

素粒子の世界の 相転移現象

北沢正清

京都大学基礎物理学研究所

研究紹介・奈良学園， 2026年1月20日

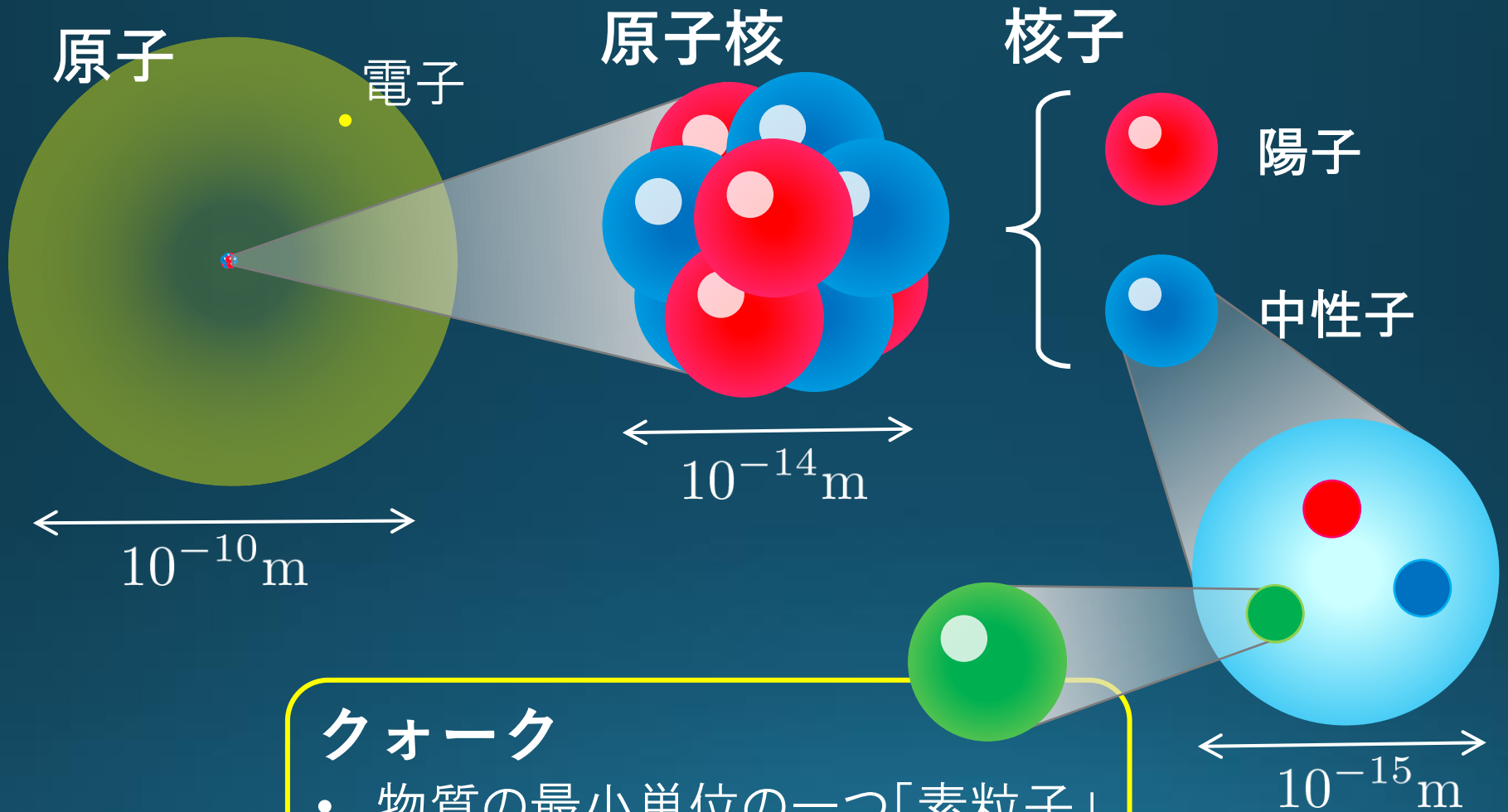
専門

「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

(3人の中高生の父)

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

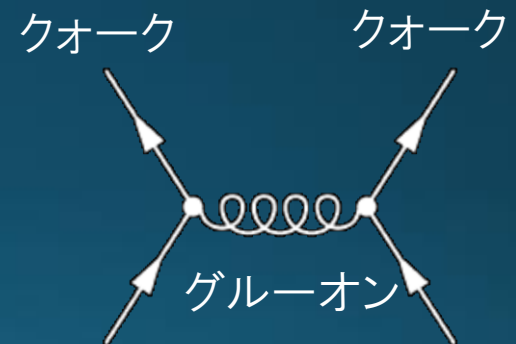
量子色力学

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



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が多い

クォーク

クォーク



出典:毎日新聞(第75期王将戦第1局)

