

TOMOE プロジェクト

(ERATO 関口三体核力PJ)

プロGRESSミーティング

2025年6月30日&7月1日

於 京都大学理学部セミナーハウス & オンライン

研究総括：関口仁子

京都大学 / 理研



原子核

原子核：陽子と中性子（総称：核子）で構成される物質

宇宙の全ての物質の構成要素

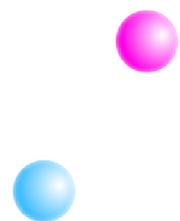
原子核の物性の発現機構の理解：原子核物理学の長年の夢

質量数

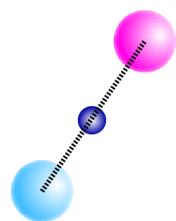
= 陽子の数 + 中性子の数



陽子
中性子



重陽子



湯川の中間子論

炭素



鉄

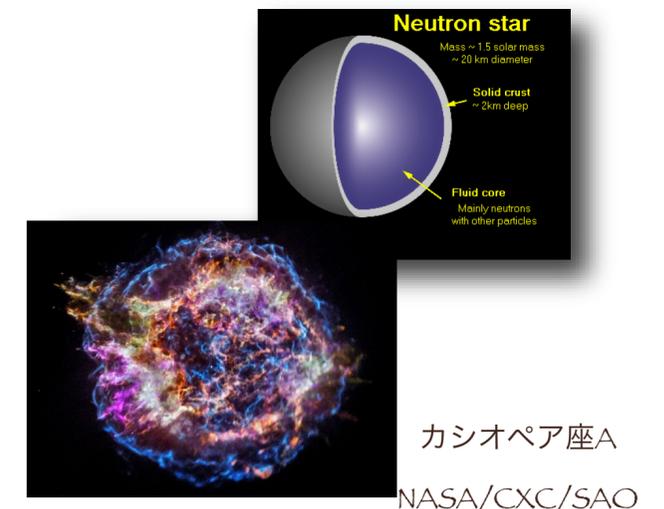


wikipedia より

金



中性子星



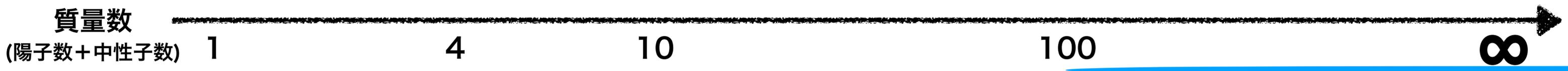
三体核力

3つ核子が同時に相互作用する力は二体核力の和で表す事は出来ない。その様な力を三体核力と呼ぶ。

(2000年代 ~)

