

平成 23 年 8 月 16 日

## ハドロン物理のめざすもの

### 1 ハドロン物理

ハドロン物理は、その名の通りハドロン (hadron) と呼ばれる一群の素粒子を研究する物理の分野である。20 世紀の素粒子物理は、原子の中心にある原子核を構成する素粒子が、4 つの基本的な相互作用 (重力、電磁気力、強い相互作用、弱い相互作用) によって反応、束縛し、また生成、消滅することを明らかにした。その中でハドロンは 強い相互作用 (strong interaction) に関わる粒子の総称で、加速器などを用いた実験室で最も普通に見られる素粒子である。代表的なハドロンである陽子や中性子から出来ていて、同じくハドロンであるパイオン (pion) (湯川秀樹によって存在が予言された素粒子) などの中間子を交換することによって強く束縛されてできている原子核は、ハドロン物理の主たる対象であるため、原子核物理と密接な関係がある。

20 世紀の後半には、ハドロンの構造や相互作用に関する研究が飛躍的に進み、強い相互作用の基礎理論として量子色力学 (quantum chromodynamics, QCD) が誕生した。その結果、ハドロンを形作るクォーク (quark) やその相互作用を媒介するグルーオン (gluon) の存在が明らかになり、多くの理論的予言が実験によって精密に検証されるに到った。2004 年のノーベル物理学賞は、量子色力学が強い相互作用の基礎理論であることを明らかにする上で鍵となった 漸近的自由性 (asymptotic freedom) の発見の業績で Gross, Wilczek, Politzer に与えられた。さらに、低エネルギー QCD の重要な特長であるカイラル対称性とその自発的破れの概念を導入した南部陽一郎氏に 2008 年のノーベル物理学賞が与えられたことは記憶に新しい。

こうして、基礎理論である QCD が検証されてきた一方で、この理論における低エネルギー現象の複雑さとそのダイナミクスを QCD からの直接予言することの難しさが明らかになった。この難しさは主として QCD の真空が単純な (摂動論的) 真空ではなく、クォーク凝縮やグルーオン凝縮を含んでいることから来ている。したがってその真空の上の基本的励起モードであるハドロン (1 粒子) 状態もその真空の性質を反映して多彩なスペクトルを示すことがわかってきた。1980 年以降、低エネルギー QCD の解をどうやって導くかがハドロン物理の中心課題となったが、なかなかすっきりした解決には到らなかった。

そんな中で、21 世紀に入って、ハドロン物理は成熟期に達すると共に、未解決の問題への具体的な手がかりが得られ、解決が現実味を帯びてきた段階に来ている。原子核物理と共に進展してきたハドロン物理も、QCD の物理として再構成され、原子核そのものやその相互作用を QCD の第一原理から出発して記述することも試みられている。21 世紀に入って稼動し始めた新しい実験施設からも予想を超えた結果が現れて、QCD の物理が新しい局面を迎えている。

## 2 ハドロンとは

ハドロン (hadron) は強い相互作用する素粒子を一括して呼ぶ呼び名で、一般にバリオン (baryon, 重粒子) とメソン (meson, 中間子) に分類される。バリオンは原子核の構成粒子である陽子 (p, proton) と中性子 (n, neutron)、まとめて核子 (N, nucleon) と呼ばれる、に代表されるフェルミオンで、メソンは 1935 年に湯川秀樹によって予言されたパイオン ( $\pi$ , pion) に代表される整数スピンを持つボソンである。 $\pi$  中間子は核子を原子核として束縛する相互作用である核力の担い手として予言され、1947 年に宇宙線の観測により発見され、最初のメソンとなった。その後、 $\pi$  や N などの共鳴状態として見つかった寿命の短い  $\rho, \omega$  などのメソンや、 $\Delta$  などのバリオン、また新しい量子数ストレンジネス ( $S$ ) を持つ K メソンや  $\Lambda, \Sigma$  などのバリオンが次々と発見され、強い相互作用をする素粒子の数がどんどん増えていった。

