

# 東京大学大学院理学系研究科 附属 原子核科学研究センター

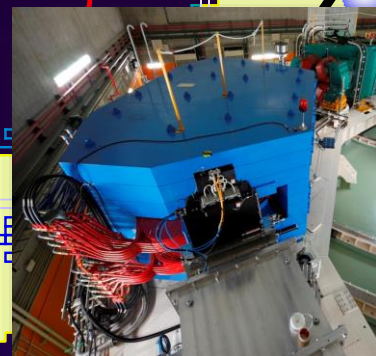
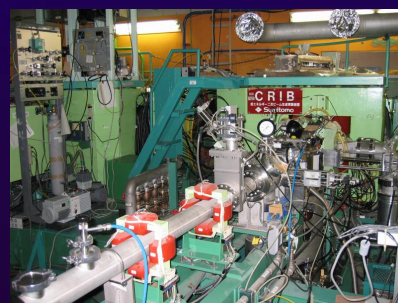
## Center for Nuclear Study (CNS) Graduate School of Science, The University of Tokyo



CNS 和光分室 CNS Wako



CNS 本郷本部 CNS Hongo



東京大学大学院理学系研究科  
附属 原子核科学研究センター  
Center for Nuclear Study  
Graduate School of Science, The University of Tokyo

本郷本部 〒113-0033 文京区本郷7-3-1  
TEL +81-3-3812-7886 FAX +81-3-5841-7642

和光分室 〒351-0198 和光市広沢2-1  
独立行政法人 理化学研究所内  
TEL +81-48-464-4191 FAX +81-48-464-4554

<http://www.cns.s.u-tokyo.ac.jp/>





# 重イオン物理学

## —原子核科学研究センターの目指すもの—

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では、陽子と中性子の数がバランスして静的な秩序が保たれ、いわば極低温の状態にあります。極低温下では、系を特徴づける自由度は凍りついていて、その本質は隠されています。

加速器を用いて様々な**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3つの自由度であるアイソスピン自由度、スピン自由度、クォーク自由度に注目し、これらに特徴的な状態を重イオン衝突により生成する新しい手法を開発しています。これらの手法を駆使して原子核世界の本質の解明し、**新しい物質像を構築**することが我々の目指すところです。

陽子数と中性子数が極めてアンバランスな状態  
(エキゾチック原子核)

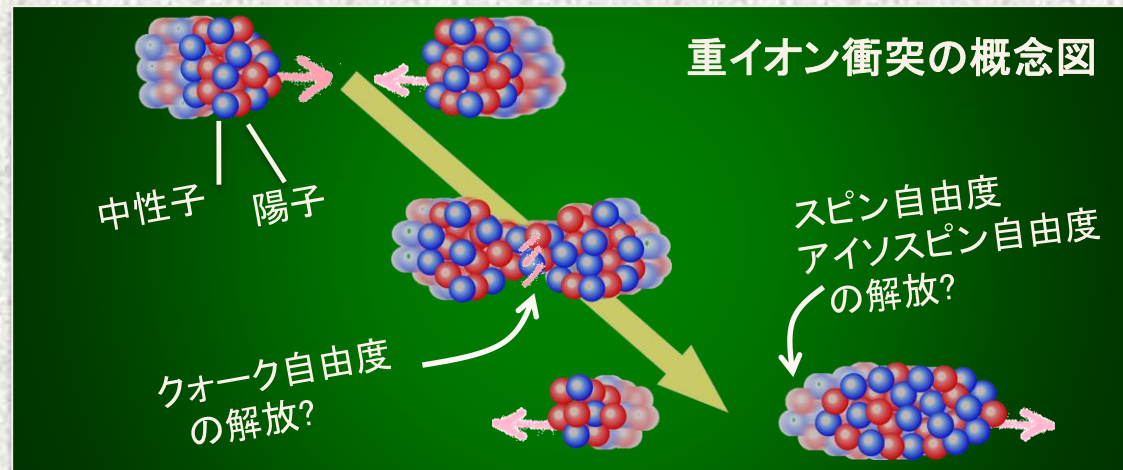
→ アイソスピン自由度の解放

核子のスピン偏極で特徴づけられた状態  
高速回転し様々な形をした状態

→ スピン自由度の解放

非常に高温でクォークやグルーオンが解放された状態

→ クォーク自由度の解放



宇宙においては、これらの自由度が解放された高温の系が随所に見られます。そこでは活発な核反応過程が起こっており、宇宙の進化をドライブしています。宇宙における熱い核反応を実験室において調べることにより、超新星などの爆発現象やそれに伴う元素合成過程を明らかにすることも、重要な目標です。

