2022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

(2023年2月3日)

物理学第二分野

D3 発表会

日時:2023年2月3日(金) 9時~ 場所:ハイブリット形式 発表時間:15分+5分(質問)

《目 次》

1.	Diagnostics for Physical Processes of X-ray Plasma in Supernova Remnant	天野 雄輝	(9:00)
2.	Quantum Gravity Beyond the End of the World	魏子夏	(9:20)
3.	Evolution of self-interacting axions around rotating black holes	大宮 英俊	(9:40)
4.	ガンマ線観測による天の川銀河系内超新星 残骸におけるPeV宇宙線加速の探索	岡 知彦	(10:00)
5.	NINJA 実験における水標的ニュートリノ反応 の測定	小田川高大	(10:20)
6.	X-ray Study On Microquasar SS 433/W50 Extended Jets: Propagation of Non-thermal Particles and Origin of Knots	佳山 一帆	(10:40)

 Radiation Hydrodynamics Simulations Revealing Protostellar Evolution in Direct Collapse Scenario 木村 和貴 (11:00)

- 8. ニュートリノ振動解析におけるニュートリノ反応 栗林宗一郎 (11:20) モデルの系統誤差の評価と振動パラメータの 精密測定
- 9. GSI-FRS におけるWASA 検出器を用いた 関屋 涼平 (11:40)
 ¹²C(p,dp)反応による η '中間子原子核の 探索

- ¹⁰. Black Hole-Neutron Star Mergers 林 航大 (13:00)
 -Universal Evolution Picture Obtained by Seconds-long Numerical-Relativistic Neutrino-Radiation Magnetohydrodynamics Simulation-
- ¹¹. S = -2系のバリオン間相互作用解明に向けた 原田 健志 (13:20) グザイハイパー核精密分光
- 12. スカラー場の理論におけるグラディエントフ 春名 純一 (13:40) ロー厳密くりこみ群
- ¹³. ホログラフィックQCDを用いたバリオンの 堀 敬一朗 (14:00) dilatation modeの研究
- ¹⁴. 修正重力におけるentropy boundと重力波メモ 松田 泰亮 (14:20) リー効果
- ¹⁵. LHC-ATLAS 実験における微少変位を持つ 三野 裕哉 (14:40) 低運動量飛跡を用いた超対称性電弱ゲー ジーノの探索
- ¹⁶. Lattice QCD studies on baryon resonances 村上耕太郎 (15:00) and pentaquarks from meson-baryon scatterings

¹⁷. Transient Chaos Analysis of String Scattering 世田 拓也 (15:20)

Diagnostics for Physical Processes of X-ray Plasma in Supernova Remnant

宇宙線研究室 天野 雄輝

Abstract We perform high resolution X-ray spectroscopy of Supernova remnants with Reflection Grating Spectrometer aboard XMM-Newton. Our results show that charge exchange X-ray emission and X-ray resonance scattering are observable in SNR. We also propose a method to constrain the 3D structure of supernova remnants from the effect of resonance scattering. © 2023 Department of Physics, Kyoto University

超新星爆発によって吹き飛ばされた物質は周囲の物質と衝突し、超新星残骸(SNR)と呼ばれる数千万 度の高温プラズマを形成する。X線観測によりSNRに含まれる重元素からの特性X線が検出でき、親星 の合成した元素の組成比やその分布を知ることができる。ここから、親星の質量や金属量といったパラ メーター制限に加え、超新星の爆発機構などの重要な問題に迫ることができる。近年の研究により、超 新星残骸の形成過程や電離状態、X線放射過程は、一様希薄な環境下での球対称な爆発に基づく従来の 描像以上に複雑であることがわかってきた。例えば、イオンと中性物質の電荷交換反応によるX線放射 の検出(e.g. [1])やイオンによる輝線光子の散乱(共鳴散乱)の示唆(e.g. [2])など、これまでSNR において考慮されてこなかった物理過程の重要性が指摘されている。これらの物理過程を見過ごすと組 成比などの測定を正確に行うことができない。一方で、これらの効果を定量的に測定できれば、イオン の運動速度やプラズマの奥行き方向の厚みなどの従来測定の難しかった物理量の測定が可能になる。

そこで我々はまず、電荷交換や共鳴散乱が SNR において検出可能なのか、またどういった条件下でど の程度スペクトル解析に寄与があるのかを明らかにすることを目的に研究を行った。電荷交換や共鳴散 乱はヘリウム様イオンの禁制線/共鳴線強度比を大きくするため、高いエネルギー分解能を持つ検出器 による SNR の観測が必要である。我々は現在最高のエネルギー分解能を持つ X 線検出器である XMM-Newton 衛星搭載の回折格子 Reflection Grating Spectrometer によって、N49 と J0453-6829 の解 析を行った。これらの SNR は周辺に密度の濃い分子雲やダストが観測されており(e.g. [3])、N49 は南 東部の縁が明るい歪んだ形状をしているなど、電荷交換や共鳴散乱の検出が期待できる。解析の結果、 どちらの SNR も衝突電離プラズマからの放射では説明できないほど大きなヘリウム様酸素禁制線/共鳴 線強度比を示すことがわかった。N49 は禁制線/共鳴線強度比以外にも、O VIII Lyβ/α、Fe XVII Lα (3s-2p)/(3d-2p)比が大きく、振動子強度が大きい(遷移確率が大きく共鳴散乱の影響を受けやすい) 輝線の強度が弱い傾向があった。また、これらの輝線強度のほとんどは N49 と同じくらいの厚みのプラ ズマによる吸収を仮定した場合説明できた。したがって N49 の大きな禁制線/共鳴線強度比の原因は共 鳴散乱であると結論付けた[4]。J0453-6829 は N49 などと比べて、共鳴散乱の効果が見えにくい球対称 な形状をしている。そこで J0453-6829 に関しては ATCA&Parkes で取得した電波データで周辺環境の調 査を行ったところ、南部で HI ガスと衝突していることがわかった。南部と北部でスペクトルを比較し たところ、南部で特に禁制線/共鳴線強度比が大きくなっていることがわかった。これらの結果から、 J0453-6829の大きな禁制線/共鳴線強度比の原因は電荷交換反応であると結論付けた[5]。

我々は共鳴散乱や電荷交換が超新星残骸で観測されることを示した。そこで、この研究の発展として、 共鳴散乱の効果を定量化することで、SNR プラズマの奥行き方向の厚みを制限する手法の提案も行う。 ターゲット天体の E0102.2-7219 は小マゼラン雲に存在する、年齢 2000 年程度の超新星残骸である。X 線イメージでは、一見すると球対称なシェルを投影した様な形状をしているが、その3次元構造はリン グ状や、視線方向に長い円筒状であるなどの説がある(e.g. [6])。我々の解析では共鳴散乱の効果はほ とんど観測されず、視線方向に長い円筒は膨張速度などを考慮しない場合は棄却されることがわかった。 この手法は将来の衛星である XRISM を用いて多数の天体に応用可能である。

References[1] Uchida, H., et al. 2019, ApJ, 871, 234. [2] Kaastra, J. S., & Mewe, R. 1995, A&A, 302, L13. [3] Yamane, Y., et al. 2018, ApJ, 863, 55. [4] Amano, Y., et al. 2020, ApJ, 897, 11. [5]Koshiba, Y., et al. PASJ, 74, 757. [6] Flanagan, K., et al. 2004, ApJ, 605, 230

Quantum Gravity Beyond the End of the World

基礎物理学研究所・素粒子論グループ 魏子夏

Abstract The AdS/BCFT correspondence is a generalization of AdS/CFT to conformal field theories with boundaries and has played an important role in the recent study of quantum gravity. We will discuss recent progress related to AdS/BCFT including holographic moving mirrors, wedge holography, causal structures, and dS brane worlds.

