

1 原子核物理学の将来

核物理委員長 永江知文

1.1 21世紀における原子核物理の課題

原子核物理学は、今から遡ること百年以上前のラザフォードによる原子核の発見に始まる、長い歴史をもった学問領域である。20世紀における先端加速器科学の発達と測定器技術の向上、それと並行した素粒子・原子核物理学の進展とを歯車として原子核の描像も大きく変遷してきた。陽子と中性子を構成要素とする伝統的な原子核の描像は、これらのハドロン粒子を構成するクォークとグルーオンのダイナミックな世界へと進化を遂げた。宇宙初期のビッグバンにおいて実現したと考えられていた高温のクォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) 状態は、RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider) や LHC (Large Hadron Collider) といった高エネルギー重イオン衝突型加速器によって再現され、その特異な性質が明らかになりつつある。近年観測が可能となった連星中性子星合体からの重力波は、中性子星中心部の超高密度ハドロン/クォーク物質の物性を教えてくれるに違いない。

また、人類によって積み上げられた、これらの原子核物理学の知識は、宇宙初期の約3分間に何が起きたのか、太陽を代表とする星の燃料が何であるかを突きとめ、星の内部での元素合成の詳細なシナリオを作りあげてきた。不安定核 (RI) ビームという武器を手にした人類は、原子核の研究対象領域を一気に広げ、中性子ハローや中性子スキンといった中性子過剰な核に特徴的な構造を発見した。また、新しい魔法数に見られるようにその広い領域に目をやると従来の常識を打ち破るような新奇な構造が出現したりする。

その結果、物質を織りなす原子 → 原子核 → ハドロン粒子 → クォークという階層世界の存在が明らかになった。一方、この物質の階層構造を形成する基となるクォークとグルーオンの世界を記述する力学は量子色力学 (QCD) として確立している。この QCD は、クォーク・グルーオンからなる $10^{-19}\text{m}(10^{-4}\text{fm})$ のミクロの世界から、半径 10^4m の巨大な原子核である中性子星の世界までの 10^{23} にも及ぶ大きくスケールの異なる物質を記述する力学と考えられている。この QCD によって織り上げられた多様な物質・宇宙の進化と成り立ちを解明していくことが、これからの原子核物理学の中心課題であり、以下のような基本的な疑問に象徴される。

- 宇宙で目にする物質はクォークからどのように生成されてきたのだろうか？
- クォーク多体系の多様な存在形態の全容はつかめたのだろうか？
- 中性子星のような高密度物質は何からできているのか？
- ハドロン質量の起源は理解できたか？
- クォーク、ハドロン、原子核という階層構造を支配する相互作用を十分理解できたのか？
- 重元素合成はどこで起きているのか？

図 1.1 は、原子核物理学の研究の目標を、日本における研究の動向と関連させて模式的に示したものである。不安定原子核ビーム施設 (RIBF/KISS-2)、大強度陽子施設 J-PARC、海外での高エネルギー重イオン衝突実験 (LHC ALICE) などを駆使して、ストレンジ物質、中性子物質、QGP などの特徴的なクォーク・ハドロン物質の研究を通じて、元素合成、超高密度物質、超高温物質を解明し、量子色力学 (QCD) が織りなす多彩な物質世界を明らかにする。

