

重イオン物理学

- 原子核科学研究センターの目指すもの -

センター長
下浦 享



自然界に存在する物質はどのように生まれどのように進化してきたのでしょうか。この自然科学の基本的な課題へのとりくみとして、わたしたちは原子核および極微世界の階層性を要とした研究を推進しています。

自然界の物質質量の大部分を担っている原子核は、核力が支配する量子複合系です。天然に存在する原子核は、陽子と中性子の数がバランスして静的な秩序が保たれた極低温状態にあります。これらの原子核は宇宙の始めから極低温のまま存在したわけではありません。宇宙における活発な核反応過程により物質は進化したと考えられていますが、それを特徴づけるさまざまな自由度は、地上にある原子核では凍りついており、本質が隠されています。加速器を用いてさまざまな重イオン（重い原子核）同士を衝突させると、この凍りついた自由度を解放することができます。原子核科学研究センター（CNS）では、原子核を特徴づける自由度と背後にある階層性と対称性に着目し、特徴的な量子状態や宇宙の始まりや元素創成の過程を重イオン反応により生成し、それらを分析するさまざまな手法を開発しています。わたしたちは、これらの手法を駆使して極微世界の本質を解明し、新しい物質像を構築することを目指しています。このような重イオン科学の研究を推進する重要な鍵の一つとして、RI ビームがあります。「RI」とは稀少（レア）な同位元素を意味し、その大部分は短寿命のため、人工的につくります。1990年代に、自然界にある原子核同士をぶつけるなどしてRI ビームを生成する技術が開発されました。大型重イオン加速器と大強度2次ビームラインで構成される理研RI ビームファクトリー（RIBF）は、国際的に最高性能のRI ビームを供給しています。CNSはRIBFに様々な先端装置を設置し、国内外研究者と共に実験を推進しています。また高エネルギー重イオン衝突実験が、米国ブルックヘブン国立研究所やジュネーブにあるCERNにおいて、国際共同研究により行われています。これらの最先端研究とともに、CNSでは、物理学専攻の協力講座として大学院教育や国際サマースクール等を実施し、重イオン科学の次代を担う若手人材の育成をはかっています。

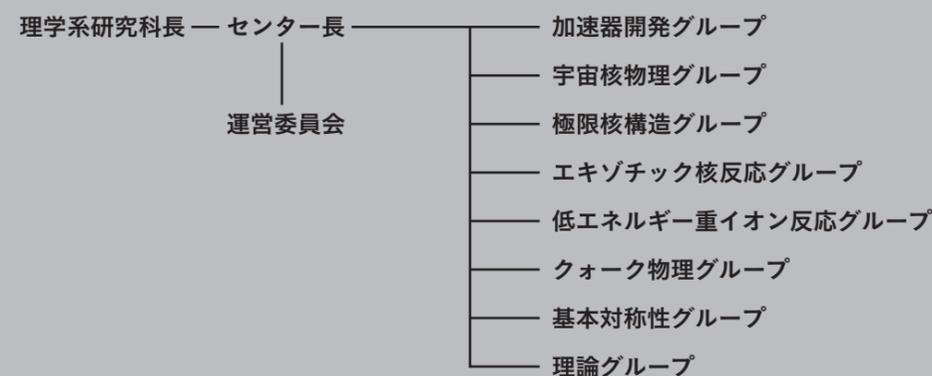
CNSの歩み

原子核科学研究センター（CNS）は、1997年、東京大学における原子核科学の研究・教育を推進するため、東京大学大学院理学系研究科附属施設として発足しました。原子核物理学を中心に、加速器科学など周辺分野を含む重イオン科学の研究を推進しています。2000年に理化学研究所内に移転して以降、この加速器施設との共同事業を中心に据え、重イオン科学を一層展開させてきました。また、高エネルギー重イオン衝突実験国際共同研究においても重要な一翼を担ってきました。

CNSは、現在8つの研究グループで構成され、イオン源、加速器、最先端検出器等のハードウェア開発を基盤として、実験・理論両面において重イオン物理の新たな局面を切り拓く研究を推進しています。2006年に稼動開始した理研RI ビームファクトリーでは、世界一級の性能を持つSHARAKスペクトロメータを建設し、高分解能ガンマ線検出器GRAPE、田無時代から引継いだRI ビーム分離装置CRIBとあわせて研究を行っています。

