

電子

原子核

核子

陽子

中性子

超高温・高密度の クォーク物質

～素粒子階層の物性論～

北沢正清

(基礎物理学研究所・原子核理論G)

10^{-14}m

10^{-16}m

自己紹介

北沢正清 (きたざわまさきよ)

出身: 長野県

2022年8月: 大阪大学 → 京都大学

専門: 「原子核理論」

特に **超高温・高密度物質** の研究

- 理論計算
- 実験データ活用
- 数値シミュレーション

を駆使した研究に日々勤しむ



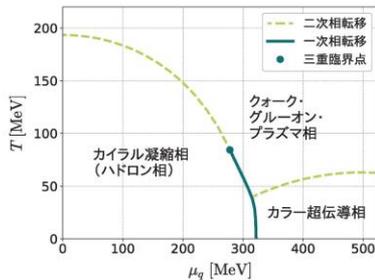
2017大阪マラソンより

宣伝

Frontiers in Physics 29

超高温・高密度のクォーク物質

素粒子の世界の相転移現象



北沢正清 [著]
国広悌二



基本法則から読み解く物理学最前線

須藤彰三 [監修]
岡 真

29

基本法則から読み解く物理学最前線 29

超高温・高密度のクォーク物質
—素粒子の世界の相転移現象—

ark Matter under Eetreme Conditions
Phase Transitions in the
World of Elementary Particles

共立出版

著者 北沢正清・国

監修 須藤彰三
岡 真

発行者 南條光章

発行所 共立出版株

東京都文京区小
電話 03-3947-
郵便番号 112-
振替口座 0011
www.kyoritsu-

新刊！

2022年9月10日 初版1刷発行

- クォーク物質の相構造
- 重イオン衝突実験
- 格子QCD数値シミュレーション
- 自発的対称性の破れ
- 超伝導とNJL模型

Product Solutions Open Source Pricing

MasakiyoK / Saizensen Public

Code Pull requests Actions Projects Security Insights

Go to file Code About

No description, website, Readme, 3 stars, 1 watching

Releases: No releases published

Issues: No packages published

Languages

File	Commit	Time ago
Chap3	first version June 2022	5 months ago
Chap4	first version June 2022	5 months ago
Chap5	first version June 2022	5 months ago
Chap7	first version June 2022	5 months ago
Chap8	first version June 2022	5 months ago
cover	first version June 2022	5 months ago
readme.md	Add files via upload	2 months ago
正誤表.md	Update 正誤表.md	2 months ago

高温の状態



水蒸気 100°C

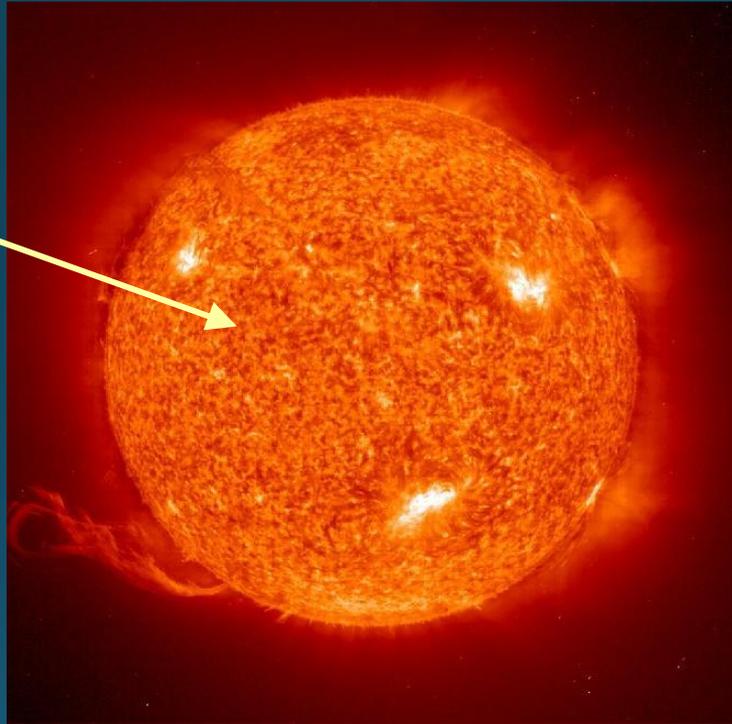


溶解した鉄 1500°C

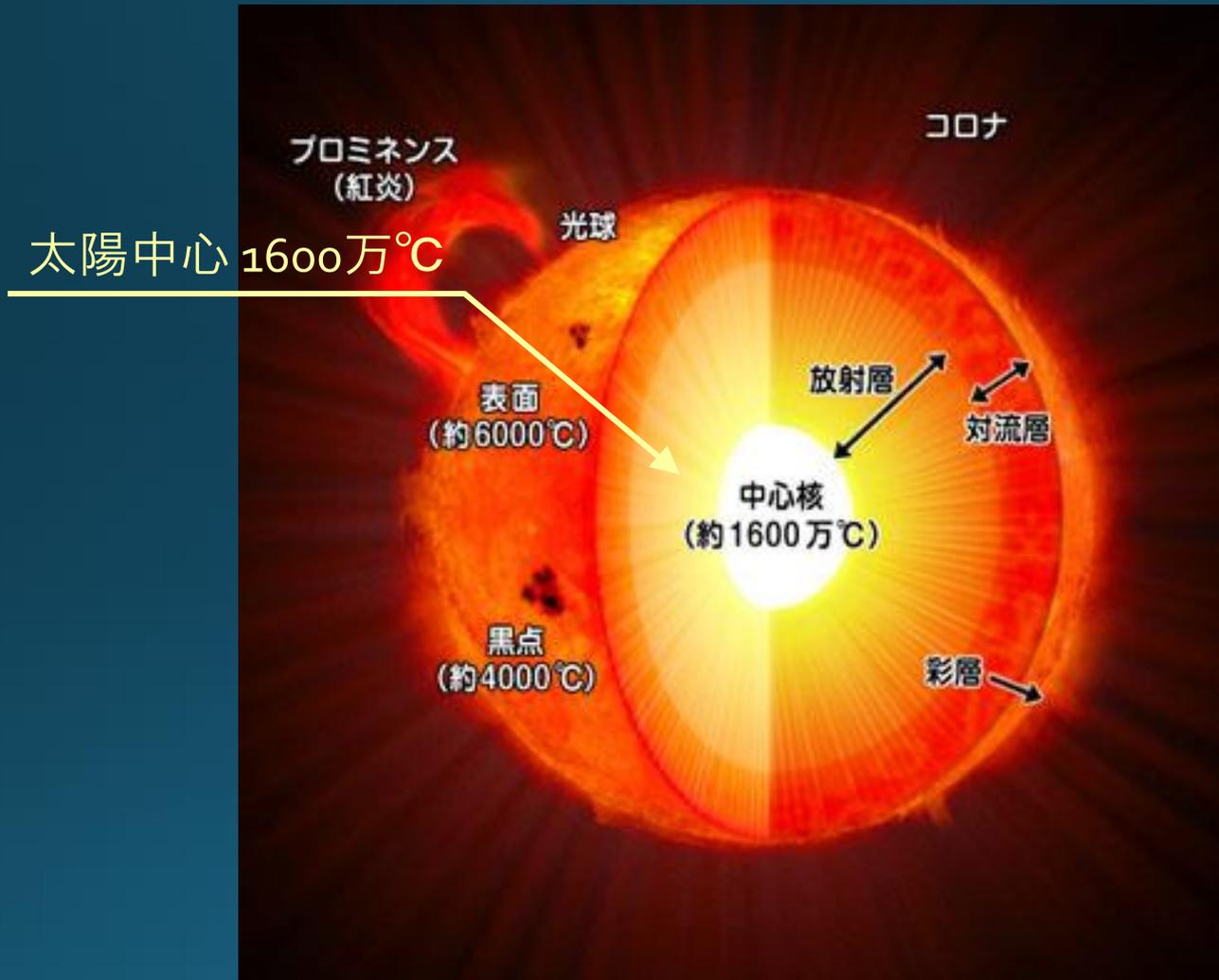


高温の状態 2

太陽表面 6000°C



高温の状態 2



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

北沢の研究内容

2兆度・ 10^{15} g/cm³
の物質の性質を探る

そんな物質を調べて、
なにが嬉しいの？

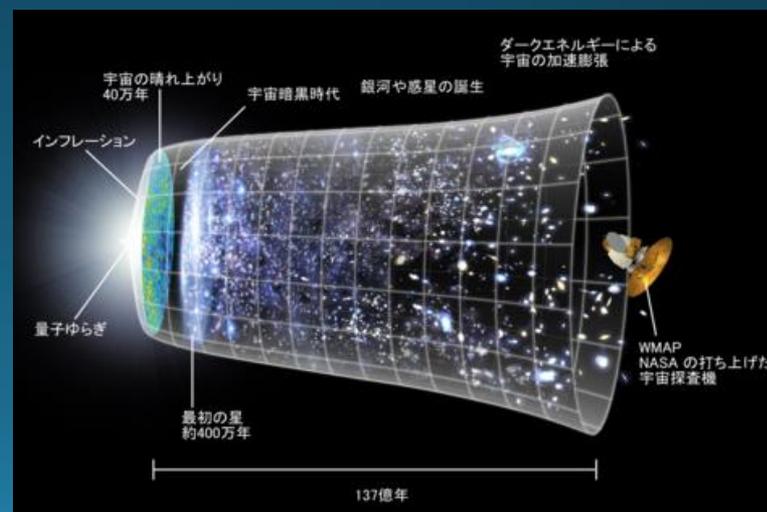
初期宇宙の超高温物質

宇宙開闢 = ビッグバン

- 我々の宇宙は138億年前にインフレーションとビッグバンによって始まった
- 誕生に向けて時間を遡るにつれ、宇宙の温度は上昇
- 誕生から 10^{-6} 秒 = 2兆度



宇宙史解明には、高温物質の理解が不可欠



中性子星 = 超高密度天体

中性子星

- 質量: 太陽の1~2倍
- 半径: 10~15km
- 中心密度: 10^{15} g/cm³
- 強力な磁場を持ち、高速回転
- 周期的な電波を放出
- 2018年、中性子星が合体する際に放出した重力波が観測される



中性子星の内部構造は、近年高く注目される



超高温・超高密度物質は
どんな性質を持つのか？

温度と相転移



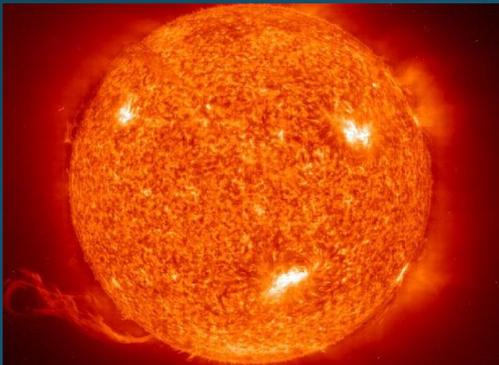
100°C

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



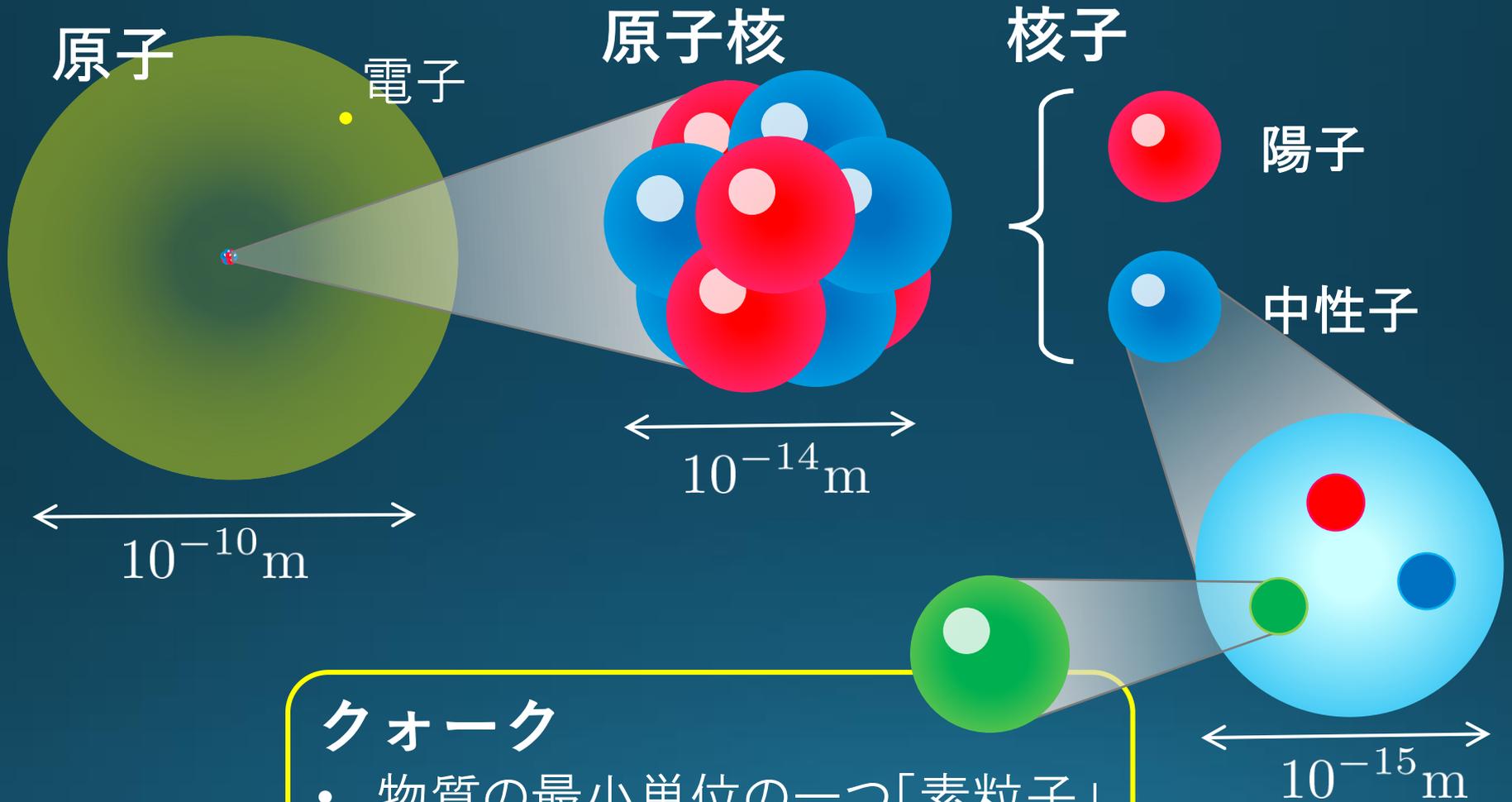
約4000°C～

水素原子の電離

= 原子が溶け出す相転移



ものは何からできている？



クォーク

- 物質の最小単位の一つ「素粒子」
- 単独で観測されたことはない

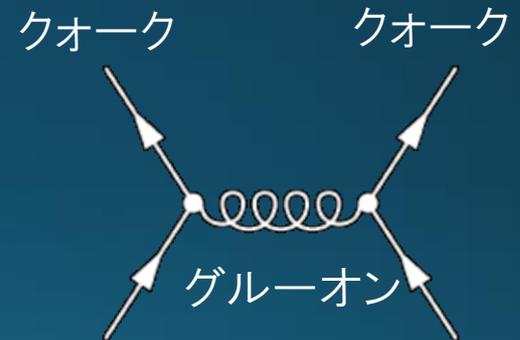
量子色力学

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
- グルーオン: クォーク間の力を媒介



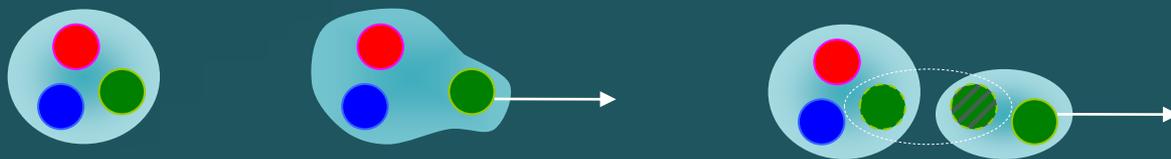
- 1970年代、物質の基礎理論として確立
- しかし、難解すぎて未だ分からないことだらけ



クォークの閉じ込め

□ クォークとグルーオンは、単独で観測されることはない。

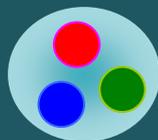
無理矢理取り出そうと引っ張ると...



