

クォーク・グルーオンプラズマ 加速器実験で探るビッグバンから 数10マイクロ秒後の宇宙

中條 達也
(筑波大学)



筑波大学・物理学セミナー 2011年11月2日

Pb+Pb @ $\sqrt{s} = 2.76$ ATeV

2010-11-08 11:30:45

File : 1482

Run : 137124

Event : 0x00000000D38BE691

Contents

1. イントロダクション

- 宇宙ビックバン
- QGP研究の歴史的背景
 - ・ 高エネルギー宇宙線、粒子多重生成現象

2. 量子色力学とクォーク・グルーオンプラズマ

3. LHC 加速器における重イオン実験

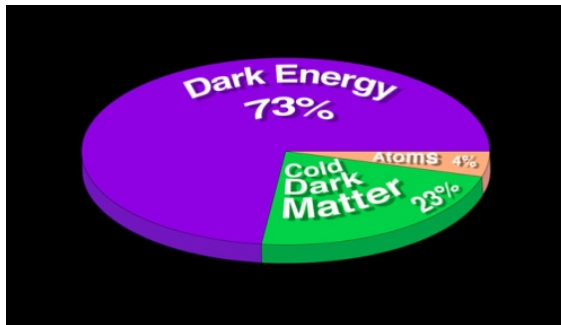
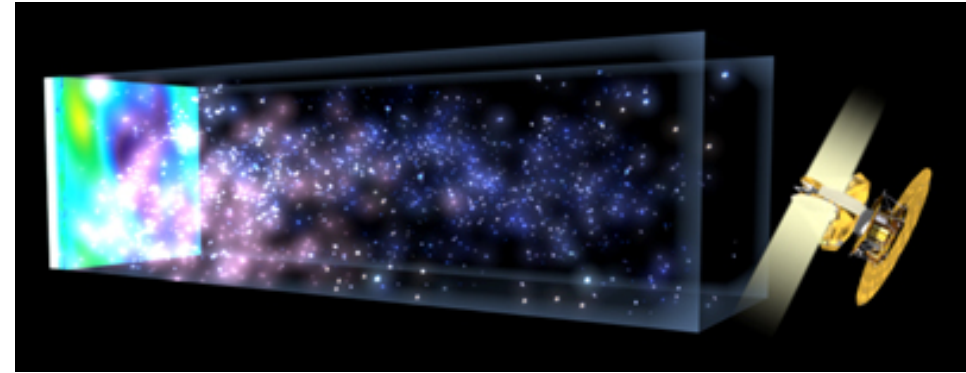
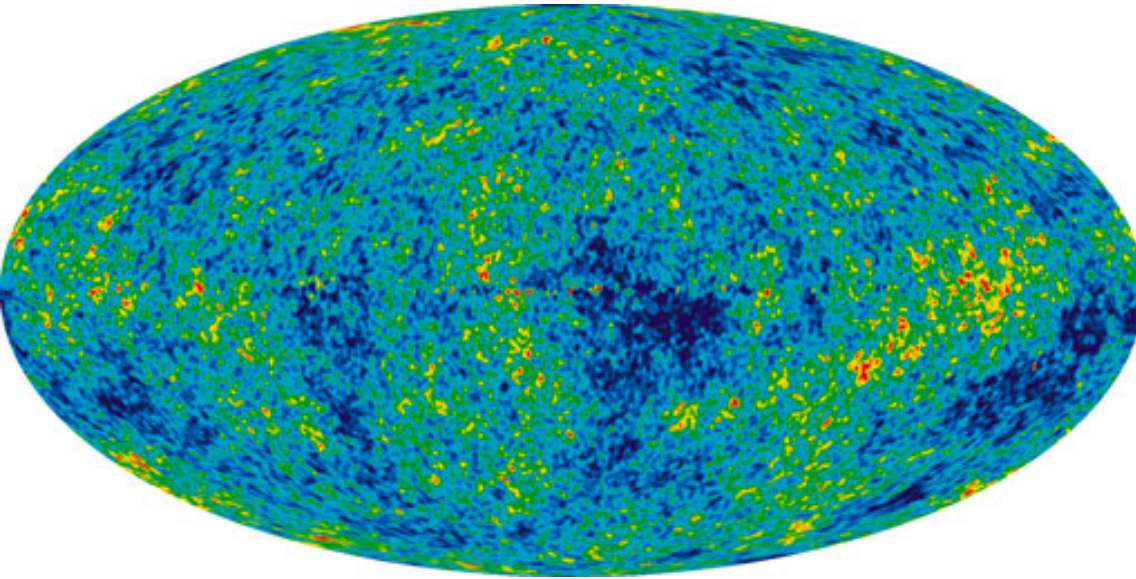
4. 最近の重イオン実験から分かったこと

5. まとめ

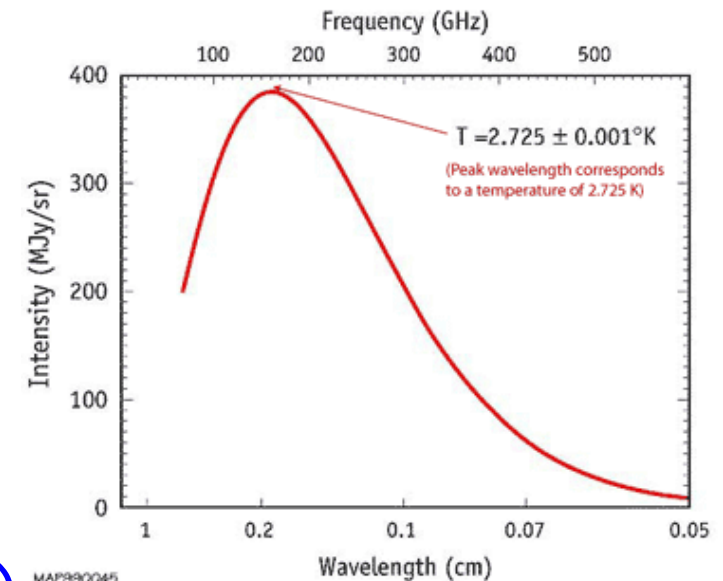
- ・ 筑波大グループの貢献

1. イントロダクション

Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP, 2001-2010)



Spectrum of the Cosmic Microwave Background

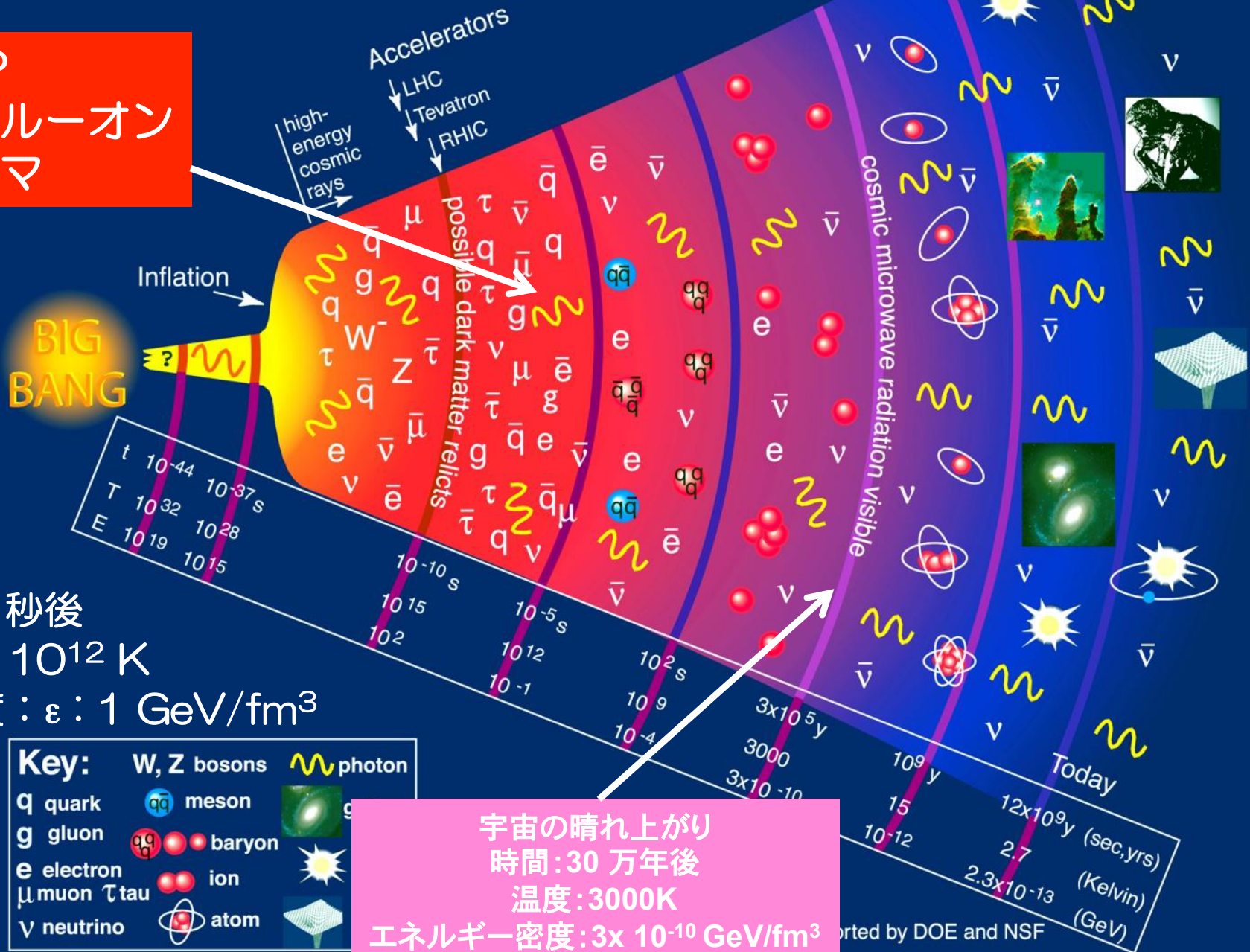


- 宇宙背景放射 (CMB) の温度測定
 $T = 2.725 \text{ K}$ (熱放射, ビックバンの名残)
- 温度揺らぎ → 宇宙年齢 137億年, 宇宙組成

History of the Universe

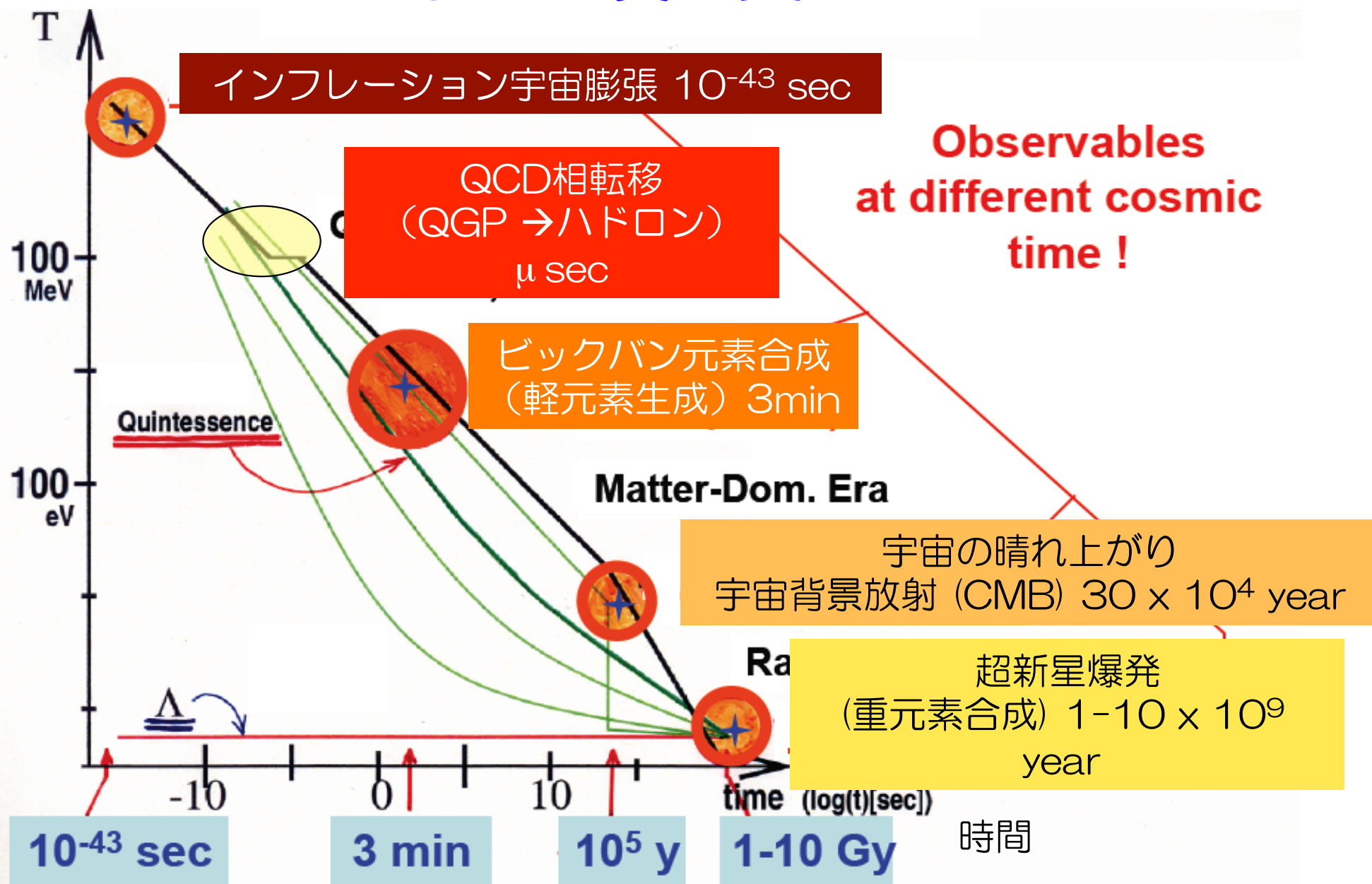
QGP

クォーク・グルーオン
プラズマ



宇宙温度の変遷

温度



折戸学, 梶野敏貴、
小特集「ビッグバン元素合成と宇宙論」
プラズマ・核融合学会誌 79, 855 (2003) より.

素朴な疑問（動機）

- 物質の温度をどんどん上げてゆくと、ビッグバン直後の様な状態を、人工的につくりだせるのであろうか？
- どのようにつくる？
- どこまで高温に？
- 相転移現象は見つかるの？

背景 ; その 1

高エネルギー宇宙線の観測

- JACEE: Japanese American Cooperative Emulsion Experiment
 - 原子核乾板による高エネルギー原子核衝突の観測

VOLUME 57, NUMBER 26

PHYSICAL REVIEW LETTERS

29 DECEMBER 1986

Average Transverse Momentum and Energy Density in High-Energy Nucleus-Nucleus Collisions

T. H. Burnett, S. Dake, M. Fuki, J. C. Gregory, T. Hayashi, R. Holynski, J. Iwai, W. V. Jones, A. Jurak, J. J. Lord, O. Miyamura,^(a) T. Ogata, T. A. Parnell, T. Saito, S. Strausz, T. Tabuki, Y. Takahashi,^(b) T. Tominaga, B. Wilczynska, R. J. Wilkes, W. Wolter, and B. Wosiek

Institute for Cosmic Ray Research, University of Tokyo, Tanashi, Tokyo 188, Japan

Department of Physics, Kobe University, Kobe 657, Japan

Okayama University of Science, Okayama 700, Japan,

Department of Applied Mathematics, Osaka University, Osaka 560, Japan

Science and Engineering Research Laboratory, Waseda University, Tokyo 162, Japan

Department of Physics and Astronomy, Louisiana State University, Baton Rouge, Louisiana 70803

Space Science Laboratory, Marshall Space Flight Center, National Aeronautics and

Space Administration, Huntsville, Alabama 35812

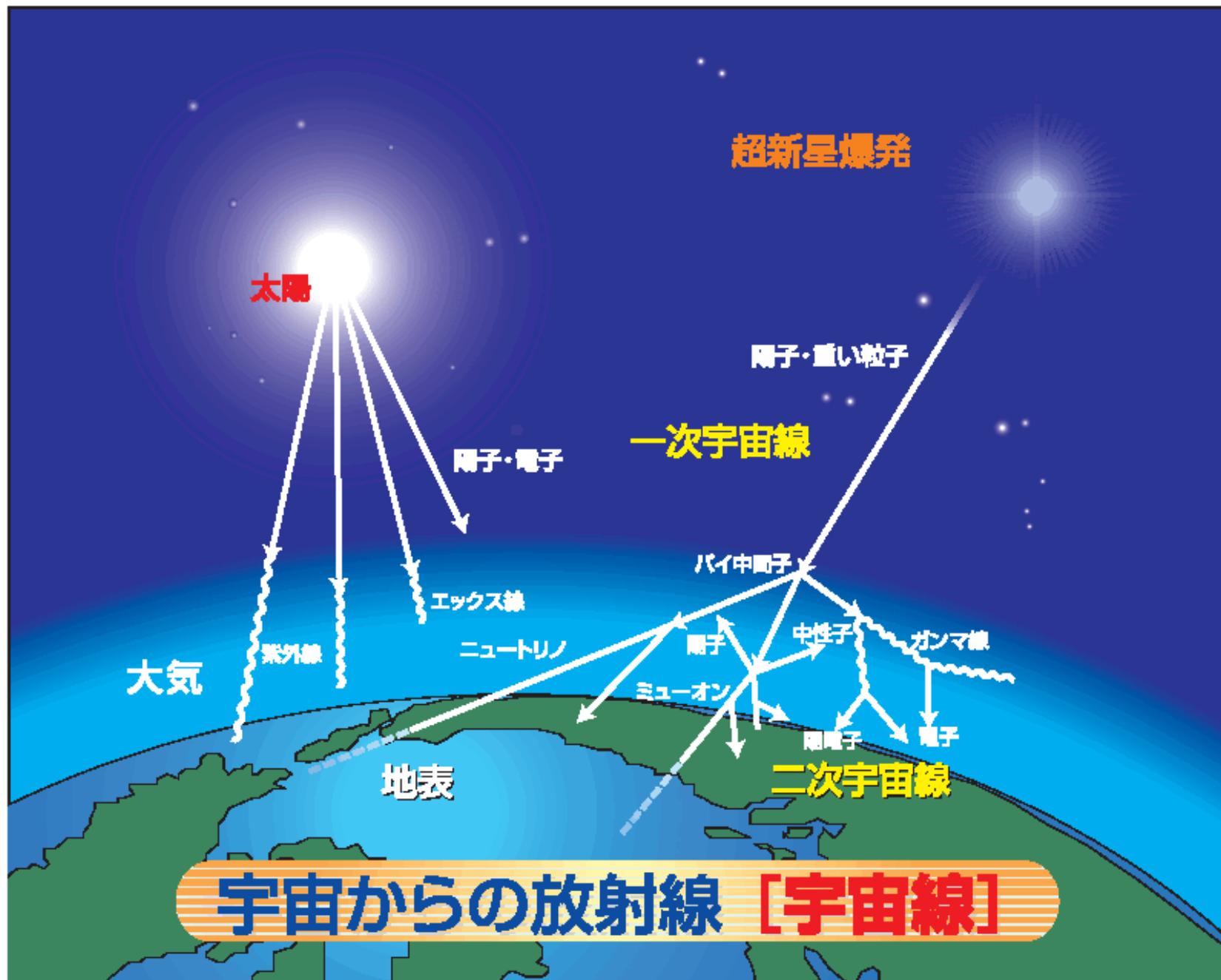
School of Science, University of Alabama in Huntsville, Huntsville, Alabama 35899

Department of Physics, University of Washington, Seattle, Washington 98105

Institute for Nuclear Physics, PL-30-055 Krakow, Poland.

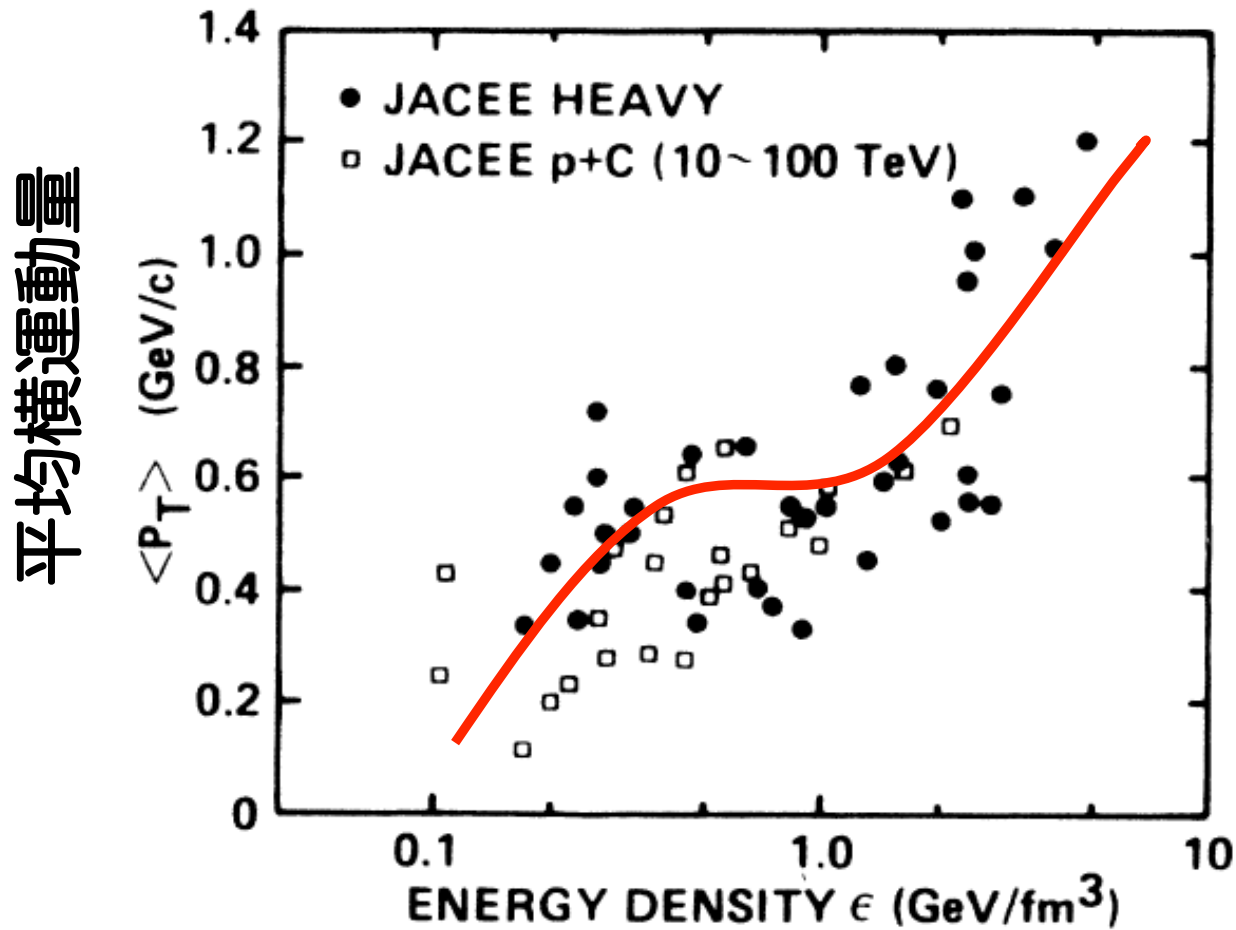
(Received 30 May 1986; revised manuscript received August 27, 1986)

Emulsion chambers were used to measure the transverse momenta of photons or π^0 mesons produced in high-energy (≥ 1 TeV/amu) cosmic-ray nucleus-nucleus collisions. A group of events having large average transverse momenta has been found which apparently exceeds the expected limiting values. Analysis of the events at early interaction times, of the order of 1 fm/c, indicates that the observed transverse momentum increases with both rapidity density and energy density.



- http://www.ies.or.jp/japanese/mini/houshasen_img/utyusen.gif

$\epsilon > 1 \text{ GeV/fm}^3$ での $\langle p_T \rangle$ の急激な増加！



JACEE: PRD 57 (1986) 3249

エネルギー密度

FIG. 3. Correlation of $\langle p_T \rangle$ with the energy density ϵ . Full circles are for individual nucleus events ($2 \leq Z \leq 26$) and open squares are for proton-lucite events.

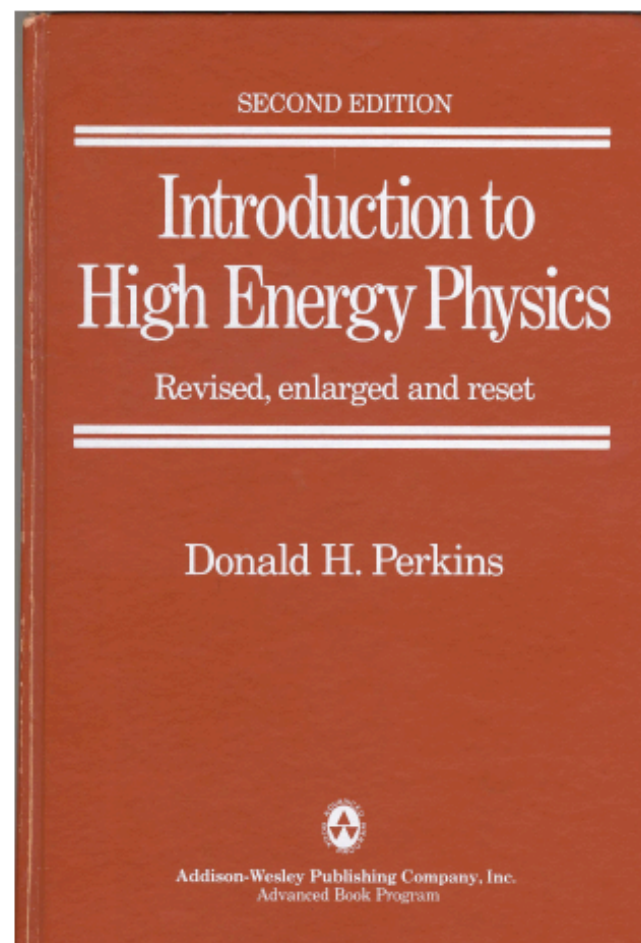
背景；その2

宇宙線による多粒子発生現象（原子核衝突）

固定標的；
衝突エネルギー5 TeV/核子
の原子核衝突イベント



宇宙線の多重発生イベント



2009.11.11 Heavy Ion Café, 松井氏のスライドより

背景；その2

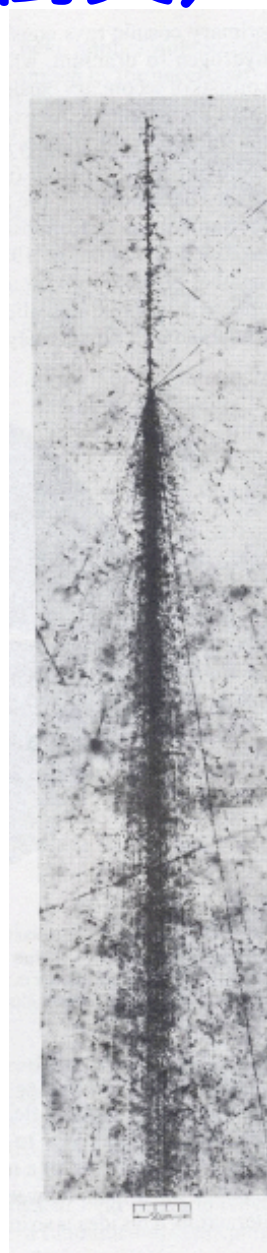
宇宙線による多粒子発生現象（原子核衝突）

宇宙線中の鉄原子核

$E = 5000 \text{ GeV/核子} = 5 \text{ TeV/核子}$

と原子核乾板との原子核・原子核衝突現象

Fig. 1.1 Collision of a primary cosmic-ray iron nucleus, of energy 5000 GeV per nucleon, with a nucleus in nuclear photographic emulsion, carried by balloon in the stratosphere. Both nuclei are fragmented, and in addition about 200 new particles (mostly pions) are created. The pions decay in flight in the stratosphere, producing leptons (muons and neutrinos). The charged muons form the bulk of the cosmic-ray flux ($\sim 1 \text{ per cm}^2 \text{ per minute}$) at sea level.



