

虹、核虹＝湯川虹からまなぶ理論物理学

高知女子大学環境理学科 大久保茂男

虹のしくみの理解のしかたは科学・物理学の進歩と軌を一にしているともいえる。フランス人のデカルトは光の水滴による屈折と反射から偏向角の存在を発見し、虹が水滴の半径の約 $7/8$ で入射した光により生ずる事、内側で明るく外側で暗く、高さが 42 度になることを科学的に明らかにした。イギリス人ニュートンは屈折率が光の波長により異なり太陽の分散により虹の色が発生し、外側がもっとも波長が長い赤色で内側が波長の短い紫色になることを示した。虹は今日でいう散乱振幅のデバイ展開の各項に対応しては現れ、空に見える主虹は内部反射回数 1 の第 3 項 ($p=2$)、副虹は第 4 項 ($p=3$)、より高次の項は強度が小さくなるため見えなくなるとした。第 2 項 ($p=1$) の内部反射をともしない屈折のみの虹 (ニュートンのゼロ次の虹) は存在するが、太陽の方向のため実際上見えないとした。これは光の粒子説による理解である。第 1 項 ($p=0$) は直接反射光である。

虹の紫色のさらに内側には、紫がかった縞模様がみられ、過剰虹として知られている。これらは光を粒子とする考えでは理解できない。光が波動であることにより理解できることがイギリス人エアリーにより示された[1]。波動説による虹の高さは粒子説と少し異なってくる。虹をより深く理解するには光が波動であると考えなければならない。

美しい虹も偏光グラスを通すと見えなくなる。光がたんなる波動では理解できない。光が偏光していることは、光の電磁波説で容易に理解できる。粒子説では粒子が内部自由度 (スピン) を持つと考えなければならない。虹の偏光は光の性質だけによるものではない。水のブリュースター角が 53 度であり、たまたま水滴による虹の角度 42 度に近いことによっている。また水による可視光の吸収係数が極めて小さいことも美しい虹がみえるうえでは大切である。

光の粒子説では虹の高さや色は屈折率のみで議論されるが、実際には水滴の大きさも重要である。水滴が大きすぎても小さすぎても美しい虹は現れない。水滴が霧のように小さいと、霧虹といわれ白色になってしまう。水滴が大きすぎると偏向角は存在できない。雨粒が数mmの大きさであることが美しい虹がみえる条件である。これには地球の重力定数の大きさがからんでくる。水滴の大きさにより、赤みがかかった虹、緑の強い虹がみえ、虹の色具合から雨粒の大きさを推定することも不可能ではない。虹の上部と下部では雨粒の大きさは重力落下のため同じとは限らない。天辺をみるのがよいが、7色の虹が見えることは実際上まずない。

虹を精確に理解するには電磁波としての光の水滴による散乱問題としてミー散

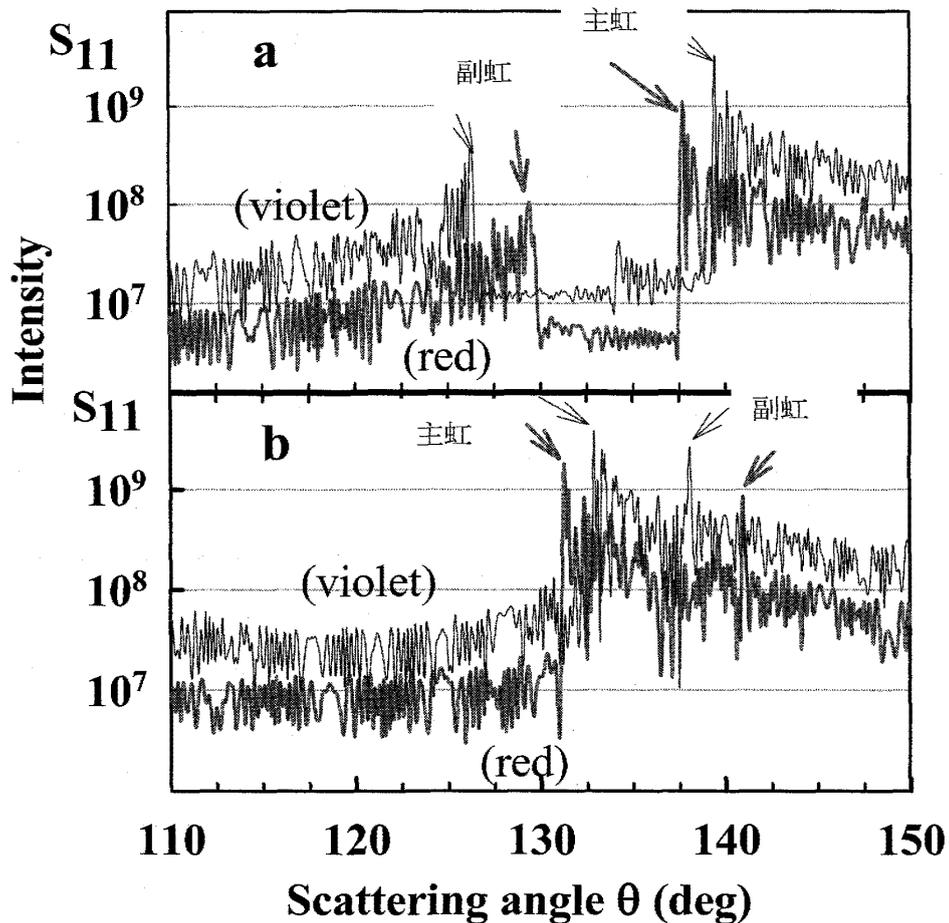


図1.(a)半径3.5mmの水滴,(b)半径5mmの液体メタンからのミー散乱が赤および紫の可視光に対して示されている.横軸は角度、縦軸は強度.

