## 平成 24 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25年2月4日、5日)

## 物理学第二分野

### 修士論文発表会

日時2013年2月4日(月)9時00分~<br/>2月5日(火)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4日(月)

1. 次世代チェレンコフガンマ線望遠鏡計画CTA におけるトリガー回路の開発

粟根 悠介(9:00)・・・1

2. K 中間子原子核探索実験のためのビーム調整及び ビーム由来バックグラウンドノイズ遮蔽体の設計

石黒 洋輔(9:20)・・・・2

3. 揺らぎを取り入れた強結合格子QCDに基づくQCD相図

市原 輝一(9:40)・・・・3

4. 超対称ヒッグスインフレーションモデルにおける soft SUSY breaking スケール

今井 匠(10:00)・・・・4

5. J-PARC における K 中間子原子核探索実験に用いる飛程検出器の性能評価

江川 弘行(10:20)・・・・5

アルファ非弾性散乱を用いた低エネルギー領域における
単極子遷移強度の系統的研究

角谷 朋亮(10:40) \*\*\*\*6

 マルチ・ストレンジネス多体系の分光実験に用いる S-2Sスペクトロメータの設計

金築 俊輔(11:00)・・・7

8. 可積分性に基づくAdS/CFT対応の検証 **亀山 尚史(11:20)** ···· 8 9. 変分法に基づいた有限質量カイラル非一様構造の研究 柄沢 真太朗(11:40)・・・・9 10. 次世代重力波観測のための初代星起源連星の進化計算 衣川 智弥(13:00)・・・10 11. テルル化カドミウム(CdTe)を用いた半導体放射線検出器の大型化 及び分解能向上の研究 合田 幸平(13:20) ••• 11 12. 電子飛跡検出型コンプトンカメラにおける飛跡取得アルゴリズムの改良 古村 翔太郎(13:40)・・・12 13. 次世代ガンマ線天文台 CTA のためのアナログメモリ DRS4 を用いた 高速波形サンプリング回路の改良 今野 裕介(14:00)・・・13 14. カイラル有効模型を用いた核媒質中n'中間子質量とn'N相互作用 酒井 俊太郎(14:20)・・・14 15. Bigravity における inflation 中の非等方性について 榊原 由貴(14:40)・・・15 16. ヒッグスボソンの観測データから分かる新しい物理の兆候 坂本 陽平(15:00)・・・16 17. AdS/CFT対応に基づいたSchwinger 効果についての解析 佐藤 芳紀(15:20)・・・17 18. de Sitter 時空上のpropagatorの解析

杉下 宗太郎(15:40)・・・18

19. K<sup>o</sup>TO 実験のためのNeutron Collar Counter の製作と 実機を用いた性能評価 関 繁人(16:00)・・・19 20. ATLAS 実験における新しいミューオントリガー回路の開発と実装 田代 拓也(16:20)・・・20 21.T2K前置検出器のアップグレードに向けたシンチレーション ファイバートラッカープロトタイプの開発 長崎 時大(16:40)・・・21 2月5日(火) 22. 高強度短パルスレーザーと金属ワイヤーの相互作用により 発生する電子線の放射特性 中島 宏章(9:00)・・・22 23. 永久磁石を用いた小型 ECR 水素イオン源の特性評価 那須 裕司(9:20)・・・23 24. M5 ブレーンと 5 次元超対称 Yang-Mills 理論 野坂 朋生(9:40)・・・24 25. 次期 X 線天文衛星 ASTRO-H 搭載 軟X線撮像検出器(SXI)の性能評価の研究 信川 久実子(10:00)・・・25 26. ヒッグスの性質と新物理の方向性 羽柴 規敏(10:20)・・・26 27. LEPS2におけるハドロン光生成反応実験のための Drift Chamberの開発 橋本 敏和(10:40)・・・27

28.標準模型及びその超対称な拡張についての研究 濱田 雄太(11:00) ••• 28 29. 衛星の撮像中における星像の中心の位置測定 藤田 翔(11:20) ••• 29 30. 異方性フェライトを用いたクライストロンビーム集束磁石 不破 康裕(11:40)・・・30 31. XENON100の最新結果を含む暗黒物質直接検出実験の 最近の結果とその理論的考察 三井 浩嗣(13:00)・・・31 32. LEPS2 TPC 用のフロントエンド回路の開発 水谷 圭吾(13:20)・・・32 33. 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(13:40)・・・33 34. N = Z 核をターゲットとした  $E_{\alpha}$ = 400 MeV での α 非弾性散乱の系統的測定 横田 直樹(14:00)・・・34 35. μ-PIC を用いた Active Target 開発および動作特性の研究 渡邊 英知(14:20)・・・35

## 次世代チェレンコフガンマ線望遠鏡計画 CTA における トリガー回路の開発

宇宙線研究室 粟根悠介

**Abstract** CTA is the project of the next-generation imaging atmospheric Cherenkov telescope array. We developed the behavior of various trigger circuits for the CTA project. We have tested the circuits combined with the readout board. We also simulated the performance of single telescope. © 2013 Department of Physics, Kyoto University

CTA 計画とは数十 GeV~数百 TeV までのエネルギーを持ったガンマ線を観測するための次世代大気チ ェレンコフ望遠鏡計画である。大気チェレンコフ望遠鏡とはガンマ線が大気に入射した時に発生する空 気シャワーによるチェレンコフ光を間接的に観測することでガンマ線の到来方向、エネルギーを決定す る地上望遠鏡である。CTA 計画では南北半球 2 つのサイトにそれぞれ口径 23 メートルの大口径望遠鏡を 4 台、12 メートルの中口径望遠鏡を 20-30 台、7m の小口径望遠鏡を 20-30 台設置することによって幅広 いエネルギー領域で全天を観測する事が可能になる。H. E. S. S. 、MAGIC などの従来の大気チェレンコフ 望遠鏡感度の 10 倍を目標にして望遠鏡の開発が進んでいる。この計画が完成することによって銀河系 外の宇宙線起源、ガンマ線バースト、TeV ガンマ線による未同定天体の発見など超高エネルギーガンマ 線の分野での研究が大きく進むと期待されている。CTA 日本グループはこの計画の中で様々な分野で貢 献しているが、我々の研究室では大口径望遠鏡のカメラ検出器となる PMT からの電気信号読み出しを決 定するトリガー回路部分と信号読み出し回路部分を開発している。

トリガー回路は様々な方式のトリガー回路を並行して開発しており、ドイツグループと共同開発した デジタルトリガー回路、スペイングループと共同開発したアナログトリガー回路がある。読み出し回路 とトリガー回路が通信するためのバックプレーン回路を独自に開発し、それぞれの方式のトリガー回路 と組み合わせて動作するか検証した。読み出し回路は PMT 7本一組のクラスタにつき一枚となっており、 望遠鏡全体の読み出しトリガーを生成するには隣り合った PMT 信号の情報が必要であるため、クラスタ をまたいで通信する必要がある。これらの通信の実証実験も3つのクラスタを用いて行った。

さらに読み出し、トリガー回路のパラメータから望遠鏡シミュレーションに組み込み、回路の性能を 検証した。基本的な動作としてデジタル方式のパラメータを用いて、一つの望遠鏡でのガンマ線のエネ ルギー閾値が 3photo electron 以上の信号が 3 ピクセル以上隣り合った場合、30GeV 程度になることな どを確かめた。本修士論文では回路の開発、試験結果と望遠鏡のシミュレーション結果をまとめる。



Fig. 1. Digital trigger decision circuits for the CTA project



Fig. 2. Differential trigger rate resulting from gamma sample

### K 中間子原子核探索実験のためのビーム調整及び ビーム由来バックグラウンドノイズ遮蔽体の設計

原子核・ハドロン研究室 石黒 洋輔

**Abstract** We are planning to search for the K<sup>-</sup>pp bound state at J-PARC. In this experiment, the time-of-flight of scattered neutrons will be measured by a neutron counter. For this purpose, a shield to prevent background noise in the neutron counter is required. I report the results of beam adjustment and the design of this shield.

© 2013 Department of Physics, Kyoto University

K 中間子原子核とは、原子核中に反 K 中間子が束縛された状態を言う。赤石・山崎によれば、この状態は 100 MeV 以上もの束縛エネルギーを持ち得る深い束縛状態と予想されている[1]。これを受けて、 FINUDA[2]や DISTO[3]といった実験がこれまでに行われてきた。これらの実験では、最も単純な K 中間子原子核である K<sup>\*</sup>pp 状態とされる信号は報告されたものの、各実験で得られた束縛エネルギーや 崩壊幅の値は一致していない。また、反応の終状態が K<sup>\*</sup>pp 状態であると断定できないデータもあり、 上述のような特徴的な性質を予想されながらも、K 中間子原子核はそもそも存在するのかどうかにさえ 明確な結論がでていない。このような状況で、先行実験にあったような不定性を排除し、K<sup>\*</sup>pp 状態に関 する確定的な情報を得るための実験として、我々は J-PARC K1.8BR beam line において、E15 実験を 計画している。

E15 実験では、反 K 中間子原子核ビームと液体 <sup>3</sup>He 標的を用いて <sup>3</sup>He(in-flight K<sup>\*</sup>, n)反応を起こし、 前方に設置した中性子検出器(Neutron Counter : NC)によって散乱中性子の飛行時間を測定する。この 飛行時間から中性子の運動量を計算することで、missing-mass 法により K<sup>\*</sup>pp 状態の束縛エネルギーを 求めることができる。しかし、この測定だけでは反応の終状態が K<sup>\*</sup>pp 状態であったかどうかを決定で きない。そこで、本実験では K<sup>\*</sup>pp→ $\Lambda$ +p の崩壊モードで生成された崩壊粒子の運動量を標的周辺に設 置した検出器群(Cylindrical Detector System : CDS)で全て捉え、K<sup>\*</sup>pp の質量を不変質量からも求める。 これによって、終状態を特定して反応を同定することができる。

このとき、標的と反応せずに通過した beam 中の荷電粒子が NC に入射すること を防ぐため、標的下流には sweeping magnet を設置する。ところが、これらの荷 電粒子が実験エリアの壁面である beam dump に入射する際に生じる二次粒子は、 やはり NC に入射し、バックグラウンドノ イズとなってしまう。よって、これらのバ ックグラウンドを低減するため、荷電粒子 の beam dump への入射位置と NC との間 に、遮蔽体を設置した(Fig.1)。これによっ て、実際にノイズの少ない TOF データを得 ることが可能となった。

本論文ではこの遮蔽体の設計と、それに 先立って行ったビーム調整実験の結果につ いて述べる。



Fig.1 A schematic view of the experimental setup at J-PARC K1.8BR beam line.

#### References

- [1] Y. Akaishi and T. Yamazaki, Phys. Rev. C65 (2002), 044005.
- [2] M. Agnello et al., [FINUDA Collaboration], Phys. Rev. Lett. 94 (2005) 212303.
- [3] ]T.Yamazaki et al., Phys.ReV.Lett.104(2010) 132502.

## 揺らぎを取り入れた強結合格子 QCD に基づく QCD 相図

原子核理論研究室 市原輝一

Abstract We develop a strong coupling lattice QCD framework including the fluctuation effects of auxiliary fields to study the QCD phase diagram. Compared with constant auxiliary field (mean field) results, fluctuation is found to reduce the critical temperature at zero baryon density, and to modify the phase boundary at finite density.

© 2013 Department of Physics, Kyoto University

量子色力学(QCD)の相図を解明する事は原子核・宇宙物理の分野において重要な課題である。低温・ 高密度相は中性子星の物理と関係しており、中性子星内部でクォーク物質が実現する可能性などが議論 されている。一方、高温・低密度相は宇宙誕生初期において実現していたと考えられている。このよう な QCD 相図を理解する上で重要な相転移としてカイラル相転移がある。QCD の第一原理計算である格子 QCD はこのような非摂動的現象を取り扱う強力な手法であるが、有限化学ポテンシャル領域では符号問 題が発生し、 $\mu/T > 1$ の領域では困難がある。そこで有限化学ポテンシャル領域における研究として、 QCD のもつ対称性を尊重した有効模型や、格子 QCD の作用の結合定数が大きいとして、ゲージ場の運動 項を展開する手法である強結合格子 QCD (SC-LQCD)等の近似的手法が用いられている。今回は強結合格 子 QCD を用いて QCD 相図を研究する。

強結合格子 QCD は格子 QCD の作用から出発しており、カイラル対称性の自発的破れを記述する事に成 功している[1]。強結合格子 QCD を用い QCD 相図も得られているが、これらの研究のほとんどが平均場 近似でしか行われていない[2,3]。SC-LQCD に基づく QCD 相図研究では、強結合極限(結合定数∞)[2] だけでなく有限結合効果を取り入れる事が重要である[3]。漸近自由性から結合定数が大きい程格子間 隔が荒いので、現実の QCD 相図へ近づく為には有限結合効果を取り入れる必要がある。また、平均場近 似を越えて汎関数積分を評価する事は理論的に重要であり、強結合極限における研究が行われている [4]。しかし、現在までこれら二つの効果を取り入れた研究は行われておらず、平均場近似を越えた枠 組みで、有限結合効果を考慮した QCD 相図研究が必要である。その為には、有限結合効果の導入が容易 ではない先行研究[4]の方法に代わる、有限結合効果を取り入れやすい枠組みの開発が必要である。

そこで今回、有限結合効果への拡張が容易な手法を開発し、平均場近似を越えた強結合格子 QCD に基づいて、強結合極限における QCD 相図について解析した。従来の研究[2,3]では、導入された補助場に対して平均場近似を施している。この補助場に対し、モンテカルロ計算によって数値的に積分する事で平均場近似を越え、分配関数を評価する。これによって補助場の揺らぎが考慮される。この定式化に基づいてクォーク数密度・カイラル感受率の振る舞いを調べ、これらの物理量から QCD 相図が求められた。得られた QCD 相図から、 $\mu = 0$ における臨界温度が平均場近似の時に比べ下がる事が分かった。また、高密度側で相境界が動く事も分かった。QCD 相図の格子サイズ依存性を議論すると、時間方向の格子サイズが大きい程、高密度領域で対称性が破れた相が広がる事が示された。

#### References

[1] 例えば、N. Kawamoto and J. Smit, Nucl. Phys. B192, 100 (1981). P. H. Damgaard, N. Kawamoto and K. Shigemoto, Nucl. Phys. B 264, 1 (1986).

[2] Y. Nishida, Phys. Rev. D69, 094501 (2004).

[3] K. Miura, T. Z. Nakano, A. Ohnishi, and N. Kawamoto, Phys. Rev. D80,074034 (2009). T. Z. Nakano, K. Miura, and A. Ohnishi, Prog.Theor.Phys. 123, 825 (2010).

[4] W. Unger and Philippe de Forcrand, J.Phys. G38, 124190 (2011).

### 超対称ヒッグスインフレーションモデルにおける soft SUSY breaking スケール

基礎物理学研究所 素粒子論グループ 今井匠

**Abstract** We consider the possibility that MSSM Higgses play the roll of inflaton. For this purpose, we start with simple review of the inflationary scenarios and discuss the motivations for MSSM Higgs inflation models. We investigate the needed conditions for successful scenario and show the constraint on soft SUSY breaking scales.