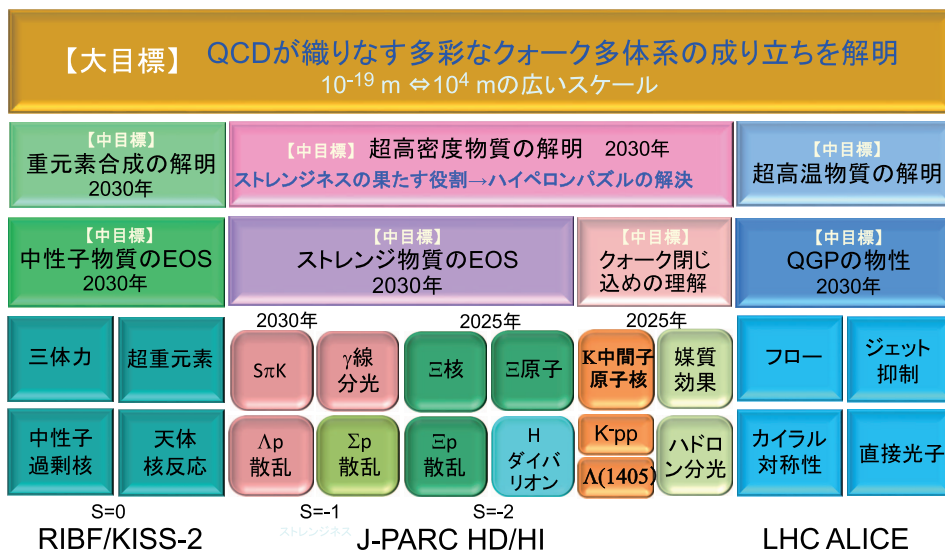


図 1.1: 原子核物理学が目指す目標と、日本における研究の動向。不安定原子核ビーム施設、大強度陽子施設 J-PARC、海外での高エネルギー重イオン衝突実験などを駆使して、量子色力学 (QCD) が織りなす多彩な物質世界をストレンジ物質、中性子物質、QGP などのクォーク・ハドロン物質の研究を通じて解明する。なお、この図では J-PARC における研究課題を中央下部にやや詳しく記載している。

1.2 我が国における原子核分野の大型計画の現状

原子核物理学の研究のための大型加速器施設としては、大強度陽子加速器、高エネルギー電子加速器、高エネルギー重イオン加速器、不安定原子核ビーム加速器という4つの潮流がある。我が国においては、茨城県東海村の J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) と埼玉県和光市の RIBF (Radioactive Isotope Beam Facility) という二つの大型加速器施設が稼働している。J-PARC では 30 GeV の大強度陽子シンクロトロンにより大強度 K^- ビームを生成し、2009 年より始まったストレンジネスの入った原子核の研究が本格化してきている。理化学研究所の RIBF では 2007 年より稼働し始めた大型超伝導リングサイクロトロンにより中性子過剰な不安定原子核ビームを生成し、超重元素探索、特異な構造をもった原子核の研究、宇宙における元素合成の謎に迫る研究が大きく進展している。2020 年における日本学術会議による「マスタープラン 2020」の策定においては、原子核分野からは、

1. 大強度陽子ビームで極める宇宙と物質の起源と進化
2. RI ビームファクトリーの高度化による重元素科学の躍進
3. J-PARC における重イオン加速による超高密度ストレンジネス核物質の研究

という3つの大型施設計画を提出した。原子核コミュニティとしては、従来に引き続き、J-PARC ハドロン実験施設の高度化と RIBF の高度化を最優先課題と位置づけた。結果として、このうち 1. 大強度陽子ビームで極める宇宙と物質の起源と進化(ハドロン実験施設の拡張計画を主とする)は、31 件の重点大型研究計画に選ばれた。また、

4. 高エネルギー重イオン衝突によるクォーク・グルーオン・プラズマ相の解明
5. 電子・イオン衝突型加速器 (eIC(Electron Ion Collider)) 計画

という2つの国際共同研究である大規模研究計画を提出した。前者は、超高温・高密度下のハドロン／クォーク物質を生成し、クォーク・グルーオン・プラズマへの相転移機構、その相構造や物性などの探究を目的とする。後者は、陽子および原子核の三次元的内部構造や原子核内部におけるグルーオン飽和の解明を目指すものである。

これまで、高エネルギー重イオン加速器と高エネルギー電子加速器を用いる研究については、基本的には海外の加速器施設での国際共同研究によって進めることとしてきた。今回もこれを踏襲したが、新たに J-PARC での重イオン加速が提案されたことは、今後の検討を要する。また、今回申請を見送った、東北大学電子光理学研究センターや大阪大学核物理研究センターの将来計画についても真摯な議論が必要とされる時期に来ている。