© 2023 Department of Physics, Kyoto University

The holographic principle has played a crucial role in studying quantum gravity. In particular, holographic correspondences associated with boundary conformal field theories (BCFT), CFT defined on a manifold with boundaries, have attracted much attention in recent years. The reason is that a BCFT has two equivalent gravity duals. The first one is obtained by introducing an end-of-the-world brane, which plays the role of the boundary on the gravity side, to the gravity side of standard AdS/CFT. The correspondence between the first gravity dual and the BCFT is called AdS/BCFT. The second gravity dual is obtained by applying the Karch-Randall brane-world holography to the first one, which will result in a dynamical AdS gravity coupled to a non-gravitational region. Such an equivalence between three theories is called double holography. The novel point of double holography is one can observe non-perturbative quantum effects in the second gravity dual while keeping the first gravity dual classical. Therefore, in this framework, one can use tools from both BCFT and classical gravity to study the quantum effects of gravity.

As a field theory, the BCFT ends at the boundary (the end of the world). However, by comparing the BCFT and its second gravity dual, it looks like quantum gravity arises from and goes beyond the end of the world. In this dissertation, we study several aspects and developments of AdS/BCFT and double holography [1, 2, 3, 4, 5]. We start with setups with timelike boundaries. We will first introduce a conformal map method to study dynamics associated with moving boundaries, the so-called moving mirror setups, in 2D CFT. We will also explain how studies of black holes using moving mirrors in old days can be related to recent developments of the island formula via AdS/BCFT and double holography [1, 2]. Then we will move on to a new holographic setup called wedge holography, which is realized by introducing two parallel end-of-the-world branes in the gravity dual of AdS/BCFT [3]. While a wedge-like region is left on the gravity side, this construction causes a dimensional reduction on the field theory side and results in a codimension-two holography. After that, we focus on the causal structures in double holography [4]. In particular, we show that the causality in BCFT is protected, but that in the second gravity dual is broken in a certain way for consistency. Then we will move on to a new quantum informational quantity called pseudo entropy, which is a generalization of entanglement entropy to post-selection setups [5]. We will end up discussing BCFT with spacelike boundaries where pseudo entropy naturally appears. We will see how AdS/BCFT provides not only a tool for analyzing setups with spacelike boundaries but also a strong motivation related to dS holography for doing so.

References

[1] Ibrahim Akal, Yuya Kusuki, Noburo Shiba, Tadashi Takayanagi, Zixia Wei, "Entanglement Entropy in a Holographic Moving Mirror and the Page Curve", Phys. Rev. Lett. **126** (2021) 061604.

[2] Ibrahim Akal, Yuya Kusuki, Noburo Shiba, Tadashi Takayanagi, Zixia Wei, "*Holographic Moving Mirrors*", Class. Quant. Grav. **38** (2021) 22, 224001.

[3] Ibrahim Akal, Yuya Kusuki, Tadashi Takayanagi, Zixia Wei, "*Codimension-two holography for wedges*", Phys. Rev. D. **102** (2020) 126007.

[4] Hidetoshi Omiya, Zixia Wei, "Causal structures and nonlocality in double holography", JHEP 07 (2022) 128.

[5] Ali Mollabashi, Noburo Shiba, Tadashi Takayanagi, Kotaro Tamaoka, Zixia Wei, "Pseudo Entropy in Free Quantum Field Theories", Phys. Rev. Lett. **126** (2021) 081601.

Evolution of self-interacting axions around rotating black holes

天体核研究室 大宮英俊

Abstract We study the evolution of self-interacting axion condensates around rotating black holes. We find that for most of the parameter regions, the dissipative effect by the self-interaction will terminate the growth of the condensate by the superradiance and the condensate settles to the quasi-stationary state. © 2023 Department of Physics, Kyoto University

Axions are one of the most motivated particles beyond the Standard Model. They provide a possible solution to the strong CP problem, can be a good candidate for dark matter, and are predicted by string theory. In particular, string theory predicts a plentitude of axions in various mass ranges [1].

When the Compton wavelength of the axion becomes comparable to the size of a rotating black hole, the macroscopic condensate of the axion will spontaneously form. The basic formation mechanism is the superradiance, the energy and the angular momentum extraction from the rotating black hole by a bosonic field. The axion condensate is thought to emit characteristic gravitational waves. The detection of the characteristic gravitational waves will be evidence of the axion [2]. However, to detect or constrain the axion, the precise prediction of the evolution of the axion condensate under various effects must be understood.

The self-interaction of the axion can alter the evolution and cause interesting phenomena. Since the self-interaction is attractive, the condensate might collapse by the self-interaction. This violent collapse is called bosenova, which can result in a burst of gravitational waves [3,4]. On the other hand, the self-interaction opens a dissipation channel, which terminates the growth of the condensate by the superradiance [5]. In this case, the condensate settles to a quasi-stationary state and continuous gravitational waves are emitted.

To clarify the final fate of the self-interacting axion condensate, we study the evolution of the selfinteracting axion around a rotating black hole. We focus on tracking the evolution starting from extremely small amplitude to large amplitude where the self-interaction becomes relevant. We find that the evolution of the condensate depends on the mass of the axion. In particular, we show that for most of the axion mass, the condensate is likely to evolve into the quasi-stationary configuration, in which the energy gain by the superradiance and the dissipation by the selfinteraction balance. In this case, bosenova is not expected.

References

- [1] A. Arvanitaki et al., Phys. Rev. D 81, 123530 (2010)
- [2] A. Arvanitaki and S. Dubovsky, Phys. Rev. D 83, 044026 (2011)
- [3] H. Yoshino and H. Kodama, Class. Quant. Grav. 32, no.21, 214001 (2015)
- [4] H. Omiya, T. Takahashi and T. Tanaka, PTEP 2022, no.4, 043E03 (2022)
- [5] M. Baryakhtar et al., Phys. Rev. D 103, no.9, 095019 (2021)

ガンマ線観測による天の川銀河系内超新星残骸における PeV 宇宙線加速の探索

宇宙線研究室 岡 知彦

Abstract To elucidate the origins of cosmic rays up to PeV, I analyzed gamma-ray observation data in the vicinity of supernova remnants G106.3+2.7 and HB9. With spectral modeling studies considering a time evolution of the maximum energy of accelerated particles, I found evidence of PeV proton acceleration in these supernova remnants.

© 2023 Department of Physics, Kyoto University

天の川銀河系内には 3 PeV 程度まで宇宙線(CR)陽子を加速する天体(通称、陽子 PeVatron)が存在 すると考えられているが未発見である[例えば 1]。 γ 線は荷電粒子と異なり星間磁場の影響を受けない ため放射領域の特定が可能である。従って、陽子 PeVatronの探索には、加速された陽子が天体周辺の 星間ガスと衝突した際に生成される π^{0} 中間子の崩壊により放射される γ 線を観測することが有効であ る。PeVatronの候補天体として超新星残骸(SNR)が挙げられているが、PeV までの粒子加速を行う SNR は未発見であった。本研究では、G106.3+2.7 と HB9 という 2 つの SNR の γ 線観測データ解析から、SNR における PeV までの陽子加速の可能性を探った。

SNR G106.3+2.7 は先行研究により 100 TeV を超える γ 線が発見され PeVatron として有力視されていたものの、この領域には高エネルギー電子を供給するパルサー風星雲 (PWN) が混在しており、その 100 TeV γ 線放射が陽子起源なのか電子起源なのか、また、由来天体が SNR なのか PWN なのか、未解明であった[2,3]。そこで私は MAGIC 望遠鏡を用いて、従来の研究よりも高い角度分解能(0.07-0.1 度)で120 時間に及ぶ TeV γ 線観測を行った。この高解像・高統計観測により、0.2 TeV 以上の放射は SNR の電波放射と空間的に一致し、6 TeV 以上の放射は PWN から遠く離れた場所でのみ検出されることが分かった。これは、100 TeV γ 線が PWN ではなく SNR に由来するということを強く示唆する。さらに、電子起源放射モデルでは 100 TeV までのエネルギースペクトルを再現できず、一方で1 PeV にカットオフを持つ陽子からの放射によって観測結果を再現できることが分かった。ただ、5 kyr 程度の年齢の SNR における PeV までの粒子加速は理論的に不可能だと予想されており[4]、SNR G106.3+2.7 からの γ 線放射 は過去に SNR から逃走し現在近くの星間ガスに到達した陽子によるものだと解釈できた。

