平成 30 年度

京都大学大学院理学研究科

修士課程

修士論文アブストラクト

(平成31年1月31日、2月1日)

物理学第二分野

修士論文発表会

平成31年1月31日(木) 9時~ 日時 2月 1日(金) 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月31日(木)

- All-to-all伝搬関数とHAL QCD法を用いた 赤星 友太郎 (9:00) 1. パイオン2体散乱の解析
- 2. フレーバー電荷を持つスカラー場とミュー粒子異常磁 阿部 慶彦 (9:20) 気能率についての研究
- 3. 重いマヨロンダークマターの崩壊とその宇宙線に 岩島 呂帆 (9:40) よる間接探索
- LEPS2 ソレノイド実験のための前方 RPCの 梅﨑 英一 (10:00) 4. 性能評価
- Chandra衛星による超新星残骸の非熱的X線放射の観 奥野 智行 (10:20) 5. 測的研究およびX線天文用SOIピクセル検出器のトリ ガー機能と多層化システムの検証
- MeVガンマ線天体観測実証試験SMILE-2+に向けた気 小野坂 健 (10:40) 6. 球システムの開発と上空における動作
- 密度汎関数理論に基づく時間反転反対称な拘束を用 加須屋 春樹 (11:00) 7. いた奇核の記述

一般相対論の拡張の有効理論におけるコンパクト天体 金沢 瞭 8. (11:20)

9.	CMB 偏光観測実験GroundBIRDで用いる真空窓の開 発研究	小峯 順太	(11:40)
10.	次期長期気球実験SMILE-3に向けたMPPCシンチレー ションカメラの開発	齋藤 要	(13:00)
11.	カイラル低エネルギー定理を満たすDπ散乱と D ₀ 共鳴	杉浦 巧	(13:20)
12.	ゲージ対称性を持つ閉じた超弦の場の理論の構築	杉本 達哉	(13:40)
13.	電子対測定に用いるハドロンブラインド検出器のための トリガー用信号読み出しシステムの開発	鈴木 一輝	(14:00)
14.	超小型ECRイオン源開発のためのリアルタイム 質量分析器の開発	竹内 佑甫	(14:20)
15.	γ線量子光学研究へ向けた時間—エネルギー 同時測定系の構築	田嶋 寛介	(14:40)
16.	RF同期型短パルスレーザーイオン源開発のための Rayleigh散乱による低圧気体密度測定	Deng Weichao	(15:00)
17.	1重項マヨロン模型におけるアノマリー的効果について	中脇 稔貴	(15:20)

レーザー加速プロトンによる⁷Li(p, α)⁴He・¹⁹F(p, α)¹⁶O 西浦 洋輔 (15:40)
 反応生成α粒子のCR-39を用いた検出

19. フェムト秒レーザーダブルパルス照射による金属表面 西野 将伍 (16:00) へのドット着色に関する研究

20.	固定電位層を導入した次世代X線天文用SOI ピクセル検出器の研究	原田	颯大	(16:20)			
2月1日(金)							
21.	頂点演算子の超局所性から見たsoft theoremの 普遍性	樋口	翔	(9:00)			
22.	MAGIC望遠鏡による活動銀河核Ton 599からの 超高エネルギーガンマ線放射の初検出と多波長解析	平子	丈	(9:20)			
23.	²⁰ Neにおける α 凝縮状態の探索	藤川	祐輝	(9:40)			
24.	ハッブル定数の不一致問題に対するCosmological Backreactionによる説明の問題点	三浦	大志	(10:00)			
25.	マルチライン時間領域干渉計を用いたγ線準弾性散 乱法によるNa-P-S系超イオン伝導ガラスのダイナミクス 研究	矢崎	慎一郎	(10:20)			
26.	新検出器Baby MINDを導入したT2K-WAGASCI 実験の最適化と解析アルゴリズムの構築	安留	健嗣	(10:40)			
27.	γ-γ摂動角相関法を用いたXe-超微細気泡の 内部圧力測定	山倉	拓也	(11:00)			
28.	偏光解析法のX線高時間分解計測への応用	吉田	将大	(11:20)			

連星磁気圏に基づいた中性子星連星合体の 電磁波対応天体に関する考察 29.

和田 知己 (11:40)

All-to-all 伝搬関数と HAL QCD 法を用いたパイオン2体散乱の解析

基礎物理学研究所 赤星 友太郎

Abstract The HAL QCD method is a powerful method to extract information of hadron interactions from Lattice QCD. To shed light on unconventional hadronic states, we need to employ an all-to-all propagator techniques together with the HAL QCD method. We study pion-pion scatterings by this combination and confirm its effectiveness.

© 2019 Department of Physics, Kyoto University

クォーク・グルーオンの基礎理論である量子色力学(QCD)を非摂動的に扱う方法として、Wilsonが 提唱した格子ゲージ理論[1]に基づく格子QCDがある。近年、実験で観測されたX,Y,Zに代表される新奇 なハドロン共鳴状態や、いまだ性質が理解されていないスカラーメソンσなどの正体をQCDから第一原 理的に解き明かそうという信念のもと、格子QCDを用いてハドロン間相互作用を計算する試みが盛んに 行われている。

格子QCDを用いてハドロン散乱を解析する手法には主にLüscher法[2]とHAL QCD法[3]の2つが存在する。 そのうち本研究でも用いたHAL QCD法は、格子QCDで計算されるNBS波動関数と呼ばれる量から対象とな る散乱系のポテンシャルを計算する手法であり、計算されたポテンシャルを用いて散乱位相差や共鳴状 態に対応するS行列の極を調べることができる。最近では、HAL QCD法によって共鳴状態Zc (3900)の正体 がカスプ効果であることを示唆する結果[4]や、将来的に実験で観測することが期待されるダイバリオ ン状態の存在を示唆する結果を得る[5]などの成果を挙げている。

その一方で、HAL QCD法には課題も残されている。それは、クォークの対生成・対消滅を含む系の解 析が進んでいないことである。クォークの対生成・対消滅を扱うためにはあらゆる時空点間をつなぐク ォーク伝搬関数(All-to-all伝搬関数)を計算する必要があるのだが、この計算は非常にコストが大き く、現状何らかの近似を行って計算を行うほかない。先行研究として、演算子を非局所的にすることで All-to-all伝搬関数を計算する手法であるLapH法をHAL QCD法に応用したもの[6,7]があるが、LapH法を 用いて計算されたポテンシャルは非局所性が大きく、正しい結果を得るためにはポテンシャルの近似精 度を高める必要があり、非常に大きな計算コストを要することが明らかになっている。

本研究ではこうした現状を踏まえ、LapH法と異なるAll-to-all伝搬関数の計算手法をHAL QCD法に応 用し、パイオン2体散乱の解析を通してその性質を検証することにした。本研究で用いたAll-to-all伝 搬関数の計算手法はTrinLat Collaborationによって提唱されたもの[8]で、LapH法と異なり演算子を局 所的に保ったまま計算することができる。それゆえ、先行研究で起こったような問題が発生しないこと が期待される。まず、I=2パイオン2体散乱の計算を行い、先行研究[6]における結果との比較を行った。 その結果、先行研究で計算された散乱位相差と無矛盾な散乱位相差を得られ、かつ期待された通り非局 所性の問題が生じていないことも確かめられた。次に、将来のハドロン共鳴状態の解析への足掛かりと して、パイオン質量が重い配位を用いてI=1パイオン2体散乱の解析を行い、ρ中間子に対応する束縛状 態が確かに現れることを確認した。これらの一連の解析から、本研究で新たに用いたAll-to-all伝搬関 数の計算手法でハドロン共鳴状態へのアプローチが可能であることが確かめられた。

- [1] K. G. Wilson, Phys. Rev. D 10, 2445 (1974).
- [2] M. Lüscher., Nucl. Phys. B 354, 531 (1991).
- [3] N. Ishii, S. Aoki, T. Hatsuda, Phys. Rev. Lett. 99, 022001 (2007).
- [4] Y. Ikeda et al. [HAL QCD Collaboration], Phys. Rev. Lett. 117, 242001 (2016).
- [5] S. Gongyo et al. [HAL QCD Collaboration], Phys. Rev. Lett. 120, 212001 (2018).
- [6] D. Kawai et al. [HAL QCD Collaboration], Prog. Theor. Exp. Phys. 2018 (2018) 043B04.
- [7] D. Kawai, EPJ Web Conf. 175, 05007 (2018).
- [8] J. Foley et al. [TrinLat Collaboration], Comput. Phys. Commun. 172, 145 (2005).

フレーバー電荷を持つスカラー場とミュー粒子異常磁気能 率についての研究

物理学第二教室 素粒子論研究室 阿部慶彦

Abstract We study extended standard models which include additional scalar fields with flavor charge. We discuss the LFV decay channel and its branching ratio through the Yukawa interactions with charged leptons, and the correction of the muon anomalous magnetic moment by the radiative corrections of these new scalar fields.

© 2019 Department of Physics, Kyoto University

素粒子標準模型は1970年代以降TeVスケールまでの物理を記述する模型として確固たる地位を築いて きた。しかし、この標準模型も完全な理論ではなく、ミュー粒子の異常磁気能率のように理論計算の 予言と実験の観測値との間にずれが存在する問題や、暗黒物質の候補を含んでいないなど様々な問題 点があり、標準模型を超えた物理の存在が期待される。本研究では新しくフレーバー電荷を持つスカ ラー場を加え標準模型を拡張した模型を考え、この新しい粒子のミュー粒子異常磁気能率への寄与に ついて研究した。

我々は、レプトンセクターの世代について離散対称性をフレーバーの対称性として課し、このフレ ーバー電荷を持つ新しいスカラー場を導入した。離散対称性をフレーバー対称性として課したのは、 対称性の自発的な破れによってゼロ質量粒子であるNambu-Goldstoneボソンが模型に現れないようにす るためである。本研究で用いた離散対称性はZ₃, A₄[1,2], S₃[3,4]の3種類である。

フレーバー電荷を持つスカラー場のミュー粒子の異常磁気能率への新しい主要な寄与は図1のダイア グラムから生じる。一方、このスカラー場はレプトンフレーバーの保存を破るYukawa相互作用を与 え、図2のような新しい荷電レプトンの崩壊チャンネルが生じる。この崩壊過程については、実験から その分岐比の値に制限が存在する。我々はこの制限の範囲内で、ミュー粒子の異常磁気能率の補正を 説明できるパラメータ領域が存在するかを、具体的なモデルの構築とそのモデルにおける解析を行う ことで調べた。また、特にS₃対称性を持つ模型についてはスカラーポテンシャルの構造[5,6]を調べ、こ のポテンシャルの真空構造を尊重した新しい提案を行った。



図 1 ミュー粒子の異常磁気能率の補正に効く フレーバー電荷を持つスカラー場*X*の輻射補 正のダイアグラム。



図 2 レプトンフレーバーの保存を変化させる ような崩壊過程の具体的なダイアグラムのひ とつ。

- [1] E. Ma and G. Rajasekaran, Phys. Rev. D 64 (2001) 113012.
- [2] T. Fukuyama, H. Sugiyama and K. Tsumura, Phys. Rev. D 82 (2010) 036004.
- [3] J. Kubo, A. Mondragon, M. Mondragon and E.Rodriguez-Jauregui, Prog. Theor. Phys. 109 (2003) 795
- [4] A. Mondragon, M. Mondragon and E. Peinado, Rev. Mex. Fis. 54 (2008) no.3, 81.
- [5] J. Kubo, H. Okada and F. Sakamaki, Phys. Rev. D 70 (2004) 036007.
- [6] D. Emmanuel-Costa, O. M. Ogreid, P. Osland and M. N. Rebelo, JHEP 1602 (2016) 154

重いマヨロンダークマターの崩壊と その宇宙線による間接探索

素粒子論研究室 岩島 呂帆

Abstract We identify the complex scalar field in the Majoron model as a dark matter (DM) candidate. We calculate its decay assuming that it is heavy, and compare the estimated cosmic rays from DM decay with measurements.

