
会場 F

素粒子実験, 実験核物理領域

F-1

ベータ遅延中性子測定のための中性子検出器の開発と性能評価

九大理^A, 阪大理^B, QST^C 岸本侃己^A, 西畑洗希^A, 小田原厚子^B, 篠原悠介^A, 横田望海^A, 大上能弘^B, Nurhafiza Mohamad Nor^B, 下田正^B, 市川雄一^A, 若狭智嗣^A, 北川淳志^C, 佐藤眞二^C

中性子数が 20 付近の中性子過剰核は、中性子魔法数 20 の消失など特異な構造の出現が示唆され、その出現機構の解明に向けて様々な実験・理論的研究が行われている。このような中性子過剰核では、中性子分離エネルギーが低くなり、中性子非束縛状態となる。そのため、中性子過剰核の核構造をより詳細に知るためには、中性子非束縛状態の観測が必要不可欠である。我々のグループでは、中性子数 20 付近の中性子過剰核の中性子非束縛状態の観測を目指し、低エネルギーから高エネルギーまで幅広いエネルギー (0.1 ~ 5 MeV) に対応した中性子検出器の開発を行っている。現在、プロトタイプが完成し、その性能評価実験を放出中性子エネルギーが既知の不安定核 ^{16}C 、 ^{17}N 、 ^{18}N のベータ遅延中性子崩壊を用いて行った。実験は、量子科学技術研究開発機構の HIMAC の 2 次ビームライン SB2 にて行った。本講演では、プロトタイプを含めた 3 種類の中性子検出器の性能評価実験とその結果について報告する。

F-2

p - ^{12}C 弾性散乱を用いた陽子偏極度計の性能評価

九大理^A, RCNP^B 山下渉^A, 若狭智嗣^A, 西畑洗希^A, 梶原孝文^A, 荒殿和希^A, 田中裕典^A, 谷本昂平^A, 長尾陽平^A, 山本陽介^A, 岸本侃己^A, 安藤蒼太^A, 篠原悠介^A, 横田望海^A, 竹中京平^A, 小林信之^B, 吉田英智^B, 大田晋輔^B

原子核を構成する核子や相互作用に関わる中間子は、自由空間と原子核媒質中ではその性質の相違が示唆されている。2核子間にはたらく核子・核子間 (NN) 相互作用は原子核媒質中では変化している可能性があり、これらを総称して核媒質効果と呼ぶ。我々のグループでは、NN 相互作用に対する核媒質効果を実験的に測定する手段として、偏極陽子を用いた ($p, 2p$) 反応のスピンの観測の完全測定を目指している。この反応は核媒質中における NN 散乱であり、完全測定によりその散乱振幅を実験的に決定することができる。完全測定には後方散乱陽子の偏極度測定が必要であり、そのための焦点面偏極度計 (2nd-FPP) の開発を行っている。2nd-FPP は 6 層 15 枚のプラスチックシンチレータで構成されており、入射陽子の 2 回散乱 (偏極分析) 標的であると共に散乱陽子の位置やエネルギーを検出する役割を持つ。先行研究から位置分解能が不十分であることが分かっており、今回、Multi Wire Drift Chamber (MWDC) を新たに 4 台導入することで、位置分解能の大幅な向上による偏極度計の性能向上を目指した。MWDC 導入による性能向上を確認するため、大阪大学核物理研究センターにて 65 MeV 陽子を用いた実験を行った。65 MeV 陽子を炭素標的に照射し、LAS スペクトロメータにて散乱角 45° の弾性散乱陽子を選択して 2nd-FPP に入射した。弾性散乱陽子の偏極度は約 0.99 であるので、これにより 2 回散乱の非対称度測定から有効偏極分解能の導出が可能となる。本講演では、MWDC を用いた飛跡の再構成による位置分解能の向上や、それによるシンチレータにおける p -C と p - p 弾性散乱の分離能の変化、ならびに有効偏極分解能などについて議論する。

F-3

$^3\text{H}(t, ^3\text{He})3n$ 反応による 3 中性子系探索に向けた中性子測定系の開発

九大理^A, 理研仁科セ^B, 東北大理^C, 東大 CNS^D, 富山大水素研^E, 京大理^F, 阪大理^G, 宮大工^H, 北京大^I, IBS^J 横田望海^A, 若狭智嗣^A, 西畑洗希^A, 岸本侃己^A, 米村千恵子^A, 笹野匡紀^B, 三木謙二郎^C, 今井伸明^D, 上坂友洋^B, 浦山廉^C, 大田晋輔^D, 亀谷晃毅^C, 竹田浩之^B, 波多野雄治^E, 羽場宏光^B, 早水友洋^B, 原正憲^E, 道正新一郎^D, 他 RIBF-SHARAQ11 collaboration^{A,B,C,D,E}, 他 RIBF-SHARAQ11 collaboration^{F,G,H,I,J}

