

# $10^3 T$ NEWS LETTER

文部科学省 科学研究費助成事業 学術変革領域研究(A) 令和5年度～9年度

1000テスラ超強磁場による化学的カタストロフィー：非摂動磁場による化学結合の科学

1000-Tesla Chemical Catastrophe: Science of Chemical Bonding under Non-perturbative Magnetic Fields



電磁濃縮法による超強磁場発生に伴うコイルの爆発の様子

cover  $10^3 T$



文部科学省 科学研究費助成事業 学術変革領域研究(A)  
1000テスラ超強磁場による  
化学的カタストロフィー  
非摂動磁場による化学結合の科学

学術変革領域研究(A)  
1000テスラ科学班ニュースレター 第1号  
2023年9月発行

編集人 池田 暁彦 (電気通信大学)  
発行人 松田 康弘 (東京大学 物性研究所)  
1000テスラ科学領域事務局  
東京大学 物性研究所 (柏キャンパス)  
〒277-8581 千葉県柏市柏の葉5丁目1番5号  
E-mail: kaori.oshima@issp.u-tokyo.ac.jp



<https://1000tesla.issp.u-tokyo.ac.jp/>

No. 01

領域代表挨拶	.....	2
領域概要	.....	4
計画研究班紹介	.....	6
活動報告	.....	18
班の取組	.....	21
公募要領	.....	22
活動記録・活動予定	.....	23

## 1000テスラ科学の開拓 領域代表挨拶

令和5年4月、学術変革領域研究(A)として「1000テスラ科学」の研究領域がスタートしました。申請にあたりましては領域メンバーの方々には多大なご協力を頂きました。あらためて、この場を借りまして篤く御礼申し上げます。

本領域の正式名称は「1000テスラ超強磁場による化学的カタストロフィー：非摂動磁場による化学結合の科学」です。化学的カタストロフィーという言葉は、阪大名誉教授で残念ながら今年2月に逝去された伊達宗行先生の教科書やブルーバックスに度々登場し、分子が宇宙の巨大磁場で崩壊する現象として紹介されています。私は大学院生のときにその存在を知りましたが、しかし、最近まで自身がその現象と深く関わることになるとは想像していませんでした。ただ今回、1000テスラもの磁場で何か新しいことを始めたいと考えた際に、真っ先に頭に浮かんだのが、この言葉でした。また、カタストロフィーという破壊的語感をもつ言葉が、破壊的手法で得られる1000テスラ発生と繋がり、また、「変革」という意味も持ち合わせることから、領域を象徴する言葉としてピッタリだと感じています。

磁場は、物質・材料の精密評価や基礎学術的発見において重要な役割を果たしています。ゼーマン分裂やランダウ量子化からは、電子の量子力学的性質を知ることができ、相互作用するスピン系においては多体効果で現れる豊かな磁気現象を磁場でコントロールすることが可能です。科学全般における磁場の重要性は、超伝導技術やプラズマ工学、加速器、磁気イメージングなどにおける磁場応用からも窺い知ることができます。磁場が重要な場であることから、磁場発生技術にも長年の歴史がありますが、その道程は平坦ではなく、強磁場発生は現在でも大変難しい技術です。磁気応力によるマグネットの破壊限界は約100テスラにあり、それ以上の強磁場発生にはマグネットの破壊を伴います。(ちなみに直流定常磁場の上限は45テスラ[アメリカNHMFL]。)この事実は、100テスラを超える磁場領域のサイエンスの発展を著しく妨げています。

2018年、東京大学物性研究所では、1200テスラの発生に成功しました。物性研では40年以上にわたり一巻きコイル法と電磁濃縮法の2つの方法で100テスラ以上の破壊型超強磁場の開発とその応用研究を行っており、1000テスラ超えは磁場開発の一つの集大成と言えます。2000年くらいまでは、アメリカやロシアで爆縮法(火薬をエネルギー源とする磁束濃縮法)での1000テスラ級の実験が行われていましたが、屋外での破壊規模の大きな実験であることから精密計測との相性は悪く、現在は殆ど新しい報告がありません。物性研での1000テスラ

達成は、未踏磁場領域における新しいサイエンスを開拓できる世界唯一の環境が整ったことを意味します。

電磁気学は確立した学問であるとの認識が一般的だと思いますが、2対の荷電粒子が運動することで現れる磁場の効果は(その起源が相対論的であるため)電場による直接的効果と比べて複雑です。ファインマンの教科書にも、ある法則はよく成り立つことが知られているが「なぜ」そうなるのか理由は分からないと書かれているなど、磁気関連現象にはまだまだ探索すべき研究領域が残されていると感じます。中でも、最も重要な研究の一つに、究極的強磁場を用いた非摂動磁場効果があると考えています。なぜ100テスラにマグネットの機械的破壊限界があるのか?金属ワイヤー中の電子運動と運動の結果生じる磁場の間のローレンツ力が応力となり、ワイヤーの機械強度を超えるためマグネットが破壊されますが、機械強度はワイヤー材料内部の原子の結合様式で決定されています。(地球上に存在する)金属において、その原子結合の強さによって決まる上限磁場:約100テスラが、物質の安定性を大きく揺るがす非摂動磁場の入り口と考えることもできそうに思います。

100テスラが入り口であれば、多くの非摂動磁場効果を見つけるために、さらに強力な1000テスラ級の磁場が必要です。電磁濃縮法で磁束濃縮時に高温プラズマ化した外周を流れている電流は数千万アンペア程度と見積もられています。このような極限的状况を作り出して初めて実現可能な磁場が、物質の安定性を揺るがす効果を与えると考えるのは自然な発想のように感じます。実際、1000テスラでの自由電子のスピンゼーマン分裂エネルギーは、銅の融点(1358ケルビン)での熱エネルギーとほぼ同じです。固体の凝集状態に大きな影響を与える磁場の領域が1000テスラ程度にあると想像されます。ただしその一方で、物質の安定性と磁場のエネルギーを比較した際、1000テスラといえども十分全ての物質をカバーする磁場ではありません。100テスラで非摂動磁場領域の入り口を抜けて、1000テスラは最初の一步を前に進んだ状況だと思っています。化学的カタストロフィーはスピンを磁場で揃えることで、共有結合が不安定化して分子が壊れる現象ですが、一般的な分子の破壊には宇宙の巨大磁場(10万テスラ程度)の強さが必要です。

本領域では、1000テスラで起こる本質的な非摂動磁場効果の探索と解明が目的であり、研究テーマの発掘が鍵となります。それは、必ずしも従来の磁場応用研究の延長線上にはないと考えています。またさらに、固体を離れて、化学反応と分子、素粒

子現象や宇宙プラズマにもその研究範囲が広がっているとも考えています。広大な対象から非摂動磁場効果を発見するには、多くの方々の実験的、理論的アイデアが必要です。1000テスラ実験はロケット打ち上げのような実験であり、回数も自ずと制限されます。100テスラ以下の周辺磁場を用いた研究の底上げからヒントを得、狙いました方向(対象物質、実験条件)に正確に打ち上げることで、結果が得られます。ときには、見当違いの方向に進んでしまうこともあるかもしれませんが、それもまたセレンディピティにつながるかもしれません。新しいことに挑戦することが、この領域では何より重要です。自由な発想と行動力で、皆様と1000テスラ科学の開拓をワクワクしながら進めていきたいと思っています。

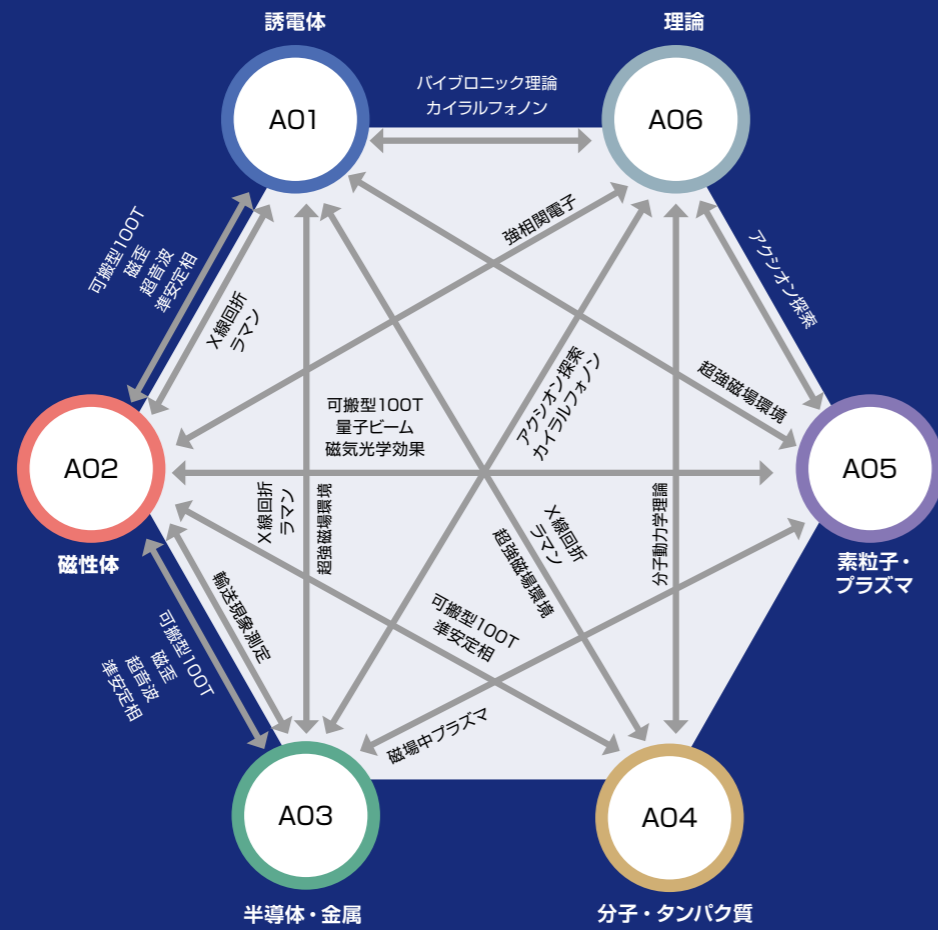
領域代表

東京大学 物性研究所  
松田康弘

松田康弘



## 領域概要



本領域では1000テスラ領域の超強磁場を用いて、様々な研究対象における非摂動磁場効果の探索を行います。固体は共有結合やイオン結合、金属結合などの化学結合によって原子が凝集することで結晶となり、誘電体、磁性体、金属・半導体などに分類されて特徴的な性質を示します。一般には磁場が電子に与えるエネルギーは小さく、摂動的であり、磁場は主に電子状態を“みる”ことに使われてきました。しかし、磁場が電子に与えるエネルギーが、結晶構造を決定している様々な相互作用のエネルギースケールと同程度、またはそれら以上となれば、磁場中で異なる結晶構造が出現し、その性質も大きく変化した新しい結晶を磁場で“つくる”ことが可能です。中性子星などでの宇宙巨大磁場による分子破壊は、化学的カタストロフィーと呼ばれます。本領域では、このような破壊的かつ創造的変化が固体において1000テスラ領域で起こる可能性が高いと考え、A01、A02、A03において、異なる切り口から、固体への非摂動磁場効果を探ります。さらに、A04では分子や高分子を対象として化学反応への磁場効果について探索を行い、A05では素粒子物理やプラズマ物理において、これまでにない非摂動的磁場誘起現象の発見を目指します。さらにA06では強力な磁場の効果を取り入れた新しい理論の構築を行い、A01～A05の実験との融合的展開を計画しています。1000テスラ非摂動磁場効果を通じ、異なる分野を融合した新しい研究領域を構築できると考えています。

