

ドップラー効果とその実例

ドップラー効果をめぐる歴史

ドップラー効果の関係式とその使い方

ドップラー効果の関係式の導出法(1)

ドップラー効果の関係式の導出法(2)

ドップラー効果の実例

光(電磁波)のドップラー効果とその実例

参考文献

ドップラー効果をめぐる歴史

ドップラー効果は、波源と波の伝播媒質との間の相対運動、または検出器と伝播媒質との間の相対運動、そして波源と検出器の間の相対運動が原因となって生じる現象である。ドップラー効果は(十分に研究されたものではなかったが)、オーストリアの物理学者(Johann Christian Doppler, 1803-1853)による力学的波動と光波の両方に対して起こることが提案された。すなわち、音波だけではなく、電磁波(マイクロ波、ラジオ波、可視光等)でも起こる現象である。1845年、オランダのボイス＝バロット(Buys Ballot, 1817-1890)が、その仮説を確かめるために、蒸気機関車を使って、二人のトランペット奏者に協力してもらった。一人は列車にのり、一定の振動数を出し続け、もう一人は駅のホームにいて、同じ振動数を出し続けた。ボイス＝バロットが観測したのは、この二つのトランペットの音からつくられた「うなり」である。なぜかということ、その当時の列車の速度は現代の列車ほどのスピードはでなかったから。

ドップラー効果の関係式とその使い方

波が伝わる媒質(波動の伝播媒質)を運動の基準となる座標系(準拠系)とする。

すなわち、波源(source)Sと検出器(detector,または観測装置)Dの速さ(速度)は伝播媒質に対して測る。

簡単のために、力学的波動のうち、音波を考える。また、SとDは、音速以下の速さで、互いにまっすぐ運動するものと仮定する。媒質に対して静止している波源からでる波の振動数を f 、伝播速度の大きさ(位相速度の大きさ)を v とする。媒質が静止している系(あるいは、媒質とともに動く系)から見た場合、検出器Dの速さを V_D 、波源Sの速さを V_S とすると、検出器Dに受信される波の振動数 f' は以下のように表される。

$$f' = \left(\frac{v \pm V_D}{v \mp V_S} \right) f$$

ただし、速さの複号は、
互いに近づく場合(遠ざかる場合)、
上記号(下記号)とする。

別の表現 $f' = \left(\frac{v \pm V_D}{v \pm V_S} \right) f$

この別の表現では、DとSが互いに近づく(遠ざかる)ときには振動数が高く(低く)なるように、複合の符号を選ぶ。

ドップラー効果の関係式の導出法(1)

(A)波源Sが(媒質に対して)静止し、検出器Dが(媒質に対して)運動する場合

(A1)DがSに近づく場合:

Dに検出される波の位相速度 $v' = v + v_D (> v)$

この場合、波長 λ は変化しない

Dに検出される波の振動数

$$f' = \frac{v'}{\lambda} = \frac{v}{\lambda} \left(\frac{v + v_D}{v} \right), \quad f = \frac{v}{\lambda}$$

$$\rightarrow f' = \left(\frac{v + v_D}{v} \right) f$$

より高い振動数の音が聞こえる!

(A2)DがSから遠ざかる場合: $v' = v - v_D (< v)$ であることより、同様にして

$$f' = \left(\frac{v - v_D}{v} \right) f$$

より低い振動数の音が聞こえる!

(B)波源Sが(媒質に対して)運動し、検出器Dが(媒質に対して)静止する場合

(B1)SがDに近づく場合:

Dに検出される波の波長 $\lambda' = \lambda - \Delta\lambda = \lambda - \frac{v_s}{f} \quad (v = \lambda f)$

Dに検出される波の振動数

$$f' = \frac{v}{\lambda'} = \frac{v}{\lambda - \frac{v_s}{f}}, \quad f = \frac{v}{\lambda}$$

より高い振動数の音が聞こえる!

$$\rightarrow f' = \left(\frac{v}{v - v_s} \right) f$$

(B2)SがDから遠ざかる場合: $\lambda' = \lambda + \Delta\lambda = \lambda + \frac{v_s}{f} \quad (v = \lambda f)$ であることより

$$f' = \left(\frac{v}{v + v_s} \right) f$$

より低い振動数の音が聞こえる!

