

---

# 現代物理学への招待 II

---

★★★★

★★★★

筑波大学物理学域  
中條 達也

# 講義内容

テーマ：「宇宙の歴史と現代物理学」

第1回 ビックバンと原子核・素粒子物理学

第2回 重イオン衝突実験で宇宙誕生の謎にせまる

## 第2回 重イオン衝突実験で宇宙誕生 に迫る

- 5. 高エネルギー重イオン実験
- 6. 「クォークスープ」と初期宇宙
- 7. (その後の宇宙)
- 8. 最後に



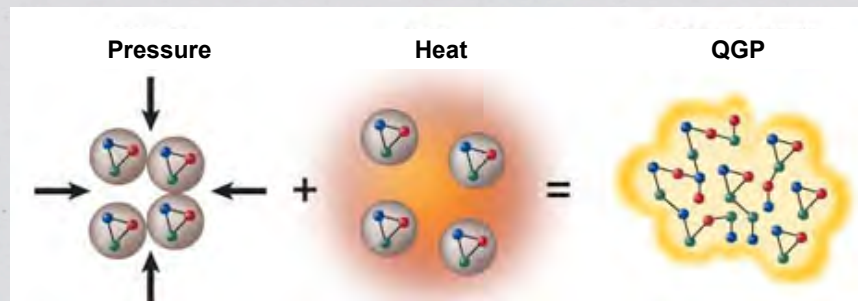
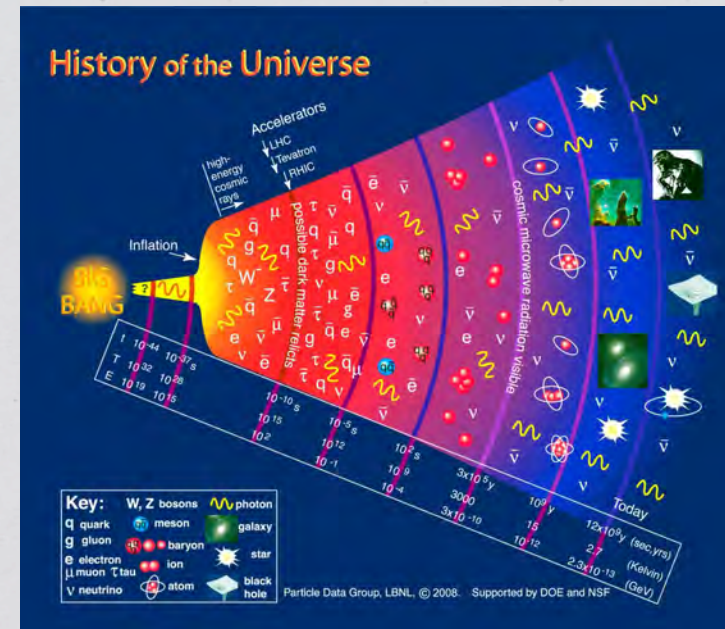
---

# 5. 高エネルギー重イオン実験

---

# 前回の復習

- \* ビッグバンの宇宙の初期状態に戻る
- \* どれくらいまで戻るか
  - \* ビッグバンから  $1/1,000,000$  秒 ( $10^{-6}$  秒後 = 1 マイクロ秒) 後
  - \* そのときの宇宙の温度は約 1 兆度
- \* 質量獲得の謎 (99%の質量は、クォークから陽子、中性子になるときに生まれている)
- \* そこではクォークやグルーオンが閉じ込めを破り、自由な状態、「クォーク・グルーオンプラズマ」(QGP) が存在している



## 宇宙初期状態に戻るには？

- ポイント① 超高温が必要
- ポイント② 体積が必要
- ポイント③ 継続時間が必要



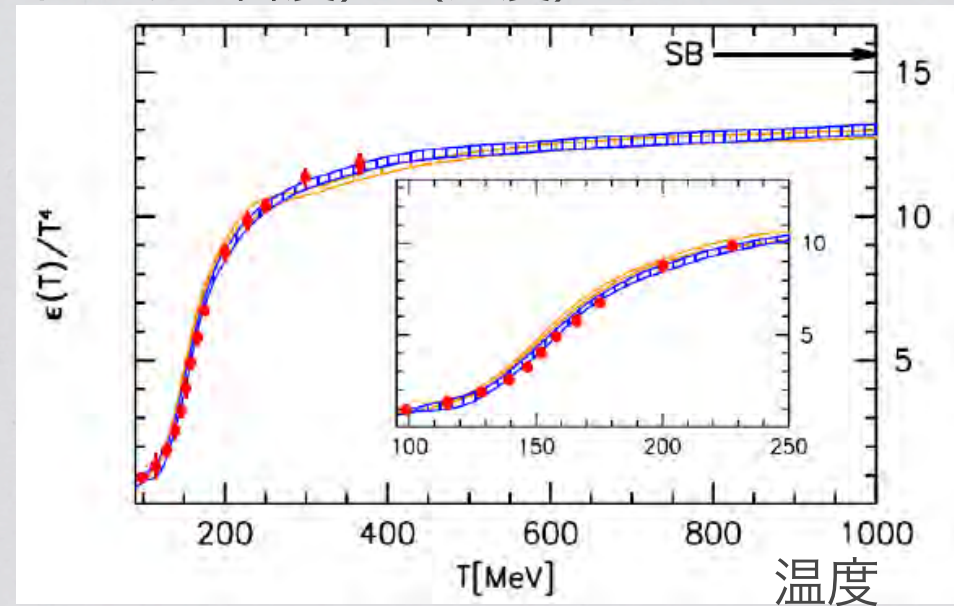
# ①超高温の実現

- ◆ \* 高エネルギーの加速器を利用する。
- \* 加速器のエネルギー：eV（電子ボルト）
- \* LHC加速器で陽子を加速させる場合：
  - \* 14 TeV (テラ電子ボルト) =  $14 \times 10^{12}$  eV（重心衝突系）
- \* LHC加速器で鉛の原子核を加速させる場合：
  - \* 鉛原子核の質量数 (A) = 208（陽子数 82、中性子数 126）
  - \*  $5.5 \times A \text{ TeV} = 5.5 \times 208 \text{ TeV} = 1144 \text{ TeV} = 1.144 \text{ PeV}$ （重心衝突系）
- \* 加速器の運動エネルギーを「熱エネルギー」に変換→粒子生成に使われる

# どれくらい高温にすればよいか？

- ◆ \* 強い相互作用を記述する理論、QCD（量子色力学、Quantum Chromodynamics）の予言
- \* 170 MeV ~ 2 兆 K で、通常のハドロン（陽子やパイ中間子）からQGP「相」に相転移する
- \* LHC 加速器や、RHIC加速器では、ちょうど 170 MeV 付近の温度を生成できる（後で説明）

エネルギー密度 / (温度)<sup>4</sup>



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

**QCD計算の予言**



## ②大きな体積の実現

\* 陽子では小さすぎる

\* 陽子の半径 1 fm (フェムト =  $10^{-15}$  m)

\* 原子核の半径:  $R = 1.2A^{1/3}$  (Aは質量数)

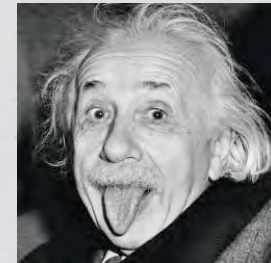
\* 鉛の場合:  $R = 1.2 \times (208)^{1/3} = 7.1$  fm

\* ポイント: 陽子よりも半径が7倍 (質量数は200倍)  
大きい原子核を高エネルギーで衝突させ、高温、大体積  
の物質を人工的に生成する。

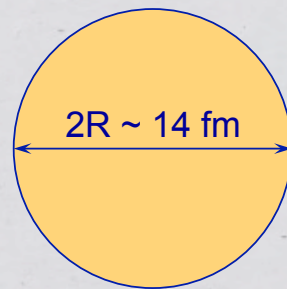
### ③持続時間

- \* いかにか長い寿命の高エネルギー物質を作るかは、自然が決めるので、我々はコントロールできない。
- \* ただし持続時間がどれくらいであったか、測定から類推が可能。

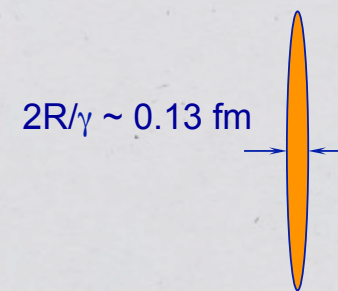
# 特殊相対性理論



静止系



高速で移動している系



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

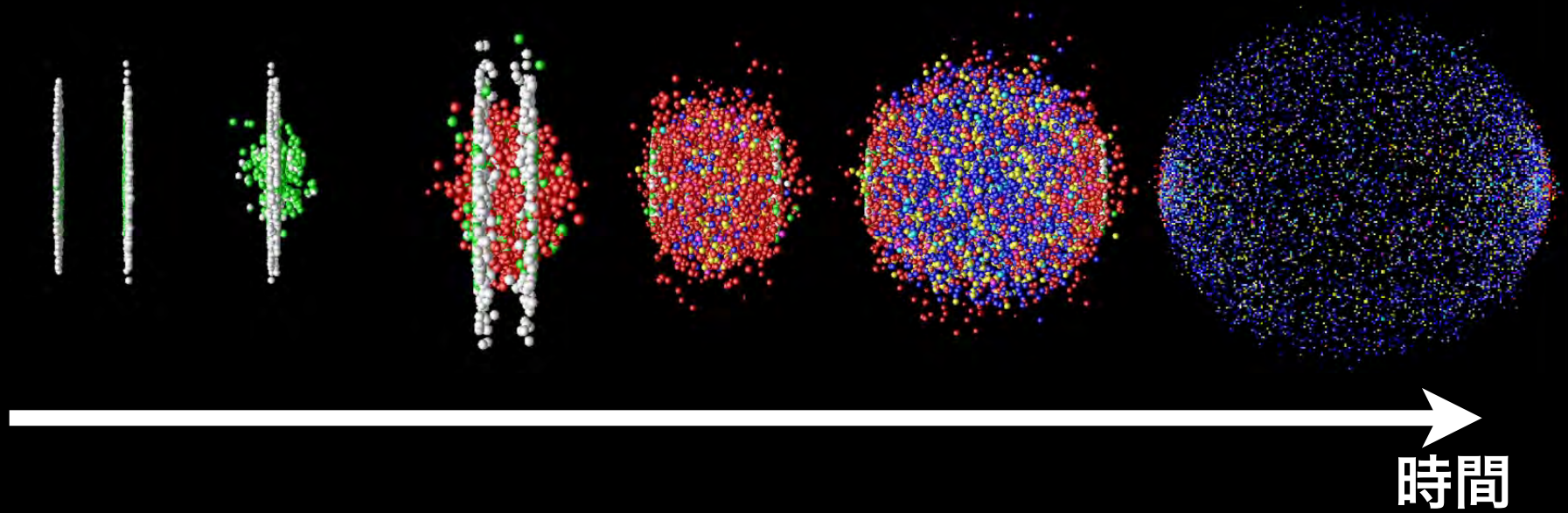
\* 高速で動く物体の長さは ガンマ因子の分だけ収縮される

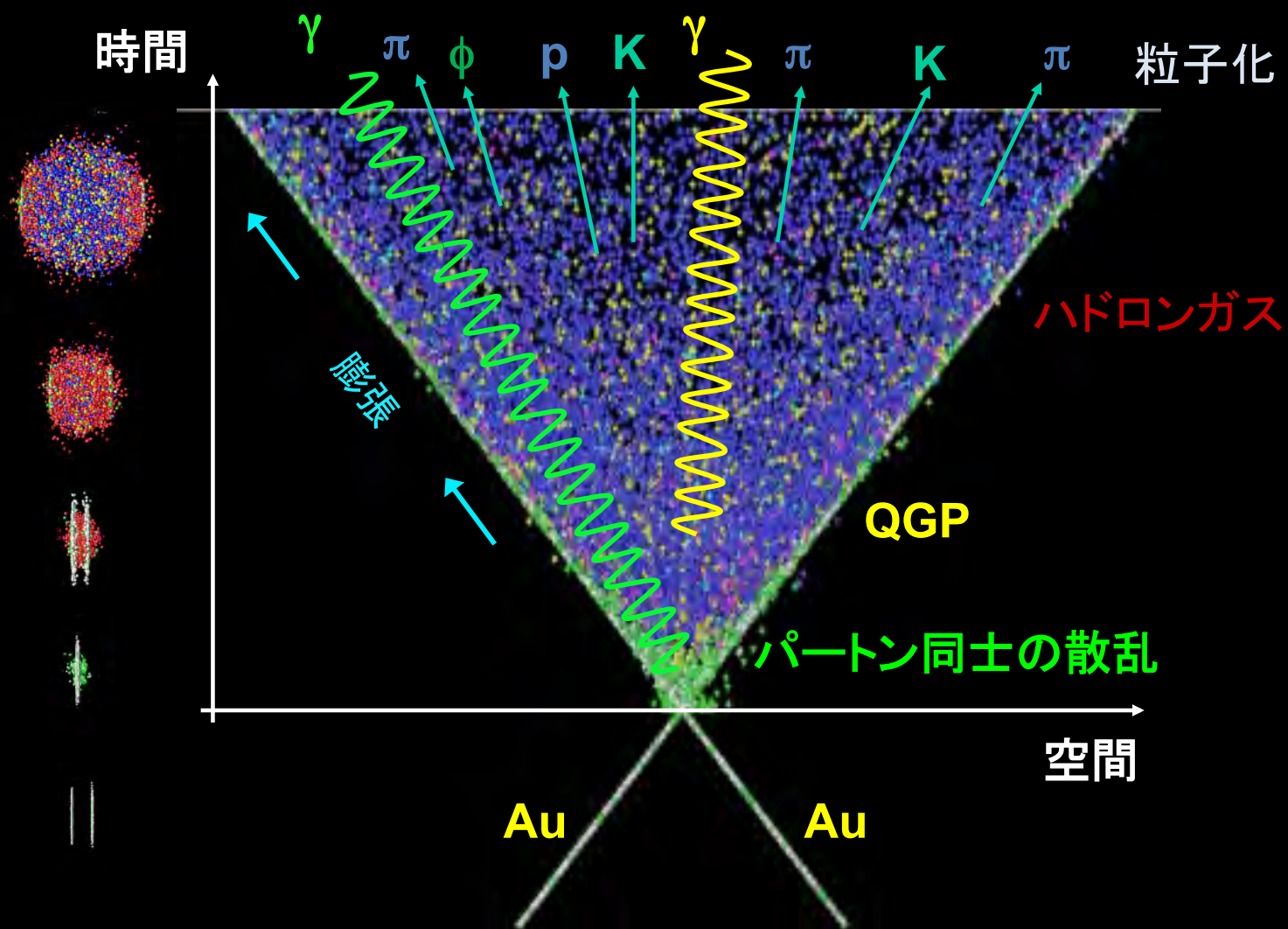




$t = -19.800$

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







# RHIC (相対論的重イオン衝突型加速器)

**BROOKHAVEN**  
NATIONAL LABORATORY

2000-



**RHIC = Relativistic Heavy Ion Collider**

周長：3.8 km

1740 個の超伝導マグネット

最高エネルギー：200 GeV 金+金

500 GeV 偏極陽子+陽子

衝突系：p+p, d+Au, Au+Au, Cu+Cu, U+U, Cu+Au.