このような重イオン科学の研究を推進するためには、**RIビーム**が鍵になります。RIとは稀少(レア)な同位元素を意味し、自然にある安定な原子核とは異なる性質を示すのでエキゾチック原子核とも呼ばれます。その大部分は短寿命のため、人工的に作ります。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のビームを生成する技術が開発されました。RIビームを出すには、重イオン(重い原子核)を加速できる大型の粒子加速器が必要です。世界にいくつかある中でも、理研のRIビームファクトリー(RIBF)は最新鋭のものです。CNSはRIBFに様々な先端的装置を設置し、国内外の研究者と共に実験をしています。また、別の観点からの研究が米国ブルックヘブン研究所やジュネーブにあるセルンの重イオン衝突型加速器での国際共同実験により行われています。

同時に、物理学専攻の協力講座としての大学院教育や国際サマースクール等により、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

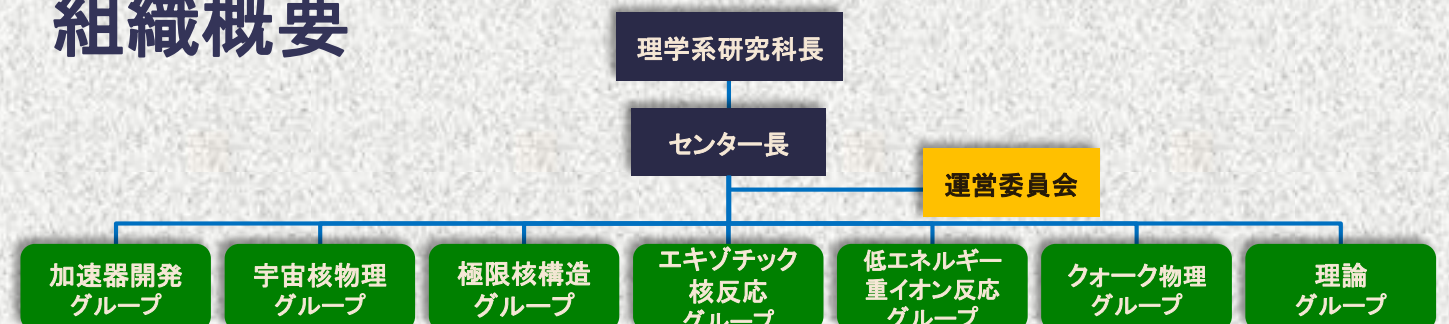
原子核科学研究センター(CNS)は、1997年、東京大学における原子核科学の研究及び教育の推進のため、東京大学大学院理学系研究科附属の施設として発足しました。原子核物理学を中心に、加速器科学など周辺分野を含む重イオン科学の研究を推進しています。2000年に理化学研究所(理研)内に移転してからは、その加速器施設との共同事業を中心に据えて、重イオン物理研究をより一層展開させてきました。また、高エネルギー重イオン衝突実験国際共同研究においても重要な一翼を担ってきました。

CNSには現在7つの研究グループがあり、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SHARQA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。

## 原子核科学研究センター沿革

- 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。
- 2001年 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。
- 2002年 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。SHARQA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 SHARQA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な測定で中心的な役割。
- 2011年 6月 CRIB国際評価。
- 2013年 3月 CNS国際外部評価。

