

平成25年度

京都大学大学院理学研究科

D3 発表会アブストラクト

(平成26年1月21日)

物理学第二分野

D 3 発表会

日 時 2014年1月21日(火) 9時～
場 所 理学研究科5号館 525号室
発表時間 15分 + 5分(質問)

《 目 次 》

1. Modeling the secular evolution of an inspiral orbit
around a Kerr black hole
磯山 総一郎 (9 : 00) . . . 1
2. π 中間子ビームを用いたK中間子原子核の研究
市川 裕大 (9 : 20) . . . 2
3. Formation of supermassive black holes in the high-redshift universe
稲吉 恒平 (9 : 40) . . . 3
4. J-PARC での中性子電気双極子能率の検出を目指した
超冷中性子リバンチ装置の改良
今城 想平 (10 : 00) . . . 4
5. コンパクト天体现象における QCD 相転移
上田 宏史 (10 : 20) . . . 5
6. 超新星残骸における過電離プラズマの研究
大西 隆雄 (10 : 40) . . . 6

7. Discrete flavor symmetry for lepton mixing and quark mixing
小笠原 敦 (11 : 00) . . . 7

8. Integrable deformations of principal chiral models
and the AdS/CFT correspondence
川口 維男 (11 : 20) . . . 8

9. T2K 実験におけるニュートリノ反応断面積の測定
木河 達也 (11 : 40) . . . 9

-----午 後 -----

10. F-theory compactified on $K3 \times K3$ and its application to landscape
木村 裕介 (13 : 00) . . . 10

11. カイラル対称性の部分的回復と核物質中の π 中間子の性質
郷田 創一郎 (13 : 20) . . . 11

12. 軽い中性子過剰核におけるダイニュートロン相関の系統的研究
小林 史治 (13 : 40) . . . 12

13. 低雑音撮像能力をもつ気球搭載型サブ MeV ガンマ線カメラの
天体検出性能の検証
澤野 達哉 (14 : 00) . . . 13

14. Non-minimal coupling in the context of multi-field inflation
Jonathan White (14 : 20) . . . 14

15. Quantum Tunneling During Inflation:
Non-linear Analysis of the Quantum Fluctuations
杉村 和幸 (14 : 40) . . . 15

16. Measurement of the energy dependent muon neutrino
charged current inclusive cross section with the T2K INGRID detector
鈴木 研人 (15:00) . . . 16
17. T2K 前置検出器部分における小型水チェレンコフ検出器
“Mizuche” を使ったニュートリノ反応数測定
高橋 将太 (15:20) . . . 17
18. X-ray study on plasma outflows from the Galactic center
中島 真也 (15:40) . . . 18
19. Direction-sensitive dark matter search
with a gaseous micro time projection chamber
中村 輝石 (16:00) . . . 19
20. SuperKamiokande における T2K ニュートリノビームの NC Gamma 事象探索
黄 坤賢 (16:20) . . . 20
21. 連星中性子星合体からの電磁波の研究
仏坂 健太 (16:40) . . . 21
22. フェムト秒レーザーと金属表面の相互作用における
レーザーナノアブレーションに関する研究
宮坂 泰弘 (17:00) . . . 22
23. A Self-consistent Model of the Black Hole Evaporation
横倉 祐貴 (17:20) . . . 23
24. Weyl-Cartan 重力 gauge 理論に基づく inflation 宇宙
渡辺 晶明 (17:40) . . . 24

Modeling the secular evolution of an inspiral orbit around a Kerr black hole

基礎物理学研究所 磯山 総一郎

Abstract We propose a Hamilton mechanics of the inspiral motion of a particle around a more massive Kerr black hole. With the two-timescale analysis and the action-angle variables, we find that the secular changes of both the action-angle variables are characterized by the long time averaged value of the interaction Hamiltonian.

© 2014 Department of Physics, Kyoto University

Inspirals of compact objects into massive Kerr black holes are important sources for future gravitational wave detectors. The detection of gravitational waves from this system relies on the accurate theoretical models of their inspiral motion. Because of the extreme mass ratio in the binary systems, the motion of inspirals are modeled as the small deviation from the Kerr geodesic subjected to the self-force acting on the small body, which is still very hard to evaluate in practice.

In this talk, we revisit the inspiral motion around a Kerr black hole and describe this system in the language of a Hamilton system. In this framework, instead of directly integrating the equation of the motion with gravitational self-forces, the orbit of the particle can be described by the Hamilton's equations of the geodesic motion on an effective spacetime.

We systematically extract the solution of Hamilton's equations that is relevant to the orbital evolution for a long time period. Relying on the action-angle variables and using the two timescale ansatz, we see that the secular changes of both action and angle variables are characterized by only differentials of a single scalar quantity: the long time averaged value of the interaction Hamiltonian. In addition, at the leading order in the mass ratio of the binary, we show that these secular changes are expressed in the gauge invariant manner.

References

- [1] W. Schmidt *Class. Quant. Grav.* **19**, 2743 (2002).
- [2] T. Hinderer and E. Flanagan *Phys. Rev* **D78**, 064028 (2008).

π 中間子ビームを用いた K 中間子原子核の研究

原子核・ハドロン物理学研究室 市川裕大

Abstract We are searching for a K^-pp bound state which is the simplest kaonic nuclei, if existed, via the $d(\pi^+, K^+)$ reaction at J-PARC K1.8 beam line. A pilot experiment was carried out in June, 2012. An overview of this experiment and current analysis status will be presented.

© 2014 Department of Physics, Kyoto University

K 中間子原子核とは反 K 中間子と原子核が強い相互作用により束縛された系であり、2002 年に赤石・山崎による少数系の K 中間子原子核に対する理論予想[1]が発表されて以来、近年活発に研究が行われている。K 中間子原子核の最も単純な系と考えられている K^- 中間子と二つの陽子の束縛状態である K^-pp においては、多くの理論予想で存在が示唆されているものの、束縛エネルギーや崩壊幅の予想値は反 K 中間子-核子の相互作用のモデルや計算手法により値が大きく異なる。また、静止 K^- 反応を用いた FINUDA 実験[2]や pp 反応を用いた DISTO 実験[3]で K^-pp 起因と解釈可能な信号が検出されているが、束縛エネルギーや崩壊幅は必ずしも一致している訳ではなく、 K^-pp を仮定しない解釈も提案されている。そのため、 K^-pp に関しては過去の実験とは異なる反応を用いた系統的な研究が必要である。

我々は J-PARC K1.8 ビームラインにおいて $d(\pi^+, K^+)$ 反応による K^-pp の探索を行っており、2012 年 6 月に約一か月間パイロット実験のデータ収集を行った。 π^+ ビームの運動量は 1.7 GeV/c である。本実験では入射 π^+ の運動量をビームラインスペクトロメータで、散乱 K^+ の運動量を SKS スペクトロメータで測定し、質量欠損法を用いて生成粒子の質量を測定する。しかし、 K^+ 中間子は K^-pp の生成以外の準自由過程の Λ 、 Σ 、 $\Lambda(1405)$ 、 $\Sigma(1385)$ などのハイペロン生成からも放出される。そのため、 K^-pp の崩壊から生成されるが、準自由過程のバックグラウンドからは生成され得ない運動学領域の陽子を、標的側方に設置した飛程検出器で K^+ 中間子と同時に検出することで準自由過程のバックグラウンドを抑制する。

図 1 に包括的な解析による生成粒子の質量分布の測定データとシミュレーションの比較を示す。このように、 Λ 、 Σ の領域 (< 2.2 GeV/c²) では測定データとシミュレーションが概ね一致していることがわかる。一方、 $\Lambda(1405)$ 、 $\Sigma(1385)^{+0}$ の生成領域 (2.3~2.5 GeV/c²) では測定データがシミュレーションに対して質量が低い側に約 40 MeV/c² シフトしていることを見出した。また、2.13 GeV/c² のあたりには ΣN - ΛN 転換反応の閾値における cusp 構造と考えられる過剰事象を検出した。この cusp 構造は過去の実験で測定されているが、包括的な測定で検出されたのは本データが初めてである。

また、準自由過程のハイペロン生成反応からは生成され得ない生成角度が大きい ($\theta_{\text{Lab}} > 60^\circ$) 陽子を飛程検出器で同時測定した排他的な解析では、より顕著に前述の cusp 構造の信号を確認した。また、包括的な解析の質量分布と排他的な解析の質量分布の比 (陽子の同時検出確率) をとると、2.3 GeV/c² 付近に有意な幅の広い構造が検出された。上記のように準自由過程のバックグラウンドからはこの運動学領域には陽子が生成され得ないことから、この構造は K^-pp のシグナルである可能性がある。

本発表では、本実験の概要とパイロット実験の解析結果を報告する。

References

- [1] Y. Akaishi and T. Yamazaki, Phys. Rev. C **65**, 044005 (2002).
- [2] M. Agnello *et al.*, Phys. Rev. Lett **94**, 212303 (2005).
- [3] T. Yamazaki *et al.*, Phys. Rev. Lett **104**, 132502 (2010).

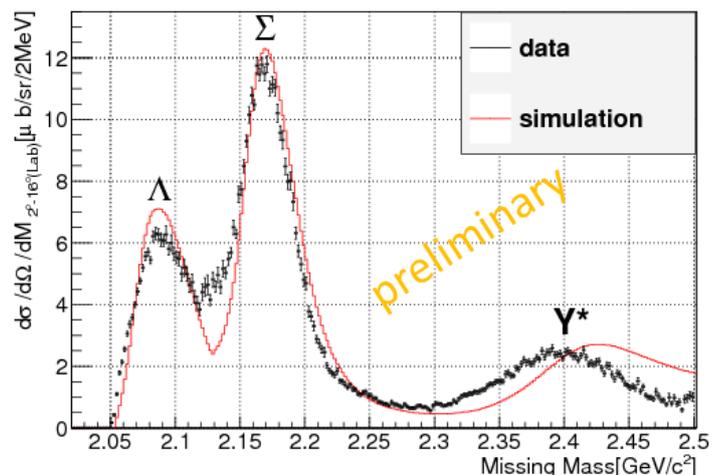


Fig. 1. The experimental data are shown with the black points with error bar. The simulated spectrum is shown with red line.

Formation of supermassive black holes in the high-redshift universe

天体核研究室 稲吉恒平

Abstract As the origin of supermassive black holes observed in the early universe, seed black holes formed by the direct collapse of supermassive stars have been envisaged. We have investigated formation of the supermassive star in first galaxies, using three-dimensional hydrodynamical simulations.