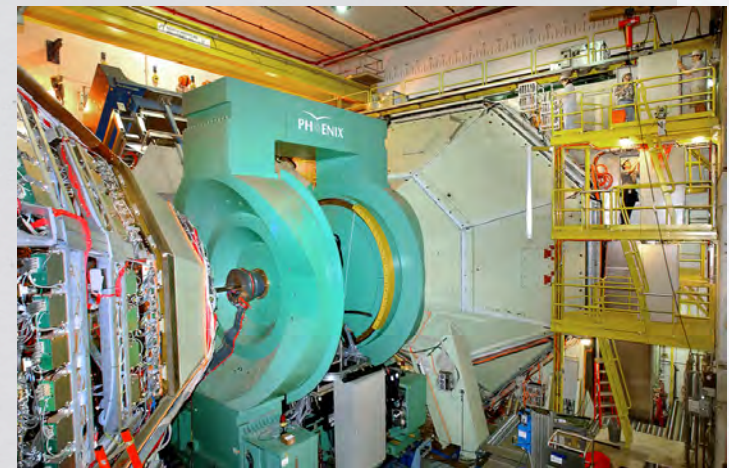
衝突エネルギー：19, 22.5, 62.4, 130, 200 GeV 等



# PHENIX 国際共同実験 (BNL)



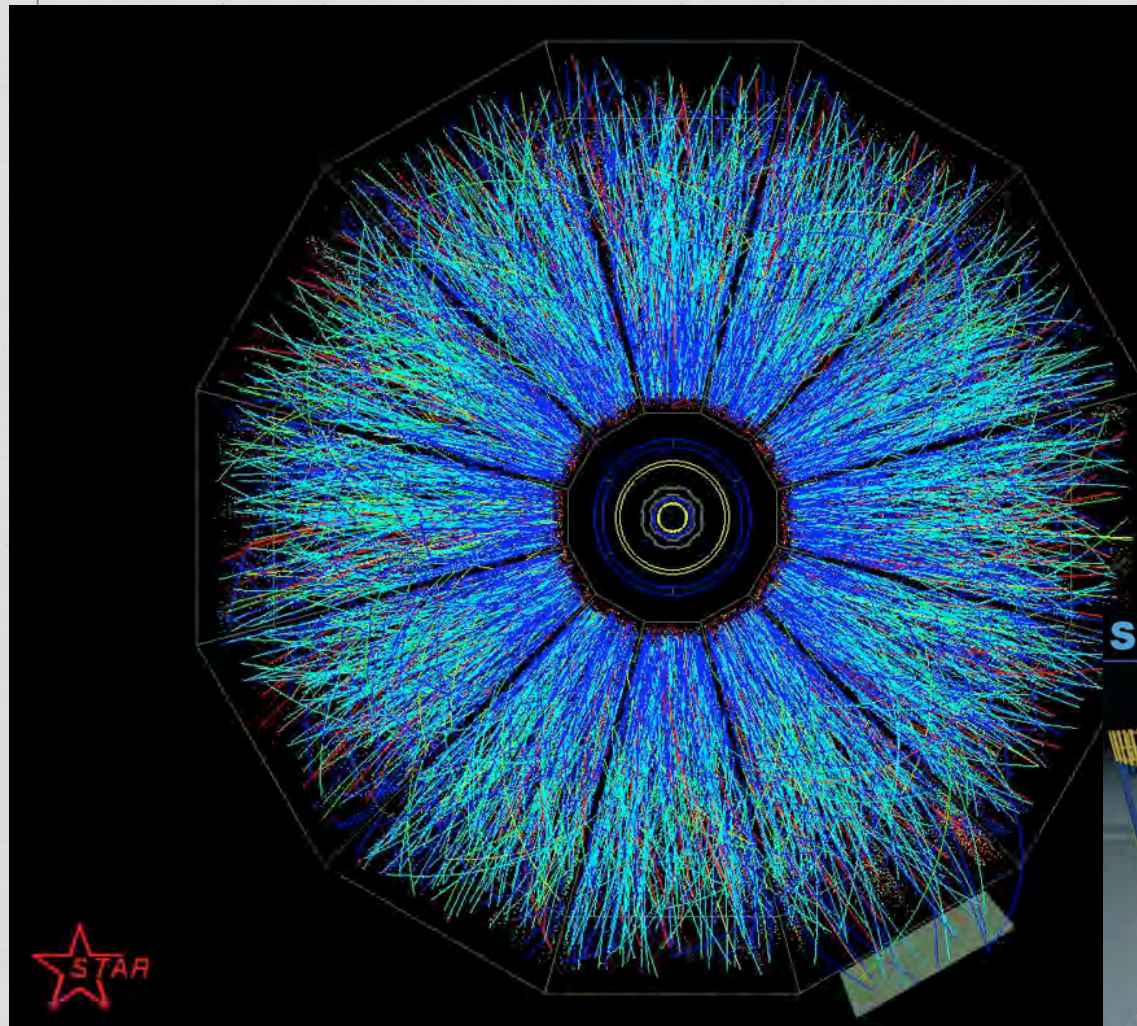




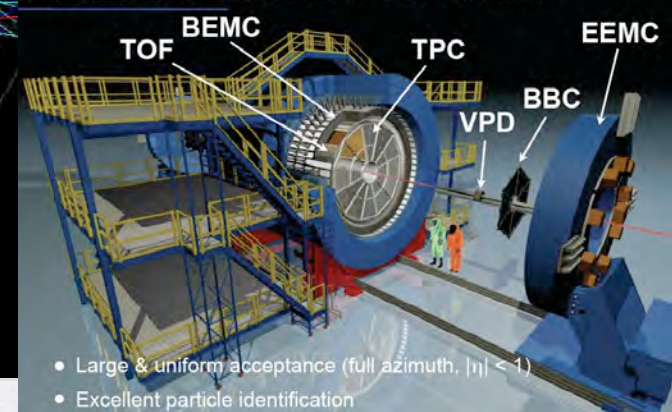
1回の原子核・原子核衝突で、  
約5000の粒子が生成される



# STAR 国際共同実験 (BNL)



## Solenoid Tracker At RHIC







## 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



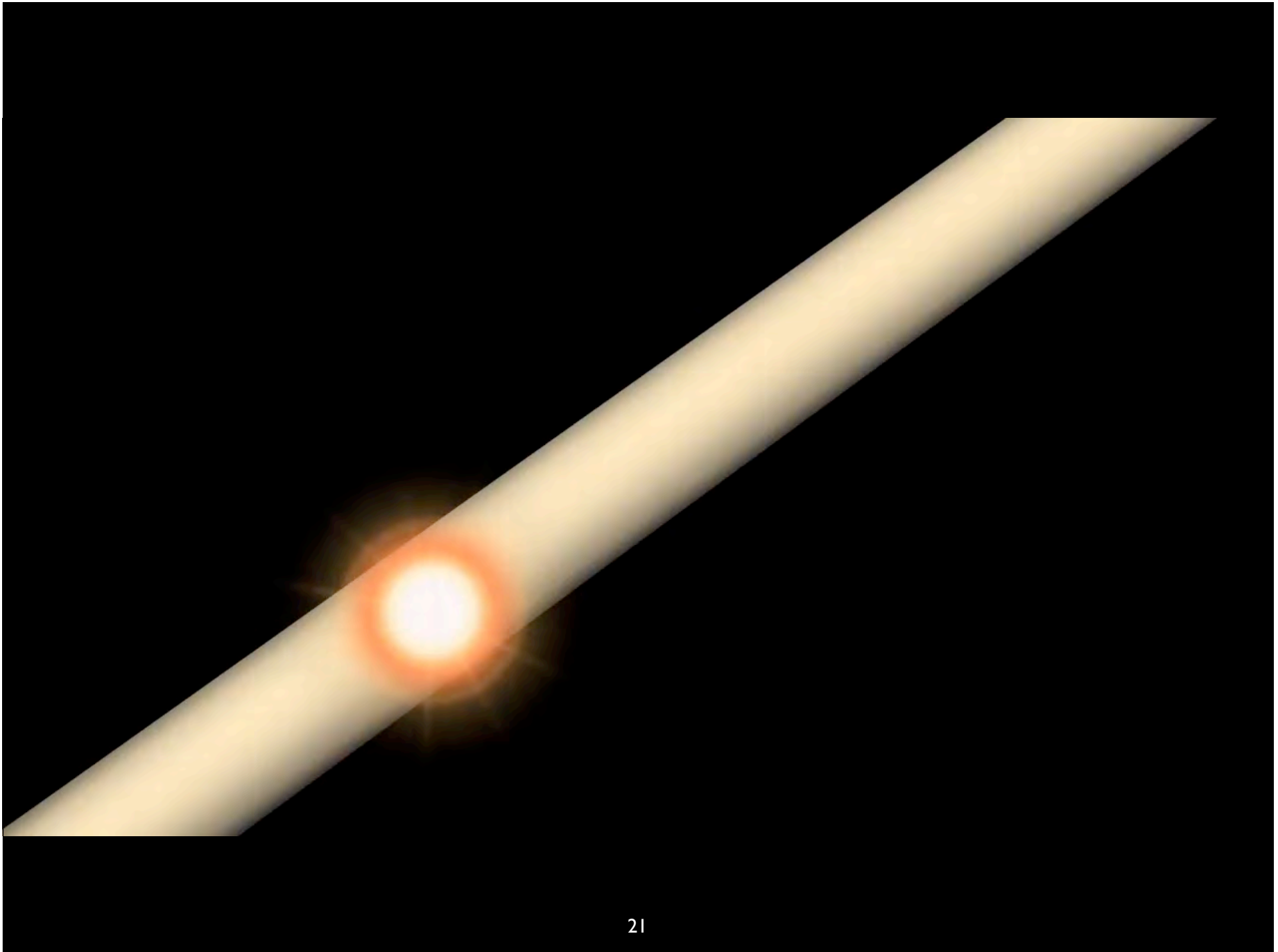


# LHC (Large Hadron Collider)

## 2009-

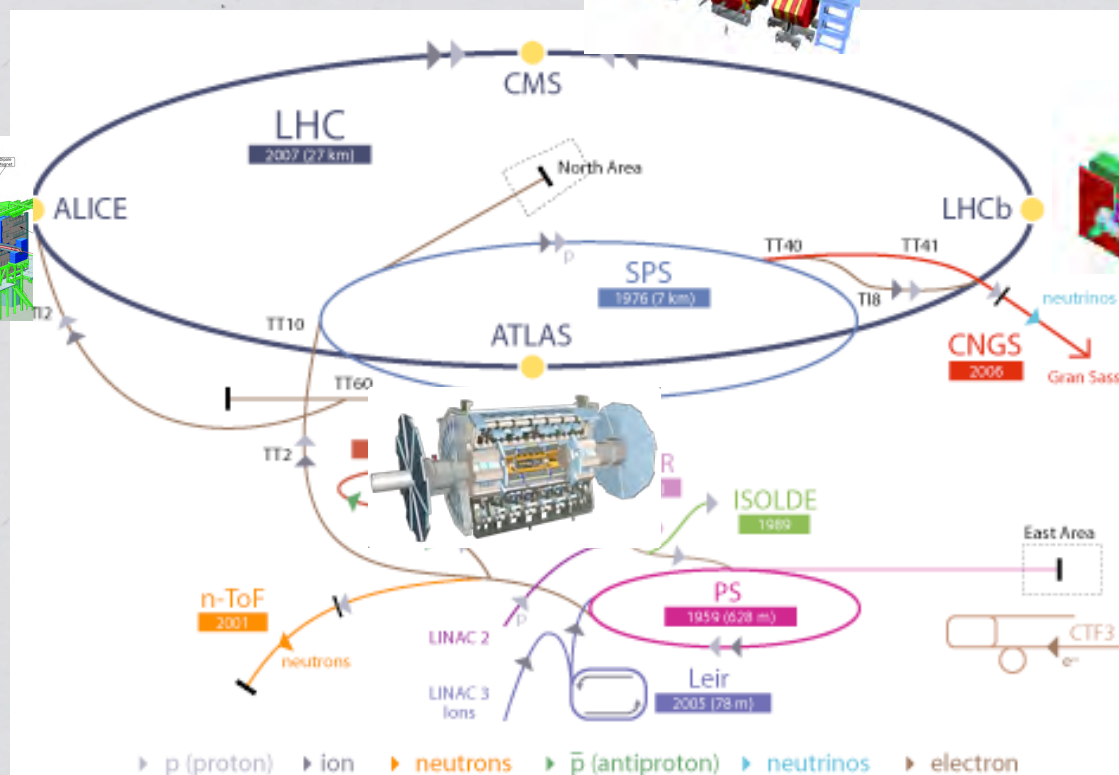
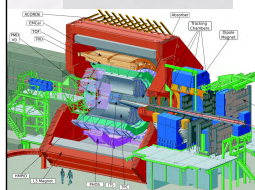
総額5500億円、(日本も170億円拠出)  
建設に15年、計画を含めると20年の歳月を経て完成



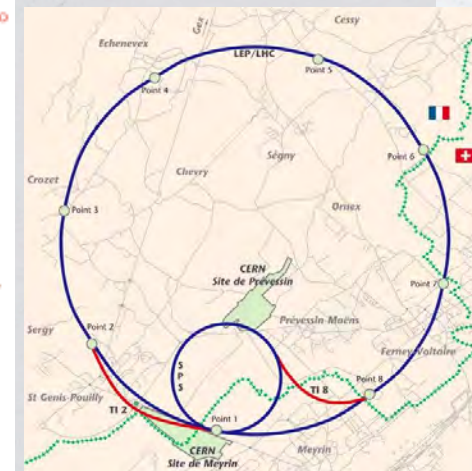




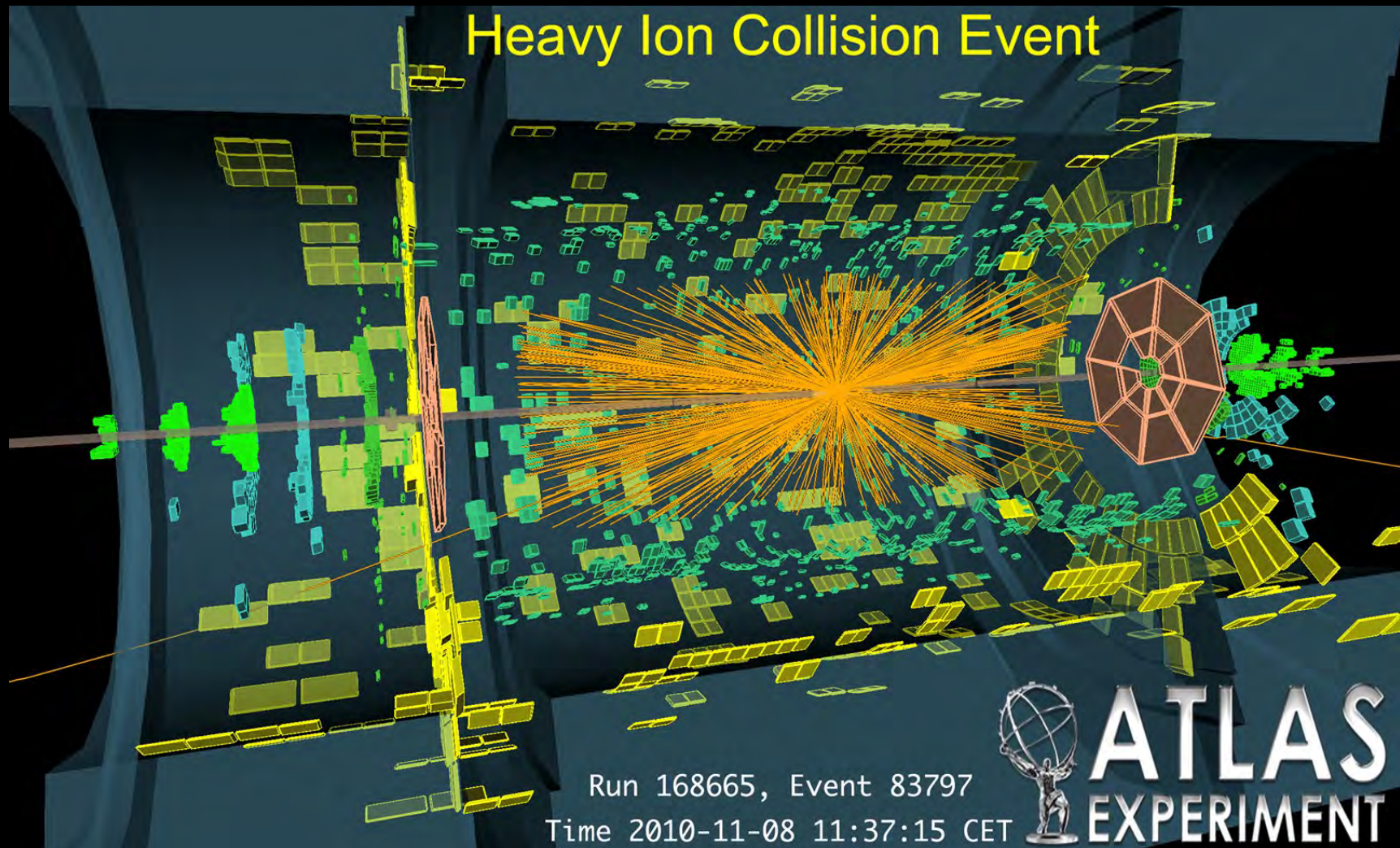
# CERN 加速器施設



LHC Large Hadron Collider SPS Super Proton Synchrotron PS Proton Synchrotron  
 AD Antiproton Decelerator CTF3 Clic Test Facility  
 CNGS Cern Neutrinos to Gran Sasso ISOLDE Isotope Separator OnLine DEvice  
 LEIR Low Energy Ion Ring LINAC LINEar ACcelerator n-ToF Neutrons Time Of Flight

