

平成26年度

京都大学大学院理学研究科

D3 発表会アブストラクト

(平成27年1月20日)

物理学第二分野

D 3 発 表 会

日 時 2015年1月20日(火) 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 》

1. Emergence of Space-Times from Gauge Theories in Gauge/Gravity
Duality
浅野 侑磨 (9 : 00) . . . 1
2. Magnetized twisted orbifold models for the origin of generation and
chirality
阿部 智大 (9 : 20) . . . 2
3. 弦の場の理論における位相的構造と反転対称性
小路田 俊子 (9 : 40) . . . 3
4. The Gribov problem beyond Landau gaugeYang-Mills theory
権業 慎也 (10 : 00) . . . 4
5. Condition for the fragmentation of protoplanetary disks
高橋 実道 (10 : 20) . . . 5
6. LEPS2 BGOegg 実験における η' 中間子原子核探索
冨田 夏希 (10 : 40) . . . 6

7. Optical Synchrotron Precursors of Radio Hypernovae	
	仲内 大翼 (1 1 : 0 0) . . . 7

8. Quantum Entanglement of Local operators	
	野崎 雅弘 (1 1 : 2 0) . . . 8

9. 光生成反応によるペンタクォーク Θ^+ 探索実験	
	野沢 勇樹 (1 1 : 4 0) . . . 9

-----午 後-----

10. Multi-metric Gravity	
	野村 紘一 (1 3 : 0 0) . . . 10

11. 楕円体上の超対称ゲージ理論の構成と局所化による計算	
	浜 直史 (1 3 : 2 0) . . . 11

12. T2K 実験 反ニュートリノ振動の研究	
	平木 貴宏 (1 3 : 4 0) . . . 12

13. ニュートリノ質量階層構造解明を目指した数 GeV 大気ニュートリノ測定のためのスーパーカミオカンデにおける粒子識別能力の向上	
	廣田 誠子 (1 4 : 0 0) . . . 13

14. A New MeV gamma-ray Imaging Spectroscopy Method with a gaseous electron tracker in an Intense Radiation Environment	
	松岡 佳大 (1 4 : 2 0) . . . 14

15. 光円錐ゲージにおける張力の無い弦の研究	
	村瀬 健太 (1 4 : 4 0) . . . 15

Emergence of Space-Times from Gauge Theories in Gauge/Gravity Duality

素粒子論研究室 浅野侑磨

Abstract Although gauge/gravity dualities have been getting understood with great effort, how the geometries emerge from gauge theories is still unclear. I will show it in the case of the gauge/gravity duality between BMN model and the type IIA supergravity by investigating the exact partition function of the gauge theory. © 2015 Department of Physics, Kyoto University

ゲージ/重力双対は Maldacena が提唱した AdS_5/CFT_4 を始めとして他の対応も精力的に調べられてきた。非常に多くのことが分かってきたものの、重力の幾何はゲージ理論においてどう実現されるのかについてはほとんど分かっていない。しかしながら幾何の創発は、ゲージ理論によって超弦理論を非摂動的に定式化する上で非常に重要な現象である。また、いまだ証明されていないゲージ/重力対応の有力な証拠のひとつでもある。

本研究では、 AdS/CFT 双対の拡張として考えられた、 AdS 空間の $1/2$ -BPS の励起についてのゲージ/重力双対 [1] を扱う。一般に、そのような $1/2$ -BPS の幾何は自由フェルミオン系で記述でき、重力側の幾何はフェルミオンの数とその配位でラベルされる境界条件で決定されることが示された。この幾何と同じ超対称性を持つゲージ理論がゲージ/重力双対で対応し、それぞれの幾何はゲージ理論の真空に対応していると考えられる。 $1/2$ -BPS の幾何の内の一つに、 $SU(2|4)$ 対称性を持つ幾何 [2] があり、対応するゲージ理論は Berenstein-Maldacena-Nastase 行列模型 (BMN 模型) [3] などの $SU(2|4)$ 対称なゲージ理論である。それらのゲージ理論は質量項があるため、無数の離散的な真空構造を持つ。これは対応する重力側の幾何構造と符合しており、ゲージ/重力双対が成り立つのであれば、ゲージ理論のそれぞれの真空周りの物理から対応する幾何を実現できるはずである。

この $SU(2|4)$ 対称性を持つゲージ/重力対応における幾何の創発を示すために、BMN 模型に局所化の方法を適用して得られた厳密な分配関数 [4] を調べた。局所化の適用の際に用いた超対称性は、対応する幾何の非自明な方向に対応する演算子が変わらないように取られており、その方向の計量を再現すると思われる。この厳密な分配関数は簡単な行列積分の形になっており、行列模型の手法を用いて解析することができる。古典超重力の近似が良くなるようなラージ N 極限をとって有効作用を調べると、それは 3 次元の軸対称な導体円盤からなる静電系に等価であることが示された [5, 6]。実際に、鞍点方程式はある背景場中の軸対称な Laplace 方程式と同じになっている。この静電系は、重力側の幾何を決める方程式と等価な系 [2] である。以上の議論から、BMN 模型における鞍点方程式が重力の幾何を決める方程式と等価であることが分かり、ゲージ理論側から対応する幾何を実現されることが示された。この対応は BMN 模型の全ての真空について確認することができる [6]。ここまでは BMN 模型についての対応だが、 $SU(2|4)$ 対称なゲージ理論は全て BMN 模型の特別な真空周りの理論と等価であることを用いると、直ちに全ての $SU(2|4)$ 対称なゲージ理論についての対応に拡張される [6]。

以上の結果から、 $SU(2|4)$ 対称な理論に幾何はどう埋め込まれているかが分かった。この方法は他のゲージ/重力対応についても適用できると考えられ、様々なゲージ理論からの幾何の創発の理解が期待される。

References

- [1] H. Lin, O. Lunin and J. M. Maldacena, JHEP **0410**, 025 (2004).
- [2] H. Lin and J. M. Maldacena, Phys. Rev. D **74** 084014 (2006).
- [3] D. E. Berenstein, J. M. Maldacena and H. S. Nastase, JHEP **0204**, 013 (2002).
- [4] Y. Asano, G. Ishiki, T. Okada and S. Shimasaki, JHEP **1302**, 148 (2013).
- [5] Y. Asano, G. Ishiki, T. Okada and S. Shimasaki, JHEP **1405**, 075 (2014).
- [6] Y. Asano, G. Ishiki and S. Shimasaki, JHEP **1409**, 137 (2014).

Magnetized twisted orbifold models for the origin of generation and chirality

素粒子論研究室 阿部智大

Abstract We study T^2/Z_N orbifold models with magnetic flux. This model can solve the puzzles in Standard Model, for example the origin of generation, chiral theory, and the mass hierarchy of quarks and leptons.

