

極限環境における光を用いた微粒子の運動制御

京都大学 大学院理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻 兼 白眉センター
 衰輪陽介

1. はじめに

光は、科学技術の重要な柱の一つであり、基礎科学と産業応用が密接に結びつく技術の代表例でもある。微細な対象物の観察から情報通信まで、その応用先は枚挙にいとまがないが、対象となる物質を光と相互作用させて光で制御を行うという観点での利用例は、意外に少ない。本稿では、そのような光による制御の例として、微粒子の運動制御の研究を紹介したい。光による微粒子の運動制御技術にも様々な種類があるのだが、その中でも最もポピュラーなのは、光の集光点に微粒子を捕まえる、光ピンセットや光トラップなどと総称される技術である¹⁾。ここでは、その細かな違いは一旦おいておき、まとめて光ピンセットと呼ぶことにする。光ピンセットは、その創始者の一人であるアーサー・アシュキン博士²⁾に 2018 年のノーベル物理学賞が授与されており、どこかでその説明を目にしたことがある方も多いかもしい。以下では、この光ピンセット技術の簡単な説明と、その原理を紹介する。そして、様々な環境における応用例を概説した後に、最後に筆者自身の研究として、極低温環境下での光ピンセットについて説明したい。本稿をきっかけに、光ピンセットやその周辺技術に興味を持ってもらえれば幸いである。光ピンセット技術は、原理的には光の波長によらないが、ここでは可視光付近の波長を想定して解説する。

2. 光ピンセット技術

2-1 光ピンセットとは

光ピンセットの実験を実際にやってみる際に最低限必要なものは、レーザー光源と、十分急峻に光ビームを集光できるレンズ、そして対象となる微粒子の 3 つである。レーザー光源としては連続波のものを選定し、おおよそ 20 ~ 100 mW³⁾あるいは、それ以上のパワーが出ると望ましい。波長をどう選択するかは悩ましい問題であるが、一般に対象微粒子や周囲の環境（例えば水中で実験を行うのであれば水）が吸収しないような光を選んだほうが無難である。集光するためのレンズとして多くの場合、顕微鏡用対物レンズが用いられるが、後述のように単なる非球面レンズでも代替可能な場合がある。微粒子については、実験条件にもよるがサイズが 10 nm ~ 10 μm ほどのものであれば、光ピンセットの対象となりうる。実際には、レーザー光源・レンズ・微粒子以外にも、光ピンセットが成功したかどうかを確認するための手段や、レーザー光源を適切に集光するための光学系も必要になるだろうが、もっとも基本的な実験系の構成要素はこれだけである。十分急峻に集光された光ビームの集光点のごく近くに（おおよそ数 μm 以下の距離）、何らかの手段で微粒子を持ってこることができれば、微粒子は集光点に吸い寄せられるように動き、集光点に 3 次元的に捉えられる。条件にもよるが、この捕捉状態は非常に安定し、意図的に中断しない限り、いつまでも微粒子を捉え続けることができる。

この光ピンセットは、光の運動量が対象の微粒子に移行することに基づく。そのため、強度の高い光、そして大きなサイズの微粒子が有利である。それでは際限なくレーザー光の強度をあげていけばどんな粒子でも光で捕まえることができるかという、残念ながら捕まえられる粒子のサイズには限界がある。これは後述するような熱の影響や重力の影響のためである。そのため、上で述べたように対象とする微粒子のサイズは、おおよそ 10 nm ~ 10 μm に制限される。光ピンセットを行うためには「十分急峻に」光ビームを集光できることが肝要なのだが、どのくらい急峻ならば「十分」なのか