

地上の実験で 宇宙の始まりを再現する

北沢 正清

大阪大学理学研究科

2017年1月7日 大阪大学サイエンスカフェ

参加者の皆様へ

話の途中でも、

- ・説明で分からないこと
 - ・ついでに聞いてみたいこと
- などは、どしどし質問して下さい。

まずは自己紹介を...

- 北沢正清
- 大阪大学理学研究科物理学専攻
- 専門：理論原子核物理
- 39歳、長野県生まれ

- 理論物理のこと、極限状態の物質のことなどに
思いを巡らしながら日々を過ごしています。
- 最近、物理についてしみじみ思うことは...

一本の草も涼風宿りけり

even on one blade of grass the cool wind lives

小林一茶

Issa Kobayashi

1814

地上の実験で 宇宙の始まりを再現する

ことを理解するために必要な、3つの極限の話

3つの極限の話

- ① 時間を過去へと遡る
- ② 物質を細かく分解していく
- ③ 物質の温度を上げていく

閑話休題

カントの二律背反

- 第一：時間・空間は無限に続くか？境界があるか？
- 第二：物質は、単純な構成要素に分解できるか？
無限に分割可能か？
- 第三：世界は決定論的か？自由意志は存在するか？
- 第四：神は存在するか？しないか？

ひとたび経験の圏域を超出すれば、
経験によって反駁される心配はなくなる。

イマヌエル・カント

1781

『純粹理性批判』

(中山元訳)



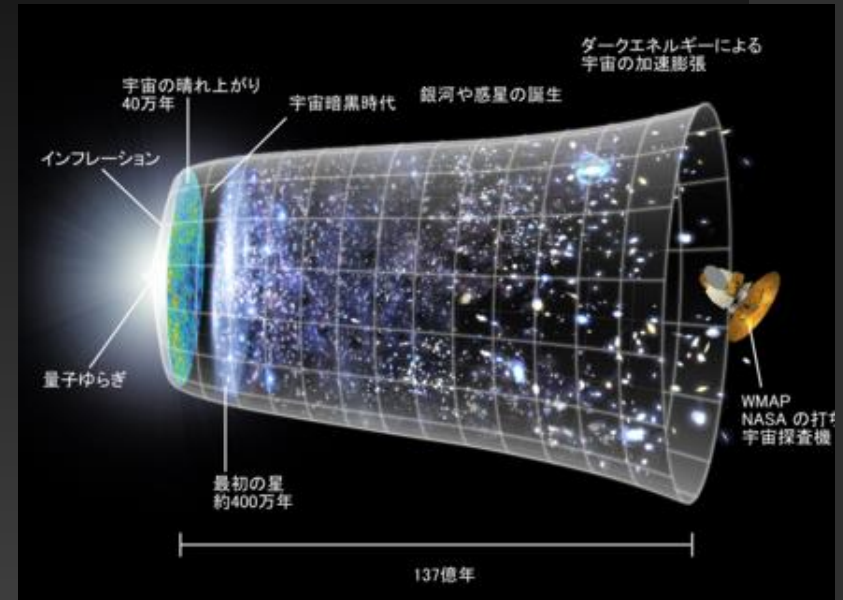
3つの極限の話

① 時間を過去へと遡る

② 物質を細かく分解していく

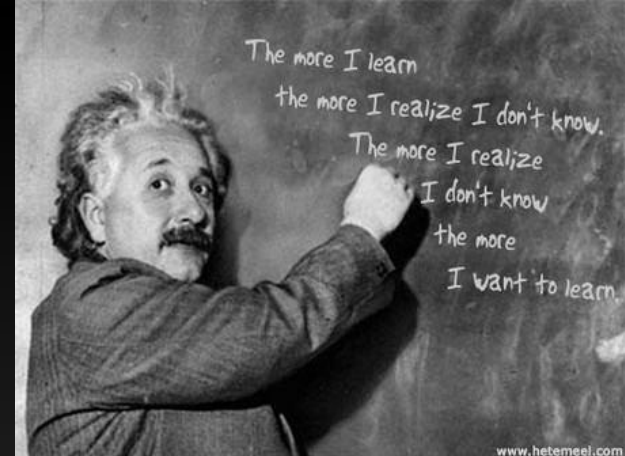
③ 物質の温度を上げていく

我々の宇宙は、 ビッグバンから始まった。



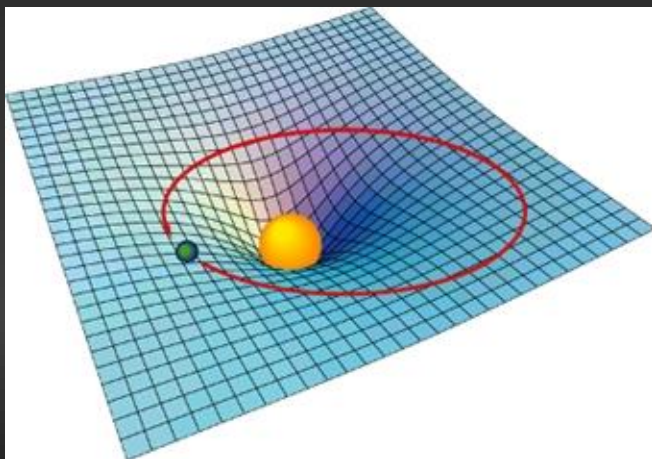
宇宙は138億年前に急激な膨張（インフレーション）
で開闢し、現在も膨張を続けている

一般相対性理論

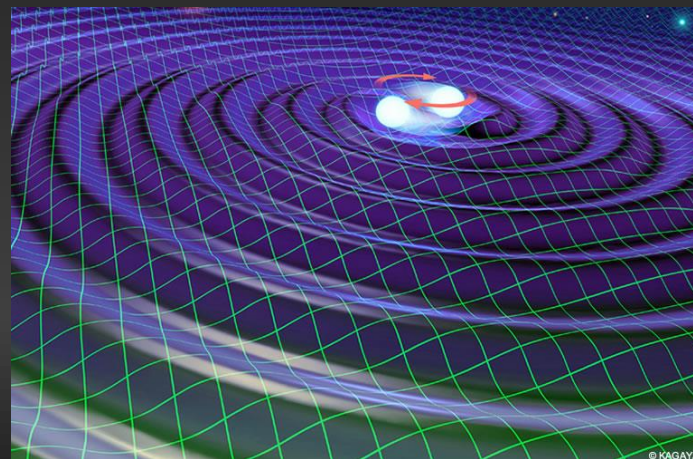


アインシュタイン
1915

時空は、平坦な「物質の入れ物」ではない。
物質の存在により歪み、変化する動的存在。



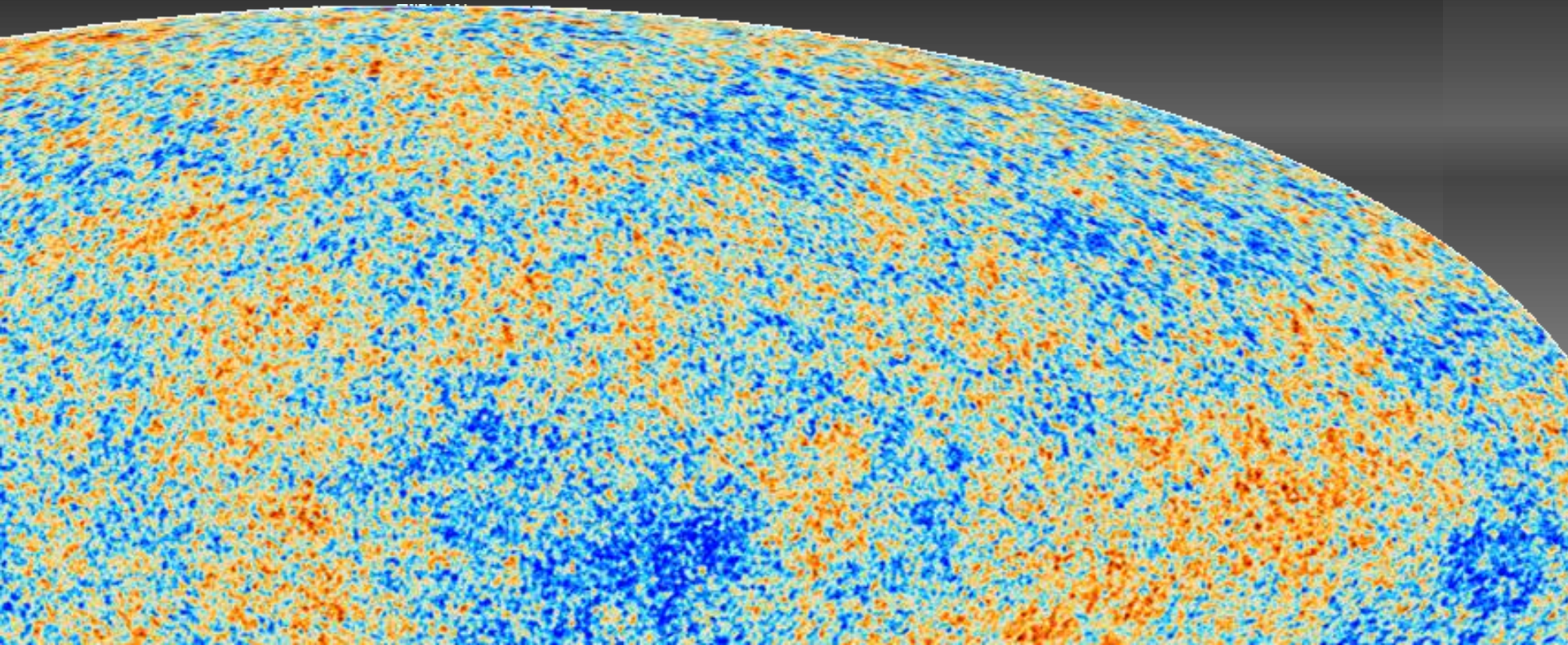
重力=時空の歪み



重力波の放出

宇宙背景放射

宇宙は2.7K(-270度)の温度を持っている。
この温度は、観測する方向に依存して
0.00001%程度のばらつきを持っている。



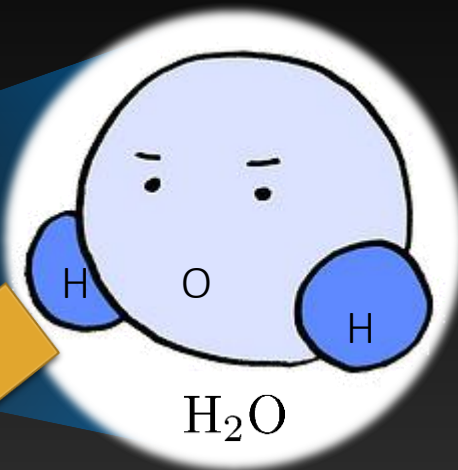
3つの極限の話

① 時間を過去へと遡る

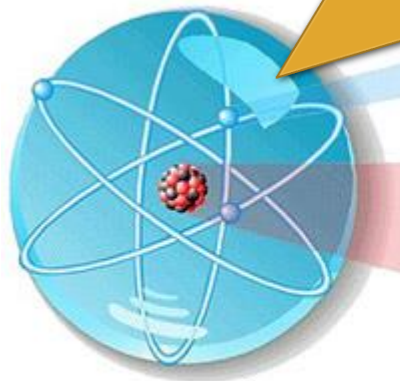
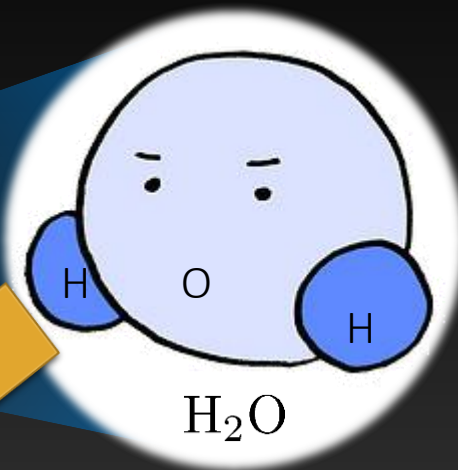
② 物質を細かく分解していく

③ 物質の温度を上げていく

ものは何からできている？

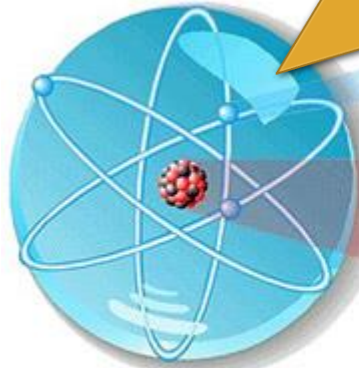
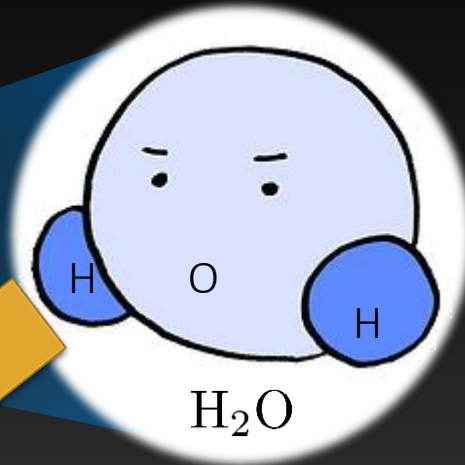


ものは何からできている？



原子 $\sim 10^{-8}\text{cm}$

ものは何からできている？



原子 $\sim 10^{-8} \text{cm}$



原子核
 $\sim 10^{-12} \text{cm}$



電子
 $< 10^{-16} \text{cm}$

陽子・中性子 $\sim 10^{-13} \text{cm}$



$\sim 10^{-13} \text{cm}$

クォーク $< 10^{-16} \text{cm}$



量子色力学

Quantum Chromodynamics (QCD)

$$\mathcal{L} = \bar{\psi}(i\not{D} - m)\psi - \frac{1}{4}F_{\mu\nu,a}F_a^{\mu\nu}$$

登場人物

- クォーク：物質場、カラー電荷
- グルオン：クォーク間の力を媒介

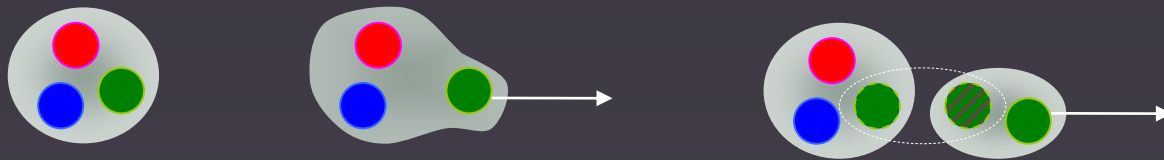
- 1970年代、物質の基礎理論として確立
- だが、難解すぎて誰にも解けない



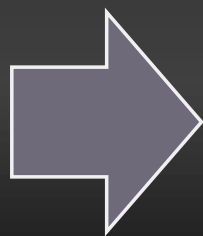
クォークの閉じ込め

□ クォークとグルオンは、単独で観測されることはない。

無理矢理取り出そうと引っ張ると...