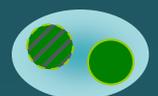
クォーク・反クォーク対を生成し、核子と中間子になる



我々の身の回りの物理の基本自由度



バリオン



中間子 (メソン)

} ハドロン

素粒子標準模型

自然界に存在する4つの力

□ 重力

□ 電磁気力

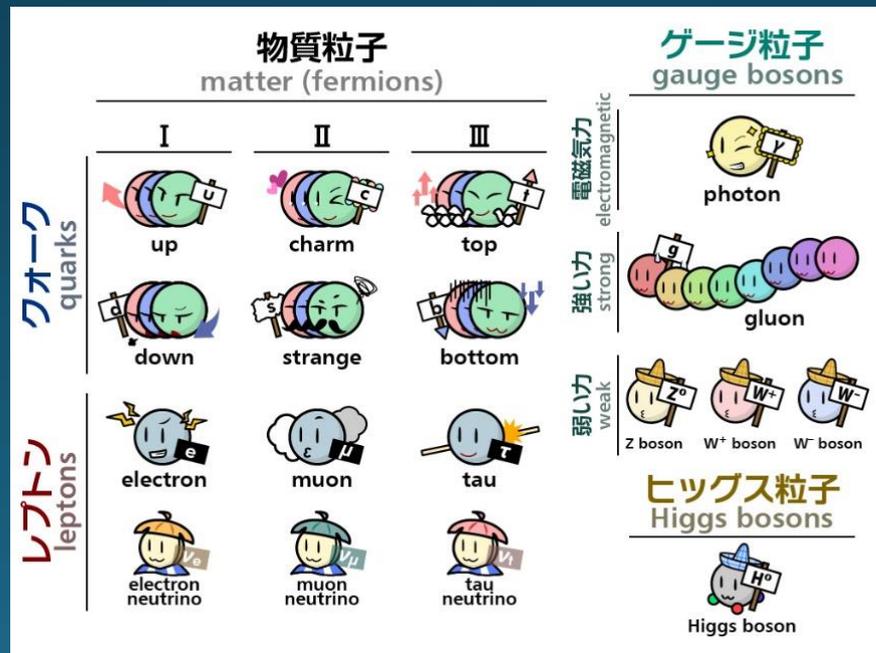
□ 弱い力

□ 強い力

} 電弱統一理論

量子色力学(QCD)

素粒子
標準模型



標準模型の作り方 1

□ 電磁気学 (Maxwell理論)

ゲージ場 $A_\mu(x) = (\Phi(x)/c, \mathbf{A}(x))$

ゲージ変換 $A_\mu(x) \rightarrow A_\mu(x) + \partial_\mu \chi(x)$

$$\mathbf{E} = -\nabla\Phi - \partial_t \mathbf{A}$$

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$$

Maxwell理論はゲージ変換の下で不変

□ 標準模型を作るには

(非常に大雑把に言うと)

ゲージ自由度 $\chi(x)$ を行列にしてみる:

- ➡ {
- 2×2 行列: 弱い相互作用
 - 3×3 行列: 強い相互作用

標準模型の作り方 2

□ 量子力学

波動関数の位相変換の自由度: $\psi(x) \rightarrow \psi(x)e^{i\theta}$

□ 座標依存の位相変換 $\psi(x) \rightarrow \psi(x)e^{i\theta(x)}$

量子力学は不変に保たれない。

しかし空間微分を

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \rightarrow \frac{\partial}{\partial x_i} + eA_i(x) \quad A_i(x) \rightarrow A_i(x) - \frac{1}{e} \frac{\partial}{\partial x_i} \theta(x)$$

と再定義すると不変になる。

ここで、

- $A_i(x)$: ゲージ場
- $\theta(x)$: ゲージ変換



電磁気学が自然に現れる
(U(1)ゲージ理論)

標準模型の作り方 3

□ 3成分場の同時変換

$$\begin{pmatrix} \psi_1(x) \\ \psi_2(x) \\ \psi_3(x) \end{pmatrix} \longrightarrow U \begin{pmatrix} \psi_1(x) \\ \psi_2(x) \\ \psi_3(x) \end{pmatrix} \quad U(x) : \text{ユニタリ行列}$$



ゲージ場 $A(x)$ を導入し、
この変換の下で不変な理論を構築

ゲージ原理

□ QCD (SU(3)ゲージ理論)

- $\psi_a(x)$: クォーク (3成分: カラー)
- $A_\mu(x)$: グルーオン

別名: 非可換ゲージ理論
ヤンミルズ理論

- 1成分 → 電磁気学 (U(1)ゲージ理論)
- 2成分 → 電弱統一理論 (SU(2) × U(1))

QCDは難しい

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

- QCDを解析的に解いて核子を作れるか？ **NO!**
- 近似的な解なら得られてる？ **NO!**
- クォークの閉じ込め？ **NO!**
- 「真空状態」は？ **NO!**

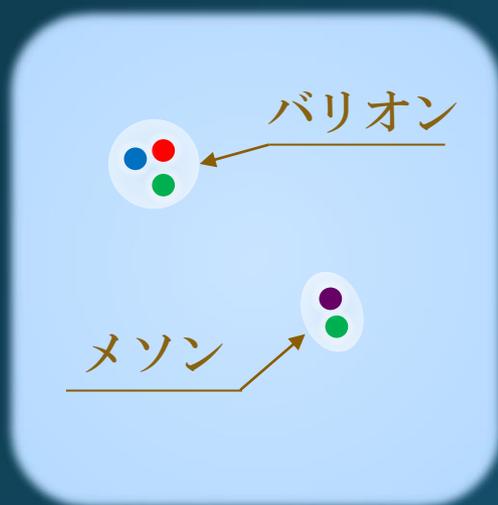
非線形→重ね合わせの原理が使えない
摂動論も(一部の現象を除き)使えない



<http://live.shogi.or.jp/ryuou/>

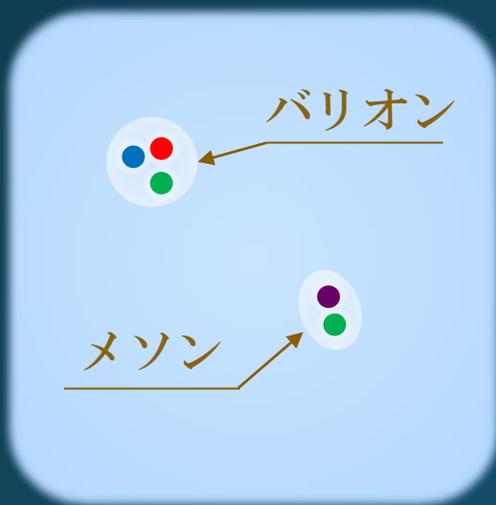
素粒子階層の相転移現象

真空



素粒子階層の相転移現象

真空



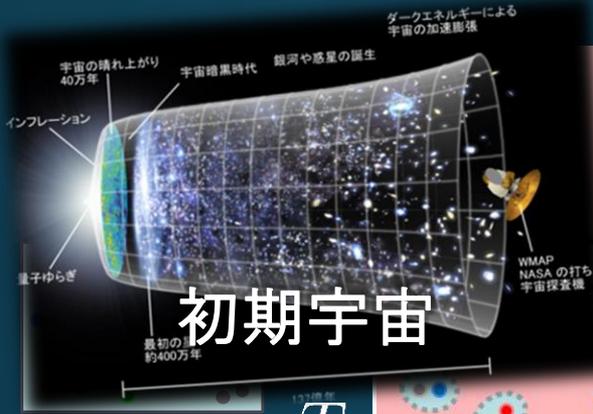
温度を上げていくと ...



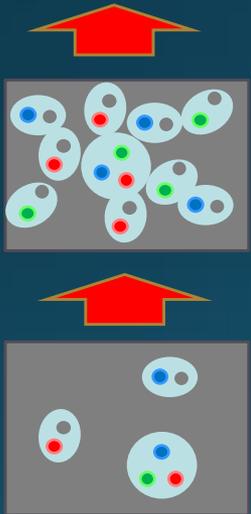
クォーク・グルーオン・
プラズマ(QGP)

ハドロンを構成するクォークが溶け出す相転移
量子色力学 (QCD) が記述する物性現象

QCDの相図



ク・グルオン・プラズマ



T_c

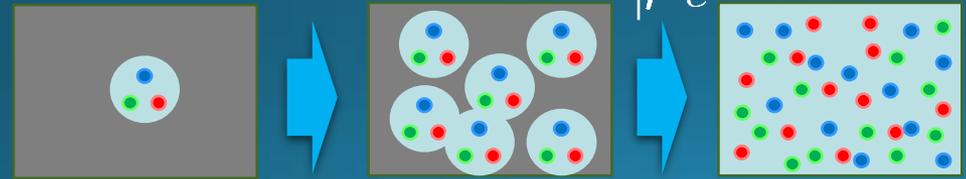
ハドロン相
(閉じこめ相)

カラー超伝導

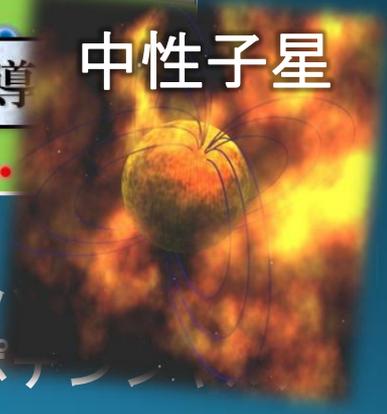
中性子星

0

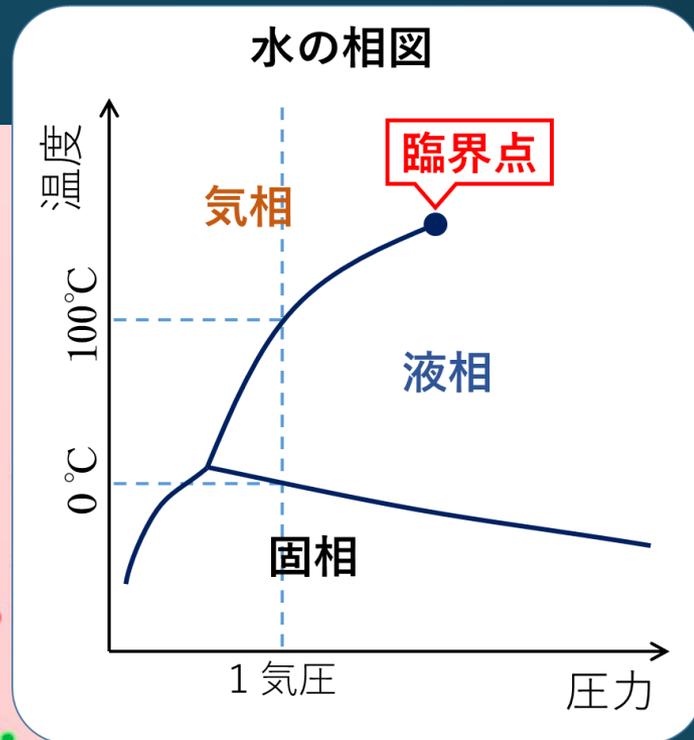
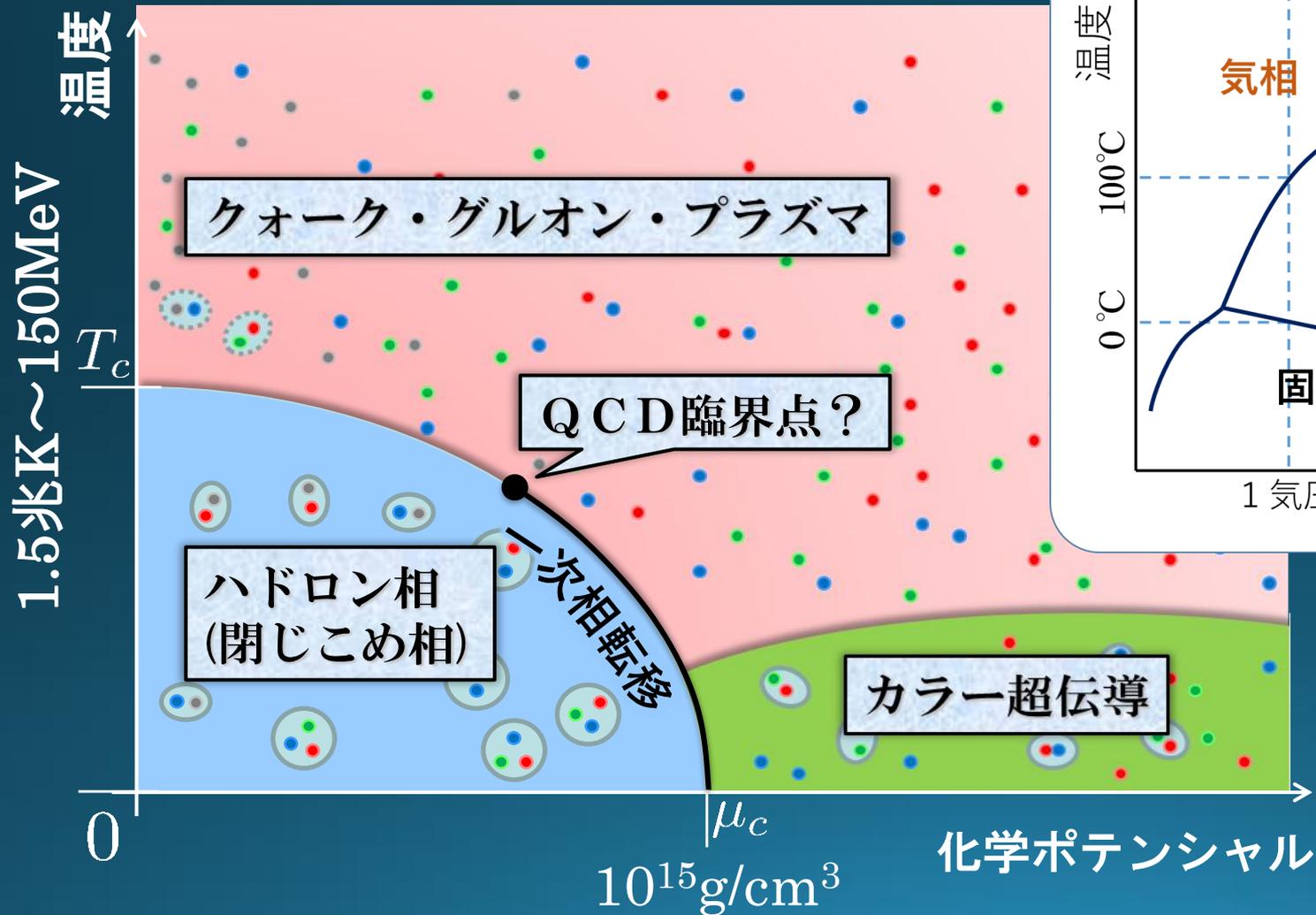
μ_c