© 2019 Department of Physics, Kyoto University

素粒子標準模型は多くの物理現象を説明することに成功している一方、ニュートリノの質量問題、物質と反物質の非対称性やダークマターの正体など、多くの問題も残されている。

ニュートリノの質量問題に対しては、シーソー模型が有力な模型としてよく知られている。シーソー 模型においては、重い右巻きニュートリノを導入し、それと電弱スケールのディラック質量との比によ って軽いニュートリノの質量を説明している。このとき、同時にレプトン数の破れも発生し、物質と反 物質の非対称性とも結びつけられる。

一方、ダークマターは宇宙の組成の23%を占める正体不明の物質である。通常の物質よりもはるかに 多く宇宙に存在するにもかかわらず、その素粒子的な性質はほとんどわかっていない。その性質を間接 的に知る手掛かりとして、PAMELA や AMS-02 などの宇宙線の観測が行われている。

本研究では、宇宙線の観測結果を用いて、以下に記す模型について、その性質と観測結果との整合性 や、取りうるパラメーターの値の範囲を調べた。

我々が検証する模型は、以下のようなラグランジアンで与えられるものである。

$$\mathcal{L} = \langle \mathrm{SM} \cong \beta \rangle + iL\mathcal{D}L + \frac{i}{2}N\partial N - (y_{\nu}\tilde{H}^{\dagger}NP_{L}L - \frac{J}{2}\Phi NN + \mathrm{h.c.}) + \langle \mathrm{DM} \cong \beta \rangle,$$

但し、L および H は標準模型のレプトン二重項およびヒッグス場であり、N は右巻きニュートリノ、Φ は新たに導入した複素スカラー場である。このスカラー場は、真空期待値が標準模型におけるヒッグス 機構のように、自発的対称性の破れによって右巻きニュートリノに重い質量を持たせると共に、複素成 分は Nambu-Goldstone ボソンであり、マヨロンと呼ばれる。



この模型においては、マヨロン場がダ ークマターの自然な候補と考えられる。 実際、現在までに keV-MeV スケールの質 量を持つスカラー場がダークマターの 候補として検証されてきている[1]。し かしながら、宇宙線の観測の中にはダー クマターの質量は TeV スケールの値で あることを示唆するものも存在してい る。

そこで我々は、上記の模型についてス カラー場が TeV スケールの質量を持つ 場合の崩壊を調べた。さらに、その崩壊 に由来する荷電宇宙線の地球上で観測 されるフラックスを推定し、AMS-02 や PAMELAによる観測結果と照合した。

Figure 1 Positron fraction: Measurement by AMS-02(dots) and estimated flux(lines).

References

[1] J. Heeck, "Majoron as cold light dark matter", arXiv:1809.09413.

LEPS2 ソレノイド実験のための 前方 RPC の性能評価

原子核ハドロン物理学研究室 梅崎 英一

Abstract In the LEPS2, we'll conduct studies on photoproduction of various hadrons. In order to identify charged particles scattered at forward angles, we use resistive plate chamber (RPC). Since there is a possibility that RPC has deteriorated over time, we reevaluated efficiencies and time resolutions. © 2019 Department of Physics, Kyoto University

自然界で確立しているハドロンとして、クォーク・反クォークで構成されたメソン、3 つのクォーク で構成されたバリオンが存在する。しかし、量子色力学によると、カラー1 重項で全体として白色であ ればクォークが 4 つ以上集まって出来た粒子でも理論的にはハドロンとして存在することは可能であ る。 SPring-8の一つのビームラインである LEPS2 実験では、高輝度・高エネルギーのγ線を標的に当 てることでこのようなエキゾチックハドロンの光生成実験を行っている

LEPS2 実験の目標とする物理の一つとして、 $\gamma n \rightarrow K^- \Theta^+$ というペン タクォークの探索実験がある(Fig.1)。この0⁺は2003年に同グループ の LEPS 実験で存在が報告されたものの、後に CLAS 実験でそれを否定 する報告もされて、存否に決着がつけられていない。この違いは散乱 粒子の測定領域の差異が原因と考えられており、LEPS2 では両者の結 果を矛盾なく説明するために4πに近い大立体角を検出器で覆って散 乱粒子を検出する (Fig. 2)。 $\gamma n \rightarrow K^- \Theta^+ \overline{\rho} c \overline{\rho} c \overline{\rho} c \overline{\rho}^+$ の崩壊で出てくる陽子、荷電π中間子の測定により、Θ⁺の不変質量を 再構成する。ターゲットとの反応で生成されて、ビーム軸から 30 度以 内の前方領域に飛んでくるこれらの荷電粒子の飛行時間を測定する検 出器として、前方高抵抗板検出器(Forward Resistive Plate Chamber 以下 RPC と略)を用いる。この RPC の利点として、高時間分解能を持ち、 磁場中でも利用でき、安価であるため、プラスチックシンチレータや チェレンコフ検出器の代わりに用いられるようになった。この RPC の 飛行時間の情報とは別に、磁場中に設置して荷電粒子の飛跡と運動量 を測定するドリフトチェンバーを用いて π、K、pの粒子識別を行う事 が出来る。

この前方領域に設置された RPC は、2013 年に行われた別のプロジェク トである BGOegg 実験で用いられた 1m 長 RPC を再利用している。約5 年の歳月を経た再稼働であり、RPC 自身の経年劣化も考えられるため、 本論文では RPC の検出効率と時間分解能評価を行った。また、実際の データ取得に近い条件での時間分解能についても解析を行った。この 実験セットアップでは読み出し回路に用いるモジュールにかかる費用を 抑えるため、RPC のストリップの信号読み出し構造に工夫がされている [2]。このセットアップで粒子識別するための解析手法について述べ、 性能評価について報告する。

References

[1] K.Watanabe, Kyoto-Univ, Master thesis(2018),

[2] N.Tomida, N.Tran, LEPS2/BGOegg technical note No.003(2016).



Fig1. Photoproduction of Θ^+



Fig2. LEPS2 Solenoid spectrometer. [1]

Chandra 衛星による超新星残骸の非熱的 X 線放射の 観測的研究および X 線天文用 SOI ピクセル検出器の トリガー機能と多層化システムの検証

宇宙線研究室 奥野智行

Abstract With *Chandra* observations of nonthermal X-rays from RX J1713.7–3946 and *Tycho*'s SNR, we find evidence of *B*-field amplification and shock deceleration. Furthermore, we develop SOI pixel sensors for a future X-ray astronomy mission, obtaining superb time resolution of ~100 ns and demonstrating a system of the stacked sensors.

© 2019 Department of Physics, Kyoto University

超新星残骸 (SNR)での宇宙線の粒子加速を研究する上で、若い SNR に見られる非熱的 X 線放射は被加速粒子の分布と周辺磁場 (B-field)を同時に反映する良いプローブである。本論文では、非熱的 X 線放射の高角度分解能観測をキーワードに、以下 2 つのアプローチで研究を行った。

1. Chandra 衛星による若い超新星残骸の非熱的 X 線放射の高角度分解能観測

SNR RX J1713.7-3946 について、スペクトルの硬さ(光子指数)の空間分布を調べた。南東部は外側 ほど光子指数が小さいというありふれた分布を持つ。一方、南西部では外側のフィラメント状放射の光 子指数が比較的大きく、内側の明るい放射周辺の光子指数が小さいという特異な分布を得た。星間ガス (ISM)分布との相関を鑑み[1]、前者は衝撃波の減速、後者は磁場乱流によるものと解釈できる[2]。

Tycho's SNR の西側では近年、特徴的な縞状放射が発見され、その成因は未だに不明である。本論文では複数年の画像とスペクトルの解析を行い、縞状放射の一部で強度と光子指数の数年単位の変動を初めて示した。この変動は数 100 μG の増幅磁場が粒子加速やシンクロトロン冷却を促進したものと解釈できる[3]。また、順行衝撃波の固有運動の測定から、衝撃波の減速を初めて観測的に示した。さらに、RX J1713.7-3946 と同様に *Tycho*'s SNR についても濃い ISM が付随していると考えられており[4]、磁場増幅や減速を示唆する領域が ISM 分布と空間的に良い相関を示すことを明らかにした (Fig. 1)。

2. 次世代広帯域 X 線撮像分光衛星 FORCE 搭載に向けた SOI ピクセル検出器の開発

2020年代後半に打ち上げを目指すFORCE衛星は、1-80 keVの広帯域X線の撮像分光を15秒角以下の高 角度分解能で実現する。我々は衛星搭載に向け、Silicon-On-Insulator (SOI) 技術を用いたピクセル検出器 "XRPIX"を開発してきた[5]。その最大の特徴は高い撮像分光能力に加え、セルフトリガー機能により優 れた時間分解能を持つことである。本論文では、射出タイミングが制御できるレーザーを用いてトリガ ー信号の遅延と揺らぎ (ジッター)の評価を行った。トリガー閾値や信号電荷量を変えて検証を行い、 その範囲内で、100 ns-10 µsの遅延と数10 ns-数 µsのジッターを達成することを確かめた。また、衛星 搭載システムのプロトタイプとして多層化システムを開発し、2層同時動作に初めて成功した (Fig. 2)。









Fig. 2. *Left*: Experimental setup of the system of the stacked sensors. *Right*: X-ray spectra of an ²⁴¹Am radioisotope obtained with the stacked XRPIX5b.

References

[1] Sano, H., et al. 2015, ApJ, 799, 175. [2] Okuno, T., et al. 2018, PASJ, 70, 77. [3] Okuno, T., et al. in prep.
[4] Lee, J.-J., et al. 2004, ApJL, 605, L113. [5] Tsuru, T. G., et al. 2018, SPIE, 10709, 11.

MeV ガンマ線天体観測実証試験 SMILE-2+に向けた 気球システムの開発と上空における動作

宇宙線研究室 小野坂健

Abstract We are developing an electron tracking Compton camera (ETCC) to observe the celestial objects in MeV region. For the confirmation of the imaging ability of ETCC, I constructed the attitude measurement instruments and arranged the thermal condition of the system loaded on the balloon. The system worked successfully.

© 2019 Department of Physics, Kyoto University

銀河系における電子・陽電子対消滅線(0.511 MeV)の起源は未だ明らかでなく、その解明には対消滅 線分布の観測が重要であると考えられている[1]。従来の MeV ガンマ線検出器では入射ガンマ線の到来 方向を統計的に推測することしかできないため雑音と信号の区別ができず、対消滅線分布を議論する のに十分な精度での観測ができなかった。我々が開発している電子飛跡検出型コンプトンカメラ (ETCC)はコンプトン散乱における反跳電子の飛跡を測定することで入射ガンマ線の到来方向を他波長 の望遠鏡と同様に点像分布関数(PSF)で決定可能であり、確実な雑音除去を実現する。

2018 年 4 月に豪州アリススプリングスにおいて行った ETCC の天体撮像能力実証のための気球実験で は高度 38.5 km 以上で観測器が 30 時間以上動作することが必要であり、システムの消費電力 214 Wを 供給可能な電池容量が求められた。しかし、上空の-23℃環境下で電池は温度低下に伴い容量が減少し てしまう。必要高度からシステムの重量は 500 kg 以下に制限されるため電池を余分に搭載できず、そ のためヒーター搭載も消費電力の観点から不可能であった。そこで軽い断熱材を用いて観測器の保温 を図った。夜間上空での観測器の温度は消費電力と地球放射によって決定される。そこで地球放射を 過去のデータから 280 W・m⁻² ± 29.9 [RMS]と見積もり、観測器内部が~0℃を下回らないように熱設 計し、熱環境試験で評価を行った。さらに今回の観測でかに星雲を優位度 5 σ 以上で検出するための上 空での要求姿勢決定精度は~1° であった。姿勢系センサーとして GPS コンパス、傾斜計、磁場センサ ーを搭載し、それらの性能試験の結果それぞれの精度は~0.5°, ~0.2°, ~0.7° [RMS]であった。 さらに冗長系として大阪大学の莊司氏らが開発した GPS ロガー[2,3]を搭載した。

放球は 2018 年 4 月 7 日 6 時 24 分(現地時刻)に行われ、26 時間の水平浮遊を実現し、予定通りの観 測を行う事に成功した。観測器内部の温度は熱設計で意図した通り~0℃以上を保った(Fig. 1)。観測 器搭載の姿勢系センサーは期待されていた動作をしなかったが、可能な補正を行うことで GPS ロガーと 同様の結果となり、GPS ロガーの動作が正常であると判明したため、観測機の姿勢としては GPS ロガー で測定したデータ(Fig. 2)を採用することとした。



by the onboard sensors during the flight.



by the GPS logger during the flight.

