

RIBF 理論研究推進会議・理研仁科センターRIBF 研究部門 主催

RIBF若手放談会: エキゾチック核物理の広がり

平成31年2月18日 － 2月20日

理研神戸キャンパス・融合連携イノベーション推進棟

世話人

阿部 喬（東大CNS）、上坂友洋（理研仁科）、上野秀樹（理研仁科）、木村真明（北大理）、
櫻井博儀（東大理/理研仁科）、笹野匡紀（理研仁科）、鈴木大介（理研仁科）、
新倉潤（東大理）、初田哲男（理研 iTHEMS/仁科）、堀内 渉（北大理）、松本琢磨(九大理)、
吉田賢市(京大理)

1 はじめに

新奇な多体相関・集団運動の発現可能性の研究は、原子核物理の醍醐味の一つである多様性の探究と、それを生み出すメカニズムの普遍性の追究に直結するものであり、階層性を越えた広く多体系の物理の中心的課題でもあります。

2007 年から稼働している RIBF では、天然には存在しない不安定核（中性子過剰核、陽子過剰核、超重核）を主な研究対象とした多体系の物理が研究されています。RIBF の完成から 10 年が経った今、これまでの研究成果を振り返り、これまでに何がわかったのか、何が新たな疑問として出てきたのかを実験・理論の研究者が概観し、そして今後 10 年、20 年どのような核物理の展開を期待するのかを議論する会を設けることにしました。

本放談会は、2017 年 8 月に行われた第一回の RIBF 理論若手放談会に続く二回目の開催となります。今回の放談会は、RIBF に限定せず広い意味での核物理・ハドロン多体系物理の若手研究者が理論・実験の枠を超えて議論や交流をし、将来の夢を語り合える場としたいと思います。通常の研究会のような既存の研究計画発表やレビュートークは極力少なくし、自由奔放・奇想天外なアイデアでも気軽に話し合える会にするため、会議で使用した講演者のスライドは原則公開しません。議論に参加したい方はぜひ直接会場にお越しください。

それぞれの招待講演には、長めの議論の時間を設けます。参加者の皆様で、活発なご議論をお願いします。関心を持たれる多くの若手研究者や学生の参加・講演も大いに歓迎いたします。

RIBF 若手放談会：エキゾチック核物理の将来

平成 31 年 2 月 18－20 日

理研神戸キャンパス・融合連携イノベーション推進棟 8 階講堂

プログラム

2 月 18 日 (月)

9:00 – 9:20

受付

座長：松本 琢磨

9:20 – 9:30

松本 琢磨 (九大)：趣旨説明

9:30 – 10:05

新倉 潤 (東大)：不安定核物理のこれから

10:05 – 10:40

関澤 一之 (新潟大)：高強度場科学の進展と原子核物理への応用

10:40 – 11:00

(休憩)

座長：佐藤 弘一 (大阪市大)

11:00 – 11:35

鹿野 豊 (慶応大)：ABC of Weak Measurement

11:35 – 12:10

内藤 智也 (東大)：机上の Coulomb

12:10 – 13:40

(昼食休憩)

座長：鷲山 広平 (九大)

13:40 – 14:15

坂口 聡志 (九大)：安定の島

14:15 – 14:50

菊地 右馬 (徳山高専)：不安定核物理の方向性

14:50 – 15:25

西村 信哉 (京大基研)：これからの r プロセス研究と原子核物理

15:25 – 15:45

(休憩)

座長：市川 雄一 (理研)

15:45 – 16:20

Riccardo Orlandi (JAEA)：Steps towards the Island of Stability: heavy actinides and super heavy elements at the JAEA Tandem facility

16:20 – 16:55

谷村 雄介 (東北大)：Clusterization and deformation of multi-Lambda hypernuclei within relativistic mean-field model

16:55 – 17:15

(休憩)

座長：関澤 一之 (新潟大)

17:15 – 17:50

吉田 聡太 (東大)：原子核構造の物理における統計的手法の応用

17:50 – 18:25

四方 悠貴 (京大)： ^{10}Be における双極子励起モードの研究

18:30 – 20:30

(懇親会)

2月19日(火)

座長：長濱 弘季(東大 CNS)

9:30 – 10:05 瀧 雅人(理研)：深層学習を使った最近の画像処理の進展

10:05 – 10:40 三木 謙二郎(東北大)：TBA

10:40 – 11:00 (休憩)

座長：瀧 雅人(理研)

11:00 – 11:35 角田 直文(東大)：原子核殻模型の統計力学的理解

11:35 – 12:10 安井 繁宏(慶応大)：チャーミングな原子核

12:10 – 13:40 (昼食休憩)

座長：角田 直文(東大 CNS)

13:40 – 14:15 長濱 弘季(東大 CNS)：基本対称性の高精度検証

14:15 – 14:50 倪 放(筑波大)：断熱的自己無撞着集団座標の方法で探る原子核の新しい集団運動

14:50 – 15:10 (休憩)

座長：谷村 雄介(東北大)

15:10 – 15:45 日野原 伸生(筑波大)：原子核密度汎関数の決定と関連する実験データ

15:45 – 16:20 笹野 匡紀(理研)：量子力学的原子核実験研究

16:20 – 16:40 (休憩)

座長：菊地 右馬(徳山高専)

16:40 – 17:15 遠藤 晋平(東北大)：Universal few-body physics and clusters with ultracold atoms

17:15 – 17:50 土井 琢身(理研)：格子 QCD による原子核物理：現状と展望

17:50 – 18:30 議論

2月20日(水)

座長：日野原 伸生(筑波大)

10:00 – 10:35 田中 翔也(近大)：高励起複合核における核分裂および中性子放出の理論研究

10:35 – 11:10 小林 信之(RCNP)：チャレンジングな核反応実験

11:10 – 11:45 阿部 喬(東大 CNS)：大規模数値計算の現在と未来

12:10 – 13:40 (昼食休憩)

座長：阿部 喬(東大 CNS)

13:40 – 15:00 鈴木 大介(理研)：総括および議論



図 1：放談会風景（理研仁科センター報告書より転載）

図 2：懇親会風景（理研仁科センター報告書より転載）



図 3：放談会風景（JICFuS 報告書より転載）



図 4：理研神戸外観（JICFuS 報告書より転載）

2 講演内容

不安定核のこれから

新倉潤（東京大学）

2007年に理化学研究所のRI Beam Factory (RIBF) が稼働を開始してからおよそ10年が経った。放談会ではまず、2013年に出版された「日本の核物理将来レポート」[1]を参照しながら、当時我々がRIBFでどのような物理を展開することを計画し、どのような結果を得たのかについて概観した。RIBFの完成により、我々が核図表上で研究対象にできる原子核の数は飛躍的に拡大し、多くの成果を出すことができた。それはまた、10年前に我々がやりたいと考えていた研究はほぼやり終えたとも言える。

それでは、今後の10年間どのような物理を我々は展開していくのだろうか。

現在、理化学研究所の仁科センターでは、「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」というタイトルで、学術会議大型研究計画に関するマスタープランにRIBFのアップグレードを提案している。これは加速器の更新と改造によって現在のRI ビーム強度をおよそ20倍に増強し、さらなる核図表拡大を目指すものである。しかし、たとえアップグレード計画が実現したとしても、現実には高々1つか2つ程度中性子または陽子が過剰な原子核が新たに生成されるだけであり、ビーム強度増強を基礎とした核図表拡大を旗印に研究を進めることの限界も見え始めている。

核図表の拡大だけでは、原子核を理解したとは言えない。現在でもユーザーレベルでは、様々な物理量測定により原子核の理解を一層深めるべく、色々な実験装置やビームラインの開発計画が進行している。もしかしたら、我々は何をもって「原子核を理解した」とするのか、その定義から考え直さなくてはならないのかもしれない。必ずしも誰かが答えを持っていることではないが、本放談会が今後の不安定核物理、ひいてはもっと広い意味での原子核物理の将来を考えるきっかけになればと思う。

本公演の最後で、内閣府による革新的研究開発推進プログラムImPACTの1つ「核変換による高レベル放射性廃棄物の大幅な低減・資源化」で進められている大強度重陽子ビーム建設計画を紹介した。これは、これまでにない超大強度重陽子ビームにより大量の中性子やミューオンを生成し、原子炉等で生成する核廃棄物の核変換に利用する計画である。この加速器は主に核変換を目的として設計されているため不安定核物理と直接関係はないが、大量の中性子・ミューオンビームはこれまでにない原子核研究を生み出す可能性がある。本講演では詳細には触れなかったが、個人的には将来この加速器で生み出される大量のミューオンを使った原子核実験により、エキゾチック原子核が作るエキゾチック原子の分光実験をやりたいと考えている。

参考文献

[1]「日本の核物理将来レポート」, 原子核研究 Vol. 57, Supplement 2 (2013).

高強度場科学の進展と原子核物理への応用

関澤 一之（新潟大）

本講演では、これから数十年の内に実現され得る新しい原子核物理の可能性として、超高強度場科学の原子核物理への応用について議論した [1]。ここで言う「超高強度場」とは、超高強度レーザーに付随する極限的な場を意味している。2018 年のノーベル物理学賞に代表されるように、1985 年の G. Mourou 等によるチャープパルス増幅法の発明以降、レーザー強度は飛躍的に、かつ、年を追うごとに増大しており、様々な分野を巻き込んで新奇な現象の探求と議論が進められている [2, 3, 4]。

その中でも本講演では、超高強度場科学について調べていく中で特に私が興味を持った、レーザーイオン加速について紹介した。レーザーイオン加速は 2000 年に発見された、高強度レーザーを薄膜などの標的に照射した際に、MeV を超えるエネルギーに加速されたイオンが放出される現象である [5]。

もし、既存の加速器よりずっとコンパクトで、レーザーで自在に駆動する高強度イオンビームが実現されれば、これまでの常識に捉われない新しい実験が可能になるのではないか。事実、現段階で既にレーザーイオン加速によって核反応を起こせることは確認されており、医療物理への応用へ向けた研究も精力的に進められている。これまでの高強度場科学の目覚ましい発展を見るに、近い将来に原子核物理に影響を及ぼす領域に達するということは、想像に難くない。

レーザーイオン加速は、「従来の加速器を用いない」（もしくは両方を組み合わせることによる）新しい核物理の探求手段をもたらすのではないか。エキゾチック核物理の将来の可能性の一つとして、視野を広げ、原子核及び高強度場物理コミュニティ全体として、真剣に考え始める必要性について議論した。

参考文献

- [1] 発表資料（英語版）は以下の URL に公開されています: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.32952.60162>
- [2] T. Tajima and G. Mourou, Zettawatt-exawatt lasers and their applications in ultrastrong-field physics, Phys. Rev. STAB 5, 031301 (2002).
- [3] A. Di Piazza, C. Müller, K.Z. Hatsagortsyan, and C.H. Keitel, Extremely high-intensity laser interactions with fundamental quantum systems, Rev. Mod. Phys. 84, 1177 (2012).
- [4] K.W.D. Ledingham, P. McKenna, and R.P. Singhal, Applications for Nuclear Phenomena Generated by Ultra-Intense Lasers, Science 300, 1107 (2003).
- [5] A. Macchi, M. Borghesi, and M. Passoni, Ion acceleration by superintense laser-plasma interaction, Rev. Mod. Phys. 85, 751 (2013).

