



## 研究課題名 陽子半径パズルの解明を目指した極限的低エネルギーでの電子・陽子弾性散乱

東北大学・電子光理学研究センター・教授

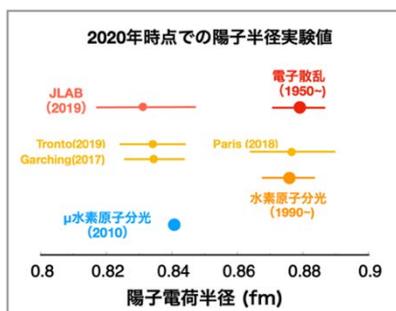
すだ としみ  
須田 利美

研究課題番号： 20H05635 研究者番号：30202138

キーワード： 電子散乱、陽子電荷半径、史上最低エネルギー、電荷形状因子、断面積絶対値測定

### 【研究の背景・目的】

高エネルギー電子散乱、水素原子分光実験、そして  $\mu$  水素原子（電子を  $\mu$  に置換した原子）分光実験から決定された陽子の電荷半径が、決定誤差を考慮しても  $7\sigma$  で 4% も食い違うことが明らかになり、「陽子電荷半径問題（Proton Charge Radius Puzzle）」として Nature 誌や Science 誌の表紙を飾る事態になった。この問題は、陽子の大きさという基本物理量が未確定であるという原子核物理学上の問題にだけでなく、基礎物理定数であるリュードベリー（Rydberg）定数の不定性に直結し、また電子と  $\mu$  粒子間の未知の相違の示唆の可能性の指摘もあり現代物理学が解決すべき問題と一つの認識されている。したがって、この問題の指摘以降、多くの追試の努力も行われてきている。昨年、2019年、までに、3つの水素原子分光、そして JLAB での電子散乱で新たに陽子電荷半径が決定された（右図）が、水素原子分光実験ではお互いに矛盾する値を示し、電子散乱のデータは半世紀にわたる電子散乱研究と深刻な不一致を示す値が発表され、混迷は一層深まっている感がある。



本研究は、史上最低エネルギーの電子散乱を実現し、電子散乱としては最も信頼度の高い電荷半径の決定を目標とする。電荷半径は、電荷形状因子の  $Q^2 \rightarrow 0$  での微分係数として定義されるため、決定精度向上には可能な限り運動量移行を小さくする必要がある。研究は、東北大学・電子光理学研究センターの大強度 6.0 MeV 直線電子加速器を利用し、極低運動量移行領域 ( $0.0003 \leq Q^2 \leq 0.005$  (GeV/c)<sup>2</sup>) を覆った電子・陽子弾性散乱測定をおこなう。所謂 Rosenbluth 分離法によって電荷半径の情報を含む電荷形状因子を分離・決定し、電荷形状因子の極低運動量移行領域での振る舞いから半径を決定する。

### 【研究の方法】

本研究では、陽子半径値決定時のモデル依存性を極限まで排除することを可能にする測定を行う。そのため、低エネルギー電子散乱 ( $E_e = 20 - 60$  MeV) で、極低運動量移行領域を覆った上で弾性散乱断面

積から電荷形状因子を実験的に分離決定するため Rosenbluth 分離法を導入する。そのためには頻繁なビームエネルギー変更が不可欠であるが、大型・高エネルギー化された最先端の原子核研究用電子加速器施設では実施不可能であり、本研究のみが全ての条件を満たすことができる。

下の写真のように、すでに加速器からの良質な電子ビームを輸送するための新ビーム輸送系ならびに散乱電子を測定する高運動量分解能電磁スペクトロメーター一台は建設済みである。測定断面積精度向上



のための 2 台目のスペクトロメーターと高品質データ収集のための測定装置高度化を行い 2022 年から測定を開始する。

### 【期待される成果と意義】

世界の原子核研究用最先端電子加速器施設では実施不可能な測定を実施し、陽子半径決定時のモデル依存性を極限まで排することで、電子散乱としては最も信頼度の高い陽子半径値を決定する。本研究により、陽子半径値を確定し、Rydberg 定数の不定性に決着をつけ、そして素粒子物理学の標準理論に関わる電子と  $\mu$  粒子の相違についての知見を与える。

### 【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ R. Pohl et al., Nature 466 (2010) 213.
- ・ A. Antognini et al., Science 229 (2013) 417.
- ・ T. Suda et al., Journal of Part. Acc. Soc. Japan, 15(2018)52-59.
- ・ T. Suda and K. Tsukada, 原子核研究 61(2017) 87-98.

### 【研究期間と研究経費】

令和 2 年度 - 6 年度 132,500 千円

### 【ホームページ等】

<http://www.lns.tohoku.ac.jp>  
<http://researchmap.jp/toshimi.suda>  
 suda@lns.tohoku.ac.jp

【基盤研究(S)】  
大区分B

研究課題名 三核子系散乱による核子間三体力の完成



東北大学・大学院理学研究科・准教授  
せきぐち きみこ  
関口 仁子

研究課題番号： 20H05636 研究者番号：70373321

キーワード： 三体力、偏極陽子、偏極重陽子、少数系、カイラル有効場核力

【研究の背景・目的】

現在、原子核物理学では核子間三体力(三体力)を含めた核力による原子核・核物質の記述が進みつつある。二核子間力(二体力)の確立、二体力をインプットとする第一原理計算の実現により、原子核の定量的な理解には三体力が不可欠であることが明らかになった。これまでに我々は、重陽子・陽子弾性散乱の微分断面積、および偏極分解能の高精度実験と三核子系の厳密理論計算との比較から三体力効果の明確な証拠を示しつつ、既存の三体力モデルの問題点を詳らかにしてきた。近年のカイラル有効場( $\chi$ EFT)核力の進展を受け、本研究では、実験から三体力を確定する事を目指す。具体的には、中間エネルギー(入射エネルギーが核子あたり70-300MeV)重陽子・陽子弾性散乱のスピンの関係数の高精度測定を完遂し、最も確実に実験から供与できる三体力の情報を完全なものとする。実験と理論研究の両輪により、三体力をも含む圧倒的な精度を持つ核力を完成させる事を目指す。

【研究の方法】

本研究では、最も確実に三体力の情報が得られる中間エネルギー重陽子・陽子弾性散乱を三体力決定のプロブとして用いる。実験では、測定の高さ故に系統的な測定がなされなかったスピン関係数の高精度測定を実現する。併行して $\chi$ EFT核力三体力(5次摂動項)の構築と同核力を用いた三核子系理論計算の開発を進める。実験値と理論計算の直接比較から、カイラル有効場核力三体力の低エネルギー一定数を決定する。

スピン関係数は、偏極重陽子ビームを偏極陽子標的に照射し、散乱の非対称度を測定することで得られる観測量である(図1)。本研究では、偏極陽子の偏極方法としてRIビーム等での実績をもつ芳香族分子(p-Terphenyl,  $C_{18}H_{14}$ )結晶をベースとする動的偏極核法を採用し、同標的の建設を進める。また、本研究では i) 広い重心系角度にわたる角度分布測定が必須、ii) 偏極微分断面積の方位角分布測定が必須、という要請から、大立体角型の検出器の建設を行う。実験は、高品質な偏極重陽子ビームが得られる理化学研究所RIBFで実施する。

【期待される成果と意義】

本研究により、藤田・宮沢型三体力以外の核子間三体力をも含め、その動的性質が確定し、 $\chi$ EFT核力に基づく三体力を含む記述精度の高い核力が構築される。これにより、同核力に基づく原子核の構造、反応、核物質の第一原理計算が実現可能となり、元素合成過程に關与する中性子過剰核の記述、中性子星などに代表される高密度核物質の状態方程式に対して、精度の高い記述・理解の到達が期待される。

また、本研究で行う実験から $\chi$ EFT核力の高次数の三体力をも含む低エネルギー一定数が初めて決定される。これらは将来、クォーク・グルーオンのダイナミクスと核子間三体力とを結合させる物理量として重要な役割を果たすと期待される。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ K. Sekiguchi, H. Sakai, H. Witala et al., Phys. Rev. C **65**, 034002 (2002).
- ・ K. Sekiguchi, H. Witala et al., Phys. Rev. C. **96**, 064001 (2017).
- ・ E. Epelbaum, H.-W.Hammer, and U.-G.Meissner. Rev. Mod. Phys. **81**, 1773 (2009).
- ・ E. Epelbaum et al., Eur. Phys. J. A **56**, 92 (2020).

