

J-PARCにおける重イオン物理

米国ブルックヘブン国立研究所 (BNL)

坂口貴男

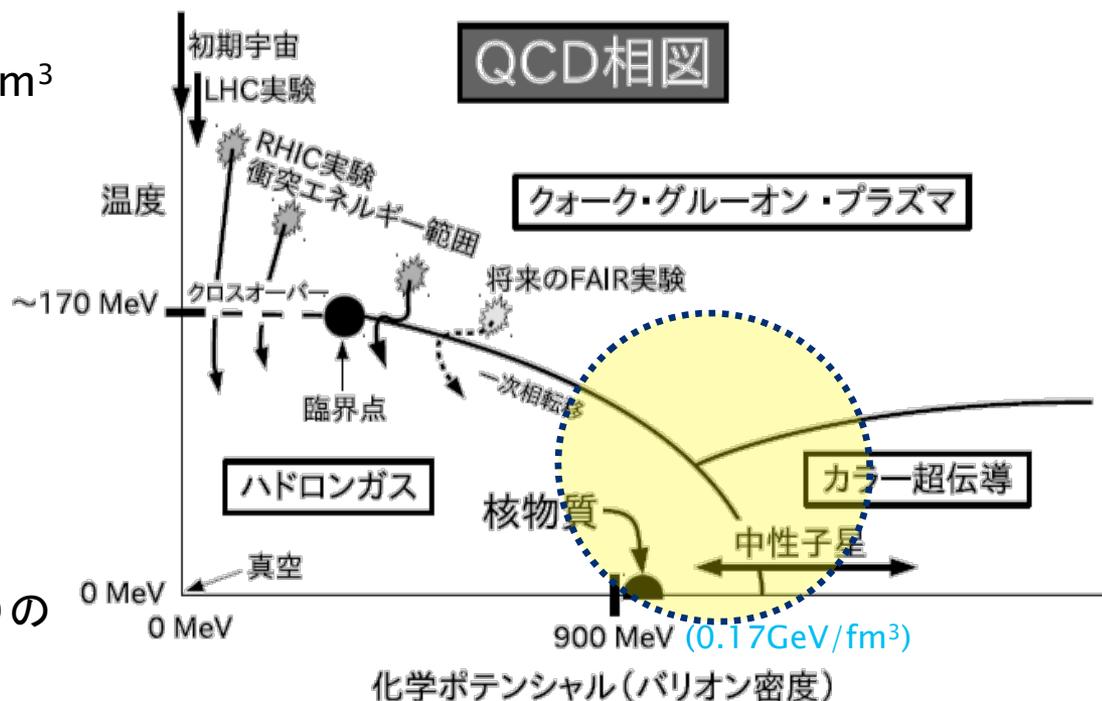
はじめに： 高密度核物質の魅力とは

- ▶ 高密度の定義： 通常原子核の～3－4倍
 - 通常原子核密度： $0.17 \text{ GeV}/\text{fm}^3$
 - クォークとグルーオンが自由に動きまわる系である、クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP)相が生成される可能性

- ▶ 天文学との関連
 - 中性子星の内部： $\sim 0.5 \text{ GeV}/\text{fm}^3$
 - 地上で再現する実験室

- ▶ 高密度での新しい研究
 - カラー超伝導など

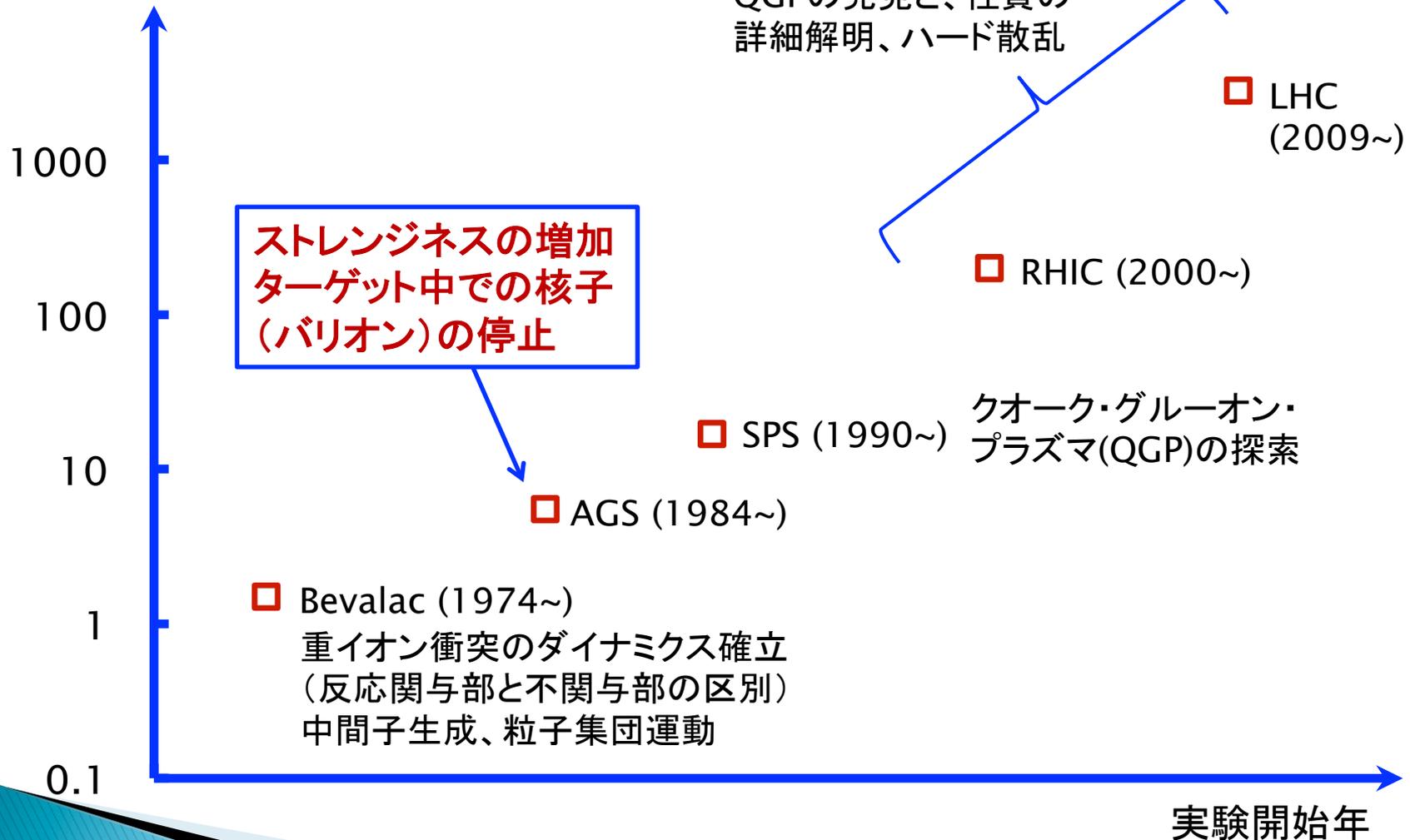
- ▶ 物性との関連で
 - さらに密度をあげれば、BCS-BESクロスオーバーへ
 - 物性(電磁相互作用系)とクォーク・原子核(強相互作用系)の類似現象の探索



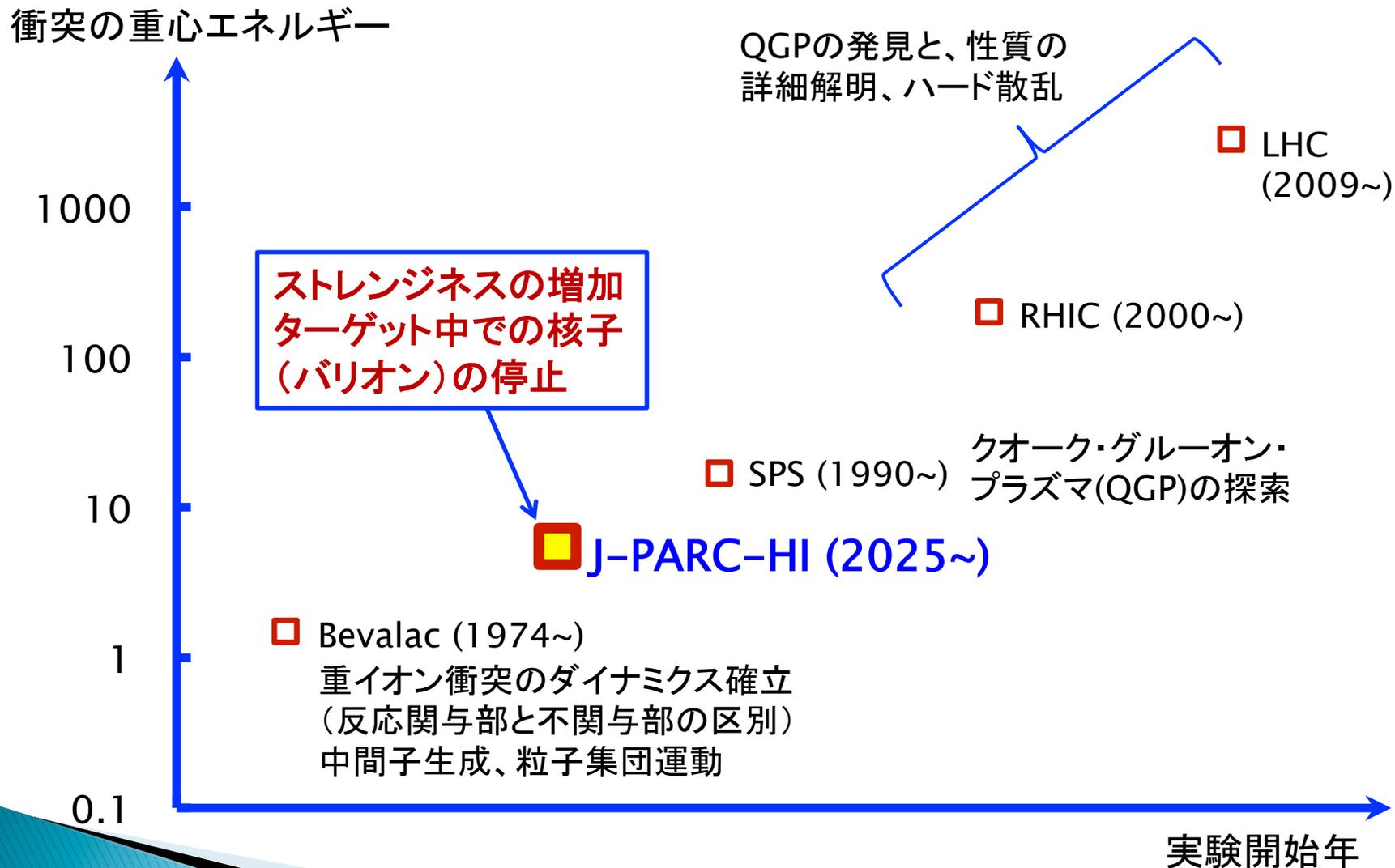
「原子核物理学(朝倉書店)」滝川昇

高エネルギー重イオン実験の歴史

衝突の重心エネルギー



高エネルギー重イオン実験の歴史



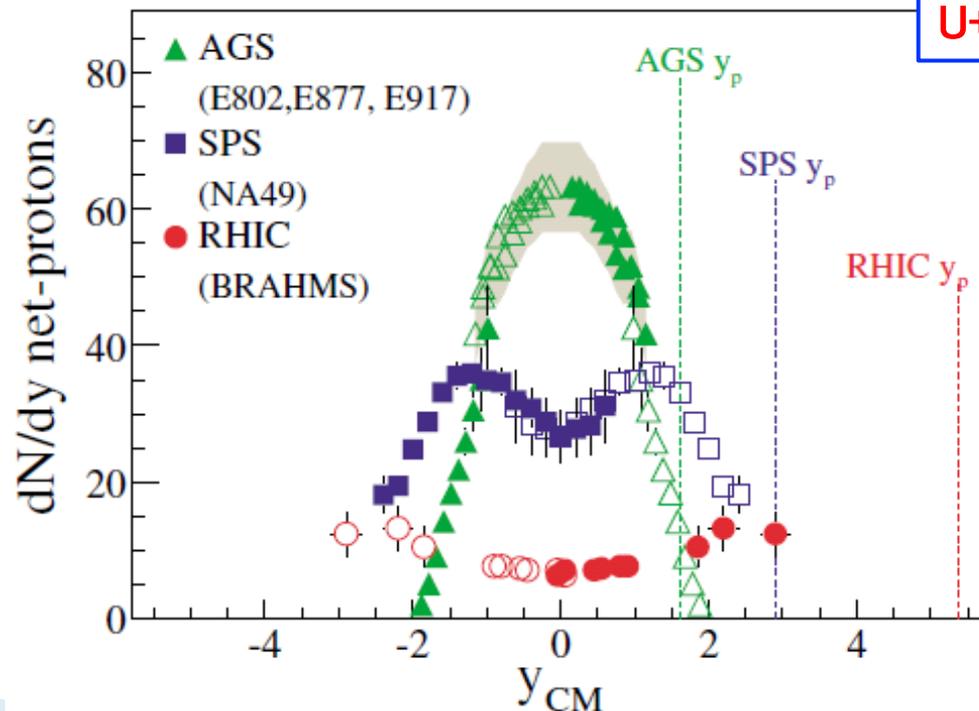
過去の実験結果から学ぶ(I)

- ▶ Net proton = ネットの陽子数 = $N(p) - N(pbar)$
 - 入射およびターゲット核子の、衝突後の位置分布を示すのに、いい指標
- ▶ AGSでは、中心ラピディティ領域に集中している
 - 核子が中心ラピディティに止まっている: 核子のストップング → **高密度核物質**
 - SPSや、RHICでは、入射およびターゲット核子は「すり抜けている」

ラピディティ (rapidity)

$$y = \frac{1}{2} \ln \frac{E + p_z}{E - p_z}$$

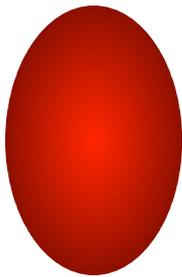
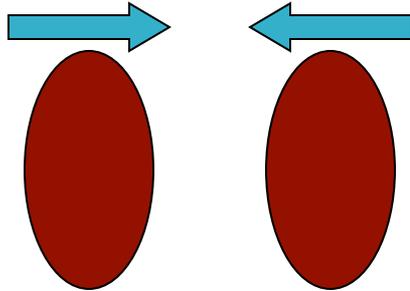
z: ビーム軸方向



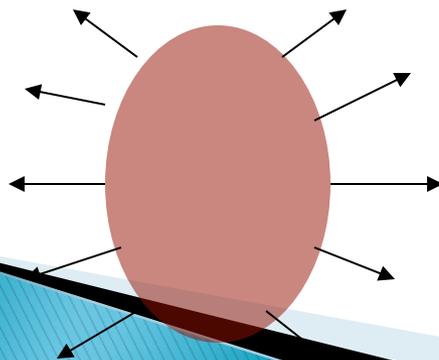
Au+Au: $\sim 6\rho_0$
U+U: $\sim 8.6\rho_0$

J-PARCでの重イオン衝突の実際

低エネルギー実験 (Landau描像)



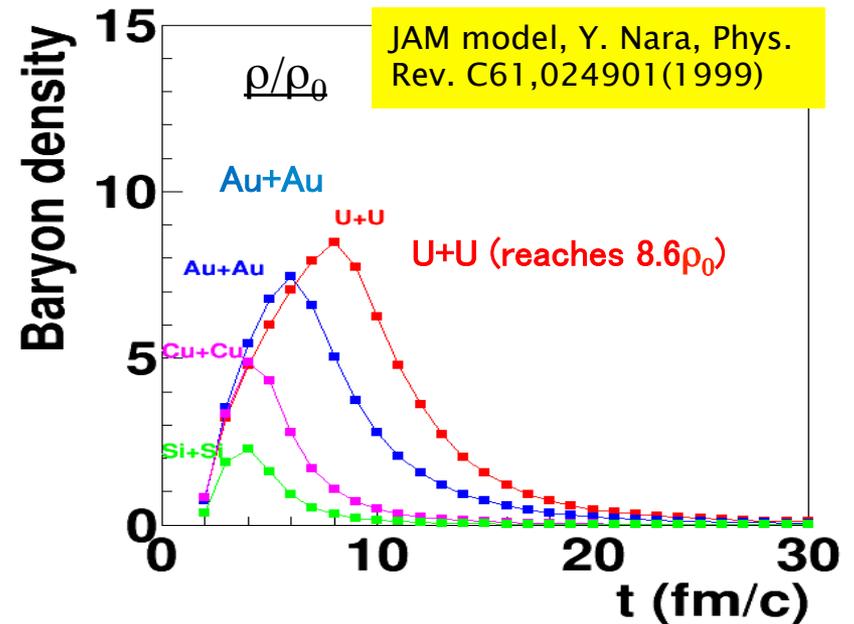
止まる
高温、高密度



Cartoon by the courtesy of K. Itakura

$$\rho = 2A / (V / \gamma_{CM}) = 2\gamma_{CM}\rho_0$$

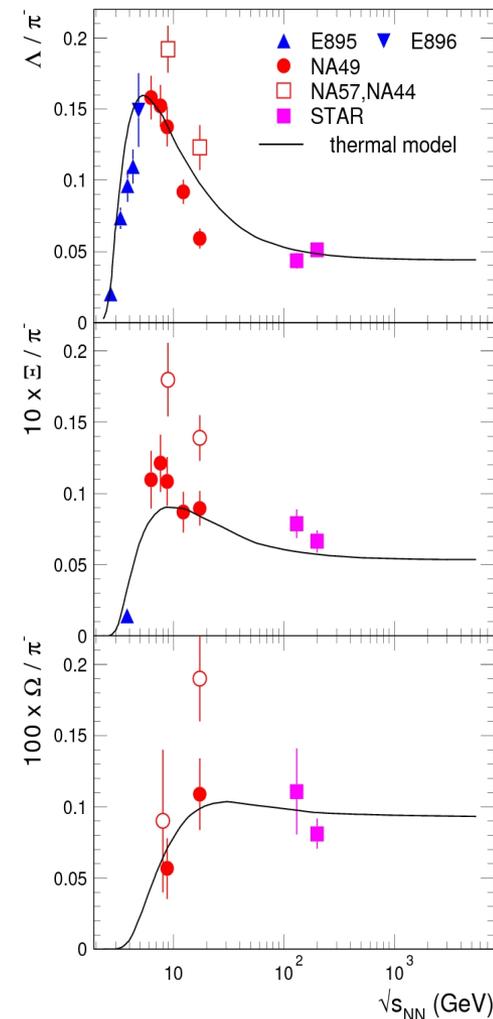
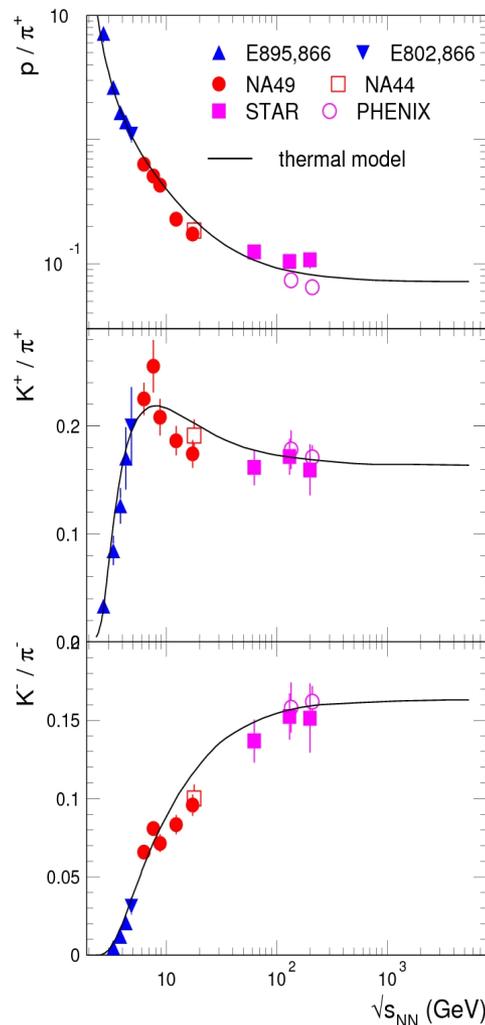
$$\gamma_{CM} \approx 2.87$$



過去の実験結果から学ぶ(II)

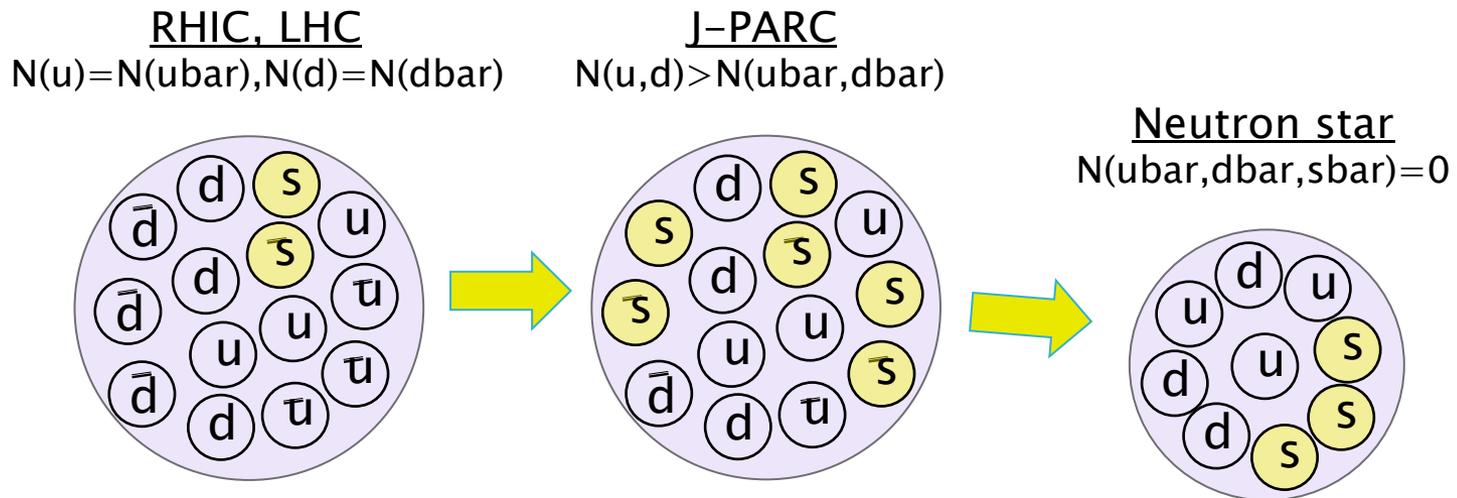
NPA772(2006)167

- ▶ 幅広い重心エネルギーにおける粒子比測定を纏めたプロット
- ▶ スレンジネスを含むハドロン: K^+ , K^- , Λ , Ξ , Ω
- ▶ π は、1イベント中の生成粒子数の目安になる
- ▶ K^+ , K^- , Λ , Ξ , Ω は、 $\sqrt{s_{NN}}=5\text{GeV}$ 付近で、最大値を示している
 - K^- はubarが少ないため、できにくい
 - Ω はそもそも統計が少ない
- ▶ AGS (J-PARC)のエネルギーは、スレンジネスが多く生成されるエネルギー