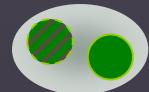
クォーク・反クォーク対を生成し、核子と中間子になる



我々の身の回りの物理の基本自由度



核子(バリオン)



中間子(メソン)

} ハドロン

3つの極限の話

- ① 時間を過去へと遡る
- ② 物質を細かく分解していく
- ③ 物質の温度を上げていく

高温の状態



水蒸気 100°C

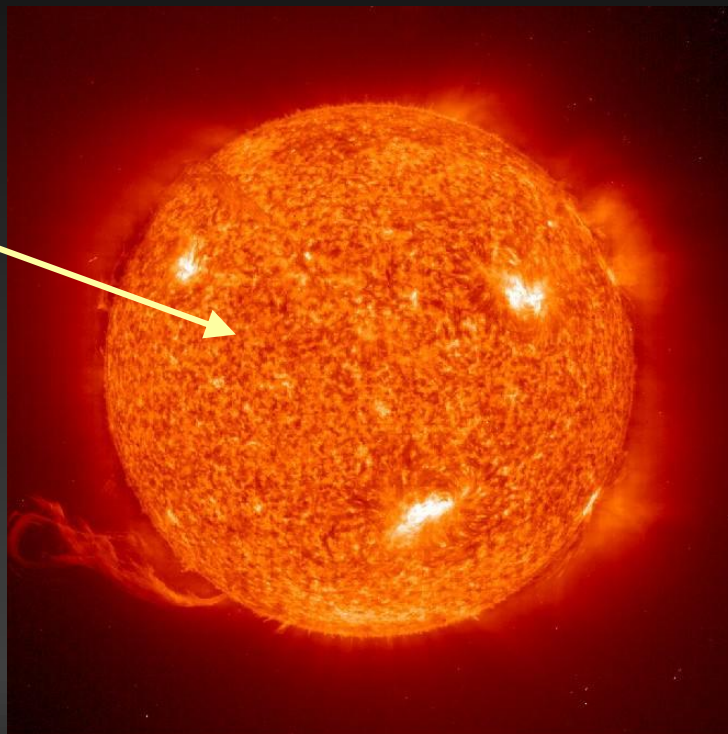


溶解した鉄 1500°C



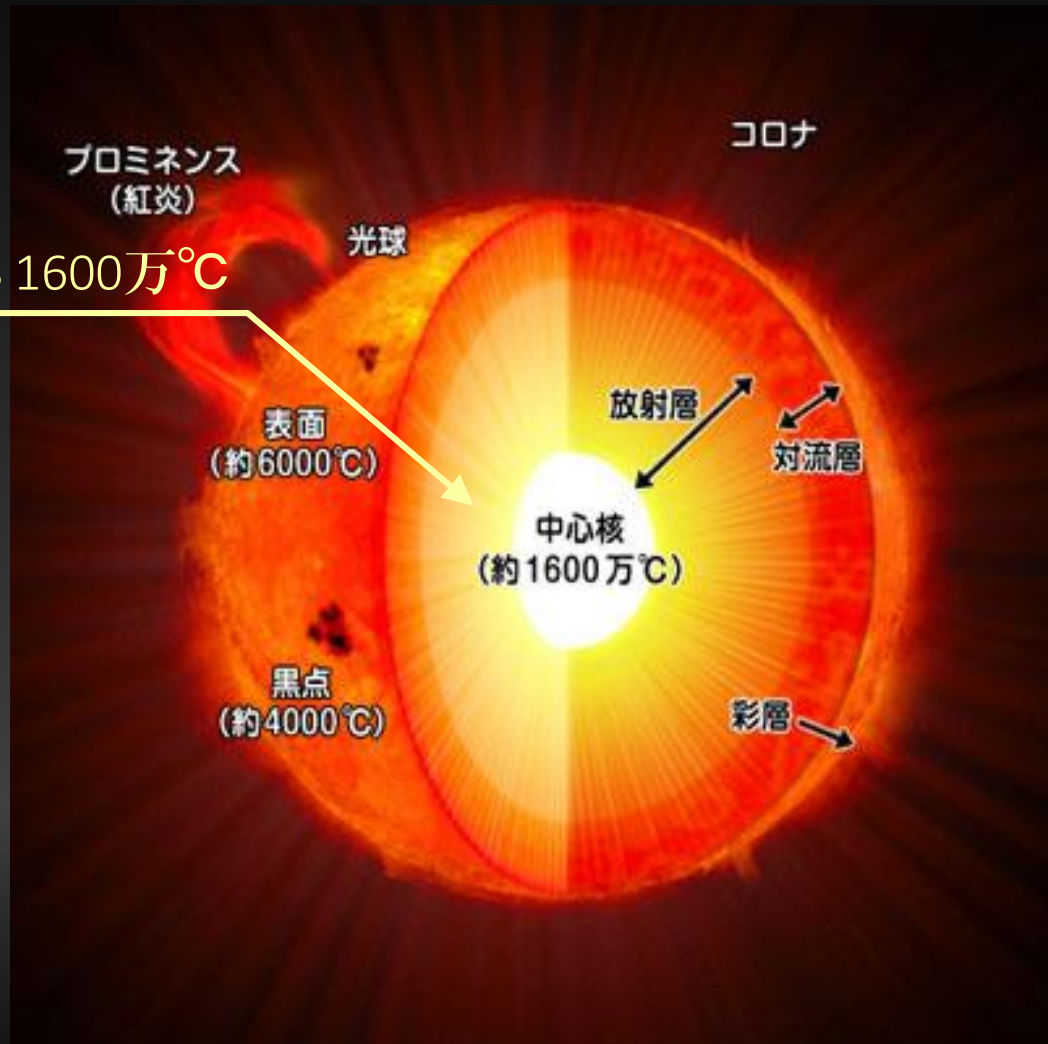
高温の状態2

太陽表面 6000°C

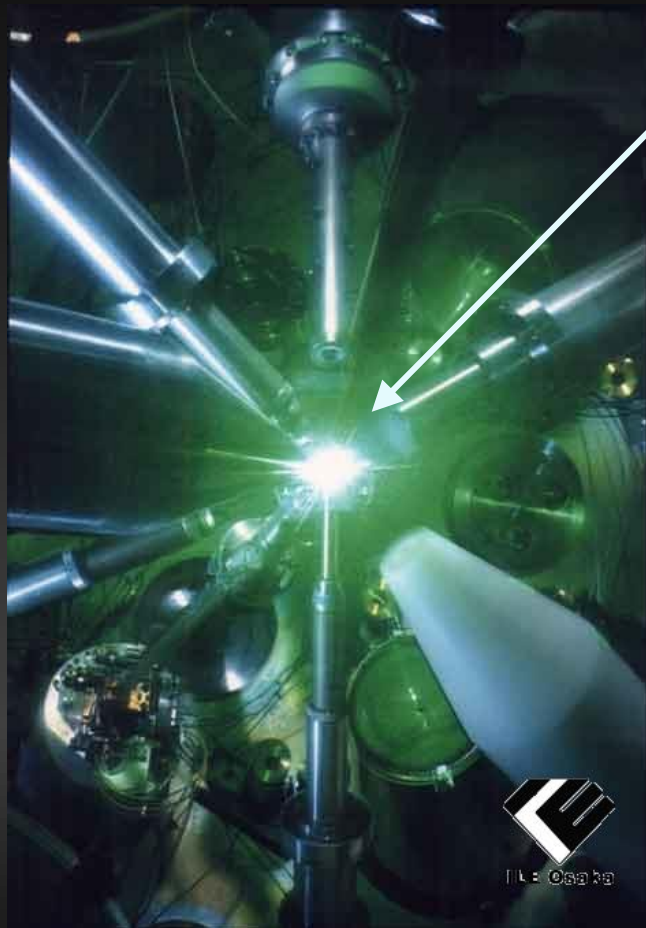


高温の状態2

太陽中心 1600万°C



高温の状態3



核融合プラズマ 1億度以上



大阪大学レーザー研 激光XII号

温度と相転移



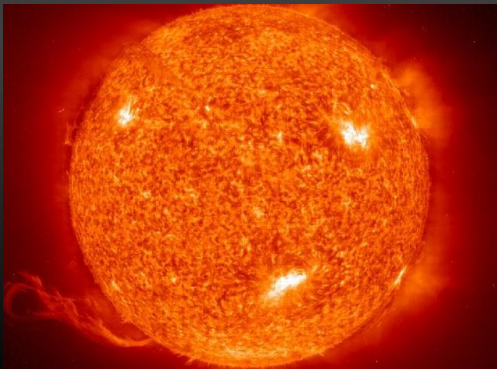
100°C

水が、液体から気体に相転移



約1500°C

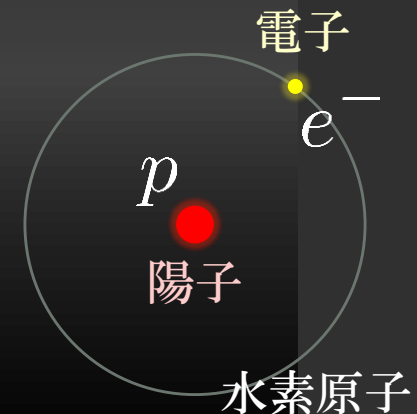
鉄が、固体から液体に相転移

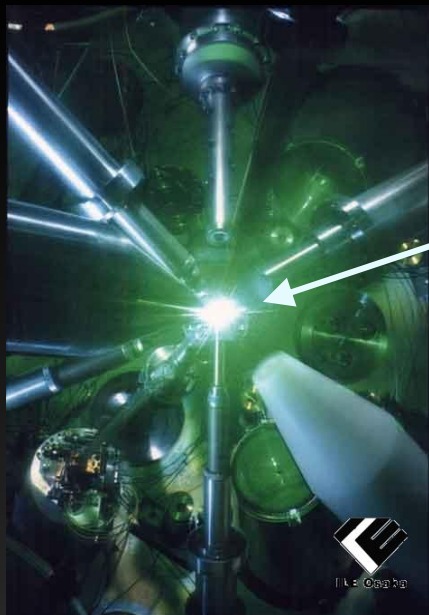


約4000°C～

水素原子の電離が始まる

水素原子→陽子+電子

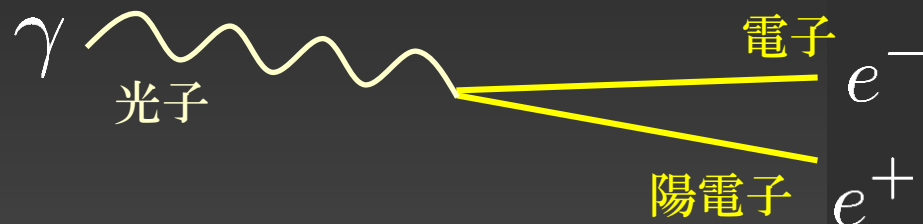




核融合プラズマ 1億度以上

約50億°C~

電子・陽電子の対生成・対消滅が始まる



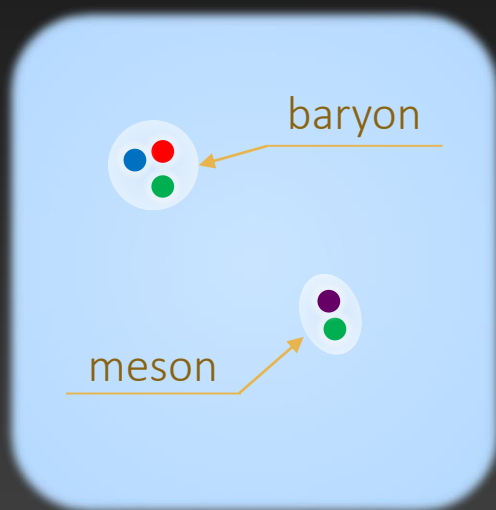
約2兆°C~

陽子・中性子（バリオン）や、
メソンが溶け始める



クォーク・グルオン・プラズマ (QGP)

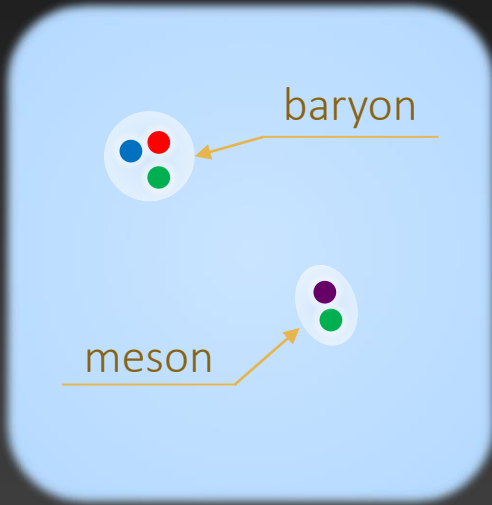
真空



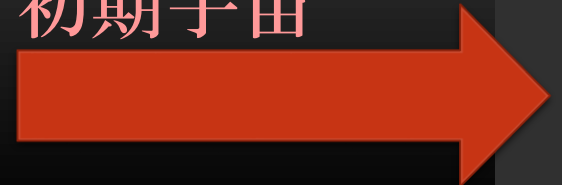
クォーク・グルオン・プラズマ (QGP)

真空

温度を上げていくと ...



