

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2023

課題番号：20K14411

研究課題名（和文）磁性体における新規輸送現象 対称性とトポロジーの観点から

研究課題名（英文）Novel Transport Phenomena in Magnets: Insights from Symmetry and Topology

研究代表者

赤城 裕 (Akagi, Yutaka)

東京大学・大学院理学系研究科（理学部）・助教

研究者番号：20739437

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、対称性とトポロジーの観点から、磁性体における新規相並びに新規輸送現象を明らかにした。とりわけ、磁性体の基礎的準粒子であるマグノンに着目した研究の成果として、CrI<sub>3</sub>といったファンデルワールス磁性体においてトポロジカルマグノン結晶絶縁体を実現し特異な電場応答を示しうる事や、多くの有機物磁性体において歪みにより制御可能な非線形スピンNernst効果が現れうる事を提案した。また、空間反転対称な遍歴磁性体において、光によって最小サイズのスキルミオン結晶状態を誘起したり、円偏光の左右によってそのスカラーカイラリティの符号が制御できることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

マグノン熱ホール効果が理論的に提案され即座に観測された事から、本研究で明らかにしたマグノンに関する新規トポロジカル相や輸送現象も、すぐに実験的な観測に繋がる可能性がある。特に非線形スピンNernst効果は、歪ませる事が容易な多くの有機物磁性体において現れうるものであり、有機物における純スピン流生成という新しい分野を切り拓く成果である。また、研究代表者らが2010年に提案した最小サイズのスキルミオン結晶状態が、2023年になり実験的に確認され再び注目を集めているが、こうしたトポロジカル磁性の光による発現/高速制御が、空間反転対称な遍歴磁性体においても可能であることを示し、学際的な分野を開拓した。

研究成果の概要（英文）：In this research, we have explored novel phases and transport phenomena in magnets through the lenses of symmetry and topology. Specifically focusing on magnons, which are elementary quasiparticles in magnets, we have identified that van der Waals magnets such as CrI<sub>3</sub> can host magnonic analogs of topological crystalline insulators, exhibiting distinctive electric field responses. We have also revealed that a strain-controllable nonlinear spin Nernst effect can occur in various organic magnetic compounds. Additionally, we have demonstrated in itinerant magnets possessing spatial inversion symmetry, that the smallest size Skyrmion crystal states can be induced by light, with their scalar chirality being controllable through the handedness of circularly polarized light.

研究分野：物性基礎論

キーワード：マグノン スキルミオン トポロジカル相 磁性体 輸送現象 非線形応答 光電場駆動 指数定理

## 1. 研究開始当初の背景

磁性体における非自明な磁気秩序やトポロジに由来した輸送現象は長年に渡り注目を集めてきた。その一例が、スカラーカイラリティ秩序と呼ばれる非共面的磁気構造を有する高次の磁気秩序と、伝導電子の結合により生じる、スピン軌道相互作用に依らない非従来型異常(トポロジカル)ホール効果であり、 $\text{Nd}_2\text{Mo}_2\text{O}_7$  や  $\text{UCu}_5$  等の物質で実際に観測された。また近年における顕著な例として、磁場中における Kitaev 量子スピン液体が  $\text{-RuCl}_3$  で実現することが発見された。とりわけ、自分自身がその反粒子であるマヨラナ・フェルミオンに起因していると考えられる、熱ホール伝導度の半整数量子化が観測され、物理分野全体に衝撃を与えた。

近年、磁気スキルミオンと呼ばれるトポロジカル励起を基本単位としたスキルミオン結晶( $\text{MnSi}$  など)が実験と理論の両面から精力的に研究されており、強磁性磁壁を駆動するために必要な電流密度の(最大で)10万分の1程度でスキルミオンを駆動できるため工学的応用の観点からも注目を集めている。しかし従来、スキルミオンの発現には特殊な対称性の結晶構造に由来した Dzyaloshinskii-守谷(DM)相互作用が必要とされており、この条件を満たす物質が少なく、物質探索・設計が難しいという問題があった。そうした磁気スキルミオン研究の黎明期において研究代表者らは、DM 相互作用が存在しないスピン-電荷結合系において、スキルミオン結晶の最小版とみなせるスカラーカイラル相が安定化し、トポロジカルホール効果を伴うことを明らかにした[Y. Akagi and Y. Motome, J. Phys. Soc. Jpn. **79**, 083711 (2010).]。

大きな成功を収めたフェルミオン自由度に起因したトポロジカル物性の研究はボゾン系にも波及している。中でも興味深いのが、磁性体における基礎的な準粒子であるマグノンである。電荷をもたないマグノンのトポロジカル熱ホール効果が理論的に提案され、すぐに  $\text{Lu}_2\text{V}_2\text{O}_7$  で観測された。一方、昨今のトポロジカル物性に関する研究の爆発的広がり、クラス AII のフェルミオン系トポロジカル絶縁体の提案が発端であったが、ここで本質的役割を果たす時間反転対称性に由来する Kramers の定理は、直接ボゾン系には適用できないことから、ボゾン系トポロジカル相は時間反転対称性を持たない系での議論に留まっていた。そこで研究代表者らは、Kramers 対の存在を保証する有効的な時間反転演算子を導入し、フェルミオン系におけるクラス AII に対応する 2, 3 次元  $Z_2$  トポロジカルマグノン系の具体的模型とそれらを特徴付ける  $Z_2$  トポロジカル不変量を提案した[H. Kondo, Y. Akagi, and H. Katsura, Phys. Rev. B **100**, 144401 (2019); H. Kondo, Y. Akagi, and H. Katsura, Phys. Rev. B **99**, 041110(R) (2019).]。ボゾン系には特有の数学的性質(非エルミート性)があるため、この不変量はフェルミオン系とは異なった表式のペリー接続、曲率を用いて表現されるという特徴がある。