ABC of Weak Measurement

鹿野 豊（慶應義塾大学、チャップマン大学）

原子核・ハドロン実験分野において、散乱実験のデータから事後処理をして所要のデータだけを抜き出すことは多く行われている。これは全く別の量子測定理論や量子基礎論の分野で発展してきたアイディアである「弱測定」と親和性があるかもしれないということで、下記の 2 点について簡単な解説を行った。1 つ目は、信号

増幅の可能性である。量子測定 of 文脈では、「弱値増幅」と呼ばれている技法であるが、通常、ある量子状態に対して、測りたい物理量の期待値を取り出す手法であるが、これでは、期待値のシフトは測定系の量子状態をあまり変化させない場合において有用でない。そこで、特定の量子状態のみを選択して（これを事後選択と呼ぶ）、測定を行うと、測定系のシフトが大きくなるというものである。これは一見、これまで原子核・ハドロン分野の実験においても実験されてきた技法のように思えるが、特定の「量子状態」に射影をするということから、位相情報をどのように引き出すのか？という点が重要である。今後、原子核・ハドロン分野の実験において、弱測定の理論を応用しようとした際に重要な要素となり得ることが指摘された。また、弱値増幅した情報が物理的に意味のある情報を含んでいるか？ということも重要である。この点に関しては、原子核・ハドロン分野の知見を専門としない講演者であったため、どのような情報が測定出来ると、理論と実験の架け橋となりうる事が出来るのか？ということが議論の対象となることが指摘された。

また、散乱理論と弱測定の実験結果である「弱値」に対して、対応関係があることが示された。散乱理論における in coming 状態、out going 状態に対する遷移確率を求めることとなるが、「弱値」はその遷移確率振幅の情報を含む、幾何学的位相との対応関係がある。その対応関係について単純な例で示した。この観点においては理論的な関係を示しただけで、今後、散乱実験系で何をどのような設定にすれば良いかについては議論することが出来なかった。また、遷移確率振幅の情報を求められたところで、散乱のどのような情報が新たに物理的に分かり、どのような物理的な情報を詳細に知ることが出来るのか？ということが今後議論しなければならない対象として議論された。しかし、物理的な対応関係を示すことが出来れば、何かしら今までに無かった原子核・ハドロン実験の情報が計算することなく測定出来る可能性を示すことが出来た。

また、基礎学問のあり方について議論に及んだ。カルフォルニア工科大学の Jean-Lou Chameau 学長 (当時) の 2012 年のスピーチを引用し、真のイノベーションとは何か？基礎学問の果たすべき役割とは何かという部分にまで議論が及んだ。その中で、原子核・ハドロン物理学として次の大きな疑問とは何か？更には、「われわれをとりかこむ自然界に生起するもろもろの現象 — ただし主として無生物にかんするもの — の奥に存在する法則を、観察事実と拠りどころを求めつつ追求すること」(朝永振一郎「物理学とは何だろうか」の序文より引用) という物理学において、次なる大きな疑問とは何かというところにまで議論が及んだ。

机上の Coulomb

内藤 智也 (東京大学, 理研仁科センター)

はじめに

本来、すべての量子多体系の性質は、Hamiltonian (または Lagrangian) から第一原理的に解くことができ、この解と実験との違いから、未知の物理量の決定や新たな物理の発見が可能であるはずである。しかし、我々が持っている量子多体問題の計算手法は未だ開発途上であり、十分な精度が得られていない。

更に、原子核物理学における重要な研究テーマのひとつとして、核力の理解が挙げられる。真空中の 2 体核力については実験的に詳細に理解されている [1] もの、量子色力学 (QCD) からの第一原理的な導出である格子 QCD 計算は未だ途上にある [2]。また、媒質中の核力、すなわち原子核や核物質中における有効核力は、真空中の核力とは大きく異なることが知られている [3]。したがって、理論計算と実験のズレは、未知の物理量や新たな物理だけでなく、多体問題の手法に由来する問題、核力の理解不足に由来する問題にも起因する。

一方、物性物理学の興味の対象である原子、分子、固体は、原子核と同様に量子多体問題であり、違いは相互作用が違うだけであるとも考えることができる。さて、物性物理学の世界では、相互作用は一般には、よく知られ

た Coulomb 力であるため、計算手法がしばしばよく発展している [4, 5]. そこで、物性物理学の知見を用いて、まずは量子多体問題の計算手法の精度向上を目指し、その上で核力や未知の物理の理解をめざすことを考える.

Coulomb 力と原子核物理—荷電対称性の破れ—

核力のより深い理解の方向性のひとつとして、多体問題中の核力の荷電対称性の破れが挙げられる. 現実的核力では、すでに荷電対称性の破れの項が考慮されているものが提案されている [1]. 一方、媒質中の有効核力の荷電対称性の破れは現在盛んに研究されているテーマである. この核力の荷電対称性の破れを超許容 β 崩壊に考慮することで、素粒子物理学の CKM 行列の V_{ud} 成分という、クォークのフレーバー対称性の破れも理解することができる [6, 7]. また、核力の荷電対称性の破れが重要な寄与をする物理量として、isobaric analog state (IAS), mirror nuclei mass difference が挙げられ、 ^{208}Pb の IAS Energy と、 ^{208}Pb の中性子スキンの厚さには関連があることが知られている [8].

実験的に得られる荷電対称性の破れの中には、核力由来だけでなく、Coulomb 力由来の効果も含まれている. したがって、Coulomb 力の高精度な計算により、核力由来の荷電対称性の破れを取り出す必要がある. しかし、密度汎関数理論で広く使われている有効核力は殆どの場合で、核力の荷電対称性の破れは考慮されておらず、Coulomb 力も計算コストの問題から、Hartree-Fock 近似を使うべきであるところを、Hartree-Fock-Slater 近似 (局所密度近似, LDA) または、交換項を無視した Hartree 近似であることが多い [9, 10, 11]. これらの近似は、原子核の性質を大域的に再現するためには問題が生じない場合でも、荷電対称性の破れの議論をする際には問題が生じる.

著者らは、この問題を解決するために、厳密な Fock 項を有効的に取り込む手法 (一般化勾配近似, GGA) を物性物理学の手法を援用することで開発した [12, 13]. また、更に、核子の有限半径や真空偏極などの、他の無視できない効果を自己無撞着に取り込んだ計算の開発も成功した [14]. また、近年、 ^{208}Pb の IAS energy を再現する核力の荷電対称性の破れを取り込んだ汎関数が提案されている [8]. 他にも、Coulomb 力や荷電対称性の破れに注目した研究が近年盛んに行われている [15, 16, 17]. これらの、近年の Coulomb 力や核力の荷電対称性の破れに関する研究は、mirror nuclei mass difference や IAS energy, 超許容 β 崩壊などの理解だけでなく、陽子過剰核のより精密な理解にも寄与すると思われる. しかし、これらの理解のためには、より多くの陽子過剰核や IAS の実験結果が必要であることも明記しておく.

Coulomb 力と核化学—超重元素の電子状態

今までは、Coulomb 力と原子核物理学の関係性について注目して議論を行ってきた. しかし、仁科センターで行われている実験に目を向けると、RIBF におけるエキゾチック原子核実験以外にも、GARIS 等を用いた超重元素の実験が重要な柱となっている. 超重元素の科学というと、超重元素の原子核構造、反応など、原子核物理学からの観点がしばしば取り上げられるが、同様に興味を持たれていることとして、超重元素の化学的性質、すなわち電子状態が挙げられる. 実際に、仁科センターでも核化学チームが、多くの超ウラン元素、超重元素の化学的性質の研究を行っている.

今年 (2019 年) は、元素周期表が提唱されて 150 周年の節目の年であるが、この元素周期表は、縦の列 (族) に同じような化学的性質の元素が並ぶように作られている. これは、価電子の電子配置が同一であることに起因している. 近年、多くの人工合成元素が発見されているが、これら人工合成元素の元素周期表における配置は、化学的性質を無視して順番に並べているにすぎない. したがって、自然な興味として、これらの超重元素は果たして元素周期表の周期性を再現するかどうかが生じる. 実際、2015 年に日本原子力研究開発機構 (JAEA) のタンデム加速器で合成されたローレンシウムのイオン化エネルギーの測定実験によると、他のランタノイ

ド・アクチノイド元素とは異なる傾向を示し、更に直上の元素であるルテチウムのイオン化エネルギーとも異なる傾向を示した [18].

一方で、理論的な観点では、超重元素の電子状態は強い Coulomb 外場中の、相対論効果が無視できない多体問題と捉えることができる。実際に、相対論効果と Coulomb 力に対する補正項を考慮することによって、ルテチウムとローレンシウムの電子配置が異なることが、著者らの研究によって判明した [19]. これは、“価電子配置が同一のものが同じ族に並ぶ”という周期性の破綻を示唆している。より重い領域の化学的性質についても、相対論効果と強い Coulomb 場によって周期性の破綻が確認できる可能性がある。

また、強い Coulomb 場では、相対論効果以外にも、真空偏極や自己エネルギーといった量子電磁力学による効果も無視できない可能性がある。ヘリウム様、リチウム様などの非常に大きく正に帯電したイオンにおける量子電磁力学の精密な検証は、理論、実験の双方から行われている [20, 21, 22] が、多体問題中の量子電磁力学については未だに検証がなされておらず、あまり広く研究もされていない。この検証は、超重元素の化学的性質の精密な測定と、量子多体問題の精密な計算の2つを合わせることによって可能になると思われる。

これらの効果による化学的性質の変化は、価電子の配置の変化である。一方、原子核による強い Coulomb 場は、内殻電子により多くの影響を与える。内殻電子の状態を調べる方法として、特性 X 線が挙げられる。今まで、超ウラン元素や超重元素領域での特性 X 線の測定は行われていない。ただし、特性 X 線の波長の理論計算の手法の精度向上も求められる。

このように、超重元素の化学的性質の研究は、電子状態における相対論効果、強い Coulomb 場による効果、量子電磁力学の効果などを幅広く議論することができる。また、これらの実験と理論計算の比較をすることによって、量子多体問題の計算手法そのものの向上に寄与することができ、これは原子核構造研究や、通常の元素の原子、分子、固体の電子状態計算の精度向上にも寄与できる可能性がある。

多体問題としてだけではなく、強い Coulomb 場を用いた、電気双極子モーメントなどの電子やミューオンの素粒子としての性質の測定も可能であるが、この内容については、長濱氏の講演に議論を譲る。

まとめ

以上のように、Coulomb 力と量子多体問題という2点に注目することで、原子核物理、超重元素の化学 (核化学) について非常に多くの基本的な問題だけでなく、より幅広い一般の物理の基本的な問題に対してアプローチをすることが可能である。これらは、理論計算の手法の精度向上も求められるが、一方で仁科センターの RIBF 装置群による、核図表の幅広い領域の高精度な実験や、超重元素の化学的性質の測定も欠かせない。また、理論側としても、原子核物理、化学の研究者だけでなく、素粒子論や量子電磁力学、量子多体問題の専門家とも密接な連携を取ることで、今は机上の空論となっているような議論も可能になるのではないと思われる。

参考文献

- [1] R. B. Wiringa, V. G. J. Stoks, and R. Schiavilla, *Phys. Rev. C* **51**, 38 (1995).
- [2] N. Ishii, S. Aoki, and T. Hatsuda, *Phys. Rev. Lett.* **99**, 022001 (2007).
- [3] K. A. Brueckner, C. A. Levinson, and H. M. Mahmoud, *Phys. Rev.* **95**, 217 (1954).
- [4] W. Kohn, *Rev. Mod. Phys.* **71**, 1253 (1999).
- [5] J. A. Pople, *Rev. Mod. Phys.* **71**, 1267 (1999).
- [6] J. C. Hardy and I. S. Towner, *Ann. Phys.* **525**, 443 (2013).
- [7] J. C. Hardy and I. S. Towner, *Phys. Rev. C* **91**, 025501 (2015).

