

日本の核物理の将来レポート

1 要旨

1.1. 本レポート作成の趣旨

21世紀初頭、日本の核物理コミュニティは、長年にわたる先人の努力が結実してRIBFとJ-PARCという世界最高性能の2種類の大型加速器を手に入れることができた。RCNPやELPH等の施設の整備もあいまって、日本の核物理は過去にない発展・成熟期を迎えようとしている。しかし、我々はこの最高の環境を享受するのみではなく、さらに今後10年、20年、30年先の核物理の進むべき方向を考えなければならない。J-PARCやRIBFの構想が20年以上前から議論されていたことを考えると、次の大規模計画の議論ももう始めるべきときだと考えられる。

もうひとつ気になることに、原子核分野の急速な広がりや専門化が挙げられる。現在、核物理コミュニティのメンバーが従事する研究内容は、クォークからハドロン、原子核、そして超新星や中性子星までを含む極めて広範な研究対象と、数100 keVから数100 GeVまでの極めて広いエネルギー領域にわたっており、一人の研究者からはその全体像がなかなか見えないばかりか、それぞれの研究分野が専門化したために各研究者は原子核コミュニティ内の他の研究分野についてよく知らないことが多いという状況になってしまった。特に今後の原子核コミュニティを支える若い研究者は、新しい最先端施設を使いこなすデータを出すことに忙しいため、原子核の他の分野へ理解や関心が広がらないという状況に陥っている可能性がある。

このような状況を打開するためには、各分野で活躍する若手研究者が中心となって、自らの研究分野の今後10年、20年、30年の進むべき方向を議論してその将来像をもつとともに、他分野との議論を通じて原子核物理全体についての理解を深めてもらうことが肝要であると考えた。そこで核物理委員会は、2010年7月に「核物理の将来」レポートの作成を提案し、核理論委員会の協力を得て、2010年9月の核物理懇談会総会で核実験・理論合同のプロジェクトとしてこれがスタートした。以下に述べるように、日本の核物理研究者の活動状況と加速器・大型装置の使用状況によって「不安定核物理」「精密核物理」「ハイパー核・ストレンジネス核物理」「ハドロン物理」「高エネルギー重イオン衝突による物理」「核子構造の物理」「核物理的手法による基礎物理」「計算核物理」の8つの分野に分類し、それぞれについてワーキンググループを10~20名程度の主に40代以下の若手研究者によって組織し、研究会や検討会を通じて文章をまとめた。また、各分野の研究には理論家の先導やデータ解釈が不可欠であるため、各ワーキンググループには関連する理論家にも入っていただいた。

全体会合もたびたび開催して意見交換や内容のすりあわせを行った。最後にこの前文を田村裕和、中村隆司が執筆した。

1.2. 経緯

- 2010年7月：核物理委員会において、田村裕和核物理委員長より「核物理の将来レポート」作成が提案される。
- 2010年9月13日：九州工業大学(日本物理学会秋季大会)
核物理懇談会総会で実験核物理・理論核物理合同のプロジェクトとして承認される。8つのワーキンググループ「不安定核物理」「精密核物理」「ハイパー核・ストレンジネス核物理」「ハドロン物理」「高エネルギー重イオン衝突による物理」「核子構造の物理」「核物理的手法による基礎物理」「計算核物理」を結成することが決まる。
ワーキンググループ全体の世話人として中村隆司核物理委員が承認される。
- 2010年11月3日：理化学研究所仁科加速器研究センター
第一回タウンミーティング（全体会合、キックオフ会）を開催。ここで正式に8つのワーキンググループが発足、議論を開始。
- 2011年2月22日：理化学研究所仁科加速器研究センター
第一回代表者会議を開催。進捗状況の確認。今後の進め方を議論。
- 2011年7月29・30日：大阪大学核物理研究センター（参加者72名）
第二回タウンミーティング（全体会合）を開催。各グループ第一版のまとめに向けての進め方を確認
- 2011年9月15日：第一版締め切り
- 2011年9月17日：弘前大学（日本物理学会秋季大会）
実験核物理・理論核物理領域合同シンポジウム「日本の核物理の将来」を開催。各ワーキンググループ代表による発表。パネルディスカッション
- 2011年12月17日：第二版締め切り
- 2011年12月17日：高エネルギー加速器研究機構 KEK
第三回タウンミーティング（全体会合）を開催。最終版に向けた議論。数ワーキンググループ間での議論。
- 2011年12月28日：第三版締め切り
- 2012年3月16日：第四版締め切り
- 2012年3月25日：関西学院大学（日本物理学会年会）
第二回代表者会議を開催。最終版についての確認。
- 2012年4月：最終版締め切り
- 2012年8月：脱稿

1.3. 本レポート作成の目的

- 日本の核物理の将来について、その方向性を示す。
- 核物理の将来像について、特に若手研究者が各自じっくり考え、議論する機会を

設ける。

- 日本の核物理に今どんな研究テーマがあって、それが今後どうなっていくのかを、研究者が互いに知る機会とし、各自が自分たちの研究や施設のみでなく、広い視野をもって核物理全体の将来を考えられるようにする。
- RIBF, J-PARC, RCNP, ELPH などの国内拠点施設や、その他の加速器施設の将来計画を合わせて考える機会とする。
- 他分野や一般市民に向けて我々の研究の意義と将来性をアピールできるようにする。
- 必要に応じて、原子核コミュニティの中で将来計画の優先度を議論できような土壌を作る。

1.4. 本レポートの今後の使われ方

- このレポートはあくまでも自分たちのためのレポートであり、外部向けのレポートではない。しかし、今後外部向けのレポートを作成する際の材料とはなりうる。
- 核物理分野に入ってくる新人に対して、この分野の現状や将来の展望を教える際の材料とする。

1.5. 核物理の現在と今後 (Big Picture)

現代の原子核物理学の使命

我々の身近な世界を満たす物質は原子からできているが、その性質を決定付けているのが原子核である。原子核の電荷と質量が原子の性質を決定付け、原子核の構造が宇宙の元素比率を決定付けている。原子核の理解は、物質を理解する上でもっとも重要な第一歩である。原子核は、素粒子クォークが強い相互作用によって結びついてできたクォーク多体系であることがわかっているが、クォークからハドロン、ハドロンから原子核が作られる仕組みを理解しなければ、物質のもとである原子核の起源を理解したことになる。さらには、宇宙初期には物質はクォーク・グルーオン・プラズマとして存在したと考えられ、また中性子星の内部にはストレンジネスを含む高密度核物質やクォーク物質が存在している可能性がある。これらの原子以外の物質を含む、宇宙における様々な「物質＝クォーク多体系」が、素粒子クォークからどのように生まれどういう性質を得たかを解明することが、現代の原子核物理学の使命である。

図 1-1 は、クォーク間の力である強い相互作用の基礎理論、QCD (量子色力学) から予想されるクォーク多体系の相図を簡略化して描いたものである。この相図上に予想される様々な形態のクォーク多体系のすべてが原子核物理の対象である。そしてこの様々なクォーク多体系とその関係を理解することは、現実の宇宙の時間発展とともにその中で進行した“物質”の進化の仕組みを理解することに他ならない。すなわち、宇宙における物質の進化の全体像を理解することが、原子核物理学の目的であるということができ

る。

宇宙における物質の進化と原子核物理学

これまでの QCD 理論と原子核物理学が予想する宇宙における物質の進化の過程は以下のとおりである。ビッグバンでクォークが生成し、初期宇宙では物質は高温のクォーク・グルーオン・プラズマの状態が存在したと考えられる。宇宙が膨張するとともに温度

度が下がり、クォークがハドロンとして閉じ込められるとともにカイラル対称性が自発的に破れて軽いクォークが大きな質量をもつ。こうしてできたハドロンのうち安定な「核子」は、単体（陽子）あるいは一部が軽い原子核となって、水素原子およびヘリウム原子の形で宇宙を満たすが、これらは重力で集まって恒星をつくり、恒星内部で核融合反応が進んでより重い原子核が合成される。鉄より重い原子核の生成は吸熱反応となる