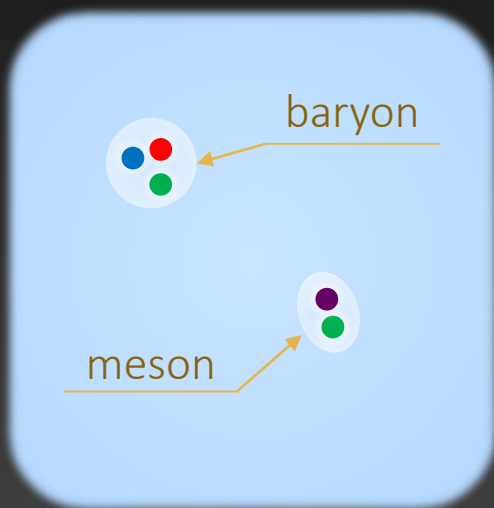
初期宇宙



クォーク・グルオン・プラズマ (QGP)

真空

温度を上げていくと ...



quark-gluon plasma

素粒子が「溶け出す」相転移

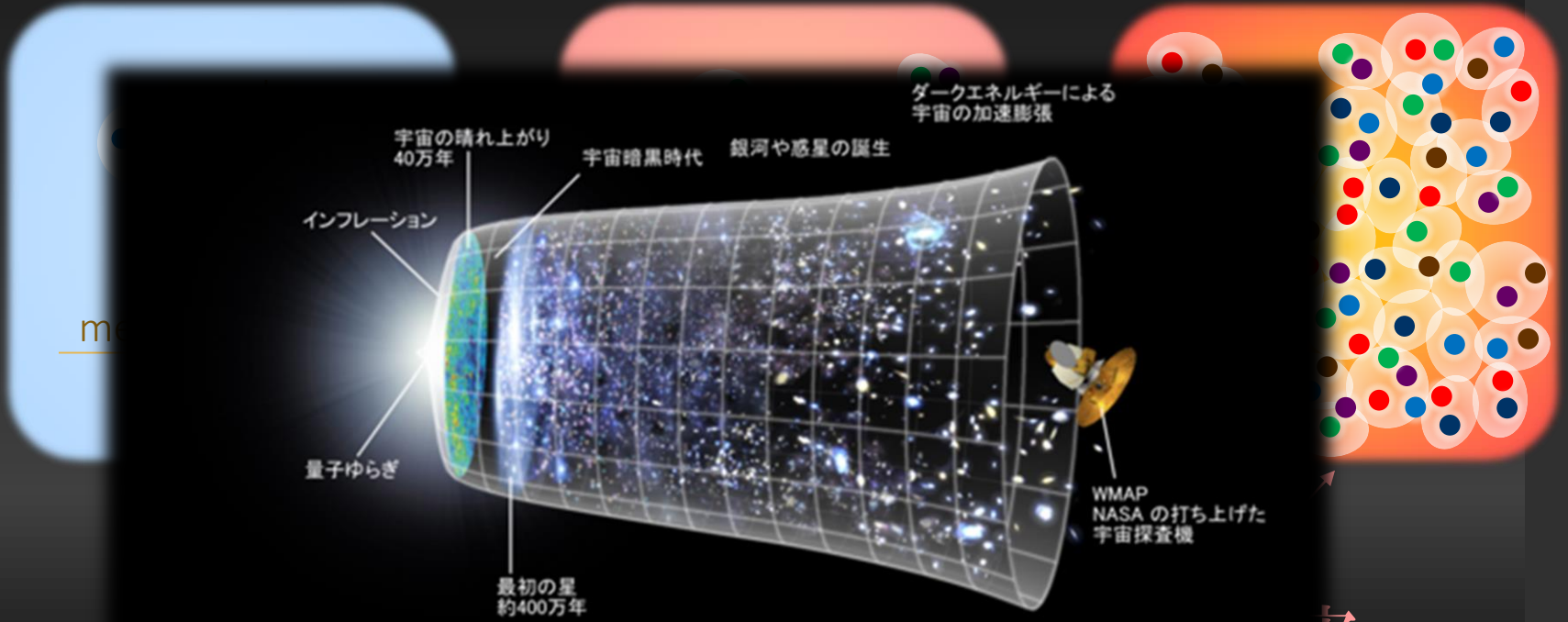
初期宇宙



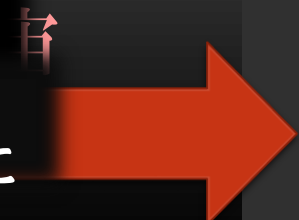
クォーク・グルオン・プラズマ (QGP)

真空

温度を上げていくと ...



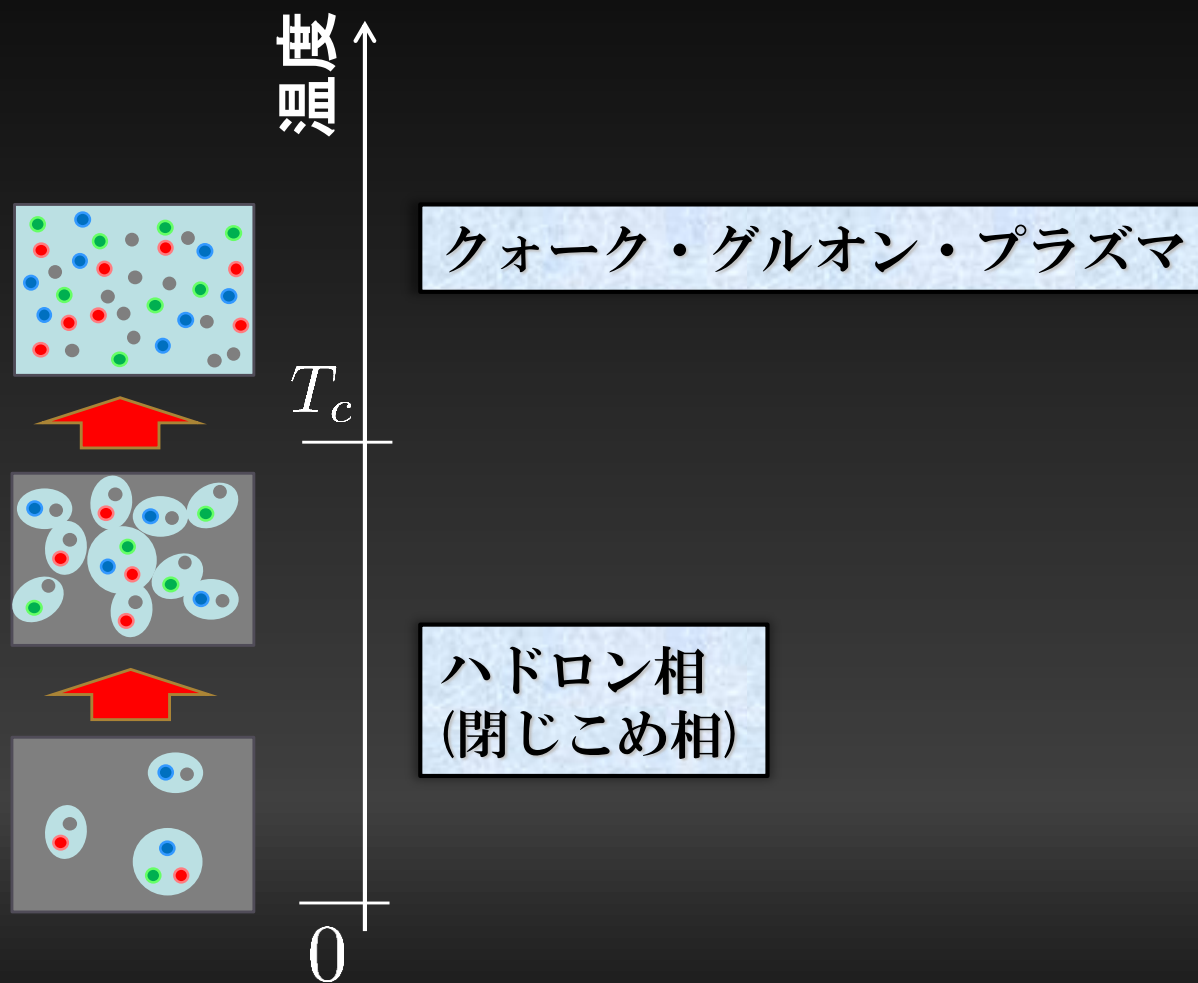
QGPは、誕生直後の宇宙の姿
誕生後 $10^{-10} \sim 10^{-5}$ 秒の間、宇宙はQGPだった



