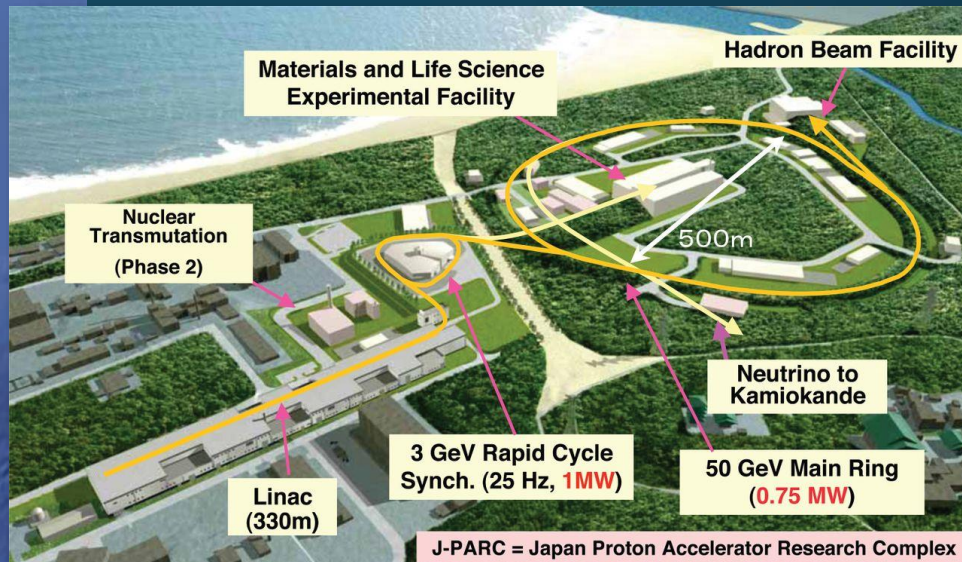


北沢正清（大阪大学）

J-PARCが目指す 重イオン衝突実験

J-PARC

Japan **Proton** Accelerator Research Complex



大強度陽子ビーム(~50GeV)を用いたハドロン・素粒子実験

J-PARC

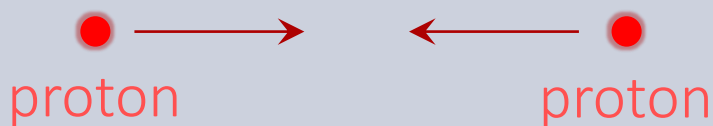
Japan Proton Accelerator Research Complex



大強度陽子ビーム(~50GeV)を用いたハドロン・素粒子実験

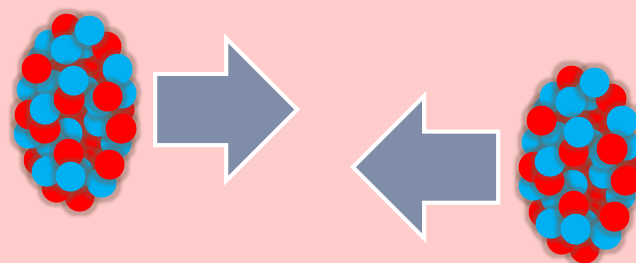
重イオン衝突実験

陽子・陽子衝突



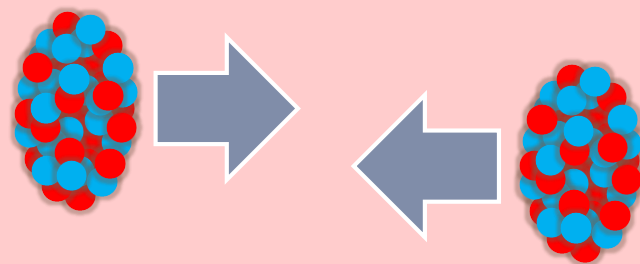
素過程の重ね合わせ
粒子探索等

重イオン衝突

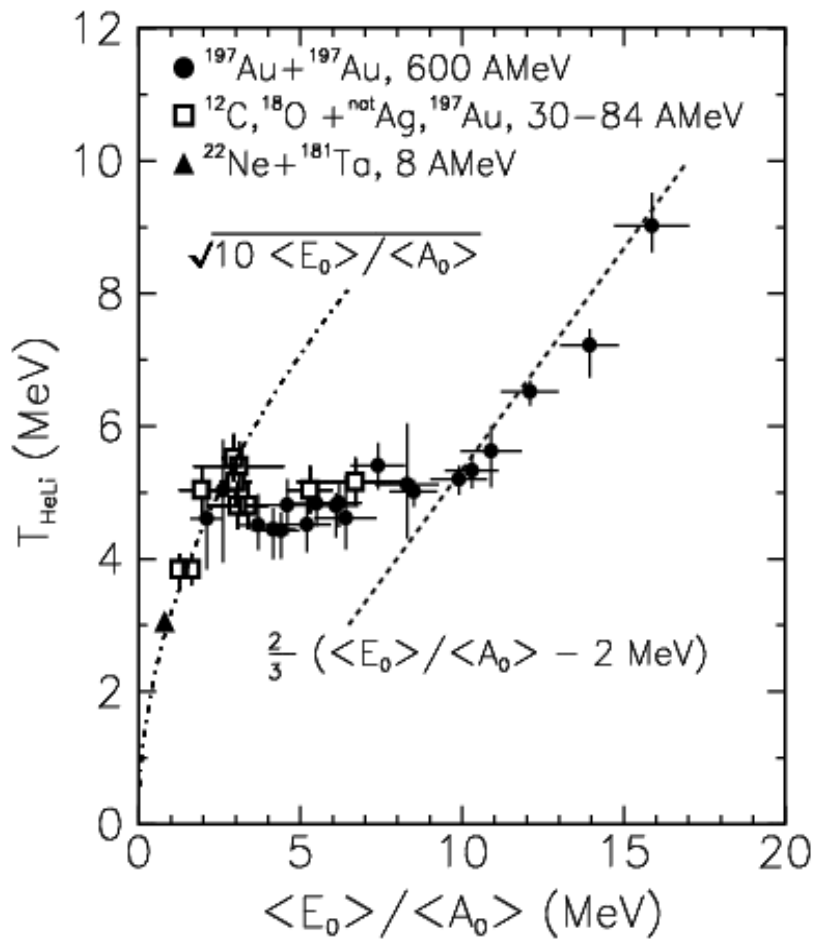
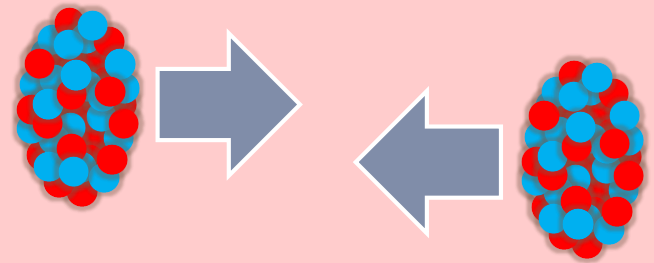


統計力学系の生成
高温物質の探索

重イオン衝突



重イオン衝突



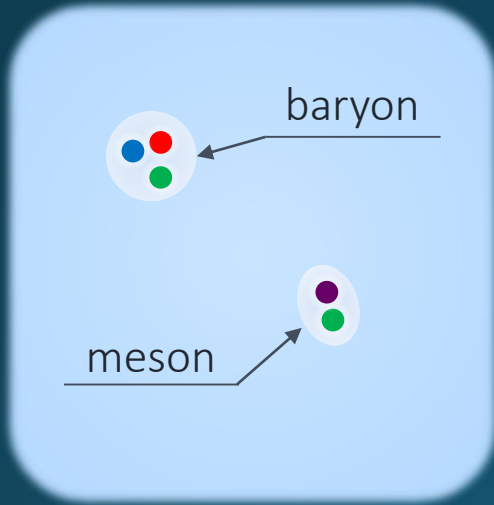
核物質の液気相転移

$$\sqrt{s_{\text{NN}}} \sim 300 \text{ MeV}$$

GSI-ALLADIN collab.,
PRL 75 (1995) 1040.

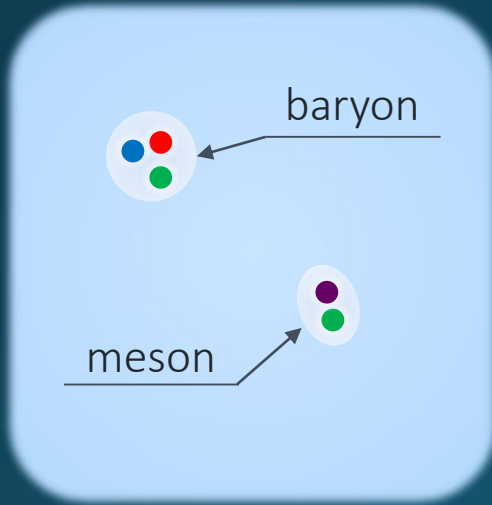
Quark-Gluon Plasma (QGP)

vacuum



Quark-Gluon Plasma (QGP)

vacuum



As T increases ...

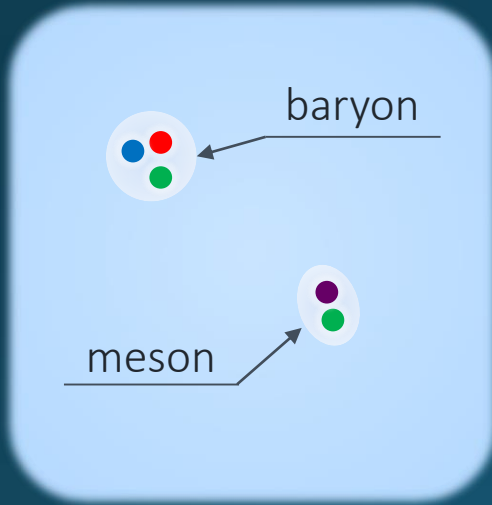


Early Universe



Quark-Gluon Plasma (QGP)

vacuum



As T increases ...