高温の状態



水蒸気 100°C

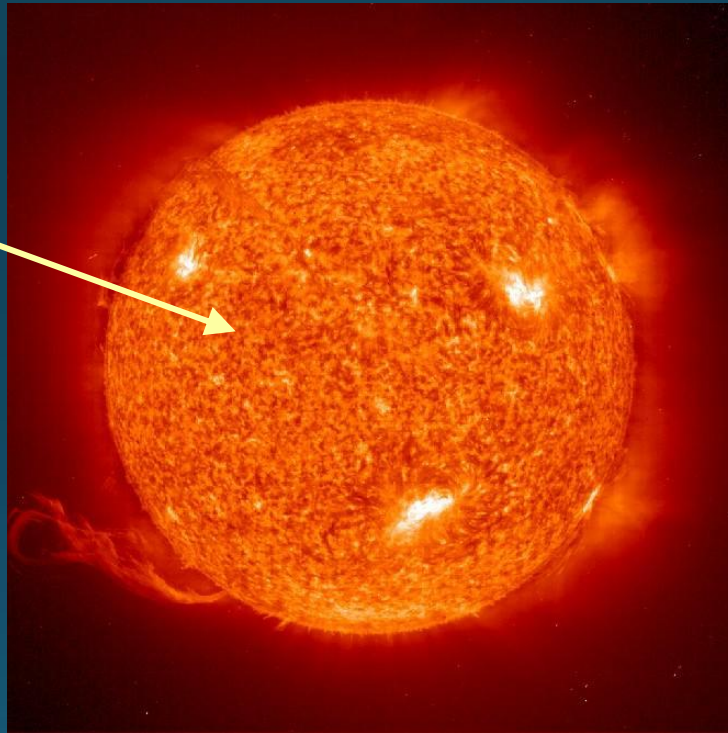


溶解した鉄 1500°C

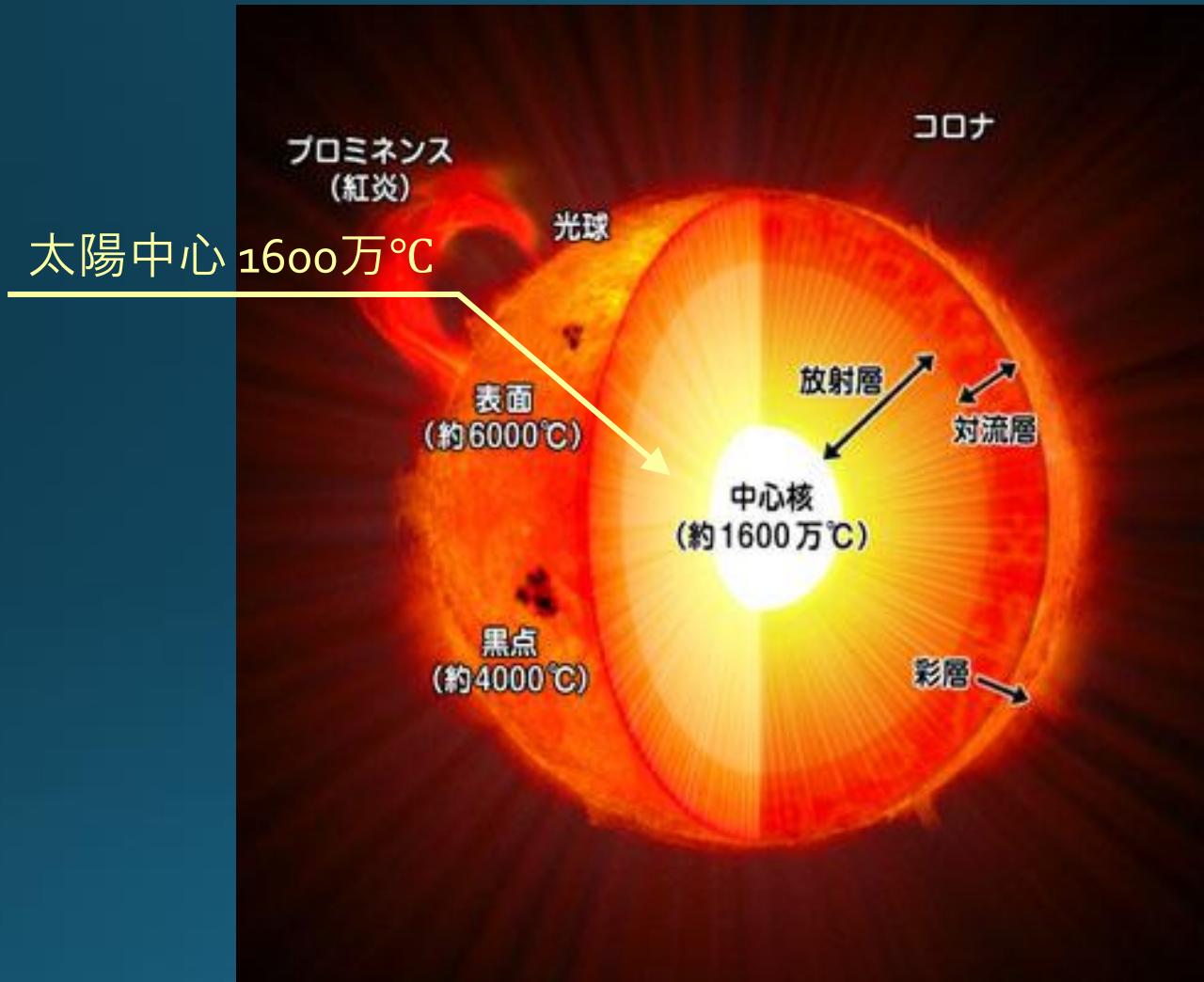


高温の状態 2

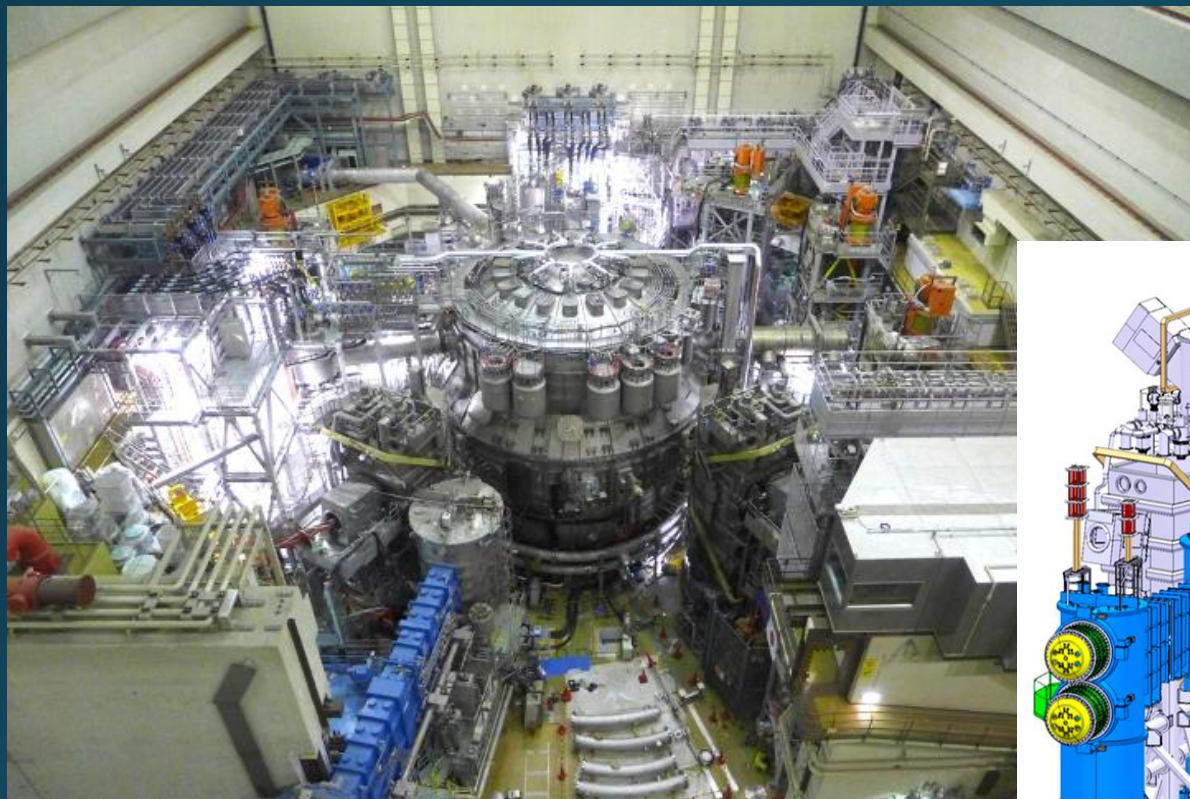
太陽表面 6000°C



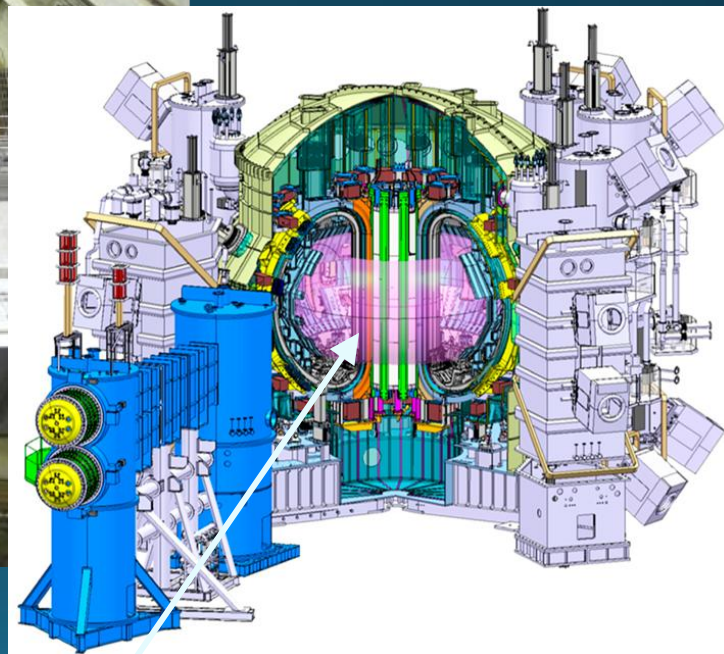
高温の状態 2



高温の状態 3



量子科学技術研究開発機構
核融合炉JT-60SA



核融合プラズマ 1億度以上

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？

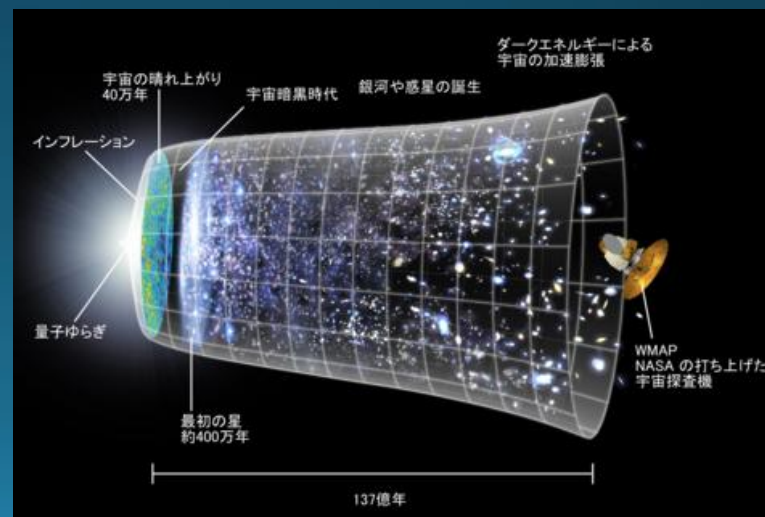
初期宇宙の超高温物質

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



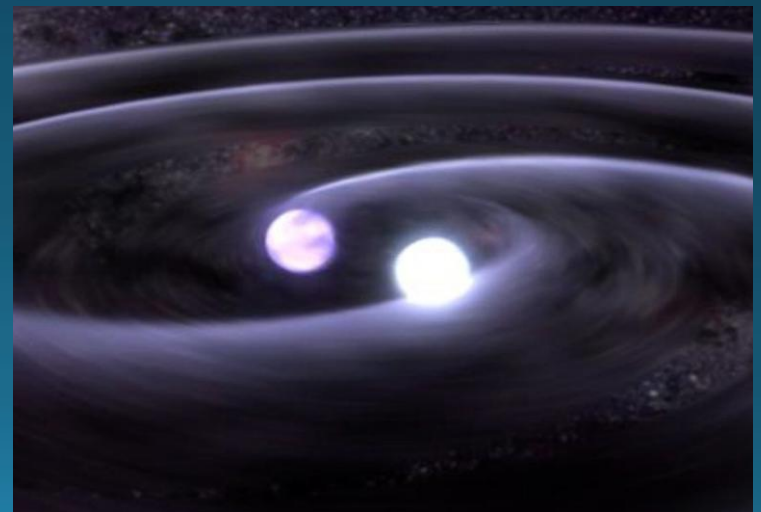
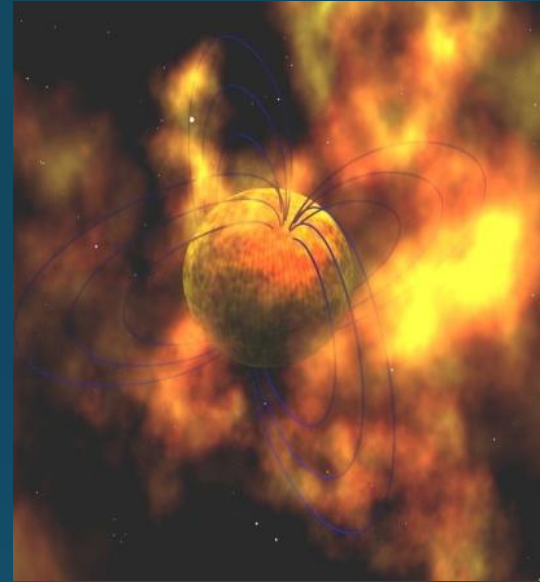
中性子星 = 超高密度天体

