

HP : <https://physicsthkyushu.wixsite.com/mysite> コアタイム : なし

研究キーワード : 標準模型, 大統一理論, 超弦理論, 素粒子論の宇宙論, 超弦理論の宇宙論, 有効場理論, 超対称ゲージ理論と双対性, 理論天文学・宇宙物理学, 高エネルギー天体物理学, 原子核理論



## Member

教授	原田恒司 (Koji Harada) 大河内豊 (Yutaka Ookouchi)
准教授	小島健太郎 (Kentaro Kojima) 中里健一郎 (Ken'ichiro Nakazato)
助教	福井徳朗 (Tokuro Fukui)
博士3年	尹強 (In Kyo) 塚原壮平 (Sohei Tsukahara)
修士2年	杉山 龍汰 (Ryuta Sugiyama) 山本 侑生 (Yuki Yamamoto)
修士1年	池部 悠介 (Yusuke Ikebe) 緒方 颯斗 (Hayato Ogata) 山崎 真尋 (Mahiro Yamasaki)



## 教員プロフィール



## 原田恒司 教授

10月より「転職」しました。専門は「素粒子理論」と名乗っていますが、学生の頃からずっと超対称性や大統一理論が気に入らないというへそ曲がりです。「低エネルギー」(中国語では低能)物理学者となり、原子核理論を場の理論的に理解することなどをやっていました。最近では宇宙初期の相転移のことなどを学生に教えてもらっています。新しい科目開発にも取り組んでいます。



## 大河内豊 教授

主に基幹教育を担当しています。物理を専門としない学生への教育は発見が多く、刺激的です。物理学科の学生にもTAなどを通して、この経験をしてもらいたいと思っています。専門に関しては、最近、特に統一理論の真空構造に興味をもっています。真空構造の理解はダークエネルギーの理解とも密接に結びついています。これまでの弦理論の進展から得られた情報を元に、新しい宇宙像に迫ることが当面の目標です。



## 小島健太郎 准教授

主に素粒子理論に関する研究を行なっています。なかでも、高次元ゲージ理論、大統一理論、超対称性理論、宇宙論、素粒子のフレーバー構造などに関心を持って研究してきました。大学院生と一緒に勉強しながら、新しいトピックにチャレンジしつつ研究の幅を広げて行けたらと思っています。



## 中里健一郎 准教授

2015年、九州大学基幹教育院に着任しました。専門は理論宇宙物理で、現在はニュートリノや原子核といったミクロな物理過程と超新星爆発や中性子星といったマクロな天体現象をつなぐ研究を進めています。宇宙物理は物理学のごった煮とも言われ、宇宙のさまざまな階層でさまざまな物理が顔を出します。なので常に幅広い物理に興味を持ち、新しい研究にも挑戦し続けたいと考えています。



## 福井徳朗 助教

福岡 → 大阪 → 茨城 → ナポリ → 京都 → 埼玉と移動しながら、九大にきました。娘には、彼女が3歳のころから量子力学と相対論を吹き込んできました。「自然科学総合実験」の磁束密度実験を担当したときは、核力と中性子星の話をして、物理に興味の無い学生にも布教活動をしています。相撲が好きです。博多・天神落語まつりにも複数回行きました。物理学科メインの屋サッカーにも参加しています。



## アピールポイント

### 教員の数が多い

理論研は学生に対して教員の数が多いという特徴があります。現在も学生7名に対して教員5名が在籍しており、手厚いサポートを受けながら研究に取り組むことができます。理論系の研究は地道な計算が多い上、途中の道のりも長く、気が滅入ってしまうこともしばしばあります。その際、様々な分野を専門とする教員の方々から多角的な視点でアドバイスをいただけるというのは他に類を見ない特色の一つです。

### TA やアウトリーチに取り組めるチャンスが多い

理論研は基幹教育院に所属する研究室であるため、TAとして学部教育に参画するチャンスが多くあります。そのため物理教育などに興味のある方にとってはうってつけの研究室であると言えるでしょう。また、理論研では物理学を専門としない方々へ向けたアウトリーチも推奨されています。専門的な研究に邁進するだけでなく、物理の枠を超えて活躍する場が多く準備されている稀有な研究室です。

### 研究の裁量が大きい

理論研は他の理論系の研究室と比較して、研究に与えられる裁量が非常に大きい研究室です。修士1年生で自身の関心に応じたテキストを輪講し、以降は教員の専門と相談しながら主体的に研究を進めていくことになります。もちろん初めから研究の海に突き落とされるのではなく、きちんと指導教員から「泳ぎ方」を教わりながらです。しかし、どんな計算をしてどんな事が言えそうか、それらを考え提案し実行に移すのは（基本的に）学生自身に委ねられています。一歩ずつ着実に、自分の手で研究を育てていくことのできる研究室です。