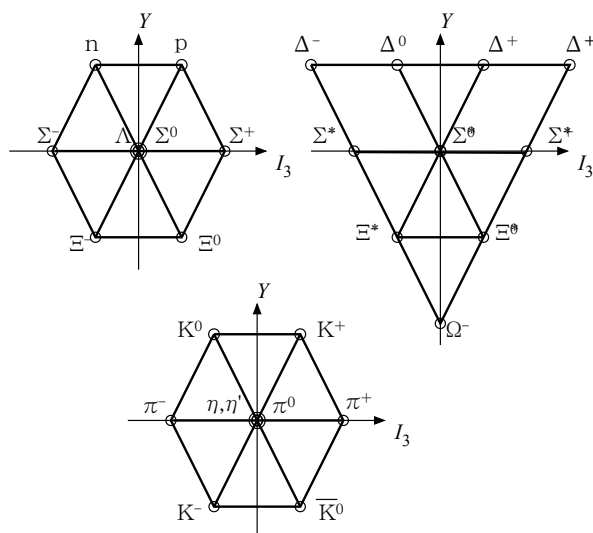


図 1: ハドロンの SU(3) 分類 : バリオン 8 重項、10 重項、メソン 8 重項 + 1 重項

これらのハドロンを分類するために、1964 年に Gell-Mann と Zweig によりクォーク模型が提唱され、ハドロン “素粒子” ではなく、さらに基本的な素粒子から作られた複合粒子であるという見方が定着した。実験的にも、1960 年代後半には、高エネルギーの電子をハドロンに衝突させて起こる深非弾性散乱 (deep inelastic scattering) により、ハドロン中にクォークが存在することが確認された。1974 年には新しいクォーク、チャーム (charm, c) からできている  $J/\psi$  と呼ばれるメソンが発見され、クォークのダイナミクスに関する研究が大きく進展し、強い相互作用の基礎理論である量子色力学 (QCD) が生まれた。QCD によればハドロンはクォークとグルーオンによって作られ、強い相互作用はカラー電荷を持つクォークやグルーオンのゲージ相互作用により記述される。グルーオンは電磁相互作用における光子と同じ役割を果たすゲージボソン (スピン 1) である。その後 30 年におよぶ研究の結果、QCD は強い相互作用の基礎理論として確認され、Weinberg と Salam による

電弱相互作用の理論と合わせて素粒子の標準理論 (standard theory) とよばれている。

強い相互作用は種々の保存則と対称性を厳密にあるいは近似的に満たす一方で、ハドロンは非常に多様なスペクトルと複雑な反応を示す。場の理論では、主な保存則は時空や内部座標の変換に対する対称性に結びついていて、連続変換に対する対称性は4元ベクトル流の保存則として書き表される。強い相互作用が満足する厳密な保存則としては、時空の対称性に起因する、エネルギー、運動量、角運動量の保存、ローレンツ不変性、パリティや時間反転対称性<sup>1</sup>のほか、内部量子数の保存則として、バリオン数(あるいはクォーク数)、フレーヴァー数保存則、荷電共役変換不変性さらに QCD の基本的な対称性であるカラーゲージ不変性などがある。さらに、近似的な対称性としては、アイソスピン対称性、フレーヴァー SU(3) 対称性、カイラル対称性、ヘビークォーク対称性など、ハドロンの分類に重要な対称性がある。

このように強い相互作用には対称性による強い制限があるにも関わらず、QCD によって作られるハドロンの構造が複雑で多様性を持つのは、1 つには QCD の結合定数が大きいいため相互作用が強いことによっているが、カイラル対称性の自発的破れなど、一部の対称性がスペクトルに直接反映せず、隠れた対称性となっていることにも起因している。QCD の基底状態である真空が理論の対称性をすべて満足する状態ではなく非自明な構造を持ち、その励起状態であるハドロンも真空の構造を反映した特徴的なスペクトルを示している。さらに、カラー電荷を持つクォークやグルーオンが全体としてカラーを持たないハドロンの中に常に閉じ込められている カラー閉じ込め (color confinement) の現象がハドロンの構造を多彩なものとしている。

このような QCD の特徴は凝縮系の超伝導系などと共通点も多く、クォーク・グルーオン物性としての研究もさかに行われる。特に、カラーの閉じ込めやカイラル対称性の自発的破れは、低温・低密度での秩序相 に対応する現象で、高温・高密度状態にするとクォークやグルーオンがハドロン中から開放され、カイラル対称性が回復する相の変化が起こることが予想されている。このような新しい物質状態は、重い原子核(重イオン)を高エネルギーで衝突させてハドロン多体系のエネルギー密度を高くした高温状態や、中性子性の中心部などの様に重力により強く圧縮された原子核(核物質、nuclear matter)として実現されると予想される。密度の高い核物質では、解放されたクォークがクーパーペアを作って凝縮することでカラー超伝導状態を作るという理論的予想もかなり確からしいものと考えられている。

