

# グラフェンバレートロンクスデバイスの創製

研究代表者

山本倫久 東京大学大学院工学系研究科 講師



## 1. 研究の背景と達成目標

半導体では、伝導バンドの底が縮退し、複数の非等価な運動量をもつ場合がある。このような自由度は“バレー”と呼ばれる。バレー自由度は、スピン自由度と同様に量子力学的に扱うことができ、結晶性が高い物質中ではその散乱要因が極めて少ない。特に、結晶性が極めて高いグラフェンでは、六角格子に沿った電子波の回転方向としても解釈できるバレー ( $K$ ,  $K'$ ) が優れた量子数として振舞う。グラフェン中のキャリアに質量を持たせると、バレーに応じてキャリアの軌道が曲がることが知られている。各バレーに属するキャリアに逆向きに実効的な磁場がかかっているのと同じ状況になるため、これはバレーホール効果と呼ばれる。その曲り具合 (バレーホール角) は、理想的な場合にはバンドギャップ中の絶縁体領域近傍で発散的に増大するため、少ない電流注入で大きなバレーの流れ (バレー流) を生成できる可能性がある。本研究では、このグラフェンを舞台に、電流を伴わない無散逸なバレー流を実証し、その物理を解明すると共にその応用原理を確立することを目指した。具体的には、電圧を純バレー流へと変換するバレーホール効果の実験的検証、バレー伝導の物理の解明、そしてその量子力学的な応用例として超伝導-グラフェン接合系におけるバレークライオニクスの技術開発を行うことを目標とした。

## 2. 主な研究成果と社会、学術へのインパクト

- ・ 電氣的に対称性を破った 2 層グラフェンにおいてバレーホール効果の検証に初めて成功した。これは、散逸が小さなバレーを情報媒体として用いる超低消費電力エレクトロニクス (バレートロンクス) 実現に向けた重要なブレイクスルーである。
- ・ 絶縁体領域における電場-バレー流の変換効率が、ホッピング伝導によって低下する一方で、熱励起キャリアによるバンド伝導の寄与に関しては電気伝導度に関わらず一定となることが明らかになった。この結果は、グラフェンデバイスの品質を高めてホッピング伝導による寄与を抑制できれば、極めて高いバレーホール角を実現できる可能性があることを示している。
- ・ 超伝導デバイス応用への準備として、グラフェンを弱結合に用いたジョセフソン接合 (超伝導-グラフェン-超伝導接合) における超伝導臨界電流を調べ、これが接合長、平均自由行程、コヒーレンス長の相対的な大きさに依存した普遍的な振る舞いを示すことを初めて明らかにした。この結果は、二次元物質を用いたあらゆる超伝導デバイスの開発において必須の知見として活用できる。

## 3. 研究成果

本研究では、異なるバレーの電子に逆向きに作用する“実効磁場”の大きさを結晶の反転対称性の破れ具合を通じて電氣的に制御できる 2 層グラフェンを用いてバレーホール効果の検証を行った。検証実験では、電流  $I$  をバレーホール効果によってバレー流に変換し、電流の漏れ出しを無視できる程度の距離を伝送させた後、逆バレーホール効果によってバレー流を電流に変換して、これに伴う電圧  $V$  を検出した (図1)。

非局所抵抗  $R_{NR} = V/I$  は、電荷中性点で対称性を破ってバンドギャップを誘起した際に、van der Paur 公式で計算される電流拡散の寄与に比べて桁違いに大きくなった。また、熱励起されたキャリアによるバンド伝導が支配的な領域では、 $R_{NR}$  は試料の抵抗の 3 乗でスケールされた。これらの結果は、バレー流を介した伝導の証拠であるとともに、バンド伝導の寄与に関してはバレーホール伝導度が電気伝導度に関わらず一定であることを示している。一方で、 $R_{NR}$  はホッピング伝導が支配的な領域では抵抗 (バンドギャップの大きさ) の関数として飽和する振る舞いを示した。これは、バレーホール伝導度またはバレー緩和長が、ホッピング伝導によって低下することを示唆している。

