

平成28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29年1月23日)

物理学第二分野

D3 発表会

日時 平成29年1月23日(月) 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 . D-brane Models and D-brane Instantons in Type IIA
Toroidal Orientifolds | 上村 尚平 (9:00) |
| 2 . Black Hole-Neutron Star Merger
-Effect of Black Hole Spin Orientation and
Dependence of ilonova/Macronova- | 川口 恭平 (9:20) |
| 3 . Leptogenesis at the reheating era | 川名 清晴 (9:40) |
| 4 . J-PARCにおけるバンチ化した冷中性子ビームを用いた
窒素14の高精度熱中性子吸収断面積測定 | 北原 龍之介 (10:00) |
| 5 . Thermalization of overpopulated systems on the basis
of the 2PI formalism | 筒井 翔一郎 (10:20) |
| 6 . Effects of oxygen vacancies on ferromagnetism in a
dilute magnetic semiconductor: Fe-doped In_2O_3 | 常山 正幸 (10:40) |
| 7 . ^{12}C 原子核における稀ガンマ崩壊モードの探索 | 津村 美保 (11:00) |

8 .	Lattice QCD study for the relation between quark-confinement and chiral symmetry breaking	土居 孝寛	(11:20)
9 .	Inflationary cosmology in scalar-tensor theories	Domenech Fuentes Guillem	(11:40)
10 .	中性子過剰な酸素同位体 ²⁰ Oにおける低励起エネルギー1-状態のアイソスピン構造	中塚 徳継	(12:00)
11 .	Out-of-time-ordered correlator and entanglement scrambling in RCFTs	沼澤 宙朗	(12:20)
----- 午 後 -----			
12 .	連星中性子星合体におけるニュートリノによる質量放出	藤林 翔	(13:40)
13 .	Missing mass spectroscopy of ¹⁰ C(α , α') with MAIKO active target	古野 達也	(14:00)
14 .	ダストの重力崩壊における弱い宇宙検閲官仮説の破れ	水野 良祐	(14:20)
15 .	高強度フェムト秒レーザーとクラスターとの相互作用によるテラヘルツ波放射に関する研究	森 一晃	(14:40)
16 .	Embedding Ghost-free Bigravity into Higher-Dimensional Gravity	山下 泰穂	(15:00)
17 .	α クラスター励起状態における芯クラスターの回転・変形 によるクラスター構造への影響	吉田 侑太	(15:20)

D-brane Models and D-brane Instantons in Type IIA Toroidal Orientifolds

Theoretical Particle Physics Group Shohei Uemura

Abstract We investigated low energy effective theories of superstring by using D-brane models. We constructed semi-realistic models and studied their gauge couplings. We also investigated the relation between discrete flavor symmetry of D-brane models and non-perturbative effects.

© 2017 Department of Physics, Kyoto University

The standard model of the particle physics (SM) has been confirmed by many experiments and observations. One of the biggest results is the observation of the Higgs particle in the LHC. However, since the SM does not include the quantum gravity, we need a more fundamental theory. Superstring theory is regarded as such a quantum theory of gravity. If superstring theory gives a quantum mechanical description of the universe, the SM should be interpreted as the low energy effective theory of superstring. In addition, the results of the LHC show that there is no new physics up to a few TeV. It may imply that the SM is valid until very high scale, e.g. the string scale. Thus, it would be important to construct such models that are derived from string theory and can explain the SM consistently.

In this thesis, we construct a new class of intersecting D-brane models compactified on torus, whose massless spectrum is the same as that of the SM. We also try to realize the gauge couplings of the SM. In intersecting D-brane models, a gauge coupling is a function of the volume of each D-brane. Thus, it may seem always possible to realize a realistic values by tuning parameters. However, we show that this is not the case in our models, and one cannot make the string scale arbitrarily low.

We also study D-brane instanton effects in D-brane models. The D-brane instanton is a D-brane which is localized in 4-dimensional Minkowski space, but has a finite volume in the compact dimensions. These effects can induce perturbatively forbidden terms, e.g. neutrino Majorana mass terms and μ -terms of the Higgs fields. First, we study them on a simple torus. where we show that Majorana mass matrices generated by D-brane instantons have permutation symmetry. μ -terms also have the permutation symmetry and it may induce an exponential hierarchy in the eigenvalues of the μ -term matrix.

However, D-brane instantons on a simple torus have a problem that they may not generate a superpotential. Thus, we investigate D-brane instantons wrapping rigid cycles on a $Z_2 \times Z_2$ toroidal orbifold, since such D-brane instantons can contribute to the superpotential naturally. We show that some Majorana mass matrix generated by rigid D-brane instantons on $Z_2 \times Z_2$ toroidal orbifold can have a Z_2 exchanging symmetry.

This thesis is based on [1,2,3,4].

References

- [1] Yuta Hamada, Tatsuo Kobayashi, and Shohei Uemura, JHEP 1405,116(2014)
- [2] Yuta Hamada, Tatsuo Kobayashi, and Shohei Uemura, Nucl. Phys. B 807,563 (2015)
- [3] Hiroyuki Abe, Tatsuo Kobayashi, Yoshiyuki Tatsuta, and Shohei Uemura, PRD. 92.026001(2015)
- [4] Tatsuo Kobayashi, Yoshiyuki Tatsuta, and Shohei Uemura, PRD. 93.065029

Black Hole–Neutron Star Merger –Effect of Black Hole Spin Orientation and Dependence of Kilonova/Macronova–

基礎物理学研究所 宇宙物理学分野 川口 恭平

Abstract We performed numerical-relativity simulations for black hole–neutron star mergers with various BH spin misalignment angles and NS EOSs, and investigate the parameter dependence of the merger process, disk formation, mass ejection, and gravitational waves, systematically. We also studied and clarified the parameter dependence of kilonova/macronova by deriving a semi-analytic model.

© 2017 Department of Physics, Kyoto University

The black hole–neutron star (BH–NS) binary mergers are among the most promising sources of gravitational waves, and the information provided by the detection of gravitational waves will surely open the door to the new aspects of the universe. Because the BH–NS binary contains a NS, electromagnetic counterparts such as kilonovae/macronovae would associate with the merger events. The simultaneous observation of the kilonova/macronova and gravitational waves would provide rich information about the merger events. To maximize the scientific outcome for the merger events, the nature and the diversity of the BH–NS mergers should be clarified. To achieve this, we studied on the BH–NS merger focusing on the next two topics in this work.

First, we studied the parameter dependence of the BH–NS merger for the case that the BH spin is not aligned with the orbital axis and the orbit precesses. For this purpose, we performed numerical-relativity simulations for the merger of BH–NS binaries with various BH spin misalignment angles, employing four models of nuclear-theory-based EOSs described by a piecewise polytrope.

Second, we studied the parameter dependence of the kilonova/macronova from BH–NS merger by deriving a semi-analytic model using the results of this work, the numerical-relativity simulations [1], and the radiative-transfer simulation performed by [2].

The main results of this work are as follows:

1. We clarified the quantitative dependence of the disk mass and the ejecta mass on the initial misalignment angle and the NS EOS, for the case that the mass ratio is 5 and the BH spin magnitude is 0.75, respectively.
2. We show that gravitational waves from BH–NS mergers have information of the tidal disruption even for the case that the BH spin is misaligned and the orbit precesses. We also propose a method that can be used to extract the cutoff frequency from gravitational waves from precessing BH–NS mergers.
3. We derive a semi-analytic model that reproduces the results of each band magnitude obtained by previous radiation transfer simulations [2] within ~ 1 mag.
4. We clarified the parameter space of the BH–NS merger that the kilonova/macronova can be observed. We also applied our model to GRB130603B as an illustration, and clarified the parameter region of the BH–NS merger which is consistent with the observation.

References

- [1] K. Kyutoku, K. Ioka, H. Okawa, M. Shibata and K. Taniguchi, Phys. Rev. D, **92**, 044028 (2015).
- [2] M. Tanaka and K. Hotokezaka, Astrophys. J., **774**, 113 (2014).