ため特殊な条件が必要だが、とくにウランにいたる現在宇宙にあるすべての元素を合成するには、超新星爆発の瞬間に起こるとされる速い中性子捕獲過程が必要だと予想されている。超新星爆発の際に中心部が圧縮されて残る高密度の天体である中性子星の内部は、さまざまな密度とバリオン組成をもつ核物質であり、中性子のみからなる低密度の核物質からストレンジクォークを含む高密度の核物質まで存在すると予想されている。さらに高密度に圧縮されると、再び相転移を経てクォークが閉じ込めから開放されるとともに 2 個のクォークがペアを作って超伝導状態のクォーク物質が作られると予想されている。図 1-1 の相図の中に、こうした物質進化の道筋を示した。

クォーク間の力である強い相互作用の基礎理論 QCD は、漸近的自由という性質のため高エネルギーにおいては摂動論的に解くことができ、高エネルギーの実験結果との一致から QCD を疑う余地はない。しかし現在の低温の宇宙に満ちるハドロンや原子核を QCD から理解することはその非摂動性のため難しい。格子 QCD シミュレーションを上手に利用しつつ、QCD の有効理論やさまざまな模型を用いて物理的な理解を進める必要がある。

原子核物理学の分類とそれぞれにおける基本的“問い”

初期宇宙での高温の物質の状態は、宇宙における物質進化のスタート地点として理解

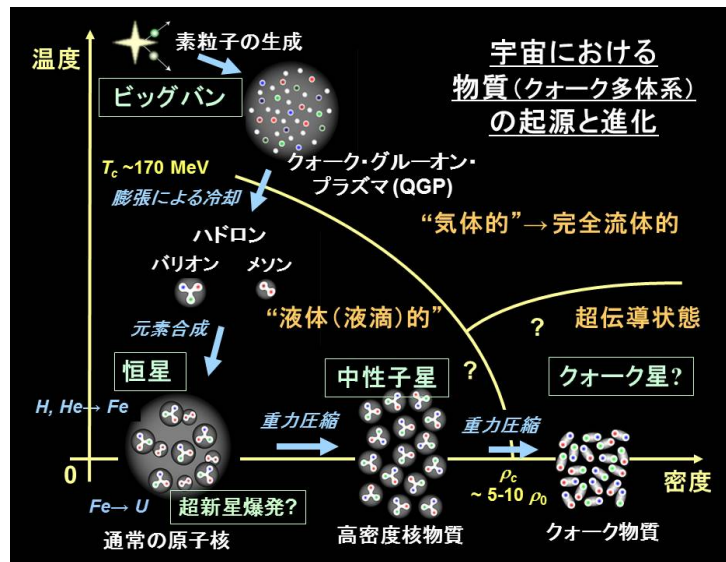


図 1-1: クォーク多体系の相図 (QCD の相図) に宇宙における物質の起源と進化を重ねて模式的に表したものの。

しなければならない重要テーマである。その状態は、QCD の予想ではクォークとグルーオンの非閉じ込め状態、クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) であると考えられる。QGP の探索は、ほぼ唯一の方法である高エネルギー重イオン衝突実験によって進められてきたが、近年の RHIC 実験によって、ジェット抑制事象や非等方的な楕円型フローのデータから、QGP の存在が確認されるとともにその性質が予測に反して完全流体的であることが明らかになった。また、その相転移温度や相転移の型も分かってきた。今後 RHIC とさらに高エネルギーの LHC での重イオン衝突実験によって、QGP の詳細な性質が解明されると期待される。また、QCD 相図の全体を決定することは極めて重要な目標であるが、そこに向けて RHIC/LHC によって高温部分を決定するとともに、より低いエネルギーでの衝突実験によって、少し低温でより高密度の領域を調べる研究も重要である。日本グループは RHIC の PHENIX 実験や LHC の ALICE 実験に多大の貢献をしており、今後も主導的役割が期待される。なお、本レポートでは、この分野を「高エネルギー重イオン衝突による物理」と呼ぶことにしている。

QGP からハドロンが生まれる際に起こるクォークの閉じ込めとカイラル対称性の自発的破れによるハドロンの質量獲得は、いずれも今後の解明が待たれる極めて重要な基本的問題である。前者は格子 QCD シミュレーションによって再現されているが、その物理的意味や定量的理解には至っていない。後者はカイラル対称性の破れ（南部理論）によって生じると考えられているが、その定量的で詳細な解明はこれからである。この両者が十分理解されていないために、我々の物質観は、クォークの世界と原子核から先の物質世界との間に断絶があるといわざるを得ない。さらに、ハドロンの構造についても、構成子クォーク模型が有効な基底状態のハドロンを除くと、我々はそれをどう理解すべきかがわかっていない。核内ハドロンの質量変化などの実験や、エキゾチックハドロンの探索、ハドロン励起状態の研究などを通してこれらの問題に取り組み、ハドロンの総合的な理解を進める必要がある。日本は世界最強のハドロン加速器である J-PARC と、SPring-8/LEPS や ELPH という光子ビーム施設を擁しており、今後の大きな発展が期待される。本レポートでは、この分野全体を「ハドロン物理」と呼ぶこととした。

ハドロンの研究として重要なもうひとつのテーマに、核子のクォーク・グルーオン構造やスピンの起源の理解がある。レプトンの深部非弾性散乱実験によって現れたスピン・クライシスは、我々の世界にとってもっとも重要な「物質」である陽子の内部構造を我々がまったく理解していないことを露呈した。日本が主導した RHIC での偏極陽子衝突や、COMPASS, SeaQuest, Belle などの実験は、核子の内部構造に対しクォーク・グルーオンの運動量分布や偏極分布による理解を進めている。将来の偏極陽子及び重イオンと電子の衝突実験施設や、J-PARC でのハドロンビームの実験により軌道角運動量を含む核子の 3 次元的な構造の解明が期待される。この分野は、「ハドロン物理」とは別に「核子構造の物理」のグループとして分類した。

核子から合成されるさまざまな原子核は、核子という基本要素が核力で結びついた多

体系として扱うことができる。ただ、核力は現象論的にはよく知られているが、その物理的理解は難しい。カラー白色のバリオンの中の強い相互作用である核力は、中性分子間の分子間力に似て複雑であり、遠距離部分は中間子交換模型で理解できるものの、斥力芯などの近距離部分はクォーク・グルーオンの自由度による理解が望まれる。そのためにはストレンジクォークを含むバリオン間相互作用全体を調べるのが有効であり、これは「ハイパー核・ストレンジネス核物理」の重要テーマの一つである。また、核力からさまざまな原子核を構成するとともに、高密度での核物質の状態方程式を決定するために、核力の3体力のさらなる理解が不可欠である。本レポートでは、3体力などの核力の詳細を調べる研究は「精密核物理」分野に分類している。

こうして核子から構成される原子核は、現在では約8千種類が存在するといわれる。これらの存在範囲の確定と、そこでの多様な原子核の性質の理解、共通する普遍的な物理の抽出は、原子核物理学の基本的テーマである。従来は安定核とその周辺の核しか知られていなかったため、原子核は陽子・中性子がほぼ1対1の割合で、それぞれ相似な密度分布で混ざり合い、普遍的な魔法数をもったものである、という常識が作られた。しかし、中性子・陽子過剰核の研究の進展によりこれらの「原子核の常識」は覆され、より一般的、普遍的な原子核構造の理解が進められようとしている。こうした研究には、近年の不安定核ビーム生成・分離技術の向上と、本格的な不安定核ビーム施設の稼働が大きな役割を果たした。不安定核ビーム施設には、重イオンビームの飛行核破砕反応を利用したin-flight型と、高エネルギー陽子ビーム等による重標的の分解で生ずる不安定核を分離・収集するISOL型とがある。前者の発展には理化学研究所（理研）が大きな貢献をはたして来ており、現在では世界最高の性能を持つRIBFで世界を先導した研究が進んでいる。この分野を「不安定核物理」分野と名づけることとする。

不安定核研究のひとつの重要な目的は、恒星における元素合成の完全な理解である。我々は、地上にある元素の起源、すなわちさまざまな原子核が宇宙のどこでどのように造られたのかをまだ十分には理解していない。主系列星の内部で陽子やヘリウムから鉄までが発熱反応によって合成される過程や、鉄からより重い核が遅い中性子捕獲で合成される過程は、安定核とその周辺を経由するためおよその道筋がわかっている。しかし超新星爆発の瞬間に一気に中性子を多数捕獲してウランまでの重い原子核が合成されるとする速い中性子捕獲過程では、きわめて中性子過剰な原子核を経由するため、それらの個々の性質や、中性子過剰領域での魔法数の変化などの理解が不可欠であり、その解明は核物理の最重要課題の一つである。RIBFとその将来計画によってその解明が飛躍的に進むものと期待される。さらに、恒星内の合成過程では届かないため地球上には存在しないが、ウランよりもずっと重い質量領域に（準）安定な原子核が存在する「安定の島」がある可能性がある。理研では $Z=113$ の発見で知られるように超重元素探索も進めているが、安定の島を調べるには新たな合成方法の開拓が必要であろう。この超重元素の分野は「不安定核物理」分野の一部として議論することにする。