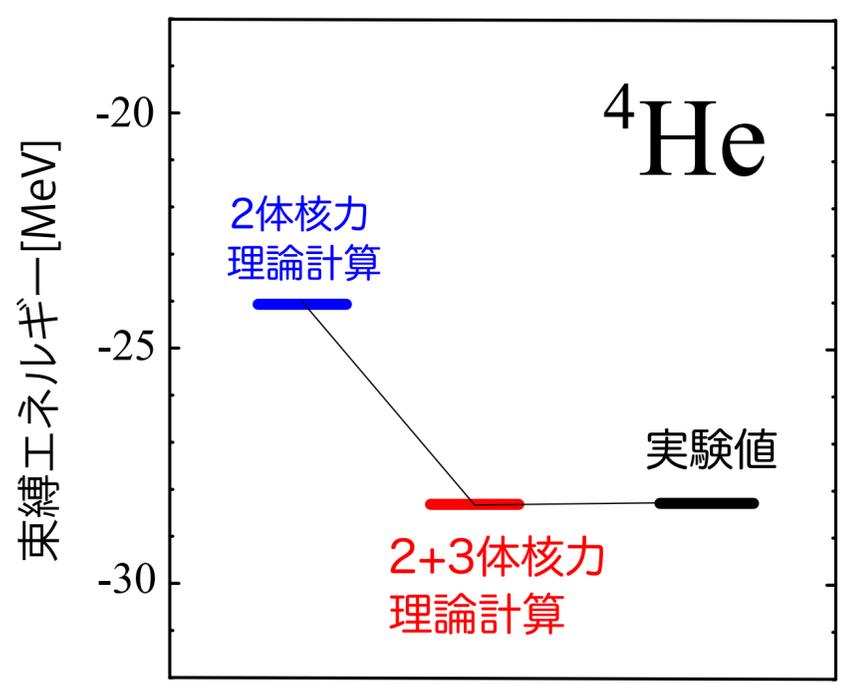
背景：二体核力の確立、量子多体系計算の登場

三体核力は「全ての原子核 (Heや酸素から中性子星まで) で必要な核力である」という新しい認識



4He原子核の束縛エネルギー

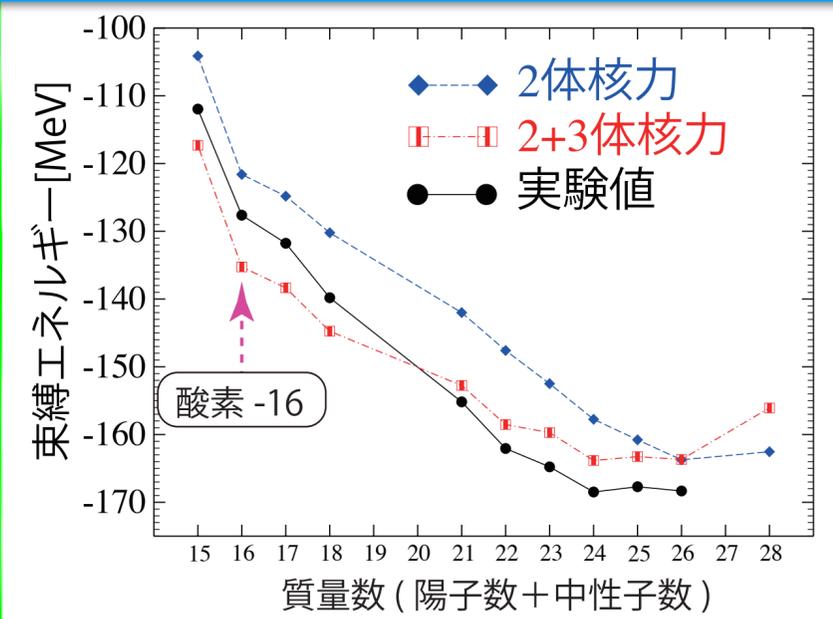
三体核力：原子核の形成に不可欠



S. C. Pieper et al., Phys. Rev. C 64, 014001 (2001)

酸素同位体の存在

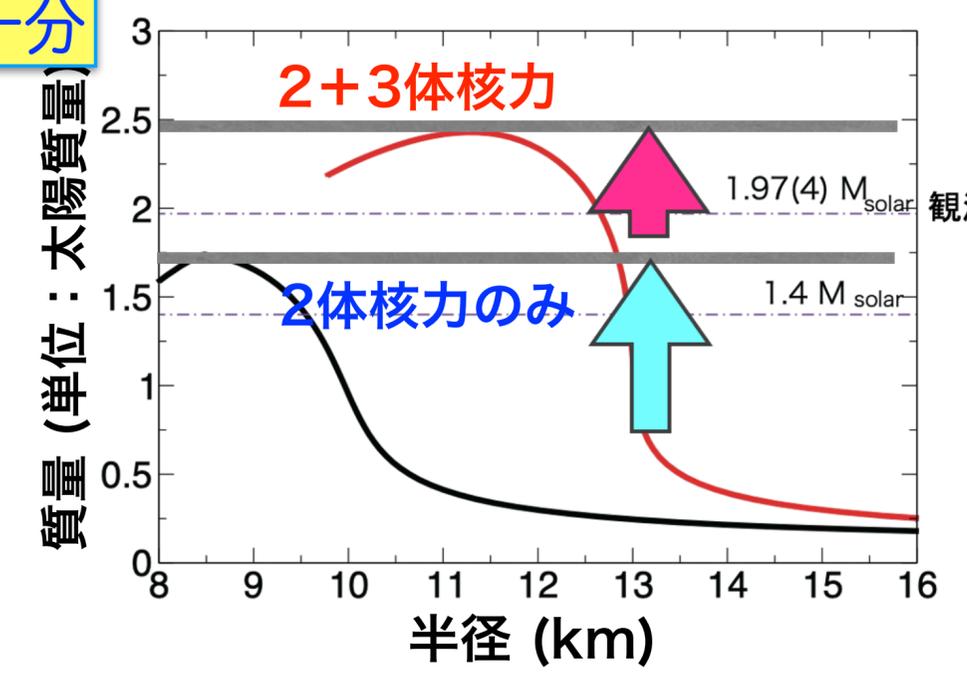
しかし、三体核力の定量的な理解は不十分



G. Hagen et al., Phys. Rev. Lett. 108, 242501 (2012)

中性子星の状態方程式

三体核力：重い中性子星の存在に不可欠



P. B. Demorest et al., Nature 467, 1081 (2010)

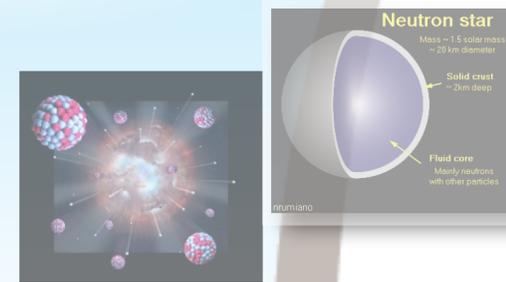
個別意見への回答 ③と関連

核融合・核分裂, 元素合成, 中性子星

核医学

RI製造

工学



概要

「核データ」の革新
～基礎と応用の架け橋～

少数核子系偏極実験

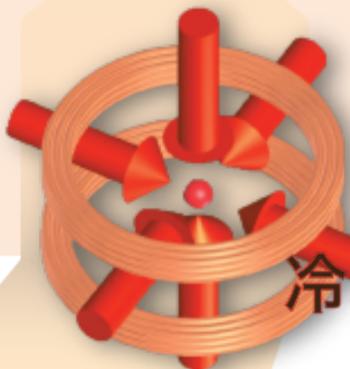
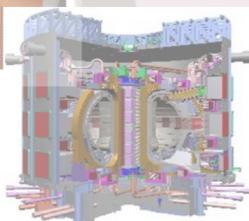
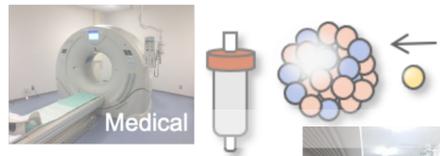
量子多体精密計算

三体核力の決定
核力の完成

原子核を精密に記述する基礎科学

予言力の高い原子核の核物性、反応断面積を創出
“世界初の量子多体系シミュレーションツール”

冷却原子実験



TEAM

～精緻な実験に基づく核力から
新しい科学の展開を目指して～

基礎科学



A班：三体核力の決定 少数核子系偏極実験 (関口)

三体核力を含む高精度な核力を完成 & カイラル有効場核力理論 (E. Epelbaum)



核力(相互作用)をインプット



B班：量子多体精密計算

(中務孝, 肥山詠美子, 緒方一介)

核子100体系の原子核構造・反応計算の確立

- ・無限小変位ガウス・ローブ関数展開法
- ・密度汎関数法
- ・原子核反応計算



C班：(堀越宗一) 冷却原子実験



計算手法の精度検証のための
ベンチマークデータ

基礎科学と同時に検討

D班：応用科学への展開

(大津秀暁, 菊永英寿, 小川美香子, 岩本修)

