

クォークの海を、彷徨う。

「ゆらぎ」を通して覗く、クォーク・グルオン・プラズマの世界

北沢 正清

原子核理論研究室

DRIFTING IN THE
QUARK-GLUON PLASMA

Q
物質の温度を上げていくと、
何が起こる？

DRIFTING IN THE
QUARK-GLUON PLASMA

高温の状態

きょうも猛暑
各地では…

最高気温 36.8℃
名古屋

最高気温	
38.5	岐阜
37.3	京都
37.2	山口
36.3	大阪
36.0	甲府
35.2	福島

(°C)

水蒸気 100°C

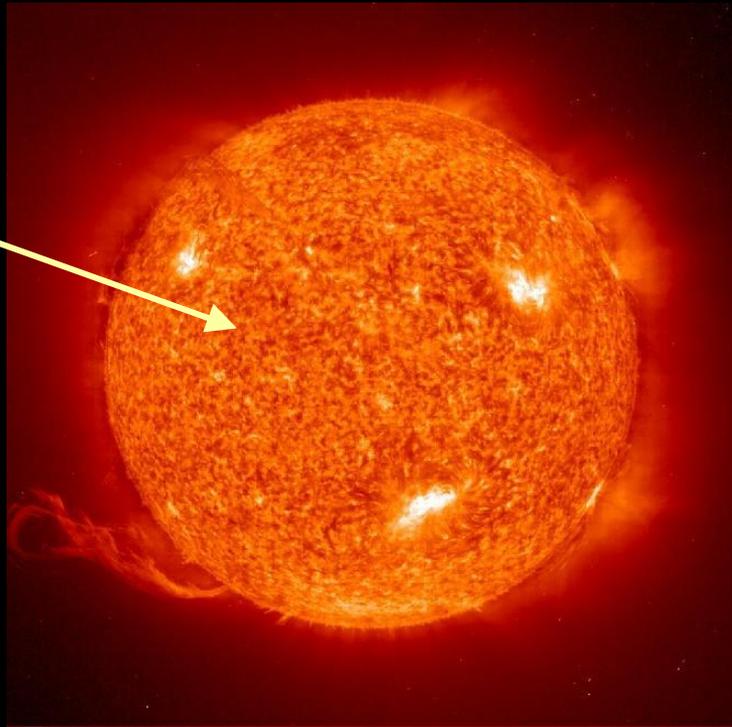
溶解した鉄 1500°C



DRIFTING IN THE
QUARK-GLUON PL

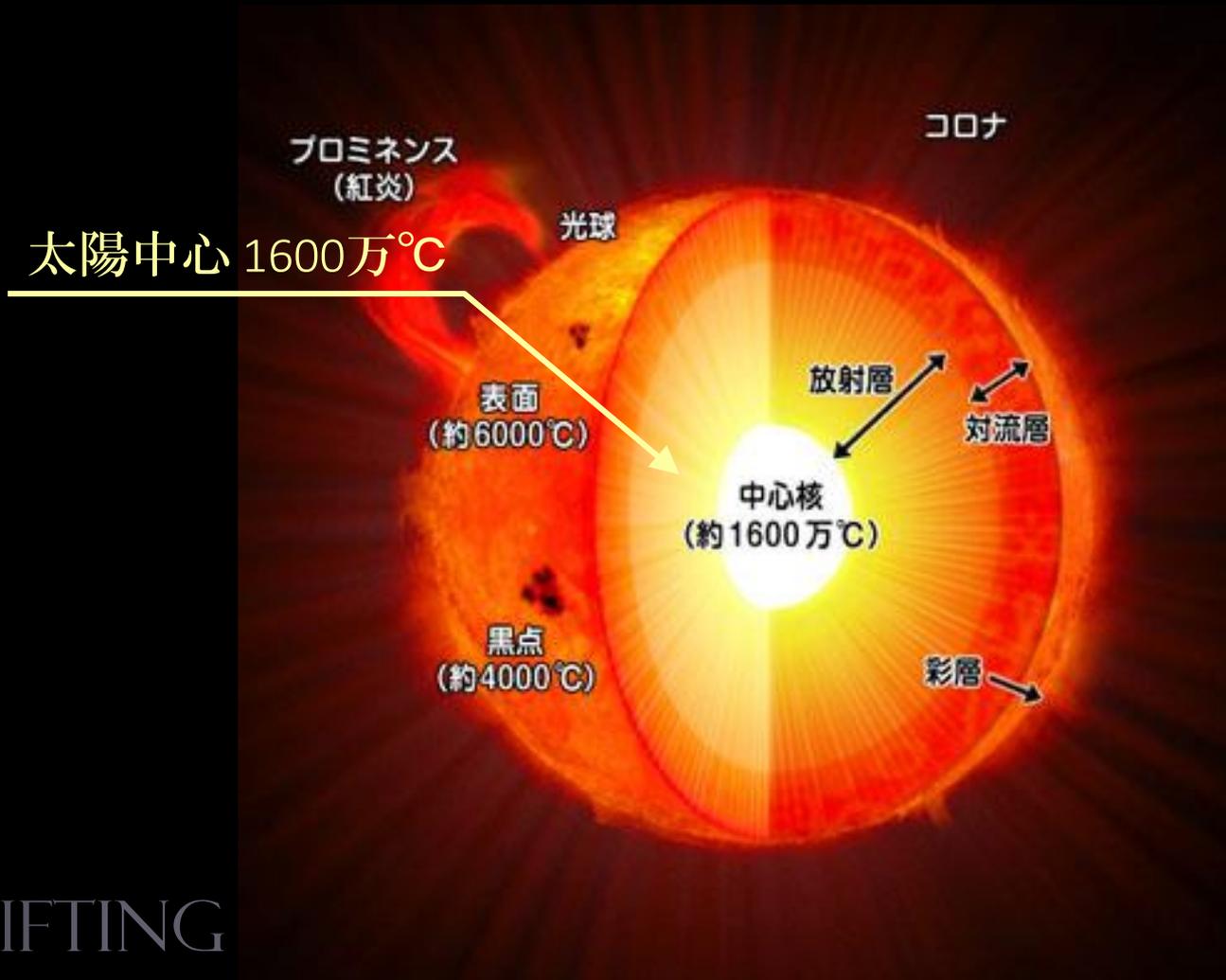
高温の状態2

太陽表面 6000°C



DRIFTING IN THE
QUARK-GLUON PLASMA

高温の状態2



DRIFTING
QUARK-GLUON PLASMA

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

DRIFT TUBE
QUARK-GLUON PLASMA

今日の話

2 兆度の物質を作り、 その性質を探る

話のポイント

- ① どんな物質ができるの？
- ② どうやって生成するの？
- ③ どうやって観測するの？

DRIFTING

QUARK-GLUON PLASMA

①どんな物質ができるの？

A

クォーク・グルオン・プラズマ (QGP)
と呼ばれる物質状態が実現します。