1950年代→1980年代

- E. Fermi (熱平衡の概念, 1950)
- L.D. Landau (流体的膨張描像, 1953)
- J. Bjorken (粒子多重生成、粒子描像によるエネルギー密度の定式化, 1983)



E. Fermi



L.D. Landau



J. Bjorken

Progress of Theoretical Physics, Vol. 5, No. 4, July~August, 1950

High Energy Nuclear Events

ENRICO FERMI

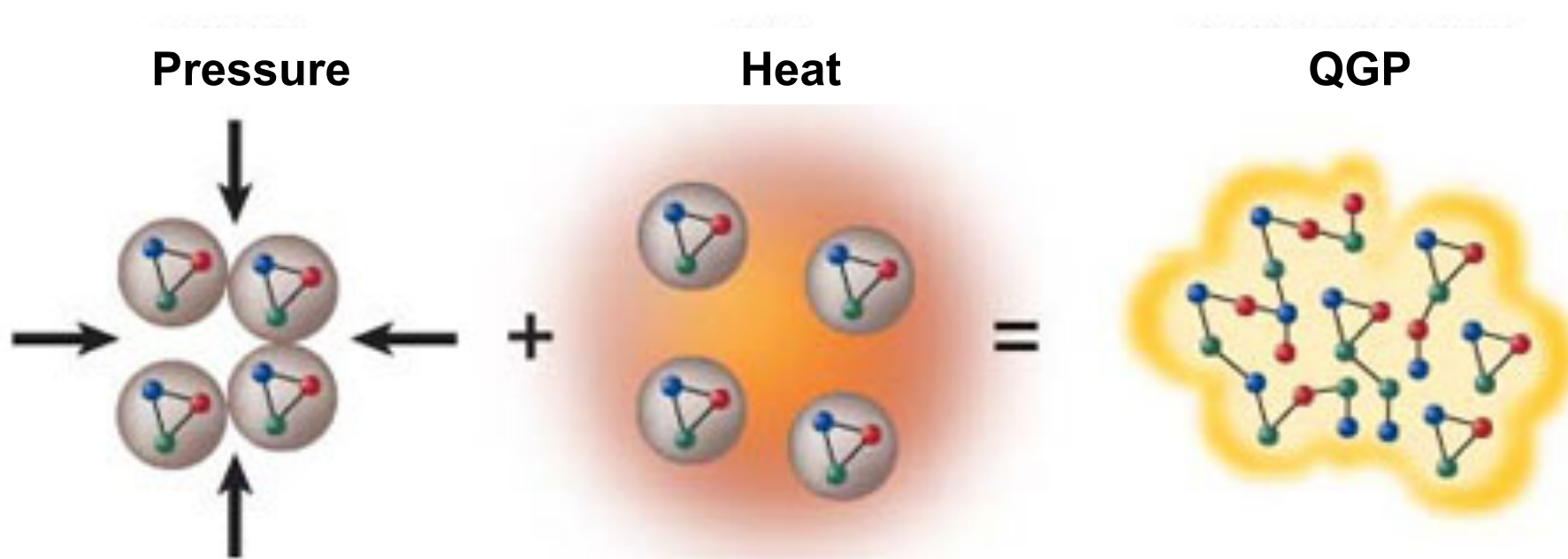
*Institute for Nuclear Studies
University of Chicago
Chicago, Illinois*

(Received June 30, 1950)

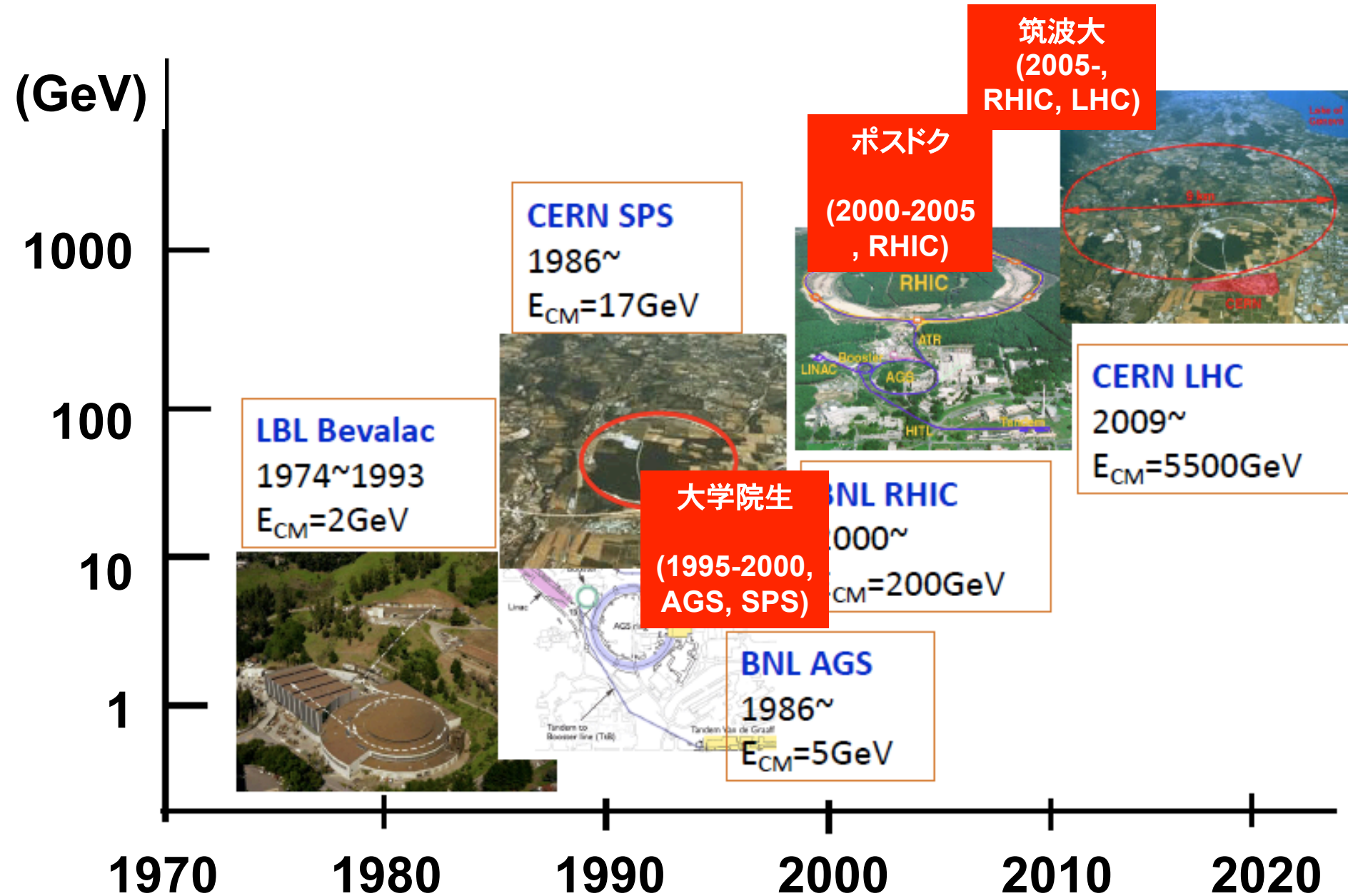
Abstract

A statistical method for computing high energy collisions of protons with multiple production of particles is discussed. The method consists in assuming that as a result of fairly strong interactions between nucleons and mesons the probabilities of formation of the various possible numbers of particles are determined essentially by the statistical weights of the various possibilities.

クォークの閉じ込めをやぶり、
クォーク・グルーオンのプラズマ状態を
人工的に作るれるのか？



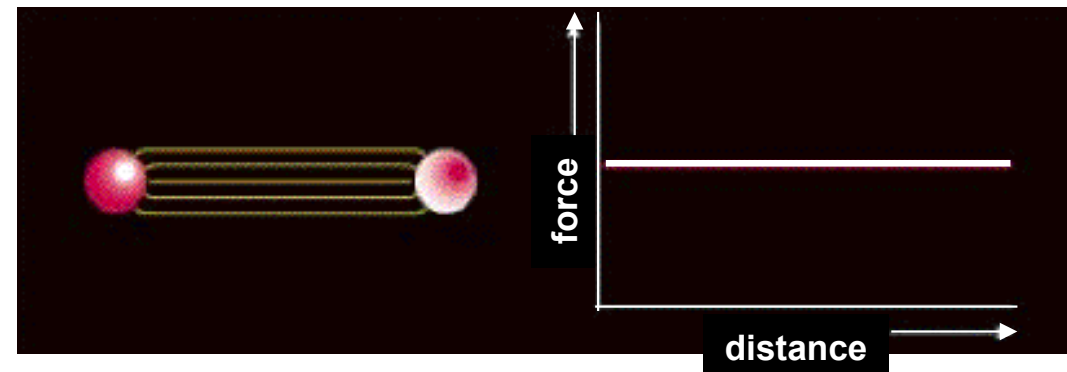
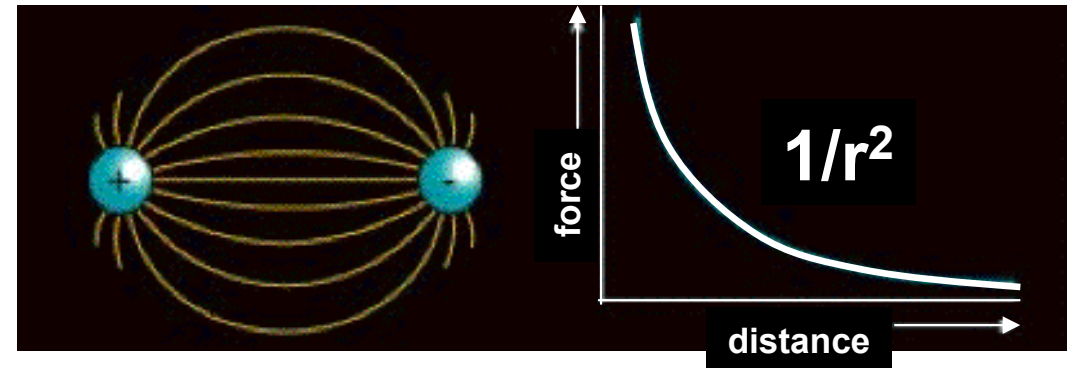
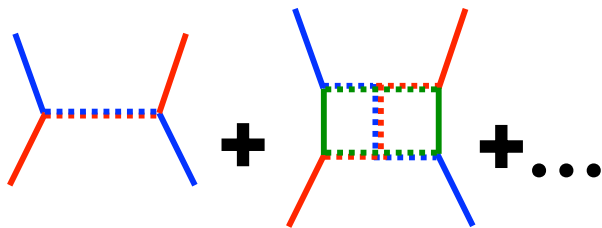
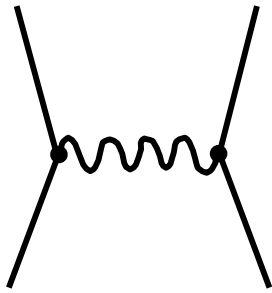
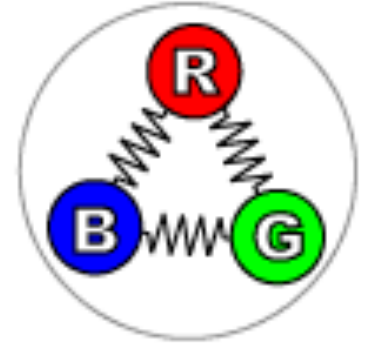
重イオン加速器発展の歴史



2. 量子色力学と クォーク・グルーオンプラズマ

QED (量子電磁気学) と QCD (量子色力学)

- QED (アーベリアン):
 - 光子：電磁力の媒介粒子、電荷なし
 - フラックスの閉じ込めなし $\Rightarrow 1/r$ ポテンシャル $\Rightarrow 1/r^2$ の力
- QCD (非アーベリアン):
 - グルーオン：強い力の媒介粒子、色電荷を持つ (赤, 緑, 青) \otimes (反赤, 反緑, 反青)
 - フラックスチューブを形成 $\Rightarrow \sim r$ ポテンシャル \Rightarrow 一定の力
 - クォークの (ハドロン内部) での閉じ込め



強い相互作用の理論（QCD）における漸近的自由性の発見



The Nobel Prize in Physics 2004

"for the discovery of asymptotic freedom in the theory of the strong interaction"



David J. Gross

🕒 1/3 of the prize

USA

University of California,
Kavli Institute for
Theoretical Physics
Santa Barbara, CA, USA

b. 1941



H. David Politzer

🕒 1/3 of the prize

USA

California Institute of
Technology (Caltech)
Pasadena, CA, USA

b. 1949



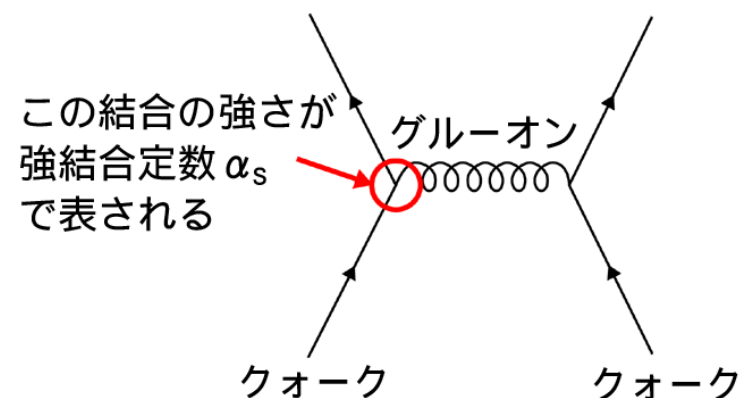
Frank Wilczek

🕒 1/3 of the prize

USA

Massachusetts Institute
of Technology (MIT)
Cambridge, MA, USA

b. 1951



クォーク・グルーオンプラズマ(QGP)とは？

Lattice QCD Calculations
F. Karsch, Lect. Notes Phys. 583 (2002) 20

理想ステファン・ボルツマン方程式
(エネルギー密度 ε と温度 T の関係)

$$\varepsilon = g \frac{\pi^2}{30} T^4 = 37 \cdot \frac{\pi^2}{30} T^4 \approx 12 T^4$$
$$\approx 12 \cdot \left(\frac{\hbar}{1 \text{ fm}} \right)^4 \approx 2.4 \text{ GeV} / \text{fm}^3$$

QGP 相での自由度

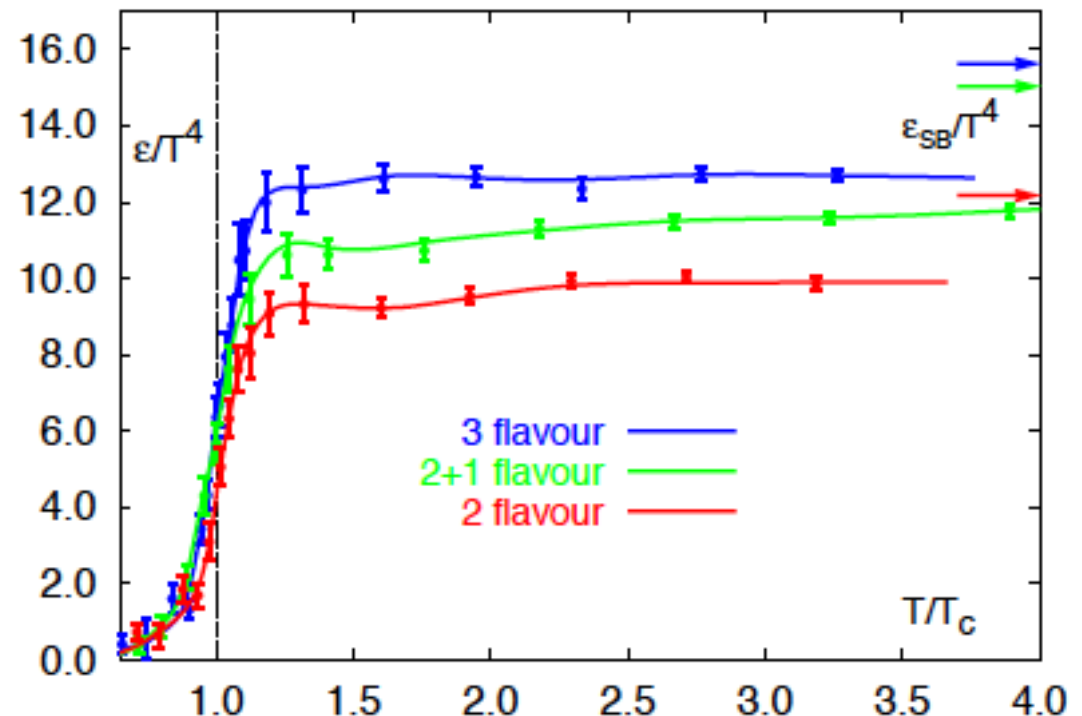
8 グルーオン, 2 スピン;
2 クォークフレーバ (u,d) と反クォーク,
2 スピン, 3 カラー

$g = 37!$ (u,d クォークのみの場合)

ハドロン相での自由度

スピン0 の π^+ , π^- , π^0 中間子が3つで

$$g = 2J+1 = 3$$

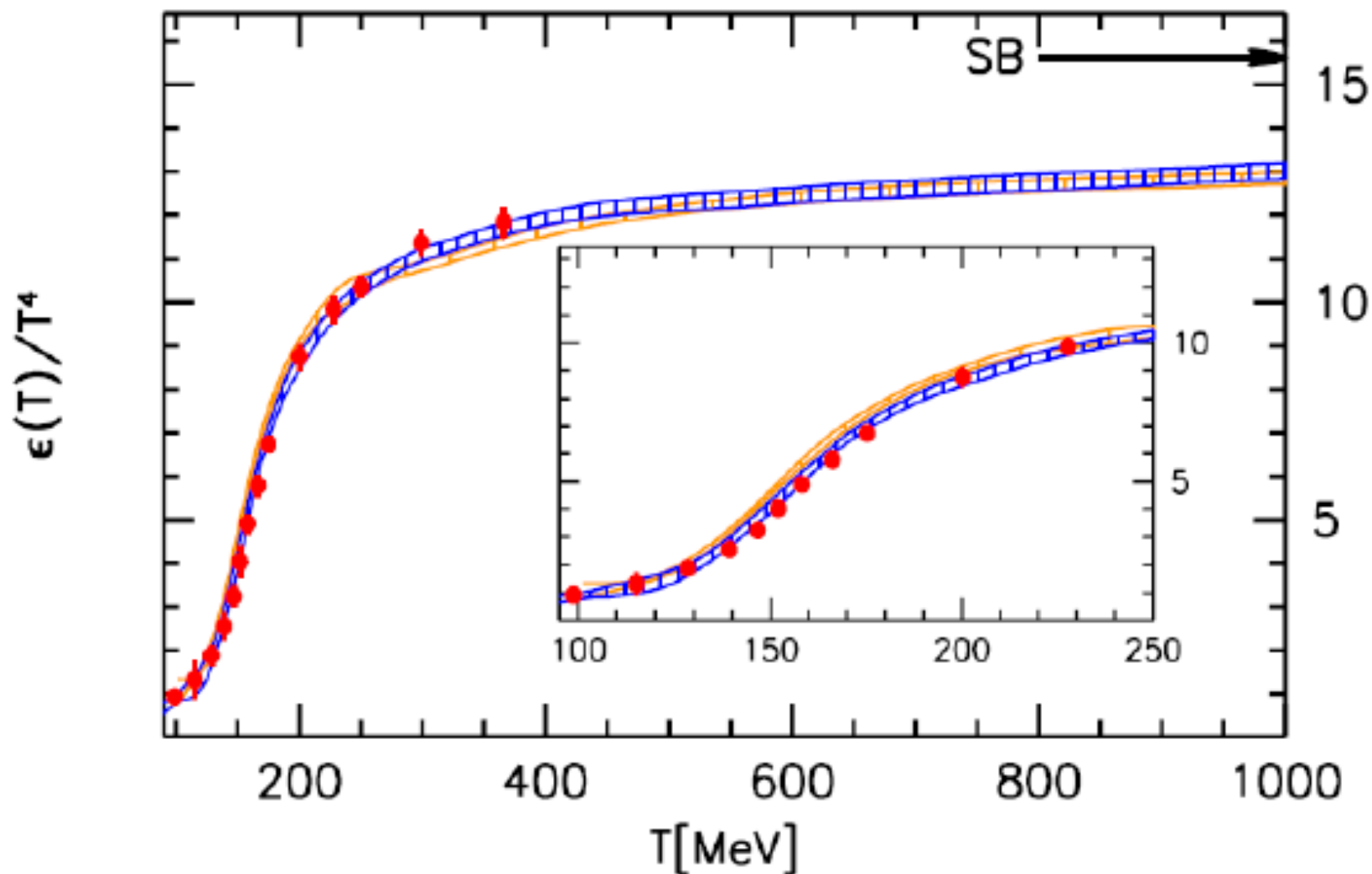


*通常の原子核のエネルギー密度: $\varepsilon = 0.2 \text{ GeV}/\text{fm}^3$

QCD相転移により、通常の原子核の少なくとも10倍以上
のエネルギー密度が生成可能

Lattice QCDの予言: $T_c \sim 170 \text{ MeV}$ 20

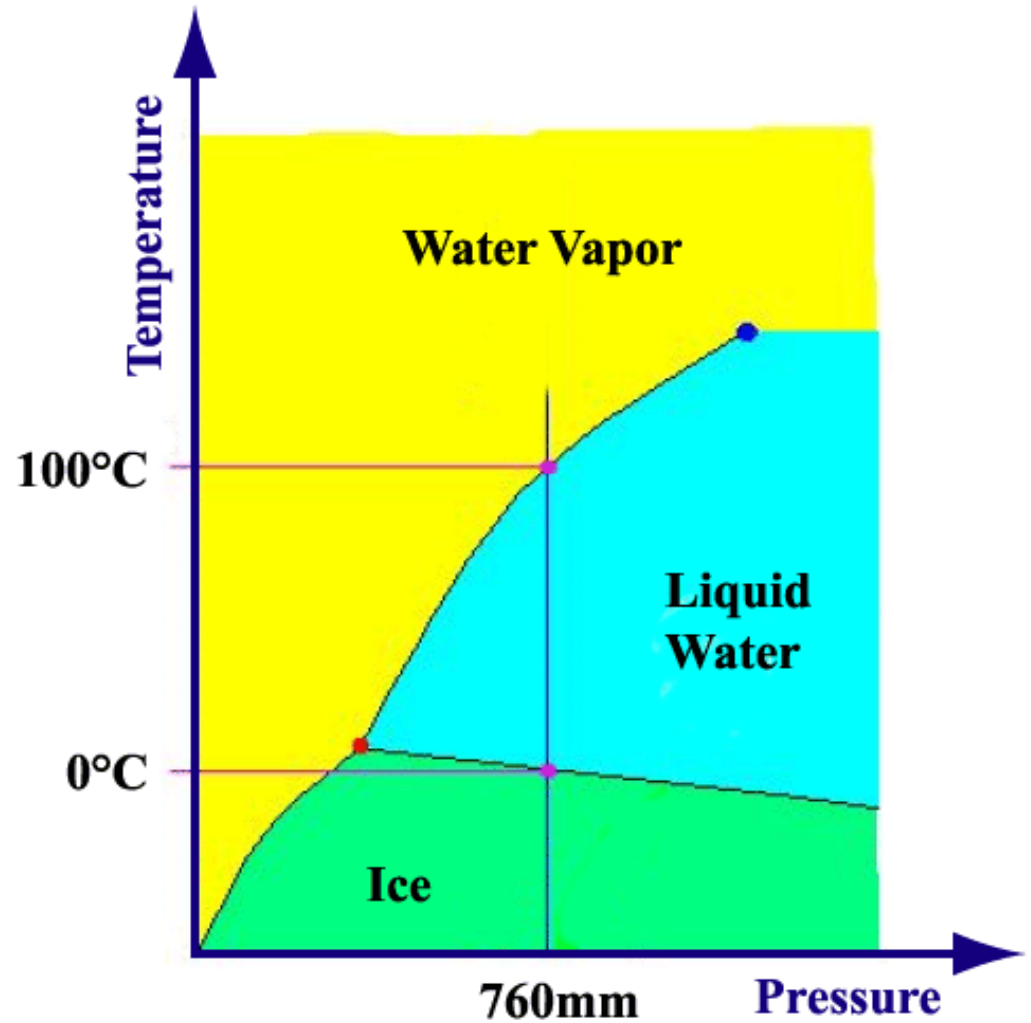
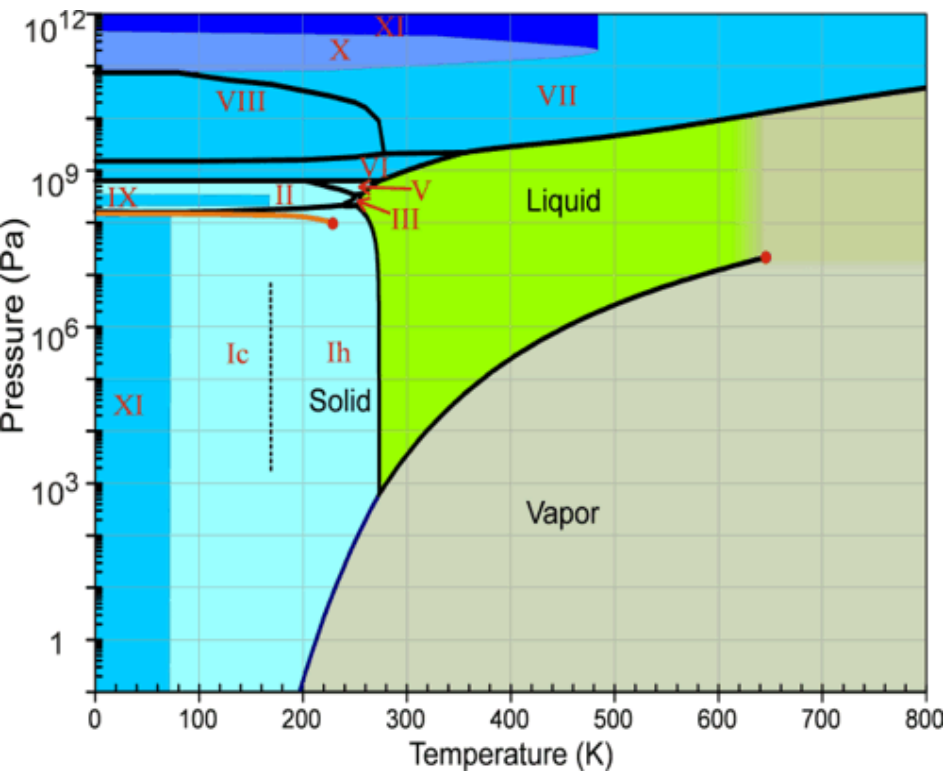
最近の 格子 QCD 計算結果



Wuppertal-Budapest's LQCD EOS
JHEP 1011 (2010)77

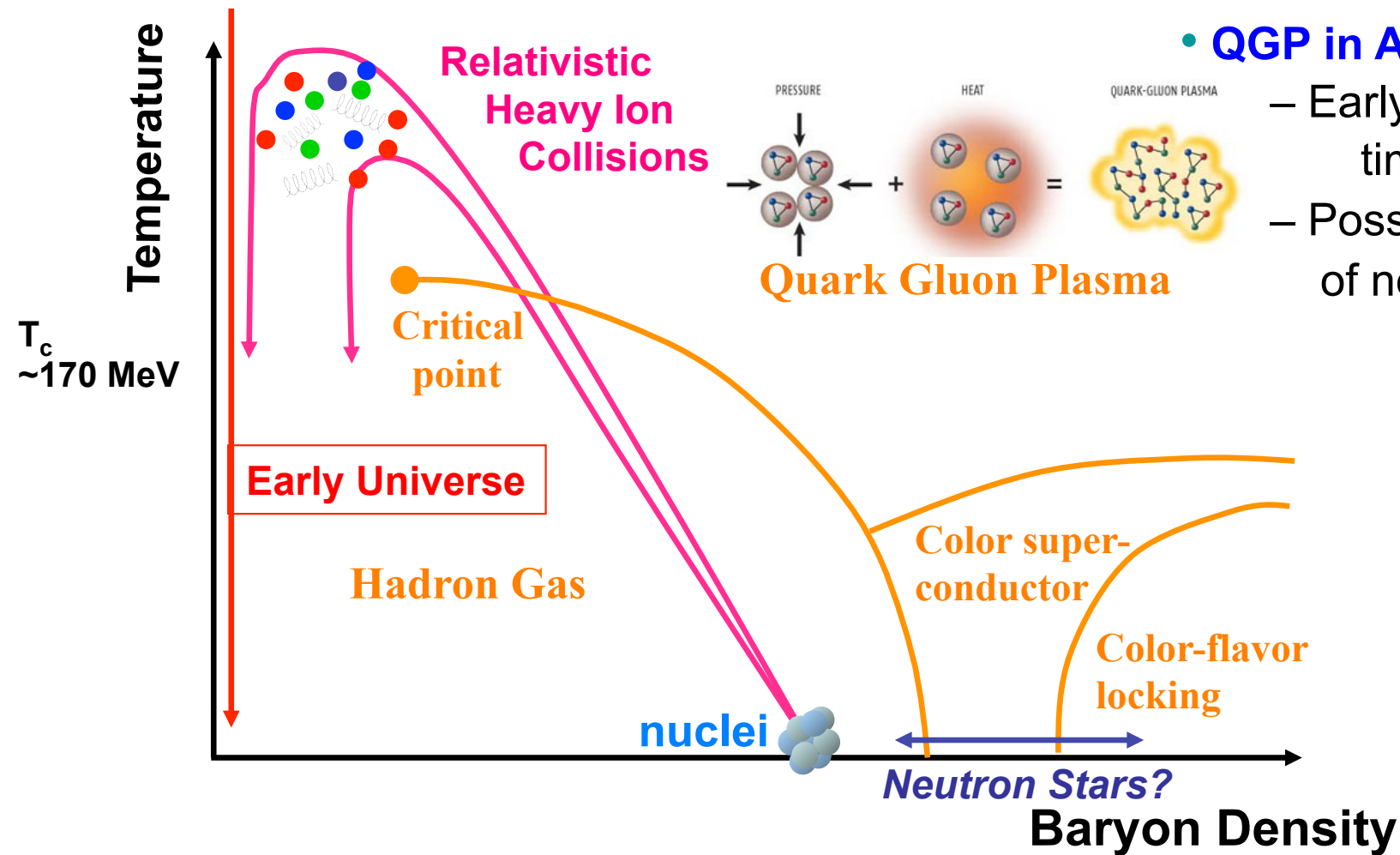
確かに $T = 150-200$ MeV
のところで相転移がありそうだ！

水の相図



http://www.colorado.edu/physics/phys4230/phys4230_sp03/mainPage5.html

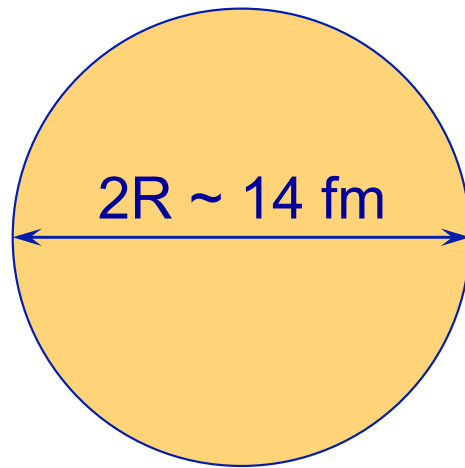
QCD物質(ハドロン)の相図



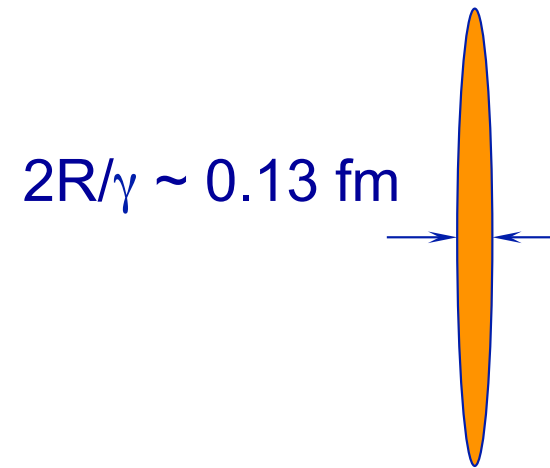
- QGP in Nuclear Physics

- Create at the lab. by heavy ion collisions
- Study the nature of QCD matter at the extreme temperature and energy density

