理研 RIBF 理論研究推進会議・理研仁科センターRIBF 研究部門 主催 理研数理創造プログラム(iTHEMS)共催

第3回若手放談会: エキゾチック核物理の将来

2020年2月19日(水)~2月21日(金)

理化学研究所神戸キャンパス・融合連携イノベーション推進棟

世話人

阿部喬(東大 CNS)、市川雄一(理研仁科/九大理)、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)、鈴木大介(理研仁科)、関澤一之(新大超域)、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) 若手放談会は、2017年8月に行われた第一回、2019年2月に行われた第二回に続く三回目の開催となります。本放談会は、RIBFの完成から10年以上が経った今、これまでの研究成果を振返り、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・理論の若手研究者で概観し、今後10年、20年先を見据え、どのような核物理の展開を期待するのかを議論する会として設けられました。

今回の放談会は、第二回の形式を踏襲し、RIBFに限定せず、原子核・ハドロン物理や他の量子多体系物理の若手研究者が実験・理論の枠を越えて議論や交流をし、将来の夢を語り合える場とすることを想定しています。今回は新しい試みとして、以下の二つのテーマについてのパネルディスカッションも行いました。

『原子核物理の新しい教科書』

はたして、よくある、原子核物理の歴史を順にたどっていくという構成が最適なのでしょうか?これまでの研究で蓄えられてきた不安定核物理の知見を踏まえると、まったく別の書き方もできるかもしれません。また、研究者がそれぞれ持つ哲学、信念、物理観に応じて、思い描く理想の教科書はまったく別のものになるのではないでしょうか。今回は、パネラーの方々にそれぞれの理想の教科書をご提案いただき、参加者と共に議論することで、我々の立ち位置、そして、原子核物理の本質を見直す機会としたいと考えています。次代を担う学生が読んだときに、もしくは他分野の研究者が読んだときに、最も魅力的に映る"新しい教科書"を想像すると、あなたならどのような教科書を書きますか?

『"冷やす"とは?』

あなたにとって、"冷たい"状態はどのような状態ですか?このある種漠然としたテーマは分野の枠にとらわれない議論を想定したからです。もちろん、フェルミエネルギーを基準にとれば、"冷たい"と感じる温度は考える系によって様々に変わると思います。また、有限量子多体系における温度の定義も、面白い議論の題材の一つです。一方で、例えば中性子を"冷やして"いくと、ド・ブロイ波長が伸びていき、孤立した原子核というミクロな世界は、よりマクロなスケールの物理と関係するかもしれません。今回は、"冷やす"をキーワードに、超冷中性子、ハドロン物理、天体・宇宙核物理、そして冷却原子系の研究者も交え、起こり得る物理現象について思考実験的に放談していただき、新しい原子核物理の可能性を模索したいと考えています。

研究会ホームページは https://indico2.riken.jp/event/3157/ にあります (ページ内に第一回,第二回放談会へのリンクもありますのでご参照下さい)。通常の研究会のような既存の研究発表やレビューではなく,自由奔放・奇想天外なアイディアでも気軽に話し合える会にするため、原則講演資料は非公開としています。是非会場でお会いしましょう。



集合写真



パネル討論風景



講演風景

第3回若手放談会:エキゾチック核物理の将来

2020年2月19-21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

	$\frac{\mathcal{I} + \mathcal{I} + \mathcal{I} + \mathcal{I}}{\mathcal{I} + \mathcal{I}}$			
2月19日(水)				
9:00 – 9:20	受付			
	座長:阿部 喬(東大 CNS)			
9:20 - 9:30	堀内 渉 (北大理): 趣旨説明			
9:30 – 10:05	新倉 潤 (東大理): ミューオニクス			
10:05 – 10:40	福井 徳朗 (京大基研): 核力研究の進展と核多体計算			
10:40 – 11:00	(休憩)			
	座長:古澤 峻(東理大理)			
11:00 – 11:35	Ma Yue(理研仁科): Hypertriton lifetime puzzle and our approach			
11:35 – 12:10	中里 健一郎 (九大基幹):原始中性子星からのニュートリノ放出と核物質状態方程:			
10:10 10:10	(日本社)			
12:10 – 13:40	(昼食休憩)			
40.40 44.45	座長: 笹野 匡紀 (理研仁科)			
13:40 – 14:15	日高 義将(理研 iTHEMS): QCD 物性			
14:15 – 14:50	川崎 信介 (KEK): 超冷中性子で探る基礎物理			
14:50 – 15:10	(休憩)			
11.00	座長:阿部 喬 (東大 CNS)			
15:45 – 17:10	パネルディスカッション 1 「"冷やす"とは?」(導入:鈴木 大介)			
	遠藤 晋平(東北大学際)			
	川崎 真介 (KEK)			
	佐藤 弘一 (大阪市大理)			
	鹿野 豊 (慶応大理工)			
	中里 健一郎 (九大基幹)			
	日高 義将(理研 iTHEMS)			
	三木 謙二郎(東北大理)			
	→/I× B/IV→P/IV (/IC/TL/			

(懇親会)

18:30 - 20:30

2月20日(木) 座長: Ma Yue (理研仁科) 9:30 - 10:05榎戸 輝揚 (理研): 雷でおきる核反応 10:05 - 10:40 古澤 峻(東理大理): 重力崩壊型超新星爆発と原子核 10:40 - 11:00(休憩) 座長:鈴木 大介(理研仁科) 青木 孝道 (東大理):加速器の大電流化 11:00 – 11:35 得能 光行:洋書の企画と出版 よもやま話 11:35 – 12:10 12:10 - 13:40(昼食休憩) 座長: 関澤 一之 (新潟大超域) 佐藤 弘一(大阪市大):大振幅集団運動の微視的理論のこれまでとこれから 13:40 – 14:15 14:15 – 14:50 増田 孝彦(岡山大異分野):トリウム 229 原子核異性体からの真空紫外光分光に向けた 取り組み 14:50 - 15:25 湊 太志 (原研): "いま"の核物理専門家が目指すべき未来とは 15:25 - 15:45(休憩) 座長: 堀内 渉(北大理) 15:45 - 17:45パネルディスカッション 2 「新しい原子核物理の教科書」(導入:関澤 一之) 伊藤 誠(関西大理工) 銭廣 十三 (京大理) 得能 光行 安井 繁宏(慶応大自然) 吉田 腎市(京大理) 2月21日(金)

座長:市川 雄一(理研仁科)

9:30 - 10:05 伊藤 由太 (原研): 重極限における原子・原子核科学

10:05 - 10:40 郷 慎太郎 (九大理): 核図表のなかの砥石

10:40 – 11:00 (休憩)

座長:新倉潤(東大理)

11:00 – 11:35 木村 真明(北大理): Shape of Exotic Nuclei

11:35 - 12:10 笹野 匡紀 (理研仁科)、関澤 一之 (新潟大超域): プラズマと核物理~湯を沸かすほど の熱い愛~

12:10 - 13:40 (昼食休憩)

座長:堀内 渉(北大理)

13:40 - 15:00 市川 雄一 (理研仁科): 総括および議論

ミューオニクス

新倉潤 (東京大学)

ミューオンは第二世代の荷電レプトンである。第一世代の荷電レプトンである電子を語源とする「エレクトロニクス」という言葉があるので、それの第二世代版ということで「ミューオニクス」という造語を本講演の表題とした。造語なので決まった定義があるわけではないが、本公演ではミューオンを用いた応用研究という意味として使うこととし、最近の研究から「ミューオン特性 X 線測定による元素分析」「ミューオン触媒核融合」「宇宙線ミューオンに起因する半導体デバイスのソフトエラー研究」の3つを紹介した。

核力研究の進展と核多体計算

京都大学基礎物理学研究所 福井徳朗

カイラル有効場理論から導出された核力 (カイラル相互作用) を用いた構造・反応計算は、これまでの原子核の性質の理解を深化させてきた。それはカイラル相互作用が以下の性質を持っているからである:

- 1. 量子色力学に立脚してるために、より微視的な起源をもつ
- 2. 三体力を始めとする多体力が二体力と整合する形で導かれる
- 3. 核子核子散乱のデータを高精度に記述する

講演では、カイラル相互作用を用いた計算例として、現実的殻模型による一粒子準位の分析とスピン軌道分離の関係を紹介した。従来の現実的核力あるいは現象論的な相互作用を用いた場合、スピン軌道分離による一粒子準位におけるギャップの出現は、(主に二体力の) スピン軌道力に帰着される。一方、カイラル相互作用を用いることで、そのスピン軌道力がどのような起源を持つのかということまで掘り下げることができる。実際、二体力だけでなく、三体力に起因するスピン軌道力が安定核領域における $0p_{3/2}$ - $0p_{1/2}$ 分離や魔法数 28 を司っていることを紹介した。

$^{3}_{\Lambda}$ H lifetime puzzle and our approach

Y. MA on behalf of J-PARC P77 collaboration

Three recent heavy ion experiments (HypHI, STAR and ALICE) announced surprisingly short lifetime for $^3_\Lambda H$ mesonic weak decay (MWD), which is difficult to interpret given the fact that $^3_\Lambda H$ is a very loosely bound system. It will be very interesting to study this issue with a different experimental approach. We propose a direct measurement for $^3_\Lambda H$ hypernucleus MWD lifetime with ~20% resolution to J-PARC hadron facility to use the K⁻ meson beam at 1 GeV/c; $^4_\Lambda H$ hypernucleus lifetime will also be measured as a feasibility test for our experimental approach.