DRIFTING IN THE
QUARK-GLUON PLASMA

温度と相転移



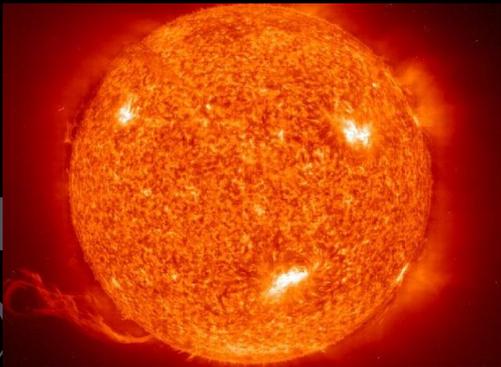
100°C

水が、液体から気体に相転移



約1500°C

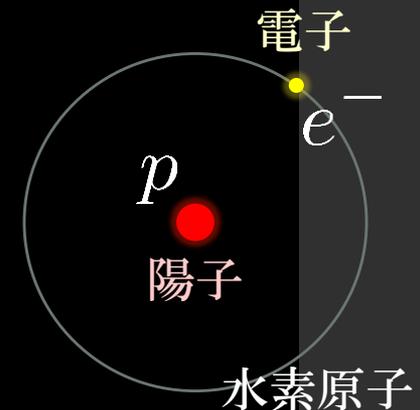
鉄が、固体から液体に相転移

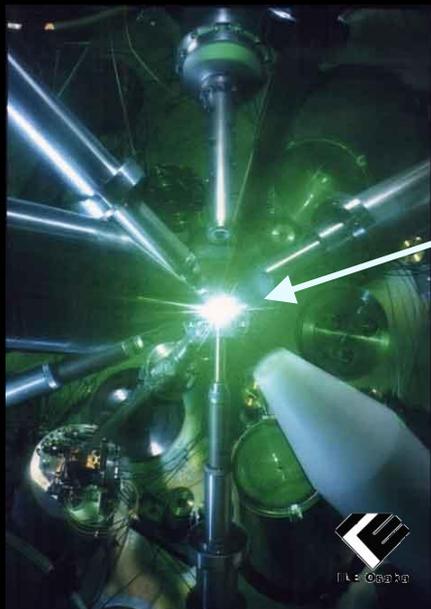


約4000°C～

水素原子の電離が始まる

水素原子 → 陽子 + 電子

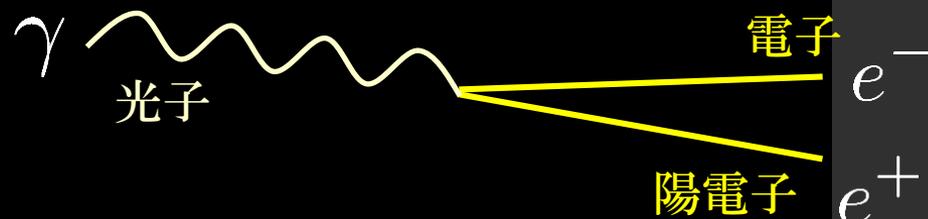




核融合プラズマ 1億度以上

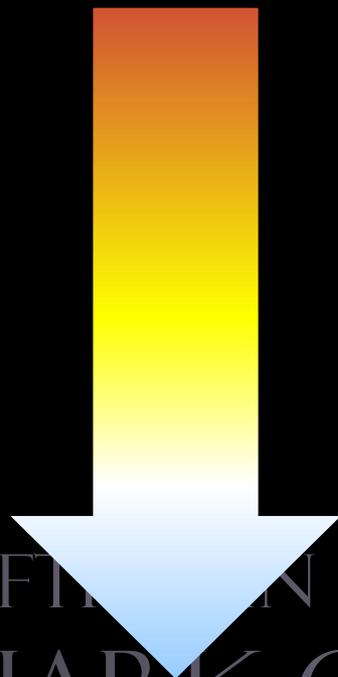
約50億°C~

電子・陽電子の対生成・対消滅が始まる



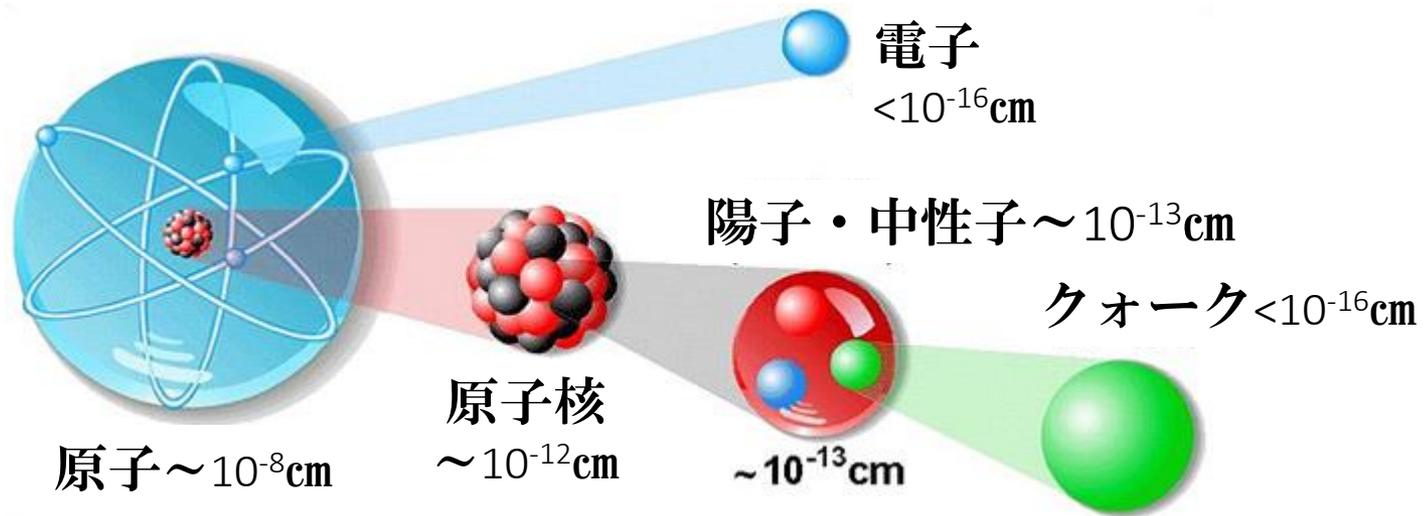
約2兆°C~

陽子・中性子（バリオン）や、
メソンが溶け始める



DRIFTING IN THE
QUARK-GLUON PLASMA

ものは何からできている？



DRIFTING IN THE
QUARK-GLUON PLASMA

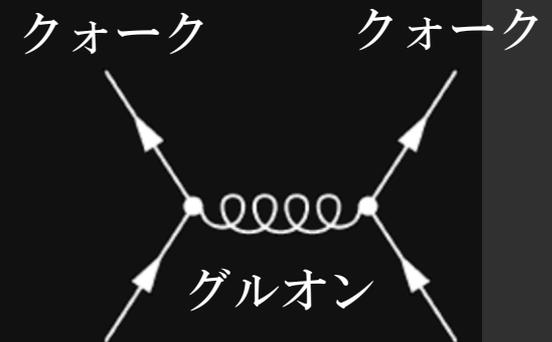
量子色力学

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



参考：量子電磁気学

- 電子：物質場、電磁的電荷
- 光子：荷電粒子間の力を媒介



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...