三核子間力とは、三核子間において二核子間力の和で表せない力を意味し、中性子過剰核の存在限界 (ドリップ線) や中性子星の状態方程式 (半径と質量の関係) を理解するために本質的な役割を果たすとして、近年実験・理論の双方から注目されている。これまでは、三核子系として d - p 散乱を用いて三体核力の研究が精力的に行われてきたが、この系はアイソスピン T が $1/2$ に制限される。中性子過剰核や中性子星の研究においては $T = 3/2$ の情報が必要であるが、これについては四核子系の p - ^3He 散乱を用いた実験が最近進展しつつある。

我々は、 $T = 3/2$ 三核子間力の情報を最もシンプルに探索できる系として、3 中性子系 $3n$ に着目し、トリチウムを標的とした $^3\text{H}(t, ^3\text{He})3n$ 反応により生成・測定するプロジェクトを東北大学、東大 CNS 等と共同で進めている。実験は理化学研究所 RI ビームファクトリーにて行われた。九州大学グループは、 $3n$ からの崩壊中性子を測定する中性子測定系を担当しており、測定系は標的周りに設置された 2 台の有機液体シンチレータから構成される。

本講演では、中性子測定系を中心とした実験セットアップ、および中性子測定系の較正やシミュレーションとの比較について報告する。

F-4

分散整合二回散乱法による ^{99}Zr アイソマー状態のスピン整列

九大理^A, 理研仁科セ^B, IJCLab^C, 阪大理^D, 立教大理^E, Université Paris-Saclay^F 篠原悠介^{A,B}, 市川雄一^{A,B}, 郷慎太郎^B, 西畑洗希^{A,B}, 安藤蒼太^{A,B}, 旭耕一郎^B, 馬場秀忠^B, 福田直樹^B, G.Georgiev^{B,C}, A.Gladkov^B, 今村慧^B, 岸本侃己^{A,B}, R.Lozaeva^{B,C}, 向井もも^B, 新倉潤^B, N.M.Nor^{B,D}, 小田原厚子^D, 清水陽平^B, M.Si^{B,C}, K.Stoychev^C, 鈴木宏^B, 田島美典^B, 高峰愛子^B, 竹田浩之^B, 武重祥子^{B,E}, 田中聖臣^B, 梶野泰宏^B, 上野秀樹^B, 若狭智嗣^A, 山下渉^{A,B}, 山崎展樹^B, 吉本雅浩^B, J.M.Daugas^{B,F}

スピン整列 RI ビームは、不安定核の励起状態の核モーメント測定によりエキゾチックな核構造を研究する上で有効な手段の一つである [1, 2]。中性子過剰な Zr 同位体では中性子数が 58 と 60 の間で基底状態における突然の変形発現が報告されている [3]。さらに、近年行われた中性子数 59 の ^{99}Zr の $7/2+$ アイソマー状態の磁気モーメント測定では、 $7/2+$ 状態が単一粒子的性質ではなくむしろ集団的性質を持つことが示唆され、励起状態においても変形が発現している可能性が報告された [4]。 ^{99}Zr の $7/2+$ アイソマー状態において示唆されている変形を直接的に確認するため、当該状態の電気四重極 (Q) モーメント測定を理研 RIBF にて行った。本実験では分散整合二回散乱法を用い、一次ビーム ^{238}U から ^{100}Zr を経て ^{99}Zr のアイソマー状態を生成した。本実験で実現したスピン整列度は、外部磁場下での時間微分摂動角分布法によって磁気モーメントと共に決定した。本講演では、本実験での測定手法と得られたスピン整列、磁気モーメントに焦点を当てて報告する。[1] Y. Ichikawa et al., Nature Phys. 8, 918 (2012). [2] Y. Ichikawa et al., Nature Phys. 15, 321 (2019). [3] P. Campbell et al, Phys. Rev. Lett. 89, 082501 (2002). [4] F. Boulay et al., Phys. Rev. Lett. 124, 112501 (2020).