© 2014 Department of Physics, Kyoto University

宇宙初期($z>7$)に観測されている超巨大ブラックホール($\sim 10^9 M_{\text{sun}}$)の存在[1]は、ブラックホールの形成過程に対して強い制限を与えている。特に形成時間を短縮することが不可欠であり、その起源として超大質量星($>10^5 M_{\text{sun}}$)の重力崩壊によりできたブラックホールが考えられている。超大質量星を形成するためには H_2 分子冷却を抑制することが必要である。 H_2 分子冷却が抑制された始原ガス雲は、代わりに H 原子冷却により等温に収縮していき、激しい分裂を回避してそのまま超大質量星を形成すると期待されている[2]。しかし、これまでの研究[3]では、主に超大質量ガス雲の形成段階が調べられており、重力崩壊し原始星が形成される過程の進化は調べられてこなかった。

本研究では、3次元流体シミュレーションを行い、超大質量ガス雲の高密度領域($>10^{10} \text{ cm}^{-3}$)における重力崩壊、そして最終的に形成される原始星の性質を調べた。重力崩壊していくガスの分裂過程はガスの熱進化に強く依存するため、本研究では超大質量ガス雲の進化に重要な影響を与える冷却過程と化学反応を全て考慮した。また、最近の銀河形成シミュレーションにより、初代銀河形成時には構造形成に起因するガスの流入により銀河中心部で乱流が発達することが示唆されている。そこで、本研究では乱流の諸性質が超大質量星形成に与える影響について調べた。結果、初代銀河形成における典型的な場合には、ガス中心部は高温を保ちながら激しい分裂は起こさずに重力崩壊することが分かった(Fig.1)。最終的には中心に原始星を形成し(Fig.2)、その原始星は激しい降着($>1.0 M_{\text{sun}}/\text{yr}$)により成長することが分かった。この原始星はこのまま質量を増加させて超大質量星になり、宇宙初期の超巨大ブラックホールの種を形成すると期待される。

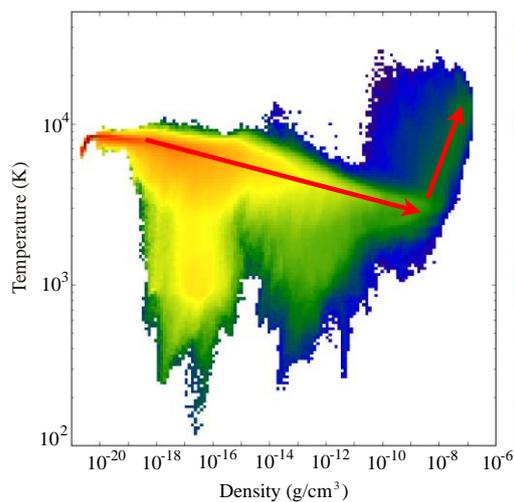


Fig.1 Density-temperature diagram of a supermassive cloud

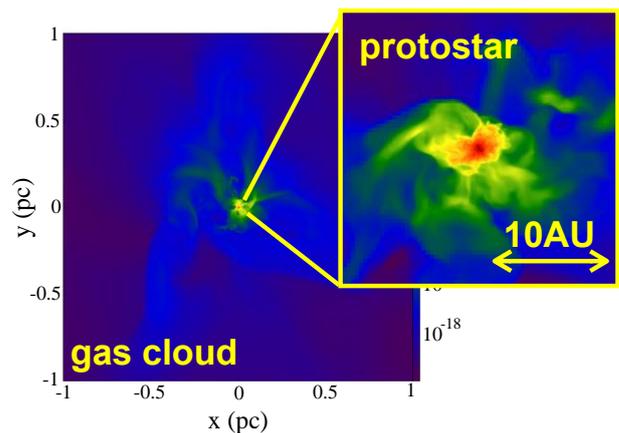


Fig.2 Density distribution of a supermassive cloud: outer region (left) and central region (right)

Reference

- [1] Mortlock et al., Nature, 474, 616 (2011)
- [2] Bromm & Loeb, The Astrophysical Journal, 596, 34 (2003)
- [3] Shang et al., Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 402, 1249 (2010)

J-PARC での中性子電気双極子能率の検出を目指した 超冷中性子リバンチ装置の改良

ビーム物理学分科 今城想平

Abstract We have developed an apparatus which can rebunch very low energy neutrons by the technique of AFP-NMR with RF and gradient magnetic fields for neutron EDM experiments in J-PARC. At present we are upgrading this apparatus. The demonstration experiments will be performed at J-PARC MLF.

© 2014 Department of Physics, Kyoto University

スピンと電気双極子能率 (EDM) を同時に持つ粒子の発見は時間反転対称性を直接的に破る事例の発見となる。また CPT 定理を仮定すれば時間反転対称性の破れの大きさから CP 対称性の破れの大きさを見積もることができる。これらを背景に中性子や原子、ミュー粒子に対して EDM の探索が行われており、我々 NOP (Neutron Optics and Physics) グループも J-PARC での中性子 EDM の検出実験を計画している [1]。素粒子標準模型の予言する CP 対称性の破れを中性子 EDM の大きさに換算すると $10^{30} \sim 10^{32} \text{ e}\cdot\text{cm}$ 程度となる。現在中性子 EDM の上限値 $2.9 \times 10^{-26} \text{ e}\cdot\text{cm}$ では標準模型の予言値にはいまだ程遠いが、超対称性理論等の新しい物理には $10^{-27} \sim 10^{-28} \text{ e}\cdot\text{cm}$ 程度の大きな EDM を予言するものがあり、これらを信じれば上限値をあと 1~2 桁更新することにより有限の EDM を検出できるかもしれない。

中性子 EDM の測定は現在では運動エネルギーが 200~300 neV 程度の超冷中性子 (UCN) を一方向にスピン偏極させたのち十分な外部磁場遮蔽を施した実験容器に貯蔵して行われている。バックグラウンド放射線遮蔽材のために実験容器は通常 UCN 源から数メートル以上離れた場所に設置されるが、UCN は約 7 m/s までの様々な速度を持っている。J-PARC のようなパルス駆動の UCN 源は原子炉によるものと比べて平均強度は劣るものの、瞬間強度は極めて高く従って、瞬間空間密度も極めて高い。現在の EDM の上限値が測定された ILL 原子炉の UCN 源に対して J-PARC では 1 MW 運転下で 30 倍以上の空間密度を達成できる見込みである。しかしこの利点も、速度拡がりがあるため数 m の輸送中に UCN が拡散し、容器への封入密度が低下し、連続源と比べて統計的に不利である。また $10^{-27} \text{ e}\cdot\text{cm}$ の EDM の測定では磁場の不均一性を 10^{-12} T 以下に抑え込まねばならないため実験容器はあまり大きくできない。そこで我々は静磁場勾配中で UCN に 1 mT 程度の静磁場と直交した RF 磁場をかけ AFP-NMR 法 [2] によってスピンを反転させることで静磁場の通過前後での UCN の運動エネルギー収支を制御して実験容器位置に時間的に集束させる装置「UCN リバンチャー」を開発し、原理実証を成功させた [3]。

中性子は 1 T の静磁場中でスピンの向きに応じて $\pm 60 \text{ neV}$ のポテンシャルエネルギーを持ち、従って 1 T の磁場中でスピン反転を行えば運動エネルギーを 120 neV だけ増減させられる。そして我々の最終目標は 20 neV~124 neV までの 104 neV の幅にわたるエネルギー制御である。しかしこの 1 号機で制御できた運動エネルギー幅は 72 neV ~ 118 neV までの約 46 neV であり、我々の最終目標の半分以下である。また 1 kW 電源アンプを用いたがインピーダンスの不整合により装置にパワーが十分入らず RF 磁場出力が 1 mT に達せずスピン反転率も 50 % ほどであった。そこで我々はこれらの問題点を解決すべく現在 2 号機を開発中である。2 号機は 1 号機の 1.9 倍となる 37 neV ~ 124 neV までの約 87 neV の運動エネルギー幅を制御でき、3 kW 電源アンプを用いた 2 mT 以上の RF 磁場出力によりスピン反転率は 95 % を達成できる見込みとなっている。

我々は今年 2 月から運転が再開される J-PARC MLF での実験を目指して装置の調整と準備を現在進めている。

References

- [1] Proposal to J-PARC, http://j-parc.jp/jhf-np/pac_1001/pdf/KEK_J-PARC-PAC2009-11.pdf
- [2] S. V. Grigoriev, et. al., Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A **384**, 451-456 (1997).
- [3] Y. Arimoto, P. Geltenbort et. al., Phys. Rev. A **86**, 023843 (2012).

コンパクト天体現象における QCD 相転移

原子核理論研究室 上田 宏史

Abstract We discuss the QCD phase diagram of asymmetric nuclear matter by using Polyakov loop extended quark meson model. The critical point temperature is found to decrease in asymmetric nuclear matter. We also discuss the phase structure of matter during the dynamical black hole formation and in the neutron star core.

© 2014 Department of Physics, Kyoto University

量子色力学(QCD)は強い相互作用の基本理論である。QCDの熱力学的な性質の知識は非常に広い温度・密度領域の現象に関わるため、重イオン衝突などの実験のみでなく、コンパクト天体現象や宇宙初期の状態などを理解するのに必要不可欠である。系の熱力学的な性質の概略はQCD相図(Fig. 1)によって表現できるため、QCD相図を正確に描くことは非常に重要である。

近年、格子QCDや有効模型によってQCD相図の研究がなされている[1]。しかしながら、第一原理計算である格子QCDのモンテカルロ計算は符号問題のため有限密度の計算が困難であり、また有効模型では模型やパラメータの依存性が大きいため、QCD相図の高密度領域はよくわかっていない。

実験研究としては、LHC、RHIC等での重イオン衝突によるQCD相図の探求が行われている。しかし、重イオン衝突では低温・高密度の平衡状態にある物質を生成するのは容易ではない。

これと相補的なQCD相図探求の場としてコンパクト天体現象がある。コンパクト天体現象では、非常に高密度の物質が生成されるため、QCD相転移の影響が多く議論されている[2]。また、荷電中性などの条件からクォーク毎の化学ポテンシャルが異なる非対称核物質が生成される。そのためコンパクト天体現象でのQCD相転移の影響等を議論するためには、Fig. 1に示すように非対称度依存性を含めた相図[3]を考慮する必要がある。

本研究では、ベクトル結合を取り入れて拡張したカイラル有効模型であるPolyakov loop extended quark meson模型を用い、QCD相図の非対称度依存性、すなわち1次相転移線や臨界点が非対称度によってどのように影響を受けるのかを調べる。この相図と、ブラックホール形成過程、中性子星の核に生成される物質の温度・バリオン化学ポテンシャル(μ_B)・アイソスピン化学ポテンシャル($\delta\mu$)を比較することで、これらの現象での相転移を議論する[4]。

本研究により、対称物質からずれると、Fig. 1のようにQCD臨界点(CP)の温度が下がることがわかった。また、ある $\delta\mu$ 以上でQCD臨界点が消滅し、ゼロ温度でもカイラル相転移が連続相転移となりうることを示唆した。さらにコンパクト天体現象との比較により、ブラックホール形成過程においてQCD臨界点探索の可能性を議論するとともに、中性子星の内部において非対称度依存性のためカイラル相転移が連続相転移となる可能性を示した。

References

- [1] K. Fukushima, Phys. Lett. B **591** (2004) 277; B. J. Schaefer et al., Phys. Rev. D **76** (2007) 074023; V. Skokov et al., Phys. Rev. D **82** (2010) 034029; S. Ejiri et al., Prog. Theor. Phys. Suppl. **153** (2004) 118.
- [2] T. Hatsuda, Modern Phys. Lett. A **02** (1987) 805; I. Sagert, et al., Phys. Rev. Lett. **102** (2009) 081101; K. Nakazato et al., Phys. Rev. D **78** (2008) 083014.
- [3] T. Sasaki et al., Phys. Rev. D **82**, 116004 (2010); K. Kamikado et al., Phys. Lett. B **718**, 1044 (2013).
- [4] H. Ueda, T. Z. Nakano, A. Ohnishi, M. Ruggieri and K. Sumiyoshi, Phys. Rev. D **88**, (2013) 074006
A. Ohnishi, H. Ueda, T. Z. Nakano, M. Ruggieri and K. Sumiyoshi, Phys. Lett. B **704**, (2011) 284

