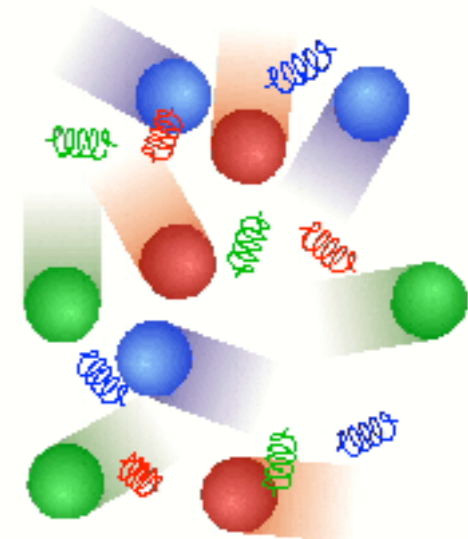


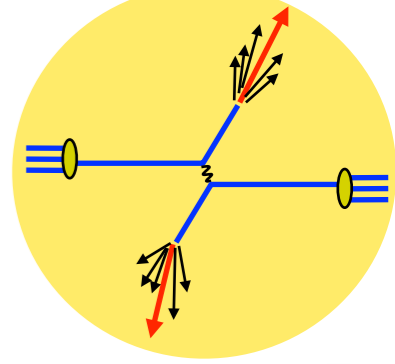


# QGP研究 過去、現在、未来



## ～ 私の研究歴 ～

筑波大学 数理物質系  
宇宙史研究センター  
三明 康郎

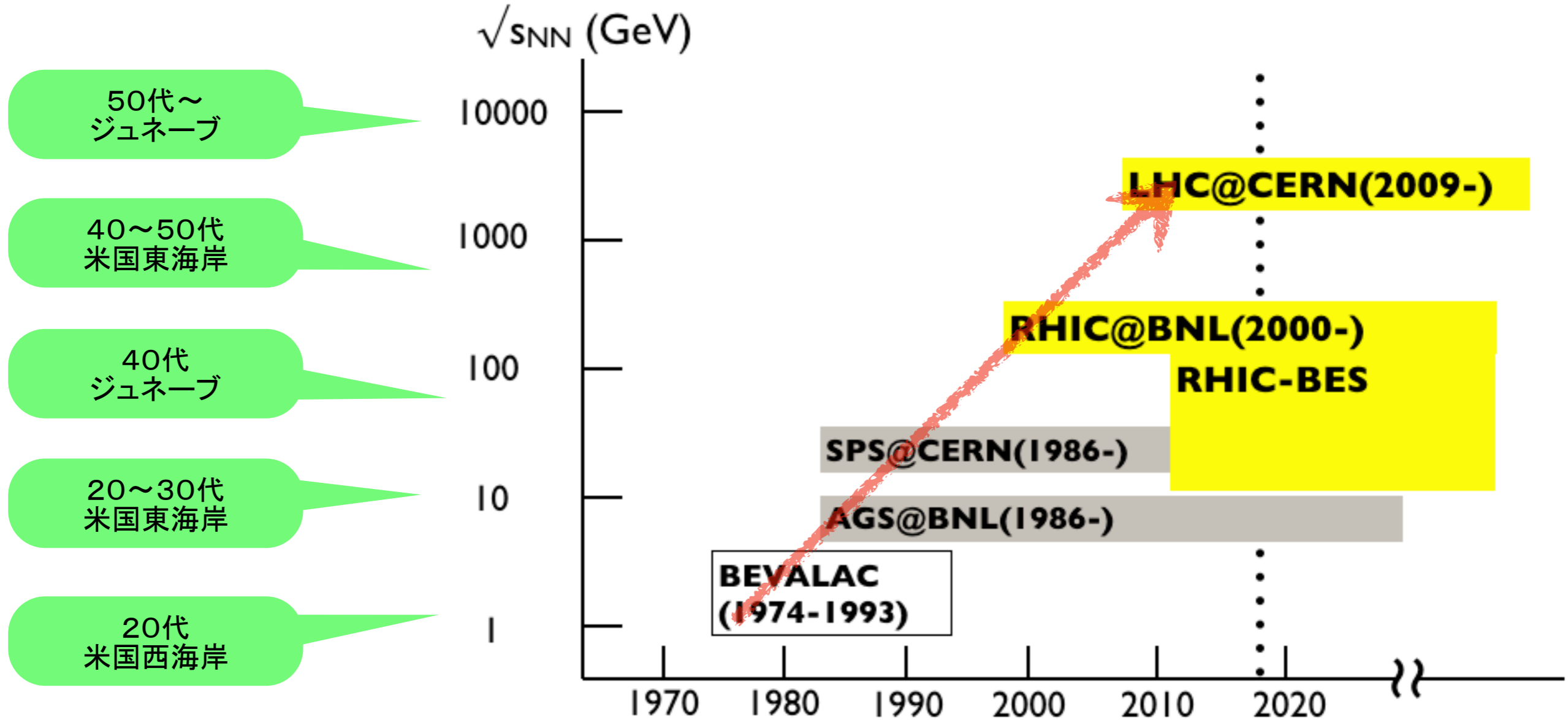
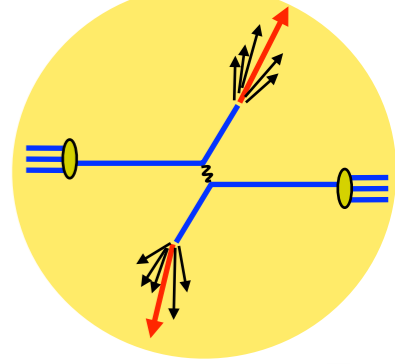


- ✓ 修士課程；阪大RCNPサイクロトロン
  - $\sim 100$  MeV/A、低エネルギー重イオン衝突の偏極
- ✓ 博士課程～東大助手；米国 LBL-Bevalac
  - $\sim 800$  MeV/A、重イオン衝突のメカニズム
  - 博士論文；陽子原子核衝突における後方散乱
- ✓ BNL研究員；米国BNL-AGS
  - $\sim 15$  GeV/A、QGP探索実験 (Strangeness増大)
- ✓ 筑波大教員；CERN-SPS、BNL-RHIC、
  - 200GeV、CERN-SPS、QGP探索実験
  - 100+100GeV、BNL-RHIC、QGP探索
  - CERN-LHC、QGP物性実験

Lee-Wick Matter  
Shock Wave  
Quark Gluon Plasma

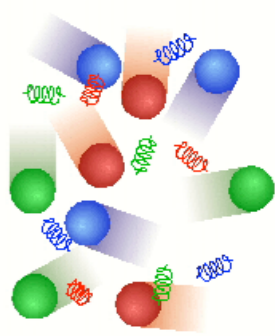
QGP探索実験  
に従事

→ 研究者として“物心”ついた以降、QGP研究一筋で来れた



	Machine	Beam+Target	Ecm [GeV]
1987 -	BNL・AGS	Si+Au, Au+Au('92)	5A, 4A
1987	CERN・SPS	S+Pb, Pb+Pb('94)	20A, 17A
2000 -	BNL・RHIC	Au + Au	130A - 200A
2011 -	CERN・LHC	Pb+Pb	2900-6300A

# 大阪大学理学部物理学科



一般相対論の内山龍雄先生が担任

✓ よく学び、よく学び

- 夏休みは「学生村」
- 卒業時、楠本賞受賞
- 卒研は杉本研へ



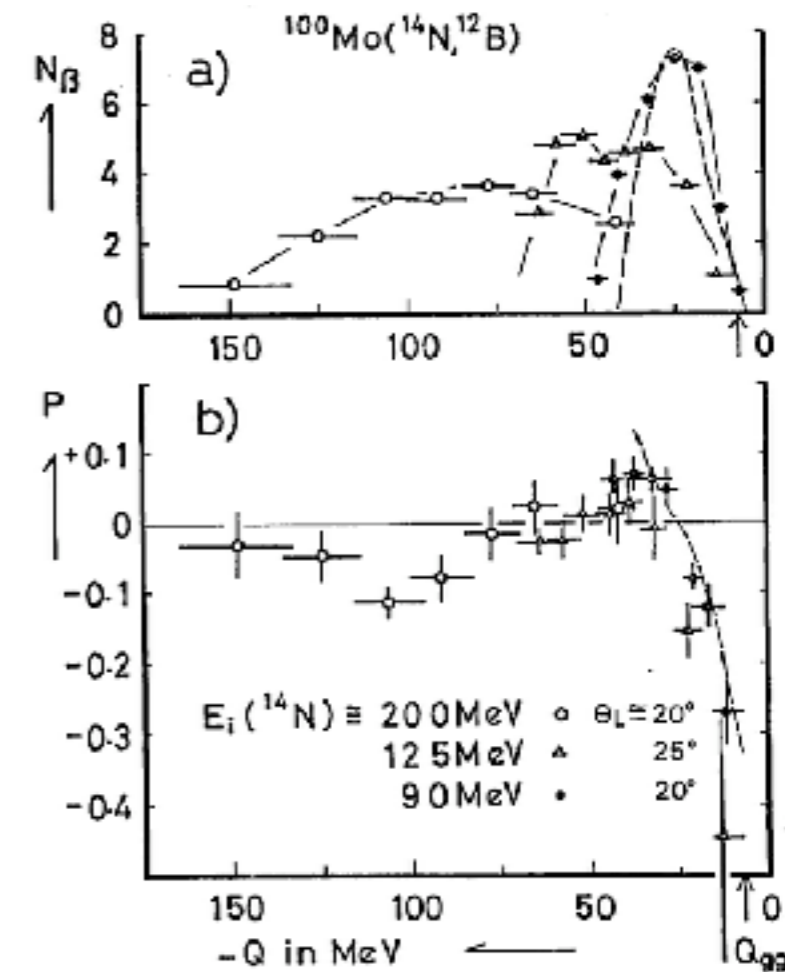
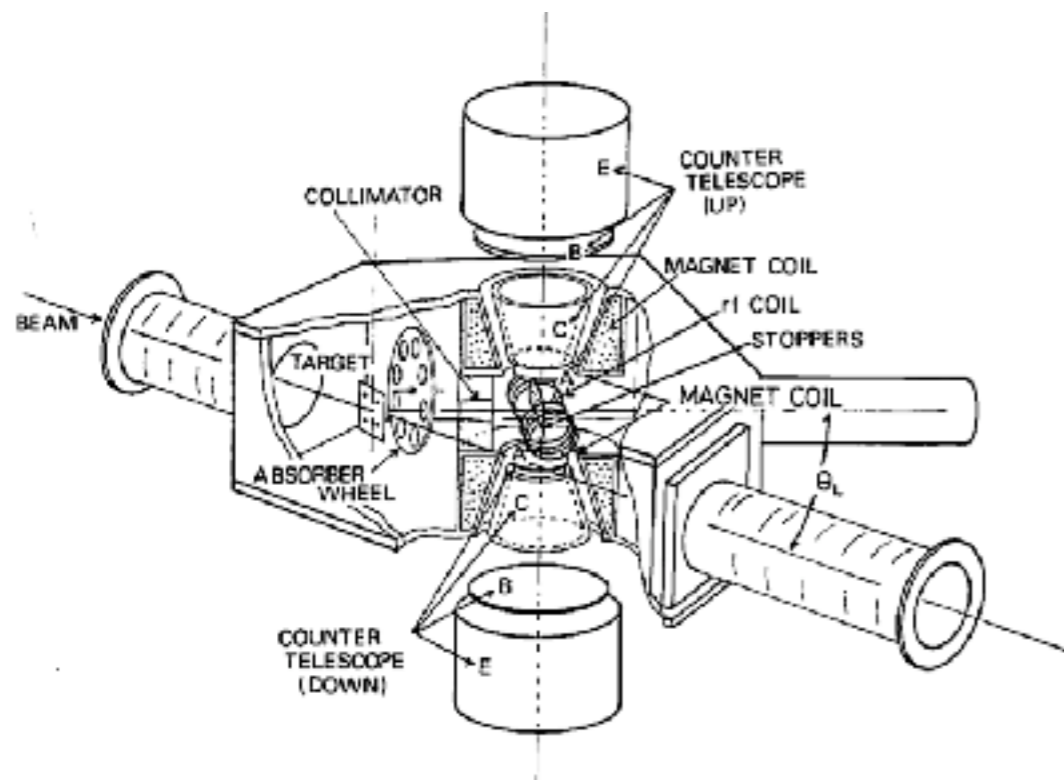
私がQGPの道に進むきっかけ →

杉本健三先生

# 大学院修士課程 ～低エネルギー重イオン衝突における偏極測定～

杉本健三先生、南園忠則先生、  
高橋憲明先生、野尻洋一先生

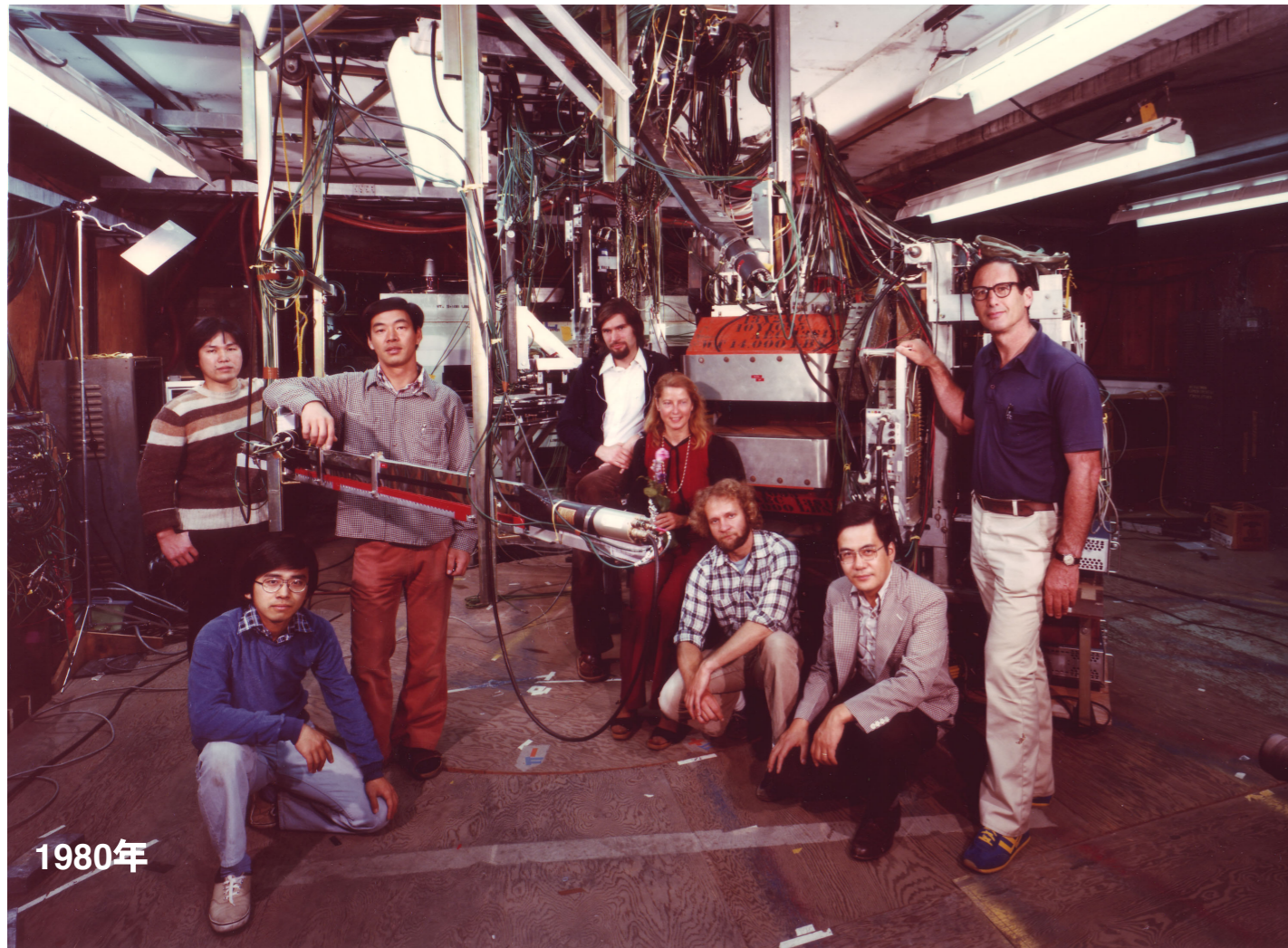
Y. Miake, Thesis for Master degree, Osaka Univ., 1979



- ✓ 理研サイクロや阪大核物理センターで偏極実験
- ✓ 実験装置の設計製作、エレキ製作、解析を担当

# 大学院博士課程 ～ LBLのチームへ～

永宮正治先生、谷畑勇夫先生、Herb Steiner先生



## ✓ 高エネルギー原子核衝突実験 (~1GeV/A)

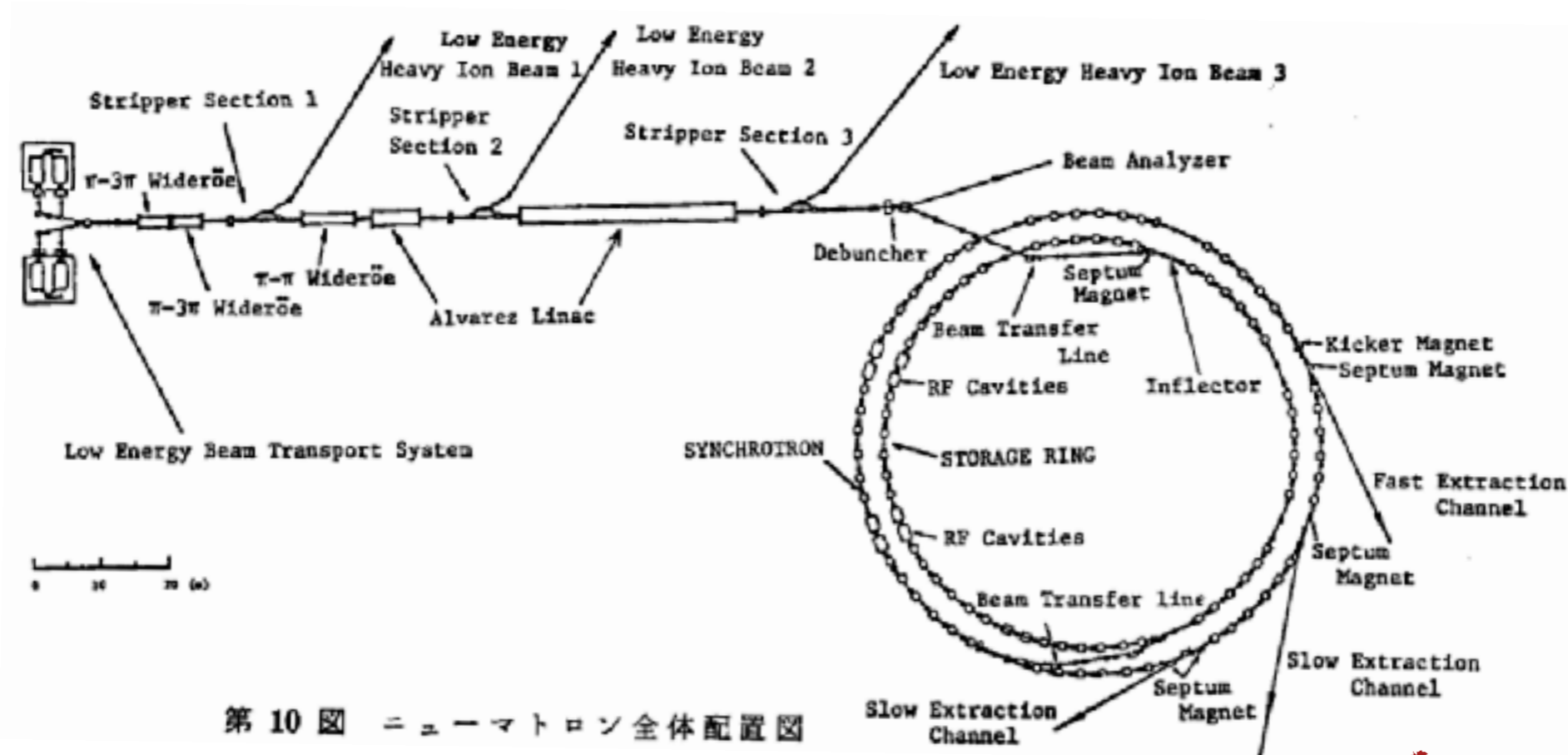
- 原子核分野で院生の海外派遣はまだまだ珍しい時期  
米国はまだまだ遠かった時代
- セグレ・チェンバレン研究室



Mt. Shasta登山

# 幻のニューマトロン計画

平尾泰男、日本原子力学会、20(1978)456



## ✓ 杉本先生が東大原子核研究所所長となって推進

- 核子あたり 100~1000MeV の重イオン加速計画
- $\pi$  中間子多重発生、高密度核物質、新しい核物質相の探索

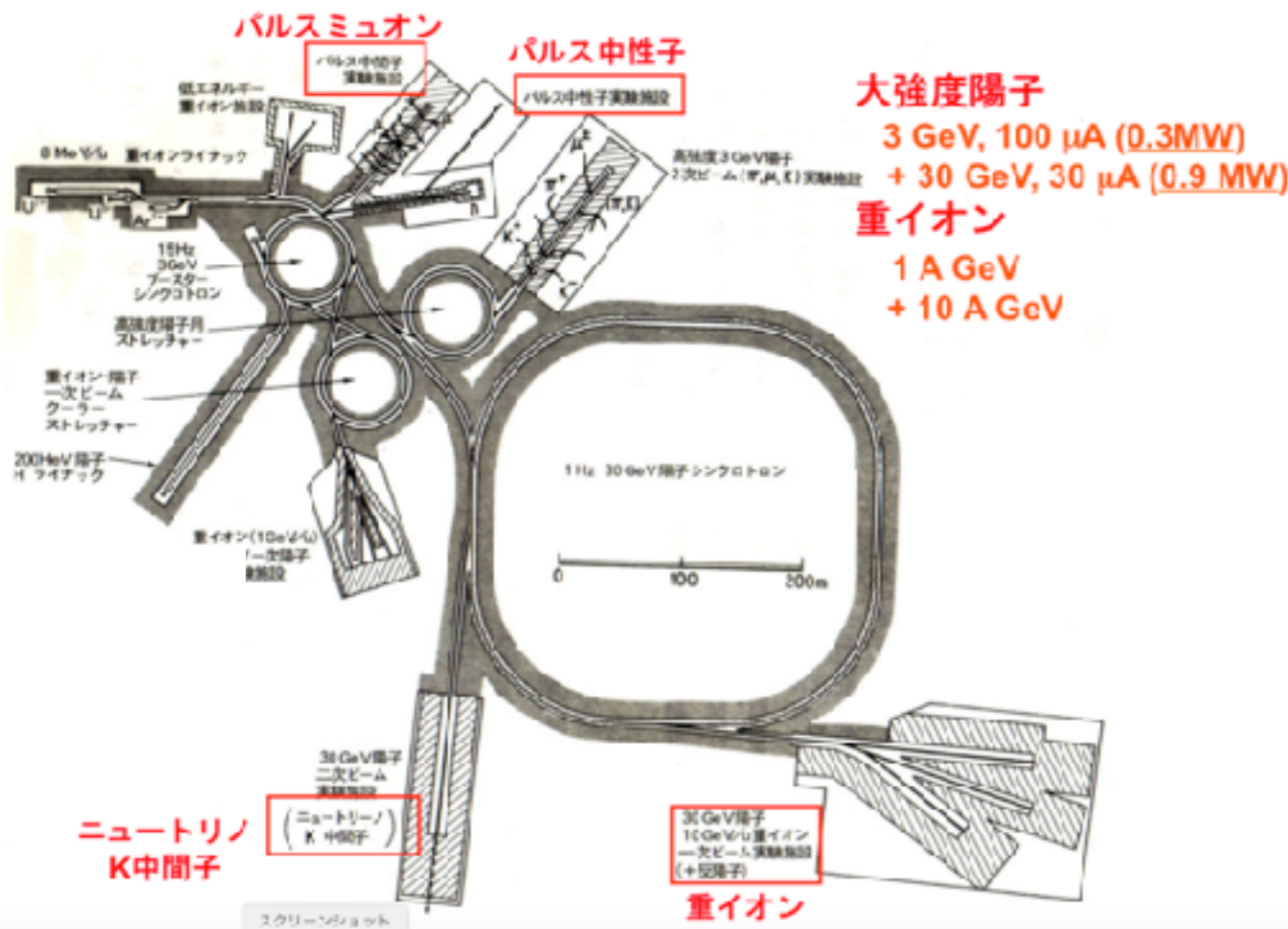
## ✓ 高エネルギー重イオン実験メンバーの育成のため バークレイに派遣

重粒子線医療用加速器  
HIMAC

大強度陽子加速器  
J-PARC

→但し、2年後に帰国すると、、、

# 東大助手～米国ブルックヘブン国立研究所 研究員



永宮先生が取りまとめた大ハドロン計画  
～ J-PARCの原型 ～

✓ 博士論文；「800MeV陽子原子核衝突における後方散乱メカニズム」

✓ 永宮先生の東大着任に伴って、  
助手に

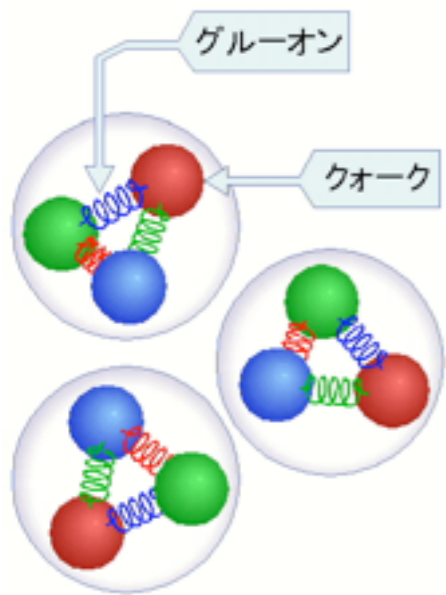
- LBL実験
- KEK実験

✓ 米国ブルックヘブン国立研究所  
AGSで重イオン加速の計画

- 大ハドロン計画立案に忙しい永宮先生に進言

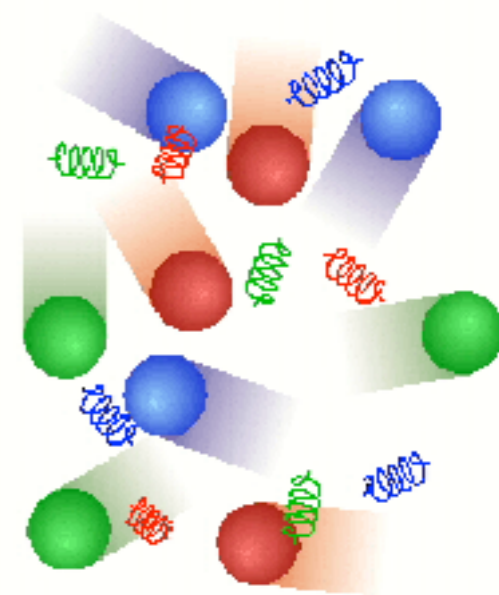
➡ 東大からBNLに派遣され、QGP  
探索実験へ邁進することに





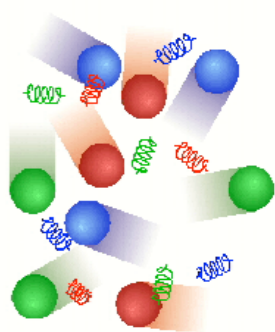
ハドロン状態

QGP状態

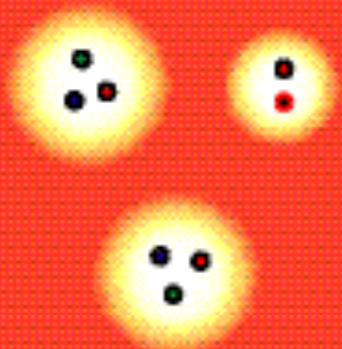


クォーク・グルオン  
プラズマ(QGP)とは

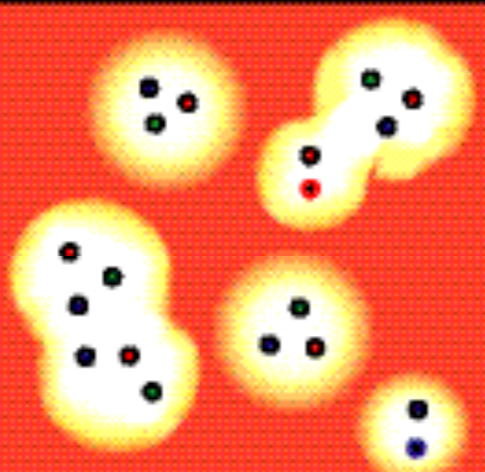
# クォーク・グルオンプラズマ (QGP) とは



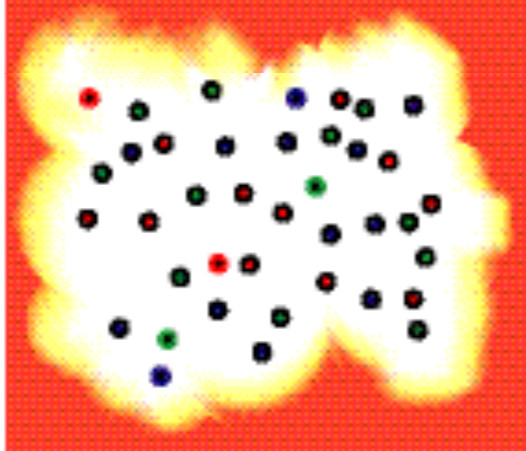
hadron gas  
T,  $\rho$  low



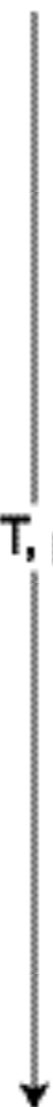
phase transition  
T,  $\rho$  critical



quark-gluon-plasma  
T,  $\rho$  high



T,  $\rho$



## ✓ ハドロンの構造；

- ハドロン（陽子、中性子や中間子）は、1fm程度の大きさを持ちクォークと媒介粒子グルオンから構成されている。
- 3つのクォークかクォーク・反クォーク対

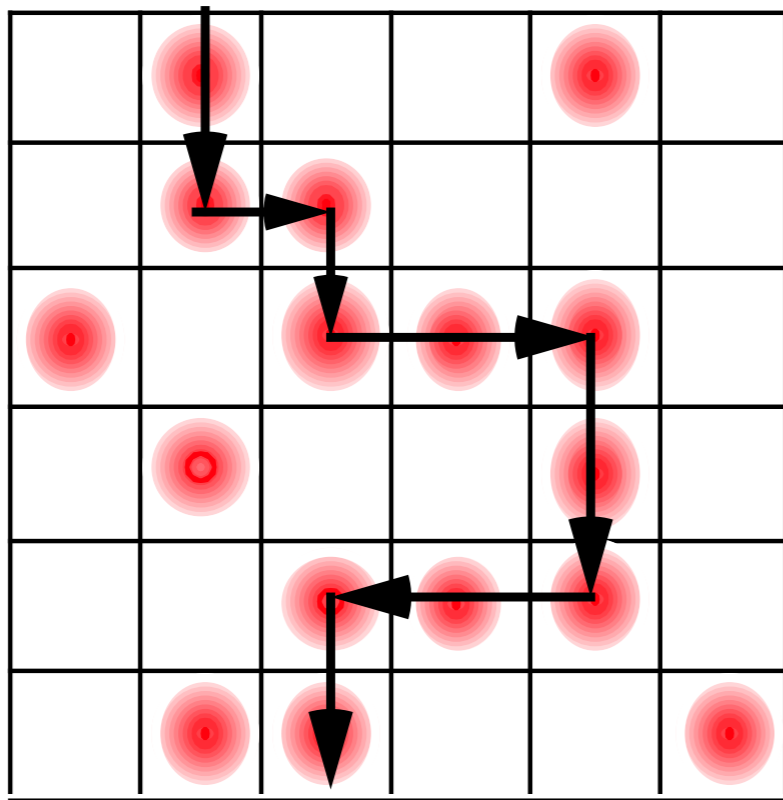
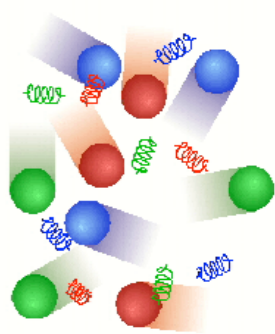
## ✓ 大きさを持つハドロンを狭い空間に多重発生させると、**ハドロンの連結**した状態が実現？

- 高温・高密度状態
- クォーク・グルオンが比較的大きな体積中を自由に飛び回る状態が実現する。

(クォーク・グルオンプラズマ状態)

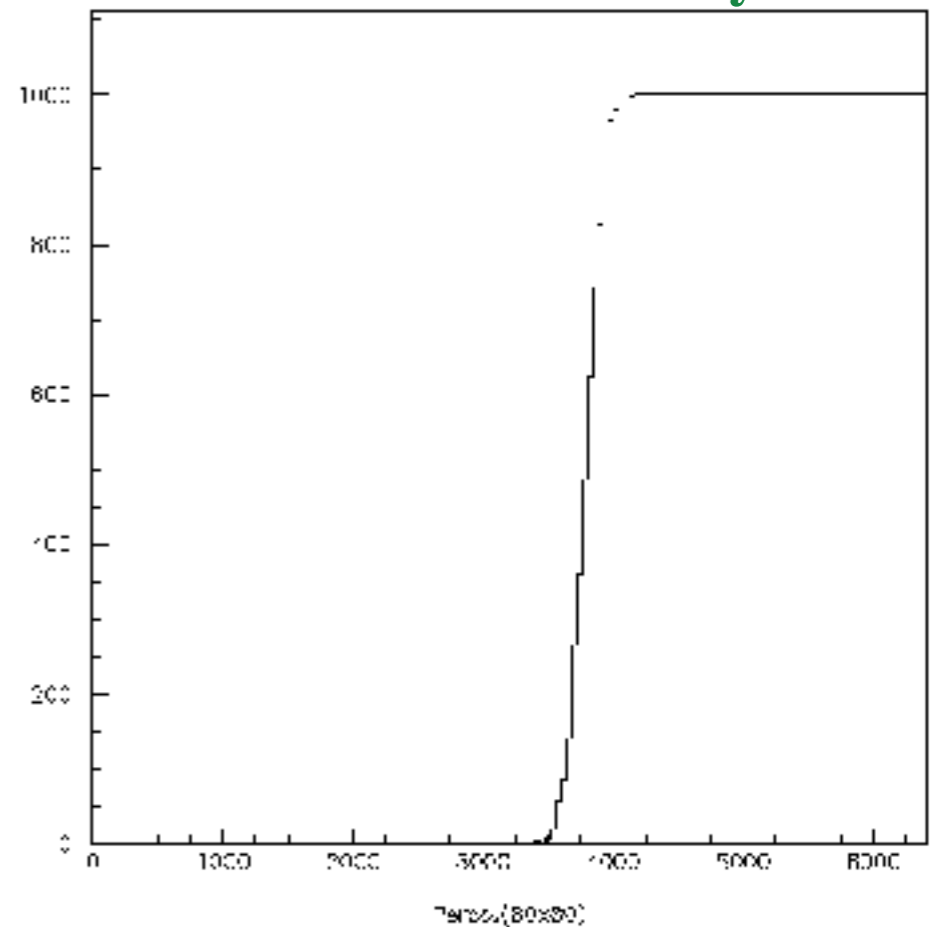
# ① 巨視的連結

## ～ percolation ～



Toy Model

巨視的連結の起こる頻度



✓ 有限の大きさを持つパイ中間子が多重発生し、巨視的連結が起こる

- クォークが隣のセル (中間子) に移動が可能  
QGP生成
- 巨視的連結(Percolation)が起こる確率

パイ中間子の密度に対し、1次相転移の振舞

$$\sigma_{pp} \approx 40mb \xrightarrow{\times \frac{2}{3}} \sigma_{p\pi} \approx 24mb$$

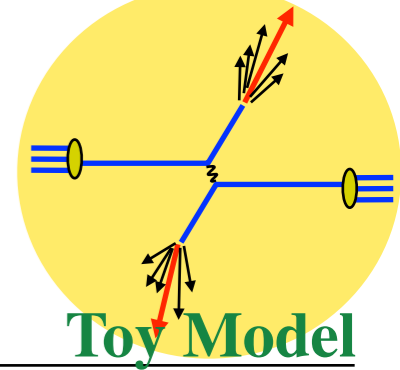
$$\sigma_{p\pi} \approx 24mb \xrightarrow{\times \frac{2}{3}} \sigma_{\pi\pi} \approx 16mb$$

$$\therefore r_{\pi\pi} = 0.7 \text{ fm} (\because \sigma_{\pi\pi} = \pi \cdot r_{\pi\pi}^2)$$

$$\varepsilon = \frac{m_{\pi} \times 0.57}{r_{\pi\pi}^3} \approx 230 \text{ MeV} / \text{fm}^3$$

# ② 状態方程式

## ～ Bag ModelによるToy Model ～



$\mu, m=0$  の理想フェルミ、ボーズ気体の場合  
Ideal Gas Model

**QGP**

$$\epsilon_{QGP} = f_{gluon} \cdot \epsilon_{boson} + f_{quark} \cdot \epsilon_{fermi}$$

$$\therefore \epsilon_{QGP} = \frac{37\pi^2}{30} T^4 + B$$

$$\begin{cases} \epsilon_{QGP} = \frac{37\pi^2}{30} T^4 + B \\ P_{QGP} = \frac{37\pi^2}{90} T^4 - B \end{cases}$$

**Pion Gas**

$$\epsilon_{\pi} = f_{\pi} \cdot \epsilon_{boson}$$

$$\therefore \epsilon_{\pi} = \frac{\pi^2}{10} T^4$$

$$\begin{cases} \epsilon_{\pi} = \frac{\pi^2}{10} T^4 \\ P_{\pi} = \frac{\pi^2}{30} T^4 \end{cases}$$

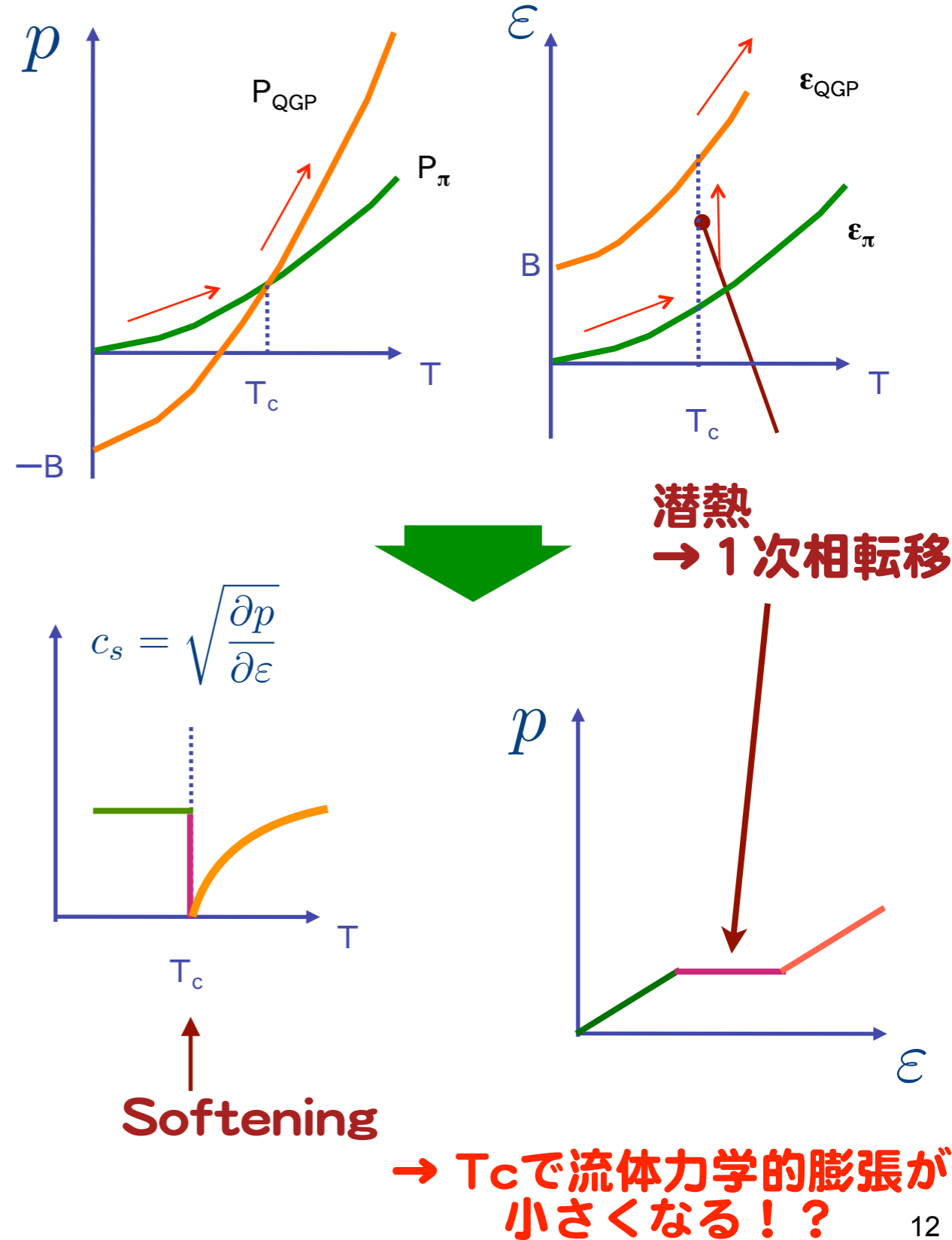
Stefan-Boltzman's

$f$  ; degree of freedom

$B$  ; bag constant

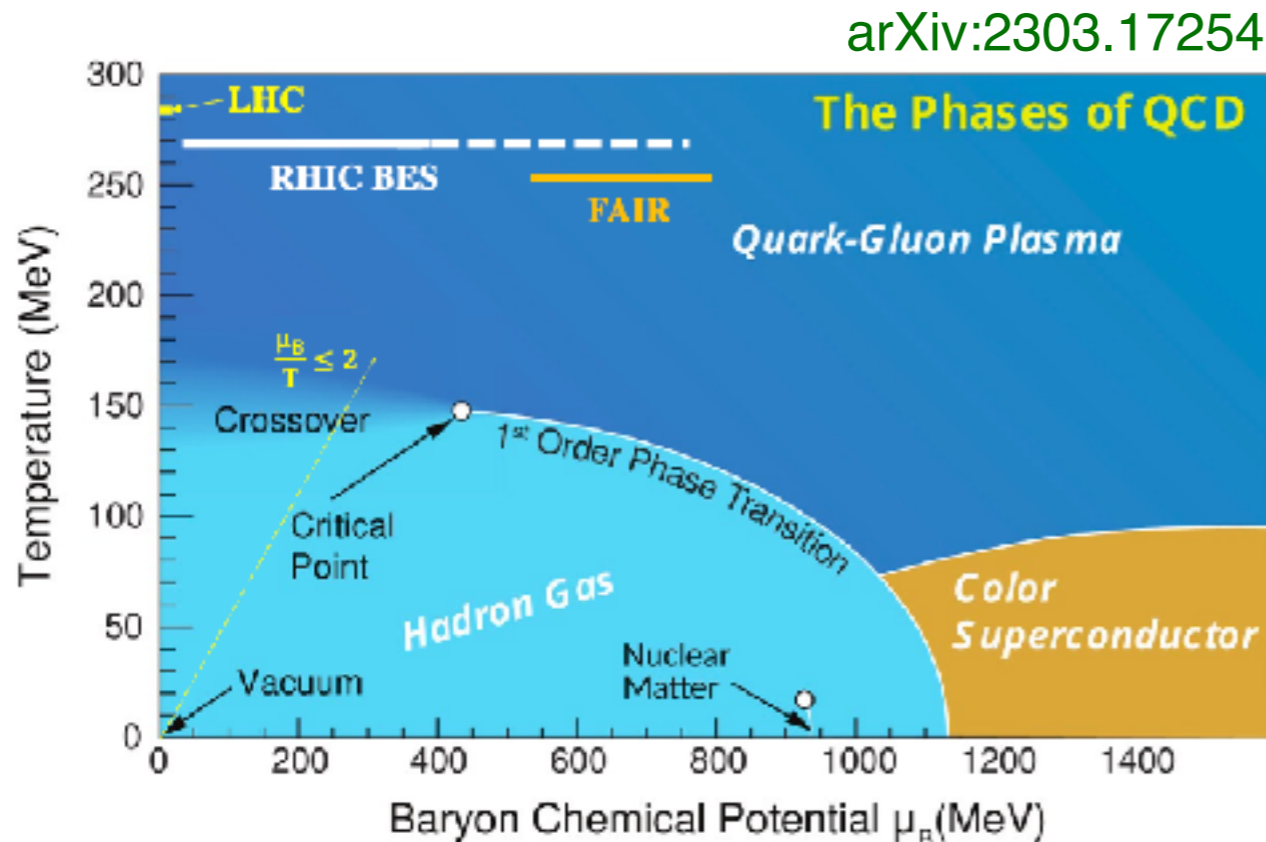
$$\epsilon = \sigma T^4$$

$$T_C = \left(\frac{90}{34\pi^2}\right)^{1/4} B^{1/4} \sim 120 \text{ MeV}$$

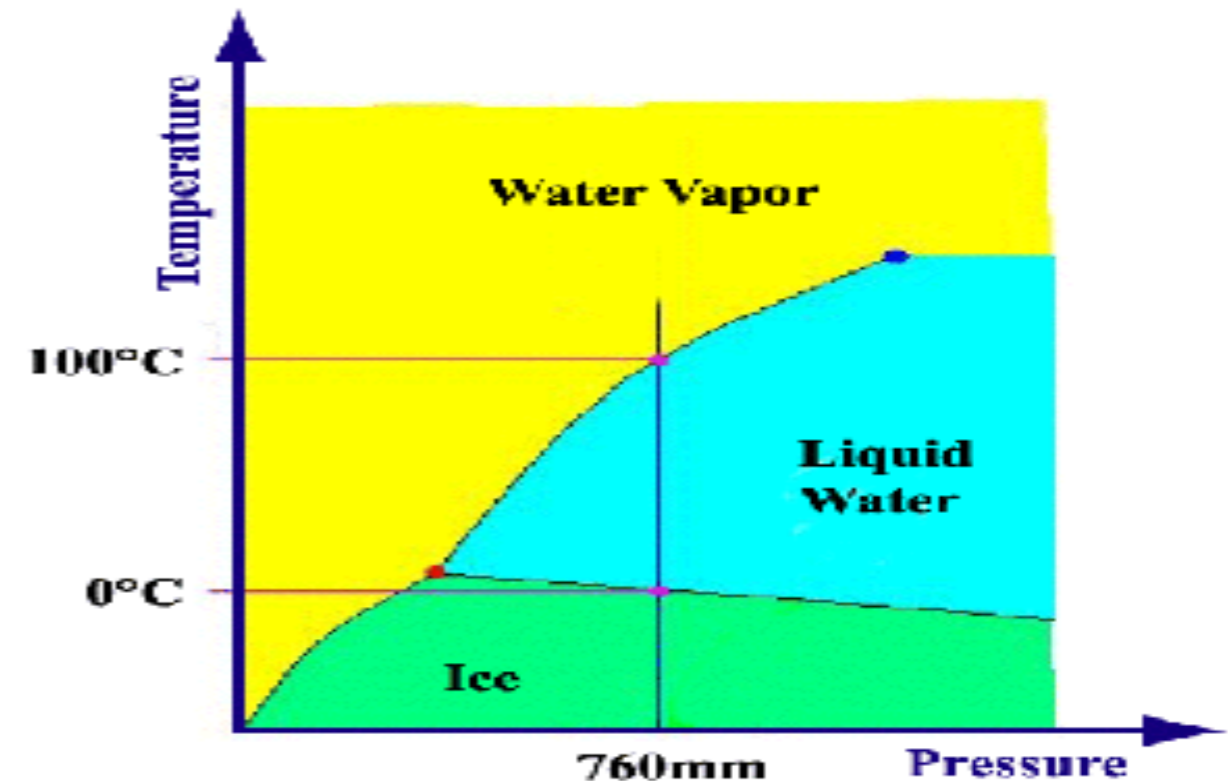


# 最近の理論) 相転移の様子

QCD物質の相図

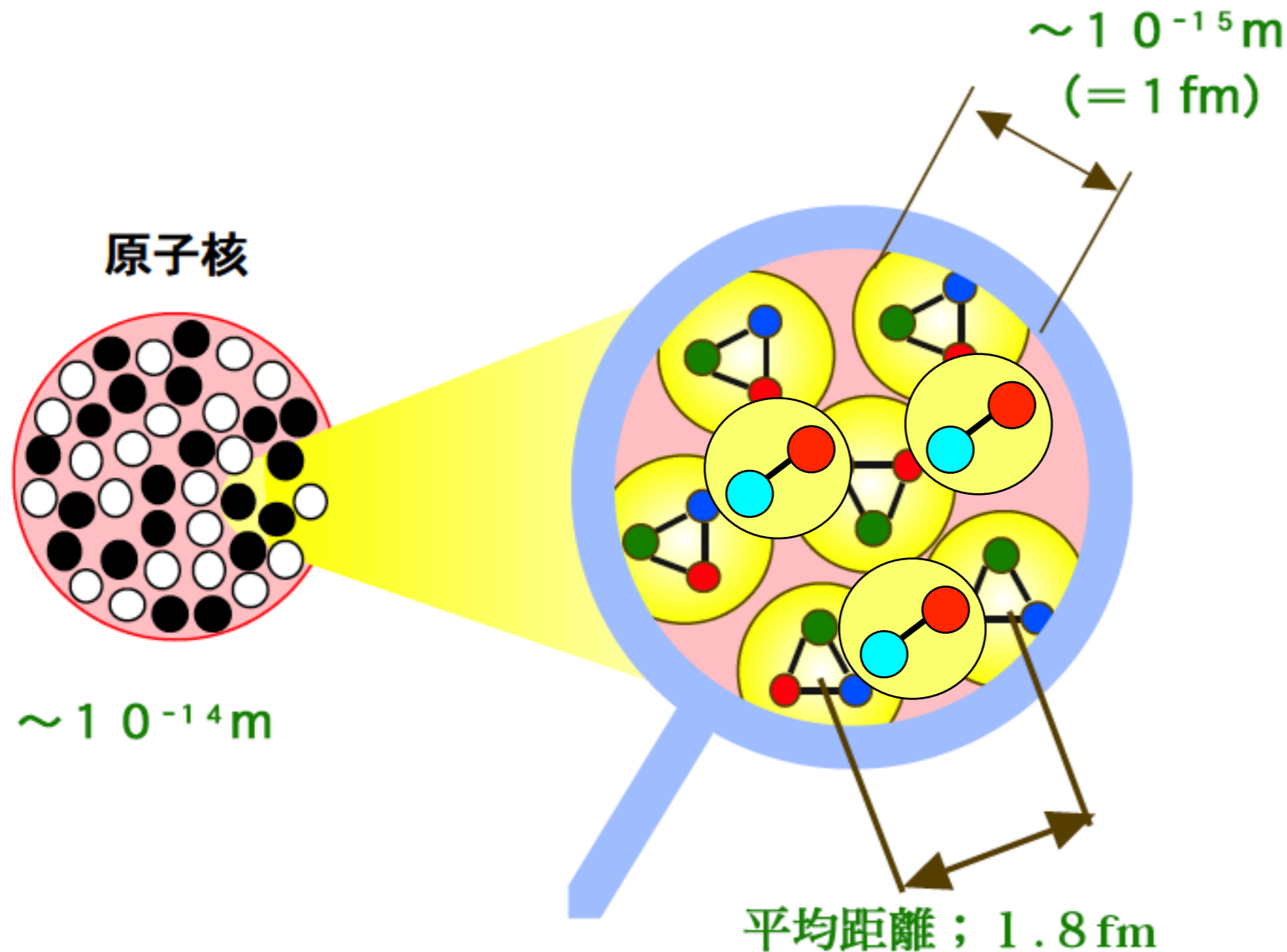
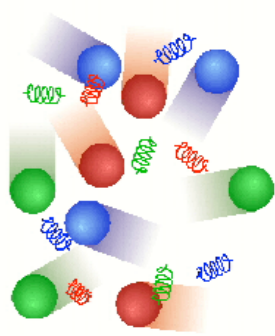