- [1] N. Prantzos et al., Reviews of Modern Physics 83, 1001-1056 (2010).
- [2] 莊司泰弘 飯嶋一征, 宇宙科学技術連合講演会, 3J15, 2017 年 10 月
- [3] 莊司泰弘 飯嶋一征, 大気球シンポジウム, isas17-sbs-007, 2017 年 11 月

密度汎関数理論に基づく 時間反転反対称な拘束を用いた奇核の記述

原子核理論研究室 加須屋春樹

Abstract I propose a method to describe odd-mass nuclei in a similar way to even ones using a time-odd constraint in a framework of density functional theory. The effects of nuclear deformation, superfluidity, and time-reversal symmetry breaking on the halo structure in ³⁷Mg are investigated with this method. © 2019 Department of Physics, Kyoto University

不安定核ビームを用いた実験技術の進展により、陽子数と中性子数を自由にコントロールして原子核 をデザインすることが可能となり、原子核物理学の研究対象は天然に存在する250種ほどの安定核から、 原子核の存在限界の内側全域を満たす約1万の核種へと劇的に広がりつつある。それに伴い、より広範 な核種を系統的に記述できる理論が求められている。

原子核の変形や核子対の凝縮による超流動性は閉殻から離れた核で見られる多体相関の例として安 定核の研究からその重要性が見出されたが、研究対象の広がりに伴いそれらが不安定核においてどのよ うな構造をもたらすかが注目されている。特にドリップライン近傍の弱束縛核に対しては、多体相関の 効果によって束縛か非束縛かが決まるという意味で、重要な意味を持つ。また原子核の超流動性は陽子 数・中性子数が共に偶数の核(偶々核)と陽子数ないし中性子数が奇数の核(奇核・奇々核)との間に決定的 な違いを生む。偶々核の基底状態のスピン・パリティは例外なく 0+であり時間反転対称性をもつが、奇 核・奇々核の基底状態は一般に有限のスピンをもち内部座標系において時間反転対称性を破る。したが って安定核から不安定核までを含む偶々核・奇核・奇々核の系統的な記述のためには、原子核の変形、 超流動性、そして時間反転対称性の破れを同時に扱うことが不可欠である。

密度汎関数理論は基底状態にある量子多体系を密度を基本自由度として記述するアプローチであり、 原子核物理の分野では、全ての原子核に普遍的なエネルギー密度汎関数の存在を保証する系統性と、古 くから用いられてきた平均場の計算手法に適合する実用性とを併せ持つ理論として発展してきた。計算 コストは核子数には依らず、そのため広い領域の原子核に適用可能である。密度汎関数理論に基づき変 形・超流動性・時間反転対称性の破れを同時に扱うことのできる枠組みは、原子核物理では Hartree-Fock-Bogoliubov(HFB)法として知られる。しかしながらHFB法による従来の奇核の記述は、ま ず時間反転対称な系における基底状態として偶々核を作り、できた偶々核の中の1つの核子対を人為的 に壊して時間反転対称性を破ることにより偶々核からの励起状態として奇核を得る、という偶々核のそ れと比べて非常に複雑なものであった[1]。偶々核の性質は密度汎関数理論を用いて詳しく調べられて いる[2]一方、核図表の3/4を占める奇核・奇々核への密度汎関数理論の適用例が非常に少ないことは、 この複雑さのためであると考えられる。

我々はHFB法において時間反転対称性を破るような適切な拘束条件の下での基底状態として奇核を記述する新しい手法を構築した。奇核を偶々核と同等の手順で記述可能となったことで、既存の偶々核の研究手法を奇核へと拡張することが容易となり、今後の奇核の研究の発展への貢献が期待される。また、近年ドリップライン近傍の奇核³⁷Mgにおいて、原子核が変形しつつ低密度の中性子が大きく広がる、変形ハローと呼ばれる新奇な構造が理研 RIBFにおいて発見された[3]。原子核の変形・超流動性・時間反転対称性の破れの全てが共存することが予想される³⁷Mgの構造を理解することは挑戦的な課題である。我々は上記の方法を用いて³⁷Mgに対し座標空間における変形 HFB 計算を行い、³⁷Mgにおいて変形がハローの形成に不可欠であること、超流動性と時間反転対称性の破れがハロー構造を発達させることを明らかにした。

References

[1] N. Shunck et al., Phys. Rev. C 81, 024316 (2010).

- [2] J. Erler et al., Nature 486, 509 (2012).
- [3] M. Takechi et al., Phys. Rev. C 90, 061305 (2014).

ー般相対論の拡張の有効理論における コンパクト天体

基礎物理学研究所 金沢 瞭

Abstract We study spherically symmetric static solutions of the effective field theory extension of General Relativity composed of the Einstein-Hilbert term and operators quartic in curvature tensor. We assume the polytropic equation of state for simplicity to solve the symtem up first order in corrections to General Relativity and demonstrate how these higher curvature terms affect the mass of the star. © 2019 Department of Physics, Kyoto University

重力波の観測により一般相対論は高い精度で成立していることが明らかになったが、一方で一般相対 論の予言する標準的な宇宙論モデルは未だ観測されていないダークマター、ダークエネルギーを必要と するなど完全に理解できてはいない。また一般相対論は量子論と整合しないことも分かっている。これ らを説明する1つの方法として重力理論を修正することが試みられており、様々な理論が提唱されてい る。中でも有効理論による一般相対論の拡張は、重力が一般相対論から幾ら修正されるべきかを観測的 に制限する上で有益な枠組みとなっている。有効理論の立場では重力の作用を予め最も一般的な形で与 えておき、その中に現れる結合定数に対して実験及び観測から制限を行う。一方で、これらの結合定数 は個々の修正重力理論の基本定数から計算することができる。このため、先に有効理論に対して制限を 付けておくことで、その有効理論で記述できるすべての修正理論に対してまとめて制限を付けることが できる。同様のアプローチとして広く用いられているものとして PPN (Parametrized Post Newtonian)があ る。PPN の枠組みでは、重力が弱く物質の運動も非相対論的な場合の計量を、パラメータを用いて一般 的に与え、そのパラメータに対して観測的に制限がつけられている。

ここでは、Endlich らの提唱した曲率テンソルの4次の項からなる有効理論に注目した[1]。この有効 理論は背景時空が真空の下では最も一般的なものである。[1]では Newton ポテンシャルと重力波の放出 の四重極公式への高次の項からの補正が計算されている。この理論は曲率についての高次の項を含むた め、曲率の大きな状況でなければこの補正は大きくならない。この有効理論によって強重力場での重力 の一般相対論からのずれを調べることは、PPN と相補的な役割を果たすと期待される。例えば、Cardoso らは[2]によって、この有効理論において球対称ブラックホール解がどう変わるのかが調べられている。 本研究は、このような曲率についての高次の項を含む重力理論をコンパクト天体の観測から制限する ことを目的としたものである。観測される中性子星をよく説明する様々な星のモデルに対して計算を行 うことで、中性子星の観測によって曲率の高次の項に対する制限を付けることが期待される。この修士 論文では、[1]の有効理論において球対称で静的な完全流体からなる星を考え、運動方程式を摂動的に解 くことで曲率の高次の項からの補正の満たす関係式を求めた。さらに簡単のため流体の状態方程式が単 純なポリトロープの関係を満たす場合について積分を行うことで、この有効理論における星の重力質量 の変化を定量的に評価した。

References

S. Endlich *et al.*, JHEP **09**, 122 (2017).
 V. Cardoso *et al.*, Phys. Rev. Lett. **121**, 251105 (2018).

CMB 偏光観測実験 GroundBIRD で用いる真空窓の開発研究

高エネルギー物理学研究室 小峯順太

Abstract GroundBIRD, a CMB polarization telescope, uses a Polyethylene window for vacuum sealing in an optical path. I develop its anti-reflection coating. Achieved transmittance is 97% in two frequency bands at 145 GHz and 220 GHz. This is 7 % improvement in the transmittance compared to the case without the anti-reflection coating.

© 2019 Department of Physics, Kyoto University

インフレーション理論は従来のビックバンモデルでは解決できない様々な課題を解決する。インフレ ーションは原始重力波の存在を予言し、原始重力波は宇宙マイクロ波背景放射(CMB)の数度角以上の 領域に Bモードと呼ばれる空間非対称の偏光パターンを作る。つまり、大角度スケールの Bモード観測 はインフレーション理論の検証になる。

GroundBIRD は大角度スケールの観測に特化した望遠鏡である。2019 年春からスペイン領テネリフェ 島で観測開始を予定している。この望遠鏡は1分間に 20 回転することで大気が変動する前に広い領域 の観測を行う。望遠鏡の焦点面に搭載した検出器は145±15 GHz と 220±15 GHz の 2 つの帯域に感度を 持ち、250 mK 以下で使用する。極低温の実現に真空断熱を用いるため、検出器は真空容器で覆われてい る。真空容器で覆われた検出器に CMB を導くため、大気圧に押されても割れずに真空を維持しつつ、上 記帯域で透過な超高分子量ポリエチレンを「真空窓」として用いる。

本研究では GroundBIRD の観測帯域で高い透過率を実現する真空窓の開発を行った。屈折率 1.53 の超 高分子量ポリエチレンに反射を防止する膜を貼り付けて、表面での反射を抑えて高透過率を実現する。 超高分子量ポリエチレンは上記帯域で 8%の反射率と 2%程度の吸収率をもつ。反射率と吸収率を同程度 にすることを目指し、透過率への要求値は両帯域で平均 95 %以上とした。反射防止膜は超高分子量ポ リエチレンと空気の中間である 1.2 程度の屈折率をもつ素材が望ましい。また、貼り付けには低密度ポ リエチレンを加熱によって溶かし、糊材として膜を接着する。これらの素材は安価かつ短時間の製作を 目指し、国内の流通品を用いる。

反射防止膜と低密度ポリエチレン、超高分子量ポリエチレンからなる系の透過率シミュレーションを 行い、目標透過率を達成できる素材を選定した。その結果、反射防止膜に ADVANTEC 東洋株式会社の PF050 と呼ばれる多孔質 PTFE を用い、低密度ポリエチレンにアラム株式会社の NSP-0.3 を用いれば要求を満 たすことがわかった。超高分子量ポリエチレンの融点未満かつ低密度ポリエチレンの融点以上の温度で 加熱して貼り付けを行った。1 枚の真空窓を作るためにかかる時間は 10 時間、単価はおよそ 5 万円で あった。加熱による膜の貼り付けに成功したが、新たな課題として、融点を下回っているにも関わらず 超高分子量ポリエチレンが変形することがわかった。変形によって 5%厚さが増える。厚さの増加によっ て透過率性能と強度性能の変化を評価することが新たな課題として挙げられ、その評価も行った。

超高分子量ポリエチレンの厚さの変化と透過率の関係を再度シミュレーションしたところ、透過率に 影響しないことがわかった。そこで、同一の方法で3枚の反射防止膜付きの真空窓を製作し、透過率を 測定した。3枚は同じ場所の透過率を測った。また、3枚の内1枚について、異なる場所の透過率を測 った。測定の結果、3枚の真空窓の同じ場所での透過率は、145 GHz 帯で平均97.3±0.1 %、220 GHz 帯 で平均97.1±0.2 %を得た。また、場所ごとの透過率の違いについては1.5 %程度であり、要求値95 % を上回った。次に、真空引きの際に負荷がかかっても破損しないことを確認するため、真空窓を望遠鏡 に取り付けて真空引きした。24時間の試験を行ったが、真空窓は破損せず真空を維持することを確認し た。

以上、GroundBIRD で用いる真空窓の作製手法を確立した。これは透過率への要求と大気圧に耐える強度要求を満たすだけでなく、安価かつ短時間での製作を実現する。

次期長期気球実験 SMILE-3 に向けた MPPC シンチレーションカメラの開発

宇宙線研究室 齋藤要

Abstract For the next balloon experiment SMILE-3, we are improving the energy resolution of gamma-rays of an electron-tracking Compton camera. Then we adopt an MPPC instead of a PMT as a photon readout. I have developed new MPPC readout circuit and evaluated the performance of the MPPC scintillation camera.

© 2019 Department of Physics, Kyoto University

MeV 領域で特徴的なガンマ線として核ガンマ線がある。例えば ²⁵Mg の陽子捕獲反応によって生成され る ²⁶A1 は、²⁶A1 → ²⁶Mg* + e⁺という崩壊過程で 1.809 MeV のガンマ線を放出する。この崩壊の半減期は 10⁶ 年程度と、銀河内の物質拡散のタイムスケールと同程度であるため、²⁶A1 の 1.809 MeV ガンマ線放射 は物質循環のトレーサーとなることが期待されている。しかしこの全天マップとしては COMPTEL や *INTEGRAL* 衛星による粗いイメージが得られているのみであり [1,2]、詳細な議論に至ってはいない。MeV 領域はコンプトン散乱優位であるため観測そのものも難しく、ガンマ線の到来方向の決定が困難で、か つ膨大なバックグラウンドが存在するため、他の領域と比べて観測が遅れている。そこで我々は優れた イメージングの能力を持つ電子飛跡検出型コンプトンカメラ (electron-tracking Compton camera, ETCC)の開発を進めている[3]。

現行の ETCC には、散乱ガンマ線検出部に GSO シンチレータと PMT (H8500、浜松ホトニクス)を組み合 わせたシンチレーションカメラを使用している。到来ガンマ線の再構成には散乱ガンマ線のエネルギー を用いるため、ETCC の角度分解能向上にはシンチレーションカメラのエネルギー分解能向上が必要とな る。このため GSO の発光波長 440 nm に対して PMT の約 2 倍の感度を持つ MPPC (Multi-Pixel Photon Counter) アレイ (S13361-3050NE-08、浜松ホトニクス)を採用した MPPC シンチレーションカメラの開発 を行った。MPPC は PMT と異なり電流を多く流す必要がないため省電力となることも期待できる。ETCC のデータ収集方法として、現在はシンチレーションカメラによるコモンスタート方式をとっているが、 SMILE-3 では不感時間削減のためコモンストップ方式によってデータ取得することを採用する[4]。コモ ンストップ方式へ対応するため現行のピークホールド ADC からサンプリング ADC へ置き換え、これによ りエネルギー分解能 7.6%(662 keV, FWHM)、時間分解能 48.9 ns(FWHM)を達成した。FPGA による読み出 しを行う基板を開発し、新システムでの動作試験と性能評価を行った。本論文では、その結果について 報告する。



Fig. 1. MPPC scintillation camera

- [1] S. Plüschke, et al., ESA SP, 459, 55 (2001).
- [2] L. Bouchet, et al., ApJ, 801, 142 (2015).
- [3] T. Tanimori, et al., ApJ, 810, 28 (2015)
- [4] 吉川慶 修士論文 京都大学 (2017).