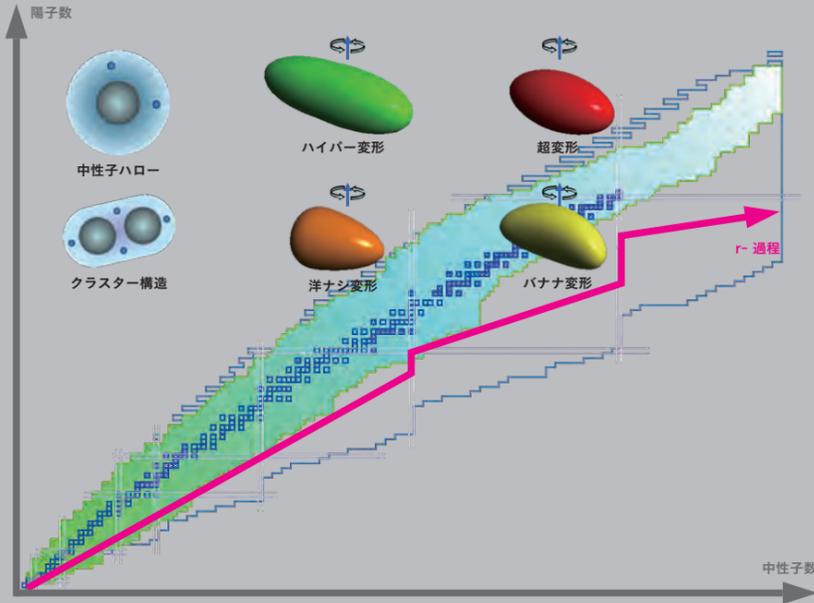
- 1997年 4月 東京大学大学院理学系研究科附属の施設として田無キャンパスに発足。サイクロトロン施設を保有。
- 1998年 4月 理研との間に「重イオン科学研究に関する協定」を締結。
- 2000年 3月 東京大学新キャンパス計画により、分室を理研内和光キャンパスに移転。
- 2001年 4月 主要研究装置（イオン源、CRIB）を理研加速器施設に設置。
- 8月 理研和光キャンパス内に、3階建て総面積1200平米の実験準備棟完成。
- 2002年 4月 理論グループを設置。
- 8月 第1回国際サマースクール開催（以後毎年開催）。
- 2004年 4月 理研との共同研究のため、東京大学と理研との間に包括的な連携協力協定を締結。SHARAKプロジェクト開始。
- 2005年 2月 CNS国際外部評価。
- 2006年 LHCにおけるALICE共同実験への参加を開始。
- 2007年 2月 第1回原子核物理プログラム採択委員会（NP-PAC）開催（以後原則年2回）。
- 2009年 3月 SHARAKスペクトロメータの完成。
- 2011年 3月 東日本大震災による福島第一原発事故からの環境放射線の大規模測定で中心的な役割を果たす。
- 6月 CRIB国際評価。
- 2013年 3月 CNS国際外部評価。
- 2014年 7月 OEDO準備室を設置。
- 2015年 3月 理研と共同でCRIBにてRIビームの産業利用を開始。
- 2016年 11月 理研との共同研究で合成した113番元素「ニホニウム」がIUPACで承認。
- 2017年 3月 OEDO完成。