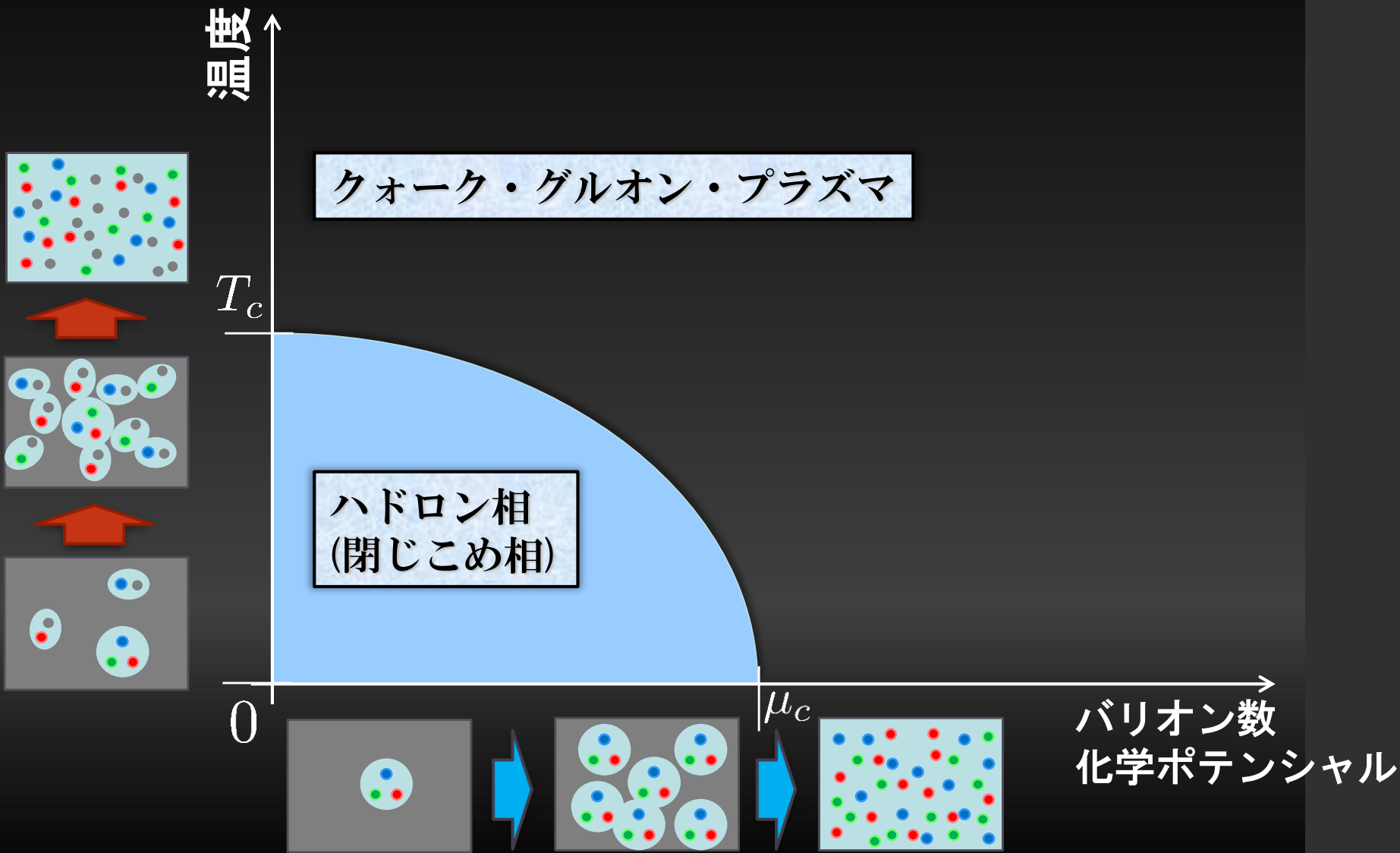
地上の実験で 宇宙の始まりを再現する

という本題に入る前に、ちょっと余談

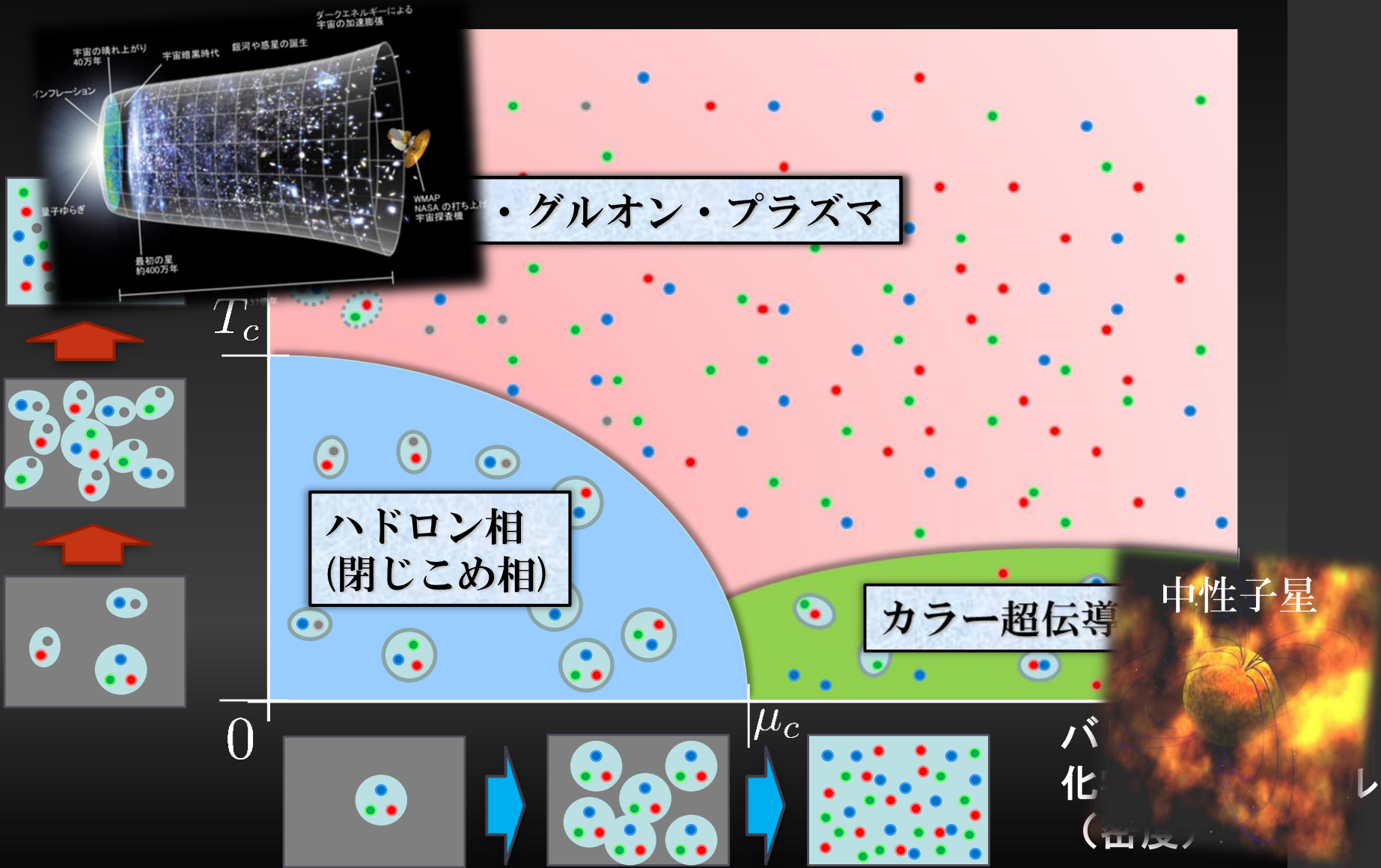
高温・高密度の量子色力学



高温・高密度の量子色力学



高温・高密度の量子色力学

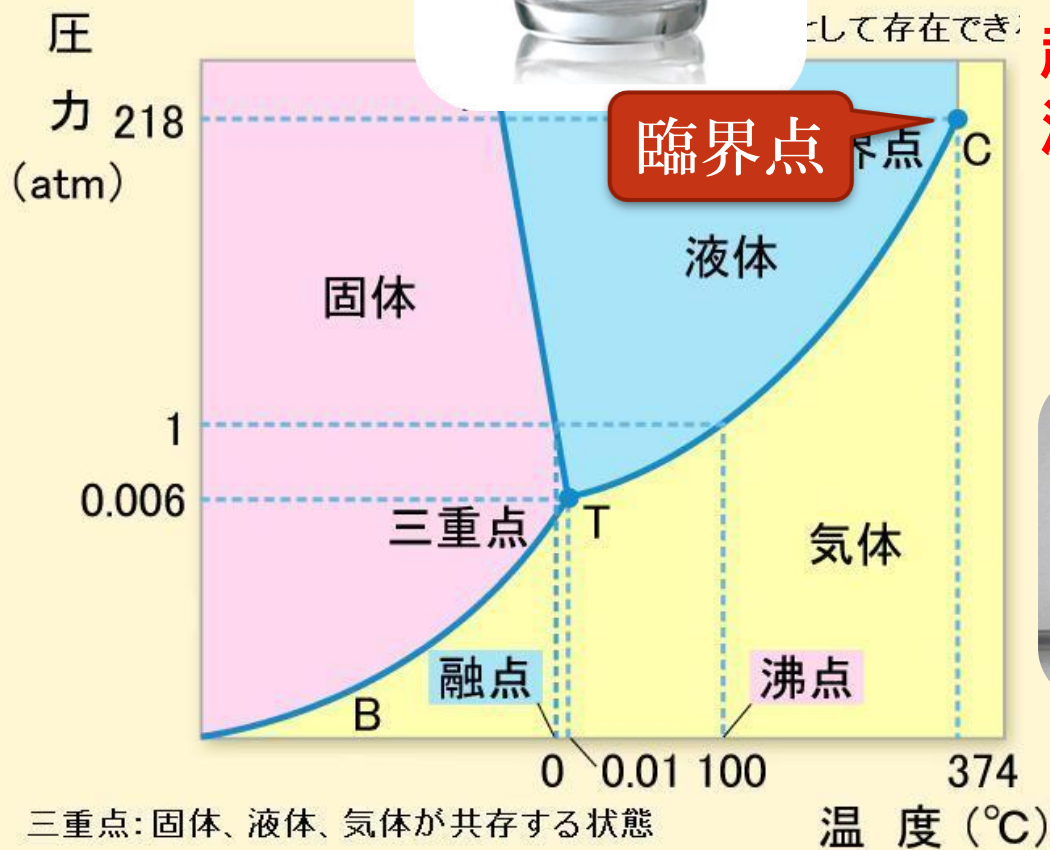


中性子星:宇宙の灯台

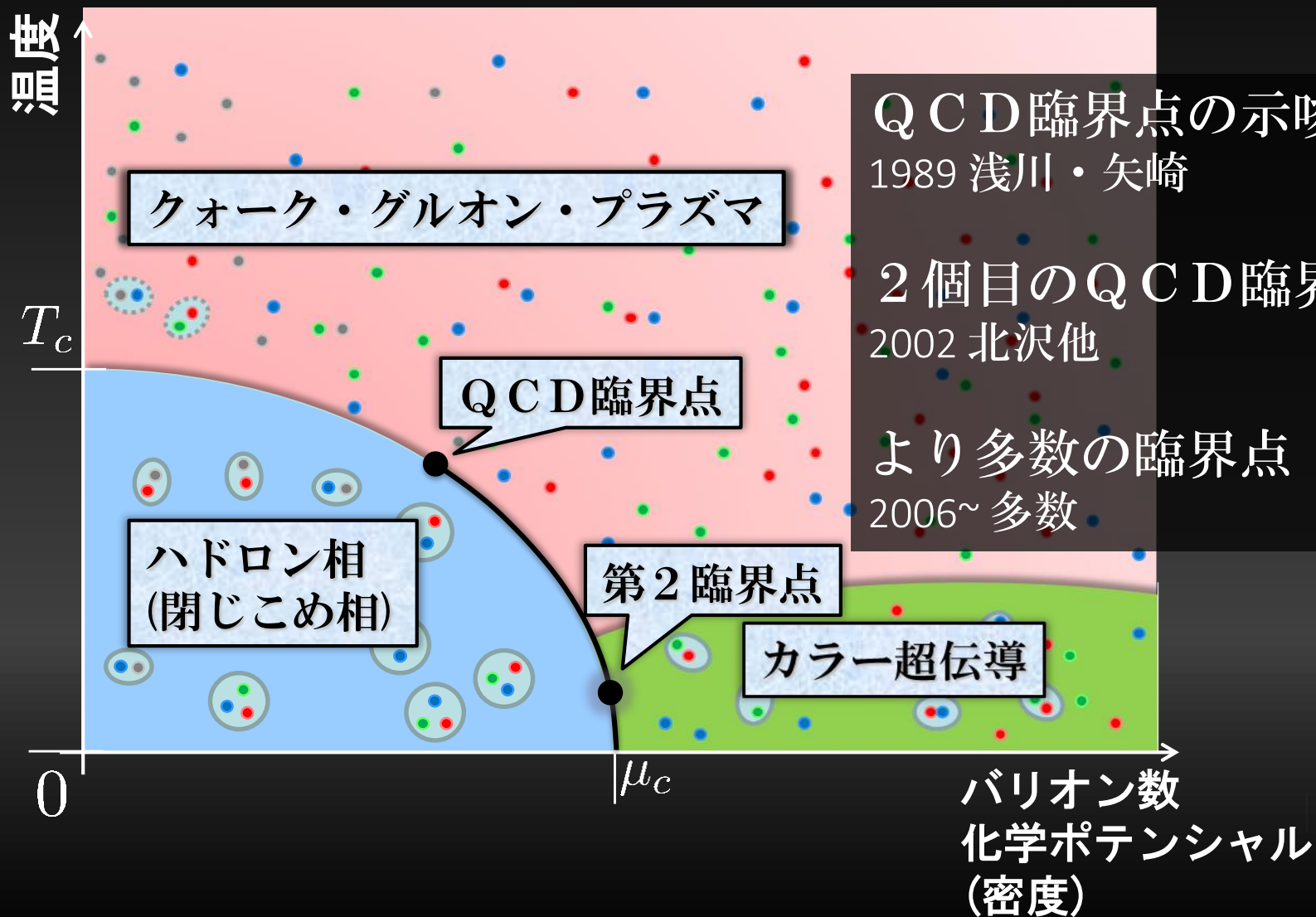
- 太陽の1.5~2倍の質量
- 半径約10kmの天体
- パルサーとして発見



水の相図



有限温度・密度QCD



そしてついに本題の、

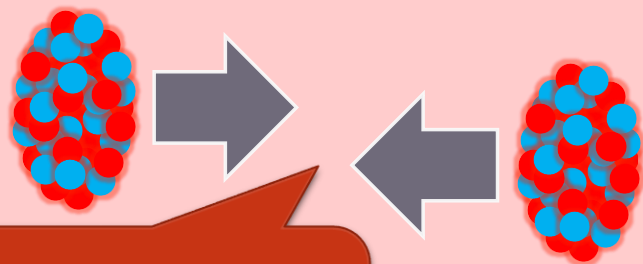
地上の実験で
宇宙の始まりを再現する

相対論的重イオン衝突実験

新粒子探索



初期宇宙の生成



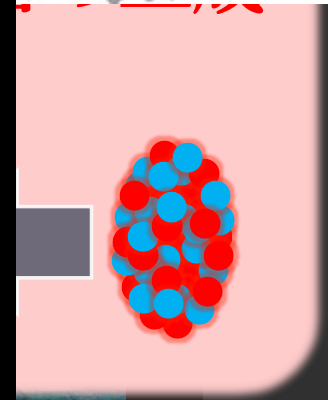
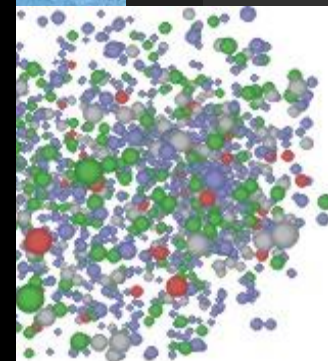
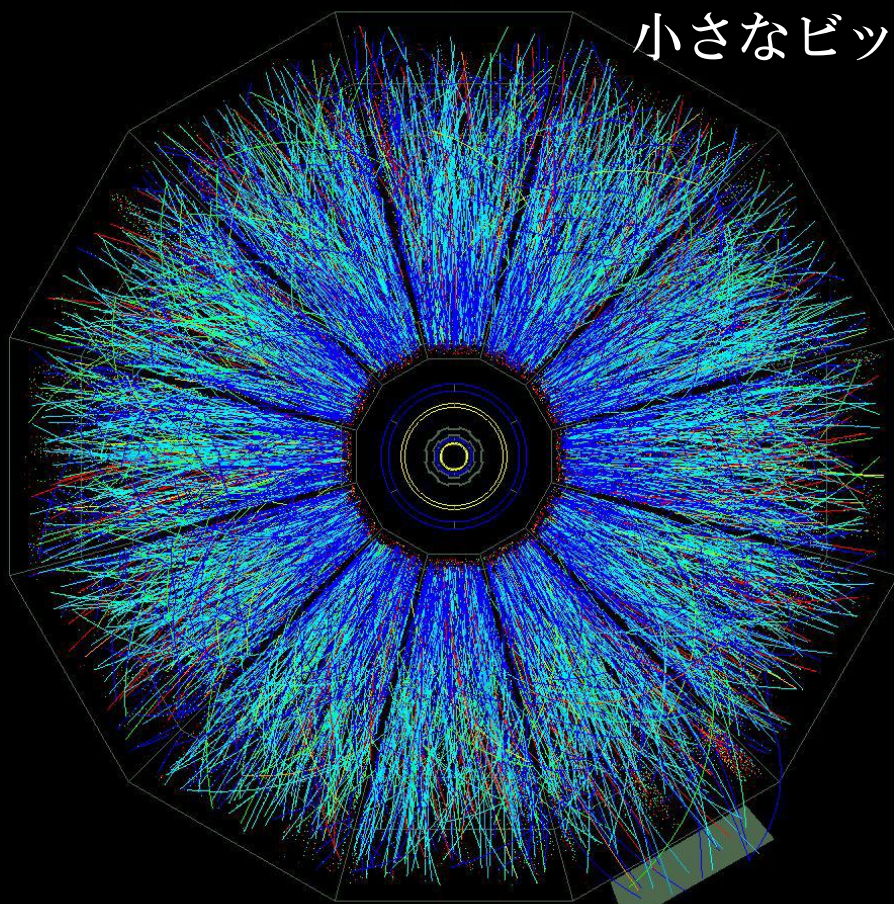
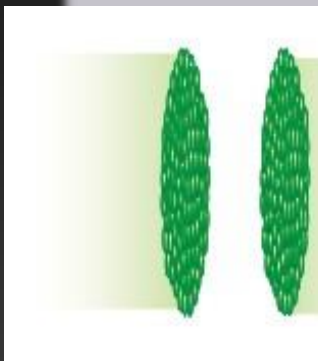
6兆度を超える
高温物質

