

「真空」の相転移

---超高温・高密度の世界で起こること---

科学カフェ京都

2017年10月14日(土)

国広 悌二 (物理学第二教室:原子核理論)

内容

- 電子、原子核、中性子の発見
- 原子核、素粒子(ハドロン)、クォークの世界
- 「強い相互作用」の基礎理論(量子色力学)の性質
- 真空の物質性:南部による真空・物質概念の変革
- 環境変化によるQCD真空の変化(相転移)
- まとめ

1. 電子、原子核、中性子の発見

1899年: J.J.トムソンによる電子の「発見」: 陰極線は負電荷の粒子線、

電荷と質量の比(比電荷)測定

化学(電気分解等)の素電荷と同定

電気素量の概念は化学者ウィリアム・プラウト(1785-1850)により、

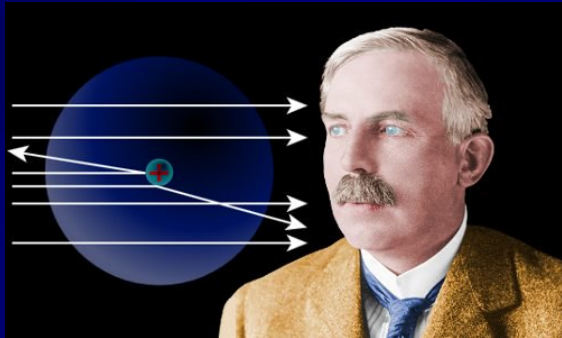
「電子(electron)」という用語はJ.J.ストーニー(1826-1911)による。



<https://www.famousscientists.org/>

1911年: 原子核の発見(E.ラザフォード): α 線の金箔による大角度散乱
方向が大きく変わる ←——— 大きい力 $1/r^2$

中心に電荷(を物質)が局在
陽子=水素原子の原子核、
中性子の存在を予言



<https://www.famousscientists.org/>

1932年: 中性子の発見(チャドウィック):

Poから出る強い透過力を持ち、陽子を弾き飛ばす放射線は、陽子とほとんど同じ質量を持つ中性粒子、すなわち、中性子であることを示した。



<https://www.famousscientists.org/>

⇒ 原子核構造論 (ハイゼンベルク 1932)

2. 現代の物質観:物質の階層構造

$$1\text{fm}=10^{-15}\text{m}$$

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

<http://www.bnl.gov/rhic/physics.asp>

電子

原子核の拡大図

名前

陽子

中性子

クォーク

グルーオン

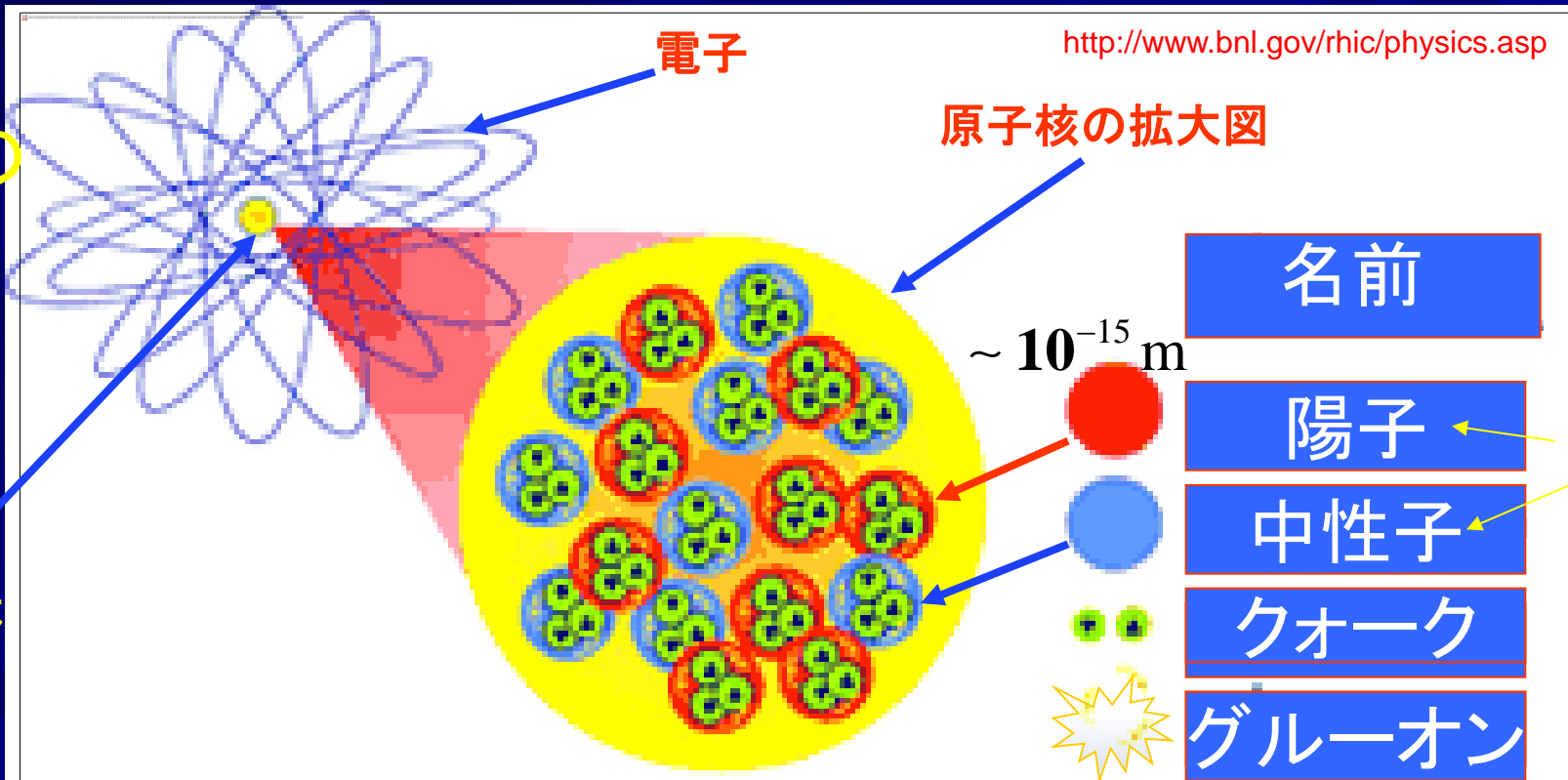
$$\sim 10^{-15}\text{m}$$

核子

$$10^{-13}\text{cm} \sim 10^{-12}\text{cm}$$

原子の構造

原子核
原子全体の
1万~
10万分の
1の大きさ



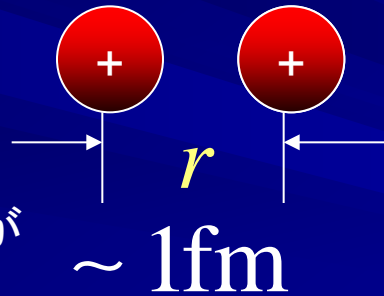
3.原子核を結合させている力

陽子(p); 正電荷を持った粒子、電子の約2千倍の質量
中性子(n); 電荷を持たない粒子、質量は陽子とほとんど同じ
(少し大きい: 真空中ではベータ崩壊をしてpになる。)

クーロン力による位置(ポテンシャル)エネルギー

■ 原子核中の陽子間に働くクーロン斥力(エネルギー)

$$\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \sim 1.4\text{MeV}$$



100万ボルトで加速された電子が持つエネルギー

単位 $10^{-15}\text{m}=1\text{fm}$
 $10^6\text{eV}=1\text{MeV}$
 $1\text{eV} \Leftrightarrow T \approx 12000\text{K}$
($E = k_B T$)

陽子間に働くこの巨大なクーロン斥力に
打ち勝って核子同士を結合させている
新しい力が必要!

核力

陽子間の電氣的な斥力に打ち勝ち、かつ、電荷のない中性子をも極小さい領域に閉じこめている「核力」の起源は何か？

核力は二十世紀になってはじめて人類がその存在を認識した新しい力（「強い相互作用」）

湯川の中間子理論(1935年)

中間子(パイ中間子)の予言！

質量 ($m_e < m_\pi < m_p$)を持つ粒子の存在:

←→ 核力ポテンシャル $e^{-\mu r}/r$
 $\mu = m_\pi c/h$

c.f. 電気力(クーロン)ポテンシャル $\frac{1}{r}$
電磁気理論:

ファラデー・マクスウェルの電磁場の理論
光は電磁波、電気力は電磁場(光子)の交換による。
1929年:ハイゼンベルク・パウリの場の量子論



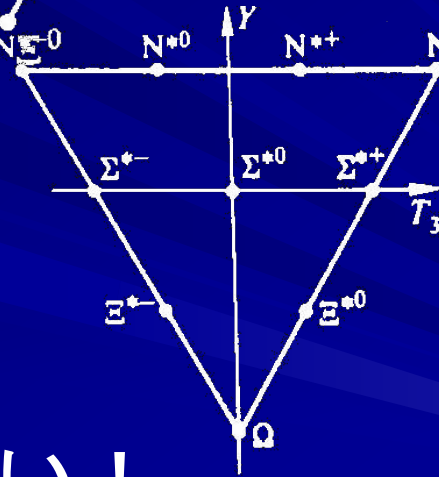
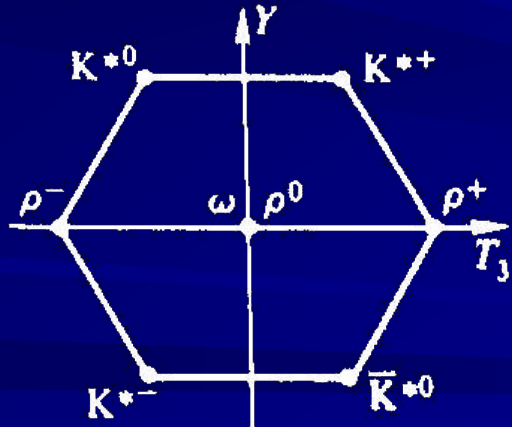
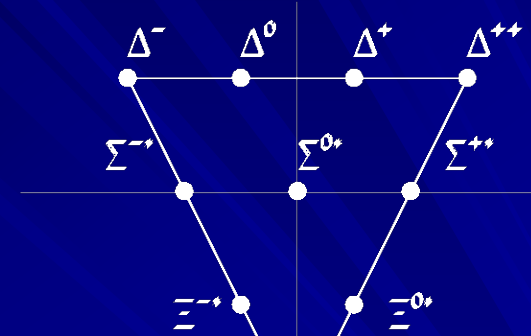
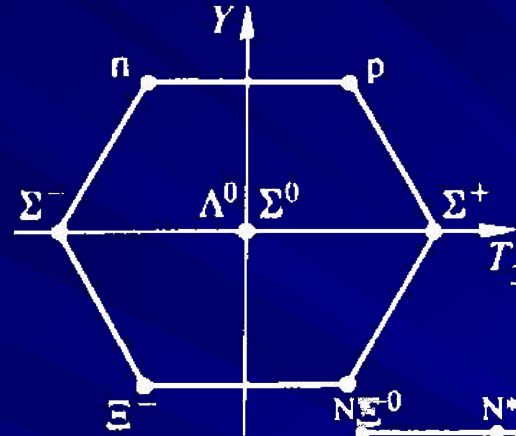
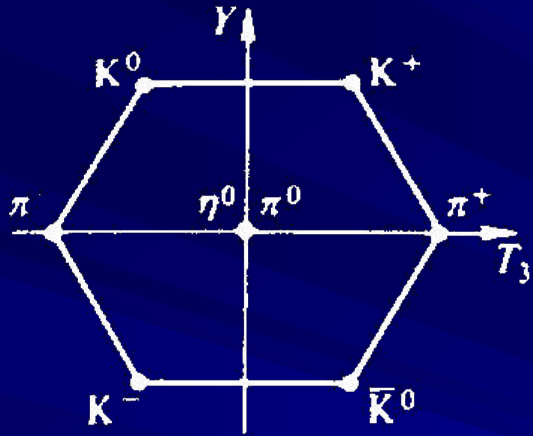
新しい力、新しい(素)粒子！
ある階層の神秘はその下の階層
の未知の素粒子の性質に帰着される。

3. 「素粒子動物園 (particle zoo)」とクォーク模型

多くの陽子、中性子、パイ中間子は「強い相互作用」をする粒子、ハドロン（「古い」素粒子）の仲間

中間子: 湯川中間子の仲間

重粒子: 陽子や中性子の仲間



もっといっぱい!