© 2013 Department of Physics, Kyoto University

2012年の素粒子物理学における最も大きな成果の一つにヒッグス粒子の発見が挙げられる。ヒッグス 粒子は標準模型において最後まで未発見粒子であった粒子であり、同時に初めて発見された基本的なス カラー粒子である。ヒッグス粒子が標準模型で想定される範囲内に見つかり、これまでの実験からも決 定的なずれは見つかっておらず、このLHC実験によって以前にも増して標準模型の信頼性が得られた と言える。一方で宇宙の観測実験においても目覚ましい発展がある。インフレーション時に生成する密 度ゆらぎやダークマター、ダークエネルギーの存在の帰結として、CMBの非等方性や宇宙の大規模構 造が形成されるという全体像の下、観測精度をさらに高める方向に実験が進められている。特に CMB の観測に着目すれば、インフラトンの振る舞いに関するパラメータに強い制限が与えられるようになっ てきている。

このような背景を考えると、インフレーションの機構を素粒子理論の枠組みで捉えることが、今後重 要になってくるのではないかと考えられる。これには様々なアプローチが存在する。本修士論文では、 標準模型に超対称化の拡張を施すことで、観測結果と無矛盾なインフレーションを実現するというアプ ローチに従い、まず始めにインフレーションの機構の基礎事項を含めレビューを行う。超対称性はヒッ グス場の質量項を輻射補正に対して安定化させることから、標準模型の階層性を説明できるのではない かと考えられてきた。これは同じスカラー場であるインフラトンに対しても同じで、インフラトンのポ テンシャルも超対称性の導入で輻射補正に対し安定化させることができる。

超対称化された標準模型 (MSSM) においては、2つのヒッグス二重項 H<sub>u</sub>、H<sub>d</sub> が存在する。さらに これらのスカラー場の空間において、ポテンシャルの4次の相互作用項が消える方向 (D フラット方向) が必然的に存在する。この点は標準模型のヒッグスポテンシャルと大きく異なる点である。MSSM にお ける D フラット方向のスカラーポテンシャルの形は、2次の質量項と高次の繰り込み不可能項によっ て決定され、これらのパラメータの調節により望ましいポテンシャル形状がが実現され得る。本修士論 文ではさらに最新の観測結果と照らし合わせ、インフレーションが現実と矛盾なく生じる状況を考察し た。特に SUSY の soft breaking scale は D フラット方向における2次の質量項と密接に関係しており、 MSSM ヒッグスインフレーションの枠内で、観測結果によって制限を受けることが分かった。

#### References

- G. Hinshaw, D. Larson, E. Komatsu, D. N. Spergel, C. L. Bennett, J. Dunkley, M. R. Nolta and M. Halpern *et al.*, arXiv:1212.5226 [astro-ph.CO].
- [2] K. T. Story, C. L. Reichardt, Z. Hou, R. Keisler, K. A. Aird, B. A. Benson, L. E. Bleem and J. E. Carlstrom *et al.*, arXiv:1210.7231 [astro-ph.CO].
- [3] A. Chatterjee and A. Mazumdar, JCAP 1109, 009 (2011) [arXiv:1103.5758 [hep-ph]].
- [4] F. L. Bezrukov and M. Shaposhnikov, Phys. Lett. B 659, 703 (2008) [arXiv:0710.3755 [hep-th]].

## J-PARC における K 中間子原子核探索実験 に用いる飛程検出器の性能評価

原子核ハドロン物理学研究室 江川弘行

**Abstract** In J-PARC E27 experiment, a *Kpp* bound state is searched in the  $d(\pi^+, K^+)$  reaction at 1.7 GeV/*c* at the K1.8 beam line. In order to improve the signal-to-noise ratio, a range counter system is constructed for a coincidence measurement of protons. I report the performance of the range counter system obtained in a pilot experiment. © 2013 Department of Physics, Kyoto University

J-PARC E27 実験では *Kpp* 束縛状態を探索している。反 *K*中間子と核子との間に働く強い引力により、 *Kpp* 束縛状態の存在が理論的に予想されているが、まだ実験的にその存在は確かになっていない。過去 に行われた実験としては、DA Φ NE の FINUDA 実験 [1]、及び SATURNE の DISTO 実験 [2]があげられ る。それらの実験で *Kpp* 由来と思われる信号が観測されたが、どちらも他の物理過程による解釈を捨て きれておらず、これらの実験とは異なる反応を用いた探索実験を引き続き行うことが必要である。

E27 実験では 1.7 GeV/c の  $\pi^+$ ビームを用いて、 $d(\pi^+, K^+)$ 反応により *Kpp* を探索する。 $d(\pi^+, K^+)$ 反応で は A(1405)を中間状態として *Kpp* を形成すると期待される。赤石・山崎による計算では、生成された A(1405)と重水素中の陽子が *Kpp* に束縛する確率はおよそ 1%と見積もられている [3]。一方で、準自由 過程によるバックグラウンドが支配的であり、例えば重陽子中の一核子と反応し、ハイペロンと  $\pi$  中間 子を同時に生成する過程が包括的な測定における *Kpp* 束縛状態の観測を困難なものとする。

そのため、E27 実験では飛程検出器を用いた排他的な測定をすることで *Kpp* を探索する。飛程検出器 は、粒子のエネルギー損失・飛行時間・飛程により、粒子を識別する検出器である。*Kpp が A+p の* 2 体に崩壊した場合には高運動量の陽子が2つ放出されると考えられるが、バックグラウンドとなる準自 由過程の反応からは、高運動量の核子は1つしか放出されない。したがって、飛程検出器を重水素ター ゲットの周りに設置して、放出粒子の中から高運動量の陽子を2つ識別することでバックグラウンドを 除去した測定ができると期待される。



Fig 1. The range counter system around the target

#### References

- [1] M. Agnello et al., Phys. Rev. Lett 94, 212303 (2005).
- [2] T. Yamazaki et al., Phys. Rev. Lett 104, 132502 (2010).
- [3] T. Yamazaki and Y. Akaishi, Phys. Rev. C 76, 045201 (2007).

E27 実験で用いる飛程検出器は、5 層のプラス チックシンチレータから成り立っている。一組あ たりの大きさは長さ 100 cm、幅 20 cm、厚さがタ ーゲットに近い側からそれぞれ 1 cm、2 cm、2 cm、 5 cm、2 cm となっており、ターゲットを囲うよう に計 6 組設置した。ビーム軸に対して左右の 39° ~ 122°を覆っており、*Kpp* 崩壊からの 2 つの陽 子を検出するアクセプタンスは約 9 % と見積もら れている。

2012年6月にE27実験のパイロット実験が行われ、実際に飛程検出器を使って測定を行った。その際、*Kpp*探索の測定とは別に、飛程検出器の性能を評価するために0.5 GeV/cのπ<sup>+</sup>ビームと液体水素ターゲットを用いてπ<sup>+</sup>p弾性散乱の測定も行った。本論文では、パイロット実験で得られたデータを元に解析を行い、飛程検出器の性能評価について記述する。

### アルファ非弾性散乱を用いた低エネルギー領域における 単極子遷移強度の系統的研究

原子核ハドロン物理学研究室 角谷朋亮

**Abstract** Cross sections for low-lying states in <sup>12</sup>C, <sup>16</sup>O, <sup>24</sup>Mg, <sup>28</sup>Si, <sup>40</sup>Ca, and <sup>58</sup>Ni were measured in inelastic alpha scattering. The measured cross sections were compared with the DWBA and coupled-channel calculations. Calculated cross sections for the  $\Delta J^{\pi} = 0^+$  transitions were systematically overestimated while those for  $\Delta J^{\pi} = 2^+$  transitions agree with the experiment. © 2013 Department of Physics, Kyoto University

原子核における遷移強度は、原子核の構造を知る上で重要な情報のひとつである。アルファ非弾性散 乱の微分断面積は原子核の遷移強度と良い比例関係にあると考えられており、アルファ非弾性散乱を用 いて遷移強度を調べる実験や理論の研究は広く行われている。

例えば、D.T. Khoa らは DWBA 計算及び coupled channel 計算を行い、アルファ非弾性散乱の微分断 面積から <sup>12</sup>C の遷移強度を決定することを試みた[1]。その結果、 $2_1^+$  状態(4.44 MeV)の遷移強度は電 子散乱によって決定された遷移強度と一致する一方、Hoyle state と呼ばれる  $0_2^+$  状態(7.65 MeV)の 遷移強度は電子散乱によって決定された遷移強度よりも小さな値となった。すなわち、Hoyle state に 関しては、電子散乱で決定された遷移強度を用いた DWBA 計算や coupled channel 計算はアルファ非 弾性散乱の微分断面積を過大評価するという結果を得た。彼らは、Hoyle state は崩壊しやすい状態で あり、3α 崩壊など他の channel との結合が強いという Hoyle state の特異性を考慮することで、アル ファ非弾性散乱の微分断面積が減少し、電子散乱の遷移強度と一致すると主張した。そこで、今回は、 単極子遷移強度の過小評価が Hoyle state の特異性によるものであるかどうかを明らかにするために、 他の原子核における単極子遷移強度を系統的に調べることにした。

実験は、大阪大学核物理研究センター (RCNP)の高分解能スペクトロメータ Grand Raiden を用いて、 <sup>12</sup>C に加えて <sup>16</sup>0、<sup>24</sup>Mg、<sup>28</sup>Si、<sup>40</sup>Ca、<sup>58</sup>Ni のアルファ非弾性散乱による各状態の微分断面積を系統的に測 定し、その単極子遷移強度を決定した。

各遷移強度は、アルファ非弾性散乱の微分断面積と、Single folding model に基づく DWBA 計算と 比較することにより決定し、電子散乱により決定された遷移強度と比較した。その結果、2<sup>+</sup>の遷移強度 は電子散乱の遷移強度を比較的良く再現するが、0<sup>+</sup>の遷移強度は小さな値となった(図1)。このこと から、アルファ非弾性散乱から決定した単極子遷移強度の過小評価は、<sup>12</sup>Cの Hoyle state 特有のこ とではなく、あらゆる 0<sup>+</sup> 遷移について言えることであると結論づけた。この原因として考えられる、 α-N相互作用、Coupled Channel、波動関数による不定性を評価したが、依然として単極子遷移強度は過 小評価であった。この食い違いの原因を明らかにするためには、計算に使用するモデルのさらなる研究 が必要である。



Fig. 1. Ratio of the transition strengths decided by inelastic alpha scattering to those from electron scattering for the  $\Delta J^{\pi} = 0^+$  and  $2^+$  transitions.

#### References

[1] D. T. Khoa and D. C. Cuong, Phys. Lett. B 660, 331-338 (2008).

### マルチ・ストレンジネス多体系の分光実験に用いる S-2S スペクトロメータの設計

原子核ハドロン物理学研究室 金築俊輔

**Abstract** We plan to obtain the spectroscopic information of  $\Xi$ -hypernucleus through the <sup>12</sup>C(K<sup>-</sup>,K<sup>+</sup>) reaction. For this experiment, we design a new magnetic spectrometer "S-2S", to have a momentum resolution of better than  $5 \times 10^{-4}$ (FWHM) to achieve energy resolution of 1.5 MeV and an acceptance of 60 msr. The design of this spectrometer based on performance simulations are reported. © 2013 Department of Physics, Kyoto University

我々は J-PARC において Ξハイパー核の分光実験を行う(J-PARC E05 [1])。この実験では<sup>12</sup>C(K<sup>-</sup>,K<sup>+</sup>) 反応を用いて Ξハイパー核を生成し、ミッシングマス分光により、Ξハイパー核の束縛状態を観測する。 これまでのハイパー核研究は、主に S=-1の系に関して行われ、特に Λハイパー核については、BNL、 KEK などでの(K, π)反応、(π, K)反応を用いた分光実験、Ge 検出器群を用いた γ線分光などから、スピ ン依存項を含めて ΛN 相互作用に関して詳細な理解が得られた。一方で、S=-2の系についてはほとん ど未開拓であり、特に ΞN 相互作用についてはほぼ何もわかっていない。過去の実験 [2][3]のスペクト ルと理論計算との比較によって、Ξ核ポテンシャルの深さが 14 MeV 程度ではないかと示唆されている のみである。E05 実験で Ξハイパー核の存否を初めて確定する。それを足掛かりとして、標的核を変え た実験や、ダブル Λ ハイパー核の直接生成実験などを行っていくことで、S=-2の系についての多くの 情報を得て、核力のハイペロンを含むバリオン間相互作用の統一的理解に大きな役割を果たす。

このような実験に対し、J-PARC K1.8ビームラインは必要な大強度Kビームを供給することができるとともに、その最終段にはQQDQQシステムからなるビームラインスペクトロメータを有し、3.3×10<sup>4</sup>

(FWHM) という高い運動量分解能で、標的に照射されるK<sup>-</sup>の運動量解析を行うことができる。しかし、散乱K<sup>+</sup>の運動量解析については、我々は十分な性能を持つスペクトロメータを持っていない。これは、散乱粒子の運動量が1.3 GeV/c~1.4 GeV/cと高いことが理由である。KEK、J-PARCでのハイパー核実験で活躍してきた、超伝導K中間子スペクトロメータSKSは、0.72 GeV/c付近の運動量に最適化して建設されたものであるため、(K<sup>-</sup>,K<sup>+</sup>)反応での実験には磁場が足らず、運動量分解能が不十分である。よって、1.3 GeV/c~1.4 GeV/cの運動量帯域で十分な運動量分解能を持ち、かつできる限り大きい立体角を

持つスペクトロメータを新たに建設することとした。性能の目標値としては、運動量分解能5×10<sup>-4</sup> (FWHM)、アクセプタンス60 msrとした。ミッシングマスのエネルギー分解能1.5 MeVで、1か月のデータ取得で十分な統計量をためることが可能となる。

このスペクトロメータにはQQDシステムを採用した。 右図に示すように、運動量ごとに横方向に収束がとられ ており、多重散乱の影響を減らすことに成功している。 検出器系は、電磁石系の前後に配置する位置検出器と、 その下流に設置する粒子識別カウンターからなる。この 論文では、これらの検出器の配置を検討し、要求される 性能を、シミュレーションによって評価した。最適なセ ットアップを示し、その予想性能を議論する。

#### References

- [1] T.Nagae et al., J-PARC E05 proposal.
- [2] T.Fukuda *et al.*, Phys. Rev. C 58,1306 (1998).
- [3] P.Khaustov et al., Phys. Rev. C 61,054603 (2000).



Fig. 1. Schematic view of a new spectrometer "S-2S"

### 可積分性に基づく AdS/CFT 対応の検証

素粒子論研究室 亀山尚史

**Abstract** Integrability is so powerful to study non-perturbative aspects of quantum field theories. Recently, the integrable structure has been found behind the AdS/CFT correspondence. It enables us to make non-trivial tests even in non-BPS sectors. We give a review of some works on integrability in both gauge and string theories.