LHC – Large Hadron Collider

相対論的重イオン衝突実験

新粒子

小さなビッグバン



LHC – Large Hadron Collider

高温物質



RHIC

アメリカ

2000年～

全長6km

光速の99.996%

約4兆度



LHC

スイス・フランス

2010年～

全長30km

光速の99.9999%

約8兆度

QGPの生成と観測

生成されたQGPは、
大きさ約 10^{-14} m、
寿命は約 10^{-22} 秒

解放されたクォークと
グルオンは、一瞬にして
ハドロン内部に再び
閉じ込められる。

ハドロン達は、
相互の散乱を経ながら
検出器に到達する。



QGP生成に要するエネルギー

問

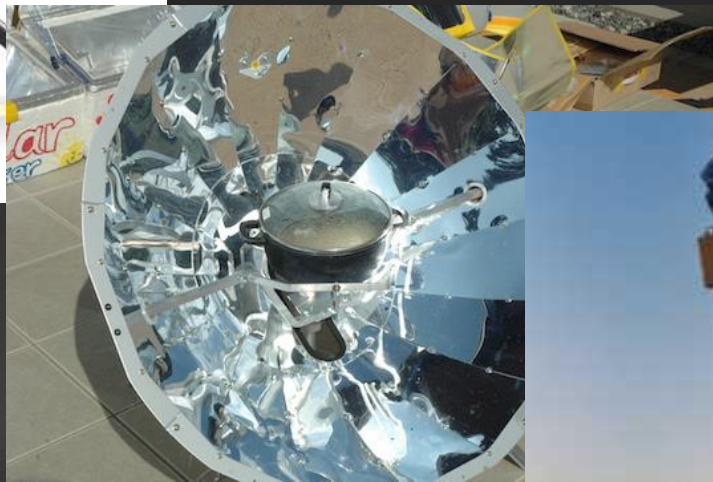
1cm³の物質を2兆度まで熱するのに
必要なエネルギーは？



太陽は膨大なエネルギーの源



虫眼鏡で発火



料理もできちゃう

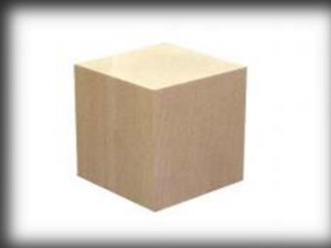
太陽熱発電



QGPの生成に必要なエネルギー

問

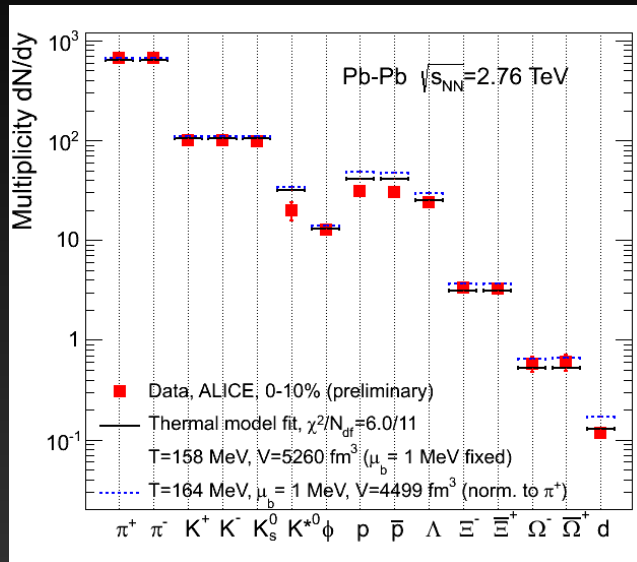
1cm³の物質を2兆度まで熱するのに
必要なエネルギーは？



答

地球に降り注ぐ全太陽エネルギー：6万年分
太陽が放出する全エネルギー：14分分

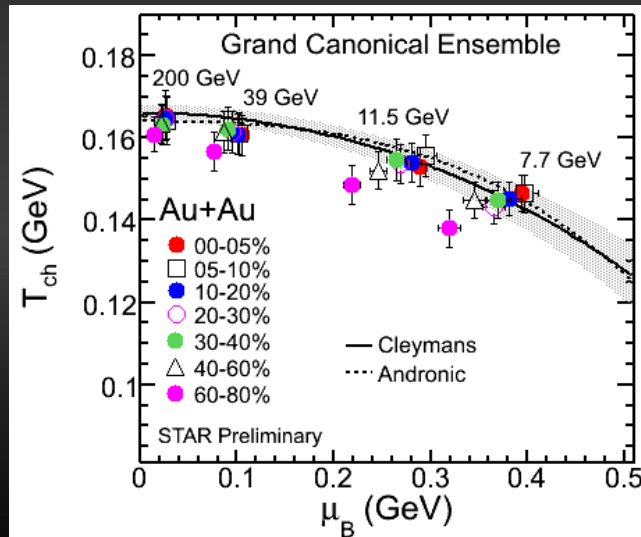
熱平衡化の証拠



各種ハドロンの粒子数は、
温度 T 、化学ポテンシャル μ の
熱平衡値で再現可能

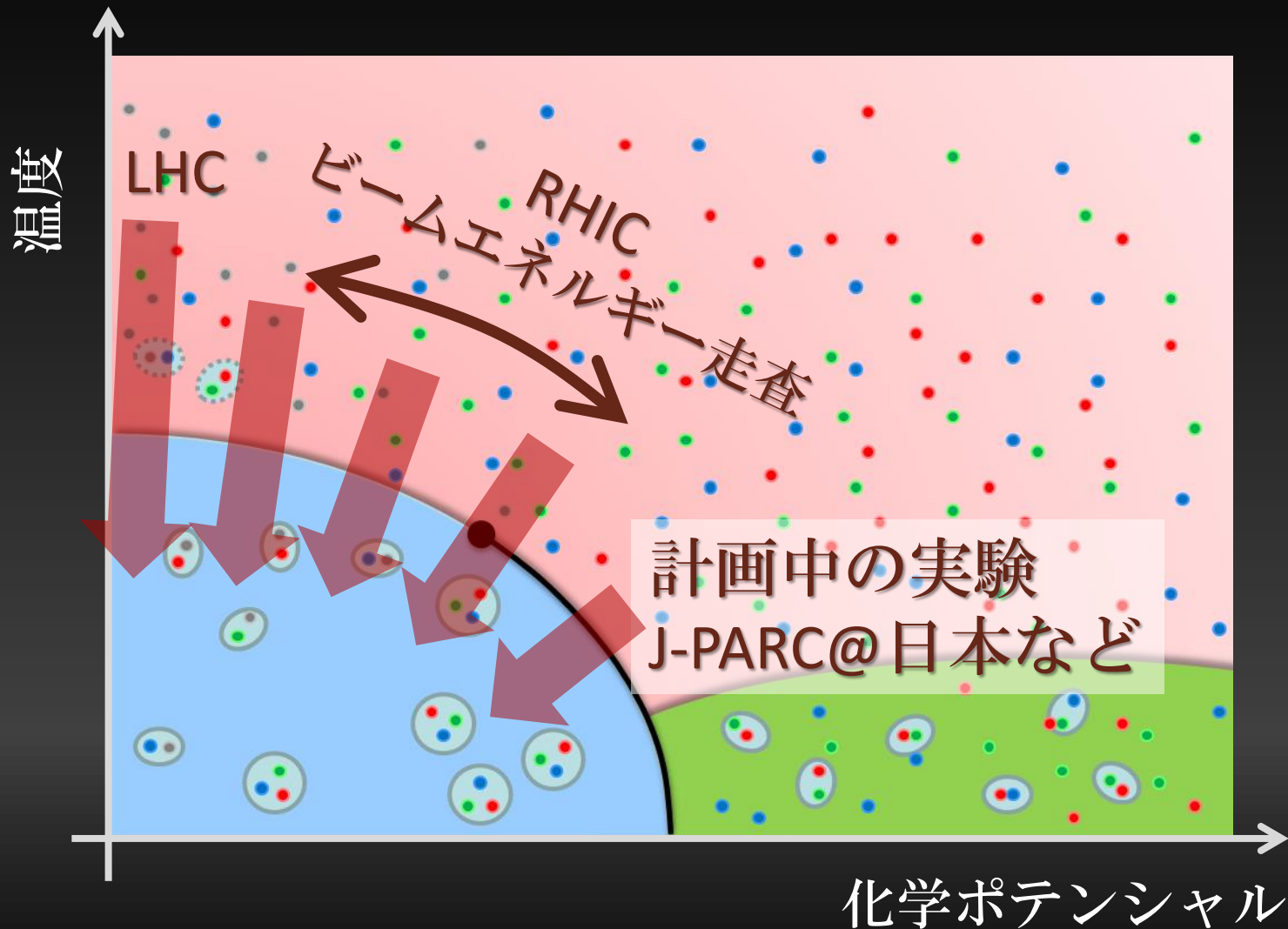


(化学)平衡状態の実現を示唆



実験的に決定した T, μ は、
衝突エネルギーに応じて
相図上を移動する

ビームエネルギー走査



LHC
2010~

RHIC-BES
Phase I
2010~2014
Phase II
2019~

J-PARC
2025~??

QCDの相構造は、実験的に探索可能！

J-PARC重イオン衝突計画



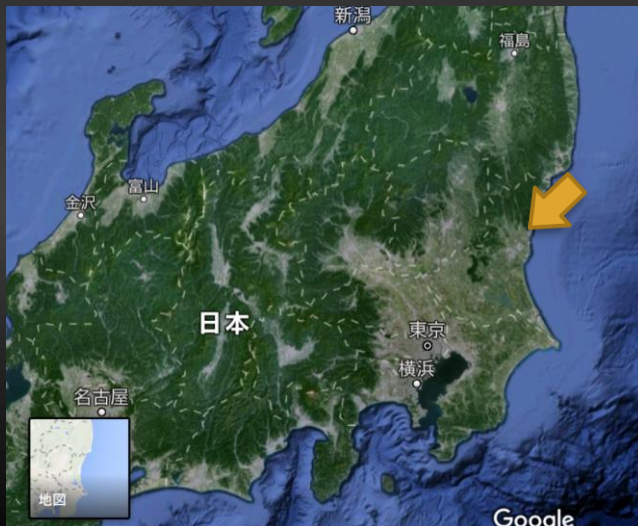
J-PARC:
陽子の加速装置



将来的に、重イオンの加速も
可能にする改造計画が胎動中



宇宙最高密度状態の生成と、超
高精度測定の実現が期待される。



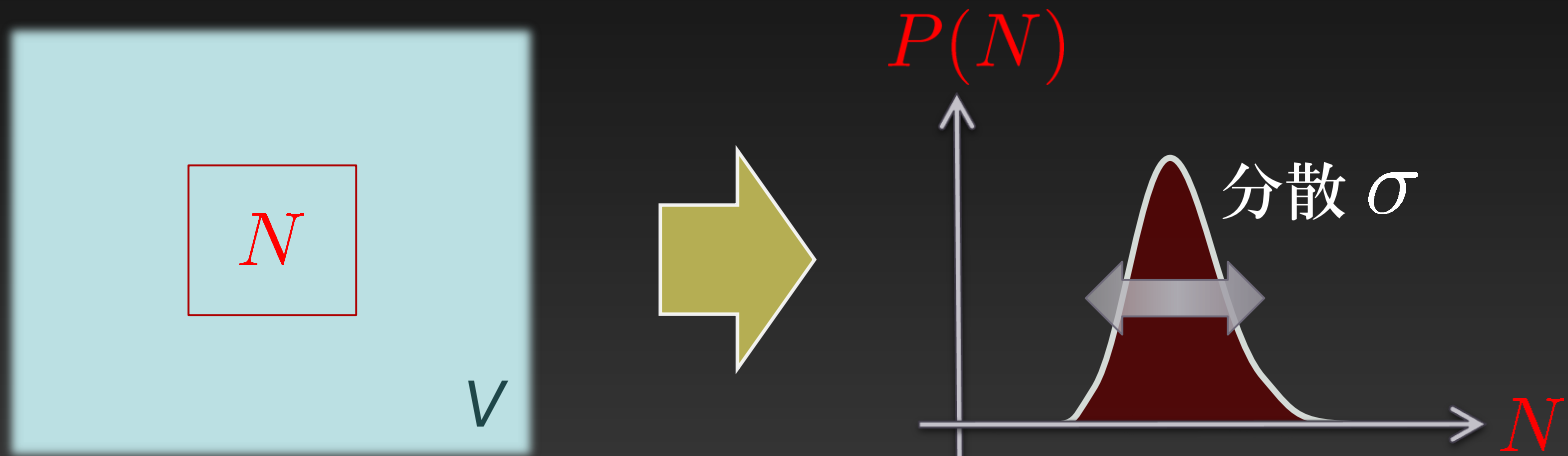
地上の実験で 宇宙の始まりを再現する

のちに、性質を詳しく調べる最新の方法

～観測量の「ゆらぎ」を利用したQGPの研究～

ゆらぎとは？

例：熱平衡状態下で、観測量はゆらいでいる



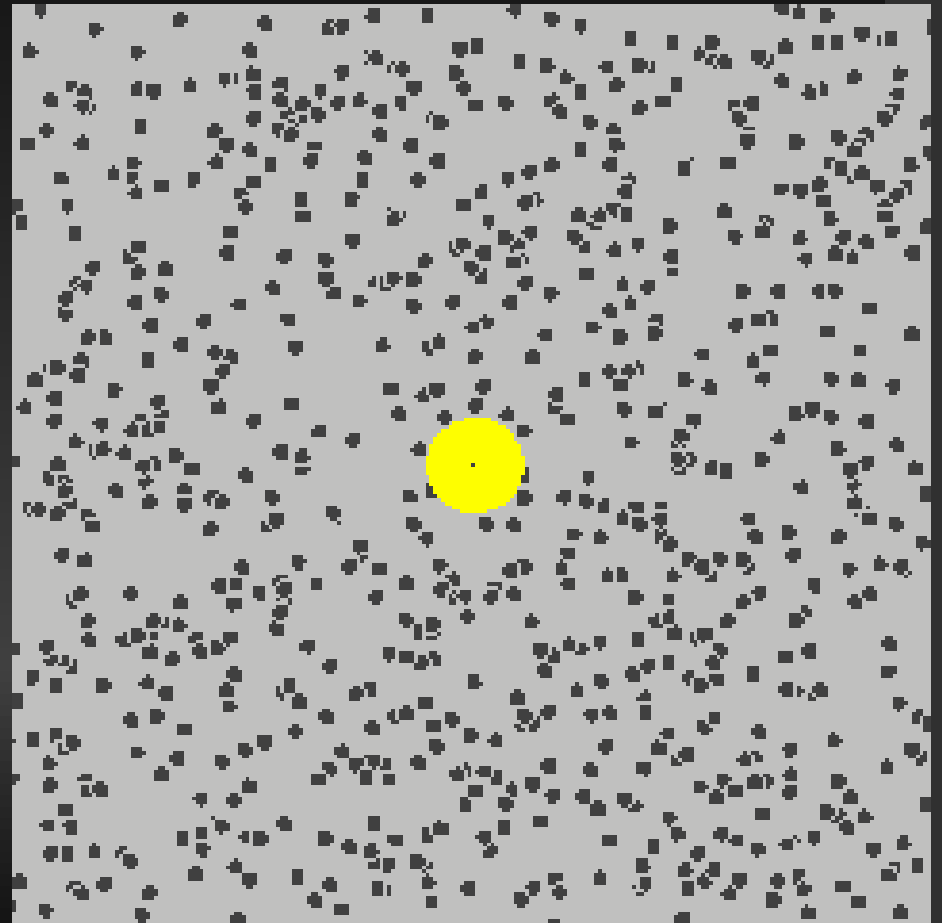
ゆらぎで見えてくる物理

- ① ミクロな自由度の同定
- ② 時間発展の履歴の記憶
- ③ 相転移の探索

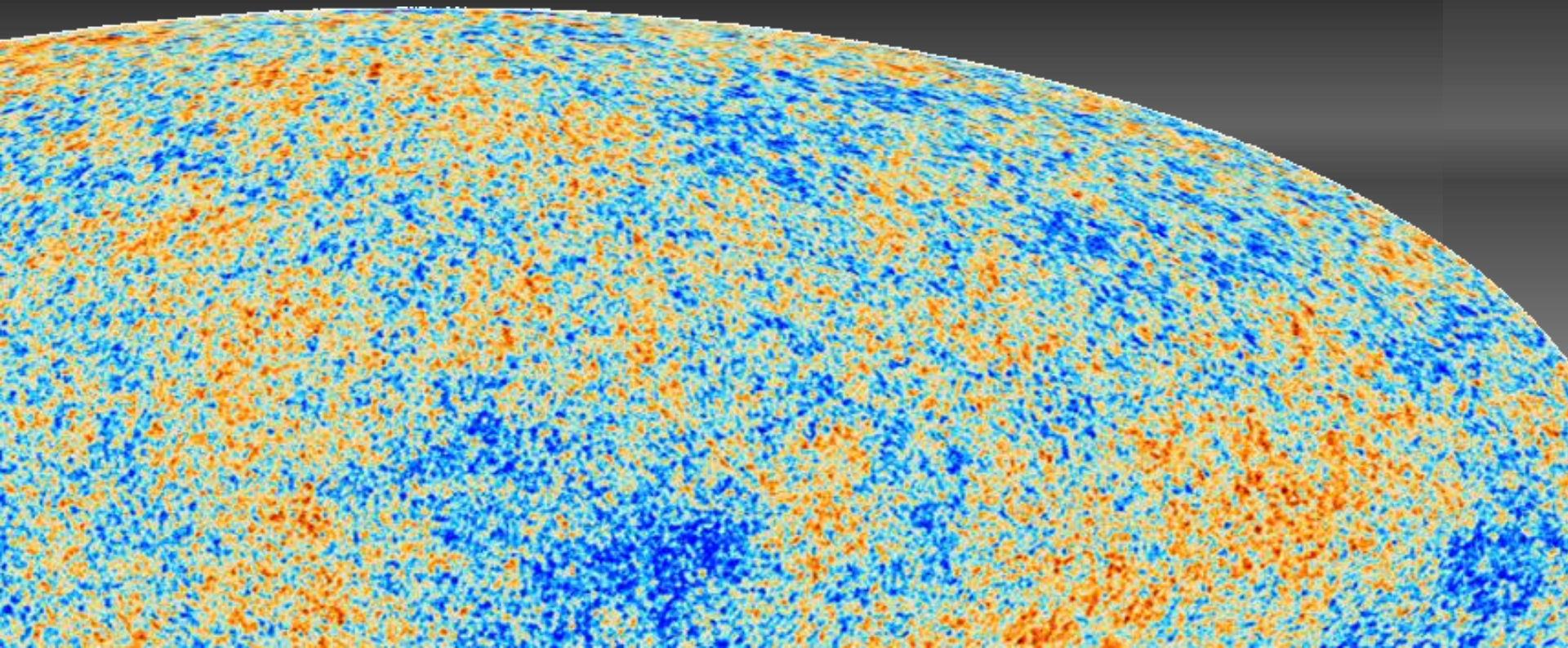
人類は、ブラウン粒子のゆらぎの観測を通して、
初めて元素（分子）の存在を確信した。