しかも、保存則と質量の規則性



ハドロンのクォーク模型

c.f. 化学の「定比例の法則」、「倍数比例の法則」  原子、分子の概念

高エネルギーを作る加速器の必要性

様々な「素粒子」の質量

$$m_e c^2 \approx 0.5 \text{MeV}$$

$$m_n c^2 \approx m_p c^2 \approx 938 \text{MeV}$$

$$m_\pi c^2 \approx 135 - 140 \text{MeV}$$



$$m_\rho c^2 \approx 770 \text{MeV}$$

$$m_\Delta c^2 \approx 1232 \text{MeV} > m_N c^2$$

「素粒子」を作るには大きなエネルギーが必要！

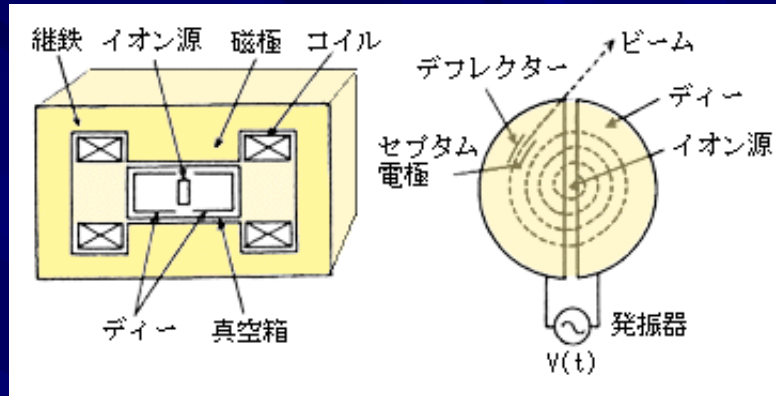
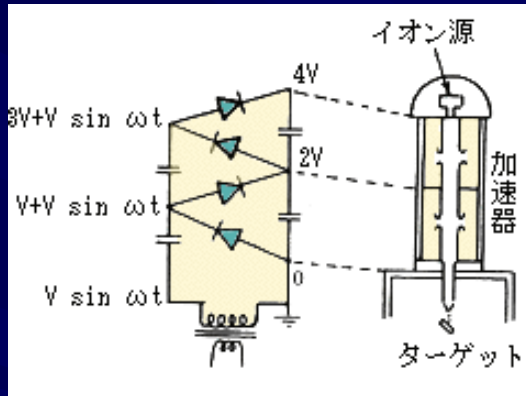
大きなエネルギーを作る装置：加速器

例：サイクロトロン、ベータトロン等、、、

今では、1兆eV(1TeV)以上のエネルギーを作り出す加速器が稼働している。(例. LHC..)

典型的加速器

<https://www2.kek.jp/kids/accelerator/accelerator05.html>



サイクロトロン

クッククロフト・ウォルトン

加速器=物質波を用いた「顕微鏡」

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad p = mv$$

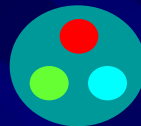
J-PARC (Japan-Proton-Accelerator-Complex)



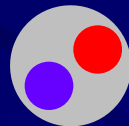
<https://j-parc.jp/researcher/ja/about/what/index.html>

ハドロンの構成要素

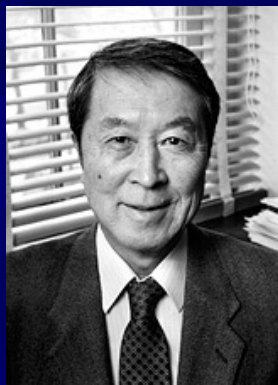
陽子、中性子の仲間(重粒子); 3個のクォーク



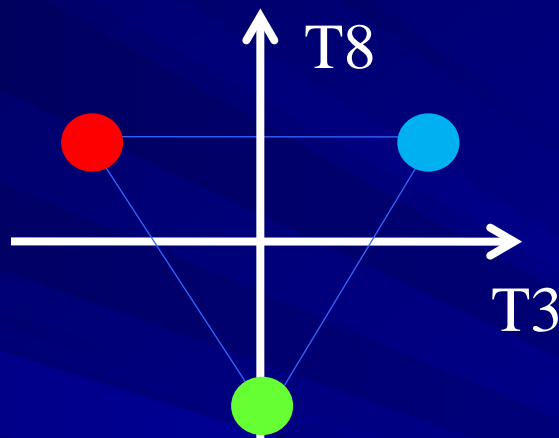
中間子; クォークと反クォークからなる



「色」の「自由度」の導入



南部陽一郎



坂田昌一



M. Gell-Mann



G. Zweig

<http://images.sciencesource.com/preview/9F0856.html>

クォークは6種類; 3「世代」

$$\begin{array}{l} \text{電荷} \\ +2/3 \quad \begin{pmatrix} u \\ c \\ t \end{pmatrix} \\ -1/3 \quad \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix} \end{array}$$



小林誠、益川敏英

しかし、クォークを単独で観測できない!

何がクォークを閉じ込めるのか?

4.「強い相互作用」の基礎理論

---量子色力学(QCD)---

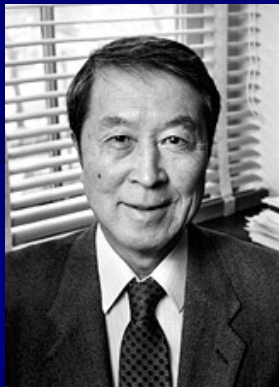
■ クォークとグルーオンの理論

強い相互作用をする粒子(ハドロン)の基礎理論はハドロンそのものではなく、それらを構成するクォークとグルーオンを使って書かれている！

D. グロス, D. ポリッツァー, F. ウイルチェック
2004年度ノーベル賞受賞



https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates

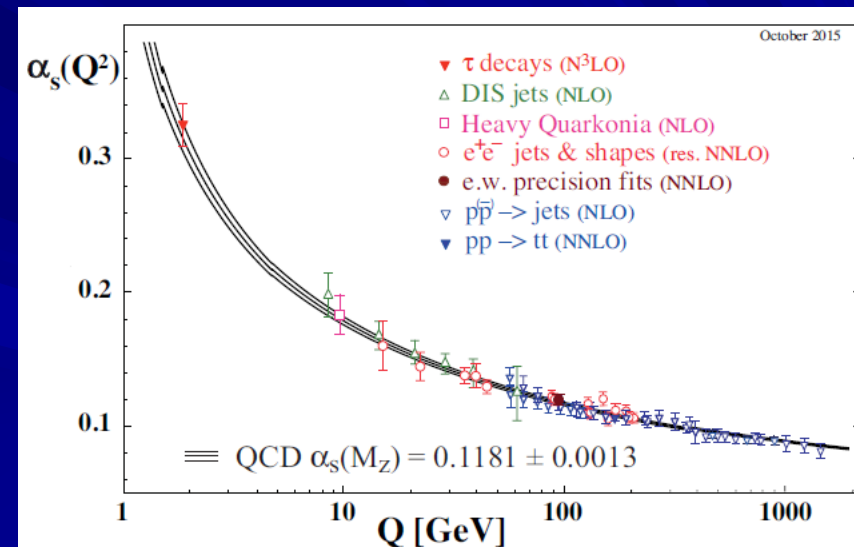


南部陽一郎

「色」の自由度の導入と、
QCD(SU(3) ゲージ理論の
構想(1960年代)