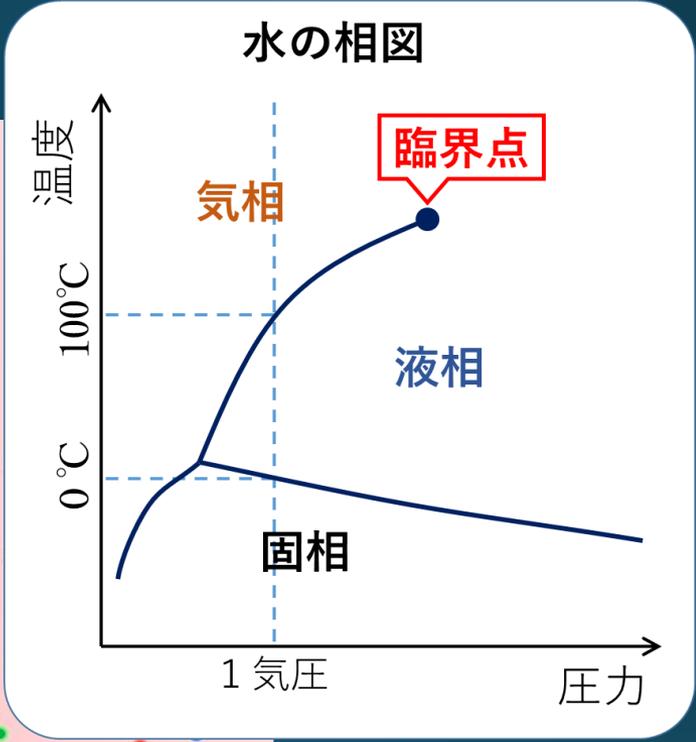
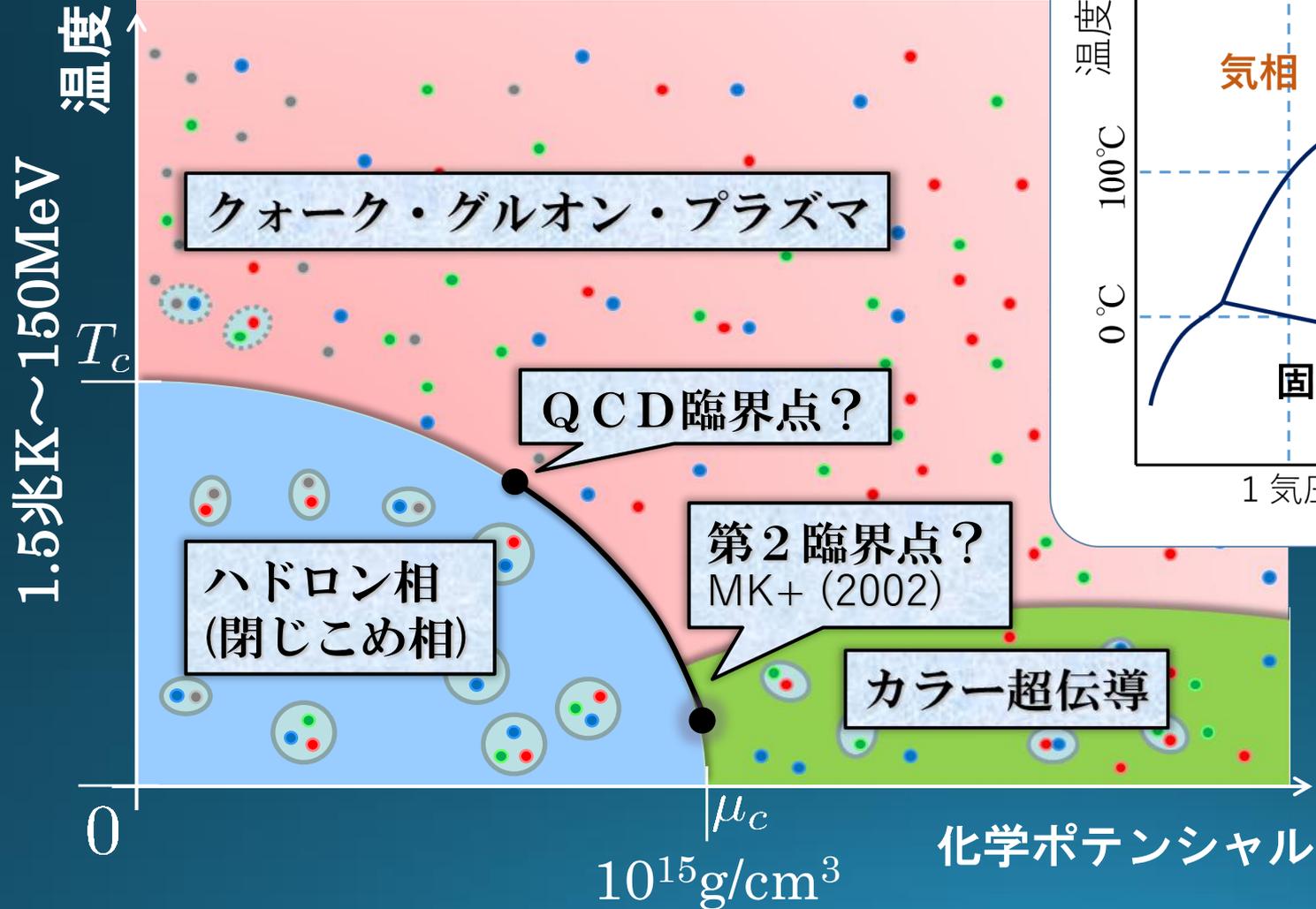
(クォーク・グルオン・プラズマ)



相転移の次数



相転移の次数

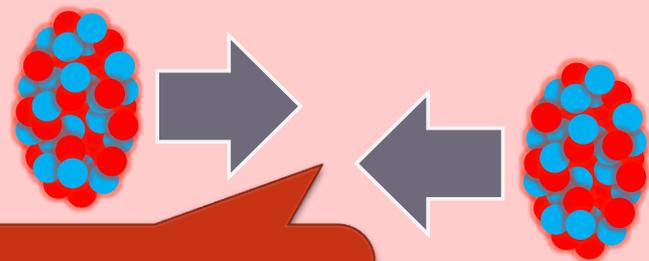


相対論的重イオン衝突実験

新粒子探索



初期宇宙の生成



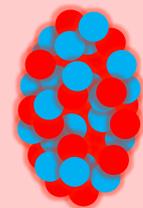
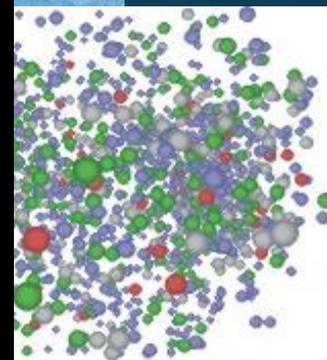
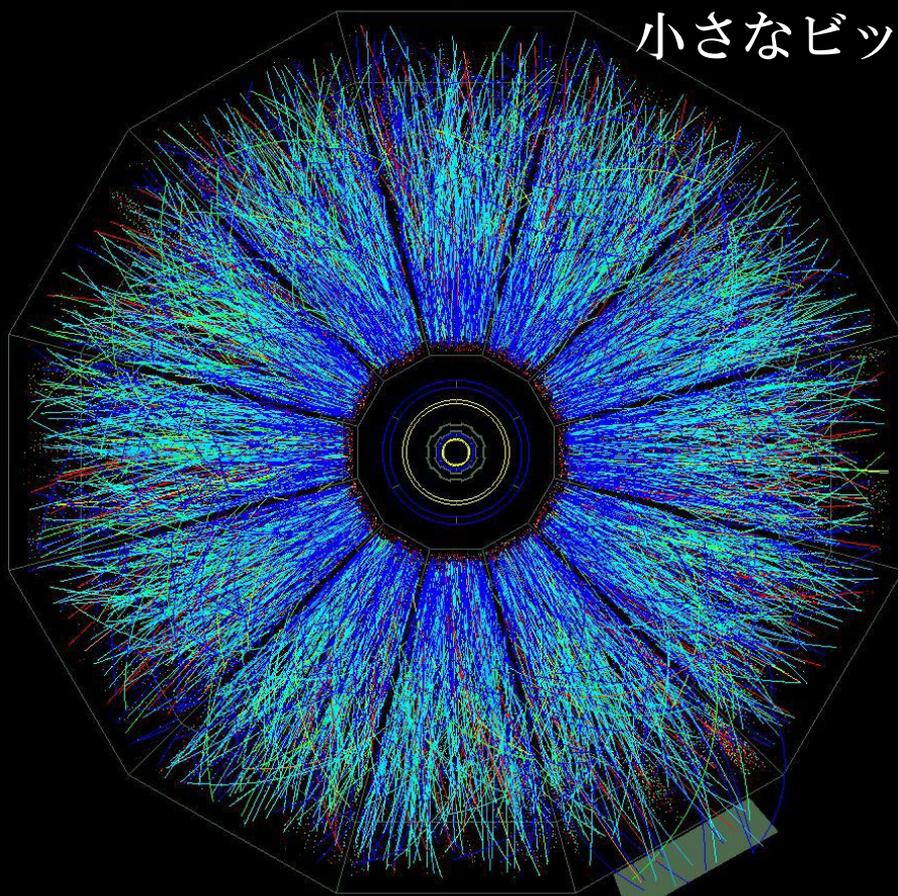
6兆度を超える
高温物質

LHC – Large Hadron Collider

相対論的重イオン衝突実験

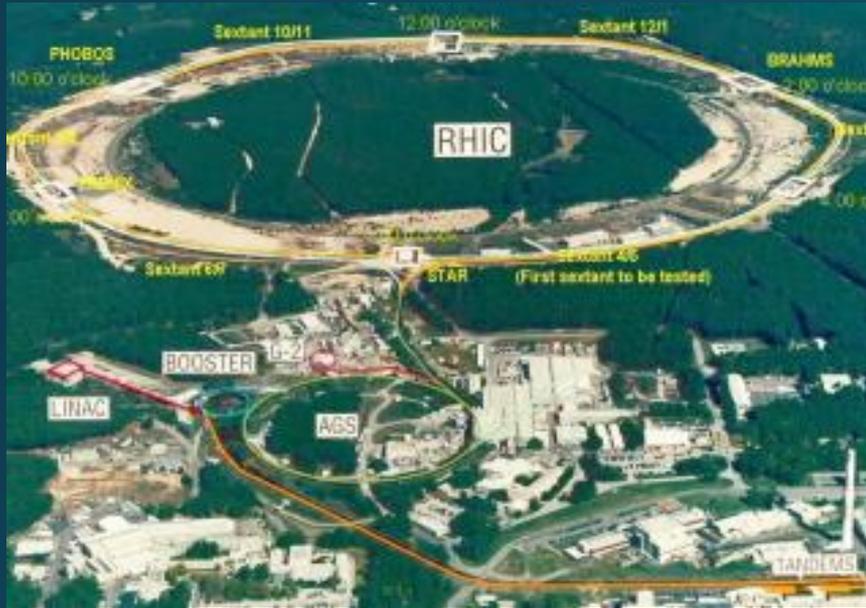
新粒子

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ーオンは、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

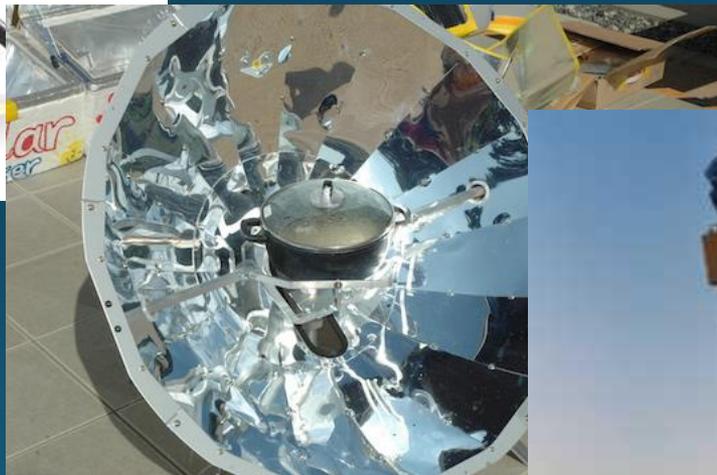
1cm³の物質を2兆度まで熱するのに
必要なエネルギーは？



太陽エネルギー



虫眼鏡で発火



料理もできちゃう

太陽熱発電



QGP生成に要するエネルギー

問

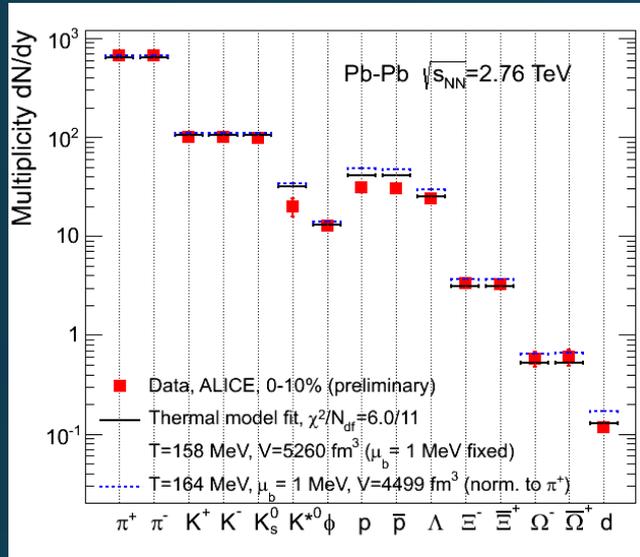
1cm³の物質を2兆度まで熱するのに
必要なエネルギーは？



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

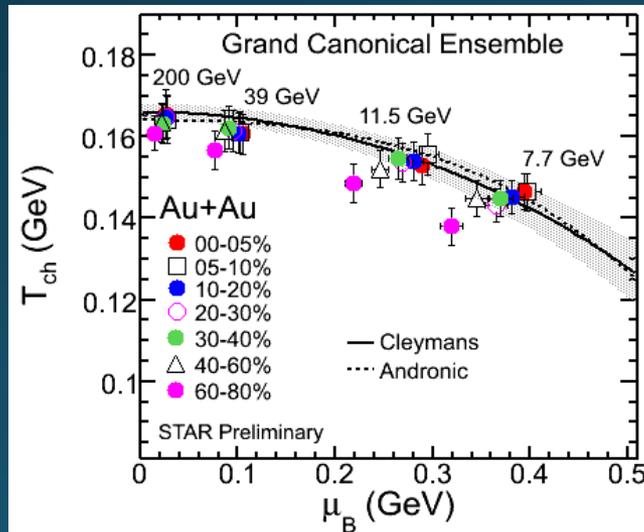
熱平衡化の証拠



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

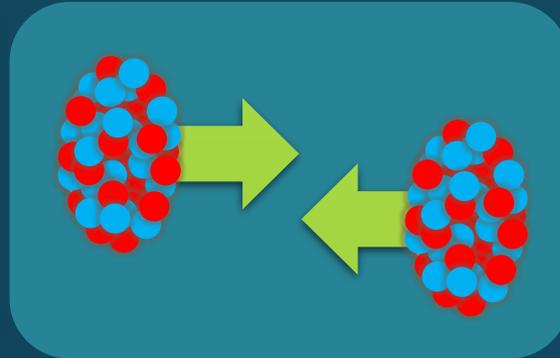


(化学)平衡状態の実現を示唆

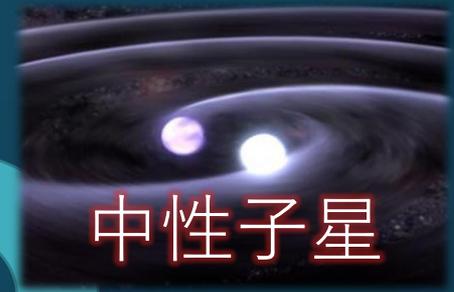
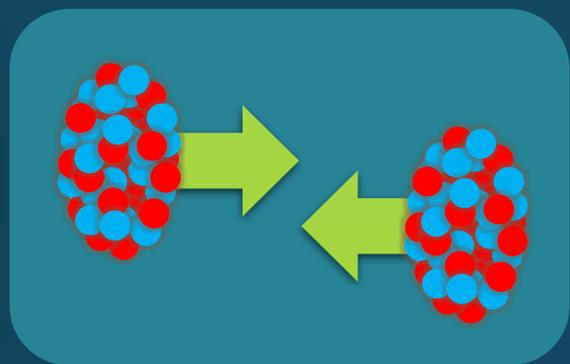