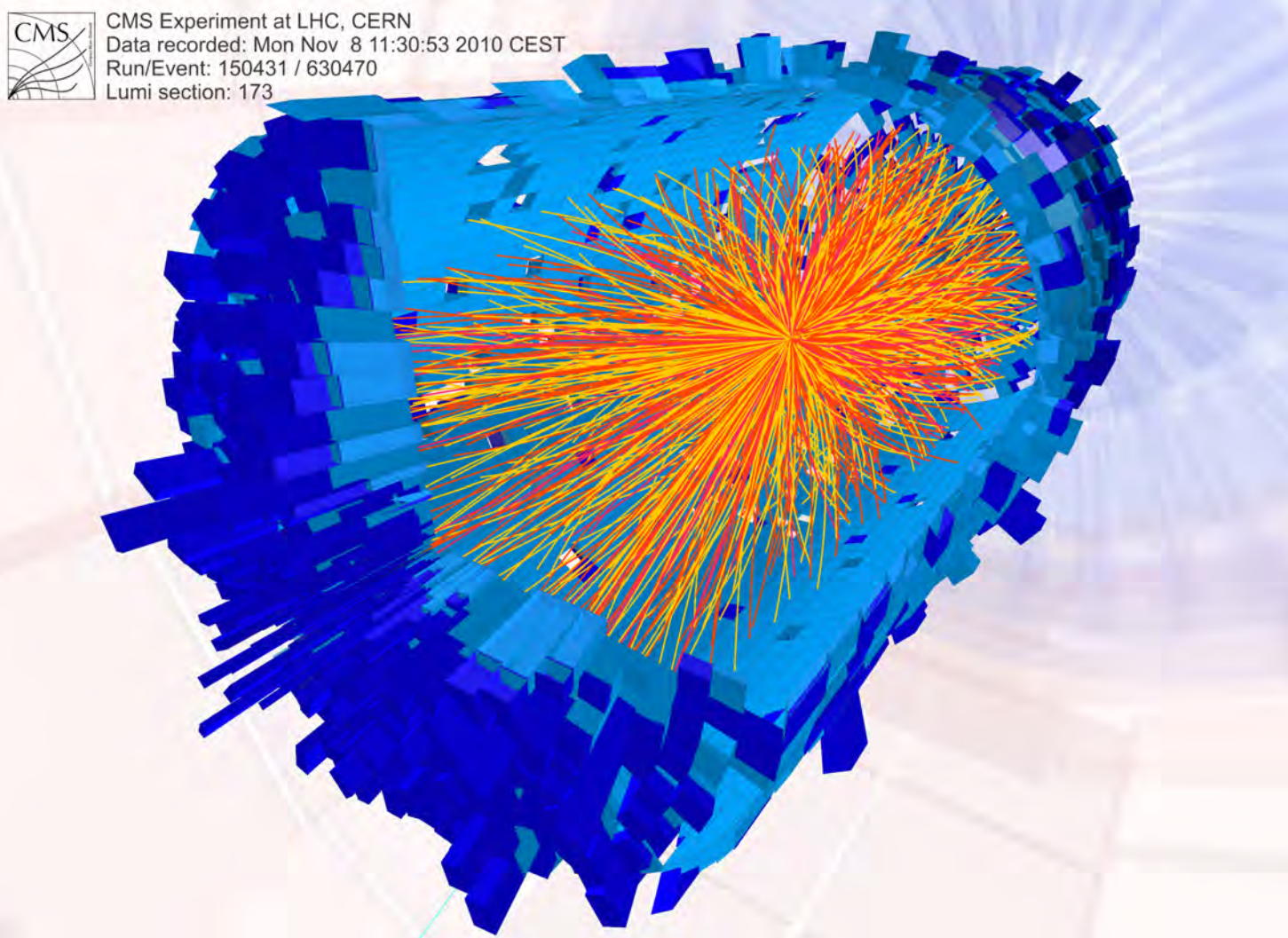


# ATLAS 国際共同実験 (CERN)

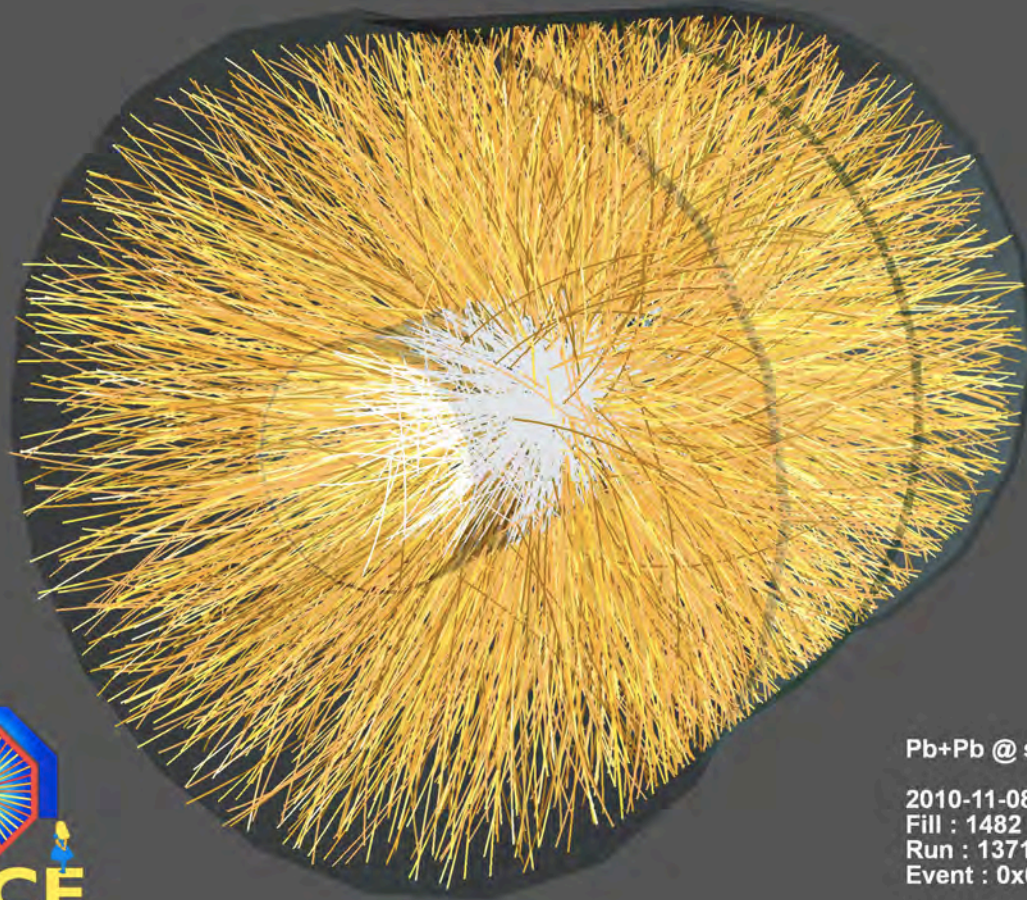




# CMS 国際共同実験 (CERN)



# ALICE 国際共同実験 (CERN)



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

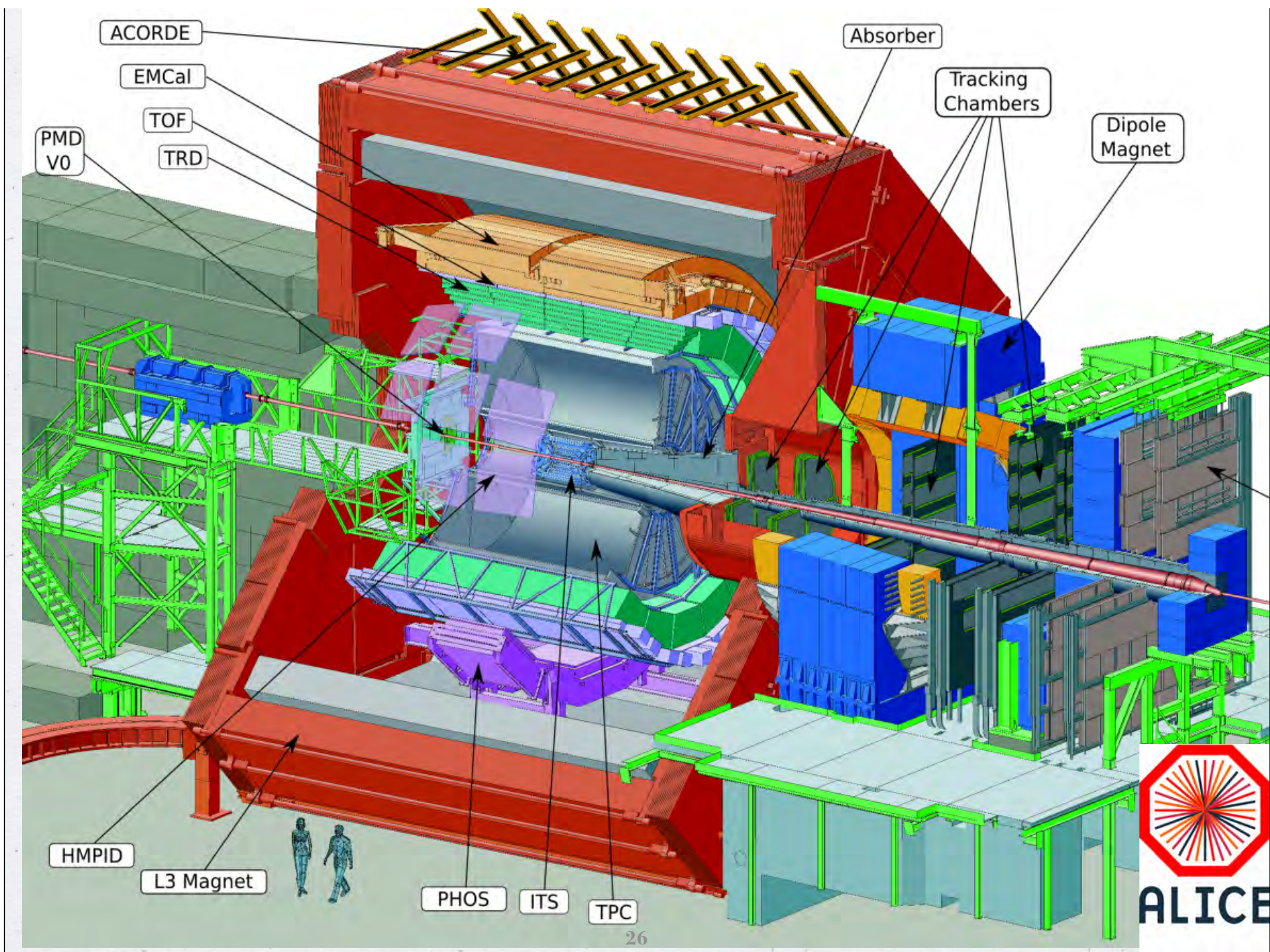
2010-11-08 11:30:46

Fill : 1482

Run : 137124

Event : 0x00000000D3BBE693













---

## 6. クォークスープと初期宇宙

---



---

# 6-1 温度の測り方

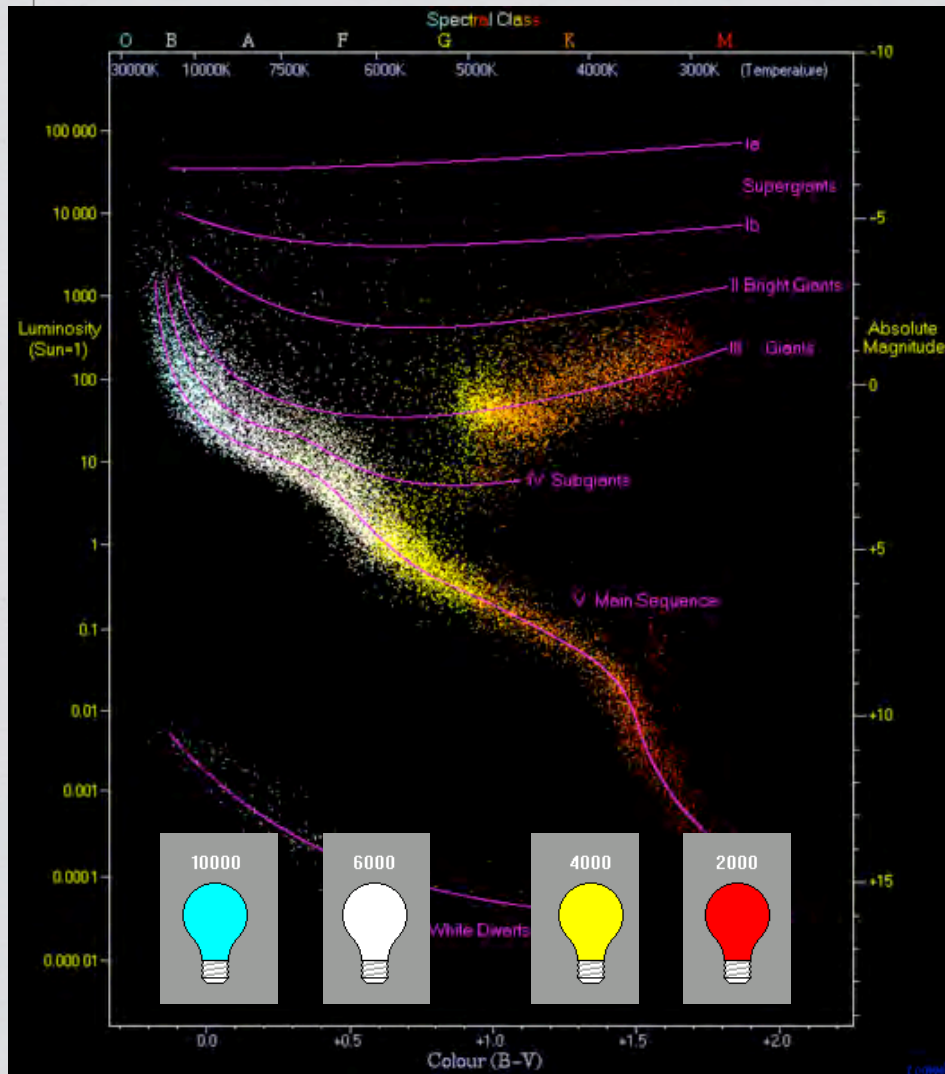
---

# QGPの温度を測るには

- ◆ \* QGPの温度は数兆 K にも達するので、普通の温度計では無理。
- \* 光を使う。
- \* 光は物質と「強い相互作用」をしないので、周りの物質の影響を受けずに、衝突初期の情報を持ったまま、出てくる。
- \* 光子のエネルギー分布から温度が分かる。