また、本研究では、これを超伝導-グラフェン接合を合わせることによるバレークライオエレクトロニクスの開発を目指した技術開発も行った。これは、バレー流による超伝導流スイッチ、バレーホール効果を利用したクーパ-対の空間的分離 (スピンの非局所量子もつれの生成) などを目指したものである。それらの準備として、グラフェンのジョセフソン接合などにおける伝導特性を調べた。特に、ジョセフソン接合では、臨界電流が接合長、平均自由行程、コヒーレンス長の相対的な大きさに依存した普遍的な振る舞いを示すことを明らかにした。

#### 4. 今後の展開

グラフェンにおけるバレーホール効果をより有効に活用するためには、ホッピング伝導の抑制とともに、主に試料端で起こるバレー緩和を抑制することが必要である。また、遷移金属ダイカルコゲナイドのバレートロンクス研究では、スピン-バレーや偏光-バレーの結合によるオプトエレクトロニクスやスピントロニクスとの融合も図られている。バレー緩和の長いグラフェンにおけるバレーを他の量子自由度と結合させる技術の開発が進めば、同様の技術融合が促進され、異なる物質のバレー自由度を結合させることもできるようになる。こうした技術により、非電荷自由度を積極的に利用した超低消費電力デバイスの開発が現実味を帯びてくるであろう。

#### 5. 発表実績

- [1] I. V. Borzenets, F. Amet, C. T. Ke, A. W. Draelos, M. T. Wei, A. Seredinski, K. Watanabe, T. Taniguchi, Y. Bomze, M. Yamamoto, S. Tarucha, and G. Finkelstein, "Ballistic Graphene Josephson Junctions from the Short to the Long Junction Regimes", *Phys. Rev. Lett.* **117**, 237002 (2016).
- [2] C. -Ting Ke, I. V. Borzenets, A. W. Draelos, F. Amet, Y. Bomze, G. Jones, M. F. Craciun, S. Russo, M. Yamamoto, S. Tarucha, and G. Finkelstein, "Critical current scaling in long diffusive graphene-based Josephson junction", *Nano Lett.* **16**, 4788 (2016).
- [3] F. Amet, C. T. Ke, I. V. Borzenets, Y-M. Wang, K. Watanabe, T. Taniguchi, R. S. Deacon, M. Yamamoto, Y. Bomze, S. Tarucha, G. Finkelstein, "Supercurrent in the quantum Hall regime", *Science* **382**, 966 (2016).
- [4] M. Yamamoto, Y. Shimazaki, I. V. Borzenets and S. Tarucha, "Valley Hall Effect in two-dimensional hexagonal lattices", *J. Phys. Soc. Jpn.* **84**, 121006 (2015).
- [5] M. Yamamoto, "Valley Hall Conductivity in Gapped Graphene Enhanced by Scattering Even in the Clean Limit", *JPSJ News and Comments* **12**, 11 (2015).
- [6] Y. Shimazaki, M. Yamamoto, I. V. Borzenets, K. Watanabe, T. Taniguchi, and S. Tarucha, "Generation and detection of pure valley current by electrically induced Berry curvature in bilayer graphene", *Nature Phys.* **11**, 1032 (2015).

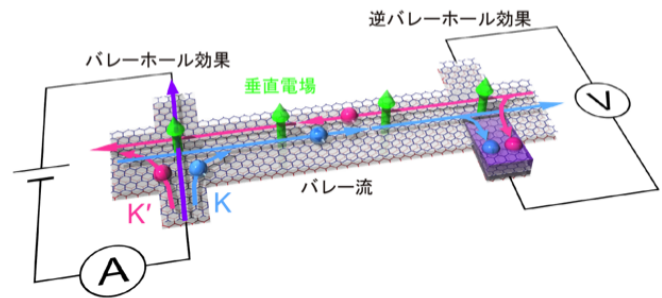


図1 バレーホール効果の検証実験の模式図