© 2015 Department of Physics, Kyoto University

標準模型は様々な実験事実を非常に高い精度で説明でき、大きな成功を収めている。折しも Higgs 粒子の発見によって、標準模型は完成したといってもよい状況である。にも関わらず、標準模型には幾つもの謎がある。例えば、同じものの繰り返しである世代構造、右手型と左手型で相互作用の仕方が異なるカイラルな構造、世代間で大きな質量の違いがある質量階層性問題などである。これらの謎の起源を探ることは素粒子物理にとって大きな課題である。

これらの謎を解決するモデルとして、高次元時空の場の量子論の枠組みで、余剰次元として一様磁場中の 2 次元トーラスを持つモデルがある。このモデルの優れた点は、高次元理論を考えることで質量階層性の解決が容易になること、一様磁場の存在によって世代構造とカイラル構造が自然に導けることである [1]。この時、磁束はトーラス上の理論の無矛盾性から量子化されており、その値が世代数を与えることになる。

実際のモデル構築に際しては、これに加えて twisted orbifold を考えるとより現実的なモデルが作れることが期待される。Twisted orbifold を考える利点は、1 つには高次元理論にありがちなエキゾチック粒子（標準模型に無い粒子）を project out できることが挙げられる。また、orbifold を考えない場合、上で述べたように世代数は磁束によって完全に決定されており、現実的なフレーバー構造を導きにくいのだが、twisted orbifold はフレーバー構造をより豊かなものに変えてくれる点も大きい。

ただし一様磁場中の orbifold 上の場の理論は、通常解析方法だと非自明な積分計算を行わなければならない、数値的にしか解くことができない。この問題は演算子形式を導入することで解決でき、 Z_N 回転した状態の解析的な表式を得ることができる。

本論文では、[3][4]に従って T^2/Z_N orbifold 上の理論を調べ、既に解析されている Z_2 orbifold の場合 [2]の再導出に加え、 Z_3 、 Z_4 、 Z_6 の場合についても解析を行った。また、その解析をもとに、クォーク・レプトンが 3 世代存在するようなモデルの可能性を探った。

References

- [1] D. Cremades, L. E. Ibanez, and F. Marchesano, JHEP **0405** (2004) 079.
- [2] Hiroyuki Abe, Tatsuo Kobayashi, Hiroshi Ohki, JHEP **0809** (2008) 043.
- [3] Tomo-hiro Abe, et. al., JHEP **1401** (2014) 062.
- [4] Tomo-hiro Abe, et. al., Nucl. Phys. **B890** (2015) 442-480.

弦の場の理論における位相的構造と反転対称性

素粒子論研究室 小路田俊子

Abstract: We explore the topological structure in Cubic String Field Theory (CSFT) on the basis of its similarity to the Chern-Simons (CS) theory. Especially, we find the invariance of correlators in the KBc algebra under the inversion transformation $K \rightarrow 1/K$. We present a construction of various D-brane solutions by using these properties.

© 2015 Department of Physics, Kyoto University

ボゾニックな開弦の場の理論である Cubic String Field Theory (CSFT) の作用の代数的構造が、三次元コンパクト多様体上のトポロジカルなゲージ理論である Chern-Simons (CS) 理論と似ている事に注目し、その類似性を CSFT において追求することで CSFT における位相的構造の探求を行った。CS 理論には winding 数と呼ばれるトポロジカルな量が存在する。Winding 数は多様体から群への巻き付きを数えており、整数に量子化された量である。Winding 数は作用の有限ゲージ変換で得られるが、同様に CSFT の作用において有限ゲージ変換 $\Psi \rightarrow U(Q + \Psi)U^{-1}$ で得られる量 N

$$N = \frac{\pi^2}{3} \int (UQU^{-1})^3$$

が同じく位相的量と見なせるのか、そしてその性質を支える背後の構造は何かを明らかにするというのが本研究の目的である。 N も Winding 数同様、微小ゲージ変換で不変な ``トポロジカル'' な量となっている。 N の構造の理解のために先ず winding 数が必ず全微分の積分形に直せることに着目した。ガウスの定理により、この量はさらに表面積分に書き直される。多様体はコンパクトゆえこの表式は一見ゼロになりそうだが、ゲージ場が多様体上に特異性を持つ場合 Winding 数は非自明な値を獲得する。このような性質を N も持つのかを調べた。その結果 N を全微分の積分形に相当する形に書き直すことに成功した。そしてこの量も代数的にゼロになる量であるが、解が特異性を持つ場合に非自明な値を取るという結果が得られ、Winding 数と似た性質を持っていることが見えてきた。次に KBc 代数というある代数を満たす三つの量 K, B, c で構成されたクラスの解について一般的に N を評価した。このクラスの解はタキオン凝縮解を含み近年活発に議論されている。 N を評価した結果、 N は解の詳細によらず、解の持つ $K=0$ と $K=\infty$ における特異性だけに依存した値を獲得することが分かった。そして古典解に対しては整数になることが分かった。興味深いことに N は、 $K=0$ と $K=\infty$ の入れ替えに対して不変であるという性質を持っている。この事実は、KBc で構成された任意の相関関数が $K=0$ と $K=\infty$ の入れ替えに対して不変 (inversion symmetry) であるという驚くべき定理の帰結であることが分かった。これらの結果から、Winding 数がゲージ場の多様体上における特異性を拾っているのに対応する現象は、 N が解の K 空間上の特異性を拾っているという現象で、その K 空間は原点と無限遠が等価なまるで球面のような構造を持っていることが分かってきた。

さて inversion symmetry の考察を開弦の場と on-shell の重力子の結合へ適用することで、新しい結果が得られた。これまで重力結合だと考えられていた量は inversion symmetry を破っており、一方正準エネルギーには inversion symmetry が存在するため、矛盾が存在した。正準エネルギーと重力結合の直接的な関係を再考察することで新たな開弦の場と重力子の結合を発見し、明白に inversion symmetric な重力結合を得た。

References

- [1] H.Hata and T.Kojita, ``Winding Number in String Field Theory," JHEP 1201, 088 (2012)
- [2] H.Hata and T.Kojita, ``Singularities in K-space and Multi-brane Solutions in Cubic String Field Theory," JHEP 1302, 065 (2013)
- [3] H.Hata and T.Kojita, ``Inversion Symmetry of Gravitational Coupling in Cubic String Field Theory," JHEP 1312, 019 (2013)

The Gribov problem beyond Landau gauge Yang-Mills theory

Nuclear Theory Group

Shinya Gongyo

Abstract We study the influence of the Gribov region in maximally Abelian gauge (MAG) Yang-Mills theory, and the Landau gauge Higgs model. We construct the Gribov-Zwanziger action in MAG and compare the propagator with the lattice result in two dimensions. Then we study the gluon propagator in the two-dimensional Higgs model.

© 2015 Department of Physics, Kyoto University

In Landau gauge, a scenario for the confinement mechanism in QCD has been proposed by Gribov and Zwanziger [1]. According to the scenario, because of the effects of the Gribov region, which eliminates the remaining gauge degrees of freedom, the functional form of the gluon propagator is largely changed, and the propagator approaches zero as the momentum decreases. This behavior shows the violation of the Kallen-Lehmann representation, and thus the gluon does not appear as a physical particle. From this point of view, the gluon propagator in Landau gauge Yang-Mills theory has been studied.

We discuss the confinement mechanism beyond Landau gauge Yang-Mills theory from the perspective of Gribov-Zwanziger scenario, in particular maximally Abelian gauge Yang-Mills theory [2,3] and the Landau gauge Higgs model [4].

First, we construct the Gribov-Zwanziger action in SU(2) MAG, which eliminates the remnant gauge degrees of freedom from the QCD action [2]. Using this action, the diagonal gluon propagator in MAG at tree level shows the violation of the Kallen-Lehmann representation as in the case of the Landau gauge, while the off-diagonal gluon propagator does not show the influence.