相対論的な速度で動く原子核 (金の場合)



静止系



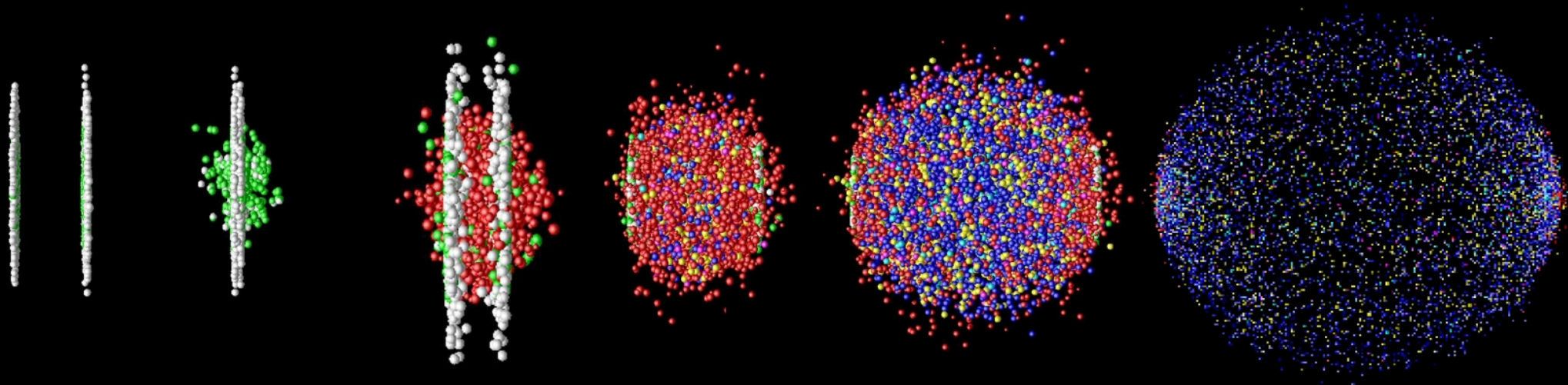
ブーストしている系

$$\beta = \frac{v}{c}, \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$



$t = -19.800$

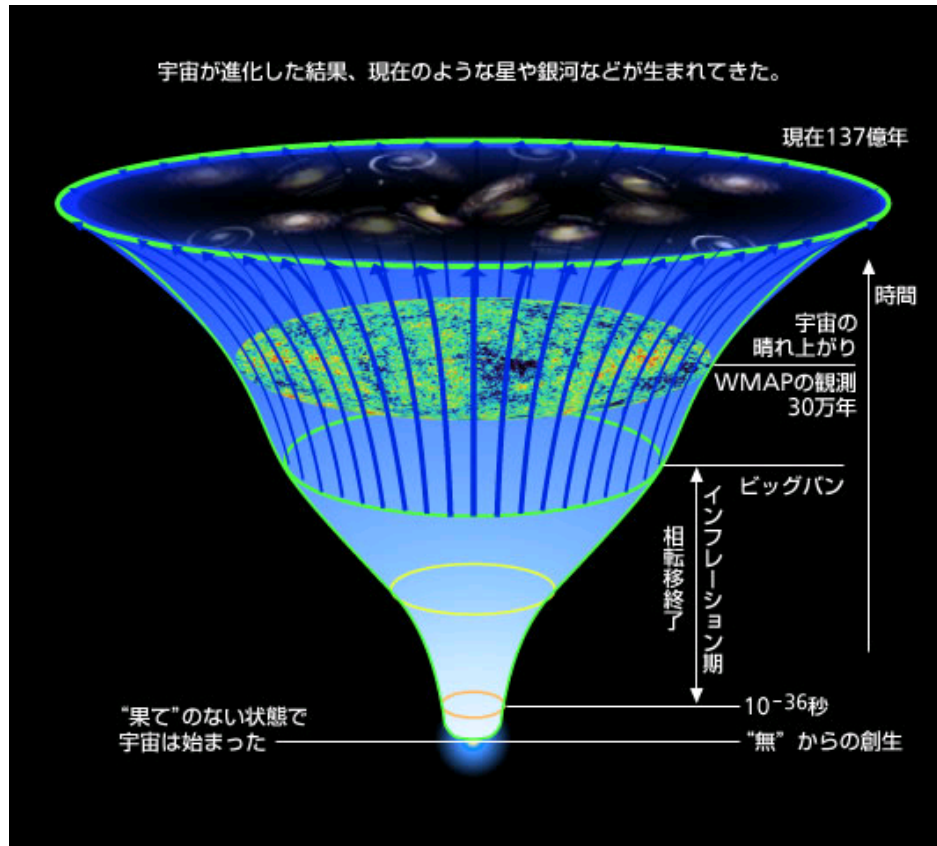
高エネルギー原子核衝突はダイナミカル！ (衝突系の時空発展)



(1)衝突前 (2)衝突直後 (3)パートン散乱 (4)熱平衡、QGP生成 (5)ハドロン生成 (6)膨張とともに終状態へ



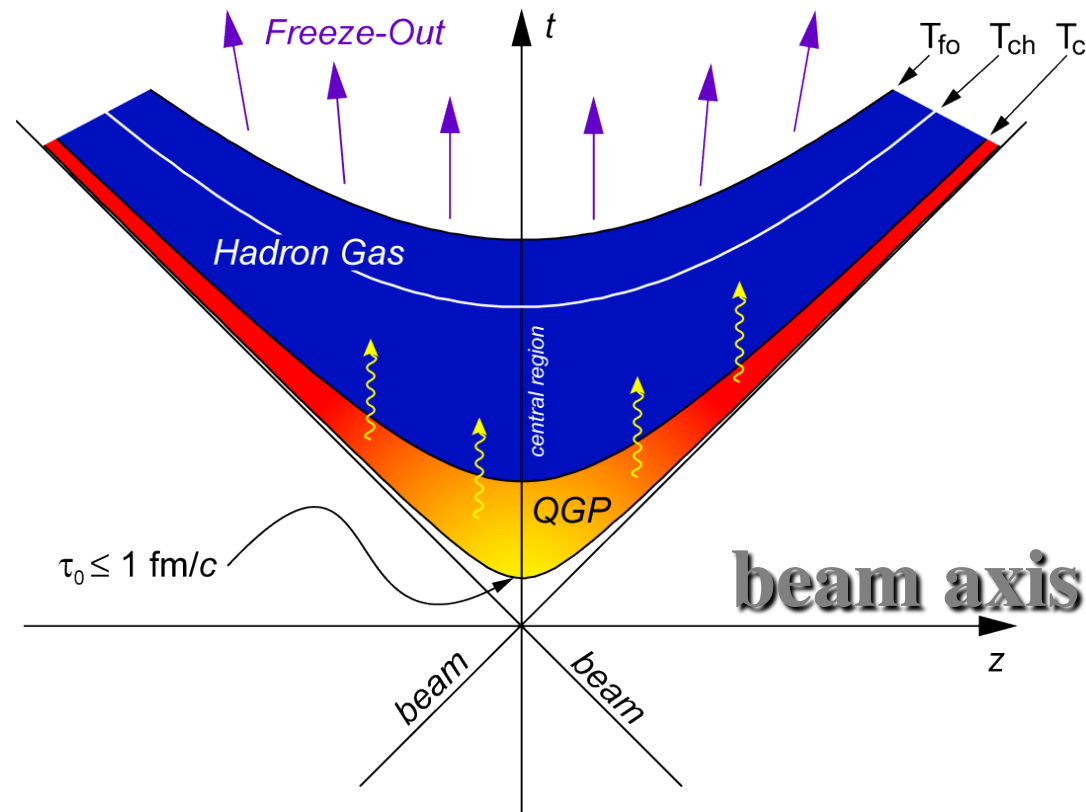
ビックバン vs. リトルバン



3D Hubble expansion

Figure adopted from

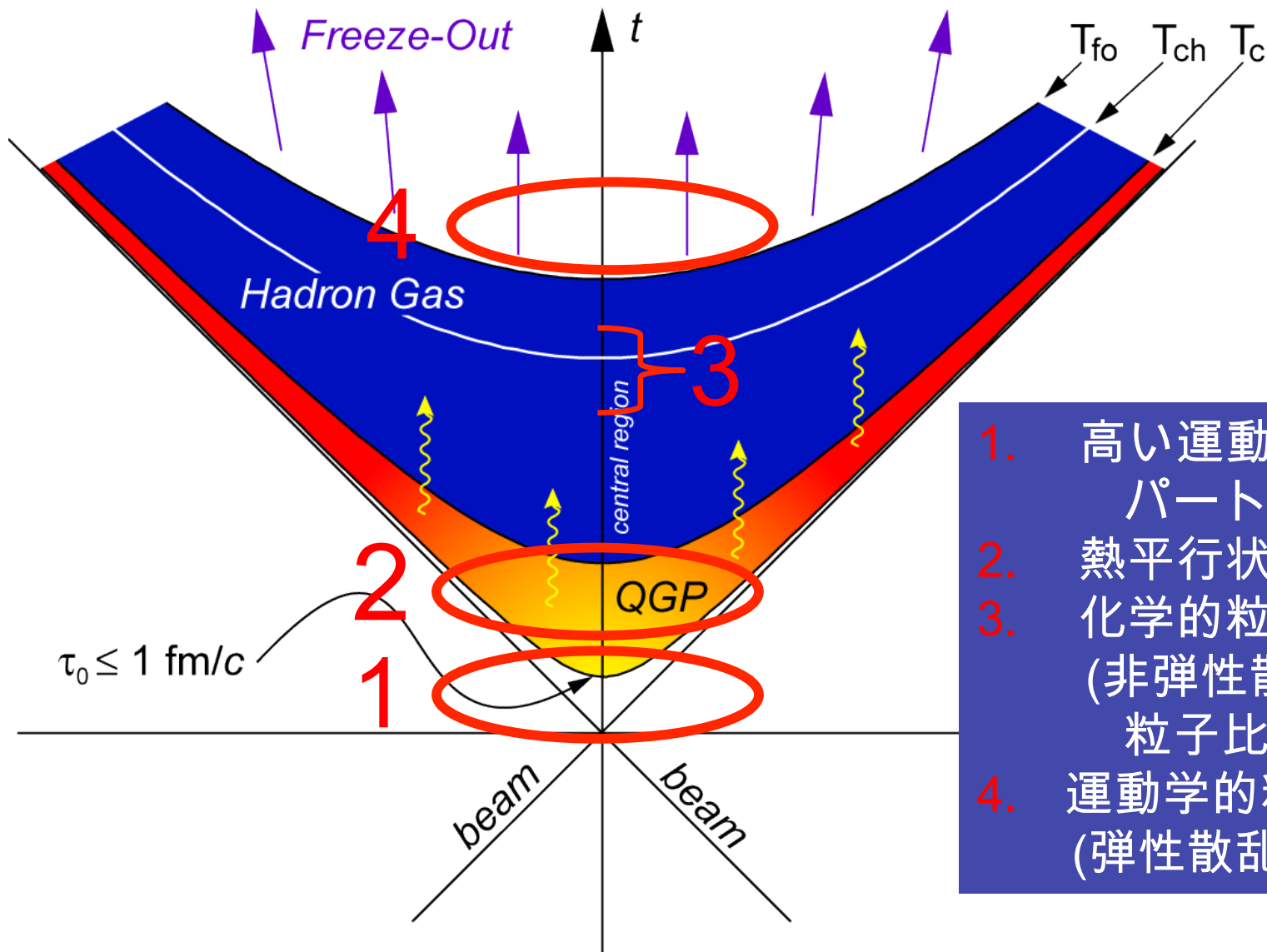
<http://www-utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~sato/index-j.htm>



**Nearly 1D Hubble expansion*
+ 2D transverse expansion**

***Bjorken('83)**

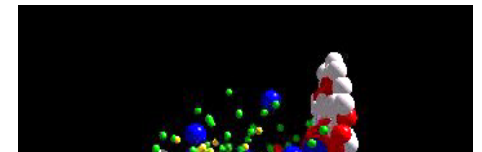
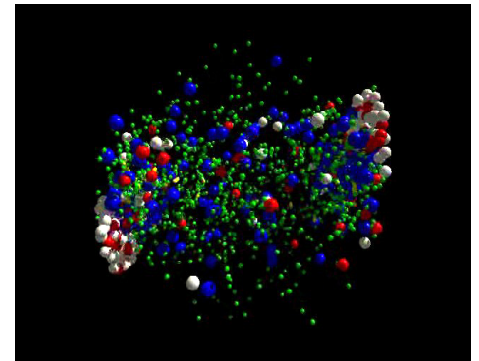
高エネルギー重イオン衝突の時空発展



1. 高い運動量移行をともなう
パートン散乱
2. 熱平行状態とQGP生成
3. 化学的粒子凍結
(非弾性散乱が終わり、
粒子比が固定)
4. 運動学的粒子凍結
(弾性散乱が終る)

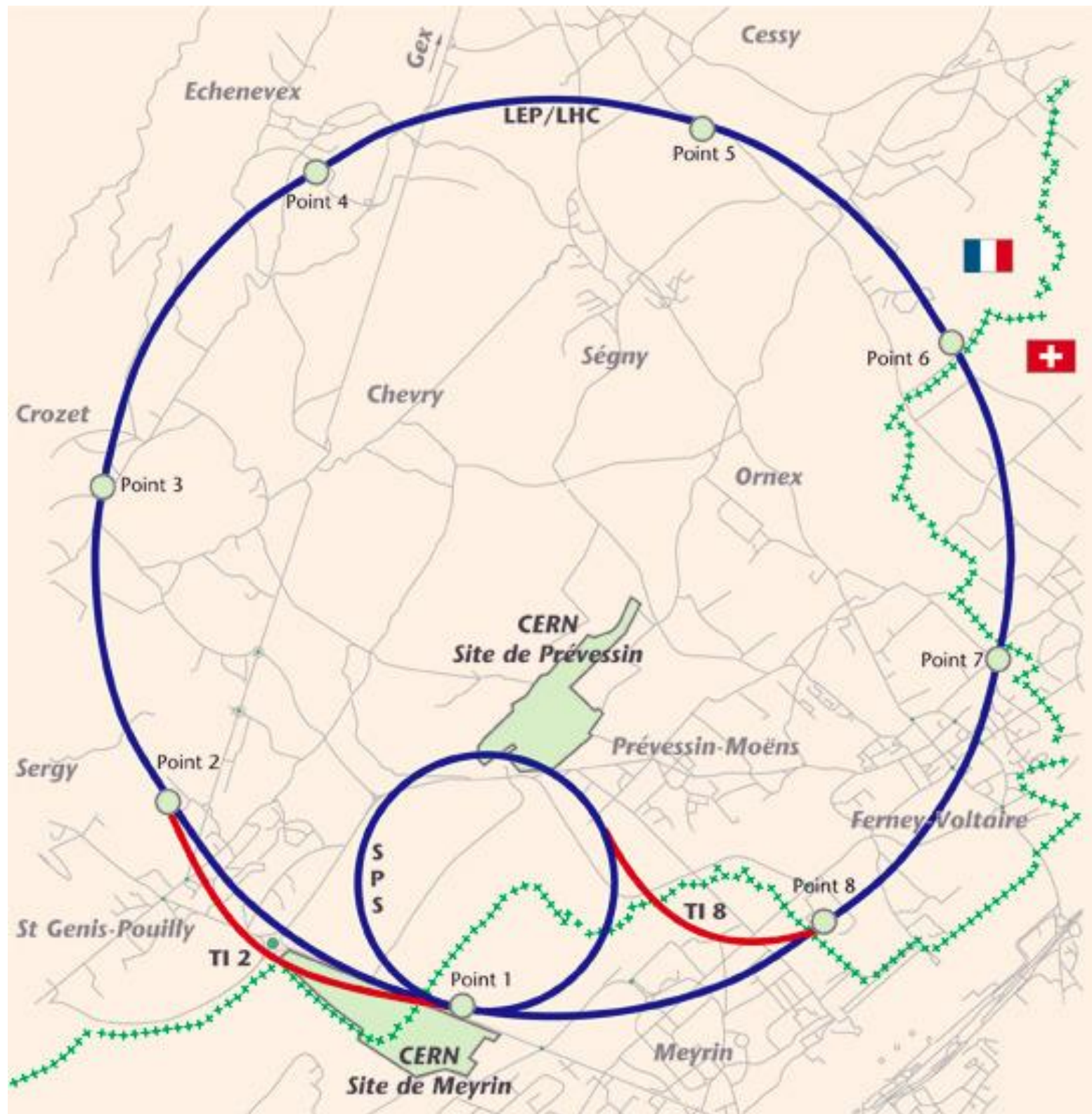
Time scale
 $10\text{fm}/c \sim 10^{-23}\text{sec}$

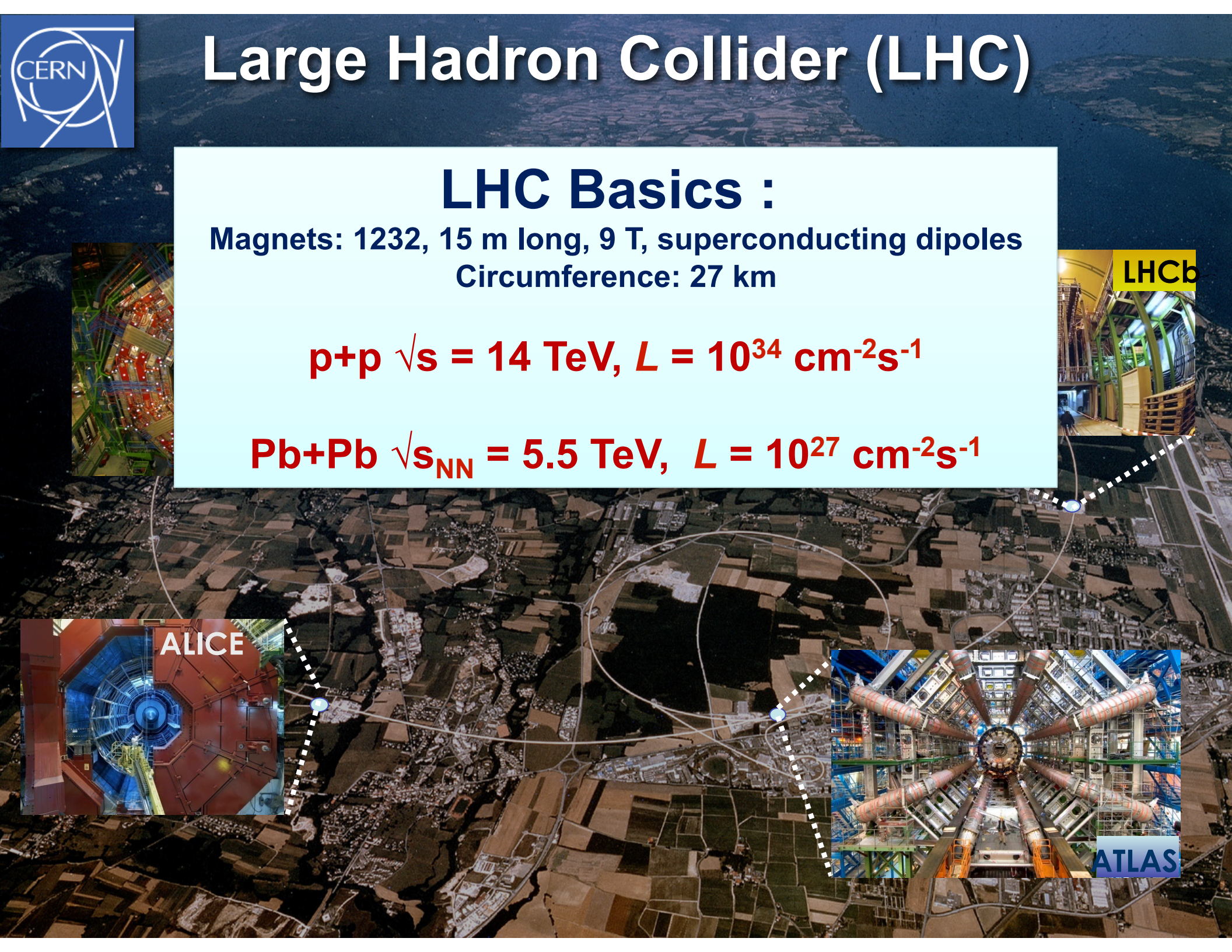
Temperature scale
 $100\text{MeV} \sim 10^{12}\text{K}$



3. LHC加速器における 重イオン実験







Large Hadron Collider (LHC)

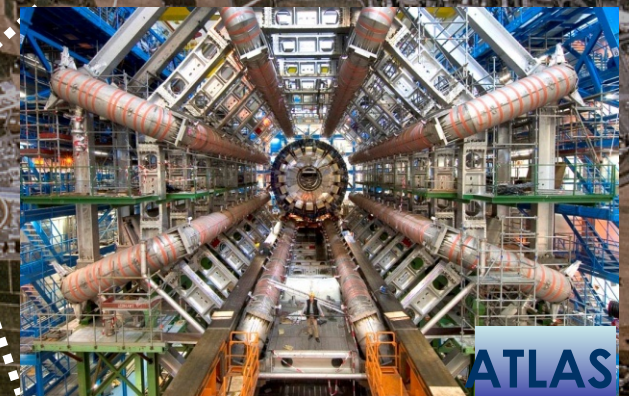
LHC Basics :

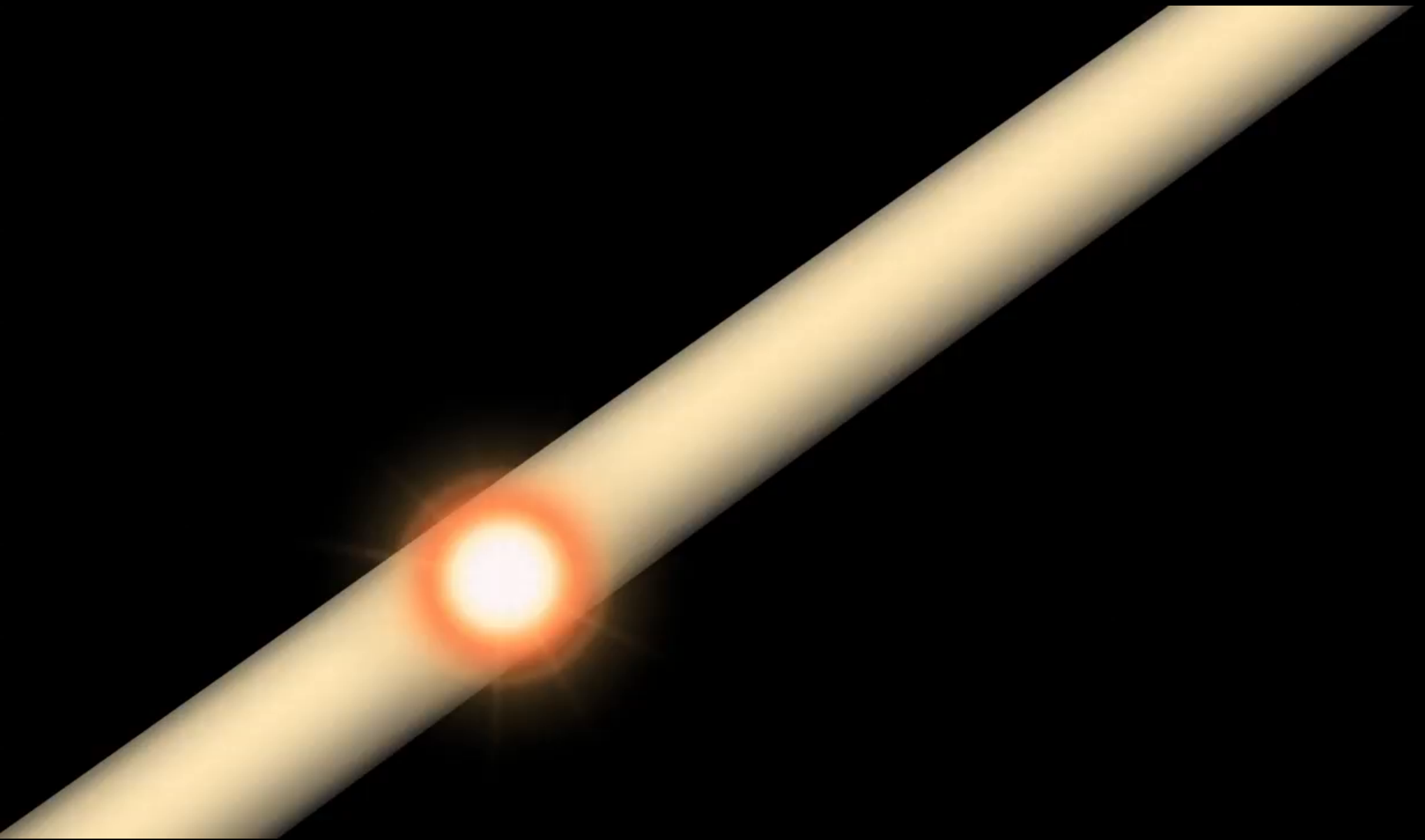
Magnets: 1232, 15 m long, 9 T, superconducting dipoles

Circumference: 27 km

$$p+p \quad \sqrt{s} = 14 \text{ TeV}, L = 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$$

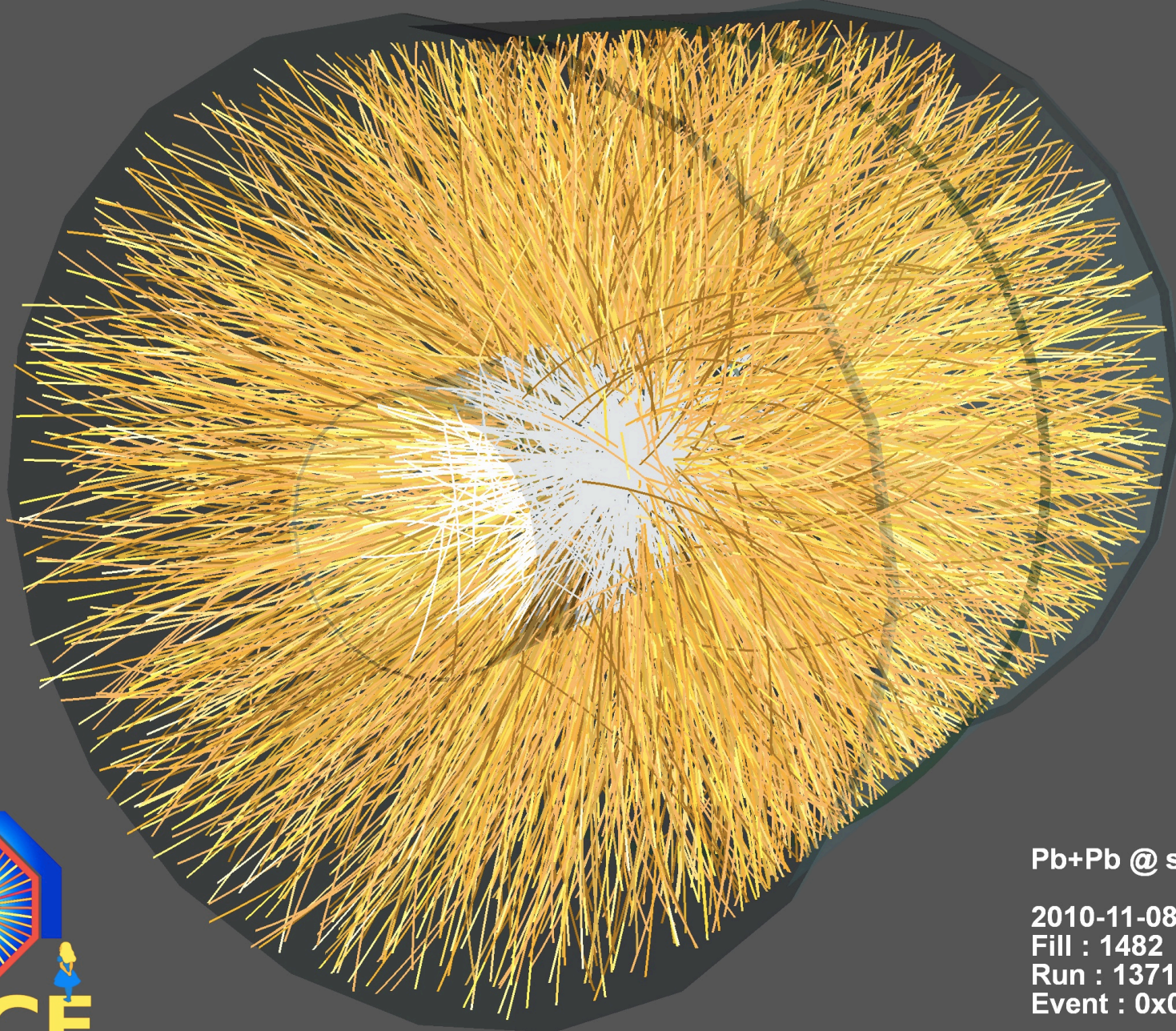
$$Pb+Pb \quad \sqrt{s}_{NN} = 5.5 \text{ TeV}, L = 10^{27} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$$





