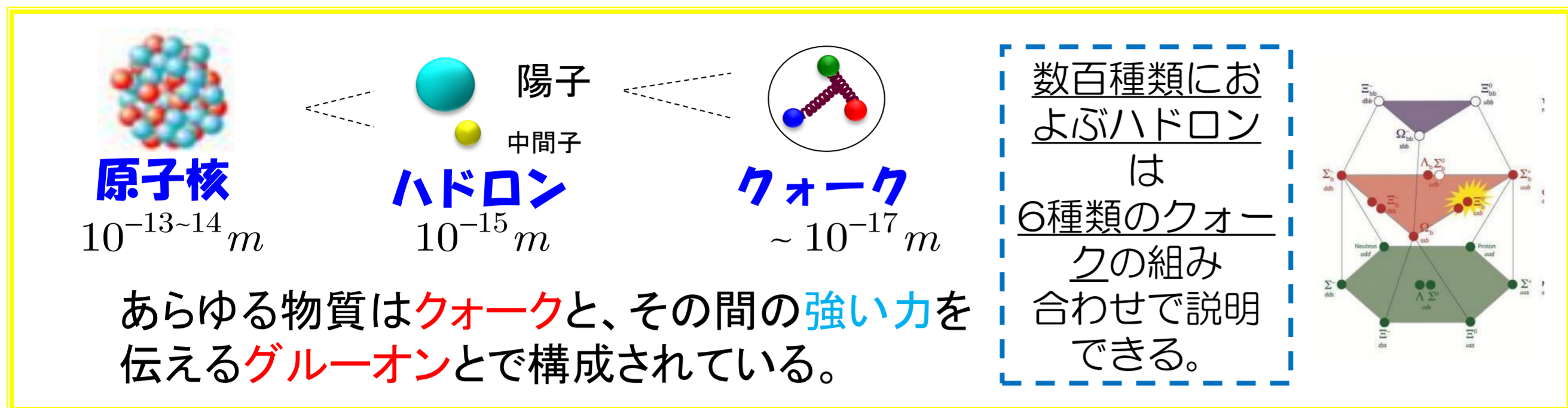


クォーク・グルーオンの力学が支配する世界 ミクロとマクロの物理学

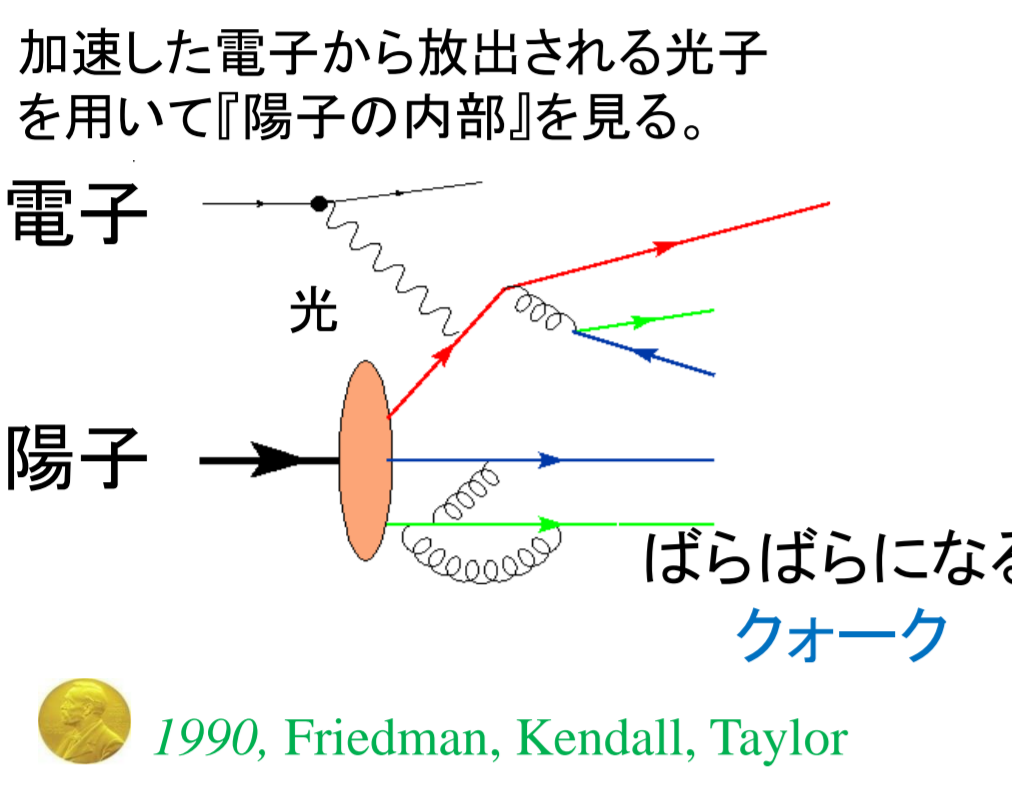