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



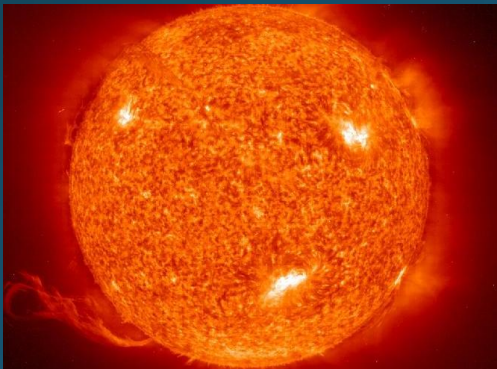
100°C

水が、液体から気体に相転移



約1500°C

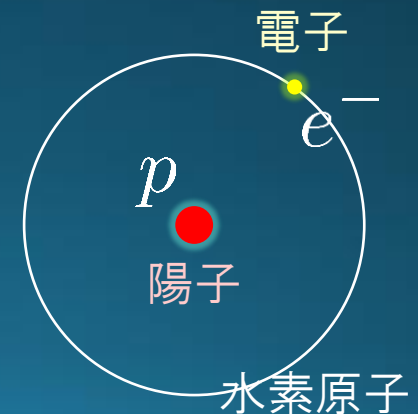
鉄が、固体から液体に相転移



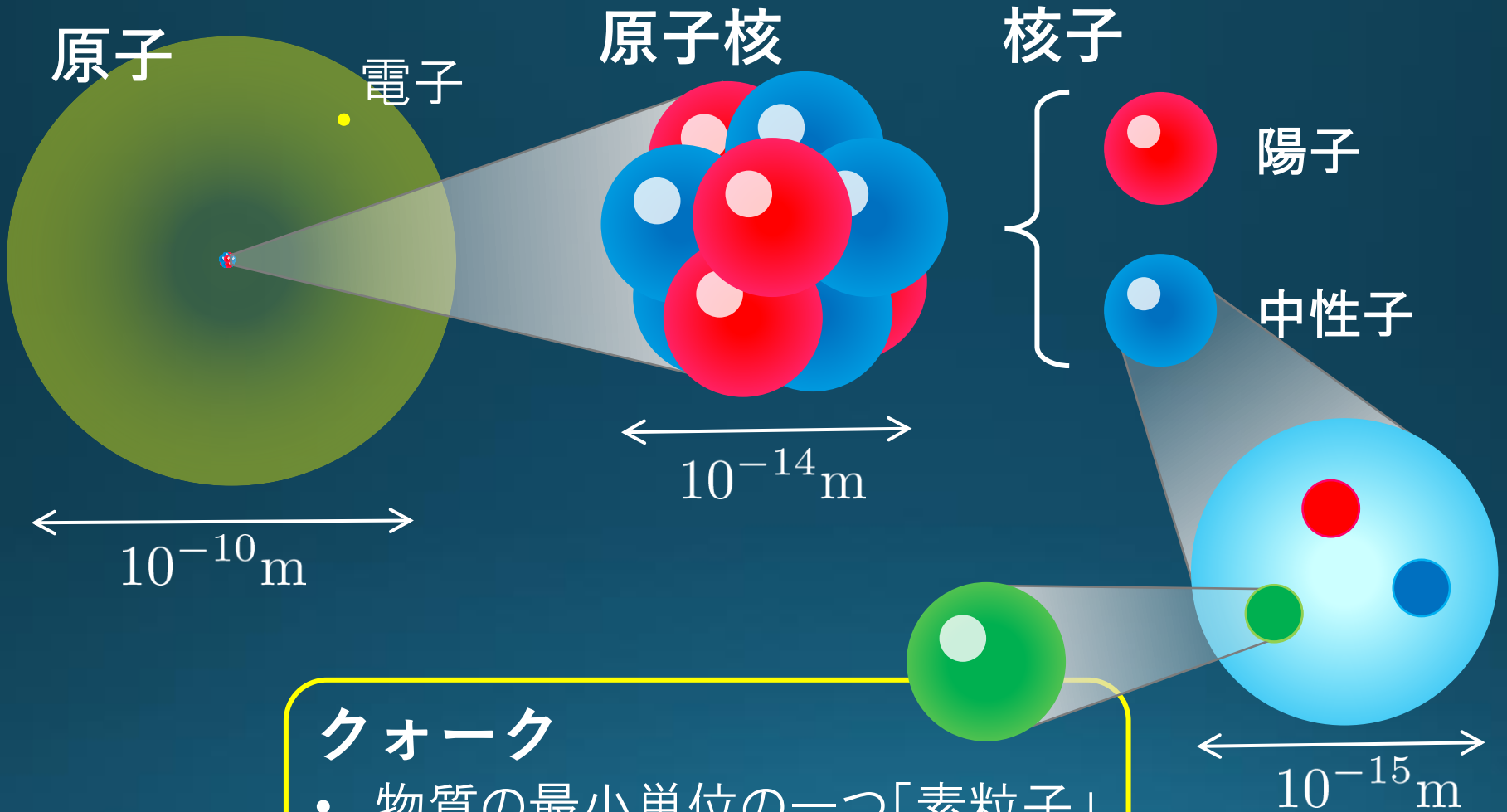
約10000°C～

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？



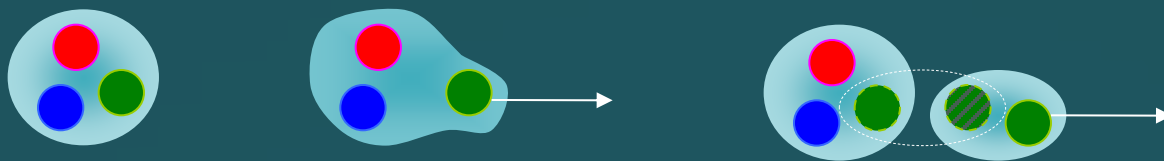
クォーク

- 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

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。

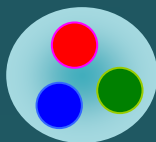
無理矢理取り出そうと引っ張ると...



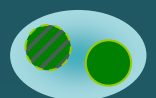
クォーク・反クォーク対を生成し、核子と中間子になる



我々の身の回りの物理の基本自由度



バリオン

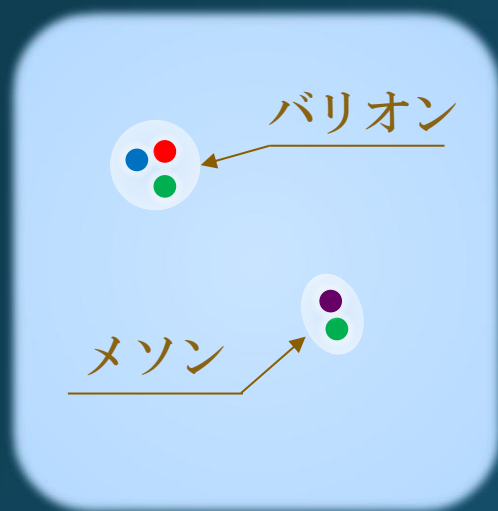


中間子 (メソン)

} ハドロン

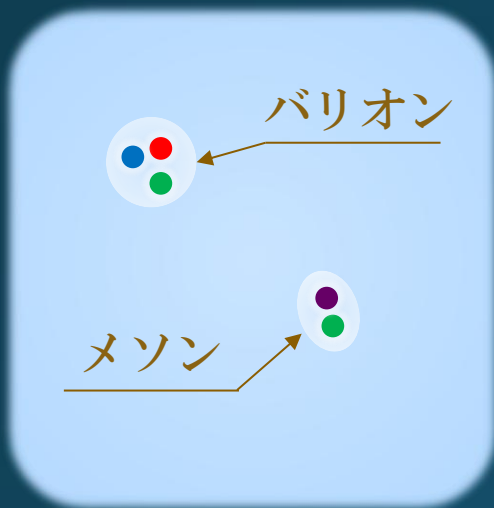
素粒子階層の相転移現象

真空



素粒子階層の相転移現象

真空



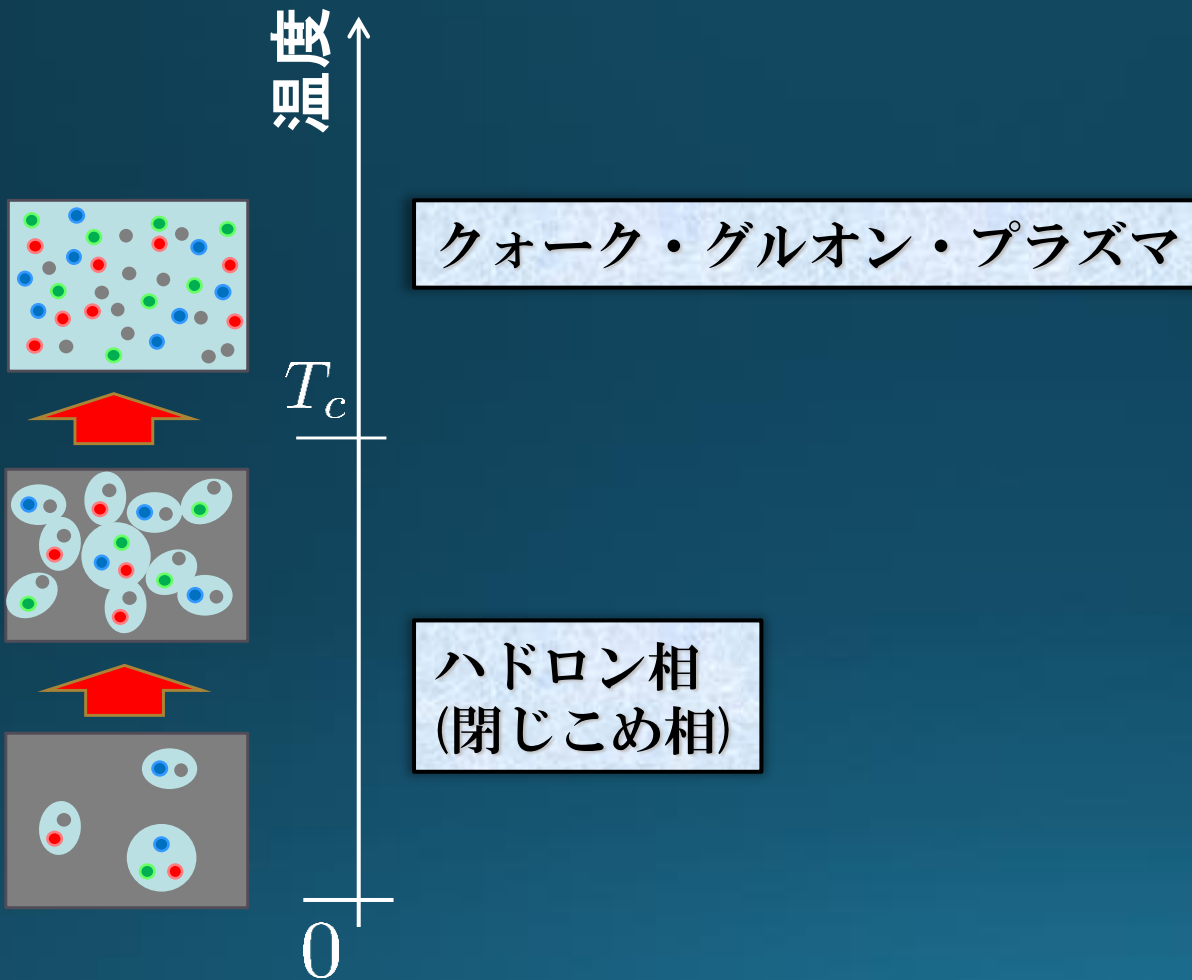
温度を上げていくと ...



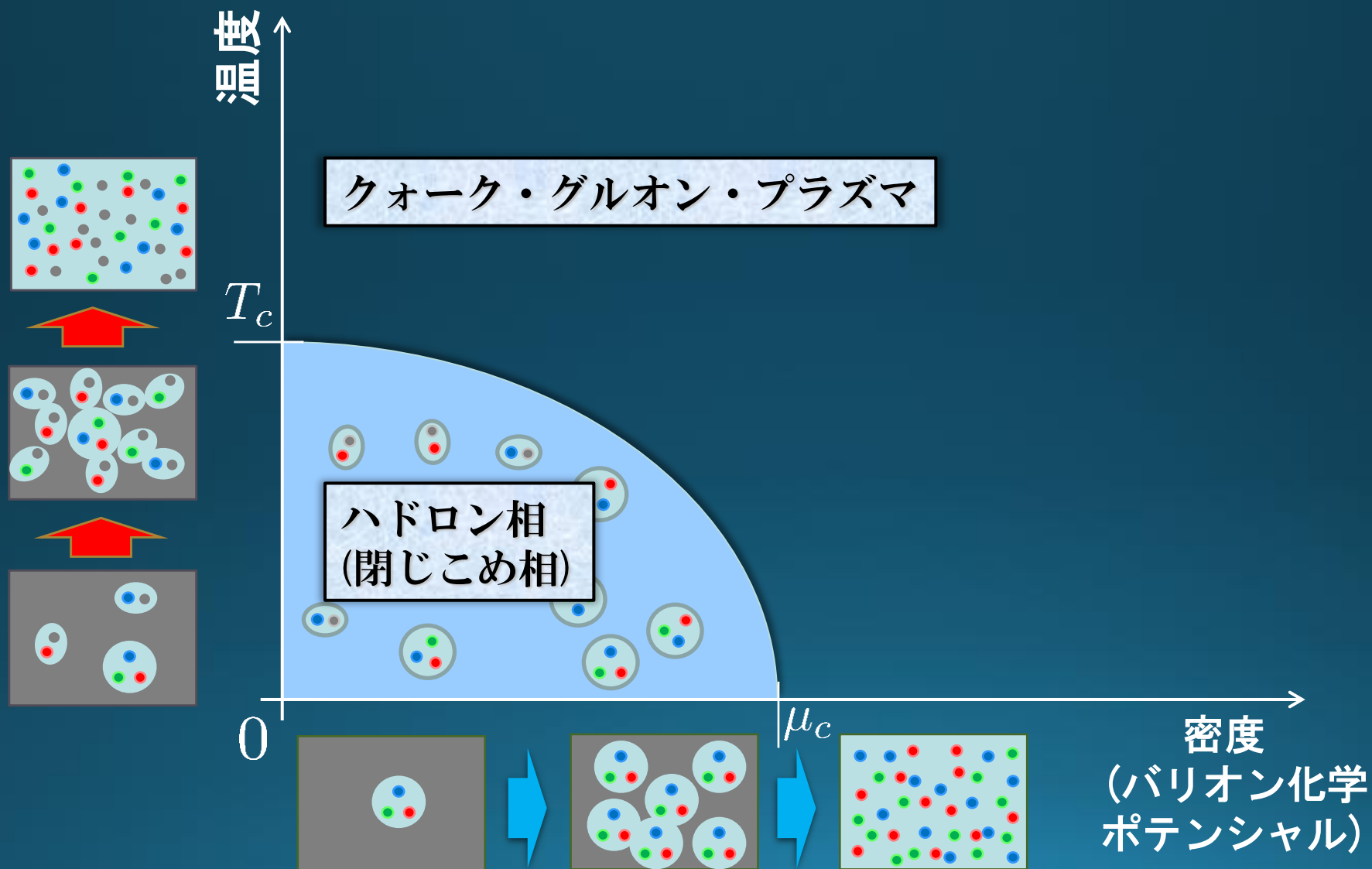
クォーク物質
(クォークグルーオンプラズマ)