From ATLAS <http://atlas.ch/>

First Pb+Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV (Nov. 8, 2010, ALICE)



Pb+Pb @ $\sqrt{s} = 2.76$ ATeV

2010-11-08 11:30:46

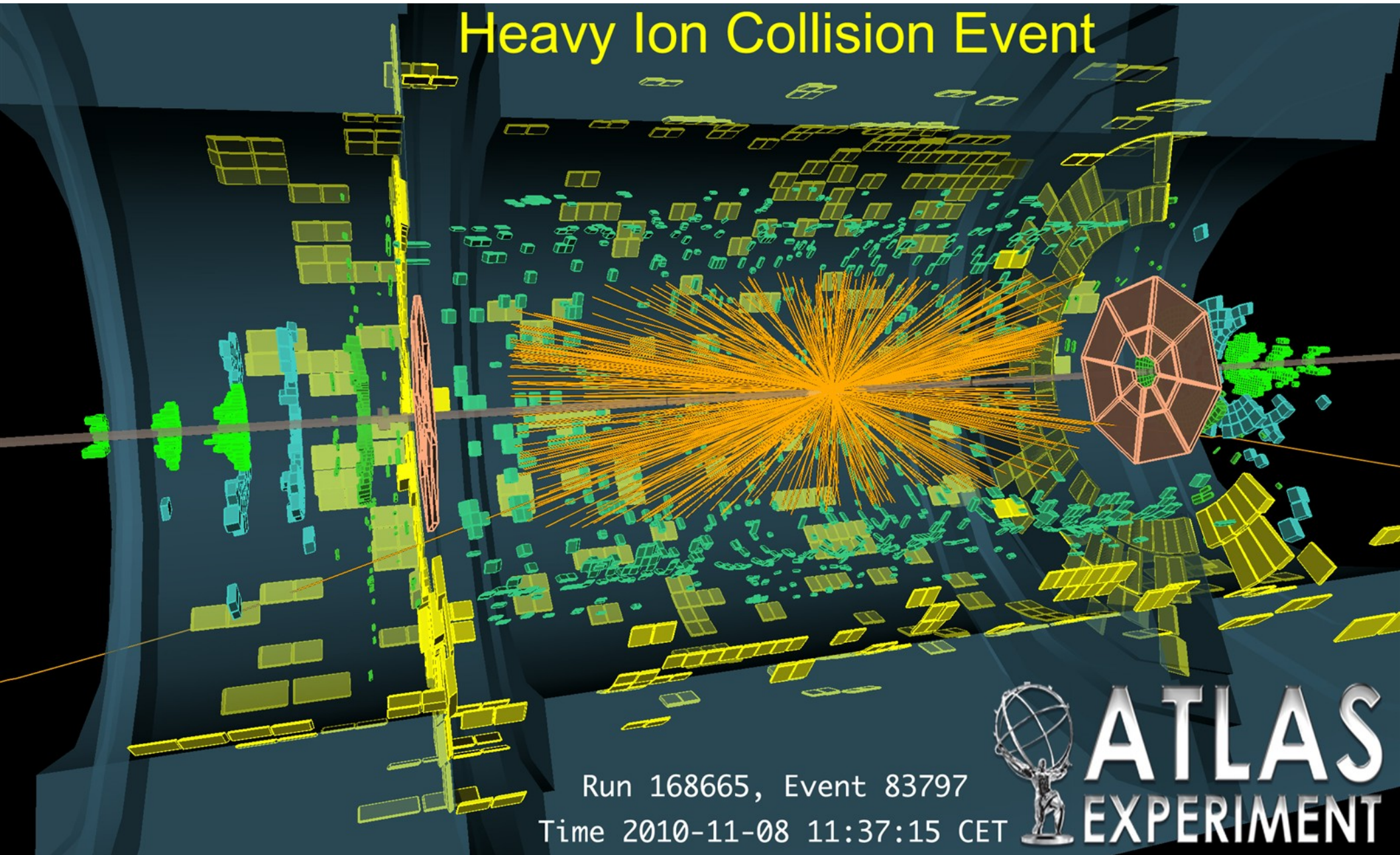
Fill : 1482

Run : 137124

Event : 0x00000000D3BBE693

ATLAS (first Pb+Pb collision)

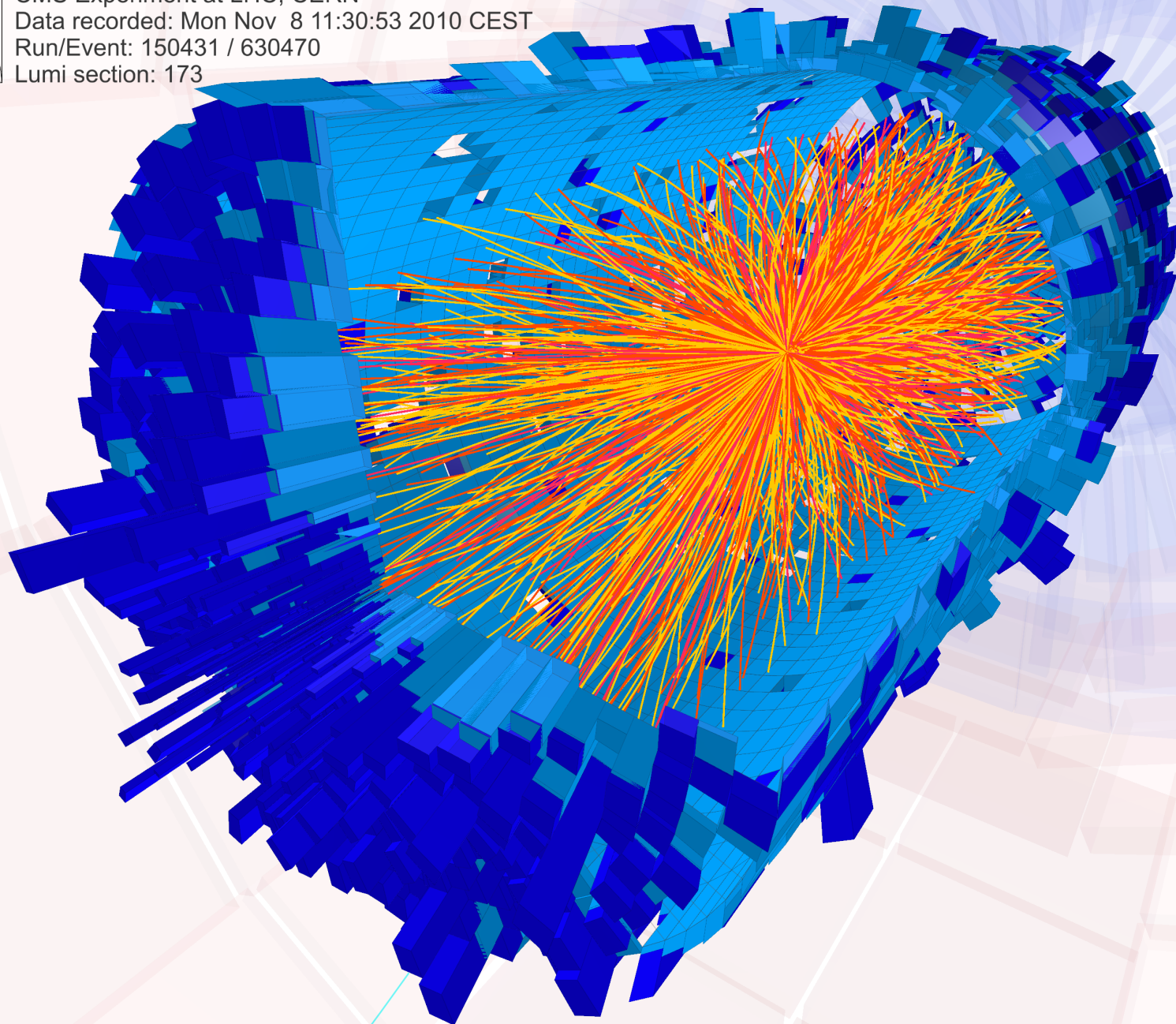
Heavy Ion Collision Event



CMS (first Pb+Pb collision)



CMS Experiment at LHC, CERN
Data recorded: Mon Nov 8 11:30:53 2010 CEST
Run/Event: 150431 / 630470
Lumi section: 173



LHC 加速器の状況とスケジュール

- LHC run history and schedule

- 2009 $p+p$ at $\sqrt{s} = 0.9$ TeV, 2.36 TeV

- 2010-2012

$p+p$ at $\sqrt{s} = 7$ TeV (and 2.76 TeV)

$Pb+Pb$ at $\sqrt{s}_{NN} = 2.76$ TeV

- 2014 full design energy

- expectations in following few years

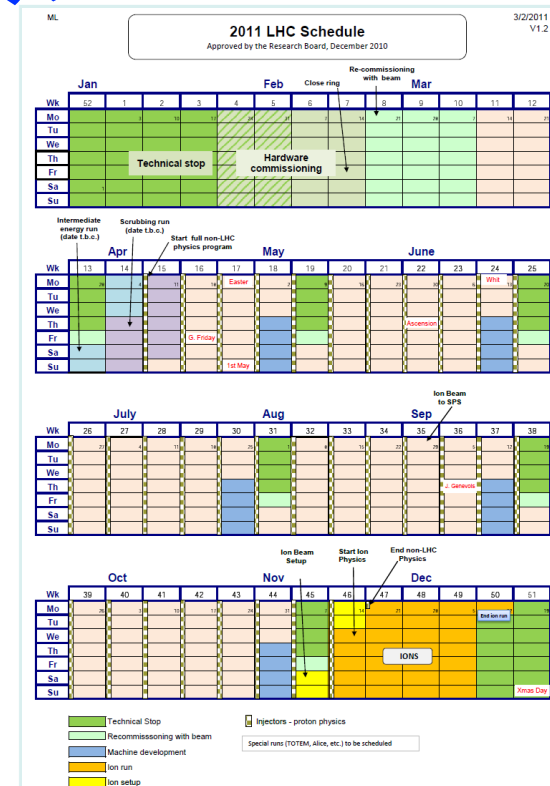
- $p+p$ $\sqrt{s} = 14$ TeV, $10^{31} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ (ALICE), 10^7 s/y

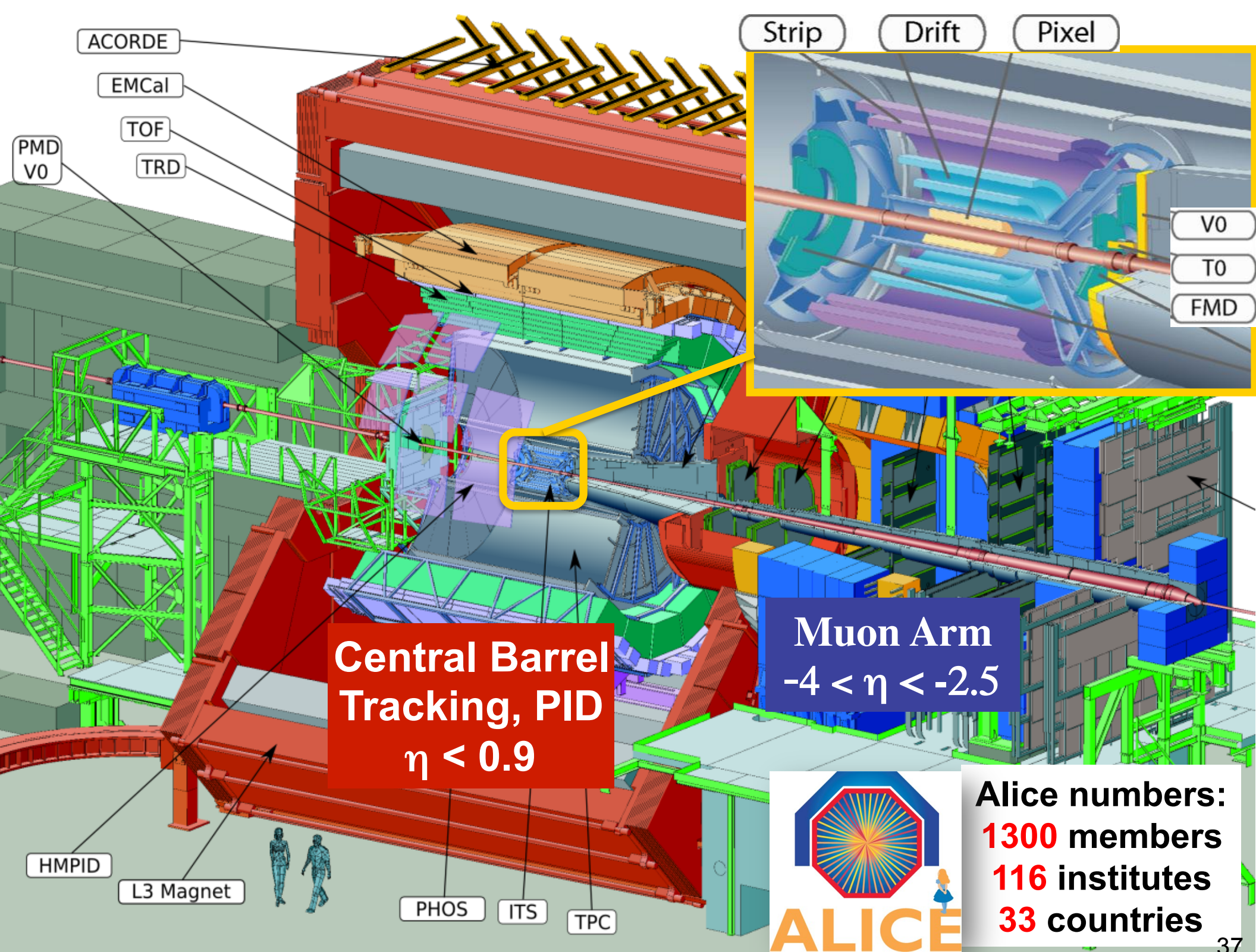
- $\sqrt{s} = 5.5$ TeV, $10^{31} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, $10^6 \text{ s/y} \times 1 \text{ y}$

- $Pb+Pb$ $\sqrt{s}_{NN} = 5.5$ TeV, $10^{27} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, 10^6 s/y

- $p+Pb$ $\sqrt{s}_{NN} = 8.8$ TeV, $10^{29} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, $10^6 \text{ s/y} \times 1 \text{ y}$

- $Ar+Ar$ $\sqrt{s}_{NN} = 6.3$ TeV, $10^{29} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, $10^6 \text{ s/y} \times 1 \text{ y}$







ALICE

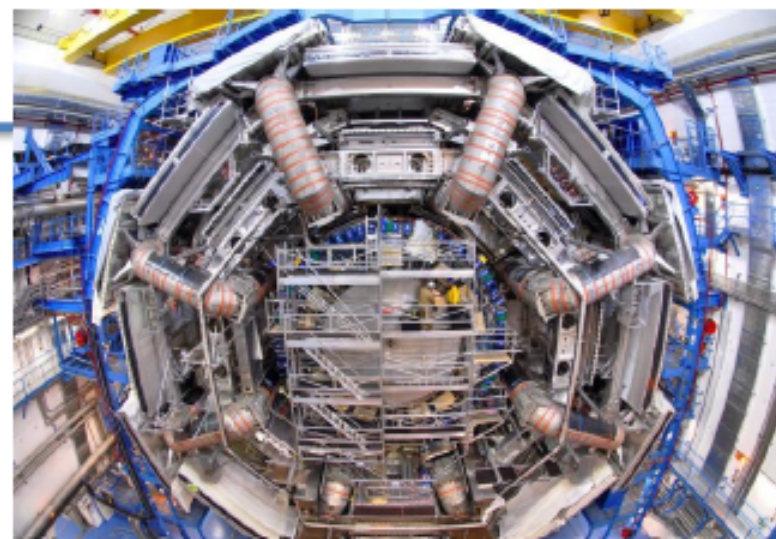
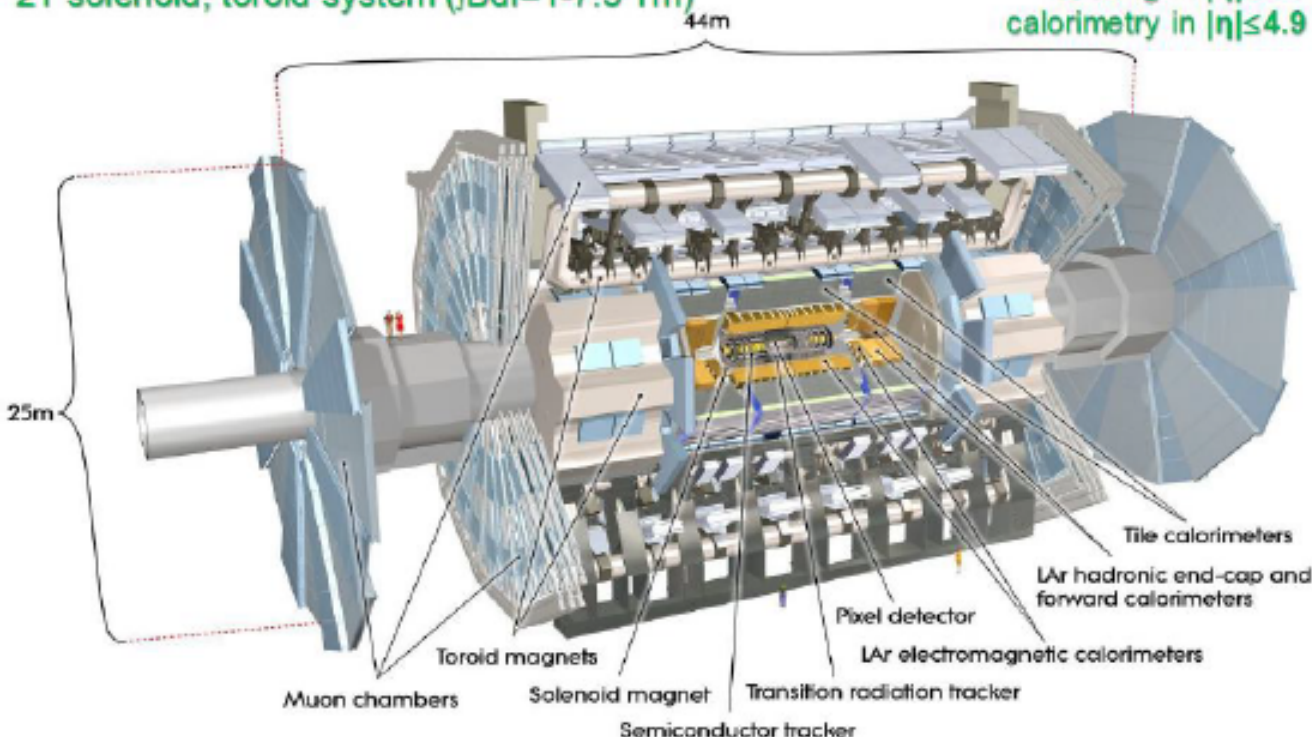
このあたりにいるはず?



ATLAS

2T solenoid, toroid system ($|B_{\text{d}}| = 1\text{--}7.5\text{ Tm}$)

Tracking in $|\eta| \leq 2.5$
calorimetry in $|\eta| \leq 4.9$



- Gigantic general purpose detector with well balanced performance (resolutions/acceptance)
- Emphasis on lepton measurements
 - 2T solenoid for inner tracker
 - Air core (less MS) + Toroid magnet (forward acceptance) for outer muon system
- Accordion shape LAr calorimeters for fine lateral + longitudinal EM shower shape

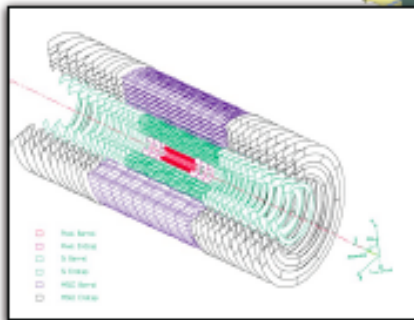
Compact Muon Solenoid

SOLENOID
3.8 T B-field

MUON ENDCAPS

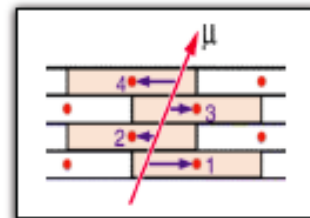
Cathode Strip Chambers (CSC)
Resistive Plate Chambers (RPC)

TRACKER



Silicon Strips
Pixels

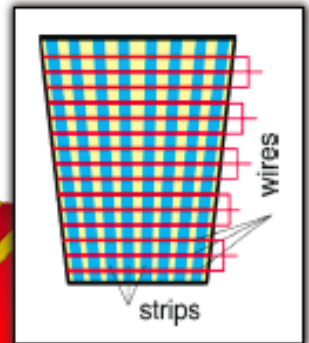
MUON BARREL

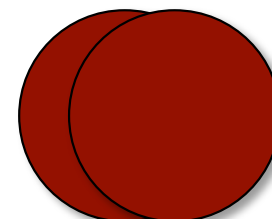
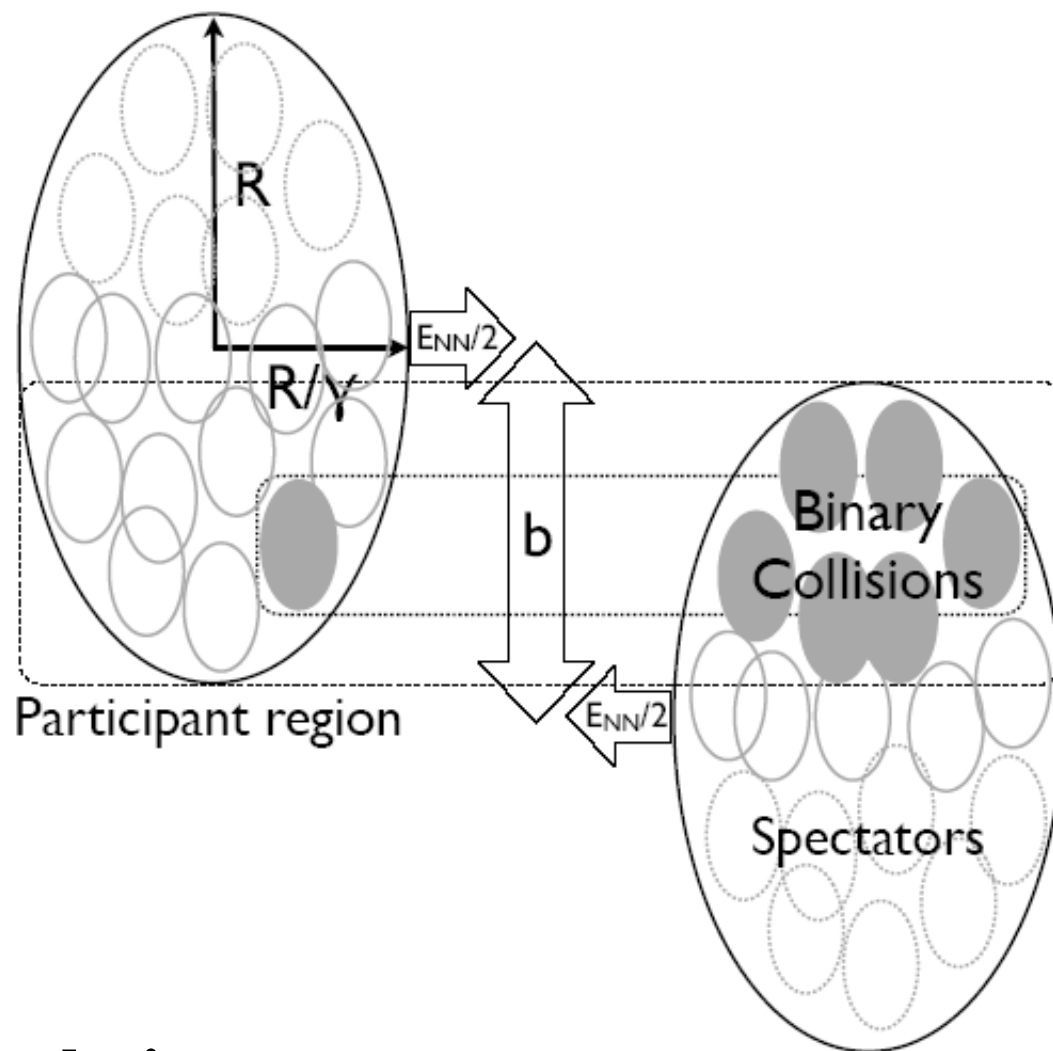


Drift Tube (DT)

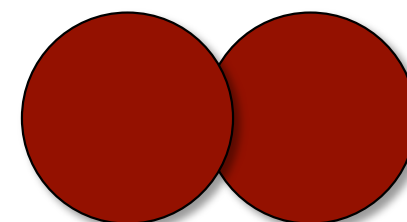


Resistive Plate
Chambers (RPC)





中心衝突
 N_{part} 大



周辺衝突
 N_{part} 小

b: impact parameter

Participant: 衝突に関与した核子

Spectator: 衝突に関与しなかった核子(傍観者)

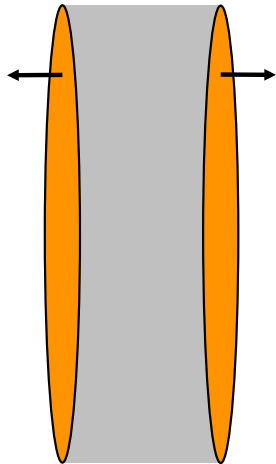
N_{part} : 衝突関与核子数

4. 最近の重イオン実験で 分かったこと

(1) エネルギー密度はどれくらい？

エネルギー密度

定義: E / V



物質中で生成されたすべての粒子をカウントし、物質の体積で割る。

2つの極端なケース:

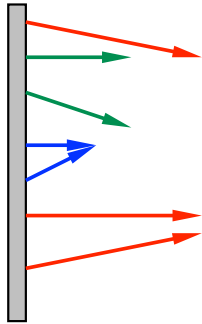
すべてが粒子 **Bjorken**

すべてが流体 **Landau**

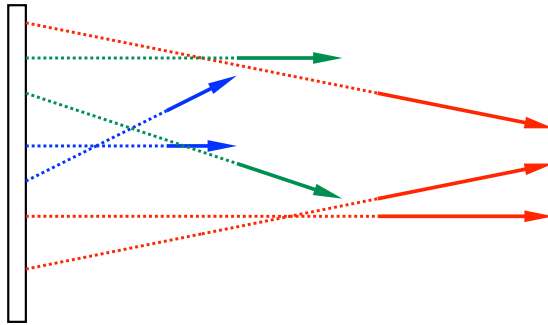
The Bjorken Picture: 粒子描像

Key ideas:

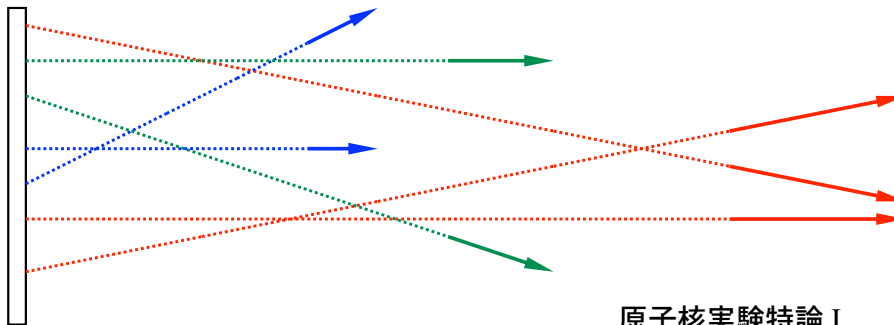
- Thin radiator (粒子を生成する薄いディスク)
- Classical trajectories (古典的軌道)
- Finite formation time
 - 薄いディスクから粒子が放射された後、固有時 τ_{Form} で2次粒子が生成される



Particles in a thin box with
random velocities

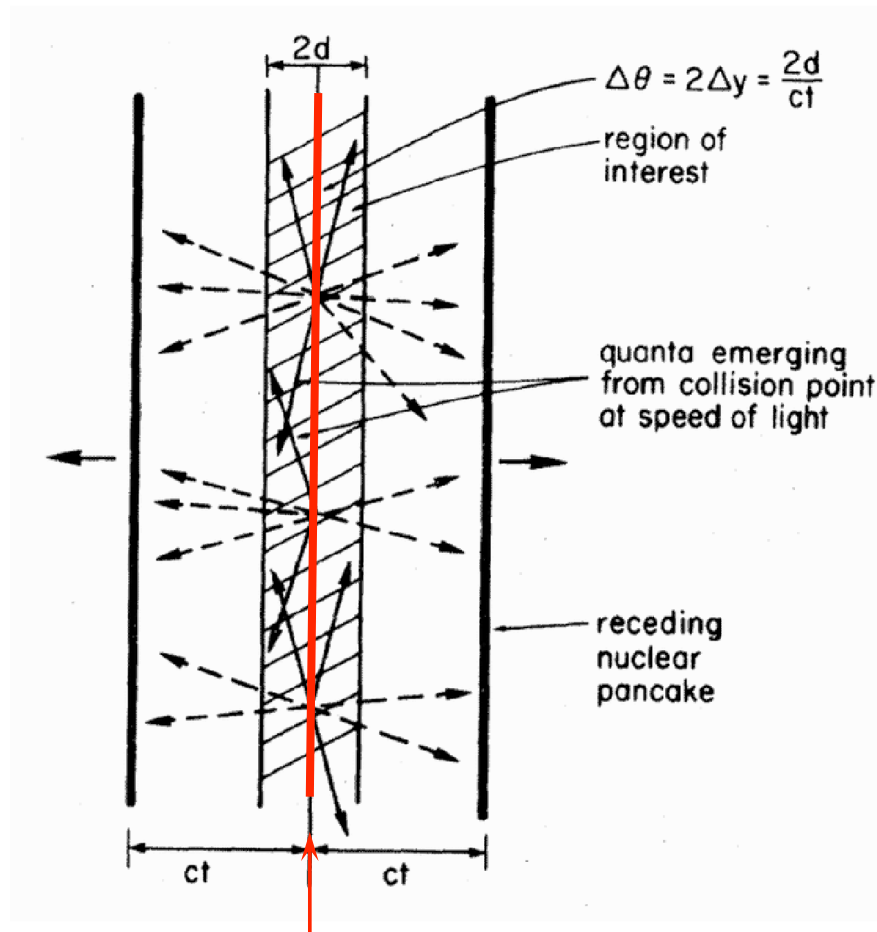


Release them suddenly,
and let them follow
classical trajectories
without interactions



Strong position-
momentum
correlations!

