

平 成 2 3 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24年2月2日、3日)

物 理 学 第 二 分 野

修 士 論 文 発 表 会

日 時 2012年2月2日(木) 9時00分～

2月3日(金) 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2日(木)

- ## 1. 次世代大気チェレンコフ望遠鏡計画 CTA に向けた光電子増倍管の

高速波形サンプリング回路の開発

青野 正裕(9:00)・・・1

- ## 2. 正則表現の行列による行列模型

浅野 侑磨(9:20)・・・2

- ### 3. Higgs ポテンシャルの安定性および標準模型を超える物理との関係について

阿部 智大(9:40)・・・3

- #### 4. フェムト秒レーザー生成金属表面周期構造間隔の

レーザーフルエンス依存性に関する研究

生田 美延(10:00)・・・4

- ## 5. 放射光メスバウアー吸収スペクトル測定用冷却システムの開発

石神 直大(10:20)・・・5

- ## 6. 強度可変永久四極磁石の調整と性能評価

牛島 正太郎(10:40)・・・6

- ## 7. 弦の場の理論における位相的構造

小路田 俊子(11:00)・・・7

8. 高強度短パルスレーザーに含まれる低強度長パルス成分

除去のためのプラズマミラーの開発

木幡 清人(11:20)・・・8

9. ディラック固有モードを用いたゲージ不変な枠組みでの

閉じ込めとカイラル対称性の自発的破れの相関の研究

権業 慎也(11:40)・・・9

----- 午 後 -----

10. 原始惑星系円盤の形成と進化

高橋 実道(13:00)・・・10

11. 超対称標準模型におけるヒッグスセクターの真空構造について

高橋 翼(13:20)・・・11

12. ブレーンワールドモデルにおけるブラックホールの動的発展

高橋 智嗣(13:40)・・・12

13. 大面積・高時間分解能 Resistive Plate Chamber の開発

富田 夏希(14:00)・・・13

14. 大質量星終焉時に付随するガンマ線バースト現象の金属量による違い

仲内 大翼(14:20)・・・14

15. AdS/CFT 対応に基づいたエンタングルメント・エントロピーの解析

野崎雅弘(14:40)・・・15

16. LEPS2 におけるハドロン光生成反応実験のための

Time Projection Chamber の開発

野沢 勇樹(15:00)・・・16

17. ループ量子重力理論への宇宙定数の導入

野村 紘一(15:20)・・・17

18. 3次元超対称ゲージ理論の局所化による計算とその応用

浜 直史(15:40)・・・18

19. 大型で高エネルギー分解能の CdTe 半導体検出器の開発

平木 貴宏(16:00)・・・19

20. 気球実験 SMILE-II の力学モデルによる姿勢制御システムの開発

松岡 佳大(16:20)・・・20

2月3日(金)

21. インフレーション宇宙における非ガウス性

三竿 和也(9:00)・・・21

22. 軽い中性子過剰核の励起状態における多核子相関についての研究

牟田 啓太郎(9:20)・・・22

23. 重力理論の Higher-Spin への拡張と双対性

村瀬 健太(9:40)・・・23

24. T2K実験のための荷電 π 中間子反応断面積の研究

山内 隆寛(10:00)・・・24

次世代大気チェレンコフ望遠鏡計画 CTA に向けた 光電子増倍管の高速波形サンプリング回路の開発

宇宙線研究室 青野正裕

Abstract We have developed the PMT-waveform sampling circuit for the CTA which is the project to construct next generation atmospheric Cherenkov telescopes. It can sample waveforms of 7 PMTs simultaneously at 5GHz maximum and transmit them using Gigabit Ethernet. We report the results of its fundamental performance tests.

© 2012 Department of Physics, Kyoto University

CTA(Cherenkov Telescope Array)計画は、従来よりも一桁良い感度で 20 GeV-100 TeV ガンマ線を全天観測するためにおよそ 100 台の望遠鏡群を建設する計画である。ガンマ線は大気で生成される空気シャワーからのチェレンコフ光を捉えることで間接的に観測される。その際にバックグラウンドである夜光を区別するために、望遠鏡の焦点面光検出器である光電子増倍管(PMT)からの波形を取得する必要がある。しかし大気チェレンコフ光の継続時間は数 ns と非常に短いため、CTA では GHz 程度の高速な波形サンプリング回路が必要となる。さらに PMT は寿命を延ばすためにおよそ 5×10^4 倍という低いゲインで運用されるため、信号を十分に増幅する必要がある。それに加えて CTA 計画では 1 台の望遠鏡に PMT が約 2300 本必要となり、発熱を抑えるために PMT 1 本あたり 2W 程度の低い消費電力や大量生産に向けた安価な回路構成など様々な性能が要求される。

そこで我々はそれらを実現すべくイタリアのグループと協力して、PSI 研究所の開発した ASIC である DRS4 チップを採用した PMT 波形の高速サンプリング回路の開発を行った(Fig. 1)。DRS4 チップの中には 1ch あたり 1024 個のキャパシタが並び、電圧情報をアナログのまま順次記録していくことができる。この回路ではこれを用いて最大 5GHz の高速な波形取得と 33MHz での低速な信号読み出しを両立した。この基板は 1 枚で 7 本の PMT から同時に信号が取得でき、そのデータは FPGA により KEK で開発された SiTCP プロトコルを用いて Gbit Ethernet で転送される。信号は約 10 倍に増幅されるものと 1/3 に減衰されるものの 2 系統に分けられており、幅広い電圧の信号に対応できるようになっている。

また CTA で考案されている複数のトリガーロジックに対し、外部基板を接続することでいずれの方式にも対応できるようになっている。PMT 毎に $2-4 \mu s$ の十分な波形保持時間があり、望遠鏡間でトリガーの同期をとるような複雑なトリガーロジックにも対応できる。

我々はこの基板を PMT と接続し、LED 光による PMT 波形の読み出しからイーサネット転送・データ取得までの一連の動作確認を行った(Fig. 2)。さらに PMT ゲイン 5×10^4 倍において 1 光電子のヒストグラムを取得し、十分に(S/N = 3.6) 1 光子が分解できることを実証した。また、ノイズレベル(0.3 光電子相当)やデッドタイム(10kHz のトリガーに対して 7.7%)等の基礎的な性能も試験した。

本修士論文では開発した回路の設計思想や構成を述べ、基本的な性能試験の結果についてまとめる。

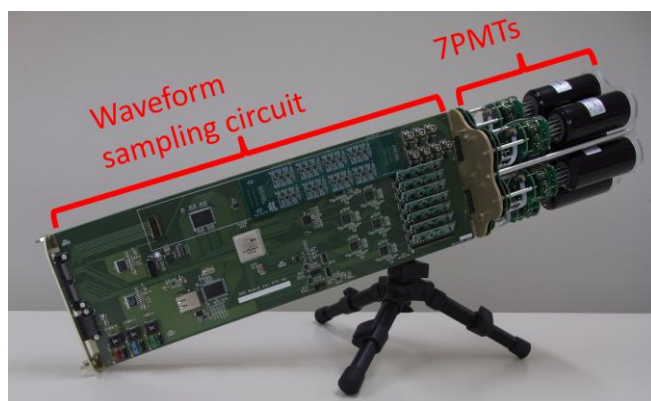


Fig. 1. PMT-waveform sampling circuit for the CTA project

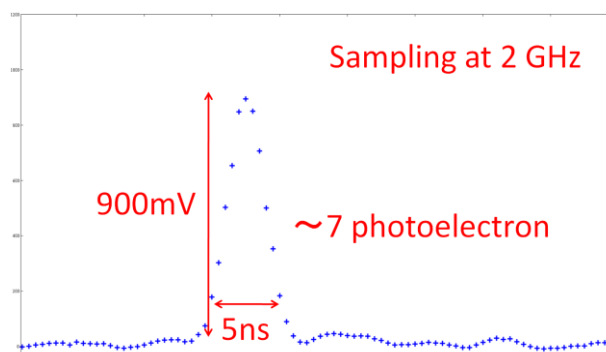


Fig. 2. PMT-waveform sampled by this circuit

正則表現の行列による行列模型

素粒子論研究室 浅野侑磨

Abstract IIB matrix model is one of the leading candidates for the non-perturbative formulation of string theory. This master thesis reviews basic properties of matrix models, and those of the regular representation, which can describe curved spacetime. Relations to the Standard Model are also discussed.
© 2012 Department of Physics, Kyoto University

重力場の量子化を実現し得る超弦理論は、非常に多くの美しい整合性を見せてきており、最も有力な最終理論の候補とされている。しかし、現時点における超弦理論の定式化は摂動論に基づいており、非摂動的な物理を記述し得ない。従って非摂動的な定式化が望まれるのであるが、その有力候補の一つが IIB 型行列模型[1]である。

行列模型は非摂動的な定式化の要件を満たしているが、実際に我々の世界を表す真空がいかにして生成されるかなど解明しなくてはならない点が残っている。そこで行列模型の持つ構造を詳しく調べたいのであるが、その方策の一つとして、“正則表現を用いた行列模型[2]の解析”がある。この模型は、IIB 型行列模型における行列を正則表現とすることによって、一般座標変換不変性をあらわに実現させたものである。本研究では、特にこの模型に注目した。

この模型では、一般座標変換不変性を論ずるために、元々は平坦であった計量を曲がった時空の計量へと拡張し、更に微分作用素を行列とみなした。通常の共変微分は行列とみなすことができないが、行列をローレンツ群の正則表現とすれば、共変微分を行列とみなせるように定義出来る。すなわち、通常の共変微分の積は

$$\nabla_1 \nabla_2 = \partial_1 \nabla_2 - \omega_{12}{}^c \nabla_c$$

のように c の足の縮約を生じてしまい、2 の方向の共変微分以外を含む和を伴った代数となる。この場合共変微分は異なる階数のテンソルへの写像であるから行列とみなすことが出来ない。一方、共変微分を正則表現の場に作用するものとみなすと、共変微分を各成分ごとに定義することが出来る。上の例との対応で説明すると、この共変微分同士の積には 1 の方向と 2 の方向の共変微分しか現れず、それ以外を含まない純粋な積となっている。つまり、この共変微分を行列とみなすことが出来るのである。

このような共変微分を用いることによって、一般座標変換対称性や局所ローレンツ対称性をあらわに保った模型を実現することが出来る。つまり正則表現の行列を用いることで重力場を正しく記述出来る可能性がある。

更に、本論文では、行列模型の真空としての標準模型についても議論した。行列模型において、交差する非可換 D ブレーン解周りの展開を考えると、あるブレーン配位によって標準模型が実現される[3]。それと同様な議論によって、正則表現の行列による行列模型においても、標準模型を実現するブレーン解が存在することが分かった。

本論文の構成は以下の通りである。IIB 型行列模型の基本的内容についてのレビューを行った後、正則表現の行列による行列模型の先行研究について詳しく紹介し、更なる研究の結果について述べる。最後に、標準模型が行列模型の真空として現れる可能性について論ずる。

References

- [1] N. Ishibashi, H. Kawai, Y. Kitazawa, A. Tsuchiya, Nucl. Phys. B **498** (1997) 467.
- [2] M. Hanada, H. Kawai, Y. Kimura, Prog. Theor. Phys. **115** (2006) 1003.
- [3] A. Chatzistavrakidis, H. Steinacker, G. Zoupanos, JHEP09 (2011) 115.

Higgs ポテンシャルの安定性および 標準模型を超える物理との関係について

素粒子論研究室 阿部 智大

Abstract: Recently, the LHC experiments have excluded a wide region of the Higgs mass. In this thesis, we revisit the stability of the Higgs potential by using the latest LHC results. We also discuss its implications for physics beyond the standard model.