### 3 ハドロン物理の新しい展開

21 世紀に入ってハドロン物理の研究は、新しい加速器実験施設での発見に促されて、新しい局面を迎えている。

<sup>1</sup>強い相互作用で、時間反転、あるいは類似の CP 不変性がわずかに破れている可能性があるが確認されていない。

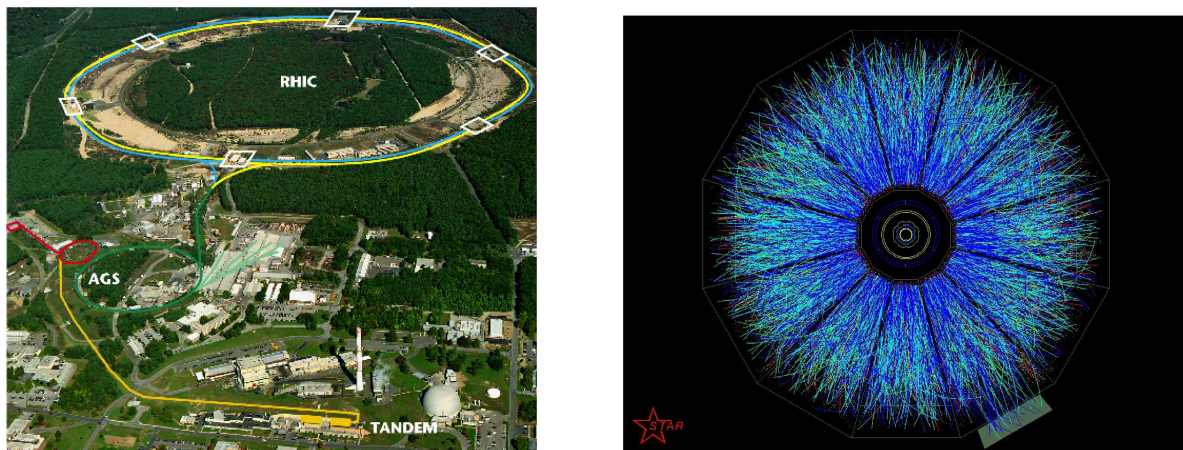


図 2: (左) Brookhaven 研究所の RHIC 加速器。(右) RHIC (STAR 検出器) における重イオン衝突のデータ。

実験分野では、アメリカのブルックヘブン研究所に建設された相対論的重イオン衝突型加速器 (RHIC: Relativistic Heavy Ion Collider) において、原子核 (重イオン) を相対論的速度 (光速に近い速度) まで加速して正面衝突させる実験が進んでいる。これは、宇宙の初期に実現していたと想定される高温度の核物質を地上の実験室で実現するために 1970 年代から行われてきた実験の一環で、クォークやグルーオンが閉じ込めから解放されて新しいクォーク・グルーオン物質を生成することを目指す。この実験で未だに解析的に理解されていないカラー閉じ込めの機構を解明し、さらに、QCD によるクォーク・グルーオンの相互作用がいかにより多彩なハドロン構造を作るかを理解する糸口となると考えられる。RHIC からは、核物質が理論的予想通りに高温度に加熱され、従来のハドロンや原子核とは異なる新しい核物質が作られていることを示す実験データが現れている。さらに、ヨーロッパ (スイス) では各国の研究者達の協力ですらにエネルギーの高い加速器、LHC (Large Hadron Collider) が建設されている。

21 世紀に入ってから日本における新発見として、兵庫県の播磨の SPring-8 放射光施設でのハドロン実験で、3 個のクォークからは作ることのできないバリオン  $\Theta^+$  (+ は電荷を表す) の存在を示す実験データが見つかった。このようなハドロンはこれまで QCD で存在が予想されているものの実験的には寿命が短い (あるいは束縛しない) ために見つかりなかつたもので、エキゾチックハドロンと呼ばれている。この発見で、エキゾチックハドロン (exotic hadron) の構造やスペクトルを解明する研究が一気に進み、ハドロンの様々な新しい形態の可能性が指摘されるようになった。

図 3 に示した反応で作られた  $\Theta^+$  は  $nK^+$  あるいは  $pK^0$  に崩壊するバリオンでストレンジネス +1 をもつことが解るが、 $s$  クォークはストレンジネス  $-1$  をもつため、 $\bar{s}$  を含まなくてはならない。通常のバリオンはクォーク 3 個でできるが、 $\Theta^+$  は 5 個のクォークを必要とするため、ペンタクォーク (pentaquark) とも呼ばれ、エキゾチックバリオン (exotic