# 星の温度



\* HR図（星の波長と明るさの関係）

\* 星の色と表面温度

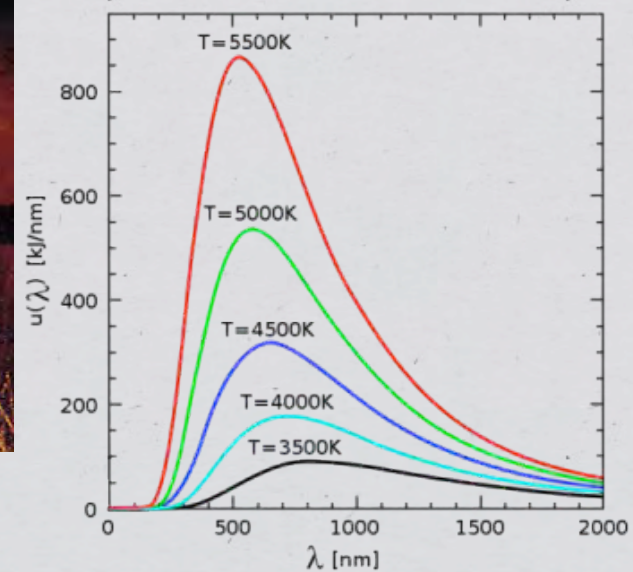
\* 青白い星の温度（シリウス） > 赤い星の温度（アンタレス）

\* [http://en.wikipedia.org/wiki/Hertzsprung-Russell\\_diagram](http://en.wikipedia.org/wiki/Hertzsprung-Russell_diagram)

# 溶鉱炉の場合

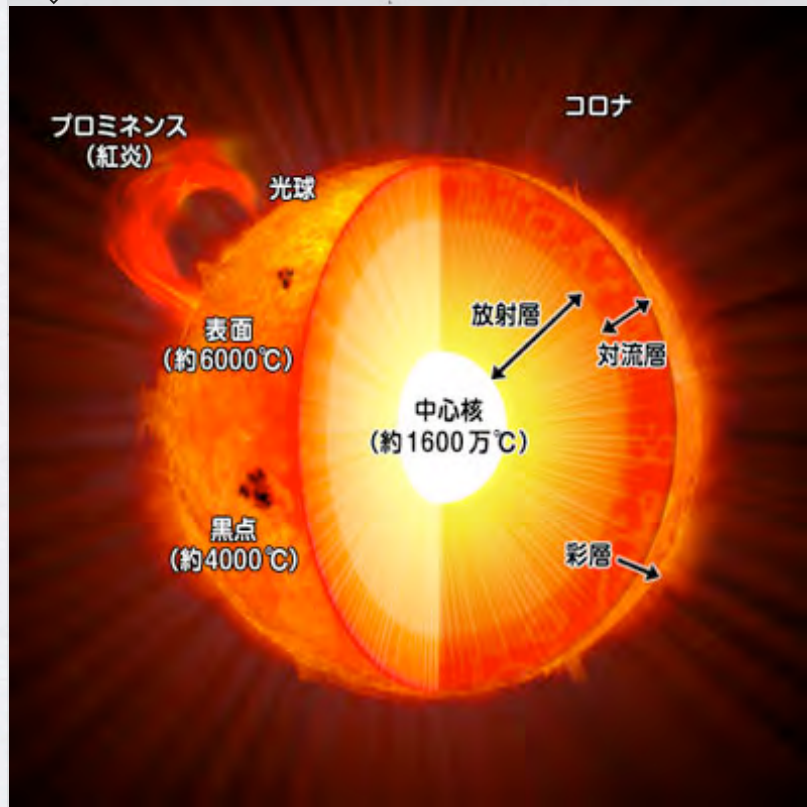


- \* 光の強度の波長分布（エネルギー分布）から、物質の温度を測定する。





# 太陽の場合



## \* 太陽の温度

黒点：4,000 K

表面温度: 5,780 K

中心温度:  $1.5 \times 10^7$  K

\* 温度 K (ケルビン) と eV の対応

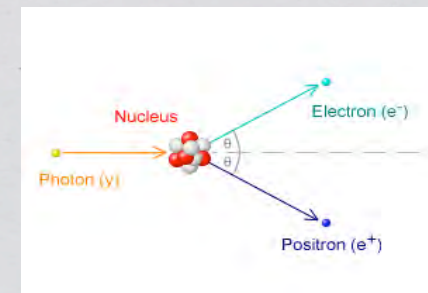
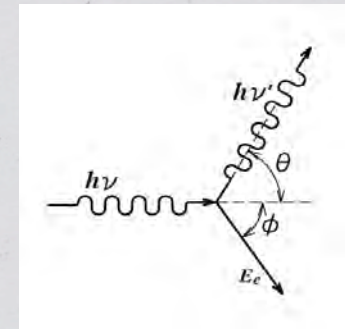
電子1個を1Vの電位差で加速したときのエネルギーが1 eV.

1 eV の平均運動エネルギーをもつ気体の温度は

11,604 K =  $10^4$  K (気体の分子運動論より)

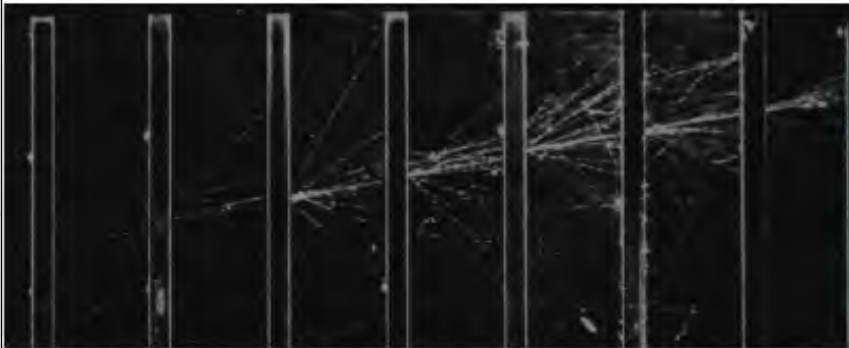
# 衝突から生じる光子の測り方

- \* 高エネルギーの光子が物質と相互作用（電磁相互作用）すると、以下の反応がおきる。
- \* 光電効果、コンプトン散乱、電子陽電子対生成
- \* 特に高エネルギーでは2）、3）が支配的。
- \* 物質と光子の相互作用により、「電磁シャワー」が形成され、このシャワーに大きさが光子のエネルギーに比例する性質をつかう。
- \* → 「電磁カロリメーター（熱量計）検出器」

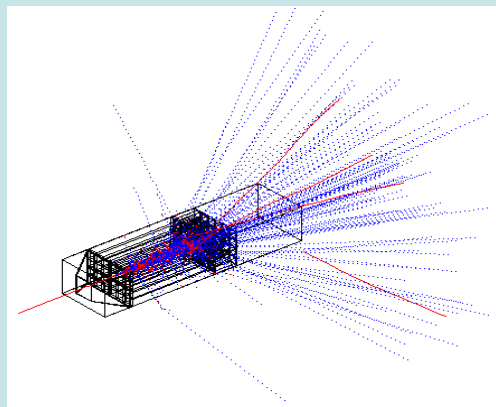




# 電磁シャワーの様子



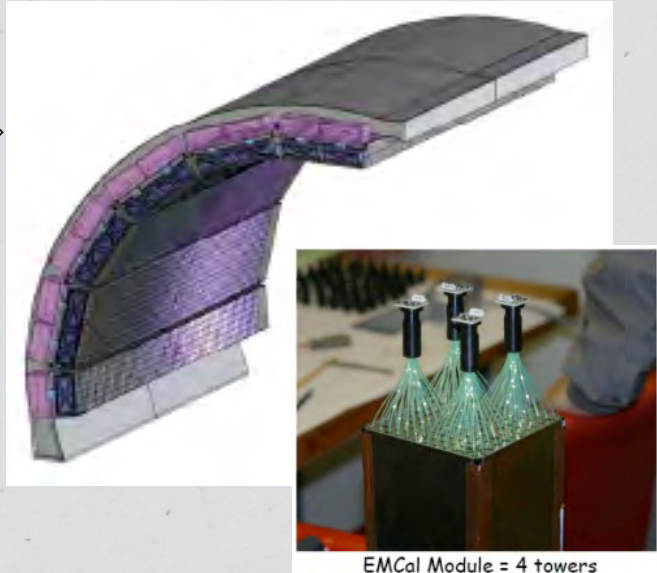
Electron  
shower in a  
cloud  
chamber  
with lead  
absorbers



Electromagnetic shower  
in PbI<sub>2</sub> Calorimeter (PHENIX)

これら電磁シャワー中の電子、陽電子をシンチレータなどの蛍光を発する物質で、再度光に変換し、それを光検出器で電気信号（パルス）にし、計測する。

## 実際の電磁カロリメータ検出器 (ALICE実験)



EMCal Module = 4 towers

### 鉛-シンチレータ サンプルング電磁カロリメータ

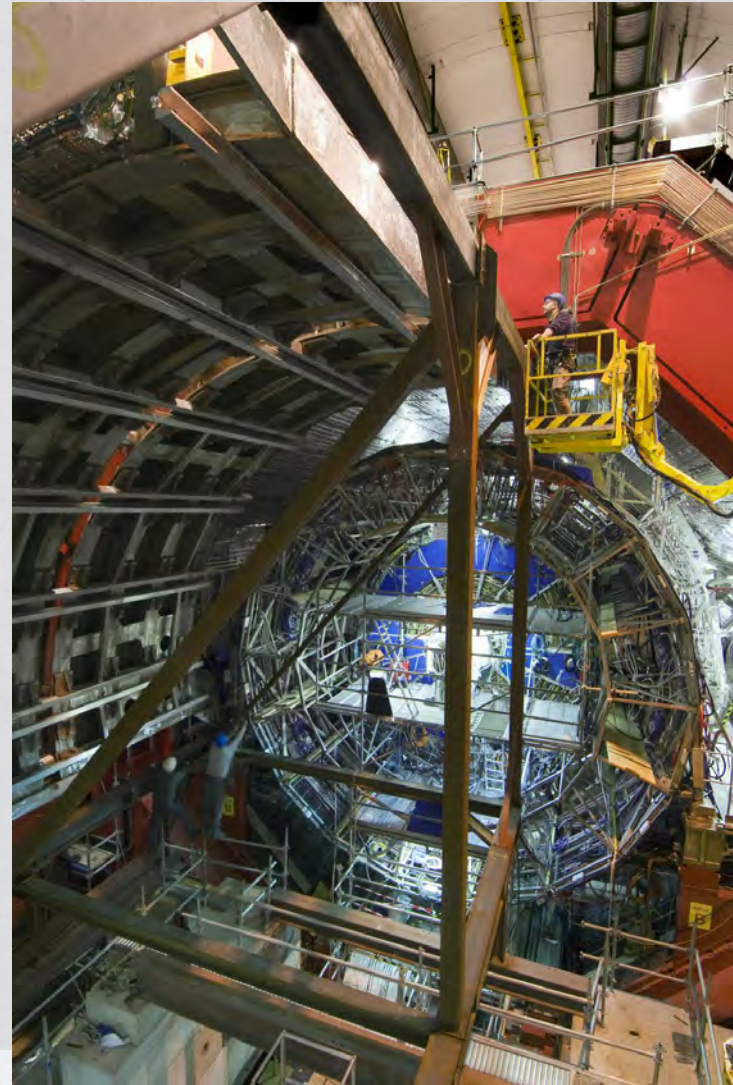
( $|\eta| < 0.7$ ,  $\Delta\phi = 107^\circ$ )

Shashlik geometry, APD 光センサ

~13,000 towers

セグメンテーション ( $\Delta\eta \times \Delta\phi \sim 0.014 \times 0.014$ )

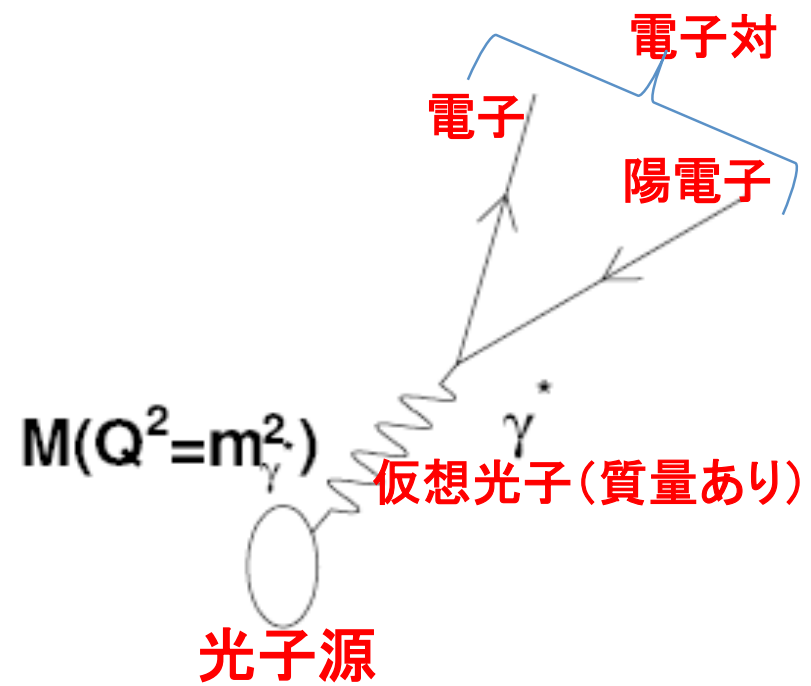
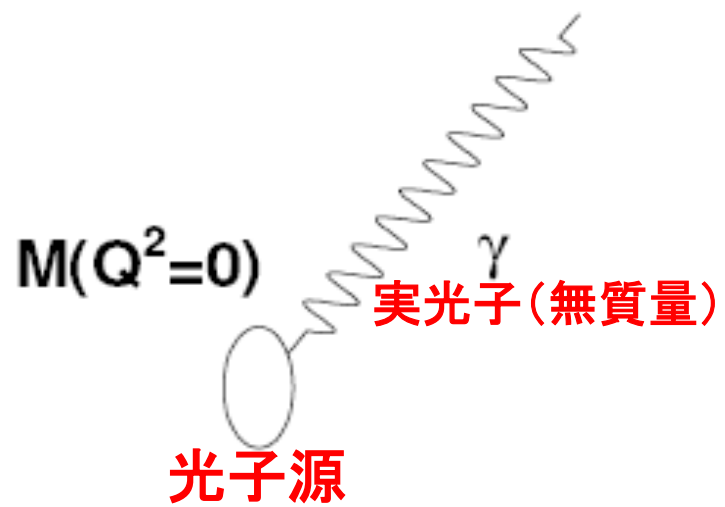
エネルギー分解能 :  $\sigma(E) < 0.1/\sqrt{E} \%$





