



独立行政法人 理化学研究所

仁科加速器研究センター

中務原子核理論研究室

中務 孝

研究室 URL <http://www.riken.jp/r-world/research/lab/nishina/theo-nuc/>

個人 HP <http://ribf.riken.jp/~nakatsuk/jindex.html>



研究室メンバー (2008.1.17, 仁科 RIBF 棟 1 F にて撮影)

左から、松本琢磨、船木靖郎、山上雅之、著者、小濱洋央、伊藤誠、市川隆敏

1 研究室の紹介

2007年8月1日に理化学研究所(理研)・仁科加速器研究センター(仁科センター)に原子核理論研究室が発足しました。本誌「原子核研究」の新世代記念号(Vol.51 No.1)に特集として掲載されているように、仁科センター自身が2006年4月に発足したばかりの新しいセンターですが、我が理論研究室は産声を上げたばかりの状態です。当初、私一人でスタートした研究室ですが、仁科センター・原子核研究部門の他研究室所属の方に協力して頂き、少し研究室らしくなってきました。この原稿を執筆している2008年1月現在、冒頭の写真の7名と本林重イオン核物理のJRA(大学院生)1名(古立直也)、理研外からの参加者も加えて、RIBF実験棟を中心に活動しています。来年度には新たなポスドクやJRA、海外からのポスドクにも加わって頂く予定です。

既に御存じのように、理研ではRIビームファクトリー(RIBF)を建設し、いよいよ本格稼働に向け始動したところで、近い将来に我々の常識を破る新現象の発見や系統的なデータの蓄積による原子核物理の大きな進展があるものと期待を寄せています。世界に冠たる理研の実験核物理の活動は、世界最大の超電導サイクロトロンからのビームによりさらに大きく発展していくことでしょう。今後理論グループの研究活動も世界的な評価を受けるよう、努力して行きたいと思っています。

研究内容について

原子核理論を、クォーク・グルーオンの自由度からハドロンの性質を記述することと、ハドロンの自由度から原子核を記述することに大別すれば、我々の研究室の研究は後者に属します。理論研究においては、個人が自分のアイデアを自由に試すことができることが大きな利点なので、研究室メンバー全員のあらゆる研究を紹介することはできません。ここでの紹介は、個人的バイアスがかかっていることを御了承下さい。

私の考える原子核理論研究室の目標は以下のようなものです。

1. 原子核を陽子・中性子といったハドロンの自由度とその相互作用から出発して、有限量子多体系である原子核および核物質の性質を理解すること。
2. 広大な核図表全体において、バラエティに富む核現象を記述し、予言力のある理論を構築すること。

核物理の研究対象は、核図表上で1次元的な線を描く安定線(ハイゼンベルグの谷)から解放され、陽子・中性子数を自由に変えた広い2次元面、さらに励起エネルギーを加えた3次元(N, Z, E)の空間に急速に拡大しています。魔法数、核変形、クラスター構造などにこれまでの常識とは異なる様相が現れており、国内外の多くの理論・実験核物理学者が研究を推進しています。安定核は核子あたりほぼ一定の束縛エネルギーと分離エネルギー($B/A \approx 8$ MeV)を持つことが良く知られていますが、ドリップ線に近付くことにより分離エネルギーがゼロに近付き、弱束縛系や低密度系としての特徴が顕著になります。フェルミ粒子系では、このように弱束縛・低密度になることで、今までパウリ原理で抑制されていた核子間相関が表に出てくると考えられます。殻模型に代表されるような平均場中の一粒子運動の概念が変更を受け、非束縛連続状態を考慮した理論が必要となります。図1は、山上さん(リサーチアソシエイト)の最近の仕事で、ドリップライン近傍核 ^{40}Mg の表面付近における強い中性子対相関を示唆する結果の一例です。また、このような弱束縛原子核を入射粒子として用いる2次ビームの実験が主流となってくるため、少ない統計量のデータから構造に関わる情報を適

