平成 27 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28年2月3日、4日)

物理学第二分野

修士論文発表会

日時	2016年2月3日(水)9時00分~
	2月4日(木)9時00分~
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3日(水)

1. 回転する超大質量星が一般相対論的不安定性により重力崩壊する条件

打田 晴輝 (9:00)・・・1

2. 宇宙の構造形成における質量をもったニュートリノの重力的クラスタリング

大石 直矢 (9:20)・・・2

3. J-PARC K1.8BR ビームラインにおける Neutron Counter の較正

加藤 司真 (9:40)・・・3

4. 崩壊モードを考慮した閾値近傍のエキゾチックハドロンの複合性

神谷 有輝 (10:00)・・・4

5. AdS₅×T^{1,1}空間における弦のカオス的運動

京野 秀紀 (10:20)・・・5

6. Yang-Baxter シグマ模型としての超弦理論の可積分変形

坂本 純一 (10:40)・・・6

7. KOTO 実験におけるビーム外縁部を覆う中性子低感度な光子検出器の開発と性能評価

篠原 智史(11:00)・・・7

8.3次元超対称ゲージ理論の厳密な計算とM理論

清水 数馬 (11:20)・・・8

9. 高角度分解能 MeV ガンマ線望遠鏡に向けた高ゲイン・高位置分解能ガス検出器の開発
 竹村 泰斗(11:40)・・・・9

10. Gamma-Ray Bursts のジェット駆動機構解明のためのニュートリノ輻射輸送

西野 裕基(13:00)・・・10

11. LEPS2 シリコンストリップ検出器の読み出し回路の性能評価

乗竹 剛志 (13:20)・・・11

12. 高エネルギー散乱過程における Non-Global Logarithm の再足し上げ
 萩原 慶一(13:40)・・・12

13. ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊探索実験AXELの試作機の製作と性能評価

潘 晟 (14:00) ・・・13

14. 輻射フィードバックによる星の限界質量の金属度・降着率の依存性福島 肇(14:20)・・・14

15. Antisymmetrized Quasi Cluster Model を用いた ¹⁶O における ¹²C+αクラスター構造と *E*0 遷移の解析

松野 秀昭 (14:40)・・・15

16.1-loop Corrections to Holographic Entanglement Entropy 宮川 大輝(15:00)・・・16

17. AdS/CFT 対応のテンソルネットワークによる記述と情報計量

宮地 真路 (15:20)・・・17

18. 電子飛跡検出型コンプトンカメラの飛跡解析方法の改良による角度分解能の向上
 宮本 奨平(15:40)・・・18

19. アイソスピン射影 AMD 法の開発と¹⁰B への適用

森田 皓之(16:00)・・・19

ATLAS 実験におけるフェイク2ミューオンの除去による高効率・低バックグラウンドな
 ミューオントリガーアルゴリズムの研究

門田 隆太郎(16:20)・・・20

21. AXEL における高エネルギー分解能を達成するための MPPC および読み出し回路についての 研究

栁田 沙緒里 (16:40)・・・21

2月4日(木)

22. 次世代長期線ニュートリノ振動実験に向けた高分解能飛跡検出器の開発

山本 実加 (9:00)・・・22

23. 汎関数繰り込み群を用いた QCD 臨界点におけるソフトモードの解析

横田 猛 (9:20)・・・23

24. 原子核におけるエキゾチックな構造である α-ring 状態とトーラス形状との関連
 吉居 正晃 (9:40)・・・24

25. ASTRO-H 衛星搭載 X 線 CCD カメラ SXI の性能評価と較正方法の確立

鷲野 遼作(10:00)・・・25

26. レーザー加速パルス電子線を用いた超高速電子線回折装置に関する研究

渡邉 浩太(10:20)・・・26

回転する超大質量星が一般相対論的不安定性により 重力崩壊する条件

基礎物理学研究所 打田晴輝

Abstract We calculate the condition in which rigidly rotating supermassive stars(SMSs) become unstable due to the general relativistic instability. We suppose that the SMSs are in a nuclear burning phase. We find that while non-rotating SMSs with mass $\sim 10^5 \cdot 10^6$ solar mass may undergo a gravitational collapse, rotating SMSs are likely to be stable against collapse unless they are able to accrete 2-5 times more mass during the hydrogen-burning phase of their evolution. © 2016 Department of Physics, Kyoto University

赤方偏移 z~6(宇宙誕生から約8億年後)の初期宇宙には10億太陽質量程度の超巨大ブラックホール(SuperMassive Black Hole; SMBH)が存在することがわかっている(e.g.,[1])。有力な SMBH 形成シナリオとして天体が重力崩壊した際に形成される BH を種としてガス降着により成長したというシナリオがあるが、典型的な初代星の上限質量である 100太陽質量程度では成長が間に合わないことが分かっており、現在問題になっている。この問題の解決となる有力な説として初期宇宙 10万太陽質量程度の超大質量星(SuperMassive Star; SMS)が形成され、重力崩壊により同程度の質量の BH となり、この BH を種として成長して SMBH となった、という Direct Collapse (DC)シナリオが考えられている。SMS が形成されるのかについては未だ解明されていないが、近年の研究によって 0.1-1 太陽質量/年 という質量降着率が長期に渡り実現されれば10万太陽質量程度の SMS が形成されうることが分かっている[2]。

DCシナリオでは種BHの性質は重力崩壊する瞬間のSMSの状態に依存する。従ってSMSが重力崩壊する 条件について考える必要がある。SMSは質量降着により質量を増すごとに中心密度が上昇し、一般相対 論的効果が大きくなる。一般相対論的効果はSMSを不安定化させることが知られており[3]、この効果 により成長のどこかで重力崩壊すると考えられている。SMSは輻射圧とガス圧で支えられた天体である が、輻射圧が非常に強くガス圧はSMSの形状にほとんど寄与しない。また、一般にSMSは回転している がその効果は非常に小さくSMSの質量の大半は球対称から変化しない。しかし不安定性を考える際ガス 圧及び回転の補正は安定化に寄与することが分かっており、またこれらの効果は一般相対論的効果と 同じ大きさであり無視できない。故に重力崩壊はこれら全ての効果を考慮に入れて考えなくてはなら ない。そこで本修士論文ではTurning Point法[4]と呼ばれる方法を用いてこれら全ての効果を入れて 数値的に不安定となる点を求めた。その際SMSは一様回転していると仮定した。またその結果を用いて SMSの中心温度が異なる場合に回転の効果がどこまで強く効くのかを調べた。またSMSが崩壊した際に どのようなBHが形成されるのかについて予想した。

その結果中心で水素燃焼が起きている10万太陽質量程度のSMSは回転していると無回転の時に比べ最 大で5倍近い質量まで重力崩壊せずに耐えられることが分かった。この結果を用いると質量降着率が 0.1太陽質量/年程度では水素燃焼時に重力崩壊せずヘリウム燃焼以降までSMSが進化する可能性が考え られる。また、重力崩壊によりSMSはその質量のほぼ全てがBHとなるが、SMSがある程度速く回転して いればその質量の数%がディスクとしてBHの周りに残ることが分かった。

- [1] Mortlock, D.J., Warren, S.J., Venemans, B.P., et al. 2011, Natur, 474, 616
- [2] Hosokawa, T., Yorke, H.W., Inayoshi, K., Omukai, K., & Yoshida, N.2013, ApJ, 778, 178
- [3] Chandrasekhar, S., 1964, ApJ, 140, 417
- [4] Friedman, J. L., Ipser, J. R., & Sorkin, R. D., 1988, ApJ. 325, 722

宇宙の構造形成における 質量をもったニュートリノの重力的クラスタリング

基礎物理学研究所 大石直矢

Abstract We study the clustering of massive neutrinos in the non-linear regime of gravitational evolution. Specifically, we discuss validity of fluid treatment on the massive neutrinos based on the collisionless Boltzmann equation.

© 2016 Department of Physics, Kyoto University

ニュートリノ振動の観測によって、ニュートリノは小さいながらも質量をもつことが分かっている。 その一方、我々の宇宙は多量のニュートリノで満ちていると考えられている。よって、宇宙初期に存在 した密度ゆらぎが重力進化することで形成される宇宙の大規模構造にも重力相互作用を通じて少なか らず影響を与えうる。

現在ニュートリノの質量について、素粒子物理からは例えばトリチウムのベータ崩壊から、宇宙論からは宇宙マイクロ波背景放射や銀河サーベイなどの観測データを組み合わせることで、上限がついている[1][2]。今後、宇宙論では大規模構造の精密観測からニュートリノの質量を測定しようとしており[2]、その質量測定に向けて宇宙の構造形成に対する精密な理論計算が必要不可欠となっている。

宇宙の構造形成の理論計算においてニュートリノは本来、無衝突ボルツマン方程式に基づいて記述される。しかし、計算コストの問題から、粒子法によるシミュレーションや流体とみなしてニュートリノの重力的進化を取り扱う手法がこれまで用いられてきた。コールドダークマターと違いニュートリノは大きな熱的速度分散をもつので、こうした手法が良いのかどうか一般に自明ではないが、重力進化の線形理論に基づく解析では、全質量が Σm_y>0.05eV なら波数 k<1h Mpc⁻¹のスケールまで流体的な取り扱いで十分精度よくニュートリノを記述できることが示されている[3]。ただし、重力進化の非線形領域で定量的な議論は未だされていない。

本研究では重力進化の非線形領域でニュートリノを流体として取り扱う妥当性について議論する。具体的には、ニュートリノの自己重力を無視し、コールドダークマターハロー(CDM ハロー)周りにどれだけニュートリノが集まるかを次の2つの方法で数値的に求める。1つ目は N-one-body アプローチと呼ばれる無衝突ボルツマン方程式を解く方法である。2つ目は連続の式と圧力入りのオイラー方程式からなる流体の方程式を解く方法である。

2つの方法を比較して得られた結果は次の通りである。流体的な取り扱いでは無衝突ボルツマンに比べて、CDM ハロー中心部分に集まるニュートリノの個数密度を一般に過小評価する。その傾向は、CDM ハローの質量が大きくなるにつれて顕著になる。ニュートリノ全質量Σm,=0.3eV の場合、質量 M_{halo}=10¹³ M_o以上の CDM ハローだとニュートリノの中心個数密度は4 倍以上ずれる。結果として、線形理論ではパーセントレベルで無衝突ボルツマンと一致するスケールでも 20%以上ずれることが分かった。

このずれは流体的な取り扱いで無視していた高次モーメントが効くことに起因する。速度分散(音速) を N-one-body アプローチで見積もったところ、CDM ハローのビリアル半径より数倍以上外側から、流体 で仮定した値よりずれ始めることが分かった。従って、重力進化の非線形領域ではニュートリノを流体 的に取り扱うことはできないといえる。

References

[1] J. Wolf. Nucl.Instr.and Methods in Phys. Research A 623 (2010) 442-444

- [2] K.N. Abazajian et al. Astroparticle Physics 63 (2015) 66-80
- [3] M. Shoji and E. Komatsu. Phys. Rev. D 81,123516 (2010)
- [4] A. Ringwald and Y.Y.Y. Wong. JCAP 12 (2004) 005

J-PARC K1.8BR ビームラインにおける Neutron Counter の較正

原子核ハドロン物理学研究室 加藤司真

Abstract We plan to measure K⁻pp bound state or Λ (1405) at J-PARC K1.8BR beamline. Forward scattering neutron is detected by Neutron Counter(NC) which is 15 meters away from target system. We have measured NC's neutron detection efficiency and charge exchange cross-section by observed the p(K⁻, n) Ks⁰ reaction.

