

---

## 会場 E

# 素粒子論, 素粒子実験, 実験核物理, 宇宙線・宇宙物理領域

---

### E-1 B → D\*η π 崩壊反応の解析

宮崎大学大学院工学研究科<sup>A</sup>, 宮崎大学工学教育研究部<sup>B</sup> 黒岩奨大<sup>A</sup>, 松田達郎<sup>B</sup>

現在、ハドロン物理の課題として、QCD に基づいてハドロンスペクトルを理解することが挙げられ、QCD から示唆されるエキゾチック中間子の探索が進められている。エキゾチック中間子とは、従来のクォークモデルでは許されない中間子のことである。幾つかの実験グループによって、 $\pi_1(1400)$  はエキゾチック中間子候補の一つであるとして報告されている。クォークモデルで導かれる中間子の量子数は決まっていて、J を全角運動量、P をパリティ、C を荷電パリティとすると、量子数  $J^{PC}=0^{-+}, 0^{++}, 1^{--}, 1^{+-}, 1^{++}$  などに限られる。 $\pi_1(1400)$  は  $\eta\pi$  に崩壊し、クォークモデルで許されない量子数  $J^{PC}=1^{-+}$  であり、その存在が確認できれば、明確なエキゾチック中間子と言える。しかし、これまでの  $\pi_1(1400)$  の存在を報告した  $\pi$  中間子回折散乱実験では、部分波解析の手法の問題や背景事象の影響などが論争となっており、その存在について確定的とされていない。そこで、今回、B 中間子崩壊過程で生成され  $\eta\pi$  系において  $\pi_1(1400)$  の存在の確認を目指す。

本研究では、 $B^0 \rightarrow D^*\eta\pi$  崩壊反応のモンテカルロシミュレーションにより、 $\pi_1(1400)$  の存在を本反応の解析によって、明らかにできる可能性を示す。また、解析で B 中間子を再構成した際に、解析ではあらゆる荷電粒子トラックおよび  $\gamma$  線の組み合わせを考えるので、1 つの崩壊イベントから複数の B 中間子候補が再構成される。そこで Best Candidate Selection と呼ぶ手法によって、尤もらしい B 中間子を選別する。これによって、真のイベントが効率良く選び出されることを示す。また、今後、KEK Belle 実験データを用いて解析することを目指す。

## E-2

### $^8\text{He}$ 中性子ノックアウト反応から生じる He 同位体の不変質量導出へ向けた解析

宮崎大工<sup>A</sup>, 理研<sup>B</sup>, 阪大 RCNP<sup>C</sup>, 京大理<sup>D</sup>, 東北大理<sup>E</sup> 清武修平<sup>A</sup>, 前田幸重<sup>A</sup>, Z.H. YANG<sup>B,C</sup>, 銭廣十三<sup>D</sup>, 上坂友洋<sup>B</sup>, 三木謙二郎<sup>E</sup>, RIBF-SAMURAI034 collaborator<sup>B</sup>

理化学研究所 RIBF で  $^4\text{He}(^8\text{He},^8\text{Be})^4n$  実験が行われ、4 中性子共鳴状態 (テトラニュートロン) 候補の存在が 2016 年 [1] に報告された。それ以降、様々なテトラニュートロン探索実験が遂行されている。その 1 つとして、2017 年に RIBF で  $^8\text{He}(p,2p)^7\text{H}\{t+^4n\}$  実験が行われた。我々は、この実験で同時に測定されたデータのうち  $^8\text{He}(p,pn)^7\text{He}\{t+3n\}$  反応の解析を行い、3 中性子状態を研究することを目指している。本研究では、その前段階として 1 中性子検出イベントである  $^7\text{He} \rightarrow ^6\text{He} + n$  反応チャンネル及び  $^5\text{He} \rightarrow \alpha + n$  反応チャンネルを解析した。実験では、一次標的である  $^9\text{Be}$  に 230MeV/u の  $^{18}\text{O}$  ビームを当て、二次ビームとして 150MeV/u の  $^8\text{He}$  ビームを得た。 $^8\text{He}$  ビームを 150mm 厚の液体水素ターゲットである MINOS [2] に照射した。前方に出射した荷電粒子は超電導双極子電磁石 SAMURAI [3] で運動量分析され、SAMURAI の入口と出口に設置された 2 つのマルチワイヤードリフトチェンバー FDC1、FDC2 を通過し、最下流に設置されたプラスチックシンチレータホドスコープ HODO で検出された。標的から出射した中性子は、SAMURAI の内部を直進し、下流に設置された NEBULA、NeuLAND の二つの中性子検出器で検出された。測定された様々な反応チャンネルの中から、 $\alpha$  粒子又は  $^6\text{He}$  と中性子 1 つが同時計測されたイベントを選び、検出粒子の運動量と運動エネルギーから  $^{5,7}\text{He}$  の相対エネルギースペクトルの導出を行った。

[1] K. Kisamori et al, Phys. Rev. L 116 (2016) 052501.