ハドロンを構成するクォークが溶け出す
素粒子の世界の相転移現象

QCDの相図



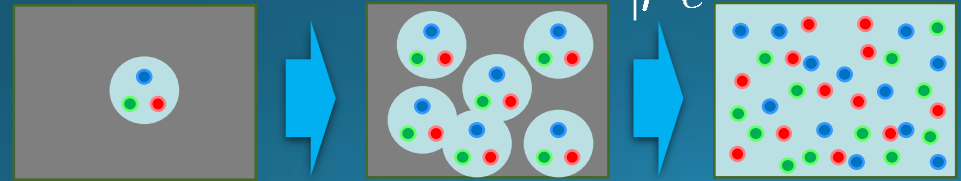
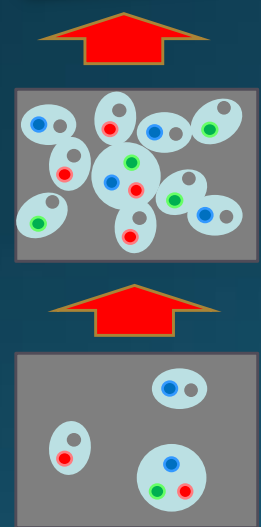
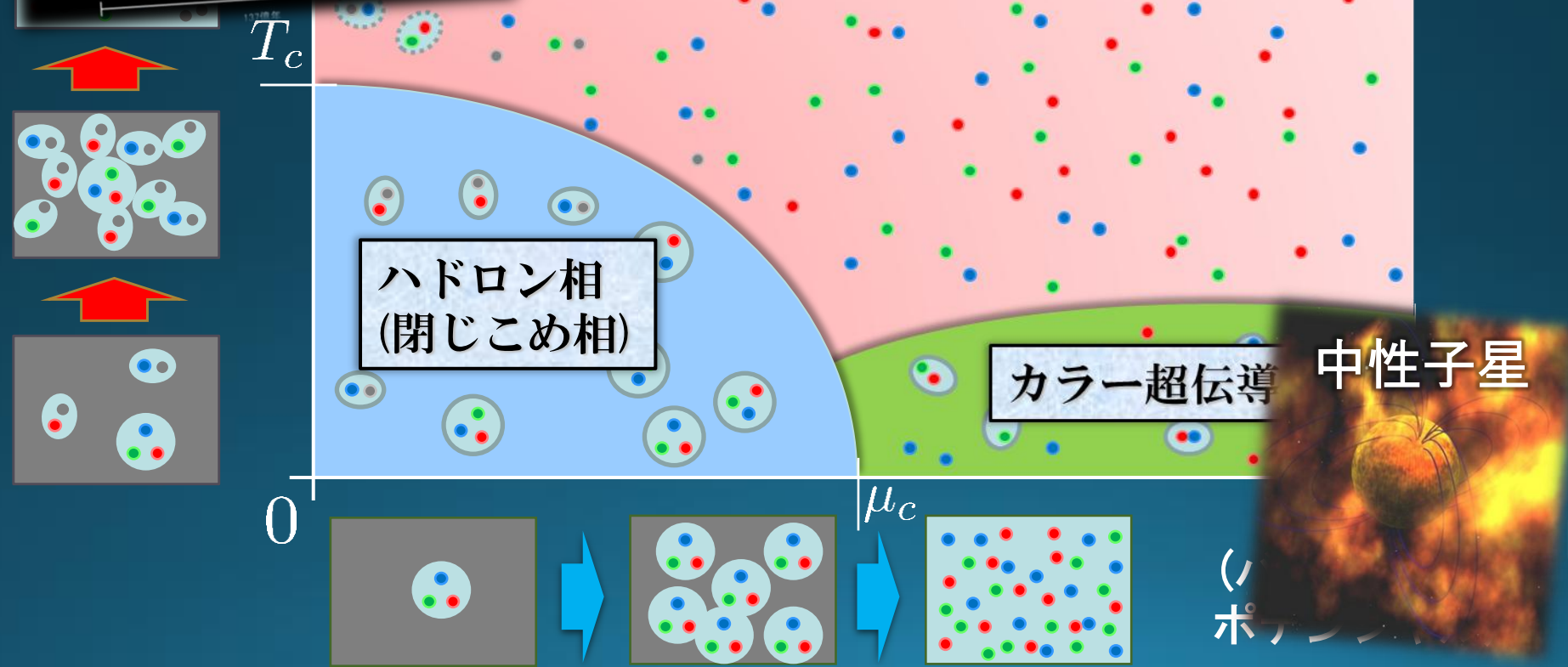
QCDの相図



QCDの相図



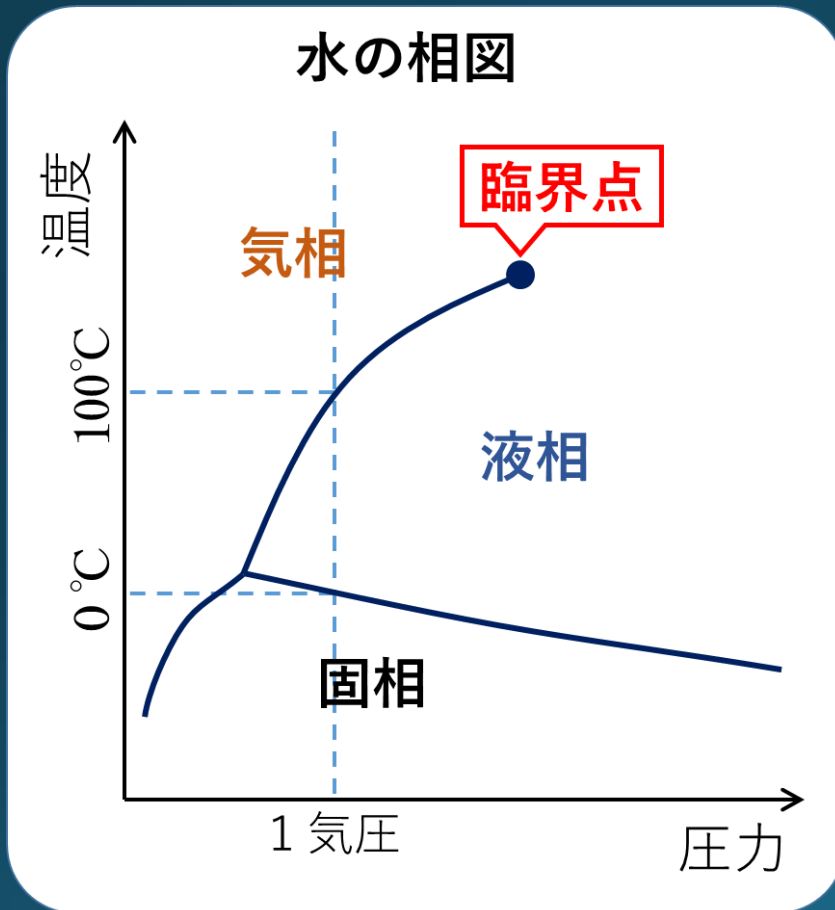
ク・グルオン・プラズマ



(ク・グルオン・プラズマ)

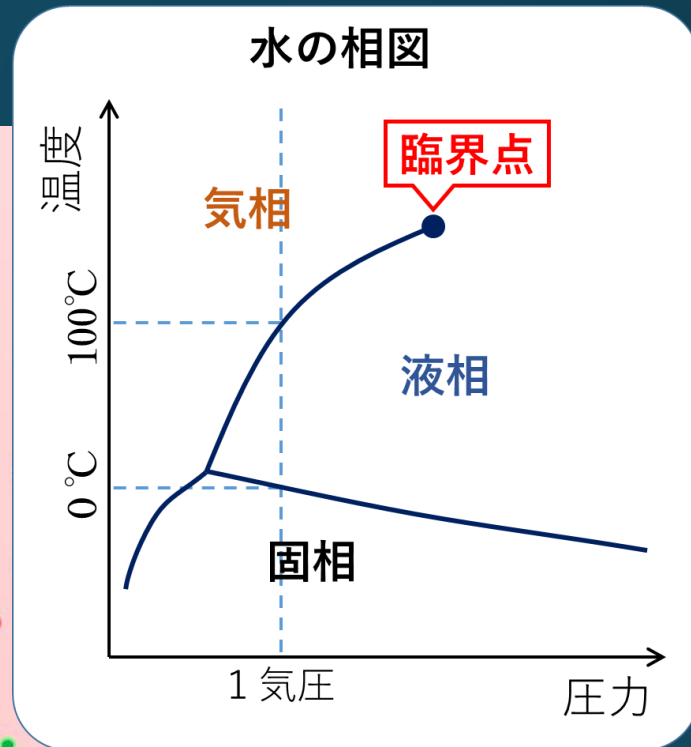
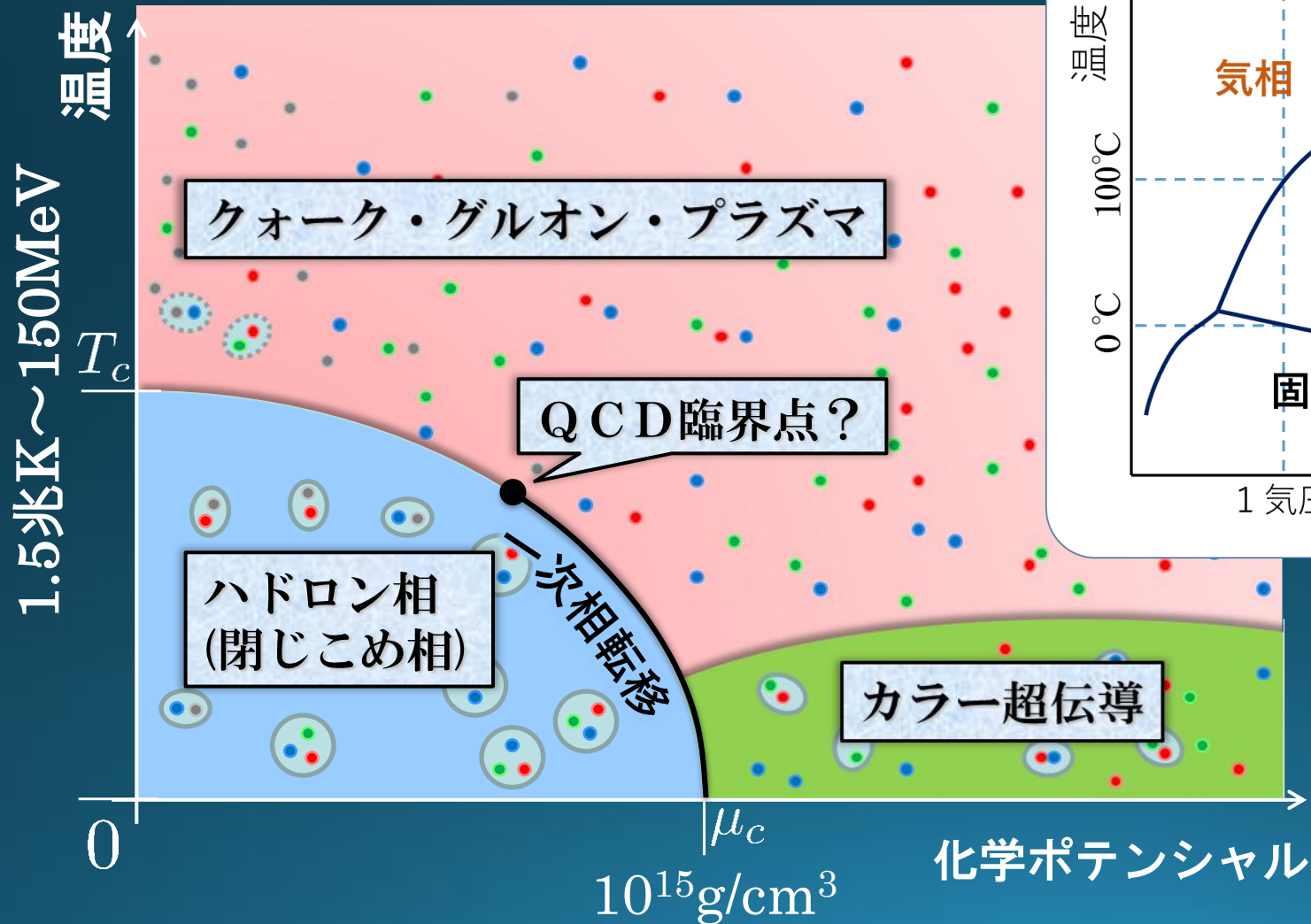
ポルカ

