

第 69 回原子核三者若手夏の学校
原子核パート研究会プログラム

研究会 1 日時：8/18(Fri) 13:30~19:10 部屋：416

No.	時間	発表者	タイトル
1-1	13:30~13:50	西田 賢	高時間分解能を目指した MPPC 用 ToT-ASIC の新規開発
1-2	13:50~14:10	西 幸太郎	アンジュレーター放射光干渉法による数 100MeV 領域の電子ビームエネルギー精密測定
1-3	14:10~14:30	高山 元	軽核同位体チェーンにおける荷電変化断面積と陽子分布半径の新導出法
1-4	14:30~14:50	野口 法秀	重い標的核に対する ^{12}C と ^{27}Al の反応断面積測定
1-5	14:50~15:10	山口 雄紀	^{20}Ne のクラスター構造と陽子弾性散乱断面積
	15:10~15:20	～ 休憩 ～	
1-6	15:20~15:40	橘 刀生	Evolution of Nuclear Shells due to the Tensor Force
1-7	15:40~16:00	類家 千怜	BCS 理論を用いた原子核対回転に伴う慣性モーメントに関する研究
1-8	16:00~16:20	金井 敦哉	二重ベータ崩壊に向けた Dirac 方程式による束縛・散乱状態の電子波動関数の計算
1-9	16:20~16:40	中島 滉太	超重核領域における核子移行反応と角運動量分布
1-10	16:40~17:00	吉村 健太	中性子星内殻における自己無撞着超流動バンド計算
	17:00~17:10	～ 休憩 ～	
1-11	17:10~17:30	金 龍熙	サイズを付加したカイラルダイクォーク模型とバリオン
1-12	17:30~17:50	蟻川 歳三	非等方格子 QCD を用いた有限温度下でのグルーボール質量変化の再考
1-13	17:50~18:10	中川 昂星	2+1 フレーバー PNJL モデルによる QCD 相図の解析
1-14	18:10~18:30	須田 大翔	QCD の低エネルギー有効模型でのカイラル対称性の自発的破れにおける軸性異常の役割
1-15	18:30~18:50	寺島 伊吹	クォーク自由度と結合したハドロン間ポテンシャルの X(3872) への応用
1-16	18:50~19:10	滝沢 京也	MIT バッグ模型に基づいた回転系における閉じ込め現象の解析

研究会 2 日時：8/19(Sat) 17:00~18:40 部屋：416

No.	時間	発表者	タイトル
2-1	17:00~17:20	小宮 良介	MIT Bag Model を用いたエキゾチックハドロンの質量計算
2-2	17:20~17:40	田中 満	対称性に基づく doubly charmed tetraquark の解析
2-3	17:40~18:00	酒井 愛斗	ハドロン分子模型に基づいた doubly heavy tetraquark の解析とスピン構造
2-4	18:00~18:20	渡辺 蒼大	高エネルギー衝突での 2 粒子間相関関数における共鳴状態の影響
2-5	18:20~18:40	岩中 章紘	カラーガラス凝縮の場の理論を用いた熱力学的記述 ～ブラックホールの蒸発は加速器で「観測」できるか？～

第 69 回原子核三者若手夏の学校
原子核パート研究会概要集

研究会 1 : 8/18(Fri) 13:30~19:10

1-1 : 西田 賢 (東京大学 中村哲研究室) 13:30~13:50

【高時間分解能を目指した MPPC 用 ToT-ASIC の新規開発】

放射線計測は、素粒子・原子核物理核における加速器実験だけではなく、宇宙・医学を含めた広範な分野で行われている。各分野での放射線計測において、検出器からの信号を読み出す信号処理回路系を高速かつ高分解能に実現することは一般的な要請である。そこで我々は、信号の読み出し方式として TOT 法を採用し、数十 ps の高い時間分解能を持つ MPPC 用の ToT-ASIC を新規に開発している。本講演では、この新型 ASIC 回路基板の開発の現状について説明する。