Fig. 2. ¹³⁷Cs energy spectrum

カイラル低エネルギー定理を満たす Dπ散乱と D₀共鳴

原子核理論研究室 杉浦巧

Abstract We investigate the nature of D_0 resonance in the $D\pi$ scattering amplitude which satisfies the chiral low-energy theorem. We show that the D_0 can be successfully described as a superposition of the $D\pi$ molecule and the chiral partner of the ground state D meson. © 2019 Department of Physics, Kyoto University

近年、構成子クォーク模型では説明することのできない性質を持ったエキゾチックハドロンという状態が実験的にも理論的にも注目を集めている[1]。詳細な実験データが得られるにつれて、軽いセクターでは Λ (1405)、a₀(980)、f₀(980)、重いセクターでは XYZ 粒子などがエキゾチックハドロンの候補として議論されてきており、ハドロンの内部構造を理解するための研究はますます盛んになっている。エキゾチックハドロンの内部構造に対する理論的な提案は様々なものがあり、マルチクォーク、ハドロン分子、グルーオンハイブリッドなどが議論されている。この中のハドロン分子とは、ハドロン間の相互作用によって、複数のハドロンがその性質を保ったまま弱く束縛されている状態のことであり、例えばX(3872)はDDbar*の分子状態の候補になっている。X(3872)のみではなく多種多様なハドロンの内部構造を解明していくにあたって、ハドロン分子描像を取り込んで重いセクターの粒子に対する理解を深めることは非常に重要であると考えられる。

本研究では、チャームメソンのひとつである D₀に注目をする。チャームメソンは c クォークと u, d ク オークで構成されているメソンであり、軽いクォークと重いクォークを含むことから、カイラル対称性 とヘビークォークスピン対称性と呼ばれる QCD の対称性を反映したスペクトルを持つ。また D₀は量子数 J^P=0⁺であり、量子数 J^P=0⁻である基底状態の D と、カイラル対称性の自発的破れによって縮退の解けた パリティ 2 重項であるカイラルパートナーと呼ばれる状態であるとみなすことができる。一方で、D₀は D と π に崩壊することも知られており、D π 分子状態の成分も含んでいる粒子であると考えられる。

本修士論文では、まずカイラル対称性、Weinberg-Tomozawa 定理、ヘビークォークスピン対称性について説明をする。Weinberg-Tomozawa 定理[2,3]とは、 π とハドロンの散乱振幅がパイオン崩壊定数 f_{\pi}と対称性から決まる定数で決定されるという低エネルギー定理であり、カイラル対称性から得られる重要な結論のひとつである。次にカイラル対称性とヘビークォークスピン対称性の下で不変になるようにDメソンの有効ラグランジアンを、カイラル線形表現を用いた場合とカイラル非線形表現を用いた場合で構成する[4,5]。それら2つの有効ラグランジアンで tree レベルのD^{\pi}散乱振幅を計算した後に、求めた散乱振幅が Weinberg-Tomozawa 定理を満たしていることを確認する。特に線形表現を用いた場合には s, t, u の3つのチャンネルからの寄与があることから、それらすべてを足し合わせたときのみ低エネルギー定理を満たすことを示す。さらに LS 方程式を用いた非摂動的な散乱振幅の計算方法について述べて、D₀の質量と崩壊幅をD^π散乱の散乱振幅の極の位置から求める。その結果、D₀の質量と崩壊幅は、純粋なカイラルパートナー状態、純粋なD^π分子状態ではなく、2 つの状態の重ね合わせとした場合においてのみ実験値を再現されることを示す。

References

[1] F. K. Guo, C. Hanhart, U. Meissner, Q. Wang, Q. Zhao, B. S. Zou, Rev. Mod. Phys. 90, 015004 (2018)

- [2] S. Weinberg, Phys. Rev. Lett. 17, 616-621 (1966)
- [3] Y. Tomozawa, Nuovo Cim. A46, 707-717 (1966)
- [4] M.A.Nowak, M.Rho, I.Zahed: Phys. Rev. D48 4370 (1993)
- [5] W. Bardeen, C. T. Hill, Phys. Rev. D49 409 (1994)

ゲージ対称性を持つ閉じた超弦の場の理論の構築

基礎物理学研究所 素粒子論グループ 杉本達哉

Abstract We construct gauge invariant actions for heterotic and type II string field theory including all the sectors. We give a way to construct an L-infinity structure that can define the action using the integrated picture changing operator.

© 2019 Department of Physics, Kyoto University

無矛盾な量子重力理論の構築は現代の素粒子論における主要な問題であり、その最有力候補として超 弦理論が研究されてきた。超弦理論の伝統的な定式化は、与えられた背景の上で第一量子化された弦の 運動を調べることによって行う。この方法では重力理論の著しい性質である背景独立性が失われており、 異なる背景間の遷移といった非摂動効果の解析が困難である。これを解決する1つの方法は、第二量子 化された弦の理論、弦の場の理論(SFT)による定式化を行うことである。中でも標的空間における共 変性を持つ SFT は、共変的な SFT と呼ばれる。この理論は BRST 量子化された世界面の理論を用いて記 述され、ゲージ対称性を持つ作用により定義される。この方法では通常の場の理論と同様に、相互作用 の構造はゲージ対称性により決定されると考えられ、ゲージ原理に基づいて理論の構築ができる。

共変的な定式化において、ボゾン弦の場の理論は 90 年代までに構築された[1][2]が、超弦の場の理 論 (SSFT)の構築は近年まで未解決であった。最初の問題は、picture changing operator (PCO)同士 の接触による発散にあった。超弦の散乱振幅を考える際、世界面に PCO を挿入する必要がある様に、一 般に SSFT の作用にも PCO を使用する必要がある。その際、散乱振幅に発散を生じさせない方法が必要 であった。そこで、発散を生む PCO を使用しない Wess-Zumino-Witten (WZW)型、積分された PCO を使 用する A ∞ /L ∞ 型、接触しない様に PCO の位置を与える Sen 型という、3 つの方法が提案された。

Ramond セクターを組み込むことも困難であったが、近年になって Kunitomo-Okawa [3]と Sen [4]によ り、それぞれ異なる解法が与えられた。Kunitomo-Okawa は、fermionic modulus の積分により現れる PCO を用いて Ramond セクターの弦の場を制限することにより、WZW 型の開いた超弦の作用を構築した。この 方法は物理的自由度を明白にするが、II 型超弦の Ramond-Ramond セクターに適用できないという困難が ある。一方 Sen は、それぞれのセクターの弦の場を 2 種類使用することで、閉じた超弦の場の理論を構 築した。この方法は全ての超弦理論に適用できるが、非物理的な自由場が現れる。これらの方法は直ち に A∞/L∞型の開いた超弦に適用された[5][6]が、WZW 型及び A∞/L∞型の閉じた超弦に適用する方法は 不明であった。

本修士論文では、ヘテロ弦・II 型超弦の場の理論の作用を、A∞/L∞型定式化によって構築した我々の仕事[7]の解説を行う。まず、構成の際に前提とする事実をまとめ、既知のA∞/L∞構造を持つSFT について解説する。その後、我々が与えた A∞/L∞型の超弦の場の理論を構成する新しい方法について解説し、それが開いた超弦に対し Erler-Okawa-Takezaki のものと一致すること、ヘテロ弦・II 型超弦にも適用可能であることを見る。

- [1] E. Witten, Nucl. Phys. B 268, 253 (1986).
- [2] B. Zwiebach, Nucl. Phys. B 390, 33 (1993).
- [3] H. Kunitomo and Y. Okawa, PTEP 2016, 023B01 (2016).
- [4] A. Sen, JHEP 1602, 087 (2016).
- [5] S. Konopka and I. Sachs, JHEP 1604, 164 (2016).
- [6] T. Erler, Y. Okawa and T. Takezaki, JHEP 1608, 012 (2016).
- [7] H. Kunitomo and T. Sugimoto, in preparation.

電子対測定に用いるハドロンブラインド検出器のための トリガー用信号読み出しシステムの開発

原子核・ハドロン物理学研究室 鈴木 一輝

Abstract A Hadron Blind Detector (HBD) is used to identify electron positron pairs in the J-PARC E16 experiment. In a newly developing system, the readout signal from the last GEM foil of HBD is used for the trigger. Such system can reduce the number of trigger channels, however the signal-to-noise ratio should be carefully examined. In this thesis, the development of this system is described. © 2019 Department of Physics, Kyoto University

J-PARC E16 実験では、原子核中におけるベクター中間子の質量スペクトルを測定する。有限密度下で はハドロンの性質が変化することが予言されており、この影響が原子核中の質量スペクトルの変化とし て現れることが期待される。ベクター中間子は、電子・陽電子対に崩壊できるが、このレプトン対は終 状態相互作用の影響が小さいため、質量スペクトル変化を探る良いプローブとなる。先行実験である KEK-PS E325 実験は、ベクター中間子の質量スペクトルを詳細に測定し、特にφ中間子の質量変化を初 めて示唆した[1]。一方、有限密度下における質量変化値の導出には、質量スペクトルの運動量依存性 (分散関係)が重要であると指摘されている。E16 実験では、KEK-PS E325 実験の 100 倍の統計量を達 成することで、原子核密度中の分散関係を初めて測定し、ベクター中間子の質量変化の実証を目指す。 ベクター中間子からの電子・陽電子崩壊対を測定する際の大きな障壁となるのが、π中間子の混入で ある。π中間子は電子の100倍程度生成されるため、高い電子識別能力が必要となる。E16実験では、 電子識別検出器としてハドロンブラインド検出器(HBD)を使用する。HBDは CF4(屈折率 1.0006)を輻 射体としたガスチェレンコフ検出器であり、電子に対してのみチェレンコフ光を発する。通常光量の少 ないチェレンコフ過程を用いながら、下段に Gas Electron Multiplier (GEM) による信号増幅部を設け て感度を高めていることが大きな特徴である。通常検出器の信号は最下段のパッドから読み出される。 しかし E16 実験では、Fig.1 のようにトリガー用信号については GEM フォイルから読み出すことを新た に試みる。これにより回路体積を削減し、検出器の大立体角化、ひいては高統計の達成を実現する。

本研究では、この HBD のトリガー用信号読み出しシステムの開発を行った。GEM フォイルからトリガー用信号を読み出すと、検出器の静電容量(検出器容量)が一般的な容量である数十 pF に比べ数 nF と 非常に大きな値になり、信号対雑音比(S/N)が悪化する。検出器容量削減のためには、読み出す GEM の 面積を縮小すれば良いが、一方で信号数が増加し回路体積が肥大する。従って、読み出し可能な検出器 容量の上限値を確定することが重要である。そのために、大検出器容量に対応した回路である Amplifier-Shaper-Discriminator (ASD)を作製した(Fig. 2)。ASD は信号の増幅、整形を行い、大き な検出器容量でも高い S/N で信号を読み出

すことを可能にする。

本論文では ASD の設計、製作について述 べ、その後、一連の HBD のトリガー読み出し システムの性能評価の結果を述べる。性能評 価は、テスト信号を用いた方法と、ELPH の陽 電子ビームを用いた方法の二通りで行った。 その結果、検出器容量 1.8 nF までトリガー 読み出しシステムが動作可能であることを 示した。また、さらなる大きな検出器容量に 対応するための今後の方針を最後に述べる。





Fig. 1. A readout system of HBD.

Fig. 2. Prototype ASD board developed for the J-PARC E16.

References

[1] R. Muto et al., Phys. Rev. Lett. 98, 042501 (2007)..

超小型ECRイオン源開発のための リアルタイム質量分析器の開発

ビーム物理学研究室 竹内佑甫

Abstract We developed a mass spectrometry system with multiple collector electrodes for simultaneous detections of multiple ion species from ion sources in order to analyze time variation of the ratios of ion species in a pulse. This system enabled us to improve the optimization efficiency in developing compact ECR ion sources.