## 組織構成

### 総括班

代表 松田 康弘	東京大学 物性研究所	教授	総括班会議の開催、領域会議・国際会議を主催
分担 大和田 謙二	量子科学技術研究開発機構 関西光量子科学研究所放射光科学研究センター	グループリーダー	若手スクール開催など企画
分担 池田 暁彦	電気通信大学 情報理工学研究所	助教	領域ニュースレター、プレスリリース担当
分担 徳永 将史	東京大学 物性研究所	准教授	会計管理
分担 木村 尚次郎	東北大学 金属材料研究所	准教授	若手表彰など企画
分担 福田 聡明	東京大学 素粒子物理国際研究センター	助教	総括班会議、国際会議庶務担当
分担 岡 隆史	東京大学 物性研究所	教授	国際共同研究や海外派遣企画
分担 伏屋 雄紀	電気通信大学 情報理工学研究所	教授	領域会議プログラム企画
分担 那須 譲治	東北大学 理学研究科	准教授	領域web ページ担当、領域イメージなど広報企画担当
分担 富田 裕介	芝浦工業大学 工学部	教授	研究項目間セミナー企画担当
分担 笠松 秀輔	山形大学 理学部	准教授	研究項目間勉強会・交流会企画担当
分担 野原 実	広島大学 先進理工系科学研究科	教授	国際展開や若手育成
協力 鈴木 博之	東京大学 物性研究所	URA	

### 計画研究班 A01

代表 大和田 謙二	量子科学技術研究開発機構 関西光量子科学研究所 放射光科学研究センター	グループリーダー
分担 塚田 真也	島根大学 教育学部	准教授
分担 平井 大悟郎	名古屋大学 工学研究科	准教授
分担 加藤 大地	京都大学 工学研究科	助教
分担 松田 康弘	東京大学 物性研究所	教授

### 計画研究班 A03

代表 徳永 将史	東京大学 物性研究所	准教授
分担 伏屋 雄紀	電気通信大学 情報理工学研究所	教授
分担 酒井 英明	大阪大学 理学研究科	准教授
分担 秋葉 和人	岡山大学 自然科学学域	助教
分担 瀬尾 優太	東京大学 生産技術研究所	特任研究員
協力 町田 友樹	東京大学 生産技術研究所	教授

### 計画研究班 A05

代表 福田 聡明	東京大学 素粒子物理国際研究センター	助教
分担 浅井 祥仁	東京大学 理学系研究科	教授
分担 陳 詩遠	東京大学 素粒子物理国際研究センター	特任助教
分担 新田 龍海	東京大学 素粒子物理国際研究センター	特任助教
分担 坂和 洋一	大阪大学 レーザー科学研究所	准教授
分担 森田 太智	九州大学 総合理工学研究院	助教
協力 尾崎 典雅	大阪大学 工学研究科	准教授
協力 佐野 孝好	大阪大学 レーザー科学研究所	准教授

### アドバイザー

黒岩 芳弘	広島大学 先進理工系科学研究科	教授
陰山 洋	京都大学 工学研究科	教授
河野 淳一郎	Rice University Departments of Electrical & Computer Engineering, Physics & Astronomy, and Materials Science & Nanoengineering	教授
掛下 知行	福井工業大学	学長
青木 秀夫	東京大学	名誉教授

### 計画研究班 A02

代表 池田 暁彦	電気通信大学 情報理工学研究所	助教
分担 米澤 進吾	京都大学 工学研究科	教授
分担 大池 広志	東京大学 工学系研究科・JSTさきかけ	専任研究者
分担 野原 実	広島大学 先進理工系科学研究科	教授
分担 野村 肇宏	東京電機大学 工学部	講師

### 計画研究班 A04

代表 木村 尚次郎	東北大学 金属材料研究所	准教授
分担 永田 崇	東京大学 物性研究所	助教
分担 若狭 雅信	埼玉大学 理工学研究所	教授
分担 草本 哲郎	大阪大学 基礎工学研究科	教授
分担 宮島 大吾	東京大学 物性研究所・JSTさきかけ	専任研究員
協力 井上 圭一	東京大学 物性研究所	准教授
協力 矢後 友暁	埼玉大学 理工学研究所	准教授
協力 松岡 亮太	分子科学研究所 生命・錯体分子科学研究領域	助教

### 計画研究班 A06

代表 岡 隆史	東京大学 物性研究所	教授
分担 那須 譲治	東北大学 理学研究科	准教授
分担 富田 裕介	芝浦工業大学 工学部	教授
分担 笠松 秀輔	山形大学 理学部	准教授
協力 石崎 章仁	分子科学研究所 理論・計算分子科学研究領域	教授

# 1000T 結晶格子の探索と解明－誘電体

A01においては、分子軌道（化学結合）の視点に立ち、超強磁場で発現する新たな固体結晶の探索・解明（超強磁場による分子軌道・カタストロフィー）を行います。特に、共有結合やイオン結合、水素結合の観点から化学結合への磁場効果を捉え、より微視的な分子軌道画像・電子分布から理解することで、化学結合への非摂動磁場効果を量子力学的に解明します。これまで磁場効果の研究対象とはならなかったBaTiO<sub>3</sub>やPbTiO<sub>3</sub>などの強誘電体や、VO<sub>2</sub>などの分子軌道結晶をはじめとした量体物質、水素結合が重要となる鉱物結晶であるボルボサイトや誘電体KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>などを対象とし、最大1000テスラまでの強磁場中において結晶構造相転移の探索を電気的、磁氣的、光学的（X線を含む）に行います。また、得られた結果を理論の方々や領域の方々で議論することで、化学結合への非摂動磁場効果の理解へつなげてゆきます。

磁場は相対論的電気効果によって運動する荷電粒子間に現れる普遍的場です。地球上においては室温程度のエネルギーにおいて十分安定な化学結合によって固体が形成されていますが、地磁気は0.3~0.5ガウス（1/10000テスラ）と弱いいため、通常は化学結合への磁場効果は無視できるほど小さいと考えられます。しかし原理的には、荷電粒子の相対運動が起これば磁場は必然的に発生し、ゼーマンエネルギーシフトやサイクロトロン運動などの磁場効果としてスピンの軌道運動に直接

影響を与えるため、宇宙空間まで含めた自然界の形成の理解において、化学結合への磁場効果の理解は基本的かつ重要な課題であり本研究領域の核心をなす問いとなっております。

化学結合は物質形成における基本概念であり、共有結合、イオン結合、金属結合、水素結合、ファンデルワール結合などの概念で整理されています。しかし、個々の物質においては中間的状态を示す場合も多く、微視的理解は容易ではありません。特に、分子軌道形成による共有結合では電子がフェルミ粒子であることの帰結として、スピンと波動関数の空間広がりが重要であり、超強磁場は恰好の化学結合制御場として機能します。実際に中性子星などの宇宙空間では、化学結合が強力な磁場による劇的な影響を受け、結合破壊による分子の崩壊や、従来の化学結合の範囲に入らない新しい化学結合様式の実現が理論的に予測されています。H<sub>2</sub>やN<sub>2</sub>などの分子破壊には、磁場が10万テスラ程度必要ですが地球上での実現は困難と言わざるをえません。一方、固体の構造相転移が化学結合の様式変化により生じていると考えれば、室温程度のエネルギースケールで、その化学結合様式に影響を与えられる可能性があります。これに相当する磁場が1000テスラ（1350K）です。

一例を挙げます。ペロブスカイト型酸化物の強誘電（構造）相転移はフォノンモードのソフト化から定性的に理解されてきましたが、最近の精密電子密度解析による一電子レベルでの共

有結合電子の可視化により、これらの相転移が共有結合性の強さにより引き起こされていることが明らかとなってきました。このように数百Kオーダーで相転移を引き起こす共有結合系において、1000テスラ強磁場をもってすれば共有結合への磁場効果が期待できます。ところが、1000テスラ強磁場を実現できる機関は東大物性研のみであり、このような超強磁場による化学結合への非摂動アプローチはこれまでに系統的・組織的に行われてきておりませんでした。類似研究が全く無いということで課題そのものが非摂動的であり、不安と期待が入り混じっておりますが、今回幸いにもこのような課題に取り組む機会をいただきましたので、A01はもとより、領域内外の皆さんと連携しながら進めてゆければと考えています。

## 研究課題の「問い」 ■化学結合への磁場効果、特に非摂動磁場効果の理解

### 本研究の目的

分子軌道（化学結合）系において、1000テスラ強磁場中で発現する新たな固体結晶（分子軌道・カタストロフィー）の探索と解明。特に、共有結合やイオン結合、水素結合の観点から化学結合への磁場効果を捉え、化学結合への非摂動磁場効果を解明する。