© 2013 Department of Physics, Kyoto University

AdS/CFT 対応[1]は  $\mathcal{N} = 4$  超対称 Yang-Mills (SYM) 理論と AdS<sub>5</sub>×S<sup>5</sup>上の IIB 型超弦理論に等価性が あるという予想である。この予想は  $\mathcal{N} = 4$  SYM のゲージ不変な演算子のスケーリング次元と弦のエネ ルギーの対応関係の検証により支持されてきたが、non-BPS 領域における検証は困難であった。近年、 AdS/CFT 対応の背後にある可積分性、即ち無限個の保存量をもつ高い対称性に着目して non-BPS 領域に おける検証が可能になった。AdS/CFT 対応では 2 つの理論は同じ可積分構造をもつ。この可積分構造を 用いて AdS/CFT 対応を検証できる。

planar 極限において *N*=4 SYM の SO(6)サブセクターにおけるシングルトレース演算子の1-ループ異 常次元行列は可積分なスピン鎖のハミルトニアンと同一視できる[2]。異常次元は可積分模型の手法であ る Bethe ansatz 方程式を用いたスピン鎖のハミルトニアンの対角化により計算できる。*N*=4 SYM とス ピン鎖の対応はスカラー場、フェルミオン場、ゲージ場とそれらの共形微分を含むシングルトレース演 算子に拡張され、この planar 極限の 1-ループ異常次元行列は PSU(2,2|4)対称性をもつスピン鎖のハミル トニアンに対応する[3]。更に all-ループ Bethe ansatz 方程式が提唱されている[4]。

また弦理論においても同様に可積分性をもつことが期待される。AdS<sub>5</sub>×S<sup>5</sup>上の超弦のシグマ模型は可 積分である[5]。AdS<sub>5</sub>×S<sup>5</sup>の部分空間である R×S<sup>3</sup>上を回転する弦のエネルギーと  $\mathcal{N}$ =4 SYM の SU(2)サ ブセクターにおける 1-ループ Bethe string 解のエネルギーがスケーリング極限において一致する[6]。更 に R×S<sup>3</sup>上の弦のシグマ模型のエネルギーを解く積分方程式と  $\mathcal{N}$ =4 SYM の SU(2) Bethe ansatz 方程式が、 スケーリング極限において 2-ループまで一致する[7]。この 2 つの理論の Bethe ansatz 方程式を直接比較 する方法は AdS<sub>5</sub>×S<sup>5</sup>上の超弦のシグマ模型に拡張されている。

ー方、量子可積分性を仮定することにより、AdS/CFT 対応のもつ対称性に基づいて S-matrix を構成し、 [4]で提唱された all-ループ Bethe ansatz 方程式が再導出された[8]。この (PSU(2|2) × PSU(2|2))× R<sup>3</sup> 対称 性をもつスピン鎖上の励起状態の散乱を記述する S-matrix は対称性に基づいた議論により overall の位相 因子を除いて導出される。

本修士論文では、planar極限の $\mathcal{N} = 4$  SYMとAdS<sub>5</sub>×S<sup>5</sup>上の超弦のシグマ模型に現れる可積分性、更に 可積分性を用いたAdS/CFT対応の検証から得られた状況証拠についてレヴューを行う。特にスピン鎖上 の励起状態とその対称性が記述する $\mathcal{N} = 4$  SYMのシングルトレース演算子をFeynmanダイアグラムに基 づき詳しく考察する。

#### References

[1] J. M. Maldacena, Adv. Theor. Math. Phys. 2 (1998) 231.

- [2] J. A. Minahan and K. Zarembo, JHEP 03 (2003) 013.
- [3] N. Beisert and M. Staudacher, Nucl. Phys. B670 (2003) 439.
- [4] N. Beisert, V. Dippel and M. Staudacher, JHEP 07 (2004) 075.
- [5] I. Bena, J. Polchinski, and R. Roiban, Phys. Rev. D69 (2004) 046002.
- [6] N. Beisert, J. A. Minahan, M. Staudacher, and K. Zarembo, JHEP 09 (2003) 010.
- [7] V. A. Kazakov, A. Marshakov, J. A. Minahan and K. Zarembo, JHEP 05 (2004) 024.
- [8] N. Beisert, Adv. Theor. Math. Phys. 12 (2008) 945.

### 変分法に基づいた有限質量カイラル非一様構造の研究

#### 原子核理論研究室 柄沢真太朗

**Abstract** We discuss inhomogeneous phases in QCD at finite temperature and/or density. In previous studies, it has been shown that inhomogeneous phase exists in the QCD phase diagram at the chiral limit. We study the effect of finite quark mass on the inhomogeneous phases by a variational method.

QCD は強い相互作用を記述する基礎理論であり、初期宇宙におけるクォーク・グルーオンプラズマや コンパクト天体内部など、様々な物理現象に対して重要な役割を果たしている。しかし理論の漸近的自 由性のより、低エネルギー領域での摂動計算はできない。次善の策としては、QCD の持つカイラル対称 性を尊重した有効模型を用いることが挙げられる。代表的な有効模型としては NJL 模型[1]があり、こ れを用いた有限温度・密度中での QCD 相図の研究が盛んに行われてきた[2]。

最近有効模型を用いた議論において、カイラル非一様構造の研究が活発に行われている。カイラル非 一様構造とは、カイラル対称性の秩序変数が空間異方性を持つことを指す。秩序変数の非一様性は、物 性物理の分野ではスピン密度波や電荷密度波・FFLO 超伝導などで広く知られている概念であり、これを 核物理へ応用しようという試みである。実際先行研究によれば、QCD 相図の低温・中密度領域において カイラル対称性の破れた相と回復した相の間にカイラル非一様凝縮相が現れることが明らかになって いる[3][4][5]。

しかしながら、これまでの研究ではその多くはかなり理想化された状況しか扱っていない。例えば理 論には外部磁場は入っておらず、また荷電非対称性もない。さらには chiral limit での議論に限定し ている。外部磁場の存在や荷電非対称性は、コンパクト天体内部の状態を再現する為には欠かせない。 また、3 重臨界点近傍を考える上ではクォーク質量の効果を無視することはできない。

有限質量を考えることの重要性は以下のように理解できる。まず、有限クォーク質量の効果により chiral limit では OMeV であったパイオンの質量が 138MeV と増加する。さらに、3 重臨界点近傍では秩 序変数の値が小さく、パイオン質量が理論の典型的スケールと同程度である。即ち、パイオン質量を無 視することは許されない。そこで本研究では、特にクォーク質量が有限であるような場合に着目する。

有限質量効果を調べている先行研究としては[6]がある。[6]では熱力学関数において質量項を摂動的 に取り扱うことで有限質量による補正を取り入れているのだが、これだけでは不十分である。質量項の 導入によってカイラル非一様構造の関数形は変化するが、摂動論ではこの寄与を追えないのである。

熱力学関数とカイラル非一様構造の有限質量補正を同時に追いたい。しかし質量項のために解析的に 構造を決定することは難しい。そこで本研究では変分法を用いる。大まかな方針は以下の通りである:

・chiral limit で既知の構造を試行関数として与えた上で、構造決定の方程式を近似的に解く。

・得られた非一様構造を質量効果が取り入れられた熱力学関数に代入し、最小値を求める。

このような手順を辿ることで

・chiral limit で現れていた構造は質量効果によりどのように変化するのか。

・クォーク質量を考えることで QCD 相図はどのように変化するのか。

の2点を中心に調べる。

#### References

[1] Y.Nambu, G.Jona-Lasinio, Phys. Rev. 122 (1961) 345-358

[2] T.Hatsuda, T.Kunihiro, Phys. Rept. 247 (1994) 221-367

- [3] D.Nickel, Phys.Rev. D80 (2009) 074025
- [4] E.Nakano and T.Tatsumi, Phys.Rev.D71 (2004) 114006
- [5] G.Basar and G.V.Dunne Phys.Rev.D78 (2008) 065022
- [6] S.Maedan, Prog.Theor.Phys. 123 (2009) 285

### 次世代重力波観測のための初代星起源連星の進化計算

#### 天体核研究室 衣川智弥

**Abstract** The target of gravitational wave is compact binary merger (NS-NS, NS-BH, BH-BH).We research the compact binary merger rate, especially the compact binary originated in first star.

© 2013 Department of Physics, Kyoto University

現在、世界初の重力波観測を目指し、KAGRA, Advanced LIGO, Advanced VIRGO といった重力波観測プロジェクトが動き出しており、将来的には重力波による天文学の幕開けが期待されいる。これら重力波 観測のメインターゲットになっているのは連星中性子星、中性子星ブラックホール連星、連星ブラックホールといったコンパクト連星である。コンパクト連星は重力波を発してエネルギーを失いながら近づきあい、 連星合体を起こす。合体時にも強い重力波を放出することが理論的に予測されている。これらコンパクト連星合体の発生率は、連星中性子星については宇宙年齢以内に合体を起こすパルサーの観測結果と、パルサーの 分布のモデルを用いて発生率を見積もることができる[1]。しかし、中性子星ブラックホール連星や連星ブラック ホールについては観測結果がないので、同様の方法では合体率を調べることはできない。そこで、重要となって くるのが連星の進化計算を用いた連星合体率の見積もりである。連星の進化を主系列時から追い、どのように 進化していくかをモンテカルロシミュレーションで計算し、その統計を取ることで直接観測できない連星ブラックホ ール等についても合体率を見積もることができる[2]。宇宙年齢以内に合体するパルサーの観測例はきわめて少 なく、連星中性子星についても星の進化計算から合体率を見積もることは重要である。

コンパクト連星が合体するタイムスケールは、数億年のものから宇宙年齢以上のものまであり、非常 に長い。そこで本研究では宇宙最初の星である初代星に着目した。初代星は現在の星よりも、比較的質 量が大きく、進化の果てにコンパクトオブジェクトになりやすいと考えられている。初代星が形成され たのが宇宙初期だとしても、前述のように、合体するまでの時間が宇宙年齢程度ならば、近傍にもまだ 合体せずに生き残っているコンパクト連星が存在する可能性がある。さらに、DECIGOやLISAといっ た重力波観測の将来計画によって、より遠方でのコンパクト連星合体による重力波も観測されると考え られている。

そこで、初代星起源の連星がどれだけコンパクト連星に成りうるかとどの程度のタイムスケールで合体を起こすかについて研究を行った。最近の研究によって、初代星の典型的な質量は数  $10M_{\odot}$ ということが分かっている[3]。よって、初代星の進化計算[4]をもとに、 $10M_{\odot} \le M \le 100M_{\odot}$ の初代星の進化を初期の質量と生まれてからの時刻を変数として表すことのできる Fitting 公式を作り、この Fitting 公式を使うかというと、大量の星について、その統計的な振る舞いを調べる場合、各々の星について基礎方程式を用いて星の進化を追うことは無理なため、このような Fitting 公式が必要となる。

このコードを用いて初代星の連星進化についてモンテカルロシミュレーションを行い、初代星起源の コンパクト連星の典型的な合体タイムスケールなどについて各モデルごとに考察した。初代星は半径や、 進化の仕方が通常の星とは異なるので、通常の星についての連星進化と比較することで、初代星連星の 進化の特徴についても考察を行った。

#### References

[1] V.Kalogera, R. Narayan, D.N.Spergel, & J.H.Taylor, ApJ, 556,340-356(2001).

- [2] K.Belczynski, V.Kalogera,&T.Bulik, ApJ,**572**,407-431(2002).
- [3] T.Hosokawa, K.Omukai, N. Yoshida, & H.W. Yorke, Science, 334, 1250-1253 (2011).
- [4]P.Marigo,L.Girardi,C.Chiosi,&P.R.Wood,A&A,371,152-173(2001).

### テルル化カドミウム(CdTe)を用いた 半導体放射線検出器の大型化及び分解能向上の研究

高エネルギー物理学研究室 合田幸平

**Abstract** To use for the neutrinoless double-beta decay search, we studied making CdTe semiconductor detector larger and achieving higher energy resolution. The hole trapping effect degrades energy resolution. We have investigated the stacking-type detector and the coplanar-grid type detectors to improve the energy resolution.

© 2013 Department of Physics, Kyoto University

物質を構成する最小の単位である素粒子の性質を知ることは自然科学の究極目標である。素粒子の一 つであるニュートリノは存在が実証されて 50 年以上になるが、弱い相互作用(と重力相互作用)しか しないという性質から直接検出自体が非常に困難であり、未だに多くの性質がわかっていない。その一 つにニュートリノと反ニュートリノが同じ粒子なのではないかという疑問がある。このような粒子をマ ヨラナ粒子という。これを検証できる現在唯一の方法が二重ベータ崩壊探索実験であり、もしニュート リノがマヨラナ粒子であるなら、ニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊が起こりうる。世界的にさ まざまな実験が行われているが、この反応は起こるとしても非常に稀であると考えられているため、現 在まで観測された例はない。

この二重ベータ崩壊探索実験を行うことを最終目標とし、テルル化カドミウム(CdTe)を用いた半導体放射線検出器の大型化及び分解能向上の研究を行った。CdとTeは共に二重ベータ崩壊を起こす同位体を持ち、その化合物は半導体の性質を持つため、検出器かつ崩壊親核として用いることができれば非常に効率よく検出することが期待される。しかし半導体検出器として見た場合、SiやGeに比べて正孔の移動度が低いため、正孔の移動時間が長くなることで欠陥準位などに捕縛されて信号が消えてしまい、分解能が劣化するため大型化は困難である。そこで正孔捕縛による効果を波形情報から補正することで分解能を改善し、正孔の移動に関与しない大面積型に大型化した素子を3枚積層させたものを用いて性能を評価した。また、正孔の影響を無視して電子のみの効果を見ることのできる coplanar grid型電極を用いた素子の性能を評価した。さらに小型で厚さのある素子を用いた前実験と比較して分解能向上の要素を考察した。



Fig. 1. Stacking-type detector



Fig. 2. Stacking-type corrected energy data

## 電子飛跡検出型コンプトンカメラにおける 飛跡取得アルゴリズムの改良

宇宙線研究室 古村翔太郎

**Abstract** For astronomical observations, we have developed the MeV gamma-rays Compton camera (ETCC) with a gaseous TPC to measure the track of a recoil electron. To increase the detection efficiency, we improved the track read-out algorithm. As a result, the detection efficiency had been improved more than 10 times.

© 2013 Department of Physics, Kyoto University

我々は次世代の MeV ガンマ線検出器として、電子飛跡検出型コンプトンカメラ(Electron-Tracking Compton Camera, ETCC)の開発を行なっている。このカメラは、ピクセル型電極構造をもつガス検出器 (Micro Pixel Chamber,  $\mu$ -PIC)を読み出しに用いたガス飛跡検出器 (micro Time Projection Chamber,  $\mu$ -TPC) と、無機シンチレータ結晶を用いたシンチレーションカメラの2つの部分から成る。前段の $\mu$ -TPC で反跳電子の反跳方向とエネルギーを、後段のシンチレーションカメラで散乱ガンマ線の吸収点と エネルギーを検出する。これにより ETCC は入射ガンマ線の1 光子ごとの完全な再構成だけでなく、強力なバックグラウンド除去能力と広視野を同時に実現することができる。

2006 年 9 月には、このカメラを用いて第 1 回気球実験 SMILE-I (Sub-MeV gamma-ray Imaging Loaded-on-balloon Experiment I) を行った。その結果、 $2 \times 10^5$  個ものガンマ線バックグラウンドの中から大気・宇宙背景ガンマ線を予測値と同等数である 420 光子検出し、高いバックグラウンド除去能力を示した[1]。2013 年以降には天体観測を目的とした気球実験が継続的に行われる予定であり、現在はそれに向けてさらなる検出感度・角度分解能の向上を目的とした改良を行なっている。

今回、μ-TPC から飛跡情報の読み出し処理を行う FPGA のアルゴリズムに、改良を施すことで検出感 度・角度分解能の向上を目指した。従来のアルゴリズムは、μ-PIC を大強度 X 線イメージング検出器とし て動作させる際に使用されていたものであり、1 事象ごとに詳細な飛跡情報を必要とする ETCC には適さ ない。実際、飛跡情報の取りこぼしが頻繁に起こり、反跳電子 1 事象あたり測定点が 2,3 点しか得られ ないなど、ETCC としての性能を劣化させる原因となっていた。新アルゴリズムを適用したμ-TPC を運 用して、新アルゴリズム用の解析手法の考案および新旧アルゴリズムの性能比較を行った。

新アルゴリズムにより得られた電子の飛跡例を示す(Fig.1)。新アルゴリズムでは飛跡の測定点が数 十倍に増加した(Fig.2)。これにより、μ-TPC中での損失エネルギーと飛跡長の関係がより正確に得ら れ、従来よりも精度の良い粒子識別によるバックグラウンド除去が可能となった(Fig.3)。これらの改 善により、ガス中の反跳電子はほぼ100%検出可能になり、ETCCの検出感度は2×10<sup>-5</sup>(@662keV)と従来の 10倍以上に改善、物理過程のみを考慮したGeant4シミュレーションの結果とも50%以内での一致をみた。 また、新アルゴリズムでは位置情報に加えて信号のTOT(Time Over Threshold)も記録しており、これを 利用して反跳電子の始点・終点を識別することが可能である(Fig.1)。これにより、角度分解能が大幅 に改善する可能性を見出した。これらの改善により、次期気球実験用ETCCにおいても従来の予想より4 倍以上の感度向上が見込まれ、ETCCによる天体観測の能力が確実に実証できると考えられる。







Fig.1. Example of the recoil electron track. Fig.2. Distributions of the number of

#### References

[1] A. Takada et al., ApJ 733 (2011).