A. Einstein
1905



我々は、宇宙背景放射の
微細なゆらぎの奥に、
138億年前の宇宙誕生を見ることができる



一本の草も涼風宿りけり

even on one blade of grass the cool wind lives

小林一茶

Issa Kobayashi

1814

コインゲーム

硬貨を何枚か振り、
裏の出た硬貨をもらえる。

選択肢 1
五円玉 × 100枚



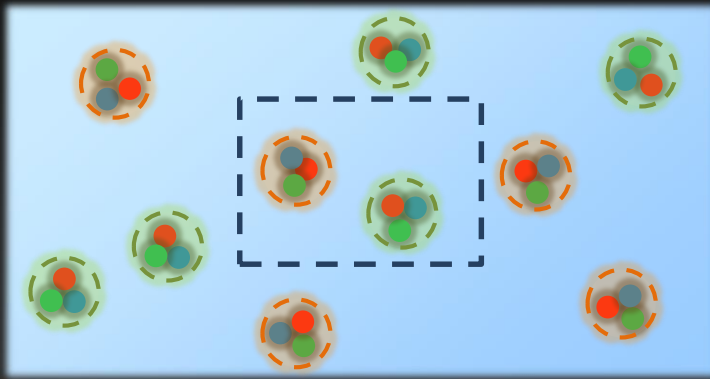
選択肢 2
十円玉 × 50枚



期待値は、共に250円
しかし、期待値の周りのゆらぎの大きさは異なる。

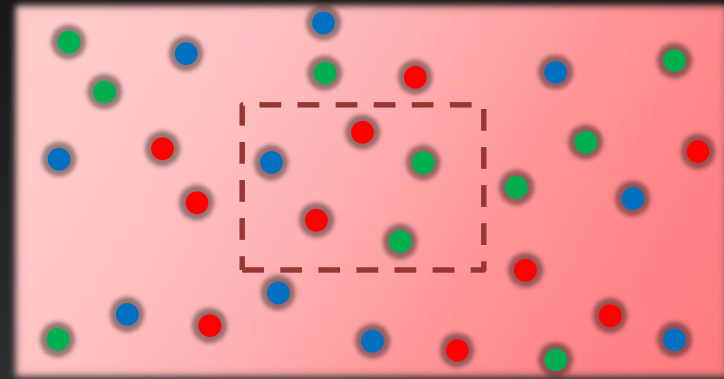
QGP状態の実現と、ゆらぎ

ハドロン相



$$|q_B| = 0, 1, |q_Q| = 0, 1$$

QGP



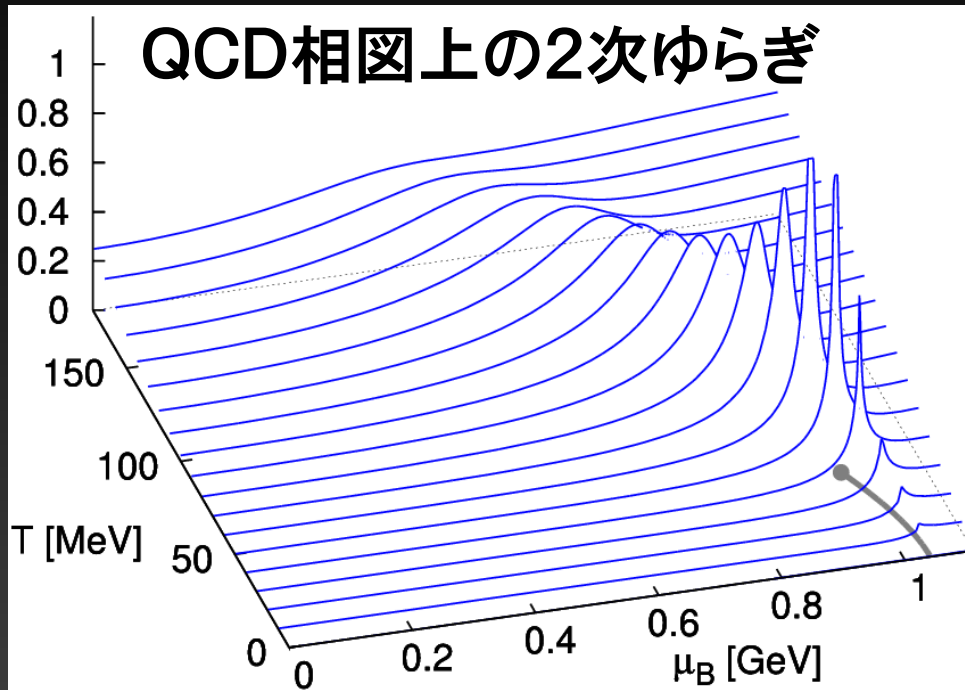
$$|q_B| = 1/3, |q_Q| = 1/3, 2/3$$

QGPでは、基本自由度が運ぶ電荷の量が減少する



ゆらぎが減少する

QCD臨界点探索の切り札

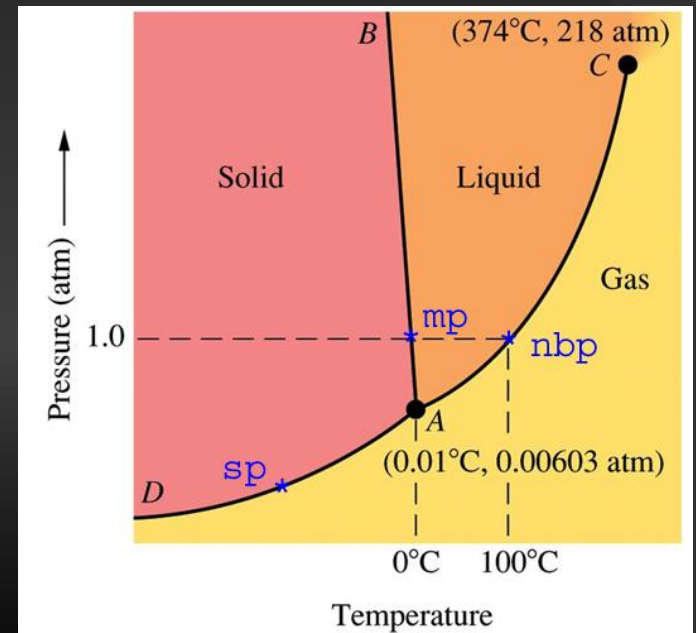


QCD臨界点があると、
ゆらぎが発散する

QCD臨界点は、
水の臨界点と同じ
動的普遍クラスに属する。

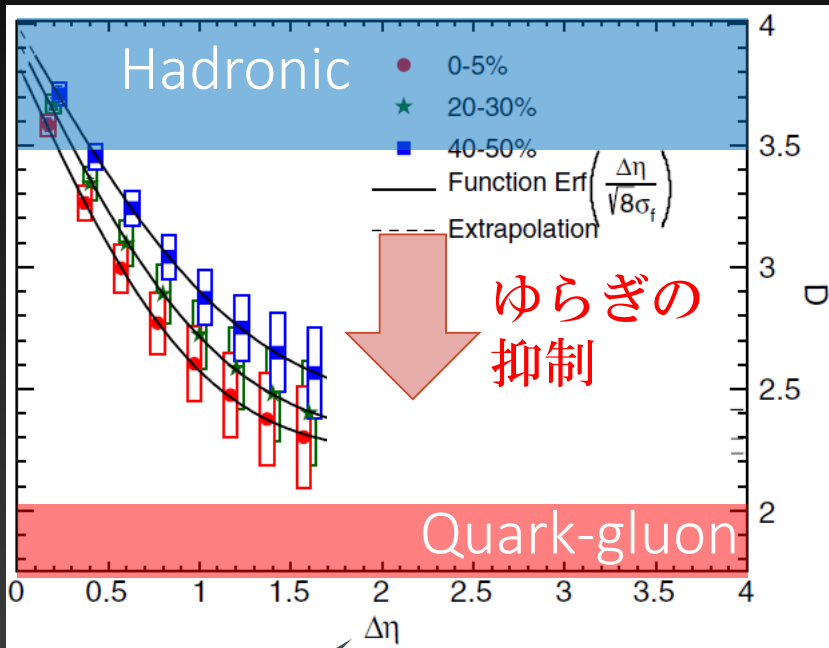
➡ ゆらぎの振る舞いが理解可

水の相図



電磁電荷ゆらぎ@LHC

ALICE Collaboration,
PRL 110, 152301 2013



$$\sim \frac{\langle \delta N_Q^2 \rangle}{V}$$

電磁電荷ゆらぎを
適切に規格化した量

$$\sim V$$

ゆらぎを観測する、
検出器の体積

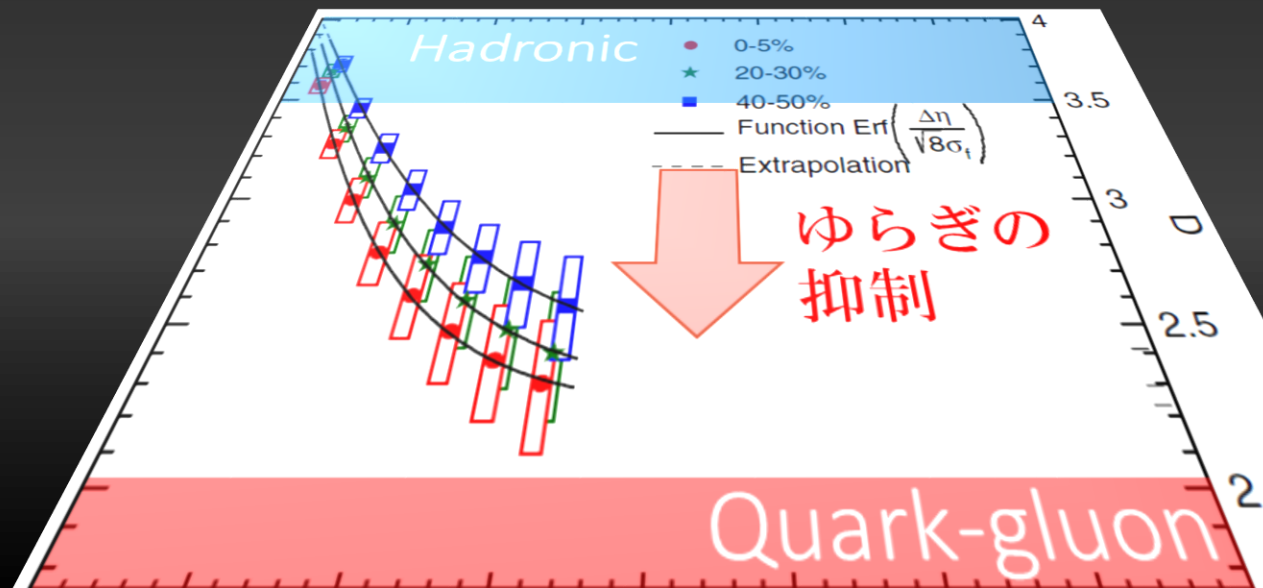
実験が観測したゆらぎの抑制は、
クォーク達が解放された痕跡。

一本の草も涼風宿りけり

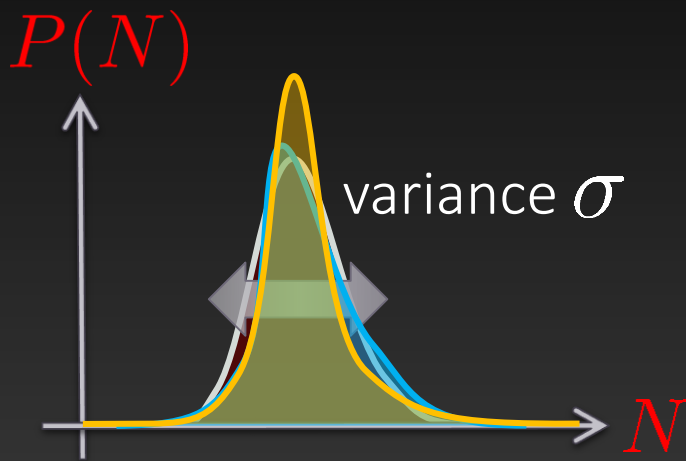
even on one blade of grass the cool wind lives

小林一茶

Issa Kobayashi



近年のトレンド: 非ガウスゆらぎ



ゆらぎがガウス型でないと
「高次ゆらぎ」が非ゼロとなる。

→

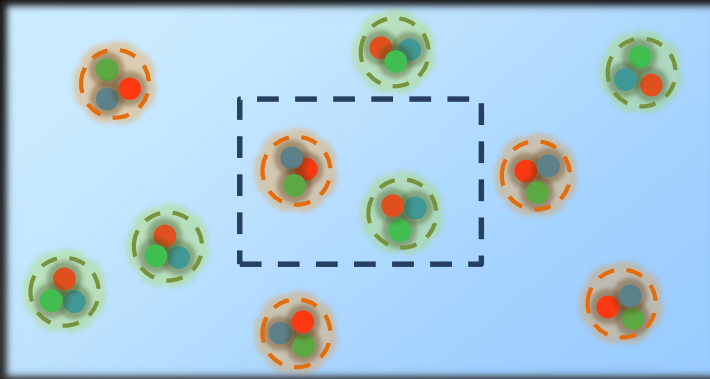
$$\left\{ \begin{array}{l} \langle \delta N^2 \rangle = V_{\chi_2} = \sigma^2 \\ S = \frac{\langle \delta N^3 \rangle}{\sigma^3} \\ \kappa = \frac{\langle \delta N^4 \rangle - 3\langle \delta N^2 \rangle^2}{\chi_2 \sigma^2} \end{array} \right.$$