物質の三態

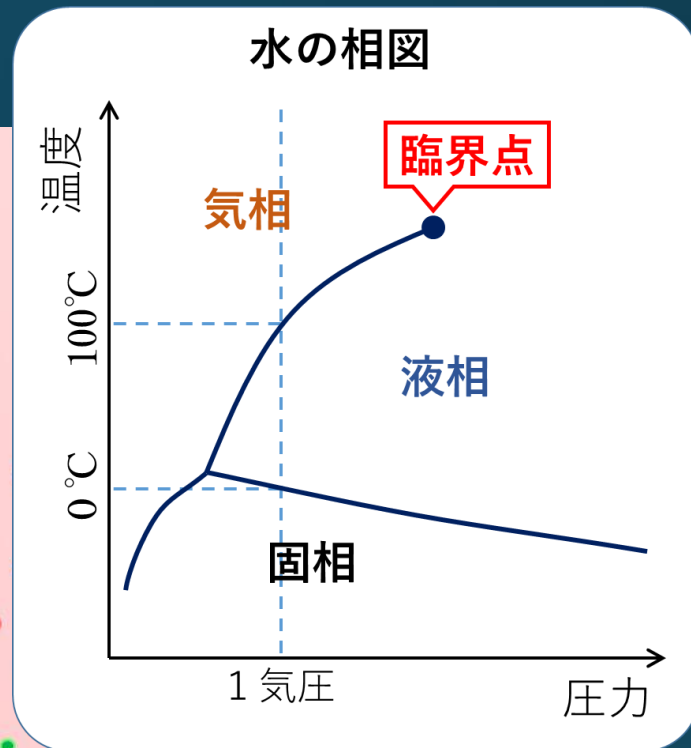
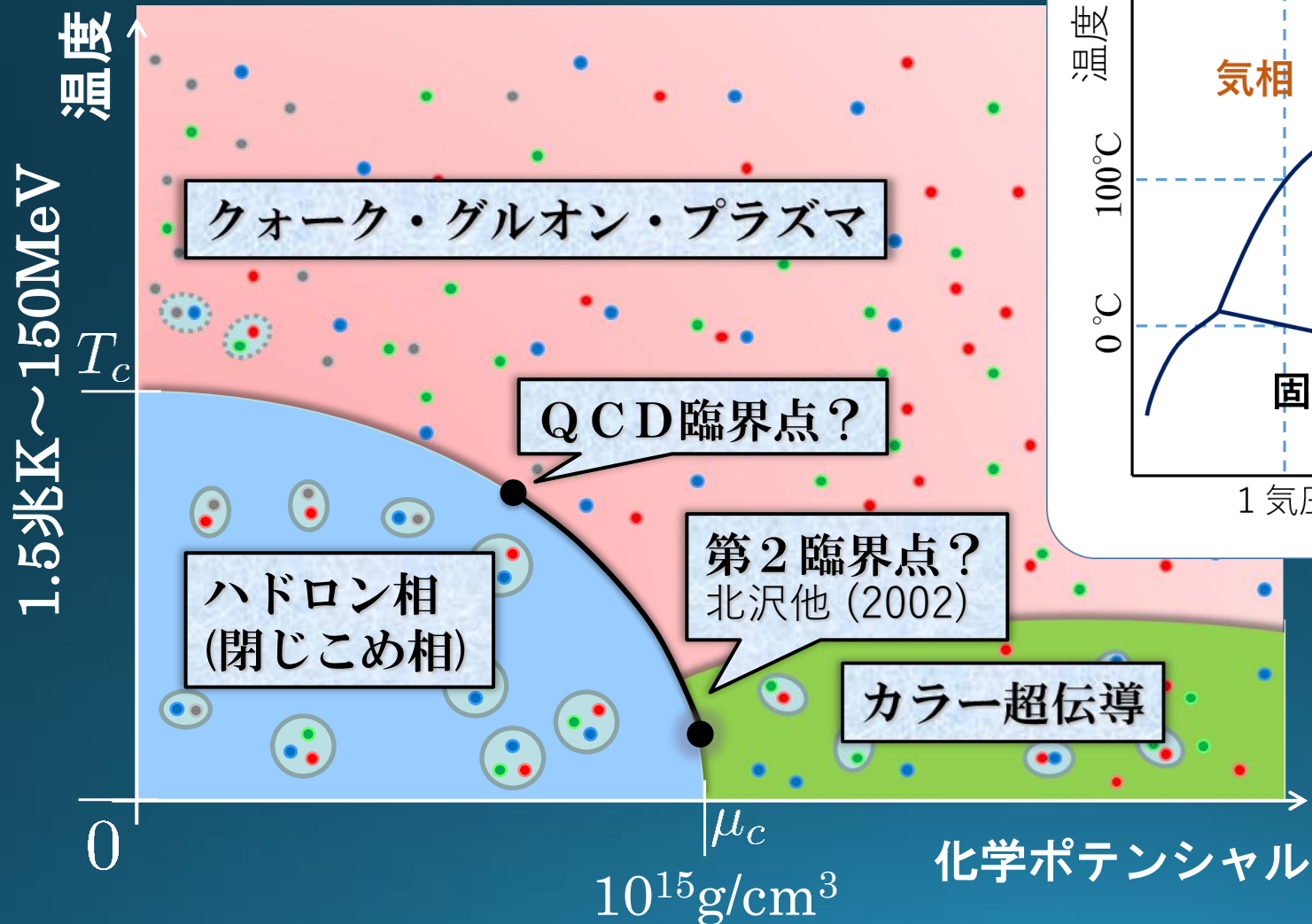


- 大気圧下で、液相と気相は不連続に変化
→ 一次相転移
- 超高圧では、一次相転移が消失
- 一次相転移の終点は、**臨界点**と呼ばれる
- **臨界点**は、物理学においてとても重要な研究対象

相転移の次数



相転移の次数



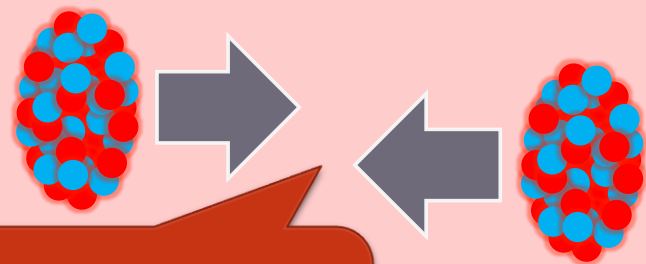
超高温・高密度物質を
地上の実験で作ります

相対論的重イオン衝突実験

新粒子探索



初期宇宙の生成



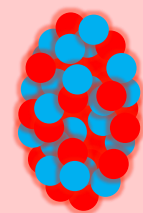
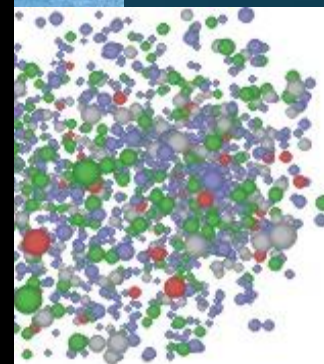
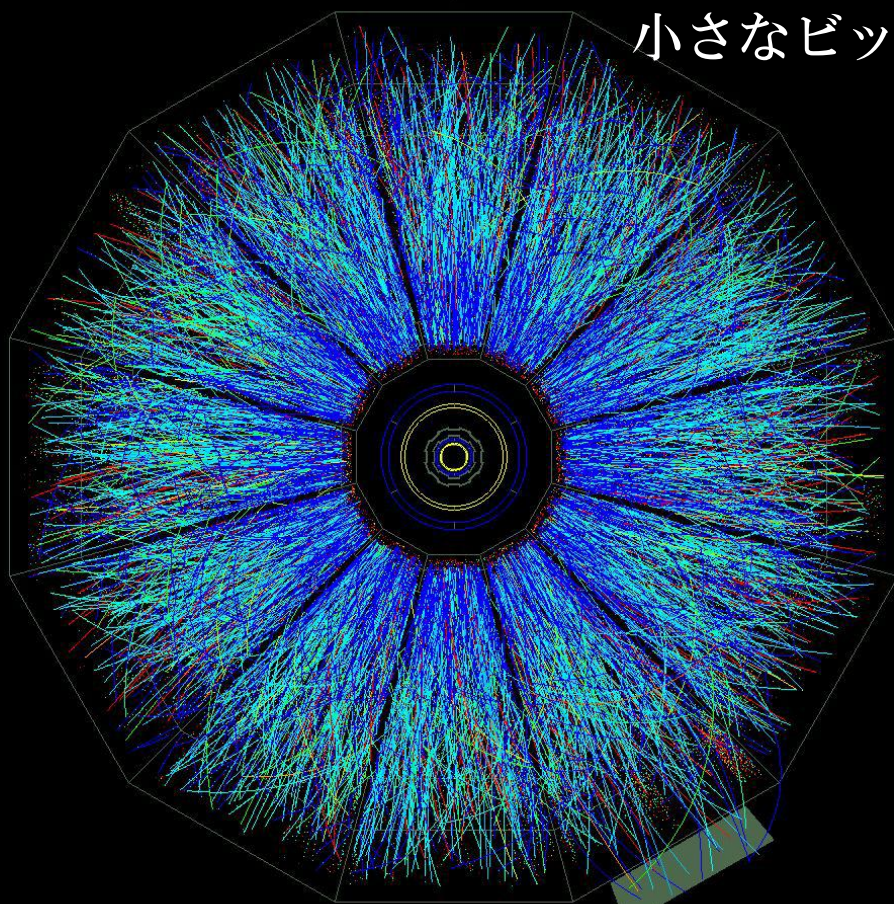
6兆度を超える
高温物質