ストレンジネスが豊富な高密度核物質

- ▶ 高温・低密度 (RHIC, LHC) → 高温・高密度 (AGS, J-PARC-HI)
→ 低温・高密度 (neutron star)
- ▶ 中性子星の中心部に近い状態に迫る
 - 重イオン反応では、**Strong Interaction**によってStrangenessが作られる
 - 中性子星内部では、**Weak interaction**によってStrangenessが作られる



J-PARC-HIにおける 高密度核物質へのアプローチ

J-PARC (KEK & JAEA)



**J-PARC
(KEK & JAEA)**

400 MeV H⁻ Linac

**Transmutation Experimental
Facility (TEF)**

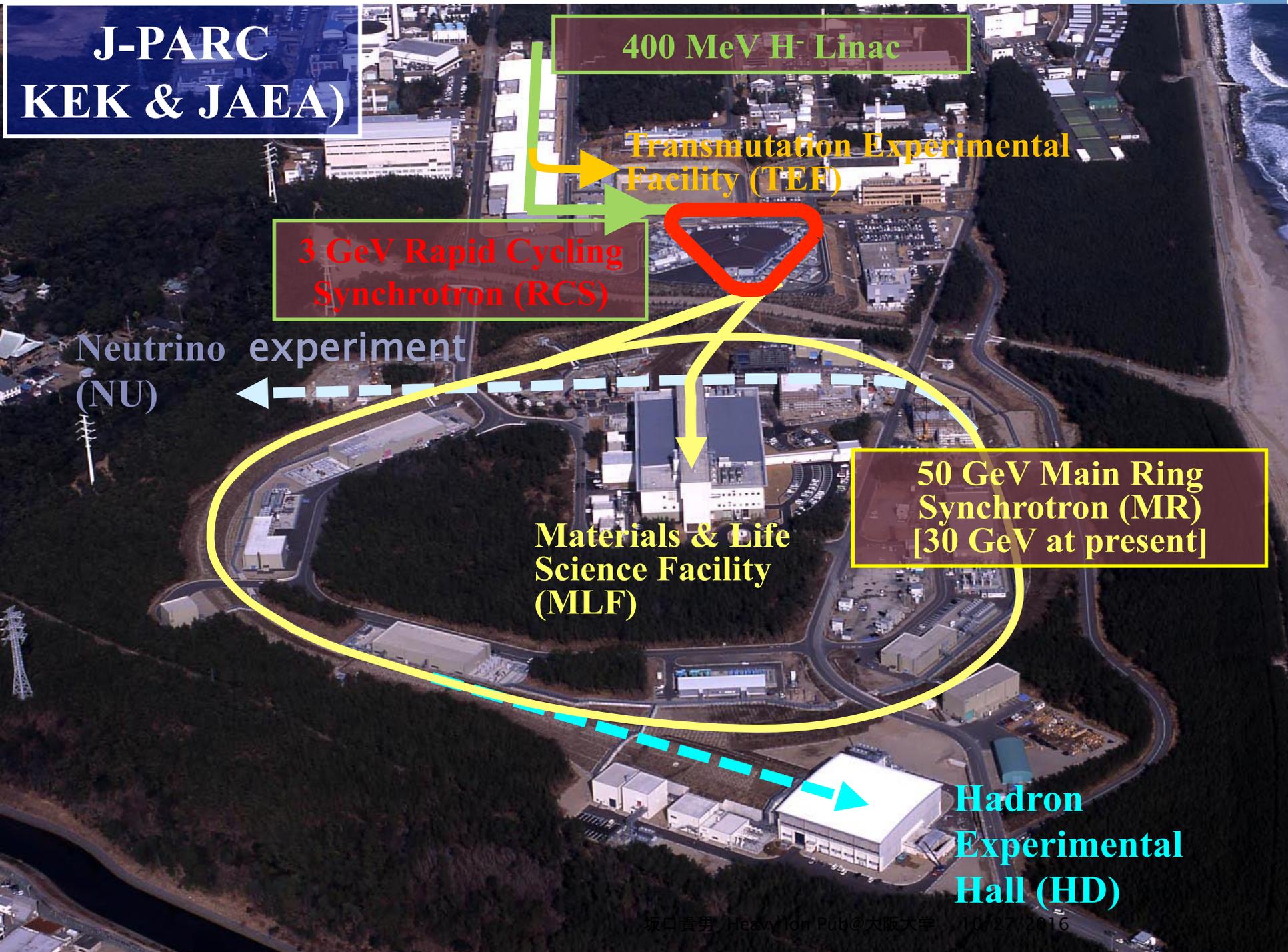
**3 GeV Rapid Cycling
Synchrotron (RCS)**

**Neutrino experiment
(NU)**

**Materials & Life
Science Facility
(MLF)**

**50 GeV Main Ring
Synchrotron (MR)
[30 GeV at present]**

**Hadron
Experimental
Hall (HD)**



J-PARC (KEK & JAEA)

400 MeV H⁻ Linac

Transmutation Experimental Facility (TEF)

3 GeV Rapid Cycling Synchrotron (RCS)

HI booster

HI Linac

Neutrino experiment (NU)

Materials & Life Science Facility (MLSF)

50 GeV Main Ring Synchrotron (MR)
[30 GeV at present]

- $E_{lab} = 1 - 19 \text{ GeV/n}$, $\sqrt{s_{NN}} = 1.9 - 6.2 \text{ GeV}$
- $10^{10} - 10^{11} \text{ cycle}^{-1}$ (~6s cycle) (世界に類のない超強度ビーム)
- Ion species: p, Si, Ar, Cu, Xe, Au(Pb), U
- 2025年以降の実験開始を目指している

Hadron Experimental

J-PARCの実験の詳細: <http://asrc.jaea.go.jp/soshiki/gr/hadron/jparc-hi/>

各粒子の生成量

Beam : 10^{10} Hz

0.1% target

→ Interaction rate 10^7 Hz

Centrality trigger 1%

→ DAQ rate = 100kHz

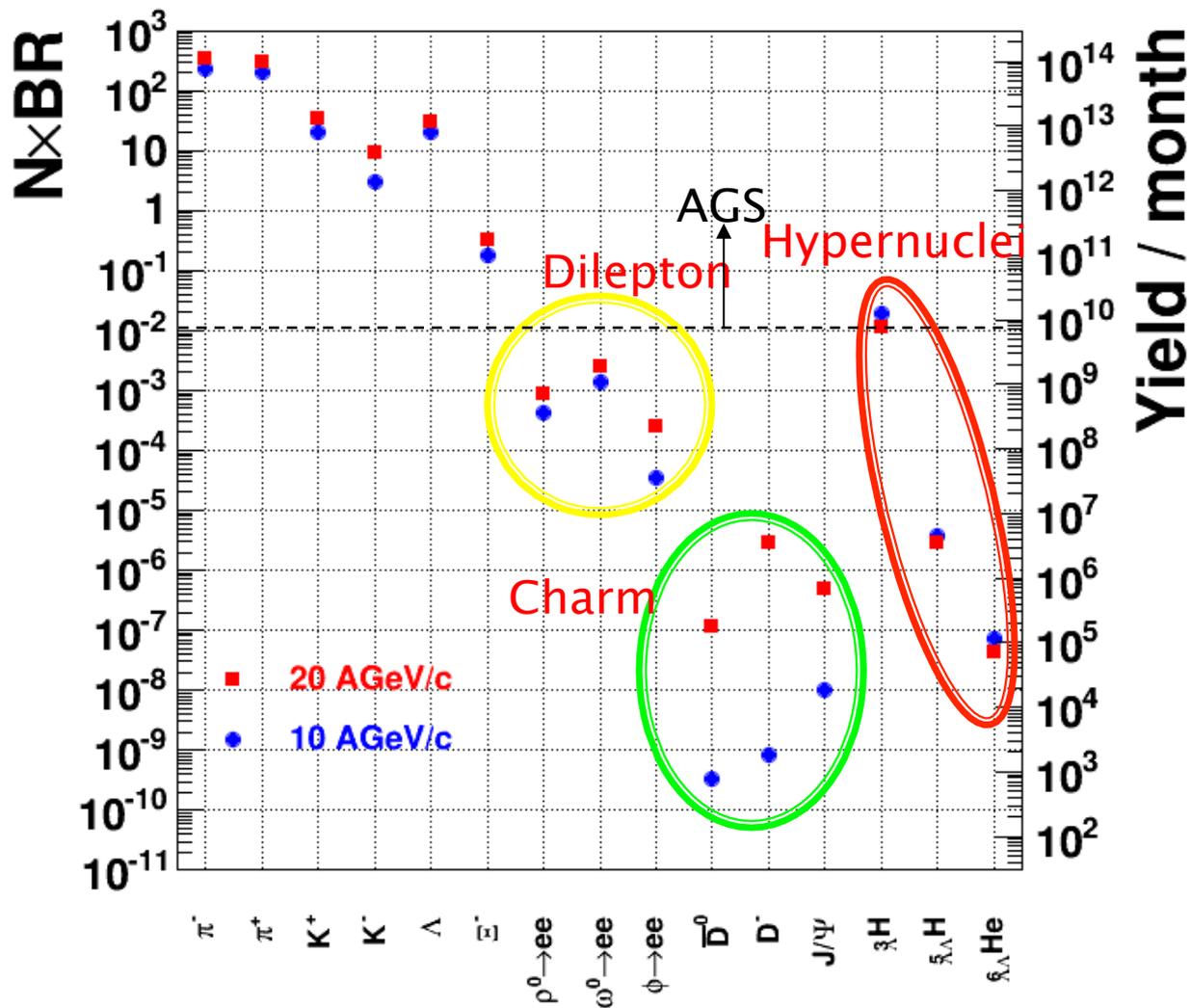
In 1 month experiment:

$\rho, \omega, \phi \rightarrow ee$ $10^7 - 10^9$

D, J/ Ψ $10^5 - 10^6$ (20 AGeV)
 $(10^3 - 10^4)$ (10 AGeV)

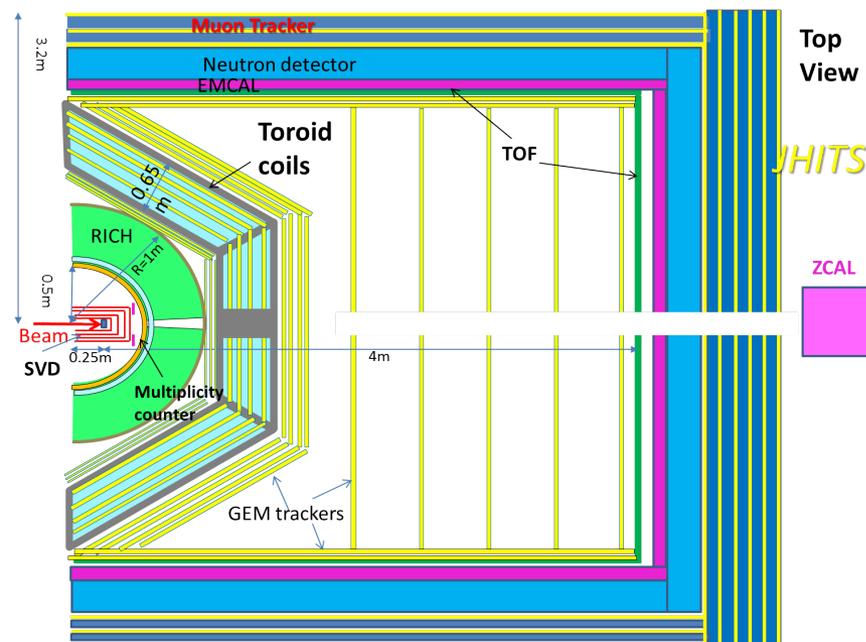
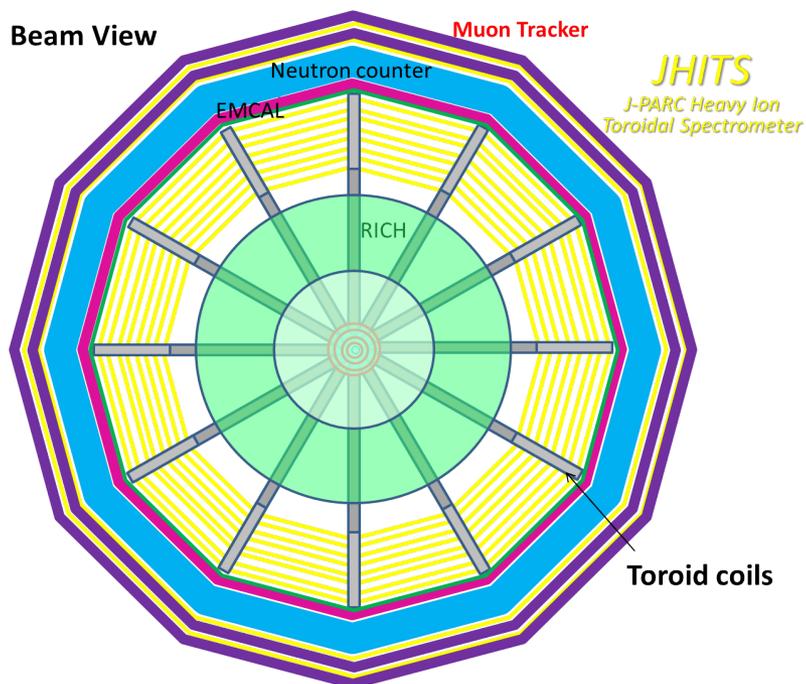
Hypernuclei $10^5 - 10^{10}$

Ref: HSD calculations in FAIR Baseline
Technical Report (Mar 2006)
A. Andronic, PLB697 (2011) 203



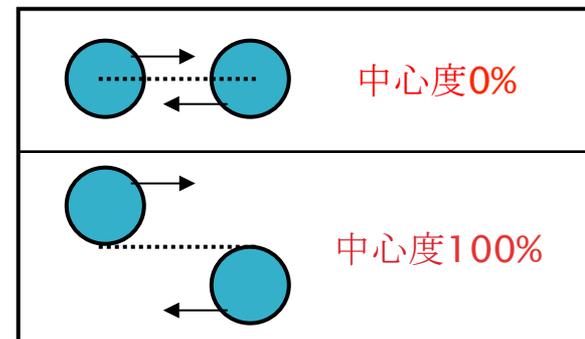
測定の基本コンセプト

- ▶ 広いアクセプタンスを覆う測定器群
 - 高速トラッキング、TOF、電磁カロリメータ、ミュオン粒子測定器
- ▶ 0.1% λ_1 のターゲット: 10~100MHzの衝突事象
- ▶ ミニマムバイアスでイベントを取得する
 - トリガー無しで、連続的にデータを取得する (ALICE等の高レート実験で実用化)
 - 高速の計算機群を用い、データ取得直後にイベントを選定し、記録装置に記録する



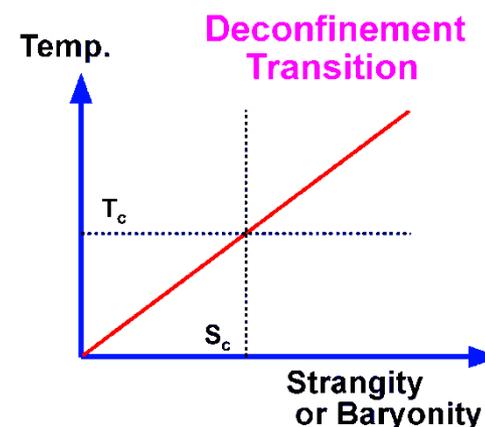
新しいイベント選定の模索

- ▶ これまでのイベント選定：衝突中心度
 - 衝突係数に比例する量。Centralityと言う
 - 0%は衝突係数0に相当し、100%は非弾性散乱が始まる最大の衝突係数に相当する
- ▶ 過去の実験と同じイベント選定では、新しい物理が出てこない可能性が高い
- ▶ **そこで、新しいイベント選定を加える**
 - 衝突中心度で、中心度0%に近いイベントを先に選択しておく
- ▶ **Strangity, Baryonity**
 - AGS実験から、このエネルギーの衝突で起きた新しい現象を積極的に選び出す
 - **ストレンジネスの増加、バリオンストップング**
- ▶ AGSより、ビーム輝度が遥かに高いたため、稀事象だけを捕える選択が可能



$$Strangity \equiv \langle N(K^+) \rangle / \langle N_{ch} \rangle$$

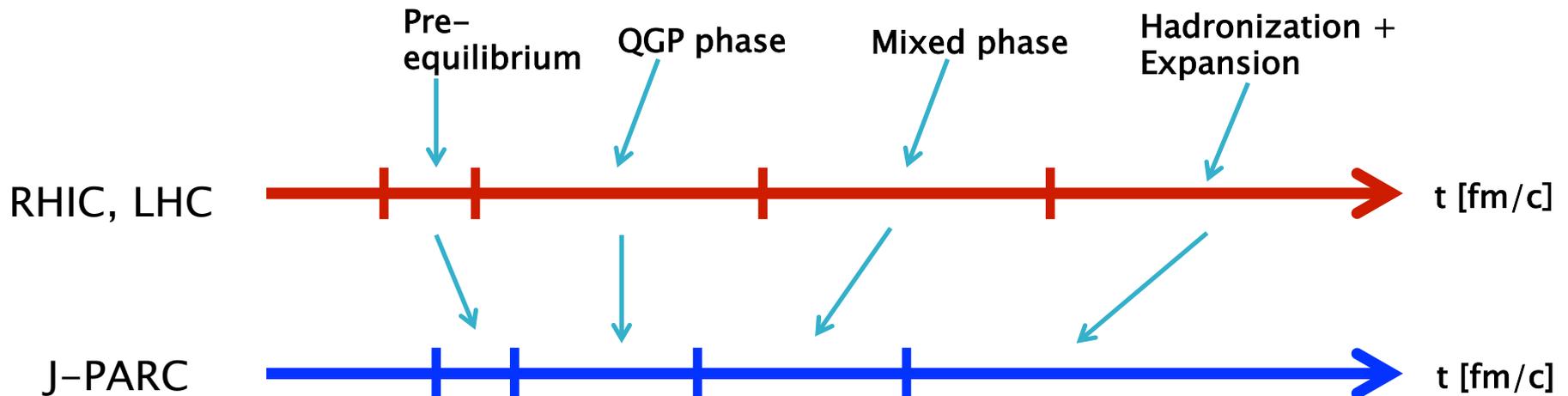
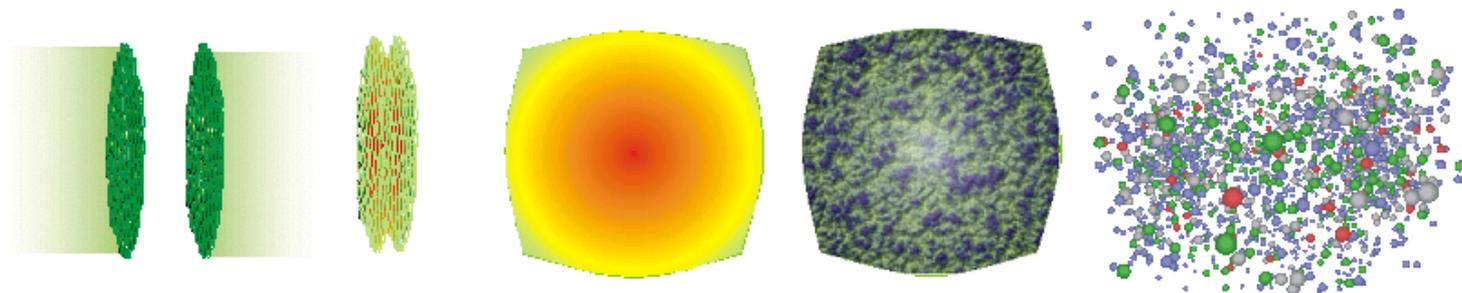
$$Baryonity \equiv \langle N(p) - N(\bar{p}) \rangle$$



TS, H. Sako and M. Kitazawa, in prep.