磁気スキルミオンのような実空間におけるトポロジカルな磁気構造や、マグノン系トポロジカル相などのような波数空間における波動関数が非自明なトポロジを有する磁気秩序などのことをまとめて「トポロジカル磁性」と呼んでいる。近年益々注目を集めている上記のような磁性体における新規相・新規輸送現象を、対称性やトポロジの観点から明らかにすることは急務である。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、磁性体における新規相・新規輸送現象を、対称性とトポロジの観点から明らかにすることである。とりわけ、物質で実現しやすい対称性によって保護されたマグノン系トポロジカル相とその候補物質を提案することを目的とする。また、そうしたマグノン系トポロジカル相が乱れに対しどれほど安定であるかも明らかにする。さらに、研究代表者が豊富な研究経験を有するスピン-電荷結合系において、局在スピンによるトポロジカル磁性と伝導電子の結合が生み出す多彩な現象を予言する。

## 3. 研究の方法

下記参照(多岐に渡るため、下記「4. 研究成果」(1)-(9)それぞれに研究の方法を記載)

## 4. 研究成果

### (1) マグノンのトポロジカル結晶絶縁体における Dirac 表面状態

量子ホール絶縁体、量子スピンホール絶縁体、Weyl 半金属などのマグノン系における対応物は近年盛んに調べられており、温度勾配に垂直な方向の熱流やスピン流など、その非自明な物性が議論されている。一方、電子系の 3 次元トポロジカル絶縁体やトポロジカル結晶絶縁体の有する Dirac 表面状態は多くの興味深い性質を示し、トポロジカル物性の研究の中でも中心的な位置にあったが、そのマグノン系での対応物はほとんど考えられてこなかった。

近藤氏(元・東京大)と研究代表者は、磁性体における時間反転と空間の半並進を組み合わせた対称性により、マグノンのようなボゾン系でも Kramers 縮退が生じることに着目し、この対称性に保護された Dirac 表面状態を有する 3 次元磁性体のモデルを構築した。この系はトポロジカル結晶絶縁体に対応するマグノン系のモデルであり、表面状態は電子系の場合のように、スピン運動量ロッキングなどの性質を示す。また、この系における電場応答も調べた。磁性体に電場をかけたとき、Dzyaloshinskii-守谷相互作用が変化することで、マグノンの磁気モーメントに依存した Aharonov-Casher 位相が加わることが知られている。今回の系でこの寄与を考えたとき、マグノンの表面状態の Dirac 分散が、互いに向かい合った面でそれぞれ上下にシフトし、その過程でマグノン流が駆動できることを明らかにした。このような現象は、電子系のトポロジカル(結晶)絶縁体でも、従来のマグノン系でも見られないものである。また、van der Waals 磁性体  $\text{CrI}_3$  がモノクリニック積層構造を有するとき、密度汎関数法などで見積もられたパラメータでマグノンバンドを計算することで、上記の表面状態が現れることを明らかにした。

### (2) マグノンの非線形スピン Nernst 効果とひずみにより調整可能な純スピン流

物質中の粒子が外場とは垂直に流れるといった非自明な輸送現象が、Berry 曲率の観点から次々に調べられている。中でも、磁性体中の輸送キャリアであるマグノンのスピン Nernst 効果は純スピン流の生成手段の 1 つである。しかし、線形応答のみを考慮した既存の理論的枠組みの中では、Dzyaloshinskii-守谷相互作用などの重い原子に由来した特有の相互作用を必要としていた。

近藤氏(元・東京大)と研究代表者は、反強磁性体における温度勾配に関する 2 次までの応答理論を構築し、マグノンの非線形スピン Nernst 効果を初めて定式化した。特に、非線形スピン Nernst 流が波数空間における Berry 曲率の双極子モーメントのような量(拡張 Berry 曲率双極子)で記述されることを明らかにした。マグノンの拡張 Berry 曲率双極子は Dzyaloshinskii-守谷相互作用などの特有の相互作用がなくても、系の対称性を崩すだけで容易に現れる。そのため、マグノンの非線形スピン Nernst 効果は、広い範囲の単純な Heisenberg 反強磁性体で期待できる純スピン流生成の機構となっている。また、拡張 Berry 曲率双極子は外的に制御できることが多く、いくつかの反強磁性体において純スピン流の向きを格子ひずみで変えられることを明らかにした。さらに、マグノンの非線形スピン Nernst 効果で生じるスピン流の大きさを評価し、典型的な磁性体で十分に観測可能であることを示した。