組織構成



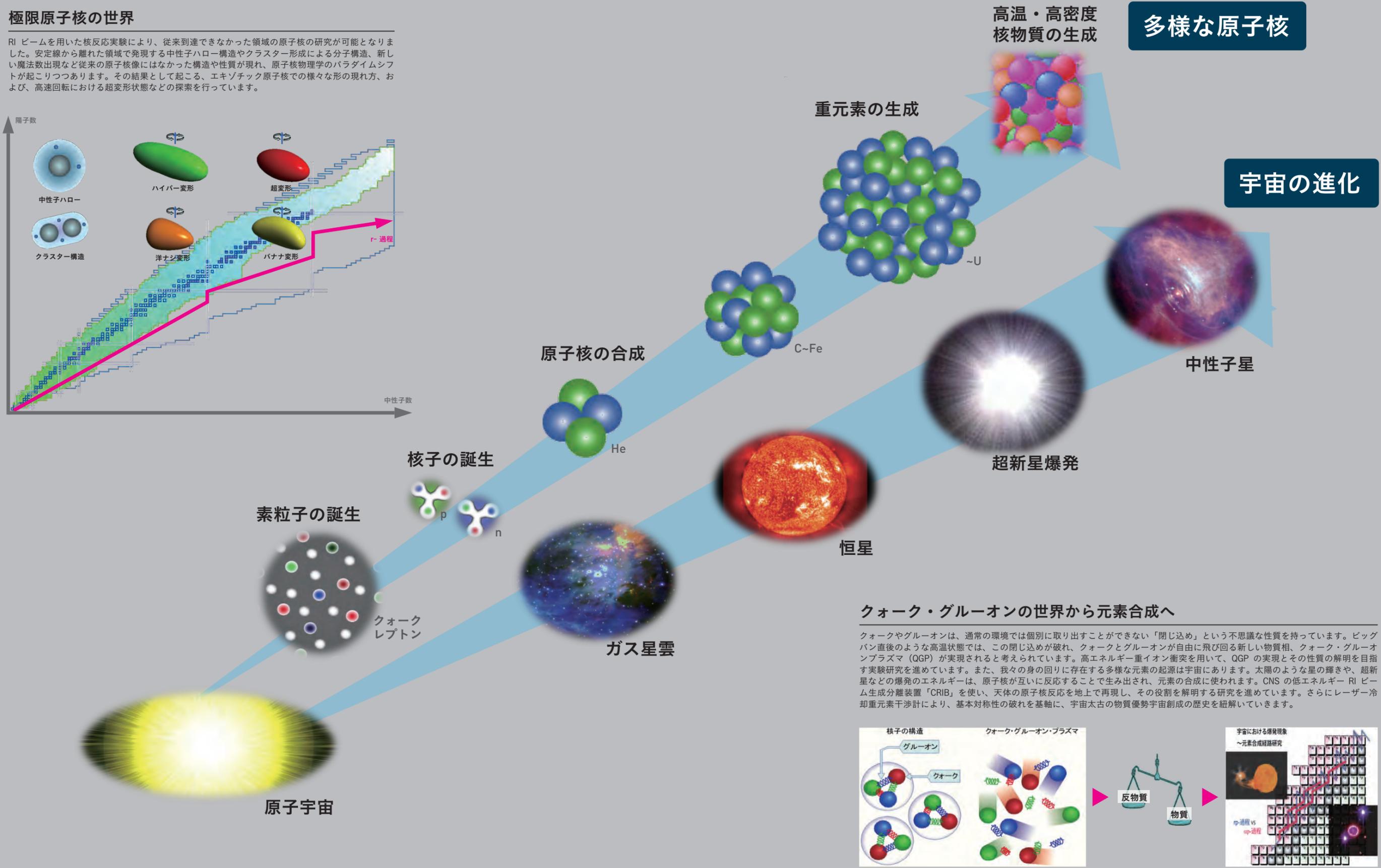
極限原子核の世界

RI ビームを用いた核反応実験により、従来到達できなかった領域の原子核の研究が可能となりました。安定線から離れた領域で発現する中性子ハロー構造やクラスター形成による分子構造、新しい魔法数出現など従来の原子核像にはなかった構造や性質が現れ、原子核物理学のパラダイムシフトが起こりつつあります。その結果として起こる、エキゾチック原子核での様々な形の現れ方、および、高速回転における超変形状態などの探索を行っています。



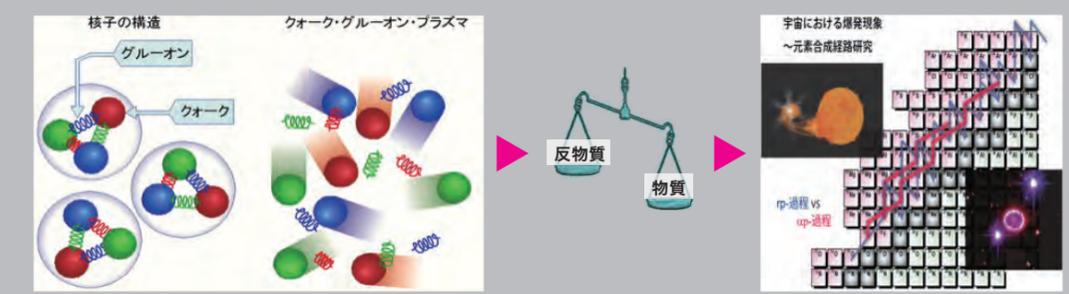
多様な原子核

宇宙の進化



クォーク・グルーオンの世界から元素合成へ

クォークやグルーオンは、通常的环境下では個別に取り出すことができない「閉じ込め」という不思議な性質を持っています。ビッグバン直後のような高温状態では、この閉じ込めが破れ、クォークとグルーオンが自由に飛び回る新しい物質相、クォーク・グルーオンプラズマ (QGP) が実現されると考えられています。高エネルギー重イオン衝突を用いて、QGP の実現とその性質の解明を目指す実験研究を進めています。また、我々の身の回りに存在する多様な元素の起源は宇宙にあります。太陽のような星の輝きや、超新星などの爆発のエネルギーは、原子核が互いに反応することで生み出され、元素の合成に使われます。CNS の低エネルギー RI ビーム生成分離装置「CRIB」を使い、天体の原子核反応を地上で再現し、その役割を解明する研究を進めています。さらにレーザー冷却重元素干渉計により、基本対称性の破れを軸に、宇宙太古の物質優勢宇宙創成の歴史を紐解いていきます。