1-2 : 西 幸太郎 (東京大学 中村研究室) 13:50~14:10

【アンジュレーター放射光干渉法による数 100MeV 領域の電子ビームエネルギー精密測定】

我々はマインツ大マイクロトロン (MAMI) において崩壊 π 中間子法によるハイパー核の質量精密分光実験を創始し、現在 3 Λ H (ハイパートライトン) を中心とした研究をおこなっている。この実験では電子の弾性散乱を用いて磁気スペクトロメーターの運動量較正をおこなっているため、電子ビームのエネルギー絶対値較正誤差が実験全体の誤差を決めており、解決すべき課題となっている。

我々はこれまで確立していなかった数 100MeV 領域での高精度電子ビーム測定手法として、ビームに沿って配置された 2 台のアンジュレータから放射される放射光の干渉を利用した新手法を開発した。この手法は高い精度を達成しており、本講演では、本手法の原理と達成された精度を報告する。また本手法をより汎用的に利用するための実用上の改良についても報告する。

1-3 : 高山 元 (大阪大学 川畑研究室) 14:10~14:30

【軽核同位体チェーンにおける荷電変化断面積と陽子分布半径の新導出法】

中高エネルギー領域での原子核衝突の反応断面積から核物質半径を導出する方法は確立している。さらに、荷電変化断面積も同時に測定することで、陽子の分布半径を推定し、それを基に中性子の分布半径を導き出そうと試みている。本研究では、既知の陽子分布半径を持つ He, Li, Be の同位体に対して、荷電変化断面積を測定し、陽子分布半径との関係を調査した。さらに、荷電変化断面積の標的依存性を評価し、陽子分布半径に関係のない荷電変化反応チャンネルを定量的に評価することで、荷電変化断面積からこれを差し引く方法を考案した。本発表では、この方法による陽子分布半径導出方法について議論する。

1-4 : 野口 法秀 (新潟大学 原子核実験研究室) 14:30~14:50

【重い標的核に対する ^{12}C と ^{27}Al の反応断面積測定】

原子核の反応断面積は核半径と密接な関係があり、断面積の系統的な測定結果に対しグラウバーモデルを用いることで核半径などを導出する方法が研究されてきた。これらの研究は軽い標的核の広いエネルギー領域のデータを基に行われてきたが、重い標的核に対してはデータ数が少なく、グラウバーモデルとの比較が十分に行われていない。本講演では重い標的核である Fe, Nb, Pb について数十 MeV/u から数百 MeV/u までのエネルギー領域における ^{12}C と ^{27}Al ビームの断面積の測定結果とグラウバー計算モデルとの比較について議論する。

1-5 : 山口 雄紀 (大阪公立大学 原子核理論研究室) 14:50~15:10

【 ^{20}Ne のクラスター構造と陽子弾性散乱断面積】

原子核では殻的、及びクラスターの様相を示す。この 2 つの配位を 1 つの枠組みで表現するモデルとして、反対称化準クラスター模型 (AQCM) が発展してきた。最近では軽い原子核である ^{12}C や ^{16}O 等への応用例があり、これらの系において α クラスター成分が有意に含まれることが示された。

本研究では AQCM の ^{20}Ne への適用について報告する。 ^{20}Ne の荷電半径を再現するという条件の下、いくつかの殻的、クラスターの配位の密度分布を生成する。この密度分布の違いは陽子弾性散乱断面積に有意に現れるので、実験で得られた断面積と比較することで、基底状態での ^{20}Ne の原子核構造を議論する。

1-6：橘 刀生（京都大学 原子核理論研究室）15:20~15:40

【Evolution of Nuclear Shells due to the Tensor Force(Review)】

原子核の構造を記述するにあたって、殻模型は大きな役割を果たしている。通常の殻模型では 2 核子間のテンソル力については陽に取り扱われていないが、実際にはテンソル力の monopole interaction によって原子核中の 1 粒子エネルギーが変化し、その結果スピン軌道分裂が抑えられることが、この論文によって明らかになった。さらに、原子核内での核子同士の衝突という直感的な描像によって、テンソル力の効果が引力的か斥力的かを定める法則が与えられ、スピン軌道分裂の抑制に対して定性的な理解が得られた。このようなテンソル力の効果は、媒質効果などが小さい valence 軌道における 1 粒子エネルギーの実験結果とよく一致する。

