平成 28 年度

京都大学大学院理学研究科

修士課程

修士論文アブストラクト

(平成29年2月2日、3日)

物理学第二分野

修士論文発表会

日 時 平成29年2月2日(木)9時~ 2月3日(金)9時~ 場 所 理学研究科5号館 525号室 発表時間 15分+5分(質問)

《目 次》

2月2日(木)

1. LHC-ATLAS実験Run-3に向けたミューオントリガー 赤塚 駿一(9:00) の改良 2. ニュートリノ中性カレント反応精密測定のための 芦田 洋輔(9:20) 核子・酸素原子核反応に関する研究 方向感度を持った暗黒物質探索のための 石山 優貴(9:40) 3. 高圧キセノンガス中での再結合現象の研究 4. 次世代X線天文衛星搭載に向けた裏面照射型 SOI 伊藤 真音(10:00) ピクセル検出器の軟 X 線感度の改善 5. すざく衛星による狭輝線セイファート1型銀河の 大村 峻一(10:20) 広帯域観測 木村 燎平(10:40) 6. ¹¹Bの2α+tクラスター構造に関する研究 7. LEPS2実験に用いるTime Projection Chamber(TPC) 小早川 亮(11:00) の性能評価 8. 行列模型及び非可換幾何に内包される重力理論の 酒井 勝太(11:20) 探索

9.	(p, ² He)反応を用いたπ中間子原子分光のための イオン光学系の開発	阪上	朱音(11:40)		
••••	••••••午 後••••••	•••••			
10.	XeガスTPCを用いたニュートリノレス二重β崩壊探 索実験AXELのための高エネルギー分解能読み出 し回路の開発	田中	駿祐(14:00)		
11.	次世代ガンマ線天文台CTA 大口径望遠鏡初号機 搭載用GHz 波形サンプリング回路の性能評価	谷川	俊介(14:20)		
12.	有限体積効果を用いたハドロン共鳴の複合性の 研究	土田	裕次郎(14:40)		
13.	ドジッター背景時空上における赤外効果の統計的 性質	徳田	順生(15:00)		
14.	陽子内部におけるグルーオンの軌道角運動量の 測定方法	中川	裕也(15:20)		
15.	宇宙論解における重力的メモリー効果と時空の 漸近的対称性	中谷	侑司(15:40)		
16.	T2K実験のためのJ-PARC MRにおける多電極 ビームモニターの開発	中西	芳枝((16:00)		
2月3日(金)					
17.	MeVガンマ線望遠鏡に向けた高エネルギー分解能 MPPCシンチレーションカメラの開発	中増	勇真(9:00)		

18. S-2S電磁石の磁場測定と運動量分解能 七村 拓野(9:20)

19.	Toward Fast Radio Burst Cosmology:Dispersion Measure Distribution	西岡	新平(9:40)			
20.	LHC-ATLAS実験のミューオントリガーにおける 飛跡再構成アルゴリズムの改良	野口	陽平(10:00)			
21.	ニュートリノ反応測定実験に用いる高位置分解能 Scintillating Fiber Trackerの開発	平本	綾美(10:20)			
22.	ホログラフィックQCDにおけるHダイバリオンの研究	松本	滉平(10:40)			
23.	MAIKoアクティブ標的のアップグレードと性能評価	森本	貴博(11:00)			
24.	Moduli stabilizationとPoly-instanton効果による インフレーション	山本	順二(11:20)			
25.	リングダウン重力波を用いた一般相対性理論の検証	山本	貴宏(11:40)			
••••••						
26.	運動学的スニヤエフ・ゼルドヴィッチ効果を用いた 宇宙論的ベクトルモードの検出可能性	山本	久司(13:00)			
27.	MeVガンマ線望遠鏡ETCCにおける新トリガー方式 の開発と不感時間削減	吉川	慶(13:20)			

LHC-ATLAS 実験 Run-3 に向けたミューオントリガーの改良

高エネルギー物理学研究室 赤塚駿一

Abstract The ATLAS Level-1 muon trigger will be upgraded to cope with the higher luminosity expected in LHC Run-3. We have developed a new trigger decision board, with the latest FPGA and high-speed transceiver interface, to make trigger decision using information from two detectors: TGC, and a new inner detector, NSW. © 2017 Department of Physics, Kyoto University

LHC は欧州原子核研究機構(CERN)に設置された陽子-陽子衝突型加速器である。ATLAS 検出器はLHC に設置された大型汎用検出器の一つであり、陽子衝突により発生する粒子を計測する。衝突により発生した未知の新粒子の崩壊を捉える、あるいはヒッグスボソンやトップクォーク等の標準理論粒子の精密 測定により、標準理論を超える新物理の発見を目指す。

LHCにおける陽子-陽子衝突の頻度は40 MHz であるが、ATLAS 実験では記録レートの制限のため全事象 を記録することはできない。そのため、物理として重要な事象を選択(トリガー)し、データを取得する必要 があ s る。本研究で扱うミューオントリガーは、ミューオンの横運動量に閾値を設けることで W ボソンの 崩壊等による高運動量ミューオンを終状態に含む事象を選択する。トリガーは2段階に分けて行われ、初段 のレベル1トリガー(L1)では全事象に対しトリガー判定を行う。ここでは2.5 µs 以内に 100 kHz 以下までイ ベントレートを落とす、という厳しい制約がある。このため、L1 は高速処理が可能なハードウェアベース で実装されている。

LHC は 2018-2021 年に加速器の改良を行い、重心系エネルギーを 14 TeV に、瞬間ルミノシティを現 在の約 2 倍の 3×10³⁴ cm⁻²s⁻¹ に増加させ運転を再開する(LHC Run-3)。ルミノシティが増加する一方で、 L1 トリガーレートに対する制約は変わらない。重要な物理事象を最大限有効に集めるために、対象とな る物理事象の取得効率を維持したまま、2 倍のバックグラウンド除去率が達成可能な新しい L1 トリガ ーの開発が緊急課題である。私は、現行のトリガー検出器 TGC と、内層に導入される新検出器 New Small Wheel (NSW)の情報を組み合わせるトリガー判定ロジックの有用性に注目した(Fig.1)。NSW は Run-3 で 新たに導入される検出器で、~100 µm の位置分解能と~1 mrad の角度分解能を持つ[1]。NSW からの情報 を用いた新しい L1 トリガー実現のために、以下の 2 つの研究を遂行した。

 Run-3 ミューオントリガー判定ボード New Sector Logic (NewSL)の開発とファームウェアのデザイン 新ロジックの実装のため、開発した NewSL には 10Gb/s の高速シリアル通信を実装した最新の FPGA を用いた。私は NewSL に実装されたチップ及び I/O インターフェイスの試験を行い、Run-3 で要求され

る性能を満たしていることを示した。さらに、Run-3 で NewSL に実装するファームウェアを開発し、これをビーム テストで使用して、①高速シリアル通信で受信した情報を用 いたトリガー判定、②受信したデータの保持・成型・圧縮、 及び TCP/IP での読み出し、の2点に成功した。

・NewSL に実装するトリガーロジックの研究

NSW の位置情報を用いることでトリガーレートを約50% 削減できることはこれまでの研究で確かめられている[2]が、 先行研究では角度情報は単純なカットにしか用いられてい ない。私は、角度情報を用いた新ロジックを発案しその性能 評価を行った。その結果、角度情報を適切に利用するように ロジックを改善することで、改善前に比べさらに最大約10% のトリガーレート削減が可能であることを示した。



Fig. 1. Concept of the Run-3 Muon Trigger

References

[1] T.Kawamoto et al., New Small Wheel Technical Design Report (2013)

[2] ATLAS Collaboration, Technical Design Report for the Phase-I Upgrade of the ATLAS TDAQ System (2013)

ニュートリノ中性カレント反応精密測定のための 核子・酸素原子核反応に関する研究

高エネルギー物理学研究室 芦田洋輔

Abstract The precise cross section of neutrino NCQE interaction is important for the Supernova Relic Neutrino search, and the understanding of secondary- γ production cross section is essential. So we study the secondary- γ production by using the RCNP neutron beam. For this, we studied the detector resolution and n- γ separation performance, and observed the secondary- γ in the RCNP-E465 experiment. © 2017 Department of Physics, Kyoto University

スーパーカミオカンデ (SK) における超新星背景ニュートリノや大統一理論磁気単極子の探索におい て、大気ニュートリノの中性カレント準弾性散乱反応 (NCQE 反応) が主要背景事象となっており、詳 細な理解が必要となっている。そのため、近いエネルギー領域でフラックスが既知の、T2K ニュートリ ノビームを用いた NCQE 反応断面積の測定が行われた[1]が、系統誤差が大きい。その主原因は、NCQE 反応によりノックアウトされた核子の水中酸素原子核との二次反応から放出されるガンマ線 (二次ガン マ線)の断面積に関する不定性である (図 1)。二次ガンマ線と信号である NCQE 反応由来の脱励起ガ ンマ線は SK では識別不可である。そこで我々は、大阪大学核物理研究センター (RCNP)の準単色エ ネルギー高速中性子ビームを用いて、中性子と酸素原子核の反応から放出される脱励起ガンマ線のエネ ルギー・断面積・多重度を測定することにより、NCQE 反応の二次過程を研究する。



Fig.1 Neutrino NCQE Interaction with ¹⁶O and its secondary process by the knock-out nucleon



Fig.2 Energy spectrum measured with the High Purity Germanium (HPGe) detector in the RCNP-E465 experiment

本研究では、二次ガンマ線測定実験に用いる検出器選定のため、種々の候補検出器(NaI(Tl), CsI(Tl), LaBr₃(Ce), BaF₂, HPGe)のエネルギー分解能と検出効率のテストを行った。また、中性子散乱による背景事象が多いと考えられる二次ガンマ線測定に備えて、有機液体シンチレータNE213とCsI(Tl)シンチレータの高速中性子・ガンマ線事象波形弁別能力をテストした。

次に、RCNP-E465 実験において、水標的に高速中性子を照射し、ゲルマニウム半導体検出器 (HPGe) を用いて図2のように励起酸素原子核からの脱励起ガンマ線を観測した。さらに、生成断面積を測定した。また、中性子散乱や熱中性子捕獲由来のガンマ線などビームライン背景事象の測定も行った。

最後に、将来実験の準備として、中性子フラックス測定のための手法決定や中性子シミュレーション、 実験のセットアップや読み出し回路の考案を行った。

References

[1] The T2K Collaboration, Phys. Rev. D 90, 072012 (2014)

方向感度を持った暗黒物質探索のための 高圧キセノンガス中での再結合現象の研究

高エネルギー物理学研究室 石山優貴

Abstract We study a possibility to use a high pressure xenon gas detector for the direction-sensitive dark matter search by measuring the rate of the columnar recombination of ionized electrons. To check the principle, we measure the recombination effect in the high pressure xenon gas. © 2017 Department of Physics, Kyoto University

宇宙に大量に存在すると言われている暗黒物質には謎が多く、世界中で様々な探索実験が行われている。その一つが、暗黒物質自身が原子核を反跳する事象を観測する直接探索である。太陽系は銀河の中で白鳥座の方向に進んでいるため、暗黒物質の到来方向にも偏りがあると考えられている。暗黒物質の到来方向に感度のある手法は暗黒物質の強い証拠となりえ、最近は反跳原子核の飛跡を検出する検出器を用いた実験がなされている。しかし、暗黒物質による反跳原子核の飛跡は短いため低圧ガスを用いたTPC (Time Projection Chamber)を用いており、標的の数が少ないのが難点である。

高密度かつ反跳原子核の方向が分かる検出器として、高圧キセノンガス中での柱状再結合現象を利用 した検出器が挙げられる。キセノンは質量数が大きい原子核であるため、スピンに依存しない散乱断面 積がとても大きく、高圧にする事で暗黒物質によるより多くの事象が期待できる。また、荷電粒子が電 離した電子及びイオンと、印加した電場との角度によって再結合現象の起こる頻度が変わる柱状再結合 現象を利用する事で方向を検出する事も期待できる[1]。

図1上のように飛跡が電場と平行である場合、加速された電子とイオンが出会う頻度が上がるため、 より多く再結合が起こり、シンチレーション光が増えると考えられる。対して、図1下のように飛跡が 電場と垂直である場合は、電子とイオンが出会う頻度が下がり、再結合が少なくなると考えられる。ま た、電場と平行に磁場を印加した場合、電子が磁場に巻きついて運動し、電子とイオンが近づくために 柱状再結合現象が起こりやすくなり、方向感度が上がる事が期待される。

原理の検証実験として、高圧のキセノンガスを封入できるイオンチェンバーと APD を組み合わせた検 出器を製作し、²⁴¹Am 線源からのα線を用いて測定を行った。まず、再結合が起きている事を確認するた めに、電離信号とシンチレーション光の電場依存性を測定し、図2の結果を得た。ここからドリフト電 場が弱いと電離信号が減り、シンチレーション光が増えているため再結合が起きている事が分かる。再 結合の方向依存性については、電離信号の持続時間を利用して解析した。また、ネオジム磁石を入れた 場合も測定し、再結合率がどうなるのかを議論する。



Fig. 1. Schematic view of columnar recombination. The columnar recombination rate may change depending on the track direction against the electric field.