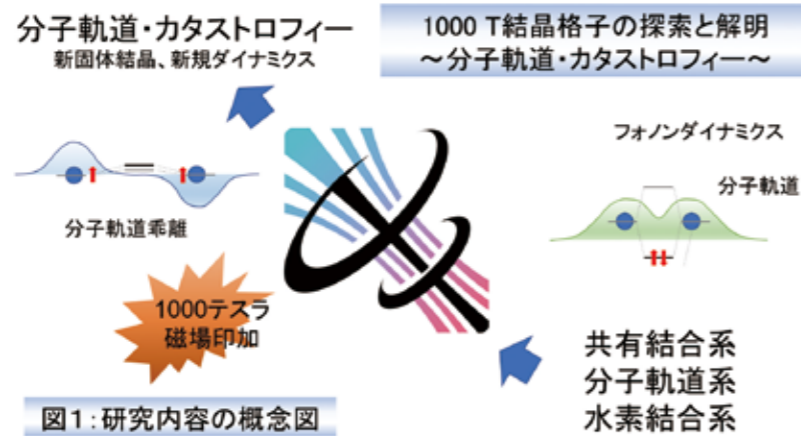


図1 A01:分子軌道・カタストロフィー「1000T結晶格子の探索と解明」

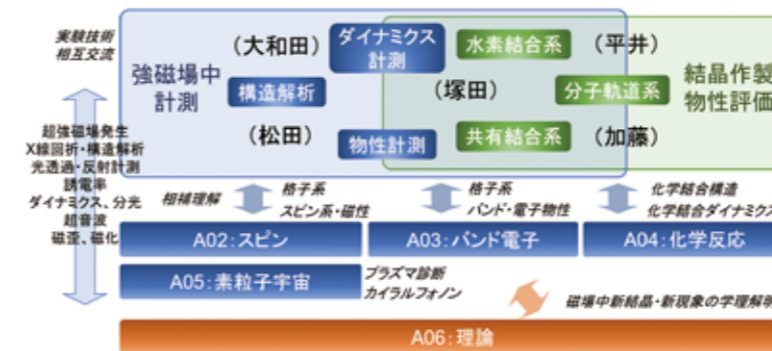


図2 A02: A01内の役割分担と領域内におけるA01の役割

研究代表者



**大和田 謙二**  
関西光量子科学研究所  
放射光科学研究センター  
グループリーダー  
構造・構造物性・放射光

よろしくお願いいたします。

研究分担者



**塚田 真也**  
島根大学 教育学部  
准教授  
誘電体・レーザー分光  
娘の成長（1 & 5才）・磁場下の強誘電体・領域内の交流、全部楽しみです。

研究分担者



**平井 大悟郎**  
名古屋大学 工学研究科  
准教授  
分子軌道物質創成

いろんな物質に磁場をかけて、思いもよらない現象と出会うことを期待しています。

研究分担者



**加藤 大地**  
京都大学 工学研究科  
助教  
共有結合物質創成

強磁場は専門外ですが、とてもワクワクです。自分の分野にこだわらず挑戦したいです。

研究分担者



**松田 康弘**  
東京大学 物性研究所  
教授  
超強磁場測定

見る前に跳べ! の精神でやっています。

# 1000T スピン格子結合の探求と理解ー磁性体

固体や分子の構造を決定する化学結合の形成において、パウリの排他律により電子がスピンを打ち消しながら運動することが多くの場合に前提となっています。強磁場により電子スピンを顕在化させ、結晶や分子の結合を破壊することを考えると、水素分子の共有結合やリチウムの金属結合を例にとれば、それぞれ約4.1万テスラ、5.6万テスラという地上では実現不可能なレベルの超強磁場を要します。このことは物質構造が通常レベルの磁場に対して強固であることの根拠となっています。

一方で、磁気状態と結晶格子状態が伴って変化する系、つまりスピン格子結合の強い物質では、多様な結晶格子状態のエネルギーが近接しており、磁場への応答が期待できます。実際に、室温付近から低温に至る広い温度領域で磁性と絡んだ構造相転移が報告されています。このようなスピン格子結合が強い物質では1000テスラ超強磁場のゼーマンエネルギーによる全く新規な結晶構造の創出、すなわち「スピノカタストロフィー」を引き起こすことが期待できます。実際に100テスラにおける固体酸素の強磁性相(θ相) [1]、500テスラにおけるVO<sub>2</sub>結晶中のV二量体の解離 [2]、600テスラにいたるコバルト酸化物の励起子秩序相の兆候 [3] が相次いで発見されました。これ

らの結果は1000テスラとスピン格子結合が協奏することで、従来別階層にあったスピン系と格子系が混成し、非摂動的巨大格子変形、すなわちスピノカタストロフィーが創出されることを示しています。一口にスピン格子結合といっても、そのマイクロな要因は実に多様であり、交換磁歪、磁気体積効果、価数変化、固体内分子の形成など枚挙に暇がありません。これらの多様なスピン格子結合を有する物質群に対するスピノカタストロフィーの効果は、広範な系でユビキタスに存在する可能性がありながら、ほとんどが未検証です。

### 当研究課題で設定する問いは下記の3つです。

- (1) 多様なスピン格子結合を有する固体結晶において、超強磁場における新規な結晶構造の創出(スピノカタストロフィー)を実験的に実現できるか。またスピンの強制偏極状態で、物質はどのような結晶構造をとるのか?
- (2) 実験的にいかにしてスピノカタストロフィーを検出できるのか?
- (3) 一次相転移における熱・磁場の高速掃引を駆使して、強磁場新結晶相をゼロ磁場で準安定相として取り出すこと(クエンチ)は可能か?

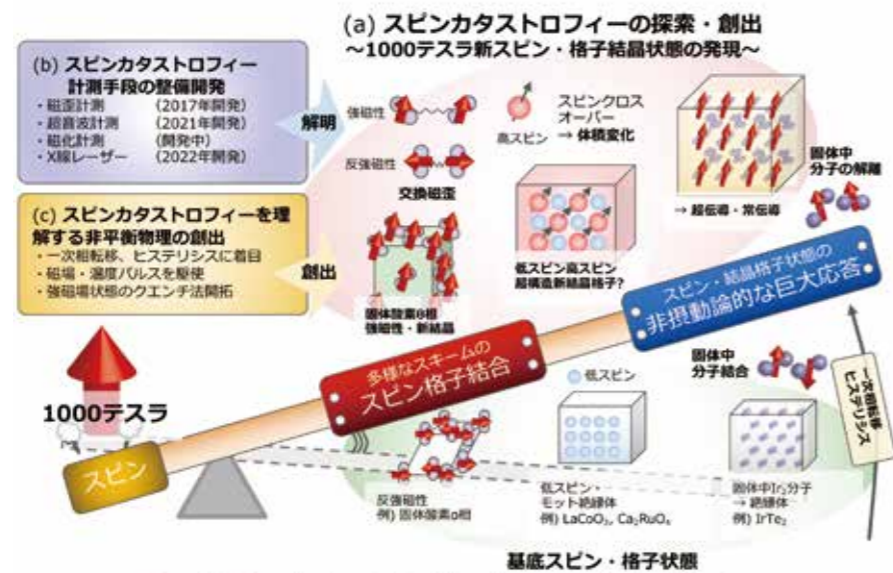


図1 スピノカタストロフィー探索の概念図

これらの問いに答えるための研究の概念図を図1に示しました。「研究項目(a):スピノ格子強結合物質系におけるスピノカタストロフィーの探索・創出」では磁場によるスピノゼーマンエネルギーが、ファンデルワールス結合や、反強磁性交換相互作用、結晶場などのエネルギーを超えるときに期待される、分子立体配置や電荷ゆらぎ、スピノクロスオーバーなどによる構造相転移、関連して生じる電気的、磁氣的、光学的異常について1000テスラ超強磁場下で実験的に明らかにします。「研究項目(b):スピノカタストロフィー計測手段の整備開発」では1000テスラ領域を探索するための手段(磁化・電気伝導度・磁歪・X線回折法・磁気光学効果)を整備し領域全体に提供します。「研究項目(c):スピノカタストロフィーの過程を理解する非平衡物理の創出」ではさらに、パルス超強磁場の掃引スピードの速さに着目し、パルス磁場における非平衡準安定状態の物理を創出し、最終目標として超強磁場状態のゼロ磁場へのクエンチ法開拓を掲げます。本研究によりスピノ駆動の化学的カタストロフィーにおけるスピノ格子結合の役割を解明します。

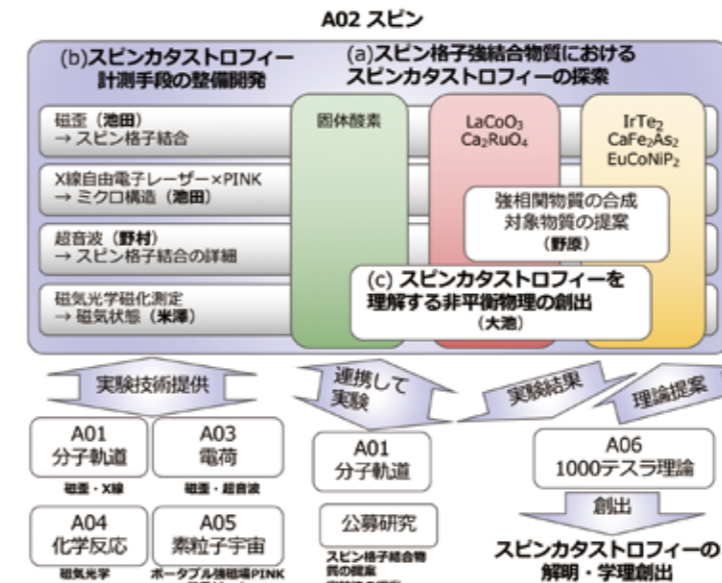


図2 A02内の役割分担、および領域におけるA02の役割

研究代表者



**池田 暁彦**  
電気通信大学 情報理工学研究所 助教  
磁歪・ポータブル超強磁場・XFEL

いろんな壁をぶちこわして、新たな扉をひらきます。

研究分担者



**米澤 進吾**  
京都大学 工学研究所 教授  
磁気光学・強相関物質計測

パルス磁場と私たちの測定技術を組み合わせて面白い大発見を目指します!

研究分担者



**大池 広志**  
東京大学 工学系研究所・JSTさきがけ 専任研究者  
準安定状態制御・急冷

安定な職を探しながら、準安定な生活を楽しんでいます。

研究分担者



**野原 実**  
広島大学 先進理工学系科学研究科 教授  
強相関物質合成・超伝導

超強磁場で現れる「けったいな」結晶構造や超強磁場で誘起される超伝導を見つけます!

研究者



**野村 肇宏**  
東京電機大学 工学部 講師  
超強磁場・酸素・超音波

みなさんと超強磁場でカタストロフさせることを楽しみにしています。

関連文献

1. "Novel Phase of Solid Oxygen Induced by Ultrahigh Magnetic Fields" T. Nomura, Y. H. Matsuda, S. Takeyama, A. Matsuo, K. Kindo, J. L. Her, and T. C. Kobayashi, *Phys. Rev. Lett.* 112, 247201 (2014)  
2. "Magnetic-field-induced insulator-metal transition in W-doped VO<sub>2</sub> at 500 T", Y. H. Matsuda, D. Nakamura, A. Ikeda, S. Takeyama, Y. Suga, H. Nakahara, Y. Muraoka, *Nat. Commun.* 11, 3591 (2020)

3. "Signature of spin-triplet exciton condensations in LaCoO<sub>3</sub> at ultrahigh magnetic fields up to 600 T", A. Ikeda, Y. H. Matsuda, K. Sato, Y. Ishii, H. Sawabe, D. Nakamura, S. Takeyama, J. Nasu, *Nat. Commun.* 14, 1744 (2023)

# 1000T バンド電子の探求と理解—金属・半導体

固体中で陽イオンが作る周期ポテンシャル中を移動する電子は一般にブロッホ状態として表されます。一方で磁場中に置かれた自由電子はランダウ状態として表されます。この二つの電子状態は異なる対称性を持っているため、その中間にある電子がどのように記述されるかは非自明な問題です。通常の固体物理学においては、磁場効果はブロッホ状態に対する二次的な効果として扱われてきました。しかし最近人類が制御可能になった1000テスラ級の超強磁場下では、小さい有効質量を持つ物質に与える磁場の効果は、一次的に扱う必要があります。私たちは、一次的な磁場効果によって一体のバンド理論で表される描像が破綻する「バンド電子のカタストロフィー」の実現と解明を目指します。カタストロフィーを実現する手段として、以下三つの効果に注目します。