- [8] X. Roca-Maza, G. Colò, and H. Sagawa, *Phys. Rev. Lett.* **120**, 202501 (2018).
- [9] M. Bender, P.-H. Heenen, and P.-G. Reinhard, *Rev. Mod. Phys.* **75**, 121 (2003).
- [10] J. Meng, H. Toki, S.G. Zhou, *et al.*, *Prog. Part. Nucl. Phys.* **57**, 470 (2006).
- [11] T. Nakatsukasa, K. Matsuyanagi, M. Matsuo, and K. Yabana, *Rev. Mod. Phys.* **88**, 045004 (2016).
- [12] T. Naito, R. Akashi, and H. Liang, *Phys. Rev. C* **97**, 044319 (2018).
- [13] T. Naito, X. Roca-Maza, G. Colò, and H. Liang, *Phys. Rev. C* **99**, 024309 (2019).
- [14] T. Naito, X. Roca-Maza, G. Colò, and H. Liang, *To Be Submitted*.
- [15] P. Baczyk, J. Dobaczewski, M. Konieczka, *et al.*, *Phys. Lett. B* **778**, 178 (2018).
- [16] J.M. Dong, Y.H. Zhang, W. Zuo, *et al.*, *Phys. Rev. C* **97**, 021301 (2018).
- [17] J.M. Dong, X.L. Shang, W. Zuo, Y.F. Niu, and Y. Sun, *Nucl. Phys. A* **983**, 133 (2019).
- [18] T. K. Sato, M. Asai, A. Borschevsky, *et al.*, *Nature* **520**, 209 (2015).
- [19] T. Naito, R. Akashi, H. Liang, and S. Tsuneyuki, *To Be Submitted*.
- [20] S. Fritzsche, P. Indelicato, and Th. Stöhlker, *J. Phys. B* **38**, S707 (2005).
- [21] P. Indelicato, J. P. Santos, S. Boucard, and J.-P. Desclaux, *Eur. Phys. J. D* **45**, 155 (2007).
- [22] P. Indelicato, *Phys. Rev. A* **87**, 022501 (2013).

Island of stability

坂口 聡志（九州大学）

This article is written to share the basic knowledge on the “island of stability”, which is predicted to exist in the northeasternmost end of the nuclear chart. Nuclear physics and related science of the nuclei in the frontier of high atomic and mass numbers are briefly overviewed.

Superheavy elements (SHE), i.e. elements with atomic numbers larger than 103, can exist owing essentially to the shell stabilization. Although the fission barrier of the liquid drop model disappears in heavy nuclei, it can be restored by the shell effect. The existence and stability of superheavy elements are thus closely related to the strength of shell effect. Various decay modes exist in SHE region, and total half-life is derived from the partial half-lives of alpha/beta decays and spontaneous fission. Island of stability is a term describing the region of heavy nuclei with long fission half-lives due to the doubly-magic nature at Z 114 and N 184 [1]. The location of the island and half-lives of those nuclei are not easy to predict. As they are remarkably sensitive to the ground state energy (mass), theoretical predictions vary widely. The proton magic number is predicted to be 114, 120 or 126. In this region, three single particle levels of $2f_{5/2}$, $3p_{3/2}$ and $3p_{1/2}$ exist. Their energy spacing depends on the theoretical models, which causes the difficulty in predicting the location of the island and size of it. Macroscopic-microscopic models predict the doubly magic nucleus to be $^{298}_{114}\text{Fl}_{184}$. It should be noted that the shell correction energy is predicted to be largest around $^{297}_{115}\text{Mc}_{182}$ [2] and that the nucleus with the longest half-life is around $^{292-294}_{110}\text{Ds}_{182-184}$ (probably in the order of 10-100 years [3]). The latter shift from the doubly magic nucleus is due to relatively short alpha-decay half-lives in high- Z nuclei. Nuclei in the island of stability are expected to be spherical, while they start to deform where the mass number is smaller than 280. In this relatively light region, deformed superheavy nuclei can be found. They are stabilized by

arrangement of single particle levels due to prolate deformation. As a consequence, relatively large level gaps are expected to emerge at $Z=100$ and 108 and at $N=152$ and 162 . On the other hand, experimental information on the deformation in this region is rather scarce [4].

Naïve questions related to the structure of SHE are: where is the center of island of stability? How large is the island? How quickly the spherical/deformation transition occurs? Will deformation largely affect the magicity? What can be found beyond the island of stability? Can we expect the existence of next island? New structure such as bubble and toroidal nuclei can be found? What would be the collective motion of such nuclei? New view or type of fission can be established where Coulomb and nuclear forces compete?

As mentioned above, the stability of SHE essentially originates from the shell structure. Investigation of shell structure in SHE region is crucially important in understanding the nature of double magicity in heavy system where Coulomb force is strong. The knowledge obtained in this region is needed not only for finding the doubly magic nucleus following ^{208}Pb but also for predicting the limit of existence of elements and nuclei. In the study of shell structure, information of energy spacing and order of single particle levels and deformation parameters are important. They have been obtained mainly via alpha-gamma, isomer-gamma and in-beam gamma spectroscopy in relatively lighter region. Recently, such spectroscopy has been applied to $Z=106$ nucleus $^{261}_{106}\text{Sg}$ and even to $Z=115$ at GSI and LBL [5]. If production rate of such nuclei can be increased, good spectroscopic information can be obtained in SHE region. Experimental information available even at present is the alpha-decay energy, which can be one of the signs of shell closure. While it changes drastically at $Z=82$ and $N=126$, such clear sign of shell closure cannot be seen in $Z=114$ [6]. This may be due to that proton magicity is lost where N is different from 184 . Since proton magicity may not be occupied only by 114 but also be shared by 120 and 126 due to adjacent subshells, the magicity may not be so prominent at 114 . In addition, if N is far different from the magic number of 184 , neutrons may act to deform the nucleus even if protons try to hold the spherical shape. Such interpretation on the alpha-decay energy has not been confirmed yet due to the lack of good spectroscopic information. In heavy nuclei, concept of magic number may need to be modified due to the effects above, and we may think of “magic combination” of Z and N (magicity appears only near the doubly magic nucleus) or “magic region” (magicity distributed among multiple adjacent subshells at $Z=114$, 120 and 126). Another feature is an expected shell closure in deformed nuclei at $Z=100$ and 108 and $Z=152$ and 162 , which has very clear sign in the alpha-decay energy. There are still numerous mysteries left to be solved in SHE region.

Shell structure is not the only target of interest. SHE includes variety of nuclear physics and scientific richness. One of the challenges in the modern nuclear physics is the description of the dynamics of massive compound nucleus. Both production and fission of heavy nuclei are the large-amplitude collective motion. One of interesting points in the fusion reaction is the mechanism of the dissipation of relative motion energy into internal energy. It has been long anticipated that “friction” occurs when the heavy nuclei collide. On the other hand, we have not yet understood the nature of it. For the description of large-amplitude collective motion, development of time-dependent Hartree-Fock model and refinement of Langevin approach are ongoing. Fission is also a key issue. Especially in SHE region, where Coulomb force effects start to compete with nuclear force, there may be some interesting feature. For the produc-

tion of new SHE and new isotopes close to the island of nuclei, we currently need a breakthrough. Cold fusion and ^{48}Ca -induced hot fusion have let us synthesize SHE up to $Z=118$. To go further, especially to the direction of the island of stability (less neutron-deficient direction), use of RI-induced fusion, charged particle emission channel or multi-nucleon transfer reaction, could be a key. There exists strong need in fundamental studies of fusion/transfer reaction mechanism, development of new experimental techniques and dedicated devices.

SHE might be produced also in universe not only by accelerators. If the large amount of SHE are produced in neutron star merger by rapid neutron capture process, it may affect abundance of nuclei with A 130 due to spontaneous fission. Fission recycling in nucleosynthesis is one of the important issues that SHE is related.

The biggest feature of SHE is its high- Z number, which produces an extremely strong Coulomb field. Science related to such strong field is one of the directions that we can access through SHE as a doorway or as a playground. In the atomic system of SHE, electrons in the inner orbitals move fast, and these orbitals shrink due to the relativistic effect. This reduces the shielding effect and leads to the expansion of the outer electron orbitals, which results in a change of chemical properties. The calculation of electron orbitals is based on the quantum electrodynamics (QED). Strength of some QED effects is proportional to the several powers of Z . CP-violation could also be enhanced and become easier to observe in such a strong field. Study of SHE would allow us to access the unique physics and chemistry under the presence of the strong Coulomb field.

Significance of SHE research can be summarized as follows: search for limit of existence, shell structure of heavy system which has unique features, dynamics of massive compound nucleus, driving force for reaction studies, possible effects on nucleosynthesis through fission recycling, science in strong Coulomb field such as relativistic effects on electron orbital and chemical properties related. In a more general sense, potential significance of SHE can be its strong Coulomb field, where crossover of the physics of 1st and higher powers could be seen. The strong field enhances various effects such as relativity of electrons and CP-violation. In addition to the nuclear physics in the high- Z and high- A frontier, SHE can also serve as a doorway to such general science.

参考文献

- [1] A. Sobiczewski, F. A. Gareev, B. N. Kalinkin, Phys. Lett. 22, 500 (1966).
- [2] R. Smolanczuk, J. Skalski, A. Sobiczewski, Phys. Rev. C 52, 1871 (1995); R. Smolanczuk, Phys. Rev. C 56, 812 (1997).
- [3] S. Hofmann, S. N. Dmitriev, C. Fahlander, J. M. Gates, J. B. Roberto and H. Sakai, Pure Appl. Chem. 2018; 90(11) 1773-1832; H. Koura, J. Nucl. Sci. Technol., 49, 816-823 (2012).
- [4] S. G. Nilsson, C. F. Tsang, A. Sobiczewski, Z. Szymanski, S. Wycech, C. Gustafson, I. L. Lamm, P. Möller, B. Nilsson, Nucl. Phys. A 131, 1 (1969); P. Möller, J. R. Nix, W. D. Myers, W. J. Swiatecki, At. Data Nucl. Data Tables 59, 185 (1995).
- [5] D. Rudolph, U. Forsberg, P. Golubev, L. G. Sarmiento *et al.*, Phys. Rev. Lett., 111, 112502 (2013); J. M. Gates, K. E. Gregorich, O. R. Gothe, E. C. Uribe *et al.*, Phys. Rev. C 92, 021301(R) (2015).

[6] M. Asai, Radioisotopes, 67, 291-298 (2018) and references therein.

Clusterization and deformation of multi- Λ hypernuclei within relativistic mean-field model

谷村雄介 (東北大学)

陽子と中性子に加えて Λ 粒子をも構成要素とする Λ ハイパー核は、バリオン間相互作用や中性子星物質が持つ性質の探究の場としてのみならず、それ自身が興味深い研究対象である。これまでの実験で生成された Λ ハイパー核はいずれも 1 個または 2 個の Λ 粒子を含む核であり、そのような系における Λ 粒子の「不純物」としての効果の研究は、変形核も含めて、理論的にも盛んに行われてきた。

より多数の Λ 粒子を含む系 (multi- Λ ハイパー核) を考えると、 Λ 粒子は単なる「不純物」というよりむしろバリオン多体系の「第三の構成要素」とみなすことができる。3 種のフェルミオンからなる量子液滴である multi- Λ ハイパー核では、1-2 個のみの Λ 粒子を含む核には見られない面白い構造や集団励起が生じる可能性があるが、先行理論研究のほとんどでは球対称性が仮定されていた。本講演では、対称性を仮定しない 3 次元の相対論的平均場計算を用いた multi- Λ ハイパー核の構造の研究 [1] について発表した。本研究では、以下の「ハイパー同位体」、 ${}_{n\Lambda}^{8+n}\text{Be}$ ($n = 2, 4$) および ${}_{n\Lambda}^{20+n}\text{Ne}$, ${}_{n\Lambda}^{28+n}\text{Si}$ ($n = 2, 8$) について、その変形やクラスター構造について調べた。 ${}_{4\Lambda}^{12}\text{Be}$ の基底状態における二体相関には ${}_{2\Lambda}^6\text{He}$ クラスター構造の兆候が見られた。Ne のハイパー同位体では、2 個または 8 個の Λ 粒子の付加により変形度がわずかに減少する一方で、Si のハイパー同位体では変形度が大きく球形に近づき、8 個の Λ 粒子を含む同位体では完全に球形となることが分かった。球形となった Si 同位体では、殻効果により、中心密度が大きくへこんだバブル構造が見られた。

参考文献

[1] Yusuke Tanimura, Phys. Rev. C **99**, 034324 (2019).