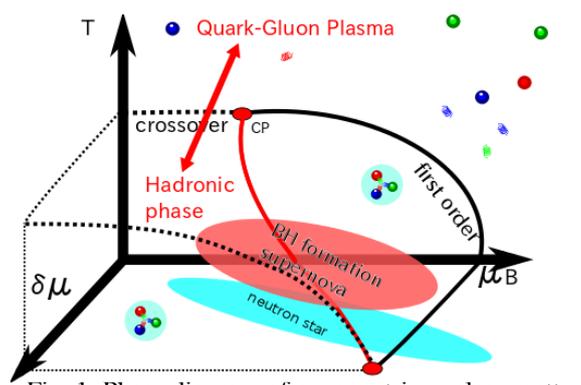


Fig. 1. Phase diagram of asymmetric nuclear matter

超新星残骸における過電離プラズマの研究

宇宙線研究室 大西隆雄

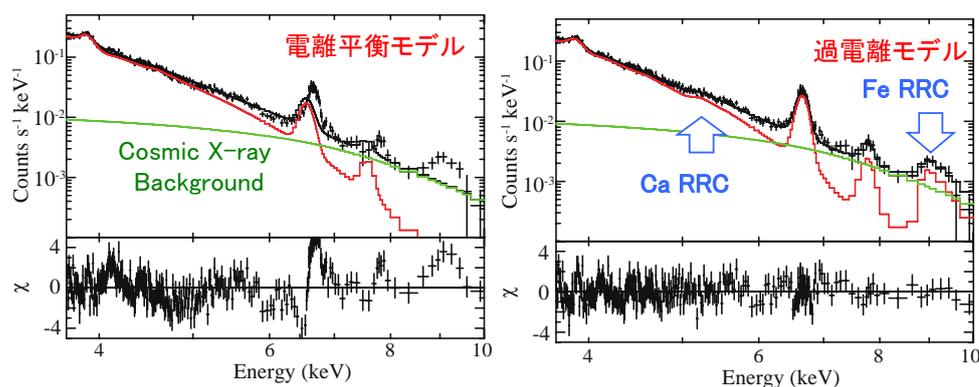
Abstract We present deep observations of the Galactic supernova remnant IC443 with the Suzaku satellite. We detected the enhanced radiative recombination continua of Fe and Ca ions. We show the results of spectral fitting and discuss the origin of the recombining plasma.

© 2014 Department of Physics, Kyoto University

超新星残骸 (SNR) における高温プラズマは、衝撃波加熱により加速された電子がイオンを電離していく緩和過程として理解されてきた。電子温度 (kT_e) と電離状態を反映する電離温度 (kT_z) を用いると、 $kT_e > kT_z$ である (電離優勢プラズマ)。また、衝撃波加熱後、 $10^{12}/n_e$ s のタイムスケールで電離過程と再結合過程が釣り合った電離平衡状態に達する (電離平衡プラズマ)。ここで、 n_e は電子密度 (cm^{-3}) である。従って、SNR におけるプラズマは電離優勢プラズマ、または電離平衡プラズマとして実現されることになる。従来の観測結果はこの描像を支持していた。

しかし最近になって、我々はエネルギー分解能に優れた X 線衛星すざくを用いることにより、再結合過程が優勢なプラズマ ($kT_e < kT_z$; 過電離プラズマ) を発見した [1]。このようなプラズマでは、高階電離したイオンがプラズマ中の自由電子を捕獲した際に放射される放射性再結合連続線 (RRC) の寄与が大きくなる。RRC を制動放射から切り分けることが、過電離プラズマであることを検証するのに重要である。これまでに検出されている Mg、Si、S の RRC は ~ 4 keV 以下で見られる。このエネルギー帯域では、重元素からの輝線が RRC と重なっており、RRC の構造は電離平衡プラズマや電離優勢プラズマのモデルフィットの残差として現れるだけである。一方、4–10 keV のエネルギー帯域では、Fe や Ca の RRC が輝線と重なり合うことなく分離することが可能であるが、統計不足のため W49B における Fe の RRC を除いて検出されていなかった。そのため、我々は最も典型的な再結合優勢プラズマである IC443 の 400 ks におよぶ長時間観測を行った。先行研究では Mg、Si、S の RRC を検出したが、統計不足のため Fe からの RRC が顕著になるエネルギー帯域でのスペクトル構造が明らかになっていなかった。

長時間観測の結果、4 keV 以上における高統計スペクトルを明らかにし、初めて Fe の $K\alpha$ 輝線、及び Fe $K\beta$ + Ni $K\alpha$ 輝線を検出した。図左は通常電離平衡プラズマモデルでフィットした結果である。Fe $K\alpha$ 輝線の中心値がモデルよりデータで高く、電離平衡よりさらに電離の進んだ状態にある可能性を示す。8–10 keV では盛り上がった構造が顕著であり、Fe の強い RRC を示唆する。さらに、5–6 keV に波のような構造が見られる。これは、Ca の RRC と対応する。以上を踏まえて過電離モデルを適用した結果 (図右)、これらの残差は全て解消し、単一の過電離モデルでデータがうまく再現することが判明した。結果として我々はこの天体から初めて Fe、Ca の RRC を発見した。



References

- [1] Takao Ohnishi, et al., PASJ, **63**, 527-533, (2011)
- [2] Takao Ohnishi, et al., submitted to ApJ

図左: 電離平衡プラズマモデル (赤) によるフィット結果。緑は Cosmic X-ray Background を示す。

図右: 過電離プラズマモデル (赤) によるフィット結果。

Discrete flavor symmetry for lepton mixing and quark mixing

素粒子論研究室 小笠原敦

Abstract We study non-Abelian discrete flavor symmetries, which could constrain patterns of the lepton mixing and the quark mixing. Through the systematical search for flavor symmetries, we propose a simple model, which generates both the lepton mixing and the Cabbibo angle.

© 2014 Department of Physics, Kyoto University

ニュートリノ質量とそれに伴うレプトンの世代間質量混合の存在は、標準模型を超えた物理を示唆しているが、その起源は分かっていない。世代間混合の値を説明する候補の一つに non-Abelian な世代間対称性を導入する方法があり、数多くの模型が提唱されている。

近年の実験により、レプトン世代間質量混合を表す Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata 行列 (PMNS 行列) に表れる θ_{13} 角が非零で比較的大きいことが判明した。これまでの多くの世代間対称性模型では、第一近似として tri-bimaximal 模様の PMNS 行列 [1] が与えられてきたが、実験結果と大きく外れてしまう。そのため、この差異を説明する新しい機構、または実験値に近い PMNS 行列を導く新しい世代間対称性が必要になっている。

新しい対称性を用いた模型構築へのアプローチとして Hernandez-Smirnov は、世代間対称性から導きうる PMNS 行列の模様を、模型に依存することなく系統的に調べる方法を提唱した [2]。彼らの手法を用いれば、PMNS 行列に表れる非零の θ_{13} 角を導く世代間対称性を見つけることが可能であり、現在までにいくつかの候補が提案されている。

一方、クオーク質量やその世代間混合は標準模型の枠組みで予言される現象だが、実験値がどのように理論的に定まるかは分かっていない。クオークの世代間質量混合を表す Cabbibo-Kobayashi-Maskawa 行列 (CKM 行列) の混合角の大きさは、Cabbibo 角が PMNS 行列の θ_{13} 角程度であり、その他はとても小さいことが知られている。そのため第一近似で tri-bimaximal 模様の PMNS 行列を導く模型では、CKM 行列は PMNS 行列の θ_{13} 角と同様に、模型に依存した高次の補正で生まれ得ると考えられてきた。しかし、もし PMNS 行列の θ_{13} 角が世代間対称性の一次の寄与で生成されるなら、Cabbibo 角も同様に一次の寄与で生成される可能性がある。よって、世代間対称性から導かれる第一近似が、PMNS 行列と CKM 行列をどの程度再現できるかを調べることは、今後の模型構築において重要である。

そこで本発表では、Hernandez-Smirnov の手法をクオーク部分に拡張することで、クオークの質量混合を導く世代間対称性を模型に依存しない系統的な方法で調べる [3]。ある範囲の世代間対称性から導かれ得る CKM 行列の模様を網羅することで、世代間対称性の可能性を探る。その結果を参考に、CKM 行列の Cabbibo 角と PMNS 行列を同時に出す世代間対称性の模型を提案する。

References

- [1] P. F. Harrison, D. H. Perkins and W. G. Scott, Phys. Lett. B **530**, 167 (2002).
- [2] D. Hernandez and A. Y. Smirnov, Phys. Rev. D **86**, 053014 (2012).
- [3] T. Araki, H. Ishida, H. Ishimori, T. Kobayashi and A. Ogashara, Phys. Rev. D **88**, 096002 (2013).

Integrable deformations of principal chiral models and the AdS/CFT correspondence

素粒子論研究室 川口維男

Abstract We consider the classical integrable structure of q -deformed $SU(2)$ and $SL(2,R)$ principal chiral models. It is known that the classical dynamics of undeformed principal chiral models can be described in two (left and right) descriptions. The two descriptions degenerate each other and, in fact, equivalent. The deformations which we discussed here resolve their degeneracy. Thus the equivalence becomes obscure. We show not only how each of the two descriptions is deformed individually but also how the left-right duality is modified.

© 2014 Department of Physics, Kyoto University

We discuss integrable deformations of $SU(2)$ principal chiral models (PCMs) [1, 2]. In particular, we concentrate on the deformations preserving $SU(2)_L \times U(1)_R$ symmetry. As a result, the deformations can be regarded as a kind of q -deformations of $SU(2)$ PCMs.

In each model, there are two ways to describe the classical dynamics: one of them is called 1) left description and the other is called 2) right description. The former is based on the $SU(2)_L$ symmetry and the later is based on the $U(1)_R$ symmetry. First, we present Lax pairs and monodromy matrices both in left and right descriptions. Then it is shown that a couple of $su(2)_L$ Yangians and the (deformed) quantum affine $su(2)_R$ are realized in the deformed sigma models. The classical r/s -matrices subject to the extended classical Yang-Baxter equation are also obtained. In addition, gauge equivalence between left and right monodromy matrices is shown.

We also discuss a similar integrable deformation of $SL(2,R)$ PCMs[3], which preserves $SL(2,R)_L \times U(1)_R$ symmetry. As in case of deformed $SU(2)$ principal chiral models, there are two descriptions for its classical integrable structure and they are gauge equivalent each other. The main distinction is the “direction” of the q -deformation. We consider the non-standard q -deformation (q -deformation to the non-Cartan direction) while the standard q -deformation is considered in case of $SU(2)$ principal chiral models. As a result, the $U(1)_R$ symmetry is no longer enhanced to the quantum affine $sl(2,R)_R$. It is shown that an infinite-dimensional algebra which has an exotic tower structure is realized in this model. In addition, we construct a homomorphism from the $sl(2,R)_R$ Yangians to the exotic symmetry.

References

- [1] I.Kawaguchi and K.Yoshida, “Hidden Yangian symmetry in sigma model on squashed sphere,” *JHEP* **1011** (2010) 032, “Hybrid classical integrability in squashed sigma models,” *Phys. Lett. B* **705** (2011) 251, “Hybrid classical integrable structure of squashed sigma models: A Short summary,” *J. Phys. Conf. Ser.* **343** (2012) 012055. I.Kawaguchi, T.Matsumoto and K.Yoshida, “The classical origin of quantum affine algebra in squashed sigma models,” *JHEP* **1204** (2012) 115, “On the classical equivalence of monodromy matrices in squashed sigma model,” *JHEP* **1206** (2012) 082.
- [2] I.Kawaguchi, D.Orlando and K.Yoshida, “Yangian symmetry in deformed WZNW models on squashed spheres,” *Phys. Lett. B* **701** (2011) 475. I.Kawaguchi and K.Yoshida, “A deformation of quantum affine algebra in squashed WZNW models,” [arXiv:1311.4696 [hep-th]].
- [3] I.Kawaguchi and K.Yoshida, “Classical integrability of Schrodinger sigma models and q -deformed Poincare symmetry,” *JHEP* **1111** (2011) 094, “Exotic symmetry and monodromy equivalence in Schrodinger sigma models,” *JHEP* **1302** (2013) 024. I.Kawaguchi, T.Matsumoto and K.Yoshida, “Schrodinger sigma models and Jordanian twists,” *JHEP* **1308** (2013) 013.