実験的に決定した T, μ は、
衝突エネルギーに応じて
相図上を移動する

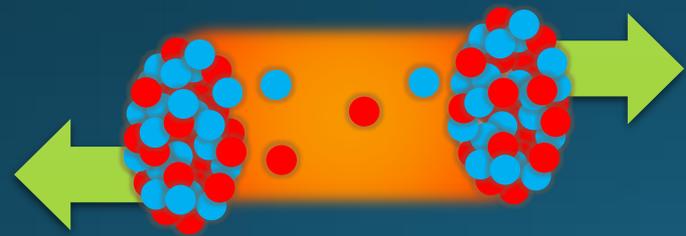
衝突エネルギーと密度



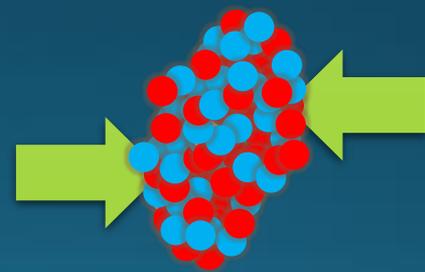
衝突エネルギーと密度



低エネルギー

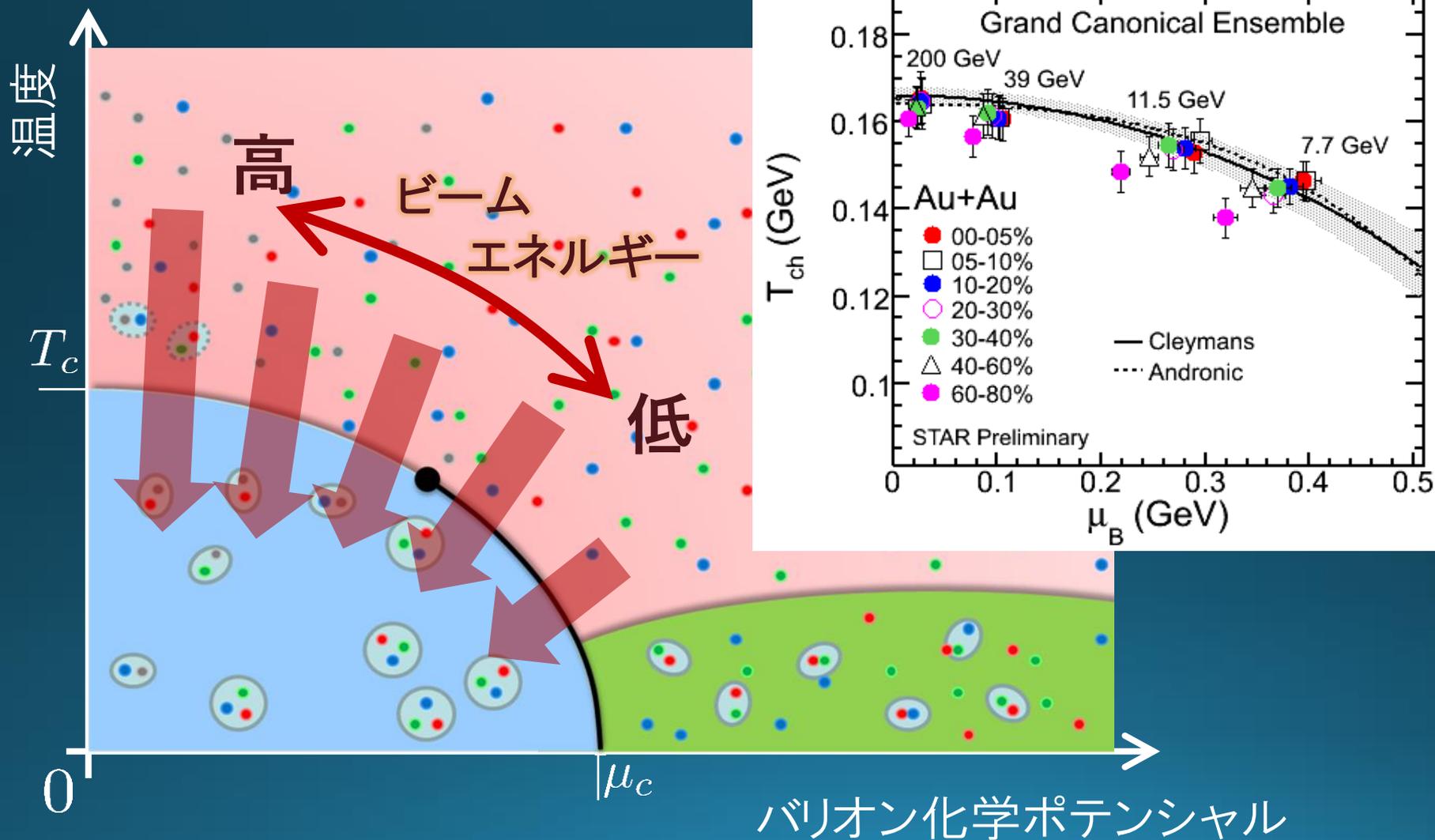


net-バリオン数: 少



net-バリオン数: 大

ビームエネルギー走査



J-PARC-HI

J-PARC Heavy-Ion Program

J-PARC加速器(RCS/MR)を用いた
世界最強度・低コストの重イオン加速・衝突実験



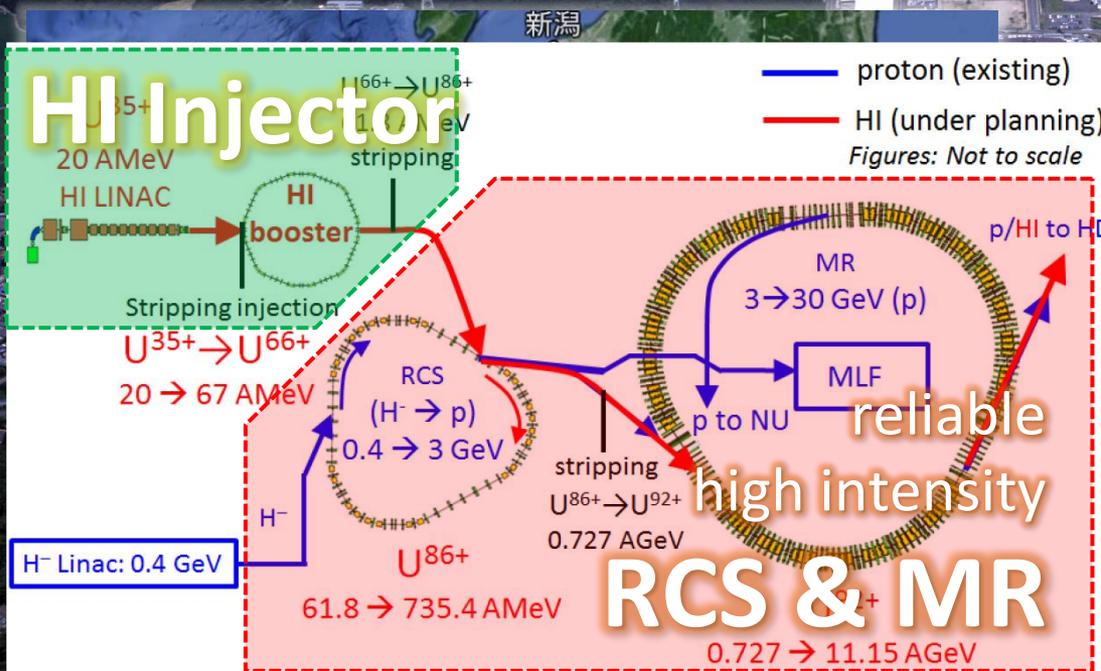
- $E_{\text{lab}} \sim 11 \rightarrow 19 \text{ AGeV}$
- $\sqrt{s_{\text{NN}}} \sim 4.9 \rightarrow 6.2 \text{ GeV}$
- 衝突レート: $\sim 10^8 \text{ Hz}$
- 実験開始: 2028~?

金ねんだわ

J-PARC-HI

J-PARC Heavy-Ion Program

J-PARC加速器(RCS/MR)を用いた
世界最強度・低コストの重イオン加速・衝突実験

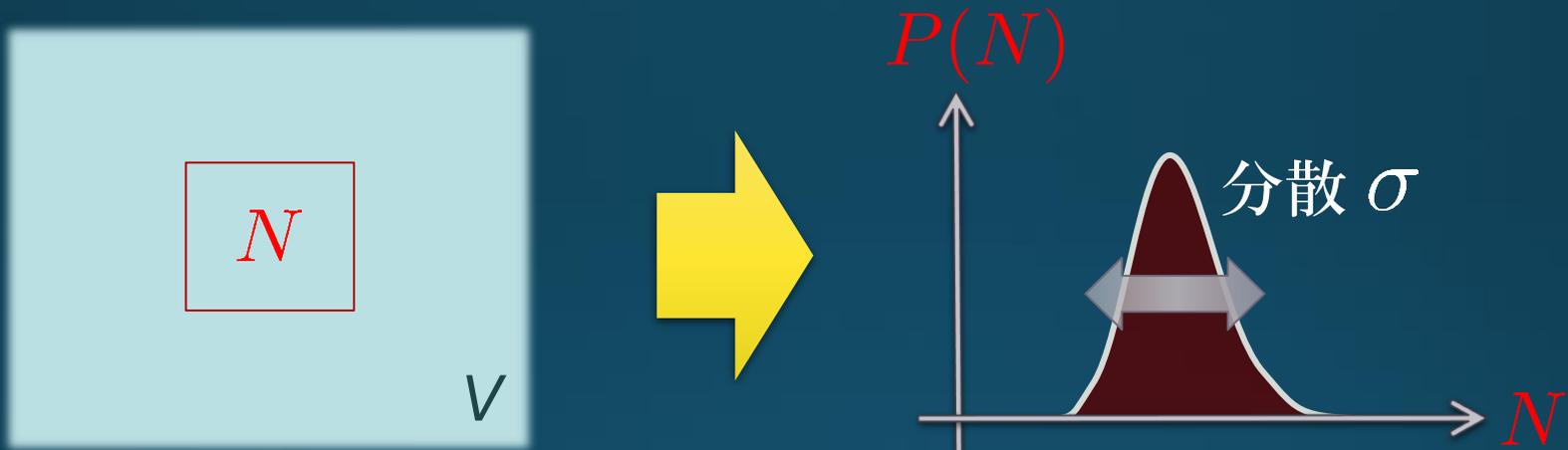


- $E_{lab} \sim 11 \rightarrow 19$ A GeV
- $\sqrt{s_{NN}} \sim 4.9 \rightarrow 6.2$ GeV
- 衝突レート: $\sim 10^8$ Hz
- 実験開始: 2028~?

「ゆらぎ」を使った QCD相構造探索

平衡状態下のゆらぎ

例：熱平衡状態下で、観測量はゆらいでいる

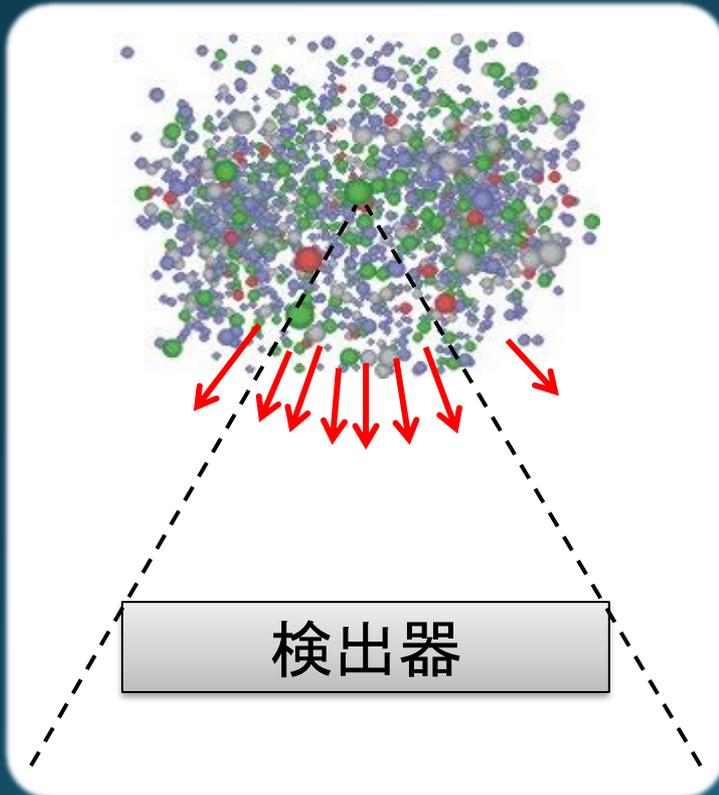


ゆらぎで見えてくる物理

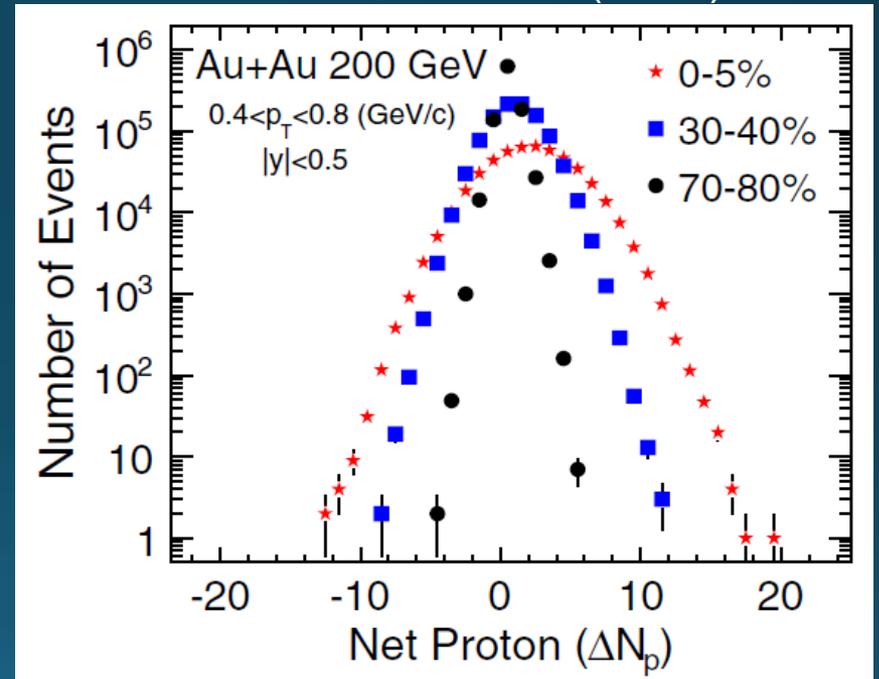
- ①ミクロな自由度の同定
- ②時間発展の履歴の記憶
- ③相転移の探索

イベント毎ゆらぎ

Review: Asakawa, MK, PPNP 90 (2016)



