

令和 3 年 5 月 25 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2020

課題番号：17K05497

研究課題名（和文）エキシトニック系におけるワニエ・モット描像とフレンケル描像間のクロスオーバー

研究課題名（英文）Crossover between Wannier-Mott and Frenkel pictures in excitonic systems

研究代表者

浅野 建一（Asano, Kenichi）

大阪大学・全学教育推進機構・教授

研究者番号：10379274

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：半導体光物性と強相関電子系の分野でそれぞれ独自に進展してきた電子正孔系（エキシトニック系）の研究を、俯瞰的・統合的に発展させることを目指し、これまでにない多種多様な角度からの研究を行った。それに付随して統計力学基礎論に関する研究や新数値計算手法の開発等にも取り組んだ。その結果、グラフェンにおける超強磁場下サイクロトロン共鳴、谷構造を持つ低次元半導体におけるポリ励起子、 $S=1$ ダイマー系の四極子相と励起子相の関係、反強磁性スピントクスチャ、量子系における揺動散逸定理の破れとサイクロトロン共鳴スペクトルの関係、クエンチ感受率の特異的な振る舞いと熱力学感受率の関係に関して成果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

全ての系は正電荷と負電荷を持つ粒子の集合体である。半金属や光励起された半導体で実現されるエキシトニック系（電子正孔系）はその本質を究極まで簡約した系と言え、究極の「物性基礎理論」の舞台だと言える。そこで得られた様々な成果は、必然的に物性物理学の非常に広い分野にインパクトを与える。また、本研究で副次的に得られた線形応答理論に関する一連の研究成果は、統計力学の基礎部分にも影響を与えるものになっている。

研究成果の概要（英文）：We made an overall study on the low energy properties of the electron-hole system hosting an excitonic phase. These studies include the development of numerical tools, deriving basic formula for the response functions, and the exploration of new properties of the excitonic phase. The high-field cyclotron resonances in graphene (gapless semiconductor), and the breaking of oscillation-dissipation theory in relation with the cyclotron resonance spectra, polyexcitons in low-dimensional semiconductors with multivalley structure, and quadrupolar phases of spin-1 dimer model which is equivalent to the two-orbital Hubbard model hosting Frenkel types of excitonic phases.

研究分野：物性理論

キーワード：励起子 電子正孔系 量子ホール系 グラフェン 揺動散逸定理 四極子 反強磁性

### 1. 研究開始当初の背景

全ての系は正電荷と負電荷を持つ粒子の集合体である。半金属や光励起された半導体で実現されるエキシトニック系(電子正孔系)はその本質を究極まで簡約した系であり、究極の「物性基礎理論」の舞台として非常に古くから注目されてきた。研究開始当初、半導体分野と強相関系分野それぞれで、この系の研究がリバイバル的な広がりを見せていた。しかし、両者の研究はそれぞれに独自の発展を遂げていてほとんど交わりがなく、それらを俯瞰的な視点から捉えている研究はほとんど皆無であった。また、グラフェンをはじめとする様々な原子層物質におけるエキシトニック効果や、量子ホール系の光学応答に関する研究が大きく進展しはじめており、それらについての解明が求められていた。

### 2. 研究の目的

半導体分野と強相関系分野それぞれで独自に進化を遂げたエキシトニック系を更に深化させながら、それらを俯瞰的・統合的な観点から捉えて、両者に共通する物理を抽出する。また、原子層物質や量子ホール系といった新奇な系でのエキシトニック効果や、より広く光学応答スペクトルについて調べる。また、量子ホール系の光吸収スペクトルの研究を通じて、量子系における揺動散逸定理の基礎理論について研究を行う。

### 3. 研究の方法

原子層物質や量子ホール系の光学応答や、エキシトニック効果の研究においては、ハミルトニアンの数値対角化の手法を主に用いる。また、少数の電子正孔系を厳密に扱う手法として、拡散モンテカルロ法のプログラムを開発する。格子模型については、相互作用が強い極限からの摂動論をもとに低エネルギー有効模型を導出し、それを厳密対角化などの数値的な手法で解析し、基底状態の相図や相関関数を求める。また励起子相に相当する2軌道混成相および四極子相に対しては、粒子を追加したときの不安定性の解析によってほぼ有限サイズ効果が無視できる相境界が得られる。