極限原子核構造

2種類のフェルミ粒子（陽子・中性子）で構成される原子核の本質を理解するため、安定な原子核に比べ陽子数と中性子数の比がアンバランスな原子核を二次ビームとした核反応実験により調べています。入射エネルギーや標的の種類に対応した核反応の選択則を駆使し、魔法数の変化や励起モードの探査・分析により、原子核世界の本質の解明をめざしています。高分解能ガンマ線検出器 GRAPE、高分解能磁気分析装置 SHARAQ、および新しい手法を用いた RI ビーム減速装置 OEDO を開発しています。



センター長・教授
下村 亨

低エネルギー重イオン核反応

変形共存、エキゾチック変形、BEC-BCS クロスオーバー現象といった、陽子と中性子が織り成す少数量子多体の効果を、放射性同位体 (RI) ビームと世界でもユニークな実験手法を用いて取り組んでいます。特に、これらの現象を選択的に見るための RI ビーム減速装置 OEDO と共に、トリチウム標的、高スピン標的の開発を進めています。また、 γ 線検出器、ストリップ型のシリコン半導体検出器を用いた反跳粒子検出器、薄型ダイヤモンド検出器の開発も進めています。



准教授
今井 伸明

エキゾチック核反応

原子核には表面や形といった巨視的な属性があります。この原子核を原子核散乱を通して「突っつく」ことで回転・振動運動を引き起こすことができます。この現象は原子核集団励起と呼ばれ、原子核の堅さをはじめとした基本的な性質を反映するため、原子核物理学の中心的な研究対象になってきました。エキゾチック核反応グループでは RIBF の不安定核ビームなどを用いて、原子核の新しい様相と集団性を生み出す相互作用の研究を進めます。



准教授
矢向 謙太郎

核物質

膨大な数の核子が集まった核物質は、中性子星を構成する物質ですが、核物質の基礎となる状態方程式や構成要素が決まっておらず、強い力の世界の謎として残されています。この問題に挑戦するため、核反応を一網打尽に調べ上げられるアクティブ標的装置（技術開発の質も参照のこと）を開発しており、短寿命原子核の振動モードや核子相関の実験的研究から核物質や中性子星の性質と構造を解明し、強い力の謎に迫ります。



助教
大田 晋輔

極限原子核構造

原子核の安定性を司る核力の性質を、核質量や励起モードの系統的測定を通して顕かにし、いまだ謎にまつまれている魔法数の生成・消滅、中性子分布の巨大化現象の発現メカニズムを解明します。東大 CNS と理化学研究所が運用する不安定核ビームラインを駆使し、ごく短い寿命をもつ原子核の様々な基本物理量を測定する実験を進めています。広範な原子核データを通して新しい原子核描像を構築することが目標です。



助教
道正 新一郎

基本対称性

反物質消失機構、暗黒物質の実体など、宇宙太古の物質創成の歴史を、基本対称性の破れを軸足に、解明して行きます。重元素では、相対論効果や原子核の変形効果により、微小な基本対称性の破れが増幅されて観測され、対称性を調べる顕微鏡の役割を果たします。この重元素を原子核反応で生成するとともに、レーザー冷却技術を駆使して重元素の量子状態を制御し、原子干渉計を用いた精密量子計測によって、物質・反物質対称性の破れの謎を探索して行きます。



教授
酒見 泰寛

クォーク物理

ビッグバン直後の初期宇宙に存在した、クォーク・グルーオンプラズマを実験室で生成し、その性質を調べることで、初期宇宙の物質状態やクォークの閉じ込め・ハドロンの質量獲得といった物質創生の謎を解明して行きます。クォーク・グルーオンプラズマを実験的に検証する方法が高エネルギー重イオン衝突実験です。欧州素粒子原子核研究所 (CERN) の大型ハドロン加速器 (LHC) を用いた ALICE 実験を推進しています。