水の相図



- ✓ Lattice QCDの計算によると、バリオン密度( $\mu_B$ )の高いところでは1次相転移を示す
  - RHICやLHC実験で実現しているようなバリオン密度の低い領域では、クロスオーバーを示す。
  - どこかで1次相転移の途切れる点、臨界点が存在しているはず！
- ✓ 水の相図のように、QCD物質の相図解明は大きな物理的意義があると期待。

# QGPの作り方；多重発生～連結



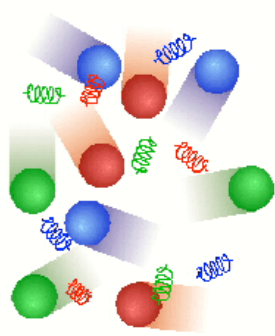
→ ちよいと圧縮／加熱すると、核子が互いにオーバーラップしてQGPへ！？

→ 実験室で実現する方法；高エネルギー原子核・原子核衝突実験

(出来るだけ大きな原子核同士の衝突)

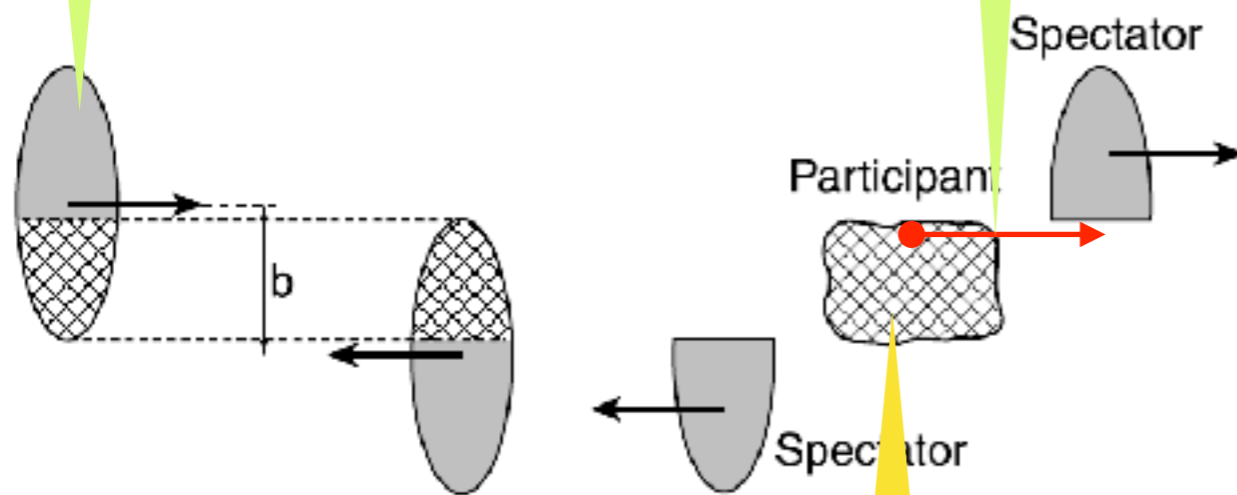
- ✓ 物質の密度； $\sim \text{g/cm}^3$
- ✓ 原子核密度； $\sim 10^{12}$ 倍 $\sim 100$ 万トン/ $\text{cm}^3$
- ✓ 原子核内の核子の平均距離は意外と近い

# 高エネルギー原子核・原子核衝突の特徴



核内のフェルミ運動に比べ、衝突時間は格段に短い「スナップショット」

横運動量はビーム軸方向に比べ格段に小さい「直進」



**衝突により粒子多重生成**

持ち込まれた運動エネルギーの一部が原子核程度の空間に解放

→高温高密度状態 (Fire Ball)

## ✓高エネルギーの特徴

- (衝突時間)  $\ll$  (核の固有時間)

$$\tau_{\text{col}} \equiv \frac{R_A}{c\gamma_{\text{beam}}} \ll \tau_{\text{int}} \equiv \frac{R_A}{c\beta_{\text{Fermi}}}$$

- deBroglie波長が原子核より十分短い
- 持ち込む角運動量  $\gg \hbar$

- 量子力学的 Partial Wave Analysisは不要
- 古典力学的 Impact Parameter  $b$

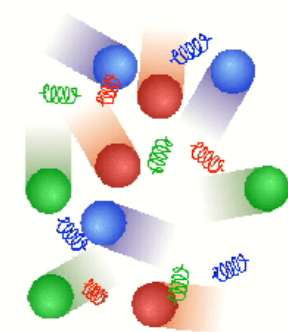
$$L_{\text{max}} = (A \cdot p_N) \times 2R \gg \hbar$$

- 生成粒子の横運動量  $\ll$  ビーム軸方向の運動量

$$p_t \sim 250[\text{MeV}/c] \ll p_{\text{beam}}$$

→ Participant Spectator Model<sub>5</sub>

# 中高エネルギーの場合 (Landau Picture)

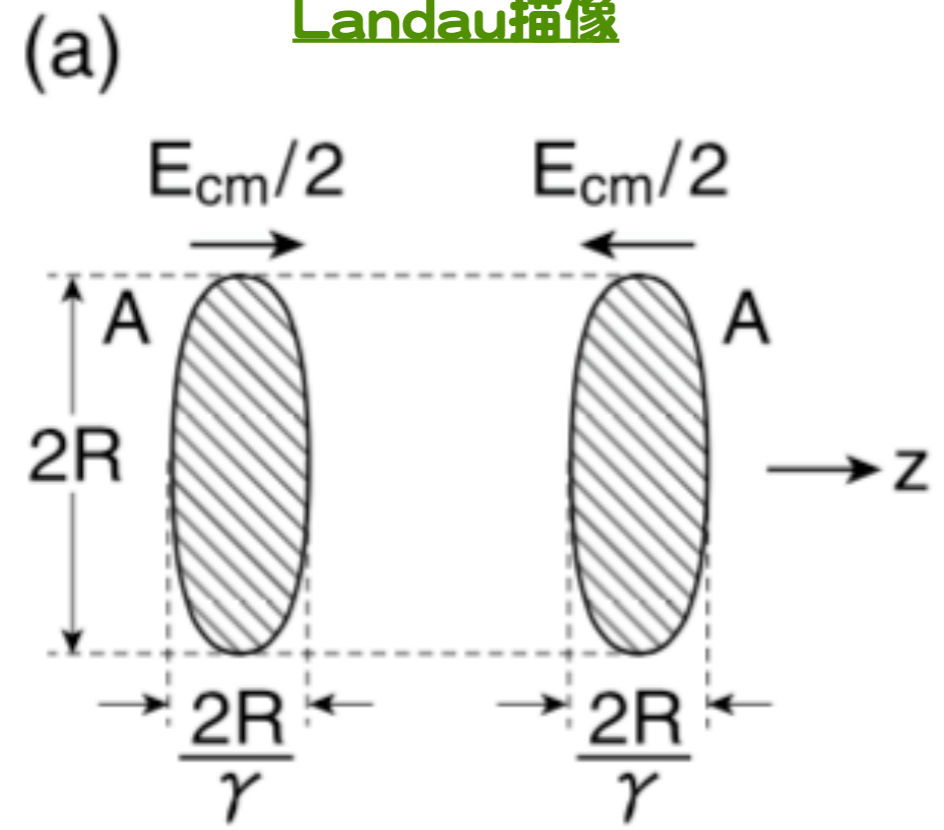


衝突エネルギーが相互作用程度の場合

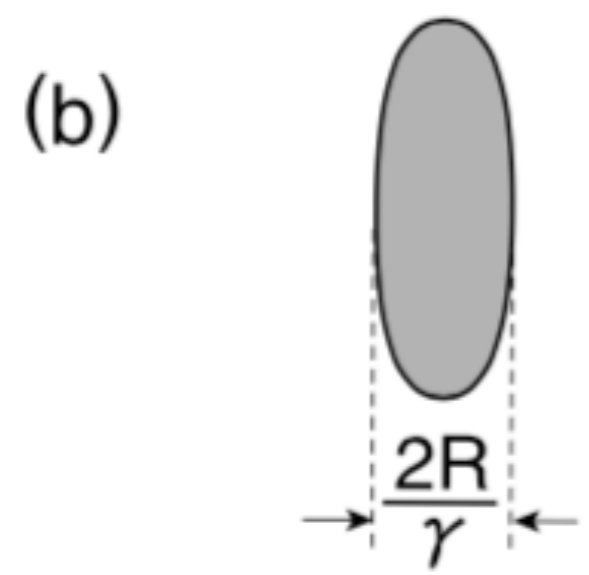
AGS, JPARC-HI

Landau描像

衝突前

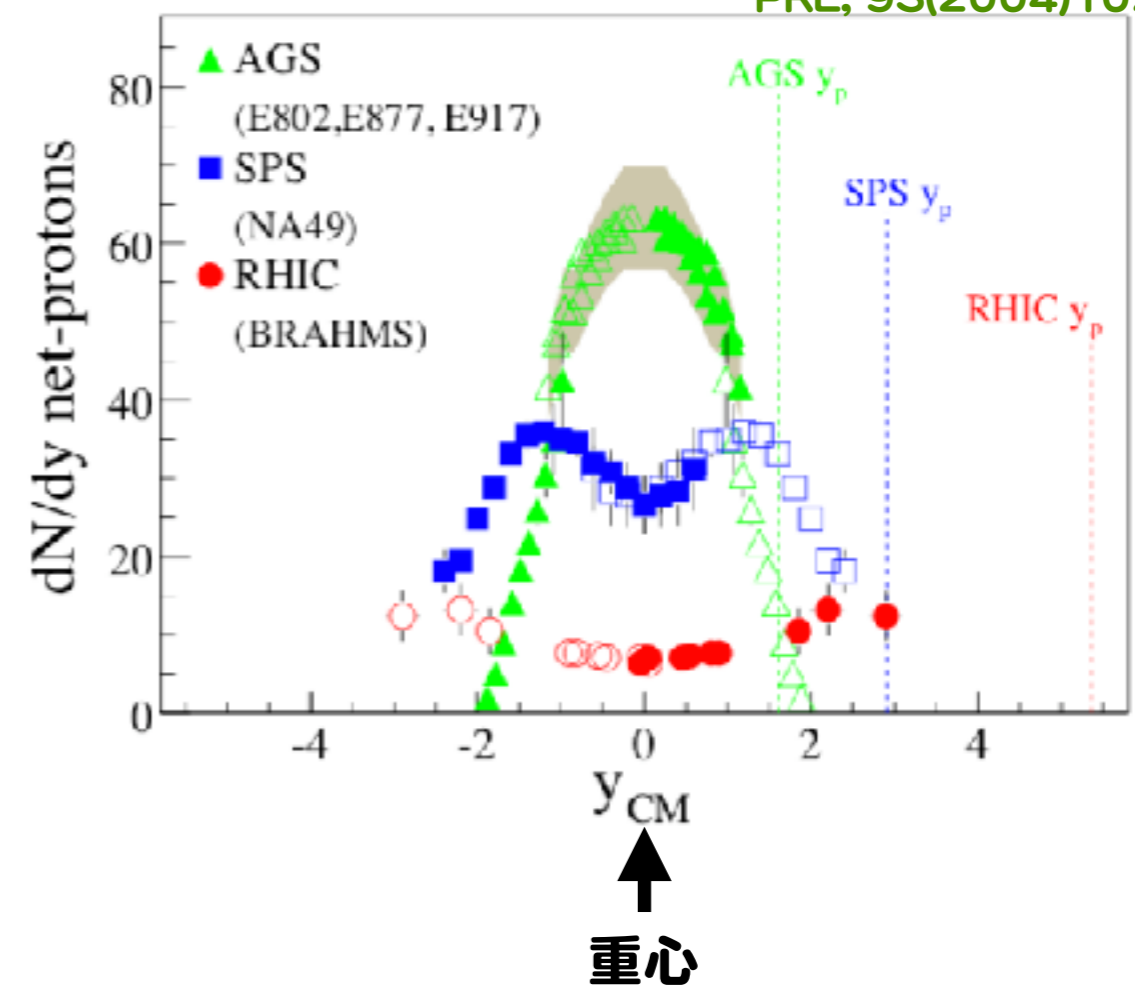


衝突後



衝突後の陽子のビーム軸方向の分布

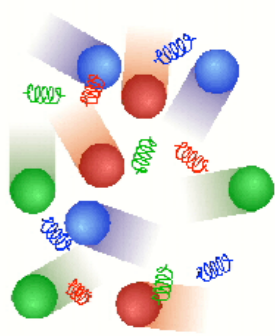
PRL, 93(2004)102301



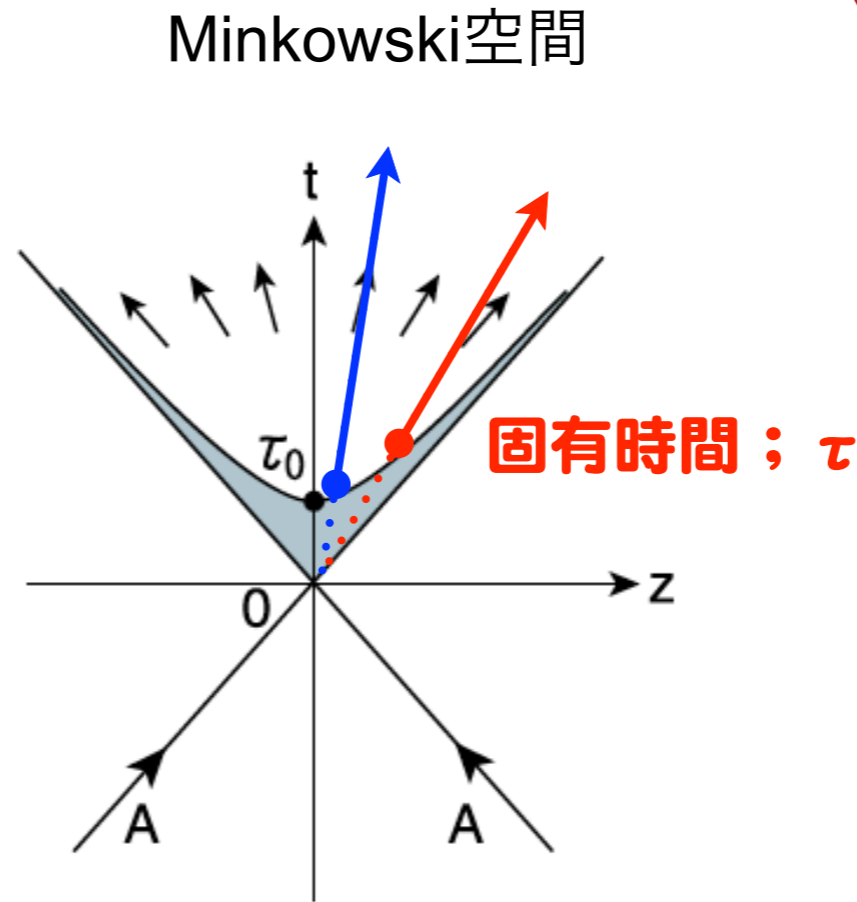
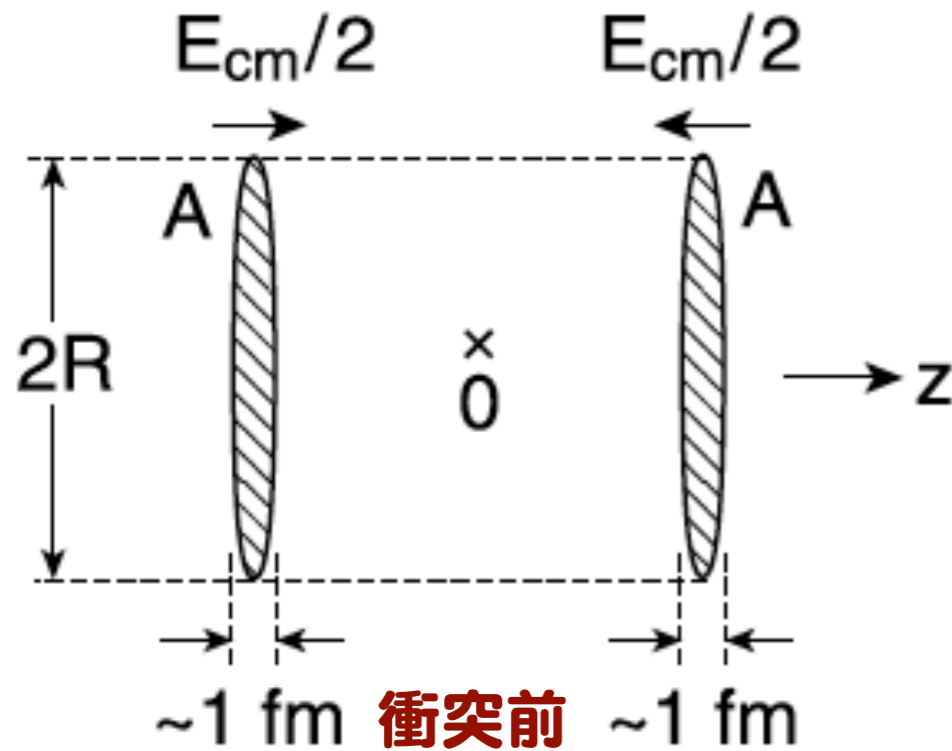
- ✓ 上手い衝突エネルギーでは衝突した原子核が重心系で丁度停止する
- ✓ バリオン密度最大 →  $\mu_B$  大きい
- ✓ 超高エネルギー衝突では  $\mu_B \sim 0$



# 超高エネルギーの場合 (Bjorken Picture)

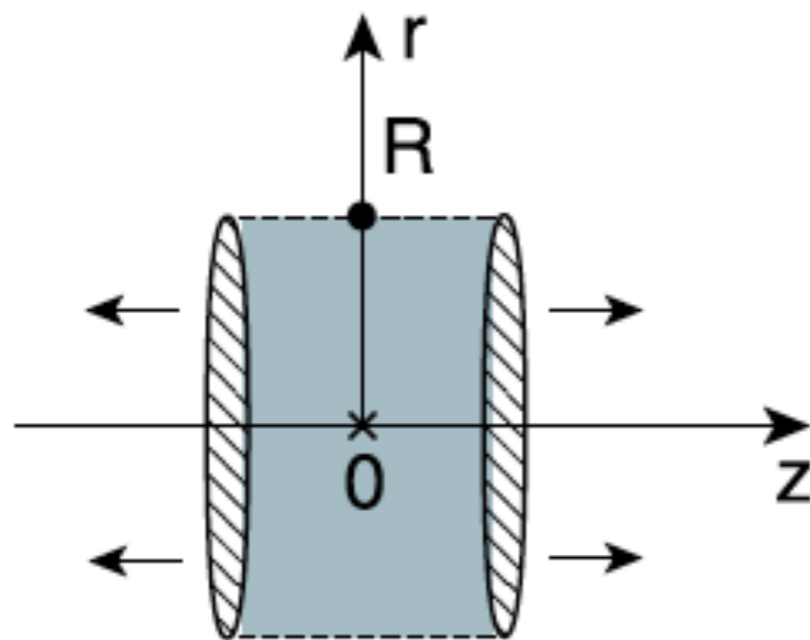


衝突エネルギーが相互作用に比べて十分大きい場合



## ✓ Bjorkenの描像

- ローレンツ収縮のために原子核衝突は短時間の間に起こり、その短時間にハドロンの多重発生が起こるが、固有時間 $\tau$ 以後、それらは自由粒子として飛び出す。



## ✓ 到達エネルギー密度

$$\epsilon_{BJ} = \frac{1}{\pi R^2} \frac{1}{c\tau_0} \frac{dE_T}{dy}$$

# BNL-AGS-E802実験 (1985~)



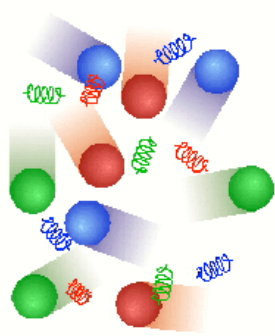
AGS重イオン加速の立役者  
Harvey Wegner

✓ 米国ブルックヘブン国立研究所における初めての重イオン加速

- タンデム加速器からAGS加速器までビームパイプで接続
- 核子あたり 15GeVのSiビーム



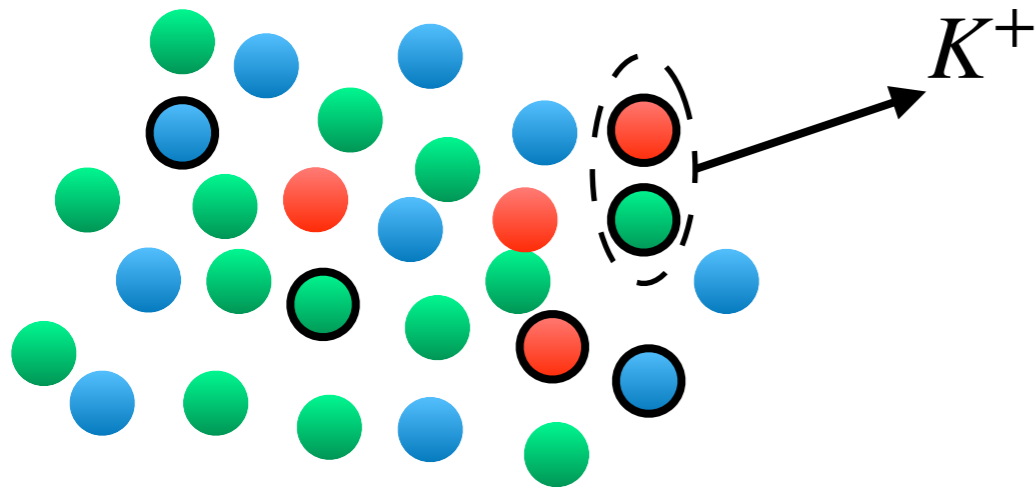
# QGP生成の手がかり； Strangeness Enhancement



Strangeness Production in the Quark-Gluon Plasma  
J. Rafelski and B. Müller, Phys. Rev. Lett. 48 (1986) 1066

$T \sim 120 \text{ MeV}$

$m_s \sim 100 \text{ MeV}$



$$n_s = n_{\bar{s}} = 2 \times 3 \int \frac{d^3p}{(2\pi)^3} \exp\left(-\frac{\sqrt{p^2 + m_s^2}}{T}\right)$$

✓ 高温QGP中では  $s\bar{s}$  対生成が盛んに起こる

● QGP中では  $gg \rightarrow s\bar{s}$  により速やかに反応が起こる

⇒ 化学平衡を仮定することができる

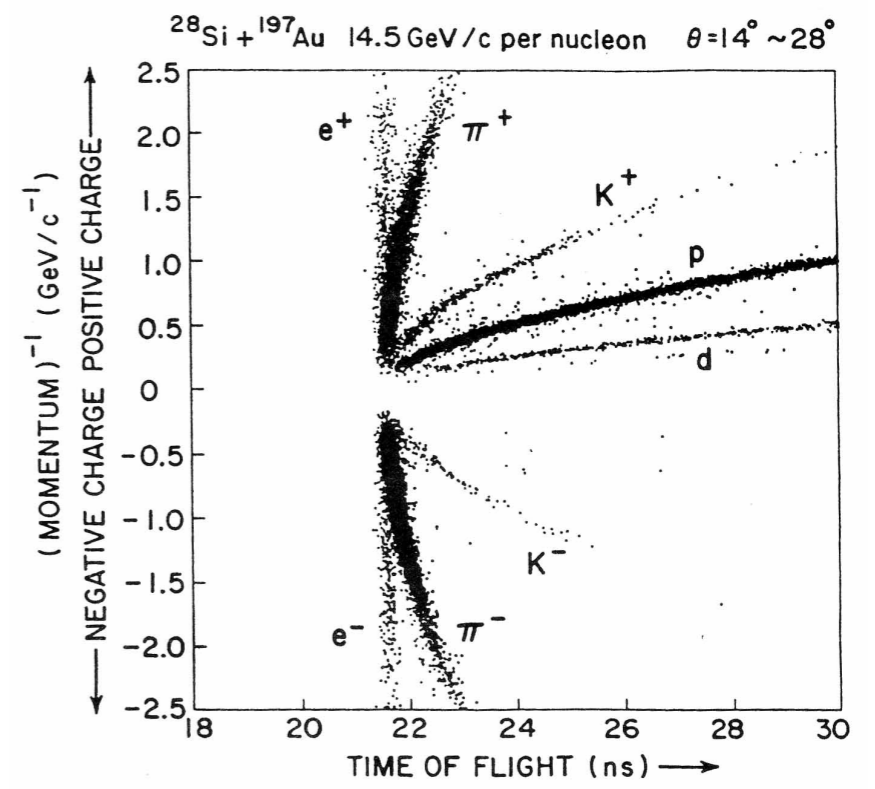
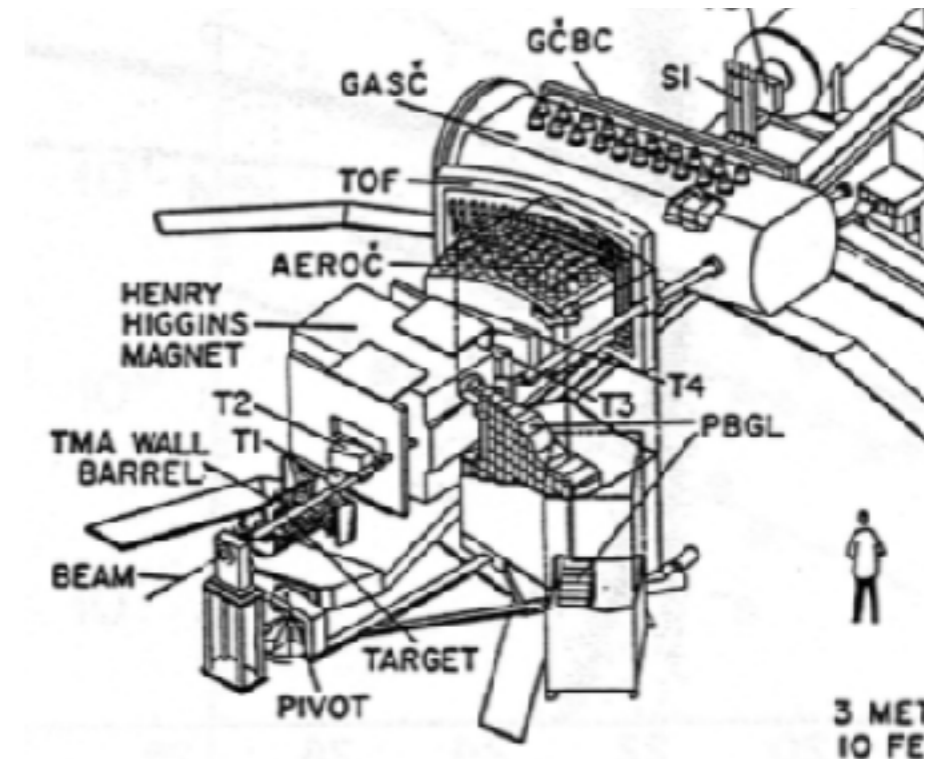
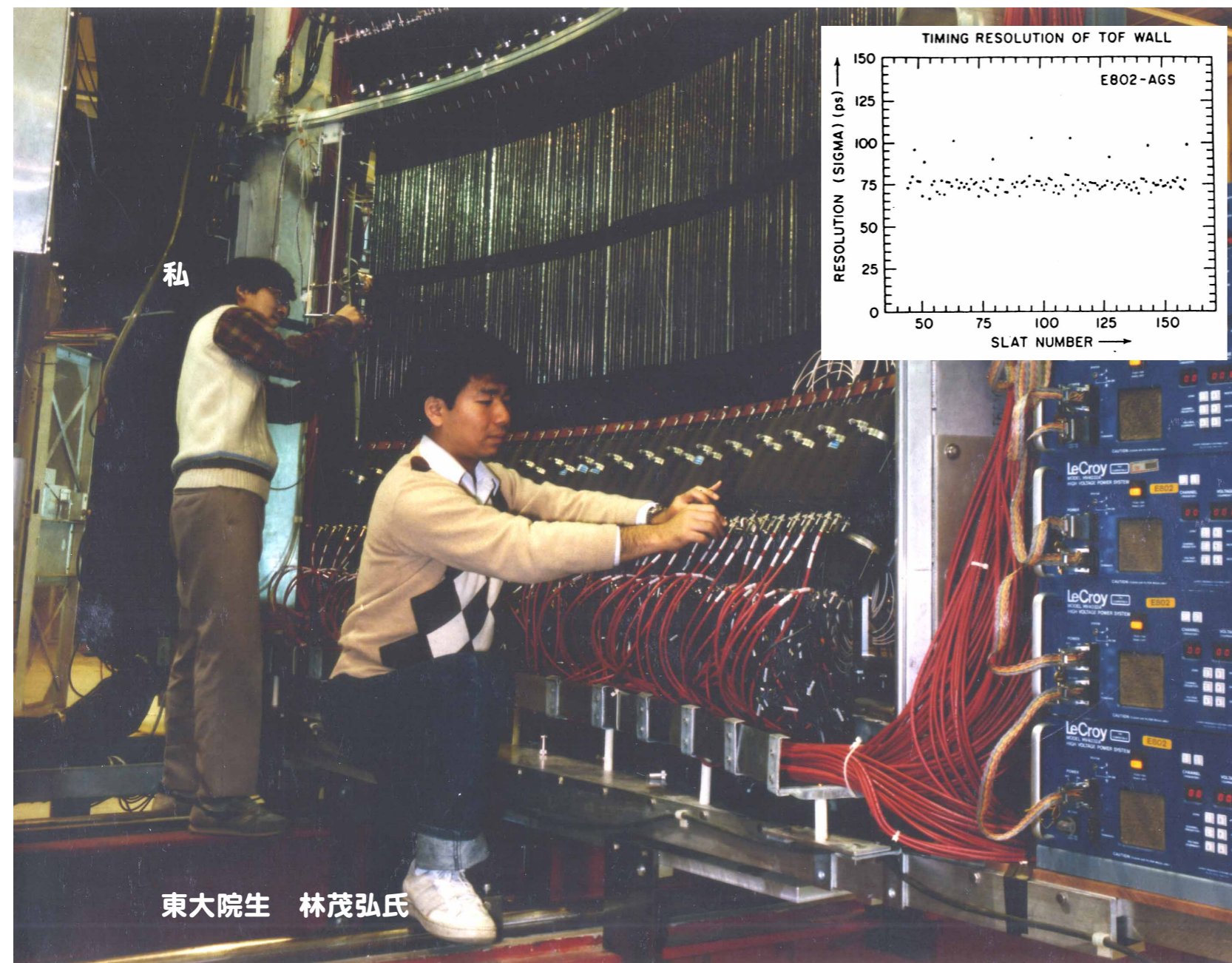
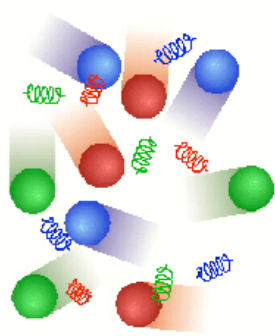
●  $K^+; u\bar{s} \quad \pi^+; u\bar{d}$

⇒ QGP中では「 $K^+/\pi^+$ 比の増大」予測

✓ K中間子の識別が実験の肝

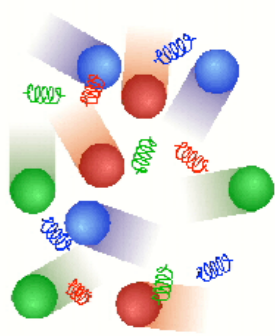
$$\frac{K^+}{\pi^+} = \frac{n_{\bar{s}}}{n_{\bar{d}}} \sim \frac{(m_s T)^{3/2} T^{3/2} \exp\left(\frac{m_s}{T}\right)}{T^3 \exp\left(\frac{-mu}{T}\right)} \sim \left(\frac{m_s}{T}\right)^{3/2} \exp\left(\frac{\mu - m_s}{T}\right)$$

# E802 高時間分解能飛行時間測定器



✓ 50ps以下の時間分解能→大評判！

# 「 $K^+/\pi^+$ 比の増大」 最初の報告(1987)



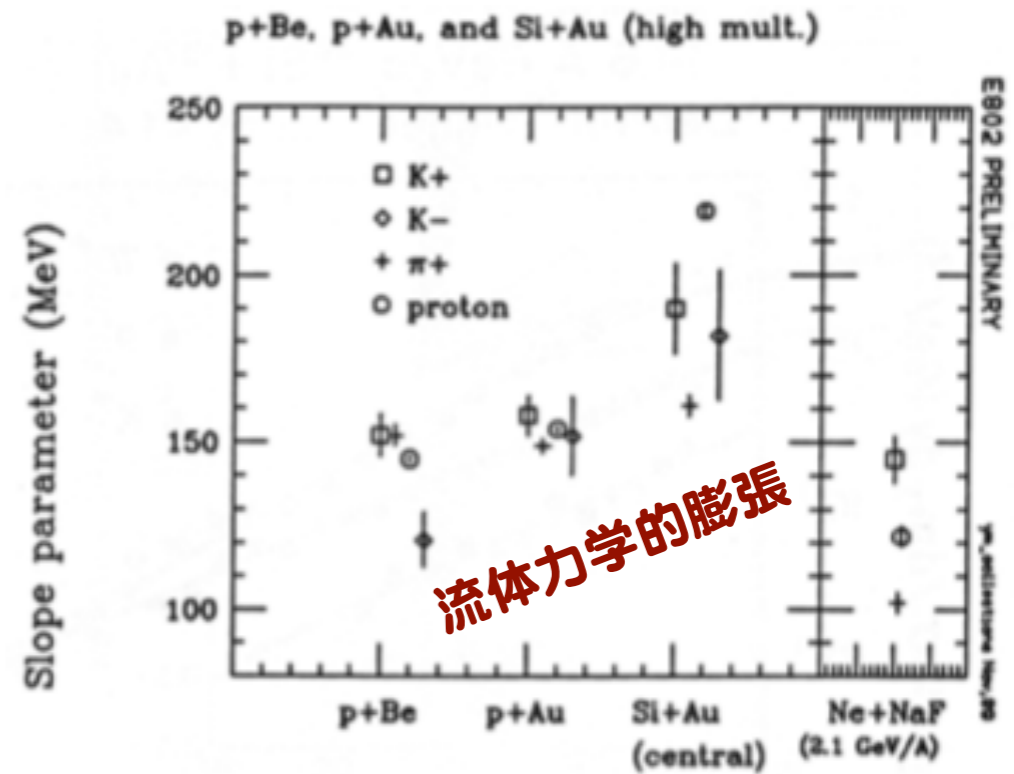
Z.Phys.C38(1988)135

Table 1.  $K/\pi$  ratios measured in 14.5 GeV/c per nucleon Si+Au collisions at  $14^\circ-28^\circ$ ,  $p_{lab} < 2.0$  GeV/c. (preliminary)

	Min. bias trigger	Central trigger
$(K^+/\pi^+)_{present}$	$19 \pm 5\%$	$24 \pm 5\%$
$(K^-/\pi^-)_{present}$	$6 \pm 5\%$	$4^{+4\%}_{-2\%}$

**Quark Matter 87**  
**Preliminary spectrometer results from E-802\***  
 Y. Miake and G.S.F. Stephans  
 Brookhaven National Laboratory, Upton, USA and Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA  
 E802 Collaboration

**M. Gyulassy, HIPAGS90**  
**6 Kaon/pion systematics from p+A to Si+Au**  
 The high of the meeting was the masterful presentation by Miake of new E802 data on  $p, \pi^\pm, K^\pm$  production in  $p+Be, p+Au$ , central  $p+Au$  and  $Si+Au$ . The data presented are so comprehensive that they virtually tell their own story without need for model calculations.



