平成 26 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27年2月4日、5日)

物理学第二分野

修士論文発表会

日	時	2015年	2月4	4日	(水)	9時0	0分~
			2月	5日	(木)	9時0	0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(水)

1. 超小型位置天文観測衛星 Nano-JASMINE の PSF による星像中心位置決定法

荒井 隆志 (9:00)・・・・1

2. 有機半導体を用いた放射線検出器の開発

石井 佑季 (9:20)・・・2

3. ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊探索実験AXELのための光検出器MPPCの評価

石山 優貴 (9:40)・・・3

4. EMRI-MBHにおける相対論的効果と古在機構

岩佐 真生 (10:00)・・・4

5. M 理論の構成的定式化に向けたランダム体積の新しい生成法について

梅田 直弥 (10:20)・・・5

6. 時空の地平線の量子ゆらぎに着目したブラックホール情報喪失問題の研究

岡崎 智久 (10:40)・・・6

7. 宇宙放射線環境下における電子飛跡検出型コンプトンカメラの性能評価

小田 真 (11:00)・・・7

アクシオンのインフレーションで生成されるカイラルな原始重力波についての研究
小幡 一平(11:20)・・・8

9. SπRIT-TPC 実験のためのトリガーシンチレータアレイの開発

金子 雅紀(11:40)・・・・9

10. KOTO 実験における高レート多線式比例計数管のための波形整形機能を持つ 信号増幅器の開発

上路 市訓 (13:00)・・・10

11. 行列模型における重力子散乱の非摂動論的な解析

川井 大輔 (13:20)・・・11

1 2. Derivation of Hydrodynamic Equations with Renormalization Group Method

菊池 勇太 (13:40)・・・12

13. 電子飛跡検出型コンプトンカメラによる偏光観測実験

岸本 哲朗(14:00)・・・13

14. LHC-ATLAS 実験 Run-2 に向けた Level-1 ミューオントリガーアルゴリズムと

データ収集システムの改良

救仁郷 拓人 (14:20)・・・14

15. X 線天文衛星「すざく」による超新星残骸G337.2-0.7 の観測研究

高田 明寛 (14:40)・・・15

16. (K⁻, K⁺)反応を用いたΞハイパー核分光実験のための水チェレンコフ検出器の開発
竹中 耕平(15:00)・・・16

17. Gas-jet型 ISOL への適用に向けたレーザーイオン化法の基礎研究

谷口 良徳 (15:20)・・・17

18. チャーン・サイモンズ・マター理論のLevel-Rank duality

崔 在旺 (15:40)・・・18

19. 伏見関数を用いた相対論的重イオン衝突におけるエントロピー生成機構の解析

築地 秀和 (16:00)・・・19

20. 次世代ガンマ線天文台CTA大口径望遠鏡初号機搭載に向けたGHz波形サンプリング 回路の性能評価

土屋 優悟 (16:20)・・・20

21. 高強度レーザーと薄膜の相互作用により加速される電子の金属ワイヤーを 用いた誘導に関する研究

寺本 研介 (16:40)・・・21

22. KOTO 実験の中性ビーム中で荷電粒子を検出する Thin Gap Chamber の開発

中桐 洸太 (17:00)・・・22

23. 高強度レーザー・薄膜相互作用により加速される陽子線の計測に関する研究

中島 裕人 (17:20)・・・23

24. T2K 実験ニュートリノビーム増強のための J-PARC Main Ring Intra-bunch feedback system の開発

仲村 佳悟 (17:40)・・・24

25. 階層性問題とブレーンワールドモデル~新しいモデルの構築に向けて~

西 雅人(18:00)・・・25

2月5日(木)

26. フェムト秒レーザーによる金属表面ナノ周期構造自己形成に関する研究
西井 崇也(9:00)・・・26

27. ブラックホールの情報損失問題とFuzzball予想

朴 敏奎 (9:20)・・27

28. 宇宙大規模構造の3点統計を用いた原始非ガウス性の決定精度

橋本 一彦 (9:40)・・・28

29. T2K 実験前置検出器 INGRID を用いた反ニュートリノビーム測定

林野 竜也(10:00)・・・29

30. 超高強度極短パルスレーザー光高品位化のためのプラズマミラー装置の開発と性能評価 前田 一弥(10:20)・・・30 31. シミュレーションによる次世代ガンマ線天文台 CTA 大口径望遠鏡のハードウェア 仕様の検証

増田 周 (10:40)・・・31

32. 宇宙X線観測用SOIピクセル検出器における電荷収集効率の改善

松村 英晃(11:00)・・・32

33. 超大質量星の重力崩壊に伴うガンマ線バーストの研究

松本 達矢 (11:20)・・・33

34. カイラルユニタリー法に基づく反 K 中間子-核子ポテンシャルの構築とΛ(1405)の解析

宮原 建太 (11:40)・・・34

35. MAIKo アクティブ標的を用いた⁴He 光分解反応断面積の測定

村田 求基 (12:00)・・・35

36. Brown-Kuchar のメカニズムとループ量子重力理論

森山 健太(12:20)・・・36

37. η'核分光実験におけるデータ収集システムの開発

山上 大貴 (12:40)・・37

38. 原子核におけるトーラス形状とαリング状態の相互関係

吉居 正晃 (14:20)・・・38

39. 非一様カイラル相におけるクォーク物質の磁性

吉池 遼 (14:40)・・・39

40. 三次元格子構造を持つ新型ニュートリノ検出器WAGASCIの開発

吉田 健人 (15:00)・・・40

41. 場の理論のエンタングルメント・エントロピーと局所演算子による励起状態

渡邊 賢人 (15:20)・・・41

超小型位置天文観測衛星 Nano-JASMINE の PSF による星像中心位置決定法

天体核研究室 荒井隆志

Abstract We create the method of determining the center position of star image of Nano-JASMINE using a point spread function. In addition, we evaluate the center detection accuracy of this method by changing various settings parameters.

© 2015 Department of Physics, Kyoto University

位置天文学は、天体の位置・距離・速度を正確に測定することを目的としており、それらの値は観測 から幾何学的な手法を用いて直接算出される。この特徴から位置天文学の測定結果は、天文学の様々な 研究方法での基本情報となる。特に、銀河系内の天体の測定結果は、銀河系の構造や形成史の解明への 資料となる。更には、銀河の形成や進化の解明を通して、初期宇宙や宇宙論の研究へと繋がっている。 また、高精度な天体の測定は系外惑星探査にも用いられる。そのための高精度な測定には、より高精度 な観測データが必要となり、欧州宇宙機関(ESA)は位置天文観測衛星「Hipparcos」(1989年)「Gaia」 (2013年)を打ち上げた。

日本でも赤外線探査に因る位置天文衛星計画である「JASMINE 計画」の第一段である、超小型位置天 文観測衛星「Nano-JASMINE」の打ち上げが 2015 年に予定されている。この Nano-JASMINE は全天の星を 2~3 ミリ秒角の精度で測定することを目的としている。そのためには、衛星の正確な制御と共に、 CCD 検出器の星像データ(Point Spread Function)の中心位置を 1/600pixel 以下の正確さで読み取るこ とが不可欠である。

ESA の衛星 Gaia も CCD 検出器を用いており、CCD の観測データから主成分分析を用いて fitting し 星像の中心を求める手法が既に考案されている。しかし、Gaia の星像中心位置決定法は、CCD の 2 次元 星像データである PSF (Point Spread Function)ではなく、そのデータを 1 次元に落とした LSF (Line Spread Function)を対象としている。そのため、Gaia の星像中心位置決定法を Nano-JASMINE に適用す ると、撮像方式や中心検出に使用するデータの違いから問題が生じる。まずは、データの次元を落とす 処理によって中心検出に使用できる値が減少する問題だ。Gaia は 12pixel×12pixel のデータを中心検 出に用いるのに対し、Nano-JASMINE は 5pixel×9pixel のデータを中心検出に用いる。この違いから、 LSF での星像中心位置決定法を Nano-JASMINE を適用すると、5 つの値しか解析に用いることが出来ない ため、目標とする精度での中心検出は困難だと予測される。また、このデータの次元を落とす処理によ り、観測機器にエラーが生じた時の補正が困難になるという問題も生じている。

これらの問題に対処すべく、我々はGaiaのLSFによる1次元での星像中心位置決定法を参考にして、 Nano-JASMINEのPSFによる2次元での星像中心位置決定法を構築した。更に、光学計算により算出された Nano-JASMINEのPSFのモデルデータを用いて、このPSFによる星像中心位置決定法の検出精度評価を行った。また、LSFでの星像中心位置決定法で行われた処理や各パラメータの変更によって中心位置検出精度がどのように変わるかを検証した。

References

[1] Astronomy & Astrophysics, Volume 538, id.A78, 47 pp

有機半導体を用いた放射線検出器の開発

原子核・ハドロン物理学研究室 石井佑季

Abstract Alpha condensed state is expected to provide a good opportunity to study the low-density nuclear matter. To search for such states, we need highly thinner detectors than normal Si detectors. In the present work, we developed an organic semiconductor detector and carried out the first performance test.

© 2015 Department of Physics, Kyoto University

現在、原子核物質の状態方程式にかかわる知見の多くは、天然に存在する原子核と同様に飽和した核 密度を持つ核物質にかかわるものに限定されており、低密度、高密度の物質に関しては多くの研究の余 地が残されている。近年の理論計算により、低密度核物質中ではαクラスターが主要な構成要素となり、 ボゾンであるαクラスターが最低のエネルギー準位に凝縮した、α凝縮状態と呼ばれる核物質の新たな存 在形態が指摘されており、実験的研究の展開が期待されている。

α凝縮状態は、A=4N核との超前方角度α非弾性散乱によって効率的に励起することができる。さらに、 励起されたα凝縮状態はA=4(N-1)核のα凝縮状態の波動関数との重なりが大きいため、ひとたびα凝縮状 態が励起されれば逐次α粒子を放出しつつ軽い核へと崩壊することが予測される。このことから、非弾 性α粒子と崩壊α粒子の同時計測によるα凝縮状態の探索が着想された。しかし、崩壊α粒子のエネルギ ーは1~4 MeV 程度と非常に小さいため、粒子識別が非常に難しい。

低エネルギーα粒子の検出には、E-ΔE 法や TOF を用いた方法が考えら れる。しかし、E-ΔE 法は現状で入手可能な Si 検出器が厚すぎるため、透 過型検出器を用意することができない(Fig. 1)。また、TOF による分離は 粒子弁別の分解能が十分ではなく、改善のためには標的との距離をとる必 要がある。すると立体角を確保するために必要な検出器面積が増え、コス ト面での不利が生じる。

そこで我々は有機半導体検出器の開発を実施している。有機半導体素子 は、有機物質をフィルム上に蒸着して作成するため、従来の無機半導体 素子に比べ、非常に薄い検出器を低コストで作成することが可能であり、 前述の透過型検出器として利用できると期待される。

本研究では、開発の第一段階として共同研究者である山形大学有機エレトロクニスイノベーションセンターのプロジェクト研究員・小林秀幸 氏から Fig. 2 に示す構造の有機半導体素子の提供をうけ、放射線検出が 可能であるかの検証実験を行った。検証にあたって大きな課題として予 想されたのが、素子が非常に薄いために透過粒子のエネルギー損失が小 さく、検出器からの信号が小さくなってしまうという困難である。

本研究ではペルチェ素子を用いて検出器を冷却することによりノイ

High E 器田製 副型 器田製 副型 器 上ow E 图 型 系 在 E - ΔE

Fig. 1. $E-\Delta E$ detection.



Fig. 2. Schematic view of organic semiconductor detector.

ズの低減を図った。また、信号の波高を増大させるために、α粒子よりもエネルギー損失の大きな¹⁶O ビームを用いて検証実験を行った。本研究の最終的な目標は低エネルギーα粒子の検出であるが、α粒子 のエネルギー損失は小さく、現在の素子で十分なシグナル/ノイズ比を得ることが難しいと考えられた ため、今回の検証実験では放射線計測による信号を確認することを第一とした。

今回性能試験を行った有機半導体素子では、通常の有機発光デバイスと同様の構造を採用したために 有感領域を十分に厚くすることができなかったが、将来的には複数の素子を積層するタンデム構造の導 入によって有感領域を増大させ、α粒子を始めとする軽粒子についても検出可能になると期待される。

検証実験は大阪大学豊中キャンパスにあるバンデグラフ加速器施設において 2014 年 11 月から 2015 年 1 月にかけて計 3 回実施した。

本論文では、作成した素子の構造と検証実験のセットアップについて記述するとともに、有機半導体 検出器の基礎特性について報告する。

ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊探索実験 AXEL の ための光検出器 MPPC の評価

素粒子物理学研究室 石山優貴

Abstract AXEL is an experiment to search for the neutrinoless double-beta decay using a Time Projection Chamber with massive xenon gas. ElectroLuminescence ultraviolet light generated by ionization electrons is detected with MPPC photosensors. We evaluated the performance of MPPC for ultraviolet light.

© 2015 Department of Physics, Kyoto University

標準模型を構成する基本粒子の中でもニュートリノについては依然として分からないことが多い。例 えば、質量については上限しか分かっていない。また、現在は3種類しかないとされているが、非常に 重い右巻きニュートリノが存在することによって、観測されている3種類のニュートリノは非常に質量 が軽いのではないかとするシーソー機構という理論もある。この理論はニュートリノが自身の反粒子で あるというマヨラナ性を持つという観点から構成されている。このマヨラナ性を実験的に確認する上で 強力な物理現象がニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊(0v β β) である。

¹³⁶Xe はニュートリノを伴う二重ベータ崩壊(2 $\nu \beta \beta$)をする核種として知られており、0 $\nu \beta \beta$ 崩壊 する核種の候補の一つである。0 $\nu \beta \beta$ 崩壊は半減期が10²⁵年以上と非常に稀に起こる反応であるため、 キセノンを大質量にすることで崩壊確率を上げる必要がある。また、崩壊の際生じる2つの電子のエネ ルギーと軌跡を観測することにより、0 $\nu \beta \beta$ かどうかを判別する必要がある。図1のエネルギースペ クトラムを見ると、背景事象や2 $\nu \beta \beta$ 崩壊のテールと区別しなければならない。そのため高エネルギ ー分解能が必要になる。

AXEL 実験はキセノンガスを 30 気圧 1 トン詰めた大質量高エネルギー分解能 TPC で 0 v β β 崩壊を探 索するという計画である。読出し部分に工夫を凝らすことにより、高エネルギー分解能の達成を目指す。 その工夫とは、ElectroLuminescence によるイオン化電子の光増幅を 7.5mm 間隔のセル毎に行い、各セ ル内に置かれた MPPC 光検出器により測定するというものである。総光量から各事象のエネルギーを算 出する。この方式により、事象の起きた場所に依らず一様性の高いエネルギー測定が可能になると期待 される。

キセノンガス中で電子が移動すると、波長が170nm ほどの紫外光の ElectroLuminescence が発生する。 この紫外光を効率よく検出できるかどうかが高エネルギー分解能達成には重要である。本研究では1気 圧のキセノンガス中でトリウムを用いて ElectroLuminescence を発生させ、波長変換剤を用いた可視光 に感度のある MPPC を用いるべきか、紫外光に感度のある MPPC を用いるべきかを議論する。



Fig. 1. Energy spectrum of neutrino double-beta decay and neutrinoless double-beta decay



Fig. 2 ElectroLuminescence detected by a normal MPPC with wavelength shifter and a UV MPPC

EMRI-MBHにおける相対論的効果と古在機構

天体核研究室 岩佐真生

Abstract In hierarchical triple systems, Kozai mechanism can produce large amplitude oscillations of the inner eccentricities and inclinations. It is known that relativistic effects suppress this mechanism. Including relativistic effects and applying the secular theory, we study hierarchical triple systems whose outer semi-major axes decay due to radiation reaction. © 2015 Department of Physics, Kyoto University

Extream Mass Ratio Inspiral (EMRI) は銀河中心の大質量ブラックホール (MBH) の周りをコンパクト天 体が運動し重力波を放出する現象であり、強重力場の情報を引き出すことができるという点で重力波観 測の重要な対象となっている。また銀河の合体に際し、もう一つの MBH が付随し3体系が形成される可 能性があり、コンパクト天体が潮汐力により破壊され X 線などで観測されることが示唆されている。こ れは重力波観測を補うとともに host galaxy の特定ができるという点で重要である。 日本回はこのよう な現象が起こると期待されている MBH(m₀)-コンパクト天体(m₁)-MBH(m₂)で構成される階層的3体(図1) を考える。特に以下で述べる古在機構[1]と一般相対論的効果 の競合に着目した。

軌道傾斜角が十分大きい階層的3体における重要な機構と して、古在機構が知られている。これは内連星に摂動を与え る第3天体からのトルクにより、内縁の軌道の離心率・軌道 傾斜角・近点引数が振動する現象である。近年の観測により 離心率の大きな系外惑惑星の発見や星の10%程度が3体系で あることが認識されると、惑星系・コンパクト連星などの宇 宙物理的側面において古在機構は重要な役割を果たすと考え Fig.1. 階層的3体のイメージ図 られるようになった。



□──般相対論的効果、とくに近点移動の効果により古在機構が抑制されることが知られている[2]。 これまでの研究では、古在機構により内連星の離心率が大きくなった場合散逸効果(潮汐力、重力波放 出)が非常に有効に働くので、主に古在機構が初期に支配的である状況下での数値計算が多く行われて きた[3][4]。

本研究では、初期に一般相対論的効果が支配的である状況下から内連星・第三天体の両方に重力波放 出の効果を加えた計算、とくに第三天体の重力波放出による進化が内連星の重力波放出による進化より も早く起こる場合(宇宙物理学的な系としては先述したように MBH-EMRI-MBH で構成される階層的3体) に注目して計算を行った。つまり一般相対論的効果が支配的な状況下から古在機構が支配的になる方向 へと進化する系を考えた。またその結果を永年摂動論を用いて解析した。具体的には、簡単な Hamiltonian の位相空間の進化を断熱不変量を用いて追跡した。また、それを用いて内連星の離心率の 進化の振る舞いを再現した。

References

[1] Kozai Y., 1962 AJ ,67,591, Lidov. M. L. , 1962, Planet Space Sci.,9,719

- [2] Holman, M., Touma, J. & Tremaine, S. 1997, Nature., 386, 254-256
- [3] Blaes, O., Lee, M. H., & Socrates, A. 2001, ApJ,578, 775
- [4] Thompson, T.A., 2011, ApJ, 741, 82