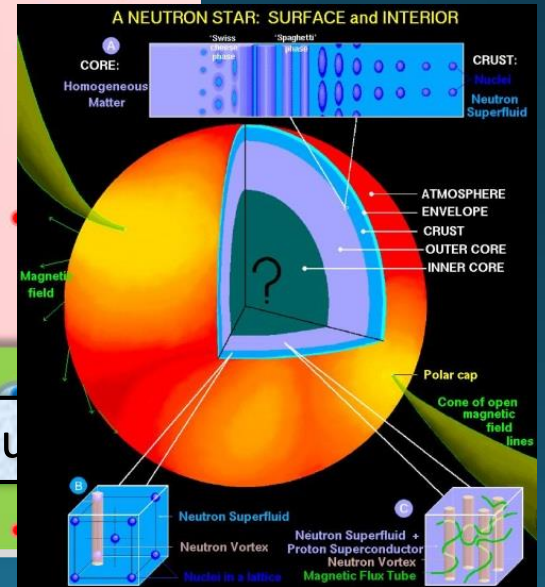
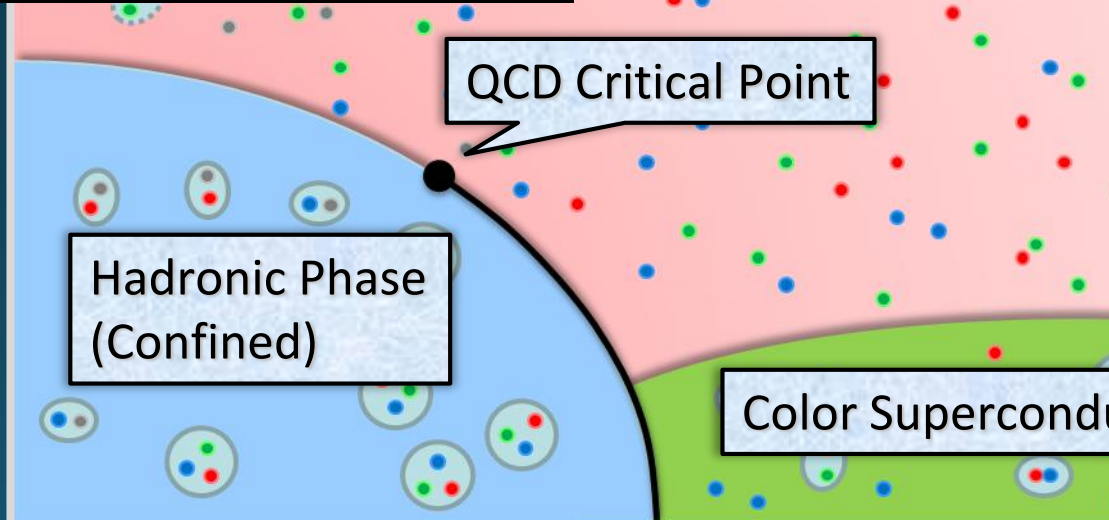
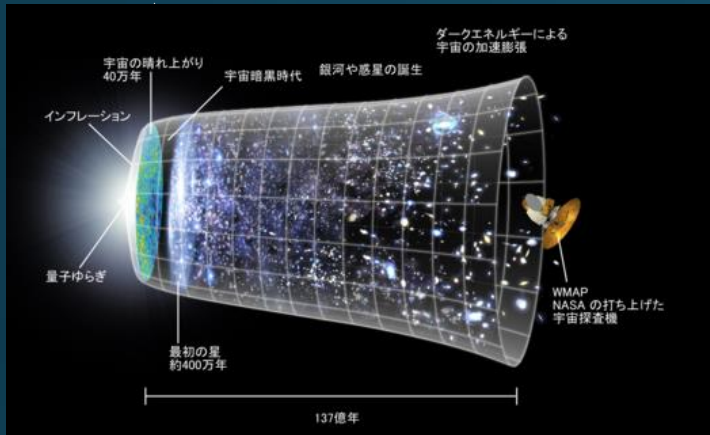