References

[1] D.R.Nygren, J. Phys. Conf. Ser. 460, 012006 (2013).



Fig. 2. Measured scintillation light (left) and ionization (right) yields as a function of electric field.

次世代 X 線天文衛星搭載に向けた 裏面照射型 SOI ピクセル検出器の軟 X 線感度の改善

宇宙線研究室 伊藤真音

Abstract We evaluated the soft X-ray performance of back-illuminated (BI) types of SOI pixel sensors. We found that the dead layer thicknesses of our sensors are ~ 0.5 μ m, which satisfy our requirement of 1 μ m. We also performed TCAD device simulations and successfully reproduced the experimental results. © 2017 Department of Physics, Kyoto University

超新星残骸における Fe、Ni を撮像分光することで超新星の爆発起源に迫ることができる。しかし今 まで Fe-K 輝線周辺のエネルギー帯 (6.4-8.1keV) は明るい天体しか十分に観測できなかった。そこで、 我々は、以上を目的とした次世代 X 線天文衛星「FORCE」に搭載予定である X 線 SOI ピクセル検出器 を開発している。これは SOI (Silicon On Insulator) 技術を用いた厚いセンサー部と高速の CMOS 読み出 し回路を一体化した検出器である (Fig. 1) [1]。各ピクセルにヒットタイミングを出力させるイベントト リガー機能を備えることで、高い時間分解能 (~10 µsec) を得る。これにより、従来の X 線 CCD では不 可能であった反同時計数法を用いて、宇宙線起源である非 X 線バックグラウンドを大幅に抑え、0.5-40 keV にわたる広帯域撮像分光を実現する。

軟 X 線感度を高くするには、X 線入射面の不感層をできるだけ薄くする必要がある。我々の目指す感 度実現において、不感層厚の目標は 0.1 μm、要求値は 1.0 μm である。検出器回路層側(表面)には厚さ 8 μm 程度の回路層があるため、検出器センサー層側(裏面)から X 線を入射させる裏面照射型 (Back-Illuminated: BI)検出器が必要である。BI素子の製造過程で裏面には結晶欠陥が生じ、これに起因 して暗電流が発生する。よって、結晶構造を回復させ暗電流を抑えるだけではなく、薄い不感層を同時 に実現する裏面プロセスを行うことが必須である。我々は、これまでに熱処理の方法が異なる2 種類の 裏面プロセスを施した BI SOI ピクセル検出器を開発した。一つは、ローレンス・バークレー国立研究所 で開発されたイオンインプラント+低温アニール処理 (PZ)[2]を施した素子、もう一つはイオンインプラ ント+レーザーアニール処理 (LA)を施した素子である。PZ と LA ともに、CI (2.6 keV)、Ti (4.5 keV)、 Fe (6.5 keV)、Se (11.2 keV)の特性 X 線を用いた評価を行い、検出効率を見積もった (Fig. 2)[3]。X 線フ オトンカウンティングの実質的な不感層は、裏面プロセスで決まる物理的な不感層だけではなく、空乏 層厚や読み出しノイズに依存する。従って、これらのパラメータの違う素子を使って、軟 X 線性能のパ ラメータ依存性を調べた。以上の結果から、2 種類の裏面プロセスはともに物理的に 0.5 μm 程度の不感 層が存在し、要求値 1.0 μm を達成していることが分かった。さらに得られた不感層厚は TCAD デバイ スシミレーションによって再現でき、裏面感度改善の指針を立てることができた。



Fig. 1. Cross-sectional view of the SOI sensor.



Fig. 2. Quantum efficiency of the BI SOI sensors as a function of X-ray energy.

References

- [1] Y. Arai et al., NIM A 636 (2011) S31. [2] M. Battaglia, et al., NIM A 674 (2012) 51.
- [3] M. Itou et al., NIM A 831 (2016) 55.

すざく衛星による狭輝線セイファート1型銀河の広帯域観測

宇宙線研究室 大村峻一

Abstract We study X-ray emissions from four narrow-line Seyfert 1 galaxies (NLS1s) with Suzaku. We aim to measure high energy cutoff in a power-law component. We find a trend that NLS1s have lower cutoff energies than those of broad-line Seyfert 1 galaxies. © 2017 Department of Physics, Kyoto University

狭輝線セイファート1型銀河(Narrow-Line Seyfert 1 = NLS1)は、活動銀河核(AGN)の中でも可視 光の輝線ドップラー速度幅が狭いという特異な特徴をもち、中心核の超巨大ブラックホール(SMBH)の 質量が小さく、質量降着率が高いと考えられている。これらの性質は、より一般的なセイファート1型 と対極にある。また、AGNからのX線は、全光度の約10%にも及ぶ上に、数日という短い時間変動を持 つことから、SMBH近傍の情報を引き出すには欠かせない。したがって、X線帯域での両者の比較研究は SMBH への質量降着の物理を理解する上で大きな手かがりとなる。さらに、SMBHの成長の初期段階と考 えられており、SMBHと銀河の進化の解明の上で、避けては通れない天体である。

AGN の X 線広帯域のスペクトルには、カットオフをもつ、べき関数成分が存在するが、起源に関して は必ずしも統一的解釈に至っていない。そこで、我々はこの放射メカニズムを解明することを目的に「す ざく」衛星を用いて4つの NLS1 天体(Mrk 110、SWIFT J2127.4+5656、IGR J16185-5928、WKK 4438)に ついて、0.25-40 keV の広帯域観測を行った。べき関数成分は SMBH の周辺に存在する熱的な電子コロナ が降着円盤からの光子を逆コンプトン散乱することで放射されるというモデルがある[1]。我々は、そ のモデルを用いてスペクトルフィットを行った。その結果、Mrk 110、SWIFT J2127.4+5656、WKK 4438 ではコロナの電子温度で決まるエネルギーカットオフが 50 keV 以下に決めることができた。広輝線セ イファート 1 型銀河(Broad-Line Seyfert1 = BLS1)の過去の観測(カットオフエネルギーが約 100 keV[2])に比べ、コロナの温度が低いという結果が得られた(Fig 1)。

我々はコロナの電子温度が、逆コンプトン散乱による冷却と陽子とのクーロン衝突による加熱の釣り 合いによって決まっているという簡単な仮定のもと、コロナの電子温度と光度のエディントン比に



J2127.4+56 and WKK 4438. The green arrow denotes a lower limit of IGR J16185-5928. Data points for BLS1[2] are plotted in gray.

References

[1] Zdziarski, A. et al., MNRAS 283 193 (1996)

[2] Molina, M. et al., MNRAS, 399 1293 (2009)

¹¹Bの2α+t クラスター構造に関する研究

原子核理論研究室 木村燎平

Abstract Cluster Structures in ¹¹B are investigated with a microscopic cluster model. Excitation mechanism of ¹¹B is compared with that of ¹²C and ¹⁰Be. It is clarified that internal excitation and rotation of the subsystem play an important role in cluster excitation. © 2017 Department of Physics, Kyoto University

¹¹Bの励起状態には2α+tクラスター構造が現れると考えられているが、まだ不明な点が多い。近年、 高温高密度環境における元素合成過程への関心が高まり、¹¹Bやその鏡映核である¹¹Cのα捕獲による生 成反応 ⁷Li[Be](α , γ)¹¹B[C]が注目され、より高い励起状態の探索が進んでいる[1]。また、 ¹¹B(3/2⁻₃)(8.56MeV)はホイル状態(¹²C(0⁺₂))と似た性質を持つ 2α+tクラスター励起状態の候補であると モノポール遷移の観測により指摘され、その構造が注目されている[2]。理論面においては、ホイル状 態との類似性が大きな議論となっている一方で[3-5]、この状態がクラスター模型計算では再現できな いという理論研究の報告もあり[6]、¹¹B(3/2⁻3)状態の構造が議論の1つとなっている。このように、¹¹B の励起状態のクラスター構造はまだ未解明の点が多く、実験理論の両面からの研究が期待されている。 ¹¹Bの2α+tクラスター励起のメカニズムを理解するため、比較的研究の進んでいる¹²C、¹⁰Beとの比較 を行った。本研究では"クラスター間の相対運動"の励起, "直線配置"の励起という2種類のタイプ の励起に注目した。前者は、⁷Li,⁸Be,⁶Heとαクラスター間の相対運動が励起したモードに対応し、基底 状態から部分系の回転を伴わずに2体クラスター間の距離が大きくなる励起である。後者は3つのクラ スターが一直線上に並んだ構造を指す。¹²Cはクラスター間の相対運動の励起状態が直線配置の励起状態 より低いエネルギーであると言われている。一方、¹⁰Beでは逆に直線配置の励起状態の方が低いエネル ギーに現れるが、順序の逆転の理由は不明である。本研究では¹²C、¹⁰Beで見られるクラスター励起の順 序の逆転の原因を解明し、さらに¹¹Bでも同様の解析を行うことによって¹¹Bのクラスター励起のメカニ ズムの定性的な議論を行った。本研究では上記の2種類の励起状態を記述する簡単なクラスター模型を 用いて、2種類の励起モードの詳細を解析した。¹²Cでは、クラスター間の相対運動の励起状態は部分系 の[®]Be内のα+αクラスター構造の発達によってエネルギーを大きく稼ぐことが低い励起エネルギーの 要因であることがわかった。また、¹⁰Beでは直線配置におけるパウリブロッキングによる斥力効果が¹²C と比べて小さいために直線配置の励起エネルギーが低くなることがわかった。同様の解析により、¹¹Bは 部分系内のクラスター構造の発達、3 つのクラスターが一直線上に並んだことよるパウリブロッキング の効果の点で¹²C、¹⁰Beの中間の性質を持つことがわかり、結果としてクラスター間の相対運動の励起状 態の方が直線配置の励起状態より低いエネルギーとなる結果を得た。このように、多様なクラスター励 起の励起エネルギーには、部分系であるクラスターの内部励起や回転の効果が重要な寄与を与えている ことが明らかになった。

本論文では、まず宇宙の元素合成において原子核のクラスター構造が果たす役割について簡単にまと めた上で、¹¹Bや ¹¹Cの関わる元素合成反応を紹介する。続いて ¹²C、¹¹B、¹⁰Beのクラスター励起状態につ いて、上記の2種類のタイプの励起状態に焦点を当ててこれまでの研究をレビューする。さらに、本研 究で用いたクラスター模型の定式化をし、その模型での解析に基づいて、¹²C、¹¹B、¹⁰Beのクラスター励 起の励起エネルギーを議論する。そして、得られた結果を踏まえて ¹¹Bのクラスター励起状態について定 性的に考察する。

References

[1] H. Yamaguchi et al., Phys. Rev. C 83, 034306 (2011).