T2K 実験におけるニュートリノ反応断面積の測定

高エネルギー物理学研究室 木河達也

Abstract The neutrino interaction cross sections for inclusive charged current interaction, charged current quasi-elastic scattering and charged current coherent pion production are measured using the T2K neutrino beam and the fully-active tracking detector “Proton Module”.

© 2014 Department of Physics, Kyoto University

T2K 実験[1]は 2009 年に開始した長基線ニュートリノ振動実験である。J-PARC 加速器により生成された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 離れたスーパーカミオカンデで観測することによりニュートリノ振動の精密測定を行う。ニュートリノ振動実験においてはニュートリノ反応に対する理解が非常に重要になるため、私は T2K 実験のニュートリノビームと自ら開発、製作した Proton Module 検出器を用いて 1GeV 付近のニュートリノ反応断面積の精密測定を行った。Proton Module 検出器はプラスチックシンチレータのバーを並べた全感知型飛跡検出器であり、この検出器をニュートリノ標的および反応点付近の飛跡再構成のために用い、すぐ下流に設置されている鉄とシンチレータのサンドイッチ構造の INGRID 検出器をミューオン識別のために用いる。

ニュートリノ振動はニュートリノ荷電カレント反応を通して測定するため、荷電カレント反応の精密測定は特に重要である。そのため、まず Proton Module 検出器と INGRID 検出器を用いて鉄と炭素における荷電カレント反応断面積を測定した。それと同時に鉄と炭素における荷電カレント反応断面積の比を非常に精密に測定した。これらの測定結果はモデルによる予測とよく一致しており、荷電カレント反応において、標的原子核に依存性したアノマリーが測定精度の範囲で存在しないことを確認した。この結果は前置検出器とスーパーカミオカンデにおいて異なった種類の原子核をニュートリノ標的として用いている T2K 実験にとって重要な結果である。

次に Proton Module 検出器を用いて T2K 実験のニュートリノ振動測定で信号モードとしている荷電カレント準弾性散乱 ($\nu_\mu + n \rightarrow \mu + p$) の断面積を測定した。測定結果はモデルによる予測と無矛盾であったが、再構成された飛跡が 1 本のサンプルと 2 本のサンプルからそれぞれ求めた断面積にはわずかな違いが見られた。T2K 実験ではニュートリノ反応における原子核モデルとしてフェルミガスモデルを用いているが、これは近似を用いて単純化されたモデルであり、より複雑な Spectral function と呼ばれるモデルがより現実的であると考えられている。Spectral function を用いた場合の見積もりではこの違いは小さくなっているため、この違いは Spectral function の正しさを示していると考えられる。

最後に Proton Module 検出器を用いてニュートリノが原子核全体と相互作用する荷電カレントコヒーレント π 生成反応 ($\nu_\mu + A \rightarrow \mu + \pi + A'$: A は原子核) の断面積を測定した。この反応断面積の予測には Rein and Sehgal モデル[2]が広く用いられてきたが、K2K 実験、SciBooNE 実験において 1GeV 付近のエネルギー領域で得られた信号は Rein and Sehgal モデルの予測より遥かに小さく、有意な信号が見つからない。Proton Module 検出器による測定結果も Rein and Sehgal モデルによる予測よりずっと小さいものであったが、荷電カレントコヒーレント π 生成反応が存在しない場合の予測より 1σ 以上の超過が見られた。その信号の終状態の粒子の角度分布を見ると、小角度の領域においては Rein and Sehgal モデルとよく一致しており、大角度領域では大きくずれているため、Rein and Sehgal モデルにおける終状態粒子の運動学の予測に原因がある可能性を示唆した。

いずれの測定結果も T2K 実験において考慮されているニュートリノ反応モデルの不定性の範囲内であり、T2K 実験においてニュートリノ反応モデルとその不定性が正しく扱われていることを示した。(ただし荷電カレント準弾性散乱と荷電カレントコヒーレント π 生成反応の断面積の測定結果はまだ T2K 実験の公式の物理結果ではない。)

References

- [1] K. Abe *et al.* (T2K Collaboration), *Nucl. Instrum. Meth. A* **659** 106 (2011)
- [2] D. Rein and L. M. Sehgal, *Ann. Phys.* **133** 79 (1981)

F-theory compactified on $K3 \times K3$ and its application to landscape

基礎物理学研究所 素粒子論グループ 木村 裕介

Abstract We study flux compactification of F-theory on $K3 \times K3$, and its application to landscape problem. $K3$ surface admits several distinct elliptic fibrations, and each fibration contains the algebraic information such as gauge group. Using lattice theoretic approach, we investigate distribution of gauge groups over the landscape of vacua.

© 2014 Department of Physics, Kyoto University

ストリング理論をコンパクト化する空間の変形の自由度をモジュライというが、この自由度からスカラー粒子が出現してしまう。宇宙論との整合性から、そのような粒子が出現しないようモジュライを安定させる必要がある。F理論において4形式フラックスを導入することでモジュライを安定できることが知られている。我々の論文ではコンパクト化する空間が $K3 \times K3$ の場合を考える。この時、フラックスの導入は各々の $K3$ 曲面の代数的サイクルの数が増えることに対応する。代数的サイクルの数が可能な最大に達した $K3$ 曲面を attractive $K3$ という。コンパクト化する空間である $K3 \times K3$ において、両方の $K3$ 曲面とも attractive である場合がモジュライを安定させる観点より理想的である。

ストリング理論では可能な真空の解が一つに定まらず無数に存在するが、これをランドスケープ問題という。F理論では、楕円ファイブレーションから非可換ゲージ群などの物理情報を読み取れる。 $K3$ 曲面は複数の楕円ファイブレーションを持ち、それぞれのファイブレーションに応じて対応する物理が変わってくる。この $K3$ 曲面の特徴を応用することで、非可換ゲージ群に対する条件をつけた従来より精密なランドスケープ問題の考察が出来る。異なる真空を区別するファイブレーションの分類を便宜上 J_1 分類と呼ぶ。同様に、ゲージ群や物質表現が等しくなるかで区別する分類を J_2 分類と呼ぶ。一般に J_2 分類は J_1 分類より粗い。物理的に異なる真空でもゲージ群や物質表現が一致する場合があるのだ。格子理論を用いて J_2 分類を調べる Kneser-Nishiyama 法という数学的手法が存在する[1]が、我々はこの方法に加え、Piatetski-Shapiro, Shafarevich[2]らの理論に倣い、2次の整数係数コホモロジー群格子のうち(-2)-反射群に関する基本領域を調べることで、より細かい J_1 分類の意味で楕円ファイブレーションを数える結果を導いた[3]。これにより、 $K3 \times K3$ のランドスケープにおいて非可換ゲージ群を残すことでどの位真空の数が減るか、またどのゲージ群がより多くの真空を持つかなど、問題の統計的な側面まで詳細に調べることが出来る。我々は E_n -ゲージ群と $E_{n-1} \times U(1)$ -ゲージ群を持つ真空の数の比率を計算した[4]。これが今発表の主結果である。動機は $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ をゲージ群として持つ真空より $SU(5)$ を持つ真空の数の方がランドスケープで多いことを実証することにあるが、類似のケースであり実行可能な上記の場合を計算対象とした。

Aspinwall, Kallosh は tadpole 相殺条件に更なる制約を加えた条件の下で、どの $K3$ 曲面が許されるかを調べた[5]。我々はこの制約を緩め、全てで 34 個の attractive $K3$ 曲面を今研究のサンプルとして用いた。一般には上限を見積もったが、うち 10 個については J_1 分類と J_2 分類が一致することを我々は[3]で確認している。この事実はランドスケープにおいて真空の数を比べ正確な計算を実行する今発表の主結果を得るうえで本質的である。

References

- [1] K.Nishiyama, Japan. J. Math., **22** (1996).
- [2] I.Piatetski-Shapiro and I.R.Shafarevich, Math. USSR Izv. **5** (1971).
- [3] A.Braun, Y.Kimura and T.Watari, arXiv: 1312.4421[math.AG]
- [4] A.Braun, Y.Kimura and T.Watari, to appear
- [5] P. S. Aspinwall and R. Kallosh, *JHEP* **0510**(2005) 001, [arXiv:hep-th/0506014].

カイラル対称性の部分的回復と核物質中の π 中間子の性質

原子核理論研究室 郷田創一郎

Abstract To study partial restoration of chiral symmetry, we evaluate in-medium chiral condensate, pion decay constant and pion mass using in-medium chiral perturbation theory up to the next-to-leading order of nuclear density. We find that NLO corrections are not small and low energy theorems are not satisfied in this order.

© 2014 Department of Physics, Kyoto University

低エネルギーQCDでは、カイラル対称性の自発的破れが起きているが、この現象が構成子クォーク質量を生成し、ハドロン質量のほとんどを与えていると考えられている。近年、この対称性の破れを原子核を舞台として検証する試みが理論・実験ともに盛んである。特にカイラル対称性の自発的破れの秩序変数である、カイラル凝縮の核媒質中での変化に着目し、質量生成機構を検証するという研究が行われている。この変化はカイラル対称性の部分的回復と呼ばれ、この観点から、ゼロ温度・有限密度とみなせる原子核という有限密度系と中間子との束縛系に特に注目が集まっている。原子核中でのハドロン の性質の変化を通して、カイラル対称性の部分的回復を理解することが理論・実験ともに重要視されている。

その理解を目指した理論的な研究として、有限密度中でも成り立つ関係式が、密度の一次の範囲内でカレント代数に基づいて系統的に導かれている[1]。また π 中間子原子の深い束縛状態に関する精密分光実験を通して、対称性の部分的回復が線形密度の範囲内で定量的に見積もられている[2]。

この研究では、まずカイラル対称性の破れの秩序変数であるカイラル凝縮の密度依存性を解析する[3]。さらにその自発的破れに伴う南部ゴールドストーン粒子である π 中間子に注目し、核物質中で π 中間子の性質がどのように変化するかを定量的に議論する。特に π 中間子の崩壊定数、質量の密度依存性を評価する[4]。解析には核物質中に拡張したカイラル摂動論[5,6]を用い、線形密度近似を超えてNext-to-leadingの補正までを議論する。この理論を用いる利点は、カイラル対称性を尊重している点と、運動量の次数を勘定することで物理量の大きさを系統的に評価することが可能である点である。核物質中での π 中間子は波動関数くりこみにより密度効果を受ける。これが核物質中での π 中間子を特徴付け、崩壊定数、質量等の物理量に寄与し、本質的に重要であることを示す。またその密度依存性を解析し、 $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ 崩壊から波動関数くりこみの密度依存性を観測できることを示す。核物質中での低エネルギー定理、特にGell-Mann-Oakes-Renner関係式が成り立つかどうかも議論する。

References

- [1] D. Jido, T. Hatsuda and T. Kunihiro, Phys. Lett. B **670**, 109 (2008).
- [2] K. Suzuki et al., Phys. Rev. Lett. **92**, 072302 (2004).
- [3] S. Goda and D.Jido, Phys. Rev. C **88**, 065204 (2013).
- [4] S. Goda and D.Jido, arXiv:1312.0832.
- [5] J. A. Oller, Phys. Rev. C **65**, 025204 (2002).
- [6] U. G. Meissner, J. A. Oller and A. Wirzba, Annals Phys. **297**, 27 (2002).