[2] A. Obertelli et al, Eur. Phys. J. A 50 (2014) 8.

[3] T. Kobayashi et al, Nucl. Instrum. Methods B 317 (2013) 294-304.

## E-3

### 磁場を用いた中性子寿命実験における宇宙線カウンターの開発

九大理<sup>A</sup>, 高エ研<sup>B</sup>, 九大 RCAPP<sup>C</sup> 松崎俊<sup>A</sup>, 市川豪<sup>B</sup>, 音野瑛俊<sup>C</sup>, 角直幸<sup>B</sup>, 槇田康博<sup>B</sup>, 三島賢二<sup>B</sup>, 矢野浩大<sup>A</sup>, 吉岡瑞樹<sup>C</sup>

中性子の寿命 ( $879.4 \pm 0.6$  秒) は素粒子物理学や宇宙論において重要なパラメーターの 1 つで、これまで大きく分けて 2 つの方法で測定されてきた。1 つは中性子ビーム中で中性子が  $\beta$  崩壊して出てきた陽子数を数えるビーム法、もう 1 つは中性子を容器に貯蔵し、一定時間後に崩壊せず残った数を数える貯蔵法である。しかしながら、これらの 2 つの実験結果には 8.4 秒 ( $3.8 \sigma$ ) の乖離が生じている。そこでこれらの 2 つの手法とは別に、中性子が  $\beta$  崩壊をして出てきた電子をガス検出器を用いて測定するビーム法の実験を J-PARC MLF BL05 で行っている。この実験では、ビーム軸上で発生するシグナルと、ガス検出器壁面で発生するバックグラウンドと区別することが出来ない。そこで我々は、ソレノイド磁石を用いて中性子ビーム軸方向に磁場を印加することで、壁面由来のバックグラウンドを削減する新しい実験を行うことを計画している。実験の準備として、宇宙線由来のイベントの除去やガス検出器の検出効率を測定するために宇宙線カウンターの製作を行っている。本講演では、宇宙線カウンターの製作及び試験の状況について報告する。

## E-4

### 複合核反応における時間反転対称性の破れの探索実験のための $^{117}\text{Sn}(n, \gamma)$ 反応断面積の角度依存性の測定

九大理<sup>A</sup>, 広島大<sup>B</sup>, 名大理<sup>C</sup>, JAEA<sup>D</sup>, 名大 KMI<sup>E</sup>, 阪大 RCNP<sup>F</sup>, 東工大理<sup>G</sup>, 九大 RCAPP<sup>H</sup> 古賀淳<sup>A</sup>, 飯沼昌隆<sup>B</sup>, 石崎貢平<sup>C</sup>, 井出郁央<sup>C</sup>, 遠藤駿典<sup>C,D</sup>, 奥平琢也<sup>D</sup>, 北口雅暁<sup>E</sup>, 木村敦<sup>D</sup>, 酒井健二<sup>D</sup>, 嶋達志<sup>F</sup>, 清水裕彦<sup>C</sup>, 高田秀佐<sup>A</sup>, 谷結以花<sup>G</sup>, 新實裕大<sup>C</sup>, 広田克也<sup>C</sup>, 藤家拓大<sup>C</sup>, 藤岡宏之<sup>G</sup>, 山本知樹<sup>C</sup>, 吉岡瑞樹<sup>H</sup>, 吉川大幹<sup>F</sup>

現在の物質優勢宇宙を説明するために、標準模型を超える CP 対称性の破れ (CPT 定理を仮定すると、時間反転対称性の破れと等価) が不可欠と考えられている。中性子が原子核に吸収された時、複合核という準安定状態を形成するが、これを複合核反応と呼ぶ。複合核反応では空間反転対称性の破れの大きさが陽子-陽子散乱に比べて、最大で約  $10^6$  倍に増幅されることが、様々な原子核において実験的に観測されている。この増幅効果が時間反転対称性の破れでも起こり得ると理論的に示唆されており、実験感度が高くなることから、時間反転対称性の破れの発見が期待されている。実験感度の指標となるパラメタの一つに  $\kappa(J)$  があるが、これはほとんどの原子核でこれは測定されたことがない。この  $\kappa(J)$  は  $p$  波共鳴における入射中性子の 2 つのスピ状態の混合角によって一意に決まる値である。Flambaum の理論によると、この混合角は特定の終状態に遷移する場合の  $(n, \gamma)$  反応の角度依存性を測定することで求めることができる。我々は J-PARC MLF BL04 にて  $^{117}\text{Sn}(n, \gamma)$  反応の即発ガンマ線の測定を行った。この実験装置は複数のゲルマニウム検出器が設置してあるため、特定の遷移のみイベントを選別することやガンマ線の角分布を測定することが可能である。 $^{117}\text{Sn}(n, \gamma)$  反応の場合は複合核から基底状態に直接遷移する際の反応断面積が有意な角度依存性を持つことが分かった。本講演では J-PARC で実験内容や角度依存性の解析結果について報告する。