しかし、上記の解釈は観測的証拠のない SNR の最大加速エネルギーの時間発展を仮定している。そこ で、現在の粒子分布を反映する SNR 本体と過去の粒子分布を反映する星間ガス領域の y 線スペクトルを 観測し比較することで、SNR における粒子加速の時間発展を測定する手法を新たに考案し、SNR HB9 の y 線観測に適応した。今回新たに Fermi 衛星 LAT の 12 年間分の GeV y 線観測データを解析し、SNR HB9 本体と星間ガス領域それぞれと空間的に相関する y 線放射を発見した。そして、両領域のスペクトルを 上記の時間発展のシナリオを仮定したモデルにより再現でき、現在の SNR での最大加速エネルギー

(300 GeV)よりも高いエネルギー(3 PeV)まで過去に SNR によって加速されていたという証拠を得た。 加えて、この SNR 本体と周辺の星間ガス領域からの γ線スペクトルを同時にモデルフィットすることに より、SNR 周辺の CR 拡散係数をかつてない精度で推定できることも分かった。

この方法で開発したモデルを、SNR G106.3+2.7、および、G335.2+0.1 の観測データにも適用し、どの SNR でも似たモデルパラメータでスペクトルを再現できることが分かった。さらに、得られたモデルパラメータを用いて SNR からの PeV CR 量を計算すると、その値が地球で観測される CR の測定値とファクター3 倍以内で一致することが分かった。これは SNR が PeV までの CR 起源である強い証拠となる。

References

[1] P. Blasi, Astron. Astrophys. Rev. 21, 70 (2013).

- [2] M. Amenomori et al., Phys. Rev. Lett. 126, 141101. (2021).
- [3] Z. Cao, et al., Nature 594 (7861), 33-36 (2021).
- [4] V. S. Ptuskin & V. N. Zirakashvili, Astron. Astrophys. 429, 755–765 (2005).

NINJA 実験における水標的ニュートリノ反応の測定

高エネルギー物理学研究室 小田川高大

Abstract Understanding the neutrino interactions is essential for neutrino oscillation experiments because it is the source of one of the largest systematic uncertainties. We performed a neutrino interaction measurement using nuclear emulsion detectors in the NINJA experiment. The analysis improvements and measurement results in the NINJA experiment are shown in this presentation. © 2023 Department of Physics, Kyoto University

長基線ニュートリノ振動実験である T2K (Tokai to Kamioka) 実験はこれまでにレプトンにおける CP 対称性の保存を 90% 信頼度で棄却し、またレプトンの混合角について世界最高精度で測定を行って きた[1]。T2K 実験の主要な系統誤差の要因がニュートリノ反応のモデルの不定性である。したがって、 T2K 実験が測定精度を向上していくにあたっては、ニュートリノと原子核、特に Super-Kamiokande と 同じ水標的での反応をより詳細に理解することが重要である。反応モデルの不定性の要因である原子核 効果を理解するためには、広い位相空間において反応由来のハドロンの情報を取得することが必要にな る。しかし、現行の水標的を用いた反応測定においては低運動量の陽子に対する検出効率が低く、運動 量閾値は 500 MeV/c 程度に留まっていた。

我々はニュートリノ反応由来の低運動量ハドロンを測定するために、J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex)で生成された大強度ニュートリノビームと、高い3次元空間分解能を持つ原子核乾板を用いた実験である NINJA (Neutrino Interaction research with Nuclear emulsion and J-PARC Accelerator)実験を行っている[2]。NINJA 実験においては原子核乾板と水標的とをニュートリノビーム軸方向に積層した ECC (Emulsion Cloud Chamber)と呼ばれる検出器を用いることで陽子に対する運動量閾値を 200 MeV/c まで拡張できる。ECC はまた広い角度アクセプタンスを達成しており[3]、広い位相空間での陽子の測定が可能となっている。

本研究においては 2019 年度に行われた NINJA 実験の物理ランの解析を行った。まず、荷電カレン ト反応の同定のために開発・設置した Scintillation Tracker について飛跡接続の手法を確立し、位 置・角度分解能や検出効率の評価を行った[4]。Scintillation Tracker は少ない読み出しチャンネル 数で 1 m 四方の領域を覆い、かつ 2-3 mm 程度の位置分解能を達成した。評価の結果、物理測定に対 して十分な性能を達成していることが確認され、実際に上流の ECC との飛跡接続を遂行した。

また、ECC 中での多重電磁散乱 (MCS, Multiple Coulomb Scattrings) を用いた荷電粒子の運動量再 構成手法を開発した。ECC 中でのエネルギー損失を尤度関数に新たに取り入れることで、特に低運動量 領域において存在したバイアスを削減し、再構成手法の改善を達成した[5]。

これらの開発した手法を用いて、実際に 8 kg の水標的に対してニュートリノ反応由来の荷電粒子の 多重度や角度・運動量を測定し,特に 200 MeV/c の低運動量閾値でのニュートリノ-水反応由来の陽子 の観測に成功した。また、ハドロンの広い位相空間における高い検出効率によって、多重度によって分 類された反応由来の荷電粒子の kinematics の測定がニュートリノ反応の理解のための強力な手段と なることを示した。

本測定は NINJA 実験において初の正ニュートリノ水反応測定となっており、開発された手法および それらを用いて得られた測定結果は今後の NINJA 実験の測定、および T2K 実験における系統誤差の削減の指針となる。将来的には NINJA 実験の測定結果によって、T2K 実験の系統誤差が削減され, CP 対称性の破れを発見することが見込まれる。

References

[1] K. Abe et al. (T2K Collaboration), Phys. Rev. D 103, 112008 (2021).

[2] A. Hiramoto et al. (NINJA Collaboration), Phys. Rev. D 102, 072006 (2020).

[3] Y. Suzuki et al., Prog. Theor. Exp. Phys. 2022, 063H01 (2022).

[4] T. Odagawa et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 1034, 166775 (2022).

[5] T. Odagawa et al., Prog. Theor. Exp. Phys. 2022, 113H01 (2022).

X-ray Study On Microquasar SS 433/W50 Extended Jets: Propagation of Non-thermal Particles and Origin of Knots

宇宙線研究室 佳山 一帆

Abstract We perform spatially resolved imaging spectroscopy of X-ray emission from SS 433/W50. We found that the electrons are accelerated at the innermost knot and lose their energy via synchrotron cooling during transport along the jet. We discuss the scenario of particle acceleration and X-ray emission in this system.

