



# 高エネルギー重イオン衝突で探る ビッグバン直後の宇宙

中條 達也  
(筑波大学)

筑波大学・物理学セミナー 2010年11月10日

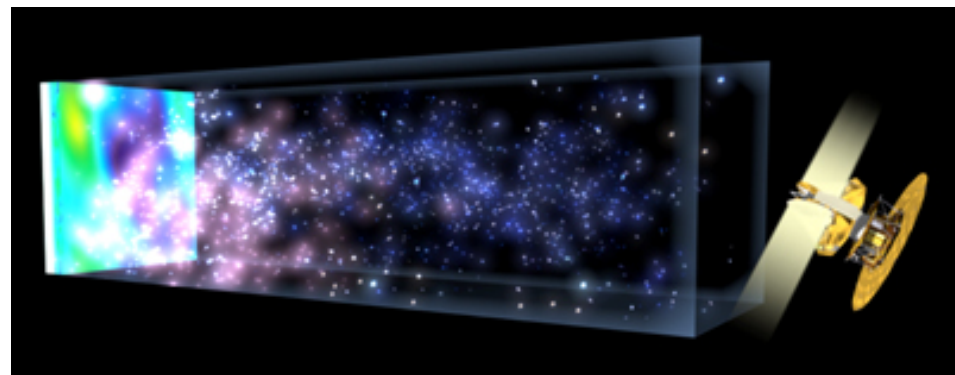
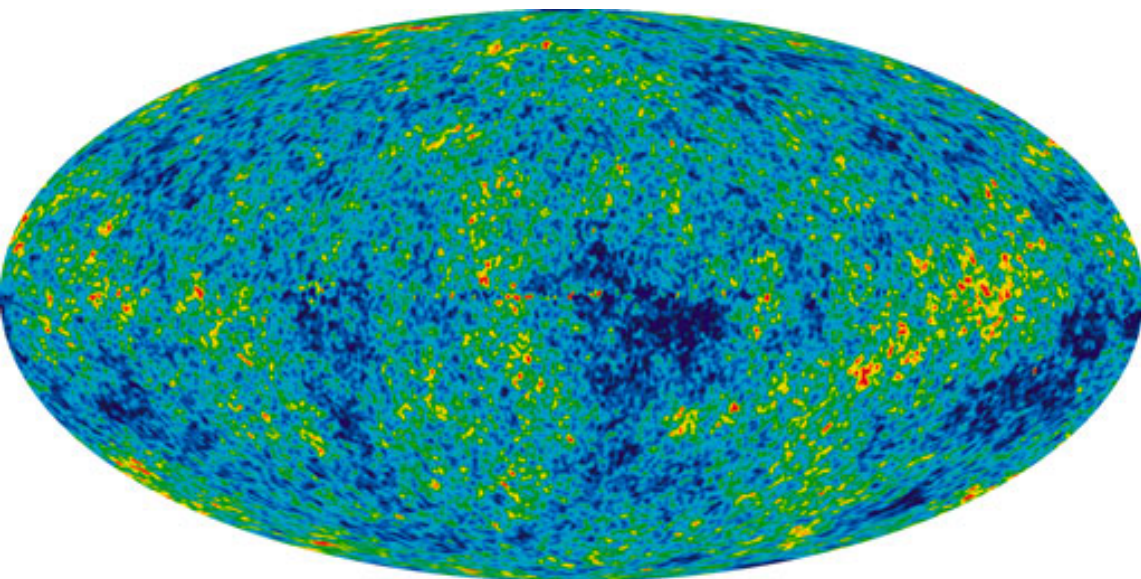


# Contents

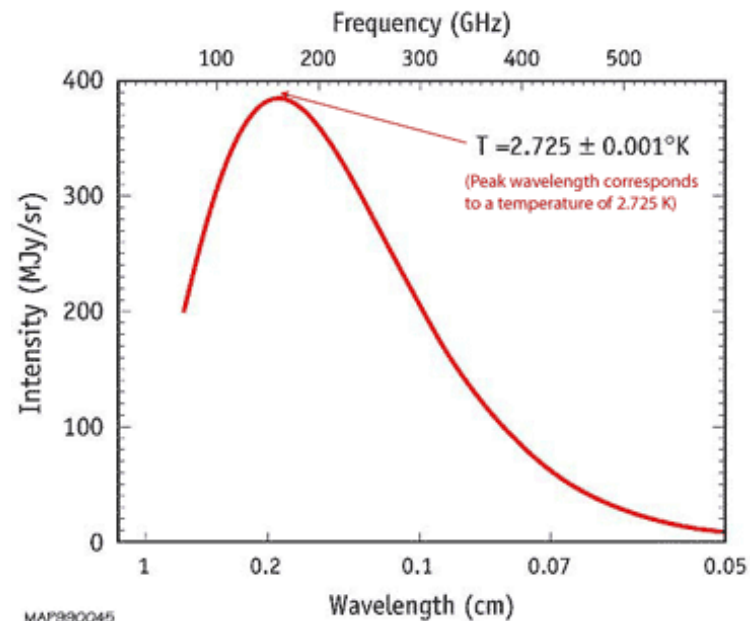
1. イントロダクション
  - “ビッグバン” と “リトルバン”
  - 高エネルギー宇宙線、粒子多重生成現象
  - 高エネルギー重イオン実験
2. RHIC実験のハイライト (2000-)
3. LHC-ALICE実験、始動 (2009-)
4. 今後の展望

# 1. イントロダクション

# Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP, 2001-2010)



Spectrum of the Cosmic Microwave Background



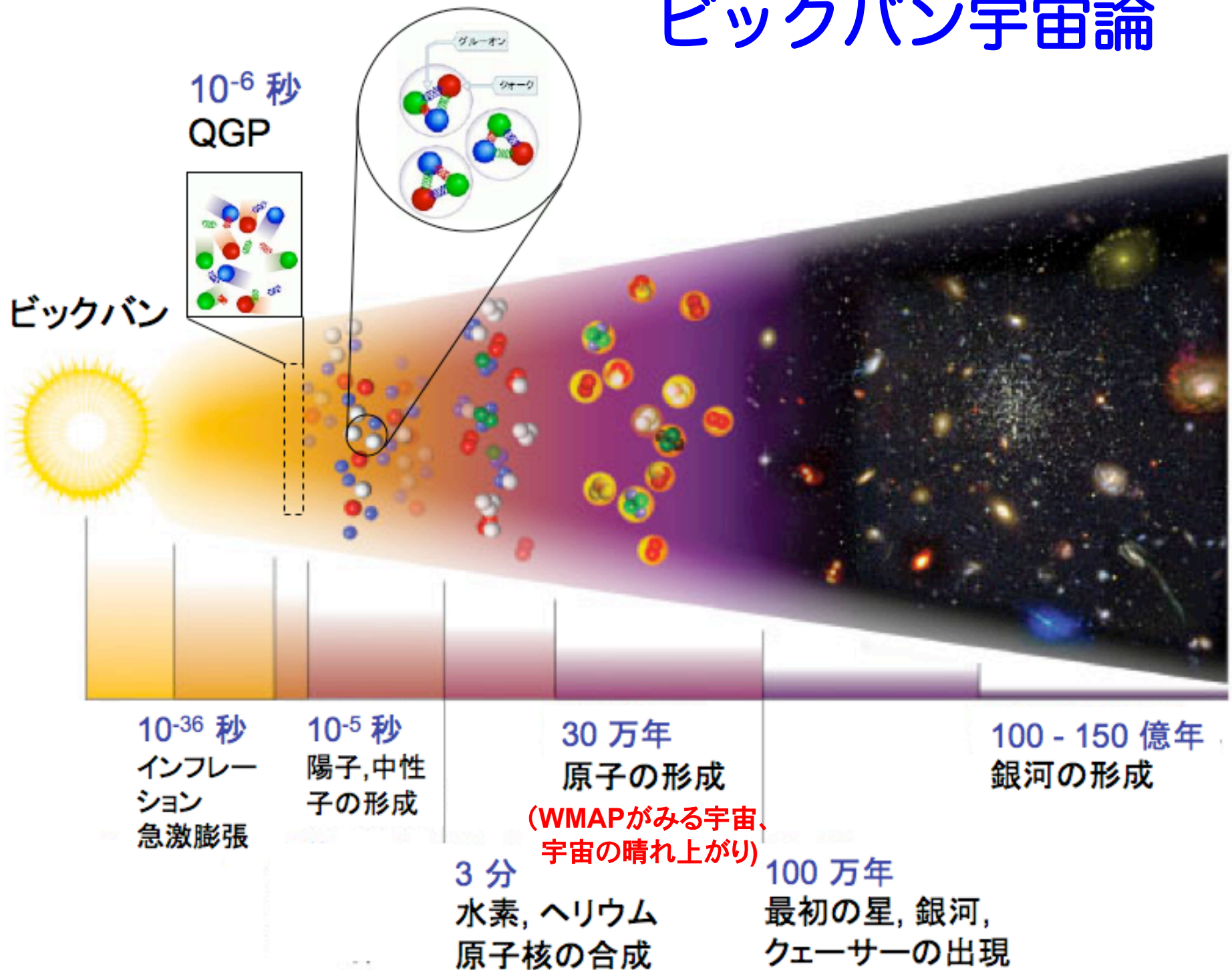
- 宇宙背景放射 (CMB) の温度測定

$T = 2.725 \text{ K}$  (ビッグバン熱放射の名残)

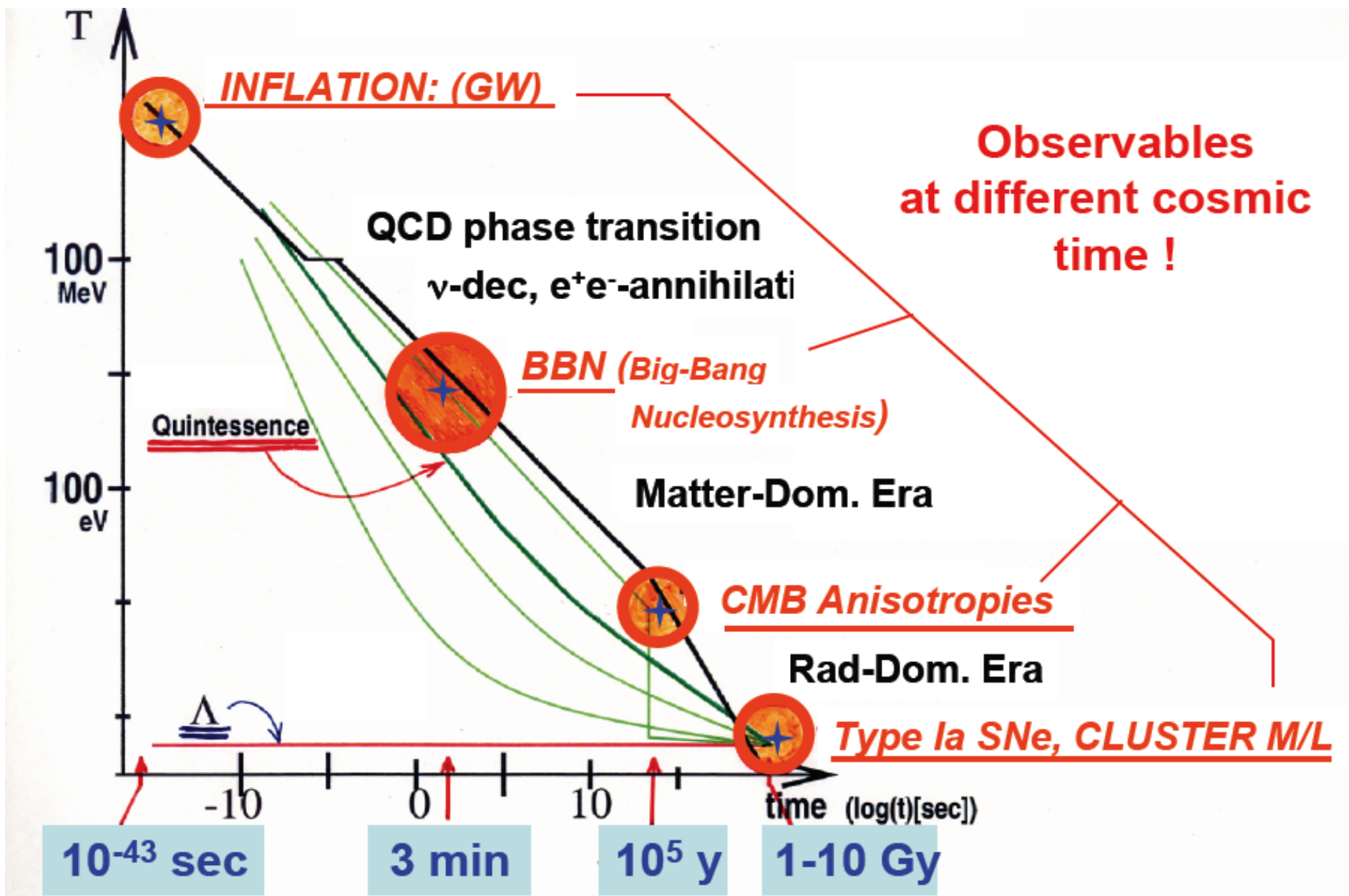
- WMAP 実験 (宇宙組成と宇宙年齢)

温度揺らぎ → 宇宙年齢 137億年

# ビッグバン宇宙論



# 宇宙温度の変遷



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、人工的に作りだせるのであろうか？
- どのように？
- どこまで高温／高密度に？
- 相転移現象は見つかるのか？

# 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,<sup>(a)</sup> T. Ogata, T. A. Parnell, T. Saito, S. Strausz, T. Tabuki, Y. Takahashi,<sup>(b)</sup>

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*

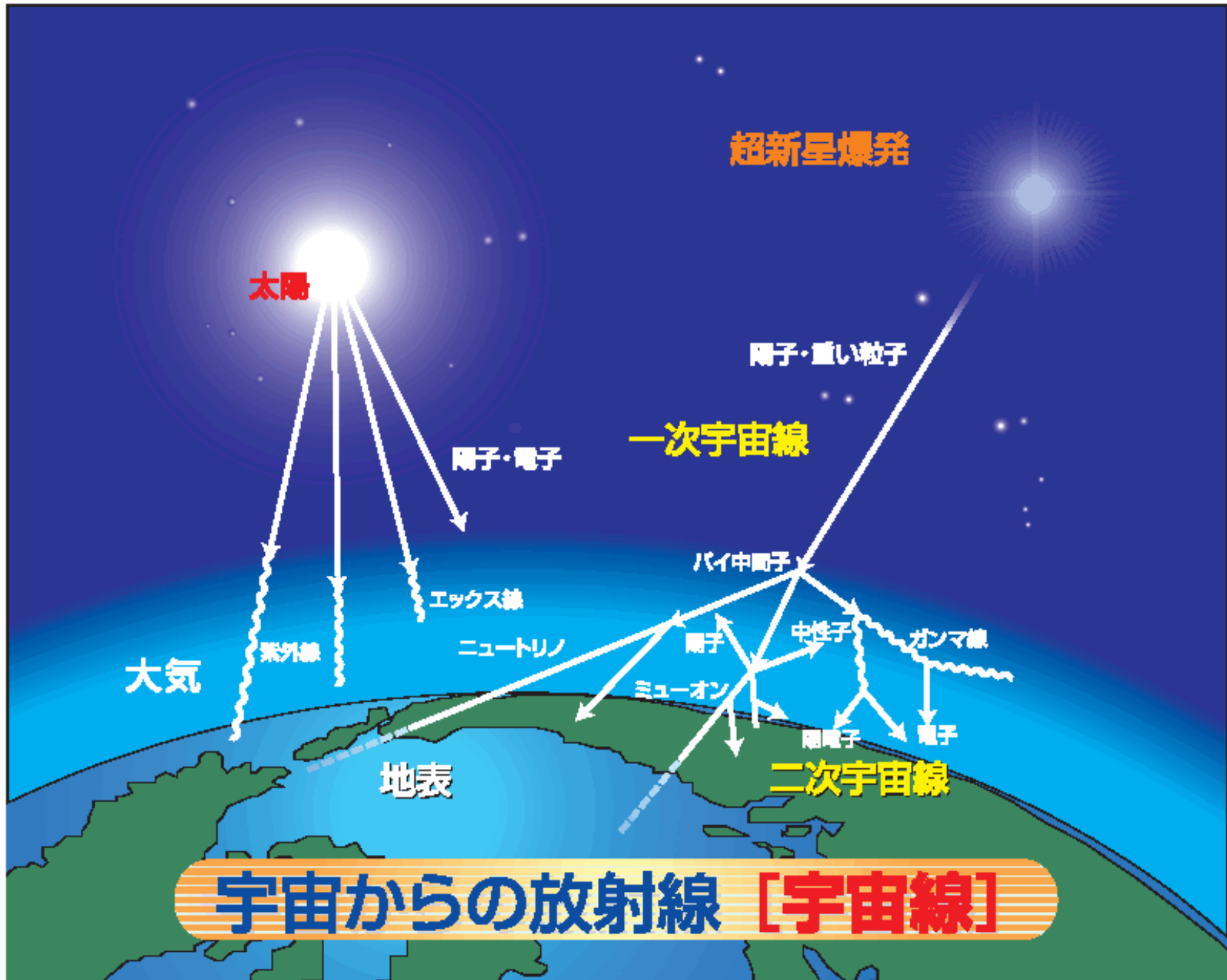
*Department of Physics, University of Washington, Seattle, Washington 98105*

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

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

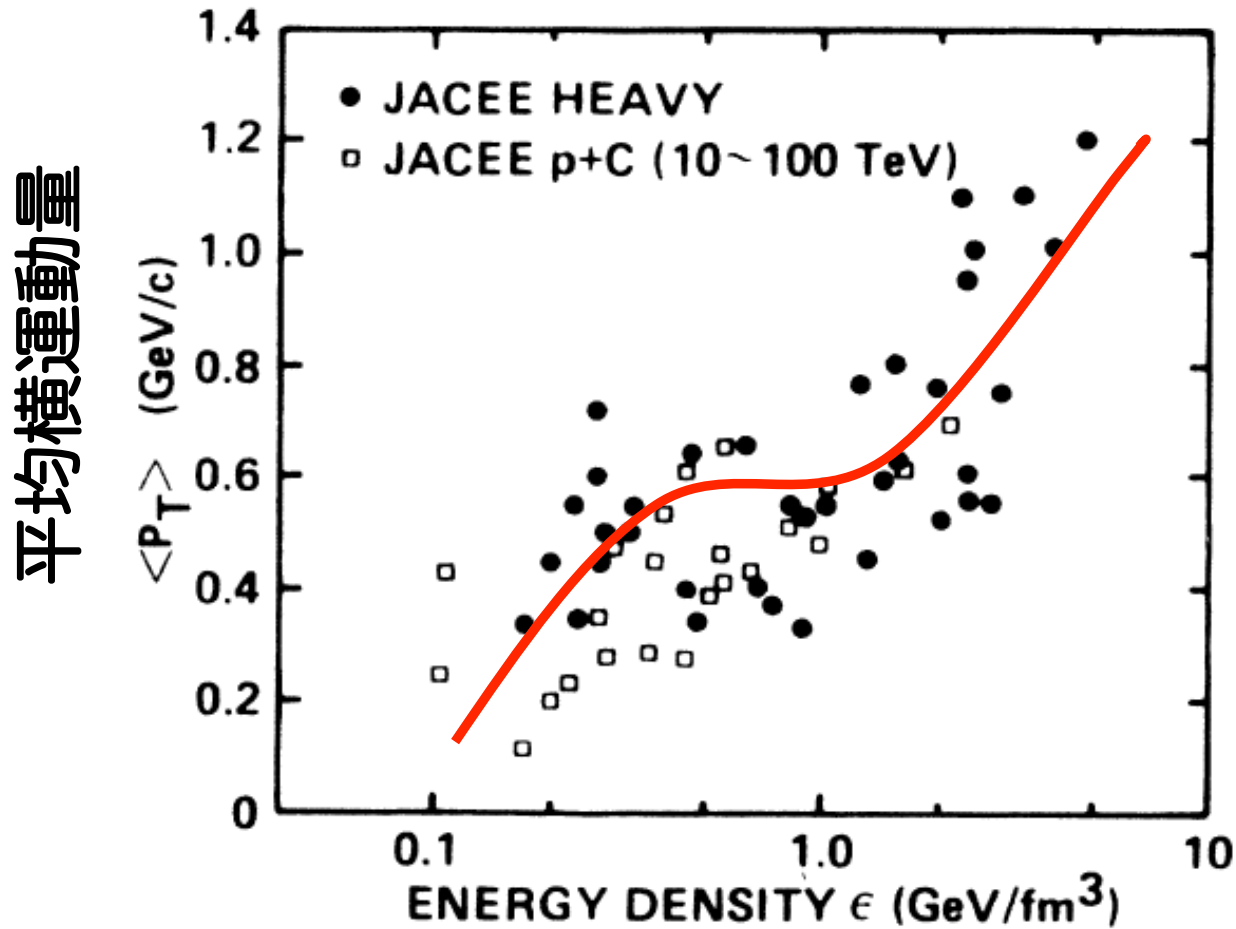
Emulsion chambers were used to measure the transverse momenta of photons or  $\pi^0$  mesons produced in high-energy ( $\geq 1$  TeV/amu) cosmic-ray nucleus-nucleus collisions. A group of events having large average transverse momenta has been found which apparently exceeds the expected limiting values. 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](http://www.ies.or.jp/japanese/mini/houshasen_img/utyusen.gif)

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



JACEE: PRD 57 (1986) 3249

エネルギー密度

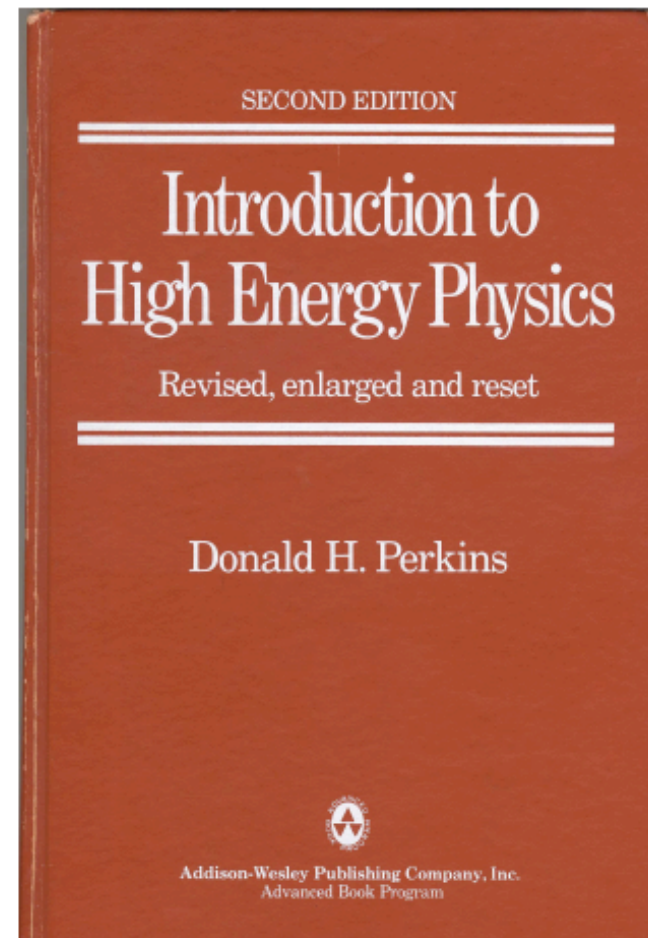
FIG. 3. Correlation of  $\langle P_T \rangle$  with the energy density  $\epsilon$ . Full circles are for individual nucleus events ( $2 \leq Z \leq 26$ ) and open squares are for proton-lucite events.

# 背景；その2

## 宇宙線による多粒子発生現象（原子核衝突）

宇宙線の多重発生イベント

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



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）

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

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 ( $\sim 1$  per  $\text{cm}^2$  per minute) at sea level.

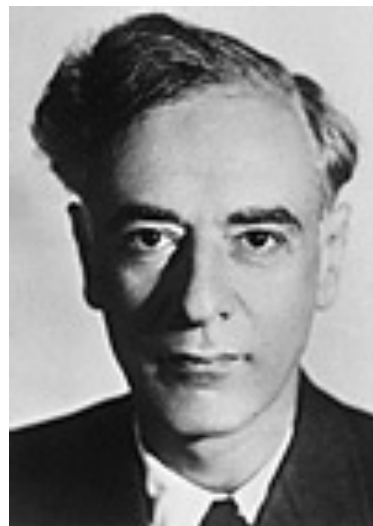


## 1950年代→1980年代

- 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

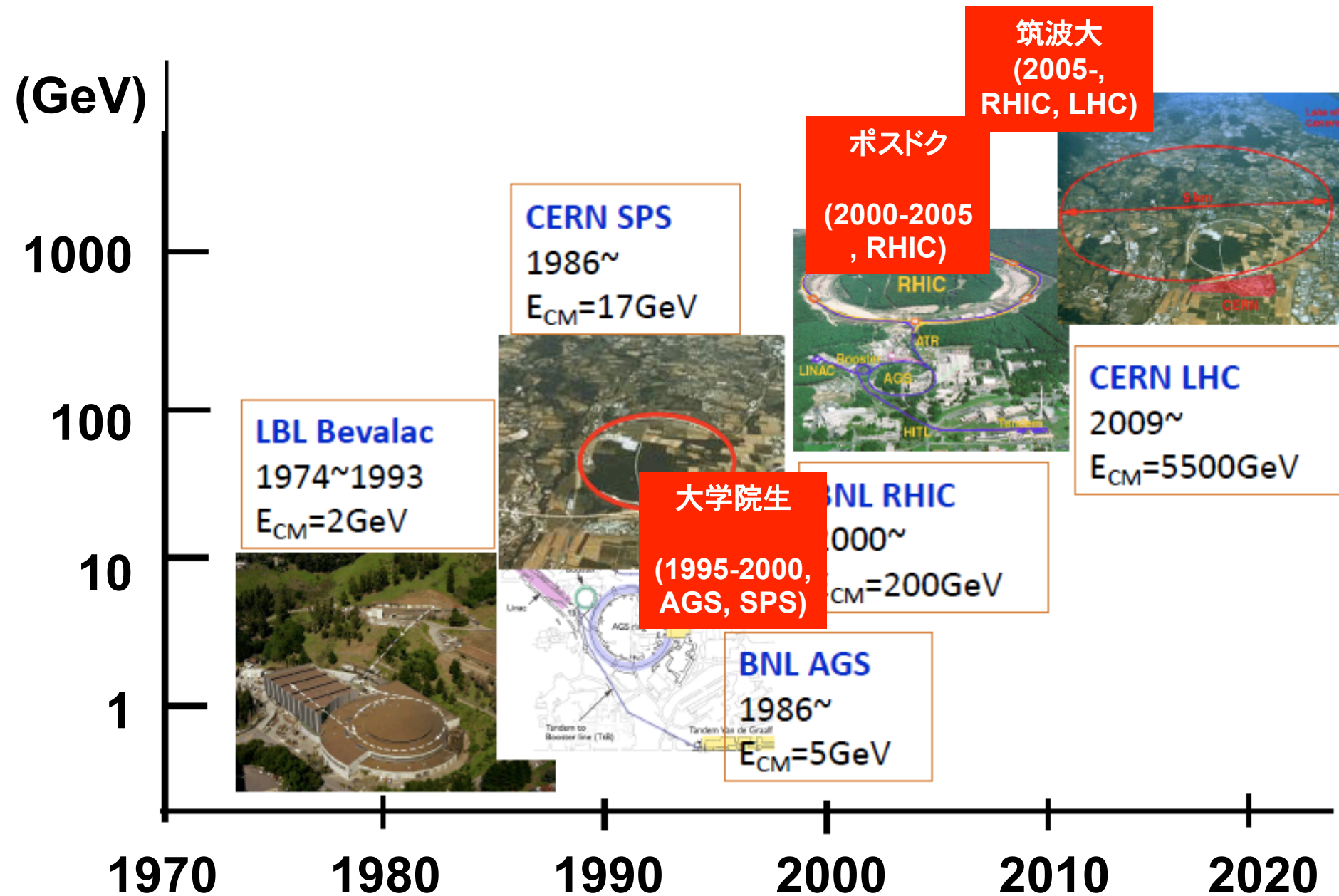


L.D. Landau



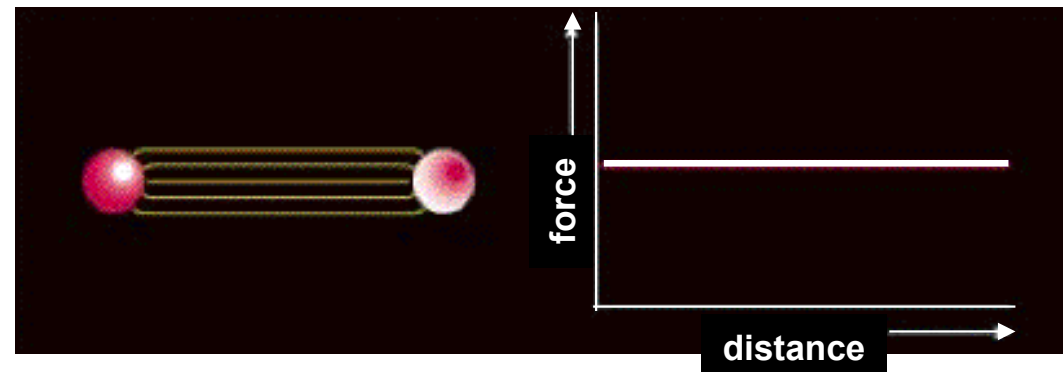
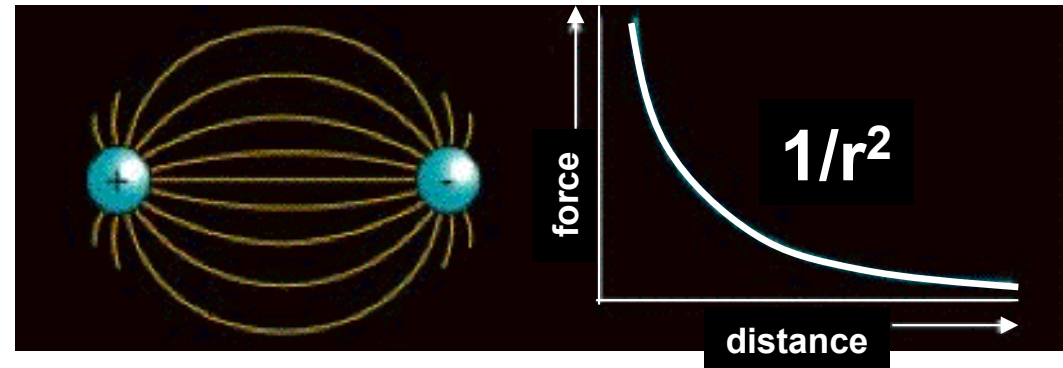
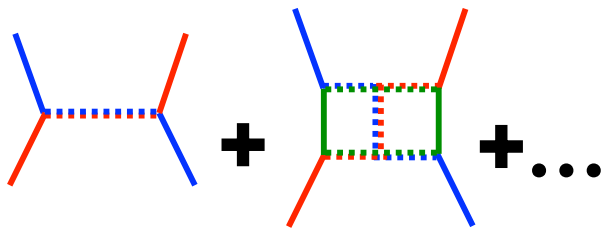
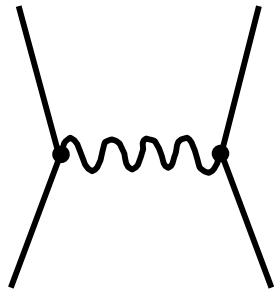
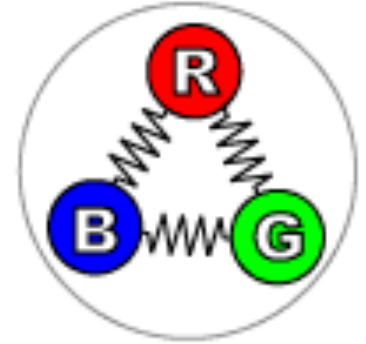
J. Bjorken

# 重イオン加速器発展の歴史



# 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



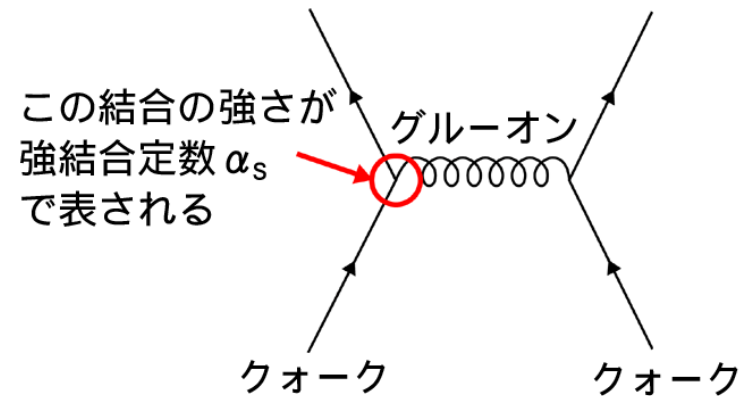
**Frank Wilczek**

🕒 1/3 of the prize

USA

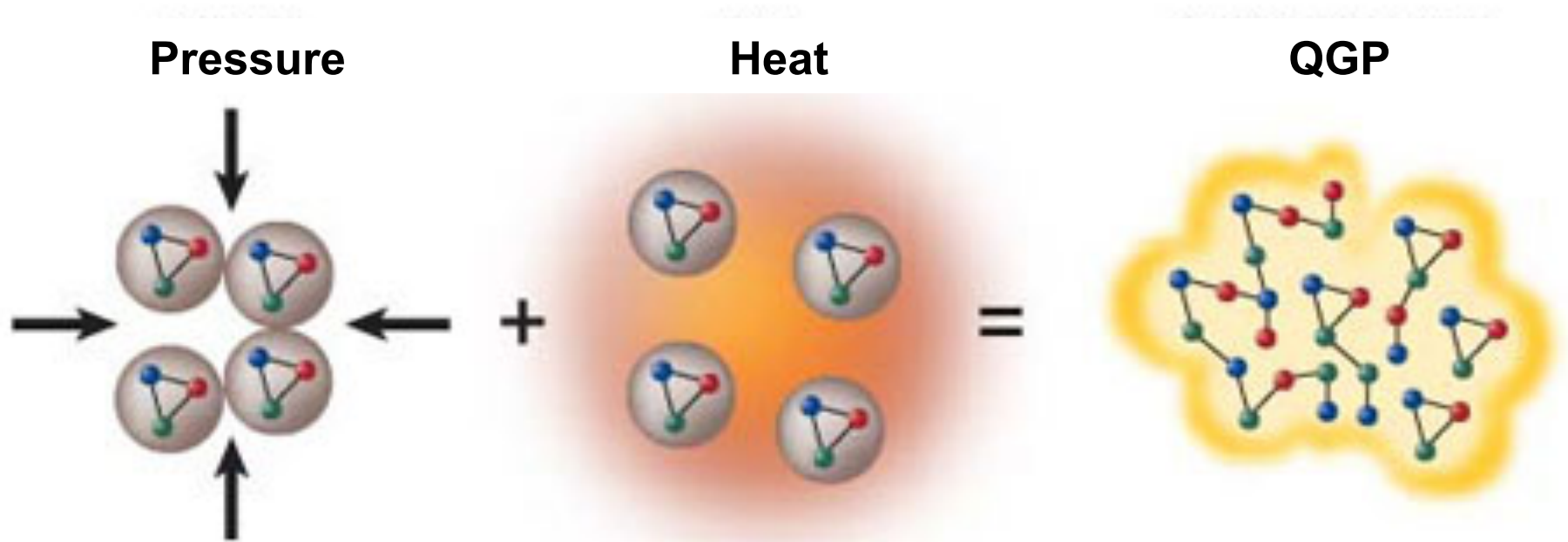
Massachusetts Institute  
of Technology (MIT)  
Cambridge, MA, USA