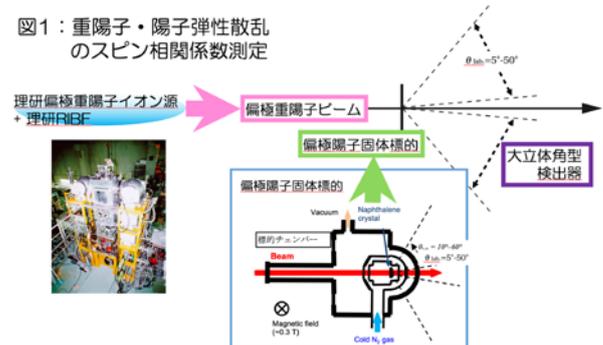
【研究期間と研究経費】

令和2年度-6年度 151,600千円

【ホームページ等】

<http://lambda.phys.tohoku.ac.jp/nuclphys2/>  
kimiko@lambda.phys.tohoku.jp

図1: 重陽子・陽子弾性散乱のスピンの関係数測定



【基盤研究(S)】  
大区分B



研究課題名 大型偏極ターゲットを用いた核子スピンのクォーク構造の解明

山形大学・理学部・教授

いわた たかひろ  
岩田 高広

研究課題番号： 20H05637 研究者番号：70211761

キーワード： 核子スピン、QCD

【研究の背景・目的】

物質はどのようにできているのか？ 物質を構成するのは電子と、原子核を構成する核子（陽子と中性子）である。電子はスピン 1/2 を持つ素粒子で、その性質はよく理解されている。ところが、やはりスピン 1/2 を持つ核子の構造は十分に解明されていない。核子は、スピン 1/2 を持つ素粒子であるクォーク 3 個が軌道角運動量： $L=0$  で結合した複合粒子で、そのスピンはクォークスピンの合成と考えられてきた（クォークモデル）。ところが、クォークスピンの役割が少ないことが分かってきている。結局、クォークスピン以外で核子のスピンの寄与しているものは何か？ は現在も不明で「核子スピンの起源の謎」と呼ばれる重大な問題になっていた。

起源の候補として第一に挙げられたのは相互作用に関与するグルーオンのスピン寄与である。グルーオンはスピン 1 を持つ素粒子で核子スピンの寄与できる。しかし、この測定は難しいため、まだ十分な精度の測定値が得られていない。しかし、この寄与が期待したほど大きくはないことは分かっている。

一方、クォークの軌道角運動量（OAM）にも注目が集まっている。従来のクォークモデルでは核子中のクォークの OAM はあり得ないが、実験データはその存在を示唆しつつある。

【研究の方法】

クォーク OAM の効果は偏極した核子に高エネルギーのミュオンを入射して生成される粒子の左右

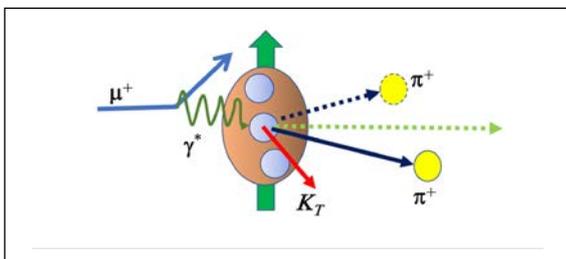


図1 シバース非対称度の測定

非対称に現れる。これはシバース非対称度と呼ばれる（図1）。この非対称度が0でないならば、OAM が存在する一つの証拠と考えられる。私たちは CERN の SPS 陽子加速器からの 160GeV のミュオンを大型偏極標的（図2）に入射して、生成粒子を COMPASS スペクトロメーターでとらえる。また、この測定では核子のテンサーチャージ（TC）を同時に得ることができる。素粒子の標準モデルを超える理論で予想さ

れる核子の電気双極子能率の程度はこの量に依存するので、非常に重要な量として認識されている。

【期待される成果と意義】

原子や原子核の系では構成要素の OAM は基底状態では現れない。基底状態の核子に OAM が存在することが明らかになれば新たなパラダイムの構築につながる。

核子は複数のクォークが強く結合した複雑な系でその理解は QCD（量子色力学）に拠らざるを得ない。現在、QCD 計算を可能にする唯一の方法は分割した時空間で場の量子論を扱う格子 QCD である。この手法は部分的には成功を収めているが、実際に測定を行い、厳しく確認する必要がある。

また、我々の研究は素粒子の標準モデルを超える理論の予想に関わる基本的な量を提供する。これによって、新物理の探索が加速される。



図2 COMPASS 偏極標的とスペクトロメーター

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ Collins and Sivers asymmetries in muon production of pions and kaons off transversely polarised proton., COMPASS, C.Adolph et al., *Phys.Lett. B744 (2015) 250-259*
- ・ Measurement of the Collins and Sivers asymmetries on transversely polarised protons. COMPASS, M. Alekseev, et al., *Phys.Lett. B692:240-246,2010.*

【研究期間と研究経費】

令和2年度－5年度 155,200千円

【ホームページ等】

<https://wwwcompass.cern.ch>  
[tiwata@sci.kj.yamagata-u.ac.jp](mailto:tiwata@sci.kj.yamagata-u.ac.jp)

【基盤研究(S)】  
大区分B



研究課題名 LHC 超前方光子測定によるグルーオン飽和と QGP 生成起源

筑波大学・数理物質系・講師  
ちゅうじょう たつや  
中條 達也

研究課題番号： 20H05638 研究者番号：70418622

キーワード： カラーグラス凝縮、QGP、ALICE 実験、LHC 加速器、シリコン電磁カロリメータ

【研究の背景・目的】

素粒子に働く「強い力」を記述する量子色力学 (QCD) において、未発見な状態が存在する。「カラーグラス凝縮 (CGC)」である。この状態は QCD が予言する高密度グルーオン物質であると同時に、高エネルギー重イオン衝突で出現するクォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) の初期状態を与え、我々の「強い力」の理解の根源に関わっている。

これまで多くの探査が行われてきたが、明確なシグナルは得られていない。我々は高粒子密度下でも透過プローブを捉えることができる、高精細シリコン電磁カロリメータ検出器「FoCal」を開発した。

今回、この FoCal の一部を LHC 加速器 ALICE 実験の前方に先行して建設設置し、中性中間子測定と既存の ALICE 検出器を駆使することにより、CGC の存在を実験的に探査する。重イオン反応で出現する QGP の生成起源、早期熱化機構を解明する。日本チームが主導する新しい国際共同実験である。

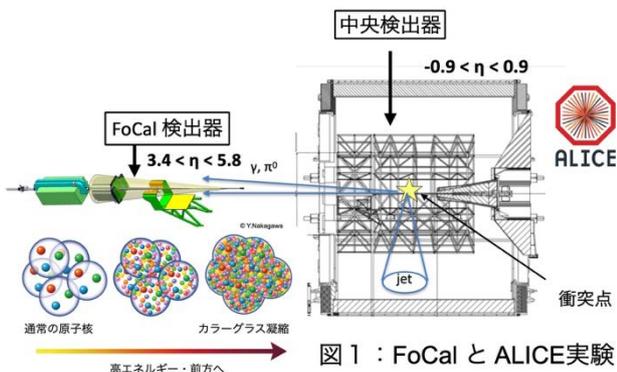


図1：FoCal と ALICE 実験

【研究の方法】

CGC の明確なシグナルを得るためには、(1) 超前方方向 (ビーム軸ゼロ度方向) の測定、(2) 高エネルギーの重い原子核ビームの使用、(3) グルーオン密度に敏感なプローブの識別、の3点が重要である。

そこで本研究では、世界最高エネルギーの鉛原子核ビームを供給することができる加速器 LHC (Large Hadron Collider・CERN 研究所 (スイス)) を用い、ALICE 実験の超前方方向に FoCal を設置し、グルーオン密度に敏感なプローブである光子を世界で初めて捉える。日本がプロジェクトを主導し、FoCal におけるエネルギー測定的主要部である「FoCal-E PAD」検出器を製作する。さらに2024年の LHC 第3稼働機・最終年に、製作した FoCal モジュールの一部