© 2011 Department of Physics, Kyoto University

標準模型は電弱スケールにおいて極めて高い精度で実験結果を再現しており、唯一未発見のHiggs粒子も現在稼働中のLHCにおいて発見が期待されている。昨年未のATLASとCMS両グループからのLHC実験中間報告[1,2]によれば、Higgs粒子の質量 m_h として許される領域は、LEP実験からの制限と併せて

$$115 \text{ GeV} \leq m_h \leq 130 \text{ GeV} \quad (95\% \text{ C.L.})$$

または500–600GeV以上となっており、特に125GeV近辺にHiggs粒子ではないかと思われる兆候が観測されている。

電弱対称性が破れた真空は、Higgs 4点結合定数 λ が正であることによって安定性が保障されている。電弱スケールにおける λ の値はHiggs質量と関係していて、Higgs質量が大きいと λ も大きく、Higgs質量が小さいと λ も小さくなる。標準模型が電弱スケール以上のエネルギー領域でも成り立っていると考えて、 λ の高エネルギー領域での振る舞いを見ると、Higgs質量が大きければ発散し、逆にHiggs質量が小さければ λ が負になり、真空の安定性が損なわれてしまう[3]。現在のHiggs質量に対する115GeVから130GeVという制限では λ が発散することは無いが、真空の安定性が損なわれる可能性があり、最新の実験結果をもとに再度検討する必要がある。

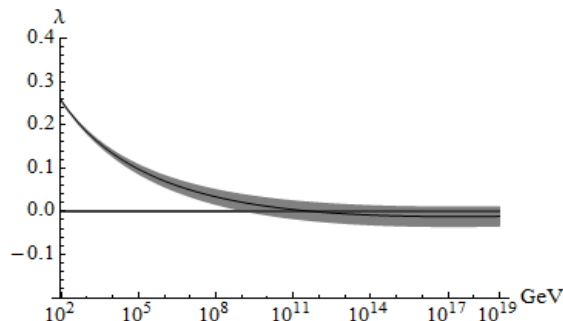


Fig1. The RG flow of the λ for the Higgs mass equal to 125GeV

一方で、高エネルギー領域で標準模型を拡張しようという様々な理論的試みがある。例えば、ニュートリノ質量の生成機構、大統一理論、超対称性などである。このような標準模型の拡張を考えると、新しい粒子や新しい相互作用などが現れ、それらが λ の高エネルギー領域での振る舞いを変化させることがある。修士論文では、そのような標準模型の拡張が与える現象論的な影響や制限を、Higgsポテンシャルの安定性という観点から考察する。

References

- [1] The ATLAS collaboration, arXiv:1112.2577[hep-ex]; “ATLAS NOTE ATLAS-CONF-2011-163”, <http://cdsweb.cern.ch/record/1406358/files/ATLAS-CONF-2011-163.pdf>
- [2] The CMS collaboration, “CMS Physics Analysis Summary”, <http://cdsweb.cern.ch/record/1406347/files/HIG-11-032-pas.pdf>
- [3] レビューとして Abdelhak DJOUADI, “The Anatomy of Electro-Weak Symmetry Breaking Tome I: The Higgs boson in the Standard Model”, Phys.Rept.457:1-216,2008

フェムト秒レーザー生成金属表面周期構造間隔の レーザーフルエンス依存性に関する研究

レーザー物質科学 生田美延

Abstract

To study the mechanism for self-organization of periodic structures on metal surfaces by femtosecond laser irradiation, periodic gratings formed for several metals and wavelengths have been microscopically investigated. It has been found that the laser fluences for the self-organization and the ablation are correlated with each other. © 2012 Department of Physics, Kyoto University

フェムト秒レーザーと物質との相互作用の結果観測される諸現象には未だにその物理が解釈されていないものが多い。材料固有のフルエンスでフェムト秒レーザーを固体試料に連続照射した際に試料表面に形成されるナノ周期構造はその一つである。金属に対して、周期構造の間隔がレーザー波長以下になり、照射レーザーのフルエンス及びパルス数に依存するというフェムト秒レーザー特有の現象が報告されているが、その研究報告はきわめて少なく、しかも同一の手法によって系統的に調べられたものはない。周期構造自己形成機構の物理を解明するには未だ至っていない。近年我々のグループは、ナノ周期構造の形成機構を明らかにすべく、格子間隔のフルエンス依存性を種々の金属について調べ、その依存性を「レーザー波の表面プラズマ波へのパラメトリック崩壊モデル」[1]により説明できることを実験的に明らかにしてきた[2]。このモデルによると、表面プラズマ波の波長 λ_{sp} は入射レーザーの波長とプラズマ密度（フルエンス）に依存する。そして、金属表面には λ_{sp} と一致する格子間隔をもった周期構造が形成すると考えられている。本研究では、異なるレーザー波長の場合について調べ、このモデルの妥当性・普遍性の検証を行った。

実験には、表面研磨した金属(Ti, Mo)を用いた。チタンサファイアレーザー(波長 800 nm、パルス幅 160 fs)及びその2倍高調波(400 nm)を、金属に対して垂直に集光照射した。レーザー照射領域の光電界強度分布の不均一性の影響をなくすため、レーザーの強度空間分布はスーパーガウス形状にした。Fig.1には異なる2つのレーザー波長に対するTiのアブレーション率のフルエンス依存性を示す。Fig.2には、形成したナノ周期構造間隔のレーザーフルエンス依存性(40パルス)およびパラメトリック崩壊モデルによる計算結果を示す。Fig.1より求まるアブレーション閾値を周期構造形成の下限とした計算結果と実験データが非常に良い一致を示し(Fig.2)、パラメトリック崩壊モデルの普遍性を検証した。さらに本研究で、周期構造の形成するフルエンス範囲はアブレーション率により決まることを明らかにした。金属元素やレーザーフルエンス及びレーザー波長は、アブレーション率を決めるパラメータとなっている。本研究の成果は、金属のフェムト秒レーザーアブレーションに関する基礎物理分野のみならず新規のナノ加工プロセスなどの応用分野にも有益な知見になる。

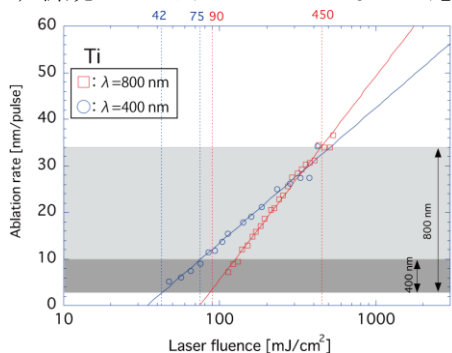


Fig.1. Laser fluence dependence of ablation rate for Ti.

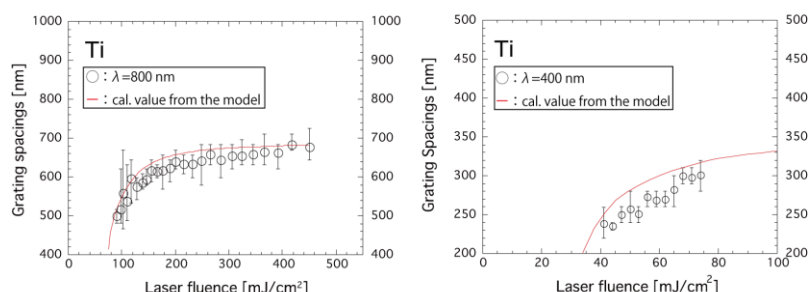


Fig.2. Laser fluence dependence of grating spacings and calculation value from the model for Ti.

References

- [1] S.Sakabe *et al.*, Phys. Rev.B **79**(2009)033409. [2] K.Okamuro *et al.*, Phys. Rev.B **82**(2010)165417.

放射光メスbauer吸収スペクトル測定用 冷却システムの開発

核放射物理学研究室 石神直大

Abstract We have developed a refrigeration system for Synchrotron-Radiation-Based Mössbauer Spectroscopy. This method enables us to obtain the Mössbauer spectra of the elements with high excitation energy above 40 keV, whose Mössbauer spectra were difficult to be measured using Synchrotron Radiation. We evaluated the performance of developed system and successfully verified its cooling capability.

© 2012 Department of Physics, Kyoto University

1957年にRudolf L. Mössbauerによって原子核の無反跳共鳴現象、いわゆるメスbauer効果が発見された。以降、物質中の元素（同位体）を特定した磁性や電子構造の測定に非常に有効な手法として様々な分野の研究で精力的に利用されており、現在でも多数の研究者によって発展を続けている。一方、1980年代より電子加速器を利用した放射光科学が急速に発展しており、我が国でも1997年より第3世代放射光施設SPring-8が稼働を始めている。我々はこれまでSPring-8において、メスbauer効果と深く関連した実験手法である核共鳴散乱法を用いた研究を行っており、超伝導物質の磁性やフォノン状態密度測定、スローダイナミクス観測などで成果を上げている。

これらの放射光を用いたメスbauer分光研究において、最も応用が期待されている手法の一つが放射光エネルギー吸収スペクトル分光法である。[1] この手法は放射光を用いて測定試料のメスbauer核を励起し、その先に配置した散乱体試料にドップラー速度を与えることでエネルギー分光を行うものであり、これまで適切な放射性同位体が存在しないためにメスbauerスペクトル測定が困難だった核種にも対応出来る。また、放射光核共鳴散乱法では通常検出器としてAvalanche Photodiode (APD)を用いるが、これは40 keV以上のエネルギー領域では検出効率が悪かった。新手法では共鳴励起後の脱励起に伴って発生する内部転換過程由来の蛍光X線を観測することで、従来の方法では測定の難しかった高いエネルギーの核種の観測も可能となる。これにより、放射光で励起可能なほぼ全てのメスbauer核種についてメスbauerスペクトルを取得することが可能となった。

メスbauer効果では、低温で無反跳共鳴現象の起こる確率が大きくなるため、効率的な測定を実現するには散乱体試料の冷却が必要になる。これまで放射光メスbauer分光法用に使用していた測定装置は、ヘリウムフロー型クライオスタットを用い、運動部分であるサンプルホルダーと低温部を直接銅製板バネで繋ぐ構造をとっていた。しかしながらこの構造は、ヘリウム消費量の多さ、運動部分の冷却の安定性などの面で欠点があった。今回我々は全く新しい構造の測定装置の開発を行った(Fig. 1)。従来の装置との大きな相違点は、ヘリウムフロー型クライオスタットの代わりにパルス管冷凍機を用いることと、試料室をヘリウムガスによって熱交換する構造にしていることの二点である。この装置では液体ヘリウムタンクの交換を必要としないため、長時間安定して測定が行える。また熱交換に気体を用いるため、板バネのようにサンプルの運動を妨げる恐れもなく、測定中のサンプルの付け替えも比較的容易に行えるという利点がある。我々はSPring-8で使用するための装置のデザインを行い、実際に製作した装置について性能評価を行った。その結果サンプル温度21.5 Kを実現し、十分実用に足る性能であることを確認した。今後この装置をビームライン上に設置し、実際にスペクトルの測定を行うことを計画している。

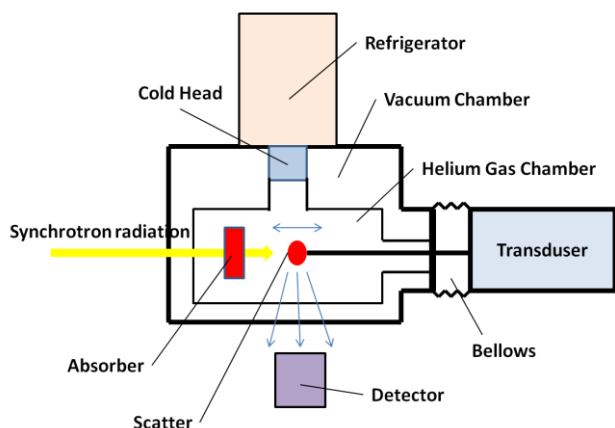


Fig. 1. Schematic drawing of new system

References

- [1] Makoto Seto *et al.*, Phys. Rev. Lett., **102**, 217602 (2009).

強度可変永久四極磁石の調整と性能評価

粒子ビーム科学研究室 牛島正太郎

Abstract Five-ring-singlet Permanent Magnet Quadrupole Lens system has been investigated for a final focus doublet. Some improvements on each ring and on this lens system have been held. We have carried out measurements of magnetic field and evaluated performance of this system. Installation for beamline and first beam test also have been held.