ガウス

非ガウス

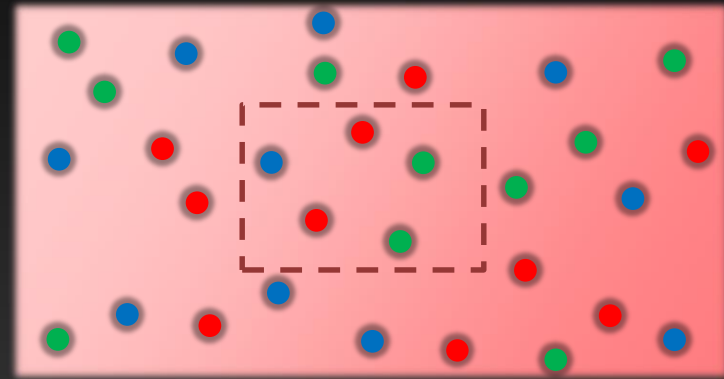
非ガウスゆらぎの特徴1

ハドロン相



$$|q_B| = 0, 1, |q_Q| = 0, 1$$

QGP



$$|q_B| = 1/3, |q_Q| = 1/3, 2/3$$

QGPでは、基本自由度が運ぶ電荷の量が減少する



非ガウスゆらぎは、ガウスゆらぎより
より顕著に減少する

非ガウスゆらぎの特徴2

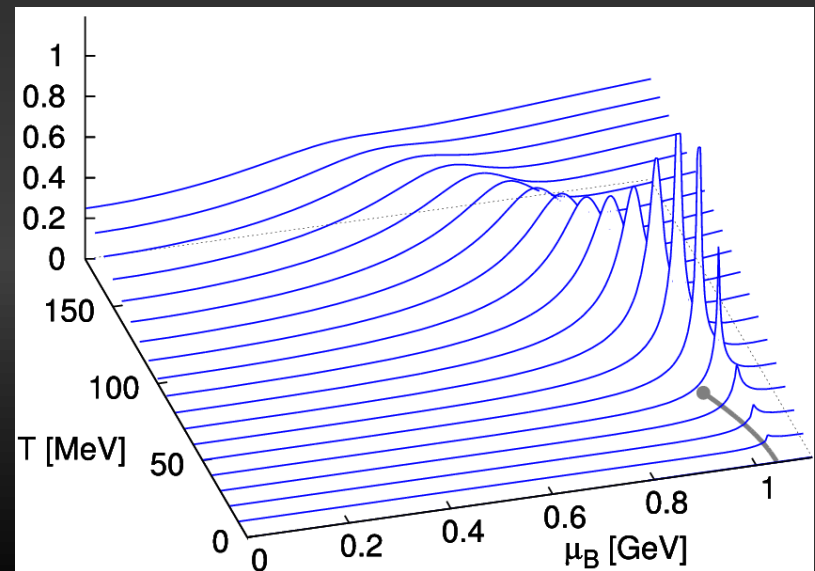
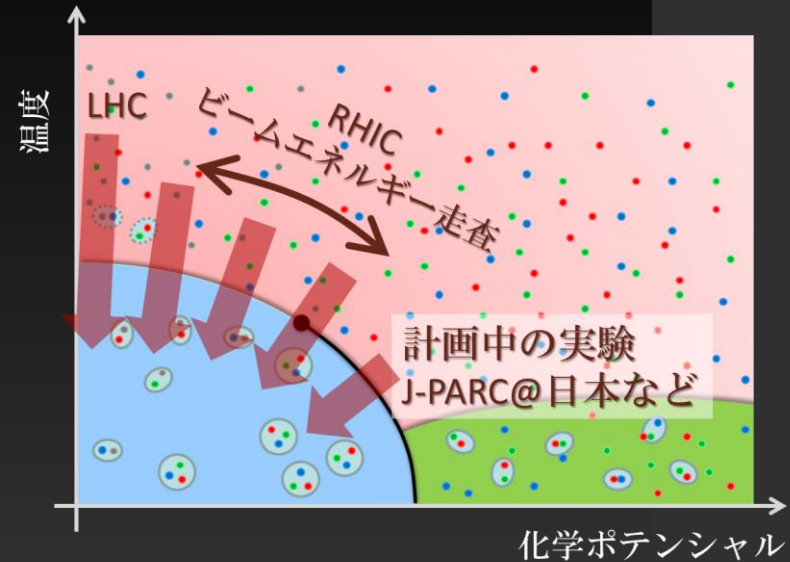
QCD臨界点探索の切り札

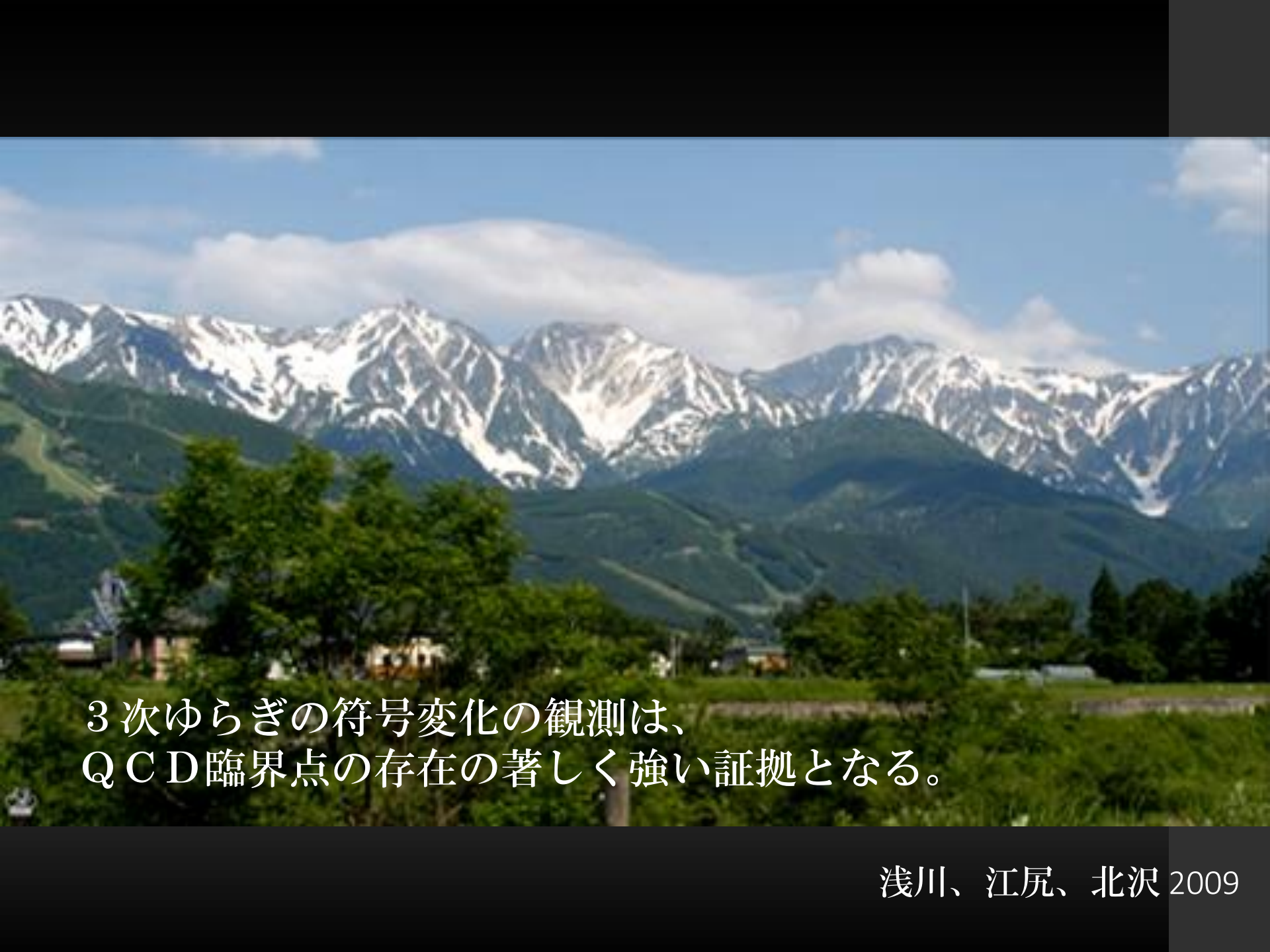
3次ゆらぎ

$$\langle \delta N^3 \rangle = T \frac{\partial \langle \delta N^2 \rangle}{\partial \mu}$$



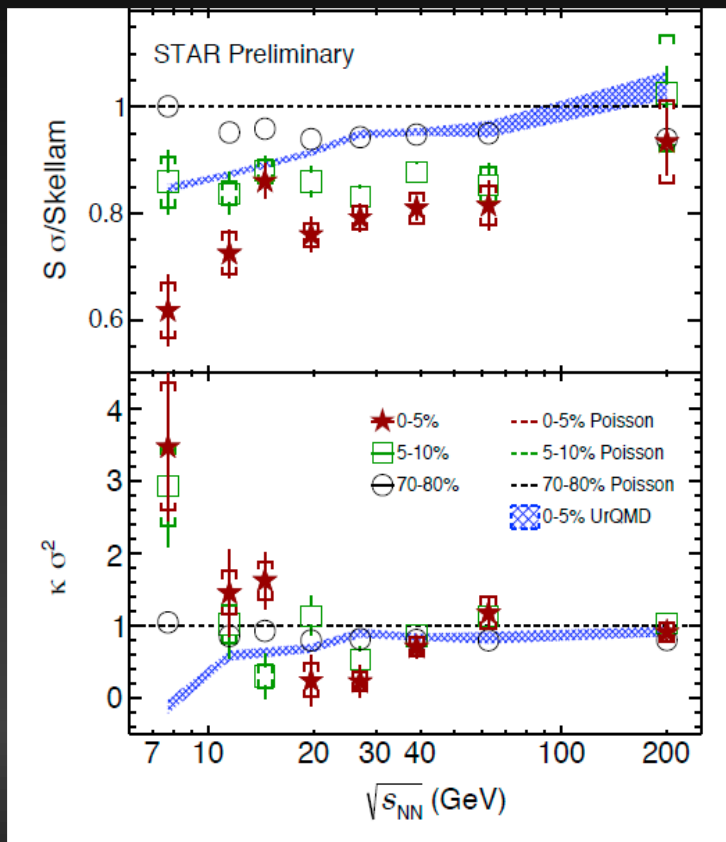
二次ゆらぎのピークで
符号を変える





3次ゆらぎの符号変化の観測は、
QCD臨界点の存在の著しく強い証拠となる。

現実には……



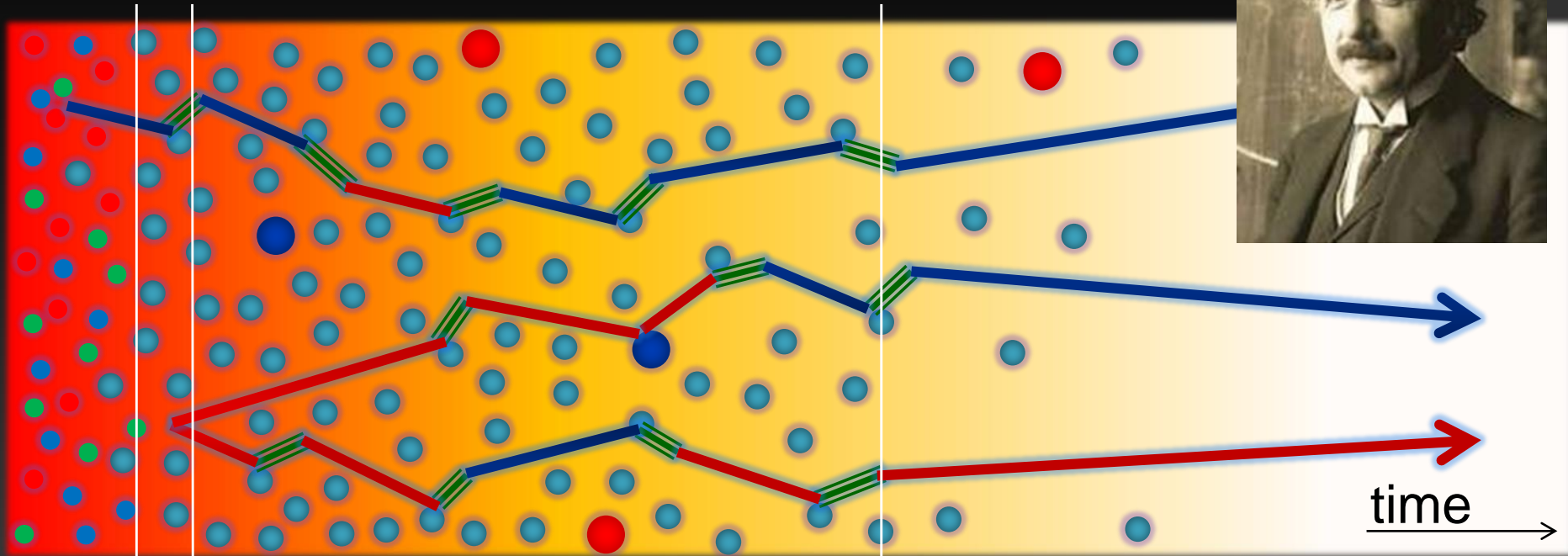
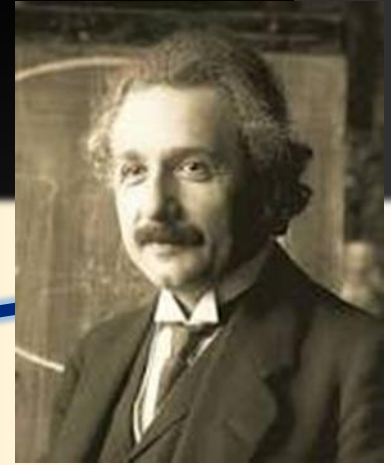
← 3次ゆらぎ

符号の変化は起こっていないが、減少は見られている

実験解析の問題点：
陽子数ゆらぎと核子数ゆらぎの混同

北沢、浅川、2012

ブラウン粒子モデル



hadronize

chem. f.o.