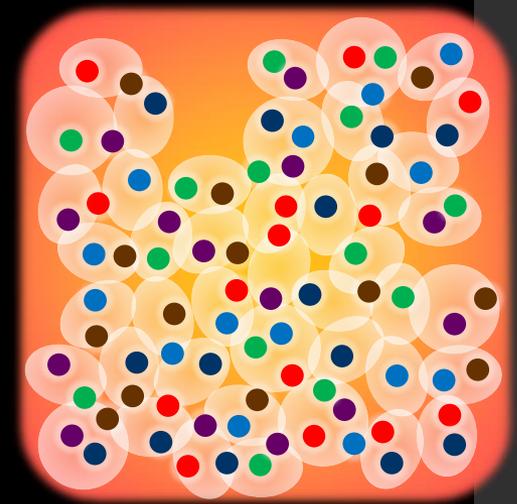
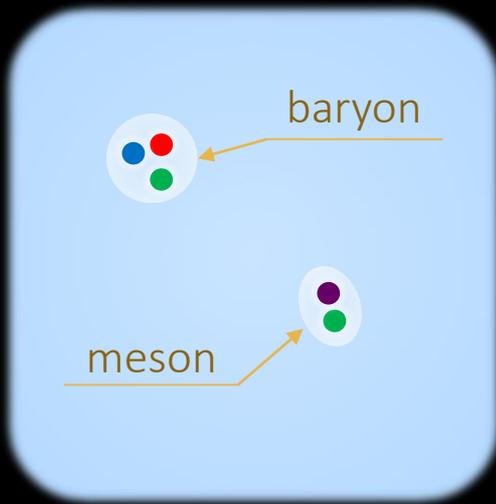
クォーク・反クォーク対を生成し、核子とメソンになる

我々の身の回りの物理の基本自由度は
ハドロン（バリオン・メソン）である。

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

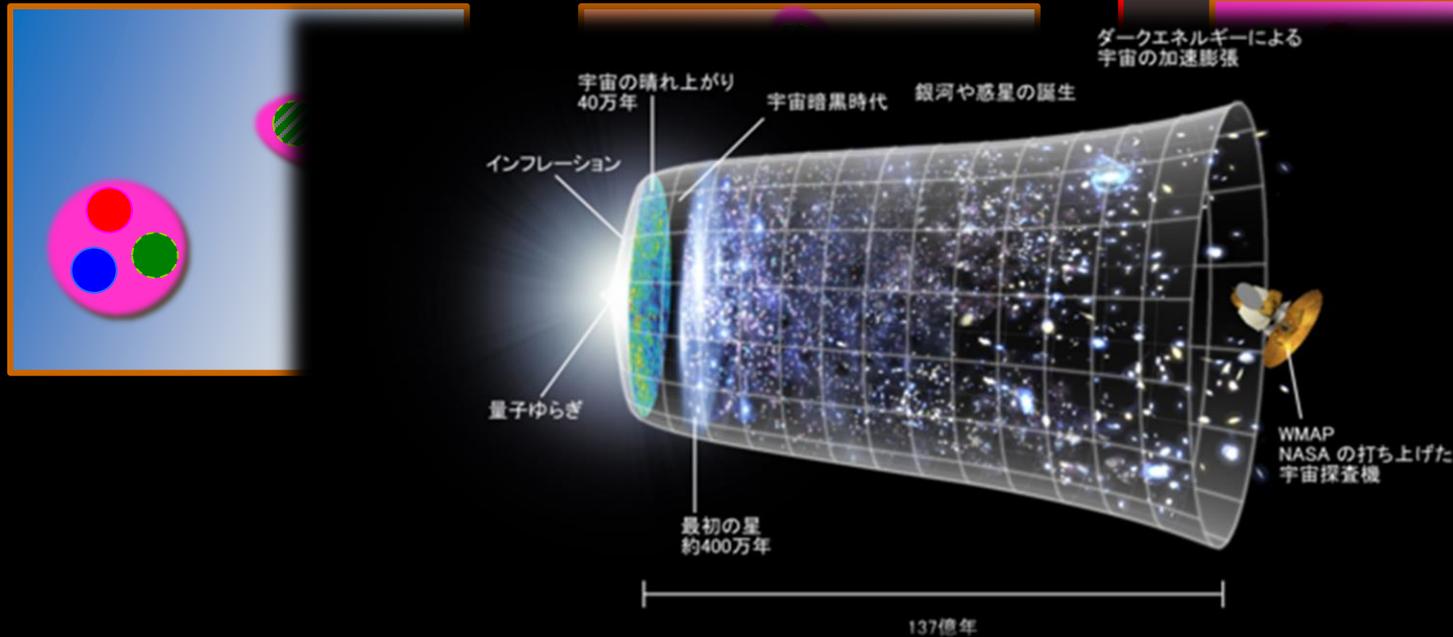
初期宇宙



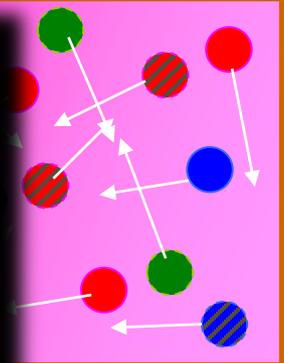
DRIFTING IN THE
QUARK-GLUON PLASMA

クォーク・グルオン・プラズマ (QGP)

物質の温度を上昇させていくと...



