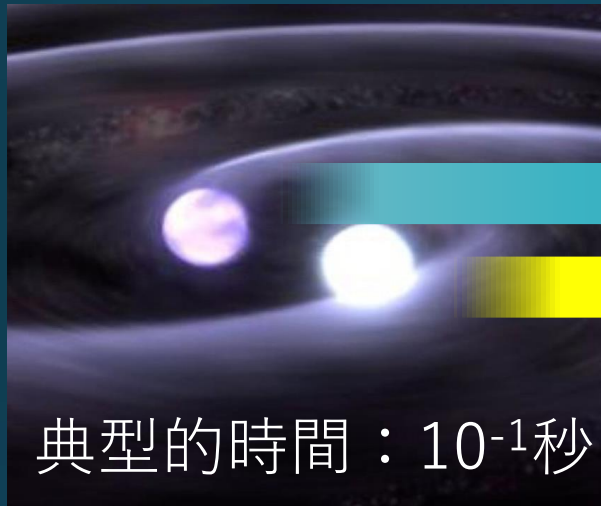
5. 坂口

保存電荷イベント毎ゆらぎ

# 観測量の階層性

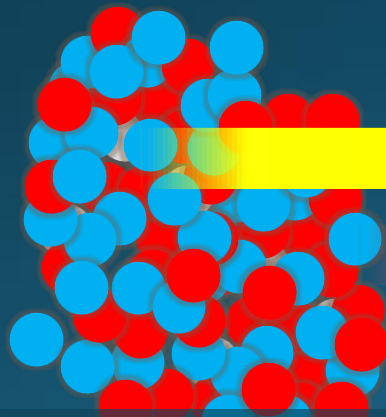


# 観測量の階層性



重力波

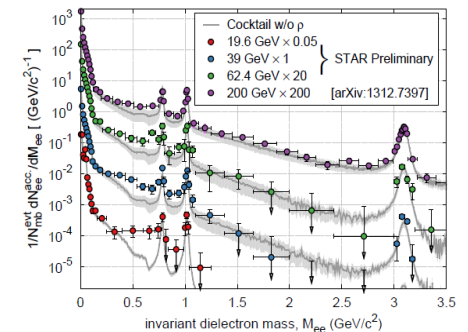
電磁波



電磁波

ハドロン観測量

レプトン対生成



※時間スケールの異なる観測量を用いた多面的解析：J-PARCが初

