

## 第 72 回 原子核物理夏の学校

### 原子核パートプログラム

研究会 1A：8/3(月) 17:00–19:45 場所：ホール A1

| No.   | 発表者   | 時間          | タイトル                                                       |
|-------|-------|-------------|------------------------------------------------------------|
| 1A-1  | 平原颯太  | 17:00–17:15 | 変形 Skyrme-HFB による $\beta$ 崩壊 $Q$ 値の系統的解析                   |
| 1A-2  | 三河美紗希 | 17:15–17:30 | $N=118$ 変形シェル構造から探る安定の島の核構造                                |
| 1A-3  | 宇都宮颯斗 | 17:30–17:45 | QRPA を用いた恒星内電子捕獲の理論計算                                      |
| 1A-4  | 本間雅也  | 17:45–18:00 | 微視的理論に基づく相互作用するボソン・フェルミオン<br>モデルハミルトニアン の決定法               |
| 1A-5  | 古賀幸太郎 | 18:00–18:15 | 粒子数・角運動量射影を用いた時間依存 Hartree – Fock<br>理論による多核子移行反応のスピン依存断面積 |
| 1A-6  | 住谷和輝  | 18:15–18:30 | アクチノイド領域における Skyrme Hartree-Fock 法を<br>用いた核分裂過程の研究         |
| 1A-7  | 吉川志音  | 18:30–18:45 | 相対論的平均場理論による核分裂の研究                                         |
| 1A-8  | 赤瀬俊哉  | 18:45–19:00 | アクチノイド領域における核分裂時に伴う中性子放出に<br>関する研究                         |
| 1A-9  | 廣田知章  | 19:00–19:15 | 誘起核分裂のランダムウォークによる定量的解析                                     |
| 1A-10 | 管原幹基  | 19:15–19:30 | 中性子過剰核を用いた超重元素生成断面積の理論的評価                                  |
| 1A-11 | 佐藤孝樹  | 19:30–19:45 | チャンネル結合法および動力学モデルを用いた捕獲断面積の<br>評価                          |

研究会 1B：8/3(月) 17:00–20:00 場所：会場 301・302

| No.  | 発表者  | 時間          | タイトル                                             |
|------|------|-------------|--------------------------------------------------|
| 1B-1 | 杉本航洋 | 17:00–17:15 | Lednický-Lyboshits 公式による femtscopy 解析の問題<br>点の明示 |
| 1B-2 | 中澤光  | 17:15–17:30 | 構成子カウンティング則の拡張によるストレンジペンタ<br>クォークの研究             |
| 1B-3 | 内田崇翔 | 17:30–17:45 | $K + d \rightarrow KNN$ 反応における核物質中のクォーク凝縮の<br>理解 |

| No.   | 発表者  | 時間          | タイトル                                         |
|-------|------|-------------|----------------------------------------------|
| 1B-4  | 高崎蓮斗 | 17:45–18:00 | クォーク物質を含む中性子星状態方程式に対する質量・半径関係と潮汐変形率の比較       |
| 1B-5  | 土田陽仁 | 18:00–18:15 | 高密度物質での Kohn-Luttinger 効果と中性子星への影響 (レビュー)    |
| 1B-6  | 圓谷風優 | 18:15–18:30 | Skyrmion 結晶中の中間子とカイラル対称性                     |
| 1B-7  | 藤丸大輔 | 18:30–18:45 | エニオンを用いた格子ゲージ理論の電磁双対性の検証と連続極限へのつながりを念頭においた解析 |
| 1B-8  | 秋葉桂大 | 18:45–19:00 | 量子計量と非線形 Hall 効果による光の重力レンズへの補正               |
| 1B-9  | 松下慧  | 19:00–19:15 | 磁場中のカラー超伝導における量子幾何学的効果                       |
| 1B-10 | 福本翼  | 19:15–19:30 | インスタントンとゲージ理論の真空                             |
| 1B-11 | 服部暁翼 | 19:30–19:45 | 格子ゲージ理論における機械学習の応用                           |
| 1B-12 | 吉田翔  | 19:45–20:00 | QCD Matter in de Sitter Spacetime            |

**研究会 2 : 8/5(水) 16:00–19:00 場所 : 会場 301・302**

| No.  | 発表者   | 時間          | タイトル                                                                     |
|------|-------|-------------|--------------------------------------------------------------------------|
| 2-1  | 千葉裕貴也 | 16:00–16:15 | 暗黒物質-原子核散乱の検知に向けた 2 体 current を含む原子核構造因子の第一原理計算                          |
| 2-2  | 上原悠   | 16:15–16:30 | 非弾性分解反応に対する新しいモデルの提案                                                     |
| 2-3  | 林宗良   | 16:30–16:45 | 運動量空間における直接反応の記述に向けて                                                     |
| 2-4  | 立石諒汰  | 16:45–17:00 | 量子もつれから見る重陽子の内在的異方性                                                      |
| 2-5  | 木内耀介  | 17:00–17:15 | クラスター模型を用いた放射捕獲反応率の計算                                                    |
| 2-6  | 三浦一真  | 17:15–17:30 | ダイニュートロン相関における反対称スピン軌道三体力の効果解明に向けて                                       |
| 2-7  | 栗田光一  | 17:30–17:45 | ダイニュートロン相関とハロー核のソフト双極子励起                                                 |
| 2-8  | 松木達哉  | 17:45–18:00 | 重力崩壊型超新星における dineutron・tetra-neutron の役割                                 |
| 2-9  | 森田皓平  | 18:00–18:15 | 微視的核物質状態方程式に基づく有効相互作用を用いた原子核の殻効果の評価                                      |
| 2-10 | イ・テホ  | 18:15–18:30 | 中性子星状態方程式における $\Lambda$ NN・ $\Lambda$ $\Lambda$ N 三体力が中性子星構造に及ぼす影響の系統的研究 |

| No.  | 発表者   | 時間          | タイトル                                       |
|------|-------|-------------|--------------------------------------------|
| 2-11 | 中邨陽   | 18:30–18:45 | 有限温度 Extended Thomas-Fermi 法による原子核パスタの構造計算 |
| 2-12 | 服部 竜大 | 18:45–19:00 | 中性子星内殻・外核境界近傍における量子渦の微視的構造の解析              |