媒質に対して、S、Dの運動は独立であるから、(A),(B)の場合をまとめると、証明すべき式になる。

ドップラー効果の関係式の導出法(2):

—基準座標系を明示的に用いる—

ランダウ, リフシッツ「流体力学2 (理論物理学教程)」(東京図書)、68節

静止してる媒質中を伝播する正弦波に対して角振動数 ω 、波数 k 、伝播速度(位相速度) v に対して

$$\omega = vk, \quad (\omega \equiv 2\pi f, k \equiv 2\pi / \lambda)$$

速度 u の、媒質の一様な流れを考える。

座標 x をもつ固定座標系(K系)、K系に対して、

速度 u で運動する、座標 x' の座標系K'系を考える。

K'系からみると、媒質流体は静止しているので、正弦波は一般の形、

$$\psi(x', t) = A \sin(kx' - vk t)$$

をもつ。K'系における座標 x' は、K系における座標 x と $x' = x - ut$ という関係(ガリレイ変換)にある。よって、固定座標系K系では正弦波は

$$\psi(x, t) = A \sin[kx - (kv + ku)t]$$

という形をもつ。したがって、速度 u で運動する媒質中の波の角振動数 ω 、波数 k の間の関係式は

$$\omega = vk + uk \quad (1)$$

となり、位相速度 v' は

$$v' = \frac{\omega}{k} = v + u \quad (2)$$

以上までの議論は「静止」と「運動」を相対的に取り替えても一般に正しい。

(A)媒質に対して静止している波源 S から発射された波を、媒質に対して速度 v_D で運動している検出装置 D が受け取るとする。媒質に対して「静止している」 K' 系では、波源の角振動数 $\omega = vk$ は、検出装置 D とともに「運動している」 K 系から見ると、媒質は速度 $(-v_D)$ で「運動している」ので、(1)式より検出器 D で検出される角振動数は

$$\omega' = vk - v_D k$$

振動数については

$$= \omega \left[1 - \frac{v_D}{v} \right] = \left(\frac{v - v_D}{v} \right) \omega$$

$$f' = \left(\frac{v - v_D}{v} \right) f$$

となる。

遠ざかる場合には、より低い振動数の音が聞こえる。

(B)媒質に対して速度 v_s で運動する波源Sから発射された波を、媒質に対して静止している検出装置Dが受け取るとする。

この場合、検出装置Dは固定系K系であり、波源Sとともに運動する系が[運動]K'系である。したがって、K'系で見ると、媒質流体は速度($-v_s$)で運動する。波源が「静止している」K系では、放出される波の角振動数は波源の角振動数 ω に等しくなければならない。(1)式において、 $u \rightarrow -v_s$ と置いて、 $\omega = vk - v_s k$

$$= vk \left[1 - \frac{v_s}{v} \right] = \left(\frac{v - v_s}{v} \right) vk$$

が成り立つ。一方、固定系である検出装置Dでは $\omega' = vk$ が成り立つので、結局

$$\omega' = \left(\frac{v}{v - v_s} \right) \omega \rightarrow f' = \left(\frac{v}{v - v_s} \right) f \quad \text{遠ざかる場合には、より高い振動数の音が聞こえる。}$$

となる。上述の場合と逆向きの場合も、同様にして、導出できる。

コメント

波源と検出器の相対的な運動だけがドプラー効果の原因だとすれば、関係式はその相対速度だけで決まるはずである。しかし、関係式はそうになっていなくて、それらの影響は分母と分子に別々に現れることは不思議に思われるであろう。

前項で説明したように、波の伝達媒質との相対運動の効果が、波源と検出器では異なるので、分母と分子に別々に影響することになるのである。

ドップラー効果の実例

- 1) 救急車のサイレンや電車の汽笛
- 2) 自動車の速度測定装置
- 3) 野球などの球速測定器(スピードガン)
- 4) コウモリ(蝙蝠)による方向・位置の探知
- 5) 血流測定装置

参考：光(電磁波)のドプラー効果とその実例

振動数 f の光(電磁波)の波源が検出装置Dに対して、速さ v で移動する場合、検出装置で検出される振動数 f' は、真空中の光速を c として

$$f' = f \sqrt{\frac{c - v}{c + v}}$$

と表される。(お互い遠ざかる場合には、 $v > 0$ 、近づくとき、 $v < 0$ と考える。) 力学的な波動の場合、その伝達媒質(空気、水、血液など)が必要であることと異なり光は真空中でも伝播することに注意しよう。

実例

- 1) レーザー光による物体速度測定。
- 2) 天体からの電磁波のスペクトルの赤方偏移：

遠ざかる天体からの光が、地上(静止系)同じ光に比べて、振動数がより低い(波長が長い)方にずれること。

これにより、銀河のお互いの後退速度は相当に大きいことがわかった。
さらに、それらの観測データの分析からE. Hubbleが、アインシュタインも驚愕したように、宇宙(空間)膨張という壮大な事実を発見した。

参考文献

- 1) 佐藤文隆、松下泰雄「波のしくみ—『こと』を見る物理学—」
(講談社ブルーバックス、2007年)
- 2) R. A. Serway「科学者、技術者のための物理学Ib」(学術出版社)
特に、447ページ。
- 3) D. ハリディ他「物理学の基礎[2]波動」(培風館)
特に、103ページ
- 4) ランダウ, リフシッツ「流体力学2 (理論物理学教程)」(東京図書)、
68節