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？



# 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  $\varepsilon$  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

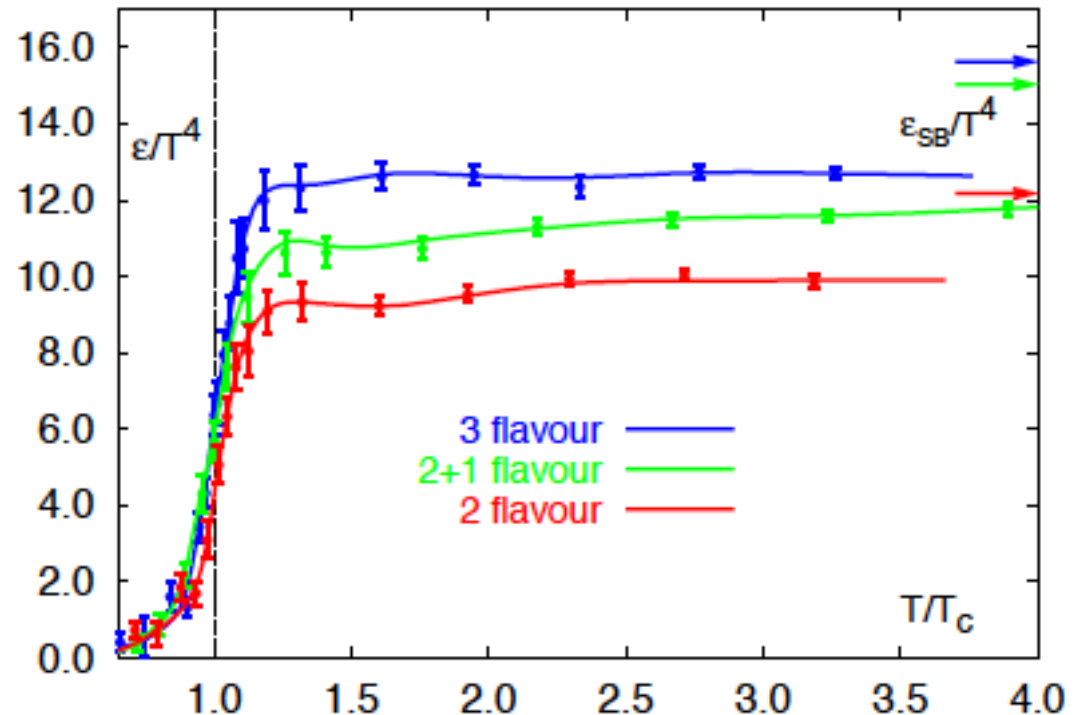
8 グルーオン, 2 スピン;  
2 クォークフレーバ (u,d) と反クォーク,  
2 スピン, 3 カラー

$g = 37!$  (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  $\pi^+$ ,  $\pi^-$ ,  $\pi^0$  中間子が3つで

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

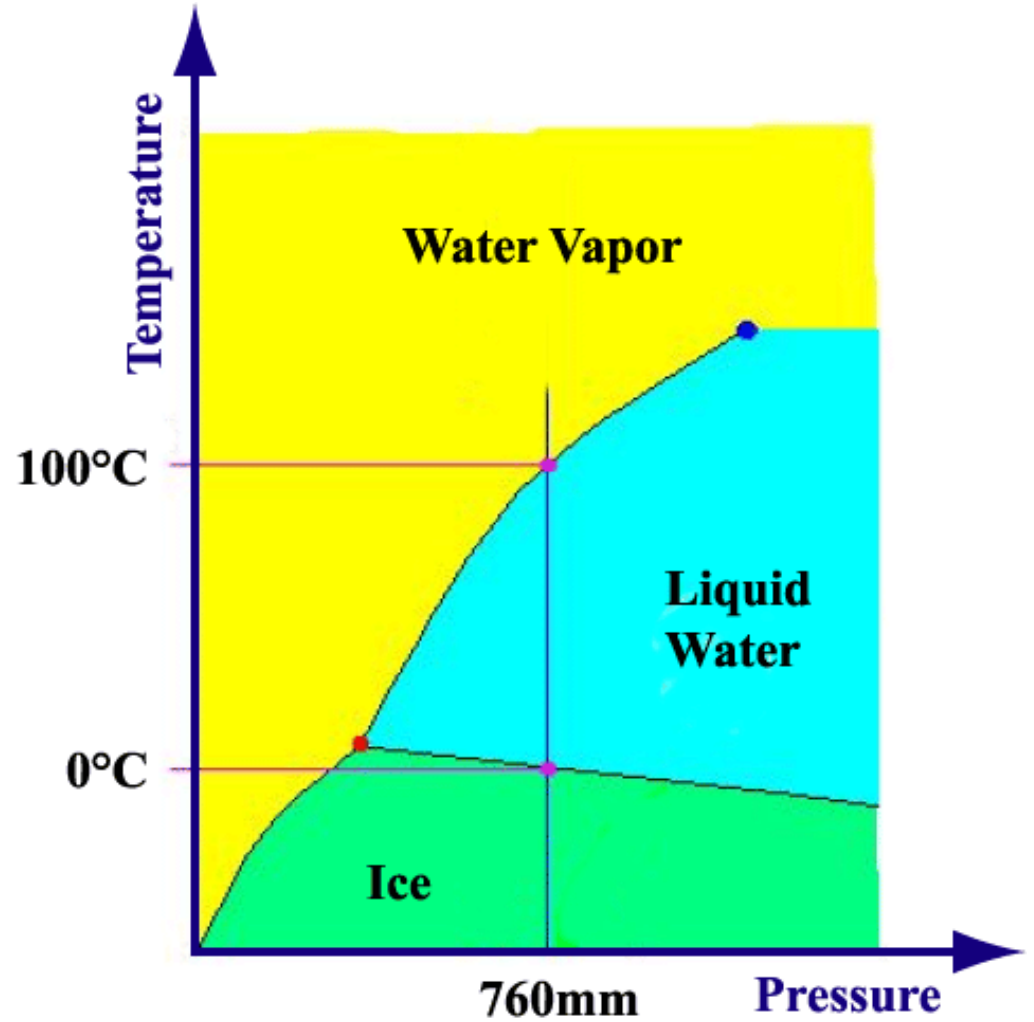
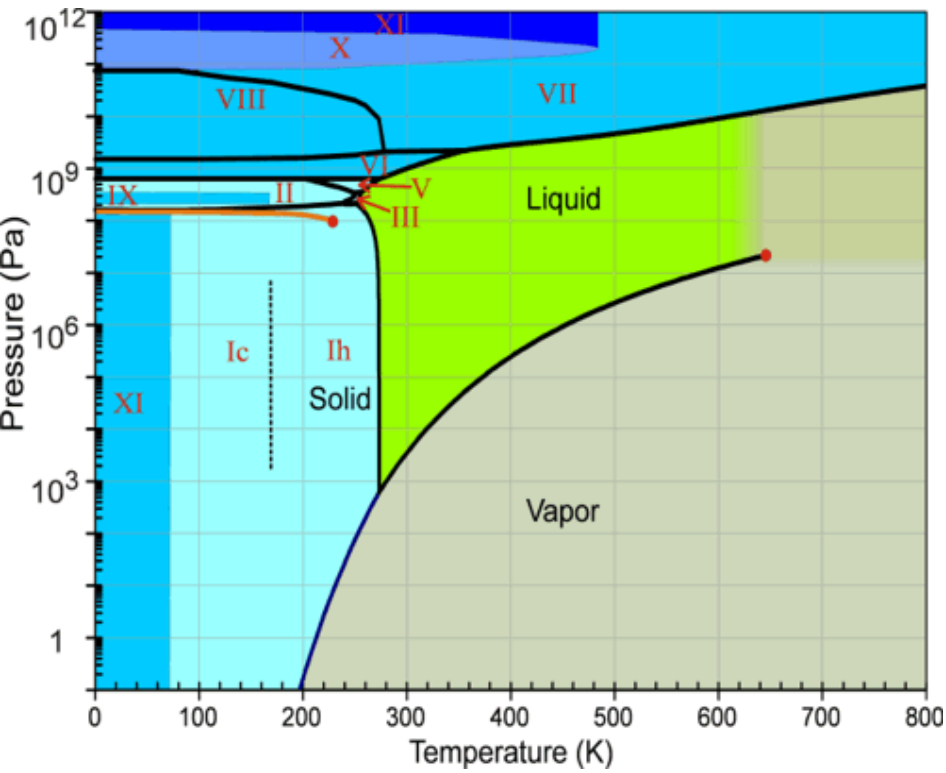


\*通常の原子核のエネルギー密度:  $\varepsilon = 0.2 \text{ GeV}/\text{fm}^3$

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

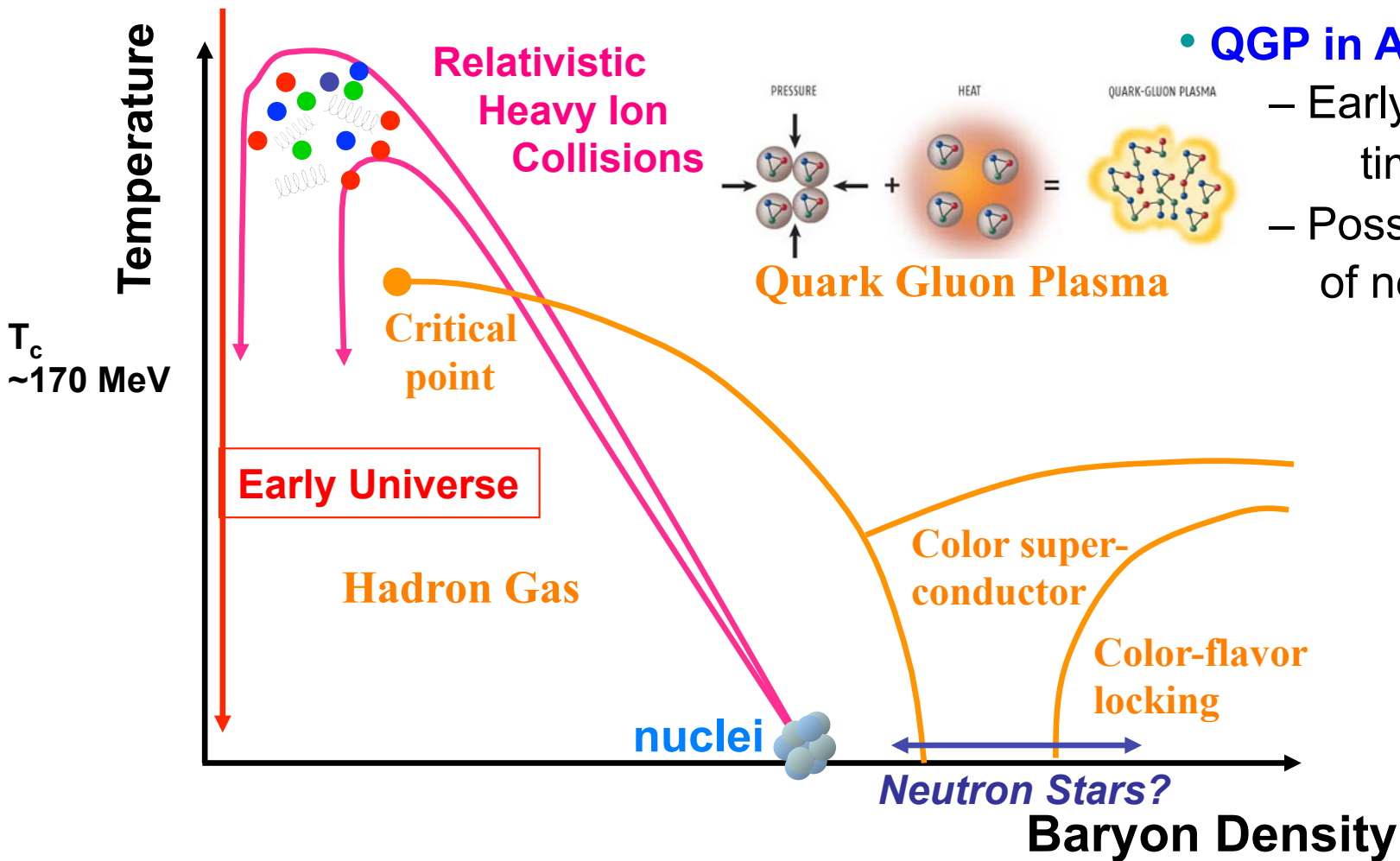
Lattice QCDの予言:  $T_c \sim 170 \text{ MeV}$  18

# 水の相図



[http://www.colorado.edu/physics/phys4230/phys4230\\_sp03/mainPage5.html](http://www.colorado.edu/physics/phys4230/phys4230_sp03/mainPage5.html)

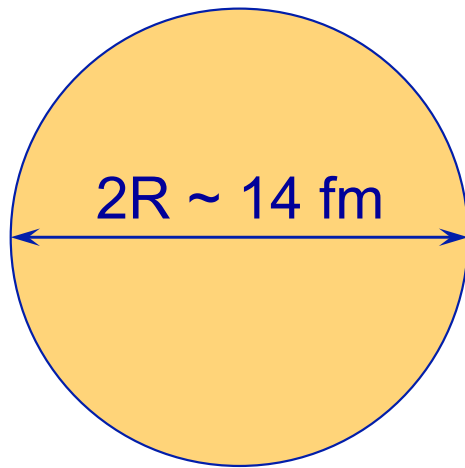
# QCD物質(ハドロン)の相図



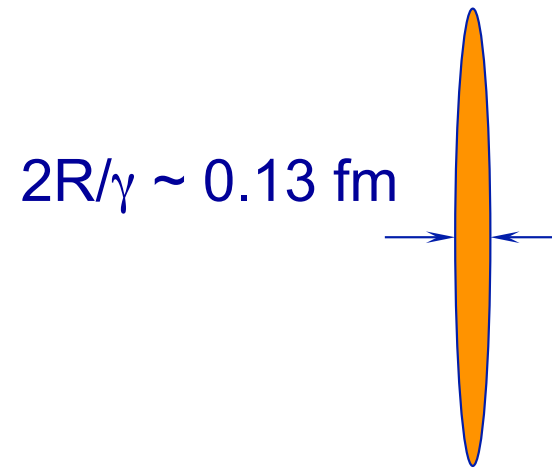
- **QGP in Nuclear Physics**

- 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



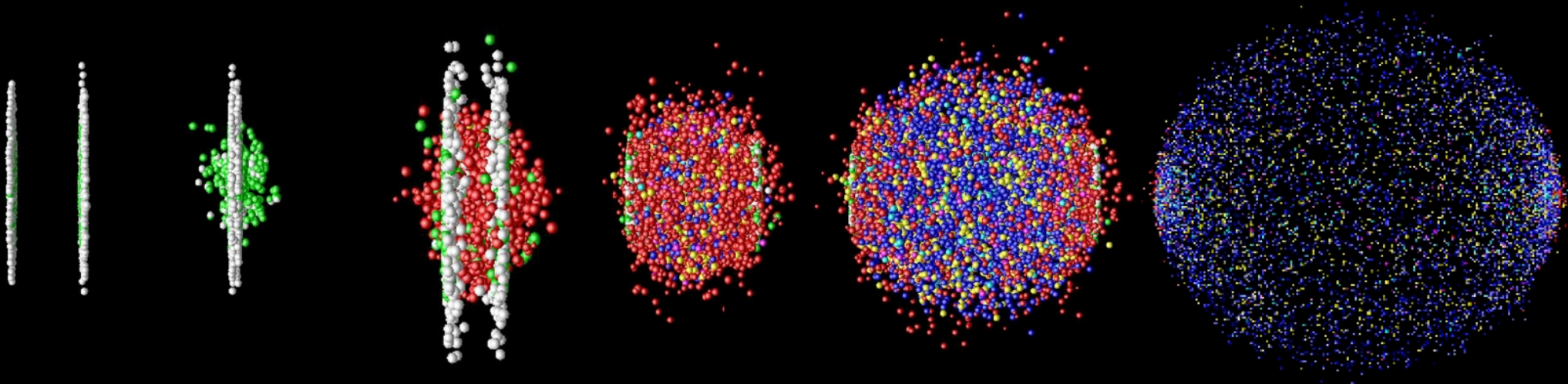
ブーストしている系

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



$t = -19.800$

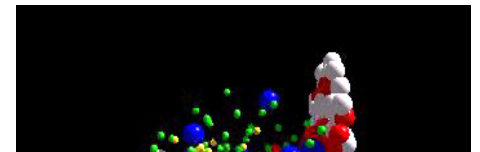
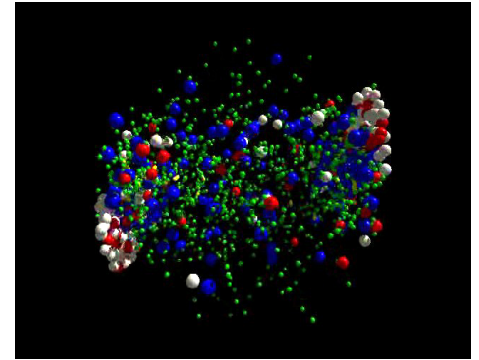
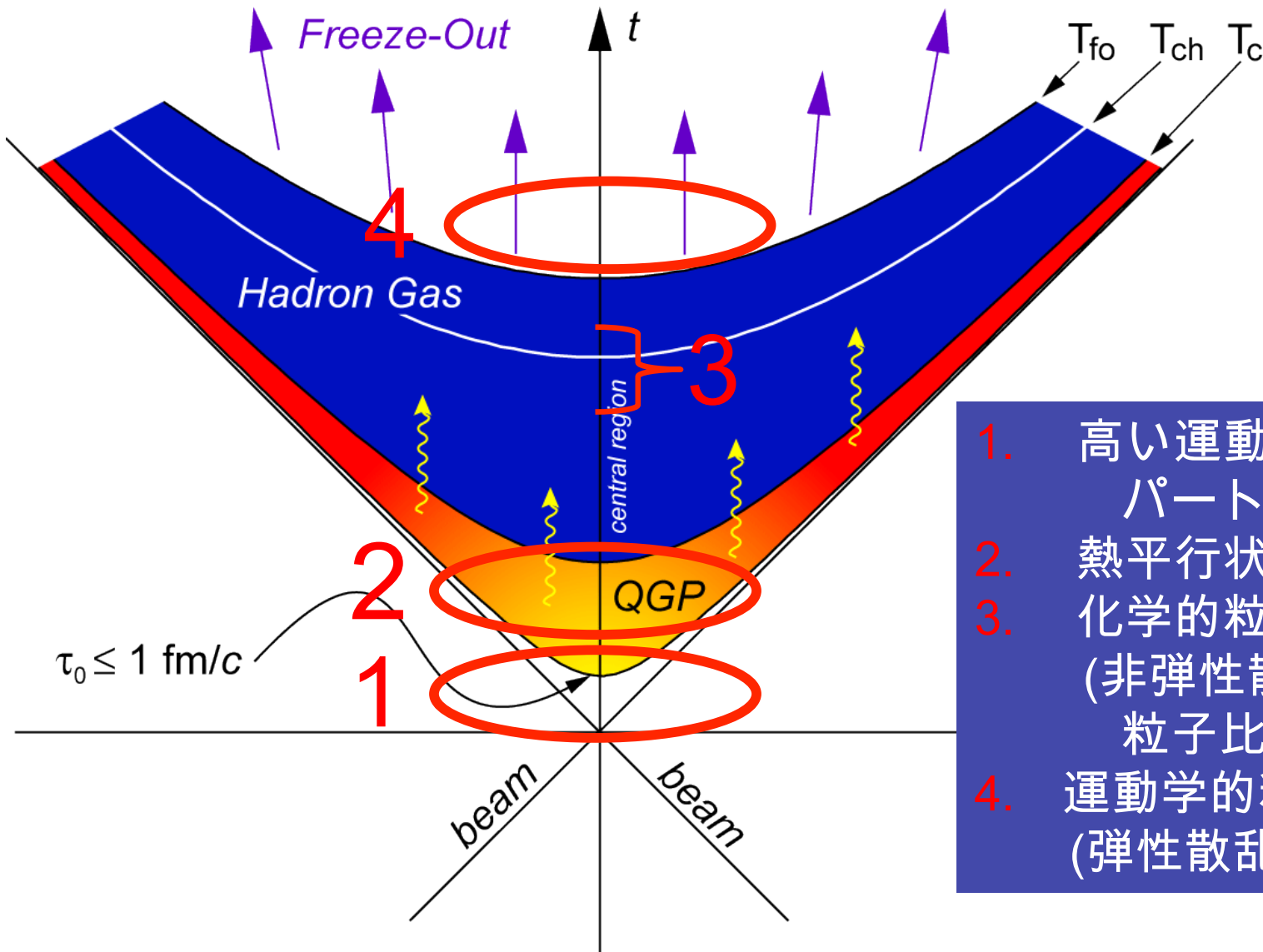
# 高エネルギー原子核衝突はダイナミカル！ (衝突系の時空発展)



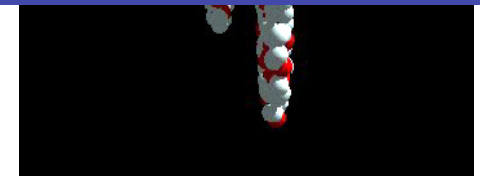
(1)衝突前 (2)衝突直後 (3)パートン散乱 (4)熱平衡、QGP生成 (5)ハドロン生成 (6)膨張とともに終状態へ

時間

# 高エネルギー重イオン衝突の時空発展



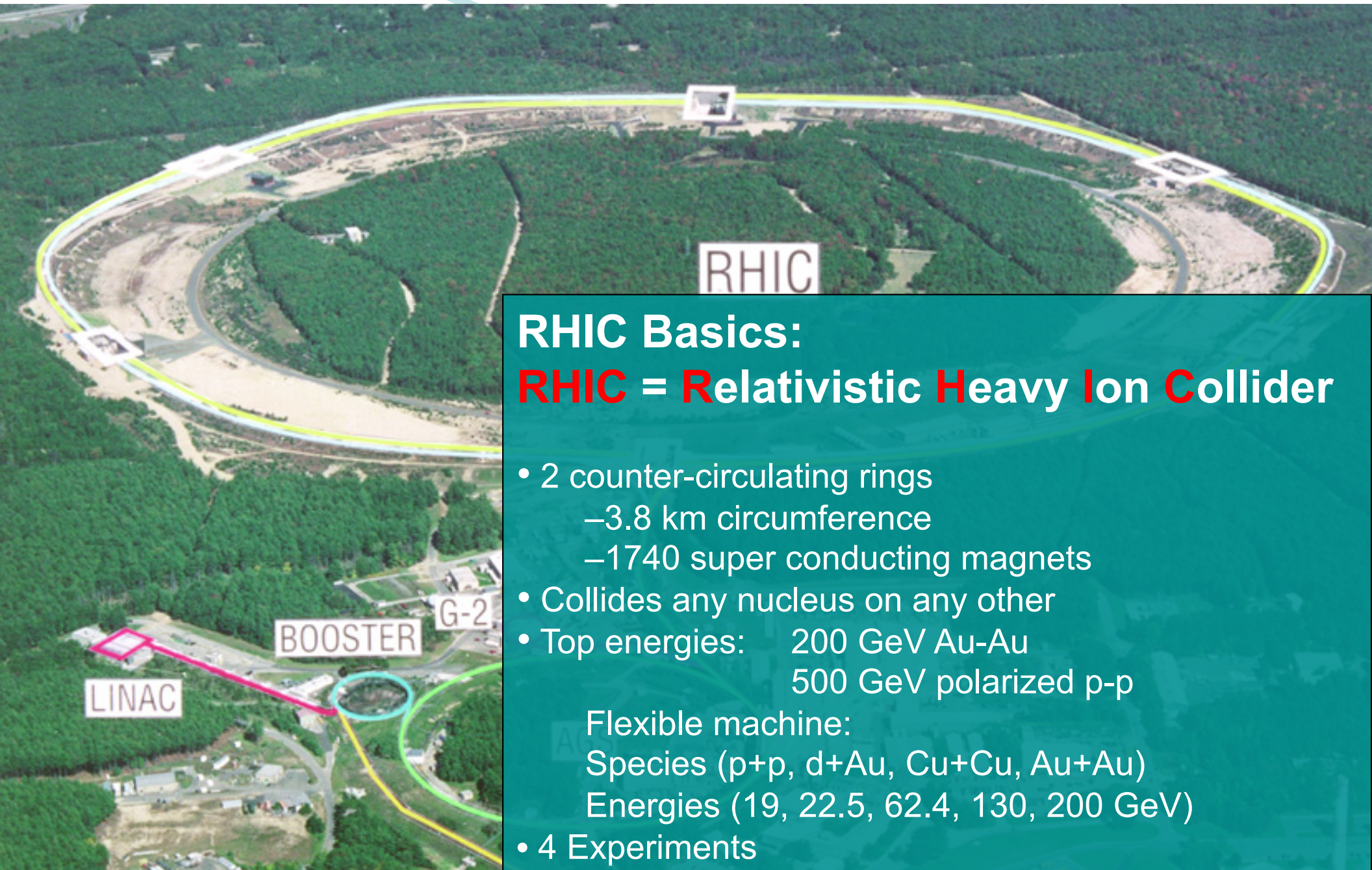
1. 高い運動量移行をともなう  
パートン散乱
2. 熱平行状態とQGP生成
3. 化学的粒子凍結  
(非弾性散乱が終わり、  
粒子比が固定)
4. 運動学的粒子凍結  
(弾性散乱が終る)





## 2. RHIC実験のハイライト (2000- 現在)

# RHIC : 相對論的重イオン衝突型加速器



## RHIC Basics:

**RHIC = Relativistic Heavy Ion Collider**

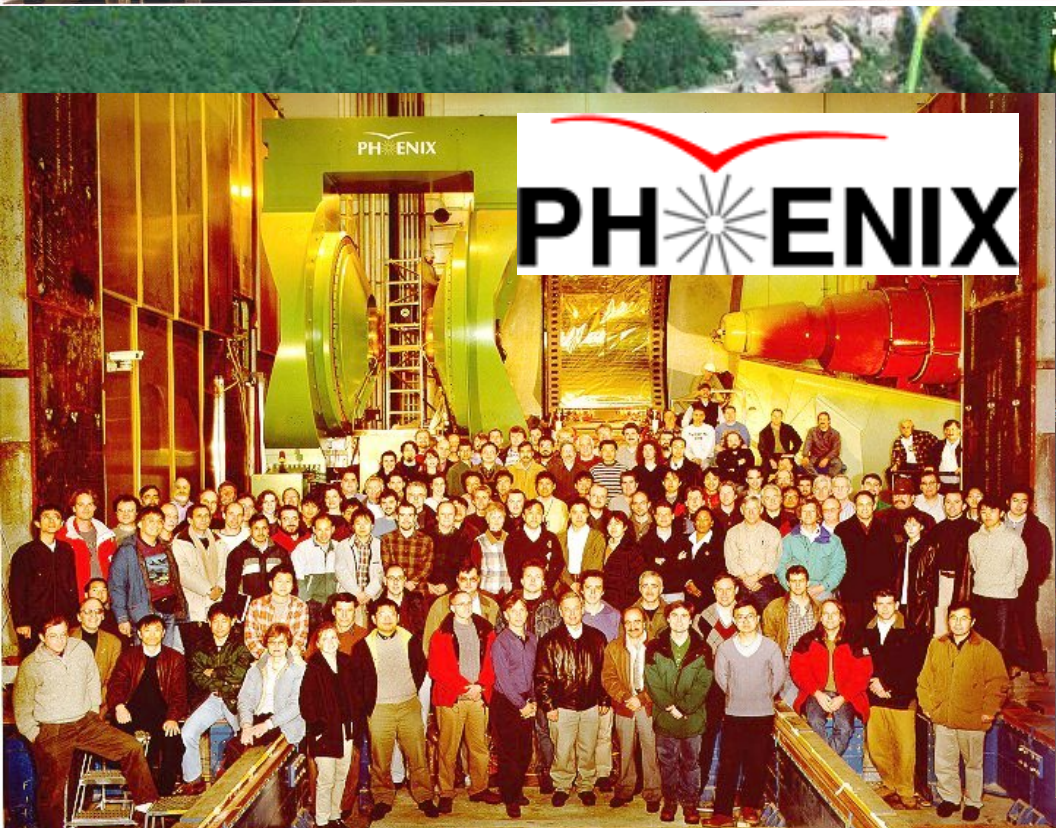
- 2 counter-circulating rings
    - 3.8 km circumference
    - 1740 super conducting magnets
  - Collides any nucleus on any other
  - Top energies: 200 GeV Au-Au  
500 GeV polarized p-p
- Flexible machine:  
Species (p+p, d+Au, Cu+Cu, Au+Au)  
Energies (19, 22.5, 62.4, 130, 200 GeV)
- 4 Experiments



PHOBOS



BRAHMS

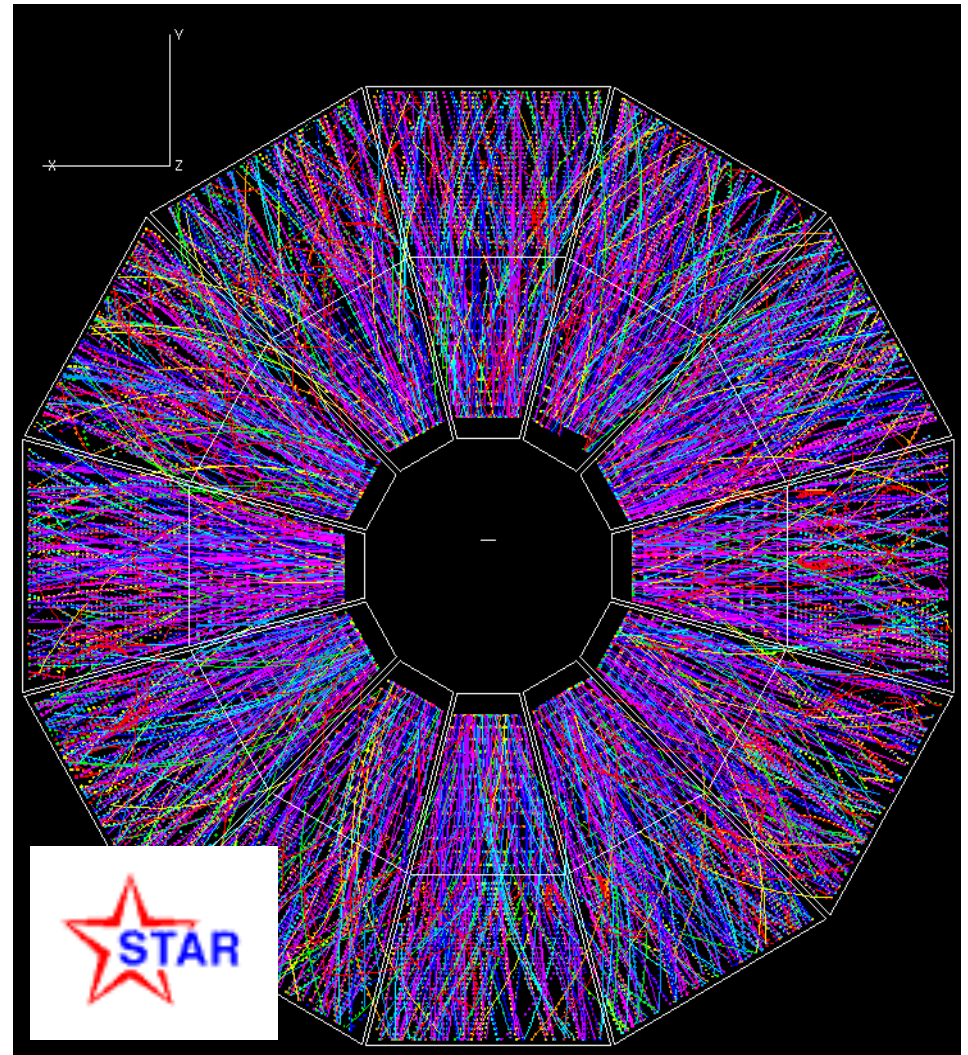
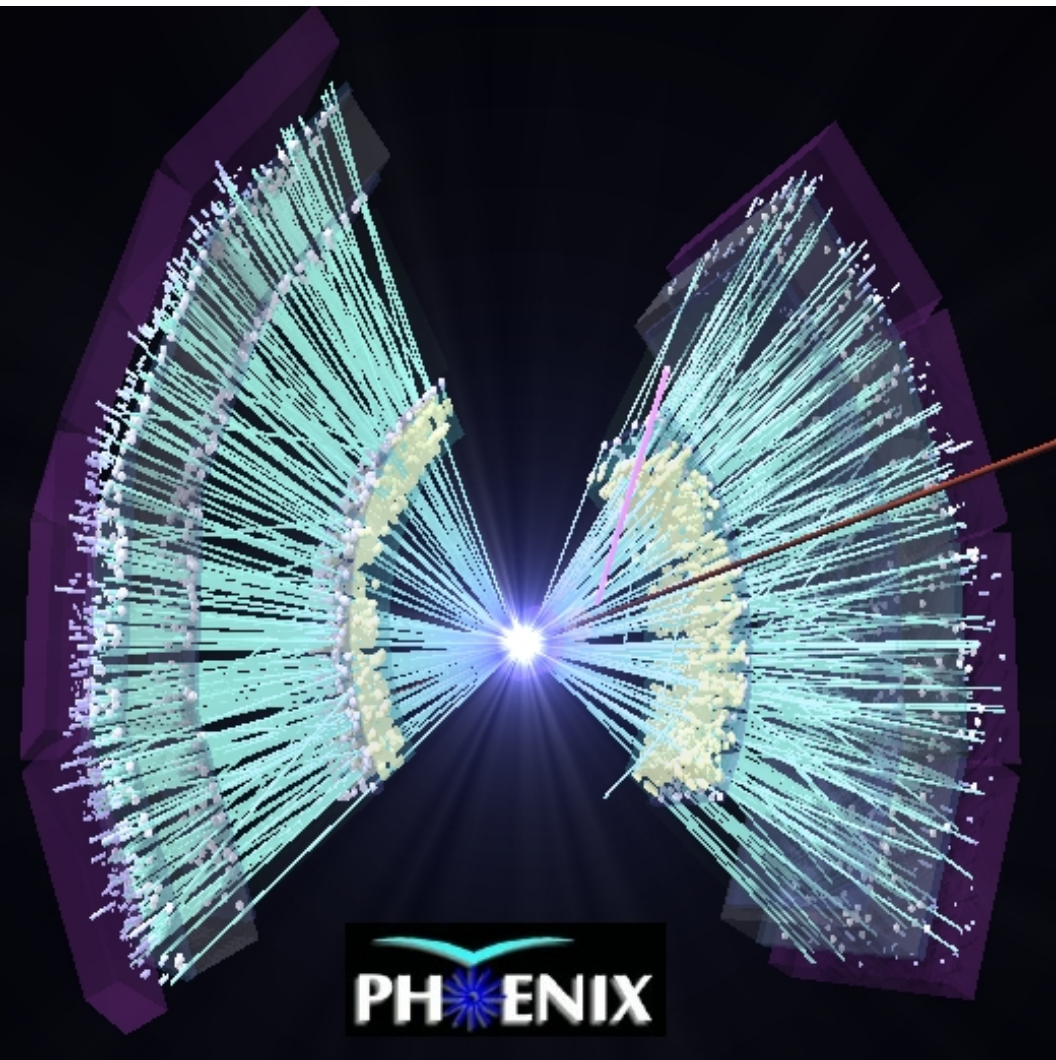