## ①電子相関効果

金属において、磁場によるサイクロトロン・エネルギーがフェルミ・エネルギーを凌駕すると、電子の運動が最小半径を持つサイクロトロン軌道に閉じ込められた量子極限状態が実現します。この量子極限状態では、抑制された運動の自由度に対してクーロン相互作用の寄与が相対的に大きくなり、強相関状態が実現します。三次元系の量子極限状態では、電荷・スピン密度波、ウイグナー結晶、励起子相など、様々な量子相の実現が提案されてきましたが、そのほとんどは未解明です。本研究では、磁場で増強された電子相関効果を用いて一体のバンドモデルでは説明できない多体系の量子状態を開拓します。

## ②反磁性効果

ビスマスやグラファイトにおける顕著な反磁性はバンド構造に由来しています。グラファイトの反磁性は磁場増加とともにほぼ単調に増大し、70テスラで約300 Gaussに達します。この値から磁化と磁場の積でエネルギーを評価すると最強の永久磁石が構造を保持できる限界値に近いことがわかります。それではビスマスやグラファイトに1000テスラの磁場を印加すると、果たして構造を維持できるのでしょうか?本研究ではバンド電子由来の反磁性物質に注目し、反磁性効果を起源とした磁場による物質壊変を目指します。

## ③常磁性効果

2枚のグラフェンシートを魔法角と呼ばれる角度だけ傾けて積層すると平坦なバンド構造が実現します。このフラットバンドに注入するキャリア数を制御するとモット絶縁体や超伝導など、強相関電子系に特徴的な量子状態が実現できることがわかっています。フラットバンドが実現するとき、常磁性磁化率の増大が期待されます。私たちは具体的な試算の結果、1000テスラ級の超強磁場を使えば、ファンデルワールス系物質における積層の「魔法角化」ができるのではないかと考えています。本研究では磁場による魔法角積層構造の創成と、その構造における量子物性開拓に挑戦します。

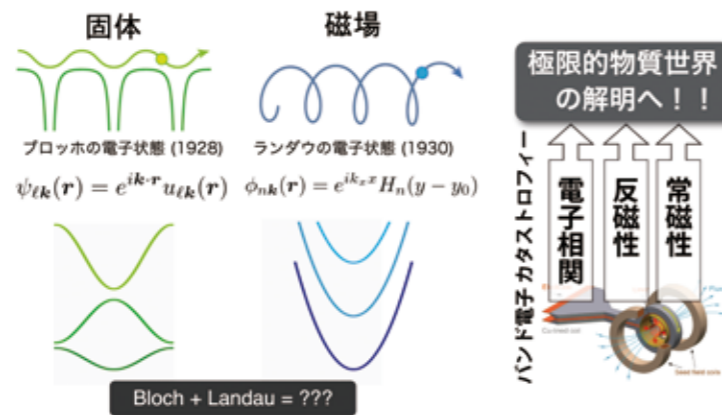


図1 本研究におけるバンド電子カタストロフィーの概念図

## 関連文献

1. Possible Excitonic Phase of Graphite in the Quantum Limit State. K. Akiba, A. Miyake, H. Yaguchi, A. Matsuo, K. Kindo, and M. Tokunaga, *Journal of the Physical Society of Japan*, 84, 054709 (2015) DOI 10.7566/JPSJ.84.054709
2. Quantum Hall effect in a bulk antiferromagnet EuMnBi2 with magnetically confined two-dimensional Dirac fermions. H. Masuda, H. Sakai, M. Tokunaga, Y. Yamasaki, A. Miyake, J. Shiozai, S. Nakamura, S. Awaji, A. Tsukazaki, H. Nakao, Y. Murakami, T. Arima, Y. Tokura, and S. Ishiwata, *Science Advances* 2, e1501117 (2016) DOI 10.1126/sciadv.1501117
3. Thermodynamic evidence of magnetic-field-induced complete valley polarization in bismuth. A. Iwasa, A. Kondo, S. Kawachi, K. Akiba, Y. Nakanishi, M. Yoshizawa, M. Tokunaga, and K. Kindo, *Scientific Reports*, 9, 1672 (2019) DOI 10.1038/s41598-018-38206-x1

## 研究課題の「問い」

- 強磁場中で一体的なバンド電子描像が破綻するバンド電子のカタストロフィーが実験的に実現できるか。
- カタストロフィーが起きた後の状態では、どのような物質の機能が発現するか。

## 本研究の目的

研究項目として下記三つの効果を用いたバンド電子のカタストロフィー実現と解明をめざします。本研究の概念図を図1に示しました。

- (a) 電子相関効果：量子極限状態における新奇量子状態の探索
- (b) 反磁性効果：反磁性エネルギーを利用した物質構造の壊変
- (c) 常磁性効果：ファンデルワールス系物質の磁場による積層制御と機能開拓

図2には、それぞれの目標達成に向けたA03項目内の役割分担と項目間連携を示しました。図にはそれぞれの効果の実現が見込まれる代表的な物質系を記載していますが、関連した現象は他の様々な物質でも期待されます。A03研究項目では公募研究を通じて、幅広い対象にわたる研究の展開を目指しています。

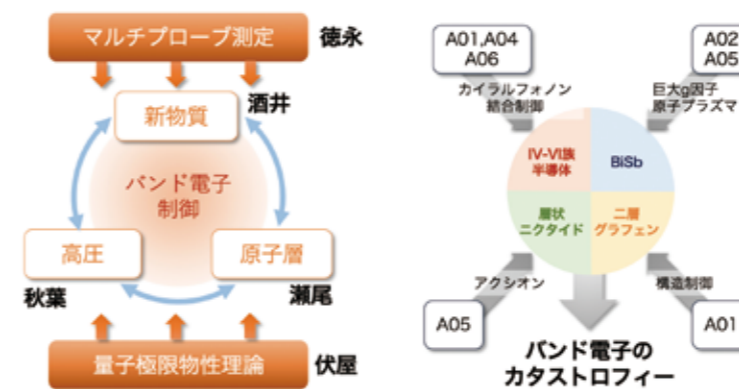


図2 A03内の役割分担・領域におけるA03の役割

4. Nonperturbative Matrix Mechanics Approach to Spin-Split Landau Levels and the g Factor in Spin-Orbit Coupled Solids, Y. Izaki and Y. Fuseya, *Physical Review Letters*, 123, 156403 (2019) DOI 10.1103/PhysRevLett.123.156403
5. Field-induced reentrant insulator state of a gap-closed topological insulator (Bi1-xSbx) in quantum-limit states, Y. Kinoshita, T. Fujita, R. Kurihara, A. Miyake, Y. Izaki, Y. Fuseya, and M. Tokunaga, *Physical Review B*, 107, 125140 (2023) DOI 10.1103/PhysRevB.107.125140

研究代表者



**徳永 将史**  
東京大学 物性研究所  
准教授  
磁気抵抗・磁化・磁気共鳴

60T までなら色々測れます。磁場で変なことが起きるのを楽しみにしています。

研究分担者



**伏屋 雄紀**  
電気通信大学 情報理工学研究所  
教授  
磁場中固体電子論・量子輸送現象  
実験と物質を真摯に見つめる理論を心がけています。ビスマスが大好きです。

研究分担者



**酒井 英明**  
大阪大学 理学研究科  
准教授  
ディラック系物質開拓  
相対論的準粒子を有する物質を開拓し、超強磁場が誘起する新奇状態と機能を明らかにします。

研究分担者



**秋葉 和人**  
岡山大学 自然科学学域  
助教  
熱測定・超音波・圧力  
極限環境の極致ならではの、新しい現象の発見を目指して努力します。

研究分担者



**瀬尾 優太**  
東京大学 生産技術研究所  
特任研究員  
原子層物質創成・制御  
複合原子層に超強磁場をかけることで全く新しい現象に出会えることを期待しています。

研究協力

**町田 友樹**  
東京大学 生産技術研究所 教授

# 1000T 化学反応の探索と解明—分子・タンパク質

荷電粒子の角運動量と軌道運動に働きかける磁場は物質に対し様々な現象を生じさせます。固体物性への影響ほどは知られていないかもしれませんが、化学反応、合成、異性化などの化学的挙動においても、その振る舞いに主要な役割を果たす電子に対し磁場はZeeman相互作用やローレンツ力を介して作用するため、多彩で興味深い磁場効果が発現することが期待されます。その顕著な例の一つは、分子や結晶中で化学結合を組む電子対のスピン三重項を極めて強い磁場で不安定化し結合を破壊する化学的カタストロフィーと呼ばれる現象でしょう。しかしながら、化学においてこれまで用いられてきた磁場は最高でも数10テスラに止まっており、磁場がこのような非摂動的効果を与える化学現象はほとんど報告されていません。A04では化学的カタストロフィーをはじめとして、未踏の1000テスラの強磁場が物質の化学的振る舞いに対し非摂動的に働いて引き起こす様々な新現象を開拓・解明します。そしてこの取り組みから強磁場によって実現する新たな化学反応、合成手法、新物質、新機能を発見・開発し化学の可能性を大きく広げることを目指します。

現在計画している研究テーマは大きく分けて次の3つから

なります。

- 1) 好塩菌などの細菌の生命活動に不可欠な光駆動のプロトンポンプとして働く光受容タンパク質バクテリオロドプシンに対する超強磁場の効果を調べます。プロトン輸送の引き金となるロドプシン中の有機分子レチナールの光異性化への磁場効果の観測により未だ詳細が解明されていないロドプシンの光励起・反応過程を明らかにし、さらに超強磁場によるタンパク質の初めての立体構造制御に挑みます。
- 2) 有機分子に光照射すると励起スピン三重項状態からの緩和によりラジカルやスピン三重項状態がしばしば生成されますが、そのようなスピン自由度を伴った状態を経由する光化学反応や発光、励起ダイナミクスには磁場の大きな影響が期待されます。この期待のもと強磁場を用いた光化学反応のスイッチングの実現と一重項光励起子分裂・三重項励起子融合への超強磁場効果の解明に取り組みます。さらに超強磁場でスピン三重項を直接安定化できれば、光照射の三重項経路で起こる機能発現や構造変態を磁場によって起こすことが可能になります。その一環としてホトクロミック物質の

超強磁場による発色反応の実現を目指します。また基底状態にスピン自由度をもつ安定ラジカル分子や、比較的弱い外部刺激により共有結合が開裂してラジカル対を生成するプロラジカル分子の集合体にも顕著な磁場効果が期待されます。プロラジカル分子についてそのスピン状態の相対安定性を超強磁場で制御することで共有結合の可逆切断/生成を実現し、化学的カタストロフィーによる熱ではできない新物質・新機能の開拓を目指します。また安定ピラジカル物質の室温単分子磁場応答発光の初実現に取り組みます。

- 3) 超強磁場をツールとして有機・無機材料のキラリティーを制御する新たな不斉合成手法の開発とその機構解明を目指します。その一つがChirality Induced Spin Selectivity(CISS)と呼ばれるキラル物質による電子のスピン偏極を用いた不斉合成です。超強磁場によってスピン偏極度を制御した電気化学反応からCISS由来の不斉合成機構を解明し、さらに高効率な不斉合成法の開発を目指します。また磁場と併せて電場を印加することで生じる電気磁気効果を用いて、超強磁場による磁性体の結晶キラリティー制御に取り組みます。