© 2023 Department of Physics, Kyoto University

宇宙ジェットとは、天体から噴出されるプラズマやガスの噴流である。宇宙の様々な階層で見られる 現象であり、原始星、白色矮星、中性子星、ブラックホールなどのコンパクトな天体から噴出される。 銀河の中心にある超巨大ブラックホールからは、100kpc 以上の長さに及ぶジェットと共に膨大なエネル ギーが放出される。また、銀河系内ブラックホールや中性子星、原始星から噴出される、数 pc の長さ のジェットも検出されている。ジェットの速度も様々で、数 100km/s(原始星ジェットなど)から光速に 近い速度(ガンマ線バースト)になることもある。ジェットは電波や X 線、 y 線の波長で電磁波を放射 しており、宇宙線加速源の候補としても注目されている(e.g., [1])。

W50 星雲の中心に位置する SS 433 は、銀河系で最も有名な X 線連星系の一つである。中央のコンパクト天体 (ブラックホールまたは中性子星)から光速の 26%の速さで東西にジェットを噴出している[2]。 ジェットは数十 pc まで広がり、約 162 日の周期で歳差運動をしている。これまでの X 線観測から、ジェットの歳差運動軸に沿って東西に伸びたローブが発見されている[3]。また、その中に歳差軸に沿って分布する、局所的に明るい knot と呼ばれる構造があり、それらは SS 433 に近い順に head, lenticular, ring (東側)と w1, w2 (西側)と呼ばれる[4,5,6]。このローブからの X 線放射はシンクロトロン放射であり、この系で電子が加速されていることを示す証拠となっている。最近の γ 線の観測によって、最内部の knot から 25 TeV 以上の γ 線放射が発見され、約 100 TeV までの粒子加速が行われていることが分かった[7]。しかし、knot の起源や拡張構造など、非熱的な X 線放射の詳細については明らかになっていない。knot の成因や粒子加速の描像を明らかにするためには、X 線による分光観測が不可欠である。

本研究では、XMM-Newton および Chandra 衛星を用いて、W50 からの X 線放射の空間分解撮像とスペク トル解析を行った。その結果、東西のローブから熱的放射と非熱的放射を検出した。放射の空間分布を 調べると、熱的放射は星雲全体に広がっているのに対し、非熱的放射はジェット歳差軸に沿って分布し ていることを発見した。本研究の解析から、SS 433 と head および SS 433 と w1 の間には有意な X 線放 射がないことがわかった。最もSS 433 に近い knot (head, w1)からは X 線の非熱的放射が検出された。 そのスペクトルの傾きを表す光子指数は、典型的なシンクロトロン放射のものと一致しており、knot で 粒子加速が起きていることが示唆される。また、SS 433 から遠ざかるにつれて光子指数が大きくなり、 特に西ローブでは w2 の外側で急激に光子指数が大きくなることを発見した、これは、シンクロトロン 放射をする電子の最大エネルギーが小さくなることを意味し、電子がジェットを進みながらシンクロト ロン冷却を受けている体と考えられる。そこで、我々は先行研究に基づいてシンクロトロン電子の時間 発展モデルを構築し、観測結果との比較を行った。その結果、knot が特に磁場が強い領域であることを 明らかにした。一方、東ローブでは、lenticularの外側でもスペクトルの傾きは平坦なままであり、西 ローブに適用したモデルでは説明ができないことを発見した。これは粒子の再加速の可能性を示唆して いる。また、西側の2つの knot (w1, w2)の間に、分子雲と相関する新たな knot (w1.5)を発見した[8]。 本発表では、ジェット中でのシンクロトロン放射の時間発展および knot の成因について議論する。 Referencess

[1] Abdo, A. A. et al., 2010, Science, 328.5979, p. 725. [2] Margon, B & Anderson, S. F., 1989, ApJ, 347, p. 448.

- [3] Watson, M. G. et al., 1983, ApJ, 273, p. 688. [4] Safi-Harb, S. & Ögelman, H., 1997, ApJ, 483.2, p. 868.
- [5] Safi-Harb, S., et al., 2022, ApJ, 935.2, 163, p.163. [6] Kayama, K. et al., 2022, PASJ, 74, 5, p.1143.
- [7] Abeysekara, A. U. et al., 2018, Nature, 562.7725, p. 82. [8] Yamamoto, H. et al., 2022, PASJ, 74.3, p. 493.

Radiation Hydrodynamics Simulations Revealing Protostellar Evolution in Direct Collapse Scenario

基礎物理学研究所 宇宙グループ 木村和貴

Abstract We perform three-dimensional radiation hydrodynamic simulations resolving the interior of rapidly accreting primordial protostar. Our results show that a ~10 solar-mass very inflated protostar generally appears, and that realistic initial turbulence causes stellar rapid rotation. © 2023 Department of Physics, Kyoto University

Recent observations reveal that supermassive black holes (SMBHs) with more than a billion solar masses already exist at $z \sim 6-7$, and their origin has been studied so far [1]. One possible pathway to form such SMBHs is Direct Collapse (DC) scenario [2]. In this scenario, star-forming clouds which collapse via H atomic cooling maintain a high temperature and protostars grow in mass with high accretion rates $(\dot{M} \sim 0.1-1M_{\odot})$. As a result, if the accretion continues, protostars can grow up to supermassive stars (SMSs; $M_* \sim 10^5-10^6M_{\odot}$) and they leave the massive black hole seeds which may evolve into the observed SMBHs.

In this scenario, protostellar evolution is crucial for SMS formation. If protostars emit a copious amount of ionizing photons, radiative feedback shuts off the accretion, terminating the stellar mass growth. The protostellar rotation also affects their growth, changing their evolution by inducing chemical mixing. Moreover, when the protostar rapidly rotates, the centrifugal force may hinder the gas accretion through the circumstellar disk via the so-called $\Omega\Gamma$ limit [3]. However, despite its significance, protostellar evolution has been studied mainly by one-dimensional (1D) stellar evolution calculations (e.g., [4]), and realistic three-dimensional (3D) protostellar evolution still needs to be clarified.

In this work, we develop a new radiation solver employing an explicit M1 closure method and perform radiation hydrodynamic simulations resolving the protostellar structure in the DC scenario. We follow its evolution until it grows to $10M_{\odot}$ from two different initial conditions of spherical and turbulent clouds.

In both cases, protostars evolve keeping its large radius, as predicted by the previous 1D calculations. In the spherical case, when $M_* = 10M_{\odot}$, the protostellar radius is $700R_{\odot}$, the luminosity is 10^5L_{\odot} , and the effective temperature is 4000 K. The radiative feedback is ineffective due to its low effective temperature. In the turbulent case, the protostar rotates more than 0.5 times the Keplerian velocity due to the angular momentum provided by the initial turbulence. As a result, the protostar has an oblate shape with its equatorial radius 2-3 times larger than the polar radius. Its luminosity is an order of magnitude larger than in the spherical case. However, the effective temperature remains several thousand Kelvin, and the protostar hardly emits ionizing photons also in this case. Our results indicate that we need to consider the rotational effect to reveal the realistic protostellar evolution.

References

[1] Inayoshi K., Visbal E., Haiman Z., 2020, ARA&A, 58, 27

- [2] Bromm V., Loeb A., 2003, ApJ, 596, 3
- [3] Haemmerlé L., Woods T. E., Klessen R. S., Heger A., Whalen D. J., 2018, ApJ, 853, L3
- [4] Hosokawa T., Yoshida N., Omukai K., Yorke H. W., 2012, ApJ, 760, L3

ニュートリノ振動解析におけるニュートリノ反応モデルの 系統誤差の評価と振動パラメータの精密測定

高エネルギー物理学研究室 栗林 宗一郎

Abstract Neutrino oscillation parameters are measured in the T2K experiment. One of the primary systematic errors in this experiment stems from the neutrino-nucleus interaction model. To evaluate the error, we perform studies with the simulated data sets. This talk will present the results of neutrino oscillation analysis focused on those studies. © 2023 Department of Physics, Kyoto University

T2K 実験[1]は、J-PARC 加速器施設で生成するニュートリノビームを、標的から 280 m離れた前置検 出器及び 295 km離れた後置検出器スーパーカミオカンデにより測定する長基線ニュートリノ振動実験 である.本実験では、PMNS 行列で記述されるニュートリノ振動パラメータの内、CP 位相に相当する δ_{CP} と θ_{23} 、 Δm^2_{23} を世界最高精度で測定を行なっている。特にニュートリノ振動における CP 対称性の破れ ($\delta_{CP} \neq 0, \pi$)の証拠を得ることが T2K 実験の目標である。この目標を達成するためにはニュートリノフ ラックスとニュートリノ反応による系統誤差の評価が重要となる。

特に,現在のニュートリノ振動測定ではニュートリノ反応モデルによる不定性が系統誤差の大きな要因となっている.現在の解析においてその不定性を理論モデルや外部実験の測定結果を元に組み込み, さらには前置検出器での振動前のニュートリノ反応の測定データを用いてその系統誤差削減を行っている.しかし,そもそも解析に使用する反応モデルの選択による潜在的なバイアスが解析結果に大きな系統誤差を与える可能性がある.