## E-5

### 逆運動学 $^{12}\text{C}(\alpha, \alpha_2)$ 散乱によるホイル状態の生成

九大院理<sup>A</sup>, 理研<sup>B</sup> 久保大志<sup>A</sup>, 寺西高<sup>A</sup>, 中島優人<sup>A</sup>, 後藤滉一<sup>A</sup>, 松尾仁<sup>A</sup>, 久保野茂<sup>B</sup>

炭素  $^{12}\text{C}$  の第 2 励起状態はホイル状態と呼ばれ、恒星中での  $^{12}\text{C}$  の生成に深く関わっている。我々のグループではホイル状態から基底状態への電子対崩壊分岐比の測定を逆運動学法を用いて行う予定である。その際、ホイル状態の生成には  $\alpha(^{12}\text{C}, \alpha_2)$  反応を使用する。今回はホイル状態の生成効率が高くなるビームエネルギーを決定するため、九大のタンデム加速器を用いてビームエネルギーを 32-42 MeV の範囲で変えつつ、実験室系 0 度での  $\alpha(^{12}\text{C}, \alpha_2)$  微分断面積を測定した。

## E-6

### 51V+208Pb 反応系における融合障壁分布の測定

九大院理<sup>A</sup>, 理研仁科センター<sup>B</sup>, オーストラリア国立大 (ANU)<sup>C</sup>, オークリッジ国立研究所 (ORNL)<sup>D</sup>, 大阪大<sup>E</sup>, 埼玉大<sup>F</sup>, 中国科学院近代物理研究所 (IMP)<sup>G</sup>, テネシー大学ノックスビル校 (UTK)<sup>H</sup>, 東北大<sup>I</sup>, 新潟大<sup>J</sup>, 日本原子力研究開発機構 (JAEA)<sup>K</sup>, 山形大<sup>L</sup>, ユベール・キュリアン学際研究所 (IPHC)<sup>M</sup> 内藤夏樹<sup>A,B</sup>, 田中聖臣<sup>A,B</sup>, 坂口聡志<sup>A,B</sup>, 森田浩介<sup>A,B</sup>, 加治大哉<sup>B</sup>, 田中泰貴<sup>B,C</sup>, 庭瀬暁隆<sup>A,B</sup>, 羽場宏光<sup>B</sup>, BrionnetPierre<sup>B</sup>, 森本幸司<sup>B</sup>, for the nSHE Collaboration<sup>A,B,C,D,E</sup>, for the nSHE Collaboration<sup>F,G,H,I,J</sup>, for the nSHE Collaboration<sup>K,L,M</sup>

我々の研究グループでは、現在知られている最も重い元素である 118 番元素オガネソン (Og) を超えた領域、すなわち周期表の第 8 周期における新元素の探索を行っている。融合反応を用いた超重元素生成の確率は非常に低いため、生成断面積が最大となるような最適な実験条件の決定が重要である。特に、断面積は入射エネルギーに強く依存し、入射エネルギーが 5% ずれるだけで断面積は 1 桁低下すると予想されている。融合断面積から導出された融合障壁分布は、最適な入射エネルギーに関する情報を得るために有用である。この障壁分布は、融合断面積と相補的な関係にある、後方角度での準弾性散乱断面積のエネルギー励起関数を測定することによって得ることができる。我々は得られた障壁分布を用いて、最適な入射エネルギーや入射核および標的核の反応チャネルの結合に関する影響について調べたい。

今回の研究では、我々は  $^{51}\text{V}+^{208}\text{Pb}$  反応系における準弾性散乱断面積のエネルギー励起関数を測定した。この反応系を選んだ理由は、 $^{51}\text{V}$  が現在、119 番元素探索実験 (nSHE 実験) にビームとして用いられているからである。実験は理化学研究所重イオン線形加速器 (sRILAC) で行われた。準弾性散乱断面積は、気体充填型反跳イオン分離器 (GARIS3) を用いて、標的から反跳された  $^{208}\text{Pb}$  を検出することによって測定した。この反跳核は入射核や他のバックグラウンド粒子と分離され、焦点面検出器へ輸送された後、エネルギーと飛行時間が測定された。また、入射核および標的核の励起状態が  $^{51}\text{V}+^{208}\text{Pb}$  の融合反応における捕獲確率に影響するかどうかを議論するため、我々は計算コード CCFULL を用いて、測定結果と光学ポテンシャル計算およびチャネル結合計算との比較を行った。本発表では、以上の実験および議論の詳細について発表する。