### (3) 乱れのある Bosonic Bogoliubov-de Gennes 系における非可換指数

大きな成功を収めたフェルミオン自由度に起因したトポロジカル物性の研究はボゾン系にも波及している。特に最近、磁性体におけるボーズ準粒子であるマグノンに関するトポロジカル物性の研究が急激に増加している。一方、ペアリング項を持つような Bogoliubov-de Gennes (BdG) 型のボゾン系には、その統計性に由来した非エルミート性があるため、エルミート系におけるトポロジカル相の分類/特徴付けを直接適用することは出来ない。また、トポロジカル相は乱れに強いとされているが、系に乱れがあると波数が定義できないため、相を特徴付けるトポロジカル不変量を定めることは自明ではない。

そこで研究代表者は、非可換幾何の手法を用いることで、乱れのあるマグノンホール系における Chern 数に対応する非可換指数を定義した。ここでは、ボゾン系における“フェルミ”射影演算子を導入することで上記の手法を拡張した。また、この定義の妥当性を確かめるため、乱れのあるマグノンホール系を記述する人工的スピンアイス模型[B. Xu, T. Ohtsuki, and R. Shindou, Phys. Rev. B **94**, 220403(R) (2016).]における非可換指数を数値的に調べた。結果として、clean limit で Chern 数が +1 となるような場合に乱れを導入しても、非可換指数は  $n_{\text{Ch}} = +1$  となり、実際に乱れのあるマグノンホール系を特徴付けられることを明らかにした。本手法は、擬時間反転対称性に守られた  $Z_2$  トポロジカル相などの他のクラスへの拡張も可能であり、いくつかの例も示した。

### (4) Dzyaloshinskii-守谷型相互作用によって安定化した孤立 $\text{CP}^2$ スキルミオン

近年、様々な系において 2 次元スキルミオンの研究が盛んに行われており、実際にカイラル磁性体、フラストレート磁性体などで実験的に観測されている。一方、 $\text{SU}(N > 2)$  対称性をもつ磁性体中の 2 次元スキルミオンに関する理論的研究も数多くなされている。例えば、 $\text{SU}(N)$  強磁性 Heisenberg 模型は連続極限において  $\text{CP}^{N-1}$  非線形シグマ模型となり、この模型における 2 次元スキルミオン解は古くから知られている[V. Golo and A. Perelomov, Phys. Lett. B **79**, 112 (1978)]。しかし、この解は模型のスケール不変性に起因する不安定性をもつ。

研究代表者は甘利氏(元・JINR、現・慶應大)・澤渡氏(東京理科大)・Shnir氏(JINR)ら素粒子物理学者との学際的共同研究により、 $CP^2$ 非線型シグマ模型のスケール不変性を、Dzyaloshinskii-守谷(DM)型の相互作用項を加えることによって破り、安定な2次元スキルミオン解を解析的・数値的に構成した。また、得られた孤立スキルミオン解のエネルギーが、一般的な真空解(スピネマティック状態)のエネルギーよりも低いパラメータ領域を見出した。これは、得られたスキルミオン(または、それらで構成されたスキルミオン格子)が系の基底状態として現れうることを示唆している。さらに、 $SU(3)$ スピン演算子と $S=1$ スピン演算子の対応関係を用いて、得られた孤立スキルミオンの持つ磁化ベクトルなどを計算した。得られた特徴としては、(i)無限遠方では磁気秩序が存在しないにも関わらず、スピン空間の回転対称性が破れており、スピネマティック状態となっている。(ii)一方で、スキルミオンの周りには磁気双極子が現れている。これは、スキルミオンが磁気双極子を誘起することを意味しており、時間反転対称なために観測が難しいスピネマティック相の(間接的な)観測の可能性を期待させる結果である。

#### (5) $CP^{N-1}$ 非線型シグマ模型における分数スキルミオン

スキルミオンのようなトポロジカル励起(ソリトン)は位相的な保存量であるトポロジカルチャージによって特徴づけられ、通常整数値をとる。しかし、分数のトポロジカルチャージを持つトポロジカルソリトンが、冷却原子系や磁性体、中性子星の内部などに現れることが理論的に示唆されている。例えば、Heisenberg模型や $SU(2)$ Yang-Mills理論の有効模型である $O(3)$ 非線型シグマ模型において、容易面磁気異方性を表すポテンシャル項(とSkyrme項またはDzyaloshinskii-守谷相互作用などの安定項)を加えると、トポロジカルチャージ $1/2$ を持った配位が得られる。このような配位は分数スキルミオン、またはメロンと呼ばれ、実際に $Co_8Zn_9Mn_3$ などのカイラル磁性体でも観測されている。

研究代表者は甘利氏(元・JINR、現・慶應大)、Gudnason氏(河南大)、新田氏(慶應大)、Shnir氏(JINR)ら素粒子物理学者との学際的共同研究により、 $O(3)$ 非線型シグマ模型の一般化である $CP^{N-1}$ 非線型シグマ模型にポテンシャル項と安定項を加え、分数スキルミオン(分子)を数値的に構成した。ここで加えたポテンシャル項は、模型の $SU(N)$ 対称性を極大トラス部分群 $U(1)^{N-1}$ まで破り、 $N=2$ のときは容易面異方性をもつ相互作用に帰着するものである。例えば $N=3$ においては、整数トポロジカルチャージ $Q$ をもつスキルミオンの初期波動関数を最適化することで、それが $3Q$ 個に分裂し、各々がトポロジカルチャージ $1/3$ を持つような分数スキルミオンが現れることを明らかにした。またそれらがある一定の距離を保つことから、合計のトポロジカルチャージが整数 $Q$ となる分子を形成することが分かった。