**研究会 3：8/6(木) 9:15–11:30 場所：会場 301・302**

| No. | 発表者   | 時間          | タイトル                                                      |
|-----|-------|-------------|-----------------------------------------------------------|
| 3-1 | カユウ   | 9:15–9:30   | Geant 4によるイオンチェンバーのエネルギー分解能に対する荷電状態揺らぎおよび $\delta$ 線生成の影響 |
| 3-2 | 井上千波  | 9:30–9:45   | $^{40}\text{Ca} - ^{56}\text{Ni}$ 近傍の鏡映核における物質半径差の系統的研究   |
| 3-3 | 小林颯人  | 9:45–10:00  | 厚い固体重水素標的を用いた $^{90}\text{Sr}$ の核子剥離断面積測定                 |
| 3-4 | 杉山大樹  | 10:00–10:15 | ノックアウト反応で明らかにする核内陽子-中性子相関                                 |
| 3-5 | 堤祐人   | 10:15–10:30 | “K-ppn” 束縛状態の探索実験に向けたエアロゲルチェレンコフ検出器の開発および評価               |
| 3-6 | 高橋 仁  | 10:30–10:45 | Decay Pion Spectroscopy による $\Lambda$ N 荷電対称性の破れの測定       |
| 3-7 | 石戸景   | 10:45–11:00 | $\Lambda$ ハイパー核の欠損質量分光で迫る核構造と三体相互作用                       |
| 3-8 | 神保 拓斗 | 11:00–11:15 | 反応計算による、J-PARC E15 実験で生成された $\bar{K}NN$ 原子核のスピン/パリティ      |
| 3-9 | 野見山裕也 | 11:15–11:30 | カイラル摂動論                                                   |

# 第 72 回 原子核物理夏の学校

## 原子核パート研究概要集

研究会 1A：8/3(月) 17:00–19:45

1A-1：平原颯太（九州大学大学院 理論核物理研究室）

17:00–17:15

### 【変形 Skyrme-HFB による $\beta$ 崩壊 $Q$ 値の系統的解析】

本研究では、Skyrme-HFB 計算を用いて  $\beta$  崩壊  $Q$  値を系統的に解析する。従来の球対称計算を軸対称変形核へ拡張し、変形自由度が  $Q$   $\beta$  値の再現性および対称エネルギー・有効質量との相関に与える影響を調べる。

1A-2：三河美紗希（筑波大学 原子核理論研究室）

17:15–17:30

### 【 $N=118$ 変形シェル構造から探る安定の島の核構造】

中性子数  $N=184$  近傍には球形閉殻に起因する安定の島の存在が予測されている。一方、 $N=118$  近傍では大きな変形シェルギャップが形成され、 $^{204}\text{Rn}$  などで超変形状態の存在が予測されている。 $N=184$  球形シェルと  $N=118$  変形シェルは同一の一粒子軌道配置に由来するため、相関が示唆されている。実験可能である  $N=118$  領域の知見は、実験が困難である超重核予測の検証・制約に利用できる。本研究では、Skyrme エネルギー密度汎関数による HFB 計算を用いて  $N=184$  シェルギャップと  $N=118$  核の励起エネルギーを計算し、汎関数パラメータである有効質量が両者に及ぼす影響を調べ、その相関と超重核予測の不定性について議論する。

1A-3：宇都宮颯斗（九州大学 理論核物理研究室）

17:30–17:45

### 【QRPA を用いた恒星内電子捕獲の理論計算】

電子捕獲反応は、恒星の進化と元素合成過程の中で、超新星爆発を理解するために重要な反応である。本研究は、Hartree-Fock Bogoliubov (HFB) により基底状態を求め、その上で準粒子ランダム位相近似 (QRPA) を用いて電子捕獲率を計算した。計算はニッケル 78、クリプトン 118 の 2 種類に対し、複数の密度汎関数パラメータを用いて行うことで、理論予測の不定性を見積もることを目指す。本発表では、計算手法の概要と研究の進捗を報告するとともに、現在得られている結果と今後の展望について議論する。

1A-4：本間雅也（北海道大学 原子核理論研究室）

17:45–18:00

### 【微視的理論に基づく相互作用するボソン・フェルミオン模型ハミルトニアン決定法】

質量数が奇数である奇核の微視的な記述、特に励起状態や電磁気遷移の記述は不対核子の影響で偶偶核よりも難しい。中重領域の奇核を記述する模型のひとつに相互作用するボソン・フェルミオン模型がある。この模型のハミルトニアンパラメータは通常、低励起状態のエネルギースペクトルを再現するように現象論的に決定されるが、エネルギースペクトルが観測されていない核ではパラメータを決められないという課題がある。そこで、微視的理論に基づいてパラメータを決定する方法を提案する。本講演では、この手法により得られたユウロピウム同位体の励起エネルギーや構造的性質について議論する。