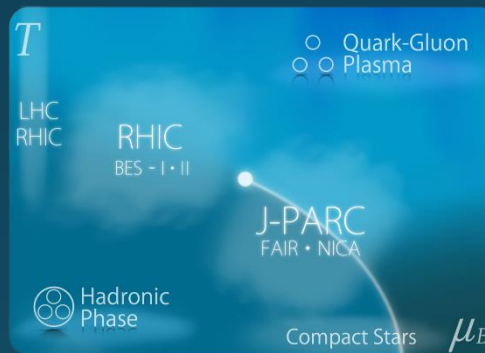
# J-PARC-HIとは？

世界最強度ビームで探る宇宙最高密度

## 3つの重要課題



極微の中性子星衝突

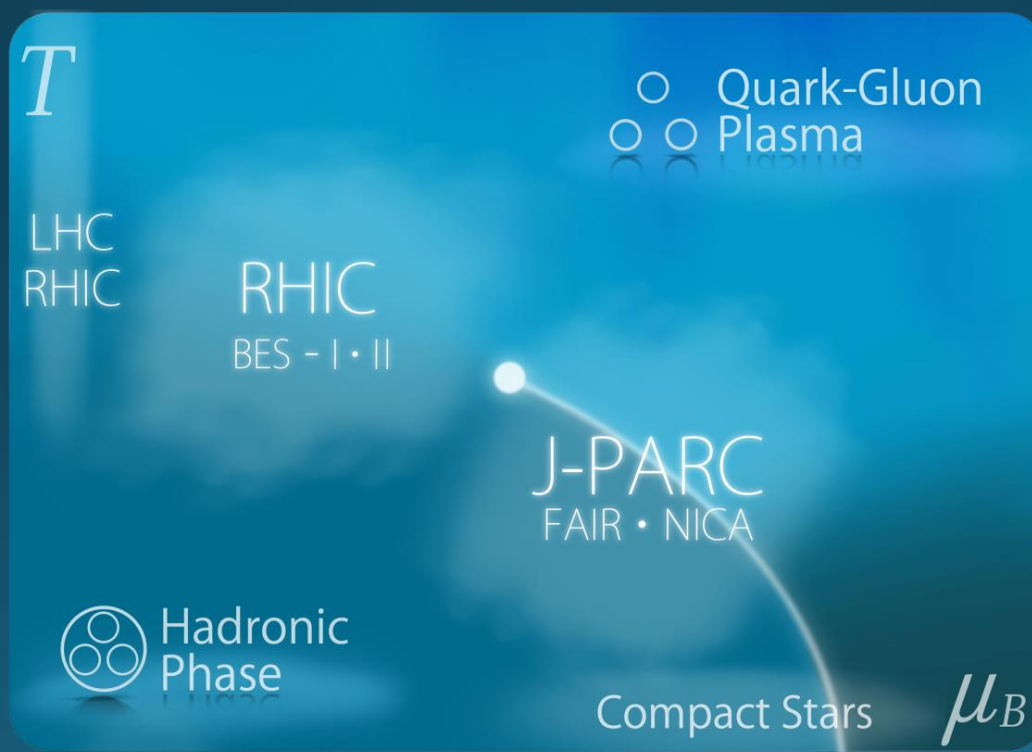


物質による真空の破壊



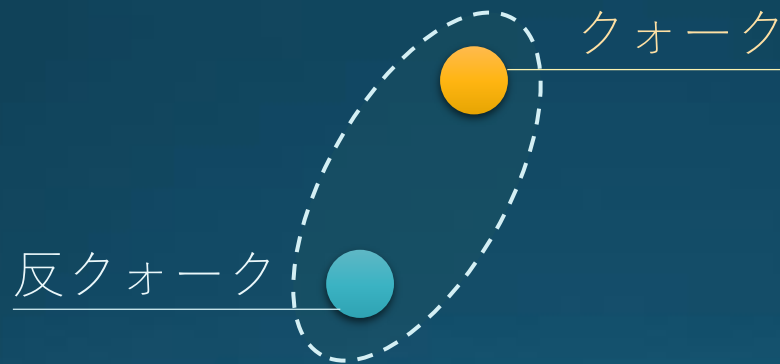
レア粒子捕獲場