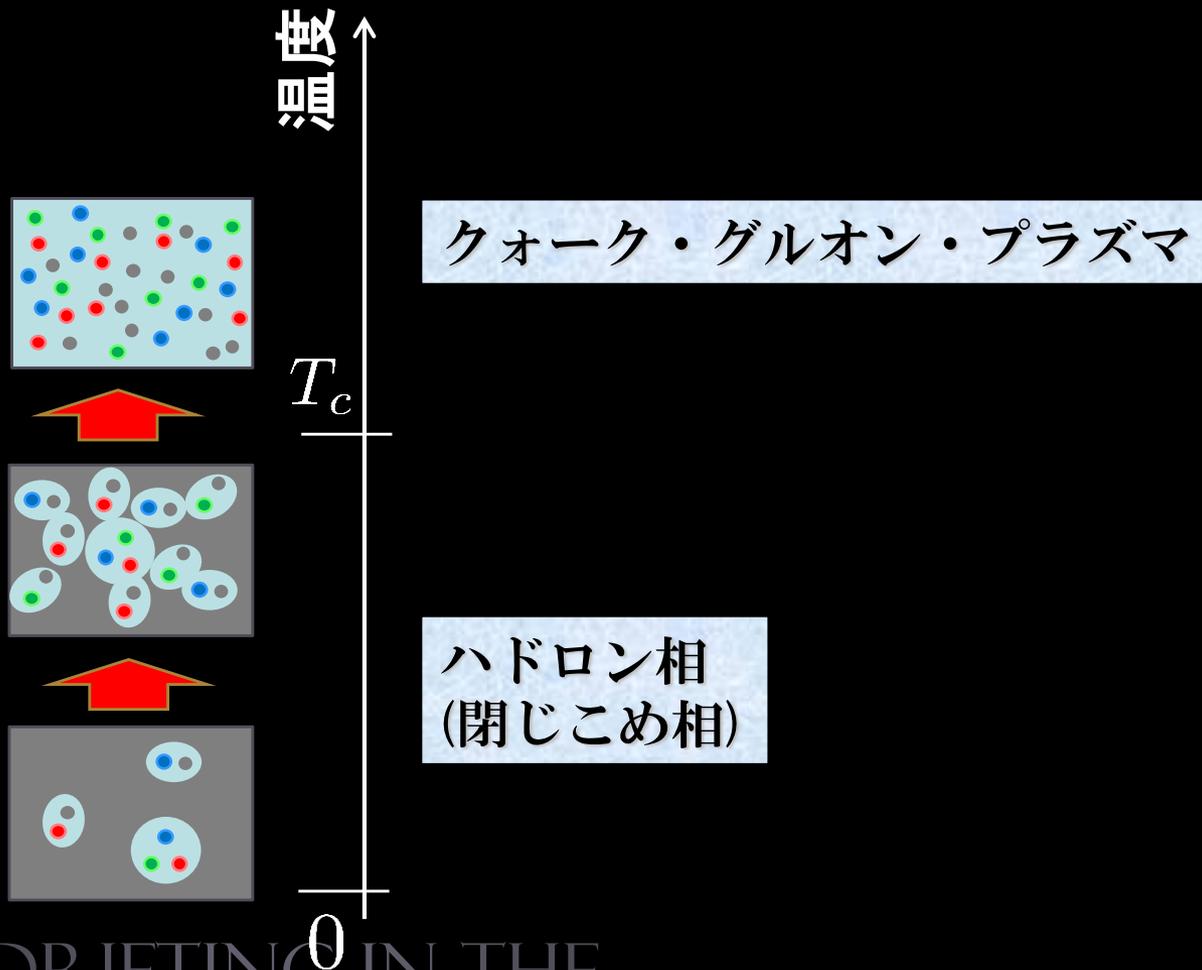
約2兆度に達すると



自由に飛び
実現する！

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

有限温度・密度QCD

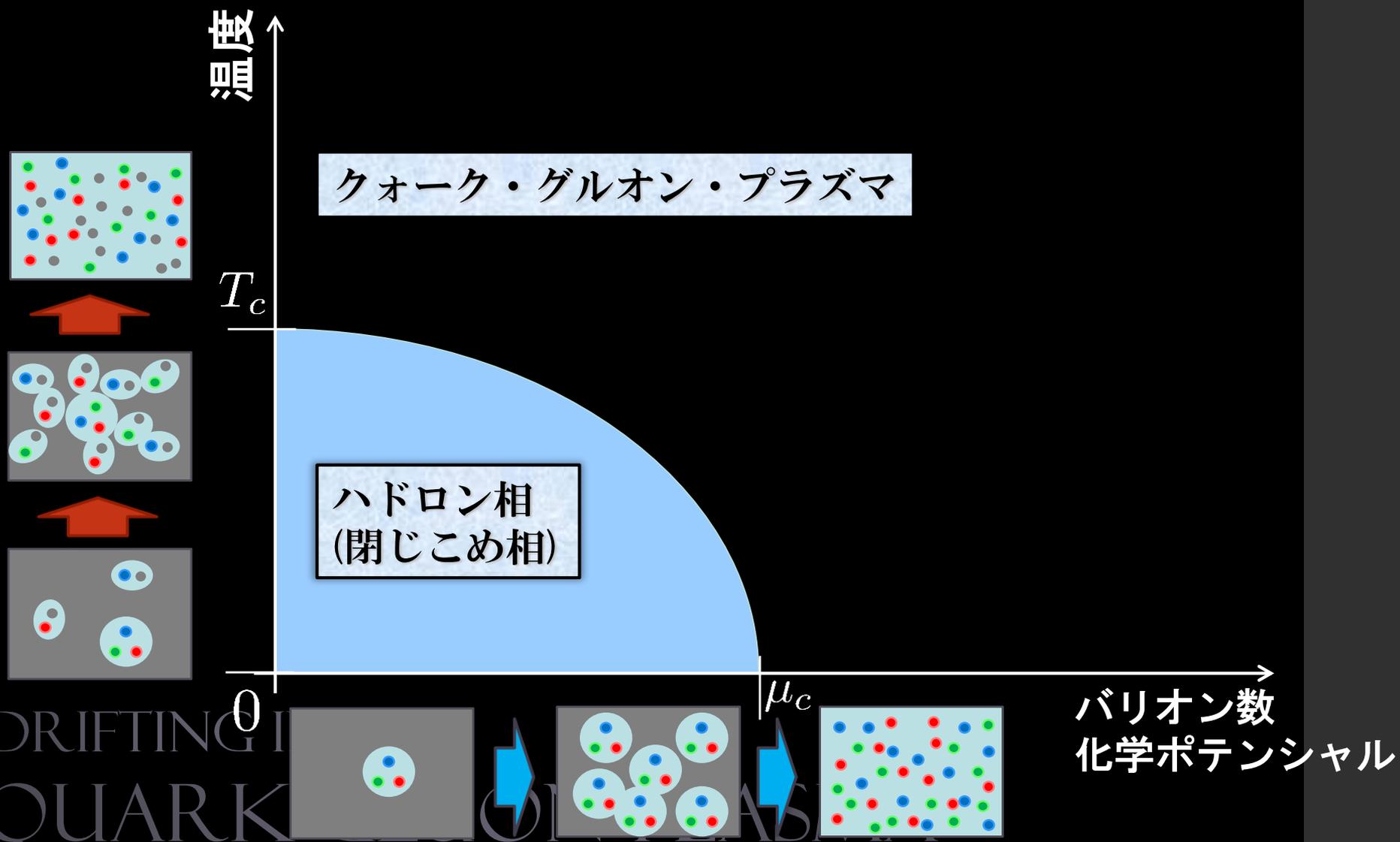


クォーク・グルオン・プラズマ

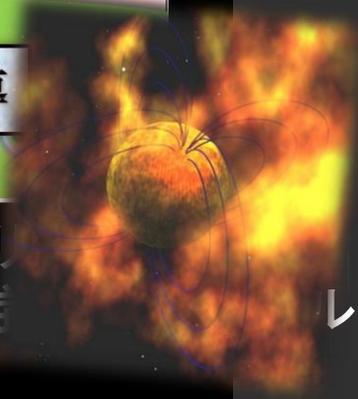
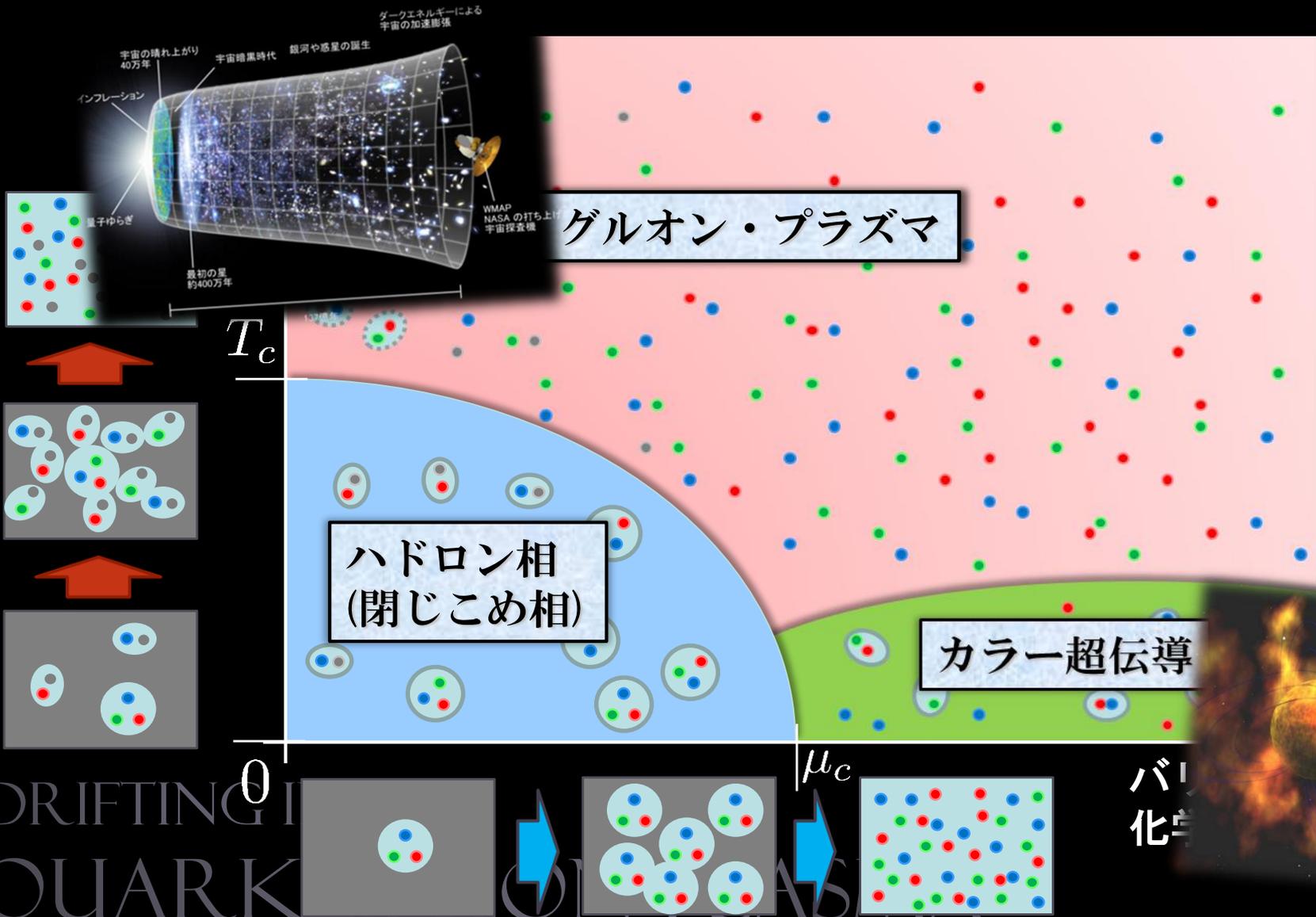
ハドロン相
(閉じこめ相)