Fig.2. Distributions of the number of hit pixels on the  $\mu$ -PIC.

Fig.3. Relation of the track length and energy deposit in the  $\mu$ -TPC.

## 次世代ガンマ線天文台 CTA のためのアナログメモリ DRS4 を用いた高速波形サンプリング回路の改良

宇宙線研究室 今野裕介

**Abstract** We have developed the front-end electronics for the CTA, which is the next generation VHE gamma-ray observatory. It samples waveforms of 7 photomultipliers at 1-2 GS/s using an analog memory ASIC DRS4 and digitizes them. We report the design and the performance of the improved version of the electronics.

© 2013 Department of Physics, Kyoto University

Cherenkov Telescope Array (CTA) [1] は次世代のチェレンコフ望遠鏡群建設計画であり、口径の異なる大中小の望遠鏡を南北両半球の2サイトに数十台の規模で並べることで、現行の望遠鏡に比べ感度を 10倍、角度分解能を3倍、さらにエネルギーレンジを数10GeVから100TeV以上と広帯域化し、宇宙線 起源の解明、ガンマ線バーストの検出など、宇宙の非熱的現象の探求を目指す.

CTA 大口径望遠鏡は低エネルギー閾値を達成し, 主に 200GeV 以下の領域をターゲットとする望遠鏡で ある. 我々は大口径望遠鏡で使用するための光電子増倍管 (PMT)の信号波形読み出し回路を開発した. チェレンコフ望遠鏡では,地球大気に入射したガンマ線が生成する空気シャワーからのチェレンコフ光 を,地上の光検出器カメラでとらえ,得られたシャワーのイメージからガンマ線の到来方向とエネルギ ーを決定する. チェレンコフ光に対し,星の光などの夜光がノイズとしてピクセルあたり 100MHz 程度 のレートで混入する.シャワーからのチェレンコフ光は数 nsec という短い時間幅の広がりを持つため, 信号波形を GHz でサンプリングし,信号積分時間を短くすることで夜光の混入を抑えることができる. これによって小さな信号に対し S/N を改善し,解析におけるエネルギー閾値を下げることを目指す.し かし GHz でサンプリングを行う ADC は高価かつ消費電力が大きい.1 台の望遠鏡には 1855 本もの PMT が

用いられるため,カメラ内の発熱とコストを考慮するとこれは 好ましくない.そこで我々の開発した読み出し回路ではアナロ グメモリの ASIC である DRS4[2]を用いてサンプリングを行う. DRS4 は1 チャンネルあたり 1024 個並んだキャパシタに入力信 号のアナログ電圧値を GHz で順次サンプリングしていく.デジ タル変換はサンプリングした後で各キャパシタの電圧値を 33MHz の低速 ADC で読み出して行うため,高速サンプリングを 低消費電力で実現できる.デジタル変換されたデータはギガビ ットイーサネットを用いてストレージへと転送される.

本修士論文ではプロトタイプを改良し、より実際の望遠鏡に 搭載する形に近づけ、量産を意識しコストダウンもされた改良 版読み出し回路(Fig. 1)のデザインと性能評価について報告す る. 試験の結果, PMT の信号が正しく読み出され(Fig. 2)、ノ イズ RMS~0.1phe(photoelectron)、ダイナミックレンジ 1-3000phe 以上、小信号に対し帯域 280MHz(-3dB)、クロストー ク 0.4-1%、消費電力 2.4W/PMT という性能が得られた. この他 DRS4 のキャパシタについてチャージリークを測定し、読み出し 時間の間では問題が無いことを確認し、温度試験によりペデス タル変化~-0.01phe/℃が得られ、DRS4 の全キャパシタのペデ スタルのキャリブレーションを行い、各キャパシタに固有のオ フセットとフラクチュエーションの大きさが得られた.









#### References

The CTA Consortium, "Design Concepts for the Cherenkov Telescope Array", arXiv:1008.3703
S. Ritt *et al.*, "Application of the DRS chip for fast waveform digitizing", NIMA, 2010, 623:486-488

## カイラル有効模型を用いた 核媒質中 η'中間子質量と η'N 相互作用

原子核理論研究室 酒井俊太郎

**Abstract** The mass reduction of the  $\eta$ ' meson is expected by the in-medium partial restoration of chiral symmetry. Using a chiral effective model, the mass reduction and the  $\eta$ 'N interaction are discussed. We found that the  $\eta$ 'N interaction is attractive and the attraction leads an  $\eta$ 'N bound state. © 2013 Department of Physics, Kyoto University

本論文では核媒質中でのη'中間子の質量変化と、真空中でのη'N相互作用について議論する。 擬スカラーでフレーバー1重項のη'中間子は、同じく擬スカラーでフレーバー8重項の $\pi$ ,K, $\eta$ 中間子に比べ 大きな質量を持つことからU<sub>A</sub>(1)問題として議論されてきた。現在ではこの質量差はQCDレベルでの U<sub>A</sub>(1)アノマリーによって説明される[1,2]。この $\eta$ '中間子がフレーバー1重項であることに起因する他の8 重項の擬スカラー中間子との質量差は、3フレーバーにおいてカイラル対称性が存在する時には消失す ることが指摘されている[3,4,5]。カイラル対称性の自発的破れの秩序変数はクォーク凝縮であるが、こ のクォーク凝縮の低密度領域での値は模型に依らずに議論することができる。低密度領域ではクォーク 凝縮の絶対値は減少することが示されており、カイラル対称性の部分的回復が起きることが期待される。 このクォーク凝縮はハドロンの性質と深く関係しており、密度効果によるクォーク凝縮の変化は密度中 でのハドロンの性質の変化を引き起こす。近年原子核標的を用いた実験で検証がなされ、核物質中 ( $p=p_0-0.17 \text{fm}^3$ )においてカイラル対称性の部分的回復が起きていることが示唆されている[6,7]。これら のことを合わせて考えると、飽和密度においてカイラル対称性が部分的に回復し $\eta$ '中間子の質量が減少 することが期待される。さらに核媒質中での中間子の質量減少は、真空中での $\eta$ 'N相互作用は引力であ ることが期待される。

本研究では、この期待される核媒質中でのη'中間子の質量減少と真空中でのη'N間の引力相互作用を 調べるためにカイラル有効模型、具体的にはバリオン自由度を含む線形シグマ模型を用いる。カイラル 有効模型はハドロンを記述する低エネルギー領域での有効模型であり、線形シグマ模型はQCDのもつ globalな対称性を尊重した模型である。今回は対称性としてSU(3)<sub>L</sub>×SU(3)<sub>R</sub>を課し、determinant型相互作 用を導入することによってU<sub>A</sub>(1)アノマリーの効果も取り込んだ。この模型においてη-η'中間子間の質量 差は飽和密度において約130MeV減少することが確認できる。また、真空中でのη'N相互作用については 引力となることが分かる。この引力相互作用の大きさはK<sup>bar</sup>N間の相互作用の強さと同じ程度の強さであ る。このK<sup>bar</sup>N系についてはこの引力相互作用からハドロン分子型の束縛状態と考えられるA(1405)が存 在するため、このK<sup>bar</sup>N間の引力と同じ程度の強さの引力を持つこのη'N系においても束縛状態が存在す ることが期待される。今回はη'N系についてもK<sup>bar</sup>N系と同様にハドロン分子的な状態が主要な寄与を与 えると仮定して計算を行った。その結果、η'N間の束縛エネルギーは約6MeVであることが分かった。こ のような束縛状態は現在報告されていないが、今後の実験解析によって発見される可能性がある。

#### References

[1]E. Witten, Nucl. Phys. B156 (1979) 269.
[2]G. Veneziano, Nucl. Phys. B159 (1979) 213.
[3] T.D. Cohen, Phys. Rev. D54 (1996) 1867.
[4]S.H. Lee, T. Hatsuda, Phys. Rev. D54 (1996) 1871.
[5]D. Jido, H. Nagahiro, S. Hirenzaki, Phys. Rev. C84 (2012) 132201(R).
[6]K. Suzuki, *et al.*, Phys. Rev. Lett. 92 (2004) 072302.
[7]E. Friedman, *et al.*, Phys.Rev. C72 (2005) 034609.

### Bigravity における inflation 中の非等方性について

天体核研究室 榊原 由貴

**Abstract** We study the cosmic no-hair in bimetric gravity perturbatively. We examine de Sitter solutions with the cosmological constants as the slow roll limit of the inflation. Under anisotropic perturbations, we find that there exists at least one de Sitter branch which is stable and holds the cosmic no-hair. © 2013 Department of Physics, Kyoto University

宇宙初期に何らかの機構により宇宙加速膨張期が存在すると、Cosmic Microwave Background(CMB)の 温度が全天でほぼ一様であるといった問題を解決できる。このシナリオは inflation と呼ばれている。こ のシナリオでは、加速膨張により初期の古典的な非等方性や非一様性が十分ならされ、inflation 期に生 成された量子ゆらぎのみが残り、それがもととなって CMB 温度ゆらぎなどが作られると考えられてい る。実際、inflation シナリオから予言される値は観測と非常に良い精度で一致する。

しかし、非一様非等方な初期条件で inflation が起きたとき実際に、inflation 中に非一様性非等方性が 十分ならされる、つまり cosmic no-hair が成り立つかということは自明でない。理想的な状況では cosmic no-hair が成り立つことが解析的に示されている[1]が、より一般的な状況で成り立つかは非自明である。 実際、ベクトル場など一般のテンソル場の存在下で成り立たないケースがみつかっている[2]。

そのような背景を受けて本研究の目的は、spin-2 matter 存在下で cosmic no-hair について調べることと した。Spin-2 matter 入りの理論で inflation を扱おうとすると spin-2 matter と metric の coupling から graviton に massive mode が生じてしまう。Graviton が massive mode を持つ場合、一般には対称性が下がり constraint が減ることで ghost 化する mode が残ってしまうという問題があったが、そのような ghost が生じない action が近年構成された[3]。その理論は、2 つの metric を含み bimetric gravity(bigravity)と呼ばれている。

今回は spin-2 matter 入りの inflation を扱うために、この bigravity を spin-2 matter を含む重力理論の model として採用し、cosmic no-hair が成り立つかについて調べた。具体的には、bigravity で inflation の slow roll limit である de Sitter 解を構成し、それに非等方摂動を加えて decay の time scale を見積もった。時空の計量側のみに宇宙項がある場合には、de Sitter 解が 1 つ存在し、その解に非等方摂動を加えても加速膨張の time scale より早く decay することが分かった。Matter sector にも宇宙項を入れた場合には、解の branch が 2 つ存在し、片方の branch については非等方性が十分早く decay した。一方、もう一つの branch については coupling constant などの parameter に依存して非等方摂動に対し不安定、もしくは decay したとし ても加速膨張の time scale より decay の time scale が長く cosmic no-hair が成り立たないことがわかった。

ところで、bigravity では前述のように graviton の massive mode が存在するが、de Sitter background で massive spin-2 field を考えたとき系のエネルギーが下から bound されるためには、effective mass に最小値 があることが知られている[4,5]。これは Higuchi bound と呼ばれている。今回調べた解の branch ごとに 非等方摂動に対応する effective mass を評価してみると、ちょうど解の branch の境界で effective mass が Higuchi bound に一致し、そのため摂動レベルで cosmic no-hair が成り立つ branch については Higuchi bound より大きくなることがわかった。この結果は、bigravity で宇宙論が議論できるような安定な膨張解が存 在する可能性を示唆している。

#### References

[1] R. M. Wald, Phys. Rev. D 28, 2118 (1983).

[2] M. -a.Watanabe, S. Kanno and J. Soda, Prog. Theor. Phys. 123, 1041 (2010).

- [3] S. F. Hassan and R. A. Rosen, JHEP 1202, 126 (2012).
- [4] A. Higuchi, Nucl. Phys. B 282, 397 (1987).
- [5] M. Fasiello and A. J. Tolley, JCAP 1211, 035 (2012).

### ヒッグスボソンの観測データから分かる新しい物理の兆候

素粒子論研究室 坂本 陽平

**Abstract** Recently, a signal around 125 GeV for a new particle has been announced by CERN. The decay rate mean that it is a higgs boson expected from Standard Model. But is it a new particle? Wouldn't be something beyond SM hidden in the date? I studied about this and reviewed in this paper. © 2013 Department of Physics, Kyoto University

SU(3)×SU(2)×U(1)対称性のある標準理論と呼ばれる理論にはレプトンやクオーク、ゲージボソン など合わせて 25 個の粒子があることが知られているが、その中に未だに観測されずに残っている唯一 の粒子がある。それはヒッグスボソンと(単にヒッグスとも)呼ばれている粒子で相互作用する強さの 関係からかなり高エネルギーである加速器を使わないと観測が難しいとされている。しかし、最近にな ってそれと非常に良く似た新しい粒子の兆候が約5シグマの精度で欧州原子核研究機構(CERN)のATLAS と CMS のグループによってそれぞれ発表された[1,2]。それをみるとヒッグスの質量が約125GeV とした ときの標準理論から予想される様々な粒子への崩壊率と実験データがかなりシンクロしていることが わかる。しかし、ヒッグスからフォトンへの崩壊(h→2γ)やグルーオンフュージョン(h+2g)などのあ る特定の過程に対しては実験結果とのズレが確認されている。このことは実験誤差によるものならたい したことはないのだが、本質的な理論と実験とのズレを表している可能性がある。この論文ではそれら のズレを解消するために提案されているモデルをまとめて検証することを目的としている。

初めに標準理論でフェルミオンやゲージボソンが質量を持つ理由であるヒッグスメカニズムを QED のような可換なゲージ場や一般的な非可換ゲージ場のような簡単で本質的な場合に適用してゲージボ ソンがどのようなメカニズムで質量を獲得するかを見る。さらに Glashow-Weinberg-Salam の理論[3]の ような SU(2)×U(1)の理論を使って具体的にヒッグスボソンというものの存在を仮定し、それがフェル ミオンやウィークボソンなどにどのような質量を与えるかを具体的に見て、ヒッグスボソンからほかの 粒子に崩壊する確率(崩壊率)などを計算するためのファインマンルールを説明する。

次にこの一年程のあいだに観測されたデータを概観して標準理論から計算される値に比べどれほ ど違うのかを確認する。また、特に違いが顕著に現れる過程に対しては重点的に計算する。ただし、実 験結果は日進月歩の勢いでめまぐるしく変わっているので最新の結果と矛盾を生じているところがあ るかもしれないが、そこまではこの論文では追わない。

最後に今までの観測値を説明するような新しいモデルをいくつか説明し、まとめる。例えばディラ トンといった新しい場(すなわち粒子)を仮定してそこからどのようにカップリングあるいは崩壊率が 補正を受けるかを見る。ほかにもヒッグスセクターと呼ばれるような単純に一つのヒッグスが線形的に 結合して起こすような普通のヒッグスメカニズムよりも複雑な機構を用いて結果としてゲージボソン などが質量を獲得するようなプロセスをまとめる。具体的にはヒッグスが2つ存在するようなものなど である[4]。そしてそのようなモデルのメリットとデメリットを吟味すし、新しいこのようなモデルが 何を意味しているものなのか考察する。

#### References

[1] F.Gianotti, the ATLAS Collaboration, talk given at CERN on July 4,2012 ATLAS Collaboration

- [2] J. INcandela, the CMS Collaboration, talk given at CERN on July 4,2012 CMS Collaboration
- [3] S. Glashow, Nuclear Phys. 22 (1961) 579
  - S. Weinberg, Phys. Rev. Lett. 19 (1967) 1264

A. Sala,, in: N. Svartholm (Ed.), Elementary Particle Theory, Almqvist and Wiksells, Stockholm, 1969, p.367 [4]Dean Carmi, Adam Falkowski, Eric Kuflik, Tomer Volansky and Jure Zupan [arXiv:1207.1718v3] Higgs After the Discovery : A Status Report

### AdS/CFT 対応に基づいた Schwinger 効果 についての解析

#### 素粒子論研究室 佐藤芳紀

**Abstract** Pair creation of electron and positron due to the Schwinger effect is expected to be observed a pair in laboratories in the near future. In this thesis we discuss the Schwinger effect in the context of the AdS/CFT correspondence. We consider some generalizations of this scenario.