准教授
郡司 卓

原子核理論

陽子・中性子を構成要素とした原子核の構造を、大規模殻模型計算に基づいて研究しています。エキゾチックな核構造とそれが現れるメカニズムを理論の側面から解明すると共に、元素合成の理解など他分野への応用を目指しています。量子多体問題の数値解法の探求や、最先端の大規模並列計算環境の能力を最大限生かすためのソフトウェア開発も平行し進めています。



特任准教授
清水 則孝

宇宙核物理

我々の住む地球を構成している元素はどのようにして創られたのか、この根本的な疑問に答えるには、大きな宇宙に浮かぶ天体と、微小な原子核の研究が必須です。特に、高温の星の中で原子核がどのように振る舞うかを理解することが重要です。山口研究室 / 宇宙核物理グループでは、爆発天体温度の不安定核ビームを生成できるユニークな装置「CRIB」を使って、世界の研究者と共に、様々な宇宙の謎の解明に取り組んでいます。



講師
山口 英斉

理化学研究所の RIBF 加速器施設内にさまざまな装置を設置し、それらを軸に研究を進めています。



SHARAQ と OEDO

RIBF には RI ビームの反応を分析するスペクトロメータがいくつかありますが、2009 年に完成した CNS の基幹装置 SHARAQ スペクトロメータは、その高い分析能力（運動量分解能：1/15000）が特長です。高分解能ビームラインと組み合わせて使用することにより、高分解能の質量欠損スペクトルが得られます。テトラ中性子状態の高精度分光などが行われています。実験の幅を広げるため、RI ビームの品質を落とさずエネルギーを下げる OEDO プロジェクトにも着手し、2017 年 3 月に完成しました。右の写真は OEDO の RF 偏向装置です。



低エネルギー二次ビーム分離器 CRIB

宇宙核物理研究を行うために、低エネルギーかつ高強度の不安定核ビームを直接反応を利用して生成できる、世界でもユニークな装置です。



中性子検出器アレイ WINDS

エキゾチック核反応で周辺方向に放出される中性子の測定に用いる検出器アレイを理研と共同で開発しています。



大強度重イオン源

高磁場とマイクロ波を用いて大強度重イオンビームを生成します。プラズマ分光によるイオン識別等により、金属イオンや高品質ビーム生成が可能で



ゲルマニウム検出器アレイ GRAPE

γ 線のエネルギーと検出位置を高分解能で測定可能な電極分割型ゲルマニウム検出器 18 台で構成された測定器です。光速の 30-50% で運動しているエキゾチック原子核から放出される γ 線のドップラー効果を高精度で補正することができ、原子核構造の解明に威力を発揮します。位置検知型の特徴を活かし PET やコンプトンカメラなどイメージングへの応用可能性も持っています。



レーザー冷却重元素干渉計

物質・反物質対称性の破れから生じる原子系の微小なエネルギー変位を検出するため光格子冷却重元素を用いた原子干渉計を開発しています。2019 年度整備完了予定。



AVF サイクロトロン

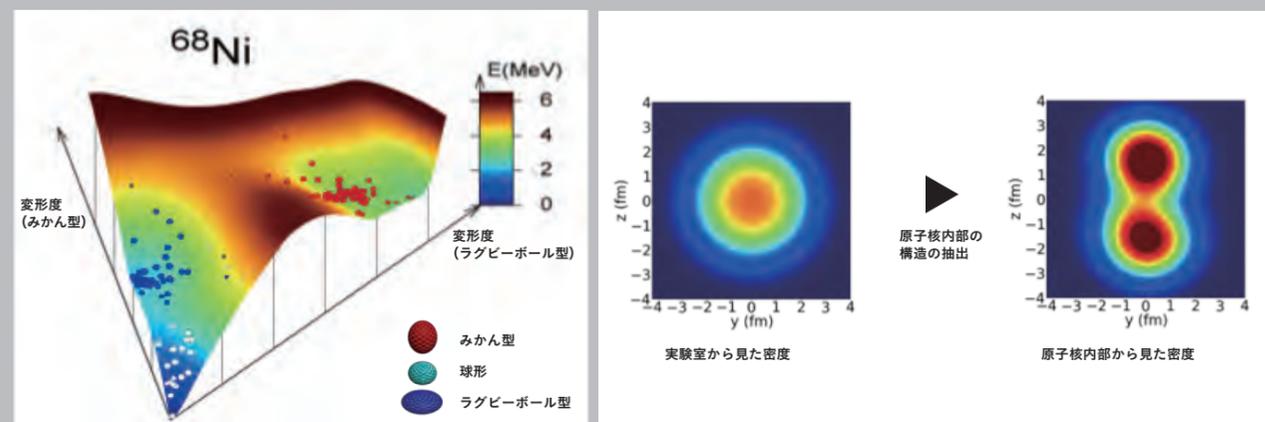
原子核物理実験、RI 製造等にビームを供給する加速器。高品質、大強度ビームの供給を目指し仁科加速器研究センターと高度化を進めています。