1A-5：古賀幸太郎（東京科学大学 原子核理論研究室）

18:00–18:15

**【粒子数・角運動量射影を用いた時間依存 Hartree – Fock 理論による多核子移行反応のスピン依存断面積】**

多核子移行反応は、原子核ダイナミクスの一つであり、これまで盛んに研究されてきた。本研究では、時間依存 Hartree – Fock 理論に粒子数射影および角運動量射影を組み合わせ、移行チャンネルごとの生成核スピン分布とスピン依存断面積を微視的に計算する手法を構築した。さらに、Ca40+Sn124 反応へ適用し、各移行チャンネルで得られる生成核の角運動量分布を解析した。本講演では、手法の概要と計算結果について報告するとともに、得られた角運動量分布の特徴について議論する。

1A-6：住谷和輝（関西大学大学院 量子多体物理学研究室）

18:15–18:30

**【アクチノイド領域における Skyrme Hartree-Fock 法を用いた核分裂過程の研究】**

本研究では、アクチノイド核種における自発核分裂の機構を微視的観点から解明するため、Constrained Skyrme Hartree-Fock+BCS 法を用いてポテンシャルエネルギー曲面の静的計算を行った。拘束条件のわずかな違いによる形状の急激な変化を防ぐ目的でネック粒子数拘束を導入し、分裂直前の各形状の変化を追跡可能にした。ベンチマークである 240Pu では非対称分裂の優位性を定量的に確認した。さらにフェルミウム同位体を比較解析し、258Fm における対称分裂の優位性と、256Fm では第三障壁周辺で非対称分裂経路に対してエネルギー的な柔らかさを持つことを示した。今後は集団質量を取り入れた動的な経路探索による、分裂経路の特定を目標としている。

1A-7：吉川志音（大阪大学 核物理研究センター理論部）

18:30–18:45

**【相対論的平均場理論による核分裂の研究】**

WKB 近似を用いた自発核分裂 (量子トンネル効果に伴う核分裂) では、作用積分を最小化する経路を分裂経路とみなす。その作用積分には、原子核の変形に対する静的効果を表したポテンシャルエネルギー (PES) と変形に対する慣性として動的効果を表す質量パラメータの 2 種で評価されるが、質量パラメータは PES に比べて近似による不定性大きい。近年、対称変形に限定した LQRPA を適用することで、従来のクランキング近似より大きな慣性を得ることが示された。一方で殻効果により非対称分裂が多数を占める。そこで本研究は非対称変形を含む LQRPA 質量パラメータの構築を目指し、本発表では現状の PES やクランキング質量パラメータについて議論を行う予定である。

1A-8：赤瀬俊哉（関西大学 量子多体物理学研究室）

18:45–19:00

**【アクチノイド領域における核分裂時に伴う中性子放出に関する研究】**

核分裂の仕組みや分裂片の形状を知る上で、どの段階で中性子が放出されたのかという情報が重要であるが、核分裂の動的プロセスを実験的に直接観測することは難しい。そのため、理論的に中性子の放出を予測することで実験の指針を与えることが不可欠となる。本研究では、即発中性子の中でも特にネック断裂時に放出される断裂中性子に注目し、時間依存のシュレディンガー方程式を用いて原子核の形状変化に伴う波動関数の時間発展を計算する。得られた波動関数の動的な時間変化から、放出中性子の個数や放出位置、角度分布を定量的に評価し、核分裂の動的プロセスについて発表を行う。

1A-9：廣田知章（京都大学基礎物理学研究所 原子核理論研究室）

19:00–19:15

【誘起核分裂のランダムウォークによる定量的解析】

核分裂片の質量分布は、原子核がどのような形状変化を経て分裂に至るかを反映する重要な観測量であり、その理解には静的なポテンシャルエネルギー面に加えて動力学的記述が必要となる。Randrup らは、強散逸極限における核形状の発展を Smoluchowski 方程式で記述し、5 次元ポテンシャルエネルギー面上のランダムウォークとして計算した。その結果、質量分布は格子化や散逸テンソルの異方性に対して概ね頑健で実験値ともよく一致する一方、十分な形状自由度が不可欠であることが示された。本発表では、この手法の理論的背景と核分裂研究における意義を概説する。Phys. Rev. C 84, 034613 のレビュー。

1A-10：管原幹基（近畿大学大学院 核反応エネルギー研究室）

19:15–19:30

【中性子過剰核を用いた超重元素生成断面積の理論的評価】

現在までに発見されている二重魔法核の中では 208Pb が最も重く、次に予想される魔法数は  $Z=114$ 、 $N=184$  である。核図表上で中性子過剰な領域にあるこの周辺を「安定の島」と呼び、超重元素の中でより安定となる核種の合成が注目されている。これまで、この二重魔法核に最も近い核種は 292Fl であり、ここからさらに 3 個の中性子を放出した 289Fl が実験で観測されている。298Fl の生成には中性子数が足りず、さらに中性子過剰な核種が求められる。本研究では、動力学模を用いて中性子過剰な領域の融合反応を計算し、超重元素の生成確率を評価することで、安定の島到達において有効な反応系を提案することを目的とする。

1A-11：佐藤孝樹（近畿大学 核反応エネルギー研究室）

19:30–19:45

【チャンネル結合法および動力学模型を用いた捕獲断面積の評価】

超重元素領域における融合分裂過程は、その反応時間の違いから捕獲過程、複合核形成過程、複合核崩壊過程の三つの段階に分けられる。本研究では捕獲過程について取り扱う。捕獲過程における断面積の計算は複数の手法が存在する。巨視的手法である動力学模型は原子核の反応ダイナミクスやエネルギー散逸を記述できるものの、クーロン障壁以下の入射エネルギー領域には適用できない。一方で、量子力学的手法であるチャンネル結合法はクーロン障壁以下の計算が可能ではあるが、エネルギー散逸を十分に記述することは困難である。本発表では、この 2 つの手法による計算結果を組み合わせることで、広範なエネルギー領域に対して捕獲断面積を評価する手法を提案し、その妥当性について検討する。