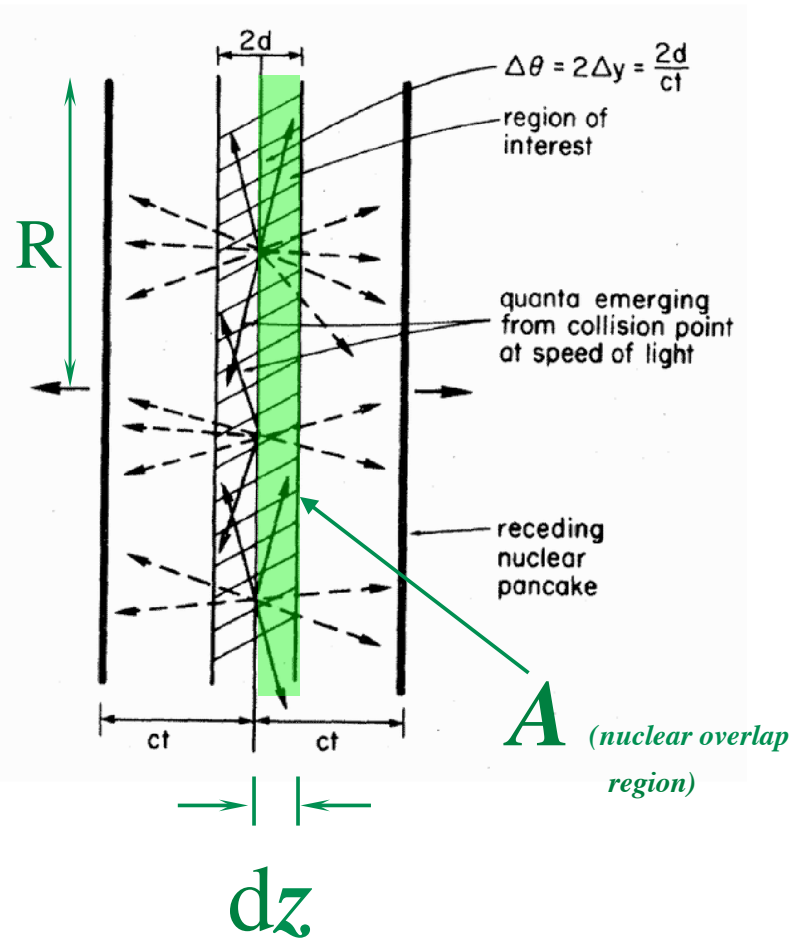
J.D. Bjorken, Phys. Rev. D 27 (1983) 140
“Highly relativistic nucleus-nucleus
collisions: The central rapidity region”



Key idea: Use the space-momentum correlation to translate between spatial density dN/dz and momentum density dN/dp_z

Thin radiator

原子核実験特論 I



Count particles in the **green box** at some time t , add up their energies, and divide by the volume.

Particles in the box if

$$0 < \beta_Z < dz / \tau_{Form} \quad (\text{limit of infinitely thin source})$$

Number of particles
$$dN = \frac{dN}{d\beta_Z} \frac{dz}{\tau_{Form}} = \frac{dN}{dy} \frac{dz}{\tau_{Form}}$$

Average energy per particle $\langle E \rangle = \langle m_T \rangle$

Volume of the box $V = A \cdot dz$

$A \equiv$ xy cross section area (limit $t \ll R$)

$$\langle \varepsilon(t) \rangle = \frac{\text{Energy}}{\text{Volume}} = \frac{\langle E \rangle dN}{V} = \frac{1}{t A} \frac{dN(t)}{dy} \langle m_T \rangle(t) = \frac{1}{t A} \frac{dE_T(t)}{dy}$$

$$\frac{dE_T}{dy} = \langle m_T \rangle \frac{dN}{dy}$$

$$\langle \varepsilon(t) \rangle = \frac{1}{t A} \frac{dE_T(t)}{dy}$$

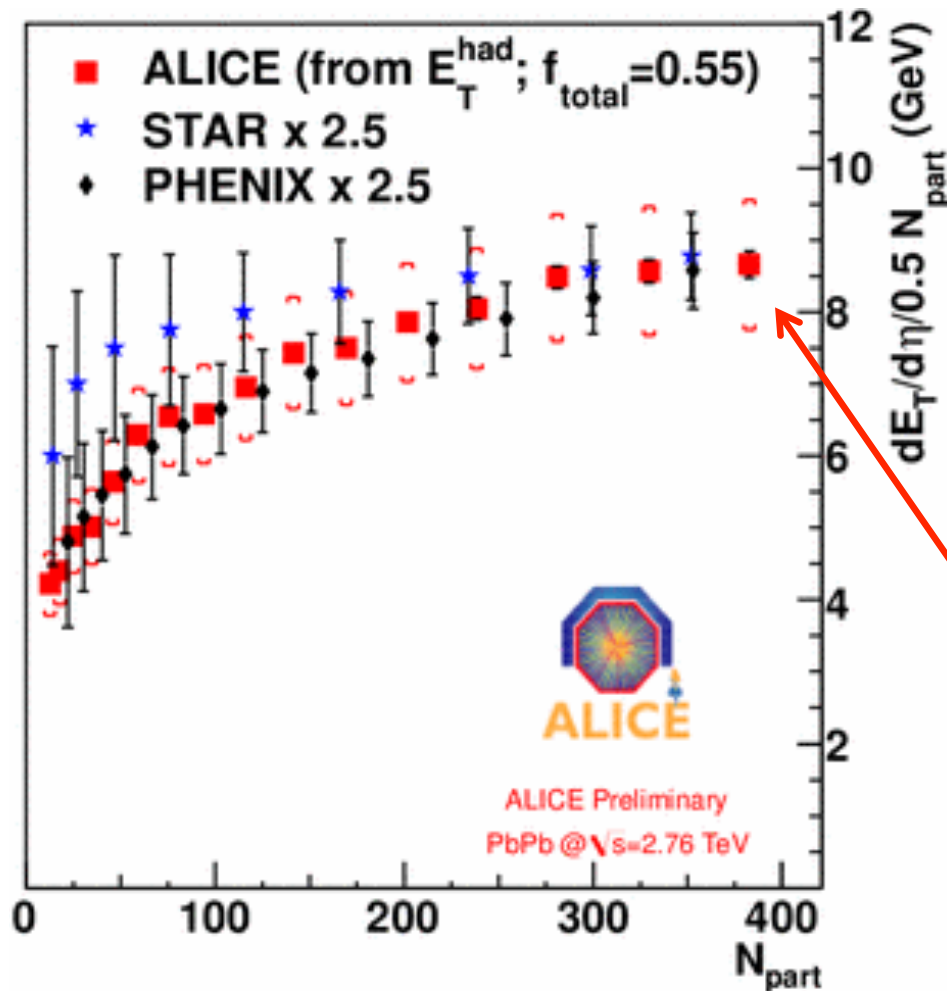
$t \gg 2R/\gamma$ Crossing time

$t \geq \tau_{\text{Form}}$ Formation time

$$\langle \varepsilon(\tau_{\text{Form}}) \rangle = \frac{1}{\tau_{\text{Form}} A} \frac{dE_T(\tau_{\text{Form}})}{dy} \approx \frac{1}{\tau_{\text{Form}} A} \frac{dE_T^{\text{Final State}}}{dy}$$

$\varepsilon_{\text{Bjorken}}$

Energy density from E_T at LHC



- Energy density of the medium from Bjorken formula

$$\varepsilon_{Bj} = \frac{1}{\tau \pi R^2} \frac{dE_T}{dy} \quad R = 1.12 A^{1/3} \text{ fm}$$

$$\varepsilon_{Bj} \tau \approx 16 \text{ GeV}/(\text{fm}^2 \text{c})$$

- $\approx 3 \times \varepsilon_{Bj} \tau$ at RHIC (0.2 TeV)
- RHIC: $\varepsilon \tau = 5.4 \pm 0.6 \text{ GeV}/(\text{fm}^2 \text{c})$

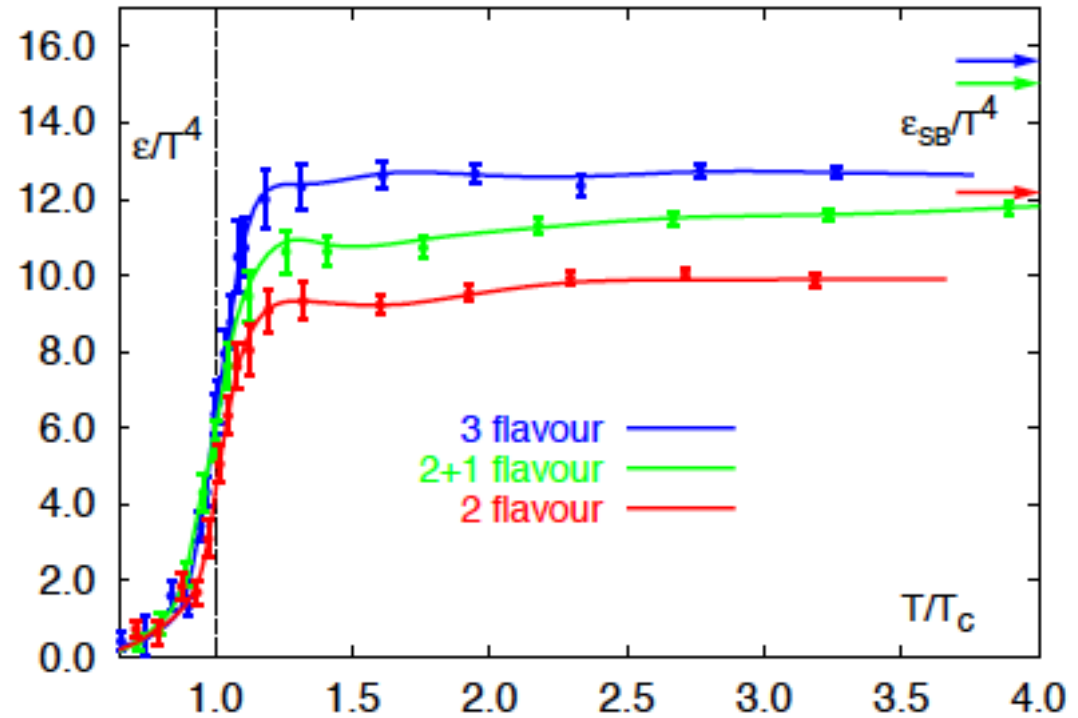
クォーク・グルーオンプラズマ(QGP)とは？

理想ステファン・ボルツマン方程式
(エネルギー密度 ε と温度 T の関係)

$$\varepsilon = g \frac{\pi^2}{30} T^4 = 37 \cdot \frac{\pi^2}{30} T^4 \approx 12 T^4$$
$$\approx 12 \cdot \left(\frac{\hbar}{1 \text{ fm}} \right)^4 \approx 2.4 \text{ GeV} / \text{fm}^3$$

Remember

$$\varepsilon_{Bj} \tau \approx 16 \text{ GeV}/(\text{fm}^2 \text{c})$$



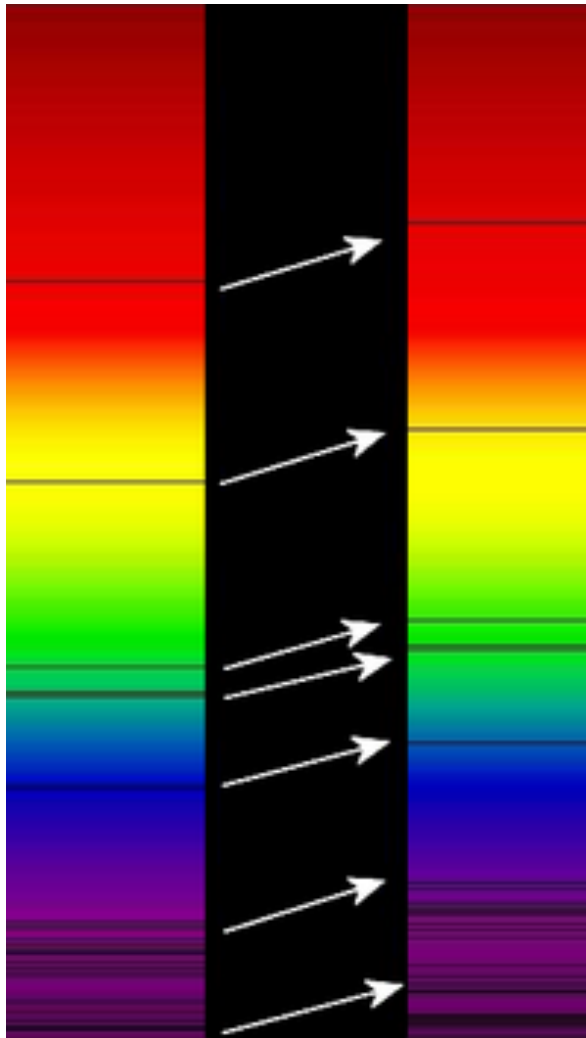
*通常の原子核のエネルギー密度: $\varepsilon = 0.2 \text{ GeV}/\text{fm}^3$

QCD相転移により、通常の原子核の少なくとも10倍以上
のエネルギー密度が生成可能

← QGP 生成に十分なエネルギー密度

(2) 系の膨張速度は？

赤方偏移と青方偏移

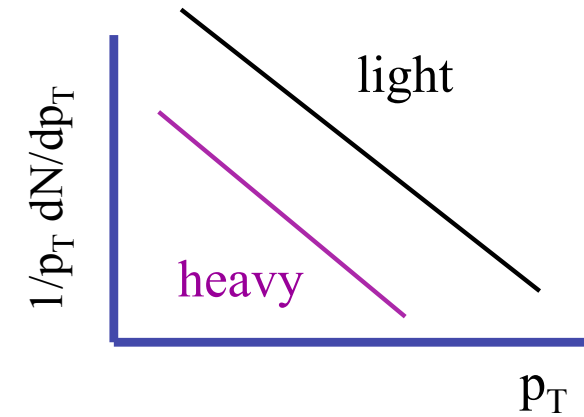
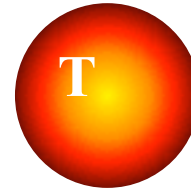


赤方偏移:

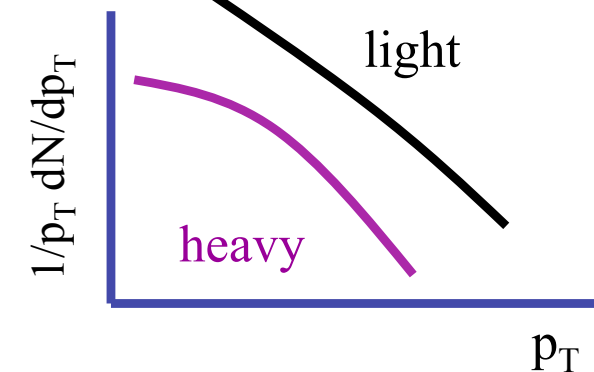
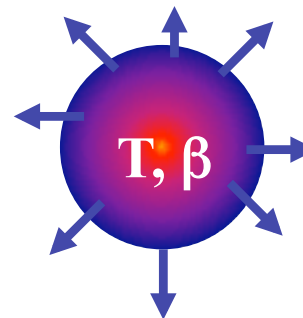
太陽の光のスペクトル(左)と遠方銀河のスペクトル(右)吸収線が赤方にシフトしている

→ 宇宙膨張 → 遠方の銀河ほど早い速度で観測者から遠ざかっている。

pure thermal source



expanding source



青方偏移:

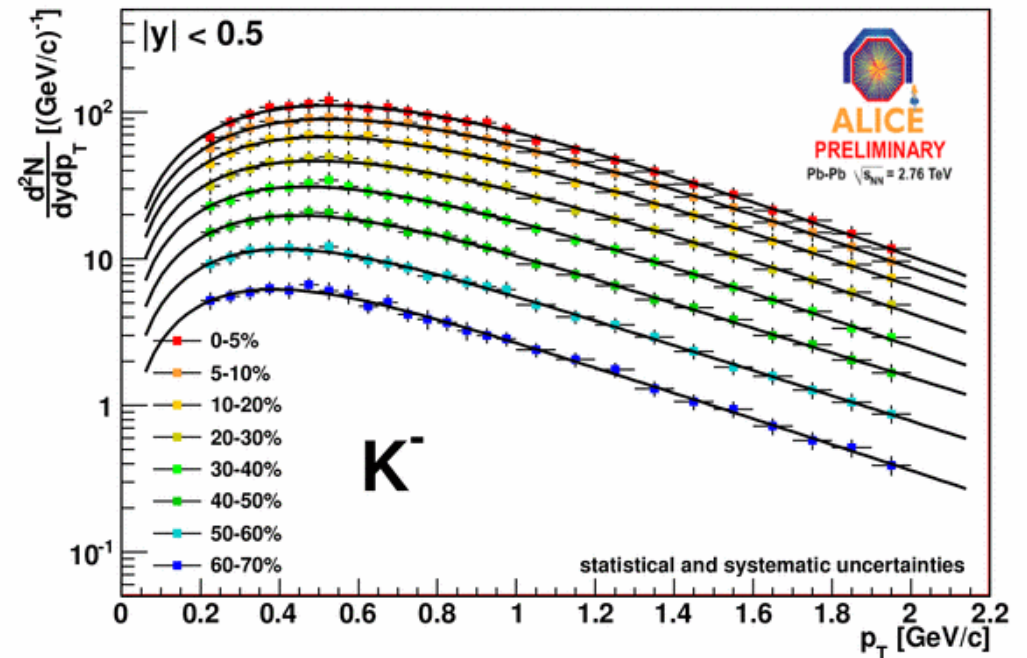
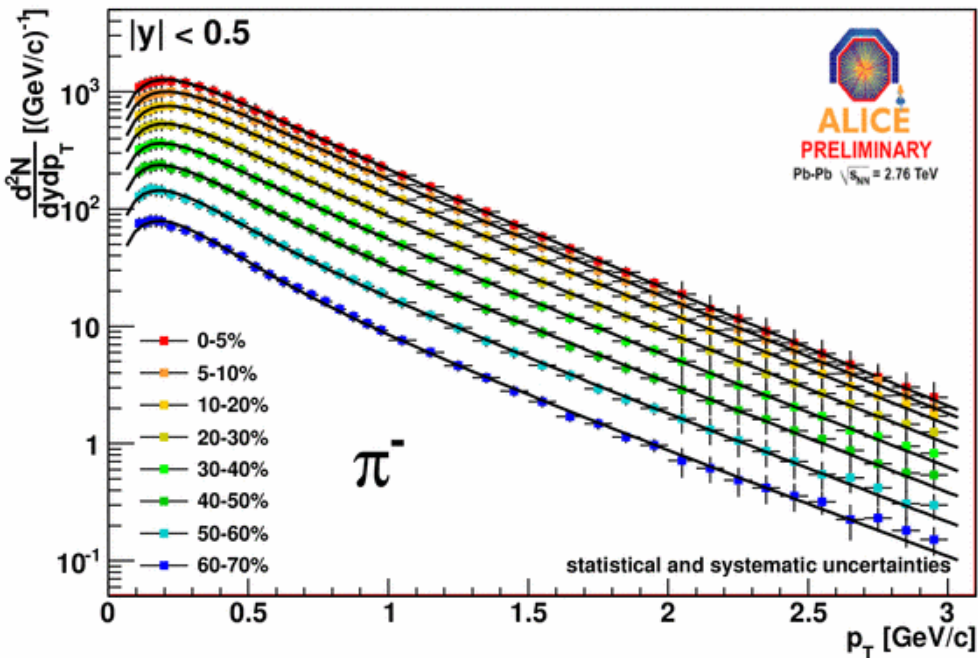
膨張がない場合:

温度 T で定義される系のエネルギー分布 (p_T) → ボルツマン分布(サーマル分布)

膨張がある場合:

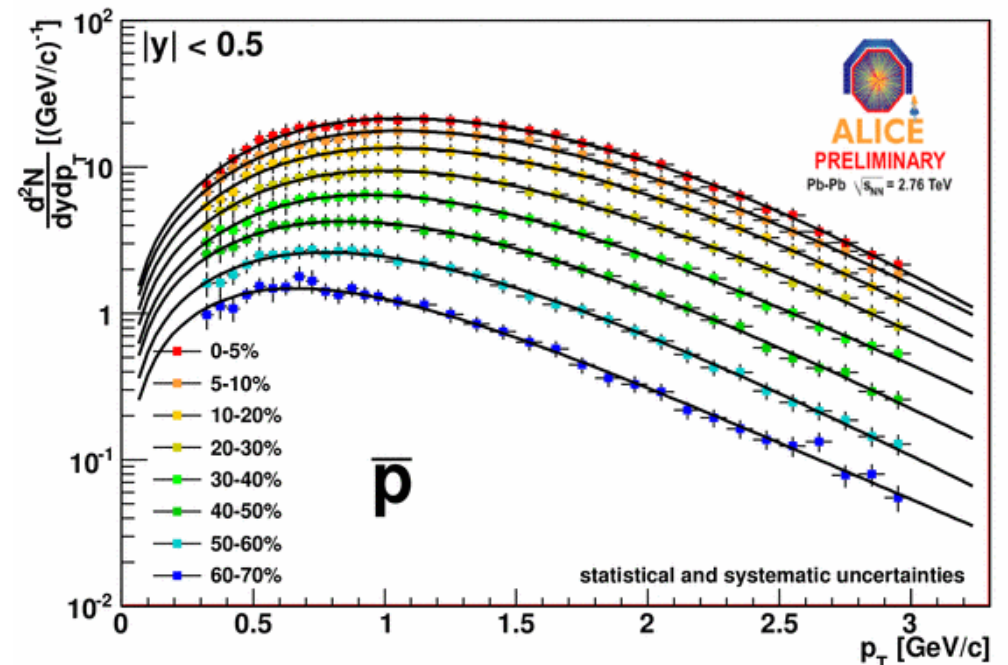
共通速度場で粒子が押される。重い粒子程大きなエネルギーを得る。等方的膨張。観測者に向かって粒子が近づいている → 青方偏移

粒子の運動量(エネルギー)分布

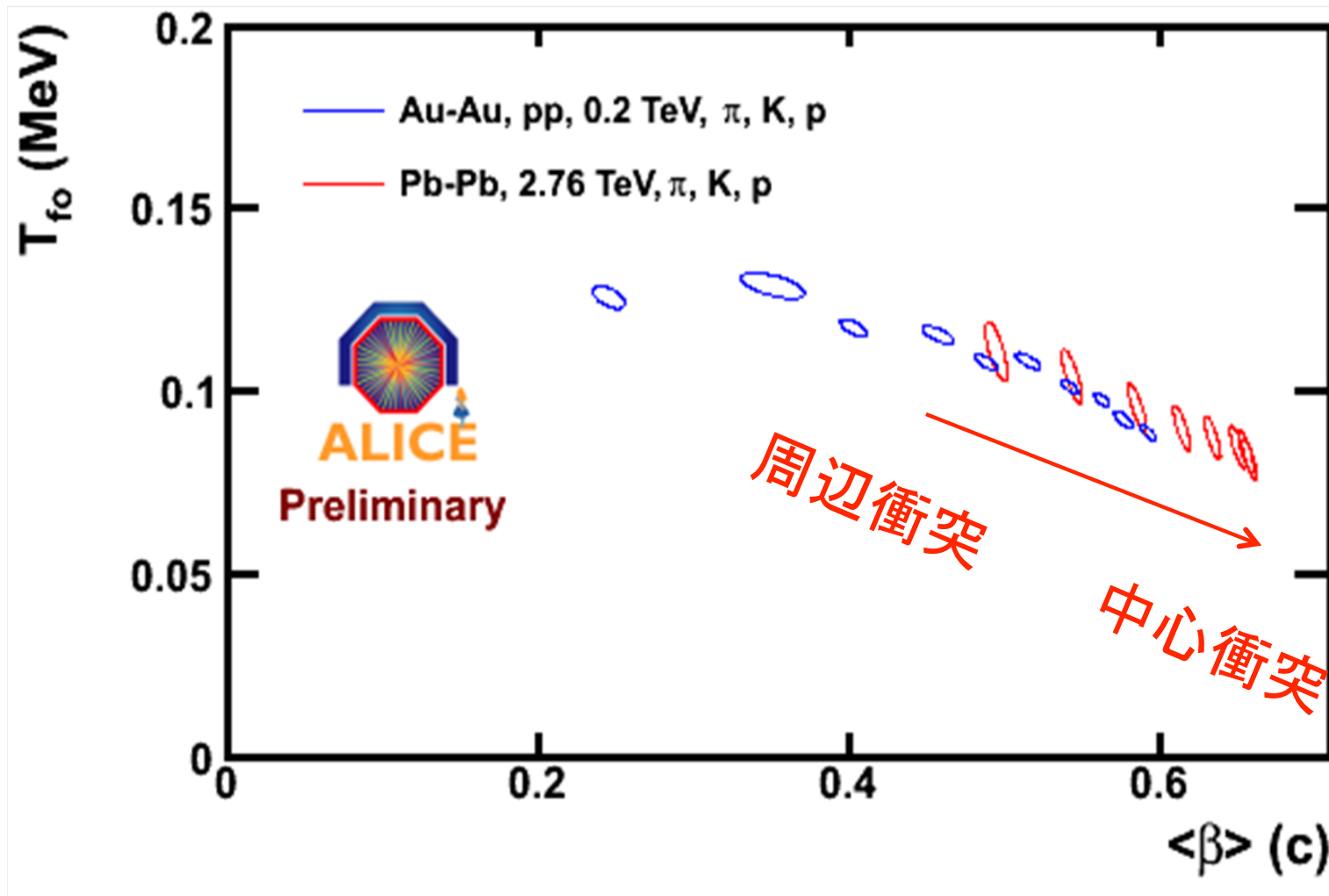


重い粒子ほど、
運動量分布の形が変形

質量: $\pi < K < p$



運動量分布から分かる系の膨張速度



- 系の膨張速度 β_T : 光速の 66 % !
- RHIC (0.2 TeV) から 10% 増。

(3)

どれくらい初期宇宙に近づいている
のか？（反粒子／粒子の生成比）

相図は？

ハドロン生成のしくみ (1)

- ◆ 局所的熱平衡 (Tが一定) と 化学平衡(n_i 粒子多重度が一定) を仮定
- ◆ 温度(T) と化学ポテンシャル (μ) で 粒子多重度 n_i が決定される
(フェルミオン、ボソンに対する大分配関数より)

$$n_i = \frac{g}{2\pi^2} \int_0^\infty \frac{p^2 dp}{e^{(E_i(p)-\mu_i)/T} \pm 1}, \quad E_i = \sqrt{p^2 + m_i^2}$$