核データの革新

量子多体精密計算を基礎と応用の橋渡しの
役割を担う「核データ」のリソースとする



研究アドバイザー

研究連携：下浦享, 研究監査：酒井英行

ヘッドクォーター

総括補佐：深堀智生

総括補佐：松崎禎市郎

アシスタント：磯貝恵美子



J S T

プロジェクト推進部

杉山寿伸 古川雅士
中村亮二 永井諭子
飯田祐斗

指針・方向性

- 📌 “三体核力を意識すること”
- 📌 “基礎”に戻ることができる体制の構築
- 📌 3体核力は2体核力の「おつり」という理解ではなく、両者は同等に扱われるべき力である事を出発点とする



これまで&これから

2023年

- 10月1日 ERATO スタート
- 10月25日 キックオフミーティング 於東工大
- 11月23日 「ERATO を紹介する会」 於理研

2024年

- ・定例ミーティング 開始
各班活動、研究連携、全体議論
- ・全体会議：（年に2回）開始
各グループ研究活動と連携の議論を行う場
6月20日、11月19/20日
- ・HQ関係者の各班/Gr. 訪問による検討会
第1回目：大阪公立大学訪問（5月24日）
第2回目：東北大学 RARiS（9月10日,11日）

2025年

- ・HQ関係者の各班/Gr. 訪問による検討会
第3回目：筑波大学（5月16日）
- ・プロGRESSミーティング（全体会議）
- 6月30日&7月1日
- 秋開催
- ・11月：核データ研究会との共催会合

2026年

- ・中間レビュー

2027年

- ・藤田・宮沢70周年シンポジウム

2028年

- ・最終年度レビュー
- 都度、他企画のご相談、ご連絡をします



協同体制

• A, B 班連携

- 11th Chiral Dynamics (2024.8, ドイツ・ボホム)
- 23th Few Body Conference (2024.9, 中国・北京)
- Asia Pacific Conference of Few Body Problems in Physics (2025.9, ベトナム, 共催)

• B, D 班連携

- B³D meeting (核反応-核データ) : 定期開催 (毎 2ヶ月)
- BD班 意見交換会 : 定期開催 (毎 2ヶ月)
- 理研研究会「核反応の時間発展ダイナミクスの解明に向けて」(2024.9, 和光市, 共催)

• C 班 : 冷却原子-原子核物理 の協同

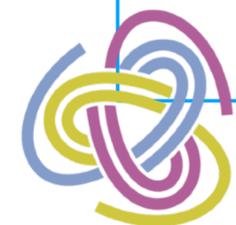
- C班 勉強会 : 月一開催

• 他分野との連携 (学協会、企業)

- Recent Progress in Many-Body Theories (RPMBT22) (2024.9, 筑波, 共催)
- 核データ研究会 (2024.11/ 2025.11)
- 日本原子力学会 (2024.9 / 2025.3)

• A,B,C,D 班の連携

- B1 主催 理論 workshop : 仙台 (2025.1), Bochum (2025.12)





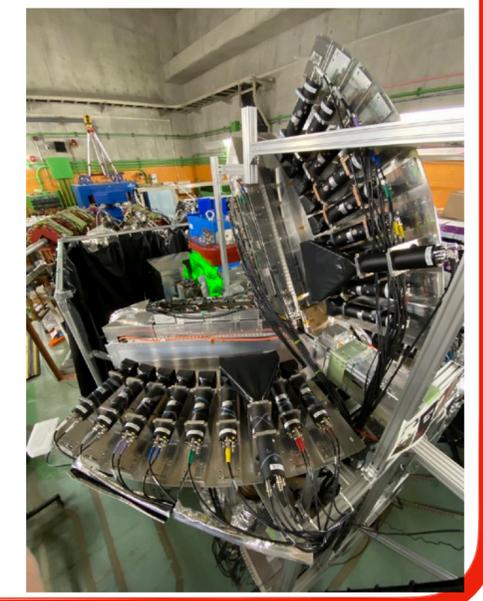
A班：三体核力の決定

三体核力を含む高精度な核力を完成

少数核子系偏極実験 (関口) & カイラル有効場核力理論 (E. Epelbaum)



- [実] 理研RIBFにおける重陽子-陽子弾性散乱のスピンの相関係数測定にむけた建設&開発
 - New 検出器 + New 偏極陽子標的による重陽子-陽子弾性散乱 (齋藤由子さん：博士論文 & ANPhA賞@INPC2025)
 - 偏極重陽子イオン源：水漏れ事故(2023年)を受け、修繕、整備、加速試験 (菅原さん発表)
 - 偏極陽子固体標的：高度化 (放射線損傷対応、偏極度向上) (高橋さん発表)
- [理] カイラル有効場における三体核力理論の研究 (H. Huesmannさん & Walkowiakさん発表)
- [理] 三核子系散乱/Femtoscropy における三体核力効果の議論 (S. Heihoffさん発表)
- [連] 理論：A班-B班の連携構築