#### (6)一般化Dzyaloshinskii-守谷相互作用を有する $SU(3)$ 磁性体における $CP^2$ スキルミオン結晶

2009年、磁気スキルミオンと呼ばれるトポロジカルソリトンが、磁性体中で観測された。それを契機として、実験と理論の両面から、磁気スキルミオンの研究が精力的に行われ、トポロジカルホール効果などの磁気スキルミオンに起因した新たな物理現象の発見や、低消費電力デバイスをはじめとする磁気スキルミオンの工業的応用の提案がされてきた。近年では、従来の磁気スキルミオンにはない特性をもつトポロジカルソリトンの探索が盛んに行われ、反強磁性体やフェリ磁性体などの様々な磁性体中のスキルミオンも議論されている。ただし、これまで安定なスキルミオン結晶(スキルミオンが周期的に配列した磁気構造)が見出されていたのは、秩序変数空間が $S^2=CP^1$ である古典スピン系あるいはスピン $1/2$ の系に限られていた。

研究代表者は甘利氏(元・JINR、現・慶應大)、Gudnason氏(河南大)、新田氏(慶應大)、Shnir氏(JINR)ら素粒子物理学者との学際的共同研究により、秩序変数空間が複素射影空間 $CP^2=SU(3)/U(2)$ である、一般化Dzyaloshinskii-Moriya相互作用とZeeman相互作用を含んだスピン $1$ の $SU(3)$ 強磁性体の模型において、低磁場領域と高磁場領域で異なる種類のスキルミオン結晶が系の基底状態として現れることを見出した。具体的には、高磁場領域では単位トポロジカルチャージをもつスキルミオンの三角格子が、低磁場領域ではトポロジカルチャージ $1/2$ をもつスキルミオン、すなわち半スキルミオン(メロン)から成る八ニカム格子が系の基底状態であることがわかった。これらのスキルミオン結晶を、系の秩序変数空間が $CP^2$ であることから、 $CP^2$ スキルミオン結晶と名付けた。上記2種類の $CP^2$ スキルミオン結晶間の遷移は、相転移ではなくクロスオーバーであると、これらの配位が持つエネルギーやトポロジカルチャージ密度から計算される配位的エントロピー(Shannonエントロピーを場の理論的に一般化した量)の振る舞いなどから結論付けた。また、これらの配位は従来の磁気スキルミオンと同様に磁気双極子の構造因子にtriple-q構造を持つことに加え、 $CP^2$ スキルミオン結晶特有の性質として、磁気四重極子の構造因子においてもtriple-q構造を持つことを数値的に見出した。

#### (7) $S=1$ 量子磁性体における半古典的シミュレーション

量子磁性体の古典的極限を考えると、個々のスピンを $O(3)$ ベクトルと考えるのが通例である。これにより、スピン $1/2$ の磁性体における通常の磁気秩序は、半古典的なレベルで驚くほどうまく記述できる。しかし、 $S > 1/2$ のような磁性体は「より古典的」であると考えられるにもかかわらず、 $O(3)$ ベクトルではその特性の多くを説明することはできない。特に、磁性絶縁体、鉄系超伝導体、冷却原子系において実現の可能性が示唆されている単一サイトで磁気四極子を持つ状態を記述することはできない。これらの問題に対しては、古典的な極限を別の形でとらえ

る必要があり、そのために新しいツールが必要である。

Remund 氏(OIST), Pohle 氏(元・東大院工、現・東北大), 研究代表者, Romhanyi 氏(California 大 Irvine 校), Shannon 氏(OIST) は、 $S=1$  量子磁性体の半古典的特性を正しく記述する新しい方法を確立した。この方法は、 $S=1$  量子スピンを完全に記述するために必要な  $su(3)$  代数を拡張した  $u(3)$  代数に基づいている。このアプローチにより、磁気双極子と磁気四極子を同等に扱う枠組みが得られ、数値計算を実装しやすい運動方程式の記述が可能となる。

この新しい方法を、三角格子上的  $S=1$  bilinear biquadratic 模型の磁気四極子状態 (スピンネマティック状態、スピン液晶状態) に適用し、解析的に求められる古典的低温展開や flavor wave 理論と、古典的モンテカルロ法や分子動力学シミュレーションなどの数値計算との比較を通じ、その妥当性を確かめた。そして、本手法の大きな成果として、半古典分子動力学シミュレーションによる動的構造因子に補正項  $1/T$  を加え  $T \rightarrow 0$  の極限を取ることで、 $T=0$  の flavor wave 理論の (量子論の) 結果を再現できることを明らかにした。また、実験との関連性を考慮し、本手法が異方性を持つ模型にも適用できることを確かめた。この手法によって、今までアクセスできなかったスピン液晶におけるトポロジカル励起のダイナミクスを調べることもできる。

#### (8)非エルミート量子多体系における複素 Berry 位相の量子化

基底状態にギャップをもつエルミート量子多体系のトポロジカル相を解析する有効な手法の一つとして、量子化 Berry 位相を用いる方法がある。これは系に局所的なひねりを導入することで定義された Berry 位相が、幾つかの対称性の下で量子化し、それによりトポロジカル相を特徴付けているスピン重項などのオブジェクトの有無を検出できるというものである。

