

# 凝縮系物性研究部門

Division of Condensed Matter Science

高温超伝導体、有機超伝導体、グラフェン、トポロジカル絶縁体など、「新物質」の発見が物質科学の新しい局面を切り拓いた例は枚挙に暇がない。また超伝導や量子ホール効果などの予期せぬ現象は、極低温、高圧、強磁場といった「極限環境」において見だされてきた。凝縮系物性研究部門では、新しい物質系の探索と極限環境を用いた精密測定を組み合わせることにより、新しい物質観につながる物性現象を発見し解明することを目標としている。

当部門を構成する研究室は、自由な発想のもとに、新物質や高品質試料の作製や、極限環境での精密な電氣的・磁氣的・熱的測定を行っている。有機伝導体、原子層（二次元）物質、トポロジカル物質などの多様な物質を対象に、電子相関、フラストレーション、対称性、トポロジー、分子自由度などが協奏して現れる多彩な現象の解明に取り組んでいる。

本年度は井手上研究室が新たに当部門に加わった。

Discoveries of new materials, for example, high temperature superconductors, organic superconductors, graphene, and topological insulators, have often opened new horizons in materials science. Application of extreme conditions of low temperature, high pressure, and high magnetic field have also revealed various unexpected properties of matters, such as superconductivity and quantum Hall effect. The goal of the Division of Condensed Matter Science is to uncover novel phenomena that lead to new concepts of matter, through combining the search for new material and the precise measurements under extreme conditions.

Each group in this division pursues its own research on synthesis of new materials and high quality samples, or on precise measurements of electric, magnetic, and thermal properties, based on their own free ideas. Their main subject is to elucidate various phenomena which emerge as a concerted result of electron correlation, frustration, symmetry, topology, and molecular degrees of freedom, in various materials such as organic conductors, atomic layer (two-dimensional) materials, and topological materials.

Ideue group has newly joined this division in 2022.

---

部門主任 長田 俊人  
Leader OSADA, Toshihito

---

## 井手上研究室 Ideue Group

## 研究テーマ Research Subjects

- 1 ナノ物質の対称性制御を基軸とした新奇物性探索  
Exploration of novel physical properties based on symmetry control of nanomaterials
- 2 量子整流現象：非相反伝導現象、超伝導ダイオード効果、バルク光起電力効果  
Quantum rectification effect: Nonreciprocal transport, superconducting diode effect and bulk photovoltaic effect
- 3 量子相制御：電界誘起超伝導、トポロジカル相転移、磁気秩序制御等  
Quantum phase control: Electric-field-induced superconductivity, topological phase transition, magnetic order control etc



准教授 井手上 敏也  
Associate Professor IDEUE, Toshiya

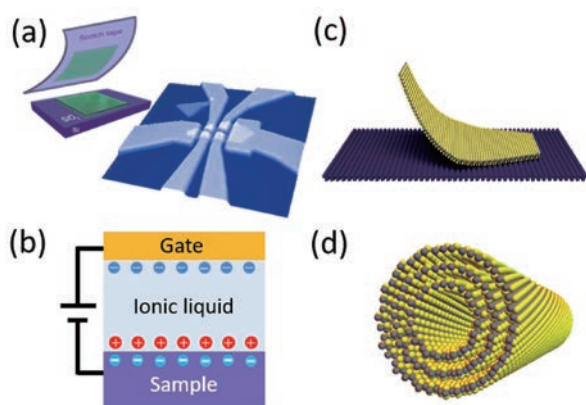
専攻 Course

工学系・物理工学

App. Phys., Eng.

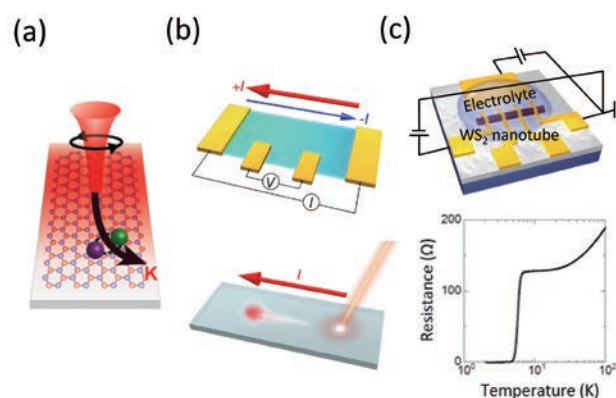
層状物質を剥離して得られる2次元結晶やそれが丸まったナノチューブに代表されるナノ物質は物質科学の新しい舞台として近年大きな注目を集めている。これらは3次元結晶にはないユニークな物性を示すことに加え、デバイス化や電場・磁場・圧力などの外場印加、電気化学的手法、曲率構造やヘテロ界面の作製等によって物質の対称性を自在に制御可能であり、それを反映した特徴的機能性を創出することができる。本研究室では、そのような量子ナノ物質特有の電気伝導特性や超伝導物性、光学特性の発見と理解によって、物質科学のフロンティアを開拓することを目指している。電荷やスピン、格子、励起子、超伝導ボルテックスといった様々な量子自由度の整流効果やホール効果、スイッチング等の量子機能性の創出に取り組んでいる。