quark-gluon plasma

Early Universe

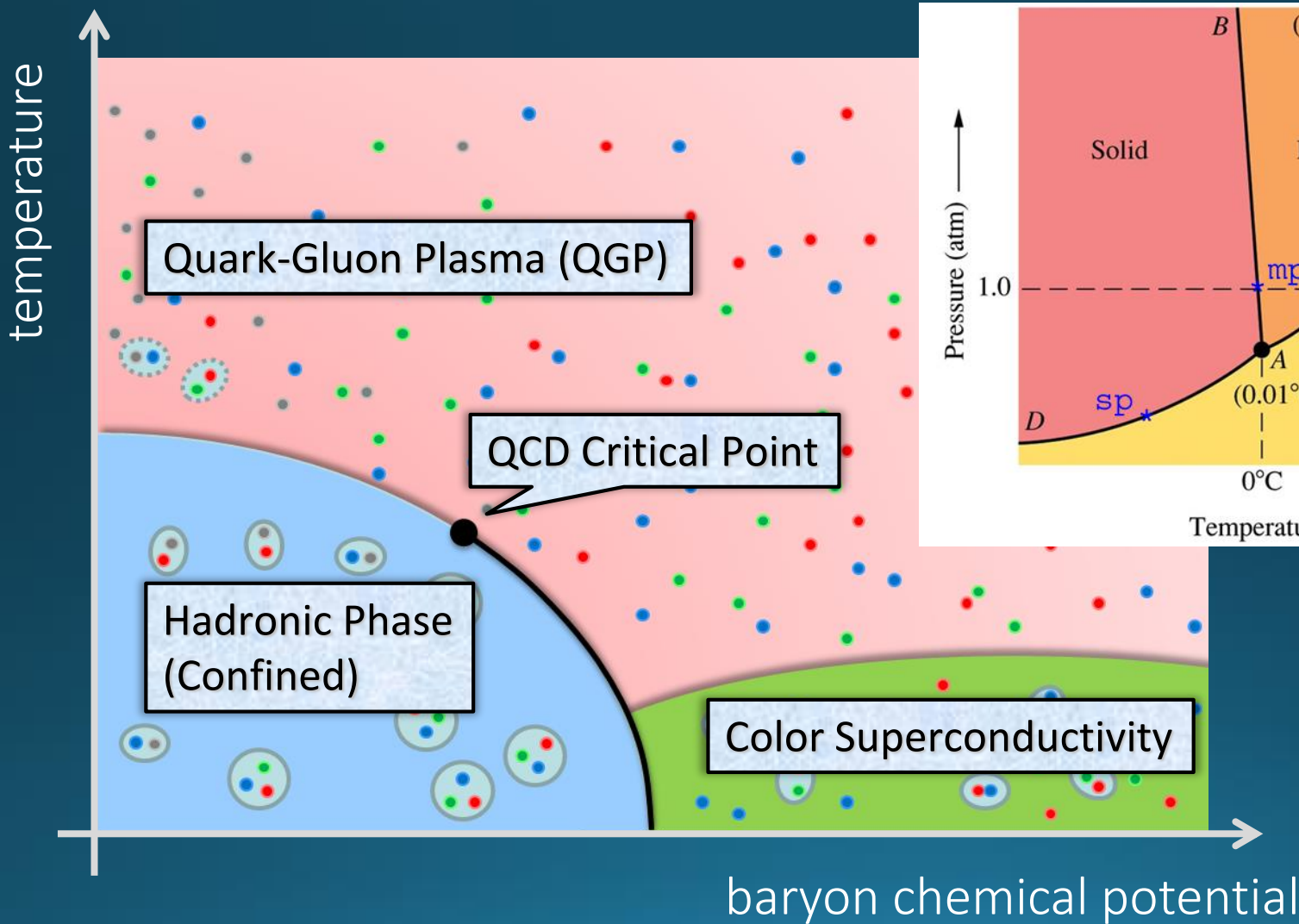


QCD相図

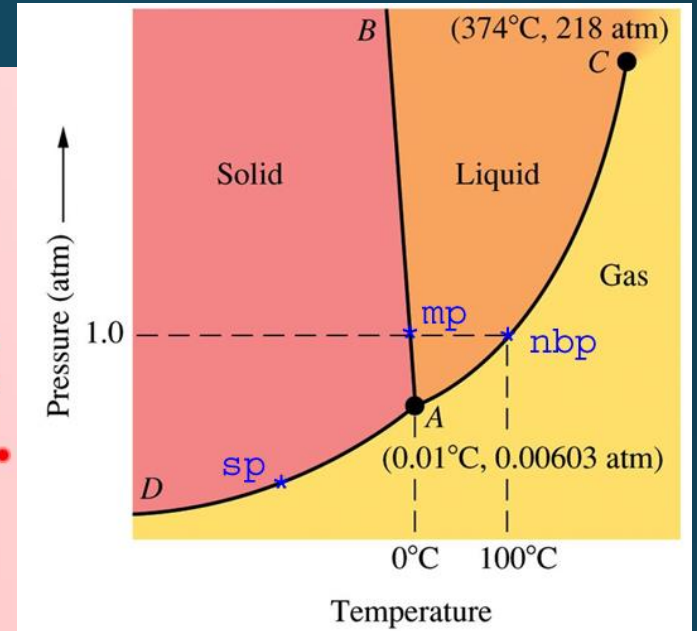


baryon chemical potential

QCD 相図



Phase diagram of water



衝突エネルギーの変遷



1 GeV

10 GeV

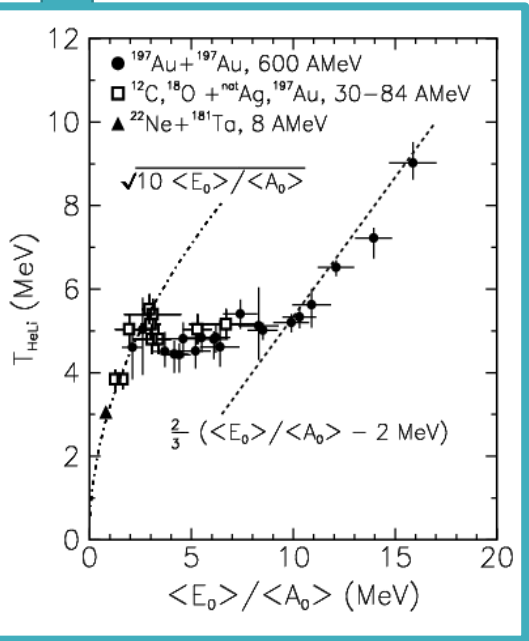
100 GeV

$\uparrow \sqrt{s_{NN}}$

AGS 1992~
SPS 1994~

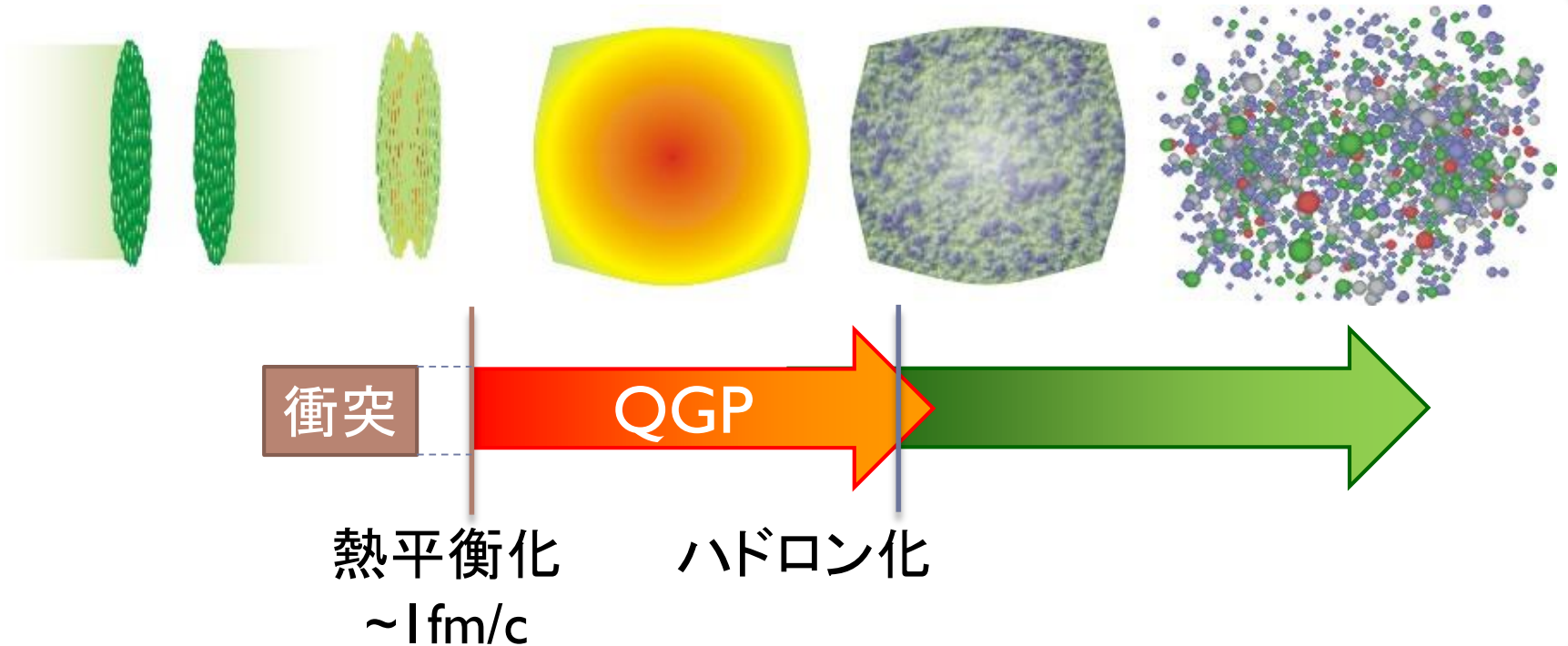
top RHIC
200GeV
2000~

LHC \rightarrow
2.76TeV
2010~



相対論的重イオン衝突の歴史は、
高エネルギー化の歴史

相対論的重イオン衝突

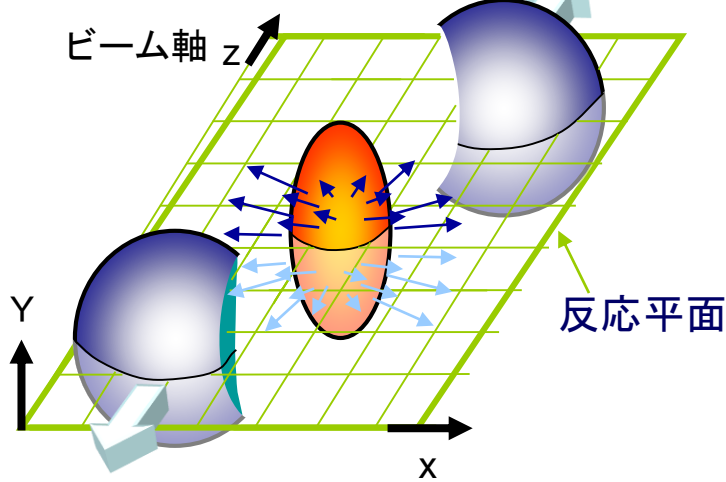


□ RHICの発見

- 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

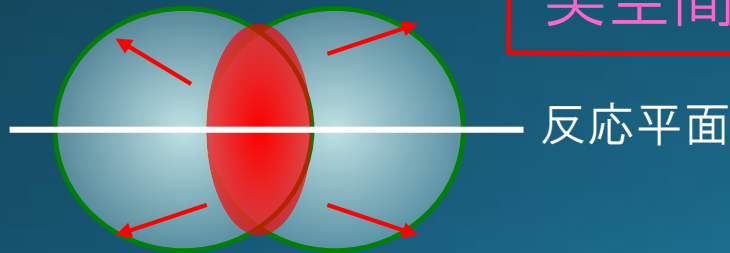


非中心衝突では、
粒子は非等方的に放出される。

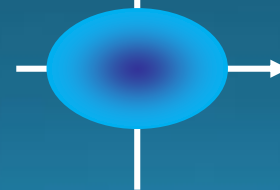
角度方向の異方性

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

実空間



$v_2 > 0$



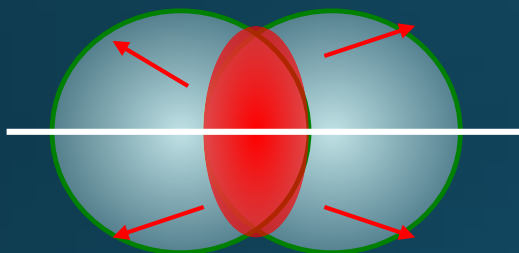
$v_2 < 0$



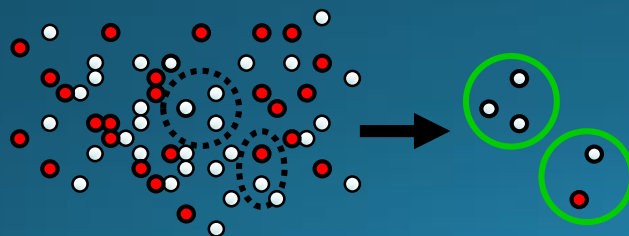
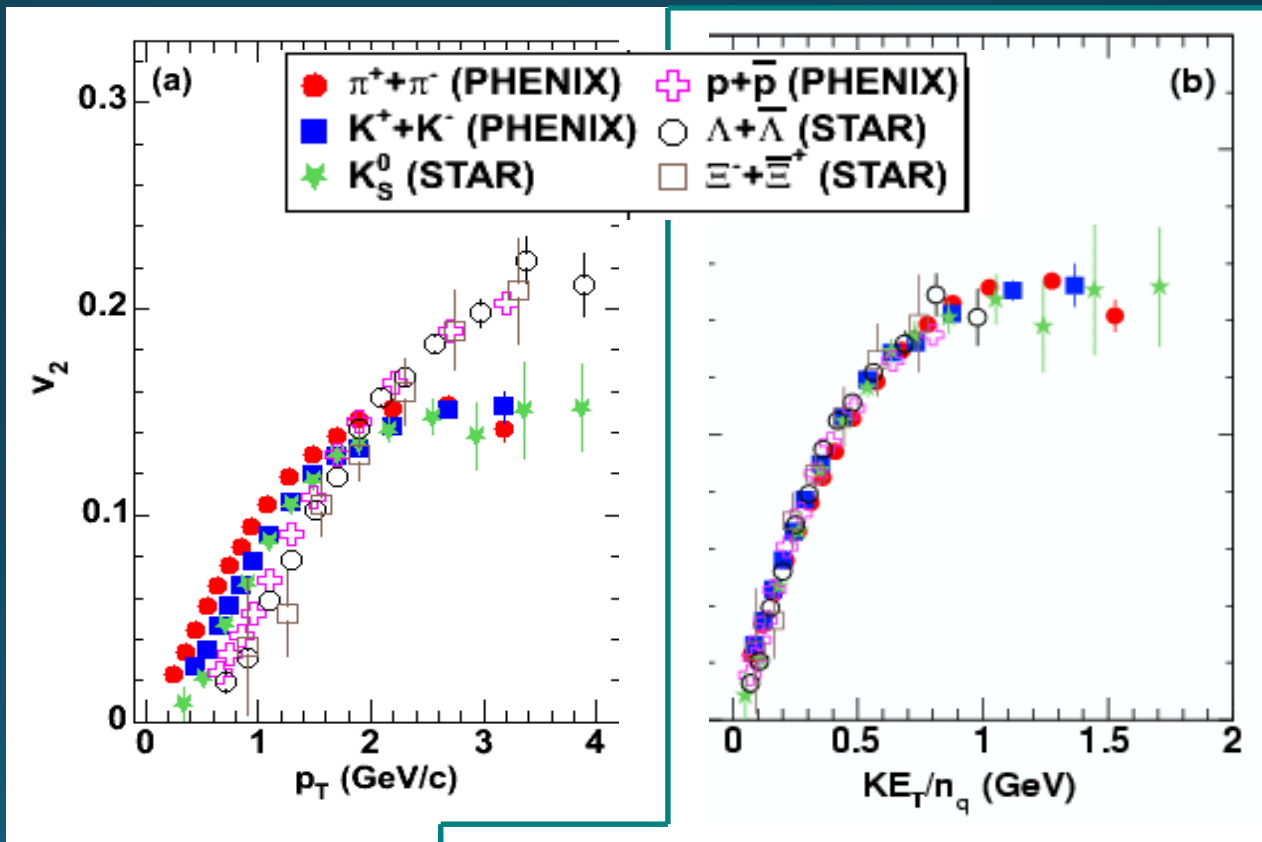
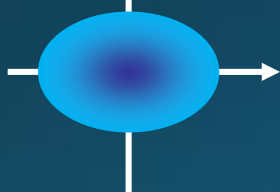
p_T 空間