© 2016 Department of Physics, Kyoto University

我々の実験グループでは、³He(K⁻, n)反応を測定しK⁻pp状態を探索する実験やd(K⁻, n)反応を測定する ことで Λ (1405)を観測する実験を計画している。反K中間子は原子核中において核子との間で強い引力が 働くことで束縛状態が出来ることや、その結果として密度が通常の原子核密度の何倍にもなることが 理論的に計算されている[1]。また、 Λ (1405)はその特異な性質からKNの束縛状態としての見方や、Σπと KNが結合した2つの極の重ね合わせという解釈もされている。しかし、KN間の相互作用については多く の部分が謎に包まれているため、実際にそのようなKNの束縛状態の存否については明らかになってい ない。従って、最も軽いK中間子原子核としてのK⁻pp束縛状態や Λ (1405)について研究することはハドロ ン物理における重要なテーマの一つである。我々の実験グループでは、反応により生成された前方中 性子を測定することで反K中間子が原子核に束縛された最も簡単な系であるK⁻pp状態や Λ (1405)を観測 し、その存否とKN間の相互作用について理解を深めることを目標にしている。

散乱される中性子はその名の通り電気的に中性である。そのためシンチレーションカウンターを用いて中性子を検出する場合は、飛来した中性子がシンチレーター内の水素や炭素の原子核と反応し、散乱された陽子を測ることで間接的に中性子を検出する。そのため中性子の検出効率は、反跳陽子の発するシンチレーション光に対する閾値と大きく関係する。中性子の単色ビームがあれば、これを用いて検出効率を較正することが可能であるが、これが困難であるため多くの場合にはシンチレーター内での中性子反応と反跳陽子による発光をモンテカルロ法によりシミュレートすることにより計算で求めている。しかし、今回E15実験で測定するような0.8-1.2GeVという高い運動量領域での中性子-陽子、中性子-炭素原子核反応ではπ中間子生成も伴い、シミュレーションにのみ頼っていては大きな系統誤差が生じてしまう。

そのため、本論文ではK1.8BRビームラインにおける中性子検出器であるホドスコープの検出効率を 測定した。前方22msr以内に散乱される中性子の運動量と入射位置を、再構成される K_s^0 の運動量と運動 学により計算する。また、液体水素を標的にした $p(K, n)K_s^0$ 反応を考察することでFermi motion やFSIを 考慮する必要がなく、これによりシンチレーションカウンターでの中性子の検出効率を高精度で求める ことができる。さらに物理的に重要な意味を持つ断面積を得られた検出効率から計算し過去のデータと 比較することで、より信頼のできる値であることを確認する。

References

[1] Y. Akaishi and T. Yamazaki, Phys. Rev. C 65, 044005 (2002).

[2] T. Yamazaki and Y. Akaishi, Phys. Lett. B 535, 70 (2002).

[3] T. Hashimoto(E15 collaboration)., arXiv:1408.5637v2[nucl-ex] (2014).

崩壊モードを考慮した閾値近傍のエキゾチックハドロンの 複合性

原子核理論研究室 神谷有輝

Abstract In the framework of the effective field theory, we study the relation between the compositeness of stable bound states with observables. We generalize this relation for the quasi-bound states with finite decay width. We use the generalized relation to discuss the internal structure of exotic hadron candidates. © 2016 Department of Physics, *Kyoto University*

単純なqqメソンやqqqバリオン構造では説明できない、より複雑な内部構造をもつ状態はエキゾチッ クハドロンと呼ばれる。近年重いセクターのハドロンとして見つかった多くのXYZ粒子が、エキゾチッ クハドロンである可能性が指摘され注目を集めている。一方で軽いセクターのエキゾチックハドロン候 補であるA(1405)やa₀(980)の内部構造の探求も理論的かつ実験的に行なわれている。発見されたハド ロンの内部構造を実験の観測量からモデルに依存せず議論する手段として、Weinberg が導いた束縛状態 に対する弱束縛関係式に着目する方法がある[1]。この関係式は、ある束縛状態の波動関数のうちに複 合的状態を見出す確率である複合性を、実験から得られる散乱長と束縛エネルギーから直接決定できる ことを示しており、重水素は陽子と中性子の複合的状態であることが核力ポテンシャルを使うことなく 示された。従ってこの弱束縛状態の内部構造と可観測量との関係式は、状態の内部構造のモデル非依存 な特定に非常に有用である。しかし安定状態を仮定して導かれた関係式は、不安定状態であるエキゾチ ックハドロン候補には適用できない。さらに不安定状態に対しては複合性の値が複素数になるため、複 合性を確率と考えることができず、物理的解釈は困難になる。また関係式に現れる誤差項の物理的意味 が不明瞭なため、複合性をモデル非依存に評価できる条件が不明確であるという問題がある。

本研究ではまず、非相対論的有効場の理論を用いて束縛状態に対する弱束縛関係式を導出する。この 考察により、関係式中のモデル依存性と誤差項との関係を明確にし、複合性をモデル非依存に決定でき る条件を明らかにする。さらに有効レンジ展開が破綻する場合にも複合性が観測量のみで決定できるこ とを示す。次に不安定状態である準束縛状態を記述できる場の理論を用意し、準束縛状態の複合性Xと 散乱長 a_0 、固有エネルギー E_h で決まる長さスケール $R \equiv 1/\sqrt{-2\mu E_h}$ の間に次の弱束縛関係式がモデル非 依存に成り立つことを示す[2]。

$$a_0 = R \left[\frac{2X}{1+X} + O\left(\left| \frac{R_{\text{typ}}}{R} \right| \right) + \left(\frac{\mu}{\mu} \right)^{3/2} \quad O\left(\left| \frac{l}{R} \right|^3 \right) \right]$$
(1)

ここで、 $\mu \geq \mu$ は各々散乱チャネルと崩壊チャネルの換算質量、 R_{typ} は系の典型的相互作用レンジを表す。 また $l = 1/\sqrt{2\mu\nu}$ は崩壊チャネルとの閾値エネルギー差 ν から決まる長さスケールである。閾値エネルギ ー差 ν が十分大きく $|l/R|^3 \ll 1$ が満たされる時、この関係式(1)は束縛状態に対する弱束縛関係式に一致 し、束縛状態に対してと同様に閾値近傍のハドロンの複合性を実験における観測量のみから決定できる ことを示している。また計算される複素複合性の解釈方法を束縛状態の複合性との整合性を考慮して議 論し、Xの値から内部構造を確率解釈する方法を提案する。

最後に、拡張した関係式(1)を実際のエキゾチックハドロンの候補に適用する。知られている散乱長 と固有エネルギーから複合性を評価し、 $\Lambda(1405)$ は $\bar{K}N$ 複合的成分が支配的であること、および $a_0(980)$ は $\bar{K}K$ 複合的成分以外が支配的であることを示す。

References

[1] S. Weinberg, Phys. Rev. 137, B672 (1965).

[2] Y. Kamiya and T. Hyodo, arXiv:1509.00146 [hep-ph].

$AdS_5 imes T^{1,1}$ 空間における弦のカオス的運動

素粒子論研究室(京野 秀紀)

Abstract We study chaotic motions of classical strings in a near Penrose limit of $AdS_5 \times T^{1,1}$. It is known that chaotic motions appear on $T^{1,1}$, and we show that the chaos persists even in the near Penrose limit by providing the Poincaré sections as the existence of chaos. © 2016 Department of Physics, Kyoto University

近年、素粒子論における研究の中でカオスが注目を集めつつある。カオスとは非線形系に現れる非常 に複雑な運動のことを指す。カオスは日常にありふれたものであり、気象現象の予測不可能性のことを 指した「バタフライ効果」などで有名である。素粒子論分野では、ブラックホールの情報喪失問題や熱 化過程をカオスを使って説明しようという試みが近年なされている[1]。ブラックホールついては、その エントロピーの微視的な起源など理解されていないことが多く、その解明は微視的なスケールでの重力 理論の理解に繋がると考えられている。

一方、超弦理論において最も盛んに研究されている対象の一つにAdS/CFT 対応がある [2]。AdS/CFT 対応とは超弦理論とゲージ理論の等価性を主張するものである。この対応を利用して、重力の微視的な 性質をゲージ理論によって解析できると期待されている。AdS/CFT 対応に関わる重要な研究として、 $AdS_5 \times S^5$ 空間上の超弦理論において Penrose 極限と呼ばれる極限をとった時の弦の状態と、ゲージ理 論の演算子に具体的な対応関係を与えたものがある [3]。 $AdS_5 \times S^5$ 空間上の超弦理論は $\mathcal{N} = 4$ 超共形 ゲージ理論に双対であり、文献 [3] では、Penrose 極限によって両理論の一部分を切り出して対応関係が 調べられた。さらに、 $AdS_5 \times S^5$ 空間上の超弦理論と $\mathcal{N} = 4$ 超共形ゲージ理論は共に可積分構造を持っ ており、可積分性を用いて対応関係を一般化する試みが行われてきた。

可積分構造を持ち合わせない AdS/CFT 対応も知らている。 $AdS_5 \times T^{1,1}$ 空間上の弦理論は $\mathcal{N} = 1$ 超 共形ゲージ理論に双対であると考えられており [4]、 $AdS_5 \times T^{1,1}$ 空間上の弦の運動にはカオスが現れる [5]。このとき、弦のカオス的運動がゲージ理論側とどのように対応しているのかは知られていない。そ こで、ゲージ理論との対応を考えやすい Penrose 極限をとってもカオスが現れるかどうかは興味深い問 題である。我々は論文 [6] において、 $AdS_5 \times T^{1,1}$ 空間の Penrose 極限で二次の補正項まで取り入れたも のでも、カオスが現れることを示した。

本修士論文は論文 [6] に関わる先行研究のレビューと [6] の結果をまとめたものである。まず AdS/CFT 対応についてのレビューを行う。特に Penrose 極限を使って、弦の状態とゲージ理論の演算子に対応関 係を与えた文献 [3] に焦点を当てる。次に、カオスについてのレビューを行う。カオスには明確な定義 は存在しないが、通常の軌道にはない、いくつかの特徴を持つ。それらの特徴と、カオスの検出方法に ついて説明する。カオスが現れる AdS/CFT として $AdS_5 \times T^{1,1}$ 空間を扱うが、 $AdS_5 \times T^{1,1}$ 空間とこの 場合の AdS/CFT について説明する。そして最後に $AdS_5 \times T^{1,1}$ 空間上の弦の運動を解析し、Poincare 断面を用いてカオスの存在を確かめる。

- [1] J. Maldacena, S. Shenker and D. Stanford, arXiv:1503.01409 [hep-th].
 - J. Polchinski, arXiv:1505.08108 [hep-th].
 - G. Gur-Ari, M. Hanada, S. Shenker, arXiv:1512.00019 [hep-th].
- [2] J. Maldacena, Adv. Theor. Math. Phys. 2 (1998) 231 [Int. J. Theor. Phys. 38 (1999) 1113]
- [3] D. Berenstein, J. Maldacena and H. Nastase, JHEP 0204 (2002) 013.
- [4] I. Klebanov and E. Witten, Nucl. Phys. B 536 (1998) 199.
- [5] P. Basu and L. Pando Zayas, Phys. Lett. B 700 (2011) 243.
- [6] Y. Asano, D. Kawai, H. Kyono and K. Yoshida, JHEP 1508 (2015) 060.