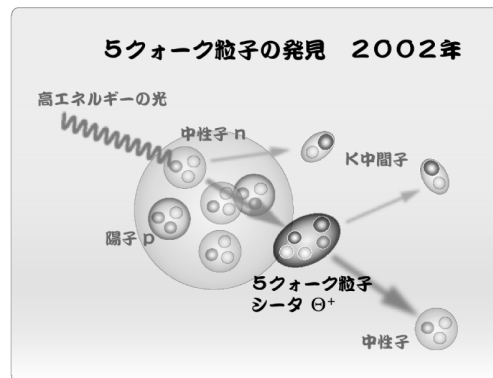


図 3: SPring-8 におけるペンタクォークバリオン  $\Theta^+$  の発見。SPring-8 の LEPS 実験施設で生成された光子を標的の炭素原子核にあてて、 $\gamma n \rightarrow K^- \Theta^+$  反応を観測した。

baryon) に分類される。この状態は、世界中の注目を集め、他のいくつかの反応でも観測されたが、一方で幅の狭いこのような状態の存在を否定あるいは疑問視する観測結果がいくつも報告されたため、その存否は未だに決着がついていない。

さらに、KEKB などの B メソンファクトリーでは、B メソンからの崩壊過程などを用いて、チャームクォークを含むハドロンの研究が盛んに行われている。KEKB の Belle 検出器では、大量のチャームを含むメソンが観測されているが、その中には従来の  $c\bar{c}$  のスペクトルには合致しない新しいメソンが多く含まれている。たとえば、最初に発見された X(3872) メソンはその質量と幅、崩壊の様子などから、 $ud$  クォークを含むテトラクォーク (クォーク 2 個と反クォーク 2 個によって作られるメソン) あるいはチャームメソンの分子的な束縛、あるいは共鳴状態である可能性が指摘されている。さらに、Belle (KEK) グループが発見した  $Z^\pm(4430)$  と呼ばれるメソンは、(図 4 左)

$$Z^\pm \rightarrow \pi^\pm + \psi'$$

という崩壊を見せることから、 $c\bar{c}$  を含むことがほぼ確実なメソンであるが、電荷を持つため、 $Z^+ = (c\bar{c}u\bar{d})$  のように、 $u, d$  クォークも含まなければならない。そのため、少なくとも 4 個のクォークからなる状態であると考えられるほかない。その他にも、B ファクトリーからは、 $D_s^*(2317)$ ,  $D_s^*(2463)$ , X(3872), Y(4260), Y(4360), Y(4660) などと呼ばれるメソンが見つまっているが、いずれも、単に  $c\bar{c}$  と解釈するには無理があるので、その構造や性質が注目を集めている。

これら、ペンタクォークやテトラクォークは、その内部に通常のハドロンでは実現しないカラーの組み合わせ、すなわち  $qq(C=6)$  とか、 $q\bar{q}(C=8)$  などを含むことができる。これらの新しいカラーがエキゾチックメソンを色彩豊かなハドロンとし、QCD の相互作用の新しい形態や新しい束縛状態を探るために重要な役割を果たしている。