Leptogenesis at the reheating era

素粒子論研究室 川名 清晴

Abstract We propose a novel leptogenesis scenario at the reheating era. Based on the effective Lagrangian, we show that the observed baryon asymmetry can be explained by considering the scatterings of the Standard Model (SM) leptons produced by the decay of a heavy inflaton.

© 2017 Department of Physics, Kyoto University

By the discovery of the SM Higgs [1,2], the SM has established its own position as a low energy effective theory below the weak scale. However, this is not the end of the story, and there are still various problems in the SM.

Among them, the baryon asymmetry of the universe [3]

$$\eta = (8.67 \pm 0.05) \times 10^{-11}$$

is important because it is related to various aspects of the universe: Cosmology, CP violation, new particle, neutrino sector, . . . etc. In order to solve this problem, people usually introduce new particles which can have the origin of the above asymmetry.

For example, the thermal leptogenesis scenario [4] by the decay of heavy Majorana neutrinos attracts much attention in connection with phenomenology of neutrino sector. In this scenario, after the reheating is completed, the heavy neutrinos exist as thermalized particles. Then, when the temperature of the universe becomes lower than their masses, they start to decay into the SM Higgs H and the left handed lepton L : $N_R \rightarrow H + L$. This process violates the lepton number, and the lepton asymmetry is produced. Finally, this asymmetry is converted to baryons by the nonperturbative effects in the SM. It is surprising that we can actually obtain enough asymmetry within this minimum set up.

However, in order to thermalize heavy Majorana neutrinos, the reheating temperature T_R must be larger than the masses of these neutrinos, $T_R > M_N \sim 10^{15}$ GeV, and it is usually difficult to obtain such a high reheating temperature. Taking this fact into consideration, we propose a new leptogenesis scenario at the reheating era [5]: We assume a heavy inflaton which can decay into the SM particles after inflation. Here these SM particles are inevitably out-of-equilibrium, and we can satisfy one of the Sakharov's three conditions. Then, by considering their scatterings during the reheating, we show that the enough asymmetry can be produced even if $T_R \ll 10^{15}$ GeV. Here, we use the dimension 5 and 6 operators, $LLHH$ and $LLLL$ as their interactions, and these operators give the origins of lepton number violation and CP violation. Because our mechanism does not assume a specific model, this can be applicable to various extensions of the SM such as seesaw models.

References

- [1] ATLAS Collaboration, G. Aad *et al.*, Phys.Lett. **B716**(2012)
- [2] CMS Collaboration, S. Chatrchyan *et al.*, Phys.Lett. **B716**(2012)
- [3] P. A. R. Ade et al. [Planck Collaboration], Astron.Astrophys. 594 (2016) A13.
- [4] M. Fukugita and T. Yanagida, Phys. Lett. B 174 (1986) 45.
- [5] Y.Hamada and K. Kawana, Phys.Lett. B763 (2016) 388-392

J-PARC におけるバンチ化した冷中性子ビームを用いた 窒素 14 の高精度熱中性子吸収断面積測定

ビーム物理分科 北原龍之介

Abstract For considering possibility of ^{14}N as a flux monitor gas of a neutron lifetime measurement at J-PARC/MLF/BL05, we demonstrated a novel method for high precise measurement of a thermal neutron cross section of $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$ by referring to that of $^3\text{He}(n,p)^3\text{H}$ using bunched cold neutron beams and the lifetime measurement detector.

© 2017 Department of Physics, Kyoto University

中性子寿命はビッグバン元素合成理論やCKM行列のユニタリティ検証に関わる重要な物理量の一つである。これまで中性子寿命は2つの手法で測定されており、それぞれの測定精度は0(0.1%)で与えられている。しかし、これらの手法間で 3.8σ の乖離が見られ寿命の値の信頼性が損なわれている[1]。そのため、我々はJ-PARC/MLF/BL05において既存の手法とは異なる系統誤差を持つ手法で中性子寿命を測定精度0.1%で測定し、その不定性の評価を目指している。

我々の中性子寿命測定ではTime Projection Chamber(TPC)を使い、中性子の β 崩壊時に生成される電子を測定する。また、TPC動作ガス中に微量に含まれる ^3He の中性子吸収反応で生成された陽子を同時に測定することで、ガス導入時の温度、分圧測定から求めた ^3He ガス密度と高精度で求められた熱中性子吸収断面積から中性子フラックスを評価し、寿命を導出する。

この手法はKossakowskiらが先行実験を行っており[2]、TPC有感領域長よりも短いバンチを形成し、TPC有感領域中にバンチが存在するときのみ測定を行う事で検出器周辺から発生する即発ガンマ線バックグラウンドを低減していたが、バンチ形成の際にフラックスを損失していた。それに対し我々はJ-PARC/MLF/BL05から供給される大強度冷中性子パルスビームを、TPC上流にあるSpin Flip Chopper[3]と呼ばれるバンチ形成用光学デバイスによってフラックスを損失する事なくバンチ化し、輸送する事ができる。また、TPC構造材の天然放射能によるバックグラウンドが問題であったが、放射性核種を含まないPEEK樹脂で製作したTPCを用いることでバックグラウンドの低減に成功した[4]。

本研究では ^3He の熱中性子吸収断面積が大きいいため導入する ^3He ガスは微量となり、ガス密度評価において要求精度を満たさない事が問題となっている。この問題の解消にはガス導入システムの改善の他に、フラックス評価用ガスを ^3He よりも熱中性子吸収断面積が小さいガスに変更する事が考えられる。しかし、 ^3He の熱中性子吸収断面積の測定精度を超える候補ガスは存在しないため、高精度の熱中性子吸収断面積測定が求められる。そこで、寿命測定と同様冷中性子バンチとTPCを使用した、ガスにおける熱中性子吸収断面積測定の実証を行った。

本測定では、候補ガス ^{14}N と高い吸収断面積測定精度を持つ ^3He を動作ガスに加え、各吸収反応の同時測定を行う。これは中性子バンチを用いることによる低バックグラウンド環境下で、両者の吸収断面積比を高い精度で決定する新たな手法であり、他の核種にも適用可能である。各反応の切り分けはデポジットエネルギー分布を用いており、エネルギーキャリブレーションが非常に重要になる(Fig. 1)。2016年に取得したデータの解析を行い、反応点の位置分布ごとのキャリブレーションに成功した。

本発表では断面積測定の解析の現状について報告する。

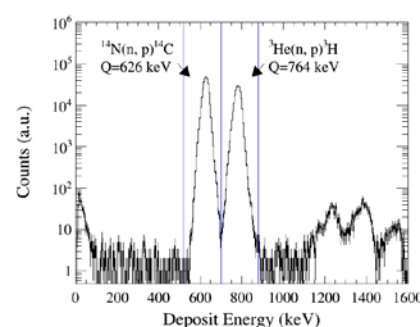


Fig. 1. Deposit energy distribution.

References

- [1] Particle Data Group 2017 <http://pdg.lbl.gov/>
- [2] R. Kossakowski, et al., Nucl. Phys. A, 503, 473 (1989).
- [3] K. Taketani, et al., Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A, 634, S134 (2011).
- [4] Y. Arimoto, et al., Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A, 799, 187 (2015).

Thermalization of overpopulated systems on the basis of the 2PI formalism

Nuclear Theory group Shoichiro Tsutsui

Abstract We investigate the evolution of the $O(N)$ -symmetric underpopulated or overpopulated scalar fields on the basis of the two-particle irreducible formalism in a strong coupling regime. We find the rapid growth of the number of the zero momentum mode only in overpopulated systems.

© 2017 Department of Physics, Kyoto University

Understanding the thermalization process of relativistic heavy-ion collisions is one of the outstanding issues in the physics of quark-gluon plasma. In high energy collisions, the initial state of matter is dominated by gluons and the occupation number of them becomes quite large [1]. Several studies based on the Boltzmann equation with $2 \rightarrow 2$ scattering (particle-number-conserving process) suggest that the overpopulated initial state leads to the formation of the Bose-Einstein condensate (BEC) [2-4].