東京理科大学理学部第1部物理学科 鈴木克彦研究室

研究の目的

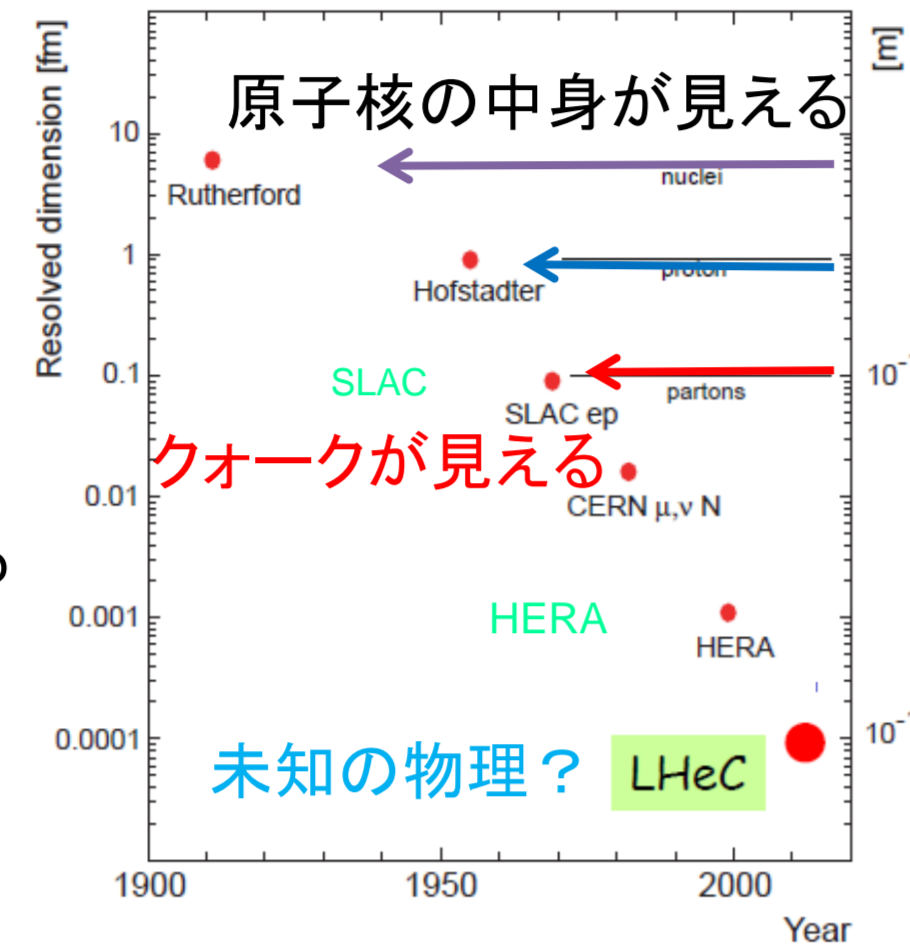
物質を作る最小単位の粒子と、その間に働く力(相互作用)を理解する



ミクロの世界に迫る目(実験)