M 理論の構成的定式化に向けた ランダム体積の新しい生成法について

素粒子論研究室 梅田直弥

Abstract M-theory is a strong candidate for the unifying theory including quantum gravity. Its fundamental degrees of freedom are expected to be membranes, but no analytical methods to handle their random volumes have been known. We construct a new model generating cellular decompositions of random volumes and investigate its analytical properties. © 2015 Department of Physics, Kyoto University

超弦理論では弦の励起モードに重力場以外にもゲージ場・物質場などが現れるため、超弦理論は現在、 重力を含む統一理論の最有力候補として活発に研究されている。摂動的に無矛盾な超弦理論は多数知ら れているが、それらの間の双対性から、M理論と呼ばれる理論の存在が示唆されている。それは、コン パクト化の極限でIIA型超弦理論に帰着し、低エネルギー有効理論が11次元超重力理論となるものであ るが、現在ではその基本的力学自由度は空間2次元に拡がった膜であると考えられている。

M 理論の定式化の候補の1つとして最も成功しているのが BFSS 行列模型[1]である。これは行列自由 度を持つ D0 ブレーンを基本自由度とする理論であるが、膜の理論を行列正則化したものとみなすこと もできる。この模型は行列の大きさが無限大になる極限でM理論を記述していると考えられている。こ の模型は線形近似の範囲で11 次元超重力理論から得られる結果と一致するなど多くの成功を収めてい るが、多体系における重力の非線形効果を考慮すると一般に一致しない[2]など、不完全な点も残って いる。また、行列の大きさを無限大にする極限は解析的な扱いが困難である。

一方、行列正則化を行うのではなく、ランダム体積を直接扱う方法も考えられる。その際、ランダム 面を用いた弦理論の定式化が参考になると思われる。そこでは、Feynman 図として世界面の三角形分割 を生成する模型を考え、弦の力学が記述される。この理論は行列模型で記述できるため、鞍点法などを 用いて解析的に扱えるという利点がある。そこで、膜の場合にも、Feynman 図として3次元世界体積の 四面体分割を生成する模型を考えることで、膜の力学を解析的に扱えることが期待される。これまで、 ランダム体積への拡張方法としてテンソル模型などが提案されているが、これらの模型では鞍点法など の行列模型の手法が使えず、解析的な扱いは困難である。

そこで、我々はランダム体積の新しい生成法を導入することで膜の理論の定式化を試みた[3]。通常 のランダム体積の議論では Feynman 図として四面体分割を考えるが、我々はより一般の3次元胞体分割 を考え、それを生成する模型を構築した。この模型ではランダム面の場合と同様に行列模型と対応させ ることが可能であり、解析的な扱いが容易となっている。また、理論に存在するパラメータの極限を考 えることで、四面体分割に制限することもできる。

本修士論文の前半では主にランダム面の生成による弦理論の記述と解析的な性質に関するレビュー を行い、ランダム体積への拡張方法を検討する。後半では、胞体分割を用いたランダム体積の新しい生 成法に関して、その具体的な構成法を示し、解析的な性質を調べる。

References

[1] T. Banks, W. Fischler, S.H. Shenker, L. Susskind, Phys. Rev. D55, 5112 (1997).

- [2] M. Dine, R. Echols and J.P. Gray, Nucl. Phys. B564, 225 (2000).
- [3] M. Fukuma, S. Sugishita and N. Umeda, work in progress.

時空の地平線の量子ゆらぎに着目した ブラックホール情報喪失問題の研究

基礎物理学研究所 岡﨑智久

Abstract Consideration of the formation and evaporation of quantum black holes forces us to abandon the semi-classical description of gravitation if unitarity and the equivalence principle hold in nature. A possible ignition of breakdown is the fluctuation of spacetime near horizons. We investigate its effects on evaporating black holes.

© 2015 Department of Physics, Kyoto University

量子力学では時間発展がユニタリー性を有している。よってもし現在の状態を完全に知ることができ れば、過去の状態を正確に復元することができる。この意味で情報は任意の過程で原理的には保存され ると考えられている。

ところがブラックホールを考えるとユニタリー性が危機に瀕する。一般相対性理論において、重力崩 壊に伴って形成されるブラックホールは、一度中に入ると何も出てこない時空の領域である。これに重 力の半古典量子論を適用すると、ブラックホールは放射を出して蒸発することが理論的に導かれた。放 射は重力崩壊する物体の詳細によらない熱放射であると計算されており、蒸発によって情報が失われる と考えられる[1]。これはブラックホールの情報喪失問題として知られている。

近年この過程を吟味することで、量子力学のユニタリー性、一般相対論の等価原理、および重力の半 古典量子論が両立しないことが明らかになった[2]。ユニタリー性を保とうとすると放射どうしに量子相 関が必要となり、半古典の記述をあらわに破る相互作用がない限りは、事象の地平線近傍で真空を保つ ために必要な量子相関を生成できなくなる。その結果、ブラックホールが蒸発によって質量が半分程度 になるまでに、事象の地平線に高エネルギーの励起が現れると主張された。

この仮説は等価原理を破っていて許容しがたいため、別の可能性も探られている。この問題は量子力 学と一般相対論を統合する際の矛盾を扱っているため、その解決は量子重力理論の理解に貢献すると期 待されている。様々な立場から提案がなされているが、それぞれに困難や不十分な点があり、現時点で は統一的な道筋は示されていない。

ユニタリー性と等価原理は基本原理であるため、ここでは半古典近似が破綻する可能性を追究する。 上記の議論から質量が初期の半分になる時点で既に破綻が見えなければならない。原因としてまず考え られるのは時空の曲率が大きくなり量子ゆらぎが無視できなくなることであるが、大きなブラックホー ルでは事象の地平線付近での曲率は小さく、内部の高曲率領域は外部空間と因果的に結ばれず影響を及 ぼすことができないので、不適当である。

そこで本研究では事象の地平線の持つ性質に着目した。事象の地平線付近で短波長のモードも遠方に 到達すると強い赤方偏移によって波長が長くなる。よって地平線近傍に存在する時空の小さな量子ゆら ぎが遠方では増幅されて現れると考えられる。半古典近似では地平線を含め時空を古典的に扱っている ので、その影響が議論を大きく変更する可能性がある[3]。

事象の地平線の位置が確率分布を持つモデルを考え、量子放射のスペクトルを計算した。その結果、 ゆらぎを小さくする極限において、全くない場合のスペクトルに帰着しないという不連続性が現れた。 これは、時空の微小な量子ゆらぎのために、半古典近似がブラックホール時空で適用できない可能性を 支持する。そこでユニタリー発展を保証する量子相関が現れるかを計算すると、相関の大きさ自体は非 常に小さいことがわかった。今後、蒸発の過程を取り入れた解析を行って、相関が累積することによる 効果を評価することが求められる。

References

[1] S. W. Hawking, Phys. Rev. D 14, 2460 (1976).

- [2] A. Almheiri, D. Marolf, J. Polchinski and J. Sully, J. High Energy Phys. 02, 062 (2013).
- [3] R. Brustein, Fortschr. Phys. 62, 255 (2014).

宇宙放射線環境下における 電子飛跡検出型コンプトンカメラの性能評価

宇宙線研究室 小田真

Abstract For a test of background rejection power of our electron-tracking Compton camera (ETCC), we emulated a space radiation environment including gamma-ray, neutron, and charged particles, using a high energy proton beam. As a result of this experiment, we proved that an ETCC keeps a good sensitivity by a powerful background rejection mainly based on particle identification utilizing dE/dx. © 2015 Department of Physics, Kyoto University

数百 keV から数 MeV までのガンマ線の観測は様々な天体現象の解明に役立つ。特に超新星爆発時に生成される元素からの核ガンマ線[1]は、宇宙の元素合成の仕組みを理解するための、MeV 領域でのみ観測可能な重要な手がかりである。しかし、このエネルギー領域では画像化が困難なコンプトン散乱が支配的であるため観測そのものが難しい。さらに全天に広くひろがったガンマ線放射や、宇宙線と衛星筐体との相互作用から生じる荷電粒子や中性子など大量の雑音が存在するため SN 比の悪い観測しか行えず[2]、MeV ガンマ線天文学は未開拓のままである。実際これまで最も成果をあげている COMPTEL でも SN 比を改善するためにカット条件を厳しくしたため、地上実験からの予想よりも検出感度が悪かった[3]。従って、MeV ガンマ線望遠鏡には強力な雑音除去能力が必須であり、その実証が重要である。

我々は 140MeV の陽子線を水ターゲットに照射することでガンマ線・中性子・電子などの 2 次粒子を 生成し宇宙放射線環境に近い環境を作り出すことに成功した。この試験環境下に設置したガンマ線検出 器(GSO シンチレータ)と中性子検出器(有機液体シンチレータ)の測定と、試験環境を再現した Geant4 に よるシミュレーションから、宇宙環境[4]と同様に数 MeV まで伸びる連続的なスペクトル構造と 1:1 程

度のガンマ線に対する中性子比が再現されていることを確認した(Fig. 1)。また、このシミュレーションで2次粒子の強度や比率はビーム強度と水ターゲットの大きさを変更することで調整可能であることも確認しており、今後様々な実験への応用が期待できる。

我々はこの環境を利用して、次世代ガンマ線望遠鏡として開発 中の電子飛跡検出型コンプトンカメラ(Electron-Tracking Compton Camera, ETCC)の雑音除去性能の試験を行った。ETCC は 散乱ガンマ線と反跳電子の運動量をそれぞれ測定することでコ ンプトン散乱を完全に再構成する。この飛跡情報から得られる エネルギー損失率による粒子識別(Fig. 2)などでこれまでに ない強力な雑音除去能力を実現しており、気球実験規模で MeV 領域のガンマ線をCOMPTELの10倍以上高い感度で観測可能であ る。本性能試験では高雑音環境下でも検出効率を落とすこと無 く、高い有意度で¹³⁷Cs 線源を検出し、ETCC の雑音除去性能を 実証することができた。これによりかに星雲などの天体観測を 目的とする気球実験に向けた ETCC 本体の準備は完了した。

- [1] E. Churazov+, Nature 512 (2014), 406
- [2] G. Weidenspointner+, A&A 368 (2001), 347
- [3] V. Schönfelder, NewAR 48 (2004), 193
- [4] T. Mizuno+, Proc.ofSPIE 7732 (2010), 77323C



Fig. 1. Spectra of gamma-ray, neutron, and charged particles



Fig. 2. Particle identification utilizing dE/dx

アクシオンのインフレーションで生成される カイラルな原始重力波についての研究

天体核研究室 小幡 一平

Abstract Axions, pseudo NG bosons, are supposed to exist in a wide range of masses in string theory, and affect various cosmological phenomena, like inflation. Interestingly, chiral gravitational waves could be produced by gauge fields coupled with axions during inflation. We focus on the possibility of detecting such gravitational waves in future experiments.

© 2015 Department of Physics, Kyoto University

「アクシオン」とはカイラル対称性の自発的破れによって生じる擬南部・ゴールドストーンボソンで あり、歴史的には QCD の強い CP 問題を解決するために導入された。しかし QCD のみならず、ストリン グ理論からも余剰次元のコンパクト化などを通して数多く生成され、幅広いエネルギー領域で現れるこ とが示唆されている。そのためアクシオンは星形成やブラックホール、CMB の偏光やダークマター、ダ ークエネルギーなどの多様な宇宙現象に影響を及ぼすことが期待されている。

初期宇宙の物理に関しても例外ではなく、今回我々はアクシオンがインフレーションに果たす役割に ついて注目した。通常、インフレーションを引き起こすスカラー場「インフラトン」は量子補正を考慮 すると紫外発散によってポテンシャルの形が大きく変化する。ポテンシャルの形は CMB の温度ゆらぎや 宇宙の大規模構造を形成した密度ゆらぎの初期スペクトルを決定するため、量子効果が大きいと観測に 整合させることが難しくなる。しかし、アクシオンがインフラトンであれば、アクシオンは並進対称性 をもつのでポテンシャルを量子補正から守り、CMB の観測結果と矛盾のないインフレーションモデルを つくることが可能になるのである[1]。

そして、インフレーション中にアクシオンがゲージ場と相互作用すると興味深い現象を引き起こす。 アクシオンはカイラル対称性のアノマリーを通してゲージ場の Chern-Simons 項と結合しているが、そ の結合が大きければゲージ場の真空期待値は有効的にインフラトンの役割を担うことが知られている [2]。さらに、Chern-Simons 項の効果によってゲージ場の量子ゆらぎは偏光成分の1つが増大し、時空 の量子ゆらぎに影響を与えることで、通常とは異なるパリティの破れた(カイラルな)原始重力波を生 み出す。そのため、カイラルな原始重力波の有無はアクシオンの存在を検証でき、初期宇宙の物理を特 徴づける重要なプローブとなり得るのである。しかしながら、従来のモデル[2]はカイラルな原始重力 波を過剰に生成して CMB の観測に整合せず、現実的なインフレーションモデルではなかった[3]。

本研究[4]で我々は、複数のアクシオンをモデルに含めることでこの問題を回避できる可能性を提唱 した。前述したように、アクシオンはストリング理論のコンパクト化などから非常に多く生成されるの で、この観点に基づくとインフレーションを引き起こすアクシオンもまた複数存在することが自然に期 待される。その中でゲージ場との結合定数に階層性のあるアクシオンがインフラトンになれば、CMB の スケールでカイラルな原始重力波の生成を抑え、観測に矛盾しないモデルが構成できる。さらに、CMB よりも小さなスケールではカイラルな原始重力波が増大することがわかり、将来の重力波の干渉実験な どでその兆候が検出される可能性があることを突き止めた。

References

[1] K. Freese, J. A. Frieman and A. V. Olinto,

"Natural inflation with pseudo - Nambu-Goldstone bosons," Phys. Rev. Lett. 65, 3233 (1990).

[2] P. Adshead and M. Wyman,

``Chromo-Natural Inflation: Natural inflation on a steep potential with classical non-Abelian gauge fields,"

Phys. Rev. Lett. 108, 261302 (2012) [arXiv:1202.2366 [hep-th]].

[3] P. Adshead, E. Martinec and M. Wyman,

"Perturbations in Chromo-Natural Inflation," JHEP 1309, 087 (2013) [arXiv:1305.2930 [hep-th]].

[4] I. Obata, T. Miura and J. Soda, "Chromo-Natural Inflation in the Axiverse," arXiv:1412.7620 [hep-ph].

SπRIT-TPC 実験のための トリガーシンチレータアレイの開発

原子核ハドロン物理学研究室 金子雅紀

Abstract We plan to measure charged pion ratio, n-p ratio, ³H-³He ratio from heavy ion collisions mainly by TPC in SAMURAI dipole spectrometer at RIBF to constrain density dependence of symmetry energy of nuclear matter. It is essential to select central collision for TPC data acquisition. We have developed trigger-scintillator-array which is sensitive to multiplicity to select central collision, and performed test experiment at HIMAC using light particle fragment from 300AMeV ¹³²Xe beam. The performance of scintillator and wavelength shifting fiber is reported. © 2015 Department of Physics, Kyoto University

核子の理想的な混合状態である核物質の物性は、その状態方程式によく従うことが知られている。特に、中性子過剰な核物質における状態方程式は中性子星の内部構造や、半径と質量の関係などを理解する上で重要である。核物質の状態方程式を記述するための物理量は、核物質のエネルギー(E)、温度(T)、密度(ρ)、アイソスピン非対称量(δ)であり、中性子星内部のような、T~0の極限における核物質のエネルギーは以下のように、アイソスピン非対称量により展開できる。ここで、 δ は ρ_n 、 ρ_p をそれぞれ核物質の中性子密度、陽子密度として、 $\delta = (\rho_n - \rho_p)/(\rho_n + \rho_p)$ である。

$E(\rho, \delta) = E(\rho, 0) + E_{sym}(\rho)\delta^2 + O(\delta^4).$

上式の第二項 E_{sym}は対称エネルギー項と呼ばれ、理論・実験の両面から制限を与える試みがされているが、原子核密度の二倍程度の高密度領域においては、未だ不定性が大きいのが現状である[1]。そこで、高密度領域における対称エネルギーの密度依存性に制限を与えるために、理研 RIBF 施設において、 複数種類のスズ同位体ビーム・スズ同位体ターゲットの衝突系から得られる荷電パイオン比や陽子ー中 性子比、³H-³He 比などを TPC 及び中性子検出器を用いて測定する実験(SπRIT-TPC 実験)が計画され、現 在その準備が進行中である。

ベントを優先的に選択してデータ収集を行うことを考えている。

我々は、重イオン衝突イベントにおける多重度に閾値をかけて トリガー信号を生成する検出器の開発を行っている。これにより、 対称エネルギーの寄与がより顕著に現れていると考えられる中心 衝突イベントに限定して、反応粒子のトラッキングを行うことが 可能となる。本研究では、実機完成へ向け、FPGA内部でトリガー 信号を生成するロジック回路を作成、各構成要素の性能評価を行 った。構成要素の一つであるシンチレータに、本実験で想定して いるエネルギーの粒子が入射したときの応答を評価するため、 HIMACにて 300AMeV の¹³²Xe ビームを用いた試験を行い、反応の多 重度として検出するために十分な光量が得られることやクロスト ーク問題などの知見を得た。更に宇宙線や線源を用いた評価によ り、テスト実験での問題点に対する方案を考察した。本論文では、 主にシンチレータ、波長変換ファイバーの取り扱いを決定するた めの性能評価について報告する。



Fig. 1. Density dependence of symmetry energy of nuclear matter [1]. The blue box and several lines are experimental constraints and theoretical prediction, respectively.

References

[1] Tsang et al., PRC86 (2012) 015803

KOTO 実験における高レート多線式比例計数管のための 波形整形機能を持つ信号増幅器の開発

高エネルギー物理学研究室 上路市訓

Abstract An amplifier was developed for a multi-wire proportional chamber (MWPC) to be used in the KOTO experiment. By using fast low-noise operational amplifiers and pulse shortening techniques, it reduced the long tail in the signal of the MWPC, which satisfied the requirements from its high rate condition.