© 2013 Department of Physics, Kyoto University

量子電磁気学における非摂動論的な現象として、外電場中における粒子・反粒子の対生成(Schwinger 効果)が知られている [1]。粒子・反粒子の対生成が生じる単位体積当たりの確率は

$$P \simeq \frac{1}{(2\pi)^3} \left(\frac{eE}{\hbar c}\right)^2 \exp\left(-\frac{\pi m^2 c^3}{\hbar eE}\right) \tag{1}$$

と表されるので、対生成が生じる電場のスケールは $E_c = m^2 c^3/e\hbar \simeq 1.3 \times 10^{18}$  [V/m] である。 $E_c$  は原 子のイオン化が起きるスケール $E_i = m^2 e^5/(4\pi\epsilon_0)^3\hbar^4 \simeq 5.2 \times 10^{11}$  [V/m] に比べて極めて大きく、実験 室で作られる電場ではほとんど粒子・反粒子の対生成は起きない。よって、現在のところ、Schwinger 効果は実験では確認されていない。しかし、DESY の XFEL 計画やヨーロッパの ELI 計画で、 $E_c$  の  $1/10 \sim 1/100$  程度の強さの電場を作ることが決まっており、Schwinger 効果の観測される日も近い。

本修士論文では、AdS/CFT 対応に基づいて Schwinger 効果を議論する。その動機は主に二つある。 一つ目は、電場の振る舞いである。通常の U(1) ゲージ理論では電場に上限がない。一方、弦理論で は電場に上限が存在する [7, 8]。よって、AdS/CFT 対応の文脈で双対な関係にあるゲージ理論と弦理論 において一見矛盾しているように見える。逆に AdS/CFT 対応が正しいとすれば、強結合領域における ラージ N ゲージ理論における新しい側面を示唆しており、興味深い。

二つ目は、弦理論の描像を用いるとモノポールやダイオンへの拡張が容易な点である。ホログラフィックな描像では、電子・陽電子の対生成は、背景場としてゼロでない NS-NS 場 *B*<sup>2</sup> がある場合のプローブ D3-ブレーン上に端を持つ開弦(F-string)を用いて記述できる [4, 5]。S 双対を考えると、モノポール・反モノポールの対生成は背景場としてゼロでない R-R 場 *C*<sup>2</sup> がある場合のプローブ D3-ブレーン上に端を持つ D-string を考えればよい。

本修士論文の構成は次の通りである。まず、「世界線の経路積分形式」に基づいて場の量子論での対 生成をレビューする [2, 3]。そして [5] に基づいて AdS/CFT 対応に基づいて電子の対生成のレビューを 行ったのち、モノポールとダイオンの対生成、有限温度への拡張を行う [6]。さらに電場が空間的・時間 的に一様でない場合 [3] についても議論する。

#### References

- [1] J. S. Schwinger, Phys. Rev. 82 (1951) 664.
- [2] I. K. Affleck, O. Alvarez and N. S. Manton, Nucl. Phys. B 197 (1982) 509.
- [3] G. V. Dunne and C. Schubert, Phys. Rev. D 72 (2005) 105004.
- [4] A. S. Gorsky, K. A. Saraikin and K. G. Selivanov, Nucl. Phys. B 628 (2002) 270.
- [5] G. W. Semenoff and K. Zarembo, Phys. Rev. Lett. 107 (2011) 171601.
- [6] S. Bolognesi, F. Kiefer and E. Rabinovici, arXiv:1210.4170 [hep-th].
- [7] E. S. Fradkin and A. A. Tseytlin, Nucl. Phys. B 261 (1985) 1.
- [8] C. Bachas and M. Porrati, Phys. Lett. B **296** (1992) 77.

### de Sitter 時空上の propagator の解析

素粒子論研究室 杉下宗太郎

**Abstract** In this thesis, we study quantum field theory in curved spacetimes, especially in de Sitter space. We develop a method to calculate Green's functions of a free scalar field in a nonstatic universe. We apply this method to obtain the Feynman propagators in de Sitter space and investigate their properties. © 2013 Department of Physics, Kyoto University

de Sitter 時空上の場の理論は宇宙論、特にインフレーション理論と関連して盛んに研究されてきた。 また、現代物理学の主要な問題の一つである宇宙項問題は、de Sitter 時空の量子論的な不安定性を考 慮することで解決できるのではないかという指摘がなされている[1]。さらに、素粒子物理学の最重要課 題である量子重力理論の定式化においても、曲がった時空上の場の理論の理解は不可欠である。このよ うに素粒子物理や宇宙物理を理解する上でde Sitter 時空上の場の量子論を考察することは非常に重要 である。

インフレーション理論を観測的に精密検証する手段として、宇宙の密度揺らぎの Non-Gaussianity を 調べるという方法があるが、その計算を行うためには真空を指定する必要がある。しかし、一般に曲が った時空上で真空を決定する方法は自由場においても確立されているとは言えない。通常は場を生成消 滅演算子で展開し、消滅演算子で消される状態として真空を決める[2]。ところが、その展開の仕方には Bogoliubov 変換分の不定性が存在し、展開の仕方によって様々な真空状態を定義することができる。 時空が十分未来や過去で漸近的に定常な場合には自然な展開の仕方が存在するが、de Sitter 時空をす べて覆う global 座標等 de Sitter 時空でよく使われる座標系は漸近的に定常でなく、真空の不定性が 残ってしまう。

そこで本研究では、時空座標を時間方向と空間方向に分解し、その時間並進の生成子として場のハミ ルトニアンを定義し、その基底状態として真空状態を定義するという方法をとった[3]。このハミルトニ アンは一般に時間依存するが、自由場の場合にはモード展開を行なうことでパラメータが時間依存する 調和振動子のハミルトニアンに帰着する。そのため、モードごとに各時刻での真空を定義することが可 能になり、観測者の使う時間を指定している限り真空の不定性は存在しない。このようにして、非定常 時空においても二点関数等を計算する方法を構成した。この方法は、漸近的に定常な時空の場合には従 来の結果を正しく再現し、さらに今まであまり考えてこられなかった有限時間間隔での真空から真空へ の遷移振幅を計算することもできる。

これらを踏まえた上で、上記の方法を de Sitter 時空の Poincare 座標と global 座標に適用し、Feynman propagator を計算した。適切な i  $\epsilon$  処方をとることで過去の真空と未来の真空で挟んだ in-out Feynman propagator の計算が可能となり、その結果は Feynman 流の経路積分で得られるものと一致することを数値計算で確認した。そして、各モードの和をとり直すことで得られた Feynman propagator は de Sitter 群のもとで不変な表式となった。さらに、この propagator は Polyakov が[1]で Green 関数の持つべき性 質として挙げた composition lawを満たすことを示した。特に Poincare 座標の場合、得られた propagator は Euclidean AdS の propagator を double Wick 回転させたものに対応しており、[4]で提唱された dS/CFT 対応の手法を適用できる可能性があることがわかった。また、[5]において in-in 形式では de Sitter 群のもとで不変な massless propagator は存在しないことが証明されているが、 Poincare 座標の場合の in-out propagator は massless 極限を持つことがわかった。

#### References

[1] A. M. Polyakov, "De Sitter space and eternity," Nucl. Phys. B 797 (2008) 199.

- [2] N. D. Birrell and P. C. W. Davies, "Quantum fields in curced space," Cambridge, Uk: Univ. Pr. (1982).
- [3] M. Fukuma, Y. Sakatani and S. Sugishita, work in progress.
- [4] A. Strominger, "dS/ CFT correspondence," JHEP 0110 (2001) 034.
- [5] B. Allen, "Vacuum states in de Sitter space," Phys. Rev. D 32 (1985) 3136.

## K<sup>0</sup>TO 実験のための Neutron Collar Counter の製作と 実機を用いた性能評価

高エネルギー物理学研究室 関繁人

Abstract Neutron Collar Counter (NCC) is a veto counter for  $K^{O}TO$  experiment to search for  $K_{L} \rightarrow \pi^{0}vv$  decay. I developed NCC using CsI crystals and measured the light yield, I also developed the photomultipliers to fit our condition. I confirmed the expected performance of the NCC installed at J-PARC K<sub>L</sub> beamline.

© 2013 Department of Physics, Kyoto University

K<sup>0</sup>TO 実験は、茨城県東海村に建設された J-PARC の大強度陽子シンクロトロンを用いて、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \nu$ 崩壊モードの崩壊分岐比を測定する実験である。この崩壊分岐比の理論値は 2.4×10<sup>-11</sup>と非常に小さく、シグナル事象の発見のためには、バックグラウンド事象を小さく抑えることが重要である。

K<sup>0</sup>T0 実験では、シグナル事象の検出にあたり、崩壊で生じたπ<sup>0</sup>起源の2γを CsI カロリメーターで 検出する。その際、それ以外の粒子が生成していないことを保証するために、全立体角を覆う検出器群 (veto 検出器)を用いる。

本論文では、K<sup>0</sup>TO 検出器上流部に beam hole を取り囲むよう設置される veto 検出器である Neutron Collar Counter (NCC) について述べる。この検出器の主な役割は、上流部での K<sub>L</sub>崩壊で生じる y を veto し、バックグラウンド事象を抑制することである。また、ビーム軸周辺に存在する中性子 (ハロー中性子) と検出器の相互作用によって生じた  $\pi^0$ や  $\eta$  が崩壊することで 2 y を生成し、バックグラウンド源 になりうる。そこで、ハロー中性子起源バックグラウンドを抑制すること、同時に、ハロー中性子起源 のバックグラウンドを正確に見積もるため、ハロー中性子の energy と flux を測定することも NCC の重要な役割となる。

NCC は、複数の pure CsI 結晶を用いて構成、波長変換ファイバー を読み出しに用いることで上記の要求を満たすようデザインされて いる(fig 1)。バックグラウンド veto や、ハロー中性子の測定のた めには、各結晶の発光量が十分大きく、かつ module 内で揃っている ことが求められる。そこで私は、NCC に用いられる CsI 結晶の発光 量を測定、module 内の一様性を十分確保出来ることを確認し、実機 の製作を行った。完成した実機についても光量を測定し、光量と一 様性を十分確保することに成功した。





fig 1 NCC design

熱による基板抵抗の破壊などが問題となりうる。実際に、既存のPMTでは放電が発生すること、発熱による温度上昇があることを確認したため、真空対策を施した新型PMTの開発を行い、放電の危険が抑えられていること、発熱による温度上昇も十分小さいことを確認した。また、1MHz 程度の高い counting rate による PMT の出力の変動が十分小さいこと、要求されるダイナミックレンジにおいて出力の線形性が保証されていることも重要である。そこで私はこれらの項目を実際に測定し、各 PMT が NCC の運用環境において、十分使用に耐えうる性能を持っていることを確認した。

最後に、NCCを J-PARC 実験エリアにインストールし、宇宙線や K<sub>L</sub> beam を用いて実機の性能を評価し、 期待通りの性能が出ていることを確認できた。

#### References

[1] J. Brod et al. "Two-loop electroweak corrections for the  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \nu$  decay" Phys. Rev. D 83, 034030 (2011)

### ATLAS 実験における新しいミューオントリガー回路の開発と 実装

高エネルギー物理学研究室 田代 拓也

**Abstract** This thesis reports the development of new circuit for muon endcap trigger in ATLAS experiment. Current endcap muon trigger is dominated by background. I developed new trigger to suppress the background and keep the trigger rate low. © 2013 Department of Physics, Kyoto University

Large Hadron Collider (LHC)は CERN 研究所に建設された、世界最高エネルギーの陽子陽子衝突型加速 器である。LHC は 2012 年現在、バンチ衝突頻度 20MHz、重心系のエネルギー8TeV での衝突を達成してい る。LHC は 2013 年よりアップグレードのため長期シャットダウンに入り、2015 年から重心系エネルギ ー13TeV、バンチ衝突頻度 40MHz で運転を再開する予定である。

ATLAS 検出器[1]は LHC の衝突点に設置されており、高エネルギー領域での物理事象を精密に測定する ことを目的としている。ATLAS 実験の主な物理ターゲットは超対称性粒子(SUSY)等の重い粒子の探索、 Higgs 粒子の性質の解明、及び高エネルギー領域での素粒子標準模型の精密検証等である。

ATLAS 実験では多段トリガーシステムが用いられている。これは LHC で発生する膨大なデータの中から物理解析に有用なデータを効率的に選び出すためである。ATLAS のトリガーはレベル 1、レベル 2、イベントフィルター(EF)の3段階で構成されている。私は特にエンドキャップ部分のミューオンスペクトロメータの情報を用いたレベル1トリガーの改良を行った。レベル1トリガーはハードウェアでトリガー判定が行われ、2.5µsまでのレイテンシーが許されている。レベル1トリガーは全体で 60kHz までレートを落とす。

エンドキャップミューオントリガーは TGC (Thin Gap Chamber) という検出器のヒット情報を利用する。 TGC は MWPC チェンバーをホイール状に配置し、多層並べた構造をとっている。TGC はまず各層でのミュ ーオンのヒット位置を算出し、ミューオンの軌跡を調べる。次にその軌跡がトロイド磁場によりどの程 度曲がったかでミューオンの横運動量を概算し、算出された横運動量が閾値を超えたらトリガーを発行 する。

現在、TGC で発行するトリガーには衝突点以外から飛来する荷電粒子によるバックグラウンドが多く 含まれており、トリガーレートが高くなっている。そのため現在のままのトリガーではLHC のアップグ レードにおけるルミノシティ増加に対応出来ない。私は、トロイド磁石より内側に配置されたチェンバ ー(TGC EI/FI)を加えた新しいトリガーロジックを開発した。TGC でトリガー判定の最終段に使用される Sector Logic ボード(SL)の FPGA (field-programmable gate array)に記述するファームウェアを新たに 作り、動作テストと実装を行った。また SL の新しい動作モードとして、Monitoring mode を追加した。 このモードでは既存のトリガースキームを変えないままアップグレード後の SL の性能を評価すること が出来る。2012 年 11 月より、ATLAS では私の開発した SL が採用され、Monitoring mode で走っている。

この論文では、まず ATLAS 検出器全体のデザインと運転状況、レベル1ミューオントリガーの現状に ついて述べ、次に私の開発した新しいトリガー回路の仕様と実装について説明し、LHC アップグレード 後に予想されるトリガーの評価を示す。

#### References

[1] The ATLAS Collaboration et al 2008 JINST 3 S08003 doi:10.1088/1748-0221/3/08/S08003

## T2K 前置検出器のアップグレードに向けたシンチレーション ファイバートラッカープロトタイプの開発

高エネルギー物理学研究室 長崎時大

T2K long-baseline neutrino oscillation experiment has possibilities to upgrade the near detector. The scintillation fiber tracker is one of the candidates of the upgrade and its prototype is newly developed to check if it can reconstruct 1cm-long tracks of charged particles, We will report its performance.