## 組織概要





# 多様な原子核の世界

## 極限原子核構造

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。

## エキゾチック核反応

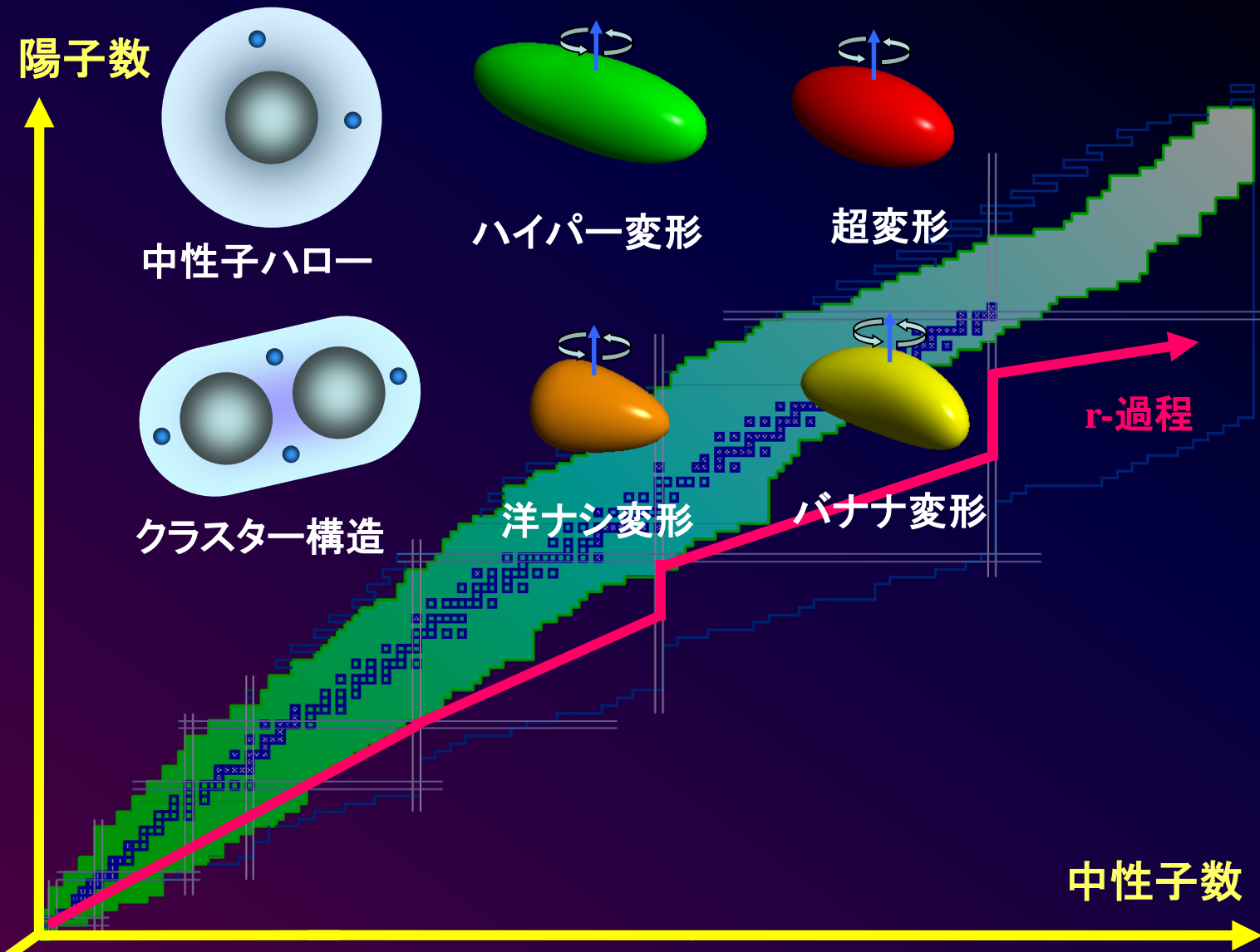
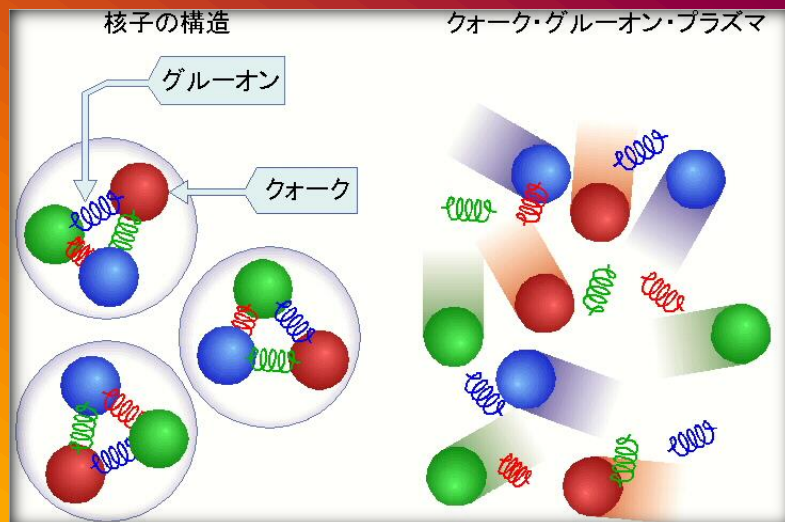
中性子や陽子といった原子核の構成要素は、それぞれスピンとアイソスピンを持っていて、その組み合わせがさまざまな様相を作り出しています。原子核の散乱反応などを通してこれら进行操作することにより、核構造の実験的研究が進んできました。RIBFに設置した磁気スペクトロメータ「SHARAQ」では、RIビームを、標的核の内部状態を操作する「道具」として利用し、エキゾチックな状態をつくり出します。

## 低エネルギー重イオン核反応

エキゾチック核で見つかった興味深い量子現象に焦点をあて、様々な低エネルギー重イオン核反応を駆使してその現象の原因に迫ります。また、原子核のハイパー変形、ドーナツ型形状など新しい量子現象を鮮明に捉えるため、新方式の標的やイオン源など基盤技術の開発をリードします。

## 高エネルギー重イオン衝突

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。光速に近い速さの重い原子核同士の衝突によって造られる高温・高密度の極限状態において、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)が実現されると予想されています。QGP状態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。