## E-7

### ILD 検出器シミュレーションを用いた高時間・空間分解能カロリメータの研究

九大理<sup>A</sup>, 九大 RCAPP<sup>B</sup>, KEK 素核研<sup>C</sup> 久原真美<sup>A</sup>, 末原大幹<sup>A</sup>, 川越清以<sup>A</sup>, 吉岡瑞樹<sup>B</sup>, DanielJeans<sup>C</sup>

ILC (国際リニアコライダー) は、現在建設・運転の計画が進められている次世代の線形加速器実験である。ILC 実験の目的は、加速した電子と陽電子を衝突させ、ヒッグス粒子などの精密測定や、標準理論を超える新物理の研究を行うことである。電子と陽電子が衝突する場所に設置を予定している検出器の一つに ILD (International Large Detector) がある。ここでの荷電粒子の識別にはガス飛跡検出器 (TPC) が用いられる。TPC では粒子の運動量とエネルギー損失 (dE/dx) を測定することで粒子識別を行うが、この測定のみでは識別が行えない領域が存在する。しかし、これらに、粒子飛行時間 (Time of Flight, ToF) の測定を加えると、広い運動量領域において、より良い精度で粒子識別を行うことができる。ToF の測定には、高い時間分解能が要求される。ILD 検出器を構成する検出器の一つで、ToF を測定するのに適していると考えられているものに電磁カロリメータ (ECAL) がある。ECAL の時間分解能を向上させるため、LGAD (Low Gain Avalanche Diode) というシリコンセンサーの導入を検討している。LGAD は内部に増幅機構を持っており、空乏層が薄くても十分な量の信号を収集することが可能であるため、高い時間分解能を達成することができる。LGAD を ECAL の一部として導入した場合の評価を行うために、ECAL に荷電粒子を入射した際のシミュレーションデータを用いて質量分布を計算し、時間分解能が粒子識別に与える影響の研究を行った。また、中性粒子の位置・方向感度を上げるため、ECAL のシリコンセンサーの各セルに PSD (Position-Sensitive silicon Detector) を導入することが研究されている。こちらに関しても位置分解能が与える影響についての研究を行った。

## E-8

### LHCの高輝度化計画に向けた ATLAS 実験用シリコンピクセル検出器のワイヤー保護用 CFRP 構造体の強度評価

九大理<sup>A</sup>, KEK 素核研<sup>B</sup>, 都立大<sup>C</sup>, 京教大理<sup>D</sup>, 総研大理<sup>E</sup> 岩下侑太郎<sup>A</sup>, 池上陽一<sup>B</sup>, 汲田哲郎<sup>C</sup>, 小林大<sup>A</sup>, 高嶋隆一<sup>D</sup>, 東城順治<sup>A</sup>, 外川学<sup>B</sup>, 花垣和則<sup>B</sup>, 東野聡<sup>B</sup>, 藤野大地<sup>D</sup>, 緑川晋平<sup>E</sup>, 三宅響<sup>C</sup>, 宮崎祐太<sup>A</sup>, 姚舜禹<sup>A</sup>

CERN(欧州原子核機構)の ATLAS 実験では、陽子-陽子衝突型の加速器である LHC の高輝度化に際し、ATLAS 検出器の内部飛跡検出器を新しいシリコン検出器 ITk(Inner Tracker) に入れ替えることを計画している。その一部であるピクセル検出器 ITk-Pixel は、約 1 万個の検出器モジュールから成り、1 モジュールは読み出し用のフレキシブル基板 (FPC), シリコンセンサ, ASIC から構成されている。このモジュールにおいて、FPC と ASIC を接続し信号を読み出すために、直径 25  $\mu\text{m}$  のアルミワイヤを用いる。このワイヤは非常に脆く、組立・運搬時の接触, 振動, 運転中の磁場による振動で損傷する恐れがあるので、ワイヤを保護する必要がある。当初、ワイヤを樹脂で封止して保護する手段を考案していた。しかし、接触に対する強度、放射線・温度変化への耐性要求を満たす樹脂が見つからなかった。そのため、新たな保護手法として、ワイヤを屋根型の構造物で保護することを考えている。構造物を用いた保護に関しても、接触などによる曲がりに対する十分な強度、放射線耐性が要求される。構造物もしくはその素材が設計上要求される性能を満たしていない場合、それ自体が大きく変形してワイヤに接触し、損傷させる可能性があるため、構造物に対する強度測定、その素材のヤング率測定といった事前の性能評価が重要となってくる。現在、ワイヤ保護用の構造体に用いる CFRP の材料選定を完了し、強度・放射線耐性の評価についての準備・測定を進めている。本講演では、ワイヤ保護用 CFRP の性能評価に向けた、ヤング率測定的手法改善, 測定精度の調査などについて報告する。