PHENIX



STAR

# Display Event in PHENIX and STAR



金原子核の正面衝突において、約6000個の粒子が生成される！

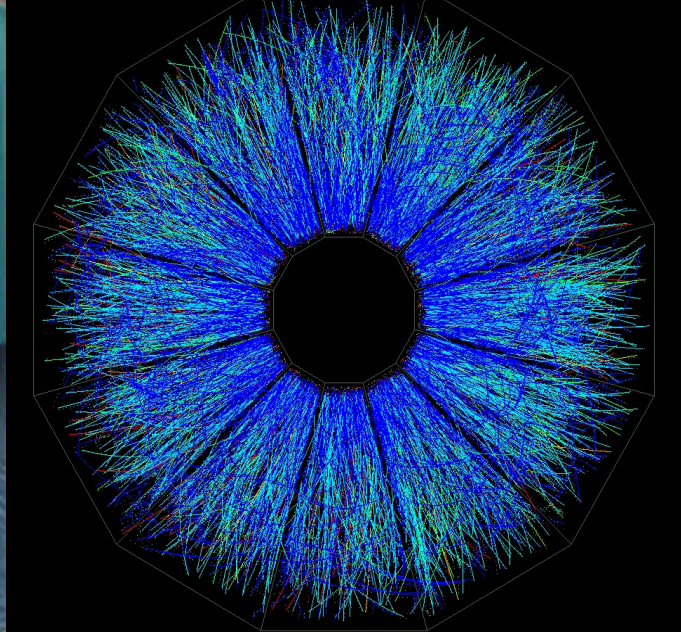
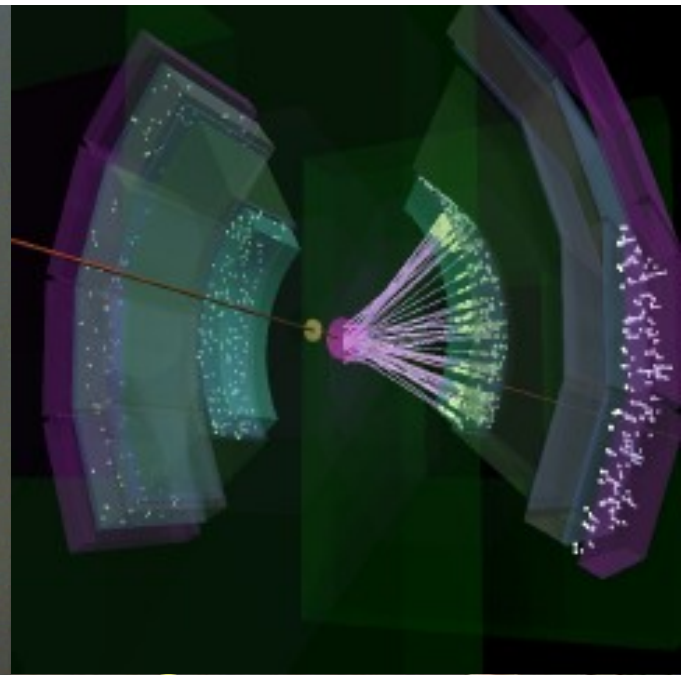
PHENIX



PHENIX

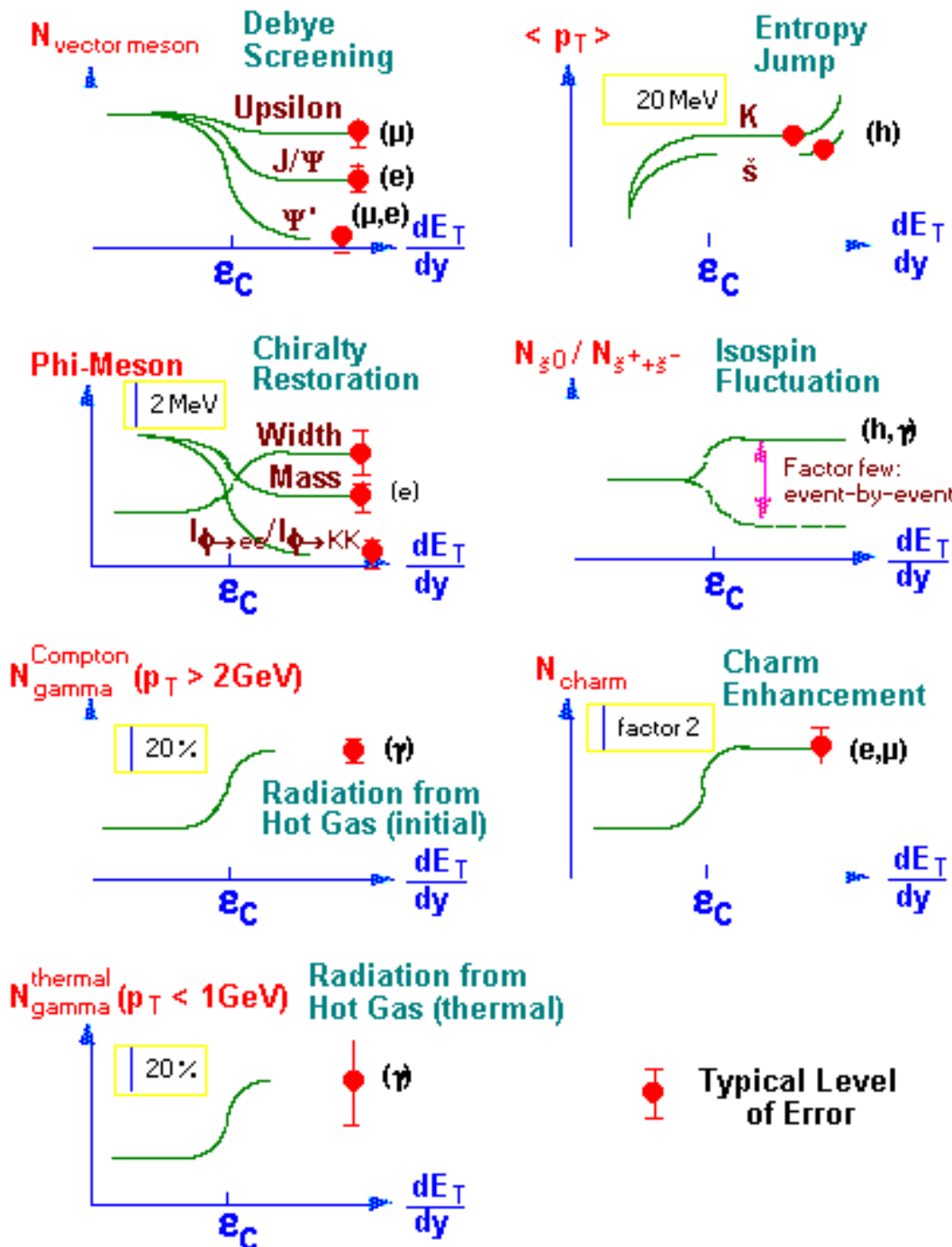


PHENIX



**June 12, 2000 @ PHENIX**  
First collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 56$  GeV Au+Au

# Signatures of Quark-Gluon Plasma



RHIC 実験前の  
理論予測  
(2000年より前)

QPG生成のシグナル  
として、様々な  
観測量が提唱された。

しかしその後、これらの多くの予言  
が正しくないことが判明することになる。





asahi.com

恐竜博2006  
古代エジプト

| 朝日新聞社から | アスパラクラブ | クラブA

社会 スポーツ ビジネス 暮らし 政治 国際

天気 | 住まい | 就職・転職 | BOOK | 健康 | 愛車 | 教育 | サイエンス | デジタル

Benesse

「ゆとり教育」見直し発表。中学と高校

社会

asahi.com トップ > 社会 > その他・話題

## 宇宙の始まりはしずく？ 「クォークは液体」と発表

2005年04月18日23時34分

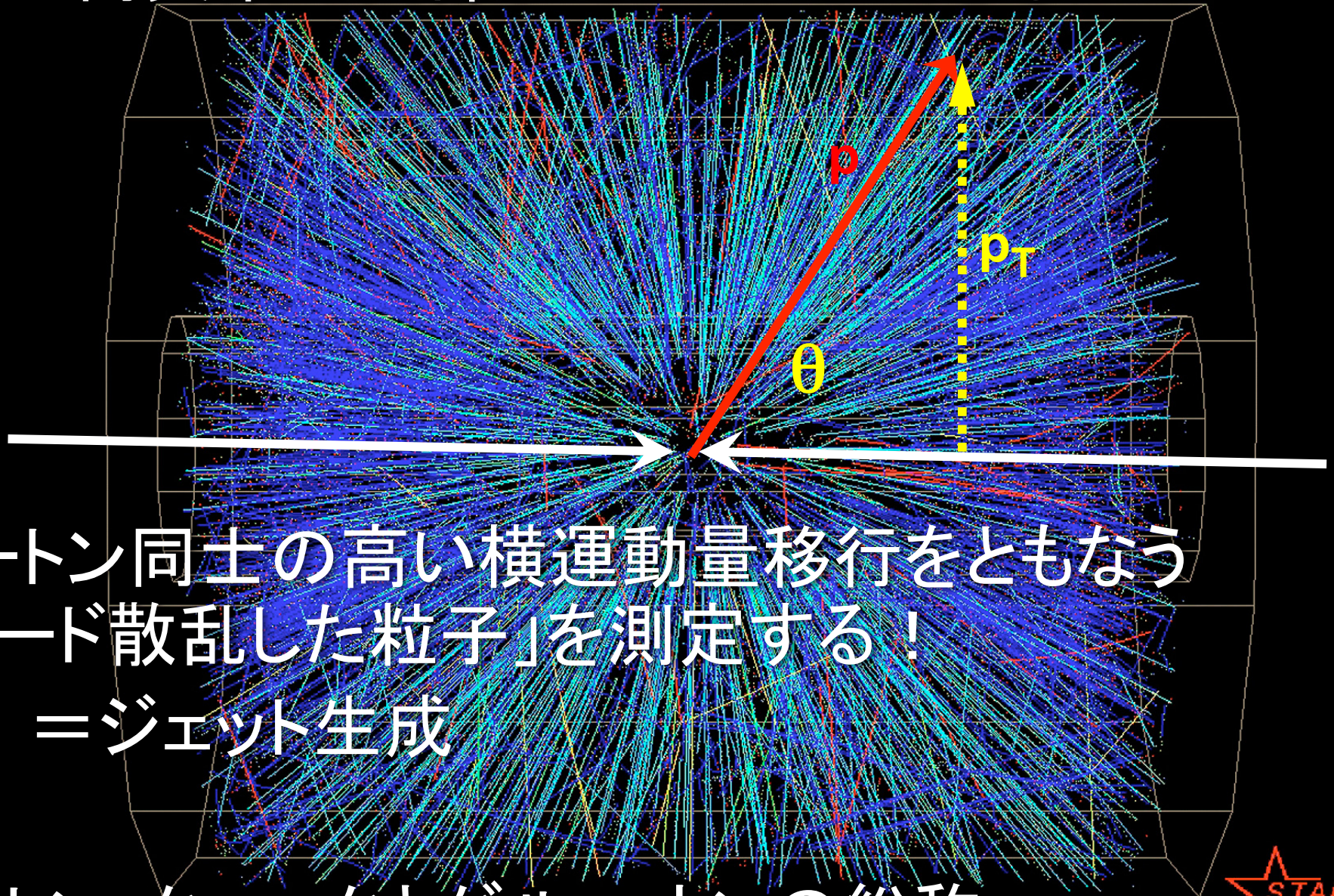
宇宙誕生の大爆発「ビッグバン」直後に相当する超高温・高密度の状態を再現する実験をしてきた日米などの国際チームは18日、物質を形づくる究極の基本粒子クォークは超高温でバラバラになるが、気体のように自由に跳び回るのでなく、しずくのような液体状態にあったと考えられる、と発表した。理論的に予想外の発見で、宇宙や物質のなりたちを説明するシナリオに影響を与える可能性がある。

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

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

# 横方向のダイナミクス

Q.いかに衝突系の内部までプローブできるか？



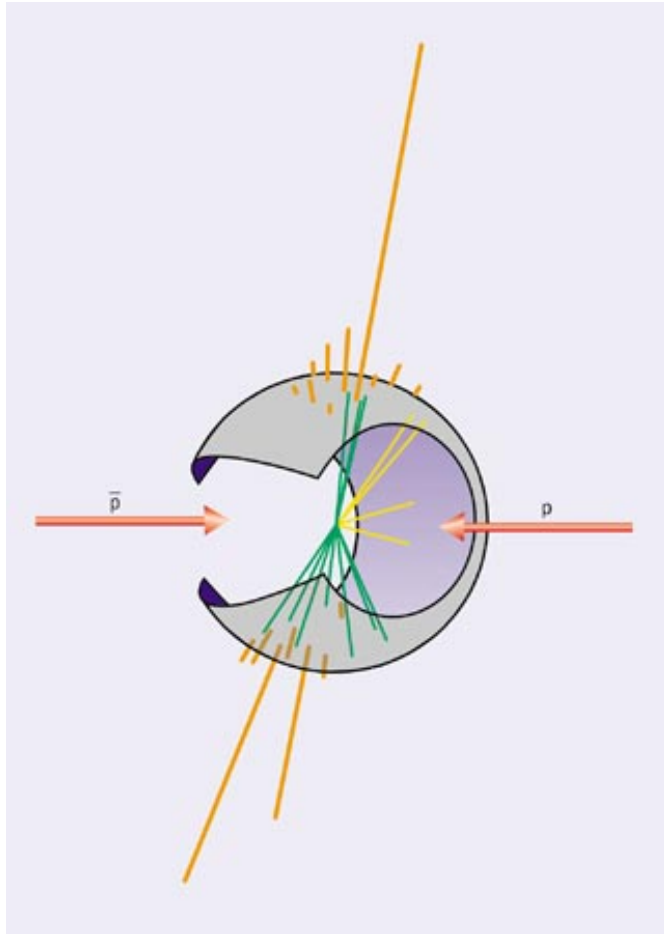
A. パarton同士の高い横運動量移行をともなう  
「ハード散乱した粒子」を測定する！  
＝ジェット生成

\* パarton: クォークとグルーオンの総称

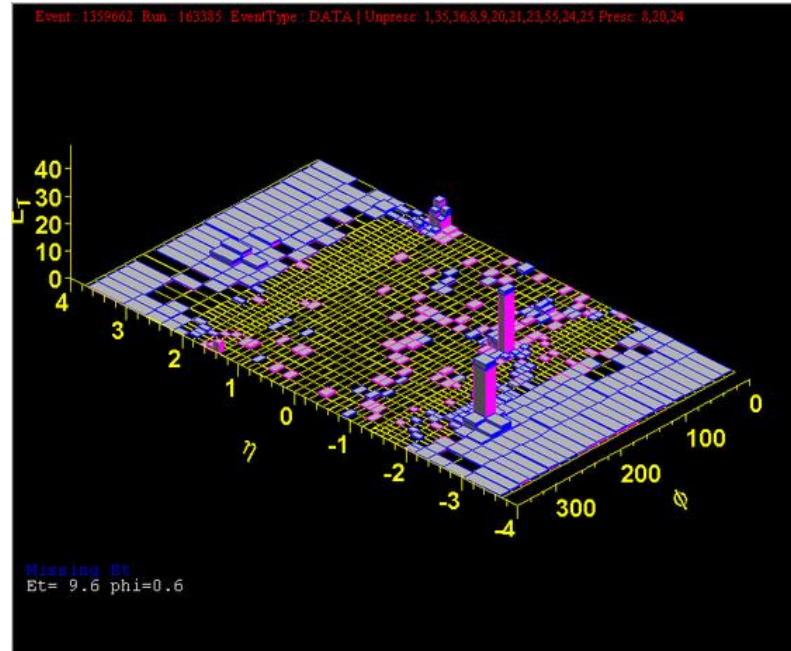


# ジェットとは？

(taken from P.Stankus PHENIX Focus talk, 2005)



A UA2 two-jet event, ca 1982



On-line  
display  
from  
Fermilab,  
ca 2004

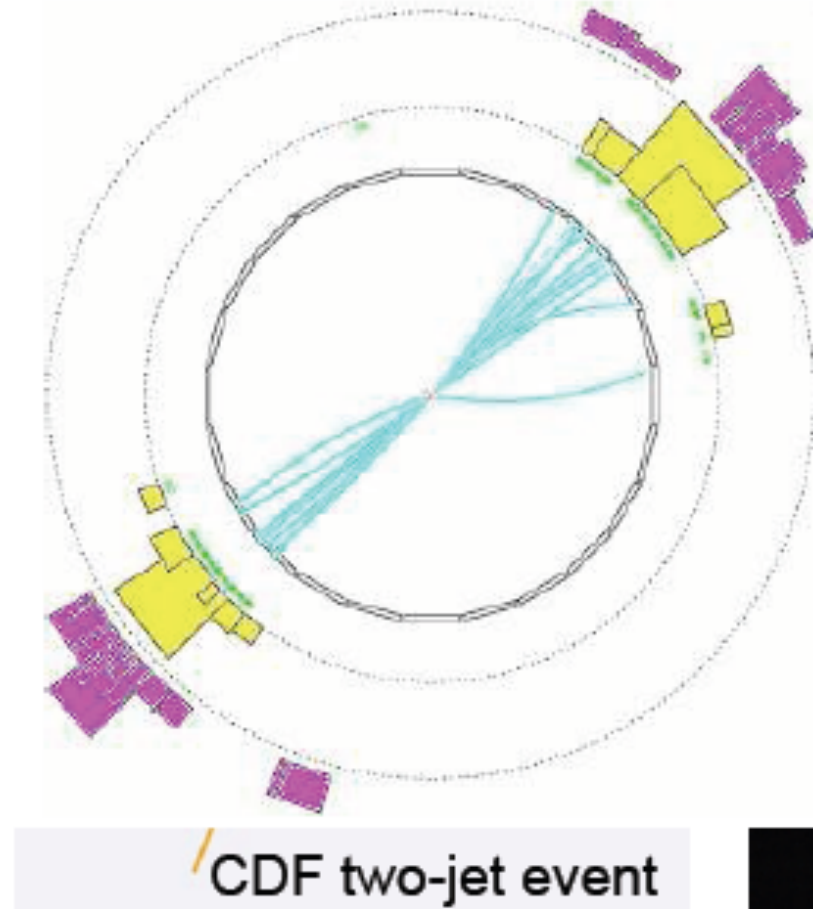
実験的に観測される高い運動量をもったハドロンの束

1. クォークやグルーオン同士の高い運動量移行反応で生成される
2. 運動量保存により、角度にして約 $180^\circ$ 方向に対になって生成

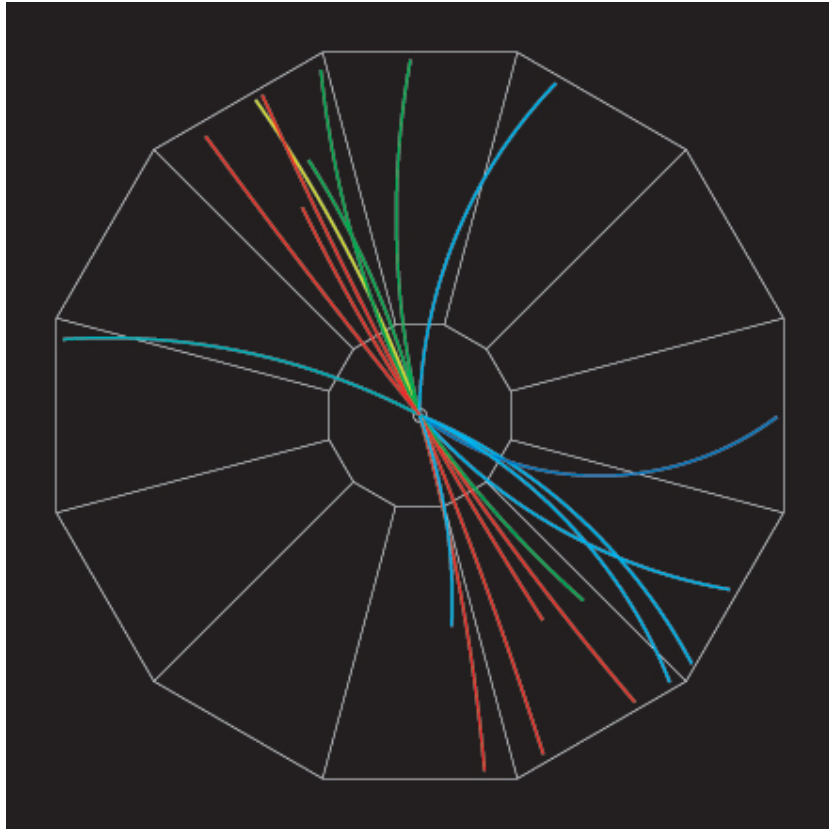
# More Jets in HEP



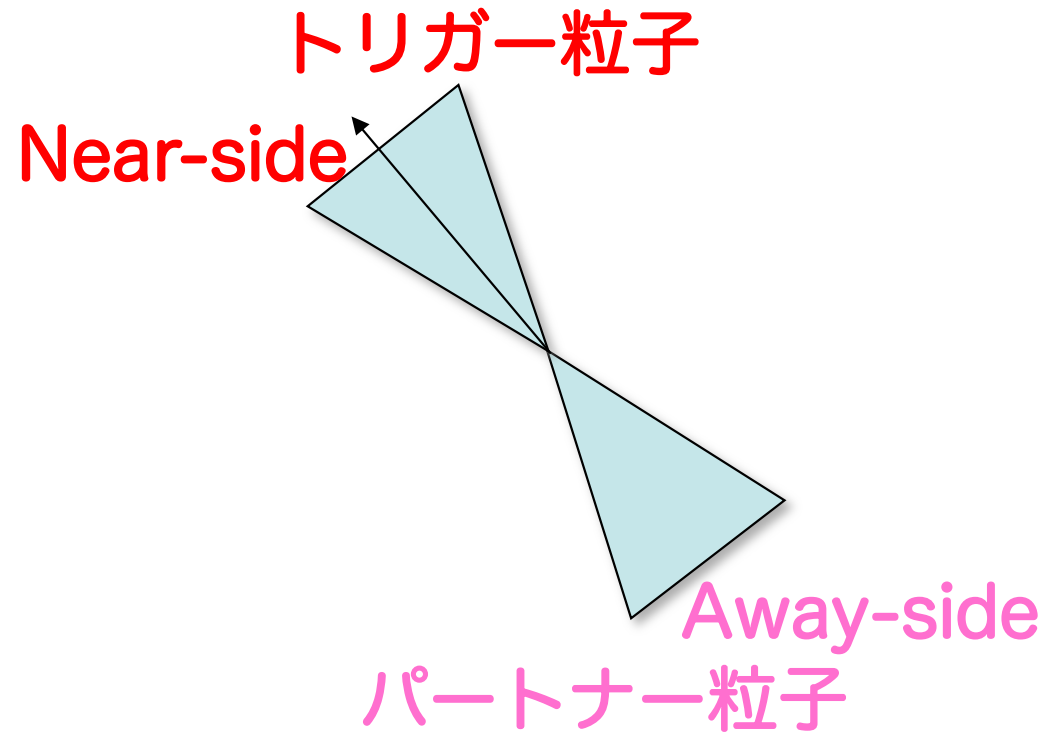
Delphi 1992



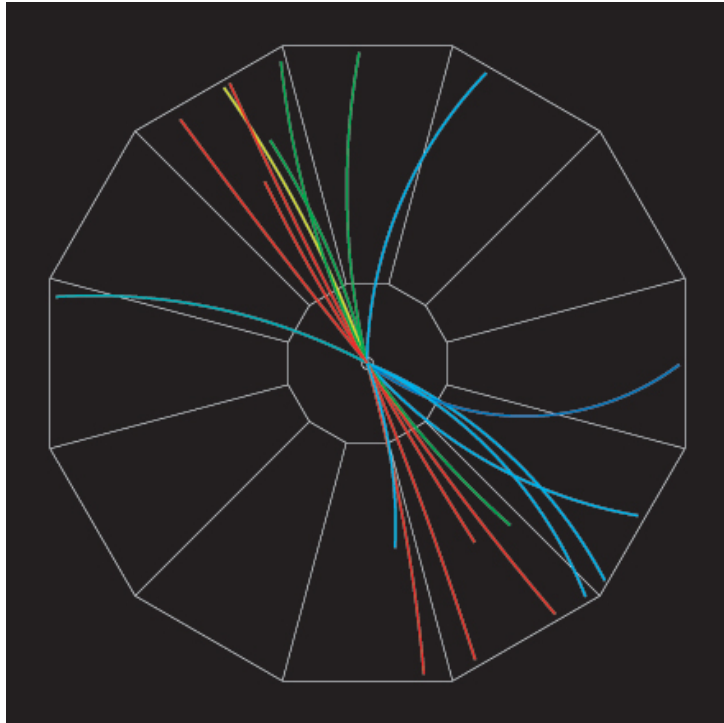
# ジェットの方位角相関の様子 (陽子-陽子 p+p 衝突の場合)



STAR event display in p+p

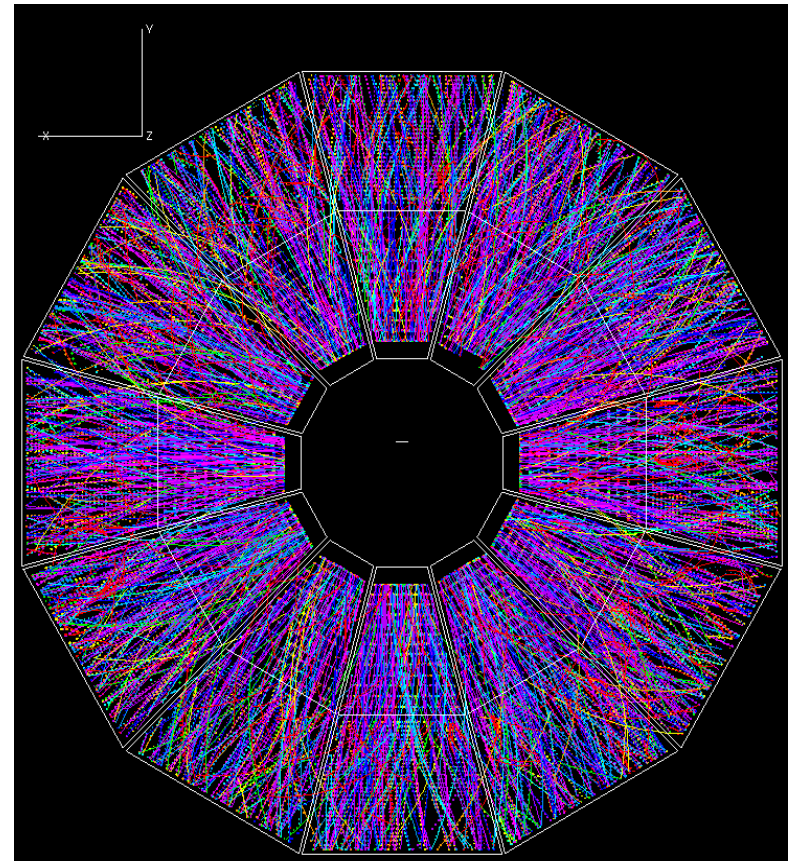
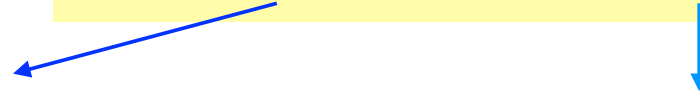


# STAR実験によるジェットイベント



p+p → jet+jet  
(STAR@RHIC)

Find this.....in this

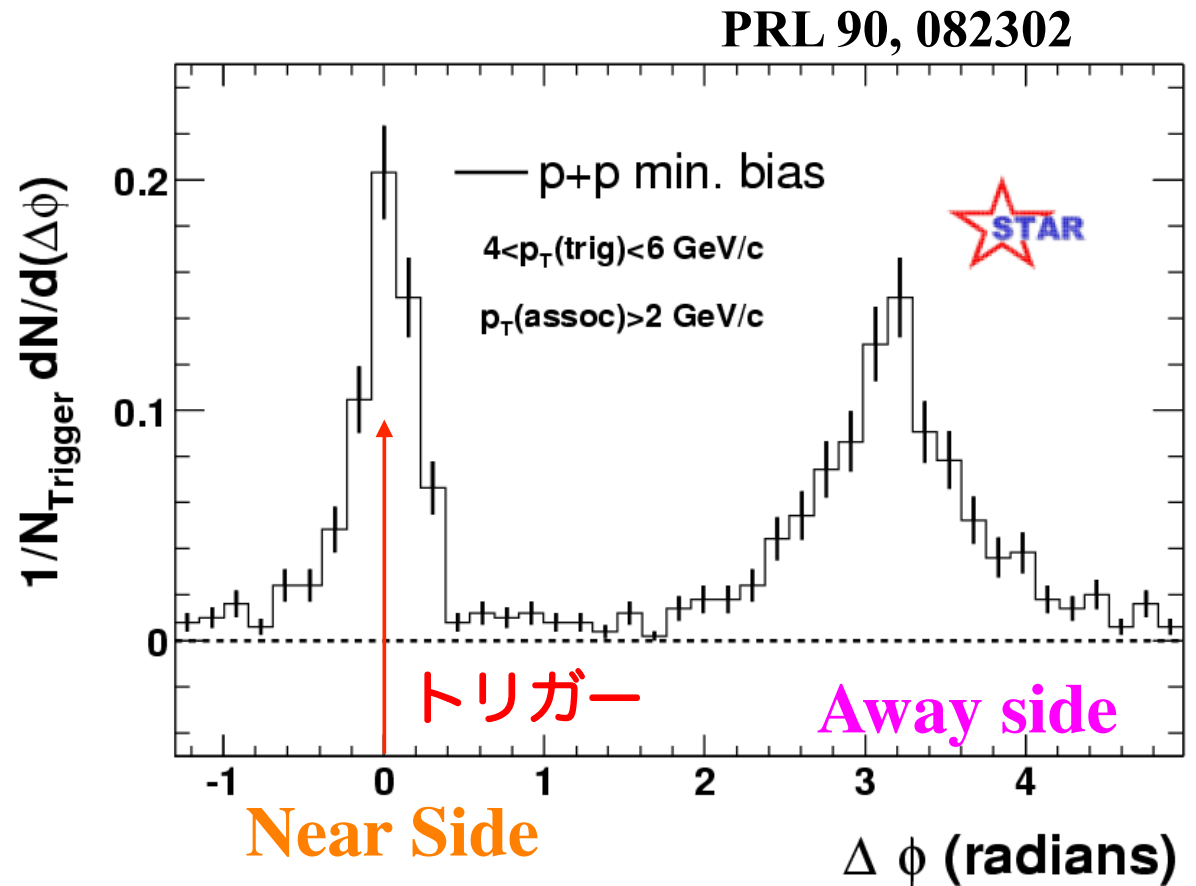
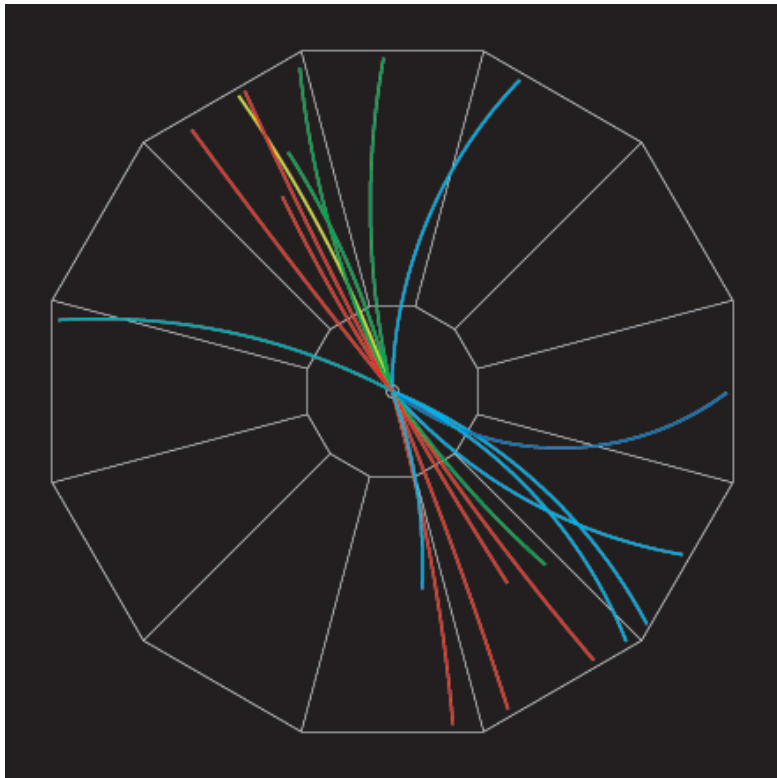


Au+Au → ???  
(STAR@RHIC)

- ・ しかしながら、金原子核衝突でジェットを見つけ出すのは実験的に非常に困難！  
(処方) 統計的手法を用いる

# ジェットと2粒子方位角分布 (p+p)

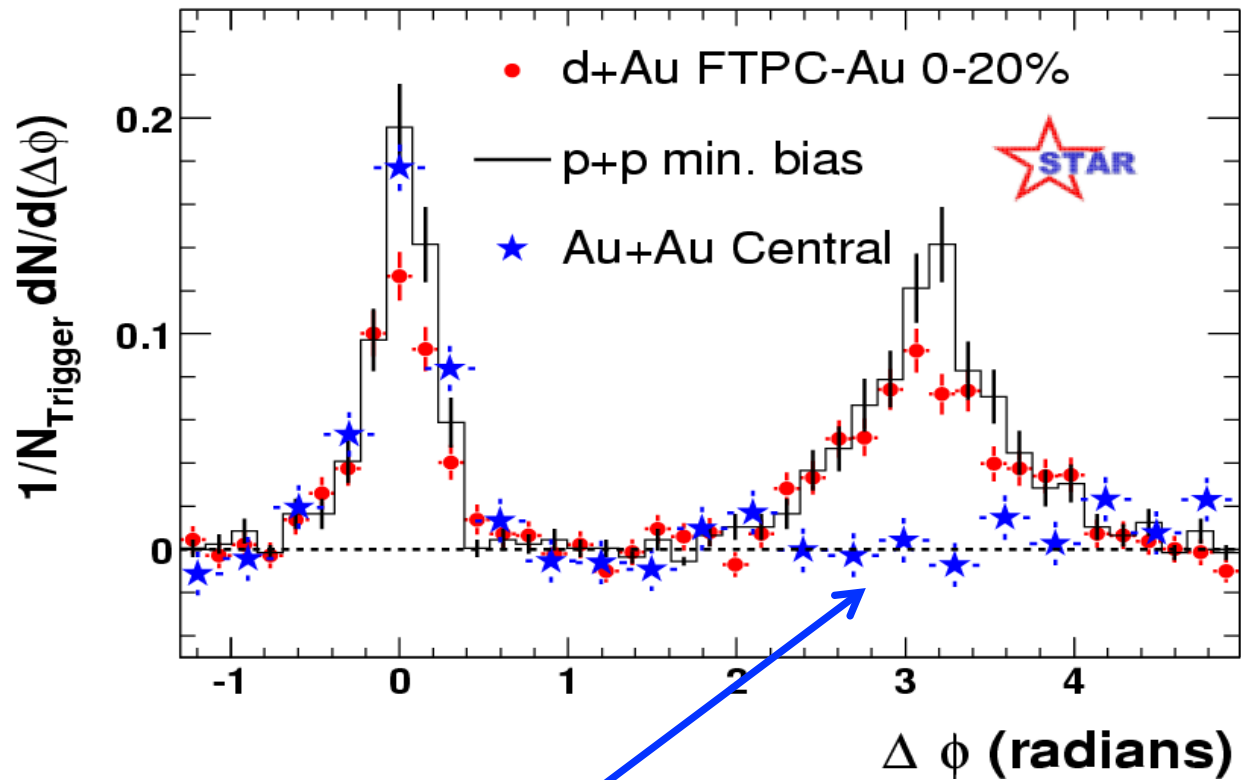
p+p → di-jet



- trigger: highest  $p_T$  track,  $p_T > 4 \text{ GeV}/c$
- $\Delta\phi$  distribution:  $2 \text{ GeV}/c < p_T < p_T^{\text{trigger}}$ 
  - normalize to number of triggers

# ジェットと2粒子方位角分布 (Au+Au)

Phys. Rev. Lett. 91, 072304 (2003).