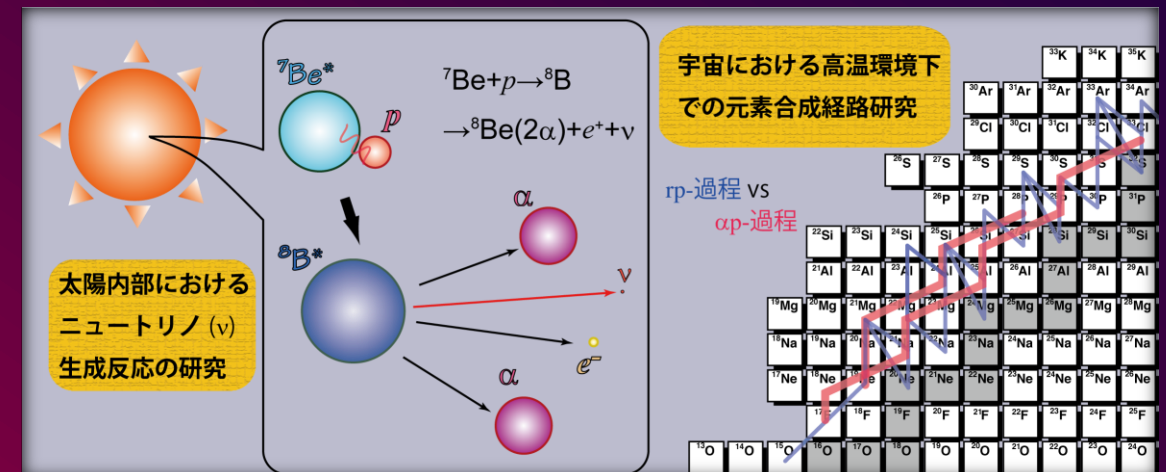
## 温度、エネルギー密度

## 重イオン加速器

重イオンを用いた研究には、さまざまな種類、エネルギー、強度の重イオンビームが必要です。それぞれのイオンは固有の性質を持ち、ビームの実現方法も異なってきます。鍵となるイオンの性質を解明し、新しいイオン源や加速器を提案・創造することにより実験研究の地平を広げていきます。

## 宇宙における原子核反応 —元素の起源と宇宙の進化—

原子核反応は、宇宙において重要な役割を果たしています。様々な元素を合成するために不可欠であるとともに、星を輝かせ、進化させていく巨大なエネルギーを生み出します。CNSの開発した、低エネルギーRIビーム生成分離装置「CRIB」を使い、高温の爆発現象における原子核反応の役割を解明するための研究を行っています。



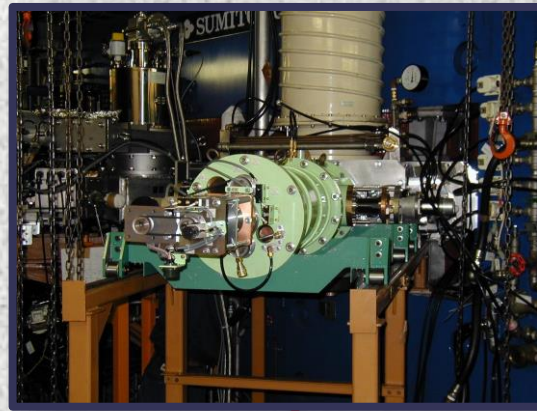


# 基幹装置

原子核科学研究センターは理化学研究所のRIBF加速器施設内に様々な装置を設置し、それらを軸に研究を進めています。

## 高性能AVFサイクロトロン

サイクロトロン高周波加速システムに導入されたフラットトップシステムにより、ビーム強度とエネルギー分解能の向上に成功しました。



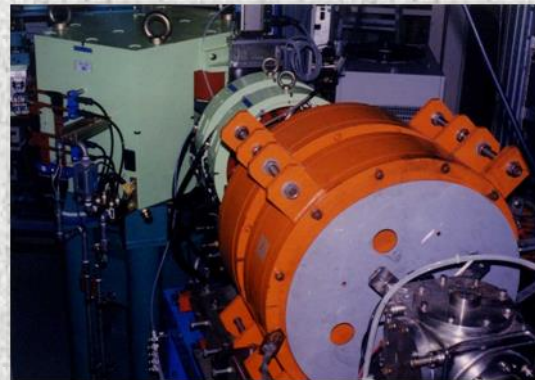
## ゲルマニウム検出器アレイ (GRAPE)

$\gamma$ 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台で構成された高精度・高感度の測定装置です。

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 $\gamma$ 線のドップラー効果を高精度で補正することができ、様々な粒子検出装置と組み合わせることで、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生かし、PETやコンプトンカメラなど $\gamma$ 線を用いたイメージングへの応用可能性も持っています。