研究会 1B：8/3(月) 17:00–20:00

1B-1：杉本航洋（名古屋大学 クォーク・ハドロン理論研究室）

17:00–17:15

【Lednicky-Lyuboshits 公式による femtoscopy 解析の問題点の明示】

2 体相関関数を議論する” femtoscopy” 解析の内、その計算の簡便さから特に広く用いられた解析的手法である Lednicky Lyuboshits 公式について、その妥当性を検証した。既知の散乱長、有効レンジをもとに 2 体相関関数の相対運動量に対する振る舞いを Lednicky Lyuboshits 公式に基づく予測をし、物理的性質と振る舞いの対応について考察した。結果として今までに考えられていた低運動領域での正負と相互作用の引力的・斥力的性質は必ずしも一致せず、定義上とり得ない負の値をとる様子も見られ、

有効理論としてのこの公式に内在する問題点を明示的にした。

**1B-2：中澤光（大阪大学 クォーク・核理論研究室）**

17:15–17:30

**【構成子カウンティング則の拡張によるストレンジペンタクォークの研究】**

近年、エキゾチックハドロン候補であるストレンジペンタクォーク  $P_s(2080)$  の存在が提唱されている。 $P_s(2080)$  は、そのおよその質量とクォーク組成から、核子励起状態  $N^*$  に3クォーク状態とともに混在していると考えられる。この混合割合を明らかにするため、構成子カウンティング則と呼ばれる、高エネルギー・大角度でのハドロン生成散乱における散乱断面積のエネルギー依存性からそのハドロンのクォーク数を明らかにできる手法を利用する。本研究では、カウンティング則を複数のクォーク数の混合状態になっているハドロンに適用できるように拡張し、 $N^*$  の実験データに応用することで、 $P_s(2080)$  の存否及び、その正確な質量・量子数の特定を試みる。

**1B-3：内田崇翔（東京科学大学 慈道研究室）**

17:30–17:45

**【 $K + d \rightarrow KNN$  反応における核物質中のクォーク凝縮の理解】**

量子色力学 (QCD) におけるカイラル対称性は低エネルギー領域で自発的に破れているが、有限密度中では部分的に回復すると期待されている。その秩序変数の一つであるクォーク凝縮は、散乱断面積を通して評価可能であり、定量的な議論に向けてストレンジクォークを持つ  $K$  中間子を用いた  $KN$  散乱が注目されている。この散乱振幅のうちアイソスピン  $I=1$  の成分は  $K + p$  散乱実験から決定されているが、 $I=0$  の成分は中性子ターゲットの困難さから未確定である。そこで本研究では、重陽子をターゲットとした  $K + d \rightarrow KNN$  反応の理論計算を行う。発表では、レビューとして先行研究の内容を紹介する。

**1B-4：高崎蓮斗（慶應義塾大学 理論研究室山本グループ）**

17:45–18:00

**【クォーク物質を含む中性子星状態方程式に対する質量・半径関係と潮汐変形率の比較】**

中性子星内部は、地上実験では到達困難な低温・高密度領域にあり、QCD 相図を探る貴重な舞台である。そのような領域ではクォーク物質の出現が期待されるが、その状態方程式には大きな不定性が残されている。本発表では、クォーク物質の出現、カラー超伝導クォーク物質への一次相転移およびハドロン-クォーククロスオーバーを含む複数のモデルの状態方程式についてレビューし、中性子星の質量・半径関係および潮汐変形率の数値計算の結果をもとに、各モデルの観測的特徴を議論する。

**1B-5：土田陽仁（新潟大学 原子核理論研究室）**

18:00–18:15

**【高密度物質での Kohn-Luttinger 効果と中性子星への影響 (レビュー)】**

Kohn-Luttinger 効果とは、短距離の斥力相互作用により高密度物質中のフェルミオン間に引力を形成 ( $s$  波以上の部分波に対して) し、フェルミ面にクーパーペアを形成しうるとする現象のことである。本研究は強い短距離斥力相互作用を持つ高密度物質に対して Kohn-Luttinger 効果の影響を評価したものである。さらに、中性子星内部の中性子やクォークのペアリングギャップに与える影響についても議論する。

**1B-6：圓谷風優（東京科学大学 理学院原子核ハドロン物理研究室）**

18:15–18:30

**【Skyrmion 結晶中の中間子とカイラル対称性】**

量子色力学は低エネルギーで強結合となり、摂動論による解析が困難である。Skyrme 模型は、カイラル有効理論に現れるトポロジカルソリトンとしてバリオンを記述する。本発表では、Large-NQCD, カイラル対称性の自発的破れ、非線形シグマ模型から Skyrmion 描像までを概説する。さらに、Skyrmion 結晶中の中間子揺らぎに関する先行研究を整理し、K 中間子の媒質中崩壊定数およびカイラル対称性との関係を調べるための拡張方針を議論する。

**1B-7：藤丸大輔（京大基研）**

18:30–18:45

**【エニオンを用いた格子ゲージ理論の電磁双対性の検証と連続極限へのつながりを念頭においた解析】**

ハミルトニアン形式の格子ゲージ理論は従来の格子ゲージ理論の課題である符号問題の解決が期待されているが、連続極限が難しい問題として残っている。そこで、本発表では連続極限の理解に向けて磁場を対角化するゲージ不変な基底の構成と、それを用いた解析について発表する。この際にトポロジカル物性の理論や量子誤り訂正符号理論を用いるため、それについて簡単に紹介する。また、本研究を通じて非可換ゲージ理論の双対性が簡単な模型において確認できたため、それについても説明を行う。