© 2013 Department of Physics, Kyoto University

T2K(Tokai to Kamioka)長基線ニュートリノ振動実験は2009 年4月に開始された実験で、茨城県東海 村の大強度陽子加速器施設 J-PARC の陽子ビームを用いて生成した世界最大強度のニュートリノビーム を生成点直後に設置されている前置検出器と295km離れた岐阜県飛騨市にあるスーパーカミオカンデで 観測し、電子ニュートリノ出現モード、ミューニュートリノ消失モードの振動パラメータの精密測定を 行う。T2K 実験は測定精度向上を目的として前置検出器のアップグレードを計画している。

ニュートリノの原子核との相互作用はいくつかあるが、T2K 実験において上記の精密測定を行うため にそれぞれのニュートリノ反応について十分な理解が必要となる。しかし現在それぞれの反応モードの 反応断面積には大きな不定性があり、T2K 実験の振動解析において大きな系統誤差を生んでいる。これ らのニュートリノ反応の不定性を減らすために、より低エネルギーの荷電粒子を捉えるためのアップグ レードが計画されていて、候補のひとつに現在使用している 1cm 角のシンチレータより細かいシンチレ ーションファイバーを使った飛跡検出器を考えている。1cm 角の現在のシンチレータでは約 5cm 以上の 飛跡しか検出できなかったが、このアップグレードにより約 1cm 以上のより短い飛跡を再構成すること が可能になりニュートリノ反応の理解が飛躍的に進む。

今回そのプロトタイプとして 1.5mm 角のシンチレーションファイバーを使用した小型の飛跡検出器を 製作した。この検出器は 1.5mm 角の棒状のシンチレーションファイバーを水平方向に交互に 1 層当たり 8 本で 8 層垂直交差させた 64 チャンネルの飛跡検出器で、各チャンネルの光量から 3 次元的に飛跡を再 構成することができる。本研究では上記のプロトタイプに使用するシンチレーションファイバー、光検 出器 Monolithic Aray Multi-Pixel Photon Counter (MPPC)、データを取得するための DAQ についてそ れぞれ飛跡検出器を組む前に性能試験を行いそれらが要求性能を満たすことを確認した。次にシンチレ ーションファイバー、光検出器の治具を作成し飛跡検出器を組み立てた。そしてこの飛跡検出器に<sup>90</sup>Sr 線源から放射されるβ線を当てる試験を行い、得られる光量が飛跡を再構成するのに十分であることを 確認した。またβ線が飛跡検出器内を通過する飛跡を再構成することに成功した。この研究により 1.5mm 角のシンチレーションファイバーを使用することで約 1cm 程度の飛跡が再構成することが可能であるこ とが示された。



Fig. 1. Scintillation fiber tracker prototype



Fig. 2. Monolithic Aray Multi-Pixel Photon Counter

## 高強度短パルスレーザーと金属ワイヤーの相互作用により 発生する電子線の放射特性

レーザー物質科学研究室 中島宏章

**Abstract** We have studied the characteristics of fast electrons emitted from a fine metal wire with a 10-µm diameter irradiated by an intense femtosecond laser pulse. It has been found the property that the electrons emitted from a metal wire are self-guided to the axial direction of the wire. © 2013 Department of Physics, Kyoto University

高強度短パルスレーザーと固体の相互作用により発生する電子線は高輝度・短パルス・点源の特徴を 有している。我々はこの電子線の指向性の向上を目的として金属ワイヤーから発生する電子線の放射特 性を調べている。今までに直径 300 µm のタングステンワイヤーから発生する電子線がワイヤーの軸方 向に指向性を持つことを報告した[1]。さらなる指向性の向上とそのメカニズムの解明のために、より細 長い金属ワイヤーをターゲットにしたレーザー照射実験と数値シミュレーションによる解析を行った。

Figure 1(a)は電子線の放射特性計測の実験配置である。直径 10  $\mu$ m のタングステンワイヤーに中心波 長 800 nm、パルス幅 160 fs のレーザーパルスを入射角度 45°で集光・照射し、ワイヤーの軸方向に放射 した電子線を 3 枚積層したイメージングプレート (IP) で測定した。集光点でのレーザー強度は約 10<sup>19</sup> W/cm<sup>2</sup>である。IP にはワイヤーを通すために約 1 mm の穴をあけている。Figure 1(b)上段は L = 150 mm、 400 mm、1050 mm における積層 IP の 2 枚目で検出された電子線放射分布である。半値全幅で直径約 3 mm の電子線放射分布となっており、電子線がワイヤー軸方向に指向性を持って放射していることが分かる。

実験結果を説明するために簡単なモデルによる数値シミュレーションを行った。電場の大きさはワイ ヤー軸からの距離 r に反比例し、レーザー照射から t 秒後のワイヤー付近の電場を線電荷  $\rho(t) = \rho_1$  $\exp(-t/\tau_1) + \rho_2 \exp(-t/\tau_2) + \rho_3$ で決まると仮定した。 $\tau_1$ 、 $\tau_2$ は数 10 ps、 $\rho_1$ 、 $\rho_2$ は数 1000  $\mu$ C/m、 $\rho_3$ は数 nC/m の大きさである。t = 0に 50 ~ 1000 keV のエネルギーを持った電子線をレーザー照射位置のワイヤー円

周から放射させた。Figure 1(b)下段は電子線放射地点から 150 mm、400 mm、1050 mm にあるスクリーンを通過した 電子線の空間分布を表すシミュレーション結果である。 実験結果と同様に電子線が1 m にわたり誘導されている。 数 10 ps で減衰する強い電場により電子線の径方向速度 成分が小さくなることで、ワイヤー軸に沿ったコリメー ションがおこる。その後、 $\rho_3$ が静電場として電子線をワ イヤー軸方向へ弱く引き付けることで、1 m にわたる長 距離誘導現象を再現できた。このとき初期の電場の大き さはワイヤー表面で  $3 \times 10^{10}$  V/m、数 100 mm 以上の誘導 に必要な静電場の大きさは  $5 \times 10^6$  V/m となった。弱い電 場が発生する原因としてワイヤーの帯電や表面波が考え られる。

直径 10 μm のタングステンワイヤーに高強度短パルス レーザーを照射すると、発生した電子線はワイヤー軸方 向に 1 m にわたり誘導されることが分かった。またシミ ュレーションによる解析から、電子線の長距離誘導には 長時間持続する弱い電場が重要な役割を果たしているこ とが分かった。

#### (a) Laser Tungsten Wire $45^{\circ}$ (10-µm diameter) L(b) 5 mm L = 150 mm L = 400 mm L = 1050 mm(a) L = 1050 mm L = 1050 mm L = 1050 mmL = 1050 mm

Fig. 1. (a) Experimental setup to observe emitted electrons using stacked IPs. (b) Typical images of electron emission obtained on the second layer IP (top) and simulation results (bottom) at L = 150 mm, 400 mm, and 1050 mm.

#### References

[1] S. Tokita et al., Phys. Rev. Lett. 106 (2011) 255001.

### 永久磁石を用いた小型 ECR 水素イオン源の特性評価

#### ビーム物理学研究室 那須裕司

Abstract A very small ECR ion source with permanent magnets is under development. We made some improvements on the ion source through identification of ion species with the mass spectrometry and measurement of the extracted ion beam current. Various experimental results and properties of the ion source are discussed.

© 2013 Department of Physics, Kyoto University

近年、中性子を用いた実験の需要が高まっているのに対し、肝心の中性子実験施設が少ないという問題がある。日本国内にも J-PARC をはじめとした大規模中性子実験施設が国内に点在する一方、学生教育を目的とし学生が主体的に実験できるようなサテライト型実験施設はほとんどなく、小型中性子源の開発は急務となっている。

そこで我々の研究室では、普及可能な小型サイズの中性子源の開発の第一歩として<sup>7</sup>Li(p、n)<sup>7</sup>Be反応 などを用いた陽子加速器ベースの小型中性子源を想定し、1次ビームとしての陽子ビームを引き出すた めのH<sup>+</sup>イオン源の開発に着手している[1]。一般に水素プラズマからイオンを取り出すH<sup>+</sup>イオン源の場 合、プラズマ中にはH<sup>+</sup>イオンのみならず、分子状イオンのH<sub>2</sub><sup>+</sup>やH<sub>3</sub><sup>+</sup>も同時に生成される。これらは比電 荷が異なるため高周波加速されず、単に高周波電力の浪費や中性化して真空排気系への負荷となり好ま しくない。このためにはプラズマ温度を上げるのが有効であり、ECR 方式のイオン源が好適である。永 久磁石を用いた ECR イオン源そのものは重イオンビームの引き出し源として用いられている[2][3]。

これまで開発中のH<sup>+</sup>イオン源では、1)パルス駆動にも拘わらず常時流れる高電圧電流による高電圧 印加の限界、2)高電圧印加によるプラズマの消失、3)引き出されたイオンビーム中のH<sup>+</sup>の生成比率 が小さく到達ビームカレントは1mAにも満たない、などの問題点があった。本研究により、それぞれ1) 引き出しギャップ間の磁場の存在によるガス放電が主たる原因であることが判明し、真空排気系の増強、 2)プラズマチェンバー内にリング磁石を装荷することにより下流側ミラー磁場を形成すること、3) 供給ガス量の調整による平均自由行程の最適化、が有効であることが分かった。

本研究発表会では本 ECR イオン源の種々の実験結果と改良点の詳細について発表する予定である。



Fig. 1. Layout of the very small ion source

Fig. 2. Axial magnetic field distribution

#### References

- [1] M. Ichikawa, et al., Proceedings of the 1st International Particle Accelerator Conference (2010).
- [2] M. Muramatsu et al., Review of Scientific Instruments, Vol. No. 71, No. 2, 984-986(2000).
- [3] K. Yoshida et al., Proceedings of the 1st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (2004).

### M5ブレーンと5次元超対称 Yang-Mills 理論

#### 基礎物理学研究所 素粒子論グループ 野坂朋生

**Abstract** In this thesis I review several approaches to obtain the low energy effective theory of the M5-brane(s). They include the recent conjecture that the five dimensional maximally supersymmetric Yang-Mills theory is equivalent to the low energy effective theory of multiple M5-branes, and a result which support this conjecture.

© 2013 Department of Physics, Kyoto University

超弦理論は、基本物体を点でなく有限の長さの弦と考える事で、重力場の量子化における紫外発散の 問題を回避し、量子重力の定式化に成功している.だが、超弦理論は今のところ摂動論的にしか定式化で きていない.超弦理論の非摂動論的定式化は、超弦理論の低エネルギー極限である10次元超重力理論と 11次元超重力理論の関係から、ある11次元超重力理論の量子論(M理論)によって与えられると考えら れており、このM理論を構築する事が弦理論における重要な問題の一つとなっている.

超弦理論には弦だけでなく弦が端を持つことが出来る物体 (D ブレーン) が存在したが, M 理論にはそれらに対応する物として M2 ブレーンと M5 ブレーンという 2 種類の物体が存在すると考えられている. 空間的に p 次元に広がった D プレーン (D<sub>p</sub> ブレーン) は, それに端を持つ開弦の運動を考える事で, 時間 方向も含めて p+1 次元の場の理論で記述され, 弦理論の非摂動論的理解やブラックホールの量子的性 質の理解において重要だった. 従って, M2 ブレーンや M5 ブレーンの場の理論による記述を理解する事 が, M 理論を理解する上で重要な第一歩であると考えられる.

この内 M2 ブレーンについては、その低エネルギー有効理論として近年 Aharony, Bergman, Jafferis, Maldacena らによって ABJM 理論と呼ばれる 3 次元  $U(N) \times U(N)$  ゲージ理論が提案され、11 次元超重 力理論における M2 ブレーンを表す解との比較から、これが正しく N 枚重なった M2 ブレーンを表す理論であると考えられている.

これに対して、N 枚 重なった M5 ブレーンの低エネルギー有効理論はある 6 次元の場の理論で記述されると考えられているが、それがどのような物であるかはまだ知られていない. この場の理論は、11 次元 超重力理論および弦理論からの考察から、自己双対 2 形式と呼ばれる場を何らかの形で non-abelian 化 したものを含むと考えられているが、そのようなものの具体的な数学的定義は知られていない. この事 が、この 6 次元理論の作用を提案することを困難にしている.

一方、これと大きく異なるアプローチとして最近、この6次元理論を $S^1$ コンパクトしたものが5次元 超対称U(N)Yang-Mills 理論と等価であるという主張がなされた[1][2].5次元の理論が6次元の理論と 等価であるためには、コンパクト化方向の運動量に対応したエネルギーを持つ無限個の状態が含まれて いなければならないが、実際5次元超対称 Yang-Mills 理論にはこのような状態が存在する.また、5次元 超対称 Yang-Mills 理論に紫外発散がないと仮定すると局所化と呼ばれる手法を用いて自由エネルギー F が計算できるが、N が大きい極限においてそれが11超重力理論から予言される M5 ブレーンの自由エ ネルギーと同じ振る舞い ( $F \propto N^3$ ) をするという非自明な結果が得られている [3].

本修士論文では、M5ブレーンに関するこれらの進展についてのレビューを行い、今後の展望について 述べる.

#### References

- [1] M. R. Douglas, JHEP **1102** (2011) 011 [arXiv:1012.2880 [hep-th]].
- [2] N. Lambert, C. Papageorgakis and M. Schmidt-Sommerfeld, JHEP 1101 (2011) 083 [arXiv:1012.2882 [hep-th]].
- [3] J. Kallen, J. A. Minahan, A. Nedelin and M. Zabzine, JHEP **1210** (2012) 184 [arXiv:1207.3763 [hep-th]].