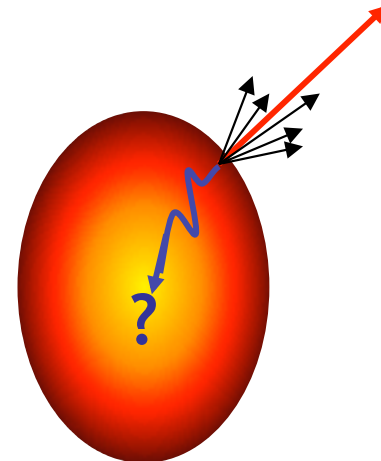


Near side: p+p, d+Au と同じ

**Away side:**  
**Au+Au 中心衝突で反対方向**  
**のジェットが消滅!**

このデータを再現するには。

- グルーオン密度:  
 $dN_g/dy \sim 1100$
- エネルギー密度:  
 $\epsilon > 100 \epsilon_0$  (!)  
 (=  $\epsilon > 15 \text{ GeV} / \text{fm}^3$ )





# Jet Suppression at RHIC

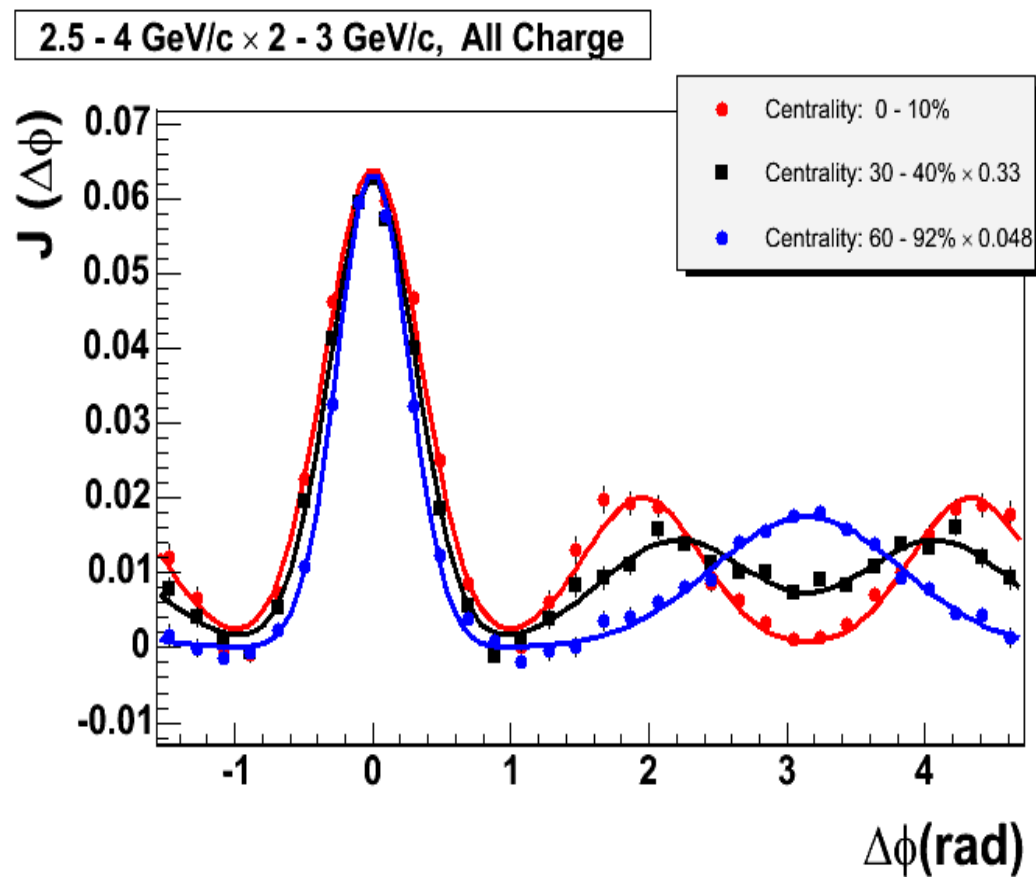
Quarks 

Animation by  
Jeffery Mitchell



高エネルギーパートンが物質中  
を通過した際に失われた  
エネルギーはどこに？

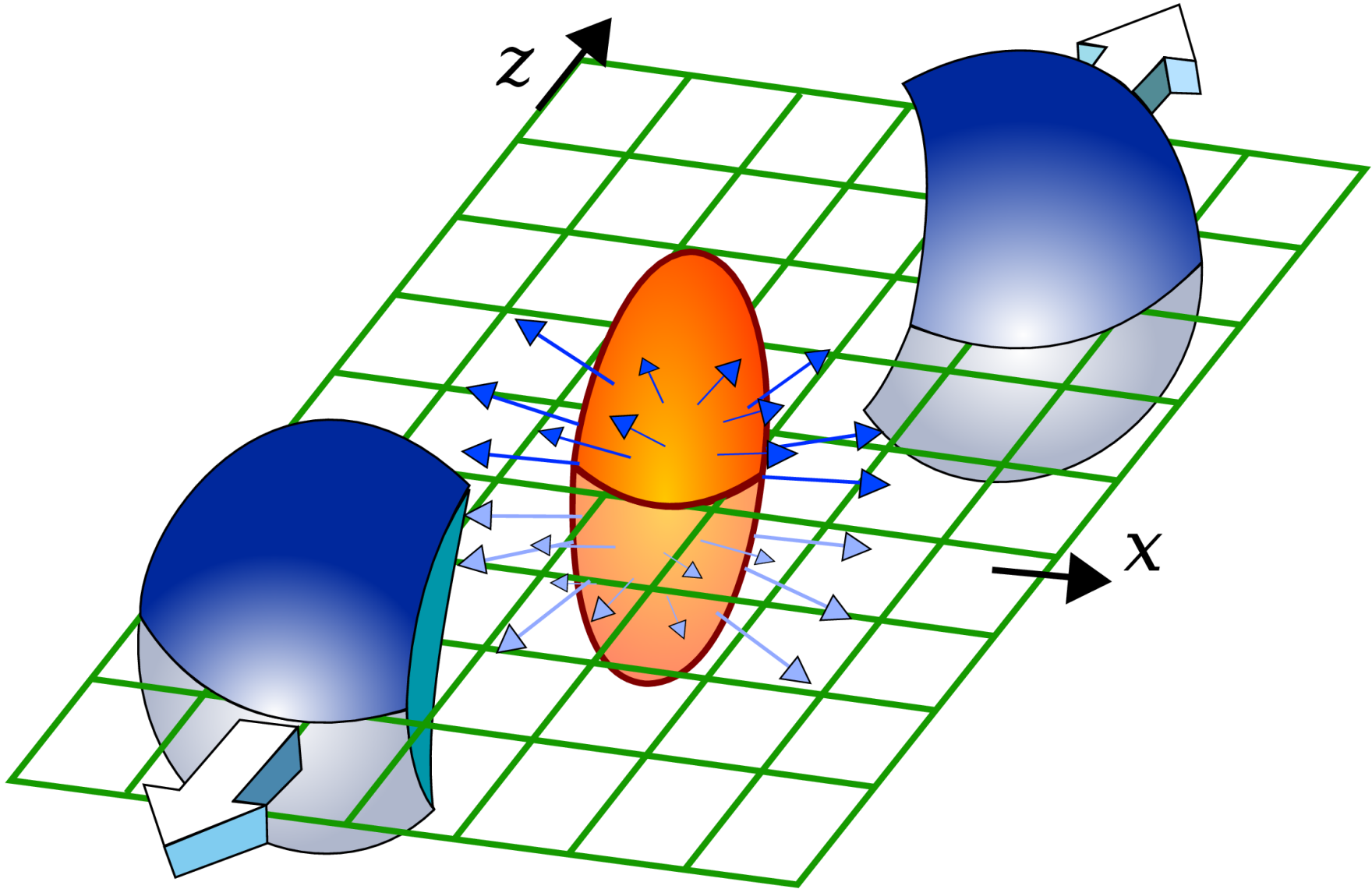
どのように物質中を  
伝播するのか？



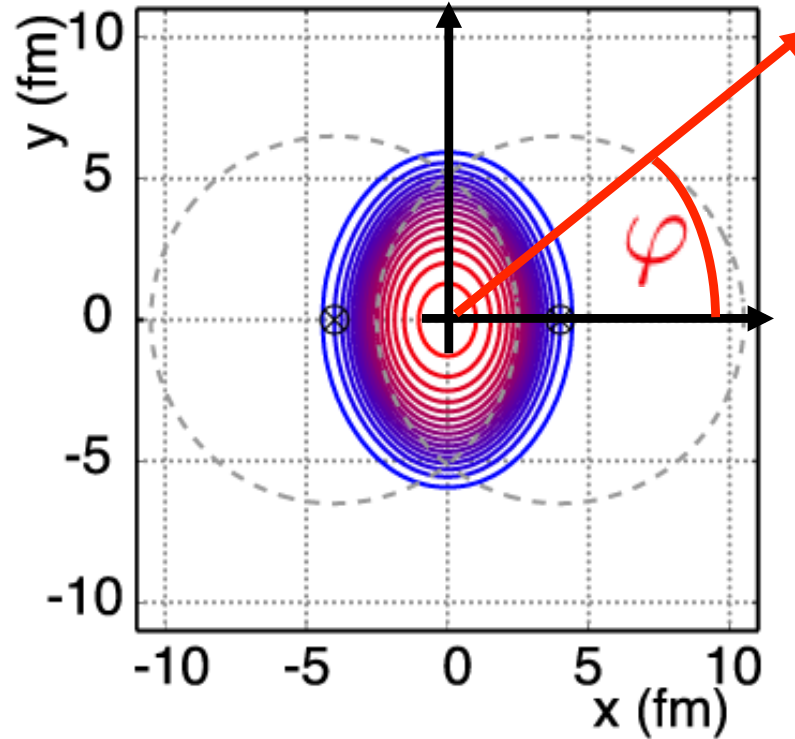
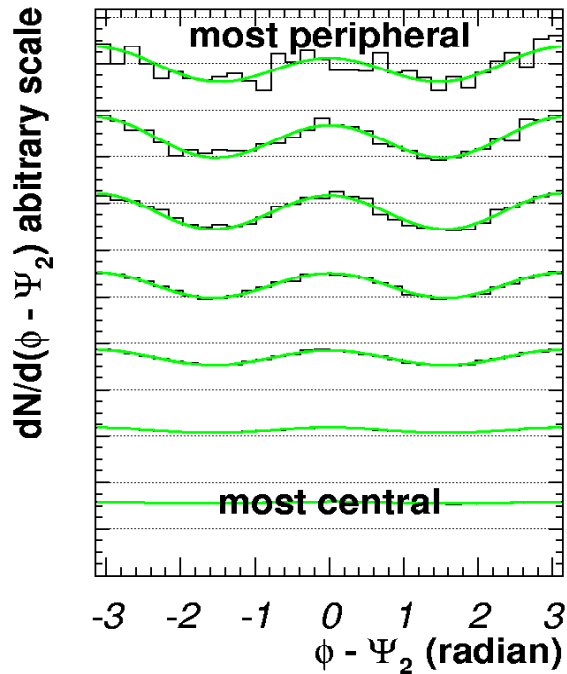
Away side に2つのピーク？

衝撃波！？

# 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？

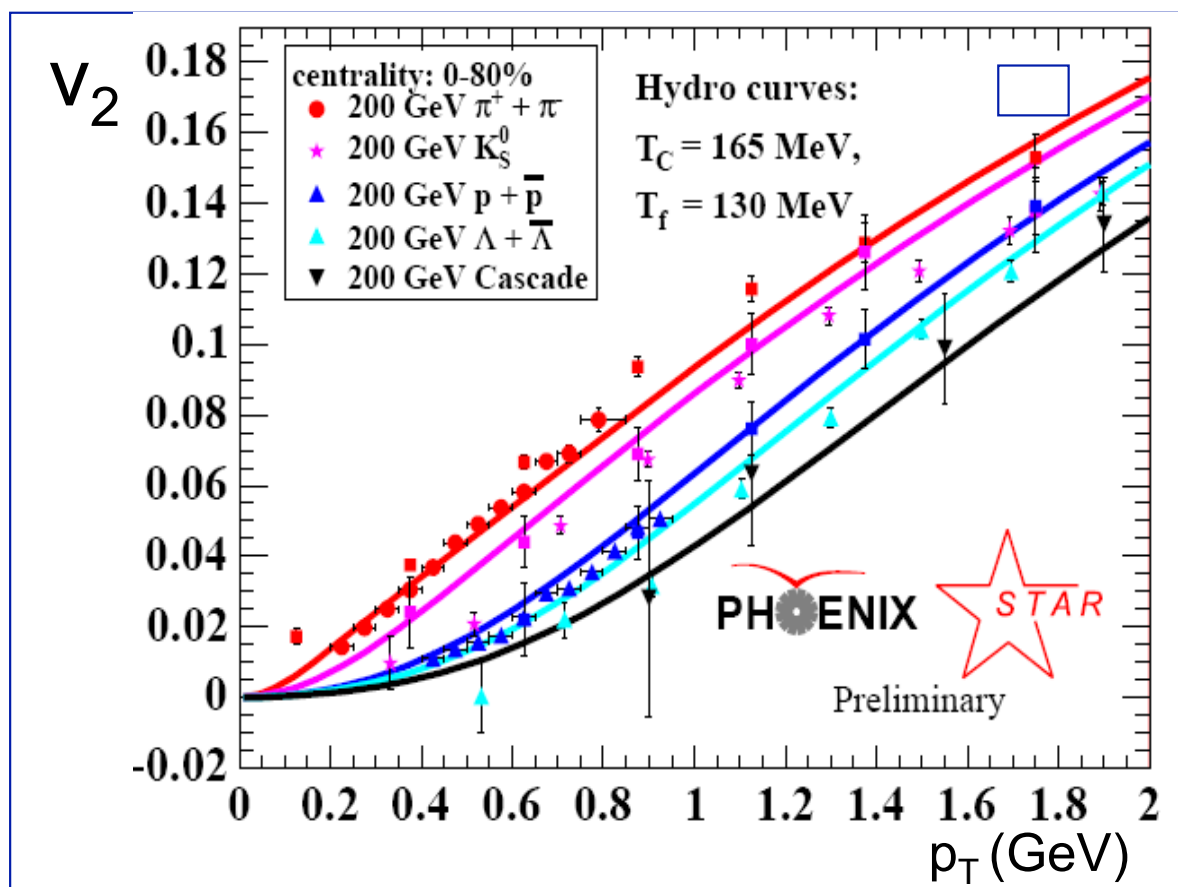


$$\frac{dN}{p_T dp_T dy d\varphi}(p_T, \varphi; b) = \frac{dN}{2\pi p_T dp_T dy} (1 + \underline{2v_2}(p_T; b) \cos(2\varphi) + \dots)$$

- Simple answer: Yes! 非常に高い集団運動的振る舞いが RHIC でみえた。

# 完全流体の実現か？

- 粘性なしの流体力学模型, RHICで初めてデータを再現



Lines:  
Hydrodynamics calc.  
with QGP type EoS.

\*viscosity = resistance of liquid  
to shear forces (and hence to flow)

\* Required QGP Type EoS in  
Hydro model

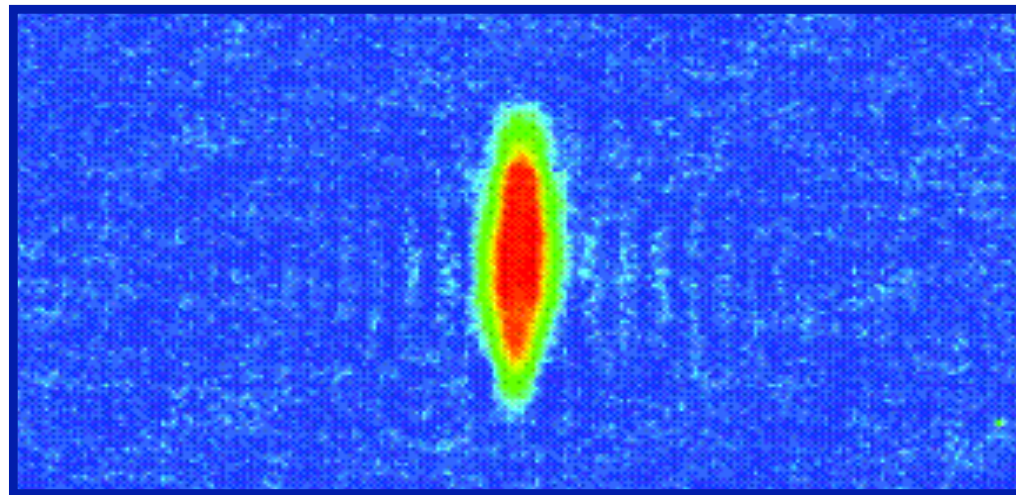
熱平衡にかかる時間  $t=0.6$  fm/c 、  
エネルギー密度  $\varepsilon=20$  GeV/fm<sup>3</sup>

# Analogy in Cold Atomic System

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

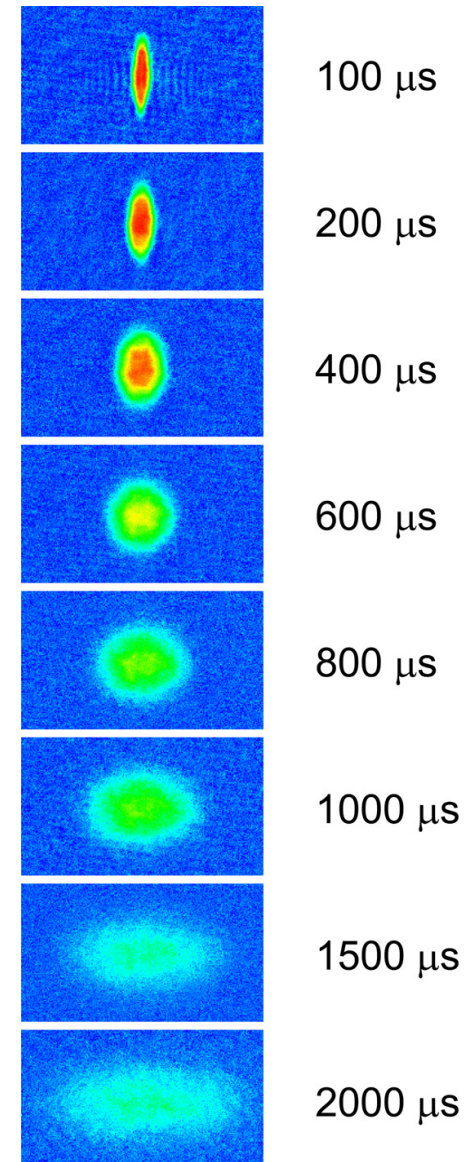
${}^6\text{Li}$  (@  $10^{-6}$  K)

- 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)

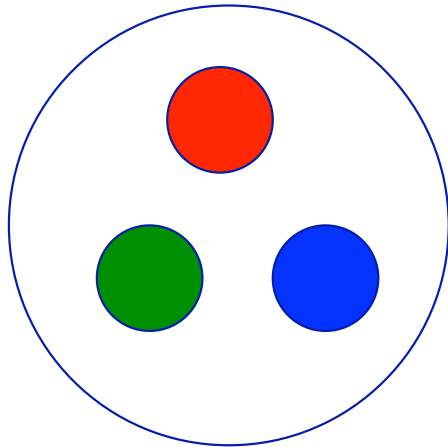


The RHIC fluid behaves like this, that is, a strongly coupled fluid.

# ハドロンの種類

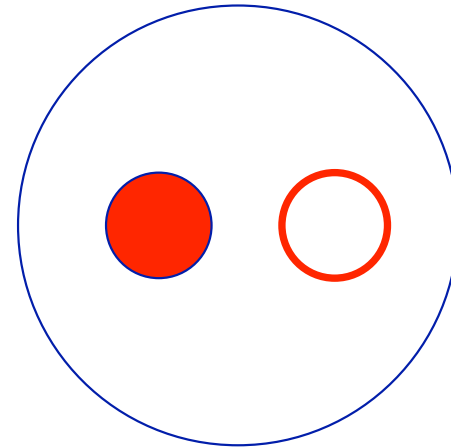
## バリオン (重粒子)

- フェルミオン
- 構成クォーク数 : 3
- クォーク3つ、又は反クォーク3つからなる



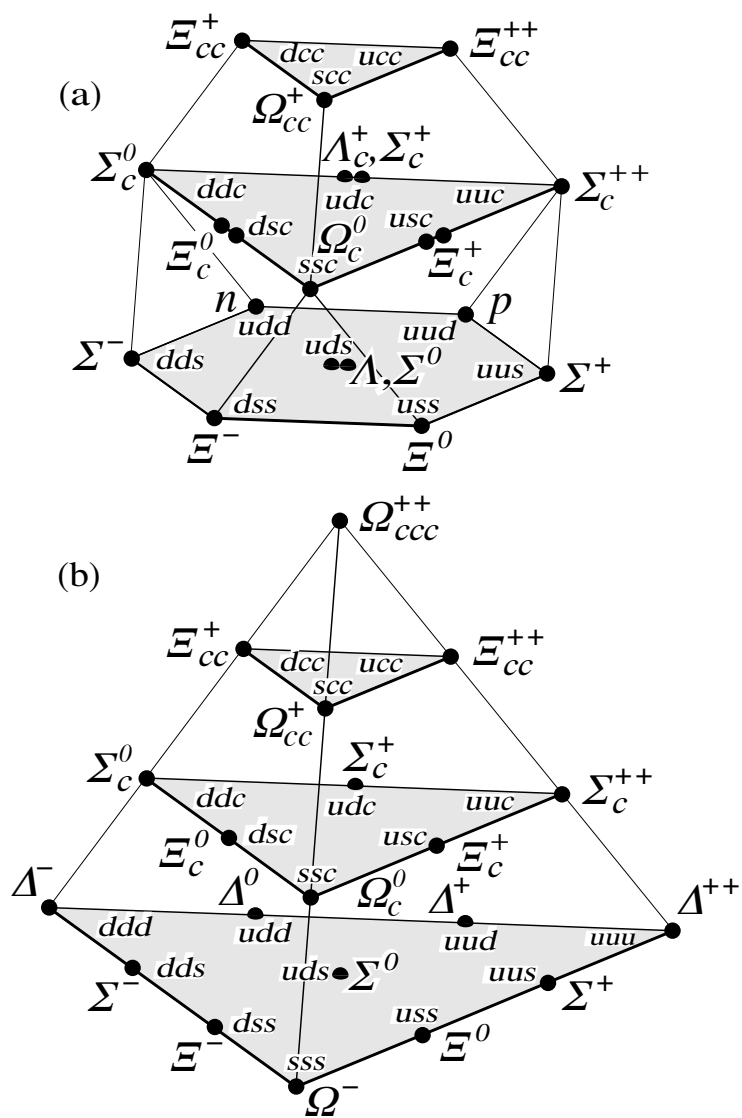
## メソン (中間子)

- ボソン
- 構成クォーク数 : 2
- クォークと反クォーク対からなる

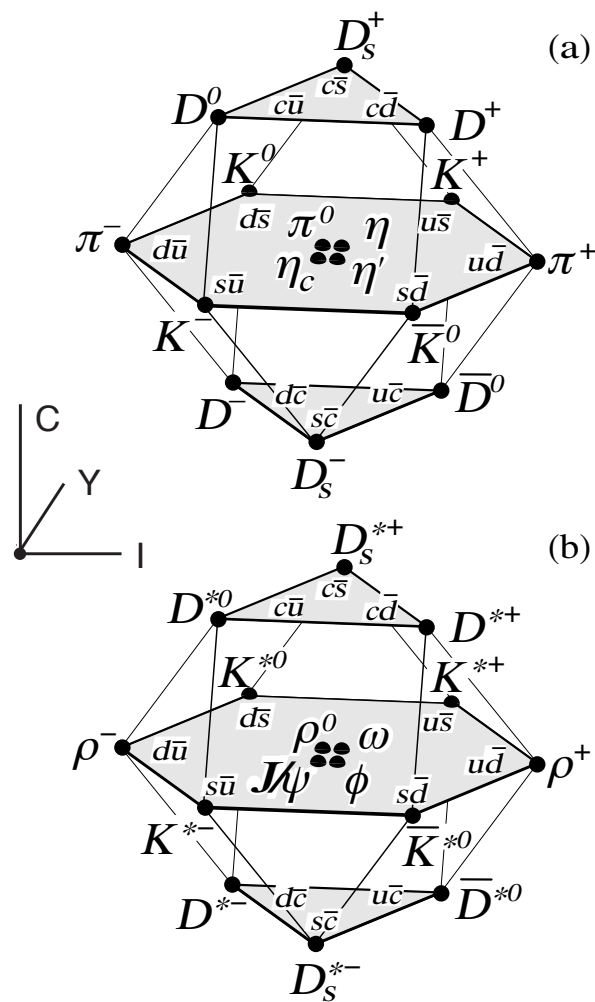


# ハドロンとクォークモデル

## バリオン (重粒子)

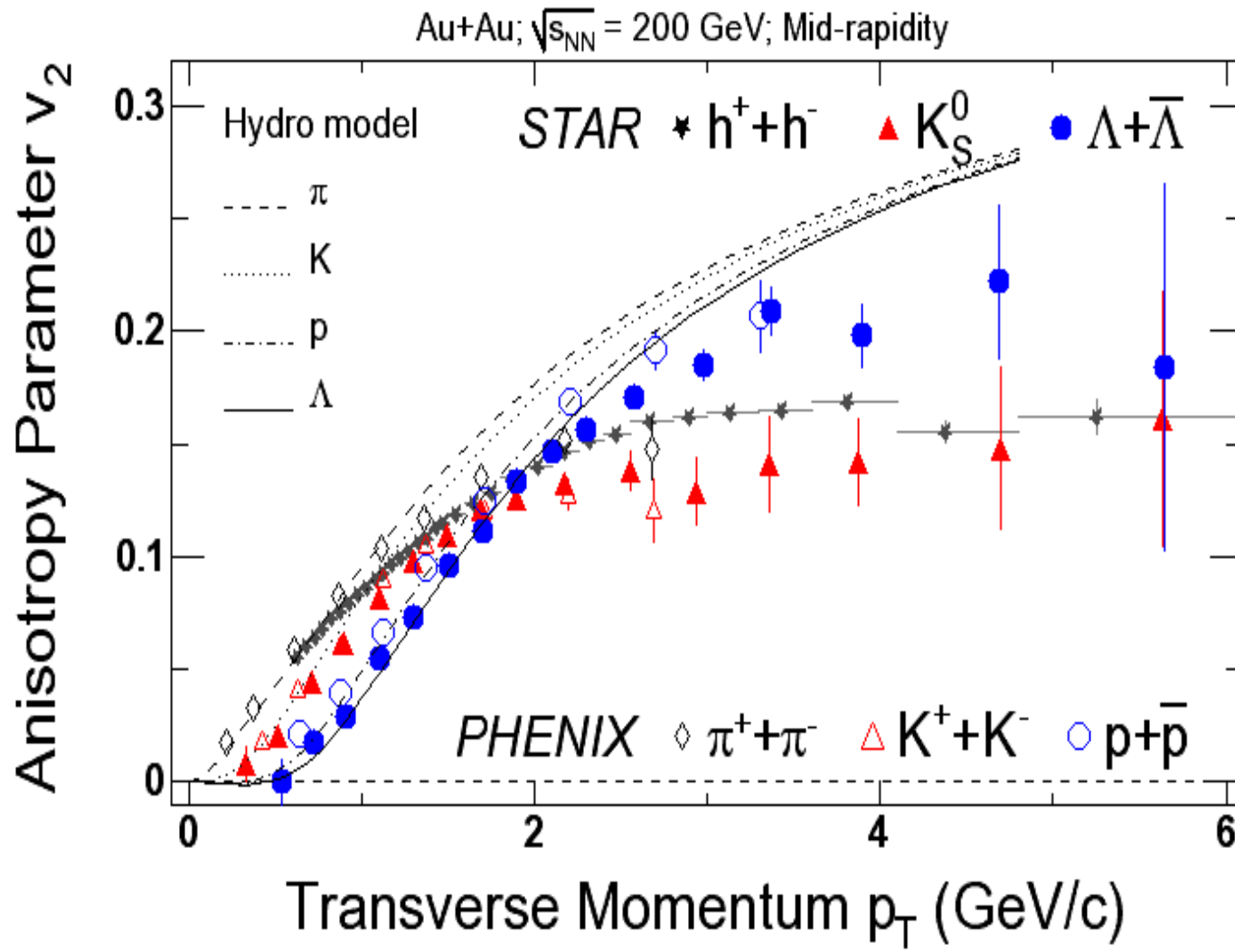


## メソン (中間子)

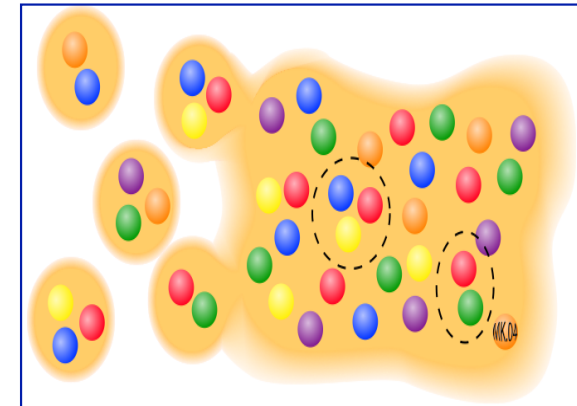
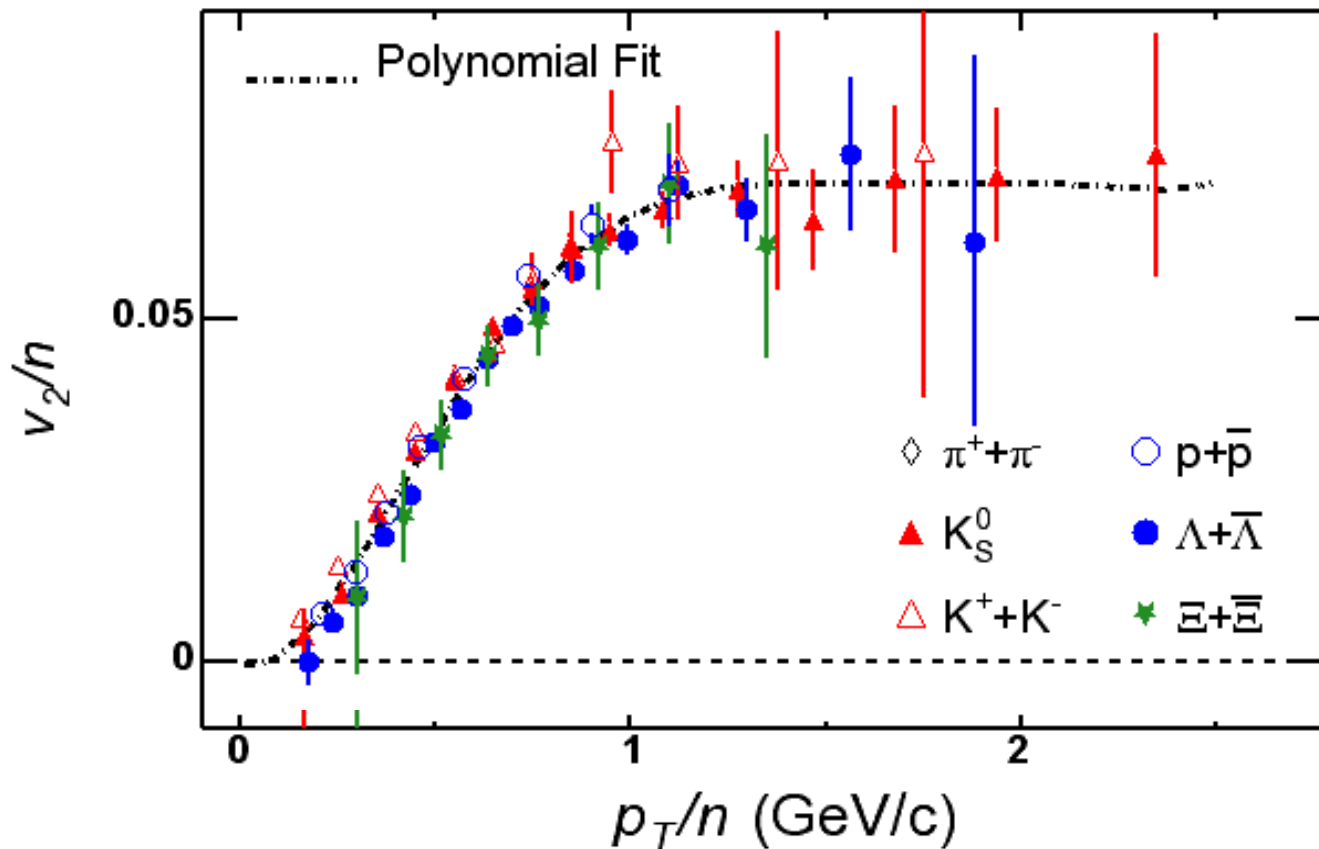




# 様々な粒子の $v_2$ 測定



# $v_2$ とクォーク融合模型



- 構成クォークの数でのスケーリング則が成り立つ
  - 中間子 (クォーク-反クォーク対)  $n=2$ ,
  - バリオン ( (反) クォーク3つ)  $n=3$ ,
- 圧力勾配がハドロンレベルではなく、クォークレベルで生成・発展している証拠！

