

電子

原子核

核子

# 素粒子物理の世界 への招待

北沢正清

(大阪大学→  
京都大学基礎物理学研究所)

$10^{-14}\text{m}$

$10^{-16}\text{m}$

中性子

電子

原子核

核子

陽子

中性子

# 素粒子の世界の 相転移現象 への招待

北沢正清

(大阪大学→  
京都大学基礎物理学研究所)

$10^{-14}\text{m}$

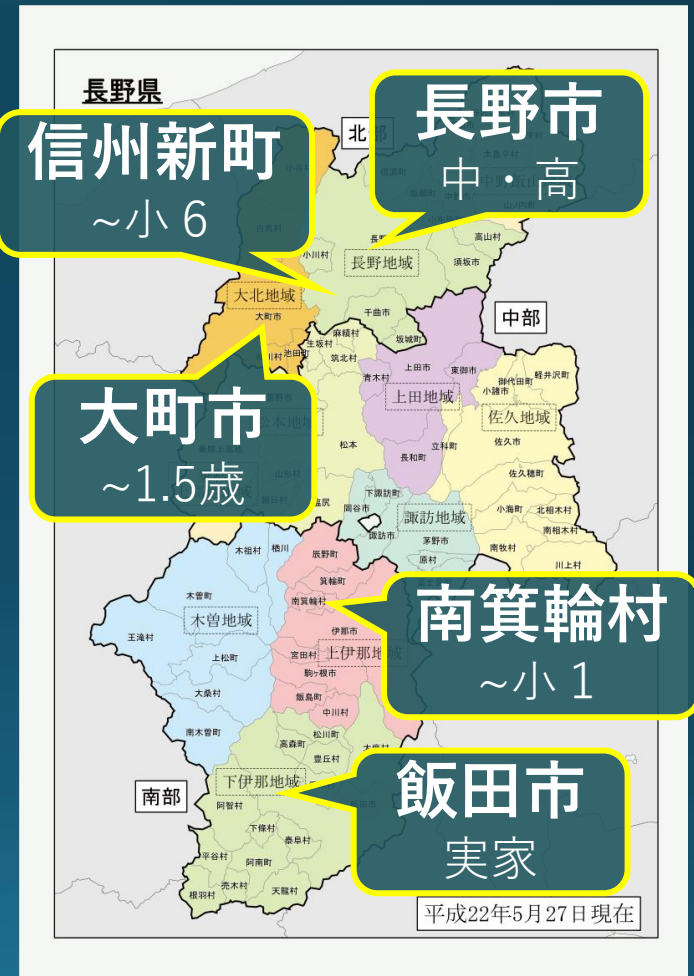
$10^{-16}\text{m}$

# 自己紹介

- 1977 誕生(大町市)
- 1993 柳町中学校卒業
- 1996 長野高校卒業
- 2000 筑波大学卒業
- 2005 京都大学博士課程修了
- 2005-2006 ドイツ、アメリカなど
- 2007 定職を得る

趣味

ランニング、特に山道



# 自己紹介

- 1977 誕生(大町市)
- 1993 柳町中学校卒業
- 1996 長野高校卒業
- 2000 筑波大学卒業
- 2005 京都大学博士課程修了
- 2005-2006 ドイツ、アメリカなど
- 2007 定職を得る

岩崎先生と  
同期

趣味

ランニング、特に山道

高2の頃に、物理を  
生業にしようと決心



現在地



# 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



# 高温の状態



水蒸気 100°C

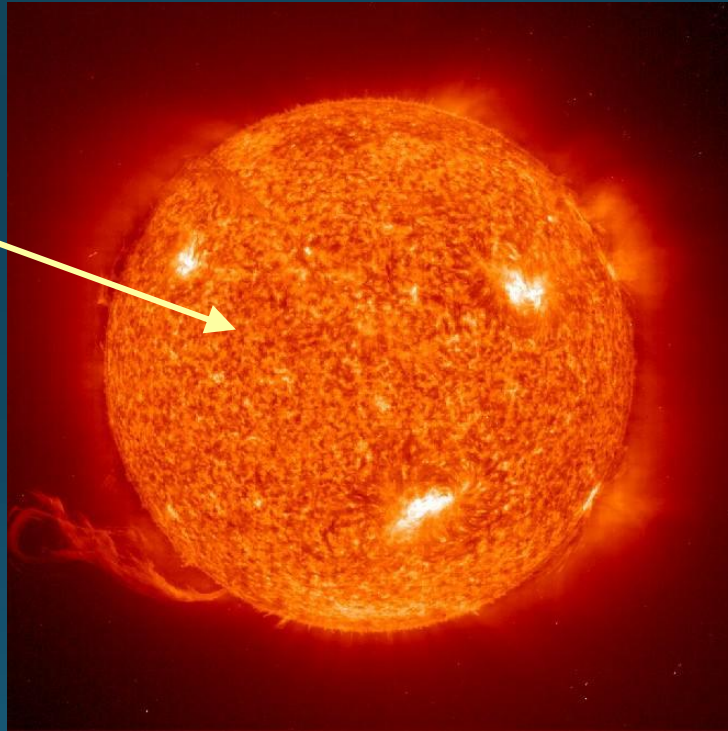


溶解した鉄 1500°C

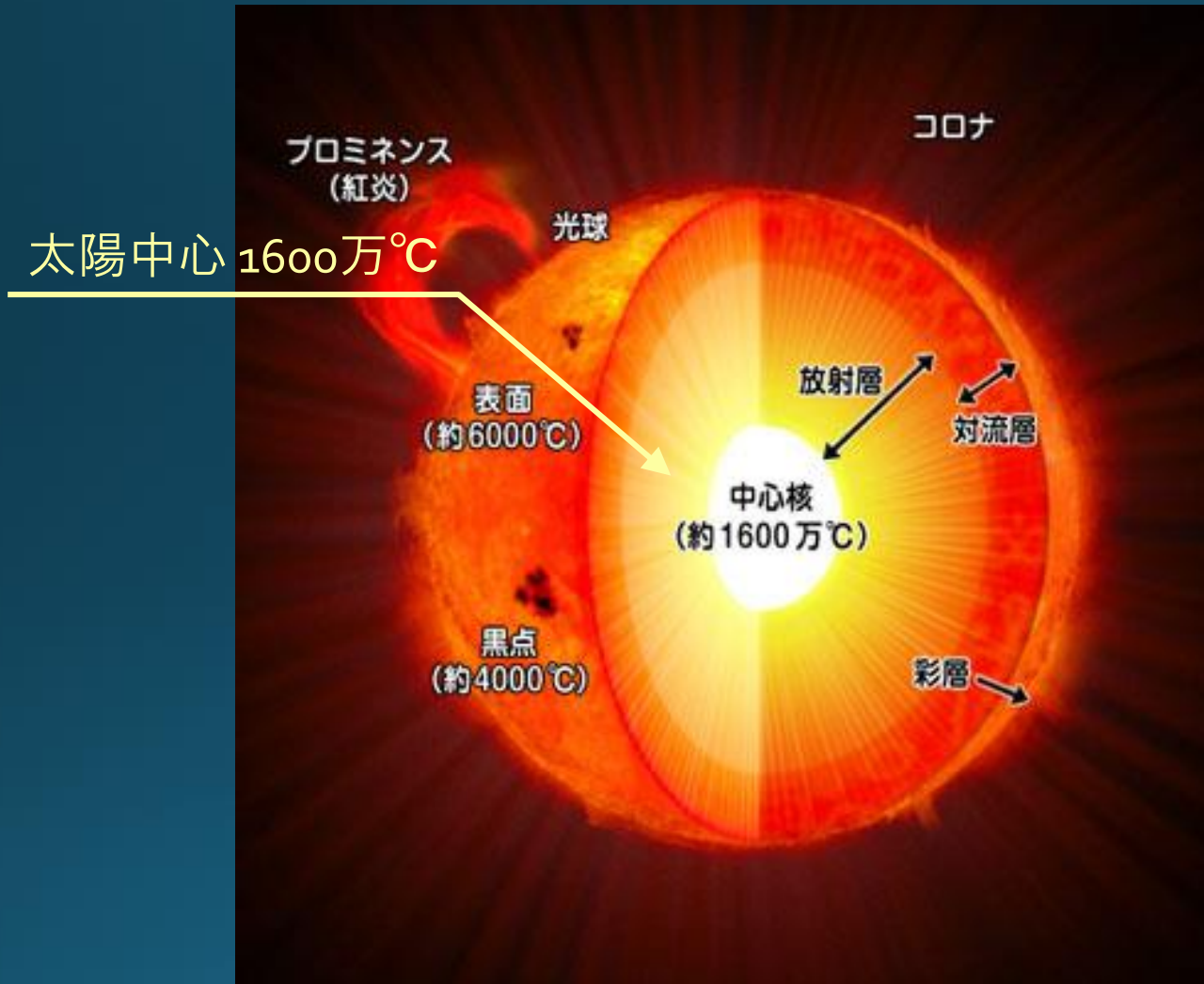


# 高温の状態 2

太陽表面 6000°C

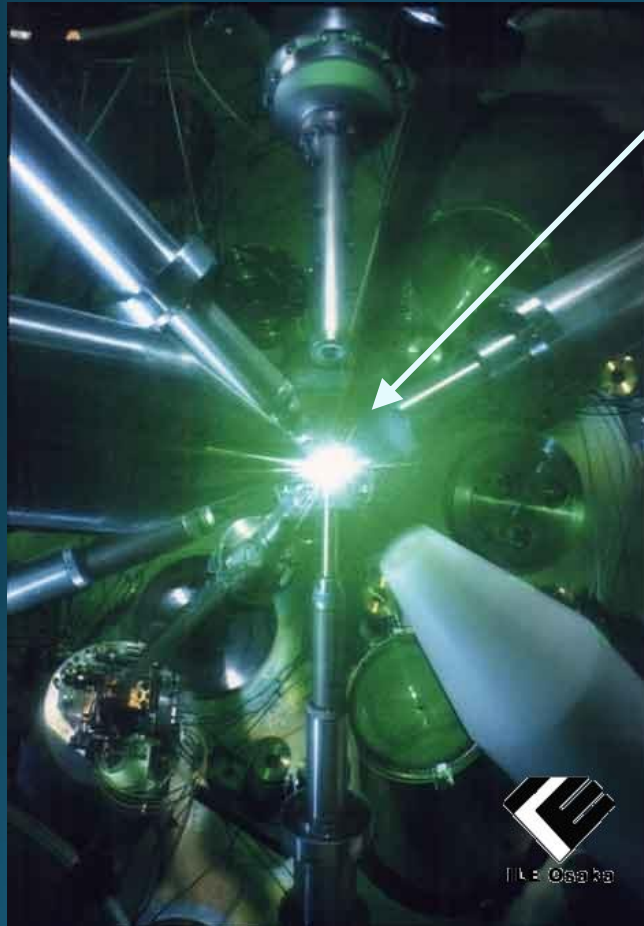


# 高温の状態 2





# 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/cm<sup>3</sup>  
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？