そこで、反応モデルを変えた場合のシミュレーションデータを用いて、そのバイアスの評価を行った.元々のモデルの場合と別のモデルに変えた場合の解析結果を比較し、最終的なニュートリノ振動 パラメータの測定結果に与える影響を調べた.

特に,前置検出器,後置検出器の解析それぞれに終状態の 陽子, π粒子に関しての新しいイベント選択を今回の解析に 組み込んだことを踏まえ,終状態に陽子,π粒子を有するイ ベントに関連した多様な反応モデル候補も考慮した.具体的 には,より多様な原子核内の核内効果に関するモデル,ニュ ートリノ反応から出るπ粒子の運動に関するモデル等につい て評価を行った.

解析結果としては、ニュートリノ振動における CP 位相については信頼区間を 7%程度変えるが、最新のデータ解析結果の主要な結論は変えないことを確認し、90%の有意度で CP 対称性が破れているという結果を得た.

 Δm^2_{23} については2.7 × 10⁻⁵ eV²程度のズレがあることがわ かった.このバイアスを系統誤差として考慮し最終的な解析 結果を得た.その他の振動パラメータについては考慮すべき と思われる大きな変化はないことがわかった.

本発表では上記の話題を中心に T2K 実験におけるニュート リノ振動解析の現状と最新結果について述べる.

References

K. Abe et al. (T2K), Nucl. Instrum. Meth. A 659, 106
 (2011), arXiv:1106.1238 [physics.ins- det].



Fig. 1. Comparison of fit results of Δm^2_{23} for nominal model (blue lines) and alternative model (orange lines). There are two lines for normal (solid lines) and inverted (dashed lines) ordering of each model according to the neutrino mass hierarchy.

GSI-FRS における WASA 検出器を用いた ¹²C(p, dp)反応による η'中間子原子核の探索

原子核・ハドロン物理学研究室 関屋涼平

Abstract The QCD vacuum in the low energy regions can be studied by a bound state between an η' meson and a nucleus (η' -mesic nuclei). We performed missing-mass spectroscopy of the ${}^{12}C(p,d){}^{11}C \otimes \eta'$ reaction with simultaneous measurement of protons in decays of the η' -mesic nuclei. We report the summary of the experiment and the current analysis status. © 2023 Department of Physics, Kyoto University

η'(958)中間子は擬スカラー中間子九重項の中でも特異的に大きな質量を持っている。これは、低エネ ルギー領域の量子色力学(QCD)において、カイラル対称性の破れと軸性 U(1)対称性の破れに伴う真空の 構造に起因していると考えられる。カイラル対称性が部分的に回復している原子核密度中では、η'中間 子の質量が 37-150 MeV/c²減少すると様々な理論モデルによって予言されている[1,2,3]。原子核中におけ る質量の減少は、原子核とのスカラー的な引力ポテンシャルとして表されるため、原子核との束縛状態 (η'中間子原子核)の存在が予想される。

本研究の目的は η '中間子原子核を実験的に観測し、原子核密度下における η '中間子の質量変化を測定 することで、対称性の破れに伴う QCD 真空の構造に迫ることである。本実験では、先行研究として 2014 年に実施された¹²C(p,d)¹¹C $\otimes \eta$ '反応による質量欠損分光で実証された測定手法[4]を元に、新しく η '中 間子原子核の崩壊事象に着目して η '中間子原子核の観測を目指す。崩壊チャンネルのうち、二核子吸収 (η 'N $p \rightarrow Np$)によって放出される陽子は、他のチャンネルによる陽子よりも比較的高い運動量(~1 GeV/c) を持つ。この崩壊後の陽子をバックグラウンドの少ない標的後方で測定することによって、先行実験よ りも 100 倍大きなシグナル・バックグラウンド比(S/B~1)を実現しながら測定を実施する。

我々は 2022 年 2 月に、ドイツ重イオン研究 所において、大立体角検出器 WASA 検出器[5] を改良・開発し、スペクトロメータ FRS にイ ンストールして実験を実施した(図 1)。本実験 では、エネルギー2.5 GeV、強度約3×10⁸/sの 陽子ビームを4g/cm²の¹²C標的に照射し、前方 0 度方向に射出された重陽子を FRS で測定す ると同時に、標的周りの粒子を WASA 検出器 で測定した。FRS 上に設置した複数のプラスチ ックシンチレータ間の飛行時間計測によって 前方の重陽子を識別しつつ、多心式ドリフト 検出器によって再構成した荷電粒子の飛跡か ら運動量を解析し、欠損質量を測定した。



検出器によって再構成した荷電粒子の飛跡か Fig. 1 The WASA detector installed in the FRS F2. ら運動量を解析し、欠損質量を測定した。 F2 denotes the intermediate focal plane of the FRS. WASA 検出器内部には超伝導ソレノイド磁石 The figure is taken from [4].

があり、1Tの磁場を発生させ運動量解析に用いた。WASA 検出器を構成する検出器のうち、円筒型ストローチューブ検出器による荷電粒子の飛跡解析から測定した運動量と、その周囲に配置されたプラス チックシンチレータで測定したエネルギー損失の相関から、陽子とバックグラウンド源となるπ中間子 を弁別する。本発表では、実験と取得したデータの概要及び現在の解析状況について述べる。

References

- [1] H. Nagahiro et. al., Phys. Rev. C 74, 045203 (2006).
- [2] S. Sakai and D. Jido, Phys. Rev. C 88, 064906 (2013).
- [3] S. D. Bass and A. W. Thomas, Phys. Lett. B 634, 368 (2006).
- [4] Y. K. Tanaka et. al., Phys. Rev. C 97, 015202 (2018).
- [5] H.-H. Adam et al., nucl-ex/0411038 (2004).

Black Hole-Neutron Star Mergers –Universal Evolution Picture Obtained by Seconds-long Numerical-Relativistic Neutrino-Radiation Magnetohydrodynamics Simulation–

基礎物理学研究所 宇宙グループ 林航大

Abstract We performed numerical-relativistic neutrino-radiation magnetohydrodynamics simulation of seconds-long black hole-neutron star mergers and obtained a self-consistent evolution picture of the inspiral, merger, and post-merger stages. In addition, we found that the obtained evolution picture is qualitatively universal irrespective of the setups. © 2023 Department of Physics, Kyoto University

Black hole-neutron star mergers are one of the main targets of ground-based gravitational wave detectors, and two events GW200105 and GW200115 were detected in 2020 [1]. No electromagnetic counterparts were detected in these events, but depending on the parameters of the binary, the neutron star could be tidally disrupted, leading to mass ejections and the formation of the accretion disk around the remaining black hole. In such a case there is a high expectation for the electromagnetic counterparts to be detected. In the neutron-rich ejected matter, r-process nucleosynthesis synthesizes the heavy radioactive elements. Radioactive decay of such elements generates thermal energy and the ejecta shines as kilonovae. If the remaining system after the merger is a highly magnetized accretion disk surrounding a rapidly rotating black hole, the magnetically driven ultrarelativistic jet could be launched and drive short-hard gamma-ray bursts.

In order to analyze the observational signals and extract scientific information on the merger events, creating the theoretical evolution model of the system is essential. Based on this motivation, we performed numerical-relativity simulations of seconds-long black hole-neutron star mergers incorporating neutrino-radiation transport and magnetohydrodynamics and obtained a self-consistent evolution picture of the inspiral, merger, and post-merger stages [2]. In addition, we also performed simulations for various initial and computational setups and found that the obtained evolution picture is qualitatively universal irrespective of the setups [3].