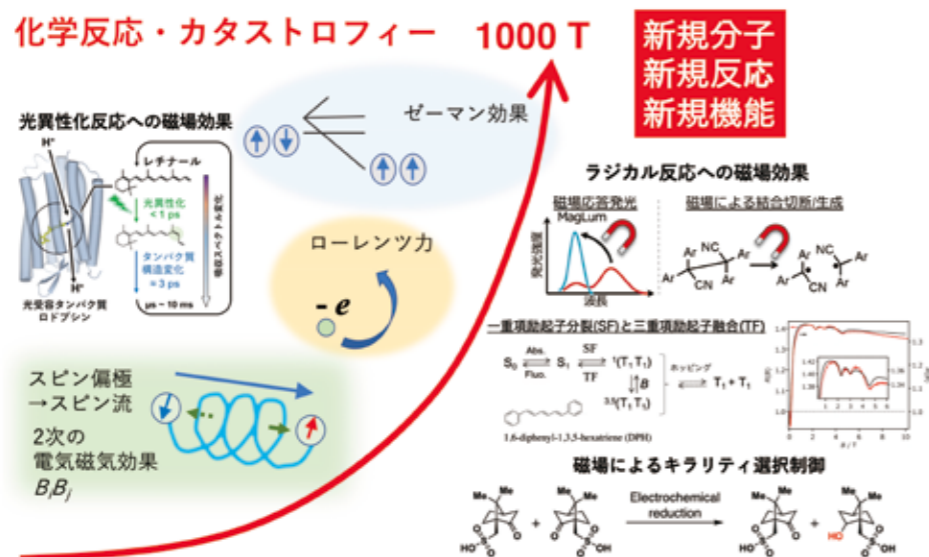


図1 研究内容の概念図

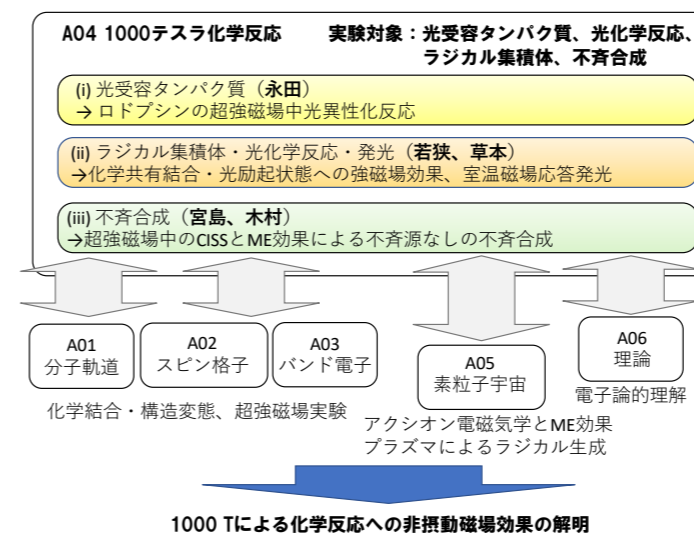


図2 A04内の役割分担と領域内におけるA04の役割



**木村 尚次郎**  
東北大学 金属材料研究所  
准教授  
磁気光測定・キラリティー制御

初めて知る化学への磁場効果をこの領域で学んでいくことを楽しみにしています。



**永田 崇**  
東京大学 物性研究所  
助教  
生体高分子の磁場効果・光測定

誰も挑戦していないことに取り組める領域に参加させて頂けてとてもわくわくしています。



**若狭 雅信**  
埼玉大学 理工学研究科  
教授  
化学反応の磁場効果

化学反応の磁場効果、さて1000Tでは何が起こるのでしょうか？



**草本 哲郎**  
大阪大学 基礎工学研究科  
教授  
ラジカル分子の磁場効果

本領域で様々な化学的カタストロフィーを目の当たりにするのが楽しみです。



**宮島 大吾**  
東京大学 物性研究所・JSTさきかけ  
専任研究員  
キラル分子育成

鳴かぬなら殺してしまえホトギス。何か見つかるまで磁場を掛けまくります。

研究協力

井上 圭一

東京大学 物性研究所 准教授

矢後 友暁

埼玉大学 理工学研究科 准教授

松岡 亮太

分子科学研究所 生命・錯体分子科学研究領域 助教

# 1000T 素粒子探索と宇宙磁気プラズマの解明

2012年のHiggs粒子の発見は、それまで物質を構成する fermion やそれらの相互作用を媒介する gauge boson を研究対象としてきた素粒子物理学を新たなフェーズへと導きました。Higgs粒子が他の素粒子と本質的に異なり、「真空」と同じ量子数を持つスカラー粒子であることで、

(1) 真空は空っぽではなくHiggs場が凝縮しており、  
 (2) その相転移により宇宙が進化してきたこと  
 を示しています。またそれは同時に素粒子研究自体も、宇宙や真空、及びそれらを内包する「時空」に対する研究へと自然に拡張される契機となりました。現在では、宇宙の成り立ちを説明する「物質・反物質間の非対称性」や、銀河及び星の形成を支配する「暗黒物質」、さらに宇宙加速膨張の起源となる「暗黒エネルギー」の探索が精力的に行われています。

また恒星の重力崩壊や超新星爆発を始めとして、宇宙空間は「catastrophic現象」の宝庫であり、その生成物であるブラックホールや中性子星、および衝撃波などでは宇宙初期と同様の非常にエネルギー密度の高いプラズマ状態が実現しています。天文観測やシミュレーション上では、これらのダイナミクスにおいて超強磁場が重要な役割を担っていることは理解されていますが、そのような極限状態に対して実際に人類がアクセスする手段が無いため、多くの部分が未解明のままとなっています。これらのダイナミクスをミクロなレベルで理解するためには高温・高密度プラズマの研究が必要です。近年パワーレーザー技術の進展によりそのようなエネルギー密度の高いプラズマが実験室で実現可能となり、宇宙プラズマ現象を素過程から解明する「レーザー宇宙物理学」が日本で発祥しました。現在では観測、理論・シミュレーションと並ぶ重要な研究手法となっています。

## 研究課題の「問い」

- 宇宙の進化や時空構造の変遷をたどる上で、磁場が果たしてきた役割を実験的に明らかにできないか?
- 多様な天体現象に対し、強磁場下での素粒子反応やプラズマのダイナミクスを調べることで、新たな素過程を見出すことができるか?
- 時間や空間に対する対称性などの類似性から、そのような素過程を再現する新たな物性を開拓できないか?

## 本研究の目的

研究項目として下記の3点を設定します。また図1に本研究の概念図を示しました。

- 初期宇宙の進化や星の形成を支配する暗黒物質および暗黒エネルギーの高感度探索、および新粒子に対する物性系でのアナロジーの調査。
- ブラックホールや中性子星などの強磁場天体で発現する真空の磁気応答や異常シンクロトン放射の検証、および極限環境下での新たな素過程の発見。
- 宇宙プラズマにおける強磁場の役割の系統的な調査とそのダイナミクスの解明。

本計画研究は「宇宙」と「強磁場」を共通テーマとして、素粒子物理と宇宙プラズマ物理の研究者が協力し合う学際的研究です。素粒子及びプラズマはどちらも現象をミクロなレベルで記述しますが、素粒子物理は量子化された場の理論で記述されるため、新たな粒子や素過程が発見された場合には関連する反応を演繹的に知ることができます。さらに、本研究で対象とする暗黒物質等の質量スケールが加速器実験と比較して大幅に軽い場合、パワーレーザーやXFELといった種々の量子ビームを使用することで高感度な探索が行えます。

一方プラズマは荷電粒子の集団より成る流体であり、現象を特徴づける時間及び空間スケールがプラズマ密度のルートに反比例するため、宇宙規模の時空現象を実験室系での高密度プラズマにより再現することができます。天体観測は、(1) 現象全体のマクロ構造を捉えるリモート観測（望遠鏡で天体を観測する等）、及び(2) 現象のミクロな物理量をローカルに観測するその場観測（観測衛星により太陽風を観測する等）に大別され、マクロ構造とミクロな物理量の同時計測は不可能ですが、レーザー実験では可能です。さらに可視光やX線などの異なる波長帯でのイメージングや分光、及び電子やプロトン等をプローブ粒子とした局所電場・磁場の精密測定が可能であり、それらのダイナミクスと合わせると、実験により得られる情報量が格段に多いのが特徴です。またプラズマの温度・密度・速度を調整可能であるなど制御性に優れており、対象とする現象を広大なパラメータ空間の中で連続的・系統的に調査できます。

上記の特色に加え、領域の基盤設備である超強磁場システムの使用によって新物理に対する探索感度やパラメータ空間のサイズが増大し、宇宙空間に存在する人類未踏の物理過程を研究することができます。