**1B-8：秋葉桂大（慶應義塾大学 理論研究室山本グループ）**

18:45–19:00

**【量子計量と非線形 Hall 効果による光の重力レンズへの補正】**

ヘリシティ（偏光）の自由度を考慮すると、フォトンの Hamilton 方程式は Berry 曲率に由来する補正を受けることが知られている。本講演では、経路積分の手法を用いて、この方程式が Berry 曲率だけでなく、運動量空間における量子状態同士の“距離”を与える計量である量子計量によっても補正されることを説明する。さらに、現象論的応用として曲がった時空における光の重力レンズを考える。量子計量を考慮した Hamilton 方程式を用いることによって、重力場について非線形な応答を示す非線形 Hall 効果による補正項が量子計量に起因して現れることについて議論する。

**1B-9：松下慧（東京理科大学 鈴木研究室）**

19:00–19:15

**【磁場中のカラー超伝導における量子幾何学的効果】**

中性子星は高密度系であることに加えて、非常に強い磁場を持つことで知られている。カラー超伝導では、光子とグルーオンが混合して生じる回転した  $U(1)$  電磁場が Meissner 効果を受けずに内部へ侵入する。この磁場によって形成される Landau 準位を平坦なバンドとしてみなすことで、近年凝縮系物理で注目を集める平坦バンド超伝導と同様の数理解造を持つことが期待される。平坦バンド超伝導における超流動剛性が量子計量によって特徴づけられることから、磁場中のカラー超伝導においても量子幾何学的寄与が重要であることが示唆される。本発表では磁場中カラー超伝導と平坦バンド超伝導の理論的対応を概観し、その意義について議論する。

**1B-10：福本翼（京都大学 原子核理論）**

19:15–19:30

**【インスタントンとゲージ理論の真空】**

Yang – Mills 方程式には、インスタントンと呼ばれる解が存在する。インスタントン解からは、位相的に異なる真空の間の遷移振幅が得られ、その結果としてゲージ理論は、 $\theta$  真空と呼ばれる非自明な真空構造を持つことが知られている。



本発表では、主に Callan, Dashen, Gross (1976) を元に、インスタントン解と、ゲージ理論の真空構造について概説する。

1B-11：服部暁翼（大阪大学 クォーク核理論研究グループ）

19:30–19:45

**【格子ゲージ理論における機械学習の応用】**

格子ゲージ理論の配位生成において、連続極限での臨界減速やトポロジカルフリージングによる計算コストの増大は深刻な課題である。本発表では、この物理的ボトルネックを打破する新たなサンプラーとして、G. Aarts らの論文 (arXiv:2601.19552) に基づく Diffusion Model を用いた配位生成手法のレビューを行う。Diffusion Model はデータに加えたノイズを段階的に除去するスコア関数を学習し、確率過程を経て所望の分布に従う配位を生成する手法である。本発表では、Diffusion Model による配位生成の数理的仕組みを基礎から概説するとともに、単一データからの学習で未知のパラメータへ高精度に外挿できる拡張性について議論し、新たなサンプリングの可能性を紹介する。

1B-12：吉田翔（東京大学 福嶋研究室）

19:45–20:00

**【QCD Matter in de Sitter Spacetime】**

We investigate how QCD matter responds to the Weyl transformation in de Sitter spacetime. Many studies have shown that the phase structure of QCD matter is sensitive to the external gravitational field, motivating us to answer an extreme question: Would hadrons be dissociated into quarks and gluons if they were in extremely rapidly expanding universe. de Sitter spacetime is one of the best curved spacetime to evaluate such situation since it approximately describes the universe with accelerated expansion. By employing the idea of the hadron resonance gas model for hadronic phase and the trace anomaly of the conformal fields for free massless quarks and gluons, we compare the Euclidean energy density for the two QCD phases. Our results show that the effective degrees of freedom of QCD matter might be shifted due to the change of the de Sitter radius which also determines the temperature for a static observer and expansion speed simultaneously.

**研究会 2：8/5(水) 16:00–19:00**

2-1：千葉裕貴也（筑波大学 原子核理論研究室）

16:00–16:15

**【暗黒物質-原子核散乱の検知に向けた 2 体 current を含む原子核構造因子の第一原理計算】**

暗黒物質と原子核との弾性散乱による直接探索実験は、暗黒物質検出の主要な手法の 1 つである。しかし、散乱断面積の比較対象となる実験データが存在しないため、信頼性の高い理論的予測が不可欠である。そのため、多体計算には Valence-Space In-Medium Similarity Renormalization Group (VS-IMSRG) 法を採用する。VS-IMSRG 法は、連続的なユニタリー変換を通じて初期の多体ハミルトニアンをブロック対角形式へと変換する手法である。我々は、 $^{129}\text{Xe}$  および  $^{131}\text{Xe}$  原子核の核構造因子の計算に成功した。さらに、2 体 current は従来、大きな不確実性を伴う近似によって扱われてきたが、本研究ではそのような近似を行うことなく 2 体 current を明示的に扱っており、これにより将来の直接検出実験の正確な解釈に大きく貢献する。

2-2：上原悠（九州大学大学院 理論核物理研究室）

16:15–16:30

**【非弾性分解反応に対する新しいモデルの提案】**

不安定核の分解反応は、弱束縛系の性質を調べる重要な手法である。連続状態離散化チャネル結合法 (CDCC) は分解反応を精密に扱える量子反応モデルであるが、分解断面積のエネルギー分布を過小評価する場合がある。この問題の原因の 1 つとして、CDCC は標的核が基底状態に留まる弾性分解のみを扱っているのに対し、実験データには標的核が励起される非弾性分解の寄与が含まれることが挙げられる。本研究では、非弾性分解反応を記述する新しいモデルを提案する。 ${}^6\text{He} + {}^{208}\text{Pb}$  の分解反応を例に、非弾性分解成分を加えることで CDCC の過小評価問題が改善されるかどうかを明らかにする。