© 2019 Department of Physics, Kyoto University

中性子は光子と同様電荷を持たないが大きな質量を持ち、また物質中の透過力が大きいなど、素粒子物 理学などの基礎物理研究のみだけでなく、産業、医療など多岐にわたって重要なプローブである。日本 国内にも Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC) や京都大学原子炉実験所をはじめと した大規模中性子実験施設が存在しており、高い中性子強度を活かした実験を行うことが可能となって いるが、これらは共同利用施設であり、利用の申請に時間が掛かる、気軽にセットアップを変更するこ とが出来ない等の欠点がある。そのため、何度も試行を繰り返す必要があるような初期段階の研究、学 生教育、検出器のテストなどには適していない。小型中性子源では小回りが効くが施設数はまだ多くな い。基礎物理の研究対象としてのみならず、今後更なる拡がりが見込まれる中性子科学分野において、 汎用性のある中小規模の中性子源は重要性を増してきている。当研究室では、大学研究室レベルで運用 可能な汎用の小型加速器駆動中性子源の実現をめざして⁷Li(p、n)⁷Be 反応などの低エネルギー核反応を 用いた中性子源を開発中である。そこでまず1次ビームとしての陽子ビームを引き出すための小型大電 流 ECR H⁺ イオン源の開発を進めている[1]。プラズマ電子温度の高い ECR H⁺ イオン源でも、H⁺ だけで なく、分子状イオン(H2*やH3*)も同時に生成される。本イオン源は陽子線形加速器への利用を想定して いるため、イオン源から引き出されるビームの H⁺ 比率は可能な限り高いことが望まれる。このため、 引き出しビーム中のイオン種の割合を分析しながら、H⁺の割合が増加するように多くのパラメータ(磁 場分布、ガス圧、マイクロ波入力など)を最適化する必要がある。これまで、イオン源から引き出され たビーム中のイオン種の分析は、磁場や電場を掃引する分析磁石または Wien Filter とファラデーカッ プの組み合わせたものによっていたが、時間がかかり非効率であった。そこで今回、永久磁石と多数の コレクター電極を組み合わせた質量分析器(Fig.1)を製作、テストベンチを構築し、イオン源試作4号 機において種々のパラメータを変更して、測定を行った。この質量分析器の特徴は、引き出しビーム中 の複数種のイオンを同時かつほぼリアルタイムに分析可能(Fig. 2)という点である。これにより磁場分 布、ガス圧、マイクロ波入力など多数のパラメータが複雑に関わって決まる、イオン源で生成されるビ ームの性質を調べる際の効率を格段に向上することに成功している。現時点で、イオン源の引き出し電

圧 25 kV、パルス幅2 ms で H^{*} のピーク電流値 1.5 mA を確認 できている。入力する RF パワ ーを大きくすることで引き出 しビーム電流の値が向上する 傾向も見られ、入力パワーの向 上等により更なるイオン源の 性能向上が見込まれる。このよ うに、今回開発したリアルタイ ム質量分析器が今後の開発研 究において強力なツールとな ることが期待される。



Fig. 1 Schematic drawing of the mass spectrometer.

Fig. 2 A typical mass analysis result of the extracted beam.

References

[1] Y. Iwashita, H. Tongu, Y. Fuwa, and M. Ichikawa, Rev. Sci. Instrum. 87, 02A718 (2016).

γ線量子光学研究へ向けた時間―エネルギー 同時測定系の構築

核放射物理学研究室 田嶋 寬介

Abstract Toward gamma-ray optics measurement, we have developed a simultaneous timing and energy measurement system for gamma-rays from radioactive nuclides which have cascade decay schemes. This work makes it possible to acquire coincidence gamma-ray information from all detectors by choosing arbitrary time and energy windows. © 2019 Department of Physics, Kyoto University

放射性同位体から放出されるγ線は、メスバウアー効果などを利用した物性研究にも精力的に利用される一方で、γ線放射・吸収の基礎過程に注目した研究も行われてきた。γ線は可視光と比較して、高空間分解能、光学的厚みのある物体に対する高い透過性などの性質を有しており、量子情報や通信といった分野での展開も期待されている。特にメスバウアー効果によって吸収・放出される無反跳γ線においては ΔE/E~10⁻¹³ にも及ぶ高いエネルギー分解能を有する場合があることから、その利用は極めて有望視されており、2014 年にはメスバウアー線源でのカスケード崩壊を利用したコヒーレントなパルス波形制御が可能であることが報告されている[1]。このようなメスバウアーγ線による量子情報研究を展開していくため、その第一段階としてパルス波形制御のフィールドとなる原子核のカスケード崩壊を利用した時間スペクトル測定系の高度化研究を行った。

カスケード崩壊するγ線源から放出される相関したγ線を用いて崩壊過程の時間スペクトルを測定 する場合、通常は検出器の信号に対して、SCA等の波高弁別可能なハードウェアを用いたコインシデン スにより、目的とするエネルギーのγ線の時刻を取り出す。検出器自体には相関するγ線が観測される にもかかわらず、このようなハードウェア的手法では測定前に設定しておいたエネルギー範囲のγ線し か計数できない。そのため、試料に対する外部磁場の印加やエネルギー変調をかけた場合の応答を測定 する際の自由度が大幅に低下する。この問題を解決するため、本研究では検出されたγ線に対してその エネルギーと検出された時刻とを共に記録しておき、測定後にソフトウェア的に時間スペクトルを再構 成できる手法の開発に取り組んだ。絶対時刻とエネルギーの情報を保存するシステムとして、波高に対 応した時間遅れの信号を出す ATC (Amplitude to Time Converter) [2]と、信号が来た絶対時刻を記録 できる高速 MCS (Multi-Channel Scaler)を組み合わせた回路系を開発した。さらに、保存データの 中からそれぞれの検出器で検出された任意のエネルギー、時刻の信号を選び出すソフトウェアを開発し、 エネルギースペクトルや相関のあるγ線のタイムスペクトルの測定を可能にした。このシステムを用い て¹⁸¹Taのカスケード崩壊過程を利用した第3励起準位の崩壊過程の時間スペクトル測定に成功した。



Fig.2. Amplitude to time converter (ATC).

- [1] F. Vagizov et al., Nature 508 (2014)80.
- [2] T. Masuda et al., Rev. Sci. Instrum. 88 (2017) 063105.

R F 同期型短パルスレーザーイオン源開発のための Rayleigh 散乱による低圧気体密度測定

ビーム物理学研究室 Deng Weichao

Abstract For developing short-pulse laser ion sources that generate bunched ion beams synchronized to RF phases, Rayleigh scattering was measured for the estimation of injected raw gas density at the laser interaction point through a pulsed gas valve. By improving the optics system, signals from photomultiplier tube was analyzed. © 2019 Department of Physics, Kyoto University

加速器は科学の発展に大きな貢献をしてきており、今後も大きな役割を果たすことが大いに期待され ている。加速器の小型化が進めば普及が進み、さらなる貢献や、産業、医療へも応用が広がる可能性が ある。イオン加速器ではイオン源が不可欠であるが、通常イオンはプラズマから引き出して生成する。 プラズマを気体の放電などにより生成する場合、中性ガスが高真空を必要とする加速器に直結する空間 に存在し、真空排気装置の適切な設計が重要となる。一方、数 MeV 以上のエネルギーの加速する加速 器は通常高周波加速を行うが、従来のイオン源の発生するビームはこの高周波周波数と比較するとほぼ 直流であるため、バンチングという操作が必要である。このため、加速 RF と同期した準 fs 極短パルス レーザーによる気体のプラズマ化を利用しイオンビーム生成時からバンチ構造をもったイオン源の開 発を進めている。[1][2] これまで、単バンチイオンの生成は確認されているが、その際の水素ガス密度 の時間変動構造の把握は今後の研究開発において一つの鍵となる。この計測を行うため、6W 青色半導体 CW レーザーを使用し、1mm 幅のガス噴出領域の照射から得た Rayleigh 散乱信号の検出を試みた。(Fig.1) 光学系の改良、迷光の抑制が重要であり、ガス噴出領域からの Rayleigh 散乱光の信号の性質について探 った。今後ガス密度変化の精密測定及びレーザーイオン源開発の推進になると期待される。



Fig. 1. Diagram of experiment setup.

References

[1]Yasuhiro Fuwa, "Design of Front End for RF Synchronized Short Pulse Laser Ion Source", NAPAC2016, WEPOA04 (2016).

[2]Eisuke Miyawaki, "RF Synchronized Laser Ion Source Using Ultra Short Pulse Laser", PASJ, TUP111 (2017).

1 重項マヨロン模型におけるアノマリー的効果について

物理学第二教室 素粒子論研究室 中脇稔貴

Abstract Singlet majoron model, which may have axionic effective coupling between a majoron and gluons, has some difficulties to work as axion model and solve strong CP problem. We pointed out these difficulties, and discussed whether that model is capable of setting strong CP angle to zero. © 2019 Department of Physics, Kyoto University

強い CP 問題は,素粒子標準模型の抱える問題点の一つである.これは標準模型のゲージ群のうち, カラーSU(3)の持つθ真空について, [0,2π)の範囲で任意の値を持ってよいそのθパラメータ(強い CP 角)が<10⁻⁹という制限を受けているというものである.このことは,強いCP角を0にセットする標準模 型を超えた機構があることの示唆であるとされ、複数の理論がその候補として提唱されている、中で も特に有力なものとして、アクシオン模型がある.

アクシオン模型は、標準模型のカラーSU(3)群と結合するフェルミオンにカイラルな U(1)対称性を持 たせ、かつそれを何らかのスカラー場の期待値によって破らせる模型であり、この時現れる擬南部

-Goldstone ボソン(アクシオン)は図1のアノマリー過程を通じて2 グルーオンとのCPを破る相互作用項を持つ.これは強いCP角を動 的な場に昇格させたことに対応し、この場はθ真空のエネルギー 密度に由来するポテンシャルによって自動的に期待値0をとって, それが見かけの強い CP 角として観測される. 但し、観測と矛盾し ないための"見えないアクシオン"模型は、標準模型に少なくとも

2つ以上の場を追加するものしか知られていない.

これに対し, Latosinski らが, ニュートリノ物理でしばしば言及 されるマヨロン模型がアクシオン模型と同様の機構を備えている可 能性を指摘している[1]. ここで用いられた 1 重項マヨロン模型は 標準模型にスカラー場を1つ加えただけの簡単なもので、 レプトン 数対称性の南部-Goldstone ボソンであるマヨロンが図2のような3

ループ過程を通じてアクシオンと 同様の2グルーオンとの結合を持 つ. 同時にこの過程が高次ループ を要することから、実効的なアク シオンとしての崩壊定数が小さく なり, 観測による制限も回避でき

る模型になっている.

グルーオン結合を与える過程は通 left-handed neutrinos.



Fig. 2. A typical process that connects majoron to 2 gluons. The broken line ところが、この模型でマヨロン- represents majoron, and the lepton loop includes mixing of right- and

常のアクシオン模型での対応する過程と多くの部分で相違し、結果アクシオン模型では保証されてい た Adler-Bardeen の定理との兼ね合いや対称性などが不明瞭になっている.従って1 重項マヨロン模型 が本当に強い CP 問題を解決するかははっきりとしていない. 今回我々は,1重項マヨロン模型がアクシ オン模型としてはたらく際のこれらの問題点を明確にし、直観的には強い CP 問題が解決できるように 見えることとの整合性を調べようと試みた.

References

[1] Adam Latosinski, Krzysztof A. Meissner, Hermann Nicolai, Nucl. Phys. B868 (2013) 596-626



Fig. 1. The 1-loop anomaly diagram in axion model. One with reversed fermion loop is assumed to be included. The broken line represents axion, and the solid one colored fermion.

レーザー加速プロトンによる ⁷Li(p,α)⁴He・¹⁹F(p,α)¹⁶O 反応 生成 α 粒子の CR-39 を用いた検出

レーザー物質科学研究室 西浦洋輔

Abstract Alpha particles produced by ${}^{7}\text{Li}(p,\alpha){}^{4}\text{He} \cdot {}^{19}\text{F}(p,\alpha){}^{16}\text{O}$ reactions with laser accelerated protons in LiF target have been successfully detected by CR-39 with etching in PEW(Potassium hydroxide-Ethanol-Water) solution and two-step etching in PEW and NaOH solution. © 2019 Department of Physics, Kyoto University

高強度レーザーを標的に照射すると標的はプラズマとなり電子、X線、電磁波、中性子などの放射線 が発生すると同時にプロトンを主としてイオンが加速される。近年、レーザー装置の高出力化によって 高エネルギーイオンの生成が可能となっており、それに伴いがん診断のポジトロン断層法に用いる短命 同位体の生成や中性子ラジオグラフィに用いる中性子生成など、レーザー加速イオンによる核反応の利 用も考えられている。これらの応用に向け、レーザーイオン加速を行う際に生じるプラズマ背景下での 核反応生成イオン(2次イオン)のエネルギーや数量の空間分布の測定手法が求められている。しかし 大量の電子線やX線、電磁波、プロトン等が存在するレーザープラズマ中で数の少ない2次イオンを検 出するのは困難である。

このようなレーザープラズマ背景下でイオンを選択的に検出可能な検出器として CR-39 がある。 CR-39 はイオン以外の放射線に対し非常に低感度でイオン単体を検出できる点から、宇宙線計測や放射 線科学分野などで広く用いられている。CR-39 にイオンが通過すると通過経路に沿って放射線損傷が生 じ、この損傷部分を強アルカリ水溶液で溶融(エッチング)することで入射イオンの飛跡に沿って穴(エ ッチピット)を形成することができる。これを光学顕微鏡で観察しエッチピットのサイズや形状からイ オン種やエネルギー、入射角を評価するのが一般的である。しかし上述の方法では2次イオンを検出す る際、1次イオンのレーザー加速プロトンも大量に検出される。そこで CR-39 の感度を制御し、プロト ンを検出しない検出方法が必要である。

CR-39の感度は主にイオンのエネルギーや質量、エッチング速度で決まり、これらの条件の中でもエ ッチング速度はエッチング溶液によって容易に変えることができる。エッチング速度を変える方法とし て PEW 溶液を用いたエッチングがある。PEW 溶液は水酸化カリウムとエタノールと水の混合溶液で、 エタノール濃度や溶液温度を変化させることでエッチング速度を容易に制御できる。また PEW 溶液と NaOH 溶液を使った2段階エッチングという手法ならより精度よく感度を制御できることも報告されて いる。筆者はこれらの PEW 溶液を用いたエッチングと2段階エッチングをレーザープラズマのような 放射線ノイズの多い環境下でのレーザー加速イオン誘起核反応生成2次イオン検出への応用を提案し、 それを初めて実証した。

実験では、PEW 溶液のみを用いたエッチングと2段階エッチングの2つの手法によりレーザー加速プ ロトンと⁷Li(p,α)⁴He・¹⁹F(p,α)¹⁶O 反応から生成される α 粒子を弁別し、α 粒子を選択的に検出した。さ らに PEW 溶液のみを用いたエッチングと2段階エッチングを比較し、PEW 溶液のみを用いたエッチン グにおいても有効なエネルギー分解が可能であることを明らかにした。



Fig. 1. Detection of alpha particles from ${}^{7}\text{Li}(p,\alpha)^{4}\text{He} \cdot {}^{19}\text{F}(p,\alpha)^{16}\text{O}$ reactions with laser accelerated protons.