実験で見えるスケール



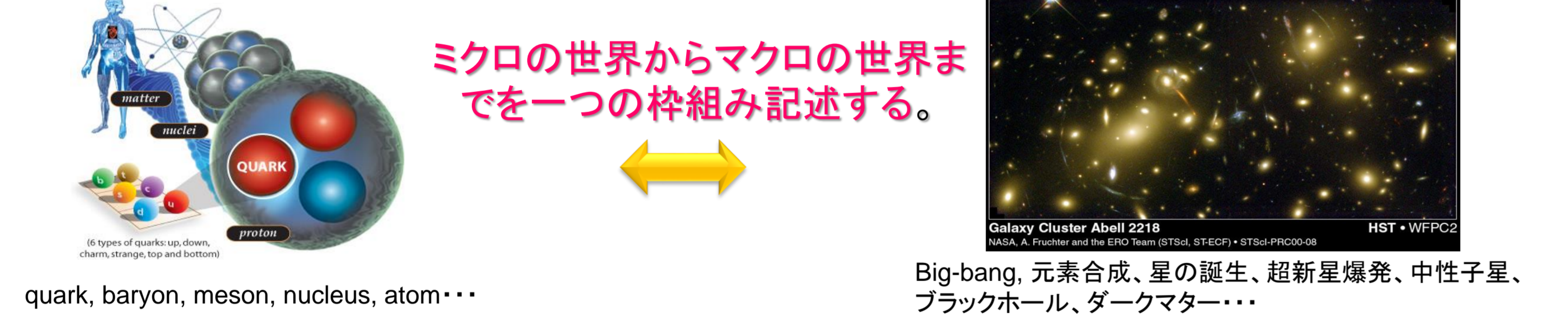
実験物理学者の仕事

LHC 5.6 TeV/A
LHC加速器(1周27km)

- 新しい粒子、現象を発見する。
- 理論で予測された現象を確かめる。

このような物理を理解すると何が出来るか？

- ★ 様々な物質の性質を根源から理解し、その力学を構築できる。
- ★ 理論に基づいて、非日常的な環境(高温/高密度など)下での物理現象を予測する。それによって、「宇宙の始まりで起こったこと」や「星の内部で起こっていること」を理論的に説明できる。



枠組み・方法

<現時点での理解: Standard Model >

6種類のクォーク & 6種類のレプトン(電子の仲間とニュートリノ)
+
4種類の力 = ゲージ場 「強い」「弱い」「電磁気」「重力(?)」
により世界は構成されている。特に物質を作る「強い相互作用」の理論は

量子色力学(QCD)

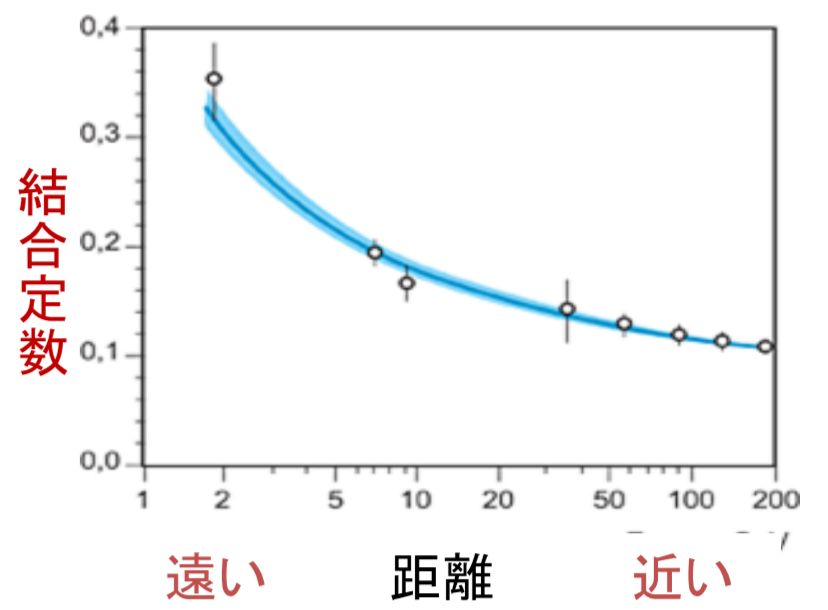
$$\mathcal{L}_{QCD} = \bar{\psi} i \gamma^\mu (\partial_\mu - ig T^a A_\mu^a) \psi - m \bar{\psi} \psi - \frac{1}{4} F_{\mu\nu}^a F^{a\mu\nu}$$