The experimental concept is shown in Fig.1. A Cylindrical Detector System(CDS) used in J-PARC E15/E31 experiment is employed to capture the delayed π^- as a weak decay product from $^{3,4}_{\Lambda}$ H hypernuclei; a calorimeter is installed in the very forward region to tag fast π^0 meson along ~ 0 degree, which corresponds to small recoil momentum of Λ hyperon. Such a selection will improve the ratio between $^{3,4}_{\Lambda}$ H and quasi-free Λ and Σ background. A test beam for feasibility study with 4 He target has been tentatively assigned in April, 2020. We will soon have the first hand result for our project.

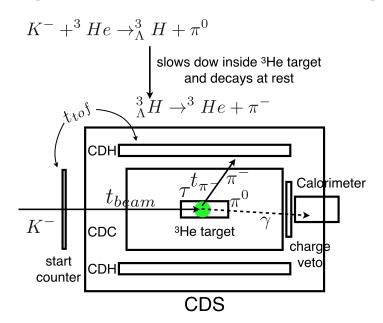


Figure 1: Schematic view of the experimental setup; Cylindrical Detector System(CDS) is used to capture delayed π^- particle from $^{3,4}_{\Lambda}{\rm H}$ weak decay; high-energy γ rays ($E_{\gamma} \geqslant 600~{\rm MeV}$) are tagged with PbF $_2$ calorimeter.

原始中性子星からのニュートリノ放出と核物質状態方程式

中里健一郎(九州大 基幹教育院)

よく言われるように、中性子星は巨大な原子核とみなすこともできる天体で、その質量や半径を測定することで核物質の状態方程式に制限が付けられると考えられている。しかしながら、異なるモデルに基づいていても、中性子星の質量と半径については似たような結果が予言されることもあるため、質量や半径を決めることが原子核物理学のゴールとはなりえない。一方、これまたよく知られている通り、中性子星は太陽の約 10 倍以上の質量を持つ恒星が進化の最後に起こす超新星爆発によって誕生し、その過程では大量のニュートリノが放出される。実際、SN 1987A の観測データから中性子星の質量を探る試みもある。そこでこの研究では、超新星爆発によって生まれたばかりの中性子星(原始中性子星)から放出されるニュートリノを観測することで、核物質状態方程式への制限(願わくば、中性子星の質量-半径関係を超える)が可能か否かを検討した。

本研究では、原始中性子星の進化を超新星爆発から数十秒のタイムスケールにわたって数値計算 し、その過程で放出されるニュートリノのエネルギーを評価した。 大局的に調べるために、一核子 あたりのエネルギーwが次のような関数形で与えられる現象論的な状態方程式を用いる:

$$w(n_b, Y_p) = w_0 + \frac{K_0}{18n_0^2}(n_b - n_0)^2 + S(n_b)(1 - 2Y_p)^2,$$
(1)

ここに, n_b , Y_p はそれぞれバリオン数密度, 陽子混在度である。また, 飽和密度, 飽和エネルギーはそれぞれ $n_0=0.16~{\rm fm}^{-3},\,w_0=-16~{\rm MeV}$ とし, K_0 は非圧縮率である。また密度依存する対称エネルギー $S(n_b)$ は, 以下のような 2 次関数で近似する:

$$S(n_b) = S_0 + \frac{L}{3n_0}(n_b - n_0) + \frac{1}{n_0^2} \left(S_{00} - S_0 - \frac{L}{3} \right) (n_b - n_0)^2, \tag{2}$$

ここに、 S_0 、L はそれぞれ飽和密度における対称エネルギーとその微分量に対応する。また、 S_{00} は 2 倍の飽和密度における対称エネルギーである。この研究では、実験から得られた原子核のデータおよび観測(X 線、重力波)から得られた中性子星半径のデータとコンシステントになる範囲で、 K_0 、 S_0 、L、 S_{00} をパラメータとして振って数値計算を実行し、各モデルにたいして放出されるニュートリノのエネルギーの減衰タイムスケール τ を評価した。

結果として得られたニュートリノ放出のタイムスケールは、最終的に形成される中性子星の質量 m と半径 r について、 $\beta = Gm/rc^2$ として、以下のように表わされることが分かった:

$$\tau = \tau^* \left(\frac{m}{1.4M_{\odot}}\right)^2 \left(\frac{r}{10\,\text{km}}\right)^{-3} \frac{1}{(1 - 0.5\beta)\sqrt{1 - 2\beta}},\tag{3}$$

この関係式は星の冷却タイムスケールに相対論的な補正を加えることでよく説明できる。また、比例係数 τ^* は概ね 35 秒程度だが核子の effective mass に依存し、effective mass が小さいほど短いことも分かった。つまり、原始中性子星から放出されるニュートリノには、中性子星の質量と半径だけでなく、核子の effective mass の情報も含まれていると言うことができる。

「QCD 物性」日高義将(理研)

量子色力学(QCD)は、クォーク、グルーオンの素粒子の世界から原子核の複合粒子 の系までを記述する基礎理論である. QCD には、ゲージ対称性や自発的対称性の破 れと言った現代物理において欠かせない基本的な概念が凝縮されている. 本講演で は、QCD の多体系としての性質ついて概観した.素粒子論が高エネルギーフロンティ アであるのに対し、QCD 物性は、数兆度の超高温、原子核密度の数倍といった高密 度の極限状態を対象とした高温高密度フロンティアと言える. QCD には、自発的対 称性の破れといった普遍的な性質とカラーの閉じ込め現象という他の物性系には見ら れないユニークな性質が備わっている。自発的対称性の破れや、超伝導現象と言っ た普遍的な性質の理解は、歴史的に物性分野と互いに影響しあい発展してきた. 本 講演では、最近の物性物理のトポロジカル物質の理解の進展を踏まえ、QCD の高密 度物質の可能な相について再考した. ハドロン相(閉じ込め相)とクォーク物質相(カラ 一超伝導相)が同じ大域的対称性の破れを実現しているため、この2つの相の間は、 相転移なしに連続的に繋がっているというクォークハドロン連続性の描像が90年代終 わりに提唱されて、それに基づいた様々な議論がなされてきた。ここでは、これらの相 がトポロジーの観点から区別され、クォークハドロン連続性成り立たない可能性につい て議論した. 具体的には, ハドロン相の超流動渦とカラー超伝導相の渦が相転移なし に繋がりうるかという問題の考察から、ハドロン相とカラー超伝導相の間がトポロジカル に区別できる可能性があることを紹介した.トポロジカルに区別できる場合,それは、2 つの相の間に量子相転移が存在することを意味する. 量子転移にともなう特異性は、 有限温度の状態にも影響を与え、重イオン衝突実験において観測される可能性があ り, 今後の理論, 実験の進展が期待される.