DRIFTING IN THE
QUARK-GLUON PLASMA

有限温度・密度QCD



有限温度・密度QCD



DRIFTING
QUARK

ON

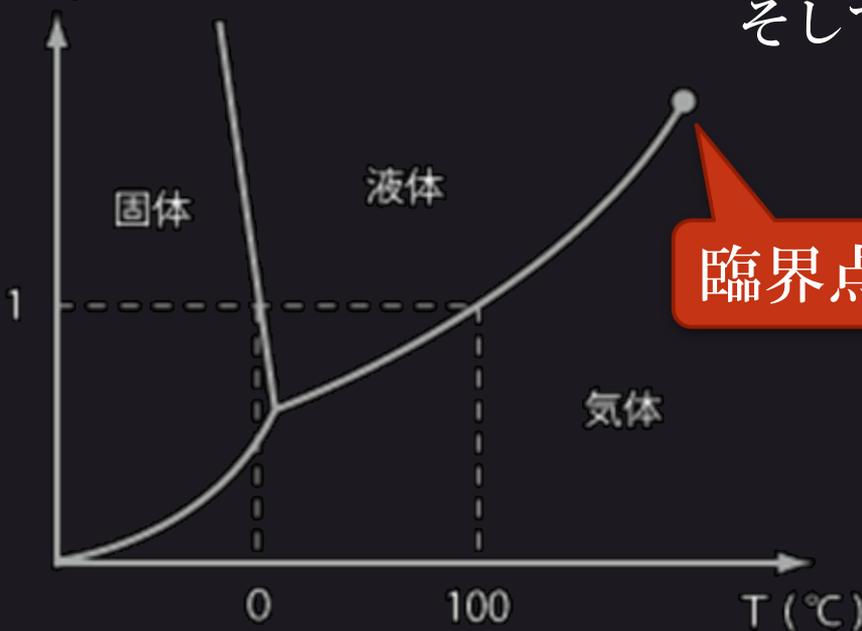
バリ
化学

レ

水の相図

圧力

P (atm)



超臨界状態

そこは、液体でもなく、気体でもない。
そして、液体でもあり、気体でもある。

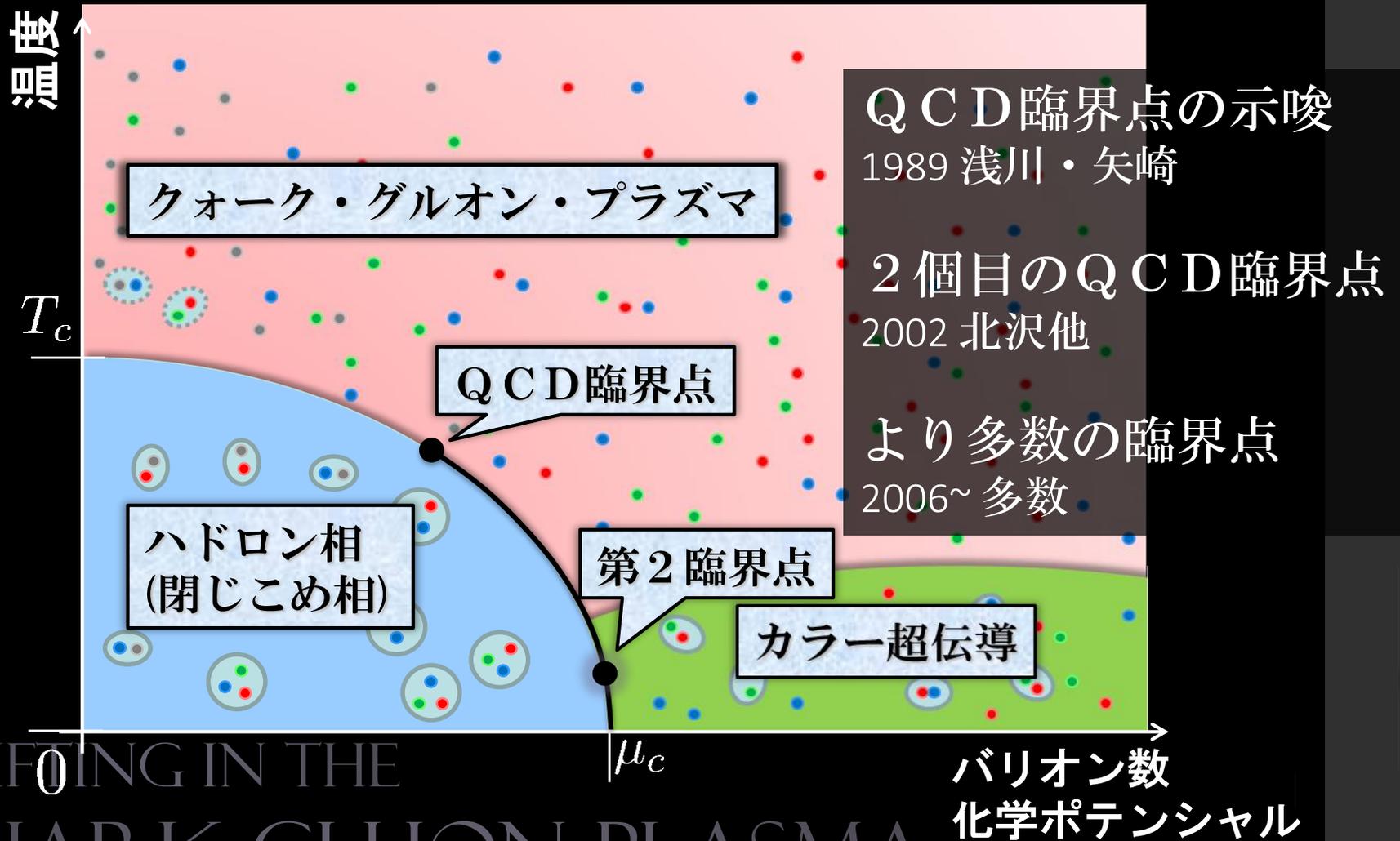
Inspired by “マンションポエム”