STAR, PRL105 (2010)



コインゲーム

- ① 500円を賭ける
- ② 表のコインを受け取る

選択肢 1
五円玉×200枚



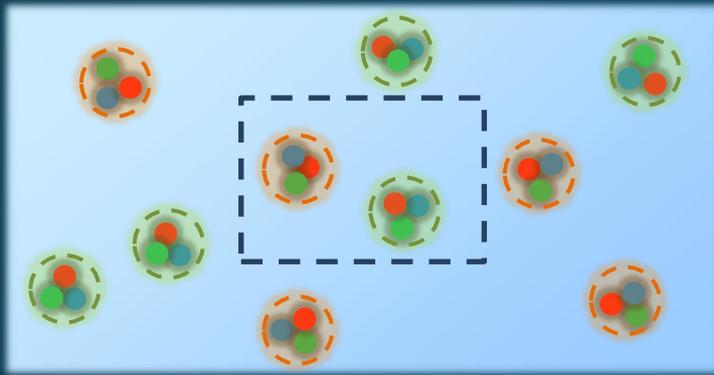
選択肢 2
十円玉×100枚



期待値は、共に500円
しかし、期待値の周りのゆらぎの大きさは異なる。

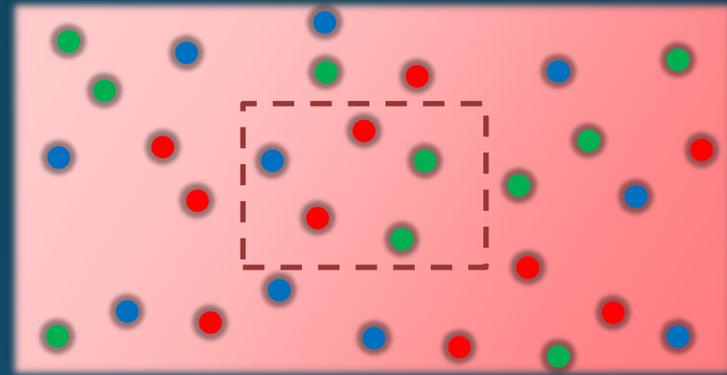
QGP状態の実現とゆらぎ

ハドロン相



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

QGP



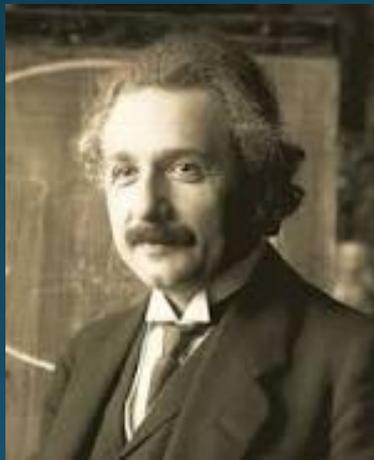
$$|q_B| = 1/3, |q_Q| = 1/3, 2/3$$

QGPでは、基本自由度が運ぶ電荷の量が減少

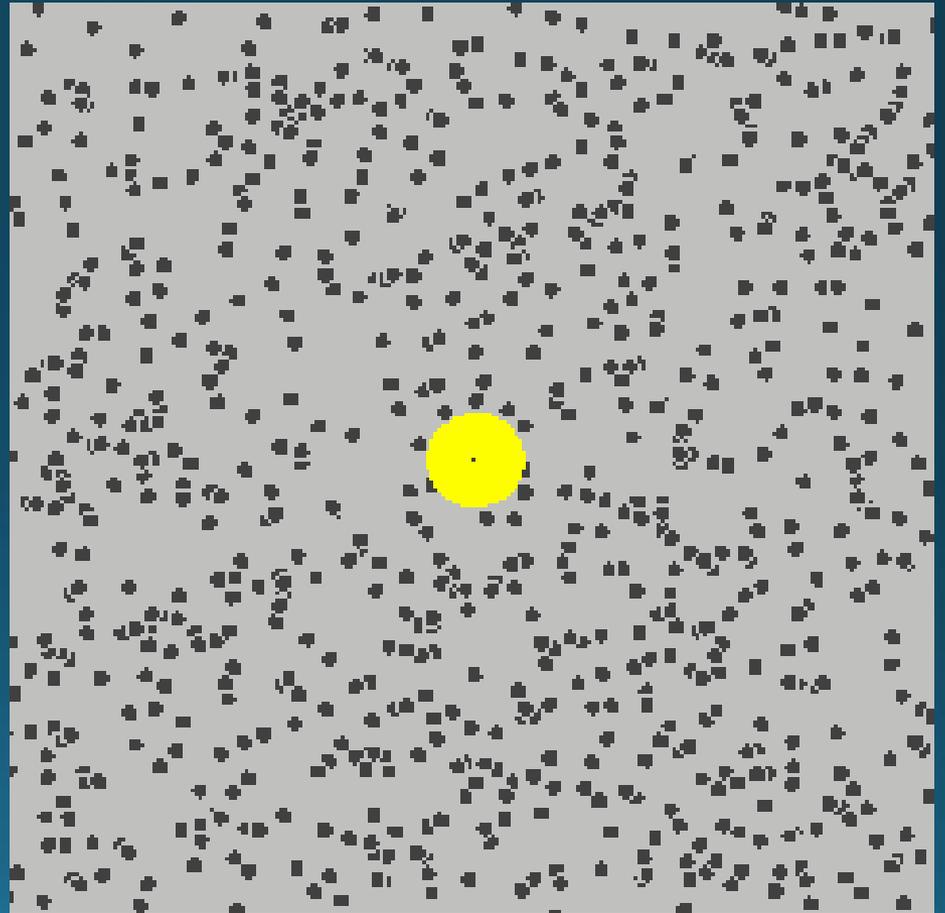


ゆらぎが減少

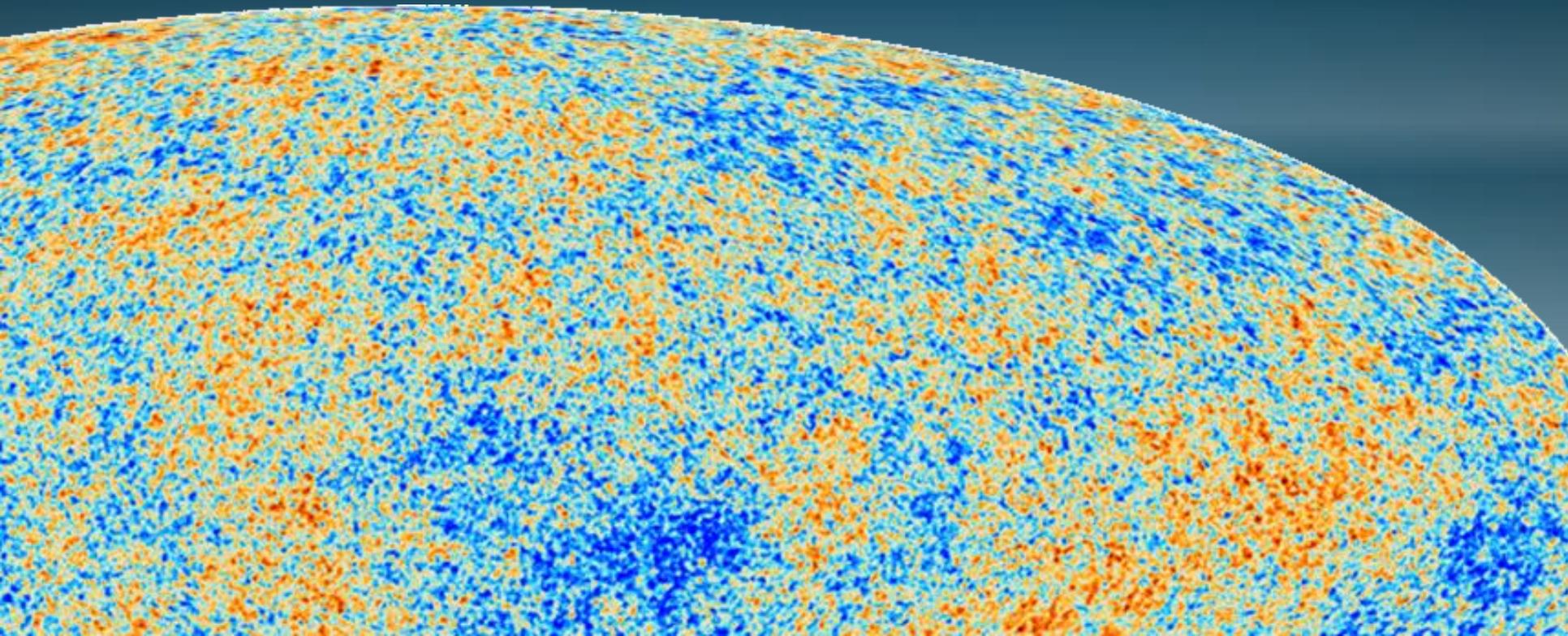
人類は、ブラウン粒子のゆらぎの観測を通して、
初めて元素（分子）の存在を確信した。



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

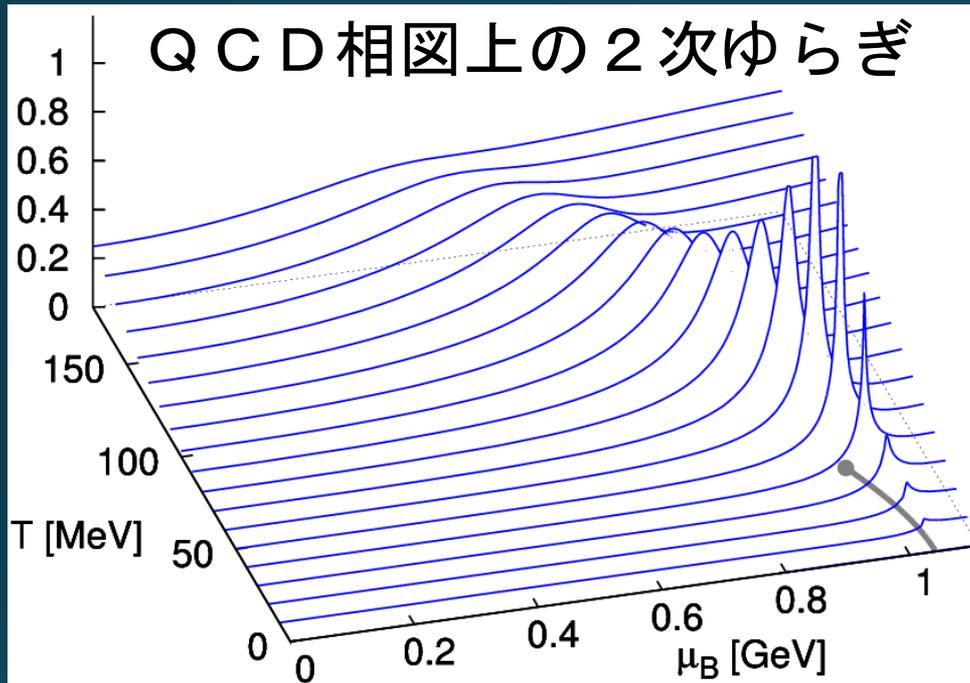
小林一茶

Issa Kobayashi

1814

非ガウスゆらぎを使った QCD臨界点探索

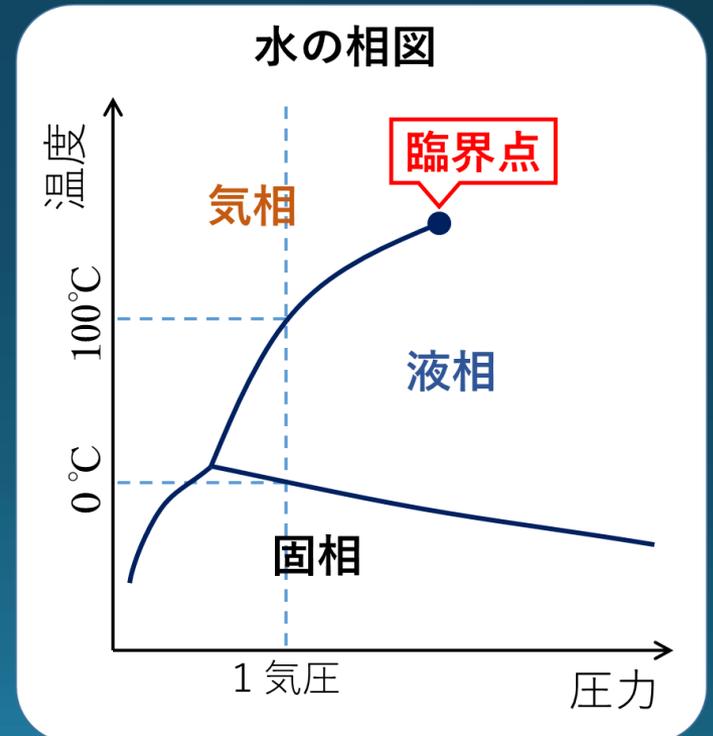
ゆらぎとQCD臨界点



QCD臨界点上では、
ゆらぎが発散する

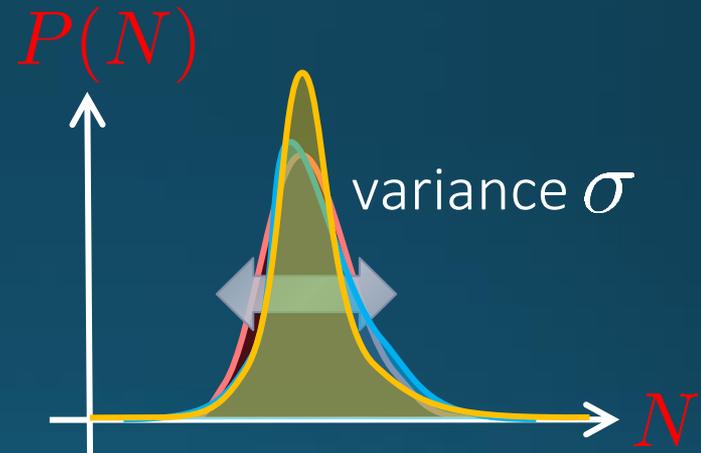
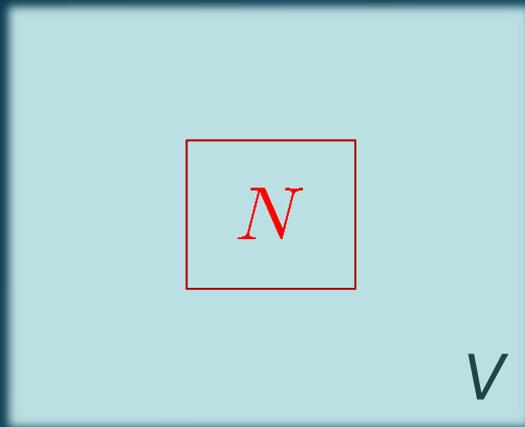
QCD臨界点は、水の臨界点と同じ
動的普遍類に属する。