楕円フロー v_2

楕円フロー v_2

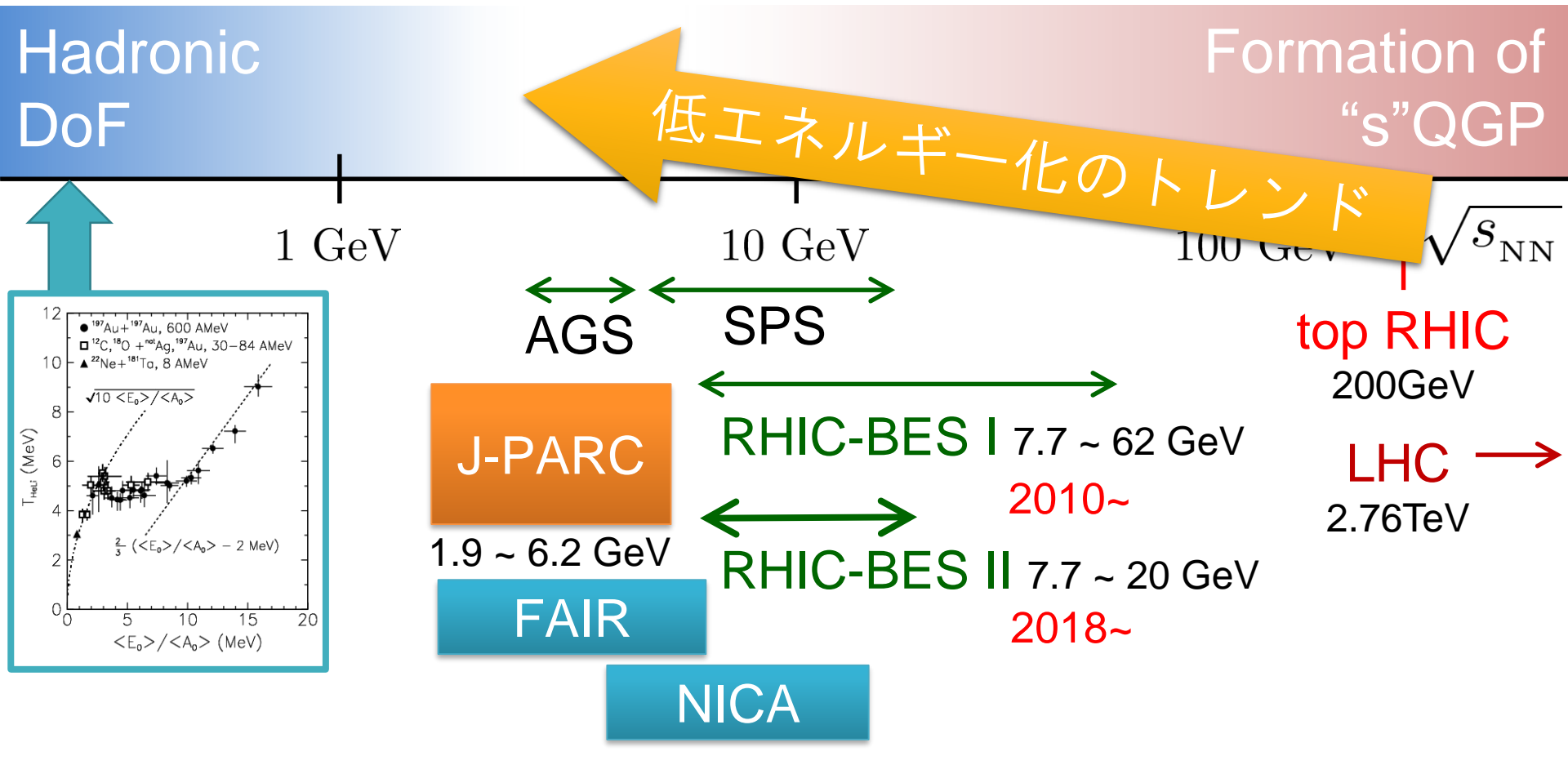


$v_2 > 0$



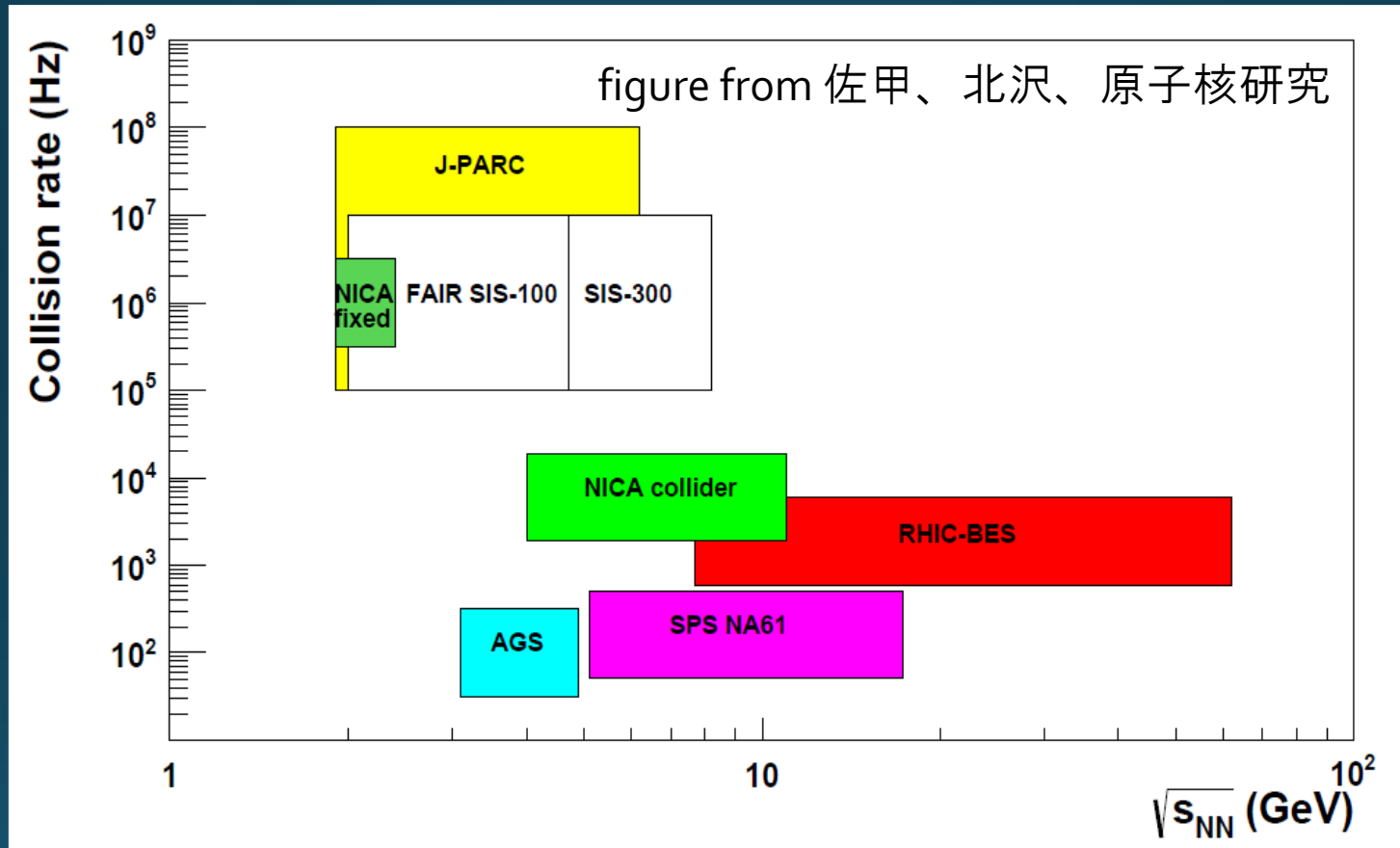
運動量をクォーク数で割算
→ 流れがぴったり重なる！

衝突エネルギーの変遷



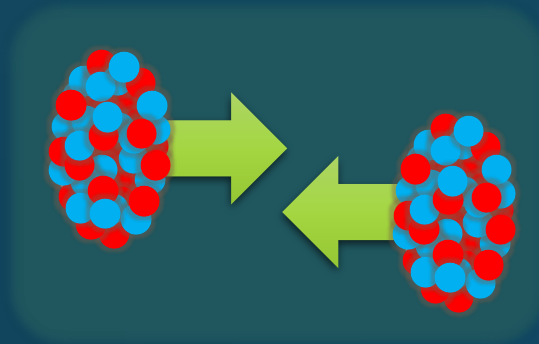
“Beam-energy scan (BES)プログラム”