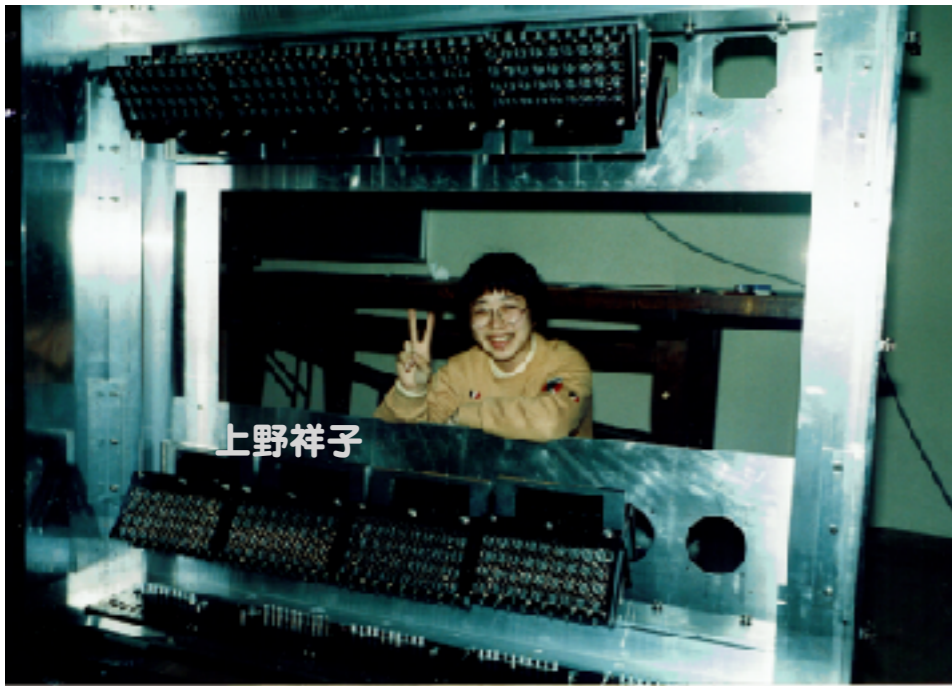
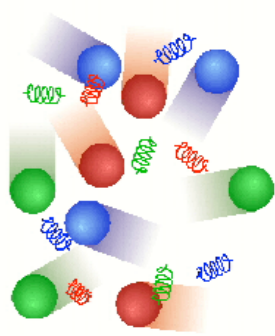
✓ 最初の報告

- 国際会議：Quark Matter 87, HIPAGS90, QuarkMatter 90

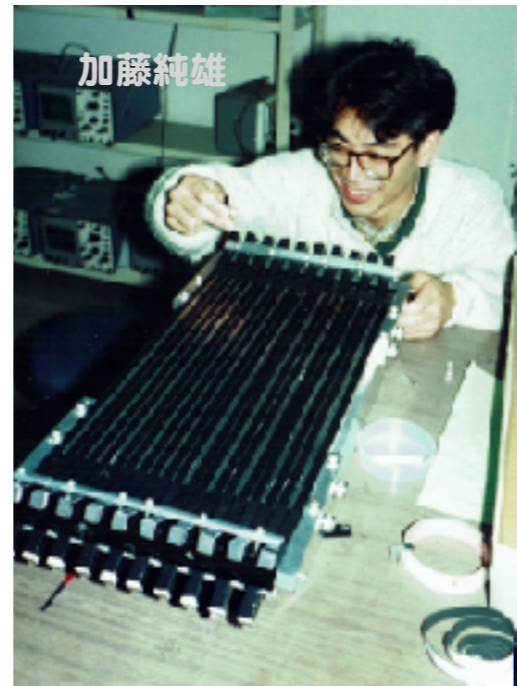
✓ Strangeness Enhancement、流体力学的振舞

→ モテ期到来！

# BNL-AGS E866実験(1991)



上野祥子

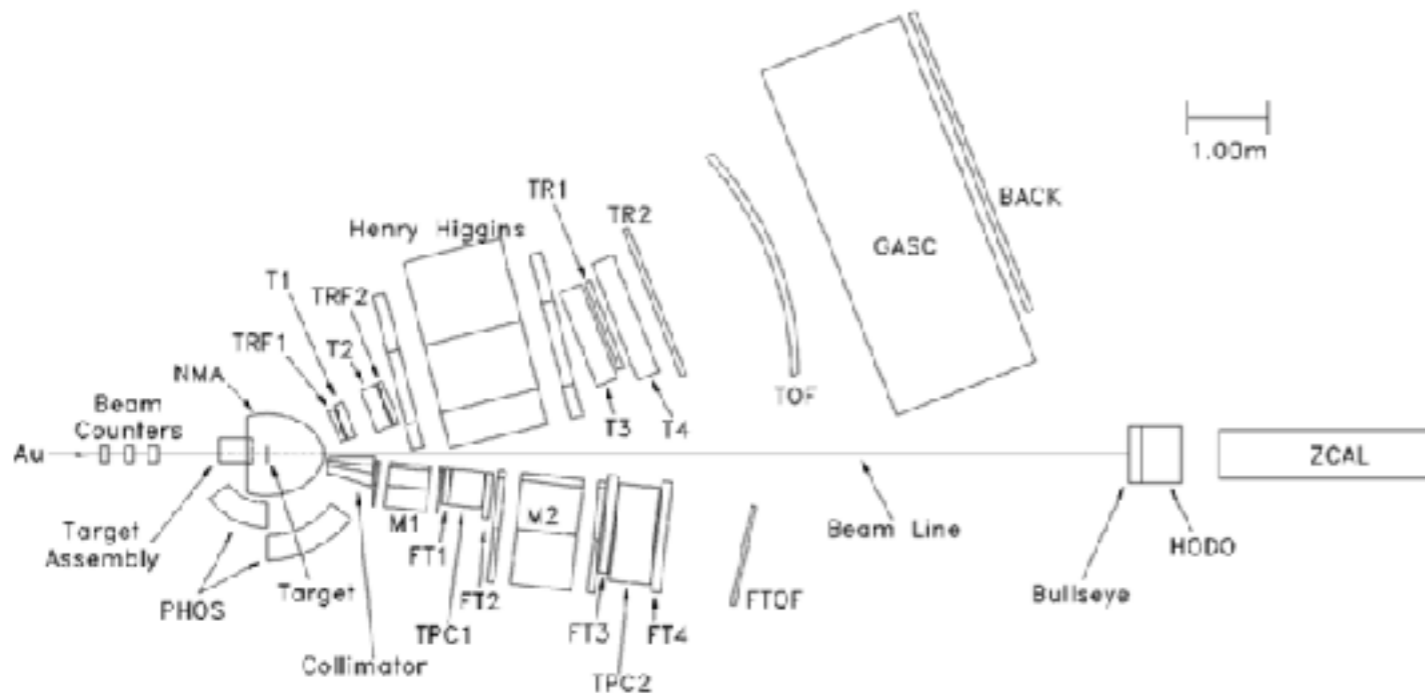


加藤純雄

家庭の悩みとBNLのgroupの問題

- ✓ 八木先生に声をかけていただき、  
1991 筑波大学講師に着任
- ✓ FTOF建設
- ✓ 加速器改造後、Au 12A GeV ビーム
- ✓ 系統的測定

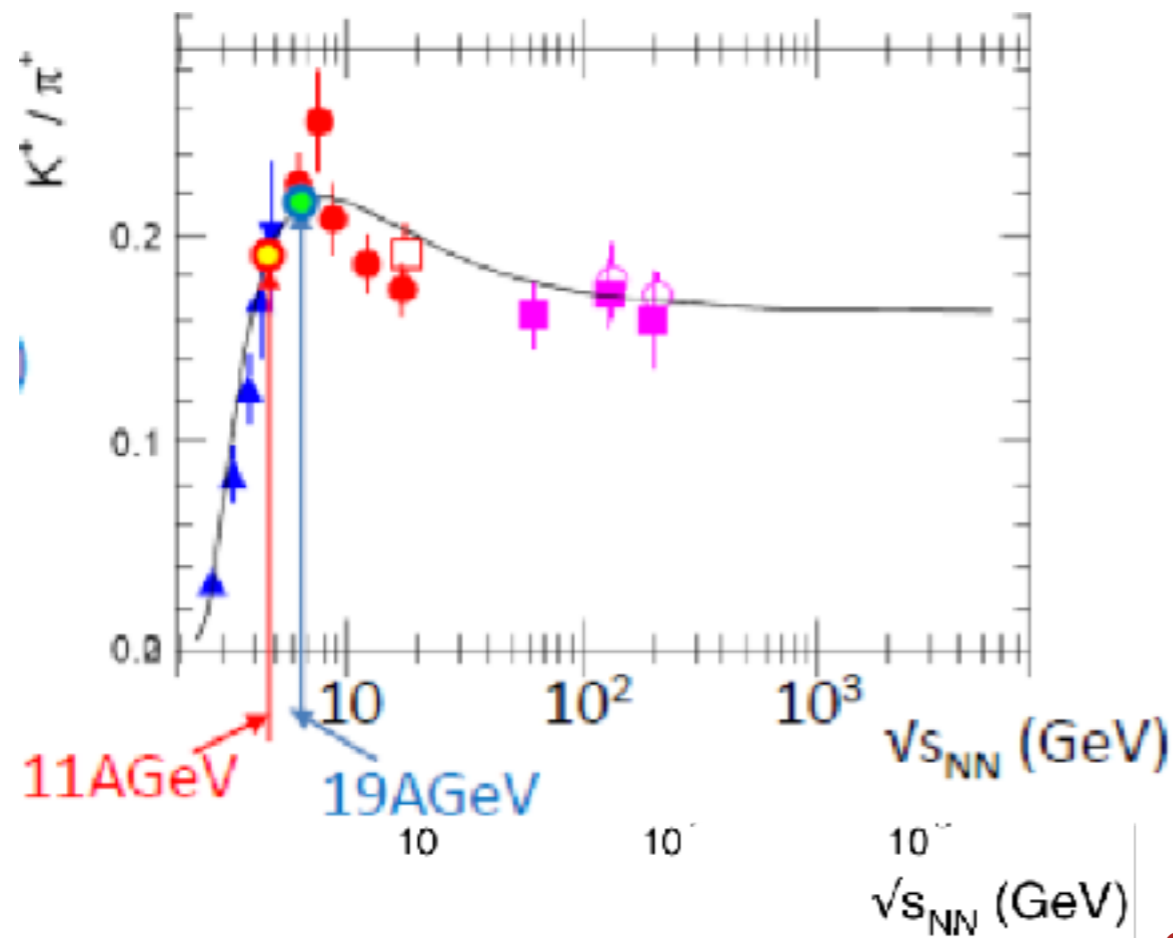
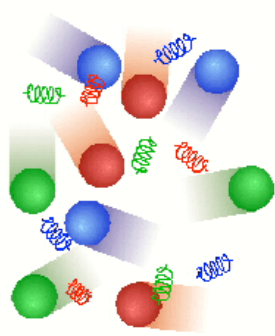
1992.10



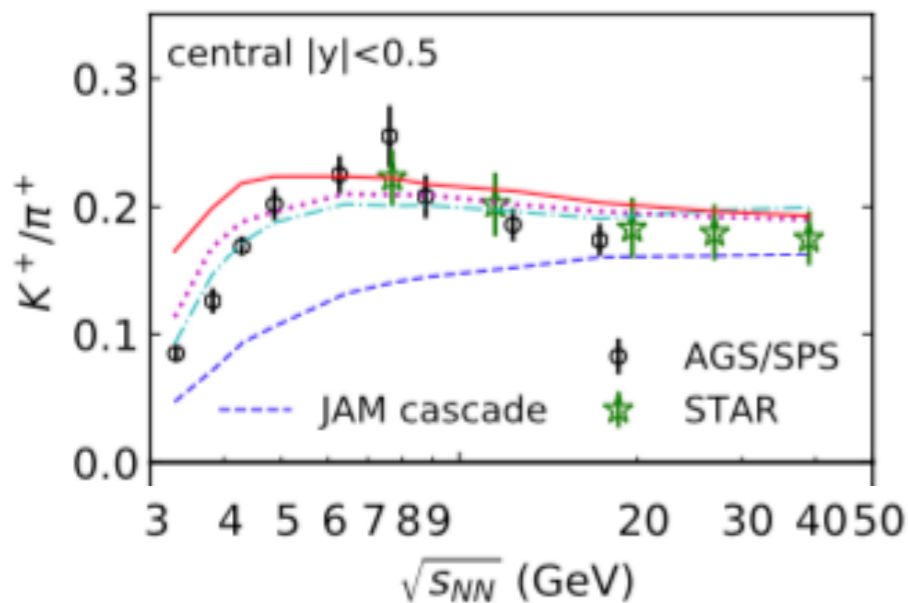
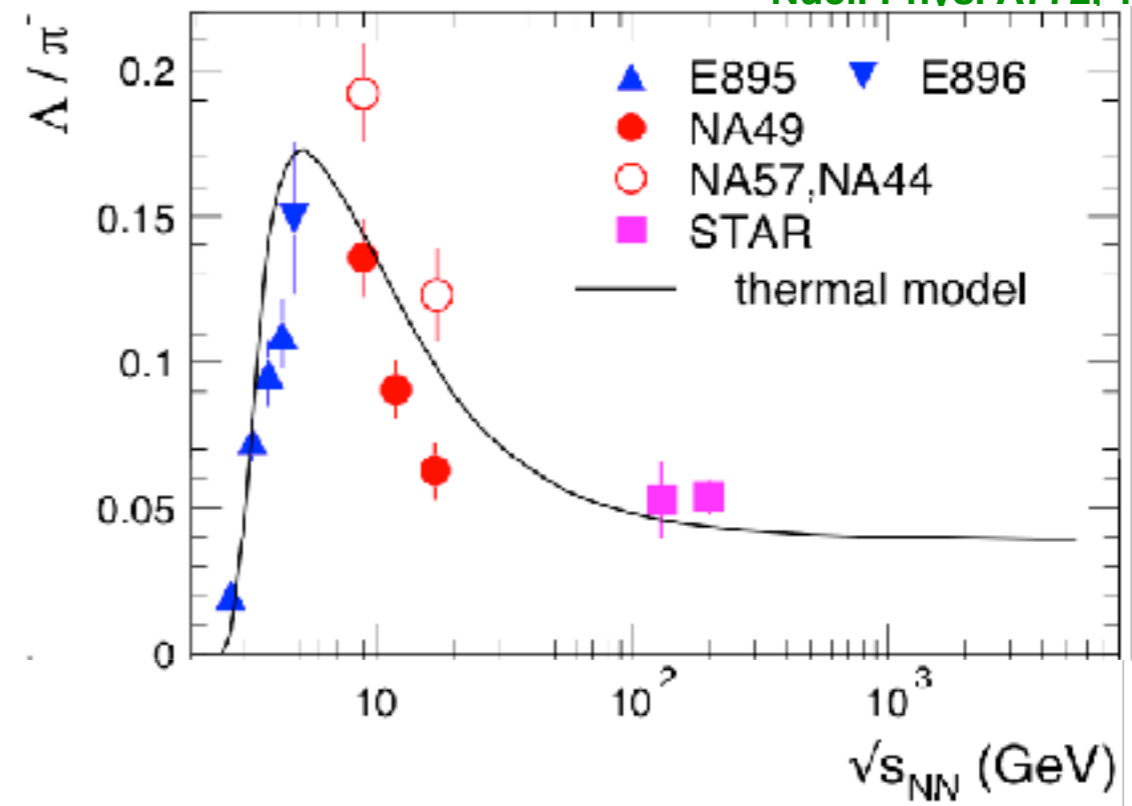
H8年度筑波大学博士論文、熊谷荒太「Deuteron Production in Au+Au Collisions at 11.7A GeV/c」

H12年度筑波大学博士論文、中條達也「Study of Single Particle Spectra and Two Particle Correlations in Au+Au Collisions at 4-11 A GeV」 22

# Strangeness Enhancementの現状



Nucl. Phys. A772, 167(2006)



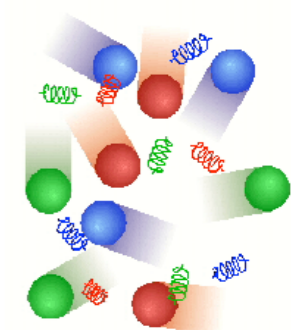
✓ 衝突ビームエネルギー依存性が測定

- $K^+/\pi^+$  比、 $\Lambda/\pi^-$  比、共にピーク
- 「特徴的なビームエネルギー依存性はQGP生成の証拠」と主張する理論計算

Phys.Rev. C98 (2018) no.2, 024909

✓ 今でもホットトピックス！

# 衝突型加速器RHICへ



米国ブルックヘブン国立研究所(BNL)  
RHIC加速器(2000-)  
全周3.8km  
 $\sqrt{SNN}=10-200$  GeV Au+Au

✓ 2000 高エネルギー重イオン衝突型加速器

✓ PHENIX実験の戦略

- 数多くの証拠を網羅

✓ 私たちの戦略

- 粒子識別；飛行時間測定器

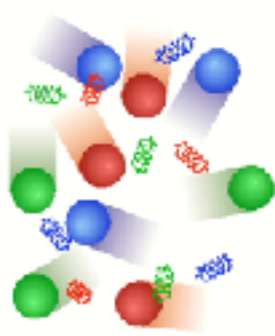
⇒ 科研費・特別推進(1994-97)

⇒ CERN-WA98で予備実験

- 粒子識別；エアロゲル検出器



# 科研費・特別推進の裏話



## ✓ 急遽、申請書を書くことになった

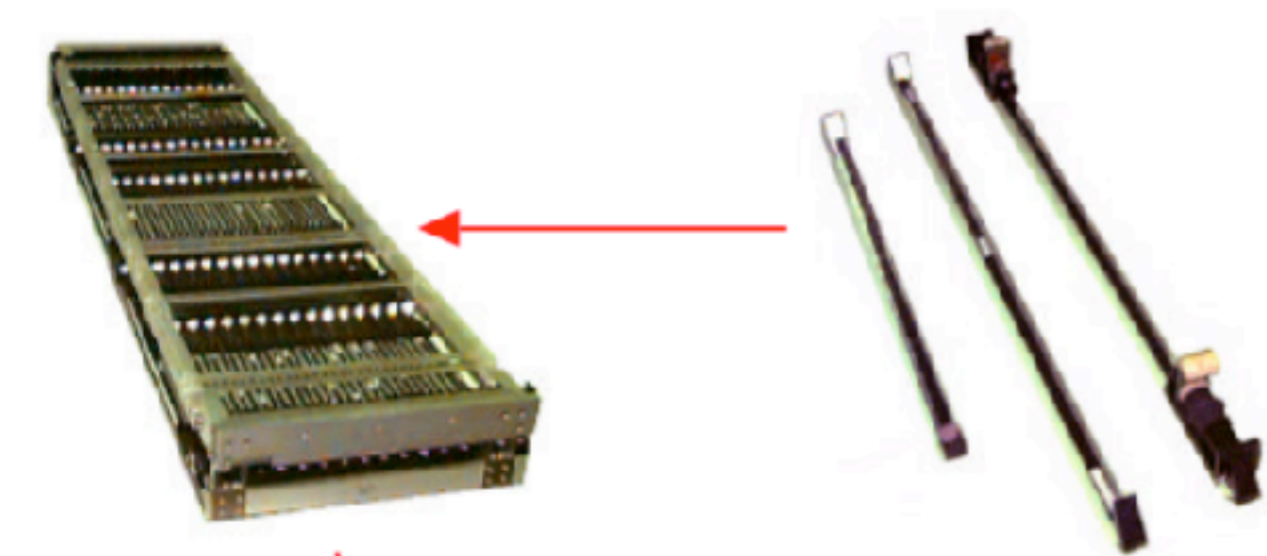
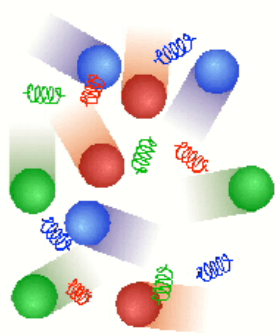
- 大立体角ソレノイド+TPCの実験チームと強磁場狭領域（電子、ミューオン、ハドロン）の2チーム体制に再編
- Sam Aronson；サンタフェ全体会議で「第2実験はレプトンに集中すべき」

～ 自主規制 ～

## ✓ 結局、特別推進研究(1994-1997)と国際学術研究(1995-1997)を獲得

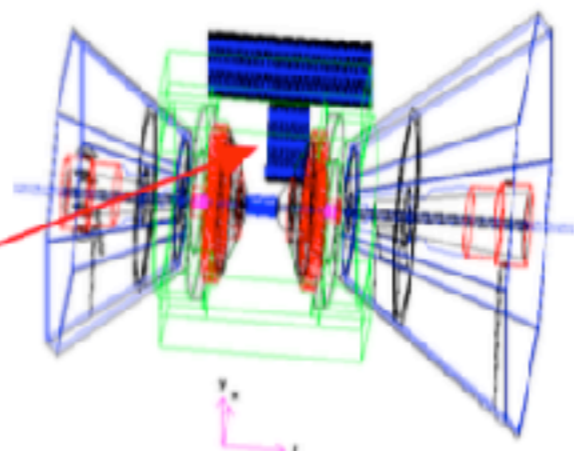
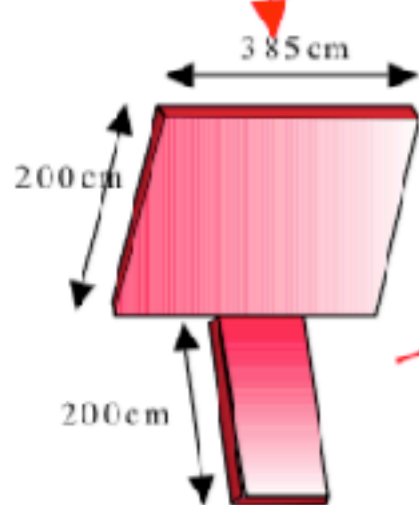
- 国際執行では事務方に多大な負担

# PHENIX TOFの特徴



Panel; 96 slats

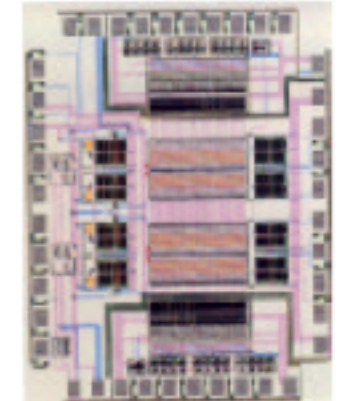
Slat; Plastic rod w. 2 PMT's



Riko Hguchi (Tsukuba)

## Custom Made Chip

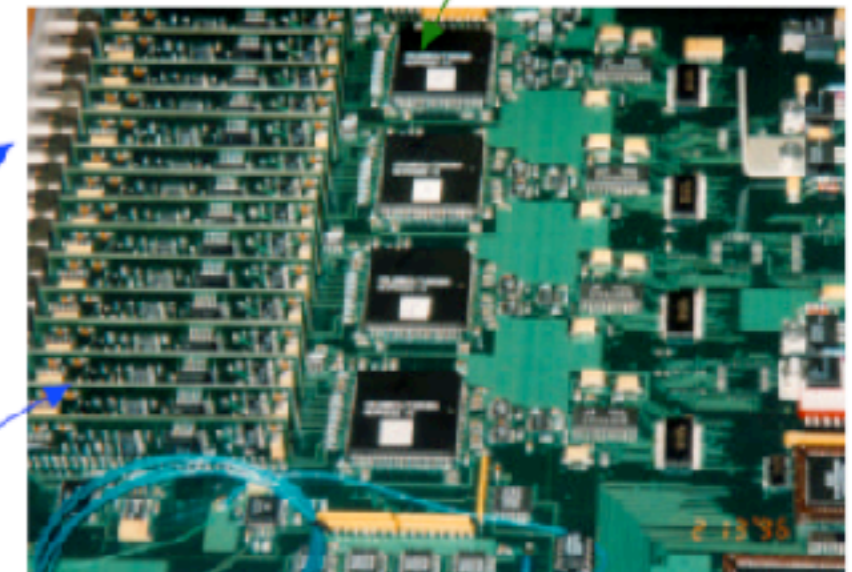
FEE board  
16ch/board  
8 layers PC



TVC+AMU chip  
4ch/chip

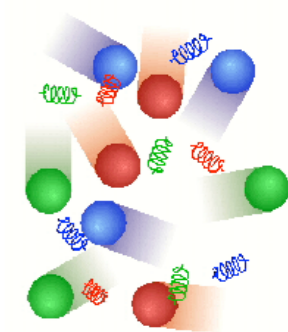
PMT inputs  
lemo

Discriminator  
Sub-board

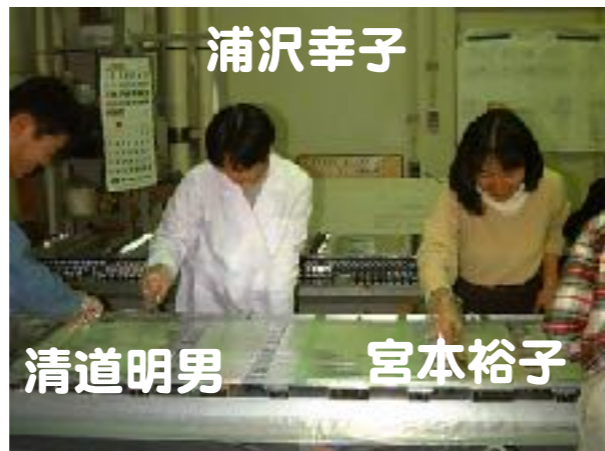


- ✓ 1056本のシンチレータ、2112本の光電子増倍管
- ✓ コロンビア大Nevis研とTVC/AMUチップの共同開発

# PHENIX TOFの組み立て (1996-98)



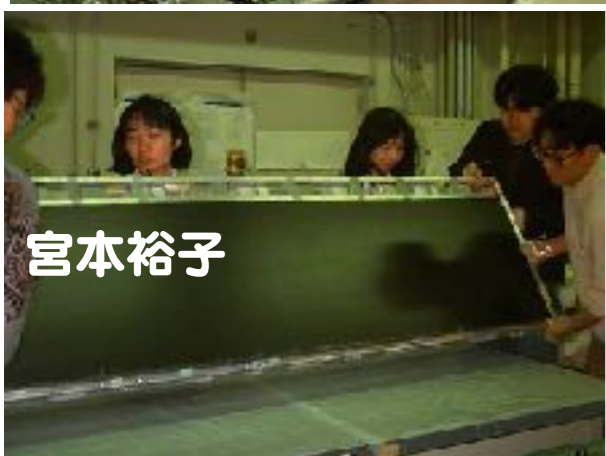
浦沢幸子  
清道明男  
樋口理子



浦沢幸子  
清道明男  
宮本裕子



横田幸郎  
中條達也



宮本裕子



佐藤進



西村俊二  
倉田美月  
中條達也  
加藤純雄  
八木浩輔  
島田知弘  
稲葉基  
絵野澤和彦  
佐甲博之  
清道明男  
浦沢幸子  
佐藤進

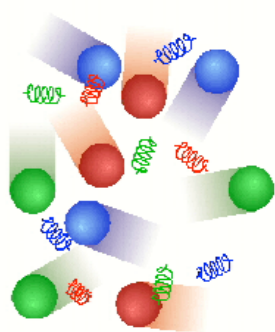


宮本裕子  
中條達也  
横田幸郎  
倉田美月

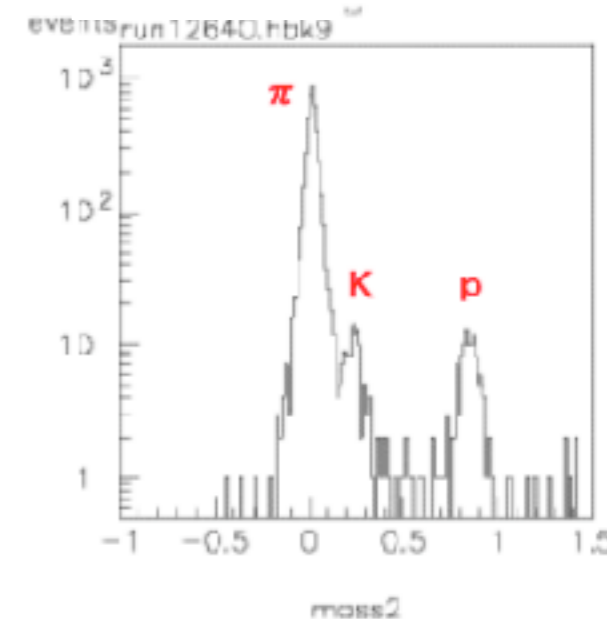
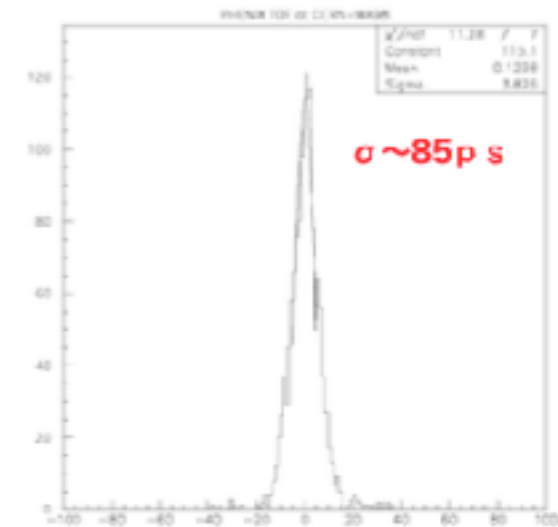
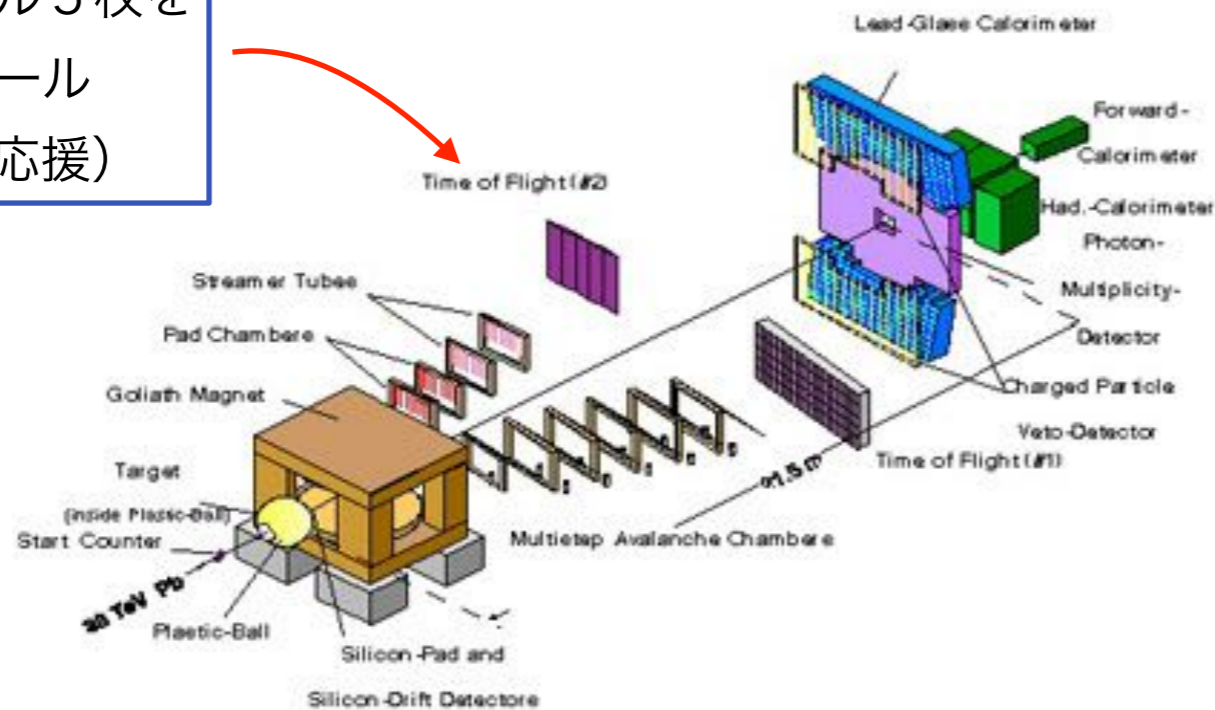


横田幸郎

# PHENIX-TOF@CERN-WA98実験 (1996)



PHENIX TOFパネル5枚を  
急遽インストール  
(H. Gutbrodの応援)



✓計画通りの時間分解能！

宮本裕子

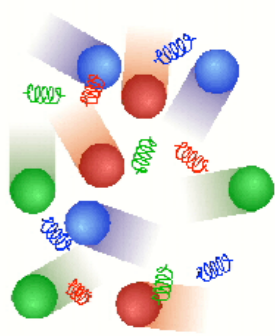
西村俊二

佐藤進

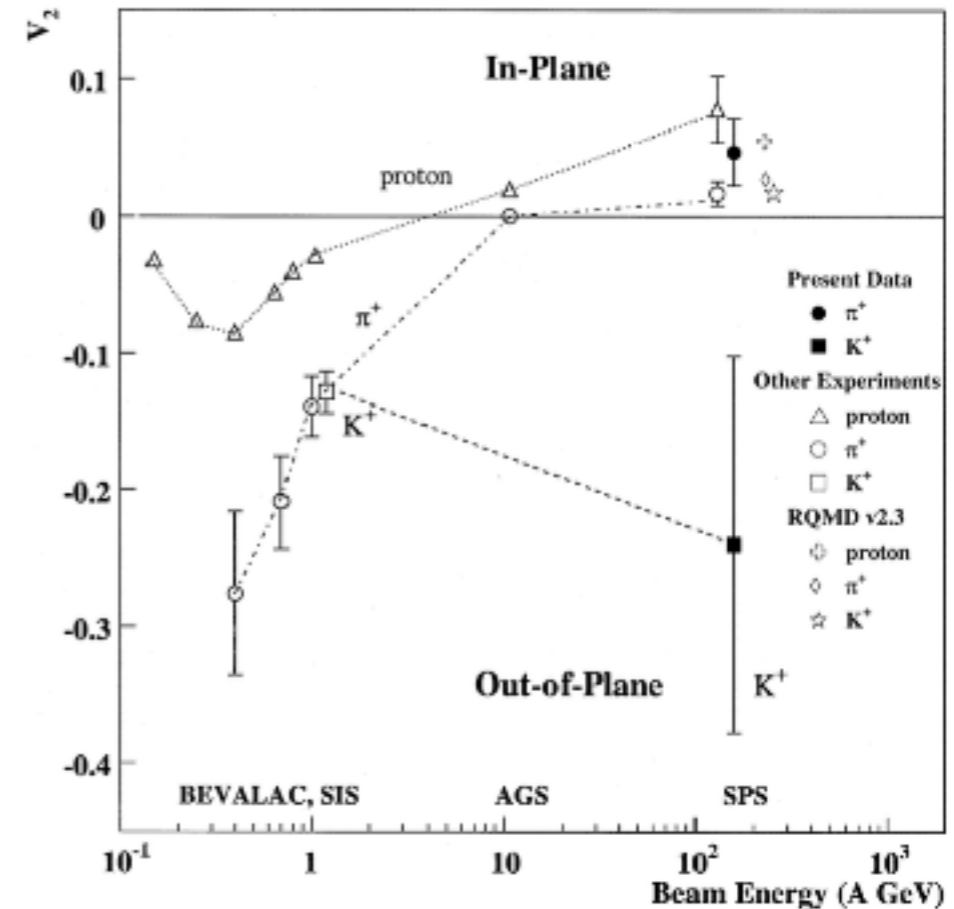
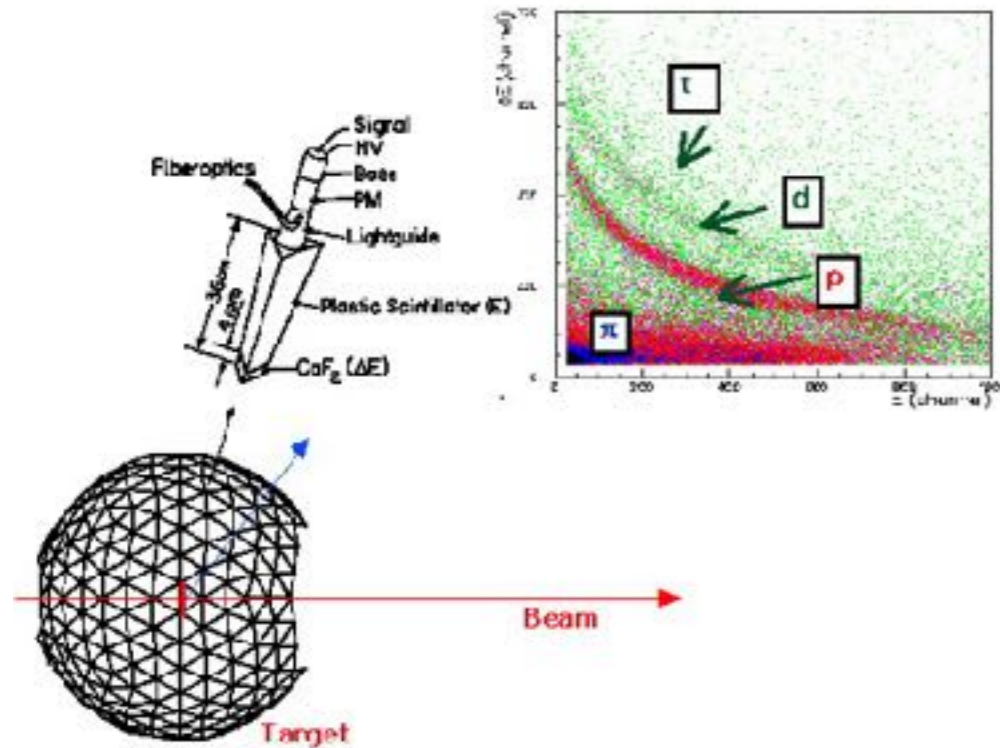
西村俊二

横田幸郎

# WA98実験副産物 ～方位角異方性測定～



WA98, Phys. Let. B469 (1999) 30



✓ SPSエネルギーにおける最初の $v_1$ 測定に成功

✓ 統計に苦しんだ $v_2$ 測定

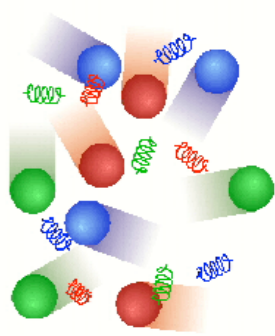
Directed Flow Analysis in Pb + Pb Collisions at 158 GeV/A  
WA98 S. Nishimura, ICPAQGP 1997, 258-269

H10年度博士論文、倉田美月「Azimuthal anisotropy of particle emission at target rapidity region in Pb+Pb 158A GeV collisions」

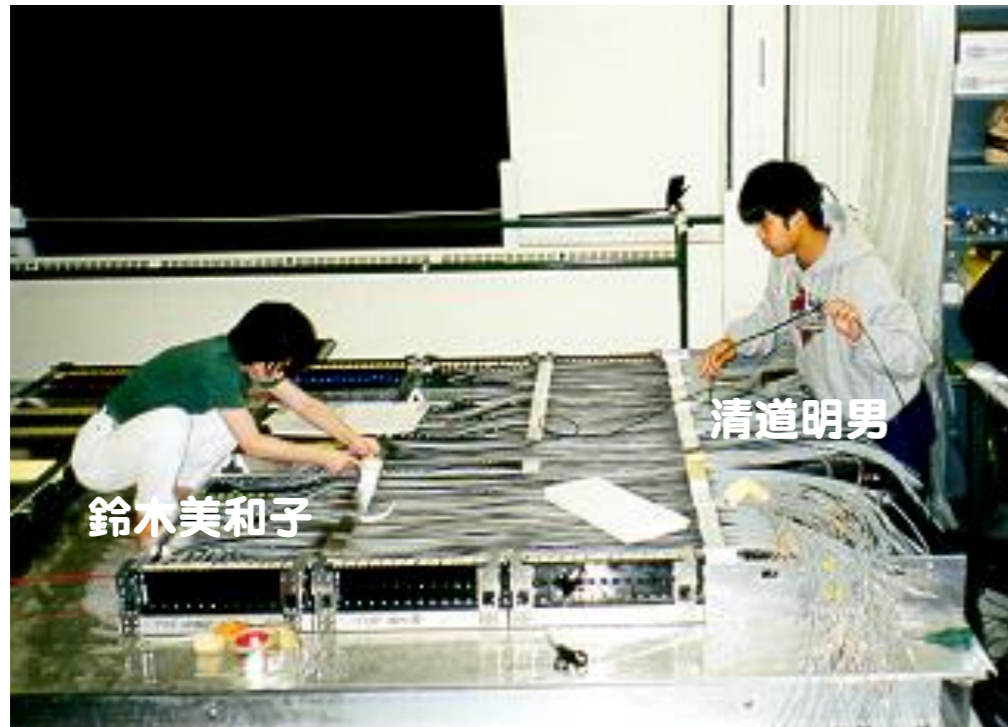
H10年度博士論文、絵野沢和彦「Study of the azimuthally anisotropic emission of kaons in 158A GeV Pb+Pb collisions at CERN-SPS」

H12年度博士論文、佐藤進「Study of Delta++ Resonance Abundance in 158 A GeV Pb + Pb Collisions at CERN-SPS」

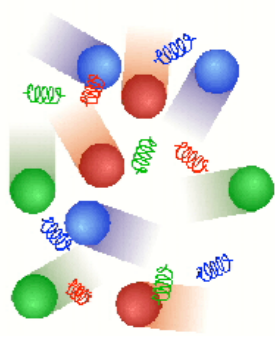
# PHENIX実験への設置



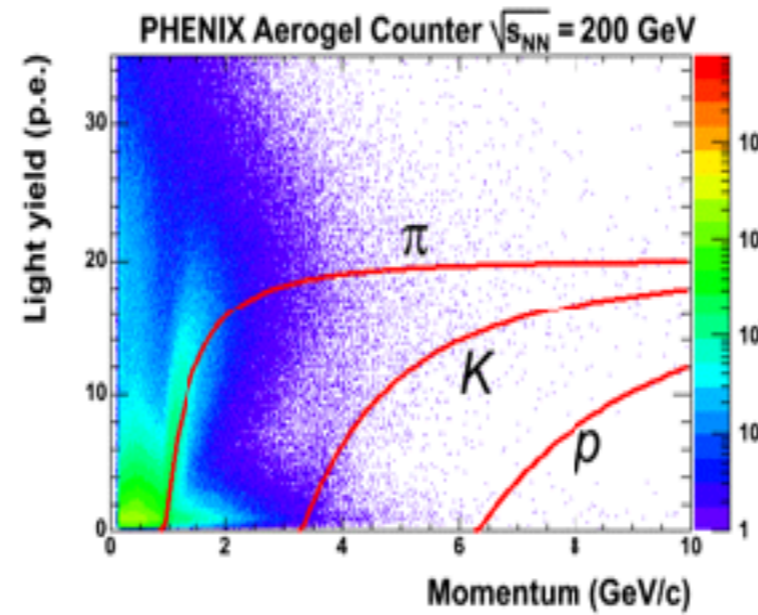
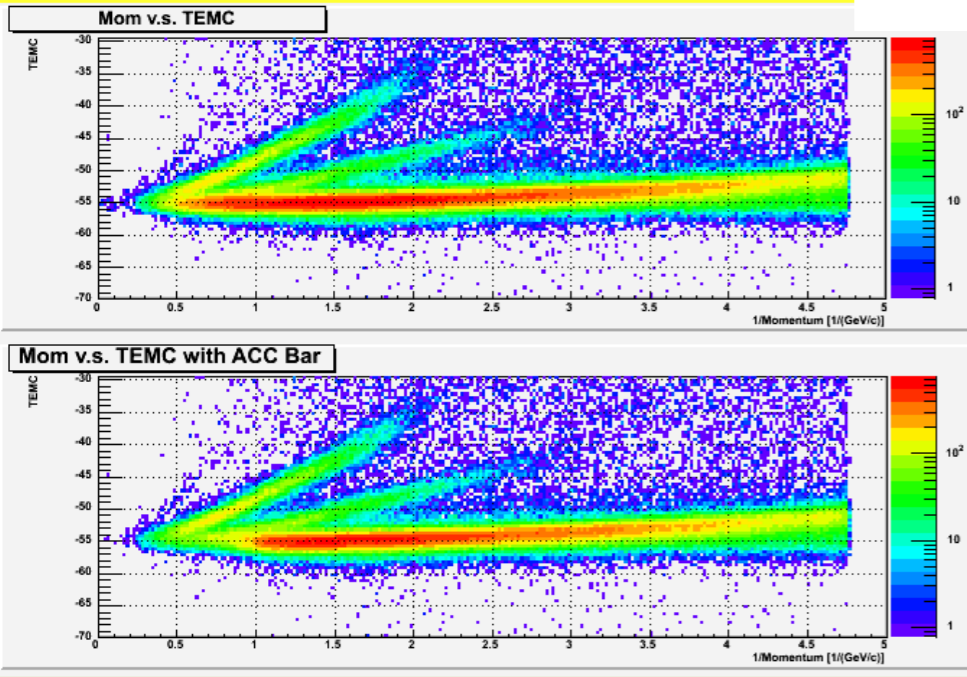
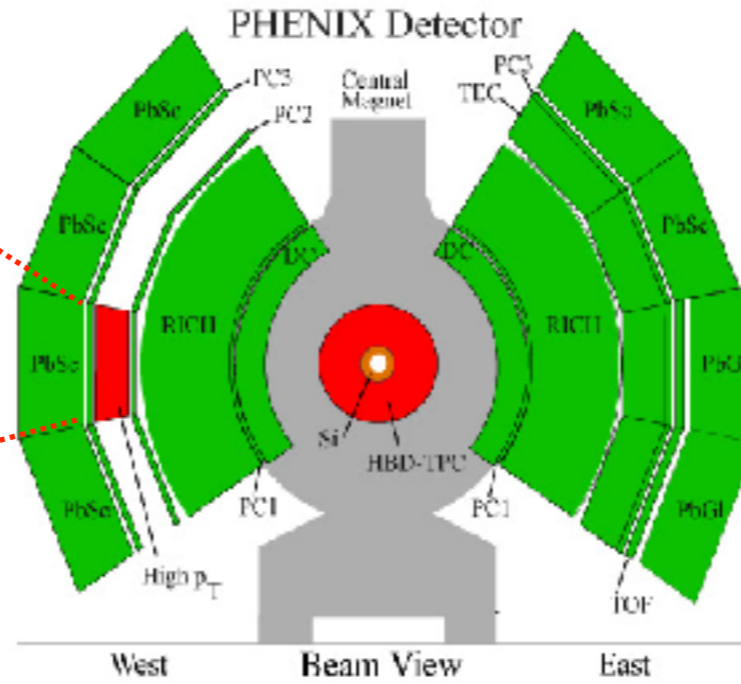
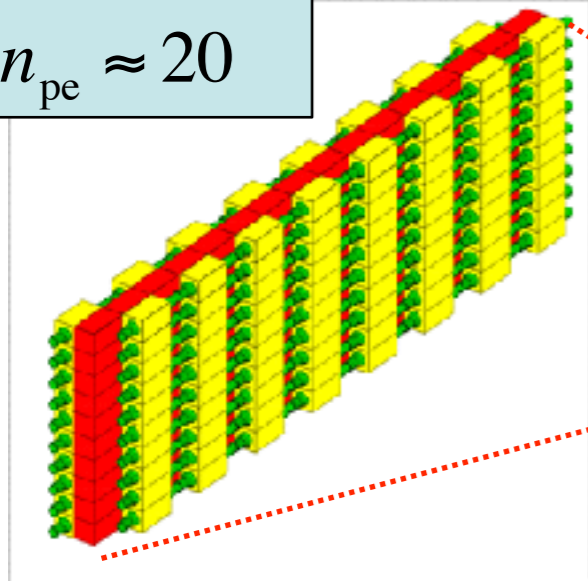
1998-1999



# 粒子識別領域の拡張 ～ 超低屈折率エアロゲルチェレンコフ ～



$n_{\text{index}} = 1.012$   
 $n_{\text{pe}} \approx 20$

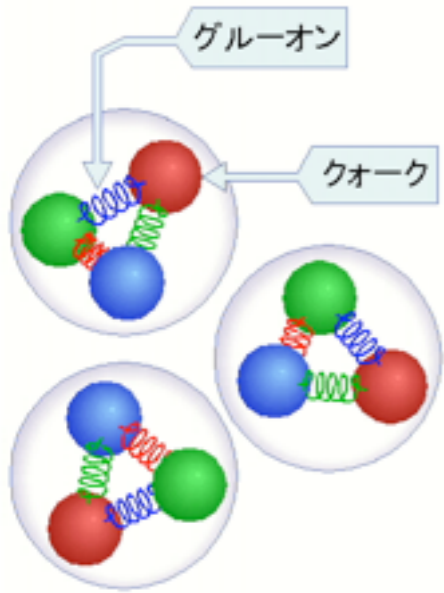


# JINR Dubnaとの連携



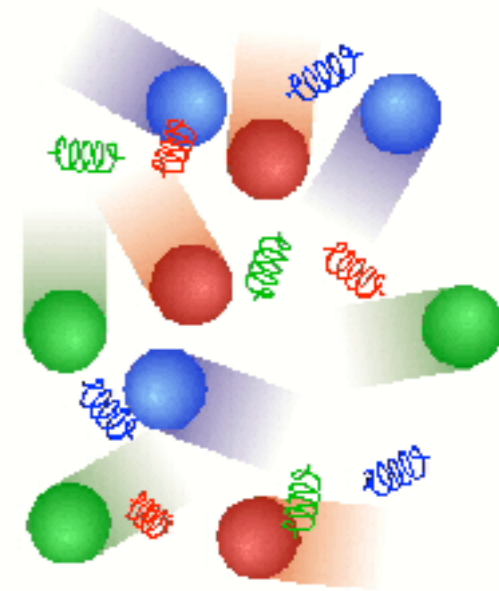
- ✓ Aerogel製作に向けて協定締結
- ✓ KEKテスト実験に幾度も来日