力の強さ

<http://pdg.lbl.gov/2015/reviews/rpp2015-rev-qcd.pdf>



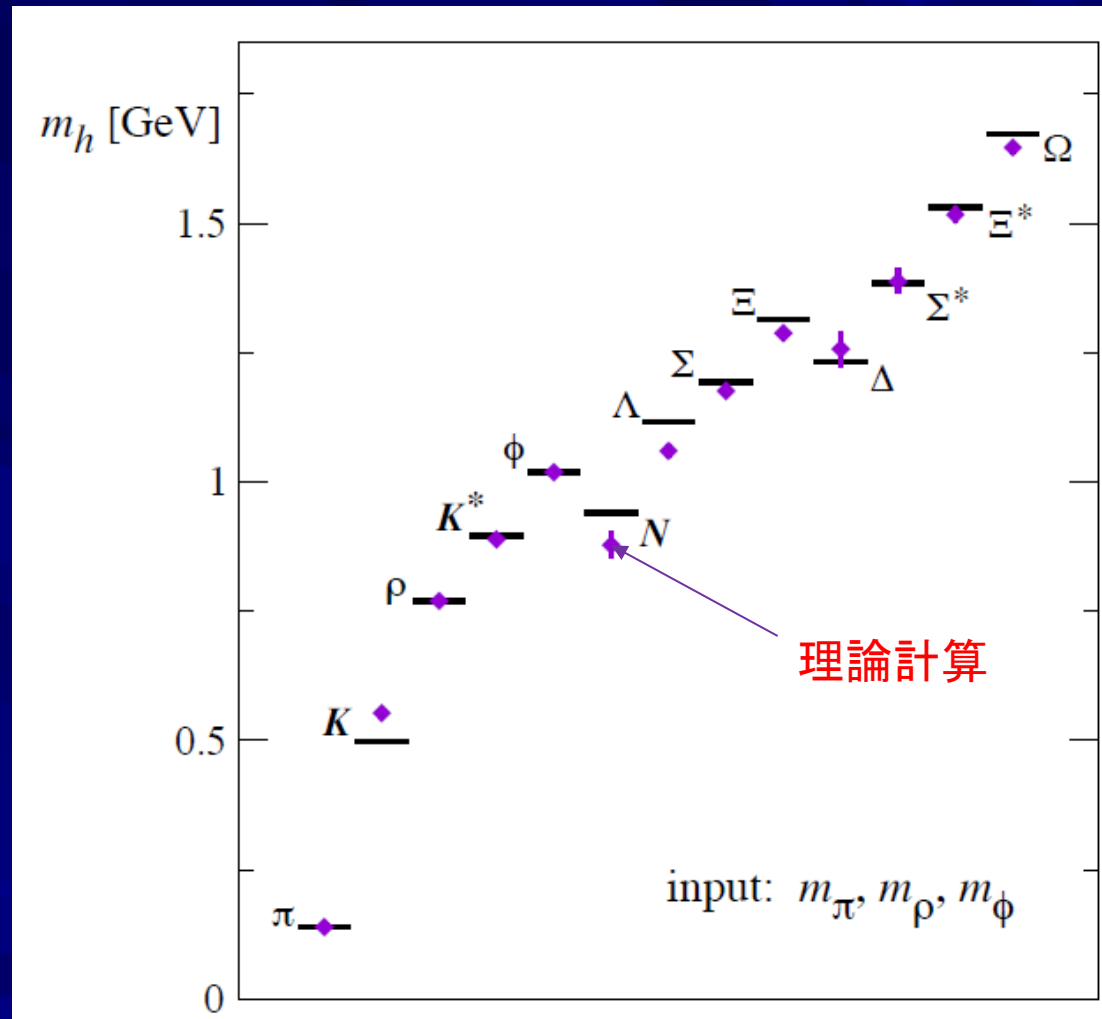
← 長距離

→ 短距離

短距離でのクォーク・グルーオンの
漸近自由性と長距離での力の増大

量子色力学による素粒子(ハドロン)の質量の再現

GeV=1000 MeV



$$m_e c^2 = 5 \times 10^{-4} \text{ GeV}$$

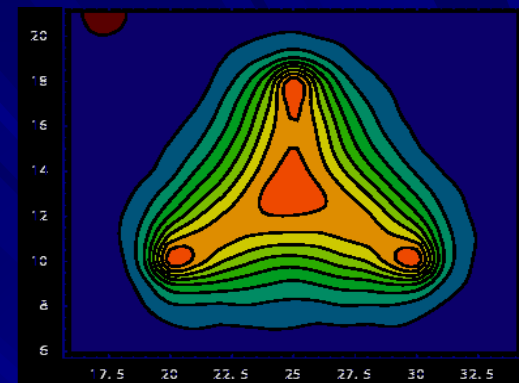
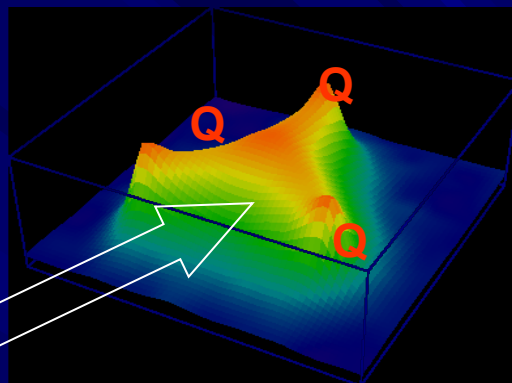
From PDG citing
CP-PACS collab.: PRD 67 (2003)

中間子



グルーオン; 膠(にかわ)粒子

陽子や中性子



市江博子博士その他(2003)

量子色力学の特徴

- 分解能に応じて変化する描像、「法則」: 高分解能ではほとんど質量のないクォークとグルーオンが「見える」。実際、理論はクォークとグルーオン場で書かれている。(ハドロンではない。) さらに高分解能ではクォーク間の力は弱くなる。しかし、低分解能(長距離)では力が強く、クォークやグルーオンは単体では取り出せない。(閉じこめ問題)
 - ハドロン(「素粒子」)は低分解能で見える(複合)粒子
 - ハドロンの仲間では特別に軽い湯川のパイ中間子の存在は陽子や中性子の質量の起源と結びついている。(カイラル相転移; 南部陽一郎)
- 温度、密度による真空の根本的变化(相転移)

量子力学的粒子には二つのタイプがある: フェルミ粒子、ボーズ粒子

量子力学的粒子は自転している: その回転の強さ(角運動量, スピン)はとびとびの値しか取れない。

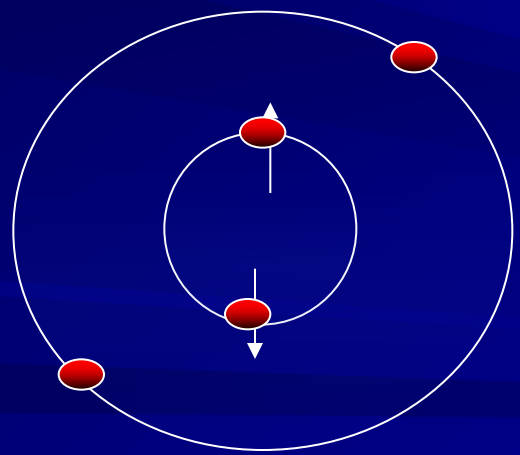
具体的には、整数 (0, 1, 2, 3, ...) または

半整数 (1/2, 3/2, 5/2, ...)

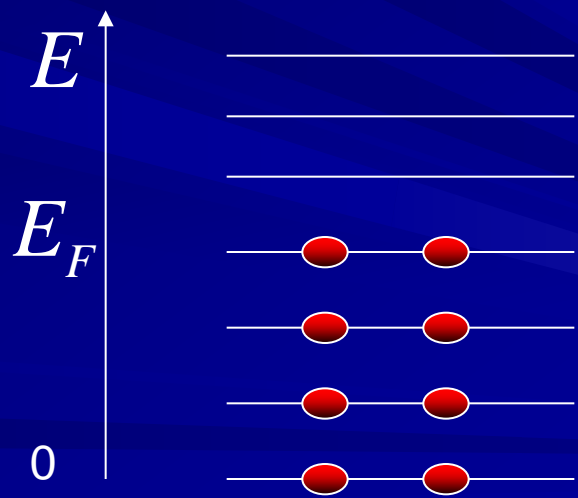
ボーズ粒子; 光子、中間子、グルーオン、フォノン

フェルミ粒子; 電子、陽子、中性子、クォーク、ニュートリノ

パウリの排他律: 一つの量子状態には一個の粒子しか入れない



原子内の電子の軌道



一般の場合のフェルミ粒子のエネルギー準位占拠の様子. スピン=1/2の場合.

真空と物質； 真空と物質の相互規定性

物質とは何か？

20世紀の物理学（場の量子論）の答え：
物質とは量子場の励起状態のことである。

物質と真空は相互規定的であり、現代の物質の理論は
必然的に真空の理論にもなっている。

何が物質かということは真空を決めることと等価で
ある。

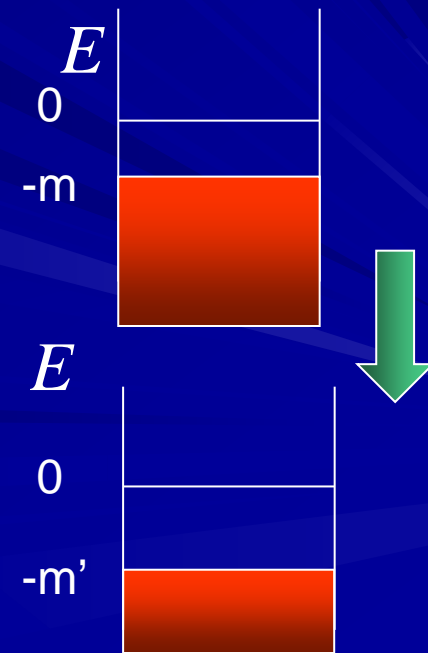
例 ディラックの相対論的電子の理論

真空は負のエネルギーの状態に電子がいっぱい充満した状態。
そこからのずれ（電子を足したり取ったり）するとそこに電子や陽電子が
作られたように見える。（反粒子の存在の予言!）

真空はもっと「物質的」：対称性の自発的破れ概念(南部,1960)

どういう性質を持つ粒子（物質）が存在するかは、
相互作用の結果決まる。超伝導状態の金属中の電子が
エネルギーギャップを持つように、クォークの質量も
真空の変化（相転移）により変化し得る。（カイラル対称性の自発的破れ）

現代の物質理論は真空の「物性理論」という側面を持つ。



真空と物質； 真空と物質の相互規定性

物質とは何か？

20世紀の物理学（場の量子論）の答え：
物質とは量子場の励起状態のことである。

物質と真空は相互規定的であり、現代の物質の理論は必然的に真空の理論にもなっている。

何が物質かということは真空を決めることと等価である。

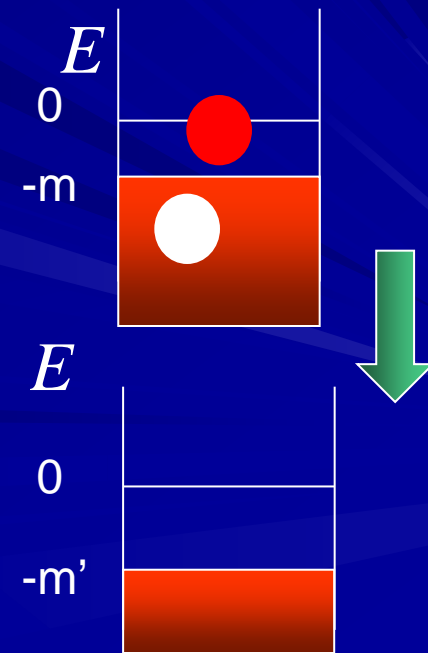
例 ディラックの相対論的電子の理論

真空は負のエネルギーの状態に電子がいっぱい充満した状態。そこからずれ（電子を足したり取ったり）するとそこに電子や陽電子が作られたように見える。（反粒子の存在の予言!）

真空はもっと「物質的」：対称性の自発的破れ概念(南部,1960)

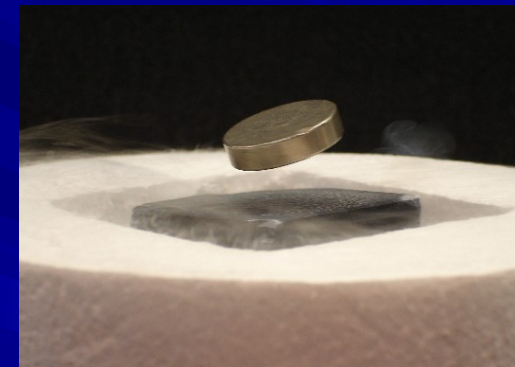
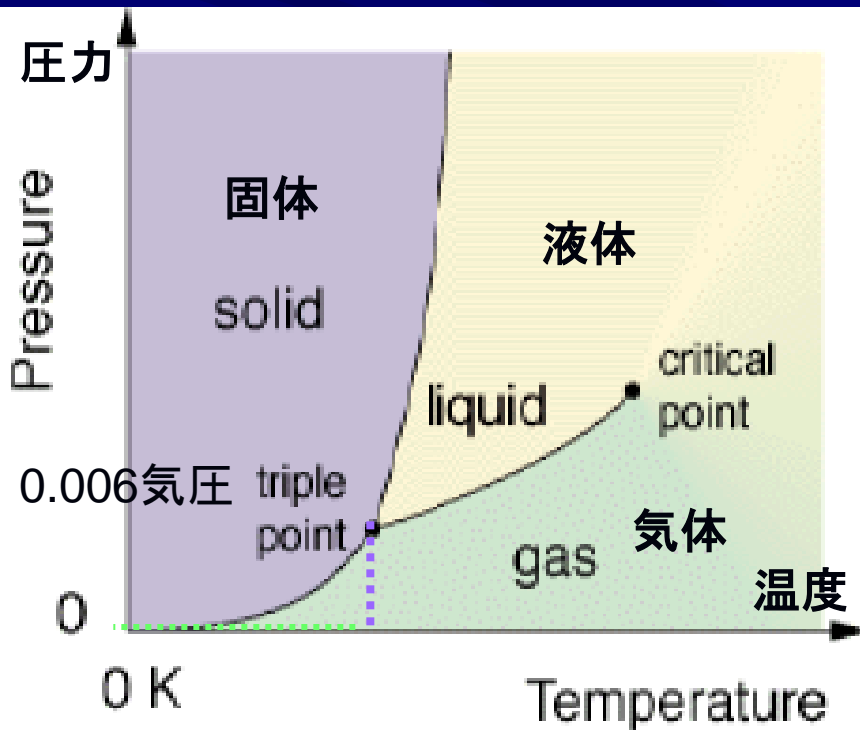
どういう性質を持つ粒子(物質)が存在するかは、相互作用の結果決まる。超伝導状態の金属中の電子がエネルギーギャップを持つように、クォークの質量も真空の変化(相転移)により変化し得る。(カイラル対称性の自発的破れ)