J-PARC重イオン衝突の特徴

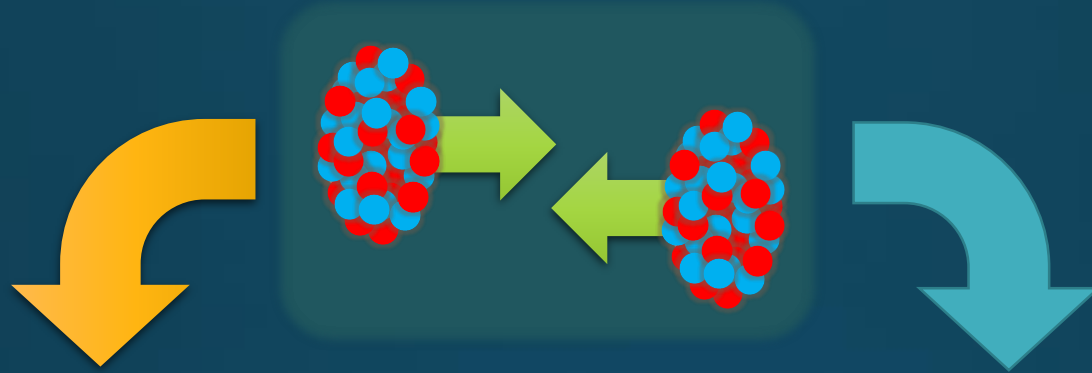


- 超高輝度ビーム・衝突レート
- 新しい検出器技術・性能向上

衝突Eと、バリオン数密度

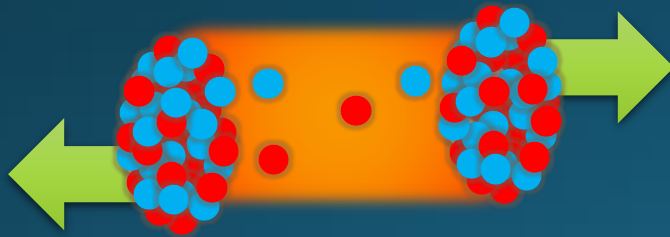


衝突Eと、バリオン数密度

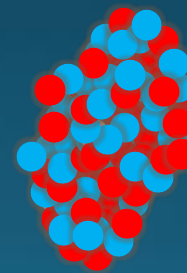


高エネルギー衝突

低エネルギー衝突



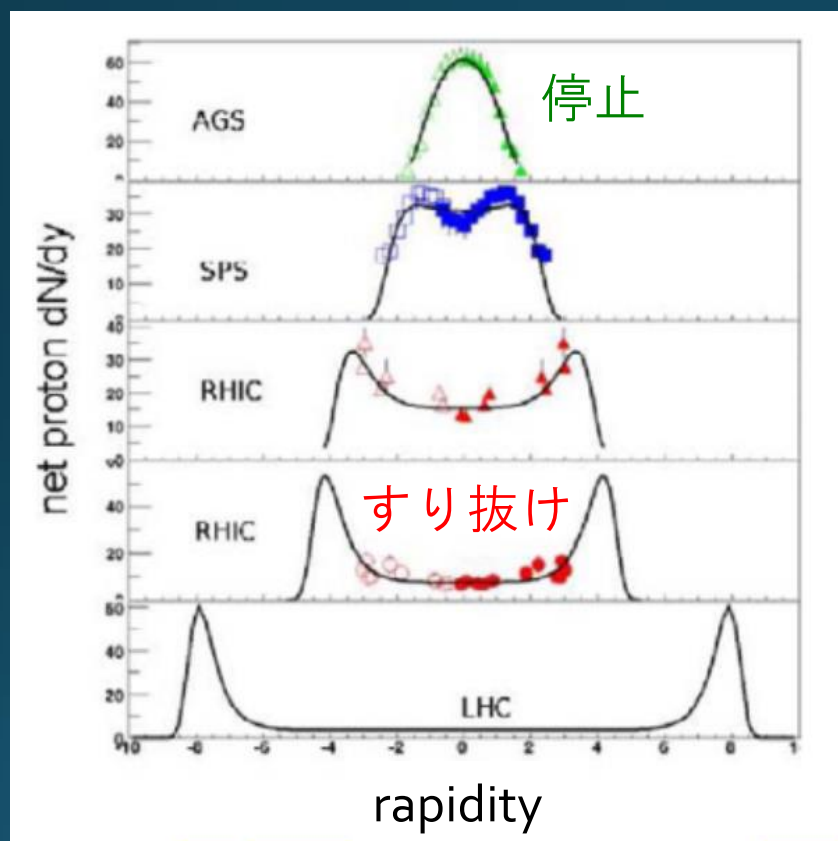
核子は突き抜ける
正味バリオン数：小



核子が止まる
正味バリオン数：大

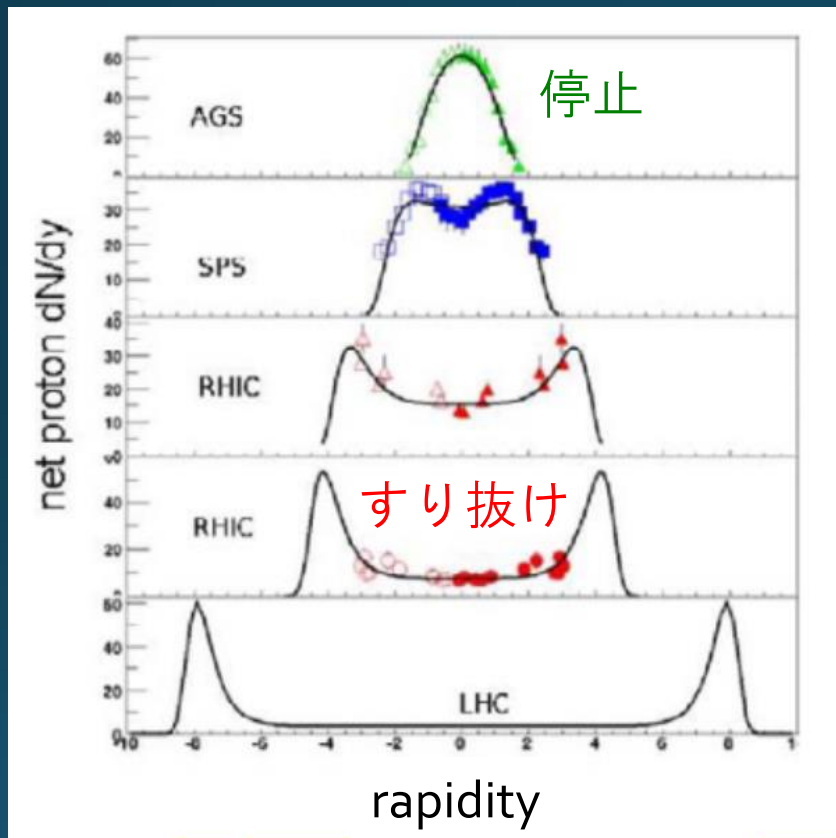
バリオン減速

正味陽子数の y 依存性

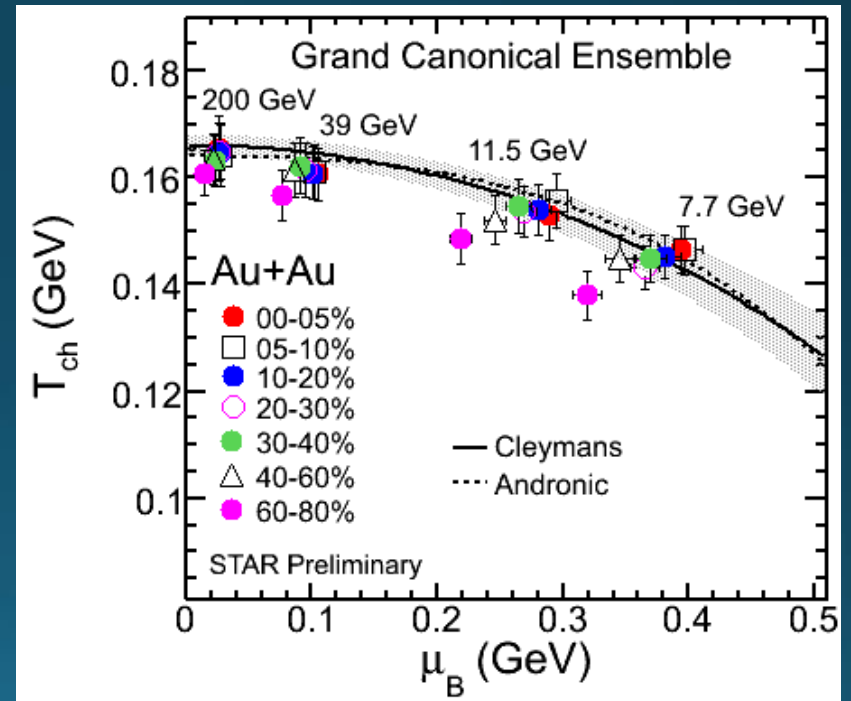


バリオン減速

正味陽子数の y 依存性

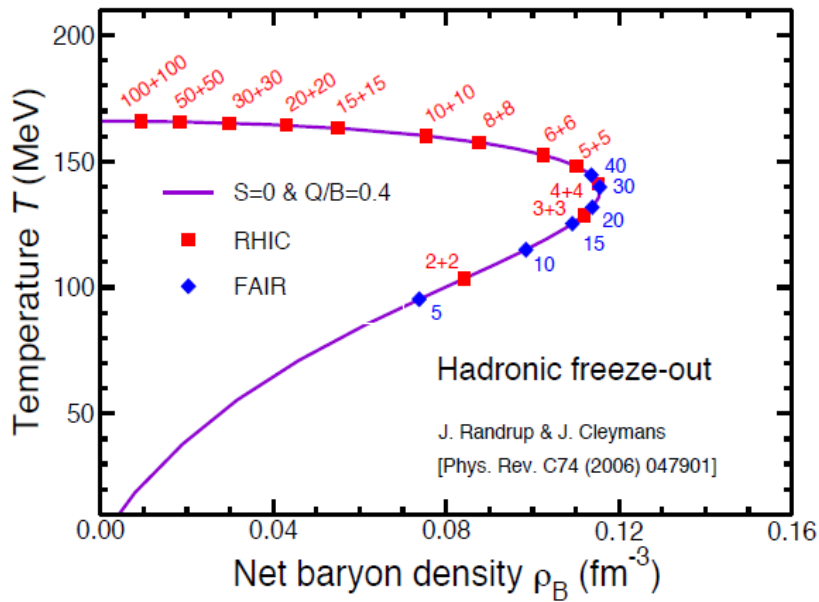


粒子収量比から定義した
温度・化学ポテンシャル

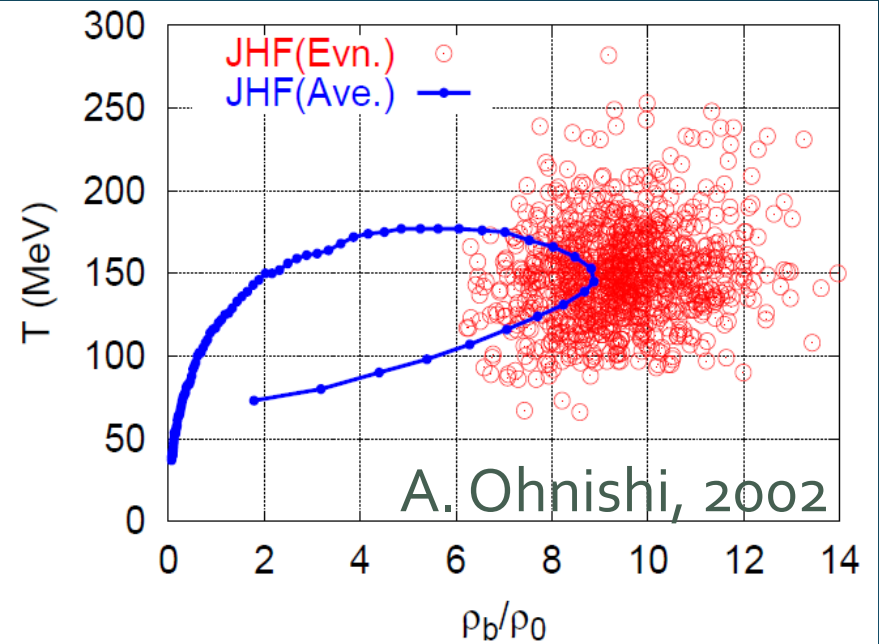