# RHICにおける成果

## ～PHENIX TOFの成果～



### ① Baryon Anomalyの発見

→ Quark Recombination Modelの成立

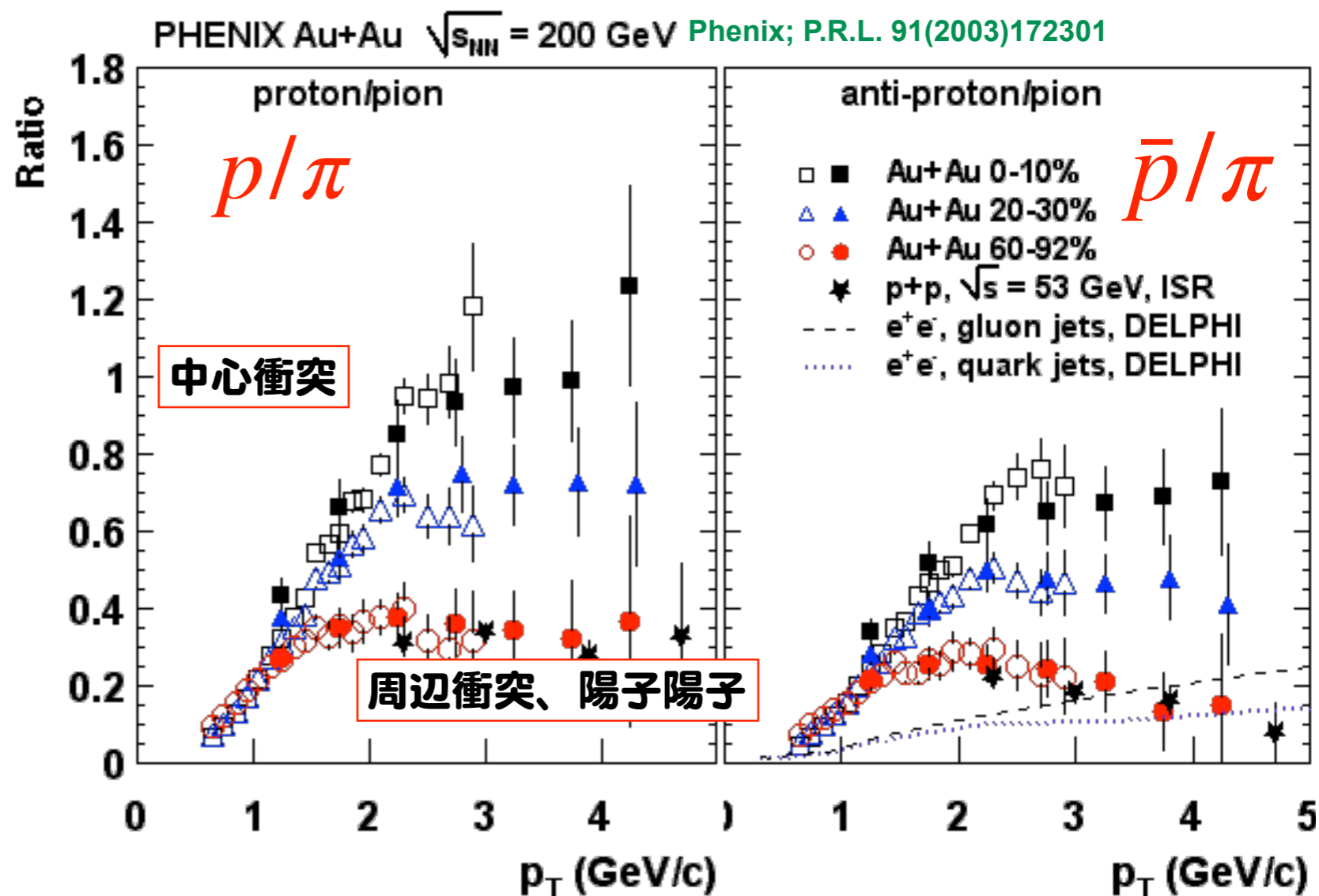
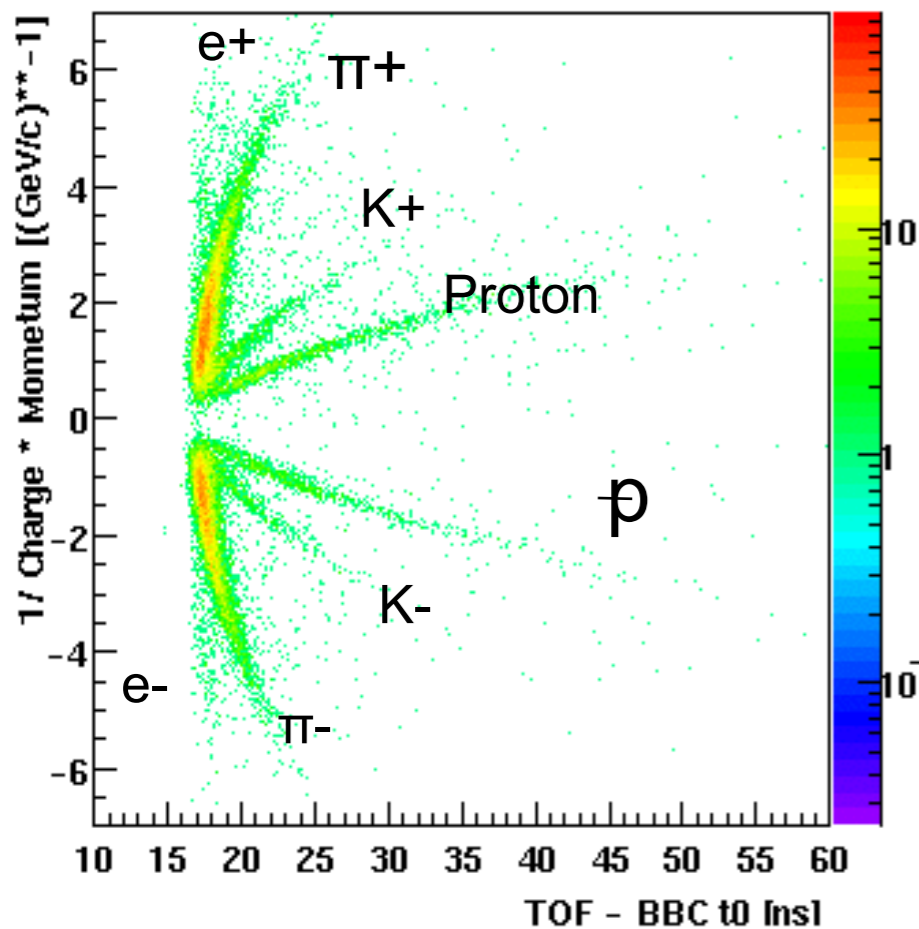
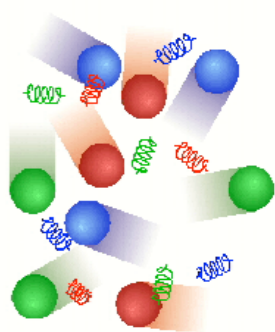
### ② 大きな楕円方位角異方性の発見

→ 流体力学模型の成立

QGP生成の実験的証拠として重要な貢献

# PHENIX TOF粒子識別の成果

## 1) Baryon Anomaly の発見



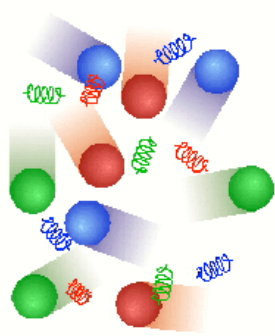
✓ 他の高エネルギー粒子衝突反応に比べて、多くの陽子や反陽子が生成されることを発見！

● QGP特有のハドロン生成メカニズム

→ クォーク融合模型

→ 中條達也氏；原子核談話会新人賞受賞

# QGP特有の粒子生成メカニズム ～ クォーク融合模型 ～



✓ クォークのuniversal分布,  $w(p_t)$

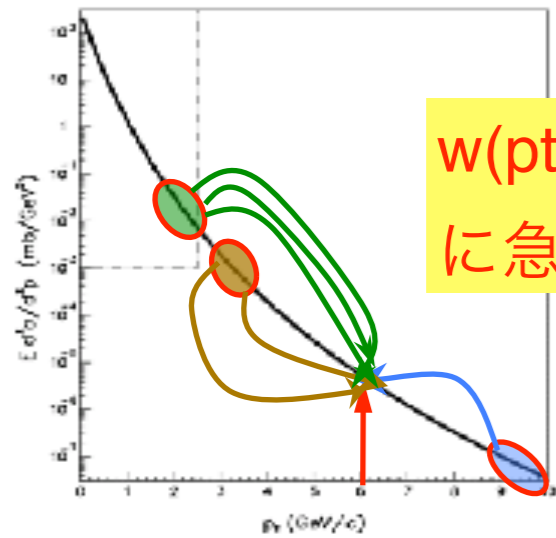
✓ 2個のクォークからなるメソンの生成確率は  $w^2$  バリオンは  $w^3$  に比例

To form meson at  $p_t$ , quark at  $p_t/2$

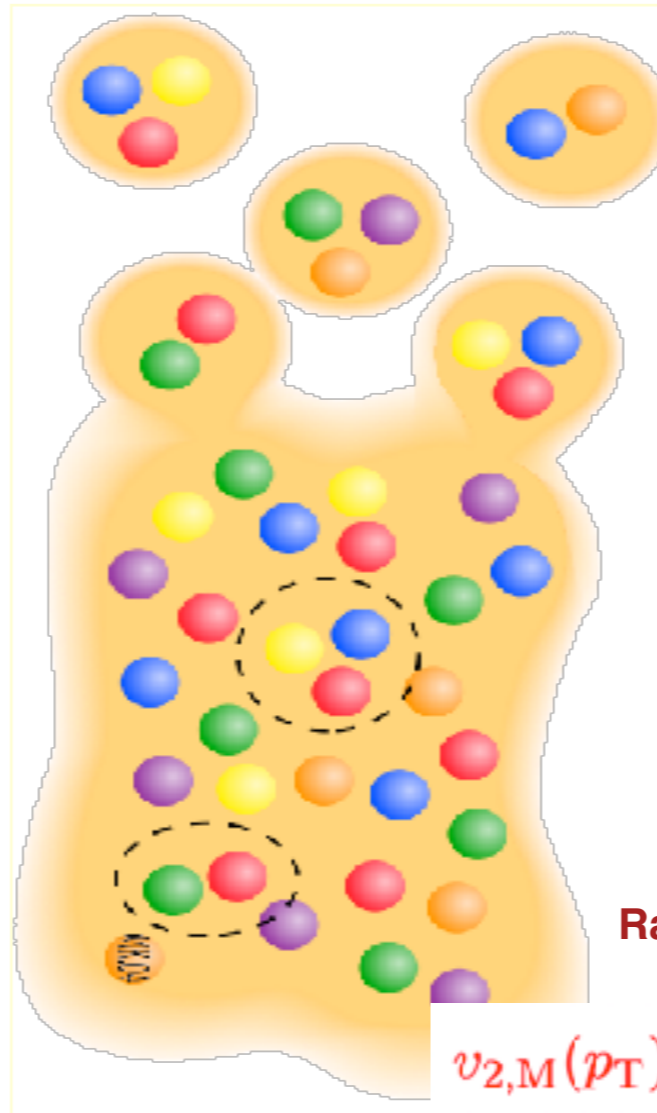
$$W_M(p_t) \approx C_M \cdot w^2(p_t/2)$$

To form baryon at  $p_t$ , quark at  $p_t/3$

$$W_B(p_t) \approx C_B \cdot w^3(p_t/3)$$



$w(p_t)$ は $p_t$ と共に急激に減少



$$v_{2,M}(p_T) \sim 2v_{2,q}(p_T/2), \quad v_{2,B}(p_T) \sim 3v_{2,q}(p_T/3)$$

Ang. distr. of meson (2q);

$$\frac{dN_M}{d\phi} \propto w^2 = (1 + 2v_{2,q} \cos 2\phi)^2$$

$$\approx (1 + 4v_{2,q} \cos 2\phi)$$

Ang. distr. of baryon (3q);

$$\frac{dN_B}{d\phi} \propto w^3 = (1 + 2v_{2,q} \cos 2\phi)^3$$

$$\approx (1 + 6v_{2,q} \cos 2\phi)$$

Ang. distr. of quark (q);

$$w \propto (1 + 2v_{2,q} \cos 2\phi)$$

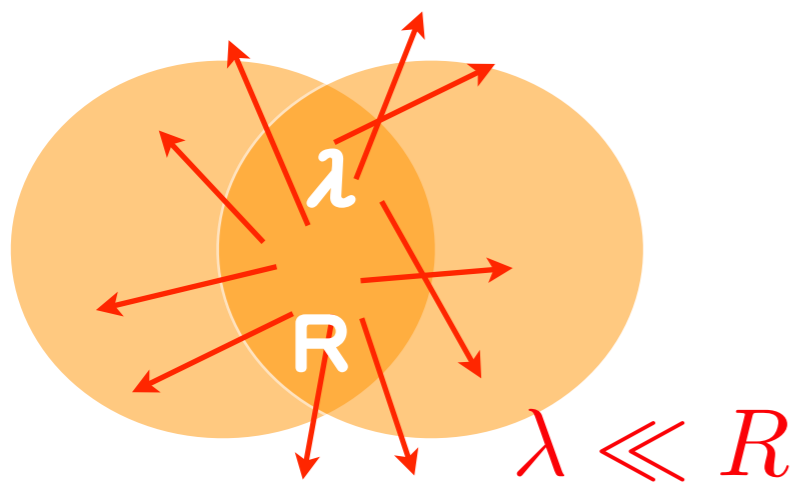
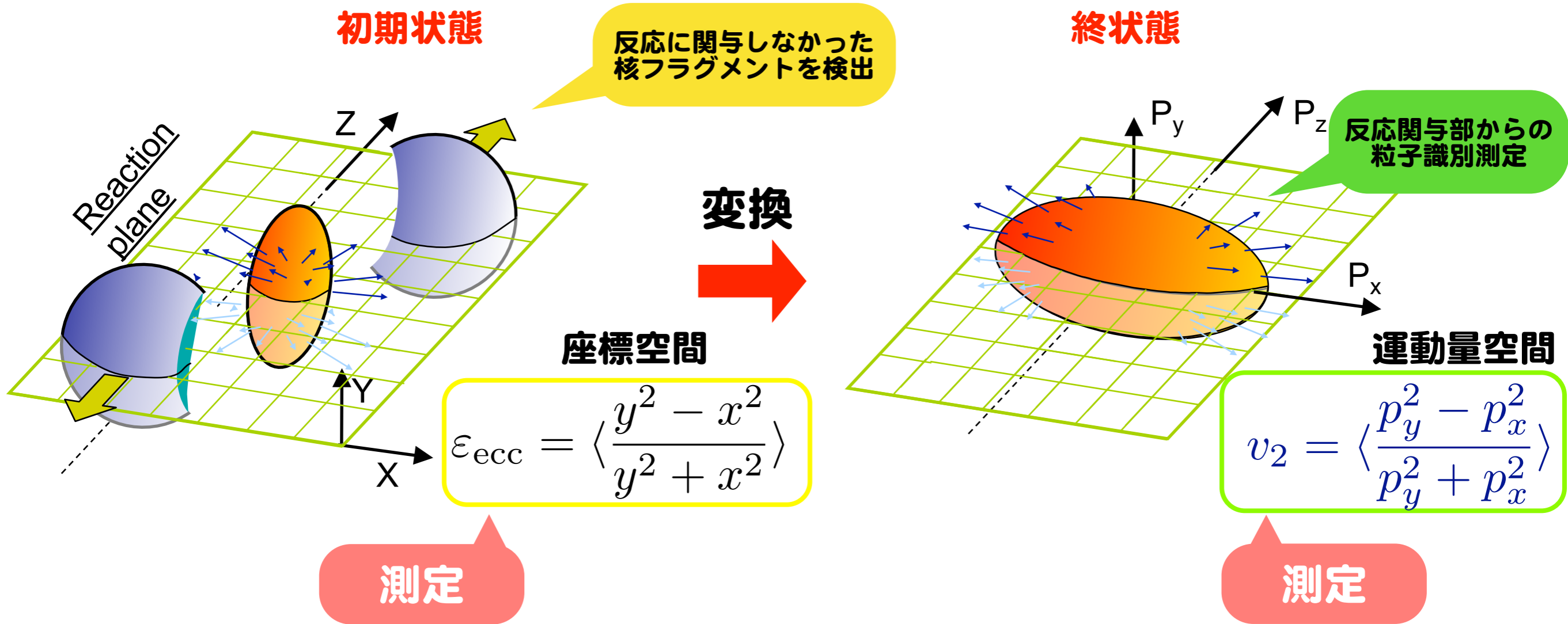
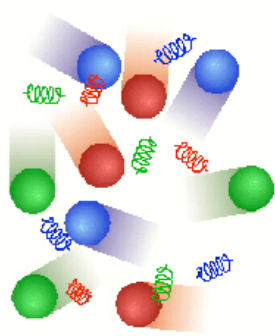
Ratio of Number of quarks

➡ Baryon Anomaly

➡ Quark Number Scaling

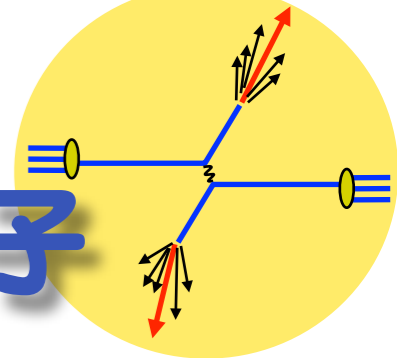
# PHENIX TOF粒子識別の成果

## 2) 大きな楕円的方位角異方性の発見



- ✓ 初期状態と終状態両方を測定可能
- 変換過程 (流体力学) の詳細を理解

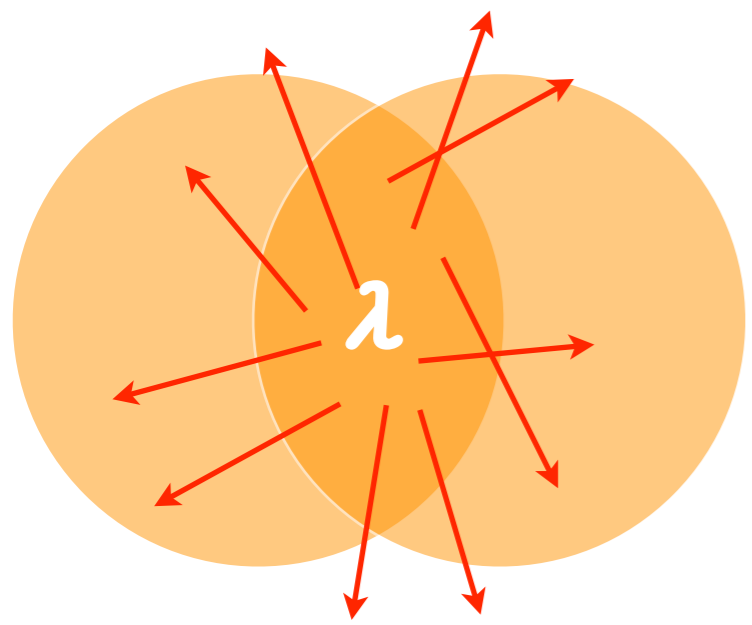
# 初期状態の座標空間異方性から 終状態の運動量空間異方性に変換される様子



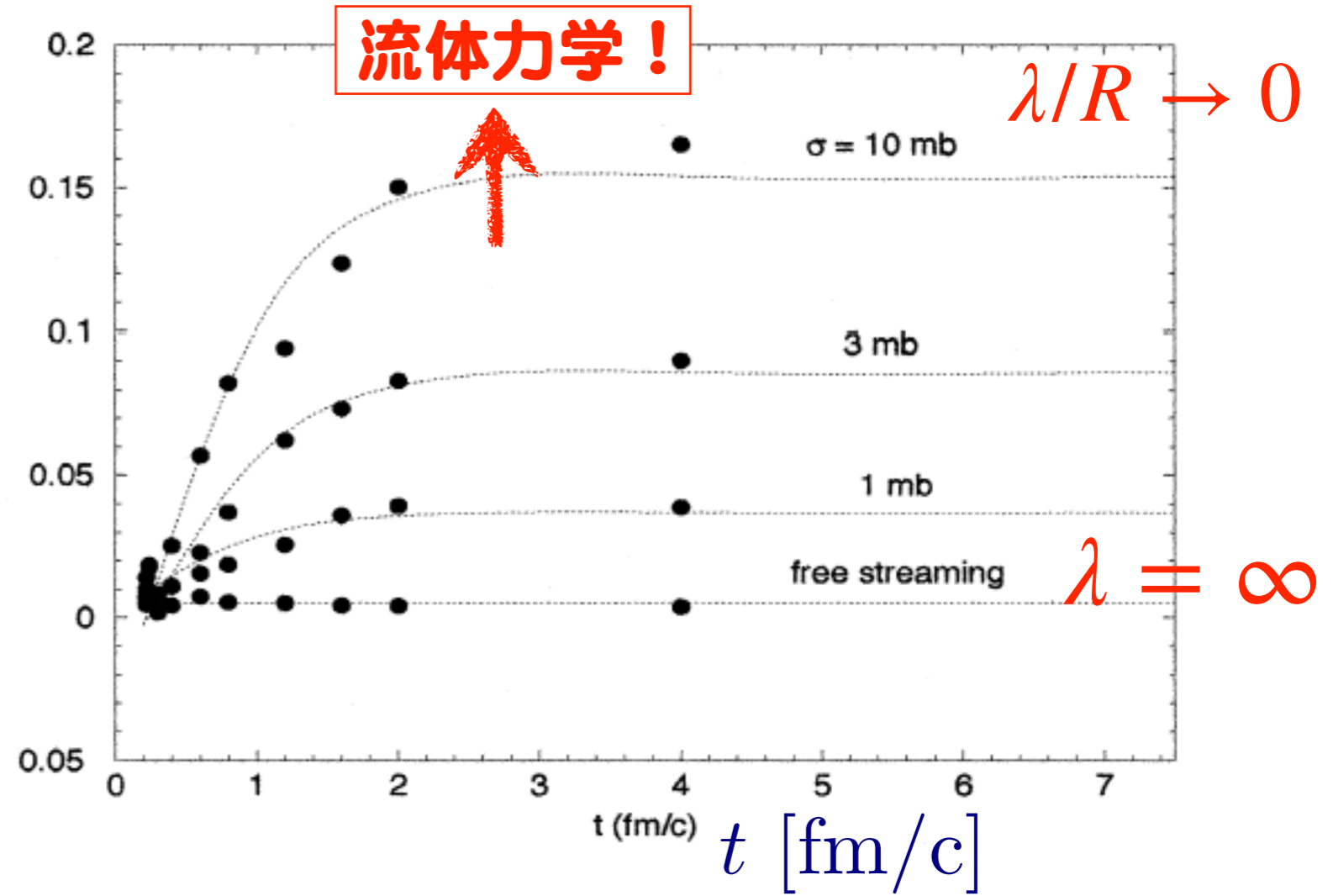
初期状態  $\varepsilon_{ecc} = \left\langle \frac{y^2 - x^2}{y^2 + x^2} \right\rangle$

$\lambda = \frac{1}{n\sigma}$

終状態  $v_2 = \left\langle \frac{p_y^2 - p_x^2}{p_y^2 + p_x^2} \right\rangle$



$v_2$

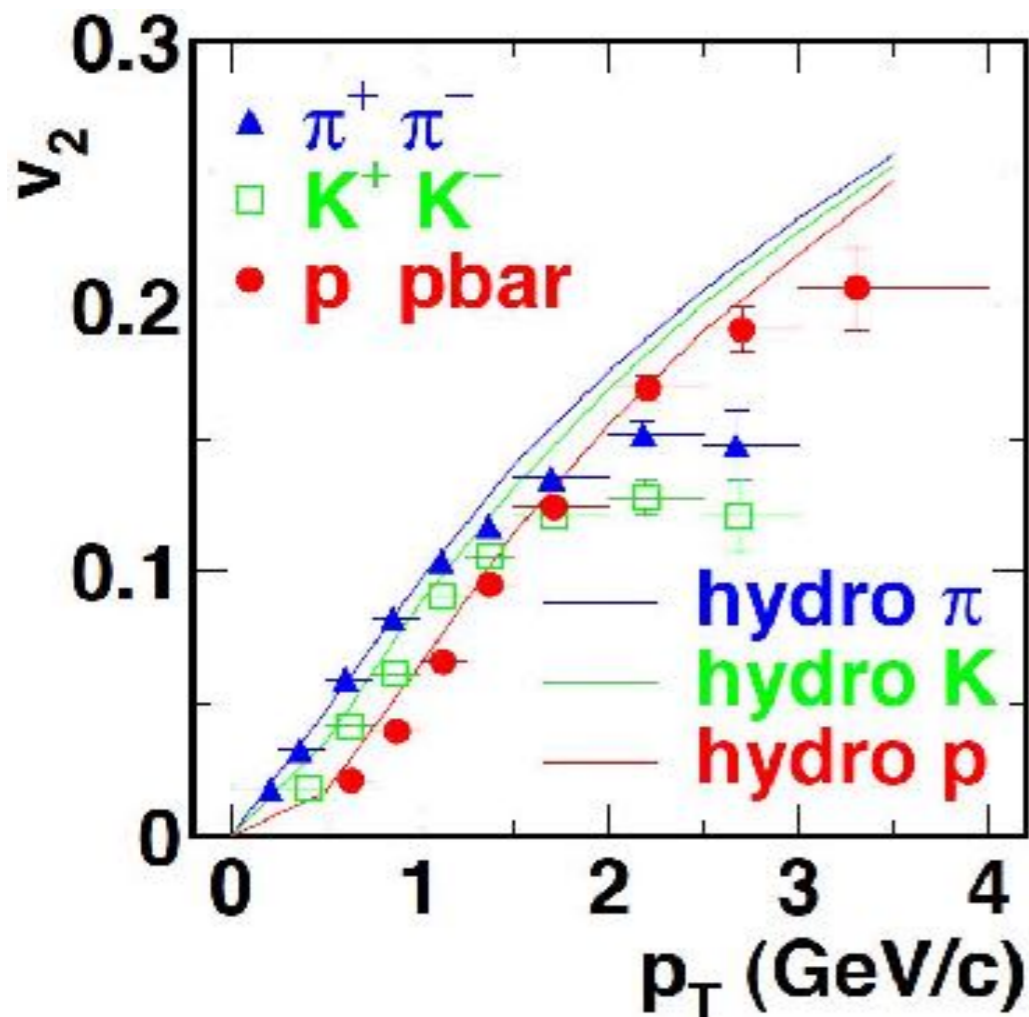
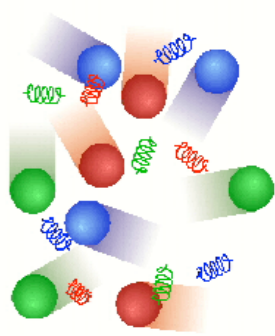


✓ 座標空間異方性から速やかに運動量空間異方性に変換される

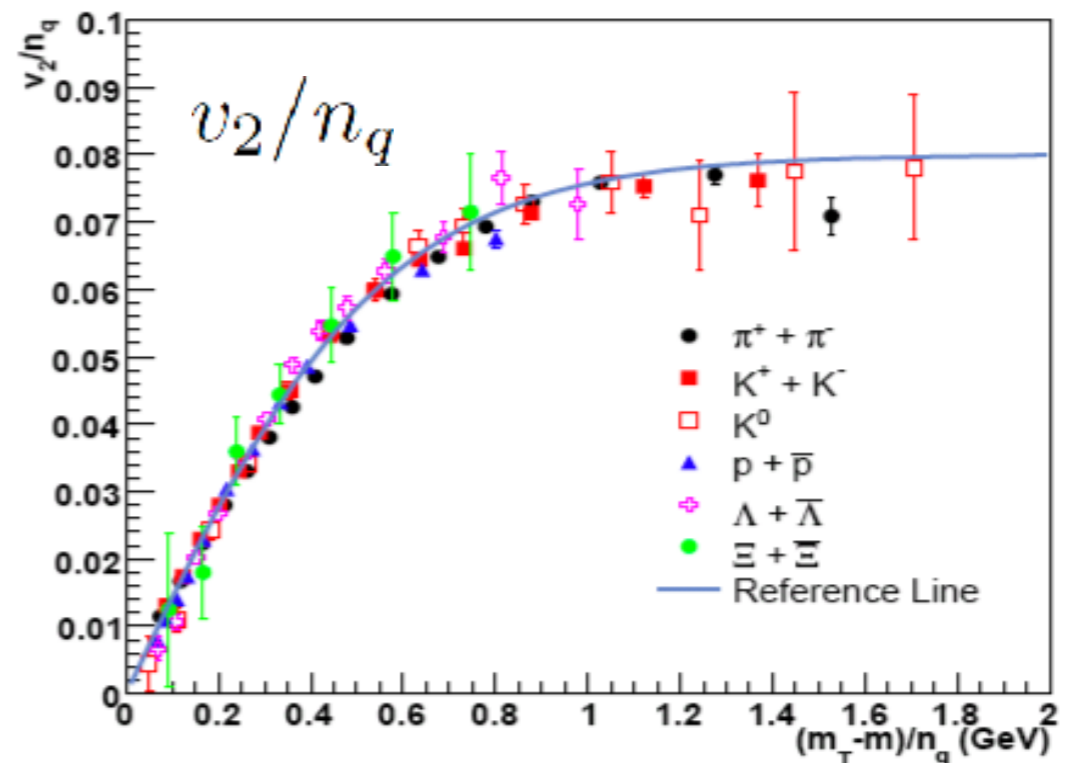
- 流体力学モデルを適用可能

# PHENIX TOF粒子識別の成果

## 2) 大きな方位角異方性 $v_2$



方位角異方性/クォーク数



横運動エネルギー/クォーク数

$E_T/n_q$

### ✓ 大きな楕円方位角異方性 ( $v_2$ ) の観測

- 極めて早い thermalization  $\sim 0.6$  fm/c
- 完全流体!  $\rightarrow$  強結合 QGP の発見
- クォーク数 ( $n_q$ ) スケーリング  
 $\rightarrow$  パartonレベルで異方性が生成

H18博士論文、坂井真吾「核子対あたり200 GeV の金・金衝突における電子の方位角異方性の測定とheavy quarkの集団運動」

H19博士論文、益井宙「重心系核子対あたり200GeVの金・金衝突における識別された荷電ハドロン楕円フローの衝突中心度依存性の測定」

H20博士論文、三木健太郎「RHIC-PHENIX  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV 金・金衝突実験における中性パイ中間子及び直接光子の方位角異方性の測定」

H21博士論文、下村真弥「RHIC-PHENIX実験での相対論的原子核衝突における家電ハドロン方位角異方性の系統的な研究」

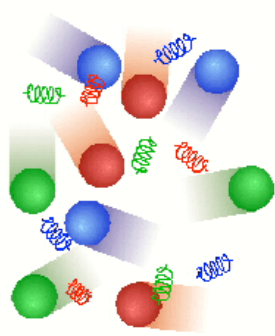
H25博士論文、新井田貴文「RHIC-PHENIX実験 200 GeV 金+金衝突における同種2粒子を用いた量子力学的干渉効果の反応平面依存性の測定」

H25博士論文、轟木貴人「RHIC-PHENIX  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV 金・金衝突実験における二粒子相関の反応平面依存性の測定」

H26博士論文、水野三四郎「RHIC-PHENIX実験における  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV 金・金衝突での直接光子の高次方位角異方性の測定」

H28博士論文、中込宇宙「RHIC-PHENIX実験における  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV 銅・金衝突での1次、2次、3次方位角異方性の測定」

# PHENIX実験 Top 5 論文



INSPIRE 2023/11/21

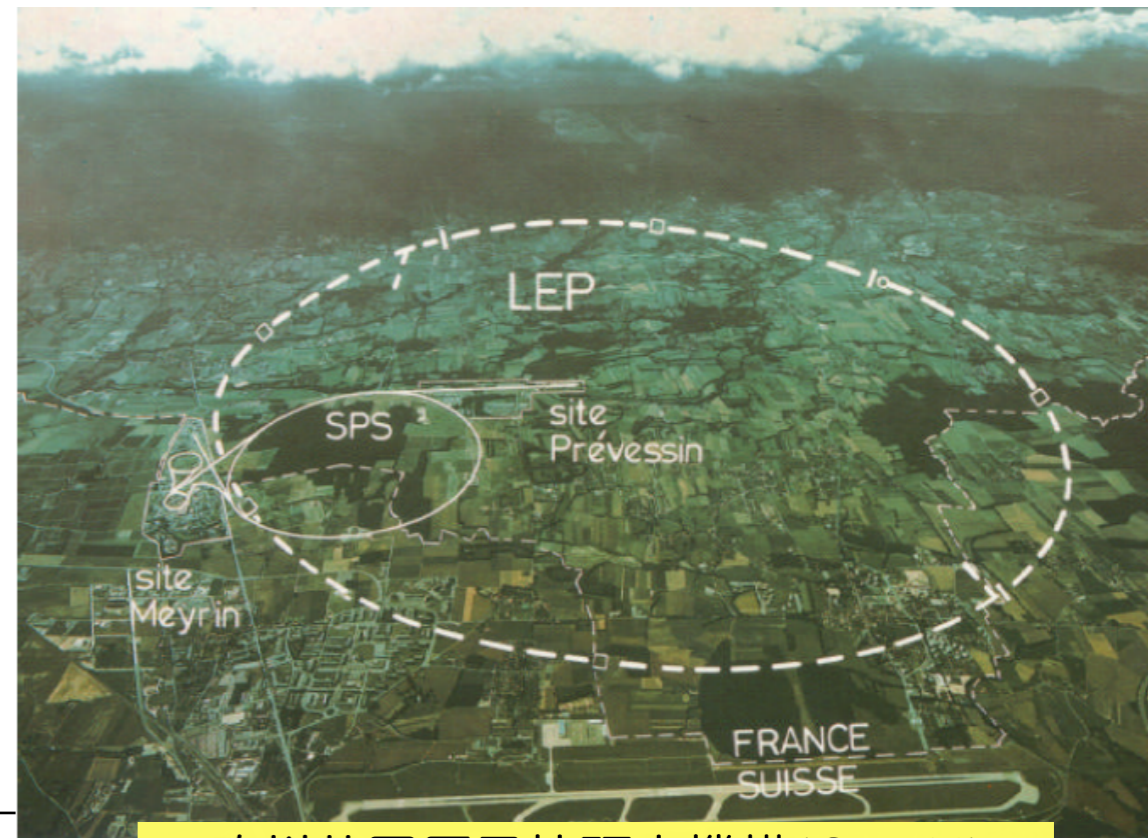
被引用件数	論文題目	雑誌	内容
3521	Formation of dense partonic matter in relativistic nucleus-nucleus collisions at RHIC	Nucl.Phys. A757 (2005) 184-283	QGP生成の総説
1195	Suppression of hadrons with large transverse momentum in central Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 130$ GeV	Phys.Rev.Lett. 88 (2002) 022301	Jet Quench
994	Identified charged particle spectra and yields in Au+Au collisions at $S(NN)^{**1/2} = 200$ -GeV	Phys.Rev. C69 (2004) 034909	TOF粒子識別によるハドロン横運動量分布
874	Elliptic flow of identified hadrons in Au+Au collisions at $s(NN)^{**}(1/2) = 200$ -GeV	Phys.Rev.Lett. 91 (2003) 182301	TOF粒子識別による楕円型方位角分布
783	Energy Loss and Flow of Heavy Quarks in Au+Au Collisions at $s(NN)^{**}(1/2) = 200$ -GeV	Phys.Rev.Lett. 98 (2007) 172301	RAA and $v_2$ of heavy flavor

✓ 被引用件数top5のうち2件が我々の貢献

- 飛行時間測定器建設に携わった多くの院生に感謝



米国ブルックヘブン国立研究所(BNL)  
RHIC加速器(2000-)  
全周3.8km  
 $\sqrt{s_{NN}}=10-200$  GeV Au+Au



欧州共同原子核研究機構(CERN)  
LHC加速器(2009~)  
全周27km世界最大・最高エネルギー  
 $\sqrt{s_{NN}}=2.76, 5.5$  TeV Pb+Pb

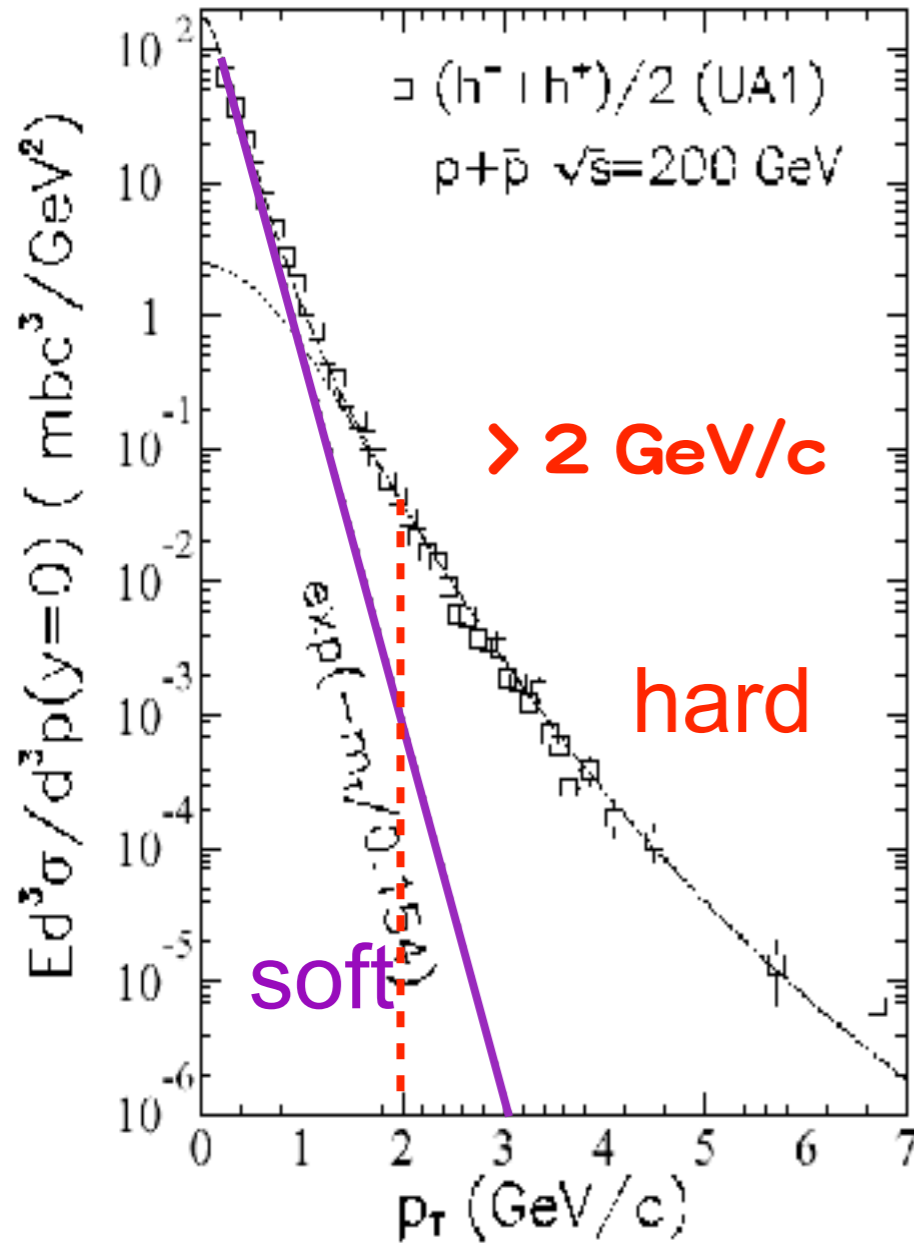
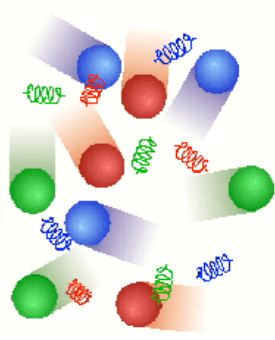
実験屋は加速器と共に

# RHICからLHCへ ～方向転換～

- ① RHIC vs LHC
- ② JET

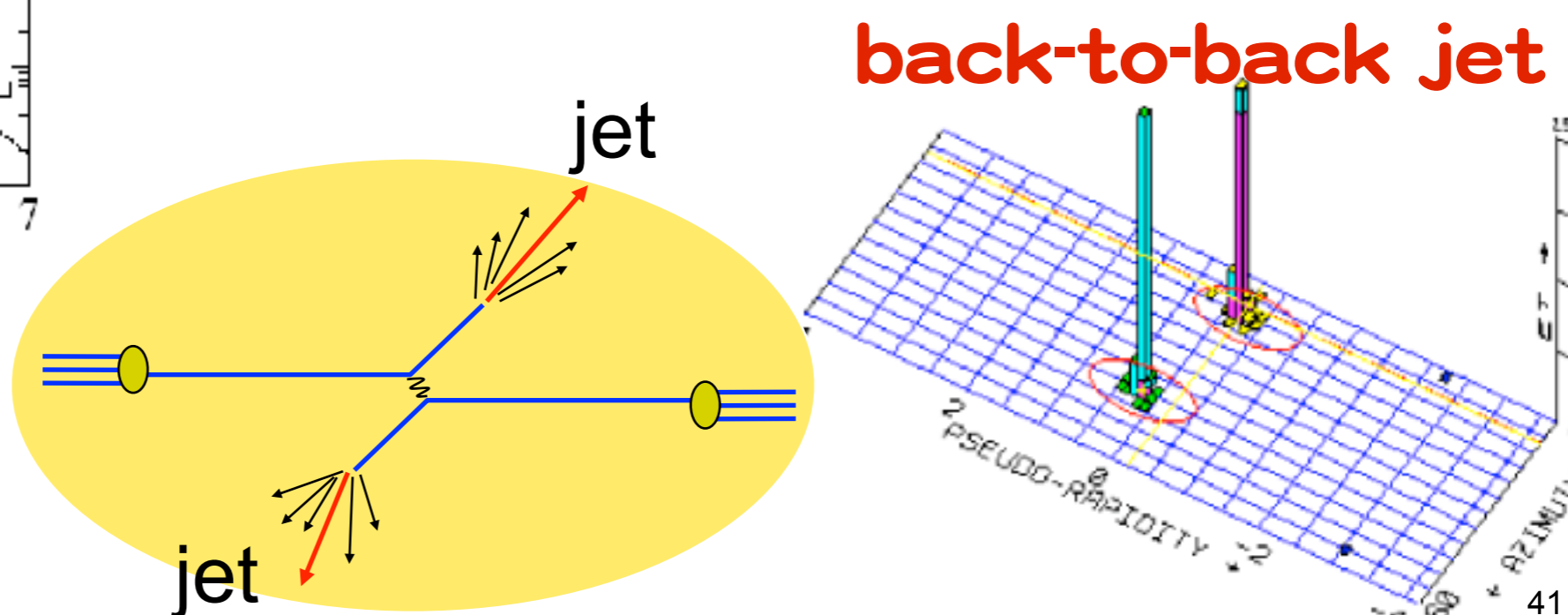


# 熱的分布 (Soft) vs Jet (Hard)

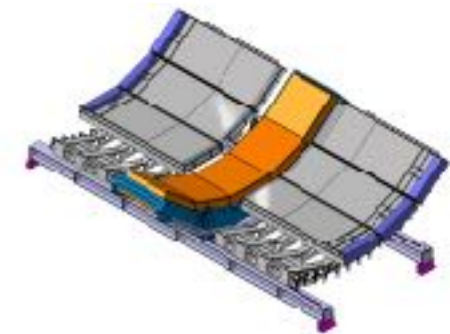


- ✓ 1972年にISRの実験から熱的分布とは異なる高運動量成分が発見
- ✓ クォーク/グルオンの2体散乱+ Fragmentationによりback-to-back jetが生成
- ✓ 高運動量領域の主成分
  - ➡ QGPを探るプローブとして着目

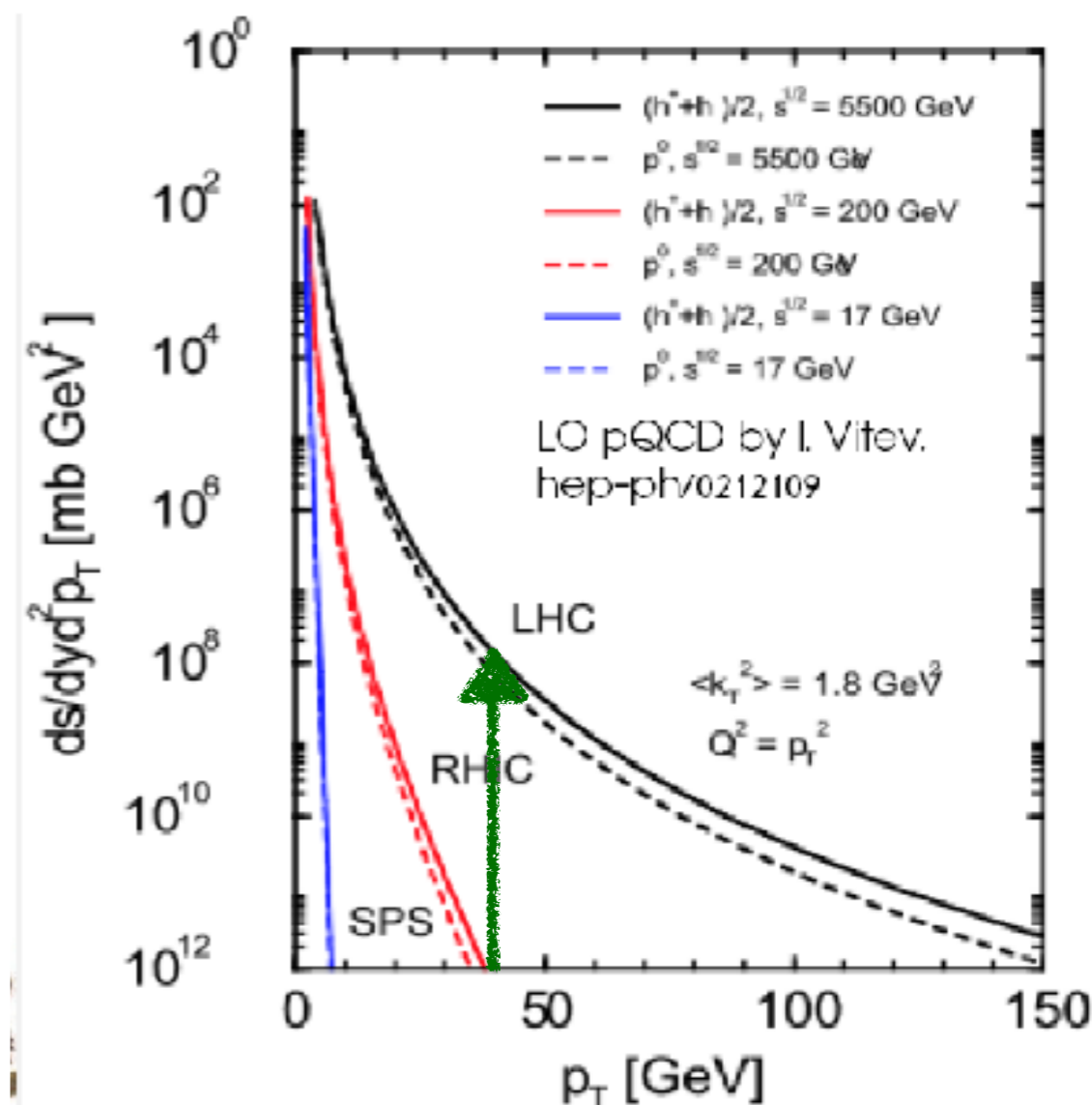
$$E \frac{d^3\sigma}{dp^3} = C_0 \exp\left(-\frac{m_t}{T_0}\right) + \frac{C_1}{(p_t + p_0)^n}$$



# RHICからLHCへ



	RHIC	LHC
$\sqrt{s_{NN}}$ (GeV)	200	5500
$T/T_c$	1.9	3.0-4.2
$\varepsilon$ (GeV/fm <sup>3</sup> )	5	15-60
$\tau_{QGP}$ (fm/c)	2-4	>10