10 ~ 20fm

kinetic f.o.

time

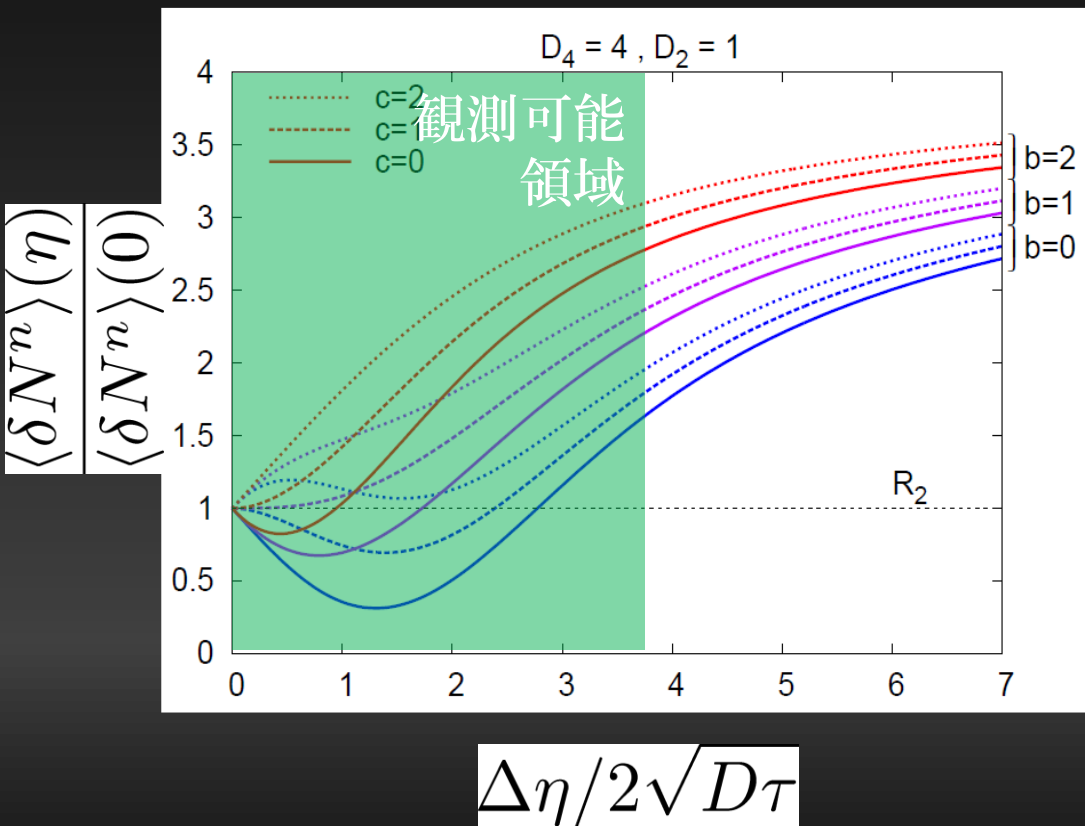
	p, \bar{p}		mesons
	n, \bar{n}		baryons
	$\Delta(1232)$		

NOTE:

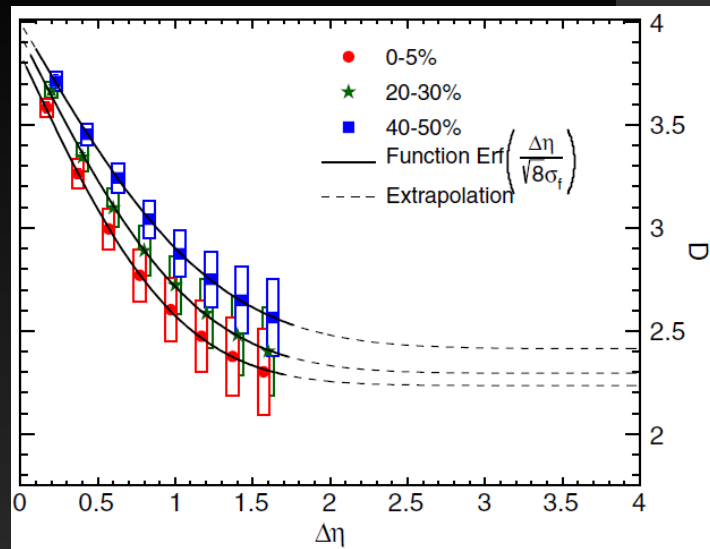
媒質中を彷徨う核子は、
あたかも
ブラウン粒子の
ようにふるまう。

予言

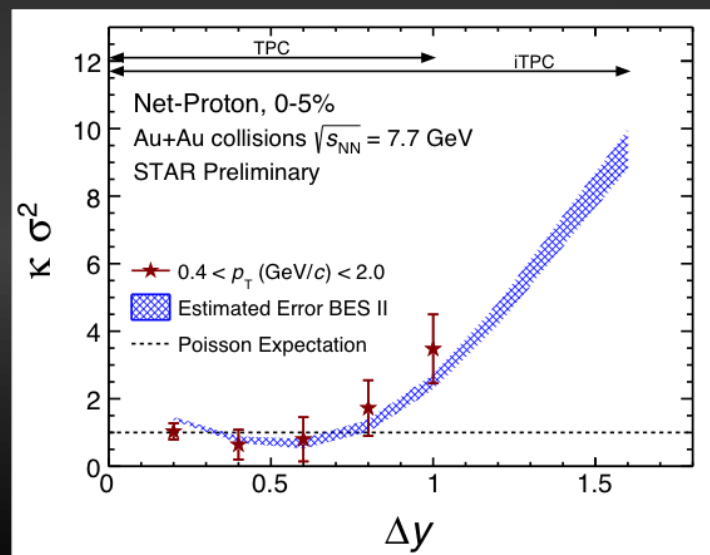
4次ゆらぎの体積依存性



2次ゆらぎ@LHC



4次ゆらぎ@RHIC



まとめ

- 宇宙はビッグバンから開闢し、その直後の宇宙はクォーク・グルオン・プラズマ状態だった。
- 我々は現在、地上の実験でこの初期宇宙の状態を作り出すことができる。
- 「ゆらぎ」を用いて実験結果をより深く理解する試みが現在絶賛進行中。

最後に……

ひとたび経験の圏域を超出すれば、
経験によって反駁される心配はなくなる。

イマヌエル・カント

1781

『純粹理性批判』

(中山元訳)

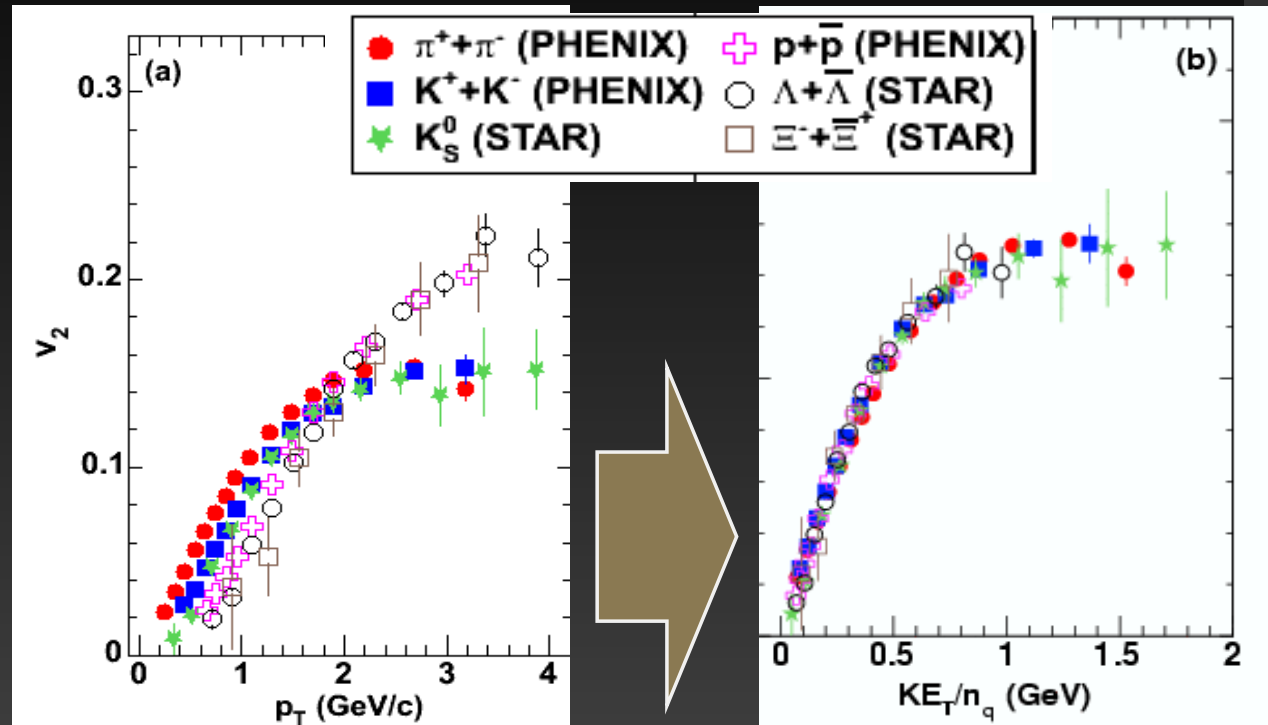
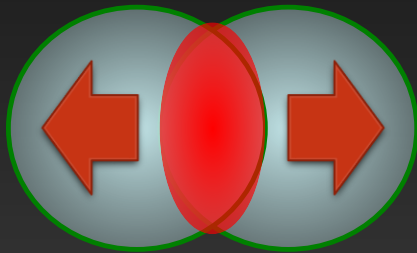


経験の圏域を超出したいと思うのは
人間の自然な感覚であり、
理論物理学はその一形態に過ぎない。

科学とは、
経験の圏域を超出した思索を、
経験の反駁によって検証する営みではなかろうか。

クォークの「流れ」の観測

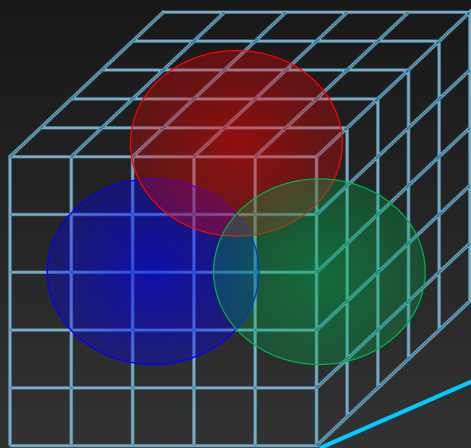
楕円フロー v_2



フローの強さと運動量を
クォーク数で割算
→流れがぴったり重なる！

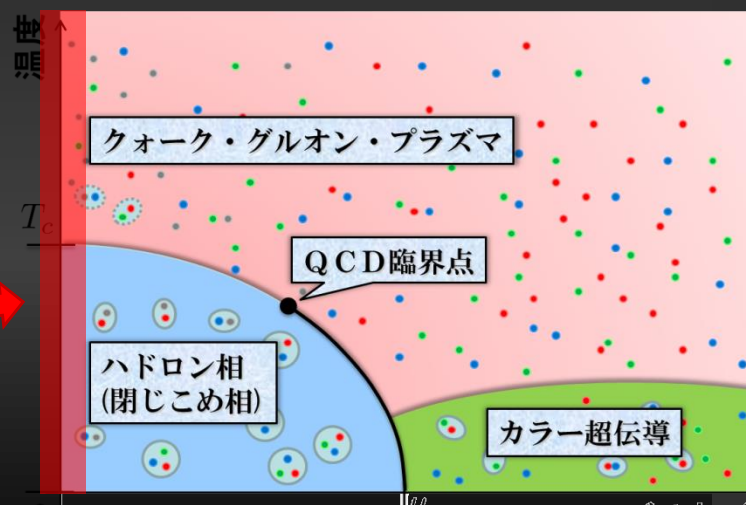
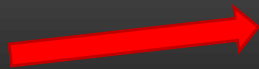
格子QCD数値解析

時空を格子化し、数値解析する



Bluegene
@KEK

注意：
現在の数値解析技術では、
 $\mu=0$ の解析しかできない
「符号問題」



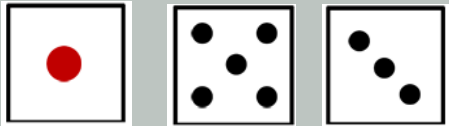
試行回数と、ゆらぎ



試行回数の増加に伴い、
平均値のゆらぎは減少する

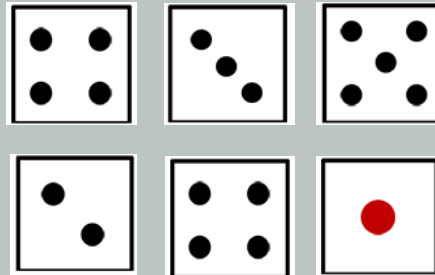
A

3回の試行
の平均値

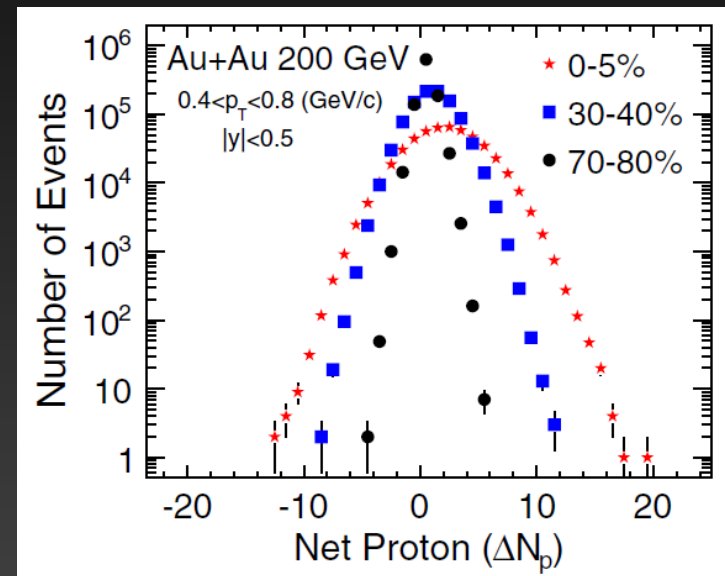
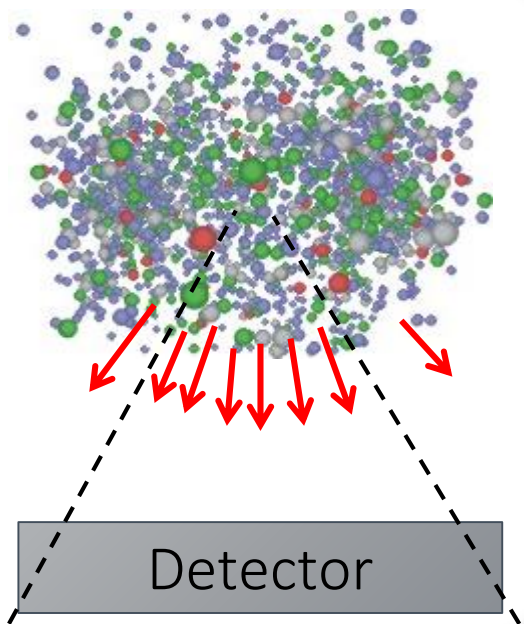


B

6回の試行
の平均値



重イオン衝突実験でのゆらぎ測定 「イベント毎解析」



STAR Collaboration, PRL 2010