Next, to investigate the Gribov-Zwanziger scenario in MAG, we study the diagonal and off-diagonal gluon propagators in MAG using SU(2) lattice simulations in two dimensions [3]. The reason why we study two-dimensions is that in two-dimensional Landau gauge, the behavior of the propagator is well described by the propagator of the Gribov-Zwanziger action in accordance with the scenario. We calculate the gluon propagators and their dressing functions using numerical simulations. These behaviors support that the violation of the Kallen-Lehmann representation is visible for the diagonal gluon and is not visible for the off-diagonal gluons, consistent with the Gribov-Zwanziger scenario in MAG.

Finally we investigate the gluon propagator of the SU(2) Higgs model in two dimensions using lattice simulations [4]. The lattice result shows that the gluon propagator in Landau gauge would vanish at zero momentum in the infinite-volume limit. The behavior supports that the Gribov-Zwanziger scenario is also valid for the Higgs model in two dimensions. Furthermore this result is consistent with an analytical study which shows that in two dimensions, for the Landau gauge inside the Gribov region, the gluon propagator vanishes at zero momentum whether the action includes other fields such as fermion and scalar fields or not [5].

References

- [1] N. Vandersickel and D. Zwanziger, Phys.Rept. **520**, 175 (2012).
- [2] S. Gongyo and H. Iida, Phys.Rev. **D89**, 025022 (2014).
- [3] S. Gongyo, arXiv:1411.2211 [hep-lat].
- [4] S. Gongyo and D. Zwanziger, J. High Energy Phys. **12** (2014) 172.
- [5] D. Zwanziger, Phys.Rev. **D87**, 085039 (2013).

Condition for the fragmentation of protoplanetary disks

天体核研究室 高橋実道

Abstract The fragmentation of the protoplanetary disks is a candidate of the formation mechanism of binary systems, brown dwarfs and gas giant planets. We have investigated the condition for the fragmentation of the protoplanetary disks by using two-dimensional hydrodynamical simulations.

© 2015 Department of Physics, Kyoto University

原始惑星系円盤は形成初期段階において円盤は重力的に不安定であり、自己重力によって渦状腕が形成されることが数値計算により示唆されている[1][2]。円盤が十分重い場合は、この渦状腕は分裂すると考えられる。このような円盤の分裂は、観測されている遠方ガス惑星や褐色矮星、連星系の形成過程を説明する可能性があり、星と惑星の形成と進化を考える上で非常に重要である。

自己重力円盤では、渦状腕による円盤中のガスの再分配とショック加熱により、円盤を自己重力的に安定化させる。従って、円盤が分裂するためにはこの安定化に打ち勝って不安定性が成長する必要がある。円盤分裂の条件として、これまでは円盤の冷却率に対する分裂の条件が広く用いられてきた[3][4]。これは、渦状腕が形成された円盤の冷却率が十分大きい場合、円盤が分裂するというものである。しかし、この条件とは矛盾する数値計算の例が多く存在する。例えば、円盤が断熱の場合でも分裂する計算結果[2]や、円盤の冷却率が十分小さくても分裂しない計算結果[5]が報告されている。このように、冷却率に対する条件では円盤分裂の条件として不十分であることが分かっている。

そこで本研究では、より現実的な原始惑星系円盤の分裂条件を調べるため、円盤の大局的な数値計算を行い、分裂する条件と渦状腕の構造の関係を調べた。その結果、渦状腕内部の Toomre parameter Q と分裂条件に対応があることを発見した。この結果は渦状腕を回転する細いリングとして扱った場合の線形解析から得られる自己重力不安定の条件として解釈可能であり、渦状腕の幅の2倍程度の長さで局所的に $Q < 0.6$ を満たすことが円盤分裂の条件であることが分かった。

円盤が分裂する為に必要な初期面密度は、ガスの不透明度に依存する。円盤は光学的に厚いため、不透明度が小さいほど輻射冷却は効率的になる。そのため、不透明度が小さいほど小さな初期面密度の円盤で分裂が起きる。本研究の結果、円盤の典型的な Q パラメータが2より大きい場合、不透明度によらず円盤は分裂せず、 Q が1程度まで小さくなると断熱の場合でも円盤が分裂することが分かった。

References

- [1] Bate, M. R. 1998, ApJ, 508, L95
- [2] Machida, M. N., Inutsuka, S., & Matsumoto, T. 2010, ApJ, 724, 1006
- [3] Gammie, C. F. 2001, ApJ, 553, 174
- [4] Meru, F., & Bate, M. R. 2012, MNRAS, 427, 2022
- [5] Tsukamoto, Y., Takahashi, S. Z., Machida, M. N., & Inutsuka, S. 2015, MNRAS, 446, 1175

LEPS2 BGOegg 実験における η' 中間子原子核探索

原子核ハドロン研究室 富田 夏希

Abstract We are searching for η' meson-nucleus bound state via $\gamma(^{12}\text{C}, p)\eta' \otimes ^{11}\text{B}$ reaction at LEPS2 beamline at SPring-8 using the BGOegg detector system. The status of the experiment and the performance of the detectors will be presented.

© 2015 Department of Physics, Kyoto University

ハドロン質量のうち、ヒッグス機構により説明できるのは数%程度であり、大部分はカイラル対称性の破れによるものと考えられている。高温高密度中ではカイラル対称性は部分的に回復すると考えられるため、原子核内で生成されたハドロンは真空中と比べて質量の減少を観測できる可能性がある。中でも η' 中間子は $U_A(1)$ 異常から、原子核内で 150 MeV もの質量の減少があるとの予想がある[1]。150 MeV もの質量の減少があると、 η' 中間子と原子核は束縛状態を形成する。我々は SPring-8 の LEPS2 ビームラインにおいて、BGOegg 検出器を用いて η' 中間子原子核探索実験を行っている。

LEPS2 ビームラインでは、高輝度 γ 線を用いて $\gamma(^{12}\text{C}, p)\eta' \otimes ^{11}\text{B}$ 反応により ^{11}B 原子核中に η' 中間子を生成する。LEPS2 ビームラインでは 1.4-3.0 GeV の γ 線を用いることができ、Fermi 運動量以下の遅い η' 中間子を原子核中に生成できるため、深い束縛状態の探索が可能である。Fig. 1 に BGOegg 実験の実験セットアップを示す。入射 γ 線のエネルギーはタギング検出器により、前方に放出される陽子のエネルギーはターゲットの下流 12.5m においた RPC-TOF 検出器により測定する。エネルギー分解能はタギング検出器と RPC-TOF 検出器を合わせて 12~18 MeV 程度である。入射 γ 線と前方陽子のミッシングマス法により η' 中間子の原子核束縛状態を探索する。 η' 中間子は原子核内では真空中と同じ崩壊分比は持たず、大部分が核子吸収により η 中間子を伴った崩壊をされると考えられる。この η 中間子を BGOegg 電磁カロリメーターで測定することにより、 η' 中間子が生成したイベントを選び出し、多重 π 中間子生成などによるバックグラウンドを抑制する。

本研究は 2014 年よりデータ取得を開始し、現在もデータ取得を続けている。本発表では予想されるスペクトルと、データ取得状況および検出器の性能評価について報告を行う[2]。

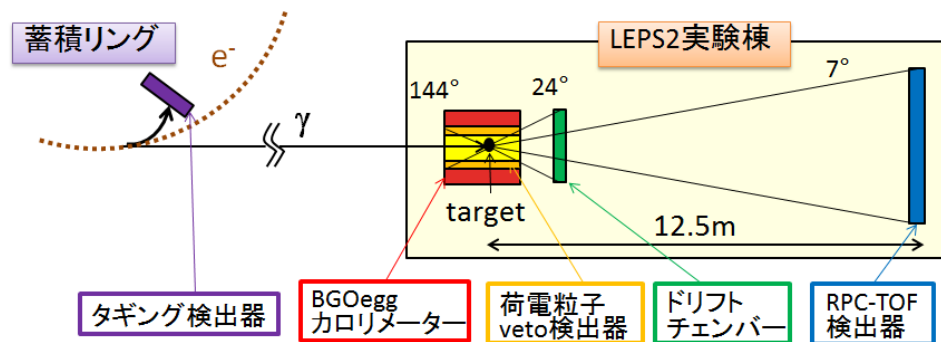


Fig. 1. The experimental set up of the BGOegg experiment.