## 光子を測るもう一つの方法

- ◆ ＊ 「仮想」光子を測る。
- ＊ 光子は質量ゼロの粒子。ただし、量子力学による不確定性が許される範囲の極々短時間では、質量を持つ「仮想光子」として存在できる。
- ＊ 仮想光子は、電子と陽電子対に崩壊する。
- ＊ 電子、陽電子対を測定すれば、「仮想光子」＝光子が測定できる





# (陽) 電子の測り方

\* チェレンコフ光を利用する。

\* チェレンコフ光とは？

\* 荷電粒子が屈折率  $n$  の物質中を通過した際、物質中での光の速度 ( $c/n$ ) より荷電粒子の速度 ( $v$ ) が速い場合に、粒子の飛跡に沿って放射される弱い光のこと。

1934年、P.A. Cherenkov により発見。I.M. Frank, I.Y. Tamm によりその現象を古典電磁気学で説明(ノーベル物理学賞受賞 1958「チェレンコフ効果の発見とその解釈」)。



アメリカ/アイダホ国立研究所内  
にある新型実験炉で観測された  
チェレンコフ放射



## The Nobel Prize in Physics 1958

"for the discovery and the interpretation of the Cherenkov effect"



Pavel Alekseyevich  
Cherenkov

③ 1/3 of the prize

USSR

P.N. Lebedev Physical  
Institute  
Moscow, USSR



Il'ja Mikhailovich  
Frank

③ 1/3 of the prize

USSR

University of Moscow;  
P.N. Lebedev Physical  
Institute  
Moscow, USSR



Igor Yevgenyevich  
Tamm

③ 1/3 of the prize

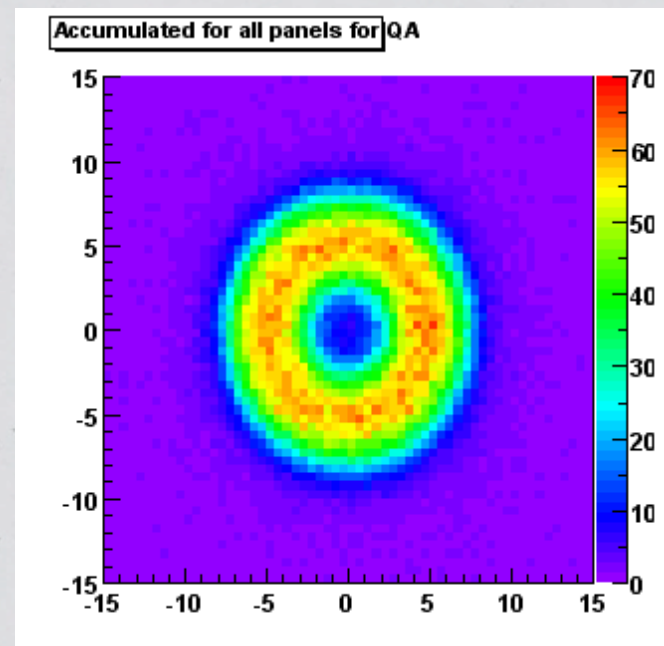
USSR

University of Moscow;  
P.N. Lebedev Physical  
Institute  
Moscow, USSR

# リングイメージ・チェレンコフ光検出器 (RICH)



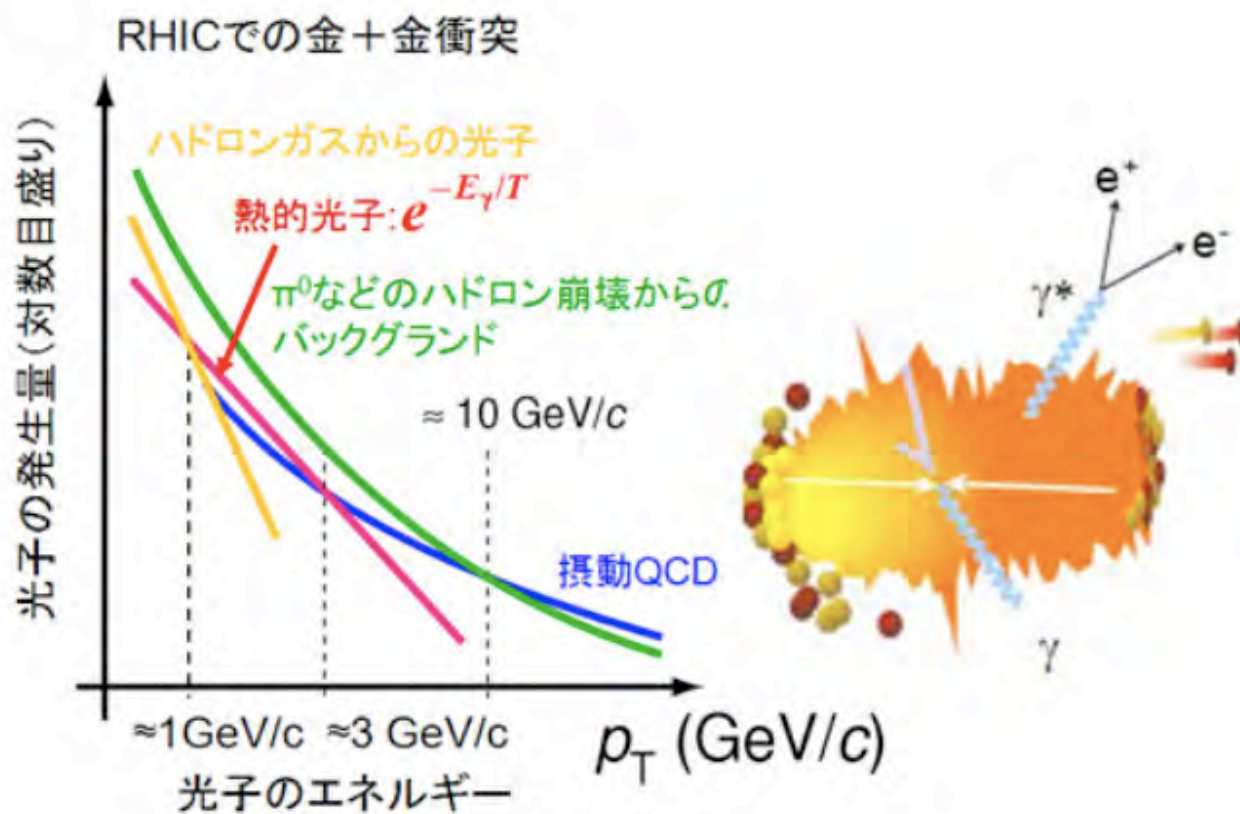
実際のRICH検出器 (PHENIX)



電子によるリングイメージ

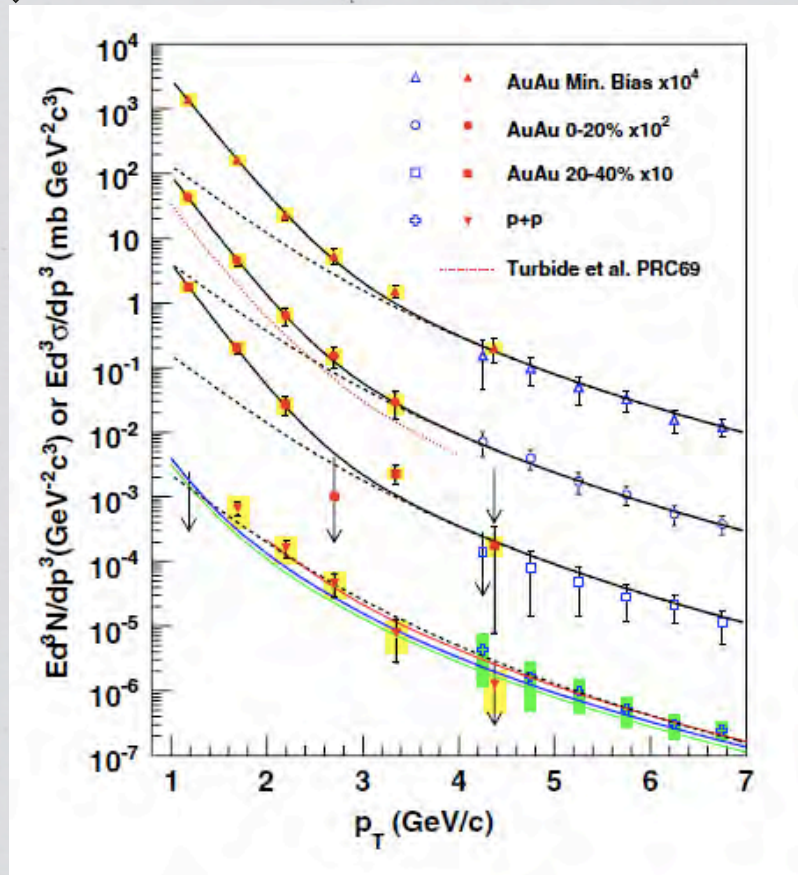


# 重イオン衝突での光子測定



# 結果

PHENIX (PRL 104, 132301 (2010))



- \* 熱光子の兆候が見えた。
- \* 今回の熱的光子の測定： $T = 300 \text{ MeV} \sim 4 \text{ 兆度 } (4 \times 10^{12} \text{ K})$
- \* 相転移の理論予測：170 MeV.
- \* 予想を遥かに超える高温度を実現
- \* 世界で最も高い温度！



---

## 6-2 状態を探索

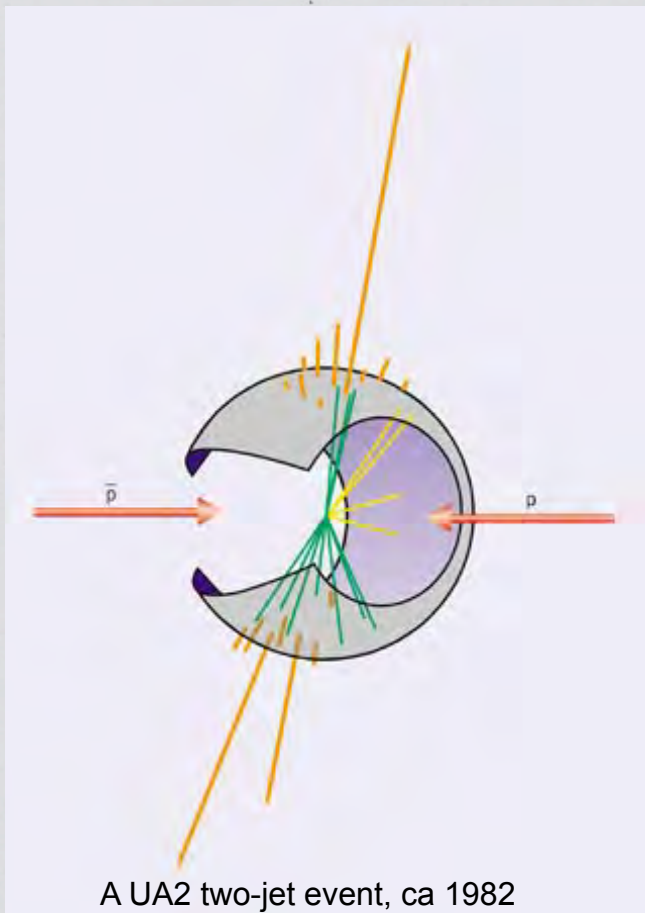
---

# 状態を探る方法

- \* 基準（プローブ）となるものがどれだけ変化するかによって、状態を探る
- \* プローブの例）光子、ジェット、ハドロンなど




# ジェットとは？



- \* ジェット＝高い運動量（エネルギー）を持った粒子の束
- \* 運動量保存の法則により、方位角にして約180°方向に生じる

# Jet Suppression at RHIC

Quarks

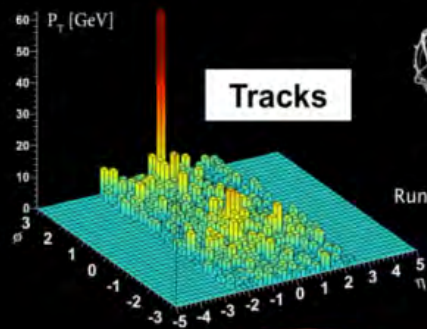


Animation by  
Jeffery Mitchell





# ジェットの結果 (1)

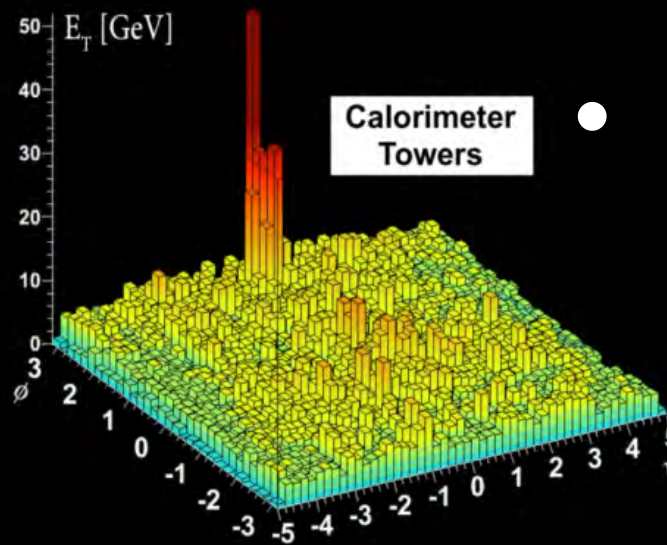
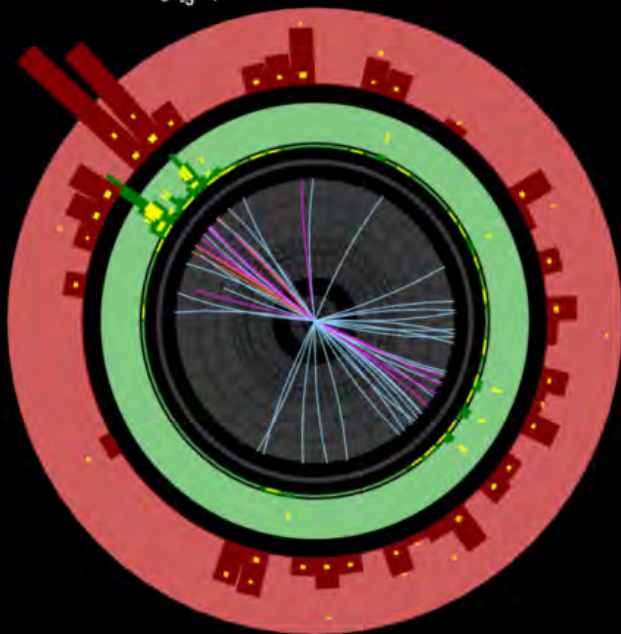
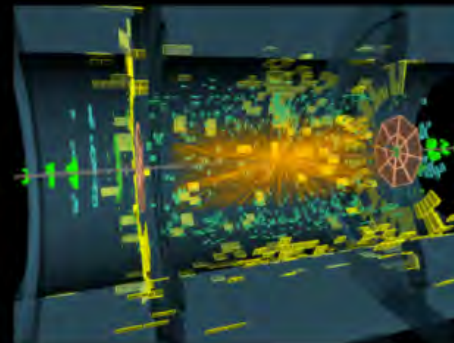