を ALICE 実験に先行して導入し、初期物理データを取得、データ解析を行う。

【期待される成果と意義】

今回導入する FoCal 検出器と、既存の ALICE 検出器群を用いて、主に  $\pi^0$  中間子とその相関測定から、以下の点を明らかにする。(1) グルーオン密度の飽和がどこで出現するのか (カラーグラス凝縮 CGC の発見)、(2) 小さな衝突系で現れるリッジ構造について、より広範囲な  $\Delta\eta$  領域、かつ透過的なプローブで探査する (QGP 生成の起源、早期熱化機構)、(3) 超前方領域 ( $3.5 < \eta < 4.5$ ) におけるジェット抑制効果の世界初測定 (Pb-Pb)、前方 QGP 流体発展。

これらの知見は、重イオン衝突における QGP 生成メカニズムの全容を明らかにし、量子色力学的相関の新展開が期待される。技術面ではプロトン CT など、新しい医療応用の可能性がある。

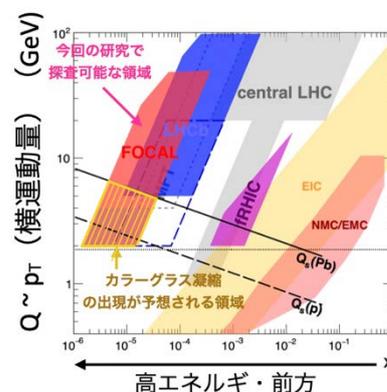


図2：FoCal で探査する新しい領域

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- Letter of Intent: A Forward Calorimeter (FoCal) in the ALICE experiment, ALICE Collaboration (T. Chujo et al.), CERN-LHCC-2020-009, LHCC-I-036, ALICE-PUBLIC-2019-005.
- S. Acharya, T. Chujo et al., ALICE Collaboration, "Measurement of charged jet cross section in pp collisions at  $\sqrt{s} = 5.02$  TeV", Phys. Rev. D 100 (2019), 092004.

【研究期間と研究経費】

令和2年度～6年度 149,800 千円

【ホームページ等】

<http://alice-j.org>  
chujo.tatsuya.fw@u.tsukuba.ac.jp

## 【基盤研究(S)】

### 大区分B



## 研究課題名 重力波宇宙物理学の包括的研究

東京大学・大学院理学系研究科・教授

よこやま じゅんいち

横山 順一

研究課題番号： 20H05639 研究者番号：50212303

キーワード： 重力波、データ解析、ブラックホール、連星中性子星、キロノバ、重元素の起源

### 【研究の背景・目的】

米国の LIGO や欧州の Virgo によってブラックホールや連星中性子星合体からの重力波が続々と検出され、重力波宇宙物理学の時代が幕を開けました。わが国の KAGRA も感度を向上させながら国際共同観測網に加わる準備ができました。本研究計画はまず、①レーザー干渉計の環境チャンネルも採用した独自の解析手法によってノイズを効率的に除去し、KAGRA による重力波の早期初検出を目指します。②この三者のデータによって測定される連星ブラックホールの質量分布関数とパルサーの周期擾乱で観測される長波長重力波背景放射を用いることにより、ブラックホールの起源を明らかにします。③連星中性子星系合体については、マルチメッセンジャー宇宙物理学において光学対応天体となるガンマ線バースト及びキロノバの物理過程を、数値相対論によって明らかにすると共に、その際起こる r プロセス元素合成を計算し、銀河の化学進化の観測と照らし合わせて、金銀などの重元素の起源を明らかにします。以上によって重力波宇宙物理学の喫緊の課題を包括的に解決することを目的とします。

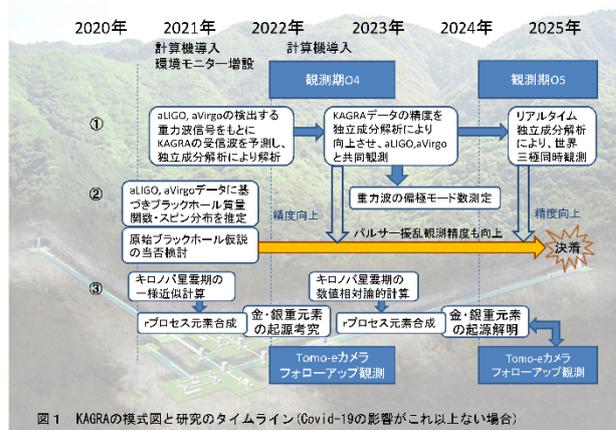
### 【研究の方法】

まず、KAGRA の加速度計や光てこ、音響モニター、電気ノイズ計等数万チャンネルに及ぶ環境信号とレーザー干渉計の重力波チャンネルとの相関解析及びスペクトル解析を行います。この主要部と重力波チャンネルを合わせてこれらの線形・非線形結合を独立成分分析によって行い、重力波チャンネルからノイズを効率的に除去します。そのデータに重力波検出パイプライン GstLAL を適用し、本研究費で導入する計算機クラスターを用いて KAGRA による重力波信号初検出を目指します。

ブラックホールの起源については、まず質量によって観測可能上限距離が異なることを正しく考慮した真の質量分布関数を求め、ブラックホールの起源が初期宇宙にできた原始ブラックホールであるとの仮説のもとで密度ゆらぎのスペクトルを逆算します。この密度ゆらぎをもとに生成する長波長重力波のスペクトルをパルサーの周期擾乱による制限と比較し、原始ブラックホール仮説が棄却される質量域を明らかにします。

連星中性子星合体後に生成するキロノバのダイナミクスと放射現象を、数値相対論に基づく初期状態の計算、原子核組成の計算、非熱平衡状態での放射過程の計算を本研究費で導入する計算機クラスターで

行うと共に、Tomo-e カメラなどの観測データと比較することによって連星中性子星合体で生成する重元素量を求めます。



### 【期待される成果と意義】

まず、KAGRA による重力波検出が実現されると、世界三極四台同時観測を行うことによって重力波源の位置決定精度が飛躍的に向上し、ブラックホールの質量などの測定精度の向上や連星中性子星合体の早期追尾観測が可能になります。ブラックホールのデータの集積とパルサーの周期擾乱の観測により、重力波で見つかった連星ブラックホールの起源が初代天体なのか、初期宇宙にできた原始ブラックホールなのか明らかになります。さらに、キロノバの数値計算と観測との比較、そして矮小銀河の観測により、金銀プラチナなどのどれだけが連星中性子星合体によって生成したか明らかになるとともに、原子核物理の素過程にも重要な知見が得られます。

### 【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ R. Saito and J. Yokoyama “Gravitational wave background as a probe of the primordial black hole abundance” Phys Rev Lett 102(2009)161101
- ・ K. Hotokezaka et al. “Synchrotron radiation from the fast tail of dynamical ejecta of neutron star mergers” Astrophys J 867(2018)95

### 【研究期間と研究経費】

令和2年度～6年度 155,700千円

### 【ホームページ等】

<http://www.resceu.s.u-tokyo.ac.jp/~yokoyama/gw.html>  
yokoyama@resceu.s.u-tokyo.ac.jp

## 【基盤研究(S)】 大区分B



### 研究課題名 最高エネルギーガンマ線天文学の新展開

東京大学・宇宙線研究所・教授  
たきた まさと  
瀧田 正人

研究課題番号： 20H05640 研究者番号：20202161

キーワード： 宇宙線、ガンマ線、ミュー粒子、空気シャワー、チェレンコフ光、ポリビア

#### 【研究の背景・目的】

宇宙からは陽子や原子核を主成分とする高エネルギー粒子「宇宙線」が飛来している。宇宙線は、銀河系内の天体で  $10^{15}$  eV (千兆電子ボルト=ペタ電子ボルト、1 PeV) 以上のエネルギーに加速されると考えられている。その起源として超新星残骸・パルサー・ブラックホールなど様々な候補天体が挙げられているが、いまだにその発生源は不明である。PeV は地上に建設された最高エネルギー加速器 Large Hadron Collider (欧州) の加速上限 7TeV を 100 倍以上も上回るエネルギーである。宇宙線の加速には地上の実験室では実現できない極限的な電磁場や重力場が関係しているはずであり、

「どのような天体がどのようなメカニズムで粒子を加速しているのか？」  
「宇宙の極限環境では何が起きているのか？」

が本研究課題の核心をなす問いである。本研究では、南米ポリビアのアンデス山脈高地(標高 4700 m) に新しい宇宙線観測装置を建設し、最高エネルギー (sub-PeV 領域:  $10^{14}$  eV -  $10^{15}$  eV) ガンマ線観測による銀河宇宙線加速天体の発見を目指す。「どのような天体」の問いに答え、さらに、そのエネルギースペクトルを明らかにすることで、個々の天体で生起する極限現象の解明につなげる。