原子核構造の物理における統計的手法の応用

吉田 聡太 (東京大学)

この 10 年で、核力や、核力から導出された有効パラメータをインプットとした微視的な原子核構造・反応の理解が進みつつある。少数系の厳密計算や、閉殻近傍核における post Hartree-Fock 法 (Coupled Cluster, IM-SRG,...)、導出された有効相互作用に基づく厳密対角化計算やモンテカルロ殻模型計算など、軽い核から中重核に至るまで、核力に依拠した核構造計算の適用範囲は大幅な広がりを見せ既に実験データと比較に耐えうるだけの定量性が得られつつある。さらには、密度汎関数と核力の繋がりを探るといった原子核物理の積年の課題に関しても、今後の研究の進展が期待される。また、カイラル有効場の理論に基づく核力の光学ポテンシャルへの応用なども進み、原子核反応の微視的理解もホットなトピックの一つである。これらは、未知の原子核の性質に関する予言能力という観点からも非常に重要なアプローチであり、さらなる応用や進展が期待される。しかしながら、これらを推し進めていくことは、真に定量的な原子核の静的・動的性質の理解をもたらすだろうか？核力には依然として大きな不定性が存在している。さらに、実用的には多体計算の収束性を向上

するために SRG などソフト化の過程が必要になるが、こうしたユニタリ変換で誘起される多体力を有限次で打ち切る限り、元のハミルトニアン (生の核力) の情報は損なわれてしまう。また、多体手法においても、高次項の打ち切りや種々の近似等に由来する不定性が存在している。

これらの不定性を系統的かつ適切に評価する方法論の整備は、究極的には核力への重要な制限を与えたり、多体手法の近似の正当性を検証し、予言能力のある理論予測を提示する上で極めて重要である。不定性評価は、単に予測にエラーバーをつけるにとどまらず、パラメータの変更や多体手法における近似の度合いに対して、計算の出力がどのように“応答”するか、といった入力と出力との非自明な関係を可視化することであるとも言える。

講演では、不定性評価が比較的思考しやすい配置間相互作用の方法を例に、[与えられた模型空間の中で問題が厳密に解ける場合] と [近似計算が漸近的に厳密解に近づいていく場合] の 2 つに関して不定性評価の一般的な方法論を紹介した。前者のインプットに由来した不定性評価の議論は既に論文として出版されているため、詳細は論文に譲る [S. Yoshida et al., Phys. Rev. C 98, 061301(R) (2018).]。後者の議論では、No-core shell model や Monte Carlo Shell Model を例に、ノンパラメトリックな確率モデルに基づいた外挿法を紹介し、多体手法に存在する intrinsic な不定性評価の方法論を提示した。我々は普段意識せずに計算結果の点列や実験データなどを、特定の関数形に基づいてフィットするが、関数形が非自明な場合や特定の関数を採用する深淵な理由が存在しない場合、与えられた点列 (データ) に過度に忠実で予言能力を欠いたいわゆる overfitting に陥っている危険性がある。提案したガウス過程に基づく方法論は、overfitting を防ぐ自然な機構が備わっている上に、ベイズ統計との親和性も高く、予測の不確かさが系統的に表現できたり、最新のデータに対して予測を容易に更新できるなどの柔軟性を有しており、様々な周辺領域での応用が考えられる。

これらの統計的な手法の開発・応用を通じて、模型に依存しない (あるいは特定の模型でしかアクセスできない) 描像を探ることを今後の目標としたい。

^{10}Be における双極子励起モードの研究

四方悠貴 (京都大学)

双極子応答として有名な現象に巨大双極子共鳴 (GDR) がある。GDR は陽子と中性子が逆位相で振動するような集団励起モードであり、和則をほとんど尽くすような強い遷移強度をもつ。それに対し、主に中性子過剰核において GDR よりも低いエネルギー領域に低エネルギー双極子励起 (LED) と呼ばれる GDR から分離した強度が出現する。しかし、不安定核実験の難しさからその情報は少なく、未だ完全な理解には至っていない。特にその励起モードは長年興味の対象となっている。近年 RI ビームの発展により観測データが集まってきており、そこから LED の多様な特徴が見えている。そこから LED の励起モードは複数の候補を持つことが予測される。古くから考えられている候補として余剰中性子とコアの部分が逆位相で振動するピグミーモードがある。しかし、LED は $N=Z$ 核でも生じることからピグミーモードだけでは LED のすべての性質を説明できない。そこで近年注目されているモードとして渦的構造をもつトロイダルモードがある。このモードは $N=Z$ 核でも中性子過剰核でも生じることから LED 励起モードの有力な候補となっている。最近、軽い核において双極子励起モードの新たな可能性としてクラスターモードが指摘された。実際、クラスター励起は強いアイソスカラー型の双極子遷移を enhance することが解析的に示されている。軽い核においては GDR 領域よりも低いエネルギー領域に多様なクラスター励起構造を示すため、クラスター励起モードも軽い核において有力な LED 励起モードの候補である。しかし、これまでクラスター構造の観点から LED の研究はほとんど

行われておらず、その関係性は未知のままである。そこで我々は LED 励起モードをクラスター構造の観点から明らかにすべく ^{10}Be における LED 励起モードの研究をクラスター模型を用いて行った。解析の結果、低エネルギー領域にいくつかの強い LED 遷移が見られた。遷移カレント密度の計算により、 1_1^- への励起は変形した ^6He が回転することによる渦的なモードが生じていることが分かった。これは subsystem に変形したクラスター構造を持つような原子核において系統的に渦的なモードが出現することを示唆する結果である。このモードは和則の数 % を尽くすようなアイソスカラー双極子 (ISD) 遷移強度を示しているが、ISD 強度の観測では渦モードの直接的な証拠とはならず、渦的励起モードのプロープの探索はこれからの重要な課題である。 1_2^- と 1_3^- 状態は $\alpha+\alpha+2n$ の三体クラスター励起状態である。どちらの状態も $2n$ クラスターのモードのよって強い E1 強度が生じており、アイソベクター双極子 (IVD) 励起において余剰中性子が重要な寄与を果たすことを確認できた。一方、 1_3^- では三体クラスターの大きく発達するモードによって非常に強い ISD 強度も生じていた。このようにクラスター励起により生じる LED 強度や励起エネルギーには様々な特徴があることを ^{10}Be において明らかにした。しかし、クラスター構造から LED の系統的な性質を理解するには未だ研究が少ないのが現状である。この理解のために、軽い核から中重核への実験・理論、両側面による相互理解的な研究が必要である。

身近な原子核実験の背後にある量子性の検証

三木謙二郎 (東北大学)

本講演では、普段原子核実験をおこなう中で講演者や学生がふと思いあたる量子論の基礎的な疑問の数例を紹介した。主に扱った内容を以下に示す。1) アイソスピンという量はスピンと同様に量子力学的な物理量であるか否か。2) 不安定粒子の寿命とその粒子を測定・観測するというものの関係。3) RIBF での不安定核生成にはしばしば原子核破砕反応が用いられるが、反応で生成される複数種の不安定核の重ね合わせ状態はどの程度の時間・距離のスケールまで維持されるのか、そしてどのような測定によって失われるのか。

チャーミングな原子核

安井 繁宏 (慶應義塾大学自然科学研究教育センター)

核物質中におけるチャームバリオンの性質について議論する。重いクォークのスピン対称性を基礎としてチャームバリオンと核子の相互作用を表すラグランジアンを構築し、有効ポテンシャルや線り込み群における核子のループの寄与を評価することによって核媒質効果を議論する。具体的に Λ_c バリオンおよび Σ_c , Σ_c^* バリオンを考える。前者については束縛エネルギーや核物質密度の変化を議論して、後者についてはスピン-アイソスピンによる近藤効果を議論する。

イントロダクション

通常の原子核はアップ、ダウクォークで構成されたバリオン多体系であり、クォークは核子 (バリオン) を構成して核子間に核力が働くことによって原子核を形成している。クォークの種類 (フレーバー) はアップ、ダウン以外にストレンジネス、チャーム、ボトム、トップも存在する。これらのフレーバーをもつバリオン間にも“核力”が働いて、通常の原子核の拡張としてフレーバーをもつバリオン多体系を形成すると考えられる。ストレンジネスについてはハイパー原子核や $\bar{K}$ メソン原子核といったストレンジネス原子核が研究されてきた。

一方でチャームやボトムをもつ原子核 (チャーム原子核, ボトム原子核) については、1970 年代から理論的研究がなされてきたものの実験的研究は進んでおらず、今後 GSI や J-PARC 等での研究が展開されることが期待されるテーマである [1]。チャーム原子核やボトム原子核はハドロン物理としても興味深い。近年の高エネルギー実験で発見されたように、チャームやボトムをもつ様々なエキゾチックハドロン (4 クォーク状態や 5 クォーク状態) が存在することが明らかになり、ハドロン分子の観点からハドロン間相互作用の多様なあり方が理解されている。また最近の格子 QCD 計算の発展によってチャームハドロンと核子の相互作用が解明されつつある。そこでチャーム原子核やボトム原子核を詳しく調べることはハドロン物理と原子核物理の両面において興味深い課題であると言えるだろう。

チャーム原子核やボトム原子核の大きな特徴のひとつは、重いクォークがもつ (近似的な) “スピン対称性” である。チャーム, ボトムクォークの質量は QCD の低エネルギースケール Λ_{QCD} (数百 MeV 程度) に比べて大きいので近似的に無限大の質量とすることができ、その結果としてスピンが良い保存量とみなされる。重いクォークのスピン対称性はチャーム原子核やボトム原子核の相互作用や質量スペクトラムに直接的に反映される。本研究では重いクォークのスピン対称性に基づいて Λ_c バリオンや Σ_c , Σ_c^* と核子の相互作用を表すラグランジアンを構築して、核物質中の Λ_c バリオンや Σ_c , Σ_c^* の性質について議論を行う [2, 3]。なお同様の議論が Λ_b バリオンや Σ_b , Σ_b^* バリオンにも適用可能である。