Tracks

**ATLAS**  
EXPERIMENT

Run Number: 169045, Event Number: 1914004

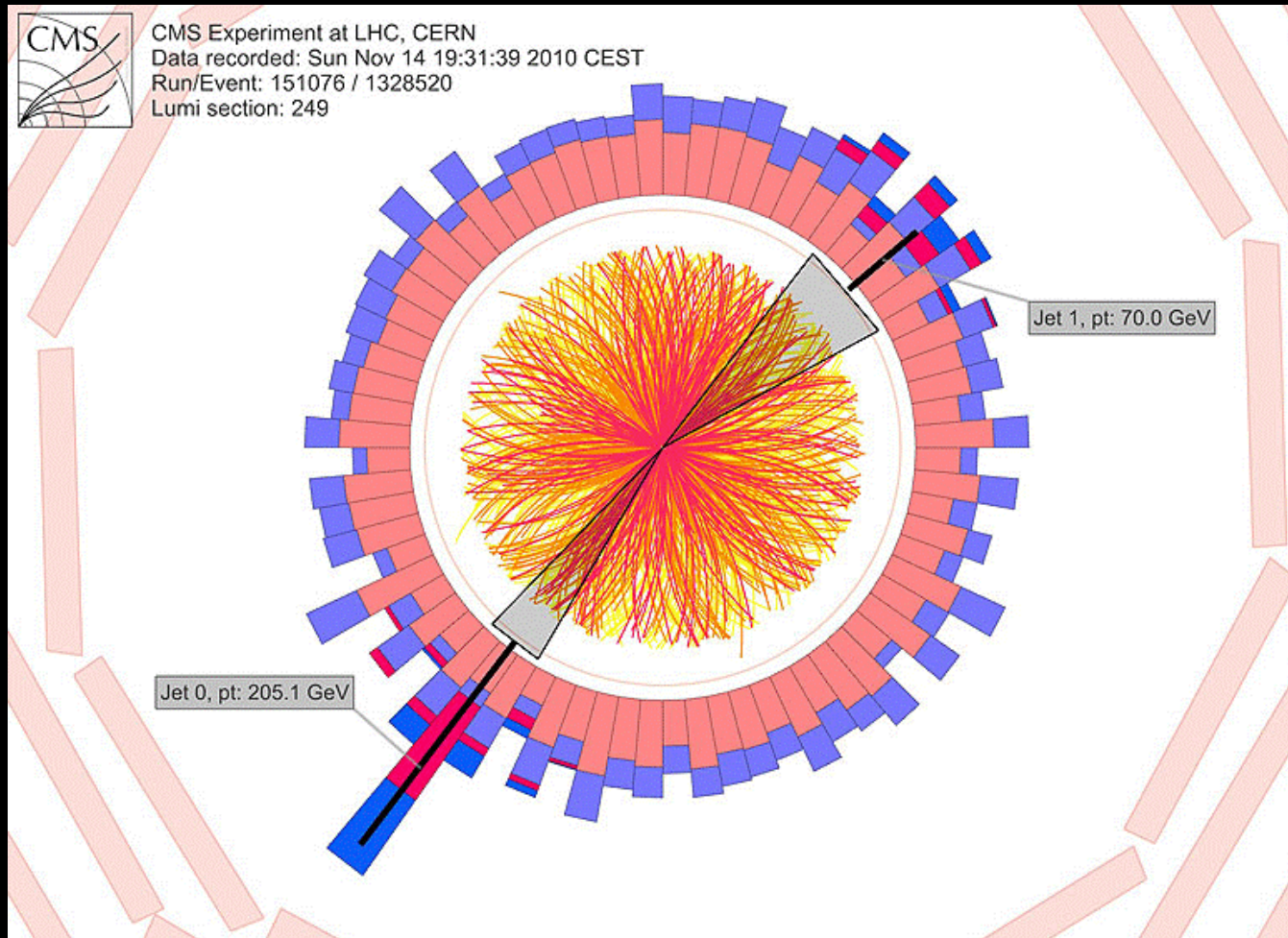
Date: 2010-11-12 04:11:44 CET



Calorimeter  
Towers

- 重イオン衝突で、ジェット抑制現象が観測された。

## ジェットの結果 (2)





## ジェット測定より分かったこと

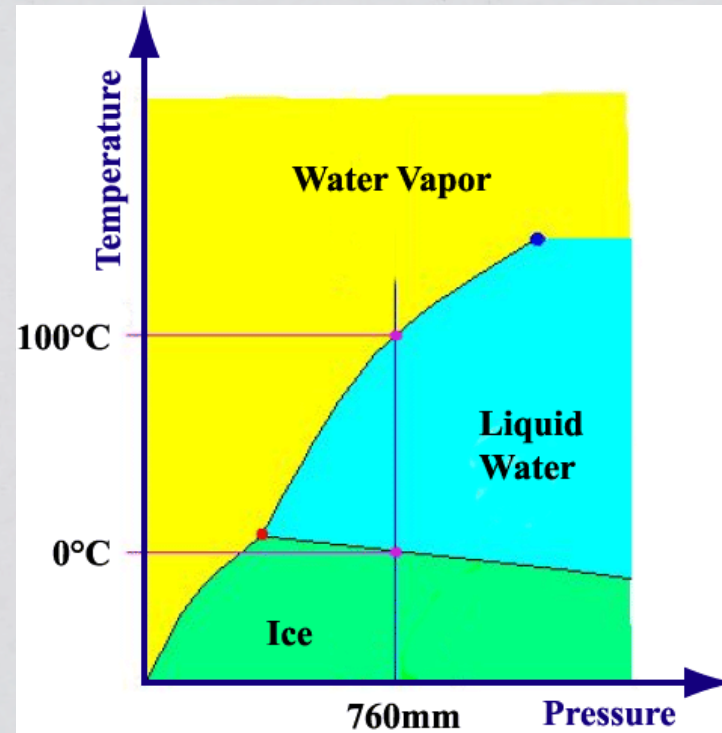
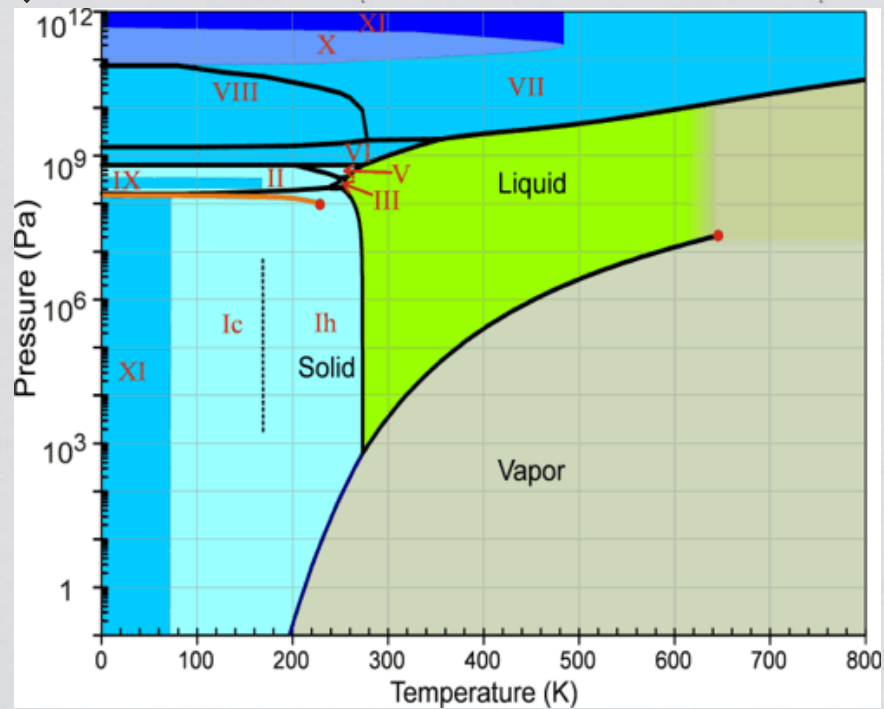
- \* ジェットは物質中で大きく吸収されている。
- \* この性質はQGP特有のもの。
- \* QGPの生成は疑いようがない。
- \* 吸収されたエネルギーは、粒子生成につかわれていることが分かってきた（現在のホットな話題の1つ）。

# 相の状態は？

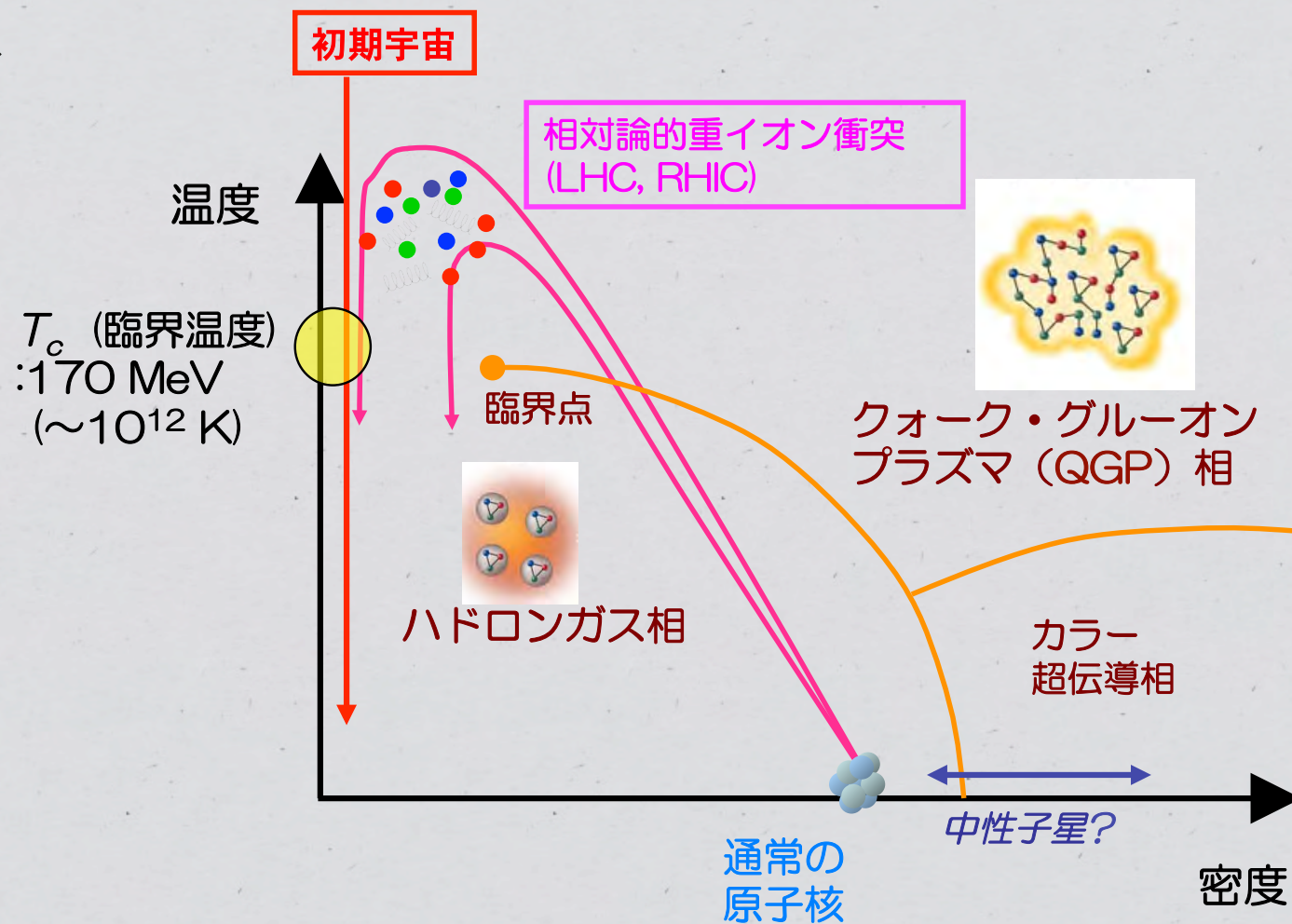
- \* 物質の相には、固体、液体、気体など、様々な相がある。
- \* QGP相とは、どのような性質をもっているのだろうか？