References

- [1] H. Nagahiro *et al.*, Phys. Rev. C **74**, 045203 (2006).
- [2] N. Tomida *et al.*, JINST **9**, C10008 (2014).

Optical Synchrotron Precursors of Radio Hypernovae

天体核研究室 仲内 大翼

Abstract While gamma-ray emissions are not detected, some hypernovae were suggested to be jet-driven explosions like gamma-ray bursts, since the late-time radio emissions hint the underlying relativistic ejecta. However, we find the above suggestion implausible by interpreting the radio emissions consistently with the spherical hypernova explosion model.

© 2015 Department of Physics, Kyoto University

極超新星は通常の超新星よりも1桁程度爆発エネルギーの大きな現象であるが、その一部には相対論的ジェットを起源としたガンマ線バースト (GRB) に付随して発生したものもあり、極超新星は GRB と通常の超新星を分け隔てる機構を考える上で重要な天体であるといえる。近年いくつかの極超新星に対して、上記のようなガンマ線放射を伴わないにもかかわらず、ジェット起源の爆発である可能性が提案された [1, 2, 3]。これはそれらの極超新星の後期電波観測から、相対論的速度をもつ放出物質の存在が示唆されたためである。超新星の後期電波放射は、超新星爆発に伴った放出物質が星周物質中を伝播する際に発生するシンクロトロン放射でよくモデル化され、観測データとの比較により放出物質のもつエネルギーや速度を見積もることができる [4]。

しかし、ジェット起源の爆発でなくとも、例えば球対称な衝撃波による爆発であっても、相対論的な放出物質が形成されることが知られている [5]。例えば、爆発に伴って発生した衝撃波が星の外層を伝播する状況と考えた時に、星の表層に近づくにつれて星の物質から受ける動圧が小さくなるため衝撃波面の速度は増大する。また、衝撃波加熱された星外層が断熱膨張を始める際にさらなる加速が期待される。これを受けて本研究 [6] では球対称な衝撃波による爆発モデルに基づいて上記極超新星の後期電波放射を再考察した。その結果これと無矛盾に説明できることがわかった。さらにこのモデルに従えば Fig. 1 の青線で示したような、光学・シンクロトロン・プリカーサ放射が極超新星成分に先だって発生しうることが予想された。このような光学・シンクロトロン・プリカーサ放射を検出することができれば、我々のモデルを確かめることができるだろう。また Large Synoptic Survey Telescope (LSST) のような広視野光学望遠鏡が稼働する時代になれば上記光学・シンクロトロン・プリカーサ放射は頻繁に検出されることが期待され、ジェット起源の爆発については GRB や超新星爆発の発生機構を明らかにする上で重要となるかもしれない。

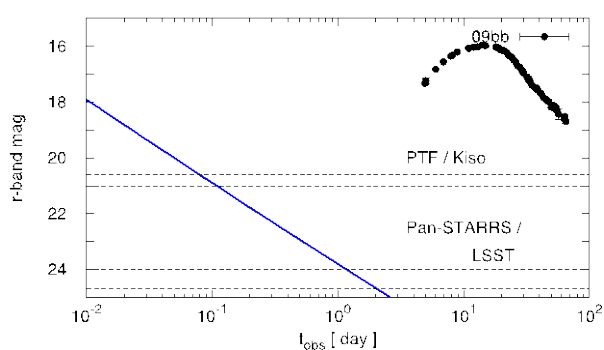


Fig. 1. The optical synchrotron precursor of a radio hypernova (blue line). The black points correspond to the observed hypernova emissions, and the dotted lines to the sensitivity of each optical detector.

References

- [1] Soderberg, A. M., et al. 2010, *Nature*, 463, 513
- [2] Margutti, R., et al. arXiv:1402.6344
- [3] Chakraborti, S., et al. arXiv:1402.6336
- [4] Chevalier, R. A. 1998, *ApJ*, 499, 810
- [5] Tan, J. C., et al., 2001, *ApJ*, 551, 946
- [6] Nakauchi, D., et al. arXiv:1411.1603

Quantum Entanglement of Local operators

基礎物理学研究所 素粒子論グループ 野崎 雅弘

Abstract We investigate the dynamical property of (Renyi) entanglement entropies for the locally excited state generated by acting various local operators on ground states in various conformal field theories. In particular, we study the late time behavior of those entropies. © 2015 Department of Physics, Kyoto University

近年、(レニ) エンタングルメント・エントロピーが様々な分野において注目を集めている。物性理論においてはトポロジカル相を特徴付けるオーダーパラメタ(量子的なオーダーパラメタ)として注目を集め、(格子)ゲージ理論においては閉じ込め/非閉じ込め相の相転移、或いはクロスオーバーに対するオーダーパラメタとして注目されている。また、特に素粒子理論の弦理論の分野においては、(レニ) エンタングルメント・エントロピーはゲージ/重力対応を深く理解する上で重要な役割をなすと期待されている。

こういった応用を行う際に(レニ) エンタングルメント・エントロピーの持つ基本的な性質を理解することが重要であると期待される。特に本研究では場の理論における最も基本的な励起状態である、局所演算子によって励起された状態に対して(レニ) エンタングルメント・エントロピーの時間発展を調べることでこのエントロピーの持つダイナミカルな基本性質を明らかにすることを目標に研究を行った。以前、発表者らが行った研究[1, 2]では系を励起させた際に部分系に含まれるエネルギーの逆数に比べ、部分系の特徴的な大きさが非常に小さい時、部分系に含まれる内部エネルギーとこの部分系のエンタングルメント・エントロピーの増加量の間に熱力学第一法則に類似した関係が成り立つことを見出した。この時、比例係数を用いて有効温度が定義でき、その温度が理論の詳細によらないことも見出された。逆の極限である部分系の大きさが無限大である場合、(レニ) エンタングルメント・エントロピーの持つ別の基本的な性質を調べられると期待できる。このため、我々はこの様に選んだ部分系に対して局所演算子によって励起された状態の(レニ) エンタングルメント・エントロピーの時間発展を様々な共形場の理論において調べた。その結果、下記の様な様々な興味深い結果が得られた。

[3]の論文では無質量自由場の理論においては(レニ) エンタングルメント・エントロピーは因果律を守りながら増大し、最終的には定数(終値)に近づいて行くことを見出した。この時間発展は局所演算子によって生成された準粒子間のエンタングルメントからの寄与として解釈でき、この解釈からある種類の演算子と(レニ) エンタングルメント・エントロピーの終値の関係を予想した。[4]の論文で、この予想の正当性を証明した。[5]の論文では、自由 $U(N)$ ゲージ理論において非常に N が大きい極限における物理を調べた結果、(レニ) エンタングルメント・エントロピーが閉じ込め/非閉じ込め相におけるエントロピーを特徴付ける振舞いに類似する振舞いを見出された。また、(レニ) エンタングルメント・エントロピーの極限としてエンタングルメント・エントロピーを計算する際には、先にこの極限を取った後でのみ N が大きい極限をとれるという結果が得られた。非常にセントラル・チャージが大きな共形場の理論やホログラフィックな場の理論においてもこの様な励起状態に対する(レニ) エンタングルメント・エントロピーの時間発展を調べた結果、非常に時間が経過すると(レニ) エンタングルメント・エントロピーは時間とともに対数的に増加することを見出した。今回の発表では時間の許す限り、これらの研究結果について発表を行う。