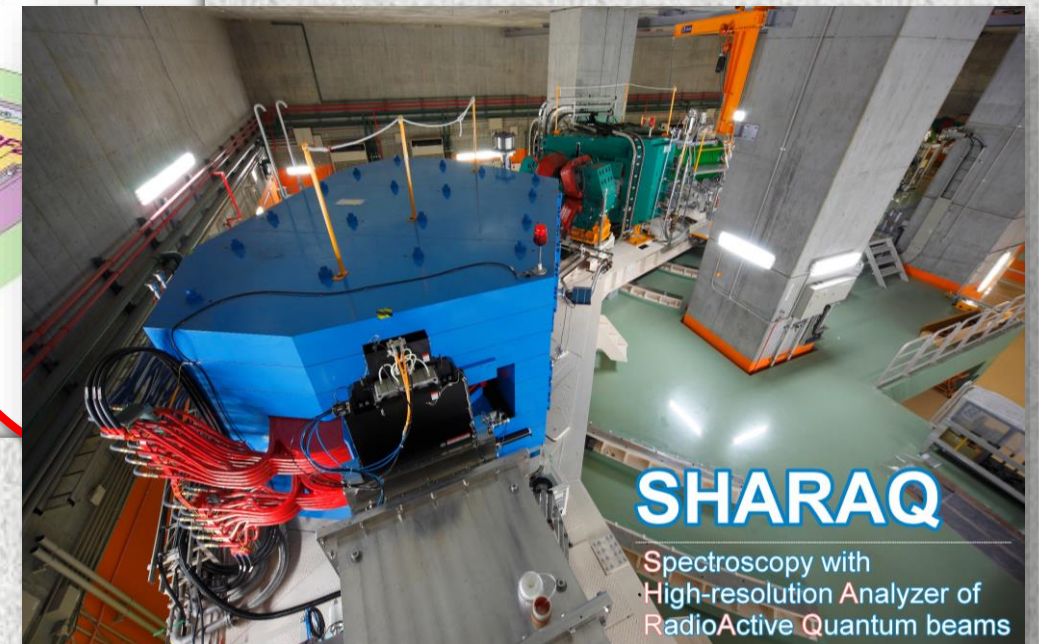
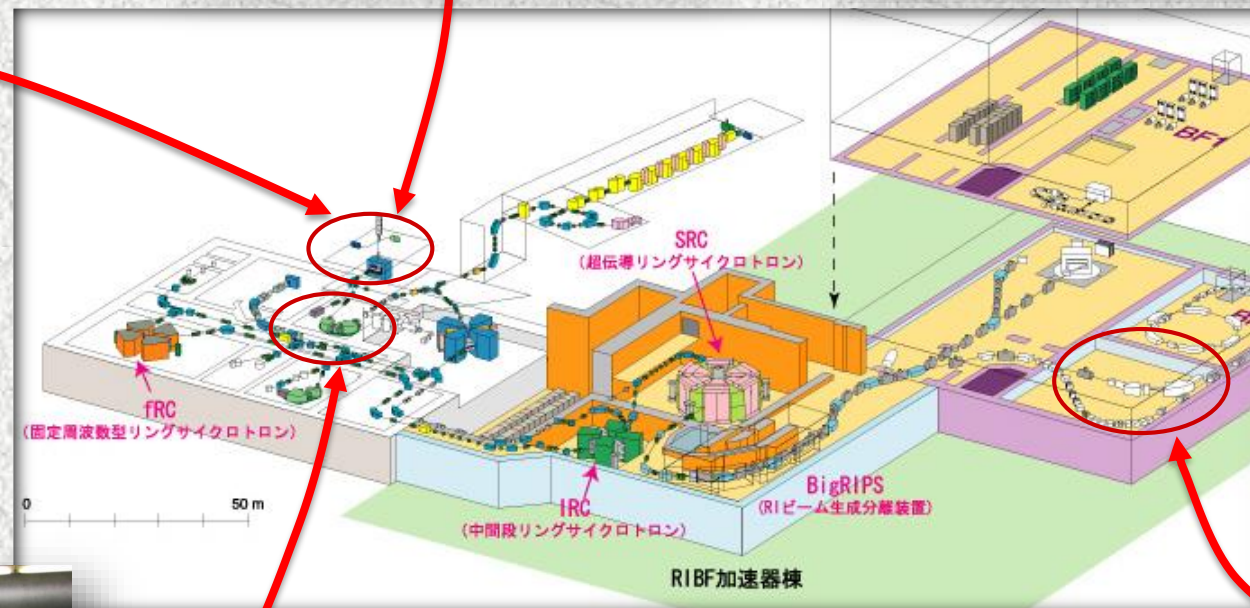
1 MeVの $\gamma$ 線に対する性能