臨界点

温度

DRIFTING IN THE
QUARK-GLUON PLASMA

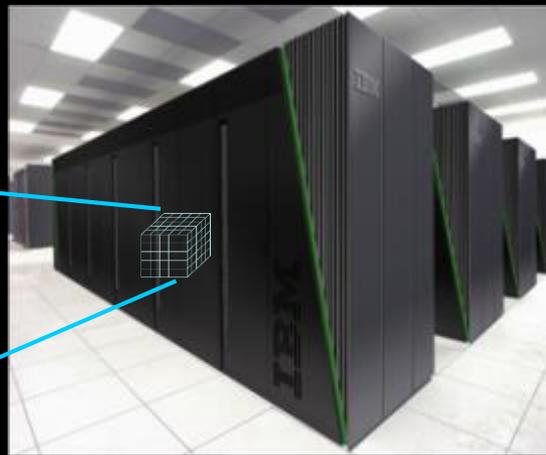
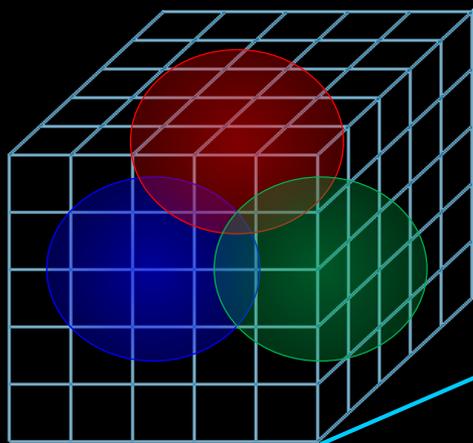
有限温度・密度QCD



DRIFTING IN THE
QUARK-GLUON PLASMA

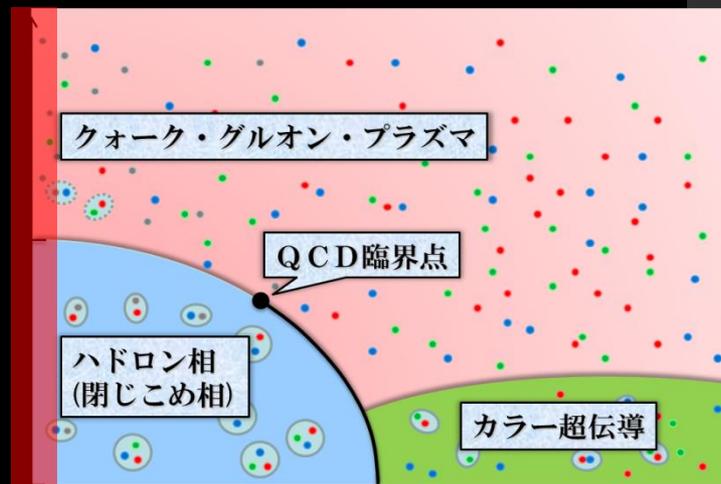
格子QCD数値解析

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」



DRIFTING IN THE
QUARK-GLUON PLASMA

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)

DRIFTING IN THE
QUARK-GLUON PLASMA



今日の話

2 兆度の物質を作り、 その性質を探る

話のポイント

- ① どんな物質ができるの？
- ② どうやって生成するの？
- ③ どうやって観測するの？

DRIFTING

QUARK-GLUON PLASMA

②どうやって生成するの？

A

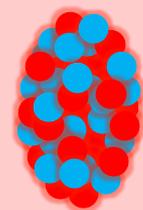
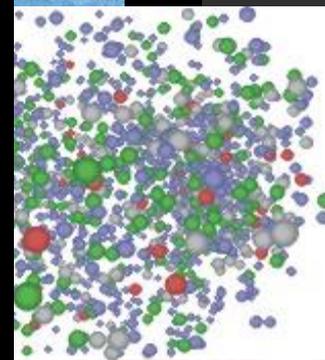
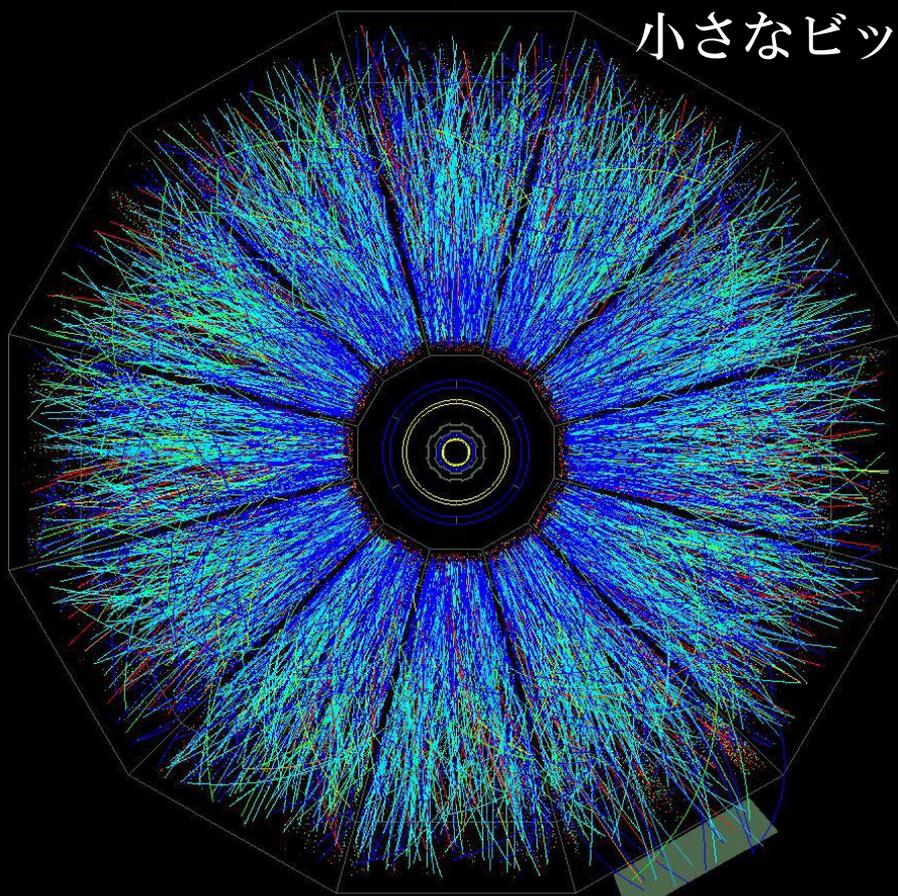
重イオン衝突実験で作ります。