このような新しい核物質やエキゾチックハドロンの性質を解明し、QCD によるハドロンおよび原子核の記述を可能とするための研究を進めるために新しい加速器の建設も進ん

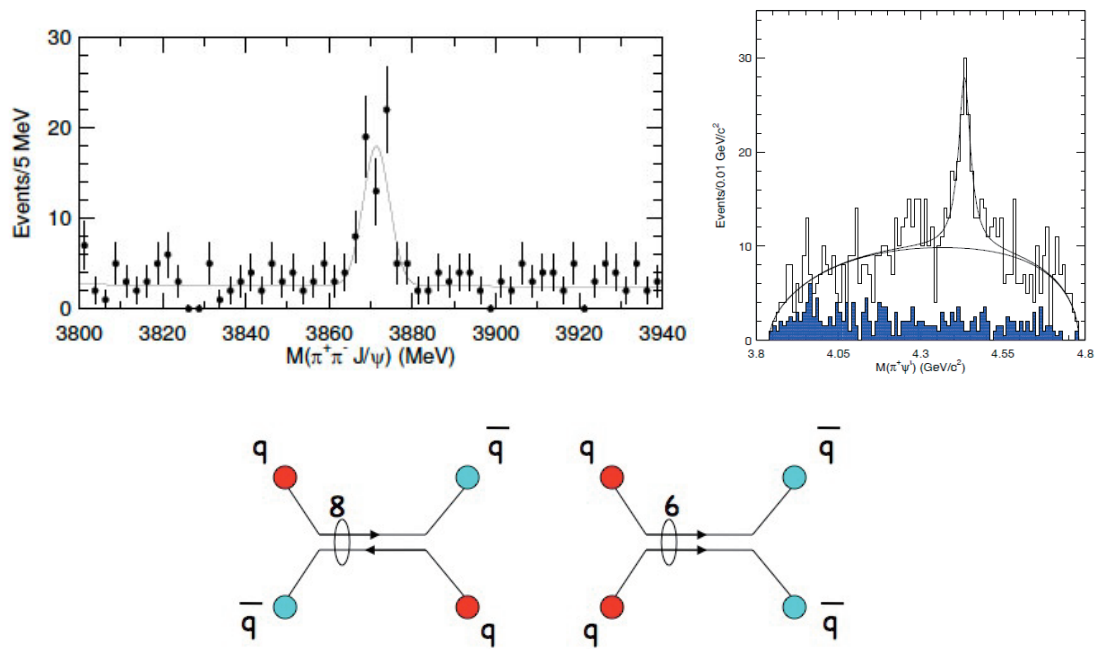


図 4: エクゾチックハドロン (上左) Belle で発見された  $X(3872)$ , (上右) 同じく  $Z(4430)$ 。電荷 +1 を持つ。(下) エクゾチックハドロンに含まれる新しい色構造



図 5: 大強度陽子加速器施設 J-PARC。

でいる。茨城県東海村に建設された新しい加速器施設、大強度陽子加速器 J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) のメインリングは大強度の陽子ビームをエネルギー 50 GeV で標的原子核に照射して、生成される二次粒子である  $\pi, K$  などを用いた実験を行っている。今後さらに拡張して、 $p, \bar{p}$  などほかの粒子や、エネルギーの高い粒子ビームを作る計画も進んでいる。また、J-PARC のメインリングはニュートリノビームも作り出すことができ、岐阜県の神岡にあるニュートリノ観測施設へニュートリノを照射してニュートリノの混合などの性質を調べる研究も進んでいる。

## 4 21世紀ハドロン物理の課題

### 4.1 QCD が正しいことはなぜ分かるか

QCD はクォークの持つカラーの自由度 ( $N_c = 3$ ) (カラーはクォークの内部自由度の名称で、南部陽一郎らによって提唱された。光の振動数である実際の“色”とは関係ないことは言うまでもない。) の対称性に基づくゲージ場の理論 (gauge field theory) で、ゲージ変換が行列で表されるため互いに交換しないので、非可換 (あるいは非アーベル (non-Abelian) ) ゲージ理論と呼ばれる。この非可換性が可換ゲージ理論である電磁気学とは異なる様々な性質、たとえば漸近的自由性とそれと相補的であるカラーの閉じ込めの現象をもたらすと考えられる。QCD が強い相互作用の基礎理論であることの根拠として以下の 3 点を挙げておく。

- クォークがカラーの自由度をもっていることは、バリオンの基底状態のクォークのフェルミ統計対称性から帰結される。カラー数は  $N_c = 3$  であることが、 $e^+ + e^- \rightarrow$  (hadrons) の解析などから確認されている。

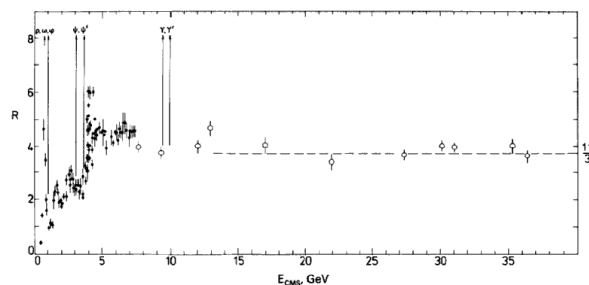


図 6:  $e^+ + e^- \rightarrow$  (hadrons) 衝突実験のデータ。対生成されるクォークの種類数を特定することができる。

- QCD では、クォーク・グルーオンの相互作用は高運動量では次第に弱くなるという、漸近的自由性 (asymptotic freedom) という性質を持つことが予言される。これを確か

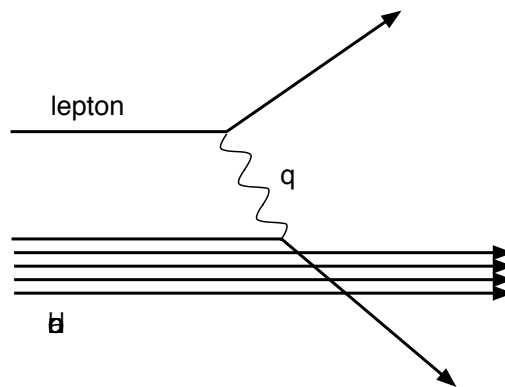


図 7: レプトンのハドロンによる深非弾性散乱

めるために、高エネルギーのレプトンをハドロン（特に陽子）に散乱させて起こす高運動量移行反応（深非弾性散乱、deep inelastic scattering）実験が行われた。その結果、この反応はハドロンを構成する個々のクォークからの散乱の重ね合わせとして表され、しかも、クォークがハドロン中でほぼ自由粒子として振舞っている（スケーリング現象、scaling）ことが明らかになった。さらに、クォーク・グルーオンの相互作用による、自由粒子からのずれは摂動論によって計算することができ、実験データにおけるスケーリングの破れとよく一致している。