簡単に書けば…

$$dn \sim e^{-(E-\mu)/T} d^3 p$$

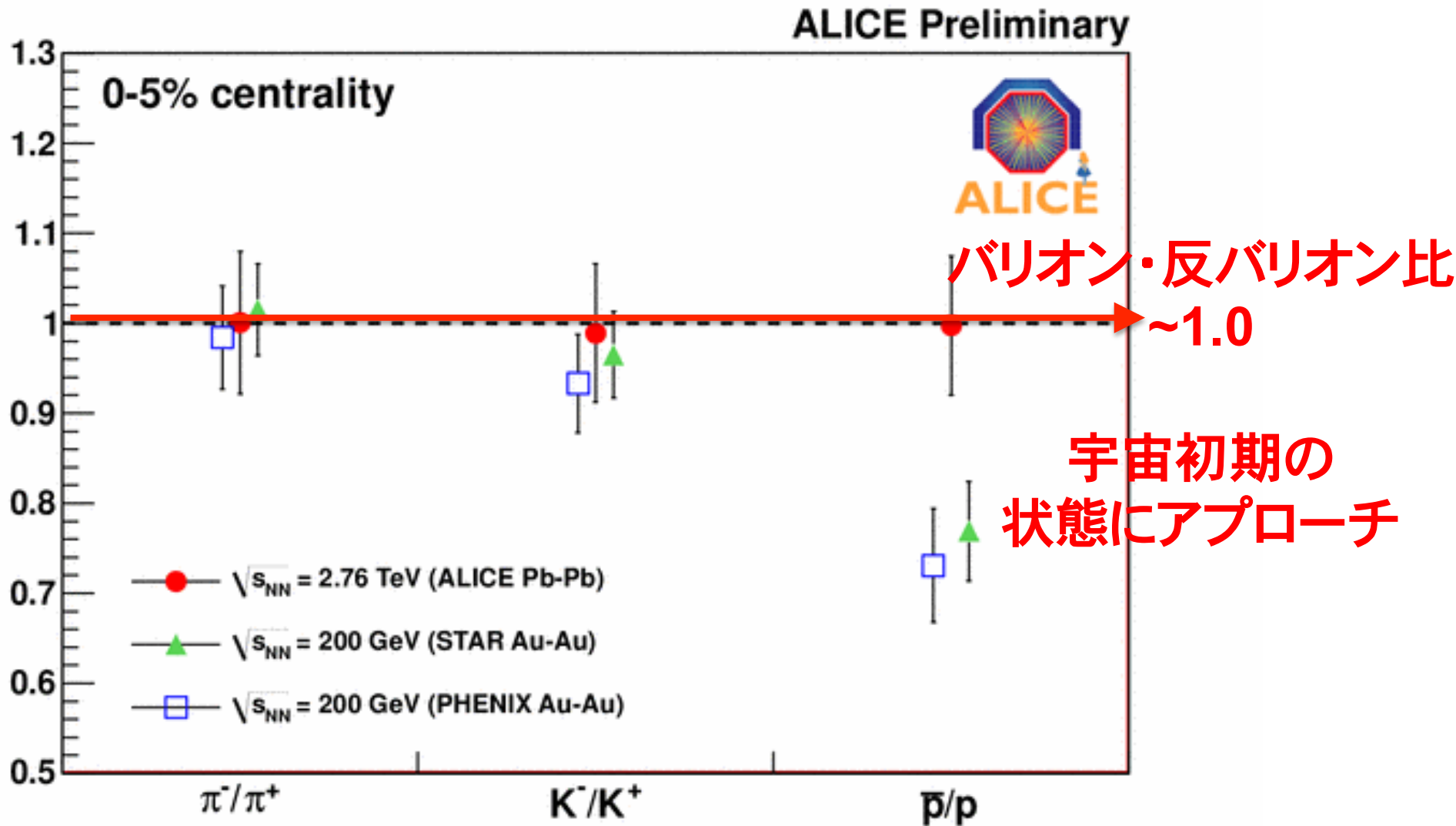
ハドロン生成のしくみ (2)

- ある1つの粒子生成比 (e.g., 反陽子-陽子比 \bar{p} / p)
→ μ / T 比を決定
- 別の粒子生成比 (e.g., K中間子- π 中間子比 K / π)
→ $T \rightarrow \mu$
- このようにして、全てのハドロン生成収量とハドロン生成比を決定することができる!

$$\frac{\bar{p}}{p} = \frac{e^{-(E+\mu)/T}}{e^{-(E-\mu)/T}} = e^{-2\mu/T}$$

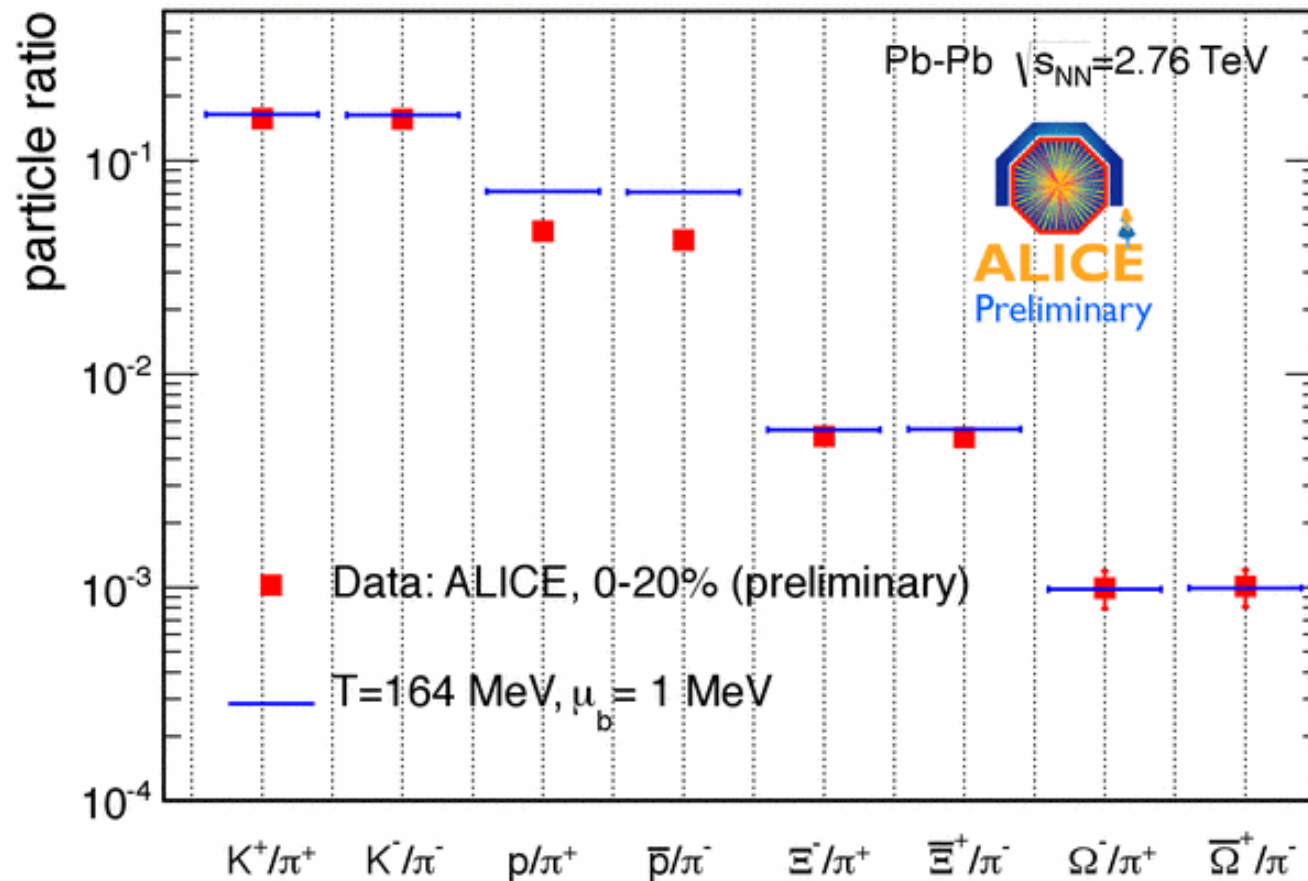
$$\frac{K}{\pi} = \frac{e^{-(E_K)/T}}{e^{-(E_\pi)/T}} = e^{-(E_K-E_\pi)/T} \approx e^{-\Delta m/T}$$

π^-/π^+ , K^-/K^+ , \bar{p}/p 粒子生成比



ALI-PREL-8993

統計的サーマルモデルで μ_B , T_{ch} を求める!

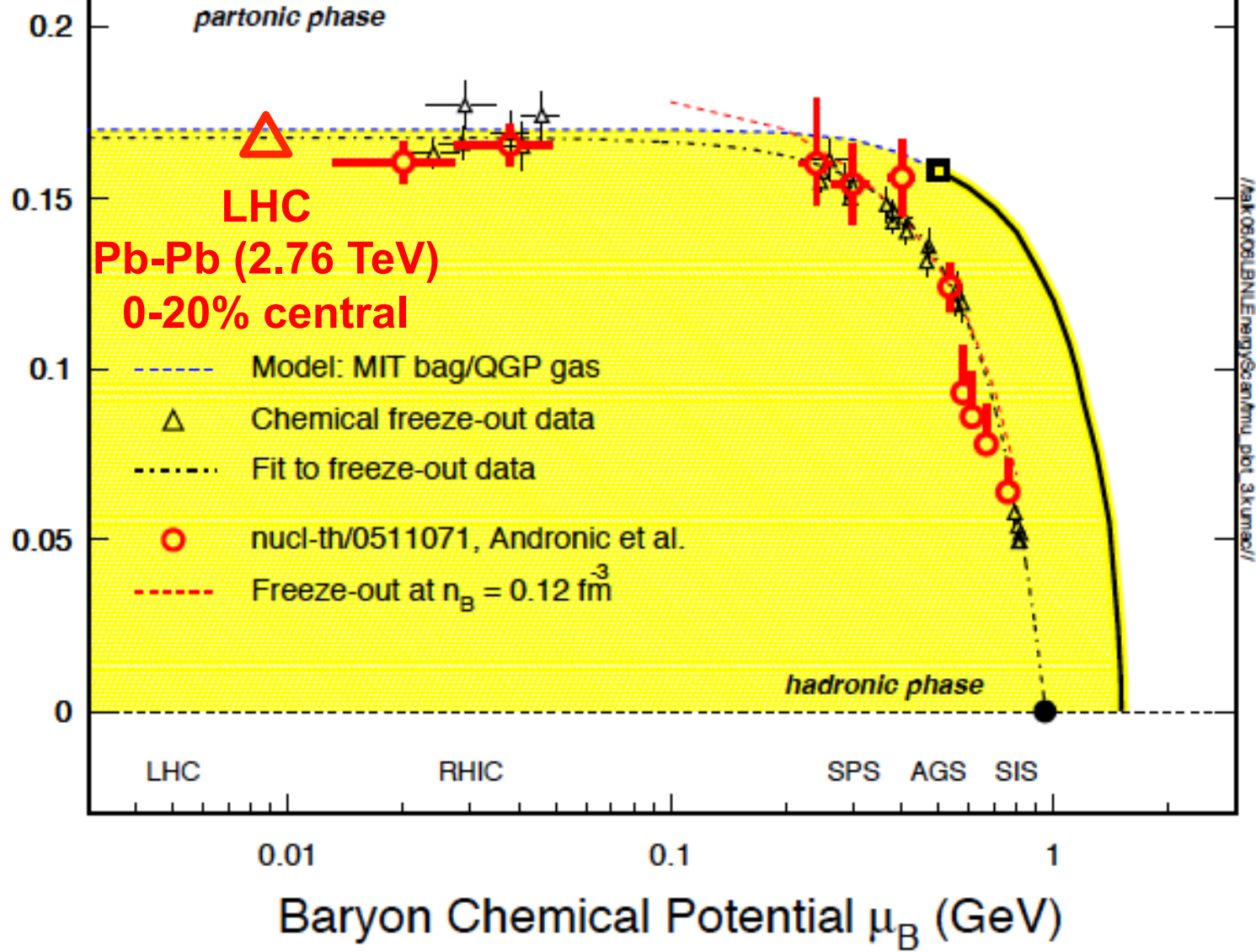


- 大分配関数に従って、すべての粒子比を二つのパラメータでフィットする。
- 結果: $T_{ch}=164$ MeV, $\mu_B = 1$ MeV

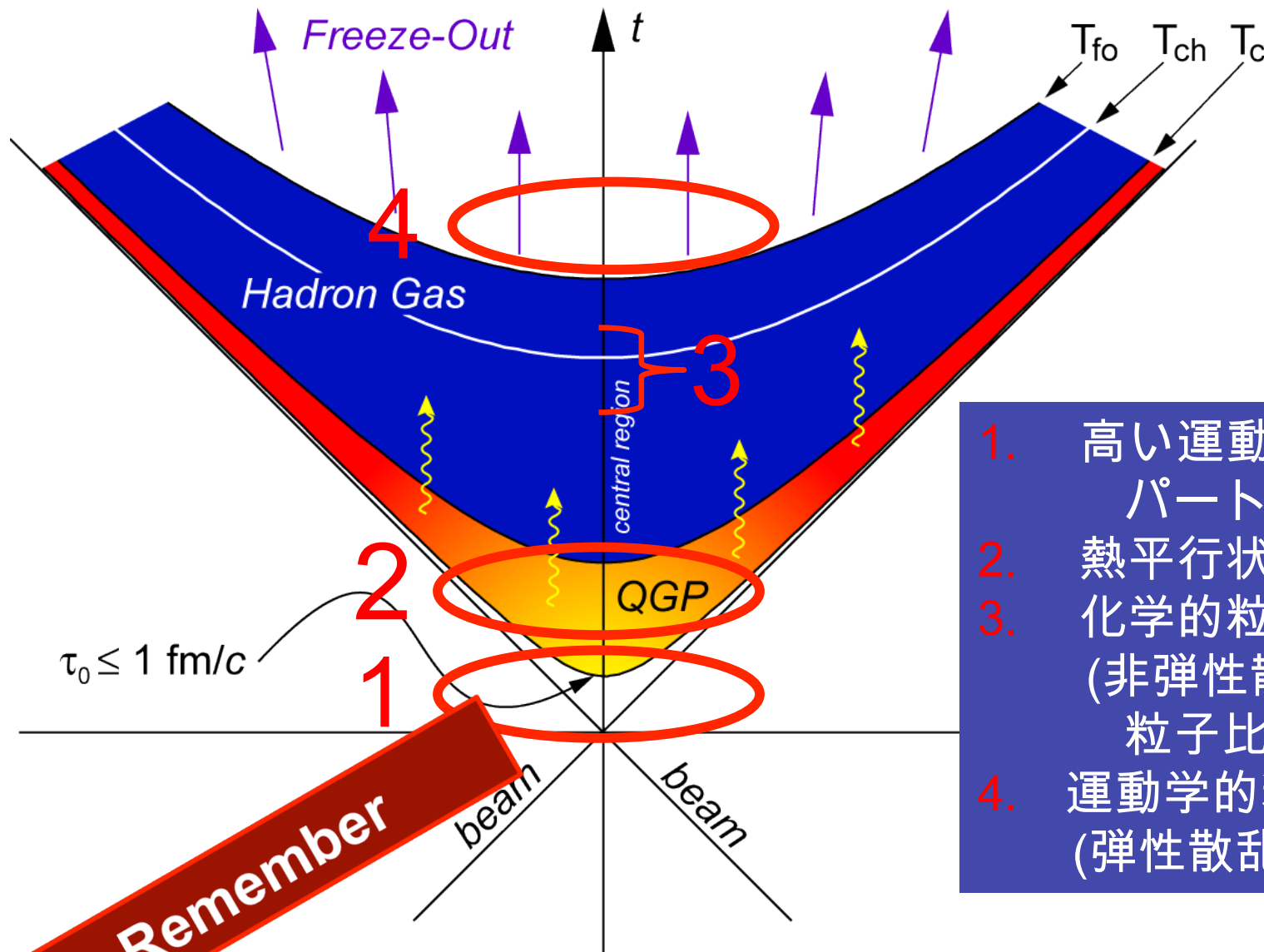
Center of Mass Beam Energy \sqrt{s}_{NN} (GeV)

5400 200 20 5 1

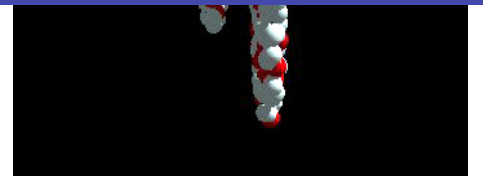
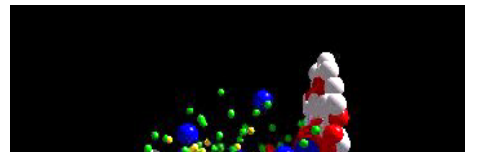
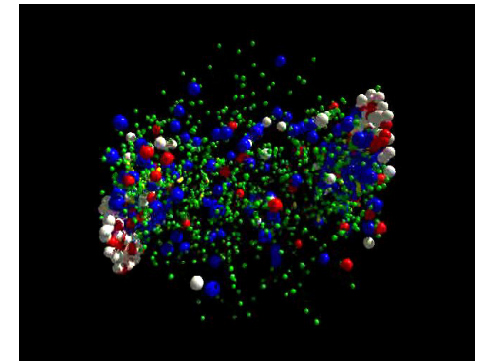
Temperature T (GeV)



高エネルギー重イオン衝突の時空発展



1. 高い運動量移行をともなう
パートン散乱
2. 熱平行状態とQGP生成
3. 化学的粒子凍結
(非弾性散乱が終わり、
粒子比が固定)
4. 運動学的粒子凍結
(弾性散乱が終る)



Time scale
 $10 \text{ fm}/c \sim 10^{-23} \text{ sec}$

Temperature scale
 $100 \text{ MeV} \sim 10^{12} \text{ K}$

(4)系の体積、寿命は？

量子力学的干渉効果を使って、システムの大きさや寿命を測定

● Hanbury Brown & Richard Twiss

- 二光子の強度相関より星の角直径を求めた。(1950年代はじめ)



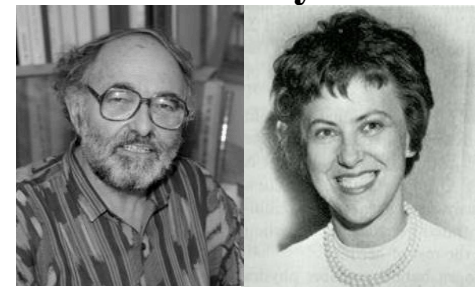
Hanbury Brown

● Goldhaber, Goldhaber, Lee, Pais

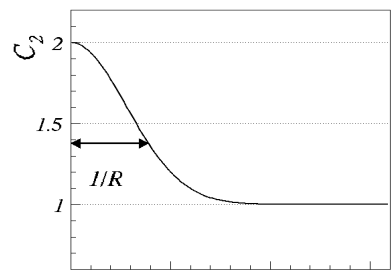
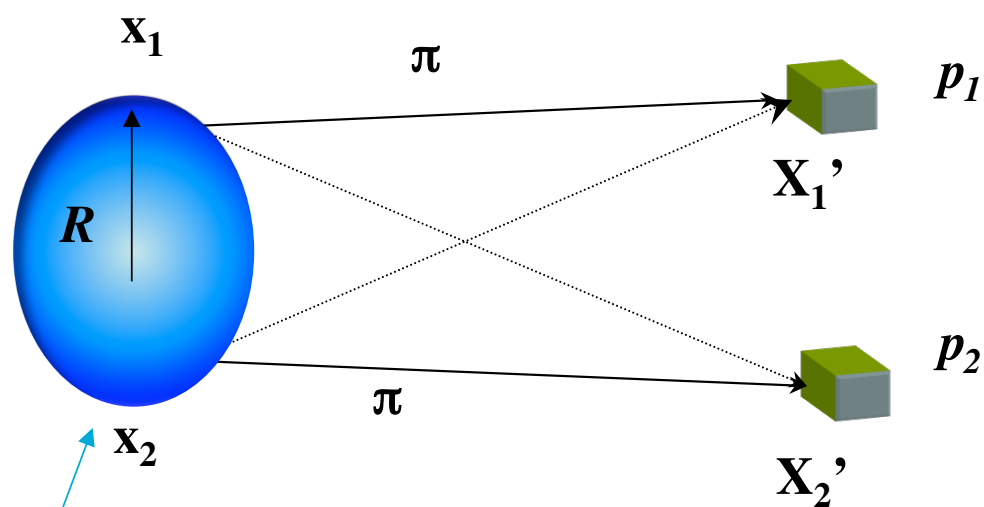
- 原子核衝突実験に応用(1960)

観測した同一粒子の二粒子相関を見た。

- ボーズ粒子の波動関数の対称性(フェルミ粒子; 反対称性)



Goldhaber夫妻



$$C_2 \equiv \frac{P(p_1, p_2)}{P(p_1) \cdot P(p_2)}$$

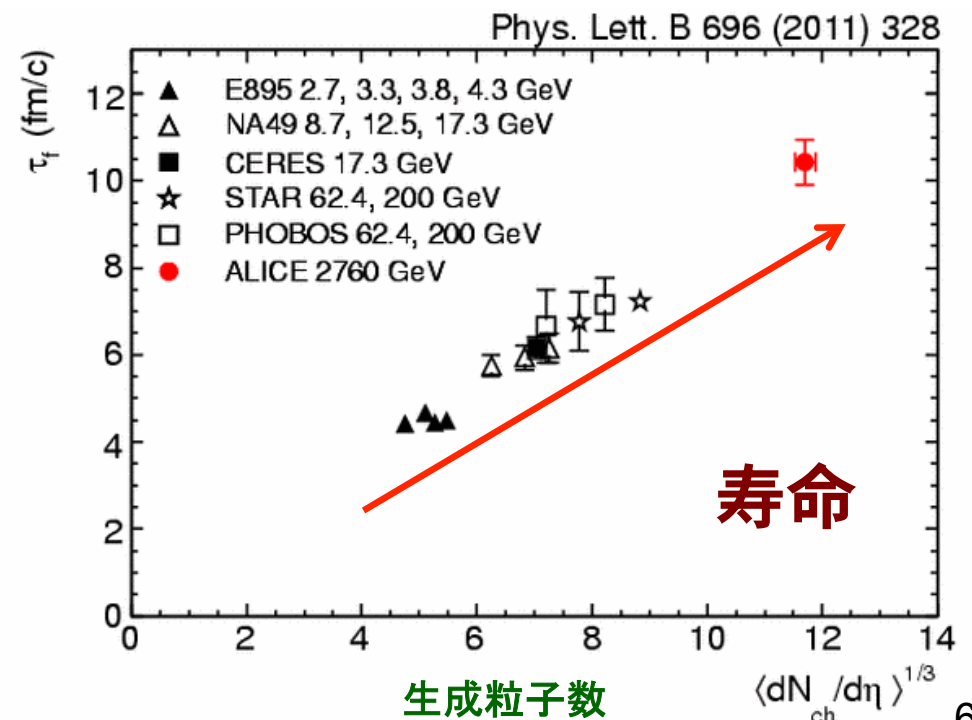
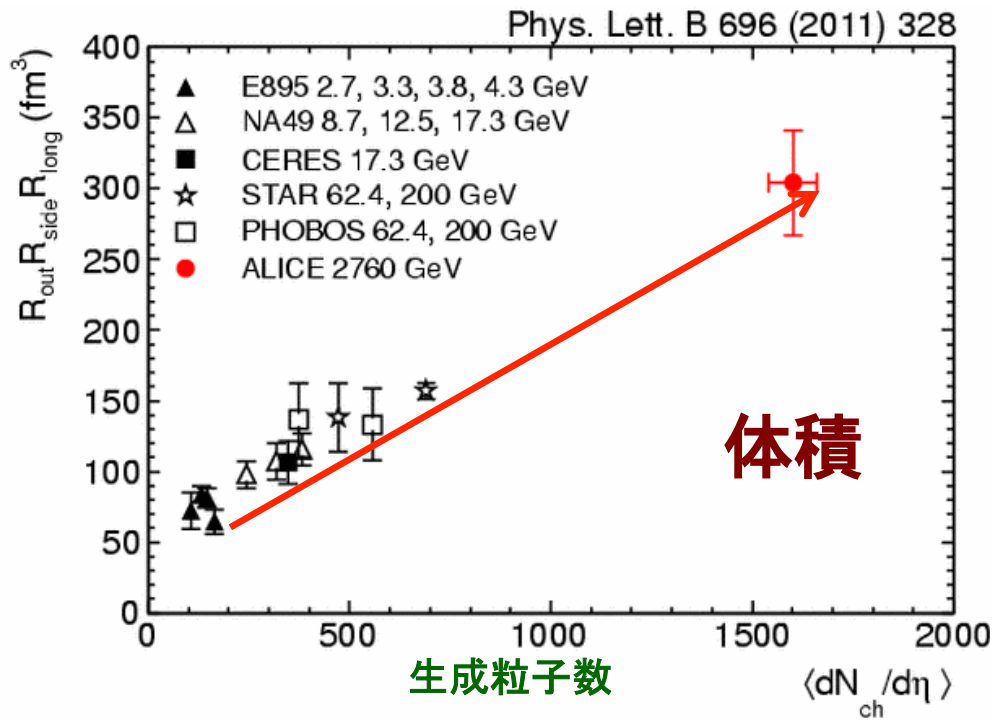
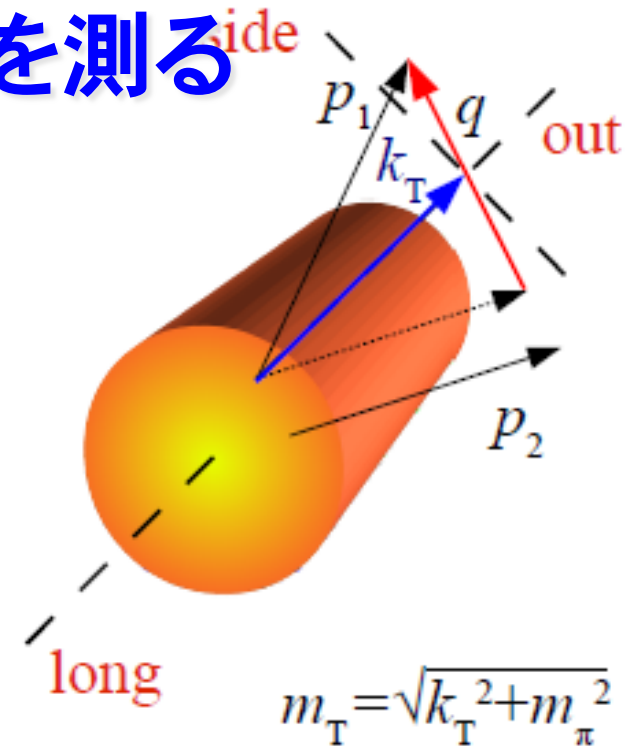
$$= 1 + |\tilde{\rho}_{eff}(\mathbf{q})|^2$$

$$= 1 + \lambda \exp(-R^2 \mathbf{q}^2)$$

Particle emitting source

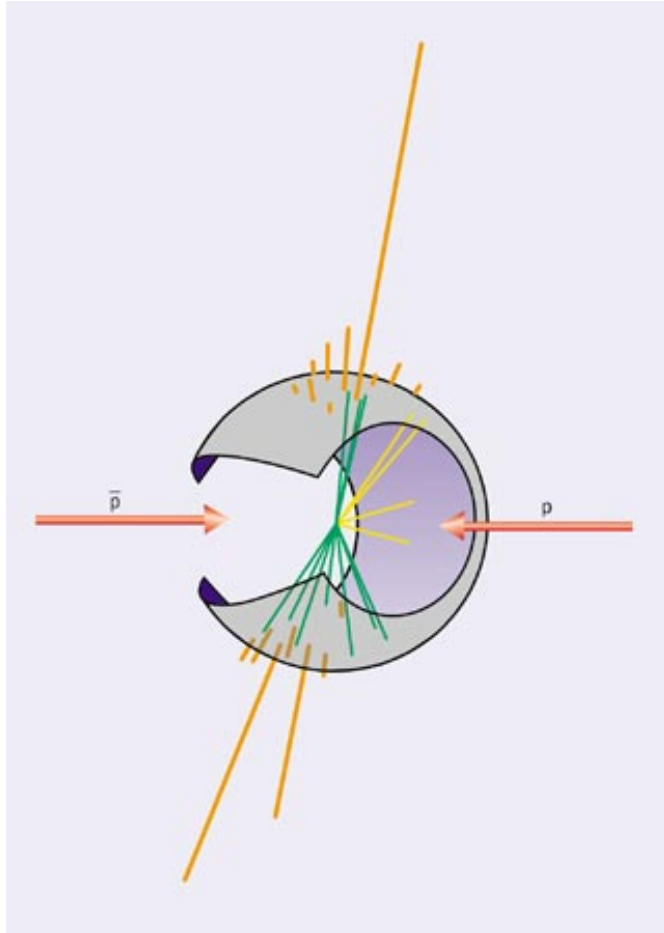
HBT 測定から体積、寿命を測る

- 直交する3つの方向 → HBT radii (R_{long} , R_{side} , R_{out})
- **Volume $V = R_{\text{long}} \times R_{\text{side}} \times R_{\text{out}}$: x2 @ RHIC**
- **$t \sim 10 \text{ fm/c}$: 40% higher @ RHIC**