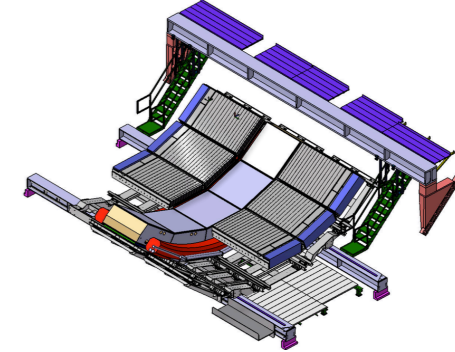
✓ LHCをRHICと比べると、

● 到達温度やエネルギー密度がたかだか数倍大きい

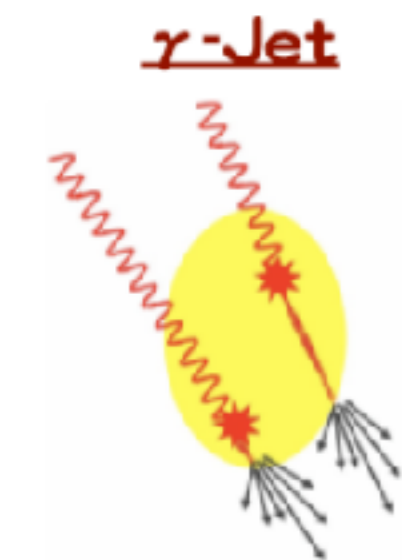
● ジェットの生成量 (数桁)

→ ハドロン測定からジェット測定へ転換  
(ハドロン識別からパートン識別へ)

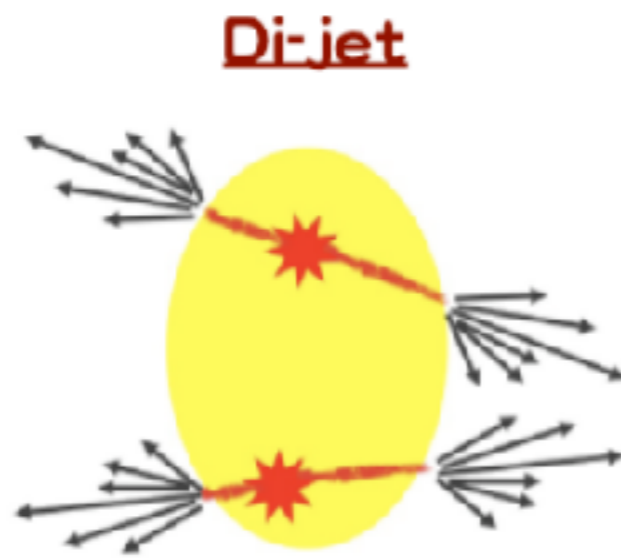
# 筑波グループ提案による DCALプロジェクト(2009~)



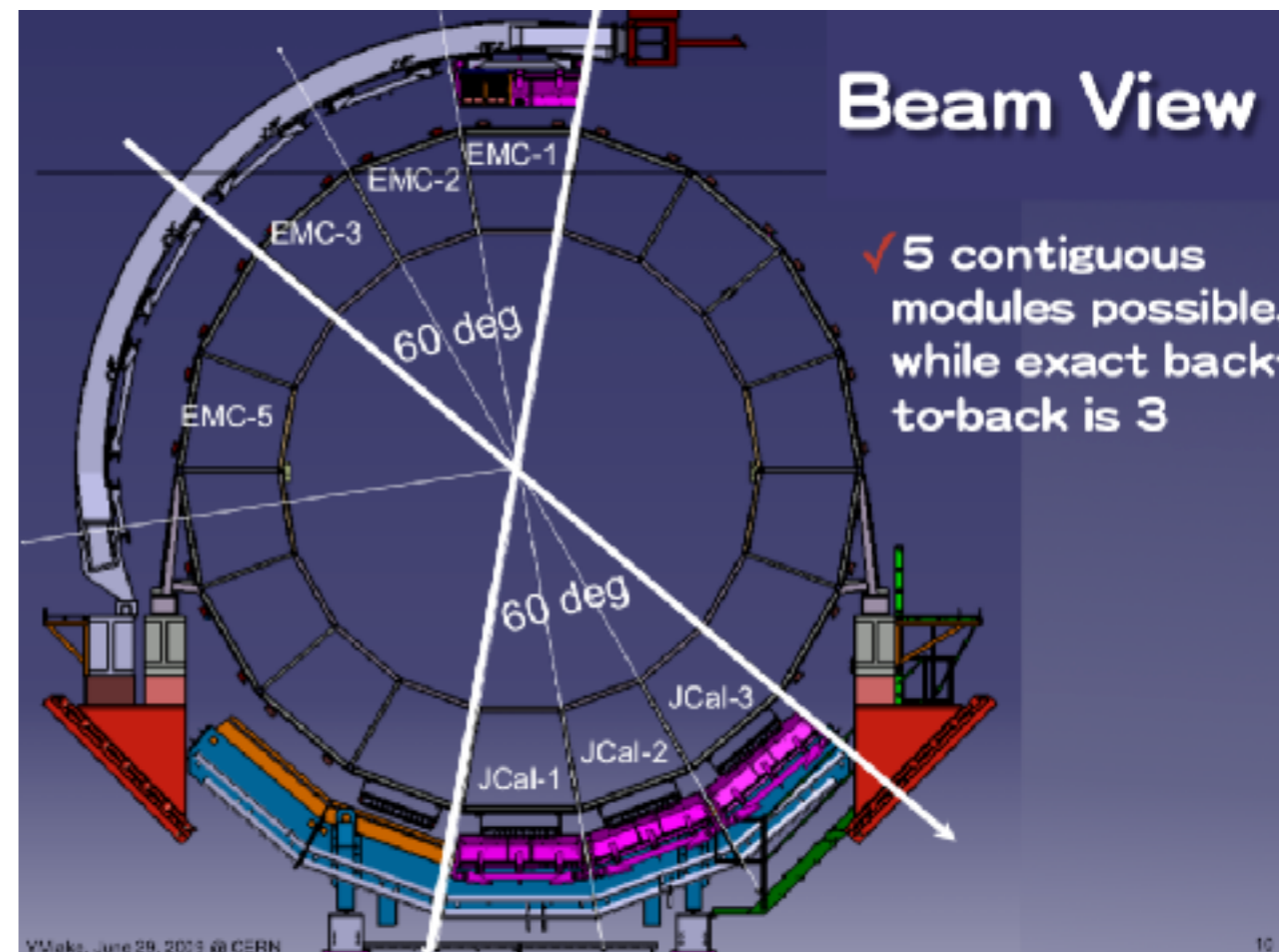
科研費・基盤研究S (2008-2012)  
 科研費・基盤研究B (2013-2017)  
 科研費・基盤研究B (2007-2020)



- ✓ Quark Jet
- ✓ Small Xsection
- ✓ Experimentally difficult



- ✓ Mostly Gluon Jet
- ✓ Larger Xsection
- ✓ Interpretation may be difficult

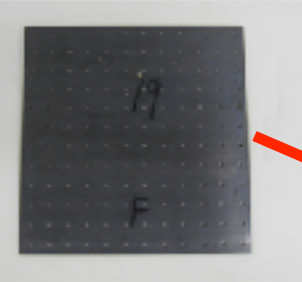
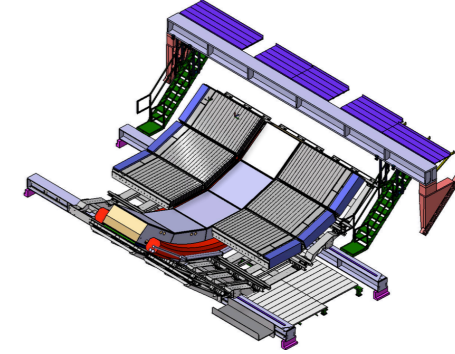


✓ DiJet測定能力を高める ~Jet Tomography~

✓ Jetのトリガー能力を高める

- 米仏中伊の共同プロジェクトに発展

# 電磁カロリメータ DCal



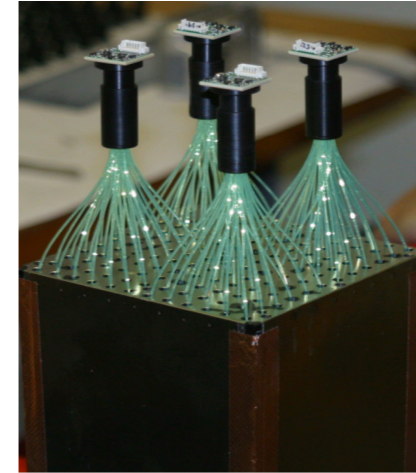
Lead



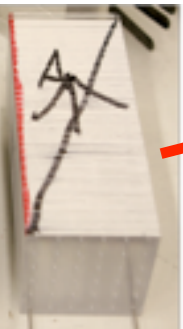
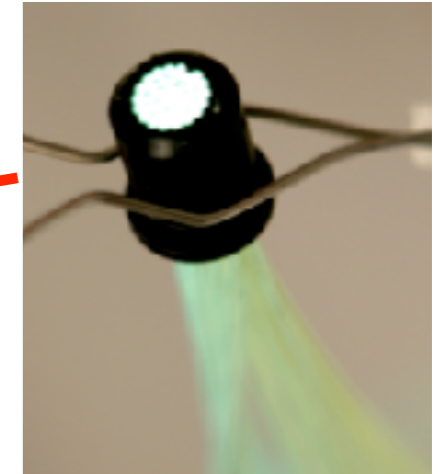
Paper



Module (77 layers)



4 APD/module

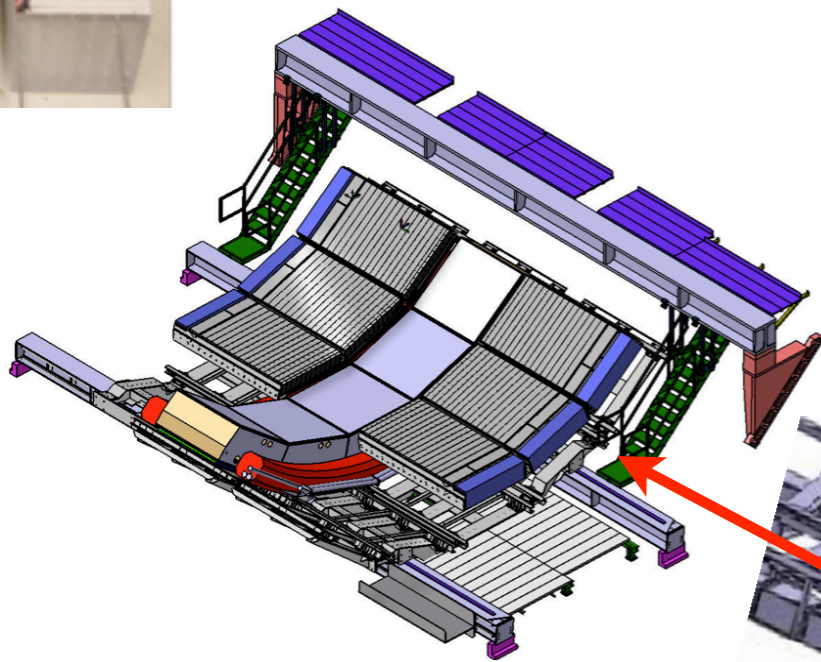


Scint.

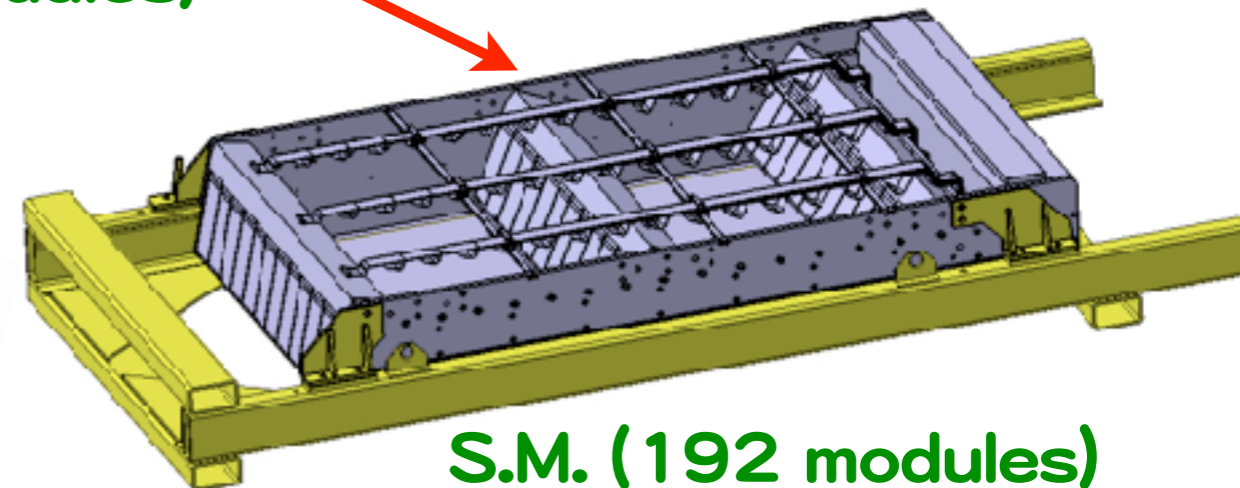


Strip (12 modules)

Quantity	Value
Tower Size (at $\eta=0$ )	$\sim 6.0 \times \sim 6.0 \times 24.6 \text{ cm}^3$ (active)
Tower Size	$\Delta\phi \times \Delta\eta = 0.0143 \times 0.0143$
Sampling Ratio	1.44 mm Pb / 1.76 mm Scintillator
Number of Layers	77
Effective Radiation Length $X_0$	12.3 mm
Effective Moliere Radius $R_M$	3.20 cm
Effective Density	5.68 g/cm <sup>3</sup>
Sampling Fraction	10.5
Number of Radiation Lengths	20.1



DCal (6 S.M.)



S.M. (192 modules)

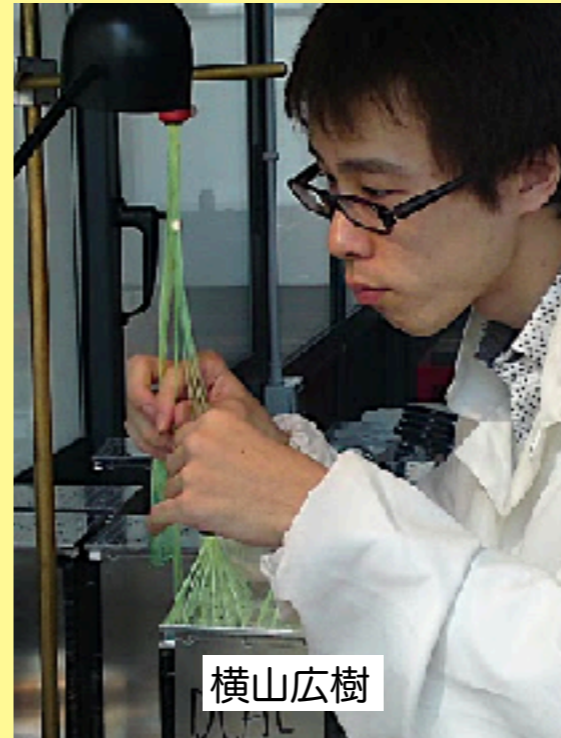
# コツコツと組み立て～発送



水野三四郎



中島朋



横山広樹



下村真弥



窪田晋太郎

Jihyun Bhom



新井田貴文

竹内理将

郡司薫

Manoel Dialinas

中島朋

堀内聖志

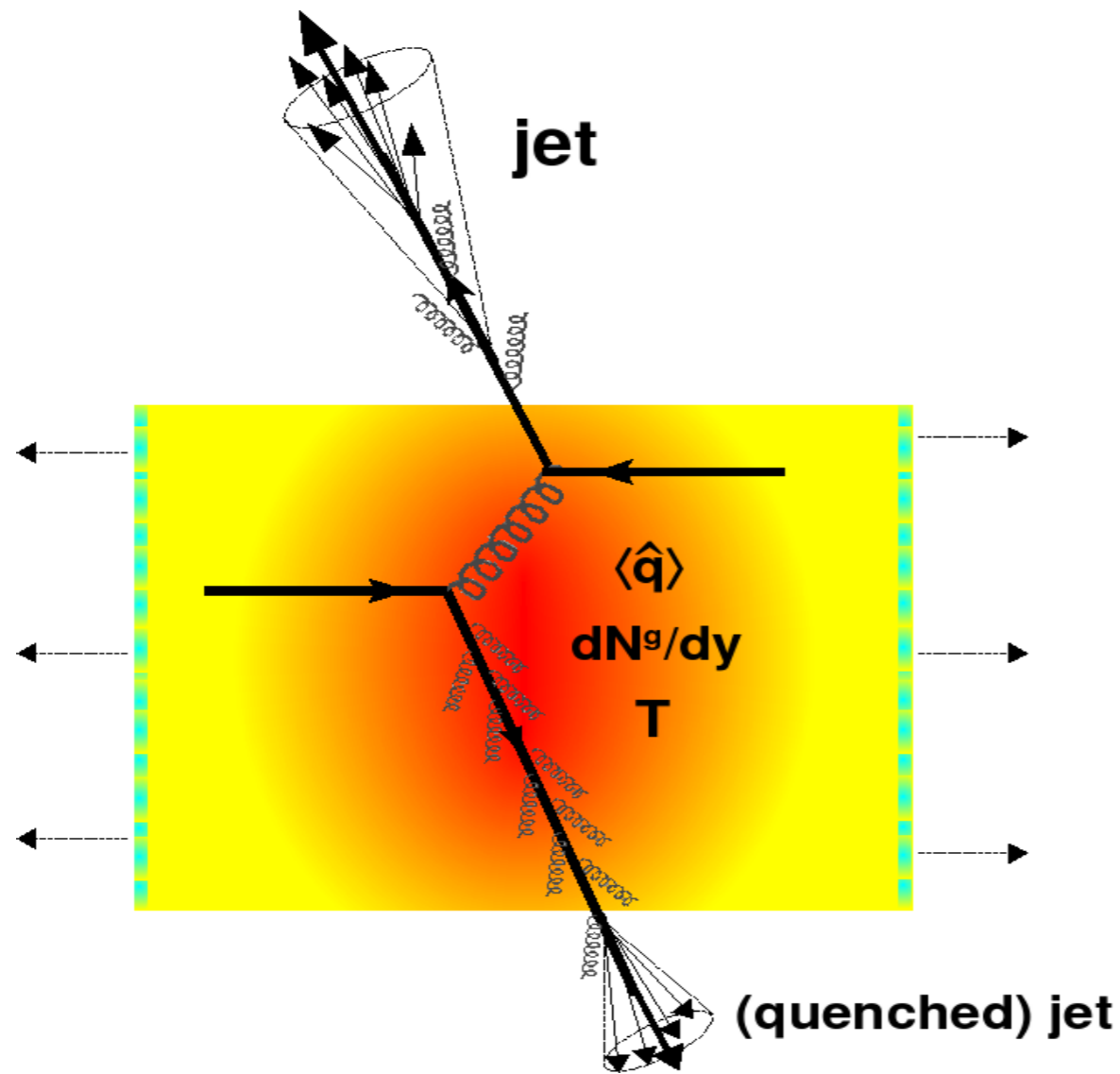
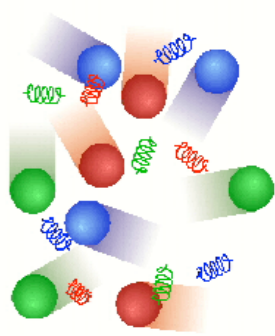
私



新井田貴文



# Jetの物理 ～ パートンの特徴的エネルギー損失 ～



“Jet quenching”

✓ AA衝突で2つのパートンが  
Hard Scatt. を起こす

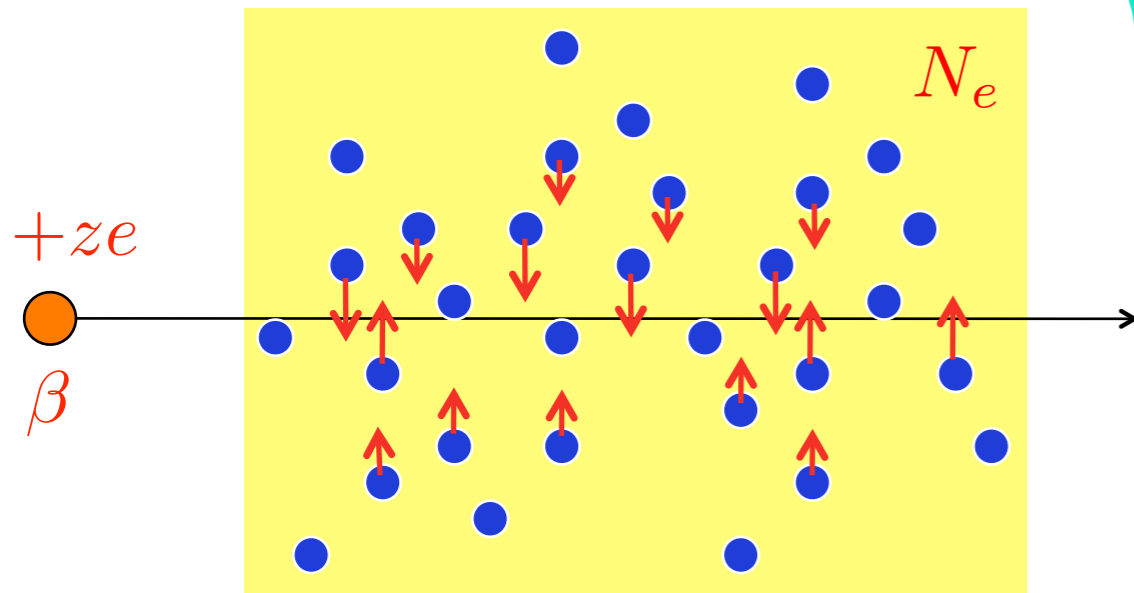
- 一つは真空に飛び出しジェットを生成し、
- 他方は、QGP中を突き抜ける際に特徴的なエネルギー損失を受ける

✓ 現れる現象；

- ジェットの消失／減衰
- 高横運動量粒子の減少
- ジェット成分の変化？

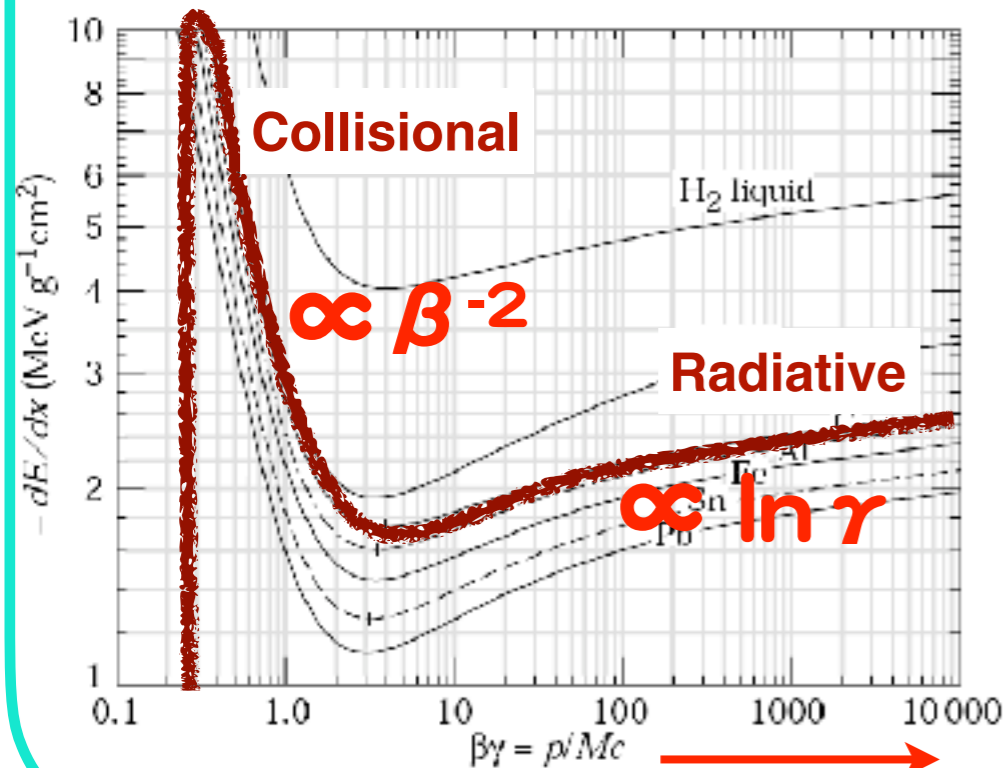
# 物質中のエネルギー損失

## QED

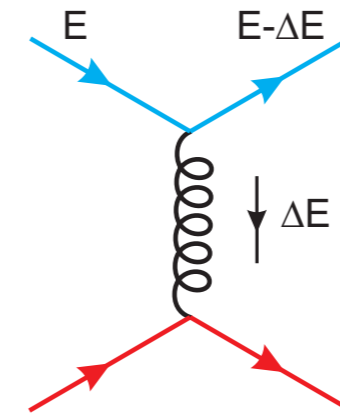


エネルギー損失量は電子密度に比例

$$-\frac{dE_{\text{Bethe}}}{dx} \propto \frac{z^2 N_e}{\beta^2} \ln(\beta^2)$$

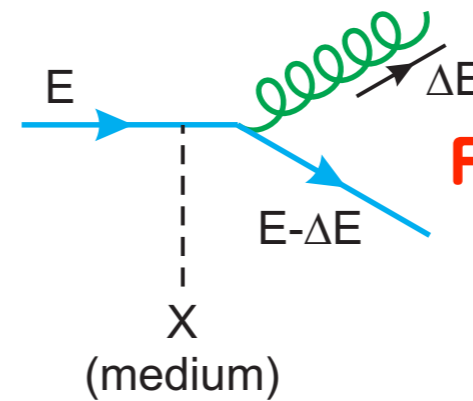


## QCD



Collisional

$$\Delta E \propto l^1$$

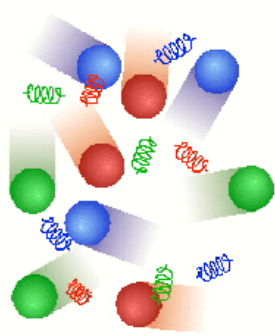


Radiative

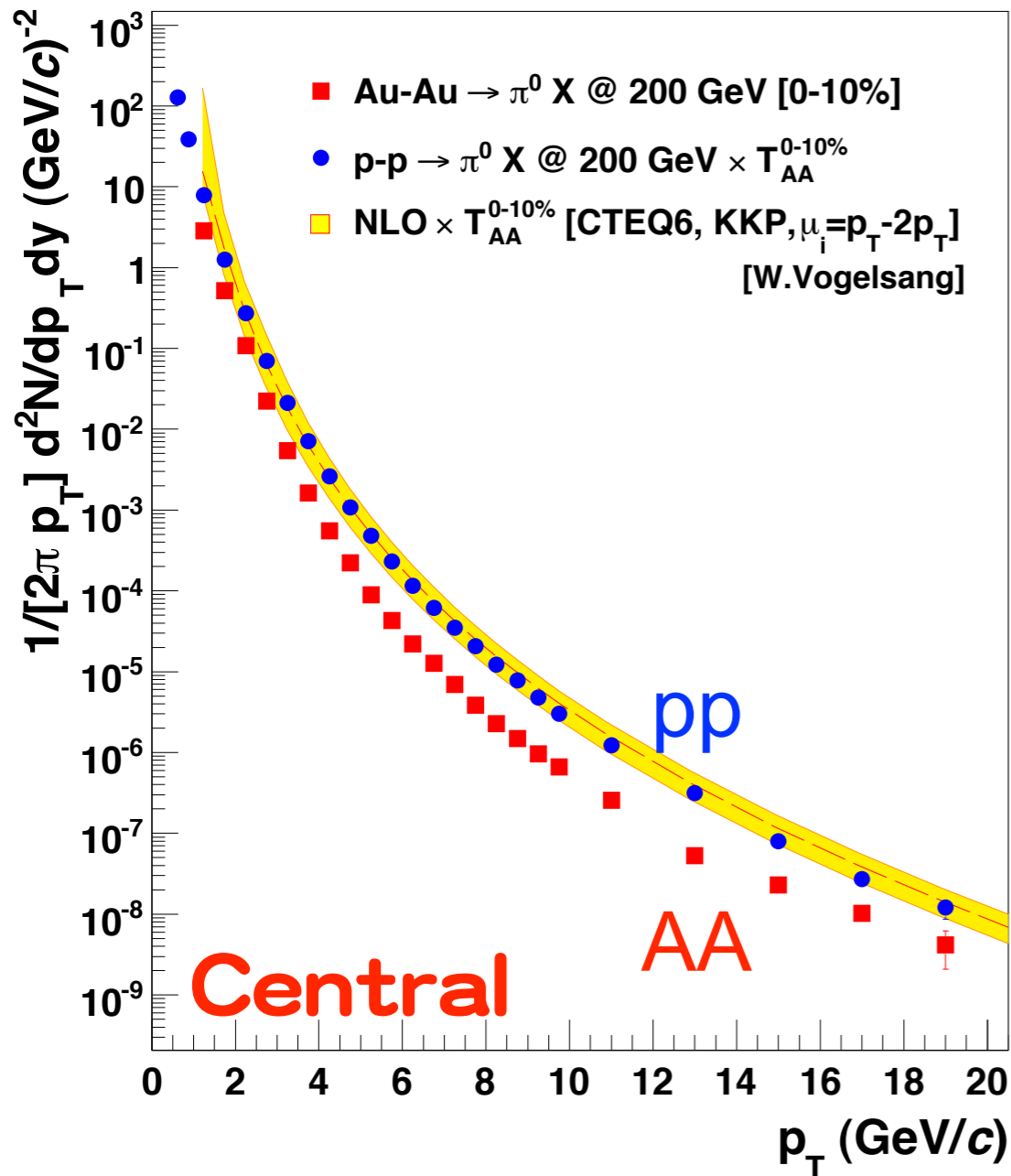
$$\Delta E \propto l^2 !?$$

- QED
  - ✓ エネルギー損失量は電子密度に比例
  - ✓ Collisional + Radiative (制動輻射)
- QCD
  - ✓ 色電荷を持つグルオンが多数存在
  - ✓ Collisional + Radiative
- エネルギー損失量から物質の密度を測定できる

# 高横運動量粒子が減少する現象



Phenix; P.R.L. 91, 232301 (2008), PRD76,051106(2007)



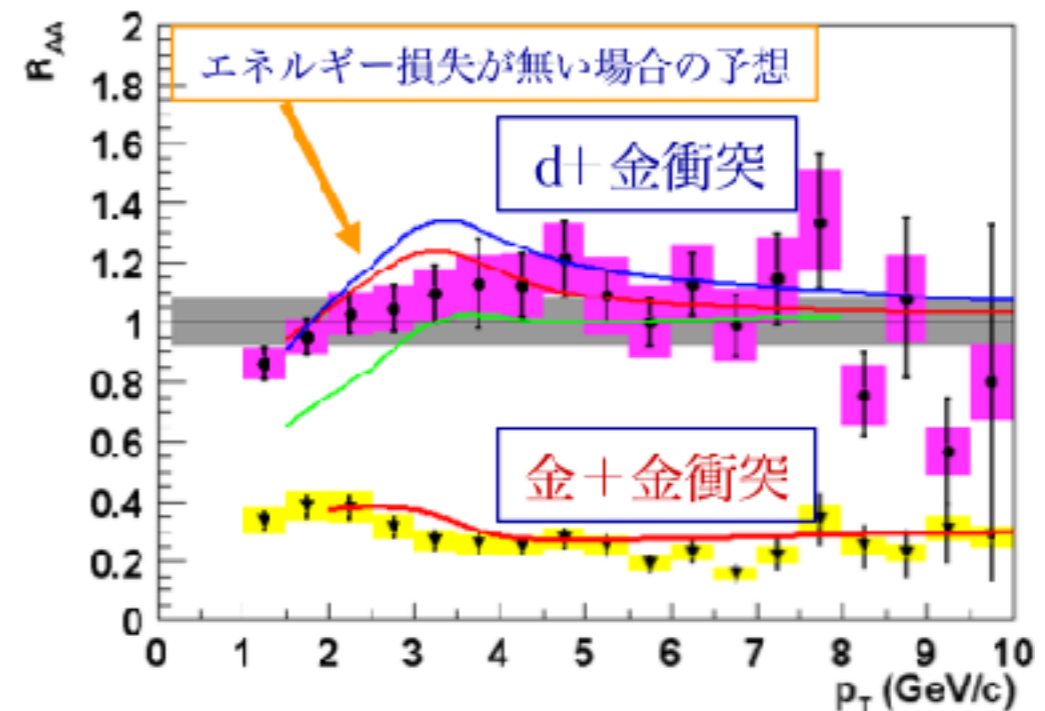
## ✓ pp衝突の重ね合わせと比較

Nuclear Modification Factor;

$$R_{AA} = \frac{\text{"hot/dense QCD medium"}}{\text{"QCD vacuum"}} = \frac{dn_{AA}/dp_T dy}{\langle N_{\text{binary}} \rangle \cdot dn_{pp}/dp_T dy}$$

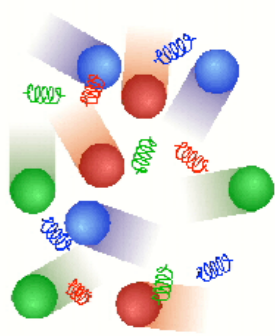
## ✓ AA中心衝突では高横運動量領域で「減少」

## ✓ dAuでは見られず、AuAuで見られることからJet Quenchか？

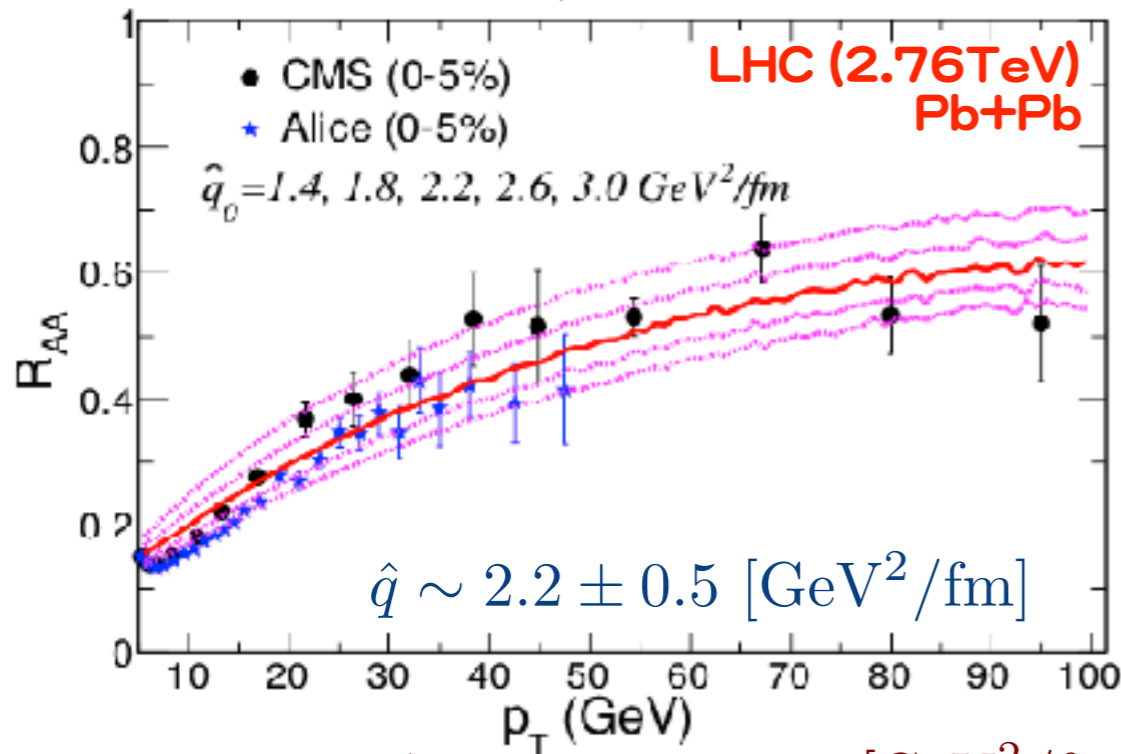
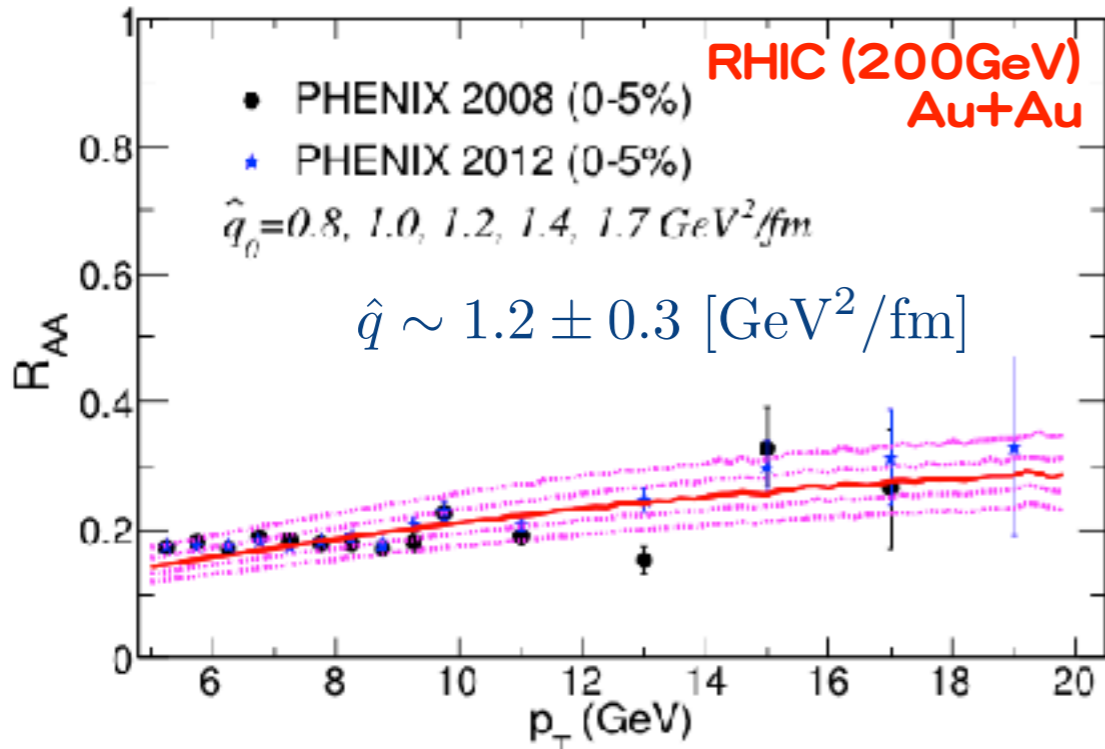




# エネルギー損失量



PRC90(2014)14909



$\hat{q}_{\text{cold nuclei}} \sim 0.02 \text{ [GeV}^2/\text{fm]}$

## ✓ 3次元理想流体力学モデルによる時間発展計算

- Glauber w. Wood-Saxonを仮定
- RHIC Au+Au central collision
- LHC Pb+Pb central collision

## ✓ Cold nucleiの約100倍の損失

➡ QGP特有の効果

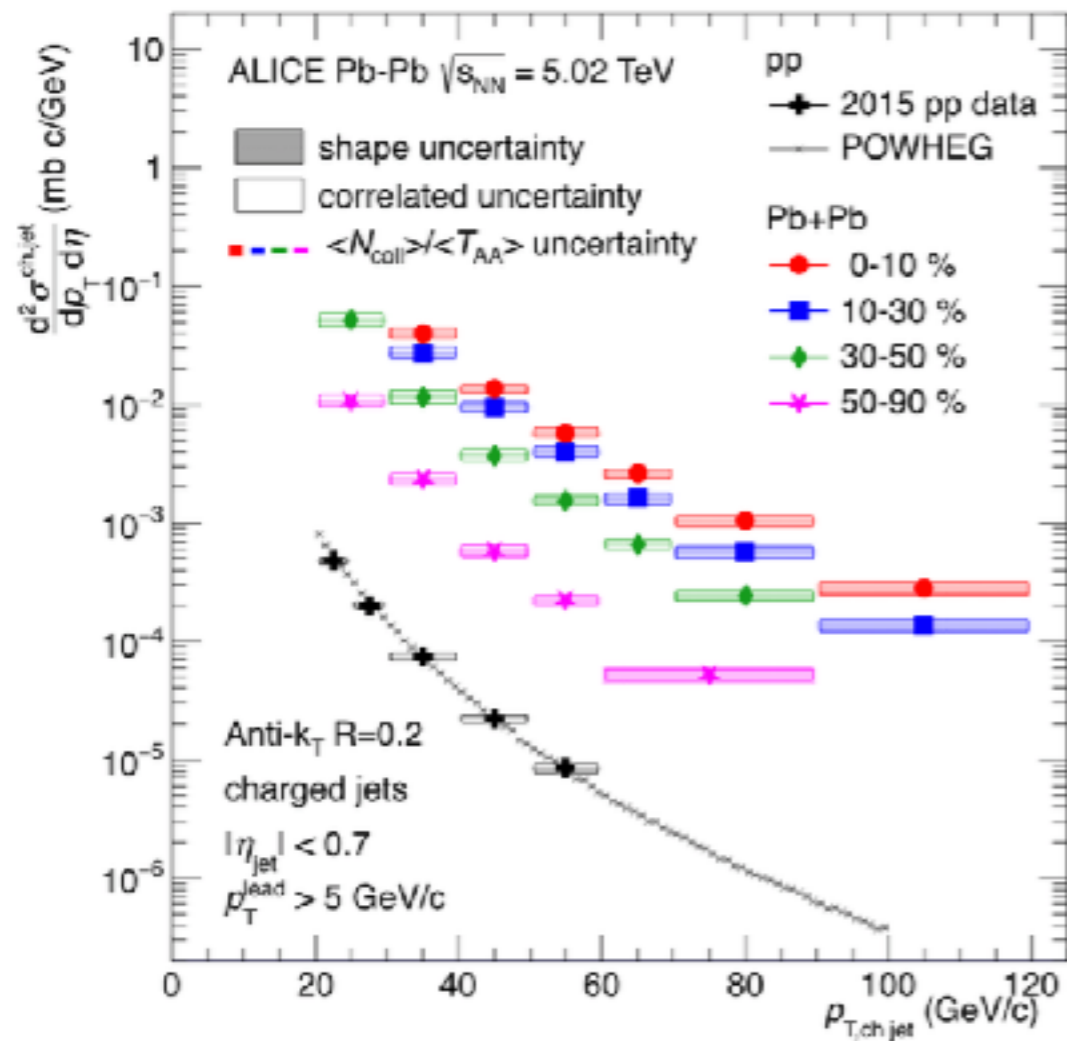
## ✓ RHICからLHCで約2倍に

- グルオン密度比 $\sim 2$

$$\frac{\left(\frac{dN_{\text{ch}}}{dy}\right)_{\text{LHC}}}{\left(\frac{dN_{\text{ch}}}{dy}\right)_{\text{RHIC}}} = \frac{1584}{687} \sim 2$$

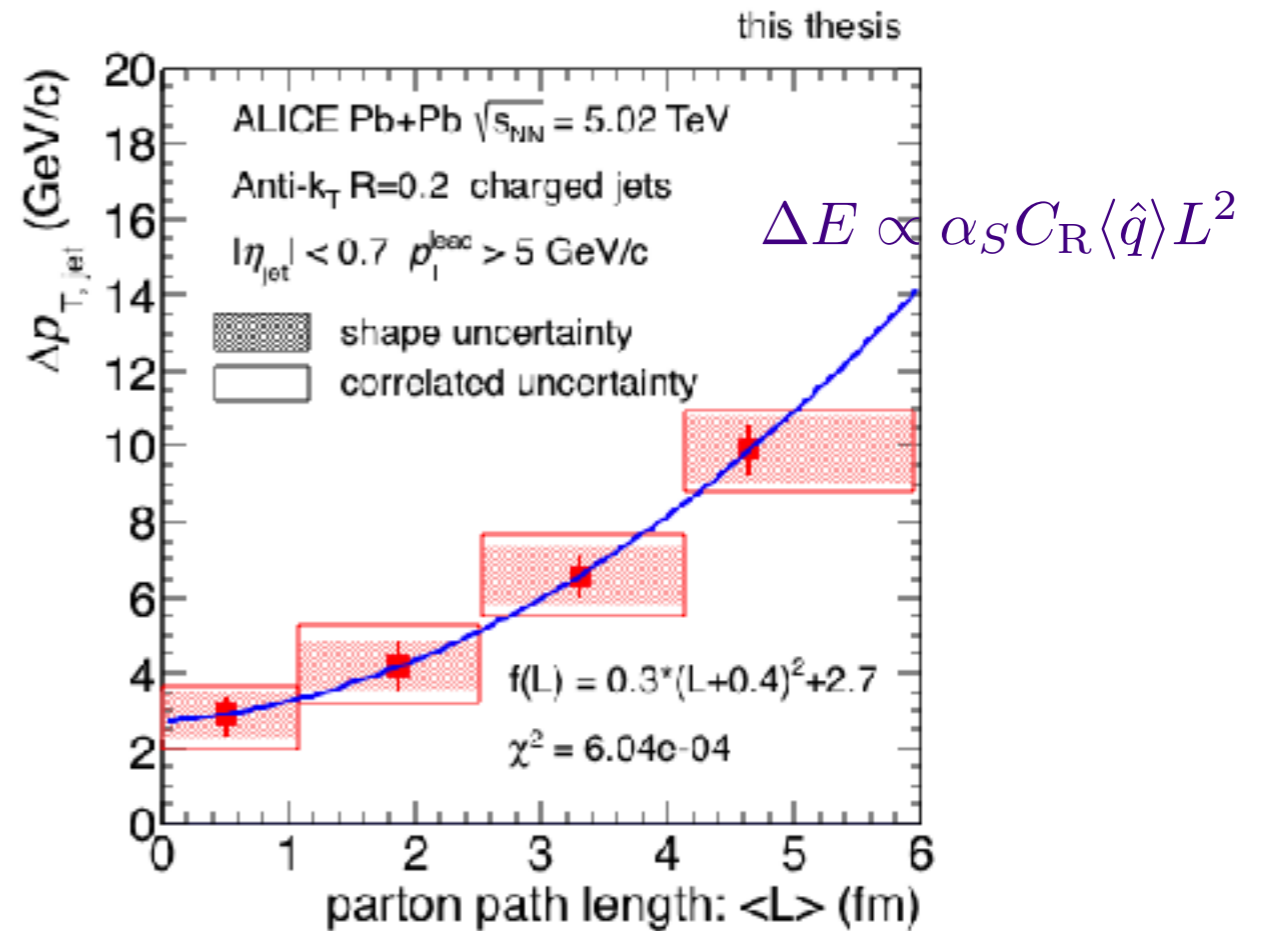
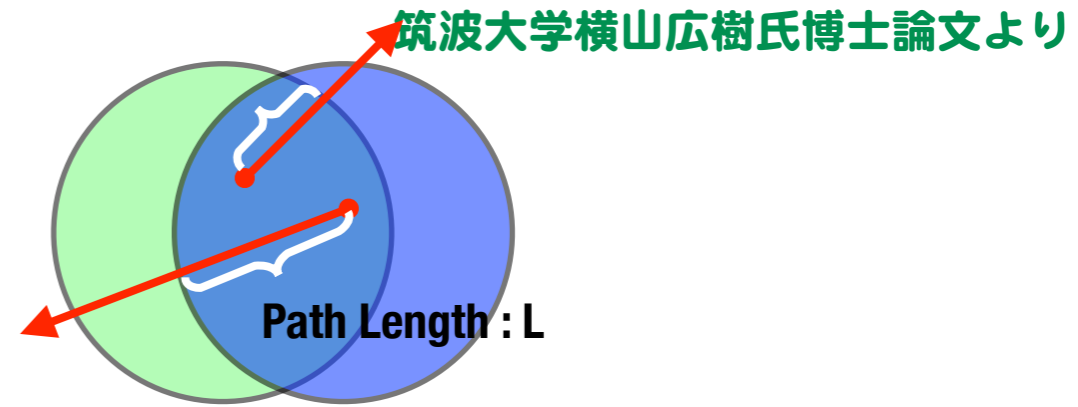
# Jet測定からJet Quenchを調べる