F-5

EDM 測定に向けた核スピンメーザーの開発

九大理^A, 東工大科技創成^B, 理研仁科セ^C 安藤蒼太^A, 市川雄一^A, 佐藤智哉^B, 篠原悠介^A, 西畑洗希^A, 若狭智嗣^A, 岸本侃己^A, 山下渉^A, 横田望海^A, 立川柊平^A, 竹中京平^A, 梶原孝文^A, 荒殿和希^A, 郷慎太郎^C, 高峰愛子^C, 上野秀樹^C, 旭耕一郎^C

標準模型を超える CP 対称性の破れを探索するため、我々は反磁性原子である Xe の永久電気双極子モーメント (EDM) の探索を行っている。本研究では、核スピンメーザーの手法を用いて電磁場印加中の Xe 原子の歳差周波数を精密に測定する。

核スピンメーザーは歳差運動を半永久的に維持する機構であり、長時間測定により高い周波数決定精度を達成することができる。本研究で用いる核スピンメーザーは、異核種同位体 ^{129}Xe と ^{131}Xe を用いることにより、同位体間での EDM 差分の検出を狙うと同時に、互いが共存磁力計としても働くシステムとなっている。

現在、EDM 測定に向けた異核種核スピンメーザー装置を九州大学に構築している。本講演では、Xe 同位体 (^{129}Xe , ^{131}Xe) 原子を封入したガラスセルを使用し、 ^{129}Xe , ^{131}Xe それぞれの原子においてパルス NMR 法を用いた自由誘導減衰測定、そしてメーザー発振の測定および評価について発表する。

F-6

磁場を用いた中性子寿命精密測定実験の検出器アップグレードと性能評価

九大理^A, 高エ研^B, 九大 RCAPP^C, 名大 KMI^D 星野公邦^A, 市川豪^B, 音野瑛俊^C, 北口雅暁^D, 角直幸^B, 谷田征輝^A, 細川律也^C, 槇田康博^B, 三島賢二^B, 吉岡瑞樹^C

自由中性子は陽子・電子・反電子ニュートリノの3体へ β 崩壊し、その寿命はおおよそ15分であることが知られている。中性子寿命は素粒子物理学や宇宙論において重要なパラメータの1つであるが、現在その値は2つの測定手法、「ビーム法」と「貯蔵法」の間で異なっており、 4σ を超える乖離が見られる。

現在我々は従来のビーム法とは異なり、入射中性子数と β 崩壊により生じた電子数を同時計測する手法による測定をJ-PARCのMLF/BL05にて行なっている。この実験では β 崩壊による信号事象と、ガス検出器の動作ガスに散乱された中性子に起因する背景事象の区別が困難であることが問題となっている。この背景事象は、中性子が検出器の壁面に吸収されて γ 線を放出する(n, γ)反応を起こし、更に γ 線が壁面と衝突して放出される電子により生じる。

そこで我々は中性子のビーム軸方向に磁場を印加することでローレンツ力により信号領域への背景事象の漏れ込みを抑制する新たな実験を計画している。本発表ではこの実験の物理測定に向けた検出器 (TPC: Time Projection Chamber) のアップグレードとその性能評価について発表する。

F-7

国際リニアコライダーにおける2-fermion測定による新物理探索の研究

九州大学^A 永江航志^A, 末原大幹^A, 川越清以^A, 吉岡瑞樹^A

国際リニアコライダー (ILC, International Linear Collider, ILC) は岩手県北上山地に建設予定の電子陽電子直線型加速器であり、ヒッグス粒子精密測定などを目的として世界各地の研究者たちが共同で研究および開発を行なっている。現在初期段階で全長は20 km、重心系エネルギーは250 GeVで実験ができるように計画されている。電子陽電子衝突によるフェルミオンペアの生成過程は重いゲージボソンの生成に感度がある。LHCでは直接重い粒子によるピークを根拠に新粒子を見つけるのに対して、ILCでは重い粒子によって生じる標準模型からのずれを観測し、間接的に新粒子の存在を示すことができる。本研究では、重心系エネルギーが500 GeVのILCが重いゲージボソンなどの新物理の間接探索を行えるかを評価した。今回用いたデータはiLC Softを用いて生成された検出器フルシミュレーションデータであり、ヒット位置やエネルギーなどの情報が紐づけられている。その内の一部を用いて μ や τ のフェルミオンペアごとにシグナルと背景事象を弁別し、新物理探索が行えるかの評価を行った。本発表ではその結果について報告する。