© 2015 Department of Physics, Kyoto University

KOTO 実験は長寿命 K 中間子の稀崩壊事象 $K_L \rightarrow \pi^0 vv$ (BR=2x10⁻¹¹)の探索を行う国際共同実験である。Fig. 1 に $K_L \rightarrow \pi^0 vv$ 崩壊の例を示す。崩壊生成物の π^0 は直ちに 二つのガンマ線に崩壊し、CsI 電磁カロリメータによ って観測されるが、ニュートリノは検出されない。そ の他の K_L 崩壊に起因するバックグラウンドを削減す るため、崩壊領域を囲う検出器群によってカロリメー タ上の二つのガンマ線以外に粒子が存在しないこと を保証する。BHCV (Beam Hole Charged Veto) はそ



Fig. 1 Detectors used in the KOTO experiment.

の一つで、ビーム下流に逃げる荷電粒子を捉える。BHCV はビーム軸上に設置されているために、K_Lビーム中に大量に含まれるガンマ線や中性子によって発生する信号のレートが荷電粒子によるものより高く、現在使用されているプラスチックシンチレータは将来のビーム強度増強に耐えられない。そのため、低物質量で中性粒子に対する不感率がより高い多線式比例計数管(Multi-Wire Proportional Chamber, MWPC) に置き換える計画が進められてきた。

BHCV の信号読み出し系の設計では、荷電粒子の検出効率 99.5%を実現する低検出閾値で運用可能な信 号対ノイズ比(S/N)が求められるのに加え、高レートでの信号のパイルアップ(Fig. 2)に起因する 検出効率の悪化を考慮しなければならない。K_L→π⁰vv事象候補が観測されると、BHCV のヒットを同期す るための一定時間(数+ns)が設けられるが、パイルアップによってヒット時刻を見誤り同期判定時間 の外に出てしまうと、未検出となってしまうためである。パイルアップを抑制するために信号のパルス 幅は短いほうが良いが、MWPC の信号はイオンの低速なドリフトに起因する低周波成分によって数μs に わたって残留してしまう。そのため、信号増幅器にはパルス幅を短くする波形整形機能が必要である。

本研究では、低ノイズでローオフセットな高速オペアンプと波形整形回路を組み合わせることで、十 分な S/N を維持したままパルス幅 100 ns (Fig. 3)の出力を持つ信号増幅器の開発に成功した。また、 増幅器単体の性能試験、および、KOTO 実験で実際に使用されている読み出し系を含めた総合試験を通し て、開発した増幅器が BHCV を実際に使用するに当たって適切な性能を保持していることを保証した。



(n:e) optilidue 0.6 0.6 0.4 0.4 0.2 0 0 0 100 200 300 400 500 time [ns]

Fig. 2 Pile up of waveforms without pulse shortening. The arrows indicate the time of half maximum of each waveform.

Fig. 3 Comparison of output waveforms with and without shaping circuits.

行列模型における重力子散乱の 非摂動論的な解析

素粒子論研究室 川井 大輔

Abstract We propose a new way to compute two graviton-graviton scattering with a lattice simulation of the BFSS Matrix model. we test our method by calculating the potential associated with the scattering non perturbatively. We also argue technical aspects of it for efficiency. © 2015 Department of Physics, Kyoto University

超ひも理論は、量子重力とゲージ理論を統一的に記述すると期待されているが、未完成な理論でも ある。例えば、摂動的な真空が無数に縮退するため、その縮退を解く非摂動的な効果を取り入れた定式 化をすることが最重要課題の一つである。これを解決する有力な候補として T. Banks, W. fischler, S. H. Shenker, L. Susskindによって提唱された行列模型(BFSS 行列模型)[1]やIIB 行列模型[2]がある。 BFSS 行列模型では、重力子が D0-brane により記述される。N 個の D0-brane の有効作用は時間のみに 依存する N×N ユニタリー行列で記述されており、そのダイナミクスの解析は量子力学の問題に帰着さ れる。このため、量子色力学(QCD)の非摂動的な定式化として格子ゲージ理論が知られているが、格子 ゲージ理論の手法によって BFSS 行列模型の数値的な研究が可能である。

BFSS 行列模型には超対称性があり、そのダイナミクスに対して重要である。例えば、超対称性による非繰り込み定理により、重力子散乱では主要項が

$$V_{eff}(r) \propto -\frac{15}{16}r^{-7} + O(r^{-9})$$
 (r:2 重力子間の距離)

のように決まる[3]。一方で、超対称性をもつ理論の格子計算は一般に困難であり、未解決問題が無数 に存在する。その一つが、行列模型における重力子の散乱での非摂動効果である。このような超対称性 を保つ問題に対する数値計算の手法を考案するのが本研究の目的である。

本研究では、この重力子散乱の問題に対する格子を用いた非摂動計算法を提案し、その手法が超対称性理論の持つダイナミクスをよく記述するかを調べる。特に、V_{eff}~r⁻⁷の振舞いは超対称性が重要な役割を果たしている。よって、この振る舞いを出せるかは本研究で提案する手法で超対称性を適切に取り扱えているかを測るよい指標となり得るので、この振る舞いについて中心的に議論する。

この手法は行列模型のインスタントン効果など他の非摂動的な振る舞いにも適用しうる。したがって、 この手法がうまくいくことが分かれば、現在までに研究されていなかった行列模型の非摂動的な振る舞 いに対する新しい理解が得られると期待される。

また、近年はスーパーコンピューターが多くの分野で用いられるため計算時間を有効に活用する必要が生じており、計算効率の良いコードを書く技術が強く求められている。そこで、本研究では、研究に用いる数値計算コードを作成するにあたり、Rational Hybrid Monte Carlo アルゴリズム(RHMC)[4] や Open MPI による並列計算など格子 QCD で用いられている高速化技術を多く取り入れ、作成したコードがスーパーコンピューターで使用可能な速度を出せることを目指しコードの作成を行っている。これらの数値計算上の技術についてもレビューし、行列模型の数値計算コードをどのように書けば効率良く計算できるかについても議論する。

- [1] T.Banks, W. Fischler, S. H. Shenker, and L. Susskind, Phys. Rev. D 55, 5112, 1997
- [2] N. Ishibashi, H. Kawai, Y. Kitazawa, and A. Tsuchiya, Nucl. Phys. B498, 467 (1997)
- [3] M.R.Douglas, D. Kabat, P. Pouliot, S.H. Shenker, Nucl. Phys. B485:85-127, 1997
- [4] A.D.Kennedy, Nucl. Phys. Proc. Suppl. 128C (2004) 107-116

Derivation of Hydrodynamic Equations with Renormalization Group Method

Nuclear Theory Group Yuta Kikuchi

Abstract The formulation of the dissipative hydrodynamic equation in relativistic systems has not been established although it should provide a powerful tool to investigate the non-equilibrium phenomena. We have derived the relativistic dissipative hydrodynamic equation with the renormalization group method and also extended our formalism to reactive multi-component systems. © 2015 Department of Physics, Kyoto University

Many theoretical and experimental approaches imply that the quark-gluon plasma (QGP) which is thought to be created in the relativistic heavy ion collision is described by the hydrodynamics with very small dissipation (see [1,2], for instance). Therefore, a relativistic dissipative hydrodynamic equation is needed to study such a phenomenon, but a naive relativistic extension of the Navie-Stokes equation has fundamental problems such as ambiguity of flow velocity, existence of unphysical instability, and lack of causality and we need to introduce what is called the second-order hydrodynamic equation to avoid such problems. The way of formulation of the secondorder hydrodynamics is, however, controversial and many kinds of equation are proposed. For instance, the Israel-Stewart equation [3] which is a kind of the second-order hydrodynamic equation widely used for the analyses of time development of the relativistic heavy ion collision does not have established validity because ambiguous assumptions are imposed to derive it. In fact, it has been shown that its time-development was different from that of the relativistic Boltzmann equation quantitatively.

To eliminate the ambiguity in the derivation of hydrodynamics and perform the systematic formulation, the renormalization group method [4,5] has been utilized for the derivation of the first-order hydrodynamic equation [6] and second-order one [7] in the relativistic systems. In their works, they solved the Boltzmann equation faithfully and extracted the equation describing slow dynamics, i.e., hydrodynamics. The important point is that any assumptions are not imposed as opposed to the derivation of Israel-Stewart equation. In this thesis, we discuss the following two works we have recently studied. The one is that we have derived the second-order hydrodynamic equation from the relativistic Boltzmann equation taking into account of the quantum statistical effect which was neglected in the previous works. This effect should be included to investigate the behavior of Bose or Fermi fluid quantitatively. The other one is that we have extended our formalism to the derivation of the second-order equation in the reactive multi-component systems. This formulation is important for the study of QGP fluid because it is inherently multi-component fluid composed of quarks and gluons and, moreover, particle creation and annihilation occurs during scattering processes in such a system. Furthermore, the derivation of hydrodynamics from the underlying microscopic theory gives us the microscopic expressions for the transport coefficient. It is remarkable that we have obtained the new microscopic expressions for the second-order transport coefficients which have natural and plausible forms.

References

[1] Tetsufumi Hirano, Ulrich Heinz, Dmitri Kharzeev, Roy Lacey, and Yasushi Nara. Hadronic dissipative effects on elliptic flow in ultrarelativistic heavy-ion collisions. Physics Letters B, 636(6):299–304, May 2006.

[2] Paul Romatschke and Ulrike Romatschke. Viscosity Information from Relativistic Nuclear Collisions: How Perfect is the Fluid Observed at RHIC? Physical Review Letters, 99(17):172301, October 2007.

[3] W. Israel and J.M. Stewart. Transient relativistic thermodynamics and kinetic theory. Annals of Physics, 118(2):341–372, April 1979.

[4] LY Chen, N Goldenfeld, and Y Oono. Renormalization group theory for global asymptotic analysis. Physical review letters, 73(2):1311–1315, 1994.

[5] T Kunihiro. A geometrical formulation of the renormalization group method for global analysis. Progress of Theoretical Physics, 94(4):503–514, 1995.

[6] K. Tsumura, T. Kunihiro, and K. Ohnishi. Derivation of covariant dissipative fluid dynamics in the renormalization-group method. Physics Letters B, 646(2-3):134–140, March 2007.

[7] Kyosuke Tsumura and Teiji Kunihiro. New Forms of Non-Relativistic and Relativistic Hydrodynamic Equations as Derived by the Renormalization-Group Method. Progress of Theoretical Physics Supplement, 195(195):19–28, 2012.

電子飛跡検出型コンプトンカメラによる偏光観測実験

宇宙線研究室 岸本哲朗

Abstract Polarimetry has been important to obtain new information we couldn't get by existing procedures, such as spectroscopy. Since ETCC(Electron-Tracking Compton Camera) reconstructs a Compton scattering event of gamma-ray including its electron track, it gives a good capability of background rejection. We show that ETCC works good as a polarimeter. © 2015 Department of Physics, Kyoto University

X線やガンマ線天文学において、スペクトルやイメージ、光度曲線といった情報については調べられ ているものの偏光についてはよく調べられているとはいえない。しかしながら、宇宙からやってくる光 の偏光の情報を用いれば例えばガンマ線バーストのジェットの構造[1]や、ブラックホールの周辺構造 [2]、磁場情報を含めた粒子加速天体の放射領域について今までは得られなかった知見、特に非熱的現 象における磁場の関与などの情報が得られるため、偏光観測性能の良いガンマ線検出器はぜひとも必要 である。しかし、これまでは雑音の多さや感度の問題で十分な品質の観測は困難であった。 ETCC (Electron-Tracking Compton Camera) [3]は Compton 散乱を用いた検出器で sub-MeV/MeV 領域をタ ーゲットとする。ETCC の構造はガス TPC の周りにシンチレータが配置してあり、TPC で電子の飛跡を、 シンチレーターで散乱光子をとらえる。従来の Compton カメラとの違いは電子の飛跡情報を利用するこ とであり、Compton 散乱を完全に再構成することができる。これにより高いバックグラウンド除去能力 とイメージング能力、などの特徴を有している。これは ETCC で偏光が観測できれば広視野に加え、従 来よりはるかに高い感度による偏光のイメージングが可能になることを意味する。

近年、感度の向上に伴い偏光観測が現実味を帯びてきた。本研究では従来の Compton カメラでは困難 であった、弱線源由来のガンマ線によるコンプトン散乱光の偏光測定実験を当研究室で進行中の気球実 験 SMILE-II フライトモデルとなる ETCC で行った。実験は¹³³Ba 線源からのガンマ線を検出器の正面に 設置したパラフィンで散乱させることで 40 %程度の偏光をつくりだしそれを検出する。その結果、検出 器の偏光観測性能を示すある Q 値は 0.12±0.005 となり偏光は十分検出できている。S/N 比は 0.17 であ る。偏光を測定する上で現在の飛跡の再構成の方法には問題があることが判明したため、シミュレーシ ョンと実験の比較によりどのように改善すればよいか検討した。

[counts/s]

0

100

200



Fig.1 モジュレーションカーブ 縦軸はカウント数、横軸は 方位角。下のデータは雑音を除去しない場合。上は した場合である。点は実測値、実線は三角関数によ るフィットである。エネルギーは 320 keV 以下でカ ットしてある。

- [1] D. Yonetoku et al., 2011 ApJ743, L30
- [2] J. D. Schnittman and J. H. Krolik, ApJ 701, 1175
- [3] Y. Mizumura et al., 2014 JINST9, C05045

Fig.2 測定したスペクトル。上のデータは偏光光のスペクトル。下のデータはバックグラウンド。

500

600

700

300

Energy [keV]

400

LHC-ATLAS 実験 Run-2 に向けた Level-1 ミューオントリガーアルゴリズムと データ収集システムの改良

物理学第二教室 高エネルギー物理学研究室 救仁郷拓人

Abstract LHC is restarting in 2015 with higher luminosity. We will apply two upgrades in the ATLAS Muon trigger system accordingly. First, a new coincidence logic between TileCal and TGC is required. Second, triggers are vetoed when too many consecutive hits are observed in TGC. © 2015 Department of Physics, Kyoto University

CERN 研究所に設置されている陽子衝突型加速器 LHC は2012年まで重心系エネルギー8 TeV での運転を行った (Run-1)。LHC は13 TeV まで重心系エネルギーを引き上げて新粒子の生成断面積を大きくした上で、2015年に運転を再開する (Run-2)。Run-2 では更にバンチ衝突間隔を Run-1 での値 50 nsから 25 ns に引き下げて高ルミノシティでの運転を行う。この高ルミノシティ環境において Run-1 と同等の物理解析が行えるデータの質を保ったまま、LHC 性能向上による統計量増大の恩恵を得るためには、検出器側でもトリガーシステム・データ収集システムを改良する必要がある。本研究では ATLAS 検出器のハードウェアミューオントリガー、データ収集システムそれぞれに対して改良を行った。

1つ目の改良は、ハドロンカロリーメータ TileCal とミューオントリガー検出器 TGC 間のコ インシデンス要求によるトリガーアルゴリズム改 良である。Run-1 において TGC が発行するトリガ ーの約60%は、衝突点から飛来するミューオン以 外によって発行されていることがわかっており、こ のままではそれらの本来取得すべきでないイベン トのために Run-2 でのミューオントリガーレート が許容される範囲を大きく超えてしまう。これに対 して、本来取得すべきでないイベントを選択的に除 去するために、TileCal の情報を利用する手法を考 案した。TileCal は 3 層構造になっており、その最



Fig. 1. Distribution of Level-1 muons as a function of η and for offline selected muons

外層まで到達するのはほとんどがミューオンであることを利用してミューオン識別が行える。TileCal のエネルギー情報を利用して本来取得すべきでないイベントを選択的に除去するアルゴリズムを開発 したことにより Run-2 でのトリガーレートを削減できる。Fig.1 において 1.0 < $|\eta|$ < 1.3 でのトリガー削減が開発したアルゴリズムによるものである。従来のトリガーアルゴリズムと比べて、効率を 97%に保ったまま、範囲内のトリガーを15%まで削減できることを示した。本研究の結果は ATLAS 内で承認され [1] に採用されており、2015年中に必要なエレクトロニクスもインストールされる。

2つ目の改良は2012年に起きたデータロスへの対策である。2012年に TGC において通常の 100倍多いヒットが数µsにわたって発生し続けたために、ヒットレートが高くなりすぎてデータを ロスしてしまうことがあった。この原因は未だわかっていないので、Run-2 において同様の問題を起こ さないために、連続して大量のヒットがある場合はトリガーを VETO する機能が必要である。さらに、 VETO をする前後で検出器の信号を正確にモニタリングする必要もある。これらの要求を満たすために、 専用回路を開発した。

これら2つの改良によって Run-1 と比べて高ルミノシティ・高パイルアップ環境となる Run-2 にお いても Level 1 ミューオントリガーを Run-1 以上に高い性能で運転することを目指している。

References

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

X線天文衛星「すざく」による超新星残骸 G337.2-0.7の観測研究

宇宙線研究室 高田明寛

Abstract We report on the Suzaku result on the Galactic supernova remnant G337.2–0.7. Based on highly reliable background estimation, the X-ray spectrum is successfully divided into components of interstellar medium and ejecta. We measure the metal abundances in the ejecta precisely and discovered an Fe line. We determine the ejecta mass and supernova type, and discover new facts that ejected materials distribute asymmetrically and most of Fe is not heated up yet. © 2015 Department of Physics, Kyoto University

G337.2-0.7 は銀河内の超新星残骸(SNR)である。過去の X 線天文衛星 Chandra と XMM-Newton による観 測[1]では、Si などの重元素の組成比から Ia 型超新星起源の SNR であることが示唆されている。しかし ながら、Ia 型起源に特徴的な Fe の K 輝線は見つかっていなかった。

そこで私たちは、X 線天文衛星「すざく」を用いて G337.2-0.7 の長時間観測を行った。G337.2-0.7 は銀河面上に位置するためにバックグラウンドとして銀河面リッジ X 線放射(GRXE)が大きく寄与する。 また、イメージを解析すると視野外の明るいブラックホール連星 4U1630-47 からの迷光が入ってきており無視できないことが分かった。そこで私たちは GRXE のモデル[2]とシミュレーションで得た迷光のモ デルを用いてバックグラウンドスペクトルのモデル化を行った。

迷光とバックグラウンドの寄与を慎重に見積もった結果、これまでに検出されていた Mg、Si、S、Ar、 CaのK輝線に加えて、G337.2-0.7から初めて低電離FeのK輝線(~6.47 keV)を発見した。SNR全体の X線スペクトルは3成分の電離非平衡プラズマで再現できた。1つは太陽組成のプラズマであり、衝撃 波により掃き集められた星間物質起源であると考えられる。残り2成分のプラズマは高い重元素量をも っため、爆発噴出物起源である。星間物質と爆発噴出物を分離したことで、爆発噴出物の元素組成比と その空間分布を正確に決定した。

得られた爆発噴出物の Mg や Si といった重元素の組成比と質量から、この SNR が Ia 型起源であるこ とが分かった。しかしながら、Fe の質量を見積もると太陽質量のおよそ 0.04 倍であり、Ia 型で予想さ れるよりもかなり小さい値だった。これは大部分の Fe は未だ逆行衝撃波によって加熱されていないこ とを示唆している。また、SNR の中心に比べて北東では爆発噴出物の重元素量が大きく、重元素が北東 に偏った非対称な爆発が示唆される。



Fig. 1. (left) Spectrum of G337.2-0.7. The best-fit three optically-thin thermal plasma in non-equilibrium ionization models are shown as the red, green (ejecta) and blue (interstellar medium) lines, respectively. The black solid line and dotted lines are the background and the stray light. (right) Abundance ratios of the ejecta plasma relative to Si. The solid line is observed value and dotted lines are some theoretical models.