格に引き出すことのできる弱束縛性を考慮した非経験的な反応理論、特に元素合成過程で重要な低エネルギー反応にも応用可能な、定量的量子反応理論計算が要求されています。

私自身が現在興味を持って進めている研究テーマの一つが、密度汎関数理論 (DFT; Density Functional Theory) による原子核構造の普遍的記述です。DFT は、量子多体系の基底状態を一体密度を基本自由度として記述するもので、Hohenberg-Kohn の定理により厳密な記述が“一応”保障された理論です。核力から第一原理的に多体波動関数を直接扱う核構造の記述は、現在でも $A \lesssim 10$ 程度の軽い核に限定されており、多体の波動関数 $\Psi(\vec{r}_1, \dots, \vec{r}_N)$ の代わりに密度 $\rho(\vec{r})$ を決定すれば良いというアイデアは、量子多体系を扱う幅広い分野の研究者にとって非常に魅力的です。”一応”と書いた意味は、その厳密な記述を与える普遍的なエネルギー密度汎関数 $E[\rho]$ をまだ我々は知らないためです。この $E[\rho]$ を探そうという試みは、密度汎関数を用いる多粒子系計算を行う様々な分野において一つの中心的なテーマとなっています。原子核理論では、有効核力平均場模型と呼ばれていた理論と実質的に同値ですが、最近では有効核力にとらわれない形のエネルギー密度汎関数も提案され、DFT の名前で呼ぶことが多くなっています。この理論の特徴は、上記の目標 2. に対応して、核図表全体に対して唯一の普遍的汎関数で対応できる能力があることです。原子核構造模型の多くは、核種や質量領域に応じて有効相互作用を変更する必要があり、あらゆる質量領域において束縛エネルギーの絶対値から励起スペクトルまでを記述できる微視的理論は他にありません。重い核においては、束縛エネルギーは 1 GeV オーダー、励起スペクトルは 10 keV オーダーなので、5 桁も異なる物理量を同時に再現する能力を要求されているのです。

原子核の密度汎関数による記述は物体固定座標系で行われるため、もとの多体ハミルトニアンがもつ対称性を自発的に破る場合があります。この失われた対称性を回復する方法、連続状態の効果を正確に取り入れる方法、現在のエネルギー汎関数には欠けている長距離相関を考慮する方法などを開発することが理論の課題となっています。図 2 は、安定核の ^{12}C について、虚時間発展法を用いて 3 次元座標表示の配位を生成し、パリティ・角運動量射影後に配位混合計算を行った結果です。 ^{12}C の励起状態には、基底状態と全く異なる構造が現れることが知られていますが、それらを定量的に再現することに成功しています。 $E_x \sim 8 \text{ MeV}$ にある 0^+ 状態は Hoyle 状態と呼ばれ、3 つのアルファ粒子がゆるく結合した状態です。