## 次期X線天文衛星ASTRO-H搭載 軟X線撮像検出器(SXI)の性能評価の研究

宇宙線研究室 信川 久実子

**Abstract** We have developed the CCD camera system, Soft X-ray Imager (SXI), onboard ASTRO-H. The CCDs are cooled down to about -120°C. The flexible printed circuits (FPC) are adopted to connect the CCDs to the video boards. We examined that the FPC properly functions during the thermal-cycle from -130°C to +70°C. We have developed an engineering model of the SXI system. We measured the readout noise and energy resolution and found that they were 7e<sup>-</sup> (rms) and 150 eV (FWHM) at 5.9 keV, respectively, which archive their goals. We also conducted a performance evaluation of coolers, analog electronics for them, and heaters. (© 2013 Department of Physics, Kyoto University)

我々は2014年度に打ち上げを予定している次期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)の開発を行っている。SXIはCCD素子4枚を2×2に並べ、0.4−12 keV帯域で38'×38'という広い視野をカバーする。CCD素子はスターリング式冷凍機を用いておよそ−120℃に冷却する。本研究では開発の一部および機能・性能試験を行った。

SXIではFPC (Flexible Printed Circuits)を用いて、CCDとビデオボードを接続している。過去の衛星搭載品で 当初用いたマルチレイヤーFPCでは、低温時に断線するという障害が発生し、衛星計画に重大なインパクト を与えた。SXIではマルチレイヤーFPCを採用する。我々は-130℃から+70℃までの熱サイクルを40回かけて もFPCが問題なく動くことを確認した。

また我々はSXIのエンジニアリングモデル (EM) を作成し、2012年6月から10月にかけて動作試験および性 能評価を行なった (Fig. 1.はEMシステムの写真)。 EMシステムでは試作のエレクトロニクスを用いており、 その読み出しノイズ (rms) は目標値の7 e<sup>-</sup>を達成することを確認した。SXIではCCD温度をモニタしながら ヒーター出力を制御することで、温度を-120℃程度で一定に保持する。我々はEMシステムにおいて目標温 度の±0.1℃で温度制御が動作することを検証し、読み出しノイズへの影響は0.1 e<sup>-</sup>以下であることを確認した。 また冷凍機のEM品 (SXI-1ST-B) とその制御回路 (SXI-CD) の動作試験と冷凍性能の評価も行い、要求を満 足する結果を得た。電荷注入機能の動作も確認し、電荷転送効率の向上に有効であることを検証した。さら に5.9 keVのX線を照射した結果、単一ピクセル内に収まるX線イベントについて、エネルギー分解能が目標 値の150 eV (FWHM) を達成し、全X線イベントでは要求値の200 eVを満足することを確認した (Fig. 2. は 取得したスペクトル)。



Fig. 1. 日本の次期 X 線天文衛星に搭載する軟 X 線撮像検出器のエン ジニアリングモデル (EM) によるシステム。SXI-S の中に4つの CCD 素子が入っている。



Fig. 2. EM システム (Fig. 1.) を 用いて 5.9 keV の X 線を照射し て得たスペクトル。下側は単一 ピクセル内に収まる X 線イベン ト、上側は全 X 線イベント。

### ヒッグスの性質と新物理の方向性

基礎物理学研究所 素粒子論グループ 羽柴規敏

**Abstract** We investigate the possibility that we can get the information of the physics beyond the standard model through the properties of the Higgs boson. Especially, we consider the case that the di-photon decay width of the Higgs boson is enhanced by the staus, and analyzed the long-lived stau case. © 2013 Department of Physics, Kyoto University

2012 年 7 月、CERN は LHC を用いた実験によって新たなスカラー粒子を発見したと発表した。現在ま での実験結果は、この粒子の性質が標準模型のヒッグス粒子と無矛盾であることを示しており、これま でに行われてきた検証実験と共に標準模型を支持している。しかし、標準模型はその枠内にある物理現 象を再現する模型としては成功を収めているが、その一方で暗黒物質の候補として適切な素粒子を含ん でいない等の欠陥を持っている為、標準模型を拡張した模型の存在が予想されている。そこで、標準模 型を超える物理として、数多くの模型が提唱され、LHC による検証が行われているものの、その兆候は 未だ見えていない。この状況を踏まえ、本修士論文では、発見されたスカラー粒子をヒッグス粒子であ ると仮定し、「新物理の窓」としてのヒッグスの性質を再考することで、新物理の在るべき姿について 考察を行った。

ヒッグスを含め、新粒子は既知の粒子への崩壊の仕方を知っていれば、それを通じて直接検出され、 同時に崩壊先の粒子との間の結合の強さを測定できる可能性がある。一方で、その存在を直接検出でき なくとも、それらの粒子がループを回る効果を見ることで間接的に知ることが出来る。つまり、標準模 型を超える物理を知るには、崩壊が主にループとして生じるような、標準模型自体の寄与が小さい過程 に注目して、未知の粒子の存在を見出すことが有用であると考えられる。このような過程の内の1つで、 実際にLHCで精力的に測定が行われているのが、ヒッグスから光子対への崩壊である。現時点での実験 結果は、この過程が標準模型で期待される頻度よりも多く生じていることを示唆しており[1]、これを 説明する理論的な可能性として、例えば標準模型を超対称化した模型で、タウ粒子の2つの超対称パー

トナー(スタウ)の間の質量混合を大きくするこ とが提案されている[2]。本修士論文では、ヒ ッグスから光子対への崩壊と同じく、間接的に 未知の粒子への制限を与えることが出来る電弱 精密測定の実験結果を考慮した場合に、この案 によってヒッグスと光子対との結合をどれだけ 変化させることが出来るか議論した(Fig. 1)。 また、そこから得られた知見を基に、LHCで排 除されていない可能性がないか考え、特に最も 簡単な例として長寿命スタウの場合について解 析を行った。



Fig.1: Contour plots of the signal strength of the higgs to di-photon process and the mass of a lighter stau in the mL-X $\tau$  plane with tan $\theta$  = 50 under the assumption that mL = mE. The shaded area denotes the region satisfying the electroweak precision data. Now, X $\tau$  is defined as A $\tau$  - µtan $\theta$ .

#### References

[1] The ATLAS Collaboration, "An update of combined measurements of the new Higgs-like boson with high mass resolution channels," ATLAS-CONF-2012-170 (2012).

[2] M. Carena, S. Gori, N. R. Shah and C. E. M. Wagner, "A 125 GeV SM-like Higgs in the MSSM and the ¥gamma ¥gamma rate," JHEP **1203**, 014 (2012).

LEPS2 におけるハドロン光生成反応実験のための

### Drift Chamber の開発

原子核ハドロン物理学研究室 橋本 敏和

Abstract We have developed drift chambers for hadron photoproduction experiments in LEPS2. Our chambers will be used to measure particles at forward angles. Our goal is to achieve 150  $\mu$ m position resolution. We evaluated positon resolution and incident angle dependence of it by using positron beam, and achieved our goal.

© 2013 Department of Physics, Kyoto University

現在 SPring-8 において建設が進められている LEPS2 はハドロン光生成反応実験のための新たな y 線ビームラインである。LEPS2 では y 線の生成に逆コンプトン散乱を利用しており、最大 3GeV の y 線を 10% の強度で得られる。これは既存の LEPS と比べておよそ 10 倍のビーム強度である。また検 出器の立体角範囲は、LEPS で覆っていた超前方領域から後方まで拡張されている。これにより LEPS よりも高統計、広範囲での研究が可能になり、ハドロン物理の大きな問題であるクォークの閉じ込めや 質量獲得機構の解明などを行う。

LEPS2 の検出器は反応によって生じた終状態の粒子をすべて検出するためにほぼ  $4\pi$  を覆っている (Fig.1)。この中で、Drift Chamber は超前方領域で高運動量の粒子を検出する重要な検出器であり、前 方 5 度から 30 度までの範囲を覆っている。側方、後方領域は Time Projection Chamber(TPC)で検出 する。Drift Chamber は合計 4 台作られる予定である。

本研究では前方粒子の飛跡検出器として Drift Chamber の開発を行った。検出器の性能として、1T の磁場中で∠p/p=1%の運動量分解能が必要とされる。そのために必要な位置分解能は 150µm である。 位置分解能の悪化を抑えるためにチェンバーの張力と自重によるワイヤーのたるみをできる限り小さ くする必要がある。今回はワイヤーのたるみ 100µm 以下を目標とした。また外層の飛行時間検出器の 位置の要請からチェンバーの最大外径は 1600mm 以下である必要がある。この 2 つの条件を満たした 上で有感領域が最大となるように設計を行い、最終的に六角形のメインフレームと補強用のフレームを 合わせた形を採用した。この設計で得られた有感領域は直径 1280mm である。1 つのチェンバーにつき 6 層の面があり、2 面ごとに異なる方向にワイヤーが張られている。ワイヤーの方向はそれぞれ X(0 度)、

U(60 度)、V(-60 度)となっている。チェンバーのド リフト領域の構造は1辺16mmの正方形型セル構造 となっており、センスワイヤーとポテンシャルワイ ヤーが8mmおきに交互に張られている。

本研究では実機のうちの1つを製作し、LEPSのY 線ビームを鉛に入射して生成した約1GeVの陽電子 を用いて、位置分解能の評価試験を行った。検出効 率がプラトー領域になるよう印加電圧の最適化を行 い、チェンバーに対して垂直に陽電子を入射した。 入射した陽電子の直線トラッキングを行い、130µm という位置分解能を得た。これはLEPS2の要求性能 を満たしている。またチェンバーを回転させて陽電 子の入射角度を変え、位置分解能の入射角依存性を 調べた。

本論文では、実機の設計と性能評価の詳細な報告 を行う。



Fig.1 LEPS2 spectrometer

### 標準模型及びその超対称な拡張についての研究

#### 素粒子論研究室 濱田雄太

**Abstract** This paper consists of two parts. First, we calculate the bare Lagrangian of Standard Model(SM). This work is the first step in order to discuss SM-like string model numerically. Second part is devoted to the cosmological constraints on spontaneous R-symmetry breaking models. We find that few parameter regions are allowed.

© 2013 Department of Physics, Kyoto University

2012年にヒッグス粒子と思われる粒子が発見された [1]。標準模型は現在までの実験結果と極めて高い精度で一致する。一方で、実験的な証拠はないもののヒッグス粒子に対する不自然さの問題から TeV スケールでの超対称性の存在が期待されている。そのような超対称性を持つ模型の中で R-symmetry を 自発的に破ることで超対称性も破るような模型はプランクスケールと電弱スケールの階層性を説明する 可能性を持ち、魅力的である。そこで、本論文では標準模型がプランクスケールまで有効なシナリオと 途中のエネルギースケールに超対称性があらわれ、その後 R-symmetry が自発的に破れるシナリオにつ いて考察した。

標準模型がプランクスケールまで有効な場合、標準模型の bare なラグランジアンを求めることが重 要である。これは標準模型を出すような超弦理論の模型を考えてそれを数値的に議論するための第一歩 となる。特に、本論文ではヒッグス場の bare な質量と4 点結合に注目した。中でもヒッグス場の bare な質量については、その二次発散部分を 2-loop の精度で計算した。その結果, bare な質量と4 点結合 は top quark の質量に大きく依存し、その値によってはプランクスケールで 0 をとることもあり得る ことを発見した [2] (図 1)。

R-symmetry を自発的に破るような模型ではその破れに伴い R-axion と呼ばれる軽い粒子が出現する。 R-axion の他の粒子との結合は R-symmetry の破れのスケール  $f_a$  で抑制される。このため、Big Bang Nucleosynthesis や Cosmic Microwave Background、もしくは Dark Matter の abundance の観測から R-axion の質量  $m_a$  と破れのスケール  $f_a$  に大きな制限がつく。結果として、長寿命の R-axion はほぼ禁 止されることを見いだした [3]。この解析は加速器での制限とは独立な結果を与え、加速器で到達できな いようなスケールの超対称性模型についても禁止することができる。



⊠ 1: Bare Higgs mass and quartic coupling at Planck scale as a function of top quark mass.

#### References

- [1] G. Aad et al. [ATLAS Collaboration]; S. Chatrchyan et al. [CMS Collaboration],
- [2] Y. Hamada, H. Kawai and K. -y. Oda, arXiv:1210.2538 [hep-ph].
- [3] Y. Hamada, K. Kamada, T. Kobayashi and Y. Ookouchi, arXiv:1211.5662 [hep-ph].

### 衛星の撮像中における星像の中心の位置測定

#### 天体核研究室

#### 藤田翔

**Abstract** This should be a short explanation of position astronomy and my mission about the approach to a high precision measuring of the center of PSF from a data expressing how many photons are contained in an each pixel. © 2013 Department of Physics, Kyoto University

1 0 0 0 0 0

位置天文学とは、星の銀河での3次元的な位置と、天球上での2元的な軌道を正確に求める学問であ り、天文学において最も古くから行われてきた試行である。地上での観測では、大気や重力変形の影響 もあって、測定精度には随分前から限界がきていた。20世紀の末に、ヨーロッパ宇宙機関(ESA)が 世界で初めての位置天文観測衛星 Hipprcos(ヒッパルコス)を打ち上げ、地上の観測精度に比べて、一 桁以上もの精度向上を果たした功績によって、位置天文学は再び日の目を見ることになる。ヒッパルコ スによって、地球から 100pc(1 pc=3.0×10<sup>19</sup>cm)内の距離にある星々に関しては、10%の誤差範囲 でデータが得られた。このカタログを元に、主に太陽系近傍の星の個数密度や、ディスク上のダークマ ターの存在量等が議論されるようになり、当時のサイエンスに一石を投じるきっかけとなった。

そして、日本初の位置天文観測衛星として発足したのが JASMINE 計画である。ヨーロッパでは、ヒッパルコスより2桁も観測精度が上昇した位置観測天文衛星 Gaia が近年打ち上げられることになっている。JASMINE 計画の手始めとして、ヒッパルコスの軌跡を模倣して、地球から 100pc 内の約2等級から9等級の星をターゲットにした Nano-JASMINE 衛星の打ち上げに関して、現在国立天文台のメンバーを中心にして、集中検討が行われている。Nano-JASMINE では、可視光ではなく、赤外線観測法を用いることによって、Gaia では観測できない比較的明るい星や、銀河面上の星形成領域等に関しても観ることが出来るので、地球から 100pc 以内の星に対してより多くの正確な情報が手に入るだろうと期待されている。

位置天文学の意義としては、星の正確な距離がモデルや仮説無しで直接得られることによって、距離 指標(セファイド変光星の PL 関係のゼロ点)がより正確に求められることにある。また、 Nano-JASMINE で得られる極近傍の銀河の質量分布に加え、Gaia や、Nano-JASMINE に続く small JASMINE では、銀河中心の星の密集地帯であるバルジ周辺の星のデータも採取できるので、銀河の形 成や進化に関する情報、あるいは重力レンズ効果といった一般相対論の検証等にも繋がる。

そこで、私は Nano-JASMINE の様々なミッションチームの中で、データ解析を担当し、実際に望遠 鏡の視野に収まった星の像から、すなわち各ピクセル内に収容された光子数のデータを用いて、地球か ら100pc以内の星の軌道を、10%の精度の範囲内で収まるようなモデルの構築を行った。本研究 は、観測で得られた星像の拡がりである PSF:Point Spread Function の光子数の離散的データから、最 小二乗法を用いて、その中心をいかに精度良く求めるかといった内容の報告書である。

目標となる精度を達成する上では、最小二乗法を用いる際に、データと理論推定値の間のゆらぎは、 果たしてポアソン近似で十分なのか、あるいは二項分布で計算した場合と比べて差が生じてくるかとい ったことも含めて、確率論の根本的な枠組みから検討した。また、1個の星の観測において、10秒程 度の撮像時間中に、星は視野内で軌道を描く。これにより光子の位置の分布関数である PSF は、視野内 で姿勢変動するので、得られる光子の分布は、星の軌道に沿って、中心を徐々に動かした PSF を重ね合 わせた確率分布に従っている。変動が大きければそれだけ推定誤差も大きくなるが、軌道の変位は予め わかっているという前提で、どの程度の長さの変位までなら、最小二乗法により、目標の精度で星の軌 道を求められるのかといったことを計算した。

#### References

[1] JASMINE 計画:http://www.jasmine-galaxy.org/index-j.html

[2] Chris Flynn and Burkhard Fuchs,"Density of matter in the Galactic disk"(1993 December 9)

[3] Naoteru Goda,赤外線位置天文観測衛星(JASMINE)計画第2回検討報告書~Japan Astrometry Satellite Mission for Infrared Exploration (2008).

### 異方性フェライトを用いたクライストロンビーム集束磁石

ビーム物理学 不破康裕

**Abstract** For feasibility evaluation of the permanent magnet beam focusing for klystrons, a test model composed of anisotropic ferrite magnets has been developed. This model has a few features for reduction of its construction cost. The power test of a 750 kW klystron with this focusing magnet has been carried out.