1-7：類家 千怜（筑波大学 原子核理論研究室）15:40~16:00

【BCS 理論を用いた原子核対回転に伴う慣性モーメントに関する研究】

原子核内の 2 核子が角運動量 0 になるように対を組むペアリング相互作用は、ゲージ対称性の破れを引き起こすとされている。その結果、原子核の量子的状態はゲージ空間内で新たな対回転自由度を持ち、対回転の慣性モーメントという物理量を持つ。本研究では、ペアリング相互作用を含むハミルトニアンで記述される系の基底状態を BCS 理論によって求め、対回転バンドおよびそれに伴う対回転の慣性モーメントの分析を通じて、主に Sn および Ni 原子核同位体の中性子対相関の性質を考察した。今回の発表では、特に対回転の慣性モーメントの中性子数依存性と対凝縮量依存性に関して議論する予定である。

1-8：金井 敦哉（筑波大学 原子核理論研究室）16:00~16:20

【二重ベータ崩壊に向けた Dirac 方程式による束縛・散乱状態の電子波動関数の計算】

いくつかの原子核では、2 つの核子が同時にベータ崩壊を起こす二重ベータ崩壊と呼ばれる現象が稀に起こることが知られている。この際、2 つのニュートリノが放出されるが、ニュートリノはフェルミ粒子の中でも粒子・反粒子の区別がないマヨラナ粒子である可能性があると言われており、その場合ニュートリノの放出を伴わない二重ベータ崩壊が起こる可能性がある。この崩壊の半減期を実験的に測定し、位相空間因子と原子核行列要素と呼ばれる量を理論計算できれば、有効ニュートリノ質量を求めることができる。本研究では、位相空間因子計算の準備として、まず水素原子について束縛状態の電子の波動関数を求めて厳密解と比較し、その後、 ^{48}Ca を含むいくつかの二重ベータ崩壊を起こす原子核について散乱状態

1-9：中島 滉太（近畿大学 核反応エネルギー研究室）16:20~16:40

【超重核領域における核子移行反応と角運動量分布】

動力学モデルによる超重核領域における核子移行反応と角運動量分布の数値シミュレーション

1-10：吉村 健太（東京工業大学 関澤研究室）16:40~17:00

【中性子星内殻における自己無撞着超流動バンド計算】

中性子星は中心部で密度が飽和密度の数倍にも達する、地上では到底実現できない核物性の宝庫であり、その内部構造は密度領域によって様々に変化すると考えられている。本研究の対象とする内殻と呼ばれる領域は、中性子過剰な原子核とドリップした自由中性子ガスが β 平衡条件の下で共存している状態にあり、特にその底部では「パスタ構造」と呼ばれる様々な結晶構造が実現すると目されている。そのような結晶構造の核物性を定量的に評価するためには、核子の超流動性のみならず、バンド理論を用いた数値シミュレーションが必要となる。本研究では超流動性のある核子多体系に対する時間依存密度汎関数理論 (TDDFT) をバンド理論と組み合わせることで自己無撞着な超流動バンド計算を実現し、結晶構造が原子核やドリップ中性子のダイナミクスに与える影響を定量的に調べることに成功した。本発表では

その定式化と計算結果、及び現在取り組んでいる理論的拡張について議論する。

1-11：金 龍熙（九州大学 理論核物理研究室） 17:10～17:30

【サイズを付加したカイラルダイクォーク模型とバリオン】

クォーク 3 つのうち 1 つがヘビークォーク（チャーム・ボトム）で構成されるシングルヘビーバリオンは、含有する残り 2 つの軽いクォーク（アップ・ダウン・ストレンジ）による複合粒子「ダイクォーク」という描像を顕著にもつと期待される。本研究では、シングルヘビーバリオンについてヘビーバリオンとダイクォークの 2 体系と見なし、バリオンとダイクォークとの関係性について追求する。特にダイクォークについては、内部にある 2 クォーク間の分布・サイズを考慮し、且つカイラル有効模型をも駆使して解析する。

1-12：蟻川 歳三（東北大学 原子核理論研究室） 17:30～17:50

【非等方格子 QCD を用いた有限温度下でのグルーボール質量変化の再考】

先行研究 [1][2] によって、閉じ込め相及び非閉じ込め相でのグルーボール基底状態の質量が計算されている。これらの研究では、非閉じ込め相においてもグルーボールは準安定状態として存在していると結論づけられている。