船木さん (基礎特研) は、アルファ凝縮という観点からこの状態を記述し、このような状態が他の原

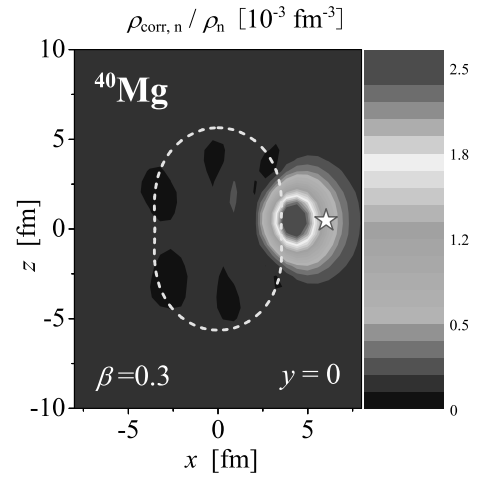


図 1: 超流動状態にある ^{40}Mg の中性子 2 体相関を表す図 [1]。

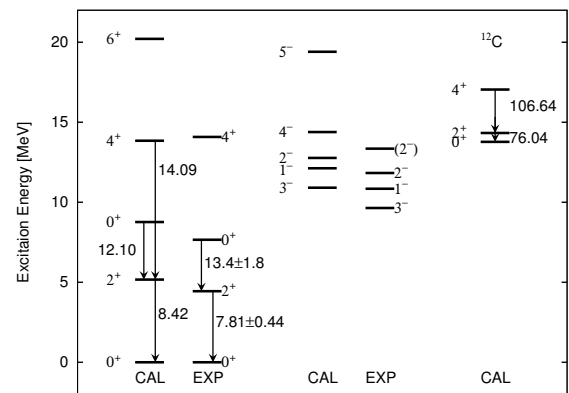


図 2: Skyrme 汎関数 (SGII) を用いて計算した ^{12}C の励起スペクトル [2]。

子核にも存在するか、調べています [3]。また、時間依存密度汎関数理論による線形応答計算、非線形ダイナミクスの記述は、筑波大や京大のポスドク・大学院生との共同研究により最近著しく進展しており、今後の更なる発展を大いに期待しています [4, 5]。将来的には核分裂ダイナミクスの自己無撞着な微視的記述に向けて新しい解法や計算アルゴリズムの開発にも取り組むつもりです。

原子核構造を実験的に探るためには、加速器を用いた様々な種類の散乱実験が用いられます。したがって構造の研究は常に反応理論を必要としています。核構造の第一原理的記述が $A > 10$ の原子核に対して非常に困難であると述べましたが、核-核反応の記述はさらに困難です。必然的に、弾性散乱・非弾性散乱といったチャンネル毎、複合核反応・直接反応といった反応の種類毎に異なる模型が用いられています。これら多彩な反応機構を統一的に記述する理論を手に入れることは理想ですが、まだ簡単に我々の手の届くところにはありません。しかも、不安定核の 2 次ビーム実験では、安定核で用いられてきた計算手法が必ずしもうまくいくとは限りません。例えば、不安定核の光学ポテンシャルに関する情報は極端に少なく、非経験的な理論が求められています。低エネルギーの核反応を記述するためには、共鳴状態を記述できる核構造計算と融合した量子散乱理論が必要です。分解チャンネルを考慮した直接反応理論として、離散化連続チャンネル結合法 (CDCC) 法や座標表示による吸収境界条件法があり、信頼度の高い微視的構造計算との融合、組み換えチャンネルを扱えるような拡張などが課題と言えます。伊藤さん (基礎特研) の生成座標法に基づく変分散乱解法 [6] や、松本さん (基礎特研) による 4 体 CDCC 計算 [7] など、この課題に関係した研究が進行中です。

一方で、大量に得られる実験データの解析には、比較的簡単な模型による原子核の記述によって断面積を計算し、データから構造や反応機構に関する知見を得ることも重要です。例えば、中高エネルギーの散乱に有効なグラウバー近似は、様々な実験データの解析に用いられています。図 3 に小濱さん (前任研究員) の最近の結果を示します。原子核を黒体球と仮定し、グラウバー近似をさらに簡略化したフラウンホーファー回折の描像に基づいて陽子弾性散乱断面積の角度分布からその半径 a を決定したときの全反応断面積 πa^2 と実験データとの比較です。このような比較的簡単な解析から、原子核の半径や密度分布に関する情報を引き出すことを目指しています。また、市川さん (基礎特研) は、半現象論的ポテンシャルを用いた低エネルギーでの核融合断面積の系統的解析を行い [9]、微視的記述の困難な超重領域核の反応ダイナミクスの記述を目指しています。

基礎物理学としての核物理の広がりとともに、将来、原子核物理の応用的側面の重要性も無視できない状況になると思います。核融合・核分裂といった原子核物理の課題は、原子力や核廃棄物問題に直接関与するものです。エネルギー・環境問題が国家の緊要な戦略課題となりつつある現在、原子力の基盤となる原子核物理学が果たす役割は今後さらに大きくなるでしょう。次節の雑談の中でも述べていますが、我々の研究活動が国民の税金によって支えられている現実を考えると、純粋科学的興味と応用研究の両立を模索することも、今後の核物理の発展にとって決して無意味ではないと思います。