The universal evolution processes of the black hole-neutron star merger are as follows: As the tidal force of the black hole exceeds the self-gravitating force of the neutron star, the neutron star is tidally disrupted; Then the dynamical mass ejection and the formation of the accretion disk take place within the timescale of ~10 ms; Subsequently, the magnetic field in the accretion disk is amplified by the magnetic winding, Kelvin-Helmholtz instability, and magnetorotational instability, which induce the turbulent effective viscosity and results in the angular momentum transport; The post-merger mass ejection driven by the magnetically-induced viscous heating sets in at ~300–500 ms after the merger as the temperature of the disk and neutrino luminosity drops, and continues for several hundred ms; If one end of the magnetic field line falls into the black hole and the other end ascends from the disk by magnetic buoyancy, the magnetosphere along the black hole rotation axis is developed by the magnetic tower effect; The magnetosphere is collimated by the geometrically-thick accretion disk, and the strong Poynting flux with the typical maximum isotropic-equivalent luminosity of ~3×10⁴⁹–10⁵⁰ erg/s is generated; Then the Poynting flux starts to decrease after ~0.5–2 s. The evolution of the accretion disk determines the evolution of the magnetosphere and determines the timescale of the strong Poynting-luminosity stage.

References

[1] R. Abbott et al., Astrophys. J. 915, L5 (2021).

[2] Kota Hayashi, Sho Fujibayashi, Kenta Kiuchi, Koutarou Kyutoku, Yuichiro Sekiguchi, Masaru Shibata, Phys. Rev. D 106, 023008 (2022).

[3] Kota Hayashi, Kenta Kiuchi, Koutarou Kyutoku, Yuichiro Sekiguchi, Masaru Shibata, arXiv:2211.07158.

S = -2 系のバリオン間相互作用解明に向けた グザイハイパー核精密分光

原子核・ハドロン物理学研究室 原田健志

Abstract Experimental information on the S = -2 systems is essential for understanding baryon-baryon interactions. However, it is still very scarce. We are going to perform a high-resolution spectroscopy of Ξ hypernuclei in a missing-mass method via the (K⁻, K⁺) reaction (J-PARC E70 experiment). In this presentation, I will report the current status and overview of the experiment. © 2023 Department of Physics, Kyoto University

 $u, d, s \\ / 2$

J-PARC K1.8 ビームラインでは、次期実験として(K⁻, K⁺)反応を用いたΞハイパー核の精密分光実験 (J-PARC E70 実験[1])を予定している。J-PARC E70 実験では、K1.8 ビームラインが供給する大強度 K 中間子ビームを使用してΞハイパー核を生成する。入射 K⁻粒子及び散乱 K⁺粒子の運動量はそれぞれ、 ビームラインスペクトロメーター ($\Delta p/p = 10 \times 10^{-4}$ (FWHM))及び新設した高分解能磁気スペクトロ メーターS-2S ($\Delta p/p = 6 \times 10^{-4}$ (FWHM))を用いて測定する (Fig. 1)。また、標的にはシンチレーシ ョンファイバーで構成されるアクティブファイバー標的 (AFT)を使用する。標的中を荷電粒子が通過 する際、そのエネルギー損失は平均値の周りに分布する。AFT を用いることでエネルギー損失に比例す るシンチレーション光量を一事象ごとに測定し、標的中でのエネルギー損失のふらつきを補正する。こ れにより、反応点でのK[±]粒子の運動量を高分解能で測定することが可能となる。以上を駆使することに より、Ξハイパー核の収量及び欠損質量分解能を、それぞれ約100カウント及び2 MeV/ c^2 (FWHM)と いう高統計・高分解能での分光実験を実現し、先行実験[2]よりも高い信号感度でΞハイパー核のエネ

ルギー構造を調べる。得られた実験情報をもとに Ξハイパー核の束縛状態をピーク構造として捉 え、その崩壊幅を測定し、バリオン間相互作用模 型に強い制限を与える。

現在、J-PARC K1.8 実験エリアでは、J-PARC E70 実験実施に向けた準備作業を進めている。ほぼ全 ての検出器のインストールが完了しており、2023 年中のビームタイム開始に向けデータ取得シス テムの整備を進めている。本発表では、J-PARC E70 実験の準備状況及び今後の展望について報告す る。



Fig. 1. Experimental setup of the J-PARC E70 experiment.

References

[1] T. Nagae et al., J-PARC E70 proposal (2018).

[2] T. Nagae et al., AIP Conference Proceedings 2130, 020015 (2019).

スカラー場の理論における グラディエントフロー厳密くりこみ群

素粒子論研究室 春名純一

Abstract

Recently, a new framework, Gradient Flow Exact Renormalization Group (GFERG), was proposed to define the Wilsonian effective action with coarse-graining based on a diffusion equation. In this talk, we investigate the fixed point structure of the GFERG equation associated with the general polynomial diffusion equation of scalar field theories. © 2023 Department of Physics, Kyoto University

くりこみ群の方法は現代物理学の基本的な解析手法であり、低エネルギー有効理論と高エネルギー側の理論をつなぐ流れに注目することで、様々な物理系のダイナミクスを調べることを可能にするものである。特に場の量子論の文脈で、くりこみ群の方法の定量的な定式化として厳密くりこみ群と呼ばれる枠組みが開発されてきた。これまで、この枠組みを通して場の量子論の相構造や統計系の臨界現象が調べられ、それらの摂動的側面と非摂動的側面の両面が明らかにされてきた。

近年,拡散型の方程式に基づく粗視化を用いてウィルソン流の有効作用を定義する新しい枠組みとして,グラディエントフロー厳密くりこみ群が提案された[1].この枠組みの特筆すべき特徴の一つは、 紫外切断を導入するにも関わらず,ゲージ対称性や拘束条件といった,場の標的空間の大域的構造を保 つくりこみ群の流れを定義できるという点である.この特徴により、グラディエントフロー厳密くりこ み群はゲージ対称性や非線形性を持つ物理系のダイナミクスを非摂動的に研究するための有望なアプ ローチと言える.

本発表では、論文[2]に基づき、グラディエントフロー厳密くりこみ群を用いて一般のスカラー場の 理論の固定点構造を調査する.具体的には、場の多項式で表される一般の拡散方程式を通してウィルソ ン有効作用を定義し、そのくりこみ群の流れの固定点構造を調べる。そして、ここで定義したウィルソ ン作用が従うくりこみ群の流れの方程式が、既存の厳密くりこみ群で知られているウィルソン-ポルチ ンスキー方程式と同じ固定点を持つことを示す。さらにそれらの固定点まわりの流れについても調査し、 ウィルソン-ポルチンスキー方程式と同様の流れの構造を持つことを議論する.

References

[1] H. Sonoda and H. Suzuki, PTEP2021 No.2, 023B05 (2021), [arXiv:2012.03568 [hep-th]]
[2] Y.Abe, Y.Hamada and J.Haruna, PTEP2022, No.3, 033B03 (2022), [arXiv:2201.04111 [hep-th]]

ホログラフィック QCD を用いたバリオンの dilatation mode の研究

原子核理論研究室 堀 敬一朗

Abstract We investigate a single baryon and its dilatation mode in holographic QCD based on the Sakai-Sugimoto model. Using Witten Ansatz, the baryon description converts from an instanton to a vortex. We study size dependence of baryon mass and the dilatation mode. © 2023 Department of Physics, Kyoto University

ホログラフィック QCD は近年、超弦理論から生まれた QCD の非摂動的解析手法である。D ブレーンに 対する考察から提唱されたゲージ理論と高次元重力理論の等価性というゲージ/重力双対を利用し、QCD に対応する系と等価な理論を構成することで、摂動的には不可能な QCD の強結合領域を調べる手法であ る。いくつかある構成法のなかでも、酒井・杉本モデルは non SUSY な massless QCD に対応する系にな っており、メソンのスペクトルや多くの現象論的な法則を再現するものとして優れている [1,2]。1+4 次 元時空上のメソン場の SU(2)ゲージ理論になっており、バリオンの自由度は陽には現れない。これは QCD の large Nc 展開の解析からメソンとグルーボールの有効理論だけになることと一致している。ここでは バリオンはメソン場のトポロジカル・オブジェクトとして表現され質量は Nc のオーダーになる。SU(2) ゲージ理論には 4 次元のトポロジカル・オブジェクトであるインスタントンが存在しこれがホログラフ ィック QCD におけるバリオンとみなすことができる [3,4]。