本研究では、グルーボール 2 点関数の閉じ込め相と非閉じ込め相における振る舞いの違いに着目し、先行研究では考慮されていなかった非閉じ込め相における温度に依存する定数項（ゼロモードの寄与）を除去することで、先行研究とは異なる質量変化の様相が得られた。

[1]N. Ishii, H. Suganuma and H. Matsufuru Phys. Rev. D 66 094506 (2002)

[2]X.F. Meng, et al. Phys. Rev. D 80 114502 (2009)”

1-13：中川 昂星（京都大学 核理論研究室） 17:50～18:10

【2+1 フレーバー PNJL モデルによる QCD 相図の解析 (Review)】

イラル転移と閉じ込め・非閉じ込め転移は、第一原理計算である格子 QCD の結果から、ゼロ密度ではほとんど同時に起こることが確かめられている。しかし、現実ではそれぞれの秩序変数は well-defined ではないため、同時に起こる必要はない。一方有限密度では、一般的に格子 QCD による解析は符号問題のため実行不可能である。そのため、QCD の対称性に立脚した有効模型による解析が行われることが多い。PNJL 模型は、カイラル転移を記述する NJL 模型に閉じ込め・非閉じ込め相転移の秩序変数である Polyakov ループを組み込んだものである。本発表では、この模型を用いて有限温度・密度での QCD 相図の解析を行う。その結果、二つの転移がほとんど同時に起こることが示唆される。

1-14：須田 大翔（東京工業大学 原子核ハドロン研究室） 18:10～18:30

【QCD の低エネルギー有効模型でのカイラル対称性の自発的破れにおける軸性異常の役割】

QCD の低エネルギー有効模型の 1 つに Nambu-Jona-Lasinio(NJL) 模型が知られている。NJL 模型において軸性異常を考慮するとアノマリー駆動的なカイラル対称性の自発的破れが実現する。またアノマリー駆動的な破れが実現する場合、軽いスカラーメソンであるシグマ粒子の質量が約 800MeV よりも軽くなることが予言される。本講演では一連の研究背景および上述のシナリオを別の QCD 有効模型であるインスタントン液体模型の観点から調べるために行っている計算結果について議論する。

1-15：寺島 伊吹（東京都立大学 原子核ハドロン研究室） 18:30～18:50

【クォーク自由度と結合したハドロン間ポテンシャルの $X(3872)$ への応用】

チャンネル結合の観点からハドロン-ハドロンポテンシャルとクォーク-反クォークポテンシャルの性質を研究する。異なる自由度の消去により、有効ポテンシャルに非局所性とエネルギー依存性が生じることが示されている [1]。得られた非局所ポテンシャルに対して、ポテンシャルのエネルギー依存性を調べることにより、既存の局所近似の 2 つの方法、formal 微分展開と HAL QCD 法における微分展開を適用する。応用例として、 $X(3872)$ を $c\bar{c}$ と $D\bar{D}$ のチャンネル結合モデルで記述し、DDD 有効ポテンシャルの性質を議論する。エネルギー依存のポテンシャルに対しても、HAL QCD 法による局所近似が formal 微分展開よりうまくいくことを示す。同時に、HAL QCD 法では、系が $X(3872)$ のような

浅い束縛状態を持つとき、散乱位相差が局所ポテンシャルを構成する波動関数の選択により敏感に変化することを示す。

[1] I. Terashima and T. Hyodo, arXiv:2305.10689 [hep-ph].

1-16：滝沢 京也（東京理科大学 鈴木（克）研究室）18:50~19:10

【MIT バッグ模型に基づいた回転系における閉じ込め現象の解析】

閉じ込め現象への回転による効果を、MIT バッグ模型に基づいて計算する。2017年にRHICで行われた中心のずれた重イオン衝突ではQGPの強大な渦度が観測され、QCDにおいて回転の効果が理論と実験の両面で大きく注目されるようになった。本研究では、クォークやグルーオンが非常に遅く回転する無限井戸型ポテンシャルの中にいるとみなしてディラック方程式を摂動的に解くことで、MIT バッグ模型特有のパラメータであるバッグ定数を求める。また、QGPとハドロンの圧力を比較することで転移温度の角速度依存性を確認する。バッグ定数に回転の効果を導入する場合としない場合で転移温度の角速度依存性を確かめ、入れた場合は上昇し、入れない場合は低下することが分かった。