(a) experiment set up (b) CR-39 surfaces after etching in PEW solution and (c) after two-step etching.

フェムト秒レーザーダブルパルス照射による金属表面への ドット着色に関する研究

レーザー物質科学 西野将伍

Abstract Dot coloring to blue and brown has been demonstrated on titanium metal surface irradiated by laser beams composed of double pulses with appropriate time interval. Elemental analysis using electron probe micro analyzer (EPMA) suggests that the dot coloring is due to the formation of uniform oxidation layer on the irradiated area. © 2018 Department of Physics, Kyoto University

レーザーによる金属着色では照射レーザーのパルス幅によって着色機構が異なる。パルス幅の長いナ ノ秒レーザーを照射するとその熱的効果により照射領域に酸化膜が形成され、金属/酸化膜界面と酸化 膜/雰囲気界面から反射される光の干渉によって特定の色が見られる(着色される)[1]。ピコ秒レーザ ーやフェムト秒レーザーなど比較的短いパルスのレーザーを照射すると酸化膜に加えて表面に微粒子 が形成され、プラズモン共鳴により入射光の一部の波長が吸収されることで着色される[2]。いずれの場 合も均一に着色するためにレーザービームか試料のいずれか一方もしくは両方を走査してレーザース ポットを一部重ねながら照射し(ここでは走査照射とよぶ)形成される表面構造を均一にする必要があ る。着色される色はレーザーフルーエンスと走査速度によって変化する。そのため所望の色に着色する には多くの照射条件の最適化が必要である。また走査しなければならないためレーザースポット径(数 +µm)よりも大きな領域にしか着色できない。この課題を解決するための理想的な方法はインクジェッ トプリンターのような三原色を用いたドット状の着色である。しかし走査をせずに同じ領域にレーザー を照射しても(ここでは定点照射とよぶ)、ナノ秒レーザーの場合は熱的影響が大きいことから照射領 域内で酸化膜の厚みに勾配ができ単一色を微小領域に着色することはできない。また本研究の予備実験 として熱的影響が少ないフェムト秒レーザーを用いた定点照射の場合でも酸化膜がリング状に分布し、 また微粒子が形成される照射領域の中央部には着色されなかった。本研究では、「フェムト秒レーザー ダブルパルス照射」を行った。フェムト秒レーザーパルスを照射した後、フェムト〜ピコ秒の時間差を 設けてさらに別のフェムト秒レーザーパルスを照射した。この方法では第一のレーザーパルス照射後、 熱的な平衡状態に達する前の金属表面に第二のパルスが照射されることで単一パルスを照射したもの とは異なる表面構造が形成されることが期待される。

本研究ではチタンにフェムト秒レーザーをダブルパルス照射することで特定の照射条件でドット状の着色に成功した。実験では波長 800 nm、パルス幅 150 fs、繰り返し1kHzのフェムト秒レーザーを用いビームスプリッターにより二つのパルスに分け、一方のパルスを BBO 結晶により二倍波(400 nm) に変換した。二つのパルスを合流、空間的に同期させ、一方のパルスの光路長を調整することで時間差を 0~800 ps として試料に 30~300 回照射した。試料には表面研磨したチタンを用いた。Figure 1 にドット状に着色されたチタンのレーザー顕微鏡像とその領域の EPMA による酸素の信号強度の空間分布を示す。この結果から着色領域は一様に酸化されており、酸化膜形成による着色であることが明らかになった。



Fig. 1 (a) Dot coloring area observed with a confocal laser microscope and (b) distribution of oxidation amount on the dot coloring area measured by EPMA. (Color scale shows relative intensity of oxygen signal)

- [1] Arkadiusz J. et.al. Appl Phys A (2014) 115:1003-1013.
- [2] Jean-Michel Guay. et.al. Nature communications (2017) 10.1038, 16095.

固定電位層を導入した次世代 X 線天文用 SOI ピクセル検出器の研究

宇宙線研究室 原田颯大

Abstract We have been developing event driven SOI pixel sensors, called "XRPIX". Our new device with the Pinned Depleted Diode (PDD) structure, XRPIX6E, achieves the energy resolution of 140 eV in FWHM at 6.4 keV. To further improve the performance, we propose a new PDD structure.

© 2019 Department of Physics, Kyoto University

近年の研究で、銀河中心に超巨大質量ブラックホールが普遍的に存在する事が判明したが、その進化 の過程や起源は謎に包まれている。ブラックホールなど多くの天体は、広帯域で X 線を放射するため、 詳細な性質の解明には広帯域 X 線観測 (0.5-80 keV) が必要となる。しかし、~10 keV 以上の帯域では、 高エネルギー粒子起因の非X線バックグラウンド (NXB) が高いという問題がある。我々は広帯域かつ 高感度のX線観測実現に向け、次世代X線天文衛星計画「FORCE」を推進している。問題のNXBは、 検出器の周りをアクティブシールドで囲み、反同時計数法を用いて除去することを検討している。しか し、現行の主力 X 線検出器 CCD は時間分解能が数秒と遅いため、反同時計数法を用いることが出来な い。そこで、我々はX線 SOI ピクセル検出器「XRPIX」を開発している。

XRPIX は、SOI 技術を用いた検出部・読み出し回路一体型の半導体検出器である。各ピクセルにイベ ントトリガー機能を実装しているため、イベントを検出したタイミングでヒットしたピクセルを読み出 す「イベント駆動読み出し」が可能で < 10 us の高時間分解能を実現できる [1]。XRPIX はトリガー信 |号を使用せず、一定周期で特定の領域を読み出す「フレーム読み出し||も可能である。今までの素子で は、イベント駆動読み出しがフレーム読み出しに比べて著しくエネルギー分解能が悪いという問題があ った。これはトリガー回路と読み出しノード間に寄生容量が存在し、干渉する事が原因であった [2]。 この問題を解決する方法に、センサー層と回路層の間にシールド層を導入することが考えられる。そこ で、我々は固定電位層の位置が異なる2種類の素子を開発した。

1. Double SOI 構造 1つ目は、酸化膜中に固定電位層を 設けた Double SOI 構造を持つ素子 XRPIX6bD である。 XRPIX6bD を評価した結果、干渉の抑制に成功し、イベ ント駆動読み出しで過去最高性能となる 345 eV (FWHM)@6.4 keVを達成した (Fig. 1)。しかし、テール 成分が大きいといった新たな問題も見つかった。

2. Pinned Depleted Diode 構造 従来の干渉の問題、及び 新たに XRPIX6bD で見つかった問題を解決するため、 我々は PDD 構造 [3] を導入した最新素子 XRPIX6E を 開発した。センサー層と絶縁層の界面を覆うように固定 電位層を導入することで、静電シールドの役割を持たせ



ながら界面から生じる暗電流を抑制できるなど様々な利 Fig. 1. X-ray spectra obtained with XRPIX6bD and 点が期待できる。XRPIX6E を評価した結果、イベント駆 XRPIX6E in the event driven readout mode. 動読み出しで XRPIX6bD の性能を大幅に上回る 140 eV (FWHM) @ 6.4 keV を達成した (Fig. 1) [4]。

優れた性能を達成した XRPIX6E であるが、ある特定の条件下でしか動作しないという新たな問題に 直面した。原因を調査し、得られた理解をもとに我々は、従来の PDD 構造のメリットは残しつつ正常に 動作可能な新 PDD 構造の提案を行った。この新構造は、SOIPIX グループ全体に取り入れられることに なり、この構造をもとにした素子製作が現在進められている。

References [1] T. G. Tsuru et al., SPIE 9144, 914412 (2014). [2] A. Takeda et al., POS (TIPP2014), 138 (2014). [3] H. Kamehama et al., Sensors, 18, 27 (2018). [4] S. Harada et al., NIM A, in press (2018).

頂点演算子の超局所性から見た soft theorem の普遍性

素粒子論研究室 樋口 翔

Abstract The universal behavior of the soft theorem at the tree level is explained by considering the operator product expansion of the soft and hard vertex operators. The world-sheet integral for the soft vertex is turned out to be determined only by the regions that are close to the hard vertices after eliminating total derivative terms. This analyses can be applied to massless particles in various theories such as bosonic closed string, closed superstring and heterotic string.

© 2019 Department of Physics, Kyoto University

近年、A.Strominger らの研究[1]に端を発して、長波長の物理が見直されている。その 1 つが soft theorem である。soft theorem とは、散乱過程における微小なエネルギーを持つ質量 0 の粒子(soft 粒子)の影響が、どんな散乱振幅についても、その他の粒子(hard 粒子)の運動量や角運動量のみを用いて 普遍的に書けるということを主張する。場の理論の soft theorem は古くから調べられており[2]、例え ば、soft graviton とその他の任意の n 個の粒子の散乱振幅は、次のように普遍的な形で与えられる。

$$M_{n+1}(q; p_1, \dots, p_n) = \frac{h_{\mu\nu}(q)}{p_k \cdot q} \sum_{k=1}^n \left[p_k^{\mu} p_k^{\nu} - i q_{\alpha} p_k^{\mu} J_k^{\nu\alpha} - \frac{q_{\alpha} q_{\beta} J_k^{\mu\alpha} J_k^{\nu\alpha}}{2} \right] M_n(p_1, \dots, p_n)$$

ただし、*q*は soft graviton の微小な運動量、 $h_{\mu\nu}(q)$ は soft graviton の偏極テンソル、 $p_k^{\mu} \geq J_k^{\mu\alpha}$ はk 番目の粒子の運動量と角運動量, $M_n(p_1, \dots, p_n)$ は soft graviton がなかったときの散乱振幅を表す。こ の場の理論における soft theorem は Ward identity を用いて導くことが可能であるが、なぜ soft 粒子を 一つ付け加えたダイアグラムが、運動量や角運動量演算子が外線の粒子に作用している形で普遍的に書 けるのかという疑問については明確な理由を与えてくれない。

そこで我々は、より高エネルギーで成り立つ弦理論から soft theorem を捉えなおすことにより、上で 説明した soft theorem の普遍性について明快な説明を与えた[3]。弦理論において散乱振幅は、弦の掃 く2次元の世界面上に in state と out state に対応する頂点演算子を挿入することによって表される。 世界面上に挿入された soft粒子の頂点演算子とhard粒子の頂点演算子の演算子積展開を考えることで、 soft 粒子が元の散乱振幅をどのように変えるのかを調べられる。実は2次元の世界面上で部分積分を行 うことで soft 粒子に対応する頂点演算子は、その他の hard 粒子に対応する頂点演算子と重なったとき のみに0でない寄与を持つ超局所的な演算子になっていることが分かる。つまり、soft theorem の外線 の情報のみで書けるという普遍性は、弦理論においては soft 粒子の頂点演算子が超局所的な演算子であ り、そのため外線の情報のみを拾うという性質に起因していることが分かった。この解析はボゾニック 閉弦理論、超弦理論、heterotic 弦理論など様々な理論で適用することができ、低エネルギー極限では場 の理論で調べられている結果と一致することも確認された。

さらに我々の提案した超局所演算子を用いることで計算がかなり簡単になり、弦理論に登場するすべての粒子の散乱と soft 粒子の散乱過程を調べることができるようになった。プランクスケールなどの高 エネルギー領域で現れる今まで知られていた場の理論の soft theorem からのズレを一般的に書き下した[3]。Soft theorem は重力波のメモリーエフェクトと密接に関連しているため、もし将来的に重力波 の観測などからこのズレが測定することが可能になれば、弦理論の成立を示唆することができる。

- [1] Andrew Strominger, arXiv:1703.05448.
- [2] Steven Weinberg, Phys.Rev. 140 (1965) B516-B524.
- [3] Sho Higuchi, Hikaru Kawai., Nucl.Phys. B936 (2018) 400-447.

MAGIC 望遠鏡による活動銀河核 Ton 599 からの 超高エネルギーガンマ線放射の初検出と多波長解析

宇宙線研究室 平子丈

Abstract We detected very-high-energy gamma-ray emission from the active galactic nuclei Ton 599 at redshift z = 0.72 for the first time with the MAGIC telescopes. I report the analysis results, and discuss the emission mechanism with the multiwavelength spectrum from the radio to gamma-ray bands. (a) 2019 Department of Physics, Kyoto University

活動銀河核(Active Galactic Nuclei, AGN)は、活動的な現象によりその銀河に含まれる星全体に匹敵 する以上の光度で輝く中心領域である. AGN は中心に超巨大ブラックホールがあり、降着円盤に垂直な 方向に相対論的ジェットが存在し、様々な観測的側面を持つサブクラスが存在する.本研究で扱うブレ ーザーは、AGN をジェットの方向に近い向きから観測した場合に対応し、超高エネルギー(Very High Energy, VHE) ガンマ線が観測される数少ない天体である[1].