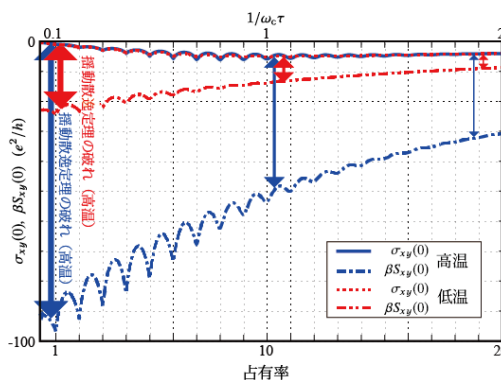
### 4. 研究成果

#### 1. 量子系における揺動散逸定理の破れとサイクロトロン共鳴スペクトル：

揺動散逸定理は線形応答と平衡状態での物理量の時間揺らぎの逆温度倍に等しいという関係式で、実際に線形応答からゆらぎ(ノイズ)の情報を得るのにも用いられる。古典系では線形応答関数の散逸に直接関係する成分のみならず、関係しない成分にも関係式が成立する。量子系では測定による反作用があるため、ゆらぎの測定可能性を検討しなければならない。最近、量子系で測定の反作用効果まで考慮した理論が構築され、散逸に直接関係する成分についてはある種の理想的な測定を行えば静的極限において関係式が成立し続けるが、関係しない成分については静的極限をとっても関係式が破れることが指摘されている。しかし、具体的な定理の破れの大きさは明らかにされていなかった。

代表者は東京大学の久保氏、清水教授と共に、散逸に関係する成分では古典極限が再現されるような低振動数領域でも、散逸に関係しない線形応答の成分に大きな定理の破れが現れる具体的例として、磁場中の二次元電子系を考察した。ホール伝導度と非対角電流ゆらぎの間の関係を調べた結果、実験的に実現可能な試料の移動度、および温度領域において揺動散逸定理の破れを観測し得ることが明らかになった。特に、低温強磁場における揺動散逸定理の破れの大きさはホール伝導度より1桁以上も大きくなることがわかった。同時に、光吸収スペクトル(サイクロトロン共鳴)から、実測可能なゆらぎのスペクトルを再現する方法についても明らかにした。この成果はPhysical Review B誌に掲載された。

さらに、非対角電流ゆらぎに局在状態が寄与していることも見出した。これはホール伝導度にも対角伝導度にも対角電流ゆらぎにも見られない特徴である。さらにこの事実を反映して、非対角電流ゆらぎが占有率に対してほぼ線形に増加するため、これが占有率を推定するのに有用な量になっていることがわかった。

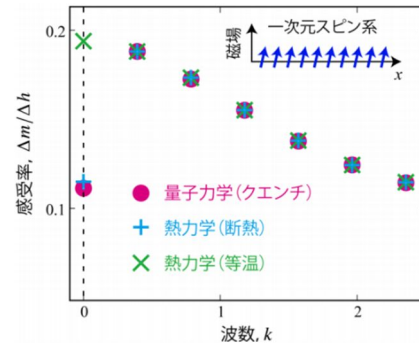


#### 2. 二重量子ドット系における Fano 効果：

二重量子ドット系の離散準位と空間的に広がった連続的な準位が結合して生じる Fano 効果について調べ、則元氏らが得たトンネルスペクトルの実験データを、単純なモデルで定性的に説明することに成功した。この成果はPhysical Review B誌に掲載された。

### 3. クエンチ感受率の特異的な振る舞いと熱力学感受率の関係

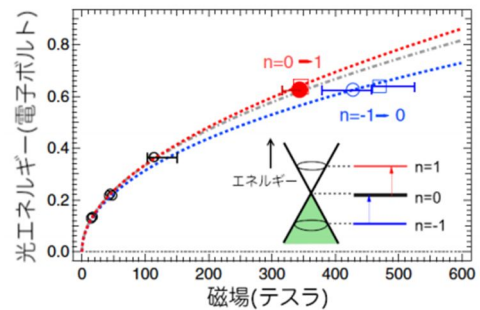
電子正孔系の低密度・低温領域に現れる励起子ガス相や、その Bose-Einstein 凝縮相は冷却原子系の物理と非常に深い関係性を持っている。現在冷却原子系では、系を外界から孤立させた理想的な状況下で、外場を突然印加した後の系の量子力学的時間発展を調べる研究が広く行われている。東京大学の千葉氏、清水教授と共に、この突然の外場印加に対する系の応答を表す感受率(クエンチ感受率)が、外場の空間変調を表す波数の関数として不連続に飛ぶことがあることを示した。そして、この飛びの前後の値が、準静的に外場をかけてた際に得られる二種類の熱力学感受率(等温感受率と断熱感受率)にそれぞれ等しくなることを見出した。