エネルギー分解能(ドップラー補正後)	8 keV (FWHM)
全検出効率( $\epsilon_{\Omega}$ )	5%



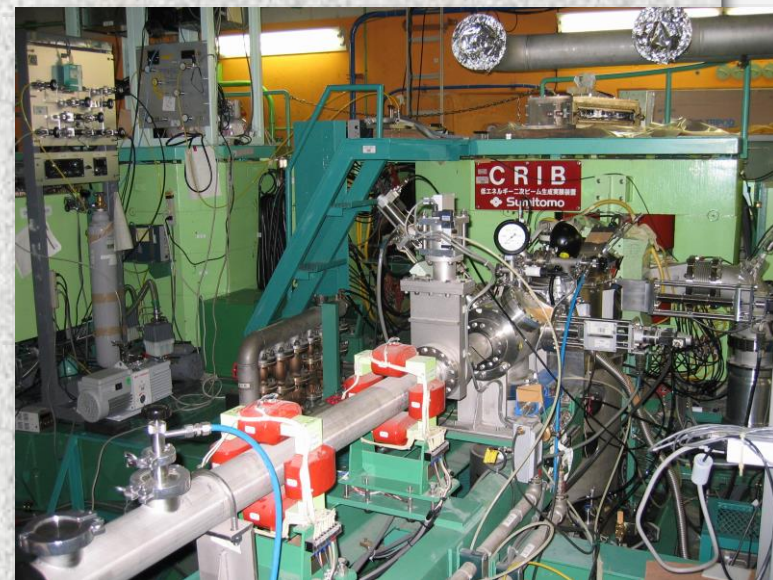
## 大強度重イオン源

高磁場と14ギガヘルツのマイクロ波を用いて大強度の重イオンビームを生成します。



## SHARAQ

Spectroscopy with High-resolution Analyzer of RadioActive Quantum beams



## 低エネルギー二次ビーム分離器 (CRIB)

宇宙核物理研究に役立つ、低エネルギー(核子あたり10MeV以下)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。

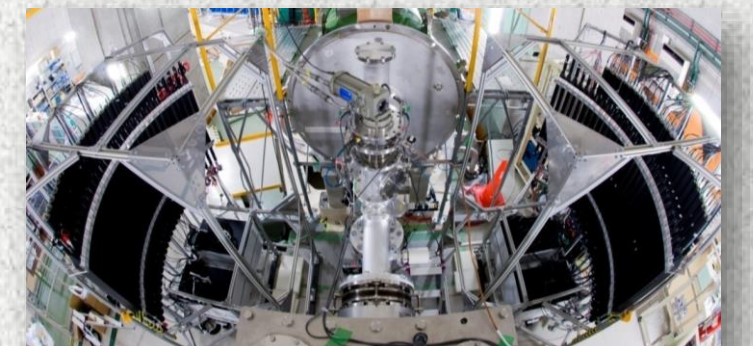
### 性能表 Specifications

軌道半径	84 - 98 cm
最高エネルギー	110Z <sup>2</sup> /A MeV
分析エネルギー範囲	30%
立体角	5.6 msr
運動量分解能(F1)	1/850
運動量分散(F2)	0

## SHARAQスペクトロメータ

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ることで、高分解能の質量欠損スペクトルが得られます。右図はSHARAQに設置される中性子検出器アレイ(WINDS)です。散乱反応で生成する中性子を広い角度範囲で測定することができます。

また、実験の幅を広げるため、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ました。



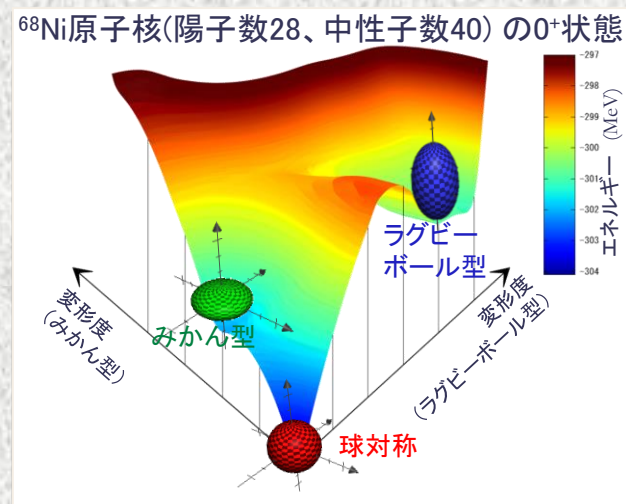


# 原子核理論研究

## 大型並列計算機による原子核構造量子シミュレーション計算

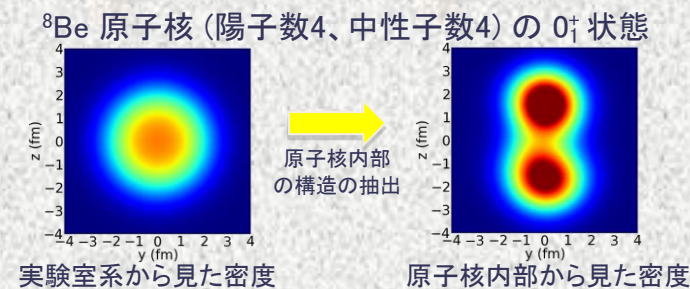
様々な種類の原子核に量子力学の計算を適用し、理論的な解明を目指しています。原子核の内部では、1個から200個程度の陽子と中性子が、強い相互作用(核力)により互いに力を及ぼしつつ全体としてまとまった姿をしています。目的は、陽子・中性子という構成要素から出発して全体の姿を記述したうえで、量子力学的な多体系ならではの存在形態・運動がないかを探ること、かつ核力のもつ性質がどのようにこの多体系の形成に関わっているかを明らかにすることです。