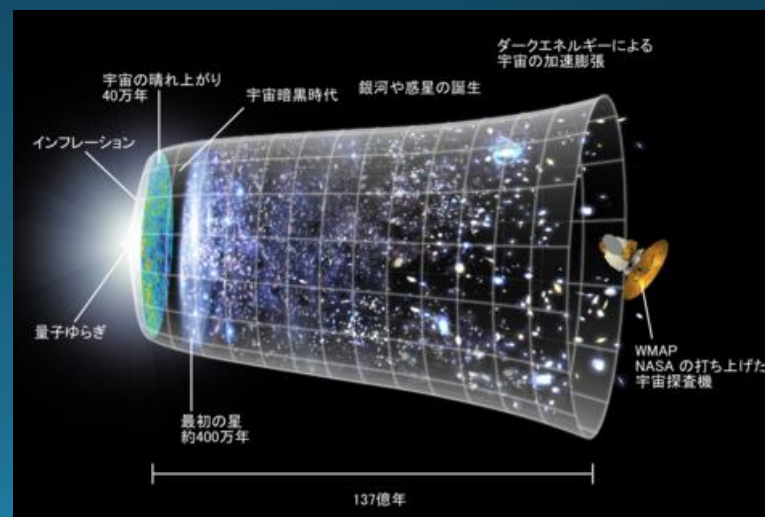
# 初期宇宙の超高温物質

## 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



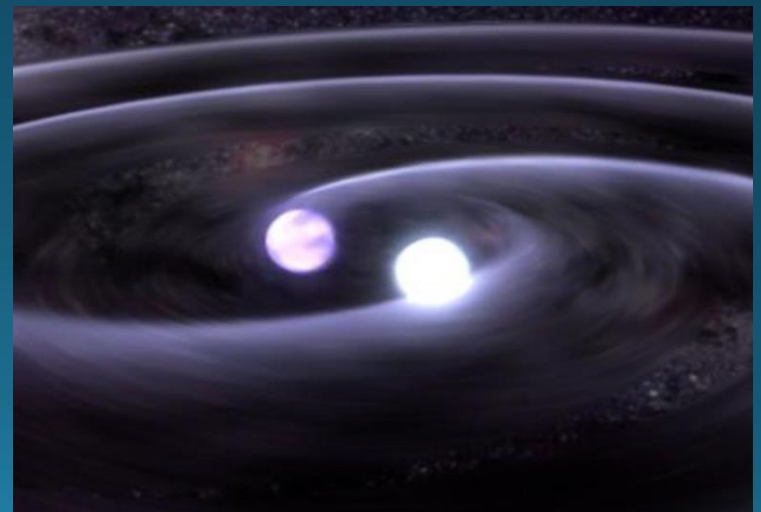
# 中性子星 = 超高密度天体

## 中性子星

- 質量: 太陽の1~2倍
- 半径: 10~15km
- 中心密度:  $10^{15}$  g/cm<sup>3</sup>
- 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



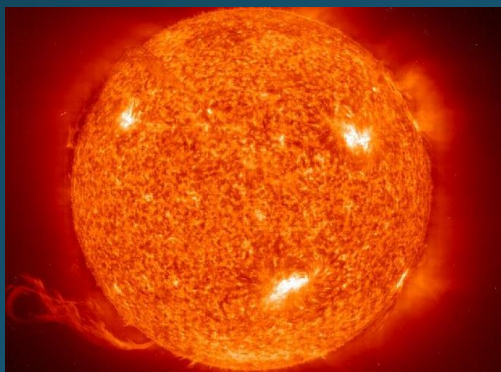
100°C

水が、液体から気体に相転移



約1500°C

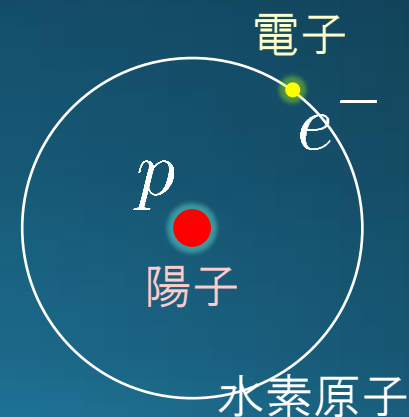
鉄が、固体から液体に相転移



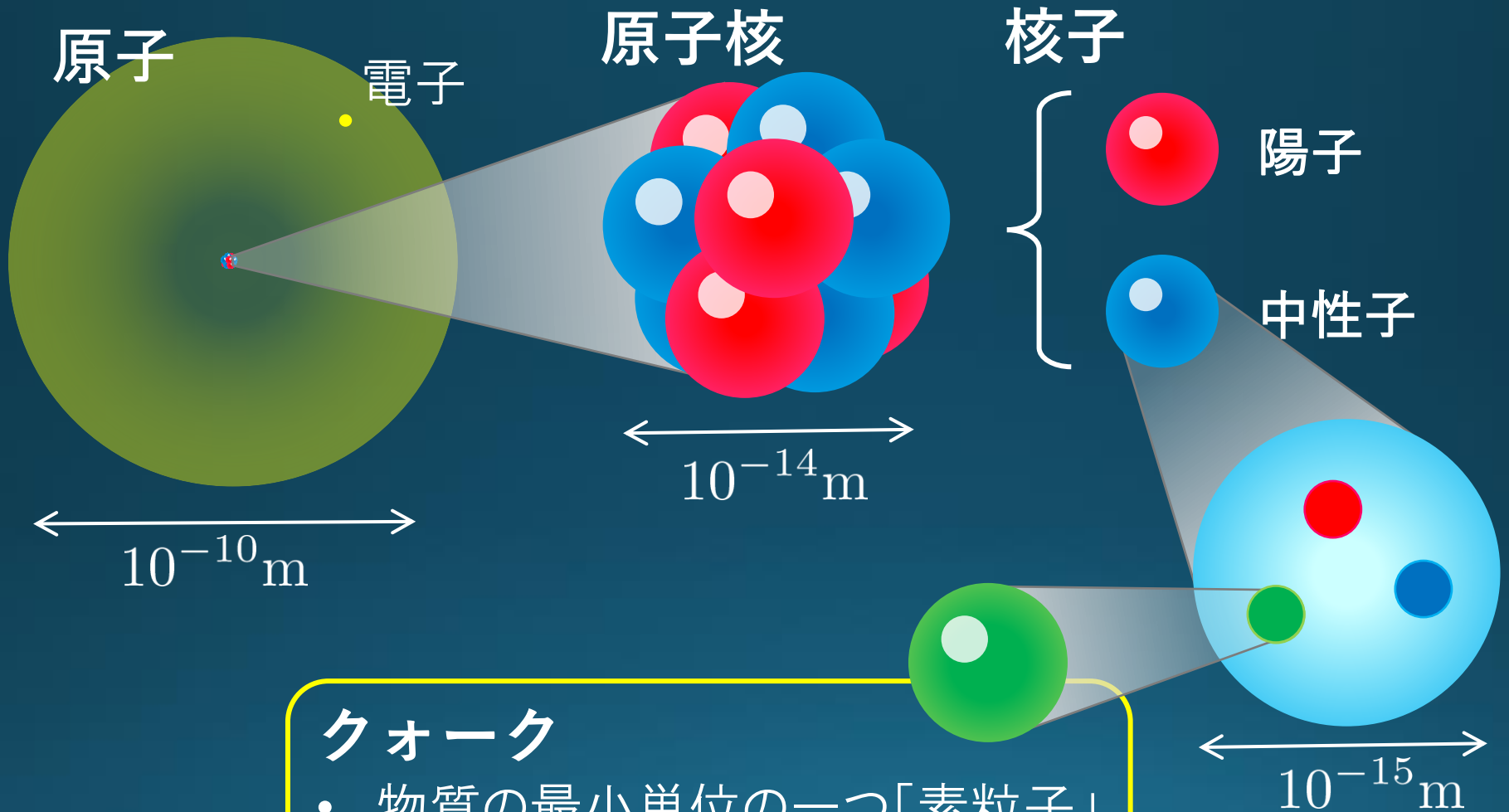
約4000°C～

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

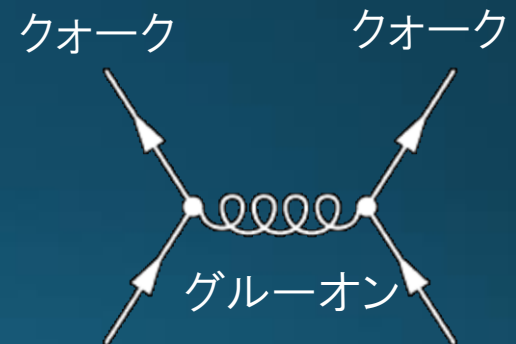
# 量子色力学

## 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



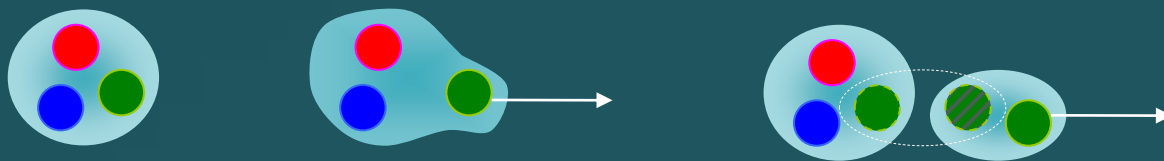
- 1970年代、物質の基礎理論として確立
- しかし、難解すぎて未だ分からないことだらけ



# 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。

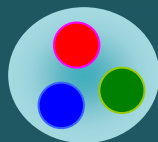
無理矢理取り出そうと引っ張ると...



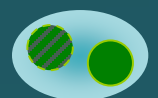
クォーク・反クォーク対を生成し、核子と中間子になる



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

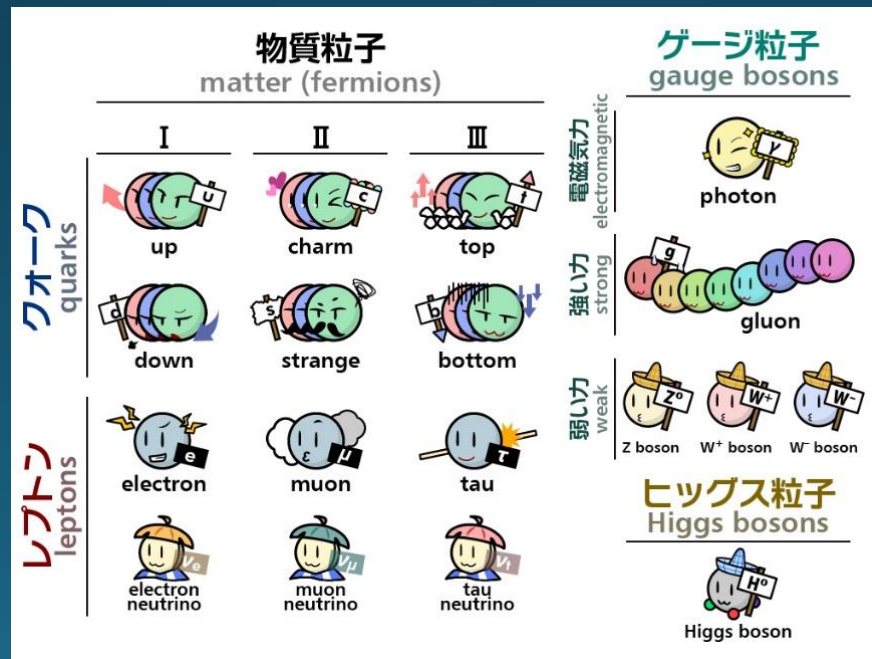
弱い力

強い力

電弱統一理論

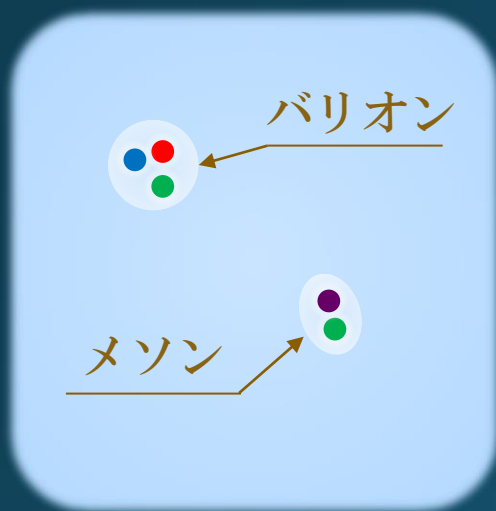
量子色力学(QCD)