- [2] T. Kawabata, *et al.*, Phys. Lett. B **646** (2007) 6.
- [3] Y. Kanada-En'yo, Phys. Rev. C 75, 024302 (2007).
- [4] T. Yamada, Y. Funaki, Phys. Rev. C 82, 064315 (2010).
- [5] T. Suhara, Y. Kanada-en'yo, Phys. Rev. C 85, 054320 (2012).
- [6] P. Descouvemont Nucl. Phys. A 584, 532 (1995).

LEPS2 実験に用いる Time Projection Chamber(TPC)の性能評価

原子核ハドロン研究室 小早川 亮

LEPS2 is a high-energy gamma-ray beamline at Spring-8, where we are constructing a general-purpose detector system. The main tracking device is a Time Projection Chamber (TPC). I designed the endcap of solenoid magnet to improve the uniformity of magnetic field. Further I tested the performance of TPC using cosmic ray. © 2017 Department of Physics, Kyoto University

SPring-8のLEPS2ビームラインでは、高輝度のγ線を用いた様々なハドロン光生成反応実験が計画 されている。LEPS2実験の検出器群は0.9 Tのソレノイド磁石内に設置される。標的から側方に散乱さ れた荷電粒子を検出するのに、Time Projection Chamber (TPC)を用いる。本修士論文では、TPCの 性能評価とソレノイド磁場の最適化について述べる。

TPCとは、希ガスで満たされた有感領域内を通過した荷電粒子の飛跡を再構成する検出器である。 荷電粒子の飛跡に沿って発生した電子はTPC内の電場と磁場に従ってドリフトし、正の高電圧のかか ったワイヤー付近でガス増幅を起こす。これによって陰極パッド上に誘起される電荷分布の位置情報 から飛跡の2次元座標(x,y)を、電子のドリフト時間と速度からドリフト方向の座標(z)を測定する (Fig.1)。飛跡を精度よく決定するためには、TPC内の電場と磁場の一様性が不可欠である。電場の 一様性は、ドリフト筐体側面に蒸着された8 mm幅のストリップ電極に段階的に電圧を印加することで 実現される。電場分布をシミュレーションし、印加電圧を最適化した。また、LEPS2ソレノイド磁石 内の磁場を一様にするために、3次元磁場計算により、ソレノイド磁石を閉じるエンドキャップの最適 な厚さと位置を決定し、取り付けた。磁場測定の結果、磁場の非一様性によるドリフトのズレは6 cm から2 cm程度に抑えられることがわかった。しかし計算上では、4 mmまで抑えられるはずだったの で、今後、鉄材の素性を検討し直し、エンドキャップを再設計する予定である。

LEPS2用TPCは六角柱の形である(Fig.2)。有感領域の内接円の直径が1190 mm、最大ドリフト距離 710 mmである。パッドは4.6 mm×10 mmのものが10422 個ある。LEPS2で行う予定の Θ^+ 探索実験 では、 $\Theta^+ \rightarrow K^0$ spの不変質量分解能6 MeV/c²以下を目標にしている。そのために、パッド・ワイヤー構 造と読み出し回路によってきまるTPCの固有の位置分解能が150 µm以下であることが求められてい る。

LEPS2用TPCの実機と読み出しボード48 枚(パッド768 個分)を用いて、磁場のない状態で宇宙線を 用いてTPCの位置分解能を評価した。今回の実験で、TPCの固有の位置分解能を見積もった結果、111 (+45,-85) μmの精度が出ていることがわかった。つまり、Θ⁺探索実験に対する要求性能を満たしてい る。今後、統計を増やすことによって、誤差を減らし、より正確な性能評価を行っていく。



Fig. 1. Operating principle of TPC



Fig. 2. TPC of LEPS2

行列模型及び非可換幾何に内包される重力理論の探索

素粒子論研究室 酒井 勝太

Abstract In this thesis, the relation between the matrix models and gravity is discussed. We investigate the conjecture that the matrix model contains gravity as induced noncommutative U(1) gauge theory. We also analyze the approach in which curved spacetimes are realized, and deduce the mass spectrum. © 2017 Department of Physics, Kyoto University

超弦理論は重力を含みうる量子論として長らく研究されてきたが、この理論は摂動的に定式化され ており、曲がった時空すなわち有限の重力をダイナミカルに扱う方法が存在しない。この問題は超弦 理論の非摂動的定式化により解決されることが期待され、その候補の一つとして行列模型がある。特 に、理論の出発点で時空を一切仮定しない IIB 行列模型[1]では、弦の多体系が記述される可能性の示 唆[2]、(3+1)次元膨張宇宙の出現[3]といった結果が存在する。これらはいずれも、行列模型には時空の 自由度が含まれていることを意味していると考えられる。

その反面、行列の解釈が定まらないことで、時空や重力の自由度が理論にどのように含まれている かは今尚不明となっている。近年の興味深い報告として、行列模型から得られる非可換時空上の*U*(1) ゲージ理論が、長波長領域で重力として理解できるのではないかという仮説[4]がある。これは行列の 古典解を非可換多様体の座標と解釈し、その揺らぎをゲージ場と理解するアプローチに基づく。この 仮説に関連して、非可換多様体上ではゲージ場の物質への結合が計量揺らぎの形で理解できること、 1 ループ有効作用が長波長極限で重力の作用と関連していることなどが示されてきた。

また、行列を時空上の関数空間に作用する微分演算子として解釈する研究もなされてきた[5]。こち らでは古典解として曲がった時空を出現させることができ、一般座標変換不変性の存在も示唆されて いる。このアプローチでは有効作用の定性的性質、運動方程式レベルでの解析などが行われてきた一 方で、量子補正を考慮したスペクトルの解析など、多くの課題を残している。

本修士論文では、最初に IIB 行列模型のレビューを行い、これが IIB 超弦理論の非摂動的定式化と考 えられる理由を解説する。続いて行列の様々な解釈、アプローチを紹介し、それぞれで理解できる物 理を整理する。その後、非可換時空上の U(1)ゲージ理論と重力の関係を解析し、非可換時空を用いた アプローチでは既存の形式を拡張する必要があることを示す[6]。最後に、演算子解釈における1ルー プ有効作用で出現しうる質量項の形を特定し、その意味や通常の重力揺らぎとの関係を考える。

Reference

[1] N. Ishibashi, H. Kawai, Y. Kitazawa and A. Tsuchiya, Nucl. Phys. B 498 (1997) 467-491

- [2] M. Fukuma, H. Kawai, Y.Kitazawa and A. Tsuchiya, Nucl. Phys. B 510 (1998) 158-174
- [3] S. Kim, J. Nishimura and A. Tsuchiya, Phys. Rev. Lett. 108 (2012) 011601
- [4] H. Steinacker, Class. Quant. Grav. 27 (2010) 133001
- [5] M. Hanada, H. Kawai and Y. Kimura, Prog. Theor. Phys. 114 (2006) 1295-1316
- [6] H. Kawai, K. Kawana and K. Sakai, arXiv:1610.09844[hep-th]

(p, ²He)反応を用いたπ中間子原子分光のための イオン光学系の開発

原子核・ハドロン物理学研究室 阪上朱音

Abstract We plan to study deeply bound pionic atoms by missing mass spectroscopy with the $(p,^2He)$ reaction at RCNP. The main background is an accidental coincidence when two protons in a single bunch are inelastically scattered at the target. Feasibility of removing such events by developing the ion optics is investigated.

© 2017 Department of Physics, Kyoto University

 π 中間子原子の深い束縛状態における束縛エネルギーを測定し、 π 中間子と原子核の相互作用を記述 する光学ポテンシャルのパラメータを精密に決定することがカイラル対称性の破れの部分的回復の理 解につながる[1]。 π 中間子原子の研究でこれまでに主に行われてきたのは、(d,³He)反応を用いた π 中間 子原子の生成であるが、我々は新たに(p,²He)反応を用いた π 中間子原子の生成実験を大阪大学核物理研 究センター(RCNP)で行う予定である。この反応による π 中間子原子の生成・観測方法が確立されれば、 他施設では困難であるキセノン同位体などの様々な核種について π 中間子原子の系統的な研究が可能と なり、異なる密度におけるカイラル対称性の部分的回復を定量的に評価できると期待される。

この実験では陽子ビームを標的に入射し、反応生成物である2つの陽子をGrand Raiden スペクトロメ ータで検出する。ビームはバンチ構造をなすため、標的上に同時に到着した同一バンチ内の2つの陽子 が非弾性散乱をしたものを検出する偶然同時計数が、測定の主なバックグラウンドとなる。(p,²He)反応 では標的上の同じ点から2つの陽子が放出されるが、偶然同時計数によるものは相関のない2点から放 出されると考えられる。そこで我々は、標的上の位置、特にy方向の位置を精度良く決定することで偶 然同時計数イベントと真のイベントを見分ける方法を検討している。標的でのビームの広がりは±1 mm 程度なので、位置を200 µm の精度で決定することができれば、バックグラウンドを約80%除去できる。

検出器はスペクトロメータ下流の焦点面に設置されており、標的上での位置や角度は直接測定できない。そのため、反応点を精度良く決定するためには、スペクトロメータの光学的性質を理解することが重要である。2016年4月にテスト実験を実施し、水平方向に張った金線の標的(Fig.1)と、sieve slit(Fig.2)と呼ばれる 5×5の穴の空いたスリットを用い、標的上でのy方向の位置、角度(θ, φ)が定まるような状況を作り出して測定を行った。焦点面における像と、金線の標的の位置や sieve slit の穴との相関から、yに関する輸送行列要素を3次まで決定し、焦点面で観測される位置や角度から標的上の位置を再構成する式を導出した。また、その再構成された標的上での位置の分解能を評価した。金線標的を y = 0.0, 0.5, 1.0 mm の位置にしたときの、焦点面における θ と、行列要素を用いて再構成した標的上の位置 y との相関の分布 (Fig.3)を見ると、実際の標的の位置を正しく再構成できていることがわかる。

本論文では、テスト実験における測定をもとに導出した輸送行列を用いて評価した標的上での位置分 解能を報告する。また、偶然同時計数を効果的に除去するために適したビームの広がりや、アクセプタ ンスを制限することによる位置分解能の改善の可能性について議論する。

References

[1] T. Yamazaki et al., Phys. Rep. 514, 1 (2012).



Fig.1. Gold wire target



Fig.2. Sieve slit





XeガスTPCを用いたニュートリノレス二重β崩壊探索実験 AXELのための高エネルギー分解能読み出し回路の開発

高エネルギー物理学研究室 田中駿祐

Abstract We have developed a read-out circuit to read the signal from a high pressure Xe gas time projection chamber, AXEL, for the neutrinoless double beta decay. The board reads the waveform of MPPC signal with very wide dynamic range to achieve high energy resolution. © 2017 Department of Physics, Kyoto University

ニュートリノがマヨラナ粒子であるか否か、つまりニュートリノと反ニュートリノが同一の粒子であ るか否かは、未解明の問題の多いニュートリノの中でも最大の謎の1つである。ニュートリノの質量が 他の粒子と比較して異常に軽いことや、物質優勢宇宙がいかにして成立したかを、ニュートリノのマヨ ラナ性から説明する理論が存在することもあり、近年注目が集まっている。

ニュートリノのマヨラナ性を実験的に確かめるほぼ唯一の方法が「ニュートリノレス二重β崩壊(0vββ 崩壊)」を観測することである。これは、1つのβ崩壊から仮想的に発生した反ニュートリノが、そのマ ヨラナ性のために「ニュートリノ」として他の核子に吸収されることでもう一方のβ崩壊を引き起こ し、結果的に2つの電子のみが飛び出してくる現象である。0vββ崩壊はニュートリノがマヨラナ粒子で なければ起こり得ず、この現象を発見すればニュートリノがマヨラナ性を持つことを確認できる。

AXEL検出器は、0vββ崩壊探索のための高圧XeガスTPC (Time Projection Chamber)である。これまでに 0vββ崩壊に対して高い感度を達成している2系統の実験の長所である高いエネルギー分解能と大きな崩 壊核質量を兼ね備え、さらに3次元飛跡情報を用いた背景事象の削減も行う、次世代の検出器である。

AXEL実験の現在の小型試作機は64チャンネルであるが、2017年に建設予定の次期試作機ではチャン ネル数が1000チャンネル以上に増大する。そのため、ガスTPCの読み出しに特化した、低コストの読み 出し回路の開発が急務となっている。本研究では、β線が停止する際に発生する5×10³個/µsの電離電子 から、拡散によって空間的に広がった数個の電離電子にまで渡る幅広いダイナミックレンジと、高いエ ネルギー分解能(目標0.5%FWHM)を両立するための回路設計を行った。電離電子は光に変換した上で、 光検出器であるMPPCを多数使用して読み出すため、読み出し回路には各MPPCの電源電圧を個々に調 整する機能や、キャリブレーションのためにダークカレントを測定する機能も必要となる。

設計した回路について、原理的な分解能については回路シミュレータによるシミュレーションを、そのシミュレーションの妥当性やノイズによる分解能の悪化については試作機を用いることで、回路の性能評価を行った。その結果、回路のエネルギー分解能が0.1%FWHMを下回り、要求を十分に満たすことを確認した。



Fig. 1. Construction of the read-out circuit



Fig. 2. prototype of the circuit

次世代ガンマ線天文台CTA 大口径望遠鏡初号機搭載用 GHz 波形サンプリング回路の性能評価 _{宇宙線研究室} 谷川俊介

Abstract CTA is a next-generation Very-High-Energy gamma-ray observatory. We have completed the waveform GHz-sampling system for the 23m diameter Large-Sized Telescope (LST) of CTA which detects Cherenkov light from an air shower. We report the performance of the readout system for the first LST.