C班：冷却原子実験

計算手法の精度検証のためのベンチマークデータ

2025年3月10日22時

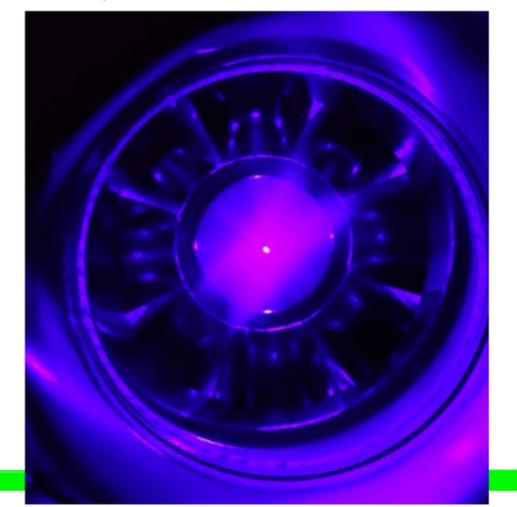
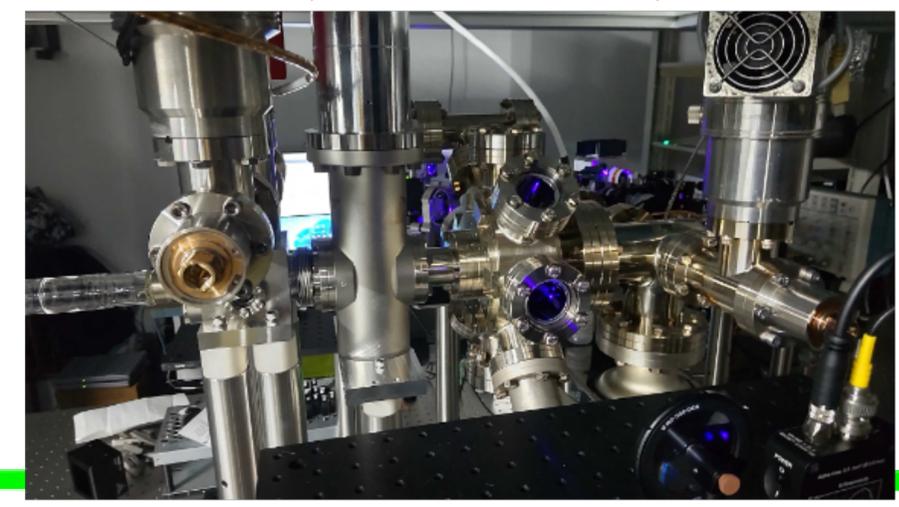
国内初となるDy原子のレーザー冷却の実現！

「冷却Dy原子による人工原子核の実現」

C班プロジェクト名を“DyNAMIQS”と命名
 Dysprosium-based Nuclear Many-body
 Interacting Quantum System (ロゴは後ほど発表)



(堀越宗一)





B班：量子多体精密計算・無限小変位ガウス・ローブ関数展開法 (B01 Gr.)・密度汎関数法 (B02 Gr.)・原子核反応計算 (B03 Gr.)

(中務孝, 肥山詠美子, 緒方一介)

核子100体系の原子核構造・反応計算の確立

📍 B01-02-03における連携

以下連携を本格的に開始

- ボソン (He原子) 系における少数系厳密計算と密度汎関数計算
- B01班の遷移密度を用いた軽核と核子の反応計算
- B02班の3体核力入り2核子間有効相互作用や核内重陽子分布を核反応へ適用

📍 D班との連携

- B+D / B3D : D班の出口戦略に関わる核構造・核反応についての議論.
 - 直接反応とCCONEの接続の議論 / ニュートリノ原子核反応に関わる共同研究の立ち上げ

📍 他：富岳による量子多体計算の開始

📍 査読付き学術論文

B01 : 10本代表的成果は以下2つ

- Myo+, "Variation of multi-Slater determinants in antisymmetrized molecular dynamics and its application to ^{10}Be with various clustering", PRC 108, 064314, 2023
- Q. Meng+, "Doubly heavy tetraquarks including one-pion exchange potential", PLB 846, 138221, 2023

B02 : 21本(うち投稿中7本): 代表的成果は以下の2つ

- K. Washiyama+, "Five-dimensional collective Hamiltonian with improved inertial functions", PRC 109, L051301 (2024);
5次元集団模型の微視的基礎付け、LQRPA慣性質量
- A. Kumar+, "Large-scale shell model study of β -decay properties of $N=126, 125$ nuclei: Role of Gamow-Teller and first-forbidden transitions in the half-lives", PRC 109, 064319 (2024); ベータ崩壊の大規模殻模型計算

B03 : 5本(うち投稿中2本): 代表的成果は以下の2つ

- T. Fukui+, "Uncovering the mechanism of chiral three-nucleon force in driving spin-orbit splitting", PLB 855, 138839 (2024);
3体核力をランク分類し、spin-orbit分離への影響を調査 **プレスリリース**

- Y. Chazono+, "Phenomenological approach for introducing 3NF contributions into p-d elastic scattering cross section", submitted to PRC;
pd散乱断面積を現象論的2体+3体有効相互作用を用いて記述

D班: 応用科学への展開

応用



D班：応用科学への展開

(大津秀暁, 岩本修, 菊永英寿, 小川美香子)