軽い中性子過剰核における ダイニュートロン相関の系統的研究

原子核理論研究室 小林 史治

Abstract We investigate dineutron correlation in the light neutron-rich nuclei. A dineutron is a compact spin-singlet two-neutron pair regarded as a kind of cluster. We suggest that dineutron correlation can be generally significant in those nuclei. We present contribution of the dineutron correlation in the ground and excited states of ${}^8\text{He}$.

© 2014 Department of Physics, Kyoto University

近年、科学技術の進歩により自然界には存在しない中性子過剰な不安定核の研究が実験的に可能になり、長らく研究されてきた安定核における常識を打ち破る新奇な現象がいくつも発見されてきた。そのような多様な様相を見せる原子核の性質を明らかにするために、中性子過剰核は理論・実験両側面から精力的に研究されている。中性子過剰核特有の物理の一つに“ダイニュートロン相関”がある。ダイニュートロンとは空間的にコンパクトなスピン0の二中性子対である。自由空間において二中性子は束縛状態を形成しないにも関わらず、無限核物質の低密度領域や中性子過剰核の核表面付近では、二中性子間の空間的な相関が強まりコンパクトなダイニュートロンが形成されることが理論的に示唆されている[1, 2]。特に中性子過剰核中においては、有限効果によってダイニュートロンは全系のサイズに比べ非常にコンパクトになり一種の擬似的なボソン(クラスター)と見なし得る。しかし二中性子は元々非束縛なために、ダイニュートロンの形成の度合いやサイズなどの性質は、芯原子核の占有軌道・変形構造・芯と余剰中性子の束縛の強さなどの状況に応じて多様に変化することが期待される。しかし先行研究で用いられてきた既存のモデルでは芯の構造を考慮することが難しく、その適用範囲はごく一部の原子核に限られていた。本研究では芯の構造をあらわに取り入れた上でその周りのダイニュートロンの運動を詳細に記述する枠組み“ダイニュートロン凝縮波動関数”を一から構築した[3]。この枠組みはダイニュートロンの観点からは研究されていない大半の原子核に適用でき、これによりダイニュートロン相関の普遍的性質を明らかにするための系統的研究が可能になった。

今回の研究では軽い質量数($A \leq 10$)の中性子過剰核に着目し、それらにおけるダイニュートロン相関の寄与を解析した。その解析からこれら軽い中性子過剰核では一般的にコンパクトなダイニュートロンが核表面付近で形成され得ることを示した。その中でも今回の発表では ${}^8\text{He}$ の結果に着目する[4]。 ${}^8\text{He}$ は α 芯+四余剰中性子でよく記述され、四つの余剰中性子が独立に $0p_{3/2}$ 殻に入ってLS力を稼ぐ殻模型的な成分と一つもしくは二つのダイニュートロンが形成される成分が競合することが考えられる。今回の解析により ${}^8\text{He}$ の基底状態においては殻模型的な成分と一つのダイニュートロンが芯から大きく発達する成分が競合することを示した。芯と余剰中性子が適度に束縛している基底状態においてはダイニュートロンがLS力によって崩される効果が重要であり、ダイニュートロンが同時に二つ発達する成分は大きく抑制される。一方で二つのダイニュートロンが発達する成分は励起状態において重要になり、二つのダイニュートロンが擬似的にボソンとして振る舞い最低軌道を占める“ダイニュートロン凝縮状態”が励起状態として存在し得る可能性を示唆した。この状態は α と2ダイニュートロンという三つのクラスターがガス状に、互いにほぼ相関を持たずに大きく広がった構造で特徴づけられる。今回の発表では基底状態における殻模型成分とダイニュートロン成分の競合、および励起状態におけるダイニュートロン凝縮という新奇な状態について述べる。

References

- [1] M. Matsuo, Phys. Rev. C **73**, 0044309 (2006)
- [2] K. Hagino, H. Sagawa, J. Carbonell and P. Schuck, Phys. Rev. Lett. **99**, 022506 (2007)
- [3] F. Kobayashi and Y. Kanada-En'yo, Prog. Theor. Phys. **126**, 457 (2011)
- [4] F. Kobayashi and Y. Kanada-En'yo, Phys. Rev. C **88**, 034321 (2013)

低雑音撮像能力をもつ 気球搭載型サブ MeV ガンマ線カメラの 天体検出性能の検証

宇宙線研究室 澤野達哉

Abstract We have been developing an Electron Tracking Compton Camera (ETCC) for the MeV gamma-ray region in the universe by balloon experiments. The simulated detection efficiency of the flight-model-type ETCC is consistent with the simulated one, which enables us to detect Crab nebula with $> 5\sigma$ level.

© 2014 Department of Physics, Kyoto University

サブ MeV ガンマ線帯域の連続スペクトル観測は、活動銀河核のガンマ線バーストの光度における経験則を用いた距離梯子への利用 [1] など高エネルギー天体现象へのユニークなプローブになる一方で、雑音事象が非常に多く観測装置の発展が遅れている分野である。観測の困難を克服した観測技術の確立のため、コンプトン散乱を利用する、ガス検出器とシンチレーションカメラからなる電子飛跡検出型コンプトンカメラ (ETCC) の開発を行い、気球観測による天体撮像能力の実証を目指している。開発した気球搭載型 ETCC (FM ETCC) の性能を説明すべく、物理過程と検出器のエネルギー分解能のみを考慮したモンテカルロシミュレーションにより ETCC の検出効率を評価したところ、FM ETCC と同タイプの試験用小型 ETCC の実験値と 30%以内で一致しており (Fig. 1) [2]、精度良いシミュレータの構築に成功した。このことは、ETCC が雑音事象を含む環境でコンプトン散乱事象を選択的にほぼ 100%捉えられていることを示している。FM ETCC の基本性能を用いて数値計算を行い、高度 40 km の中緯度で数時間の観測により、かに星雲を 5σ 以上の有意度で観測可能であることを示した。ガス検出器に用いるガス種の選定により 10 倍程度まで有効面積を達成、flux に変動の可能性が指摘される Vela パルサーの観測による検証を南極周回気球実験によって可能な感度に達成する (Fig. 2) など、気球観測実験によるサブ MeV ガンマ線天文学の開拓の実現性を検証した。

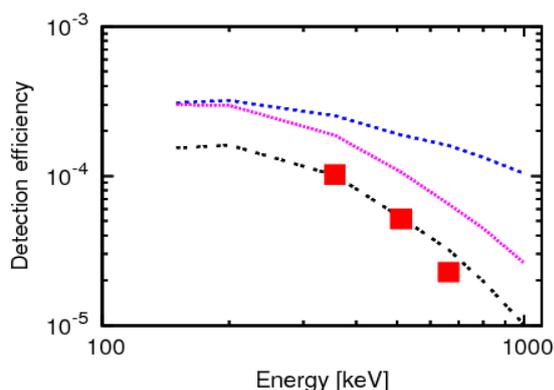


Fig. 1. Detection efficiency of small ETCC: simulation (Double-dashed line) and measured (closed square). See [2] for details.

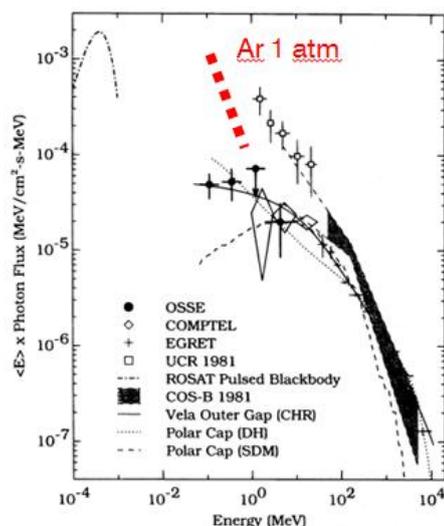


Fig. 2. Detection expectation of the circumpolar-flight ETCC (dotted line) for Vela pulsar. The original figure is from [3].

References

- [1] D. Yonetoku *et al.*, *ApJ*. **609**, 935-951 (2004).
- [2] T. Sawano *et al.*, *JPS Conf. Proc.*, in press (2013).
- [3] M.S.Strickman *et al.*, *ApJ*. **460**, 735 (1996).

Non-minimal coupling in the context of multi-field inflation

Yukawa Institute for Theoretical Physics Jonathan White

Abstract Motivated by their good consistency with recent observational data, we study the class of multi-field inflation models that contain a non-minimal coupling to the gravity sector. In particular, we focus on the formulation dependence of this class of models and the potentially important role of the Higgs.

© 2014 Department of Physics, Kyoto University

Recent observations of the Cosmic Microwave Background (CMB) show very good consistency with inflationary models whose actions can be written in a form that contain non-minimal coupling between the field driving inflation and the Ricci Scalar. Such non-minimal coupling is also theoretically well motivated, for example in the context of unifying particle physics theories. The same theories also predict the existence of many light degrees of freedom in addition to the inflaton. Motivated by these facts, in this work we study multi-field inflationary models with non-minimal coupling.

It is well known that models with non-minimal coupling can be re-cast in the form of Einstein gravity via a conformal transformation of the metric. The original “frame” and that after the rescaling of the metric are referred to as the Jordan and Einstein frames, respectively, and there is a long-standing debate as to the level of equivalence between results obtained in the two frames. We focus on comparing the curvature perturbations associated with the two frames, as these quantities are very closely linked to the temperature fluctuations of the CMB. At linear order we find that, as a result of the isocurvature modes inherent to multi-field models of inflation, the two quantities and their evolutions do not necessarily coincide. In particular, the conservation of one does not necessarily imply the conservation of the other. Using the δN formalism to go beyond linear order, we find that the statistical properties of the two curvature perturbations may also be very different, including the non-gaussianity. Given that non-gaussianity is a powerful tool for distinguishing between different models of inflation, this highlights the importance of determining how each of the curvature perturbations is related to observations.

In the second part of our work we consider the reheating process in the same class of inflation models. Taking a bottom-up approach we assume that there are no direct interaction terms between the inflaton sector and the Standard Model. As such, reheating takes place via gravitationally suppressed dimension-5 interaction terms, with the decay rates of the inflaton sector depending on the masses of the decay products. Since all masses of the standard model particles are acquired from the Higgs field expectation value, we argue that the rate of gravitational particle production can be spatially modulated by the stochastic value of the Higgs condensate generated during inflation. We show that observational constraints on the curvature perturbation generated from this Higgs isocurvature mode can be used to set a lower bound on the inflaton mass during the reheating phase. Given that gravitational interactions are universal, and that we know the Higgs field to exist, this work is important in constraining the possible role that the Higgs field might play in the dynamics of the early Universe.

References:

- [1] J. White, M. Minamitsuji, and M. Sasaki, *Curvature perturbation in multi-field inflation with non-minimal coupling*, JCAP 07(2012)039.
- [2] J. White, M. Minamitsuji, and M. Sasaki, *Non-linear curvature perturbation in multi-field inflation models with non-minimal coupling*, JCAP 09(2013)015.
- [3] J. White and Y. Watanabe, *in preparation*.

Quantum Tunneling During Inflation: Non-linear Analysis of the Quantum Fluctuations

Yukawa Institute for Theoretical Physics Kazuyuki Sugimura

Abstract We perform a non-linear analysis of the primordial fluctuations generated from quantum tunneling during inflation, which can become a key to observationally test the string theory landscape in future. We develop formulation and then apply it to a couple of inflation models with quantum tunneling.
© 2014 Department of Physics, Kyoto University

While inflation is now part of the standard cosmology, our knowledge of the physics behind inflation is very limited. The energy scale of inflation is far beyond that of the standard model of particle physics and there is no hope to realize accelerator experiments at such high energy. However, string theory, the most studied candidate of the ultimate theory, recently offered a new framework on inflation: the string theory landscape.