# 物質による真空の破壊



# 真空 ≠ 空っぽ

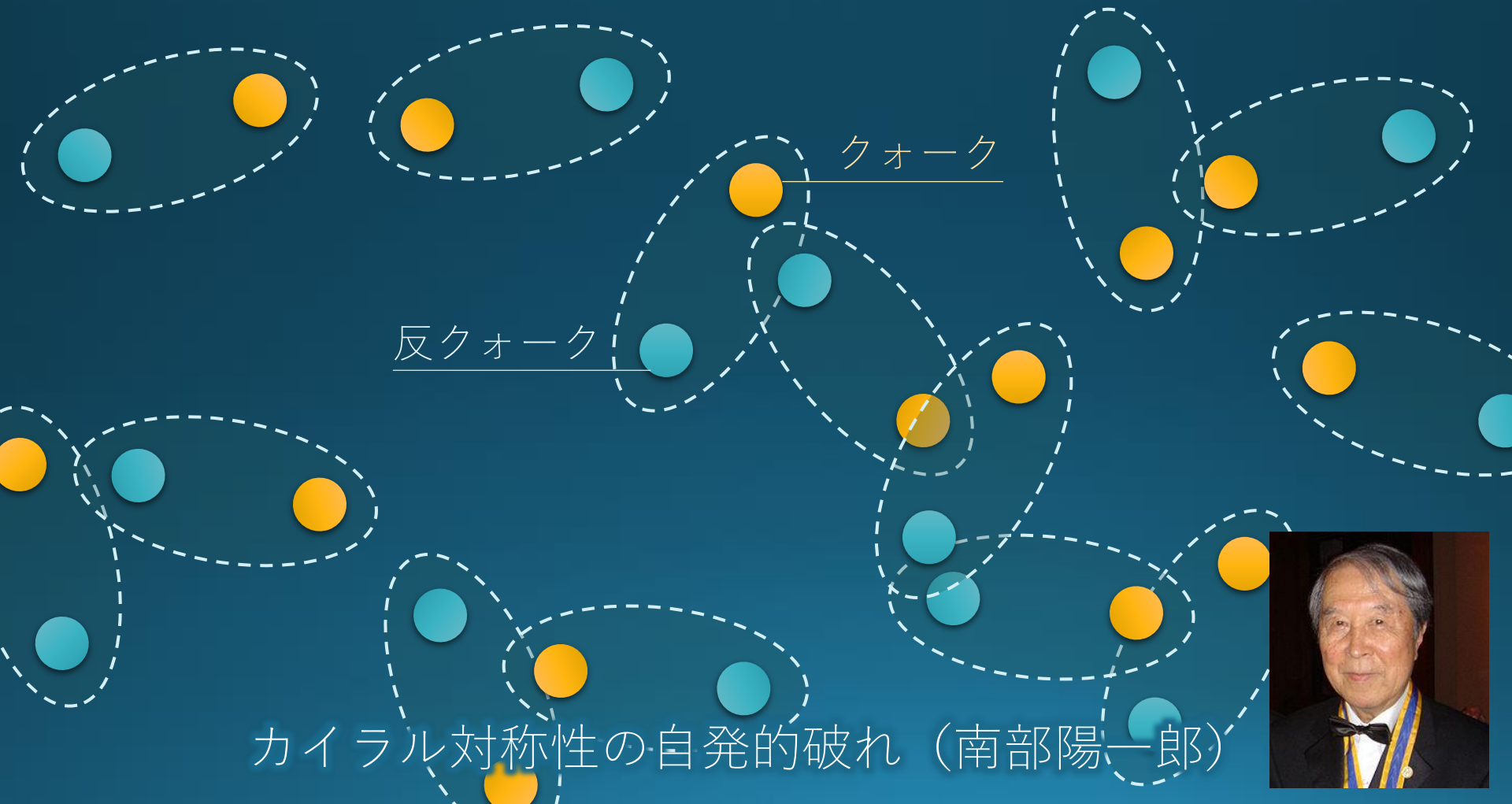
我々の真空は、クォーク反クォーク凝縮で埋め尽くされている



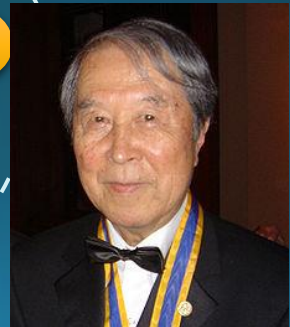


# 真空 ≠ 空っぽ

我々の真空は、クォーク反クォーク凝縮で埋め尽くされている

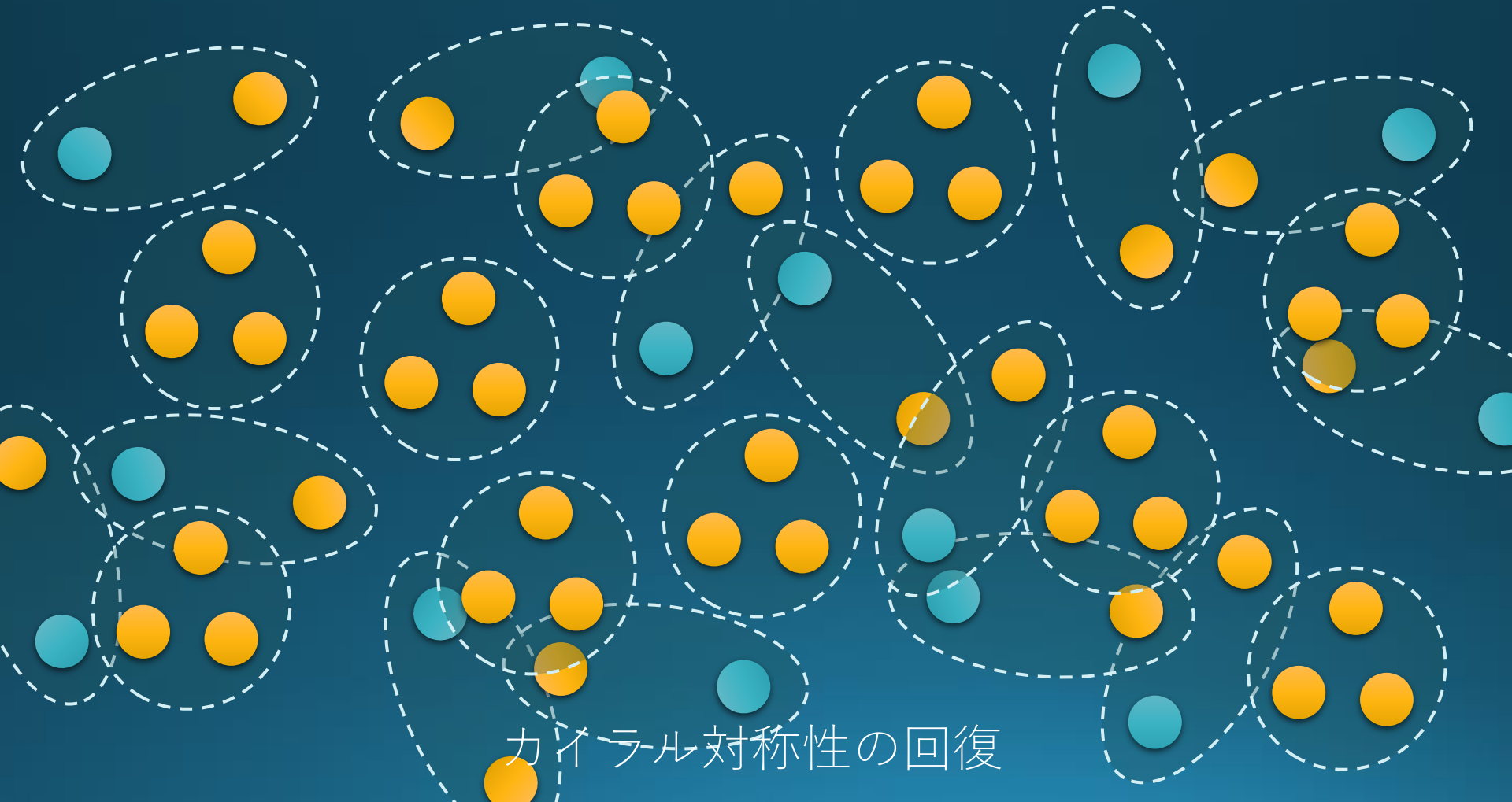


カイラル対称性の自発的破れ (南部陽一郎)