© 2012 Department of Physics, Kyoto University

ILC では、衝突点でのビーム交差角を 14mrad と設定していて、最終集束レンズは衝突点から 4~5m 離れたところに置かれるため、入射と出射ビームは 60mm 程度しか離れていない。2012 年に完成させる TDR では超伝導磁石によるものがベースラインになっているが、実績のある従来の構造と違って薄いコイルが必要になり、これはまだ開発中である。超伝導磁石では一般に、極低温を維持するため熱侵入を減らす必要から機械的支持の間隔が広く、剛性は高くない。従って、機械的振動による磁場中心の揺れが心配されている。振動の振幅がフィードバック制御の許容範囲を超えるようだとビームの衝突が制御不能となる。このため、バックアップスキームを用意しておく必要がある。そこで、振動がなく小型で高い安定性を見込める永久磁石を用いた四極磁石を開発している。永久磁石によるものの R & D は C L I C においても有用になろう。これまで、連続的に磁場強度を変化させられる Gluckstern の考案した[1]、5 つの 4 極磁石のリングを組み合わせた複合磁石強度可変四極磁石のプロトタイプ製作、実証実験を進めてきている。これは 5 個の Permanent Magnet Quadrupole (PMQ) の長さを調節して並べ、奇数番目と偶数番目のそれぞれの組み合わせを互いを逆方向に回転することにより、G L 積をキャンセルさせて集束強度をゼロまで可変させることが出来る。各 PMQ を回転する際に生じるスキュー成分による x-y カップリングもそれぞれの磁石の長さを調節することによりトータルとして小さくすることができる。各 PMQ の長さはそれぞれ 20, 55, 70, 55, 20mm となっている。

初めの磁場測定試験では集束性能低下の原因となる軸ずれや高次多極磁場成分が、四極磁場に対して十分低い状態ではなかったため、これを低減するための調整を各 PMQ に対し行いそれらを一桁程度低減するのに成功した。また、磁石全体での磁場測定をローテーションコイルを用いて行い、機械回転機構に対する四極磁場の強度変化や回転、軸ずれ、多極成分の変化などと、それらに対する再現性の評価を行った。磁場測定では、磁場強度は最大値の 0.3% まで減らせることが確認できた(図 1 参照)。しかし、強度を指標とした機械的な再現性は理想値より一桁以上悪い。特に四極磁場の回転(スキュー、図 2 参照)は集束性能に大きく影響を及ぼすが、磁石ムーバによる精密な補正が軸ずれよりも難しく、要求したい精度は高いので改善が必要である。

A T F 2 ビームラインにインストールすることにより、アライメント時の問題の洗い出しを行い、ここでのビームテストによりビームに対して四極磁石として十分機能していることを確認した。

References

[1] R.L.Gluckstern et al., Variable Strength Focusing with Permanent Magnet Quadrupole, Nucl. Instrum. Meth., 187, 119, (1981).

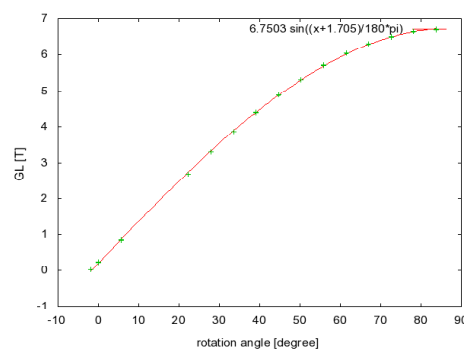


Fig. 1. Magnetic field strength as a function of rotation angle.

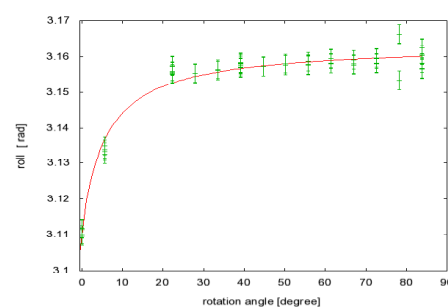


Fig. 2. Rolling angle of quadrupole component as a function of rotation angle.

弦の場の理論における位相的構造

素粒子論研究室 小路田 俊子

Abstract The action and the properties of basic operations of cubic string field theory (CSFT) are quite similar to those of Chern-Simons (CS) theory. CS theory is known as a theory with topological degrees of freedom; especially, winding number is an integer by which pure gauge solution is classified. In this thesis, we focus on this similarity, and study whether topological structure is realized in CSFT.

© 2011 Department of Physics, Kyoto University

ボゾニックな開弦の場の理論として cubic string field theory (CSFT) がある。2005 年、CSFT の古典解として弦の非摂動論的真空を表すものが発見された[1]。CSFT の力学変数は弦を引数に持つ汎関数で「弦の場」と呼ばれる。点粒子の場の理論と同じように弦の場を量子化した際には弦の生成消滅を行う。CSFT の作用は、Chern-Simons (CS) 理論の作用において、ゲージ場を弦の場に置き換え、外微分「 d 」、外積「 $\wedge$ 」、多様体上の積分「 $\int_M$ 」を、

$$d \rightarrow Q_B \quad \wedge \rightarrow * \quad \int_M tr \rightarrow \int \quad (1)$$

に置き換えることによって得ることができる。さらにそれぞれの演算子は $\{d, \wedge, \int_M\}$ と同じ性質

$$\begin{aligned} & \text{(i) } Q_B^2 = 0 \quad , \quad \text{(ii) } Q_B(\Psi * \Phi) = (Q_B \Psi) * \Phi + (-1)^\Psi \Psi * (Q_B \Phi) \quad , \quad \text{(iii) } (\Psi * \Phi) * \Sigma = \Psi * (\Phi * \Sigma) \\ & \text{(iv) } \int \Psi * \Phi = (-1)^{\Psi\Phi} \int \Phi * \Psi \quad , \quad \text{(v) } \int Q_B \Psi = 0 \end{aligned}$$

を満たす。 (Ψ, Φ, Σ) は任意の弦の場、 $(-1)^\Psi$ は弦の場のゴースト数。) これらの性質により作用のゲージ変換性なども形式的に全く同じである。

「 $*$ 」や「 $\int$ 」は弦の配位空間における演算で多様体という概念はなく、また CSFT には古典解にも物理的自由度があるなど CS 理論とは表現する物理的内容が異なるものの、作用の構造は式(1)の置き換えだけで得られてしまうのである。そこでこの類似性に着目し、CS 理論のアナロジーによって CSFT の深い構造を探ってみようというのが本研究の主旨である。CS 理論というのは位相的自由度で特徴付けられる理論であり、作用をゲージ変換して得られる量 N

$$N = \frac{k}{24\pi^2} \int_M tr (gdg^{-1})^3 = \int_M d(\cdots) = \int_{\partial M} (\cdots) \in \mathbb{Z} \quad (2)$$

は pure-gauge 型の古典解を分類することができる。 N は整数に値を取り、多様体から群への winding 数を与える。また上に表したように必ず全微分の積分形に書かれる。この巻き付き数 N から置き換え(1)で得られる CSFT 側の N (以後 $\mathcal{N}$ と書く)はこのような性質を持つのだろうか。もし $\mathcal{N}$ が winding 数であるならば、 $\mathcal{N}$ は一体何から何への「巻き付き」なのだろうか。そして式(2)の最後の等式のように弦の場の理論においても Gauss の法則が成り立つのだとすれば、「 $\int$ 」の「表面」とは何であろうか。また実際に整数量子化されれば、 $\mathcal{N}$ が pure-gauge 型の真空解のエネルギーに比例することから、真空解が位相的な量で特徴付けられることが分かる。本論文では $\mathcal{N}$ の理解のために、まず式(2)の一つ目の等式に注目した。それは CSFT では任意の弦の場に対して(v)が成り立つと考えられており、 $\mathcal{N}$ が真空エネルギーに比例することに一見矛盾しているように見えるからだ。今回任意の古典解に対し $\mathcal{N}$ を全微分の積分形に対応する、 $\int Q_B(\cdots)$ の形に直すことに成功した。また現在見つかった古典解に対し適切な正則化をすることで無矛盾に式(2)の一つ目の等式が CSFT でも成立することが分かった。さらに winding 数の性質である加法性 $N[g_1 g_2] = N[g_1] + N[g_2]$ が $\mathcal{N}$ に成立するのかを調べた。加法性は一般に破れているが、その時には運動方程式にアノマリーがあることが分かった[2]。

References

- [1] M. Schnabl, Adv.Theor.Math.Phys.10,433(2006) [arXiv:hep-th/0511286]
- [2] H. Hata and T. Kojita, arXiv:hep-th/1111.2389 (to be appear in JHEP)

高強度短パルスレーザーに含まれる低強度長パルス成分 除去のためのプラズマミラーの開発

レーザー物質科学 木幡清人

Abstract Laser intensity dependence of plasma mirror reflectivity has been measured at the incident angles of 10, 30, 45, 60 degrees. The reflectivity of 75% has been obtained. Temporal waveforms of laser pulses without and with a plasma mirror have been measured. The pulse contrast-rate has been successfully improved over 10^3 .

© 2012 Department of Physics, Kyoto University

高強度短パルスチャープパルス増幅 (CPA) レーザーシステムからの出力パルスには、メインとなる短パルスに低強度長パルスが付随しておりプリパルスと呼ばれる。これは自然放出光増幅 (ASE) などが原因となって生じる。プリパルス付パルス光をレーザー固体相互作用実験に使用すると、プリパルスの影響が顕著になる場合がある。メインパルスの到達前にプリパルスによって固体ターゲットがプラズマ化され、レーザーは膨張プラズマとの相互作用をし、個体との相互作用とは異なる諸現象を起こす。これを回避するには、パルスコントラスト (メインパルス強度/プリパルス強度) を改善する必要がある。私達はその手段の一つ、プラズマミラーについて研究している。プラズマミラーはまだ新しい技術であり、最適な条件や特性について十分な研究が行われていない。本研究では、高反射率かつ高コントラスト改善のプラズマミラーを開発するために、高反射率のための最適照射条件の調査とコントラスト改善の評価を行った。

高反射率最適照射条件を調べる実験は、入射角が異なる (10、30、45、60 度) 場合にレーザー入射強度とプラズマミラー反射率の関係を測定した。パルス幅 150fs、波長 800nm のレーザーをパルスエネルギー120mJ で使用した。Fig. 1 に示すように非軸放物面鏡で集光し P 偏光で合成石英板に入射した。結果を Fig. 2 に示す。強度の増加と共に反射率は増加、さらに強度が増加すると反射率は減少する。入射角が小さいほど反射率の最大値は大きく、10 度入射で強度が約 $10^{16}\text{W}/\text{cm}^2$ のとき約 75% 反射する。高反射率に最適な条件は、入射角が小さく強度が約 $10^{16}\text{W}/\text{cm}^2$ の場合である。

この照射条件の下で、パルスコントラスト改善比を評価するために、パルス時間波形を 3 次オートコリレーターで測定した。低反射コートを施したガラス基板を使用したプラズマミラーの場合の結果を Fig. 3 に示す。プリパルス部分で 3 桁のコントラスト改善が見られる。反射率 75% かつコントラスト改善 3 桁のプラズマミラーを開発できた。

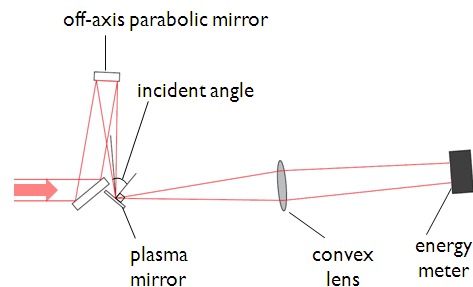


Fig. 1. Experimental setup for measurement of reflectivity.

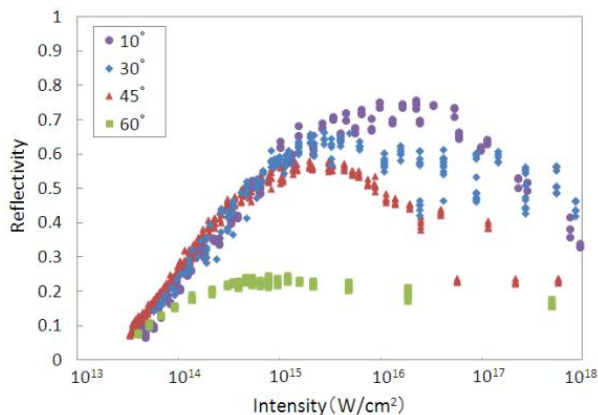


Fig. 2. Intensity dependence of plasma mirror reflectivity at 10, 30, 45, 60 deg. incidents.