本研究では、2017 年 12 月 15 日に MAGIC 望遠鏡でブレーザー Ton 599 を Fermi ガンマ線衛星からの フレアアラートを受け追観測したところ、VHE 領域(E>100 GeV)において1時間の観測で約9 σ の有 意度で初めて検出し、赤方偏移 z=0.72 であることから VHE 領域で3番目に遠い天体となった.その後 MAGIC 望遠鏡で2週間観測した光度変動では、2日目に増光しピークとなった後減衰する様子が見ら れた(Fig. 1).さらに、Fermi ガンマ線衛星の観測データ解析も行い、スペクトルを求めた(Fig. 2).

また、今回のフレア期間に対応する光学、電波、X線の解析データを収集し、光学領域での強い光度 変動を確認した.観測された多波長スペクトルは、電波から光学領域ではジェット内で加速された電子 のシンクロトロン放射、ガンマ線領域ではダストトーラスからジェットに入射した光子の逆コンプトン 放射、X線領域は後者とシンクロトロン光子の逆コンプトン放射の重ね合わせであり、それらがジェッ トの噴出方向へドップラーブーストされた放射であるという標準的な電子起源放射モデル[2]で説明出 来ることを示した.



Fig. 1 The gamma-ray light curve of Ton 599 observed with MAGIC above 80 GeV for two weeks.



Fig. 2 The gamma-ray spectrum observed with MAGIC and *Fermi*-LAT on 15 December 2017 (MJD 58102).

- [1] C. M. Urry and P. Padvani, Astronomical Society of the Pacific, 107, 803-845 (1995).
- [2] S. Inoue and F. Takahara, The Astrophysical Journal, 463, 555-564 (1996).

²⁰Neにおけるα凝縮状態の探索

原子核・ハドロン物理学研究室 藤川 祐輝

Abstract Alpha clustering is an important phenomenon in light nuclei. In the present work, we searched for an alpha condensed state in 20 Ne by measuring inelastic alpha scattering at 0 degrees and subsequent particle decays. We found a candidate for the 5 alpha condensed state. © 2019 Department of Physics, Kyoto University

広大な宇宙で起きている現象には、物質を構成する微小な要素である原子核の性質が深く関わっている。なかでも、超新星爆発や中性子星といった天体現象を記述するためには、幅広い密度領域における「核物質の状態方程式」を確立しなければならない。しかし、通常の原子核の密度は標準核子密度で飽和しているため、高密度や低密度領域における核物質の性質はほとんど知られていない。近年の理論計算では、低密度状態において α クラスターが析出し、主要な構成要素になると示唆されている。 α クラスターは最低エネルギー状態に凝縮し、 α 凝縮相を形成する。一方、原子核の特異な励起状態にも低密度凝縮状態が現れる可能性がある。例えば、 12 Cにおける $0\frac{1}{2}$ 状態はホイル状態として広く知られた α 凝縮状態である。低密度 α 凝縮状態は 12 C以外のA = 4n核においても存在が予言されている[1]。しかし、 α 凝縮状態の存在について、研究者の間で一定の合意に至っているのは 8 Be・ 12 C・ 16 Oの3核種のみである。

そこで我々は、²⁰Ne原子核におけるα凝縮状態の探索実験を行った。本実験では 0 度でのα非弾性散乱 を測定し、励起エネルギー分布を測定した。加えて、α凝縮状態はα粒子を放出して崩壊しやすいと期待 されており、励起状態からの崩壊粒子は重要な情報を持つため、励起状態からのα粒子や陽子などの崩 壊粒子を同定し、そのエネルギーを測定した。崩壊粒子測定のために、散乱槽内に Si 検出器アレイを Fig. 1 のように設置した。また、α凝縮状態からの崩壊α粒子は1~2 MeVと低エネルギーであるため、ガ ス標的のガス封止膜でのエネルギー損失が問題となる。そこで我々はガス封止膜として厚さ 100 nm の 窒化シリコン薄膜 (SiNx)を導入した。Fig. 2 にガス標的セルを示す。

実験は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行い、²⁰Neガス標的に 389 MeVのαビームを入射した。非弾性散乱は西実験室の Grand Raiden スペクトロメータで測定し、²⁰Ne の励起エネルギースペクトルを得た。また、崩壊粒子の同時測定によって崩壊チャンネルを選択し、崩 壊チャンネルごとの²⁰Neの励起エネルギースペクトルを得た。この励起エネルギースペクトルでは、 ²⁰Neの5α崩壊閾値よりも4.3 MeV高い励起エネルギー領域 (E_x~23.5 MeV) に構造が観測された。この構 造は崩壊チャンネルを特定しないα非弾性散乱の励起エネルギースペクトルでは観測されず、α崩壊チャ ンネルの選択を行って初めて観測された。

観測された構造は5α凝縮状態の候補であると考えられる。我々は、今後、統計崩壊模型との比較を行い、この構造が5α凝縮状態にあたるか否かについて精査する予定である。



Fig. 1 Si detector array



Fig. 2 Gas target cell

References

[1] T. Yamada and P. Schuck, Phys. Rev. C, 69, 024309 (2004).

ハッブル定数の不一致問題に対するCosmological Backreaction による説明の問題点

天体核研究室 三浦 大志

Abstract There is a tension between the values of the Hubble constant, measured using the cosmic distance ladder and the angular scale of fluctuations in the cosmic microwave background. We reinvestigate a proposed explanation for the Hubble constant tension by cosmological backreaction, to find a problem in the treatment of caustics. © 2019 Department of Physics, Kyoto University

宇宙の膨張率を記述する速度と距離の間の比例係数 H_0 はハッブル定数と呼ばれ、宇宙論モデルを制限 する重要なパラメータとなっている。現在 Λ CDM モデルは様々な観測とほぼ矛盾がない。しかしなが ら Planck 衛星で観測された宇宙マイクロ波背景放射(CMB)の非等方性からは、 $H_0 = 67.37 \pm 0.54 \text{ km s}^{-1}\text{Mpc}^{-1}$ と求められており[1]、宇宙距離はしごを用いた直接観測では $H_0 = 73.52 \pm 1.62 \text{ km s}^{-1}\text{Mpc}^{-1}$ と求められている[2]。この2つの値の間には3.6 σ の不一致がある。この不一致は Λ CDM モデルを超えた新しい物理を示唆している可能性がある。

一方で小スケールでの宇宙の非一様性により背景時空の時間発展が変更される効果(Cosmological Backreaction)により直接観測によって測定されたハッブル定数が変更され、ハッブル定数の不一致問題 が解決できる可能性があるという主張がある[3]。宇宙の非一様性は現在に近い時刻でのみ成長するので、 CMB の観測から測定されたハッブル定数には影響しないと仮定する。[3]では Silent universe という近似 モデルを用いて宇宙の構造形成を数値シミュレーションで計算している。その結果を用いて ray-tracing 法により直接観測によって測定されるハッブル定数を見積もっている。Silent universe モデルでは物質は 渦度と圧力がゼロのダークマターで近似し、同期化された共動な座標系を用いている。この座標系にお ける時間一定面上においてシミュレーションによって得られた3次元曲率を平均すると、背景宇宙が平 坦であったとしてもゼロでない曲率が生まれる。ハッブル定数が背景宇宙のものと変更されたのはこの 曲率が原因であると[3]は主張している。

しかしながら、基本的に Cosmological Backreaction は計量に対する摂動の 2次のオーダーで影響し、ホ ライズンより十分内側で Newtonian Cosmology に一致する Newtonian gauge では十分無視できるという 主張もある[4]。したがって本論文では[3]で求められたハッブル定数のずれが他の影響で説明されるの ではないかと考え詳しく吟味する。特に、[3]で用いられたモデルでは物質の世界線が交わり発散する面 (caustics)が存在するが、その取り扱い方が不正確であるという問題点に着目する。この問題点は、 Newtonian Cosmology で構造形成を考えた場合に現れると予想されるものである。そこで Newtonian Cosmology において、[3]で用いられている構造形成のモデルを模したものと、caustics の取り扱いを改 善したモデルの 2 つから見積もられる直接観測からのハッブル定数を比較する。Silent universe の Newton 近似は Zeldovich 近似であるので[5]、前者として Zeldovich 近似に[3]で用いられた caustics の取り扱いを 採用する。後者として、物質に無限小の人工粘性を加えることで caustics をより正確に取り扱える adhesion モデルを用いる。これら 2 つのモデルにおいて ray-tracing 法を用いてハッブル定数を見積もる ことにより、[3]に対応するモデルではハッブル定数にずれが生じ、adhesion モデルの方ではハッブル定 数のずれは生じないことを示す。

- [1] N. Aghanim, et al. (Planck), [arXiv:1807.06209].
- [2] A. G.Riess, et al., Astrophys. J., 861, 126 (2018).
- [3] K. Bolejko, Phys. Rev. D 97, 103529 (2018).
- [4] A. Ishibashi and R. M. Wald, Class. Quant. Grav. 23, 235 (2006).
- [5] S. Matarrese, O. Pantano and D. Saez, Phys. Rev. D 47, 1311 (1993).

マルチライン時間領域干渉計を用いたγ線準弾性散乱法に よる Na-P-S 系超イオン伝導ガラスのダイナミクス研究

核放射物理学研究室 矢崎慎一郎

Abstract We studied the atomic dynamics of Na-P-S superionic conducting glasses by quasi-elastic γ -ray scattering using multi-line time-domain interferometry. Combining obtained data with static structure information, we discuss detailed structural dynamics picture of the Na-P-S glasses. © 2019 Department of Physics, Kyoto University

放射光 X 線により ⁵⁷Fe 原子核を励起し、脱励起の際に弾性的に放射される γ 線をプローブ光として準 弾性散乱測定を行うことで、対象試料中における原子のダイナミクスを測定する事ができる [1,2]。本 手法では、測定試料中で準弾性散乱した γ 線のエネルギー幅の変化を、構築した時間領域干渉計(Fig. 1) により時間領域上で読み取ることで、原子~分子スケールの構造の緩和時間を ns~µs の時間スケールに おいて微視的に特定することができる。本研究では、この方法を次世代電池として注目されている Na₂S-P₂S₅(Na-P-S)超イオン伝導ガラスへ適用した。次世代電池は、近年の携帯電子機器や電気自動車の 急速な普及に伴い、より高性能への開発需要が高まっているものであり、特に電極、電解質物質を含む 全体を固体で構成する全固体電池は、安全性等の面から次世代電池として注目されている。 Na₂S-P₂S₅(Na-P-S)超イオン伝導ガラスは、PS₄四面体イオンと Na⁺イオンからなる非晶質物質であり、常 温で~10⁻⁶ (S/cm)と比較的高い電気伝導率を示す。この系は全固体電池への応用が期待されるため、静 的な構造情報に基づく研究[3,4]やマクロイオン伝導度測定など盛んに研究が行われてきた。しかし、 原子レベルにおいてµ秒程度で起こるイオンダイナミクスは未だ十分に測定されておらず、Na-P-S 系の 高いイオン伝導性の微視的な起源は明らかではない。

本研究では、(Na₂S)_x-(P₂S₅)_{100-x}を3種類の異なる組成(x=50,70,75)で作成し、大型放射光施設 SPring-8 の核共鳴散乱ビームライン(BL09XU)にてこの準弾性散乱実験を行った。実験によって得た散乱γ線の時 間スペクトルから、原子・分子スケールに対応する運動量移行q領域におけるサンプル中の電荷密度相 関の緩和時間を抽出することができた。これにより、初めて Na-P-S ガラス中で Na⁺イオンのみならず PS4 四面体イオンも運動していることを明らかにすることができた。加えて、原子ダイナミクスの情報 と、X線回折測定とその結果の2体分布関数解析および逆モンテカルロモデリングにより得られた詳細 な静的構造情報とを紐づけることで、より具体的な微視的ダイナミクス描像の議論も試みた。また物性 研究と並行して、時間スペクトルの校正に関する評価も行った。



Fig. 2. Examples of γ -ray time spectra

- [1] A. Q. R. Baron, H. Franz, A. Meyer, et al., Phys. Rev. Lett. 79 2823 (1997).
- [2] M. Saito, R. Masuda, Y. Yoda and M. Seto, Sci. Rep. 7 12558 (2017).
- [3] A. Hayashi, K. Noi, A. Sakuda and M. Tatsumisago, Nat. Commun. 3 856 (2012).
- [4] Y. Onodera, H. Nakashima, K. Mori, et al., JPS. Conf. Proc. 8 031013 (2015).

新検出器 Baby MIND を導入した T2K-WAGASCI 実験の最適化と解析アルゴリズムの構築

高エネルギー物理学研究室 安留健嗣

Abstract The T2K-WAGASCI experiment aims to understand neutrino-nucleus interactions precisely in order to reduce the dominant systematic uncertainties in the T2K experiment. This thesis discusses the evaluation of the new detector, Baby MIND, the optimization of the experimental setup for next year's run and the development of the corresponding analysis algorithms.