© 2017 Department of Physics, Kyoto University

Cherenkov Telescope Array (CTA) [1]計画は現行のチェレンコフ望遠鏡よりも一桁以上高い感度で、20 GeV から300TeV のガンマ線を観測する次世代の大規模チェレンコフ望遠鏡群の国際共同建設計画であ る。口径の異なる数十台のチェレンコフ望遠鏡からなる望遠鏡アレイをチリのアタカマ砂漠とカナリア 諸島ラパルマ島に建設し、全天を観測する。 チェレンコフ望遠鏡は、地球大気に入射したガンマ線が 作る空気シャワーからのチェレンコフ光を観測して、入射ガンマ線のエネルギーや到来方向を推定する。 CTA 大口径望遠鏡(LST)は口径23 m で各アレイに4 台ずつ建設され、20 GeV から1 TeV の低エネルギ 一領域の観測を行う。焦点面検出器としては光電子増倍管(PMT)が使用される。PMTから得られるチェレ ンコフ光の信号は数nsec 程度の短い時間的広がりを持ち、観測する際にはチェレンコフ光に加えて数 100MHz 程度の頻度で夜光などのバックグラウンドが混入する。そこで、波形サンプリングをGHz で行 い信号の積分時間を数nsec 程度まで短くすることで、バックグラウンドとチェレンコフ光による信号 とを分離する。消費電力を抑えるため、GHz サンプリングにアナログメモリASIC であるDRS4 チップを 用いる。DRS4 は内部に多数のキャパシターを持ち、各時間での信号の電圧値情報をキャパシターに取 り込むことでサンプリングを行う。すでに初号機搭載用の150 枚の読み出しボード(1050本のPMT に相 当)が量産された。

本修士論文では、量産された読み出しボードの性能評価、及びDRS4 のspike 特性について報告する。 ここで spikeとは、信号を入れていない状態でも、サンプリングしたときの電圧値が局所的に高くなる 部分が見られる現象をいう。試験の結果、0.4 p.e. 以下のノイズレベル、0.5~2000p.e.で線形性5% 以 下、1% 以下のクロストーク、電圧値の小さい信号に対し帯域300 MHz (-3 dB)、という結果が得られた。 加えてDRS4 のキャパシターに関して、テストパルスを用いて異常な特徴を示すキャパシターが無いこ とを確かめた。また、LED を用いて夜光などのバックグラウンドを再現した状態で測定を行い、光源か らの光が強い場合には、PMT のゲインが下がらないことを確認した。さらに、DRS4 のspike の起こる 条件を発見し、取り除く事が出来た。



Fig1. Photograph of the readout system with 7 PMTs.



Fig2. PMT waveform sampled with the readout system.

References

[1] The CTA Consortium, "Design Concepts for the Cherenkov Telescope Array", Experimental Astronomy, 32(2011) 193

有限体積効果を用いたハドロン共鳴の複合性の研究

原子核理論研究室 土田裕次郎

Abstract We discuss the structure of a resonance state in the infinite volume system, by studying the eigenenergies in the corresponding finite volume system. We propose the new framework of representing compositeness of the resonance state. After examining the validity of this method, we apply it to exotic hadron candidates.

© 2017 Department of Physics, Kyoto University

従来のクォーク模型で説明できない内部構造をもつハドロンはエキゾチックハドロンと呼ばれる。例 えば、現在実験で観測されている $\Lambda(1405)$ や $\Lambda_c(2595)$ などの内部構造について多くの議論がある。ハド ロンの内部構造を定量的に理解する指標として、Weinberg によって提案された複合性 X[1]があるが、 複合性 Xの確率解釈は安定な束縛状態にしか適用できない。一方、エキゾチックハドロンのような共鳴 状態は、波動関数が規格化できず固有エネルギーが複素数となり、それに伴う複合性の確率解釈に困難 がある。

本研究では、有限体積効果を用いて共鳴状態の複合性の解釈について議論する。一辺の長さ L の箱の 中での有限体積系では、散乱状態に対応する連続固有状態が離散的な状態になる。その離散的な固有状 態は波動関数が規格化出来るため、各固有状態に対し複合性 X_{FV}(L)は確率解釈可能となる。本研究の目 的は、有限体積系での複合性と、無限体積系での共鳴状態の内部構造との関係を調べ、確率解釈可能な 複合性の枠組みについて理解し、実際のハドロン共鳴に応用することである。

まず、共鳴状態を記述する無限体積系でのモデルを有限体積系で考え、その固有エネルギーが離散化し、共鳴状態に対応するエネルギーレベルは体積依存性が小さいことを確認する。この結果をもとに、 波動関数に対する有限体積効果によりエネルギーレベルが変化する箱の大きさを *L*min、散乱状態との結 合によりエネルギーレベルが変化する箱の大きさを *L*max とし、その間の共鳴状態の情報が反映された領 域について *X*_{FV}(*L*)を平均化することで、確率解釈可能な複合性 *X*resを提案する。

$$\frac{1}{L_{\max} - L_{\min}} \int_{L_{\min}}^{L_{\max}} X_{\rm FV}(L) dL = X_{\rm res} \,, \, 0 < X_{\rm res} < 1$$

この手法の妥当性を簡単な Single channel model で検証する。

最後に、実際に観測されているハドロンの共鳴状態 Λ(1405), Λ_c(2595)にこの手法を応用する。 Λ(1405)を含むメソンバリオン散乱振幅などの観測量を再現するフレーバーSU(3)のカイラルユニタリ ー模型を有限体積系に拡張し、チャンネル *i* の複合性(X_{res})*i*を計算する。結果として

$$(X_{\rm res})_{\bar{K}N} = 0.584, \ (X_{\rm res})_{\pi\Sigma} = 0.261, \ Z_{\rm res} = 0.155$$

を得る。ここで Z_{res} は一粒子性である。この結果によると $\Lambda(1405)$ の主要な成分は $\overline{K}N$ であるが、 $\pi\Sigma$ など他の成分も無視できない寄与がある。先行研究[2]では $\Lambda(1405)$ の 2 つある極のエネルギーの高い方に注目することで $\overline{K}N$ 成分が支配的であったことに対し、本研究の手法では両方の極の寄与を含んだ $\Lambda(1405)$ の構造を示していると解釈できる。また、 $\Lambda_c(2595)$ についても同様の解析を行い、複合性の評価及び $\Lambda(1405)$ との関係について議論する。

References

[1] S. Weinberg, Phys. Rev. 137, B 672 (1965).

[2] Y. Kamiya, T. Hyodo, Phys. Rev. C 93, 035203 (2016).

ドジッター背景時空上における赤外効果の統計的性質

天体核研究室 徳田 順生

Abstract We formulate a systematic way of deriving effective equation of motion for longwavelength part of a minimally coupled massless test scalar field with quartic self-interaction on de Sitter background.

We explicitly derive a stochastic formalism which correctly recovers the next-to-leading secularly growing part at a late time.

© 2017 Department of Physics, Kyoto University

インフレーションパラダイムにおいて、宇宙マイクロ波背景放射ゆらぎなどの観測されるゆらぎの起 源は、インフレーション中に量子ゆらぎが準指数関数的膨張によりハッブルスケールよりも十分長い長 波長モード(IRモード)となったものである。量子ゆらぎを含めてインフレーションのダイナミクスを 取り扱う手法として、ストカスティックアプローチがある[1]。この手法では、インフラトン等の弱結合 自己相互作用量子場の IR モードは古典化しているものとして取り扱われる。なぜなら、これらの場は 非常にスクイーズした状態にあるためである。さらに、弱結合の仮定により短波長モード(UVモード)は 自由場であるという近似を採用すると、IRモードのダイナミクスは各ハッブルホライズンで独立なスト カスティックノイズを受けたブラウン運動にしたがって時間発展していくことが知られている[1]。

通常の摂動論的計算は赤外成長項の存在のために、インフレーションが長時間継続すると破綻すること が知られているが、ストカスティックアプローチはこのような場合にも適用することができる。実際、 この近似的取り扱いは特にドジッター背景時空上のテストスカラー場の理論において場の期待値に現 れる赤外成長項の最も主要な項(L0)を摂動的に任意の次数まで再現することも示されている[2]。また、 このような確率的描像において可観測量である断熱揺らぎを計算する手法も開発されている[3]。この 近似では各ハッブルホライズンが過去の履歴に依存せず独立な確率過程に従うことから、我々の宇宙が 実際にはどれだけの長さのインフレーション期を経験したかが観測量には影響しない[4]。

一方で、UV モードにおける自己相互作用の効果を含めた場合にも IR モードのダイナミクスが確率過 程として解釈できるか否か、また、仮に確率過程としての解釈が可能でもストカスティックノイズの空 間的・時間的相関がハッブルスケール・時間を超えて持続するか否かは分かっていない。確率過程とし て解釈ができない場合や、できたとしてもストカスティックノイズの空間的・時間的相関が大スケール・ 長時間持続する場合には、ゆらぎの古典化の過程の詳細や、我々の宇宙が十分長いインフレーション期 を経験したか否かということが観測量に影響を及ぼす可能性がある。

従って、本研究ではインフレーションにおける UV モードの自己相互作用の効果を取り入れた零質量 場の IR モードのダイナミクスを記述する有効理論を系統的に調べる方法を初めて構築する。なお、L0 に限れば IR モードの有効理論を導出する方法は[5]によって提案されているが、本研究ではその理論的 正当性の検証も深く議論する。また、トイモデルとしてドジッター背景時空上における 4 次の自己相互 作用項をもつ零質量極小結合のテストスカラー場の理論を用いて IR 場の期待値に現れる赤外成長項の L0 に次ぐ主要項(NL0)までを記述する確率過程を導出し、少なくともこの近似のレベルでは場の IR モー ドのダイナミクスは整合的に確率過程として解釈可能であることを具体的に示す。さらに、NL0 を超え てより高次の補正を含めた IR モードの従う確率過程がどのような性質を持つかについても議論する。

References

[1]A.A.Starobinsky, Phys Lett. B117 (1982) 175-178.

[2]N.C.Tsamis et al., arXiv:gr-qc/0505115.

[3]T.Fujita *et al.*, arXiv:1308.4754.

[4]V.Vennin et al., arXiv:1506.04732.

[5]M.Morikawa Phys Rev. D 42, 1027 (1990).

陽子内部におけるグルーオンの軌道角運動量の測定方法

原子核理論研究室 中川裕也

Abstract Decomposition of the proton's spin into spin and orbital angular momentum of quarks and gluons is a long standing problem. We show that the orbital angular momentum carried by gluons at small-x can be probed by measuring the longitudinal single spin asymmetry in the diffractive dijet production process.