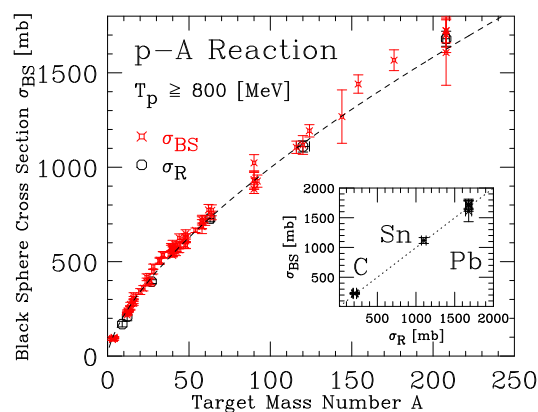


図 3: 原子核を黒体球と仮定した陽子反応断面積 [8]。

2 人物紹介 (雑談)

「人物・研究室紹介」ということなので、ここからは私の自己紹介をしたいと思います。研究履歴の紹介ですと退屈な方も多いと思われるので、雑談を交えて (ばかり?) お話したいと思います。

高スピン核構造の研究: 大学院 (京都大)・ポスドク (Chalk River)

大学院時代に、原子核高スピン状態、特に超変形回転バンドの素励起モードの研究を始めました。超変形回転バンドは1984年に ^{152}Dy に発見されたのが最初ですが、ちょうどこのころ、励起 (yrare) 超変形回転バンドが観測され話題になっていました。当初は、通常の高スピン状態での類推から、これらを克蘭キング模型の粒子・空孔励起あるいは2準粒子励起として説明することが世界的な潮流でした。水鳥・松柳・清水 (九大) は世界に先駆けて八重極振動励起の可能性を指摘していましたが、実験データとの比較を含めたその詳細な理論解析を私が担当することになりました。学位論文では ^{193}Hg における粒子・振動結合効果と ^{152}Dy の解析から、強い八重極相関を提唱しましたが、データの数もまだ少なく、欧米を中心とする実験グループに注目されるまでには到りませんでした。

そのせいもあってか、学振、理研・基礎特研などPDの応募は全く不合格で、たまたま高スピン核構造の理論のポスドクを探していたカナダのChalk River研究所TASCC (Tandem Accelerator Superconducting Cyclotron) 部門に9月着任で赴任することになりました¹。首都オタワから北西に200 km 程 17号線を行ったところにある原子力研究所です。きれいな紅葉の秋があつという間に過ぎ去り、ある日突然気温が何十度も下がって酷寒の冬になります。真冬は最高気温が -20°C 以下の日が続きます。冬の寒さに加えて、初夏にはブヨが大発生、8、9月は日本の倍はあるような大きな蚊が外出を阻んで、とても人間の住める場所ではないと思っていましたが、人間の適応能力とはすごいもので、2年目には寒さも虫もほとんど気にならなくなりました。ウィンタースポーツなどに無縁であった私が毎年スキーに行くようになったのも、このときアパートの隣に住んでいた画家 (の卵?) に無理矢理誘われたのがきっかけです。初スキーは普段のコートにジーパン姿でしたが、気温が低いのでどんなに転んでも濡れることはありません。ただ転ぶ前から寒さで顔が痛い!

研究面で印象に残ったことは、成果発表に対する真剣さです。TASCCでは、論文やプロシーディングスなどを投稿する前に、必ず研究所内部のレフェリーの審査を受けることになっていました。また、会議での口頭発表の前にも必ず内部のミーティングの席で予行練習が義務づけられていました。これをポスドク、研究員、部門のディレクターなど差別なしにやるのです。各自の研究はもちろん自由で、理論のポスドクだった私は、年度末の成果報告と次年度計画書以外100%自分の研究に集中させてもらいました。ただ、公の場での発表には所属機関としての責任があるという考え方だと思います。また、当時チョークリバーには個性的な第一線で活躍する研究者が多く在籍しており、ガンマ線分光解析のRADWAREで有名なD. Radfordや、弱い相互作用の研究に執念のような情熱のあるJ. Hardy (当時TASCC director)、現在Canadian Penning trapの中心人物になっているG. Savardなど、個人の能力とグループの活動が有機的に結合した組織でした。研究所を作るのは、加速器や検出器ではなく、人であるということを改めて認識させられました。