坪田氏(東京大)、楊氏(元・東京大)、研究代表者、桂氏(東京大)は、この量子化 Berry 位相の方法を非エルミートな場合に拡張した。実ラインギャップがある非エルミート量子多体系において、複素 Berry 位相という非エルミート系に一般化された Berry 位相が、二種類の一般化された対称性の下で  $Z_2$  量子化を示すことを証明した。また、具体的なモデルでの数値的検証により、この量子化複素 Berry 位相がフェルミオン系・スピン系に関わらず非エルミート多体系のトポロジカル相の解析に有効であることを示した。

#### (9)空間反転対称な遍歴磁性体におけるスカラースピнкаイラリティの光制御

磁気スキルミオンをはじめとする非共面的・非共線的なスピントクスチャとその創発磁場をもたらす新奇物性が広く関心を集めている。そのような磁気構造はスカラースピнкаイラリティ等で特徴付けられ、空間反転対称性のない系で存在する Dzyaloshinskii-守谷相互作用等の反対称相互作用によって安定化されることが知られている。また、空間反転対称性を持つ磁性体においても、幾何学的フラストレーションやフェルミ面の不安定性に起因してスキルミオン結晶相やスカラースピнкаイラル相が現れることが示されている。近年、これらのスピントクスチャの光制御の可能性についても盛んに議論されており、レーザー光の加熱効果を利用したスキルミオン生成等が提案・報告されている。しかしながら、これらの多くは反対称相互作用の存在が本質的であり、空間反転対称性を持つ系におけるスピントクスチャの光制御に関する研究はほとんどなされていない。

小野氏(東北大)と研究代表者は、空間反転対称性を持つ三角格子上的強磁性近藤格子模型において、テラヘルツ電場の印加によって誘起される実時間ダイナミクスの数値解析を行った。ここで、ハミルトニアンは伝導電子のホッピング項ならびに伝導電子と古典局在スピンの間の強磁性交換相互作用項のみからなり、外部電場は伝導電子系のパイエルス位相として取り入れられる。結果として、強磁性金属相の基底状態を初期状態として直流電場を印加した場合は、およそ数百フェムト秒に相当する時間スケールで強磁性秩序が融解し、その後数ピコ秒でスカラースピнкаイラル状態や 120 度ネール状態が現れることが見出された。また、この非平衡スカラーカイラル状態においては、カイラリティの符号が円偏光の左右によって制御できることも明らかになった。これらの非平衡状態における磁気構造は、電場により駆動された電子の非平衡分布によって安定化され、反対称相互作用を必要としない。このことは、空間反転対称な遍歴磁性体がスピントクスチャの高速光制御の有望な舞台となる可能性を示唆している。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 5件 / うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Shoichi Tsubota, Hong Yang, Yutaka Akagi, and Hosho Katsura	4. 巻 105
2. 論文標題 Symmetry-protected quantization of complex Berry phases in non-Hermitian many-body systems	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 L201113-1~6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.105.L201113	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Kimberly Remund, Rico Pohle, Yutaka Akagi, Judit Romhányi, and Nic Shannon	4. 巻 4
2. 論文標題 Semi-classical simulation of spin-1 magnets	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 033106-1-63
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.4.033106	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Yuki Amari, Yutaka Akagi, Sven Bjarke Gudnason, Muneto Nitta, and Yakov Shnir	4. 巻 106
2. 論文標題 CP <sup>2</sup> skyrmion crystals in an SU(3) magnet with a generalized Dzyaloshinskii-Moriya interaction	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 L100406-1~6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.106.L100406	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Hiroki Kondo, Yutaka Akagi	4. 巻 127
2. 論文標題 Dirac Surface States in Magnonic Analogs of Topological Crystalline Insulators	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 177201-1~7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.127.177201	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yutaka Akagi, Yuki Amari, Sven Bjarke Gudnason, Muneto Nitta, Yakov Shnir	4. 巻 2020
2. 論文標題 Fractional Skyrmion molecules in a CP <sup>N-1</sup> model	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 194-1 ~ 19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP11(2021)194	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Hiroki Kondo, Yutaka Akagi	4. 巻 4
2. 論文標題 Nonlinear magnon spin Nernst effect in antiferromagnets and strain-tunable pure spin current	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 013186-1 ~ 10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.4.013186	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Akagi Yutaka	4. 巻 89
2. 論文標題 Topological Invariant for Bosonic Bogoliubov-de Gennes Systems with Disorder	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 123601-1 ~ 5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.89.123601	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hiroki Kondo, Akagi Yutaka, Katsura Hosho	4. 巻 2020
2. 論文標題 Non-Hermiticity and topological invariants of magnon Bogoliubov-de Gennes systems	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 12A104-1 ~ 36
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptaa151	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yutaka Akagi, Yuki Amari, Nobuyuki Sawado, Yakov Shnir	4. 巻 103
2. 論文標題 Isolated Skyrmions in the CP2 nonlinear sigma model with a Dzyaloshinskii-Moriya type interaction	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 065008-1 ~ 13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.103.065008	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Atsushi Ono and Yutaka Akagi	4. 巻 108
2. 論文標題 Photocontrol of spin scalar chirality in centrosymmetric itinerant magnets	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 L100407-1 ~ 7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.108.L100407	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計68件 (うち招待講演 6件 / うち国際学会 32件)