#### 【研究の方法】

南米ポリビア共和国のチャカルタヤ宇宙線観測所の近くに、新しい宇宙線空気シャワー観測装置を建設して、天体からの最高エネルギー (sub-PeV 領域) ガンマ線を探索する。

本研究のアイディアの全体像を図 1 に示す。高エネルギー荷電宇宙線やガンマ線が地球大気中で高エネルギー反応を繰り返して生成する粒子群「空気シャワー」を検出し、入射粒子のエネルギーと到来方向を決定できる。しかし、地上のシンチレーション検出器だけでは、圧倒的な到来頻度を持つ荷電宇宙線空気シャワーが雑音になって、天体からのガンマ線を有意に検出できない。ミュー粒子はハドロン反応を繰り返す荷電宇宙線空気シャワー中には大量に含まれるが、電磁相互作用で発達するガンマ線空気シャワーにはほとんど含まれない。これによって、雑音となる荷電宇宙線空気シャワー事象を除去し、天体からの微弱なガンマ線事象を検出する。

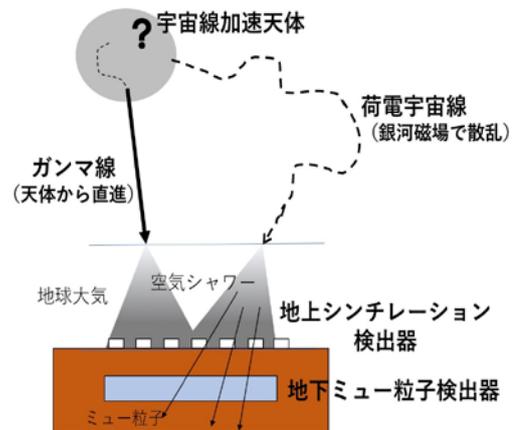


図1 本研究の全体像。地上シンチレーション検出器が空気シャワーの方向とエネルギーを決定し、地下ミュー粒子検出器が荷電宇宙線雑音を排除する。

#### 【期待される成果と意義】

本研究は南半球初の sub-PeV ガンマ線放射天体発見に十分な感度を持った実験である。南半球からは銀河系中心や多くの超新星残骸など、重要な宇宙線加速候補天体が観測可能であり、世界で初めて、1912 年の宇宙線発見以来の謎である宇宙線加速天体を明らかにすることに飛躍的な貢献をすることが期待される。

#### 【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ M. Amenomori, ... M. Takita, ..., et al., "First Detection of Photons with Energy beyond 100 TeV from an Astrophysical Source", *Physical Review Letters*, 123, 051101-1-6, (2019)
- ・ T.K. Sako, ..., M. Takita, ... et al., "Exploration of a 100 TeV gamma-ray northern sky using the Tibet air-shower array combined with an underground water-Cherenkov muon-detector array", *Astroparticle Physics*, 32, 177-184, (2008).

#### 【研究期間と研究経費】

令和2年度-6年度 152,300 千円

#### 【ホームページ等】

<https://www.alpaca-experiment.org/>

## 【基盤研究(S)】 大区分B



### 研究課題名 動的再構成可能なトポロジカルナノフォトニクスの研究

東京工業大学・理学院・教授

のうとみ まさや  
納富 雅也

研究課題番号： 20H05641 研究者番号：50393799

キーワード： トポロジカルフォトニクス、ナノフォトニクス、非エルミート光学、フォトニック結晶

#### 【研究の背景・目的】

固体中の電子の波動関数が波数空間で持つ特殊なトポロジーによって、様々な新奇な性質が発現することが判り、その端緒となった成果は2016年のノーベル賞が授与され、トポロジカル物性と総称される活発な研究分野となっている。近年、この概念が屈折率の周期系であるフォトニック結晶に適用され、興味深いトポロジカルな光学的性質が次々と発見されており、この分野はトポロジカルフォトニクスと呼ばれ研究が活発化している。しかし、光学系におけるトポロジカルな性質はこれまで構造により定まっており、可変ではなかった。本研究では、チューナブルなナノ材料によるナノフォトニクス構造修飾法と、屈折率虚部により大幅に特性が変化する非エルミート光学系を用いて、動的に再構成可能な光トポロジ技術を開発することを目指す。さらに、同技術を用いて制御可能な様々なトポロジカル物性を探索し、それによって導かれる新しい光制御技術を提案することを目指す。

#### 【研究の方法】

本研究では、再構成可能なトポロジカルフォトニクスを実現するために、(1)チューナブルなナノ材料修飾の利用、(2)非エルミート光学系の利用という二つの手法をとる。(1)は相変化などにより屈折率が変化する材料を、フォトニック結晶上に装荷することでトポロジカル相転移を狙うものである。図1(a)に我々が検討を進めている構造の例を示す。ここでは相変化により大きく屈折率が変化する $\text{Ge}_2\text{Se}_2\text{Te}_5$  (GST)薄膜を想定しているが、GSTを適切にパターンニングすることにより、GSTの相転移によってフォトニック結晶が通常バンドギャップを持つ状態からトポロジカルなギャップを持つ状態に相転移することを見出している。本科研費研究では、様々な材料や構造を用いて素子を作製し、多彩なトポロジカル相の制御の実験による実証を狙う。

(2)では、屈折率の実部だけでなく虚部も周期性を持つ非エルミート型の光周期系を用いる。非エルミート光学系のバンド構造には、例外点と呼ばれる不連続点が現れ、特殊なバンド構造が実現することが知られているが、屈折率虚部(即ち利得または吸収に相当)は電流注入などによって大きく変えることが可能であり、チューナビリティが発現する。我々は屈折率虚部の制御により、トポロジカル絶縁相を自由に生成、制御できる構造を発見している(図1(b))。本科研費研究では、この手法を用いて非エルミート

型の再構成可能なトポロジカルフォトニクス構造を研究し、実験による実証を狙う。

また、本研究で開発するチューニング技術を用いて、光のベクトル性に起因するトポロジカル物性であるトポロジカルな偏光特異点を制御することも計画している。

本研究は NTT 物性科学基礎研究所と共同で行う。

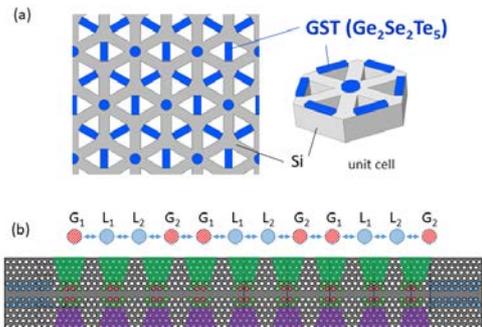


図1 再構成可能なトポロジカルフォトニクス構造。(a)相変化材料装荷型 (b)非エルミート型。

#### 【期待される成果と意義】

トポロジカルフォトニクスの分野では近年次々と新しい性質が見出されているが、本研究で開発する技術によって、この新奇なトポロジカルな特性を自在に制御できるようになれば、新しい光制御技術への発展が期待される。例えば、トポロジカル数に代表されるトポロジカルな性質を動的に制御可能な新たな自由度としてとらえた新しいコンセプトの光デバイス・光制御技術などが考えられる。

#### 【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ K. Takata, and M. Notomi, "Photonic topological insulating phase induced solely by gain and loss," *Phys. Rev. Lett.* 121, 213902 (2018).
- ・ T. Yoda and M. Notomi, "Generation and annihilation of topologically protected bound states in the continuum and circularly polarized states by symmetry breaking", *Phys. Rev. Lett.* 125, 053902 (2020)

#### 【研究期間と研究経費】

令和2年度～6年度 141,300千円

#### 【ホームページ等】

<http://notomi-lab.phys.titech.ac.jp>  
[notomi@phys.titech.ac.jp](mailto:notomi@phys.titech.ac.jp)