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の上で進めています。こうして様々な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、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、下の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。



## 技術開発



先端的な実験研究には、先端的な測定装置や加速器技術が欠かせません。CNSでは、物理研究と並行して新しい検出器、イオン源、フラットトップ加速技術などの技術開発を進めています。前ページで紹介した基幹設備の多くもそのような技術開発の結果生み出されたものです。研究グループの垣根を越えた協力関係のもと、それぞれの得意分野を活かした装置・技術開発が日々進行中です。

左図上は、理研等と共同開発している新しいガス検出器**GEM(ガス電子増幅器)**に用いられる規則的に穴(直径 $70\mu\text{m}$ )の開いた絶縁体フォイルです。このGEMを利用した**アクティブ標的**(左図下)は、標的と検出器の機能を同時に備えた装置です。我々が開発している時間投影型飛跡検出器の構造をしたアクティブ標的では原子核が散乱する様子を三次元的に捉えることができます。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。

左図上は、理研等と共同開発している新しいガス検出器**GEM(ガス電子増幅器)**に用いられる規則的に穴(直径 $70\mu\text{m}$ )の開いた絶縁体フォイルです。このGEMを利用した**アクティブ標的**(左図下)は、標的と検出器の機能を同時に備えた装置です。我々が開発している時間投影型飛跡検出器の構造をしたアクティブ標的では原子核が散乱する様子を三次元的に捉えることができます。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。

# 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。

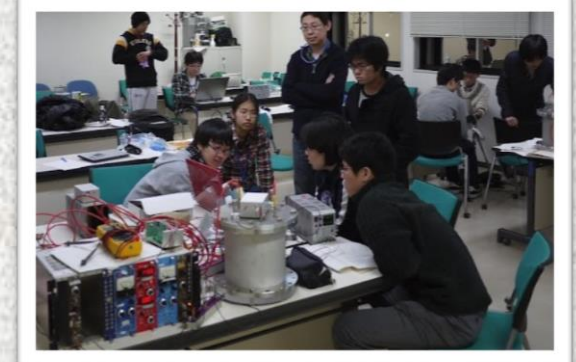
2002年から始まった**国際サマースクール**は、重イオン分野の若手研究者に良質な講義を提供することを目的とし、例年国内外の一流研究者に講義をお願いしています。修士学生からシニア研究者にわたって100人近くの参加者が集います。アジアの近隣諸国をはじめとした世界各地からも十数名の学生の参加があり、講義のみならず、日本の学生との交流やCNSの施設見学を楽しんでいます。

### 国際サマースクール (CNSS13, 2014年)



### 全学体験ゼミナール

毎年10名程度の教養学部生が4日間泊りがけで参加し、検出器を製作して目に見えない粒子の測定に挑戦します。



## 福島第一原発事故への取組み

東日本大震災による福島第一原子力発電所の事故を受け、日本の原子核物理学コミュニティはその直後から放射線の測定で様々な貢献をしました。特に、CNSは、阪大核物理研究センターなどとともに、福島県のほぼ東半分を2kmメッシュで覆う、大規模な土壌放射線測定などの活動を行いました。CNSはガンマ線測定を全国の大学等で分担して行うためのハブの役目を果たし、6000個の土壌サンプルを福島県の採取現場から受け取って全国の測定チームへ送る一方、CNS自身もガンマ線測定を遂行しました。分析の結果は、セシウムやヨウ素のRIの分布マップおよびデータベースとして文部科学省から公表されています。放射線強度の地域的な偏りや、セシウム134とセシウム137の比の一定性などが明らかになっています。