1. 発表者名 Hosho Katsura, Hiroki Kondo, Yutaka Akagi
2. 発表標題 Magnonic analogs of topological insulators in two and three dimensions
3. 学会等名 Band Topology in Quantum Magnets: From nontrivial excitations to non-Hermitian topology and spintronics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kimberly Remund, Rico Pohle, Yutaka Akagi, Judit Romhányi, and Nic Shannon
2. 発表標題 Spin-1 magnets – A $u(3)$ Formalism
3. 学会等名 The 11th International Conference on Highly Frustrated Magnetism 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Leilee Chojnacki, Rico Pohle, Han Yan, Yutaka Akagi, and Nic Shannon
2. 発表標題 Analogues of light and gravity in the collective excitations of quantum magnets
3. 学会等名 The 11th International Conference on Highly Frustrated Magnetism 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yutaka Akagi
2. 発表標題 Emergence/control of topological spin textures in various spin systems
3. 学会等名 The 12th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kimberly Remund, Rico Pohle, Yutaka Akagi, Judit Romhányi, and Nic Shannon
2. 発表標題 Spin-1 magnets – A $u(3)$ Formalism
3. 学会等名 The 29th International Conference on Low Temperature Physics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Leilee Chojnacki, Rico Pohle, Han Yan, Yutaka Akagi, and Nic Shannon
2. 発表標題 Analogues of light and gravity in the collective excitations of quantum magnets
3. 学会等名 The 29th International Conference on Low Temperature Physics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Atsushi Ono and Yutaka Akagi
2. 発表標題 Photocontrol of spin scalar chirality in centrosymmetric itinerant magnets
3. 学会等名 The 29th International Conference on Low Temperature Physics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuki Amari, Yutaka Akagi, Sven Bjarke Gudnason, Muneto Nitta, Yakov Shnir
2. 発表標題 CPA2 Skyrmion crystals in an SU(3) magnet with a generalized Dzyaloshinskii-Moriya interaction
3. 学会等名 The 2nd International Symposium on Trans-scale Quantum Science (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Leilee Chojnacki, Rico Pohle, Han Yan, Yutaka Akagi, and Nic Shannon
2. 発表標題 Analogues of light and gravity in the collective excitations of quantum magnets
3. 学会等名 The German Conference of Women in Physics (Deutsche Physikerinnentagung) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kimberly Remund, Rico Pohle, Yutaka Akagi, Judit Romhányi, and Nic Shannon
2. 発表標題 Spin-1 magnets — a u(3) Formalism
3. 学会等名 American Physical Society March Meeting 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Atsushi Ono and Yutaka Akagi
2. 発表標題 Optically controlled spin scalar chirality in centrosymmetric magnetic metals
3. 学会等名 American Physical Society March Meeting 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 赤城裕
2. 発表標題 磁性体におけるスピン液晶スキルミオンの開拓
3. 学会等名 新学術領域研究「量子液晶の物性科学」 第二期公募研究キックオフミーティング
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 甘利悠貴, 赤城裕, Sven Bjarke Gudnason, 新田宗土, and Yakov Shnir
2. 発表標題 一般化Dzyaloshinskii-Moriya相互作用を有するCP <sup>2</sup> 非線形シグマ模型における孤立スキルミオン
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 甘利悠貴, 赤城裕, Sven Bjarke Gudnason, 新田宗土, and Yakov Shnir
2. 発表標題 一般化Dzyaloshinskii-Moriya相互作用を有するSU(3)スピン系におけるCP <sup>2</sup> スキルミオン結晶
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小野淳, 赤城裕
2. 発表標題 空間反転対称な遍歴磁性体におけるスピンスカラーカイラリティと円偏光自由度の非線形結合
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山田昌彦, 赤城裕, 宇田川将文
2. 発表標題 数値的負符号問題の解決1 有限温度キタエフ模型の数値解
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山田昌彦, 赤城裕, 宇田川将文
2. 発表標題 数値的負符号問題の解決2 無限乗積展開法の発展
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山田昌彦, 赤城裕, 宇田川将文
2. 発表標題 数値的負符号問題の解決3 第二密度行列くりこみ群法の発見
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 赤城裕
2. 発表標題 Topological magnetism in quantum spin-nematics
3. 学会等名 令和4年度 新学術領域研究「量子液晶の物性科学」 領域研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 甘利悠貴, 赤城裕, Sven Bjarke Gudnason, 新田宗土, Yakov Shnir
2. 発表標題 Realization of spin nematic Skyrmion crystals in cold atom systems
3. 学会等名 令和4年度 新学術領域研究「量子液晶の物性科学」 領域研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山田昌彦, 三野巧, 高橋雅大, 赤城裕, 諏訪秀磨, 藤本聡, 宇田川将文
2. 発表標題 行列積くりこみ群法の開発
3. 学会等名 物性研短期研究会「固体におけるエニオンと分数統計粒子研究の最前線」
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 江崎蘭世, 赤城裕, 桂法称
2. 発表標題 XCuCl <sub>3</sub> (X=TI, K)のBEC相における電場誘起トリプロン熱ホール効果
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 甘利悠貴, 赤城裕, Sven Bjarke Gudnason, 新田宗土, and Yakov Shnir
2. 発表標題 スピン軌道相互作用を有する冷却原子系におけるCP <sup>2</sup> スキルミオン結晶とその派生相
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山田昌彦, 三野巧, 高橋雅大, 赤城裕, 諏訪秀磨, 藤本聡, 宇田川将文