## 【基盤研究(S)】 大区分B



### 研究課題名 真空紫外高分解能レーザー分光学の基盤の構築と反水素レーザー冷却への展開

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授

かつらがわ まさゆき

桂川 眞幸

研究課題番号： 20H05642 研究者番号：10251711

キーワード： 真空紫外単一周波数波長可変レーザー、高分解能レーザー分光

#### 【研究の背景・目的】

光・量子科学はレーザーの極限化技術と共に互いに表裏一体をなし発展してきた。ほぼ全ての領域が開拓されてきたように見える一方で、レーザーの発明から60年近くを経た現代でも全く手つかずのまま残されたレーザー技術の領域がある。真空紫外域(波長 < 200 nm)における単一周波数・波長可変レーザー技術(図1の未踏)はまさにその一つである。

本研究課題はこの未踏領域に应用レベルで利用可能な真空紫外・単一周波数・波長可変レーザー技術を確認することを第一義的に目指す。また、実現される真空紫外レーザーを技術基盤として真空紫外域における高分解能レーザー分光学を開拓し、さらに、その知見をもとに反水素原子をレーザー冷却するための定量的なシナリオを構築することを目指す。

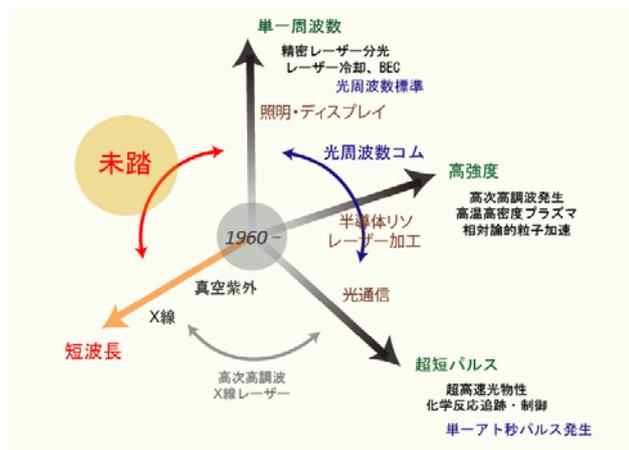


図1 レーザー技術の極限化と相補的に発展する光・量子科学の多様な研究領域

#### 【研究の方法】

非線形光学過程に人為的な位相制御を組込むと量子効率1の非線形波長変換が可能になるということを見出した。これまでに理論的な枠組みを構築し、原理実証実験をおこなった。この研究課題では、これらの成果を気体を媒質とする高次の非線形光学過程に適用することで、真空紫外域において应用レベルで利用可能な単一周波数・波長可変レーザーを実現する。また、実現されるレーザーを用いて、Lyman  $\alpha$  遷移を冷却遷移とする反水素のレーザー冷却のシナリオを、水素原子をテスト媒質とした実験をもとに構築する。

#### 【期待される成果と意義】

ボーズアインシュタイン凝縮に代表される量子凝縮系の物理は、現代物理学における最もホットな話題の一つであろう。周知のように、その前にはレーザー冷却の長期にわたる研究の蓄積があり、さらにそれは高分解能レーザー分光学の基盤の上に発展してきた。振り返るとこの大きな流れの中でいつも主たる物質として扱われてきたのはアルカリ原子であった。しかし改めて考えてみると、アルカリ原子を用いなければならない物理的理由は必ずしも大きく無いように思える。最大の理由は、近赤外～可視の波長域に成熟した(単一周波数波長可変)固体レーザー技術があり、それに最適な物質がアルカリ原子であったということでは無いだろうか。

真空紫外域は光と物質の相互作用が極めて強い波長域である。この研究プロジェクトで進める真空紫外単一周波数波長可変レーザーが実用技術として確立すれば、自ずと真空紫外域における高分解能分光学への道が拓かれ、さらにその先には水素・反水素のレーザー冷却(Lyman  $\alpha$ : 121.6 nm)とその精密レーザー分光を通じた基本的な対称性の検証、また核遷移を用いた次々世代の周波数標準(トリウム(Th)の核遷移: 149 nm)など、多様な学問的展開が期待される。

#### 【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- T. Suzuki, M. Hirai, and M. Katsuragawa, Octave-spanning Raman comb with carrier envelope offset control, **Phys. Rev. Lett.** **101**, 243602 (2008). **表紙**
- J. Zheng and M. Katsuragawa, Freely designable optical frequency conversion in Raman-resonant four-wave-mixing process, **Scientific Reports** **5**, 8874 (2015).
- M. Katsuragawa and K. Yoshii, Arbitrary manipulation of amplitude and phase of a set of highly discrete coherent spectra, **Phys. Rev. A**, **95**, 033846 (2017).
- C. Ohae, J. Zheng, K. Ito, M. Suzuki, K. Minoshima, and M. Katsuragawa, Tailored Raman-resonant four-wave-mixing process, **Optics Express**, **26**, 1452 (2018).

#### 【研究期間と研究経費】

令和2年度～6年度 112,800千円

#### 【ホームページ等】

katsuragawa@uec.ac.jp

## 【基盤研究(S)】 大区分B



### 研究課題名 過去1万年間の太陽活動

名古屋大学・宇宙地球環境研究所・准教授

みやけ ふさ  
三宅 美沙

研究課題番号： 20H05643 研究者番号：90738569

キーワード： 太陽、宇宙線、宇宙線生成核種、樹木年輪、氷床コア

#### 【研究の背景・目的】

太陽フレアやコロナ質量放出は、非常に高いエネルギーを持つ粒子「Solar Energetic Particle (SEP)」を放出する。地球近傍の人工衛星は、しばしば SEP フラックスの急増を観測し、このような現象は SEP イベントとして知られる。大規模な SEP イベントは人工衛星の破壊や宇宙飛行士の被ばく、通信障害等を引き起こし、現在の宇宙開拓時代において大きな脅威になり得るため、その理解を深める必要がある。しかし、1940 年代以前の観測データはなく発生頻度や規模の上限など長期的な発生特性についてよくわかっていない。

過去に発生した超巨大 SEP イベント（観測史上最大の SEP イベントの数十倍規模）の優れた代替データとして、樹木年輪の  $^{14}\text{C}$  や氷床コアの  $^{10}\text{Be}$ 、 $^{36}\text{Cl}$  といった宇宙線生成核種が知られる。研究代表者は、これまでに宇宙線生成核種の分析から、西暦 775 年や西暦 994 年などの超巨大 SEP イベントの痕跡を発見した（図 1）。これは、我々の太陽でスーパーフレアが発生した可能性を示すだけでなく、現代社会に甚大な影響を与え得る極端太陽現象が将来発生する可能性を示すものである。

本研究は、年輪の  $^{14}\text{C}$  と氷床コアの  $^{10}\text{Be}$ 、 $^{36}\text{Cl}$  分析から、過去 1 万年間における最大の SEP イベントの同定と、超巨大 SEP イベントの発生頻度及びその発生特性の解明を目的とする。我々の太陽における発生特性を、太陽型恒星の恒星フレアと比較することで、太陽型恒星における太陽の普遍性と特殊性を評価する。

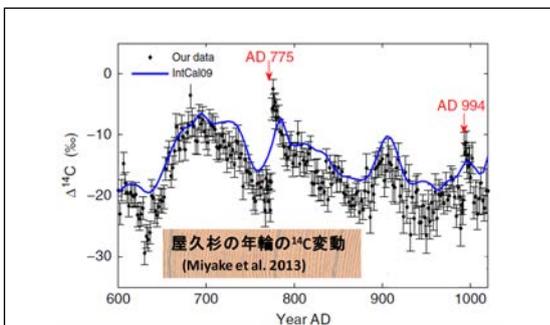


図 1  $^{14}\text{C}$  データにみられる超巨大 SEP イベントの痕跡

#### 【研究の方法】

超巨大 SEP イベントの痕跡を網羅的に検出するため、樹木年輪の 1 年分解能の  $^{14}\text{C}$  分析を過去 1 万年

間について実施する（図 2）。さらに、検出されたイベントの特性を氷床コアの  $^{10}\text{Be}$  と  $^{36}\text{Cl}$  分析から明らかにする。

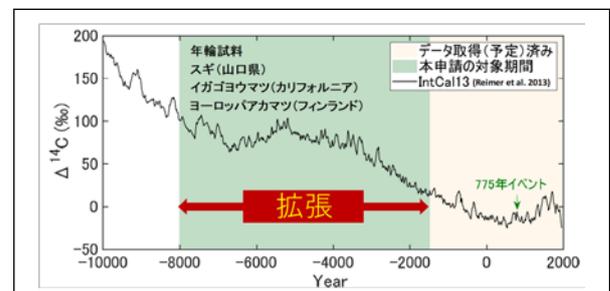


図 2 年輪  $^{14}\text{C}$  分析の対象期間

#### 【期待される成果と意義】

本計画が達成されることにより、過去 1 万年間の世界に類を見ない長期  $^{14}\text{C}$  単年データが獲得され、超巨大 SEP イベントの発生頻度と最大の SEP イベントが明らかになる。さらに、過去 1 万年間には太陽活動低調期から活動期まで様々な太陽活動がみられることから、超巨大 SEP イベント発生と太陽活動との関係性の解明が期待される。