原子核のアイソスピンを大きく変化させた中性子・陽子過剰核（不安定核と称する）において従来の常識を超える現象が見つかったのと同様に、励起エネルギーや角運動量を変化させた原子核には、加速器や検出器の高度化にともなって超変形状態や三軸非対称変形状態、アルファクラスターのボーズ凝縮状態のような従来の常識を超えたさまざまな原子核が発見されつつあり、原子核を支配する新たな対称性や、核構造を理解するための新たな概念の発見などを通して、原子核物理学を深化し発展させることとなろう。こうした研究では、励起状態を従来以上に精密・高感度に分光することがポイントであるため、これを「精密核物理」に含めることとした。「精密核物理」は阪大 RCNP リングサイクロトロンを中心として進展してきた分野でもある。

ストレンジネスを含むハイパー核の研究は、原子核の概念をバリオン多体系へと拡張するとともに、中性子星内部でハイペロンが発生すると考えられる高密度物質の理解に不可欠である。また、高密度核物質では K 中間子が凝縮する可能性もあり、K 中間子が束縛した原子核の研究が待たれる。これらのストレンジネスを含む核物理の研究は日本人が世界をリードしており、J-PARC により特に今後のさらなる発展が期待されている。この分野は「ハイパー核・ストレンジネス核物理」で議論される。

中性子過剰核やハイパー核の研究から、広い密度領域にわたりさまざまな陽子・中性子・ハイペロン比をカバーする核物質の状態方程式を決定することは極めて重要な課題であり、そこから中性子星内部を理解することができる。さらに、低温高密度で予想されるカラー超伝導状態のクォーク物質については、実験による直接的な研究は困難だが、高密度核物質の状態方程式の決定と中性子星の観測結果から、その間接的存在を示すことができよう。QCD に基づく理論研究の進展も期待される。これらは「不安定核物理」「ハイパー核・ストレンジネス核物理」「計算核物理」にまたがる分野である。

原子核の現象や知識、技術を用いて物理法則の基本的な対称性や素粒子物理学を研究する分野も原子核物理学の一部である。中性子や電子（原子）、ミュー粒子の電気双極子モーメント（時間反転対称性）の探索による宇宙の物質・反物質非対称性の理解や、反陽子を用いた CPT 対称性の検証、二重ベータ崩壊によるニュートリノのマヨラナ性の探索とその質量の測定など、物質存在の根本にかかわる研究の多くは原子核物理学の技術や理論に立脚している。こうした分野は「核物理的手法による基礎物理」と呼ぶことにする。

近年、スーパーコンピュータの高速化と計算手法の発展により、格子 QCD シミュレーションや、核力からの第一原理による少数系原子核の厳密計算、従来より大きな模型空間での殻模型などの核構造計算、汎関数法を用いた原子核の構造計算などが大きく進んできた。日本では、次世代大型計算機「京コンピュータ」のプロジェクトに関連して、活発に研究が進んでいる。本レポートは、大型の加速器や実験装置と関連付けて核物理の将来を議論することを念頭においているが、大型コンピュータは大型実験装置と同様に戦略的に導入・使用しなければならないため、「計算核物理」分野として、本レポー

トのサブグループとして取り上げることとした。

以上を簡潔にまとめると、原子核物理学が答えるべき基本的な問いとして以下のよう
なものあげられる。

- クォーク・グルーオン・プラズマ相の性質の理解
- クォークの閉じ込め機構の理解
- ハドロンの質量獲得機構の詳細
- ハドロン（特に励起状態）の構造の理解とエキゾチックハドロンの存否
- バリオン間相互作用（核力）の理解
- ハドロン、とくに核子のクォーク・グルーオン構造やスピンの起源の理解
- 原子核の存在領域の確定と中性子・陽子過剰核をカバーする核構造の理解
- 原子核の様々な変形やクラスター構造などの多様な形態の探索とその理解
- 元素合成の全過程の解明。とくにウランに到る重元素の合成過程の理解
- 安定な超重元素の存否とその合成方法の探索
- 核力から広い範囲の原子核をできるだけ正確に記述する理論手法の確立
- 低密度から高密度、さまざまな中性子・陽子・ハイペロン比の核物質の状態方程式の決定と中性子星の物質の全体的理解
- クォーク物質の存否とその性質
- クォーク多体系の相図の決定

図 1-2 には、以上のように分類した核物理のサブグループ(計算核物理を除く)の研究が、図 1-1 の相図の上でどの位置に対応するかを示した。また、物質の起源・進化の観点で重要な核物理の基本的な謎も書き込んである。

図 1-3 は、上記の研究がそれぞれどのような目標や夢に向かって進んでいくかを模式的にあらわしたものであり、学会の“理工学・夢ロードマップ”として

2011 年 1 月に核物理委員会・核理論委員会で作成・承認したものである。8 つの研究分野におおよそ対応する研究が、国内や国外の研究施設を利用しながら、進展してゆく様

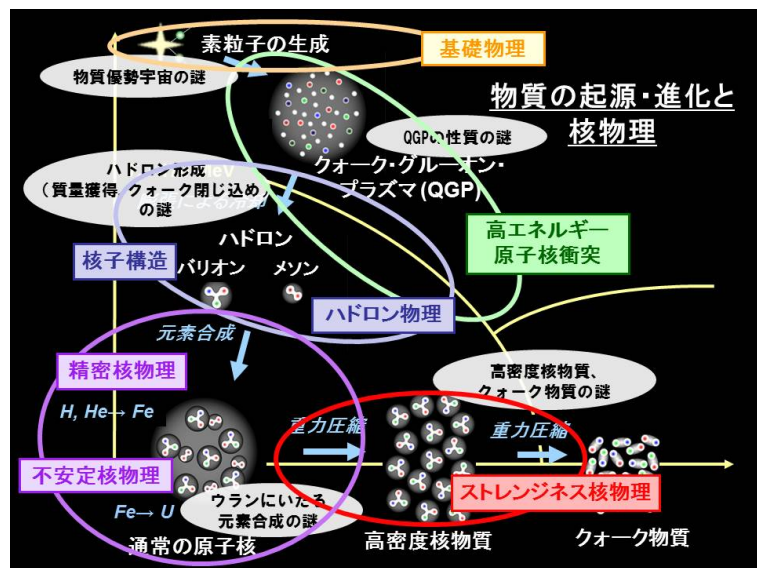


図 1-2: 図 1-1 の相図の中に、物質の起源・進化の観点で重要な核物理の基本的な謎と、核物理の諸分野を示した。

子を示している。また、今回のレポートでは議論していないが、図 1-3 に示されているような核物理の工学的、医学的応用による社会への成果の還元もきわめて重要なテーマであり、われわれ研究者が日ごろ意識すべきことであろう。



図 1-3: 学術会議で作成した「科学・夢ロードマップ 原子核物理学」

1.6. 研究施設

1.6.1. 現在の施設

日本の核物理の研究施設としては、まず KEK・JAEA が共同運営する J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) と理化学研究所 RI Beam Factory (RIBF) の 2 つの世界最大級の施設がある。

J-PARC では 30 GeV の大強度陽子ビームから作られる中間子やミュオン、中性子などの二次粒子ビームによるハドロン物理、ストレンジネス核物理、基礎物理などを中心とした核物理の研究が進められている。J-PARC は素粒子物理や物質・生命科学にもまたがる広範なサイエンスを担っており、核物理は主に原子核素粒子実験施設（ハドロン実験施設）に引き出された連続陽子ビームをもとにした実験を行っている。原子核・素粒子の研究は、KEK によって世界に開かれた共同利用実験として行われている。