RHIC, LHCとの時間発展の違い

- ▶ 衝突後の各ステージの持続時間が違うことにより、観測量に影響
- ▶ 最終的に観測にかかる物理量は、持続時間で積分したもの

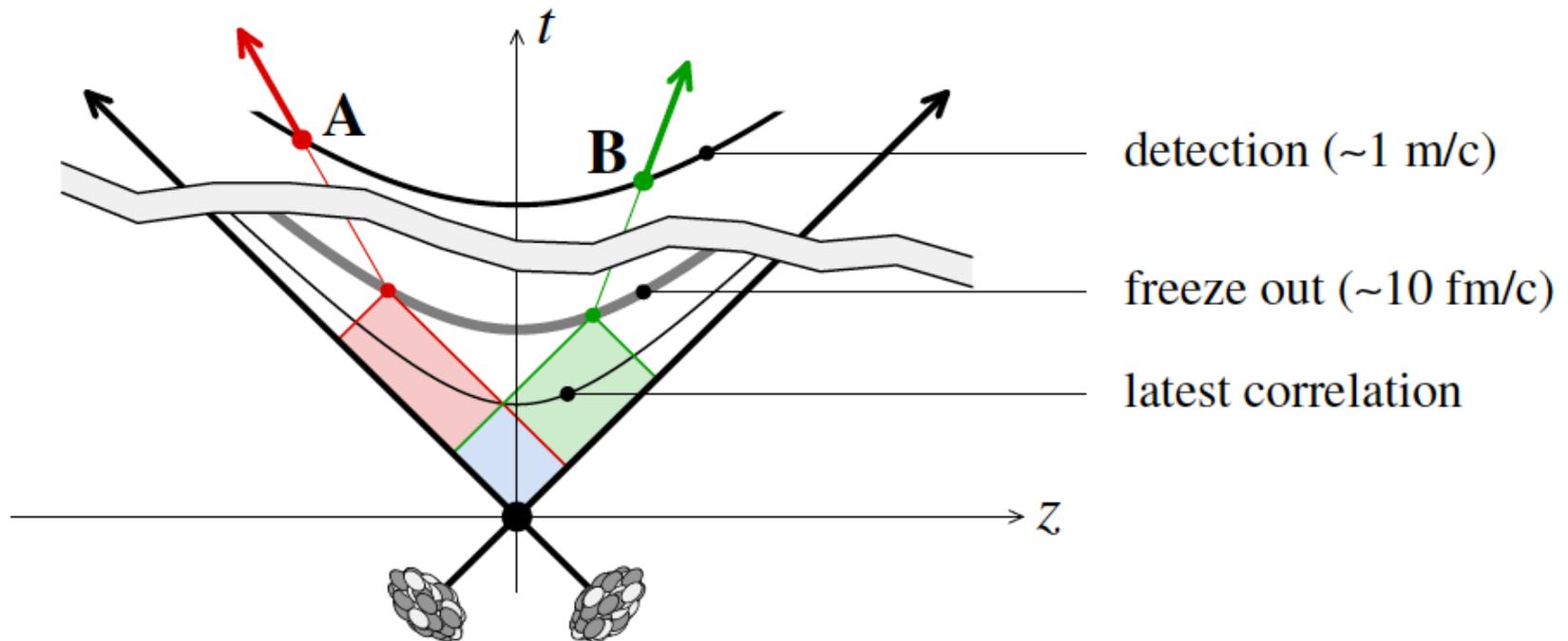


クォーク・グルーオンの自由度の見える時間が短い可能性

ラピディティ相関による時刻選定

- ▶ ラピディティの異なる粒子対は、衝突後のある一定の時間までしか、相関を持っていない
 - 系の時空発展と因果律から、単純に導出される (e.g. arXiv:1412.0471)
 - Bjorken描像を仮定している

- ▶ ラピディティの異なる粒子の相関を取れば、その発生源の時刻を限定することができるかもしれない

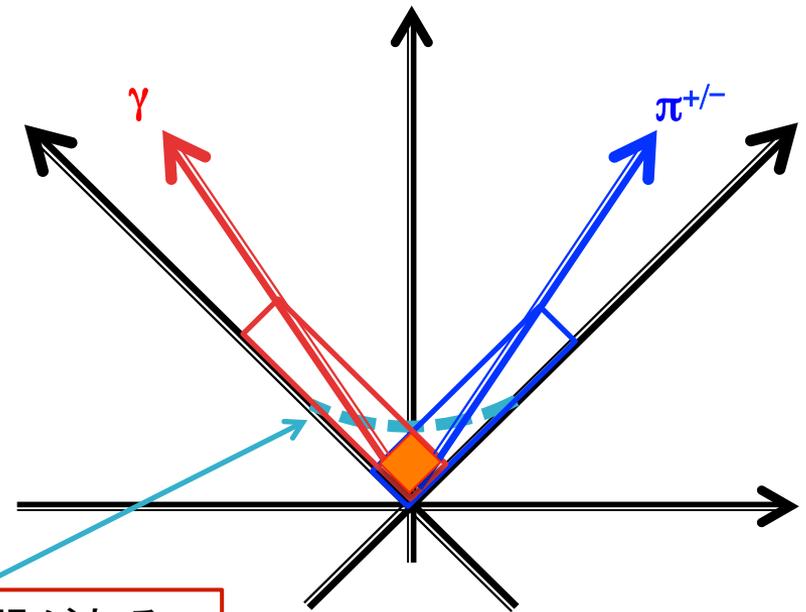
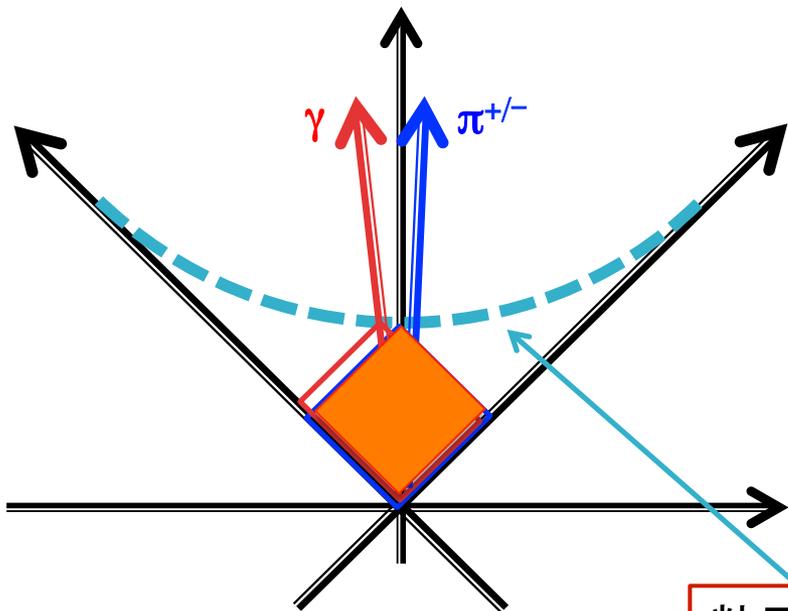


ラピディティ相関による時刻選定

Bjorken描像を仮定。理論のinput求む

2つの粒子が、いずれも
中心ラピディティから来る場合
(終状態まで積分)

2つの粒子が、前方と後方
ラピディティから来る場合
(より初期に限定)



粒子対の相関がある、
最後の時刻

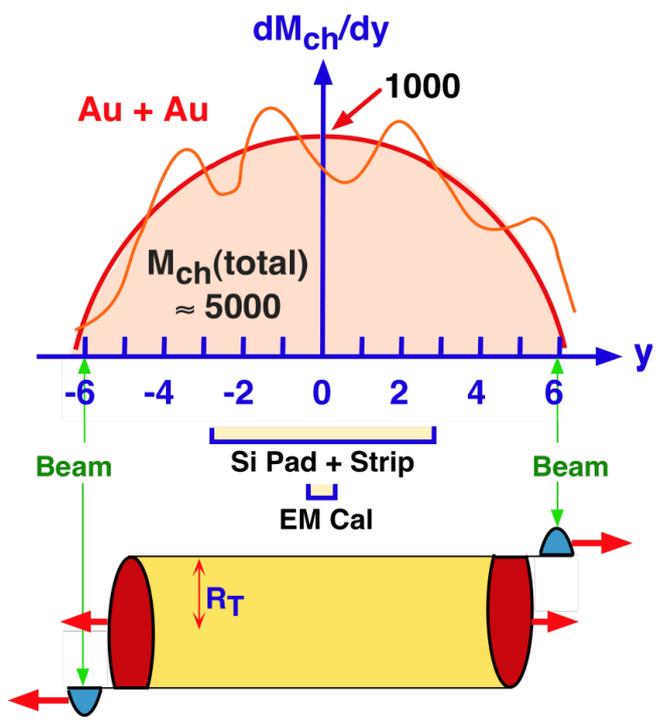
測定する物理量

RHIC実験開始前の測定量候補

Signatures of Quark-Gluon Plasma

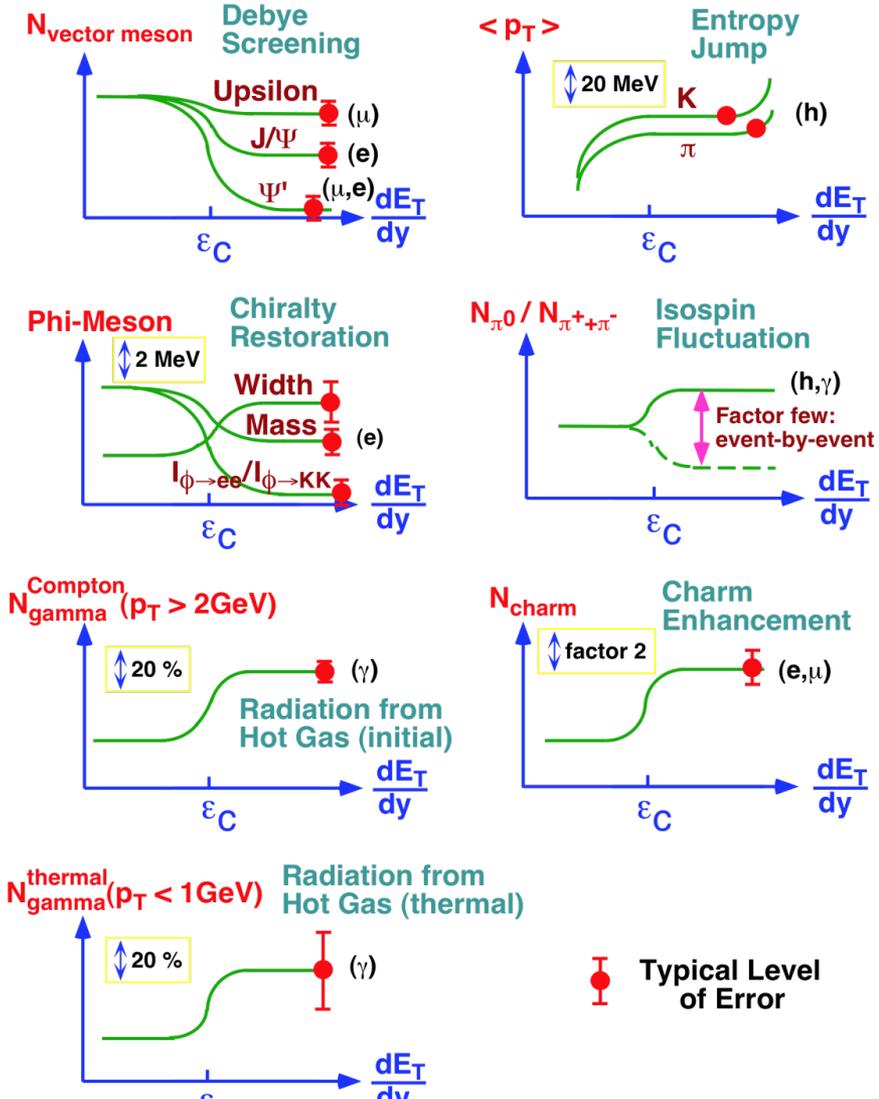
PHENIX

Global Event Trigger



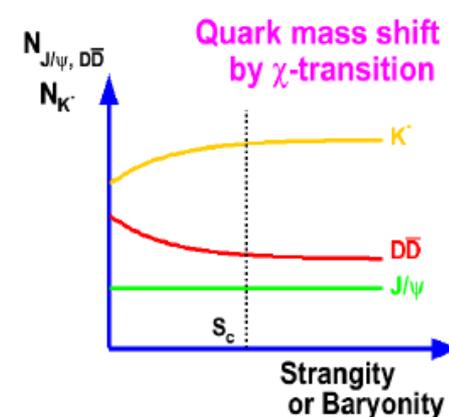
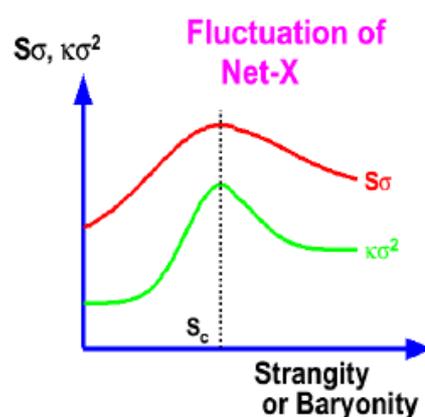
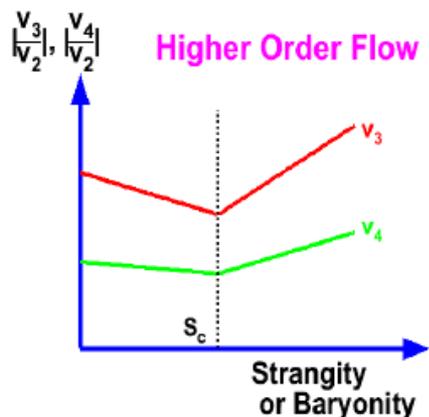
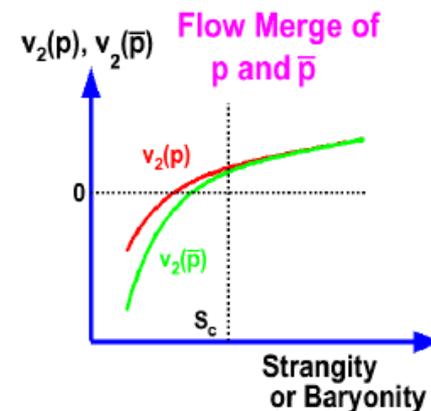
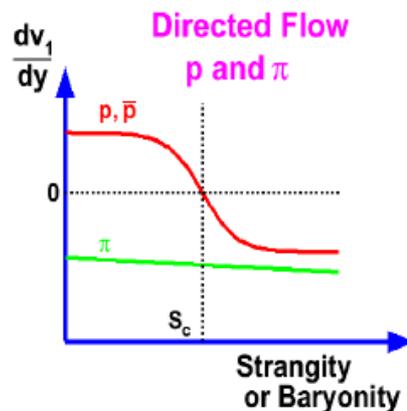
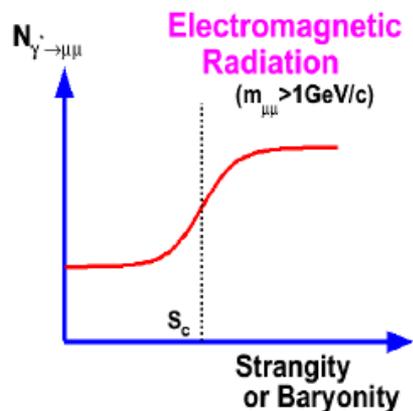
$$\epsilon = \frac{1}{\pi R_T^2 \tau_0} \frac{dE_T}{dy}$$

Si Pad + Strips EM Cal



J-PARC HIの場合は？ (概観)

- ▶ RHIC、LHC実験で発見された、新しい物理量を中心に測定する
- ▶ 測定量をStrangity、Baryonityの関数で考える
 - Centrality (中心度)で見るだけでは、厳しい可能性



相図における系の“位置”を知る

- ▶ 温度およびバリオン化学ポテンシャル(核子密度に相当)
 - 生成粒子数の比より推定: Grand Canonical Stat Model

$$\ln Z_i = \frac{V g_i}{2\pi^2} \int_0^\infty \pm p^2 dp \ln[1 \pm \exp(-(E_i - \mu_i)/T)],$$

$$\mu_i = \hat{\mu}_b B_i + \hat{\mu}_{I_3} I_{3i} + \hat{\mu}_S S_i + \hat{\mu}_C C_i$$

化学ポテンシャル μ_i

μ_b : バリオン, μ_{I_3} : アイソスピン

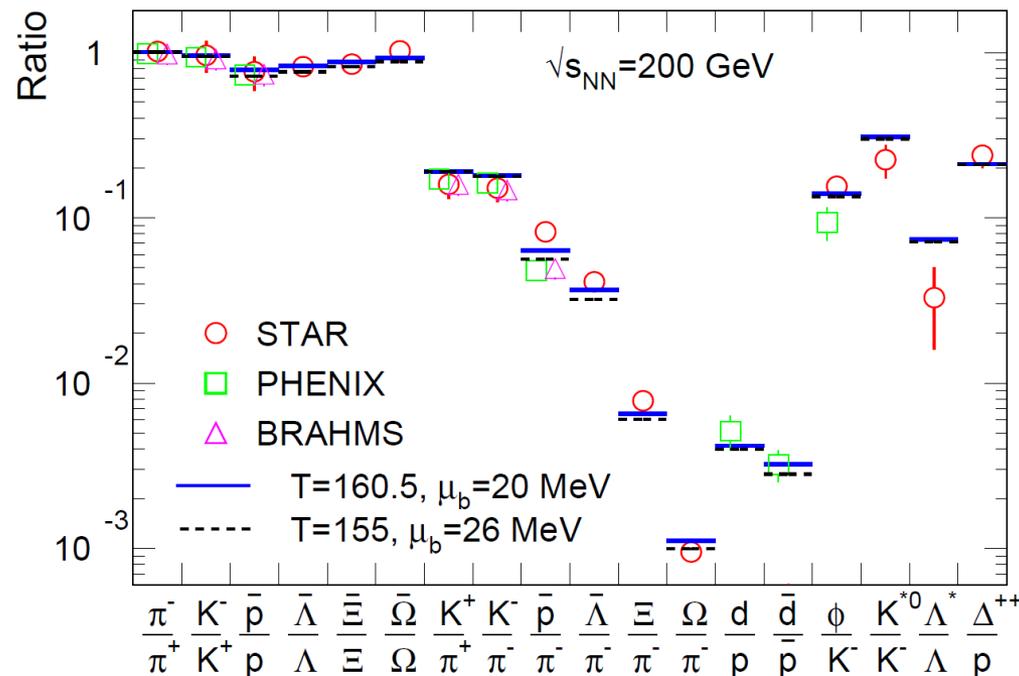
μ_S : ストレンジネス, μ_C : チャーム

$g_i = (2J_i + 1)$ スピン自由度

粒子数: n_i

$$n_i = N_i/V = -\frac{T}{V} \frac{\partial \ln Z_i}{\partial \mu}$$

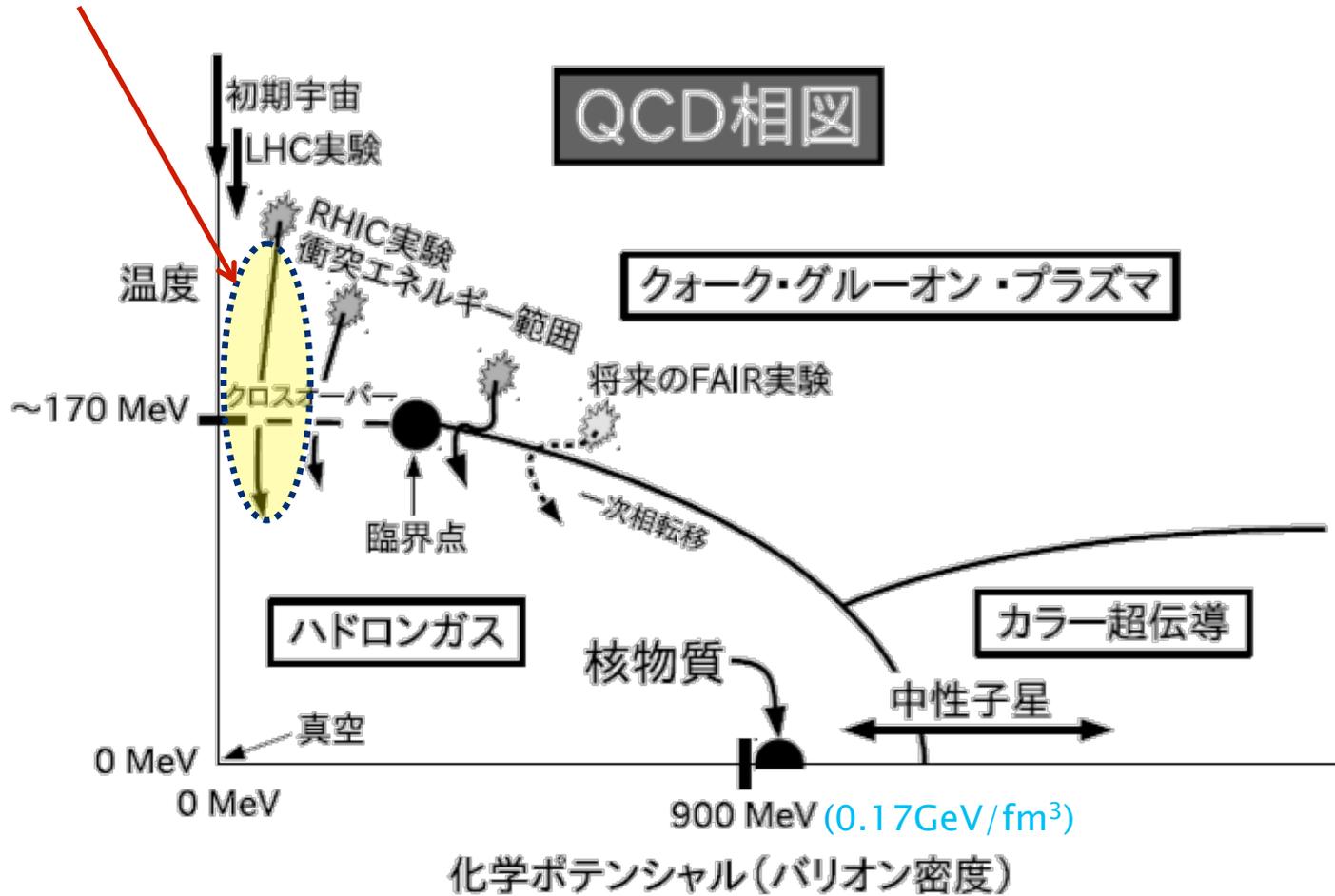
$$= \frac{g_i}{2\pi^2} \int_0^\infty \frac{p^2 dp}{\exp[(E_i - \mu_i)/T] \pm 1}$$



See, e.g., A. Andonic, P. Braun-Munzinger, J. Stachel, NPA 772(2006)167

たとえばRHICでは

- ▶ 高温・低密度！

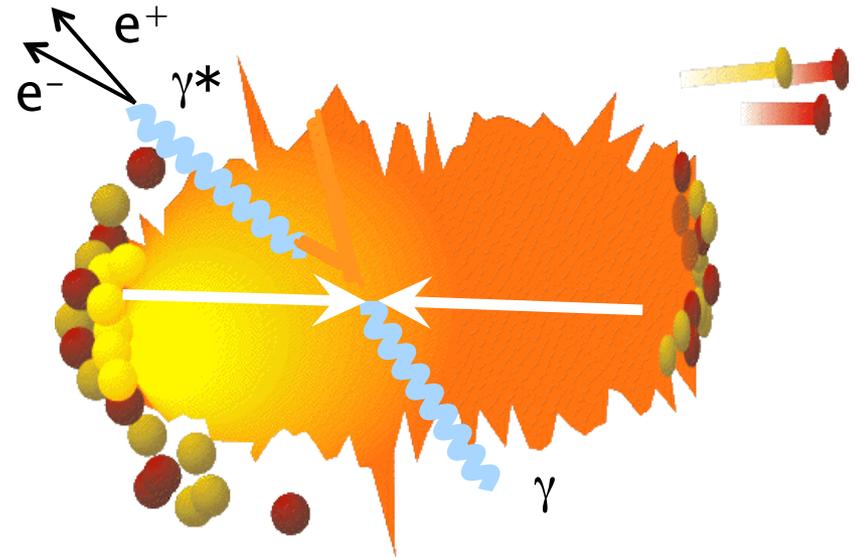


「原子核物理学(朝倉書店)」滝川昇

系の温度を探る熱光子

- ▶ 衝突後の全ての状態から、放出される
- ▶ 放出後は、強い相互作用がないため、衝突領域を通過して出てくる
 - 放出時の温度がわかる
 - 時間発展で積分したものに注意
- ▶ 光子の1次生成プロセスは、コンプトン散乱か、クォーク対消滅