F-8

国際リニアコライダー計画における深層学習を用いたシャワークラスタリングアルゴリズムの開発

九大理^A, 九大 RCAPP^B, 阪大 IDS^C 津村周作^A, 末原大幹^A, 川越清以^A, 吉岡瑞樹^B, 長原一^C, 中島悠太^C, 武村紀子^C

国際リニアコライダー (ILC, International Linear Collider) は岩手県北上山地に建設予定の電子陽電子直線型加速器であり、ヒッグス粒子精密測定などを目的として世界各地の研究者たちが共同で研究および開発を行なっている。その一環として、検出器を用いて得られたデータの解析などを行う ILC ソフトウェアの開発が行われている。現在の ILCSoft ではシャワークラスタリングには人の手により定められた閾値によるデータの選定を行う手法が用いられている。近年、このような人力による手法に対して機械学習を活用された手法の方が精度の観点で大きく改善が見られた結果が確認されており、機械学習に対して注目が集まっている。特に、ILC の測定器は Particle Flow Algorithm(PFA) と呼ばれる手法を用いてエネルギーを分解能良く測定することを可能としており、この手法は非常に多数のチャンネル読み出しを利用しているため、大量のデータ解析に適した深層学習技術と相性が良い。シャワークラスタリングはこの PFA の一部として PandoraPFA と呼ばれるフレームワークの中で実装されており、本研究では Graph Neural Network と呼ばれる深層学習技術の一つを用いて精度向上を試みている。この手法は Large Hadron Collider(LHC) における CMS 計画において先行研究が行われているものであり、シミュレーションで生成されたシャワーに対するクラスタリングにおいて十分な精度を達成したという実績がある。本研究ではそのネットワーク手法の PFA に対する実装と最適化を目的とする。ネットワークは与えられたカロリメータのヒットから、各ヒットの特徴を距離として表現された空間によって学習し、それぞれのヒットがどれだけそのクラスターらしいかを表す値を出力する。今回、1600 イベントのカロリメータシミュレーションのデータを用意し、学習を行なったところ、損失関数の低減が見られ、適切に学習が進んでいることが確認できた。定量的にネットワーク性能の評価を行うために、マッチングにより各クラスターラベルとネットワークにより予測されたヒット ID を関連づけた。本発表ではその結果や今後の展望について報告する。

F-9

太陽電池検出器のエネルギー・時間分解能および放射線耐性の評価

九大理^A, 高エネルギー加速器研究機構^B, 九州大学超重元素研究センター^C, 九大院理^D, 原子力研究機構^E 松浦開^A, 能見幹都^A, 庭瀬暁隆^B, 森田浩介^{C,D}, 長江大輔^C, 坂口聡志^{C,D}, 甲斐民人^D, 富松太郎^D, 永田優斗^D, 武藤大河^D, 杉山晃一^D, 松永壮太郎^D, 鄭 淳讚^B, 浅井雅人^{C,E}

アクチノイド核の核分裂には核分裂片の質量数がほぼ等しい対称分裂と、それらが大きく異なる非対称分裂があるが、これらは核子数の僅かな違いで急激に遷移するとされている。また、中性子過剰アクチノイド核の核分裂に対する安定性は、超ウラン核合成の起源である r-process と密接な関係があり、広く興味の対象となっている。核分裂片などの重イオンの検出においてはシリコン検出器が一般的に用いられるが、シリコン検出器は放射線損傷によって性能が低下することが知られている。その問題を解決する手段として、太陽電池検出器が注目されている。太陽電池検出器はシリコン検出器と同様に半導体ダイオードであり、空乏層に放射線が入射した際に生成される電子正孔対を収集することでエネルギー・時間の情報が得られる。特長としては極めて安価で、自由な大きさ・形状に加工ができる。また、放射線耐性に優れるとされているが、具体的なデータは乏しい。そこで我々は、太陽電池検出器とシリコン検出器の放射線耐性を評価し比較するためのビーム照射実験を行った。実験では九州大学のタンデム加速器を用いて、66 MeV, 3 kcps の ¹²⁷I ビームを太陽電池検出器とシリコン検出器に 2 時間直接照射した。ビーム照射によってエネルギースペクトルのピークがシフトするか、エネルギー分解能が悪化するかを調べた。また同時に、時間分解能の評価、長時間の照射、異なる大きさの太陽電池検出器の比較なども行った。その結果、太陽電池検出器はシリコン検出器と比較して、エネルギースペクトルピークシフトやエネルギー分解能の悪化が極めて小さく、放射線耐性に優れていることが分かった。このことから、高バックグラウンド条件下での核分裂片測定にも有用であるといえる。本講演では、主に太陽電池検出器とシリコン検出器のエネルギースペクトルの時間変化による放射線耐性の評価・比較について紹介する。