- 低エネルギーでの QCD の性質は摂動論では計算できないため、非摂動的な手法が不可欠である。その中で、格子に場の理論を設定して数値的にこれを解く方法として、格子 QCD (lattice QCD) の数値シミュレーションがある。近年、スーパーコンピュータを用いた計算により、ハドロンのスペクトルやクォークの閉じ込めの現象が説明できることが明らかになってきた。例えば、陽子と  $\rho$  中間子の質量の比は 10% 以下の誤差で理論的に再現することができる。

## 4.2 解明を待つハドロン物理の課題

このように、強い相互作用の正しい理論であることがほぼ確実な QCD であるが、実際には QCD をもとに、多様なハドロンの世界を理解するためにはまだまだ解っていないことがたくさんある。ここでは現状と今後のハドロン物理における主な課題を挙げてみよう。

1. カラー閉じ込めの原理 : QCD はクォークとグルーオンの場の理論として表されているが、にもかかわらず、クォークやグルーオンは単体で取り出すことができない。これはカラーの自由度が閉じ込められていて、カラー白色のハドロンから取り出すことができないためであると解釈されている。このカラーの閉じ込めは数値的には格子



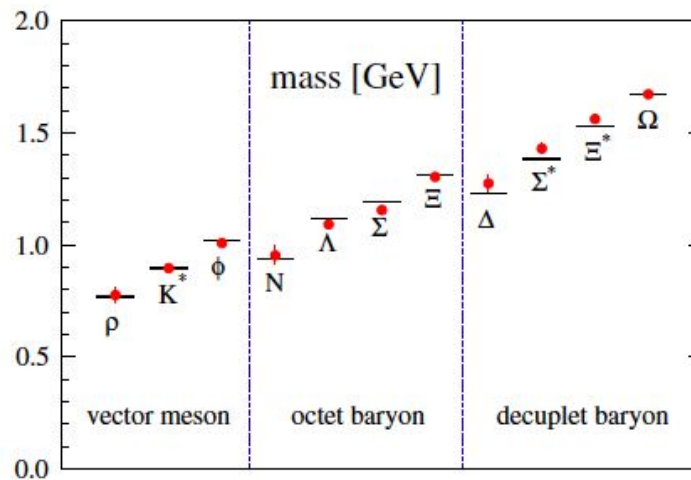


FIG. 24 (color online). Light hadron spectrum extrapolated to the physical point using  $m_\pi$ ,  $m_K$  and  $m_\Omega$  as input. Horizontal bars denote the experimental values.

図 8: 格子 QCD によるハドロンのスペクトルの計算結果 (Phys. Rev. D79 034503, PACS-CS collaboration, 2009)

QCD 計算によって確かめられてきたが、その機構を解析的に理解する試みはいまだに成功していない。

2. カイラル対称性の破れの機構: カイラル対称性はフェルミオンのカイラリティの保存則に対応する対称性で、フェルミオンの質量が 0 の場合に厳密に成り立つ。QCD の場合、クォークの質量は 0 でないので厳密な対称性ではないが、 $u$ ,  $d$  などのクォークは十分質量が小さいため  $SU(2)_R \times SU(2)_L$  などのカイラル対称性が近似的に成立している。ところが、強い相互作用の真空がこの対称性を自発的に破っているため、ハドロンのスペクトルはこの対称性に従っていないことが南部陽一郎によって指摘された。格子 QCD においても、カイラル対称性が破れることが実証されている。一方で、QCD においてカイラル対称性の破れの原因となるダイナミクス、あるいは破れの機構をわかりやすく説明する試みとして、低い運動量領域での強いグルーオン交換相互作用の効果や、インスタントンなどの非摂動的な解の役割などの指摘があるが、必ずしも一定の描像が描かれているわけではない。
3. 非自明なトポロジーを持った真空の構造の解明: QCD の真空は非自明なトポロジカルな構造を持つことが知られている。さらに、ユークリッド化された QCD の古典解として、インスタントンと呼ばれるトポロジカルソリトン解が存在し、この解によって、トポロジーの異なる QCD 真空間のトンネル効果による真空混合が起こることが理論的に示されている。 $\theta$  真空と呼ばれるこの真空は QCD から決まらないパラメータ  $\theta$  をもつが、 $\theta$  がゼロでないと、QCD が CP 対称性を破ることになる。強い相互作用