Small Rate: Yield $\propto \alpha\alpha_s$



$$E \frac{dR_\gamma}{d^3 p} = -\frac{\alpha_{em}}{\pi^2} \text{Im}\Pi_{em}(\omega, k) \frac{1}{e^{E/T} - 1}$$

Π_{em} : 光子自己エネルギー

$$\text{Im}\Pi_{em}(\omega, k) \approx \ln\left(\frac{\omega T}{(m_{th}(\approx gT))^2}\right)$$

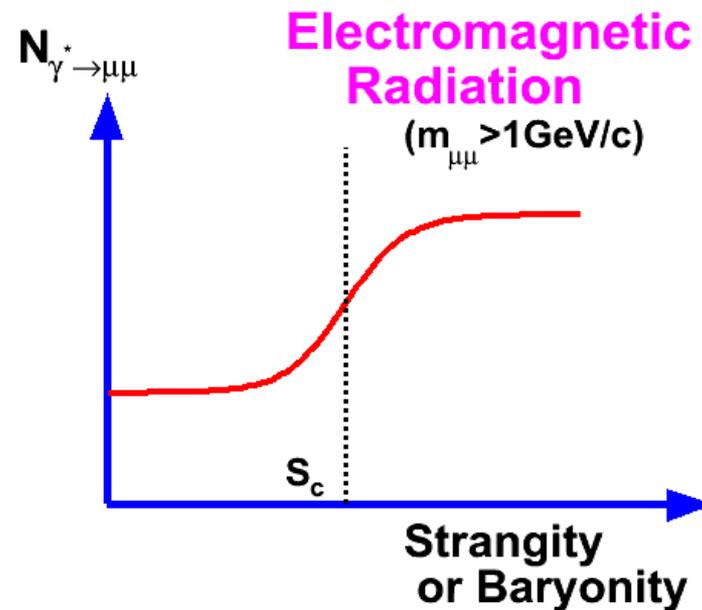
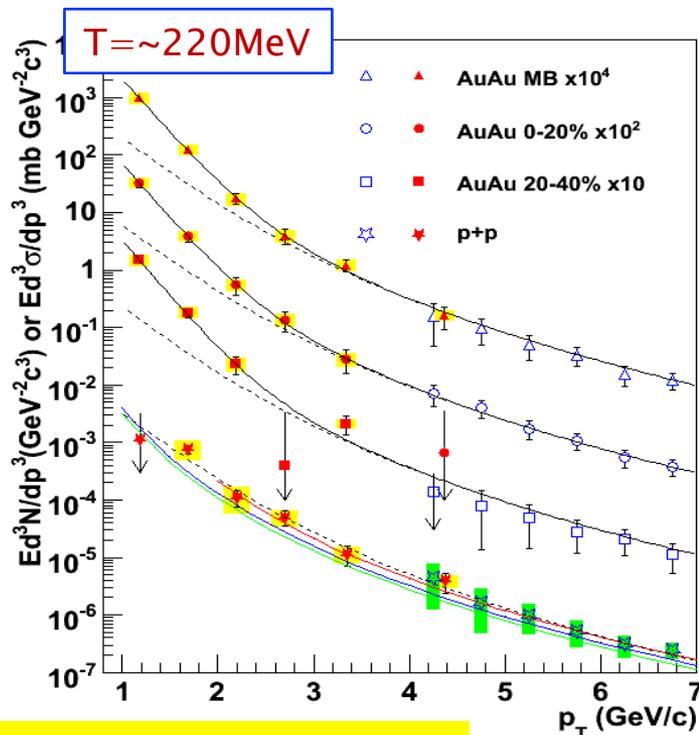
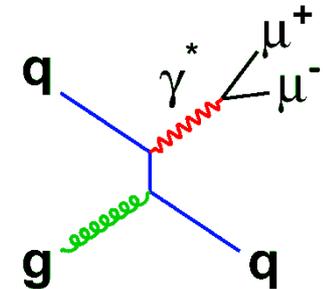
•光子自己エネルギー(生成確率)とボーズ分布の積で表される

• $E \gg T$ の場合は、単純な指数関数となり、そのSlopeは温度を示す

A recent review: TS, Pramana 84, 845(2015)

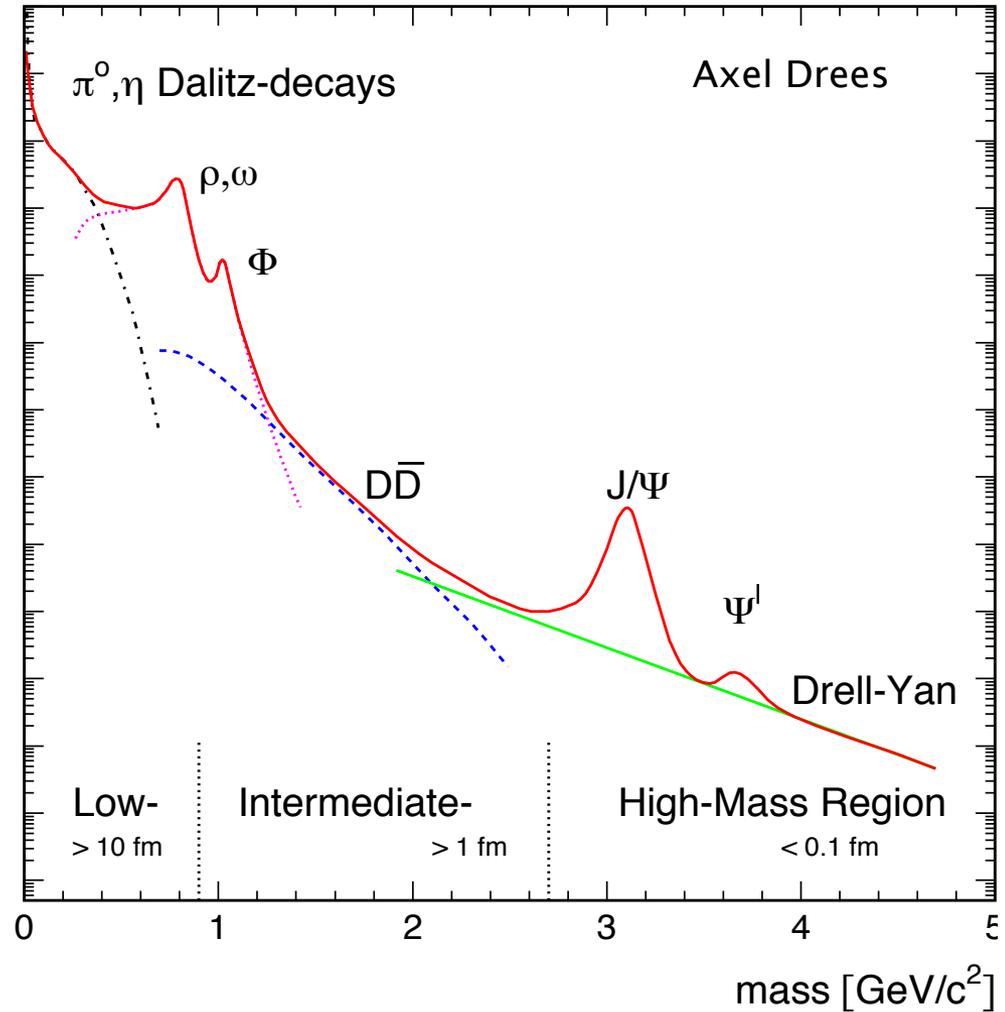
J-PARCでは、仮想光子を測定

- ▶ 熱光子と同等のプロセスで作られ、仮想質量(Q^2)を持つ
- ▶ RHICでは、仮想光子の電子対崩壊チャンネルで、測定に成功
 - ただし、系の時間発展で積分したものであることに注意
- ▶ J-PARCでは、仮想光子のミュオン対崩壊チャンネルで測定する
 - $\gamma \rightarrow \mu^+\mu^-$: π^0 や η からのバックグラウンドがない。S/N比がよい



電子対・ミュオン対の測定

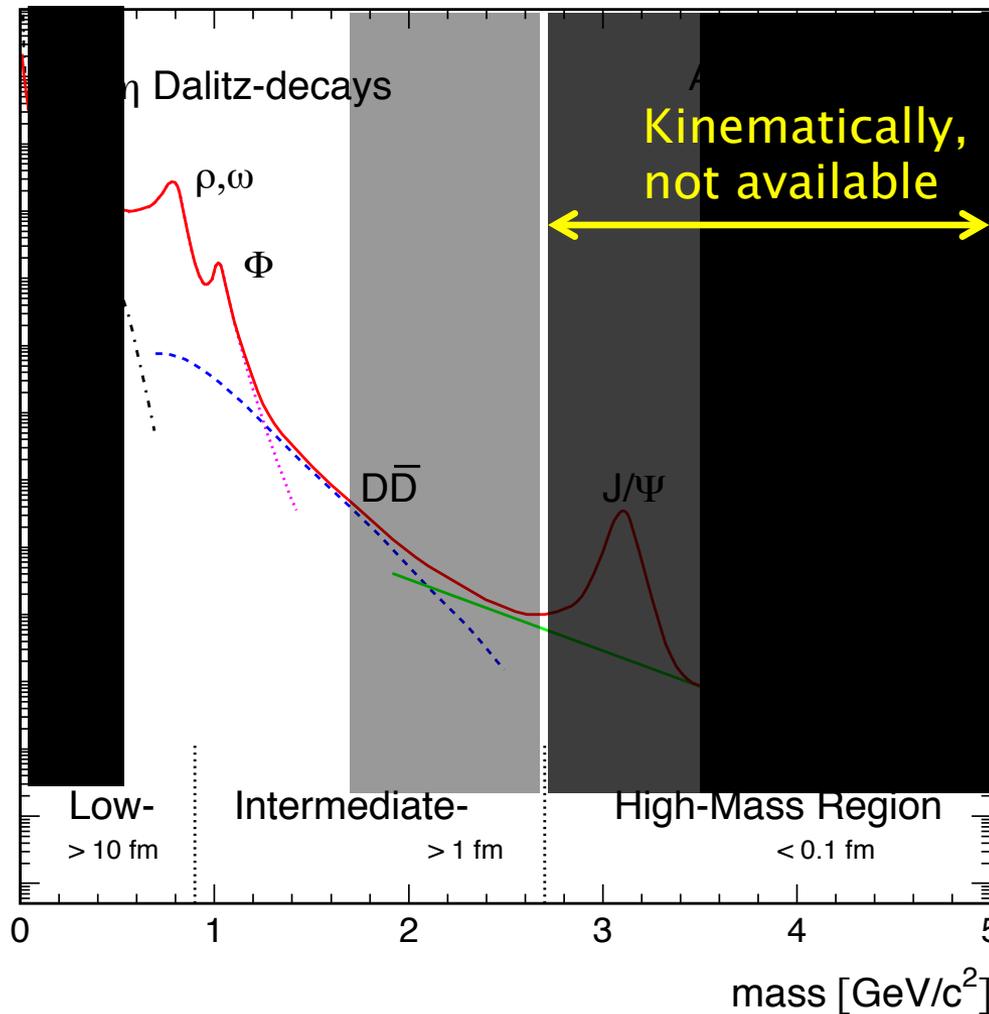
Dielectron landscape at RHIC/LHC energy



ミューオン対の測定

- ▶ バックグラウンド電子対を避ける為、ミューオン対で測定する。
 - 物質からの電子や、ビームハロー
- ▶ $\gamma^* \rightarrow \mu^+\mu^-$ の生成量は、 e^+e^- に比べて下がるが、J-PARCでは有利
 - π^0 や η のダリツ崩壊電子がない
 - 荷電 π, K からのミューオン崩壊はある
- ▶ 電子対チャンネルも確認する
 - $\gamma^* \rightarrow l^+l^-$
- ▶ このエネルギーでのレプトン対測定の例はない。世界初の挑戦

Dimuon landscape at J-PARC-HI energy



dileptons

$$\frac{dR_{ee}}{d^4p} = -\frac{\alpha_{em}}{M^2\pi^3} f^B \text{Im}\Pi_{em}(M > 0)$$

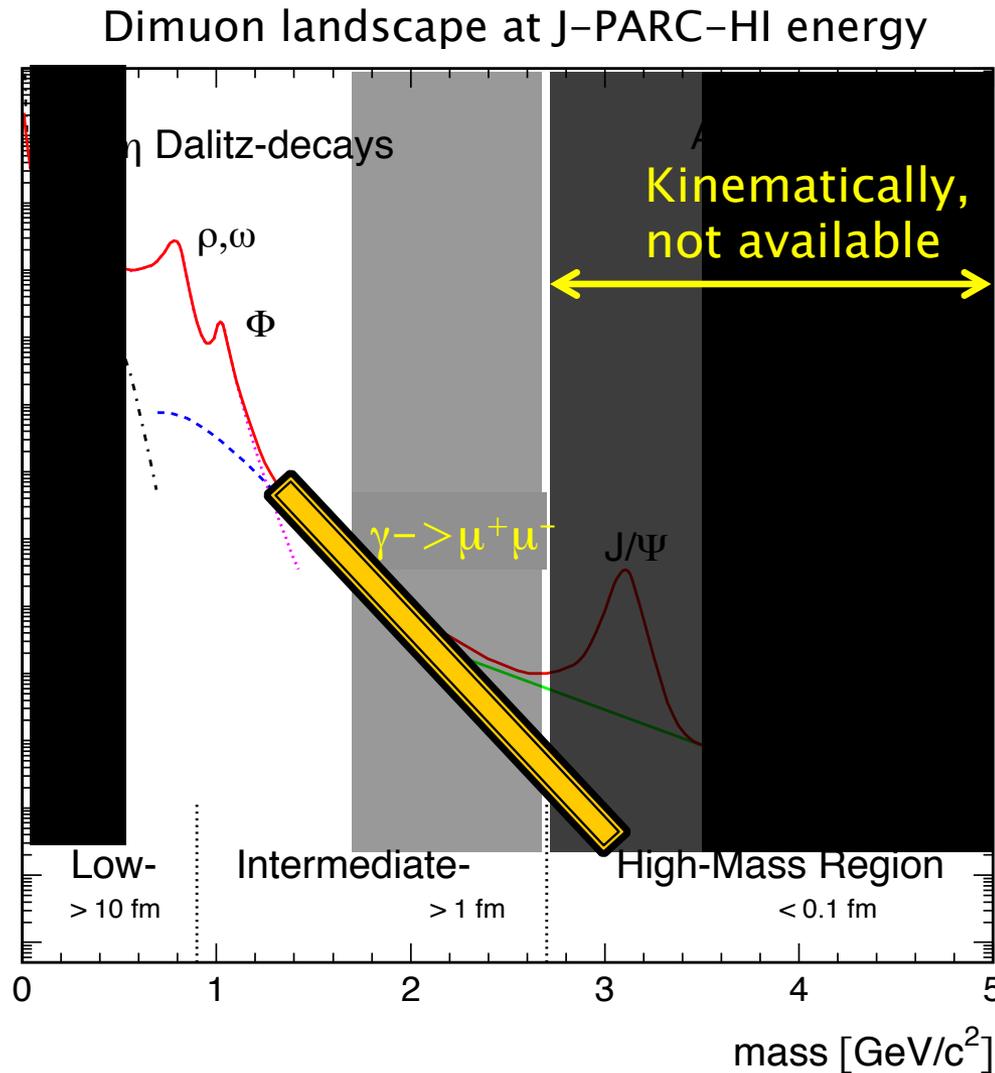
f^B : Bose dist. Π_{em} : photon self energy

ミューオン対による温度とモーメント測定

- ▶ $\gamma^* \rightarrow \mu^+\mu^-$ で仮想光子を測るには ϕ 中間子より上の領域に注目する。
 - 本質的にチャームの生成がないので、この領域は、熱的電子対が支配的
- ▶ レプトン対のモーメント測定
 - QCD和則の拡張によって、間接的に $\langle q\bar{q} \rangle$ に結び付けられる。
 - Hayano and Hatsuda, RMP82, 2949

$$\int dm_{ee} N(m_{ee}) m_{ee}^n (n = 1, 2, \dots)$$

- ▶ このエネルギーでのレプトン対測定の例はない。世界初の挑戦



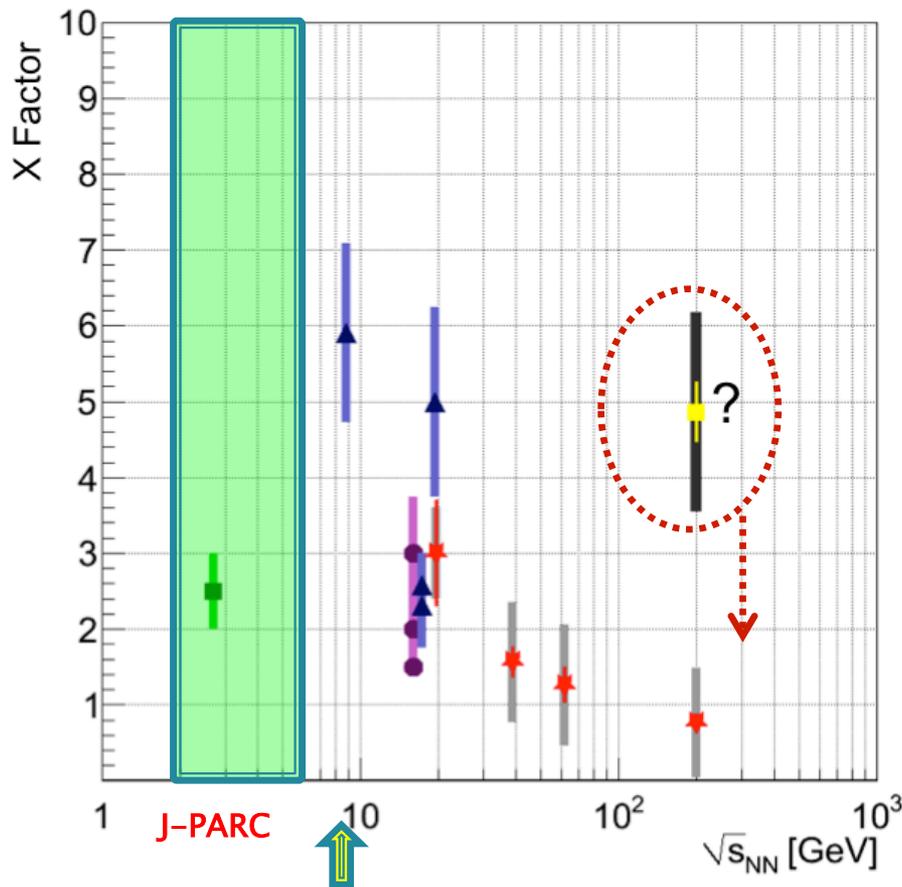
dileptons

$$\frac{dR_{ee}}{d^4p} = -\frac{\alpha_{em}}{M^2\pi^3} f^B \text{Im}\Pi_{em}(M > 0)$$

f^B : Bose dist. Π_{em} : photon self energy

低質量レプトン対の系統性

- ▶ X-Factor: Low-mass dilepton enhancement factor
 - Measured / cocktail in $m=0.2-0.8 \text{ GeV}/c^2$



- NA60 In+In at 158 GeV/u
- HADES Ar+KCl at 1.76 GeV/u
- ▲ CERES Pb+Au at 40 GeV/u
- ▲ CERES Pb+Au at 158 AGeV ($\sigma/\sigma_{\text{tot}} = 28\%$)
- ▲ CERES Pb+Au at 158 AGeV ($\sigma/\sigma_{\text{tot}} = 7\%$)
- ▲ CERES S+Au at 200 AGeV
- PHENIX Au+Au at 200 AGeV
- ★ STAR Au+Au at $\sqrt{s} = 200 + \text{BES GeV}/u$

PHENIXの値は下がりました(2015)

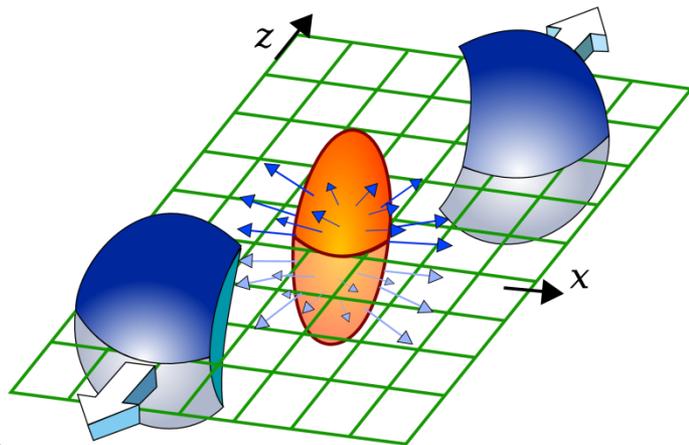
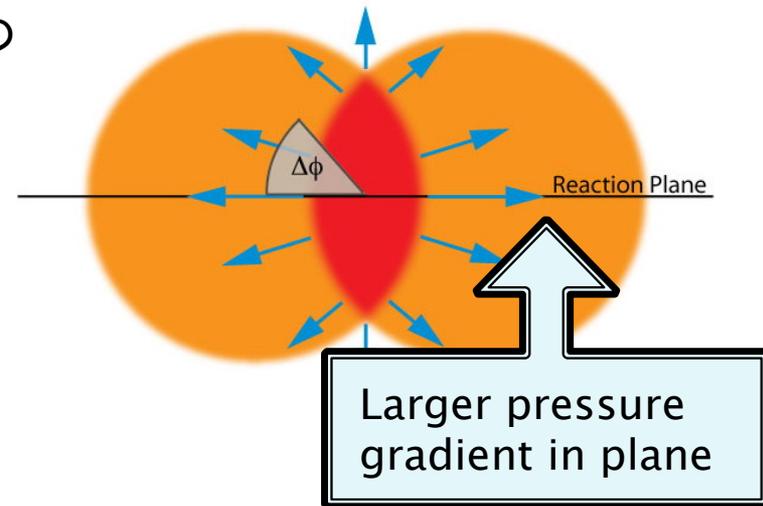
Maximum low mass enhancement around J-PARC energies?