© 2013 Department of Physics, Kyoto University

CERNのLHC (Large Hadron Collider)において125 GeV 付近にヒッグス粒子とみられる新粒子の兆候 が確認され、ヒッグスファクトリーとしてのILC (International Linear Collider)の必要性が高まっ ている。ILC 計画における高周波電力供給方式の1つとして提案されたDRFS (Distributed RF Scheme) では、8000 台に及ぶ比較的小型の MA (modulating anode)クライストロンをトンネル内部に配置するこ とで施設全体の建設費の削減を目指している。この方式ではクライストロンユニットの数が非常に多い ために、その構成要素の故障率をできる限り押さえることが重要となる。通常クライストロン内の電子 ビームの集束にはソレノイド電磁石を用いるが、その場合電磁石電源や冷却水系が必要となりこれらの 故障は加速器の安定な運転の妨げとなる。電子ビームを永久磁石で集束できれば電源・冷却水が不要に なり故障の抑制とともに消費電力、運転コストの削減も実現できる。本研究では、周波数1.3 GHz、最 大出力750 kW の MA クライストロンに使用可能な集束磁石を永久磁石で製作し、クライストロンの出力 試験を実施して、安価で量産可能な永久集束磁石の可用性を検討した。

製作した集束磁石の磁石素材には、残留磁化・保磁力が十分に大きくかつ安価である異方性フェライトを選択した。磁場設計には3次元磁場解析コード RADIA 4.29 を用いた。磁場分布および製作コストの最適化の結果、Fig. 1のように磁石・ヨークの配置を決定し実際の集束磁石を製作した。この集束磁石はクライストロンの安定な運転と製作コストの抑制のため次のような特徴を持っている。1): ビームの集束には単方向の磁場を用いている。こうすることで交代磁場を用いていた PPM 方式で問題となっていたクライストロンのパルス立ち上がり時のビームミスマッチの原因となる禁止帯の発生を避けられ、クライストロン本体の損傷を防ぐことができる。2): 磁石部が水平方向に可動になっており磁場調整を容易に行うことができる。また、この機構によりクライストロン下部にある径の大きいカソード部分の挿入時に磁石を開いておき、挿入後に磁石をクライストロンに近づけることができるため集束に必要な磁石の体積を小さくし製作コストが低減される。製作した磁石に対し磁場の調整・測定を行い、測定された磁場分布を用いてビームの輸送解析を実施し十分なビーム集束力を有していることを検証した。さらに実際にクライストロンを挿入して実施した出力試験においては、カソード部の磁場を調整することにより現時点で550 kWのピーク出力が得られている。

この設計方針は特定のクライストロンに対象を限らないため、多くのクライストロンに幅広く応用が 可能である。



Fig. 1: The Layout of magnets and iron yokes

## XENON100 の最新結果を含む 暗黒物質直接検出実験の最近の結果とその理論的考察

基礎物理学研究所 素粒子論グループ 三井浩嗣

Abstract For many years, direct detection experiments have attempted to identify dark matter. The scenario of isospin violating dark matter has been considered to relax the tensions between the results of DAMA, CRESST, CoGeNT and CDMS experiments, but the recently updated XENON100 result excludes the interesting signal region. © 2013 Department of Physics, Kyoto University

宇宙の観測により、宇宙にある物質のうちで電磁波で観測することのできる既知の物質は5%だけで あり、71%がダークエネルギー、24%が暗黒物質であることが分かっている。暗黒物質は素粒子標 準模型では説明できない物質である。暗黒物質は我々の太陽系にも存在し、その密度は0.3 GeV/cm<sup>3</sup>で あると見積もられている。素粒子標準模型を超える理論では多くの模型が提唱されているが、その中で も弱い相互作用の程度の相互作用をする安定な粒子である WIMPs (Weakly Interacting Massing Particles)が注目されている。そして、多くの観測結果から暗黒物質が持つとされている性質を、WIMPs は満たしている。そのため、暗黒物質の正体は WIMPs である可能性が高い。この WIMPs を地球上で 検出するための実験、つまり直接検出実験は現在までに数多く行われており、今後もさらに精度の高い 実験が行われる予定になっている。暗黒物質を理解することは天文学的に重要であるだけでなく、素粒 子標準模型を超える物理を理解するためにも非常に重要である。

2010年以降、直接検出実験の結果が続々と報告されており、暗黒物質の 性質が次第に制限されてきている。そして、それらを考察する理論的研究も 行われている。

例えば、2010年の直接検出実験の結果としては、暗黒物質と中性子、陽子とのそれぞれの結合定数 $f_n$ 、 $f_p$ が等しいという既知のほとんどの模型で成り立っている仮定の下では、DAMA[1]、CRESST[2]、CoGeNT[3]は概ね矛盾しておらず、CDMS[4]はこれらに矛盾していた。このとき、この二つの結合定数について、アイソスピンを破れば[5]、四つの実験結果を一つの暗黒物質で説明できる可能性が指摘された。ところが、2011年から2012年にかけてXENON100[6]の最新結果が得られ、2012年7月のXENON100の結果はそれらの実験結果と矛盾し、アイソスピンを破るという理論的可能性だけでは無矛盾にはできない。現在のところ、直接検出実験により観測されているシグナルが暗黒物質によるものであるかどうか結論できない。



直接検出実験の他にも、今後はLHCからも暗黒物質に関する更なる実験 結果が得られることが期待されており、暗黒物質に関する研究が進展する 可能性もある。

Fig. 1. The  $f_n/f_p$  ratio dependence for representative signal points and exclusion curves given by various experiments[1-4,6].

本修士論文では、直接検出実験に関する理論的枠組みについて、様々な 模型の記述において重要となる演算子に注目し、最近の直接検出実験の結 果についてレビューし、考察した。

#### References

[1] [DAMA Collaboration], Eur. Phys. J. C 56, 333 (2008); [DAMA and LIBRA Collaborations], Eur. Phys. J. C 67, 39 (2010).

[2] G. Angloher, M. Bauer, I. Bavykina, A. Bento and C. Bucci et al., Eur. Phys. J. C 72, 1971 (2012).

[3] C. E. Aalseth, P. S. Barbeau, J. Colaresi and J. I. Collar et al., Phys. Rev. Lett. 107, 141301 (2011).

[4] [CDMS-II Collaboration], Phys. Rev. Lett. 106, 131302 (2011).

[5] J. L. Feng, J. Kumar, D. Marfatia and D. Sanford, Phys. Lett. B 703, 124 (2011).

[6] [XENON100 Collaboration], Phys. Rev. Lett. 109, 181301 (2012).

### LEPS2 TPC 用のフロントエンド回路の開発

原子核ハドロン研究室 水谷圭吾

Abstract We developed front-end electronics for LEPS2 TPC. To get good performance out of a LEPS2 TPC, high-speed and low-power-consumption front-end electronics is required. In this thesis, development and basic performance test of front-end electronics for LEPS2 TPC are described. © 2013 Department of Physics, Kyoto University

LEPS2 は大型放射光施設 SPring-8 に現在建設中であり、エネルギー3 GeV、エネルギー分解能 10 MeV、 計数率 10 Mcps の高エネルギー y 線ビームを用いて実験を行うことができる。LEPS2 ビームラインでは、 ペンタクォークの探索実験や η'中間子を用いた質量生成機構の解明実験などのさまざまなハドロン 光生成反応実験を行う予定である。

LEPS2 のスペクトロメーターはほぼ全立体角を覆い、反応における全粒子を検出することができる。 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し、大散乱角領域に放出された荷電粒子は Time Projection Chamber (TPC) で検出する。TPC を用いることで、円筒型ドリフトチェンバーに比べて下流側 の端面での物質量を小さくすることができ、多重散乱の効果を抑えることができる。

LEPS2 で用いる TPC は 10,000 チャンネルとチャンネル数が多いため、全体で 800W 以下の低消費電力 な読み出し回路が要求される。また 5-10kHz という高計数率で粒子検出を行い、TPC のドリフト時間が

最大 10 us 程度あるので、TPC 読み出し回路 は dead-timeless で高速なものが必要であ る。

本研究では LEPS2 TPC 用のフロントエン ド回路の開発を行った。高速かつ低消費電 力の読み出しを行うために、高速 FADC ボー ドを作成した(Fig. 1)。さらに低消費電力な 読み出しを実現するために、アナログ部分 を 10mW/ch 以下の省電力 ASIC で作成した (Fig. 1)。FADC ボードは 16ch/board で、 op-amp を用いたアナログ部分、14-bit, 40MSPS の高精度高速 FADC チップ、データ処 理のための FPGA 部分からなり、消費電力を 抑えるためにアナログ部分の能動素子数が

できるだけ少なくなるように設計した。ASIC は 8ch/chipで、チャージアンプ、ポールゼロキャンセル、 シェイパー、アナログバッファから成り、低消費電力 を実現するため、0.25umプロセスで製作した。

それぞれの回路について、ゲイン、FWHM、リニアリ ティ(Fig. 2)、ノイズレベル、オフセット、クロスト ークとそれらのチャンネル間依存性を調べた。ゲイン、 FWHM、リニアリティはそれぞれ 1 V/pC, 210 ns, 1-2 % 程度で目標値を達成した。ASIC に関しては、それらの 温度依存性も調べ、20℃, 40℃, 60℃で正しく動作す ることを確認した。

本論文では、FADC ボードおよび ASIC の設計および 試験結果の詳細について述べる。



Fig.1: FADC ボードと ASIC(左下)



Fig.2: ASIC のリニアリティ

### 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** We focus on the cluster structure of light neutron-rich nuclei; cluster-shell competition of carbon isotopes and three triton (3t) states of <sup>9</sup>Li. In carbon isotopes, cluster structure is shown to appear as low-lying excited states. In <sup>9</sup>Li, we investigate whether 3t states appear or not in excited states. © 2013 Department of Physics, Kyoto University

軽い中性子過剰核として炭素同位体と<sup>9</sup>Liに着目し、それぞれの原子核の構造について研究した。 したがって、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<sup>9</sup>Liにおける3つのトライトン(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<sup>12</sup>Cは、3αクラスター的な成分とシェル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 ターを導入し、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<sup>16</sup>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が示唆されている[4,5]。 本研究では<sup>16</sup>Cと、より中性子過剰な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。

#### ②<sup>9</sup>Liにおける3t状態

 $\alpha$ クラスター以外のクラスター構造として、 $\alpha$ クラスターより陽子の1つ少ないt(トライトン)が知られている。tは"フェルミオン"としての性質を持つ。<sup>12</sup>Cの励起状態には3 $\alpha$ 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が、そこでは $\alpha$ 粒子の持っている"ボソン"としての性質により $\alpha$ 粒子が凝縮した状態が存在し得ると考えられている。この $\alpha$ 凝縮状態は"THSR波動関数"によって良く記述される[6]。3つの $\alpha$ クラスターからなるこの状態と類似して、本研究では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<sup>9</sup>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つ集まったこの状態は、ボソンである $\alpha$ が3つ集まった<sup>12</sup>Cのsecond 0<sup>+</sup>状態(Hoyle状態)とは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 1-4 (2001).

## N = Z 核をターゲットとした $E_{\alpha}$ = 400 MeV での $\alpha$ 非弾性散乱の系統的測定

原子核ハドロン研究室 横田直樹

**Abstract** Differential cross sections of the inelastic alpha scattering from <sup>12</sup>C, <sup>16</sup>O, <sup>24</sup>Mg, <sup>28</sup>Si and <sup>40</sup>Ca at 400 MeV were measured. We obtained their transition strengths by using DWBA calculation in the framework of single folding model and examined the uncertainty in this model. © 2013 Department of Physics, Kyoto University

α 非弾性散乱は散乱断面積が大きい、高分解能測定しやすいなどの特徴をもち、また DWBA 計算で微 分断面積をよく再現できるといった反応メカニズムの単純さもあって原子核の励起状態を探る有用な 手法である。特に大阪大学核物理研究センター(RCNP)でも α 非弾性散乱を用いて古くから巨大共鳴や クラスター状態の測定がなされてきた。

しかしながら近年 <sup>12</sup>C の Ex = 7.65 MeV の励起状態(Hoyle 状態)への遷移において、従来の手法では その励起強度が実験値よりも小さくなることが報告されている[1]。Hoyle 状態は α クラスター構造を持 つことで知られており、各半径が基底状態に比べ大きいといった特徴的な構造に起因することが示唆さ れているもののその原因はわかっていない。

そこで本実験では $\alpha$ 非弾性散乱の励起強度の核種依存性、励起状態の角運動量依存性を調べるために RCNP において、<sup>12</sup>C,<sup>16</sup>O,<sup>24</sup>Mg,<sup>28</sup>Si,<sup>40</sup>Ca をターゲットとして $\alpha$ 粒子エネルギー400MeV で各低エネル ギー励起状態の微分断面積を測定した。Ex = 4.44 MeV の励起状態と Hoyle 状態の微分断面積を Fig.1 に示す。過去に RCNP において同エネルギーでターゲットが <sup>58</sup>Ni,<sup>90</sup>Zr,<sup>208</sup>Pb の $\alpha$ 非弾性散乱が測定さ れていたので、その結果もあわせて解析した。DWBA 計算には Single folding model で得られる歪曲 ポテンシャルを用い、遷移密度にはマクロスコピックなモデルを用いた。この解析において、使用する 光学ポテンシャルの密度依存性の有無による再現性の是非、<sup>12</sup>C については Resonating Group Method を用いて計算された遷移密度を使った DWBA 計算、さらに Coupled Channel 計算も行い本実験の計算 モデルの妥当性を検証した。



Fig. 1 Differential cross sections for Ex = 4.44 MeV state(left) and Hoyle state(right) in <sup>12</sup>C. The solid curve is the angular distribution calculated by DWBA.

#### References

[1] D.T.Khoa et al., Phys. Lett. B 660 (2008)331

## μ-PIC を用いた Active Target 開発 および動作特性の研究

原子核ハドロン研究室 渡邊英知

**Abstract** We developed the new active target using  $\mu$ -PIC which works as a time projection chamber. He and isobutane are filled in the active target. In the present work, behaviors of the active target with the change of gas mixture, pressure and voltage were studied. © 2013 Department of Physics, Kyoto University

原子核物理学において α クラスター構造は重要な研究対象の一つであり、その発現機構を明らかに するには、安定核から不安定核に向けた系統的研究が必要である。近年、原子核とα粒子の非弾性散乱 を測定することでクラスター構造を研究する実験手法が確立されているが、不安定核ビームをヘリウム 標的に入射する逆運動学を行う必要がある。逆運動学条件下における前方散乱では反跳したα粒子のエ ネルギーが低く測定が困難であるので、不安定核における実験データは非常に少ない。

そこで、様々な不安定原子核の α 非弾性散乱の測定を可能とすることを目的として、京都大学宇宙 線研究室が開発した高性能粒子線イメージング装置 μ-PICを用いた Time Projection Chamber、新型ア クティブ標的を開発している。これは検出器内部にヘリウムを密封して、そこに不安定核ビームを入射 することで不安定核と α 粒子の非弾性散乱を測定しようとするものである。検出器内部で散乱が起こ るため全立体角について低エネルギーの粒子を検出することが可能である。Fig.1 はアクティブ標的の 構造と散乱の様子を示している。粒子線による電離で発生した電子が、印可された電圧によりμ-PIC に 向かってドリフトして、μ-PIC 表面で増幅されて検出される。側面の Si と CsI 検出器はΔE-E 法によ り粒子の同定を行うために設置する予定であるが、本研究ではまだ導入されていない。α 粒子と不安定 核の散乱を測定するにあたってヘリウム 100%の検出器ガスを用いることが望ましいが、検出器内部での 放電を防ぐためにクエンチングガスとしてイソブタンを混入させる必要がある。

本研究では、アクティブ標的内部に α 線源<sup>241</sup>Am を入れて検出器の性能評価を行った。 α 線は直線 軌道を描くことを用いて、アクティブ標的内部の位置分解能を評価した。また、ADC モジュールにより μ-PIC で検出される電荷量を測定し、ガスゲインを決定した。さらに、検出器内部のガス混合比と全圧 から計算できる α 線の飛程を用いてドリフト速度を評価する手法を確立した。印可電圧、ヘリウムとイ ソブタンの混合比、全圧を変化させて位置分解能、ガスゲイン、ドリフト速度を測定することで、アク ティブ標的の動作特性を研究し性能評価を行った。



Fig.1 Schematic view of the Active Target using  $\mu$  -PIC