# 真空 ≠ 空っぽ

物質の存在は、真空を変質させる



カイラル対称性の回復

# 真空の一次相転移を観測せよ

QGPの生成@RHIC  
格子QCD数値実験

クロスオーバー  
転移

QCD臨界点

一次相転移

 Hadronic  
Phase

Compact Stars

$\mu_B$

○ Quark-Gluon  
○ Plasma

LHC  
RHIC

RHIC  
BES - I・II

J-PARC  
FAIR

# 真空の一次相転移を観測せよ

QGPの生成@RHIC  
格子QCD数値実験

○ Quark-Gluon  
○ Plasma

QCD臨界点

クロスオーバー  
転移

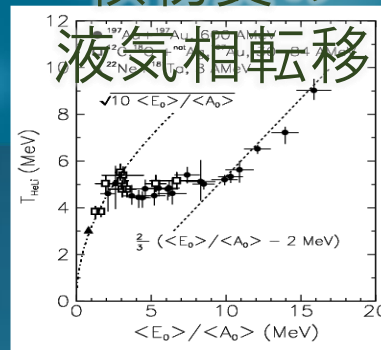
一次相転移

核物質の  
液気相転移



水の沸騰

$1\text{g/cm}^3$

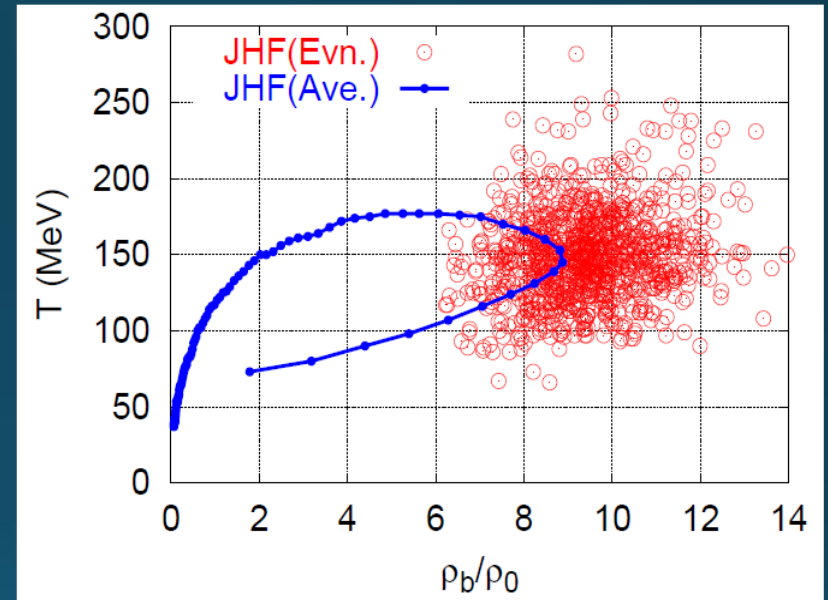
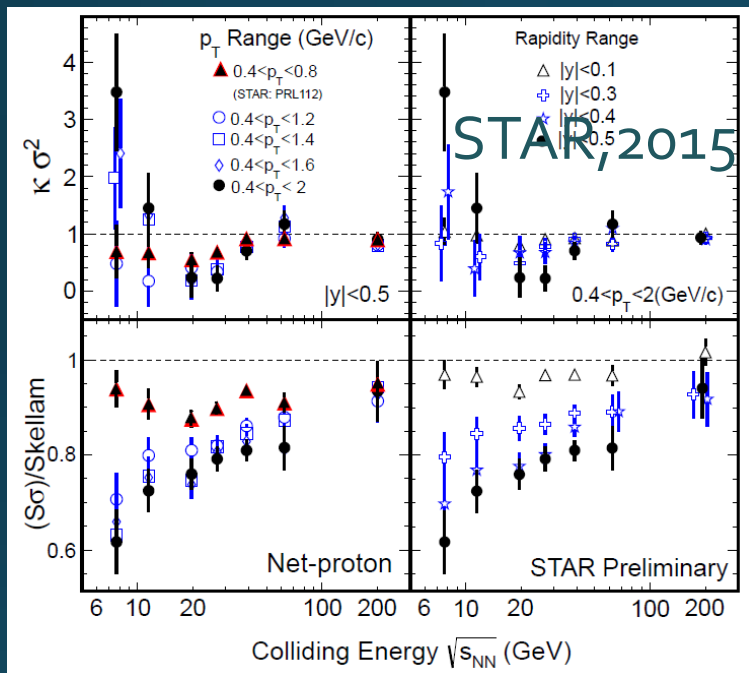