より具体的に実験で得られる結果を予言するため、一次元スピン系におけるクエンチ感受率と、熱力学が与える等温感受率と断熱感受率を、波数の関数として求めた。その結果、系の運動が十分に複雑な場合には、確かに上記のような振舞いになることを明らかにした。また、系の運動が単純すぎると、条件が満たされなくなってクエンチ感受率が熱力学感受率のいずれとも一致しなくなることがあることもわかった。この成果は Physical Review Letters 誌に掲載された。プレスリリースも行った。

### 3. グラフェンにおける超強磁場下サイクロトロン共鳴のスペクトル

東京大学物性研究所の嶽山グループが超強磁場発生装置(560T 超)を用いて観測した。単層グラフェンのサイクロトロン共鳴のデータを解析し、観測されたスペクトルの分裂が電子正孔対称性の破れによるものであることを明らかにした。実際にスペクトルの分裂幅は磁場の 1/2 乗ではなく、 $k \cdot p$  法が予言する 1 乗に比例する。過去の研究では、外的に歪ませたグラフェンでしかサイクロトロン共鳴で電子正孔対称性の破れを観測した例はなく、超強磁場によってはじめてこの破れが観測可能なまでに大きくなっていることがわかった。この点が評価され、出版した論文は Physical Review B 誌の Editor's choice に選出された。プレスリリースも行った。



### 4. ポリ励起子に関する研究

複数の励起子の束縛状態(ポリ励起子)は、通常の谷構造のない直接型半導体では励起子 2 個の場合(励起子分子)しか観測されない。電子や正孔の内部自由度がスピン由来の 2 なので、パウリ排他律が 3 個以上の励起子の束縛を抑制するためである。しかし、SiGe/Si 量子井戸や、窒化ボロンや遷移金属ダイカルコゲナイドの原子層物質では、2 個のみならず 3 個あるいは 4 個の励起子から成るポリ励起子を実現し得る。実際、電子や正孔がスピンと谷を併せて内部自由度 4 を持つ。さらに、低次元性によるポリ励起子の束縛の増強を期待できる上、原子層を重ねることで電子と正孔を空間的に離れた別々の二次元面に閉じ込めることも可能である。

そこで内部自由度 4 の電子と正孔から成る二次元ポリ励起子をごく一般的に考察した。具体的には、 $N(=1, 2, 3, 4)$  個の電子と同数の正孔を互いに区別できる異種粒子として扱って、それらが互いに Coulomb 相互作用する系の厳密な基底状態のエネルギーを、拡散モンテカルロ法を用いて数値的に評価した。伝導帯が谷構造を持つバルクのシリコンやダイヤモンドでは、ポリ励起子由来の発光ピークが実測されているが、その特徴が二次元系でも現れる普遍的なものであることを明らかにした。さらに、電子間および電子正孔間の対布関数を計算して、それを基にポリ励起子の内部構造についても解析した。

### 5. $S=1$ ダイマー系の四極子相の研究を通じた励起子相の解明

2 軌道ハバード模型の 1/2-filling においてクーロン相互作用  $U$  が強い領域では、1 サイト 2 軌道当たり 1 電子の基底が低エネルギー領域を支配する。この基底で張られる系の絶縁相の有効ハミルトニアンは、各サイトあたり電子が下の軌道を占有する低スピン状態  $S=0$  と 2 軌道それぞれ 1 電子ずつ占有する高スピン状態  $S=1$  (3 重縮退) の計 4 状態で表せ、軌道間のエネルギー差とサイト間の遷移積分  $t$  の比に応じて 2 軌道間が有限の確率で混じりあう。この混成状態が格子系の励起子相に相当する。この有効ハミルトニアンは、スピン自由度のみしか存在しない  $S=1$  ダイマー系の低エネルギーモデルでもある。本研究では、この  $S=1$  が 2 つ合わさって 2 つのダイマーサイトを形成し、このダイマーサイトが 2 次元三角格子を組む量子スピン模型を解析した。もともとダイマー内の反強磁性相互作用が強い場合には系はシングレット状態(励起子モデルにおける低スピン状態)を基底状態を持つ。これに対してフラストレートしたダイマー間