クォークがゲージ場グルーオンを交換しながら相互作用する非可換ゲージ理論

短距離では相互作用が弱くなりクォークはほとんど自由になる: 漸近的自由 (Asymptotic Freedom) 2004 Gross, Politzer, Wilczek

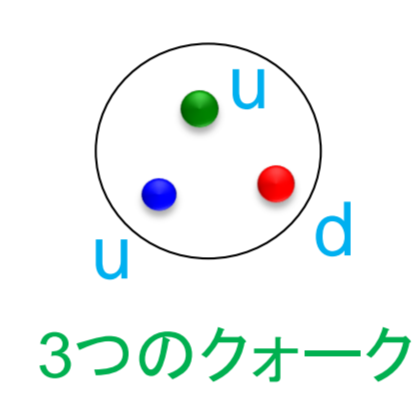
長距離では発散的に強くなり、引き離すことができない。カラーの閉じ込め (Confinement)

摂動論が使えない! この問題ははまだ解かれていない。

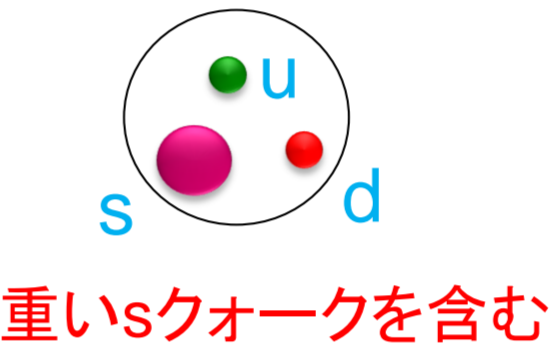


この理論の最も簡単な応用例: 世の中にはどんなハドロンが存在できるか?