## E-9

### 252Cf, 256Fm, 258Fm, 259Lr の自発核分裂における核分裂片質量分布解析

九大院理<sup>A</sup>, 日本原子力研究開発機構<sup>B</sup> 東聖人<sup>A</sup>, 浅井雅人<sup>A,B</sup>, 森田浩介<sup>A</sup>, 坂口聡志<sup>A</sup>, 郷慎太郎<sup>A</sup>

原子核が二つに分裂する核分裂過程では、多くの放射性原子核が生成される。そのため適切な廃棄物処分や原子力の安全性向上のためには核分裂反応機構を解明し、核分裂生成物の質量数分布や運動エネルギーを高精度に予測する必要がある。特にアクチノイド核種においては、核分裂生成物の質量数-運動エネルギー分布が陽子数・中性子数に応じて急激に変化する。この現象の原因は未だ解明されておらず、アクチノイド領域の核分裂機構は、現在非常に注目されている。例えば、256Fm と 258Fm は中性子の数が 2 つしか違わないにも関わらず、前者の質量分布は 2 つのピーク、後者は 1 つのピークを持つ。核分裂片の質量数-運動エネルギー分布の解明は核分裂のメカニズム解明への重要な手掛かりとなる。本発表ではアクチノイド核種である 252Cf, 256Fm, 258Fm, 259Lr の 4 核種の自発核分裂における核分裂片質量数-運動エネルギー分布を機械学習の手法を用いて分類し、その結果から核分裂反応機構の考察を行う。具体的には、混合ガウスモデルを最尤推定する手法の一つである EM アルゴリズムを核分裂片分布の解析に適用し、ガウス分布の個数を推定する。その個数から、核分裂におけるそれぞれの核分裂片の変形度を推定する。

## E-10

### 低エネルギー重イオンに対するシリコン検出器の波高欠損およびエネルギー分解能の研究

九大院理<sup>A</sup>, 九大超重元素研究センター<sup>B</sup>, 日本原子力研究開発機構<sup>C</sup> 長田茉莉<sup>A</sup>, 坂口聡志<sup>A,B</sup>, 浅井雅人<sup>B,C</sup>, 甲斐民人<sup>A</sup>, 郷慎太郎<sup>A,B</sup>, 田中聖臣<sup>A</sup>, 富松太郎<sup>A</sup>, 内藤夏樹<sup>A</sup>, 永田優斗<sup>A</sup>, 東聖人<sup>A</sup>, 松尾仁<sup>A</sup>, 武藤大河<sup>A</sup>, 村上郁人<sup>A</sup>, 鷲山広平<sup>B</sup>, 森田浩介<sup>A,B</sup>

原子核の自発核分裂は、対称分裂と非対称分裂の2つのモードに大別される。重元素の領域では、その2つのモードのどちらが支配的であるか、中性子数に応じて変化する。例えば、256Fmの核分裂の質量分布では、質量数がおおよそ110と140のものに分裂する非対称分裂が見られる。一方、中性子が二つ増えた258Fmでは対称分裂が支配的である。その中間の核である257Fmでは対称分裂と非対称分裂の二つの振る舞いをする様子が見られる。このように原子核の中性子数の増加に伴い、非対称分裂から対称分裂に遷移する理由は解明されておらず、現在、精力的に研究が進められている。この研究では、分裂片の質量を、より良い分解能で測ることが重要である。通常、2つの分裂片の質量比はシリコン検出器によって測定した運動エネルギーの比から決定される。シリコン半導体検出器は軽イオンの測定では0.3%程度の非常に良いエネルギー分解能を測定できる。しかし、重イオンの測定では、波高欠損により運動エネルギーと信号強度の関係が比例関係から大きくずれる上に、シリコン検出器の分解能が悪くなる傾向にある。重イオンに対するシリコン検出器のエネルギー分解能と波高欠損を詳細に調べることは、分裂片の質量数と質量分解能を正しく評価し、質量分布の幅を議論する上で有意義である。そこで、九州大学加速器・ビーム応用科学センターにおいて、12Cなどの軽イオンから127Iなどの重イオンを用いてSi検出器の分解能と波高欠損を系統的に調べた。その結果について報告する。