理研 RIBF は世界最大の超伝導サイクロトロンを擁する加速器群によりウランまでの

さまざまな重イオンビームを光速の約 70% (345 MeV/核子) まで加速し、多彩な不安定原子核ビームを高強度で生成して、陽子ドリップ線から中性子ドリップ線に至る広範囲の不安定核についてそのエキゾチックな核構造や核反応の研究、爆発的元素合成等に関連した天体核物理について最先端の研究が展開されている。世界では現在、次世代型とよばれる高強度の不安定核ビーム施設が建設されつつあるが、RIBF はその先頭を切って 2007 年に稼働を始めた。RIBF ではまた重イオンの線形加速器により超重元素の合成実験も行われており $Z=113$ の合成などの成果を生み出している。本施設は、理研仁科センターによって共同利用的な運営が行われており、世界的に多くのユーザーを抱える。

また、日本には大学共同利用機関・共同利用拠点である大阪大学核物理研究センター (RCNP) および 2011 年より大学共同利用拠点となった東北大学電子光物理学研究センター (ELPH, 旧東北大学原子核理学研究施設) があり、共同利用実験を行っている。RCNP はリングサイクロトロンによる陽子や軽イオンビームによる精密核物理を中心とした研究を進めつつ、SPRING-8 の LEPS ビームラインで数 GeV の光子ビームによるハドロン実験が行われている。神岡実験室での基礎物理研究も行っている。ELPH は電子ライナックと 1.2 GeV シンクロトロンにより、主に 1 GeV 程度の光子ビームを用いたハドロン実験を行っている。

東京大学原子核科学研究センター (CNS) は、理研との密接な連携のもと全国共同利用を行っている。RIBF 内に設置した実験施設によって不安定核物理や精密核物理、とくに天体核反応に関する研究を行っている。

ほかにも、東北大学サイクロトロン RI センター、JAEA タンデム、筑波大学加速器センター、九州大学でも、中小規模の加速器によって不安定核物理や精密核物理、基礎物理などの研究が行われている。

一方、現在国内に関連する加速器施設がない分野もある。高エネルギー重イオン衝突では、日本人研究者は、実験の可能な施設である米国 BNL の RHIC 加速器と CERN の LHC 加速器において、国際共同研究として研究を推進している。核子構造についても、将来的には J-PARC で研究が提案されているが、現在は RHIC や LHC、さらには CERN や Fermilab の高エネルギーハドロンビームによって研究を進めている。また、それ以外の分野においても、国内の施設のみならず、海外の加速器施設も適宜用いて研究が行われている。よって、将来計画を議論する際には、国内のみならず世界の加速器計画の動向を十分に把握しておかねばならない。

それぞれの施設の概要や将来計画の詳細については、関連する WG の報告で述べられている。

1.6.2. 将来の施設へ

J-PARC は 2010 年に、RIBF は 2007 年に稼働してまだ日が浅く、当面は現施設から多くの成果を出すことも重要である。しかし、J-PARC では加速器ビームの強度

と質の問題や、ビームタイムの不足、ビームラインの本数や実験室スペースの不足が深刻であり、それらの解決がまずきわめて重要と考えられる。特にハドロン施設の拡充が強く要求されている。さらに将来に向けて、偏極陽子や重イオンなどの加速ビームの多様化や、エネルギーアップ、ストレッチャーリング敷設などの次のステップへの発展が議論されようとしている。RIBFについては、周辺施設の整備は進んできているものの、ビームタイムの不足が深刻な状況にあり、早急な解決が必要である。その次の段階としては、重イオン加速器の増強や不安定核の再加速等によってビームの核種とエネルギーを多様化し、ビーム強度を大幅に増大させる RIBF の高度化計画の検討が進んでいる。また、RCNP のリングサイクロトロンや LEPS ビームラインの高度化は、「サブアトミック拠点」として一部予算化され、進行しているところである。

一方、さらに将来については、本レポートの報告をもとに議論し、我々の核物理コミュニティにとって 10~20 年後に必要な大型施設は何なのかを明確にしていく必要がある。多くのワーキンググループでは、必ずしもそのような施設の明確なイメージは示しておらず、現状の施設の高度化による現在の研究の発展の延長線上での将来計画が示されている。そのような着実な考え方は大切だが、我々は何のために原子核物理を研究するのか、本当に原子核物理学が解明すべき謎は何なのか、といったことを明確に意識しながら、必要な施設を具体化していく必要がある。そのような議論のための出発点として、今回のレポートをとらえてほしいと思う。

1.7. 核物理の将来レポートの概観

日本の核物理の将来レポートは、「不安定核物理」「精密核物理」「ハイパー核・ストレンジネス核物理」「ハドロン物理」「高エネルギー重イオン衝突による物理」「核子構造の物理」「核物理的手法による基礎物理」「計算核物理」の 8 ワーキンググループによって、2010 年 11 月より約 1 年半をかけて積み重ねられた議論に基づき、まとめられたものである。分野の分け方は他の方法もあるが、ここでは将来を考える上で鍵となる「施設」にも着目し、以下のような指針により 8 グループとした。

- **不安定核物理** — 不安定核ビームを用いた核子多体系・不安定核の研究に加え、超重元素の物理、宇宙核物理も含めた分野とした。関連施設は理研 RIBF 等
- **精密核物理** — 精密測定を駆使して核子多体系としての原子核を研究する分野とした。また、 γ 線精密核分光も含む。関連施設は RCNP 等
- **ハイパー核・ストレンジネス核物理** — ハイパー核、ストレンジネスの入った原子核を研究する分野。関連施設は J-PARC, J-Lab 等
- **ハドロン物理** — メソン・バリオンをクォーク多体系として QCD (Quantum Chromo Dynamics, 量子色力学) の立場で解析・探求する分野。関連施設は J-PARC, SPring-8/LEPS (RCNP), ELPH 等
- **高エネルギー重イオン衝突による物理** — 高エネルギーの重イオン衝突実験に

より、クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) などの高温高密度状態にある QCD 物質の物理を探求する分野。関連施設は RHIC, CERN/ALICE 等。

- **核子構造の物理** — 核子の内部構造を研究する分野。関連施設は RHIC, CERN/COMPASS, Fermilab/SeaQuest, KEK/Belle, J-PARC 等
- **核物理的手法による基礎物理** — 原子核的手法を駆使して標準理論を超える物理を探求する分野。関連施設は CERN/AD, RCNP, J-PARC, 各大学等
- **計算核物理** — 理論核物理。特にスーパーコンピュータなどの高速計算機を駆使して研究を進める分野。関連施設は「京」等

以上の分野について、まず、それぞれの概観を以下 (1.7.1–1.7.8 章) で述べ、さらに 2.1–2.8 章においては、各グループで議論された内容の詳細をレポートの形でまとめる。なお、2-1–2.8 章ではそれぞれの章が独立にも読めるように構成している。

1.7.1. 不安定核物理

原子核は中性子と陽子という 2 種類のフェルミオンからなる有限量子多体系であり、中性子数と陽子数という 2 つの自由度の上に多彩な秩序・構造を生み出す。現代核物理は、その研究対象を、中性子数と陽子数の組み合わせが限定された安定核から、多様な中性子数・陽子数比をもつ不安定核へと飛躍的に広げることによって、核物理の新パラダイムの構築が進みつつある。広義の不安定核物理は、重い原子核の極限にあたる超重元素の物理を含む。さらに不安定核構造や反応が大きな役割を果たす宇宙核物理分野も含め、2.1 章で本分野の将来について詳述する。

最近の進展

不安定核物理は、入射核破砕法による生成技術が確立した 1990 年代以降、理研、GSI (ドイツ)、GANIL (フランス)、MSU (米) の 4 研究所が競ってその研究を進めてきた。このなかで、魔法数の消失現象や新魔法数が軽い中性子過剰核に発見され、殻構造は中性子過剰度とともに進化 (Shell Evolution) していくことが、これまでの常識を覆して定説となりつつある。中性子ハローや中性子スキンなどの特異構造も明らかになり、そのダイナミクス (反応の特異性) の研究も進んだ。中性子過剰束縛極限 (中性子ドリップライン) の実験的確認は現在でも非常に困難であるが、ようやく酸素 ($Z=8$) まで到達し、Mg ($Z=12$) あたりまではドリップラインへの到達が見えてきた。ドリップライン近傍核は中性子・陽子の非対称度が特に大きく、弱束縛系であることから、新しい物理の展開が期待されている。超重元素は広義の不安定核ととらえられる。2004 年、理研では 113 番元素の合成に成功した。一方、ロシアの Dubna ではホット核融合法により 117 番元素の合成に成功している (ただし、この手法では原子番号の特定に不定性が残る)。天体内で起こっている元素合成プロセスの解明でも不安定核の研究は大きく貢献してきた。以上のように、ここ 20 年程で不安定核物理は核物理の主要分野の一つとなり、大きく進展した。