この研究では回転対称性をリスペクトした Witten Ansatz を用いてバリオン数1のバリオンを調べる。 Witten Ansatz [5] の適用により1+4次元の非可換ゲージ理論は1+2次元の可換ゲージ理論に還元される。 それに伴って、バリオンを表現するトポロジカル・オブジェクトはインスタントンからボルテックスに 変わり、数値計算が容易になるため、バリオンの質量と半径の計算が可能になった [6,7]。

この発表ではさらにバリオンのサイズに関する研究についても述べる。Witten Ansatz を適用したこと によるインスタントンとボルテックスの間のモジュライの関係を利用すると、ボルテックスの零点を固 定することでバリオンのサイズを仮想的に変更した場合のエネルギーの評価が可能になった。これによ りバリオンの質量のサイズ依存性を調べることができる。さらにサイズが振動する dilatation mode を考 える。サイズ振動に対する運動項の評価については、断熱近似を用いることで計算が可能になる。その 結果、dilatation mode の励起エネルギーは 450MeV 程度であることがわかった [8]。この dilatation 励起 は、フレーバーなどの量子数を変えないので、核子に対する dilatation 励起の候補としては、質量 1440MeV のローパー共鳴状態 N*(1440) が考えられる。また、この dilatation 励起は、ストレンジネスなど量子 数が異なるバリオンにおいても、同程度のエネルギーの励起状態として現れると予測される。

References

- [1] T. Sakai and S. Sugimoto, PTP 113, 843 (2005).
- [2] T. Sakai and S. Sugimoto, PTP 114, 1083 (2005).
- [3] H. Hata, T. Sakai, S. Sugimoto and S. Yamato, PTP 117, 1157 (2007).
- [4] K. Hashimoto, T. Sakai and S. Sugimoto, PTP 120, 1093 (2008).
- [5] E. Witten, Phys. Rev. Lett. 38, 121 (1977).
- [6] M. Rozali, J. B. Stang and M. van Raamsdonk, JHEP 02, 044 (2014).
- [7] H. Suganuma and K. Hori, Phys. Scripta 95, 074014 (2020).
- [8] K. Hori, H. Kanda and H. Suganuma, in preparation.

修正重力における entropy bound と重力波メモリー効果

基礎物理学研究所 宇宙グループ 松田泰亮

Abstract We study two theoretical aspects of modified gravity. First, we generalize the Bousso's covariant entropy bound in general relativity to Einstein-Gauss-Bonnet gravity and prove it under a set of assumptions. Second, we focus on the so-called memory effect of gravitational waves and generalize it to a scalar-tensor theory in cosmological backgrounds.

© 2023 Department of Physics, Kyoto University

重力を記述する理論として Einstein-Hilbert 作用を採用した一般相対論は多くの観測結果と整合す る結果を残している。しかしながら、この作用を変更し、より正確な重力理論を得ることができるので はないかという試みが主に二つの動機からなされている。

一つは、一般相対論が量子重力理論の低エネルギー有効理論であり、考える物理現象のエネルギーの スケールを上昇させることによって、低エネルギーの領域では考える必要のなかった高階微分項などの 項が量子補正として現れることが期待されるという動機である。

もう一つは、ダークエネルギーの候補を始めとする現在の宇宙論における未解決問題を解決する方法 として重力の作用を変更することを候補とするという動機である。一般相対論の観測と整合する部分に 影響を与えないまま未解決問題に対して影響を与えるように重力の作用を変更することが可能であれ ば、それをもって宇宙論の問題に対する解答とすることができる。

真の重力を一つに断定することは困難であり、現在重力理論の修正の仕方として様々な候補が挙げられている。それらの候補のいずれが真の重力理論かを決定することが現時点で不可能であっても、各々の理論の性質を調べることは、今後真の重力理論を探索するに当たって有益である。

本研究においては二つの観点から既存の重力理論の性質を調べた。まず、[1]においては、重力を修 正する一つ目の動機である、古典的な重力理論は量子重力理論の低エネルギー有効理論であるという観 点から、特にEinstein-Gauss-Bonnet重力について調べた。ブラックホールの熱力学的性質は重力の量 子性に端を発しているという予想がなされており、その帰結として、物質のエントロピーがその物質の 占める領域の面積によって上限を与えられるという予想がいくつかの形で提唱されている。そのような 予想のうち、Bousso[2]は、一般共変性を指導原理として、重力の理論が満たすべき性質としてBousso boundと呼ばれる物質のエントロピーの上限の仕方を定式化した。Bousso boundは D 次元時空において 面積 A を持つ D-2 次元超曲面から内向きに発せられる測地線によって構成された D-1 次元光的超曲 面上に分布する物質のエントロピーが、A/4 を上限とすると主張している。この主張には完全な証明は 与えられていないがいくつかの条件を貸した上での証明は与えられており、量子重力の有効理論として 重力理論が満たすと予想される性質の一つである。本研究ではEinstein-Gauss-Bonnet重力におけるブ ラックホールエントロピーの形を一つ仮定し、それに基づいてBousso boundを拡張、証明し、Generalized second lawというブラックホールエントロピーが満たすべき性質を満たすことも示した。

また[3]においては、二つ目の動機に関連して、宇宙論的背景で重力の変更により観測可能な量の受ける変化を調べるという観点から、重力波による観測可能な現象としてメモリー効果に注目した。メモリー効果とは重力波の伝搬によって、二つの観測者の距離が瞬時かつ永久に変化するという効果である。 Wald and Tolish [4]による宇宙論的な背景におけるメモリー効果の研究をScalar-Tensor理論に応用し、 スカラー場と重力が結合した場合においてメモリー効果を宇宙論的な背景で計算する方法を与えた。

References

[1] T.Matsuda and S.Mukohyama, Phys. Rev. D 103, 024002 (2021)

[2]R.Bousso, JHEP 9907, (1999) 004.

[3]M.A.Gorji, T.Matsuda and S.Mukohyama. Phys. Rev. D 106, 024013 (2022).

[4]A.Tolish and R.Wald Phys.Rev. D 94 (2016) 4, 044009

LHC-ATLAS 実験における微少変位を持つ 低運動量飛跡を用いた超対称性電弱ゲージーノの探索



Figure 1^{\pm} Diagrams representing the two-lepton final state of (a) production of el radiation (*j*), and (b) slepton pair $\ell\ell$ production in association with initial state radiation (*j*). The Higgsino-simplified model also considers $\tilde{\chi}_2^0 \tilde{\chi}_1^0$ and $\tilde{\chi}_1^+ \tilde{\chi}_1^-$ production

Events with two same-flavour opposite-charge energy $(E_{\rm T}^{\rm miss})$, hadronic activity are sele placing addition requirements on a number either estimated with in situ techniques pr cor simultaneous likelihood fit with the \$Rs. The electroweakinos) or the m_{T2} distribution (for sleptons).

nner detecto $\tilde{\chi}_1^0$ $d_0 \sim \mathcal{O}(1) \text{ mm}$ π^{\pm} Track Interaction Point

issing transverse s) are defined by backgrounds are that enter into a distribution (for