現代の物質理論は真空の「物性理論」という側面を持つ。



相転移と相図; 水と金属の例

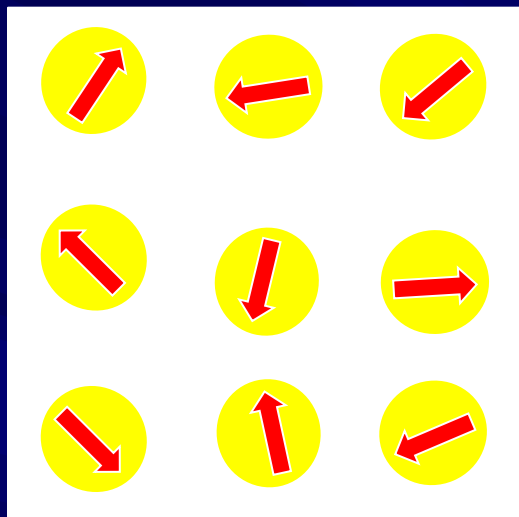
- 水の三態; 氷(固体)、水(液体)、水蒸気(気体)
- 金属の磁石化; 高温(cf. 鉄では1000Kぐらい)で磁石になる性質を失う。(回転対称性の破れ)
- 金属の超伝導; 超低温で抵抗なしで電流が流れるようになる。(ゲージ対称性の破れ)



マイスナー効果:
磁界をかけると超伝導状態の
金属(酸化銅)が中空に
浮き上がる

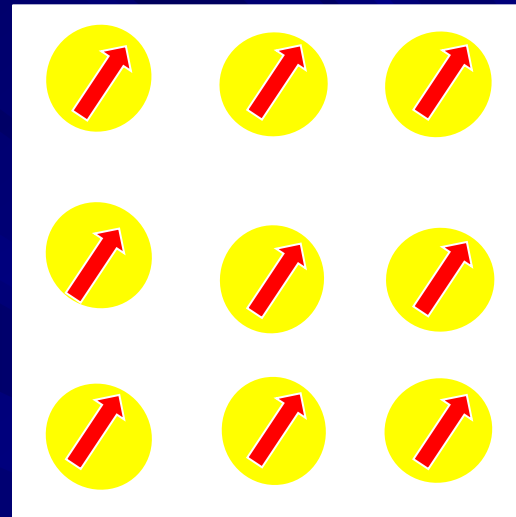
磁石への相転移

--- 回転対称性の自発的破れ ---



高温 $T > T_c$

微小磁石の方向が乱雑
(エントロピー S が大きい)



低温 $T < T_c$

微小磁石の方向が互いに揃う方が
エネルギー E が小さい



特定方向が選ばれる:
「回転対称性が自発的に破れた。」

c.f. 有限温度 T で実現する状態は以下の量(ヘルムホルツの自由エネルギー)が最小になるように決まる

$$F = E - TS$$

内部エネルギー

エントロピー

常伝導

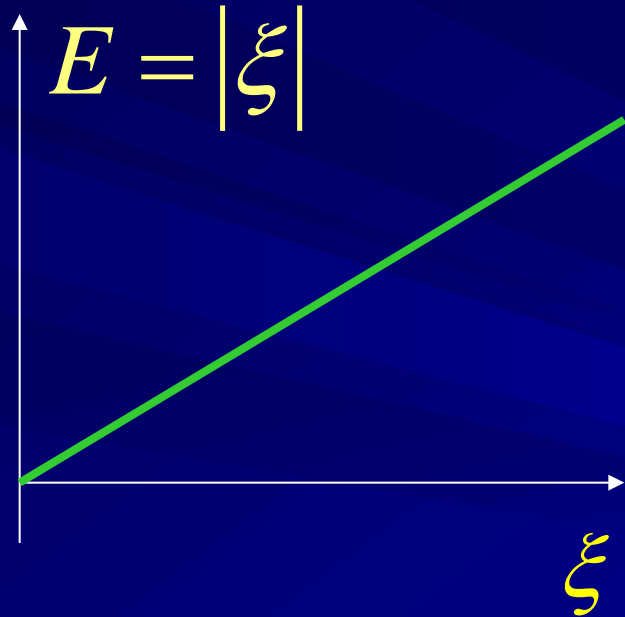
超伝導

$$\langle \psi_{\uparrow} \psi_{\downarrow} \rangle = 0$$



$$\langle \psi_{\uparrow} \psi_{\downarrow} \rangle \neq 0.$$

ゲージ対称性の破れ

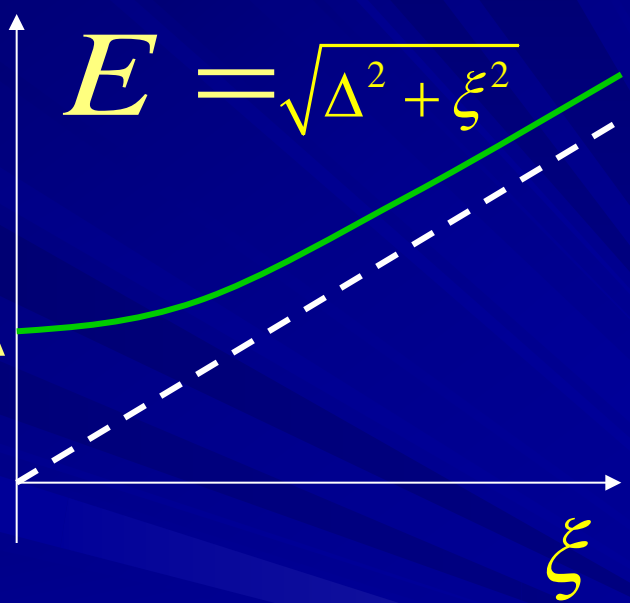


ギャップ Δ



$$E = \sqrt{\Delta^2 + \xi^2}$$

質量 Δ の相対論的エネルギー



真空(基底状態)の変化

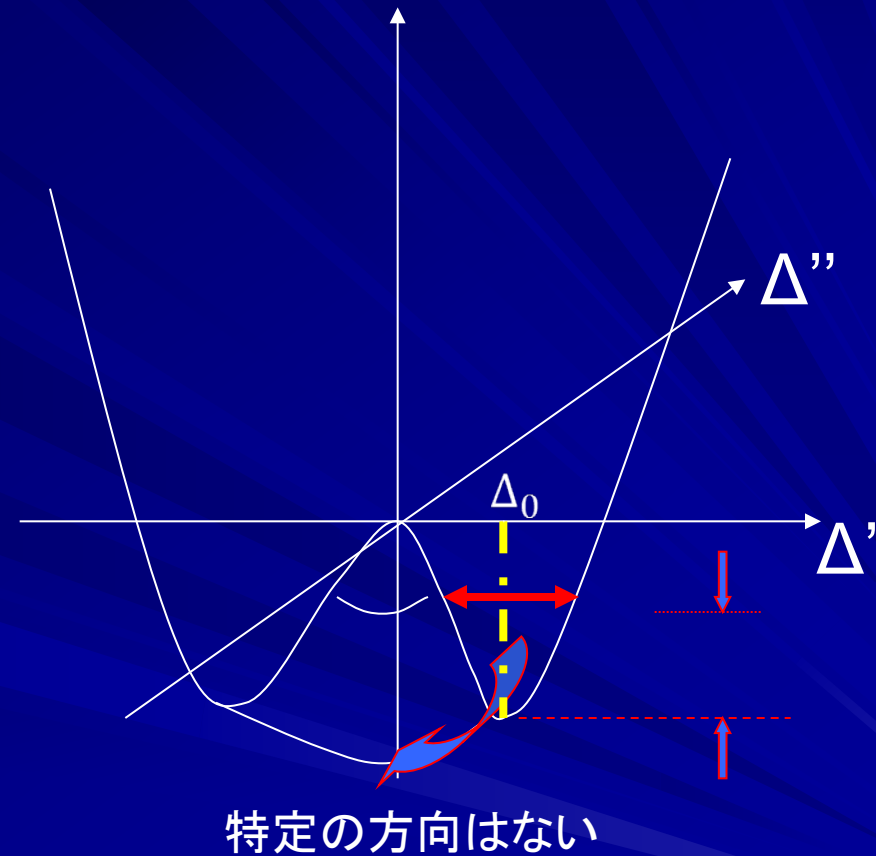
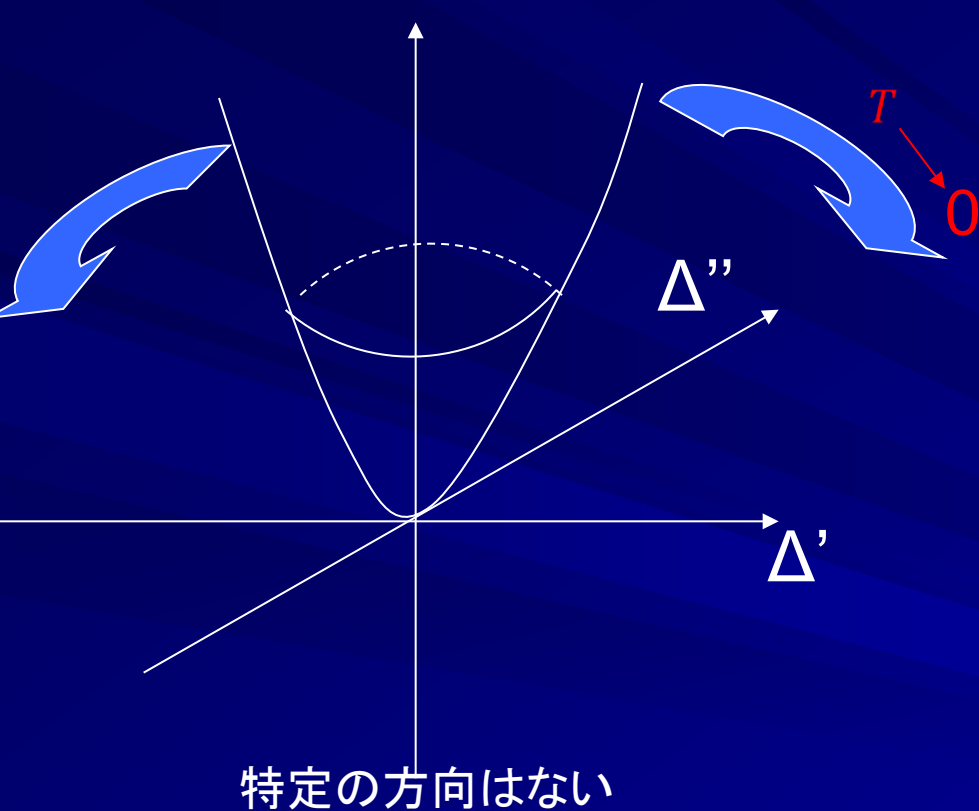


観測される粒子(素励起)の性質の変化

素粒子の質量も不変のものではなく、真空の相転移の結果実現している?(南部1961)

超伝導相転移と対称性の破れ

$$\langle \psi \psi \rangle = g(\Delta' + i\Delta'') = g|\Delta|e^{i\theta}$$



$$\Delta = \Delta_0 + \tilde{\Delta} \text{ 量子揺らぎ}$$

c.f. 標準模型におけるヒッグズ粒子

ϕ ; ヒッグズ場



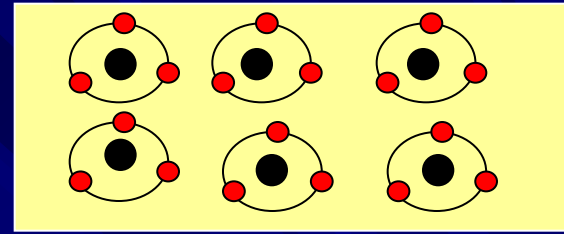
$$\phi = \langle \phi \rangle + \tilde{\phi}$$