の相互作用を2種類加えると、トリプル(励起子モデルの高スピン状態をあらわす準粒子)がドーブされ、ボーズアインシュタイン凝縮する。この凝縮はハバード模型における励起子相に読み替えることができる。とくに相互作用の片方が反強磁性、片方が強磁性の場合には、トリプルが四極子的な秩序を形成することが明らかになった。

このような四極子相の熱力学的特性を調べるために、基底状態とするより単純な量子スピン模型として  $S = 1$  の bilinear-biquadratic 模型を考えた。この biquadratic 相互作用は前述の  $S = 1$  ダイマー模型において高次の摂動効果としてトリプル間に自然に表れる相互作用となっている。そこで bilinear-biquadratic 模型に対して、各サイトでの量子的な四極子秩序変数を用意し、この秩序変数を変分的に取り扱うモンテカルロ計算により、比熱と磁化率の温度依存性を調べたところ、常磁性相から四極子相への相転移が比熱のピークで観測された。この転移温度は、磁場をかけると一旦上昇したあと下降するリエントラント現象を示し、さらに高い磁場で温度ゼロに到達する。リエントラントが生じる起源は、磁場によって高温の常磁性相が急激にエントロピーを失うのに対して、低温の揺らぎが強い四極子相にはほとんどエントロピー変化がないからである。これはヘリウム系でポムランチョック効果として知られる現象となぞらえて理解することができる。

## 6. 反強磁性スピネクスタの理論

5で論じた2軌道ハバード励起子模型は、具体的に  $\text{BiCoO}_3$  の実験研究を説明するために考案された。この  $\text{BiCoO}_3$  が、スピン軌道相互作用と Co の反強磁性秩序を由来とするスピネクスタを示すことが第一原理計算で示されている。本研究では、 $S=1/2$  が実際に正方格子に配置されたスピン模型のマグノン励起をスピン波近似によって調べた。反強磁性体では、上下スピンをもつ2つの磁氣的副格子に対して2種類のマグノンが定義される。この2種類が Bogoliubov-de Gennes 型のスピン波ハミルトニアンで混成する。系の結晶構造に反転対称性がない場合、スピン軌道相互作用が存在するが、これが絶縁体ではジャロシンスキー守屋(DM)相互作用に転化する。この DM 相互作用のために、上下のスピンを量子的な「縮み」を運ぶ2種類のマグノンがまじりあい波数空間で  $k$  点によって運ぶスピンの向きを連続的に変化させるスピネクスタが生じることを明らかにした。同時に DM 相互作用によって、マグノンバンドに有限のベリー曲率が生じる。磁場を2次元面に垂直にくわえるとこのベリー曲率が熱ホール係数に有限の寄与をあたえるようになり、熱ホール効果が観測されることを理論的に予言した。

最後に、このような反強磁性マグノンのスピネクスタやトポロジカルな効果を、モデルの詳細によらずに予言することのできる一般論を構築した。この理論は  $4 \times 4$  の行列で示される Bogoliubov-de Gennes 型のスピン波ハミルトニアンを  $2 \times 2$  に形式論的にマップすることによって、解析的にスピネクスタが増強されるパラメタ領域を同定することを可能にしている。実際、この一般論を用いることで系に反転対称性が存在する Kitaev 模型においても、反強磁性基底状態が実現するパラメタ領域においてスピネクスタが観測することを突き止めた。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計16件（うち査読付論文 16件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Nakamura Daisuke, Saito Hiroaki, Hibino Hiroki, Asano Kenichi, Takeyama Shojiro	4. 巻 101
2. 論文標題 Quantum limit cyclotron resonance in monolayer epitaxial graphene in magnetic fields up to 560 T: The relativistic electron and hole asymmetry	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 115420
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.115420	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 -
1. 著者名 Chiba Yuuya, Asano Kenichi, Shimizu Akira	4. 巻 124
2. 論文標題 Anomalous Behavior of Magnetic Susceptibility Obtained by Quench Experiments in Isolated Quantum Systems	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 110609
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.124.110609	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 -
1. 著者名 Tanaka Katsuhiko, Hotta Chisa	4. 巻 101
2. 論文標題 Multiple quadrupolar or nematic phases driven by the Heisenberg interactions in a spin-1 dimer system forming a bilayer	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 94422
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.094422	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 -
1. 著者名 Mitsumoto Kota, Hotta Chisa, Yoshino Hajime	4. 巻 124
2. 論文標題 Spin-Orbital Glass Transition in a Model of a Frustrated Pyrochlore Magnet without Quenched Disorder	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 87201
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.124.087201	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 -