原子核理論研究 - 大型並列計算機による原子核構造シミュレーション計算 -

様々な種類の原子核に量子力学の計算を適用し、理論的な解明を目指しています。原子核の内部では、1個から200個程度の陽子と中性子が、強い相互作用（核力）により互いに力を及ぼしつつ全体としてまとまった姿をしています。目的は、陽子・中性子という構成要素から出発して全体の姿を記述したうえで、量子力学的な多体系ならではの存在形態・運動がないかを探ること、かつ核力のもつ性質がどのようにこの多体系の形成に関わっている

かを明らかにすることです。これらの解明のためには殻模型計算という手法が適しています。東大グループが提唱・発展させてきたモンテカルロ殻模型による計算を京コンピュータ等の大型並列計算機で進め、原子核の性質を調べています。特に、普遍的なものと想定されていた魔法数が変わってしまうなど、未知の性質が明らかになりつつあるエキゾチック原子核に対して、新たな性質や存在限界の予言や解析を行い、実験研究とも連携し

ています。京コンピュータによる分析により、下左の図のように同一原子核で多様な構造が狭いエネルギー領域に集まる「変形共存」が現れていることが分かりました。軽い原子核において「芯なし殻模型計算」を実行し、下右図のようにクラスター構造を導出するという成果を出しています。



ニッケル 68 (陽子数 28、中性子数 40)

⁸Be 原子核 (陽子数 4、中性子数 4) の 0⁺ 状態

教育

CNS は物理学専攻の協力講座として大学院教育に携わっています。最先端の大規模実験装置を用いた最先端の研究を通じて大学院生を教育することによって、高度な専門知識を備え、国際的な共同研究をリードする人材育成に努めています。2012年4月現在、19名の大学院生（博士課程12名、修士課程7名）が在籍しています。物理学専攻が3年生を対象として開講している学生実験のうち、「原子核散乱」は2002年からCRIBなどCNSの装置を用いて行われています。学部学生が日常目にしない加速器や大型実験装置に触れる貴重な機会となっています。2006年度から、東京大学教養学部生を対象に「全学体験ゼミナール」に取り組んでいます。「見えない原子核や素粒子を見る」といったテーマで、実際に最先端

の検出器を自ら組み立てて宇宙線等を測定してもらうなど、実習に重きを置いたカリキュラムを組んでいます。原子核・素粒子分野の物理への興味を育むことが狙いです。2002年から始まった国際サマースクールは、重イオン分野の若手研究者に良質な講義を提供することを目的とし、例年国内外の一流研究者に講義をお願いしています。修士学生からシニア研究者にわたって100人近くの参加者が集います。アジアの近隣諸国をはじめとした世界各地からも十数名の学生の参加があり、講義のみならず、日本の学生との交流やCNSの施設見学を楽しんでいます。



上：全学体験ゼミナール／下：国際サマースクール (2014年)

次世代検出器の研究開発

先端的な実験研究には、従来の枠組みを超えることのできる新しい測定技術や加速器技術が欠かせません。加速器技術では新しいイオン源やビームの品質向上のための診断系の開発を行い、安定かつ大強度のイオン源を実現するため努力を重ねています。飛跡検出を行うガス検出器 (TPC) の心臓部となるガス電子増幅器 (GEM) では、欧州素粒子原子核研究機構 (CERN) が行ってきた製法とは異なる新しい製法を理化学研究所とともに共同開発することで、従来よりも厚い GEM を製作することができるようになりました。これによりより低い電圧で安定した高い増幅度を達成することができるようになりました。近年では GEM を用いた TPC 開発が世界的にも盛んに行われてきてお