<陽子(最も普通)>

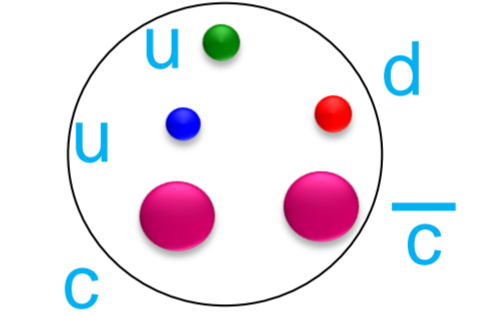


<ハイペロン>



陽子よりも重い粒子
通常の世界では存在せず加速器でしか作れない。
しかし高密度の中性子星の中では最も重要になってくると考えられる

<ペンタクォーク>



5つのクォークで出来た束縛状態
今までは存在が確認されていなかった
最近、LHCbで新粒子発見の発表 2015.6

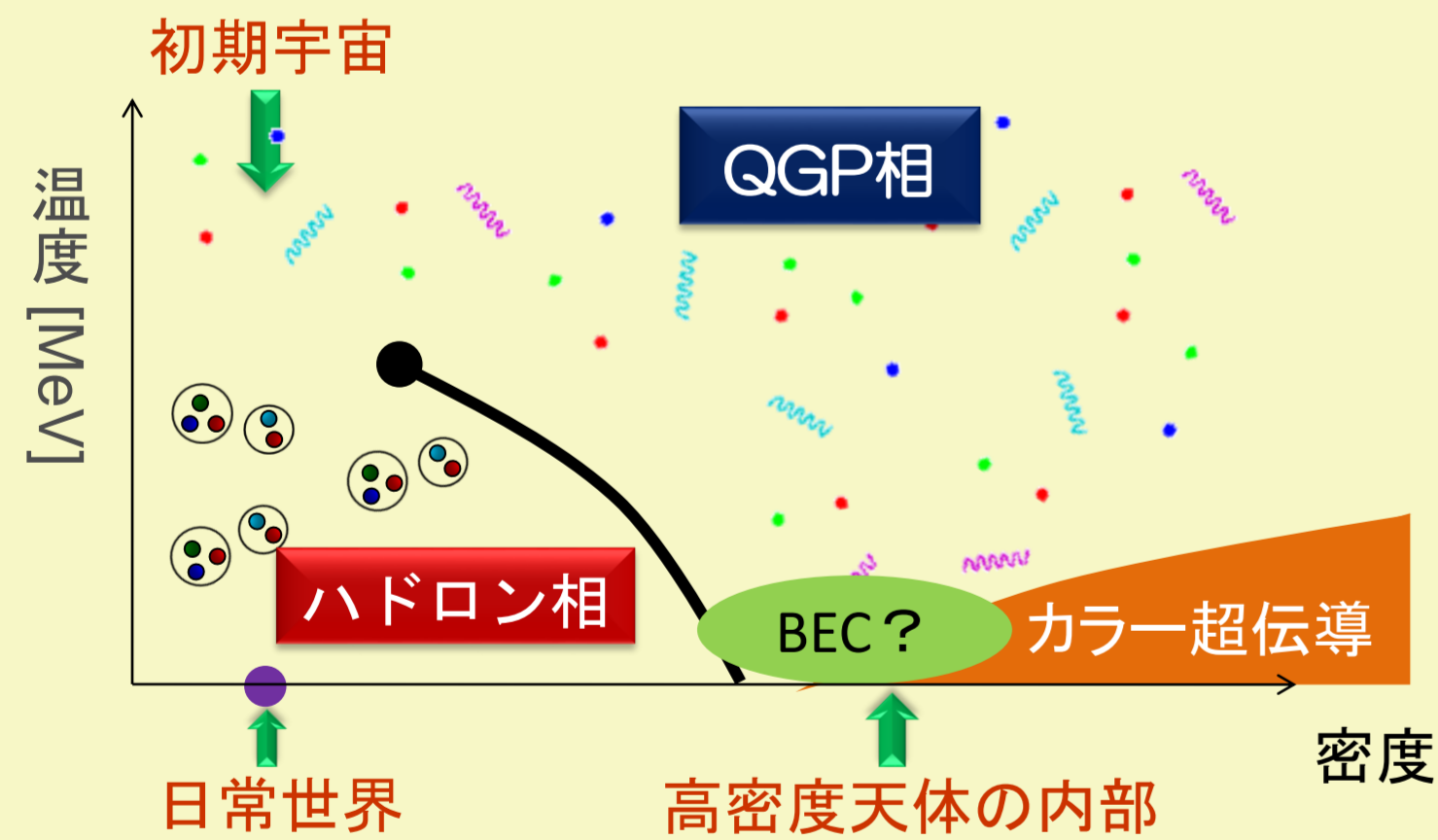
研究の対象とテーマ

現実の研究ではいろいろな興味、方法が組み合わせられて初めて一つの「仕事」になります。

II 高温・高密度状態の物質: Quark-Gluon Plasma

★ Quark-Gluon Plasma

超高温・超高密度の状況ではハドロンが溶けて自由なクォークとグルーオンのプラズマ状態に相転移すると予想される。また単なるガス相への相転移でなく、より豊富な相構造が期待できる。