✓ ジェットクエンチは高横運動量粒子だけでなく、ジェット測定から調べたい！



H24 坂田洞察博士論文「LHC-ALICE実験におけるジェット荷電粒子方位角相関測定」

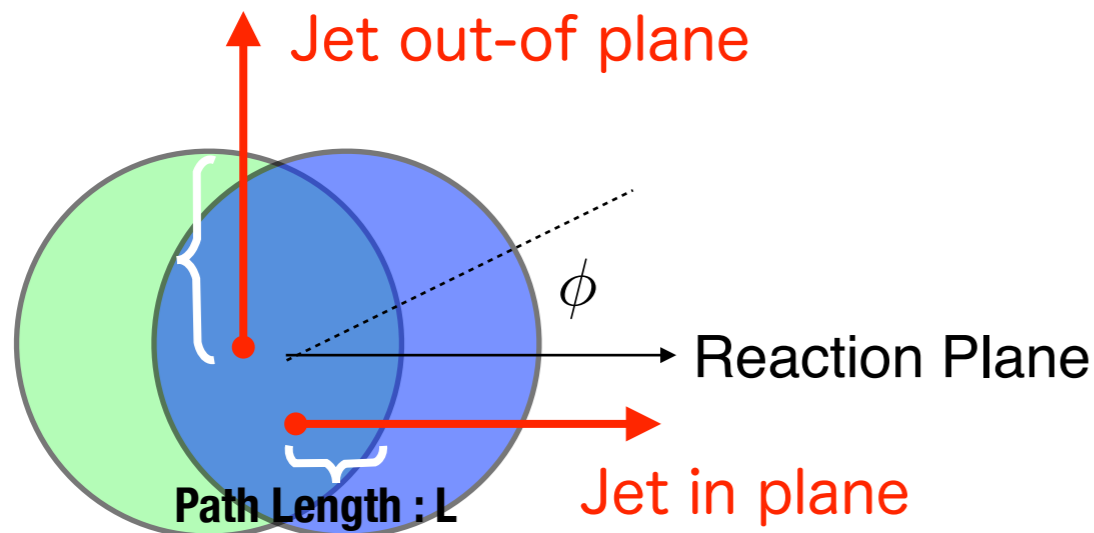
H27 渡辺大介博士論文「ALICE実験における  $\sqrt{s_{NN}}=7$ TeV 陽子・陽子衝突及び  $\sqrt{s_{NN}}=2.76$ TeV 鉛・鉛中心衝突での  $\pi^0$ -ジェット相関の測定」



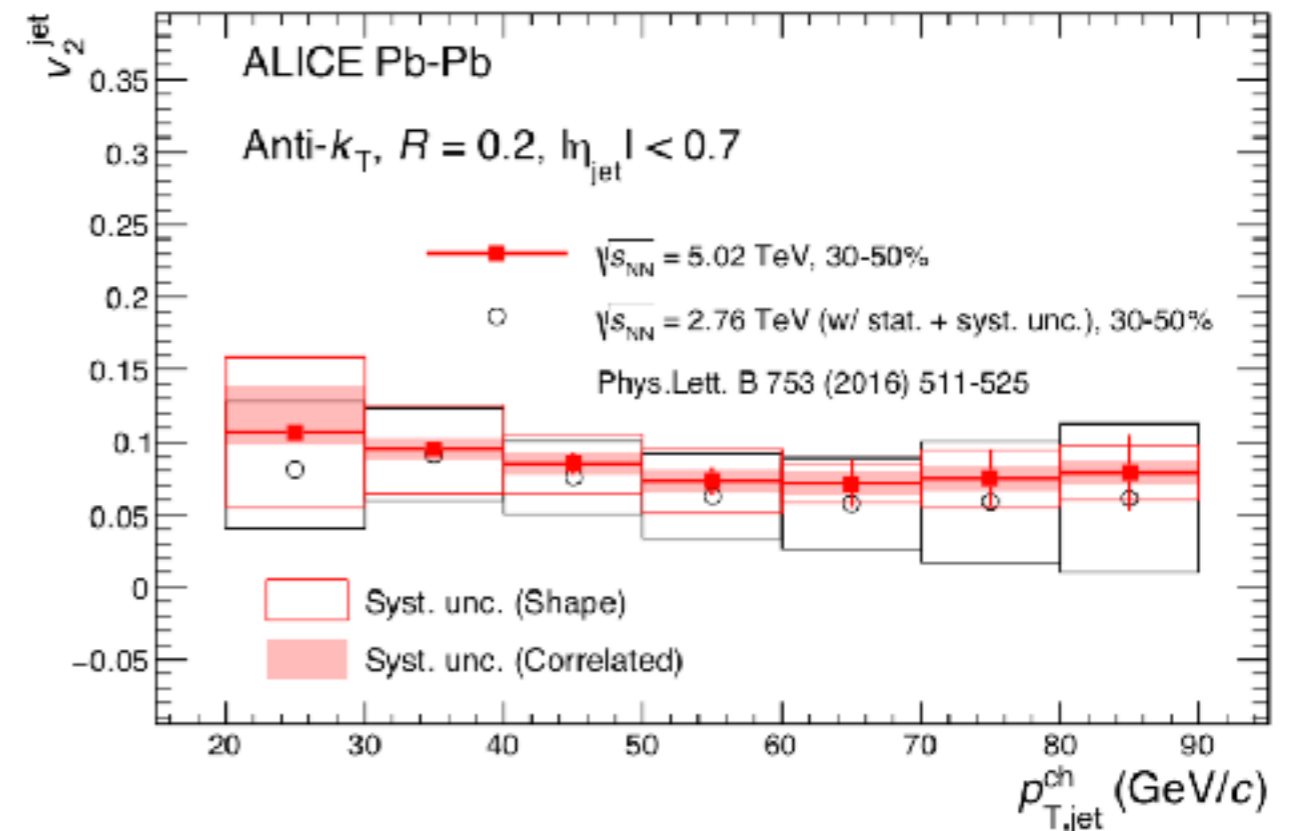
H29 横山広樹博士論文「LHC-ALICE実験  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV 鉛鉛衝突実験における荷電粒子ジェットの測定」

# $v_2$ からJet Quenchを調べる

筑波大学細川律也氏博士論文より



$$L_{\text{out-of plane}} > L_{\text{in plane}}$$



✓ Out-of planeの方がエネルギー損失が大きいはず →  $v_2 > 0$

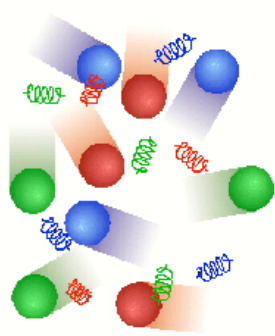
$$\frac{dN(\phi)}{d\phi} = 1 + 2v_2 \cos 2\phi$$

$$N_{\text{in}} \equiv \frac{dN(\phi=0)}{d\phi} = 1 + 2v_2$$

$$N_{\text{out}} \equiv \frac{dN(\phi=\pi/2)}{d\phi} = 1 - 2v_2$$



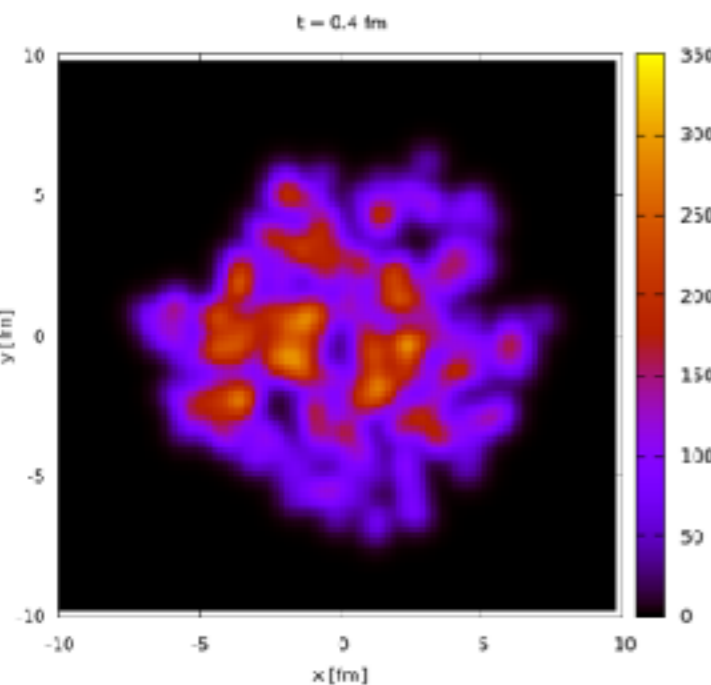
$$v_2 = \frac{1}{2} \frac{N_{\text{in}} - N_{\text{out}}}{N_{\text{in}} + N_{\text{out}}}$$



# 現状) 現実の原子核・原子核衝突で起こっている揺らぎからQGPの粘性の情報

現実の原子核・原子核衝突では核子数と衝突確率が有限であることから、揺らぎが発生  
→高次のフーリエ成分

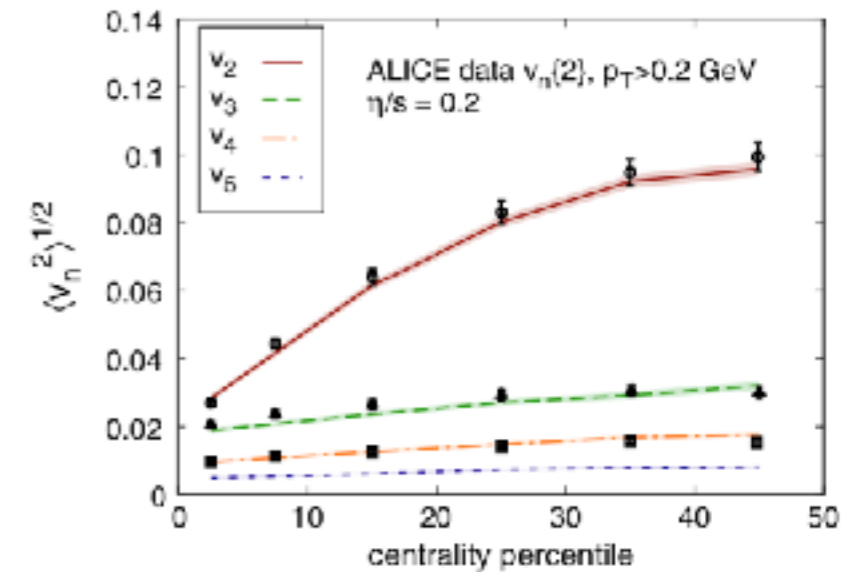
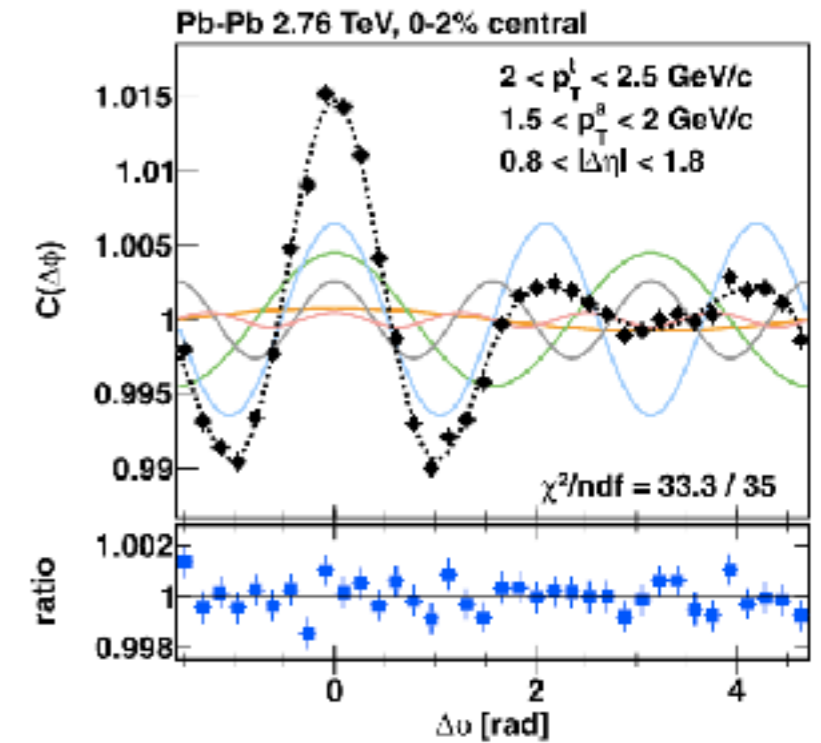
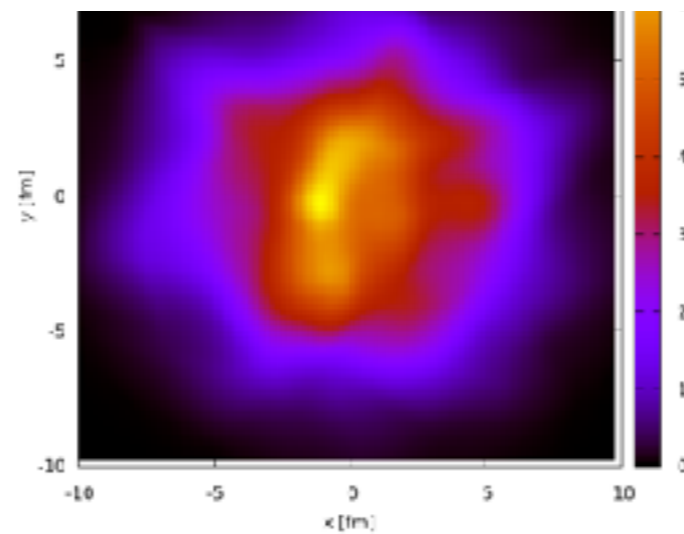
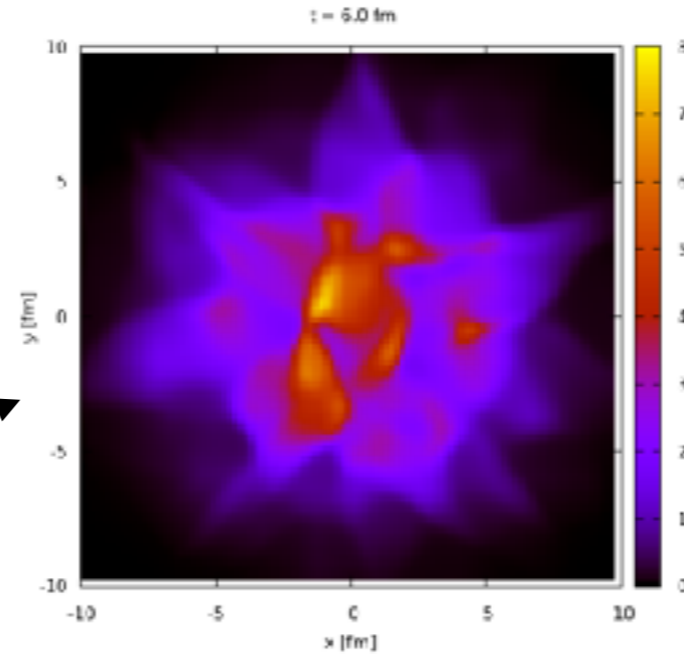
Schenke and Jeon,  
Phys.Rev.Lett.106:042301



$\eta/s = 0$

時間発展

$\eta/s = 0.16$



$\eta/s \sim 0.20$  at LHC,  
 $\eta/s \sim 0.12$  at RHIC

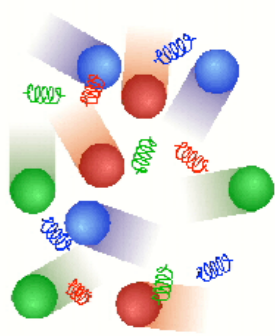
QGPはサラサラな流体!

ALICE, PLB, 708, (2012)

ALICE, PRL 110,012302(2013)

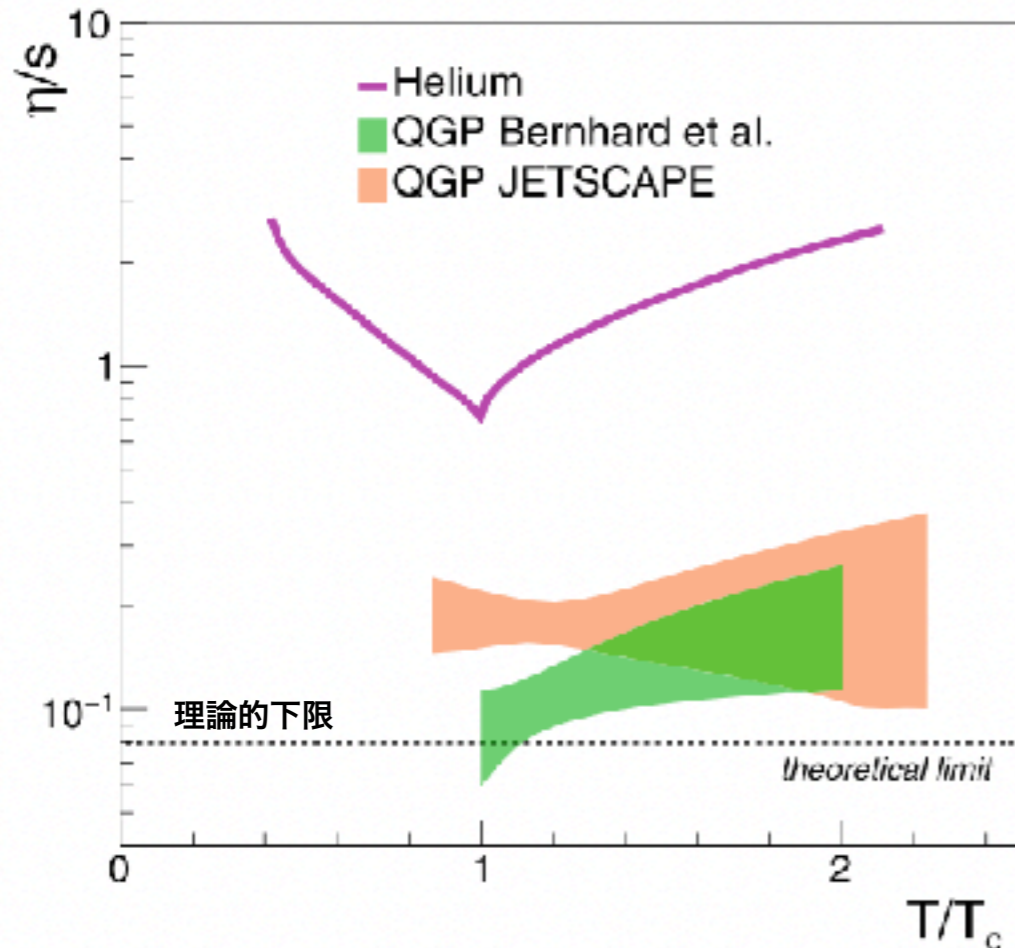
✓これほど高次成分が重要な役割を果たすとは、、、

# Sophisticatedな解析 ～ Bayesian Analysis ～



J. E. Bernhard, J. S. Moreland, S. A. Bass, Nat. Phys. 15(11), 1113–1117 (2019)

JETSCAPE, PhysRevLett.126(2021)242301



✓ Bayesian Parameter Estimation法による多種の実験データと理論模型の丁寧な比較

- $v_1$ - $v_4$ だけでなく、荷電粒子収量、 $E_T$ 、 $\pi$ 、 $K$ 、 $p$ の平均 $p_T$ も比較対象
- 実験データで理論模型のパラメータ制約範囲を決定する解析手法

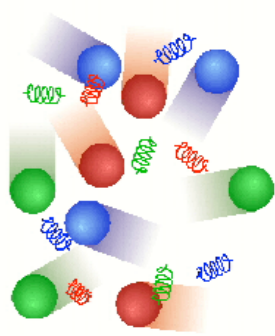
多くの流体力学模型による研究から、確かめられた2つの重要な特徴

1) 粘性(shear viscosity)が非常に小さい

2) QGP状態になるまでの時間が驚くほど短い  $t < 1 \text{ fm}/c$

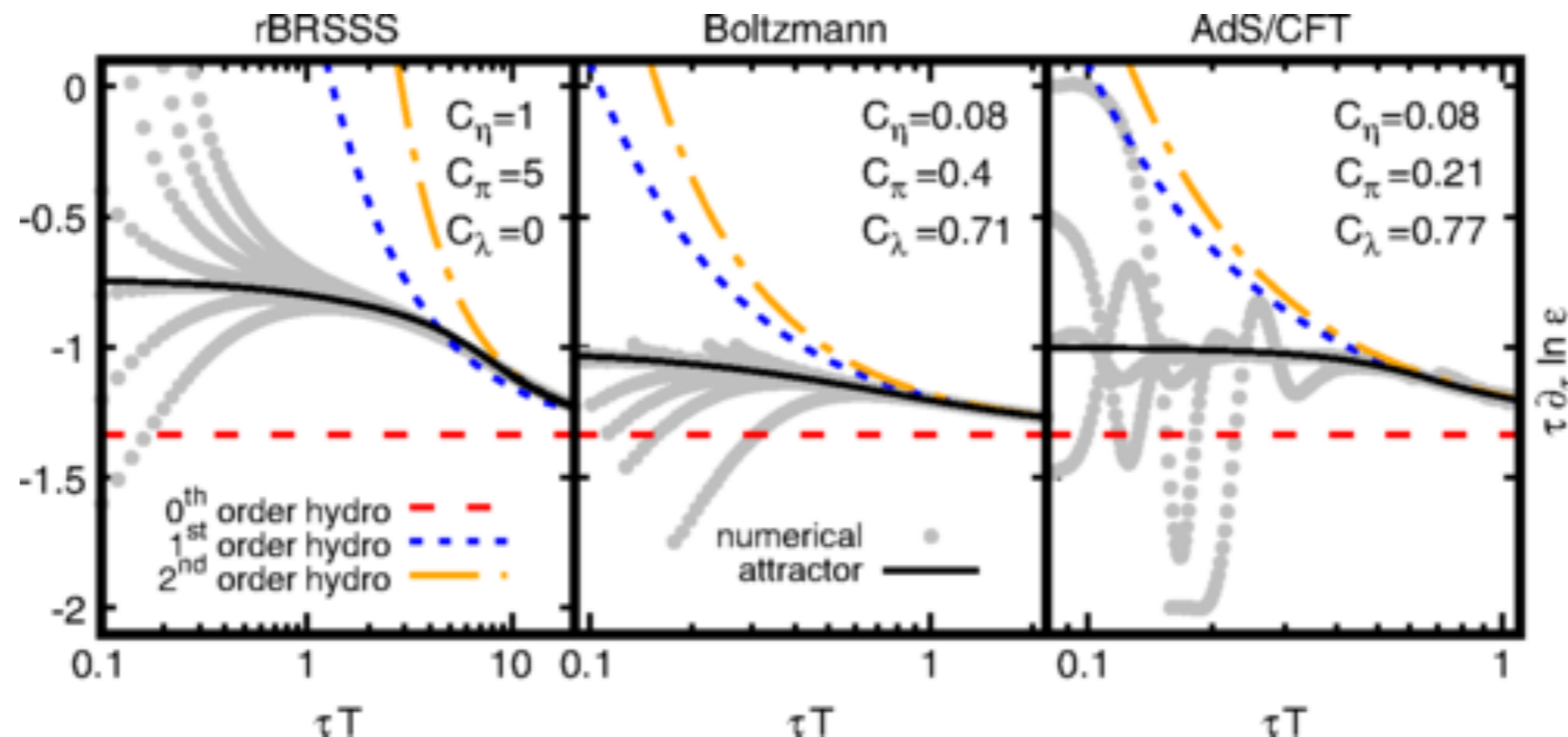
熱化のメカニズムの解明が今後の大きな課題

# 早い熱化のメカニズムの手がかり？



“Relativistic Fluid Dynamics Far From Local Equilibrium.”  
P. Romatschke, Phys. Rev. Lett. 120, 012301 (2018)

Private comm. w T. Hirano



✓ 流体力学は局所平衡から離れた領域でも適用！？

● 局所平衡から流体力学解に早く到達する様子

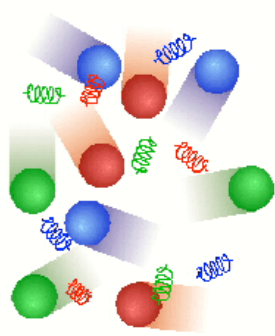
➡ Hydrodynamic attractor

“Causality violations in realistic simulations of heavy-ion collisions”  
C. Plumberg, et.al., Phys. Rev. C 105 (2022) L061901

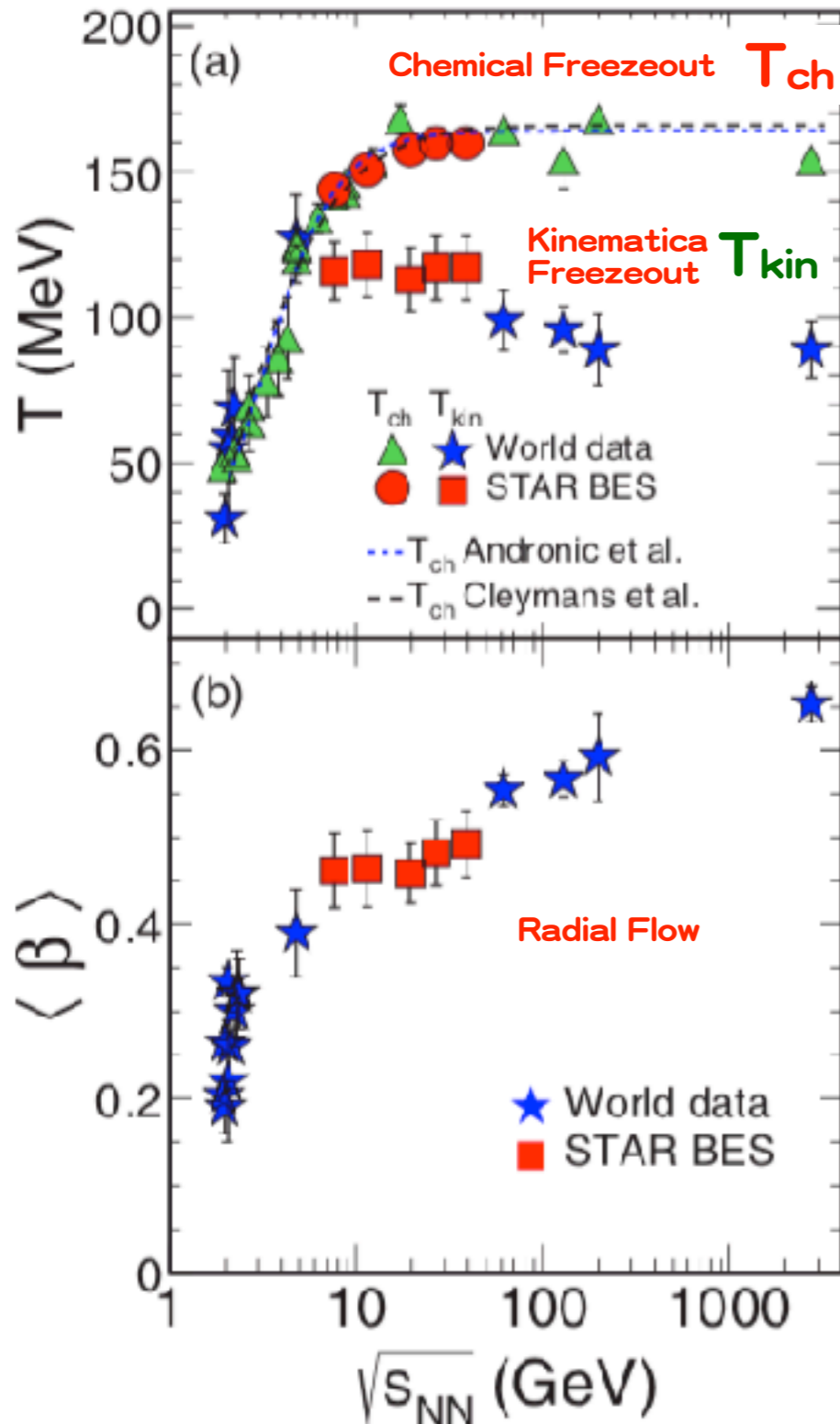
✓ 局所平衡から離れた領域における流体力学計算は因果律を満たしていないという指摘

➡ 今後の流体力学の進化を促す

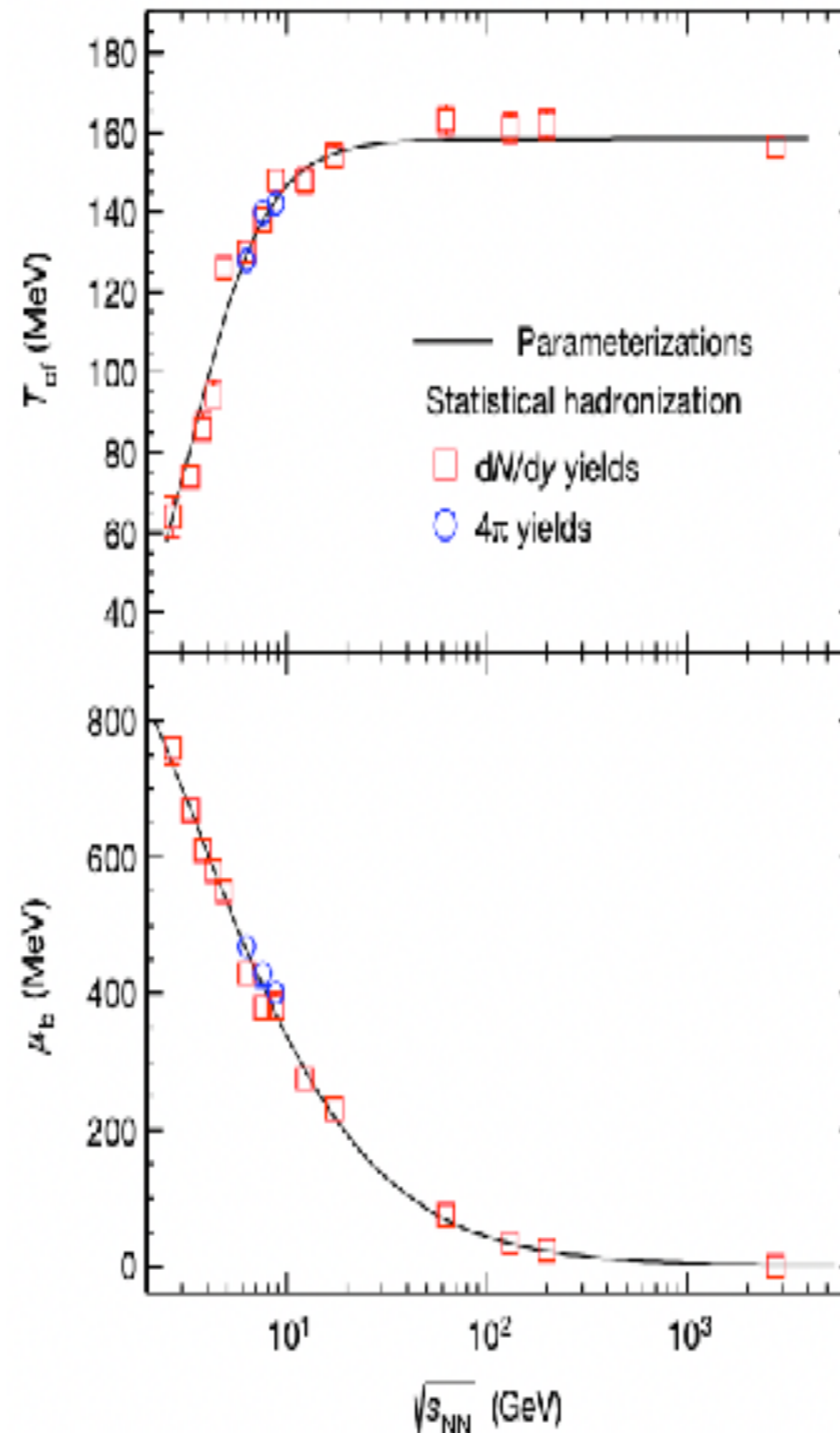
# QGP生成閾値はどこ？ ～ AA Collisionの様相 ～



STAR, Phys.Rev. C96(2017)044904

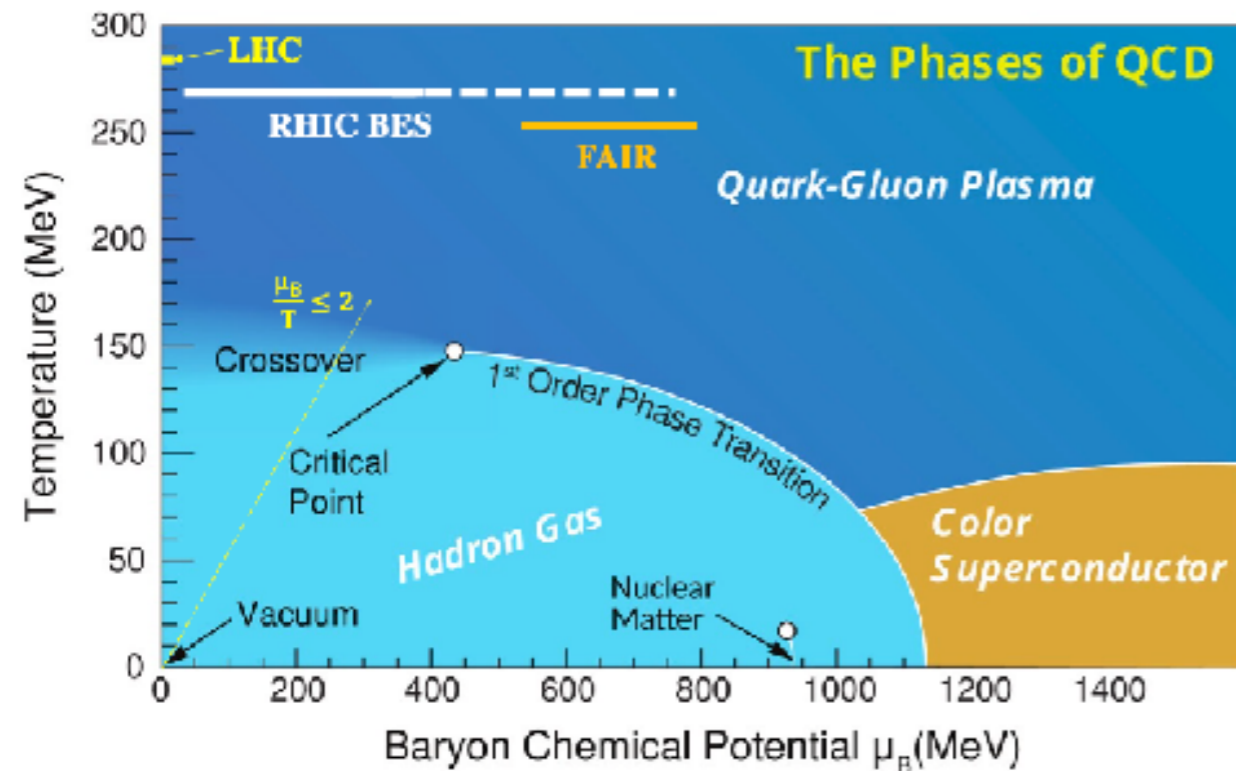
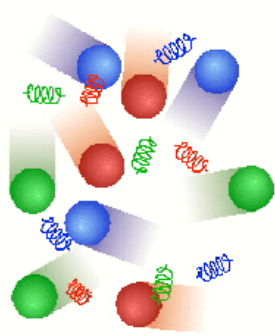


Nature 561(2018)321



- ✓ 化学平衡温度、運動学的温度；
  - $\sqrt{s_{NN}} \sim 10$  GeV以上で一定
  - $\sqrt{s_{NN}} = 2 \sim 10$  GeVで急速に変化
- ✓ バリオン密度  $\mu_B$ ；
  - $\sqrt{s_{NN}} \sim 100$  GeV以上で一定
    - ➡ Bjorken領域
  - $\sqrt{s_{NN}} \sim 10$  GeV以下で極めて大きく
    - ➡ Landau領域
- ✓ 次の一手；
  - $\sqrt{s_{NN}} = 2 \sim 10$  GeV !

# QGP研究の課題

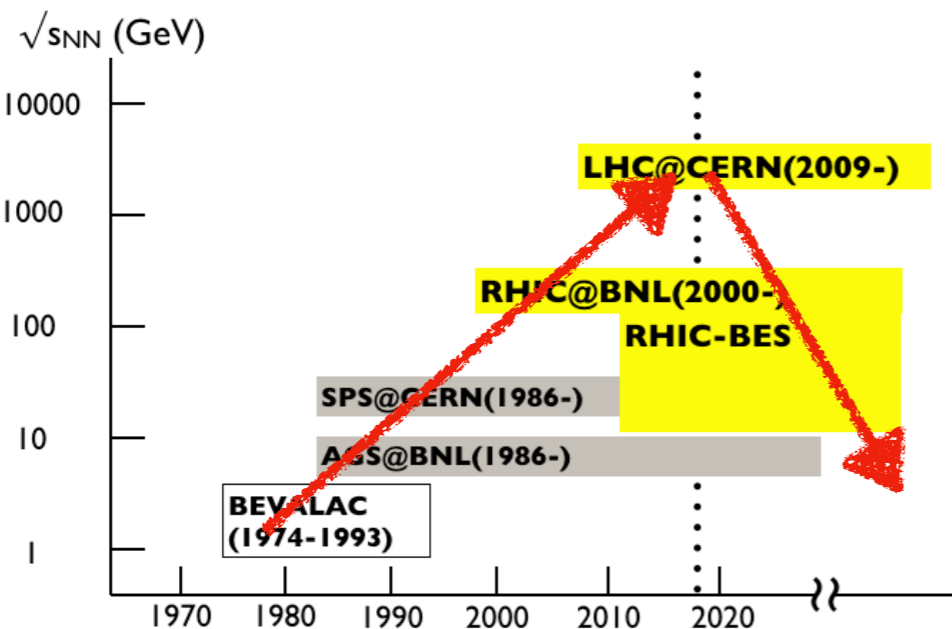


## ✓ わかったこと；

- QGP生成とQGP物性の手がかかり
  - ➡ 流体力学的理解
  - ➡ 特徴的エネルギー損失の様子

## ✓ わかってないこと；

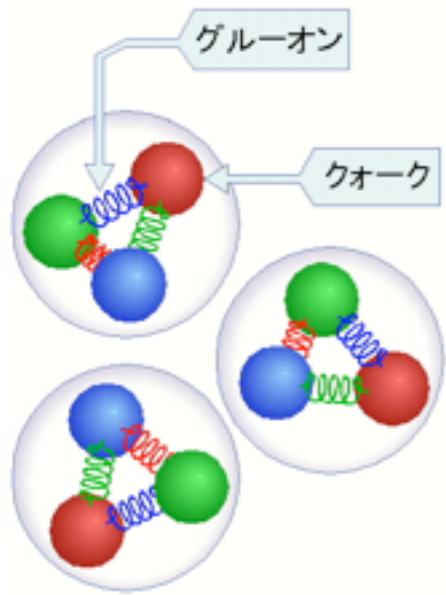
- なぜこんなに早く熱化できるのか？ (初期状態は?)
  - ➡ LHC-FoCalプロジェクト(中條さん)
- QCD相転移の構造 (臨界点、次数)
  - ➡ RHIC Beam Energy Scan, FAIR-CBM (江角さん)



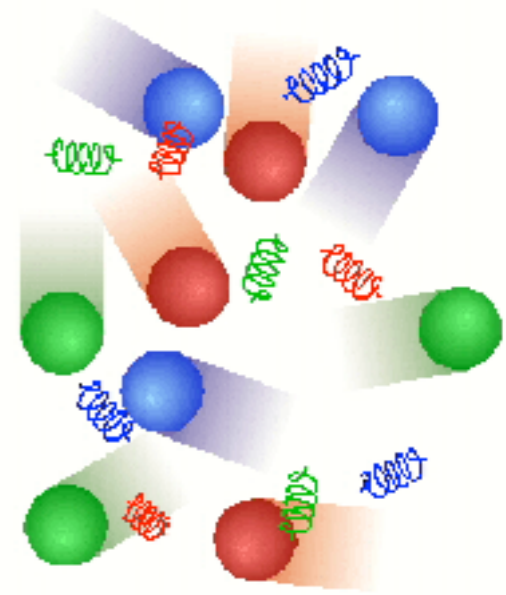
## ✓ 次世代の加速器の計画／建設が進行中

- 独 FAIR 建設中
- 露 NICA 建設中
- 日 JPARC 計画中
  - ➡ <10GeV付近を高強度で高統計実験





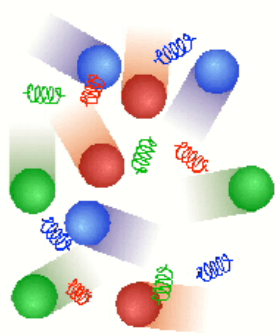
# 果たせなかった夢 ～未来～



1. 夢 その1

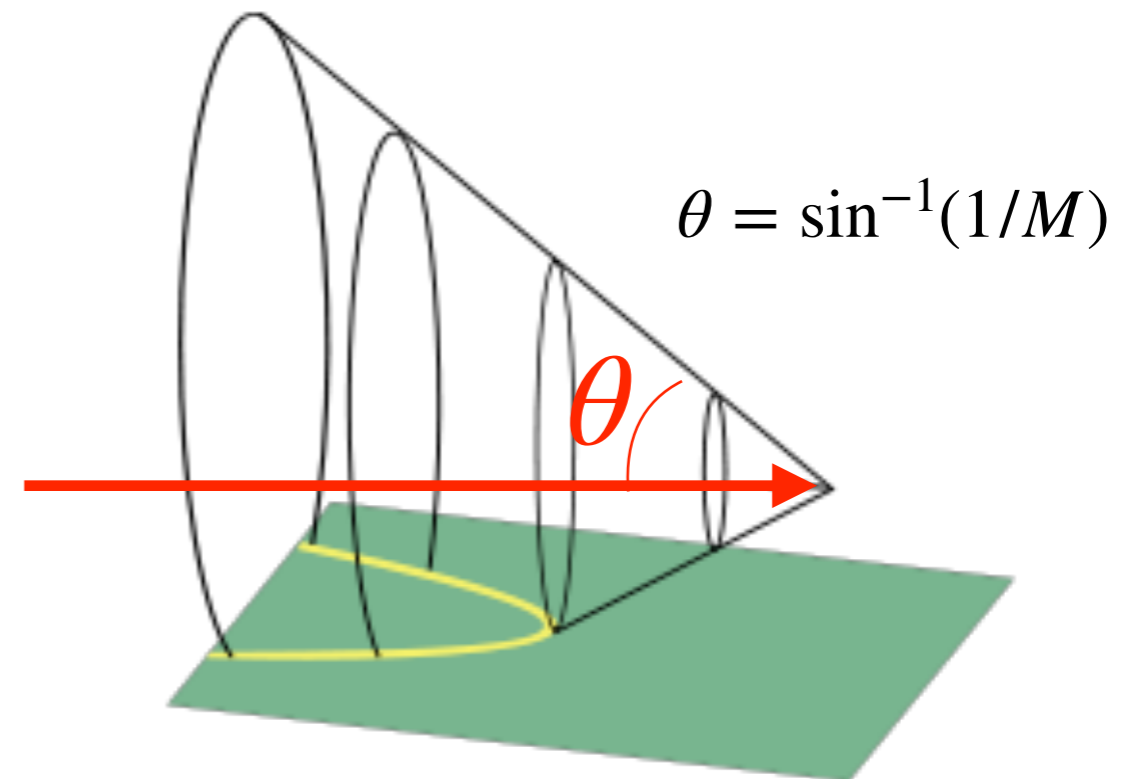
2. 夢 その2

# 夢その1) Shock Wave / Mach Cone



[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:FA-18\\_Hornet\\_breaking\\_sound\\_barrier\\_\(7\\_July\\_1999\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:FA-18_Hornet_breaking_sound_barrier_(7_July_1999).jpg)

