Megoldás. *a*) Tegyük fel, hogy a gép vízszintesen és egyenesen repül. Tekintsük a hangrobbanást okozó repülőgép útjának egy rövid, Δs hosszúságú szakaszát. Jelöljük v-vel a gép, c-vel a hang sebességét. Legyen Δt az a rövid időtartam, amely során a hang kibocsátását követjük, vagyis $\Delta t = \Delta s / v$.

Hogyan képzelhető el, hogy ezen Δt idő alatt kibocsátott hang gyakorlatilag egyszerre érkezik el hozzánk? Jelöljük r_1-gyel a gép tőlünk vett távolságát a Δs útszakasz elején, r_2-vel pedig az útszakasz végén.

A Δs útszakasz elején kibocsátott hang $t_1 = r_1/c$ idő múlva érkezik el hozzánk. Az útszakasz végén kibocsátott hang Δt idő múlva indul el, majd $t_2 = r_2/c$ idő eltelte után érkezik meg. A hangrobbanás létrejöttének feltétele, hogy ez a két hang (s persze a kettő között kibocsátott összes többi hang is) gyakorlatilag egyszerre érkezzék meg, vagyis

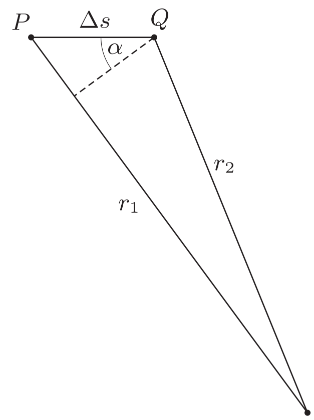
$$\Delta t + t_2 = t_1$$

legyen. Az időket a sebességekkel kifejezve:

$$\frac{\Delta s}{v} + \frac{r_2}{c} = \frac{r_1}{c},$$

vagyis

(1) $$\frac{\Delta s}{v} = \frac{r_1 - r_2}{c}.$$



1. ábra

Az *1. ábráról* leolvasható, hogy ha Δs elég kicsi r_1-hez és r_2-höz képest, akkor jó közelítésben írhatjuk:

$$r_1 - r_2 = \Delta s \sin \alpha.$$

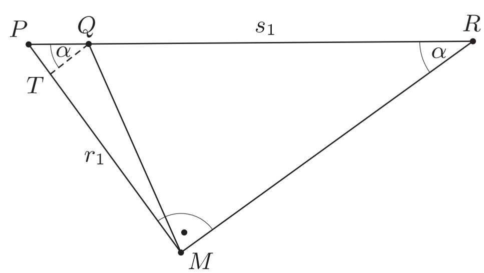
Ezt felhasználva az (1) egyenlet alapján a következőt kapjuk:

$$\sin \alpha = \frac{c}{v}.$$

Innen látszik, hogy a hangrobbanás létrejöttének szükséges feltétele

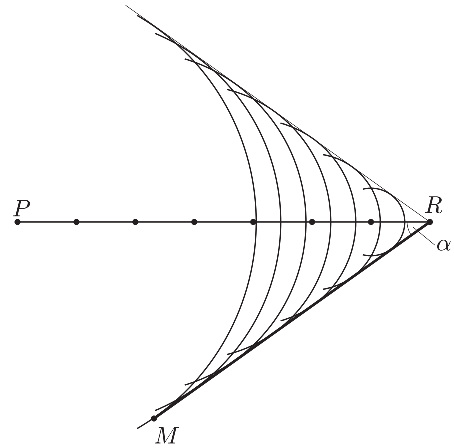
$$\frac{c}{v} \le 1, \qquad \text{vagyis} \qquad v \ge c,$$

tehát a repülőgép sebessége nem lehet kisebb a hang sebességénél.



2. ábra

Kiegészítés. A P pontból és a hozzá közeli pontokból kiinduló gömbhullámok „egymásra torlódva” olyan hullámfrontot hoznak létre, amely M felé halad, a haladási irányra merőleges ($TQ \parallel MR$) hullámfelülettel (*2. ábra*). Mire a hullámfront az M megfigyelőhöz ér, a repülőgép már az R pontban van. A gép az egész PR úton bocsátott ki hullámokat, vagyis az összetorlódott hullámokból addigra már az egész MR szakasza illeszkedő hullámfelület alakult ki. Ezt segít elképzelni a *3. ábra*.



3. ábra

Az ábrán látható körök a repülőgép által kibocsátott gömbhullámokat szemléltetik, ezek burkolója egy kúpfelület, amelynek csúcsa R-ben van, félnyílásszöge pedig α. A hangnál gyorsabban mozgó tárgyakra vonatkozó elmélet kidolgozója *Ernst Mach* (1838–1916) osztrák fizikus volt. Tiszteletére ezt a kúpot Mach-kúpnak nevezik. Innen is leolvasható a $\sin\alpha = c/v$ összefüggés.

b) A hangrobbanás létrejöttéhez nem szükséges, hogy a repülőgép hajtóművei működjenek és hangot adjanak ki. A gép kikapcsolt hajtóművel is tud hangrobbanást kelteni, ahogy egy kilőtt puskalövedék is „fütyül”, miközben repül a levegőben. Vagy egy másik példa: egy hajó akkor is kelt vízhullámokat, amikor semmi nem mozog fel-le rajta, csak szépen siklik előre a vízben. Orrhullámnak nevezik, ami a hajó orrától indul el, tathullámnak azt, ami a hajó mögül indul. A hangsebességnél gyorsabban repülő puskagolyóról (lövedékről) készített gyorsfényképen jól látszik, hogy a lövedék elején és a végét követően is indul el egy-egy lökéshullám, a sebességek arányának megfelelő Mach-szögben (lásd a hátsó borítót).

Az űrsikló leszállásakor hasonlóképpen két lökéshullám követi egymást, amelyeket a hirtelen bekövetkező nyomásingadozás vált ki a levegőben. Egyik lökéshullám az űrsikló elejéről indul, a másik az űrsikló vége után alakul ki. Ezért hallhattak a földi megfigyelők az Endeavour űrsikló közeledtekor is gyors egymásutánban két „távoli” hangrobbanást.

Kiegészítés. Mivel a leszálló űrsikló nem egyenes pályán halad, elvileg többször is teljesülhet a hangrobbanásnak a feladatban megfogalmazott feltétele. Ilyenkor a földi megfigyelő több hangrobbanást is hallhat egymás után.