超冷中性子で探る基礎物理

川崎真介(KEK)

超冷中性子(UCN: Ultra-Cold Neutron)とは数 100 neV 程度しか運動エネルギーを持たない非常に低エネルギーの中性子の事で、物質容器中に閉じ込めることが可能である。このため UCN は外場との相互作用時間を長くとることが出来、、微弱な相互作用を増幅して観測することができる。この性質を用い UCN は様々な基礎物理実験に用いられている。本講演では UCN を用いる基礎物理実験の例として、中性子電気双極子モーメント実験、中性子寿命測定実験、重力場に束縛された中性子の量子化状態測定などを議論した。

その中でも中性子電気双極子モーメント探索実験は現在の物質優勢宇宙の起源を探る試みとして興味深い。中性子電気双極子モーメントの存在は時間反転対称性(T 対称性)を破る。ローレンツ対称性から導かれる CPT 保存が成り立つと仮定すれば T 対称性の破れはすなわち CP 対称性の破れを意味する。中性子電気双極子モーメントを精密に観測することによって現在の物質・反物質の非対称性の起源を解き明かすことができるかもしれない。これまでに最も感度の高い実験はフランスの Institute Laue Langevin (ILL)で行われた[1]。超冷中性子(Ultra-Cold Neutron: UCN)を物質容器に溜め込み電磁場中でのスピンの歳差運動周期を精密に測定する実験である。この実験では nEDM の大きさに 3.0×10^{26} ecm の上限値を与えている。この測定の感度は統計精度により制限されており、大強度の UCN 源を開発することで新物理の予想する nEDM 領域を探索することが可能になる。

現在、世界中で開発の進む UCN 源は主にはスーパーサーマル法を用いている。スーパーサーマル法とは 1meV 程度の運動エネルギーを持つ中性子を超流動へリウム等の UCN コンバーター中に照射し、フォノン散乱によってさらに中性子を冷却し UCN を得る方法である[2]。この方法を用いてカナダ TRIUMF 研究所に中性子電気双極子モーメント探索実験を旗艦実験とする高強度 UCN 源が建設されている[3](TUCAN コラボレーション)。講演では到達できる測定感度や現在の建設状況も報告した。

参考文献

- [1] J. M. Pendlebury et al., Phys. Rev. D. 92, 092003 (2015)
- [2] R. Golub and J. Pendlebury, Phys. Lett. A 62, 337 (1977)
- [3] S. Ahmed et al., Phys. Rev. C 99 (2019) 25503

パネル討論会の報告

今回の若手放談会では、新しい試みとしてパネル討論会を行いました。これまでの放談会は、通常の研究会のように、講演者による口頭発表を軸に企画構成されてきました。講演は根本的には一人の講演者から多数の聴衆へ、という一方向の伝達構造を基軸としています。一方、パネル討論では、壇上のパネラーたちによる討論を呼び水に、多数の聴衆を巻き込む多方向的な議論の構造が可能になるのではないか。新しい野心的なより踏み込んだ放談会の形式を模索する意味も込めて、今回の放談会ではパネル討論会を二本企画しました。

パネル討論会を企画する上で最も心を砕いたのは、テーマの設定です。テーマが余りに専門的すぎると議論のハードルが高くなってしまう。一方で、テーマが曖昧だと議論が発散することを恐れました。なにぶん初めての試みでしたので、どのあたりで手を打つのかが難しい判断でした。悩んだすえ、二つの討論会のテーマを逆方向に偏らせることで、全体としてバランスをとることにしました。つまり、一つの討論会は核物理分野になじみ深いテーマとし、もう一つは分野横断的なテーマとしました。前者では核物理で日常的な言語と概念で議論し、後者では核物理を超えたより一般的な言語と概念を導入することを企図したのです。テーマの最終的な決定には、パネラーの皆さんのご意見も伺いたかったので、11月7日と11月11日の二回に分けて、RIBF棟で打ち合わせを行いました。その結果決まったのが「原子核物理の新しい教科書」と「冷やすとは?」という二つのテーマです。

「原子核物理の新しい教科書」で想定していた議論は、いま原子核物理にはどのような教科書が求められているのか、教科書を書くとしたら何を一番の本質ととらえるのか、例えば学部学生を惹きつける教科書とはどんなものか、といったことでした。パネラーとして、原子核理論から伊藤誠さん、安田繁宏さん、吉田賢市さん、原子核実験から銭広十三さん、そして出版業に詳しい物性物理理論出身の得能光行さんをお招きしました。

「冷やすとは?」の構想の原点は、低エネルギーの中性子でした。熱中性子の捕獲反応における巨大な断面積や、超冷中性子の凝縮現象など、低エネルギーで波動関数が広がった中性子が生じるである現象を議論することを考えていました。打合せの際に、対象を中性子に限定せずより一般的なテーマの方が議論しやすいとパネラーから要望があり、「冷やす」をキーワードとしました。そもそも温度とは何か?低温になったとき、原子核を代表する量子多体系はどのようにふるまうのか、といったことを議論することにしました。パネラーとして、原子核理論から佐藤弘一さん、日高義将さん、中里健一郎さんを、原子核実験から三木謙二郎さんを、低温原子理論から遠藤晋平さんを、超低温中性子実験から川崎真介さんを、そして分野外の理論研究者として鹿野豊さんをお招きしました。

パネル討論会は、初日と二日目の夕方に行いました。討論会では、まず世話人が趣旨説明を行った後、各バネラーが順番に事前に準備したスライドを発表しました。スライドは、バネル討論の流れを作るために、世話人がお願いしてパネラーの皆さんに事前に用意して頂いたものです。各テーマに関して思うところを、スライド 2、3 枚で簡潔にまとめて頂きました。バネラーの皆さんのスライドを一通り紹介した上で、パネラー全体の討論に移ろうと考えていました。ところが、図らずも、スライド紹介だけで聴衆とパネラーの間の議論が白熱してしまい、全体討論の時間をとることができませんでした。全パネラーの司の議論が白熱してしまい、全体討論の時間をとることができませんでした。全パネラーのスライド紹介で、連日連夜8時ごろまで討論が続いたのです。世話人にとって、これは予想外の事態でした。いわゆるパネル討論の体を成さなかったという意味では、当初の企画の意図がくじかれたわけですが、しかしながら、一つの主題のもとに展開する「ショート・トーク・セッション」としては、大きな成功を収めたのではないかという意見が寄せられました。「ショート・トーク・セッション」がもつ構造的な長所は、スイライドの枚数が絶対的に少ないという点にあると思います。限られたスライドの中に、アイデアのエッセンスが絞り込まれるからです。そして、そこを出発点として、相対的に長い時間をかけて聴衆が議論を展開してゆくことができる。パネラーの発議を着火点として、爆発的に議論が広まる構造が、放談会の趣旨とよく一致したのだと思います。

このように、放談会の形式をめぐる試行は、予想外な形で一つの答えにたどり着きました。次 回の放談会でもまた新しい試みが継続されることを期待します。

雷でおきる核反応

榎戸輝揚 (理化学研究所)

原子核物理の若手、中堅の方の面白い集まりに呼んでくださってありがとうございました。私はもともとX線天文学の分野で、宇宙放射線の観測を通して、超新星爆発の後に残される高密度天体「中性子星」の観測的研究を進めてきました。最近になって、雷放電や雷雲からもX線やガンマ線が放射されているという事実を知り、X線天文学の対象ではありませんでしたが、その観測ノウハウを活用して、雷と雷雲という地球物理の観測対象に挑戦してみました。普通、大気吸収の影響が大きいはずのこういった対象から、地上や衛星観測を通して放射線が見つかってくるのは、驚くべきことです。

日本の冬季雷雲は高度が低く、放出エネルギーの大きな雷活動があることで世界的に有名で、絶好の観測対象です。原子力発電所のモニタリングポストや、私達自身の観測結果によって、雷雲の通過時に MeV エネルギーに達する放射線が地上に到達していることが報告されており、これをより詳細に、多地点でマッピングする「雷雲プロジェクト」を2015年頃に立ち上げました。当初、研究資金が不足していたため、学術系クラウドファンディング academist で市民サポーターから直接の寄付をたより(文献1)、小型で環境放射線の計測に十分な性能をもつ測定器を独自に開発し、徐々に観測域を拡大していきました。その結果、雷雲内の電場で加速された電子からの制動放射ガンマ線という描像が明らかになりつつあります。

2017年2月に、雷放電に伴う放射線と、それに引き続いてガンマ線の残光と、 0.511 MeV の対消滅線が見つかりました。詳細な解析から、これは雷放電で発生した 10 MeV を超えるガンマ線が大気中の窒素や酸素の原子核と光核反応を起こした 結果と明らかになりました。ガンマ線残光と対消滅線はそれぞれ、光核反応で発生した中性子と陽電子を捉えたものであることがわかりました(文献2)。この結果 は、雷という身近な現象が、単に電磁気学の研究対象ではなく、原子核物理の知見も使って研究すべき対象であることを示しています。現在、金沢市を中心にシチズンサイエンスの枠組みを取り入れた観測計画を進めています(文献3)。