核データの革新

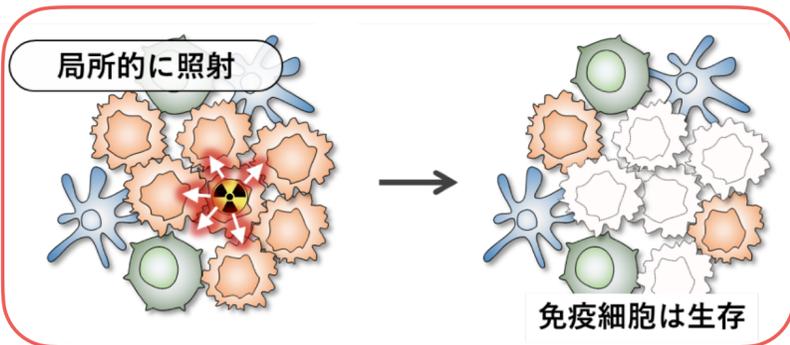
量子多体精密計算を基礎と応用の橋渡しの役割を担う「核データ」のリソースとする



総括補佐：深堀智生（日本原子力研究開発機構）

展開例1：RI製造と細胞投与

オージェ電子による
がん診断+治療の検討



Achievement

^{64}Cu 製造：東北大RARiS で継続中
北大へ提供
細胞投与：北海道大学で実施
 ^{77}Br 製造：テスト中@東北大

→小川さん：明日13:30-

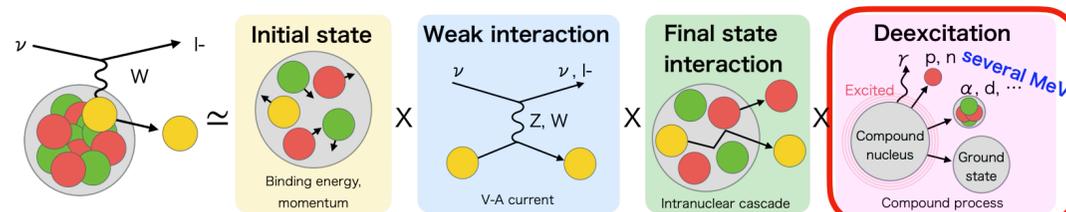
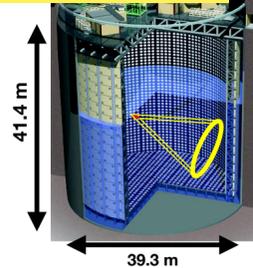
展開例2：ニュートリノ原子核反応と核データ

大型ニュートリノ検出器での
ニュートリノ原子核反応の理解 → 急務
新たな物理現象の発見につながる可能性

^{16}O から核子がひとつ消えた
状態の終状態を(精度よく)決める。
→ 実験の検討を開始

→安部さん：明日11:50-

Super-Kamiokande
(1996-, water)



核データの理解と展開

核データ利用

- ・ JENDL 5.0 核データベースの整備 (JAEA) →岩本さん：明日15:35-
- ・ CCONE計算コードをベースとした計算システム(+ビジュアライザ)の整備 (JAEA+理研) →酒井さん：明日16:00-

核データ高度化/B3班との連携

- ・ SCDW 計算コードとCCONE 計算 (Exciton Model)の相違点、比較方法 →理解は深まったが連携コード作成までは至っていない。

B班精密量子多体計算への要請

- ・ 7体系の構造/反応計算の検討の要請(ベンチマークとして)
- ・ 他、核データ(断面積, 半減期...)と実験データに乖離がある反応の提示

B班との連携



核力(相互作用)を
インプット

プロジェクトの紹介：パンフレット

ERATO

関口三体核力プロジェクト

原子核に秘められた力の謎を解く



A

実験+理論による三体核力の構築

加速器実験により、三核子

TOMOEプロジェクトは、基礎
つくるのはグループAによる「
まず、関口グループが加速器
運動エネルギーをもった重陽
照射し、特定の角度に重陽子
率)を測ることで、三体核力の効
また、実験の条件をいろいろ
態なので、励起して変形すると
の向きがそろっている偏極
スピンをコントロールするこ
(ハミルトニアン)をもつのか
行い、三体核力の本質を明ら
の高い核力を構築するための



04

B

量子多体計算で原子核の構造を解く

軽元素の原子核の状態を精

グループAが実験と理論から正
ミルトニアン)をもとに、核子4個(ク
子核)ほどの軽元素の原子核の工
性=波動関数)を計算で精密に
のグループB1です。

右上の図でいえば、核子たちが最
ギが最も低い基底状態の値を求
開法)。核子が5個以上集まった原
すが、実際は計算量が膨大になるの
になります。そこで、TOMOEプロジ
や量子コンピュータを駆使してこの
学の専門家がタッグを組んで挑戦し
「計算による数値実験で、原子核の
インターフェースの開発を目指した

重い元素の原子核の状態を明

肥山グループからのデータを引
元素に至る原子核の状態を計算
グループB2です。ここで使うのは「密
かれば基底状態の原子核のエネル
密度汎関数法は電子の多粒子系
ので、軽元素の原子核ほど精度が高
精度の高い軽元素の原子核の計
反対に、原子核が重いときには、密
「やがては、超高密度の謎の天体
のかも明らかになるでしょう。軽
面白いです」と中務博士。

さらに中務グループでは、基底状
核も密度汎関数によって求めてい
果は、原子核での反応を扱う緒方一

06

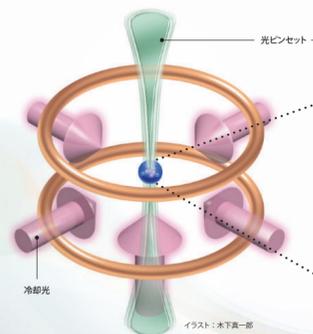
C

冷却原子を使った「量子シミュレータ」で人工原子核をつくる

原子をレーザーで極低温に冷やした希薄な原子気体を用いて、量子現象を調べよう
という動きが近年活発になっています。このよ
んでいます。

量子シミュレータでは、原子間に働く力(相互
という現象を利用して制御できるので、原子は
量子現象も調べることができます。原子と原子
が小さいのですが、原子系全体と原子間相互作
子間相互作用のエネルギーの比を同じくらいに
に拡大した人工原子核の中で、グループBの
堀越宗一博士たちのグループCです。

多数の粒子を制御する量子シミュレータの
いう確率で観測されているかの平均から、実
ターに視覚的に立ち現れてきます。「これまで
ので、このプロジェクトで50個、100個レベル
るのか、期待しています」(堀越博士)。



量子シミュレータ
いくつかのレーザーにより原子を閉じ込める場(ウィット)を形成す
る(左図)。ここに別のレーザーを利用した「光ピンセット」(図中の緑
色の部分)で原子を1個ずつ移動させ、目的の場所に運ぶ。こうして
原子核の核の状態を原子で代替してシミュレートする。