# 水の相図

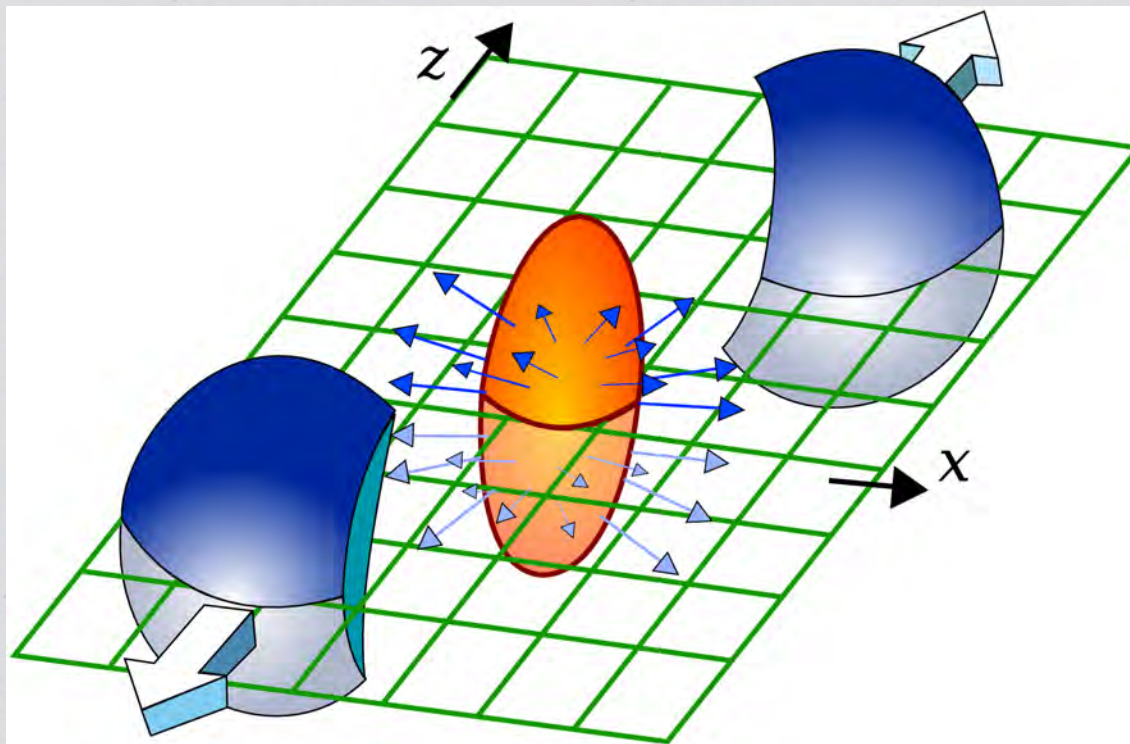


# 核物質の相図

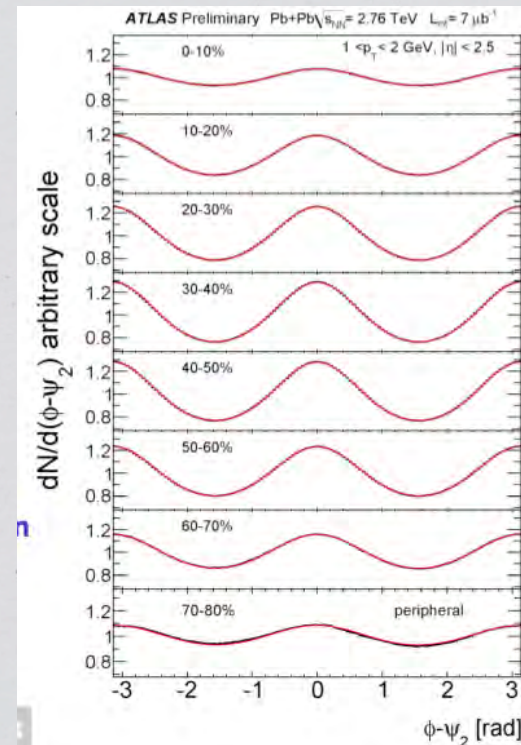
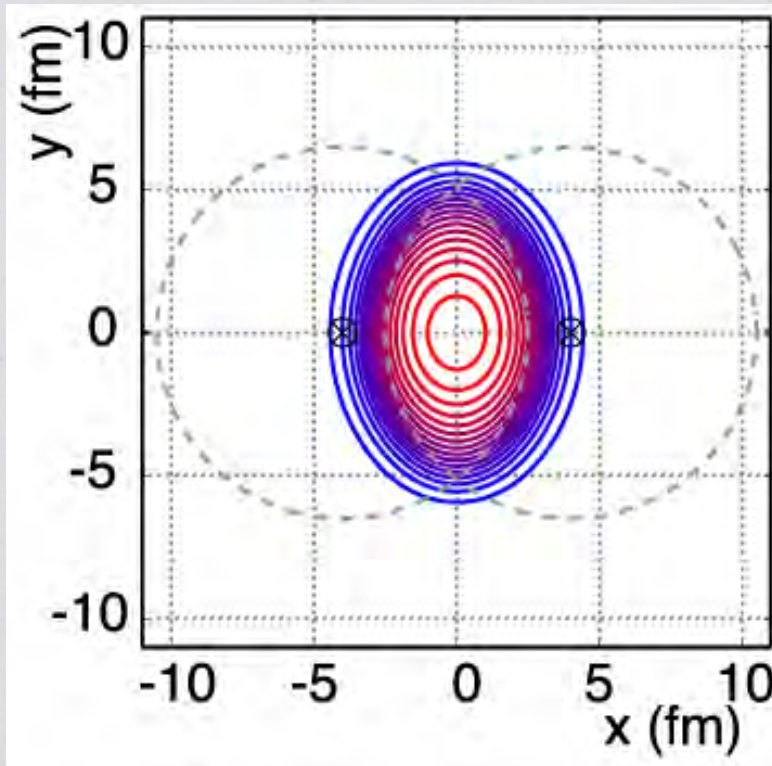




# 相の状態を調べる為に、人為的に衝突の形状をかえてみる



# アーモンドの時間発展



正面衝突

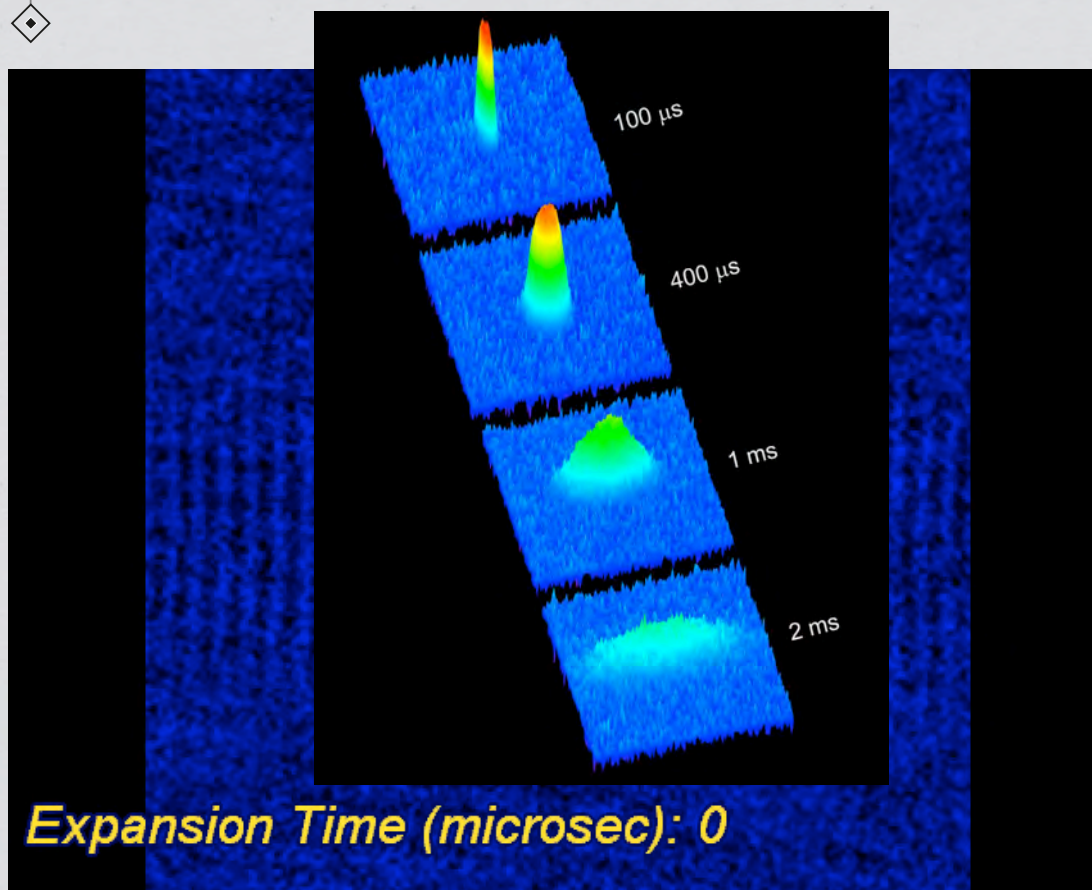
かすり衝突

この振る舞いから、QGPは液体的な性質を持つ事が分かった。

液体＝強く結合する系



# 極低温原子との類似



$10^{-6}$  K の世界

$^6\text{Li}$  (レーザー冷却)

フェルミガス系

= 強く結合する系

QGPの性質と同じ！

---

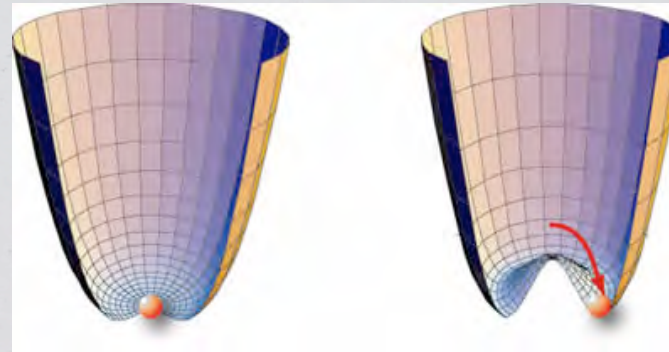
## 6-3 質量の謎に迫る

---



# 残り 1 %の質量獲得機構とは？

- \* (カイラル) 自発的対称性の破れ (南部陽一郎, 2008 年ノーベル物理学賞)
- \* QCD (量子色力学) の真空: クォークの対称性が保たれている。高温、高密度に世界
- \* 一方、現在はその対称性が破られている状態。



PHYSICAL REVIEW

VOLUME 122, NUMBER 1

APRIL 1, 1961

## Dynamical Model of Elementary Particles Based on an Analogy with Superconductivity. I\*

Y. NAMBU AND G. JONA-LASSEN†

The Enrico Fermi Institute for Nuclear Studies and the Department of Physics, The University of Chicago, Chicago, Illinois  
(Received October 27, 1960)

It is suggested that the nucleon mass arises largely as a self-energy of some primary fermion field through the same mechanism as the appearance of energy gap in the theory of superconductivity. The idea can be put into a mathematical formulation utilizing a generalized Hartree-Fock approximation which regards real nucleons as quasi-particle excitations. We consider a simplified model of nonlinear four-fermion interaction which allows a  $\gamma_5$ -gauge group. An interesting consequence of the symmetry is that there arise automatically pseudoscalar zero-mass bound states of nucleon-antinucleon pair which may be regarded as an idealized pion. In addition, massive bound states of nucleon number zero and two are predicted in a simple approximation.

The theory contains two parameters which can be explicitly related to observed nucleon mass and the pion-nucleon coupling constant. Some paradoxical aspects of the theory in connection with the  $\gamma_5$ -transformation are discussed in detail.

### I. INTRODUCTION

IN this paper we are going to develop a dynamical theory of elementary particles in which nucleons and mesons are derived in a unified way from a fundamental spinor field.<sup>1</sup> In basic physical ideas, it has thus the characteristic features of a compound-particle model, but unlike most of the existing theories, dynamical treatment of the interaction makes up an essential part of the theory. Strange particles are not yet considered.

The scheme is motivated by the observation of an interesting analogy between the properties of Dirac particles and the quasi-particle excitations that appear in the theory of superconductivity, which was originated with great success by Bardeen, Cooper, and Schrieffer,<sup>2</sup> and reformulated in an elegant mathematical form

equations<sup>3,4</sup>:

$$\begin{aligned} E\psi_{p+} &= \epsilon_p\psi_{p+} + \phi\psi_{p-}^*, \\ E\psi_{p-}^* &= -\epsilon_p\psi_{p-}^* + \phi\psi_{p+}, \end{aligned} \quad (1.1)$$

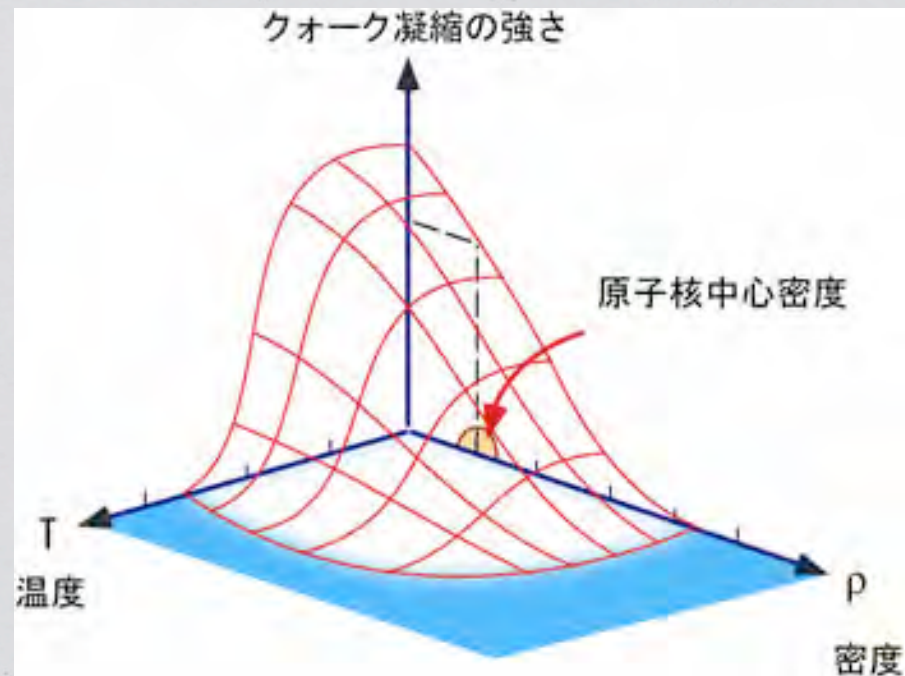
near the Fermi surface.  $\psi_{p+}$  is the component of the excitation corresponding to an electron state of momentum  $p$  and spin  $+$  (up), and  $\psi_{p-}^*$  corresponding to a hole state of momentum  $p$  and spin  $+$ , which means an absence of an electron of momentum  $-p$  and spin  $-$  (down).  $\epsilon_p$  is the kinetic energy measured from the Fermi surface;  $\phi$  is a constant. There will also be an equation complex conjugate to Eq. (1), describing another type of excitation.

Equation (1) gives the eigenvalues

$$E = \pm (\epsilon_p^2 + \phi^2)^{1/2} \quad (1.2)$$

# 質量の謎

- \* 温度、密度を上げることで、対称性が回復。
- \* 対称性が回復すると、質量が軽くなる。
- \* 質量が軽くなるということは、その物質を構成しているクォーク凝縮の強さが弱くなるということ

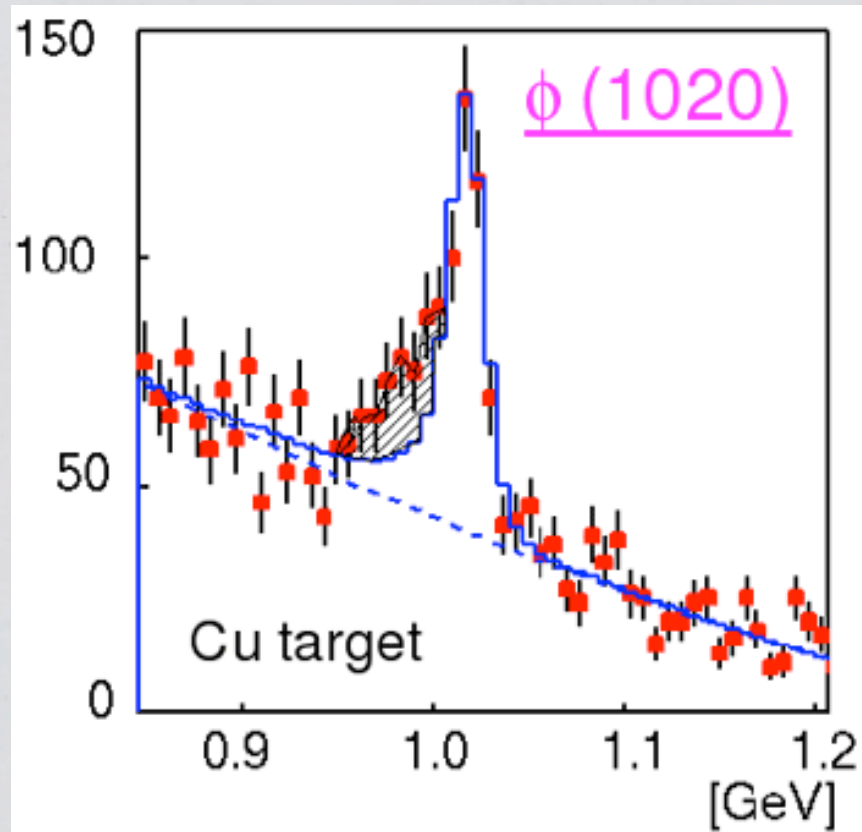




# 実験的にどう迫るのか？

- \* QGP状態を作って、QCDの閉じ込めを破ってあげればよい。
- \* そこで、理論的に予測されている「ベクトル中間子」と呼ばれる粒子を測定し、その質量が軽くなっているかどうかを調べる。
- \* ベクトル中間子のうち、電子-陽電子対に崩壊するものを測定。