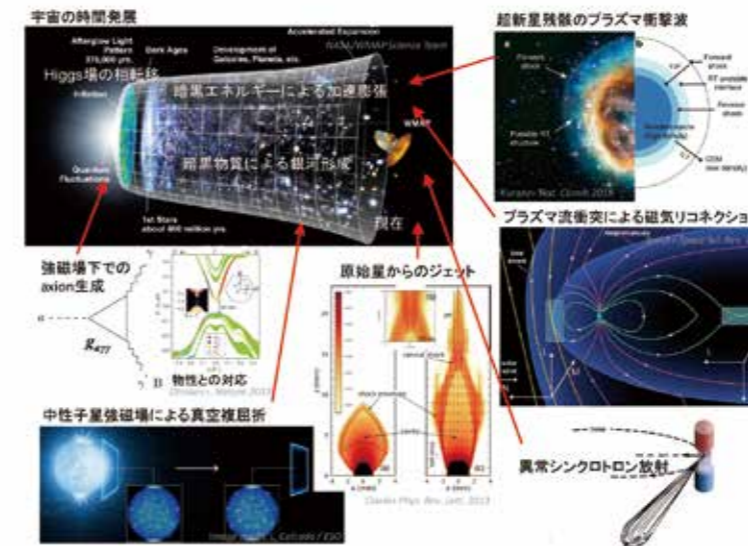


図1 計画の概要、および本研究で探る宇宙の超強磁場現象

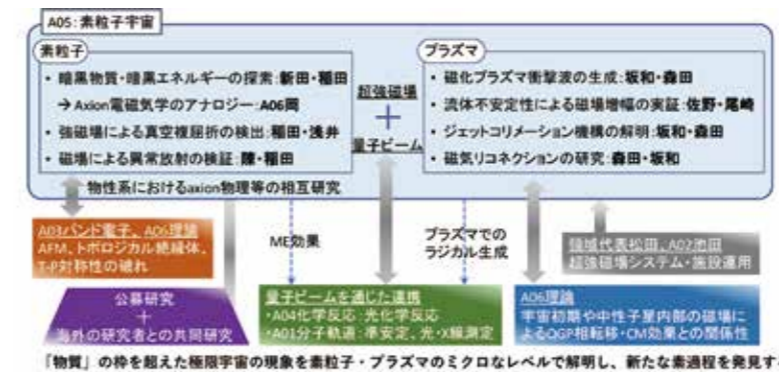


図2: A05研究体制および役割と領域内研究・外部研究との連携



**研究代表者**  
**稲田 聡明**  
 東京大学 素粒子物理国際研究センター 助教  
 真空複屈折・量子計算機

強磁場を舞台に皆様との新たな相互作用を期待しています。



**研究分担者**  
**浅井 祥仁**  
 東京大学 理学系研究科 教授  
 高エネルギー物理・素粒子理論解析  
 LHC よりも高いエネルギー領域の物理を非加速器実験で間接的に検証します。



**研究分担者**  
**陳 詩遠**  
 東京大学 素粒子物理国際研究センター 特任助教  
 素粒子実験・ニュートリノ

ニュートリノが人類の叡智に届する瞬間に立ち会いたいと思います。



**研究分担者**  
**新田 龍海**  
 東京大学 素粒子物理国際研究センター 特任助教  
 素粒子実験・アクション

超強磁場と素粒子実験の融合、とても楽しみです。



**研究分担者**  
**坂和 洋一**  
 大阪大学 レーザー科学研究所 准教授  
 パワーレーザー・プラズマ実験・衝撃波

強磁場とレーザープラズマで宇宙を探りたい。



**研究分担者**  
**森田 太智**  
 九州大学 総合理工学研究院 助教  
 プラズマ実験・磁気リコネクション

領域での異分野交流によって、新しい共同研究が生まれることを楽しみにしています。

**研究協力**  
**尾崎 典雅**  
 大阪大学 工学研究科 准教授  
**佐野 孝好**  
 大阪大学 レーザー科学研究所 准教授

## 関連文献

1. C. Bartram, T. Nitta et al (ADMX Collaboration), Search for Invisible Axion Dark Matter in the 3.3–4.2  $\mu\text{eV}$  Mass Range Physical Review Letters 127, 261803 (2021). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.127.261803>
2. T. Inada, T. Yamazaki, T. Namba, S. Asai, T. Kobayashi, K. Tamasaku, Y. Tanaka, Y. Inubushi, K. Sawada, M. Yabashi, T. Ishikawa, A. Matsuo, K. Kawaguchi, K. Kindo, and H. Nojiri, Search for Two-Photon Interaction with Axionlike Particles Using High-Repetition Pulsed Magnets and Synchrotron X Rays, Phys. Rev. Lett. 118, 071803 (2017) <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.118.071803>
3. T. Yamazaki, T. Inada, T. Namba, S. Asai, T. Kobayashi, A. Matsuo, K. Kindo, H. Nojiri, Repeating Pulsed Magnet System for Axion-like Particle Searches and Vacuum Birefringence Experiments, Nuclear Instruments and Methods A 833, 122 (2016), <https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.07.031>.
4. T. Morita, T. Kojima, S. Matsuo, S. Matsukiyo, S. Isayama, R. Yamazaki, S. J. Tanaka, K. Aihara, Y. Sato, J. Shiota, Y. Pan, K. Tomita, T. Takezaki,

Y. Kuramitsu, K. Sakai, S. Egashira, H. Ishihara, O. Kuramoto, Y. Matsumoto, K. Maeda, and Y. Sakawa, Detection of current-sheet and bipolar ion flows in a self-generated antiparallel magnetic field of laser-produced plasmas for magnetic reconnection research, Physical Review E 106, 055207-1-12 (2022). <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.106.055207>

5. Youichi Sakawa, Yutaka Ohira, Rajesh Kumar, Alessio Morace, Leonard NK Döhl, Nigel Woolsey, Identification of electrostatic two-stream instabilities associated with a laser-driven collisionless shock in a multicomponent plasma, Physical Review E 104, 055202-1-13 (2021). <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.104.055202>
6. F. Fiuza, G. F. Swadling, A. Grassi, H. G. Rinderknecht, D. P. Higginson, D. D. Ryutov, C. Bruulsema, R. P. Drake, S. Funk, S. Glenzer, G. Gregori, C. K. Li, B. B. Pollock, B. A. Remington, J. S. Ross, W. Rozmus, Y. Sakawa, A. Spitkovsky, S. Wilks, and H.-S. Park, Electron acceleration in laboratory-produced turbulent collisionless shocks, Nature Physics 16, 916-920 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41567-020-0919-4>



# 1000T 非摂動磁場効果の理論

理論班には領域代表から階層を超えた磁場中物理の学術変革の基盤となる理論構築という高い目標を与えられました。紀元前の磁石の発見に端を発した磁場下の物理は、近現代では電磁気学や量子電磁力学の確立の指針を与え、物性ではランダウ量子化や整数・分数量子ホール効果、ホフスタッターバタフライの発見に至るなど非常に長く深い研究の歴史があります。本領域ではこれらに匹敵するマイルストーンとなる発見が求められます。本領域と関係の深い電場中の固体物理や、素粒子のアキシオン探索、そして分子やタンパク質の量子化学的研究における進展を取り込みつつ、シンプルで普遍的な系を考えると前進したいです。

## 並行世界としての電場中物理

現在、電場中の物理は量子幾何学効果のキーワードの下に現代化の途上にあります。幾何学効果は平易にいうとハミルトニアンが行列であることに由来する現象です。ベリー曲率由来の量子ホール効果やカイラル磁気効果、アキシオン応答などが代表例です。幾何学効果は絶縁体の起金属転移にも現れます。絶縁体に電場を印可すると、まず分極が誘起され、次にシュエイング機構により電子・正孔の対生成が起きます。さらに強電場では、電子はワニエ・シュタルク局在状態に移行します。近年は非熱的量子制御をめざし、電子を光子と結合させバンド構造そのものを制御するフロック・エンジニアリングや格子を電場で制御する非線形フォノンクスが進展しております。磁場は電場と同じくゲージ場として電子と相互作用するため各現象には磁場誘起の対応物があり、本研究で参考にしたいです。

## 磁場中物理のミニマル問題

① ランダウ量子化と量子幾何学効果、非可換場の理論  
ランダウ量子化と量子幾何学効果が結びつくと特異な量子現象が発現します。ディラック電子における真空偏極やカイラル磁気効果、平坦バンド系における量子計量と関連した現象(Nature 584,59(2020))が知られています。本領域で興味を持たれているディラック絶縁体やファン・ホッフ特異性のある系(Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub>等)などにも未知の量子現象が隠れているかもしれません。磁場中の量子系はランダウ準位(非可換場の理論)で記述され、ポテンシャル問題やエキシトン等の束縛準位の解析が容易になりますが、量子幾何学効果を取り込む研究に余地があります。

② ホフスタッターバタフライと相関効果  
1000Tの磁気長は8Å程度です。同程度の格子定数を持つフラレン固体や分子性半導体ではホフスタッターバタフライが現れます。これらの物質群では超伝導や電荷秩序、モット転移などの強相関秩序が発現するため磁場下の相関効果を調べる理想的な舞台です。これらの系を念頭に強相関模型を用いたポロジカル秩序等の量子多体相の探索を考えております。

③ 固体の化学的カストロフィー  
本領域では既に磁場の印可によって結晶構造やスピン構造が破壊的に変化する固体版の化学カストロフィーが実現しております。一方で、そのメカニズムの詳細は未解明で、理論研究も乏しいです。格子自由度は電子と結合することで数千倍に増強された磁場効果を受けることがカイラルフォノンの研究で知られています。この知見を元に、磁場誘起相転移における「この原理」を探索します。

④ カイラルフォノンとフロック・エンジニアリング  
電子・光子系ではフロックエンジニアリングや共振器エンジニアリングに注目が集まっています。これを磁場下の電子・格子系に翻訳すると、カイラルフォノンと結合した電子のフロック状態やポーラロン状態と、そこで発生するホール効果やカイラル秩序の問題になります。

⑤ 階層を越えて-“アキシオン探索からタンパク質・分子系へ”-  
アキシオン探索に物性側から参画するチャンスがうれしく感じます。未知素粒子としてのアキシオンはディラックフェルミオンの軸性電流と結合するスカラー場です。一方で、物性の広義のアキシオンはベリー曲率由来のホール効果を誘起する準粒子一般で、磁性ワイル半金属のマグノンやフォノン、エキシトンなど多様です。物性には準粒子を測定する様々なノウハウがありますので、うまく意思の疎通ができれば新しいアキシオン探索方法を提案できるかもしれません。さらにはタンパク質や分子を含む非晶質の磁場効果には環状電流やCISをはじめとした興味深い問題が多くあります。極限的な磁場下でのシンプルな設定を考えることで新しい視点を得たいです。

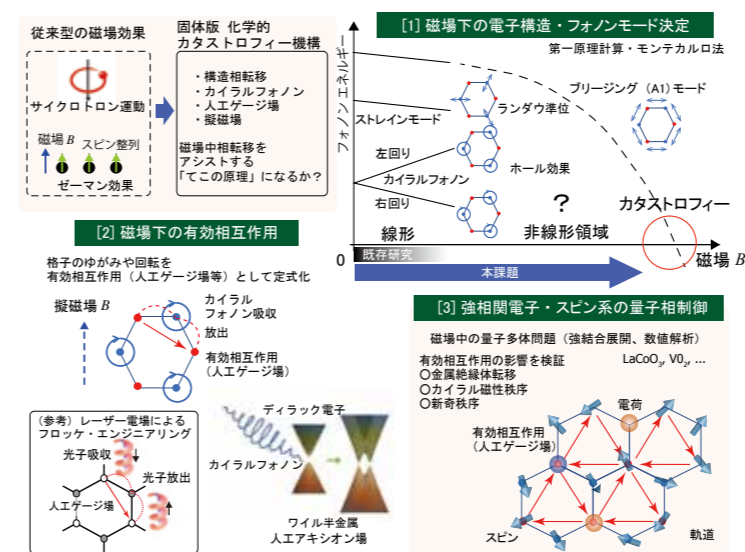


図1 研究内容の概念図

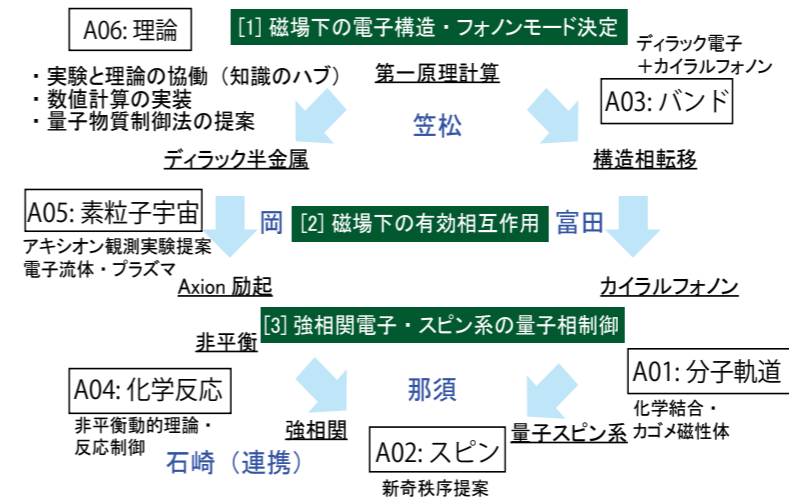


図2 連携図



**岡 隆史**  
東京大学 物性研究所 教授  
フロック理論・磁場誘起人工ゲージ場  
磁場中物理学は、量子幾何学や場の理論などの視点を用いて、現代化が可能と考えています。皆様と一緒に新現象の発見を行いたいです。



**那須 譲治**  
東北大学 理学研究科 准教授  
磁場中強相関理論・量子相制御  
超強磁場による新概念の探索が楽しみです。



**富田 裕介**  
芝浦工業大学 工学部 教授  
パイロニックフォノン有効模型  
いろんな現象や階層をつなぐ有効模型を作れたらいいなと考えています。



**笠松 秀輔**  
山形大学 理学部 准教授  
磁場中構造理論・第一原理計算  
非常に挑戦的な領域で不安もありますが、何か出てくるかとても楽しみです。

## "Something's Coming"

—— 第1回領域会議 レポート (6月19~21日 東京大学物性研究所) ——

A03班 伏屋雄紀

*Could it be? Yes, it could.*

*Something's coming, somethin' good, if I can wait!*

*Something's comin', I don't know what it is,*

*But it is gonna be great!*

(ミュージカル「ウエストサイド物語」より)