© 2017 Department of Physics, Kyoto University

陽子はQCDの観点からは素粒子であるクォーク、グルーオン(パートン)からなる複合粒子として理解 できる。実際に高エネルギー物理学では陽子がパートンからどのように構成されているかが重要な研究 対象となっている。このような研究の中には陽子のスピン1/2がパートンによってどのように担われて いるかを明らかにするものも含まれる。

陽子のスピンは直感的にはクォークとグルーオンそれぞれのスピン、軌道角運動量の4つに分解できると考えられる。これについてはまずJaffeとManoharがゲージに依存する分解を与えた[1]。このゲージ依存性の問題はJiによって解決された[2]。しかし、Jiの分解ではグルーオンの寄与をスピンと軌道部分に分解することができなかった。この問題もChenらによってゲージ不変かつ、JaffeとManoharが提唱したような4つの部分への分解が提唱され解決された[3]。また、パートンの位相空間分布関数であるWigner関数と軌道角運動量の関係がLorceとPasquiniや八田によって提唱された[4]。

実験的には、EMCの実験によってクォークのスピンが測定された[5]。クォーク模型の期待からはクォ ークのスピンが全体に対して占める割合は半分以上であると思われていたが、測定結果はこの期待を大 きく下回るものであった。グルーオンのスピンもRHIC等で測定され解析が行われた[6]。この結果得ら れたグルーオンのスピンの寄与と上述のクォークのスピンの寄与を合わせても陽子のスピン1/2を説明 するには至らない。よって、各パートンの軌道角運動量の寄与を考えることが重要になる。しかし、パ ートンの軌道角運動量の寄与を測定する方法はこれまで確立していなかった。

以上のような背景を踏まえ、本修士論文ではグルーオンの軌道角運動量の測定方法を初めて提唱する。 我々は上述のWigner関数と軌道角運動量の関係からのアプローチを試みた。本研究では電子と偏極した 陽子の深非弾性散乱におけるdiffractive dijet productionと呼ばれる過程において、ヘリシティの符 号の異なる陽子を用いたときの微分断面積の差であるlongitudinal single spin asymmetryと呼ばれる 量がグルーオンの軌道角運動量へのsmall-x領域からの寄与と関係付くことを示した[7]。実験的にはこ のような過程は今計画が進んでいるEIC(Electron Ion Collider)によって実現できる[8]。

References

[1] R. L. Jaffe and A. Manohar, Nucl. Phys. B337, 509 (1990).

- [2] X.-D. Ji, Phys. Rev. Lett. 78, 610 (1997), arXiv:hep-ph/9603249.
- [3] X.-S. Chen et al., Phys. Rev. Lett. 100, 232002 (2008), arXiv:0806.3166.
- [4] C. Lorce and B. Pasquini, Phys. Rev. D84, 014015 (2011), arXiv:1106.0139.
 Y. Hatta, Phys. Lett. B708, 186 (2012), arXiv:1111.3547.
- [5] J. Ashman et al., Phys. Lett. B206, 364 (1988).
- [6] D. de Florian et al., Phys. Rev. Lett. 113, 012001 (2014), arXiv:1404.4293.
- [7] Y. Hatta, Y. Nakagawa, F. Yuan, and Y. Zhao, (2016), arXiv:1612.02445
- [8] A. Accardi et al., Eur. Phys. J. A52, 268 (2016), arXiv:1212.1701.

宇宙論解における重力的メモリー効果と 時空の漸近的対称性

基礎物理学研究所 宇宙グループ 中谷侑司

Abstract We investigate the gravitational memory effect caused by a collision of point particles in a spatially curved expanding universe. In an open universe, we show that the effect can be regarded as a result of operating the asymptotic symmetry transformation. © 2017 Department of Physics, Kyoto University

漸近的対称性は無限遠における時空構造を保つ変換として定義される。特に漸近的に平坦な時空の光的 無限遠における対称性はBondi-Metzner-Sachs 群(BMS 群)と呼ばれる群構造を持つ。Minkowski 時空におけ る対称性である有限次元の Poincare 群とは異なり、BMS 群は並進群を拡張した無限次元可換群である超並 進群と Lorentz 群の半直積群となっている。BMS 群はエネルギーゼロの重力子の散乱振幅との関連性[1]やこ の対称性から作られる保存量の観測可能性などによってその性質が明らかになりつつある。また最近ではブラ ックホール情報喪失問題の解決やブラックホールエントロピーの起源の解明に繋がるのではないかという提案 もあり、時空の漸近的な対称性が有する物理的意義を解明することは今後の重力理論における重要な課題の 1つとなっている。

一方、2015年に人類史上初となる重力波の直接観測がなされたことは記憶に新しい。これにより重力波天 文学の時代の幕開けとなり、一般相対論から予想される様々な現象の検証がより一層可能となることが期待さ れる。そのような現象の1つに(重力的)メモリー効果がある。衝突や崩壊を伴う重力波源から放出された重力 波によってテスト観測者間の距離に永続的な変位が生じる場合がある。このように重力波が自身の通過した場 所にその痕跡を残していく現象をメモリー効果と呼び、今後の観測が期待されている[2]。近年、漸近的平坦時 空において、メモリー効果と時空の漸近的対称性との間に対応関係が存在することが示された[3]。これは重 力波の通過により誘起される時空の漸近構造の遷移を超並進変換によって記述し得るというものでメモリー効 果に明確な操作的意味合いを与える。

漸近的平坦時空に限らず、より一般の時空においても漸近的対称性とメモリー効果との間に関係性を見出 せるか、という問いは時空が有する漸近的対称性の物理的性質を明らかにする上で非常に興味深い。特に現 実の宇宙に目を向けると漸近的に平坦ではなく膨張しており、重力波源からの距離が Hubble 長に比べて無視 できない場合のメモリー効果に対しては宇宙膨張を加味しなくてはならない。既に先行研究によって宇宙論的 なメモリー効果が考えられており[4]、さらにこの場合においても漸近的な対称性とメモリー効果の間の対応関 係の存在が確認されている[5]。

しかしこれらは空間的に平坦な膨張宇宙に限った議論であり、空間曲率のある宇宙においてはそもそもメモ リー効果自体調べられていない。そこで本研究では空間的に曲がっている膨張宇宙において点粒子の衝突を 重力波源とするメモリー効果を調べた。その結果、同じ空間曲率を持つ宇宙モデル間にある種の対応関係が 存在することを発見した。さらにこの対応関係を応用して開いた宇宙及び閉じた宇宙におけるメモリー効果の 計算方法を提唱した。また減速膨張する開いた宇宙に対して光的無限遠における対称性を見出し、メモリー効 果との関係性を調べ、得られた公式は漸近的平坦時空におけるものと同じ形になるという結果を得た。

References

[1]A. Strominger, J. High Energy Phys. 07,152 (2014)

[2]M. Favata, Class. Quant. Grav. 27: 084036, 2010

[3]A. Strominger, A. Zhiboedov, J. High Energy Phys. 01, 086 (2016)

[4]A.Tolish, R. M. Wald, Phys. Rev. D94 (2016) no.4, 044009

[5] A. Kehagias, A. Riotto, JCAP 1605 (2016) no.05, 059

T2K 実験のための J-PARC MR における 多電極ビームモニターの開発

高エネルギー物理学研究室 中西芳枝

Abstract For the T2K experiment, it is important to increase the beam intensity with small beam loss. To reduce it, we have developed a 16-electrode pick up beam monitor. It can measure not only the position, but the higher order moment turn by turn and could be useful for injection matching. © 2017 Department of Physics, Kyoto University

長基線ニュートリノ振動実験 T2K では、茨城県東海村にある加速器施設 J-PARC で生成したミュー型、 または反ミュー型ニュートリノビームを 295km 先の岐阜県飛騨市に位置する大型水チェレンコフ検出器 スーパーカミオカンデに打ち込み、ニュートリノ振動現象の観測を行っている。ニュートリノ振動モー ドのうち、ミュー型ニュートリノの消失事象と電子型ニュートリノの出現事象、加えてそれらの反粒子 モードの観測により、ニュートリノ振動のパラメータを測定する。現在の実験目標は、測定精度を向上 し、ニュートリノと反ニュートリノの振動確率の違いを見ることにより、レプトンセクターでの CP 対 称性の破れを3 σ で発見することである。測定精度の向上に向けた重要課題の一つとして、ニュートリ ノの生成源である J-PARC Main Ring (MR)の陽子ビーム強度向上が挙げられる。ターゲットに照射する陽 子数を増やすことが、ニュートリノイベント数の向上、統計誤差の削減に直結するためである。

J-PARC MR では現状のパワー435k₩ から 750k₩ への増強が計画されている。ビーム強度向上に伴って 問題となるのは、リング周回中に生じるビームロスである。加速器の運転において、陽子ビームが真空 パイプにぶつかると、その周辺機器が放射化し、維持保守、改善が困難になる。そのため、ある閾値以 上のビームロスが生じた場合、ビーム強度を減らさざるを得ないことから、陽子ビームを監視・制御し ビームロスを減らすことが重要である。特に、J-PARC3段階加速の最終段である MR へ入射する時のビ ームの形状は、その後の MR 内でのビームの動きを決定するという点から精密な制御が必要である。ビ ーム位置が理想的な入射位置からずれていると、その後周回中に振動が大きくなりビームロスが生じる。 また、入射時のビームの広がりが理想値と異なると、その後の周回中にビームの広がりが増大するため、 ビームハローがパイプにぶつかり、大きなビームロスを引き起こす原因となる。現状では、入射直後に 置かれたビーム位置モニターで入射直後のビームの位置を観測している。さらなる入射制御の精度向上 に向け、我々はビーム広がりの指標であるビームの4重極モーメントを観測するための多電極ビームモ ニターを開発し、MR ヘインストールした。製作したモニターは、短冊形電極と電極埋め込み用の溝が掘 られたパイプによって構成されており(Fig.1)、16本の電極によってビームの位置・広がりの情報を含 んだ電磁場をピックアップするものである。本論文では、T2K 実験、J-PARC の紹介と現状について述べ たのち、既存の4電極ビームモニターを用いたビームの観測結果を報告し、新たな 16 電極ピックアッ プの開発とビームの観測結果(Fig.2)について記述する。また、4 重極モーメント測定の今後の展望につ いても述べる。



Fig. 1. Picture of 16-electrode pick up.



Fig. 2. One bunch signal measured by 16-electrode pick up.