## イベント

### 年間スケジュール

4月	新入生歓迎会
9月-10月	修論構想 (M2)
10月	文献紹介 (M1) / 博論構想 (D3)
11月	修論構想 2nd (M2)
12月	忘年会
1月	新年会
3月	リサーチレビュー (M1)

### 定例イベント

毎週月曜日 昼休み	研究室ミーティング (ランチミーティング)
不定期開催	文献紹介 (月 1~2 回程度) 理論物理学セミナー

修論構想とは M2 の学生が研究の進捗や開催時点での修論の構想を研究室全体で共有する会のことを指します。博論構想も同様です。理論物理学セミナーとは学内外から講師をお招きしてご講演いただくものです。過去のイベントの様子は研究室 HP のイベント (<https://physicsthkyushu.wixsite.com/mysite/event>) から閲覧できます。

当研究室は 2017 年に設立されたため、進学や就職に関しては、そもそもサンプル数が少ないという事情があります。



## 実績

### 研究

Koji Harada, Shuichiro Tao, Qiang Yin, "Saddle-point approximation to the false vacuum decay at finite temperature in one-dimensional quantum mechanics"

Yutaka Ookouchi, Ryota Sato, and Sohei Tsukahara, "Decay of Kaluza-Klein Vacuum via Singular Instanton"

Ken'ichiro Nakazato, Yuri Okubo, Carolina Sayuri Takeda, "Vacuum structure of an eight-dimensional SU(3) gauge theory on a magnetized torus," *Physical Review D* 110 (1) 016028 (2024)

Ken'ichiro Nakazato, Ryuichiro Akaho, Yosuke Ashida, and Takuji Tsujimoto, "Impacts of Black-Hole-Forming Supernova Explosions on the Diffuse Neutrino Background," *Astrophys. J.* 975, 71 (2024)

Makoto Sakuda, Toshio Suzuki, Ken'ichiro Nakazato, Hideyuki Suzuki, "Study of the neutrino-oxygen cross sections of the charged-current reaction  $16\text{O}(\bar{\nu}_e, e^+)16\text{N}(0 \text{ MeV}, 2^-)$  and the neutral-current reaction  $16\text{O}(\nu, \nu')16\text{O}(12.97/12.53 \text{ MeV}, 2^-)$ , producing high-energy  $\gamma$  rays," *Prog. Theor. Exp. Phys.* 2024, 103D01 (2024)

Yudai Suwa, Akira Harada, Masamitsu Mori, Ken'ichiro Nakazato, Ryuichiro Akaho, Masayuki Harada, Yusuke Koshio, Fumi Nakanishi, Kohsuke Sumiyoshi, and Roger A. Wendell, "Observing Supernova Neutrino Light Curves with Super-Kamiokande. V. Distance Estimation with Neutrinos Alone"

L. Coraggio, G. De Gregorio, T. Fukui, A. Gargano, Y. Z. Ma, Z. H. Cheng, and F. R. Xu, "The role of three-nucleon potentials within the shell model: past and present," *Prog. Part. Nucl. Phys.* 134, 104079 (2024)

T. Fukui, G. De Gregorio, and A. Gargano, "Uncovering the Mechanism of Chiral Three-Nucleon Force in Driving Spin-Orbit Splitting," *Phys. Lett. B* 855, 138839 (2024)

Sohei Tsukahara, "On Stabilization of Magnetically Charged Brane Shell and Over-extremality"

### 進学

博士課程進学 (全て粒子系理論物理学研究室) 5名  
就職先 (修士課程)

金融系, IT系, (株)NHKエデュケーショナル  
就職先 (博士課程)

半導体系, IT系, JR九州システムソリューションズ (株)



## 研究内容

粒子系理論物理学研究室（以下、理論研）では、素粒子理論（場の理論や超弦理論）、原子核理論、宇宙理論など、多角的視点で理論物理学の研究を行なっています。研究に関連するキーワードとしては以下のようなものがあります。

### 標準模型

標準模型は自然界を記述する基礎的な理論の1つです。この理論は  $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$  という対称性（ゲージ対称性）に基づいており、これらは素粒子が受ける4つの力（重力、電磁力、強い力、弱い力）のうちの重力を除いた3つの力を表現しています。2011年には、理論の最後のピースであったヒッグス粒子が実験的に発見され、この理論の成功がより強固なものとなりました。