## E-11

### 超重核領域における $\alpha$ 線および自発核分裂片測定のためのSi検出器用プリアンプの性能評価①

九大超重元素研究センター<sup>A</sup>, 日本原子力研究開発機構<sup>B</sup>, 九大院理<sup>C</sup> 浅井雅人<sup>A,B</sup>, 甲斐民人<sup>C</sup>, 富松太郎<sup>C</sup>, 永田優斗<sup>C</sup>, 武藤大河<sup>C</sup>

超重核の測定には主にSi検出器が使われる。核反応で合成された超重核は反跳核分離装置で分離され、Si検出器に埋め込まれる。その後、埋め込み信号とその後の $\alpha$ 崩壊や自発核分裂の検出信号を精密に測定することで超重核を同定する。また、超重核の核構造研究や核分裂機構の研究においても $\alpha$ 線や自発核分裂片の精度良い測定が不可欠である。本研究では、Si検出器を用いて $\alpha$ 線や自発核分裂片を精度良く測定する際に重要となるプリアンプの性能評価を実施した。評価を行ったプリアンプはHamamatsu H4083、Hamamatsu H4083(改造)、Cremat CR-110、111、Amptek A250 (1 pF, 3pF)の6つで、評価項目は①正 (POS) 出力と負 (NEG) 出力の比較 ②波高値 ③立ち上がり時間 ④立ち下がり時間 ⑤エネルギー直線性 ⑥エネルギー分解能 ⑦測定可能なエネルギー最大値 (ダイナミックレンジ) ⑧リニアアンプの違いによる出力波形の違いである。これらの評価を $\alpha$ 線源 241Am とパルサーを用いて行った。本発表では実験装置・解析手法の詳細な説明および、エネルギー分解能の結果についての考察を行う。

## E-12

### 超重核領域における $\alpha$ 線および自発核分裂片測定のための Si 検出器用プリアンプの性能評価②

九大院理<sup>A</sup>, 九大超重元素研究センター<sup>B</sup>, 日本原子力研究開発機構<sup>C</sup> 甲斐民人<sup>A</sup>, 浅井雅人<sup>B,C</sup>, 永田優斗<sup>A</sup>, 富松太郎<sup>A</sup>, 武藤大河<sup>A</sup>

近年の研究において 118 番元素 Og までの元素が全て確認された。これは第 7 周期までの周期表が完成したことを意味し、研究は次の段階へ進むことになった。各国では 119 番以降の元素つまりは第 8 周期以降の元素合成実験が盛んにおこなわれている。超重元素合成実験では、検出器にインプラントされた超重核の $\alpha$ 崩壊鎖や自発核分裂の検出信号を精密に測定し、既知核のものと照合することで超重核は同定している。検出器は主に Si 検出器が用いられており、その検出精度が実験の精度を決めている。本研究では超重核測定を高精度で行う際に重要な Si 検出器用プリアンプの性能評価を行った。性能比較するプリアンプは浜松ホトニクス社の H4083、Cremat 社の CR-110-R2、CR-111-R2.1、Amptek 社の A250 とし、241Am  $\alpha$ 線源とパルサーを用いて実験を行った。評価項目としてはエネルギー分解能、立ち上がり波形、エネルギー直線性、ダイナミックレンジを採用し、プリアンプ間の性能比較を行った。本発表では立ち上がり波形、エネルギー直線性、ダイナミックレンジの項目で性能比較を行い、本実験における総合評価を報告する。

## E-14

### 有限アイソスピン密度がある場合の $Z_3$ 対称な格子 QCD 計算

佐賀大理工<sup>A</sup>, 出水中央高<sup>B</sup>, 気象庁<sup>C</sup>, 九大院理<sup>D</sup>, 理研<sup>E</sup> 河野宏明<sup>A</sup>, 開田丈寛<sup>B</sup>, 高橋純一<sup>C</sup>, 八尋正信<sup>D,E</sup>

量子色力学 (QCD) の相図の研究は、素粒子・原子核物理学だけでなく宇宙論や天体物理学の観点からも重要な研究課題である。しかし、高バリオン密度状態においては、格子 QCD 計算による統計力学的計算は、符号問題という難問を抱えており、計算が進展していない。近年、 $Z_3$  対称性を保つ  $Z_3$ -QCD においては符号問題が弱い可能性がある事が指摘された [1,2]。この  $Z_3$ -QCD は、零温度極限で通常の QCD と一致するので、その有限密度における相図の研究は興味深い。ここでは、 $Z_3$ -QCD の位相クエンチ近似における有限化学ポテンシャルでの計算について報告する。この計算結果は、有限アイソスピン化学ポテンシャルにおける状況に対応するが、再重み法の使用によって、有限クォーク数化学ポテンシャルにおける結果を導く事が期待できる。

#### 参考文献

- [1] T. Hirakida et al., Phys. Rev. D **94**, 014011 (2016), arXiv:1604.02977.
- [2] T. Hirakida et al., Phys. Rev. D **96**, 074031 (2017), arXiv:1705.00665.