素粒子  
標準模型



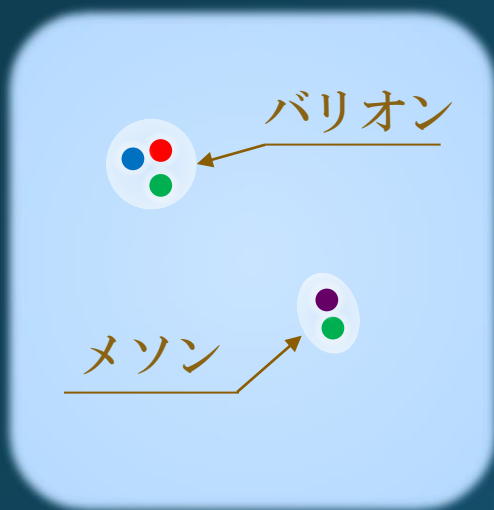
# 素粒子階層の相転移現象

真空



# 素粒子階層の相転移現象

真空



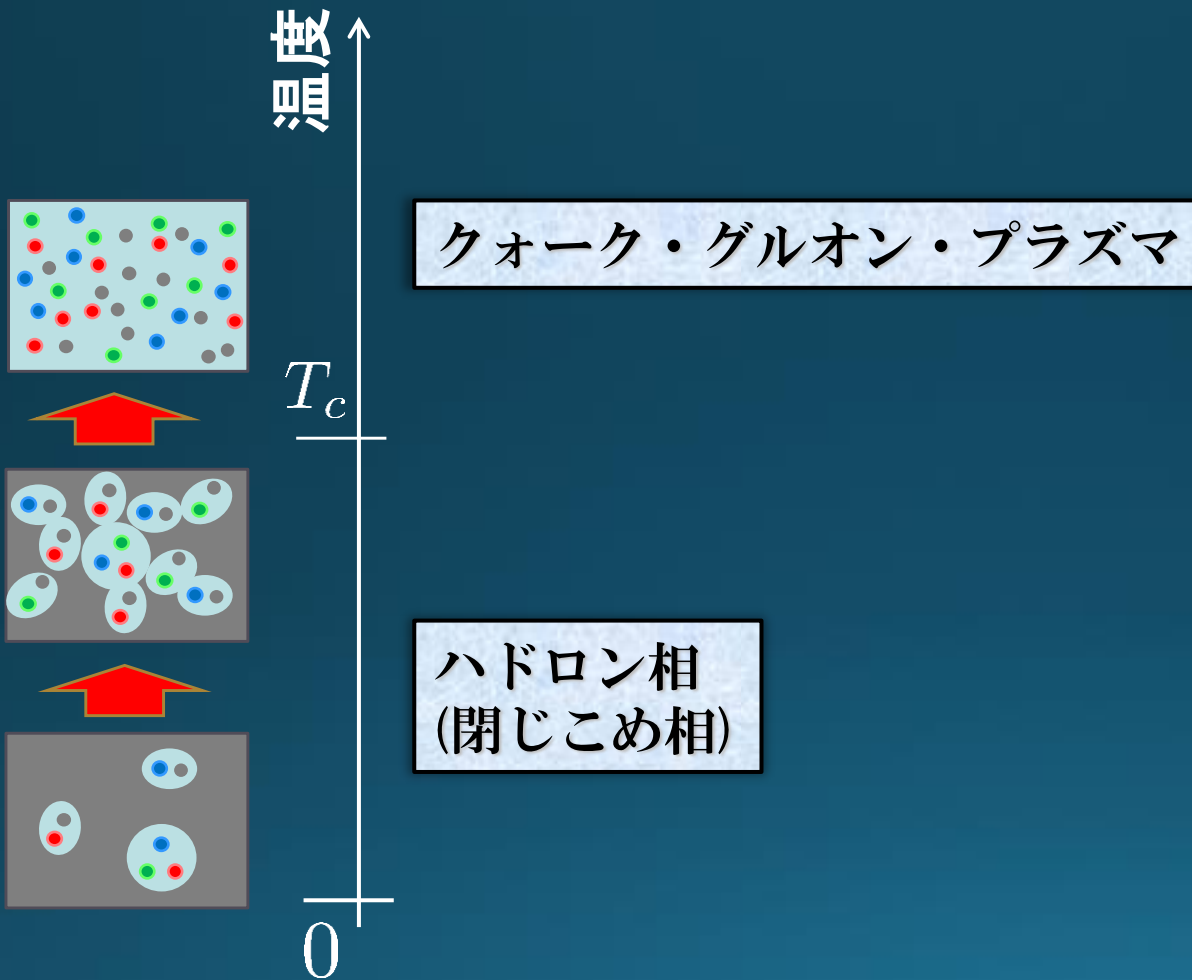
温度を上げていくと ...



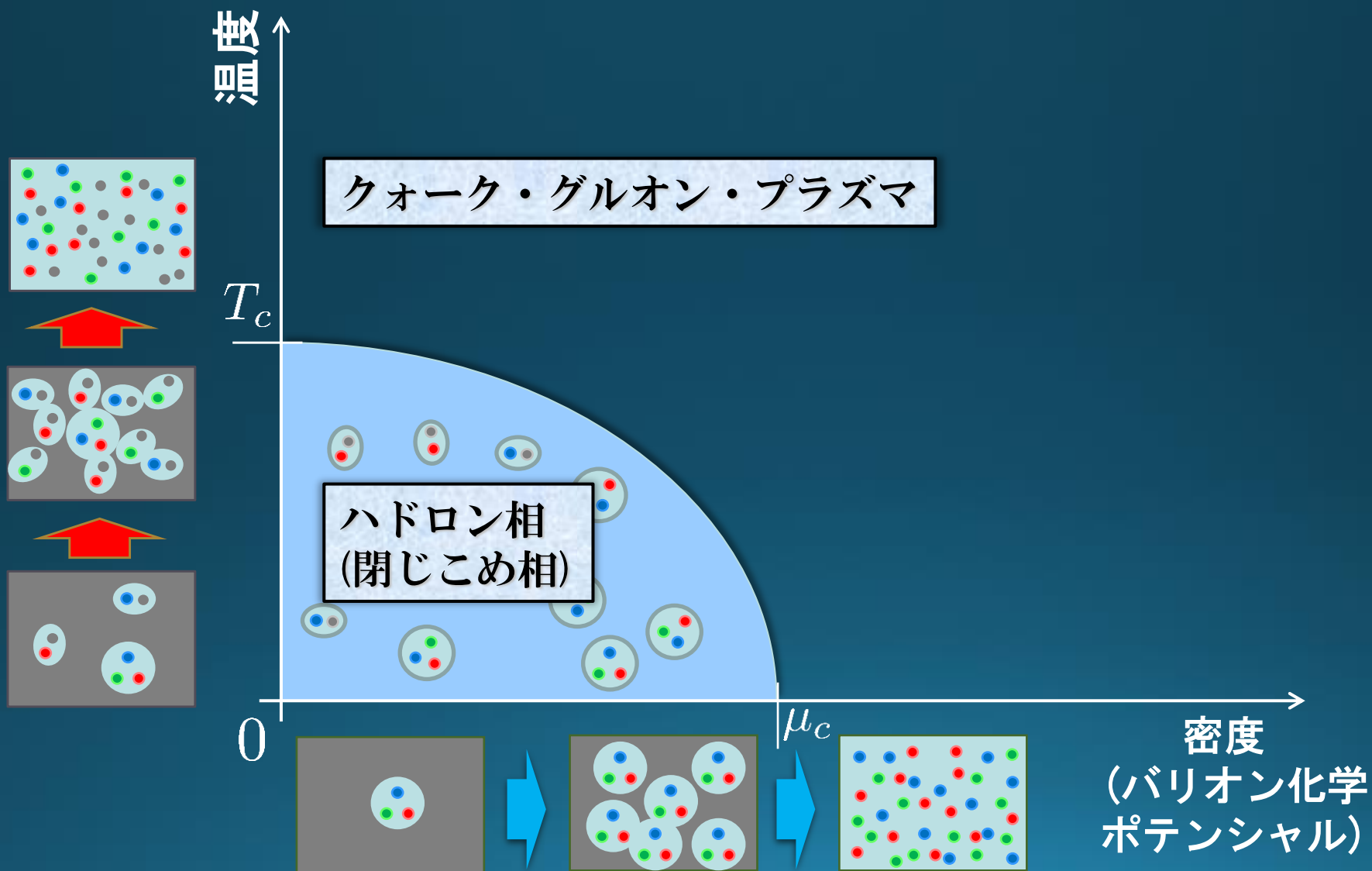
クォーク物質  
(クォークグルーオンプラズマ)

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

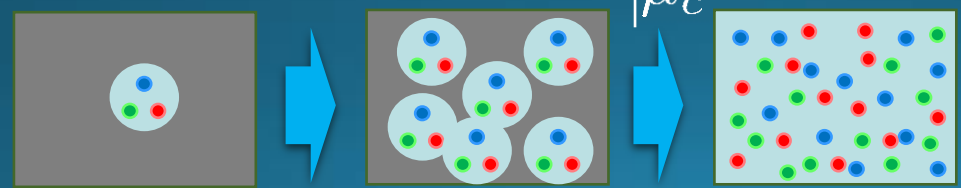
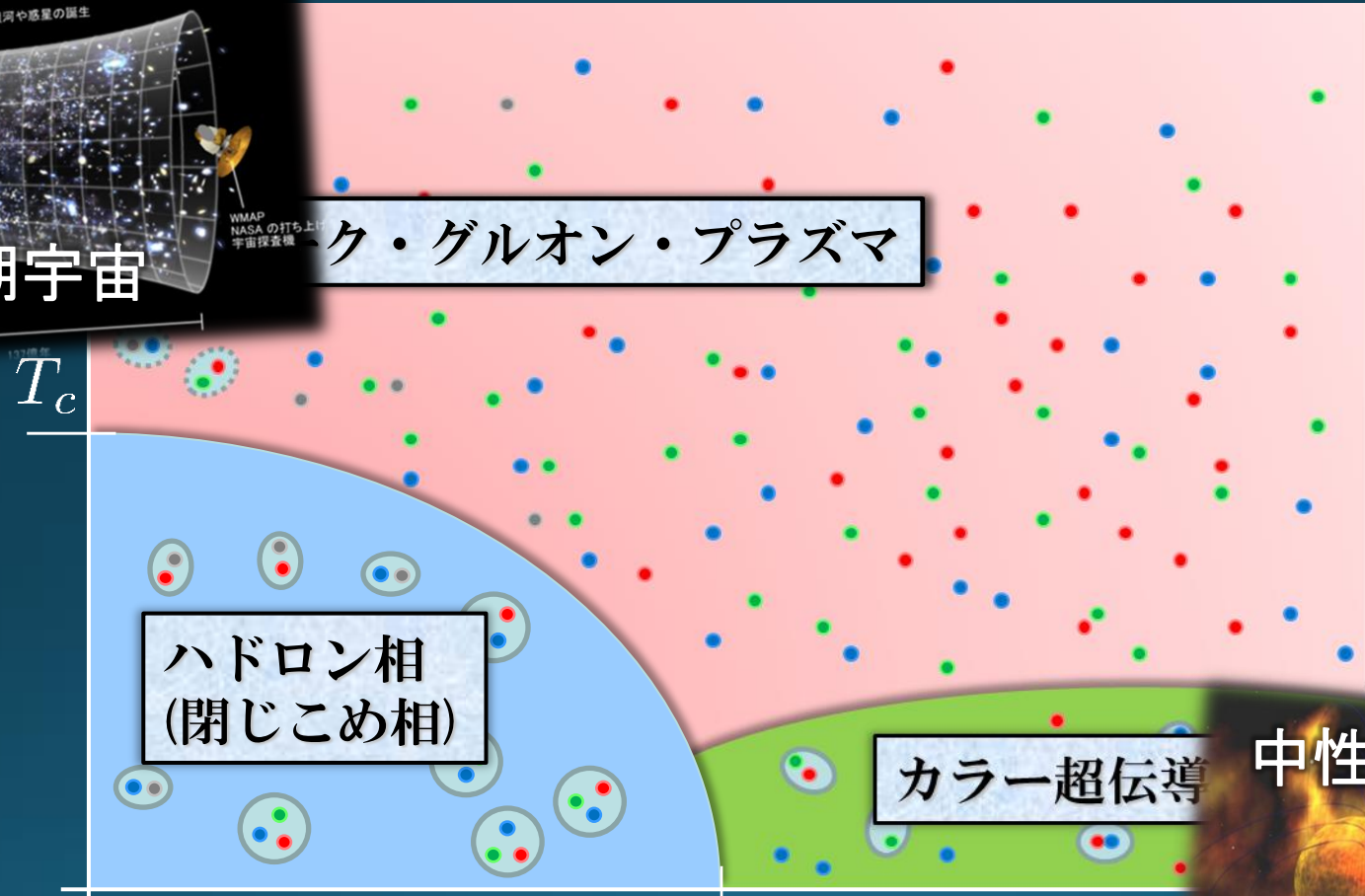
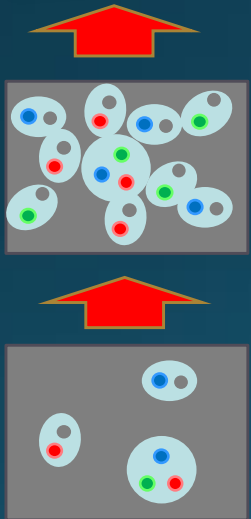
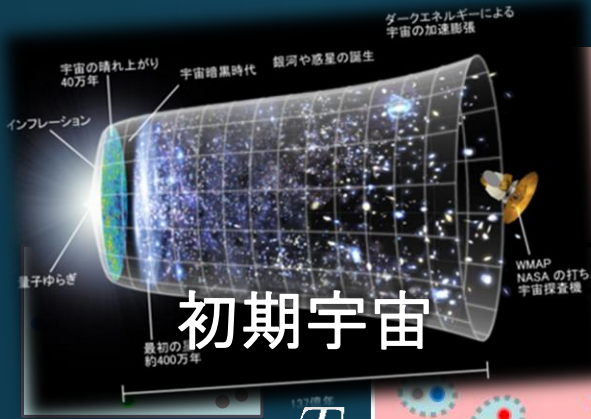