### 大統一理論

3つの力を統一的に記述する試みとして大統一理論と呼ばれるものがあります。これは、標準模型よりも大きなゲージ対称性（ $SU(5)$ や $SO(10)$ など）を持つ理論から、対称性の自発的な破れを通じて標準模型を実現するというシナリオに基づく理論です。大統一理論は、標準模型の背後にある、より基礎的な理論の候補として、さまざまな観点から研究が進められてきています。

### 素粒子論的宇宙論

誕生直後、まだ極小サイズだった宇宙では、インフレーションという指数関数的な膨張が起こったとされています。このインフレーションとその後の宇宙の発展には素粒子論が密接に関わっており、粒子がどのように結合し、どのような性質を持つかによって宇宙の発展が支配されます。また、現在の宇宙を構成するのは物質のみであり、反物質は自然に存在していません。この非対称性を生み出すメカニズムを理解するためにも素粒子論は不可欠です。加えて実験的に存在が示唆されているダークマターやダークエネルギーについても、素粒子論の観点から理解する試みが進められています。

### 超弦理論 / 超弦理論的宇宙論

アインシュタインの一般相対性理論と量子論を両立するような量子重力理論の構築は素粒子論の大きな研究テーマの1つです。これを4次元時空の理論で実現することは難しく、現状は時空を10次元に拡張した超弦理論が最有力候補とされています。この時、余計な6次元を十分小さなスケールまで（上手に）丸め込む（コンパクト化する）ことで、実際の観測と無矛盾な理論が得られると期待されています。とりわけブラックホールや初期宇宙といった、極めて重力の作用が大きいステージの物理を理解する上では、こういった量子重力理論の効果が重要になってきます。超弦理論を完全に扱うことは大変難しいことですが、理論の中に存在する紐状の物体やDブレーンのような高次元物体をうまく組み合わせることで初期宇宙のダイナミクスなどを調べることができます。

### 有効場理論

場の量子論の有用性は、素粒子の記述ばかりにとどまりません。場の量子論のもつ普遍的な性質によって、核子のような複合粒子の低エネルギーでの相互作用も系統的に扱うことができます。有効場理論を用いれば、モデルによらない一般的な解析を行うことができます。



### 超対称ゲージ理論と双対性

双対性とはある種の理論間の対応関係のことを指します。2つの異なる理論の間に対応関係があれば、片方の理論で解くのが難しい問題であっても、もう片方の理論で解析することが可能となります。このように、双対性は極めて強力な手法である一方、双対な理論を見つけることは一般的に非常に難しい問題です。その点、超対称性を保つ理論ではこの双対関係を調べやすく、結果として、ゲージ理論の強結合領域におけるダイナミクスや真空の相構造の解析が可能になります。これらの結果から強結合領域では閉じ込め現象に限らず多くの興味深い相が現れることが理解されるようになりました。

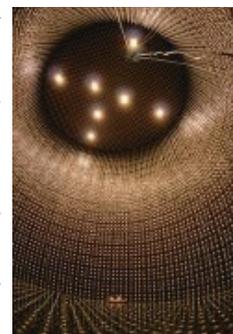
### 超新星爆発

太陽より約10倍以上重い星は、その進化の最後に自らの質量を支えきれなくなり重力崩壊を起こします。その結果、超新星爆発が起こって中性子星が残されたり、ブラックホールが形成されたりすると考えられています。しかし、その全容が理論的に解明されたとは言えないのが現状です。特に重力崩壊した星の中心部は非常に高密度な状態となり、原子核や素粒子といった微視的な物理過程が爆発のダイナミクスにあらわな影響を与え、同時に大量のニュートリノを宇宙空間に放出することが知られています。よって、この現象を正しく理解するためには、大型検出器によるニュートリノ観測とともに、粒子系物理学に基づく理論研究の両輪が不可欠になってきます。



### ニュートリノ天文学

超新星爆発をはじめとする種々の高エネルギー天体から放射されるニュートリノは、天体内部の情報のみならず宇宙における天体進化の歴史や、素粒子としてのニュートリノの性質についての情報をも我々にもたらしてくれます。また、過去に起こった大質量星の重力崩壊を起源とする背景ニュートリノ放射は、近い将来、検出が期待されているため、その理論モデルの構築と検出予測が重要な課題となっています。



### 三体核力

3つの核子に働く力で、二体核力の組み合わせでは記述できません。三体核力は謎だらけで、その強さや原子核の構造・反応にどのように寄与するのかが解明されていません。この謎を解くために、カイラル有効場理論によって導出された二体核力と三体核力をインプットとして、核多体計算をスーパーコンピュータ上で実行することが現在の原子核理論研究の大きな潮流です。