F-10

Excitation energy dependence of fission of ^{258}Md produced by $^4\text{He} + ^{254}\text{Es}$ reaction

九大院理^A, 原子力機構^B, Univ. of York^C, 東北大院理^D, Oak Ridge National Laboratory^E
松永壮太郎^A, 坂口聡志^A, 廣瀬健太郎^B, 西尾勝久^B, 浅井雅人^B, A.N. Andreyev^{B,C}, 石橋優一^A,
伊藤由太^B, 岩佐直仁^D, 恵下田美樺^D, R. Orlandi^B, 佐藤哲也^B, 洲崎ふみ^B, J. Smallcombe^B, 塚田和
明^B, 牧井宏之^B, K.P. Rykaczewski^E

我々は新元素の発見及び安定の島の探索に向けて核融合・核分裂のメカニズムを解明するための研究を進めている。アクチノイド原子核領域の核分裂においては、対称分裂と非対称分裂のどちらが優位であるか、質量数 $A=257$ を境に核子数のわずかな変化によって急激に変化する。また一般的には、原子核の励起エネルギーの増加とともに対称分裂の成分が大きくなることが確認されている。

これらの現象を解明するために、まだ調べられていない核種の核分裂特性を系統的に明らかにする必要がある。日本原子力研究開発機構では、米国 ORNL の High Flux Isotope Reactor で製造された 99 番元素アインスタイニウム同位体 ^{254}Es (半減期 276 日) を入手し、 ^{254}Es 近傍核の核分裂特性を調べる実験が可能となった。

実験は原子力開発機構タンデム加速器にて行なった。 ^4He ビームを ^{254}Es 標的に照射して複合核 ^{258}Md を合成し、この ^{258}Md が核分裂を起こした際に放出される核分裂片を検出した。核分裂片は、対をなす多芯線比例計数管 (Multi Wire Proportional Counter, MPWC) で検出した。マイクロチャンネルプレートを用いた MCP-TOF 検出器との間の核分裂片の飛行時間の測定から 2 つの核分裂片の速度を求め、核分裂片の質量数と全運動エネルギーを導出した。また ^4He ビームのエネルギーを変化させ、励起エネルギーに対する核分裂特性の変化を調べた。

本講演では、 ^{258}Md の核分裂特性に関する実験の詳細と解析の現状を報告する。

F-11

APD による加速 α 粒子の直接検出

九大理^A 小谷基樹^A, 寺西高^A, 田中久登^A, 松永琳太郎^A, 松本泰知^A

現在我々は、天体におけるトリプルアルファ反応率の決定に必要なパラメータの一つである ^{12}C 第二励起状態の放射崩壊分岐比を $^{12}\text{C}(\alpha, \alpha_2)^{12}\text{C}^*$ 反応により精密に決定する実験を計画しており、その際、数 MeV 程度の反跳 ^{12}C 用の検出器として、リバース型のアバランシェフォトダイオード (APD) を使用することを検討している。リバース型 APD は表面から深さ数 μm の位置に増倍層があるため、飛程の短い ^{12}C に対して大きな波高を生み出すことが期待されており、バックグラウンドとなる散乱 α 粒子に対する ^{12}C の弁別が通常の半導体検出器の場合と比較して容易になる可能性がある。

光検出器として製造されている APD を低エネルギー荷電粒子の直接検出に用いた研究例は過去にほとんどない。そこで我々は昨年度の子備研究において、 ^{241}Am α 線 (5.5 MeV) および九州大学タンデム加速器による 3–24 MeV の ^{12}C に対する APD の応答を測定し、5–6 MeV 程度の ^{12}C に対して大きな増倍率が得られることを見出した。本研究では新たに、タンデム加速器による 10, 15, 20 MeV の α 粒子に対する APD の応答を測定した。本講演では、APD の増倍率の粒子およびエネルギー依存性の結果をまとめ、 $^{12}\text{C}(\alpha, \alpha_2)^{12}\text{C}^*$ 実験における、APD による ^{12}C と α 粒子の弁別について議論する。