Quantum nanomaterial such as two-dimensional crystals and nanotubes is attracting much attention as a new material platform in recent days. In addition to the unique physical properties, which are absent in bulk three-dimensional materials, we can freely control the symmetries of nanomaterials and realize the emergent functionalities reflecting the characteristic symmetries by device fabrication, application of the external pressure or electric/magnetic field, electro-chemical gating method, and making van der Waals interfaces or curved nanostructures. We are exploring novel transport phenomena, superconducting properties, and optical properties in these symmetry-engineered nanomaterials and pioneering the frontier of nanomaterial science. We are aiming at controlling the various quantum degree of freedoms or elementary excitations in nanomaterials (charge, spin, lattice, exciton, superconducting vortex etc.) and developing exotic quantum functionalities such as quantum rectification effect (nonreciprocal transport, superconducting diode effect, and bulk photovoltaic effect), Hall effect of uncharged excitations (magnon, phonon, exciton), and quantum phase control (electric-field-induced superconductivity, topological phase transition, magnetic order control).



様々な手法によるナノ物質の特徴的対称性の創出。(a) 劈開法による層状物質の薄膜化およびデバイス化。(b) イオン液体ゲート。(c) ファンデアワールス界面作製。(d) ナノチューブ・曲率構造。

Emergence of unique symmetries in nanomaterials. (a) Nanodevice of few-layer two-dimensional crystals. (b) Ionic liquid gating. (c) Van der Waals interface. (d) Nanotube and curved nanostructure.



ナノ物質における量子機能性の例。(a) 素励起のホール効果。(b) 量子整流現象：非相反伝導とバルク光起電力効果。(c) 電界誘起超伝導

Quantum functionalities in nanomaterials. (a) Hall effect of elementary excitations. (b) Quantum rectification effect: Nonreciprocal transport and bulk photovoltaic effect. (c) Electric-field-induced superconductivity.



# 長田研究室 Osada Group

## 研究テーマ Research Subjects

- 1 有機ディラック電子系のトポジカル物性  
Topological properties of organic Dirac fermion systems
- 2 次元物質の電子構造と量子輸送現象  
Electronic structure and quantum transport in two-dimensional materials
- 3 層状伝導体の角度依存磁気伝導と層間コヒーレンス  
Angle-dependent magnetotransport and interlayer coherence in layered conductors
- 4 グラファイトの磁場誘起電子相転移の超薄膜化による量子サイズ効果  
Quantum size effect of ultra-thinning on magnetic-field-induced electronic phase transitions in graphite



教授 長田 俊人  
Professor OSADA, Toshihito

専攻 Course

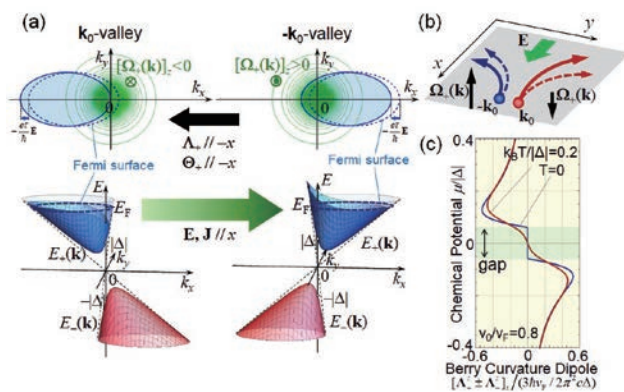
工学系物理工学  
App. Phys., Eng.