CNSの土壌測定用ゲルマニウム検出器システム





# 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。

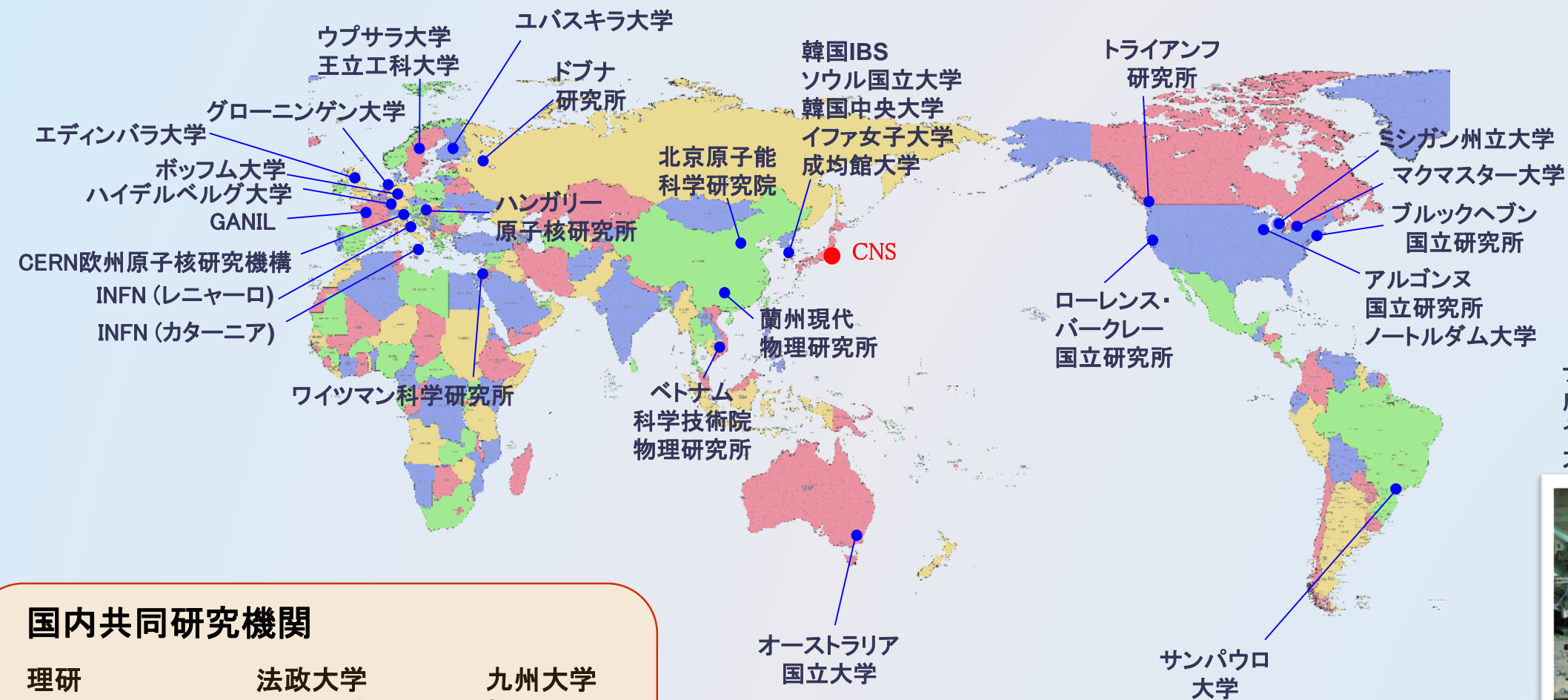
特に、東京大学と理化学研究所は、不安定核に関係する物理を国際的に推進するための「重イオン科学研究に関する協定」を結び、CNSはこれに全面的に協力してきました。CRIBを始めとするCNSの基幹設備を用いた共同研究をはじめ、理研仁科センターの加速器施設を用いた研究は、仁科センター、高エネルギー加速器研究機構との三者共催によるPAC(プログラム採択委員会)において審議され、採択されたものが実行されます。

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。

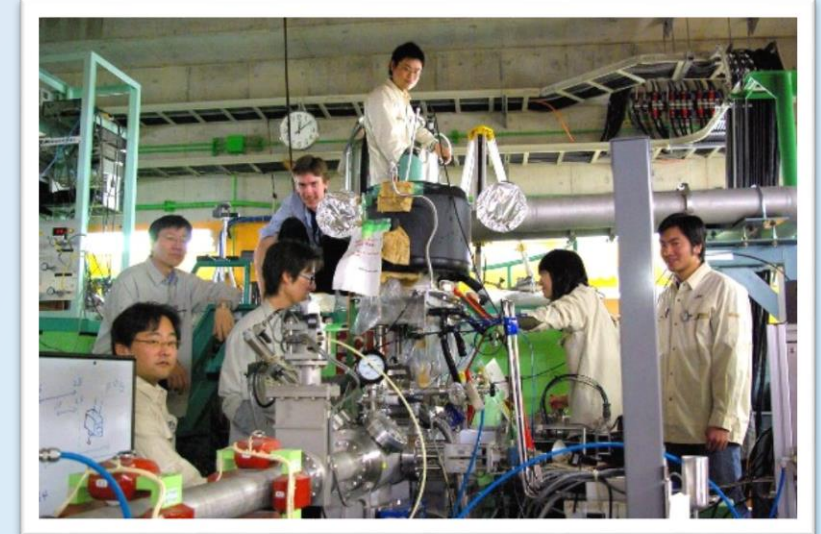
# 高エネルギー重イオン衝突実験 国際共同研究

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実験に参加し、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。2007年より、CERNの大ハドロン加速器LHCにおけるALICE実験に参加し、RHICの20倍以上の衝突エネルギーで実現が期待される、より温度の高い状態のQGP研究を進めています。



# CRIBでの共同実験

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。



# 国内共同研究機関

- |       |       |      |
|-------|-------|------|
| 理研    | 法政大学  | 九州大学 |
| JAEA  | 山形大学  | 放医研  |
| KEK   | 東工大   | 東北大学 |
| 筑波大   | 京都大学  | 広島大学 |
| 国立天文台 | 長崎総科大 | 大阪大学 |
| 埼玉大学  | 早稲田大学 |      |