★ 実験によるチャレンジ
近年の原子核衝突実験で約1兆度の高温状態(Big-bangの10⁻⁶秒後の世界)を作りQGPの観測に成功した。

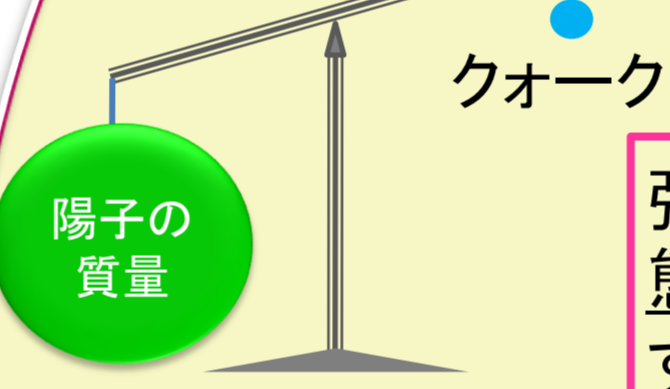
QCDの「物性」理論

I. 真空とは何か? / ハドロンとは何か?

★ 質量の謎

陽子の中のクォークの質量は陽子質量のわずか1%

原因: カイラル対称性の自発的破れ
2008 Y. Nambu



強い相互作用のため真空が変形(超伝導状態)しHamiltonianが持っていた対称性を壊す。その結果、物質は質量を獲得する。

★ 陽子の構造

陽子(スピン1/2)はスピン1/2のクォーク3個から出来ているはず...

実験では
・クォークは陽子の運動量の50%程度しか担っていない
・クォークは陽子のスピンのわずか30%程度しか担っていない

現実の陽子の内部は、グルーオンや無数のクォーク対が存在する非常に難しい構造をしている

非摂動的な物理系は予期できない複雑な構造をもつ

過去の卒研テーマ

- 高密度クォーク物質中におけるBEC-BCSクロスオーバー(07)
- 結晶化したカイラル凝縮とQCD相転移(08-12)
- 強磁場下でのクォーク物質の性質(12,13,14)
- カイラル摂動論を用いた核子三体力(14)
- 1+1次元相対論的場の理論とBethe仮説(10)
- WZW軸性異常項がもたらす物質のトポロジカルな秩序構造(12)
- ブラックホールのホーキング輻射機構のハドロン生成への応用(07)
- QCD臨界点近傍の揺らぎと重イオン衝突における観測量(08)
- 中性子星と核/クォーク物質の性質(08,10,11,12,14)
- 高速回転する中性子星の安定性(09)
- 初期宇宙相転移による揺らぎの形成(08,09)
- レプトン非対称性と初期宇宙相転移(13)
- 恒星の重力崩壊時におけるニュートリノ・ハドロン相互作用(07,10)
- 超高エネルギー宇宙線源としてのstrangeクォーク物質(09)
- ゲージ・重力理論対応によるメソンの記述(07,10)
- AdS/QCDによる核子の記述(11)
- 2光子衝突によるパイ中間子対生成(13)
- SUSYにおけるニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊(09)
- 熱的leptogenesisによるバリオン非対称の生成(13)
- 超対称性模型における中性子の磁気双極子モーメント(11)
- 初期宇宙ソファレロン過程におけるバリオン数と磁場の生成(14)

大学院生のテーマ

- ゲージ・重力対応による高エネルギーハドロン散乱
- 結晶化したカイラル凝縮の安定性
- 強い場下での粒子生成
- 強磁場下でのクォーク物質の性質
- 高密度における核子間相互作用と中性子星
- 初期宇宙における磁場の生成と発展

III. 宇宙・天体・宇宙線の物理

★ 中性子星: 存在する超高密度天体

~10¹⁴ [g/cm³] という超高密度の星。核物質(主に中性子)で出来ている。またクォーク星の存在も予言されている。

★ 宇宙初期と相転移

宇宙初期の超高温状態における素粒子の相転移は、現在の宇宙にも痕跡を残している。
...揺らぎの生成、ダークマター、etc.