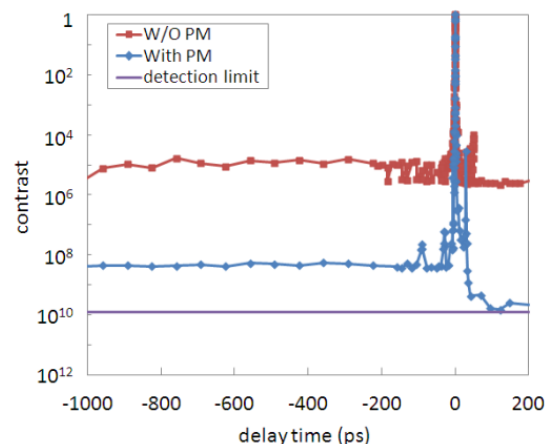


Fig. 3. Temporal waveforms without and with plasma mirror.

ディラック固有モードを用いたゲージ不変な枠組みでの 閉じ込めとカイラル対称性の自発的破れの相関の研究

原子核理論研究室 権業慎也

Abstract We formulate a gauge-invariant Dirac-mode expansion of the QCD operator such as the Wilson loop. With this method, we investigate the relation between confinement and chiral symmetry breaking in lattice QCD on 6^4 at $\beta=5.6$. As a result, confinement is not directly related to chiral symmetry breaking through Dirac modes.

© 2012 Department of Physics, Kyoto University

量子色力学 (QCD) の低エネルギー領域においては、クォークの閉じ込めやカイラル対称性の自発的破れといった非摂動的現象が生じる。クォークの閉じ込めは、クォークが単体では観測されずカラー 1 重項のハドロンとして観測される現象でありハドロン形成に密接にかかわる。一方、カイラル対称性の自発的破れは QCD が有しているカイラル対称性が自発的に破れる現象であり、その結果、クォークが低エネルギーで有効質量を獲得する。これまでにこれらの非摂動的現象の間にはなんらかの関係があることが示唆されてきた。例えば、有限温度の QCD においては閉じ込め・非閉じ込め相転移およびカイラル相転移がおこるが、両者の相転移温度がほぼ一致することが格子 QCD により明らかにされている [1]。他にも最大可換ゲージにおいて出現する位相的欠陥であるモノポールが閉じ込めのみならずカイラル対称性の破れに関しても支配的な寄与をすることが指摘され [2]、その後両者におけるモノポールの重要性は格子 QCD でも確かめられた [3]。

本研究ではディラック演算子 $\gamma^\mu D_\mu = \gamma^\mu (\partial_\mu + igA_\mu)$ の固有モードに着目し、ゲージ不変性を保ったまま、格子 QCD を用いてカイラル対称性の破れと閉じ込めの間の関係を調べる新たな方法を開発し、その方法を用いて解析を行った。

この方法ではディラック演算子の固有モードで、ある物理量 (ここではウィルソン・ループを考える) を展開しゲージ不変な射影をおこなう。ウィルソン・ループはクォーク・反クォーク間ポテンシャル (閉じ込めポテンシャル) と関係づけられているので、これにより固有モードと閉じ込めポテンシャルの関係を調べることができる。

一方、カイラル対称性の自発的破れは Banks-Casher 関係式 [4]

$$\langle \bar{q}q \rangle = -\lim_{m \rightarrow 0} \lim_{V \rightarrow \infty} \frac{\pi}{V} \langle \rho(0) \rangle$$

($\rho(\lambda)$: ディラック固有値のスペクトル関数) を通して、固有モードの低エネルギー領域 (赤外領域) と関係づけられている。したがって赤外領域を切断する射影をおこなったときの閉じ込めへの影響を調べることによりカイラル対称性の自発的破れと閉じ込めの関係を調べることができる。

この新たに開発した方法を用いて数値計算をおこなった結果、ディラック固有モードの赤外領域は閉じ込めにほとんど影響しないことがわかった。したがって、閉じ込めとカイラル対称性の自発的破れはディラック固有モードを通しては直接は関係しないという結果が得られた [5]。この結果はカイラル対称性は回復するが閉じ込められている状況に相当しており、そういう状況が起こりうることも示唆している [5]。

References

- [1] 例えば、F. Karsch, Lect. Notes Phys. **583** (2002) 209.
- [2] H. Suganuma, S. Sasaki and H. Toki Nucl. Phys. B **435** (1995) 207.
- [3] O. Miyamura, Phys. Lett. B **353** (1995) 91; R.M. Woloshyn, Phys. Rev. D **51** (1995) 6411.
- [4] T. Banks and A. Casher Nucl. Phys. B **169** (1980) 103.
- [5] H. Suganuma, S. Gongyo, T. Iritani and A. Yamamoto, arXiv:1112.1962 [hep-lat].

原始惑星系円盤の形成と進化

天体核研究室 高橋実道

Abstract We investigate the formation process of self-gravitating protoplanetary disks. The angular momentum is redistributed by the action of gravitational torque in the massive disk. We develop a simplified one-dimensional accretion disk model that take into account the transfer of angular momentum within the disk in terms of effective viscosity.

© 2012 Department of Physics, Kyoto University

星形成過程で原始星の周囲に作られる円盤である原始惑星系円盤の形成過程は、近年特に注目の集まっている研究課題である。最終的に星を構成するガスの大部分は円盤を通じて中心星に降着するため、円盤の形成・進化を理解することは星形成過程を理解するために必要である。また、1990年代に系外惑星が観測されはじめてから、惑星系形成シナリオが盛んに研究されるようになった。原始惑星系円盤は惑星系形成の現場だと考えられているため、現実の星形成でどのような原始惑星系円盤が形成されるかは、その後の惑星系形成に大きな影響を与える。

近年、計算機の発展などにより原始星・原始惑星形円盤形成の一貫した 3D シミュレーションが可能となった。その結果、星形成過程では中心星よりも重い、重力的に不安定な円盤が形成されることが分かってきた[1][2][3][4]。このような円盤が星・惑星系形成に与える影響を定量的に理解することが現在重要となっている。

本研究では、原始星形成期の原始惑星系円盤形成を半解析的に計算し、最終的に形成される原始惑星系円盤について議論する。シミュレーションによる原始星・原始惑星系円盤形成は計算に時間がかかり、その応用にも限界がある。また、この原始惑星形円盤形成過程においてどのような物理過程が本質的な役割を果たしているのかもまだ十分には解明されていない。今回の解析的な研究によりシミュレーションの物理的な解釈が可能となり、化学進化・惑星系形成などのより発展的な研究へと繋がっていくことが期待される。

本研究では重力的に不安定な円盤へのガス降着及び円盤から中心星への質量の輸送を 1 次元軸対称のモデルで評価し、円盤の時間進化を調べた。重力的に不安定な円盤では非軸対称の渦状腕が立ち、重力トルクによって角運動量が輸送される。これまで、この効果を実効的な粘性として取り入れ、角運動量輸送で表す方法がいくつか提案されている[5][6]。本研究では、原始惑星系円盤形成過程での円盤に対するガス降着を現実的に取り入れ、3 次元シミュレーションの結果と合致する重力トルクによる角運動量輸送のモデルを明らかにした。また、新たに見つかった粘性円盤の重力不安定性により円盤形成過程でガス惑星が形成される可能性について考察した。

本研究では簡単のため中性のガスを考え、磁場の効果を見捨てた。しかし、現実の星形成では磁場によってガスに働く力が重要となる。従って、本研究結果に磁場の効果を取り入れ、より現実的な原始星・原始惑星系円盤形成を解析的に理解することが今後の課題である。

References

- [1] S. Inutsuka, M. N. Machida, & T. Matsumoto, *ApJ* **718**, L58 (2010).
- [2] M. N. Machida, S. Inutsuka, & T. Matsumoto, *ApJ* **724**, 1006 (2010)
- [3] M. N. Machida, S. Inutsuka, & T. Matsumoto, *ApJ* **729**, 42 (2011)
- [4] M. N. Machida, S. Inutsuka, & T. Matsumoto, *PASJ* **63**, 555 (2011)
- [5] D. N. C. Lin, & J. E. Pringle, *MNRAS* **225**, 607 (1987).
- [6] Z. Zhu, L. Hartmann, & C. Gammie, *ApJ* **713**, 1143 (2010).

超対称標準模型における

ヒッグスセクターの真空構造について

基礎物理学研究所 素粒子論グループ 高橋翼

Abstract Due to the additional singlet, the NMSSM Higgs sector is much richer compared to the MSSM. We analyzed the Higgs scalar potential of the NMSSM and found that the parameters of the model are constrained by considering the stability of the realistic vacuum.

© 2012 Department of Physics, Kyoto University

標準模型を超える物理として最有力候補とされているのが超対称性をもつモデルである。最も単純な超対称化標準模型はMSSMであるが、重いヒッグス質量を出すためにはストップ粒子からの輻射補正を十分に効かせる必要がある。昨年発表されたLHC実験が予測する115～127GeV領域のヒッグス質量を出すにはfine-tuningが必要となる。

NMSSM(Next-to-MSSM)はMSSMにゲージ重項場を加えたモデルである[1]。MSSMがもつ μ 問題を解決することやヒッグス場の質量をMSSMより重くできることなどから、MSSMについて研究が盛んなモデルの1つとなっている。ゲージ重項がヒッグスに混合することでヒッグスセクターが大きく変わり、スペクトルやゲージ粒子との結合がMSSMとは異なるほか、ヒッグススカラーポテンシャルやその真空構造も複雑になり、現実的な真空のほかにさまざまな真空が出現する可能性がある。これまでのNMSSMの研究の多くでは、このような非現実的な真空の存在はほとんど考慮されてこなかったが、われわれの真空 $V_{\min|real}$ が非現実的 (unrealistic) な真空 $V_{\min|unrealistic}$ より深いという安定条件を要請すると、重要なパラメータ領域を禁止する可能性がある。したがって現実的な真空の安定条件を考慮することは大変に重要である。非現実的な真空としては、ヒッグス場が適切な真空期待値を持たなかったり、カラーや電荷の対称性が破れたりする極小が考えられる[2]。

本論文では主としてNMSSMのヒッグススカラーポテンシャルを解析し、今までの研究[3]においては考えられていなかった非現実的な真空も考慮することで、NMSSMのパラメータにより強い制限を与えた。特に最も軽いヒッグスにゲージ重項がある程度混合する際には、深い非現実的な真空が現れやすく、したがってそのような一重項の混合への制限が与えられる。またゲージ重項との混合効果も考えると、NMSSMにおいてもヒッグス粒子の質量を持ち上げるにはパラメータの取り方に工夫が必要なことを数値的に示した。

References

- [1] Reviewとしては U.Ellwanger, C.Hugonie and A.M.Teixeira, Phys. Rept. 496, 1 (2010) [hep-ph/0910.1785].
- [2] J.A.Casas, A.Lleyda and C.Munoz, Nucl. Phys. B 471, 3 (1996) [hep-ph/9507294].
- [3] Y.Kanehata, T.Kobayashi, Y.Konishi, O.Seto and T.Shimomura, arXiv:1103.5109 [hep-ph].

ブレンワールドモデルにおけるブラックホールの動的発展

基礎物理学研究所 宇宙グループ 高橋智嗣

Abstract In order to investigate dynamical properties of a brane-localized black hole, we have developed a numerical-relativity formulation, numerical scheme, and numerical implementations for evolving a black hole in a braneworld model. Using the numerical code and initial data which contain a brane-localized black hole, we perform numerical-relativity simulation for a brane-localized black hole.