T. Galatyuk, EM probes of Strongly Interacting Matter, ECT*, Trento 2007

Highest baryon density $\sim 8 \text{ GeV}$
(Randrup, PRC74(2006)047901)

粒子の集団運動

- ▶ 非中心衝突においては、衝突領域が非等方
 - 熱平衡に達していれば、この非等方性が、横運動量の非等方性を生む
- ▶ 粒子の放出角分布を反応面に対して測定し、フーリエ展開する。
 - 反応面は、前方ラピディティで決定する
- ▶ 二次の係数が楕円性のフローの強度を示す



$$\frac{d^3 N}{p_T dp_T dy d\varphi} \propto [1 + 2v_2(p_T) \cos 2(\varphi - \phi_{RP}) + \dots]$$

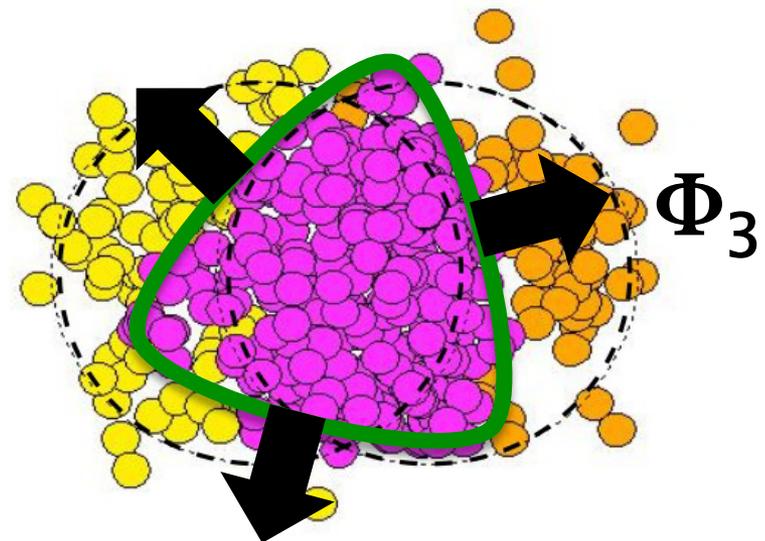
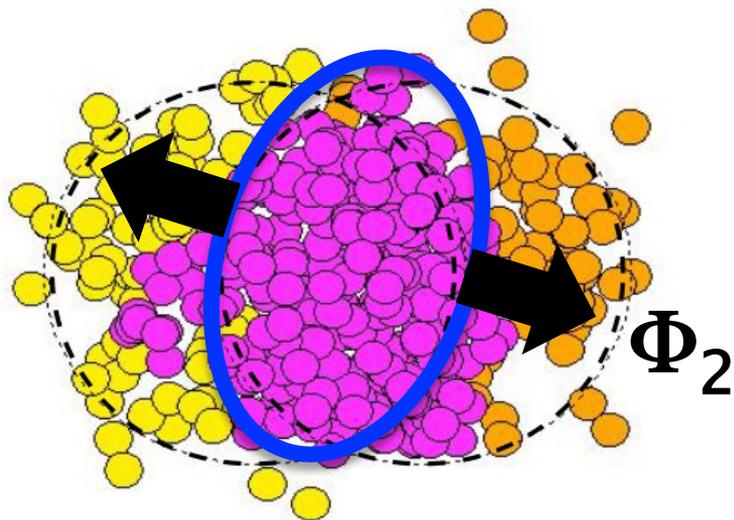
Φ_{RP} : Event Plane

核子の位置は揺らぐから....

- ▶ 核子の分布に揺らぎがあるため、衝突面は、完全な楕円ではない
 - 高次の非等方性が出現 ($v_3, v_4, \dots v_n$)
- ▶ 高次の非等方性は、系を「連続流体」として見たときの諸量に、敏感である
 - 状態方程式 $E=E(P)$ 、ずり粘性 (η) とエントロピー (s) の比が、得られる。 (η/s)

$$\frac{dN}{d(\phi - \Psi_n)} = N_0 \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} v_n \cos\{n(\phi - \Phi_n)\} \right]$$

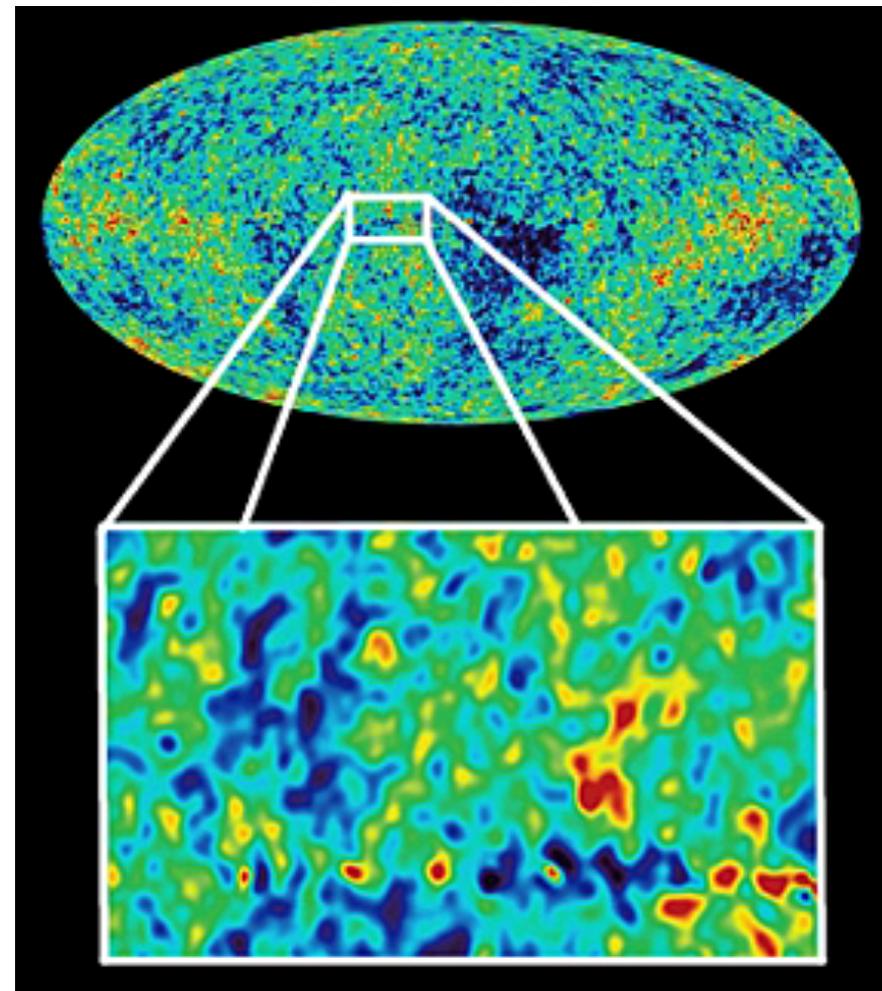
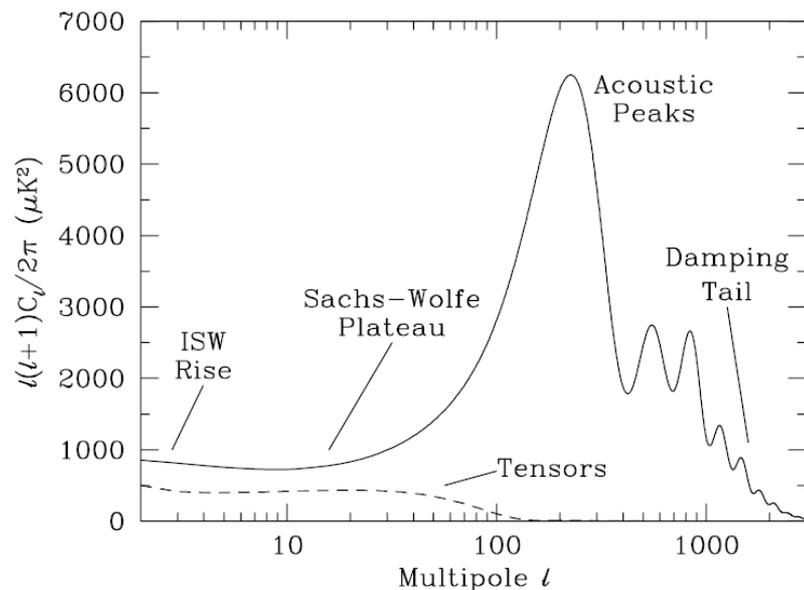
Φ_n : Event Plane



観測宇宙論との類似性

- ▶ 背景輻射の温度揺らぎ
 - 宇宙標準理論パラメータのインプット

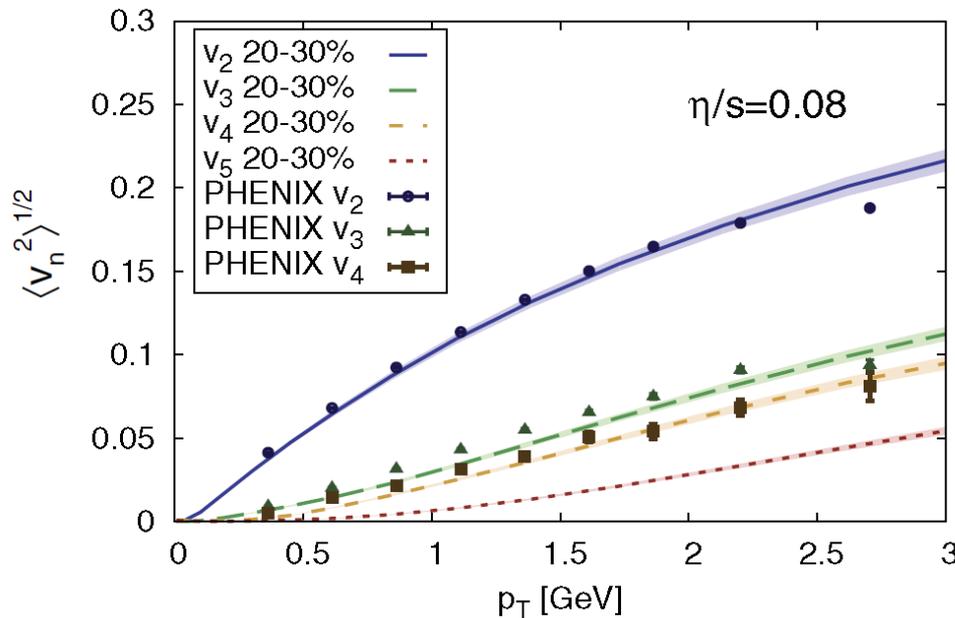
- ▶ 宇宙の時間発展(相転移)の痕跡を残す



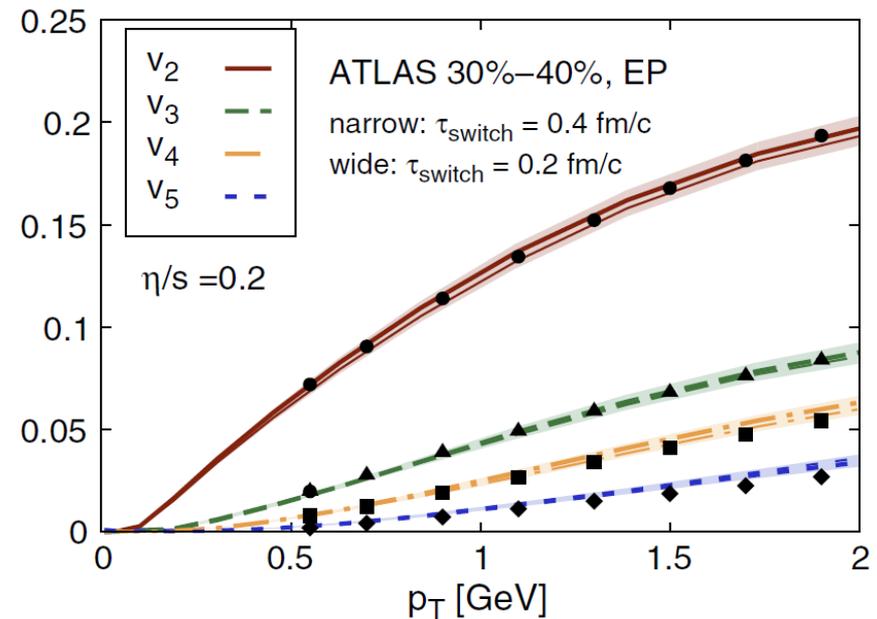
From NASA and Rev. of Part. Phys.

流体モデルとの比較

- ▶ QGPがパートンで構成される流体と考えるモデル
- ▶ RHIC, LHCのいずれの高次フローの結果をよく説明している
 - ずり粘性対エントピー比が、非常に小さい($\eta/s=0.08$ @RHIC, $\eta/s=0.2$ @LHC)
 - RHICが、より完全流体に近いことを意味する。(η/s の理論限界値: $\sim 1/4\pi$)



B. Schenke, S. Jeon and C. Gale, PRC 85, 024901 (2012)



C. Gale et al., PRL110, 012302(2013)

流体モデルとの比較

▶ QGPがパートンで構成される流体と考えるモデル

- ▶ RHIC, LHCのいずれの高次衝突実験
- ずれ粘性対エントロピー比が、非
 - RHICが、より完全流体に近いこ

2005年4月18日

asahi.com

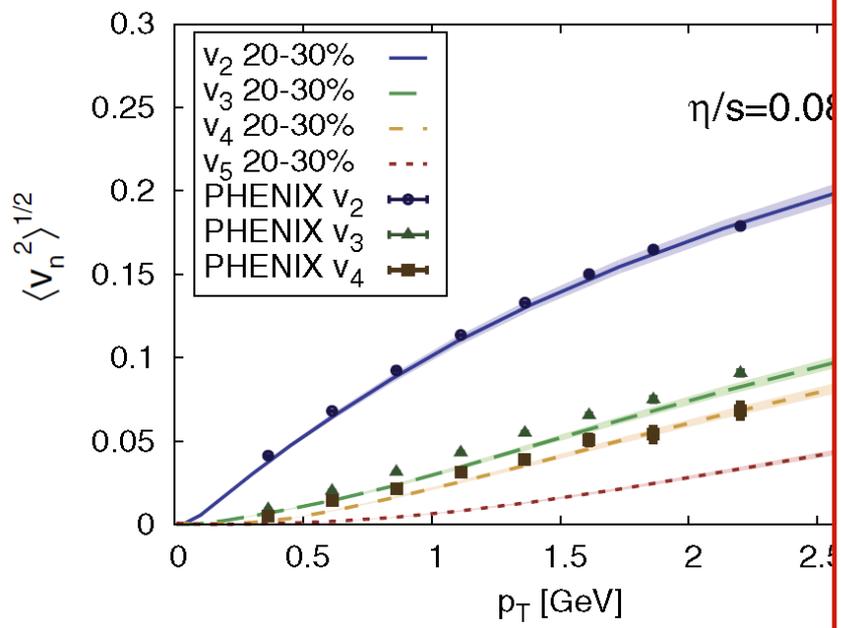
» 恐竜博2005:東京・国立科学博物館で7月3日
 » 古代エジプトから西洋近代絵画まで一 ベル
 | 朝日新聞社から | アスパラクラブ | クラブA&A | 携帯サービス | Web朝日新聞

社会 スポーツ ビジネス 暮らし 政治 国際 文化・芸能 ENGLISH

天気 | 住まい | 就職・転職 | BOOK | 健康 | 愛車 | 教育 | サイエンス | デジタル | トラベル | 囲碁・将棋 | 社説

Benesse

「ゆとり教育」見直し発表。中学校の教科書に「発展的な学



B. Schenke, S. Jeon and C. Gale, PRC 85, 02

社会 asahi.com トップ > 社会 > その他・話題

宇宙の始まりはしづく? 「クォークは液体」と発表

2005年04月18日23時34分

宇宙誕生の大爆発「ビッグバン」直後に相当する超高温・高密度の状態を再現する実験をしてきた日米などの国際チームは18日、物質を形づくる究極の基本粒子クォークは超高温でバラバラになるが、気体のように自由に跳び回るのでなく、しづくのような液体状態にあったと考えられる、と発表した。理論的に予想外の発見で、宇宙や物質のなりたちを説明するシナリオに影響を与える可能性がある。

基本粒子クォークとそれらをくっつける「のり」の役をするグルーオンという素粒子は、超高温の宇宙初期にはバラバラで存在していたが、冷えた今の宇宙では、強い力で陽子などの中に閉じこめられ、1個ずつ引き離すのは難しい。

チームは00年から米ブルックヘブン国立研究所で、ほぼ光速で走る金のイオン同士を衝突させ、ビッグバンの数十万分の1秒後にあたる1兆度以上の「クォークとグルーオンのかたまり」を作ってきた。そこから飛び出した粒子の軌跡などを解析したところ、かたまりは、粘り気がないサラサラした液体の性質を示すことが分かった。

社会その他・話題

- ▶ 宇宙の始まりはしづく? 「クォークは液体」と発表 (23:34)
- ▶ NHK番組への遺憾申し入れ、教師ら都教委に撤回要求 (22:55)
- ▶ 愛犬の歯科検診も開催 4月18日は「よい歯」の日 (15:36)
- ▶ 物資輸送の馬の「ダンツケ」再現 北海道 (06:00)
- ▶ 紀宮さま、結婚前に思いつづる 回答要旨 (05:29)

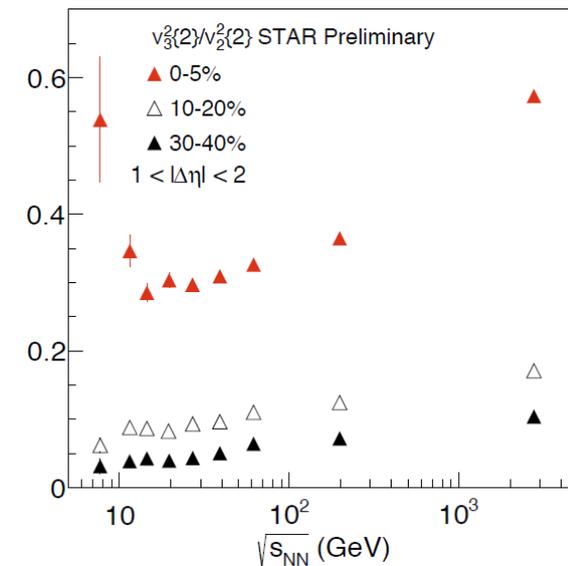
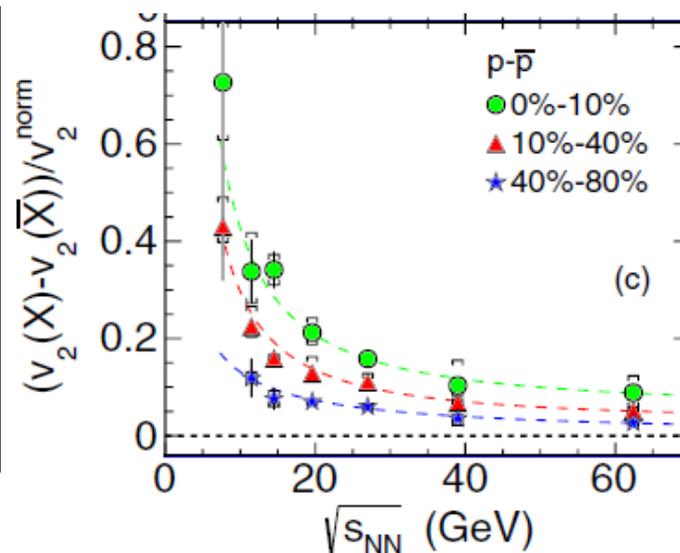
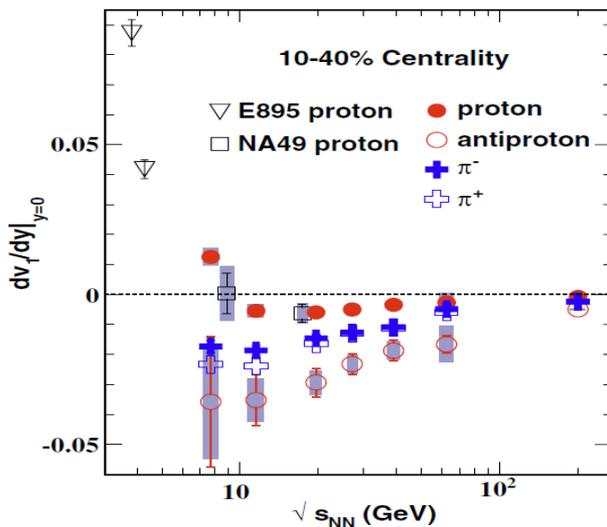
企画特集 一覧

- 暮らし・みなとみらい
- 大規模タワーマンション
- マリOTTホテル
- マリOTTリワードを活用しよう
- 恋愛・結婚特集
- バツ1子持ちは相手に負担?
- 投資信託講座
- 最終回:投資信託を始める前の心構え
- シンガポール航空
- オンライン購入でお得な航空券
- リフォーム特集

$V_1, V_2, V_3, V_4 \dots$

- ▶ v_1 : Slope of directed flow (dv_1/dy) for protons will change its sign from positive to negative around mid-rapidity, if a phase transition occurs
- ▶ v_2 : Flows of protons and anti-protons merge at higher energies.
 - Low p_T , the pressure from the partonic phase is not well developed
- ▶ v_3, v_4 : mainly from fluctuations. Will be increased in partonic phase

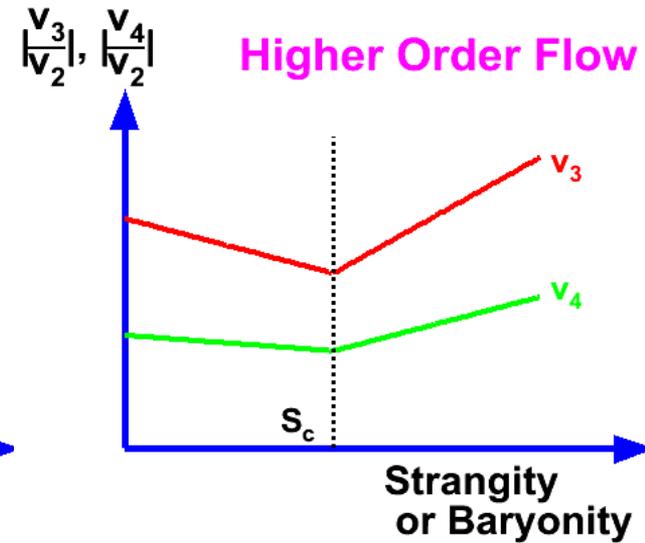
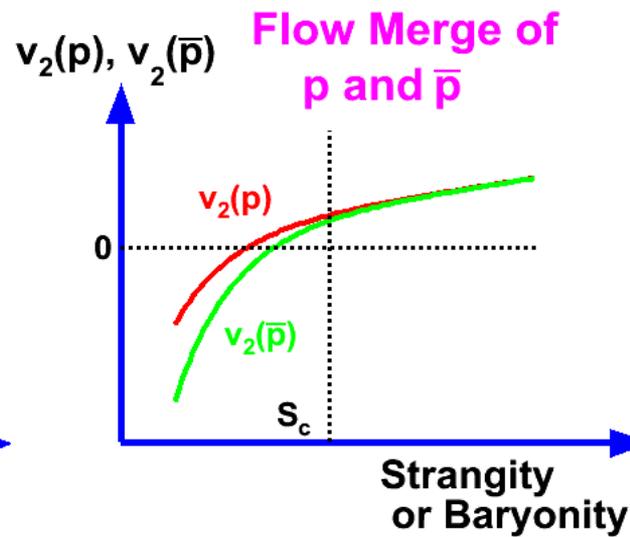
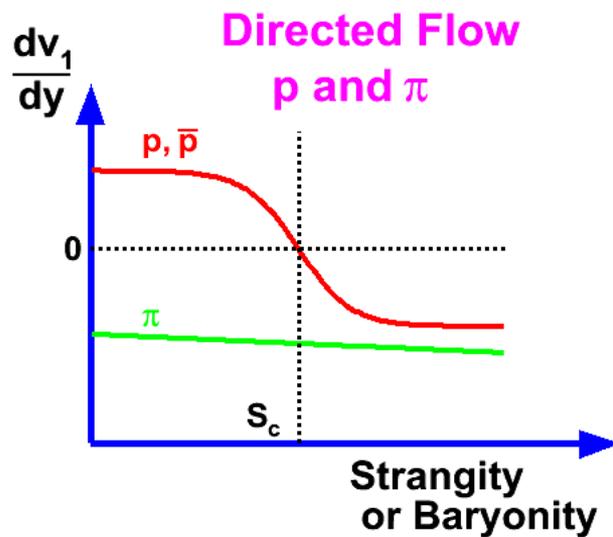
PHYSICAL REVIEW C 93, 014907 (2016)