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

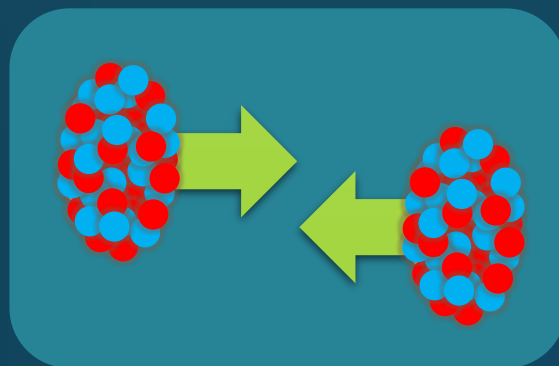
2010年～

全長30km

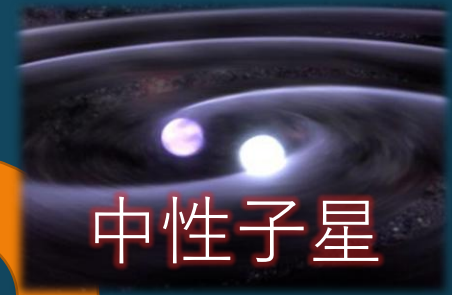
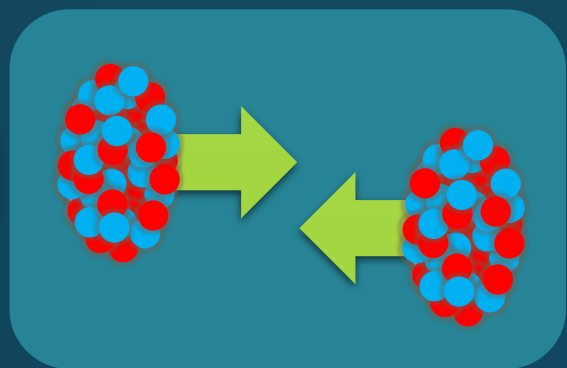
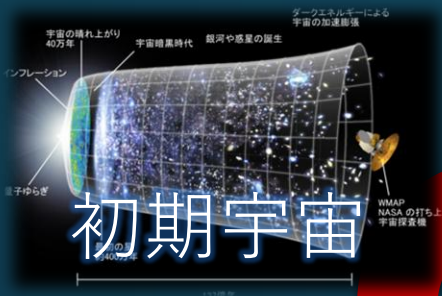
光速の99.9999%

約8兆度

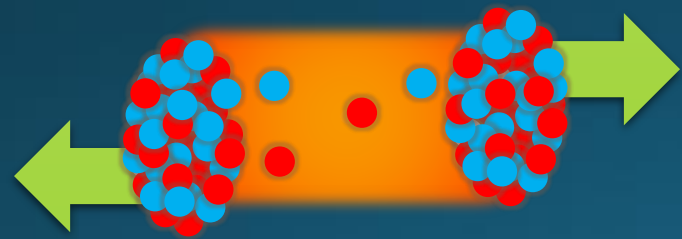
衝突エネルギーと密度



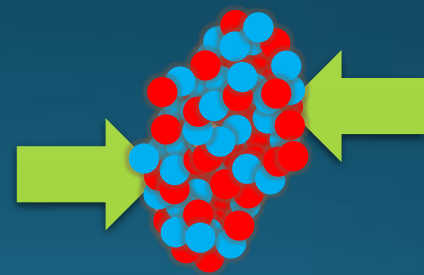
衝突エネルギーと密度



低エネルギー

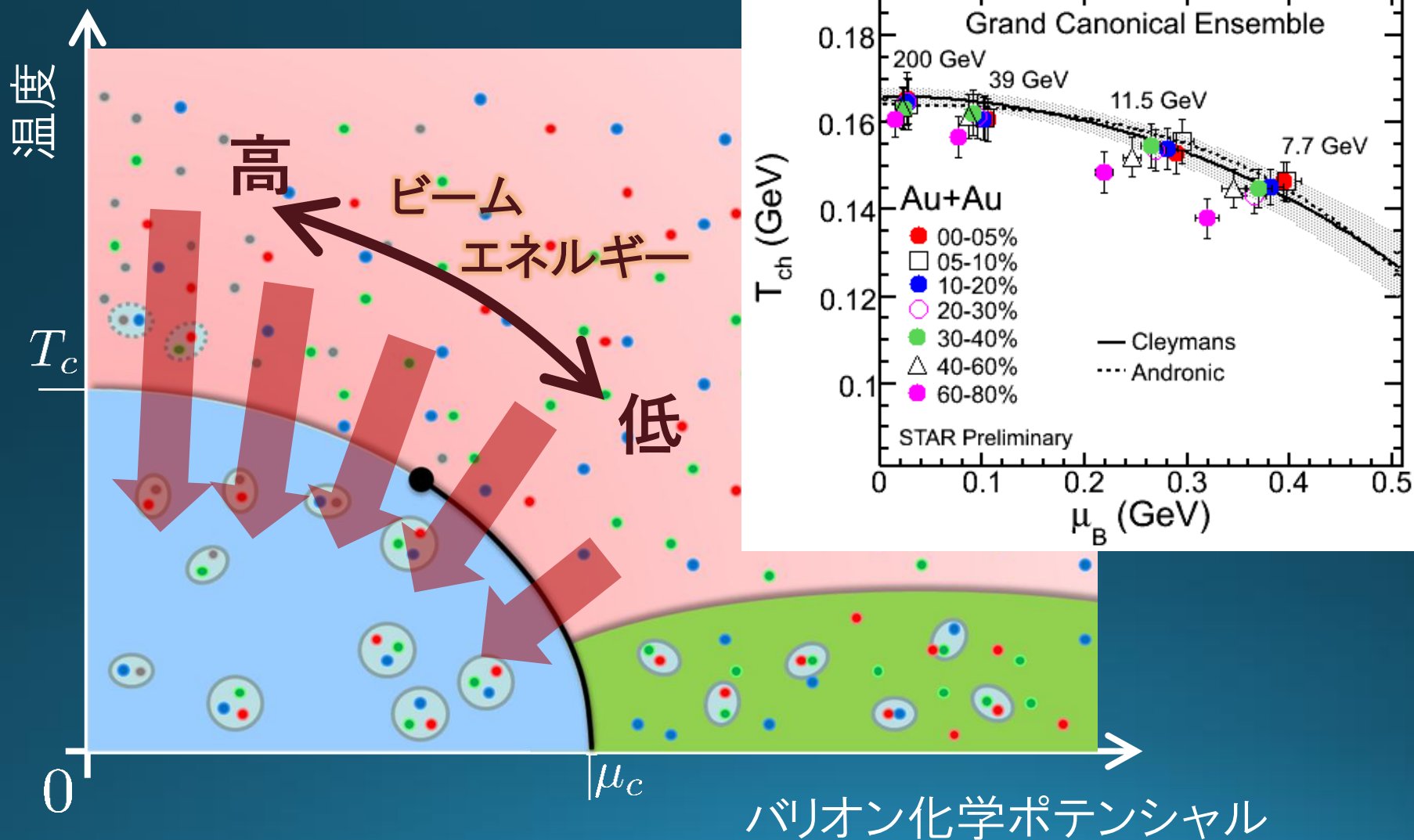


net-バリオン数: 少



net-バリオン数: 大

ビームエネルギー走査



J-PARC-HI

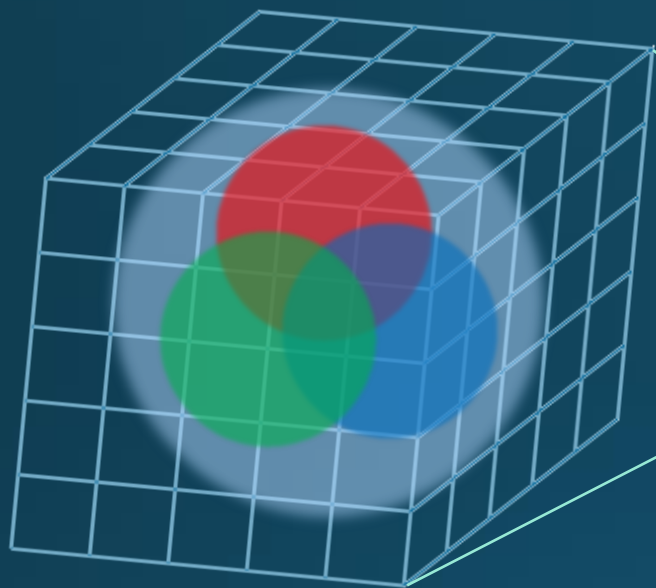
J-PARC Heavy-Ion Program

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



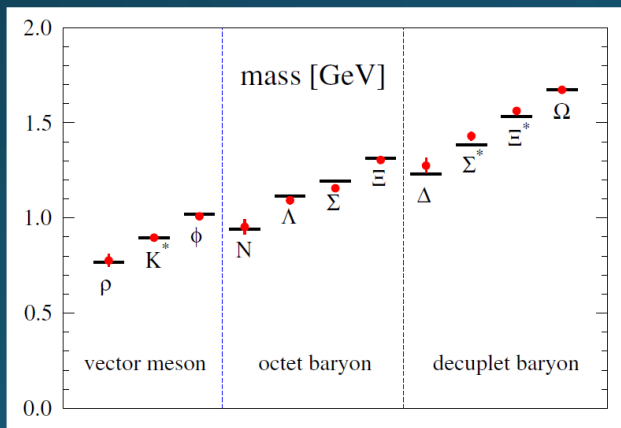
- $E_{\text{lab}} \sim 11 \rightarrow 19 \text{ AGeV}$
- $\sqrt{s_{\text{NN}}} \sim 4.9 \rightarrow 6.2 \text{ GeV}$
- 衝突レート: $\sim 10^8 \text{ Hz}$
- 実験開始: 2028~?

格子QCD第一原理数値計算



富岳計算機

クハドロンの質量



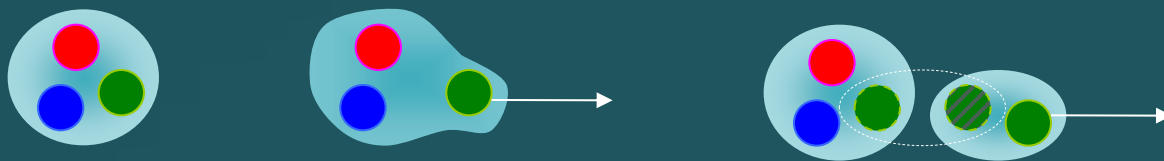
PACS-CS ('09)

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...