乱を解かなければならない。コンピュータが使える以前はワトソン変換という素粒子物理学での角運動量理論をつかって近似的に計算された[2-4]。現在ではパソコンで1秒もあれば厳密解が得られる。ミー散乱の計算の1例が図1に示されている。ミー散乱でえられる虹の高さは光の粒子説や単純な波動説でえられるのとは異なる。虹の高さは厳密に言えば学問が進歩するごとに変わってきている。図1(a)に見られるように、138度付近(視角では $180-138=42$ 度)のもっとも大きなピークが主虹、129度(視角51度)の2番目のピークが副虹、その間の谷がアレキサンダーの暗黒帯である。詳しい分析をすると、3番目以降たくさんの虹のピークを見ることができる。原理的には無限個存在する。しかし、図1(a)でわかるように、内部反射を1度もともなわない屈折のみのニュートンのゼロ次の虹は存在しない。

ミー散乱を解くことで任意の媒質からの虹を予言することができる。液体メタンの屈折率1.290(赤)-1.300(紫)は1.312より小さく、主虹と副虹の高さが逆転する(図1(b))。その結果、過剰虹が両者の間に現れることになり、アレキサンダー暗黒帯は生じなく、二つの虹はつながり、区別がつきにくくなる。しかも赤色の吸収係数

が大きいので虹は赤みのないものとなる[6]。土星の最大の衛星タイタンでは氷点下 180 度くらいで液体メタンの雨が降っていることが探査機ホイヘンスで観測された。はたして、地球以外の天体で虹がみられるのだろうか。

ミー散乱のマクスウェル方程式を解いて虹が完全にわかったかというともない。水滴表面波の振る舞いなどなどわかってないことも多い。虹は数学的には特異点の問題である[5]。

粒子説で光の偏光を説明するには内部自由度スピンの 1 必要である。光の波動性と粒子性の矛盾は量子論によってはじめて止揚される。光が質量 0 のゲージ粒子であることに感謝してもよいかもしれない。虹を見てその深遠な美しさを愛で、自然の神秘の奥深さに思いをはせられるのは理論物理学をまなんだ人の特権かもしれない。

ニュートンがその存在を固執した一度も内部反射をとまなわないうで屈折のみでおこる虹は、マクロの世界でなく、またニュートン力学ではなく、量子論の支配するミクロの世界で実現されている。湯川核力で強く結合している原子核は入ってきた粒子を曲げる力、つまり屈折率が非常に強い液滴である。しかも、水などマクロの世界と異なり、表面が明確でなくぼやけていて反射はおこりにくい、屈折率が表面から中心部へと連続的に変化する量子液体である。高速で入射したアルファ粒子は原子核のなかで屈折をくり返しながらか角で量子的な虹、核虹(湯川虹)を示す。入射粒子があまり高速でないときは虹の前駆現象であるプレ虹が現れる[7-8]。明確な過剰虹も見られる。もちろん色はなく副虹もなくただ 1 個の虹があらわれる。かくして神様はミクロの世界に虹を 1 個残された。1 度も内部反射をしない虹の存在を信じたニュートンは正しかった。ニュートンはひょっとしたら量子論と原子核という量子的液体の存在を直感していたのだろうか。

虹を深く理解することは、創造主の意思の理解に近づくことであり、古典力学、電磁気学、量子論、原子核、物理学、地球科学、数学[5]・・・等への格好の入門の道であるように思われる。初学者から専門家までかかわり楽しむことができよう。

[1] G. B. Airy, *Trans. Camb. Phil. Soc.* **6**, 379. (1838).

[2] H. M. Nussenzveig, *Sci. Am.* **236**, 116 (1977).

[3] H. M. Nussenzveig, *J. Math. Phys.* **10**, 82 (1969).

[4] H. M. Nussenzveig, *J. Math. Phys.* **10**, 125 (1969).

[5] J. Adam, *Phys. Rep.* **356**, 229 (2002).

[6] S. Ohkubo and H. Kusuyama, *Bull. Kochi Women's Univ.*, **58**, 9 (2009).

[7] F. Michel, G. Reidemeister, and S. Ohkubo, *Phys. Rev. Lett.* **89**, 1527 (2002).

[8] F. Michel, F. Brau, G. Reidemeister, and S. Ohkubo, *Phys. Rev. Lett.* **85**, 1823 (2000).