# QGP生成の初期温度は？



# 電子崩壊で測定する 光子のエネルギー分布＝温度

物質の熱的放射→  
エネルギー分布(ボルツマン分布)  
より温度を測定する

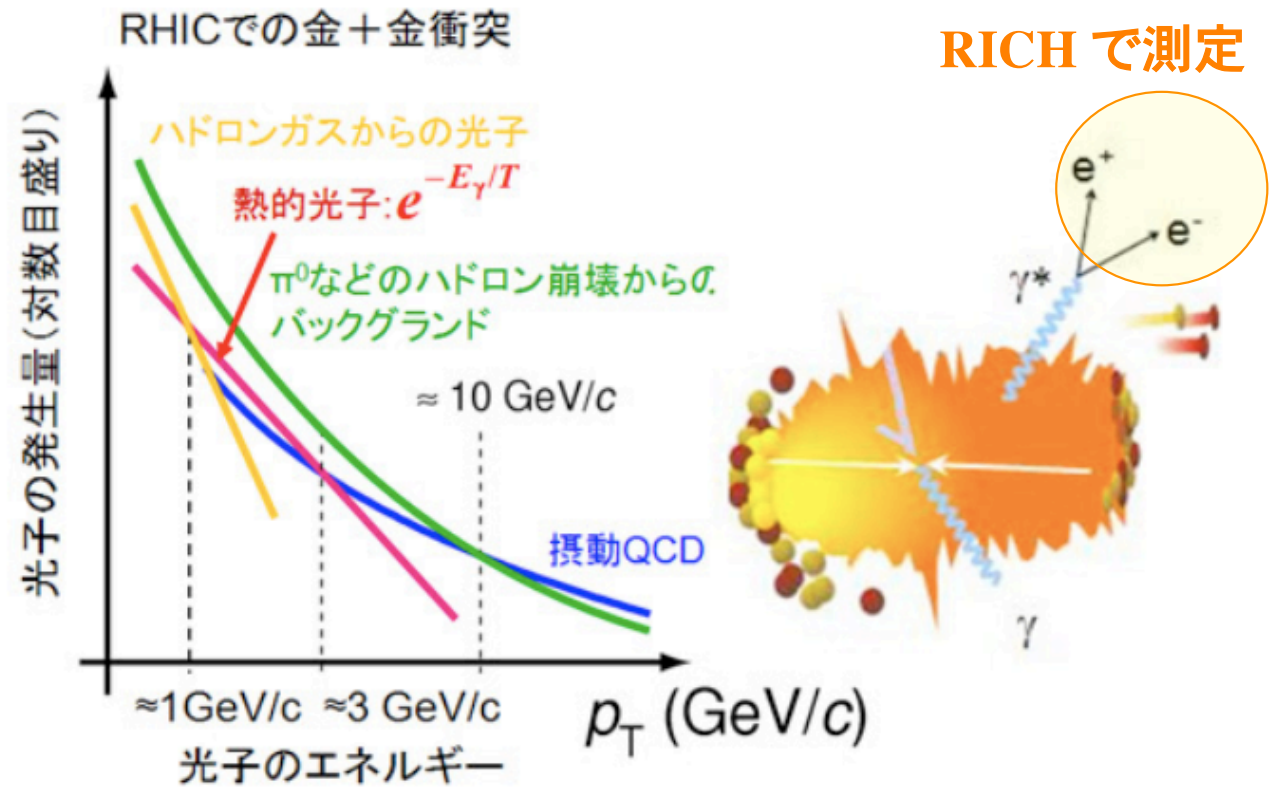
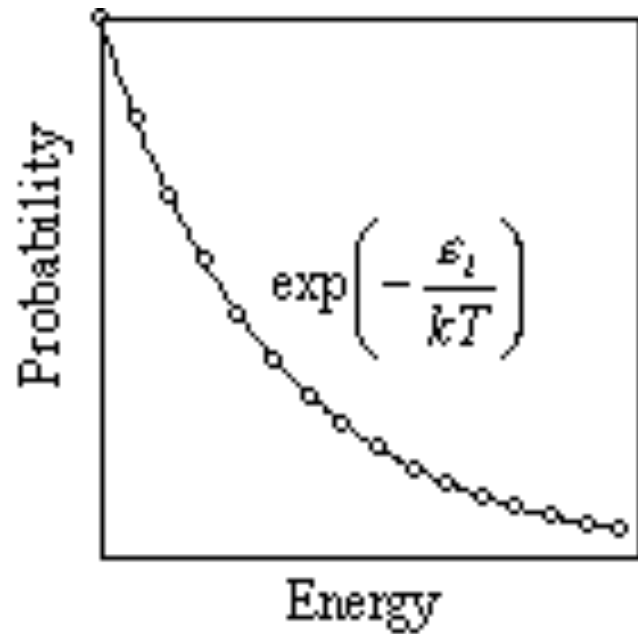
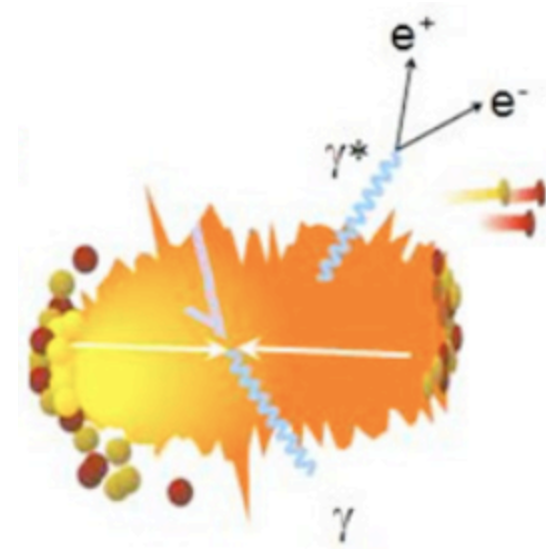
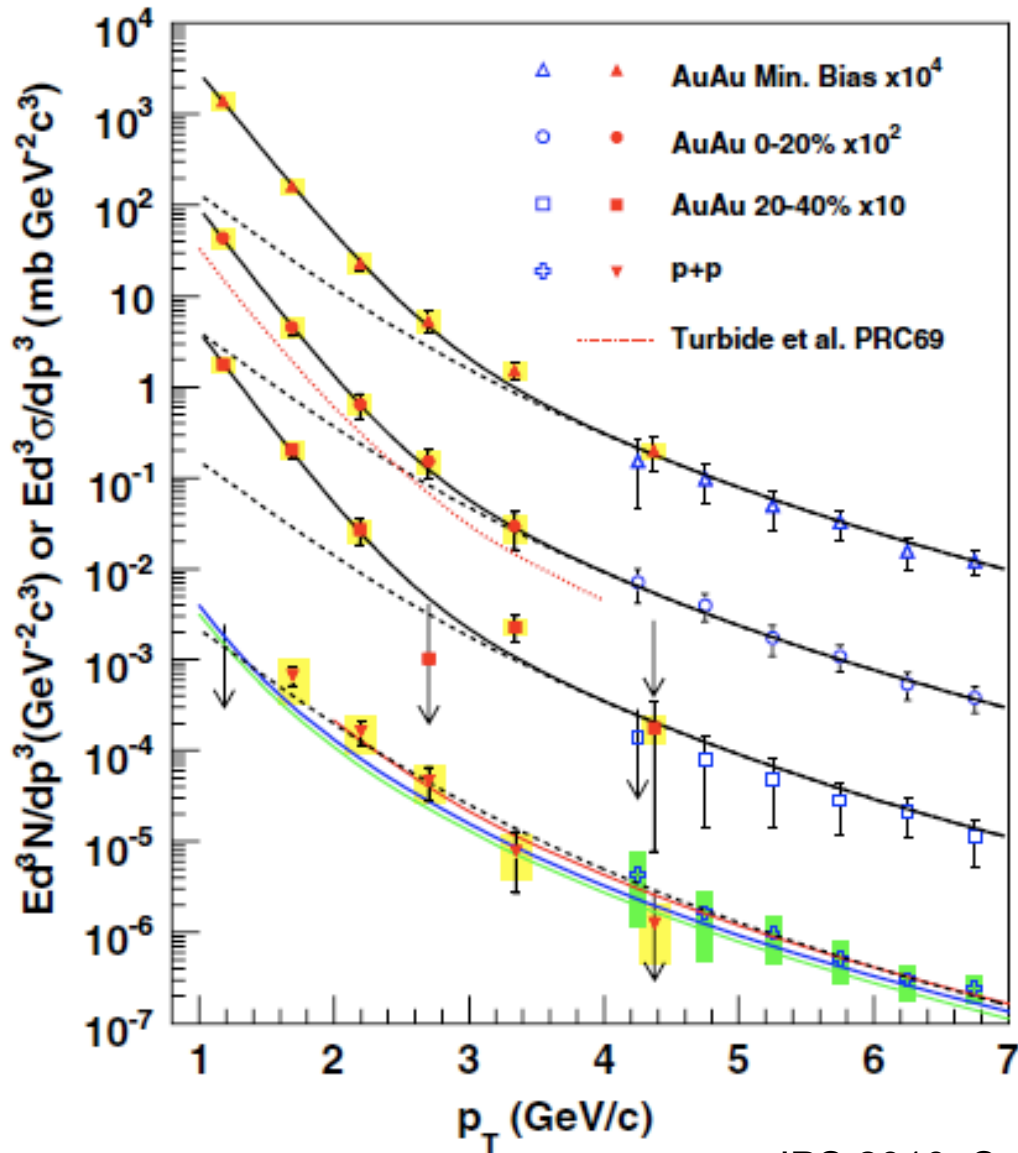


図3 : 高密度物質の初期温度の測定

# 初期温度の測定



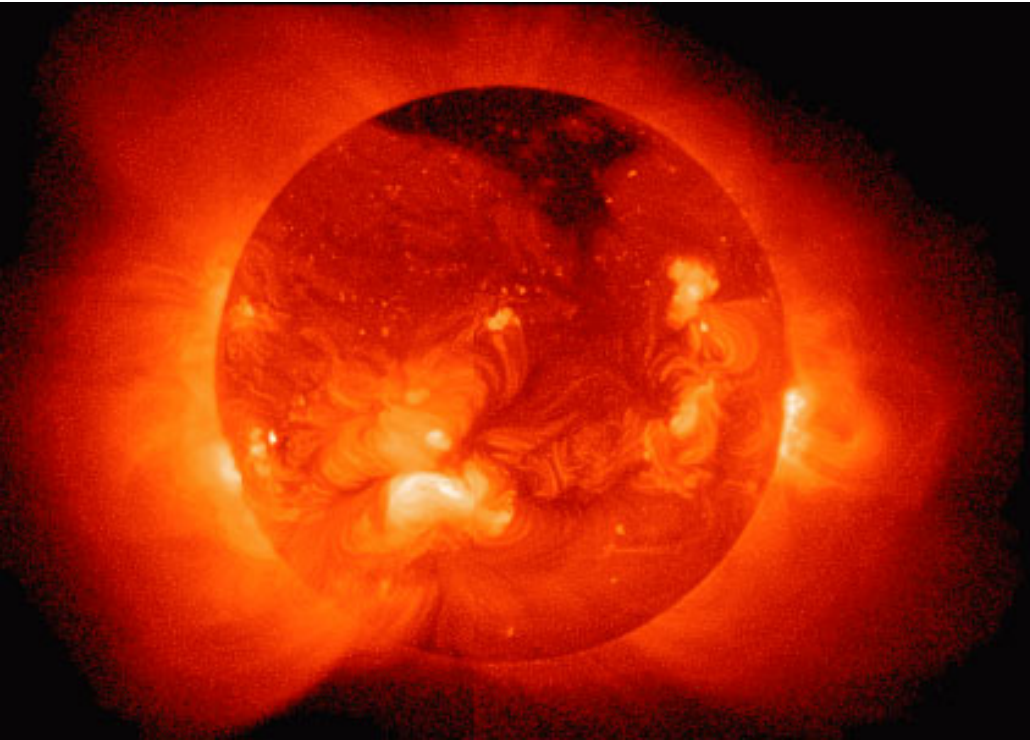
**DATA:**  $T_{ini} > T_{AuAu} \sim 220$  MeV  
**MODELS:**  $T_{ini} = 300$  to  $600$  MeV  
 Lattice QCD prediction:  $T_c \sim 170$  MeV

**Indicating thermal photon emission at low  $p_T$ .**

JPS 2010, Sep. 13, T. Chujo

PHENIX (PRL 104, 132301 (2010))

# 4兆度

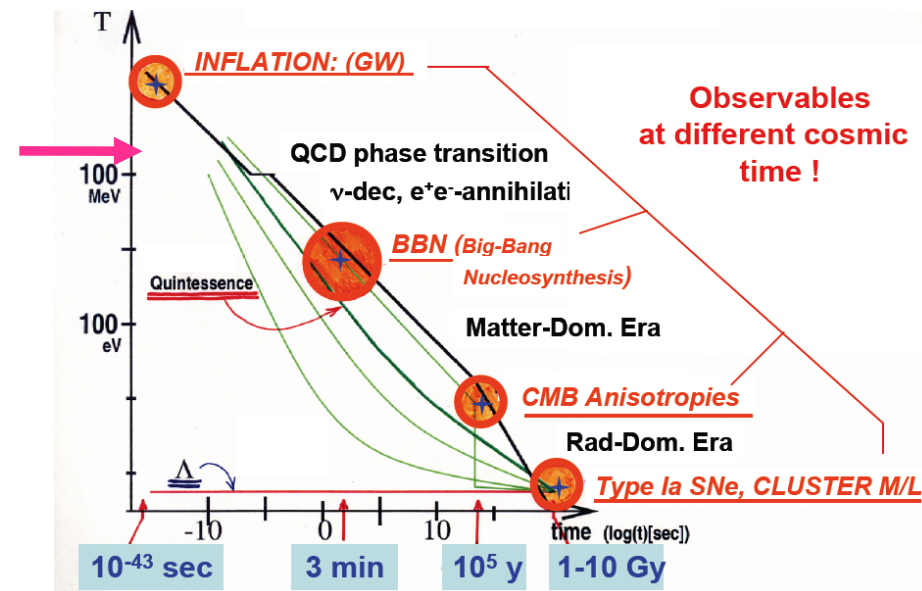


太陽  
 表面温度: 5,780 K  
 中心温度:  $1.5 \times 10^7$  K  
 コロナの温度:  $5 \times 10^6$  K

## 温度 K (ケルビン) と eV の対応

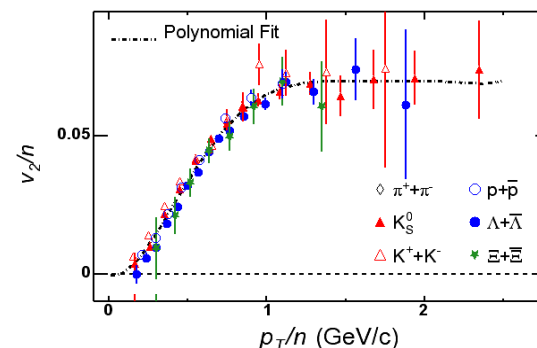
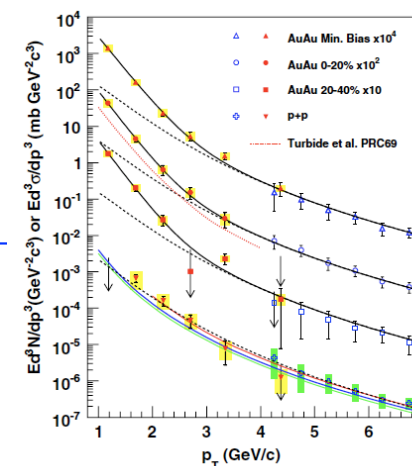
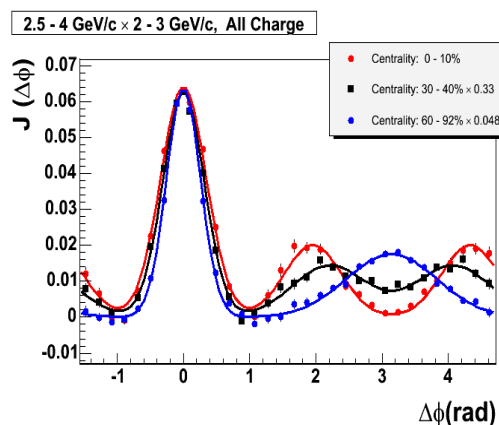
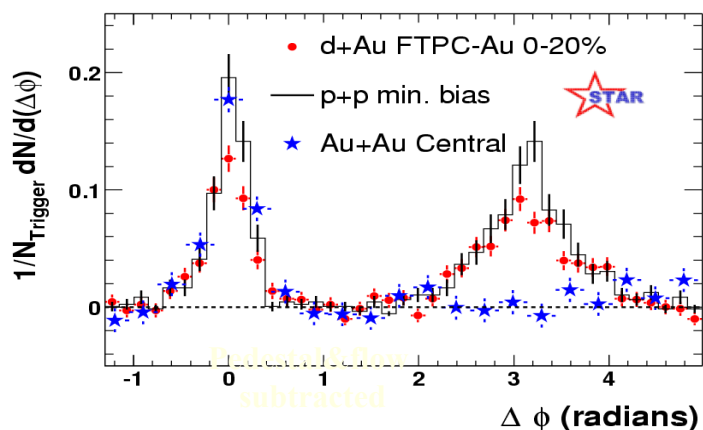
電子1個を1Vの電位差で加速したときのエネルギーは1 eV.  
 1 eV の平均運動エネルギーをもつ気体の温度は11,604 K  
 (気体の分子運動論)

今回の熱的光子の測定:  $T = 300 \text{ MeV} \sim 4 \text{ 兆度}$   
 ( $4 \times 10^{12} \text{ K}$ )

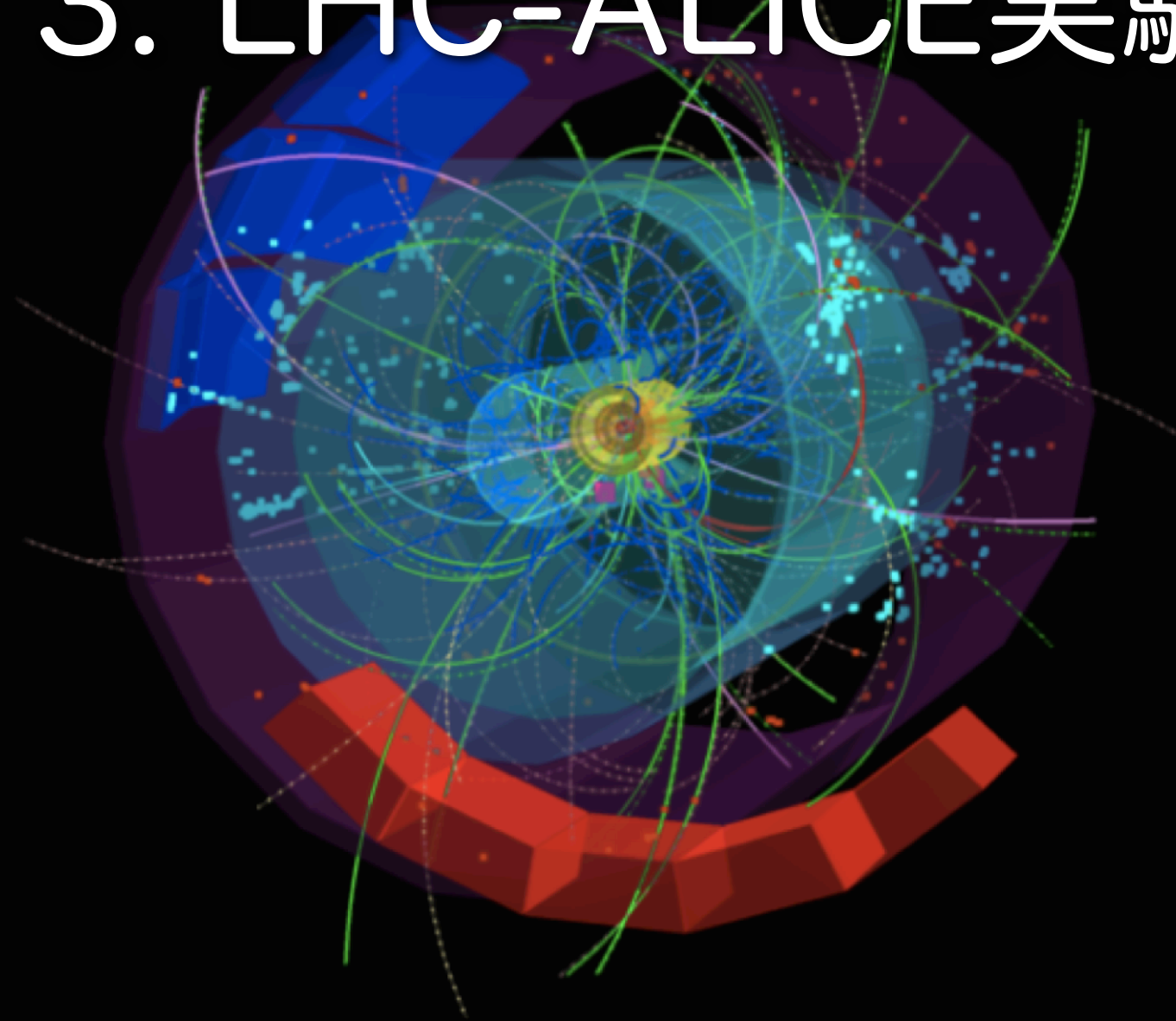


# RHIC 実験のハイライト

- 反対側のジェットの消滅（グルーオン密度とQGP物質のエネルギー損失）
- ジェットと媒質の相互作用：衝撃波生成か？
- 大きな集団運動の観測とクォーク融合モデルによる自然な解釈
- 熱的光子の観測：
  - 4兆°Cを実現 > QCD相転移温度



# 3. LHC-ALICE実験





# Snap shot of ALICE Control Room (2010.08.25)

*- Data taking period, very quite... -*



最初の陽子-陽子衝突を喜ぶ研究者たち  
First collision p+p  $\sqrt{s}=900$  GeV  
(2009.11.23, ALICE Control Room)

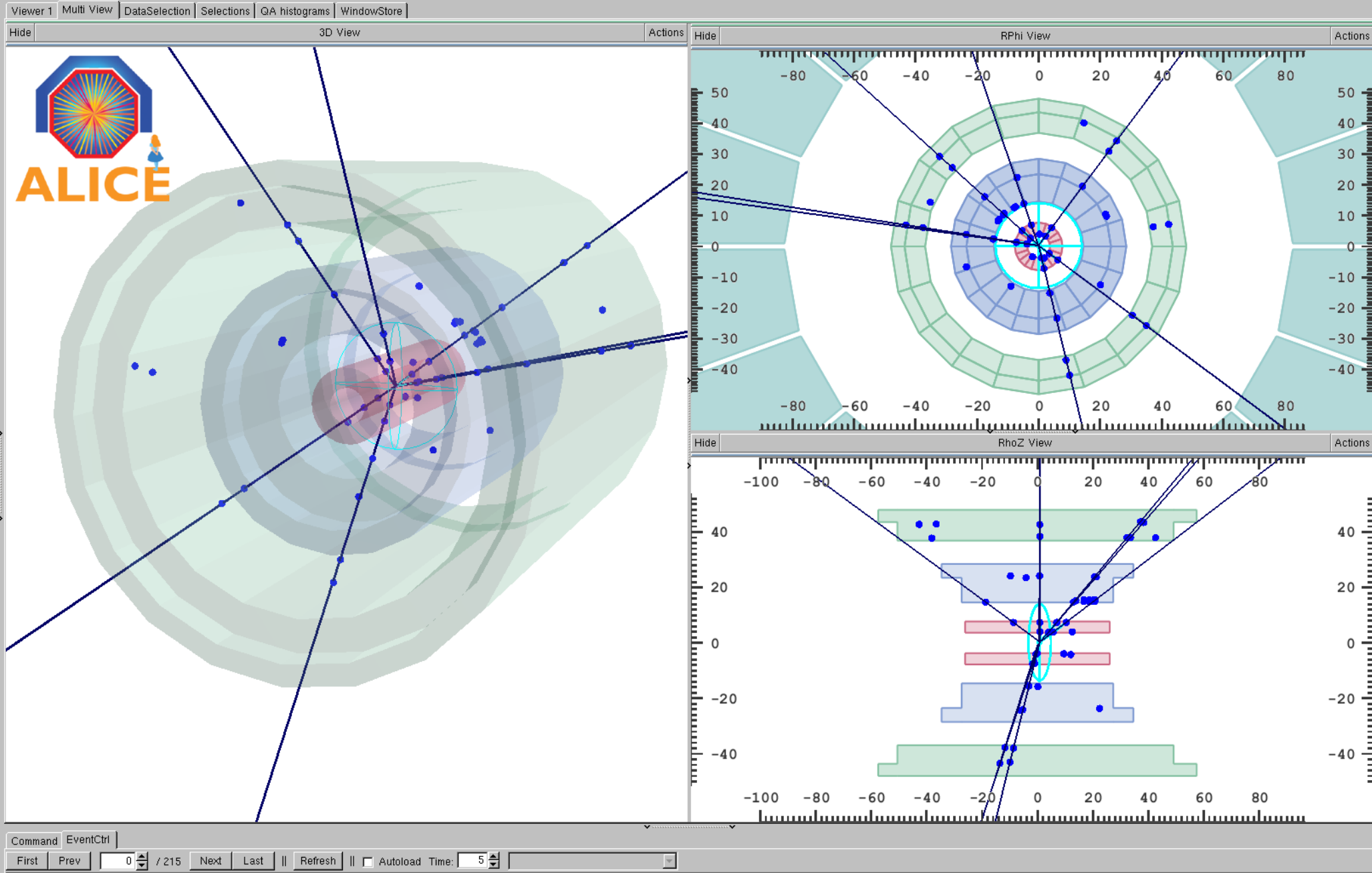
Same Room



PS 2010, Sep. 13, ...

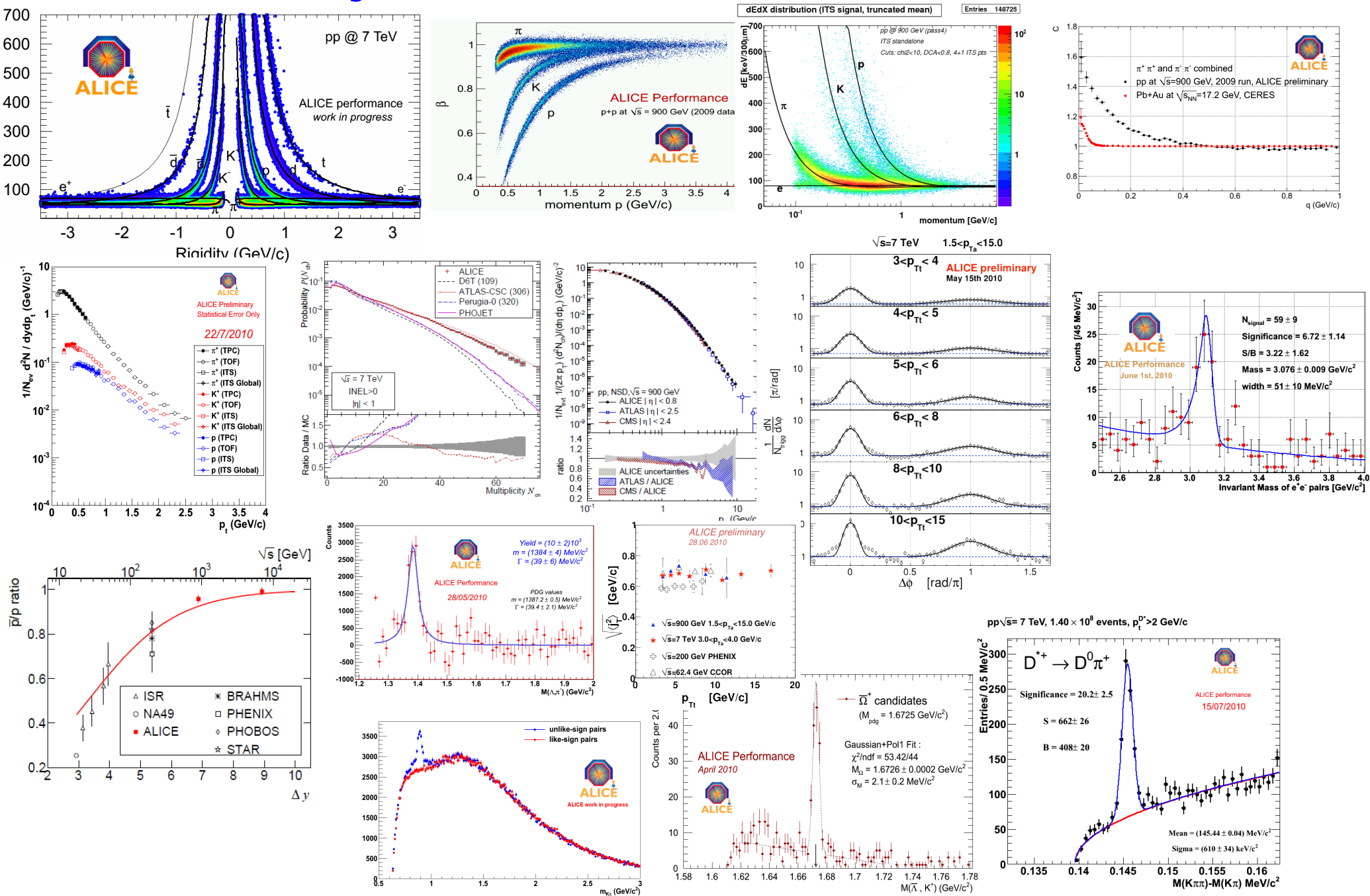
# The first “event” in p+p 0.9 TeV

mestamp: 2009-11-23 15:47:17; Event # in ESD file: 0

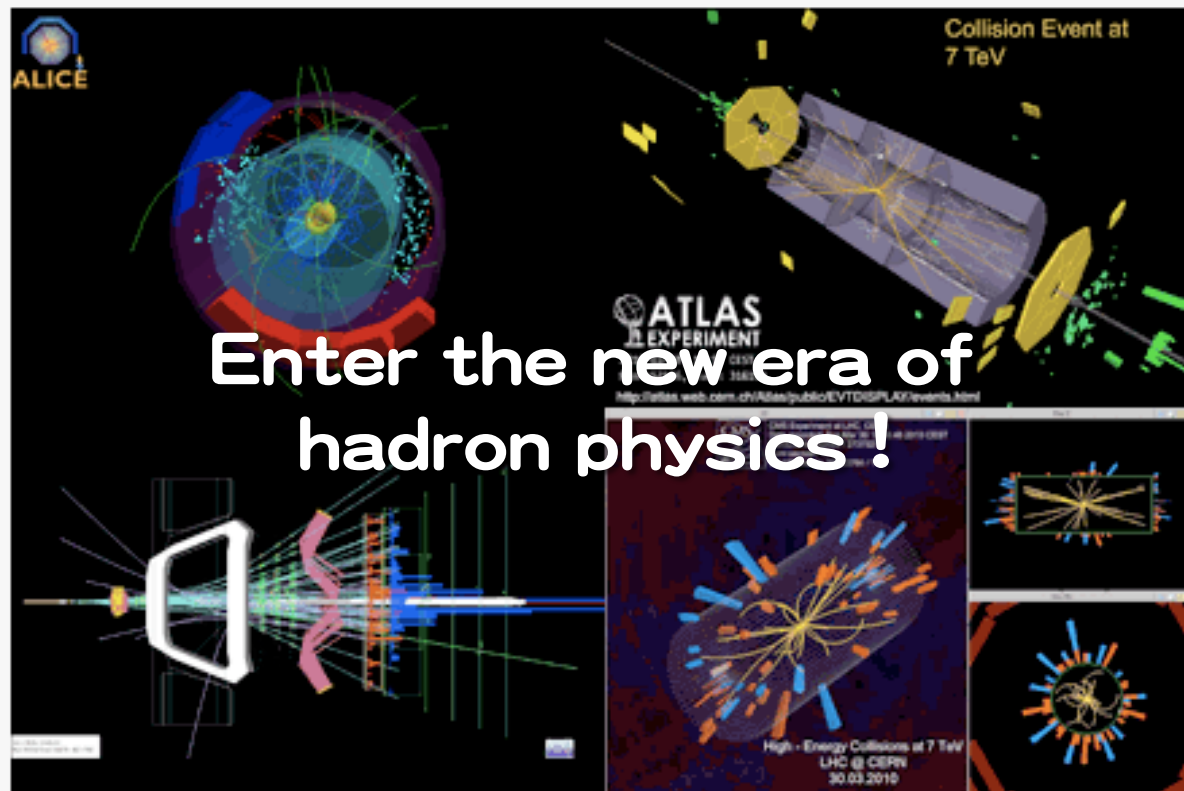




# After 9 months later... Already lots of first results from ALICE!



# LHC First Physics



7 TeV collision events seen today by the LHC's four major experiments (clockwise from top-left: ALICE, ATLAS, CMS, LHCb). [More LHC First Physics Images »](#)

## LHC research programme gets underway

Geneva, 30 March 2010. Beams collided at 7 TeV in the LHC at 13:06 CEST, marking the start of the LHC research programme. Particle physicists around the world are looking forward to a potentially rich harvest of new physics as the LHC begins its first long run at an energy three and a half times higher than previously achieved at a particle accelerator. [Read more...](#)

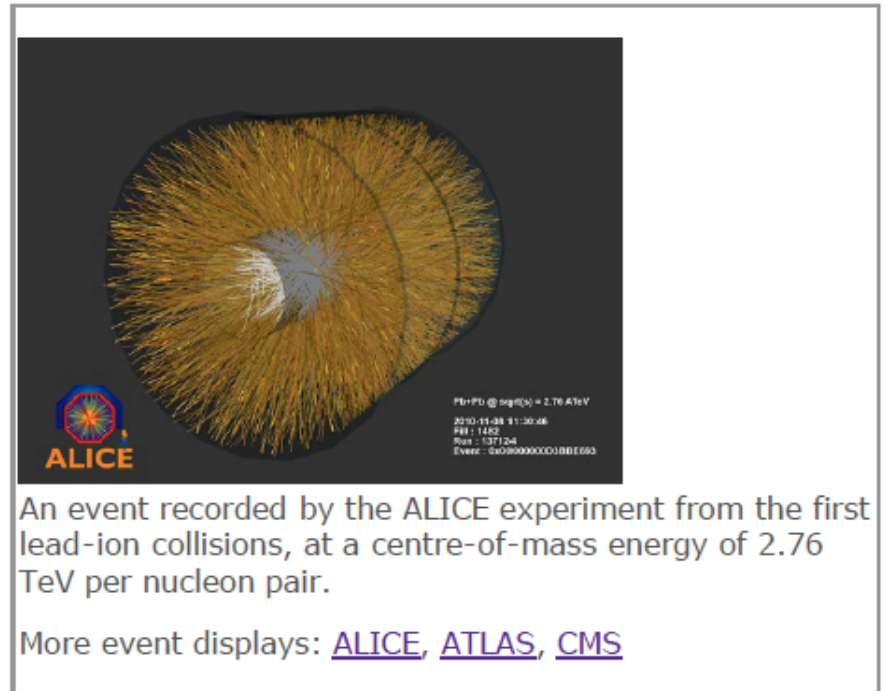


## CERN completes transition to lead-ion running at the LHC PR21.10 08.11.2010

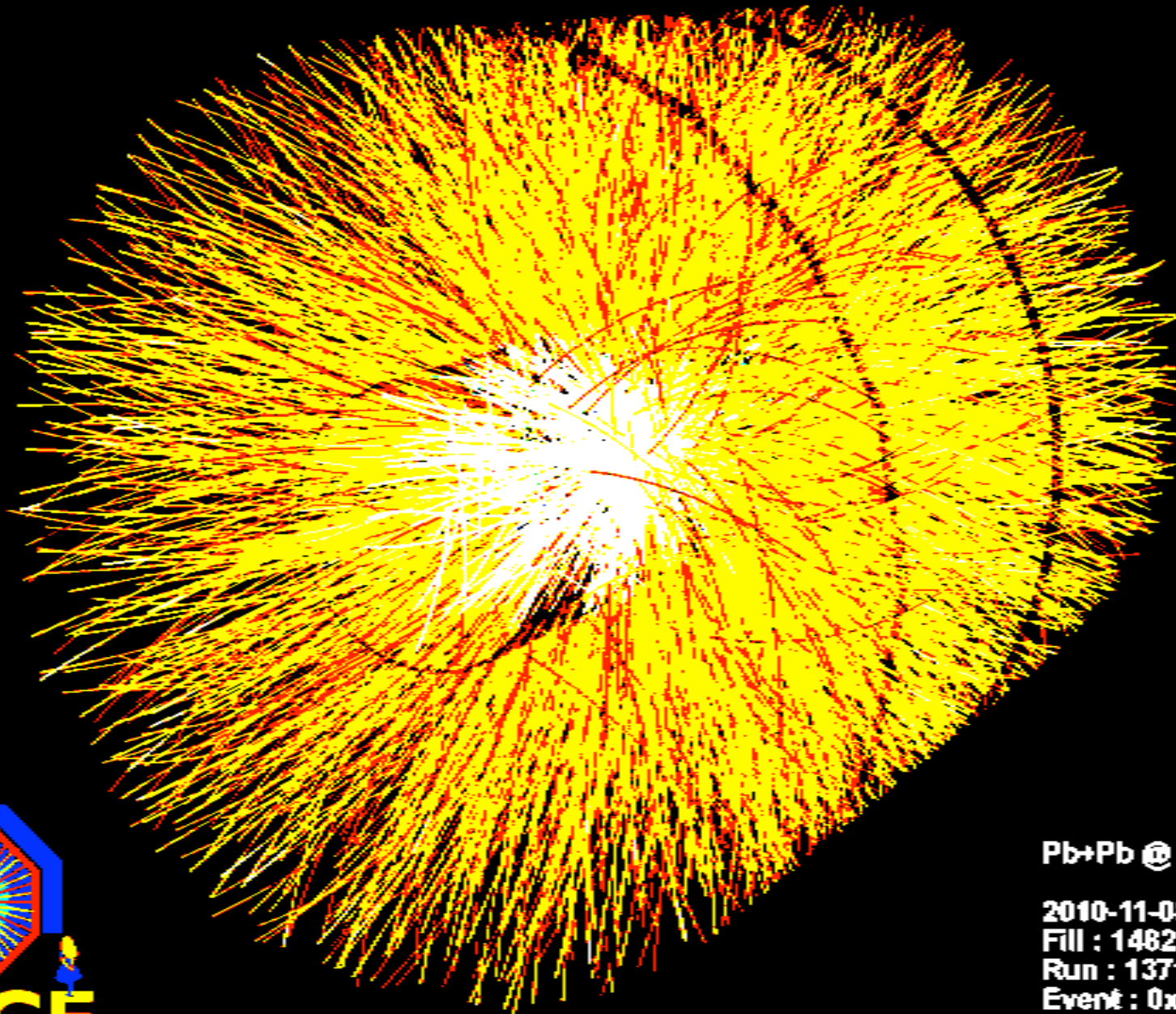
Geneva, 8 November 2010. Four days is all it took for the LHC operations team at CERN<sup>1</sup> to complete the transition from protons to lead ions in the LHC. After extracting the final proton beam of 2010 on 4 November, commissioning the lead-ion beam was underway by early afternoon. First collisions were recorded at 00:30 CET on 7 November, and stable running conditions marked the start of physics with heavy ions at 11:20 CET today.