Yang-Baxter シグマ模型としての超弦理論の可積分変形

素粒子論研究室 坂本 純一

Abstract In this thesis, we discuss applications of Yang-Baxter deformations to superstring theories. The deformations are known as a systematic way describing integrable deformations of two-dimensional non-linear sigma models. We mainly discuss integrable deformations of superstring on $AdS_5 \times S^5$ and Minkowski spacetime. (©2016 Department of Physics, Kyoto University

AdS/CFT 対応は重力理論と場の理論との間の注目すべき対応関係である。場の理論は非摂動的に定義され るので、この対応を深く理解することは弦理論の非摂動的な理解に必要なステップだと考えられる。この対応 の特徴として、ある一方の理論の強結合領域がその双対な理論の弱結合領域に対応する強弱双対性がある。そ れゆえ、この関係は場の理論の強結合領域が古典重力で記述可能である、という利点を与える一方で、その直 接的な検証を困難なものにしている。

しかし、現在、可積分系という特別な系に対してはこの直接的検証が可能であると考えられている。この例 の一つに $AdS_5 \times S^5$ 時空上の IIB 型超弦理論と $\mathcal{N} = 4$ 超対称 Yang-Mills 理論の対応があげられる。ここで可 積分系とは系の自由度に対して十分な数の保存量をもつ系として定義される。可積分系特有の手法は、両者の 物理量を有限の結合定数で計算可能にし、その直接検証に大きく貢献してきた。それゆえ、この可積分構造を 保つ変形の研究は、共形対称性がないより一般の対応に対する理解を促すことが期待される。

本修士論文では数ある可積分変形のアプローチのなかでも、とくに超弦理論の変形に注目する。超弦理論 は弦が伝播する時空を標的空間にもつ二次元非線形シグマ模型で記述されることがよく知られている。その 一方で、Yang-Baxter 変形という非線形シグマ模型の可積分構造を保つ変形を系統的に記述する方法が存在す る [1]。この手法は非一様な古典 Yang-Baxter 方程式に基づき、主カイラルシグマ模型の文脈で考えられてき た。そのような中で近年、Delduc、Magro、Vicedo 達はこの変形を対称空間に適用可能な形で拡張し、さら には AdS₅×S⁵ 上の超弦理論の変形に応用した [2]。その後、[3] において一様な古典 Yang-Baxter 方程式に基 づく変形へと拡張された。一様な Yang-Baxter 変形はよく知られた時空を含み、その可積分性を示してきた。 しかしながら、変形の物理的意味やその背後に存在する数学的構造は完全には明らかにされていないのが現状 である。

そこでまず我々は AdS₅×S⁵ 時空の一様な Yang-Baxter 変形に付随する Lax 対の具体形を考察した [4]。と くに考察の対象を T 双対と座標のシフトの組み合わせである TsT 変換として理解される変形に限った。ここ で Lax 対とは、シグマ模型の可積分性を保証する運動方程式と等価な情報をもつ線形演算子である。この研究 の過程で変形後の Lax 対は、変形前の Lax 対における U(1) 対称な場に単純な置き換え則を適用することで得 られることが見出された。さらにこの置き換え則を用いれば、変形の効果は閉弦の境界条件に押し込めること ができる。

曲がった時空の変形はよく調べられてきたが、平坦時空の変形もまた興味深い。実際、[5] で提案した Minkowski 時空の Yang-Baxter 変形は、量子化可能な時空上の弦理論を含み、そのスペクトルを求めることができる。そ れゆえ、Yang-Baxter 変形が与える弦の量子論的な側面への影響が直に調べられる。また、AdS₅×S⁵の変形 と比べて得られる時空は単純なため、その物理的解釈をしやすいという利点もある。提案当初はその可積分性 は示されていなかったが、後に TsT 変換として解釈可能な変形に対して、これを示すことに成功した [6]。[7] ではより一般の変形を考え、[6] で与えた Lax 対の一般化を行った。

- [1] C. Klimcik, JHEP **0212** (2002)051 ; J. Math. Phys. **50** (2009) 043508.
- [2] F. Delduc, M. Magro and B. Vicedo, Phys. Rev. Lett. 112 (2014) 051601.
- [3] I. Kawaguchi, T. Matsumoto and K. Yoshida, JHEP 1404 (2014) 153.
- [4] T. Kameyama, H. Kyono, J. Sakamoto and K. Yoshida, JHEP 1511 (2015) 043.
- [5] T. Matsumoto, D. Orlando, S. Reffert, J. Sakamoto and K. Yoshida, JHEP 1510 (2015) 185.
- [6] H. Kyono, J. Sakamoto and K. Yoshida, arXiv:1512.00208 [hep-th].
- [7] A. Borowiec, H. Kyono, J. Lukierski, J. Sakamoto and K. Yoshida, arXiv:1510.03083 [hep-th].

KOTO 実験におけるビーム外縁部を覆う中性子低感度な光子 検出器の開発と性能評価

高エネルギー物理学研究室 篠原智史

Abstract For the KOTO experiment, we have developed a photon detector less sensitive to neutron. We report the design to reduce backgrounds due to the detection gap just around the beam core and performance studies as well as the operation and the performance in the KOTO 2015 Physics run. © 2016 Department of Physics, Kyoto University

KOTO 実験は大強度陽子加速器施設 J-PARC で行なわれている、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \nu$ 稀崩壊探索により標準理 論を超えた物理の発見を目的とした国際共同実験である。 π^0 の崩壊により生じた 2 つの γ を検出する カロリメータと π^0 以外に何もない(ν は検知されない)ということを保証するための検出器群が全崩 壊領域を覆うように設置してある (Fig. 1)。KOTO 実験ではビームホールを抜けてくる γ を捉えるために ビームホール光子検出器(BHPV)が設置されている。しかし、この BHPV はビーム中心に関しては高い背

景事象削減力を持つ一方で、ビーム外縁部には不感領 域があることが判明した。本研究ではこの不感領域に よる $K_L \rightarrow 2\pi^0$ 崩壊由来の背景事象が標準理論感度で 約3.2イベント相当残ることを明らかにした。また、 この背景事象のうち BHPV に入射する1 GeV 以上の $\gamma を$ 主に削減する必要であることを示し、その γ が BHPV 直後では広範囲にわたっていることも示した。さらに ビーム外縁部には大量の中性子が残存していることを シミュレーションによって確認した。



示した削減すべき背景事象のためにビーム外縁部を覆う鉛とアクリルの Cherenkov 検出器を考案し、 開発を行った(BHGC)。 γは鉛内での対生成により電子、陽電子になり、それらがアクリルに入射し Cherenkov 光を発生させる。その Cherenkov 光をアクリル内で伝搬させて光電子増倍管で捉えることで γの検出を行う。また一方で、陽子や荷電パイオンなど、中性子の反応由来の荷電粒子は、電子、陽電 子に比べ質量が重く、速度が遅いため、Cherenkov 発光の閾値を超えにくい。さらに、Cherenkov 発光 が起きても、Cherenkov 角が小さく、アクリル内を伝播する全反射条件をみたしにくい。この2つの性 質を用い、中性子由来のヒットを削減する。

アクリル検出器の原理検証のために電子ビームによる試作機のテストを行った。測定の結果、入射位 置、角度によらず十分な光量を確保できた。また開発した ray tracing コードを用いて光学シミュレー ションを行い、ビームテストの結果を評価した。実機のデザイン決定のためにシミュレーションを行い、

背景事象削減を最大化できるよう最適化をはかった。決定し たデザインに基づきモジュールの構造の設計を行い、モジュ ールを組み上げ、2015年3月にBHGCのインストールが完了 した(Fig. 2)。その後、KOTO実験はBHGCと共に2015年度 の物理ランを行った。BHGCの1p.e. calibrationの方法を 確立し、ビーム中のgainの低下もないことを示してラン中 のPMTの安定動作を担保した。またビームプラグを閉じて行 う特別なランでは高速荷電粒子を選定し、timing calibrationとアクリルの発光量測定を行った。光量測定の 結果ではその安定性を担保し、アクリルのradiation damage がないことを確認した。シミュレーションとの比較も行い、 BHGCのビーム中の性能を評価した。



Fig. 2. Beam Hole Guard Counter (BHGC) viewed from downstream.

3次元超対称ゲージ理論の厳密な計算と M 理論

基礎物理学研究所 素粒子論グループ 清水数馬

Abstract: The M5-brane is expected to give some knowledge about M-theory, but is not well-known object so far. In this thesis, we have calculated the partition function of mass deformed ABJM theory on the three-sphere by using a localization method in order to know the information about the M5-brane.

© 2016 Department of Physics, Kyoto University

超弦理論は重力も含めた現在知られている力を統一し得る理論の有力候補である。しかし、超弦理論は任 意の背景時空周りの摂動論でしか定義されていない。摂動論では理論の限られた部分しか扱えないので、理 論の全容を知るためには非摂動効果も含めた定式化が必要である。

そのような非摂動的定式化の方法の一つとして M 理論と呼ばれる理論が提案されている[1]。 M 理論は基本 的な自由度ですら明らかでない未知の理論であるが、その低エネルギー有効理論は 11 次元の超重力理論で あることが知られている。11 次元超重力理論には M2-ブレーンと M5-ブレーンという(1+2)次元と(1+5)次元に広 がった物体が古典解として存在し、これらの物体は保存電荷を持ち、質量が最も小さく安定であるため、M 理論 にも存在していると考えられる。一方、超弦理論の D-ブレーンの有効理論は基本的物体である弦の構造を反 映した理論になっていたことから、M-ブレーンの低エネルギー有効理論も M 理論の構造を反映していると考え られ、重要である。

また、M5-ブレーンが重要であるのは M 理論の理解という観点からだけではない。その有効理論が低次元 の場の理論の間の双対性を説明し得るという観点からも、M5-ブレーンについて調べる事は興味深いことであ る。しかし、M5-ブレーンの有効理論は未だ知られておらず、M5-ブレーンを直接調べるのは困難である。一方、 M2-ブレーンの有効理論はゲージ群が U(N)×U(N)である 3 次元の最大超対称性を持つ超対称ゲージ理論で あることが Aharony,Bergman,Jafferis,Maldacena らによって決定された(ABJM 理論)[2]。ここで、N は M2-ブレー ンの枚数を表す。M5-ブレーンの情報を得るために、最大超対称性を保つように物質場に質量を加えて変形し た ABJM 理論(mABJM 理論)[3]を利用する。なぜならば、質量を与えることは M2-ブレーンが存在する 11 次元 時空に背景場を入れることに対応し、その背景場の効果によって M2-ブレーンが M5-ブレーンとして広がるとい う電磁気における分極の類似の現象が起きるため、mABJM 理論は M2-ブレーンが広がるという形で M5-ブレ ーンの情報を含んでいるからである。

M 理論の構造を知るには有効理論を厳密に扱う必要がある。そこで超対称場の理論の局所化という強力な 方法を用いる。局所化の方法を用いると経路積分を有限次元の積分に削減することができ、超対称不変な物 理量を厳密に扱えるのである[4]。しかし、局所化の方法を用いるためには(2+1)次元の理論を 3 次元のコンパ クトな空間の上の理論に拡張しなければならない。特に半径のみをパラメーターに持つ 3 次元球面上で理論を 考えることは、解析が比較的容易という点だけでなく様々な点で重要である。

以上を踏まえて、我々は M5-ブレーンについての知見を得るために、3 次元の理論である mABJM 理論を調べた[5]。3 次元球面上の mABJM 理論の N 無限大極限における自由エネルギーを計算し、N の 3/2 乗というN の有理数冪に比例することを明らかにした。さらに、その比例係数は質量パラメーターの関数として滑らかではなく、1 次相転移点が存在することを発見した。この現象は mABJM 理論に特有の興味深い現象であり、M5-ブレーンに関する情報をもたらすと思われる。

本修士論文では ABJM 理論、局所化など 3 次元の超対称理論に関連した基本事項を紹介した後に、我々の 研究の詳細を述べる。

References

[1] E. Witten, Nucl. Phys. B 443, 85 (1995) doi:10.1016/0550-3213(95)00158-O.

[2] O. Aharony, O. Bergman, D. L. Jafferis and J. Maldacena, JHEP 0810, 091 (2008).

[3] J. Gomis, D. Rodriguez-Gomez, M. Van Raamsdonk and H. Verlinde, JHEP 0809, 113(2008).

[4] A. Kapustin, B. Willett and I. Yaakov, JHEP 1003, 089 (2010)doi:10.1007/JHEP03(2010)089.

[5] T. Nosaka, K. Shimizu and S. Terashima, arXiv:1512.00249 [hep-th].