助教 田縁 俊光  
Research Associate  
TAEN, Toshihiro

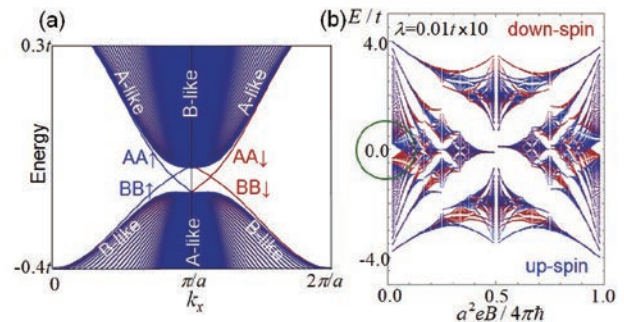
本研究室では、原子層（二次元）物質、トポジカル物質、人工ナノ構造を対象として、強磁場・低温・高圧環境下の輸送測定（直流・交流伝導、熱電効果等）の実験的研究を行うことにより、新しい電子状態や量子輸送現象、トポジカル現象を探索・解明・制御することを目指している。主な実験手段は先端的微細加工・評価装置群を用いた原子層積層構造やナノ構造の素子形成（電子線リソグラフィー等）、超伝導磁石内の2軸全磁場方位依存性の精密計測、40 T級小型パルス磁石による強磁場計測などであり、簡単な理論的考察も並行して行う。近年は有機ディラック電子系や $\tau$ 型有機導体におけるトポジカル電子状態（量子ホール強磁性、チャーン絶縁相など）やトポジカル輸送現象（非線形異常ホール効果など）、振れ積層グラフェンや黒リン超薄膜の量子伝導、グラファイトの磁場誘起電子相転移に対する超薄膜化による量子サイズ効果に関する研究を行っている。

Osada group aims to search, elucidate, and control novel electronic states, quantum transport phenomena, and topological phenomena in atomic layer (two-dimensional) materials, topological materials, and artificial nanostructures, by transport measurements (dc/ac electric transport, thermoelectric effects, etc.) under high magnetic field, low temperature, and high pressure environments. The main experimental tools include device fabrication of atomic layers, their complex stacks and nanostructures using advanced microfabrication/evaluation equipment (electron-beam lithography etc.), precision measurement of double-axial angle dependence in superconducting magnets, high magnetic field measurement with 40T-class miniature pulse magnet. Simple theoretical studies are also performed in parallel. Recently, we have focused on topological electronic states (quantum Hall ferromagnetic state, Chern insulator state, etc.) and transport phenomena (nonlinear anomalous Hall effect, etc.) in organic Dirac fermion systems and  $\tau$ -type organic conductors, quantum transport in twisted bilayer graphene and black phosphorus ultrathin films, and quantum size effect of ultra-thinning on the magnetic-field-induced electronic phase transitions in graphite.



(a) 電荷秩序ギャップのある有機ディラック電子系のバンドと伝導帯のベリー曲率。電流を流すと占有状態がフェルミ面からずれる。(b) 非線形異常ホール効果。(c) ベリー曲率双極子の化学ポテンシャル依存性。

(a) Band structure of organic Dirac fermion system with a charge order gap and Berry curvature of its conduction band. When the system carries electric current, the occupied region shifts from the Fermi surface. (b) Nonlinear anomalous Hall effect. (c) Chemical potential dependence of the Berry curvature dipole.



(a) スピン軌道相互作用のある $\tau$ 型有機導体ナノリボンのバンド構造。ギャップ内にヘリカルエッジ状態が現れる。(b)  $\tau$ 型有機導体の磁場中エネルギー準位。軌道効果によるスピン分裂が起こる。

(a) Band structure of the nanoribbon of the  $\tau$ -type organic conductor with a finite spin-orbit coupling. There appear helical edge states in the gap. (b) Energy levels of the  $\tau$ -type organic conductor under magnetic fields. Spin splitting with orbital origin can be seen.



[https://www.issp.u-tokyo.ac.jp/maincontents/organization/labs/osada\\_group.html](https://www.issp.u-tokyo.ac.jp/maincontents/organization/labs/osada_group.html)

# 森研究室 Mori Group

## 研究テーマ Research Subjects

- 1 分子の自由度を生かした新規有機（超）伝導体およびプロトン伝導体の開発と機能性研究  
Development and studies of structural and physical properties for novel organic (super)conductors and proton conductors based upon molecular degree of freedom
- 2 固体中で電子がプロトン運動と協奏した有機伝導体、金属錯体、誘電体の開発と機能性研究  
Development and studies of structural and physical properties for electron-proton coupled molecular functional materials
- 3 分子性物質の外場（磁場、電場、温度、圧力）応答の研究  
Studies of responses by external stimuli (magnetic and electric fields, temperature, pressure) for molecular materials
- 4 有機電界効果トランジスタの研究  
Study of organic field effect transistor



教授 森 初果  
Professor MORI, Hatsumi

専攻 Courses

理学系化学 新領域物質系

Chem., Sci. Adv. Mat., Frontier Sci.