# QCDの相図



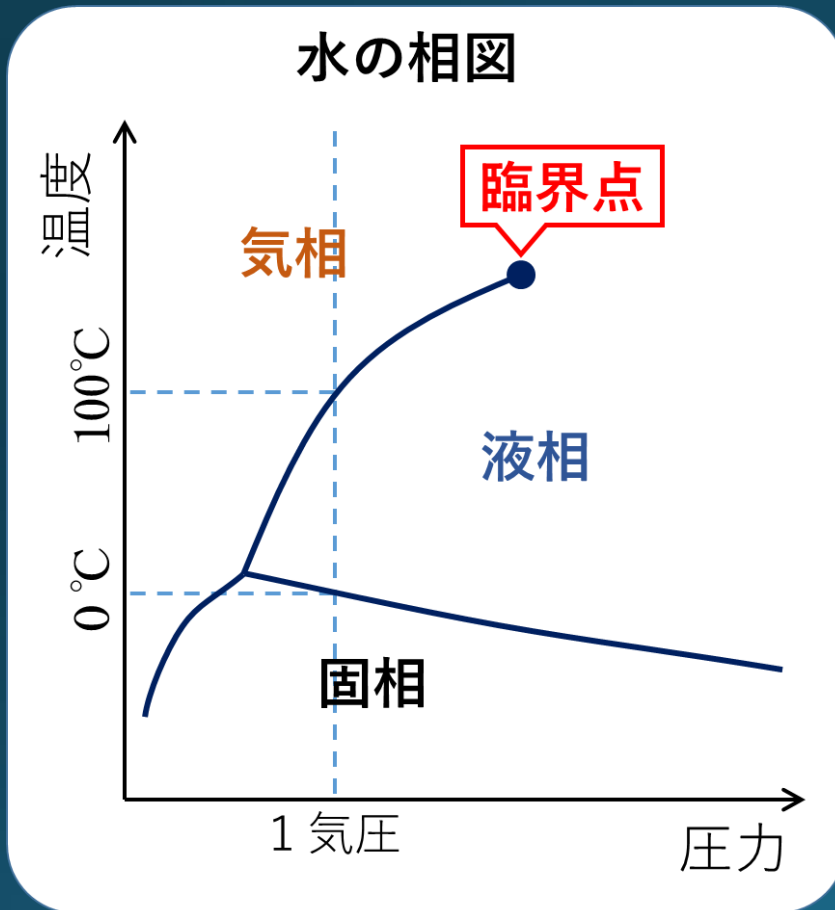


# QCDの相図



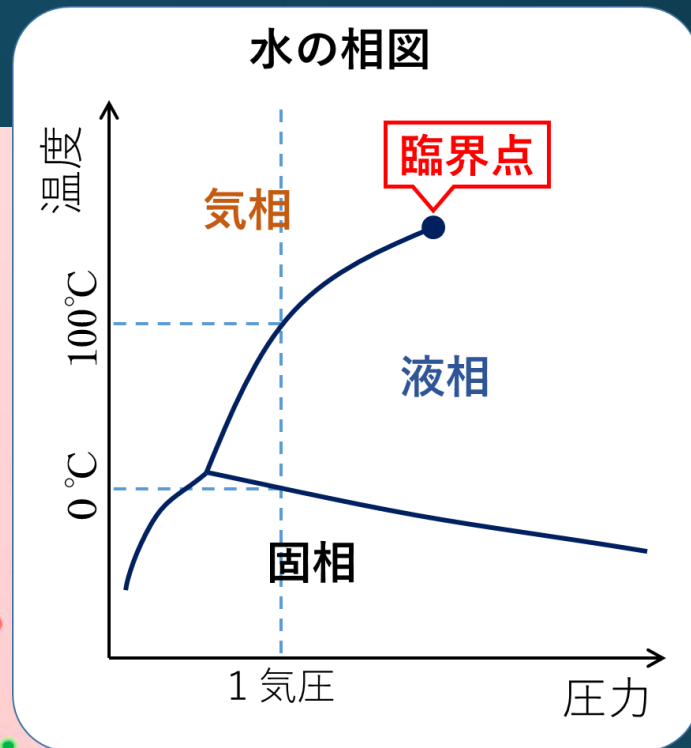
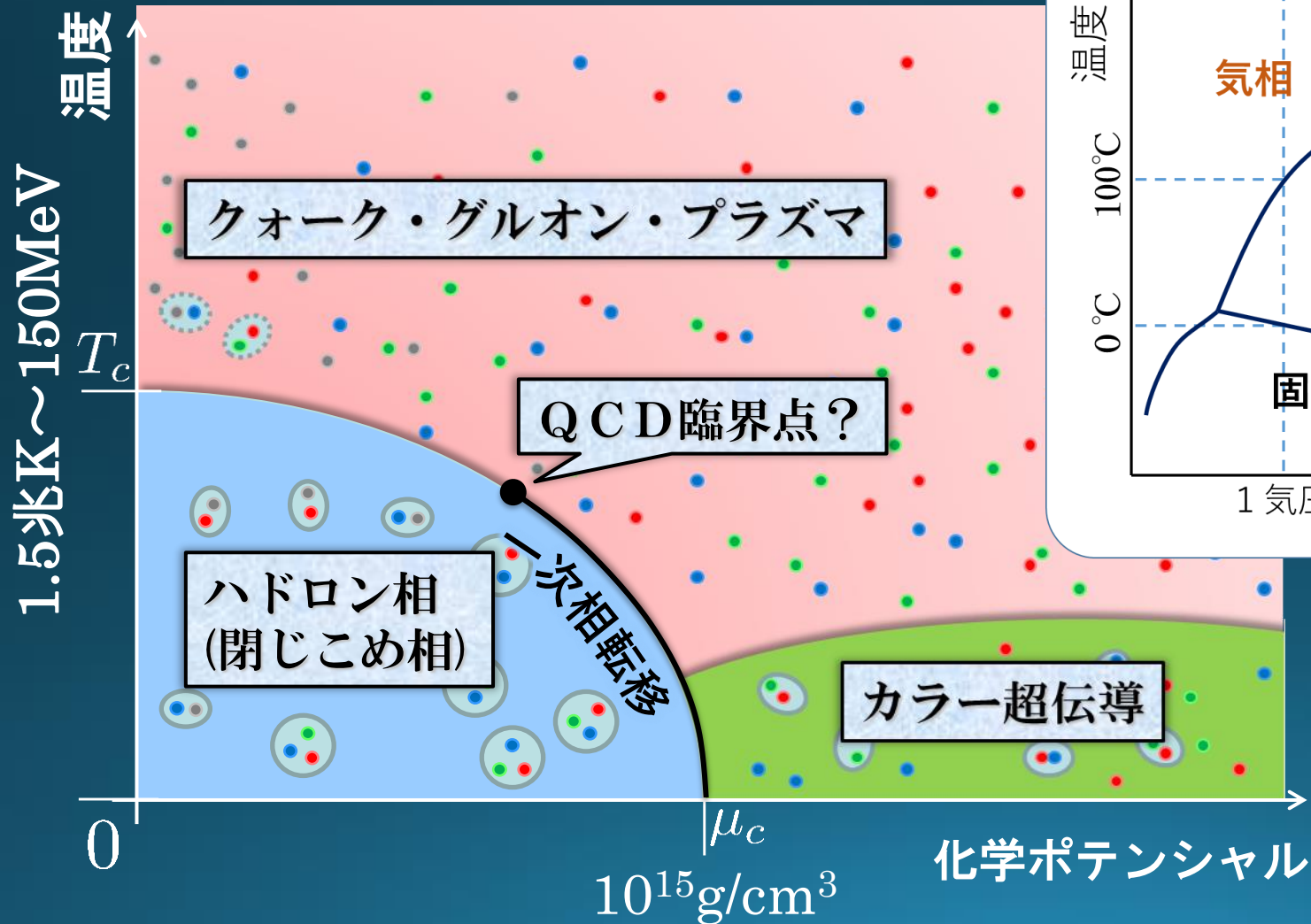
(ク・グルオン・プラズマ)

# 物質の三態

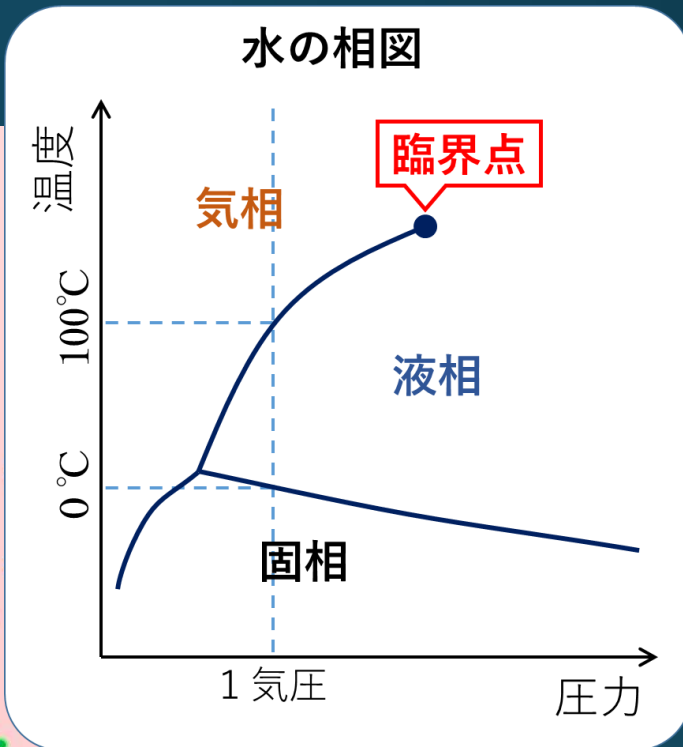
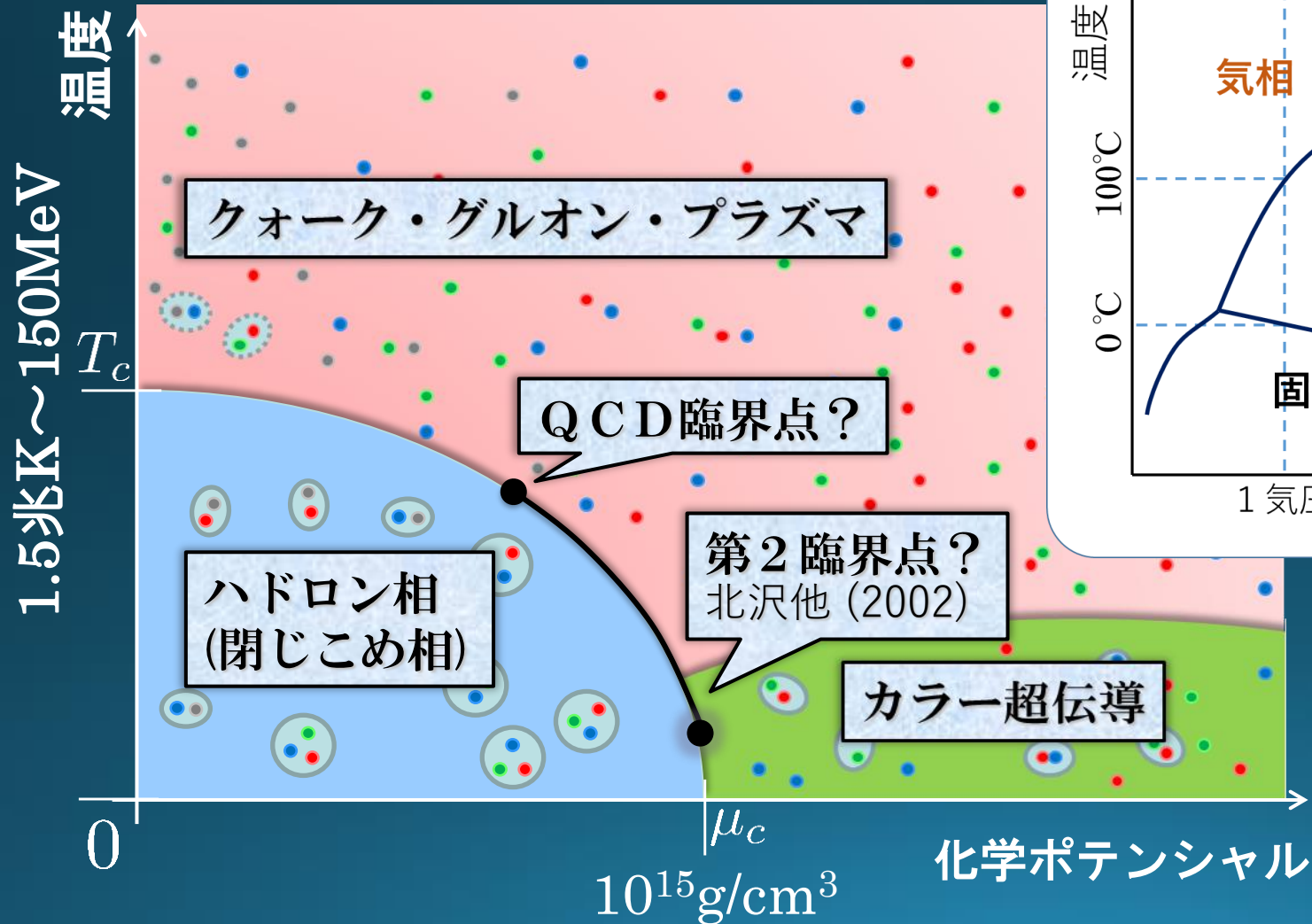