DRIFTING IN THE
QUARK-GLUON PLASMA

相対論的重イオン衝突実験

新粒子

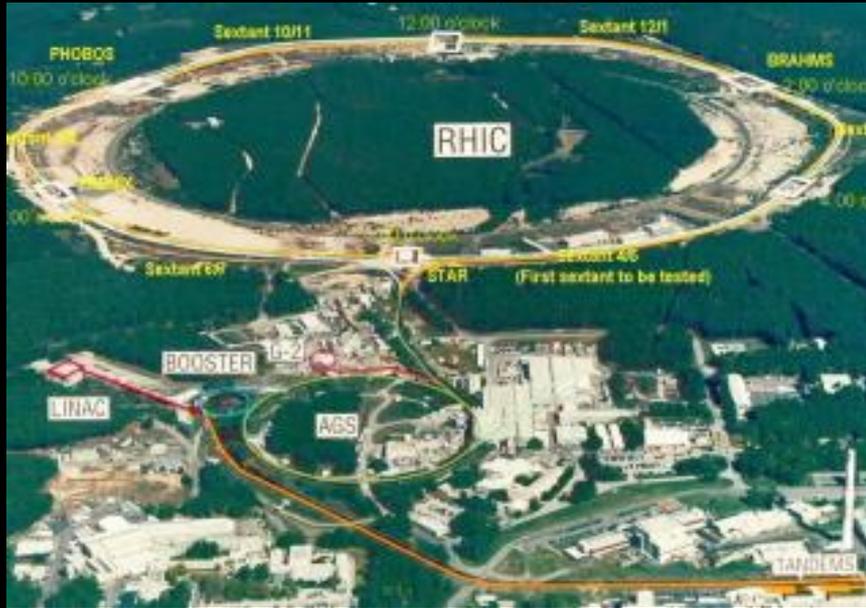
小さなビッグバン



高温物質

LHC – Large Hadron Collider

DRIFT
QU



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

DRIFTING IN THE
QUARK-GLUON PLASMA

QGPの生成と観測

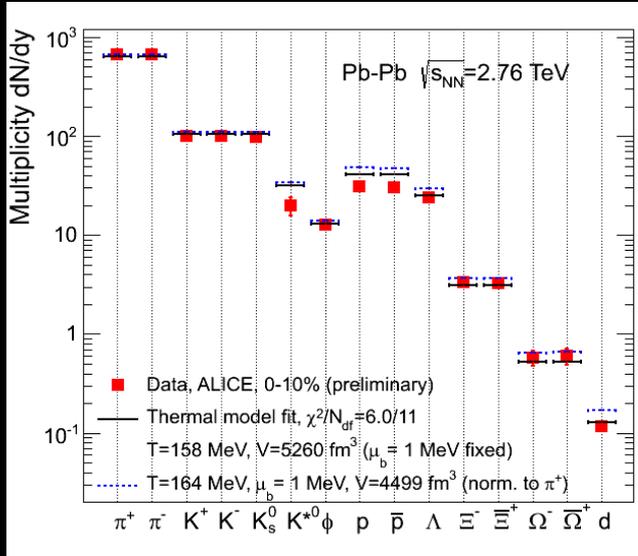
生成されたQGPは、
大きさ約 10^{-14} m、
寿命は約 10^{-22} 秒

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。



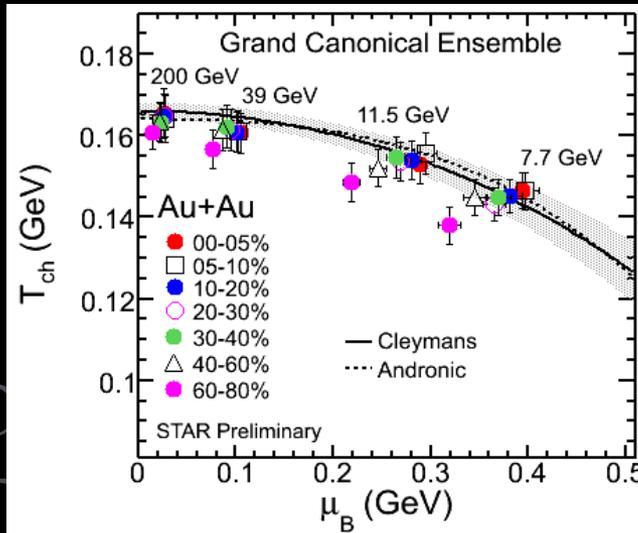
熱平衡化の証拠



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

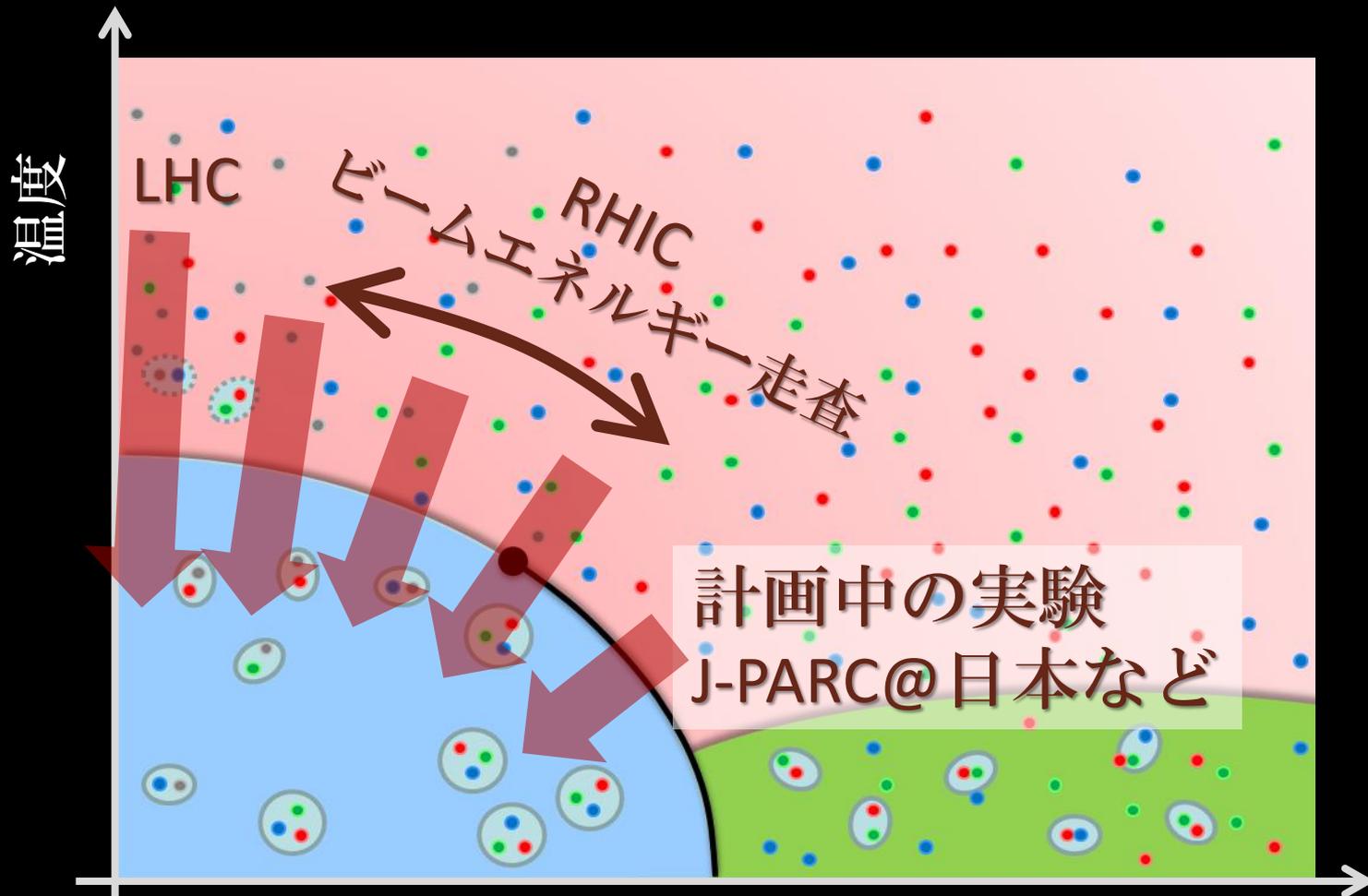


(化学)平衡状態の実現を示唆



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
2010~2013
Phase II
2015~

J-PARC
2018~??