1. 著者名 Kawano Masataka, Hotta Chisa	4. 巻 100
2. 論文標題 Discovering momentum-dependent magnon spin texture in insulating antiferromagnets: Role of the Kitaev interaction	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 174402
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.100.174402	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 -

1. 著者名 川野 雅敬, 堀田 知佐	4. 巻 55
2. 論文標題 反強磁性絶縁体のマグノン励起にみられるスピントクスチャと異常熱ホール効果	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 固体物理	6. 最初と最後の頁 41-50
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

1. 著者名 Shota Norimoto, Shuji Nakamura, Yuma Okazaki, Tomonori Arakawa, Kenichi Asano, Koji Onomitsu, Kensuke Kobayashi, Nobu-hisa Kaneko	4. 巻 97
2. 論文標題 Fano effect in the transport of an artificial molecule	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 195313(1-8)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.97.195313	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 -

1. 著者名 Kentaro Kubo, Kenichi Asano, Akira Shimizu	4. 巻 98
2. 論文標題 Macroscopic quantum violation of the fluctuation-dissipation theorem in equilibrium	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 115429(1-7)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.98.115429	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 -

1. 著者名 Masataka Kawano, Yoshinori Onose, Chisa Hotta	4. 巻 2
2. 論文標題 Designing Rashba?Dresselhaus effect in magnetic insulators	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Communications Physics	6. 最初と最後の頁 27(1-8)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s42005-019-0128-6	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 -

1. 著者名 Masataka Kawano, Chisa Hotta	4. 巻 99
2. 論文標題 Thermal Hall effect and topological edge states in a square-lattice antiferromagnet	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 054422(1-16)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.99.054422	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 -

1. 著者名 Hiroyuki Endo, Chisa Hotta, Akira Shimizu	4. 巻 121
2. 論文標題 From Linear to Nonlinear Responses of Thermal Pure Quantum States	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 220601(1-6)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.121.220601	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 -

1. 著者名 Chisa Hotta, Kenichi Asano	4. 巻 98
2. 論文標題 Magnetic susceptibility of quantum spin systems calculated by sine square deformation: One-dimensional, square lattice, and kagome lattice Heisenberg antiferromagnets	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 140405(1-5)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.98.140405	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 -

1. 著者名 Xavier Plat, Tsutomu Momoi, Chisa Hotta	4. 巻 98
2. 論文標題 Kinetic frustration induced supersolid in the S=12 kagome lattice antiferromagnet in a magnetic field	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 014415(1-15)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.98.014415	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 -

1. 著者名 Yuto Yokoyama, Chisa Hotta	4. 巻 97
2. 論文標題 Spin nematics next to spin singlets	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 180404(1-5)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.97.180404	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 -

1. 著者名 Taniguchi Daisuke, Okabayashi Jun, Hotta Chisa	4. 巻 96
2. 論文標題 Pressure-induced two-step spin crossover in a double-layered elastic model	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 174104
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.96.174104	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 -