References

- [1] M. Nozaki, T. Numasawa and T. Takayanagi, JHEP 1305, 080 (2013).
- [2] J. Bhattacharya, M. Nozaki, T. Takayanagi and T. Ugajin, Phys. Rev. Lett. 110, no. 9, 091602 (2013).
- [3] M. Nozaki, T. Numasawa and T. Takayanagi, Phys. Rev. Lett. 112, 111602 (2014).
- [4] M. Nozaki, JHEP 1410, 147 (2014).
- [5] P. Caputa, M. Nozaki and T. Takayanagi, PTEP 2014, no. 9, 093B06 (2014).

光生成反応によるペンタクォーク Θ^+ 探索実験

原子核・ハドロン物理学研究室

野沢 勇樹

Abstract The experiment for pentaquark Θ^+ search at SPring-8/LEPS has been carried out from October, 2013. The large-size trigger counter was used in this experiment to improve the rejection efficiency of the background events originated from the proton. We report the overview of this experiment and current analysis status.

© 2015 Department of Physics, Kyoto University

Θ^+ は $uudds^-$ quark から構成される 5 quark 状態の粒子であり、SPring-8/LEPS 実験において ^{12}C からの光生成反応によって初めて発見された[1]。この発見以降世界中で様々な実験グループにより、様々な反応過程において Θ^+ の探索実験が行われてきたが、その存在を支持する結果および否定する結果がともに報告されており、その存否に関しては未だに決着がついていない。

LEPS グループでは重水素標的を用いた $\gamma d \rightarrow K^+ K^- p n$ 反応の実験も行われており、 Θ^+ の存在を支持する結果が得られている[2]。 $\gamma d \rightarrow K^+ K^- p n$ の反応において、重水素中の中性子からの光生成反応 $\gamma n \rightarrow K^- \Theta^+ \rightarrow K^- K^+ n$ が観測すべきシグナルイベントであり、一方で陽子からの反応 $\gamma p \rightarrow K^- K^+ p$ はすべて background イベントとなる。したがって S/N を向上させるためには、この proton 起因の background イベントをいかに除去するかが重要になる。2006–2007 年に行われた追実験の解析により、トリガーカウンターにおける proton のエネルギー損失の情報を用いる新たな解析手法を用いることで、積極的に proton 起因のイベントを除去することが可能となった。

そこで我々はこの新たな解析手法の元での統計量を向上させるために、再度 SPring-8/LEPS beamline において、重水素標的をもちいた $\gamma d \rightarrow K^+ K^- p n$ 反応による Θ^+ 探索実験を行った。入射する 1.5–2.4 GeV の高エネルギー γ 線は、蓄積リング中の運動量 8 GeV/c の電子と波長 355 nm の LASER の逆コンプトン散乱により得られる。今回の実験では、proton からのイベントの除去効率をさらに向上させるため、780 mm $\times$ 344 mm の大面積のトリガーカウンターを用いて実験を行った。本実験のデータ取得は 2013 年 10 月に開始し、現在までに入射光子数において 2006–2007 年に取得したデータとほぼ同量の統計量を得ている。

図 1 に液体水素標的による $\gamma p \rightarrow K^+ K^- p$ 反応で測定した proton 除去効率の反応位置依存性を示す。黒点は過去の小面積のトリガーカウンターの実験での除去効率を示し、白点は本実験の大面積のトリガーカウンターでの除去効率を示している。本実験では大面積のトリガーカウンターを用いたことで、過去の実験に比べて、標的全体において proton 除去効率が向上している。また、反応位置を標的下流側に制限することで、除去効率をさらに向上させることができる。本実験において -1020 mm より下流側の反応位置だけを選ぶことで、proton 除去効率は過去の実験に比べておよそ 1.4 倍向上する。

本発表では、本実験の概要および取得したデータの解析状況について報告する。

References

- [1] T. Nakano *et al.*, Phys. Rev. Lett. **91**, 012002 (2003).
- [2] T. Nakano *et al.*, Phys. Rev. C **79**, 025210 (2009).
- [3] Y. Kato *et al.*, Few-Body Syst. **54**, 1245 (2013).

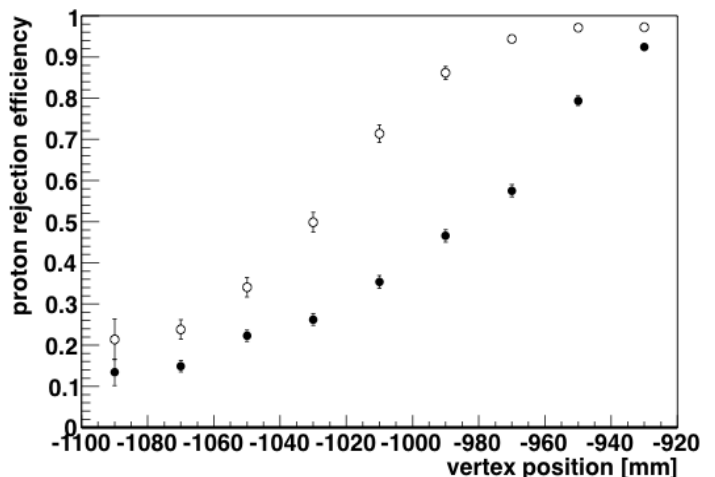


Fig. 1. Proton rejection efficiency as a function of the reaction coordinating along the beam axis: small-size trigger counter (filled circle), and large-size trigger counter (open circle).

Multi-metric Gravity

天体核研究室 野村紘一

Abstract We consider interacting multiple gravitational fields in a metric formulation. In general, these theories suffer from extra ghost-like degrees of freedom, which have negative kinetic energy. Then, we determine when we can exclude such ghosts and construct a healthy theory for interacting gravitational fields.

© 2015 Department of Physics, Kyoto University

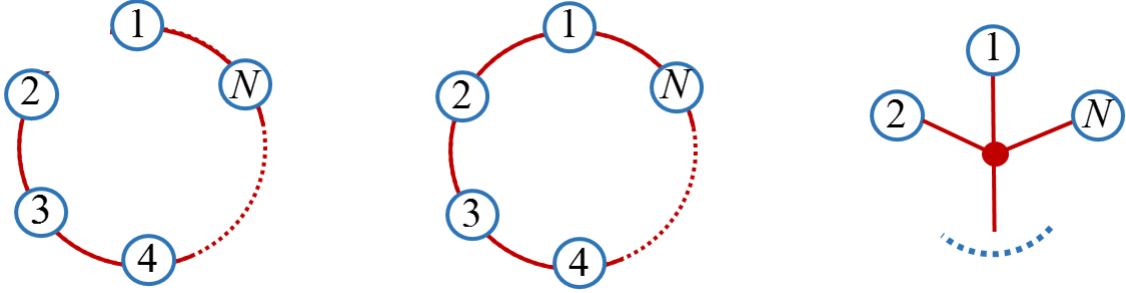


Fig. 1: Diagrams represents unbranched tree type, loop type and branching vertex type interactions.