研究会 2：8/19(Sat) 17:00~18:40

2-1：小宮 良介（京都産業大学 ハドロン原子核研究室）17:00~17:20

【MIT Bag Model を用いたエキゾチックハドロンの質量計算】

MIT Bag Model を用いてエキゾチックハドロンの質量を予言した。エキゾチックハドロンとは、クォーク4つ以上で構成される複合粒子のことである。中でもクォーク4つで構成されるテトラクォークの質量を計算した。計算に用いたBag Modelは、ハドロンをバッグという有限領域にクォークを閉じ込めたものとして表現する模型である。最初に既知のハドロンの質量を再現するように模型のパラメータを決定し、それらを用いてストレンジネスを含む T_{ss} とチャームクォークを含む T_{cc} というテトラクォークの質量を計算した。

2-2：田中 満（名古屋大学 クォーク・ハドロン理論研究室）17:20~17:40

【対称性に基づく doubly charmed tetraquark の解析】

doubly charmed tetraquark の質量と崩壊幅を対称性に基づいて解析した。 T_{ccs}^+ の崩壊幅の予言はフレーバー対称性を用いて行った。 T_{ccs}^+ の質量及び T_{cc}^- 、 T_{ccs}^- の質量と崩壊幅の予言は、これらがカラー反対称なダイクォークにより構成されるという仮定のもと、スーパーフレーバー対称性を用いて行った。ここで得られた結果を将来的に実験と比較することで、doubly charmed tetraquark を構成するダイクォークのカラー表現に言及することが出来る。

2-3：酒井 愛斗（名古屋大学 クォーク・ハドロン理論研究室）17:40~18:00

【ハドロン分子模型に基づいた doubly heavy tetraquark の解析とスピン構造】

2022年にLHCb実験によって $T_{cc}(cc\bar{u}\bar{d})^+$ が報告された。この束縛エネルギーは0.273 MeVであり、 $D^{*+}D^0$ の閾値に近いことから、重陽子と比較しハドロン分子として解析し、実験で報告された T_{cc} の性質を見た。他の量子数の T_{cc} についても束縛状態を探した。次にボトムクォークを2つ含むテトラクォーク T_{bb} についても同様の解析をし、多くの束縛状態を得た。得られた束縛状態のスピン多重項について考え、それによりダイクォークスピン構造を示唆した。

2-4：渡辺 蒼大（東京都立大学 原子核ハドロン物理研究室）18:00~18:20

【高エネルギー衝突での2粒子間相関関数における共鳴状態の影響】

ハドロン間相互作用を調べるための散乱実験はこれまでで行われているが、現在の技術では全てのハドロンでデータを得られるわけではない。ハドロン散乱実験が難しい系において、高エネルギー衝突実験における2粒子間相関関数が有効であることが近年注目を集めている。特にエネルギーが閾値の下にある束縛状態を持つ2粒子間相関関数については研究が盛んに行われている。

本研究ではエネルギーが閾値の上であり不安定な共鳴状態に着目し、共鳴状態を含む散乱振幅を記述するために有効レンジ展開を用いる。得られた散乱振幅から相関関数を計算し、共鳴状態が相関関数に与える影響を調べる。最後にALICE実験で得られたデータをもとに実際のハドロンへ応用し、計算の妥当性を議論する。

2-5：岩中 章紘（阪大 RCNP 理論部）18:20~18:40

【カラーグラス凝縮の場の理論を用いた熱力学的記述 ～ブラックホールの蒸発は加速器で「観測」できるか？～】

高エネルギー加速器実験から、カラーグラス凝縮（CGC）と呼ばれる状態の存在が示唆されている。CGC はグルーオンが原子核内に飽和した状態で、これまで半古典的な有効模型を用いて理論的に取り扱われてきた。本発表ではカラー数無限大の極限をとった有限体積 Yang-Mills 理論を用いて、CGC を記述する新たな枠組みの構築を試みる。その結果から CGC のゲージ/重力対応について議論し、加速器実験でブラックホールの蒸発現象を「観測」する可能性を考察する。