ヒッグズ粒子

プラズマ(電子とイオン)

高温になると、
原子内の電子が原子からはぎ取られ
(原子がイオン化され)自由に運動し
ている物質の状態

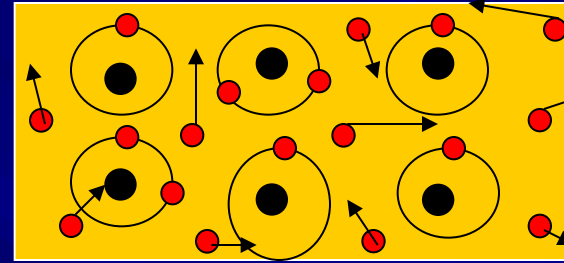
室温



通常物質



高温



プラズマ状態

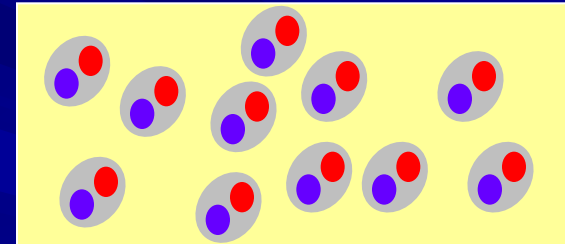
Cf. 珪素(Z=14)の場合、電子10個を
剥ぎ取る温度は約700万度K
(約600eV)

クォーク・グルーオン プラズマ

超高温あるいは超高密度になると、
素粒子(陽子、中性子、中間子などの
ハドロン)を構成していたクォークと
グルーオンが解離して(「溶け出して」)
運動している物質の状態。クォークは
ほとんど質量を失っている。

低温

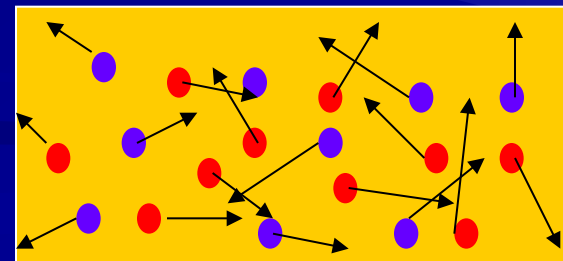
$$k_B T < 150 - 200 \text{ MeV}$$



ハドロンガス



高温



クォーク・
グルーオン
プラズマ

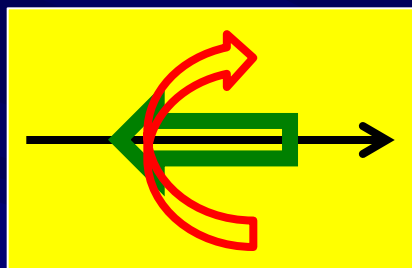
$$k_B T > 150 - 200 \text{ MeV}$$

ビッグバン後約 10^{-5} 秒ごろの温度

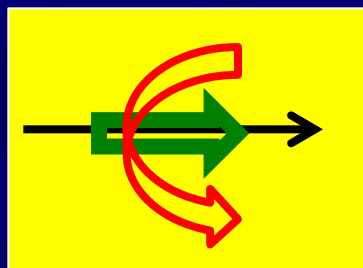
カイラル(手系)対称性とその自発的破れ、質量の発現

対称性 → 保存則

空間一様性: 運動量保存
時間の一様性: エネルギー保存
等方性: 角運動量保存 etc



スピンの向き
が運動量と逆
左巻き(Left-handed)



スピンの向き
が運動量と同じ
右巻き(Right-handed)

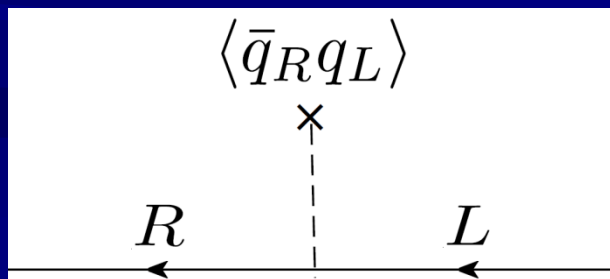
カイラル(手系)対称性



この2つの状態が混じらない。
(いつもこの向き関係を保っている。)

質量0の粒子はこの性質を持つ。

混じる方がエネルギーが低くなることもある！

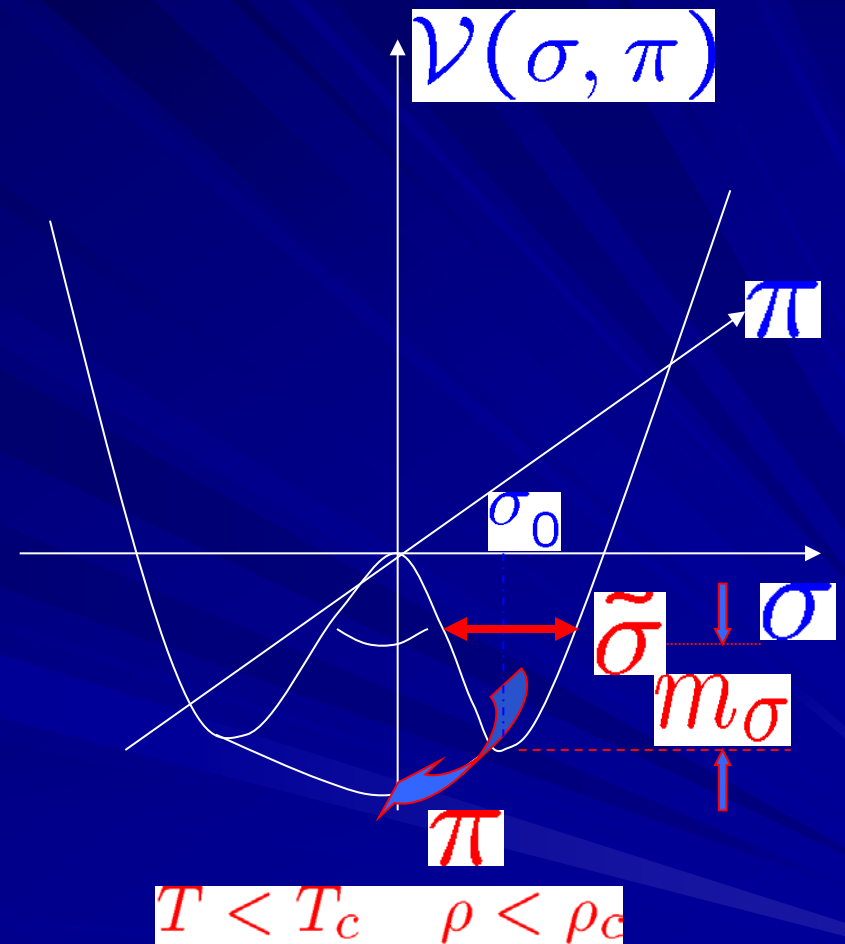
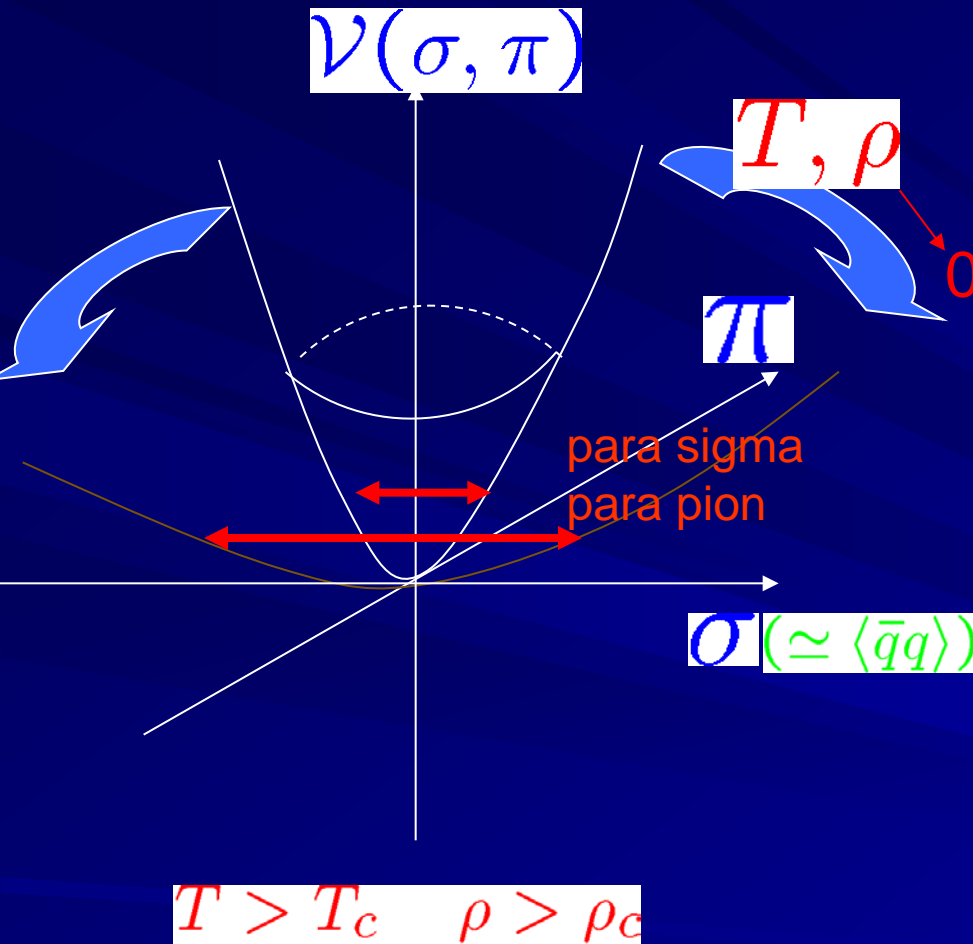


カイラル対称性が自発的に破れる！



質量が発現！

カイラル相転移と集団モードの変化



$$\sigma = \sigma_0 + \tilde{\sigma}$$

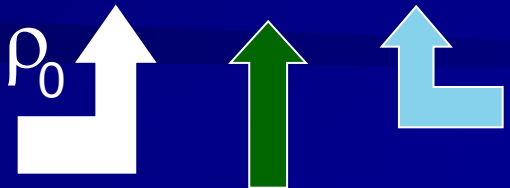
c.f. 標準模型におけるヒッグズ粒子

ϕ ; ヒッグズ場 $\longrightarrow \phi = \langle \phi \rangle + \tilde{\phi}$ ヒッグズ粒子

ハドロン・クォーク物質の状態変化: 相図



いくつかのタイプの超流動



パイ、K中間子凝縮?

H物質? ペンタクォーク物質?
部分的非閉じ込め? 磁性相転移?