The purpose is to determine when we can construct a healthy theory for interacting multiple gravitational fields. In general, interaction among gravitational fields contain extra ghost-like degrees of freedom. Thus, we need to construct a theory which excludes such ghosts and has the right number of degrees of freedom. In describing gravitational fields, we have two kinds of formulations. One of them is expressed by metrics, and the other is written by vielbeins. If there is one field, these two formulations coincide. However, they do not necessarily overlap when we have multiple kinds of interacting gravitational fields.

In any case, the interaction patterns are classified into three categories, which we call unbranched tree type, loop type and branching vertex type interactions (Fig. 1).

Only under the unbranched tree type interaction, metric theories and vielbein theories coincide. In this study, we have addressed metric theories since vielbein theories are already known to be ghost-free [1].

Our strategy is to directly count the total number of degrees of freedom by using the ADM decomposition and the Hamiltonian analysis. However, the non-linear dependence of the lapse and shift obscures the constraint structure. Thus, we have employed the spatial homogeneous ansatz to make the lapse appear linearly [2]. The result of our analysis is that, in a metric formulation, only the unbranched tree type interaction can exclude extra ghost degrees of freedom. Other patterns suffer from ghosts and cannot be allowed.

References

- [1] Hinterbichler, Kurt and Rosen, Rachel A, “*Interacting Spin-2 Fields*”, JHEP07(2012)047.
- [2] Nomura, Kouichi and Soda, Jiro, “*When is Multimetric Gravity Ghost-free?*”, PhysRevD.86.084052(2012).

楕円体上の超対称ゲージ理論の構成と局所化による計算

基礎物理学研究所 素粒子論グループ 浜直史

Abstract We constructed four-dimensional $N=2$ supersymmetric gauge theories on ellipsoids, deformed spheres, and applied localization method to derive exact values of physical observables. We also studied five-dimensional $N=1$ supersymmetric gauge theories on ellipsoids and calculated the partition functions of these theories to define a new physical observable, “supersymmetric Renyi entropy”.

© 2015 Department of Physics, Kyoto University

元来、相互作用を含むゲージ理論について物理量を計算しようとすると、経路積分即ち無限次元の積分を行わなければならない、その実行は非常に困難であった。局所化という計算方法は、ある種の超対称性を持つ理論において、その超対称性の性質を用いることで、考えなければならない経路積分を単純化する手法であり、これによって、ある種の物理量の厳密な値を計算することを可能とするものである。超対称ゲージ理論への局所化原理の応用は[1]によって、4次元 $N=2$ の理論を球面上に構成することから始められた。このような非摂動的な物理量は特に、理論同士の間で予想されていた双対性の確認やその拡張などに用いられ、様々な次元の理論、あるいは様々な多様体の上への理論の構成が要請され、実際にその計算結果が応用され、ひいては超対称ゲージ理論の新たな分類方法を提供してきたものである。

我々が[2]にて行ったのは、4次元 $N=2$ の理論を楕円体と呼ばれるコンパクトな多様体の上に構成し、そこに局所化の手法による計算を適用したものである。楕円体とは、球面に関してその軸長比をパラメータとして変形することで、球面が持っていたアイソメトリをより小さい対称性へと破ったもので、実際、4次元楕円体ではそのアイソメトリは $U(1) \times U(1)$ となっている。このようにして取り込んだ軸長比という新たなパラメータは、局所化での計算結果にも表れ、実際、球面上の理論での計算結果をパラメータ変形したものとなることが分かった。特にこの変形の結果は、AGT 対応[3]という双対性を拡張するものとなった。この AGT 対応は、4次元超対称ゲージ理論と 2次元共形場理論を関係づけるもので、6次元の $N=(2, 0)$ 理論と呼ばれる M 理論において重要な意味を持つ未詳な理論にあって、コンパクト化に際しての 2種類の極限として説明されているため、この AGT 対応を拡張したことは大きな価値を持つ。

また我々は[4]にて、5次元の $N=1$ 超対称ゲージ理論を、5次元の楕円体(アイソメトリは $SU(2) \times U(1)$ である)の上に構成し、局所化によって分配関数を計算し、その計算結果を新たな物理量の定義に用いた。近年、系の一部を観測できないような理論を考えることで、その隠されたことで失われる物理量を測定する、エンタングルメントエントロピーという物理量が注目されている。このエンタングルメントエントロピーは、その隠された部分の n 重被覆を考えることでパラメータ拡張したレニエントロピーという物理量から計算することが出来る。 d 次元の系で隠された部分が $d-2$ 次元の超球面の場合は、さらに座標変換によって、 d 次元球の超球面の分配関数からこれを求められる。ここに局所化による分配関数の計算結果を用いることは、 n 重被覆による円錐的な特異点が超対称性を破ることから自明ではないが、特異点を滑らかに解消することでこの試みを $d=3$ の場合に考え、超対称レニエントロピーとしてこの量を定義したのが[5]である。分配関数の持つ数学的構造から、この n 重被覆とその特異点解消が与える分配関数への影響は、球面から楕円体への変形が与えるそれと同様であることが分かっており、3次元楕円体での分配関数の計算結果[6]がそのまま使えたものであった。我々はこれを $d=5$ の場合に試みたものであり、それによって定義した超対称レニエントロピーは、レニエントロピーが満たすべきいくつかの不等式を満たすことや、重力双対からの計算と無矛盾であることが確認されている。

References

- [1] V. Pestun, Commun. Math. Phys. **313**, 71 (2012).
- [2] N. Hama, K. Hosomichi, JHEP **1209**, 033 (2012), [Addendum-ibid. 1210, 051 (2012)].
- [3] L. F. Alday, D. Gaiotto and Y. Tachikawa, Lett. Math. Phys. **91**, 167 (2010).
- [4] N. Hama, T. Nishioka and T. Ugajin, JHEP **1412**, 048 (2014)
- [5] T. Nishioka and I. Yaakov, JHEP **1310**, 155 (2013)
- [6] N. Hama, K. Hosomichi and S. Lee, JHEP **1105**, 014 (2011).

T2K 実験 反ニュートリノ振動の研究

高エネルギー物理学研究室 平木 貴宏

Abstract The T2K experiment has started to take data in antineutrino mode since 2014. The antineutrino beam was obtained by reversing the polarity of horn focusing magnets. Results of commissioning studies with muon monitor and status of oscillation analysis in the antimuon-neutrino disappearance mode will be presented.