得られたデータは、過去の太陽活動を調査する上で重要になるだけでなく、多くの発展性を有する。例えば、本研究は  $^{14}\text{C}$  年代測定に対する基礎データを提供する。急激な  $^{14}\text{C}$  スパイクは、1 年での年代束縛点として利用することが可能であり、超高精度  $^{14}\text{C}$  年代測定や、氷床コア・湖海底堆積物コアの 1 年での同期を可能とする。このような、地域や天然試料のタイプの縛りのない年代指標はこれまでに例がなく画期的なものといえる。

#### 【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ F. Miyake, I. Usoskin, S. Poluianov (Editors), “Extreme Solar Particle Storms: The hostile Sun”, Institute of Physics Publishing (2019).
- ・ F. Miyake, K. Nagaya, K. Masuda, T. Nakamura, A signature of cosmic-ray increase in AD 774-775 from tree rings in Japan, Nature, 486, 240-242 (2012).

#### 【研究期間と研究経費】

令和 2 年度－6 年度 152,400 千円

#### 【ホームページ等】

<http://www.isee.nagoya-u.ac.jp/>

## 【基盤研究(S)】

### 大区分B



## 研究課題名 水素化物の室温超伝導化とデバイス化の研究

大阪大学・大学院基礎工学研究科・教授

しみず かつや

清水 克哉

研究課題番号： 20H05644 研究者番号：70283736

キーワード： 超伝導、高圧合成、水素化物

### 【研究の背景・目的】

近年、水素化物が高圧力条件下で 200 K を超える超伝導を示すことが実験的に明らかにされ、いよいよ室温超伝導が視野に入ってきたといえる。高圧力下では様々な水素化物において室温またはそれ以上の転移温度の超伝導体になると予測されている。本研究では、高圧力の技術を駆使して、現在その実現に最も近いと考えられる水素化物を対象とし、室温超伝導は実現できるのか、超伝導転移温度はどこまで上げることができるのか、を追究する。そして、室温で動作する超伝導デバイスの形成を目標に、①室温超伝導体を高圧力下で合成すること、②超伝導体によるデバイス回路を高圧装置内で動作させることを目的とする。これまで我々が築いてきた高圧力を用いた物質合成および物性測定技術をより高度に拡張し、室温超伝導の実現にとどまらず、社会実装へ具体的につなげる指針を示すことをめざす。高圧力技術と微細デバイス技術の協同によって、室温超伝導の実現と利用を先導する。

### 【研究の方法】

水素化物を合成するための出発原料は、元素と水素である。原料となる元素を水素とともに高圧力発生装置：ダイヤモンドアンビルセル (DAC) に封入して圧縮し、高圧力条件下でレーザー加熱等により目的の水素化物を合成する (図 1)。この手法はこれまで多く用いられてきたが、限られた水素化物にのみ合成の報告がされ、他の多くの水素化物は報告がない。これは水素を扱うことに難しさにくわえ、適切な合成 (加熱) 手法の探索が重要であると着意した。したがって、低温下の加圧、ジュール加熱など新規な合成経路および合成法にチャレンジする。原料元素が複数となる 3 元系の水素化物にはさらに高温の超伝

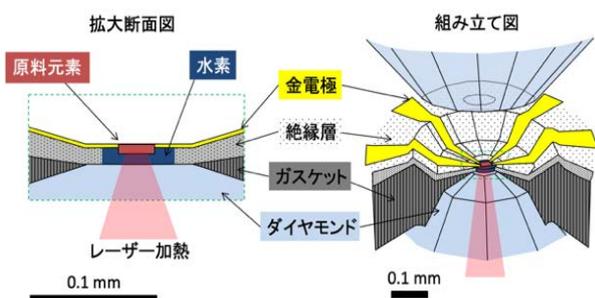


図 1 超伝導水素化物合成法の模式図

導が理論予測されているものがあるなど、様々な金属水素化物の中から理論計算と精密結晶構造解析により候補物質を見極め、高温高圧合成を行う。

これらと同時に、高圧装置内でデバイス形状に成型した超伝導体を合成し、高圧力下の超伝導デバイスの構築を行う。圧力下で動作する超伝導デバイスの研究はこれまでほとんど行われていない。既存超伝導体を用いた動作検証により、圧力下超伝導デバイス構築のノウハウを確立させ、高温超伝導体を超伝導材料としてデバイスへ組み込む。

### 【期待される成果と意義】

室温超伝導が社会に与えるインパクトは計り知れない。広くエネルギーシステムやエレクトロニクス・通信システムにおいて、人類の将来に大きな影響をもつ重要性をもつ。本研究は、水素化物をその候補として高圧力環境での実現に加えて、高圧力を保持したままの利用に挑戦する。これは、室温超伝導の社会実装への指針を与え、さらには実用に叶う低圧力での実現、そして常圧力下の実現に向けた研究へ発展させる契機となる。本研究が目指す最終形である「室温動作超伝導デバイス」の例として室温で動作する高感度磁気センサーなどが考えられる。

本研究の学術的背景には、「物質の究極の姿の追究」があり、それに基づいて設定した研究課題は「室温超伝導は実現できるのか」そして「それを利用できるのか」の問いに答えることである。物質の極限状態の追究に物理の本質があるという研究代表者の信念に基づき、超高圧力をもちいた室温超伝導実現に挑戦し、その恩恵を享受できるのかを追究することでこの「問い」に答えたい。

### 【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ M. Einaga, K. Shimizu *et al.*, “Crystal structure of the superconducting phase of sulfur hydride”, *Nature Phys.* 12, 835–838 (2016).
- ・ M. Sakata, K. Shimizu *et al.*, “Superconductivity of lanthanum hydride synthesized using AlH<sub>3</sub> as a hydrogen source”, *Supercond. Sci. Technol.* 33 (2020) 114004 (6pp).

### 【研究期間と研究経費】

令和 2 年度－6 年度 151,200 千円

### 【ホームページ等】

<http://www.hpr.stec.es.osaka-u.ac.jp/shimizu@stec.es.osaka-u.ac.jp>

## 【基盤研究(S)】 大区分B



### 研究課題名 重水素分子で探る星形成の極初期

国立天文台・野辺山宇宙電波観測所・教授

たてまつ けんいち

立松 健一

研究課題番号： 20H05645 研究者番号：40202171

キーワード： 星形成、分子雲コア、始動条件、重水素

#### 【研究の背景・目的】

天文学研究において、重水素を含む分子の電波観測の重要性が極めて高まっている。1 番目の理由は、人類最強の電波望遠鏡アルマによって、極めて高分解能の観測が可能になったが、ほとんどの分子が(ダストへの吸着などによる) depletion によって存在量が著しく減少し、低温(10-20K)の「星なしコア」(原始星が誕生する前の分子雲コア)の観測が難しいことが判明したからである。気相で形成される重水素を含む分子は depletion の影響を受けにくいことが観測的に明らかにされており、ドップラー効果により速度場が調べることができる分子トレーサとして星なしコアの研究に極めて重要である。

2 番目の理由は、特に気相で形成される重水素を含む分子は、星形成の直前直後に最大値を取ることが化学モデル計算で示されているからである。星なしコアでは存在量が単調増加、星形成後に単調減少し、進化段階を明示する。