© 2012 Department of Physics, Kyoto University

L. Randall と R. Sundrum によって提唱された RSII モデル[1]とは、無限に広がる5次元時空の中に我々の世界が4次元の膜状の領域（ブレン）として存在するモデルである。このモデルで重力は5次元的な作用に支配されると考えているのにも関わらず、弱重力の現象では4次元重力が良い近似で再現されることが知られており、我々の宇宙を記述するモデルであると期待されている。しかし一方で、強重力の現象においては4次元重力には無い、様々な興味深い特徴が現れることが知られている。その中の一つとして、ブレンに局在するブラックホールについての問題が挙げられる。

4次元の重力理論に限らず、多くの重力理論においてブラックホールが存在することはよく知られている。しかし、RSII モデルでブレンに局在する静的ブラックホールが存在するかどうかは明らかになっていない。実際の宇宙の観測ではブラックホールが存在することが確かめられており、RSII モデルが我々の宇宙を記述しているという立場からすると、RSII モデルでブラックホールが見つかっていないことは大きな問題である。近年、P. Figueras らが RSII モデルでの静的ブラックホールを数値的に求めるを試み、実際にブラックホール解を作ることに成功した[2]。しかし、彼らの方法は解が時間に依存しないという仮定を前提としているので、時間発展を計算することはできず、実際に重力崩壊が起きた時に、彼らの求めた静的ブラックホールに落ち着くかどうかは不明である。また、そもそも彼らの得た結果が正しいものかどうか独立の方法で検証されるべきである。

そこで我々は、ブレンワールドモデルにおけるブラックホールの動的発展の問題、特に最終状態として静的ブラックホールに落ち着くかどうかを数値的に調べることを目的として研究を行った。

まず、ブレンワールドモデルに適した数値相対論の定式化を行った。漸近的に平坦な時空に適した数値相対論の定式化をそのまま、ブレンワールドモデルの場合に当てはめるのではうまく計算ができない。そこで、我々はブレンワールドモデルの計量が、漸近的平坦な時空と共形変換で結びつくことを利用してブレンワールドモデルに適した数値相対論の定式化を行った。さらに、その定式化で正しく時間発展が計算できることを確かめるために、テストシミュレーションを行った。その結果、線形解析の結果を再現し、定式化がうまくいっていることが分かった。

次に、ブレンワールドモデルでのブラックホールの動的発展を計算するための初期データを求めた。初期データを求めるためには Hamiltonian 拘束条件を解く必要がある。我々は RSII モデルでの初期データを求めた先行研究[3]と同様の形の計量を仮定し、Hamiltonian 拘束条件を数値的に解くことによって初期データを求め、結果としてブレンに局在したブラックホールを含む初期データを構成することができた。

最後に、上で求めた初期データを使って実際に、ブレンワールドモデルでのブラックホールの時間発展のシミュレーションを行い、その結果について議論した。

References

- [1] L. Randall, R. Sundrum, Phys. Rev. Lett. **83**, 4690 (1999)
- [2] P. Figueras, T. Wiseman, arXiv:1105.2558.
- [3] T. Shiromizu, M. Shibata, Phys. Rev. **D62**, 127502 (2000)

大面積・高時間分解能 Resistive Plate Chamber の開発

原子核ハドロン研究室 富田 夏希

Abstract We are developing a large area, high time-resolution time of flight (TOF) detector system based on resistive plate chambers (RPCs) for LEPS2 experiment at SPring-8. Our goal is to achieve 50 ps time resolution with the readout pad area larger than 100 cm². Our prototype RPC achieved 60 ps time resolution with 100 cm² readout pad. This performance almost satisfies the requirements of LEPS2.

© 2012 Department of Physics, Kyoto University

荷電粒子の飛行時間(TOF)検出器は、加速器を用いた素粒子・原子核実験において、生成粒子の識別に欠かせない存在である。その役目は長年シンチレーション検出器によって担われてきたが、近年シンチレーション検出器を上回る性能を持った Resistive Plate Chamber (RPC)の開発が進んでいる。RPCは50 ps程度の高い時間分解能を持ち、生産コストが安く、磁場中でも使え、大型化が簡単、といったシンチレーション検出器にはない特徴を持つ。[1]

我々は現在SPring-8において建設が進められている新たなハドロン光生成実験用ビームラインLEPS2のTOF検出器としてRPCの開発を行った。LEPS2は既存のLEPSの約10倍の光子強度とほぼ 4π を覆う大立体角検出器により、LEPSでカバーできなかった領域において、ハドロン内部構造の研究や、原子核中での中間子の質量変化をプローブとしたカイラル対称性の部分的回復の研究などを行う。

LEPS2のTOF検出器はソレノイドマグネット中でターゲットから約1 mの距離に設置される。そのわずかな飛行距離で1.1 GeV/cの運動量のK中間子と π 中間子を識別するために50 ps程度の高い時間分解能が必要である。TOF検出器の覆う面積は約5 m²であり、我々は読み出しチャンネル数を1000以下に抑えるために、100 cm²以上の面積の読み出しパッドのRPCの開発が必要である。

RPCはFig. 1.およびFig. 2.のような高抵抗のガラスを数100 μ mの間隔で積み重ねた構造のガス検出器である。荷電粒子が通過するとガスがイオン化され、ガラスにかけられた電場によって電子が増幅される。その電子の動きによりガラスの外側の読み出しパッドに誘起される信号を検出する。RPCは1つ1つのガスギャップが狭いため、非常に高い時間分解能を出すことができる。

現在大規模実験で使用されているRPCは10 cm²程度の小さい読み出しパッドのものが多く、大面積の読み出しパッドのRPCの開発研究はRPCの大きな課題の1つとなっている。我々はプロトタイプのRPCの開発を行い、8 cm²の読み出しパッドで約40 ps、100 cm²の読み出しパッドで約60 psと、LEPS2での要求性能をほぼ満たす時間分解能を達成した(Fig. 3.)。本論文では開発したプロトタイプのRPCについて、時間分解能のガス依存性・レート依存性など基本性能を詳細に報告する。

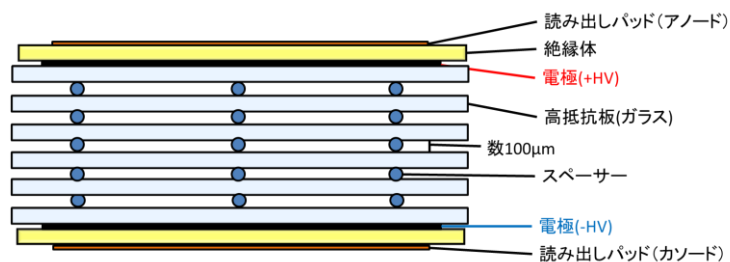


Fig.1. Schematic drawing of a RPC

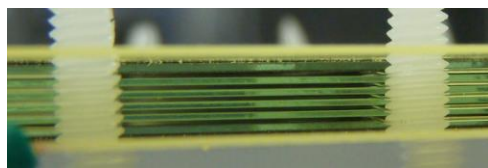


Fig.2. Side view of a RPC

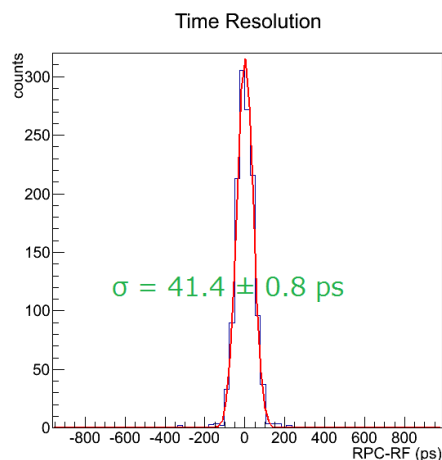


Fig.3. Time distribution of the prototype RPC

References

- [1] P.Fonte IEEE Trans. Nucl. Sci. 49 (2002) 881

大質量星終焉時に付随するガンマ線バースト現象の 金属量による違い

天体核研究室 仲内 大翼

Abstract We analytically investigate explosive phenomena driven by jets in the core collapse phase of massive stars. We discuss various observational signatures of the phenomena made by differences of the mass and the metallicity of progenitor stars.

© 2012 Department of Physics, Kyoto University

ガンマ線バースト(以下 GRB と略記)は宇宙で最も明るい現象である。その光度は銀河 1 億個分に相当する。一部の GRB には超新星爆発が付随するため、大質量星の重力崩壊に伴って発生する GRB の種族があると考えられている。[1] 具体的には、まず大質量星が崩壊する過程でブラックホールと降着円盤の系が形成され、これがエンジンとなってジェットを生み出す。次にジェットは星の大気中を進んでいくが、その際進行方向に存在する星の大気は強い衝撃波を経験した後ジェットの脇へとよけられコクーンという構造を形成する。コクーンも大きな圧力を持つため星の大気中へと膨張し始める。つまり星の中ではジェットーコクーン構造を保ちつつジェットは伝播すると考えられている。[2] 最後にジェットが星の外に飛び出した後、ジェットのもつエネルギーの一部がガンマ線へと変換されることで GRB が発生すると考えられている。

GRB は宇宙論的な距離で発生する現象であり、最近では赤方偏移 8.26 を持つものまで見つかっている。そのため宇宙で最初に形成された初代星も GRB の親星となる可能性があり、GRB は宇宙の歴史を探る手段として注目されている。初代星はビッグバン元素合成時の極低金属量のガスから形成される。有力な冷却材である金属が少ないため現在の星よりも大質量であったと考えられている。初代星形成過程を調べるときには、中心星へとガスが降着する状況を考えるが、最近の研究では中心星からの輻射が降着流に与える影響を考慮した計算が行われている。その結果、初代星の典型的質量が $40 M_{\odot}$ 程度になるという議論がある。[3]

以上を背景として、本修士論文では様々な質量をもつ初代星に対して、GRB のようなジェット現象を起こすことができるかどうかを評価した。また比較のため金属欠乏星や太陽金属量の星についても調べた。評価は、星の中における、ジェットーコクーン構造を伴ったジェットの伝播に注目して解析的に行った。ジェットのモデルとしては、質量降着率に比例した光度を持つジェットを考えた。[4] またジェット現象が可能だと判定された星に対して、期待される最大光度や継続時間を評価した。さらに GRB の経験則である米徳関係式[5] の成立を仮定することで、期待されるスペクトルのピークエネルギーを評価した。

References

- [1] Meszaros, P. 2002, ARA&A, 40, 137
- [2] Matzner, C. D. 2003, MNRAS, 345, 575
- [3] Hosokawa, T., Omukai, K., Yoshida, N., & Yorke, H. W. 2011, Science, 334, 1250
- [4] Suwa, Y., & Ioka, K. 2011, ApJ, 726, 107
- [5] Yonetoku, D., Murakami, T., Nakamura, T., et al. 2004, ApJ, 609, 935

AdS/CFT 対応に基づいたエンタングルメント・エントロピーの解析

基礎物理学研究所 素粒子論グループ 野崎雅弘

Abstract In this paper, I review some recent developments of the holographic entanglement entropy. In particular, I discuss what data of quantum field theory contributes to the universal term of the holographic entanglement entropy.

© 2012 Department of Physics, Kyoto University

現在までの超弦理論の研究によって、 d 次元の場の理論と $d+1$ 次元の重力を含む理論が対応するということが予想されている [1] [2]。この対応は AdS/CFT 対応と呼ばれている。この対応に基づいて、対応する場の理論のエンタングルメント・エントロピーを重力理論からホログラフィックに解析する手法としてホログラフィック エンタングルメント・エントロピー (HEE) が提唱されている。

エンタングルメント・エントロピーは場の理論において系全体を幾つかの系に分割した時に、それぞれの系の間の量子的もつれを表す量としてフォン・ノイマン・エントロピーを用いて定義された量である。このエンタングルメント・エントロピーは相転移における秩序変数として用いることができる。エンタングルメント・エントロピーは非常に対称性の高い 2 次元の共系場の理論(CFT)の様に特定の理論ではレプリカ法を用いて、解析的に計算ができる。しかし、より高次元の CFT や一般の場の理論においてはレプリカ法を用いて解析を行うことは技術的に非常に複雑で困難である事が知られている。

一方で、先ほど述べた HEE ではエンタングルメント・エントロピーの解析を行う場合、重力理論が高次の曲率を含まない古典的な重力理論であれば、 γ_A を A の境界を端に持つ曲面の内で最小の面積を持つ曲面として重力定数 G と共に

$$S_A = \frac{\text{曲面}\gamma_A\text{の面積}}{4G} \quad (1)$$

の関係式を用いて、系 A のエンタングルメント・エントロピーの解析が行えると予想されている [3]。この関係式(1)を用いて HEE を解析することは、レプリカ法を用いて解析することに比べ非常に容易な場合があることから、高次元の CFT や一般的な場の理論のエンタングルメント・エントロピーの解析を行う手法として注目されている。

また、場の理論におけるエンタングルメント・エントロピーや HEE は一般的に紫外発散のカットオフを導入しなければ発散してしまう量である。しかし、これらの量から紫外発散のカットオフに依らないユニバーサルな量が定義できる。この量は $\log$ の項の係数や定数項として現れ、セントラルチャージ等の量に関係しているため、ユニバーサルな量の議論を行う事は非常に重要である。この為、HEE に現れるユニバーサルな量が対応する CFT のどのような情報に依存した量であるのかということを調べるのは重要である。また CFT 以外の場合では、このようなユニバーサルな量が CFT の場合で計算した場合からどのような補正を受けるのかという事を議論することも同様に重要である。

本修士論文では、これらの事柄についてレビューを行い、今後の展望について述べる。

References

- [1] J. M. Maldacena, Theor. Math. Phys. 2, 231 (1998) [Int. J. Theor. Phys. 38, 1113 (1999)] [arXiv:hep-th/9711200].
- [2] E. Witten, Adv. Theor. Math. Phys. 2, 253 (1998) [arXiv:hep-th/9802150].
- [3] S. Ryu and T. Takayanagi, Phys. Rev. Lett. 96, 181602 (2006) [arXiv:hep-th/0603001].