今後の展望

従来の不安定核の研究は、安定線より ± 10 個程度までの中性子過剰/陽子過剰の領域に主な研究対象が限られており、中性子側のドリップラインはようやく酸素に到達できたところである。今後はより重い領域、より中性子過剰（陽子過剰）な領域の研究が進展すると考えられる。2007年には、理研に世界最大の超伝導サイクロトロン SRC が完成し、第三代となる不安定核生成施設 RIBF（理研 RI ビームファクトリー）が本格稼働し始め、世界の拠点研究所となった。現在、同様の第三代不安定核ビーム施設の建設が、GANIL (SPIRAL2), GSI (FAIR), MSU (FRIB)など世界的に進められており、この分野の急速な進展が期待される。今後数年に限ってみても RIBF において安定線から遠く離れた二重閉殻核 ^{78}Ni ($Z=28, N=50$) や、 ^{100}Sn ($Z=50, N=50$) の近傍核の研究が進展すると期待されている。以下に、今後解決すべき不安定核分野の基本問題を上げる。

- 存在限界と基礎量：原子核の存在限界（中性子・陽子過剰、超重元素）はどこにあるのか。超重元素の安定の島は存在するのか。
- 一粒子運動：殻構造は安定線から離れた領域でも原子核の基本構造たりうるのか。
- n 核子相関：核子相関は不安定核に新しい相をもたらすのか。
- 変形：自発的対称性の破れは原子核にどのような形を生み出すのか。
- 状態方程式：中性子物質は硬いのか、柔らかいのか。
- 宇宙核物理：我々の世界を形作る元素はどのようにして作られたのか。

こうした問題に具体的にどう取り組むのかが不安定核物理の課題であり、2.1 章ではそれを詳細に論じる。さらに近未来の RIBF, RCNP, CYRIC, JAEA についても論じる。

1.7.2. 精密核物理

中性子と陽子の多体系である原子核を精密測定することにより、核物理の本質を探究する分野を「精密核物理」とし、その現状と将来を 2.2 章で議論する。大阪大学核物理研究センター（RCNP）における高品質軽イオンビームによる原子核の高励起状態の研究や、高分解能・高立体角のゲルマニウム γ 線検出器による精密核分光をどう発展させ、核物理の未解決の問題に挑むかを論ずる。不安定核分野のワーキンググループと相補的であり、原子核の新パラダイム構築という観点では不安定核と目標が一致する。

最近の進展

原子核を理解するためには、その相互作用である核力の理解がまずは重要である。最も基本的な 2 体力については、1990 年代に実験データを高精度で再現する現実的核力が完成した。最近の大きな成果としては 3 体力の確立が挙げられ、3 体力効果を取りこむことによる核構造計算の精密化などの新たな潮流も生まれている。

原子核は有限多体系であり、その多くは球形ではない。多様な変形の存在が、高分解能 γ 線検出器による回転準位の測定などにより次々と明らかにされている。また、原子核は離散集合のダイナミクスが顕著に現れる多体系であり、高分解能の非弾性散乱によ

り、軽い安定核に出現する α クラスター状態の理解も進みつつある。

多核子系の極限が核物質であり、中性子星などの天体において実現していると考えられる。核物質の状態方程式 (Equation of State, EOS) の主要項である核物質の硬さ (非圧縮率 K_{∞}) は RCNP における α 非弾性散乱の系統的研究により精密に求められた ($K_{\infty} = 240 \pm 20$ MeV)。さらに、中性子星の場合に重要な非対称核物質 ($N > Z$) の非圧縮率の精度も徐々に向上しつつある ($K_{\tau} = -550 \pm 100$ MeV)。

今後の展望

精密核物理では、「核力の理解」「極限原子核の物性」「原子核の多様な相の起源」「ハドロン相の状態方程式の理解」「直接反応の真の理解」という 5 テーマを重点テーマとする。

「核力の理解」: QCD に基づく核力の真の理解を目指して、3 体力の短距離成分およびアイソスピン依存性や、媒質・密度による核力の変容などについて、その解明に取り組む。

「極限原子核の物性」: 変形と高スピンの極限を目指し、いまだ発見されていないハイパー変形やバナナ型変形のようなエキゾチック変形の探索を行い、変形進化のダイナミクスを解明する。さらには高速回転の極限において変形から核分裂に至るメカニズムを解明する。

「原子核の多様な相の起源」: 新たなクラスター凝縮状態を探索し、その特徴とされる核半径の増大を直接的に測定する。また、多様な相の起源である対相関やテンソル相関などの強い核子間相関を調べる。さらに、不安定核の巨大共鳴状態を探索する。

「ハドロン相の状態方程式の理解」: 不安定核の巨大共鳴の探索などを行い、中性子過剰核物質の EOS を決定する。一方で、原子核の励起状態に対応する、有限温度・有限密度における核物質の EOS の導出を目指す。これは、QCD 有効モデルを検証するためにも有用である。

「直接反応の真の理解」: 直接反応過程のうち、これまで定量的予言が困難であった多核子移行反応など比較的複雑な過程を定量的に理解する。これは上述の核子間相関などの新奇な構造を発見し、それを定量的に理解する上でも重要である。

以上の物理を推進する上で重要な施設計画が高強度・超高品質ビーム施設であり、RCNP の将来計画として提案している。その基幹装置の一つとして、励起状態の精密測定が可能な対象核種を飛躍的に増やす長寿命不安定核標的生成装置 (BRILLIANT) がある。これにより、巨大共鳴などの核構造のアイソスピン依存性や、天体核反応に重要な励起状態の高分解能測定などについて研究対象のフィールドを大幅に拡張することを目指している。その他、必要な加速器や高分解能検出器なども合わせ、2.2 章で本分野の現状と将来について詳述する。

1.7.3. ハイパー核・ストレンジネス核物理

ハイパー核・ストレンジネス核物理は、通常の核子をもつ u, d クォークに加え、 s クォーク (ストレンジネス) を含むクォーク・ハドロン多体系を主たる研究対象とする研究分野である。その目的の一つは、ストレンジネスをツールとして核物理の基本問題に挑むこと、すなわち、パウリの排他律の制約を受けないハイペロン (ストレンジネスを含む核子) を原子核深部のプローブとして、核媒質中でのハドロン の性質変化の問題にアプローチすることである。もう一つの目的は核物理を $SU(3)_f$ の世界に拡張し (f : フレーバー)、それによって生まれる新たなクォーク・ハドロン多体系を調べることである。 s クォークを含むハドロン多体系は $SU(3)_f$ 対称性で取り扱える程度には軽く、その振る舞いは QCD のダイナミクスを強く反映する。したがって、本分野の研究は QCD と、豊富なデータの蓄積を有する低エネルギー核物理との橋渡しの役割も果たすと期待される。

最近の進展

本分野は、KEK-PS や JLab を中心としたハイペロンやハイパー核の実験により、最近大きく進展した。二体間力 (YN 力、ここで Y はハイペロン) の導出を目的としたハイペロンの散乱実験では、シンチレーションアクティブ標的を用いて、散乱画像を記録する手法が開発され、 $\Sigma^+ p, \Sigma^- p$ の散乱事象に対して高運動量領域での散乱断面積が初めて導出された。中間子ビームによるハイパー核反応分光では、1990 年代に KEK-PS の超伝導スペクトロメータ SKS を用いた (π, K^+) 反応の高分解能実験が可能となり、 Λ 粒子の一粒軌道描像が確立され、 Λ 粒子のポテンシャルの深さが確定した。JLab では高分解能 K 中間子スペクトロメータが導入され、電子ビームを用いたハイパー核の生成とその分光実験が本格的に行われるようになった。ここでは軽い核から中重核までの広範囲のハイパー核が約 500 keV という分解能で分光され、YN 相互作用における電荷対称性の破れ (Charge Symmetry Breaking, CSB) や、中重ハイパー核のコア励起状態に関する新たな知見が得られつつある。ハイパー核 γ 分光もその進展がめざましい。1998 年にハイパー核分光用 Ge 検出器群 Hyperball が建設され、KEK-PS と BNL-AGS での実験から、 Λ に起因する LS 力が小さいことなど ΛN スピン依存力が明らかとなった。また、 ${}^7_{\Lambda}\text{Li}$ ハイパー核で $B(E2)$ (電気四重極換算遷移確率) が初めて測定され、コア核が Λ によって 19% 程度縮んでおり、 Λ 粒子が原子核のバルクな性質を変容させることがわかった。 $S=-2$ のダブルハイパー核については、原子核乾板やシンチレーションファイバーなどを用いた新しい検出器技術が開発され、 $\Lambda\Lambda$ ハイパー核 (${}^6_{\Lambda\Lambda}\text{He}$: NAGARA 事象) が世界で初めて明確に同定されて、ここから $\Lambda\Lambda$ 相互作用が約 1 MeV の弱い引力であることがわかった。この発見は $\Lambda\Lambda$ より軽い H ダイバリオン ($uuddss$ 系) の存在を明確に否定した。