音速を超えた時の衝撃波により雲が発生

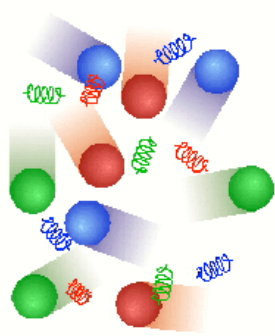


✓ 音速より速く移動する時に発生

$$c_s = \sqrt{\frac{\partial p}{\partial \varepsilon}}$$

状態方程式の情報に直結した量

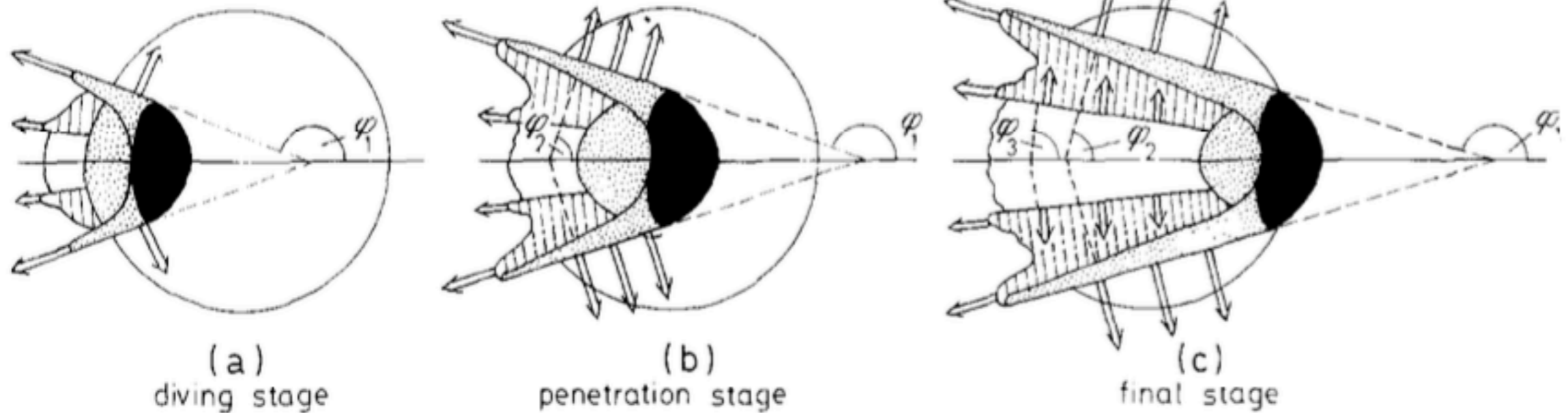
# Nuclear Shock Waves



“Nuclear Shock Waves in Heavy-Ion Collisions”,  
W. Scheid, H. Müller, and W. Greiner, Phys. Rev. Lett. 32(1974)741

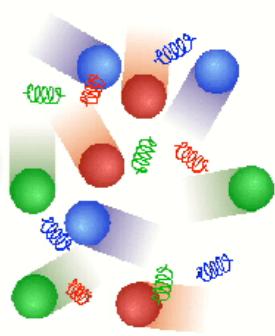
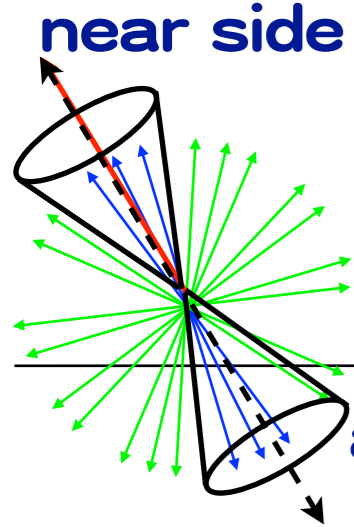
Z. Physik A273(1975)359

Mach Shock Front  $v_s = 0.58c$



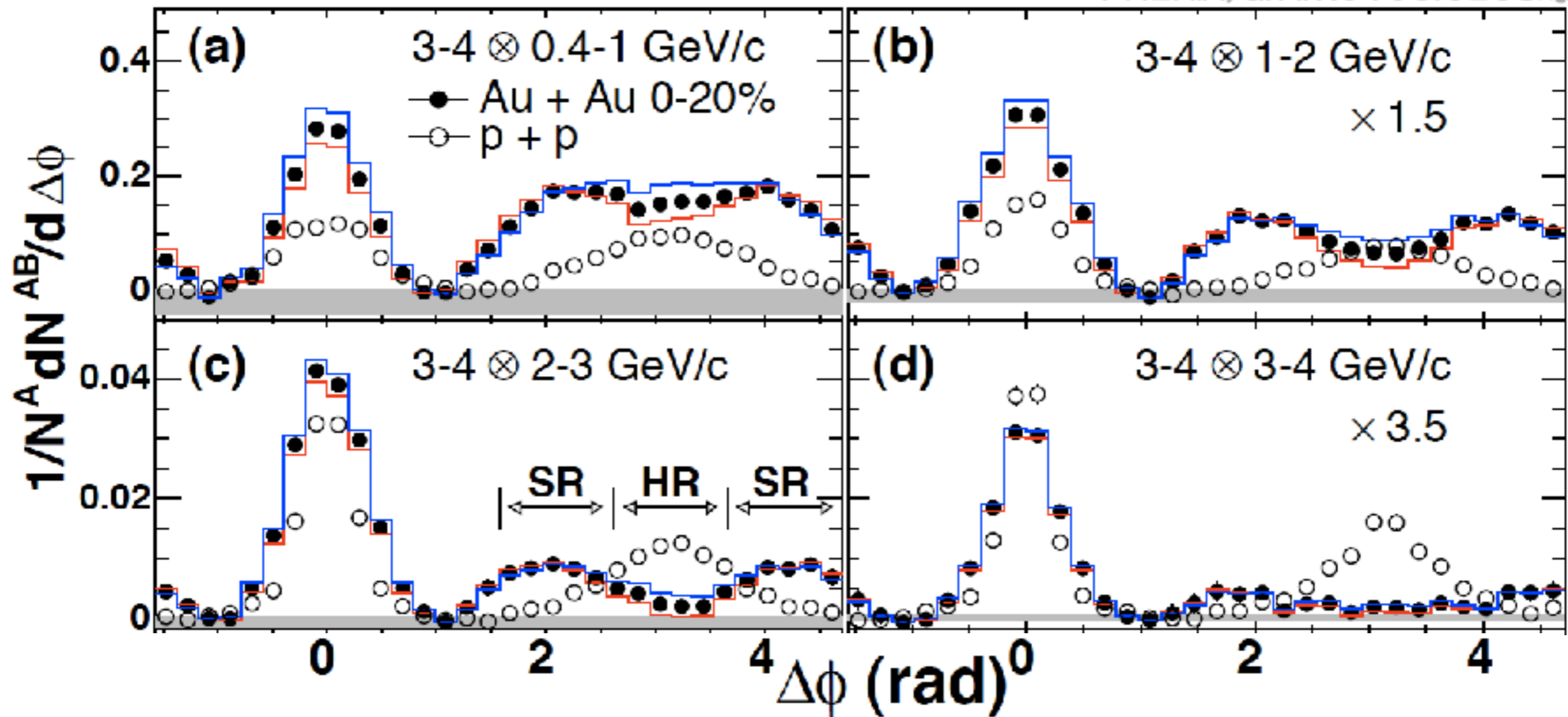
✓ Berkeleyの頃からの夢

# Shock Wave of gluon ?



$$p_{T}^{\text{trig}} = 3\sim 4 \text{ GeV}/c \times p_{T}^{\text{assoc}}$$

PHENIX, arXiv:0705.32381[nucl-ex]

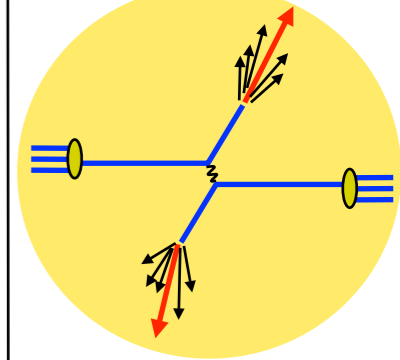


✓ 運動量によらず同じ角度に放出？

● Shock Wave /Mach Cone ??

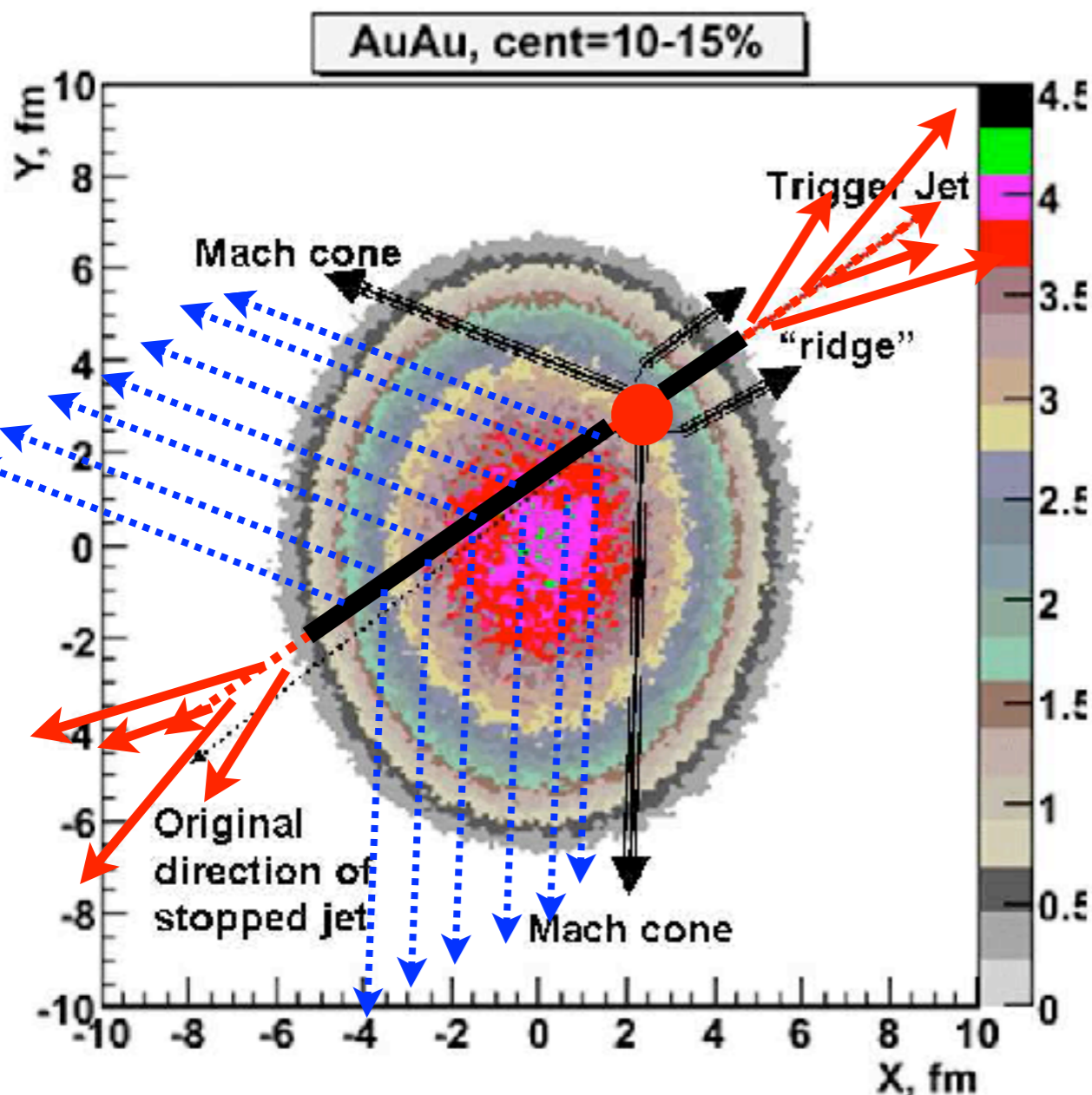
➡ Shock Waveの性質は確認されず否定された

# LHCでは綺麗に見れるかも しれない! ?



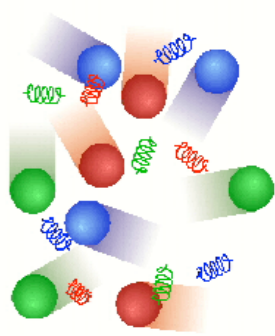
DCal project 提案理由の一つ

V.S. Pantuev, arXiv:hep-ph/0701.1882v1



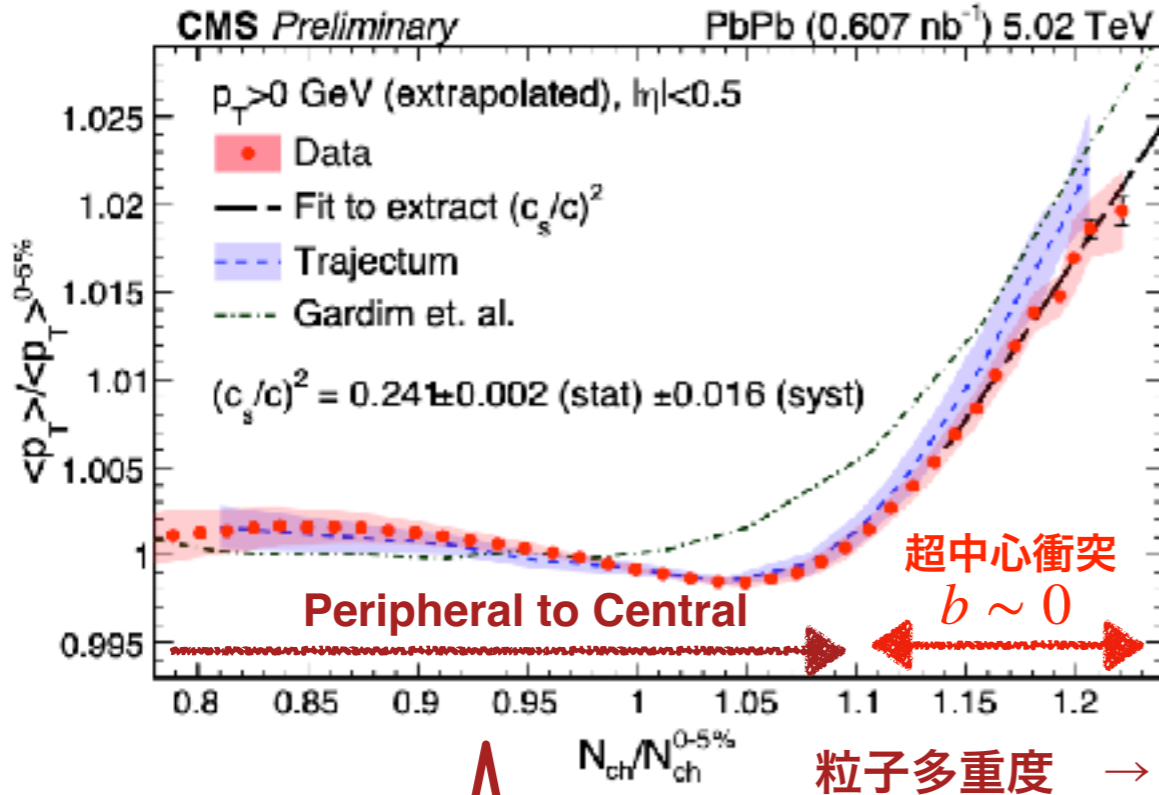
- ✓ Dijets with energy un
- ✓ Mach cone with away side jet.
- ✓ Higher, the better;
  - Clear separation in momentum and  $\phi$

# 超中心衝突における $\langle p_T \rangle$ 測定



CMS@QM2023. CMS PAS HIN-23-003

Ollitraultらの提案 ; Phys. Lett. B809(2020)135749



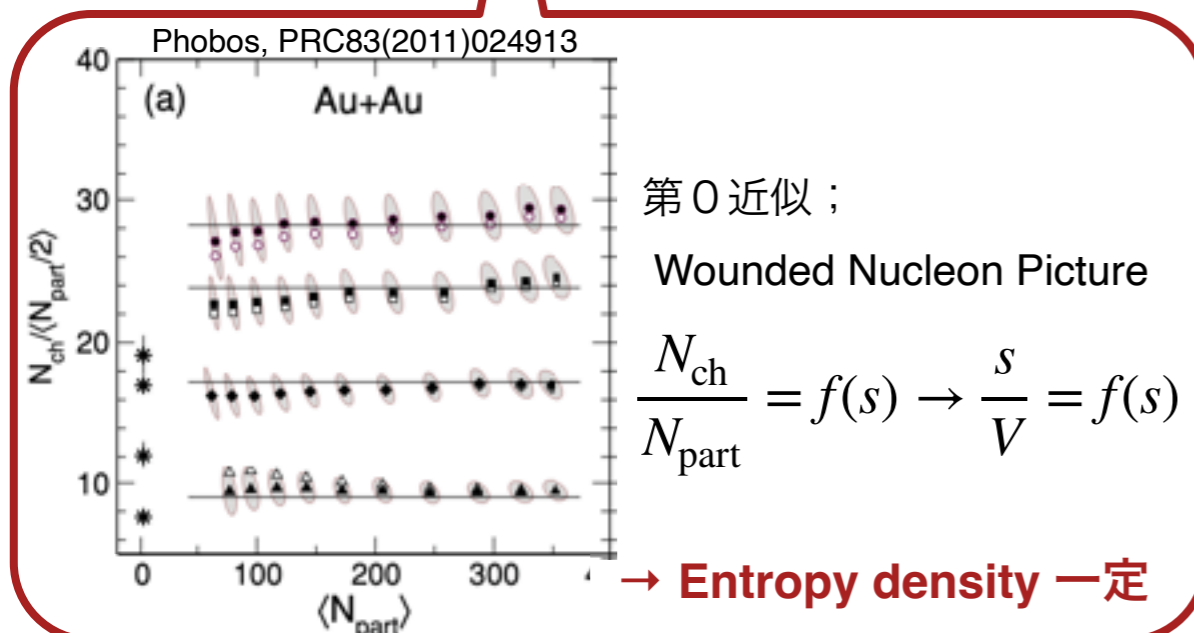
## ✓ 超中心衝突( $b \sim 0$ )

- QGP体積一定
- parton cascade過程の揺らぎ
  - ⇒ エントロピー密度 / 温度の揺らぎ
  - ⇒ 粒子数 ~ エントロピー

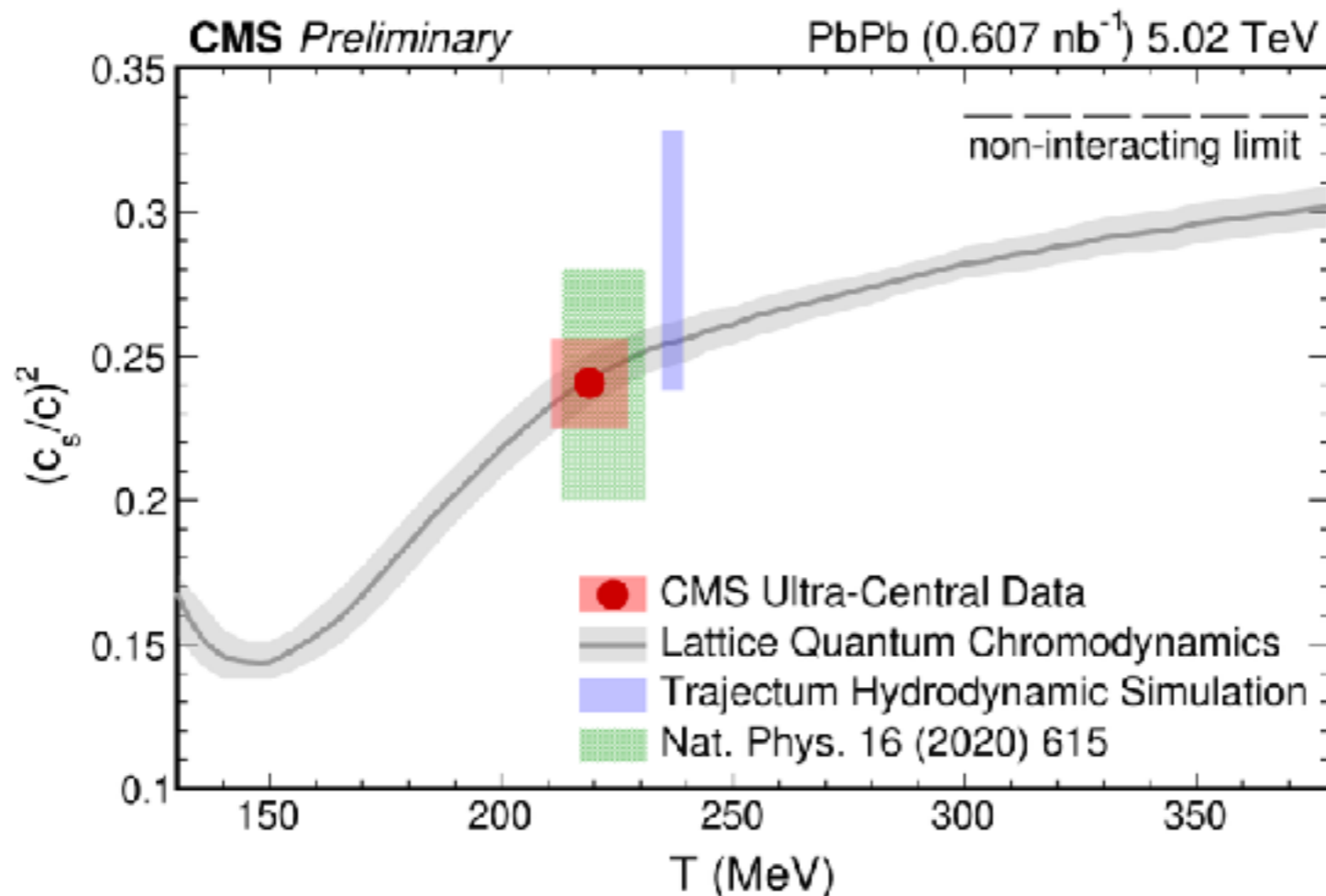
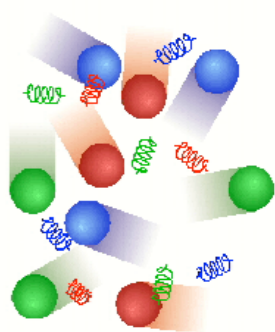
## ✓ 超中心衝突ではQGP温度は粒子多重度と共に変化

$$c_s^2 \equiv \frac{\partial P}{\partial E} \rightarrow \frac{s}{T} \frac{dT}{ds} \quad T \propto \langle p_T \rangle$$

$$s \propto N_{ch}$$



# $C_S$ が求まったので終わり？

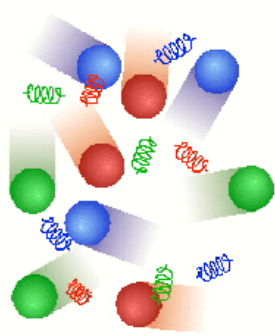


CMS@QM2023  
CMS PAS HIN-23-003

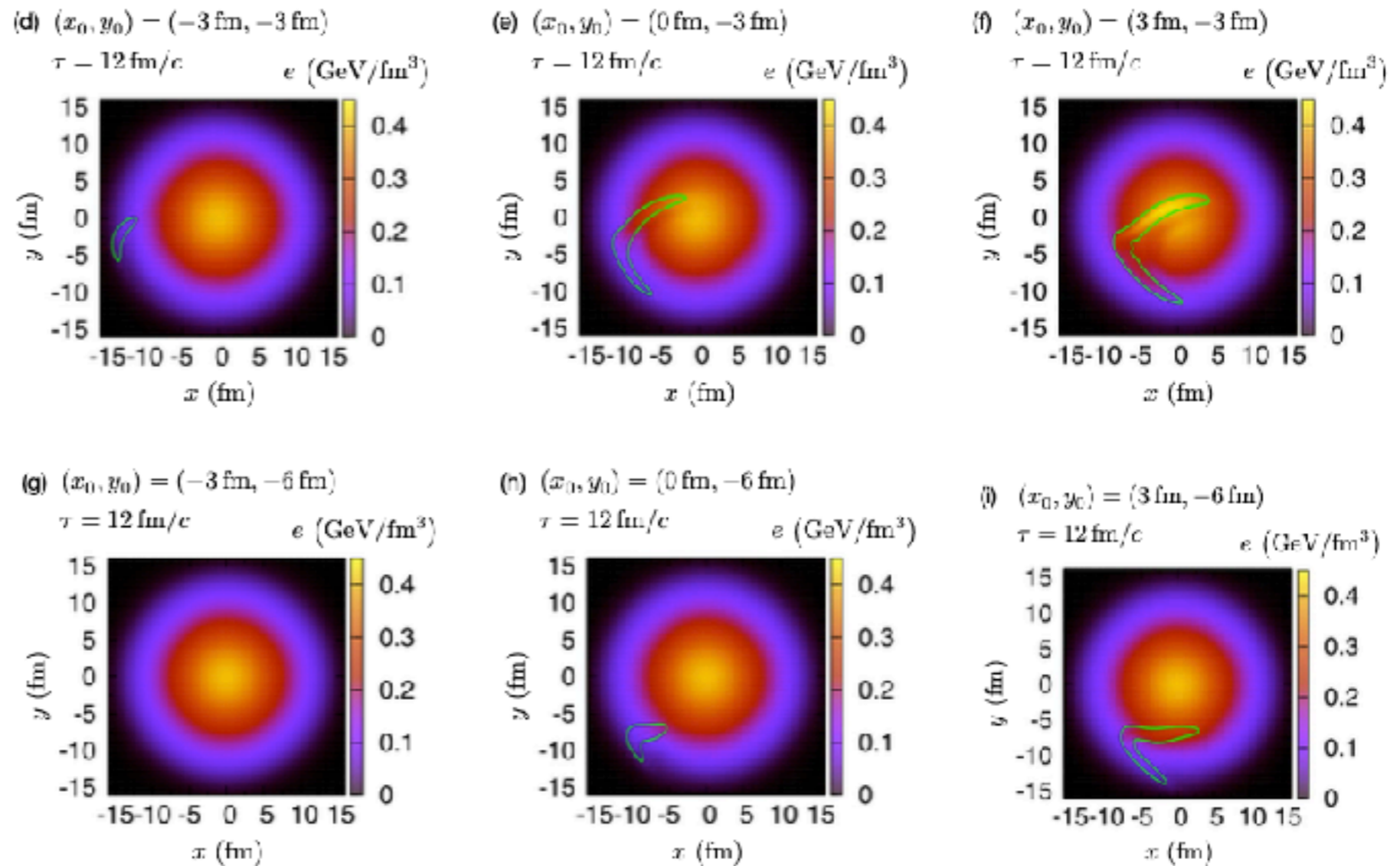
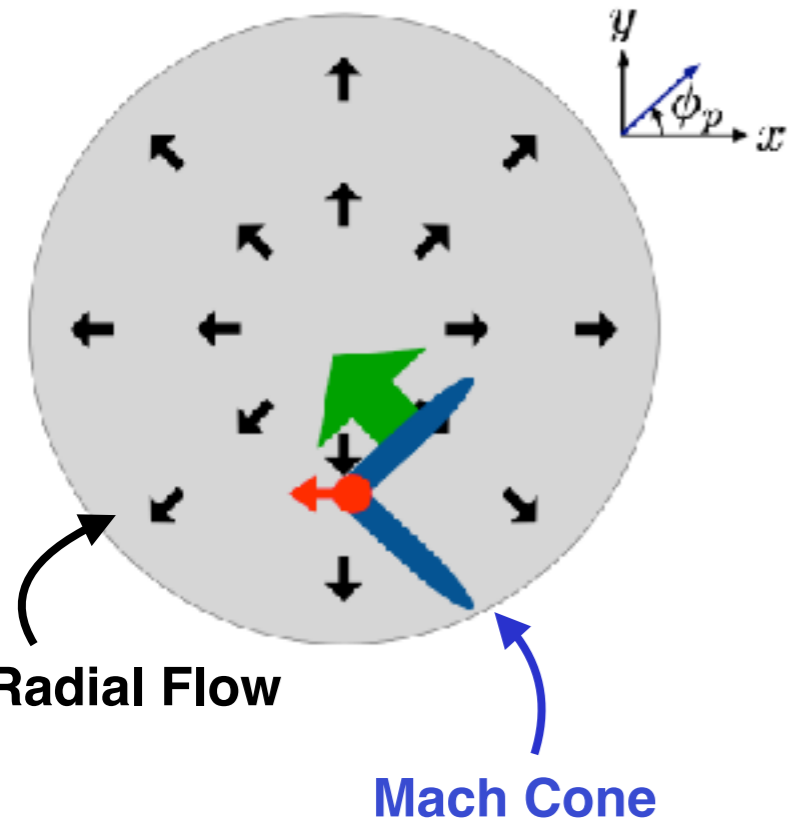
- ✓ 最新のhydro計算結果と矛盾しない
- ✓ Lattice QCDの計算と良い一致
  - Shock Waveの目的は音速測定 → 夢が叶ったのか？
    - ➡ 実験屋としては、現象として「Shock Wave」を見たい

ジェットの内側なので  
測定は難しそう

# 高エネルギーゆえの難しさ



Y. Tachibana and T. Hirano  
Phys. Rev. C93(2016)054907



✓ Jetが引き起こすMach Cone

✓ Mach ConeとRadial Flowのせめぎ合い

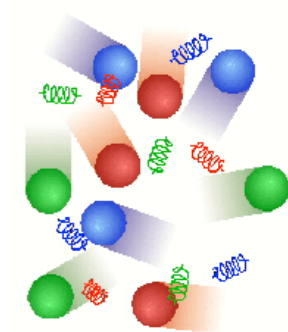
- “ $\gamma$ -Jet事象で発生点を分割して解析せよ”

➡ 高統計、高分解能測定のための難しい解析



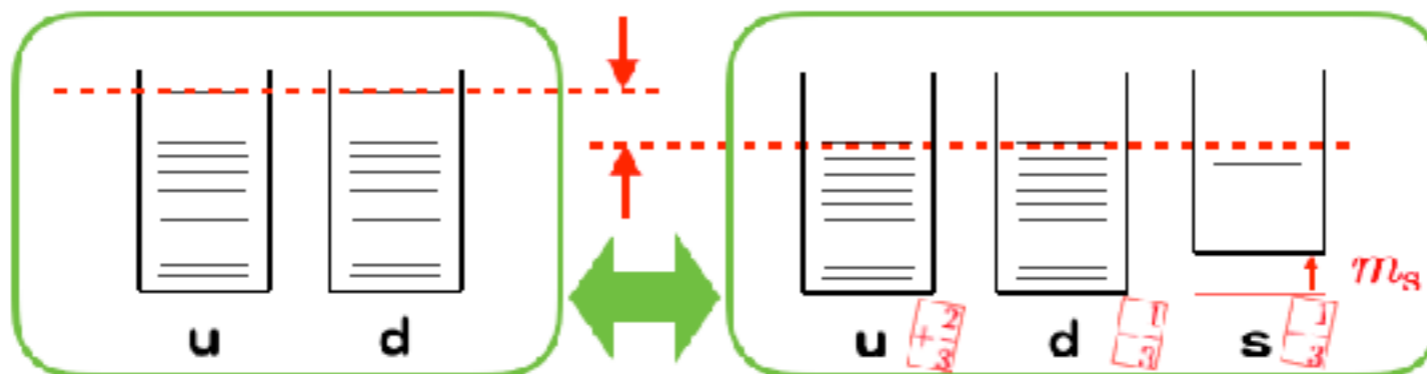
# 夢その2) Strangelet

～ 熱いQGPが見つかったんだから、次は、  
冷たいクォーク物質を見つけたい～

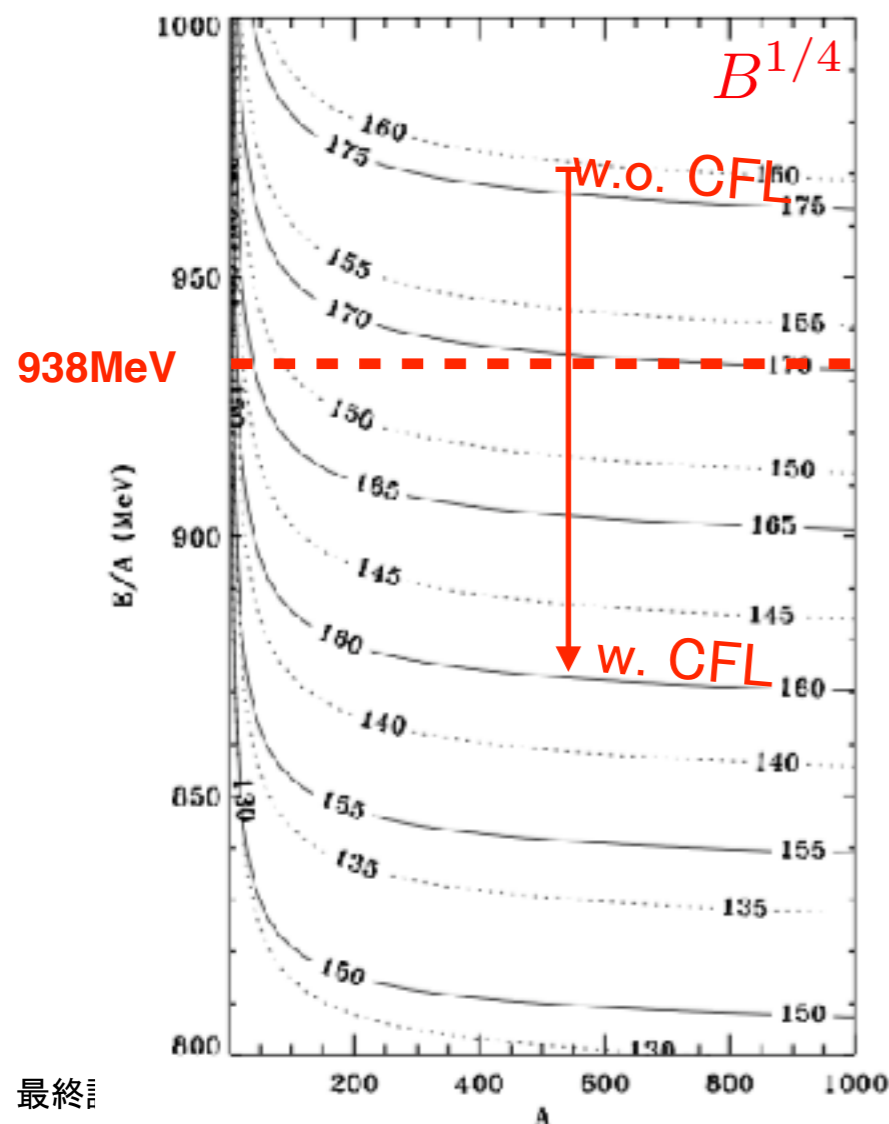


Ordinary Nucleus

Strangelet



$m_s = 150 \text{ MeV}$



PRL87(2001)172003

## ✓ 初期の予測

- $A > 10, n_s/A > 0.8, \tau > 10^{-4} \text{ s}$ , PRL43(1978)1291
- $n_s/A \sim 1, E/A < 938 \text{ MeV}$  stable, PRD30(1984)272
- . . .

## ✓ Color Flavor Locked

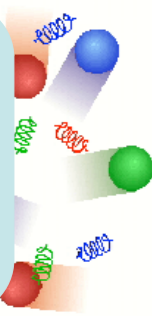
- 異なるcolorとflavorのクォーク対がCooper Pair化、Bose凝縮によりエネルギー低下! ?

## ✓ 定量的には予測困難な状況

- $A \sim 10 - 100$  領域のLattice QCD計算を期待
- 実験が決定的役割を担うべき

# Strangeletの特徴

Collapsed Nuclei  
Strange Matter (S star)  
S drops  
Strange Quark Matter (SQM),,,,,

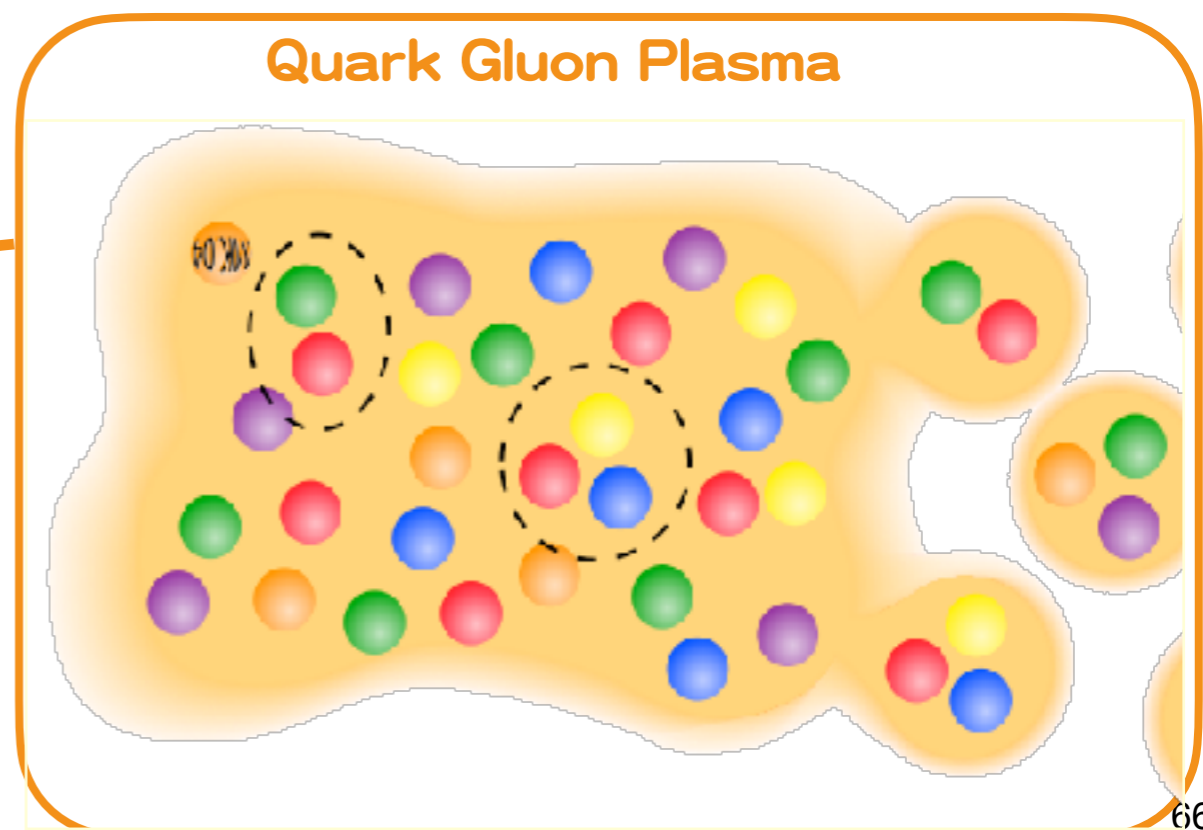
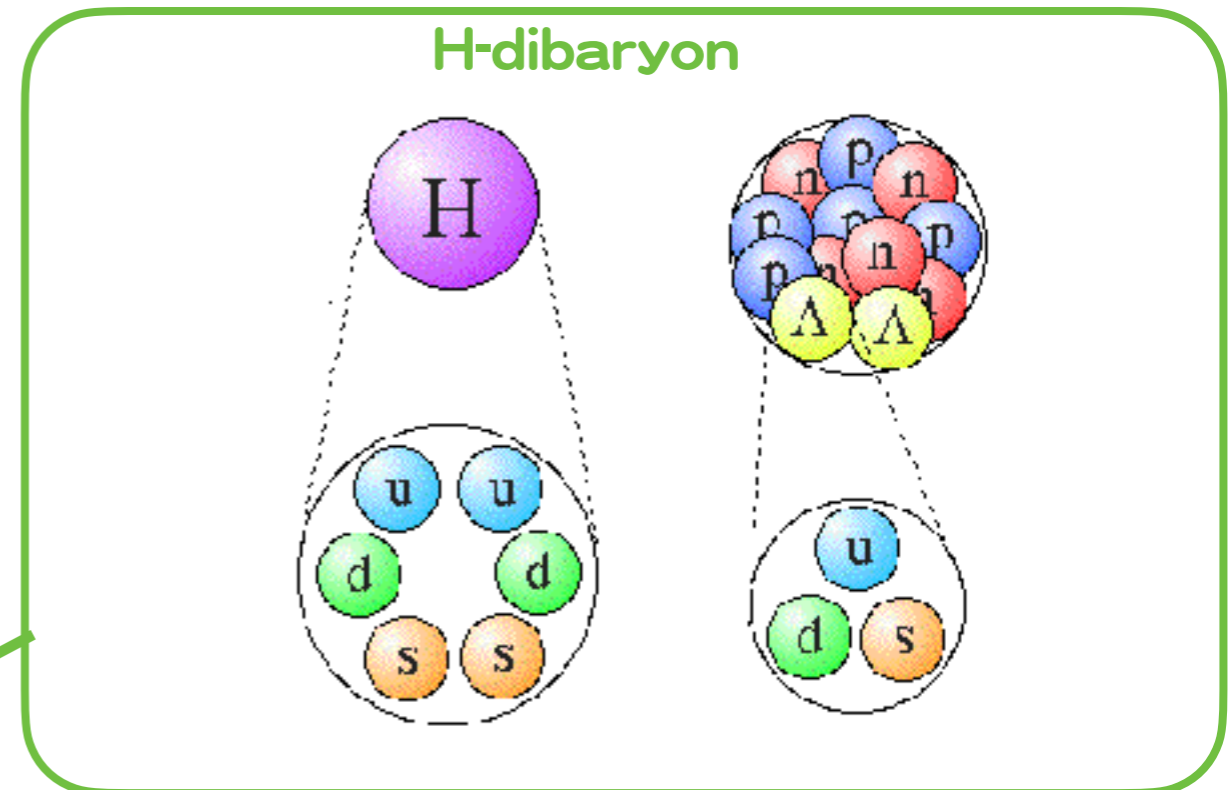


## ✓特徴

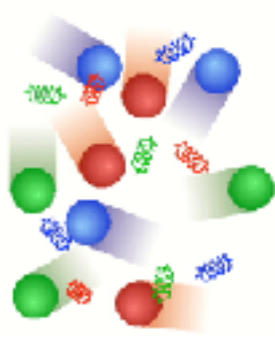
- Charge/Mass 小
- Strangeness 多
- $A \sim 10 \sim 100$  (原子核)  $\sim 10^{57}$  (星)
- 安定? / 準安定?  
(通常の原子核より安定な相も!?)