参考文献

- 1. 学術系クラウドファンディング academist <u>「カミナリ雲からの謎のガンマ線</u> <u>ビームを追え!」</u>
- 2. Enoto et al., <u>"Photonuclear reactions triggered by lightning discharges"</u>, *Nature* 551, 481-484 (2017)
- 3. 雷雲プロジェクト・宣伝動画 https://www.youtube.com/watch?v=kWh6Jae1Hh8

重力崩壊型超新星爆発と原子核

東京理科大学 古澤峻

「恒星の進化」は最も古い宇宙物理学の分野の一つだが、近年はX線観測の発展、ニュートリノ、重力波天文学の始まりにより、中性子星などの高密度天体の進化、構造、突発現象が注目を集めている。特に重力崩壊型超新星爆発は、重力波・ニュートリノなどの放出源、高温高密度下の核物理の検証場所、元素の起源としても重要視されている。しかし、これら高密度天体現象は非常に複雑で、重力、電磁気力、強い相互作用、弱い相互作用すべての基本的な相互作用が重大な役割を担い、重力、磁気、回転、熱エネルギーや、光・ニュートリノ・重力波の放射エネルギー、放出物の運動エネルギーの急激な変換を起こる。そのため第一原理的な数値計算が不可能に近く、爆発に至るプロセスや、ダイナミクス、状態方程式などのインプット物理との関連の多くが未解明である。

状態方程式は、物質の「硬さ」や「組成」を決める重要なインプット物理であり、「硬さ」は爆発や合体のダイナミクス、特に重力波観測に大きく影響する。「組成」は、もう一つのインプット物理である弱相互作用反応率と併せて、特にニュートリノ放出、元素合成に影響すると考えられている。近年、状態方程式の「硬さ」に関する研究は、変分法など、核子-核子散乱データを高精度で再現する、現実的な核力に基づく、最先端の一様核物質計算が行われ始めている。一方で、個々の原子核の混合状態を解く「組成」や弱相互作用反応率の計算は、約30年からあまり更新されていない。我々のグループの系統的な研究[1-5]などにより見えてきた、超新星ダイナミクスに重大な影響を与える核物理の不定性は、以下の通りである。

- 1、核子のニュートリノ散乱・放出・吸収率
- 2、核物質のエネルギー(特に核密度以上における核力モデル)
- 3、重原子核 (N,Z)=(40-80,25-40) の励起状態(有限温度効果)
- 4、重原子核 (N,Z)=(40-80,25-40) のニュートリノ放出率
- 5、軽原子核(N,Z)=(1,1), (1,2), (2,2)の媒質中のエネルギー(有限温度・密度効果)
- 6、軽原子核(N,Z)=(1,1), (1,2), (2,2)のニュートリノ散乱・放出・吸収

この他にもハイペロンの出現など特殊な原子核物理が、超新星のシミュレーション予測を大きく変える可能性も残されている。今後は、天体物理・計算物理、原子核理論、原子核実験の分野が連携し、これらの超新星シミュレーションに使われている計算モデルやデータを更新していくことが望まれる。

- [1] S. Furusawa, H. Nagakura, K. Sumiyoshi, et al., Astrophys. J., 774. 78. (2013).
- [2] S. Furusawa, H. Nagakura, K. Sumiyoshi, et al., Phys. Rev. C 95, 025809 (2017).
- [3] S. Furusawa, H. Togashi, et al., Journal of Physics G, 44, Number 9 (2017)
- [4] S. Furusawa Phys. Rev. C 98, 065802 (2018)
- [5] H. Nagakura, S. Furusawa, et al. Astrophysical J. Suppl. 240, 38 (2019)

第3回若手放談会報告書「加速器の大電流化」

背景と概要

加速器の発明以来,ビームのエネルギーと電流の増加が要求され続けている. 2020 年現在,ビームエネルギーのフロンティアはシンクロトロンによって切り開かれ,ビーム電流の増加はライナックが担っている. 2019 年には内閣府研究開発プログラム ImPACT「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」[1]によって,ビーム電流 1A の加速器の概念設計が提案された[2]. 本放談ではビーム電流 1A の技術的困難の対策について述べ,将来のさらなるビーム電流向上のために 1kA 加速器の概念提案をした.

内容

ImPACT 加速器におけるビームロス

加速器のビーム電流を増加させるにあたって問題 となるのがビームロスである。ビームロスは放射線管 理上, 経験的に 1W/m 程度に抑えるのが常識とされて いる. この常識を ImPACT 加速器に当てはめると 1A 加速器ではビームロスの割合を特に高エネルギー領 域では 10-8/m のオーダーまで低減させる必要がある. 一方で、大電流ビームにはビーム自身や真空ダクトや 共振器が作る電磁場の作用が働く. この作用は一般的 に軌道からの変位に対して線形の項のみならず、非線 形の項も生じる. 非線形効果の下で、ビームのエミッ タンスは保存せず, ハローと呼ばれる設計軌道から大 きく離れた位置に粒子分布が生成される. ハロー成分 のビームは一般的にエミッタンスが大きいため、加速 中にロスする可能性が高い.よって、ビームロスを十 分小さくするには加速器の開口をハローも考慮した ビームサイズに対して十分大きくとる必要がある. し かし、この要請は電磁石や加速空洞などの巨大化を招 く. 例えば半径 500mm 程度の開口を持った四極電磁 石を設計をすると高さ 3m 程度の巨大なものになる.

ImPACT 加速器の課題

上記の議論より、ImPACT 加速器を 1A 加速器として成立させるためにはビーム自身の発散力を抑制す

東京大学理学系研究科物理学専攻 D2 青木孝道 2020 年 2 月

るために、ある程度の大口径化と中性化を施し、ハロー生成の原因となる非線形効果の排除と入射ビーム分布の最適化などが必要である.

大口径ビームの光学設計には従来用いられる近似 区近似などの近似手法が適用できないことも考えら れ,非線形ビーム光学理論の構築も必要である.

さらなる大電流化

1A 加速器が完成すれば、核変換装置としての応用が期待できるが、それでも粒子の流量は 10^{18} 個/s 程度である。mol/s の世界までにはあと 5 桁ほど不足している。せめて、1A から 3 桁ビーム電流を上昇させ、0.01mol/s の加速器を設計できないか考えてみた。

結果、ビーム電流の原理的な限界が見えており、ビームが作る電磁ポテンシャルの高さがビーム自身の運動エネルギーKと等しくなるような状況が一つの限界とできる。これは、運動エネルギーKの単一粒子があったとしても、そのビームに合流させられないことを意味しており、その大きさ I_{lim} は

 $I_{lim} = 4\pi \varepsilon_0 c\beta \gamma^2 K$

であることが簡単な電磁気学から導ける. この式はビームサイズやエミッタンスなどビーム光学的なパラメータには依存せず, ビームのエネルギーKを決めた瞬間に自然と決まり, 100kV のプロトンに対しては49Aとなる. よって, 1kAの加速器を作るにはある程度高いエネルギーまでは並列に加速器を作るほかなく,約25本の40A加速器からのビームを途中で合流させながら,ターゲットにビームを運ぶ必要がある. また消費電力の観点から,エネルギー回収の仕組みも必要である.