- 大気圧下で、液相と気相は不連続に変化  
→ 一次相転移
- 超高圧では、一次相転移が消失
- 一次相転移の終点は、**臨界点**と呼ばれる
- **臨界点**は、物理学においてとても重要な研究対象

# 相転移の次数



# 相転移の次数



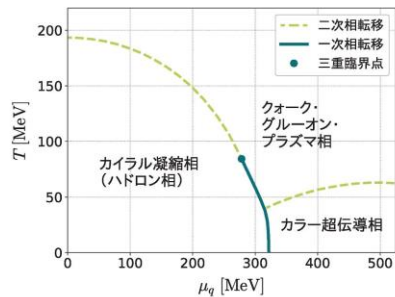
# 宣伝

## 最近本を書きました！

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  
国広悌二 [著]



基本法則から読み解く物理学最前線

須藤彰三  
岡 真 [監修]

29

共立出版

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—

*Quark Matter under Extreme Conditions*  
*Phase Transitions in the*  
*World of Elementary Particles*

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 共立出版株

東京都文京区小

電話 03-3947-

郵便番号 112-

振替口座 0011

www.kyoritsu-

印刷

執筆は大変骨が折れました。

超高温・高密度物質を  
地上の実験で作ります

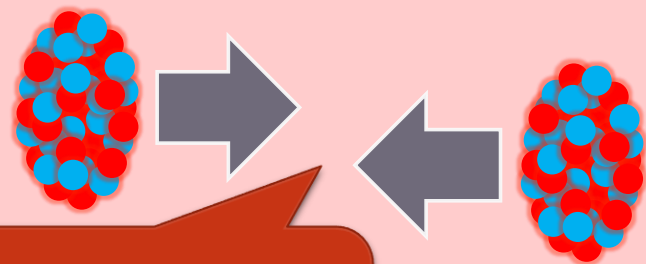


# 相対論的重イオン衝突実験

新粒子探索



初期宇宙の生成



6兆度を超える  
高温物質

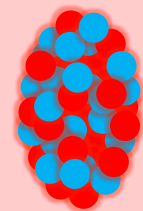
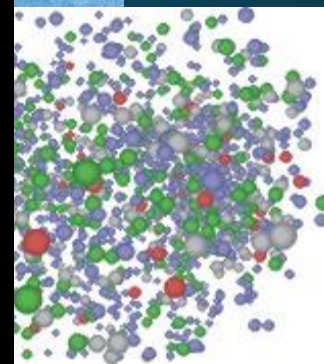
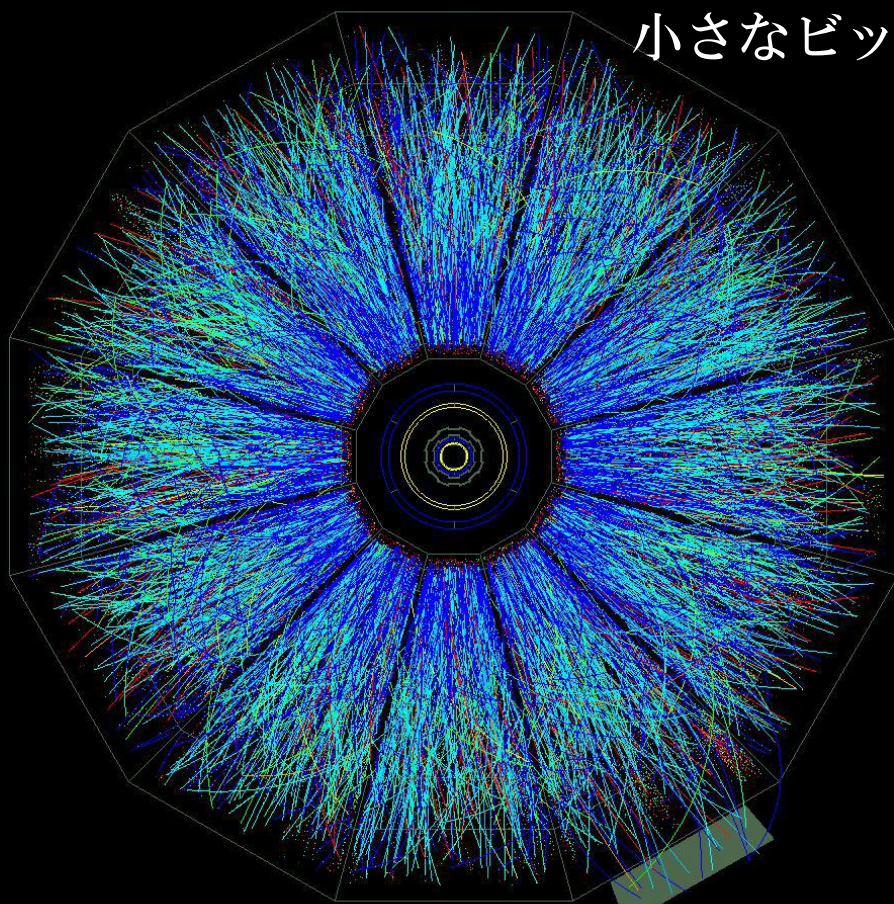
LHC – Large Hadron Collider



# 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

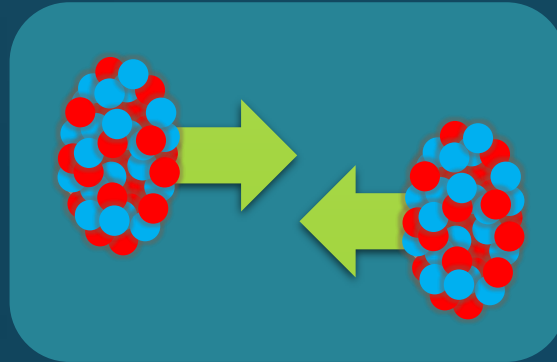
2010年～

全長30km

光速の99.9999%

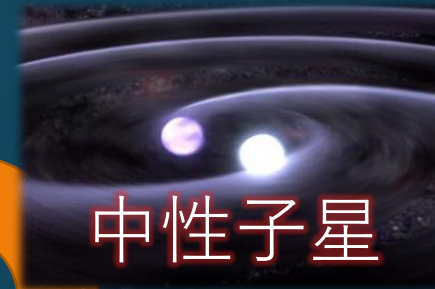
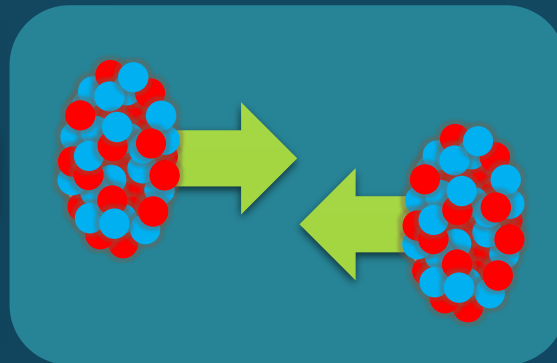
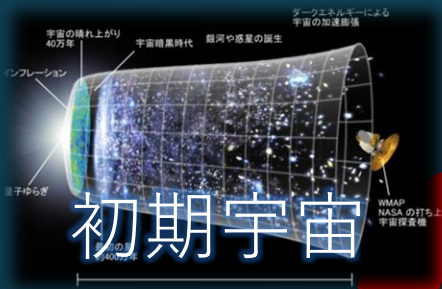
約8兆度