The motivation of this work is to test this theory-motivated framework by observation, which possibly has an extremely large impact on both cosmology and string theory. The string theory landscape is a huge landscape of potential for scalar fields, which are originated from the degrees of freedom of the extra dimension geometry in string theory. Although details of the landscape are not clear yet, string theory generally suggests the existence of local potential minima, where scalar fields jump around by quantum tunneling. Evidences of the string theory landscape can be found by searching for distinctive observational signatures generated by such quantum tunneling.

In this work, we focus on the non-Gaussianity of the primordial fluctuations generated from quantum tunneling during inflation, which can become a key to observationally test the string theory landscape in future. The non-Gaussianity of the primordial fluctuations, an observable related to the higher order correlations of them, is going to be a powerful tool to probe inflation in the coming era of high precision cosmology. Since there was no previous work on the non-Gaussianity from quantum tunneling, we start with developing formulation to calculate it. The commonly used formulation to calculate the non-Gaussianity, the so-called in-in formalism, is not directly applicable to systems with quantum tunneling because the evolution of the quantum fluctuations during quantum tunneling cannot be described as real (Lorentzian) time evolution. We derive the extended in-in formalism on quantum tunneling background in a system of multi-dimensional quantum mechanics based on the WKB analysis of tunneling wave functions [1], and then further extend this to cosmological systems with quantum tunneling.

We apply this newly developed formulation to a couple of models motivated by the string theory landscape, namely, models where slow-roll inflation is triggered by quantum tunneling [2] and ones where bubbles are nucleated via quantum tunneling during slow-roll inflation [3], to predict the non-Gaussianity of the primordial fluctuations from these models for the first time. As a result of calculation, we find that the bispectrum can be generated in the long-wavelength modes due to quantum tunneling during slow-roll inflation in the former models and that large skewness regions with azimuthal symmetric spatial dependence can be generated due to nucleated bubbles in the latter.

References

- [1] K. Sugimura, Phys.Rev. D88 (2013) 025037.
- [2] K. Sugimura and E. Komatsu, JCAP 1311 (2013) 065.
- [3] K. Sugimura, D. Yamauchi, and M. Sasaki, Europhys.Lett. 100 (2012) 29004.

Measurement of the energy dependent muon neutrino charged current inclusive cross section with the T2K INGRID detector

高エネルギー物理学研究室 鈴木研人

Abstract The energy dependent muon neutrino charged-current (CC) inclusive cross section from 1 to 3 GeV is being measured at the T2K INGRID detector. The current analysis status and the prospect will be presented.

© 2014 Department of Physics, Kyoto University

The T2K experiment [1] is a long baseline neutrino oscillation experiment. The purpose of this experiment is to measure the neutrino oscillation parameters and the CP violating phase (δ_{cp}). In 2013, the non-zero neutrino mixing parameter (θ_{13}) was observed with a significance of 7.3σ by measuring the electron neutrino appearance [2]. The combined measurement with other reactor experiments showed that δ_{cp} preferred $-\pi/2$. On the other hand, the property of the neutrino interaction itself is not fully understood in the neutrino physics. T2K experiment also aims to make the mechanism clear by measuring the neutrino cross section at T2K near detector. The purpose of this analysis is to measure the energy dependent muon neutrino charged-current (CC) inclusive cross section from 1 to 3 GeV with the T2K INGRID detector. Since there is little data measured by the other experiments in this energy region, the result of this analysis will be useful for some neutrino interaction models.

The INGRID (Fig. 1) is an on-axis neutrino near detector which is composed of identical 14 modules and designed to measure the neutrino beam direction with the $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ coverage. Each module is arranged in horizontal and vertical direction. Each module has iron target plates and plastic scintillator planes. A neutrino interacts with one of the iron plates and generates charged particles. Then, these particles are tracked by the scintillator planes. By counting the number of the interactions, we measure the neutrino CC interaction rates with the high detection efficiency ($>70\%$).

INGRID cannot measure the neutrino energy. But the expected energy spectrum of the neutrino beam is different for each module position. With this feature and categorizing the neutrino events according to some topologies, the energy dependence of the CC inclusive cross section from 1 to 3 GeV can be measured. The principle of this measurement, the systematic errors, the result with Toy MC data, and the prospect of this analysis will be presented.

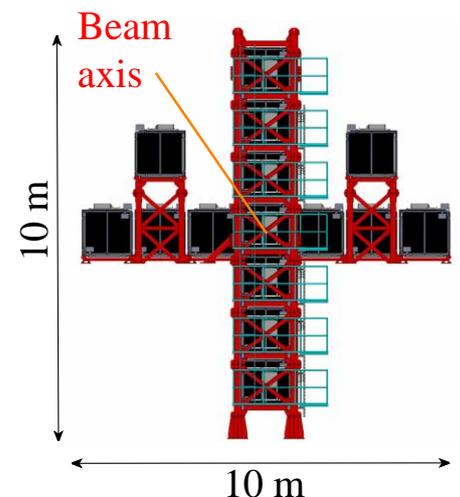


Fig.1 INGRID detector. Two separated modules located at off-axis positions are not used in this analysis.

References

- [1] K.Abe *et al.*[T2K collaboration], Nucl,Instrum.Meth.A **659** (2011) 106.
- [2] K.Abe *et al.*[T2K collaboration], arXiv:1311.4750 [hep-ex]

T2K 前置検出器部分における小型水チェレンコフ検出器 “Mizuche” を使ったニュートリノ反応数測定

高エネルギー物理学研究室 高橋将太

Abstract “Mizuche” is newly developed water Cherenkov detector for counting the neutrino at the near detector hall of T2K. It aims to test feasibility for precise counting under rather high intensity beam using same type detector as Super-Kamiokande. We report the result of our measurement and BG treatment.

© 2014 Department of Physics, Kyoto University

東海神岡間長基線ニュートリノ振動実験[1]（以下 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 の陽子ビームを使って生成した人工ニュートリノビームを、295km 離れた岐阜県飛騨市にあるスーパーカミオカンデに向けて飛ばし、その飛行中に起こるニュートリノ振動を観測する実験である。2009 年 4 月に稼働開始したこの実験は、現在までに電子ニュートリノ出現事象の発見[2]、および、ミューオンニュートリノ消失モードの精密測定[3]を達成している。

ニュートリノ振動の精密測定には、ニュートリノビームのフラックス、ニュートリノ反応断面積、検出効率の不定性に起因する系統誤差を低く抑えることが必要となってくる。前置検出器部分において、後置検出器であるスーパーカミオカンデと同じ測定原理・ニュートリノ反応標的を持つ水チェレンコフ検出器を使って測定することができれば、これらの系統誤差を削減することが期待できる。

T2K 実験のニュートリノビーム強度では、大型の水チェレンコフ検出器に対するニュートリノ反応レートが大きく、1 バンチ内で多数のニュートリノが反応してしまい、バンチ毎にイベントを区別して測定することが困難になる。そのため、本実験では容積を 2.5 トンと小型化し、ニュートリノ反応数を計数することに特化した Mizuche 検出器を開発した[4]。

Mizuche 実験は 2012 年からデータ取得を開始した。本発表では、2012 年 5 月 28 日～6 月 9 日に取得したデータについての解析結果を報告する。

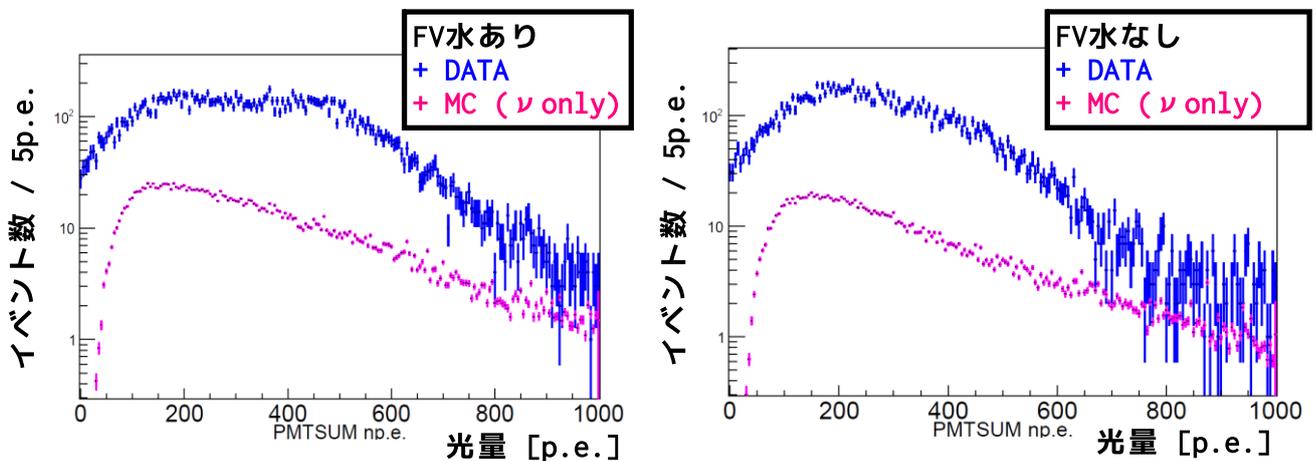


Fig.1. Distribution of light yield for data and Monte Carlo (only neutrino interaction). Right: with FV water; Left: without FV water.

References

- [1] Y. Itow et al., “The JHF-Kamioka neutrino project”, <http://arxiv.org/abs/hep-ex/0106019>
- [2] K. Abe et al., “Observation of Electron Neutrino Appearance in a Muon Neutrino Beam”, <http://arxiv.org/abs/1311.4750>
- [3] K. Abe et al., “Measurement of Neutrino Oscillation Parameters from Muon Neutrino Disappearance with an Off-Axis Beam”, <http://prl.aps.org/abstract/PRL/v111/i21/e211803>
- [4] 高橋将太, 修士論文「ニュートリノ反応数測定のための小型水チェレンコフ検出器”Mizuche”の開発」

X-ray study on plasma outflows from the Galactic center

宇宙線研究室 中島 真也

Abstract We present the discovery of plasma outflows extending 100-200 pc north and south of the Galactic center. These plasmas have thermal energy of 10^{52} erg. We also found the southern plasma to be in a recombining phase. These plasmas were likely generated by the Galactic center activity 10^5 yr ago.

© 2014 Department of Physics, Kyoto University

The center of our Galaxy (Galactic center; GC) has a lower activity than that of active galactic nuclei or starburst galaxies at present. The current luminosity of the central supermassive black hole, Sagittarius (Sgr) A*, is eight orders of magnitude lower than its Eddington luminosity of 10^{44} ergs. Moreover, on-going explosive star formation is not found. However, signatures of past GC activities have been reported recently. For instance, X-ray observations have discovered fluorescent lines of neutral iron from dense molecular clouds in the GC (X-ray reflection nebula; XRN). They are likely to be caused by reflections of past Sgr A* flares occurring 100-1000 yr ago. The luminosity of the flares are estimated as 10^{39} ergs [1]. Gamma-ray observations also revealed the giant bubbles, which suggest another Sgr A* flare or a nuclear starburst 10^6 - 10^7 yr ago (Fermi bubble; FB) [2]. Such observational evidence of past GC activities is still limited, so that there is a large gap in the activity history between 10^3 and 10^6 yr ago (see Fig. 1).

Our aim is to find other relics of GC activities and to clarify the history of them. Previous X-ray observations have concentrated on the Galactic plane region. Contrastingly, we focused on the Galactic bulge region because it is less contaminated by the strong GC background emission and is more suitable to detect phenomena associated with the GC activities. We performed the survey of the off-plane region with the Suzaku satellite, and found the large diffuse plasma to the south and north of the GC, which are referred to as GC South and GC North, respectively.