Λ_c バリオン—核物質中の束縛エネルギー—

Λ_c バリオン (質量 2286 MeV) はスピン 1/2, アイソスピン 0 をもつ。 Λ_c バリオンが核物質に存在するときの核媒質効果を議論する [2]。 Λ_c バリオンの有効場として $\Psi_v(x) = \frac{1+\gamma^\mu v_\mu}{2} e^{iMv \cdot x} \Psi(x)$ を導入しよう。ここで $\Psi(x)$ は元の Λ_c バリオンの場であり、 $\Psi_v(x)$ は Λ_c バリオンの質量 M を基準としたエネルギーをもつ有効場である。 v^μ は Λ_c バリオンが静止してる座標系 (v フレーム) の 4 元速度であり、 $v^\mu = (\sqrt{1+|\mathbf{v}|^2}, \mathbf{v})$ のように表される。 $\frac{1+\gamma^\mu v_\mu}{2}$ は v フレームにおいて正エネルギー成分を取り出す射影演算子である。このような $\Psi_v(x)$ と核子を表す 2 成分スピノル $\varphi(x)$ を用いて次のようなラグランジアンを導入する：

$$\mathcal{L}[\varphi, \Psi_v] = \varphi^\dagger i \frac{\partial}{\partial t} \varphi + \varphi^\dagger \frac{(i\nabla)^2}{2m} \varphi + \bar{\Psi}_v i \frac{\partial}{\partial t} \Psi_v + c_1 \varphi^\dagger \varphi \bar{\Psi}_v \Psi_v + \mathcal{O}(1/M), \quad (1)$$

c_1 は Λ_c バリオンと核子の結合定数の大きさである。重いクォーク極限のみを考えて $\mathcal{O}(1/M)$ のオーダーの項を無視した。重いクォークのスピン交換の大きさは $\mathcal{O}(1/M)$ なので、重いクォークの極限で Λ_c バリオンと核子のスピン交換相互作用を無視することができる^{*1}。また Λ_c バリオンはアイソスピンをもたないためにアイソスピン交換も存在しない。したがって Λ_c バリオンは非可換相互作用をもたない。これが Σ_c , Σ_c^* バリオンと大きく異なる点である^{*2}。さて Λ_c バリオンが核物質中に存在するときのエネルギーを考えるために、 Λ_c バリオンは核物質のひとつの点 ($\mathbf{x} = \mathbf{0}$) において静止しているとして $\Psi_v(x)$ に対して $\Psi_v^\dagger(x) \Psi_v(x) = \delta^{(3)}(\mathbf{x})$ のような拘束条件を課すと、系の生成汎関数は

$$Z = \mathcal{N} \int \mathcal{D}\psi \mathcal{D}\bar{\psi} \mathcal{D}\Psi_v \mathcal{D}\bar{\Psi}_v \prod_{t, \mathbf{x}} \delta(\bar{\Psi}_v(x) \Psi_v(x) - \delta^{(3)}(\mathbf{x})) \exp\left(i \int d^4x \mathcal{L}[\varphi, \Psi_v]\right), \quad (2)$$

^{*1} 簡単に言うと Λ_c バリオン (udc) の ud ダイクォークはスピンをもたないので Λ_c バリオンのスピンと c クォークのスピンは同一視される。

^{*2} Σ_c (Σ_c^*) バリオン (uuc , udc , ddc) の uu , ud , dd ダイクォークは非ゼロのスピンおよびアイソスピンをもつので、重いクォークの極限でも Σ_c (Σ_c^*) バリオンと核子の相互作用においてスピン交換およびアイソスピン交換が存在する。

のように与えられる。この生成汎関数の積分をすることは難しいように見えるが、補助場を導入することによって Ψ_v を積分して $\mathcal{L}[\varphi, \Psi_v]$ を次のようなラグランジアンに置き換えることができる：

$$\mathcal{L}[\varphi] = \varphi^\dagger i \frac{\partial}{\partial t} \varphi + \varphi^\dagger \frac{(i\nabla)^2}{2m} \varphi + c_1 \varphi^\dagger \varphi \delta^{(3)}(\mathbf{x}). \quad (3)$$

これは Ψ_v の拘束条件を式 (1) に直接代入することによっても得ることができる。 c_1 の値については、 Λ_c バリオンと核子の散乱における格子 QCD 計算 [4] およびカイラル外挿 [5] による散乱長を用いて評価する。式 (3) から散乱長を導くとき核子のループ積分が含まれるので、(3 次元運動量) カットオフも導入しなければならないことに注意する。式 (3) をもとにループ計算を行って有効ポテンシャル

$$V^{(0)}(T, \mu; \mathbf{u}) = -\frac{4}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} dp_0 \arctan\left(\frac{\pi c_1 \rho(p_0)}{1 + c_1 F(p_0)}\right) \frac{1}{e^{\beta(p_0 - \tilde{\mu}_u)} + 1}, \quad (4)$$

を得る^{*3}。 T は温度である。ここで Λ_c バリオンが核物質中で静止している場合だけではなく速さ $u = |\mathbf{u}|$ で運動している場合を考えて、核子の化学ポテンシャル μ の代わりに $\tilde{\mu}_u = \mu - \frac{1}{2}mu^2$ を定義した。 u が光速に比べて十分小さいときは $u \approx v$ と近似することができる。 $\rho(x)$ および $F(x)$ の関数形については文献 [2] を参照せよ。

上記の有効ポテンシャルより通常密度の核物質中の Λ_c バリオンの束縛エネルギーは $-V^{(0)}(T, \mu; \mathbf{u}) = 24\text{--}28$ MeV であると評価される。これは $T\rho$ 近似の値 (約 40 MeV) よりも少し小さい。これはループ効果を含むかどうかの違いに起因すると考えられる。QCD 和則による解析では約 20 MeV であり今回得られた値に近い [6]。核物質中を Λ_c バリオンが速さ u で運動することによって $\frac{M^{(0)}}{2}u^2$ の運動エネルギーを余分にもつ。このとき $M^{(0)} = 300\text{--}400$ MeV であると評価される。また Λ_c バリオンと核子の間の引力のために Λ_c バリオン周辺の核物質密度はバルク空間の密度 n_N に比べて大きくなる。 Λ_c バリオン位置における核物質密度は $n_N^*(\mathbf{0})/n_N = 1.3\text{--}1.9$ であり高密度な状態が実現されると考えられる。

Σ_c, Σ_c^* バリオン—スピン-アイソスピン近藤効果—

$\Sigma_c (\Sigma_c^*)$ バリオン (質量 2455 MeV (2520 MeV)) はスピン 1/2 (3/2), アイソスピン 1 をもつ。 Λ_c バリオンと異なって、 Σ_c, Σ_c^* バリオンは核子との相互作用においてスピン交換, アイソスピン交換による非可換相互作用をもつことに注意する。そこで近藤効果のためにスピン交換, アイソスピン交換が核物質中で大きく変化することを議論しよう [3]。 Σ_c, Σ_c^* バリオンがスピン 1, アイソスピン 1 の軽いダイクォーク ($A^\mu(x)$) とチャームクォーク ($u_v(x)$) から構成されていることを考慮して、 Σ_c, Σ_c^* バリオンの有効場 $\Psi_v^\mu(x) = A^\mu(x)u_v(x)$ を導入する。 Ψ_v^μ は Σ_c バリオンと Σ_c^* バリオンの重ね合わせ状態である。それぞれの状態には $\Psi_{v1/2} = \frac{1}{\sqrt{3}}\gamma_5\gamma_\mu\Psi_v^\mu$, $\Psi_{v3/2}^\mu = \Psi_v^\mu - \frac{1}{3}(\gamma^\mu + v^\mu)\gamma_\nu\Psi_v^\nu$ のように射影される。このとき Σ_c, Σ_c^* バリオンと核子のラグランジアンは

$$\begin{aligned} \mathcal{L}[\varphi, \Psi_v^i] = & \varphi^\dagger i \frac{\partial}{\partial t} \varphi + \varphi^\dagger \frac{(i\nabla)^2}{2m} \varphi + \bar{\Psi}_v^i i \frac{\partial}{\partial t} \Psi_v^i \\ & + C_1 \varphi^\dagger (\mathbf{1}_2 \otimes \mathbf{1}_2) \varphi \bar{\Psi}_v^i (\delta^{ij} \otimes \mathbf{1}_2 \otimes \mathbf{1}_3) \Psi_v^j + C_2 \varphi^\dagger (\sigma^\ell \otimes \mathbf{1}_2) \varphi \bar{\Psi}_v^i (i\varepsilon^{ij\ell} \otimes \mathbf{1}_2 \otimes \mathbf{1}_3) \Psi_v^j \\ & + C_3 \varphi^\dagger (\mathbf{1}_2 \otimes \tau^d) \varphi \bar{\Psi}_v^i (\delta^{ij} \otimes \mathbf{1}_2 \otimes t^d) \Psi_v^j + C_4 \varphi^\dagger (\sigma^\ell \otimes \tau^d) \varphi \bar{\Psi}_v^i (i\varepsilon^{ij\ell} \otimes \mathbf{1}_2 \otimes t^d) \Psi_v^j + \mathcal{O}(1/M\bar{5}) \end{aligned}$$

のように表される ($i = 1, 2, 3$)。核子に作用する演算子 $A \otimes B$ において A, B はスピン, アイソスピンの演算子を表し、 Σ_c, Σ_c^* バリオンに作用する演算子 $A \otimes B \otimes C$ において A, B, C は軽いダイクォークのスピン, 重

^{*3} 上付き添え字 (0) は重いクォーク極限であることを表す。

クォークのスピン, ダイクォークのアイソスピンの演算子を表す。 C_A ($A = 1, 2, 3, 4$) は結合定数である。真空 (バリオン数ゼロ) においてスピン交換, アイソスピン交換の大きさ (C_2, C_3, C_4) が小さくて摂動的に取り扱うことができて、これらは核物質中において近藤効果のために大きく変化する可能性がある。どのように変化するのを見積もるために、 Σ_c, Σ_c^* バリオンと核子の散乱の 2 次摂動による繰り込み群方程式を考える：

$$\begin{aligned}\frac{d}{d\lambda}C_2(\lambda) &= \rho_0(4C_2(\lambda)^2 + 8C_4(\lambda)^2), \\ \frac{d}{d\lambda}C_3(\lambda) &= \rho_0(-4C_3(\lambda)^2 - 8C_4(\lambda)^2), \\ \frac{d}{d\lambda}C_4(\lambda) &= \rho_0(8C_2(\lambda)C_4(\lambda) - 8C_3(\lambda)C_4(\lambda)).\end{aligned}\tag{6}$$

ここで $\lambda = -\ln(\Lambda/\Lambda_0)$ であり、 Λ はフェルミ面からのエネルギー、 Λ_0 はフェルミ面から十分離れたエネルギー (相互作用のカットオフのスケール) を表す。上記の繰り込み群方程式は、フェルミ面から離れたエネルギー ($\lambda = 0$) から出発してフェルミ面に近づく ($\lambda \rightarrow \infty$) ときの結合定数の大きさの変化を表す。 C_1 は可換相互作用に関係するので近藤効果に影響されないことに注意する。上記の非線形微分方程式の解析解を見いだすことは一般的には容易ではない。しかし、式 (5) の C_2, C_3, C_4 が $C_2 = C_3 = \pm\sqrt{2/3}C_4 (= C > 0)$ を満たすとき、スピン対称性とアイソスピン対称性を含む大きな群として $SU(4)$ 対称性が存在するために簡単な解析解を見つけることができる*4。このとき、式 (6) は

$$\frac{d}{d\lambda}C(\lambda) = 16\rho_0C(\lambda)^2,\tag{7}$$

のように表すことができ、この方程式の解は

$$C(\lambda) = \frac{C}{1 - 16\rho_0C\lambda},\tag{8}$$

である。 $C(\lambda)$ は核物質中における C の値であり ρ_0 はフェルミ面上の状態数密度である。高エネルギー側 ($\lambda = 0$) から出発して低エネルギー側 ($\lambda \rightarrow \infty$) に変化するとき、 Λ がゼロにたどり着く手前でエネルギースケール $\Lambda_K = \Lambda_0 e^{-1/(16\rho_0C)}$ において $C(\lambda)$ は発散する。これは核媒質効果のために相互作用の大きさが非常に大きくなることを表す。 Λ_K は近藤スケールといい弱結合から強結合に変化するエネルギースケールの尺度を表す。上記の解析においてスピン交換, アイソスピン交換による非可換相互作用が重要な役割を果たしていることに注意する。とくにスピン交換とアイソスピン交換を同時に引き起こす相互作用 (C_4 項) は近藤効果を強める役割を果たす (スピン-アイソスピン近藤効果)。逆に Λ_c バリオンの場合は、核子との相互作用においてスピン交換, アイソスピン交換が抑制されているために近藤効果は起こらない。今回の解析では重いクォークの極限を考えたために議論が簡単になった。しかし実際にはチャームバリオンの有限質量の効果や Σ_c, Σ_c^* バリオンと Λ_c の結合も考慮する必要があるだろう。これらは今後の課題である。

参考文献

- [1] A. Hosaka, T. Hyodo, K. Sudoh, Y. Yamaguchi and S. Yasui, Prog. Part. Nucl. Phys. **96**, 88 (2017) [arXiv:1606.08685 [hep-ph]].
- [2] S. Yasui, arXiv:1811.07286 [hep-ph].