今後の展望

以上のように KEK, BNL, JLab を中心とした実験により最近の進展はめざましく、今

後 J-PARC や GSI, JLab などでの実験により本分野が飛躍的に進展すると期待されている。

今後解決すべきハイパー核・ストレンジネス核物理分野の基本問題を以下にあげる。

(カッコ内は今後行うべき研究課題)

- バリオン間の相互作用は理解できるか？
(YN 散乱実験 (偏極観測量測定を含む)、 $S=-2$, -3 系の研究、バリオン間の弱い相互作用等)
- 多体系におけるハドロンの振る舞いは裸のハドロンとどのように違うのか？
(ハイペロンの入った 3 体力、荷電対称性の破れ、媒質中でのハドロンの性質、中性子過剰ハイパー核等)
- 高密度核物質の性質は？
($S=-1$, -2 ハイペロンの相互作用、 $S=-2$, -3 系)

J-PARC の始動によって、本分野の進展が期待されており、 $S=-1$ のみならず $S=-2$ のハイパー核の生成とその理解などが大きく進展し、 $SU(3)_f$ の物理や中性子星の理解にも繋がる成果が出てくるものと期待される。さらに長期的には $S=-3$ のハイパー核もターゲットとなる。2.3 章では特にこの達成に必要な J-PARC のアップグレードも含め本分野の将来について詳述する。

1.7.4. ハドロン物理

ハドロン物理は強い相互作用で結合したメソン・バリオン (すなわちハドロン) をクォーク多体系として QCD の立場で解析する分野である。クォーク・グルーオンを支配する法則 QCD のもたらす現象はエネルギースケールによって大きく様相が変わり、高エネルギーにおいては漸近的自由度によって現象を摂動的に取り扱えるが、低エネルギーにおいては結合定数が大きくなるために非摂動的な現象が現れる。現代ハドロン物理の主要テーマは、この低エネルギーの非摂動的な現象の理解である。具体的には、QCD に付随する 3 つの対称性 (カラー、カイラル、フレーバー) のそれぞれについて「カラーの閉じ込め機構の解明」「カイラル対称性の自発的破れに伴うハドロンの質量獲得機構の解明」「ストレンジネス、チャーム、ボトムに至るフレーバーフロンティアの拡張」という 3 つの問題に取り組む。

最近の進展

「カラーの閉じ込めとハドロンの階層構造の探求」: 2003 年の SPring-8/LEPS におけるペンタクォークの発見はこのテーマの大きなハイライトであった。これが契機となり、その後多くの検証実験が世界中で行われたが、現在でもその存否は決着していない。一方、低エネルギースケールにおける QCD の検証に重要な役割を果たすバリオン共鳴は、光子ビーム、パイオンビームなどの実験によりデータの集積が急速に進んできている。

「ハドロンの質量獲得機構の解明」: GSI では負電荷のパイ中間子を原子核に束縛さ

せた π 中間子原子の生成に成功し、その精密核分光が進んでいる。その結果、 π -原子核間の強い相互作用に強い制限が与えられた。理論計算ではこれをカイラル対称性と関連付け、その破れによる質量獲得のシナリオを裏づける結果が得られている。一方、KEK-PS では核媒質中のベクトル中間子の質量が 1997~2002 年に測定され、その質量スペクトルの低エネルギー側に異常が観測され注目されている。これについては J-Lab で否定的なデータも出ており、今後の精密実験による決着が待たれるところである。

「フレーバーフロンティアの拡張」：チャームクォーク、ボトムクォークを含むハドロンの研究が加速度的に進展している。Belle 等でこうした共鳴状態が次々と観測され、その中には質量がクォーク模型の予想からずれているものも見つかっており、その解明が待たれる。

今後の展開

「カラーの閉じ込めとハドロンの階層構造の探求」：SPring-8/LEPS で得られた中間子生成反応については、今後、生成過程、崩壊過程を精査し、構成子クォークに関する情報を引き出す必要がある。

「ハドロן質量獲得機構の探求」：パイ中間子原子の分光研究については、理研 RIBF における予備実験で GSI 実験の 10 倍の生成能力が確認されており、数年以内に高統計・高精度化が実現する見込みである。これにより、 π 中間子—原子核相互作用の精密決定、カイラル凝縮の大きさの密度依存性についての研究も大きく進展する。原子核中のベクトル中間子の質量については、有限密度核媒質中での質量スペクトルを確定させることが目標である。その速度依存性だけでなく、核標的サイズの依存性、衝突係数依存性も調べ、質量分布の核媒質中での変化の有無、さらにはそのメカニズムを明らかにする。J-PARC のハドロןホールでこうした実験を行う予定であるが、「高運動量ビームライン」の建設が不可欠である。

さらに、長期的には

- ストレンジネス $S=-2,-3$ を持つバリオン共鳴状態
- 原子核—基底状態バリオンの束縛系の高分解能スペクトロスコピー
- チャームクォークを含むバリオン共鳴の分光
- チャームクォークを含むメソン原子核相互作用の研究（チャームメソン原子核束縛状態）

といった、研究がまだ進んでいないテーマに重点的に取り組む。そのためには J-PARC, RIBF, 大強度光子ビーム (SPring-8) などを高度化する必要がある。こうした点も含め本分野の将来を 2.4 章で詳述する。

1.7.5. 高エネルギー重イオン衝突による物理

宇宙初期の高密度・高温状態で物質はどのような状態にあったのだろうか。高エネルギー重イオン衝突は、宇宙初期にのみ存在するような高温高密度状態にある QCD 物質

を生成できる唯一の実験手法である。最近、QGP (Quark Gluon Plasma) が実験的に確認され、精密科学としての QGP 科学がスタートしつつある。本ワーキンググループでは、

- 初期宇宙での極限物質の様相とその進化、物質創成の謎の解明
- 星の終焉での極限物質の様相、高密度 QCD 多体系の相構造の解明
- QCD 真空の構造、ハドロン質量の発現構造の解明
- 高強度ゲージ場と非平衡 QCD のダイナミクスの解明

の4つの夢を掲げる。具体的には「QGP 物性の精密研究、熱平衡化機構の研究」「有限密度 QCD 相構造の研究」「カイラル対称性の回復現象の研究」のテーマについて、それぞれの実験研究を推進する。

最近の進展

「QGP 物性の精密研究、熱平衡化機構の研究」：最近の大きな進展は、RHIC や LHC での研究を通じて、QGP 生成の確証が得られたことである。一連の研究により、エネルギー密度、運動学的凍結温度、化学的凍結温度が導出された。また、高横運動量パートンや重クォークの生成といったハード過程がプローブとして利用できるようになり、グルーオン密度、パートン阻止能、輸送係数といった力学量を議論できるようになった。初期到達温度や QGP の比粘性が導出され、後者からは生成された物質が関連の強い液体的なものであることが示唆されている。

「有限温度 QCD 相構造の研究」：極限状況下におけるハドロン多体系に関する重要な研究テーマの一つが有限温度・密度における QCD 相図の決定である。RHIC、CERN-SPS の実験によって、フリーズアウト特性、最高バリオン密度、ストレンジネス生成、フロアの振舞、揺らぎの測定、高次モーメントの測定などが行われた。

「カイラル対称性の回復現象の研究」：これまで、重イオン衝突等で低質量ベクトル中間子の性質変化を直接的に見る試みが行われてきた。しかし、いまだ統一的な見解が得られていない状況にあり、今後の研究の進展が待たれている。