From the spectral analysis of GC South, we discovered the plasma is in a recombining phase, which is not expected in the standard shock-heating scenario. Indeed, a recombining plasma (RP) model well represents the spectrum, and gave us the electron temperature of 0.5~keV, the initial ionization temperature of 1.6~keV. The recombination timescale of 10^5 yr indicates that GC South was generated 10^5 yr ago. The absorption column density suggests that GC South is located at the GC distance. The mass and thermal energy of the plasma reach $3000 M_{\odot}$ and 8×10^{51} erg, respectively [3].

The spectra of GC North is represented by a CIE plasma with the electron temperature of 0.7~keV. The absorption column density indicates that GC North is also located at the GC distance. The mass and thermal energy are found to be $900 M_{\odot}$ and 3×10^{51} erg, respectively. The dynamical time scale of the plasma is estimated as 10^5 yr. These parameters are comparable to those of GC South.

We consider that a past GC activity 10^5 yr ago generated GC South/North on the basis of large thermal energies in both the plasma and the RP in GC South.

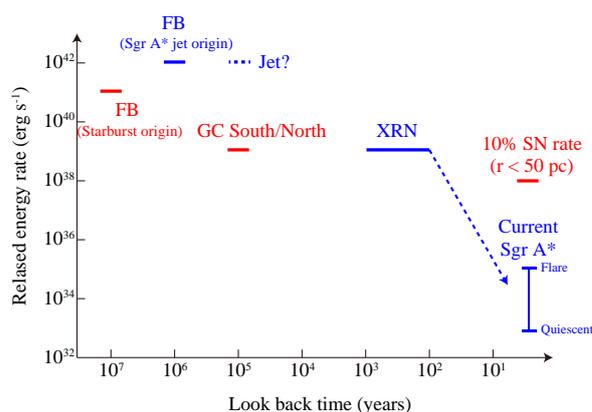


Fig. 1 History of the past GC activities.

References

- [1] Ryu *et al.*, PASJ, **65**, 33 (2013).
- [2] Su *et al.*, ApJ, **724**, 1044 (2010).
- [3] Nakashima *et al.*, ApJ, **773**, 20 (2013).

Direction-sensitive dark matter search with a gaseous micro time projection chamber

宇宙線研究室 中村 輝石

Abstract A direction-sensitive dark matter search with improved gaseous micro time-projection-chamber was performed in Kamioka. New best direction-sensitive SD cross section limit 557 pb for WIMP mass of 200 GeV/c² was obtained. Remaining background was studied, and the polyimide of the μ -PIC was found to be a dominant background source.

© 2014 Department of Physics, Kyoto University

Non-baryonic dark matter is widely believed to account for a large fraction of the mass in the universe by a lot of observation of universe. Weakly Interacting Massive Particle (WIMP) is the leading candidate of the dark matter. Direct search experiments pursue for the signal of WIMP-nucleus elastic scatterings, where WIMPs in the halo of our galaxy are expected to be detected on the Earth[1]. Direct search experiments can provide the robust evidence of the existence of the halo dark matter. Since the shape of the expected energy spectrum is exponential-like, the decrease of threshold energy is important to get enough signals.

Many direct search experiment of dark matter have been performed so far. Although some experiments have reported a positive result, no experiments have reached widely agreed discovery. In order to obtain a robust evidence of the dark matter, more reliable signal is needed. A most convincing signal of the dark matter would be seen in the directional distribution of the recoil nucleus. Since the Cygnus constellation is seen in the forward direction of the Solar system's motion, dark matters would seem to come from the Cygnus direction like "WIMP-wind". A gaseous detector with a good position resolution is required for the direction-sensitive search in order to detect a shorter track than 1mm in atmospheric pressure gas.

We have developed a direction-sensitive dark matter detector, NEWAGE-0.3b' to improve the sensitivity by one order of magnitude from previous measurement performed by NEWAGE-0.3a[2]. NEWAGE-0.3b' consists of a micro time projection chamber (μ -TPC) filled with 0.1 atm of CF₄ gas, its electronics system, and the gas circulation system with cooled charcoal for reduce radon, which is one of the background source, and impurities. NEWAGE-0.3b' was designed to have a twice larger target volume with low background material, a lowered threshold of 50 keV with an angular resolution of 40 degree[3], and an improved data acquisition system.

A direction-sensitive dark matter search in Kamioka underground laboratory with NEWAGE-0.3b' was performed from 2013/07/17 to 2013/11/12. Compared to the previous measurement with NEWAGE-0.3a, obtained background level was reduced by 1/10 in the energy range of 100-400 keV. With an exposure of 0.327 kg days, a new 90%C.L. direction-sensitive spin dependent (SD) cross section limit 557 pb for WIMP mass of 200 GeV/c² was obtained. This result is improved by a factor of 10 from previous measurement, and marks the world-record direction-sensitive limit.

The identification of the background source is very important to improve the low background detector. Remaining background was studied in detail, and the polyimide of μ -PIC was found to be the dominant background source. If a new low-background μ -PIC is developed, the background level will be limited by environmental gamma-rays and it will be reduced by constructing a lead shield. The expected limit with the above improvements will reach to the DAMA region. Further sensitivity will be achieved by recognizing the head/tail of the track, improving angular resolution, and using large-size detectors with long-term operation, and then a direction-sensitive dark matter search of DAMA region will start.

References

- [1] J. D. Lewin and P. F. Smith *Astropart. Phys.* 6 (1996) 87.
- [2] K. Miuchi et. al. *Phys. Lett. B* 686 (2010) 11.
- [3] K. Nakamura et. al. *JINST.* 7 (2011) C02023.

SuperKamiokande における T2K ニュートリノビームの NC Gamma 事象探索

高エネルギー物理学研究室 黄坤賢

Abstract We observed NC (neutral current) Gamma events arise from the T2K neutrino beam at the SuperKamiokande detector by the GPS signal. Data until July 2011 agree to our simulation, except for the simulation has more multi-gamma events than real data. Improvements of the simulation of NC Gamma events are reported here.

© 2014 Department of Physics, Kyoto University

In neutrino neutral current interaction, target nuclear can be excited by kicking nuclei out. Then de-excite gamma can be generated from the target nuclear, which is called as primary gamma. While the kick-out nuclei can also excite another nuclear, and produce gamma (secondary).

In SuperKamiokande, NC Gamma events from atmosphere neutrinos are one kind of relevant background in Supernova relic neutrino research. As anterior data of NC Gamma are little, the uncertainties of cross-section in MC are large now. [1] T2K neutrino beam can be used for precise measurement of NC gamma cross-section, as the peak energy of neutrino flux is about 600MeV which is similar with SK atmosphere neutrino.

T2K is long-baseline neutrino oscillation experiment, which produce 8 bunches neutrino beam in 2.47 sec cycle from J-PARC, Tokai. Applying GPS timing cuts and other reductions, 43 events are left as NC Gamma candidates in T2K run1~3 data. While in simulation, neutrino fluxes are predicted by T2K beam group. SK simulation software generated neutrino interaction and raw SK simulation files. After reduction as real data, final simulation results are shows as Fig. 1. [2] For Compton scattering electrons, the mean value of their Cherenkov opening angle is about 42 degree. MC and data also shows that there is a peak of 42 degree coming from scattering electrons. But near 90 degree of Cherenkov angle, more events are appealing in MC simulation than real data.

Events which Cherenkov angles are near 90 degree are considered as multi-gamma. In simulation, we know that these events are mainly secondary gamma. This result shows that the simulator for kick-out nuclei is not consistent with real physics process.

To find some improvements of simulation, we categorize every Cherenkov angle plots of MC and data into several types. And 2.2MeV gamma events after NC interaction are also used to get neutron multiplicity of NC gamma reaction. In this talk, above hints of simulation improvement will be discussed.

References

- [1] Supernova Relic Neutrino Search at Super-Kamiokande, K.Bays, T. Iida, The SuperKamiokande Collaboration, Phys. Rev. D 85, 052007 (2012)
- [2] Koh Ueno, "Study of neutron-current de-excitation gamma rays with T2K neutrino beam", Ph.D thesis (Feb, 2012).

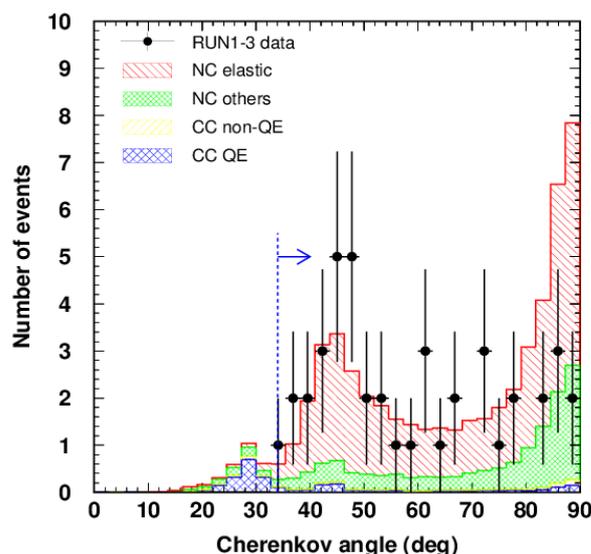


Fig. 1. Cherenkov angle distribution of T2K run1~3 NC Gamma events. Histogram shows that simulation results, and dots are data observed in SK detector.

連星中性子星合体からの電磁波の研究

天体核研究室 仏坂健太

Abstract Electromagnetic counterparts to gravitational-wave signals will play an important role to achieve gravitational-wave astronomy in near future. I study expected electromagnetic signals based on numerical relativity simulations. I find the recent discovery of a kilonova candidate associated with GRB 130603B is largely consistent with compact binary merger scenario.

© 2014 Department of Physics, Kyoto University

連星中性子星の合体は、地上重力波干渉計のメインターゲットとして研究されてきた。2～4年後に稼働が予定されている重力波干渉計では、合体からの重力波を年に数回検出できると予想されて[1]、重力波天文学がまさに始まろうとしている。このような背景の下、最近、連星中性子星合体にともなって放射される電磁波が注目を集めている。本発表では、この電磁波に関する研究について紹介する。

重力波に付随する電磁波が注目される理由として、以下のことが挙げられる。(i) 重力波天体からの電磁波の同時観測に成功すれば、天体が所属する銀河を特定できて、波源までの距離などを知ることができる。(ii) 検出閾値付近の重力波イベントの発見の手助けになるかもしれない。(iii) 重力波・電磁波から得られた情報を組み合わせて高エネルギー天体現象の解明に迫れる。本発表では、数値相対論による連星中性子星合体シミュレーションに基づいて、どのような電磁波が放射される期待されるかを紹介する。その中でも、特にキロノヴァと呼ばれる中性子星合体時に放出される物質の放射性崩壊によって輝く現象について詳しく述べる。この現象は、理論的に予想されているもので、確かな発見はまだされていない。最近の輻射輸送計算、核反応計算、数値相対論によって[2-6]、キロノヴァは新星の百から千倍ほどの明るさで、一週間ほど赤から赤外の波長域で光ることがわかった。重力波天体観測と組んで、このような増光を観測するためには、視野の広い4m以上の望遠鏡が必要であると予想できる。

昨年起こったショートガンマ線バースト GRB 130603B 後に赤外線が増光が観測された[7]。この増光現象は理論的に予想されていたキロノヴァの増光にとっても良く似ており、連星中性子星の合体もしくはブラックホール・中性子星連星の合体で無矛盾に説明できることを示す。また、キロノヴァの明るさは、中性子星の状態方程式と連星の質量によって大きく異なることがわかっており、今回の観測結果は、‘やわらかい’状態方程式ならば連星中性子星を、‘硬い’状態方程式ならばブラックホール・中性子星連星を示唆する[8]。将来、重力波観測で連星質量を測定し、天体の区別ができれば、キロノヴァの明るさから状態方程式に対して示唆を与えることができるかもしれない。

References

- [1] J. Avadie et al., *Classical and Quantum Gravity*, 27, 173001 (2010)
- [2] B. D. Metzger et al., *MNRAS*, 406, 2650 (2010)
- [3] D. Kasen, N. R. Badnell, and J. Barnes, *ApJ*, 774, 25 (2013)
- [4] M. Tanaka and K. Hotokezaka, *ApJ*, 775, 113 (2013)
- [5] K. Hotokezaka et al., *Phys. Rev. D* 87, 024001 (2013)
- [6] A. Bauswein, S. Goriely, and H. -T. Janka, *ApJ*, 773, 78 (2013)
- [7] N. R. Tanvir et al., *Nature*, 500, 547 (2013)
- [8] K. Hotokezaka et al, *ApJL*, 778, L16 (2013)

フェムト秒レーザーと金属表面の相互作用における レーザーナノアブレーションに関する研究

レーザー物質科学分科 宮坂 泰弘

Abstract The mechanism of nano-ablation for metal irradiated by femtosecond laser pulses is studied. We have observed the energy spectrum of emitted ions in extremely low laser fluence irradiation, and propose a non-thermal mechanism to explain the spectrum. We found a remarkable dependence of ablation rate on incident angle for *s*-polarization.