★ 超新星爆発の物理

星は重力崩壊を起こし最後に超新星爆発を起こす。爆発のカギは崩壊途中の「ニュートリノと核物質の反応によるエネルギー輸送」(現在のモデルでは爆発しない!)

★ 宇宙線:

宇宙で発生した素粒子・原子核が何等かの理由で加速され地球に到達。宇宙の進化などを知ることができる。

ミクロの物理と一般相対論を組み合わせると、様々な天体現象の理解・予言ができる

V. 弱い相互作用と標準模型を超える物理

★ 弱い相互作用の物理: probeとしての役割

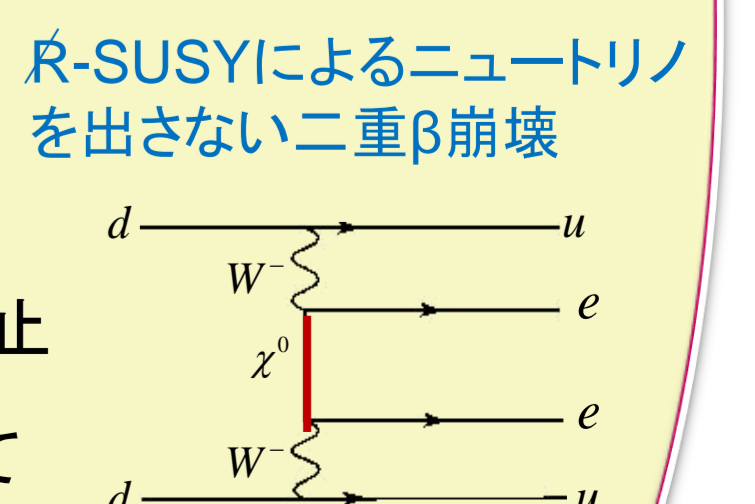
ハドロンは弱い相互作用で崩壊し別な量子数の粒子になる。電弱統一理論は確立されており、摂動計算可能

<様々な役割を果たせる>

- ハドロンを崩壊させることで対称性をテスト
- 弱崩壊幅からハドロン内のクォーク波動関数を知る。
- ニュートリノは天体物理で非常に重要な役割

★ 標準模型を超える

宇宙の進化の上で
・バリオン数・レプトン数を保存しない過程
・CP対称性を破る過程
などは非常に重要だが、標準模型では禁止
例えば超対称性模型(SUSY)などを用いて物理量を予言する。
(微量だが、将来の実験で検証可能)



新しい物理の探索

IV. ゲージ・重力理論対応

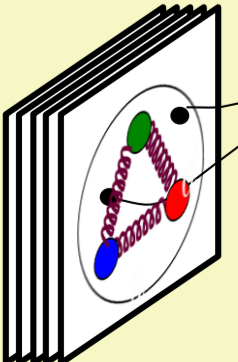
★ 強い相互作用の系に対する新しい計算方法

QCDの最大の困難: 相互作用が遠距離で発散的に増大するため摂動論を用いて計算することができない。

Maldacena's conjecture(97) based on duality in the string theory

4次元の強い力のゲージ理論(量子論) ↔ 曲がった5次元時空(AdS空間)での古典重力理論

二つの見方が同じ答を与える(仮定)とすると、5次元の古典力学を解くだけで、4次元の強く相互作用する量子論を解ける。



- 4次元のゲージ理論に対応する5次元重力理論の有効作用を用いる。
- 作用を極小化した5次元方向の(古典的)Lagrange方程式を解く。(力学的な情報は5次元成分のみ反映する)
- 得られる物理量にある極限操作を行うと4次元の量になる。

新しい理論的アプローチ開拓する