References [1] Rakowski, C. E., et al. 2006, ApJ, 646, 982.

[2] Uchiyama, H., et al., 2013, PASJ, 65, 19. [3] Takata, A., et al., PASJ, submitted.

(K⁻, K⁺) 反応を用いた Ξ ハイパー核分光実験のための 水チェレンコフ検出器の開発

原子核ハドロン物理学研究室 竹中耕平

Abstract Ξ -hypernucleus will be observed through the (K⁻,K⁺) reaction in J-PARC. We will install a water Cherenkov detector to reject protons scattered as background in the on-line trigger. We have developed a prototype of the detector through cosmic ray tests and evaluated the performance based on a test experiment at ELPH.

© 2015 Department of Physics, Kyoto University

ストレンジネス核物理学は、原子核中にハイペロンやK 中間子等のストレンジネス量子数S を持ち 込んでハイパー核を作りその構造や核力を調べることで、陽子と中性子の多体系としての原子核の枠を 越えて、より一般化されたハドロン多体系としての原子核の性質を理解する事を目的としている。これ までのハイパー核研究は、ストレンジネス S = -1 の系を中心に行われ、 Λ N 相互作用に関する詳細な 情報を得てきた。しかし、S = -2 の系の相互作用に関しては、多くの理論的予測が存在するものの[1,2]、 数種類のダブル Λ ハイパー核[3]を除き明確で系統的な実験的事実が皆無に近い。そこで、大強度陽子 加速器施設 J-PARC で、S = -2 の系である Ξハイパー核の存在を世界で初めて確認することにより、Ξ N、 $\Lambda\Lambda$ 相互作用についての情報を引き出し、マルチ・ストレンジネス多体系も含めたバリオン間相互 作用の性質を統一的に理解することを目指している。

その第一歩として、我々は入射運動量1.8 GeV/cの(K⁻, K⁺)反応を用いた Eハイパー核分光実験 E05 を J-PARC で予定している[4]。ところが、K⁻ビームが標的に照射されると K⁺だけでなくその 1000 倍程度に もなる多くの陽子が生じ、スペクトロメータ下流に散乱される。それがトリガー段階でバックグラウン ドとなり、データ取得効率を悪化させる。これを防ぐには、この陽子を少なくとも 90 %除去しなけれ ばならない。そこで、我々は水チェレンコフ検出器を導入することにした。これは K⁺と陽子が通過する 際の光電子数の差を利用して陽子除去を行うものである。まず、水チェレンコフ検出器の試作機を製作 し、宇宙線を用いて反射材や透過窓、光電子増倍管による光電子数の変化を調べ最適化を行った。また、 東北大学電子光理学研究センター(ELPH) で光電子数のビーム入射位置・角度依存性を調べた(Fig. 1)。 その結果、光電子数のビーム入射位置によるばらつきは約5 %以内であった(Fig. 2)。この結果を考慮 した上で陽子除去効率を見積もり、最終的に J-PARC E05 実験で使用する実機の最終設計を行った。



Fig. 1. Setup of a beam test at ELPH.



- [1] T. Motoba, S. Sugimoto, Nucl. Phys. A 835, 223 (2010).
- [2] T. Harada, Y. Hirabayashi, A. Umeya, Nucl. Phys. A 914, 85 (2013).
- [3] H. Takahashi et al., Phys. Rev. Lett. 87, 212502 (2001).
- [4] T. Nagae et al., J-PARC proposal E05.

Gas-jet 型 ISOL への適用に向けた レーザーイオン化法の基礎研究

核ビーム物性学研究室 谷口良徳

Abstract By applying the laser ionization method to a gas-jet type ISOL, KUR-ISOL, available nuclides at KUR-ISOL are extended. In order to examine whether atoms transported by gas-jet are ionized by laser or not, it is necessary to perform a feasibility test. An apparatus for the test was developed and tested. © 2015 Department of Physics, Kyoto University

ガスジェット型のオンライン同位体分離装置(KUR-ISOL, Kyoto University Reactor Isotope Separator On-Line)が京都大学原子炉実験所の原子炉に設置されており、²³⁵Uの熱中性子核分裂反応によって生成 される中性子過剰核の核分光実験やそれらを用いた物質科学実験が行われている [1]。

KUR-ISOLにおいて、不安定原子核は、原子炉の実験孔に別途設置された²³⁵Uのターゲット(UF4) と原子炉中性子との核分裂反応によって得られる。核分裂生成物(FP)は、ガスジェット法により、タ ーゲットチェンバーからイオン源(タングステンを用いた表面電離型イオン源)まで輸送され、イオン 源から引き出されたイオンは加速された後、電磁石により質量分離される。表面電離型イオン源は、主 に、アルカリ金属原子、アルカリ土類金属原子、さらに酸化法を用いた希土類原子のイオン化[2]が可 能であり、その他の元素のイオン化は難しい。そこで、表面電離型イオン源とは別のイオン源としてレ ーザーイオン源の可能性が検討されている。レーザーイオン源の特徴は、目的とする元素の第一イオン 化エネルギーに対応した波長のレーザーを照射すれば、原理的には全ての元素に対し1価のイオンを生 成できることにある。

レーザーを用いたイオン源は様々存在するが、未だガスジェット型に適用可能なレーザーイオン源は 開発されていない。ガスジェット型では、FP の輸送効率を上げるため、キャリアガスにエアロゾル物質 (PbI₂)を混ぜ、そのエアロゾルに FP を吸着させて輸送する。エアロゾルに吸着された FP は、そのま まレーザーが照射されても、イオン化できないと考えられるため、FP をエアロゾルから分離した後に、 レーザーが照射されなければならず、この点がガスジェット型にレーザーイオン源を適用させる上で難 しい点である。ガスジェット型 ISOL である KUR-ISOL にレーザーイオン源が適用できれば、今まで利 用できなかった²³⁵U の核分裂生成核が不安定ビームとして取り出せるため、より広範囲の原子核の構造 研究やそれを用いた物性研究に貢献できる。

本研究では、ガスジェット型 ISOL にレーザーイオン化法が適用できるかを検証するため、KUR-ISOL を模擬したガスジェット装置及びイオン化装置(Fig.1)を設計・製作し、安定同位体を用いて、レーザーを入れる前段階までの各部分の動作テストを行った。得られた結果を報告する。



Fig. 1. Schematic diagram of the test system.

References

[2] Y. Kawase and K. Okano, Nucl. Instr. Meth. B 37/38 (1989) 116-119.

^[1] A. Taniguchi et al., Nucl. Instr. Meth. B 317 (2013) 476-479.

チャーン・サイモンズ・マター理論の Level-Rank duality

物理第二教室 基礎物理学研究所 崔 在旺

Abstract I will check that a three dimensional Chern-Simons theory coupled to scalar fields is dual to the Chern-Simons theory coupled to fermion fields. This is mainly a review of the recent papers [1], [2], [3]. In large N limit, we can compute free energies and mass pole of regular and critical Chern-Simons-Matter theories exactly. And we can find that these quantities of the two theories exactly match under level-rank duality which interchanges the level of the Chern-Simons term and the rank of the gauge group. © 2015 Department of Physics, Kyoto University

3次元のチャーン・サイモンズ理論は多くの面白い性質がある。例えば、2次元のWess-Zumino-Witten モデルと対応し、チャーン・サイモンズ項の係数であるレベルとゲージ群のランクを入れ替える変換で ある level-rank duality があるということが昔から多くの論文によってわかっていた。この論文では、 この duality が物質場が入ったときにも成立するように拡張できるということを、分配関数の比較から 確認する。この論文では主に最近研究された[1], [2], [3]の論文を review する。

レベルkのU(N)のチャーン・サイモンズ理論に質量のない基本表現のスカラー場とフェルミオン場が 結合した場の理論の分配関数を計算する。Light-cone gauge を使ってゲージ固定する。ラージNの極限 は`t Hooft 結合定数 λ=N/k を固定し、N または k を無限大にする極限を取ることで得られる。ラージN の極限で厳密伝搬関数や有限温度の分配関数が厳密に計算できる。また、チャーン・サイモンズ項があ るため、ゲージ場によるホロノミの効果がラージNの極限でも無視できない効果になっているので、そ の効果も考えに入れる。

この計算により、レベル k_{YM}(k_{YM} =k-Nsign(k):繰り込みする前のレベル)の U(N) チャーン・サイモン ズ理論にスカラー場が結合した critical 理論と、レベル-N の U(k_{YM})の regular 理論の分配関数と mass pole が完全に一致する。反対に、スカラー場が結合したレベル k_{YM}の U(N)の regular チャーン・サイモ ンズ理論とフェルミオン場が結合したレベル-N の U(k_{YM})の critical チャーン・サイモンズ理論が同じ 分配関数や mass pole を持っていることが確認できる。ここで regular はゲージ場との相互作用以外の 他の相互作用項がない UV fixed point の理論を意味し、critical は質量パラメータを入れて、後でこ のパラメータで積分することで得られる IR fixed point の理論を意味する。

フェルミオンとスカラーが両方入ったチャーン・サイモンズ理論も考えて、level-rank duality で結合定数のある変換の下で、同じ分配関数と mass pole を持つ。このとき、結合定数をうまく調節すると N=2 の超対称性を持った理論になる。この場合の dual map で既に知られていた self-duality を再現する。[4]

この duality はフェルミオンの理論を対応するボソンの理論に結びつける。この意味で、3 次元での ボソン化だと思うことができる。また、level-rank duality は`t Hooft 結合定数 λ_{M} を $-1/\lambda_{M}$ に変換 させる。つまり、結合定数を逆数にする変換の下で duality をなしているので、S-duality の一つだと 思うことができる。従って、この duality は強結合の理論と弱結合の理論が対応していることを意味す る。

References

[1] O. Aharony, S. Giombi, G. Gur-Ari, J. Maldacena, R.Yacoby, "The Thermal Free energy in Lager N Chern-Simons-Matter Theories", [arXiv: 1211.4843] (2013).

[2]S. Giombi, S. Minwalla, S. Prakash, S. P. Trivedi, S. R. Wadia, X. Yin, "*Chern-Simons Theory with Vertor Fermion Matter*" [arXiv: 1110.4386] (2012).

[3] S. Jain, S. P. Trivedi, S. R. Wadia, S. Yokoyama, "Supersymmetric Chern-Simons Theories with Vector Matter", [arXiv: 1207.4750] (2012).

[4] A. Giveon, D. Kutasov, "Seiberg Duality in Chern-Simons Theory" [arXiv: 0808.0360] (2009)

伏見関数を用いた相対論的重イオン衝突における エントロピー生成機構の解析

原子核理論研究室 築地秀和

Abstract Early thermalization in heavy ion collisions at RHIC and LHC suggests that most of entropy is created in the short time 0.6-1.0fm/c. We calculate semi-classical time evolution of entropy which is defined by Husimi function and confirm that the entropy is created in Yang-Mills field with a Hartree approximation. © 2015 Department of Physics, Kyoto University

クォーク・グルーオンが閉じ込めから解放された状態をクォーク・グルーオン・プラズマ(QGP)と呼び、RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider : BNL)や LHC (Large Hadron Collider : CERN)における相対論的重イオン衝突 実験では QGP 生成の様々なシグナルが観測されている。完全流体模型はこれらの実験結果をよく再現することが知られており、0.6-1.0fm/c 程度までに系が局所熱平衡に達することが必要とされる[1]。しかし、この熱化 時間は摂動論的 QCD などでは説明できないほど早いものであり、「早い熱化」の問題として多くの関心を集め 盛んに研究がなされているが未だ解決には至っていない。

この「早い熱化」はハドロンとして観測される際のエントロピーの大部分が短い時間に生成されることを示唆 している。こうした重イオン衝突の初期段階ではグルーオンが大量に顕在化しているためグルーオンの古典場 としての記述がよく成り立つと考えられており、そのダイナミクスは古典ヤン-ミルズ場(CYM)によって記述され る。CYM におけるエントロピーについてはカオス性に起因するエントロピー生成率(コルモゴロフ-シナイエントロ ピー)が巨視的な値をもつことが示されている[2]。そこでの重要な示唆は初期条件の揺らぎが系のカオス性を 誘発するという点であり、揺らぎを量子論的な揺らぎとして取り入れてエントロピー生成を直接議論することが 大きな課題となっている。

伏見(Husimi)関数 f_H は、量子力学における密度行列の「位相空間」での定式化であるウィグナー関数をガウス関数で粗視化して正定値を満たすようにした量子論的分布関数であり、これから伏見-バール(H-W)エントロピー S_{HW} が定義される:

$$S_{HW} = -\int dp dq f_H(p,q;t) \log f_H(p,q;t)$$

本研究ではウィグナー関数の半古典的な時間発展を計算することで H-W エントロピーの時間発展を解析する。 そのための数値計算法として「試行粒子法」に加え、独自に「二段階モンテカルロ法」を考案し、まずは少数自 由度の量子力学系[6,7]に適用する。そこで各手法の特性と有効性を明らかにするとともに、先行研究では見ら れなかった振る舞いについて考察を加える。次にヤン-ミルズ場の理論への拡張を試みる。ここでは正準変数 を用いた拡張を考えており、場の理論においては汎関数積分を数値的に実行する必要があるため数値計算上 非常に挑戦的な試みである。今回、ハートリー近似を用いて求めてはいるが H-W エントロピーが有意に増加す ることを確認した。今後、高エネルギー重イオン衝突での「早い熱化」などの問題への展開が期待される。

- [1] U.W.Heinz, AIP Conf. Proc. 739, 163 (2005).
- [2] T.Kunihiro, B.Muller, A.Ohnishi, A.Schafer, T.T.Takahashi, A.Yamamoto, Phys. Rev. D82, 114015 (2010); H.Iida, T.Kunihiro, B.Muller, A.Ohnishi, A.Schafer, T.T.Takahashi, Phys. Rev. D88, 094006 (2013).
- [3] A.Wehrl, Rev. Mod. Phys. 50, 221 (1978).
- [4] K.Husimi, Proc. Phys.-Math. Soc. Jpn. 22, 246 (1940).
- [5] E.Wigner, Phys. Rev. 40, 749 (1932).
- [6] T.Kunihiro, B.Muller, A.Ohnishi, A.Shafer, Prog. Theor. Phys. 121, 555 (2009).
- [7] H-M.Tsai, B.Muller, Phys. Rev. E85, 011110 (2012).

次世代ガンマ線天文台CTA大口径望遠鏡初号機搭載に向けた GHz 波形サンプリング回路の性能評価

宇宙線研究室 土屋優悟

Abstract We have developed the readout system using an analog memory to be installed on the first Large-Sized Telescope of CTA, which is the next generation ground-based VHE gamma-ray observatory. It samples waveforms of 7 PMTs at 1 GHz with low power consumption. We report the performance of the system. © 2015 Department of Physics, Kyoto University

Cherenkov Telescope Array (CTA)計画[1]は現行の望遠鏡よりも一桁以上高い感度で 20 GeV から 100 TeV 以上の従来よりも広い範囲のガンマ線を観測する次世代の大規模チェレンコフ望遠鏡群の国際共同 建設計画である。CTA では 1000 を越える線源天体を検出・観測することで、高エネルギーガンマ線天文 学を飛躍的に発展させることが期待されている。チェレンコフ望遠鏡は、地球大気に入射したガンマ線 が作る空気シャワーからのチェレンコフ光を用いて元のガンマ線のエネルギーや到来方向を間接的に 観測する。CTA 大口径望遠鏡は 20 GeV から 1 TeV の低エネルギー領域を観測するもので、口径 23 m で 南北半球に 4 台ずつ建設される。焦点面検出器として使用される光電子増倍管 (PMT)から得られるチェ レンコフ光の信号は数 nsec 程度の短い時間的広がりを持ち、観測する際には同時に数百 MHz 程度のレ ートで夜光などのバックグラウンドが入射してくる。そこで波形サンプリングを GHz で行い、信号の積 分時間を数 nsec 程度まで短くすることがバックグラウンドとの分離のために求められる。しかし使用 される PMT は 1 台あたり 1855 本にもなりカメラ内での発熱を考慮すると GHz サンプリングを消費電力 の大きい Flash ADC 方式で行うことは非常に困難である。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 を用いて低消費電力での GHz サンプリングを達成している。

本修士論文では CTA 大口径望遠鏡初機への搭載に向けた読み出し回路の改良と性能評価について報告 する。試験の結果、ノイズレベル ~0.09 phe (RMS) 、タイミングジッター 20 ps 以下、ダイナミック レンジ1~2000 phe 以上、小信号に対し帯域 300 MHz (-3 dB)、クロストーク 0.2%以下、消費電力 2.7 W/PMT という結果が得られた。この他、トリガ回路やスローコントロールボードなどの新たに改良され た周辺機器との接続下における波形取得試験も行い、より望遠鏡搭載状況に近い環境での動作試験に成 功した。



Fig. 1. Photograph of the camera module with a 7-PMT cluster.



Fig. 2. PMT waveform sampled with the latest camera module at 1 GHz.