*4 一般的な場合については文献 [2] を参照せよ。

- [3] S. Yasui and T. Miyamoto, arXiv:1905.02478 [hep-ph].
- [4] T. Miyamoto *et al.*, Nucl. Phys. A **971**, 113 (2018) [arXiv:1710.05545 [hep-lat]].
- [5] J. Haidenbauer and G. Krein, Eur. Phys. J. A **54**, 199 (2018) [arXiv:1711.06470 [hep-ph]].
- [6] K. Ohtani, K. j. Araki and M. Oka, Phys. Rev. C **96**, 055208 (2017) [arXiv:1704.04902 [hep-ph]].

基本対称性の高精度検証

長濱 弘季 (東京大学 CNS)

約 137 億年前、この宇宙がビッグバンにより誕生した際に、同量の物質と反物質が対生成したと考えられている。しかし、現在の宇宙を見渡す限り、物質で占めており、反物質はほとんど見当たらない。これを、物質-反物質非対称性といい、現代物理が抱える大きな謎の一つである。素粒子物理の標準理論によると、CPT 対称性は保存しており、物質と反物質の基礎物理量の絶対値は等しい。また、CP 対称性の破れは、K 中間子や B 中間子といった物理系で観測されているが、物質-反物質非対称性を説明するには、破れの寄与があまりにも小さい。よって、この謎を解決する糸口を突き止めるためには、CPT および CP 対称性の高精度検証が必要不可欠である。本発表では、Penning trap を用いて反陽子と陽子の基礎物理量を高精度で測定することにより、CPT 対称性の厳密な検証を行っている理研・Ulmer 研、そして、理研の AVF サイクロトロンを用いて電子 EDM の増幅度が原子の中で最大の Fr を生成し、電子 EDM の高精度測定を行うことで、新たな CP 対称性の破れの探索を行っている東大・CNS の研究を紹介した。その上で、筆者が将来展開していきたい基本対称性の検証実験についても言及した。

断熱的自己無撞着集団座標の方法で探る原子核の新しい集団運動

倪 放 (筑波大学)

近年発展が進んでいる断熱的自己無撞着集団座標 (ASCC) の方法を用いると、今まで考えもしなかった原子核の集団運動の様式を発見できるのではないかという提案を、本講演で述べた。

たくさんの陽子・中性子から成る莫大な運動自由度の中に、ほかの内部自由度と分離されている集団的自由度が存在するとき、原子核は集団運動をする。集団的自由度は集団座標で記述できる。例えば、四重極変形方向に集団運動する原子核は、振動方向 (β, γ) と回転方向 ($\theta_1, \theta_2, \theta_3$) という 5 つの集団座標で記述される。

原子核の低エネルギー領域において、集団運動が特に重要である一方、理解があまり進んでいない。原子核の低励起状態 (特に励起 0^+ 状態) の構造や、核融合・分裂の反応経路が未だに謎である。我々が知っている集団座標の数が限られており、量子多体系から生じうる多彩な集団運動のほんの一部しか記述できない。事前に予想していない集団運動に太刀打ちすることができない。

ASCC は、莫大の微視的自由度から少数の集団的自由度を自己無撞着に抽出する方法である。多体系の中にどんな集団運動が隠されているかを事前に知らなくても、ASCC がそれを見つけてくれる。講演では、ASCC の理論手法を簡単に述べ、原子核を単純化した模型における 1 次元 ASCC の 3 つの応用例を挙げた。ASCC を用いた結果、既に自明な集団座標が存在する系において、質量パラメータが優れることや、より適切な集団的自由度を抽出できていることを述べたうえ、事前にどんな集団運動が生じるかを予測できない系においても、集団座標を導出し集団運動の記述が可能であることを示した。

ASCC は近々実際の原子核への適用が期待されている。近年、乱雑位相近似 (RPA) 計算のアルゴリズムが

改良され RPA の計算時間が大幅に短縮したことから、ASCC の計算時間が実際の原子核に対しても許容可能と予想されている。ただし、ASCC は成熟した理論ではなく、理論を発展させながら実際の原子核への適用が必要と考えられる。例えば、対相関があるとき対回転自由度を完全に分離することが難しいという問題が残っている (佐藤氏からの指摘)。現在は ASCC を研究している人が非常に少ない。原子核の新しい集団運動を発見できる大きな潜在力を持つ理論なので、もっと多くの研究者が ASCC に関心を持つことを望んでいる。

原子核密度汎関数の決定と関連する実験データ

日野原 伸生 (筑波大学)

原子核密度汎関数法は不安定原子核を含む広い質量領域の原子核を計算することが可能な量子多体理論である。原子核密度汎関数法ではエネルギー密度汎関数が存在し、これを密度に関して最小化することで基底状態の密度やエネルギーを求めることができるが、このエネルギー密度汎関数自体は束縛エネルギーや荷電半径、OES などの基底状態の代表的な実験データを最もよく再現するように決定されることが多い。局所密度の汎関数で書かれる Skyrme 型の UNEDF エネルギー密度汎関数では 10 以上ある結合定数パラメータの値を 130 程度の実験データとその原子核密度汎関数理論計算値による最小二乗フィットによって決定されている。このときに用いる実験データには結合定数とよく相関するものもあればそうでないものもあるため、密度汎関数が含む結合定数とよく相関する実験データを最小二乗フィットに用いることが重要である。これまでに作られてきたエネルギー密度汎関数では、例えばアイソベクトル型の有効質量に対応する結合定数は基底状態の実験データとはあまり相関せず、最小二乗フィットに組み込まれてこなかった。しかしながらこの量は巨大双極子共鳴のエネルギーと相関することが明らかとなっており、今後の密度汎関数では基底状態の情報のみならず励起状態の情報も含んだフィットを行う必要性が指摘されている。

本講演ではその他に局所ゲージ対称性によって自由にとれる結合定数の数に制限をかけることが可能であることや、これまでのエネルギー密度汎関数ではあまり詳細に決定されてこなかった汎関数としてテンソル密度汎関数と対密度汎関数を挙げ、それらの詳細な形、局所ゲージ対称性による制限と、どのような実験データと相関しうるかについて述べ、今後の原子核密度汎関数とその決定に関して必要な実験データについての議論を行った。

量子力学的原子核実験研究

笹野 匡紀 (理化学研究所)

原子核は“孤立した”量子多体系であるというのは、原子核物理学者の中で広く受けられている想定である。この想定もあってか、原子核物理研究分野は、内向きの興味に陥ることが多く、分野としての広がりや層の厚さに関心せず、“孤立している”。比較のため、原子核以外の量子多体系、例えば原子を考えると、むしろある原子が単体として安定して存在することはまれで、多くの場合、他の原子と結合し、外界の絶え間ない擾乱にさらされていることが、ほとんどである。このこともあってか、原子レベル以上の量子多体系の研究は、化学、物性物理学から分子生物学に至るまで非常に多様な広がりを見せている。

この講演では、上に述べたような原子核およびその研究分野の孤立を打破するため、量子力学的原子核実験研究手法を提案した。本来、原子核は、観測系を含む全体の系のハミルトニアンの一部として記述できるはずであり、何らかの観測、つまり外部との相互作用を行った段階で、孤立できず、必ず量子的相関が生じるはず

である。しかしながら、原子核の孤立性を想定するがため、その観測系と対象である原子核との間での量子的相関は着目されてこなかった。この講演では、この忘れられた原子核と観測系との間の量子相関に着目し、あたらしい観測量にどうアプローチするかということを、空間的相関、スピン・アイソスピン相関、時間的広がりにおける相関のそれぞれの観点から、議論した。

空間的相関に関しては、2 体密度分布の測定手法を提案した。2 体密度分布に関しては、量子的相関ではなく、古典的な量ではないかというコメントがあった。この点に関しては、今後議論をしたいが、やはり量子的相関だと考えている。一方で仮に 2 体密度分布が測定されれば、短距離相関、クラスター相関、核力の飽和性などといった、もっぱら机上のモデル論争、つまり、自分の描像が正しく、他人の描像が良くないといった不毛な論争に陥りがちなトピックに、実験的な決着をつけることができると考えている。

2 点目として、アイソスピンはスピンなのか、という東北大学三木謙二郎さん、及び、その学生の質問に対する答えを提示した。詳細は省くが、量子化軸を斜めに（陽子-中性子の間の軸からずらして）、測ることでアイソスピンのスピンの振る舞いを確認できるという案を示した。また、その応用例も示した。とくに慶応義塾大学鹿野豊氏との懇親会における議論を踏まえて、アイソスピン相関を用いたイメージングの仮想実験を提案できたことは非常に面白い経験であった。コメントとして、HBT 干渉法を用いる可能性が指摘された。

ところで、原子核の現象を、顕微鏡で細胞が動くのを見るように、見るができないのは、原子核のサイズが小さすぎるということよりは、その現象が速すぎるためである。そのスピードは、例えば、一粒子軌道運動は 10^{-23} 乗秒、巨大共鳴は 10^{-21} 乗秒、一部の遅い核分裂で 10^{-18} 乗秒、ベータ崩壊で 10^{-15} 乗秒といった具合であり、光学的な観測方法は現在、難しい。（なお、この点に関しては、関澤氏より、超短パルスレーザーの進展とその応用に関する講演があった。）この講演では、最後のトピックとして、このような速い現象を重力場の微小な違いと量子的干渉効果を使うことで測定する手法を提案した。上記、鹿野氏より、冷却原子や重力の基礎研究分野における最近の進展について解説するコメントがあった。

鹿野氏の講演からもよくわかったことであるが、次々と新しい量子的測定手法が生み出されている。原子核実験分野も、10 年後には、そのような手法を用いて研究を行うのが当たり前になっていることを望んでいることをメッセージとして訴えた。

Universal few-body physics and clusters with ultracold atoms

遠藤晋平 (東北大学 学際科学フロンティア研究所)

1995 年に極低温まで冷却された原子気体のボース凝縮が実現され、冷却原子気体という分野がはじまった。これまで 24 年間の冷却原子研究で非常に多くの成果がなされてきた。量子情報、物性化学、精密分光学、化学、強相関少数・多体問題、非平衡物理、などありとあらゆる分野に関わる研究がなされており、その意味において冷却原子は量子系のシミュレータだとも言われている。特に Feshbach 共鳴という技術により、原子間相互作用を自由自在に制御できるようになったことで、これまで実現不可能であった多くの強相関量子少数・多体現象が実現された。粒子間相互作用 (散乱長) が非常に大きな系では、少数系・多体系の波動関数や状態方程式が物理系等によらずユニバーサルに記述されることが知られているため、冷却原子を探ることで核物質や固体中の電子系の挙動など様々なことを知ることができる。

量子少数系における非常に顕著なブレイクスルーとして Efimov 状態が 2000 年代にはじめて明瞭に観測された。Efimov 状態とは、粒子間の散乱長が非常に大きな系で普遍的に現れる 3 粒子束縛状態であり、離散スケール不変性 (繰り込み群リミットサイクル) を示す。Efimov 状態は当初 3 重水素核や C 核の励起状態

(Hoyle 状態) を記述する理論として提唱されたが、これらの系では散乱長が相互作用レンジの高々 5-10 倍程度でしかないため、3 粒子束縛状態/共鳴状態は 1 つしか現れず、これが Efimov 状態といえるのか意見が分かれてきた。しかし冷却原子において Feshbach 共鳴を用いて散乱長を非常に大きくすることで、Efimov 状態が 2-3 個観測され、それらが Efimov の予言した 22.7 倍の離散スケール不変性を示すことが明瞭に観測された。本講演ではこれらの冷却原子における Efimov 状態の研究や最近の発展について発表した。