用による CP の破れは非常に小さいことが実験的に明らかになっているが、 $\theta$  が非常に小さい理由は自明でない。また、QCD の真空はグルーオンが凝縮した状態であることが解っているが、これをインスタントンと関連づけることによって、インスタントン真空の描像が提唱されている。インスタントンがクォークに及ぼす相互作用がカイラル対称性の破れを引き起こす事も示唆されている。

4. ハドロンのスペクトル: ハドロンのスペクトルは、軽いクォークからなるハドロン群と重いクォークからなるハドロン群ではっきり異なる特徴を持つことが解る。重いクォークからなるクォーコニウムと呼ばれる  $c\bar{c}$  などのメソンは、クォークを閉じ込める線型のポテンシャルと短距離でのクーロン型相互作用のスペクトルとしてかなりよく再現することが出来る。一方、軽いクォークからなるハドロンの基底状態についてはフレーヴァー対称性やクォーク模型による分類が良く成り立っているが、励起状態のスペクトルにはクォーク模型では予言の難しい状態が多くある。とりわけ、軽い中間子状態は、相対論的かつカイラル対称性に基づく解析が重要であるが、最近はカイラル有効理論をメソン、バリオンの励起状態に適用する研究が盛んに行われて成果をあげている。一方、第一原理からのスペクトル計算は格子 QCD による数値計算で基底状態の計算がある程度可能である以上には、解析的な手段が確立していない。従来クォーク模型では説明が難しいスカラー ( $0^+$ ) メソンにおける SU(3) 表現の混合や SU(3) を破るスペクトル、バリオン励起状態のスペクトルと構造など現象が QCD のどのような性質を反映しているのかを解明するためにも、非摂動的かつ解析的な方法によるハドロンのスペクトルの計算方法の確立が課題となっている。
5. エキゾチックハドロンの解明: QCD ではカラー閉じ込めのためにハドロンはカラー白色でなければならないとする。最も簡単なカラー白色の多体系はクォークと反クォーク 1 個ずつからなるメソンで、次に 3 個のクォークからなるバリオン (3 個の反クォークなら反バリオン) が考えられる。しかし、他にも、グルーオン 2 個または 3 個からなるグルーボールとか、2 個のクォークと 2 個の反クォークからなるメソン、4 個のクォークと 1 個の反クォークからなるバリオンなどさまざまな可能性が考えられる。さらにはグルーオンがあらわに含まれるようなハドロンもあり得る。ところが、これまで  $q\bar{q}$  メソン、 $qqq$  バリオンではないとはっきり確認されたメソンやバリオンは見つかっていなかった。通常の  $q\bar{q}$  メソンと  $qqq$  バリオンでは表せないようなハドロンを総称してエキゾチックハドロン (exotic hadron) と読んでいる。これまでに、多くのエキゾチックハドロンの探索が行われてきたが、いずれも否定的で、QCD にとって大きな謎であった。2003 年のペンタクォーク発見の報告を契機に様々なエキゾチックハドロンの可能性が検討され、とりわけ重いクォークを含むハドロンに不思議な状態が多く見つかっている。このように一気に開けてきたエキゾチックハドロンの可能性だが、その実態はまだ明らかになっていない部分が多い。
6. 有限温度での真空の性質と相転移: 有限温度でのカイラル対称性の回復、クォーク・グルーオンのハドロンからの開放によるクォーク・グルーオンプラズマ (quark-gluon

plasma, QGP) 状態の実現などが格子 QCD によって予言されてきた。これを確かめるために、相対論的エネルギーまで加速された重イオン衝突を実現する RHIC (relativistic heavy ion collider)、および LHC (Large Hadron Collider) 加速器が用いられている。RHIC では、高温の核物質がこれまでの予想に反して強結合状態であることを示す実験データが得られ、新しい核物質が生成されていることを示唆している。今後、さらに通常核物質からクォークグルーオンプラズマ相への相転移に到るための条件の確定、相転移後の QCD にスペクトルの変化の確認、有限温度、密度の両方の効果の現れ方の研究などの重要なテーマの研究が進んでいくと期待される。