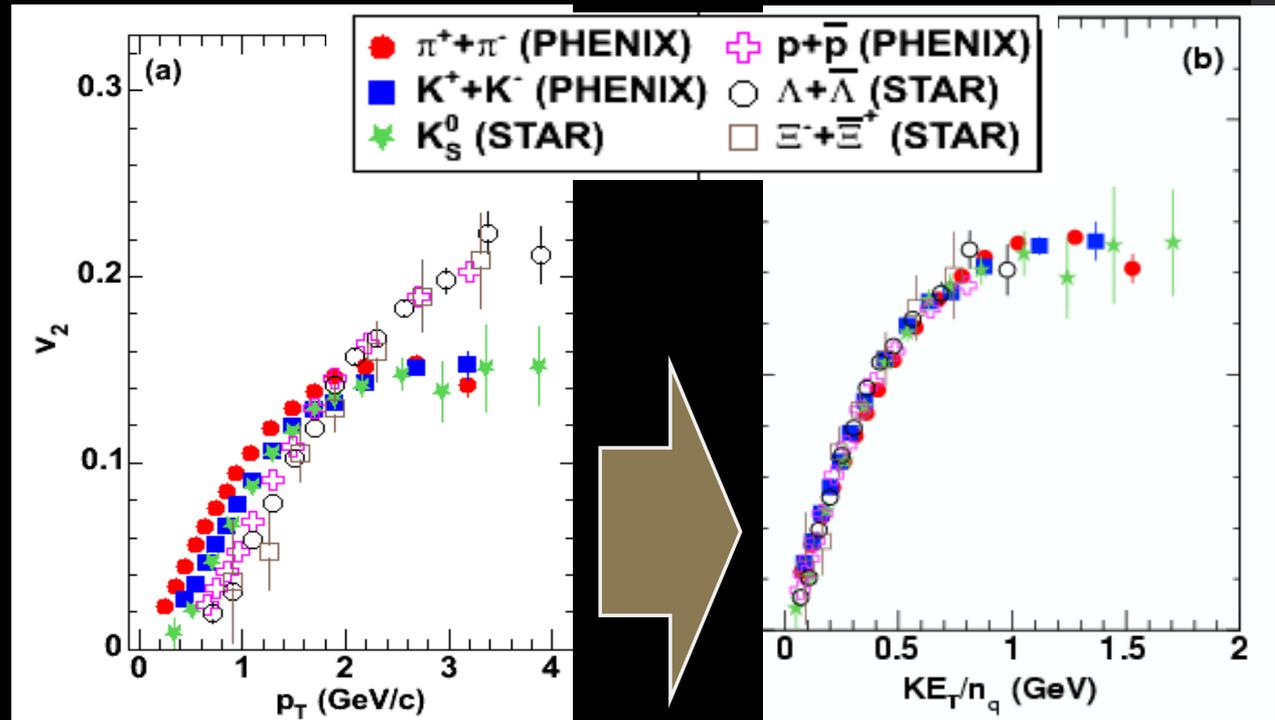
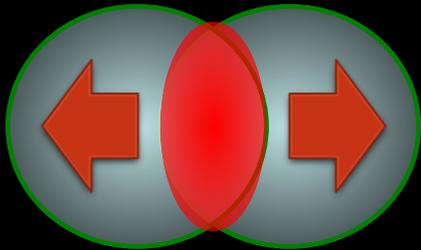
DRIFTING IN THE
QUARK

化学ポテンシャル

QCDの相構造は、実験的に探索可能！

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！

DRIFTING IN THE
QUARK-GLUON PLASMA

今日の話

2兆度の物質を作り、 性質を探る

話のポイント

- ①どんな物質ができるの？
- ②どうやって生成するの？
- ③どうやって観測するの？

DRIFTING

QUARK-GLUON PLASMA

Q

QGPの生成、QCD臨界点の存在をより直接的に検証する手段はないか？

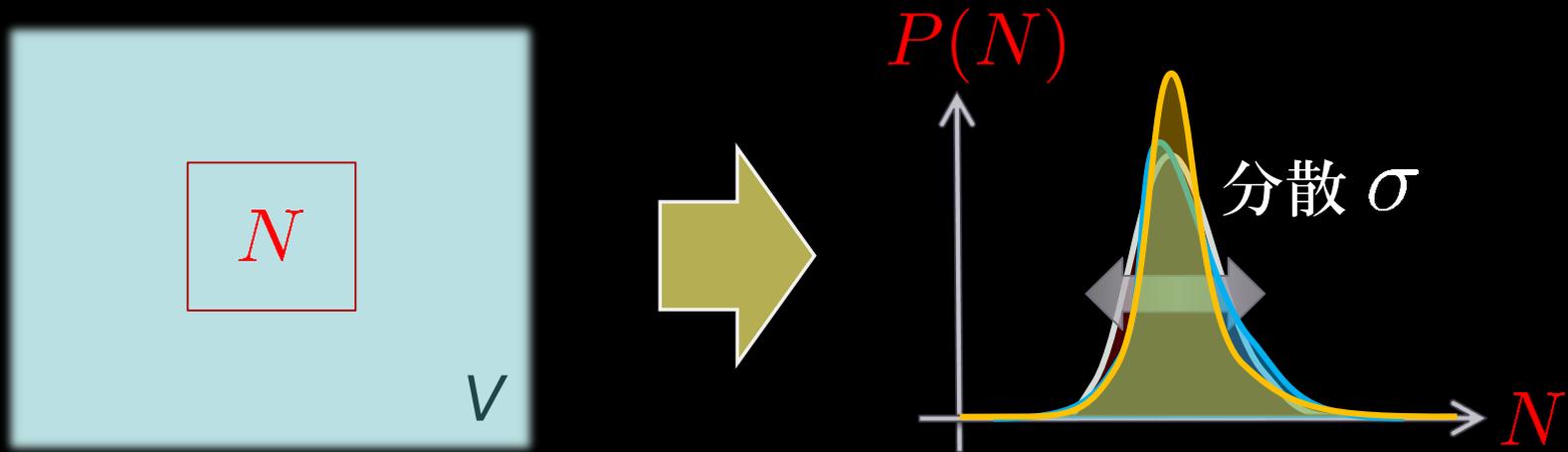
A

「ゆらぎ」を使う！

DRIFTING IN THE
QUARK-GLUON PLASMA

ゆらぎとは？

熱平衡状態下で、観測量はゆらいでいる



DRIPTING IN THE
QUARK-GLUON PLASMA

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

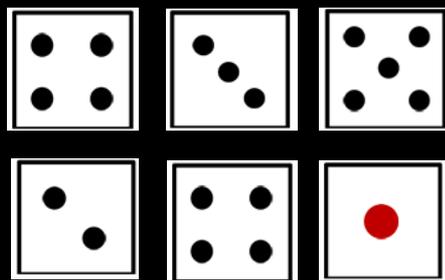
A

3回の試行
の平均値



B

6回の試行
の平均値



理論物理学とは、
経験の圏域を超出して彷徨う思索である。

そしてその営みは、
経験の反駁を経て報われる。

DRIFTING IN THE
QUARK-GLUON PLASMA

原子核理論研究室とは
クォーク・ハドロンの研究室

DRIFTING IN THE
QUARK-GLUON PLASMA

素粒子論

物性論

場の理論

量子統計力学

量子色力学(QCD)

相転移

ゆらぎ

格子QCD数値解析

電弱統一理論

臨界現象

原子核理論研究室とは
クォーク・ハドロンの研究室

中性子星

重イオン衝突実験

クォーク・グルオン・プラズマ

ハドロン散乱・ニュートリノ散乱

超新星爆発

T2K実験

DRIFTING IN THE
宇宙
QUARK-GLUON

質問歓迎します！

実験