$V_1, V_2, V_3, V_4 \dots$

- ▶ v_1 : Slope of directed flow (dv_1/dy) for protons will change its sign from positive to negative around mid-rapidity, if a phase transition occurs
- ▶ v_2 : Flows of protons and anti-protons merge at higher energies.
 - Low p_T , the pressure from the partonic phase is not well developed
- ▶ v_3, v_4 : mainly from fluctuations. Will be increased in partonic phase

PHYSICAL REVIEW C 93, 014907 (2016)

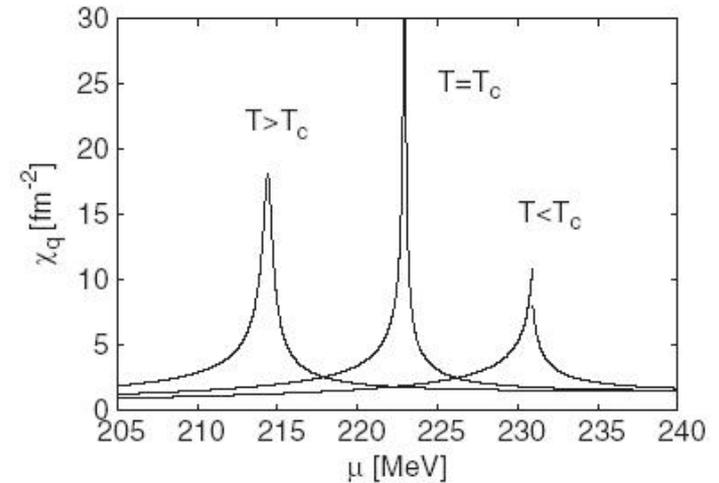


相転移と揺らぎ

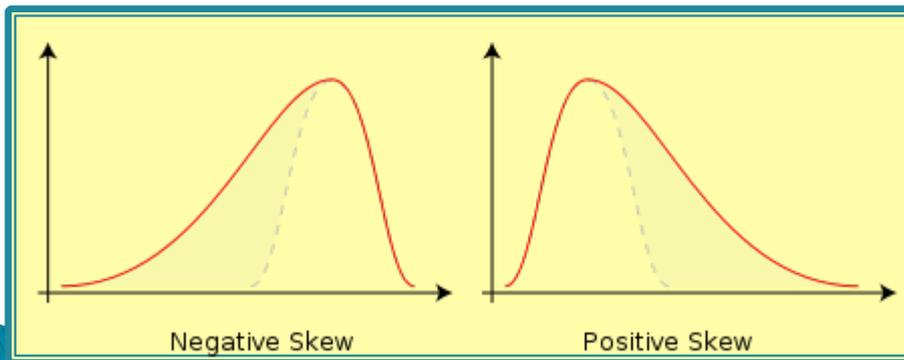
- ▶ エネルギー揺らぎの増加 → 比熱の変化
- ▶ 粒子数の揺らぎの増加 → 圧縮率の変化
- ▶ ネットのバリオン数の揺らぎ → 相関長関数と関連(相転移の指標)

Variance: $\sigma^2 = \langle (\Delta \mathcal{N})^2 \rangle \sim \xi^2$ $[\chi^{(2)}/\chi^{(1)}]$
 Skewness: $S\sigma = \langle (\Delta \mathcal{N})^3 \rangle / \sigma^2 \sim \xi^{5.5}$ $[\chi^{(3)}/\chi^{(2)}]$
 Kurtosis: $K\sigma^2 = \langle (\Delta \mathcal{N})^4 \rangle / \sigma^2 - 3\sigma^2 \sim \xi^9$ $[\chi^{(4)}/\chi^{(2)}]$

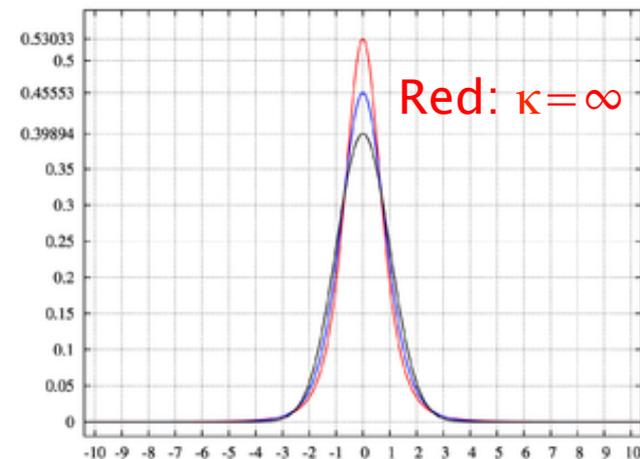
B.-J. SCHAEFER AND J. WAMBACH



Skewness

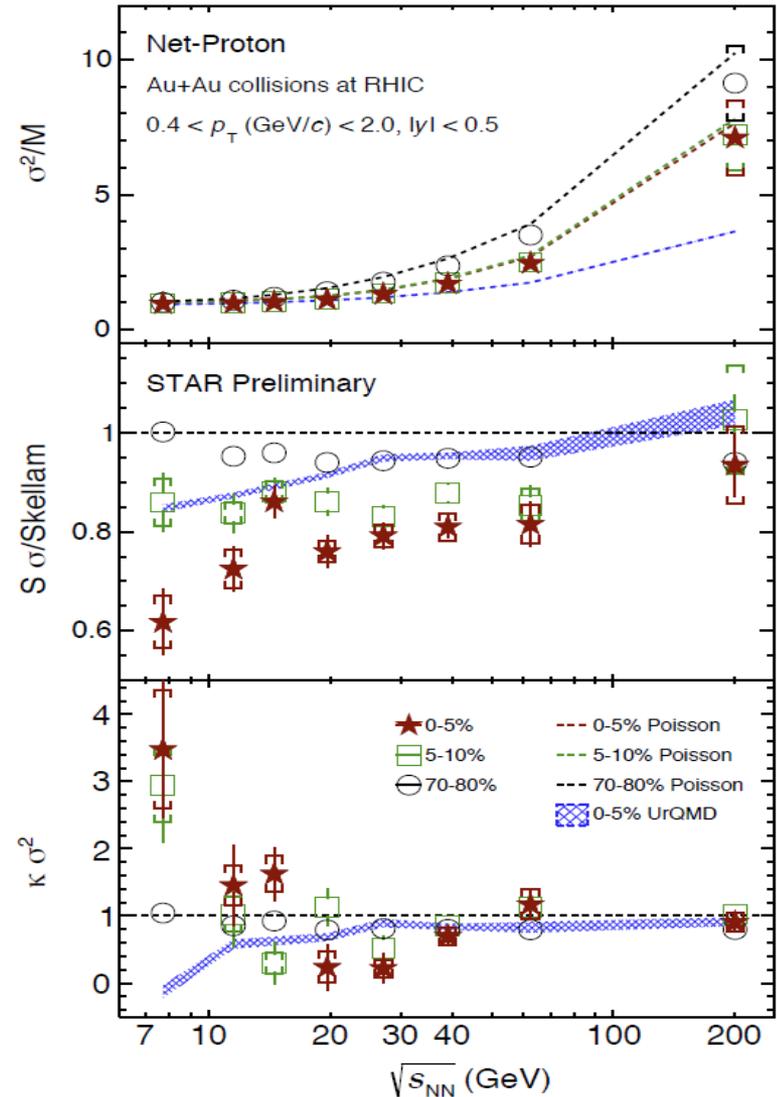


Kurtosis



ネット陽子数の揺らぎ

- ▶ RHICにおけるSTAR実験での観測
 - 加速器のエネルギーを変化させ、 $\sqrt{s_{NN}}=7\text{GeV}$ から200GeVまでの、幅広いエネルギー領域を走査
- ▶ σ/M , $S\sigma$ ともに、Poisson分布と無矛盾
 - M は平均値
 - Skellmanは二つのPoisson分布の畳み込み
- ▶ $K\sigma^2$ のみ、 $\sqrt{s_{NN}}=7-10\text{GeV}$ で大きく変化
 - 臨界点通過の可能性?
- ▶ J-PARCエネルギーでは、この変化の低エネルギー側を見られる可能性
 - 十分な統計量での、詳細な測定が必要

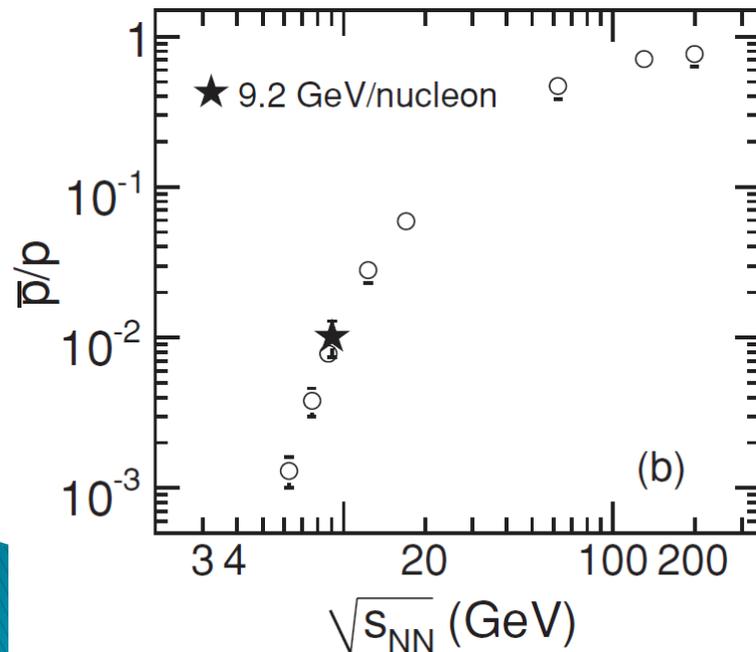


Variance : $\sigma^2 = \langle (\Delta \mathcal{N})^2 \rangle \sim \xi^2$ $[\chi^{(2)}/\chi^{(1)}]$
 Skewness: $S\sigma = \langle (\Delta \mathcal{N})^3 \rangle / \sigma^2 \sim \xi^{5.5}$ $[\chi^{(3)}/\chi^{(2)}]$
 Kurtosis: $K\sigma^2 = \langle (\Delta \mathcal{N})^4 \rangle / \sigma^2 - 3\sigma^2 \sim \xi^9$ $[\chi^{(4)}/\chi^{(2)}]$

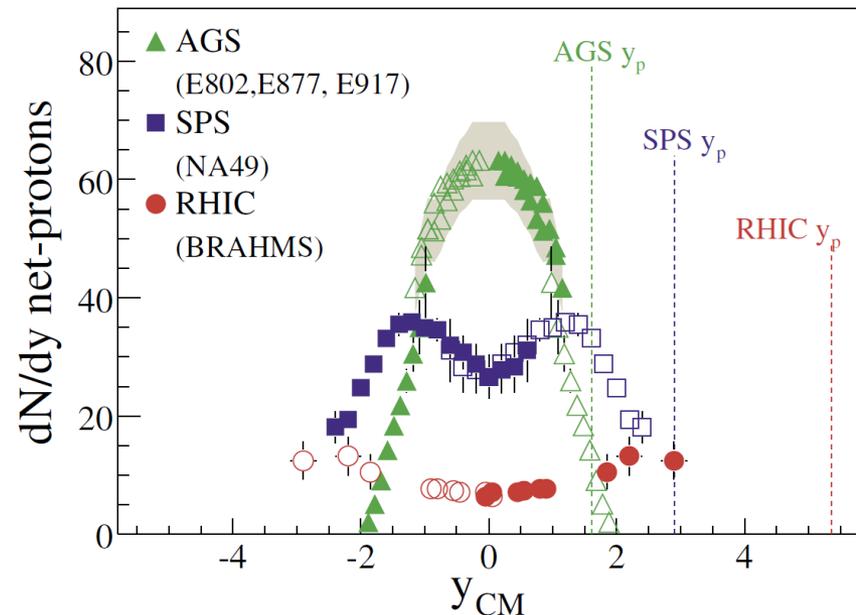
ネット陽子数の揺らぎについての疑問

- ▶ 反陽子の生成量はとても低い
- ▶ 陽子は、バリオンストップングから供給される
- ▶ ネット陽子数の揺らぎに、1次相転移の情報は、どれくらい入ってくるのか？

STAR, PRC81, 024911(2010)

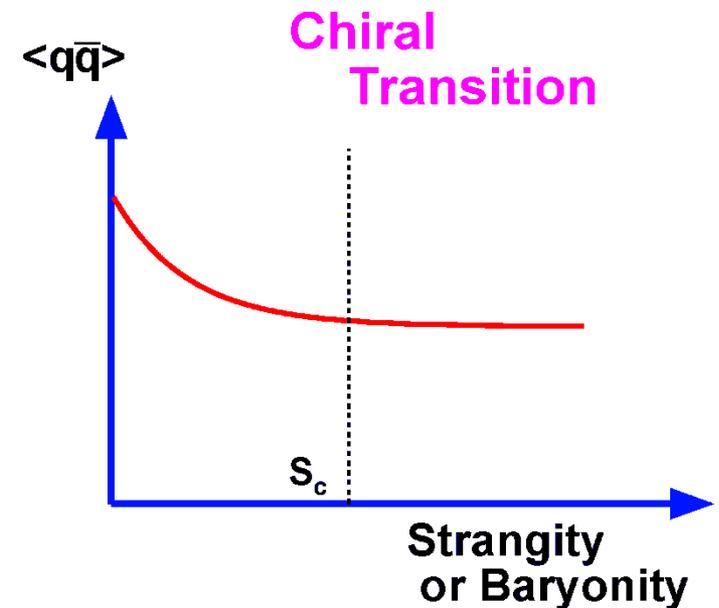
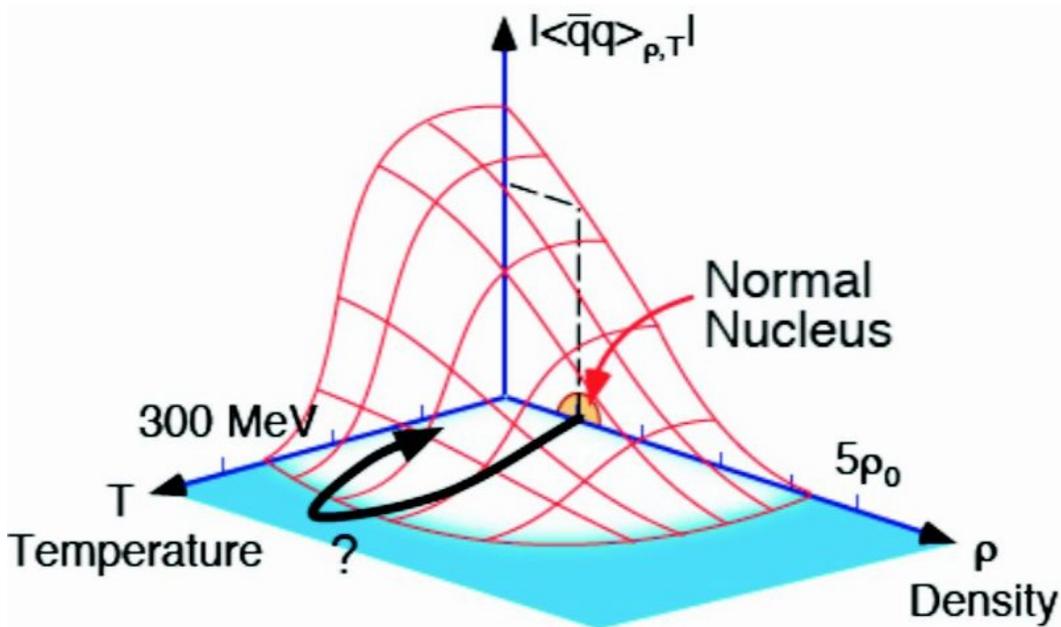


BRAHMS, PRL93, 102301(2004)



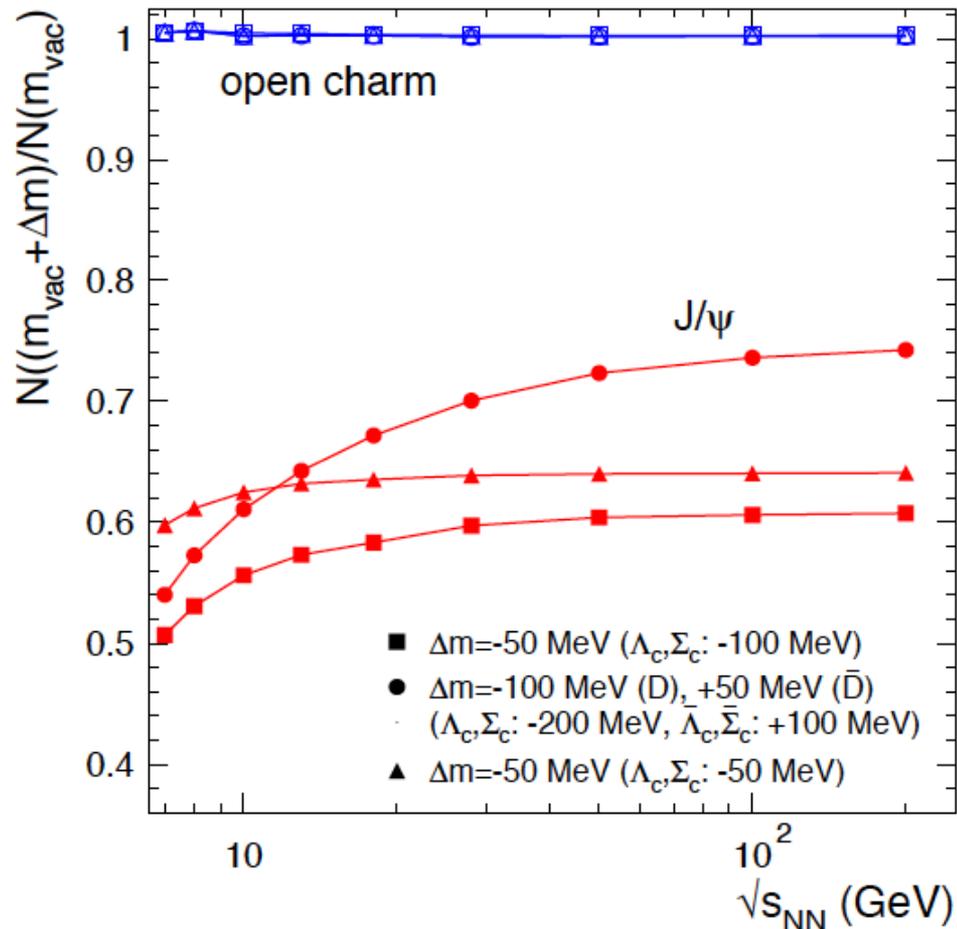
カイラル対称性の回復

- ▶ $\langle q\bar{q} \rangle$ 凝縮は、温度方向より、密度方向のほうが変化が出やすい
 - 緩やかではあるが、発現が早い
- ▶ カイラル対称性の回復をJ-PARC-HIで観測することは、重要
 - 高温側よりも、より面白い



チャームハドロンの質量変化

- ▶ チャーム対生成の閾値エネルギーでは、D中間子の生成量が、J/ψの生成量に影響を与える
 - D⁺: c-dbar, D⁻: cbar-d (both are 1.87GeV/c²)
 - J/ψ: c-cbar (3.10GeV/c²)
- ▶ D中間子が生成されると、チャームがDに取り残されてしまうので、J/ψの生成量が下がる
- ▶ 重心エネルギーが、D中間子を作れないくらい下がると、その分、J/ψ生成にいく確率が高くなるはず
- ▶ しかし、D中間子を作るu, dは、周りの場からもらうから、実際は、影響がない
 - By 原田さん、浅川さん



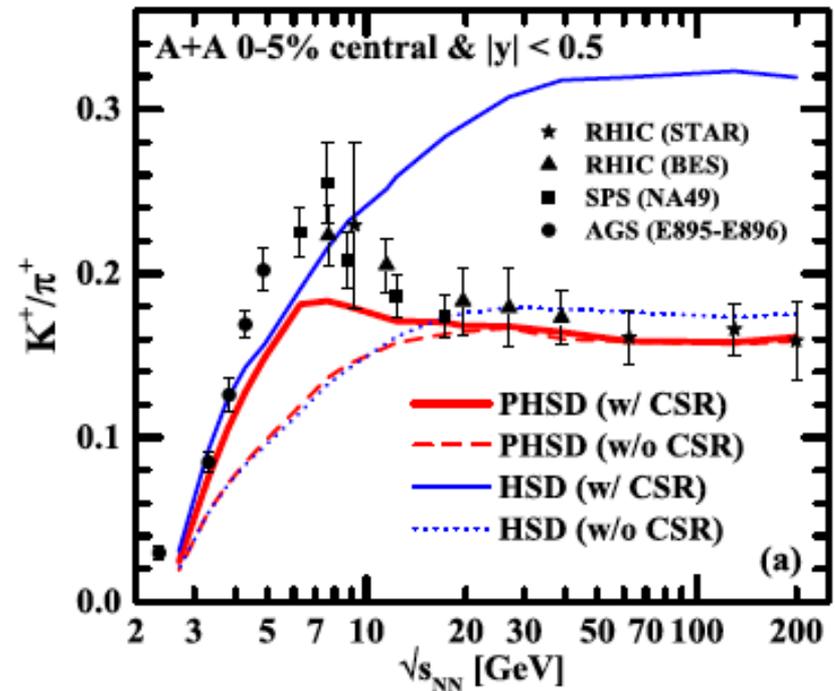
他の観測量は？

- ▶ 他には？チャームドバリオンの質量を系統的に測定するか？
 - 質量変化はわずか。
 - ハドロニックチャンネルで測るのは、ダメ
 - レプトンチャンネルでは何か？