そう口ずさみながら帰りたくなる、知的興奮に包まれた濃密な3日間でした。その興奮冷めやらぬうちに書き留めておこうと、領域会議からの帰宅途中、ターミナル駅のスタバに立ち寄り、この原稿を書き始めました。

会議のオープニングは松田代表から1000テスラ科学の概要と計画が改めて紹介されました。その最後に「研究成果も大事ですが…」と前置きされた上で、

- ・ **新しいことの発見を First Priority に**
- ・ **開拓者精神で、ときには、みるまに飛ばそう!**  
きつと何かが見つかる

とのメッセージが投げかけられました。この代表の言葉に我々メンバーは強く励まされ、「この言葉をかけてくれる代表に率いてもらっている限り、本領域はきつと良い方向に向かう」と直感しました。

今回の会議では、計画班の代表者が30分、分担者は20分の持ち時間で、初日はA01~A03班、二日目はA04~A06班、丸二日かけて全員が発表しました。さらに三日目は公開研究会として、代表による領域の説明と、三名の講師のチュートリアル講演が行われました。講演では、15分の長めの質疑応答時間が設けられましたが、それでは足りないほどのやりとりがありました。

本領域の大きな特徴の一つは、物性物理を中心としながらも、化学、生物、素粒子、宇宙と自然科学の広い分野の研究者が集まっていることです。これほど異なる分野が集まれば、第一回目はほとんど顔合わせ程度、というのがよくあるパターンでしょう。しかし、それは見事に良い方向に裏切られました。初対面の人が多い研究会とは思えないくらい、初日から活発な質疑応答が交わされました。

会議全体を通して特に印象的だったのは、若手研究者が非常に積極的に発言されている姿です。質疑応答はむしろ30代以下の若い研究者を中心に進められました。そして若い人たちに刺激されるかのように“ミドルエイジ”も積極的に質問を投げっていきます。これは参画者の平均年齢が低い本領域の特徴をよく表した現象だったといえるでしょう。和やかな空気の中でみなさん誰にも遠慮することなく、どんどん質問する。「分野外なので教えて欲しいのですが…」なんてお決まりの枕詞は本領域



▲初日終了後にあった強磁場施設見学も大変盛況で、みなさん熱心に質問を寄せられたため、予定していた1時間を大幅に超えました。



には必要ありません。だってみんな分野外なのですから!

みなさん、純粋に「知りたい」という気持ちで質問をされている。そしてこれから「何かが起こりそう」という高揚感を共有し、メンバー全員で同じ方向を向いて「せーの!」で一斉に一步を踏み出そうとしている。その純朴な気持ちに包まれた会議は、とても清々しいものを感じられました。

もう一つ印象的だったのは、休憩時間です。質疑応答で十分カバーできなかった点について、発表者あるいは質問者がフォローに向かう姿がそこかしこで見受けられました。そしてそれからより深い意見交換が交わされました。個人的にも、そうした休憩時間中のやりとりが発展し、早速新たな班間連携や勉強会が企画されるに至りました。これこそ、対面ならではの展開です。コロナ禍の遠隔会議ではなかなか得られなかったこの躍動感を、みなさん長く待ち望んでおられていたことでしょう。それがひしひしと伝わってきました。

と、書いているうちに、A04班代表の木村さんからメールがありました。会議が終わったときに質問させて頂いたことについて、詳しく書かれた解説をお送りくださったものでした。木村さんもまだ新幹線の中のはずなのに、早々に送ってくださっ

たのでした。昨晩は懇親会に出席後、ほぼ最終の新幹線に乗られたアドバイザーの陰山先生から総括班にメッセージがあり、懇親会をフォローアップするかのようにSlack上でやりとりする場面もありました。このスピード感! 本領域の発展に、否応なしに期待が高まります。

*Somethin's comin', don't know when  
But it's soon;  
Catch the moon, one-handed catch!*



▲懇親会も、国籍や老若男女を問わず、大いに盛り上がりました。それだけではまだまだ話足りず、(会場候補の少ない柏の葉キャンパス駅で)二次会に繰り出す一群の姿も観測されました。



学術変革領域研究 (A)

1000 テスラ超強磁場による化学的カタストロフィー：非摂動磁場による化学結合の科学

第1回領域会議 | 2023年6月19日(月) - 21日(水) 東京大学物性研究所 6階大講義室

(初日) 6月19日(月) <非公開会議 対面のみ>

<座長> AO3 徳永 将史	
9:30 - 9:40	「はじめに」 領域代表 松田 康弘 (東大)
9:40 - 10:10	「AO1 研究概要と計画」 AO1 代表 大和田 謙二 (QST)
10:10 - 10:30	「磁場下強誘電体のラマン分光」 AO1 分担 塚田 真也 (島根大)
10:30 - 10:50	「固体中の多様な分子軌道形成と磁場効果」 AO1 分担 平井 大悟郎 (名大)
10:50 - 11:10	「分子軌道への磁場効果の探索」 AO1 分担 加藤 大地 (京大)
11:10 - 11:30	「強誘電体への強磁場効果の探索」 AO1 分担 松田 康弘 (東大)
写真撮影 昼休み	
<座長> AO1 大和田 謙二	
13:30 - 14:00	「AO2 研究概要と計画」 AO2 代表 池田 暁彦 (電通大)
14:00 - 14:20	「超強磁場状態をゼロ磁場に持ち帰る方法」 AO2 分担 大池 広志 (さきかけ・東大)
14:20 - 14:40	「超強磁場による共有結合の破壊：モデル物質の開発」 AO2 分担 野原 実 (広島大)
14:40 - 15:00	「固体酸素の超強磁場における結晶構造」 AO2 分担 野村 肇宏 (東京電機大)
15:00 - 15:20	「高感度磁気光学効果測定による パルス磁場下のスピン-格子結合効果の研究」 AO2 分担 米澤 進吾 (京大)
休憩：20分	
<座長> AO2 池田 暁彦	
15:40 - 16:10	「AO3 研究概要と計画」 AO3 代表 徳永 将史 (東大)
16:10 - 16:30	「磁場中固体電子の量子論」 AO3 分担 伏屋 雄紀 (電通大)
16:30 - 16:50	「強磁場・高圧力・極低温の極限環境を用いたバンド電子の研究」 AO3 分担 秋葉 和人 (岡山大)
16:50 - 17:10	「特異なバンド構造を持つ V 族元素ネットワークにおける強磁場効果」 AO3 分担 酒井 英明 (阪大)
17:10 - 17:30	「強磁場を用いた原子層物質の積層構造制御」 AO3 分担 瀬尾 優太 (東大)
17:30 - 17:40	「講評」 アドバイザー 黒岩 芳弘 (広島大)
施設見学 17:40 - 18:40	

(2日目) 6月20日(火) <非公開会議 対面のみ>

<座長> AO5 稲田 聡明	
9:20 - 9:50	「AO4 研究概要と計画」 AO4 代表 木村 尚次郎 (東北大)
9:50 - 10:10	「光受容タンパク質ロドプシンの光反応と磁場効果の可能性」 AO4 分担 永田 崇 (東大)
10:10 - 10:30	「光化学反応に対する強磁場効果」 AO4 分担 若狭 雅信 (埼玉大)
10:30 - 10:50	「有機ラジカルが示す発光の磁場効果」 AO4 分担 草本 哲郎 (阪大)
休憩：20分	
<座長> AO6 岡 隆史	
11:10 - 11:50	「AO5 研究概要と計画」 (40分) AO5 代表 稲田 聡明 (東大)
11:50 - 12:10	「強磁場を用いた軽い微小電荷粒子探索」 AO5 分担 陳 詩遠 (東大)
12:10 - 12:30	「アクションと強磁場」 AO5 分担 新田 龍海 (東大)
昼休み / 総括班会議	
14:00 - 14:30	「パワーレーザーを用いた宇宙磁化プラズマ実験：無衝突衝撃波」 (30分) AO5 分担 坂和洋一 (阪大)
14:30 - 14:50	「パワーレーザーを用いた宇宙磁化プラズマ実験：磁気リコネクション」 AO5 分担 森田 太智 (九州大)
<座長> AO4 木村 尚次郎	
14:50 - 15:20	「AO6 研究概要と計画」 AO6 代表 岡 隆史 (東大)
15:50 - 16:10	「強相関電子系における磁場効果」 AO6 分担 那須 譲治 (東北大)
16:10 - 16:30	「LLG 方程式を用いた相転移温度の磁場依存性の解析」 AO6 分担 富田 裕介 (芝浦工大)
16:30 - 16:50	「第一原理計算による磁場誘起相の解析」 AO6 分担 笠松 秀輔 (山形大)
16:50 - 17:00	「講評」 アドバイザー 陰山 洋 (京大)
懇親会 18:30 - 20:30 (柏の葉キャンパス駅前)	

(3日目) 6月21日(水) <公開会議 ハイブリッド予定>

9:00 - 9:30	
9:30 - 10:10	「領域の概要」 領域代表 松田 康弘
「Hot Topics: 超強磁場におけるスピン3重項励起子凝縮」 AO2 代表 池田 暁彦	
休憩：20分	
10:30 - 11:30	
「チュートリアル講演(1) 光化学反応の磁場効果」 AO4 分担 若狭 雅信	
11:30 - 12:30	
「チュートリアル講演(2) 素粒子物理と強磁場」 AO5 代表 稲田 聡明	

共用ポータブル磁場発生装置について

強磁場の発生装置は大型で、一般には専用施設が必要です。1000テスラの磁場発生も東大物性研でのみ可能です。もし強磁場環境を利用したい場合、強磁場コラボラトリーによる国内の共同利用研究の受け入れ体制が確立されています。一方で専用施設の外でも強磁場下での測定を可能とすることで、飛躍的に本領域の研究を進展させることができます。本領域ではこのために、

- 「ポータブル40テスラパルス磁場発生装置」
  - 「ポータブル100テスラパルス磁場発生装置」
- を総括班で整備し、各研究項目の研究で共用できる体制を整備します。これによって、現在磁場環境のない研究者も磁場研究を自らの所属機関で行うことが可能となります。