MeV ガンマ線望遠鏡に向けた高エネルギー分解能 MPPC シンチレーションカメラの開発

宇宙線研究室 中增勇真

Abstract Electron-Tracking Compton Camera has been developed for the observation of MeV gamma-ray images. To improve the angular resolution, we develop a scintillation camera with better energy resolution by using Multi-Pixel Photon Counter (MPPC). We design the new readout electronics and evaluate its performance by measuring the energy spectrum of radioisotopes. © 2017 Department of Physics, Kyoto University

電子と陽電子が衝突して対消滅することにより 511keV のガンマ線を放出する。この対消滅線が OSSE/CGRO[1]や SPI/INTEGRAL[2]などにより銀河中心から観測されている。陽電子は放射性同位体な どのβ⁺崩壊による生成や、高エネルギー対生成過程によって生まれるが、銀河系内部に広がった対消滅 線の起源が決定できるような観測はまだされていない[2]。また、超新星爆発などにより生成される放射 性同位体の崩壊で、数百 keV から数 MeV の核ガンマ線が放射される。この MeV ガンマ線輝線を観測 することで、元素合成の現場を直接知ることができる[3]。このように MeV ガンマ線は様々な天体現象 を理解するうえで重要であるが、コンプトン散乱が優位になり、ガンマ線の到来方向を求めるのが難し い。そこで、我々は、優れたイメージング能力を持つ電子飛跡検出型コンプトンカメラ(Electron-Tracking Compton Camera, ETCC)の開発を進めている[4]。

現在の ETCC では、散乱ガンマ線の読み出しに GSO シンチ レータと PMT(H8500, 浜松ホトニクス)を用いたシンチレーシ ョンカメラを採用している。到来ガンマ線を再構成する際、散 乱ガンマ線のエネルギーを用いるので、ETCC の角度分解能を 改善するためにシンチレーションカメラのエネルギー分解能を 良くする必要がある。GSO の発光波長は 440 nm であり、PMT よりも発光波長に対する感度が 2 倍良い Multi-Pixel Photon

Counter (MPPC)アレイ(S13361-3050NE-08, 3 mm 角/ ch, 16× 16 ch, 浜松ホトニクス)を採用し、その信号読み出し回路を 新規に設計、製作した。現在の PMT シンチレーションカメ ラで約 11 % (662 keV)であったエネルギー分解能を、今回試 作した MPPC シンチレーションカメラにより、約 8 % (662 keV)にまで改善することができた。

現在、ETCC には 108 個の PMT を搭載しており、合計で 約 60 W の電力を消費している。衛星で測定する際、現在の 16 倍ほどの PMT を搭載することを予定しており、約 1 kW もの電力を消費することになる。これは、PMT 自体の消費 電力が大きいことと、そのデータ取得部でも電力を消費して



Fig. 1. MPPC scintillation camera



いることに起因する。そこで、消費電力の小さい MPPC に置き換えるとともに、データ取得部も FPGA で読み出せるように改良した。さらに、これまでは、コモンスタートでデータを取得していたが、将来 的に、デッドタイムを削減する目的で、コモンストップでデータを取得することを採用した。そのため、これまではピークホールド ADC で取得していたが、コモンストップに対応できるサンプリング ADC で 取得する回路を開発し、その性能を評価した。本論文では、その結果について報告する。

References

- [1] W. R. Purcell, et al., ApJ, 491, 725-748 (1997).
- [2] N. Prantzos, et al., Rev. Mod. Phys., 83, 1001-1056 (2010).
- [3] R. Diehl, Astronomical Review, 8, 4-52 (2013).
- [4] T. Tanimori, et al., ApJ, 810, 28 (2015).

S-2S 電磁石の磁場測定と運動量分解能

原子核・ハドロン物理学研究室 七村拓野

Abstract Strangeness -2 spectrometer(S-2S) is a spectrometer for the spectroscopy of Ξ -hypernuclei. Recently we have performed magnetic field measurement of a dipole magnet of S-2S. We also discuss how errors of the magnetic field affect the momentum resolution of the S-2S. © 2017 Department of Physics, Kyoto University

Eハイパー核の構造の研究は、Ξ-N相互作用のポテンシャルの深さやΞ-N→ΛΛ遷移の強度に関する 情報を与え、フレーバーSU(3)のバリオン間相互作用の全体像を理解するうえで重要な役割を果たす。

S-2S(**S**trangeness **-2 S**pectrometer)は、J-PARCにおいて(K⁻, K⁺)反応を用いた Ξ ハイパー核分光実験 を世界最高のエネルギー分解能で行うために新たに建造した散乱 K⁺粒子用スペクトロメータであり、2 台の四重極磁石(Q1, Q2)および 1 台の双極磁石(D1)で構成される。目標とする運動量分解能($\Delta p/p$)は、 入射 K⁻粒子用ビームラインスペクトロメータ(1.0×10⁻³)と同等以上の性能を要求し 6×10⁻⁴となってい る。

S-2Sでは、飛跡検出器によって得た散乱粒子の飛跡とS-2Sの計算磁場を用いて運動量の再構成を行う。計算磁場では、鉄芯材のB-H曲線の非線形性やヒステリシス特性、実際の電磁石の細かな形状などの入力パラメーターの不定性のため、実物を完全に再現することは容易でない。そこで我々は、磁場分布を実測して、これと計算磁場を比較することにより、これらのパラメーターの最適化を図ることとしている。これまでに、Q1, Q2 に対しては既に測定と計算磁場の最適化を行い、0.1%の精度で測定磁場を再現することに成功している[1]。

本研究では2015年に建造が完了したD1電磁石 について、NMR プローブを用いて励磁曲線や長 時間安定性、磁場設定の再現性といった基本的 な性能を調べるとともに、3軸ホールプローブ と3次元駆動装置を組み合わせた磁場測定器系 (Figure 1)により、測定磁場と計算磁場の相違 が起きる可能性が最も高いと予想される磁極端 付近を中心として大凡 800 mm×280 mm×1700mm の領域にわたって磁場分布の測定を行った。



Figure 1. picture of magnetic field mapping system.

論文では測定で得られた磁場分布について、誤差の評価を行い現状得られている計算磁場との比較を 行うとともに、計算磁場の最適化を行う上で改善すべき要素の検討を行う。また、Geant4によるシミュ レーションを基に、磁場分布の誤差が S-2S の運動量分解能に与える影響を評価する。

References

[1] 金築俊輔 ほか 日本物理学会 2013 年秋季大会 20pSH-6

Toward Fast Radio Burst Cosmology:Dispersion Measure Distribution

天体核研究室 西岡新平

Abstract Fast Radio Bursts (FRBs) are newly identified transients with millisecond duration. By observing FRBs, we can measure extragalactic Dispersion Measure (DM) to reveal missing baryon. We calculate the distribution function of cosmological DM by using N-body simulation data. We compare the calculated mean and variance with the analytic calculations. © 2017 Department of Physics, Kyoto University

近年 Fast Radio Burst (FRB) と呼ばれる突発天体が観測されている[1]。ミリ秒程度の継続時間を持ち、 その名の通り電波(~1GHz)で光る突発天体である。最初の観測は 2007 年で[2]、これまで 17 個の FRB が観測されている。FRB のソースの正体や母銀河、地球からの距離などはわかっていないが、後述する ように FRB から観測できる自由電子の柱密度が銀河系内の値としては大きすぎるため、我々の銀河の外 から来ているということがわかっている。また、全天で1日に1万個の FRB が発生しているという見積 もりがされており、今後の観測機器の発展によってより多くの FRB が観測されることが期待されている。

FRB の光の到着時間の遅れの波長依存性を観測することで、FRB までの自由電子の柱密度 (Dispersion Measure;DM) を観測することができる。これまでは、銀河系内のバリオン分布についてはパルサーの観測などからわかっていたが、銀河系外のバリオンの分布を直接観測する手段はなかった。FRB は銀河系外のバリオンを観測する手段を与える新しい天体である。これによって、例えば、ミッシングバリオン 問題にも手がかりを与えられるかもしれない。ミッシングバリオン問題とは、CMB の観測から宇宙に存在していると考えられているバリオンの量が、銀河団内のバリオンや、分子雲として存在するバリオンの量を足しても説明できないという問題である。残りのバリオンは銀河間にあると考えられているが、希薄すぎて電磁波で観測することが難しく、直接見ることができていない。

本論文では、FRB を用いた DM の測定、そこから派生する新たな宇宙論研究のための第一歩として、あ る赤方偏移(距離)を決めたときに DM がどのような値を取るのかという問題を考察した。宇宙が完全 に一様等方とすると距離と DM の値は一対一に対応する。しかし実際はバリオンの密度ゆらぎによって 同じ距離に対しても DM の値はある分布を持つ。DM は距離指標として使うことができるが、DM の分布に よって不定性が生じるため、それを調べることは大変重要である。過去の研究においては DM の平均値 については解析的に計算されている[3]。[6]において DM の分布関数が計算されているが、精度が悪す ぎて宇宙論には全く使えない。

我々は、DM の分布関数を求めるために、宇宙論的な N 体シミュレーション[5]を用いてバリオンの分 布を用意し、原点にいる観測者から各赤方偏移面まで光を飛ばすレイトレーシングシミュレーションを 行った。光の経路に沿って DM を積分し、ある赤方偏移に対する DM の分布関数を求めた。光が伝播する 際、物質の作る重力場によって光は曲げられる。この重力レンズ効果を考慮して光の経路を計算した。

その結果、第一に、シミュレーションから計算した DM の平均値は、知られている解析的な計算[3]と よく合うことを確かめた。第二に、シミュレーションから求めた DM の分散は、N 体シミュレーションの 精度の範囲内で、理論的なパワースペクトルから求めた値[4]とほぼ一致することがわかった。第三に、 DM の分布関数は対数正規分布に近くなることがわかった。ただし、赤方偏移が小さい(距離が近い)と ころでは対数正規分布からずれる。これは歪度を入れた対数正規分布に近いということがわかった。

References

- [1] Thornton D. et al.,2013,Science,241,53
- [2] Lorimer D. et al. ,2007,Science,318,777
- [3] Ioka K.2003, ApJ, 598, L79
- [4] McQuinn M.,2014,ApJ780,L33
- [5] Shirasaki M.,2015,MNRAS,453, 3043–3067
- [6] Dolag K., 2015, MNRAS 451, 4277-4289

LHC-ATLAS 実験のミューオントリガーにおける 飛跡再構成アルゴリズムの改良

高エネルギー物理学研究室 野口陽平

Abstract The ATLAS muon trigger selects events with the final states containing muons. The criteria of selection are based on the transverse momenta (p_T) of muons calculated in the online tracking. I have developed a new algorithm for p_T -calculation to improve p_T -resolution in the trigger selection. © 2017 Department of Physics, Kyoto University

我々はLHC-ATLAS 実験において重心系エネルギー13 TeV での陽子陽子衝突実験を行っている。新粒子の探索や標準模型の精密な検証を行うために多くのデータが必要であり、瞬間ルミノシティの向上が行われており、現在では1.4×10³⁴ cm⁻²s⁻¹に達している。

衝突で起こる全ての事象を記録することは不可能なので、データを記録する前に必要な事象をトリガ ーシステムによって選別する。例えばミューオントリガーはヒッグス粒子の崩壊で生成する数+ GeV の ミューオンを含む事象やBメソンの崩壊で生じる数 GeV のミューオンを含む事象等様々な事象を取得す るために用いられるが、記録前の選別で不要な事象が混入してしまうと、その分これらの重要な事象の 統計量を失ってしまう。そのため、衝突頻度の増大を活かすためにトリガーにおける選別能力の向上が 必要である。

ミューオントリガーでは、まずレベル1トリガーでハードウェアを用いた高速な選別を行ったあとで、 ハイレベルトリガーでソフトウェアによるオンライン飛跡再構成にもとづいた精密な事象選別を行う。 ハイレベルトリガーはさらに多段階に分かれており、その最初の段階(MuonSA)ではシンプルな飛跡再構 成アルゴリズムを使用し高速な処理を行いながら、レベル1トリガーよりも精密な判定を行う。

私は精密なミューオンの飛跡測定器である CSC 検出器(Fig. 1)での位置と方向の測定アルゴリズムを 開発・実装し、MuonSA に組み込むことで p₁の分解能の向上を行った。

CSC が磁場よりも内側に配置されていることを活かした pr計算アルゴリズムの考案・開発を行った。 25GeV での従来の prの測定誤差は8%だったが、開発したアルゴリズムの使用によって3%に改善した。(Fig.2 丸→三角)

次に、開発した pr計算手法を MuonSA に導入した場合のトリガー効率を評価し、閾値以上のミューオンに対するトリガー効率を維持しつつ閾値以下のミューオンに対するトリガーを削減できることを確かめた。

さらに、MuonSA によって発行されているトリガーを衝突によって生じたミューオン由来のものとバッ クグラウンドに由来するフェイクに分類し、それぞれに対する CSC の情報を用いたレートの削減を評価 した。



Fig. 1. The muon system. The CSC is located in the innermost layer of the muon system.



Fig. 2. p_T-resolution with the current and the new methods. The circles are for the current method and the triangles are for the new one.