参考文献

- [1] https://www.jst.go.jp/impact/hp_fjt/profile/
- [2] H. Okuno, H. Sakurai, Y. Mori, R. Fujita, M. Kawashima, "Proposal of a 1-ampere-class deuteron single-cell linac for nuclear transmutation", Proceedings of the Japan Academy, Series B, Physical and Biological Sciences, 10.2183/pjab.95.030

講演者:得能 光行

発表日:2020年2月20日

報告書

洋書の企画と出版 よもやま話

本発表は、洋書の出版に関心がある聴衆を対象とし、出版までの工程の全体像を俯瞰しながらいくつかトピックを紹介した。なかでも、洋書を企画する上でキーのとなるであろう事柄を講演者の経験をもとに取り上げた。以下に講演の全体的な流れと各々の項目について簡単にまとめる。

発表内容

- 1. 導入 出版社内における書籍編集者の役割と位置づけ
- 2. 企画の発案から出版までの流れ
- 3. 企画書の作成とレビュー
- 4. 原稿作成の流れ
- 5. 制作の流れ
- 6. まとめ

1. 導入

講演者の自己紹介を兼ね、書籍編集者の大まかな仕事内容や出版社内での編集者の位置づけを紹介。出版には著者が直接接する編集・制作の他にも書籍の流通や出版後の著者サービスを担う営業・マーケティング・カスタマーサポートなどの部署があり、互いに機能しあって書籍出版の事業が成り立っていることを説明。

2. 企画の発案から出版までの流れ

洋書企画の提案から出版に至るまでの流れを俯瞰。講演者の担当分野では企画書をベースに書籍を出版するかを編集部で審査するため、原稿の執筆依頼や提出は企画採用の後であると強調していた。

3. 企画書の作成とレビュー

企画を発案する上での興味の対象となる事柄について紹介。まずは企画書に含めるべき情報や内容を紹介した後、どのような書籍のタイプやカテゴリーがあるかや、その中で人気が高いのはどういうものかについて説明。また、提案した企画を編集部でどのようにレビューしているかや、レビューでよく指摘される意見についても紹介。

4. 原稿作成の流れ

原稿を作成する上での注意点について紹介。特に、問い合わせの多い、図表を転載する場合の作業内容について説明。その他、原稿のファイル形式やテンプレートについても紹介。

5. 制作の流れ

最終的に受理された原稿が、その後どう組版・処理されるのかについて簡単に紹介。組版された原稿データはXML形式として保存され、さまざまなメディアに変換されることを紹介。

6. まとめ

本講演のまとめと特に強調したいメッセージについて言及。ただし、当日は時間が押していたためスライドの表示のみに留めた。

大振幅集団運動の微視的理論のこれまでとこれから

佐藤 弘一(大阪市立大学 理学研究科/南部陽一郎物理学研究所(NITEP))

原子核の大振幅集団運動の微視的理論の構築は長年の未解決問題である。この講演では、時間 依存 Hartree-Fock(TDHF)理論の断熱近似に基づくこれまでアプローチについて振り返り、最近の 発展とこれからの展望について議論した。TDHF 理論は原子核の平均場理論の典型例であるが、 半古典論であり、1粒子のトンネル現象は取り扱えるが、多粒子が関与する巨視的トンネル現象 を扱えない。この問題を解決すべく、少数の集団的自由度(集団座標と共役な集団運動量)を導入 し、断熱展開(集団運動量展開)に基づき、集団座標の関数としてハミルトニアンを決定する、所 謂、断熱的 TDHF (ATDHF)理論が 1970 年代以降幾つか提案されてきた。しかし、ATDHF 理論に は、解が一意に定まらない等の問題があり、殆ど実用されなかった。また、ATDHF 理論の最大の 問題点の一つは超流動性が考慮されていないことであった。この問題を克服する理論として「断 熱的自己無撞着集団座標(ASCC)理論」が 2000 年代に提案された[1]。これは 1980 年代に丸森ら によって提案された SCC 理論の断熱近似であり、超流動性を取り込んだ ATDHF 理論の進化版で ある。しかし、ASCC 理論にも次の問題があった。超流動系を取り扱うにあたり、基本方程式系 の持つ"ゲージ"対称性のために数値的な不安定性が起こり、集団的自由度が決定できなくなる ことである[2]。これに対し一応の処方(一種のゲージ固定)は与えられたが、その処方に明確な正 当化はなく根本的解決には至っていなかった。更には、本来ダイナミクスに寄与する断熱展開の 高次項が取り込まれていないことも問題であった。断熱展開の高次項を取り込む必要性は、ATDHF 理論においても既に Villars らによって指摘されていた。Baranger-Veneroni の ATDHF においても、 高次項に相当する項(いわゆる B-term)の必要が認識されていた(B-term が高次項に相当すること は、筆者が示した[3])。しかし、その高次項を決定するための一般的な理論は知られておらず、 1970年代からの未解決問題だった。実は、ゲージ対称性の問題と高次項の問題は密接に関係して いる。この講演では、これらの問題に対する一連の仕事[3]について簡単に紹介した。断熱展開の 高次項を取り込んだ新たな基本方程式系を提案し、簡単な 2 準位模型を用いて、従来無視されて いた断熱展開の高次項が集団運動の慣性質量、従って低励起状態の集団ダイナミクスに実際に有 意な寄与を与えうる事などを示し、新しい理論の有効性を示した。この様に、TDHF 理論の断熱 近似に基づくアプローチには様々な困難があったが、この一連の仕事によって、1970年代からの 原子核理論の未解決問題にようやく解答が与えられたのである。

この講演では、今後の展開として、ASCC 理論やその近似である Local QRPA 法の核反応計算への応用、冷却原子系への応用、場の理論への拡張などの可能性について議論した。

- [1] M. Matsuo, T. Nakatsukasa, K. Matsuyanagi, Prog. Theor. Phys. 103, 959 (2000)
- [2] N. Hinohara, T. Nakatsukasa, M. Matsuo, and K. Matsuyanagi, Prog. Theor. Phys. 117, 451 (2007).
- [3] K. Sato, Prog. Theor. Exp. Phys. **2015**, 123D01(2015); *ibid*. **2017**, 033D01 (2017); *ibid*. **2017**, 123D03 (2017); *ibid*. **2018**, 103D01 (2018).

トリウム229原子核異性体からの真空紫外光分光に向けた取り組み 増田孝彦(岡山大学異分野基礎科学研究所)

本講演では、トリウム229原子核の極低エネルギー第一励起準位への能動的遷移の実現^口、および次の研究段階である真空紫外光発光観測実験の進展について紹介した。

トリウム229原子核は安定・不安定含む全ての同位体の中で唯一、8eV程度と極めてエネルギーが低くかつ寿命の長い第一励起状態(以下、アイソマー状態と表記する)を有する原子核として知られている。原子核の励起エネルギーが通常keVからMeVの領域にあることを考えると、これは異常に低いエネルギーであると言える。このエネルギーは光の波長で約150nmにあたり、レーザー発振可能な波長域である。したがってトリウム229原子核はレーザー励起可能な原子核として注目を集めている。

レーザーはこれまで原子分子分野で広く活用され、高分解能分光やコヒーレント量子現象の制御など、様々な成果をあげている。もしトリウム229のアイソマー状態にレーザー励起できるようになれば、レーザー発振や制御に原子核を利用できる可能性がある。特に注目されているのが、時間の単位を定義する周波数標準としての応用である。原子と異なり、原子核は周囲を電子雲に遮蔽された孤立量子系であるため、黒体輻射等の外部からの擾乱に強い。そのため、原子を用いた周波数標準に比べ精度が高められると考えられている。応用のみならず基礎物理にも活用できると提案されている。例えば、このエネルギー値が微細構造定数 α に敏感とも期待されており、宇宙の加速膨張の謎を検証する手法の一つである α の恒常性検証に有用なツールとなりうる。

レーザー励起の実現のためには、アイソマーのエネルギーを精度よく決める必要があり、そのために世界中で研究が行われている。従来の研究では、トリウム229の親核であるウラン233のアルファ崩壊に伴って生成されたアイソマーを用いていた。我々のグループではSPring-8の放射光を使って、能動的にアイソマー状態を生成するというユニークな手法で実験を進めている。能動的にアイソマーを作ることができれば、放射線的にクリーンな環境下で、アイソマーを自在に生成できるため、バックグラウンドに強い測定ができるのが利点である。

具体的には29.2keVの放射光X線をトリウム229標的に照射しまず第二励起状態に共鳴励起させ、その後自然にアイソマー準位に遷移するというものであり、核共鳴散乱と呼ばれる手法を応用している。生成したアイソマーから基底状態に脱励起する際の発光を観測分光することで、発光波長つまりアイソマーのエネルギーを高精度で決定できる。現在はアイソマー準位への遷移に成功したところで、今後アイソマー準位からの脱励起観測を目指している。

講演では、核共鳴散乱によるアイソマー生成実験について実験原理や装置の詳細を紹介し、最近得られた実験結果を報告した。また次の研究計画としてアイソマーからの脱励起光観測についてこれまでの進展と今後の課題について述べた。質疑応答では、トリウム229の有用性から始まり、Horizon2020に代表される組織的研究活動の現状、また我々の手法の優位性や困難な点、今後の展望など、多くの議論をすることができた。

参考文献

[1] Takahiko Masuda et al., Nature, 573, 238-242 (2019).