08



Three-Nucleon Force Project



Three-Nucleon Force Project

D

応用科学への展開

核データベースの作成からその応用まで、きめ細かくコーディネート

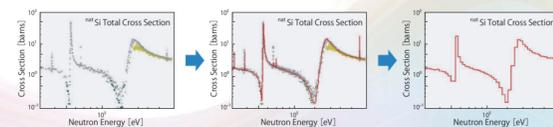
応用科学への展開

三体核力を考慮した新たな核データベースづくり

岩本修博士たちのグループは、原子核の反応データをデータベースにまとめたENDL5を構築
した立役者です。世界中の実験データを収集・評価し、実験の空白地帯は理論的に詰め、約10年
の歳月をかけて作り上げました。中性子に関する反応だけで800核種に上ります。

核データは長年、原子炉の設計など原子工学分野で使われてきましたが、最近では核医学
の分野はもちろんのこと、電子デバイスの書き込み符号に宇宙線などの環境放射線によって誤り
が生じる問題など、電子工学分野でも盛んに用いられています。量子コンピュータの開発では、
誤り訂正が最重要課題の一つになっています。

応用範囲が広がると、核反応のデータもさらに広範囲のものが求められるようになります。原
子力以外の分野で使われるデータについてはまだ十分とはいえませんが、実験で全てをカバーし
ていくのは難しいでしょう。「理論を基本的なところから積み上げて予測精度を上げていくことが
できれば、データの信頼性が向上し、カバーできる範囲も広がっていきます。それを基に、どのよ
うな次世代核データベースが作られるか」と、岩本博士は構築しています。



放射性同位元素 (RI) の核データを検証し、RI製造技術を確立

菊永英寿博士たちのグループは、加速器で加速した電子を物質に入れ、そこから出てくるアル
ファ粒子(ヘリウムの原子核)のような荷電粒子、あるいは電荷を持たない中性子、あるいは
制動放射線(光)を標的に当てて、RIをつくっています。このとき、核反応が起こる確率は、核
データの反応断面積の値によります。この値が2倍違えば収量は2倍違ってきます。核医学な
どで使う商用的なRI製造事業を計画するときは、核データの予測値を使うので、データが正し
くないと事業計画に支障が出ます。そのためデータの検証は不可欠で、菊永博士たちは反応断面積の測定がいちばん難しい「光入
射」の方法を試みています。

このプロジェクトでも、理論計算に基づいた新しい値が示されれば、それを実験値と比べ検証します。また、車載型RIを製造し、

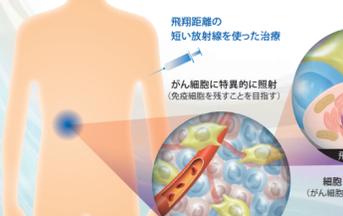
核データベースの作成からその応用まで、きめ細かくコーディネート

グループに引き渡してもいきます。
「RIを新しくつくるとき、過去にあまり例のない反応を使
うときや、昔のデータで信頼性が低いときには、実験をして
データを取り直します。信頼できる正確な核データがあれば、いろ
んな計画を立てられます。菊永博士は究極のデータを目指しています。

新しい核種を使った放射線診断薬・治療薬の開発

近年、核医学の発展は目覚ましく、生体機能を映像化する陽電子放出断層撮影(PET)や
光子放射型コンピュータ断層撮影(SPECT)などのイメージング診断が多くの病院で使
ようになりました。PETによるがんの診断では、がん細胞に取り込まれやすいブドウ糖
を放出する放射性ブドウ糖(フルクトース18)を組み合わせた放射性薬剤が一般的に使われてい
ます。小川美香子博士たちのグループでは、放射性物質を使った診断薬の開発だけでなく、
がん細胞に特異的に結合する放射性同位元素を用いた診断薬の開発に力を入れています。がん細胞という、細胞の集合体イメージ
が、そこにはがん細胞だけでなく、免疫細胞なども混じっています。ベータ線やエック
スの強い放射線を照射すると、免疫細胞まで殺してしまうことになり、また、がん細胞
だと増殖する危険性が高くなります。一方、飛行距離が短く標的の近くで一枚
ることのできるアルファ線や、1個の細胞内にとどめることができるオージェ電子とい
うのが、がん細胞だけをターゲットに消滅させることができ

小川博士は「診断と治療の両方できる(Radiotheranostics)性同位元素薬剤の開発」がプロジェクトの本命だと考えてい



細胞レベルに照射(がん細胞の特定部位に照射)