We investigate the evolution of the $O(N)$ -symmetric overpopulated scalar fields on the basis of the two-particle irreducible (2PI) formalism [5,6] to next-to-leading order in the $1/N$ expansion [7]. In particular, we focus on a strong coupling regime in order to give an insight into the behavior of strong-interacting gluons found in heavy-ion collisions.

We find that the low momentum region of the particle distribution can be described by Bose-Einstein distribution already at early times, and the time-dependent temperature and chemical potential can be defined. The chemical potential approaches very close to the quasi-particle mass from below (See Fig.1). Although this behavior is reminiscent of the BEC formation, we find that the occupation number of the zero momentum mode peaks out, but never diverge (See Fig.2). Our result suggests that the formation of BEC is hindered due to the particle-number-changing processes. In contrast to the overpopulated systems, we also find that the number of zero mode grows monotonously and gradually in the underpopulated case.

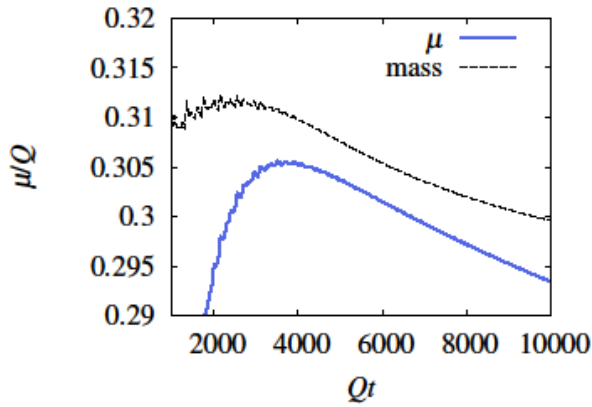


Fig.1 The evolution of the chemical potential.

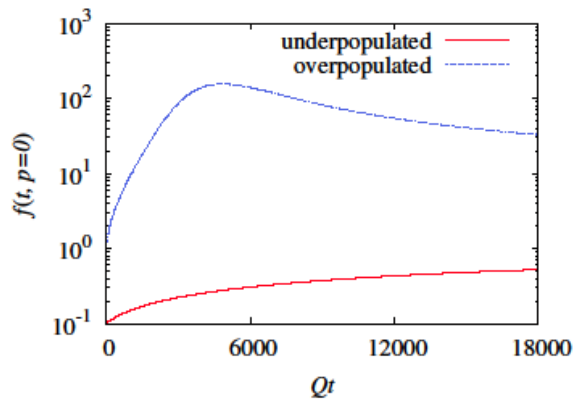


Fig.2 The occupation of the zero momentum mode.

References

- [1] J. P. Blaizot, F. Gelis, J. F. Liao, L. McLerran and R. Venugopalan, Nucl. Phys. A 873, 68 (2012).
- [2] D. V. Semikoz and I. I. Tkachev, Phys. Rev. Lett. 74, 3093 (1995).
- [3] J. P. Blaizot, J. Liao and L. McLerran, Nucl. Phys. A 920, 58 (2013).
- [4] Z. Xu, K. Zhou, P. Zhuang and C. Greiner, Phys. Rev. Lett. 114, no. 18, 182301 (2015).
- [5] G. Baym, Phys. Rev. 127, 1391 (1962).
- [6] J. M. Cornwall, R. Jackiw, and E. Tomboulis, Phys. Rev. D10, 2428 (1974).
- [7] J. Berges, Nucl. Phys. A 699, 847 (2002).

Effects of oxygen vacancies on ferromagnetism in a dilute magnetic semiconductor: Fe-doped In_2O_3

核ビーム物性学研究室 常山正幸

Abstract In_2O_3 doped with transition metal atoms (TM) and oxygen vacancies (Vo) is considered to be ferromagnetic. The origin of the ferromagnetism, however, is not well understood. In order to clarify the ferromagnetic interaction, Time-Differential Perturbed Angular Correlation method was applied to TM-doped and Vo-introduced In_2O_3 .

© 2017 Department of Physics, Kyoto University

Some of non-magnetic semiconductors become ferromagnetic by being implanted with a small amount of transition metal atoms (TM) [1]. TM-doped semiconductors that exhibit ferromagnetism are called Dilute Magnetic Semiconductor (DMS), and attract much attention as spintronic materials recently. Although both theoretical and experimental researches have been performed considerably, the origin of ferromagnetism in DMSs is not well understood. In preceding experimental research, various values of the magnetic moment in a same DMS were reported. This disagreement is considered to be due to the preparation method of the sample. Thus, it is difficult to discuss the interaction that causes the ferromagnetism in DMSs, and, in order to clarify the origin of the ferromagnetism, each DMSs is still under intense investigation.

DMSs based on oxide semiconductors with a wide bandgap attract much attention in particular because they exhibit ferromagnetism at room temperature (RT). In oxide DMSs, it is considered that the origin of RT ferromagnetism is not only due to doped TM but also oxygen vacancies Vo. Although the effects of oxygen vacancies were investigated in various ways, few studies on the correlation between oxygen vacancies and ferromagnetism have been reported.

In this study, we performed Time-Differential Perturbed Angular Correlation (TDPAC) measurements at RT for $^{111}\text{In}(\rightarrow^{111}\text{Cd})$ probes in $(\text{In}_{0.9}\text{Fe}_{0.1})_2\text{O}_3$ samples, in which Fe ions occupy the In sites. An effectiveness of oxygen vacancies on ferromagnetism in a bulk $(\text{In}_{0.95}\text{Fe}_{0.05})_2\text{O}_3$ sample was suggested [2]. However it is still unclear how oxygen vacancies play a role in ferromagnetism. TDPAC technique is a powerful method for obtaining information of local structures in materials. Then changes of the electronic configurations in the Vo-introduced samples may be evaluated by measuring hyperfine fields. The Larmor precession due to hyperfine interactions for the 245-keV state in ^{111}Cd ($I^\pi = 5/2^+$, $\mu = -0.7656(25) \mu_N$, $Q = 0.77(12) \text{ b}$, $T_{1/2} = 85 \text{ ns}$) was observed through the 171–245-keV γ - γ cascade. Hyperfine magnetic fields in the samples that have different amounts of Vo were attempted to measure by the TDPAC method in order to clarify the effect of oxygen vacancies. The samples were prepared by sintering in air the mixture of In_2O_3 and Fe_2O_3 powders with appropriate amounts. Oxygen vacancies in the samples were introduced, annealing the samples at high temperature in vacuum. The results of the measurement will be reported in the presentation.

[1] H. Ohno, *Science*, **281**, 14 (1998).

[2] R.K. Singhal *et al.*, *Applied Surface Science*, **257**, 1053 (2010).

^{12}C 原子核における稀ガンマ崩壊モードの探索

原子核・ハドロン物理学研究室 津村美保

Abstract At high temperature, highly excited states in ^{12}C might play a part of the triple α reaction, but the γ -decay probabilities of these states have not been determined. We planned the measurement of $^1\text{H}(^{12}\text{C}, ^{12}\text{C}^*\text{p})$ reaction to determine the γ -decay probability of the 3_1^- state in ^{12}C and examined the feasibility of the plan. © 2017 Department of Physics, Kyoto University

^{12}C 原子核は宇宙での元素合成過程において重要な役割を担っている。 ^{12}C は Fig. 1 に示すようにトリプル α 反応により 3 つの α の共鳴状態を経て生成されることが知られており、この過程は主に $0_2^+(7.65 \text{ MeV})$ 状態を経由する。 10^9 K 以上の高温条件下では 0_2^+ より 2 MeV ほど高い励起状態である $3_1^-(9.64 \text{ MeV})$ や $2_2^+(9.84 \text{ MeV})$ 状態の寄与が高まると指摘されている[1]が、これらの励起状態の γ 崩壊確率は未だに決定されていない。これが高温領域での ^{12}C の反応率を計算する際に大きな不確定要素となっており、全ての重元素は ^{12}C を経由して合成されるため、 ^{12}C の高励起状態の γ 崩壊確率を決定することの意義は大きい。