➡ ゆらぎの振る舞いが理解可



平衡状態下のゆらぎ

例：熱平衡状態下で、観測量はゆらいでいる



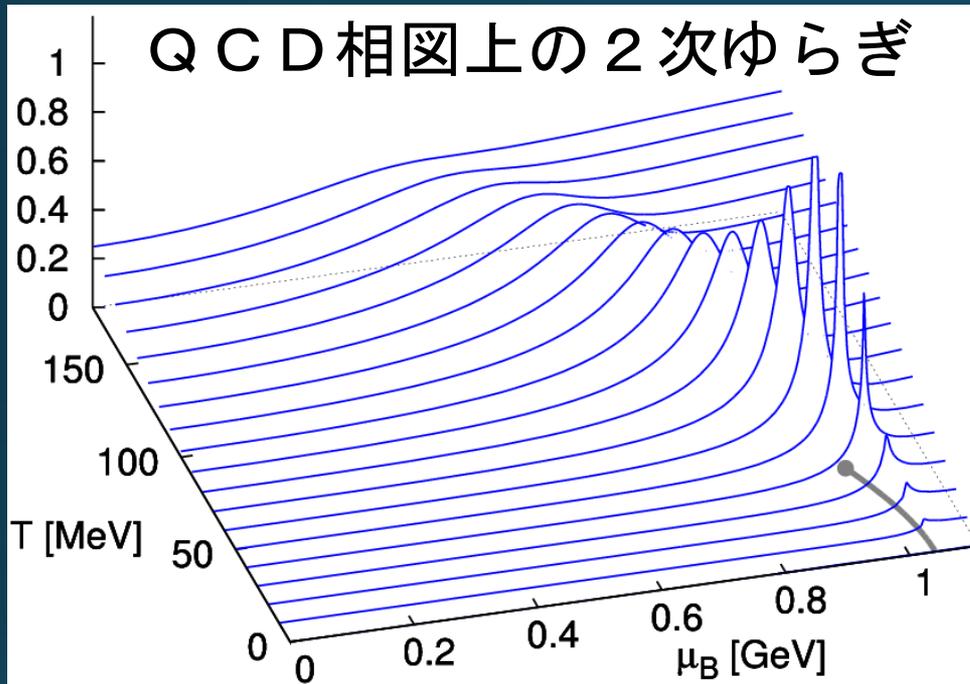
ゆらぎで見えてくる物理

- 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

ゆらぎの**非ガウス性**には
更なる情報が含まれる

3 次のゆらぎ

Asakawa, Ejiri, MK, PRL '09

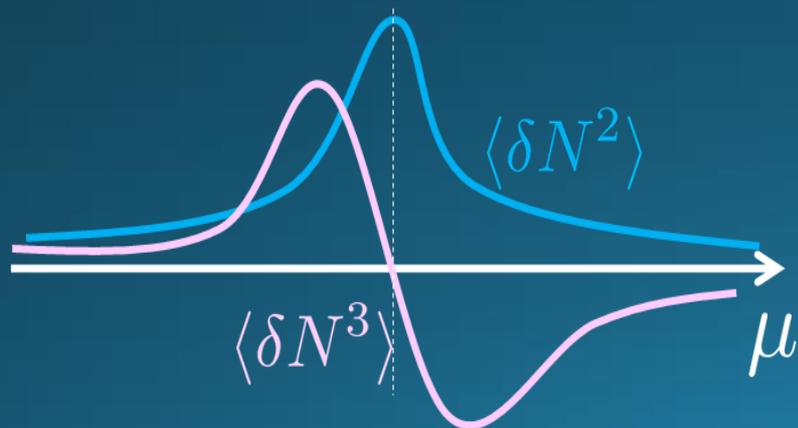


熱力学関係式

$$\langle N_B^3 \rangle_c = T \frac{\partial \langle N_B^2 \rangle_c}{\partial \mu_B}$$



相境界の手前と向こうが、 $\langle N_B^3 \rangle_c$ の符号で区別可能！



高次ゆらぎの符号

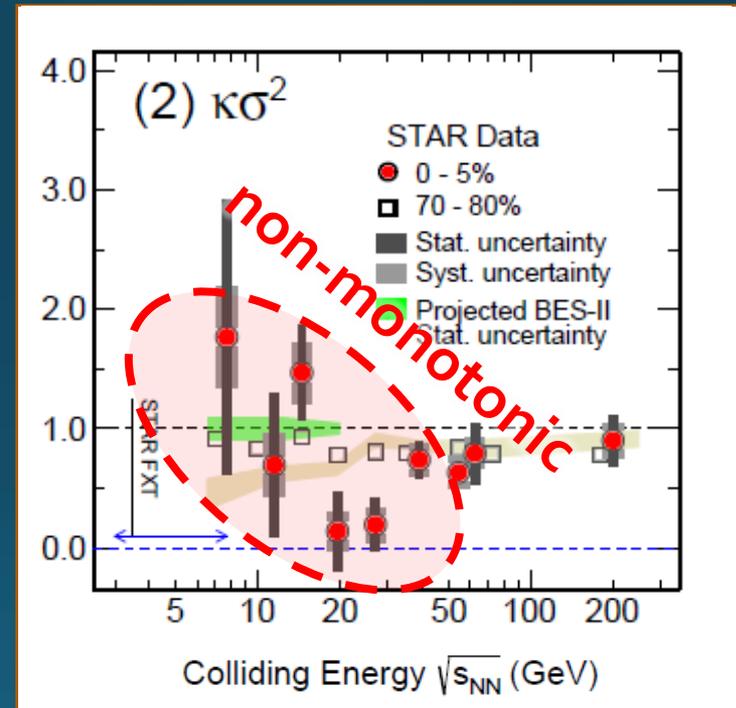
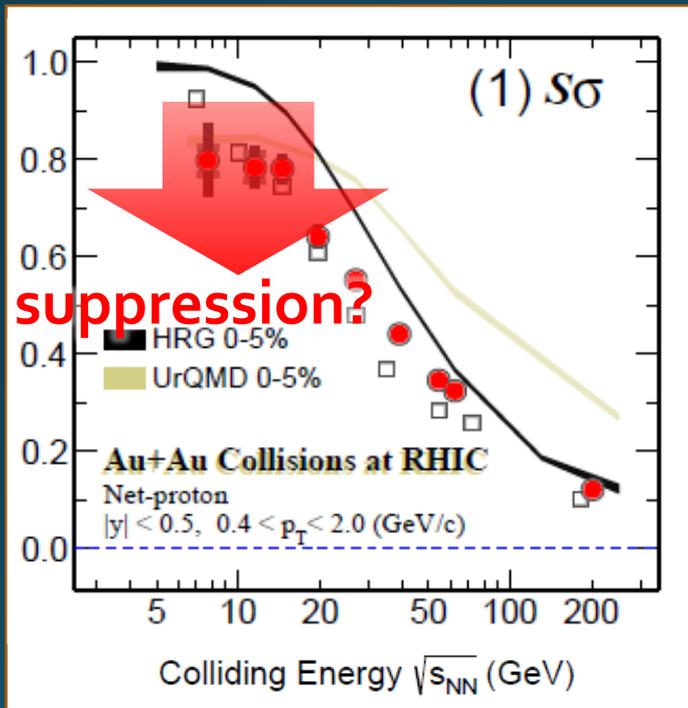
浅川, 江尻, 北沢, PRL '09

高次ゆらぎの符号変化は、
① QCD相図上に相境界が存在すること
② 相境界の「向こう側」を生成したこと
の直接的なシグナルとなる。

陽子数ゆらぎ：実験結果

$$\langle N_p^3 \rangle_c / \langle N_p^2 \rangle_c$$

$$\langle N_p^4 \rangle_c / \langle N_p^2 \rangle_c$$



STAR, 2001.06419

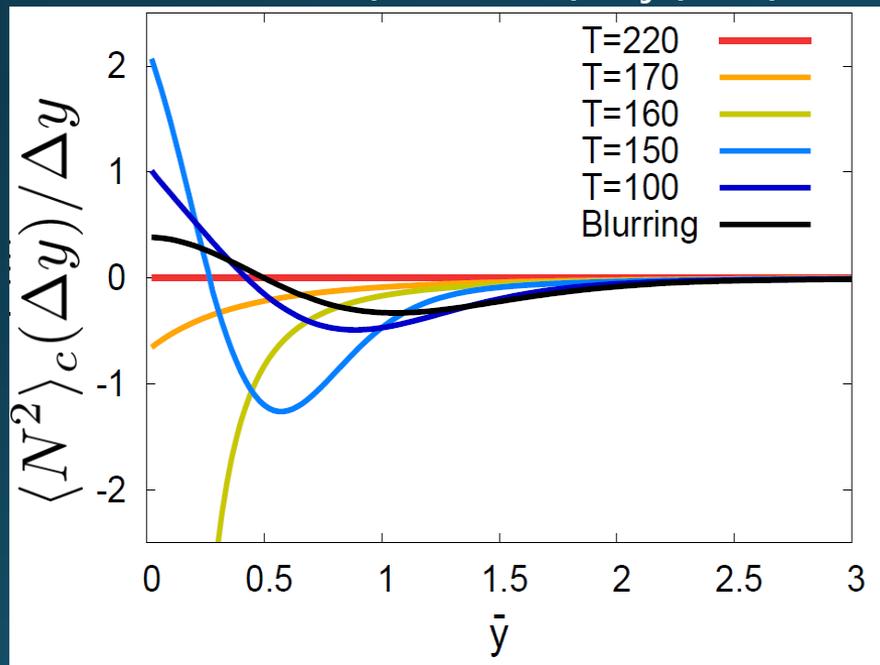
相転移の存在を示唆する非単調な振る舞い

Rapidity Window Dependence around QCD-CP in Stochastic Models

□ 2nd order cumulant

analytic solution

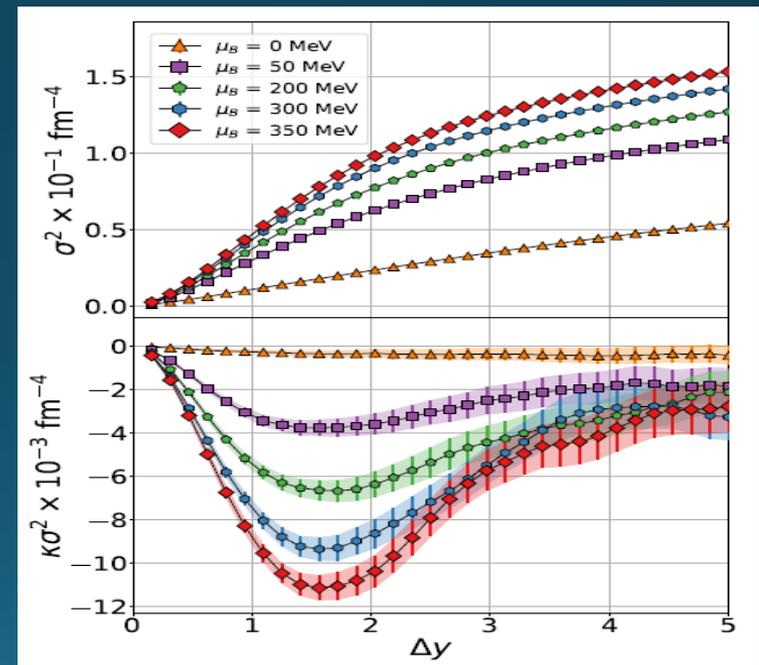
sakaida, Asakawa, Fujii, MK, 2018



□ higher order cumulants

numerical implementation

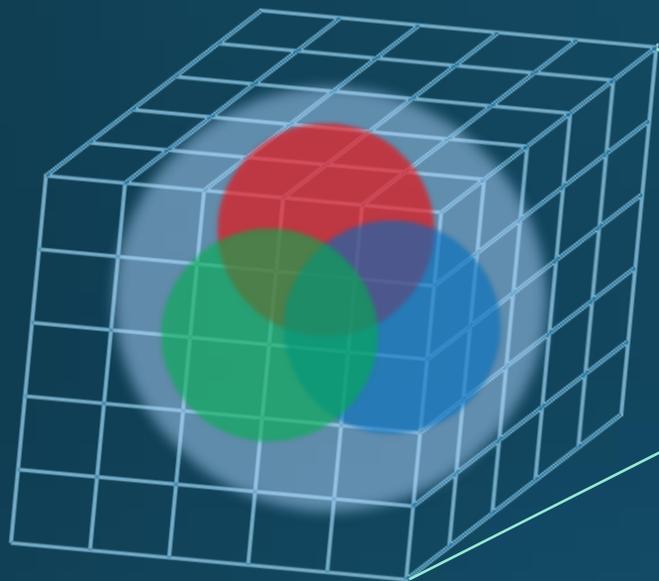
Pihan+, 2205.12834



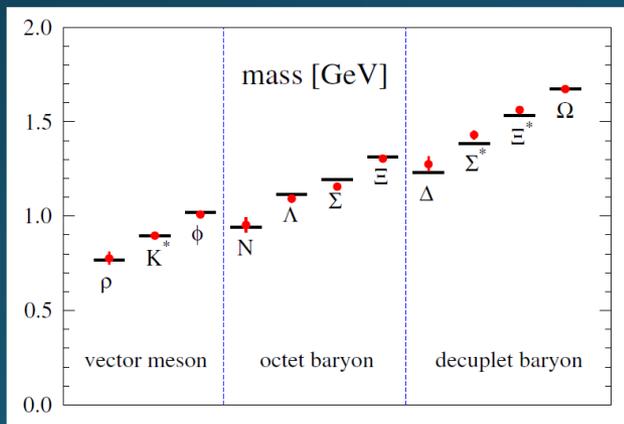
□ Non-monotonic Δy dependence can emerge reflecting the dynamical evolution.

格子QCD数値シミュレーション
による
クォーク閉じ込めの研究

格子QCD第一原理数値計算



ロハドロンの質量



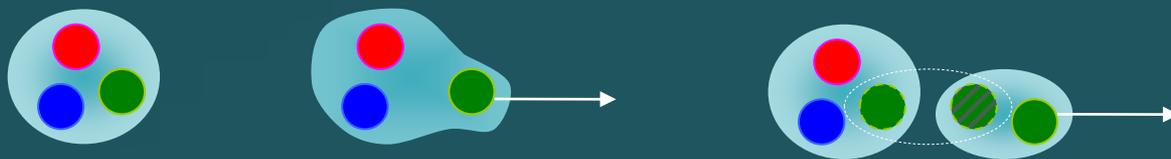
PACS-CS ('09)

QCDの非摂動的性質を
定量的に調べる
現状唯一の手段

クォークの閉じ込め

- クォークとグルーオンは、単独で観測されることはない。

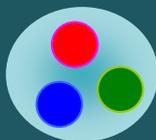
無理矢理取り出そうと引っ張ると...