TASCCには名前の通り超電導サイクロトロンがあり、複数の研究グループの一つが、 8π と呼ばれるガンマ線検出器を使って活躍する北米有数の核分光グループでした。彼らは当時の流行だった超変形分光実験以外に、通常よりも高いエネルギーの“Unsafe COULEX”と呼ばれる方法による励

¹4～8月までの5ヶ月間は阪大RCNPで理論部研究室員 (教務補佐) で御世話になりました。

起バンド観測実験を始めたところでした。データの中には、ベータ、ガンマ、八重極バンドなどの集団振動励起が高スピンでどのように変化していくか、見事に観測したデータがあり、私はこの理論解析を担当することになりました。当初片手間として始めた仕事でしたが、次々と出てくる新しいデータに圧倒されて、やがて理論模型の改良などに本腰を入れて取り組むことになりました。この一連の研究を通して、高スピン状態で集団励起モードを破壊するコリオリ力の効果を確認しました。そして、このコリオリ効果に打ち勝ち、集団励起モードが高スピン状態においても存在できる理想的環境を提供しているのが、超変形状態に他ならないことに気付きました。詳細は省きますが、大きな変形の効果は回転のコリオリ力を相対的に弱めるように働くことが重要な要因の一つです。そこで、励起超変形回転バンドの系統的な理論解析を行い、当時観測されていた励起バンドの多くが八重極振動励起モードであることを複数の状況証拠と共に提示しました [10]。幸運なことに、アメリカで大型ガンマ線検出器 GAMMASPHERE が本格稼働を始めたところで、超変形バンドの崩壊に関する情報が得られ、我々の予言と一致するデータが次々と発表されました [11]。このころようやく、我々の解釈が高スピン核分光の世界で市民権を獲得するようになりました。

Chalk River は国際的評価も高い素晴らしい研究所でしたが、私の在籍 2 年目の途中からは厳しい現実と直面することになりました。当時のカナダ連邦政府は危機的な財政状況にあり、Chalk River 研究所に対しても政府から予算カットが通達されました。これに応じて、研究所のトップは原子力研究への一本化、すなわち基礎科学部門 (TASCC と中性子散乱研究部門) の閉鎖という決断を下したのです。J. Hardy をはじめとして多くのスタッフが、研究を続けながら、リサーチ・カウンシル、州政府、マスメディア、研究者コミュニティなど様々なチャンネルに働きかけを行い、カナダにおける TASCC の重要性・必要性を訴え続けました。結局、この訴えは実らず、1997 年 3 月にサイクロトロンは停止し鉄屑となってしまいました。ポスドクという身分であった私は自由に次の研究場所を探すことが許されましたが、正式なスタッフは閉鎖を前提として外に次のポジションを探すこともできず、非常に苦しい立場に追い込まれていました。閉鎖を受け入れずに抵抗し続けたことで、様々な不利益を被ったスタッフもいます。私は今でもカナダ政府のこの決断は間違いだったと思っていますが、一方で、加速器施設などのいわゆる「巨大基礎科学」は常に国など公の機関の支援を必要とするという“明白な事実”に無関心であった自分を反省しています。

大振幅集団運動: ポスドク (UMIST)

閉鎖を目前に Chalk River から逃亡した私は、イギリスのマンチェスター工科大学 (UMIST) でポスドク生活を送ることになりました。サッカー狂にはマンチェスター・ユナイテッドの本拠地として有名なこの町は、かつての産業革命の中心地で、町はずれの産業博物館では巨大な蒸気機関が今でも実際に動いています。マンチェスターに到着して最初の問題は“英語”でした。カナダで 2 年以上過ごして、少々アクセントがあるとしても英語は何とかなるだろうと思っていましたが、周りの人はいったいどの言葉を喋っているんだろうと思う程聞き取れません。私を雇った教授の R. Bishop に会ったときに、彼の英語がクリアで非常に分かり易く、ホッとした覚えがあります。Chalk River 時代に住んでいた隣町 (Deep River) では、町にはバーが一つだけで、飲みに行けば必ず知合いに会うことができました。マンチェスターはさすがに都会で、数え切れないくらいのパブがあって、それぞれで違う味のビールが楽しめます。イギリス料理は期待できませんが、イギリス最大と呼ばれるインド人街と小さいながらも充実したチャイナタウンが私の胃袋を救ってくれました。産業革命時代を彷彿とさせる運河沿いは、ゲイ・ビレッジと呼ばれ、夏に開催されるパレードには全英だけでな