ニュートリノ反応測定実験に用いる 高位置分解能 Scintillating Fiber Tracker の開発

高エネルギー物理学研究室 平本綾美

Abstract We are developing a scintillating fiber tracker with a new idea of position measurement for precise observation on neutrino interactions. High position resolution can be achieved by arranging square fibers in a slanting lattice pattern and measuring light yield ratio of neighboring fibers. We have evaluated the detector performance with a prototype and a positron beam. © 2017 Department of Physics, Kyoto University

T2K実験は、ニュートリノ振動を精密測定する長基線ニュートリノ振動実験である。現在T2Kにおける 系統誤差の大きな要因となっているのがニュートリノと原子核の反応の不定性であり、近年とくに、始 状態で核子が2個関係し終状態で陽子が2本でてくる2p-2h反応の不定性が注目を集めている。陽子の飛 跡は非常に短く、2p-2h反応は現在の前置検出器では観測することができない。不定性削減のためには 2p-2h反応を直接観測することが必要で、そのための手段として原子核乾板が有効であると考えた。

現在、原子核乾板を用いてニュートリノ反応点周りを精密に観測する実験が進行しており、T2K前置 検出器ホールにおける観測が試験的に行われている。今後、大質量の水標的およびそれに伴う大面積の 原子核乾板を用意し観測をすすめるにあたり、原子核乾板とT2K前置検出器のトラックマッチングのた めの新しい検出器が必要となる。そこで我々は、Scintillating fiberおよびMPPC(Multi Pixel Photon Counter)を用いたトラッカーの開発を行っている。

モンテカルロシミュレーションによるニュートリノ反応の見積もりを行った結果、トラッカーは約200 µ mの位置分解能が要求されることがわかった。この要求を実現するため本研究では、隣り合うファイバーの光量比を用いることでより高い位置分解能に達する手法を考案し、プロトタイプ検出器による原理検証を行ってきた。

Scintillating fiberの光量は荷電粒子が通過した際に通る距離に比例するため、Fig.1のように角フ アイバーを置くことにより、粒子の通過位置によって異なる光量比を得ることができる。この比を用い て位置を再構成することで、ファイバーを細くせずに位置分解能を向上させることが可能となる。

本論文では、2mm角のファイバー(Kuraray, SCSF-78)とMPPCを用いたプロトタイプ検出器を作成し、2 度にわたり陽電子ビームを用いた性能評価を行った結果について報告する。2枚のレイヤーにおいて再 構成された位置の差をとる(Fig. 2)ことで位置分解能を評価し、MIP換算で200 µ mの位置分解能を達成し た。さらに反射材などによりファイバーの条件を変更した場合の光学的なクロストークの変化や、粒子 の入射角度による位置分解能の変化などについても考察を行い、実機に向けた最適化を行った。





Fig. 1. Basic concept of position measurement

Fig. 2. Subtraction of reconstructed positions between two layers (2mm fiber detector, positron beam at 15 cm from MPPC).

ホログラフィックQCDにおける Hダイバリオンの研究

原子核理論研究室 松本滉平

Abstract We study the H-dibaryon (uuddss) in holographic QCD with large N_c , where all baryons appear as topological chiral solitons of Nambu-Goldstone bosons and (axial) vector mesons. We present the formalism of the H-dibaryon described as an SO(3)-type hedgehog state in holographic QCD, and investigate its properties in the chiral limit. © 2017 Department of Physics, Kyoto University

Hダイバリオン(uuddss)はバリオン数 2、SU(3)フレーバー1 重項のエキゾチックハドロンである。 1977年にJaffeによりその存在が予言され[1]、MIT バッグ模型や Skyrme 模型を用いた解析[2]から H 粒子が安定である可能性が理論的に示唆されたが、その後の実験でダブルハイパー核 (AA⁶He) が発見され [3]、少なくとも現実世界(physical point)においては、H ダイバリオンは強い相互作用に対して安定な束縛 状態でないことが示された。しかしながら共鳴状態として存在する可能性などは現在なお指摘されてお り[4]、また近年の格子 QCD の計算[5]においても、フレーバーSU(3)対称で質量の大きな領域において H ダイバリオンは安定であることが指摘されるなど、H 粒子は依然、ハドロン物理学における興味の対象 となっている。

本研究では、フレーバーSU(3)対称領域の中でも重要な領域の1つである、カイラル極限 (m₁ = m_d = m_s = 0) での H ダイバリオンの性質の解明を試みる。なお、格子 QCD はハドロン質量を計算する上で 強力な手法である一方、ゼロ質量粒子の扱いが困難であるという側面があり、カイラル極限の計算には 向かない。それゆえ本研究では、格子 QCD とは相補的に、近年の非摂動的手法であるホログラフィッ ク QCD[6]の枠組みにおいて、ソリトン描像を用いた解析を行う。ホログラフィック QCD は、超弦理論 において massless QCD と等価な D-ブレーン系 (S¹-compactified D4/D8/D8) から large N_c でのゲージ/重力 対応によって導かれる理論であり、全てのバリオンは南部-Goldstone ボソンと(軸性)ベクトル中間子か らなるトポロジカルなカイラル・ソリトンとして現れる[6.7]。そこで本研究では、H ダイバリオンを、 Skyrme 模型での解析[2]に用いられたのと同様の SO(3)型のヘッジホッグ・ソリトン解として記述し、 SU(2)でのバリオンを解析した先行研究[7]にならい、まずホログラフィック QCD での SO(3)型のソリト ンに対する作用を導出した[8]。その際、低エネルギーの有効理論で重要な、masslessの南部-Goldstoneボ ソンと最も軽いベクトル中間子のみを考慮した。そしてその作用に基づいた数値解析を行い、ホログラ フィック QCD における H ダイバリオンの質量及び半径を計算した。その結果、特にカイラル極限での 質量に関する結果として、H ダイバリオンの質量はバリオン数1のヘッジホッグ・ソリトン質量のほぼ 2倍であることを明らかにした[8]。またこのことより、カイラル極限においてHダイバリオンの質量は 2核子質量よりも小さくなるという示唆を得た。

References

[1] R. L. Jaffe, Phys. Rev. Lett. 38, 195-198 (1977); Erratum 38, 617 (1977).

- [2] A. P. Balachandran, F. Lizzi, V. G. J. Rodgers and A. Stern, Nucl. Phys. B256, 525-556 (1985);
 R. L. Jaffe and C. L. Korpa, Nucl. Phys. B258, 468-482 (1985).
- [3] K. Imai, Nucl. Phys. A527, 181c-194c (1991); H. Takahashi et al., Phys. Rev. Lett. 87, 212502 (2001).
- [4] Y. Yamaguchi and T. Hyodo, Phys. Rev. C94, 065207 (2016).
- [5] S. R. Beane et al. (NPLQCD Coll.), Phys. Rev. Lett. 106, 162001 (2011);
 - T. Inoue et al. (HAL QCD Coll.), Phys. Rev. Lett. 106, 162002 (2011); Nucl. Phys. A881, 28-43 (2012).
- [6] T. Sakai and S. Sugimoto, Prog. Theor. Phys. 113, 843-882 (2005); 114, 1083-1118 (2005).
- [7] K. Nawa, H. Suganuma and T. Kojo, Phys. Rev. D75, 086003 (2007).
- [8] K. Matsumoto, Y. Nakagawa and H. Suganuma, Proc. of 14th Int. Conf. on "*Meson-Nucleon Physics and the Structure of the Nucleon*", July, Kyoto, arXiv:1610.00475[hep-th], JPS Conf. Proc. (2017) in press.

MAIKo アクティブ標的のアップグレードと性能評価

原子核・ハドロン物理学研究室 森本貴博

Abstract Cluster correlation is of great interest from a view of nuclear structures. We are planning to measure cross sections of the ${}^{10}C(\alpha, \alpha'){}^{10}C$ reaction to search for cluster states in unstable ${}^{10}C$ nuclei. We developed the MAIKo active target to detect low-energy α particles recoiled by ${}^{10}C$. In the present study, we upgraded the MAIKo active target and carried out a performance test. © 2017 Department of Physics, Kyoto University

有限量子多体系である原子核では多様な物理現象が発現する。それらの中でも、クラスター相関は最 も興味深い現象の一つである。多くの原子核の基底状態では、核子が平均ポテンシャル中を独立に運動 すると考える平均場模型が有効であり、外見上は、クラスター相関を消失している。しかし、ある種の 励起状態では強いクラスター相関の発現によって、複数個の核子がクラスターを構成し、核構造を劇的 に変化させることが知られており、原子核におけるクラスター相関の発現と消失の機構を明らかにする ことは、有限量子多体系である原子核のダイナミクスを理解する上で非常に重要である。

現在、我々は不安定核である¹⁰Cにおけるクラスター状態を探索し、その構造を明らかにする研究を 計画している。クラスター状態を探索するための手法として、原子核とアルファ粒子の非弾性散乱を重 心系の前方角度で測定する方法が提案されているが、これを不安定核に適用することは容易ではない。 不安定核を標的にすることはできないので、不安定核をビームとして He 標的に入射する逆運動学条件 下で測定する必要がある。しかし、重心系での前方角度に散乱されたアルファ粒子の実験室系における 運動エネルギーは低く、通常の実験セットアップでは検出が困難である。そこで我々は荷電粒子の飛跡 を測定できる Time Projection Chamber の検出ガスが標的を兼ねる、アクティブ標的 MAIKo (mupic based active target for inverse kinematics.) の開発に取り組んでいる。MAIKo では、散乱が検出 器の内部で起こるので、原理的にはすべての立体角に飛んだ低エネルギー粒子を検出することが可能と なる。

本研究では、MAIKo アクティブ標的のアップグレードを行い、その性能を評価した。

MAIKo チェンバー内の圧力・温度・水分量・ガス流量をモニターし、自動で圧力調整のフィードバックをかけるガス循環機構を開発した。また、ドリフトケージの剛性を高めてドリフト電場の一様性を確保するとともに、チェンバー内のアウトガスを削減するために、ドリフトケージの柱の材料を見直した。

目標とする ¹⁰C(α, α')¹⁰C 反応測定のために、散乱されたアルファ粒子の飛程や信号の波高などの要請 から、最も実験に適しているガス混合比の候補として He(98%) + CF₄(2%), He(96%) + CO₂(4%) の二 つを決定した。実際に MAIKo チェンバーに封入したガスの混合比を確認するために、ドリフト電場の 強さを変えながら、²⁴¹Am 線源から放出されるアルファ粒子の飛跡を測定し、ドリフト電場とドリフト 速度の関係を調べた。そして、この結果を Magboltz によるシミュレーション計算の結果と比較するこ とでガス混合比を推定した。また、長時間にわたってガスをフローさせながら同様の測定を行い、ガス 組成比の長期安定性も調べた。

次に飛程と角度の分解能を評価するために、アルファ線源をチェンバー内に入れて、様々な角度に飛 んだアルファ粒子の飛跡を測定した。測定データから飛跡を再構成する手法を開発し、飛程と角度の分 解能が最良となるドリフト電場の強さを決定した。さらに、水平面と平行にコリメートしたアルファ線 源を鉛直方向に移動させることで、電子のドリフト距離を変えながら飛跡の測定を行い、ドリフト中の 電子の拡散が波高や分解能に及ぼす影響を評価した。

最後に、MAIKoの飛程と角度の分解能から、 ${}^{10}C(\alpha, \alpha'){}^{10}C$ 反応における励起エネルギー分解能を評価し、実際の測定に向けて今後の展望を議論した。

Moduli stabilization と Poly-instanton 効果によるインフレーション

素粒子論研究室 山本 順二

Abstract

We study moduli stabilization problem which arises when we compactify 10d superstring theory to 4d effective theory. Also we study inflation by the modulus. In non-perturbative corrections to fix moduli, there's poly-instanton correction that is expected when an instanton influences other instanton correction. Here we discuss axion inflation by poly-instanton. © 2017 Department of Physics, Kyoto University

超弦理論は標準模型を超え、重力まで含む ultraviolet の究極的な理論の有力な候補の1つである。しかし、10次元の理論をコンパクト化して4次元の低エネルギー物理を考える際には、余剰6次元空間の幾何を定める moduli を適切に固定しなくてはならない。超弦理論では moduli として、string coupling の大きさを決める axion-dilation, 余剰空間の体積に関係する Kähler moduli, 余剰空間の複素構造に関係する complex structure moduli に分類される。TypeIIB 型超弦理論の場合、このうち Kähler moduli には、string loop と α '補正の最低次のオーダーという摂動の範囲内で、ポテンシャルが極小値を持たず固定されない no-scale structure という構造が見られる。この Kähler moduli の stabilization に関しては KKLT scenario[1] や Large Volume Scenario[2]が提案されており、string loop, α '補正や非摂動効果によって原理的に固定されらる。