2-3：林宗良（九州大学大学院理学府 理論核研究室）

16:30–16:45

**【運動量空間における直接反応の記述に向けて】**

直接反応は核構造および核反応の性質を明らかにする上で重要な役割を果たしてきた。直接反応の研究の多くは座標空間で行われてきたが、中間状態はエネルギーの固有状態ではないため、標的核への運動量移行が大きい場合にはハミルトニアン の定義が曖昧になることがある。この問題は、反応を運動量空間で記述することで回避できる。本研究では、弾性散乱に特に重点を置きつつ、運動量空間における直接反応の記述の現状について報告する。

2-4：立石諒汰（九州大学 理論核物理研究室）

16:45–17:00

**【クォーク物質を含む中性子星状態方程式に対する質量・半径関係と潮汐変形率の比較】**

重陽子は陽子と中性子からなる最も単純な原子核であるが、テンソル力によってスピンと軌道運動が結びつき、内部には空間的な異方性が生じる。本講演では、この自由度間の結びつきを量子もつれの観点から捉え、重陽子の内在的異方性との関係を調べる。量子もつれを通して、テンソル力が重陽子の内部構造に果たす役割を考える。

2-5：木内耀介（東京科学大学大学院 関澤研究室）

17:00–17:15

**【クラスター模型を用いた放射捕獲反応率の計算】**

放射捕獲反応は、原子核が融合して形成された励起状態の原子核が  $\gamma$  線を放出して束縛状態へ遷移する核反応であり、恒星内元素合成において重要な役割を果たす。この反応の計算には散乱状態と束縛状態の波動関数が必要となるが、虚時間法を用いることで散乱状態を直接計算することなく反応率を求めることができる。また、本研究では原子核を複数のクラスターからなる複合粒子系として記述するクラスター模型を用いて波動関数を構築する。本発表では、複数の 2 粒子放射捕獲反応を対象に反応率を計算し、放射捕獲反応に対するクラスター模型の有効性を検討する。

2-6：三浦一真（九州大学 理論核物理研究室）

17:15–17:30

**【ダイニュートロン相関における反対称スピン軌道三体力の効果解明に向けて】**

三体核力の反対称スピン軌道成分は、2 核子のスピン状態を混合させ、中性子過剰核におけるダイニュートロン相関の描像を変化させる可能性がある。しかし、そのダイニュートロン相関への具体的な寄与は未解明である。そこで本研究では、微視的クラスター模型に反対称スピン軌道三体力を導入し、その

効果を解析する。また、同模型においてダイニュートロン相関を定量的に評価する指標を構築し、その有効性についても報告する。これにより、中性子過剰核における反対称スピン軌道三体力とダイニュートロン相関の関係を明らかにすることを目指す。

2-7：栗田光一（京都大学 原子核理論研究室）

17:30–17:45

**【ダイニュートロン相関とハロー核のソフト双極子励起】**

原子核のコアとなる部分の周りに12個の中性子が薄く広がっているハロー核について扱う。ハロー核は励起してコアとハローの振動を起こすソフト双極子励起や、ハローをなす2中性子が密集してダイニュートロンのようにふるまうダイニュートロン相関といった興味深い現象が見られる。特に2中性子ハロー核が起こすソフト双極子励起では、複数の配位から同じ配位に遷移する場合があります、干渉項として強度分布に現れる。本研究は、この干渉項がどうソフト双極子励起に影響を及ぼすか、またその時ダイニュートロン相関への寄与はどうであるかを調べることを目標とする。

2-8：松木達哉（東京大学 宇宙地球部会）

17:45–18:00

**【重力崩壊型超新星における dineutron・tetra neutron の役割】**

重力崩壊型超新星の中心領域では、中性子過剰かつ高温・高密度な極限環境が実現する。状態方程式は、このような領域における熱力学量や原子核組成を定め、超新星爆発機構を理解する上で重要な役割を担う。しかし、状態方程式には未だ大きな不定性が残されている。本研究では、状態方程式の重要な不定性の一つとして、2個または4個の中性子のみからなる dineutron および tetra neutron の寄与に着目し、これらを取り入れた状態方程式を構築した。本発表では、これらの状態が超新星物質の原子核組成にどのような影響を与えるのか、またその変化が超新星爆発にどのように影響し得るのかについて議論する。

2-9：森田皓平（京都大学 原子核理論研究室）

18:00–18:15

**【微視的核物質状態方程式に基づく有効相互作用を用いた原子核の殻効果の評価】**

現在超新星爆発シミュレーションで広く用いられる核物質状態方程式の多くは、非一様相を液滴模型や Thomas-Fermi 近似で記述しており、原子核の殻効果が十分に取り入れられていない。そこで本研究では、殻効果を含む非一様核物質の状態方程式の構築を目指し、その第一段階として原子核の Hartree-Fock 計算に取り組んでいる。有効相互作用には、微視的多体変分計算による一様核物質状態方程式を再現するように決定された Skyrme 型相互作用 T-KIDS を用いることで、核物質計算の知見を原子核の記述に取り入れる。本発表では、代表的な原子核に対する Hartree-Fock 計算の結果を報告するとともに、従来の Thomas-Fermi 近似による結果と比較することで殻効果の影響を定量的に評価する。