2. 発表標題 行列積繰り込み群法によるYang-Lee模型の解析
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山田昌彦, 三野巧, 高橋雅大, 赤城裕, 諏訪秀磨, 藤本聡, 宇田川将文
2. 発表標題 行列積くりこみ群法による二次元量子多体系の解析
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 赤城裕
2. 発表標題 トポロジカルな磁性とその発現機構・創発現象に関する理論的研究
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yutaka Akagi
2. 発表標題 Topological Magnons from "Nematicity"
3. 学会等名 International Conference on Quantum Liquid Crystals 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kimberly Remund, Rico Pohle, Yutaka Akagi, Judit Romh_nyi, and Nic Shannon
2. 発表標題 New Method for Studying Dynamics and Thermodynamics of Spin-1 Magnets: Application to the Ferroquadrupolar Order
3. 学会等名 International Conference on Quantum Liquid Crystals 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Rico Pohle, Yutaka Akagi, Kimberly Remund, and Nic Shannon
2. 発表標題 Dynamics of a quantum liquid crystal from numerical simulation
3. 学会等名 International Conference on Quantum Liquid Crystals 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Rico Pohle, Yutaka Akagi, Kimberly Remund, and Nic Shannon
2. 発表標題 Dynamics of spin-1 magnets from numerical simulations
3. 学会等名 XXXII IUPAP Conference on Computational Physics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yutaka Akagi
2. 発表標題 Topological Excitations and Their Emergent Phenomena in Quantum Spin Nematics
3. 学会等名 International Conference on Frustration, Topology, and Spin Textures (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kimberly Remund, Rico Pohle, Yutaka Akagi, Judit Romh_nyi, and Nic Shannon
2. 発表標題 Spin-1 magnets – a $u(3)$ formalism
3. 学会等名 American Physical Society March Meeting 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shoichi Tsubota, Hong Yang, Yutaka Akagi, Hosho Katsura
2. 発表標題 Symmetry-protected quantization of complex Berry Phases in non-Hermitian many-body systems
3. 学会等名 American Physical Society March Meeting 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroki Kondo and Yutaka Akagi
2. 発表標題 Nonlinear magnon spin Nernst effect in antiferromagnets and strain-tunable pure spin current
3. 学会等名 American Physical Society March Meeting 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 坪田祥一, Hong Yang, 赤城裕, 桂法称
2. 発表標題 反転対称性の下での複素ベリー位相の量子化
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 近藤寛記, 赤城裕
2. 発表標題 反強磁性体におけるマグノンの非線形スピネルンスト効果とひずみにより調整できる純スピン流
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 赤城裕
2. 発表標題 量子スピン液晶におけるトポロジカル励起
3. 学会等名 第5回QLC若手コロキウム「古典的液晶と量子液晶の関係探索」
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 赤城裕
2. 発表標題 Spin nematic Skyrmions in quantum magnets
3. 学会等名 令和3年度 新学術領域研究「量子液晶の物性科学」領域研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kimberly Remund, Rico Pohle, Yutaka Akagi, Judit Romha_nyi, and Nic Shannon
2. 発表標題 Spin-1 magnets – a $u(3)$ formalism
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Leilee Chojnacki, Rico Pohle, Han Yan, Yutaka Akagi, and Nic Shannon
2. 発表標題 Analogues of light and gravity in the collective excitations of quantum magnets
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小野淳, 赤城裕
2. 発表標題 空間反転対称な遍歴磁性体におけるスピンスカラーカイラリティの円偏光制御
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 赤城裕, 甘利悠貴, Sven Bjarke Gudnason, 新田宗土, and Yakov Shnir
2. 発表標題 磁性体におけるスピン液晶分数スキルミオン
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yutaka Akagi
2. 発表標題 Noncommutative indices for disordered topological phases
3. 学会等名 Localisation 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yutaka Akagi
2. 発表標題 Topological Invariant for Bosonic Bogoliubov-de Gennes Systems with Disorder
3. 学会等名 American Physical Society March Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroki Kondo and Yutaka Akagi
2. 発表標題 Dirac surface states in topological crystalline magnon insulators
3. 学会等名 American Physical Society March Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kimberly Remund, Rico Pohle, Yutaka Akagi, Judit Romha_nyi, and Nic Shannon
2. 発表標題 Equations of motions for spin-1 magnets - a $u(3)$ formalism, suitable to investigate dynamical and thermodynamical properties
3. 学会等名 American Physical Society March Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 赤城裕
2. 発表標題 量子スピン液晶におけるトポロジカル励起と創発現象
3. 学会等名 新学術領域研究「量子液晶の物性科学」 C01班公募研究キックオフミーティング
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kimberly Remund, Rico Pohle, Yutaka Akagi, Judit Romha_nyi, and Nic Shannon
2. 発表標題 Analytical Derivation of Equations of Motion for Spin-1 Magnets
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Rico Pohle, Yutaka Akagi, Kimberly Remund, and Nic Shannon