LEPS2 におけるハドロン光生成反応実験のための Time Projection Chamber の開発

原子核ハドロン研究室 野沢勇樹

Abstract We will study hadron photoproduction at SPring-8. A time projection chamber (TPC) will be developed to measure low momentum particles produced from hadron decays. In this thesis, basic performance test about dE/dx resolution and position resolution are described.

© 2012 Department of Physics, Kyoto University

LEPS2 は兵庫県西播磨郡にある大型放射光施設 SPring-8 に新たに建設されている逆コンプトン γ 線ビームラインであり、3 GeV の高エネルギー、10 MeV のエネルギー分解能でおよそ毎秒 10^7 個という高輝度の γ 線が使用できる。我々はこのビームラインで、ペンタクォーク探索実験や、 $\Lambda(1405)$ の内部構造解明実験、 Λ 中間子生成実験などの、様々なハドロンの光生成反応実験を行う予定である。

これらの反応実験で生成される粒子、とりわけ、 $\gamma p \rightarrow K^* \Lambda(1405)$ 反応[1]における K^* の崩壊や $\gamma p \rightarrow K^* \Theta^+$ 反応における Θ^+ の崩壊などにより終状態に生成される遅い π 粒子は、前方だけでなく大散乱角にも放出される。したがって、これらの大散乱角に放出された粒子を検出することが要求される。

そのため LEPS2 の検出器はほぼ 4π という大立体角を覆い、終状態に生成された粒子を全て検出できるように設計されている(Fig.1)。前方に放出された荷電粒子はドリフトチェンバーで検出する。そして、大散乱角に散乱された荷電粒子を Time Projection Chamber (TPC) で検出する。TPC を用いれば、円筒型ドリフトチェンバーに比べて前方での物質量を小さくすることができる。TPC はパッドで測定した 2 次元の座標とドリフト時間から、3 次元的に荷電粒子の飛跡を測定する検出器である。

本研究では LEPS2 で用いる TPC の開発を行った。 $\Lambda(1405)$ の質量を 12 MeV/c² の精度で測定するためには、この検出器の性能として、磁場 1 T 中で K^* の崩壊により生成されるおよそ 300 MeV の π 粒子を 1.1 % 以下の運動量分解能で測定することが要求される。

本研究ではプロトタイプを製作し、LEPS の γ 線を鉛に入射して生成したおよそ 1 GeV の陽電子ビームを用いて位置分解能の評価実験を行った。低運動量の荷電粒子に対しては多重散乱の効果と、ワイヤーと粒子の角度に依存した位置分解能の悪化を抑えることが重要である。印加電圧、パッドサイズについて最適化を行い、陽電子をパッド列に垂直に入射して、Ar-CH₄ ガスで 110 μ m という位置分解能を得た。そのときの荷電粒子とアノードワイヤーとの角度依存性についても調べた。

また多重散乱の効果を軽減し運動量分解能を向上させるために、Ne-CH₄ ガスを用いても同様の実験を行い、125 μ m の位置分解能を得た(Fig.2)。さらに拡散の影響等を測定するため、ドリフト距離を長くした新たなプロトタイプを製作し、その影響を測定した。

そしてこれらの実験結果をもとに、LEPS2 に用いる TPC のパッド面の設計を行った。その結果、 K^* の崩壊により生成される π 粒子について、Ne-CH₄ ガスを用いれば、要求性能を満たす TPC が製作できることがわかった。

本論文では、プロトタイプを用いた実験結果の詳細、およびそれらをもとに設計した TPC のパッド面の構造について述べる。

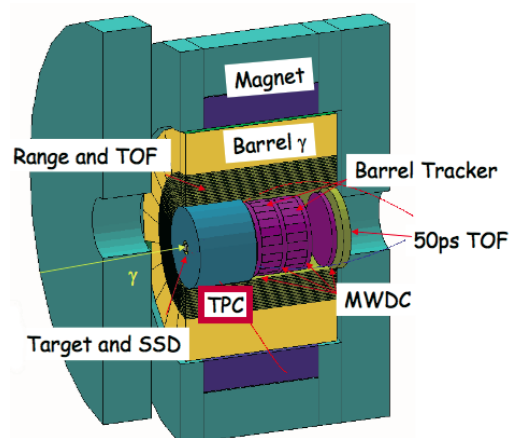


Fig. 1: LEPS2 detector system

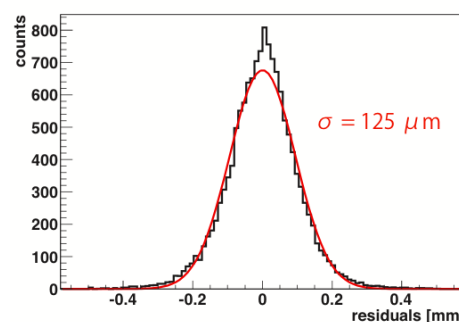


Fig. 1: Distribution of tracking residuals with Ne-CH₄ gas in pad plane.

References

- [1] T. Hyodo, et al., Phys. Lett. B 593 (2004) 75

ループ量子重力理論への宇宙定数の導入

天体核研究室 野村紘一

Abstract Loop quantum gravity is one of candidates for quantum gravity, which is unification of quantum theory and general relativity. However, it is very difficult to construct solutions of constraints. We studied possibilities to find them by introducing cosmological constant, and found solutions in a somewhat simple model.

© 2012 Department of Physics, Kyoto University

20 世紀における物理学の大きな進展は、量子論と一般相対性理論の確立によってもたらされた。量子論は素粒子のようなミクロな世界を、そして、一般相対性理論は宇宙といった大規模な重力現象をよく記述する。一見すると両者の扱うスケールには大きな隔たりがあり、接点はないようにも見える。しかし、ビッグ・バンのようなミクロな初期宇宙も研究の対象として見据えると、この二つを組み合わせた量子重力理論の構築が必要不可欠となってくる。

量子重力理論の研究は様々な困難がつきまとい、その歴史も長い、未だに決定打となるものはないのが現状である。そのような中でも現在、有力な候補と考えられているもののひとつに、ループ量子重力理論があげられる。これは、4 次元の時空内で一般相対性理論の正準量子化を非摂動的に行うものである。この理論の特徴は、量子化を行う際に、正準変数を 1 次元の直線および 2 次元の曲面で積分したホロノミー、フラックスと呼ばれる関数を用いて正則化を行う点であり、その結果として、時空の離散構造など興味深い帰結が予言されている。[1]

ところで、一般相対性理論は拘束系であるため、その量子化であるループ量子重力理論にも拘束条件が現れる。よって、物理的に意味のある量子状態を構成するためには、量子化された拘束条件の解を見つけ出さなければならない。この問題についてループ量子重力理論では、解の存在が示されているものの、non trivial な解を具体的に構成することには成功していない。[2]

そこで本研究では、理論に宇宙定数を導入し、宇宙定数の自由度を利用することで解の構成ができないかを考えた。ただし、今回は簡単のため、理論に含まれる $SU(2)$ ゲージ構造を $U(1) * U(1) * U(1)$ で置き換え考察を行なった。その結果として、宇宙定数がある特定の離散的な値を取る場合に、実際に拘束条件を満たす解の系列を構成できることが見出された。

本修士論文では、ループ量子重力理論の構成を詳述し、続いて、宇宙定数を導入した場合の解の構成の可能性について議論する。

References

[1] T.Thiemann, [arXiv:gr-qc/0210094].

[2] T.Thiemann, Class. Quant. Grav. 15 (1998) [arXiv:gr-qc/9606090].

3次元超対称ゲージ理論の局所化による計算とその応用

基礎物理学研究所 素粒子論グループ 浜直史

Abstract We studied "localization principle", a method of exact computations for path integrations in three-dimensional gauge theories with supersymmetries, and developed general formulas for the partition function of $N=2$ SUSY gauge theories on three-sphere, and on ellipsoid. They are applied to nontrivial tests of dualities such as mirror symmetry, AGT relations. © 2012 Department of Physics, Kyoto University

量子論に於ける物理量の計算では、経路積分の実行が問題となる。実際、経路積分が厳密に可能なのは、自由理論や可積分系などの少数の例に限られる。摂動的な計算も、特に3次元ゲージ理論の場合は、典型的な Yang-Mills 項がそのゲージ結合定数に質量次元を持つため、低エネルギー理論は強結合理論となり、摂動的に計算可能な物理量は限られる。そのような超対称ゲージ理論で、近年、局所化という計算方法が用いられるようになった。これは、超対称性などの冪零の対称性を利用したもので、その対称性の完全形式で書かれる項を系のラグランジアンに加えても、その対称性で不変な演算子の期待値が変わらないという性質に拠っている。この時、その加える対称性完全形式項の係数を無限大にとることによって、経路積分はその項に支配され、2次形式として積分することが可能になるというものである。この手法で計算できる物理量としては、主に Wilson loop や分配関数などが挙げられる。この計算手法の、3次元の超対称ゲージ理論への適用は、球面上に於ける理論について、まず系が $N=4$ 以上の超対称性を持つ場合に限って[1]が導入した。そして[2]と、本研究による[3]によって独立に、 $N=2$ の場合へも適用された。また、本研究では、超対称ゲージ理論を乗せる多様体を、従来の球面から、その軸長を互いに異なる値をとるように歪めた、Ellipsoid と呼ばれる多様体へも拡張した[4]。この論文ではまず、その計算原理と、これらの場合の実際の計算結果として、分配関数の一般公式などを確認する。

次に、3次元超対称ゲージ理論で物理量が厳密に計算できるようになったことが、様々な問題へと応用されていることを見る。例えば、ブレーン配位などを用いて双対だと考えられている2つのゲージ理論について、それぞれをコンパクト多様体の上に配位し、局所化を用いて分配関数を比較すると、確かにそれらが等しく、それを以てその双対性の非自明な確認とするなどの用途がある。実際、ミラー対称性[5]を初めとした様々な対称性で、そのような確認、そして新たな双対性の提唱が成されている。また、局所化は、 $(4+2)$ AGT対応[6]という双対性での、新たな対応物の発見にも援用された。この $(4+2)$ AGT対応は、4次元のある超対称ゲージ理論で計算される Nekrasov 分配関数という量と、ある2次元の超共形場理論で計算される共形ブロックという量が等しいと主張する。[4]の計算結果は、4次元の理論に局在する S-duality domain wall の作用を3次元超対称ゲージ理論との結合と考えた時の、その3次元理論の分配関数が、AGT対応で対応すると考えられる2次元 Liouville 理論での、Moore-Seiberg groupoid の成分による変換を与える積分核の寄与と等しいことも示した[7]。当論文では、局所化による計算結果がゲージ理論の研究に様々な恵沢を与える例として、このミラー対称性と、AGT対応をレビューする。

References

- [1] A. Kapustin, B. Willett and I. Yaakov, "Exact Results for Wilson Loops in Superconformal Chern-Simons Theories with Matter," JHEP 1003, 089 (2010)
- [2] D. L. Jafferis, "The Exact Superconformal R-Symmetry Extremizes Z," [arXiv:1012.3210 [hep-th]].
- [3] N. Hama, K. Hosomichi and S. Lee, "Notes on SUSY Gauge Theories on Three-Sphere," JHEP 1103, 127 (2011)
- [4] N. Hama, K. Hosomichi and S. Lee, "SUSY Gauge Theories on Squashed Three-Spheres," JHEP 1105, 014 (2011)
- [5] A. Kapustin, B. Willett and I. Yaakov, "Nonperturbative Tests of Three-Dimensional Dualities," [arXiv:1003.5694 [hep-th]].
- [6] L. F. Alday, D. Gaiotto and Y. Tachikawa, "Liouville Correlation Functions from Four-dimensional Gauge Theories," Lett. Math. Phys. 91, 167 (2010)
- [7] K. Hosomichi, S. Lee and J. Park, "AGT on the S-duality Wall," JHEP 1012, 079 (2010)

大型で高エネルギー分解能の CdTe 半導体検出器の開発

高エネルギー物理学研究室 平木貴宏

Abstract Energy resolution of thick CdTe semiconductor detectors is rather poor because of the significant hole trapping effect. We have developed a new method to improve the energy resolution by correcting the pulse height using the waveform of the signal. Limiting factor of the obtained energy resolution is examined.