© 2015 Department of Physics, Kyoto University

東海神岡間長基線ニュートリノ振動実験 (T2K 実験) [1]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、J-PARC 施設内に置かれた前置検出器及び 295km 離れた後置検出器スーパーカミオカンデで観測することにより、ニュートリノ振動の精密測定をする実験である。T2K 実験はこれまで電磁ホーンにより標的から出てくる π^+ を主に収束させるニュートリノモードのデータを取得、解析し、現在までに電子ニュートリノ出現モードの発見[2]に成功した。またミューオンニュートリノ消失モードの精密測定[3]を行い、ニュートリノ振動の混合角の一つである θ_{23} の範囲を現在最も強く制限している。

次の T2K 実験の大きな目標のひとつは反ニュートリノモードにおけるニュートリノ振動の精密測定である。反ニュートリノビームの生成は荷電 π 粒子を収束する電磁ホーンの電流の向きを反転させることにより行われる。T2K 実験は 2014 年 6 月から反ニュートリノビームのデータを取得している。

図 1 は T2K 実験の標的より下流部のビームラインの概要を示したものである。標的より生成された荷電 π 粒子を電磁ホーンで収束し、崩壊して生成されたミューオンをビームダンプ下流に設置されたミューオンモニター (MUMON) [4]で測定することにより、ビームプロファイルを測定する。MUMON はプロファイル情報をバンチ毎に即座に測定することにより、ビームラインの異常をモニターしビームの質を保証している。

本発表では、反ニュートリノモードでのビームコミッショニングスタディや反ミューオンニュートリノ消失モードの振動解析について、期待される事象数や振動パラメータの感度について発表する。

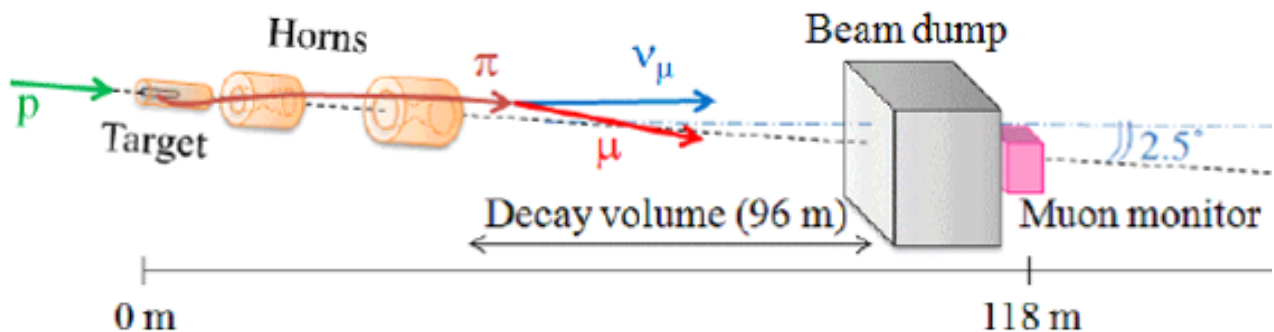


Fig1. Overview of the secondary beam line of the T2K experiment.

References

- [1] K. Abe *et al.* (T2K Collaboration), Nucl. Instrum. Meth. A **659** 106 (2011).
- [2] K. Abe *et al.* (T2K Collaboration), Phys. Rev. Lett. **112**, 061802 (2014)
- [3] K. Abe *et al.* (T2K Collaboration), Phys. Rev. Lett. **111**, 211803 (2013)
- [4] K. Suzuki *et al.* , arXiv: 1412.0194

ニュートリノ質量階層構造解明を目指した数 GeV 大気ニュートリノ測定のためのスーパーカミオカンデにおける粒子識別能力の向上

高エネルギー研究室 廣田誠子

Abstract The mass hierarchy problem in neutrinos can be measured by the observation of multi-GeV atmospheric neutrinos in Super-Kamiokande. In order to improve the sensitivity of Super-Kamiokande, I developed new particle identification algorithm using timing information pattern of photo-multiplier tubes.

ニュートリノには三世代あり、現在までにその質量二乗差 $\Delta m_{21}^2 (=m_2^2 - m_1^2)$ および $|\Delta m_{32}^2|$ が測定された。しかし後者の符号はわからず、 m_3 が最も重い場合 ($\Delta m_{32}^2 > 0$) を標準階層構造、 m_3 が最も軽い場合 ($\Delta m_{32}^2 < 0$) を逆階層構造と呼び、その決定が求められている。これが質量階層性問題である。もし階層性が判明すれば、ニュートリノ振動における CP 対称性の破れの探索や $0\nu\beta\beta$ 崩壊探索においては感度向上や探索領域の制限につながる。

スーパーカミオカンデは内壁に約 1 万本の光電子増倍管をとりつけた約 50kton の水槽からなる大型水チェレンコフ検出器である。地球の裏側で生成された大気ニュートリノが、地球を貫通しスーパーカミオカンデへと到達する際、地球の物質効果により、ニュートリノ振動において共鳴がおこり、数 GeV のエネルギー領域で順階層では電子ニュートリノ、逆階層では反電子ニュートリノの出現確率が増える。これを観測することで階層性の決定が期待できる[2]。

スーパーカミオカンデでは数 GeV 領域のニュートリノの約 4 割は複数のチェレンコフリングを作り出す。現在、この複数事象から電子ニュートリノサンプルを選別する過程で、1~2 割ほどのミューオンニュートリノ事象が混ざってしまい、測定感度を下げている。

そこで、複数リング事象における粒子識別向上のため、従来から使用されていた光電子増倍管の電荷情報以外にも、時間情報を用いた粒子識別アルゴリズムの開発を行った。

高エネルギー粒子は水中では光よりも速く走る。ミューオンニュートリノと水中の原子核との反応により出されたミューオンは同じく電子ニュートリノによって出された電子よりも長い距離を走るため、チェレンコフ光は電子の場合よりもリング中心へ速く到達する(図 1 左、概念図)。これを利用することで、電荷パターンだけでは識別が難しかった事象での識別が可能になる(図 1 右)。

開発したアルゴリズムでは、再構成された粒子の運動量や進行方向を元に、ミューオン、電子、それぞれの場合を仮定して、光電子増倍管におけるヒット時間の確率分布を求め、観測値が得られるべき確率を算出する。最終的にはリング内の全光電子増倍管の確率を掛け合わせて比較し、粒子の種類を決定する。

このアルゴリズムの宇宙線ミューオンや大気ニュートリノ MC に対するパフォーマンスを発表する。

References

- [1] S.P. Mikheyev and A.Y. Smirnov, Sov.Jour.Nucl. 42, 913 (1985); L. Wolfenstein, Phys.Rev.D 17, 2369 (1978)
- [2] Lee Ka Pik, PhD Thesis, University of Tokyo, Oct. 2012

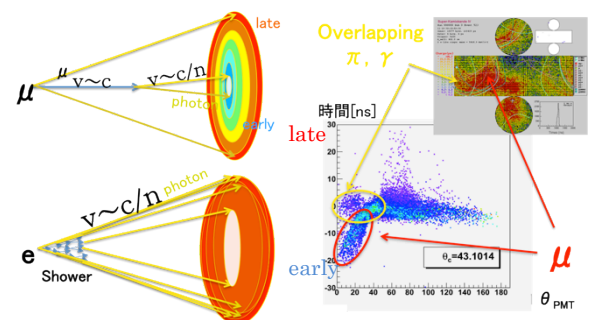


Fig 1. The difference of timing distribution between μ and e rings. Left: The schematic view of principle. Right: Hit timing vs. PMT

A New MeV gamma-ray Imaging Spectroscopy Method with a gaseous electron tracker in an Intense Radiation Environment

宇宙線研究室 松岡佳大

Abstract We developed an Electron-Tracking Compton Camera (ETCC) for a MeV gamma-ray telescope in the next generation. Also we had constructed the FM-ETCC for the next balloon experiment. We report the performance of our detector and the experiment in the efficient background.