Fig. 1. Feynman diagr

Fig. 1. Feynman diagr Colliger Generating Shenothese compressed scenarios were first established at LEP [27–37]. The lower bounds on direct chargino production from these results correspond to $m(\tilde{\chi}_1^{\pm}) > 103.5 \text{ GeV}$ for $\Delta m(\tilde{\chi}_1^{\pm}, \tilde{\chi}_1^0) > 3 \text{ GeV}$ and m(軍国差が92.4 GeV for smaller mass differences, although the lower bound on the Othargino mass weak前标 around 75 GeV for models with additional new scalars and Higgsino-like Gros事象etions [38]. $\widetilde{\mu}_{R}$, are approximately $m(\widetilde{\mu}_{R}) \gtrsim 94.6$ GeV for mass splittings down to $m(\widetilde{\mu}_{R}) - m(\widetilde{\chi}) \geq 2$ GeV. For the scalar partner of the right-handed electron, denoted \widetilde{e}_{R} , LEP established a universal lower bound of $m(\tilde{e}_R) \gtrsim \frac{1}{23} \text{GeV}$ that is independent of $\Delta m(\tilde{e}_R, \tilde{\chi}_1^0)$. Recent papers from the CMS [3920] and ATLAS [41] collaborations have extended the LEP limits for a range of mass splittings. This n 見積 extends previous LHC results by increasing the integrated luminosity, extending the search with additional channels, and exploiting improvements in detector calibration and performance. The event selection was also reoptimised and uses rectifyiques based on Recursive Jigsaw Reconstruction [42], which improve the separation of the SUSY Signal from the SM backgrounds. [2] Scott Thomas, Jam

The restrict the the mose problem as follows. After a short description of the ATLAS detector, a summary of data and simulation samples used is presented. This is followed by descriptions of the event reconstruction, signal regions, background estimates, and systematic uncertainties. The results of the search are then presented, along with the interpretation of the results in the benchmark SUSY models. A brief conclusion is presented at the end.

Lattice QCD studies on baryon resonances and pentaquarks from meson-baryon scatterings

基礎物理学研究所・素粒子論グループ 村上耕太郎

Abstract We analyze meson-baryon scatterings to study baryon resonances and pentaquarks in the HAL QCD method. We first investigate the S-wave *NK* scatterings as a test on the efficiency of the calculation technique for meson-baryon systems. We next study Δ and Ω baryons from $N\pi$ and $\Xi \overline{K}$ scatterings, respectively. We finally show the preliminary study of $\Lambda(1405)$ from S-wave meson-baryon scatterings in the flavor SU(3) limit.

© 2023 Department of Physics, Kyoto University

In this thesis, motivated by the advantage of the HAL QCD method among the approaches using lattice QCD for systems involving baryons, we attempt to study baryon resonances and pentaquarks in the HAL QCD method. To this end, we analyze meson-baryon scatterings that have quark pair creation and annihilation processes, where we need to calculate all-to-all propagators. We utilize the calculation technique that combines the stochastic approximation with the covariant-approximation averaging.

We first investigate the S-wave nucleon-kaon (*NK*) scatterings [1], which allow no quark pair creation and annihilation, as a test on the efficiency of the technique for meson-baryon systems. We employ all-to-all propagators to put the zero momentum hadron operators both at source and sink. In this study, the pion mass $m_{\pi} \approx 570$ MeV. We have observed that the I = 1 potential is more repulsive than the I = 0. The scattering phase shifts are qualitatively consistent with both the experimental data and the previous theoretical results, which suggests that the calculation technique in this work is useful for meson-baryon scatterings in the HAL QCD method. Furthermore, we have found no signals corresponding to $\Theta^+(1540)$ in the phase shifts at $m_{\pi} \approx 570$ MeV.

We next study Δ and Ω baryons from I = 3/2 nucleon-pion $(N\pi)$ and $I = 0 \Xi$ baryon-antikaon $(\Xi \overline{K})$ scatterings, respectively [2]. We use a 3-quark-type source operator with zero momentum at $m_{\pi} \approx 410$ MeV and $m_{K} \approx 635$ MeV, where not only Ω but also Δ baryons are stable. We have found that the $\Xi \overline{K}$ system has a weaker attraction than the $N\pi$ system while the binding energy from the threshold is larger for Ω than for Δ . In addition, the root-mean-square distance of $\Xi \overline{K}$ bound state is smaller than that of $N\pi$. These suggest that an inequality $m_N + m_{\pi} - m_{\Delta} < m_{\Xi} + m_{\overline{K}} - m_{\Omega}$ comes mainly from a smaller spatial size of a $\Xi \overline{K}$ bound state due to a larger reduced mass, rather than its interaction. Results of binding energies agree with those obtained from temporal 2-point functions within large systematic errors, which are mainly caused by the lattice artifact to the potential at short distances.

We finally show the preliminary analysis of S-wave meson-baryon scatterings in the two octet representations and one singlet representation in the flavor SU(3) limit, which have been suggested to couple to $\Lambda(1405)$ in the previous studies using the chiral unitary model. We employ a 3-quark-type source operator with zero momentum and the octet meson mass $m_M \approx 670$ MeV. We have found that the 3-point correlation functions have a zero point in a short distance, which leads to a singular behavior of the leading-order potentials. The ground state in every channel obtained from the potential seems to be unphysical, probably due to the singular potential. We suspect that an appearance of a zero point in the NBS wave function is caused by a distractive cancellation between a $1/r^3$ behavior at short distances from a quark-pair annihilation and a regular behavior from meson-baryon interactions with opposite signs. To overcome this problem, we should calculate the 4-point correlation function in addition to the 3-point to suppress the $1/r^3$ behavior, which is left for our future studies.

References

[1] K. Murakami, Y. Akahoshi, S. Aoki, PTEP 2020, no.9, 093B03 (2020) [arXiv:2006.01383[hep-lat]].

[2] K. Murakami, Y. Akahoshi, S. Aoki, T. Doi, K. Sasaki, "Lattice QCD studies on decuplet baryons as mesonbaryon bound states in the HAL QCD method" [arXiv:2210.05395[hep-lat]].

Transient Chaos Analysis of String Scattering

素粒子論研究室 世田拓也

Abstract We look for chaos in string scatterings. Our results show that there is no sign of chaos at least in bosonic open strings at tree-level. We conjecture that string scatterings can be chaotic if we include higher loop corrections, or if we consider closed strings or multi-point amplitudes. © 2023 Department of Physics, Kyoto University

Black holes are characterized by chaos due to the sensitivity of particle trajectories to horizon perturbations. Since the microscopic degrees of freedom of a black hole originate in a highly excited string, black hole chaos is expected to be caused by some irregular string dynamics (Fig.1). Recently [1,2] showed that string scattering amplitudes are highly erratic functions. However, the precise mechanism of how chaos shows up has not yet been identified, nor has a quantitative evaluation of chaos been made.



Figure 1. A highly excited string and a black hole as a scatterer. Black holes are regarded as chaotic scatterers since, if a particle is shot into a black hole, its initial conditions are apparently forgotten due to thermalization and it takes a long time for a particle to escape from a black hole due to redshift. The origin of black hole chaos is expected to lie in some irregular string scatterings.

In this work, we look for chaos in string scatterings. As the first step, we study open bosonic strings at tree-level. In order to extract chaos in string scattering amplitudes, we study two diagnoses for chaos: fractal structure in scattering data and geometrical structure in string scattering regions.

Our results show that there is no fractal structure in string scattering data nor non-trivial geometrical structure in string scattering regions. This means that there is no sign of chaos at least in bosonic open strings at tree-level. Nevertheless, we have not yet ruled out all possibilities. We conjecture that string scatterings can be chaotic if we include higher loop corrections, or if we consider closed strings or multi-point amplitudes.

Once chaotic dynamics is pinned down in string scatterings, it has the potential to be the microscopic origin of the Hawking radiation. We hope that this work will be a step toward a formulation of chaos in string scatterings, bridging the gap between the microscopic dynamics of strings and the macroscopic nature of black holes.

References

[1] D. J. Gross and V. Rosenhaus, "Chaotic scattering of highly excited strings," JHEP 05 (2021) 048.

[2] V. Rosenhaus, "Chaos in a Many-String Scattering Amplitude," Phys. Rev. Lett. 129 no. 3, (2022) 031601.