“The speed of the transition to lead ions is a sign of the maturity of the LHC,” said CERN Director General Rolf Heuer. “The machine is running like clockwork after just a few months of routine operation.”

Operating the LHC with lead ions – lead atoms stripped of electrons - is completely different from operating the machine with protons. From the source to collisions, operational parameters have to be re-established for the new type of beam. For lead-ions, as for protons before them, the procedure started with threading a single beam round the ring in one direction and steadily increasing the number of laps before repeating the process for the other beam. Once circulating beams had been established they could be accelerated to the full energy of 287 TeV per beam. This energy is much higher than for proton beams because lead ions contain 82 protons. Another period of careful adjustment was needed before lining the beams up for collision, and then finally declaring that nominal data taking conditions, known at CERN as stable beams, had been established. The three experiments recording data with lead ions, ALICE, ATLAS and CMS can now look forward to continuous lead-ion running until CERN’s winter technical stop begins on 6 December.



# 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

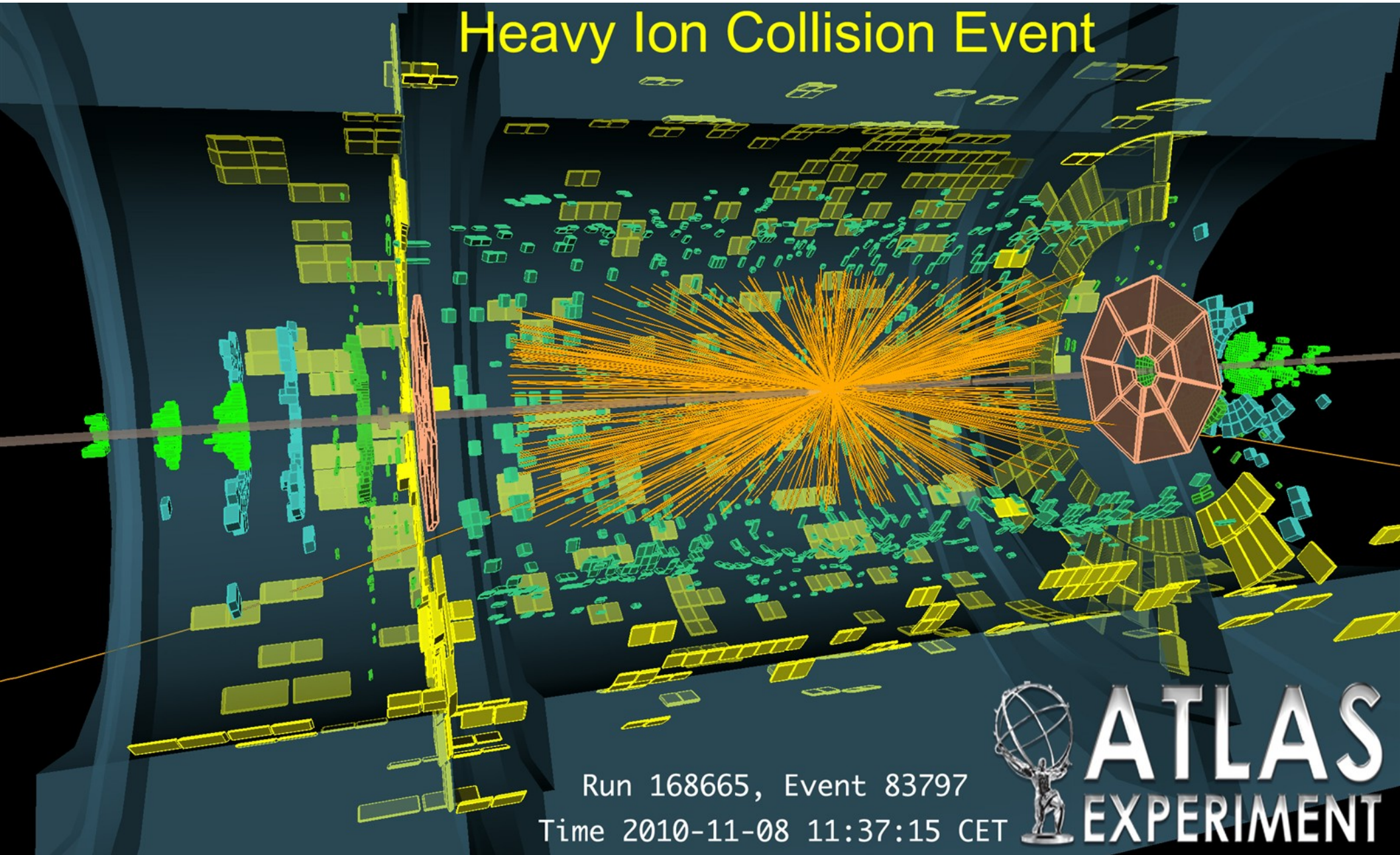
Run : 137124

Event : 0x0000000D3BBE693



# ATLAS (first Pb+Pb collision)

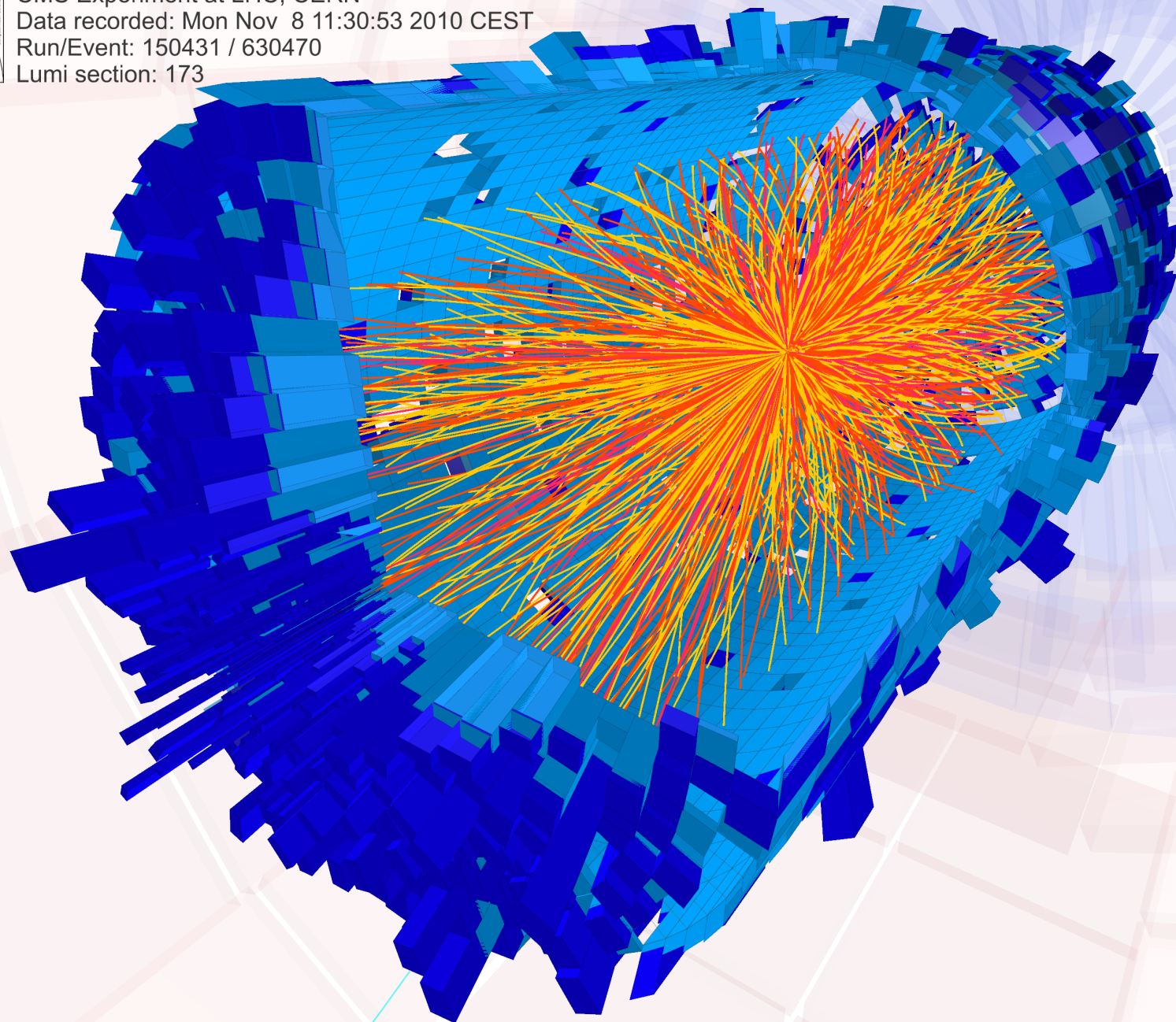
## Heavy Ion Collision Event

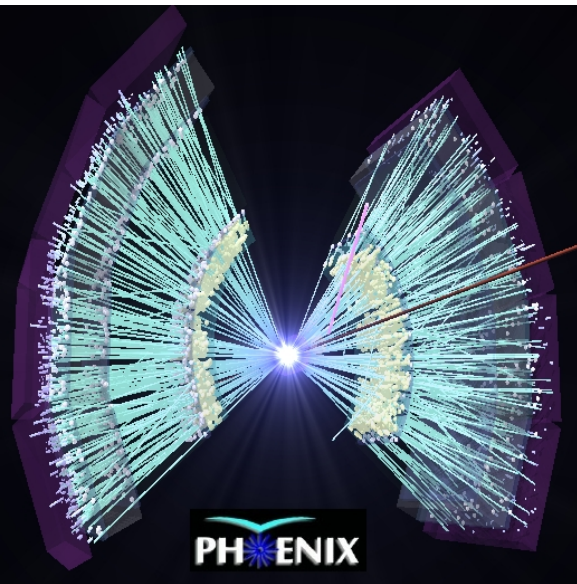


# CMS (first Pb+Pb collision)



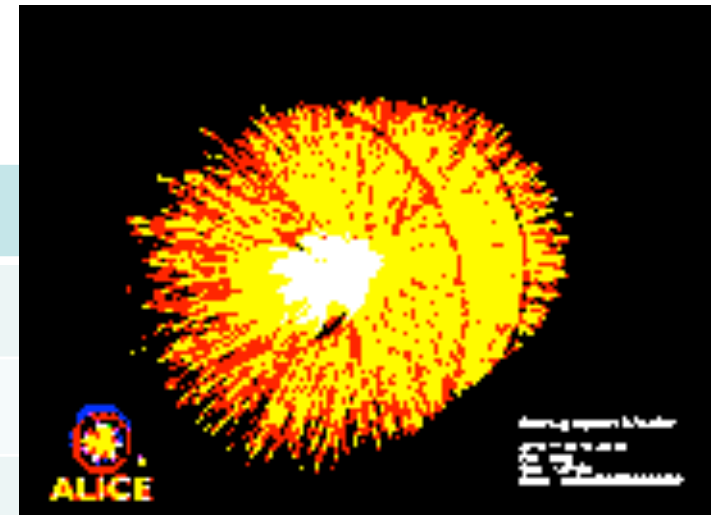
CMS Experiment at LHC, CERN  
Data recorded: Mon Nov 8 11:30:53 2010 CEST  
Run/Event: 150431 / 630470  
Lumi section: 173



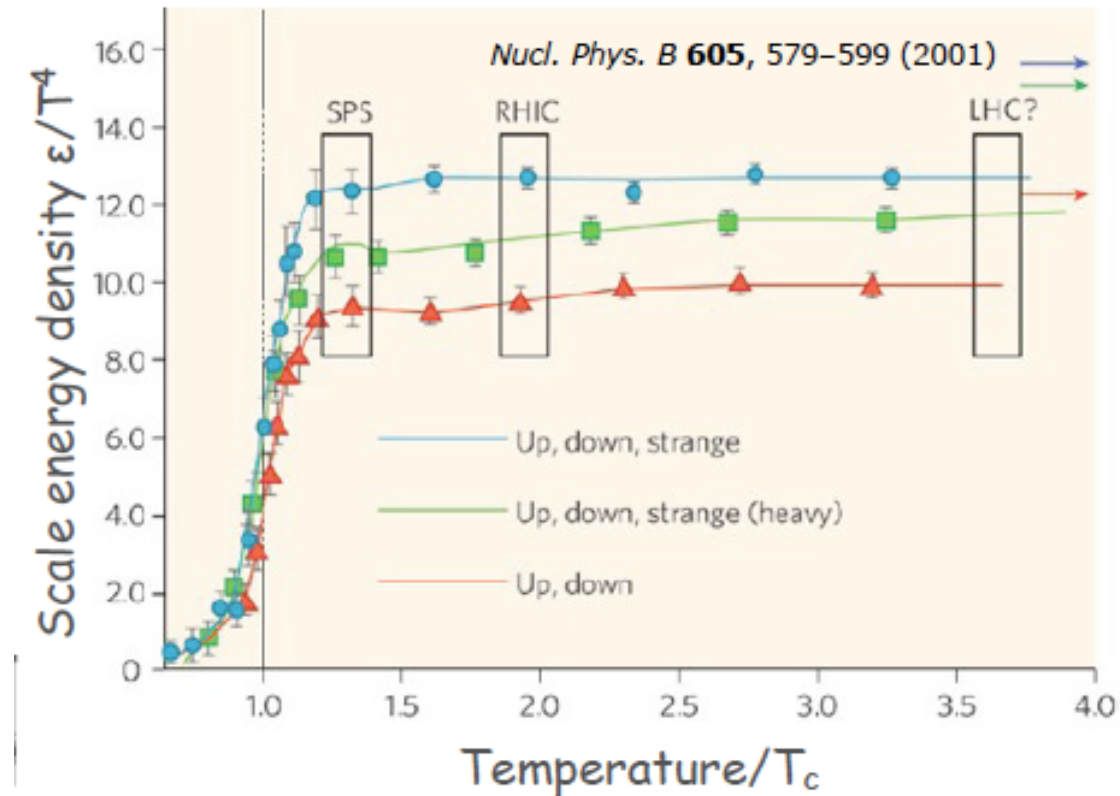


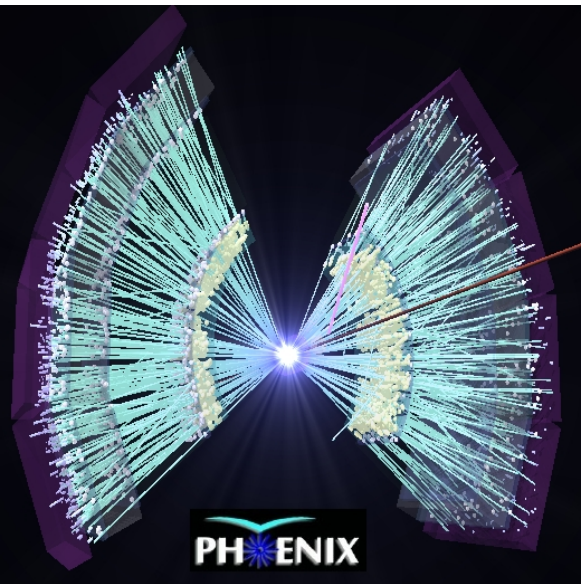
# RHIC vs. LHC

	RHIC	LHC
$\sqrt{s_{NN}}$ (GeV)	200	5500
$T/T_c$	1.9	3.5-4.0
$\epsilon$ (GeV/fm <sup>3</sup> )	5	15-60
$\tau_{QGP}$ (fm/c)	2-4	> 10



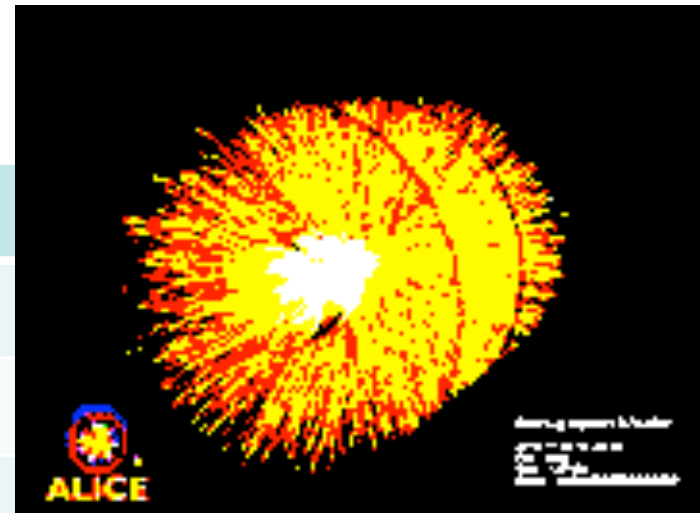
- High temperature QGP (2 x  $T_{RHIC}$ ).





# RHIC vs. LHC

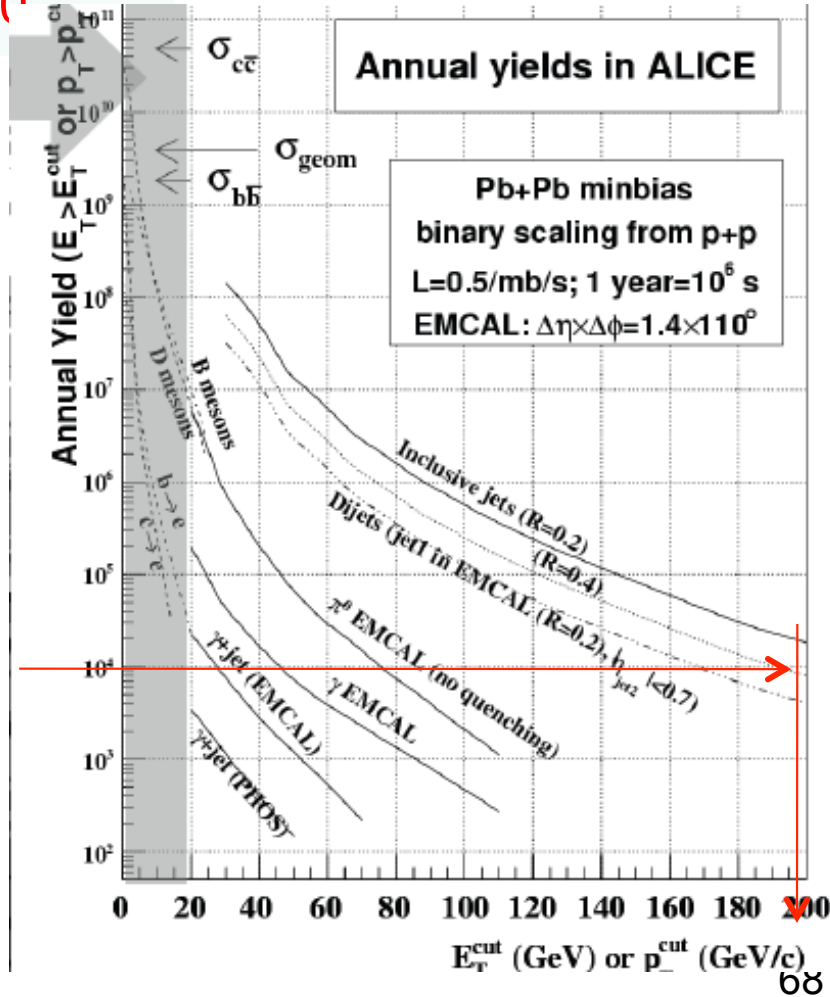
	RHIC	LHC
$\sqrt{s_{NN}}$ (GeV)	200	5500
$T/T_c$	1.9	3.5-4.0
$\epsilon$ (GeV/fm <sup>3</sup> )	5	15-60
$\tau_{QGP}$ (fm/c)	2-4	> 10

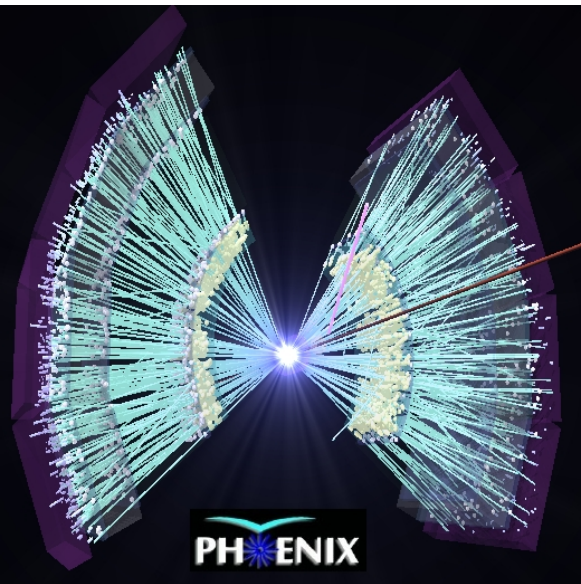


RHIC

- High temperature QGP (2 x T<sub>RHIC</sub>).
- Jet production dominant.

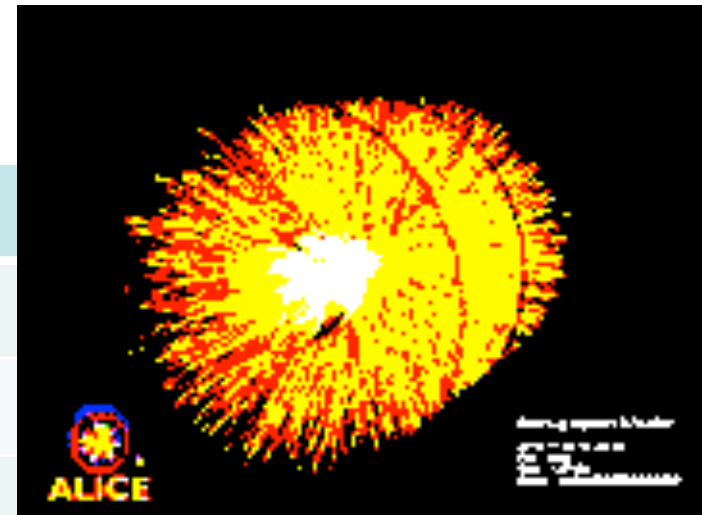
LHC:  
 Inclusive jets,  
 annual yield; 10<sup>4</sup> @  
 $p_T = 200$  GeV/c  
 (5.5 TeV, Year-1)





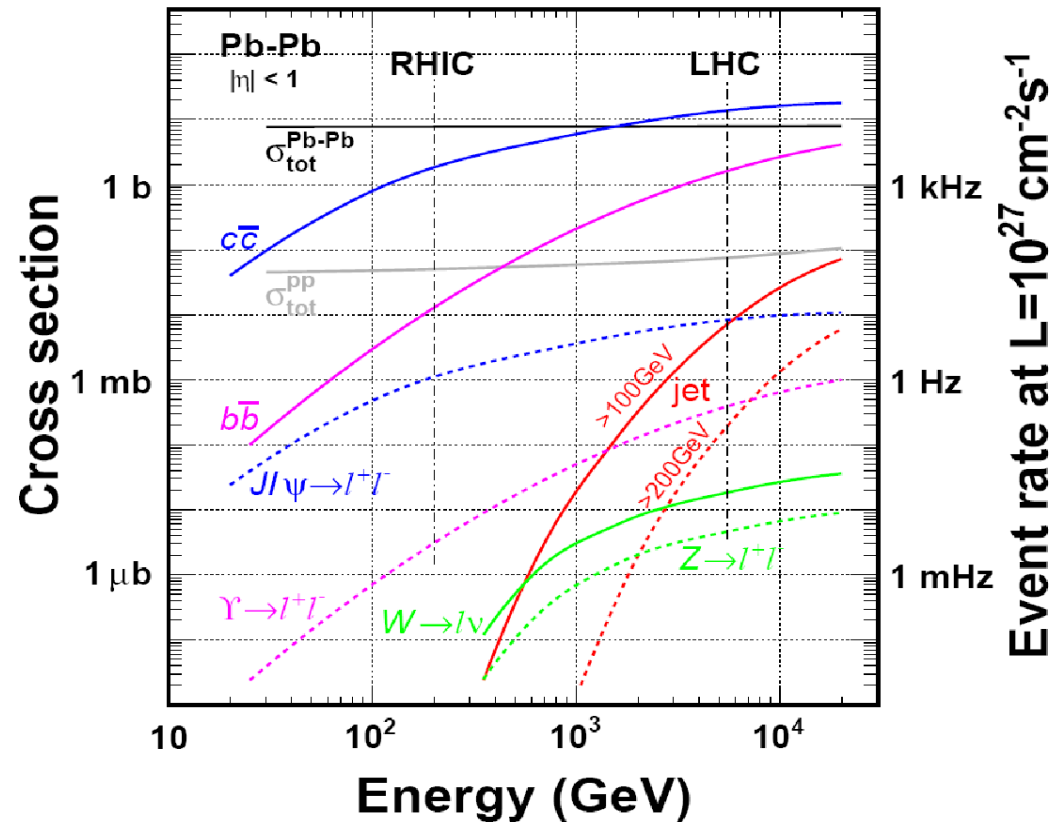
# RHIC vs. LHC

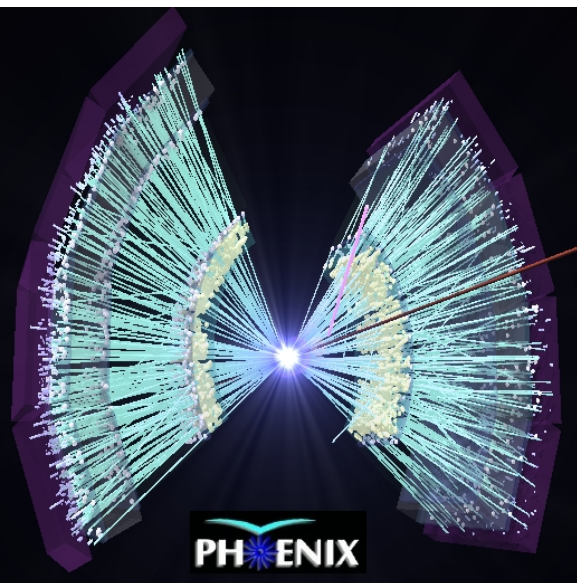
	RHIC	LHC
$\sqrt{s_{NN}}$ (GeV)	200	5500
$T/T_c$	1.9	3.5-4.0
$\epsilon$ (GeV/fm <sup>3</sup> )	5	15-60
$\tau_{QGP}$ (fm/c)	2-4	> 10



[JW Harris, Winter WS on Nucl. Dynamics (2008)]

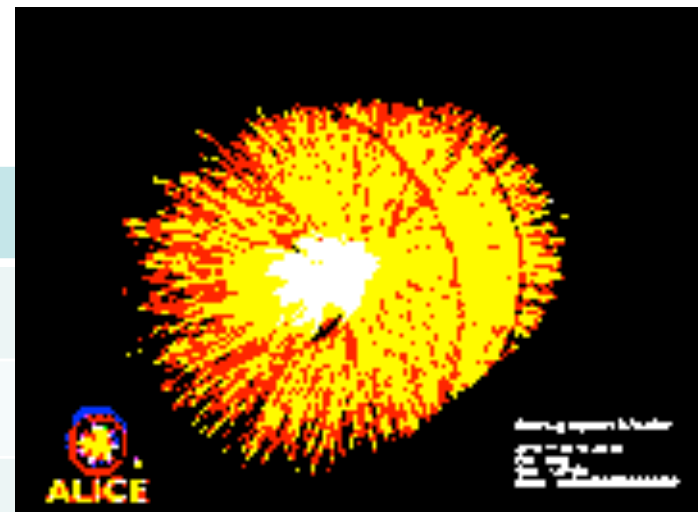
- High temperature QGP ( $2 \times T_{RHIC}$ ).
- Jet production dominant.
- Copious heavy quark production ( $10 \times \sigma_{c\text{-}cbar}$ ).



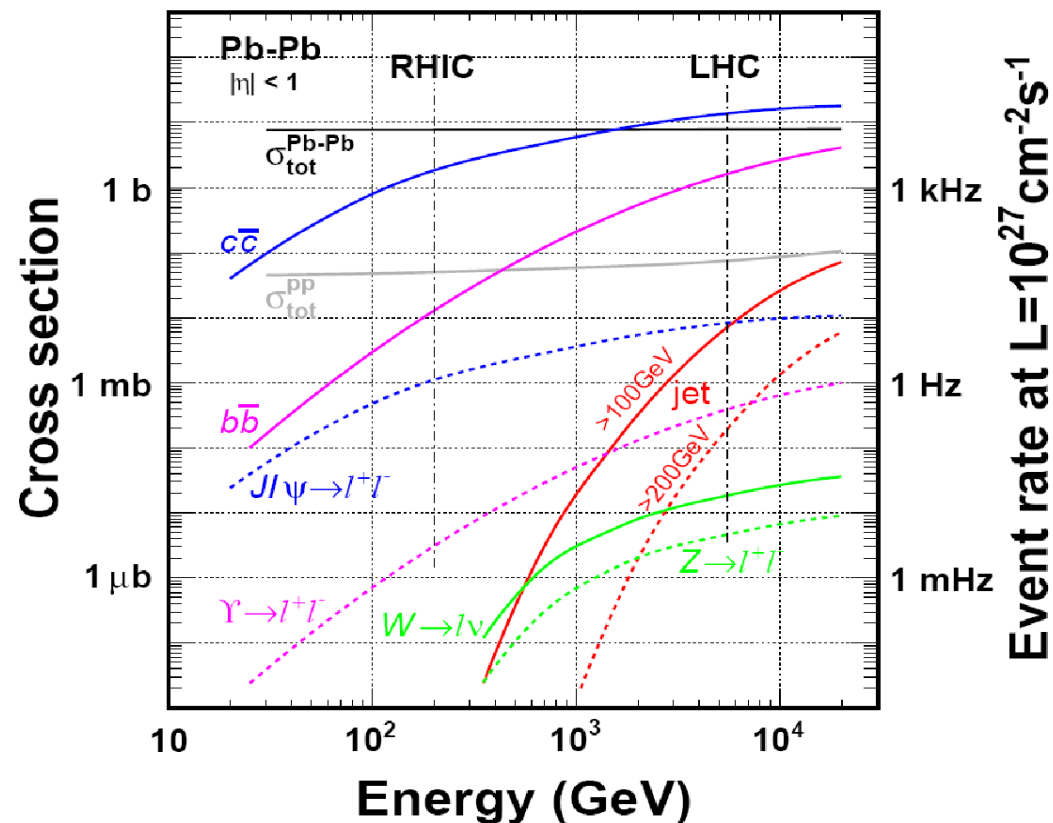


# RHIC vs. LHC

	RHIC	LHC
$\sqrt{s_{NN}}$ (GeV)	200	5500
$T/T_c$	1.9	3.5-4.0
$\epsilon$ (GeV/fm <sup>3</sup> )	5	15-60
$\tau_{QGP}$ (fm/c)	2-4	> 10



- High temperature QGP ( $2 \times T_{RHIC}$ ).
- Jet production dominant.
- Copious heavy quark production ( $10 \times \sigma_{c\text{-}cbar}$ ).
- LHC:
  - Study the matter by clean probes, and response of bulk matter in HI collisions.