(5) どれくらい高密度？
→ ジェット測定

ジェットとは？



A UA2 two-jet event, ca
1982

ジェット=高い運動量をもったハドロン粒子の束

1. クォーク・グルーオン同士の高い運動量移行反応で生成
2. 運動量保存則により、方位角にして約 180° 方向に生じる

Jet Suppression at RHIC

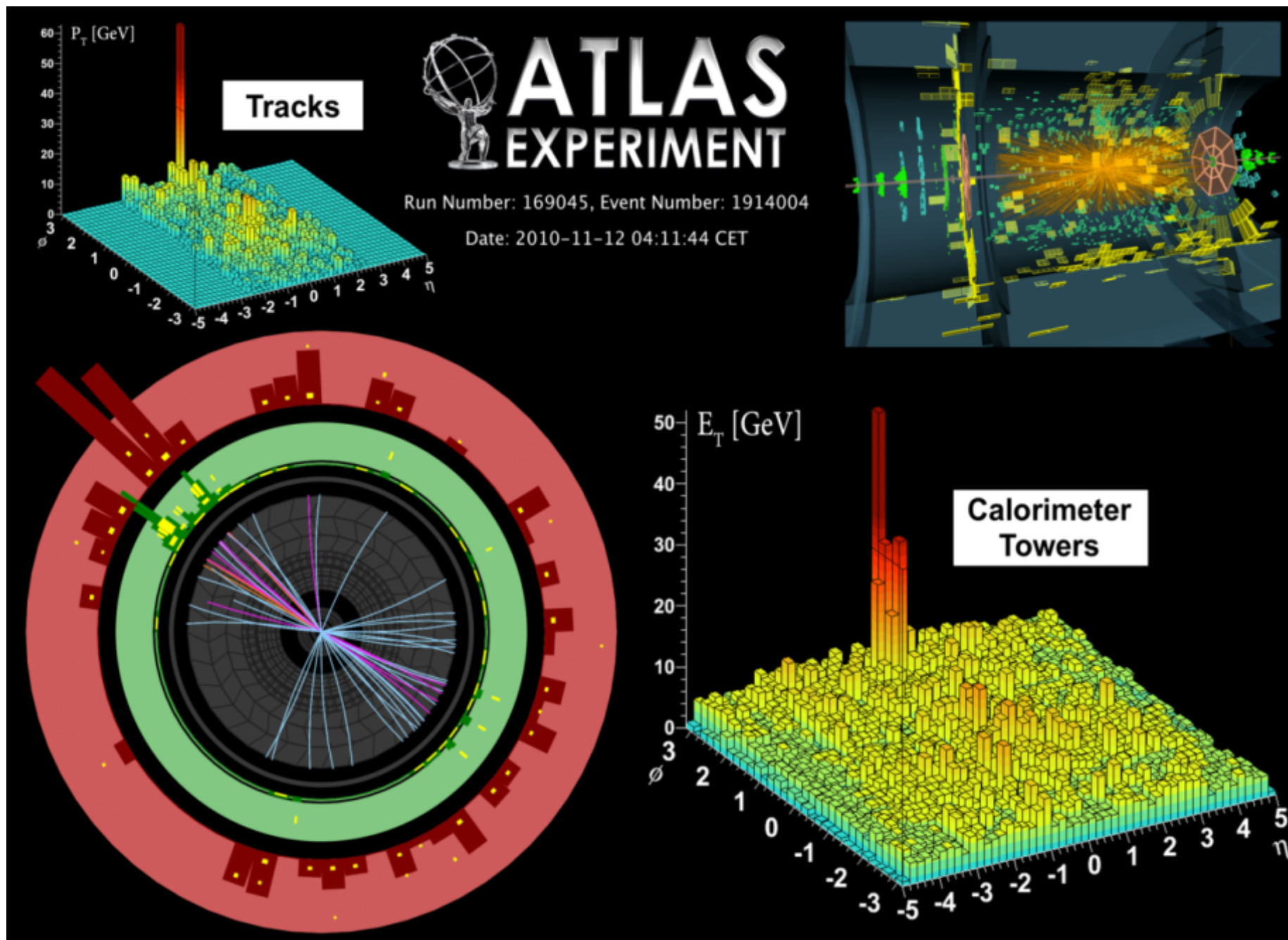
Quarks



Animation by
Jeffery Mitchell



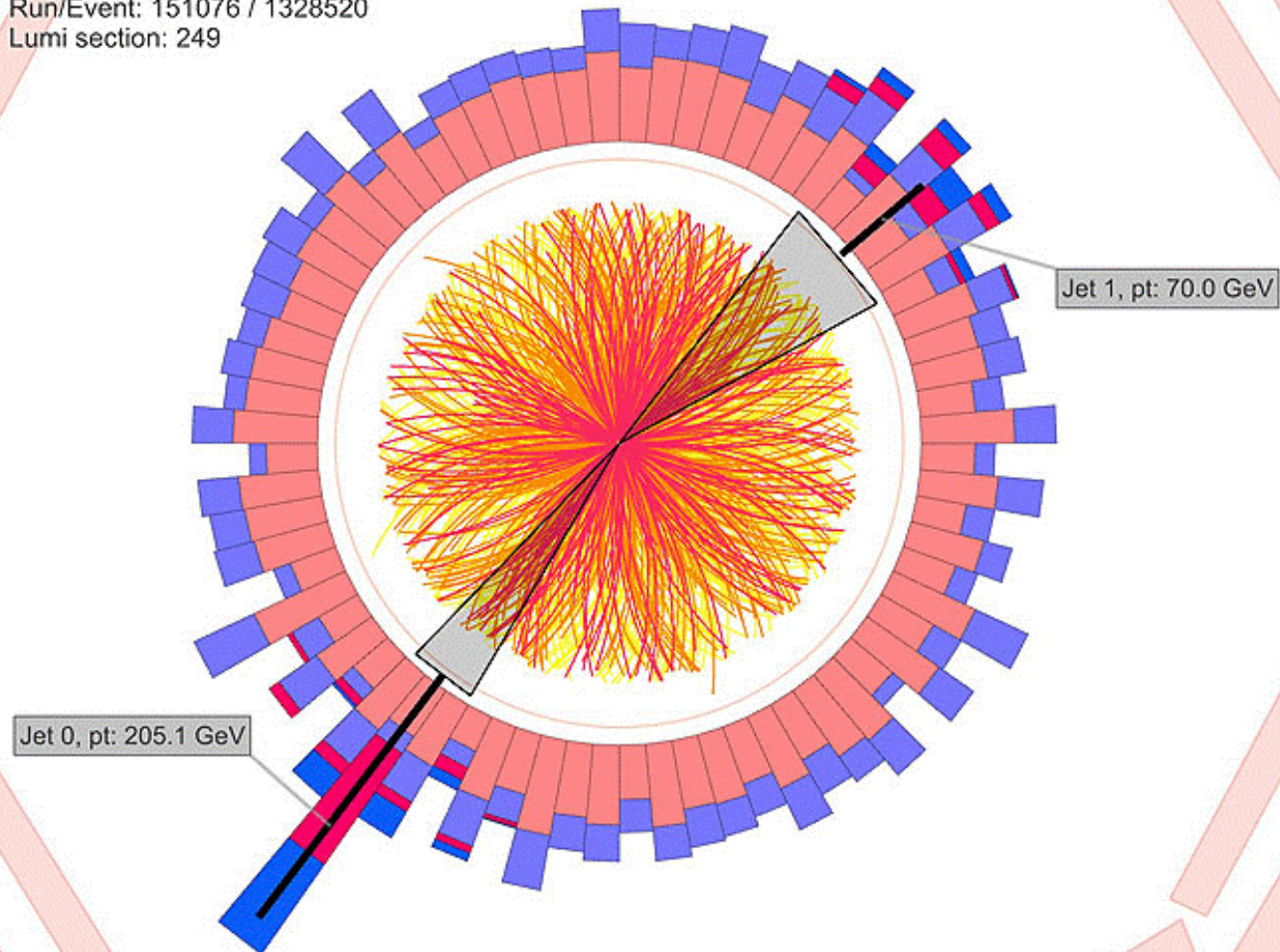
ジェット抑制とモノジェット (重イオン; ATLAS)



ジェット抑制とモノジェット (重イオン; CMS)



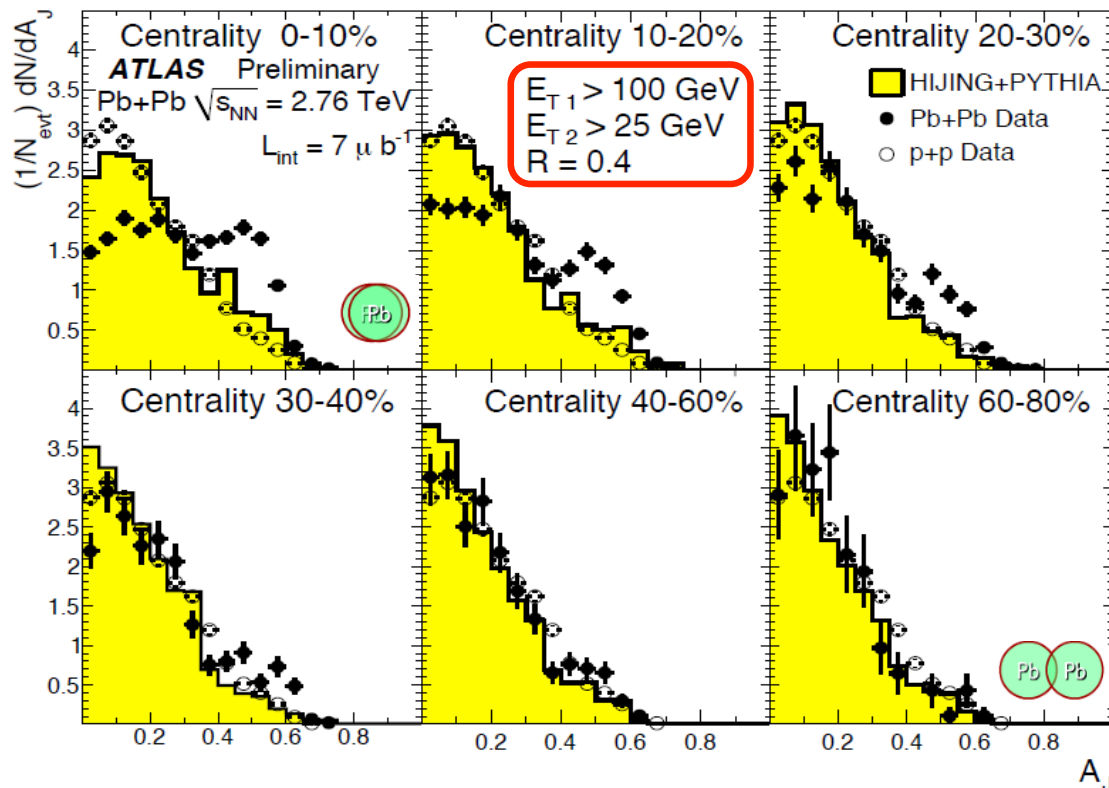
CMS Experiment at LHC, CERN
Data recorded: Sun Nov 14 19:31:39 2010 CEST
Run/Event: 151076 / 1328520
Lumi section: 249



ダイジェットのエネルギー非対称度

Di-Jet Asymmetry (ATLAS)

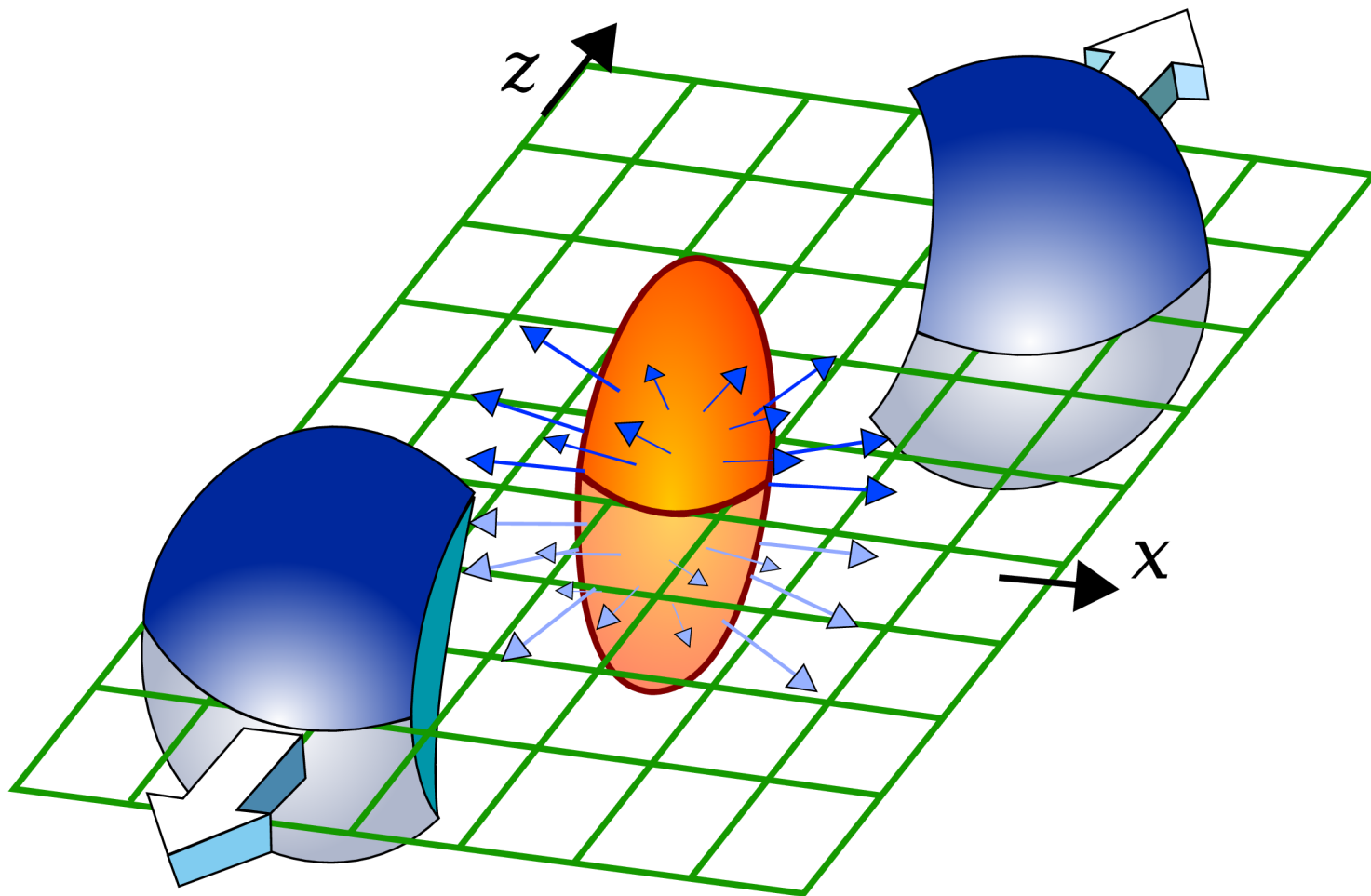
- エネルギーの非対称度 A_J .
- 中心衝突で大きな非対称がある！
- 失われたエネルギーは、低運動量の粒子生成に転化している事がわかった (CMS)。



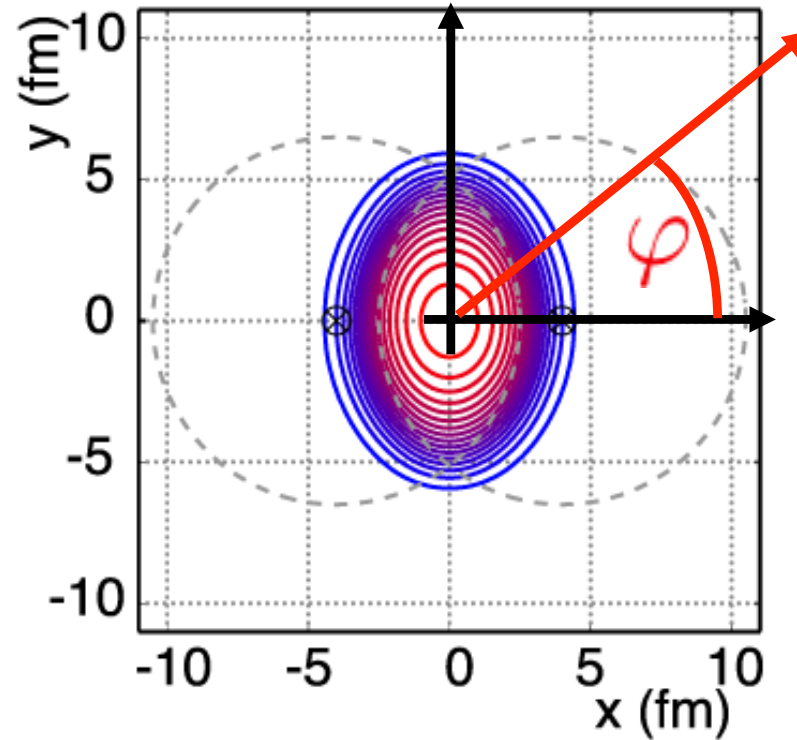
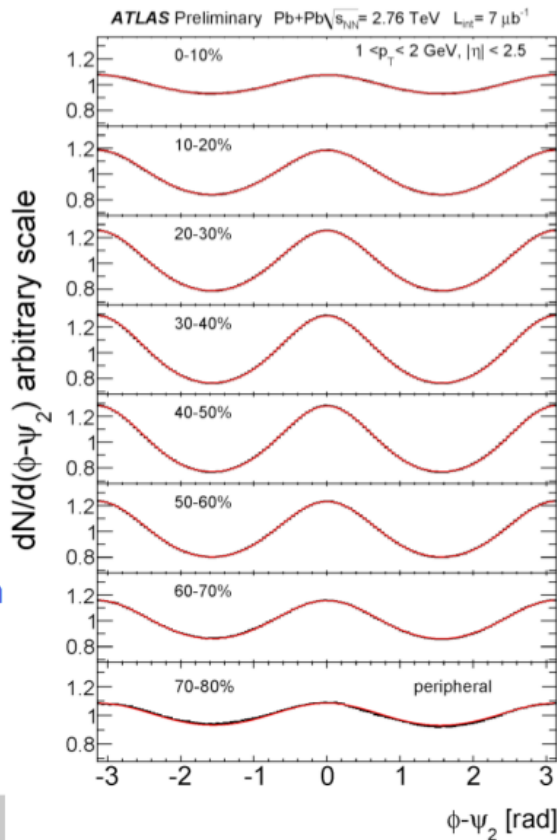
$$A_J = \frac{E_{T1} - E_{T2}}{E_{T1} + E_{T2}}$$

ATLAS (G. Aad *et al.*),
PRL 105, 252303 (2010)

(6) 集団的運動は見えるのだろうか？



集団的運動は見えるのだろうか？

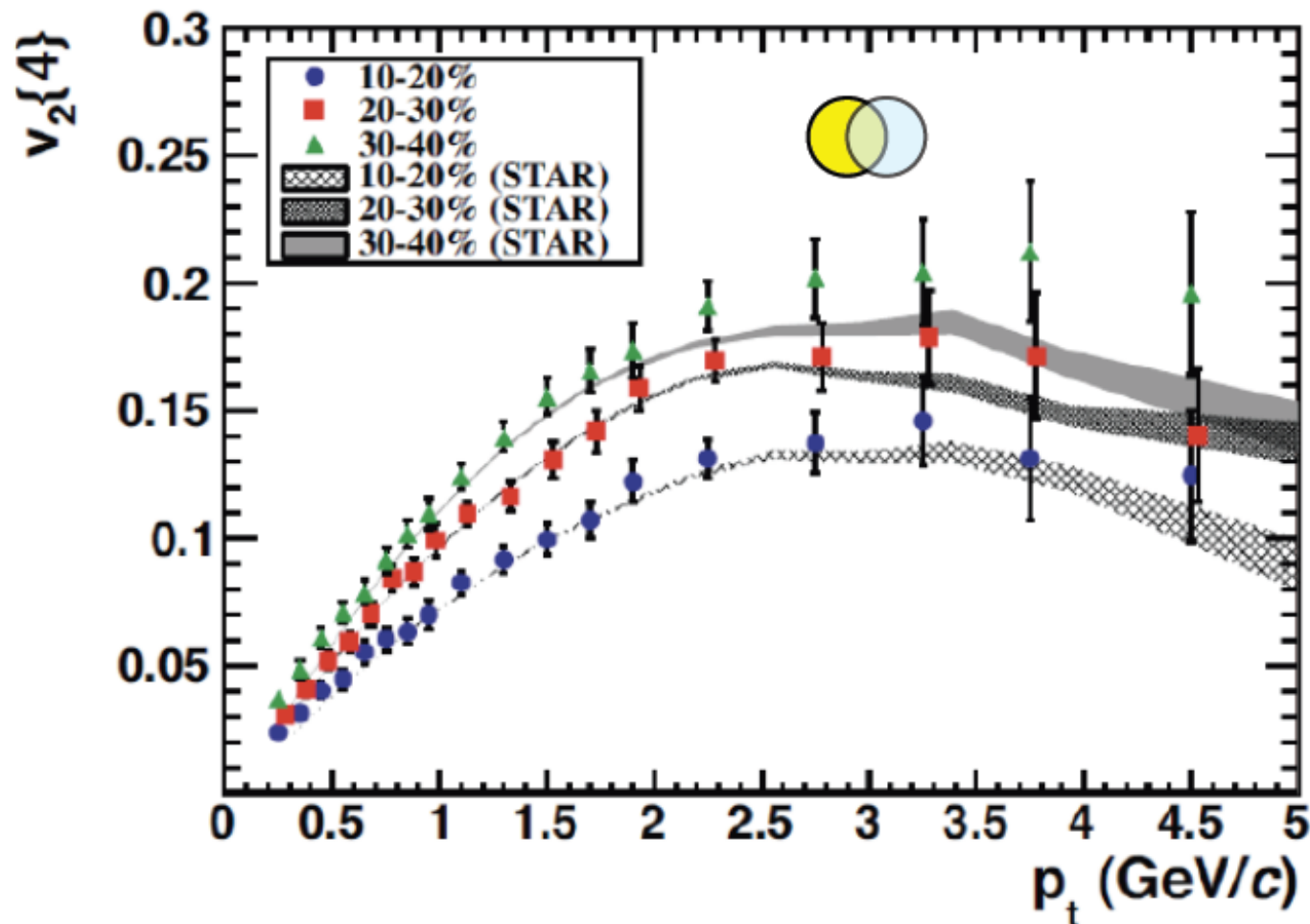


$$\frac{dN}{p_T dp_T dy d\varphi}(p_T, \varphi; b) = \frac{dN}{2\pi p_T dp_T dy} (1 + \underline{2v_2}(p_T; b) \cos(2\varphi) + \dots)$$

- 非常に高い集団運動的振る舞いが LHC でみえた。

v_2 RHIC vs. LHC

- RHIC ($\sqrt{s_{NN}}=0.2$ TeV)での v_2 と LHC ($\sqrt{s_{NN}}=2.76$ TeV)での v_2 はほとんど同じ。
- バルクなマターの性質がほとんど同じ！？

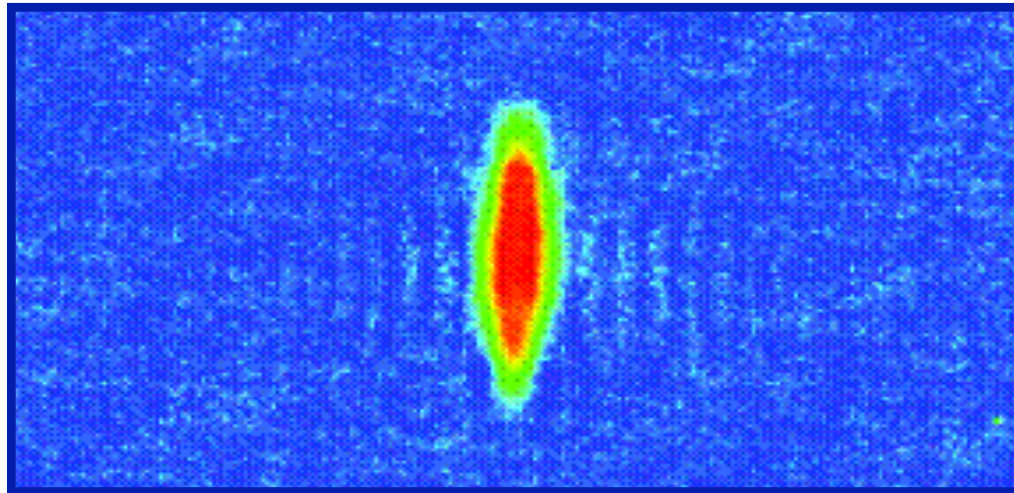


Analogy in Cold Atomic System

- Same phenomena observed in gases of strongly interacting atom at 10^{-6} K

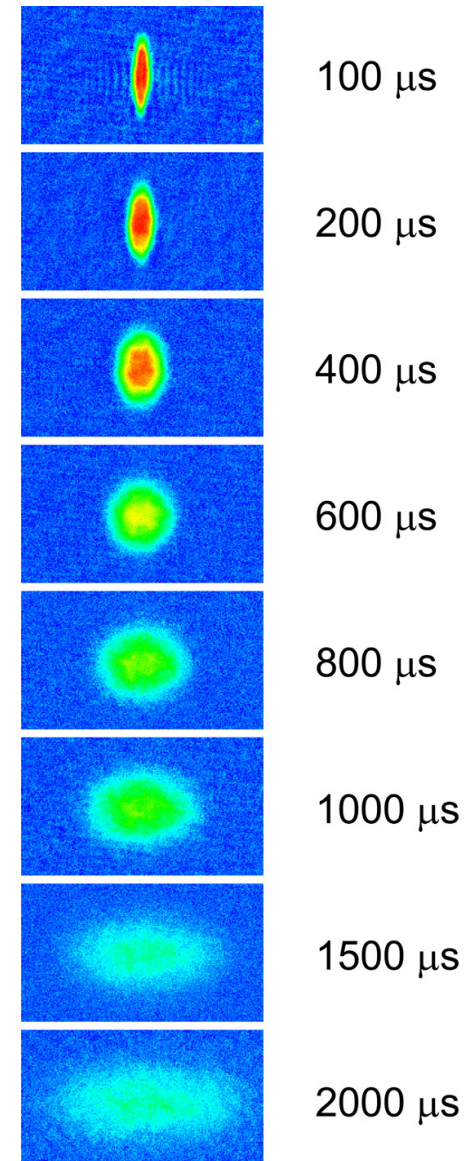
^6Li (@ 10^{-6} K)

- Laser (optical) cooling
- Fermi gas system
- (3 p, 3 n, 3 e-): odd number of nucleons and electrons
- spin $\uparrow\downarrow$ atoms.
- Quantum effect in ultra-cold atoms.



M. Gehm, S. Granade, S. Hemmer, K. O'Hara, J. Thomas

Science 298, 2179 (2002)



The LHC/RHIC fluid behaves like this, that is, a strongly coupled fluid.

(7) どれくらい高温？
重いクォークを使った温度計

J/ ψ (c-cbar クォーク束縛状態) の発見 (1976)

Samuel C.C. Ting (1976, Nobel Prize in physics)
 米・BNL, AGS加速器

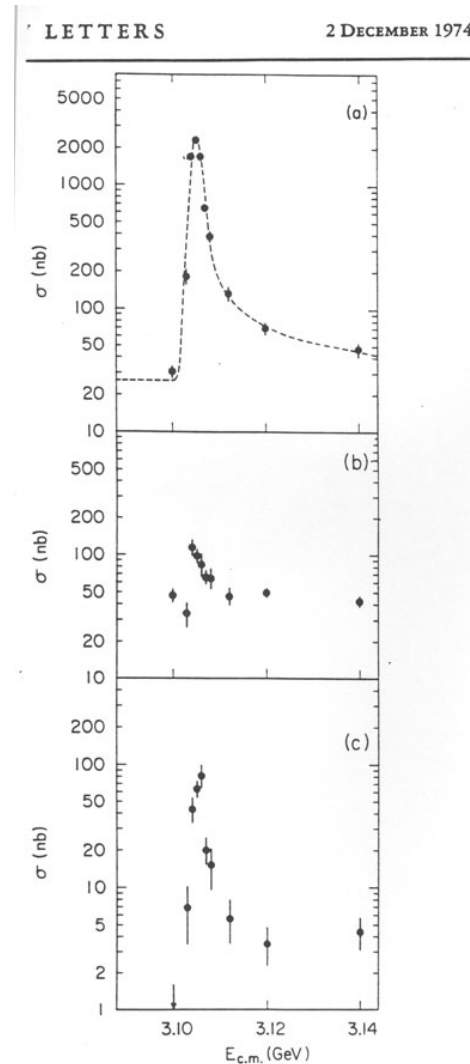
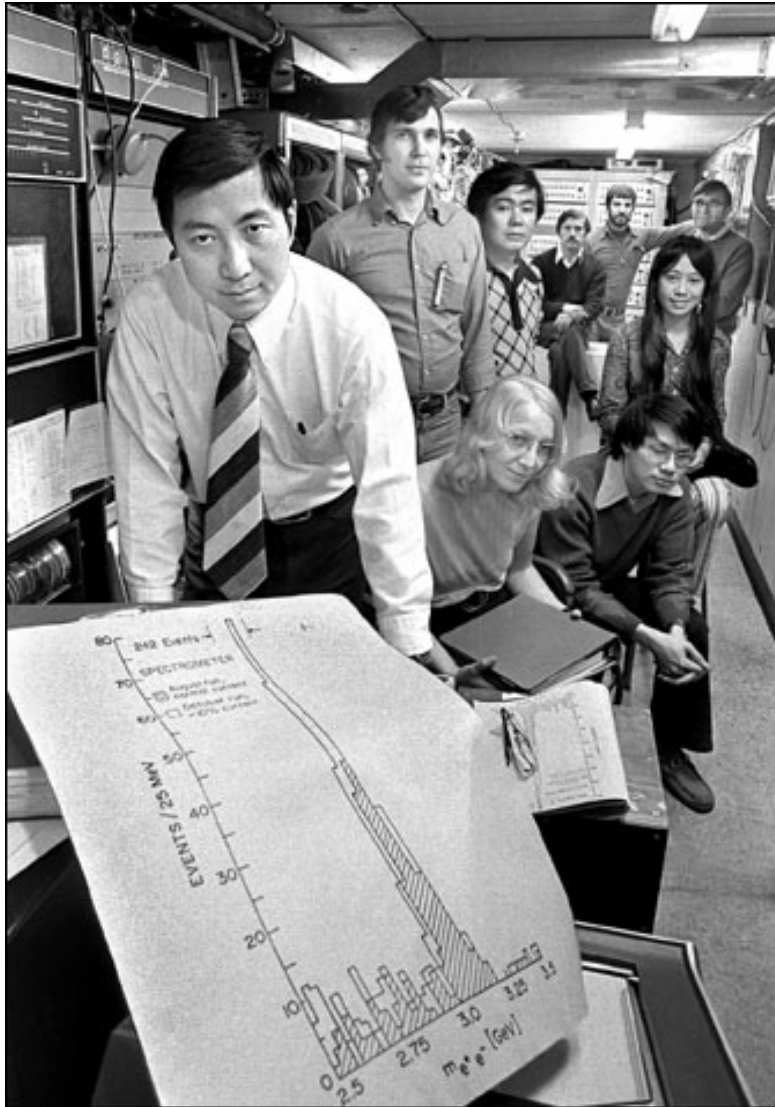


FIG. 1. Cross section versus energy for (a) multi-pion final states, (b) e^+e^- final states, and (c) $\mu^+\mu^-$, $\pi^+\pi^-$, and K^+K^- final states. The curve in (a) is the expected shape of a δ -function resonance folded with the Gaussian energy spread of the beams and including radiative processes. The cross sections shown in (b)