1.3 海外における大型加速器計画の動き

ヨーロッパでは2017年に NuPECC (Nuclear Physics European Collaboration Committee) により Long Range Plan2017が策定された。これによれば、ヨーロッパのフラッグシップ計画は FAIR(Facility for Antiproton and Ion Research) である。FAIR については、建設予算の分担に関して、ドイツのローカル政府が不足分をカバーするということが最終的に建設が認められ、建設が開始された。しかし施設建設計画のスケジュールはまだまだ予断を許さない状況であり、ビームが出るのは2025年過ぎではないかと言われている。1) 原子プラズマ物理、2) 高密度核物質、3) Rare Isotope 実験、4) 反陽子ビームによるハドロン分光、の4つの大きな研究の柱が謳われている。ヨーロッパでは FAIR より小さな domestic な計画として、GANIL の SPIRAL2 もコミッショニング中である。また、EURISOL なども計画されている。高エネルギー重イオン衝突加速器としては、CERN の LHC ALICE 実験がしばらく走り続けることが既定路線である。

米国では、NSAC (Nuclear Science Advisory Committee) によって2015年に Long Range Plan が策定されている。彼らの最優先課題は、電子・重イオン衝突型加速器 (eIC) である。この計画では、核内でのグルーオン分布を精密に調べる。陽子スピンへのグルーオンスピンの寄与を決定するとともに、未解明のカラーガラス凝縮状態を研究することを目的としている。その建設時期は、2025年以降となるはずで、それまでに、電子加速器施設ジェファーソン研究所 (JLab) のビームエネルギーを 12 GeV に増強し(既に稼働中)で、陽子内部のパートン分布の3次元構造やグルーボールやハイ

ブリッド粒子などの探索が進行している。最近になって eIC の建設サイトが BNL に選ばれたところである。またこれと並行して、ミシガン州立大学に FRIB (Facility for Rare Isotope Beams) の建設が進められており、正式には 2022 年頃の完成予定とされているが、2021 年頃に早まりそうな勢いである。

1.4 本書の構成

我が国における原子核ハドロン物理学は数多の先人達の努力の延長として引き継がれてきている。この分野での大学共同利用は、東京大学附置の原子核研究所 (INS) (1955 年発足) に始まる。SF サイクロトロン、電子シンクロトロン (ES) が建設されて共同利用が進められた。この東大核研の将来計画として相対論的重イオン反応によるクォーク・グルーオン・プラズマの探索を目的とした NUMATRON 計画が提案され、その準備段階として米国バークレー研究所 (LBL) での高エネルギー重イオン実験に日本から参加することとなった。その研究の中から不安定核ビームの手法が生まれ ^{11}Li の中性子ハローが見つかり、第 3 章の「不安定核物理」が理研の RIBF として花開くこととなった。

大阪大学には、核物理研究センター (RCNP, 1971 年発足) が設置されリングサイクロトロンによる精密核分光の流れが生まれた。これは、本書の第 2 章「核物質物理」へと発展してきている。

クォーク・グルーオン・プラズマの探索は、その後米国ブルックヘブン国立研究所の AGS, RHIC 加速器へ中心が移り、第 6 章の「高エネルギー重イオン衝突による物理」を生み出した。今では CERN LHC/ALICE 実験が主たる実験場である。RHIC では、偏極陽子衝突実験 (RHIC スピン) が並行して行われ、ドイツ DESY の HERMES 実験とともに、第 7 章「核子構造の物理」を編み出した。

残念なことに、東大核研の NUMATRON 計画が頓挫するに至り (1980 年頃)、東大核研は、大強度陽子加速器を中心に据えた「大型ハドロン計画」に舵を切り、ハイパー核の物理を筑波の KEK 12 GeV 陽子シンクロトロンにおいて展開する。これが J-PARC に引き継がれた 4 章「ハイパー核、ストレンジネス核物理」である。

高エネルギー分野のトリスタン計画が進展する頃から、クォーク模型の確立に役割を果たしたハドロン分光は素粒子物理の本流からはずれ、興味が薄らいでいた。SPring-8/LEPS でのペンタクォーク Θ^+ の報告は、第 5 章「ハドロン物理」のリバイバルを告げることとなった。 Θ^+ そのものの存否は、まだ確定していないが、LHCb 実験で発見された P_C ペンタクォークや、KEK B-Factor 等で見つかったテトラクォーク粒子と見られる $X(3872)$ などの発見とともに、新たな時代を築いている。

素粒子標準模型では許されないような新しい物理現象を探る実験は、従来にない測定精度を追求したりすることにより、第 8 章「基礎物理」を形作ってきた。原子核物理の伝統的手法を駆使することにより、境界領域との間に新しいパラダイムを切り拓くような測定が進められている。