過去には、 3_1^- 状態の基底状態への γ 崩壊幅の測定実験が、炭素標的に α 粒子を入射し標的中の ^{12}C を励起させるという方法で実施されている[2]が、 3_1^- 状態の γ 崩壊幅は全崩壊幅に比べ非常に小さく、これらの状態が、同位体濃縮された ^{12}C 標的に含まれるごく微量の ^{13}C のバックグラウンドに埋もれてしまったため、正確な測定は困難であった。今回我々は、 ^{12}C をビームとして用いることによりこの問題を解決することを計画した。逆運動学反応 $^1\text{H}(^{12}\text{C}, ^{12}\text{C}^*\text{p})$ について反跳陽子と散乱 ^{12}C を同時計測し、反跳陽子の測定から得られる ^{12}C 励起状態の全生成数と散乱 ^{12}C の測定から得られる γ 崩壊イベント数を比較することにより、 3_1^- 状態の基底状態への γ 崩壊確率を決定する。

γ 崩壊確率は確率 10^{-7} 以下と非常に小さいため、これを決定するためには S/N を良くすることが必要不可欠であり、アクシデンタルコインシデンスイベントをいかに除去するかが重要な鍵となる。アクシデンタルイベントとは、Fig. 2 右のように別々のイベントに由来する粒子をあたかも同一のイベントから発生したものと取り違えてしまう事象のことである。本研究で最初に行ったテスト実験では、ポリエチレン中の水素を標的としたが、ポリエチレンに含まれる炭素とビームとの散乱によるアクシデンタルイベントが確率 10^{-6} のオーダーで観測され、精度よく γ 崩壊確率を求める上で無視できないことがわかった。また、反跳陽子検出器として Si+CsI(Tl) を使用したが、CsI 検出器での信号のパイルアップに起因するバックグラウンドが、測定の感度を制限していることがわかった。

これらの問題点に対処するために、我々はより不純物の少ない「固体水素標的」と、より高計数率に耐える反跳陽子検出器「Gion (GAGG based light ion counter telescope)」を新たに開発・導入し、大阪大学核物理研究センター (RCNP) のサイクロトロン施設において再度テスト実験を行った。本研究ではテスト実験のデータ解析を行い、固体水素標的と Gion の有効性を検証した。さらに探索計画の実現可能性を評価し、改善すべき点について議論した。

References

- [1] F. Hoyle and W. A. Fowler, *Astrophys. J* **132**, 565 (1960).
- [2] D. Chamberlin, et al., *Phys. Rev. C* **10**, 909 (1974).

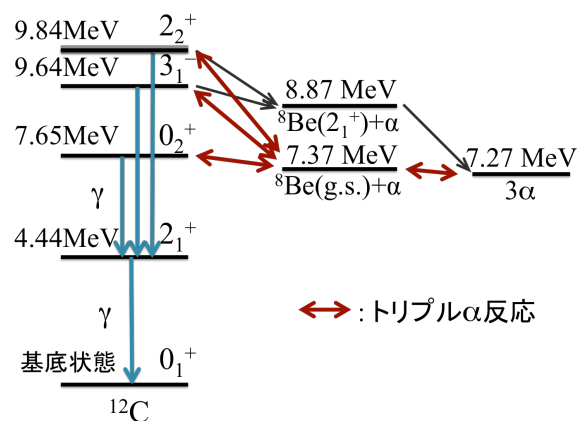


Fig. 1. Schematic diagram of the triple α reaction.

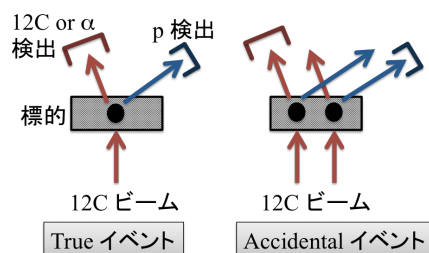


Fig. 2. Schematic diagram of accidental coincidence events.

Lattice QCD study for the relation between quark-confinement and chiral symmetry breaking

Nuclear Theory Group

Takahiro Doi

Abstract The relation between quark-confinement and chiral symmetry breaking is both analytically and numerically investigated by deriving several relations connecting order parameters for quark-confinement and eigenmodes of the Dirac operator in the lattice QCD. Our results indicate no direct one-to-one correspondence between quark-confinement and chiral symmetry breaking in QCD.

© 2017 Department of Physics, Kyoto University

The important nonperturbative phenomena in Quantum Chromodynamics (QCD) such as confinement and chiral symmetry breaking have not been fully understood yet in spite of a lot of effort. Not only each phenomenon, but their relation also is an outstanding problem. The main purpose of this study is to both analytically and numerically clarify the relation between quark-confinement and chiral symmetry breaking in QCD from the first principle. Several order parameters have been considered for quark-confinement and deconfinement. For example, the Polyakov loop is related with the single-quark energy in the QCD vacuum. The Polyakov loop is zero in the confinement phase, but nonzero in the deconfinement phase. The Polyakov loop fluctuations are improved probes for the onset of the quark-deconfinement transition [1]. The Wilson loop is directly related with the string tension of the linear-confining potential of the quark-antiquark pair. The order parameter for the chiral symmetry breaking is the chiral condensate, and it is strongly related with the eigenmodes of the Dirac operator. In fact, according to the Banks-Casher relation, the contribution from the low-lying Dirac modes is responsible for saturating the chiral condensate.

A possible analysis for our goal is to investigate the contribution from the low-lying Dirac modes to the order parameters for quark-confinement. To that end, using the lattice QCD formalism, we derive several analytical formulae expressing the Polyakov loop [2], its fluctuations [3], and the Wilson loop [4] by the Dirac eigenmodes. It is analytically and numerically found that the low-lying Dirac modes have negligible contributions to the order parameters for quark-confinement, from the analytical relations. For example, after removal of the low-lying Dirac modes below 400 MeV, the Polyakov loop is almost unchanged while the chiral symmetry is almost restored because the chiral condensate is reduced by 98 % in the case of light current quark mass, 5 MeV. This observation suggests that there is no direct one-to-one correspondence between quark-confinement and chiral symmetry breaking in QCD. Moreover, from the numerical analysis for the Dirac matrix element of the link-variable appearing in the analytical relations, we find a new “positive/negative symmetry”, which distinguishes the confined and deconfined phases. If the system is in the confinement phase, this new symmetry is realized, and it leads to the zero-value of the Polyakov loop. Although the Dirac modes should be the eigenmodes of the overlap-Dirac operator, which maximally respects the chiral symmetry on the lattice, the analytical relations connecting the order parameters for quark-confinement and the overlap-Dirac modes are difficult to derive. Nevertheless, it is possible to show that the confinement property such as the Polyakov loop, is insensitive to the density of the low-lying overlap-Dirac modes.

References

- [1] P. M. Lo, B. Friman, O. Kaczmarek, K. Redlich and C. Sasaki, Phys. Rev. **D88**, 074502 (2013).
- [2] T. M. Doi, H. Suganuma, T. Iritani, Phys. Rev. **D90**, 094505 (2014).
- [3] T. M. Doi, K. Redlich, C. Sasaki, H. Suganuma, Phys. Rev. **D92**, 094004 (2015).
- [4] H. Suganuma, T. M. Doi, T. Iritani, PTEP **2016**, 013B06 (2016).

Inflationary cosmology in scalar-tensor theories

Yukawa Institute for Theoretical Physics Guillem Domenech Fuertes

Abstract. Now that inflation is well accepted as the theory of the early universe and with current and more precise data to come, I present my work on how one can understand theories with a non-minimal coupling to gravity. In particular, I focus on an interesting model I built.

© 2017 Department of Physics, Kyoto University

Observations of the Cosmic Microwave Background provide a window to the early stages of our Universe. These observations not only give a solid support to the theory of inflationary cosmology but suggests that non-minimal couplings to gravity might have played an important role during inflation. I studied the structure of these theories, so-called scalar-tensor theories, under a general redefinition of the metric, involving a scalar field and its derivative.