今後の展望

「QGP 物性の精密研究、熱平衡化機構の研究」：これまでの研究は QGP の確立に重点が置かれていたが、今後は QGP 物性の精密研究へと軸足を移していく。そのため、様々なシステムでの高エネルギー重イオン衝突実験を遂行する。多くの測定量を異なる衝突条件下で集め、時空発展のダイナミクスを完成させ、物性量の温度や密度依存性を導出する。また衝突初期条件の定量的評価、衝突直後のダイナミクスの理解に向けて、高ラピディティでの粒子生成を測定する。この目標達成のため、現在の RHIC/LHC での研究を包括的に推進するとともに、s-PHENIX への展開、LHC-ALICE 実験増強計画の推進、さらには post LHC への展開など、アップグレードを進める。

「有限多体系 QCD 物質の相構造の研究」：RHIC, FAIR, J-PARC 加速器で実現される高・中間エネルギーの重イオン衝突を通じて、高バリオン密度状態を生成し、様々な有限密度をもつ QCD 物質相を生成し、その相構造の系統的な理解を目指す。

「カイラル対称性の回復現象の研究」：重イオン衝突を利用してカイラル対称性回復のシグナルを捉えるのは、大きな粒子多重度や複雑な動的時空発展のため、容易なことではない。そこで検出器のアップグレードや新たな解析手法の開発が求められている。また、低質量ベクトル中間子・レプトン対以外のプローブの測定も必要である。さらにカイラル磁気効果も有力である。RHIC/LHC での高温領域、FAIR/J-PARC での高密度領域での研究を順次進めて行く。

2.5 章では以上の点も含め本分野の将来について詳述する。

1.7.6. 核子構造の物理

核子は原子核の基本構成要素であり、本分野の目的はその内部構造を理解することである。実験手法としては、核子の高エネルギー散乱・衝突を用い、強い相互作用の基礎理論である QCD によって核子の物理的本質を理解することを目指している。低エネルギーでは核子は構成子クォーク画像で理解されるが、高エネルギー衝突実験から、核子の構造はより多様な内部構造を示し、特にグルーオンが大きな役割を果たすことなどが明らかになっている。今後は、まだ達成されていない核子スピン $1/2$ の起源の理解や、クォーク閉じ込めのメカニズム、パートン分布の 3 次元的理解などを目指す。

最近の進展

核子構造は、高エネルギー電子と核子との DIS (Deep Inelastic Scattering, 深部非弾性散乱) によって調べられてきた。これにより、核子のクォーク・パートン模型が確立し、非偏極では QCD で核子構造の大枠が説明できることがわかった。 x (Bjorken のスケールリングパラメータ) が大きいところ ($x > 0.1$) では核子の運動量の大半を価クォークが担っており、一方 x の小さいところでは海クォークやグルーオン密度が極めて高くなっている。その後も多くの DIS 実験によって内部構造を記述する PDF (Parton Distribution Functions) の精密化が進められるとともに、Semi Inclusive DIS (SIDIS) 実験の結果からフレーバーを分離した PDF の精密化が行われている。一方、偏極を含む核子の理解としては、1988 年に CERN の EMC グループによるミュオン深非弾性散乱の実験により、核子スピン $1/2$ が核子中のクォークのスピンだけでは説明できないことがわかり (スピントライシス)、以来、その解明に向けた研究が進んできた。最近、偏極陽子ビームや偏極陽子標的を用いた陽子・陽子散乱のデータが RHIC を中心に蓄積され、さらに SIDIS のメソン生成過程の実験などから、グルーオンの核子スピンへの寄与が明らかになりつつある。残りのクォーク・グルーオンの軌道角運動量による核子スピンへの寄与の解明は、今後の大きな課題となっている。また、核子構造に関する最近の重要課題の一つは横偏極現象の解明である。これは FNAL/RHIC の横偏極核子・核子の実験や、CERN/DESY の電子・核子衝突実験で観測された 30% におよぶ大きなシングルスピン非対称 (Single Spin Asymmetry: SSA) をどう理解するかという問題である。SSA は従来の pQCD やパートン模型ではほとんどゼロになるもので、その本格的な解明はこれからである。これ

らの問題に答えるべく、核子の三次元構造の記述に基づく理解が進められている。

今後の展望

核子構造の研究は高エネルギー（偏極）陽子ビームや電子、ミューオンビームを用いて、世界各国で行われてきた。今後は 1) 横偏極現象の解明、2) 核子の 3 次元構造と軌道角運動量の核子スピンへの寄与、3) PDF 測定の精密化、などを進めていく。1) 横偏極現象の解明は今後 10 年程度で進める。偏極陽子・陽子（反陽子）衝突での高精度な Drell-Yan 過程 ($qq^{\text{bar}} \rightarrow l\bar{l}$) の測定などを進めていく。2) 核子の 3 次元構造と軌道角運動量の寄与については、今後 20 年程度（～2030 年）をかけて進めていく。核子構造は「互いに独立なパートンからなる核子」という描像を超えていることが明らかになりつつあり「パートンの量子多体相関」を理解する必要がある。そのために核子の構造を 3 次元で精密に記述する GPD 関数の決定を目指す。GPD 関数は、DVCS (Deeply Virtual Compton Scattering) 過程、HEMP (Hard Exclusive Meson Production) 過程により測定する。2015 年以降 CERN/COMPASS 実験による DVCS/HEMP 実験、さらに 2020 年以降は EIC (LHeC) における衝突型加速器による実験を行う。3) PDF 測定の精密化では、より広い x 領域での構造関数を測定する。以上の実験計画も含め、本分野の将来について 2.6 章で詳述する。

1.7.7. 核物理的手法による基礎物理

本分野は、核物理の手法を用いて、現代物理学の根幹を形成している「素粒子標準理論」を超える物理の探索と理解を目標としている。それによって、宇宙はいかにして形成・進化してきたのかを解明する。具体的には、i) CPT 対称性はどこまで厳密に保たれているか、ii) CP 対称性の破れの起源は何か、基本相互作用の時間反転対称性は測定できるのか、iii) レプトンフレーバは破れているのか、大きなレプトン混合は存在するのか、iv) ニュートリノはマヨラナ粒子か、その質量構造はどうなっているか、v) 暗黒物質の正体は何か、などの基本的問いに答えることを目指す。そのため、それぞれについて、1) 反陽子の精密分光、2) EDM (Electric Dipole Moment 永久電気双極子) の測定、3) ミューオン異常磁気能率、ミューオン EDM、ミューオニウム微細構造分裂 (HFS) の精密測定、4) ニュートリノレス二重 β 崩壊、5) 暗黒物質探索等の研究を推進する。

最近の進展

1) 反陽子の精密分光による CPT 対称性検証実験：主要テーマは「反水素原子のレーザー/マイクロ波高精度分光」「反水素原子の重力加速度の測定」「反陽子ヘリウム原子の高精度レーザー分光」である。物質と反物質の質量、電荷、磁気モーメントを高い精度で比較することによって CPT 定理を検証するという目的を持っている。最近、CERN の反陽子減速器 (AD) で供給される反陽子を用い、高度なレーザー技術を駆使することによって、反陽子/電子質量比を 10 桁の精度で測定することに成功した。また、反水素原子を磁気トラップ中に 1000 秒以上捕獲することにも成功している。

- 2) EDM の測定: EDM は時間反転対称性を調べるプローブである。中性子の EDM は、フランス ILL の原子炉中性子を用いた実験により $2.9 \times 10^{-26} \text{ e cm}$ の上限値が得られている。この測定には蓄積された超冷中性子 (UCN) を用いる手法がとられており、その技術について世界的な競争が起こっている。原子の EDM については Princeton 大、Washington 大グループの ^{199}Hg の実験による $3.1 \times 10^{-29} \text{ e cm}$ が現在の上限値となっている。これも世界各国で激しい競争となっているが、東工大グループはスピンメーザーを用いた ^{129}Xe の超高精度 EDM 測定に向け、世界記録を塗り替えるべく準備を進めている。
- 3) ミューオンの異常磁気能率・ミューオン EDM・ミューオニウム微細構造分裂の精密測定: ミューオンを利用して、標準模型で極めて高精度で予言される基礎物理量を精密測定することにより、標準理論を超える物理の探索、物質の起源・時空の対称性の解明を目指している。米国ブルックヘブン研究所で行われたミューオン $g-2$ の測定は標準模型の予想より 3.4σ ずれており、標準理論を超える現象を示唆するものとして注目されている。この追試が待たれている。
- 4) ニュートリノレス二重 β 崩壊実験: 本研究の目的はニュートリノがマヨラナ粒子であるか否かを検証することである。ニュートリノがマヨラナ粒子となればレプトン数が保存しないことになり、物質・反物質の非対称性を解くシナリオがレプトジェネシスである可能性が出てくる。また、ニュートリノレス二重 β 崩壊の寿命はニュートリノの質量を与える。現在 100 meV の感度での実験が国内外で進められている。日本では大阪大学の CANDLES 実験や、東北大学の KamLAND-ZEN 実験が行われていて、今後さらに感度の高い実験が進められる予定である。
- 5) 暗黒物質の探索: 暗黒物質は宇宙の全質量/エネルギーの約 23% を占めると考えられているが未だにその正体が判明していない。有力なものは WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles) や axion である。WIMPs の探索では、WIMPs との弾性・非弾性散乱による検出器中の原子核の反跳信号を検出する。国内では液体キセノンを標的原子核とした東京大学の XMASS 実験が神岡鉱山内に建設され、まもなく測定が開始される。方向感度を持つ検出器としてフッ素化合物を用いた京大の NEWAGE 実験も準備を進めている。axion 探索についても検出器の R&D が進みつつある。