り、CERN の ALICE 実験では世界最大の TPC のアップグレードに GEM が採用され、CNS もその研究開発に大きな貢献をしています。また、不安定原子核反応の検出器として注目を浴びているのが TPC の検出器ガスを標的とするアクティブ標的的です。原子核反応が TPC 内部で起こるため反応の様子を三次元的に撮影することができるのが特徴です。CNS では GEM をベースとしたアクティブ標的を、研究グループを超えた協力関係のもと開発してきました。GEM-TPC 開発のノウハウや不安定核ビーム実験の要請・ノウハウを持ち寄り、うまく組み合わせることにより、世界に類を見ない大強度ビーム照射が可能なアクティブ標的を実現しました。さらに不安定核ビーム実験の実現のため

に、ビーム粒子識別システムも開発しました。毎秒100万個というビーム粒子をひとつひとつ識別することが要請されるため、非常に高速で応答し、かつ放射線ダメージにも強い検出器が必要です。CNS では低圧動作型の多芯線ドリフト検出器と新たな検出器素材であるダイヤモンドでできた高速応答時刻計測器の研究開発を続けており、これらを組み合わせることによりビーム粒子の高速識別を実現しました。現在は、ALICE-TPC のアップグレード、アクティブ標的 CAT-M の開発、単結晶ダイヤモンド検出器の開発など新しい技術開発を行うとともに、次世代実験技術の研究を進めています。



(写真左から) CERN GEM、日本製 GEM の断面図、アクティブ標的、ダイヤモンド検出器

高速データ収集システム開発

原子核の飛跡に沿って標的ガスがイオン化してできた電子を電場により引き出し、GEM で増幅して電流信号として取り出します。ALICE 実験 (CERN) には大型の時間投影型飛跡検出器 (TPC) があり、GEM を信号増幅部に使用する高度化計画が進められています。TPC からのデータ量は非常に大きく大容量データを高速処理するデータ収集系の整備も必須です。Field Programmable Logic Array (FPGA) や Graphics Processing Unit (GPU)、高性能 CPU 等の様々なハードウェアアクセラレーターを駆使したデータ処理系の開発も進めています。

RI ビーム低エネルギー化装置開発

原子核科学研究センターでは、世界初の減速方法を取り入れた RI ビーム低エネルギー化システム OEDO の開発を進めています。OEDO 装置は、エネルギー減衰板と RF 電場のビーム収束作用を組み合わせることで、RI ビームの高い減速効率と収束性の両方を実現します。下図は、世界各国の RI ビーム施設で供給できる RI ビームの質量とエネルギーを示したものです。OEDO が世界的にユニークなビームを供給できることが分かります。



RI ビーム減速システム OEDO

平成 29 年秋には長寿命核分裂生成片 (LLFP) ビームを OEDO を使って低エネルギー化し核融合反応等の核変換率測定実験を行います。放射性廃棄物の安全な処理法が模索されていますが、約 10 万年以上の非常に長い半減期を持つ LLFP 処理方法は未だ確立していません。LLFP を効率良く安定原子核に変換する核反応があれば、これらの解決策の有力候補になります。



各研究施設における RI ビームのエネルギーと質量範囲

国際共同研究

CNS は、国内外の多くの機関と活発な研究交流を行っています。特に、東京大学と理化学研究所は、不安定核に関する物理を国際的に推進するための「重イオン科学研究に関する協定」を結び、CNS はこれに全面的に協力してきました。CRIB を始めとする CNS の基幹設備を用いた共同研究をはじめ、理研仁科センターの加速器施設を用いた研究は、仁科センター、高エネルギー加速器研究機構との3者共催による PAC (プログラム採択委員会) において審議され、採択されたものが実行されます。米国ブルックヘブン国立研究所や CERN 欧州素粒子原子核機構をはじめとする国外の加速器施設における国際共同実験も精力的に推進しています。重イオン物理、加速器、検出器等についての国際会議・シンポジウムの開催も精力的に行っています。また、米国・ドイツの研究所と、ICNT (International Collaborations in Nuclear Theory in connection to rare isotopes) を結成し、研究者訪問の受入れを行うと同時に、海外への学生の派遣なども行っています。

高エネルギー重イオン衝突実験

CNS は、米国ブルックヘブン国立研究所 (BNL) の重イオン衝突型加速器 (RHIC) における PHENIX 実験 (2000-) や CERN の大ハドロン加速器 (LHC) における ALICE 実験 (2007-) に参加し、国際共同高エネルギー重イオン衝突実験を行っています。GeV や TeV エネルギーでの重イオン衝突を用いて、新しい物質相クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) に関する研究を推進しています。