"いま"の核物理専門家が目指すべき未来とは

湊 太志

1. 概要

過去から現在までの基礎科学の発展に焦点を当て、現在の基礎科学研究者が市民や社会に対して担うべき役割について再考する。また、原子核物理研究の成果を最大化させるために必要と思われる分野の活動について議論する。

2. 内容

アメリカ国立科学財団の報告書によると、基礎研究とは「自然またはその他の現象をより良く理解または予測するための科学的理論を向上させることを目指した科学研究である。」 (1) とある。このような基礎研究の発展は、研究者の知識欲や好奇心から発展するものが多く、特定の商業的な利益を目指すものではない。しかしながら、基礎研究の発展は既に現代社会に深く浸透しており、電化製品など人々の生活向上に役立つものもあれば、軍事利用など多くの市民を傷つけるものにもなり得る状況となっている。

現代の科学者が持つ市民や社会への説明責任については、以前よりたびたび議論されてきた。純粋な好奇心とそこから結びつく発見の喜びを他者と共有できることは素晴らしい機会であり、未来の科学者を育てるうえでも重要である。昨今、大学や研究機関、教育機関のサイエンスアウトリーチが様々な場所で見られるようになってきた。しかしながら、現代の基礎科学は、その専門性が深まり過ぎて、市民や社会との距離が広がりつつある側面も否定することができない。いまや国の研究機関や大学に多額の税金が使われており、特に、基礎科学研究施設の大型化が急速に進む中、一つの成果を生み出すために多額の予算・そして大量の電力が必要になってくるケースが増えている。電力に関してさらに言えば、火力発電所などからの二酸化炭素排出が世界規模の関心となっている。基礎科学の発展のために地球環境が悪化するような状況は、市民や社会にとって必ずしも受容できるものではなく、研究者にとっても不本意なことである。

基礎研究は人類の英知を広げる重要な仕事である。しかし、限られた予算と資源を有効に利用し、持続可能な社会の歯車の一部となるためには、市民・社会に自らの研究の必要性を、負の側面も隠さず説明する必要性はないだろうか。さらに、「原子核物理研究」が未来の科学者の好奇心の矢の的になるためにも、積極的なアウトリーチや市民との窓口の強化が今後必要だと思われる。知識と成果を市民・社会と共有することは、自らの成果を最大化することにつながっていくものである。

3. 参考文献

1. National Basis Foundation

https://www.nsf.gov/pubs/1953/annualreports/ar_1953_sec6.pdf

今年で第三回を迎えた若手放談会は、原子核・ハドロン物理や他の量子多体系物理の若手研究者が実験・理論の枠を越えて議論や交流をし、将来の夢を自由闊達に語り合える場として定着しつつある。原子核物理の今後の展開を議論する上で、原子核物理の本質と、ならびに、これまでに何がわかったのか(何がわかっていないのか)を整理することが重要であると考えられる。そこで本放談会では、「新しい原子核物理の教科書」というテーマでパネル討論会を実施した。このパネル討論会では、伊藤誠(関西大理工)、銭廣十三(京大理)、得能光行(出版社)、安井繁宏(慶応大自然)、吉田賢市(京大理)(敬称略、五十音順)をパネラーとしてお招きし、それぞれの思い描く理想の教科書を、タイトルと目次を基にプレゼンしていただき、その内容についての議論を行った。特に得能氏は、物性物理学の分野で学位を取得した物理のバックグラウンドがありながら、現在は出版社で編集者として活躍しており、今回のパネル討論会では実際に教科書を編集・出版する立場のご意見を頂いた。以下が、それぞれのパネラーの提案や議論の概略である:

銭廣十三:「宇宙の物質の創生と進化:QCD 自己組織化物質の非平衡世界」 銭廣氏は、「教科書は著者の"哲学"を感じられるものであるべきである」 という信念に基づき、原子核が宇宙の物質構造を形成する上で重要な役割を果 たしているという"物質観"を強調した教科書を提案した。原子核を主役に語 られるその物語は、各階層に動的に物質構造が形成されていく様を、延いては

宇宙の歴史そのものを、紐解いていく。学部生や一般市民へ向けて、広大な原

伊藤誠:「量子多体系と原子核: 量子多体系としての普遍性と特異性」

子核物理の世界観を提供するブルーバックス的な読み物が想像された。

伊藤氏は、「原子核物理の面白さを伝えるためには、量子多体系としての普遍性と特異性を明示することが重要である」と考え、原子核のクラスター構造を中核に据えた教科書を提案した。他の量子多体系(物性、化学、素粒子)とも共通する平均場的描像を概観した上で、原子核の特異性として、軽い原子核に発現するクラスター励起へと議論が展開される。最終的には、クラスター励起の関与する核反応を通じて、天体核反応や原子力等への応用についても触れられ、原子核物理の豊かさ・重要さを期待させる構成となっている。実際、様々な量子多体系を網羅し、その普遍性と特異性を分野横断的に論じた教科書はほとんどなく、そういった見方を提供する教科書として有益だろうという意見があった。

吉田賢市「原子核物理入門」」

吉田氏は、「原子核構造の基礎を学部生にもわかりやすく伝えること」を目指した教科書を提案した。大抵の教科書では当たり前のように議論される液滴模型や核力の導入を大胆にも省き、平均場理論や密度汎関数理論をベースに、原子核の基底状態から励起状態までの性質を概観する。量子力学を学んだ学部生や大学院生が、俯瞰的・現代的な視点から原子核の構造とはどういうものなのかを理解することができる、実用的な入門書である。平均場理論に基づいて統一的かつ簡潔にまとめられているため、原子核"理論"入門とすべきという意見もあったが、量子力学の基礎を学んだ読者(他分野の研究者も含め)が原子核物理の全体像を把握できるという点が、好評であった。

安井繁宏「量子多体問題としてのハドロン原子核物理入門」

安井氏は、「平均場+揺らぎ」をキーワードに、核子多体系だけでなく、 様々なクォーク多体系を扱う包括的な教科書を提案した。ハドロン物理まで含 めると、原子核物理はより一層豊かさを増す。共通の理論的枠組みや概念を軸 に、ハドロン・原子核物理を隔たりなく網羅しようとする、ある種挑戦的な教 科書であった。扱う内容が多岐にわたるため、何冊かに分けたシリーズものの 教科書とすることで、原子核・ハドロン物理の全体像を与えることが期待され た。

今回の議論の中で、「原子核物理研究者は、"量子多体系"としての面白さと、あらゆる面で宇宙・素粒子・物性物理などへと関わる"原子核が織り成す豊かな物理"に、核物理の魅力を感じている」ということが見受けられた。これをいかに次代を担う学生や他分野の研究者に伝えるかということは難しい課題ではあるが、本パネル討論会の議論がヒントを与えるものであったと考えている。

企画段階では、「新しい教科書」というテーマは単に議論の大枠を設定するものであり、それを基に原子核物理の本質を見直し、議論するということを想定していた。実際には、良くも悪くも"教科書"というテーマが思いのほか有効に働き、「実際に教科書としてどうだろうか」という議論が目立った。一般に、教科書は「既にわかっていること」をまとめたものである。一方で、研究者は「まだわかっていないこと」を日々探求している。今回のパネル討論会では、「原子核物理のわかりやすい教科書がない」という意見が散見されたが、普段不満を抱きつつも、研究の現場では議論できない"教科書のあり方"について、若手研究者間で貴重な意見交換がなされたと考えている。

講演タイトル: 重極限における原子・原子核科学

講演者: 伊藤 由太 (JAEA)

超重核領域で存在が予言されている超重核の"安定の島"に焦点を絞り、安 定の島到達に向けた課題と現段階での道筋及びそのための実験計画について議 論した。

原子核物理の大きな目標の1つである超重核の安定の島はPb-208の次に現れる球形二重魔法数核であると予言されており、原子核物理の基本的性質である設効果が強大なクーロン力の元でも成立し得るかという点でも本質的に重要である。安定の島への到達の道筋を立てるためには、未知核の精密質量測定と実験的質量値による理論の精査が不可欠であることを述べた。そのために JAEA で進めている中性子過剰超重核の精密質量測定計画について議論した。