- ▶ 古くて新しい話題？
 - カイラル凝縮を調整して、観測量を無矛盾に記述するようにしてみたら

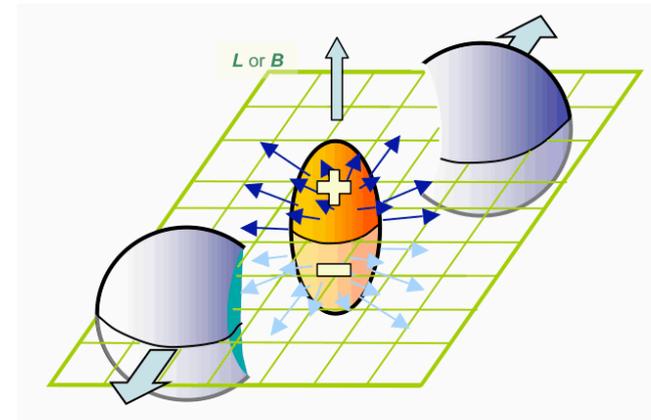
- ▶ K中間子の質量も変化し、ホーンも再現できた？

- ▶ Recent PHSD calculation with χ -sym. restoration reproduces K/π “horn”
 - Cassing, Palmese, Moreau, Bratkovskaya, PRC93, 014902 (2016)



カイラル磁気効果

- ▶ 大域的に成り立つQCDのCP対称性は、局所的には破れていても良い(インスタントンの活躍)
 - クォークの自由度が見えてくる状態で、荷電クォークは、非中心衝突で生じる磁場によって、偏在する
 - カイラル磁気効果
- ▶ 粒子の放出方向の非等方性から、カイラル磁気効果を探る
 - 衝突反応面に対して、二粒子で出る方向を測る.
 - フーリエ級数のsin項に利いてくる

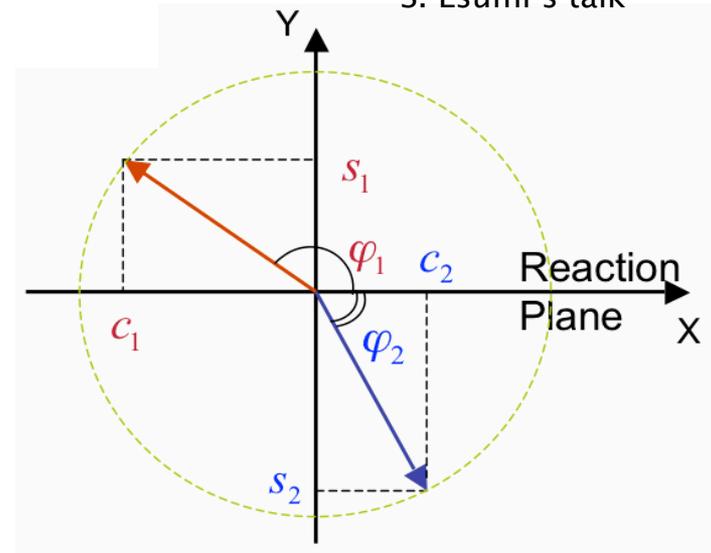


Cartoon taken from S. Esumi's talk

$$\frac{dN_{\pm}}{d\phi} \propto 1 + 2v_1 \cos(\Delta\phi) + 2v_2 \cos(2\Delta\phi) + \dots + 2a_{1,\pm} \sin(\Delta\phi) + \dots, \quad \Delta\phi = \phi - \Psi_{RP}$$

$$\begin{aligned} \langle \cos(\phi_{\alpha} + \phi_{\beta} - 2\Psi_{RP}) \rangle &= \\ &= \langle \cos \Delta\phi_{\alpha} \cos \Delta\phi_{\beta} \rangle - \langle \sin \Delta\phi_{\alpha} \sin \Delta\phi_{\beta} \rangle \\ &= [\langle v_{1,\alpha} v_{1,\beta} \rangle + B^{in}] - [\langle a_{\alpha} a_{\beta} \rangle + B^{out}]. \end{aligned}$$

$$v_1 = 0, \quad B^{in} \approx B^{out}$$



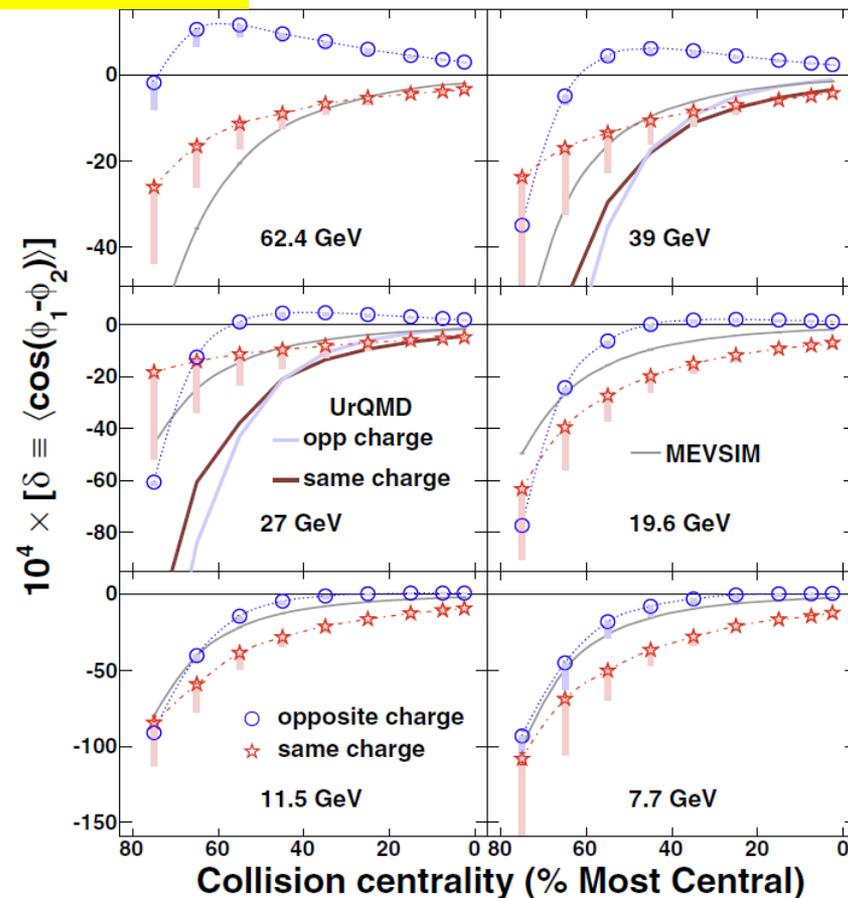
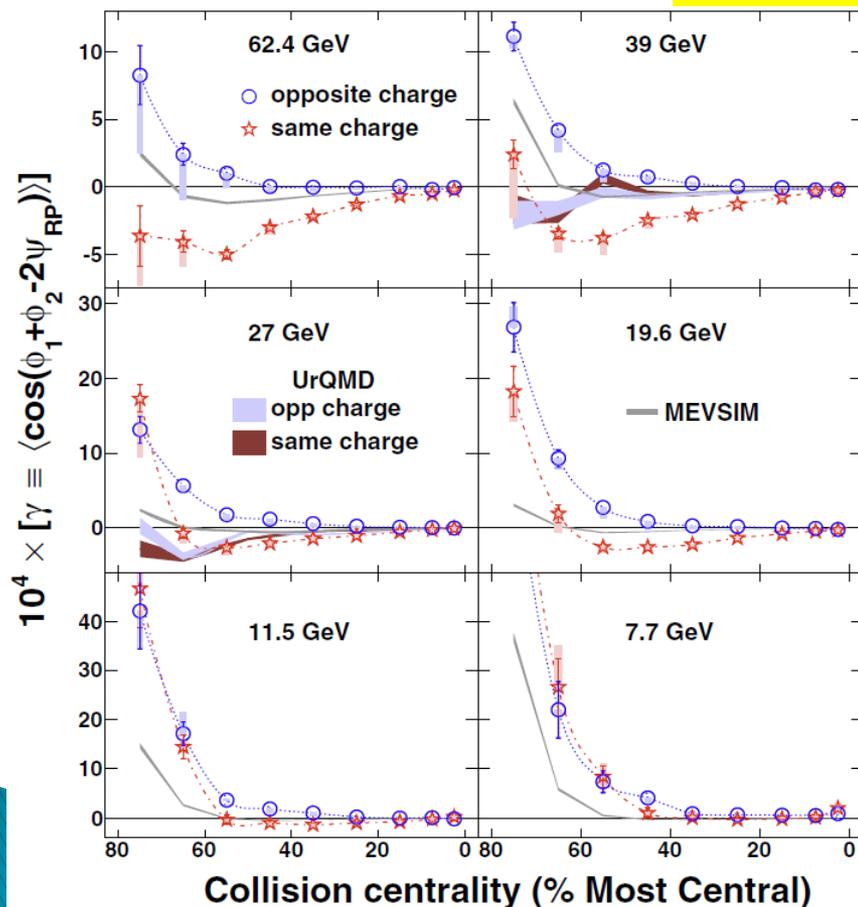
電荷の非等方性を見る

- ▶ H: カイラル磁気効果からのシグナル
- ▶ F: バックグラウンド
- ▶ v_2 : 楕円フロー, κ : 自由なパラメータ

$$\gamma \equiv \langle \cos(\phi_1 + \phi_2 - 2\Psi_{RP}) \rangle = \kappa v_2 F - H,$$

$$\delta \equiv \langle \cos(\phi_1 - \phi_2) \rangle = F + H,$$

STAR, PRL113, 052302 (2014)

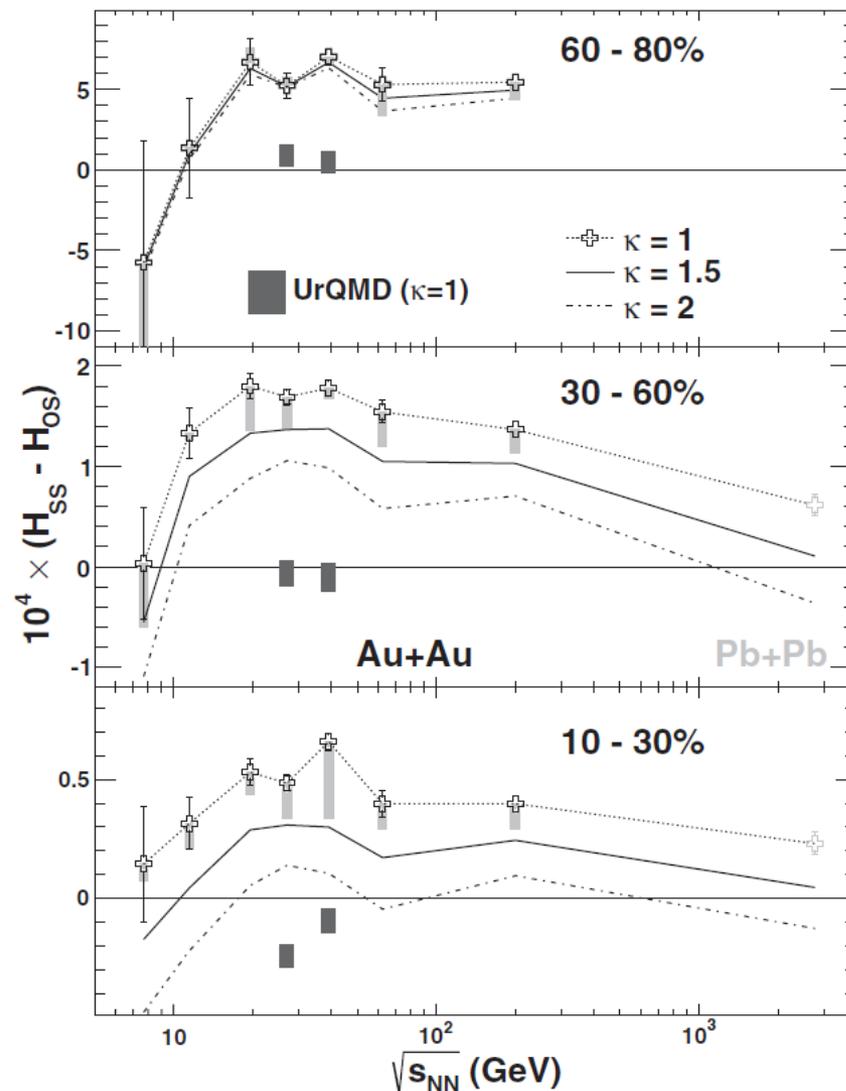


電荷の非等方性を見る

- ▶ H_{SS} : 同じ電荷の粒子対からくる
カイラル磁気効果のシグナル
- ▶ H_{OS} : 異なる電荷の粒子対からくる
カイラル磁気効果のシグナル
- ▶ 3つの κ についての結果を提示
($\kappa=1, 1.5, 2$)
- ▶ ($H_{SS}-H_{OS}$) の大きな変化があれば、
CPの破れの証拠か？
 - 現在は、そのような兆候は見えない
- ▶ J-PARC-HIでも挑戦すべき測定？
 - J-PARCでは磁場が弱いですが、netの
chargeが大きいので、シグナルは大き
いかも(福嶋さんのコメント)

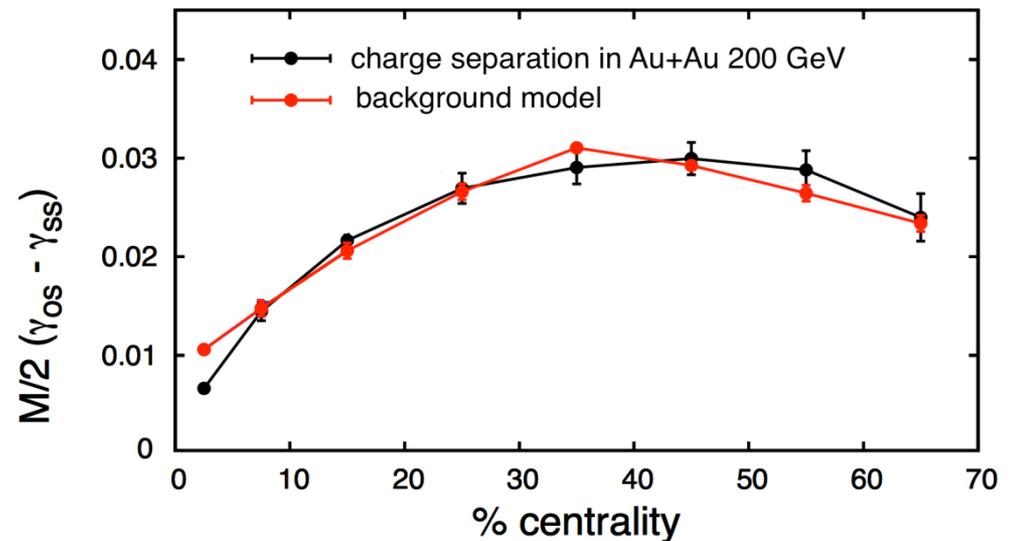
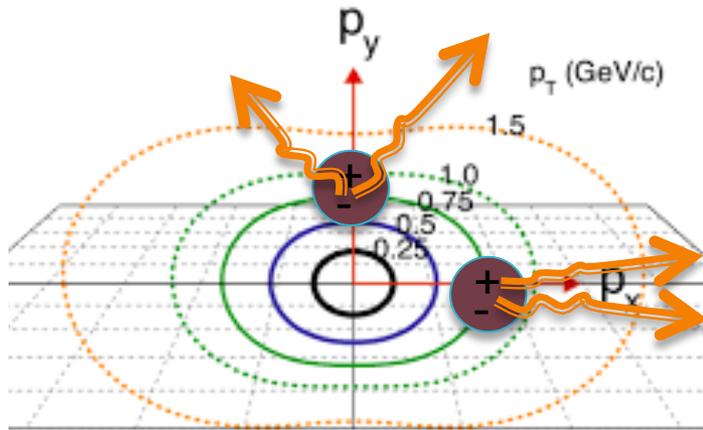
assuming factorization, $H = \frac{\kappa v_2 \delta - \gamma}{1 + \kappa v_2}$
background subtracted

Bzdak, Koch and Liao, Lect. Notes Phys. 871, 503



意外とバックグラウンドが大きいので注意

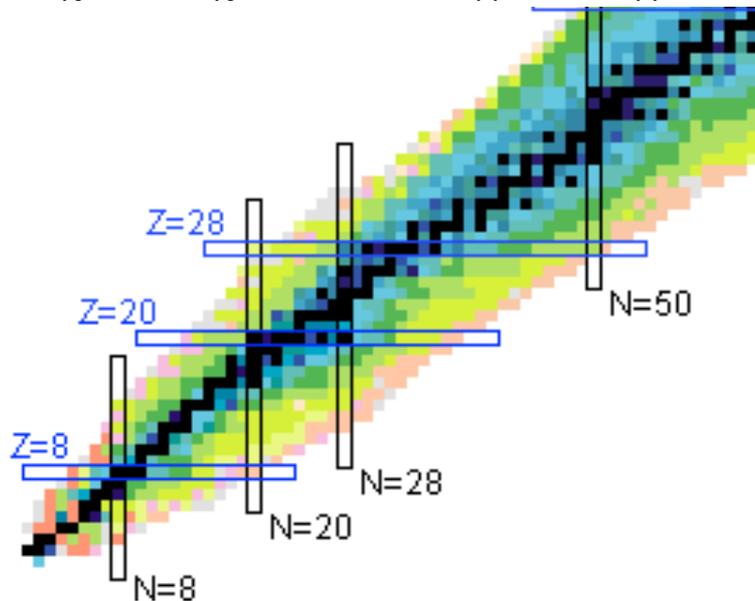
- ▶ カイラル磁気効果に関係のないバックグラウンドが、大きな偽シグナルを作る
- ▶ STARは、形状が同じで、電荷量の違う同重核を使った実験を提案
 - 生成される磁場だけ変えるというアイデア
 - 2018年に走る予定



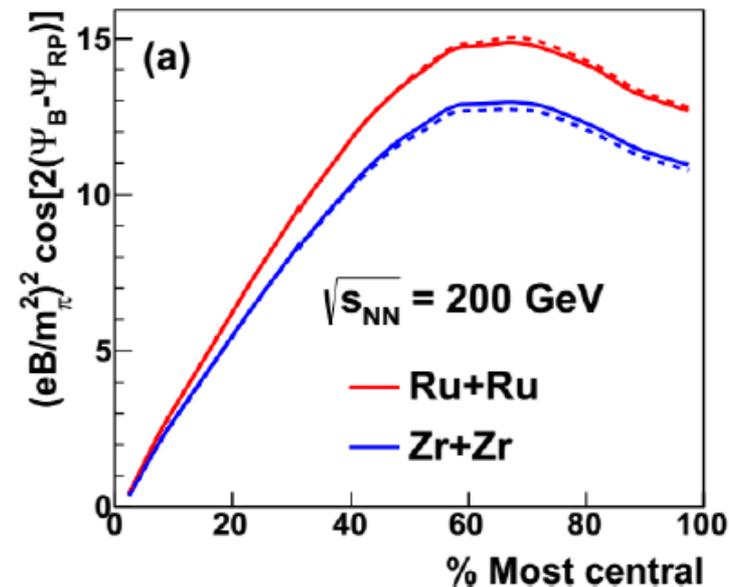
Flow boost collimates pairs more strongly in-plane than out of plane

RHICでは、同重核の実験

- ▶ STARの提案
- ▶ J-PARCでもできるのではないか？より確実な証拠



Calculations: X.-G. Huang and W.-T. Deng



dashed: Woods-Saxon case 1
solid: Woods-Saxon case 2

note: charge separation from CME is expected to go as $\langle (eB)^2 \cos[2(\Psi_B - \Psi_{RP})] \rangle$

Δ^+ は良いプローブか？

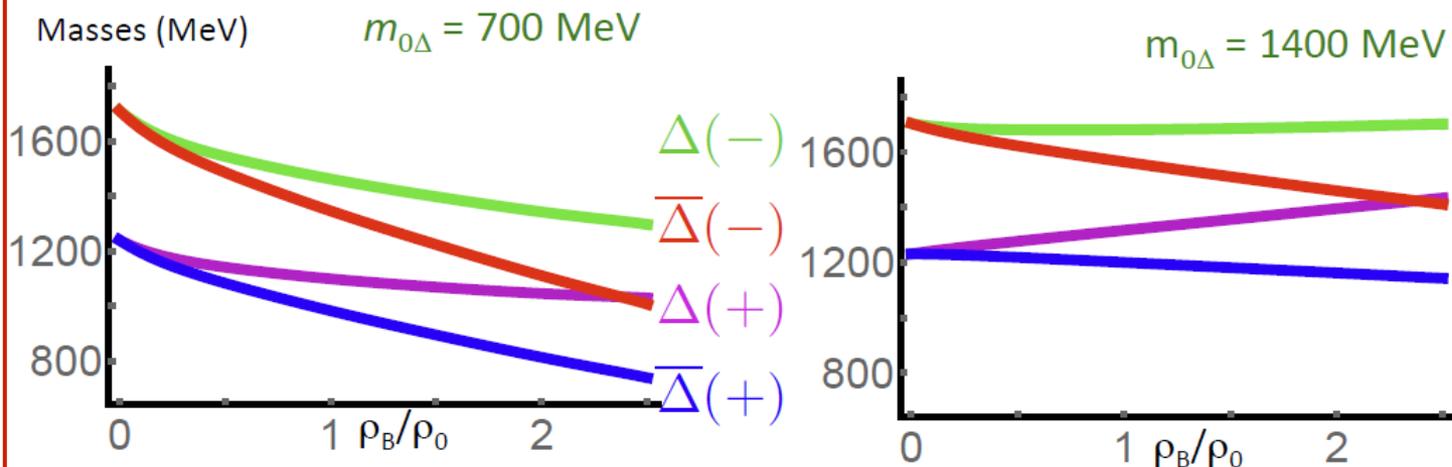
M. Harada at Reimei workshop
Aug, 2016

Density dependence of effective masses

$$m_{\Delta^\pm} = \sqrt{(\bar{g}_1 + \bar{g}_2)^2 \langle \sigma \rangle^2 + m_{0\Delta}^2} \mp (\bar{g}_1 - \bar{g}_2) \langle \sigma \rangle + g_{\omega\Delta\Delta} \langle \omega \rangle \quad (\Delta)$$

$$\bar{m}_{\Delta^\pm} = \sqrt{(\bar{g}_1 + \bar{g}_2)^2 \langle \sigma \rangle^2 + m_{0\Delta}^2} \mp (\bar{g}_1 - \bar{g}_2) \langle \sigma \rangle - g_{\omega\Delta\Delta} \langle \omega \rangle \quad (\text{anti-}\Delta)$$

I use $g_{\omega\Delta\Delta} = g_{\omega NN} = 5.4$ as a typical example.