## E-16

### 5次元ゲージ理論による Early Dark Energy の実現

九大院理<sup>A</sup>, 九大基幹<sup>B</sup> 大久保勇利<sup>A</sup>, 小島健太郎<sup>B</sup>

近年、CMB+ $\Lambda$ CDM モデルから求められるハッブル定数の値と超新星などを観測する局所的な実験によって決定される値とが大きく異なっていることが指摘されている。この不一致は  $\Lambda$ CDM モデルを超える新物理の可能性を示唆している。先行研究において、物質優勢期に宇宙の全エネルギー密度の数%を占めるダークエネルギー (DE) を与えた後、エネルギー密度が物質よりも早く減衰するような要素が存在すればハッブル定数の不一致が解決される可能性が指摘された。このように物質優勢期に全エネルギー密度の数%を占めるような DE を Early Dark Energy (EDE) と呼ぶ。本研究では、標準模型を超えるような物理から生じるクインテッセンスが EDE を与える可能性を検討する。標準模型からの単純な拡張として 5次元のゲージ理論を考え、状態方程式やエネルギー密度の定量的な評価に基づいて、理論に含まれる要素が EDE を与える可能性を議論する。

## E-17

### 非最小結合インフレーションにおけるスペクトル指数とテンソル・スカラー比の一般的な予言

佐賀大理工<sup>A</sup> 兒玉樹<sup>A</sup>, 高橋智<sup>A</sup>

インフラトン場が重力と非最小結合した一般的なインフレーションモデルにおけるスペクトル指数とテンソル・スカラー比の予言について議論する。Jordan フレームのポテンシャルと非最小結合の関数形の関係によって、スペクトル指数、及び、テンソル・スカラー比の振る舞いがどのように変わるのか具体的なモデルで調べた。インフレーションモデルとして、ケイオティックインフレーション、ナチュラルインフレーションなどを考え、また非最小結合の関数形として冪型を仮定して解析を行った。インフラトン場のポテンシャルと非最小結合の関数形の間関係によって非最小結合の大きさを変えた時、スペクトル指数とテンソル・スカラー比の振る舞いがどのように変化するかを系統的に調べた。ある特定の関係式を満たす場合、非最小結合を大きくしていくと、アトラクターになっていることを具体的に議論する。さらに、どのようなタイプの非最小結合インフレーションモデルが現在の宇宙背景放射などの観測からの制限と整合するかについても議論し、インフレーションモデルの構築に対する示唆についても議論する。

## E-18

### バリオン音響振動とビックバン元素合成における $H_0$ 問題

佐賀大学<sup>A</sup>, 高エネ研<sup>B</sup> 岡松郁弥<sup>A</sup>, 関口豊和<sup>B</sup>, 高橋智<sup>A</sup>

ハッブル-ルメートル定数  $H_0$  は宇宙論において基本的なパラメータであり、様々な観測により測定されている。例としては、宇宙背景放射 (CMB) の観測である Planck 衛星のデータを用いることにより、 $H_0 = 67.36 \pm 0.54$  km/s/Mpc (Planck collaboration A&A 641,A6(2020)) と測定されている。一方、ハッブル望遠鏡を用いた宇宙の距離はしご (年周視差 + セファイド変光星 + Ia 型超新星 を組み合わせられた距離の精密測定) に基づけば、 $H_0 = 73.5 \pm 1.4$  km/s/Mpc (Riess, Nature Rev.Phys. 2 (2019) 1, 10-12) となっている。CMB から決定された  $H_0$  と、距離はしごから直接測定された  $H_0$  の間には、統計的に有意な相違が存在する。これを、「ハッブル-ルメートル定数問題 ( $H_0$  問題)」と言う。

バリオン音響振動 (BAO)、Ia 型超新星 (SNeIa)、ビックバン元素合成 (BBN) などのデータを用いて、 $\Lambda$ CDM モデル、ダークエネルギーの状態方程式  $w = \frac{p_{DE}}{\rho_{DE}}$  を変化させる  $w$ CDM モデル、曲率密度パラメータを変化させる  $\Omega_k$   $\Lambda$ CDM モデル、ダークエネルギーの状態方程式が時間変化するモデル、 $N_{\text{eff}}$  (ニュートリノの世代数) を変化させたモデルなどを仮定し、 $\Lambda$ CDM を拡張したモデルにおける  $H_0$  問題について議論する。

