

プラズマ波動とアブラハム・ミンコフスキー問題

中村 匡 [1]
[1] 福井県大

Plasma waves and Abraham-Minkowski controversy

Tadas Nakamura[1]
[1] FPU

<http://mira.bio.fpu.ac.jp/tadas/>

Momentum of electromagnetic waves in dielectric media is still an open question in spite of hundred-year-long controversy. This problem is called "Abraham-Minkowski problem"; M. Abraham (1907) proposed \mathbf{ExH} as the expression of electromagnetic momentum, while Minkowski (1911) claimed it should be \mathbf{DxB} . Numerous papers have been published since then, but the final settlement is still yet to come.

The author considers there are two reasons for this. First reason is the scientific difficulty. Theoretically it is hard to solve the response of solids (or liquids) with a quantum model precise enough to conserve momentum. Experimentally, it is hard to detect an extremely small amount of momentum carried by electromagnetic waves in a laboratory.

The second reason is the lack of application. If the electromagnetic momentum in a dielectric media plays a key role in a industrial innovation, people would spend a great amount of effort to solve the problem. It is not the case unfortunately, and the Abraham-Minkowski problem remains a minor subject, to which not many physicists pay attention.

The present study tries to examine the problem theoretically using electromagnetic waves in a plasma. The basic mechanism of wave propagation in a plasma is well known, at least for linear waves, and the momentum can be calculated with basic equations of classical mechanics and electrodynamics.

In the spring meeting of JPGU, a preliminary result using MHD waves has been reported. The result shows the Minkowski momentum is the correct expression as the sum of electromagnetic momentum and the momentum of plasma particles. An extended treatment for general plasma waves will be presented in the presentation, along with detailed analysis of the momentum propagation mechanics.

意外なことに誘電媒質中の電磁波が運ぶ運動量については、100年以上も論争が続いているにもかかわらず、いまだに最終的な結論が得られていない。1907年に Abraham は誘電媒質中電磁波の運動量として \mathbf{ExB} を提唱し、それに対して Minkowski (1911) は \mathbf{DxB} を主張した。このどちらが誘電媒質中の運動量として正当かという論争は「アブラハム・ミンコフスキー問題」と呼ばれ、21世紀も10年が過ぎた現在に至るまで、この問題について少なからぬ論文が出版されている。

この問題が100年以上も未解決なのは、主としてふたつの理由が考えられるだろう。ひとつは、実証的な検証の困難さである。理論的にこの問題を解くには、誘電媒質の電磁場に対する応答を、運動量が保存するような精度のモデル化する必要がある。量子多体系でそのようなモデルを解くのはきわめて困難であり、ハードエビデンスを提示するのは難しい。また、実験的には電磁波の運動量のような微小な運動量を正確に測定する困難さがある。

もうひとつの理由は、実用的な需用の欠如であろう。もし電磁波の運動量の計算が産業上必要になる状況があれば、それなりの人的・経済的資源が投入され、集中的な研究がなされるはずであるが、現実にはそういう需用はないらしく、いわば『趣味的』な研究が細々と続けられていると言わざるを得ない。

本研究はそのような趣味的な研究の末席につらなるものであるが、前述の理論的な困難性を回避する試みである。先に述べたように、日常的な誘電体の電磁波に対する応答を計算するには困難な量子力学的多体問題を解く必要があるが、無衝突プラズマだとこの計算はきわめて容易である。古典的なプラズマ波動は、マックスウェル方程式とニュートン方程式の組み合わせで、少なくとも線形の範囲では十分に正確な解が得られており、その運動量も簡単に計算できる。

本年春の地球惑星科学連合同大会では、このアイデアに基づいて MHD 波動の運動量を計算し、磁場凍結条件が成立すれば Minkowski の提唱する運動量が電磁場と媒質の運動量の合計として正当であることを示した。本発表ではその詳細を検討し、また MHD 波動以外の一般のプラズマ波動でも同じ結論が得られることを報告する。