$10^{14}\text{g/cm}^3$

$\mu_B$   
カイラル  
相転移

$10^{15}\text{g/cm}^3$

# 高次相関量観測の時代へ



保存電荷イベント毎ゆらぎ  
高次キュムラント

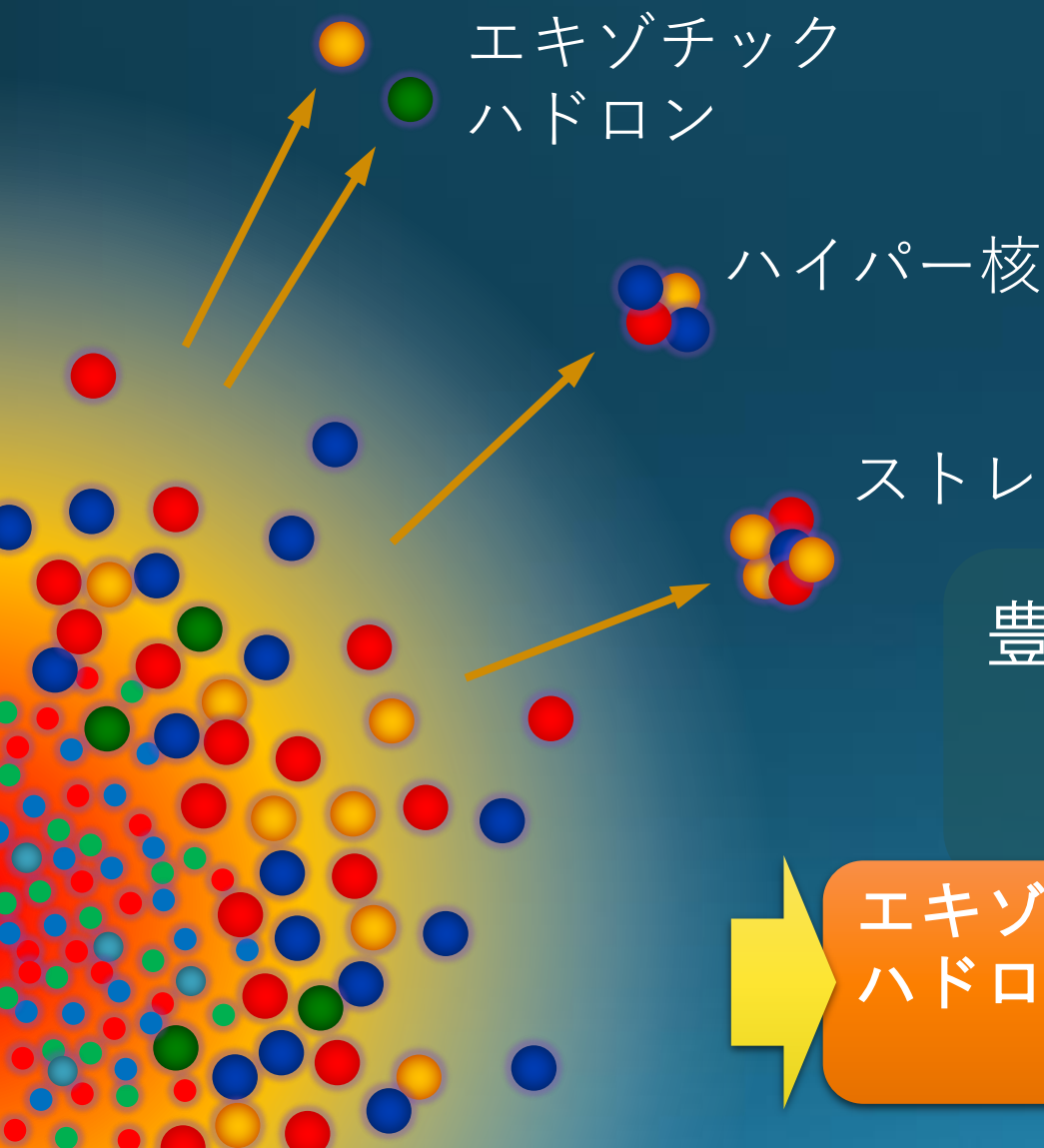
様々なトリガーによる  
イベント選択

3点・4点相関関数、フロー・粒子相関

# レア粒子捕獲場



# J-PARC-HI = レア粒子生成工場



エキゾチック  
ハドロン

ハイパー核

ストレンジレット

高密度 + 高統計

→ 稀現象の宝庫

豊富なストレンジ自由度

- 
- 負の原子番号
  - ストレンジレット

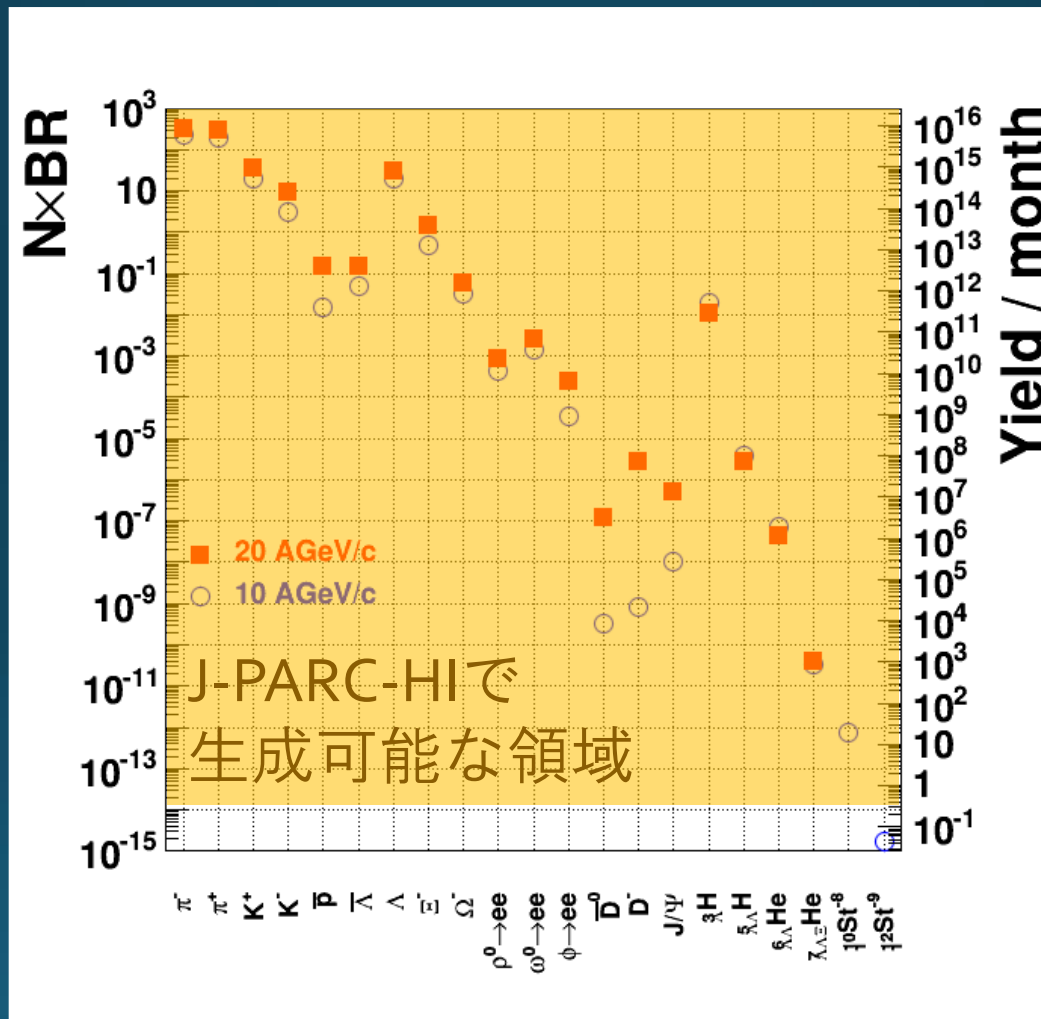
エキゾチック  
ハドロン

7. 安井

ハイパー核物  
理

8. 田村

# 生成・性質・相互作用

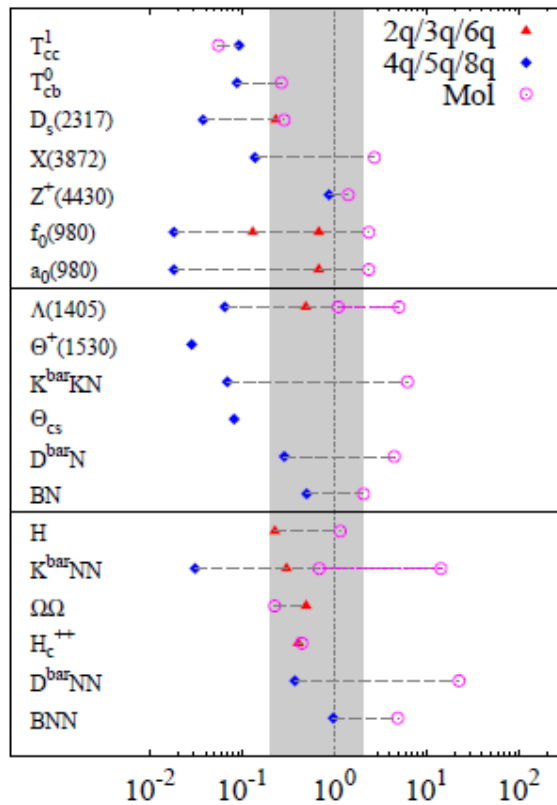


熱的模型による粒子生成率