高角度分解能 MeV ガンマ線望遠鏡に向けた 高ゲイン・高位置分解能ガス検出器の開発

物理学第二教室 宇宙線研究室 竹村 泰斗

Abstract For some application including MeV gamma-ray astronomy and neutron imaging, we develop a micro-pixel chamber (μ -PIC) with fine position resolution and high gas gain using micro electro mechanical system (MEMS) technology, comparing to a present u-PIC manufactured by printed circuit board (PCB) technology. We evaluate its performance. © 2016 Department of Physics, Kyoto University

Micro-pixel chamber (µ-PIC) はピクセル型の二次元イメージングガス検出器であり、MeV ガンマ線望 遠鏡[1]や中性子イメージング[2]、ダークマター探索[3]など様々に応用されている。現在のµ-PIC はプ リント基板 (PCB) 技術で作製されており、その位置分解能は約 120 µm (RMS) [4]を実証している。しかし、 MeV ガンマ線望遠鏡の要請として 5 度以下の角度分解能を得るためにはµ-PIC の位置分解能 100 µm 以下 が必要とされる。MEMS (Micro Electro Mechanical System) 技術はこの要求を満たしうる解のひとつで ある。PCB 技術の作製精度は約 10 µm に対して MEMS 技術では数µm であり、MEMS 技術を用いることでよ



図 1 MEMS μ -PIC 写真(左図)

Anode 460 V

り高精度な構造のμ-PICを作製できる。また、MEMS 技術では ボッシュ法を用いることでμ-PIC の基板の厚みを現在の 100 μm から 400 μm まで厚くすることができる。基板を厚くする ことでアノードストリップを電気的に隠し、基板に向かって いた電気力線をアノードに集中させることでアノードの電 場が強くなる[5]。これにより MEMS μ-PIC は従来のμ-PIC よ り高ゲインであると考えられる。以上のことより MEMS μ-PIC が高位置分解能、高ゲインを有すると期待して、製造し、シ ミュレーションおよび実測による評価を行った。

図1は作製した MEMS μ-PIC の写真と断面図である。一般 断面図(右図) 的な微細加工ガス検出器は絶縁体を基板に用い

るのに対し、MEMS μ -PIC は半導体であるシリコンを主として いるため、この違いを焦点として調査を進めた。シミュレー ションで、Ar/C₂H₆ (分圧比 90:10) 1 気圧における MEMS μ -PIC のガスゲインを求めた結果、MEMS μ -PIC は同電圧印加時に PCB μ -PIC の約 2 倍のゲインを有することが示された。図 2 はアノ ード電圧 460 V における SiO₂ 膜 1, 15 μ m を有する MEMS μ -PIC が得た ⁵⁵Fe (5.9 keV)の実測スペクトルである。SiO₂ 膜 1 μ m の MEMS μ -PIC では、シミュレーションでは考慮されていない 半導体の電荷キャリア由来と思われるゲイン降下が起きてい トル るのに対し、SiO₂ 膜 15 μ m の MEMS μ -PIC のゲインは

図 2 MEMS µ-PIC 55Fe(5.9 keV)スペクトル

Gas: Ar/C₂H₆ (分圧比90/10),1 atm

点線: MEMS μ-PIC (SiO2 1 μm)

実線: MEMS µ-PIC (SiO2 15 µm)

シミュレーションとよく一致している。これにより

シリコンを厚い絶縁体で覆うことで半導体の電荷キャリアの効果を減少させ、半導体を基板としている 欠点を補う手法を考案した。本論分ではその結果について報告する。

References

500

3000

2500

2000

1500

1000

500

- [1] T. Tanimori, et al., ApJ **810**, 28 (2015).
- [2] J. D. Parker, et al., NIMA 697, 23-31 (2013).
- [3] K. Nakamura, et al., Progress of Theosetical and Experimental Physics , 043F01 (2015).
- [4] T. Nagayoshi, et al., NIMA 525, 20-27 (2004).
- [5] T. Nagayoshi, et al., NIMA 546, 457-465 (2005).

Gamma-Ray Burstsのジェット駆動機構解明のための ニュートリノ輻射輸送

天体核研究室 西野裕基

Abstract

Neutrino pair annihilation mechanism is a plausible model for the central engine driving Gamma-Ray Bursts(GRBs). It is important to study neutrino transport for verification of this model. We describe ray-tracing methods for neutrino transfer and detailed properties of neutrino spectra.

© 2016 Department of Physics, Kyoto University

ガンマ線バースト (Gamma-Ray Bursts, GRB) は、約10ミリ秒から1万秒にわたって突発的にガンマ線とい う高エネルギーの電磁波を放射する現象である。平均光度が太陽の10¹⁷ 倍以上に達し、宇宙最大の爆発現象とも 言われる。そこではニュートリノ対消滅のような高エネルギー反応が起こっている為、高エネルギー物理学の「実 験場」として希少な場所である。GRB は相対論的なジェットの電磁放射によって説明でき、そのようなジェットは Hyper Massive Neutron Star(HMNS) やブラックホール降着円盤 (Accretion Disk) のようなコンパクト天体で生じる と考えられる。コンパクトな系では大量のエネルギーがニュートリノ・反ニュートリノとして放射される。放射 されたニュートリノと反ニュートリノの一部が衝突すると、高エネルギーの電子・陽電子対を生成しジェットへエ ネルギーを注入することできると思われている[1]。今回は、放射されるニュートリノの輸送過程に着目した。

ニュートリノ輻射輸送は Boltzmann 方程式によって計算できるが、 これは数値計算のコストが高い。特に、ニュートリノ加熱率 Q₊ は断 面積

$$\sigma \propto E^2 (1 - \cos \theta)^2$$

に依存するので、運動量空間で大量にメッシュを切らなければならないからである。そこで、Boltzmann 方程式を近似的に解く方法として、 ray-tracing 法を用いる。これは、ある点へ到達する測地線を遡ってトレースして輻射輸送計算を行う方法である。この方法では各 ray 上で独立に 計算でき、計算量が少なくてすむので、十分にメッシュを細くすること が可能である。

先行研究 [2] では特に ray-tracing 法でも LIGHT BULB 近似がよく 用いられている。LIGHT BULB 近似では、ある面上(ニュートリノ球) でのみ Fermi-Dirac 分布の放射が起こると仮定するが、実際のニュート リノのスペクトルは系のプロファイルに従って連続的に変化し、なおか





Figure 1: Neutrino pair annihilation

っFermi-Dirac 分布も実現していないので、適当なニュートリノ球を設定することが難しい。そして、対消滅過程 による加熱率 Q₊ はニュートリノ温度の9乗に比例するため、

$$Q_{+} = \frac{4}{(2\pi)^{6}} \int d^{3}q d^{3}q' f(E-\mu) f(E'+\mu) \frac{(E+E')}{EE'} (EE'v\sigma)$$
(2)

(1)

ニュートリノのスペクトルに強く依存する。例えば、温度の見積もりを30%大きくとってしまった場合、加熱率は1桁も大きくなる。そこで、今回は ray-tracing 法でニュートリノのスペクトルを適切に評価するために、主要なニュートリノ反応 [3] 電子・陽電子捕獲反応、ニュートリノ対消滅、ニュートリノ核子散乱)に加えて核子核子制動放射 [4] を考慮して輻射輸送計算を行った。

- [1] Cooperstein et al., Astrophysical Journal, 309, 653 (1986).
- [2] Zalamea and Beloborodov, Mon. Not. R. astro. Soc. 410, 2302 (2011).
- [3] Bruenn, Astrophysical Journal Supplement Series, 58, 771 (1985).
- [4] Raffelt, Astrophysical Journal, 561, Issue 2, 890 (2001).

LEPS2 シリコンストリップ検出器の 読み出し回路の性能評価

原子核・ハドロン物理学研究室 乗竹 剛志

Abstract For LEPS2 experiments, SSD will be installed downstream of the target. Reaction rate will be about 3 kHz. I have developed the FPGA codes for a VME module to improve readout rate, and I tested it at LEPS. The results of the performance tests and future prospects will be presented. © 2016 Department of Physics, Kyoto University

LEPS2 は大型放射光施設 SPring-8 のビームラインであり、現在ソレノイド電磁石を用いたスペクト ロメータを建設中である。高エネルギーの γ 線を用いて様々なハドロン光生成実験を行う予定である。 最大でエネルギーが 3 GeV の γ 線が 10 Mcps で得られる。LEPS2 の検出器は 7~120°の立体角を覆っ ている。現在実験が進行中である LEPS 実験よりも高強度、広範囲の実験が可能であり、ペンタクォー クの探索や Λ (1405)の構造解明などの研究を予定している。

ペンタクォークの探索実験など多くの実験では、粒子を高い運動量分解能で検出する必要がある。 LEPS2 ではソレノイド電磁石を用いて磁場をつくり、荷電粒子を曲げることによって運動量を測定して いる。ソレノイド電磁石の磁場の特性上、前方に飛んだ荷電粒子は磁場を通過する距離が短くなる。そ のため、前方に飛んだ粒子は運動量分解能が悪化してしまう。LEPS2 では前方への運動量分解能を改善 するため、ターゲットのすぐ下流側に Silicon Strip Detector (SSD) を設置する。設置予定の SSD は ストリップ幅が 100 um 、チャンネル数が 512 ch 、形は 1 辺が約 6 cm のひし形である。ひし形を 3 面 組み合わせて六角形をつくり、その六角形を x 面と y 面の 2 層用意することで位置を検出する予定で ある。よって SSD は合計 6 台必要であり、総チャンネル数は 3072 ch である。信号の読み出しは APV25-s1 というチップと APVDAQ という VME モジュールを用いる。APV25-s1 は SSD の各ストリップ の信号を整形し、波高情報を保存する。128 ch 分の信号を 1 つのチップで整形、保存できる。保存さ れたデータは repeater というモジュールを介して APVDAQ で読み出す。 APVDAQ 1 台で最大 4 チップ 分のデータを Flash ADC で読み取り FPGA 内の FIFO に保存することができる。

LEPS2 において重水素をターゲットとして用いた場合、最高約3kHz で反応が起こる計算であり、デ ータの読み出し速度を短くすることが必要である。具体的には、他の検出器の読み出し速度などの関係 上、15 us 以内にデータの読み出しを完了することが望ましい。しかし SSD は検出器の特性上、チャ ンネル数が非常に多く、全ストリップのデータを読み出していたのでは到底 15 us には到達できない。 目標時間内に SSD のデータを読み出すためには、読み出し回路の改良が必要となる。今回、 APVDAQ の FPGA のコードを開発し、ペデスタルサプレッションを実装し、ヒットがあったストリップの ADC デー タのみを読み出せるように改良を行った。LEPS 実験ハッチ内に SSD を設置し、改良した FPGA を実装 した APVDAQ を用いて読み出し速度の測定を行った。さらには、得られたデータをもとに、検出効率や 位置分解能などを求めた。また同じセットアップでサプレッションを行わずにデータを取り、オフライ ンで解析を行い、サプレッション有りのデータと比較した。

本論文では、 FPGA のコードの改良点、読み出し速度や検出効率などの実験結果、今後の課題を述べる。



Fig.1 LEPS2 spectrometer

Fig.2 SSD design

高エネルギー散乱過程における Non-Global Logarithmの再足し上げ

原子核理論研究室 萩原慶一

Abstract We perform the resummation of non-global logarithms at finite Nc for the hemisphere jet mass distribution in $e^+e^- \rightarrow$ di-jets process to leading logarithmic accuracy. A comparison of our results with the previous all-order results in the large-Nc limit and fixed order perturbative calculations is made. © 2016 Department of Physics, Kyoto University

QCDのような質量がゼロである粒子(quark、gluon)が存在する理論では、その摂動計算には多くの場 合途中で赤外(IR)発散が出てくる。IR発散の原因は2種類あり、エネルギーがゼロに近い粒子が多数放出 されることによる寄与(soft)と、質量がゼロの粒子が同じ方向に放出されることによる寄与(collinear)が ある。この発散は実際の断面積を計算する場合には相殺が起こって消えるのであるが、ある種の物理量 ではこの相殺が不十分で、大きな対数項を出すことがある。この対数項として最も主要な項はsoftの発 散とcollinearの発散に関係しているSudakov Logarithmと呼ばれている。さらにQCDでは、このSudakov Logではない大きな対数項としてnon-global logarithm(NGL)というものがある。この項は、立体角のある 制限された領域に出てくる粒子のエネルギーに対して上限を与えたときに出てくる対数項であり、soft の発散のみに関係する寄与である[1]。Sudakov LogとNGLは摂動論のすべてのcouplingの次数で現れ、 それらを足し上げないと摂動論の結果が信頼できないものとなってしまう。NLGの再足し上げを有限 Nc(カラー数)で行うことは難しいことが知られており、これに関してはWeigertによってWilson lineに対 する確率論的Langevin方程式を解く方法が示唆されていた[2]。八田、植田らによってこのLangevin方程 式が改良され、初めて数値計算がなされた[3]。

これを踏まえ、本研究では電子陽電子対消滅過程($e^+e^- \rightarrow \gamma^* \rightarrow \bar{q}q$)において、quarkのjetを含む半球 面のjet mass分布 (hemisphere jet mass分布)に対するNGLの寄与を評価した。hemisphere jet massの場合は、 Sudakov Logに由来するcollinear発散項があるため、これまでの方法では数値計算がうまくいかないこと がわかった。このためcollinear発散の原因となるSudakov Logを取り除くようにLangevin方程式を書き直 し、それに基づいて数値計算を実行した。そして、計算結果を先行研究の結果と比較し、オールオーダ ーかつ有限Ncの効果を議論した[4]。

- [1] M. Dasgupta and G. P. Salam, Phys. Lett. B 512, 323 (2001)
- [2] H. Weigert, Nucl. Phys. B 685, 321 (2004)
- [3] Y. Hatta and T. Ueda, Nucl. Phys. B 874, 808 (2013)
- [4] Y. Hagiwara, Y. Hatta, and T. Ueda, (2015), arXiv:1507.07641 [hep-ph].

ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊探索実験AXELの 試作機の製作と性能評価

素粒子物理学 潘 晟

Abstract AXEL is an experiment to search for neutrinoless double-beta decay using a time projection chamber with high pressure xenon gas. We constructed a prototype chamber and obtained 4.8%(FWHM) energy resolution for 122keV gamma-ray. We also evaluated the performance of MPPC photosensor for VUV light which is our interest signal region.

© 2016 Department of Physics, Kyoto University

ニュートリノが、自身の反粒子である反ニュートリノと等しいというマヨラナ性を持つかどうかを検 証することは、素粒子物理学にとって非常に重要なテーマである。これを実験的に示すことができる ほぼ唯一の手段が、ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊の観測である。我々は¹³⁶Xeを二重ベータ 崩壊核とした二重ベータ崩壊観測のため、高圧ガスTPCによるA Xenon ElectroLuminescence(AXEL)検出 器を開発している。10~30気圧の高圧キセノンガス中で生じた電離電子をドリフト電場によって Eletroluminescence Light Collection Cell (ELCC)と呼ばれる読み出し面に引き寄せ、エネルギー測定を行 う。ELCCはセル状に分割された構造をしており、各セル毎に比例蛍光過程(Electroluminescence過程、 EL過程)を通じて電子が光信号に変換され、光検出器で読み出される。EL過程は増幅揺らぎが小さいた めに高エネルギー分解能を達成することができる。我々の目標はFWHM0.5%@Q値である。セル分割読 み出しと信号の時間差から再構成される三次元飛跡情報を用いて背景事象除去を行う。

本研究ではAXEL検出器の小型の試作機を製作し、性能評価を行った。図1に製作した試作機の写真 を載せる。試作機の有効領域は直径6cm、高さ6cmである。4気圧のキセノンガスを封じ込め、⁵⁷Co由来 の122keVのガンマ線を照射して性能評価を行った。図2に得られた光子数分布を載せる。結果、122keV のガンマ線で4.8%(FWHM)の分解能が得られた。0vββ崩壊のQ値に換算すると1.1%(FWHM)である。

EL光を検出する光検出器としては浜松ホトニクス社製のMPPC (Multi-Pixel Photon Counter)を用いてい る。キセノン中のEL光の発光波長は178nmの真空紫外領域であり、通常の製品のMPPCではこの波長に 感度を持たない。そこで、浜松ホトニクス社がMEG実験と共同で開発した、液体Xe中で真空紫外光に 良い感度を持つMPPCを将来的には用いる予定であるが、この素子の高圧ガス中での光子検出効率を測 定し、性能を評価した。



Fig. 1. Picture of prototype detector.



Fig.2. Photon spectrum using ⁵⁷Co gamma ray source.

輻射フィードバックによる星の限界質量の 金属度・降着率の依存性

天体核研究室 福島 肇

Abstract The mass of a star is limited by the radiation feedback effects that halt the accretion on to the protostar. We calculate the structures of protostars and accreting envelopes for various accretion rates and metallicities to study the upper mass of a star. © 2016 Department of Physics, Kyoto University

大質量星は紫外線放射によるガスの電離、超新星爆発による運動エネルギーの注入や重元素放出による化学進化を行うことで星間空間に多大な影響を与える。銀河の進化に対して、このように重要な天体であるが、大質量星の形成過程には以下のような困難があり、いまだ標準的なシナリオは存在しない。 星は、高密度コアが重力収縮することで非常に小さい原始星が形成された後、ガスが原始星に降着することで質量を増大させることで形成される。大質量星形成における問題点は、原始星が降着により大質量になると、降着流内でダスト粒子が輻射を吸収することで輻射圧が働き、質量降着が妨げられることである。[1]によると、現在の星形成における一般的な降着率である10⁻⁵ Mo/yearの場合には質量が15Mo 程度で降着限界となる。この限界質量は降着率に対して依存性を持つことがわかっている。

また、降着流へのフィードバックを考える際に重要な原始星の光度は、降着率と星形成領域の金属度 によって異なることがわかっている[2]。低金属度環境における星形成では降着流内のダスト粒子の数 密度も減少し輻射フィードバックが弱くなるため、より大質量な星を形成できることが期待される。先 行研究[3]では[2]と同様の計算で得られた原始星の光度に対して解析的に輻射フィードバックの効果 を求めている。しかし、降着率や金属度については一部の組み合わせのみ計算が行われているだけであ る。また、外層における輻射やガスの構造、ダスト粒子のサイズ分布や破壊の過程については計算され ていない。

本論文では、降着率10⁻⁶~10⁻³M_o/year、金属度1~10⁻²Z_oの範囲で原始星構造を求め、得られた光度から外層計算を行うことにより、降着流が大きく減速され定常的に降着が続くことが困難になる星質量を求める。原始星の進化計算は[2]と同じく球対称を仮定して行った。輻射と降着流ガスの相互作用で重要なダスト粒子の取り扱いは[1]を参考にした。ここでは、ダスト粒子が破壊される効果およびサイズ分布を考慮している。輻射とガスの構造については、[4]の近似的な手法を用いて求めた。

計算を行った結果、金属度が1Zo、降着率10⁻³ Mo/yearにおいては、原始星の質量が15.8 Moの時、ダスト粒子からの再放射によって、降着流が自由落下速度の1/10以下に減速されることがわかった。その他の低降着率もしくは低金属度環境における星形成では、原始星からの輻射を降着流が直接受けることで減速される。例えば、金属度が1Zo、降着率10⁻⁵ Mo/yearにおいては、原始星の質量が14.2 Moの時に降着流の速度が自由落下速度の1/10以下に減速されることがわかった。限界質量の降着率・金属度の依存性について、高降着率(10⁻⁴ Mo/year~)の場合において、低金属度領域でより大質量星形成が可能となる示唆を得ることができた。

References

[1] Wolfire, M. G., & Cassinelli, J. P. 1987, ApJ, 319, 850

- [2] Hosokawa, T., & Omukai, K. 2009, ApJ, 691, 823
- [3] Hosokawa, T., & Omukai, K. 2009, ApJ, 703, 1810
- [4] Stahler, S. W., Shu, F. H., & Taam, R. E. 1981, ApJ, 248, 727

Antisymmetrized Quasi Cluster Model を用いた ¹⁶O における ¹²C+αクラスター構造と *E*0 遷移の解析

原子核理論研究室 松野秀昭

Abstract In ¹⁶O, the 0⁺ energy levels and the *E*0 transition matrix elements from the ground states are investigated in the framework of antisymmetrized quasi cluster model. The *E*0 transition is found out to be very sensitive to the intrinsic spin structure of ¹²C+ α cluster states. © 2016 Department of Physics, Kyoto University

近年,軽い原子核における E0 遷移がクラスター構造 の根拠になるとして注目されている [1]. ¹⁶O について は,文献 [2] において, E0 遷移強度が測定され,平均 場理論を基とした(クラスター構造を仮定しない)乱 雑位相近似計算 [3] と比較されている.そこでは,高 い励起エネルギー領域においては実験と理論が良い一 致を示すが,低い励起エネルギー領域においては一致 せず,理論計算に現れないピークが観測されている(Fig. 1 参照). Yamada 等は低いエネルギー領域に現れる遷 移強度のピークを説明するには,クラスター構造が導 入されるべきであると主張し, 殻模型的な基底状態か らクラスター模型的な励起状態に遷移が起きることを 示した [4]. 一方で,Yamada 等は ¹⁶O の励起状態であ る ¹²C+ α クラスターの内部構造については殆ど言及し ていない.

本研究では、Yamada 等の主張に加えて、励起状態の ¹²C+αクラスターの内部構造の変化が *E*0 遷移に与える



Fig. 1: Experimental E0 transition strength (histogram) and the calculated result by Ref. [3] (real line). The experimental data below $Ex\sim11$ MeV are absent because of the experimental condition. This figure is taken from Ref. [2].

影響について議論する. 具体的には、 ${}^{12}C+\alpha / p = x / p = 0$ ${}^{12}C$ 部分が 3 α 構造である(${}^{12}C(3\alpha)$)か, $p_{3/2}$ 閉殻 構造である(${}^{12}C(p_{3/2} \text{ subclosure})$)かによって、 ${}^{16}O$ の基底状態からの EO 遷移がどのように変化するかにつ いて調べる. この目的の為に、本研究は antisymmetrized quasi cluster model (AQCM) [5] の枠組みで行う. AQCM は $\alpha / p = x / p = \pi / p = x /$

本研究により、¹²C(3 α)+ α クラスター状態に対して ¹²C($p_{3/2}$ subclosure)+ α クラスター状態を導入するこ とで、スピン軌道力の効果が取り入れられ、基底状態からの E0 遷移が抑制されることが解明された. この E0 遷移の抑制は ¹²C(3 α)と ¹²C($p_{3/2}$ subclosure)におけるスピン構造の違いに依拠すると考えられる. 本研究は、E0 遷移はクラスター状態の同定には依然として有効であるが、E0 遷移が単純な α クラスター 模型では記述できない内部構造、特にスピン構造の差異を反映した重要な物理量であることを明らかに した.

- [1] T. Kawabata et al., Phys. Lett. B 646, 6 (2007).
- [2] Y.-W. Lui, H. L. Clark, and D. H. Youngblood, Phys. Rev. C 64, 064308 (2001).
- [3] Z. Ma, N. Van Giai, H. Toki, and M. L'Huillier, Phys. Rev. C 55, 2385 (1997).
- [4] T. Yamada, Y. Funaki, H. Horiuchi, K. Ikeda, and A. Tohsaki, Prog. Theor. Phys. 120, 1139 (2008).
- [5] T. Suhara, N. Itagaki, J. Cseh, and M. Płoszajczak, Phys. Rev. C 87, 054334 (2013).

1-loop Corrections to Holographic Entanglement Entropy

Theoretical Particle Physics Group Taiki Miyagawa

Abstract We calculated the difference of the 1-loop corrections to holographic entanglement entropy for a scalar field with the Neumann and Dirichlet boundary conditions. In AdS3/CFT2, our result agrees with the known result of 2- dimensional CFT. In higher dimensions, our results give holographic predictions. © 2016 Department of Physics, Kyoto University

We calculated the difference of the 1-loop corrections to holographic entanglement entropy for a scalar field with the Neumann and Dirichlet boundary conditions [1]. Entanglement entropy (EE) is a quantity that measures the correlation between a subsystem of the total Hilbert space and its complement. In the AdS/CFT correspondence, EE in CFT is a certain quantity in its holographic dual, called holographic entanglement entropy (HEE). There are two kinds of corrections to HEE. One is the higher derivative corrections. It corresponds to adding higher derivative terms to the bulk gravity action. The other is quantum gravitational corrections. It corresponds to adding loop corrections to HEE. We investigated the latter one.