Metric transformations are interesting especially for two reasons. First, they do not change the physical predictions of a theory, although the interpretations of such predictions might completely differ. For my part, I showed the physical equivalence for a generalised class of metric transformations. Second, metric transformations connect apparently different theories and models, particularly useful during inflation. My collaborators and I contributed by studying the structure of a theory after a metric transformation and found the origin of hidden constraints within the theory.

On the other hand, once matter fields are taken into account physics gets more interesting. In this presentation, I will talk about the notion of frames in these theories and explain the details of the model I built, which has interesting observational features and relies on the evolution matter fields experienced during inflation. Thus, providing a window to see the effects of non-minimal couplings.

References

- [1] G. Domenech and M. Sasaki, “Conformal Frame Dependence of Inflation,” JCAP 1504, no. 04, 022 (2015) [arXiv:1501.07699]
- [2] G. Domenech, A. Naruko and M. Sasaki, “Cosmological disformal invariance,” JCAP 1510, no. 10, 067 (2015) [arXiv:1505.00174].
- [3] G. Domenech, S. Mukohyama, R. Namba, A. Naruko, R. Saitou and Y. Watanabe, “Derivative-dependent metric transformation and physical degrees of freedom,” Phys. Rev. D 92, no. 8, 084027 (2015) [arXiv:1507.05390]

中性子過剰な酸素同位体 ^{20}O における低励起エネルギー1状態のアイソスピン構造

原子核・ハドロン物理学研究室 中塚徳継

Abstract Isospin character of low-energy 1^- states in exotic ^{20}O has been investigated. By comparing two probes with different sensitivity to the isospin, the isoscalar and isovector E1 strength was determined for the first time in unstable nuclei. It is revealed that two bound 1^- states have different isoscalar E1 strength, suggesting these states to have different underlying structure.

© 2017 Department of Physics, Kyoto University

近年、中性子過剰核の1励起状態には、よく知られた巨大双極子共鳴のほかに、低励起エネルギー領域に別の有意なピークを持つものが存在することが知られるようになってきた[1,2]。巨大双極子共鳴が中性子と陽子の逆位相な振動というアイソベクター型の集団運動によりよく記述できることが知られている一方で[1]、低励起エネルギー領域の1励起状態の構造はまだよく分かっていない。最近、安定核領域における実験により、低励起エネルギー領域の1励起状態はアイソベクター型とアイソスカラー型両方の強度を持つことがわかり[2,3]、巨大双極子共鳴とは異なる構造を持つことが示唆されるようになった。また、低励起エネルギー領域の1励起状態の強度は、過剰中性子数が多くなるほど強くなる可能性が指摘されており[1,2]、中性子過剰な不安定核での1励起状態に大きな関心を持たれている。本研究では、中性子過剰な酸素同位体 ^{20}O における低エネルギー1励起状態のアイソスピン構造を調べるために、金標的によるクーロン励起(アイベクタープローブ)と液体ヘリウム標的による ^4He 非弾性散乱(アイソスカラープローブ)での励起強度を比較する実験を行った。実験は理研 RIBF にて行い、インビームガンマ線分光の手法を用いて低エネルギー1励起状態への微分断面積を決定した。歪曲波ボルン近似(DWBA)を用いた解析から、アイソベクター遷移強度($B(E1)_{\uparrow}$)[4]とアイソスカラー遷移強度($ISD\ EWSR$)[4]を独立に求めた。結果は Fig. 1. (右)に示したように、 ^{20}O における2つの1励起状態は同じ程度のアイソベクター強度を持つ一方、アイソスカラー強度には大きな違いが見られることがわかった。このことから、2つの1励起状態は異なる構造を持っていることが示唆される。 $N=Z$ 核である ^{16}O (Fig. 1. (左))と比較すると、どちらの核も同じエネルギー領域に同程度のアイソスカラー強度を持つ一方で、アイソベクター強度には大きな差が見られる。この結果は定性的には以下のように説明できる。 ^{16}O においては、 $N=Z$ 核のために低エネルギーでアイソベクター状態が抑制され、ほぼ純粋なアイソスカラー状態が現れる。一方の ^{20}O においては、中性子が過剰に存在するために純粋なアイソスカラー状態が禁止され、アイソベクター状態が混ざった構造を持つものと考えられる。より定量的な理解のためには詳細な理論計算との比較が不可欠である。

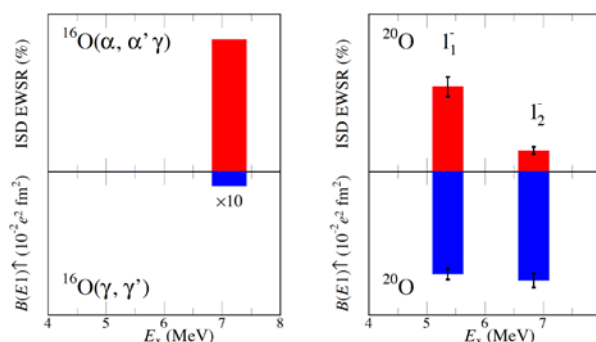


Fig. 1. The extracted isoscalar (top panel) and isovector (bottom panel) E1 strength of ^{20}O compared with ^{16}O .

References

- [1] M. Harakeh and A. van der Woude, “Giant Resonances”, Oxford University Press, 2001.
- [2] D. Savran, et al., Prog. Part. Nucl. Phys. 70 (2013).
- [3] A. Bracco, et al., Euro. Phys. J. A 51 (2015) 99.
- [4] V. Derya, et al., Phys. Lett. B 730 (2014) 288.

Out-of-time-ordered correlator and entanglement scrambling in RCFTs

基礎物理学研究所 素粒子論グループ 沼澤宙朗

Abstract We study out-of-time-ordered correlator and scrambling of entanglement in rational CFTs, which are useful quantities to characterize chaotic/integrable systems. We present that the behavior in rational CFTs are different from holographic CFTs, which seem to be integrable.

© 2017 Department of Physics, Kyoto University

近年、量子重力をホログラフィックに記述する共形場理論(CFT)やブラックホールの物理を特徴づけるものとして、量子多体系のカオスの振る舞いが注目を浴びている[1]。一方で、カオスが起きる系と比較するためにも、カオスが起きない系の解析も重要な問題である。カオスが起きない系の候補としては解ける模型が考えられるが、解ける模型が可積分らしい振る舞いをするかどうかは非自明であり、実際に可解かつカオスが起きるモデルも見つかっている[2]。そのため、逆にどのようなモデルにおいてはカオスが起きないかを調べることは興味深い問題である。

本論文では、可解な模型の例として 2 次元共形場理論の 1 つのクラスである有理型の共形場理論(RCFT)の励起状態の時間発展を調べた。調べた量は 2 種類で、1 つは時間順序積外相関関数(OTO 相関関数)であり、もう一つはエンタングルメントの攪乱である。OTO 相関関数の解析[3]では、十分時間が経った後に OTO 相関関数の値が有限の一定値に近づくことを示し、この値を求めた。ホログラフィックな共形場理論において OTO 相関関数の値は十分時間が経つと 0 に近づくため、RCFT において有限値に落ち着くという結果は、ホログラフィックな共形場理論の場合とは定量的に違う結果である。また、OTO 相関関数からリャプノフ指数を読みとるために必要な極限(large c 極限)の解析をすることで、RCFT におけるリャプノフ指数が 0 になることの傍証も得た。

また、エンタングルメントの攪乱を見るために、まず本論文では局所演算子の挿入による励起によってエンタングルメント・エントロピー(EE)がどのように変化するかを調べた[4]。その結果、量子次元と呼ばれる量の対数だけエンタングルメント・エントロピーが増加することが判明した。特に、有限な値だけ変化するという部分は、無限に増加するホログラフィックな CFT の場合と正反対であり、可積分性を反映していると考えられる。次に、この励起同士の散乱がエンタングルメントに対してどのような影響を与えるかを調べた[5]。その結果、RCFT において散乱はエンタングルメント・エントロピーの値を変えないことが判明した。つまり、エンタングルメントの攪乱が起こらない、もしくは散乱の前後でエンタングルメントが保存されるということが分かり興味深い結果が得られた。