最高密度は？

フリーズアウト時の密度

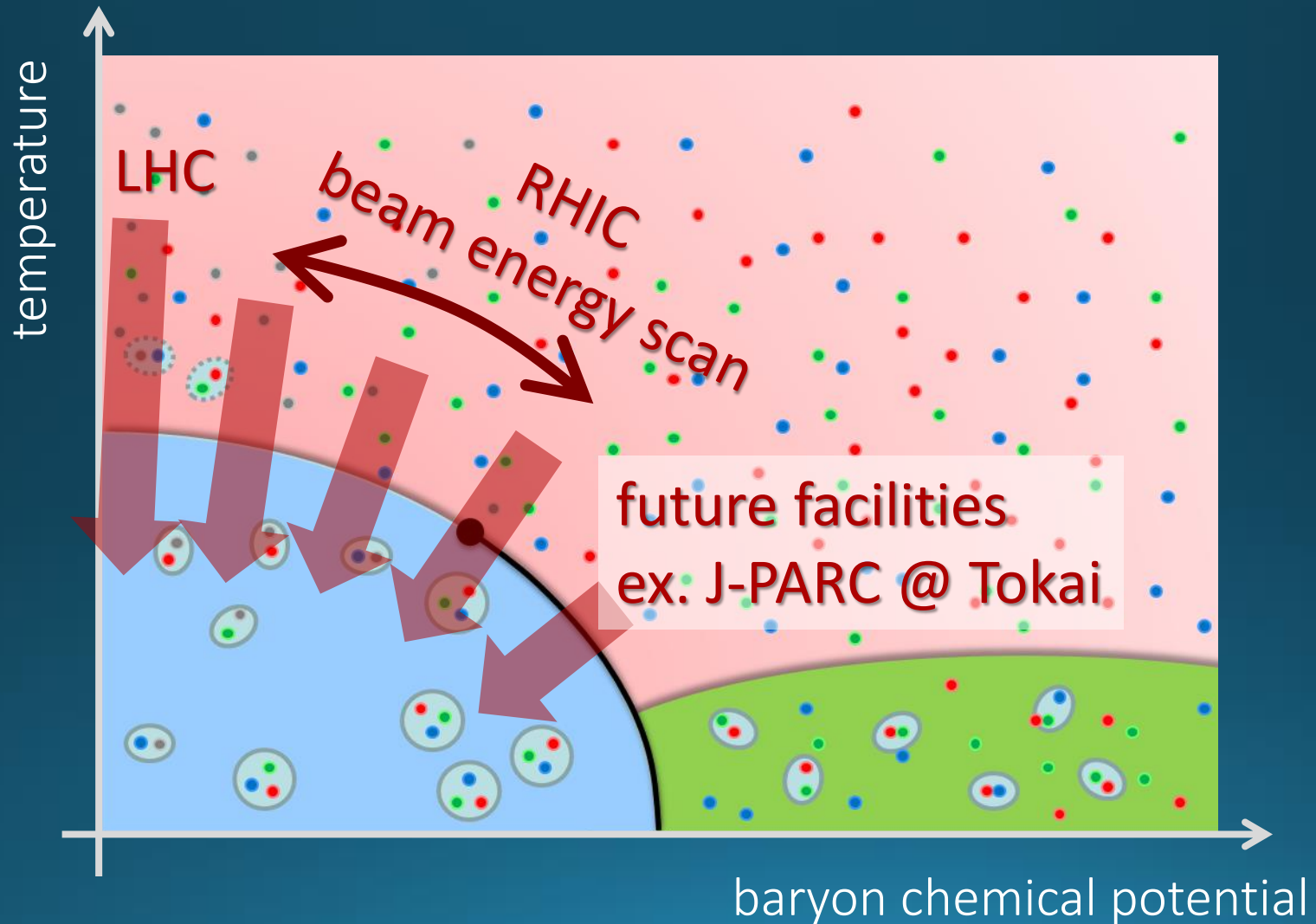


T-ρ平面上の時間発展

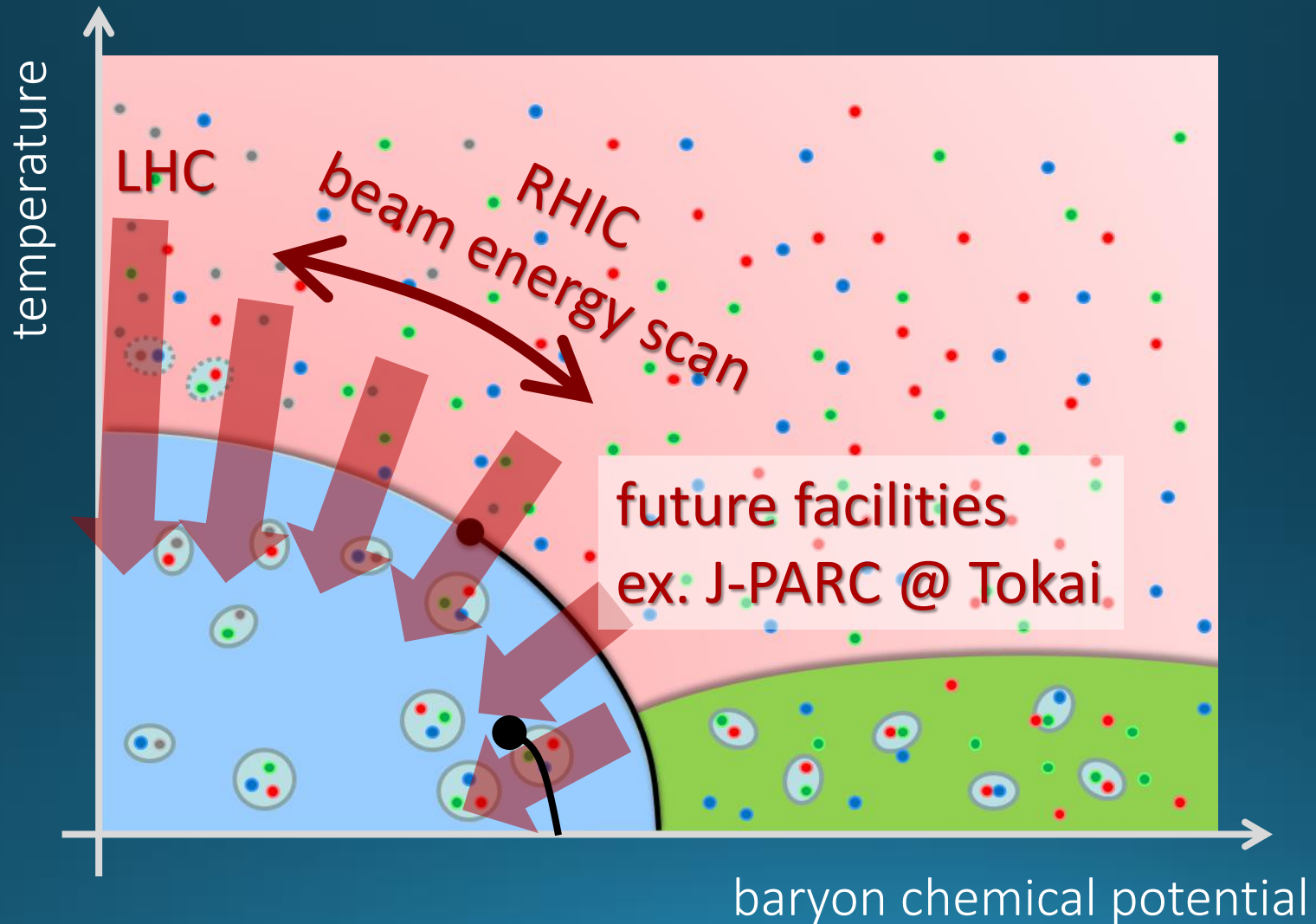


- 最高密度はJ-PARCエネルギー付近で達成されそう。
- 最高密度は $5 \sim 10\rho_0$ 。
- 密度は大きなイベント毎ゆらぎ？

Beam-energy Scan



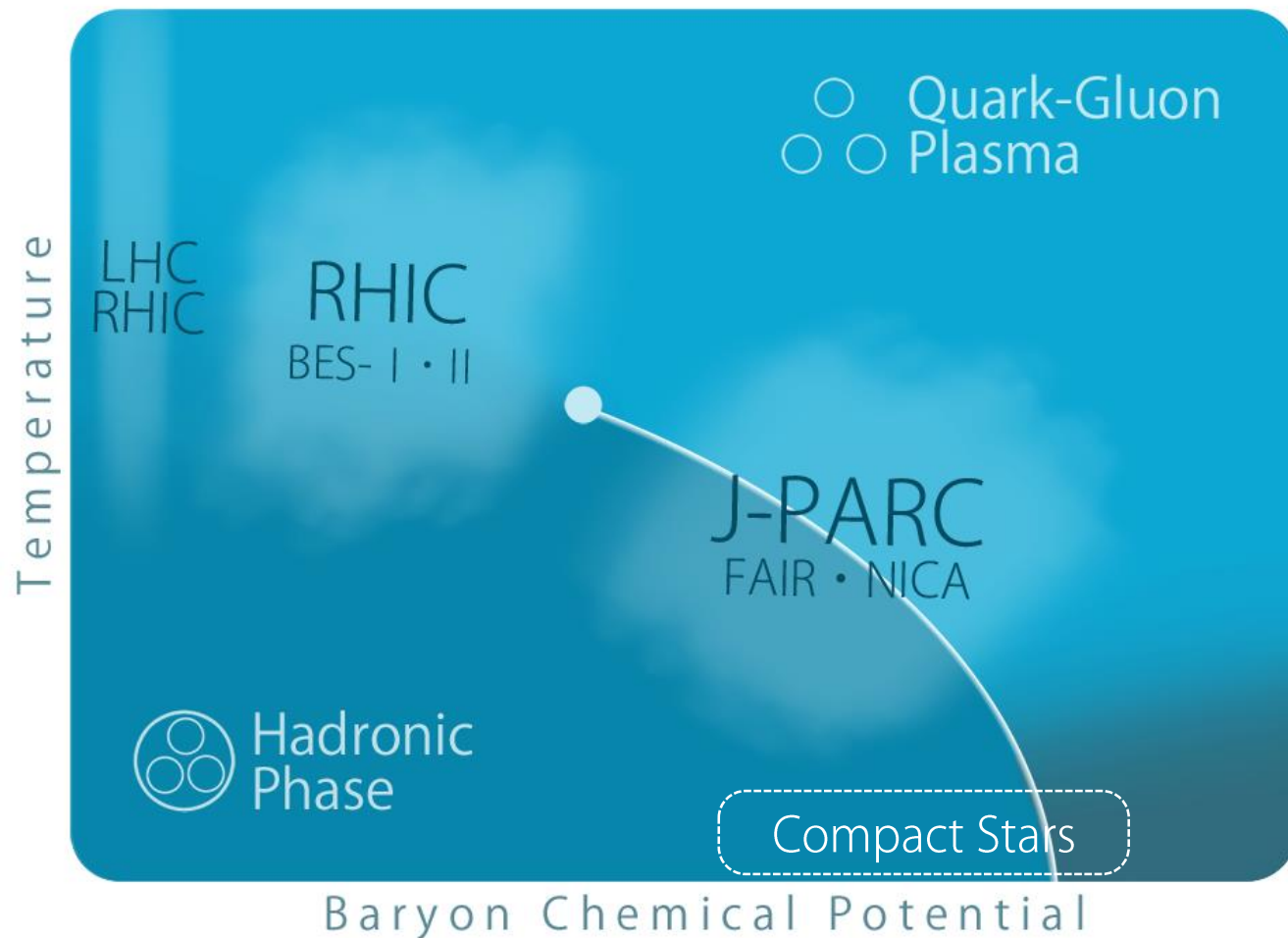
Beam-energy Scan



Q C D 相図(J-PARC ver.)

Special Thanks to
C. Matsumura

QCD 相図(J-PARC ver.)

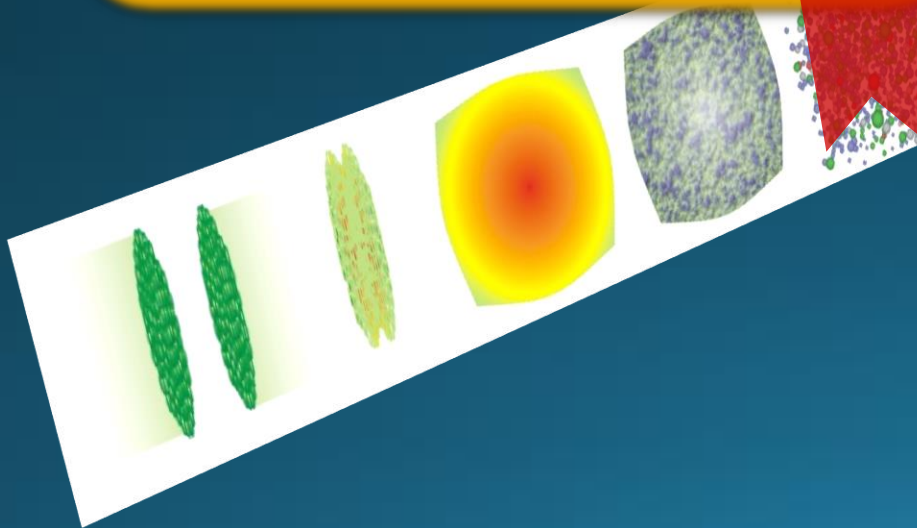
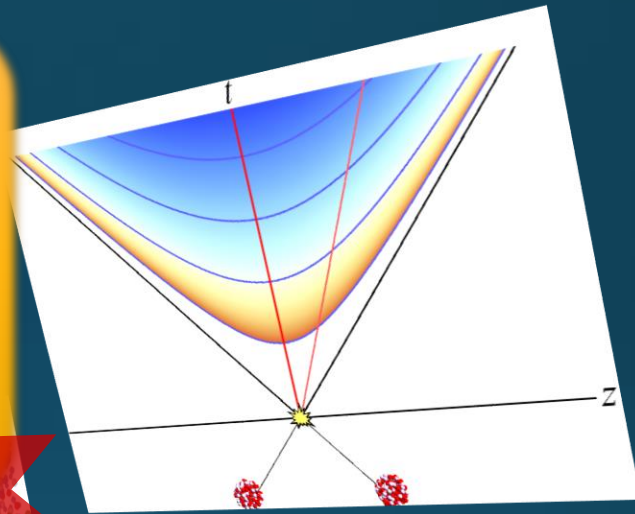


中間エネルギー領域は未開拓

高エネルギー

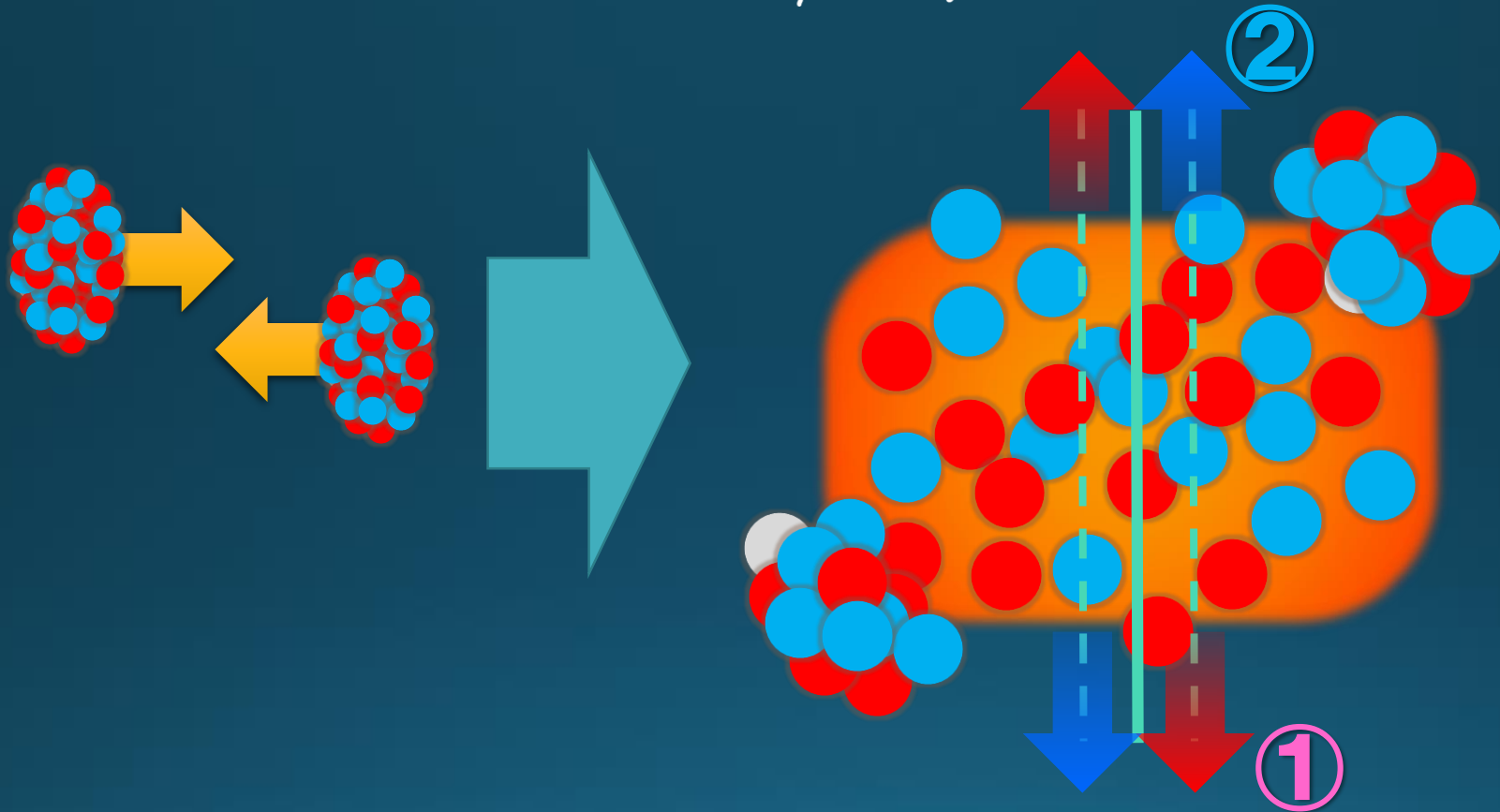
成熟した動的描像(模型)