# 衝突エネルギーと密度



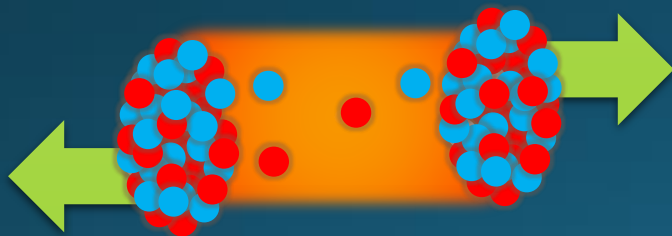


# 衝突エネルギーと密度



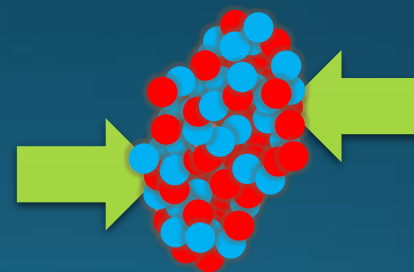
高エネルギー

低エネルギー



核子は衝突点を通過

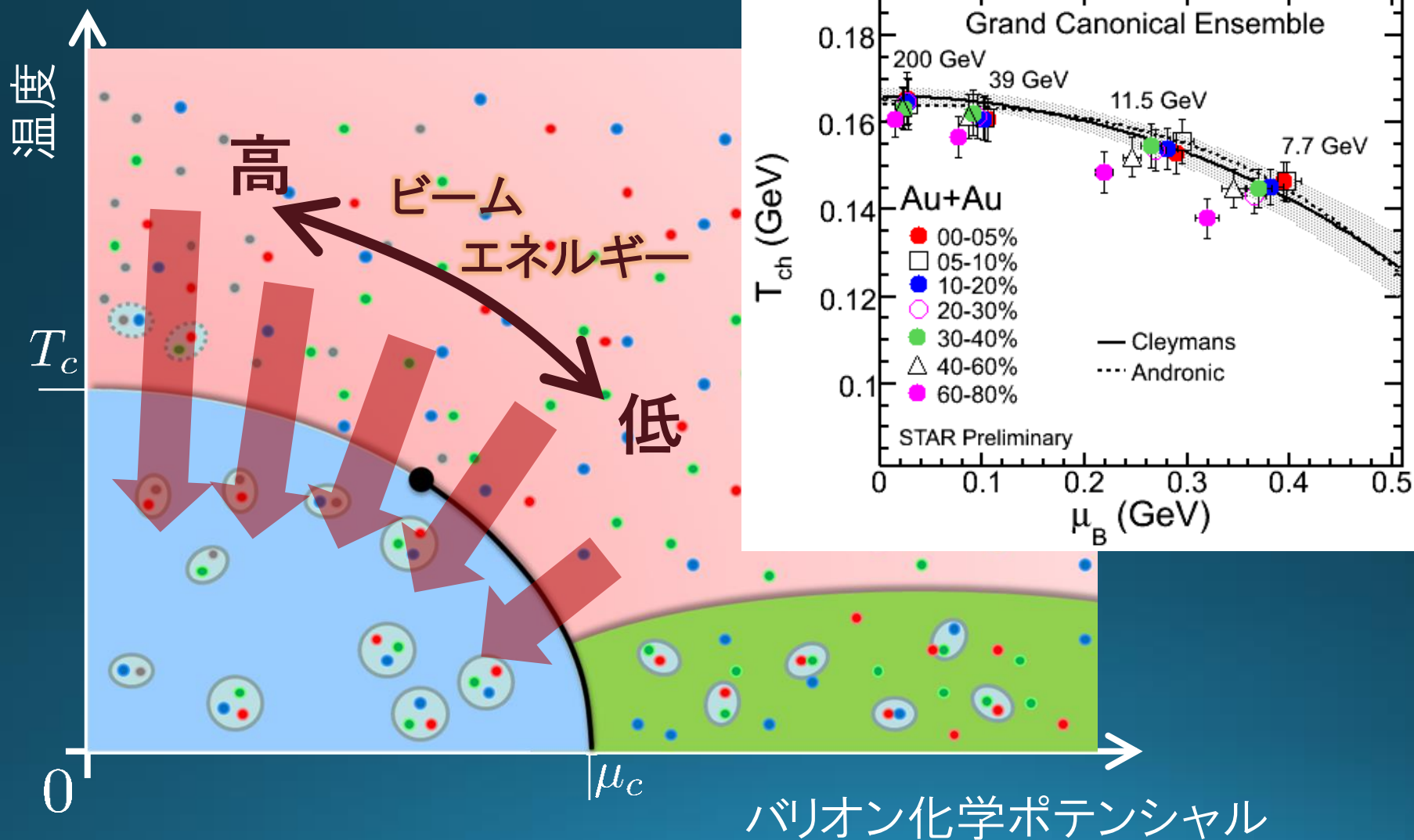
net-バリオン数: 少



衝突点で止まる

net-バリオン数: 大

# ビームエネルギー走査

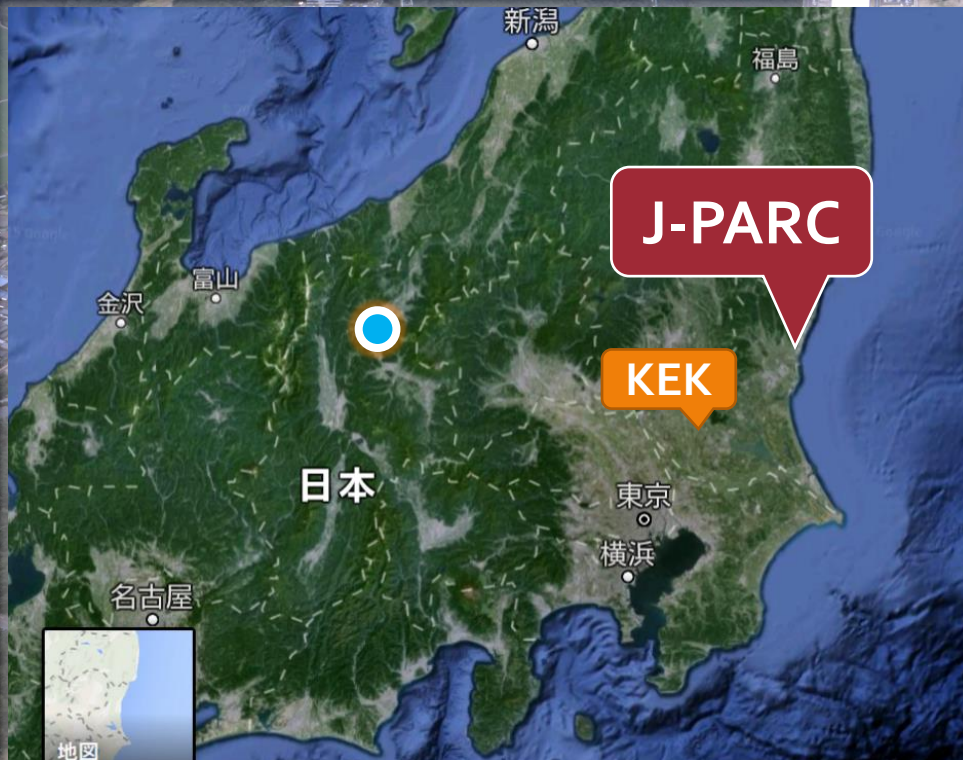




# J-PARC-HI

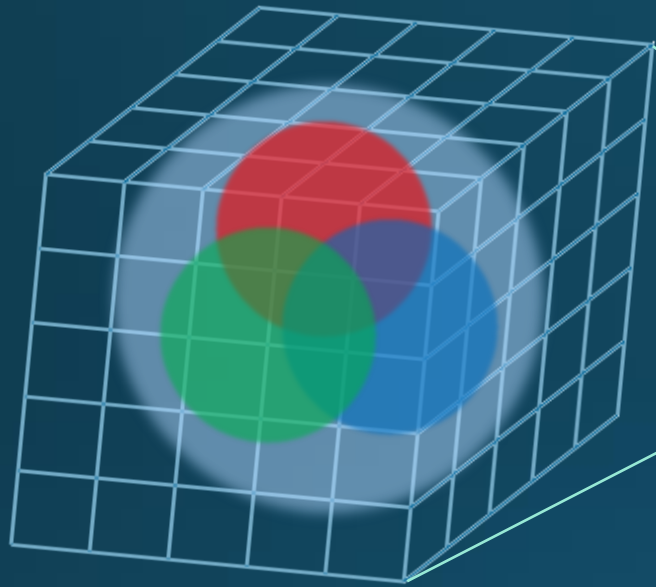
## J-PARC Heavy-Ion Program

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



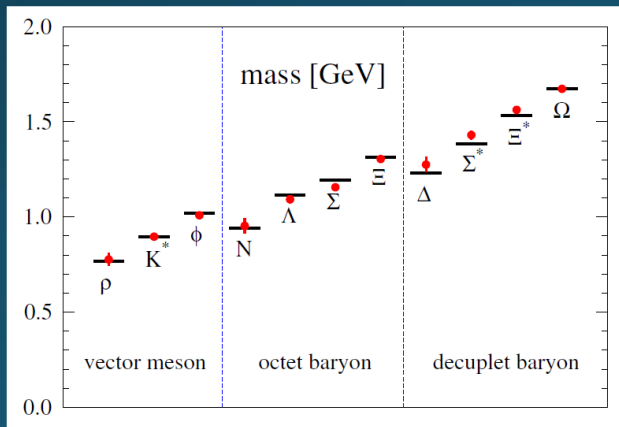
- $E_{\text{lab}} \sim 11 \rightarrow 19 \text{ AGeV}$
- $\sqrt{s_{\text{NN}}} \sim 4.9 \rightarrow 6.2 \text{ GeV}$
- 衝突レート:  $\sim 10^8 \text{ Hz}$
- 実験開始: 2028~?

# 格子QCD第一原理数値計算



富岳計算機

## クハドロンの質量



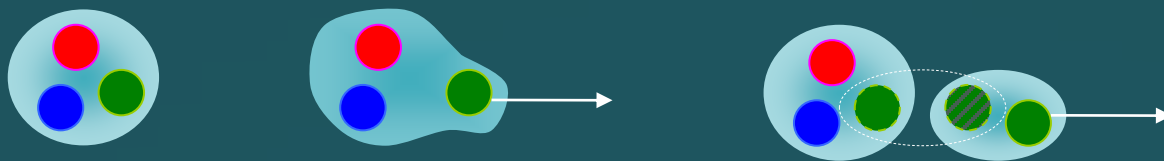
PACS-CS ('09)

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。

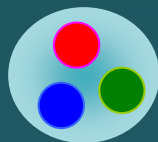
無理矢理取り出そうと引っ張ると...



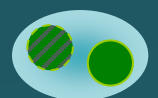
クォーク・反クォーク対を生成し、核子と中間子になる



我々の身の回りの物理の基本自由度



バリオン



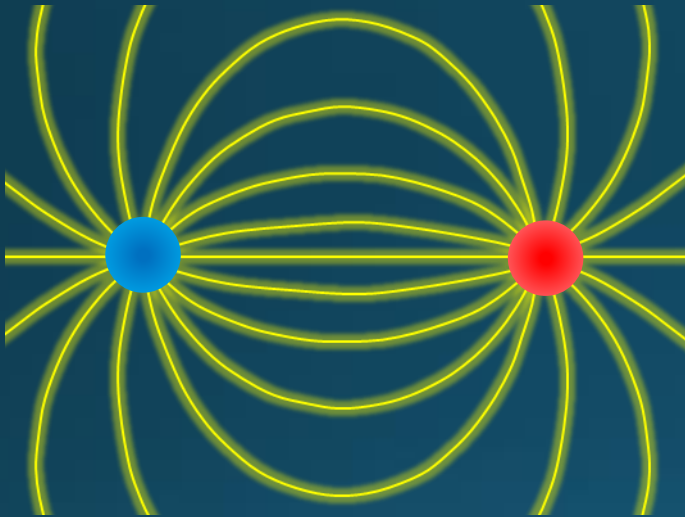
中間子 (メソン)