これらの解析から、OTO 相関関数、エンタングルメントのどちらを見ても RCFT は可積分らしい振る舞いを示すという結果が得られた。

References

- [1] S.H.Shenker and D.Stanford, Black holes and the butterfly effect, JHEP 1403 067 (2014)
- [2] J.Maldacena and D.Stanford, Comments on the Suchdev-Ye-Kitaev model, Phys.Rev.D94 (2016) no.10
- [3] Out-of-time-ordered correlators and purity in rational conformal field theories, PTEP 2016(2016)no.11 113B06
- [4] Quantum dimension as entanglement entropy in two dimensional conformal field theories, Phys.Rev.D90 (2014) no.4,041701
- [5] Scattering effect on entanglement propagation in RCFTs, JHEP 1612 (2016) 061

連星中性子星合体における ニュートリノによる質量放出

天体核研究室 藤林翔

Abstract We investigate neutrino-driven outflow from the remnant of the binary neutron star merger using numerical relativity simulations. The strong outflow is formed due to the neutrino-antineutrino pair-annihilation process, but, in this *purely* radiation-hydrodynamics simulation, we cannot see the relativistic outflow required for short gamma-ray bursts.

© 2017 Department of Physics, Kyoto University

連星中性子星合体は、地上重力波検出器にとって重要な重力波の源であると共に、合体に伴い様々な天体現象を起こすことが期待されている。

近年の数値相対論を用いた研究[1]では、連星中性子星が合体した後は、大質量中性子星が一時的に形成する可能性が示唆されている。大質量中性子星と、その周りを取り囲む降着円盤は非常に高温となり、大量のニュートリノを放出する。

このニュートリノとの相互作用により加熱された物質が系から放出される現象、ニュートリノ駆動風が起こる事が期待される[2]。放出された物質の中での重元素合成を経て大量の不安定核が作られると、その放射性崩壊に伴う熱によって可視光から赤外線で輝く現象が期待される。この天体は”Kilonova”や”Macronova”と呼ばれ、重力波に付随する電磁波天体として重要である[3]。ニュートリノ駆動風は、連星の合体とともに力学的に放出される物質に次いで、この電磁波天体のエネルギー源となる可能性がある。

また、連星中性子星合体は継続時間の短いガンマ線バーストを引き起こすことが期待されているが、ガンマ線バーストを起こす為に必要な相対論的なジェットを形成する”中心エンジン”が何であるのかは依然として不明である。大質量中性子星が存在する状況では、高いニュートリノの光度により、ニュートリノ-反ニュートリノの対消滅過程による加熱によってこのジェットが形成される可能性が存在する[4]。

以上を受け、我々は数値相対論を用いた大質量中性子星-降着円盤系の輻射流体シミュレーションを行い、ニュートリノによって放出される物質の性質を調べた。特に、相対論的な速度の質量放出が起こるか、放出される物質の質量やその他の性質はどのようなものかを調べた。

ニュートリノの対消滅加熱によって光速の50%ほどの速度を持つ質量放出が最初起こるが、ニュートリノの光度が小さくなるに従い、数100ミリ秒後には質量放出は緩やかになることが分かった。ニュートリノの対消滅加熱の効果は非常に大きく、これを無視するとニュートリノによる質量放出の性質を見誤ることになる。ただ、相対論的な質量放出はこのシミュレーションでは確認できなかった。

これは粘性を考慮しない純粋なニュートリノ輻射輸送の効果のみのシミュレーションであり、今後、連星中性子星合体の現実的な描像を確立するために、磁気乱流による粘性を考慮した計算を行う予定である。

References

- [1] M. Shibata *et al.*, Phys. Rev. D **71**, 084021 (2005), M. Shibata and K. Taniguchi, Phys. Rev. D **73**, 064027 (2006), Y. Sekiguchi *et al.*, Physical Review Letters **107**, 051102 (2011), K. Hotokezaka *et al.*, Phys. Rev. D **88**, 044026 (2013).
- [2] L. Dessart *et al.*, Astrophys. J. **690**, 1681 (2009), B. D. Metzger and R. Fernandez, Mon. Not. R. Astron. Soc. **441**, 3444 (2014), A. Perego *et al.*, Mon. Not. R. Astron. Soc. **443**, 3134 (2014).
- [3] L.-X. Li and B. Paczynski, Astrophys. J. Lett. **507**, L59 (1998).
- [4] P. Meszaros and M. J. Rees, Mon. Not. R. Astron. Soc. **257**, 29P (1992).

Missing mass spectroscopy of $^{10}\text{C}(\alpha, \alpha')$ with MAIKo active target

原子核・ハドロン物理学研究室 古野 達也

Abstract Clustering is an important aspect of atomic nuclei and its studies have been extended recently from stable nuclei to unstable nuclei. We aim to unveil inner degrees of freedom of cluster structures by measuring a mirror asymmetry of energy levels in unstable nuclei. We have developed an active target system MAIKo to measure inelastic scattering of unstable nuclei. Setup of MAIKo experiment, a test experiment and future prospect will be presented.

© 2017 Department of Physics, Kyoto University

クラスター構造は、宇宙における銀河の形成や、クォークによるハドロンの束縛など、自然界の様々な階層に発現する。これらの現象はそれぞれの階層におけるダイナミクスを理解する上で重要な側面である。原子核においては、2つの陽子と2つの中性子が強く相関したアルファクラスター構造が代表的なクラスター構造である。

RIBFに代表される近年の不安定核実験施設の発達により、原子核におけるクラスターに対する研究は、安定な $N = Z = 2n$ 核（自己共役核）から、中性子（陽子）過剰な不安定核に対象を拡張しつつある。不安定核では、過剰な中性子や陽子がアルファ粒子コアの間で共有され、分子的な構造が形成されることが議論されている。近年、アルファクラスター状態のエネルギー準位を陽子数・中性子数の入れ替わった2つの核（鏡映核）の間で比較することにより、クラスター構造の内部自由度を引き出すことが可能であることが、理論計算によって指摘されている [1]。鏡映核間での 0^+ 状態のエネルギー準位の差 (cluster Thomas-Ehrman shift) は、構成粒子のクーロン力の違いによって現れるため、クラスター間の相対距離を反映する。例えば $^{10}\text{C} - ^{10}\text{Be}$ の鏡映核系では、クラスター間の相対角運動量の異なる 0^+ 状態がいくつか予想されている。相対角運動量が異なるとクラスター間の距離が変化し、鏡映核の状態間にエネルギー差が現れる。

我々は $^{10}\text{C} - ^{10}\text{Be}$ 系のcluster Thomas-Ehrman shiftを測定する実験を計画している。RCNP E463実験では、 ^{10}C のアルファ非弾性散乱を測定し、 0^+ 状態を系統的に同定することを目指している。アルファ非弾性散乱をプローブとするのは、 $0^+, 1^+, 2^+$ といったnatural parity stateが励起されやすい、十分高いビームエネルギーではバックグラウンドとなる事象が少ないからである [2]。非弾性散乱によって 0^+ 状態を励起するには、反応断面積の大きい重心系前方角度で測定を行う必要がある。また、 ^{10}C は不安定核なので、 ^{10}C をビーム、 ^4He を標的とする逆運動学条件下で実験を行わなければならない。調べたいクラスター状態は崩壊閾値よりも高いエネルギーに予想されているため、励起スペクトルを得るには、反跳アルファ粒子を検出する質量欠損分光が適している。しかし、前方角度では反跳アルファ粒子のエネルギーが1 MeV以下と非常に低いため、通常的手法では測定が困難であった。

上記の困難を克服するために、我々はMAIKoアクティブ標的を開発した [3]。MAIKoアクティブ標的は、荷電粒子の飛跡を3次的に捉えることが出来るTime Projection Chamber (TPC) の検出ガスを標的ガスとしても用いるシステムである。 ^4He ガス標的と不安定核ビームの散乱事象をTPC検出器の有感領域内で測定することで、低エネルギー反跳アルファ粒子の検出を実現している。

2016年11月にRCNPにおいて、75 MeV/uの ^{10}C ビームを用いたテスト実験を実施した。テスト実験では、本測定のために新たに開発したビーム粒子飛跡検出器 (MWDC) や、崩壊粒子検出器の動作確認を目的とした。また、実際にMAIKoアクティブ標的を用いて ^{10}C アルファ非弾性散乱を測定した。

本発表では、MAIKoアクティブ標的の概要、テスト実験の解析状況、及び2017年に予定されている本実験の展望について発表する。

References

- [1] M. Ito, EPJ Web of Conference **117**, 06014 (2016).
- [2] M. N. Harakeh, and A. van der Woude, “Giant Resonances”, Oxford Science Publications (2001).
- [3] T. Furuno *et al.*, Jour. Phys.: Conf. Ser. **569**, 012042 (2014).