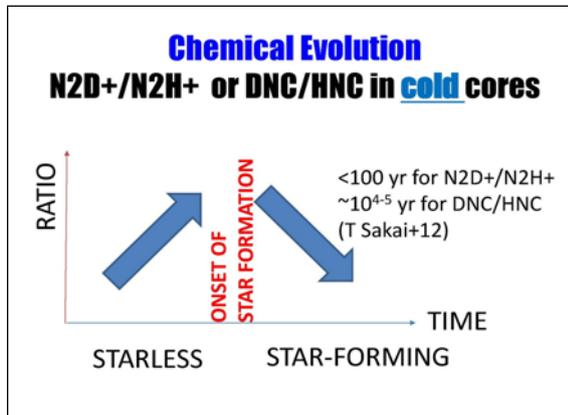


図1 気相で形成される重水素を含む分子の存在量変化の概念図。

#### 【研究の方法】

本研究では、重水素を含む分子の観測を可能にする72-116 GHzの7ビームのマルチビーム受信機を開発し、野辺山45m電波望遠鏡に搭載し、重水素を含む分子を用いた代表的な星形成領域のサーベイ観測を遂行する。7ビームを用い、両偏波を観測するために、初段に72-116 GHzの極低雑音アンプを用いる。受信機の製作・調整に2年間をかけ、3年目は野辺山45m電波望遠鏡を用いた立ち上げ・試験観測を行う。4-5年目には、星形成の規模が大きく異なる、我々の銀河系内の代表的な星形成領域、お

うし座、へびつかい座、オリオン座、赤外線暗黒星雲のサーベイ観測を行い、その違いを分子雲コアの進化を追いつつ比較研究という新しい切り口で研究する。またアルマ望遠鏡を用いた高分解能・高感度 follow-up 観測を提案遂行する。

#### 【期待される成果と意義】

本研究では、我々が確立した重水素比を用いた Chemical Evolution Factor と、原始星のデータを用いて、分子雲コアを「星なしコア初期」、「星なしコア中期」、「星なしコア後期」、「星ありコア」に分類し、分子雲コアの進化を統計的に研究することにより、上記の目標を達成する。

星形成の始動条件が、乱流の散逸、質量降着、磁場の減少、あるいはそれ以外、のいずれであるかを解明する。乱流の散逸であれば、星なしコアの期間に乱流速度の減少が統計的にみられるはずである。質量降着が原因であれば、乱流速度の減少は見られず、コア質量が星なしコアの進化に従って増加する傾向が予測される。Chemical Evolution Factor を用いた統計的研究で、これまでにない研究の進展が期待される。

#### 【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- Ken'ichi Tatematsu, Tie Liu, Gwanjeong Kim, Hee-Weon Yi, Jeong-Eun Lee, Naomi Hirano, et al. "ALMA ACA and Nobeyama observations of two Orion cores in deuterated molecular lines," ApJ, 895, 119 (2020)
- Gwanjeong Kim, Ken'ichi Tatematsu, et al., "Molecular Cloud Cores with High Deuterium Fraction: Nobeyama Single-Pointing Survey," ApJS, 249, 33 (2020)

#### 【研究期間と研究経費】

令和2年度-6年度 158,000千円

#### 【ホームページ等】

<https://www.nro.nao.ac.jp/~kt/>



## 研究課題名 電磁トラップを利用したミュオン粒子の質量と磁気モーメントの精密測定と新物理探索

高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・教授

しもむら こういちろう

下村 浩一郎

研究課題番号： 20H05646 研究者番号：60242103

キーワード： ミュオン、ミュオニウム、ペニングトラップ、スピン

### 【研究の背景・目的】

素粒子標準模型は物質の基本構成要素とそれらの力学を記述するもので、ヒッグス粒子の発見により理論的だけでなく実証的にも完成した。しかし、模型のパラメタが多すぎることや、暗黒物質の担い手となる粒子が含まれていないことなど、数多くの問題を内包している。それらを解決する素粒子標準模型を超える新物理は必ず存在する。その兆候を探す有効な手段として、本研究では、測定の精度を究極まで高めるといふ実験手法を採用する。

ミュオンはほどほどの質量と寿命を持ち、標準模型の検証、そして新物理を探索するプローブとして最適である。長く、世界各地でミュオン研究が行われているが、ミュオン自身そしてミュオンを含む物理現象に、素粒子標準模型では説明が困難なものが複数観測されている。

本研究では、ミュオン、特にそのスピンに関する周波数精密測定を複数の物理系で行い、ミュオン粒子そのものの実験的理解を究めることで、新物理探索を目指す。

### 【研究の方法】

本研究では、ミュオンにかかわる相互に関連した二つの精密測定研究を実施する。

#### ミュオニウム

これまでの実績の発展として、ミュオニウム（正ミュオンと電子のクーロン束縛系）の磁場下でのゼーマン副準位の高精度測定を実施する。すでに磁場のない状態での基底状態超微細構造測定において、最高精度を達成している。さらに磁場のある状態での測定を実施することで、一桁以上高い精度でのミュオニウムの超微細構造(1ppb)およびミュオンの磁気モーメントと質量(ともに5ppb)を決定する。

#### ミュオントラップ

ミュオンを電磁トラップ(ペニングトラップ)で捕獲し、トラップ内でのミュオンの運動を観測する。ミュオンペニングトラップは世界初の挑戦で、超低速ミュオンビームを大量に生成できる日本のJ-PARCでのみ可能な実験である。ミュオンの磁場下での周回周波数を測定することで、ミュオンの磁気モーメントと質量を最高精度(2ppb)で決定する。

ミュオントラップ実験では、ミュオンの発生・輸送を、高磁場下で行うため、100%偏極したビームを準備できる。ミュオニウム実験で使用する超伝導磁石は2.9Tまでの均一静磁場を供給でき、超低速ミュオン生成時のスピン偏極ならびにトラップ用静磁場と

しても使用する(図1)。また、超低速ミュオン発生源から測定エリアまでの距離が50cm程度と短く、5keV程度の低い加速電圧でビームロスなく輸送でき、捕獲に必要な電位も5keV程度ですむ。

測定には、ミュオニウム実験と同様に、崩壊陽電子をミュオンのスピンのシグナルとする手法を採用する。陽電子の統計量を確保し高精度を担保する。シミュレーションの結果では、 $10^{12}$ 個のミュオンを観測した場合、統計精度のみで、磁気モーメントを1ppbの精度で決定できる。ミュオンスピンを $180^\circ$ 反転する操作を加えることで、ミュオンの質量を同様の精度で測定できる。これらはいずれも100日程度のオペレーションで達成可能である。

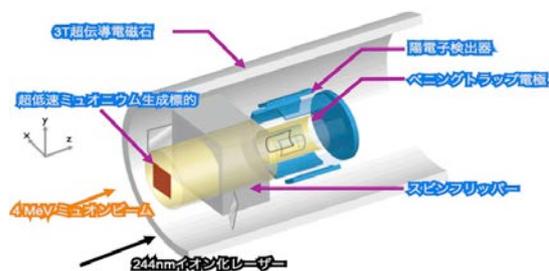


図1 ミュオントラップの実験装置

### 【期待される成果と意義】

これらの結果を総合し、進行中のミュオニウム $1s$ - $2s$ エネルギー準位差測定、ミュオン異常磁気能率(Muon g-2)測定との比較、様々な理論モデルとの照合によって、素粒子標準理論を超えた新物理の探索を行う。

### 【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ K. Shimomura, *Muonium in J-PARC; from fundamental to application* Hyperfine Interactions 233,89-95 (2015)
- ・ H. A. Torii, S. Kanda, K. Shimomura, P. Strasser *et al.* *Precise Measurement of Muonium HFS at J-PARC MUSE*, JPS Conf. Proc. 8 (2015) 025018(1-6).