特に最近では 4 体、5 体束縛状態なども観測され、Efimov 状態という 3 粒子の物理をより多体系の物理とつなげようという試みも行われている。そのような研究が今後ますます進展し、少数系と多体系の協奏による興味深い物理現象がいくつも見つかることが期待される。

また、冷却原子の少数系・多体系に対して発見された少数・多体現象とハドロン・核物質での束縛・共鳴状態との関連をより深めるような研究も進展すると期待される。冷却原子系と原子核ハドロン系は、コントロールパラメータや観測可能な物理量が異なるという点も興味深い。冷却原子においては、散乱長を自由自在に制御できるという長所があるが、原子核・ハドロン系においては散乱長はそれぞれの系で自然界が選んだ値に固定される。一方エネルギーに関しては、冷却原子では温度でしか制御できない一方、原子核ハドロン系においては散乱実験でエネルギーを自由自在にコントロールできるという長所がある。また、冷却原子における Efimov 状態等の少数束縛状態は、直ちにより小さなクラスターへ崩壊してしまうため不安定であり、これまで「原子がいなくなる」ということをもって Efimov 状態が形成されたと間接的に測ってきた。一方原子核・ハドロン系においては、束縛状態や非常に長寿命な共鳴状態として少数クラスターが安定に実現される。これらの違いを活用した原子・原子核・ハドロンの共通点・相違点を探る研究も今後進展が期待される。

格子 QCD による原子核物理：現状と展望

土井 琢身 (理化学研究所)

格子 QCD 第一原理計算に基づく原子核物理研究の展望について、現状と将来の見通しを議論した。

高励起複合核における核分裂および中性子放出の理論研究

田中翔也 (近畿大学)

核分裂の理解は超重元素合成や天体核物理においても重要となっている。しかし、その反応過程の複雑さゆえに、多くの未解明点を残している。特に高い励起エネルギーにおける核分裂の扱いは、実験データの不足のために理解されていなかった。近年、原子力機構にて重イオン・多核子移行反応を用いた核分裂測定手法が開発され、 $^{237-240}\text{U}$ 、 $^{239-242}\text{Np}$ 、 $^{241-244}\text{Pu}$ ($E^* = 10 \sim 60 \text{ MeV}$) における核分裂片質量分布の実験データが取得され、高エネルギー核分裂へのアプローチが可能となった。

励起エネルギーが上昇した場合、重い原子核では主に二つの崩壊過程が競合して発生することが予測される。1 つ目は、殻効果を失うために質量対称 (液滴模型的) な分裂が支配的となる過程。もう 1 つは連続的な中性子蒸発の後におこる核分裂で、いわゆるマルチチャンス核分裂 (MCF) という過程である。例えば、高い励起エネルギーを有した ^{240}U 複合核が存在した場合、そのまま分裂を起こす 1st-chance fission、もしくは 1 つの中性子を放出し、励起エネルギーの下がった ^{239}U へと変化する。この ^{239}U は更に核分裂を起こす (2nd-chance fission) か、中性子を蒸発させる。このチャンス核分裂の連鎖は複合核の励起エネルギーが分裂障壁以下になるまで続く。しかし実験では、原子核が核分裂するまでに放出される中性子の数を、イベント毎

に区別して観測することができないため、すべての核分裂の情報が観測量に含まれてしまっている。

この課題の解決に向けて、原子核から中性子を放出する確率を評価可能な統計モデルコードと、原子核の形状の時間発展を記述し原子核の分裂をシミュレーション可能な動力学モデルを組み合わせることで、マルチチャンス核分裂が観測量へ与える影響を調べた。

本研究では、21 核種 ($^{234-240}\text{U}$ 、 $^{236-242}\text{Np}$ および $^{238-244}\text{Pu}$)、励起エネルギー 10~60 MeV に対して核分裂片質量分布の評価を行った。その結果、マルチチャンス核分裂の効果を取り入れることで、高い励起エネルギーにおいても実験データとよく一致する計算結果が得られた。また、実験データにおける励起エネルギー依存性や原子番号および中性子数の変化に対する傾向を説明することに初めて成功した。今まで観測されてきた高励起複合核における核分裂片質量分布はある特定の核種および励起エネルギーに由来するものではなく、実際は中性子放出により様々な状態に変化した原子核での核分裂の情報も混ざっており、マルチチャンス核分裂の重ね合わせによって表されることが示された。高い励起エネルギー領域における核分裂片質量分布で見られる、ふた山分布を維持するという傾向は、高い励起エネルギーであっても殻構造 (微視的な効果) が保持されるというのではなく、マルチチャンス核分裂によることを本研究で明らかにした。今後、さらなる系統的な理解に向けて、核分裂片質量分布以外の観測量におけるマルチチャンス核分裂の影響を調べたいと考えている。

チャレンジングな核反応実験

小林信之 (大阪大学 RCNP)

核反応を用いた核構造研究は加速器の発展と共に大きく進歩した。本講演では実験的に測定が困難、又は実現不可能とされているいくつかの核反応を議論し、そのうち 2 つの核反応に関する実験セットアップの実現可能性を検討した。一つは、原子核の励起状態をビームとして利用するための実験セットアップである。2 つのスペクトロメータを用いることで励起状態の寿命が数 10 ns 程度以上であれば、励起状態をイベントバイイベントでタグし、ビームとして利用できる可能性を示した。もう一つは、数 fm 程度の精度で原子核にビームを当てる実験のセットアップである。結晶構造を持つ標的をうまく用いることで、このような実験ができるかもしれないことを議論した。

大規模数値計算の現在と未来

阿部 喬 (東大 CNS)

本講演では、講演題目の下、原子核・ハドロン物理学分野における大規模数値計算の役割について、原子核理論の研究者の立場から現在の状況を俯瞰し、今後の大規模数値計算を用いた原子核研究の進展のひとつの可能性についても言及した。

原子核・ハドロン物理学における理論研究の究極の目標のひとつとして、強い相互作用の基礎理論である量子色力学 (QCD) の観点からバリオン多体系である原子核の構造や反応を理解することが挙げられる。このような目的から、近年、QCD ラグランジアンもしくは QCD に基づく核力を用いた核子多体系における大規模数値計算が格子 QCD 計算による原子核の直接計算、少数核子系における厳密計算や一般的な核子多体系における第一原理計算などにより行われるようになってきた。このような原子核多体系における大規模数値計算が行われるようになった背景には、近年の計算機性能の飛躍的向上とその計算手法の発展が挙げられる。このように現在では、原子核物理学の研究はこれまでの実験・理論手法の両輪によるアプローチから実験・理論、

計算科学手法の3本柱によるアプローチへと進展してきたといえる。今後も国内外でスーパーコンピュータなどに代表される大型計算機による大規模計算の重要性は増していくと期待される。

このような大型数値計算を実行する大型計算機の計算性能の限界を見積もるひとつの指標として、その科学技術の基盤である大規模集積回路の製造・生産における長期傾向を示すムーアの法則がある。これは集積回路上のトランジスタの数は1年半ごとに2倍になるという経験則である。しかしながら、現在のテクノロジーを維持するだけでは近い将来このトレンドは鈍化しはじめムーアの法則の限界を迎えることが懸念されている。一方で、カーツワイルの収穫加速の法則で提唱されているように次世代科学技術によるパラダイムシフトにより、ムーアの法則の終焉が回避される可能性も指摘されており、現状では、近い将来を見据えて様々な最新テクノロジーを取り入れた計算技術の発展を考慮して大規模数値計算を行う必要があるといえる。そのような潮流のひとつとして、ニューラルネットワークプロセッサや次世代GPUと並んで量子計算（量子コンピューティング）が注目されるようになってきている。

このような最新テクノロジーを駆使した量子計算機が、超伝導素子、イオントラップ、光子量子コンピュータなどにより近年実用化できるようになり、量子多体系計算も量子化学の分野を皮切りに最近では原子核・ハドロン物理学の分野でも徐々に成果が出始めている。たとえば、有効場の理論を用いた重陽子の束縛エネルギーの計算や格子QCD計算を念頭においた格子Schwingerモデルにおける計算などが行われている。現段階では、古典計算機で行える計算の範疇は越えていないが、今後、量子計算機の性能が飛躍的に向上すれば、これまでの古典計算機で行われていた計算を越える可能性もある。ただし、大規模集積回路の製造におけるムーアの法則と同様に量子計算機の要である量子状態のコヒーレンス時間を計算性能の尺度とした量子版のムーアの法則でも近年ではその性能は頭打ちになる傾向がみられているため、今後の継続的な性能向上には技術開発のパラダイムシフトを必要とし、まだ見通しは不透明な状況だといえる。

これまで、主に量子ゲート方式による量子計算機を使った量子計算についての状況について述べてきたが、このような量子計算機はいわゆる「汎用計算機」とも呼ぶことができる。その一方で、量子シミュレータのように未知の（知りたい）量子多体系を既知の量子多体系（冷却原子系や光学格子系）へマップし、その既知の量子多体系を実験手法により測定（観測）することによって、未知の量子多体系のダイナミクスを間接的にシミュレートするような研究方法が模索されている。このような手法は量子ゲート方式による量子計算機（「汎用計算機」）と対をなして「専用計算機」による量子計算ともとらえることができる。実際、このような専用計算機を原子核・ハドロン分野に応用しようという試みのひとつとして、たとえば中性子星の状態方程式の研究などにおいてアイデアが提唱されている。

以上のように、現在では、原子核・ハドロン物理学の分野での大規模数値計算において、その基盤である計算機に係る科学技術の進展など自身の専門分野以外にも目を向ける必要があり、より柔軟な姿勢で今後の動向に対応し、研究をしていく姿勢が求められている。

放談会のまとめ

鈴木 大介 (理化学研究所)

第二回 RIBF 理論若手放談会は、平成 31 年 2 月 18 日から 20 日の間、神戸理研にて開催されました。第二回を組織するにあたって、私たち世話人が最も心を砕いたのは、「RIBF に限定せず広い意味での核物理・ハドロン多体系物理の若手研究者が理論・実験の枠を超えて議論や交流をし、将来の夢を語り合える場」をいかにして実現するか、ということでした。そして、単なる「場」の提供を超えて、分野や常識を異とする同世代の若者と自由に議論することの重要さと楽しさに対する「意識」を参加者に持っていただけるような会にすることでした。

そうした目的意識のもと、私たち世話人がまず行ったことは、プログラム構成の抜本的な刷新です。まず(1) 理論と実験の双方の領域から、多くの若手に参加してもらうことを目指しました。理論と実験は、現代物理学の両輪です。物理学を前進させるには両者の協調が不可欠であり、「理論若手」と冠された放談会に実験系の若手が参加することは、何ら趣旨に反するものではないと考えます。第一回の放談会では、ほぼ全ての講演者が、理論系でした。そこで、今回の放談会には実験系の若手を 4 名招待しました。そしてこの 4 名の招待講演者は、理研周辺ではなく、国内各地の主要な研究拠点から来て頂きました。すなわち、東京大学（新倉）、九州大学（坂口）、東北大学（三木）、原研（オルランディ）そして大阪大学（小林）です。結果的に、地勢的なバランスをとることができただけでなく、実験領域に関しても、不安定核分光から、超重元素、ミューオン核分光まで幅広くカバーできる布陣となりました。