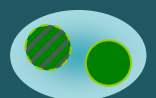
クォーク・反クォーク対を生成し、核子と中間子になる



我々の身の回りの物理の基本自由度



バリオン

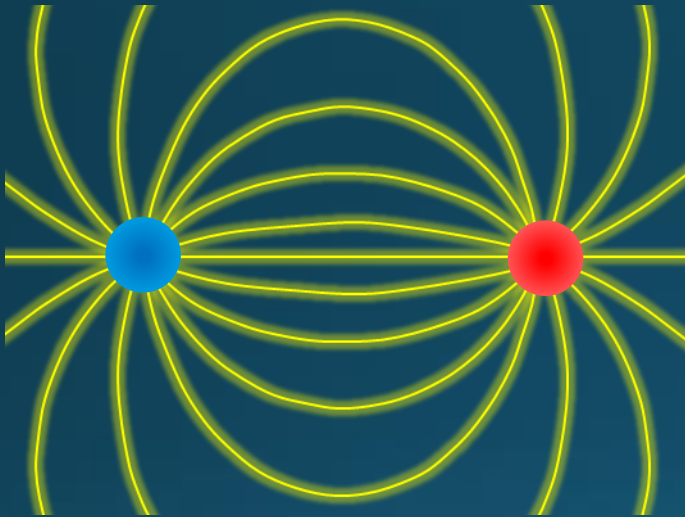


中間子 (メソン)

} ハドロン

クォーク閉じ込めの解釈

電磁気力



力線が自由に広がる

QCD

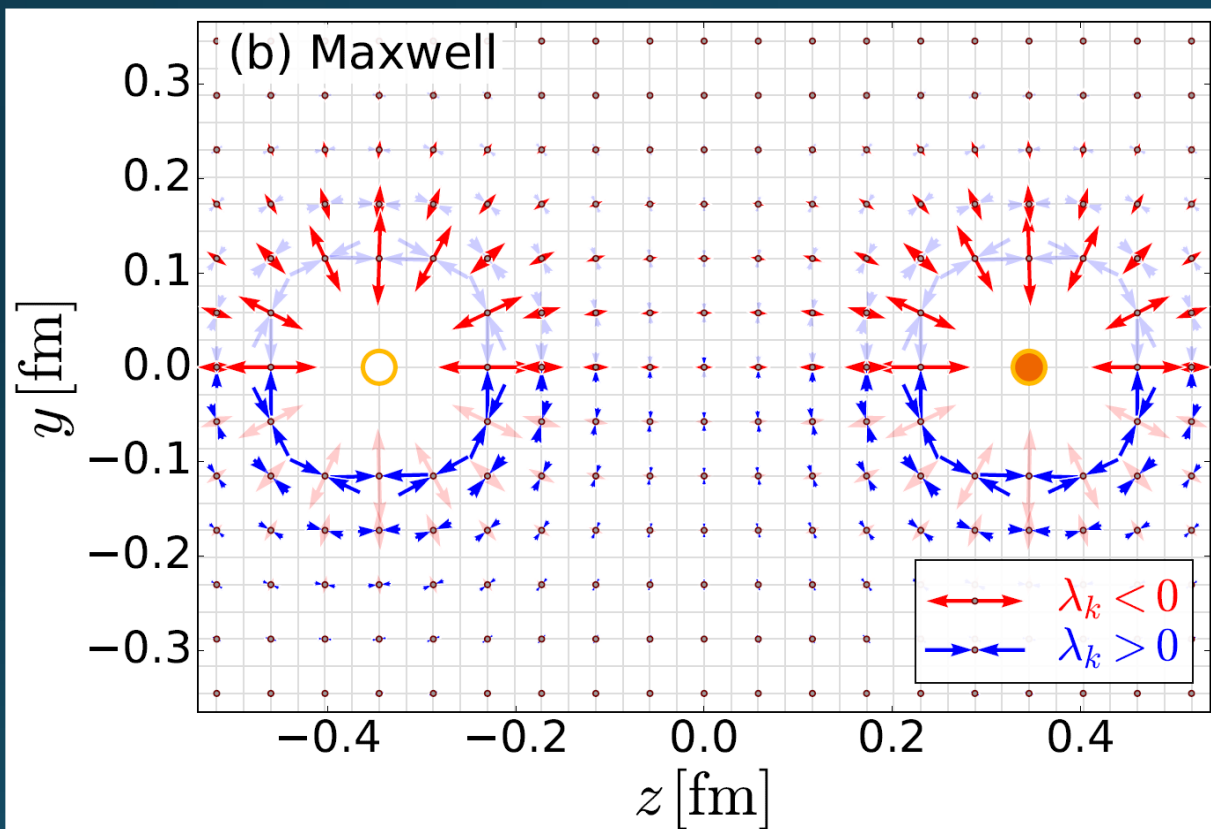


QCDの力線は集約される
直線状に高エネルギー状態



高エネルギーの力線束が
クォーク閉じ込めをもたらす

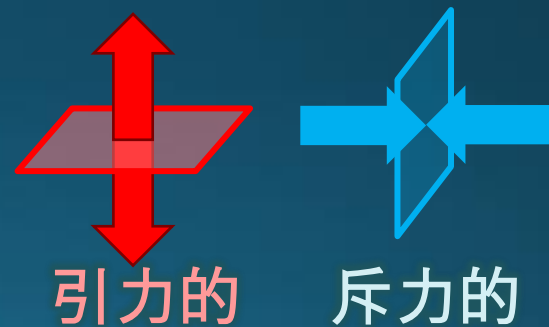
電気力線



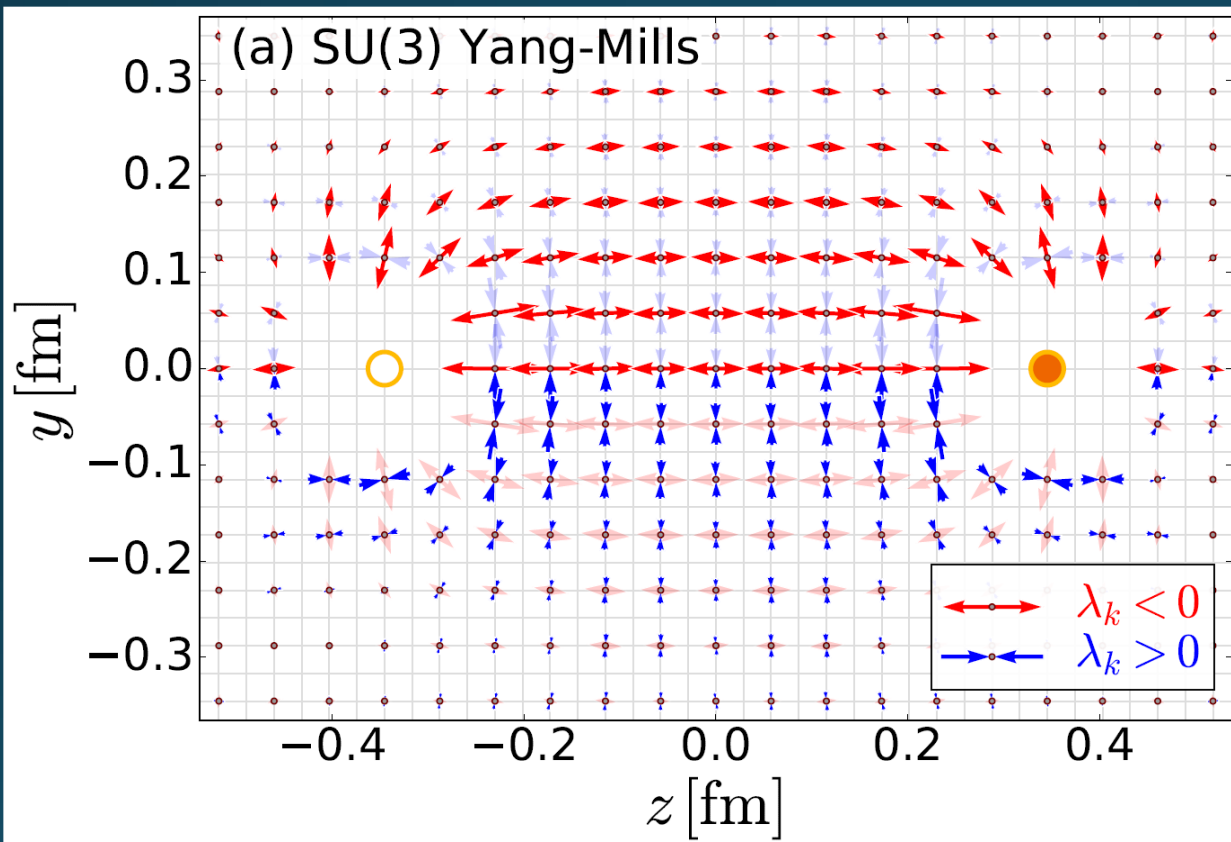
$$T_{ij}v_j^{(k)} = \lambda_k v_i^{(k)}$$

$(k = 1, 2, 3)$

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

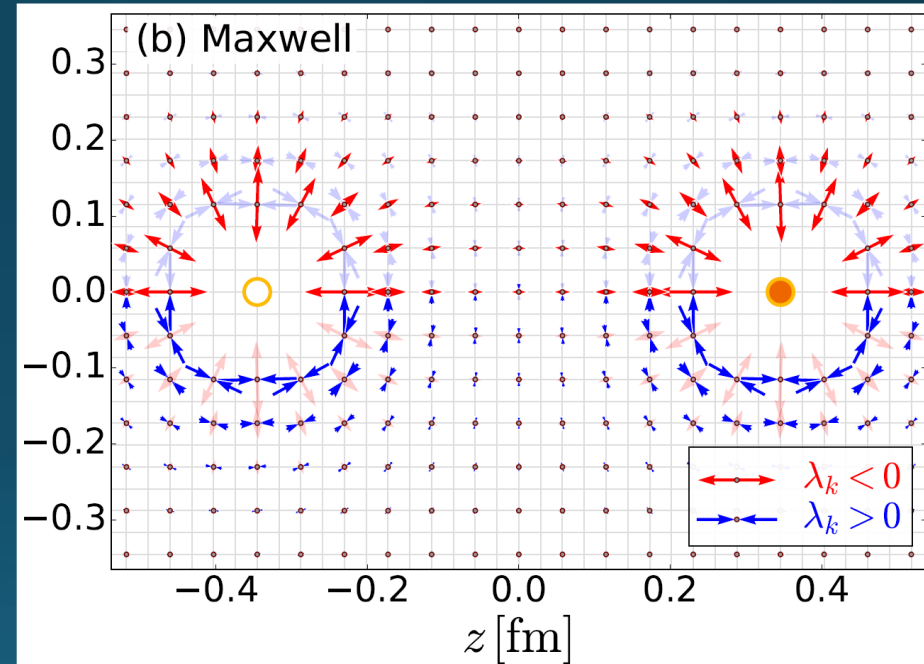
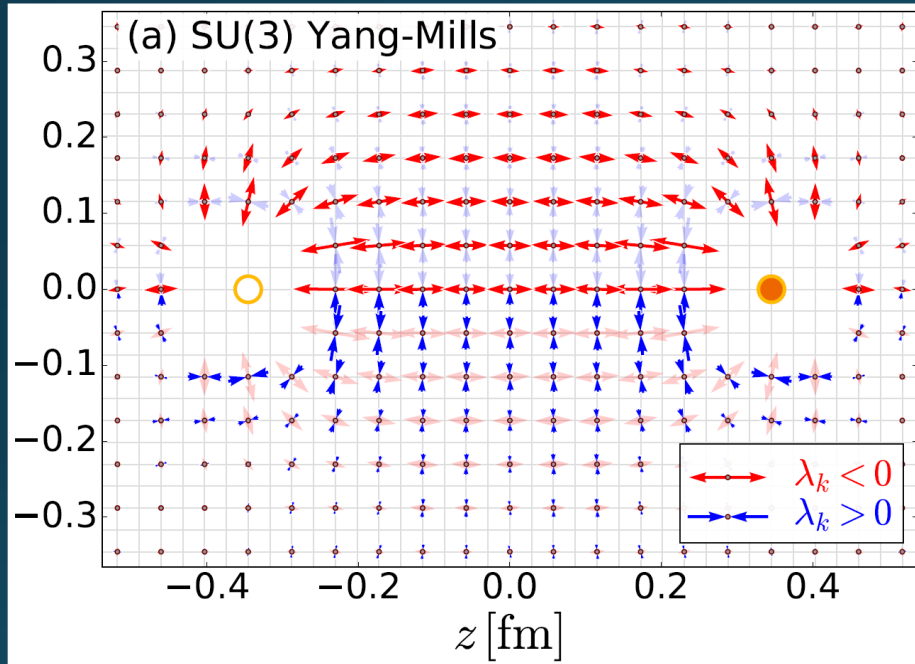
2019 (Physics Letters)