具体的な研究テーマをご紹介します。↑がついているものが学生の参画している研究です。

### ・宇宙初期の1次相転移とバブルの運動↑

宇宙初期に起こる電弱相転移が標準理論を超えた物理の影響で1次相転移であると仮定すると、宇宙バリオン数生成、ダークマターの生成などのシナリオに大きな影響を及ぼします。我々は有限温度での1次相転移の崩壊確率と、生成された真真空のバブルの速度を決定する方法について、先行研究における不備な点を改善すべく研究を行いました。

### ・フラックス背景場中の6次元ゲージ理論のスペクトルとその現象論↑

6次元ゲージ理論において余剰次元方向の非自明なフラックスの存在を仮定すると、その影響が低エネルギー有効理論にも現れてきます。我々は、非可換ゲージ理論に基づく模型に注目し、運動方程式や場の境界条件と両立するフラックスおよびウィルソンラインの背景場を包括的に調べました。また、その結果に基づき、一般性のあるフラックスおよびウィルソンラインの背景場のもとで、4次元有効理論に生じる質量スペクトルを議論しました。

### ・T2/ZN オービフォルド余剰次元模型におけるゲージ同値な境界条件の分類

コンパクトな余剰次元としてT2/ZN( $N = 2, 3, 4, 6$ )オービフォルドを仮定した高次元ゲージ理論に課される場の境界条件の性質を調べました。このようなゲージ理論では、ゲージ変換の自由度を用いて、場の境界条件を変化させることができます。これにより、境界条件に対して物理的に等価な同値類が定義できます。このことを用いて、ゲージ群の表現空間において境界条件を表す行列が、その同値類の中に常に対角型なものを含むかどうかを詳細に検討しました。

### ・超新星ニュートリノ

超新星爆発やブラックホール形成など大質量星の重力崩壊に伴って放出されるニュートリノ（超新星ニュートリノ）に関する研究を多角的に進めています。最近では、超新星ニュートリノの光度や平均エネルギーが核物質状態方程式にどのように依存するかに焦点を当てた数値シミュレーションを行いました。さらに実験研究者とも協力の下、既存の検出器スーパーカミオカンデを想定した観測予測を行って、実際に超新星ニュートリノが検出された際のデータから、核物質の性質や後に残される中性子星の質量などを探る手法を提唱しました。また超新星背景ニュートリノと呼ばれる、過去の超新星爆発によって宇宙に放出されたニュートリノに関する研究にも取り組んでいます。特に、最新の天文観測から示唆される銀河の化学進化モデルに基づいた星形成率も取り入れて、超新星背景ニュートリノのフラックスや検出数の予測を行いました。

理論研には特別研究生の配属がなく、大学院からの受け入れとなります。大学院では学生1人1人がそれぞれの興味関心に応じて主体的に研究に取り組んでいくこととなります。参考までに修了生の研究テーマを以下に列挙します。

- Mass spectrum and vacuum structure of higher-dimensional non-abelian gauge theories with magnetic flux background (2024年9月、博士論文)
- Exploring Higher-Dimensional Gauge Theory: A Model of Early Dark Energy and A Non-Abelian Gauge Theory with Magnetic Flux Background (2024年3月、博士論文)
- Study of Kerr-AdS5 spacetime from the quasi-normal modes and catalytic effect of the vacuum decay (2023年3月、博士論文)
- 特異点を含むバウンス解による5次元真空崩壊の解析 (2024年3月、修士論文)
- トーフトフラックスを持つ6次元SU(N)ゲージ理論の構築と4次元低エネルギー有効理論における質量スペクトル (2023年3月、修士論文)
- 弦理論における準安定状態の崩壊と触媒効果 (2022年3月、修士論文)
- 複数の質量スケールを持つ系に対して有効場理論を用いて得られるRG改善有効ポテンシャルとその有限温度への拡張 (2022年3月、修士論文)
- CP対称性と一般化された大域的対称性を用いたSU(6)カイラルゲージ理論の相構造の研究 (2021年3月、修士論文)
- $\Lambda$ CDMモデルにおけるハッブル定数の不一致問題と5次元ゲージ理論によるEarly Dark Energyの実現 (2021年3月、修士論文)

研究室HPにこれらの修士論文の概要が掲載されていますので、興味のある方は是非ご一読ください。

## Message

今やってる研究に全力で向き合ってください。1年後の自分に感謝されるはず (M1 池部)  
学部の勉強の重要さを痛感する日々です (M1 緒方)  
今ある時間と毎日の学習を大切にしてください (M1 山崎)  
一緒にゼミをしないか(お願いします) (M2 杉山)  
これまで通り、言語化する努力を止めないことです (M2 山本)  
人類は最初に読んだ場の量子論の教科書を親と思う習性があります (D3 塚原)