References

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

高強度レーザーと薄膜の相互作用により加速される電子の 金属ワイヤーを用いた誘導に関する研究

レーザー物質科学研究室 寺本研介

Abstract We have demonstrated experimentally the guidance of laser accelerated electrons by a metal wire set nearby but separately from the laser irradiation foil target (the electron source). Energy and intensity of electrons guided along the wire are higher as the space between the foil target and the wire is smaller.

© 2015 Department of Physics, Kyoto University

高強度短パルスレーザーと薄膜ターゲットの相互作用により発生する高速電子は高輝度、短パルス、 点源の特徴を持つ。この電子線源の応用の一つとして、フェムト秒の時間分解能を持つ超高速電子線回 折法が考えられている[1]。高品位な超高速電子線回折を実現するためには、より短パルス、高強度な 電子線が求められる。薄膜ターゲットから発生する電子線はほぼ等方的に放射されるため指向性が悪い。 指向性を改善することで高強度な電子線を得ることが期待できる。我々は今までに、高強度短パルスレ ーザーを金属ワイヤーターゲットに照射するとワイヤー軸方向に電子線が誘導されることを報告して きた[2][3]。この結果、電子線の指向性が向上し、薄膜ターゲットよりも高強度な電子線を生成するこ とに成功した。電子はワイヤー径方向に形成される電場によって誘導されていると考えられる。この電 場の由来としてレーザーにより誘起され、ワイヤー表面を伝搬する電磁波(表面波)が考えられる。本 研究では、電子線の発生部分(薄膜ターゲット)と誘導部分(金属ワイヤー)を分離しても、表面波に より電子線を長距離誘導することが可能であることを実験により検証した。

Fig. 1(a)は実験配置の概略図である。波長 800 nm、パルス幅 40 fs、集光強度 3.5×10¹⁹ W/cm²のレ ーザーパルスを厚さ 11 μm の A1 薄膜に照射して電子を発生・加速し、近傍に配置した金属ワイヤー(タ

ングステン、直径 300 µm、長さ 150 mm)を 用いて誘導する。金属ワイヤーは薄膜の裏 面に垂直に設置してあり、薄膜と金属ワイ ヤーは距離(*D* mm)の間隔を設けてある。 電子は積層させたイメージングプレート (IP)で検出し、空間放射分布を測定した。

Fig. 1(b)は典型的な実験結果である。上 段が1枚目のIP、下段が2枚目のIPで測 定した電子の空間放射分布である。電子は 明らかにワイヤーに沿って誘導されてお り、リング状の構造を持って分布している。 さらに、電子線は距離Dによって強度とエ ネルギーが異なり、Dが小さいほど強度は 強く、エネルギーは高くなる傾向があった。 電子の誘導には、表面波が寄与していると 思われるが、薄膜とワイヤーは分離している ので、レーザープラズマにより発生したパル ス電磁波が薄膜-ワイヤー間の空間を伝搬し ワイヤーの表面波に移行したと考えられる。

- [1] S. Tokita et al., Phys. Rev. Lett. 105 (2010) 215004.
- [2] S. Tokita et al., Phys. Rev. Lett. 106 (2011) 255001.
- [3] H. Nakajima et al., Phys. Rev. Lett. 110 (2013) 155001.



Fig. 1. (a)Experimental setup to observe the special distributions of electron emissions. (b) Typical images of electron emission obtained on IPs.

KOTO 実験の中性ビーム中で荷電粒子を検出する

Thin Gap Chamber の開発

高エネルギー物理学研究室 中桐 洸太

Abstract The KOTO experiment aims to search for the rare direct CP-violating decay, $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \nu$. We designed a thin gap chamber for the experiment, which is installed downstream in-beam area. We produced a prototype chamber, evaluated its performance, and achieved and 99.9% efficiency and 20-ns time jitter.

© 2015 Department of Physics, Kyoto University

KOTO 実験は J-PARC の大強度陽子ビームを用いて長寿命中性 K 中間子稀崩壊事象 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \nu$ の世界初 観測を目指しており、これを通しての素粒子標準理論を超える新物理探索を目的とした実験である。シ グナル事象の候補として" π^0 が崩壊して生じた 2 光子が電磁カロリーメータで観測され、かつ他に何 も観測されない"ことを要求するため、生成した K_L 粒子をコリメータにより細く絞って検出器エリアへ 輸送し、全立体角を覆うように検出器を配置している (Fig. 1)。

KOTO 検出器群の内の1つである Beam Hole Charged Veto (BHCV) は検出器群下流部のビーム中に設置 され、ビーム軸上に飛んでくる K_L 粒子からの荷電崩壊生成粒子を捉える役割を持つ検出器である。K_L ビーム中には多量の中性子や光子が残存しており、これらと BHCV そのものが反応して粒子検出の信号 を誤発行してしまう (Accidental hit)。 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \nu$ 事象をとらえたのと同じタイミングでこのような ことが起こると、シグナル事象を検出できない (Accidental loss)。

現在 BHCV は 3mm 厚のプラスチックシンチレータと PMT で構成されているが、2013 年 5 月の 24 kW ビームでの本実験ですでに 10%程度の Accidental loss が生じており、KOTO 実験のデザイン値である 300 kW ビームでは 30%以上の Accidental loss が見込まれている。

これを削減するため、物質量が少なく中性子・光子と反応を起こしにくい Multi-wire chamber、さら にその中でも高レート環境下でもゲイン低下を起こしにくい、ワイヤー・カソード間距離が短い thin gap chamber[1]を用いた BHCV を考案した。

本検出器の大きな特徴は、(1)カソード面として物質量を減らすためにポリイミドフィルムにカーボ ンを塗布したものを用いていることと、(2)ガスとして CF₄と n-Pentane を混合した電子のドリフト速度 の速いガスを用いていることにある。ドリフトの速いガスを用いるのは、粒子が BHCV に到達してから 検出信号を出すまでの time jitter を短くし、カロリーメータで2光子を検出した時に BHCV での粒子 検出信号の有無をチェックする時間幅を短くして Accidental loss を減らすためである。

小型試作機を製作し(Fig.2)、電子ビームを用いた性能評価を行った結果、99.9%以上の検出効率、20 nsのtime jitterを達成した。さらにKOTO実験での300 kW ビーム時相当のレートにおいての顕著なゲイン低下も見られないことを確認して、BHCVとしてのデザインを決定した。





Fig. 1 KOTO detector.

Fig. 2 Prototype chamber.

References

[1] Majewski, S. et al., Nucl. Instr. and Methods in Phys. Research 217, 265-271 (1983).

高強度レーザー・薄膜相互作用により加速される陽子線の 計測に関する研究

レーザー物質科学分科 中島裕人

Abstract We have developed the energy spectrum diagnostics for laser-driven proton beams by time-of-flight technique with less background noises. In addition, it is confirmed that higher proton beams are generated from nanostructured targets. © 2015 Department of Physics, Kyoto University

高強度で短パルスのレーザーを薄膜ターゲットに照射すると、MeV オーダーのエネルギーを持つ陽子 線が発生することが知られている(以下、レーザー加速陽子線)。レーザー加速陽子線は、短パルス、 低エミッタンス、発生装置が小型などの特徴を持ち、様々な応用が期待される。またレーザー加速陽子 線のエネルギースペクトルはマクスウェル分布に従い、ピークを持たない幅広いスペクトルとなる。そ の特徴のためにレーザー加速陽子線は、陽子線ラジオグラフィ¹⁾に応用されている。本研究では、レー ザー加速陽子線のエネルギーアナライザーを設計するとともに、ターゲットとして表面にナノ構造持つ 薄膜を用いることで陽子線の最大エネルギーの向上を目指した。レーザー加速陽子線の検出器としては、 固体飛跡検出器 CR-39 がその計数効率の高さから広く用いられているが、CR-39 での検出にはエッチン グ処理が必要であり、その場、その時刻での確認ができない。実験効率向上のためにも、エネルギー測 定のためのオンラインアナライザーが必要であるが、レーザー加速陽子線と同時に発生する X 線や電子、 散乱光などのバックグラウンドがノイズとして無視できないため、それらへの対策を施した検出器が必 要である。我々は、プラスチックシンチレータによる TOF(Time-Of-Flight)法を用いて、レーザー加速 陽子線のエネルギーを測定するための検出器を設計した。Fig.1 にその概略図を示す。プラスチックシン チレータの厚みは X 線を検出せず、4MeV までの陽子を止めるようにしてある。また、散乱光によるノ イズを減らすため、プラスチックシンチレータの手前にはアルミ箔を設置した。シンチレータと薄膜タ ーゲットの間には、低エネルギーの電子がシンチレータに入射するのを防ぐ双極子磁石を設置してある。 以上の工夫により、X線や電子、散乱光などのバックグラウンド成分を抑制し、TOF 法によりレーザー 加速陽子線を測定することが可能になった。一方、レーザー加速陽子線のさらなる実用化へ向けて、最 大エネルギーの向上、発散角抑制、エネルギーの単色化などが課題となっている。特に最大エネルギー の向上は、小型の陽子線がん治療装置²⁾や PET(ポジトロン断層法)用陽電子放出核種の生成³⁾などを 実現する上で不可欠である。これまでに、表面にナノ構造を付与したターゲットを用いることで、高エ ネルギーの陽子線の発生に成功したという報告がある 4),5),6)。我々は、ターゲットとして表面にナノ構造 を持つ薄膜(モスアイフィルム)に着目し、この薄膜ターゲットにパルス幅 40fs のレーザーパルスを2

× 10¹⁹W/cm²の強度で集光照射し陽子線を発生 させた。検出器は複数枚の CR-39 を重ねたも の(積層 CR-39)を用いた。陽子線の最大エネ ルギーを、構造のない薄膜ターゲット照射時の エネルギーと比較した。結果モスアイフィルム ターゲットから、より高エネルギーの陽子線の 発生が観測された。



References

- [1] A. J. Mackinnon et al., Phys. Rev. Lett. 97 (2006), 045001.
- [2] S. V. Bulanov, V. S. Khoroshkov, Plasma Phys. Rep., 28 (2002), 453.
- [3] K. W. D. Ledingham et al., J. Phys. D: Appl. Phys. 37 (2004), 2341.
- [4] D. Margarone et al., Phys. Rev. Lett. 109 (2012), 234801.
- [5] T. Ceccoti et al., Phys. Rev. Lett. 111 (2013), 185001.
- [6] A. Zigler et al., Phys. Rev. Lett. 110 (2013), 215004.

T2K 実験ニュートリノビーム増強のための J-PARC Main Ring Intra-bunch feedback systemの開発

高エネルギー物理学研究室 仲村 佳悟

Abstract To determine yet-unknown CP violating phase in the lepton sector in T2K experiment, increasing the intensity of the J-PARC accelerator is an urgent subject. We have developed an intra-bunch feedback system and succeeded in reducing beam loss. And the highest beam power so far, 260kW was achieved with this development.

© 2015 Department of Physics, Kyoto University

T2K は長基線ニュートリノ振動実験で茨城県東海村 にある J-PARC(Japan Proton Accelerator Research Complex)から発射されたミューニュートリノビームを 生成点直後にある前置検出器と295km離れた岐阜県飛騨 市に位置するスーパーカミオカンデで観測する。現在は 反ニュートリノでの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測定及び CP 対称性を破る 位相の探索を目指している。CP 位相の探索には電子ニュ ートリノ出現モードと反電子ニュートリノ出現モード の精密測定が必要で、統計誤差の削減、つまり J-PARC



Figure 1: Schematic view of intra-bunch feedback system

から発射する陽子ビームの粒子数を増やすことが最も重要である[1]。J-PARC 主リングで粒子数を制限 しているものの一つにビームが発生させる電磁場をビーム自身が感じることでビームが不安定になり ビームロスを引き起こすビーム不安定性があげられる。J-PARC ではバンチの平均位置を検出しその位置 を補正するようにキックを加えるバンチ毎フィードバックシステムが開発され、ビーム不安定性を抑え ることに成功した。しかしバンチ毎フィードバックシステムはバンチ内振動を抑制することができず、 このバンチ内振動によって不安定性が引き起こされてしまう。そこで新たにバンチ内までフィードバッ クをかけるバンチ内フィードバックシステム(Intra-bunch Feedback system)を開発している(Fig. 1)。

このシステムには高周波まで感度を持つモニタが必要で あり、電極に指数関数型にテーパーを施すことで通常のス トリップライン型モニタよりも高周波帯域をもつモニタ を作成し、1GHz まで精度 15%の感度を持つことを確認した。 このモニタを用いてバンチ内フィードバックシステムの 試験を行いバンチ内振動の抑制し、ビームロスを抑えるこ とに成功した。2014 年 5 月からユーザー利用運転に使用 し、(Fig. 2) 2014 年 12 月には現在までの最高強度である 260kW での利用運転を達成し、T2K に 1.8x10²⁰POT (Proton on Target)の反ニュートリノビームを供給した。またマク ロ粒子シミュレーションによってバンチ内フィードバッ クシステムの特性の評価も行った。

References

[1] K. Abe et al., arXiv:1409.7469

[2] K. Nakamura et al., IPAC2014, Dresden, June 2014.

[3] K. Nakamura et al., Proceedings of 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aomori, Aug. 2014.

[4] K. Nakamura et al., IBIC2014, Monterey, September 2014.



Figure 2: The red line shows the survival ratio with the bunch by bunch feedback only, the green line is the one with the intra-bunch feedback in addition.

階層性問題とブレーンワールドモデル ~新しいモデルの構築に向けて~

素粒子論研究室 西 雅人

Abstract

Braneworld model is one of the promising candidates for solving the large mass hierarchy problem. This master thesis reviews basic properties of braneworld model with a focus on RS model, and those of models which take into account our expanding universe. © 2015 Department of Physics, Kyoto University

2012年の Higgs boson の発見を以て,標準模型は一応の完成となった.しかしながら,標準模型では 解決困難な問題が数多く存在し,それらは新たな物理の存在を示唆していると思われる.このような問 題の中で,「重力についての階層性問題」を解決できる可能性をもつ理論の1つに,ブレーンワールド モデルがある.これは,ゲージ粒子は(1+3)次元のブレーン上に束縛されるのに対し,重力子は余剰次元 方向に伝播し得るため,重力相互作用が他の相互作用に比べて弱いのではないか,というアイデアに基 づいている.

本研究ではまず, ブレーンワールドモデルの1つである, Randall-Sundrum モデル(RS モデル)に注目した. このモデルの特徴は

・余剰次元を1つ導入した AdS5時空(バルク)をS¹/Z2でコンパクト化

・張力のみを考慮に入れた(1+3)次元の static なブレーンを 2 枚バルクに埋め込む

というものであり,計量は

$$ds^{2} = e^{-2k|y|} \eta_{\mu\nu} dx^{\mu} dx^{\nu} + dy^{2}$$

となる(yは余剰次元を表す).2枚のブレーン上の電弱対称性が破れるエネルギースケールを,一方を TeV スケール,もう一方をプランクスケールに選ぶことを考える.このとき,ブレーン間の距離とAdS₅ の半径の両方をTeV スケール,或いはプランクスケール程度にとることが可能となり,新たに生じる階 層性はあまり大きくならないことが分かる.また,コンパクト化によって生じる各 Kaluza-Klein モー ドの質量スペクトルは,およそTeV の差を有していると分かり,実験によって観測される可能性を示唆 している[1].

しかしながら, RS モデルはブレーン上の時空が static であると仮定しており,これはビッグバンを 仮定した上での現実の宇宙,即ち加速膨張する宇宙とは相容れない.そのため近年では,ブレーン上の 時空が dS4であると仮定したモデルの研究も成されている[2].また,このようなモデルは,ブレーン上 にスカラーポテンシャルを導入した場合の解と類似していることが分かっている[3].AdS5を仮定した 場合,計量は

 $ds^{2} = \sinh^{2}[k(|y| + \varepsilon)] \{ -dt^{2} + c^{2Ht} \eta_{ij} dx^{i} dx^{j} \} + dy^{2}$

と表される. 任意パラメータである ε は零, 或いは負にとることが常であったが, 本研究では正の場合 も新たに考慮し, RS モデルにおいて展開された議論が同様に行えるかを検証した.

本論文の構成は以下の通りである.まず, RS モデルを中心にブレーンワールドモデルの基本的内容 のレビューを行い,膨張宇宙を考慮に入れたモデルの先行研究を紹介する.そして最後に,新たに考慮 したモデルを加え,階層性問題の説明,及びgravitonモード等について論ずる.