7. 有限バリオン密度での QCD の相図: 原子核中のバリオン (核子) 密度を高くすると、QCD の基底状態には真空中とは全く異質な構造が現れることが最近明らかとなってきた。密度を高くすると、高温の場合と同様に、クォークやグルーオンが 1 個のハドロン中に留まらなくなり、新しいクォーク・グルーオン物質相を作ることが期待される。そこでは、通常の固体中の電子の物性などと同様に、クォーク間に引力が働いてカラー超伝導状態が出現したり、フェルミエネルギーが高くなってストレンジクォークが生成されたり、また集団的なソフトな励起モードが現れたりするなど、多彩で複雑な相図が予想されている。このような温度とバリオン密度に対応する化学ポテンシャルを座標軸とした QCD の相図の解明を目指して、QCD 物性とも言える研究が盛んに行われている。実験的には、地上ではそのような高密度状態は実現が難しいが、中性子星の内部などに高密度ハドロンの物質が存在すると考えられている。また、通常の原子核の密度でも、高密度状態への遷移の手がかりが得られるとされて、原子核を実験室として有限密度の QCD を研究することが可能である。例えば、 $\pi$  の弱崩壊定数の媒質中での変化、 $\rho$  などのベクトルメソンの質量の減少などを示唆する実験データが報告されており、有限密度での真空の性質の変化を反映しているとの解釈が提案されている。

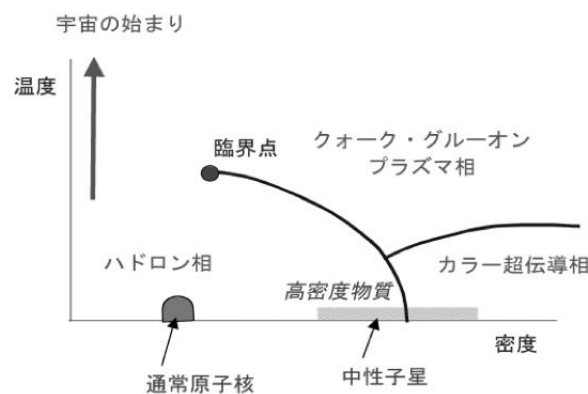


図 9: QCD の相図

8. 核子のスピン構造：ハドロン中のクォーク（あるいは一般にパートン）の分布関数は、主にレプトンの深非弾性散乱実験によって明らかにされてきた。その結果、光円錐座標系で見た陽子などのハドロンは価クォーク (valence quark) と呼ばれるフレーヴァー量子数を担うクォークと、海クォーク (sea quark) と呼ばれる  $q\bar{q}$  の対生成による運動量の低いクォークから構成され、さらにグルーオンも陽子の運動量を多く運ぶ担い手となっていることが明らかになった。また、原子核中での核子のパートン分布が自由な核子と異なっていることも 1980 年代に発見され、その機構の解明も進んでいる。1990 年代には、陽子のスピンの担い手が必ずしも価クォークではなく、海クォークや、グルーオンさらに、クォークやグルーオンの軌道核運動量の寄与が重要であることが示唆されている。実験的研究は、ドイツの DESY 研究所や、アメリカの Brookhaven 研究所などの加速器を用いて、日本の研究者も多く参加して進められている。最近さらに、運動量移行を伴う 一般化されたパートン分布関数 (generalized parton distribution) が提案され、ハドロンのクォーク構造をさらに精密化する試みが続いている。このような、光円錐座標でのクォーク分布関数は、低エネルギーでのハドロンスペクトルに基づくクォーク構造からは自明ではないもので、両者の関係を明らかにし、第一原理からこれを解明することが求められている。
9. ハドロンの電磁相互作用、弱相互作用への QCD 補正：ハドロンの構造や性質は電磁相互作用や弱崩壊などの現象で、詳しく研究されてきたが、これらの相互作用の頂点における形状因子や、非レプトン弱崩壊における強い相互作用の補正効果が重要であることが知られている。また、電弱相互作用における CP 対称性の破れや、アイソスピン選択則などの研究においても、ハドロンの構造に起因する強い相互作用の効果の精密な理解の必要性が指摘されている。第一原理から、このような強い相互作用の効果を実算し、その役割を理解することがハドロン物理の目標の一つとなっている。

### 4.3 課題への取り組み

上に挙げたさまざまな課題は、いずれも QCD が低エネルギーでは摂動論では取り扱えないことが原因となっている。QCD を非摂動的に扱う手法としては、格子 QCD の数値シミュレーションを代表に、QCD 和則などの解析的手法や、カイラル対称性、ヘビークォーク対称性などの対称性に基づく低エネルギー有効理論による解析など、様々な手法が開発されてきた。これらはそれぞれが限界を持つ手法であるがこれらを組み合わせて総合的に全体像を描くことが必要となっている。一方、実験的研究でも、LHC での重イオン反応、J-PARC でのハドロン実験など複数の実験施設が稼働し成果を挙げ始めている。この分野では、実験結果と理論解析の連携が十分になされることが課題解決と今後の発展のために不可欠である。