# Large Hadron Collider (LHC)

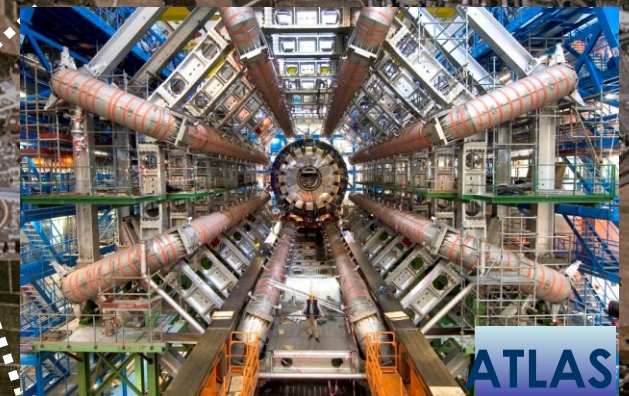
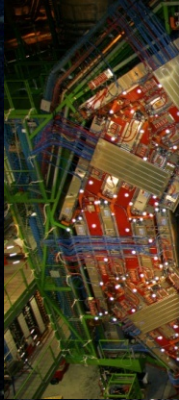
## LHC Basics :

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

Circumference: 27 km

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

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



# ALICE experiment

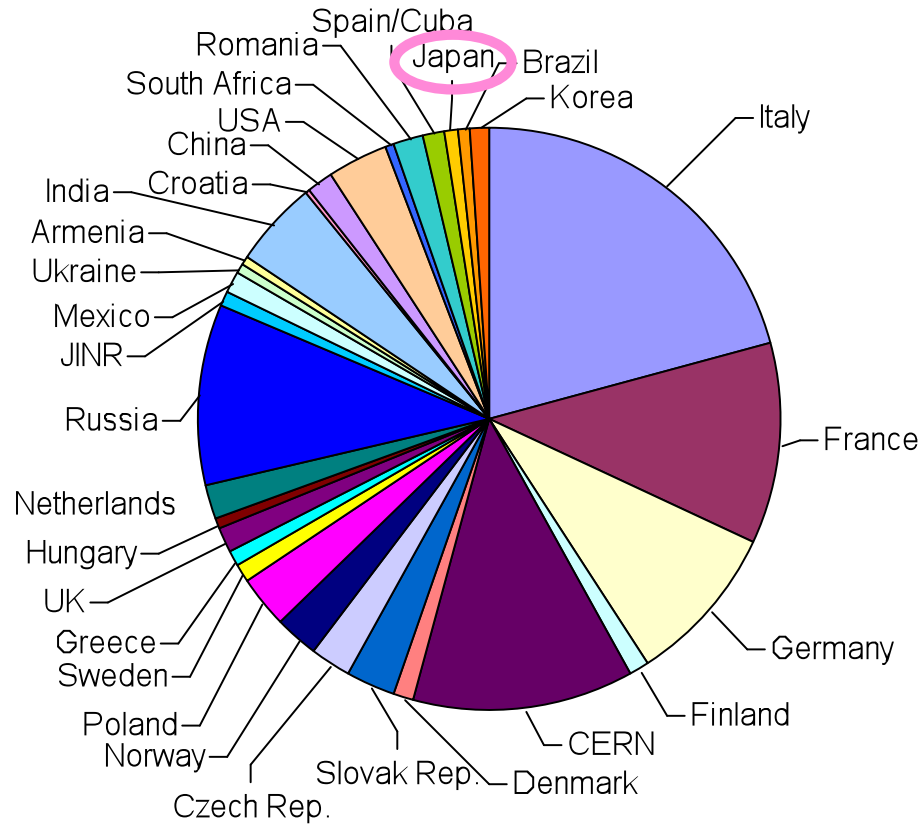
## ALICE = A Large Ion Collider Experiment

- Dedicated heavy ion experiment at LHC:
  - Study ‘state of matter’ at high temperature & energy density; QGP.
  - LHC: **30 x energy** of RHIC
    - Expect very different type of ‘QGP’
    - ‘hard signals’ to probe QGP (jets,  $\gamma$ , c and b quark )
    - First Pb+Pb (2.76 TeV) collisions Nov. 2010
- ALICE Institutes from Japan.
  - Hiroshima Univ.: PHOS
  - Tokyo Univ. (CNS): TRD, FoCAL upgrade
  - Univ. of Tsukuba: EMCal, DCal





# ALICE Collaboration



**Collaboration:**  
 > **1000** Members  
 > **100** Institutes  
 > **30** countries



このあたりにいるはず？



ALICE

# ALICE

Strip    Drift    Pixel

ACORDE

EMCal

TOF

TRD

ACORDE  
V0  
T0  
ZDC  
FMD  
PMD

V0

T0

FMD

HMPID

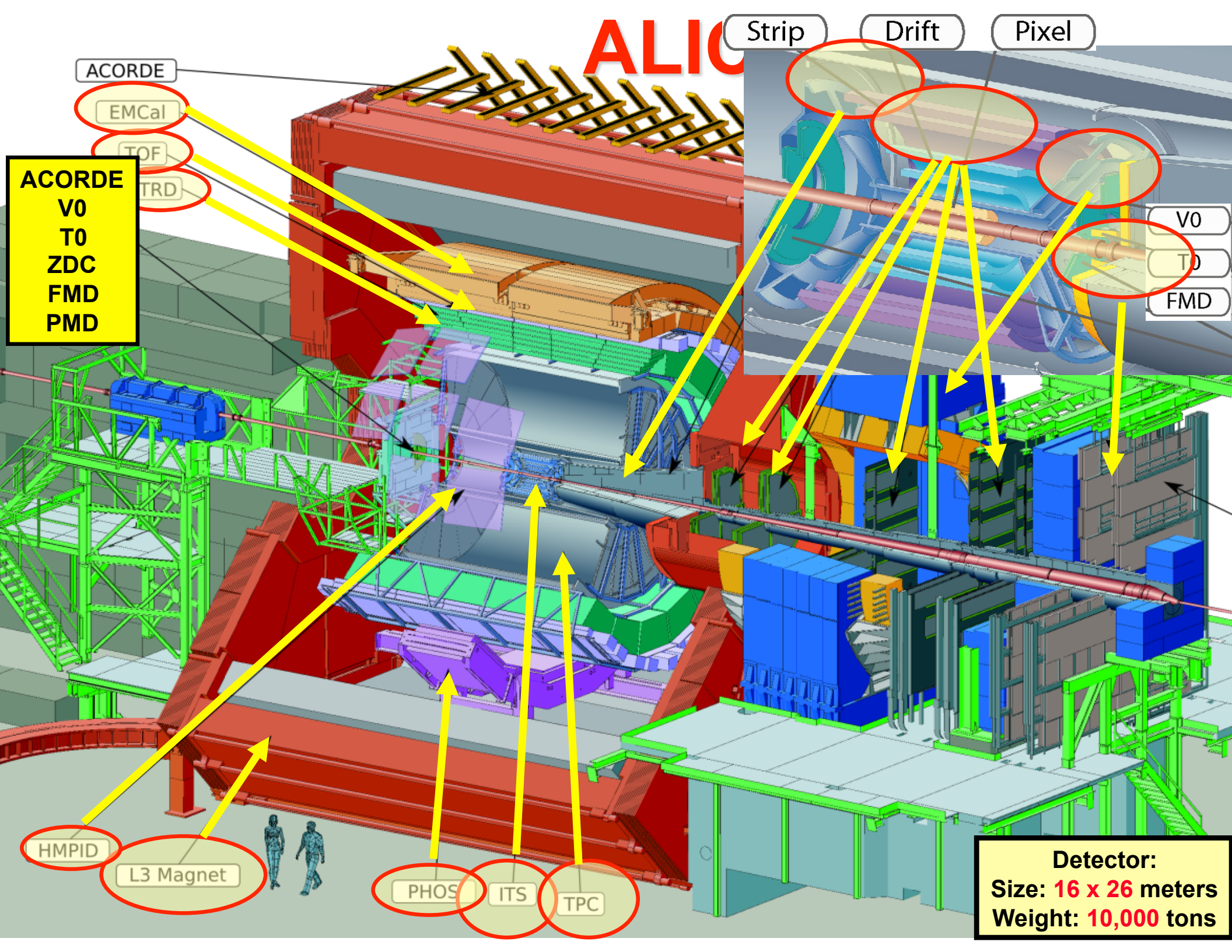
L3 Magnet

PHOS

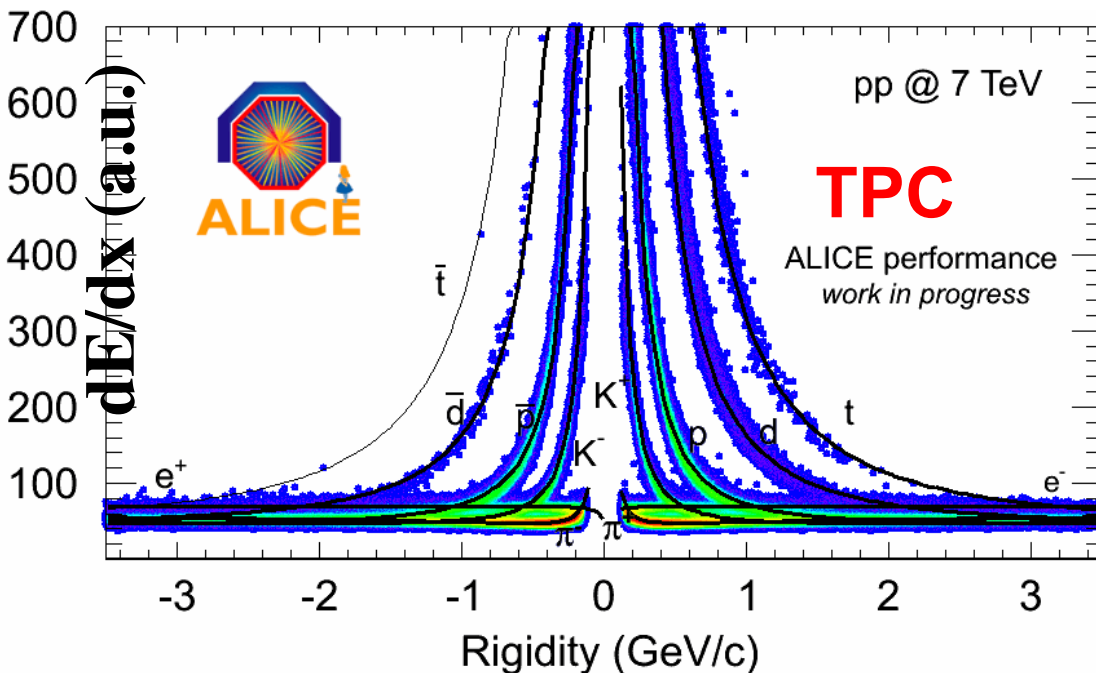
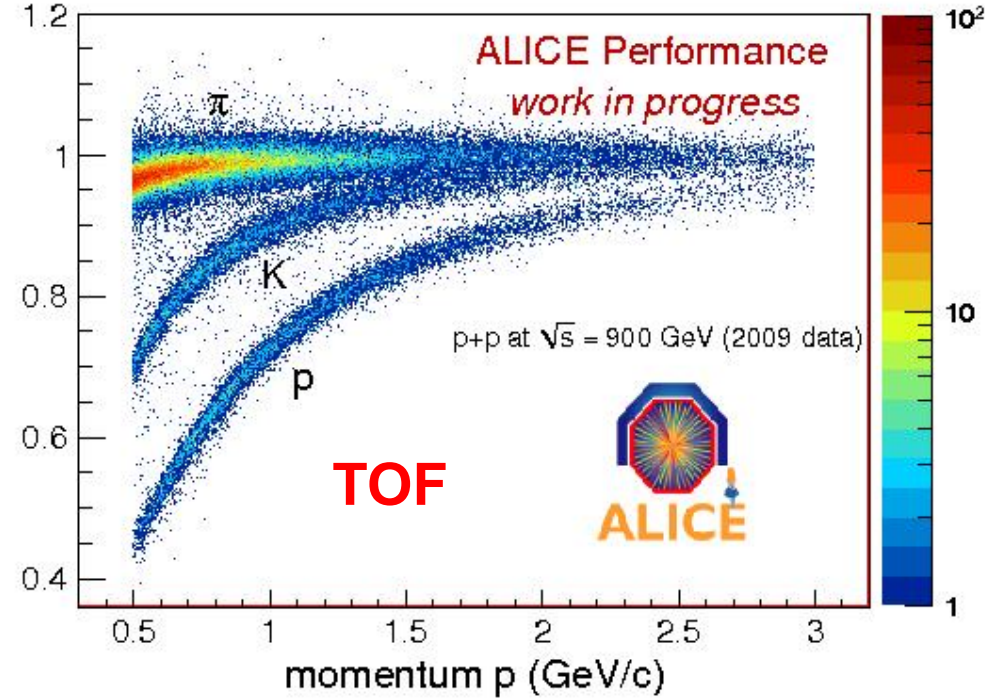
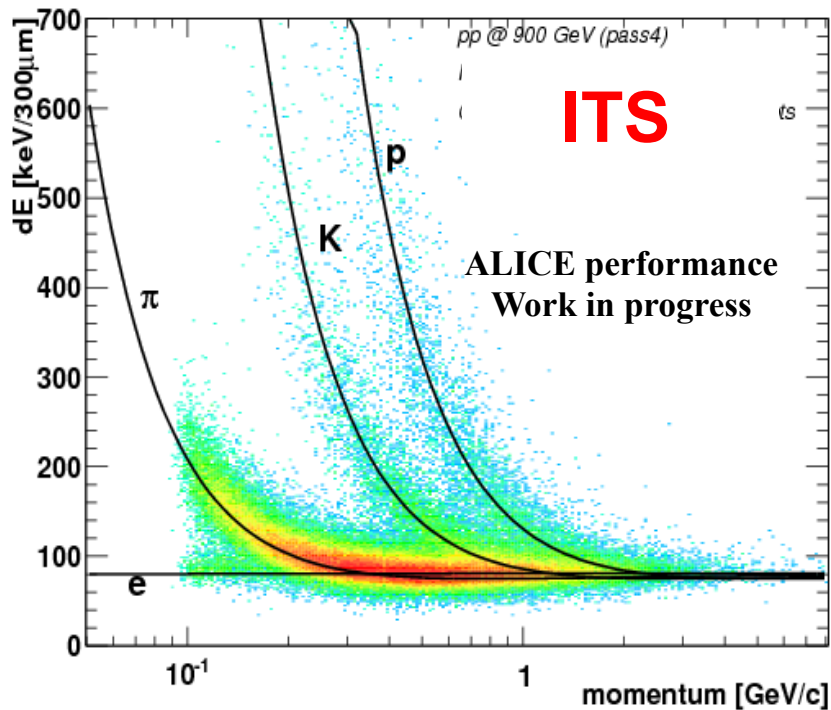
ITS

TPC

**Detector:**  
**Size: 16 x 26 meters**  
**Weight: 10,000 tons**

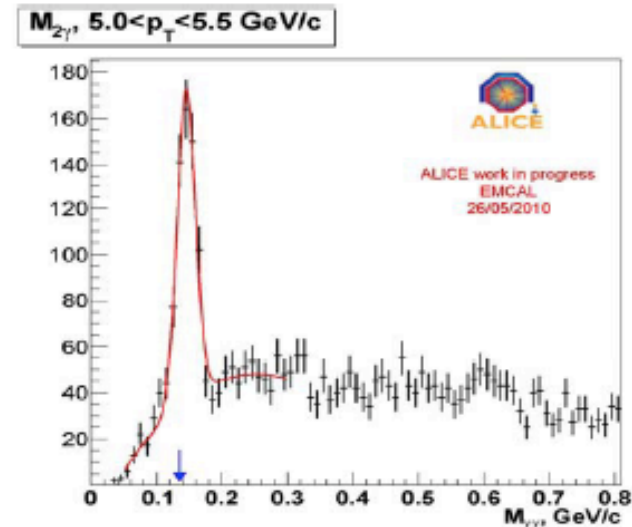
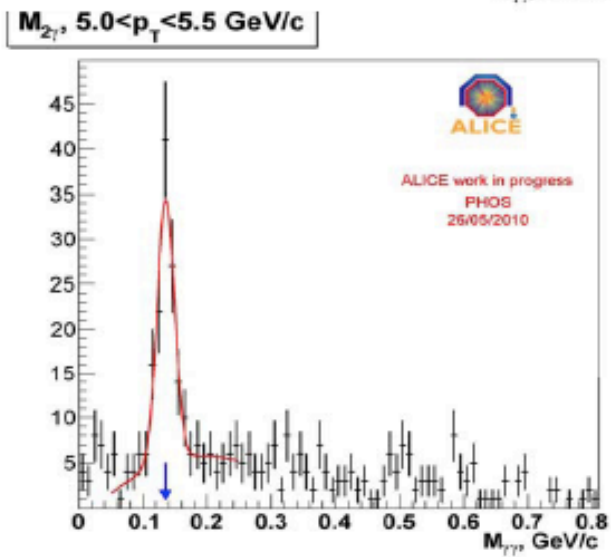
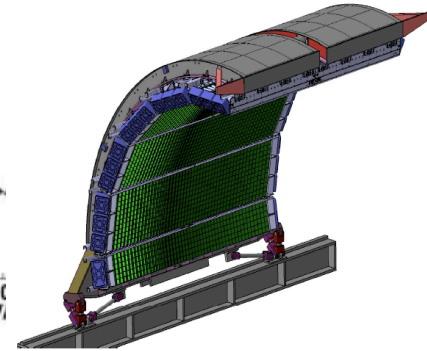
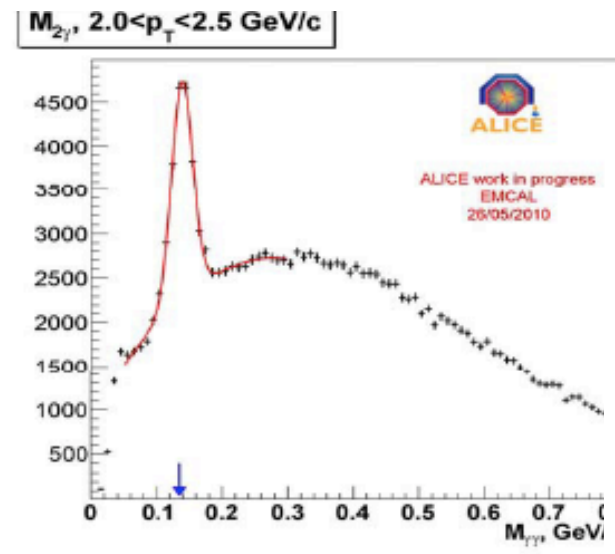
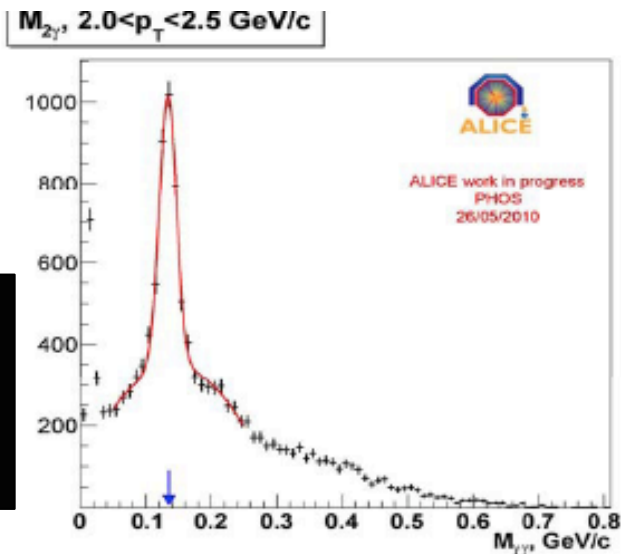
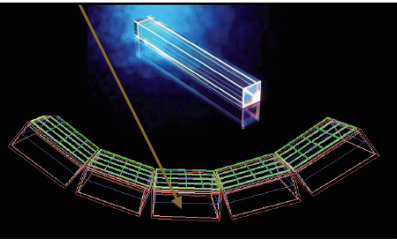


# ALICE PID performance



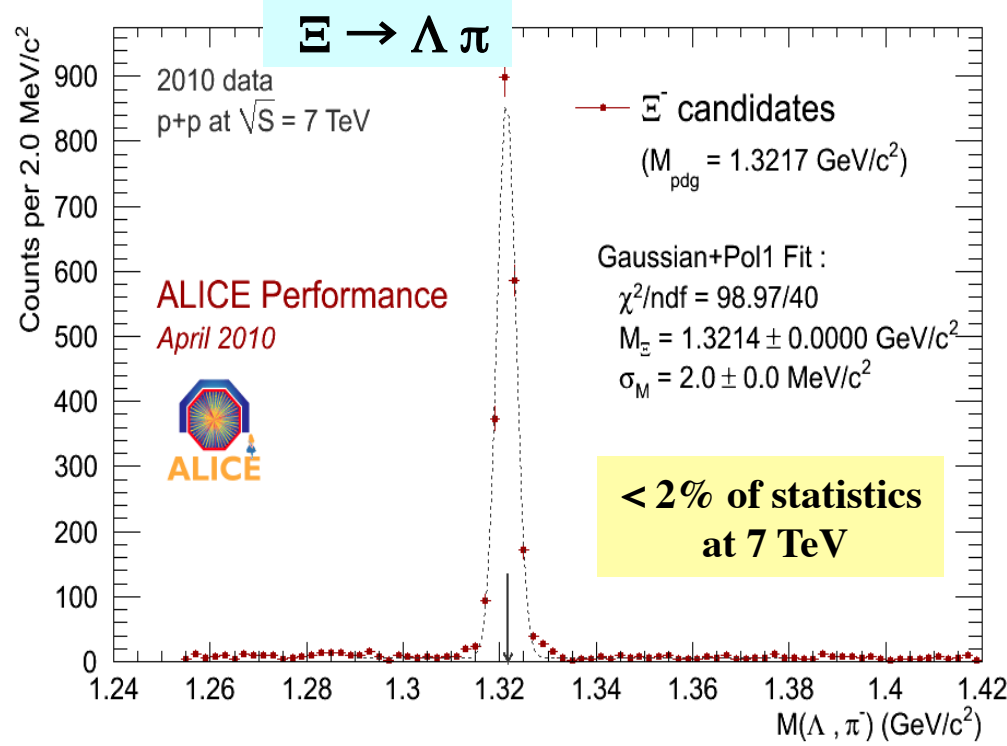
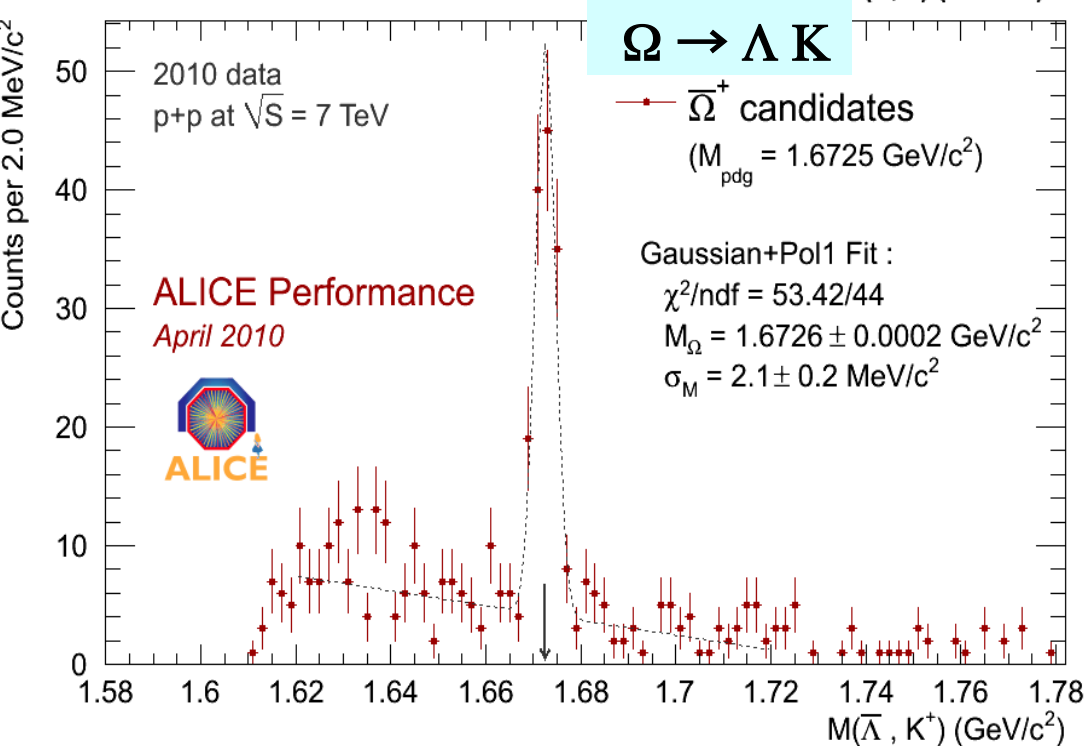
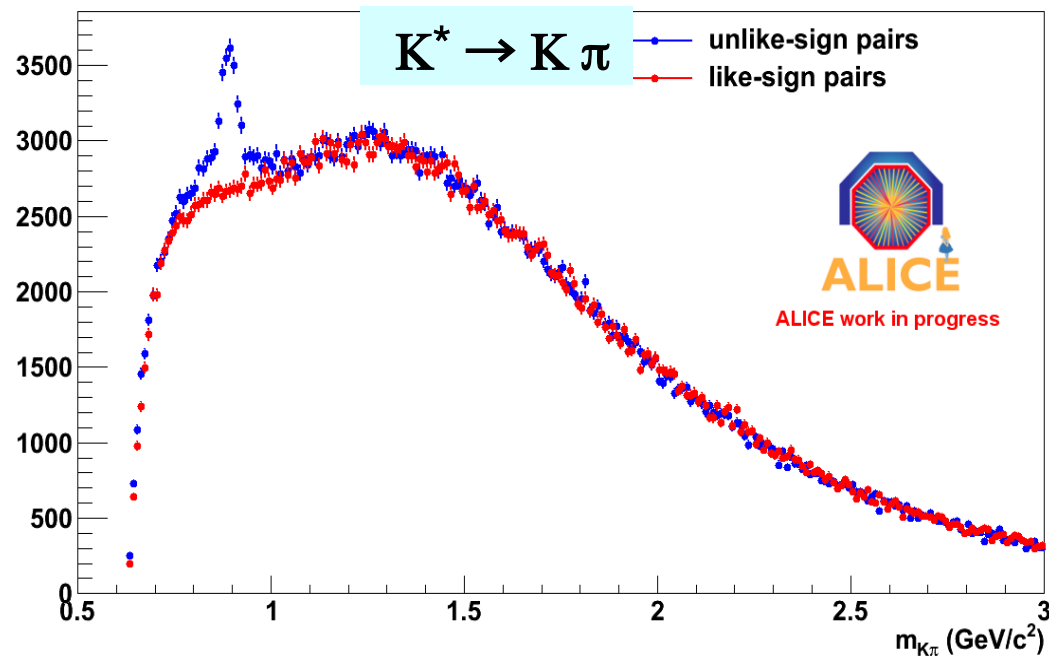
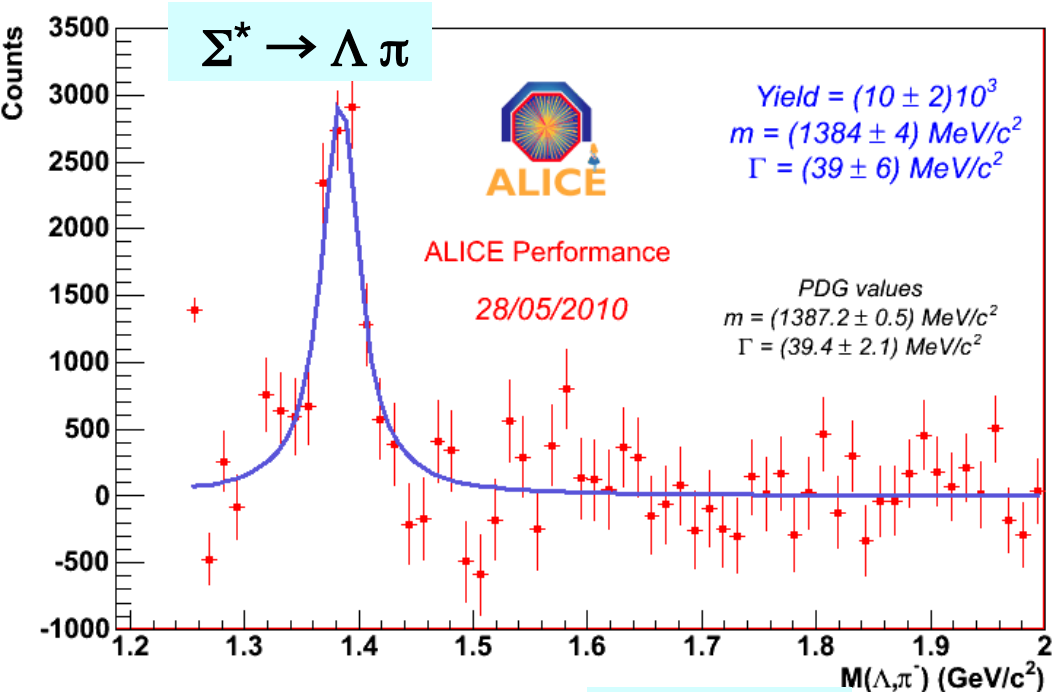
- PID using ITS, TOF, TPC
- TPC  $dE/dx$ :
  - separates p/ K up to 1.1 GeV
- TOF:
  - separates K/  $\pi$  up to  $\sim 1.5$  GeV

# Calorimeters: PHOS, EMCAL



- Invariant mass of  $\pi^0$  at 7 TeV p+p data.

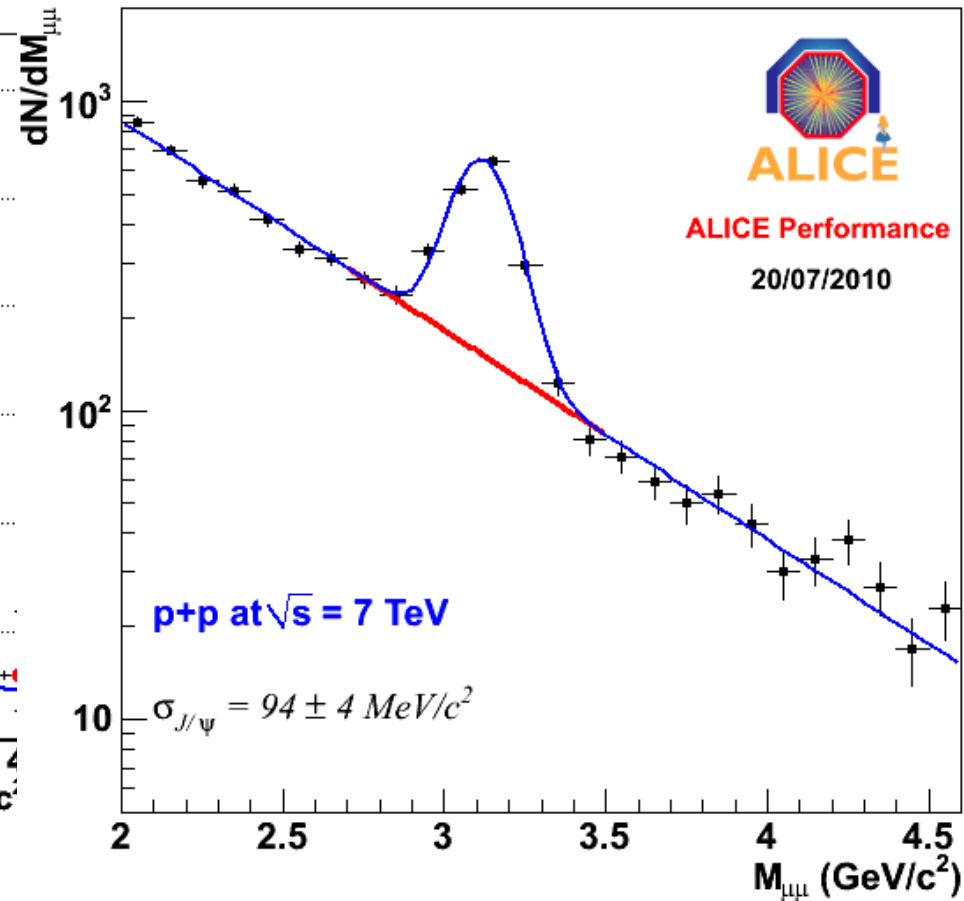
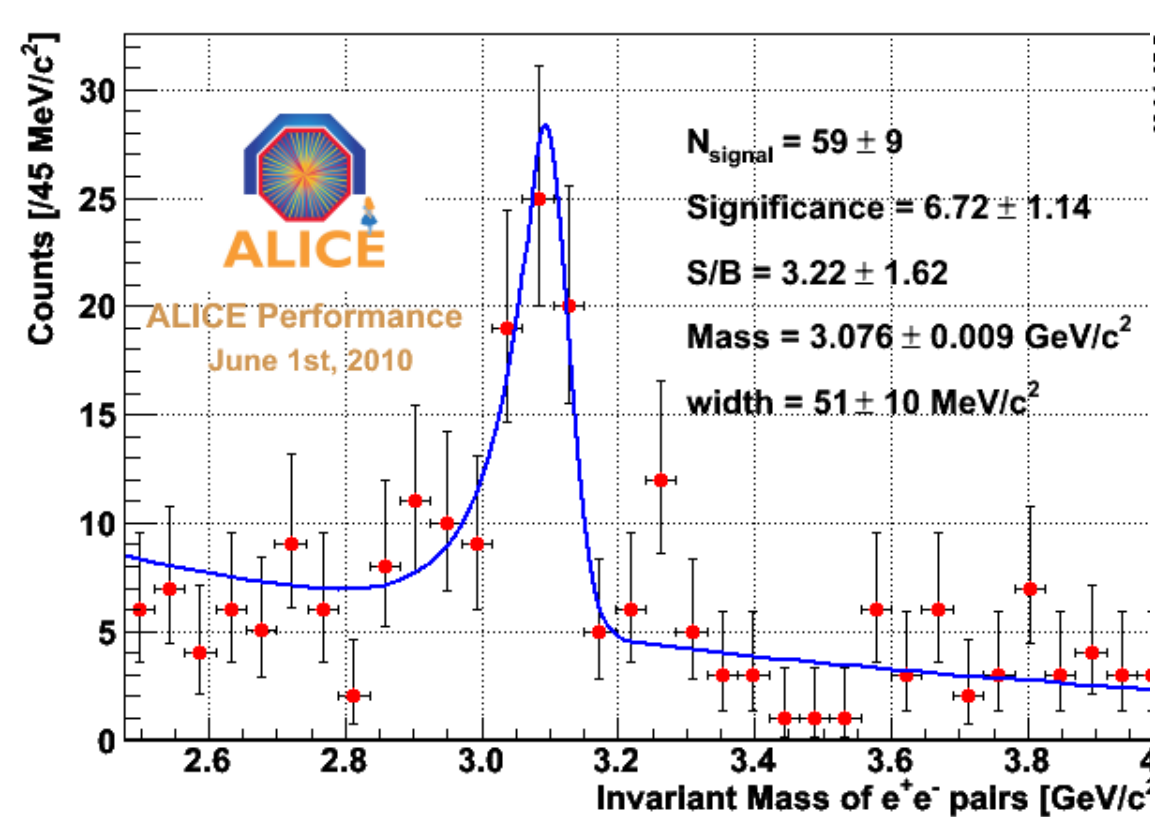
# Strangeness productions (p+p 7 TeV)



# J/Ψ at p+p 7 TeV

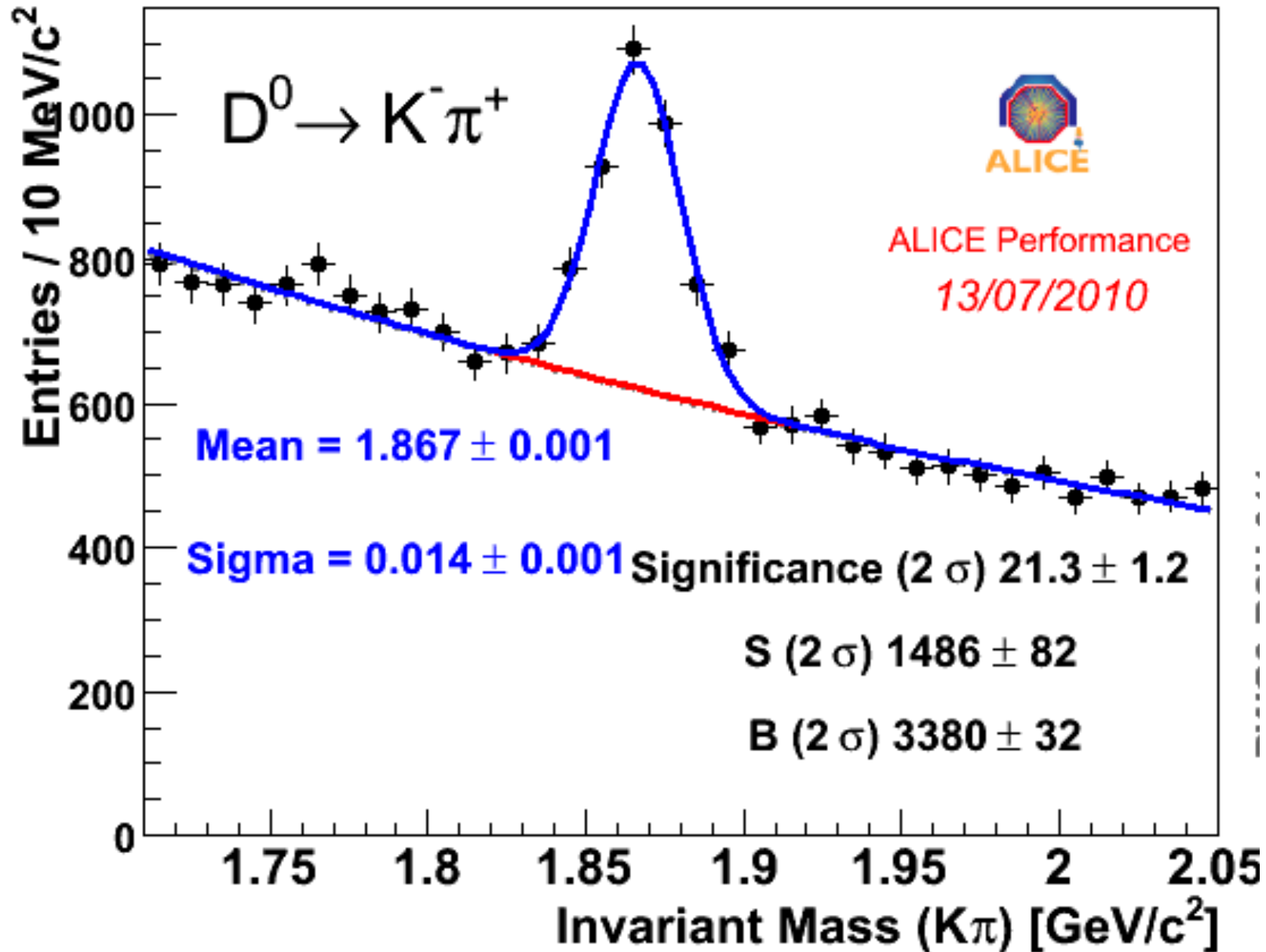
J/Ψ → e<sup>+</sup>e<sup>-</sup> |y| < 1