} 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

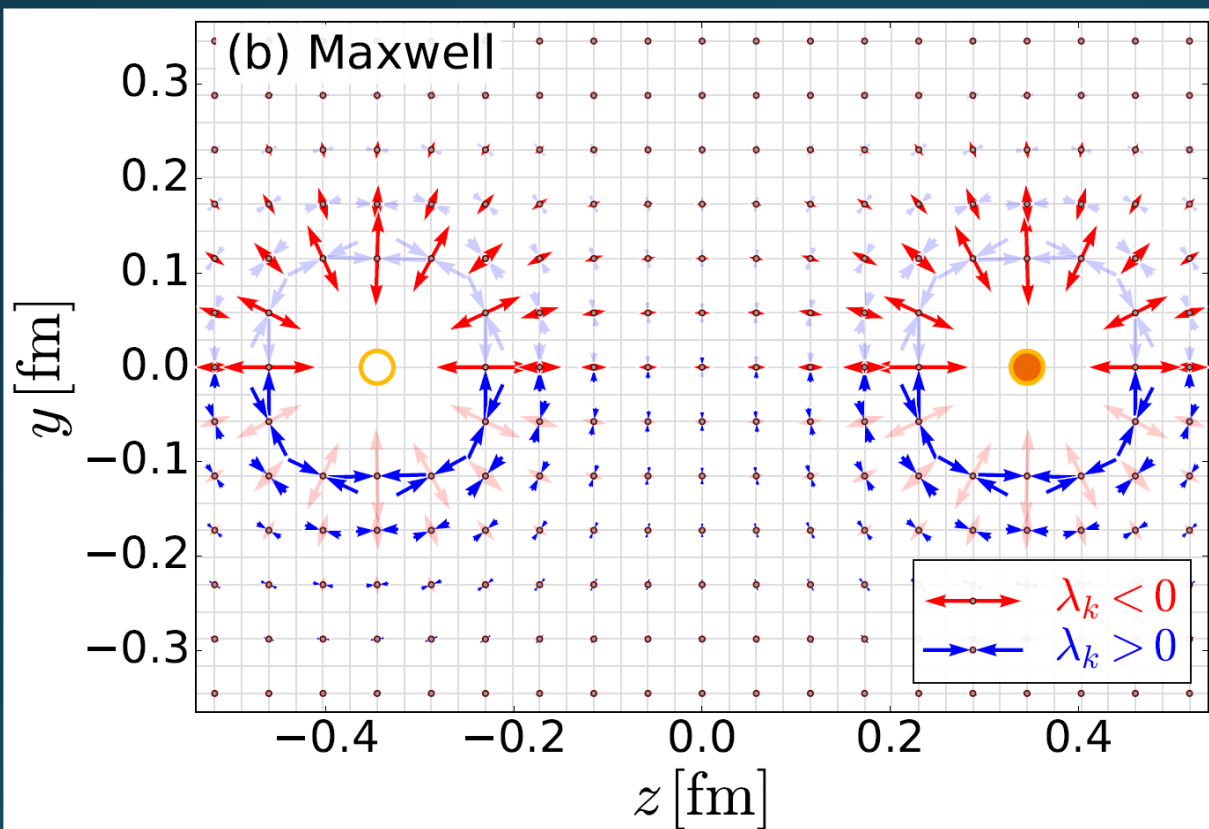


QCDの力線は集約される  
直線状に高エネルギー状態



高エネルギーの力線束が  
クォーク閉じ込めをもたらす

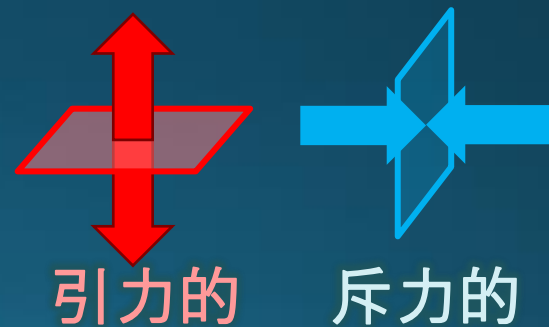
# 電気力線



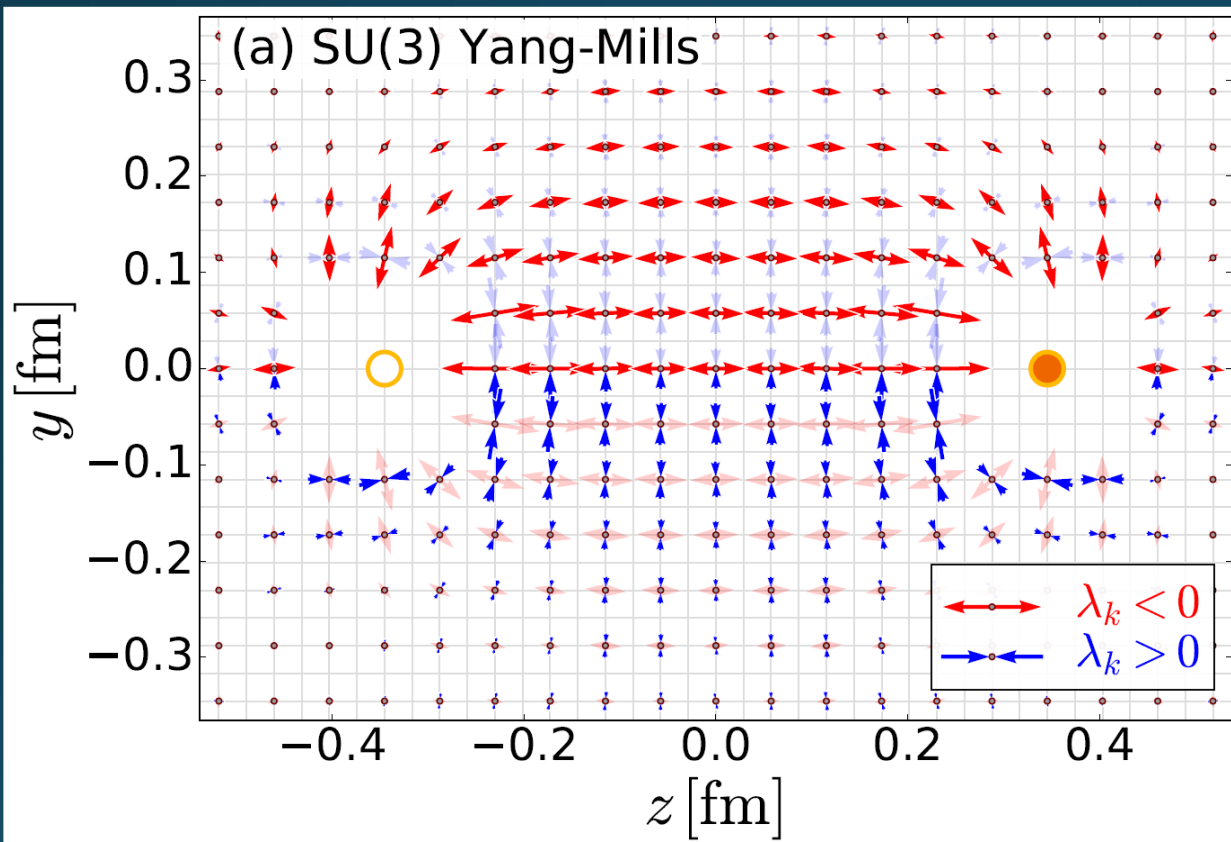
$$T_{ij}v_j^{(k)} = \lambda_k v_i^{(k)}$$

$(k = 1, 2, 3)$

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)

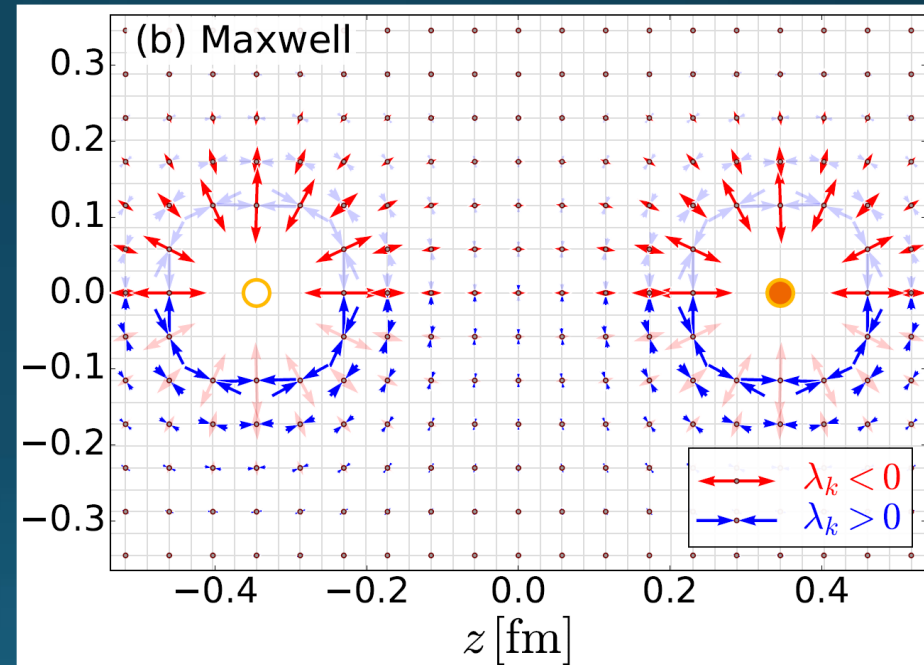
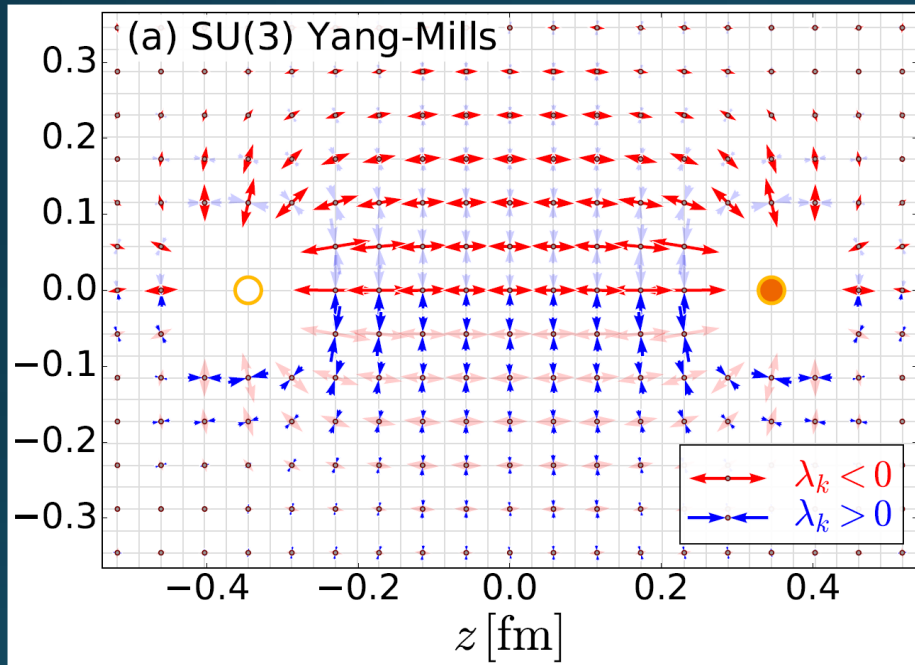
線の長さ＝場の強さ



# 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

# 宇宙を支配する方程式への道

# 運動方程式 = 微分方程式

運動方程式

$$ma = F \quad a = \frac{dv}{dx} = \frac{d^2x}{dt^2}$$

微分方程式

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = -mgh$$



代数方程式

$$\begin{cases} x + y = 10 \\ 2x + 4y = 20 \end{cases}$$

微分方程式を「解く」→関数 $x(t)$ が決まる

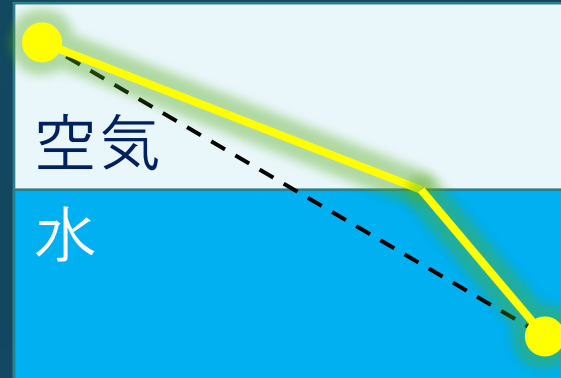
大学1年

- 単振動はなぜsinとcosなのか
- エネルギー保存則の証明
- 未来の予言

# 物理法則 = 最小化問題

## フェルマーの原理

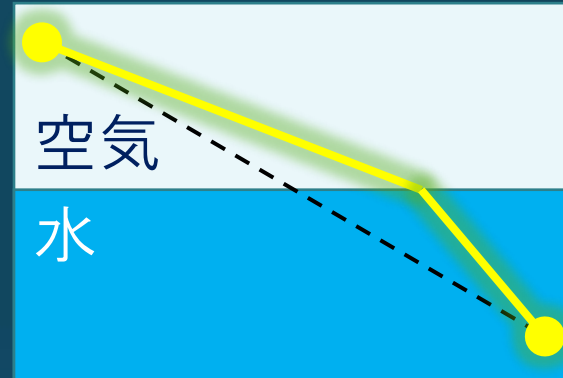
= 光は最短時間経路を進む



# 物理法則 = 最小化問題

## フェルマーの原理

= 光は最短時間経路を進む



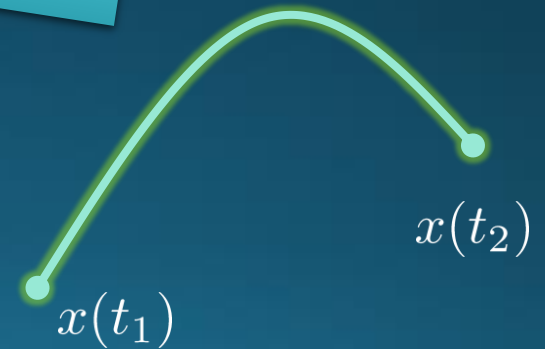
## 最小作用の原理

質点は、ある量を最小にする経路を進む

大学1~3年

$$S = \int_{t_1}^{t_2} \mathcal{L} dt$$

作用      ラグランジアン



➡ 基本法則を決める = ラグランジアンを書下す

# 量子力学と場の理論

## 量子力学

大学2年～

全ての粒子は波であり、  
全ての波は粒子である。

シュレディンガー方程式

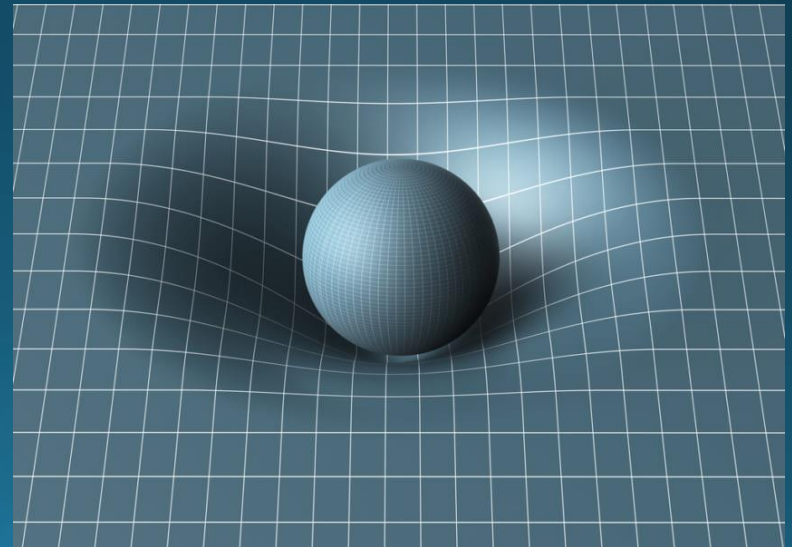
$$i\frac{\partial}{\partial t}\psi = H\psi$$

## 場の理論

大学2年～

我々の宇宙は、様々な種類の「場」  
で満たされている。

粒子＝場の振動  
力は、場の歪みが媒介





# 例：電磁気学

## 自然界の電磁気現象

電気力、磁石力、ローレンツ力、電磁誘導、コイル、右ねじ、フレミングの左手則、...