線の長さ＝場の強さ

両者の比較

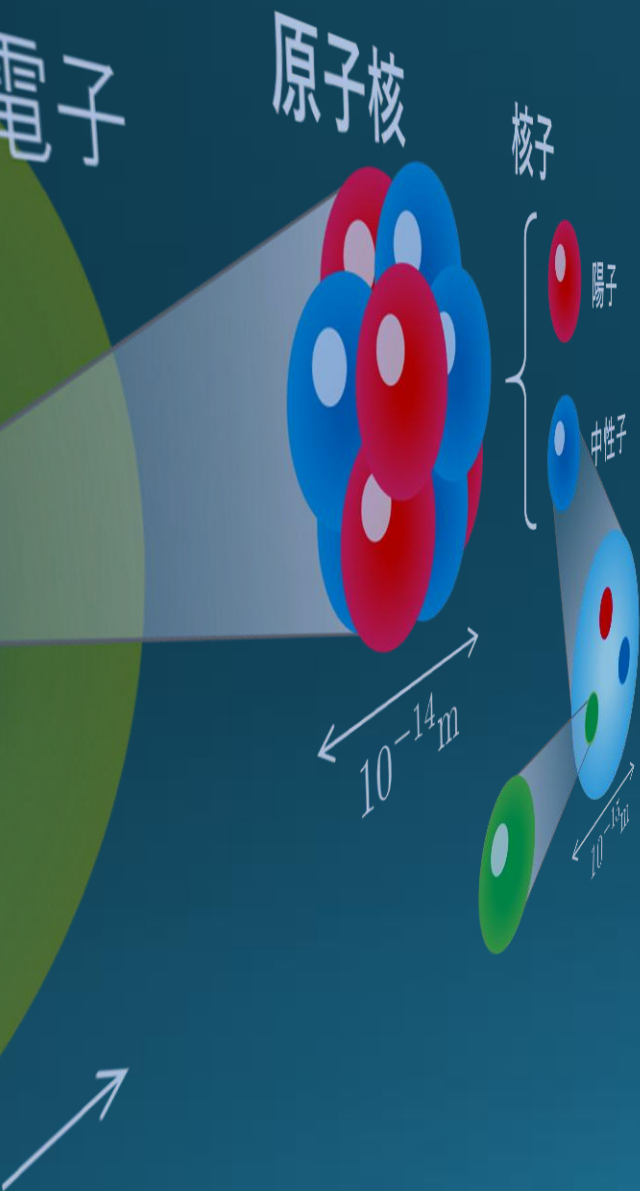
クォーク・反クォーク系

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

まとめ



素粒子の世界には
多様な相転移現象が存在する

これらの現象は、様々な動機から
近年注目される重要な研究課題

巨大な加速器やスパコンを使った
実験・シミュレーションが進行中

高校で習う物理・数学の先には、
未知なる研究課題が待ち構えている

最後に

- 中学・高校の学習項目は自身の人生、そして社会の役に立つことばかり。楽しく勉強しよう。
- 苦勞して学んだことは必ず将来の役に立つ。苦手科目も満遍なく勉強を。
- 現代文明、科学リテラシーの次世代の担い手として活躍を。
- 「原子核理論」っておもしろい！

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

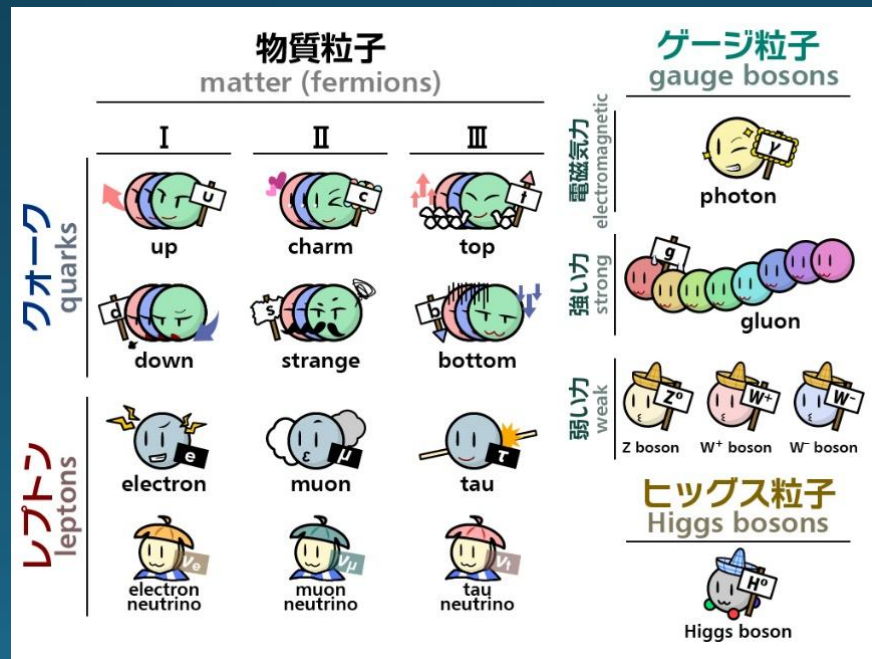
弱い力

強い力

電弱統一理論

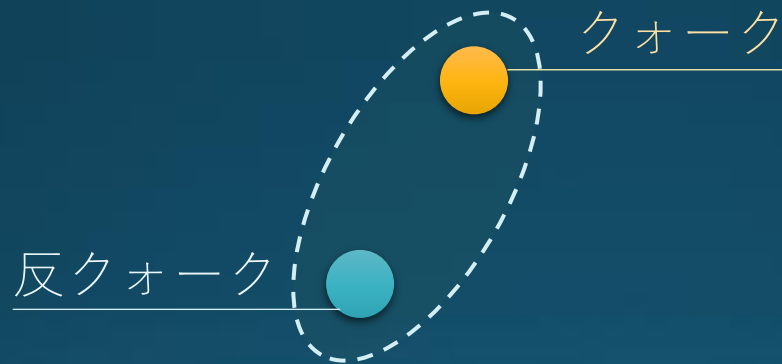
量子色力学(QCD)

素粒子
標準模型



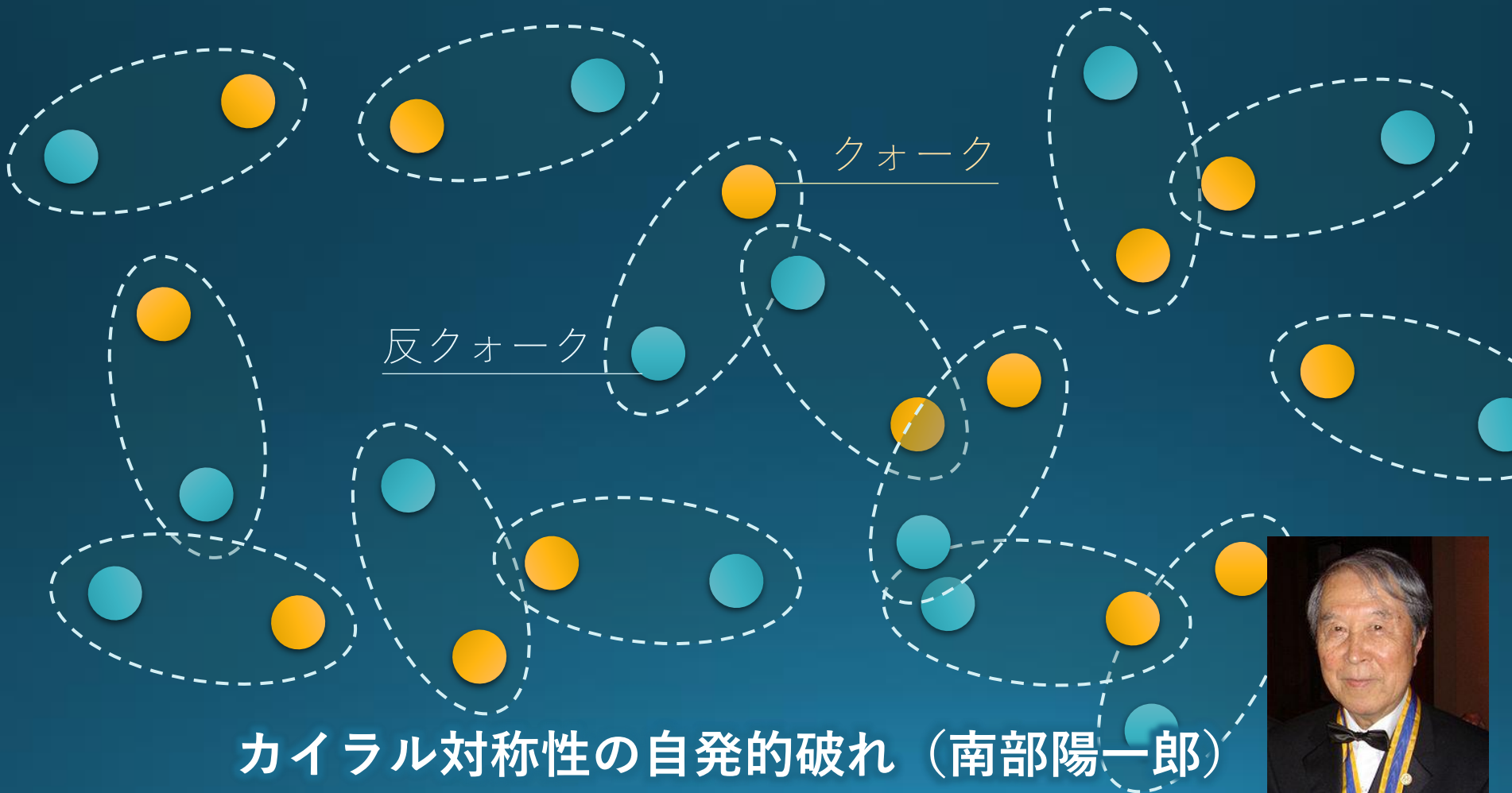
QCDの真空状態

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)