くヨーロッパ中からゲイが大集合します。一見の価値があります。色々な意味で。

話を研究に戻します。ここでは大学の講師として新しく着任した N. Walet と、大振幅集団運動理論の研究を進めました。アメリカ・ペンシルベニア大学の A. Klein のグループで研究開発された大次元の古典的位相空間から少数次元の集団空間を抜き出す方法を、BCS 理論で扱う核子超流動系に適用できるよう拡張することを試みました。開発した方法を数値的厳密解が可能なモデルに適用し、その有用性を確かめましたが、現実的なハミルトニアンへの適用を考えたときには、対回転モードとの直交性を数値計算でどのように実現するかが未解決でした [12]。この問題は、2000 年に松尾さんと松柳さんとの共同研究で断熱的自己無撞着集団座標法 (ASCC 法) を提案し解決しています [13]。最近になって、京大で学位を取った小林さん (現 (株) アドバンスソフト) や今年取得の日野原さんとの共同研究でこの一連の研究は大きく進展しました [5]。この方法を現実の原子核ダイナミクス解析 (特に核分裂を代表とする大振幅集団運動の微視的記述) に適用することは、前節で述べた通り、私の現在の主要なプロジェクトの一つです。

線形応答計算と連続状態: ポスドク (理研)

マンチェスターのビールを一通り飲み尽くした世紀末 (1999) に、理研の基礎科学特別研究員 (谷畑主任のリニアック研究室) に採用決定となり、日本に戻るようになりました。理研では上で述べた大振幅集団運動論の発展に加えて、密度汎関数理論を用いた原子・分子の光応答、原子核の応答関数計算を主な研究テーマに選びました。こちらは矢花さん (筑波大) に色々と教えて頂きながらの共同研究でした。まずエネルギー汎関数が比較的簡単な分子やクラスターといった電子系を対象にして、連続線形応答理論の新しい計算法を開発しました。イオン化ポテンシャルを超えるエネルギーの光子吸収では、電子は連続状態に励起されて遠方に逃げていくという過程が起きます。この過程を記述するには、様々な形をもつ分子の電子波動関数 (正エネルギー) の遠方での境界条件を正確に記述する必要があります。そこで、任意の変形ポテンシャルにおける外向波境界条件を満足するような一粒子グリーン関数の構成法を開発し、線形応答に応用しました [14]。また、矢花・Bertsch によって開拓された実時間計算法に吸収境界条件法を組み込み、正確なグリーン関数の取り扱いとの比較も行い、十分な精度が得られることを示しました。最近、この方法を原子核密度汎関数にも適用することに成功しました [15]。また、吸収境界条件法の別の応用として、微視的反応理論への応用を試み、九大や大阪市大グループで精力的に研究されている CDCC 法に負けない精度があることを重陽子分解反応を例に示しました [16]。

密度汎関数理論と量子反応計算: 助手 (東北大)、講師 (筑波大)

2001 年に東北大の任期付き助手として採用されました²。任期付きということで担当する授業は最小限で、2004 年に筑波大に講師として着任するまで、私のポスドク生活は計 10 年に及ぶ長期になってしまいました。この間、日本・海外を問わず可能性のある職には尽く応募して、面接も相当数経験しました。このおかげで、面接や選考の方法に色々なお国柄 (あるいは地域柄?) があることを学びました。ちょっと面白いので紹介します。アメリカはご存知の方も多いと思いますが、多人数個別面接で、当該 department の色々な専門の研究者と個別にオフィスを訪ねて話をします。「どんな研究をしているんだ?」と聞かれることもあります。「俺はこんなことをやってるんだ」と一方的に話をされてその聞き役になったり、お互いに興味が合致すると論文を持ち出して研究の議論になってしまったりと、面接だか何だか分からないスケジュールが 2 日間程びっしり組まれています。イギリ