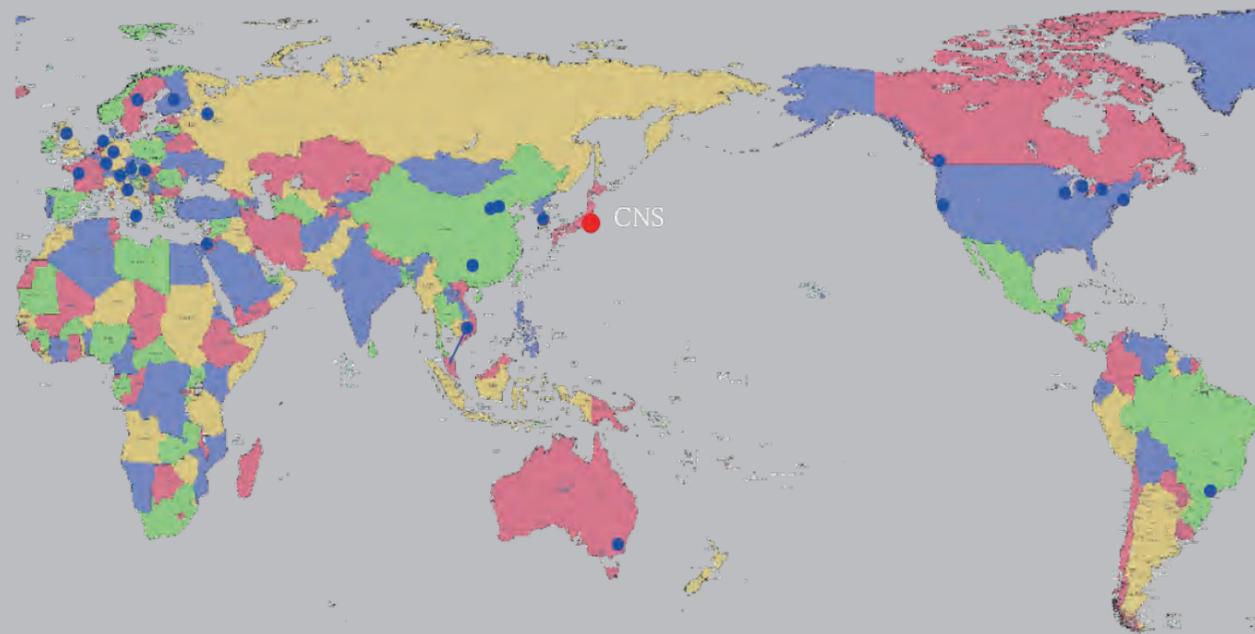


CRIB での国際共同実験

基幹装置 CRIB を用いた研究について、韓国 IBS、ベトナム科学技術院物理研究所、イタリア INFN-LNS、韓国成均館大学と協定や研究覚書を結び、原子核物理学や宇宙核物理学の分野における国際共同研究として、大きく展開しています。



共同研究機関



<海外>

- ・ CERN 欧州原子核研究機構
- ・ GANIL
- ・ ハイデルベルグ大学
- ・ ボッフム大学
- ・ INFN (レニャーロ)
- ・ INFN (カタリーニャ)
- ・ グローニンゲン大学
- ・ ウブサラ大学
- ・ 王立工科大学
- ・ ユバスキラ大学
- ・ エディンバラ大学
- ・ チューリッヒ工科大学
- ・ ドブナ研究所
- ・ ハンガリー原子核研究所
- ・ ワイツマン科学研究所
- ・ 北京原子能科学研究院
- ・ 北京航空航天大学
- ・ 蘭州現代物理研究所
- ・ 韓国 IBS
- ・ ソウル国立大学
- ・ 韓国中央大学
- ・ イファ女子大学
- ・ 成均館大学
- ・ ベトナム科学技術院物理研究所
- ・ オーストラリア国立大学
- ・ ブルックヘブン国立研究所
- ・ アルゴンヌ国立研究所
- ・ ローレンス・バークレー国立研究所
- ・ ミシガン州立大学
- ・ マクマスター大学
- ・ ノートルダム大学
- ・ ワイツマン科学研究所
- ・ トライアンフ研究所
- ・ サンパウロ大学

<国内>

- ・ 理化学研究所
- ・ JAEA
- ・ KEK
- ・ 筑波大学
- ・ 国立天文台
- ・ 埼玉大学
- ・ 法政大学
- ・ 山形大学
- ・ 東京工業大学
- ・ 京都大学
- ・ 長崎総科大学
- ・ 早稲田大学
- ・ 九州大学
- ・ 放射線医学研究所
- ・ 東北大学
- ・ 広島大学
- ・ 大阪大学