また、精密質量測定の応用の 1 つとして、超重核に見られる特異な質量対称 自発核分裂の核種分布測定の可能性と物理的重要性についても触れた。動的な 核分裂という現象における、静的な殼構造(特に二重魔法数核 Sn-132)の影響が 興味深いことを述べた。

今回の発表では、時間の関係上、超重核原子に関するトピックは割愛した。次 回以降で是非議論したいと考えている。

核図表のなかの砥石

郷 慎太郎 (九大理)

2019年6月、日本の最西端は与那国島から北北西へ220m 離れた「トゥイシ」へ変更された[1]。トゥイシは刃物を磨く「砥石」に由来する説がある。地元住民にとっては古くから馴染みのある岩であり、与那国島への帰港の際の目印ともされてきた。原子核の地図ともいえる核図表において、このような「砥石」は存在するであろうか?超重核領域に古くから存在が予言されている「安定の島」は陽子・中性子数ともに魔法数を満たすことによって成立するものとされているが、既存の実験技術では直接合成することが難しい。本講演では陽子数120,122,126などに有意なエネルギーギャップを想定し、これらの陽子数と中性子魔法数184を組み合わせた実験についての可能性を放談した。これらの組み合わせの原子核は陽子・中性子比が既存の実験手法を組み合わせることで到達が可能であり、安定の島により近い情報を得られるものと考えられる。後半では「真空の崩壊」とその検出手法について議論した[2-3]。ウランなどの重元素どうしの衝突においては局所的な高電場が生成される。このような状況では、真空が崩壊する(中性真空から電子対が生成し、荷電真空となる)との予言がなされている。生成した電子・陽電子のうち、陽電子は核外に放出されるため、これらの陽電子の検出する実験手法について放談した。

- [1] 日本最西端、260m 北北西へ, 共同通信 (2019).
- [2] 真空は崩壊するか? 中山康之, 日本物理学会誌 (1983).
- [3] I. A. Maltsev et al., Phys. Rev. Lett. 123, 113401 (2019).

Shape of Exotic Nuclei

令和 2 年 4 月 5 日 北海道大学 理学研究院 木村真明

はじめに

「放談会」ということなので、「実現可能性に拘らず、科学として面白ければ、よろしい」というつもりで話をした。ただし、理論家にとっては至極現実的な話である(実験家にとっては「放談」だが)。 核構造屋の議論では、原子核の「形」が話題にのぼることが多い。その傾向は、不安定核研究でより強くなるようである。例えば、「魔法数の破れに伴う核変形」や「変形共存」、「クラスター化に伴う変形」といった具合である。ところが「形」を議論する際に我々が用いる観測量は「第一励起状態のエネルギー」や「電磁遷移確率」といった「形」とは直接結びつかない量である。そういった専門家向けの小難しい議論ではなく、原子核の形を直接的に見たい。「何とか原子核(特に不安定核)の形を観測量から復元できないものか?」というのが、この話の主旨である。

原子核の「形」を求める

実はそういう方法は既にある(多くの方は既にご存じだろうが…) [1]。モノの「形」という考え方が「量子力学的固有状態」と相容れないので、模型の助けを借らざるを得ないのだが、いわゆる「形状因子」を電子散乱で精度良く計っていけば、核の「形」を復元できるのである。不安定核の形状因子を計ることは勿論容易ではないので、実験家にとっては「放談」になってしまうのだが…。

さて、「形」の議論には模型の助けが必要である。ここではおなじみの剛体模型[2,3]から出発する。

$$\Psi_{jm}(\xi,\Omega) = \left(\frac{2j+1}{8\pi^2}\right)^{1/2} D_{m0}^j(\Omega) \chi(\xi,\Omega). \tag{1}$$

改めて説明するまでもないが、左辺は実験室系での波動関数、右辺には剛体の回転運動を表す D 関数と 剛体の内部構造を記述する内部波動関数 $\chi(\xi,\Omega)$ とが現れる。 ξ と Ω は、それぞれ剛体の内部座標と回転運動を表すオイラー角である。いま我々が知りたいのは $\chi(\xi,\Omega)$ によって記述される原子核の「形」である。 そこで、 $\chi(\xi,\Omega)$ と観測量とを結びつけるために、始状態 j_i から終状態 j_f への遷移密度を考える。

$$\rho^{j_i \to j_f}(\mathbf{x}) = \left\langle \Psi_{j_f 0} \middle| \hat{\rho}(\mathbf{x}) \middle| \Psi_{j_i 0} \right\rangle, \qquad \hat{\rho}(\mathbf{x}) = \sum_i \delta^3(\mathbf{r}_i - \mathbf{x}). \tag{2}$$

ここで、「始状態と終状態は同じ内部波動関数 $\chi(\xi,\Omega)$ で記述される」と仮定し、式(1)を代入すると、

$$\rho^{j_i \to j_f}(\mathbf{x}) = \left(\frac{2j_f + 1}{8\pi^2}\right)^{1/2} \left(\frac{2j_i + 1}{8\pi^2}\right)^{1/2} \int d\Omega \, D_{00}^{j_f^*}(\Omega) D_{00}^{j_i}(\Omega) \langle \chi(\xi, \Omega) | \hat{\rho}(\mathbf{x}) | \chi(\xi, \Omega) \rangle. \tag{3}$$

右辺の被積分関数の中に現れる $(\chi(\xi,\Omega)|\hat{\rho}(x)|\chi(\xi,\Omega))$ が,我々の欲しかった原子核の「形」(内部波動関数の密度分布)である。一方左辺の遷移密度は,電子散乱で測定可能なので,これで原子核の「形」と観測量が結びつけられた。以上がこの話のカラクリであるが,さらに粛々と計算を進めると次を得る[4]。

$$\rho_{\lambda}^{int}(x) = (-)^{j_i + j_f} \rho_{\lambda}^{j_i \to j_f}(x) / C_{i_f \circ \lambda 0}^{j_i \circ 0}$$
(4)

ここで、 $\rho_{\lambda}^{int}(x)$ 、 $\rho^{j_i \to j_f}(x)$ はそれぞれ、 $(\chi(\xi,\Omega)|\hat{\rho}(x)|\chi(\xi,\Omega))$ の多重極展開、 $\rho^{j_i \to j_f}(x)$ の簡約行列である。

$$\langle \chi(\xi,\Omega)|\hat{\rho}(x)|\chi(\xi,\Omega)\rangle = \sum_{\lambda\mu} \left(\frac{4\pi}{2\lambda+1}\right)^{1/2} \rho_{\lambda}^{int}(x) Y_{\lambda\mu}^*(\hat{x}) Y_{\lambda\mu}(\Omega), \quad \rho^{j_i \to j_f}(x) = \sum_{\lambda} C_{j_i 0 \lambda 0}^{j_f 0} \rho_{\lambda}^{j_i \to j_f}(x) Y_{\lambda 0}(\hat{x}), \quad (5)$$

また, $C^{j_i0}_{j_f0\lambda0}$ は Clebsch-Gordan 係数である。

実験家は何をすればよいのか

結局手順は次のようにまとめられる。

- 1. 電子散乱実験で核の形状因子を測る。その Fourier 変換が式(4)の右辺に現れる簡約行列である。
- 2. 式(4)の関係から $\rho_{\lambda}^{int}(x)$ を求める。
- 3. $\rho_1^{int}(x)$ と式(5)から、原子核の「形」 $(\chi(\xi,\Omega)|\hat{\rho}(x)|\chi(\xi,\Omega))$ を求める

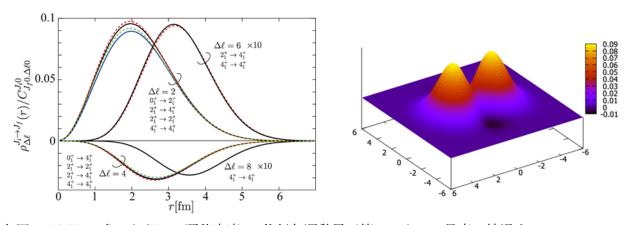
「言うは易く行うは難し」で、手順 1 をやり切るのは容易ではい。が、過去にそうした研究例がある。例えば文献 [5]をご覧になられるとよい。そこに示された $^{152}{\rm Sm}$ の変形を示す密度分布は、感動的に美しい。これぞサイエンス。万難を排して、不安定核にチャレンジしようと思いませんか?