References

[1] L.Randall, R.Sundrum, Phys. Rev. Lett. 83, 3370 (1999); Phys. Rev. Lett. 83, 4690 (1999)

[2] A.Herrera-Aguilar, D.Malagón-Morejón, R.R.Mora-Luna, JHEP 1011, 015 (2010)

[3] A.Herrera-Aguilar et al, Gen. Rel. Grav. 46, 1631 (2014)

フェムト秒レーザーによる金属表面ナノ周期構造自己形成 に関する研究

レーザー物質科学 西井 崇也

Abstract Laser-induced periodic surface structures (LIPSS) with double femtosecond-laser pulses have been studied. Only with the first pulse irradiation, the second pulse induces the LIPSS, and its features are determined by the second pulse. The first pulse can be considered to change the surface state properties. © 2015 Department of Physics, Kyoto University

フェムト秒レーザーと物質の相互作用に見られる諸現象にはその物理が解明されていないものが多く ある。パルスレーザーを金属表面へ連続照射した際に自己形成されるナノ周期構造はその一つであり、 レーザー加工分野において注目されている。金属材料の表面の特性を変えることができることから幅広 い応用がある。例えば、摩擦低減、吸収率・反射率の制御による表面の着色、生体関連材料への応用が 報告されている。金属のアブレーションが起こるレーザーフルーエンス(単位面積当たりのエネルギー) になるようにフェムト秒レーザーを集光照射すると、入射レーザー光の波長入よりも短い間隔入(試料へ の垂直入射の場合で A=0.5~0.85入程度)の格子状の溝構造が、レーザー光の偏光と垂直方向に自己組織的 に形成される[1]。金属におけるナノ周期構造の格子間隔は入射レーザーのフルーエンス、波長、入射パ ルス数によって変化するという特徴をもっている。様々なパラメータで周期構造形成実験が行われてき たが、いまだに物理解明に至っていない。

本研究ではナノ周期構造自己形成においての初期の表面状態を制御し、周期構造形成に与える影響を 調べるために、パルス間隔を変えたダブルパルス照射実験を行った。表面研磨を施した金属(チタン)を 用いた。波長 800 nm、パルス幅 40 fs のレーザーをビームスプリッターで2分割し、入射角度 0°で

同軸に集光照射した(Fig.1)。ダブルパルスのうち、先のも のを第1パルス、後のものを第2パルスとし、それぞれのフ ルーエンス、両パルスの間隔、偏光を制御し、周期構造を形 成させた。50対のパルスを照射した後、表面をSEM(走 査型電子顕微鏡)によって観察をした。SEM像を二次元フー リエ変換することで得られるパワースペクトルのピーク値か ら周期構造の格子間隔を評価した。レーザーフルーエンス 50mJ/cm²+50mJ/cm²(シングルパルス照射によってナノ周期構 造が形成されるレーザーフルーエンス閾値は65mJ/cm²)で、パ ルス間隔を変え、偏光方向を直交させたダブルパルス照射によっ て形成されたナノ周期構造のSEM像をFig.2に示す。パルス間 隔を変えることで周期構造が変化することが見て取れる。また、 パルス間隔 40ps では第2パルスに直交した方向に周期構造が形 成され、第2パルスが周期構造形成に寄与していることが考えら れる。







Fig. 2. Images of scanning electron microscopy

Reference

[1] S. Sakabe, et a.l, Physical Review B 79, 033409 re(2009)

ブラックホールの情報損失問題と Fuzzball 予想

基礎物理学研究所 素粒子論研究室 朴敏奎

概 要

After Hawking pointed out that evaporation of black holes are not unitary, there are many progresses and studies to solve this black hole's information paradox. In this thesis we first review the original information paradox and then also review the fuzzball conjecture which is believed to resolve information paradox. We mainly consider the recent progress of 3- and 4-charge black hole system. ©2015 Department of Physics, Kyoto University

本修士論文ではブラックホールの情報損失問題と Fuzzball 予想に関してレビューを行う。特に今から説明する 3 電荷系と4 電荷系に対する Fuzzball 構成における新しいアイディアに基づいた最近の研究に関しても触れる。

Hawking によってブラックホールの情報損失問題が指摘されて以来、その解決に向けて多くの研究がなされて きた。最近は AdS/CFT 対応によって、ブラックホールの蒸発は対応する場の理論で記述できるはずであり従っ てユニタリーであろうと理解されている。しかしながらこのような理解では不十分であり、実際ブラックホールが 生成され蒸発する過程の詳細を重力側できちんと示す必要がある [1]。

ところで超弦理論の中には特異点がなくホライズンも持たない Fuzzball という解が存在すると予想されている [2]。また Fuzzball は古典極限で古典ブラックホールになると期待される。Fuzzball 解が実際に構成されている例と して2電荷ブラックホール (D1-D5) がある。この系に対して Lunin と Mathur は Fuzzball 解から計算したエント ロピーと Bekenstein-Hawking エントロピーが一致することを示した。しかしこのブラックホールは古典極限でホ ライズンがゼロになってしまい、情報損失問題に関する議論ができない。従って3電荷ブラックホール (D1-D5-P) や4電荷ブラックホール (D4-D4-D4-D0) に対する Fuzzball の構成が研究されるようになった [3]。しかしながら 2電荷ブラックホールの場合とは違い、3電荷ブラックホールに対してはこれまでに構成された Fuzzball 解から計 算したエントロピーと Bekenstein-Hawking エントロピーが一致しないことが問題になる [4]。

このエントロピーの不一致を解決する1つの可能性として、de Boer と重森はエキゾチックブレーンと Superstratum を用いることを提案した [5]。エキゾチックブレーンは余次元2で非幾何学的な性質を持つブレーンであ り、Supertube 効果 [6] によって Fuzzball 解に現れることができる。非幾何学的なエキゾチックブレーンを含む Fuzzball 解は非幾何学的な性質を持ち、今までの幾何学的な時空に限られていた Fuzzball 解の解空間が非幾何学 的時空も含んでもっと広がると思われる。また、Superstratum は Supertube 効果が複数回起きて生じる2つの変 数によってパラメトライズされる弦理論的な配位であり、Supertube より変数が増えたため解空間が広がると期待 されている。特にこれらを用いると Bekenstein-Hawking エントロピーが再現できると期待される。

以上のような背景の下で本修士論文では Fuzzball 予想に関する最近の研究までの流れについてレビューする。

参考文献

- S. D. Mathur, "The Information paradox: A Pedagogical introduction," Class. Quant. Grav. 26 (2009) 224001, arXiv:0909.1038 [hep-th].
- S. D. Mathur, "The Fuzzball proposal for black holes: An Elementary review," Fortsch. Phys. 53 (2005) 793-827, arXiv:hep-th/0502050 [hep-th].
- [3] I. Bena and N. P. Warner, "Black holes, black rings and their microstates," Lect. Notes Phys. 755 (2008) 1-92, arXiv:hep-th/0701216 [hep-th].
- [4] I. Bena, N. Bobev, S. Giusto, C. Ruef, and N. P. Warner, "An Infinite-Dimensional Family of Black-Hole Microstate Geometries," JHEP 1103 (2011) 022, arXiv:1006.3497 [hep-th].
- [5] J. de Boer and M. Shigemori, "Exotic branes and non-geometric backgrounds," *Phys.Rev.Lett.* 104 (2010) 251603, arXiv:1004.2521 [hep-th].
- [6] D. Mateos and P. K. Townsend, "Supertubes," Phys. Rev. Lett. 87 (2001) 011602, arXiv:hep-th/0103030 [hep-th].

宇宙大規模構造の3点統計を用いた 原始非ガウス性の決定精度

基礎物理学研究所 橋本一彦

Abstract Detection of primordial non-Gaussianity offers a direct test of cosmic inflation. We consider the three-point statistics of the imaging surveys, and estimate their detectability by using Fisher analysis. We find three-point statistics can break the degeneracy between non-Gaussianity parameters, helping us to constrain many inflation models.

© 2015 Department of Physics, Kyoto University

インフレーションにより生成される原始ゆらぎの統計性は、数多あるインフレーションモデルに対し て観測的に制限を与える有益な情報となる。特に、そのガウス統計からのずれである原始非ガウス性を 調べる事により、インフレーションを駆動する場の数が単一であるかどうかや、ゆらぎが生成される際 の非線形ダイナミクスなども明らかになる [1]。代表的な非ガウス性の1つである local type の原始非ガ ウス性を考えると、原始ゆらぎの3点統計を f_{NL} 、4点統計を g_{NL} 、 r_{NL} というパラメータで表すことがで きる。現在までに、Planck 衛星などの宇宙マイクロ波背景放射(CMB)の観測から f_{NL} の値は比較的強く 制限されているものの、 g_{NL} や τ_{NL} に関する制限は弱い。しかし、現在の決定精度より小さな f_{NL} を持ち ながら、大きな g_{NL} 、 τ_{NL} が実現されるモデルも提案されており、 g_{NL} や τ_{NL} などの高次の統計量にも強い 制限を与える研究が必要である。

近年、数値解析や理論計算から宇宙大規模構造に含まれる原始非ガウス性の影響が、銀河・ハローの クラスタリングを通じて本来非ガウス性の情報を持たないはずの2点統計にも現れることが明らかに された[2][3]。この効果により2点統計はより大きなスケールで振幅が増幅するという強いスケール依存 性を持つ。したがって、Hyper Suprime-Cam(HSC)などの測光観測から大スケールの銀河分布を読み取る ことで原始非ガウス性を制限できる。また、測光観測はCMB 観測とは独立なので、CMB による制限 の正当性を確かめられる。しかしながらこれまでの研究(e.g.,[4])では、2点統計に対する原始非ガウス 性の影響のみが調べられてきたにすぎず、2点統計に対する f_{NL}と g_{NL}由来の寄与は同じスケール依存性 を持つために、両者の区別は難しく厳しい制限がしづらい。

本研究は、測光観測で得られる銀河の個数密度ゆらぎ以外に非ガウス性への応答が異なる弱い重力レンズ効果にも注目し、これらを組み合わせた3点統計を用いて2点統計よりも原始非ガウス性を強く制限することを目標とする。そこでこれらの3点統計を、重力進化と銀河・ハローのクラスタリングの非線形性を摂動論的に取り扱う手法(統合摂動論)に基づき計算し、原始非ガウス性由来のシグナル・ノイズ比(S/N)とその決定精度を評価した。主な結果は以下のようになる。

I.原始非ガウス性由来の S/N は2点統計より3点統計の方が大きい。特に銀河の個数密度ゆらぎのみの 3点統計が最大で、HSC の場合2点統計の4倍以上のS/N が得られる。

Ⅱ.3 点統計を組み合わせると2点統計のみの場合と比べて決定精度が大きく向上する。HSC では決定 精度が f_{NL},g_{NL}で10倍以上、τ_{NL}で20%以上向上する。(f_{NL},g_{NL},τ_{NL}以外のパラメータは固定した。)

I.より、3点統計は2点統計よりも原始非ガウス性の情報を多く含んでいることがわかる。それだけで なく、3点統計は原始非ガウス性に対して2点統計と異なるスケール依存性を持つので、両者を組み合 わせることでパラメータの縮退がとけII.のように $f_{NL,g_{NL},\tau_{NL}}$ の決定精度を同時に向上できる。インフレ ーションモデルによって f_{NL} と $g_{NL,\tau_{NL}}$ の関係は異なるので、 $f_{NL,g_{NL},\tau_{NL}}$ を同時に制限することでこの関 係の中に現れる他のパラメータや同程度の f_{NL} をもつモデル同士を強く制限することが可能になる。

References

[1]T. Suyama, T. Takahashi, M. Yamaguchi, and S. Yokoyama. JCAP 1012:030,2010 .

[2] N. Dalal, O. Dore', D. Huterer, and A. Shirokov. Phys. Rev. D 77(12):123514, June 2008..

[3] N. Afshordi and A. J. Tolley. Phys. Rev. D 78(12):123507, December 2008.

[4] T. Giannantonio, A. J. Ross, W. J. Percival, R. Crittenden, D. Bacher, M. Kilbinger, R. Nichol, and J. Weller. Phys. Rev. D 89(2):023511, January 2014.

T2K 実験前置検出器 INGRID を用いた 反ニュートリノビーム測定

高エネルギー物理学研究室 林野竜也

Abstract INGRID is an on-axis near detector for the T2K long-baseline neutrino oscillation experiment which monitors the neutrino beam profile center and intensity. T2K performed the first anti-neutrino beam operation in 2014, and we have measured anti-neutrino beam properties using the INGRID. © 2015 Department of Physics, Kyoto University

T2K 実験は、茨城県東海村にある大強度陽子加速器施設 (J-PARC)で生成したニュートリノビームを、295km 離れた岐阜県 神岡町にある水チェレンコフ検出器スーパーカミオカンデで観測 する長基線ニュートリノ振動実験である。

T2K 実験はほとんど純粋なミューオンニュートリノを用いてミ ューオンニュートリノ消失事象からニュートリノ振動パラメータ θ₂₃と /m₂₃を、電子ニュートリノ出現事象からニュートリノ振動 パラメータθ₁₃と CP 位相角δ_{cp}を測定する。

2014 年、T2K 実験は電子ニュートリノ出現現象を発見し、CP 位 相角 δ_{cp} に制限をかけた[1]。T2K 実験は、レプトンセクターにお ける CP の破れ $\sin \delta_{cp} \neq 0$ の測定感度を向上させるため、反ミ ューオンニュートリノモードでの実験を 2014 年 6 月に開始した。 反ニュートリノビームの生成は、荷電 π 粒子を収束する電磁ホー ンの電流の向きを反転させることにより行われる。

T2K 実験ではニュートリノビームの方向を SK の方向から 2.5° ずらす off-axis 法を採用している。これにより、SK に到達するニュー トリノのエネルギーをニュートリノの振動確率が最大となるエネルギ ー(Sub-GeV 領域)にあわせている。この方法では、ニュートリノビーム 方向が SK で観測されるニュートリノエネルギーに強く相関するため、 ニュートリノビーム方向を 1mrad 以内の精度で測定することが必要不 可欠である。この目的のために、ビーム中心軸上にニュートリノビーム モニターINGRID (Interactive Neutrino GRID)を設置している。INGRID ビーム軸を中心に水平方向、鉛直方向に並べられた同一の構造を持つ 14 個のモジュール(Fig. 1)を用いてニュートリノビームの方向と強度を 測定している。1 台の INGRID モジュールは鉄とシンチレータ層のサン ドイッチ構造になっており(Fig. 2)、主に鉄でニュートリノが反応して 生成された荷電粒子をシンチレータ層で観測する飛跡検出器である。

本研究では、INGRID を用いて 2014 年に取得した反ミューオンニュー トリノビームデータにおけるニュートリノビームの方向と強度の安定 性を評価した。その結果、ビーム方向のずれは水平方向、鉛直方向いず れも±1mrad より十分に小さいこと、ビーム強度は 1%以内で安定して いることを確認した。現在、T2K 実験における反ニュートリノ振動解析 の主要な誤差は統計誤差であり、本研究で確認したビーム方向のずれに よる系統誤差は、統計誤差に比べ十分小さい。

References

[1] K. Abe et al. (T2KCollaboration), "*Observation of Electron Neutrino Appearance in a Muon Neutrino Beam*", (PhysRevLett.112.061802,2014).



Fig. 1 T2K 前置検出器 **INGRID** は同一 の構造を持つ 14 個のモジュールから なる。



Fig. 2 INGRID モジュール

超高強度極短パルスレーザー光高品位化のための プラズマミラー装置の開発と性能評価

レーザー物質科学 前田一弥

Abstract We have developed a plasma mirror system to reduce prepulse components associated with high intensity laser pulses. Enhancement of contrast ratio is beyond 10^3 at 1ps before the peak, while the reflectivity of plasma mirror depends on input laser fluence and about 70% at maximum. © 2015 Department of Physics, Kyoto University

超高強度極短パルスレーザーを得るための有効な手段として、CPA(Chirped Pulse Amplification: チャープパルス増幅)という手法が広く用いられている。この手法を用いて増幅されたパルスレーザー には、増幅自然光 (ASE) や分散補償不完全に起因する低強度の成分がパルスの裾野に付随しており、 とくにパルス尖塔の時間的に前の成分はプリパルスとよばれている[1]。高強度レーザー照射実験にお いてプリパルスが存在すると、パルスの尖塔部分が到達するよりも前にターゲット表面がプラズマ化し てしまうため、レーザー物質相互作用に大きな影響を及ぼす。そのためプリパルス成分の抑制は高強度 レーザー分野における重要な課題であり、抑制のための様々な手法が開発されてきた。プリパルス除去 のための有効な手段の一つとして「プラズマミラー」がある[2]。プラズマミラーは、ガラス基板にレ ーザーを集光照射し、プリパルスにより生成されるプラズマでパルスの尖塔部分を反射する原理であり、 このとき得られるコントラスト比(=ピーク強度/プリパルス強度)改善の値は、使用する基板に施さ れる無反射コーティングの反射率によって制限される。本研究では、レーザー装置に組み込む形でのプ ラズマミラー装置の開発と、プラズマミラー装置の性能評価を行った。

Fig.1 に我々が開発したプラズマミラー装置の概念図を示す。一対の誘導ミラー対を挿入することに より、出射後のビームラインを変更することなくプラズマミラー使用/不使用を選択することが可能な 構造となっている。

自作の三次オートコリレーターを用いて出射パルスの時間 波形を測定した結果、ピークの 1ps 前において 3 桁以上のコ ントラスト比改善が達成されていることが観測された (Fig. 2)。また、プラズマミラーのエネルギー反射率は最大 で 70%程度(Fig. 3)であり、これらは 1 枚のプラズマミラー としては世界最高クラスの性能である。



Fig.1 Plasma mirror system installed in T⁶ laser system





Fig.2 Temporal waveforms of T^6 laser without and with plasma mirror measured by using 3^{rd} order autocorrelator

- [1] G. Doumy, et al., Phys. Rev. E 69, 026402 (2004).
- [2] B. Dromey, et al., Rev. Sci. Inst. 75, 645 (2004).

Fig.3 Input fluence dependence of plasma mirror reflectivity

シミュレーションによる次世代ガンマ線天文台 CTA 大口径望遠鏡のハードウェア仕様の検証

宇宙線研究室 増田 周

Abstract CTA is the project of the next generation ground-based VHE gamma-ray observatory. To decrease the energy threshold, we need to suppress the accidental trigger events caused by Night Sky Background. We studied the effects of the LST hardware parameters on NSB trigger rate and energy threshold using MC simulation.

© 2015 Department of Physics, Kyoto University

Cherenkov Telescope Array(CTA)計画[1]は次世代超高エネルギーガンマ線天文台を建設する国際共同計画である。南北サイトの半径数 km 範囲内に大・中・小三種類の口径の望遠鏡を計 100 台建設する。 CTA では相対論的エネルギーにまで加速された荷電粒子からの非熱的な GeV - TeV ガンマ線放射を観測 し、宇宙線加速現場の同定や暗黒物質対消滅ガンマ線の探索を行う。ガンマ線が地球大気に入射すると 電磁カスケードシャワーを形成しチェレンコフ光が放射される。この光を地上の望遠鏡で集光しシャワ ーイメージを撮ることによりガンマ線のエネルギー、到来方向を再構成する。CTA ではその巨大な有効 面積により現行の観測装置に比べ 10 倍の感度、3 倍の角度分解能向上、さらに 20 GeV - 100 TeV 以上 の広い観測エネルギー帯域を達成し、約 1000 個の超高エネルギーガンマ線源の検出が期待される。

口径 23 m の大口径望遠鏡(LST)では 20 GeV という低エネルギー閾値の達成を目指す。問題となるの が星の光等の夜光バックグラウンド(NSB)である。LST の焦点面カメラには光検出器として 1855 本/LST の光電子増倍管(PMT)が用いられるが、各ピクセル当たり NSB 光子が約 200 MHz という高レートで検出 される。エネルギー閾値を下げるためには NSB による偶発的なトリガーイベントを抑える必要がある。

本研究では PMT 信号パルス幅、アフターパルス(AP: PMT 内での電子と分子の衝突により起こるイオ ンフィードバックによって生じる擬似パルス)発生確率といった望遠鏡ハードウェア仕様に応じたト リガー条件の最適化と、ガンマ線トリガーレートの評価、及び性能評価のための望遠鏡シミュレーショ ンを行った。トリガー閾値は NSB のトリガーレートと宇宙線シャワーによるトリガーレートから決まる ので、今回の検証では NSB による影響の評価に重点を置いている。検証の結果、パルス幅の大小が NSB によるトリガーレートを決めていることがわかった(Fig. 1)。結果としてエネルギー閾値 25 GeV 以下 を達成するためには、クリッピングレベル(各ピクセル信号波高値の切り取り閾値)を8 光電子より高 くし、パルス幅を3 ns 以下、AP 確率が 0.02 % 以下(>4 光電子)である必要があることがわかった (Fig. 2)。さらに得られたトリガー閾値に基づき感度計算をし、観測シミュレーションを行った。



Fig. 1. Accidental trigger rate caused by NSB as a function of trigger threshold converted into photoelectrons.