- 流体的なQGP
- Bjorken描像



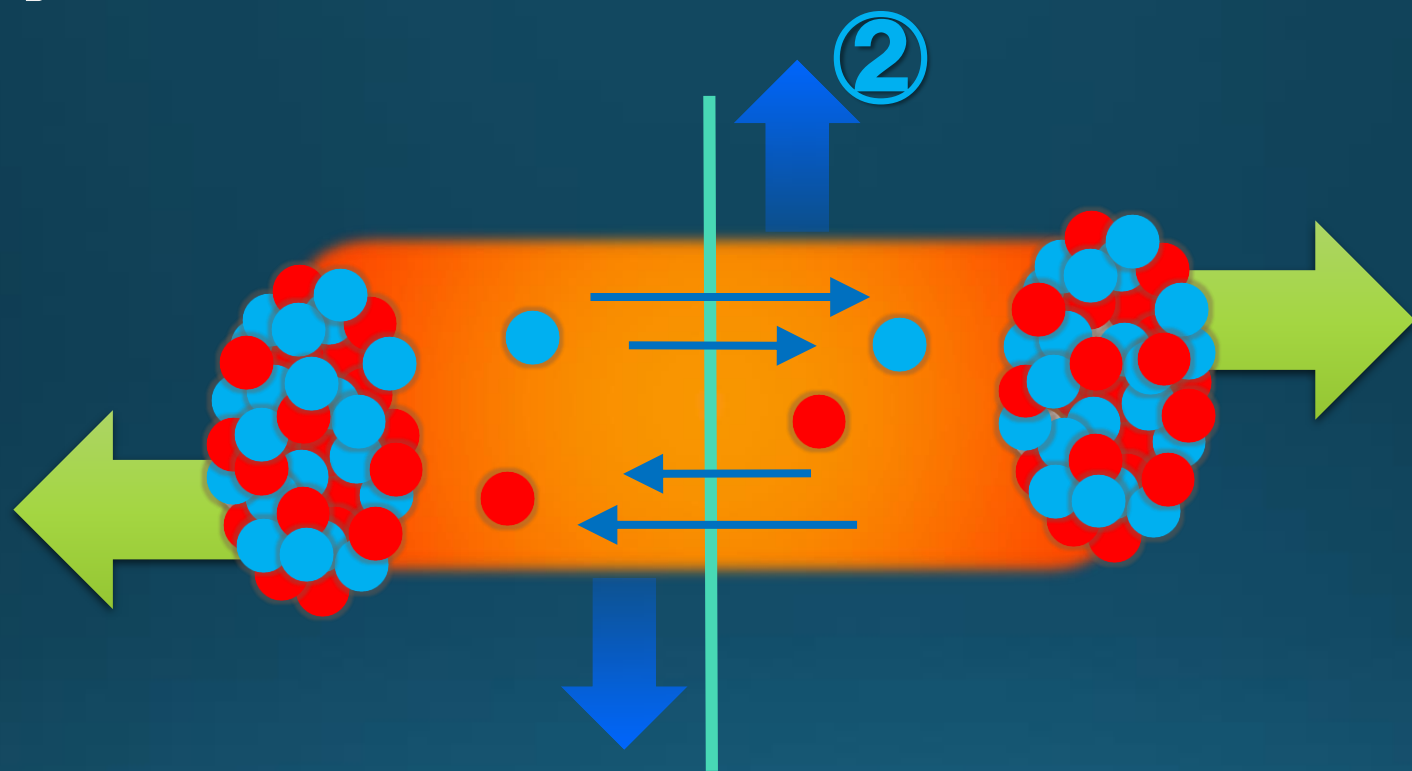
中間エネルギー
統一的動的描像の不在

Radial Flow $dv_1/dn\eta$

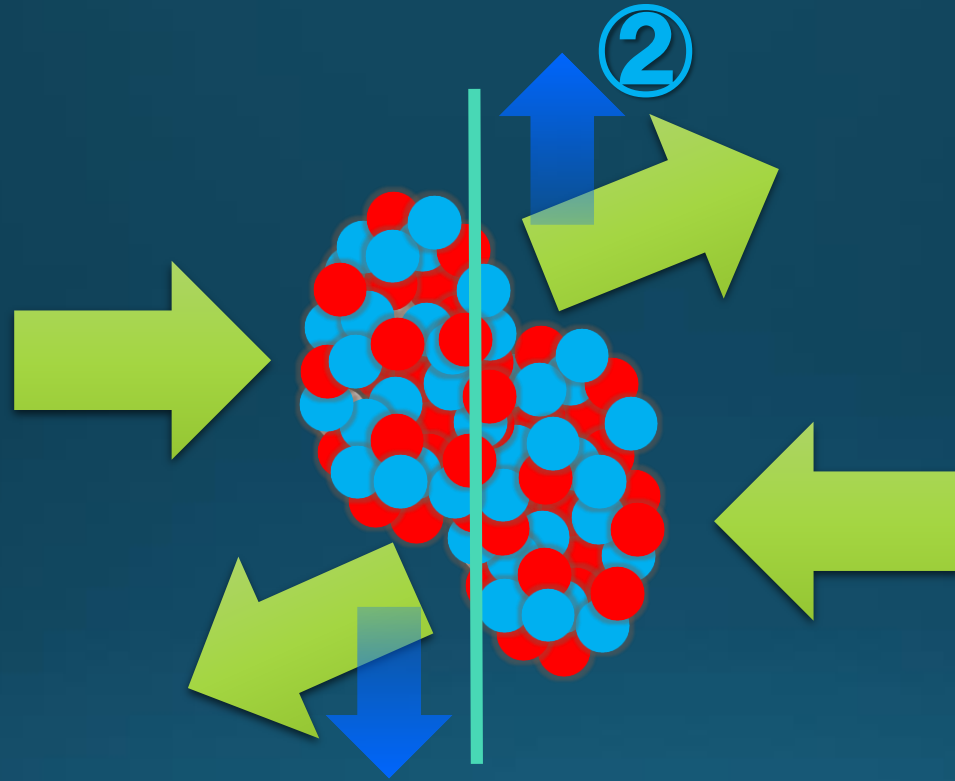


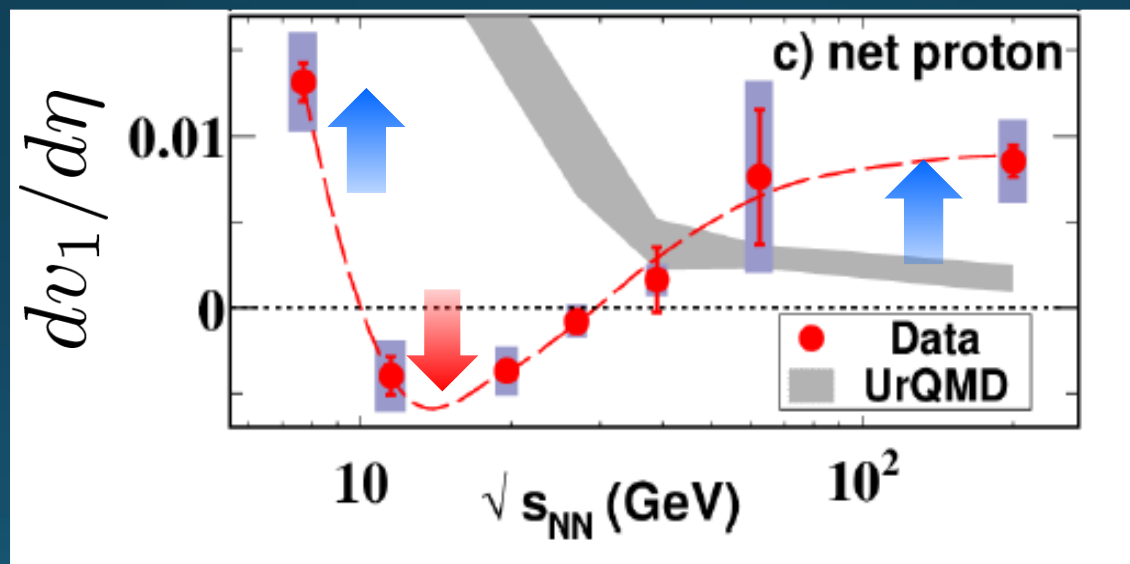
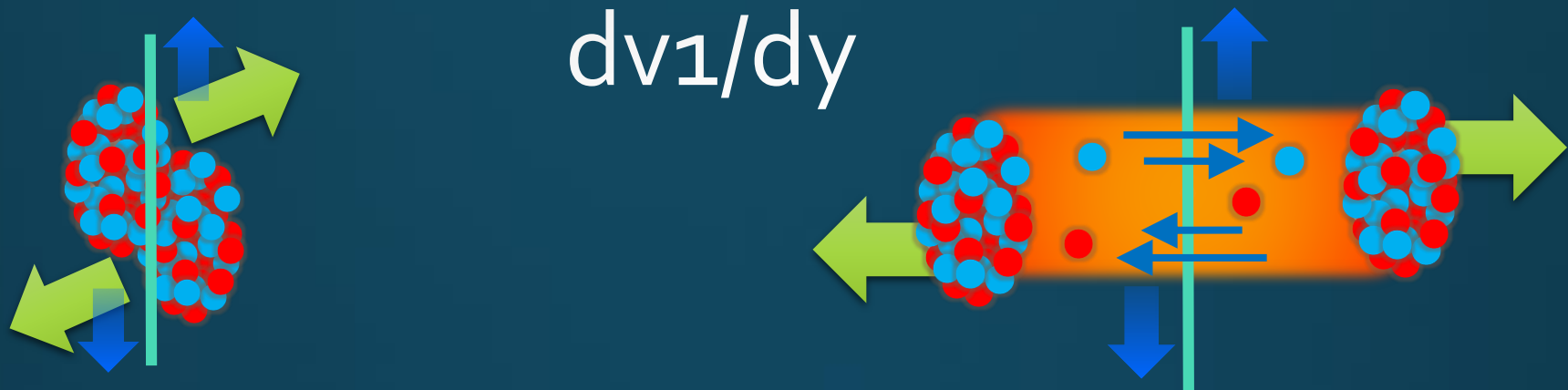
□ 物質の平均速度は、右上がり？右下がり？