The double trace deformation (DTD) plays an important role in the calculation of the 1-loop corrections to HEE for the Neumann and Dirichlet boundary conditions for bulk scalar fields. When the boundary CFT is perturbed with a DTD, there arises a renormalization group flow (RG flow) between the boundary UV CFT and the boundary IR CFT. The bulk dual description to the boundary RG flow is the change in the boundary conditions of the bulk field. If we consider a bulk scalar field theory in the Poincare AdS space, the dual field to the UV (IR) CFT takes the Neumann (Dirichlet) boundary condition respectively [2]. We calculated the difference of the Neumann and Dirichlet HEE in the 1-loop order.

We made the calculations in arbitrary dimensions. In AdS3/CFT2, our result agrees with the known result of 2dimensional CFT. In higher dimensions, our results give holographic predictions.

References

[1] Taiki Miyagawa, Noburo Shiba and Tadashi Takayanagi, "Double-Trace Deformations and Entanglement Entropy in AdS," (2015) [arXiv:hep-th1511.07194].

[2] I. R. Klebanov and E. Witten, "AdS/CFT correspondence and symmetry breaking," *Nucl. Phys.* B556 (1999)
89 [arXiv:hep-th/9905104]; S. Gubser, I. R. Klebanov, and A. M. Polyakov, "Gauge theory correlators from noncritical string theory," *Phys. Lett.* B428 (1998) 105-114 [arXiv:hep-th/9802109]; E. Witten "Anti-de Sitter space and holography," *Adv. Theor. Math. Phys.* 2 (1998) 253-291 [arXiv:hep-th/9802150].

AdS/CFT 対応のテンソルネットワークによる記述と 情報計量

基礎物理学研究所 素粒子論グループ 宮地真路

Abstract We formulate continuous tensor network for arbitrary field theory using boundary states. We generalize conjectured correspondence between MERA and AdS/CFT, to arbitrary background spacetimes. We calculate information metric of CFT vacuum using in field theory and in AdS/CFT correspondence. © 2016 Department of Physics, Kyoto University

非摂動的に量子重力理論を定式化するために、有望視されているのが AdS/CFT 対応という予想である。この対応に よると、d+1 次元の AdS 時空上の量子重力は、AdS 時空の境界上の d 次元の場の理論によって記述できる。しかし AdS/CFT 対応は様々な証拠はあるが、あくまで予想に留まり、AdS/CFT 対応の成立の機構は知られていない。

AdS/CFT 対応の機構を明らかにしようとするアプローチとして有望なのが、重力理論の時空のテンソルネットワークによる 記述である。MERA のテンソルネットワークとは、場の理論の基底状態をネットワークによって幾何学的に表したもので、 実空間繰り込み群の一種である[1]。MERA のテンソルネットワークで表わされる量子状態のエンタングルメント・エントロ ピーは、テンソルネットワーク内の曲面に交わる、テンソルの数によって評価される。この事実はAdS/CFT 対応でエンタング ルメント・エントロピーを計算する公式である、笠・高柳公式[2]に極めて類似している。笠・高柳公式によると、CFT の部 分系のエンタングルメント・エントロピーは、AdS 時空内の曲面の面積で表される。このことから MERA のテンソルネットワー ク自身と、AdS/CFT 対応における AdS 時空が対応しているという予想がなされた[3]。

本研究では、空間が離散的である場合のみ研究されてきた MERA のテンソルネットワークを、自由場[4]のみならず、 連続理論において一般的に定式化した[5]。この際 MERA のテンソルネットワークの初期状態として、場の理論の境界 状態が使えることを示した。この結果は相互作用の有無に関係なく、一般の CFT において成り立つ。

また、AdS/CFT 対応では、AdS 時空上の重力しか研究できないので、現実の宇宙の研究に直接は使えない。従って、 より一般の背景時空上への AdS/CFT 対応の拡張が望ましい。本研究では、上述の MERA のテンソルネットワークと AdS 時空との対応関係を、より一般のテンソルネットワークと時空に一般化する方法を提唱した[6][7]。一般のテンソルネット ワークにおいては、テンソルの縮約により状態が定義できる。従ってテンソルネットワークと時空を同一視すれば、時空の 中の曲面には量子状態が対応し、その量子状態の量子エンタングルメントを含む構造は、時空から読み取れることにな る。この方法では、量子状態の量子エンタングルメントの構造次第で AdS に限らない様々な時空が現れることになる。

CFT の量子エンタングルメントは、AdS/CFT 対応において時空の出現に重要な役割を果たす。例えば、エンタングルメント・エントロピーの第一法則は、重力理論側では重力の運動方程式に対応する。従って CFT の量子エンタングルメント を測る量の時空側での解釈は興味深い。本研究では、CFT の基底状態のマージナル変形に関する情報計量を場の理 論と AdS/CFT 対応の二つの方法を用いて計算し、それが近似的に時間一定面の面積に比例することを見出した[8]。 References

[1] G. Vidal, Phys.Rev.Lett.99,220405 (2007).

- [2] S. Ryu and T. Takayanagi, Phys.Rev.Lett.96,181602 (2006).
- [3] B. Swingle, Phys.Rev. D86 (2012)065007.
- [4] J. Haegeman, T. Osborne, H. Verschelde and F. Verstraete, Phys.Rev.Lett.110(2013)100402
- [5] M. Miyaji, S. Ryu, T. Takayanagi and X. Wen, JHEP 1505 (2015)152.
- [6] M. Miyaji, T. Takayanagi, PTEP 2015(2015)7, 073B03.
- [7] M. Miyaji, T. Numasawa, N. Shiba and K. Watanabe, Phys.Rev.Lett.115(2015)17,171602.
- [8] M.Miyaji, T.Numasawa, N.Shiba and K.Watanabe, Phys.Rev.Lett.115(2015)261602.

電子飛跡検出型コンプトンカメラの 飛跡解析方法の改良による角度分解能の向上

宇宙線研究室 宫本奨平

Abstract Compton camera has problems in imaging due to lack of the directional information of recoil electrons. Because Electron-Tracking Compton Camera (ETCC) can fully reconstruct Compton events, ETCC determines the point spread function (PSF). We have improved the angular resolution of recoil electron direction by improving tracking analysis method and discuss the effect of angular resolutions on PSF.

© 2016 Department of Physics, Kyoto University

星の内部や超新星爆発などによる元素合成によって放射性同位体元素が生成される。この元素の崩壊 により数百 keV から数 MeV の核ガンマ線が放射される。この MeV ガンマ線輝線は、元素の合成現場を直 接観測できる唯一の窓である[1]。しかし MeV ガンマ線領域は未開拓なまま取り残されている。実際に 宇宙で MeV ガンマ線天体を観測した Compton Telescope (COMPTEL)は、地上実験での予想より低い感度し か達成できなかった[2]。この原因の一つに、MeV ガンマ線の確立したイメージング方法がなかったこと があげられる。従来のコンプトンカメラでは電子の反跳方向を測定しないため、ガンマ線の到来方向は ガンマ線の散乱角の測定誤差(Angular Resolution Measure: ARM)の幅を持った円環上にしか制限でき ない。イメージは円環の重ね合わせで描くため、注目領域外からの漏れ込みが雑音となり感度を落とす 原因となった。COMPTELの教訓から、電子飛跡を取得し、散乱平面の測定誤差(Scatter Plane Deviation: SPD)を導入すべきと示唆された[2]。電子飛跡情報によりコンプトンイベントを完全に再構成できるの で、ガンマ線の到来方向を一意に決定でき、Point Spread Function(PSF)を定義できる。PSF が決まれ ば、望遠鏡の有効面積と PSF から、望遠鏡の感度を精度よく決定できる。

この課題を解決するために我々は、電子飛跡を測定するコンプトンカメラElectron-Tracking Compton Camera (ETCC)の開発を進めている。ETCC では飛跡情報は Time Projection Chamber (TPC)で測定してい

る。TPC 後段検出器では信号数を減らすため直交する 2 次元ストリップ読み出しを採用している。ドリフト方向 の時間軸サンプリング幅を10nsとすることで多重ヒッ トを抑えているが、それでもその影響が大きく反跳方向 が定まらない飛跡があった(図1左)。そのため SPD は 200 度(FWHM)と、電子の多重散乱による原理限界の約2 倍の値と求まっていた。この問題を解決するために信号 波形が閾値を超えている時間(Time Over Threshold: TOT)を測定し、タイムウォークを補正し、サンプリン グ幅を1nsと狭め、多重ヒットをさらに抑えた(図1右)。 電子の反跳方向決定精度が向上した結果、SPD が約 100 度(FWHM)まで改善し、多重散乱の原理限界に近付くこ とができた。SPD の改善により PSF が向上し、注目領域 外からの漏れ込みを抑えることに大きな効果があるこ とが確認できた(図 2)。本研究では、このような SPD の 改善によるイメージングスペクトロスコピーへの影響

を評価し、コンプトンカメラにおいて SPD の改善が PSF 向上に大きく寄与することを議論する。

- [1] R. Diehl et al., NuPhA. 777, 70-97(2001).
- [2] V. Schönfelder, New AR, 48, 14, 193-198(2004).







図 2. ETCC で行った漏れ込み評価測定のスペ クトル。662 keV は注目領域内の線源からのガ ンマ線、356 keV は領域外からの漏れ込みを表 す。

アイソスピン射影 AMD 法の開発と¹⁰B への適用

原子核理論研究室 森田皓之

Abstract I have developed a new method, isospin projected and $\beta \gamma$ constraint AMD, which is optimized for revealing spatial pn pair in N=Z nuclei. In my first application to ¹⁰B, I observed soft angular momentum projected PES and GCM overlap, which implies the existence of spatial pn pair. © 2016 Department of Physics, Kyoto University

原子核物理において残された大きな課題の一つが、N=Z 領域における陽子中性子相関(pn 相関)の理解 である。[1]pn 相関は同種粒子相関と異なり、isoscalor と isovector の 2 つの形態で存在しうるため、 それらの状態の競合が複雑なダイナミクスを引き起こす。例えば、Wigner エネルギーと呼ばれる対称エ ネルギーの補正項[2]や超許容遷移、isoscalor 型 pn 対相関と対凝縮及び対振動の存在など豊富な話題 を含んでいる。特に、isoscalor 型 pn 対は重陽子として束縛系としての側面をもつため、空間的な局在 化が可能である。したがって、殻模型的な対相関から多中心で局在化した pn 対の形成までを統一的に 扱える手法が必要である。

本研究では N=Z 領域の原子核で起こる pn 相関の解明に最適化された手法として、アイソスピン射影・ βγ拘束反対称化分子動力学(Tβγ-AMD)+GCM 法を開発した。反対称化分子動力学(AMD)法は、殻模型的 構造とクラスターなどの多粒子の空間的相関の両方を記述可能な手法である。AMD 法において以下の拡 張を行った。

- アイソスピン射影を行った上で、原子核の四重極変形度βγに対して拘束条件を掛けた変分[3]を 適用する。
- β γ をパラメータとしたときの波動関数の重ねあわせ(GCM)を実行し、pn 対の空間的発達を解析 する。

本研究では N=Z 奇奇核で局在化した pn 対の存在が知られている[4]最も軽い N=Z 奇奇核 ¹⁰B に同手法を 適用し有効性を確かめた。

新手法は、クラスターの存在や局在化した pn 対の存在を仮定しておらず、N=Z 領域のスペクトルで観 測されるアイソスピンの競合を理解する上で、画期的な手法である。まず新手法によって、実験で得ら れた ¹⁰B の低励起スペクトルの準位間隔と順序を、 $\beta \gamma$ 平面上の Potential Energy Surface (PES)の最 小点として再現できることがわかった。それと同時に新手法は、PES の最小点近傍の平坦な構造を明ら かにし、pn 対の発達を記述することに成功した。さらに新手法は、アイソスピン射影を通じて核子対の スピン構造を固定することで、スピンが固定された pn 対の形成の議論を可能しに、LS 相互作用との関 係を明らかにできることが分かった。例えば、¹⁰B のL², S²の角運動量射影された期待値は、 $\beta \gamma$ 平面上 で固有値を保ちながら変化することが明らかになった。

したがって、T $\beta\gamma$ -AMD は系全体の変形を $\beta\gamma$ 拘束を通じてコントロールすることで pn 対の形成とコ ア核とのダイナミクスを明らかにし、アイソスピン射影によって pn 対のスピンを固定した解析を可能 にできる手法である。新手法は構造を全く仮定しない計算であって強い拡張性をもつため、N=Z 線上の 全ての原子核に対して pn 対の形成と核の変形、スピンダイナミクスを明らかにできる可能性を持つ画 期的な手法である。

References

[1] S. Frauendorf, A. O. Macchiavelli, Prog. Part. Nucl. Phys. 78 (2014).