今後の展望

- 1) 反陽子の精密分光による CPT 対称性検証実験: CERN/AD に新型減速リング ELENA が 2011~2016 年をめどに増設される予定で、現在の約 100 倍の反水素原子が生成可能となる。反陽子・電子質量比で 2 桁以上の精度向上、反水素原子の超微細構造の測定、反水素原子の高効率での閉じ込めなどを実現させ、標準理論を超える物理の探索を行う。
- 2) EDM の測定: 「中性子 EDM»: 超冷中性子 (UCN) 密度の向上により 10 年後には 10^{-27} e cm の精度に到達すると期待される。「原子 EDM»: ^{129}Xe , ^{199}Hg などの原子でも精密

測定が期待される。0.1 pG の低磁場に抑えた環境の構築、高感度磁力計の開発によって 10 年後には 10^{-30} e cm 台の測定感度が実現され、超対称性模型などへの厳しい制限がかけられると期待される。「常磁性原子（電子）の EDM」：東北大サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター（CYRIC）で ^{210}Fr を使った EDM 探索を進めている。20 年後には電子、原子核双方の研究が進み原子 EDM の起源の詳細が明らかになると期待される。

3) ミューオン：BNL、FNAL、J-PARC で $g-2$ を測定する実験が計画されている。J-PARC では超冷ミューオンを用いて $g-2$ が 0.1ppm で測定される見込みである。さらにミューオンの EDM 測定や、ミューオニウムの HFS の精密測定なども行い、標準理論を超える物理を探求する。

4) ニュートリノレス 2 重 β 崩壊実験：大幅な感度の向上をめざし、大深度地下での実験が進められている。日本では神岡鉱山を中心に阪大と東北大のグループが進めている。数年以内に 100 meV の感度（縮退領域）まで進む可能性があり、10 年程かけて 30~50 meV（順階層領域）の感度まで進める予定である。ここでは 2 重 β 崩壊をする同位体 ^{48}Ca , ^{150}Nd を大量に用意する必要があり、その濃縮法の開発などを進める。

5) 暗黒物質：WIMPs/axion について、検出器の大型化、S/N 比の向上を進める。

以上のように、核物理的手法を駆使し、それぞれのテーマについて精度を高め、標準理論を超えた物理を探求する。2.7 章ではそれぞれのテーマについて、その現状と将来を詳述する。

1.7.8. 計算核物理

原子核は強い相互作用によって核子が互いに結合した有限量子多体系である。核物理の理論研究はクォーク・グルーオンの力学を直接扱うものから少数核子多体系、安定核での魔法数の出現、クラスター物理、不安定核構造、高密度核物質（中性子星）、ストレンジネスを含む系など、強い相互作用にまつわる多様な物理現象を各階層に応じて多様な手法を駆使して進められている。近年のコンピュータの急速な発展と新しい計算アルゴリズムの開拓などに伴い、理論の精密化がおこなわれ、分野をまたいだ研究も活発に行われつつある。ここでは理論核物理を、高速計算機を駆使して研究を進める分野としてレポートにまとめる。こうした計算核物理の進むべき重要な方向の一つは、各階層をより密接にかつ定量的に紡いでいくことにより、QCD を基礎理論とした核子および核子多体系の理解を行うことである。すでに具体的な活動を開始した計算基礎科学連携拠点、HPCI (High Performance Computing Infrastructure) の戦略分野などの紹介も交えて 2.8 章で詳述する。

最近の進展

「クォーク・グルーオン多体系」：格子 QCD によるハドロン構造の計算が急速に進みつつある。最近、格子 QCD 計算によって、擬スカラー中間子、ベクトル中間子、バ

リオン 8 重項、10 重項などのハドロンの基底状態の質量が数%の精度で再現できるようになった。さらには核力ポテンシャルを引き出すことにも成功している。一方、格子 QCD 計算は高温状態における QCD 物性を導出するのにも成功しており、その解析法は高エネルギー重イオン衝突やそこで調べられる QGP の性質を調べる上で不可欠なツールとなっている。

「核子多体系」：核子多体系の第一原理計算については現実的核力（核子核子間力）をもとにした第一原理計算（アブイニシオ計算）がここ 10 年で大きく進歩し、質量数 12 程度までの原子核の基底状態が再現できるようになった。核力の完全理解にはまだ至っていないが、実験を再現する現実的 2 体力の精密化とそれに基づく多体計算、3 体力の計算なども進みつつある。クラスター模型の計算では AMD、ユニタリー相関演算子法などの計算が進歩し中性子過剰核のクラスター構造などが明らかになりつつある。中性子過剰核の反応の記述ではしばしば連続状態を扱う必要があるが、九州大学を中心に開発された CDCC（連続状態離散化チャネル結合法）が実験結果の解析に大きく貢献した。質量数 20 を超えるような重い原子核の構造については第一原理計算が未だ不可能であるが、殻模型と密度汎関数法による多体計算が最近大きく進展し、不安定核構造の計算に応用された。殻模型ではモンテカルロ殻模型法により直接対角化の限界を超えた計算がなされており、これは HPCI の戦略分野のひとつとして活動がすでに始まっている。一方、密度汎関数法を用いると原子核を包括的かつ定量的に記述することが可能であり、重い不安定核までを含めた広範囲の原子核の構造が計算できるようになる。現在のところ全核種の質量を平均 1 MeV 以下の誤差で再現する汎関数が報告されている。時間依存密度汎関数理論に基づく線形応答計算はここ数年でもっとも大きく進んだ研究分野のひとつで、大規模並列計算によって系統的な光吸収断面積の計算が進行中である。天体核物理についても、超新星爆発の計算などが進んでいるが未だに爆発メカニズムの解明にはいたっていない。以上のように理論核物理は計算コード・大型計算機の発展もあって大きく進展している。

今後の展望

近い将来（5~10 年）については、京コンピュータ等の次世代大型コンピュータも駆使し、「軽い原子核がクォーク・グルーオンの力学からいかにして創られるか」「原子核の基底状態および励起状態の第一原理計算」「高温・高密度 QCD の相構造・状態方程式の確立」「多次元シミュレーションによる爆発的天体現象」という原子核・ハドロン・天体核物理分野の最重要課題に取り組む。

さらに長期的には以下の課題に取り組む。すなわち、クォーク・グルーオン多体系に関しては、格子 QCD によってハドロン・核子、核子多体系（ハイパー核を含む原子核、エキゾチックハドロン）を理解することを目指す。ハドロン構造の精密化（格子 QCD による核子の静的な諸性質の再現）、格子 QCD による核子多体系の理解、格子 QCD によるエキゾチックハドロン・原子核の予言（さらに、その予言に基づいて実験での探索

を促す)、極限状態での QCD 物性などがそのプログラムに含まれる。通常の原子核については、軽い核の核反応の第一原理計算、核子以外の自由度および連続状態を考慮した軽い核の第一原理計算、クラスター状態とシェル状態の統一的理解、さらには核反応理論の融合、閉殻を仮定しない殻模型の適用領域の拡張、殻模型の精密化、核分裂等の大振幅集団運動の微視的記述等が解決すべき課題となる。天体核物理については、核力をもとにした計算から高密度天体・高エネルギーの爆発現象を理解すること、爆発的現象における重元素の起源の解明などが課題になる。こうした取り組むべき課題について 2.8 章において詳述する。