飛行距離の短い放射線を使った治療

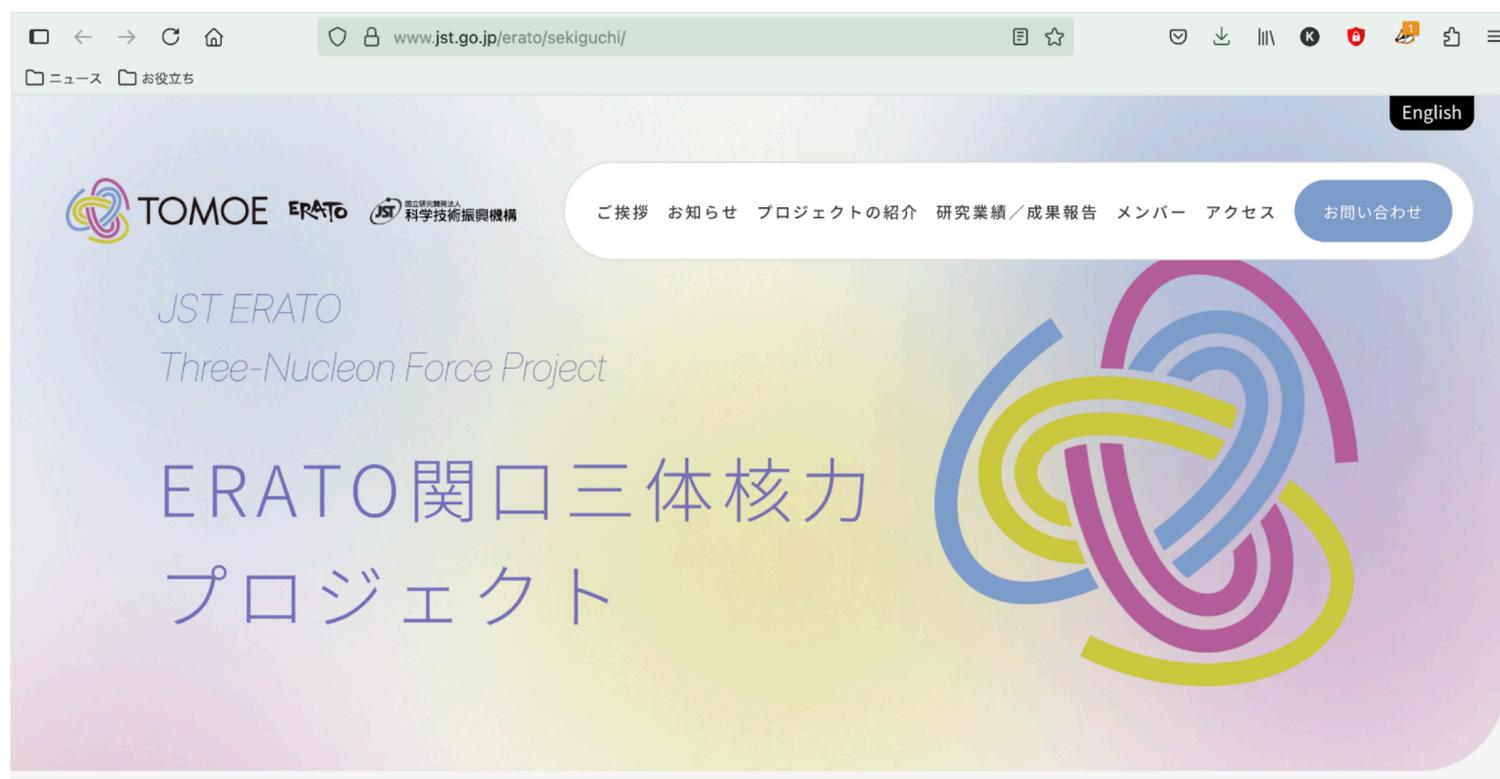
がん細胞に特異的に照射(免疫細胞を殺すことを目指す)