1. 著者名 Tanaka Katsuhiro, Yokoyama Yuto, Hotta Chisa	4. 巻 87
2. 論文標題 Origin of Biquadratic Exchange Interactions in a Mott Insulator as a Driving Force of Spin Nematic Order	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 23702
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.87.023702	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31件（うち招待講演 5件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Chisa Hotta
2. 発表標題 Spin-orbital glass transition in a model of frustrated pyrochlore magnet without quenched disorder
3. 学会等名 Correlated Disorder workshop (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 千葉侑哉, 浅野建一, 清水明
2. 発表標題 孤立量子系の磁気感受率の実測値に現れる特異な振舞
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 川野雅敬, 堀田知佐
2. 発表標題 反強磁性マグノンの擬スピン描像を用いたKi taev-Heisenberg- 模型のスピンテクスチャの解析
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田中克大, 堀田知佐
2. 発表標題 2次元系のスピネマティック相における熱力学的性質
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 千葉侑哉, 浅野建一, 清水明
2. 発表標題 量子クエンチで得られる感受率の振舞と系の非可積分性の関係
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田中克大, 堀田知佐
2. 発表標題 スピン 1 ダイマー三角格子におけるスピンネマティック相
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岩木惇司, 清水明, 堀田知佐
2. 発表標題 MPSを用いた熱的量子純粋状態の記述
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Chisa Hotta
2. 発表標題 Sine square deformation to quantum spin systems
3. 学会等名 Trends in Theory of Correlated Materials Workshop (TTCM 2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Chisa Hotta
2. 発表標題 Spin nematics next to spin singlets
3. 学会等名 Kavli ITS Workshop: Quantum Magnetism: Frustration, Low-dimensionality, Topology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Chisa Hotta
2. 発表標題 Quantum Critical Dynamics
3. 学会等名 Gordon Research Conference on conductivity and Magnetism in Molecular Materials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Chisa Hotta
2. 発表標題 Thermodynamic properties of quantum spin systems
3. 学会等名 WE-Heraeus-Seminar on TRENDS IN QUANTUM MAGNETISM (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 久保賢太郎, 浅野建一, 清水明
2. 発表標題 量子系における揺動散逸定理のマクロな破れ
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 堀田 知佐, 遠藤 寛之, 清水 明
2. 発表標題 カゴメハイゼンベルグモデルの線形・非線形応答
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 川野雅敬, 小野瀬佳文, 堀田知佐
2. 発表標題 空間反転対称性の破れた反強磁性体におけるマグノンスピン運動量ロッキング
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 川野 雅敬, 堀田 知佐
2. 発表標題 正方格子反強磁性体における熱Hall効果とトポロジカル相転移
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 千葉侑哉, 浅野建一, 清水明
2. 発表標題 久保公式はどんな熱力学感受率をあたえるか?
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 堀田知佐, 吉田紘行
2. 発表標題 S=3/2 breathing kagomeにおける quantum-classical spin liquid状態
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田中克大, 堀田知佐
2. 発表標題 2次元S = 1ダイマーダンベル模型の磁気状態の解析
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 光元亨汰, 堀田知佐, 吉野元
2. 発表標題 パイロクロア格子上反強磁性Heisenberg模型における動的Jahn-Teller歪みの効果
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 川野雅敬, 堀田知佐
2. 発表標題 二次元反強磁性体の対称性とBerry曲率
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 堀田知佐
2. 発表標題 Spin singlet相と隣接するspin nematicsの実現
3. 学会等名 物性研短期研究会「量子多体効果が生み出す液晶的電子状態」
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Chisa Hotta
2. 発表標題 Spin nematics out of spin singlets
3. 学会等名 Novel Quantum States in Condensed Matter (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 則元将太, 中村秀司, 岡崎雄馬, 金子晋久, 浅野建一, 小林研介
2. 発表標題 二重量子ドットにおけるファノ効果の観測
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 堀田知佐, 浅野建一
2. 発表標題 フラストレートした量子スピン系の磁化率と比熱
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 遠藤寛之, 堀田知佐, 清水明
2. 発表標題 熱的量子純粋状態の外場応答を用いた量子多体状態の解析
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 久保寛太郎, 浅野建一, 清水明
2. 発表標題 Hall伝導度における揺動散逸定理の量子破綻
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Xavier Plat, 桃井勉, 堀田知佐
2. 発表標題 Magnetization plateau and supersolidity in the Heisenberg Kagome model
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田中克大, 横山祐人, 堀田知佐
2. 発表標題 モット絶縁体における $S = 1$ biquadratic 相互作用の摂動論による評価
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 横山祐人, 堀田知佐
2. 発表標題 ダイマー系における多スピン交換に起因するネマティック固体・液体相
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 上田和正, 堀田知佐, 今田正俊
2. 発表標題 ボンドランダムネスのある三角格子上の横磁場イジングモデルの解析
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 浅野建一
2. 発表標題 電子正孔系の物理
3. 学会等名 東工大研究会「量子クラスターで読み解く物質の階層構造」(招待講演)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 浅野 建一	4. 発行年 2019年
2. 出版社 東京大学出版会	5. 総ページ数 528
3. 書名 固体電子の量子論	

〔産業財産権〕



〔その他〕

ミクロ法則とマクロ法則を橋渡しする新しい関係式を発見  
[https://resou.osaka-u.ac.jp/ja/research/2020/20200318\\_3](https://resou.osaka-u.ac.jp/ja/research/2020/20200318_3)  
グラフェン・ディラック電子の対称性の破れを観測  
[https://resou.osaka-u.ac.jp/ja/research/2020/20200313\\_1](https://resou.osaka-u.ac.jp/ja/research/2020/20200313_1)

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 分 担 者	堀田 知佐  (Hotta Chisa)  (50372909)	東京大学・大学院総合文化研究科・准教授   (12601)	

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
---------	---------