Fig. 2. Energy threshold as a function of pulse clipping level.

References

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

宇宙 X 線観測用 SOI ピクセル検出器における 電荷収集効率の改善

宇宙線研究室 松村英晃

Abstract We have been developing an SOI pixel sensor for future X-ray astronomy satellite. We experimentally investigate the charge-collection efficiency (CCE) within a pixel and also perform simulations of electric fields inside the sensor. Based on the result, we modify our device and succeed in improving the CCE. © 2015 Department of Physics, Kyoto University

X線トランジェント現象は現在まで多くの検出器で観測されてきた。しかし、広視野でのX線トラン ジェントの観測は 10 keV 以下の軟X線帯域では満足な結果は得られていない。その原因としては、エ ネルギー分解能がよく、さらに時間分解能が良い軟X線検出器が無かったことがあげられる。そこで、 我々の研究室では SOI 技術を用いた、検出部・読み出し回路一体型のピクセル検出器である SOI ピクセ ル検出器[1]を改良し、宇宙 X線観測用とした検出器、XRPIX を開発している。XRPIX はシリコンのピ クセル検出器であり、良いエネルギー分解能(E/ΔE = 6 keV/140 eV)と位置分解能(ピクセルサイズ: 30 μm 角)が期待できる。さらに、各ピクセルにX線入射のタイミングを判定するトリガー機能を備え、X 線が入射したピクセルのみを読み出し良い時間分解能(数 μsec)を達成する。この XRPIX を用いること で、X線トランジェント現象の軟X線観測技術を飛躍的に向上させ、既知の現象の新たな情報、さらに は未知の現象の発見することが我々の目的である。

先行研究によりイベント駆動読み出しと、30 μm 角ピクセルで厚い空乏層(500 μm)を持つ素子 (XRPIX1b)の開発に成功した。その一方で、最重要課題の1つであるエネルギー分解能が目標に到達し ていなかった。我々はXRPIX1bに10μmΦの細いビームを6μmピッチで照射して素子のサブピクセル レベルでのX線レスポンスを調査した。その結果、ピクセル境界では電荷収集効率および検出効率が悪 いことを発見した[2][3]。

これらの原因は共にピクセル境界での電荷損失であり、これがエネルギー分解能を悪くしている最大 の要因であった。Fig.1 で見られるように、読み出し回路があり、かつ、読み出しノードから遠い場所の 検出効率は悪い。この場所はピクセル境界付近であるため、この回路が電荷損失を引き起こしている原 因であるかもしれない。素子内部の電場のシミュレーションを行い検証した結果、ピクセル境界付近の 回路の影響により、素子内の電場が読み出しノードに向かっていないことがわかった。

そこで我々は、回路レイアウトを変えることにより電場構造を修正した素子、XRPIX2b を開発した。 性能評価の結果、XRPIX1b では存在した発生した電荷が複数のピクセルにまたがって回収されるイベン トでのピークシフトが XRPIX2b では見られなかった、つまり電荷収集効率を改善させることに成功し た(Fig.2)。







Fig. 2. X-ray spectra of an ²⁴¹Am radioisotope obtained with XRPIX1b (left) and with XRPIX2b (right). The red and blue lines denote spectra of single-pixel and charge-shared events, respectively.

References [1] Y. Arai et al., NIM A 636, S31-S36 (2011). [2] H. Matsumura et al., NIM A 765, 183-186 (2014). [3] H. Matsumura et al., NIM A Submitted (2014).

超大質量星の重力崩壊に伴う ガンマ線バーストの研究

天体核研究室 松本達矢

Abstract We study whether relativistic jets can break out the surface of supermassive stars of mass 10^5 solar mass and cause gamma-ray bursts or not. We find that jets are able to penetrate the surface in spite of the large radius of supermassive stars because of the radiation dominated envelope structure. © 2015 Department of Physics, Kyoto University

我々の銀河系を含め、銀河の中心には質量が 10⁶⁻⁹太陽質量の超巨大ブラックホール(Supermassive Black Hole; SMBH)が存在することが知られている。2000年代になって遠方宇宙の観測が進み、赤方偏 移 z~5-7の初期宇宙にも質量が10⁹太陽質量の SMBHが存在することがわかった。初期宇宙において SMBH が形成されるためには、恒星質量(数~数十太陽質量)の BH がガス降着によって質量を獲得すると考 えると、成長に要する時間が足りないことが指摘されている。現在、これに代わる SMBH 形成シナリオ として注目されているのが 10⁵太陽質量もの質量をもつ超大質量星(Supermassive Star; SMS)の重力 崩壊によって形成される大質量 BH を初期条件として、ガス降着で SMBH に成長させるというシナリオで ある。SMS が実際に初期宇宙で形成されるかどうかは未解明な問題であるが、近年の理論研究によって 実現可能な形成過程が確立されつつある。しかし、SMS 自体は未だに観測例のない天体であり、SMS に ついての理論研究はほとんど観測的検証が行われていない。

本研究では、SMS の存在を観測的に検証するために、SMS が重力崩壊に伴って起こす可能性があるガ ンマ線バースト(GRB)に着目する。GRB は宇宙一大きな爆発現象であり、初期宇宙で発生したとしても 観測可能である。よって、SMS の重力崩壊によって GRB が起こるかを調べ、その特徴を予言することは、 理論研究を観測的に検証するために非常に重要である。GRB の標準モデルにもとづくと、親星の重力崩 壊に伴って中心に BH と降着円盤からなる系(中心エンジン)が形成され、そこから相対論的流体であ るジェットが親星の表面に向かって伝播する。中心エンジンの活動時間内にジェットが親星の表面にた どり着いて突き破ることができると、ジェットから放射されるガンマ線を GRB として観測できる。

本修士論文では SMS を親星としたとき、ジェットが SMS 表面を突き破れるかどうかを調べた。近年の SMS 形成の数値計算[1]によると、SMS は非常に大きな半径を持つ膨れた構造をしている。同じような大 きく膨らんだ構造をもつ赤色超巨星(Red Supergiant ;RSG)は GRB を起こすことが不可能だと考えら れている[2]。我々は文献[3]による手法を用いて SMS 内を伝播するジェットの運動を数値的に計算し、 SMS が GRB を起こすかどうかを調べた。その結果、SMS は大きく膨れた構造を持つにも関わらず、ジェ ットが SMS 表面を突き破ることがわかった。RSG と SMS の間の違いを調べた結果、RSG では対流優勢の 外層構造を有するのに対し、SMS は輻射圧優勢の外層構造を持つために、密度分布の半径依存性が異な ることによって SMS ではジェットが外層内を伝播している間に加速していることが表面を突き破れた要 因であることがわかった。この結果から、SMS は重力崩壊時に GRB を起こす可能性があると結論づけら れる。また、本修士論文ではジェット伝播の計算から、SMS の重力崩壊によって起こる GRB の観測的特 徴の予言についても議論を行った。

- [1] Hosokawa, T., Yorke, H. W., Inayoshi, K., Omukai, K., & Yoshida, N. 2013, ApJ, 778, 178
- [2] Matzner, C. D. 2003, MNRAS, 345, 575
- [3] Nakauchi, D., Suwa, Y., Sakamoto, T., Kashiyama, K., & Nakamura, T. 2012, ApJ, 759, 128

カイラルユニタリー法に基づく 反 K 中間子-核子ポテンシャルの構築と A (1405)の解析

原子核理論研究室 宮原建太

Abstract The strong interacion between antikaon and nucleon leads to interesting phenomena such as Lambda(1405) and antikaon quasi-bound states in nuclei. To investigate these states, we construct the antikaon-nucleon single-channel local potential based on chiral unitary approach and analyze the spatial structure of Lambda(1405).

© 2015 Department of Physics, Kyoto University

バリオンをクォーク3体系で記述する構成子クォーク模型は、励起状態を含む様々なバリオン質量を よく再現する。しかし、A (1405)は比較的軽い質量のためクォーク模型では記述が困難であり、クォー ク3体系とは異なる構造をもつと考えられ注目を集めている[1]。さまざまな模型でA (1405)を説明す る試みが行われてきたが、近年では反K中間子と核子の準束縛状態として記述する描像が支持されてお り、反K中間子-核子間には強い引力が働くと考えられている。この引力に起因して反K中間子原子核 の存在が予言され[2]、その興味深い性質に関して実験的、理論的な研究が活発に行われている。しか し、今までの反K中間子原子核に関する理論計算は不定性が大きかった。その原因は、反K中間子原子 核の計算において重要な反K中間子-核子散乱振幅の閾値以下への外挿が、従来の実験では強く制限さ れていなかったことにある。近年、SIDDHARTA実験によって精度のよい反K中間子-核子散乱長のデータ が得られ[3]、閾値以下への外挿の不定性は大幅に減少した。そこで現在、反K中間子原子核の定量的な 議論を行うことが求められている。

本研究の目的は、少数計算において有用な局所的な反 K 中間子-核子ポテンシャルを、SIDDHARTA 実験 のデータを考慮して構築することである。ここでは QCD のカイラル対称性を考慮したラグランジアンか ら、ユニタリー性を満たす散乱振幅を計算するカイラルユニタリー法[4]を理論的基盤とする。この手 法では Λ (1405) は散乱振幅の共鳴極として動的に生成され、反 K 中間子-核子の準束縛状態と解釈され る[1]。カイラルユニタリー法によって計算された反 K 中間子-核子の散乱振幅を再現する局所ポテンシ ャルは文献[5]で構築されたが、文献[5]のポテンシャルは SIDDHARTA 実験を考慮しておらず、また散乱 振幅の複素エネルギー平面上の再現性は調べられていなかった。 Λ (1405) に関しては共鳴の極構造も興 味の対象であり、さらに少数系への応用の際にもこの共鳴構造が物理的に重要であることが示唆される ため、散乱振幅の複素エネルギー平面上の再現性を考慮することが非常に重要になってくる。

本研究ではまず、文献[5]の局所ポテンシャルから得られる反 K 中間子-核子散乱振幅を複素エネルギ ー平面に拡張し、エネルギーの実軸上に比べて複素平面上では元の振幅からのずれが大きく、極構造を 定性的に再現していないことを明らかにする。この問題を解決するために、複素エネルギー平面上にお いて再現性の良い局所ポテンシャルの構築法を確立し、この構成法を用いて SIDDHARTA 実験を考慮した 反 K 中間子-核子局所ポテンシャルを構築する。局所ポテンシャルを構築したことにより、カイラルユ ニタリー法では直接計算することのできない反 K 中間子-核子間の波動関数を求めることができる。求 めた波動関数の解析を行うことでA (1405)の空間構造についても議論する。

References

[1] T. Hyodo and D. Jido, Prog. Part. Nucl. Phys. 67, 55 (2012).

- [2] Y. Akaishi and T. Yamazaki, Phys. Rev. C 65, 044005 (2002).
- [3] M. Bazzi et al., Phys. Lett. B 704, 113 (2011).
- [4] N. Kaiser, P.B. Siegel and W. Weise, Nucl. Phys. A 594, 325 (1995).
- [5] T. Hyodo and W. Weise, Phys. Rev. C 77, 035204 (2008).

MAIKo アクティブ標的を用いた ⁴He 光分解反応断面積の測定

原子核ハドロン物理学研究室 村田求基

Abstract We have measured the cross section for the ${}^{4}\text{He}(\gamma, \text{pt})$ and ${}^{4}\text{He}(\gamma, {}^{3}\text{He})$ n reactions at New SUBARU using our active target (MAIKo). For the present study, we upgraded MAIKo by introducing GEM. Details of the experimental setup and the progress of the data analysis are reported. © 2015 Department of Physics, Kyoto University

⁴He 原子核の巨大双極子共鳴領域における光分解反応の断面積は D, ³He, ⁴He をはじめとする軽元素の ビッグバン合成における生成量を左右する[1]のみならず、反応の類似性から超新星爆発にともなって 放出されるニュートリノによる元素合成の過程にも洞察を与えうる[2]、宇宙核物理の観点から重要な 物理量である。それゆえ、実験・理論の両面から精力的な研究がなされてきたが、測定された断面積に は Fig. 1のように未だ大きな不定性が残されている。[3][4]

本研究では、ニュースバル放射光施設にて、我々のグループで開発を進めているアクティブ標的 MAIKo を用いて⁴He(γ, pt)⁴He(γ, ³He)n という二つの反応チャネルの測定を行った。アクティブ標的とは 反応の標的とする気体を気体検出器の検出ガスとして封入した検出器である。この設計によりアクティ ブ標的は反応が起こった地点とそれを取り囲む全立体角を検出領域で覆うことが可能になるため、等方 的に放出される低エネルギーの粒子の検出に優位性を持っている。

測定を行うにあたってはアクティブ標的に検出器の信号の元になる電子を増幅する機構として新た に GEM を導入した。この改修によって、検出器中でのエネルギー損失が小さい陽子の検出が可能になっ た。測定によって取得した典型的な飛跡を Fig. 2 に示す。

取得したデータの解析には、新たに開発した反応粒子の飛跡を3次元的に再構成して粒子識別を行う アルゴリズムを使用した。修士論文ではデータ解析の現状について述べる。



Fig. 1. Photodisintegration cross section of the reaction.[3]



Fig. 2. Typical track of ⁴He(γ , pt) reaction

- [1] M. Kusakabe et al., Phys. Rev. D 79, 123513 (2009).
- [2] S. E. Woosley et al., Astrophys. J. 356 272 (1900).
- [3] R. Rault et al., PRL 108, 042502 (2012).
- [4] W. Tornow et al., Phys. Rev. C 85, 061001(2012).

Brown-Kuchar のメカニズムとループ量子重力理論

素粒子論研究室 森山健太

Abstract Brown and Kuchar introduced a scheme of quantizing 4-dimensional gravitational field with scalar fields called dust. We implement their scheme in loop quantum gravity and see that the difficulty in diagonalizing Hamiltonian constraint is removed. The classical definition of the volume in loop variables is reconsidered for consistent Poisson brackets.

© 2015 Department of Physics, Kyoto University

本論文で扱うループ量子重力理論は、4 次元の重力場を非摂動的に量子化する試みである。古典的に は、ループによる表現は4次元の重力場と等価な SU(2)ゲージ場の形をもつ Ashtekar 変数の正準形式で ある。Dirac にしたがって、拘束を持つ系での正準的扱いが行われる。量子化のために、滑らかに広が った場ではなくゲージ場のWilson線を基本的な変数であると考える。任意のWilson線上の任意の規約 表現の上での内積が一意に与えられ、2乗可積分な波動関数の集合が量子的な配位空間を与える。背景 場を与えてから摂動的に重力子の量子補正を考える扱いとは異なり、背景場の計量がいらない点、微分 同相変換に共変な形式で与えられている点で、重力場の量子力学が持つことが望ましい性質を備えてい ると言える。この正準的なループ量子重力において困難とされていたのは、ハミルトニアン拘束を解 いて物理的なヒルベルト空間を取り出すことであった。

他方、本論文では、Brown と Kuchar によって与えられた重力場の正準的な扱い方の形式[1]を考える。 この形式は geometryodynamics (正準的な重力場の量子化)を実現させるための一つの枠組みである。 重力場に加えてダストと呼ばれるスカラー場の組が導入され、これらを含めた拘束つきの正準系と等価 な系を考える。新しい系では拘束同士が係数に力学量を持たない形で弱くゼロなポアソン括弧を持つの で、Lie 群を対称性変換として持っている系に対する一般的な量子化の議論を用いることができる。こ れにより Brown-Kuchar の形式内では、全ての拘束とポアソン括弧が弱くゼロであるような第一類の力 学量を常に取り出せることが保証されている。これらの性質を保ったままで系を量子的な演算子と交換 関係の組に移すことができれば、それは正準的な(3+1)次元の重力場の量子化になっていて、またその 枠組み内では興味のある量の座標によらない物理的な期待値などが計算できると期待される。

この Brown-Kuchar のメカニズムを正準的なループ量子重力理論の枠組みで実現することが近年の正 準なループ量子重力理論において提案されてきた[2]。Brown-Kuchar の形式においては、ダストの自由 度を正準的な時間のパラメータとして利用することで、ハミルトニアン拘束を満たす物理空間を与える ことが格段に容易になるので、ループ量子重力理論が抱えていた困難を大きく取り除くことができると 期待される。

本論文で考えるのは、このように Brown-Kuchar のメカニズムをループ量子重力理論によって実現す ることである。この形式はすでに与えられているものの、具体的な計算により量子的なダイナミクスを 与えることには至っていなかった。本論文ではまず、古典論、量子論ともに計算が困難になるのは、領 域 R の体積に当たる演算子 V(R)であることを確認する。V(R)は量子的な演算子としてうまく定義され ているが、V(R)の固有状態と固有値を求めなければならないという点が問題となる。しかし Brown-Kuchar のメカニズムによって、ハミルトニアン全体を対角化しなければならないという困難が取 り除かれていることを見る。量子的に与えられたグラフ上で演算子としての V(R)の作用を解析的に対角 化することは現在のところ困難である。本論文は Brown-Kuchar の形式の構成において、古典論におけ る Brown-Kuchar のメカニズムをループ表現で構成することの完成を目指した。その結果、矛盾なく古 典的な計算が実行できるようにするためには、体積 V(R)の定義に必要な交差する面上のフラックス間の ポアソン括弧のループ変数での定義を改めなければならないことが明らかになった。さらによりよい V(R)の定義を与えてポアソン括弧のもとでの Brown-Kuchar のメカニズムを成立させることを考える。

References

[1] J. D. Brown, K. V. Kuchar, Phys. Rev. D, 51, 5600 (1995)

[2] K. Giesel, S. Hofmann, T. Thiemann, O. Winkler, Class. Quant. Grav. 27, 055005 (2010)

η'核分光実験におけるデータ収集システムの開発

原子核・ハドロン物理学研究室 山上大貴

Abstract We plan to measure $\eta'(958)$ meson bound states by missing mass spectroscopy for the ${}^{12}C(p,d)$ reaction at GSI and FAIR. A huge background is expected and the signal-to-noise ratio will be of the order of 1/100 at most. We are going to upgrade the DAQ system in order to realize a high statistics for compensating the poor S/N ratio. We will introduce network-based TDC boards and a new trigger module. The performance of this DAQ system is discussed.