© 2015 Department of Physics, Kyoto University

Sub-MeV 領域のガンマ線測定は、超新星爆発における元素合成やガンマ線バーストなどの未解明天体現象の有力なプローブとなるのみならず、医療分野における粒子線治療や放射線汚染土壌の効率的な除去などの分野でも注目が高まっている。一方で、このエネルギー領域のガンマ線は、多量な雑音事象やイメージングの難しさなどから開発が遅れている分野でもある[1]。このような中、我々の研究室では雑音除去能力の高い電子飛跡検出型コンプトンカメラ (ETCC) を開発している。

2006 年に気球実験においてそのガンマ線検出能力を実証しており、次期気球実験において天体撮像能力の実証を目指し、FM-ETCC の開発を行った。気球実験に向けて検出器の大型化と、各種回路の軽量化・省電力を行った。データ収集系の改良も行い、より低デッドタイムでの高効率の測定が可能になった。電子飛跡検出アルゴリズムの改良も行い、電離損失 (dE/dx) を利用した高い雑音除去能力と空間分解能を得る事に成功した。データ収集系の改良に伴い解析手法の改良もおこない、角度分解能を考慮したイメージング手法と、イメージからのスペクトル取得ツールの開発を行った。

この能力の検証実験として、大阪大学 RCNP の 140 MeV 陽子線ビームを利用し、気球実験で予測される 5 倍程度の高雑音環境下でガンマ線源 (^{137}Cs 0.8MBq@1m) を約 5σ @1.5h で検出した[2]。また鉄ターゲットからの即発ガンマ線の検出・イメージングにも成功し、イメージングでの選択領域内のスペクトルの取得に成功した (Fig. 1)。この結果から、従来の鉛等の遮蔽物による制限を用いたスペクトルの取得ではなく、イメージングによるスペクトル取得というまったく新しい可能性を示すことに成功した。

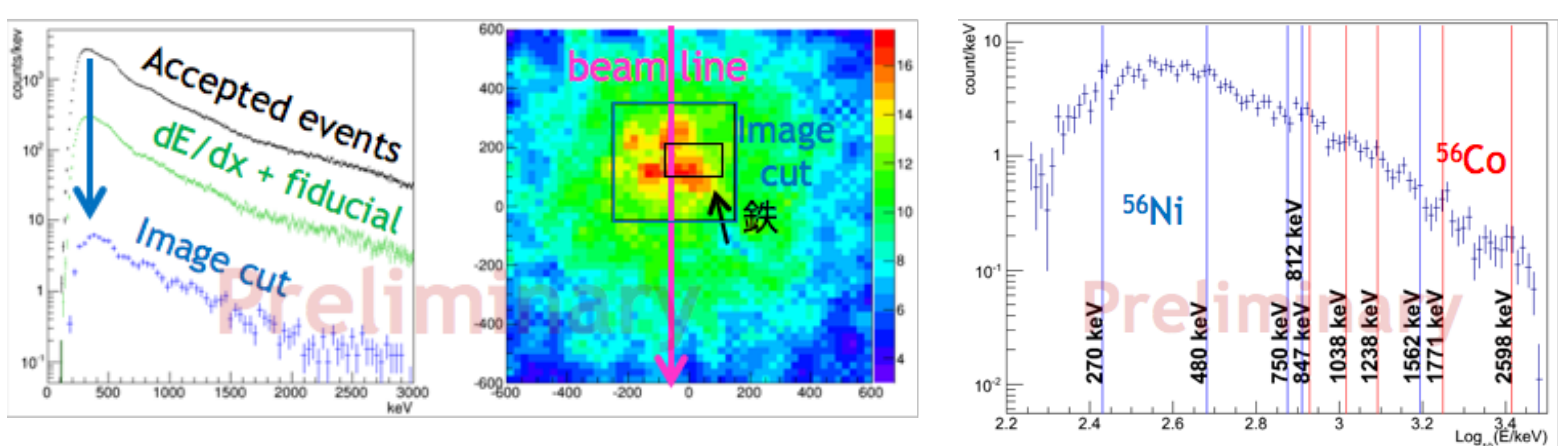


Fig. 1. Prompt gamma-ray Image and Spectrum

References

- [1] G. Weidenspointner *et al.*, A&A, **368** 347-368 (2001).
- [2] Y. Matsuoka *et al.*, JINST, in accepted (2014).
- [3] Y. Mizumura *et al.*, JINST, **9** C05045 (2014).

光円錐ゲージにおける張力の無い弦の研究

素粒子論研究室 村瀬 健太

Abstract We consider the quantum tensionless string in the light-cone gauge. We find that the anomaly of the spacetime conformal symmetry vanishes in some special operator ordering. In the other orderings, we calculate the dangerous commutator to obtain the anomaly concretely. We then investigate the mass spectrum in the case without anomaly in detail.

© 2015 Department of Physics, Kyoto University

近年、M理論やゲージ理論を理解するために、AdS/CFT 対応などの双対性の手法が、高階スピニング理論に使われ始めている。高階スピニング理論はスピンを持つ場を無限に多く持つので、古くから弦の張力の無い極限との関係が研究されている。しかしその関係はまだよく理解されていない。それは1つに、張力の無い極限や張力の無い弦の理解が不十分であるからであろう。ゆえに、張力の無い弦と高階スピニング理論との関係を探り、さらには直接双対性の舞台にするためには、張力の無い弦の理解は重要である。

古典的な弦は、点粒子の場合の様に、大局的対称性として時空の対称性を持つ。張力のある弦はポアンカレ対称性を、張力の無い弦はより大きな時空の共形対称性を持つ。張力のある弦を量子化すると、大抵、ポアンカレ対称性は量子異常（アノマリー）で破れてしまう。このアノマリーを回避するために、演算子の順序から来る曖昧さの定数や時空の次元が決定される。こうしたアノマリーの存在や制限は張力の無い弦でも指摘されている[1]。

最近、通常得られる臨界次元以外に、3次元で光円錐ゲージにおける張力のある弦の場合、アノマリーが自明に回避されることが注目され、その場合の理論が詳しく調べられた[2]。そこでは3次元の光円錐座標には、横波方向が1つしかないことが本質的である。また3次元という以外には制限はなく理論には曖昧さが残っていたが、それは超弦を考えることで取り除かれる[3]。3次元の場合にはより大きな対称性が理論の曖昧さを取り除く可能性がある。

本研究では、上のような3次元の特殊性に注目し、3次元の光円錐ゲージにおける張力の無い弦の量子論を考えた。そこで演算子の特別な順序においては時空の共形対称性のアノマリーが回避され、このさらなる対称性の要請のおかげで理論の曖昧さが除かれることを確認した。そしてアノマリーが除かれた場合の理論の変数分離型や非変数分離型といった様々な質量スペクトルを導き、それらとスピンに対応したもう1つのポアンカレ不変量との関係を調べた[4]。さらにその際の考察を基に、より大きな次元を含めて、様々な演算子順序に対してアノマリーの有無を具体的に調べた。特にある正規順序においては、3次元でもより大きな次元でも、ポアンカレ対称性は良いが、時空の共形対称性にはアノマリーがあることを見た。

本発表会では、共変的な手法で知られていた結果や光円錐ゲージで予想されていた結果と比較しながら、光円錐ゲージにおける張力の無い弦の本研究を、3次元の場合を中心に紹介する。

References

- [1] J. Isberg, U. Lindström, B. Sundborg, and G. Theodoridis, Nucl. Phys. B **411** (1994) 22-156.
- [2] L. Mezincescu and P. K. Townsend, Phys. Rev. Lett. **105** (2010) 191601.
- [3] L. Mezincescu and P. K. Townsend, Phys. Rev. D **84** (2011) 106006
- [4] K. Murase, JHEP **02** (2014) 038, arXiv:1303.7202[hep-th].