# 実験結果①

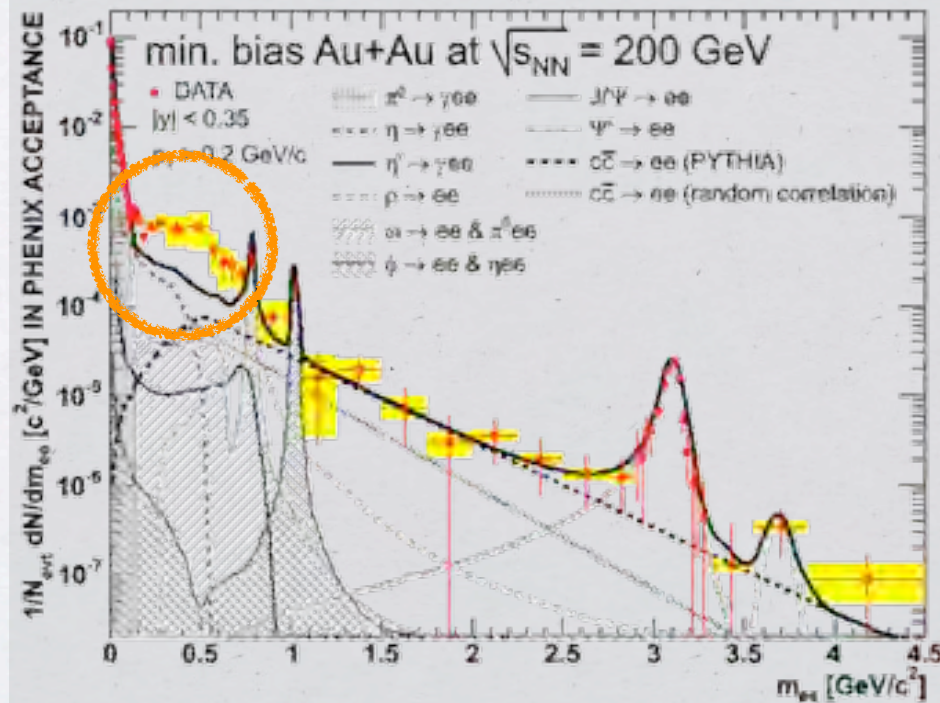


\* KEK-E325 実験

\*  $\phi$ ベクトル中間子で、質量変化の兆候が見えた



## 実験結果②



\* RHIC-PHENIX 実験

\* その兆候が見えつつあるが、大きなバックグラウンドのため測定が難しい。

\* 実験・理論両面において、今後の課題。

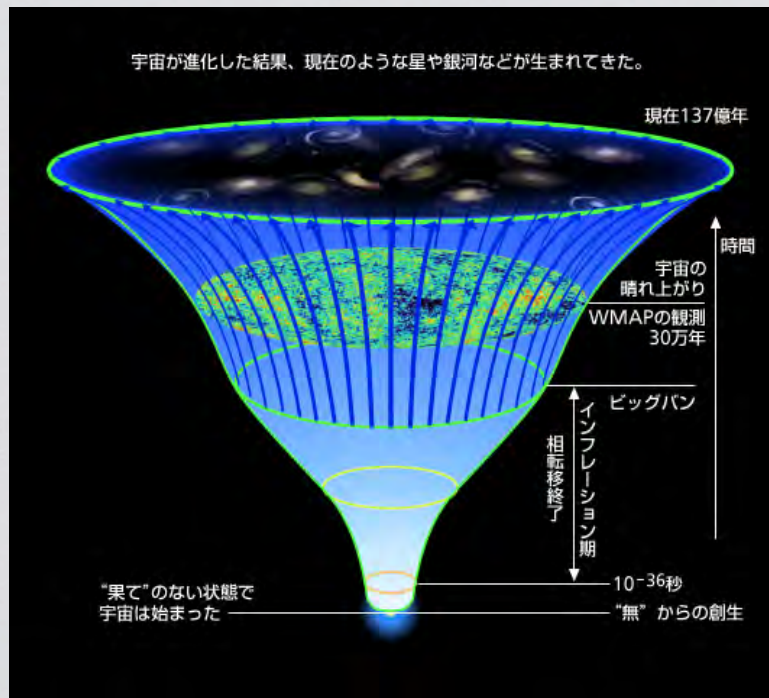
---

# クロスオーバーする物理学

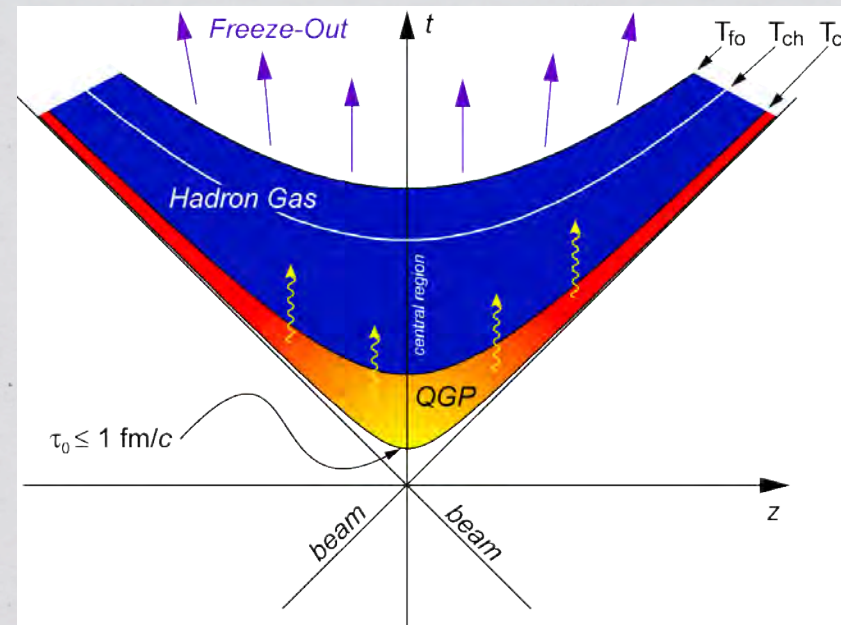
---



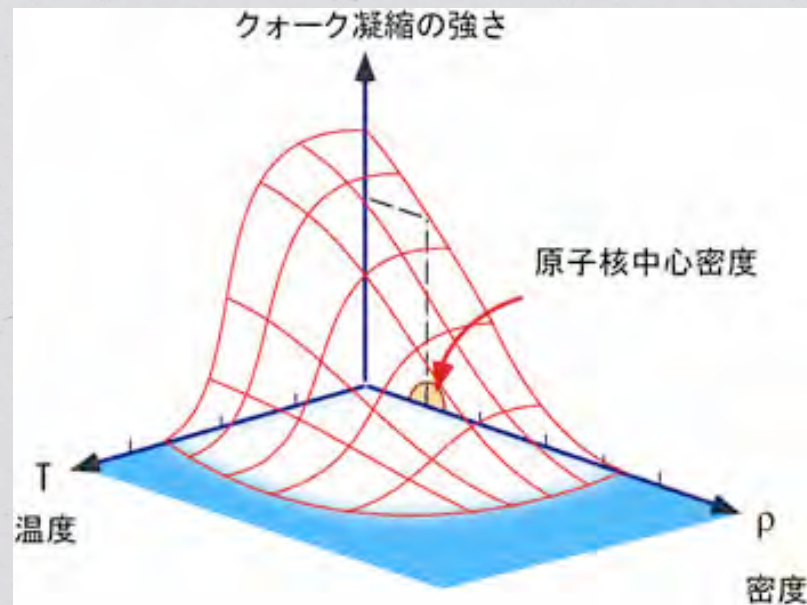
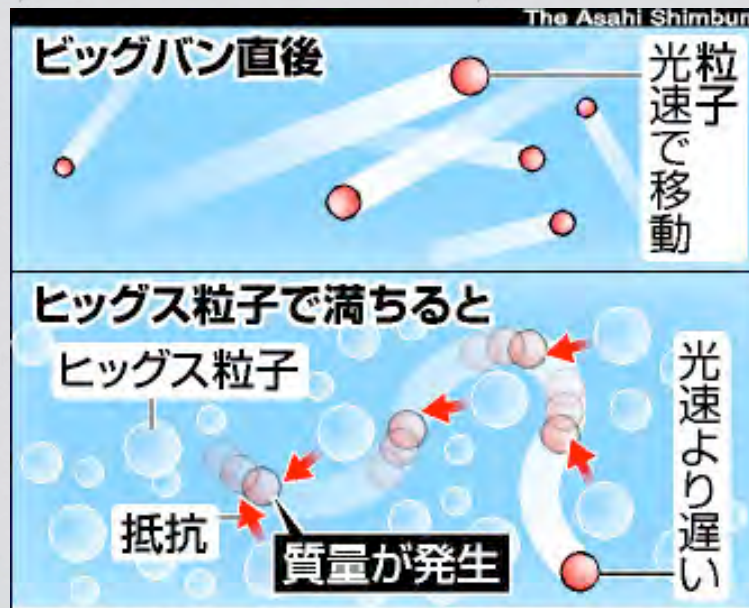
# 「ビッグバン」 vs. 「リトルバン」



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

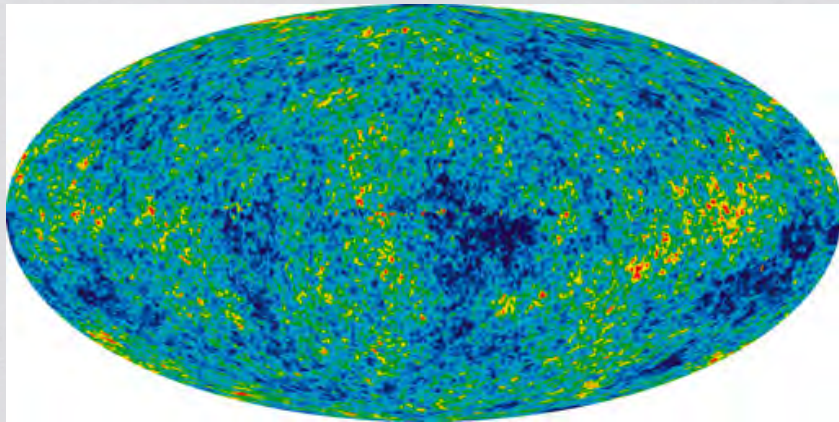


# ヒッグス質量 vs. 陽子質量



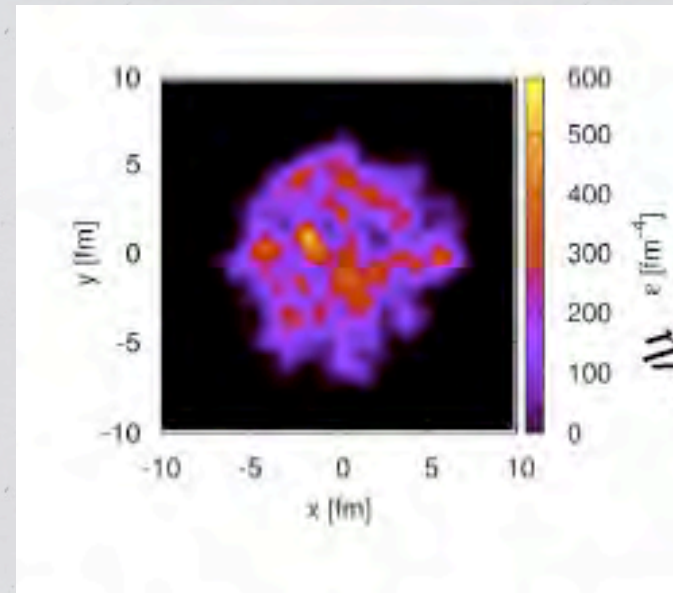


# 宇宙の温度揺らぎ vs. 重イオン衝突の密度揺らぎ



WMAP 衛星

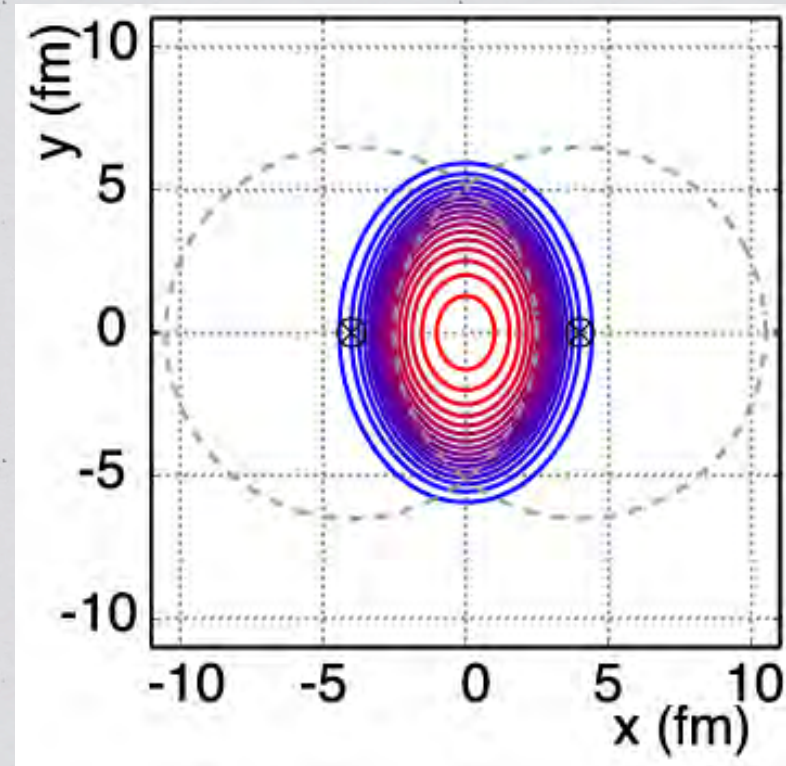
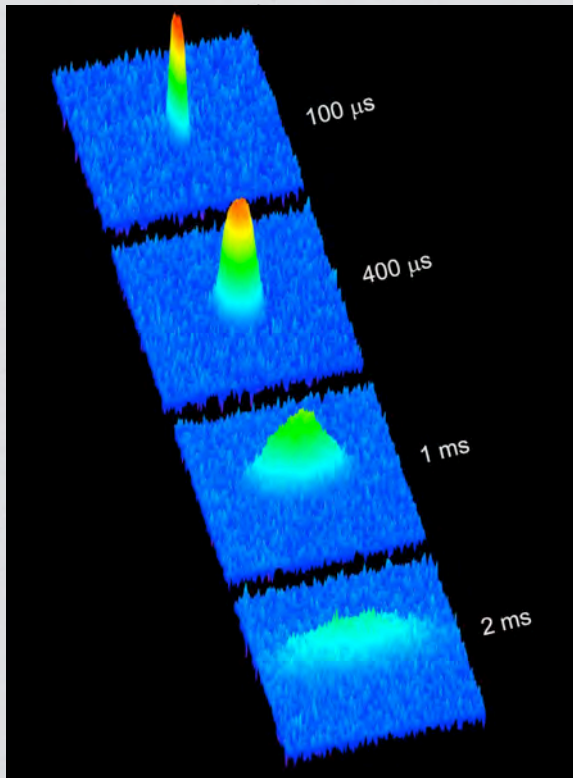
宇宙年齢、宇宙の組成



重イオン衝突

初期条件、QGP物性

## 極低温 ( $10^{-6}\text{K}$ ) vs. 超高温 ( $10^{12}\text{K}$ )





# 最後に

- ◆ ● この10年で高エネルギー重イオン、クォークグルーオンプラズマ（QGP）の物理は格段に進歩した。

◆ RHIC, LHC 加速器が稼働。ハイクオリティ実験データ。

- 一つの大きな発見は、QGPの液体的性質。
- クォークスープと初期宇宙
- 今後10年、「クォークスープ」の性質解明、質量獲得の謎、相構造の解明、が期待される