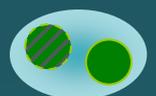
クォーク・反クォーク対を生成し、核子と中間子になる



我々の身の回りの物理の基本自由度



バリオン

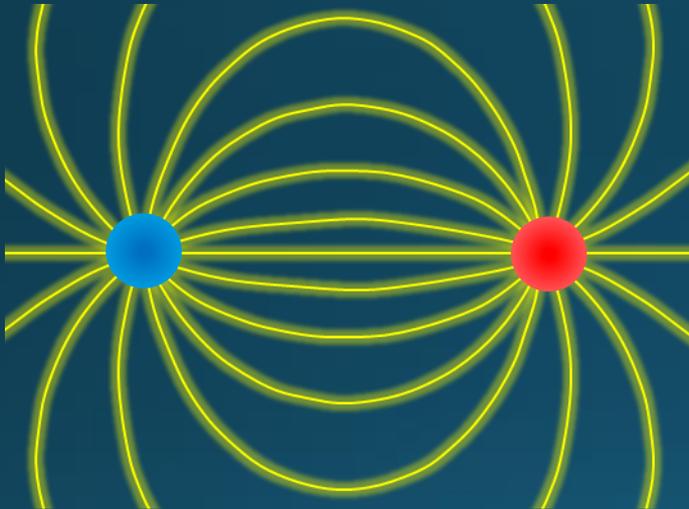


中間子 (メソン)

} ハドロン

クォーク閉じ込めの直感的説明 フラックスチューブ

電磁気学



力線が自由に広がる

QCD

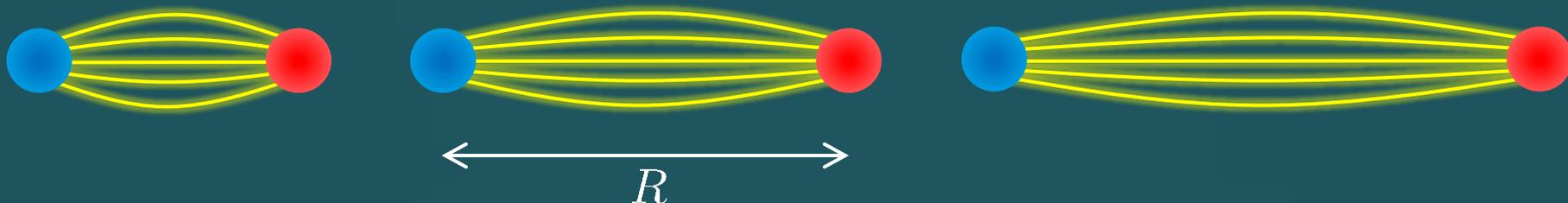


QCD真空はカラー場を排斥したがる
→ 力線が直線状の領域に集約

フラックスチューブ

フラックスチューブの性質

単位長さ当たりのエネルギーは、チューブの長さに依らず概ね一定

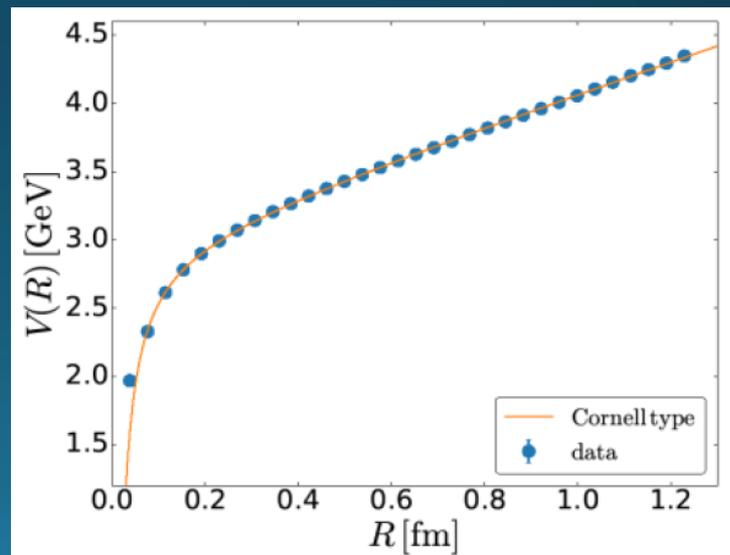


クォーク間ポテンシャル

$$V(R) \sim \frac{\alpha}{R} + \underbrace{\sigma R}_{\text{弦張力項}}$$

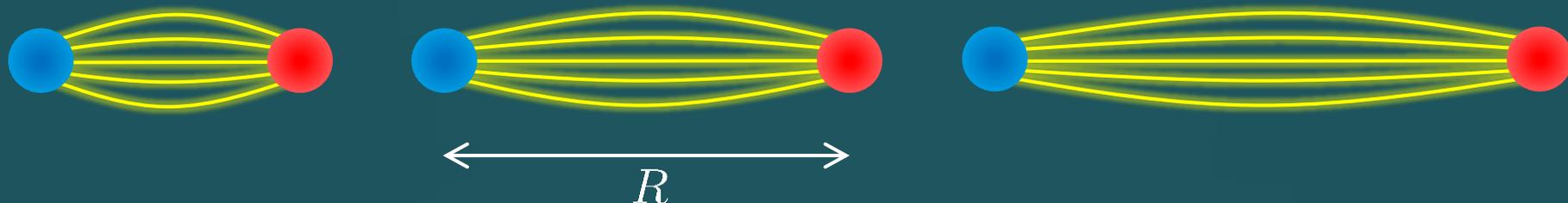
格子数値計算による結果 →

チューブ形成の“証拠”



フラックスチューブの性質

単位長さ当たりのエネルギーは、チューブの長さに依らず概ね一定



クォーク閉じ込めの説明

クォークを無理矢理取り出そうと引っ張ると...
チューブが伸びてエネルギーが増え続ける



クォーク・反クォーク対を生成し、核子とメソンになる

力の伝達

遠隔作用



Newton
1687

m_1, q_1



m_2, q_2



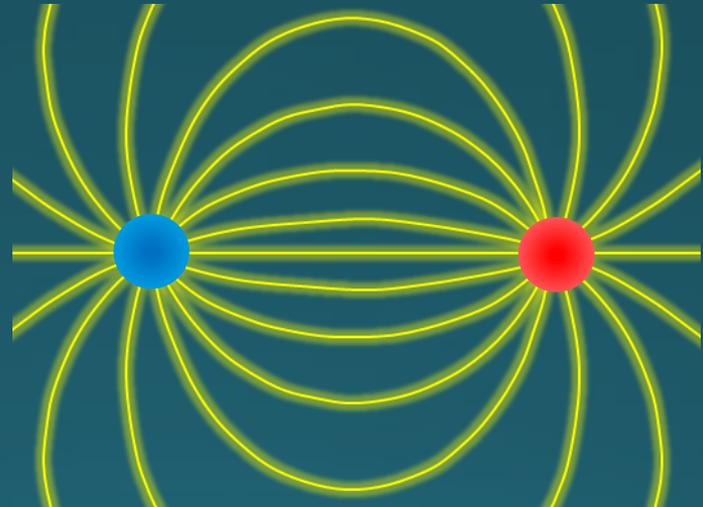
$$F = -G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

$$F = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

近接作用

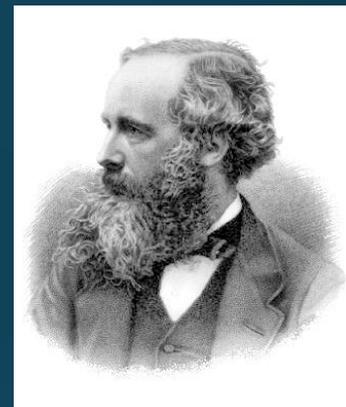


Faraday
1839



マックスウェル応力

$$\sigma_{ij} = \varepsilon_0 E_i E_j + \frac{1}{\mu_0} B_i B_j - \frac{1}{2} \delta_{ij} \left(\varepsilon_0 E^2 + \frac{1}{\mu_0} B^2 \right)$$

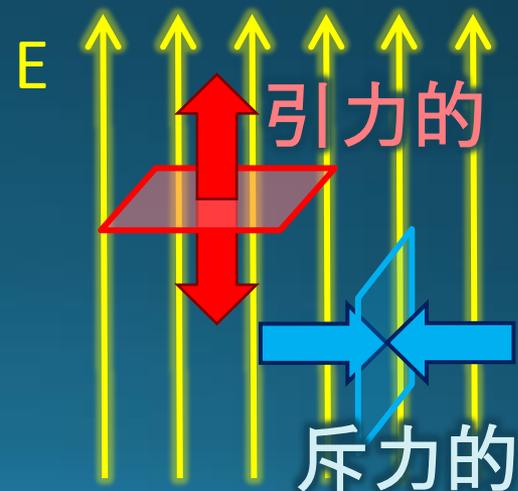


Maxwell

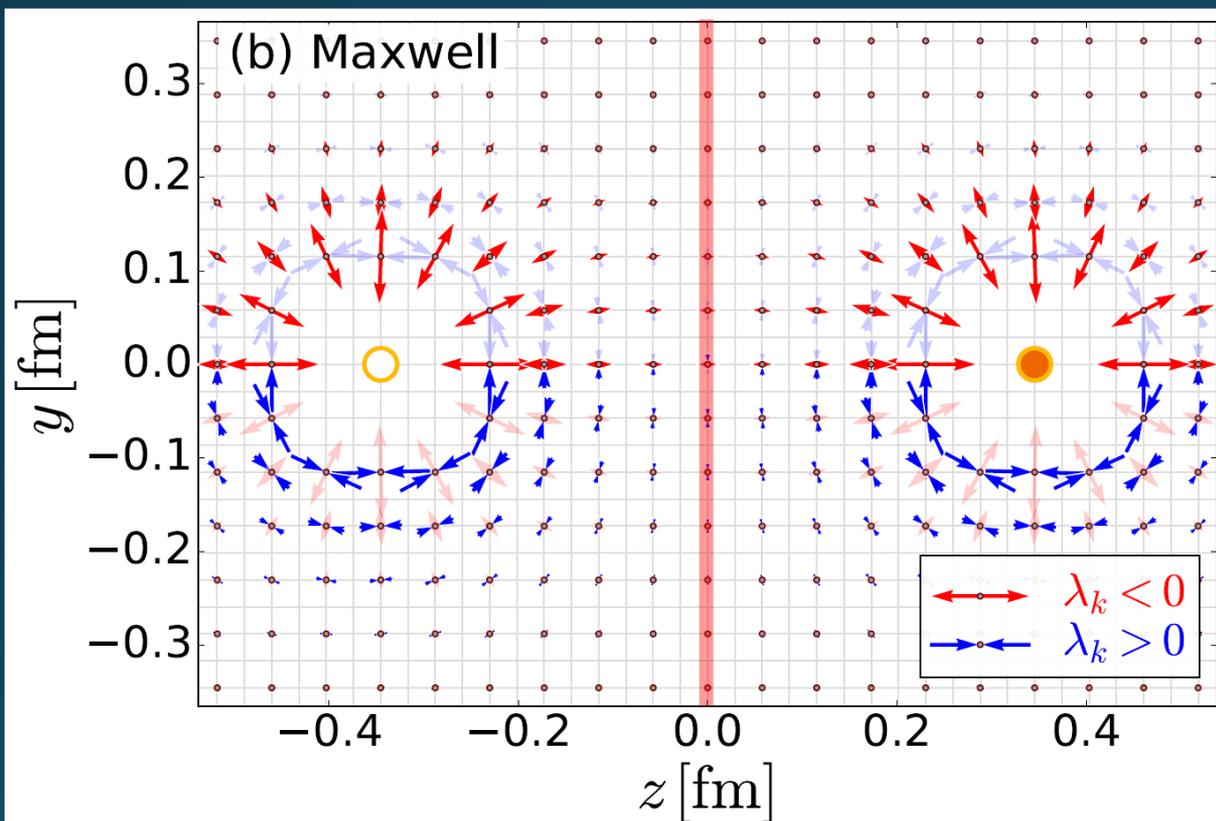
$$\vec{E} = (E, 0, 0)$$

$$T_{ij} = \begin{pmatrix} -E^2 & 0 & 0 \\ 0 & E^2 & 0 \\ 0 & 0 & E^2 \end{pmatrix}$$

- 場に平行方向：引力的
- 場に垂直方向：斥力的



マックスウェル応力



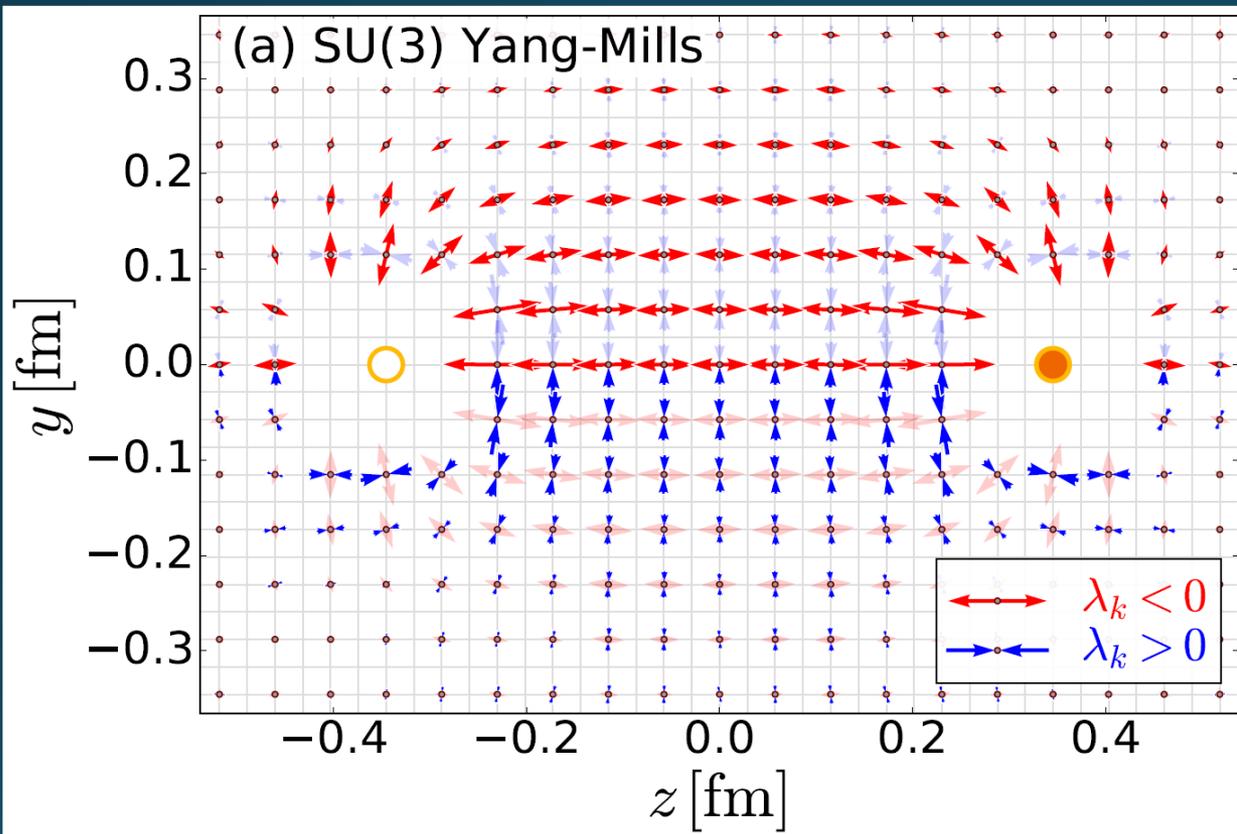
$$T_{ij}v_j^{(k)} = \lambda_k v_i^{(k)}$$