## ✓関連する密接な課題

- H - dibaryon (E42実験)  
⇒ 最も小さいSQM
- (Hot) Quark Gluon Plasma  
⇒ (Hot) Quark Matter  
RHIC, LHC加速器で実現
- (Cold) Quark Matter  
⇒ Strangelet, SQM



# (安定な)Strangelet探索実験



✓ビッグバン直後のQGPが冷却した残滓としてSQMが宇宙線中にあるかも！？

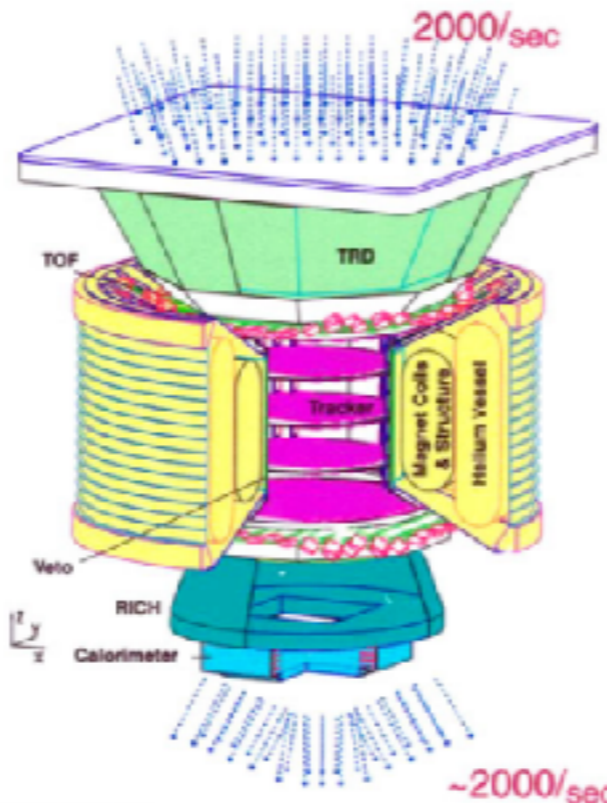
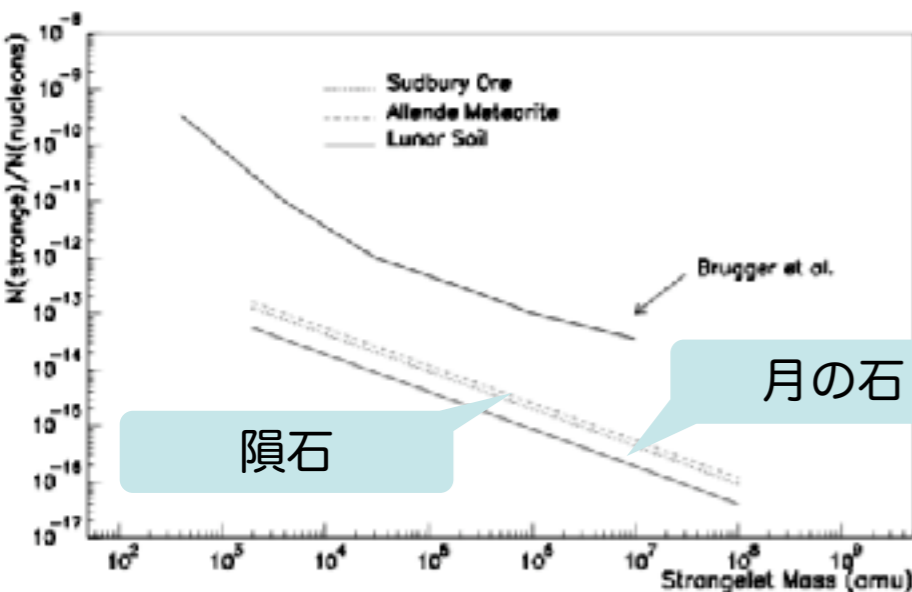
E. Witten, PRD, 30(1984)272

- 1) 隕石等に含まれるSQM探索(重イオンビームを照射しSQM崩壊からのガンマ線)
- 2) 宇宙線に含まれるSQM探索(宇宙ステーション搭載AMS)
- 3) 宇宙線による多重ミュオン事象(LHC ALICE)

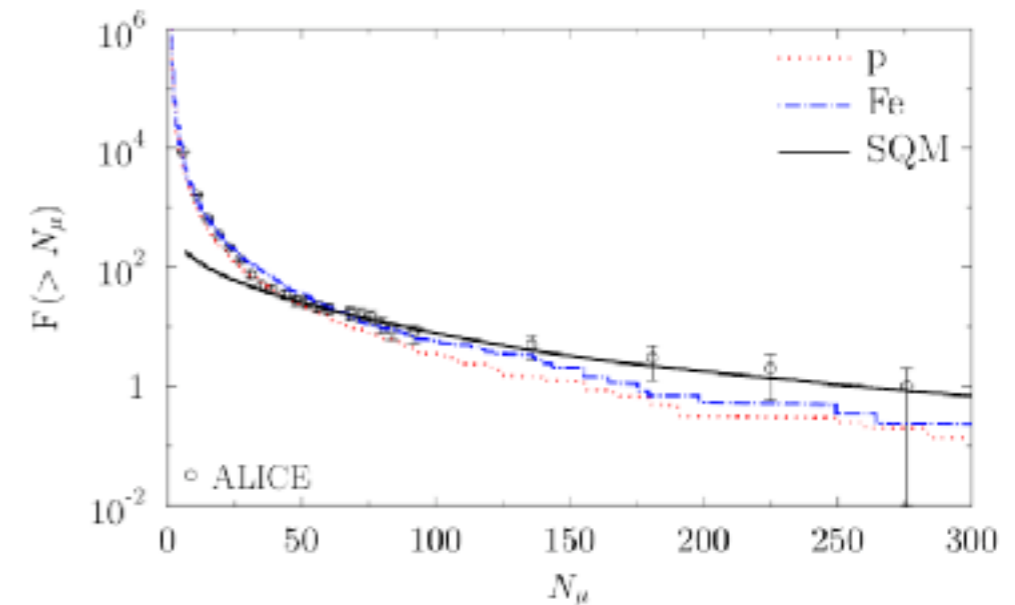
→明確な信号は観測されず

J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 30 S51

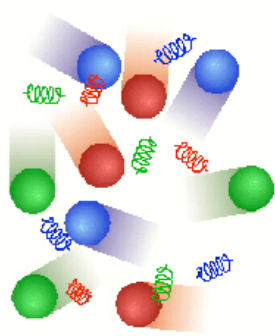
PRL, 81(1998)2416



Astr.J., 839:31, 2017

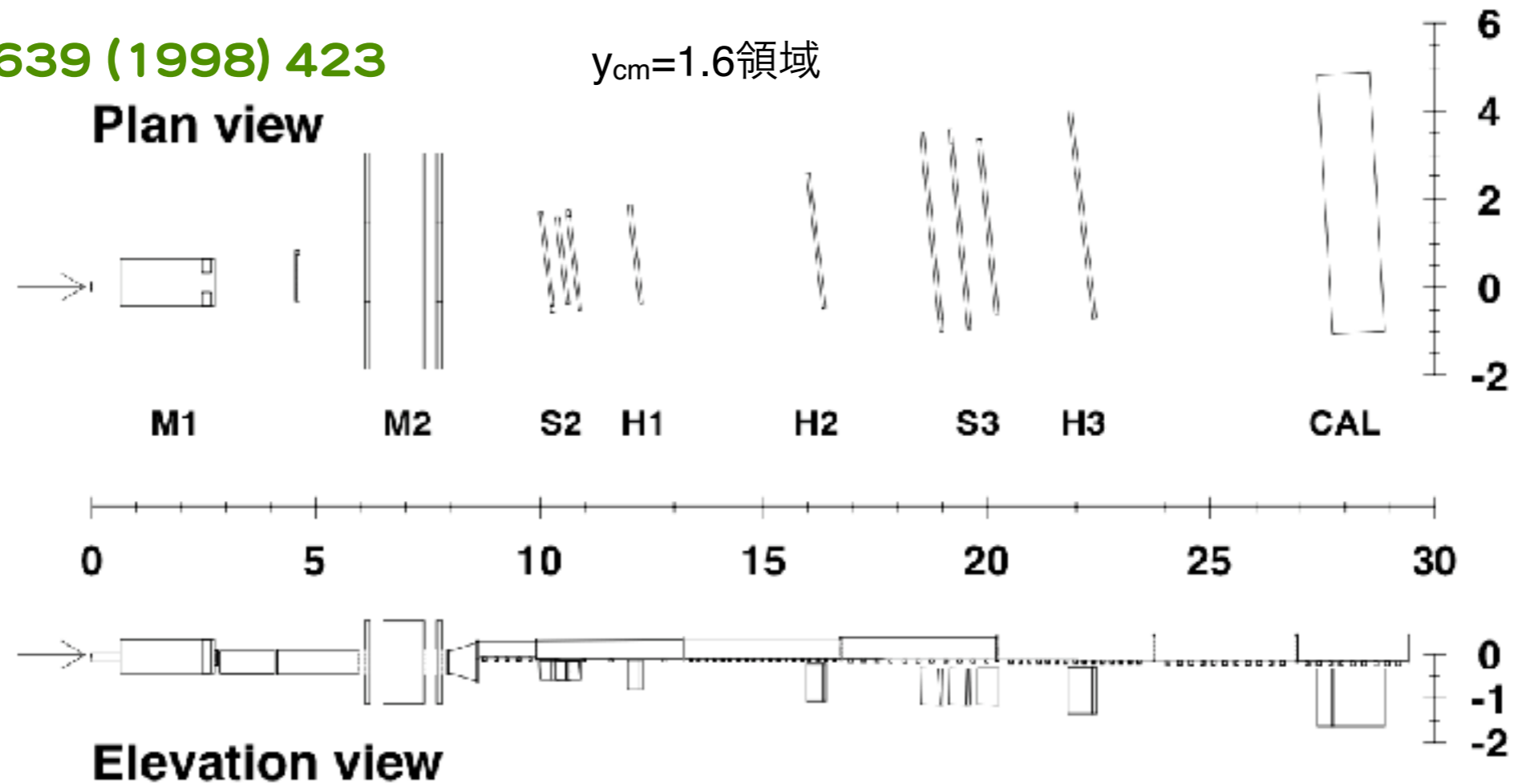


# AGSにおけるSQM探索(1997)



E864実験

Nucl.Phys. A639 (1998) 423



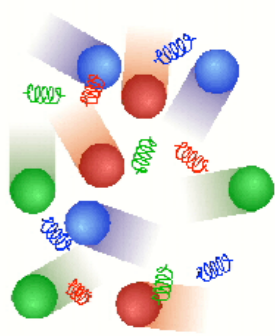
全長28m

- ✓ Au+Pb 1.6A GeV/cのMid Rapidityを探索
- ✓ Hadronic Calorimeterによるトリガー
- ✓  $Z > 0$ 、 $Z = 0$ 、 $Z < 0$ の測定

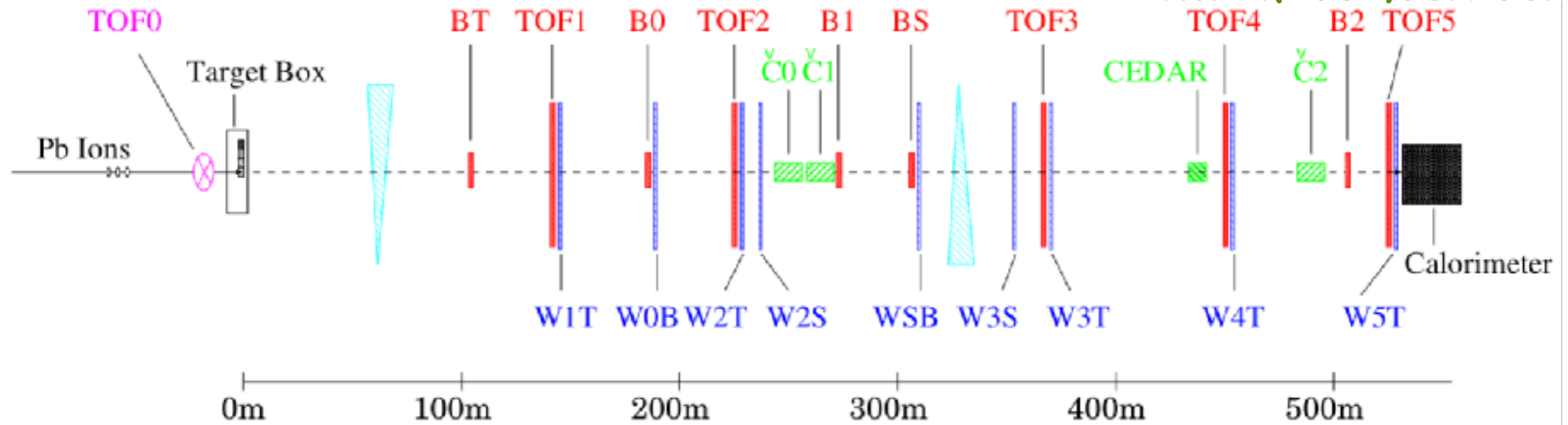
⇒  $10^9$  Au+Pb 中心衝突を精査。

上限 ;  $10^{-7} \sim 10^{-8}$ /central

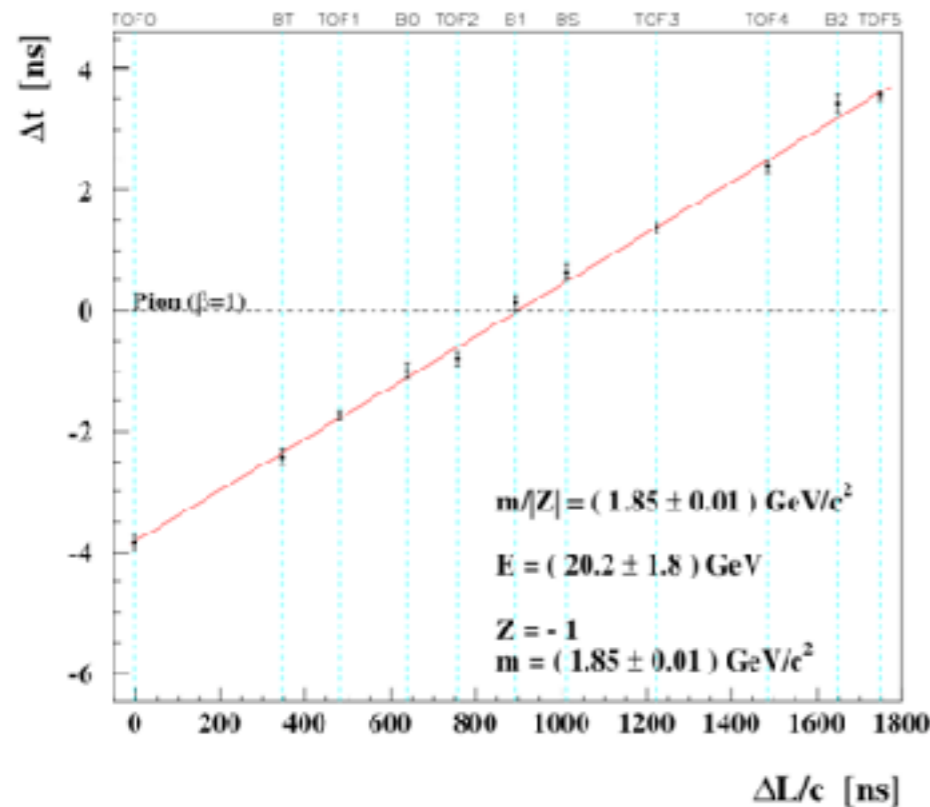
# SPSにおけるSQM探索(2002)



NA52実験  
NJP 4(2002)96.1-96.16



run 98202426 event 35865 p/Z=20 GeV/c



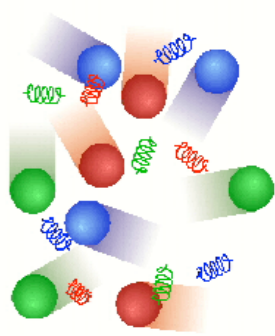
✓ 全長500mのビームライン実験

▶ 長寿命( $> 1.2 \mu s$ )のSQMに感度

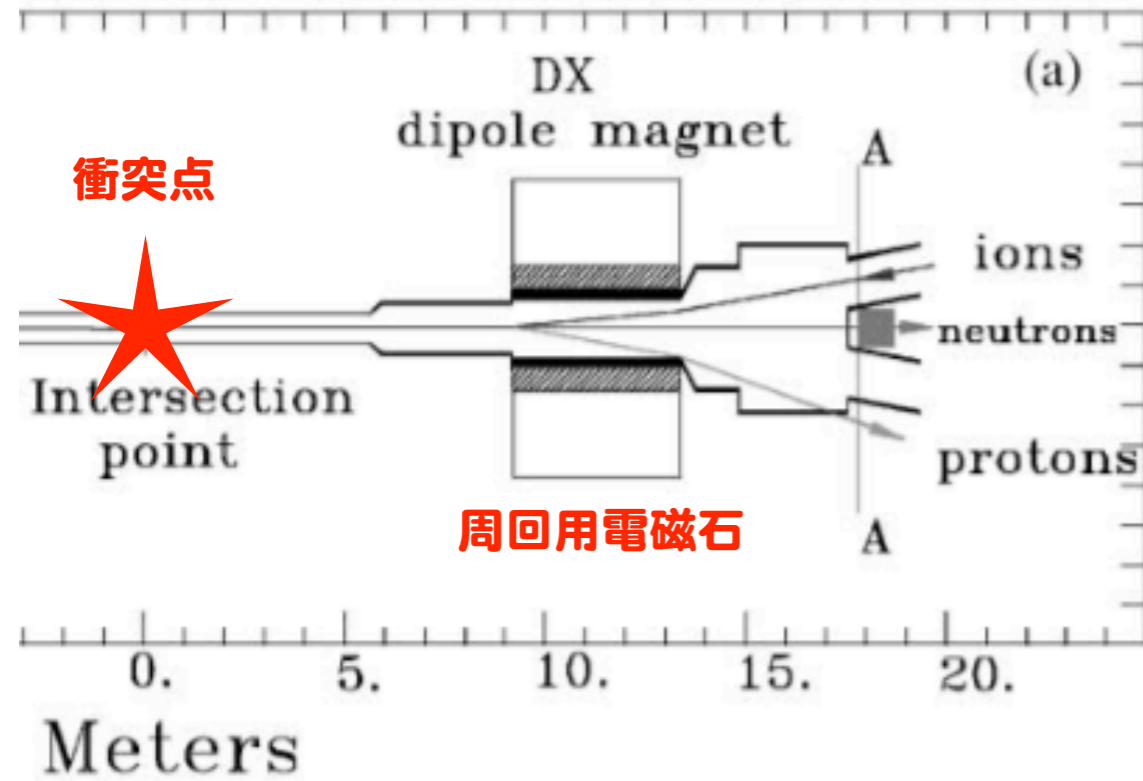
✓ Pb+Pb@158A GeV/c中心領域(Mid rapidity)を探索

➡ 上限 ;  $\sim 10^{-9} \sim 10^{-10}$

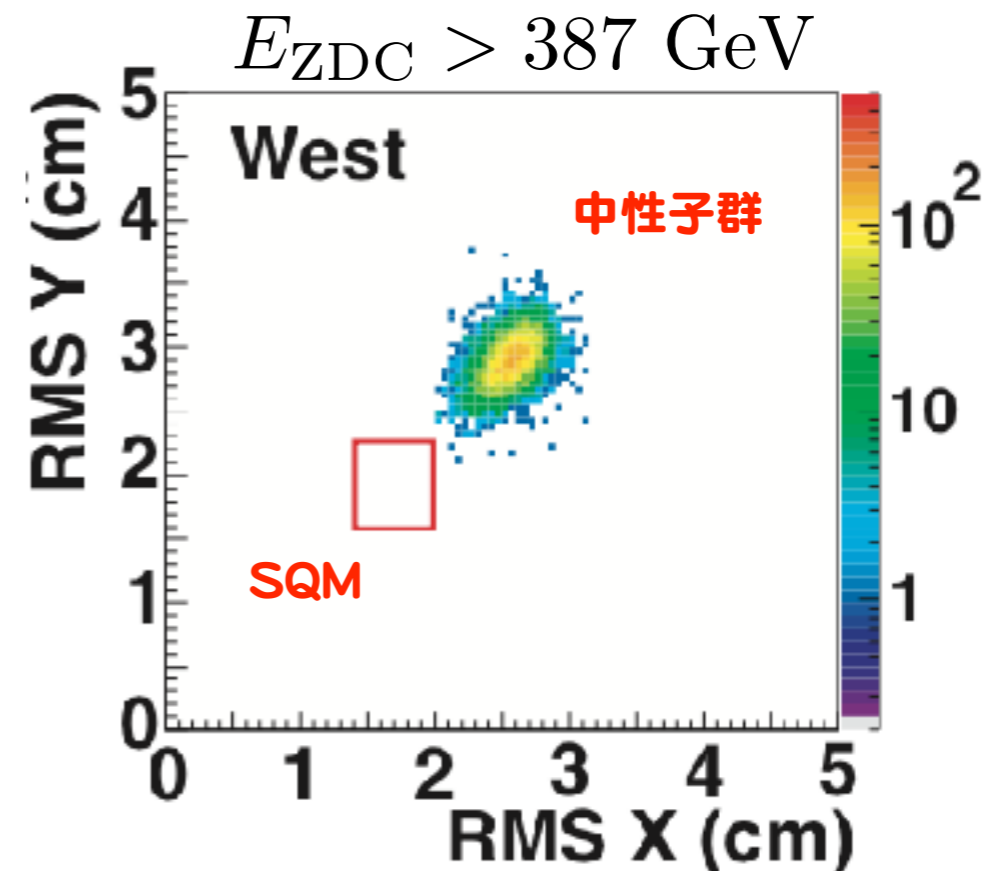
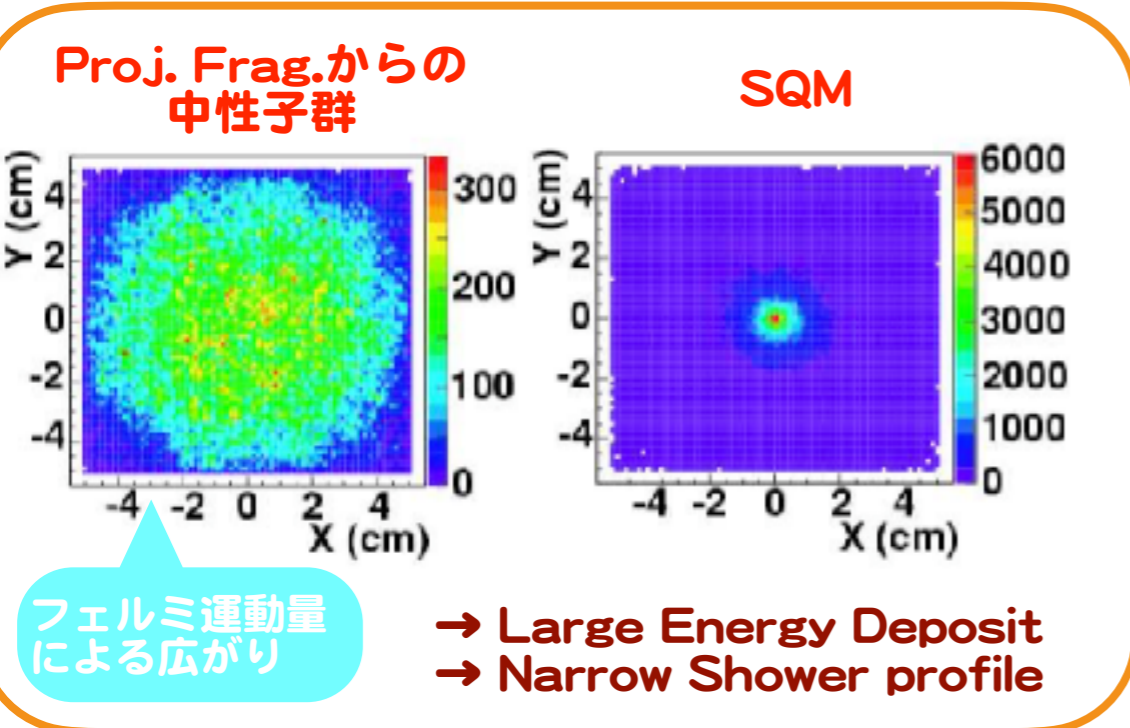
# RHICにおけるSQM探索(2007)



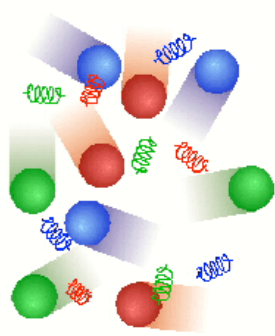
STAR実験  
Phys.Rev. C76 (2007) 011901



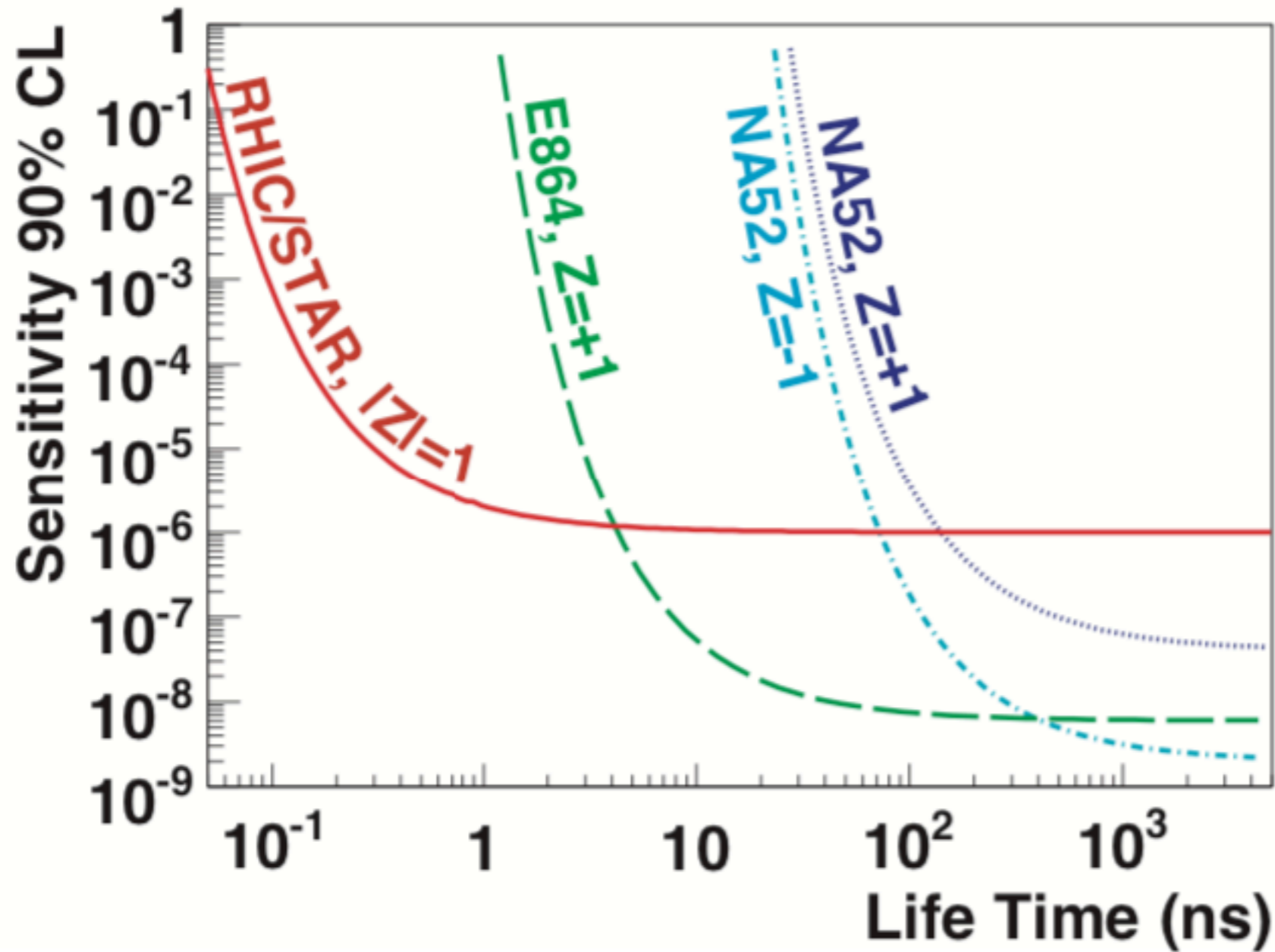
- ✓ ZDC; 衝突型加速器の超前方ハドロンカロリメータ
- ✓ 衝突点から18m下流のProjectile Fragment領域における探索
  - 電荷 $\sim 0$ 、大きなエネルギー、狭分布



# 今までの加速器探索実験



Phys.Rev. C76 (2007) 011901



✓ 高エネルギーのメリット  
/ デメリット

- ○ s生成量が多い
- × 爆発的膨張、  
バリオン低密度

⇒ バリオン密度が高く、爆発的膨張も小さい (生成粒子の Phase Spaceの小さい) 衝突事象がベター

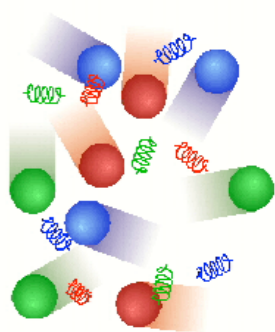
⇒ RHIC STAR実験；  
Projectile Spectator領域で探索

✓ 高々  $10^{-8}$  程度の探索

✓ 超寿命の Strangelet しか対象にしていない！

- E864, AGS, 中心領域, Au+Pb 11.6 A GeV/c
- NA52, SPS, 中心領域, Pb+Pb 158 A GeV/c
- STAR, RHIC, Proj.領域,  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV

# 重イオン衝突によるSQM生成のシナリオ



## ✓ 3つのSQM生成のシナリオ

- 1) Thermal production
- 2) Coalescence process
- 3) 熱いQGPを冷却して冷たいSQMへ

## ✓ 2つの肝；

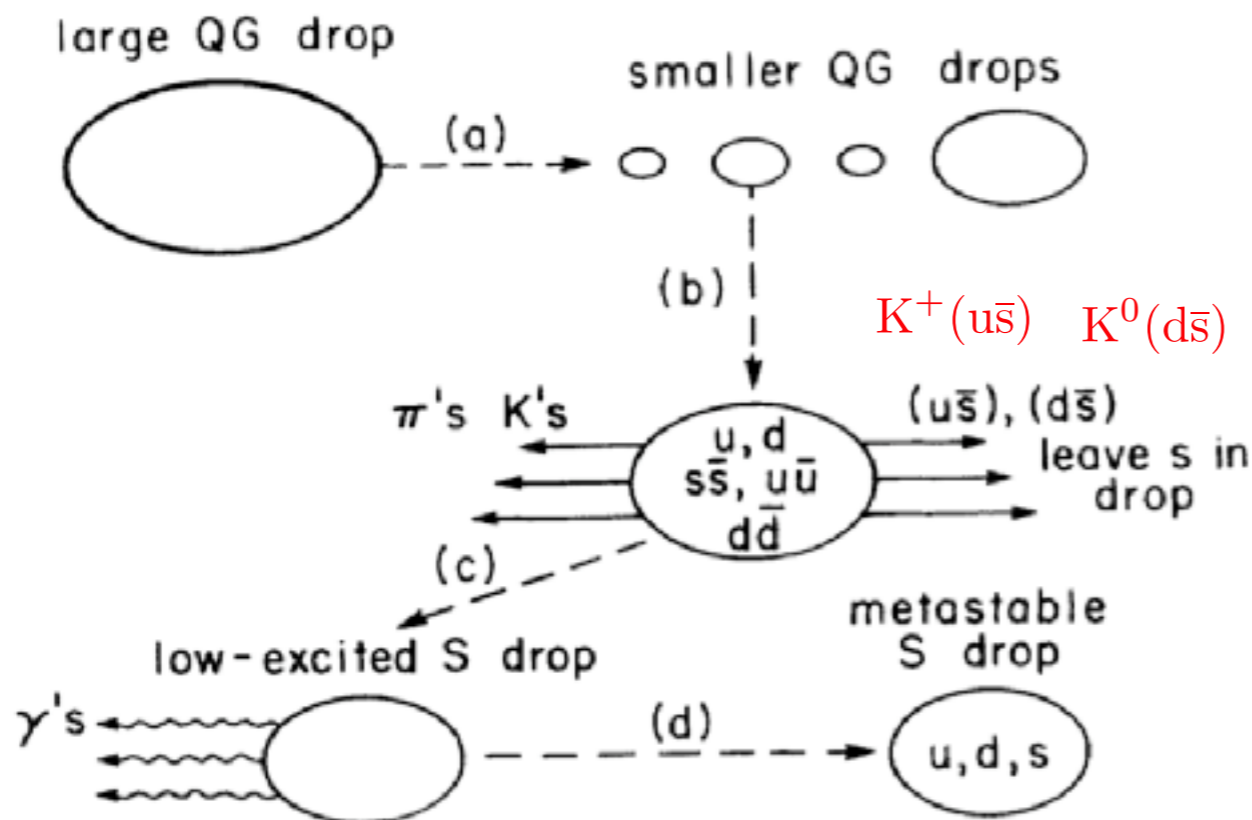
### 1) strangeness distillation

baryon richなQGPでは  $\bar{s}$  は  $K^+$  や  $K^0$  など放出され、(u,d,s)濃度が凝縮

### 2) SQM生成にはゆっくりな冷却が必要。膨張による高速な冷却は破壊的

RHICやLHCは恐らく不向き

“Ice cube from a hot furnace”

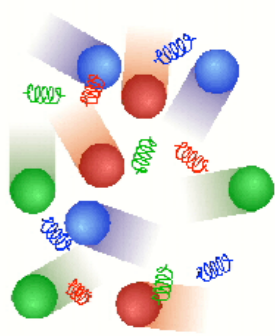


Crawford, et.al., PRD45(1992)45

→膨張が小さく、バリオン密度 (u,d密度) が高い方が有利

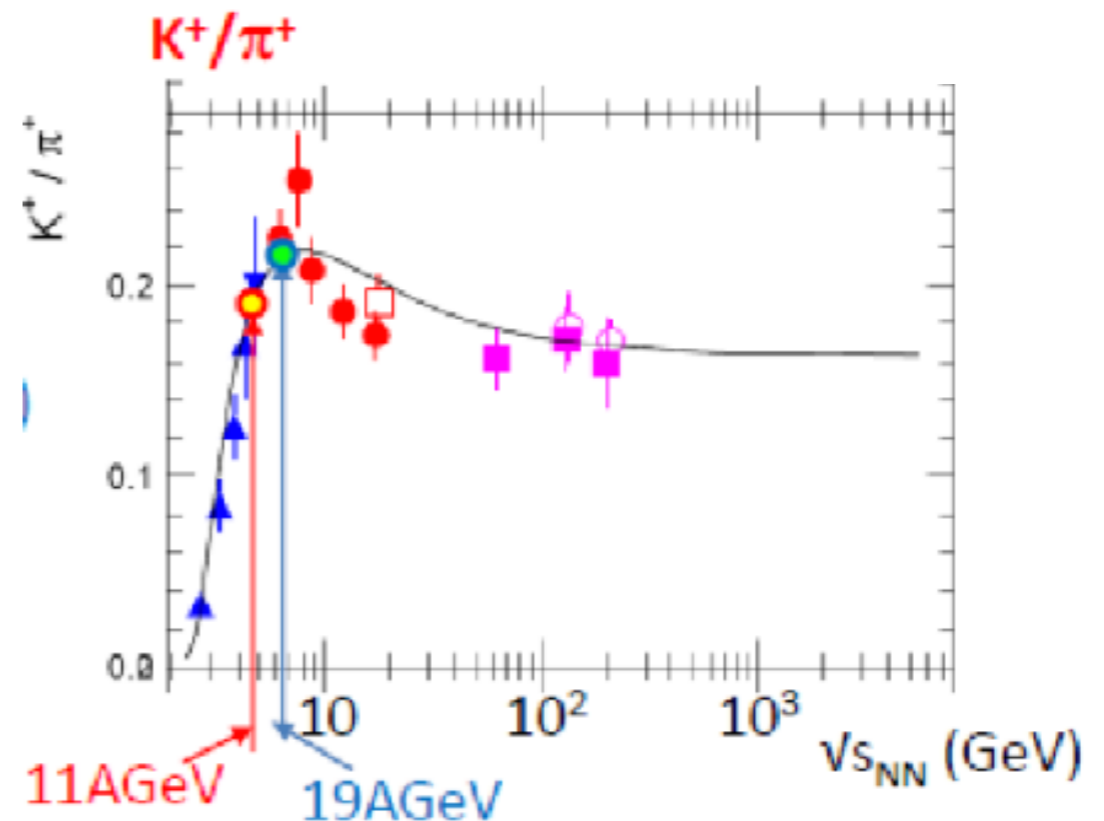
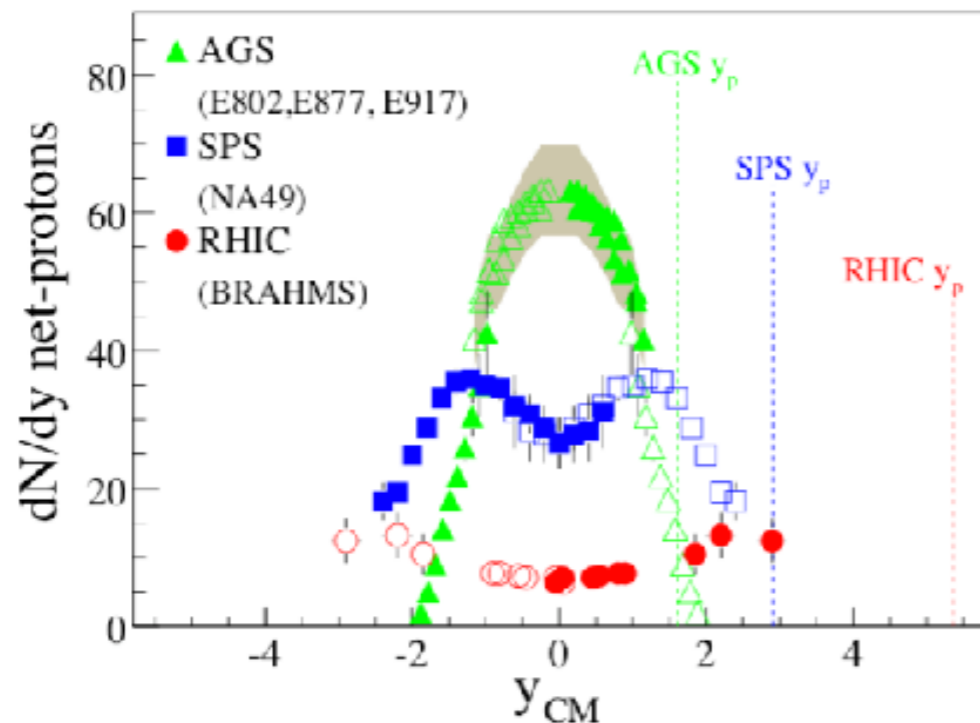


# SQM探索に最適な加速器は？

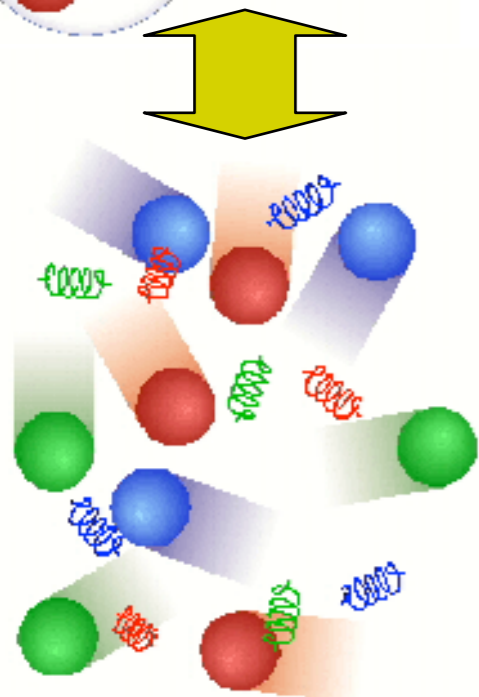
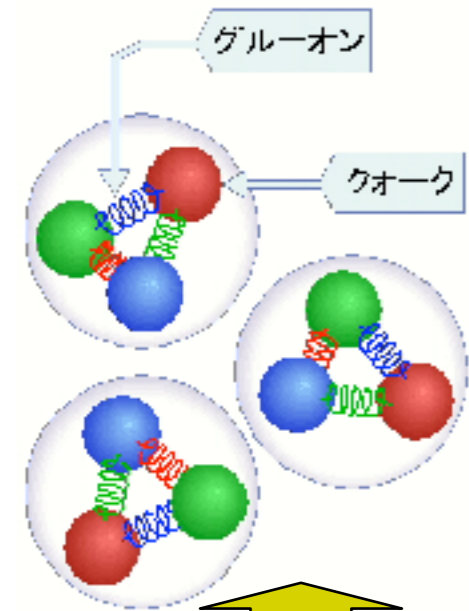
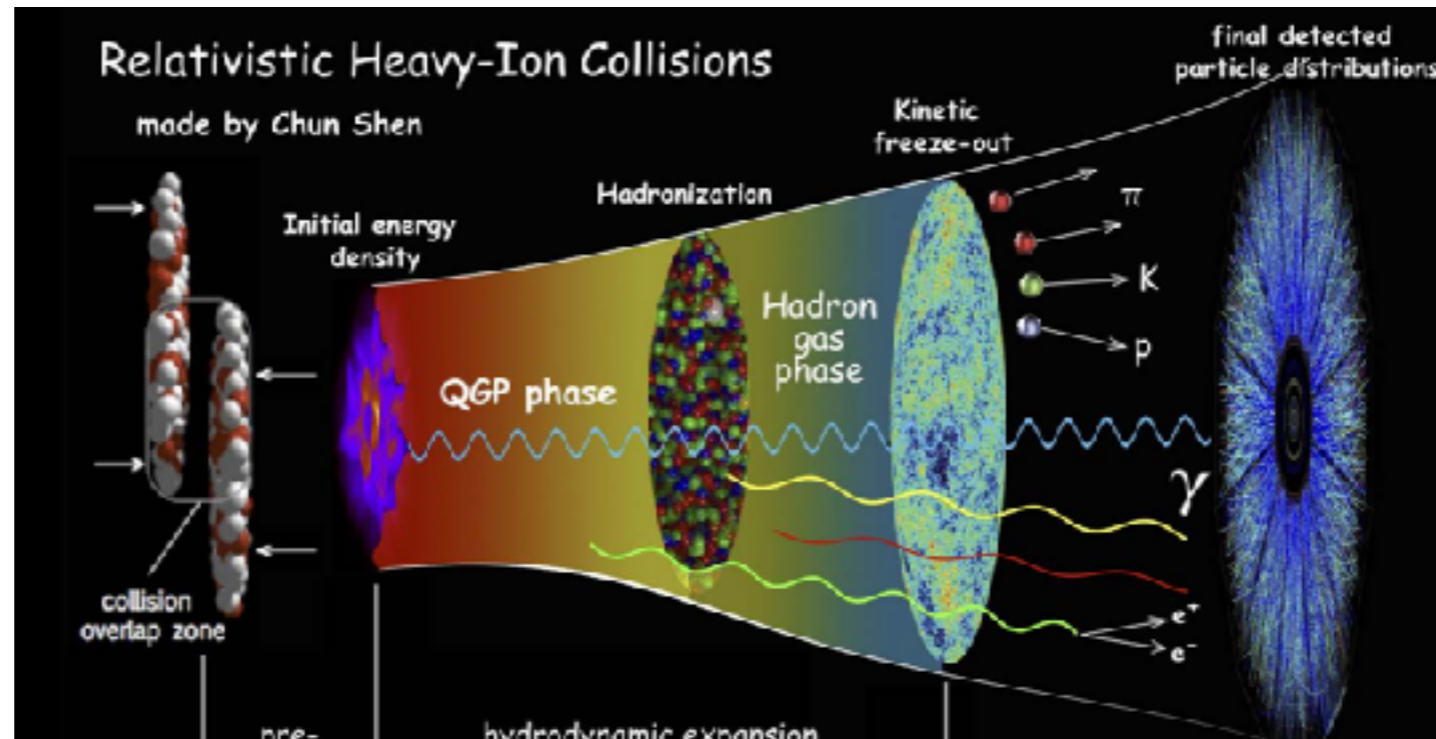
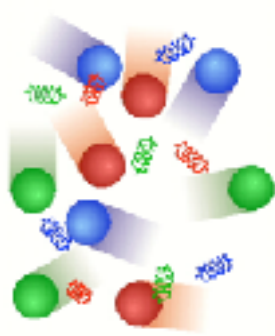


JPARCのような次世代高強度重イオン加速器

- ✓ 高いバリオン密度が高い ← Coalescence効率、CFL効果も
- ✓ 低温、小さな爆発的膨張 ← 冷却、凝集
- ✓ 高いK/ $\pi$ 比 ← s密度、distillation効率
- ✓ 高統計実験 (従前は高々 $10^9 \sim 10^{10}$ 事象) ← JPARCなら3分

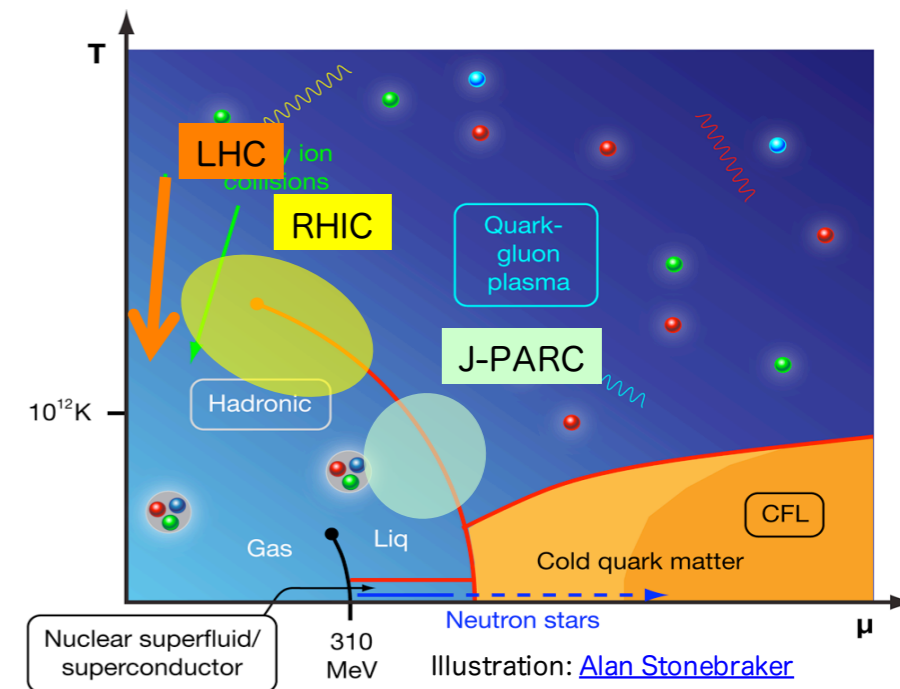


# 高エネルギー重イオン衝突がもたらしたフロンティア ～まとめに替えて～



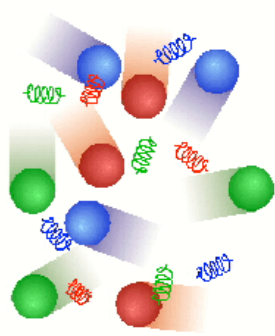
- ✓ 新たな物質の存在相 QGP
- ✓ 最も(宇宙)初期の物質
- ✓ 最も高温な物質
- ✓ 最も粘性の小さな流体
- ✓ 最も大きな渦度
- ✓ 最も強い電磁場

● これらのフロンティアがもたらした初期宇宙、QCDへの新たな知見は計り知れない



**Bright Future !!**

# QGP本 2nd edition ^



CAMBRIDGE | Catalogue

Home > Catalogue > Quark-Gluon Plasma



## Quark-Gluon Plasma

Series: [Cambridge Monographs on Particle Phy](#)

Kohsuke Yagi  
*Urawa University, Japan*

Tetsuo Hatsuda  
*University of Tokyo*

Yasuo Miake  
*University of Tsukuba, Japan*

**Hardback** (ISBN-10: 0521561086 | ISBN-13: 97

For price and ordering options, inspection copy request  
[UK, Europe, Middle East and Africa](#) | [Americas](#) | [Aust](#)



### ✓ 初版(2005)

- Amazonでも買えます。中国語版も出版
- RHIC開始直後、QGP生成にも慎重な表現

### ✓ 2nd edition原稿作成開始

- 平野さん、新井田さん
- 実験結果等、SPS/RHIC → RHIC/LHCへ全面書き換え

# 感謝

## スタッフの皆さん

稲葉基  
江角晋一  
加藤純雄  
清道明男  
金野正裕  
坂井真吾  
佐甲博之  
佐藤進  
下村真弥  
中條達也  
轟木貴人  
新井田貴文  
西村俊二  
野中俊宏  
洞口琢磨  
益井宙  
渡邊陽介  
Oliver Busch  
Norbert Novitzky

## 院生・学生の皆さん

H4 熊谷荒太  
H5 上野祥子  
H6 倉田美月、佐藤進  
H7 絵野澤和彦  
H8 中條達也、樋口理子、宮本祐子  
H9 清道明男、浦沢幸子、横田幸郎、  
三浦大輔、石橋達平  
H10 平野太一、島田知弘、稲葉基、林寛  
H11 鈴木美和子、小関国夫、吉川剛史、  
(瀬古浩嗣)  
H12 相澤美智子、箱崎大輔、坏雄大  
H13 小野雅也、鶴岡裕士、  
(今井秀樹、前田憲勲)  
H14 益井宙、坂井真吾、黒木義昭、  
(進藤美紀、団村絢子)  
H15 金野正裕、下村真弥、高木敏志、  
神長誉人、(大木俊和)  
H16 永田善彦、岡暢哉、川岸隆之、猩々智康  
H17 三木健太郎  
H18 池田義雅、田邊嶺、冨田祐介、  
新井田貴文、成澤正紀、(加藤 晴子)

H19 佐藤尚徳、渡邊健悟、(青木孝憲、  
伊藤聖、高橋靖明)  
H20 坂田洞察、佐野正人、(斎藤飛鳥、  
塩原尚希、瀬谷夏美)  
H21 梶谷緑、木村瑞希、轟木貴人、浜田英太郎、  
横山広樹、(佐藤慎九郎、常鵬)  
H22 竹内理将、(関根裕輝)  
H23 水野三四郎、近藤祐樹、窪田晋太郎、  
仲里仁、(渡辺吉彬)  
H24 郡司薫、中込宇宙、中島朋、船戸龍、  
堀内聖志、渡邊大介  
H25 大島一軌、尾崎瞳、木原宏一、小林大洋、  
田中直斗  
H26 佐藤 航、野中俊宏、細川律也、  
(渡部隼士、淀川佳介)  
H27 青山 遼、李 準一、塩谷 知弘、杉浦 哲郎、  
平野 勝大、山本 大貴、(酒谷 郁美)  
H28 伊藤 喬一郎、工藤 咲子、小山 亮平、  
福田 悠裕、松永 一成、金 秉徹、(張マリ)  
H29 佐藤 一輝、レバザ 義美  
H30 加藤浩樹、川名大地、川村陽太、鈴木刀真、  
中川和也  
H31 高村匡広、田所賢一、中川果南、畠山みな、  
星有輝子、(齋藤大士)