²ここからの研究は、はじめに記した研究室の研究と重なる部分が多いので省略させていただきます。

スでは、最終選考に残った人が同じ日・同じ時間に呼び出されて、お互いの前でそれぞれセミナーをやりました。日本で言う人事委員会の議論も公表され、自分の評価が間違っていたら反論できる機会も与えられます。北欧(フィンランド)はこのシステムがもっと徹底しているようで、書類審査の段階でその分野の第一線で活躍する研究者(ほとんどが国外の人)に応募書類が送られて審査を行い、その審査委員の報告書が応募者である我々に送られて来ます。しかも自分の分だけでなく、応募者全員の審査報告が全て送られてきて、「報告書の内容に不満があれば、誰にいつまでにクレームを上げなさい」と書かれています。応募者にとっては、世界の研究者が自分をどう評価しているかが分かるので、ある意味有り難いシステムですが、審査する側は大変なシステムです。こういうオープンな審査が必ずベストな人材を選択するとは限りませんし、実際、反論した場合にちゃんと再審査してもらえるのかどうか私も知りません。ただ、なぜ自分が不採用なのか、なぜ彼/彼女が採用されたのかを知ることは応募者の権利であるとする考え方は、日本の人事委員会“密室”方式とはあまりに対照的で、欧米の科学者とのメンタリティーの差を実感してしまいます。

RIBF に関わる原子核理論: 准主任(理研)



原子核理論研究室を理研に持つことは、原子核理論コミュニティがかねてから要望していたことでした。研究室では、准主任という枠のため、任期付きのスタッフしか新規に採用することはできません。そのためやはりポストクなど若手研究者中心に研究活動を進めていくことになると思います。若手研究者が理研で研究したいと思い、また様々な世代の研究者が気楽に訪れ、議論・意見交換を行える研究室を作りたいと思っています。

参考文献

- [1] M. Yamagami and Y.R. Shimizu, submitted to Phys. Rev. C.
- [2] S. Shinohara, H. Ohta, T. Nakatsukasa, and K. Yabana, Phys. Rev. C **74**, 054315 (2006).
- [3] Y. Funaki, et al., Preprint: arXiv:0801.3131.
- [4] T. Nakatsukasa, T. Inakura, and K. Yabana, Phys. Rev. C **76**, 024318 (2007).
- [5] N. Hinohara, et al., Prog. Theor. Phys. **119**, 59 (2008).
- [6] M. Ito, Phys. Lett. B **636**, 293 (2006).
- [7] T. Matsumoto, et al., Phys. Rev. C **73**, 051602(R) (2006).
- [8] A. Kohama, K. Iida, and K. Oyamatsu, Phys. Rev. C **72**, 024602 (2005).
- [9] T. Ichikawa, K. Hagino, and A. Iwamoto, Phys. Rev. C **75**, 064612 (2007).
- [10] T. Nakatsukasa, et al., Phys. Rev. C **53**, 2213 (1996).
- [11] A.N. Wilson, et al., Phys. Rev. C **54**, 559 (1996); G. Hackman, et al., Phys. Rev. Lett. **21**, 4100 (1997); S. Bouneau, et al., Z. Phys. A **358**, 179 (1997); D. Rossbach, et al., Phys. Lett. B **513**, 9 (2001); A. Korichi, et al., Phys. Rev. Lett. **86**, 2746 (2001); A. Prévost, et al., Eur. Phys. J. A **10**, 13 (2001); T. Lauritsen, et al., Phys. Rev. Lett. **89**, 282501 (2002).
- [12] T. Nakatsukasa, N. Walet, and G. Do Dang, Phys. Rev. C **61**, 014302 (2000).
- [13] M. Matsuo, T. Nakatsukasa, and K. Matsuyanagi, Prog. Theor. Phys. **103**, 959 (2000).
- [14] T. Nakatsukasa and K. Yabana, J. Chem. Phys. **114**, 2550 (2001).
- [15] T. Nakatsukasa and K. Yabana, Phys. Rev. C **71**, 024301 (2005).
- [16] M. Ueda, K. Yabana, and T. Nakatsukasa, Phys. Rev. C **67**, 014606 (2003).