助教 藤野 智子  
Research Associate  
FUJINO, Tomoko

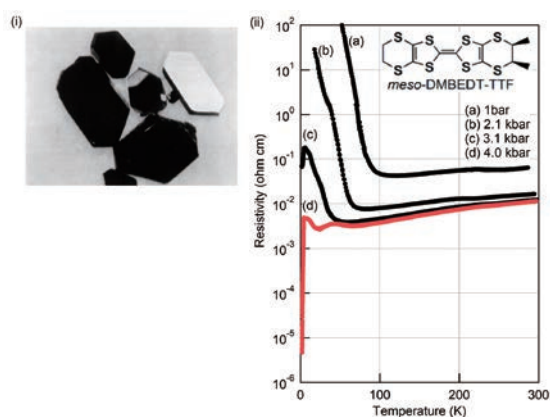


特任助教 出倉 駿  
Project Research Associate  
DEKURA, Shun

本研究室では、内部自由度をもつ分子が凝縮した分子性物質を対象とし、特異な機能性として電子・プロトン伝導性、磁性、誘電性、その圧力・電場による外場応答性、電界効果トランジスタ特性等の開拓を行っている。これら新分子性機能物質の開発は、塗布型有機伝導体や燃料電池の電解質など、有機エレクトロニクスを支える材料、デバイスの基盤研究となっている。

分子性物質の魅力は、1) 設計・制御可能であること、2) 電子間クーロン相互作用が大きく、電子の波動性と粒子性が競合すること、3) 柔らかいため、特異な外場応答性を発現することなどが挙げられる。

森研究室では、新しいモット型  $\kappa$ - $\text{ET}_2\text{Cu}(\text{NCS})_2$  および電荷秩序型  $\beta$ -(*meso*-DMBEDT-TTF) $_2\text{PF}_6$  有機超伝導体（左図）を発見し、物性研究を行った。さらに最近では、水素結合プロトンと伝導電子が動的に連動して、伝導性と磁性の切り替え現象を示す純有機伝導体（右図）を開発した。



新規有機超伝導体: (i) モット型  $\kappa$ - $\text{ET}_2\text{Cu}(\text{NCS})_2$  の単結晶と (ii) 電荷秩序型  $\beta$ -(*meso*-DMBEDT-TTF) $_2\text{PF}_6$  の電気抵抗の圧力依存性。

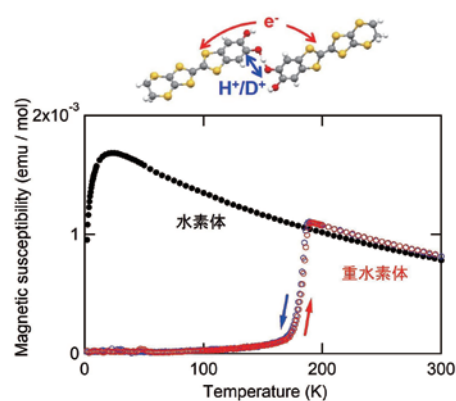
Novel organic superconductors: (i) single crystals of Mott-type  $\kappa$ - $\text{ET}_2\text{Cu}(\text{NCS})_2$  and (ii) electrical resistivities under pressures for charge-ordered-type  $\beta$ -(*meso*-DMBEDT-TTF) $_2\text{PF}_6$ .

Materials science has made great progress with the discovery of new materials that give us new concepts.

In this laboratory, we are focusing on molecular materials, which are condensed molecules with internal degrees of freedom, and exploring their unique functionalities such as electron and proton conductivities, magnetism, dielectricity, external field response due to their pressure and electric fields, and field-effect transistor properties. The development of novel functional molecular materials has become the basic research for materials and devices that support organic electronics, such as coated organic conductors and electrolytes for fuel cells.

Molecular materials are attractive because 1) they can be designed and controlled, 2) the Coulomb interaction between electrons is large, and the wave and particle properties of electrons compete with each other, and 3) they are soft, so they exhibit unique external field responses.

