

原子層科学 理論班の研究

初貝 安弘（筑波大学・数理物質系・物理学域）

「傾いたり質量を持ったりするディラック粒子」

学部の統計力学で学ぶフェルミ・ディラック分布で有名なディラックはアインシュタインの特殊相対性理論と量子論を両立させるためにディラック方程式を考えました。この方程式に従う粒子をディラック粒子と呼びます。粒子が光速にくらべてゆっくり動くときにはディラック方程式が普通の量子力学で学ぶシュレディンガー方程式に帰着します。普通の我々の世界では粒子の動きは十分に遅いので、ディラック方程式と無関係かと思われませんが、2010年のノーベル物理学賞の対象になったグラフェンの中では電子が実効的にディラック方程式に従うのです。ただ、光速に対応する理論の中の標準速度は秒速30万kmという本物の光の速度より、遙かに小さくてグラフェン中では本物の光速の300分の1程度の遅い光の世界が実現しています。ガモフは「不思議の国のトンブキンス」（1940年発行）という古く有名な啓蒙書で、光速が極端に小さい世界では自転車で走るだけで光速に近づいてしまうので、ローレンツ収縮など相対論の効果が現れることを物語の形で面白く紹介しています。グラフェンの中では、まさにこのような世界が実現しているのです。

さてグラフェンの発見以降に益々研究が進んでいる遷移金属ダイカルコゲナイドや有機物でつくった原子層物質では、その物質の多彩な特性のため、グラフェンではみられなかった特異な現象が起きます。一つ例をあげましょう。ディラックは粒子の速度は進行する方向によらないと考えました。例えると粒子は水平なテーブルの上にあるようなものです。ところが一般の原子層中の実際の物質では、傾いた斜面上に粒子があるのが一般的な状況です。これを傾いたディラック粒子といいます。また、グラフェン中の電子は質量の無いディラック粒子であるという表現がしばしばなされますが、グラフェン中の電子の質量（慣性質量）がゼロであるわけではなく、バンドギャップがゼロであるゼロギャップ半導体というのが正確な意味です。原子層物質中では、このバンドギャップは有限なのが普通ですが、この状況をグラフェンの類似物とみて、ディラック方程式に質量を持たせることで記述できるのです。最近話題のバレーホール効果などいわゆるトポロジカルな特性はこのような視点からはじめて明確に議

論できます。つまり、原子層中の電子つまり 2 次元の半導体、絶縁体のバンドギャップ近傍の物理を有効理論で議論するとき、有効粒子としてのディラック粒子は傾いたり、質量を持ったりするわけです。少し専門的になりますが、水素原子中の電子はいわゆるボーア・ゾンマーフェルトの量子化則に従い離散的なエネルギーのみを持ちます。それと同様に磁場下の荷電粒子も離散的なランダウ準位と呼ばれる離散的なエネルギーのみをとります。ディラック粒子の傾きを徐々に増やしていくことを考えると、ある角度で、急にこの離散準位は失われると考えられています。少し違った系の例ですが太陽系の彗星にはハレー彗星のように太陽の周りを公転するものと一度きりしか現れないものがありますが、傾きを変化させることによるディラック粒子の急激な変化は、公転していたハレー彗星が急に無限の彼方に飛び去る彗星に変化するようなものと類似の現象です。

我々は、多様な原子層物質での実験でディラック粒子が重要な役割を果たし新しい展開につながることを期待して、質量を持つ傾いたディラック粒子の理論を一般的に構築しました[1,2]。

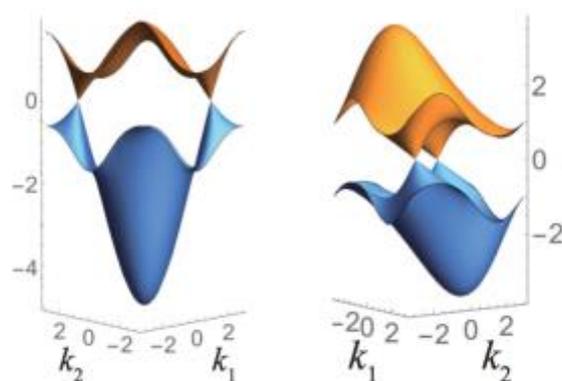


図 種々の傾いたディラック分散の例（参考文献[2]より）。

Reference:

- [1] Y Hatsugai, T Kawarabayashi, H Aoki, Physical Review B 91 (8), 085112 (2015)
- [2] T Kawarabayashi, H Aoki, Y Hatsugai, Physical Review B 94 (23), 235307 (2016)

連絡先 A04 理論班・初貝安弘 筑波大学数理物質系物理学域

Dirac particles with tilting and mass

Yasuhiro Hatsugai, Division of physics, University of Tsukuba

To construct a quantum theory, that is compatible with the special relativity by Einstein, Dirac proposed a fundamental equation for relativistic particles. This is the Dirac equation. The Schrodinger equation is reduced from the Dirac equation in the non-relativistic limit for slow (compared with the light velocity, that is, 300,000km/s) particles. Then many of material scientists considered the Dirac equation as *none of their business* before 2005. However, the situation changed substantially by the discovery of graphene. Electrons in graphene *effectively* obey the Dirac equation (this is known far before its experimental discovery) and graphene is actually realized in our real world. Note that the effective light velocity in the world of graphene is 300 times small, that is, it is a slow world described in the G. Gamov's fiction "Mr. Tompkins in Wonderland". The discovery of graphene was a surprise, then the Dirac fermion became an important target of material science and also opened potential application possibilities.

Now in our project for atomic layer materials such as transition metal dichalcogenide and some of organic materials, we have huge varieties for effective Dirac particles. When one tries to describe the valence and conduction bands in semiconductors and insulators at the same time, the Dirac equation with masses is a standard governing equation. Especially topological properties such as the valley Hall effect are naturally described by the setting. However original Dirac equation is too simple to handle these real materials. One needs to include masses (energy gap) and tilting. Recently we have developed a basic theory for the tilted Dirac fermions with/without masses [1,2].

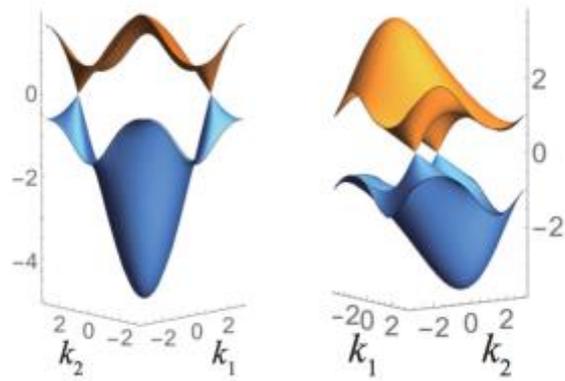


Fig. Various massless Dirac cones with tilting [2]

Reference:

- [1] Y Hatsugai, T Kawarabayashi, H Aoki, Physical Review B 91 (8), 085112 (2015)
- [2] T Kawarabayashi, H Aoki, Y Hatsugai, Physical Review B 94 (23), 235307 (2016)

Yasuhiro Hatsugai, Division of physics, University of Tsukuba