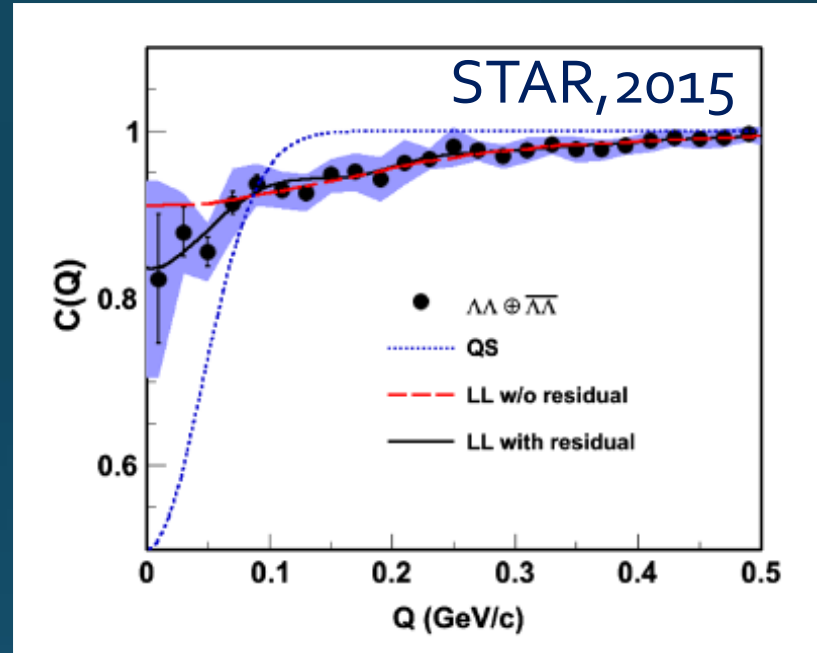


# 生成・性質・相互作用

Coalescence / Statistical model ratio at RHIC



粒子収量を用いた  
ハドロン構造の理解  
ExHIC, 2012



相関関数による  
粒子間相互作用の測定  
Morita, Furumoto, Ohnishi, 2015

J-PARC-HI=  
レア粒子の捕獲+性質調査

# 理論的挑戦

## RHICでの発見

- QGPの生成
- 流体描像の成功
- 早い熱化
- (ブースト不変性)



低エネルギーでは破綻



## J-PARC-HIに向けて

- 動的描像の確立
- 破綻する様相の理解

- RHIC / LHCで得た知見に基づく、低エネルギー領域の研究
- 理論物理は、単純な領域から複雑な領域へ



$T$   
LHC  
RHIC  
RHIC  
BES - I + II  
J-PARC  
FAIR • NICA  
Hadronic Phase  
Compact Stars