またその moduli stabilization と同時に議論されている分野として inflation がある。moduli を固定する ポテンシャルを立ち上げると同時にそれらを inflaton として slow-roll inflation を起こしうる非常に平らな ポテンシャルを生み出せないかという議論がなされている。その手法の1つとして poly-instanton による 議論がある[3]。Kähler moduli *T1*, *T2* に対して、D-brane instanton による非摂動効果は superpotential へ補 正 δ W=Aexp(-*aT*₁)+Bexp(-*bT*₂) を生成する。これに対して poly-instanton は superpotential へ

$$\delta W = Ae^{-a(T_1 + Be^{-2\pi T_2})}$$

という寄与を生み出す。deformation が不可能である rigid な cycle に巻き付いた D-brane instanton を考え ると、superpotential ヘ単一の指数関数的な非摂動効果が生じる。それに対して poly-instanton 効果は、rigid なD-brane instanton だけでなく、さらに deformation が可能な cycle に巻き付いた D-brane instanton を考え、 それにより生じる gauge kinetic function への非摂動効果によって生じる。結果として poly-instanton 効果 は T_2 の moduli に関して、exp(- aT_1)の抑制がかかる形としてとらえられる。特に Kähler moduli に関して は前述の no-scale structure によって string loop と α '補正の最低次の摂動の範囲内で potential が立ち上が らないという性質がある。したがって poly-inatanton 効果は単一の D-brane instanton 効果より抑制がかか る分 inflation に適した平らなポテンシャルを実現しやすいと期待される。

本修士論文では、まず moduli stabilization についてこれまでの議論をレビューする。そして、 poly-instanton 効果によって inflation に適したポテンシャルを立ち上げることができるかについての議論 を行う。また特に axion による inflation について議論したい。

References

[1] S. Kachru, R. Kallosh, A. D. Linde, and S. P. Trivedi, Phys.Rev. D68 (2003) 046005.

[2] V. Balasubramanian, P. Berglund, J. P. Conlon, and F. Quevedo, JHEP 0503 (2005) 007.

[3] M. Cicoli, F. G. Pedro and G. Tasinato, JCAP 1112 (2011) 022.

リングダウン重力波を用いた一般相対性理論の検証

天体核研究室 山本貴宏

Abstract We focus on the ringdown phase of gravitational waves from compact binary coalescences. Using some analytic templates with modified ringdown wave forms, we estimate the detectability of the deviation from General Relativity. © 2017 Department of Physics, Kyoto University

2015年9月14日,アメリカの重力波検出器 LIGO(Laser Interferometer Gravitationalwave Observatory) が連星ブラックホール合体時の重力波を史上初めて直接検出した[1]. 詳 細な解析の結果,このイベントは29太陽質量のブラックホールと36太陽質量のブラックホー ルが合体し,62太陽質量のブラックホールになったときに放出されたものとされた.合体後 にできたブラックホールは重力波を放出し,定常状態(カー・ブラックホール)に落ち着いて いく.この過程で放出される重力波はリングダウンと呼ばれる.リングダウンはブラックホー ルの準固有振動で記述され,減衰振動の重ね合わせで表される.

一方,特異点回避や情報喪失問題等の観点から,ブラックホールに代わる天体の可能性,あ るいは事象の地平面の量子論的修正などが議論されている.こうした天体や量子論的効果は リングダウン波形にも影響を与える場合がある.すなわち,地平面における境界条件が変更さ れることによって,準固有振動のスペクトルにも違いが現れる.この差異を捉えることができ れば,コンパクト連星合体後にできた天体が古典的なブラックホールであるかどうか,ある いはブラックホールの地平面における量子効果を検証することができる[2].

本研究では、ブラックホール代替天体や量子論的補正等を念頭におき、GW150914のリン グダウン波形を解析する.まず、リングダウン部分だけに注目し、解析に用いる理論波形を複 数用意して、それぞれを比較することで、現時点での理論波形が持つリングダウン解析におけ るパラメータ推定の精度を検証した.その結果、テンプレートに単純な工夫しても、パラメー タ推定の精度が改善することはなかった.

続いて,重力波解析に用いられるふたつの理論波形(IMRPhenomD, SEOBNRv4) に注目する.このうちIMRPhenomDのリングダウン部分の振動数と減衰率を修正し,SEOBNRv4との相関を計算した.これにより,連星合体後にできた天体の準固有振動の推定から,一般相対論からのずれが検出可能であるかを検討した.

References

B. P. Abbott *et al.*, Phys. Rev. Lett. **116**, 061102 (2016).
 B. P. Abbott *et al.*, Phys. Rev. Lett. **116**, 221101 (2016).

運動学的スニヤエフ・ゼルドヴィッチ効果を用いた 宇宙論的ベクトルモードの検出可能性

基礎物理学研究所 山本 久司

Abstract We study the detectability of the cosmological vector mode by kinematic Sunyaev-Zel'dovich (kSZ) effect. We especially focus on the cosmic string network as the scenario generating the vector mode and investigate whether or not the kSZ measurement surpasses the other measurements with respect to the detectability.

© 2017Department of Physics, Kyoto University

運動学的スニヤエフ・ゼルドヴィッチ効果(kSZ 効果)とは、運動する銀河団によって宇宙マイクロ 波背景放射(CMB)が温度変化を受ける効果である[1]。kSZ 効果の特徴は、その温度変化の大きさが銀 河団の固有速度に比例することであり、従って kSZ 効果を観測することによって銀河団の固有速度を測 ることができる。また銀河団の固有速度は宇宙の構造形成の成長率と関係しているため、kSZ 効果のシ グナルを調べることによって宇宙論のモデルの制限を行うことができる。kSZ 効果は 2012 年に初めて検 出され[2]、様々な CMB の将来観測において更に精密な測定が期待されている。

本研究は、kSZ 効果の将来観測を念頭に置いて、次に述べるベクトルモードを生成するモデルの制限 を目的としている。一般に一様等方宇宙からの摂動量はスカラー・ベクトル・テンソルモードに分解で き、このうちスカラーモードは密度ゆらぎに対応して宇宙の構造の主な種となる。またテンソルモード は重力波に対応し、初期宇宙で生成されてから現在まで残っていると考えられている。標準宇宙論では、 初期宇宙に生成されるベクトルモードは宇宙膨張によって減衰してしまうが、後の時刻でこのベクトル モードを生成するようなメカニズムとして宇宙磁場、2次以上の摂動の効果、また宇宙ひもなどがある。 これらのベクトルモード生成のメカニズムが存在する場合は、宇宙の速度場にこの成分が渦度として含 まれる。従って、本研究で着目する kSZ 効果を通して速度場を観測することで、これらのベクトルモー ド生成のモデルを制限することができる。

本研究では、この目的のためにベクトルモードがある場合の kSZ 効果の定式化を行い、スカラーモードとベクトルモードが観測から分離できることを示した。そしてフィッシャー解析を用いて将来観測でのモデルの制限について考察する。この方法論はモデルに依らず用いることができるが、解析の際はベクトルモード生成のモデルの一例として特に宇宙ひもを取り上げる。宇宙ひもとは、初期宇宙において対称性の破れで形成される一次元状の位相欠陥であり、このモデルに含まれるひもの組み換え確率Pと張力*G*µというパラメータに観測からどの程度の制限をつけることができるのかについて調べた。その際、比較として銀河の観測だけを用いた解析も行い、銀河と kSZ 観測を組み合わせた解析によって宇宙ひものパラメータ決定精度がどの程度改善されるのかについて調べた。

解析の結果、kSZ 観測を取り入れると、パラメータ領域にも依るが銀河だけの解析に比べて決定精度 は3-5倍程度改善されることが分かった。また ACTPol. という将来観測における kSZ 測定を用いた $G\mu$ の 制限では、1 σ の精度でP = 10⁻³の場合に $G\mu$ = 4 × 10⁻¹⁴まで検出できることを示した。これは、重力レ ンズ効果を用いた場合の制限[3]に比べて約10⁴倍の精度で $G\mu$ が決定できることになる。

References

[1] R. A. Sunyaev and Y. B. Zeldovich, Comments Astrophys. Space Phys. 4 (1972) 173–178.

[2] N. Hand et al., Physical Review Letters 109 (July, 2012) 041101

[3]D. Yamauchi, T. Namikawa and A. Taruya, JCAP 1210 (2012) 030, [1205.2139]

MeV ガンマ線望遠鏡 ETCC における 新トリガー方式の開発と不感時間削減

宇宙線研究室 吉川慶

Abstract For MeV gamma-ray astronomy, we are developing an Electron-Tracking Compton Camera (ETCC), which provides all the parameters of Compton-Scattering by measuring three-dimensional recoil-electron track. We present the performance of new data-acquisition system to reduce the dead time dramatically by changing the initialization of trigger from the scintillators to Time projection chamber. © 2017 Department of Physics, Kyoto University

MeV ガンマ線の観測は、元素合成[1]・粒子加速[2]・強い重力場[3]といった様々な天体現象を明らか にする。しかし、コンプトン望遠鏡 COMPTEL 以降の観測が停滞している。その原因としてコンプトン 散乱の測定が難しく、従来の検出器では散乱過程の全物理量を測定できていなかったことがある。さら に宇宙線と衛星筐体の相互作用により多量の雑音放射線が生じることが挙げられる。これらを打開する には、事象ごとに到来方向を決定することと、ガンマ線以外の事象は強く排除することが必要である。 我々は次世代の MeV ガンマ線望遠鏡として、それが可能な電子飛跡検出型のコンプトン望遠鏡 ETCC

の開発を行っている[4]。前段のガスを用いた Time Projection Chamber(TPC)でコンプトン散 乱を捉え、反跳電子の飛跡とエネルギーを取得し、 後段のシンチレータで散乱ガンマ線を吸収し、コ ンプトン散乱における全物理量を測定する。TPC でエネルギー損失率を得ることで粒子識別を行い、 電子であることを検証し、散乱運動学テストによ り、コンプトン散乱イベントであることを保証し ている。

現行の ETCC では、シンチレータのヒットで トリガーを始動する。しかしシンチレータは TPC より検出頻度が二桁程度高いため、トリ ボンマ線 Scinti. hit scinti. gate Fリフト 方向 TPC hit Coincidence TPC scinti. trigger シンチの波形 トリータ

Fig. 1. Schematic view and timing chart of TPC triggered ETCC

ガーの大半は TPC にデータが存在せず、不感時間はシンチレータの検出頻度に依存している。また、 TPC とシンチレータはともに VME を用いてデータを収集しているが、その通信速度が遅く不感時間が 増やす要因となっている。この二つを解決するには、TPC でトリガーをかけること(Fig. 1.)と、データ 転送の高速化が必要である。そこで、数 kHz でのデータ取得を目標に、TPC、シンチレータそれぞれ

に新回路を導入、トリガーを TPC で発生する方式に変更した。 さらに、ギガビットイーサネットでデータを送るようにしたこ とで、データ収集率が1kHzのときに、不感時間を3.3%に改 善できた(Fig. 2.)。またシンチレータは波形記憶 ADC を導入、 波形の立ち上がり時刻から TPC のドリフト時間を求められる ように変更し、TPC トリガーの問題であったドリフト時間不定 問題を解決し、高係数率トリガーを実現。そして、RCNP にて 80 MeV の陽子を水ターゲットに当て、放射される電子・陽電 子対消滅線を測定し、高係数率に耐えられるのか検証した。

References

- [1] R. Dihel, Proceedings of Science, 037(2011).
- [2] Urry, C. M. et al., Publ. Astron. Soc. Pac. Phys., 107, 108(1995).
- [3] McConnell, M. et al., A&AS 120, 149-152 (1996).
- [4] T. Tanimori et al., ApJ 810, 28 (2015).



Fig. 2. Variation of the dead time of the TPC DAQ system. The red and blue circles show data measured with ethernet and VME, respectively.