市販装置ではとどかない20テスラ以上の強磁場環境を磁場専用施設以外の実験室や施設に導入することには、様々な利点があります。(a) 準備段階の実験・・・個人研究室レベルで準備実験を行うことで、より高い磁場での本実験の成功確率を上げたり、技術的に困難な実験への挑戦が可能になります。(b) パルス磁場に慣れる・・・定常磁場の利用経験があるけれどパルス磁場の利用経験はない研究者、今までに磁場の利用経験がない研究者、のどちらにとっても、パルス強磁場への入門体験として有意義です。小型パルス磁場装置によってパルス磁場に直接触れる機会がふえることで、少し専門的な匂いのするパルス強磁場のハードルを下げ、領域の発展に貢献することができます。(c) 研究の新展開を促す・・・新たな

アイデアを自身の所属において短期間で実験に移行できます。従来の研究と連続性のないような全く新しい研究に取り組むことも可能です。例えば生命と磁場など。

「ポータブル40テスラパルス磁場発生装置」5台は、実験系研究項目のAO1~AO5で共用する40テスラ磁場発生装置です。このような小型磁場装置は量子ビーム施設や個人研究室で利用されてきた実績があります[Y. H. Matsuda, T. Inami, J. Phys. Soc. Jpn. 82, 021009 (2013)]。また、100テスラ発生可能な「ポータブル100テスラパルス磁場発生装置」は、一巻きコイル法によりコイルの破壊を伴って超強磁場を発生します。運用には安全上の注意なども必要ですが、すでにX線自由電子レーザー実験への適用報告もあり、共用装置にできると考えています[A. Ikeda et al., Appl. Phys. Lett. 120, 142403 (2022)]。日本においては物性研究所以外で100テスラ以上の磁場の発生に成功した例はありません。多様な研究機関での100テスラ共用装置の活用は、本領域の発展に貢献するばかりでなく強磁場科学の基盤強化の上でも意義が大きいです。

これらの装置は、研究計画以外に公募研究との共同研究においても活用可能で、領域全体に貢献すると期待しています。さらに、研究領域期間終了後には全国共同利用制度の下で共通装置に供することも可能性として想定しています。

共用装置として整備

100 T 可搬型破壊型パルス磁場装置 (1台：総括班)

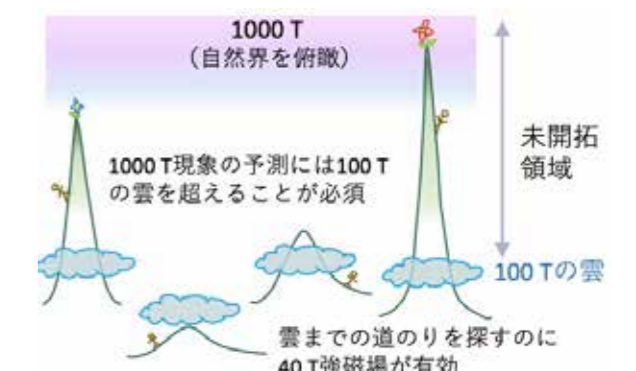
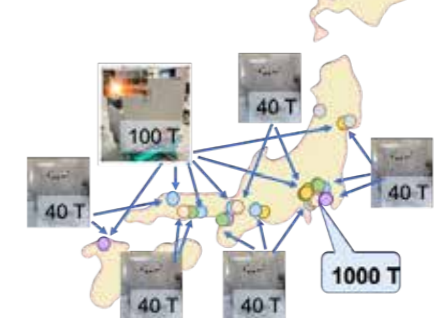


40 T 可搬型パルス磁場装置 (補助的実験用 5台：総括班)



\* 領域終了後は、強磁場コラボラトリーにて全国共用化も視野

モバイルパルス磁場で領域を融合



学術変革領域研究 (A) の公募研究の内容

1000テスラ超強磁場による化学的カタストロフィー：  
非摂動磁場による化学結合の科学

<https://1000tesla.issp.u-tokyo.ac.jp/guideline/>



領域略称名：1000テスラ科学  
 領域番号：23A201  
 設定期間：令和5(2023)年度～  
 令和9(2027)年度  
 領域代表者：松田 康弘  
 所属機関：東京大学物性研究所

領域の概要

磁場は相対論的電気効果であり自然界形成に不可欠であるが、地球上では一般にその効果は弱く、摂動的である。一方で、地球磁場の16桁倍にも及ぶ宇宙空間での強い磁場は非摂動磁場効果を与えるが、それを理解するための学問は確立していない。本研究領域では最近開発された室内世界最強の1000テスラ超強磁場を用い、地球上自然界における非摂動磁場効果を明らかにする。1000テスラの磁場が電子スピンの与えるエネルギー変化は、熱エネルギーに見立てた温度換算で1350ケルビンであり、鉄のキュリー温度や金の融点を上回り、化学結合への破壊的效果である化学的カタストロフィー現象を固体内で実現できる。固体から分子、生体分子、素粒子、プラズマを対象として、磁場による新結晶創成などの革新的現象から自然界を形成する機序の本質に迫る。

計画研究には、A01分子軌道・カタストロフィー、A02スピン・カタストロフィー、A03バンド電子・カタストロフィー、A04化学反応・カタストロフィー、A05素粒子宇宙・カタストロフィー、A06磁場カタストロフィー理論として、6つの研究項目があり、それぞれ、各1つの計画研究が設けられている。

A01からA03は固体を対象とする。化学的カタストロフィー現象の一つとして磁場による結晶変形がある。波動関数形状、ゼーマン効果、ランダウ量子化などを通して、結晶構造が磁場中で最適化することで、低磁場では実現できない磁場中新結晶が創出可能となる。分子立体配置の再構成によって120テスラで単斜晶から立方

晶へと相転移が起こる固体酸素はその典型例の一つであるが、より広範囲の対象物質への研究展開と量子力学的な転移メカニズムの理解が領域の研究目的である。結晶の変形は原子間の結合状態に変化が及ぶことで生じているため、微視的な電子論から捉え直すことが可能になると期待している。

A04は対象を分子・高分子として、光化学反応への非摂動磁場効果を主な研究対象とする。光励起状態も含めた磁場効果によって、ゼーマン効果やローレンツ力を通じた化学反応過程への非摂動効果を研究対象とする。カイラリティやスピン流と磁場との相関も利用し、強磁場新分子の創出やその生成機構の理解を目指す。

A05はプラズマおよび素粒子現象への非摂動磁場効果を研究する。宇宙空間に存在するcatastrophic現象を再現した場合に期待される、暗黒物質や暗黒エネルギーの生成・散乱・崩壊反応、量子化された真空が示す複雑折現象や異常シンクロトロン放射、更に磁化プラズマの衝撃波やジェットコリメーション、磁気リコネクションなどについて、種々の量子ビームを駆使した超強磁場実験を行う。素粒子・プラズマといったミクロなレベルでそれらの機構を解明し、通常の物質の枠を超えた極限宇宙環境で磁場の果たす役割を明らかにする。

A06は固体を中心に、分子、高分子、プラズマ、素粒子における1000テスラにおよぶ超強磁場の非摂動磁場効果の理論的解明を目的としている。

公募する内容、公募研究への期待等

今回領域では2024-2025年度の2年間実施する公募研究を募集する。

研究項目B01として、固体における非摂動磁場効果が誘起するカタストロフィック現象の実験的、理論的研究を公募する。波動関数の空間広がりの磁場制御にともなう結晶変形や、結晶周期との干渉による有効質量近似の破れ、ゼーマン効果やランダウ量子化エネルギーのスピン軌道相互作用や結晶場との競合による結晶変形を伴う相転移、フォノンへの非摂動磁場効果、など、従来の磁場研究の枠組みを超えた提案を期待する。計画研究A01～A03における対象物質群を補完する計画も歓迎する。

研究項目B02は、分子や高分子の化学反応、生体現象を対象と

した非摂動磁場効果の実験的、理論的研究を公募する。計画研究A04を補完する対象分子や高分子、生体物質を研究対象にした提案、触媒作用や人工光合成への磁場効果の研究などを期待する。

研究項目B03では、宇宙物理および素粒子物理における非摂動磁場現象を開拓する実験または理論研究を期待する。ハドロン物理や太陽物理、その他、計画研究A05と連携する研究内容も公募対象である。

これまでに強磁場実験の実績は無い研究者でも採択後に技術的な指導を行うため応募は可能である。国内磁場施設の共同利用システムや、本研究領域で整備する可搬型パルス磁場装置の利用により強磁場実験を行うことを想定している。

公募する研究項目、応募上限額、採択目安件数

研究項目番号	研究項目名	応募上限額 (単年度当たり)	採択目安件数
B01	固体における非摂動磁場カタストロフィー	実験 250 万円	8 件
		理論 150 万円	4 件
B02	化学反応への非摂動磁場カタストロフィー	実験 250 万円	3 件
		理論 150 万円	3 件
B03	素粒子・宇宙への非摂動磁場カタストロフィー	実験 250 万円	3 件
		理論 150 万円	3 件

活動記録 (2023年4月～9月)

4月	<ul style="list-style-type: none"> <li>学術変革領域 (A) 「1000テスラ科学」 がスタート</li> <li>ナイトセミナー「A**をもっと知ろう」 がスタート (** = 01 ~ 06、隔週開催全6回@オンライン)</li> </ul>
5月	<ul style="list-style-type: none"> <li>1000テスラ領域秘書に大島香織さんが着任</li> </ul>
6月	<ul style="list-style-type: none"> <li>東大物性研に1000テスラ科学共用スペース設置</li> <li>第一回領域会議キックオフミーティング @東大物性研・ハイブリッド</li> <li>1000テスラ特任助教公募開始 (東大物性研松田康弘研)</li> </ul>  
7月	<ul style="list-style-type: none"> <li>1000テスラPDに山田暉馨さんが着任 (電通大伏屋研、ISSPリサーチフェロー)</li> <li>1000テスラ科学領域ウェブサイト公開</li> <li>A02-A03 班間連携勉強会開催「p電子系の構造カタストロフィーを目指して」 @阪大・ハイブリッド</li> <li>ポータブルパルスマグネット相談会開催@オンライン (全2回)</li> </ul> 
8月	<ul style="list-style-type: none"> <li>公募研究説明会</li> </ul>
9月	<ul style="list-style-type: none"> <li>1000テスラ科学ニュースレター初号発行</li> <li>1000テスラ特任助教公募開始 (東北大理学部 那須研)</li> <li>1000テスラ特任助教公募開始 (東大物性研 岡研)</li> </ul>

今後の活動予定

11月	<ul style="list-style-type: none"> <li>1000テスラ科学チュートリアル講座「ポータブルパルス磁場発生装置を作ろう!」 @電通大 (11/13-11/17)</li> </ul>
12月	<ul style="list-style-type: none"> <li>第2回領域会議 @電通大アフラックホール(12/4-12/6)</li> </ul>
時期未定	<ul style="list-style-type: none"> <li>特任研究員・特任助教の公募を複数予定</li> </ul>