



## カイラル輸送現象 (Chiral Transport Phenomena)

山本 直希 (慶應義塾大学理工学部)

私たちの身の回りは輸送現象で溢れています。電場をかけると電流が流れる Ohm の法則や、温度勾配があると温度が高い方から低い方へ熱流が流れる Fourier の法則は、最もよく知られた輸送現象の例でしょう。一般に、輸送現象は、外場（電場や温度勾配など）に対する応答としてカレント（電流や熱流など）が生じるという形になっています。それでは、物質に磁場をかけたときに、その応答として電流が流れるような輸送現象は存在しないのでしょうか？私たちは経験的に、通常の金属に磁石を近づけても電流が流れないことを知っています。どうしてこのような輸送現象が通常の金属では起きないのか、その理由はパリティ対称性に基づいて理解することができます。仮に、磁場  $\mathbf{B}$  の応答としての電流  $\mathbf{j} = \sigma_B \mathbf{B}$  が存在したとします。すると、左辺の電流がパリティ変換の下で向きを変える極性ベクトルであるのに対し、右辺の磁場はパリティ変換の下で向きを変えない軸性ベクトルのため、両辺がパリティ対称性に矛盾しないのは、その比例係数が  $\sigma_B = 0$  となる場合だけです。すなわち、これは磁場をかけても電流が流れないということの意味します。

ただし、この議論は、自然界でこのような輸送現象が全く不可能であることを示している訳ではありません。というのも、ここでは輸送係数  $\sigma_B$  がパリティ変換の下で不変であることを暗に仮定していましたが、相対論的な系ではこの仮定を破る場合が存在するためです。具体的には、相対論的な右巻きと左巻きのカイラルフェルミオンからなる系で、それぞれの粒子数に対する化学ポテンシャルを  $\mu_R$  と  $\mu_L$  とします。ここで、輸送係数  $\sigma_B$  が  $\mu_5 \equiv (\mu_R - \mu_L)/2$  に比例している場合、パリティ変換の下で  $\sigma_B$  も符号を変えるため、 $\mathbf{j} = \sigma_B \mathbf{B}$  という輸送現象は有限の  $\sigma_B$  に対してもパリティ対称性と無矛盾になります。実際、上の系に対して  $\sigma_B$  を計算すると  $\sigma_B = e^2 \mu_5 / (2\pi^2)$  となり、このような輸送現象が存在することが確認できます [1, 2]。これは、カイラル磁気効果 (chiral magnetic effect, 略して CME) と呼ばれており、パリティ対称性を破る相対論的物質で現れるカイラル輸送現象の 1 つです。

面白いことに、この CME の輸送係数に現れる因子  $1/(2\pi^2)$  は、場の量子論において軸性カレント  $j_5$  が量子論的には保存しないことを表すカイラルアノマリーの関係式  $\partial_\mu j_5^\mu = e^2/(2\pi^2) \mathbf{E} \cdot \mathbf{B}$  の係数  $1/(2\pi^2)$  と関係しています [2]。さらに、CME 自体がカイラルフェルミオンのもつトポロジーと関係しており、その輸送係数  $\sigma_B$  は系の詳細（例えば、温度や相互作用の強さ）に依らないことが知られています。これは、強い磁場中での 2 次元電子系において、ホール伝導度がトポロジ的に量子化される整数量子ホール効果と同様の現象です。このように、CME は“量子ホール効果の空間 3 次元版” のようなもので、トポロジカル輸送現象として理解することができます。

実際に、このようなカイラル輸送現象は、原子核物理から物性物理、宇宙物理まで様々な系で現れると考えられています。上で説明したように、CME の実現に必要な要素は、右巻き・左巻きのカイラルフェルミオンの不均衡を特徴づけるパラメータ  $\mu_5$  と磁場の存在です。原子核物理