J/Ψ → μ<sup>+</sup>μ<sup>-</sup>, y = 2.5 - 4.1



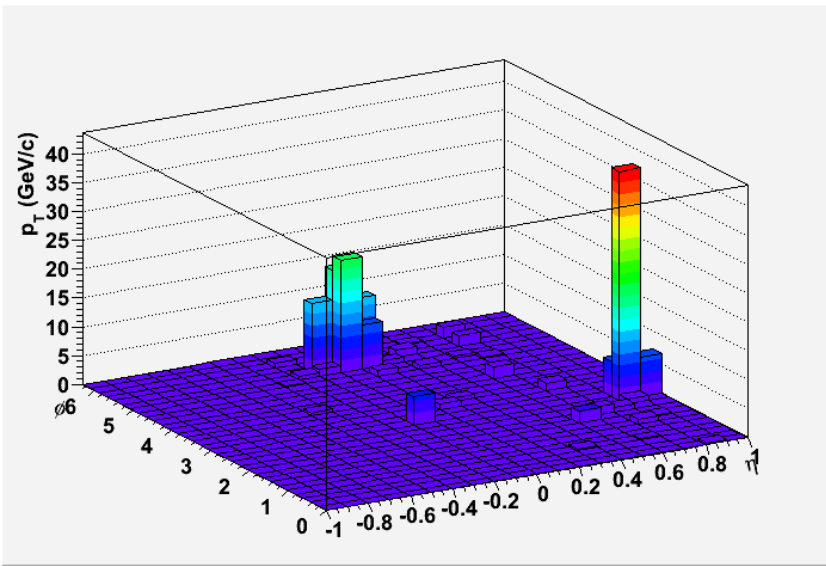
# Charm at p+p 7 TeV

pp  $\sqrt{s} = 7$  TeV,  $1.4 \times 10^8$  events,  $p_t^{D^0} > 2$  GeV/c

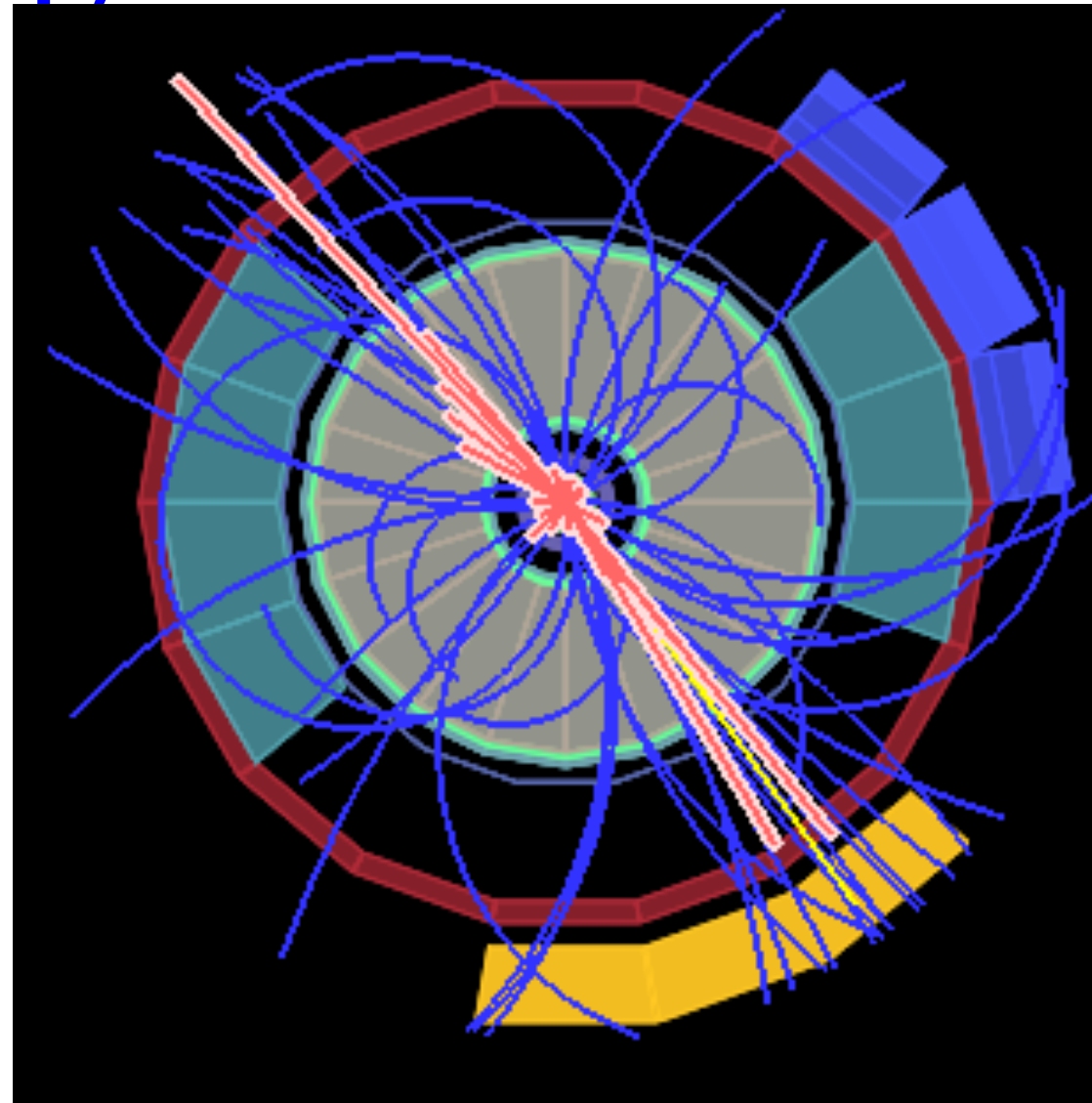




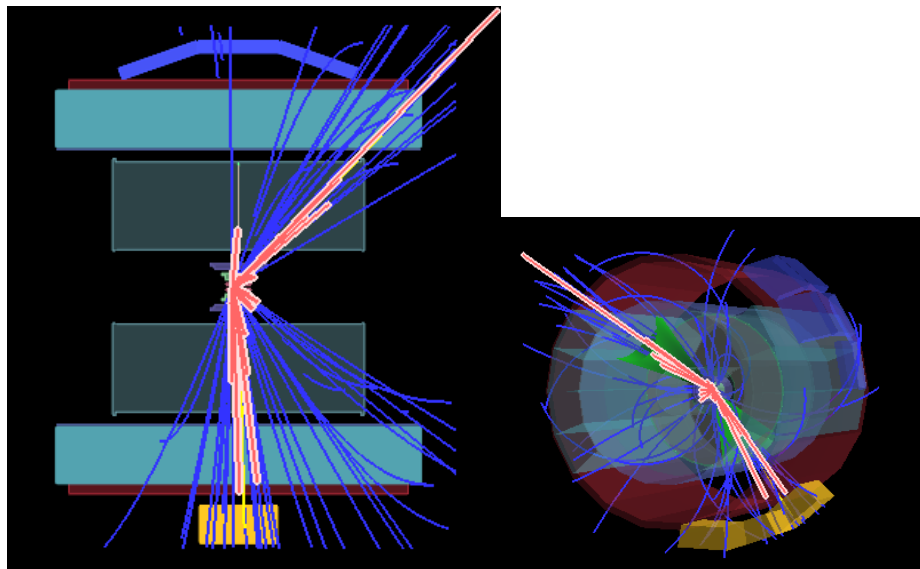
# Di-Jet event (7 TeV p+p)



$\eta$ - $\phi$  grid

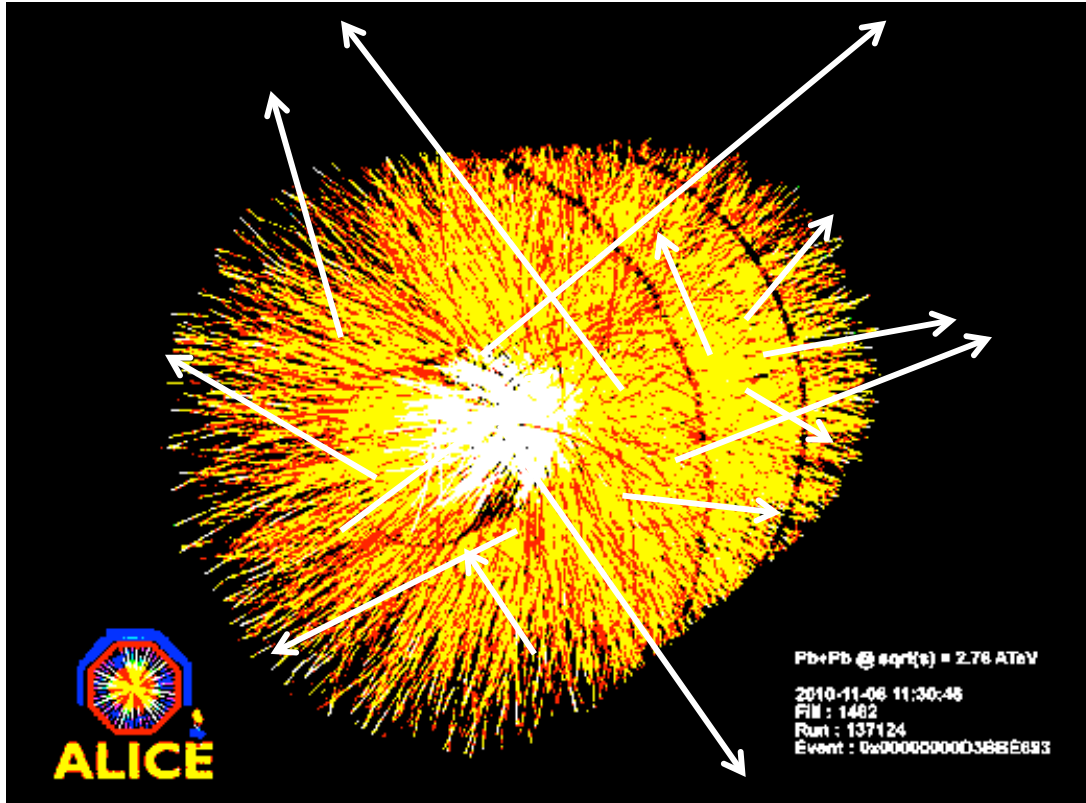


Reconstructed Jets UA1 Cone  $R = 0.4$ :  
Jet 1:  $\eta = 0.02$ ,  $\phi = 306^\circ$ ,  $p_T = 71$  GeV, Tracks 15  
Jet 2:  $\eta = 0.84$ ,  $\phi = 132$ ,  $p_T = 47$  GeV, Tracks 9  
 $\Delta\phi = 174^\circ$   
Total Tracks 108



# 4. QGP物理、今後の展開

# ジェット、パートンとQGP物質の相互作用



## パートンエネルギー損失

$$\frac{dE}{dx} = \frac{\alpha_s N_c}{4} \hat{q} L \quad ?$$

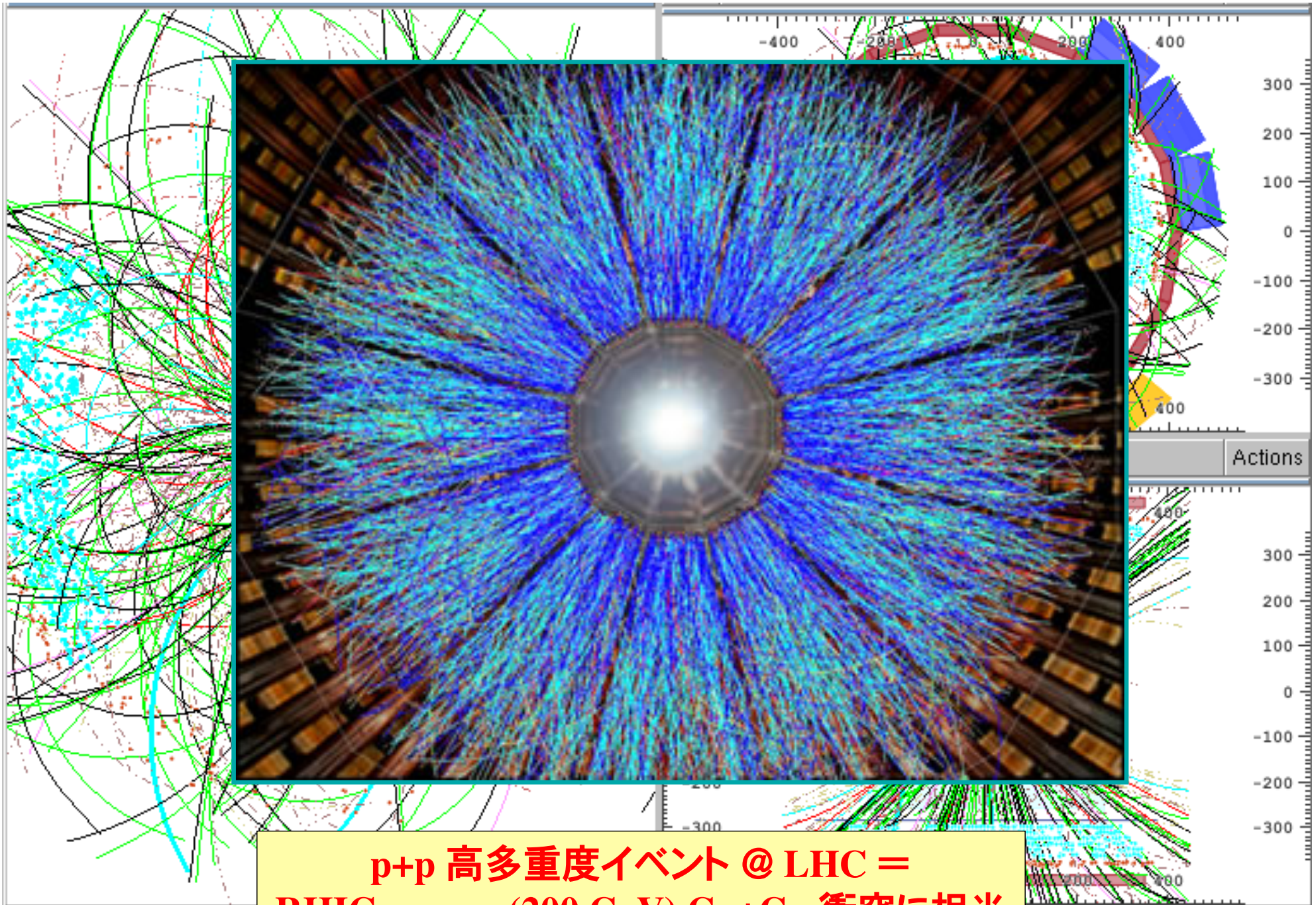
or

$$\frac{dE}{dx} = \frac{\alpha_s N_c}{4} \hat{q} L^2 \quad ?$$

多重ジェット生成でQGP物質が攪乱！？

失われたパートンエネルギーでQGPが再加熱？

# 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**

最新情報 >

ハイライト  
2010

メールマガジン

プレスリリース

トピックス

News@KEKアーカイブ

J-PARC News

イベント

求人情報

## ハイライト

### LHC実験でビッグバンが見えたのか？

先ごろスイス・ジュネーブにある欧州合同原子核研究機関(CERN)で稼動中の大型ハドロンコライダー (LHC: Large Hadron Collider) を使ったCMS (Compact Muon Solenoid) 実験グループが、7兆電子ボルト (TeV) の陽子・陽子衝突で生成した粒子の間の相関関係の測定について発表をしました。LHCの陽子・陽子衝突では100個以上の粒子が生成することがあります (図1)。CMS実験グループは、そのような事象で衝突点から飛び出す粒子間の向きの相関を分析しました。その結果、従来の陽子・(反)陽子衝突では見られなかった相関を見出しました。今回は、高エネルギーのハドロン散乱などの研究が専門の理論センターの板倉数記研究機関講師にこの現象について聞きました。

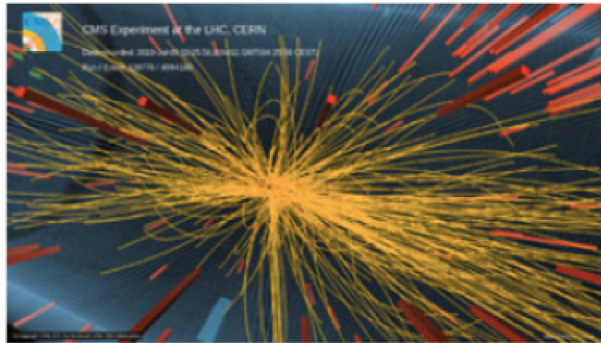


図1

画像提供: CERN/CMS

CMS実験グループが観測した100個以上の粒子が生成した事象例



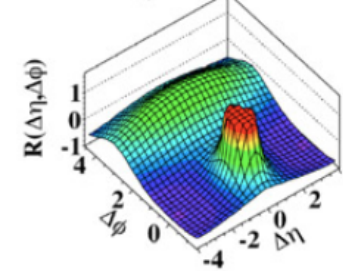
図2

画像提供: CERN/CMS

CMS測定器

—今回CMS実験グループは何を見たのでしょうか？

CMS 2010,  $\sqrt{s}=7\text{TeV}$   
MinBias,  $1.0\text{GeV}/c < p_T < 3.0\text{GeV}/c$



$N > 110, 1.0\text{GeV}/c < p_T < 3.0\text{GeV}/c$

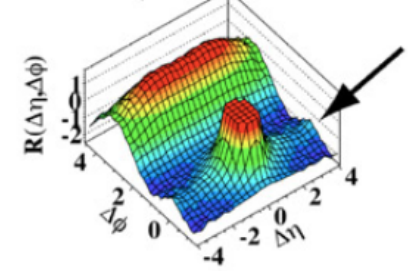


図5

横軸の $\Delta\eta$  (デルタイエータ) とは、2つの粒子の疑似ラピディティの差、つまり陽子が走

2010年10月7日

# 再び QCD 相図

- 我々はいまだQCD相図を理解していない...

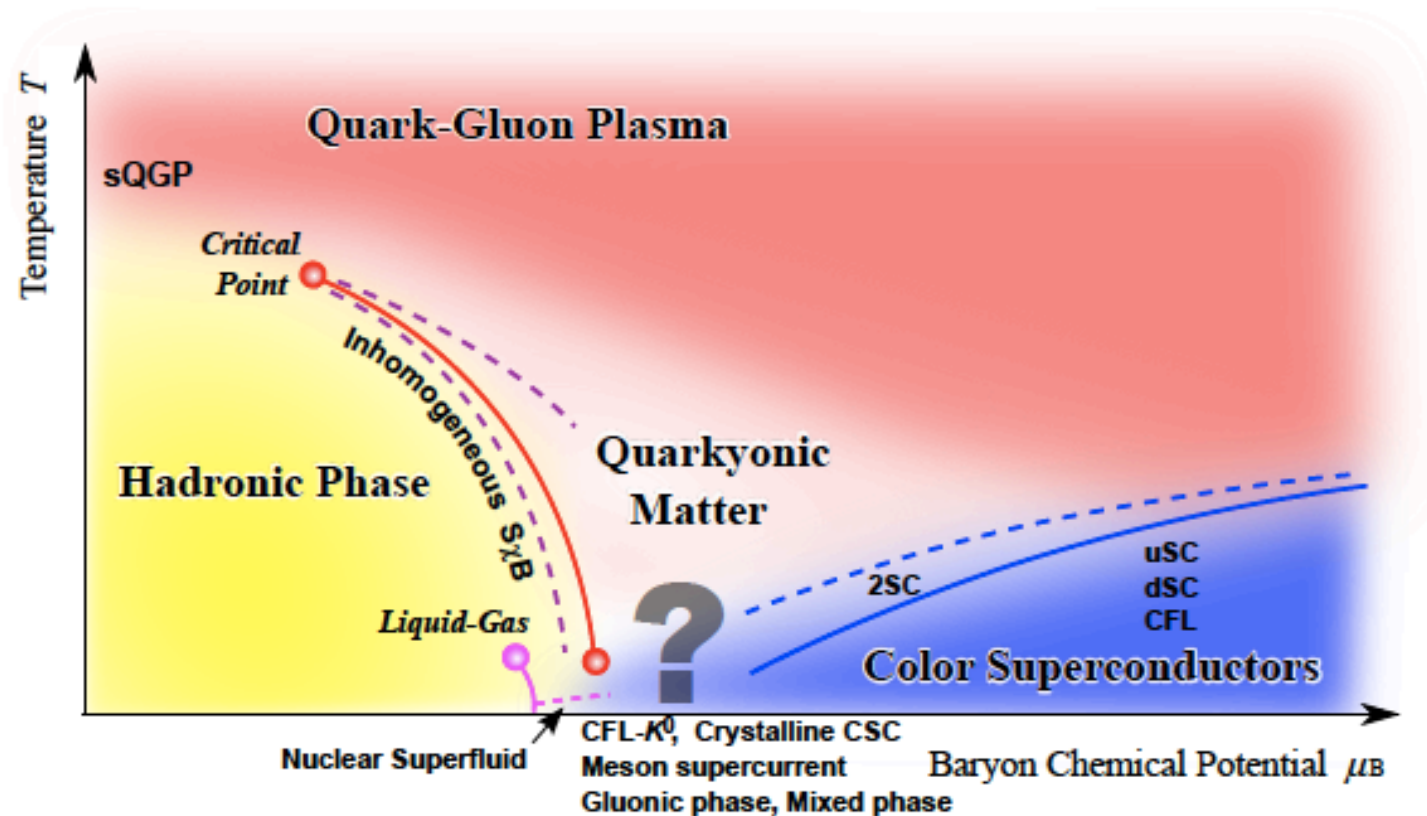
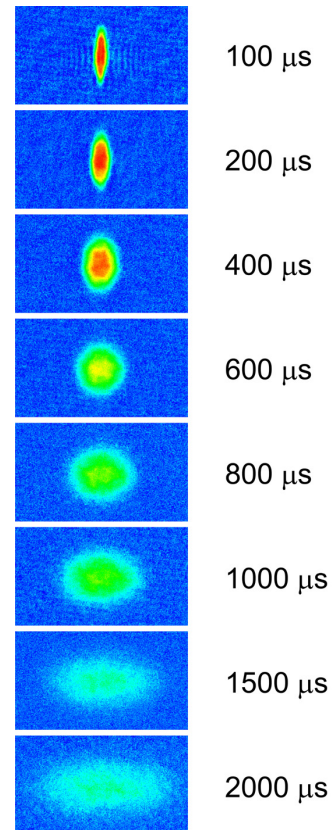
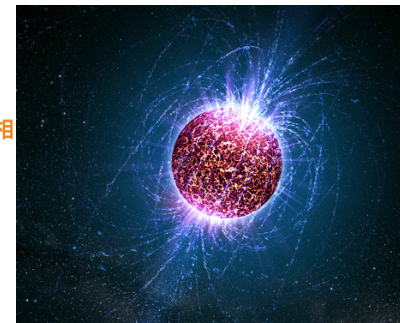
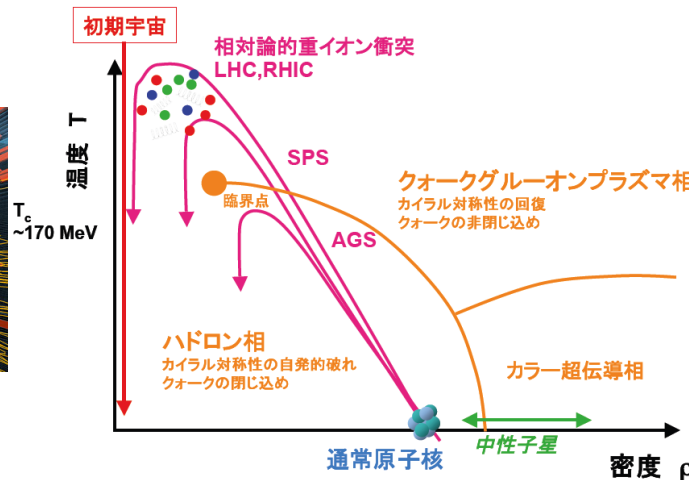
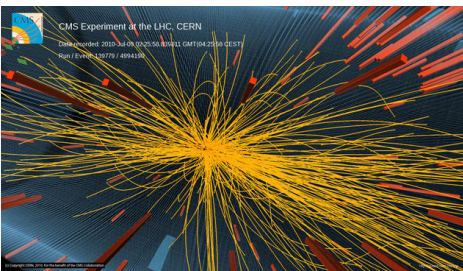
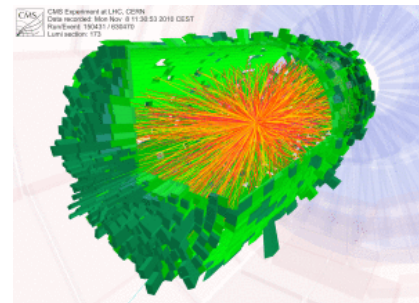
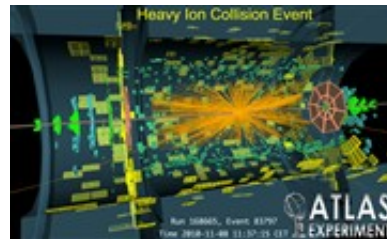
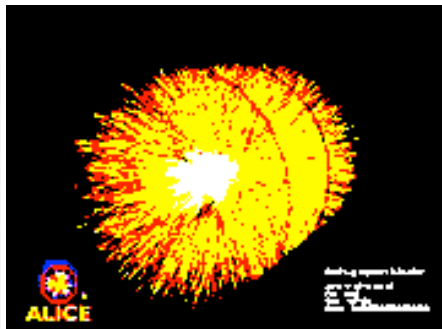


Figure 1. Conjectured QCD phase diagram with boundaries that define various states of QCD matter based on  $S\chi B$  patterns.

# QGP = クォーク多体系の物理

- 高温・高密度QCD物性の多彩さ
- クロスオーバー領域の物理：
  - ・ 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 etc...



# まとめ

- 2000年から開始した RHIC加速器を使った実験により、クォーク・グルーオンプラズマ相転移の確証を得た。
  - 宇宙誕生から100万分の1の状態、“リトルバン”の再現
  - QCD相転移を強く示唆する実験結果とそれをサポートする理論
  - QGP物性の解明に向けて、精密測定の世界へ
  - QCD 相図のマッピング (RHIC, FAIR(GSI, 独))
- 2009年よりLHC加速器がいよいよ稼働を開始。
  - より宇宙初期へと迫る
  - QGP相のさらなる理解
  - 全く予期しない新発見も！

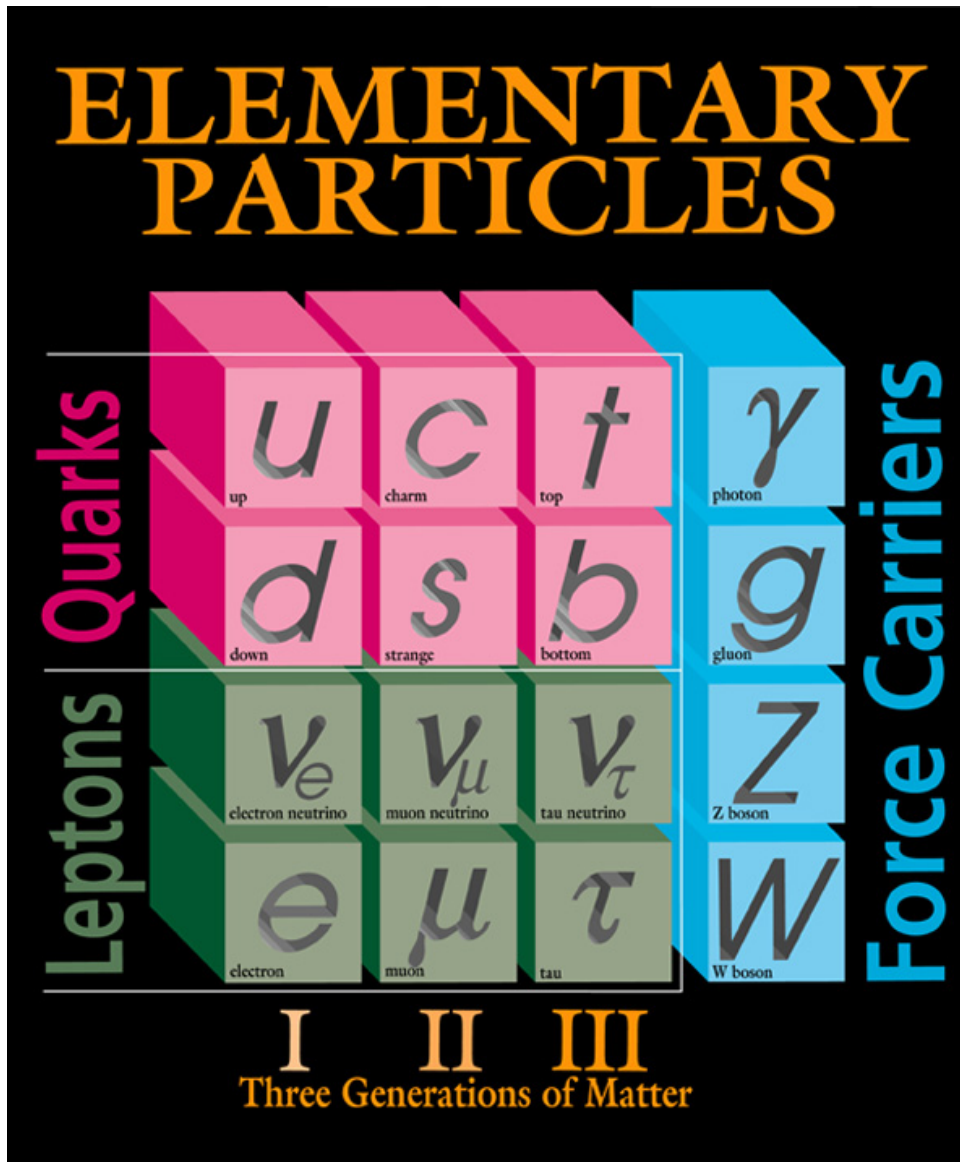


これが 本当のQGP  
の姿なの!



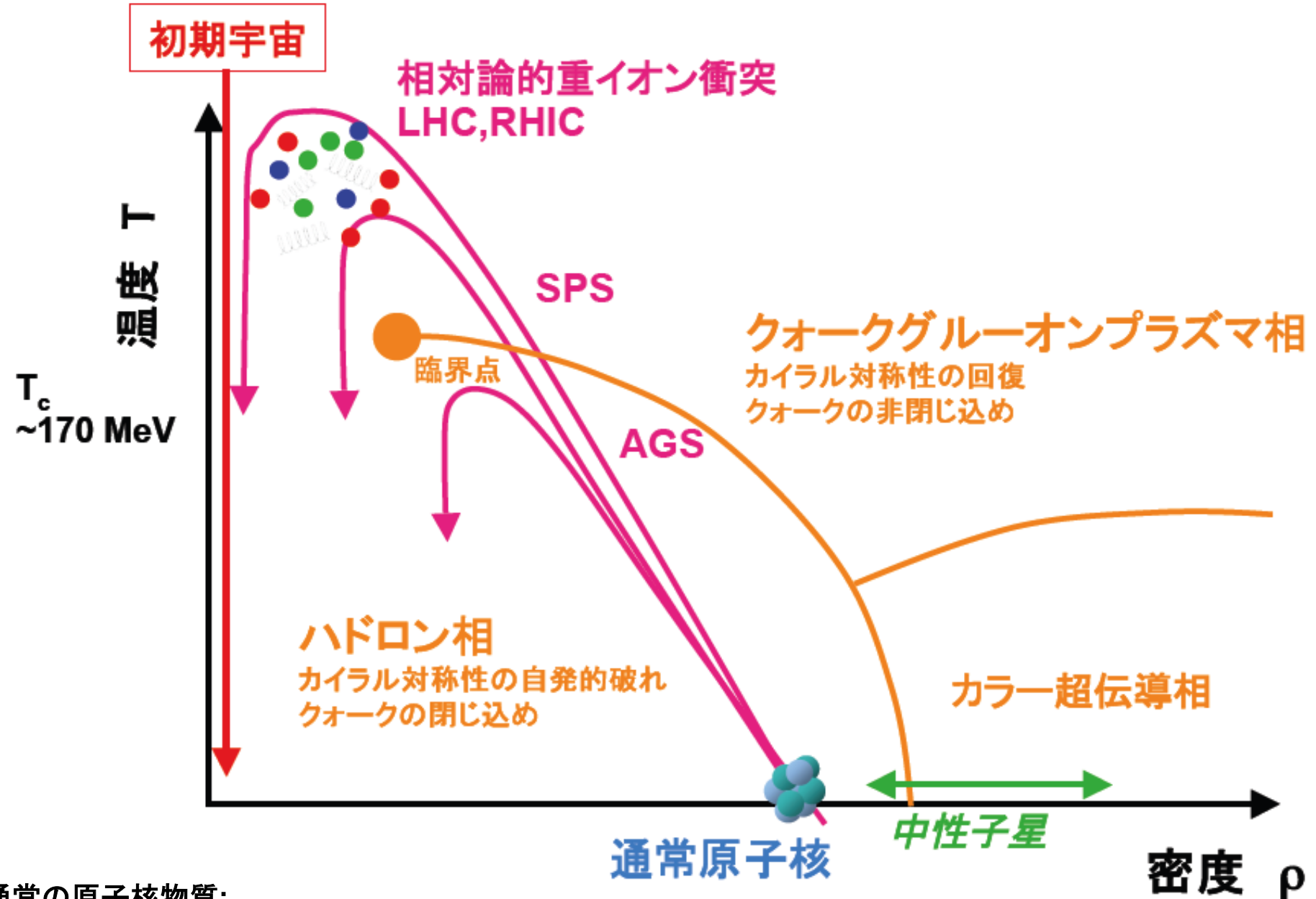
**BACKUP SLIDES**

# 標準模型



- クォークとレプトン、それらの反粒子
- 力を媒介するゲージボソン（4種類）
- 標準模型  
（Standard Model）
- QCD（量子色力学）と強い相互作用  
＝核力の起源

# 核物質の相図 (QCD phase diagram)



\* 通常の原子核物質:  
 $\epsilon \sim 0.2 \text{ GeV}/\text{fm}^3, \rho \sim 0.16 /\text{fm}^3$