In Mori's group, we discovered and studied the properties of the new Mott-type  $\kappa$ - $\text{ET}_2\text{Cu}(\text{NCS})_2$  and charge-ordered  $\beta$ -(*meso*-DMBEDT-TTF) $_2\text{PF}_6$  organic superconductors (left figure). More recently, we have developed a pure organic conductor (right figure) in which hydrogen-bonded protons and conduction electrons are dynamically concerted, exhibiting a switching phenomenon between conductivity and magnetism.



伝導電子と水素結合プロトンが相関する純有機伝導体  $\kappa$ - $\text{ET}_2\text{Cu}(\text{NCS})_2$ - $\text{X}_3(\text{Cat-EDT-TTF})_2$  ( $\text{X} = \text{H}, \text{D}$ ) において、大きな重水素効果により高温で伝導性および磁性が切り替わる。

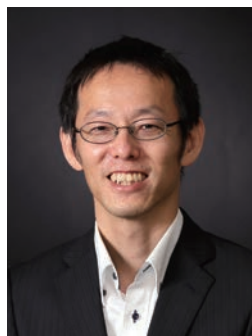
Switching behavior of electrical resistivity and magnetism due to large deuterium isotope effect in proton-electron correlated purely organic conductors  $\kappa$ - $\text{X}_3(\text{Cat-EDT-TTF})_2$  ( $\text{X} = \text{H}, \text{D}$ ).



# 山下研究室 Yamashita Group

## 研究テーマ Research Subjects

- 1 超低温における強相関電子系の研究  
Study of strongly correlated-electron systems at ultralow temperatures
- 2 絶縁体における非荷電励起の熱ホール効果  
Study of thermal Hall effects of charge-neutral excitations in insulators
- 3 NMR を用いた多極子秩序の研究  
Multipole orders studied by NMR measurements



准教授 山下 穂  
Associate Professor YAMASHITA, Minoru

専攻 Course

新領域物質系

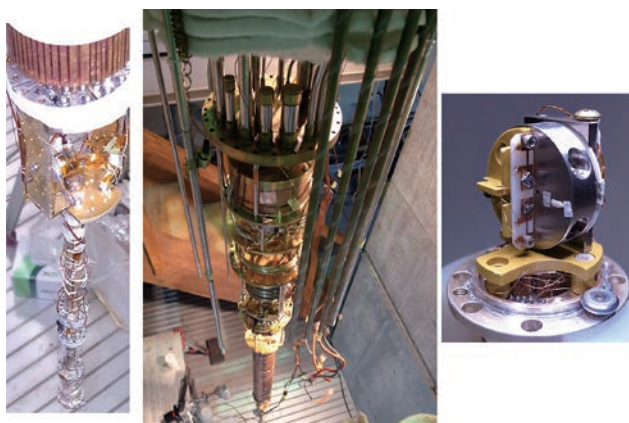
Adv. Mat., Frontier Sci.



助教 武田 晃  
Research Associate  
TAKEDA, Hikaru

温度の下限である絶対零度では全ての物質は凍りついてしまっ、何も面白い現象は無いように思われる。ところが、1ケルビンという低温領域で金属の電気抵抗が突然0になるという超伝導現象が発見されたのを契機に、液体ヘリウムの超流動転移、希薄アルカリ気体のボース凝縮など様々な量子凝縮相が極低温で発見された。室温では熱揺らぎに隠れてしまっていて見えない、多彩で不思議な物理現象が低温領域に隠れていたわけである。

当研究室ではこのような量子凝縮現象に興味を持ち、低温までの精密測定によってその物性を明らかにする研究を行っている。特に、電子系研究が全く行われてこなかった20 mK以下の超低温領域における量子臨界現象、超伝導現象の解明に力を入れている。さらに、絶縁体中のフォノンやスピンなどの非荷電励起の示す熱ホール効果やNMR測定を用いた多極子秩序の研究に力を入れて研究を進めている。

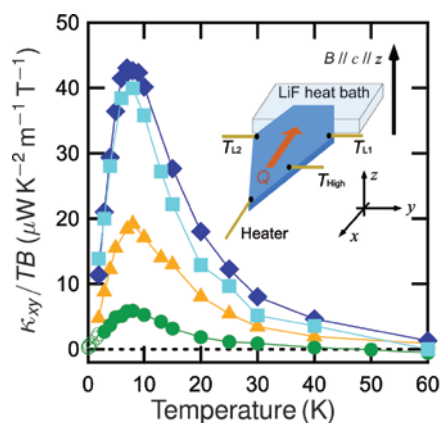


物性研の核断熱消磁冷凍機。超低温（1 mK）・高磁場（10 T）の実験が可能。左下挿入図が実験空間拡大写真。右下挿入図が超低温トルク測定用カンチレバー。

The ultralow temperature cryostat at ISSP. Nuclear demagnetization cooling enables experiments down to 1 mK under a magnetic field up to 10 T. The lower left picture is an enlarged view of the experimental space. The lower right picture shows a cantilever cell for torque measurements.