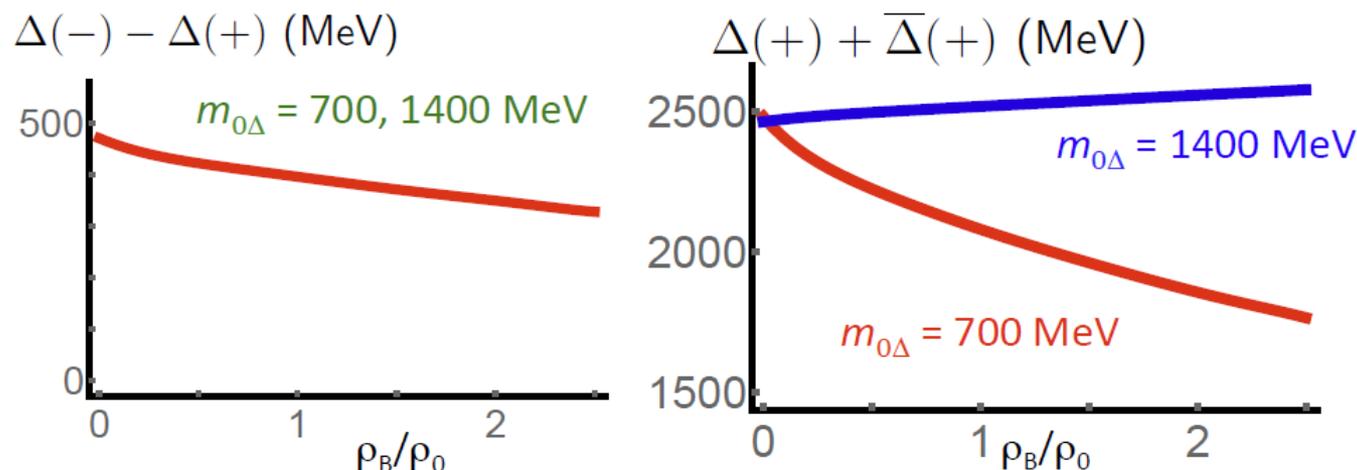


Increasing or decreasing of $\Delta(+)$ baryon mass only is not enough for measuring the chiral symmetry restoration.

カイラルパートナーと共に測るべき

M. Harada at Reimei workshop
Aug, 2016

Partial chiral symmetry restoration



- Studying the mass difference of chiral partners gives a clue for partial chiral symmetry restoration, independently of the value of $m_{0\Delta}$.
- Taking sum of particle and anti-particle will give a clue for chiral invariant mass.

$$m_{\Delta\pm} = \sqrt{(\bar{g}_1 + \bar{g}_2)^2 \langle \sigma \rangle^2 + m_{0\Delta}^2} \mp (\bar{g}_1 - \bar{g}_2) \langle \sigma \rangle + g_{\omega\Delta\Delta} \langle \omega \rangle \quad (\Delta)$$

$$\bar{m}_{\Delta\pm} = \sqrt{(\bar{g}_1 + \bar{g}_2)^2 \langle \sigma \rangle^2 + m_{0\Delta}^2} \mp (\bar{g}_1 - \bar{g}_2) \langle \sigma \rangle - g_{\omega\Delta\Delta} \langle \omega \rangle \quad (\text{anti-}\Delta)$$

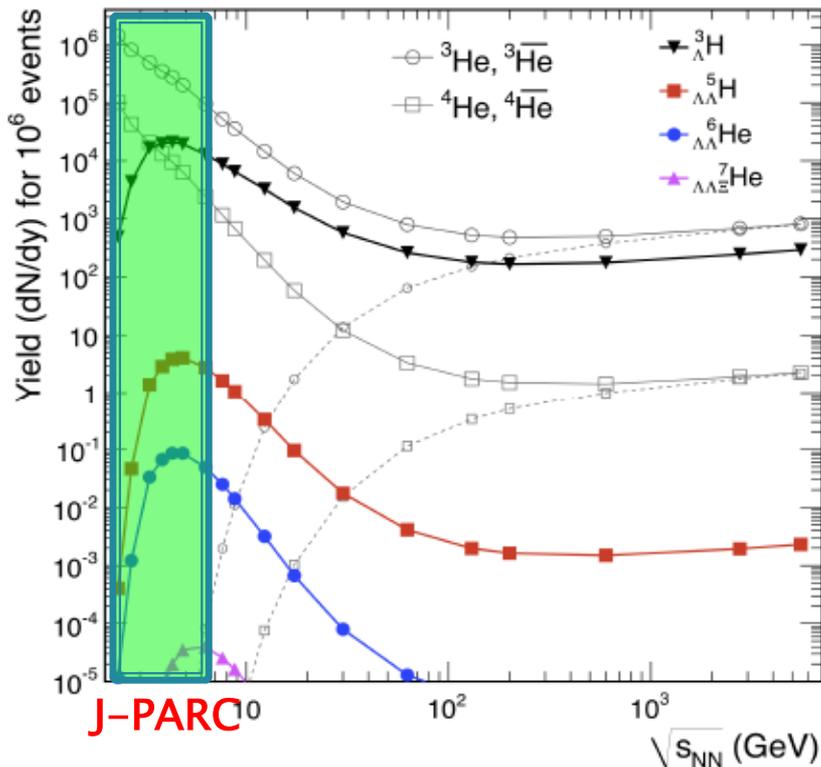
2016/08/8

Physics of Heavy-Ion Collisions at J-PARC

22

ハドロン物理への興味

ハイパー核の工場



A. Andronic, PLB697 (2011) 203

KEK Report 2000-11

Expression of Interest for Nuclear/Hadron Physics Experiments at the 50-GeV Proton Synchrotron

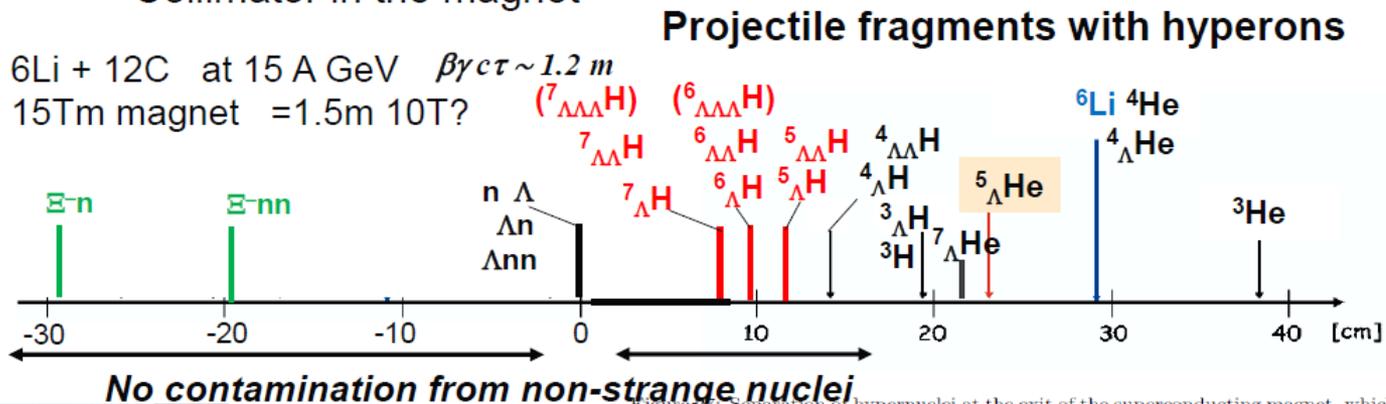
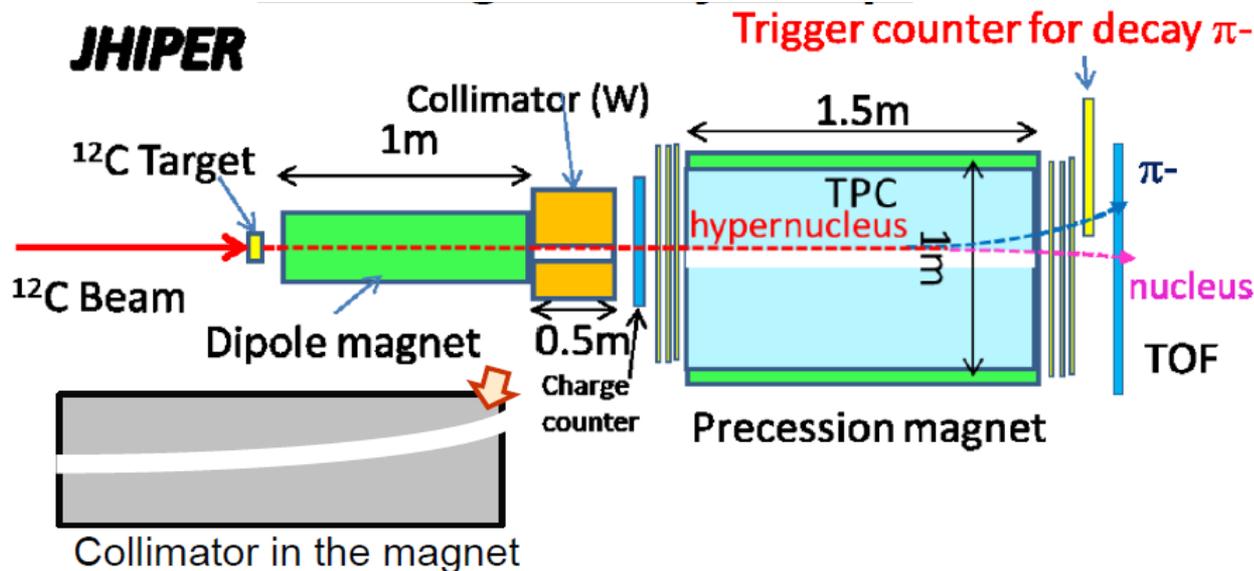
- ▶ J-PARC-HIでは、ストレンジネスの生成量の増加に伴い、ハイパー核の生成量も増加
 - コアルセンスによって作られる
 - $S=-3$ ハイパー核への扉が開かれる

- ▶ ストレンジレットもできるだろう
 - 歴史的に継続している探索実験
 - AGS: e.g. PRC54, R15 (1996)
 - RHIC: PRC76, 011901(R), (2007)

クローズド配置による測定

From H. Tamura,
Reimei workshop, Aug 2016

- ▶ 精確な2次バーテックスの測定
- ▶ 焦点面での位置で、到来するハイパー核を限定できる



ハイパー核物理のアジェンダ

From H. Tamura,
Reimei workshop, Aug 2016

Hypernuclear physics program

- **Magnetic moment and B(M1)**
 - => Baryon properties in a nucleus
 - ΛN-ΣN mixing, Baryon structure change? Effect of chiral symmetry restoration?
 - **Magnetic moment of ${}^5_{\Lambda}\text{He}$, ${}^7_{\Lambda}\text{He}$, ...**
 - Λ-spin-flip B(M1) of ${}^4_{\Lambda}\text{H}/{}^4_{\Lambda}\text{He}$... by Coulomb excitation
- **Neutron-rich/ Multi-strange hypernuclei**
 - => BB/BBB interactions, ΛN-ΣN / ΛΛ-ΞN mixing
 - Λnn , ${}^6_{\Lambda}\text{H}$, ${}^4_{\Lambda\Lambda}\text{H}$, ${}^5_{\Lambda\Lambda}\text{H}$, ... (strangelet)
 - Ξ^-n , Ξ^-nn , Ω^-n ,... (strangelet) **“Weakly-decaying negatively-charged nuclei”**
- **Lifetimes, weak decay branching ratios**
 - => baryonic weak interaction, hypernuclear structure
 - ${}^3_{\Lambda}\text{H}$, ${}^4_{\Lambda}\text{H}$, (${}^4_{\Lambda}\text{He}$, ${}^5_{\Lambda}\text{He}$), ..., $\Xi^-n \rightarrow \Sigma^-n$
- **Interaction cross section in matter => Nuclear radius, neutron halo**
 - Size of ${}^3_{\Lambda}\text{H}$, ${}^6_{\Lambda}\text{H}$, ${}^7_{\Lambda}\text{He}$,...
- **Gamma decays, B(E2) by Coulomb excitation**
 - => Impurity effect: changes of deformation, halo, collective motion,...
 - ${}^7_{\Lambda}\text{He}$, ${}^9_{\Lambda}\text{Be}$, ${}^{13}_{\Lambda}\text{C}$,...

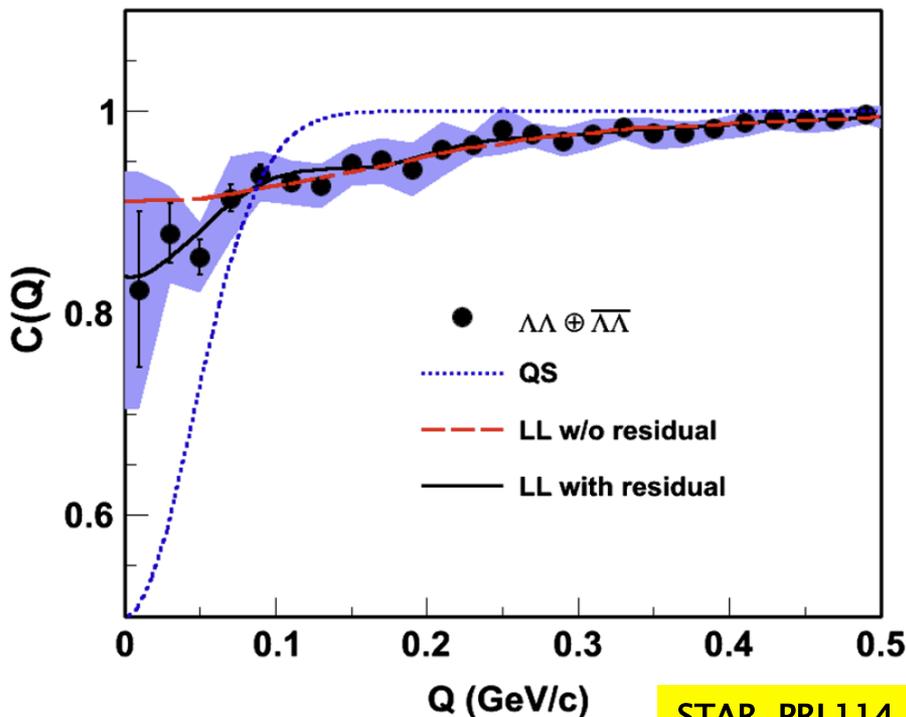
ラムダ・ラムダ相互作用

- ▶ バリオン・バリオン相互作用の測定は、基本的な重要問題
- ▶ ストレンジネス相互作用: Λ - Λ interaction: 他の相互作用と比べて他と少し弱い
 - 媒質中での相互作用を測れないか? レプトン、光子に崩壊するハドロンは?

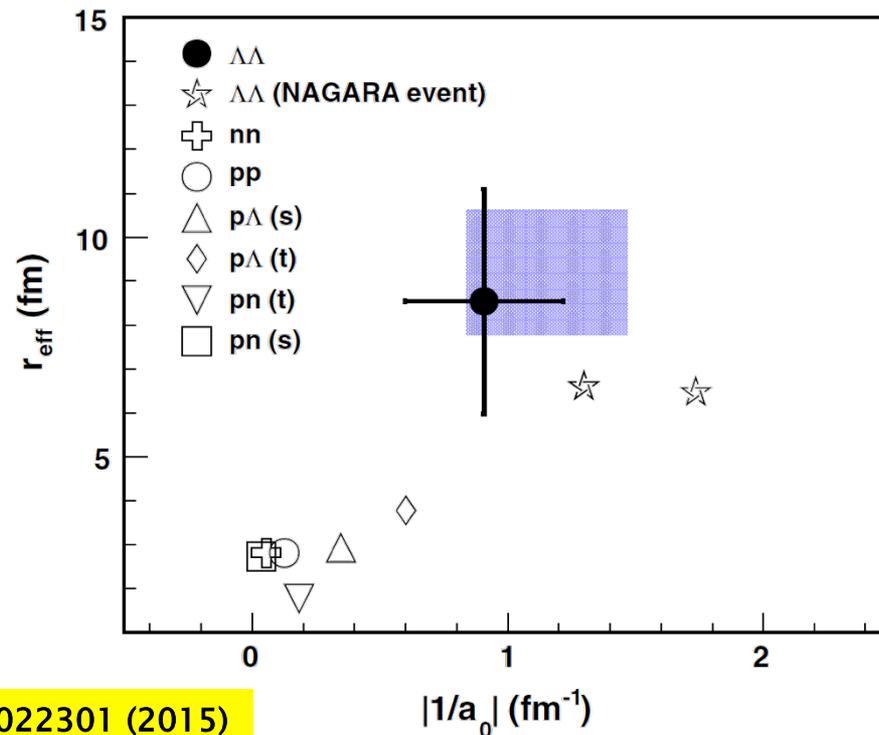
$$C(Q) = N \left[1 + \lambda \left(-\frac{1}{2} \exp(-r_0^2 Q^2) + \frac{1}{4} \frac{|f(k)|^2}{r_0^2} \left(1 - \frac{1}{2\sqrt{\pi} r_0} \frac{d_0}{r_0} \right) + \frac{\text{Re}f(k)}{\sqrt{\pi} r_0} F_1(Qr_0) - \frac{\text{Im}f(k)}{2r_0} F_2(Qr_0) \right) + a_{\text{res}} \exp(-r_{\text{res}}^2 Q^2) \right], \quad (4)$$

$$f(k) = \left(\frac{1}{f_0} + \frac{1}{2} d_0 k^2 - ik \right)^{-1}$$

where $f_0 = a_0$ is the scattering length and $d_0 = r_{\text{eff}}$ is the effective range. Note that a universal sign convention is used



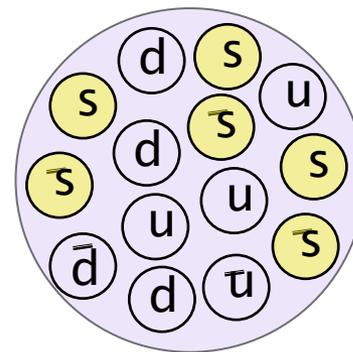
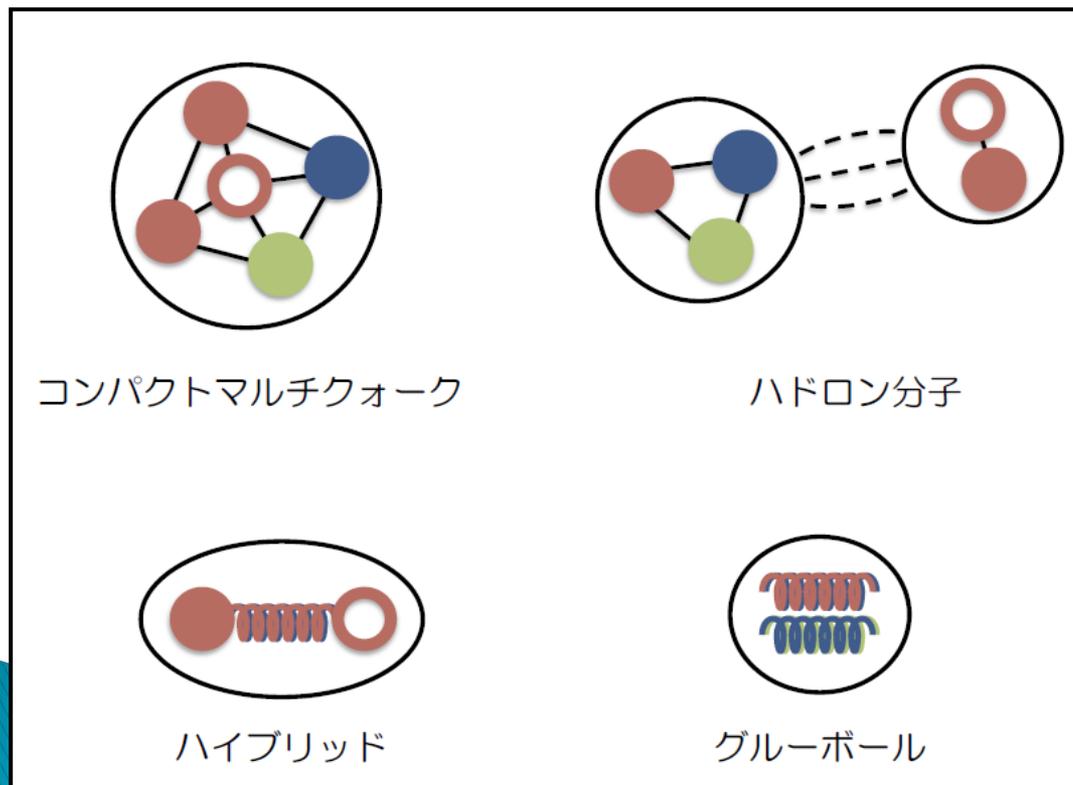
STAR, PRL114, 022301 (2015)



超エギゾチックハドロン？

- ▶ $\Lambda(1405)$, Dibaryon (H-dibaryon, WN, DD,...)
- ▶ Kaonic nucleus (K-pp,...), Strangelet and more..
- ▶ さらなるMulti-quark statesはないのか？
 - 6, 7,8-quark states?

S. Yasui at JPS, Sep 2016



まとめ

- ▶ J-PARCの重イオン衝突では、通常原子核の8倍程度の高密度に達する
 - 中性子星へのアプローチ、カラー超伝導、BEC-BCSクロスオーバーなど豊富な物理
- ▶ ビーム輝度が高いため、高統計の必要な稀事象に焦点を当てられる
 - 10~100MHzの衝突事象
 - トリガー無しで、連続的にデータを取得する（ALICE等の高レート実験で実用化）
 - 高速の計算機群を用い、データ取得直後にイベントを選定し、記録装置に記録する
- ▶ 過去の実験と異なった、新たな測定の視点を導入することが鍵

- ▶ 高エネルギー実験（RHIC、LHC）で発見された、新しい物理量を測定
 - 粒子収量の非等方性、保存量の揺らぎ
 - レプトン対、熱光子など
 - カイラル対称性、閉じ込めへの新しいアプローチ？
 - Kaon, デルタ、カイラル磁気効果？

- ▶ ハドロン物理も面白い
 - 広い視点を持つ必要がある？