### 【研究期間と研究経費】

令和2年度-6年度 151,100千円

### 【ホームページ等】

<https://www2.kek.jp/imss/msl/>



## 研究課題名 高輝度陽子ビームによる原子核中での明確な中間子質量変化の実験的確立

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・准教授

おざわ きょういちろう

小沢 恭一郎

研究課題番号： 20H05647 研究者番号：20323496

キーワード： ハドロン質量の起源、カイラル対称性、有限密度 QCD 媒質

### 【研究の背景・目的】

標準的なクォーク模型では、陽子はクォーク 3 個から構成される。しかし、その質量は単純なクォーク質量の和では理解できない。陽子が  $938\text{MeV}/c^2$  の質量を持つものに対して、その内部にあるクォークは、元々はヒッグス機構によりたかだか数  $\text{MeV}/c^2$  程度の質量しか持たないからである。この質量差は、カイラル対称性の自発的破れにより陽子が動的な質量を獲得するためと理解されている。

この考え方は広く受け入れられた考え方であり、この機構を検証するために、これまでに様々な実験的な試みがなされている。しかし、実験的には、ハドロン質量が環境によって動的に変化するという直接的な証拠は得られていない。測定されたハドロン質量は常に真空中の値と一致し、動的な質量獲得という考えから予想される周囲の環境変化による質量変化が明確に捉えられた例は皆無である。この質量変化を実験的に不定性なく明確に測定する、というのが、本研究課題の目的である。

具体的には、クォークを多数含む有限密度 QCD 媒質である原子核において、中間子質量、特に  $\phi$  中間子の質量が明確に変化していることを示す。

### 【研究の方法】

本研究課題では、J-PARC ハドロン実験施設の一次陽子ビームラインと実験装置を完成し、先行実験で



図1 建設中の実験装置

得た統計の 30 倍、73000 個の  $\phi$  中間子崩壊事象を収集する。図1に建設中の実験装置を示す。

本研究課題で遂行する実験では、J-PARC MR 加速器からの高強度一次ビーム ( $30\text{ GeV}$ , 最大  $0.5 \times 10^{10}$  protons per second) を、標的起源の電子バックグラウンドを抑えるため物質質量を減らした極薄の原子核標的(放射長で最大  $0.5\%$ 、鉛標的  $30\ \mu\text{m}$ ) に照射し、 $1 \times 10^7\text{ Hz}$  の反応レートに耐える検出器で大立体角をカバーする。そのために、GEM(ガス電子増幅器)

を用いた検出器を採用した。研究代表者を中心に開発した GEM 飛跡検出器と電子同定用のハドロンブラインド検出器 (HBD、ガスチェレンコフ検出器の一種) は、本研究で目指す測定に対して十分な性能を持つ。

### 【期待される成果と意義】

図2で示すように、本研究で測定が期待される質量分布では、自由空間中での  $\phi$  中間子質量の位置とは異なる位置に原子核中での  $\phi$  中間子質量が新たなピークとして出現する。この新たなピークを捉えることが  $\phi$  中間子の質量が原子核中で明確に変化している証拠となる。

さらに、有限温度/密度の媒質中での質量分布の変化から核子内のストレンジクォーク・反ストレンジクォークの凝縮量 ( $\langle \bar{s}s \rangle_N$ ) を評価する。これは、素粒子物性学的には、カイラル対称性の秩序変数である基本的な測定量であり、ダークマター探索の感度評価におけるパラメータでもある。

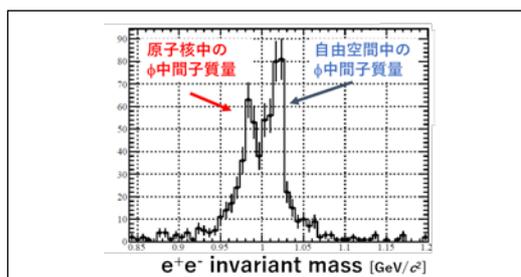


図2 期待される質量分布

### 【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ “Development of a hadron blind detector using a finely segmented pad read-out,” K. Kanno *et al.*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Vol. A819, 20, 24, 2016
- ・ “Observation of  $\rho/\omega$  meson modification in nuclear matter,” K. Ozawa *et al.*, Phys. Rev. Lett. 86, 5019, 5022, 2001

### 【研究期間と研究経費】

令和2年度～6年度 149,800千円

### 【ホームページ等】

<http://high-p.kek.jp>  
ozawa@post.kek.jp

【基盤研究(S)】  
大区分B



研究課題名 中性子過剰核の変形から探る爆発的重元素合成

理化学研究所・仁科加速器科学研究センター・前任研究員

にしむら しゅんじ  
西村 俊二

研究課題番号： 20H05648 研究者番号：90272137

キーワード： 中性子過剰核、重元素合成、β崩壊、質量、機械学習、連星中性子星衝突、超新星爆発

【研究の背景・目的】

鉄より重い元素の約半分は高速中性子捕獲とβ崩壊が競合するr-プロセス元素合成が起源とされ、超新星爆発と連星中性子星衝突が有力候補に挙げられている。重力波と電磁波の同時観測により連星中性子星衝突(GW170817)からの電磁波放射現象・キロノバが観測され、ランタノイド元素合成の証拠とされる近赤外光が確認された。一方、金・白金、ウランが合成された証拠は得られていない。r-プロセスで合成されるランタノイドは、質量数A=165近傍に特徴的なピーク構造を持つ(図1-a)。しかし、このピーク形成のメカニズムは謎に包まれている。

ランタノイド元素合成には、「原子核変形起因説」<sup>[1]</sup>と「アクチノイドの非対称核分裂起因説」<sup>[2]</sup>の2つの仮説が存在する。本研究は、**実験**：「原子核変形起因説」に着目し、鍵を握る中性子過剰なランタノイド原子核の質量とβ崩壊のデータ収集を行う。得られた実験データは、**理論**：ニューラルネットワーク・深層学習法を組み合わせた理論に投入し、β崩壊、質量の系統性と変形に起因した異常性の探索を行う。実験と理論の協力により構築した大規模な原子核データは、**計算**：現実的なr-プロセス環境を考慮にいたれた重元素合成計算に投入する。以上の研究体制の連携をとることにより原子核変形効果に着目したランタノイド元素合成の検証、さらに中性子魔法数と金・白金を含めた総合的な重元素合成の理解を目指す。

【研究の方法】

r-プロセスの定量的な見積もりを行う際に、中性子過剰核の中性子分離エネルギー(質量)、半減期、遅発中性子放出に関する不確定性が大きな障壁となっている。

①原子核実験：大強度重イオン加速器施設RIBFにおいてウラン・白金の核破砕反応を利用し、ランタノイド元素合成に重要な役割を果たす中性子過剰核を生成する(図1-b)。生成した希少原子核の質

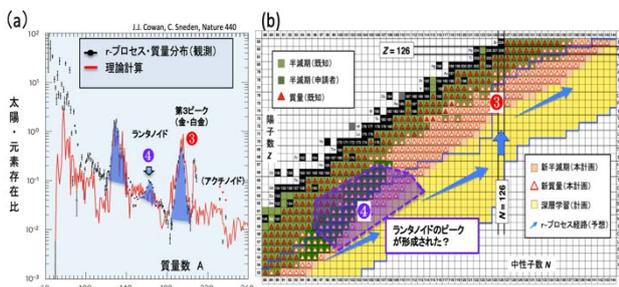


図1 (a) 太陽系の元素存在比, (b) 鍵を握る原子核情報

量、β崩壊の情報を効率的に収集するために大型ガスセル装置、β崩壊測定装置の導入を行う。

②原子核理論：原子核の振る舞いを考慮に入れた原子核理論に深層学習法を組み込み、新たに得られた実験データの検証、質量、半減期、遅発中性子放出、励起エネルギーの情報から原子核の変形魔法数に関する知見を得る。さらに原子核情報の推定とその不確定性を見積もることにより、未知の原子核領域に拡大した大規模な原子核データの構築を行う。「原子核変形起因説」において想定している変形原子核の異常について調べる。

③計算：ランタノイド、金・白金などの重元素合成量はr-プロセスの強度(電子比Ye)に大きく依存する。連星中性子星や超新星爆発の環境を考慮し、構築した大規模原子核データを取り込んだランタノイド元素合成の検証を行う(図2)。

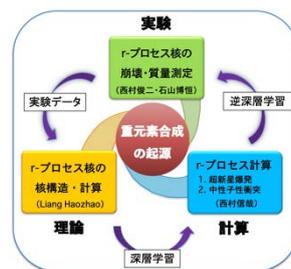


図2 研究体制

【期待される成果と意義】

提案しているランタノイド元素合成の検証は従来の中性子魔法数とは違う切り口となっており、原子核の変形に起因するβ崩壊や中性子分離エネルギーの異常な振る舞いが鍵となる。変形起因説に着目した研究戦略となっているが、かりに変形に起因する原子核の異常性が確認できず、変形起因説を否定する可能性もある。その場合には、「アクチノイド非対称核分裂説」を示唆する結果となり、GW170817における金・白金、ウラン元素合成の間接的な証拠となりえる。ランタノイド元素に加え、金・白金を含めた総合的・定量的な重元素合成研究が期待できる。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ [1] R. Surman et al., Phys. Rev. Lett. **79** (1997) 1809.
- ・ [2] S. Goriely et al., Phys. Rev. Lett. **111**, 242502 (2013).

【研究期間と研究経費】

令和2年度-6年度 146,400千円

【ホームページ等】

<https://ribf.riken.jp/~nishimu/>  
nishimu@ribf.riken.jp