© 2015 Department of Physics, Kyoto University

η'(958) 中間子は有限密度中で U_A(1)異常とカイラル対称性の部分的回復によって大きく質量が減少 する性質を持ち、原子核中で束縛状態を形成することが予測されている[1,2]。我々は 2.5 GeV の陽子ビ ームを用いた ¹²C(*p*,*d*)反応でドイツの GSI および現在建設中の FAIR において欠損質量分光を行う。多パ イオン生成などのバックグラウンドとなる事象が存在するものの崩壊幅の狭い束縛状態に対応するピ ーク構造が観測される可能性がある[3]。ただし、S/N 比は高々1/100 と非常に小さいため、大強度の一 次陽子ビームかつ厚い標的を用いた高統計での測定が必要となる。

2014 年 8 月に行った実験では VME インターフェースでの読み出し系を利用して約 2 kHz の読み出し 速度を実現していた。今後の実験ではさらなる統計量増大のために読み出し系の高速化によって 10 kHz 以上の速度を目指す。

データ収集システムの高速化の試みとして先ず MWDC 読み出し系のアップグレードを行う。Belle-II CDC 読み出し回路として開発された読み出しボードに汎用性を持たせた改良型 (Fig.1)を用いる。この ボードは1枚につき 64 チャンネルの MWDC からのアナログ信号を ASD、TDC で処理してデジタル化 し、イーサネットを利用した TCP 通信でのデータ転送までを行う。

さらに、複数の読み出しボードが独立にデータを構築するため読み出し後のイベント照合を確実に行うためのモジュール (Sub Trigger Module) が開発されており、これを新たに採用する (Fig.2)。このモジュールは各読み出しボードへタグ情報を分配し、これによって異なるボード間でのイベント同期の確実性を保証する。

本論文では、新たに開発した読み出しボードおよびタグ情報配布用のトリガモジュールを用いたデー タ収集システムを MWDC (Fig.3)につないでベータ線を用いて行った飛跡計測のテストの結果と、これ らのモジュールの高計数率トリガ時読み出しの性能評価について報告を行う。



Fig.1. ASD-integrated TDC board for network-based DAQ

- [1] D. Jido et al, Phys. Rev. C 85, 032201 (2012).
- [2] H. Nagahiro et al, Phys. Rev. C 87, 045201 (2013).
- [3] K. Itahashi et al, Prog. Theor. Phys. 128, 601 (2012).



Fig.2. Sub trigger module



Fig.3. Multi-wire drift chamber (MWDC)

原子核におけるトーラス形状とαリング状態の相互関係

原子核理論研究室 吉居正晃

Abstract The nuclei with the forms of alpha ring and torus structures have been known, and here, the relation between them is discussed. For the alpha ring state, the energy for the relative motion of alpha is estimated.

© 2015 Department of Physics, Kyoto University

原子核は多数の陽子・中性子がそれぞれ相互作用している多体系であり、この系を記述するモデルとして、各陽子・中性子が独立に運動するシェルモデルなどが知られているが、α粒子のような強い相関を持った核子がクラスターを形成するというモデルも知られている。クラスター構造は、主にクラスターを原子核から分離して取り出せるエネルギーの近傍に現れることが知られている。また、低密度核物質を考えると、通常の陽子・中性子の独立運動状態よりも、α粒子が格子状に配置した状態のエネルギーがより安定に存在できることも知られている[1]。

近年では、非常に軽い原子核以外でもクラスター構造が議論されており、たとえば ⁴⁰Ca の低密度領域 では、αクラスターがリング状に配置した状態が現れるという Hartree-Fock-Bogoliubov 理論を用いた 分析がある[2]。しかし同じ ⁴⁰Ca でも、高い角運動量を与えた場合には、αリング状態よりも、核子が トーラス状に運動する「トーラス形状」がより安定になるという指摘がある[3]。トーラス状態では、 それぞれの核子は対称軸周りに良い軌道角運動量を持ち、円周上を平面波的に運動している。

この修論での目的は、これらの 2 つの形状、すなわち、 α リング状態とトーラス状態が関連している のか、あるいは両者は完全に別個な状態なのであるか、詳細に検討することである。この目的のために、 まず、円周上のさまざまな位置に α 粒子を配置した α リング状態の波動関数を多数用意し、これらを重 ね合わせることによってトーラス波動関数を記述することができるのか、あるいはできないのかについ て詳細な分析を行なった。その結果、4 つの核子が α クラスターを形成する場合には、いかに多くの異 なった α クラスター配位を重ね合わせても、トーラス波動関数は記述されないことが明らかとなった。 本修論のもうひとつの目的は、微視的な α クラスター模型を用いて、 4° Ca の α リング状態のエネルギー を評価することである。文献[2]の 4° Ca の計算では、全系の重心運動エネルギーは取り除かれていたも のの、個々の α 粒子は空間上の各点に固定されていた。そのため、 α 粒子の相対運動を解いた際に開放 されるべき個々の α の重心運動のエネルギーを、 8 Be(2 α クラスター)に対する考察から見積もっていた。 この効果は1 α あたり約7 MeV であり、 4° Ca 全体では、計算値から約 70 MeV を手で取り除いたエネルギ

ーが α クラスター状態のエネルギーであると議論していた。

今回、微視的 α クラスター模型を用い、10 個の α クラスターをリング上にさまざまに配置した波動関 数を重ね合わせることで、α クラスター間の相対運動を解き、円周上の各点に固定した場合よりもどれ だけエネルギーが下がるかを議論した。その結果、開放される運動のエネルギーは約 20 MeV であり、 文献[2]における値よりも大幅に少ないことがわかった。これは、文献[2]で見積もられている個々の α クラスターの重心運動エネルギーの補正は、結果的にそれぞれの α 粒子が空間的に自由に運動する α ガ ス状態が現れるエネルギーを求めるための方法であり、今の場合は個々の α クラスターが円周上に固定 されており、そのために運動エネルギーの開放は 1/3 程度に留まるためであることがわかった。

さらに、円周上で全核子をばらばらに配置した波動関数を多数用意し、これとαリング状態を重ね合わせる計算を行った。この場合、全核子をばらばらに配置した状態がいかに貢献するのか、リング状態の半径をさまざまに変化させて考察を行った。

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

非一様カイラル相におけるクォーク物質の磁性

原子核理論研究室 吉池遼

Abstract In the QCD phase diagram, we consider "dual chiral density wave (DCDW)" phase where both scalar and pseudoscalar condensates become spatially inhomogeneous. Here, we study the response of quark matter to a weak external magnetic field to show the spontaneous magnetization in the DCDW phase.

© 2015 Department of Physics, Kyoto University

近年、温度密度平面でのカイラル相転移において、従来の一次相転移線のまわりに新たな相が現れる ことが提案され、様々な環境の下で精力的に研究されている[1]。QCD相図において、これまでに考えら れていた相はカイラル対称性が一様に破れている相か、回復している相の2種類であった。一方、新た な相ではカイラル対称性は破れているが、カイラル凝縮が空間非一様な周期的構造を持つ。この非一様 カイラル相が実現している可能性がある系としては、中性子星や高エネルギー重イオン衝突が挙げられ る。中性子星は低温で非常に高密度なコンパクト天体で、中心付近の密度は標準核密度の10倍程度に達 するとも言われている。

本研究では、"dual chiral density wave (DCDW)"[2]と呼ばれるスカラー凝縮と擬スカラー凝縮がともに 空間非一様になっている構造のものを考える。DCDW型の構造は平均場近似の下での1+1次元NJL模型の 自己無撞着な解の一つとしても知られている[3]。この空間1次元的な構造を空間3次元に埋め込むことで、 3+1次元におけるDCDW相を考えることができる。またDCDW型の構造は磁場をかけることによって有 利になることが知られている[4]。

我々はDCDW相にあるクォーク物質の弱い外部磁場に対する応答を解析することで、クォーク物質が 自発磁化を持つ可能性を示した。観測から、マグネターと呼ばれる中性子星の表面では、10¹⁵G程度の非 常の強い磁場が存在することがわかっている。しかしこの強磁場の起源については、依然大きな謎とし て残っている。DCDW相での自発磁化の存在は、先述したマグネター表面の強磁場の起源を、微視的な 理論から説明する候補になりうるのではないかと考えられる。外部磁場の下では、エネルギースペクト ルはランダウ準位という離散化されたスペクトルになる。特にDCDW相では最低ランダウ準位のエネル ギースペクトルは正負非対称になり、カイラルアノマリーと密接に結びついている[5]。またこのスペク トルの非対称性によって、熱力学ポテンシャル中に外部磁場の1次の項が現れるようになる。この1次の 項が存在することで、DCDW相中での自発磁化が作り出されている。さらに磁化率の振る舞いや、強磁 性転移に伴うNGモードの存在についても議論した。

他方、磁場による相転移の様相をより詳細に理解するために、秩序変数の空間微分まで含めた熱力学 ポテンシャルの展開を利用する、一般化Ginzburg-Landau展開[6]という方法を用いて行う。この熱力学ポ テンシャルを適当な次数まで展開して行う解析は、一般に展開パラメータが小さい臨界点の周りで正当 化される。本研究では、DCDW相・カイラル対称性が一様に破れた相・カイラル対称性が回復した相の 3相が交わったリフシッツ点と呼ばれる新たな臨界点のまわりで、臨界指数などの相転移の性質につい て解析した。

- [1] M. Buballa, S. Carignano, arXiv:1406.1367
- [2] E. Nakano, T. Tatsumi, Phys. Rev. D 71, 114006 (2005)
- [3] G. Basar, G. V. Dunne, M. Thies, Phys. Rev. D 79, 105012 (2009)
- [4] I. E. Frolov, V. Ch. Zhukovsky, K.G. Klimenko, Phys. Rev. D 82 (2010) 076002
- [5] T. Tatsumi, K. Nishiyama, S. Karasawa, arXiv:1405.2155
- [6] D. Nickel, Phys. Rev. Let. 103, 072301 (2009)

三次元格子構造を持つ新型ニュートリノ検出器 WAGASCIの開発

高エネルギー物理学研究室 吉田健人

Abstract To reduce the systematic error of the T2K long-baseline neutrino oscillation experiment, we are developing a new 3D grid-like neutrino detector to measure the water to hydrocarbon charged current cross section ratio using the T2K neutrino beam at J-PARC. In this paper, I evaluate the performance of the detector components.

© 2015 Department of Physics, Kyoto University

T2K (Tokai-to-Kamioka) 長基線ニュートリノ振動実験は、茨城県東海村の J-PARC で生成したミューオ ンニュートリノビームを 295km 離れた岐阜県飛騨市神岡町にあるスーパーカミオカンデで検出すること により、ニュートリノ振動のパラメータの精密測定を行うことを目的としている。

現在 T2K 実験ではニュートリノ生成点直後に設置した前置検出器群を用いて、ニュートリノフラック スやニュートリノ反応断面積などの不定性の大部分を削減しているが、今後より統計をためて精密な測 定をしていくためにさらなる系統誤差の削減が必要である。T2K 実験ではニュートリノターゲットとし て、前置検出器でプラスチックシンチレータ、後置検出器で水を用いており、この原子核標的の差によ る誤差は、前置検出器による測定では制限できないため主要な系統誤差の一つとなっている。我々は T2K 前置検出器ホールに新型検出器を設置し、水とプラスチックのニュートリノ反応断面積比を誤差 3%とい う高精度で測定することにより、この誤差を軽減することを目指している。

我々が開発している新型ニュートリノ検出器 WAGASCI (WAter Grid And SCIntillator)の特徴は、シン チレータを三次元格子状に組み、その格子でできた空間の中に水またはプラスチックをニュートリノ標 的として入れることにより、荷電粒子のトラックに対して4π方向にアクセプタンスを持つことである (Fig. 1)。また WAGASCI の水標的部分とプラスチック標的部分をほとんど同じ構造にすることにより、 水とプラスチックのニュートリノ反応断面積比の測定において、ニュートリノフラックスと検出器由来 の系統誤差を大幅に削減できる。WAGASCI のサイズは約 1m×1m×2m で、ニュートリノ標的の質量は約 2t である。WAGASCI の周囲にはミューオン飛程検出器 (MRD)を配置し、ニュートリノ反応で生じたミュ ーオンの運動量も測定する (Fig. 2)。

本論文では、新型検出器の概要を述べた後、プラスチックシンチレータや光検出器 Multi-Pixel Photon Counter (MPPC) といった検出器の構成要素の性能評価の結果を述べる。我々の実験で用いる MPPC は次世 代型で、現在 T2K 実験で用いられている MPPC から各性能が大幅に向上していることを確認した。我々 の用いるシンチレータは標的部分の体積の割合を大きくするため 3mm 厚の薄型シンチレータを用いる。我々はこのシンチレータの性能測定のために、東北大学電子光理学研究センターで陽電子ビームを用い たビームテストを行った。その結果、薄型シンチレータでも MIP に対して 99%以上という高い検出効率 が得られ (Fig. 3)、検出器の要請を満たすことを示した。最後に検出器のプロトタイプとして 62ch の小型検出器を製作し、宇宙線による光量測定やシンチレータ毎の光量のばらつきなどを測定したのでその 結果について述べる。 Muon range detector 3cm



Fig. 1. Schematic view of 3D grid-like structure.

Vµ WAGASCI detector Fig. 2. Schematic view of the WAGASCI detector.

Fig. 3. Hit efficiency (1.5p.e. threshold) of the 3mm-thickness scintillator for the WAGASCI.

場の理論のエンタングルメント・エントロピーと 局所演算子による励起状態

基礎物理学研究所 素粒子論グループ 渡邊賢人

Abstract Entanglement entropy for excited states has become a hot topic. Recently, as new laboratories for this topic, excited states by local operators were suggested. We have studied entanglement entropy for the excited states in 2-dimensional rational conformal field theories. I will explain our work and review the recent related works.

© 2015 Department of Physics, Kyoto University

エンタングルメント・エントロピー(EE)は、状態の量子もつれという量子論の本質的な性質を理解 するための重要な指標の一つである。近年、その研究分野は EE が開発された量子情報などの量子力学 にとどまらず、物性や原子核などの量子多体系、そして、素粒子論や重力理論における場の理論にまで 拡がり、各分野で EE による量子情報的な側面の理解が活発になされている。

EE の量子多体系や場の理論での研究は、主に基底状態に対して始められた。実のところ、EE は量子 多体系や場の理論において計算するのが一般には非常に難しい量である。しかしながら、自由場の理論 [1]や共形場理論[2]の場合、特殊な部分系の場合[3]、ゲージ・重力対応を用いる場合[4]など、様々な 場合について EE の計算手法が徐々に開発・発展されてきている。

2005年には、Calabrese-Cardyにより、量子クエンチと呼ばれる系のハミルトニアンを急に変化させることで得られる励起状態に対する EE が研究され始めた[5]。量子クエンチは熱化現象の簡単な模型であり、今に至るまで様々な応用がなされている。この Calabrese-Cardy の仕事以降、EE の熱力学第1法則[6]のような低エネルギー励起状態での普遍的な性質など励起状態に対する EE の研究は様々な発展を見せており、EE の研究において現在注目すべき研究のテーマの1つである。

そして、2014年の初め、野崎-沼澤-高柳により、励起状態に対する EE の新たな研究の場として、局 所演算子による励起状態が提案された[7]。この励起状態は一般に理論の高エネルギー領域の性質に影 響を及ぼしえるので、EE の熱力学第1法則のような普遍的な性質をもつかどうかは自明ではことではな い。また、その EE は局所演算子それ自体の性質を強く反映した情報をもつと考えられる。故に、局所 演算子の性質を特徴付ける量をこの EE から読み取れるのではないかと期待される。

我々は、2 次元共形場理論(CFT)、特にその中でも性質のよい rational CFT と呼ばれるクラスの理論 において、プライマリー演算子を用いて、局所演算子による励起状態の EE を議論した。その結果、そ の時間発展は、プライマリー演算子により EPR ペアのような最大限量子もつれした局所的な励起の組が 生じ、その励起の組がそれぞれ左右へ伝播していくという準粒子的な描像で解釈できることがわかった。 そして、その EE の真空状態からの増加分が量子次元と呼ばれるプライマリー演算子を特徴付ける量の 対数で得られることを発見した[8]。

本修士論文では、場の理論における EE の様々な計算手法について紹介し、我々の 2 次元 rational CFT における仕事と最近の局所演算子による励起状態の EE に関する研究の発展について述べる。

References

[1] H. Casini and M. Huerta, J. Phys. A 42 (2009) 504007.

- [2] P. Calabrese and J. Cardy, J. Phys. A 42 (2009) 504005.
- [3] H. Casini, M. Huerta and R. C. Myers, JHTP 1105, 036 (2011).
- [4] S. Ryu and T. Takayanagi, Phys. Rev. Lett. 96, 181602 (2006). ; JHEP 0608, 045 (2006).
- [5] P. Calabrese and J. Cardy, J. Stat. Mech. 0504 (2005) P010. ; J. Stat. Mech. 0706 : P06008, 2007.
- [6] J. Bhattacharya, M. Nozaki, T. Takayanagi and T. Ugajin, Phys. Rev. Lett. 110, (2013) 9, 091602. ;

D. D. Blanco, H. Casini, L. -Y. Hung and R. C. Myers, JHEP 1308 (2013) 060.

- [7] M. Nozaki, T. Numasawa and T. Takayanagi, Phys. Rev. Lett. 112, 111602 (2014).
- [8] S. He, T. Numasawa, T. Takayanagi and K. Watanabe, Phys. Rev. D 90 (2014) 041701.