© 2012 Department of Physics, Kyoto University

ニュートリノ振動によりニュートリノが有限な、しかし極端に小さな質量を持つことが示された。なぜニュートリノの質量が小さいかを説明する有力なモデルとしてシーソー機構がある。それによれば、ニュートリノは粒子と反粒子が等しいマヨラナ粒子であり、非常に重いマヨラナ質量を持った時に左巻きニュートリノの質量が非常に小さくなる。

ニュートリノが本当にマヨラナ粒子かどうかを調べる唯一の手段は原子核のダブルベータ崩壊を用いる方法である。ニュートリノがマヨラナ粒子ならばニュートリノを放出しない過程でのダブルベータ崩壊が可能になる。しかしこの過程の崩壊確率が非常に小さいため未だ実際に観測された例はない。

化合物半導体のテルル化カドミウム (CdTe) の結晶を用いた放射線検出器 (図 1) は γ 線検出器として様々な分野で利用されている。Cd, Te は共にダブルベータ崩壊をする同位体が存在するため、大型で高いエネルギー分解能をもたせることが出来れば、CdTe 検出器はダブルベータ崩壊の探索に利用できる。しかし、CdTe 検出器は Si や Ge を用いた半導体検出器と比較すると正孔キャリアのドリフト速度が低く、またキャリアが欠陥準位に捕獲されて寿命も短いため、通常厚くするとエネルギー分解能が著しく低下する。そこで波形情報から収集電荷の補正を行うことによりエネルギー分解能を向上した (図 2)。

本論文ではまずニュートリノレス二重 β 崩壊を中心としたニュートリノ物理の現状に触れ、次に CdTe 半導体検出器の特性について述べる。そして $5 \times 5 \times 5 \text{ mm}$ と $15 \times 15 \times 10 \text{ mm}$ の CdTe 結晶を用いた検出器のエネルギー分解能などの性能の評価を行い、エネルギー分解能を悪化させる複数の要因のうちどの要因が最も大きく寄与するか調べ、更なるエネルギー分解能の向上の余地があるかを議論した。最後に今後の CdTe 検出器を利用した二重 β 崩壊の探索に向けた展望を述べる。

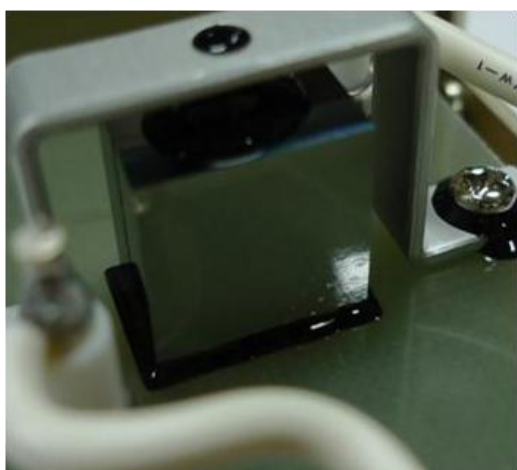


Fig.1 CdTe detector

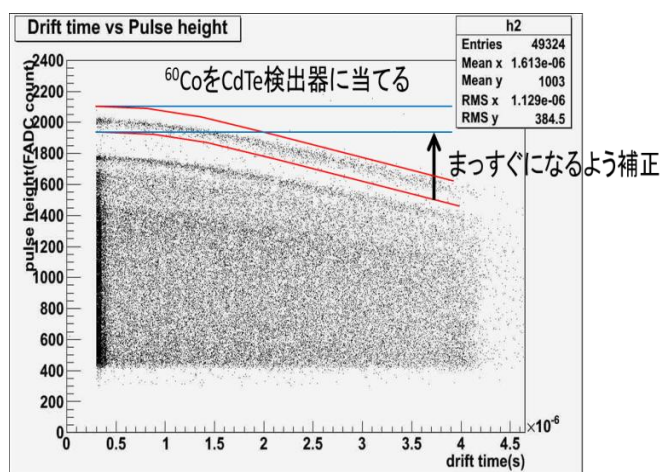


Fig.2 Pulse height correction

気球実験 SMILE-II の力学モデルによる 姿勢制御システムの開発

宇宙線研究室 松岡佳大

Abstract We have planed the next balloon experiment (SMILE-II) with MeV gamma-rays Compton camera (ETCC). In order to increase the detection efficiency, tracking of the ETCC to the target is considered to be quite important. Then I have developed the attitude control system of the balloon gondola. At first the prototype mini gondola was developed, and examined. Also I simulated the dynamics model of that.

© 2012 Department of Physics, Kyoto University

我々は次世代の MeV ガンマ線検出器として、Electron-Tracking Compton Camera (ETCC)を開発している。ETCC はガンマ線のコンプトン散乱を完全に再構成でき、ガンマ線の到来方向とエネルギーを 1 光子ごとに特定することができる。2006 年 9 月に行われた第 1 回気球実験 Sub-MeV gamma-ray Imaging Loaded-on-balloon Experiment (SMILE-I)では、高度～35km での高い宇宙線バックグラウンドから宇宙拡散ガンマ線と大気ガンマ線の検出を目標とし、それに成功した[1]。

現在は、第 2 回気球実験 SMILE-II を計画している。SMILE-II では、SMILE-I の 50 倍の感度を目標に、検出効率の向上、長時間観測に向けた電力設計や新たなシミュレーションなどを行っている。また、SMILE-II では、Crab もしくは Cygnus X-1 の観測を目標としており、検出効率の改善には天体追尾能力が必須となる。気球実験では、気球-ゴンドラ間はロープによってつるされているが気流などでトルクがかかるとロープのより戻しにより振動してしまうことを考慮する必要もある。このため、ゴンドラの姿勢(方向)制御が必要となる。

今回、我々は大気球に吊り下げられたゴンドラの方向制御を、より戻しモータと呼ばれる気球-ゴンドラ間に存在するモータのみで行う場合を想定し、姿勢制御システム Attitude Control System (ACS) を設計した。その他の方法として、さらにリアクションホイールを用いて慣性モーメントの制御を行う方式もあるが、システムが若干複雑になることやゴンドラ内部の制限などから、今回はより戻しモータのみでの制御方式の設計を行った。

また、その確認として約 40cm 立方のミニゴンドラ (Fig. 1) を作成した。ミニゴンドラは、センサとして GPS コンパスを搭載し方位角を取得する。さらにフィードバック制御をかけモータへの出力を決定するため、CPU も搭載した。このミニゴンドラを用いて、ロープによる振動の確認、制御システムによる目標方向への追従能力の確認を行った (Fig. 2)。また、制御則として PID 制御を行っているが、この制御パラメータ KP, KD, KI の値によりシステムの応答が変化する。今回、その最適値を求めるため数値計算ソフトとして Scilab を用いてゴンドラのシステムの力学モデルを作製し、シミュレーションを行った。

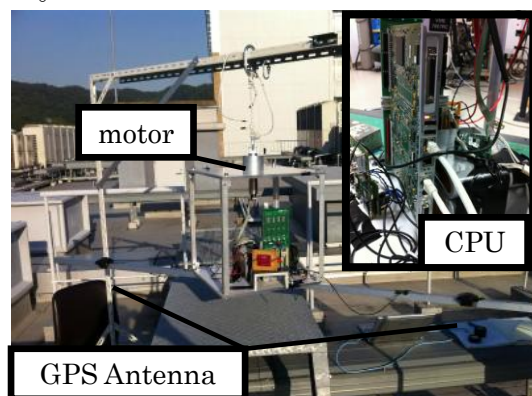


Fig.1 mini gondola

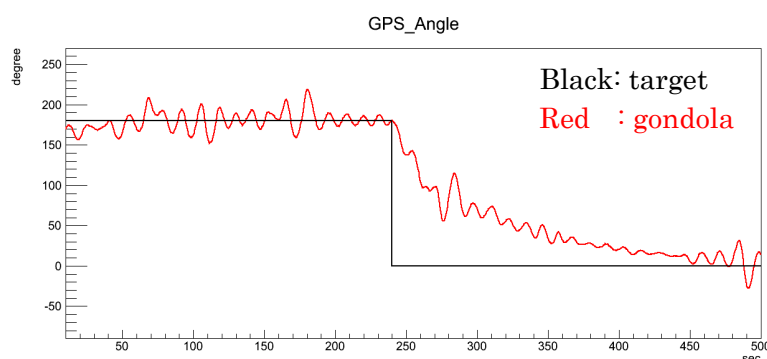


Fig.2 Angle of gondola

References

- [1] Atushi Takada, Ph. D. Thesis, Kyoto Univ. (2007).

インフレーション宇宙における非ガウス性

基礎物理学研究所 宇宙グループ 三竿和也

Abstract We first review the generation of curvature perturbations from inflation, and the formalism to compute non-Gaussianity in the curvature perturbation. Finally we discuss a possible new model which may produce a large non-Gaussianity during inflation.

© 2012 Department of Physics, Kyoto University

現在は、宇宙誕生から約 138 億年である。宇宙誕生後に生成された原子核が電子と結合し始め、光子の自由飛行が可能となった“宇宙の晴れ上がり”は、宇宙誕生から 38 万年後である。この時の光子は宇宙背景放射 (CMB) として、現在も“われら”のもとに届いている。

1989 年に打ち上げられた探査機 COBE による観測で、一様等方的に飛来するこの光子はプランク分布であり、宇宙膨張の結果、温度にして約 2.73K であった。またその後の WMAP 衛星による観測で、その極めて小さい(10^{-5})温度揺らぎのスペクトルが精密に観測された。

この宇宙の一様等方性を説明し、かつ WMAP によって観測されたスペクトルを説明する理論として、インフレーション理論が有力である。これは真空エネルギーを担うスカラー場を導入することで、宇宙初期に宇宙を指数関数的に膨張させるものである。これによりプランク時代の情報はかき消され一様等方な宇宙が出来上がる。またプランク時代の量子揺らぎが、宇宙膨張により古典化され大規模構造の元となる。

しかし、そのインフレーションのモデルの数は多く、その詳細も分からない。そこで、温度揺らぎの Non Gaussianity によってモデル区別を行うことが考えられている。通常、インフレーションのスカラー場の揺らぎは Gaussian であるが、場の理論的あるいは重力理論の非線形性により観測可能な大きさの Non Gaussianity を持つ場合がある。現在、WMAP より高性能の PLANCK が探索中であり、Non Gaussianity を観測できれば、今まで山のように提案されたインフレーションモデルに強い制限かけることができる。

本論文では、まずインフレーションからの揺らぎの理論の線形理論のレビューからはじめて、揺らぎの非線形性を解析する理論をレビューする。次に、これらの定式化の下に、non Gaussianity を生むモデルについて考察する。最後に、F. Arroja らによって提唱されたモデルを参考に、新たに、ある場がインフレーション中に量子トンネル現象を起こすことを考え、その場との相互作用によって Non Gaussianity を生むモデルを考える。その結果、この新たなモデルが観測可能な Non Gaussianity を生成する可能性を示した。

References

- [1] Xingang Chen, [arXiv:1002.1416v3](https://arxiv.org/abs/1002.1416v3) [astro-ph.CO] (2010)
- [2] Frederico Arroja, Antonio Enea Romano, Misao Sasaki, [arXiv:1106.5384v2](https://arxiv.org/abs/1106.5384v2) [astro-ph.CO] (2011)
- [3] S. Weinberg, Phys. Rev. D 77, 123541 (2008) [arXiv:0804.4291 [hep-th]].

軽い中性子過剰核の励起状態における 多核子相関についての研究

原子核理論研究室 牟田啓太郎

Abstract Cluster-shell competition of carbon isotopes and 3t states of ${}^9\text{Li}$ are studied. In carbon isotopes, cluster structure is shown to appear as low-lying excited states. In ${}^9\text{Li}$, we investigate whether three triton states appear or not in excited states.