- [2] D. S. Brenner, C. Wesselborg, R. F. Casten, D. D. Warner, J. -Y. Zhang, Phys. Lett. B243, 1 (1997).
- [3] T. Suhara and Y. Kanada-En'yo, Prog. Theor. Phys. 123, 303-325 (2010).
- [4] Y. Kanada-En'yo, H. Morita and F. Kobayashi, Phys. Rev. C91, 054323 (2015).

ATLAS 実験における フェイク2ミューオンの除去による 高効率・低バックグラウンドな ミューオントリガーアルゴリズムの研究

物理学第二教室 高エネルギー物理学研究室 門田隆太郎

Abstract We are planning an upgrade in the ATLAS Muon trigger system. In order to resolve a problem called "fake-di-muon triggers", which is one muon track but di-muon trigger is fired due to the overlap of detectors, we will apply a logic called "overlap-removal". The performances of the logic are shown. © 2016 Department of Physics, Kyoto University

欧州原子力研究機構 (CERN) に設置されている、大型陽子衝突型加速器 (Large Hadron Collider, LHC) は、2012年まで重心系エネルギー8 TeV で運転を行い(RUN-1)、アップグレードのためのシ ャットダウンを経て、 2015年5月に重心系エネルギー13 TeV で運転を再開した (RUN-2)。

本研究では、 ATLAS 検出器のハードウェアミューオントリガーの改良をおこなった。

ミューオントリガーに用いられている検出器には、各部分(トリガーセクター)の検出器が物理的に 重なっている部分がある("オーバーラップ領域"と呼ぶ)。このオーバーラップ領域にミューオンが入 射した場合、オーバーラップ領域の両方でトリガーを発行してしまう。このとき、実際には1つのミュ ーオンが2つのトリガーセクターにヒットしただけであるのに、誤って2つのミューオンがヒットした というトリガー(2ミュートリガー)を発行してしまう。このようなプロセスで発生する"偽者の"2ミ ュートリガーのことをフェイク2ミュートリガーと呼ぶ。

このフェイク2ミュートリガーの影響により、レベル1トリガーレートが高くなってしまう。この2 ミュートリガーはBの物理やエキゾティックな新粒子探索(複数のミューオンが出てくるもの)におい て非常に重要なトリガーとなっている。もし閾値をあげてトリガーレートを下げると、信号事象に対す るアクセプタンスを大きく失うことになる。

そこで私は、**閾値を低く保ったまま、フェイク2ミューオンを取り除く手法(オーバーラップリムーバ** ル)について研究した。

trigger	Rate reduction
L1_2MU4	14.26±0.06 %
L1_2MU6	23.89±0.11 %
L1_2MU10	36.4±0.2 %

Table. 1. di-muon trigger rate reduction

本研究では、フェイク2ミューオンの発生状況を調査し、それを除去するためのロジック(オーバー ラップリムーバルロジック)を開発した。このオーバーラップリムーバルロジックは、2本の横方向運 動量(pT)が6 GeV/c 以下の限られた範囲について適応していた。これを、pT の全域に渡って導 入すると、Table.1 に示すように、2本のミューオンに対する pT 閾値がいずれも4 GeV/c のトリガ ー(L1_2MU4)で14%、6 GeV/c のトリガー(L1_2MU6)で24%、10 GeV/c のトリガー(L1_2MU10) で36%、のレート削減が期待できることを、RUN-2の実データを用いて算出した。その一方で、2ミ ューオントリガーでみたい事象である J/ ϕ が2つのミューオンに崩壊する事象のうち、オーバーラッ プリムーバルにより排除してしまうものは約1% に抑えられるという評価をした。

References

[1] ATLAS Level-1 Trigger Group ``ATLAS Level-1 Trigger Group Technical Design Report" ATLAS TDR-12, 2000

[2] The ATLAS Collaboration ``The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider" Jinst, 2008

AXEL 実験における高エネルギー分解能を達成するための MPPC および読み出し回路についての研究

素粒子物理学研究室 栁田沙緒里

Abstract We are developing a proportional-scintillation mode Time Projection Chamber with high pressure Xenon gas to search for neutrino-less double beta decay. The electroluminescence photons are measured by MPPC. To achieve high energy resolution, we evaluated the response of MPPC to large light quantity and requirement to the readout electronics. © 2016 Department of Physics, Kyoto University

素粒子の一つであるニュートリノには未だに多くの謎が存在する。その一つは他のレプトンに比べて 質量が非常に軽いことである。シーソー機構により、ニュートリノがマヨラナ粒子であり右巻きの重い ニュートリノが存在すると左巻きの軽いニュートリノを説明することができる。粒子と反粒子が同じで

あるというマヨラナ性を検証するため、ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊の探索がある。 我々の進めているAXEL実験では、二重ベータ崩壊核として高圧キセノンガスを用いた比例蛍光型検出器 を開発している。二重ベータ崩壊からでてくる電子2つのエネルギーを測定するが、ニュートリノを伴 う場合、幅をもったエネルギー分布となり、ニュートリノを伴わない場合、Q値に鋭いピークをもった 分布となる。背景事象である不純物に含まれる放射性物質からの放射線や宇宙線、ニュートリノを伴う 二重ベータ崩壊を弁別したりする際に高エネルギー分解能が必要である。イオン化電子をエレクトロル ミネッセンスで増幅させることによって0.5% (FWHM)の高エネルギー分解能を達成することが可能であ るが、信号を読み出す過程でそれを悪化させる可能性がある。

信号の読み出しには MPPC を用いる。受光面が 3mm 角、50 μ m ピッチでピクセルが配列されているもの だと 1000 個/50ns まで線形性がある。一方で、予想される信号は時間当たりの最大光量が 10⁵ 個/5 μ s であり、そのような光パルスに対して線形性が保たれているかどうかが問題である。線形性を保ってい ないとエネルギー分解能を悪化させる恐れがある。光量は多いが、MPPC の回復時間に比べ十分長い時間 に当たるために線形性を保つ可能性が十分ありうる。そこで、LED を矩形波の電圧で 10⁵ 個/5 μ s の光 量まで光らせ、PMT をモニター用とし、MPPC の線形性について性能評価を行った。50 μ m ピッチでは目 標値までは届かなかったが、異なるピッチ数のものでも性能評価を行い、考察した。

MPPC からの信号は波形として記録されるが、サンプリングにあわせて波形をなまらせることになる。 そこでエネルギー分解能を悪化させない程度の時定数と読み出しサンプリングを調べるためにシミュ レーションを行った。



Fig. 1. Set up to measure the MPPC's response to large and long light pulse



Fig. 2. Response of 50um-pitch MPPC. The horizontal axis is the light intensity measured by a PMT.

次世代長期線ニュートリノ振動実験に向けた 高分解能飛跡検出器の開発

高エネルギー物理学研究室 山本実加

Abstract We are developing the scintillation fiber tracker as a candidate near detector of next-generation long-baseline neutrino oscillation experiments. It can improve understanding of neutrino-nucleon interactions by detecting short tracks of secondary particles. We developed a prototype detector and evaluated the performance of the tracker using a positron beam. © 2016 Department of Physics, Kyoto University

T2K 実験とは、茨城県東海村にある大強度陽子加速器施設 (J-PARC) で生成されたニュートリノビーム を、同施設内の前置検出器と岐阜県飛騨市にある水チェレンコフ検出器 (Super Kamiokande) で測定する ニュートリノ振動実験である。これまでに T2K 実験は、CP 位相角 $\delta_{CP}=[0.15, 0.83] \pi$ (順階層),振動パ ラメータ $\sin^2 \theta_{23}=0.528^{+0.055}_{-0.038}$ と報告している[1]。T2K 実験は引き続き 7.5×10²¹ POT (Proton On Target) までデータを増やし、測定感度を上げていく。その後、さらなる測定感度の向上を目的に J-PARC と Hyper-Kamiokande (HK)を組み合わせた次世代長期線ニュートリノ振動実験が計画されている。

T2K 実験では、現在、ニュートリノエネルギー領域 1GeV 付近においてニュートリノ反応モデルと測定 データの間に大きな違いが見られ、その結果、ニュートリノと原子核の反応の系統誤差を大きく見積も っている。今後、T2K および次世代実験において、CP 破れの探索を進めていく上で、この系統誤差の削 減が必要である。高い位置分解能を持った前置検出器で、ハドロンなどの飛跡が短い粒子を検出できれ ば、ニュートリノ反応についての理解が高まり、この系統誤差を大きく削減できる。我々は、この目的 を達成するために、シンチレーションファイバートラッカーを開発している。

シンチレーションファイバートラッカーに要求される性能は、高い分解能、高い検出効率、十分な光 量、ファイバー内での光の減衰長が長いこと(2m程度)、狭いスペースでの多チャンネル化が可能、な どが挙げられる。本研究では、この検出器のプロトタイプとして 2mm 角のシンチレーションファイバー 8×8 本を同方向に並べた検出器[Fig.1]を制作し、東北大学光理学研究センターで陽電子ビームを照射 するテストを行った。その結果、十分な光量、2m以上のファイバー減衰長、90%以上の検出効率を確認 できた。シンチレーションファイバーから発光したシンチレーション光は 64ch Array型 Multi-Pixel Photon Counter(MPPC) [Fig. 2]によって検出することで、限られたスペースに多チャンネルを収めるこ とに成功した。



Fig. 1. Geometry of scintillation fiber tracker



汎関数繰り込み群を用いた QCD 臨界点における ソフトモードの解析

原子核理論研究室 横田猛

Abstract We make an intensive investigation of the nature of the soft modes at the QCD critical point by calculating the spectral function of the sigma meson channel in the functional renormalization group. It is found that the sigma mesonic mode tends to be degenerate with the softening phonon modes. © 2016 Department of Physics, Kyoto University

クォーク物質が示す様々な相をまとめたものは QCD 相図と呼ばれ、QCD 相図は多様な相構造を持つと 今日までに予想されている。QCD 相図における相構造の一つとして、低温、低密度領域で現れるハドロ ン相と高温、あるいは高密度領域で現れるクォーク・グルーオン・プラズマ相の間の一次相転移線、及 びその端点である QCD 臨界点の存在がある。QCD 臨界点では相転移は二次となり、何らかの物理量の感 受率が発散する。

一般に臨界点が存在すると、臨界点で長寿命、ギャップレスとなるモードが少なくとも一つ存在し、 そのようなモードはソフトモードと呼ばれる。QCD 臨界点におけるソフトモードについての描像は、有 限のカレントクォーク質量のため複雑になっていると考えられている。カレントクォーク質量がゼロで あるカイラル極限では臨界点(カイラル極限では臨界線)上でシグマメソンのモードがソフト化する。し かしカレントクォーク質量が有限の場合は、臨界点でのソフトモードはクォーク数密度やエネルギー密 度といった保存量の揺らぎに対応する particle-hole モードであり、この particle-hole モードのソフ ト化により保存量密度揺らぎの感受率及びカイラル感受率の発散が起こると考えられている。時間依存 Ginzburg-Landau 理論や Nambu-Jona-Lasinio(NJL)模型における平均場理論に基づいた乱雑位相近似に よる解析から、このような描像が見いだされている[1,2]。

クォーク物質は相互作用が強い系であり、その解析には平均場理論を超えた手法が望まれる。そのような手法の一つとして、汎関数繰り込み群がある。近年、汎関数繰り込み群による実時間での解析手法が発達している。特にTripoltらにより、汎関数繰り込み群を quark-meson 模型に適用しメソンチャンネルのスペクトル関数を計算する手法が開発された[3,4]。スペクトル関数はモードのソフト化を見る上で便利な量であり、実際先行研究[1]では NJL 模型でスペクトル関数を計算することでソフトモードを特定している。

本研究では、quark-meson 模型に対し汎関数繰り込み群を用いて QCD 臨界点の周りでのシグマチャン ネルのスペクトル関数の計算を行い、QCD 臨界点におけるソフトモードを検証した。その結果、保存量 の揺らぎに対応する particle-hole モードのソフト化を示す振る舞いに加え、QCD 臨界点の近傍でシグ マメソンのモードの分散関係が低運動量領域で空間的になり、particle-hole モードによるスペクトル 関数への寄与とシグマメソンのモードによる寄与が混ざるという振る舞いが見られた。このことは、QCD 臨界点では保存量揺らぎのモードだけでなくシグマメソンのモードもソフト化するという、従来の予想 とは異なる描像を示唆している。このようなシグマメソンのモードのソフト化を引き起こすものとして、 モード間のレベル反発の影響が考えられる。我々は two sigma decay に関する結合の強さを変化させた 際のスペクトル関数の振る舞いを見ることで、シグマメソンのモードと two sigma モードの間のレベル 反発の影響について議論した。

References

[1] H. Fujii and M. Ohtani, Phys. Rev. D 70, 014016 (2004).