What happens when materials are cooled down close to absolute zero temperature? It sounds a boring question because everything freezes at  $T = 0$ . It is NOT true, however, because quantum fluctuations persist even at absolute zero temperature. The richness of low-temperature physics was first demonstrated by Heike Kamerlingh Onnes by 1911, who was the first to liquify Helium and reached  $\sim 1$  K. He discovered that the resistance of mercury suddenly vanished at low temperature. Followed by this discovery of the superconducting transition, many amazing quantum phenomena – superfluid transition of Helium, Bose-Einstein condensations of Alkali Bose gases – were found at low temperatures.

We are interested in these quantum condensed states at low temperatures where the thermal fluctuations are negligible. Especially, we are now challenging measurements of correlated electron systems at ultralow temperatures (below 20 mK) where many interesting phenomena have remained unexplored due to technical difficulties. Further, we are studying thermal Hall effects of charge-neutral excitations (phonons and spins) in an insulator, as well as detecting multipole orders by NMR measurements.



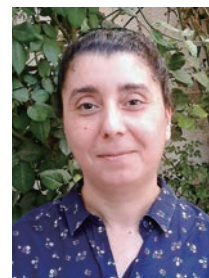
Cdカペラサイト石で観測された熱ホール伝導率  $\kappa_{xy}$  の温度依存性。温度依存性はよく似ているが、試料ごとの縦熱伝導率の大きさに対応して  $\kappa_{xy}$  の大きさも変わることが分かった。挿入図は実験セットアップの模式図。

The temperature dependence of the thermal Hall conductivity  $\kappa_{xy}$  of Cd kapellasite samples. Although the temperature dependence of all samples are similar, the magnitude of  $\kappa_{xy}$  is found to depend on the magnitude of the longitudinal thermal conductivity. The inset shows the setup of the measurements.



# ハダード研究室

Haddad Group



外国人客員教授 ハダード ソニア  
Visiting Professor HADDAD, Sonia

magic angle (MA) だけ回転させて積層した振れ2層グラフェン (TBLD) において超伝導が発見されて以来、振れ積層2次元系は最も注目される凝縮系物理学の主題の1つとなっている。これらは、電子相関、歪、振れ角、乱れ、およびトポロジーが協奏する物性研究の格好の舞台を提供する。これらの物性については、MA で発現する強相関電子相の性質、超伝導秩序変数の対称性、h-BN 基板上 TBLG で報告された Chern 絶縁相の起源など、多くの未解決の問題が残されている。

我々は、グラフェンおよび遷移金属ダイカルコゲナイドの振れ積層2層系の熱電輸送および磁気輸送に対する機械的歪みの効果を理論的に研究している。特に平坦バンドのトポロジカルな性質が現れると期待される量子極限に注目する。また Chern 絶縁相の発現に対する振れ角の効果や、平坦バンド系の電子物性を解明する上での磁性基板の役割も研究する。

Since the discovery of an intrinsic superconductivity in twisted bilayer graphene (TBLG) rotated at the so-called magic angle (MA), twisted bilayer two-dimensional (2D) systems continue to be one of the hottest subjects in Condensed Matter Physics. They are considered as excellent playground to investigate the interplay between correlations, strain, twist angle, disorder, and topology. There are still many open questions regarding the physics of these materials, in particular the nature of the strongly correlated phases occurring at the MA, the symmetry of the superconducting order parameter, the origin of the Chern insulating phase reported in TBLG aligned to h-BN...

We are theoretically investigating the effect of a mechanical strain on the thermal transport and magnetotransport properties of twisted bilayers of graphene and transition metal dichalcogenides. We focus on the quantum limit where the topological properties of the flat bands are expected to emerge. We also study the impact of the twist angle on the occurrence of the Chern phases and the role of a magnetic substrate in unveiling the electronic properties of the flat bands.