ダストの重力崩壊における弱い宇宙検閲官仮説の破れ

天体核研究室 水野良祐

Abstract By using a new method, we showed that the weak cosmic censorship conjecture, which postulates that an asymptotic observer at infinity cannot see the singularity, does not hold in five-dimensional spherically symmetric spacetime with collapsing inhomogeneous dust cloud.

© 2017 Department of Physics, Kyoto University

一般相対論においては、重力崩壊によってしばしば曲率の発散するような特異点が生成される。曲率の大きな領域では重力が非常に強いため、こうした特異点はブラックホールの内部にあり、外側からは観測できないと期待される。しかしながら、いくつかの初期条件の下における重力崩壊では、事象の地平線に覆われていないような、観測可能な裸の特異点が生成されてしまうことが知られている。こうした特異点が存在すると、一般相対論が破綻し予言能力を失ってしまう点が観測可能であることになってしまう。したがって、一般相対論をはじめとする時空計量のダイナミクスによって記述される重力理論の予言能力を検証する上で、裸の特異点がどのような初期条件の下で生じるのかを調べるのが重要となる。また一方で、一般相対論における応用上重要ないくつかの定理は、事象の地平線の外側に裸の特異点が存在しないという仮定から導かれている。特に、無限遠方の観測者から観測可能な裸の特異点は現実の重力崩壊では生じないとする仮説は、弱い宇宙検閲官仮説と呼ばれているが、その仮説が成立する範囲は、時空の対称性が非常に高い場合を除いて、よくわかっていない。したがって、一般相対論における各種定理において前提としている条件を保証する上で、弱い宇宙検閲官仮説がどのような範囲で成立するかを調べるのが重要となる。

特に4次元の球対称な非一様ダストの重力崩壊については裸の特異点が生じる条件が解析されており[1]、ダスト球の中心付近に密度の分布が集中すると一般的に弱い検閲官仮説が破れ、密度分布が平坦になると裸の特異点はブラックホールの内部にしか生じなくなることが解析的に示されている。一方で、ストリング理論などの高次元理論を動機として、高次元での球対称な非一様ダストの重力崩壊においても裸の特異点が生じる条件が調べられているが、特に6次元以上の時空においては滑らかな初期密度をもつダストの崩壊では裸の特異点が生成されず、特異点は全てブラックホールの内部にのみ現れることが解析的に示されている[2]。

5次元時空における球対称な非一様ダストの重力崩壊においては、光の測地線の方程式が他の次元の場合より複雑な極を持つために、4次元や6次元以上の場合の解析が適応不可能であることが知られていた。そこで我々は4次元の場合に使われていた手法を改良することで、5次元時空でも使用可能な裸の特異点の判定法を作り、それを用いて、5次元の球対称な非一様ダストの重力崩壊において弱い宇宙検閲官仮説が破綻するか否かを検証した[3]。その結果、4次元の場合と同じく、ダスト球の中心付近に密度の分布が集中する極限では一般的に弱い検閲官仮説が破れることが解析的に証明できた。一方で、4次元の場合よりもより広い初期密度分布のクラスの重力崩壊で、裸の特異点が生じないこともわかった。つまり、球対称の非一様ダストの崩壊においては、時空の次元が上がるほど裸の特異点が生じにくくなり、宇宙検閲官仮説が成立しやすくなる傾向があることがわかった。こうした傾向がより対称性が低い時空などの一般的な状況でも見られる傾向か否かの検証は今後の課題といえる。

References

- [1] D. Christodoulou, Commun. Math. Phys. 93, 171 (1984).
- [2] R. Goswami and P. S. Joshi, Phys. Rev. D 69, 104002 (2004) [arXiv:gr-qc/0405049].
- [3] R. Mizuno, S. Ohashi and T. Shiromizu, Prog. Theor. Exp. Phys. (2016) 103E03 [arXiv:1607.02698 [gr-qc]].

高強度フェムト秒レーザーとクラスターとの相互作用によるテラヘルツ波放射に関する研究

レーザー物質科学分科 森一晃

Abstract: Terahertz electromagnetic wave generation in the interaction of an intense femto-second laser pulse with argon clusters has been experimentally studied. With double intense femtosecond laser pulses, we have observed directional linear-polarized terahertz emission, which is convenient for terahertz wave applications.

© 2016⁷ Department of Physics, Kyoto University

周波数がテラヘルツ (0.1–10 THz, 0.1–10 ps) 領域の高強度電磁波 (以下「テラヘルツ波」) 発生
の手法としてレーザー生成プラズマが提案、実証されている。レーザーの標的物質としては固体 (金属
薄膜) や気体 (大気、希ガス等) が用いられ、シース電場によるイオン加速過程、電子の航跡場加速、
チェレンコフ放射、遷移放射などがテラヘルツ波の発生メカニズムとして考えられている。我々は 10^4
個程度の原子の結合体 (クラスター) をレーザー標的物質とすることで [1]、同程度の原子密度の気体
を標的物質としたときの 600 倍のエネルギー変換効率でテラヘルツ波発生が可能であることを報告して
いる [2]。レーザーを標的物質 (固体、気体、クラスター) に照射しプラズマ化することで発生するテ
ラヘルツ波はラディアル偏光で円錐状の空間分布で放射する。筆者は入射レーザーにダブルパルスビー
ムを用いることで従来の手法で発生するテラヘルツ波とは異なる放射特性を持つテラヘルツ波の発生
を観測した。

実験では、背圧 7 MPa のアルゴンガスを高真空ガラスチャンバーに注入することでチャンバー中心に
直径約 10 nm 程度のアルゴンクラスターを生成し、そこへ 2 つの短パルス高強度レーザー (Ti:sapphire
CPA system、中心波長 810 nm、パルス幅 40 fs) を合成石英平凸レンズで集光照射した。発生したテラ
ヘルツ波はポリスチレンレンズで平行ビームにした後、ヘリウム冷却 InSb ボロメータでエネルギーを
測定した。空間分布についてはテラヘルツ波源を中心にして観測装置全体を回転移動させることで測定
し、THz 波のスペクトルは Martin-puplett 偏光干渉計により測定した。

ダブルパルスを時間的、空間的に制御してクラスター群の中に集光することで、レーザー伝搬軸方向
に指向性を持つテラヘルツ波 (中心周波数 0.2–0.5 THz) が観測された。発生したテラヘルツ波の偏光
は直線偏光であり、電場の振動方向は第一パルスと第二パルスの集光位置を通る直線に平行であった。
本実験でのレーザー強度 (10^{16} W/cm²) で生じるプラズマチャネルからのテラヘルツ発生メカニズムは
一般にチェレンコフ放射や遷移放射で説明されるが、その場合はラディアル偏光で円錐状の放射角度分
布をもつテラヘルツ波放射となるため、これらのテラヘルツ波発生機構で本実験でのテラヘルツ波放射
を説明することはできない。クーロン爆発あるいはプラズマ膨張により生じる爆発や膨張フロントでの
電界において第二パルスにより駆動される電子が影響を受けると考えると、ダブルパルスの遅延時間と
集光位置間隔との関係、テラヘルツ波の偏光、テラヘルツ波放射角度分布を説明することが可能である
ことが示された。指向性の良い、偏光方向可変の直線偏光のテラヘルツ波光源は今後の応用へ有効であ
ると考えられる。

References

- [1] F. Jahangiri *et al.*, “Intense terahertz emission from atomic cluster plasma produced by intense femtosecond laser pulses” Appl. Phys. Lett. **99**, 261503 (2011).
- [2] F. Jahangiri *et al.*, “Enhancing the energy of terahertz radiation from plasma produced by intense femtosecond laser pulses” Appl. Phys. Lett. **102**, 191106 (2013).