$(k = 1, 2, 3)$

線の長さ = 電場の強さ



クォーク・反クォーク系



格子QCD数値計算

SU(3) Yang-Mills

$a=0.029$ fm

$R=0.69$ fm

$t/a^2=2.0$

柳原、北沢、他

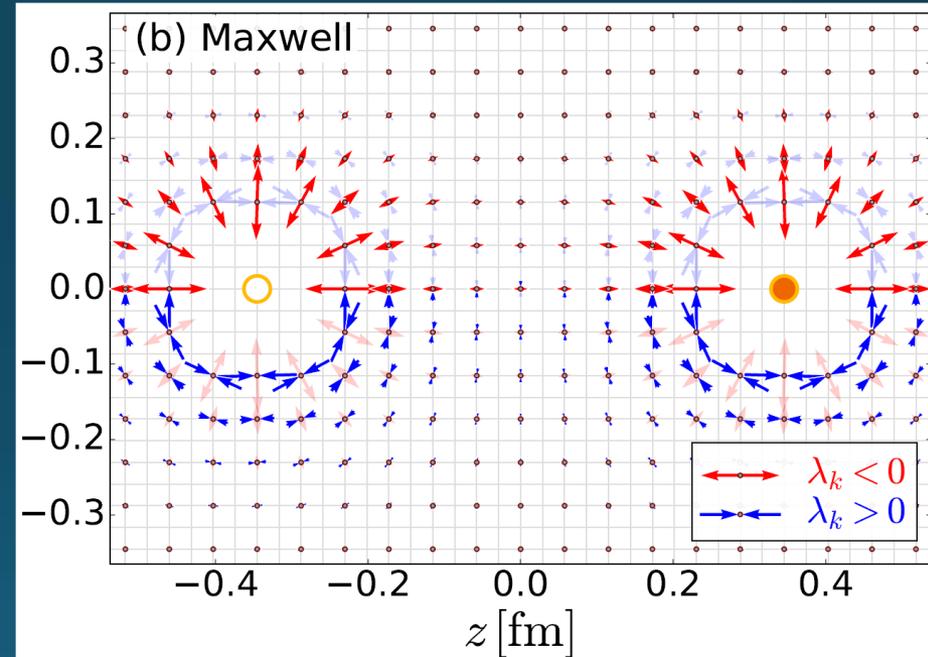
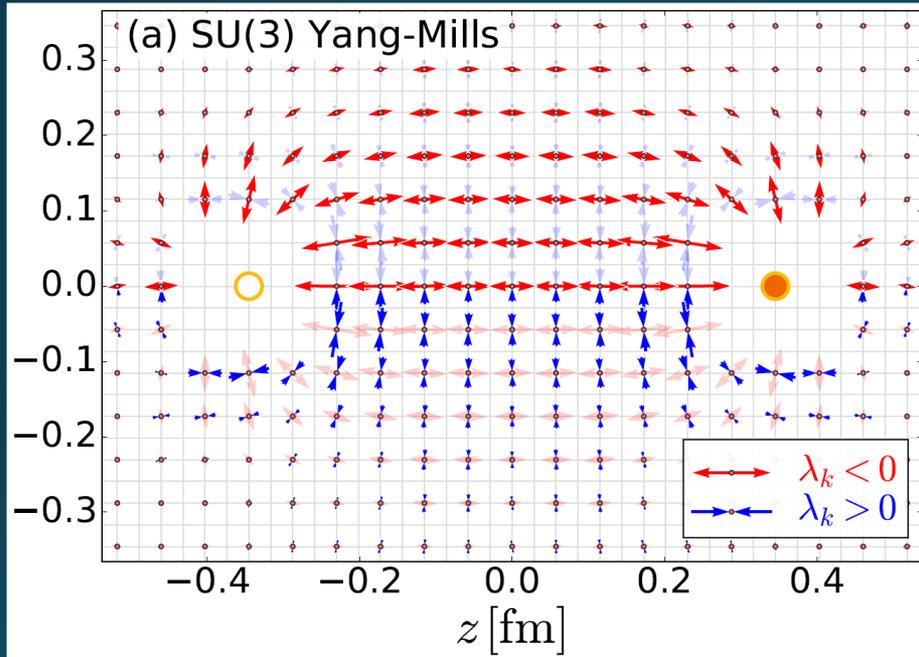
2019 (Physics Letters)

線の長さ＝場の強さ

両者の比較

クォーク・反クォーク系

電磁気学



□ クォーク・反クォーク系では、力の伝達構造がチューブ状に絞られる = flux tube

電子

原子核

まとめ

宇宙はビッグバンから開闢し、誕生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。

格子QCD数値シミュレーションも発展中。

QCD相構造を探索する研究が絶賛進行中。
特に「ゆらぎ」は有用な観測量。

原子核理論研究室が行う
クォーク・ハドロン物理

素粒子論

物性論

場の理論

量子統計力学

量子色力学(QCD)

格子QCD数値解析

相転移

ゆらぎ

電弱統一理論

臨界現象

原子核理論研究室が行う
クォーク・ハドロン物理

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・ハイパー核実験

重力波

超新星爆発

T2K実験

宇宙

実験

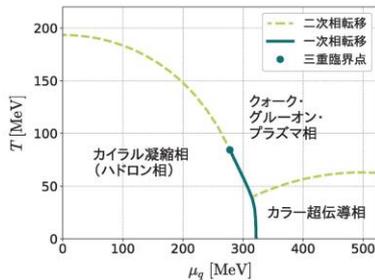
質問歓迎します！

宣伝

Frontiers in Physics 29

超高温・高密度のクォーク物質

素粒子の世界の相転移現象



北沢正清 [著]
国広悌二



29

基本法則から読み解く物理学最前線

須藤彰三 [監修]
岡 真

基本法則から読み解く物理学最前線 29

超高温・高密度のクォーク物質
—素粒子の世界の相転移現象—

ark Matter under Eetreme Conditions
Phase Transitions in the
World of Elementary Particles

共立出版

2022年9月10日 初版1刷発行

著者 北沢正清・国

監修 須藤彰三
岡 真

発行者 南條光章

発行所 共立出版

東京都文京区小
電話 03-3947-
郵便番号 112-
振替口座 0011
www.kyoritsu-

- クォーク物質の相構造
- 重イオン衝突実験
- 格子QCD数値シミュレーション
- 自発的対称性の破れ
- 超伝導とNJL模型

Product Solutions Open Source Pricing

MasakiyoK / Saizensen Public

Code Pull requests Actions Projects Security Insights

Go to file Code About

No description, website, Readme, 3 stars, 1 watching

Releases: No releases published

Files:

- Chap1 first version June 2022 5 months ago
- Chap2 first version June 2022 5 months ago
- Chap3 first version June 2022 5 months ago
- Chap4 first version June 2022 5 months ago
- Chap5 first version June 2022 5 months ago
- Chap7 first version June 2022 5 months ago
- Chap8 first version June 2022 5 months ago
- cover first version June 2022 5 months ago
- readme.md Add files via upload 2 months ago
- 正誤表.md Update 正誤表.md 2 months ago

Languages

現代物理学 小レポート

レポート課題：

本日の講義で、印象に残った内容を具体的かつ簡潔に記述せよ。

(感想を含んでもよい。) また、疑問に思ったことや、自分で調べる／考える／試す などしてみたいと思ったことがあればそれも書く。

提出方法：

PandA → [2022後期火4]現代物理学 → 課題 より提出

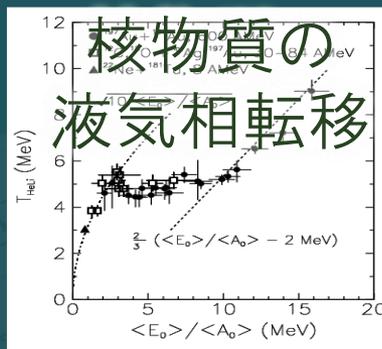
締め切り： 明日午前9時

宇宙最高密度の一次相転移 = 物質による真空の破壊



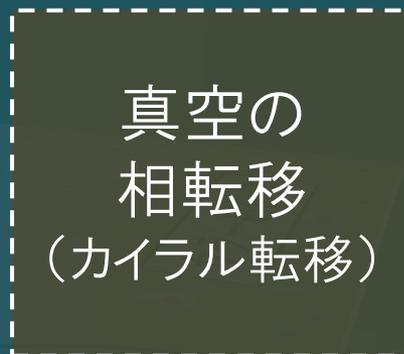
水の沸騰

1g/cm^3



核物質の
液気相転移

10^{14}g/cm^3



10^{15}g/cm^3

◆◆◆ 解説 ◆◆◆

非ガウスゆらぎで探る宇宙最高密度の相転移



北沢正清

大阪大学大学院理学研究科
kitazawa@phys.sci.osaka-u.ac.jp



野中俊宏

筑波大学数理解物質系
nonaka.toshihiro.ge@u.tsukuba.ac.jp



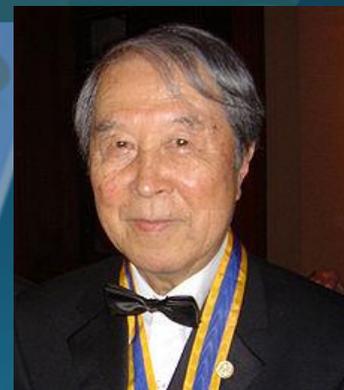
江角晋一

筑波大学数理解物質系
esumi.shinichi.gn@u.tsukuba.ac.jp

現在、およそ 10^{15}g/cm^3 という超高密度で実現するとされる相転移の実験的探索が世界各地の実験施設で行われているのをご存知だろうか。その相転移は、強い相互作用によるクォーク数密度の急激な変化と、 10^{15}g/cm^3 程度の超高密度での相転移である。

これら一連の実験が目指すのは、非ガウスゆらぎによる高密度相転移の直接的検証である。

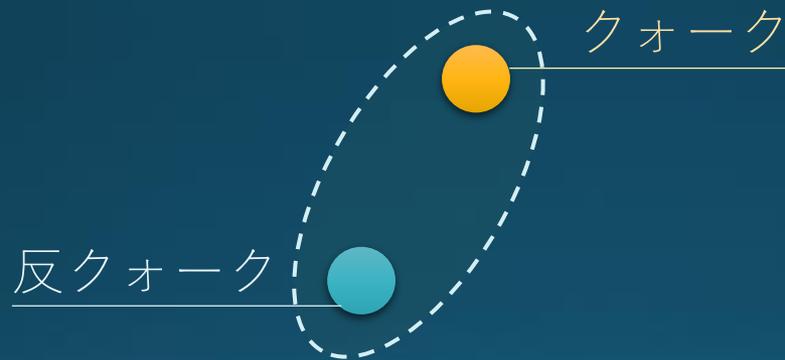
日本物理学会誌
2021年8月号



南部理論の
直接的検証

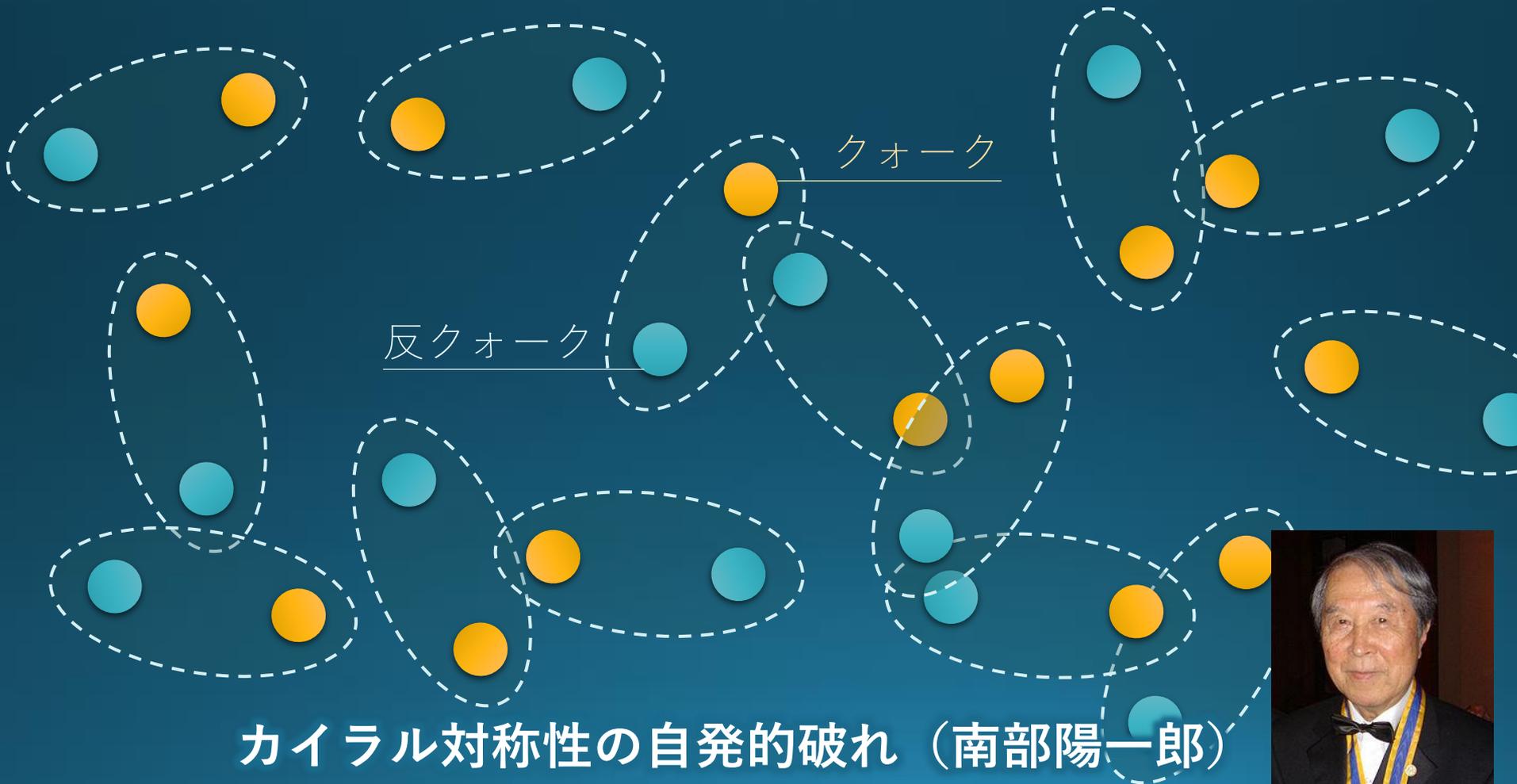
QCDの真空状態

我々の真空は、クォークの「凝縮」で埋め尽くされている



QCDの真空状態

我々の真空は、クォークの「凝縮」で埋め尽くされている



カイラル対称性の自発的破れ (南部陽一郎)