理論家は何をすればよいのか

さて、この話の鍵となる式(4)を求める際に、「始状態と終状態は同じ内部波動関数で記述される」と仮定をしたが、これを検証する必要がある。これは残念ながら理論屋にしかできないように思う。式(4)をよく見ると、左辺は始状態と終状態の角運動量に依存しないのに対して、右辺には始状態と終状態の角運動量が現れる。換言すれば、「始状態と終状態は同じ内部波動関数で記述される」という仮定が正しければ、「遷移密度を CG 係数で割ったものは始状態と終状態の角運動量によらない」筈である。例えば、 $\lambda=2$ の場合を考えると以下のようになる、

$$\rho_2^{int}(x) = \rho_2^{0 \to 2}(x) / C_{2020}^{00} = \rho_2^{2 \to 2}(x) / C_{2020}^{20} = \rho_2^{2 \to 4}(x) / C_{4020}^{20} = \cdots$$
 (6)

移行角運動量が 2 に等しい遷移は $0 \to 2$, $2 \to 2$, $2 \to 4$, ... 等々多々あるが,CG 係数で割ってしまえば,すべて同じになるべし,というわけである。残念ながら測定できるのは基底状態からの遷移 $0 \to 2$ だけなので,それ以外の遷移については理論屋が検証すべきである[6]。例として,理論で計算した 8 Be の遷移密度とそこから復元した 8 Be の「形」を下に示す。



左図: AMD で求めた ⁸Be の遷移密度。 移行角運動量が等しいものは見事に縮退する。

右図: その遷移密度から求めた、8Beの「形」。

終わりに

多くを語る必要はないだろう。前掲の図や参考文献[5]の図には有無を言わせない説得力がある。「第一励起状態のエネルギー」や「電磁遷移確率」をもとにあ~だこ~だ言うのも現実的でよいが…。実験家は SCRIT のその先として検討していただけまいか。また、理論家にとっては至極容易なタスクである。

参考文献

- [1] H. Überall, "Electron scattering from complex nuclei" (Academic, New York, 1971)
- [2] A. Bohr and B.R. Mottelson, "Nuclear Structure, vol2", (World Scientific, 1998)
- [3] 簡単のために軸対称な剛体を仮定しているが、より一般的な剛体模型でも同様に計算できる
- [4] 式(4)を導出した際に筆者は「こんな簡単な理屈は既にだれか考えているのではないか」と思い、 須田利美氏(東北大)に問い合わせたところ、案の定であった。文献 [5]を紹介され、がっかり
- [5] L.S. Carcman et al., PRC78, 1388 (1978)
- [6] 同様の検証は Nucl. Phys. A351, 456 (1981) で、上村正康氏(九大)が 12C に対して行っている

原子核とプラズマ

笹野 匡紀 (理研仁科)

関澤 一之 (新潟大学)

レーザープラズマを用いた原子核励起熱平衡状態(温度 100 keV 程度)アンサンブルの生成と、それを用いた新しい原子核物理研究(有限温度核物性相の観測、古典的描像に基づいた原子核、熱力学的現象の探索、宇宙原子核反応の直接測定など)について、議論した。具体例として、固定標的中にレーザーを用いてプラズマ状態を生成し、それを RCNP Grand Raiden などの磁気分析装置と組み合わせることで、原子核励起熱平衡状態アンサンブルに対する質量欠損法分光ができるというアイデアを発表した。

第3回若手放談会は2020年2月19日から21日までの3日間、理研神戸キャンパスにおいて開催されました。本放談会は、RIBFの完成から10年あまりが経った今、これまでの研究成果を振返り、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・理論の若手研究者で概観し、今後10年、20年先を見据え、どのような核物理の展開を期待するのかを議論する会として設けられました。

実は私個人としては前回第2回のときに初めて参加させてもらいました。(というのも第1回は主に理論系若手研究者を中心とした研究会だったからです。)そのときに強烈に印象に残ったのは、不安定核物理に限らない幅広いテーマに関する新しいアイデアを理論・実験それぞれの若手研究者が時間にとらわれずに自由に話し、学生を含む参加者からも積極的に意見が飛び交うという、他の研究会では絶滅の危機に瀕しているような光景でした。まさに理研神戸キャンパスという場所、2月中旬の3日間という日程、それに若手に限定した参加者という放談会の絶妙なフォーマットが成せる奇跡であったと思います。今回、第3回放談会では堀内渉氏、鈴木大介氏、関澤一之氏らとともに世話人を務めました。上記のような強烈な印象が残っていたため、今回の放談会も前回の形式を踏襲して、対象として原子核・ハドロン物理全般および他の量子多体系物理もカバーし、実験・理論の枠を超えて幅広い分野の知見を結集して自由なアイデアを語り合える場所を提供することを意識しました。さらに今回の放談会では、新たな試みとしてパネルディスカッションを導入しました。詳しい経緯はパネルディスカッションの報告をご覧ください。

第3回放談会では、14名の招待講演者、3名の一般講演者、それに12名のパネリストの方々に講演を行っていただきました。今回の放談会でも規定の各講演20+15分の枠にはとても収まりきらない白熱した議論が巻き起こり、連日連夜懇親会や夕食の時間が足りなくなる事態に陥りました。参加者の方々も非常に充実した時間を過ごせたのではないでしょうか。ただ懇親会や夕食も重要な意見交換の場であることを考慮すると、次回以降、発表時間や講演数の最適化の余地は残されているように思います。

本報告を書いている 2020 年 4 月 17 日現在、新型コロナウイルスのため研究活動が大きく制限されている方々も多いと思います。思い返せば第 3 回若手放談会を開催していた当時、感染拡大防止のため様々な研究会の予定が中止になり始めている時期でした。無事に第 3 回放談会を開催でき、事後も体調不良者が出なかったことは幸運であったかもしれません。今後、しばらくは大学の講義やセミナー等はオンラインになっていくことが予想されます。オンライン化にも様々なメリット、デメリットがあるとは思いますが、若手放談会のような研究会の場合、やはり空気を共有した中での白熱議論が最大のメリットであることは参加されたみなさんには納得していただけるのではないでしょうか。次回の若手放談会が来年 2 月に神戸で集会型の研究会として無事に開催され、そこで引き続きみなさんの夢やアイデアを披露しあえることを祈念してやみません。

第3回若手放談会参加者リスト(43名、順不同)

Kenichi Yoshida	Kyoto University	Shimpei Endo	Tohoku University	
Nobuyuki Kobayashi	RCNP, Osaka University	Kei Kokubun	The University of Tokyo	
Takahiko Masuda	Okayama University	Shun Furusawa	Tokyo University of Science	
Yoshihiro Aritomo	Kindai University	Nobuya Nishimura	YITP, Kyoto Univeristy	
Yutaka Shikano	Keio University	Yuki Shikata	Kyoto University	
Ken'ichiro Nakazato	Kyushu University	Wataru Horiuchi	Hokkaido University	
Yohei Chiba	Osaka City University	Masaki Sasano	RIKEN Nishina Center	
Masaaki Kimura	Hokkaido University	Takashi Abe	CNS, the University of Tokyo	
Takamichi Aoki	The University of Tokyo	Tokuro Fukui	YITP, Kyoto University	
Kazuyuki Sekizawa	Niigata University	Yuichi Ichikawa	RIKEN Nishina Center	
Takuma Matsumoto	Kyushu University	Megumi Niikura	The University of Tokyo	
Shinsuke Kawasaki	KEK	Shintaro Go	Kyushu University	
Teruaki Enoto	RIKEN	Futoshi Minato	JAEA	
Makoto Ito	Kansai University	Koichi Sato	Osaka City University	
Juzo Zenihiro	Kyoto University	Kouhei Washiyama	Kyushu University	
Yoshimasa Hidaka	RIKEN Nishina Center	Akiyuki Tokuno	Springer Nature	
Haruki Kasuya	YITP, Kyoto University	Takashi Higuchi	RCNP, Osaka University	
Ken-ichiro Yoneda	RIKEN Nishina Center	Daisuke Suzuki	RIKEN Nishina Center	
Yue Ma	RIKEN Nishina Center	Yuta Ito	JAEA	
Hideki Ueno	RIKEN Nishina Center	Shigehiro Yasui	Keio University	
Tadaaki Isobe	RIKEN Nishina Center	Nobuo Hinohara	CCS, University of Tsukuba	
Wataru Miyasakai	Nuclear Reaction Energy Laboratory			