4. 超高密度の世界

超新星爆発と中性子星の形成

重力エネルギーを用いて、H, He,,,と核融合を繰り返し、最も安定なFe(鉄)の原子核まで行き着くと、(大質量の)星の進化は終わり、超新星爆発を起こして、その残骸として超高密度の天体が形成される。それが中性子星。

おもにパルサーとして観測される。

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

質量: 太陽のおよそ1.4倍

半径: 10kmほど

内部の密度: 原子核の5-10倍

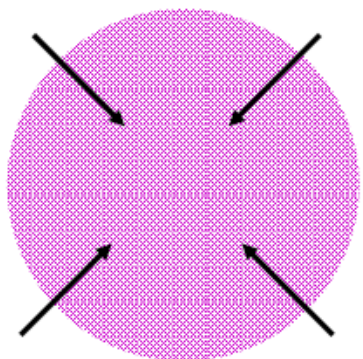
メモ: 原子核の密度=約

$$10^{14} \text{ g} = 10^{11} \text{ kg} = 10^8 \text{ t}$$

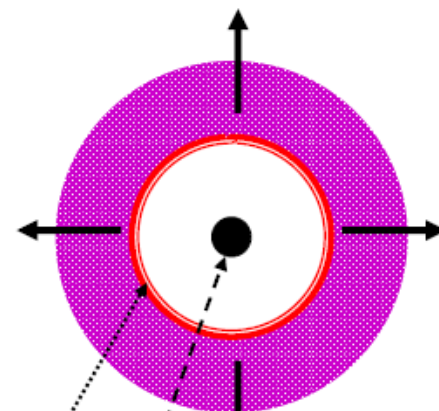
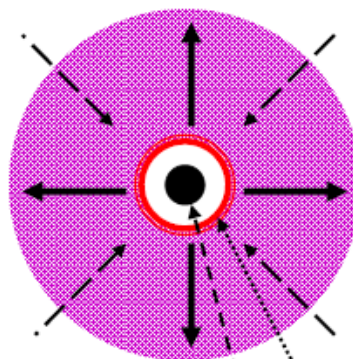
$$= 10000,0000 \text{ t} = 1 \text{ 億トン}$$

星の爆縮から超新星爆発へ

鉄の中心核



半径: 約2000km
質量: 約1.5倍太陽質量

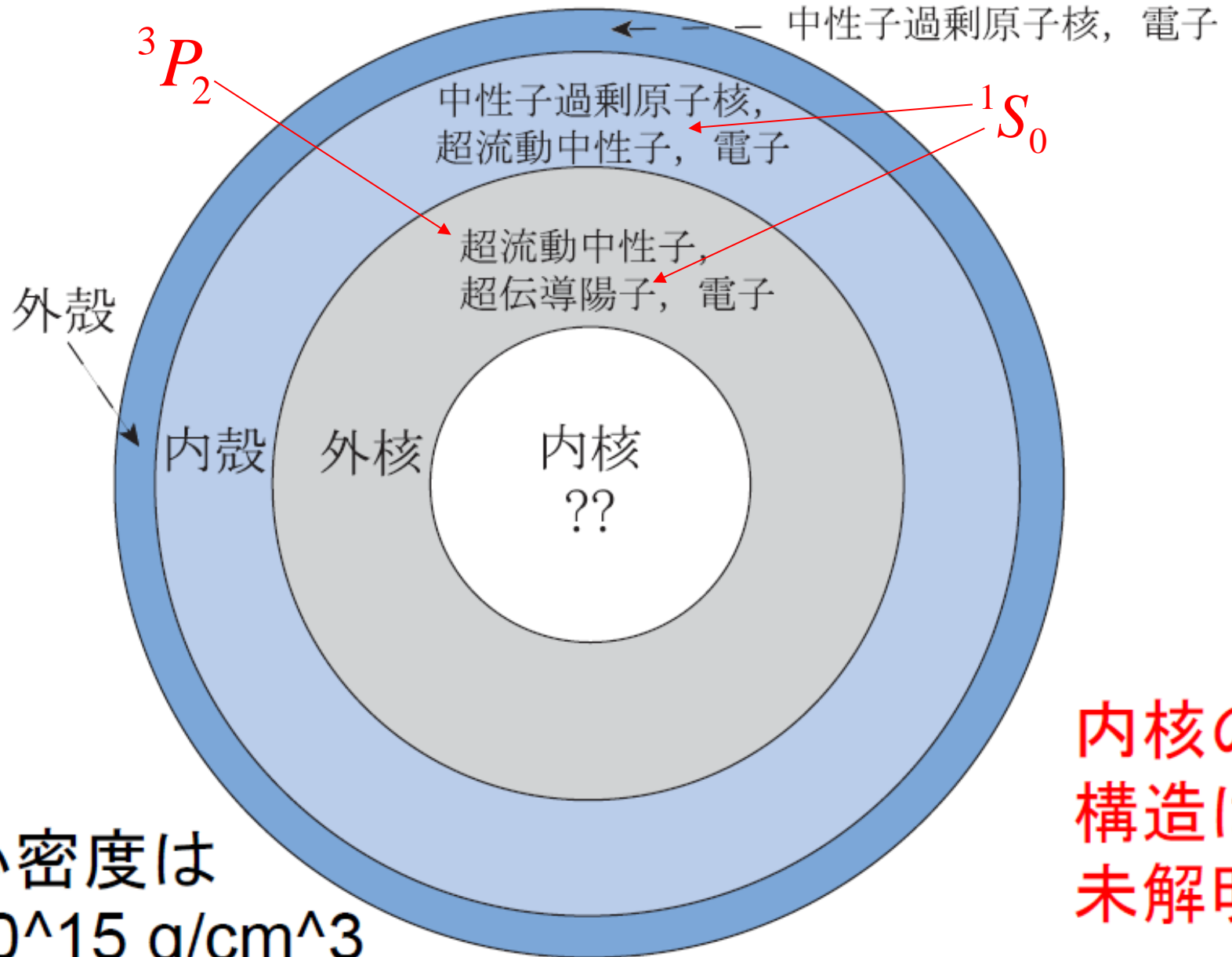


衝撃波

爆発

原始中性子星

典型的中性子星の構造

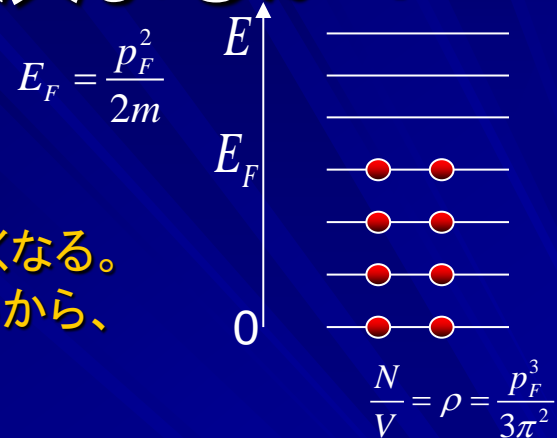


中心密度は
約 10^{15} g/cm³

内核の
構造は
未解明

高密度での物質の状態は何で決まるか？

- 核子(陽子、中性子)間やハドロン間の相互作用で決まる。
- 密度の増大により、運動エネルギー(縮退エネルギー)が大きくなる。粒子間の相互作用の「得」と縮退エネルギーの「損」のつりあいから、様々の「相」が出現する。



- 有限温度ではそのエネルギー(内部エネルギー)とエントロピー(乱雑さ、自由度)のつりあいから定まる。

ヘルムホルツの自由エネルギー $F = E - TS$

- 例; 超流動、ハイペロン(ストレンジネス)物質、核子系の層状構造を伴う中間子凝縮、クォーク物質への相転移、等々

内部エネルギー

エントロピー

高密度になるとなぜ中性子ばかりになろうとするのか

- 電子と陽子は全体が電氣的に中性になるようにいつも同数ある。
- 量子力学的な効果 (**パウリの排他律**) のために密度が上がると電子や陽子、中性子それぞれの全体のエネルギーはどんどん大きくなる。(縮退エネルギーという。)
- その大きくなり方は質量が小さいために電子のほうが激しい。

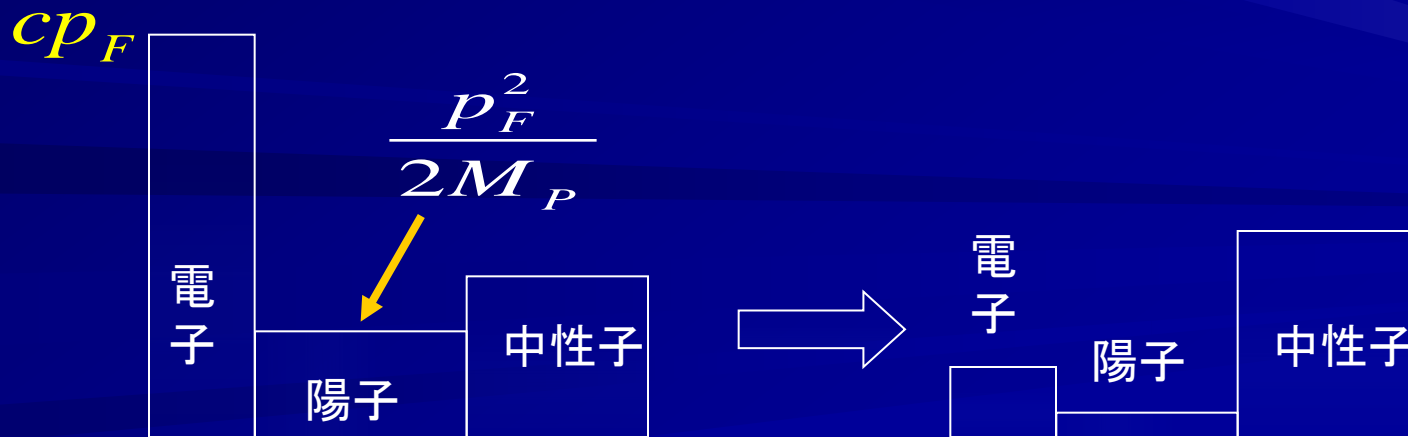
$$m_e c^2 \ll cp_F \ll M_N c^2$$

- したがって、電子の数が少ない方が全体のエネルギーが小さい。



陽子 電子 中性子 ニュートリノ

- この反応により電氣的中性条件を保ちつつ、電子の数を減らし、エネルギーの増大を避けることができる。(相対論と量子力学の効果)



1種類の核子からなる物質の密度とフェルミ運動量、その他

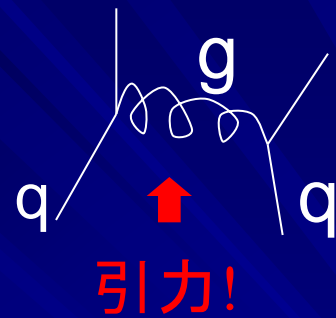
密度 ρ / ρ_0 ρ_F (MeV) $p_F^2 / 2M_p$ (MeV)
(電子のフェルミエネルギー) (核子のフェルミエネルギー)

1	342	62
0.5	270	40
0.3	227	27
0.1	158	13
0.05	125	8.3
0.01	73	2.8

カラー超伝導; クォーク対凝縮

● 高密度クォーク物質:

- フェルミオン多体系
- クォーク間相互作用は引力の組み合わせがある。



➡ クーパー不安定; 十分低い温度 T

➡ カラー電荷の超伝導



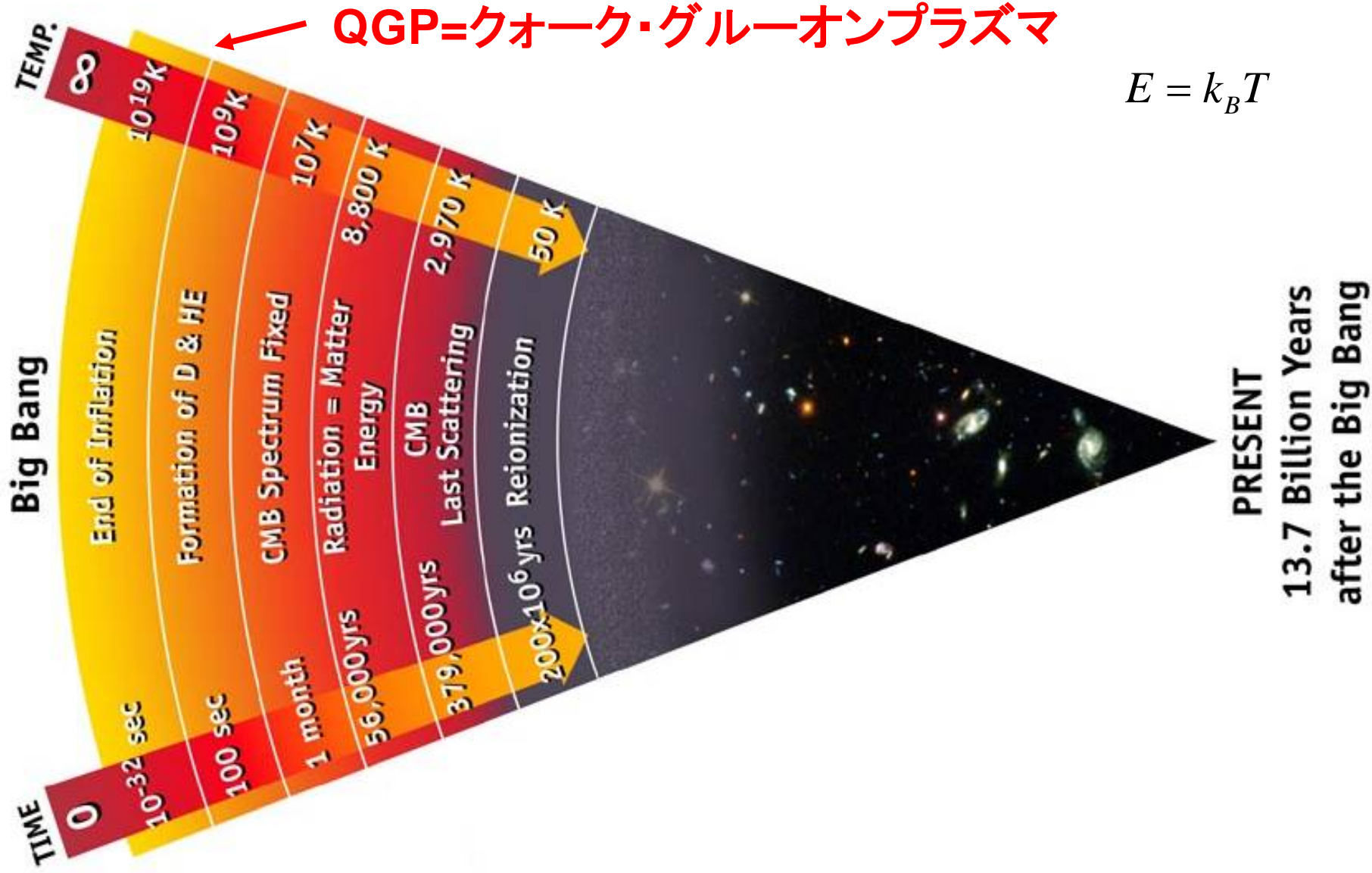
$\Delta \sim 100 \text{ MeV}$; 原子核の5-6倍の密度



5.超高温の世界

ビッグバン以後の宇宙の温度変化

1eV~ 10^4 K; 1MeV~ 10^{10} K



地上での宇宙初期の再現

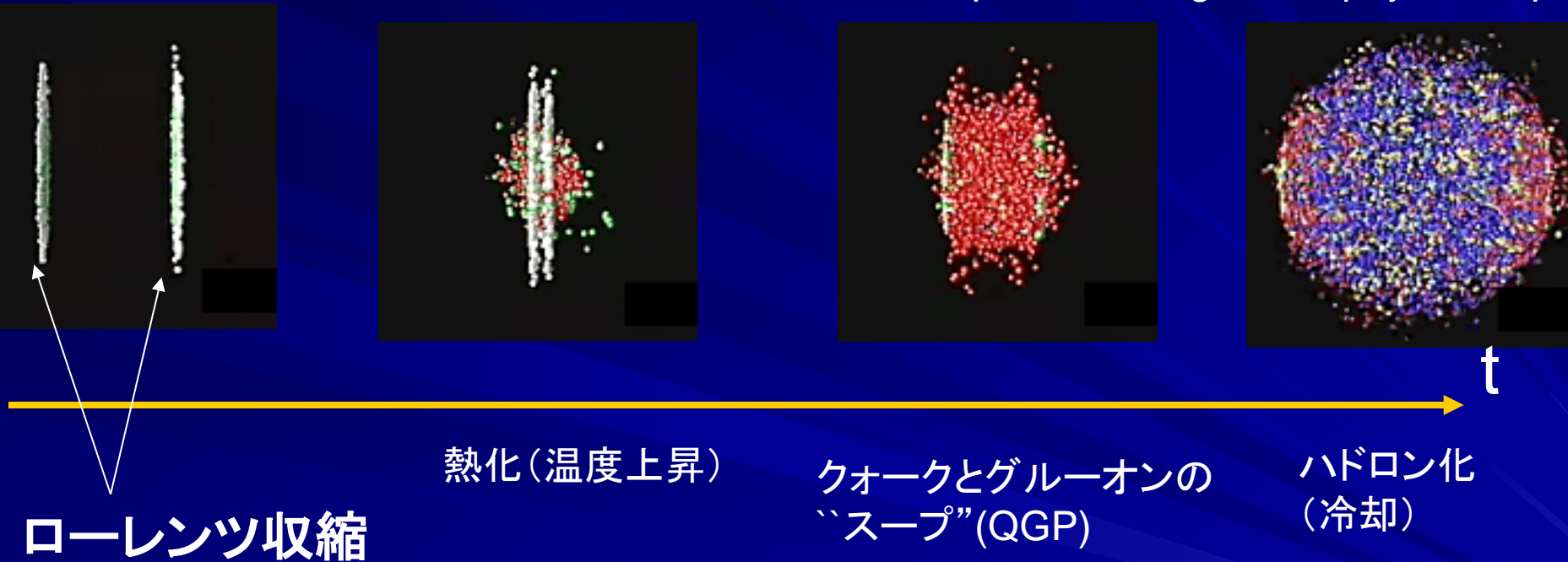
RHIC@BNL(米国)

原子核を光速の99.7%の速さまで加速、
衝突させる器械(加速器)



相対論的重イオン衝突

<http://www.bnl.gov/rhic/physics.asp>



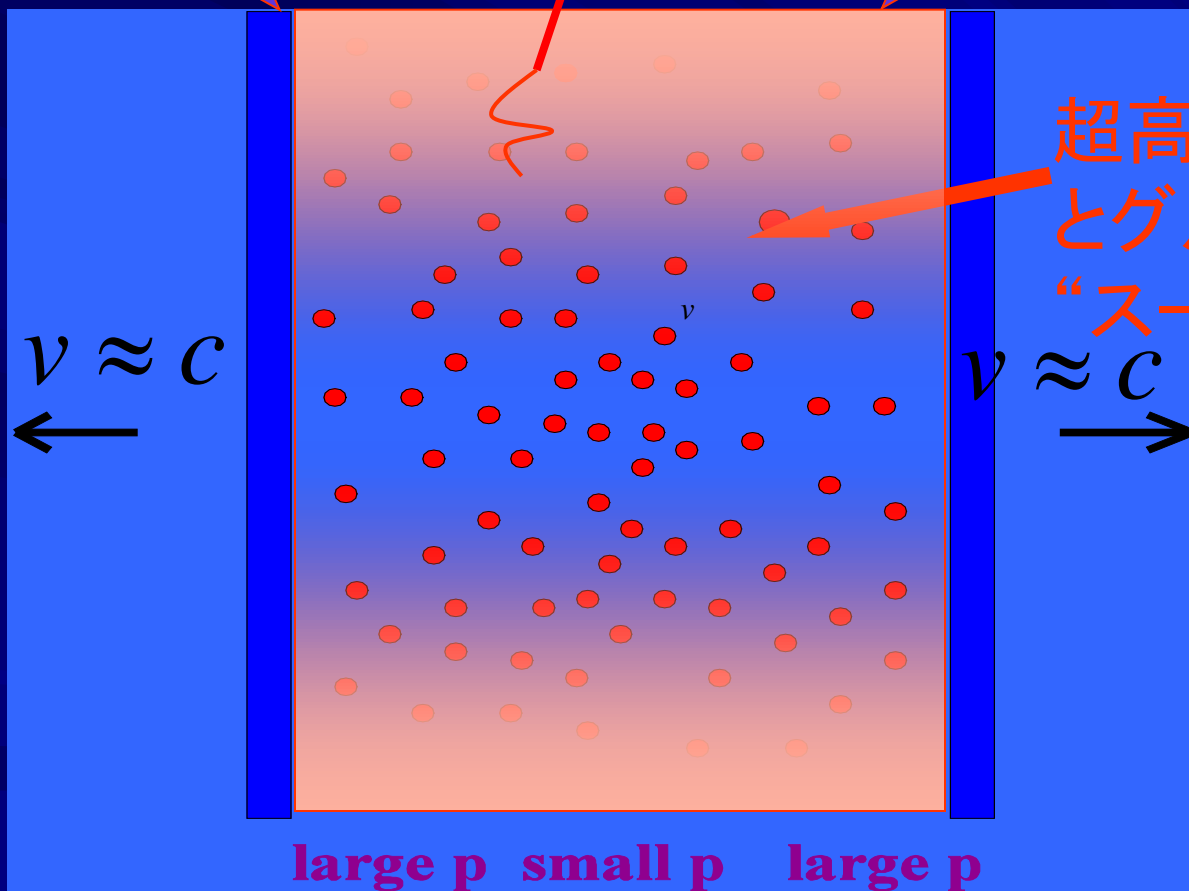
生成される何千という粒子を観測し、その性質(統計的な性質を含む)を調べる
ことにより物質がクォークとグルーオンの「スープ」が作られたかどうかを調べる。