- [2] D. T. Son and M. A. Stephanov, Phys. Rev. D 70, 056001 (2004).
- [3] R. A. Tripolt, N. Strodthoff, L. von Smekal and J. Wambach, Phys. Rev. D 89, no. 3, 034010 (2014).
- [4] R. A. Tripolt, L. von Smekal and J. Wambach, Phys. Rev. D 90, no. 7, 074031 (2014).

原子核におけるエキゾチックな構造である α-ring 状態とトーラス形状との関連

原子核理論研究室 吉居正晃

Abstract The nuclei with the forms of alpha ring and torus structures have been known, and here, the relation between them is discussed numerically and analytically. The overlap between single ring and torus configuration is numerically analyzed. I analytically try to describe the torus state by superposing many alpha ring configurations.

© 2016 Department of Physics, Kyoto University

原子核は多数の陽子・中性子がそれぞれ相互作用している多体系であり、この系を記述するモデルと して、各陽子・中性子が独立に運動するシェルモデルなどが知られているが、α粒子のような強い相関 を持った核子がクラスターを形成するというモデルも知られている。クラスター構造は、主にクラスタ ーを原子核から分離して取り出せるエネルギーの近傍に現れることが知られている。また、低密度核物 質を考えると、通常の陽子・中性子の独立運動状態よりも、α粒子が格子状に配置した状態のエネルギ ーがより安定に存在できることも知られている[1]。近年では、非常に軽い原子核以外でもクラスター 構造が議論されており、たとえば⁴⁰Caの低密度領域では、半径を制限することで、αクラスターが ring 状に配置した状態が現れるという Hartree-Fock-Bogoliubov 理論を用いた分析がある[2] (Fig.1 左)。 しかし同じ⁴⁰Caでも、高い角運動量を与えた場合には、α-ring 状態よりも、核子がトーラス状に運動 する「トーラス形状」がより安定になるという指摘がある[3] (Fig.1 右)。このトーラス状態では、一 つの軌道に4つの核子が入るという対称性が残っており、それぞれの核子は対称軸周りに良い軌道角運 動量を持ち、円周上を平面波的に運動している。本修士論文での目的は、これら2つの形状、すなわち、 α-ring 状態とトーラス状態が関連しているのか、あるいは両者は完全に別個な状態なのであるか、詳 細に検討することである。この目的のために、まず、円周上に等間隔に配置したα-ring 状態とトーラ ス状態との重なり積分を、ring 半径の関数として数値的に計算した。その結果、重なり積分はほとんど 値を持たない、つまり、円周上に等間隔に配置したα-ring 状態とトーラス状態はほとんど関連してい ないことが明らかになった。次に、円周上のさまざまな位置にα粒子を配置したα-ring 状態の波動関 数を多数用意し、これらを重ね合わせることによって α粒子が円周上を自由に運動する α-ring ガス状 態を構成し、この状態がトーラス波動関数を記述することができるのか、あるいはできないのかについ て詳細な分析を行った。その結果、4 つの核子がαクラスターを形成する場合には、いかに多くの異な った α-ring 状態を重ね合わせても、トーラス波動関数は記述されないことが明らかとなった。



Fig. 1. The schematic figure of alpha ring and torus.

- [1] D.M. Brink and J.J. Castro, Nucl. Phys. A216, 109-124 (1973).
- [2] M. Girod and P. Schuck, Phys. Rev. Lett. 111, 132503 (1-5) (2013).
- [3] T. Ichikawa, J.A. Maruhn, N. Itagaki, K. Matsuyanagi, P.-G. Reinhard, and S.Ohkubo, Phys. Rev. Lett. 109, 232503 (1-4) (2012).

ASTRO-H 衛星搭載 X 線 CCD カメラ SXI の 性能評価と較正方法の確立

宇宙線研究室 鷲野遼作

Abstract We evaluated the X-ray performance of the soft X-ray imager (SXI) onboard ASTRO-H. We found positional dependence of the charge transfer inefficiency (CTI) of the CCDs and constructed a new method to correct the SXI data.

© 2016 Department of Physics, Kyoto University

我々は次期 X 線天文衛星 ASTRO-H に搭載する軟 X 線撮像検出器 (Soft X-ray Imager : SXI) の開発を 行ってきた。SXI では 4 枚の CCD 素子を 2×2 に並べ、38'×38'の広い視野で、0.4–12 keV のエネルギ 一帯域で撮像分光を行う。ASTRO-H の打ち上げは 2016 年 2 月に迫っている。

CCD の軌道上運用での最大の問題はゲインとエネルギー分解能が経年変化することである。これは、 宇宙放射線によって空乏層内に格子欠陥が生じることが原因だと考えられている。入射 X 線が変換され た電荷は CCD のピクセル間を転送され、電気信号として読み出される。この際、格子欠陥では電荷の 一部がトラップされるため、入射 X 線のエネルギーが正しく再構成できない。この効果を電荷転送損失 (Charge Transfer Inefficiency: CTI) と呼ぶ。CTI を改善する方法の1つは、CCD 素子に人工電荷を注入 し、電荷トラップを予め埋めておくことで信号電荷の損失を防ぐことである[1,2]。この「電荷注入法」 により、CTI は大幅に改善するが、全くのゼロにすることはできない。Fig1(左) に示すように、X 線入 射位置に依存したゲインの変化が残ってしまい、さらなる較正が必要である。本修士論文では、打ち上 げ後のデータ較正を念頭にした地上較正試験の詳細について報告する。

我々は SXI のフライトモデル素子を使用した地上較正試験を 2014 年 8 月から 9 月にかけて行った。 この試験では、我々が開発した回転型 X 線発生装置を用いて 4 枚の CCD 素子に異なる 3 つのエネルギ ーの X 線を照射し、運用時と同じ温度環境を含む複数の条件でデータを取得した。取得したデータから 素子上に暗電流が周囲より数%高くなっている領域を複数見つけた (Fig. 2)。さらに、その領域では局所 的に CTI が著しく悪化していることが分かった。これまでは CTI は素子上で一様だと考えられてきた が、局所的な悪化は X 線エネルギーの測定に非常に大きな不定性をもたらす。そこで、補正手法を大幅 に改善し、CTI の空間分布を詳細にモデル化した。その結果、素子全面でのゲインとエネルギー分解能 の補正に成功した (Fig. 1 右 は CTI 補正後の X 線イベントの波高値分布)。この補正方法と較正データ は打ち上げ後の ASTRO-H の観測データ処理に用いる予定である。



Fig. 1. Relationship between pulse height of single pixel events and y-coordinate of CCD1CD before (left) and after (right) the CTI corrections.

- [1] Uchiyama, H., et al., PASJ, 61, S9 (2009).
- [2] Nobukawa K.K., et al., NIMA, 765, 269 (2014).



Fig. 2. Dark current images of CCD1 and CCD2. The CTI anomaly regions are enclosed by the three white circles.

レーザー加速パルス電子線を用いた 超高速電子線回折装置に関する研究

レーザー物質科学研究室 渡邉浩太

Abstract The instrument of ultrafast electron diffraction has been developed, which uses electron pulses accelerated by intense femtosecond laser pulse. The elemental techniques are electron acceleration, electron pulse compression, electron pulse width measurement and adjustment of pump (light) and probe (electron). I have studied these elements to catch a ultrafast phenomena. © 2016 Department of Physics, Kyoto University

量子ビームは様々な物質の構造や組成を探るためにプローブとして用いられている。プローブとして の電子線には2つの利点がある。原子弾性散乱断面積が大きく有効弾性散乱当たりの非弾性散乱による エネルギー損失が小さい。これらの理由から、超高速電子線回折法は原子尺度のスケールで物質の超高 速現象をとらえるための有効な手段となる。

レーザー加速電子パルスを電子源とする超高速電子線回折装置の開発を行った。これまでに、300fs 程度の電子パルスを作り、これを用いて金単結晶の電子回折像を単一ショットで得る事に成功してい る^{[1],[2]}。本研究では、電子線回折装置のさらなる性能改善に向けて以下の課題について取り組んだ。 ①数 100fs 以下のパルス幅,パルス当たり数 100 万個以上の電子数を目標にしたレーザー加速電子パル スの開発

②実証試験用試料の選定と作製

実験装置の概略を図1に示す。レーザービーム(中心波長810nm、最大エネルギー400mJ、パルス幅40fs) を二分割する。一方のレーザーを軸外し放物面鏡を用いて(i)固体薄膜上に集光し(~10¹⁸W/cm²)、プロー ブとなる電子を発生させ、加速する。(ii)加速された電子はエネルギー分散のため時間・空間的に広がる が、双極子磁石などの電子光学系を用いて時間・空間的に再圧縮される。電子のエネルギーは双極子磁 石で180°偏向後にスリットを通し電子エネルギーを選んでいる。もう一方のレーザーはポンプ光とし て用いる。(iii)電子の圧縮点にポンプ光を集光し、ポンデラモーティブ力による電子散乱によりパルス 幅を測定する。(iv)また、試料を電子のパルス幅が最小となる位置(圧縮点)に配置し電子回折を行ない、 ポンプ&プローブ法により超高速現象の時間分解測

ホンク&クローク伝により起筒歴現家の時间分解例 定を行なう。回折された電子は後方の蛍光スクリーン 上に入射し、EM(電子増倍)CCD カメラで撮影する。

①については、レーザーパルス幅をより短くする事 による(150fs→40fs)、電子パルスの短パルス化^[3]。 電子材料の最適化と、プラズマミラーを用いたレーザ ーパルス波形の制御により電子数を増大化した^[4]。

②については、光により可逆的に変化するし、反応 時間は数ピコ秒であり^{[5],[6]}、単結晶、光耐久性、熱変 化による安定性に優れているジアリールエテンを試 料として選定し作製した。

References

[1]S.Tokita et al., Phys.Rev.Lett. 105, 215004(2010).

- [2]S.Tokita et al., Appl.Phys.Lett. 95, 111911(2009).
- [3]S.Inoue et al., Phys.Rev.Lett. 109 185001(2012).
- [4]D.Ikeda et al.,京都大学修士論文(2014).
- [5]H.Jean-Ruel et al., J.Phys.Chem.A.105,13158(2011).
- [6]H.Jean-Ruel et al., J.Phys.Chem.B. 117,15894(2013).