2-10：イ・テホ（東京科学大学 関澤研究室）

18:15–18:30

**【中性子星状態方程式における  $\Lambda$  NN・ $\Lambda\Lambda$  N 三体力が中性子星構造に及ぼす影響の系統的研究】**

$2.0M_{\odot}$  以上の質量を持つ中性子星の存在は、高密度物質の状態方程式に厳しい制約を課す。一方、ハイペロン混合は一般に状態方程式を軟化させ、最大質量を低下させるため、観測との整合性が課題となる。本講演では、Skyrme 型エネルギー密度汎関数に基づく npe  $\mu$   $\Lambda$  物質で、密度依存型の  $\Lambda$  NN・ $\Lambda\Lambda$

N 三体相互作用を個別に変化させることで、状態方程式の変化及び質量半径関係、最大質量への影響を議論し、状態方程式の極値と Maxwell 構成の可能性についても触れる。

**2-11：中邨陽（東京科学大学 原子核理論研究室）**

18:30–18:45

**【有限温度 Extended Thomas-Fermi 法による原子核パスタの構造計算】**

中性子星内殻底部では核子の集団は球形だけでなく円柱形や板状などの様々な形状をとると予想されており、このような構造は原子核パスタと総称される。中性子星内の核物質は通常絶対零度と見なされるが、形成後間もない中性子星を考慮するためには有限温度の効果を取り入れる必要がある。本研究では Skyrme 有効相互作用に基づいた有限温度 Extended Thomas-Fermi 法により原子核パスタの構造を三次元計算格子上で決定する数値計算コードを開発している。本発表ではこの計算コードにより得られた結果について議論する。

**2-12：服部 竜大（東京科学大学 関澤研究室）**

18:45–19:00

**【中性子星内殻・外核境界近傍における量子渦の微視的構造の解析】**

中性子星は主に中性子で構成された高密度の天体で、内部には超流動性を示す中性子が存在する。中性子星の回転速度が急に変化するグリッチと呼ばれる現象が知られている。グリッチの起源はクラスト内での超流動量子渦のピン留め、内部の複数の超流動相における量子渦同士が相互作用することによる量子渦ネットワークなどのモデルが提唱されている。本発表では、中性子星内部の内殻における 1S0 超流動相と、さらに内側の外核における 3P2 超流動相の量子渦の構造に着目した。複数の相における超流動量子渦が境界付近でどのように相互作用するかを微視的に解析し、量子渦ネットワークモデルで提唱されている量子渦の結合構造のシミュレーションをおこなった。

**研究会 3：8/6(木) 9:15–11:45**

**3-1：カユウ（東京都市大学 実験原子核物理研究室）**

9:15–9:30

**【Geant 4 によるイオンチェンバーのエネルギー分解能に対する荷電状態揺らぎおよび  $\delta$  線生成の影響】**

重イオンの粒子識別において、イオンチェンバーはエネルギー損失に基づく原子番号  $Z$  の識別に広く用いられている。イオンチェンバーで得られるエネルギー分解能は、入射粒子の原子番号  $Z$  に依存しており、 $Z$  が大きくなるほど、荷電状態揺らぎが大きくなり、エネルギー分解能が悪化する傾向が見られる。一方で、 $\delta$  線の生成断面積は入射粒子の荷電状態に依存するため、荷電状態揺らぎは  $\delta$  線の生成量やエネルギー分布にも影響を及ぼす可能性がある。本研究では、Geant4 シミュレーションに荷電状態揺らぎ過程を組み込み、RIBF での先行研究および実験データの再現を試みる、荷電状態揺らぎおよび  $\delta$  線生成がイオンチェンバーでのエネルギー損失と付与、それらの揺らぎに及ぼす影響を調べた。本講演ではこれらの結果によるイオンチェンバーのエネルギー分解能の結果と考察について発表する。

**3-2：井上千波（東京都市大学大学院 実験原子核物理研究室）**

9:30–9:45

**【 $^{40}\text{Ca}$  –  $^{56}\text{Ni}$  近傍の鏡映核における物質半径差の系統的研究】**

鏡映核の物質半径差は、アイソスピン対称性の破れ等を探る上で重要な指標であり、その研究は核構

造の理解に貢献する。物質半径の導出には、相互作用断面積測定が有効な手段の一つである。本研究では、理研 TRIP 事業の一環として、理研 RIBF の BigRIPS において炭素標的に対する相互作用断面積をトランスミッション法で測定した。核子当たり 345 MeV に加速された  $^{70}\text{Zn}$  の一次ビームを Be 生成標的に照射し、測定対象の核種を含む二次ビームを生成した。これを炭素標的に照射し、検出器を用いて B  $\rho$ -TOF- $\Delta E$  法による粒子識別を行った。これにより  $^{40}\text{Ca}$ - $^{56}\text{Ni}$  近傍の質量数  $A = 41 - 55$  のアイソスピン  $T = 1/2$  および  $T = 1$  の鏡映核の相互作用断面積を測定し、Glauber 計算により物質半径を導出した。

### 3-3：小林颯人（筑波大学 原子核実験低エネルギー Gr. 小沢研究室）

9:45-10:00

#### 【厚い固体重水素標的を用いた $^{90}\text{Sr}$ の核子剥離断面積測定】

反応断面積は原子核の大きさに感度がある。核子-核子全断面積のアイソスピン非対称性に注目すると、特に陽子標的及び中性子標的を用いた反応断面積 ( $\sigma_R$ ) 測定は高精度な中性子スキン厚導出のために有効である。中性子標的の用意は難しいが、重陽子標的と陽子標的を用いた  $\sigma_R$  測定により中性子との  $\sigma_R$  が間接的に導出できることが理論的に示唆されている [1]。そこで我々は反応断面積測定用に厚い固体重陽子標的 (SDT) の開発を進めている。今回、 $^{90}\text{Sr}$  の核子剥離断面積測定実験を行い既存値 [2] と比較した。実験には、理化学研究所 RIBF において  $^{238}\text{U}$  一次ビーム (345 MeV/u) を  $^9\text{Be}$  生成標的に衝突させて生成した  $^{90}\text{Sr}$  二次ビーム (235 MeV/u) を用いた。本講演では、測定の概要とその結果を発表する。Reference [1] W. Horiuchi et al., Phys. Rev. C 102, 054601 (2020). [2] H. Wang et al., Phys. Lett.B754,104(2016)