の文脈では、相対論的重イオン衝突実験で生成されるクォーク・グルーオン・プラズマにおいて、グルーオン場のゆらぎによって、局所的に右巻き・左巻きのクォークの粒子数の差が生じます。さらに、非中心衝突実験の場合には QCD スケールの強い磁場が同時に生成されるため、CME 実現の要素を満たすと期待されています<sup>1</sup>[3]。

物性物理の文脈では、ワイル半金属・ディラック半金属と呼ばれる新しいタイプのトポロジカル物質で、CME の実現可能性が議論されています。ワイル半金属・ディラック半金属は、伝導帯と価電子帯の接するバンド交差点近傍で、相対論的なカイラルフェルミオンやディラックフェルミオンが創発する物質です。このようなトポロジカル半金属では、外から電場と磁場をかけると、カイラルアノマリーによって右巻き・左巻きのカイラルフェルミオンの粒子数の差を作ることができ、外からかけた磁場と合わせて、CME が生じると考えられます。この CME の帰結として、磁場をかけると抵抗率が減少する「負の磁気抵抗」が現れることが理論的に予言され、実験的にもそのような振舞いが報告されています [4]。

これまでは、電荷をもったカイラルフェルミオンに対する輸送現象である CME を主に議論してきましたが、ニュートリノのような電荷をもたないカイラルフェルミオンに対してもカイラル輸送現象が存在します。それは、系の大局的な回転、または局所的な渦度  $\omega$  の応答として流れる  $\mathbf{j} = \sigma_\omega \boldsymbol{\omega}$  の形の粒子流で、カイラル渦効果 (chiral vortical effect, 略して CVE) と呼ばれます<sup>2</sup>。宇宙物理の文脈では、例えば、超新星コアにおけるニュートリノ物質は、物質の密度が十分高くなるために局所熱平衡に達したカイラルな量子流体となっており、ニュートリノの CVE が現れるはずですが。また、電弱相転移以前の初期宇宙におけるプラズマはカイラルな電磁流体であり、そこでの CME や CVE によって、現在の銀河間磁場の元になる原始磁場が生成されるというシナリオも考えられています。このようなカイラル輸送現象の存在によって、系の非平衡時間発展がどのように修正を受けるかについては理論的にもまだ十分にはわかっておらず、初期宇宙や超新星の進化の過程を理解する上で、重要な問題になると考えられます [6]。

[1] K. Fukushima, D. E. Kharzeev and H. J. Warringa: Phys. Rev. D **78** (2008) 074033.

[2] 最近のレビューとして、K. Landsteiner: Acta Phys. Polon. B **47** (2016) 2617.

[3] 最近のレビューとして、D. E. Kharzeev, J. Liao, S. A. Voloshin and G. Wang: Prog. Part. Nucl. Phys. **88** (2016) 1.

[4] [https://www.condmatjclub.org/uploads/2015/05/JCCM\\_MAY\\_2015\\_03.pdf](https://www.condmatjclub.org/uploads/2015/05/JCCM_MAY_2015_03.pdf)

[5] A. Vilenkin: Phys. Rev. D **20** (1979) 1807.

[6] この方向性での最近の研究として、Y. Masada, K. Kotake, T. Takiwaki and N. Yamamoto: Phys. Rev. D **98** (2018) 083018.

<sup>1</sup>しかしながら、重イオン衝突実験における CME の確たる証拠は（著者の知る限りでは）これまで見つかっていないのが現状です。

<sup>2</sup>このような CVE の理論的進展には、超弦理論に端を発するゲージ重力対応が重要な役割を果たしてきたことを付しておきます。歴史的には、1979 年に Vilenkin が場の量子論に基づいて CVE を初めて導出したのですが [5]、この論文は長い間認識されていませんでした。約 30 年後の 2008 年頃に、ゲージ重力対応の応用によって、カイラル物質に対する相対論的流体力学に CVE が現れることが見出されました (CVE の再発見)。その後、ゲージ重力対応を用いない流体方程式と熱力学第 2 法則に基づく導出や場の量子論による導出によって、CVE の理論的な理解が進んできたという経緯があります [2]。