## E-19

### パイオンを含む EOS における中性子星の熱的進化

九大理<sup>A</sup>, 理研 iTHEMS<sup>B</sup>, 新疆大<sup>C</sup>, 久留米工大<sup>D</sup> 土肥明<sup>A,B</sup>, Helei Liu<sup>C</sup>, 野田常雄<sup>D</sup>, 橋本正章<sup>A</sup>

中性子星は、超新星爆発によって誕生した後、主にニュートリノによって冷えていくが、その冷え方は不定性の大きい、内部構造を表す状態方程式 (EOS) に大きく依存する。特に、典型的な冷却タイムスケールであるおよそ 100 歳前後の中性子星が急激に冷えているか否かが重要で、これまでに半径が小さい (あるいは、核物質の対称エネルギーが低い) EOS ではそうした急激な冷却 (核子 Direct Urca) プロセスが起こらない可能性が提示されている。しかし、そのような EOS では、観測されている低温の中性子星を再現することができないため、核子 Direct Urca プロセス以外の急激な冷却プロセスが必要と考えられる。そのため、主にエキゾチックな粒子が関わるニュートリノ放射プロセスが起こっている可能性が示唆されるが、エキゾチックな粒子が存在することで EOS が柔らかくなるため、観測されている 2 倍の太陽質量を支えられない可能性が大いにある (ハイペロンパズル)。本研究では、エキゾチックなニュートリノ放射プロセスとして、パイオン凝縮により発生するパイオン Urca プロセスを考え、EOS にもパイオン凝縮効果を取り入れて冷却シミュレーションを行った。その結果、対称エネルギーが低い EOS にパイオン凝縮効果をいれたモデルでは、観測されている 2 倍の太陽質量のみならず、もしコアに存在する中性子の超流動効果が大きい場合には単独中性子星の表面温度の観測値に関しても再現できる事がわかった。そのため、中性子星内部の対称エネルギーが低い場合、パイオン凝縮相が存在する可能性が大いに期待される。

## E-20

### リンドラー時空とカスナー時空の重力波の Unruh 効果

広島大学<sup>A</sup>, 九州大学<sup>B</sup>, 立教大学<sup>C</sup> 杉山祐紀<sup>A,B</sup>, 小林努<sup>C</sup>, 山本一博<sup>B</sup>

本研究ではカスナー時空とリンドラー領域における重力波の解を Regge-Wheeler ゲージを用いて導出した。また、リンドラー領域の解は解析接続によってカスナー時空の解から得られることを示した。さらに、これらの解析に基づいて、量子重力波の Unruh 効果について議論した。

## E-21

### 重力による粒子間の量子もつれとデコヒーレンス

九州大学<sup>A</sup> 三木大輔<sup>A</sup>, 松村央<sup>A</sup>, 山本一博<sup>A</sup>

量子重力に関して、多くの理論的研究が行われてきたが、いまだ確立した理論はない。これは実験による検証の欠如が一つの要因となっているが、近年の量子技術の発展を契機に、量子もつれを利用した重力の量子性を検証するための実験モデルが提案された。これは量子もつれが量子的な操作によってのみ生成される性質を利用しており、重力相互作用により量子もつれが生成されるならば、重力は量子的であると言える。

本講演では、提案された実験モデルの一つ [1] を多粒子系に拡張し、重力による量子もつれの生成について議論する。N 個の粒子を直線状に並べ、各粒子は空間的に離れた位置の重ね合わせ状態に用意する。この粒子系について、私たちはある 2 つの粒子に着目し、その粒子の間の量子もつれを評価する。この 2 粒子間の量子もつれは初期に生成されるが、他の粒子との重力相互作用により次第に喪失していく。これは重力によるデコヒーレンスとして特徴づけられ、このデコヒーレンスの特徴的な時間スケールについても議論する [2]。

[1] H. Chau Nguyen and F. Bernards, Eur. Phys. J. D 74, 69 (2020)

[2] D. Miki, A. Matsumura, and K. Yamamoto, arXiv:2010.05159 [gr-qc]

## E-22

Vacuum angle is a marginal parameter

阪大理<sup>A</sup>, 九大理<sup>B</sup> 北沢正清<sup>A</sup>, 鈴木博<sup>B</sup>

By employing the so-called gradient flow in lattice gauge theory, it is possible to draw the Wilsonian renormalization group (RG) flow in gauge theory in fully gauge-invariant and nonperturbative fashion. We use this idea to illustrate that the vacuum angle in pure Yang-Mills theory is a marginal parameter, which does not change under the RG transformation.