## マックスウェル方程式

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \\ \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \\ \nabla \times \mathbf{B} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \mu_0 \mathbf{j} \end{array} \right.$$

大学1年

大学3年



$$\begin{array}{l} \partial_\mu F^{\mu\nu} = j^\nu \\ \partial_\mu \tilde{F}^{\mu\nu} = 0 \end{array}$$



ラグランジアン

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}$$

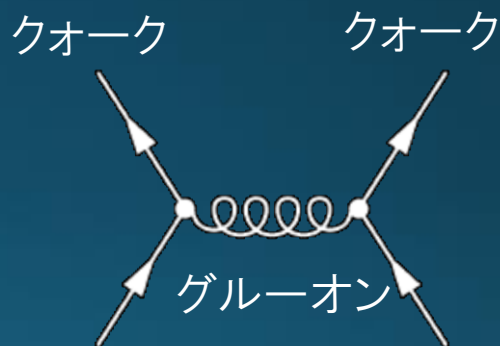
# 量子色力学

## Quantum ChromoDynamics (QCD)

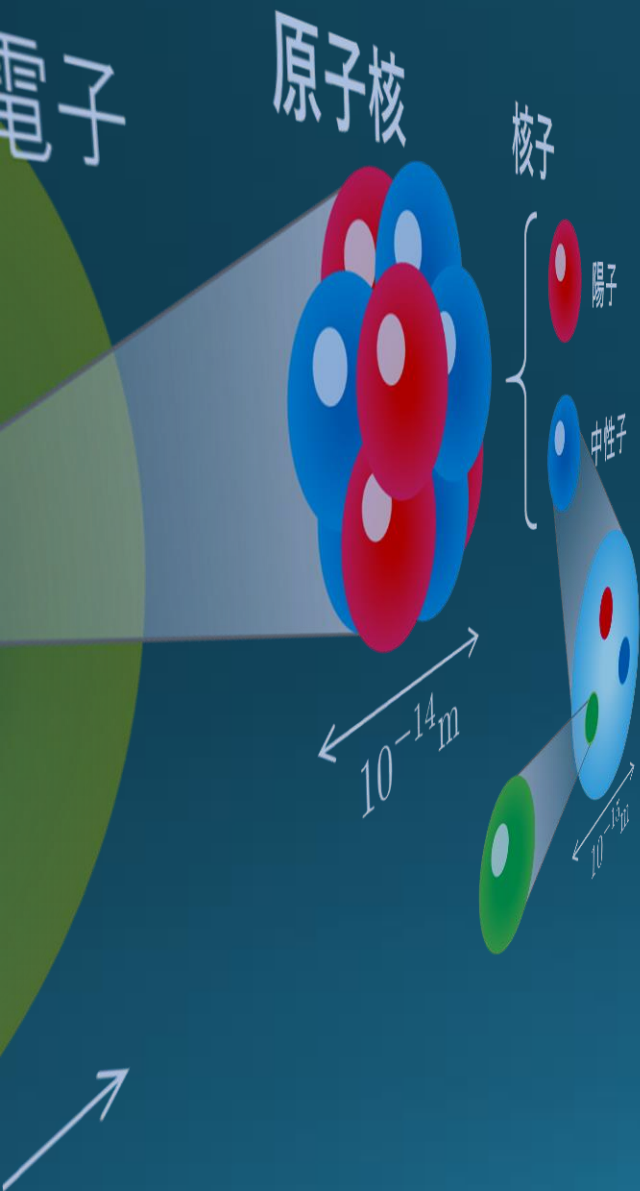
$$\mathcal{L} = \bar{\psi}(i\not{D} - m)\psi - \frac{1}{4}F_{\mu\nu,a}F_a^{\mu\nu}$$

### 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
- 電磁気学の成功、特殊相対性理論、対称性、計算可能性などから導かれた理論



# まとめ



素粒子の世界には  
多様な相転移現象が存在する

これら諸現象は、様々な動機から  
近年注目される重要な研究課題

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

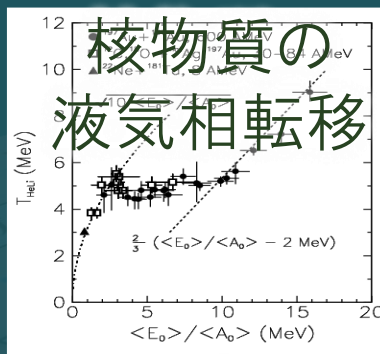
- 高校の学習項目は自身の人生、そして社会の役に立つことばかり。楽しく勉強しよう。
- 苦勞して学んだことは必ず将来の役に立つ。苦手科目も満遍なく勉強を。
- 現代文明、科学リテラシーの次世代の担い手として活躍を。
- 「原子核理論」っておもしろい！

# 宇宙最高密度の一次相転移 = 物質による真空の破壊



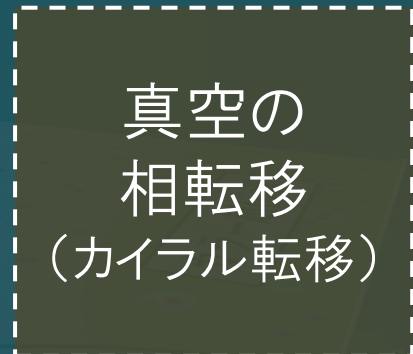
水の沸騰

$1\text{g/cm}^3$



核物質の  
液気相転移

$10^{14}\text{g/cm}^3$



真空の  
相転移  
(カイラル転移)

$10^{15}\text{g/cm}^3$

## ◆◆◆ 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



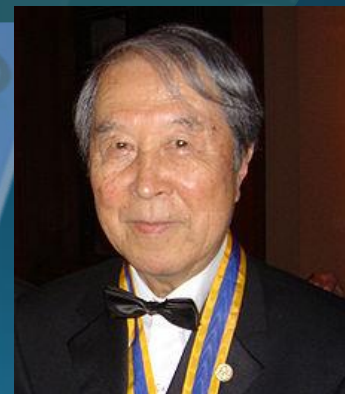
江角晋一

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

現在、およそ  $10^{15}\text{g/cm}^3$  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によるもので、

これら一連の実験が目的は、高エネルギー重イオン衝突による高エネルギー核物質の相転移を探ることである。

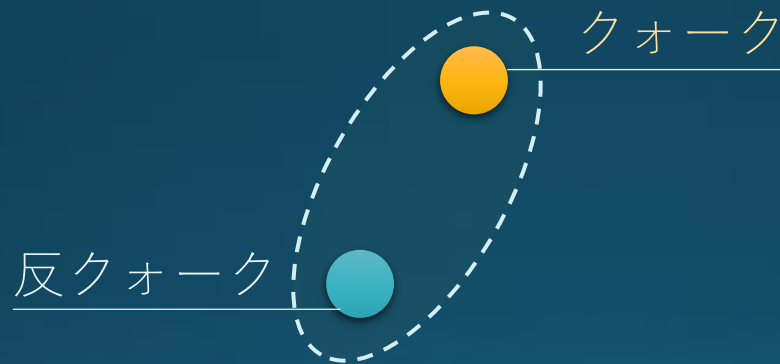
日本物理学会誌  
2021年8月号



南部理論の  
直接的検証

# QCDの真空状態

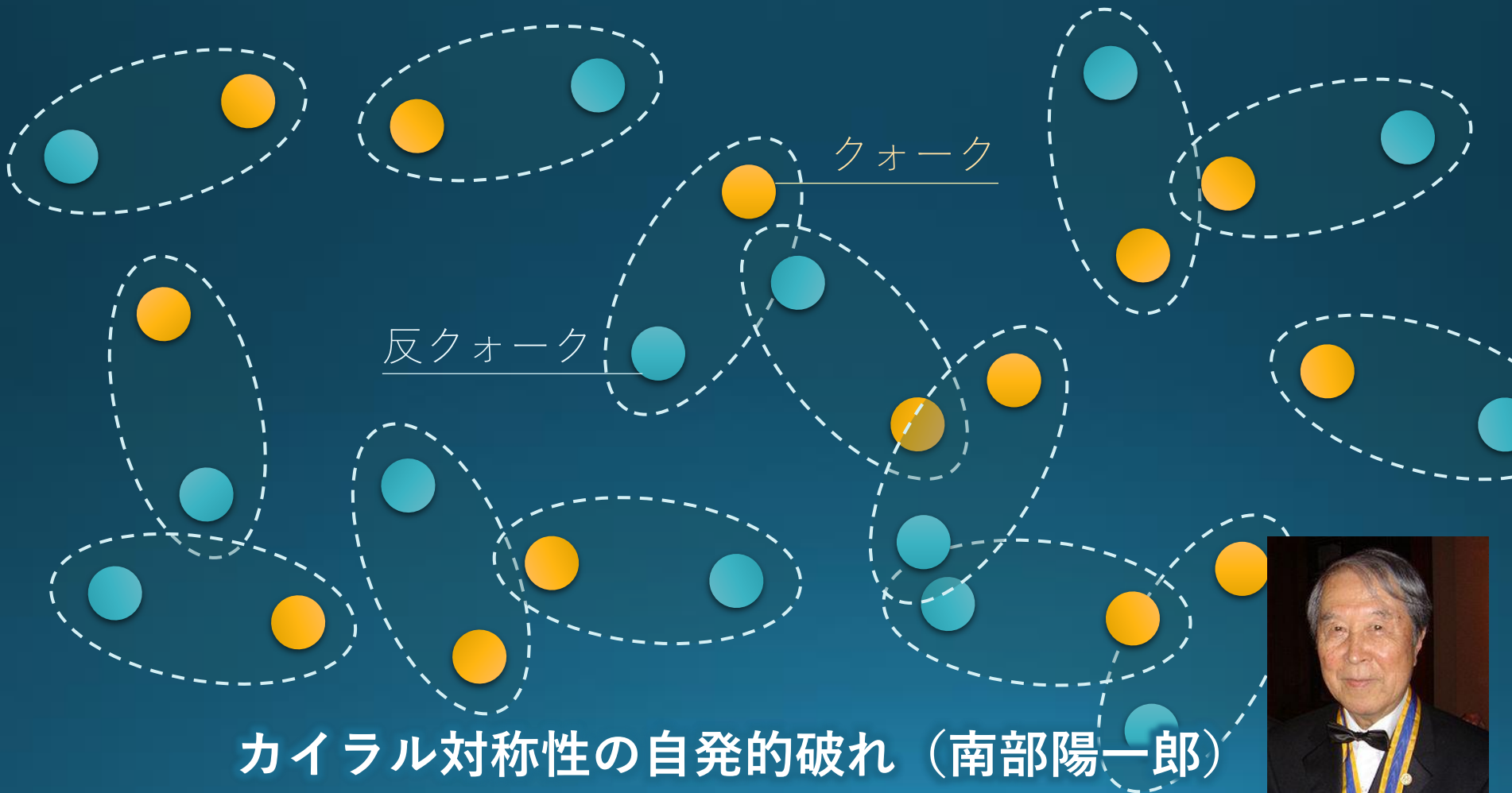
我々の真空は、クォークの「凝縮」で埋め尽くされている





# 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)