高エネルギー



低エネルギー

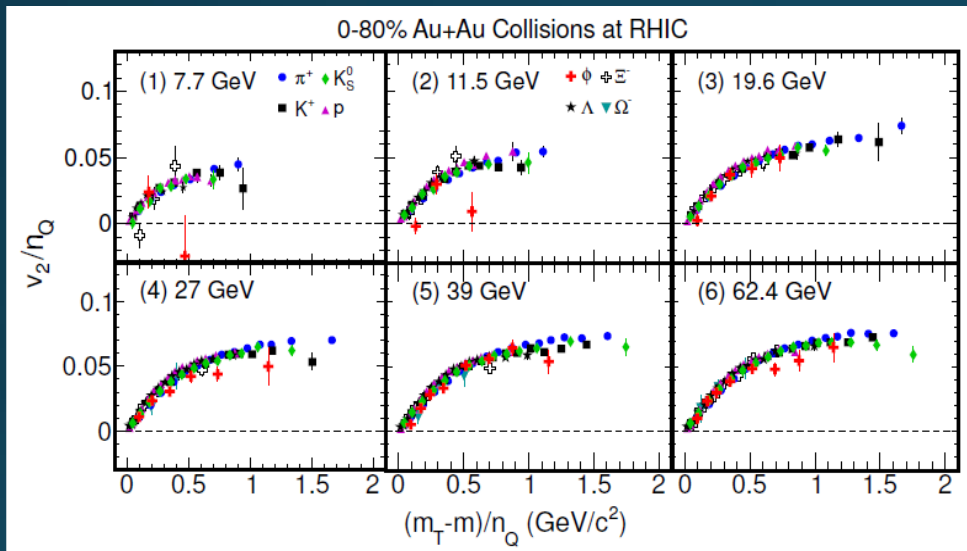




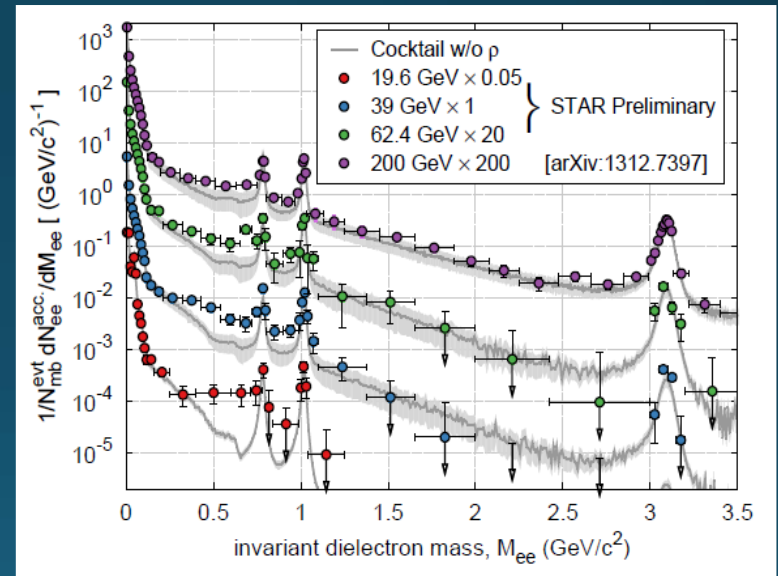
dv_1/dy は、中間エネルギーで符号を変える

その他の観測量 1

楕円フロー v_2



光子・レプトン対生成量



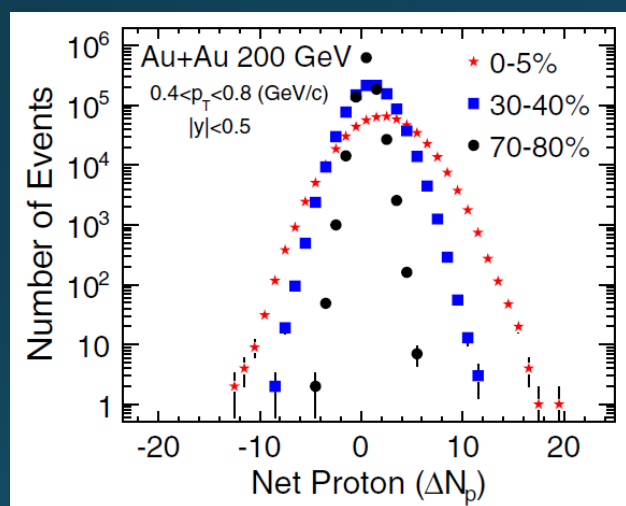
- QNSの破れはどこで起こる？
- ストレンジ自由度の分離？

- 媒質中のハドロン物理
- 高密度物質の熱輻射

その他の観測量 2

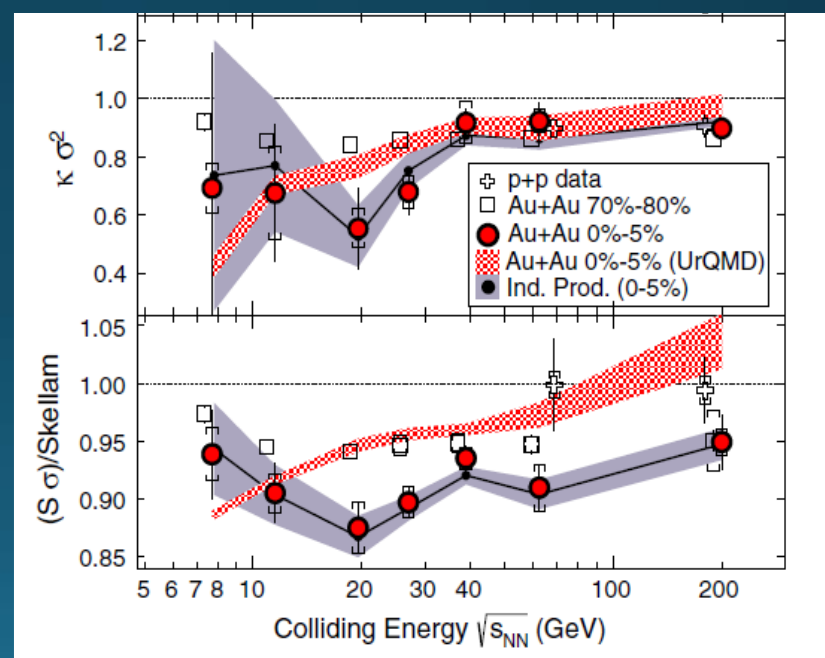
保存電荷ゆらぎイベント毎解析

陽子数ヒストグラム



STAR, PRL105 (2010)

陽子数非ガウスキュムラント



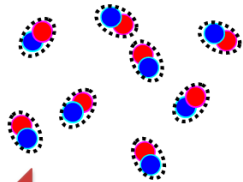
非ガウスゆらぎを、QCD臨界点探索に使う

物理学の普遍性

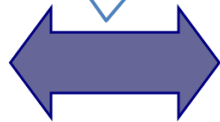
Example: BCS-BEC crossover

Leggett, 1980; Nozieres, Schmitt-Rink, 1985

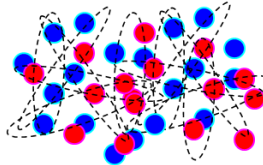
Bose-Einstein condensate (BEC)



unitary Fermi gas
2005~



Conventional superconductor (BCS state)



strong

coupling

weak

普遍性

Hadronic DoF

Formation of "s" QGP

1 GeV

10 GeV

100 GeV

$\sqrt{s_{NN}}$

AGS

SPS

top RHIC

200 GeV

J-PARC

RHIC-BES I 7.7 ~ 62 GeV

2010~

LHC

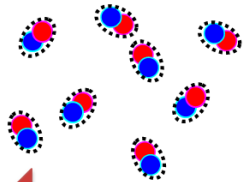
2.76 TeV

物理学の普遍性

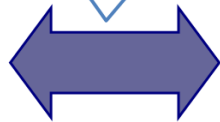
Example: BCS-BEC crossover

Leggett, 1980; Nozieres, Schmitt-Rink, 1985

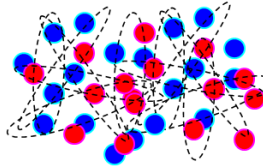
Bose-Einstein condensate (BEC)



unitary Fermi gas
2005~



Conventional superconductor (BCS state)



strong

coupling

weak

物理学の発展は、
パラメータ空間上の
簡単な領域から
複雑な領域へと進む

普遍性

Hadronic DoF

Formation of "s" QGP

1 GeV

10 GeV

100 GeV

$\sqrt{s_{NN}}$

AGS

SPS

top RHIC

200 GeV

J-PARC

RHIC-BES I | 7.7 ~ 62 GeV

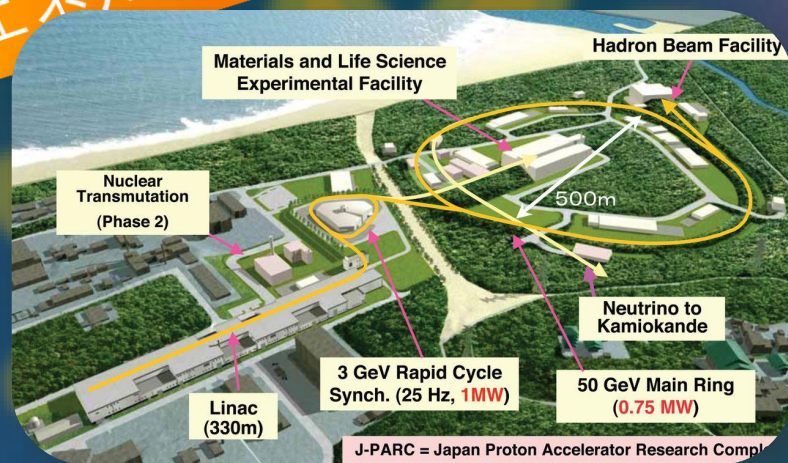
2010~

LHC →

2.76 TeV

高エネルギー重イオン衝突物理は、 中間エネルギー領域へ向かう

衝突エネルギー



ハドロン描像

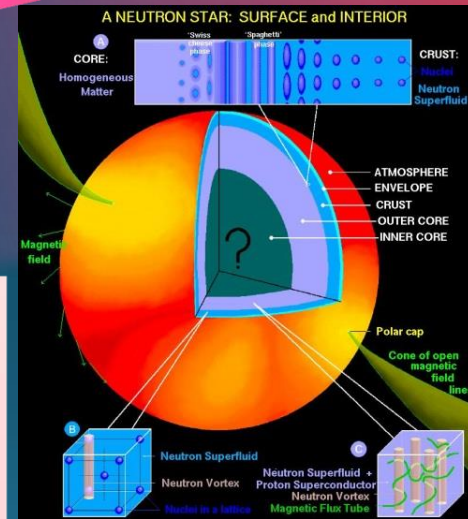
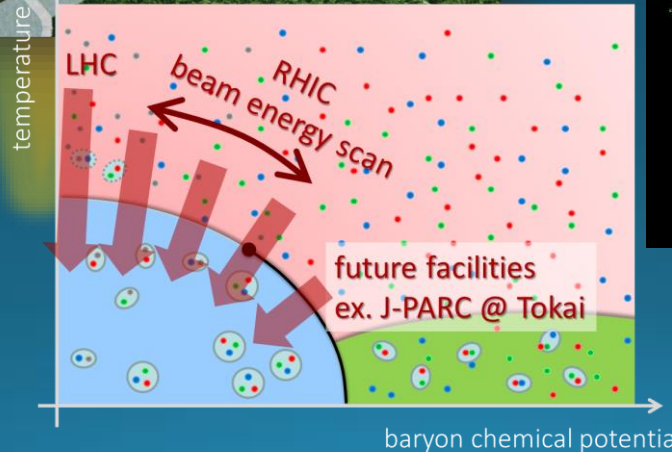
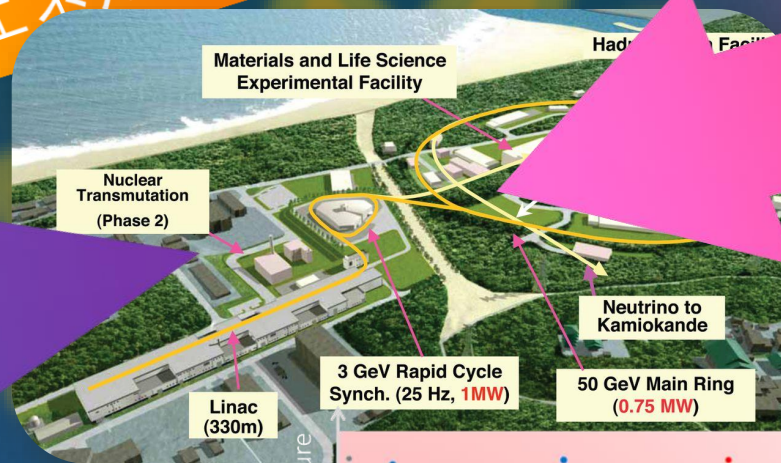
QGP 描像

高エネルギー重イオン衝突物理は、 中間エネルギー領域へ向かう

衝突エネルギー

QGP描像

ハドロン描像



まとめ

- 中間エネルギーの重イオン衝突には、様々な面白い物理がある
 - QCD相図、中性子星、エキゾチックハドロン
- 重イオン衝突実験は、中間エネルギー領域に向かう。
 - STAR-BES、J-PARC、FAIR、NICA、...
- 取り組むべき多くの課題がある！
 - 動的描像の確立
 - 高輝度ビームを活かした観測量の提案
 - QCD臨界点の探索