Quark-Gluon  
Plasma  
QCDの物性物理  
QCD相構造  
極限状態の相転移



中性子星

J-PARC-HI

世界最強度ビームで探る宇宙最高密度

# QCD・標準模型が持つ 豊かな自然現象の理解へ



## J-PARC-HI

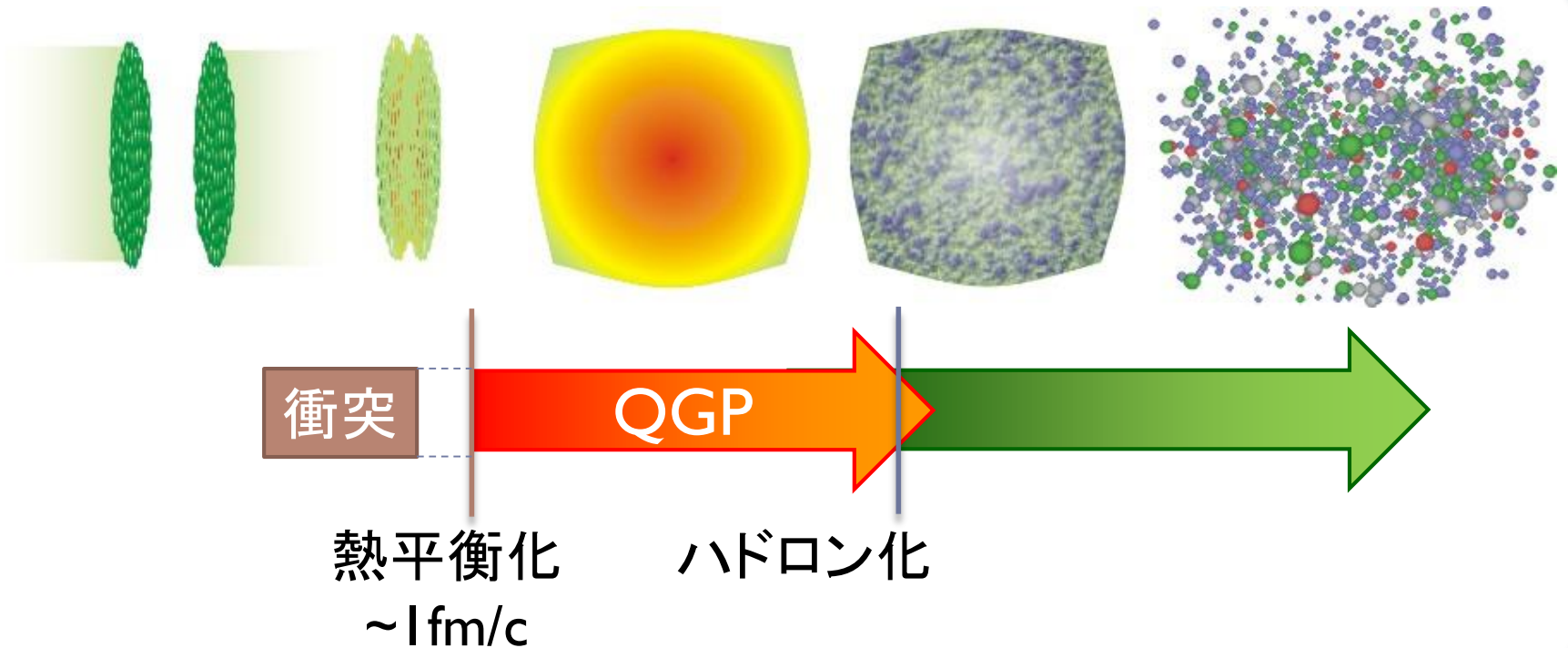
# 世界最強度ビームで探る宇宙最高密度

# まとめ

- J-PARC重イオン衝突実験計画は、**世界最強度**ビームで、**宇宙最高密度**を目指すユニークな実験計画
- 様々な物理の解明が期待される
  - 高密度の物理：中性子星EOS、QCD相構造、一次相転移
  - ハドロン物理：エキゾチックハドロン、ハイパー核