© 2014 Department of Physics, Kyoto University

レーザー照射により被照射部及びその周辺が剥離、飛散することをレーザーアブレーションという。パルス幅が金属の熱緩和時間(>ps)よりも短いことから、フェムト秒レーザーは周囲への熱影響の小さいレーザープロセッシングを実現している。また、(a)金属表面への波長以下の周期構造自己形成[1]や、(b)アブレーション閾値近傍フルーエンスにおいて、被照射部内に原子が局所的に剥ぎ取られる箇所が生じるようなアブレーションが生じる[2]ことから、付加価値の高い加工を可能にするツールとして注目されている。これらの現象はフェムト秒レーザーの高強度光による非熱的過程が寄与していると考えられるが、その詳細は明らかになっていない。本研究ではこれらの現象についてその物理機構の詳細を議論するため2つの実験に取組んだ。(a')自己形成周期構造はレーザー入射角度と偏光に対して依存することが報告され、アブレーション率の関係が最近示唆されたことから、アブレーション率の入射角度と偏光依存性を測定した。(b')アブレーション閾値近傍ではアブレーション率が極めて小さく直接観察による測定は困難であるため、飛散イオンを計測・分析することで、フェムト秒レーザーアブレーションの物理を考察した。ここでは(b')について詳細を記述する。

鏡面研磨を施した銅板に、中心波長 800 nm、パルス幅 170fs の P 偏光レーザーパルスを入射角度 70° にてアブレーション閾値近傍のフルーエンス(80 mJ/cm²)で繰り返し照射し、放出イオンを測定することで次の知見を得た。(1)アブレーションにより飛散するイオンの主成分は一価の銅(Cu⁺)である。(2)Time-of-flight (TOF)法により得られた銅イオンエネルギー分布から 50eV 以上と極めて高いエネルギーのイオンが存在する。(3)ターゲット表面上には粒径が対数正規分布する銅ナノ粒子が存在していることを電界放出型電子顕微鏡で確認した。ナノ粒子表面がクーロン爆発をしていると仮定することで、銅イオンのエネルギー分布を

$$f_{\text{CEN}}(t) = \frac{C}{t^3} \exp \left[-\frac{1}{2w^2} \left\{ \ln \left(\frac{L\sqrt{3\epsilon_0 m / (2ne^2)}}{tr_c \sqrt{i}} \right) \right\}^2 \right]$$

と記述し、実験結果の再現に成功した[3]。ここで t は飛行時間、 C は比例定数、 r_c は対数正規分布の中心粒径、 w は対数の標準偏差、 ϵ_0 は真空の誘電率、 m は原子の質量、 n は原子の個数密度、 i はイオン化率、 L はTOF長さを示す。これらの結果から、表面状態がイオン放出に大きく影響すると考え、高フルーエンスフェムト秒レーザー照射により銅板表面に微細構造を修飾し、鏡面研磨銅板の場合と同様のレーザー条件で照射を行い、さらに次の事が明らかになった。(4)表面修飾により飛散イオンのエネルギーは増大し、TOF波形のピークが180eV以上のエネルギーを示す。(5)照射回数が増えるにつれて、表面修飾銅板から飛散するイオンのピークエネルギーは減少し、鏡面研磨銅板から飛散するイオンのピークエネルギーに漸近する。以上より、アブレーション閾値近傍においては、金属表面上の微細構造からイオン放出が生じており、極めて低いアブレーション率に寄与している可能性があることが示された[3]。

References

- [1] M. Hashida *et al.*, Appl. Phys. Lett. **7**, 194-197 (2012).
- [2] M. Hashida *et al.*, Appl. Surf. Sci. **197-198**, 862-867 (2002).
- [3] Y. Miyasaka *et al.*, Phys. Rev. B **86**, 075431 (2012).

A Self-consistent Model of the Black Hole Evaporation

Theoretical Particle Physics Group

Yuki Yokokura

Abstract We construct a self-consistent model which describes a black hole from formation to evaporation including back reaction from the Hawking radiation, under some approximations. The black hole can evaporate without horizon or singularity. In this model we investigate the entropy and information problem.

© 2014 *Department of Physics, Kyoto University*

In the semi-classical approximation we construct a self-consistent model which describes a black hole from formation to evaporation including the back reaction from the Hawking radiation, under the conditions: (a) using the eikonal approximation, (b) considering only s-wave of the matter, and (c) assuming massless scalar fields with N degrees of freedom ($N \gg 1$). We first build a covariant flux formula which evaluates energy flux from particle creation in the dynamical geometry, and set up a system of equations which determines time evolution of the geometry, collapsing matter, and radiation in a self-consistent manner. We obtain an asymptotic solution for the inside of the hole, and show that the black hole can evaporate without horizon or singularity. It has an onion-like internal structure, and each layer emits the radiation following the Planck distribution with the Hawking temperature. Then, a new definition of the Hawking temperature appears, in which the temperature of the hole is defined as a response to the energy change. This dynamical definition adds to the entropy area law a logarithmic correction term which depends on details of the matter fields. We reproduce the area law except for the numerical coefficient, by counting microstates of the matter fields in the stationary interior geometry. Finally, we introduce interaction between the matter and radiation to show that the initial information of the collapsing matter comes back immediately, and propose a conjectured scenario for the remaining problem of recovery of the quantum vacuum state.

References

[1] Hikaru Kawai, Yoshinori Matsuo, and Yuki Yokokura, *International Journal of Modern Physics A*, Volume 28, 1350050 (2013)

Weyl-Cartan 重力 gauge 理論に基づく inflation 宇宙

天体核研究室 渡辺晶明

Abstract An inflationary model in the gravity whose gauge symmetry is enlarged to include dilations can explain well the characteristics of the primordial fluctuations observed in the Cosmic Microwave Background radiation and predicts peculiar signatures in the smaller scale fundamentally observable by gravitational wave interferometers and Hydrogen line radio telescopes etc.

© 2014 Department of Physics, Kyoto University

gauge 原理の観点から重力に対する理解を深めることを目的とし、その最も単純な拡張として、対称群を Poincare 群から更に dilation 対称性を付加した Weyl 群へと高めた理論、Weyl-Cartan 重力 gauge 理論[1]をとりあげる。本理論の現実の事象への応用としては、単一 scalar dilaton の場の値による自発的 dilation 対称性の破れの模型[2]が提案されたが、破れの結果としては標準模型粒子とは結合しない、非常に重い massive vector field の出現が予想されるのみで、実験・観測上の意義に乏しいものであった。

そこで本研究[3]においては、この模型を inflation 宇宙論に適用することにより、本重力理論を現代の精密観測の俎上に載せることを企図する。具体的には、次の Lagrangian で与えられる、単一ではなく2つの dilaton scalar 場が存在する模型について考察する。

$$L = \frac{\alpha\sigma^2 R[A_\mu^{ij}, h_k^\nu]}{2} - \frac{1}{2} D_\mu \sigma D^\mu \sigma + \frac{\beta\phi^2 R}{2} - \frac{1}{2} D_\mu \phi D^\mu \phi - \frac{\lambda}{4} \phi^4 - \frac{f^2}{4} F^{\mu\nu} F_{\mu\nu}[A_\lambda].$$

ここで $\alpha, \beta, f, \lambda$ は正の無次元任意定数、 $D_\mu = (\partial_\mu - A_\mu)$ は共変微分であって、各項は独立に dilation 共変である。

本模型は1つの非物理的な gauge 自由度の他に1つの物理的な scalar 自由度 (inflaton) を有するため、 $(\alpha \ll 1)$ であれば inflation を引き起こすことができるが、これにより生成される原始ゆらぎには次のような特徴が存在することが分かった。

①inflation初期に生成される、大scaleの揺らぎについて、微小な tensor/scalar 比 (重力波/密度揺らぎの比) と、 α によって定まる負の有限の scalar spectral tilt を示すが、これは現在までの宇宙マイクロ波背景放射観測の結果によく一致する。(図1)

②またその一方で小scaleでは、 β のみで与えられる特定の spectra で良く記述できる。これらの大小 scale 間の特徴的な遷移が本模型の smoking gun であるが、これは重力波干渉計や中性水素線電波望遠鏡などを用いたより小scaleの観測による検出が期待される。

References

- [1] J.M.Charap and W.Tait, Royal Society of London Proceedings Series A **340**, 249 (sep 1974)
- [2] H.T.Nieh, Physics Letters A **88**, 388 (apr 1982)
- [3] Masa-aki Watanabe and Jiro Soda, in prep.

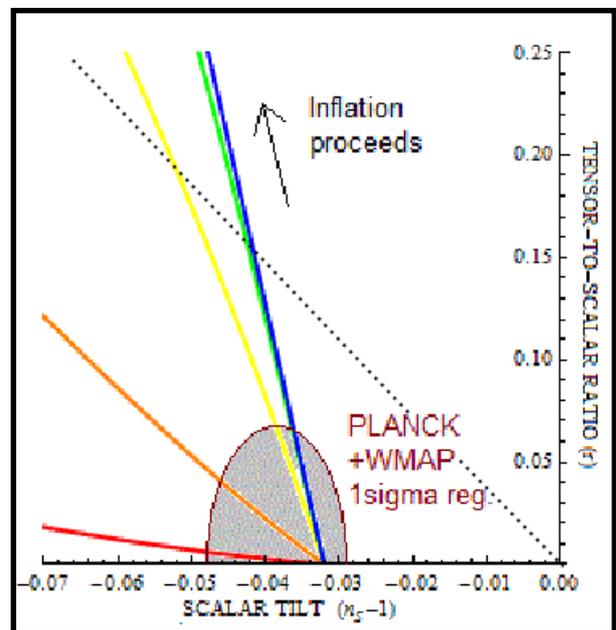


Fig. 1. Trajectories of inflations in (scalar tilt) vs. (tensor-to-scalar ratio). $\alpha = 0.004$ and $\beta = 10^{-1}$ to 10^{-5} (left to right). The observationally favored region is indicated by a gray oval. We see that they fit it better than the conventional ϕ^2 inflation model (dotted line).