東北大学の大型電子線形加速器 大規模放射線の研究開発を行っている。

プロジェクトの紹介：ホームページ

一般向け

 <https://www.jst.go.jp/erato/sekiguchi/>

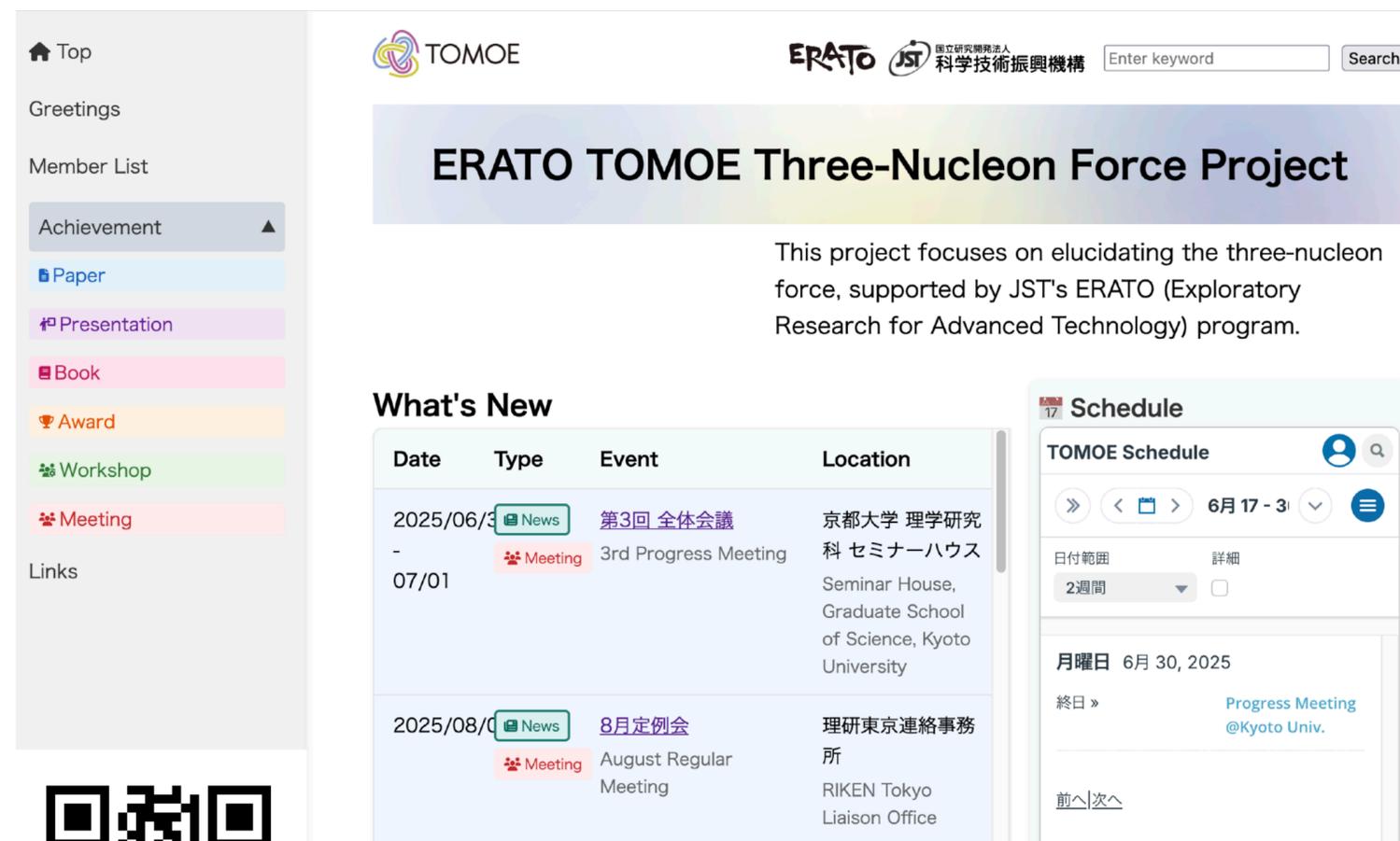


The screenshot shows the homepage of the ERATO TOMOE Three-Nucleon Force Project. The page features the project logo, navigation menus, and a large graphic with the text "ERATO 関口三体核力プロジェクト".



関連研究者向け

 <https://ribf.riken.jp/TOMOE/>



The screenshot shows the homepage for researchers, featuring a sidebar with navigation options like "Top", "Greetings", and "Member List". The main content area includes the project title "ERATO TOMOE Three-Nucleon Force Project" and a "What's New" section with a table of events.

Date	Type	Event	Location
2025/06/30	News	第3回 全体会議	京都大学 理学研究科 セミナーハウス
-	Meeting	3rd Progress Meeting	Seminar House, Graduate School of Science, Kyoto University
2025/08/01	News	8月定例会	理研東京連絡事務所
-	Meeting	August Regular Meeting	RIKEN Tokyo Liaison Office



TOMOE プロGRESS ミーティング 2025/6/30-7/1



30 June 2025

13:00	Closed session Seminar House in Yoshida Campas, Kyoto Univ.	13:00 - 13:30
	総括挨拶 Kimiko Sekiguchi	13:35 - 13:50
	A1班報告 Kimiko Sekiguchi	13:50 - 14:00
14:00	重陽子-陽子弾性散乱のスピンの相関係数測定に向けた開発 Yuko Saito	14:00 - 14:20
	重陽子-陽子弾性散乱測定に向けた重陽子ビームの偏極度測定 Hiroki Sugahara	14:20 - 14:35
	室温偏極固体陽子標的の開発状況 Daichi Takahashi	14:35 - 14:50
15:00	Coffee Seminar House in Yoshida Campas, Kyoto Univ.	14:50 - 15:10
	C班報告 Munekazu Horikoshi	15:10 - 15:20
	三次元量子物質波顕微鏡の開発 Kohei Kato	15:20 - 15:40
16:00	冷却原子系と三体力 Hiroyuki Tajima	15:40 - 16:20
	Coffee Seminar House in Yoshida Campas, Kyoto Univ.	16:20 - 16:50
	A2班報告 Evgeny Epelbaum	16:50 - 17:00
17:00	Can the strong interactions between hadrons be determined using femtoscopy? Sven Heihoff	17:00 - 17:15
	Subleading c_D-like three-nucleon interactions Henri Huesmann	17:15 - 17:30
	Analysis of Gradient-Flow Regularized nN Scattering Patrick Walkowiak	17:30 - 17:45

	B1班報告 Seminar House in Yoshida Campas, Kyoto Univ.	Noritaka Shimizu 09:30 - 10:00
10:00	Resonance spectroscopy of light unstable nuclei with complex scaling Seminar House in Yoshida Campas, Kyoto Univ.	Takayuki Myo 10:00 - 10:30
	B2班報告 Seminar House in Yoshida Campas, Kyoto Univ.	Takashi Nakatsukasa 10:30 - 10:40
	有限振幅法エミュレータとその応用 Seminar House in Yoshida Campas, Kyoto Univ.	Nobuo Hinohara 10:40 - 11:05
11:00	密度依存有効相互作用による殻模型計算 Seminar House in Yoshida Campas, Kyoto Univ.	Kota Yoshinaga 11:05 - 11:20
	Coffee Seminar House in Yoshida Campas, Kyoto Univ.	11:20 - 11:50
12:00	ニュートリノ核反応と核データ Seisho Abe	11:50 - 12:20
	Lunch	12:20 - 13:30
13:00	核医学と核データ Mikako Ogawa	13:30 - 14:15
	B3班報告 Seminar House in Yoshida Campas, Kyoto Univ.	Kazuyuki Ogata 14:15 - 14:25
	三体核力と原子核構造：密度汎関数理論の視点から Seminar House in Yoshida Campas, Kyoto Univ.	Hiroki Kida 14:25 - 14:50
15:00	d-Xi相関関数に対するバリオン3体力の影響 Seminar House in Yoshida Campas, Kyoto Univ.	Gen Uratsu 14:50 - 15:15
	D班報告 Hideaki Otsu	15:25 - 15:35
	JENDLの核データ評価とTOMEプロジェクトへの期待 Osamu Iwamoto	15:35 - 16:00
16:00	CCONEベースの計算システムの開発 Seiya Sakai	16:00 - 16:20
	Meeting remarks Kimiko Sekiguchi	16:20 - 16:30

招待講演

開催日時：6月30日 15時40分ー16時20分

講師：田島裕之氏（東大理）

講演題目：冷却原子系と三体力

開催日時：7月1日 11時50分ー12時20分

講師：安部清尚氏（東大宇宙線研）

講演題目：ニュートリノ核反応と核データ

開催日時：7月1日 13時30分ー14時15分

講師：小川美香子氏（北海道大学薬学部）

講演題目：核医学と核データ



講演者の方：

報文集を作成予定です。

発表資料のご提供をお願いします。

TOMOE プロジェクト

(ERATO 関口三体核力PJ)

プロGRESSミーティング

二日間、宜しく申し上げます！