**将来計画の実現に向け、  
皆様の忌憚のないご意見・ご協力を！**

# 相対論的重イオン衝突



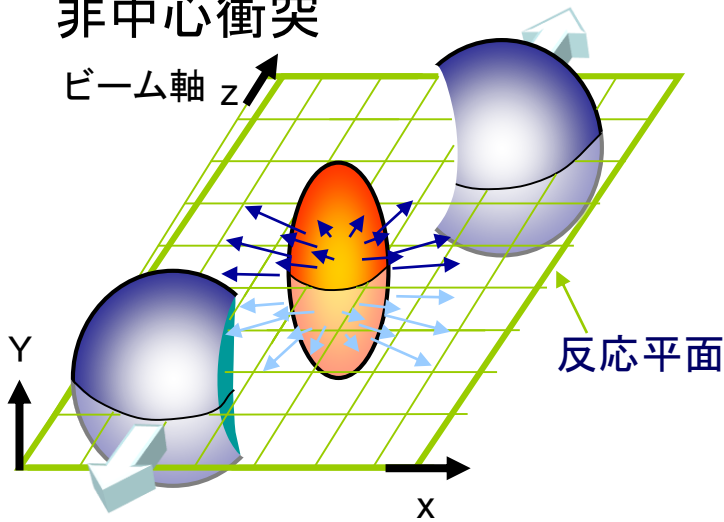
## □ RHICの発見

- 流体模型の成功
- ジェットの消失・クォーク数スケーリング

# フロー（物質の流れ）

非中心衝突

ビーム軸 z

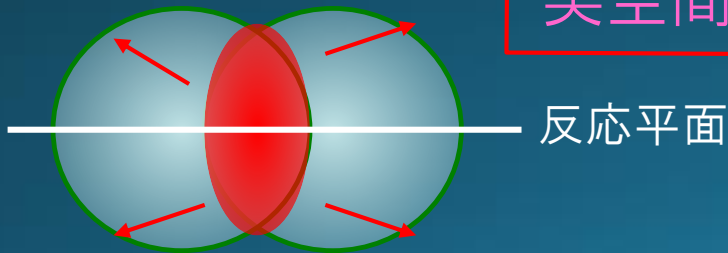


非中心衝突では、  
粒子は非等方的に放出される。

角度方向の異方性

$$\frac{dN}{d\phi} \sim 1 + v_1 \cos \phi + v_2 \cos 2\phi + \dots$$

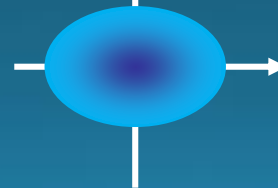
実空間



反応平面



$v_2 > 0$



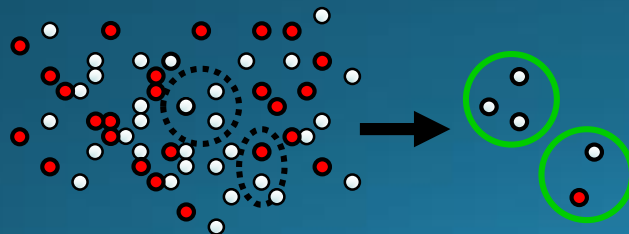
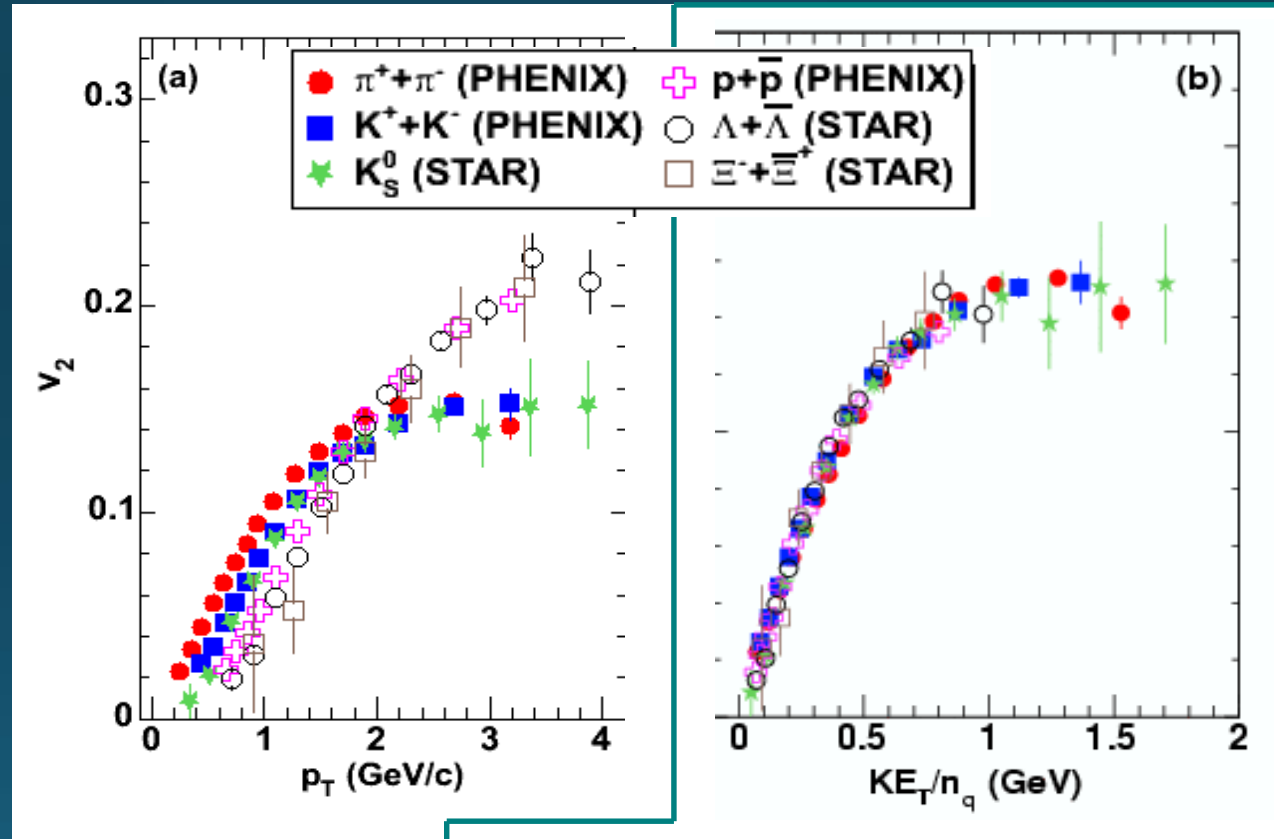
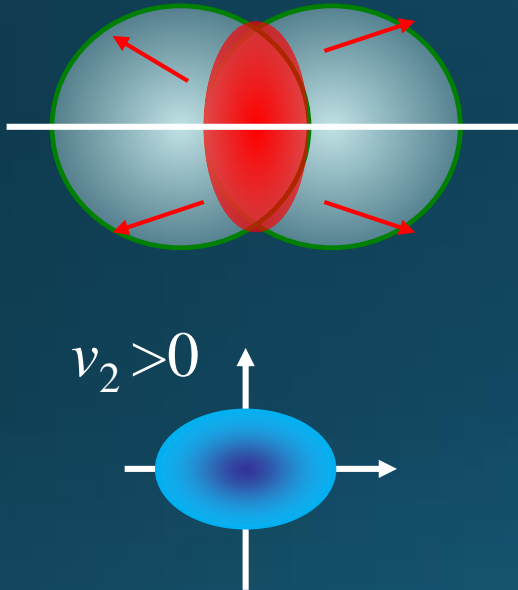
$v_2 < 0$



$p_T$ 空間

# 楕円フロー $v_2$

楕円フロー  $v_2$



運動量をクォーク数で割算  
→ 流れがぴったり重なる！