2. 発表標題 Numerical Integration of Equations of Motion for Spin-1 Magnets
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 坪田祥一, 赤城裕, 桂法称
2. 発表標題 Thue-Morse格子上の電子系のZ2 Berry phaseを用いたトポロジカルな特徴付け
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 赤城裕
2. 発表標題 量子スピン液晶におけるトポロジカル励起とダイナミクス
3. 学会等名 新学術領域研究「量子液晶の物性科学」領域研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小野淳, 赤城裕
2. 発表標題 三角格子遍歴磁性体における光誘起スピンスカラーカイラル状態
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yutaka Akagi
2. 発表標題 Topological textures and $CP^2$ Skyrmion crystals in quantum spin-nematics
3. 学会等名 The 13th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics [META 2023] (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Nanse Esaki, Yutaka Akagi, and Hosho Katsura
2. 発表標題 Electric field controllable thermal Hall effect of triplons in the quantum dimer magnets $XCuCl_3$ ( $X=Ti, K$ )
3. 学会等名 International Conference on Quantum Liquid Crystals 2023 [QLC2023] (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yuki Amari, Yutaka Akagi, Sven Bjarke Gudnason, Muneto Nitta, Yakov Shnir
2. 発表標題 Realization of spin nematic Skyrmion crystals in cold atom systems
3. 学会等名 International Conference on Quantum Liquid Crystals 2023 [QLC2023] (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yutaka Akagi
2. 発表標題 Topological magnetism in quantum spin-nematics
3. 学会等名 International Conference on Quantum Liquid Crystals 2023 [QLC2023] (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Nanse Esaki, Yutaka Akagi, and Hosho Katsura
2. 発表標題 Electric field controllable thermal Hall effect of triplons in the quantum dimer magnets $\text{XCuCl}_3$ ( $X=\text{Ti}, \text{K}$ )
3. 学会等名 The 14th APCTP Workshop on Multiferroics (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Nanse Esaki, Yutaka Akagi, and Hosho Katsura
2. 発表標題 Theoretical studies of the electric field induced thermal Hall effect in the quantum dimer magnets $\text{XCuCl}_3$ ( $X=\text{Ti}, \text{K}$ )
3. 学会等名 International Symposium on Quantum Electronics (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Nanse Esaki, Yutaka Akagi, and Hosho Katsura
2. 発表標題 Theoretical studies of the electric field induced thermal Hall effect in the quantum dimer magnets $\text{XCuCl}_3$ ( $X=\text{Tl}, \text{K}$ )
3. 学会等名 CEMS Symposium on Emergent Quantum Materials 2024 (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Nanse Esaki, Yutaka Akagi, and Hosho Katsura
2. 発表標題 Electric field induced thermal Hall effect of triplons in the quantum dimer magnets $\text{XCuCl}_3$ ( $X=\text{Tl}, \text{K}$ )
3. 学会等名 American Physical Society March Meeting 2024 (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Leilee Chojnacki, Rico Pohle, Han Yan, Yutaka Akagi, and Nic Shannon
2. 発表標題 Gravitational wave analogues in spin nematics and cold atoms
3. 学会等名 American Physical Society March Meeting 2024 (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 赤城裕
2. 発表標題 $\text{SU}(3)$ 近藤格子模型における $\text{CP}^2$ triple-Q state
3. 学会等名 日本物理学会第78回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 赤城裕
2. 発表標題 Generalized Skyrmions in spin-1 quantum magnets
3. 学会等名 ipi - ダイキン シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 甘利悠貴, 赤城裕, Sven Bjarke Gudnason, 新田宗土, Yakov Shnir
2. 発表標題 Skyrmion crystals with spin-nematic order in SU(3) chiral magnets
3. 学会等名 令和5年度 新学術領域研究「量子液晶の物性科学」 領域研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Leilee Chojnacki, Rico Pohle, Han Yan, Yutaka Akagi, Nic Shannon
2. 発表標題 Gravitational wave analogues in quantum liquid crystals
3. 学会等名 令和5年度 新学術領域研究「量子液晶の物性科学」 領域研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 赤城裕
2. 発表標題 CP <sup>2</sup> triple-Q state in the SU(3) Kondo lattice model
3. 学会等名 令和5年度 新学術領域研究「量子液晶の物性科学」 領域研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 江崎蘭世, 赤城裕, 桂法称
2. 発表標題 XCuCl <sub>3</sub> (X=Ti, K) のBEC相における電場誘起トリブロン熱ホール効果
3. 学会等名 日本物理学会2024年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小野淳, 奥村駿, 今井渉平, 赤城裕
2. 発表標題 スピンスカラーカイラル状態における高次高調波発生
3. 学会等名 日本物理学会2024年春季大会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<a href="https://sites.google.com/site/yutakaakagiacademian/">https://sites.google.com/site/yutakaakagiacademian/</a>
---

6. 研究組織			
	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	甘利 悠貴  (Amaru Yuki)		2022年6月から2023年3月の期間、ポスドクとして雇用。本研究を強力に推進していただいた。

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
ロシア連邦	Joint Institute for Nuclear Research			
中国	河南大学			
米国	University of California, Irvine			
米国	Rice University			