© 2012 Department of Physics, Kyoto University

本研究は2つの主題から成る。1つは炭素同位体におけるクラスター・シェル競合であり、もう1つは ${}^9\text{Li}$ における3t状態である。

①炭素同位体におけるクラスター・シェル競合

安定な炭素である ${}^{12}\text{C}$ は、3 α クラスターの成分と模型的な成分の両方を持つことが知られている[1]。これらの競合を取り扱うために、これまで、波動関数内に α の崩れの度合いを表すパラメータを導入し、クラスター・シェル競合がモデル化されてきた[2, 3]。また、中性子数の増加と共に、炭素同位体の基底状態ではシェル模型の成分が増加することも示されてきた[4]。これは ${}^{16}\text{C}$ の実験的に観測された小さな変形にも対応している。しかし、そのような場合でも、励起状態にはクラスターを主成分とする状態が現れ、中性子過剰核における幾何学的クラスター状態の発現[4, 5]が示唆されている。本研究では ${}^{16}\text{C}$ より先の炭素同位体を念頭に、基底状態におけるクラスター・シェル競合と、励起状態におけるクラスター構造の出現を分析する。また、クラスター状態を同定するための物理量としてE0遷移確率に焦点をあてる。

② ${}^9\text{Li}$ における3t状態

${}^{12}\text{C}$ の励起状態には3 α クラスター構造を持った状態が出現することが知られている。そこでは α 粒子の持っている“ボソン”としての性質により、 α 粒子が凝縮した状態が存在し得ると考えられており、“THSR波動関数”[6]によって良く記述される。一方、クラスター構造の候補として、 α クラスターより陽子の1つすくないt(トライトン)がある。tは“フェルミオン”としての性質を持つ。例えば、 ${}^{11}\text{B}$ の $\alpha + \alpha + t$ 構造が3番目の3/2状態で現れることが理論と実験の両面で示唆されている[7,8,9]。また、 ${}^{10}\text{Be}$ の $\alpha + t + t$ 構造を含む状態がしきい値近傍に現れることも理論的に示唆されている[9]。本研究では、 α 粒子を1つも含まない、3つのtクラスターからなる状態が中性子過剰核である ${}^9\text{Li}$ の励起状態に出現するかどうかを分析する。また、フェルミオンであるtが3つ集まった状態がボソンである α が3つ集まった ${}^{12}\text{C}$ のsecond 0^+ 状態(Hoyle状態)とどう異なっているかを明らかにする。

References

- [1] N. Itagaki, S. Aoyama, K. Ikeda, and S. Okabe, Phys. Rev. C **70** 054307 1-6 (2004).
- [2] N. Itagaki, H. Masui, M. Ito, and S. Aoyama, Phys. Rev. C **71** 064307 1-6 (2005).
- [3] N. Itagaki, M. Ploszajczak, and J. Cseh, Phys. Rev. C **83** 014302 1-12 (2011).
- [4] H. Masui and N. Itagaki, Phys. Rev. C **75** 054309 1-5 (2007).
- [5] N. Itagaki, T. Otsuka, K. Ikeda, and S. Okabe, Phys. Rev. Lett. **92** 142501 1-4 (2004).
- [6] A. Tohsaki et al., Phys. Rev. Lett. **87** 192501 (2001)
- [7] T. Kawabata et al., Phys. Lett. B **646**, 6 (2007).
- [8] Y. Kanada-En'yo, et al., Prog. Theor. Phys. Suppl. **142** (2001) 205.
- [9] Y. Kanada-En'yo, et al., C. R. Physique 4 (2003) 497.
- [10] N. Itagaki, M. Ito, M. Milin, T. Hashimoto, H. Ishiyama, and H. Miyatake, Phys. Rev. C **77**, 067301 (2008).

重力理論の Higher-Spin への拡張と双対性

素粒子論研究室 村瀬健太

Abstract Higher spin gauge theory is a generalization of gravity theory (spin 2) and is expected to be a limit of string theory. In this paper, I first review the recent developments of higher spin gauge theory, and then discuss its duality and symmetry breaking.

© 2012 Department of Physics, Kyoto University

一般相対性理論の持つ特異点等の問題を解決するために、重力理論を量子化・拡張する試みは古くからなされてきた。重力を量子化する理論の有力な候補として弦理論がある。弦理論の1つの性質に、様々なスピンの場を無限個含むというものがある。弦理論はその一部として重力だけでなく他の3つの力を記述でき、統一理論としての魅力を持つ。特異点等の問題を解決するには弦が大きさを持つこと、そしてそれに由来する様々なスピンの場を持つことが本質的に必要になると考えられるが、弦理論の場の理論的記述や非摂動的定式化は完成していないこともあり、具体的な解析は難しい。そこで何らかの工夫・道具が必要になる。(量子)重力理論を扱う1つの強力な道具に AdS/CFT 対応[1]に代表されるゲージ/重力対応という双対性がある。

一方で重力理論の拡張として”Higher-Spin”ゲージ理論がある。この理論は弦理論同様に重力(スピン 2)を含め、様々なスピンの場を含むという性質を持つので、重力理論の単なる拡張ではなく、弦理論の極限でもあると考えられる。さらに Higher-Spin ゲージ理論は場の理論であるため解析が比較的容易であり、弦理論の非摂動的な側面や定式化に何らかのヒントを与えると期待される。また Higher-Spin ゲージ理論は”O(N) critical magnets”のようなより現実世界に関わりの深い系の重力対応[2]を与えるなどそれ自体も十分魅力的である。以上の理由により、Higher-Spin ゲージ理論を詳しく調べることに興味を持たれる。

本論文では、まず Vasiliev 流の Higher-Spin ゲージ理論[3]について説明した後、4次元の場合の近年の発展について紹介する。具体的には AdS_4/CFT_3 の双対性に注目して、 AdS_4 上の Higher-Spin ゲージ理論と O(N) vector 模型との双対性の証拠として、相関関数の一致[4]や3次元 CFT に Higher-Spin 対称性がもたらす拘束についての一般論[5]を与える。これらの証拠はいずれも、厳密な Higher-Spin 対称性を持つ CFT が自由場で書けそうなことを支持している。ここでの双対性は超対称性を必要とせず、また自由場との双対性は他に例がないため、興味深いものである。

しかしながら本当に自由場しか許されないとなると、双対性の威力は感じられても、弦理論の本質は見えそうにない。Vasiliev 流の Higher-Spin ゲージ理論には理論として関数1つ分の任意性があるので、そのすべてが自由場であるとは考えにくい。無限次元の対称性があっても豊かな理論が残る2次元理論のように、自由場ではないようなものが見つけられると面白い。また弦理論においては Higher-Spin の場は質量を持つため厳密な Higher-Spin 対称性は実現していないので、どこかで対称性が破れる状態を考えねばならない。そこで以上の事実と最近の発展を踏まえて、自由場以外で Higher-Spin 対称性を持った理論の可能性についてと Higher-Spin 対称性がわずかに破れる場合について議論する。

References

- [1] J. M. Maldacena, “The Large N Limit of Superconformal Field Theories and Supergravity”, *Adv.Theor.Math.Phys.*2:231-252.1998.
- [2] I. R. Klebanov, A. M. Polyakov, “AdS Dual of the Critical O(N) Vector Model”, *Phys.Lett. B*550 (2002) 213-219.
- [3] M. Vasiliev, “Higher Spin Gauge Theories: Star-Product and AdS Space”, arXiv:hep-th/9910096.
- [4] S. Giombi, X. Yin, “Higher Spin Gauge Theory and Holography: The Three-Point Functions”, arXiv:09123462 [hep-th]. ”Higher Spins in AdS and Twistorial Holography”, *JHEP* 1104:086.2011.
- [5] J. Maldacena, A. Zhiboedov, “Constraining conformal field theories with a higher spin symmetry”, arXiv:1112.1016 [hep-th].

T2K 実験のための荷電 π 中間子反応断面積の研究

高エネルギー物理学研究室 山内 隆寛

Abstract Precise measurement of the interaction of charged pion in a nuclear medium is very important for reducing systematic uncertainty in the T2K neutrino oscillation measurement. Therefore, we performed a new experiment to measure cross sections of interactions between charged pion and nucleus. © 2012 Department of Physics, Kyoto University

長基線ニュートリノ振動実験 T2K (Tokai-to-Kamioka) [1] は、茨城県東海村にある大強度陽子加速器施設 J-PARC の陽子ビームを使って生成した人工ニュートリノビームを、295km 離れた岐阜県飛騨市にある 50kt の水チェレンコフ検出器、スーパーカミオカンデに向けて飛ばし、その飛行中に起こるニュートリノ振動を観測する実験である。2009 年 4 月に開始したこの実験は、未発見である電子ニュートリノ出現モードの発見による θ_{13} の測定と、ミューオンニュートリノ消失モードによる θ_{23} と Δm_{23}^2 の精密測定を主な目的としている。2011 年 3 月までのデータ解析で、電子ニュートリノの出現の兆候が観測され、現在はその証拠を得るために統計量を増加させ、系統誤差の削減を目指している。

T2K 実験において、ニュートリノ振動が起きる確率はニュートリノのエネルギーに依存するため、そのエネルギーを正しく測定する必要がある。T2K 実験のビームエネルギーで、ニュートリノの主な反応は CCQE (Charged Current Quasi Elastic) 反応 $\nu + n \rightarrow \mu + p$ であり、ニュートリノのエネルギーはこの反応の終状態 μ の運動量を測定することで求められる。しかし、これと似た反応で CC π 反応 $\nu + n \rightarrow \mu + p + \pi$ があり、この反応において終状態の π 中間子が原子核に吸収されると、CCQE 反応と区別がつかなくなり、ニュートリノのエネルギーを間違えて計算してしまうことになる。そのため、 π 中間子が検出器の原子核に吸収される確率をあらかじめ知っておく必要があるが、過去のデータには 20%~30% の大きな不定性があり、現在 T2K 実験における振動パラメータ測定の最も大きな系統誤差の一つとなっている。

そこで、本実験では Fig.1 に示すような π 中間子と原子核の相互作用の反応断面積測定に特化した検出器：PIAvO を開発し、カナダ TRIUMF 国立研究所の荷電 π 中間子ビームを用いて π 中間子と原子核の反応断面積の精密測定を行った。 π 中間子の散乱、吸収、荷電交換反応を区別するために、検出器は荷電粒子の飛跡のトラッキングが可能な 1024 本のシンチレーションファイバーと、反応の二次粒子として生成される γ 線を検出するための NaI シンチレータ検出器 16 本から構成されている。今回の測定では、 π^+ ビームの運動量は 150MeV/c~375MeV/c の範囲を 25MeV/c 間隔で変えて測定を行った。最終的な目標とする反応断面積の不定性は 10% 以下であり、これにより T2K 実験の系統誤差を抑制することが期待される。

本論文では本検出器の設計・開発段階から、ビームテストでのデータ取得、及び NaI シンチレータ検出器部分のキャリブレーションと物理解析の状況を中心に報告する。NaI シンチレータ検出器のキャリブレーションでは、結晶を取り付けた光電子増倍管 16 本のゲインの測定や出力電荷の直線性、エネルギー分布の広がり进行评估し、各検出器の個性を踏まえた上で物理解析を行った。物理解析では、目的とする反応の一つである荷電交換反応の反応断面積と、 π^0 崩壊 γ 線の角度分布について主に述べる。

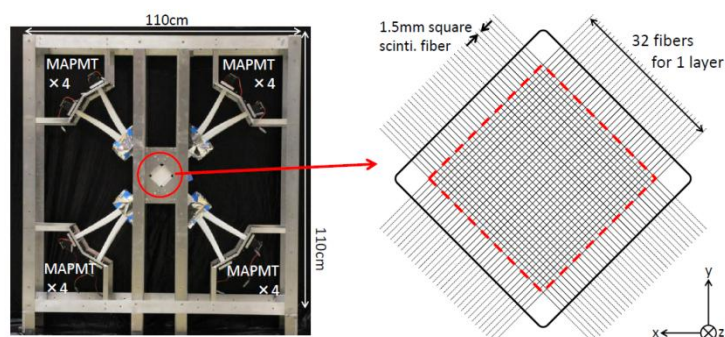


Fig. 1. PIAVO detector

References

[1] K. Abe et al., "The T2K Experiment NIMA" Volume 659, Issue 1, 11 December 2011, Pages 106–135