超相対論的原子核衝突直後の物質の様子を表す概念図

ローレンツ収縮で平べったくなった原子核

モノジェット

散逸の仕方から
背景物質の物性が
引き出せる



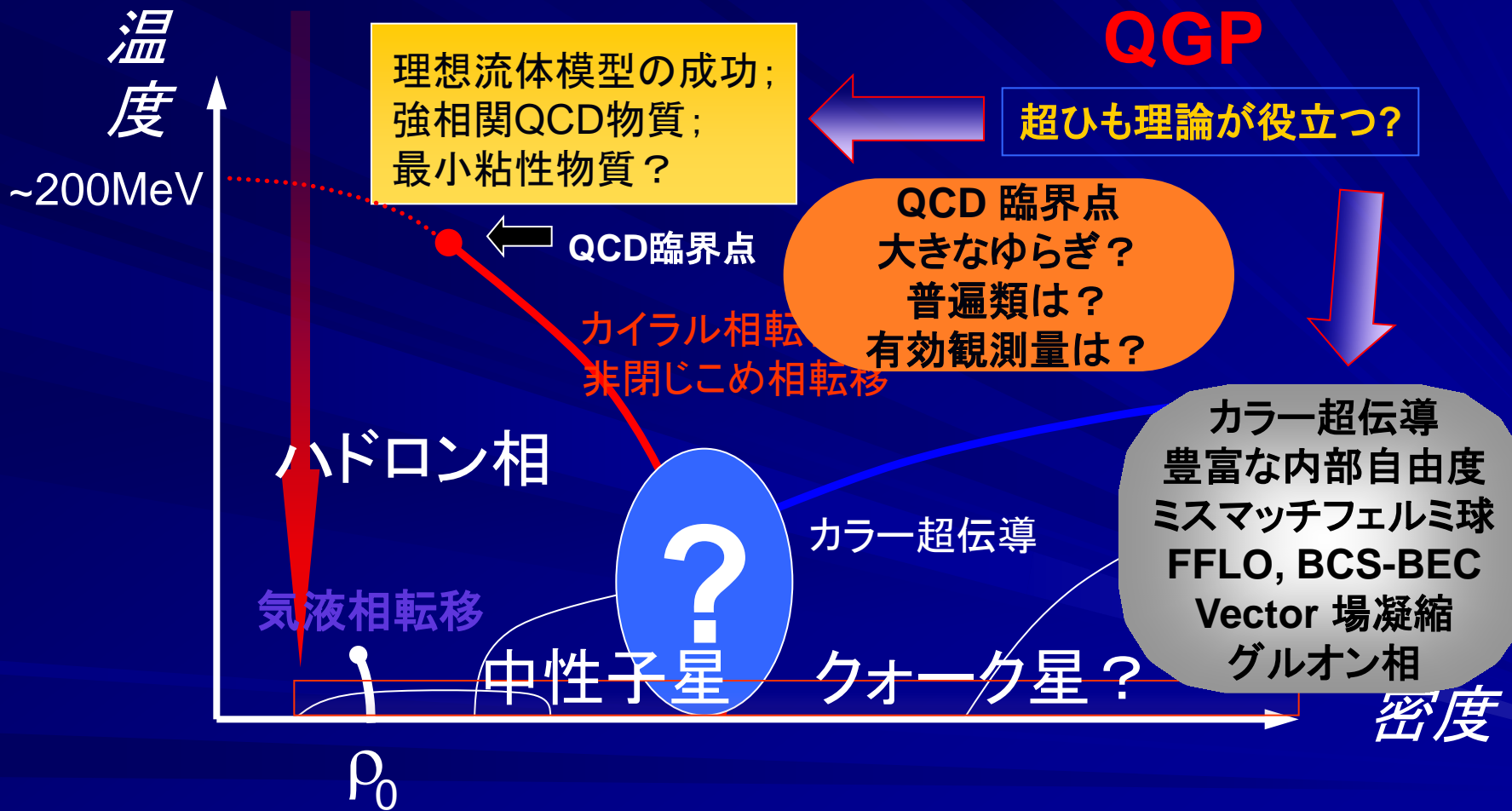
超高温のクォーク
とグルーオンの
“スープ”

$v \approx c$
←

$v \approx c$
→

large p small p large p

新しい謎、問題群



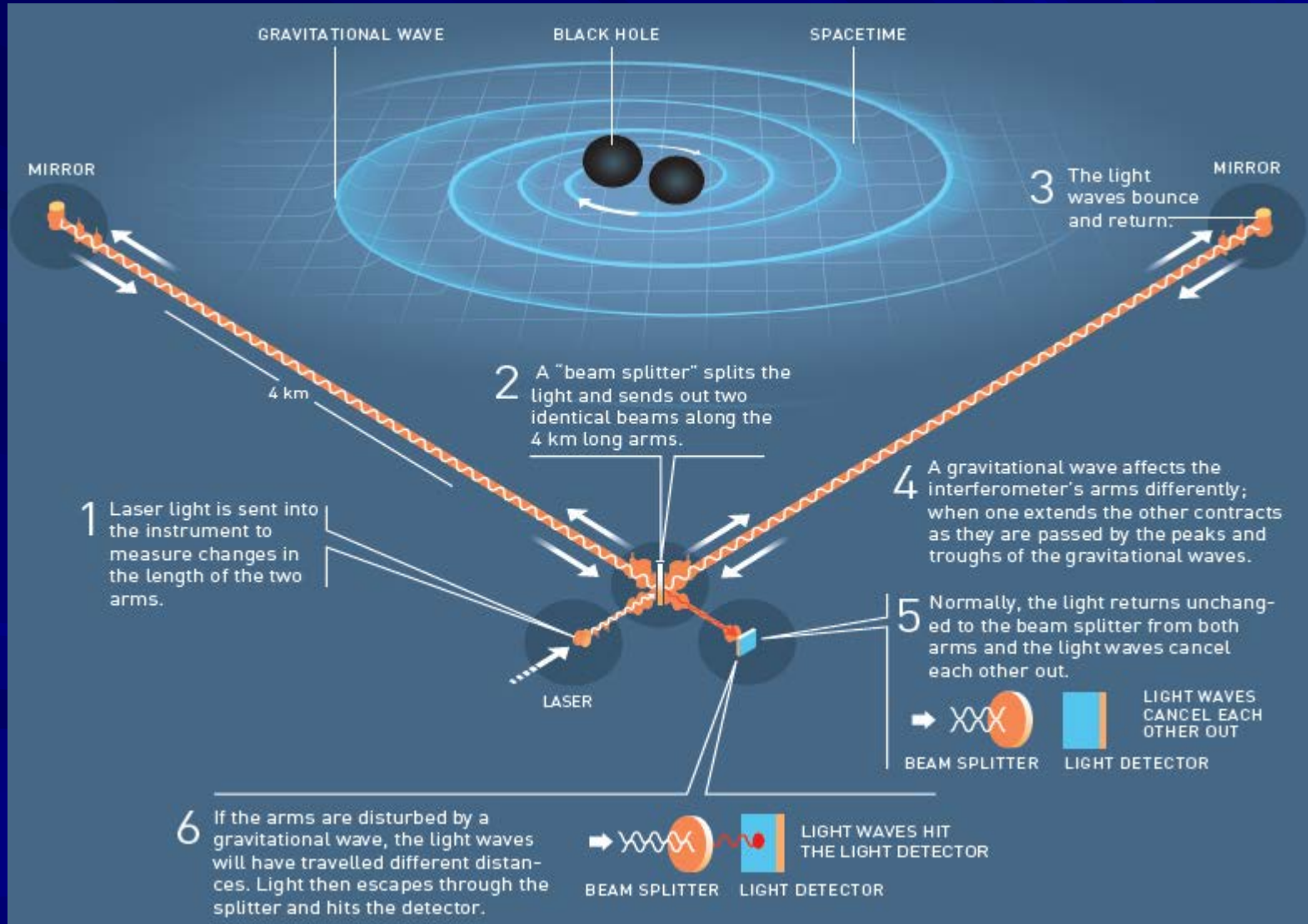
6.まとめ

- 陽子や中性子、そしてその間の力を媒介する中間子はハドロンと呼ばれる。
- ハドロンの間の相互作用、「強い相互作用」、の基礎理論は量子色力学(QCD)と呼ばれる相対論的量子場の理論であり、その理論はクォークとグルーオンの言葉で書かれている。
- 量子色力学の真空は温度や密度の変化により相転移を引き起こし、ハドロンの中に閉じ込められていたクォークやグルーオンがハドロンから解放されたり、物質の質量の元が消え、湯川の間接子も存在しなくなる。
- 高密度では、原子核物質やクォーク物質が様々な物性、相転移を示すと考えられている。
- QCDの真空が相転移を起こしているような状況は宇宙初期(0.0001秒あたりまで)存在したと考えられている。
- 超高密度の世界は中性子星やクォーク星(?)で実現している。
- 現在その検証のための実験、観測および理論的研究が活発に行われている。
- そして、予想もしない謎や驚きが提供され、場の理論から統計物理学、スーパーstring理論までも巻き込む新しい物理学の展開が行われつつある。
- 重力波天文学との関連

重力波と極限状態の物質の物理学

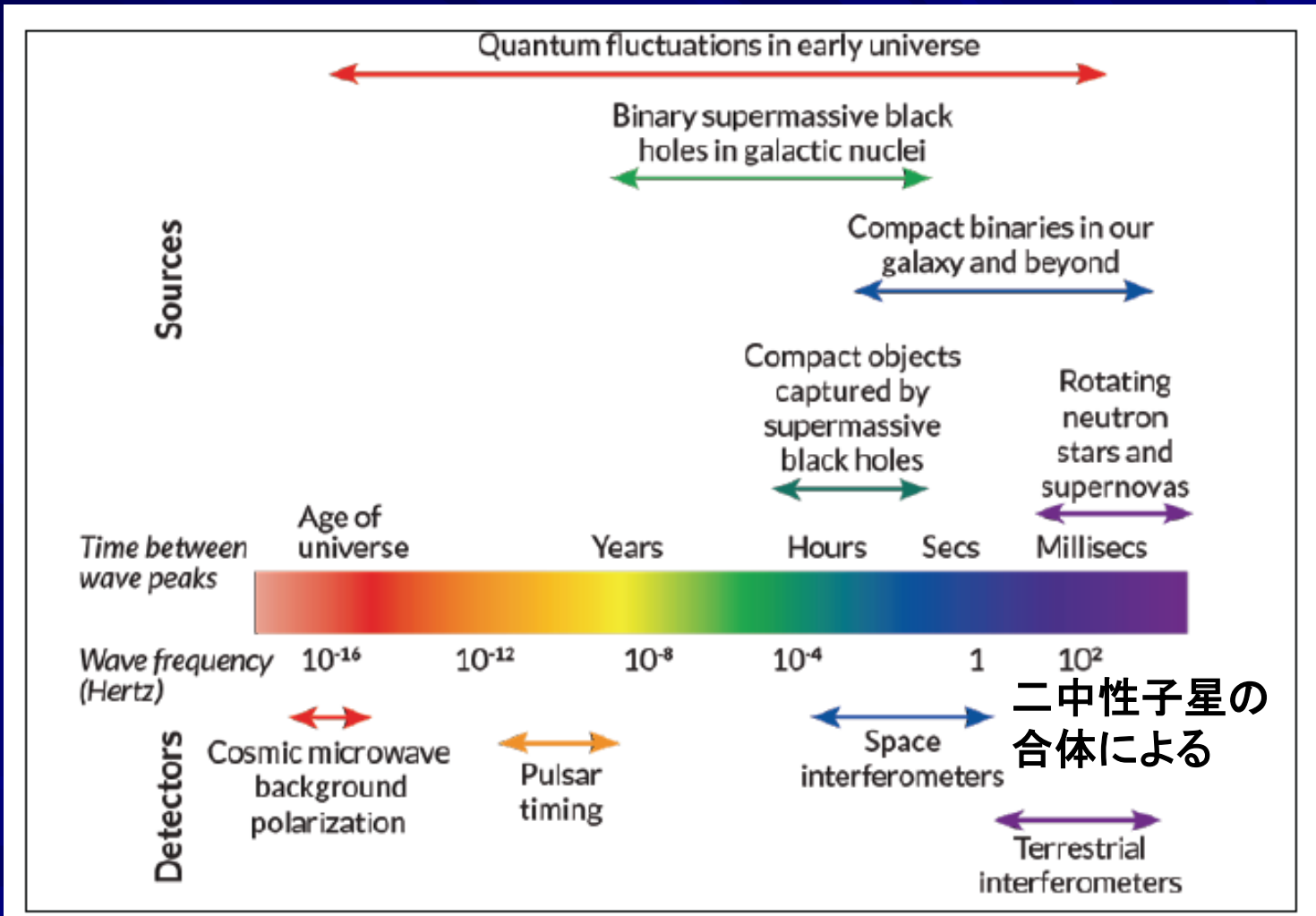
2017年ノーベル物理学賞 R.Weiss, K. Thorn, B.C. Barish **重力波の発見!**

https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2017/popular-physicsprize2017.pdf



重力波源と重力波の波長

https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2017/advanced-physicsprize2017.pdf



二中性子星の合体による

Figure 1: Gravitational-wave spectrum (credit: NASA)

中性子星の合体からの重力波/電磁波 → 中性子星の内部構造の情報

2017年10月16日
重大発表(LIGO)?