### 3-4：杉山大樹（埼玉大学/理化学研究所 上坂友洋研究室/核反応研究部）

10:00-10:15

#### 【ノックアウト反応で明らかにする核内陽子-中性子相関】

重陽子は 2 核子系で唯一の束縛状態を持つ。短距離相関研究では、核内の陽子と中性子が強く相関することが示唆されている。一方、個々の原子核で陽子-中性子相関を直接調べた実験はほとんどない。重陽子を束縛するテンソル力は原子核の束縛エネルギーの半分以上に寄与することから、核内での重陽子の相関が期待される。本研究では、これを陽子誘起重陽子ノックアウト反応により調べる。従来、弱束縛な重陽子をノックアウト反応で観測することは困難と考えられてきたが、近年、CDCCIA により適切な運動学条件では観測できる可能性が示された。そこで、重陽子の相関が強く現れると期待される  $N=Z$  核の系統的研究に向け、逆運動学条件下で重陽子ノックアウト反応を測定する検出器を開発している。

### 3-5：堤祐人（東京大学 中村研究室）

10:15-10:30

#### 【“K-ppn” 束縛状態の探索実験に向けたエアロゲルチェレンコフ検出器の開発および評価】

J-PARC E15 実験において“K-pp”束縛状態の存在が実証されたことを受けて、J-PARC E80 実験では、K-ビームを使用した“K-ppn”束縛状態の探索が計画されている。我々は、ビーム中に含まれる K/ $\pi$  粒子を識別するため、ソレノイド磁場中でも使用可能な、MPPC 読み出しのエアロゲルチェレンコフ検出器を開発している。これまでに、宇宙線やビームを用いた評価試験によって、さらなる性能改善の指針を得てきた。現在は、これらの結果をもとに、実機の作成に向けた改良を進めている。本講演では、

E80 実験の背景に加え、検出器開発の現状と最新の試験結果、ならびに今後の展望を報告する。

**3-6：高橋 仁（東京大学 中村研究室）**

10:30–10:45

**【Decay Pion Spectroscopy による  $\Lambda$  N 荷電対称性の破れの測定】**

$\Lambda$  粒子と核子の相互作用における荷電対称性の破れ（Charge Symmetry Breaking : CSB）は、ストレンジネスを含むバリオン間相互作用を理解する上で重要な研究課題である。本講演では、 $\Lambda$  ハイパー核の弱崩壊で放出される崩壊  $\pi$  中間子の運動量を高精度に測定する Decay Pion Spectroscopy による CSB 研究へのアプローチについて紹介する。まず、ハイパー核における CSB 研究の現状を概説する。その後、本実験グループが米国 Jefferson Lab で 2029 年の実験実施に向けて準備を進めているハイパー核実験の概要を紹介し、崩壊  $\pi$  中間子測定用の位置検出器の開発と期待される束縛エネルギースペクトルについて説明する。

**3-7：石戸景（京都大学 原子核・ハドロン研究室）**

10:45–11:00

**【 $\Lambda$  ハイパー核の欠損質量分光で迫る核構造と三体相互作用】**

我々の研究グループでは、米国 Jefferson Lab で計画中の次期ハイパー核生成実験に向け準備を進めている。HKS-HES スペクトロメーターを用いた欠損質量分光では、基底状態から励起状態まで含めた束縛エネルギーの精密測定が可能である。本実験では質量数  $A=6$  から 208 にいたる系統的なデータ収集を目標とする。これらの広範なデータは、高密度核物質の理解に不可欠な  $\Lambda$  NN 三体相互作用研究や、 $Mg26$  における三軸非対称変形核の構造解明のマイルストーンとして、今後の原子核・ハドロン物理学に大きく貢献すると期待される。本講演では、これら物理の概説と、多種多様な核種を用いたデータ取得を可能にする固体標的システム開発について報告する。

**3-8：神保 拓斗（京都府立大学 原子核ハドロン物理学研究室）**

11:00–11:15

**【反応計算による、J-PARC E15 実験で生成された  $\bar{K}NN$  原子核のスピン/パリティ】**

J-PARC E15 実験において、1 つの反  $K$  中間子と 2 つの陽子から構成される  $\bar{K}NN$  原子核の生成のシグナルが観測された。しかし、理論計算と実験結果を定量的に比較するには様々な課題があり、現在も十分な反応計算は行われていない。本研究は、先行研究以上に精密なモデルを構築した上で反応計算を行い、生成された  $\bar{K}NN$  原子核の構造・性質を解明することを目指している。本発表では、反応計算により生成された  $\bar{K}NN$  原子核のスピン/パリティを議論する。

**3-9：野見山裕也（京都大学基礎物理学研究所 原子核理論グループ）**

11:15–11:30

**【カイラル摂動論】**

この発表では“Phenomenological Lagrangians”, S. Weinberg, Physica A96 (1979) 327. をレビューする。強い力を記述するには QCD が最も基礎的な理論である。しかし、低エネルギー領域ではクォークの相互作用というミクロな詳細を無視し主な自由度であるパイオンや核子の相互作用を見るので十分である。今回の発表ではパイオンのみを自由度として、ラグランジアンを QCD と同じ対称性を持つように構成する。そのうえで相互作用項を分類し、最低次の散乱振幅がツリー図で与えられること、散乱の計算、繰り込み可能性について議論する。