Embedding Ghost-free Bigravity into Higher-Dimensional Gravity

Yukawa Institute for Theoretical Physics Yasuho Yamashita

Abstract In bigravity, *i.e.*, the gravitational theories having two sets of gravitons which are interacting with each other, the ghost-freeness severely restricts its interaction form. We attempt to derive this specific ghost-free interaction from the viewpoint of higher-dimensional gravity.

© 2017 Department of Physics, Kyoto University

General relativity is the current standard theory of gravity in which massless gravitons are the unique degrees of freedom that describe the dynamical nature of gravity. There are many other modified gravity theories. But gravitons are still massless in almost all of those theories. As one of the possibilities to challenge this fundamental nature of gravity, bigravity, *i.e.*, a gravitational theory that contains two sets of gravitons, has been investigated. It is known that the model suffers from a ghost instability if one allows a general form of the interactions between the two graviton sectors, *i.e.*, there appears the so-called Boulware-Deser (BD) ghost [1]. Imposing BD-ghost-freeness restricts the interaction form to the specific mass interactions proposed by de Rham, Gabadadze and Tolley [2].

The ghost-free interactions are derived artificially by the ghost-free condition, and hence we have no idea about the mechanism that tunes the interaction to be ghost-free. In order to address this issue, we propose to embed this ghost-free bigravity into higher-dimensional gravity. We focus on the Dvali-Gabadadze-Porrati 2-brane model, *i.e.*, the 5-dimensional braneworld model sandwiched by two branes equipped with brane-localized gravity [3]. If the brane-localized gravity on two branes is sufficiently strong compared with the bulk gravity, only the lowest two states in the graviton spectrum will be trapped on the branes by the brane-localized gravity, while the other Kaluza-Klein gravitons are driven away to high energy and become ignorable in the low-energy effective theory. In this setup, we confirm that the graviton's mass spectrum recovers the one in the ghost-free bigravity at low energies [4]. We then derive a part of the ghost-free bigravity action as a low-energy effective action of the DGP 2-brane model [5]. Furthermore, we introduce a stabilization scalar field to fix the brane separation. We investigate the potential of the stabilization scalar which enables to fix the brane separation stably in the setup that reproduces the ghost-free bigravity as a low-energy effective theory [4].

Also, we study instabilities in both the DGP 2-brane model and the ghost-free bigravity [4]. We show that the stabilization scalar mode in the DGP 2-brane model becomes a tachyon when the energy densities localized on the branes are increased. This energy scale is relatively low when we consider the setup that reproduces the ghost-free bigravity. This tachyonic instability leads to the breakdown of the stabilization, and consequently we cannot sustain the setup necessary to derive the ghost-free bigravity from the DGP 2-brane model. Therefore, unfortunately the correspondence between the DGP 2-brane model and the ghost-free bigravity breaks down in a relatively low energy regime.

References

- [1] D. G. Boulware and S. Deser, Phys. Rev. D **6**, 3368 (1972).
- [2] C. de Rham, G. Gabadadze and A. J. Tolley, Phys. Rev. Lett. **106**, 231101 (2011).
- [3] G. R. Dvali, G. Gabadadze and M. Porrati, Phys. Lett. B **485**, 208 (2000).
- [4] Y. Yamashita and T. Tanaka, JCAP **1406** (2014) 004
- [5] Y. Yamashita and T. Tanaka, JCAP **1605** (2016) no.05, 011

α クラスター励起状態における芯クラスターの回転・変形によるクラスター構造への影響

原子核理論研究室 吉田 侑太

Abstract We investigate alpha-cluster excited states in ^{32}S and ^{14}C with $^{28}\text{Si}+\alpha$ - and $^{10}\text{Be}+\alpha$ -cluster models, respectively. We find alpha-cluster excited states near core+alpha threshold energies. We analyze core rotation and deformation effects in core+alpha-cluster structures, and find these effects play important role to form alpha-cluster excited states.

© 2017 Department of Physics, Kyoto University

原子核から α クラスターが一つだけ励起し芯+ α という 2 体クラスター構造を持った状態を α クラスター励起状態と呼ぶ。この α クラスター励起状態は Ikeda diagram の広い原子核領域で、他のクラスター構造と比べ低い励起エネルギーで現れる基本的なクラスター構造として予言され、不安定核を含む様々な原子核でその存在が議論されている。しかし、今までのクラスター構造の研究は閉殻クラスターが中心であり、閉殻の途中 (open shell 領域) におけるクラスター構造の研究はあまり進んでいない。この open shell 領域のクラスター構造ではクラスターが球形から変形しそれが回転すると言ったクラスターの内部励起が重要になる。理論研究の問題としてこの内部励起をクラスター模型にどのように取り込むか考える必要がある。

本研究では、既存のクラスター模型に対し AQC 模型法を使うことで open shell 領域の jj 結合殻模型極限を記述できるよう拡張した。そして、芯クラスターの変形をパラメーターとして取り込み、芯クラスターの変形と (芯クラスターの回転を含む) 芯+ α クラスター間の相対運動が考慮された芯+ α クラスター模型を構築した。本模型より open shell 領域における α クラスター励起状態について理論研究を行い、計算結果と実験結果との比較やクラスター構造の安定性の議論から open shell 領域における α クラスター励起状態の有無について調べた。加えて、計算結果を解析し芯クラスターの回転・変形の役割に関して議論を行った。具体的に扱った原子核として、近年実験から示唆が得られている ^{32}S 原子核における α クラスター励起状態と、 3α クラスターの linear-chain 構造が議論されている ^{14}C 原子核の $^{10}\text{Be}+\alpha$ クラスター構造について研究した。

結果、 ^{32}S では計算により $^{28}\text{Si}+\alpha$ 閾値近傍にバンドヘッドを持つ α クラスターの回転バンドが得られた。計算結果の解析によりオブレート型の ^{28}Si 芯クラスターの α クラスターに対する回転が α クラスター励起状態に重要であることがわかった。また ^{28}Si 芯クラスターの内部励起が $^{28}\text{Si}+\alpha$ クラスター構造の安定化に寄与することが判明した[1]。 ^{14}C では、 3α クラスターの linear-chain 構造が $^{10}\text{Be}+\alpha$ 閾値近傍に得られた。特に ^{10}Be 芯クラスターの余剰中性子が α クラスターの空間的発達の抑制や状態の分離を起こすなど、励起状態のクラスター構造に影響を及ぼすことが確認できた[2]。これらの結果に加えて実験と比較できる物理量として (換算) α 崩壊幅やモノポール遷移強度についても計算した。

本研究によって open shell 領域における α クラスター励起状態が芯+ α 閾値近傍に存在することを示した。また芯+ α クラスター構造において変形した芯クラスターの回転の考慮が、 α クラスター励起状態の発現・安定化において重要であることを明確にすることができた。以上より open shell 領域における α クラスター励起状態の存在を理論計算により明らかにし、今まで研究されてきた閉殻クラスターや Ikeda diagram の領域を超えて、クラスター構造がより広い核領域で存在する可能性を示した。

References

- [1] Y. Yoshida, Y. Kanada-En'yo, and F. Kobayashi, Prog. Theor. Exp. Phys. **2016**, 043D01 (2016).
- [2] Y. Yoshida and Y. Kanada-En'yo, Prog. Theor. Exp. Phys. **2016**, 123D04 (2016).