プログラム構成を刷新する上でのより大きな挑戦は、(2) 核物理分野外の若手を招待することでした。現代の学界は、専門分野の細分化が著しく進行しています。その中でも、原子核物理の分野は、対象とする物理系が特殊かつ限定的であること、また加速器施設を中心に実験者集団が形成されていることを背景に、高い独立性をもつコミュニティを形成しています。私たち世話人は、そうした状況に新しい風を導きたいと考えていました。とはいえ、分野外の人脈というのはやはり狭いものです。そこで、世話人たちのもつ古い縁を手掛かりに、異分野で活躍する知己を探しました。最終的に、人工知能を専門とする理研の瀧雅人さん、量子力学基礎論を専門とする慶応大学の鹿野さん、そして低温少数原子系出身の遠藤さんに講演して頂きました。今回お招きした 3 人は、いずれも世話人の大学、大学院あるいは海外時代の同僚や友人です。幸いお三方とも趣旨にご賛同頂き、快く講演を引き受けて頂くことができました。

プログラム構成を作ってゆく中で大切にしたのは、講演者との打ち合わせです。冒頭で述べましたが、私たちが目指したのは研究会という年一回の「場」を端緒として、日常的に自由な議論を行う「意識」を醸成することでした。放談会の精神を日常へと還元することが、最終的には重要だと思っています。事前の打ち合わせも、そうした還元の機会の一環ととらえました。主要な世話人（阿部、笹野、鈴木、新倉、松本）が理研に集まり、招待講演者の方を囲むスタイルで、合計 5 回の打合せ兼議論の場を設けました。

9 月 13 日 長濱さん

9 月 19 日 瀧さん

9 月 28 日 関澤さん、角田さん

11 月 16 日 遠藤さん、関澤さん、角田さん

11 月 21 日 瀧さん、角田さん

打合せでは、単に世話人側の意図を伝えるだけではなく、講演者の来歴、専門分野における最先端の現状、研究環境、社会問題など、多岐のテーマをめぐって、時には午後一杯を使って、「放談」を繰り広げました。世話人が企画した議論の場は、この計5回ですが、招待講演者をお誘いする過程で、同様な意見交換、話し合いの場が各所で持たれたことと思います。

今回の放談会では計25人の登壇者に放談して頂きました。質疑を含めてひとり30分、結論のない問い、疑うべき常識、とりとめない夢を語って頂きました。参加して頂いた50人近くの聴衆は、その声に耳を傾け、共に考え、意見し、議論を交わしました。講演が終わり、休憩時間や食事、懇親会の間も、活発で刺激的な議論は止みませんでした。気がついた時には、終了予定時刻を一時間以上過ぎていた日もありました。神戸の会場は、通常の学会や研究会とは、明らかに異質の空気に包まれていたと思います。

科学の未来について、普段の研究からすこし離れて、ざっくばらんに話し合う場所をつくること。放談会の最中に、また事後のアンケート調査では、私たちのこうした意図に賛同頂く声を数多く頂戴しました。私たち世話人は、この放談会が、今後も定期的に継続して開催されることを期待してやみません。未来の放談会の一助として、今回の放談会のフォーマットについて、最後に少しでも記しておきたいと思います。研究会の「時期」、「日数」そして「場所」は、参加者のスペクトルを左右する重大事項です。若手が参加しやすいフォーマットを見出すことが重要なわけですが、今回の放談会は、第一回放談会の形式を踏襲しました。第一回放談会が発見した「2月中旬」に「3日間」、「神戸理研」に集まるというフォーマットが絶妙な選択だと考えたからです。大学入試の合間、長くもなければ短くもない日数、そして近くもなければ遠くもなくアクセスもほどよい神戸という地の利。ただし、「時期」、「日数」そして「場所」を除いた部分に関しては、次回以降改善の余地が残されていると感じています。寄せられた意見の中で多かったのは、学生が参加しやすい形式にして欲しいという要望でした。学生の場合、発表がない場合は旅費を支給しにくいといった事情があります。例えば、ポスター・セッションを設けたりして、発表の場を増やす努力が必要だと思います。

お忙しい中、講演者をはじめ遠路研究会に参加して下さいだった皆さん、とりわけ若い世代の代表ともいえる学生の皆さんに感謝致します。特に、世話人の無理難題に答えて講演の準備をして頂き、また世話人との長い打ち合わせに参加して下さいだった皆さん、どうもありがとうございました。また来年神戸でお会いしましょう。

第二回放談会 世話人一同

RIBF若手放談会：エキゾチック核物理の将来
平成31年2月18－20日
理研神戸キャンパス・融合連携イノベーション推進棟 8階講堂

名前	所属	Last name	First name	Affiliation
阿部 喬	東京大学CNS	Abe	Takashi	CNS, the University of Tokyo
天野 翔太	近畿大学	Amano	Shota	Kindai University
有友 嘉浩	近畿大学	Aritomo	Yoshihiro	Kindai University
千葉 陽平	大阪市立大学	Chiba	Yohei	Osaka City University
土井 琢身	理化学研究所	Doi	Takumi	RIKEN
遠藤 晋平	東北大学	Endo	Shimpei	Tohoku University
郷 慎太郎	九州大学	Go	Shintaro	Kyushu University
初田 哲男	理化学研究所iTHEMS	Hatsuda	Tetsuo	RIKEN iTHEMS
日野原 伸生	筑波大学計算科学研究センター	Hinohara	Nobuo	Center for Computational Sciences, University of Tsukuba
堀内 渉	北海道大学	Horiuchi	Wataru	Hokkaido University
市川 雄一	理化学研究所仁科センター	Ichikawa	Yuichi	RIKEN Nishina Center
石崎 翔馬	近畿大学	Ishizaki	Shoma	Kindai University
磯部 忠昭	理化学研究所仁科センター	Isobe	Tadaaki	RIKEN Nishina Center
加須屋 春樹	京都大学基礎物理学研究所	Kasuya	Haruki	Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University
菊地 右馬	徳山工業高等専門学校	Kikuchi	Yuma	National Institute of Technology, Tokuyama College
小林 信之	大阪大学核物理研究センター	Kobayashi	Nobuyuki	RCNP, Osaka University
小岩井 拓真	東京大学	Koiwai	Takuma	University of Tokyo
Yue Ma	理化学研究所	Ma	Yue	Meson Science Laboratory, RIKEN
松本 琢磨	九州大学	Matsumoto	Takuma	Kyushu University
三木 謙二郎	東北大学	Miki	Kenjiro	Tohoku University
長濱 弘季	東京大学CNS	Nagahama	Hiroki	CNS, the University of Tokyo
永井智哉	筑波大学計算科学研究センター	Nagai	Tomoya	Center for Computational Sciences, University of Tsukuba
内藤 智也	東京大学	Naito	Tomoya	Dept. Phys., U. Tokyo/RIKEN Nishina Center
倪 放	筑波大学	Ni	Fang	University of Tsukuba
新倉 潤	東京大学	Niikura	Megumi	University of Tokyo
西 隆博	理化学研究所仁科センター	Nishi	Takahiro	RIKEN Nishina center
西村 太樹	東京都市大学	Nishimura	Daiki	Tokyo City University
西村 信哉	京都大学基礎物理学研究所	Nishimura	Nobuya	Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University
小川 翔也	九州大学	Ogawa	Syoya	Kyushu University
奥林 瑞貴	近畿大学	Okubayashi	Mizuki	Kindai University
Riccardo Orlandi	日本原子力研究開発機構	Orlandi	Riccardo	JAEA, Advanced Science Research Center
斎藤 岳志	東京大学	Saito	Takeshi	University of Tokyo
坂口 聡志	九州大学	Sakaguchi	Satoshi	Kyushu University
笹野 匡紀	理化学研究所仁科センター	Sasano	Masaki	RIKEN Nishina Center
佐藤 弘一	大阪市立大学	Sato	Koichi	Osaka City University
関澤 一之	新潟大学	Sekizawa	Kazuyuki	Niigata University
鹿野 豊	慶応大学	Shikano	Yutaka	Keio University
四方 悠貴	京都大学	Shikata	Yuki	Kyoto University
鈴木 大介	理化学研究所仁科センター	Suzuki	Daisuke	RIKEN Nishina Center
瀧 雅人	理化学研究所iTHEMS	Taki	Masato	RIKEN iTHEMS
田中 翔也	近畿大学	Tanaka	Shoya	Kindai University
谷村 雄介	東北大学	Tanimura	Yusuke	Tohoku University
角田 直文	東京大学CNS	Tsunoda	Naofumi	CNS, the University of Tokyo
鷺山 広平	九州大学	Washiyama	Kouhei	Kyushu University
安井 繁宏	慶応大学	Yasui	Shigehiro	Keio University
矢田 雅哉	筑波大学	Yata	Masaya	Tsukuba University
米田 健一郎	理化学研究所仁科センター	Yoneda	Ken-ichiro	RIKEN Nishina Center
吉田 賢市	京都大学	Yoshida	Kenichi	Kyoto University
吉田 聡太	東京大学	Yoshida	Sota	University of Tokyo



アンケート結果

・今回の放談会で、一番刺激的だった講演はどれですか？

- どの講演も非常に面白かったですが、特に関澤さんの講演は面白かったです。
- 瀧 雅人（理研）：深層学習を使った最近の画像処理の進展
- 「高強度場科学の進展と原子核物理への応用」関澤 一之
- 関澤さん、三木さん、角田さん
- 一番は難しいが、特に挙げるならば、新倉、鹿野、坂口、長濱、遠藤（敬称略）。

瀧さんはRIBF・原子核との関連は見いだせなかったが、内容は面白かった。

- 三木謙二郎氏
- 講演というか、テーマ自体で気になっているのは核分裂/融合です。巨視的量子現象や非平衡/開放量子系などの観点から興味をもっています。

・次回の放談会で取り上げてほしいトピックはありますか？招待講演をお願いしたい人はいますか？

- 解析などに使えるツール(上記深層学習など、新しい技術)についての話がまたあれば面白いと思います。
- 宇宙核物理関係（招待講演者の選定に協力します。）
- RIBF では超重元素の化学も進んでいるので、超重元素の広いネタ（原子核物理，化学）。それ以外は、今回は割と原子核の広範な範囲をカバーしていたので良かった。
- また、弱値・弱測定の話を知りたいので、李宰河氏（東京大学生産技術研究所）など。
- 候補として阪大素粒子理論の橋本さんにAdS/CFTの原子核物理への応用を話してもらってはどうか？

・次回の放談会をより良いものとするために、ご要望等ありましたら、お教えてください。

- 非常に良い企画・ワークショップだと感じ、今後もこのような会を続けていって欲しいなと思いました。
- もう少しスケジュールに余裕があったほうがそれぞれの講演に集中できるかと思います。
- 実験の方も含め、技術的なことには極力触れず、物理のアイデアに絞った講演をしてくださったので、今まで参加した研究会のなかで一番楽しめました。次回以降も今回の方針を踏襲するのが良いと思います。
- 放談するのは良いのだが、その前提として、理論・実験お互いに「今何ができて、今何ができていないのか」「直近の課題は何か」ということが共通認識として持てないと、「その遠い先の夢」を放談するのも難しいし、その「放談」が適切かどうか判断できない。自分の分野はともかく、例えば原子核理論の人がハドロン実験の「現状」は適切に把握するのは難しいこともあるので…。
- ということで、例えば初日の午前に、例えばハドロン理論、ハドロン実験、原子核理論、原子核実験…と各分野1人ずつが、overview的なtalkをしてから、放談をするほうが良いかなと思う。
- あとは、終わってからsummaryを書いているけれども、事前にsummaryが配られたほうが良いかもしれない。難しいかもしれないけど。
- 原子核分野の招待講演者は自分の研究の既存のスライドは原則使用禁止というのは良い試みだと思うので継続して欲しい。理論の方も「眉唾ものの話」、「妄想」、「夢物語」を語っていただけるのを楽しみにしています。
- 分野を超えた人についてはレクチャーとして入門+最近の発展ということで2時間ぐらい話してもらったらより深く内容を理解できるかもしれません。