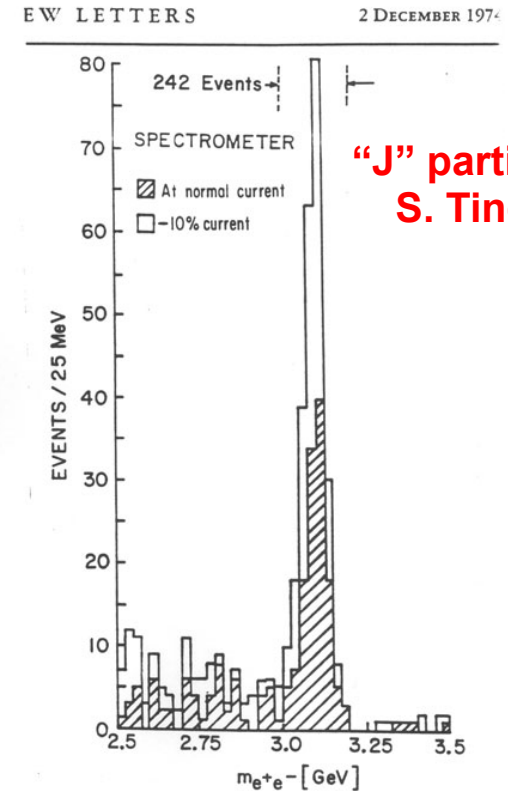
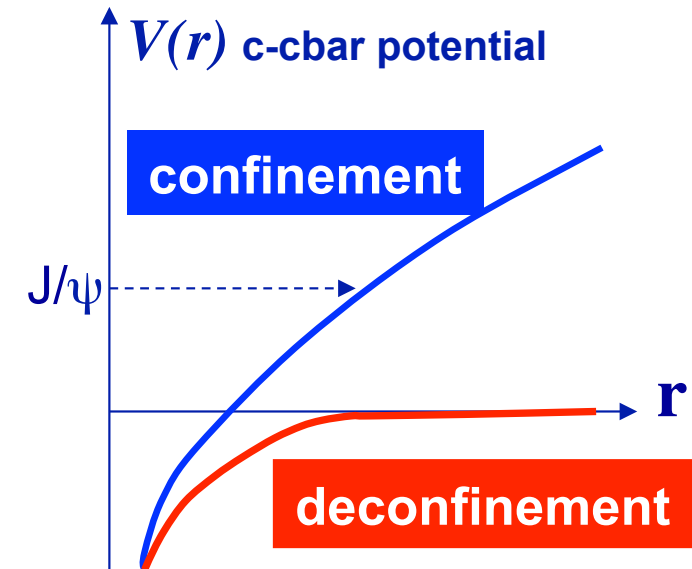
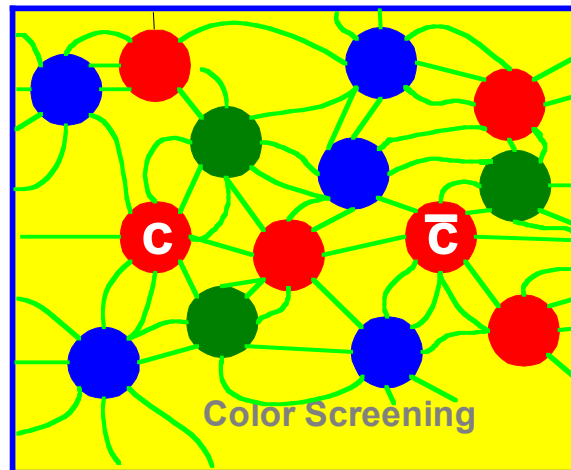
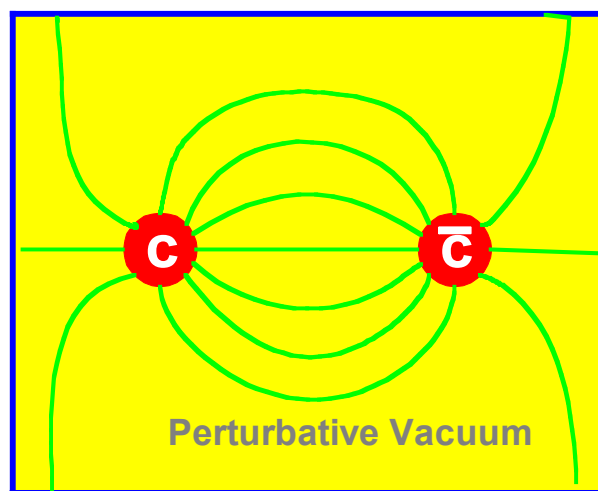


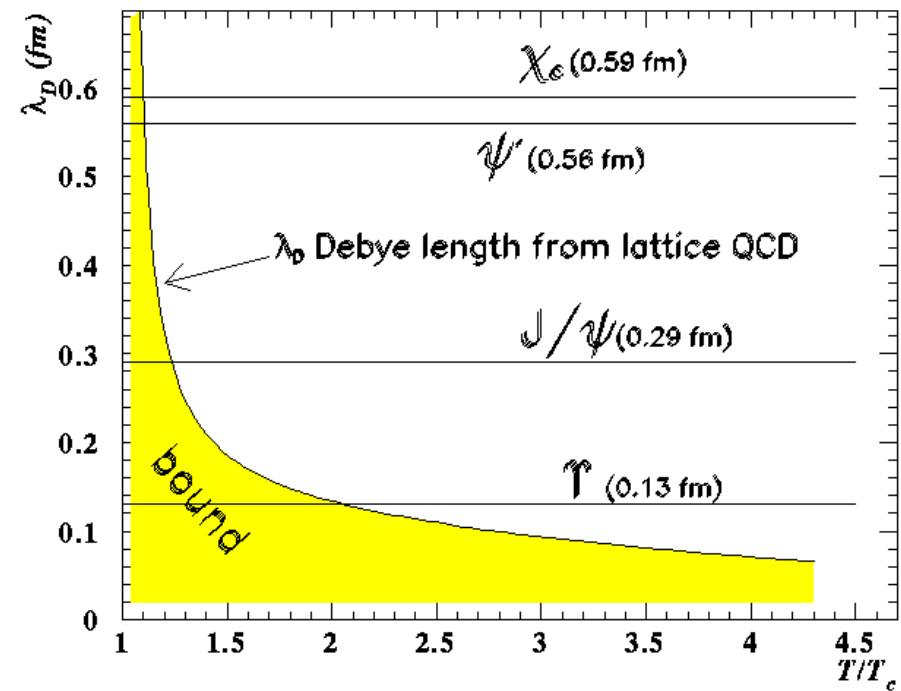
FIG. 2. Mass spectrum showing the existence of J/ψ . Results from two spectrometer settings are plotted showing that the peak is independent of spectrometer currents. The run at reduced current was taken two months later than the normal run.

“psi” particle
 B. Richter

QGP 中でのカラーデバイ遮蔽



- J/ψ : c-cbar 束縛状態 (Charmonium).
- Y : b-bbar 束縛状態 (Bottomonium).
- J/ψ & Y suppression by Debye screening effect of color charge, above the critical temperature T_c .
- One of the QGP signatures.
- Proposed by T. Matsui and H. Satz, Phys. Lett. **B178**, 416 (1986).



クォーコニウム状態の連続融解

c-cbar

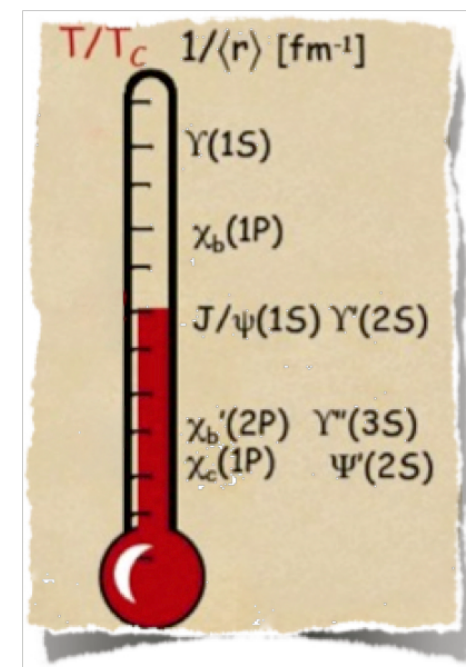
State	J/ψ (1S)	χ_c (1P)	ψ' (2S)
m (GeV/c ²)	3.10	3.53	3.68
r_0 (fm)	0.50	0.72	0.90

b-bbar

State	Υ (1S)	χ_b (1P)	Υ' (2S)	χ'_b (2P)	Υ'' (3S)
m (GeV/c ²)	9.46	9.99	10.02	10.26	10.36
r_0 (fm)	0.28	0.44	0.56	0.68	0.78

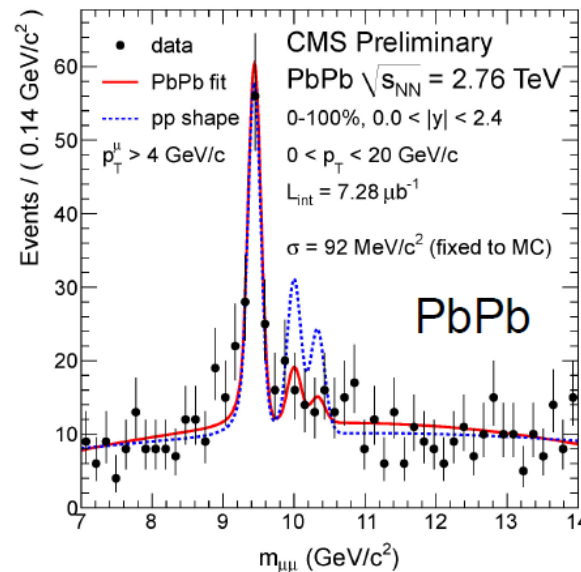
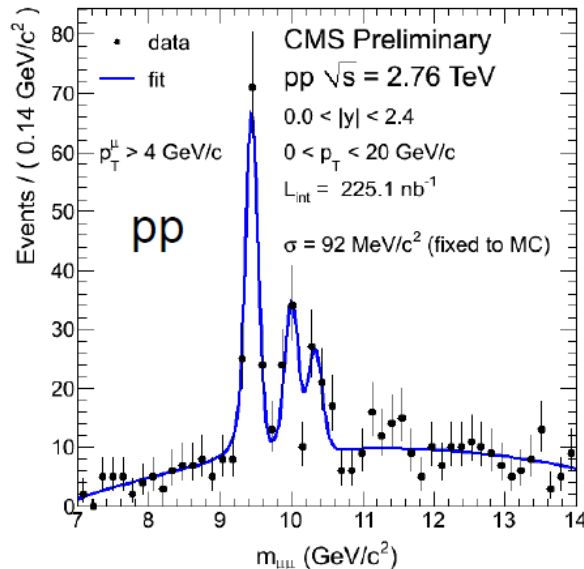
→
decreasing binding energy

クォーコニウム状態のすべての粒子を測
→ QGP の温度計になる。



Higher Υ States Suppression (CMS)

- より高い励起状態：より早く溶けると予想。



CMS-PAS-HIN-10-006
CMS-PAS-HIN-11-007
CMS (S. Chatrchyan et al.),
arXiv:1105.4894 [nucl-ex]
(2011)

$$\Upsilon(2S + 3S)/\Upsilon(1S)\Big|_{pp} = 0.78^{+0.16}_{-0.14} \pm 0.02$$

$$\Upsilon(2S + 3S)/\Upsilon(1S)\Big|_{PbPb} = 0.24^{+0.13}_{-0.12} \pm 0.02$$

$$\frac{\Upsilon(2S + 3S)/\Upsilon(1S)\Big|_{PbPb}}{\Upsilon(2S + 3S)/\Upsilon(1S)\Big|_{pp}} = 0.31^{+0.19}_{-0.15} \pm 0.03$$

- $\Upsilon(1s)$ suppressed by 0.6 ± 0.15
- $\Upsilon(2s, 3s)$ further suppressed; 2.4σ effect

TOPICAL REVIEW

Colour deconfinement and quarkonium binding

Helmut Satz

Fakultät für Physik, Universität Bielefeld, Postfach 100 131, D-33501 Bielefeld, Germany
and
Centro de Física Teórica de Partículas (CFTP), Instituto Superior Técnico,
Av. Rovisco Pais, P-1049-001 Lisbon, Portugal

Received 14 September 2005

Published 8 February 2006

Online at stacks.iop.org/JPhysG/32/R25**Table 1.** Charmonium states and binding energies.

State	η_c	J/ψ	χ_{c0}	χ_{c1}	χ_{c2}	ψ'
Mass (GeV)	2.98	3.10	3.42	3.51	3.56	3.69
ΔE (GeV)	0.75	0.64	0.32	0.22	0.18	0.05

Table 2. Bottomonium states and binding energies.

State	Υ	χ_{b0}	χ_{b1}	χ_{b2}	Υ'	χ'_{b0}	χ'_{b1}	χ'_{b2}	Υ''
Mass (GeV)	9.46	9.86	9.89	9.91	10.02	10.23	10.26	10.27	10.36
ΔE (GeV)	1.10	0.70	0.67	0.64	0.53	0.34	0.30	0.29	0.20

Table 4. Quarkonium dissociation temperatures [19].

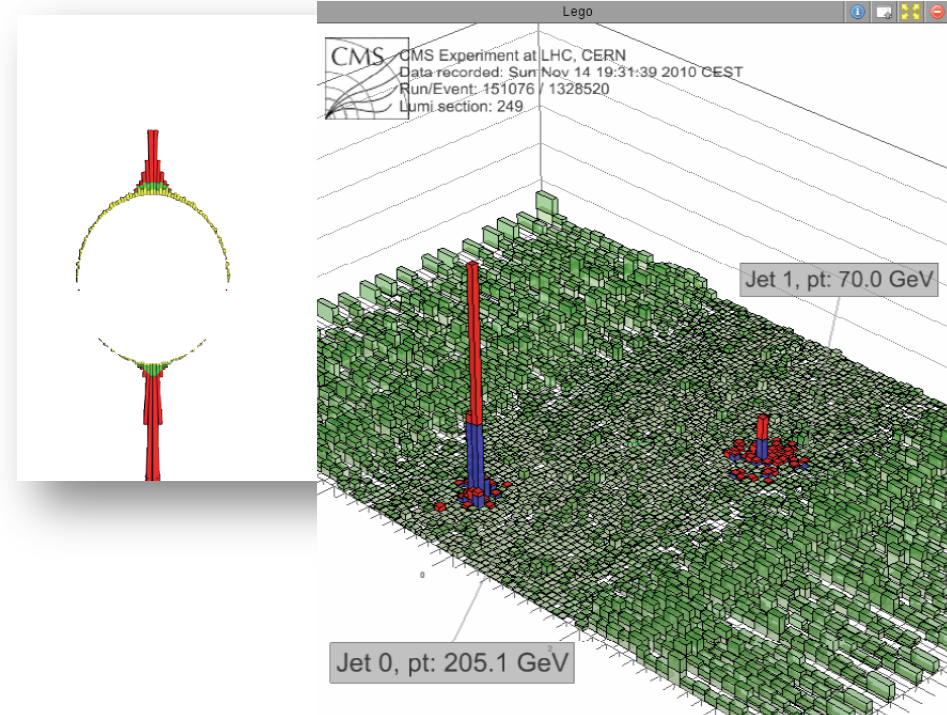
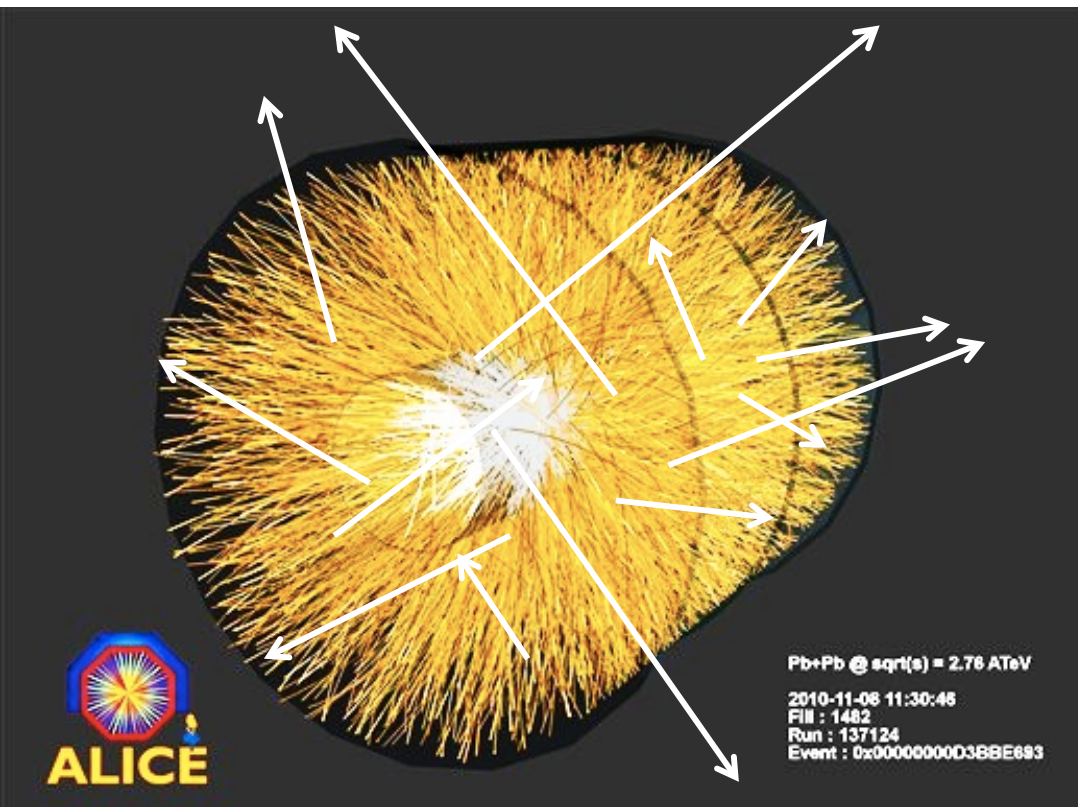
State	$J/\psi(1S)$	$\chi_c(1P)$	$\psi'(2S)$	$\Upsilon(1S)$	$\chi_b(1P)$	$\Upsilon(2S)$	$\chi_b(2P)$	$\Upsilon(3S)$
T_d/T_c	2.10	1.16	1.12	>4.0	1.76	1.60	1.19	1.17

まとめ

- ・ 2010年より、世界最高エネルギーによる高エネルギー原子核衝突実験が、CERN-LHC 加速器で始まった。
- ・ ビックバンから数10 μ 秒後の状態、“リトルバン”を再現
- ・ 地球上で最も高温・高エネルギー密度物質 (QGP) を生成
- ・ 様々な観測量から、LHC で生成されたQGPの性質が明らかになりつつある。
- ・ 実験はまだ始まったばかり。全く予想しない新発見も！

たとえば

ジェットによって失われた大きなエネルギー：どう使われる？



ジェットがQGP 物質を再加熱しているのかもしれない？

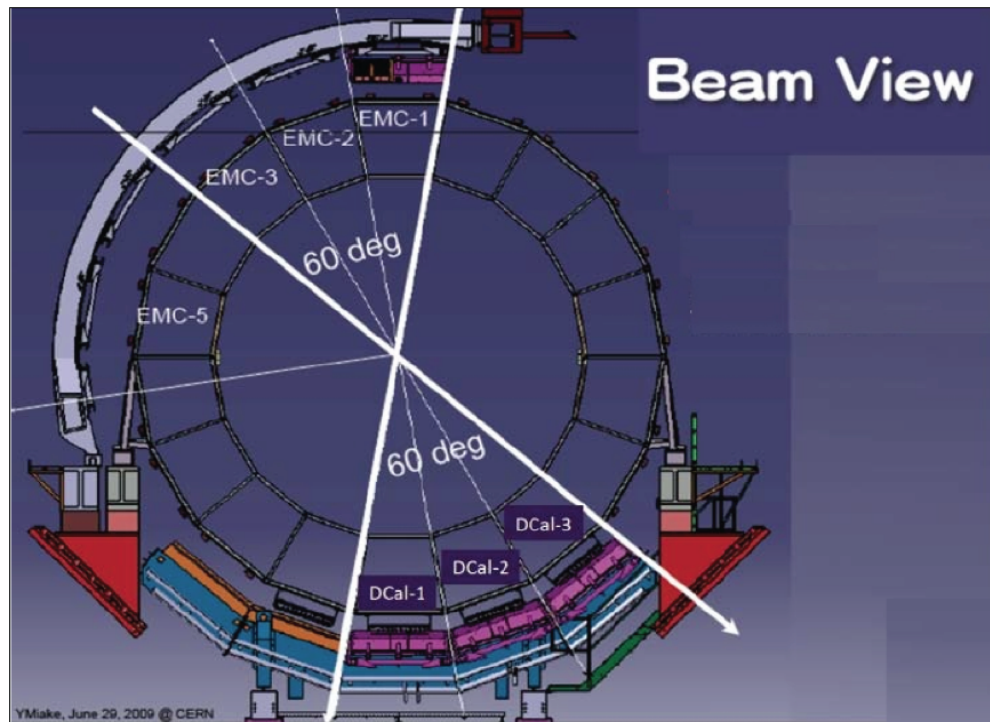
High Multiplicity Event in p+p 7 TeV



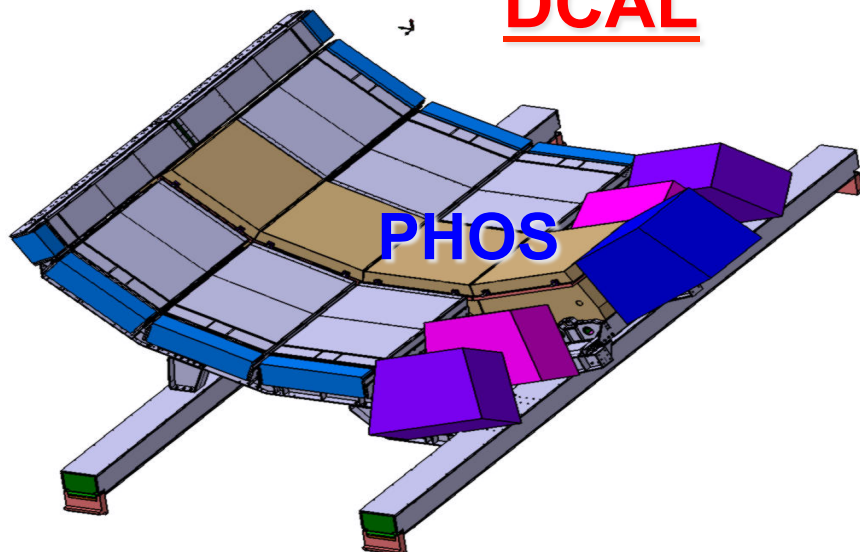
**p+p 高多重度イベント @ LHC =
RHIC energy (200 GeV) Cu+Cu 衝突に相当
陽子・陽子衝突でも QGP があるかもしれない。**

筑波大グループの貢献 (ALICE 実験 EMCAL)

ALICE ダイジェット測定用 電磁カロリメータ検出器の製作(筑波大)

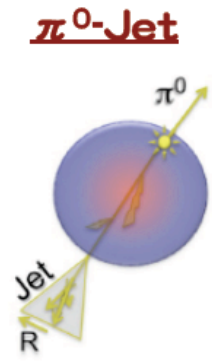
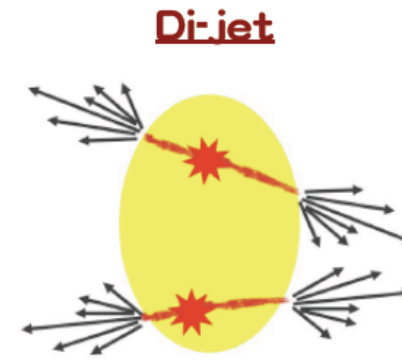
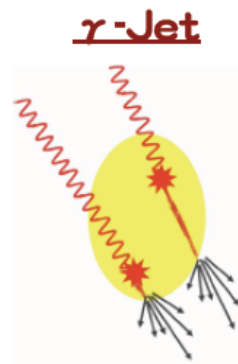


DCAL



A **60% expansion of EMCal** arranged to permit back-to-back hadron-jet, jet-jet and gamma-jet measurements.

Goal: **QGP tomography** via detailed «**jet quenching**» studies: PbPb/pp jet x-section ratios, fragmentation functions, ...



筑波大学での電磁力ロリメータモジュール 製作 (2011.7 完了)

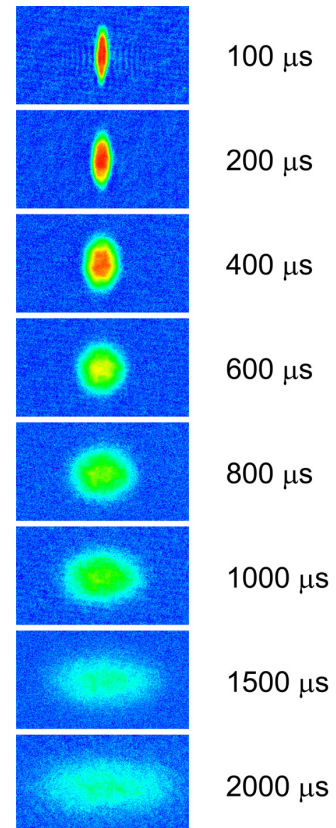
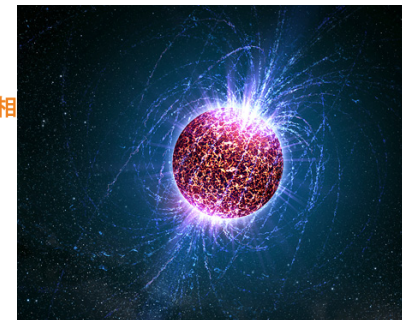
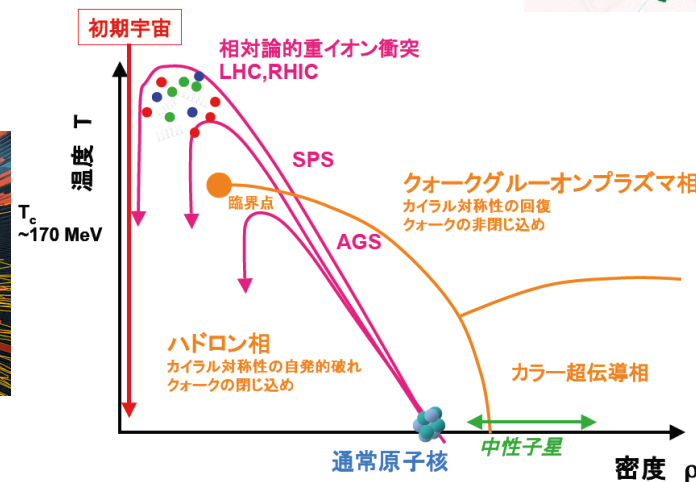
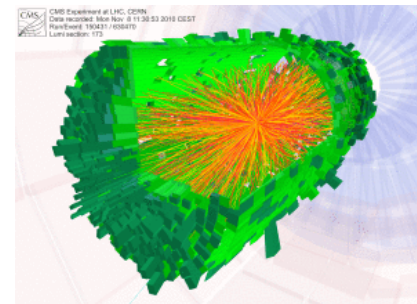
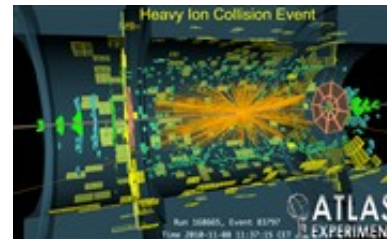
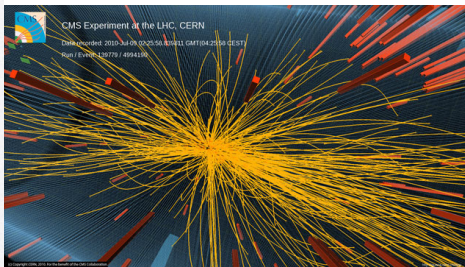
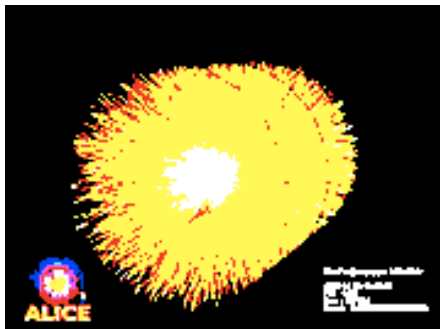
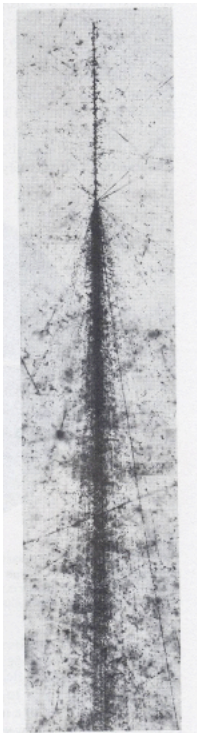




- 2011年7月 筑波大での製作完了
- 2011年8月 フランス(グルノーブル)モジュールの組み上げ
- 2012-2013年に ALICE 実験エリアにインストール 予定

最後に…

- QGP = クォーク多体系の物理.
 - 高温物質生成から初期宇宙の状態に迫る.
- 多様な分野とクロスオーバーがある面白さ
 - 低温物性（強相関）、素粒子物理、宇宙物理（初期宇宙、中性子星、超高エネルギー宇宙線）、質量の起源（カイラル対称性の破れの回復）、カラー超伝導、強磁場の物理、AdS/CFT etc…
- 視野を広く持つ → 新しい物理につながる。



これが QGP
の本当の姿なの！