© 2019 Department of Physics, Kyoto University

宇宙から反物質が消え去り物質だけが残っている物質優勢宇宙の起源を探ることは宇宙の根源を理解する上で重要な問いの一つである。粒子と反粒子の性質の違い(CP 対称性の破れ)こそが、その謎を解き明かす鍵の一つである。CP 対称性の破れはクォークですでに発見されているが、それだけでは物質優勢宇宙の謎の解明に至らないため、別の破れの発見が待望されている。T2K 実験はニュートリノ振動を通してレプトンにおける CP 対称性の破れを探索している。大強度陽子加速器施設 J-PARC でニュートリノを生成し、標的から 280m の位置に設置された前置検出器(ND280)と 295km の位置に設置された後置検出器スーパーカミオカンデを使ってニュートリノ振動を測定する。T2K-WAGASCI 実験では ND280 と少し異なる位置に検出器をおいて、水を標的とするニュートリノの微分断面積を測定し、ND280 の結果と組み合わせてニュートリノと原子核の反応を精密に研究する。この研究を通して、T2K 実験の系統誤差を削減することを目的とする。

本研究では鉄コア磁石を持つ Baby MIND 検出器の導入に伴う性能評価、およびそれを用いたアルゴリズムの開発とその評価、Baby MIND を含む 6 つの検出器の配置の最適化、ニュートリノフラックスの系統誤差の評価を行った。Fig.1 に Baby MIND で取得した反ニュートリノビームデータによる、ニュートリノイベントレートとモンテカルロシミュレーションとを比較した結果を示す。

Baby MIND の詳細な性能評価を通して、物理測定においてニュートリノ反応からの荷電粒子の電荷・運動量を精度よく求められることを確認した。開発した解析アルゴリズムをシミュレーションに適用することで、Fig.2 のような来年度の物理測定で最も効率よくイベントを取得できる配置解を求めることができた。また、微分断面積の測定において最大の寄与を持つニュートリノフラックスの系統誤差を導出し、精度の良い微分断面積の測定を期待できることを確認した。





Fig. 1. Comparison of the measured event rate with Monte Carlo simulation. Two kinds of cases of simulation

("Neutral Current + Charged Current (NC +CC)" and "only Charged Current (CC)") are shown here.

Fig. 2. The optimized experimental setup for next year's physics run. The WAGASCI experiment consists of four kinds of detectors: "WAGASCI (WG)", "Proton Module (PM)", "Side MRD", "Baby MIND (BM)". NJ indicates a detector of the NINJA experiment.

γ-γ 摂動角相関法を用いた Xe-超微細気泡の内部圧力測定

核ビーム物性学研究室 山倉拓也

Abstract The inner pressure *P* of Xe-UFB has been measured with PAC technique on ${}^{125}I(\leftarrow {}^{125}Xe)$ in Xe-UFB. The obtained value of *P* = 3.9±2.6 atm is smaller than that derived from the bubble size using the general bubble model. The possible reason for this disagreement is discussed. © 2019 Department of Physics, Kyoto University

近年、超微細気泡(<u>Ultrafine Bubble</u>, UFB)と呼ばれる直径 1 μm 以下の気泡が注目されている。UFB は寿命が長いなど一般的な気泡とは異なる性質が報告されている他、例えばその高い洗浄能力が半導体 の表面洗浄に使われるなど、工業や農業、医療などの幅広い分野で応用が進んでいる[1]。それにもかか わらず、可視光の波長より小さく光学的な測定ができないなどの困難により、いまだに内部圧力といっ た基本的な性質さえ測定されていない。

今回、¹²⁵Iをプローブとする摂動角相関 (Perturbed Angular Correlation, PAC) 法を用いて、Xe-UFB の内部圧力測定を初めて試みた。一般にガス中プローブ核の摂動係数 $G_{22}(t)$ は超微細相互作用により圧力依存性をもつことが知られており、Xe ガス中 ¹²⁷I の $A_{22}\overline{G_{22}(\infty)}$ の圧力依存性も測定されている[2]。

天然の Xe ガスで Xe 飽和水、平均粒径約 200 nm の Xe-UFB 入り Xe 飽和水を作製し、それぞれを常 温常圧下で照射用容器に封入した。これらを京都大学研究用原子炉の傾斜照射孔で熱中性子照射して ¹²⁴Xe(n,y)¹²⁵Xe 反応で ¹²⁵Xe を生成し、軌道電子捕獲でできる ¹²⁵I の 188 keV 準位(I^{π} = 3/2⁺、 $T_{1/2}$ = 0.34 ns)について 55–188 keV γ 線カスケードによる積分型摂動角相関法で $A_{22}\overline{G_{22}(\infty)}$ を測定した。この とき文献[2]のプローブ核である ¹²⁷Xe 由来の ¹²⁷I はほとんど検出されなかった。測定の結果 Xe-UFB 入 り Xe 飽和水では $A_{22}\overline{G_{22}(\infty)}$ = 0.101 ± 0.028となり、一方溶存状態の Xe のみである Xe 飽和水では放射 能が低く測定ができなかった。このことから Xe-UFB 入り Xe 飽和水で測定された $A_{22}\overline{G_{22}(\infty)}$ は、溶存 状態の ¹²⁵Xe に由来する ¹²⁵I ではなく UFB 中の ¹²⁵Xe に由来する ¹²⁵I のものだと考えられる。

¹²⁵Iの 188 keV 準位と文献[2]で用いている ¹²⁷Iの 203 keV 準位($I^{\pi} = 3/2^+$ 、 $T_{1/2} = 0.39$ ns) は類似した核構造で電磁気モーメントも近い 値をとり、Xe ガス中での超微細相互作用も同 様だと考えられる。そのため文献[2]の測定値 を¹²⁵Iの A₂₂の値で換算することにより Xe ガ ス中¹²⁵Iの A₂₂の値で換算することにより Xe ガ ス中¹²⁵Iの 188 keV 準位の $A_{22}\overline{G_{22}(\infty)}$ の圧力 依存性が得られる (Fig. 1)。この圧力依存性を Xe-UFB 入り Xe 飽和水の $A_{22}\overline{G_{22}(\infty)}$ の値に適 用し、Xe-UFB の内部圧力として 3.9 ± 2.6 atm を得た。これは平均粒径からヤング-ラプラス の式で与えられる内部圧力 15.4 atm と比べて 小さい値である。この不一致の理由について議 論する。



Fig. 1. Pressure dependence of $A_{22}\overline{G_{22}}(\infty)$ for the ¹²⁵I 55-188keV cascade in Xe gas converted from ref. [2].

- [1] The Union of Fine Bubble Scientists and Engineers, http://www.fb-union.org/about.html .
- [2] U.BEREK et al., Phys. Lett. 53A (1975) 251.

偏光解析法のX線高時間分解計測への応用

レーザー物質科学 吉田将大

Abstract Photoinduced reflection change of semiconductors can be applied to time-resolved X-ray diagnostics. We have demonstrated this method by using 800nm pulse laser and rapid reflection change as fast as 160fs is measured. The result shows the applicability of this method to single-shot measurement of pulse X-ray source. © 2019 Department of Physics, Kyoto University

大出力レーザー技術の発展に伴い、高強度短パルスレーザー生成高エネルギー密度プラズマの基礎物 理の研究が高輝度放射線源や核融合研究などの応用研究とともに国内外で行われている。レーザー生成プラ ズマのダイナミクスをフェムト〜ピコ秒の時間スケールで観測することは重要な課題である。レーザープラ ズマ内部より放射される X線はその高い透過能力により、プラズマ内部の情報を多く有したまま放射される。 そのため、ps~fsのオーダーで放射される X線を高時間分解能で測定する研究が行われている。本研究では X線の高時間分解能の計測法として偏光解析法を応用した X線計測法の開発を行った。

偏光解析法とはポンプ&プローブ法により試料の吸収率や屈折率 n の時間変化を測定する方法であり、光 励起による表面電荷のダイナミクス計測に用いられる。

我々が提案する放射線計測法では、光応答が速い半導体に放射線を照射し、表面での屈折率変化をプロー ブ偏光解析法により計測する。半導体へ入射する放射線の光子エネルギーがバンドギャップ以上の場合、半 導体に入射した光子数 *I*、表面に生成された電荷 *Q*、表面の屈折率変化 Δ*n* について(1) 式が成立する。[1]

$I \propto Q \propto \Delta n$.

(1)

(1) 式より偏光解析法により求めた An を計測し、その値から放射線強度 Iの時間変化が算出できる。この半導体の屈折率変化は 160 fs 程度の高速応答であるため、時間分解能 160 fs での X 線の時間分解計測が可能となる。

この計測法の原理実証のための実験として、GaAsの反射率の時間変化を測定した。ポンプパルスとして放射線の代わりに短パルスレーザーを用いて実験を行った。波長 810 nm、パルス幅 40 fs の Ti:sapphire レーザーを用い、ポンプ光は~23°、プローブ光は~70°の入射角度で GaAs 結晶に照射した。通常の偏光解析法では n、kの変化を導出するが、今回の計測では n、kの複合的な変化をウォラストンプリズムとバランスフォトダイオードからなる検出系で測定した。また、ポンプ光がシングルパルスの場合(Fig.1)とダブルパルスの場合(Fig.2)において反射率の時間変化を測定した。いずれの場合においても、反射率変化の立ち上がりは 160 fs 程度、立下りは数 ps 程度の高速応答を計測した。また、時間遅延が 800 fs のダブルパルスにおいても同様の反射率変化を示し、800 fs 時間間隔のダブルパルスの時間分解計測に成功した。これらの結果から、本手法が高速 X 線時間分解計測に有効な手法であることが検証された。



References

[1] Z.G.Yu: "Photoexcited-carrier-induced refractive index change in small bandgap semiconductors", J.Opt.Soc.Am.B/Vol.23,11(2006)

連星磁気圏に基づいた 中性子星連星合体の電磁波対応天体に関する考察

基礎物理学研究所 和田知己

Abstract We investigate the magnetosphere of late-inspiraling binaries including a neutron star (NS). We find that the orbital motion of the NS induces electric field, and as a result, a magnetosphere is created around the NS to shield the electric field, like in the Goldreich-Julian model of pulsars. We find that the magnetosphere around binaries may create particle wind. We calculate the wind luminosity using a classical method for pulsar wind.

© 2019 Department of Physics, Kyoto University

Einstein が一般相対性理論を発表した 1915 年から丁度 100 年経った 2015 年、連星ブラックホール合体を起源とする重力波が直接検出された。重力波の存在自体は連星パルサー PSR B1913+16 の観測から間接的に証明されていたが、直接検出はこの重力波イベント GW150914 が初である。この検出は、"重力波の直接検出"だけでなく、"30 太陽質量にもなるブラックホールの存在"、"ブラックホール連星とその合体の検出"という注目すべき点がある。このイベントをはじめとして、2019 年 1 月の現在では連星ブラックホール合体が 10 イベント、連星中性子星合体が 1 イベント検出されている。連星中性子星合体 GW170817 ではそれに付随するショートガンマ線バースト GRB170817A、およびキロノヴァ/マクロノヴァ 天体 AT 2017gfo も観測され、重力波と多波長の電磁波で観測をする重力波マルチメッセンジャー天文学の対象となる初の天体となった[1]。レーザー干渉計の感度の今後の向上を考えると、このような重力波とともに、その母天体に対する重要な情報源である。したがって、電磁波対応天体のメカニズムをより正確に解明することで、連星合体だけでなく、宇宙論や原子核物理といった重力波天文学が内包する多様な物理分野についての観測データが得られると期待できる。

本研究の目的は連星合体の直前における連星周りの磁気圏の構造を明らかにし、またそこからの電磁 波放射を考察することである。中性子星の自転が作り出す磁気圏の電磁波放射は、McWilliams & Levin 2012[2]などで既に詳しく研究されている。本研究では中性子星の自転ではなく、その公転運動による 磁気圏の形成とその電磁波放射を考察した。中性子星を公転運動する双極子磁場と仮定し、そのソース が周囲に作る電磁場を調和関数展開の表式で書き下した。また、パルサー磁気圏に関する先行研究[3] をもとに、連星周りの電場を遮蔽するのに必要なプラズマ密度を計算した。さらに、そのプラズマがパ ルサー風と同様の機構で放射されると仮定して、そのルミノシティーを見積もった。

その結果、合体直前の連星の周囲には確かにプラズマによる磁気圏が形成されることがわかった。その数密度は公転の角速度と中性子星の磁場の強さのみに依存するため、その自転角速度に依らずに存在しているという点で、これまでに考えられてきた磁気圏とは大きく異なっている。また、この磁気圏からの粒子風は合体直前のミリ秒で急激にエネルギー損失率が上がり、パルサーの場合と同様にこのエネルギーの一部が電波として放出されると、Fast Radio Burst と同程度のルミノシティーと継続時間になることもわかった。

- [1] B. Abbott et al., Astrophysical Journal Letters 848, L12 (2017).
- [2] S. T. McWilliams and J. Levin, The Astrophysical Journal 742, 90 (2011).
- [3] P. Goldreich and W. H. Julian, The Astrophysical Journal 157, 869 (1969).