一直線上の運動のほか，平面上の運動も扱っています（p.72〜73）。

発展 放物運動

(a) 水平投射　図のように，水平方向右向きに x 軸，鉛直下向きに y 軸をとり，時刻 $t=0$ に，座標の原点Oから，x 軸の正の向きに初速度の大きさ v_0 で小物体を投げ出す。

投げ出された後，小物体は x 軸方向には等速度運動をし，y 軸方向には自由落下と同じ運動をすることから，時刻 t における小物体の速度 $\vec{v}$ の x，y 成分を $(v_x,\ v_y)$，小物体の位置Pの座標を $(x,\ y)$ とすると，それぞれ次のように表される。

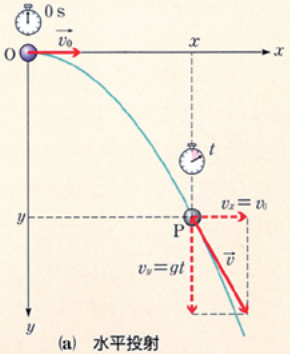
$$v_x = v_0,\quad v_y = gt$$

$$x = v_0 t,\quad y = \frac{1}{2}gt^2$$

よって，速度の大きさ（速さ）v は，

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{v_0^2 + g^2t^2}$$

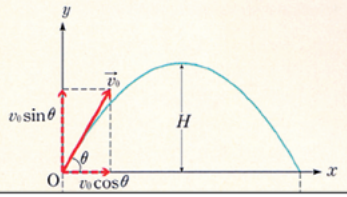
であり，速度の向きは，小物体が描く軌跡の接線方向となっている。



(a)　水平投射

(b) 斜方投射　図のように，水平方向右向きに x 軸，鉛直上向きに y 軸をとり，時刻 t

右図のように，初速度の大きさ v_0 で投げたときの放物運動について，もう少し詳しく考えてみよう。



放物運動の軌跡　時刻 $t=0$ に，地上の点Oから小物体を水平方向より角 θ だけ上向きに投げたとき，放物運動をする

発展 ボイル・シャルルの法則

ボイルの法則とシャルルの法則をまとめると次のようになる。

気体の体積 V は圧力 p に反比例し，絶対温度 T に比例する。

これを**ボイル・シャルルの法則**という。

すなわち，比例定数を k として，次式で表される。

$$V = k\frac{T}{p} \qquad \text{または，} \frac{pV}{T} = k$$

気体が圧力 p，体積 V，絶対温度 T の状態から，圧力 p'，体積 V'，絶対温度 T' の状態に変化したとき，次の関係が成り立つ。

$$\frac{pV}{T} = (\text{比例定数 } k) = \frac{p'V'}{T'}$$

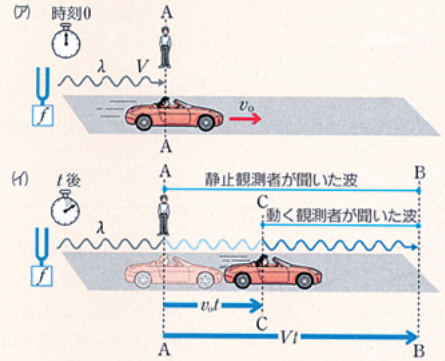
比例定数 k は気体の質量に比例する。

ボイル・シャルルの法則を用いると，たとえば，圧力 1.0×10^5 Pa，絶対温度 300 K で 1.5 m³ の体積をしめる気体について，体積を 1.2 m³，絶対温度を 400 K にしたときの圧力 p' は，次のようにして求められる。

$$p' = \frac{pV}{T}\times\frac{T'}{V'} = \frac{1.0\times10^5\,\text{Pa}\times1.5\,\text{m}^3\times400\,\text{K}}{300\,\text{K}\times1.2\,\text{m}^3} \fallingdotseq 1.7\times10^5\,\text{Pa}$$

発展 いろいろな場合のドップラー効果

観測者が動く場合　図①のように，左側に振動数 f の静止音源がある。その音源から遠ざかっている観測者が聞く音の振動数を，静止した観測者と比較しながら考えよう。(ア)は，時刻0において静止観測者がA点に立ち，動く観測者は速度 v_0 でA点を通過し，波の先端は音速 V でA点を通過している様子を示している。この瞬間から時間 t が経過すると，(イ)のように，波は Vt だけ進んで先端がB点にきているので，静止観測者はAB間に入っている波を聞いている。一方，動く観測者はその間に距離 v_0t を進んでC点にいるため，AC間の波は聞いておらず，BC間に入っている波だけを聞くことになる。その波の数は $\frac{BC}{\lambda}$ だから，動く観測者が聞く音の振動数 f' は，



図①　観測者が音源から遠ざかっている場合のドップラー効果

$$f' = \frac{BC}{\lambda t} = \frac{V - v_0}{\lambda} = \frac{V - v_0}{V}f \qquad \cdots\cdots(12)$$

となる。つまり，遠ざかっている観測者は静止観測者より低い音を聞く。音源に近づいているときは，式(12)において v_0 を負と考えればよく，観測者は高い音を聞くことになる。

音源と観測者の両方が動く場合　図②のように，速度 v_s で右に進んでいる音源の前方に，速度 v_0 で右向きに進む観測者がいる場合を考えよう。音源の前方の波長は，

本文p.155〜156では「ボイルの法則」「シャルルの法則」，p.157の発展では「ボイル・シャルルの法則」を扱っています。

音源や観測者が動く場合の「ドップラー効果」を扱っています（p.230〜231）。