rana, Torino, 1977, *Majorana eltűnése,* Magvető Kiadó, Budapest, 1978, azt a történeti szempontból paradox hipotézist fogalmazza meg, hogy az korai tiltakozásként fogható fel az atomfegyverek ellen, még az atomhasadás felfedezése előtt. Lehet, hogy igaza van?)

De ki is volt tulajdonképpen Ettore Majorana? Erre a legrövidebb és legfrappánsabb választ maga Enrico Fermi adta, amely a szicíliai Ericében lévő és ma Majorana nevét viselő nemzetközi tudományos központ (Centro di Cultura Scientifica Ettore Majorana) *Progress in Scientific Culture* című folyóiratának minden számában olvasható az eltűnt tudós fényképe alatt:

„…különféle rendű és rangú tudósok szaladgálnak a világban. Másod- és harmadrangú valakik, akik minden tőlük telhetőt megtesznek, mégsem mennek sokra. Elsőrangúak, akik nagy horderejű, alapvető felfedezésekre jutnak, amelyekkel előbbre viszik a tudományt. *S aztán a zsenik, mint Galilei és Newton. Nos hát Ettore Majorana ez utóbbiak közé tartozott."* (T.T. kiemelése.)

Majorana legfontosabb tudományos alkotása a neutrínóelmélet, melyet 1937-ben publikált (*Teoria simmetrica dell'electrone e del positrone* – Il Nuovo Cimento *5* 1937, 171–184). Elmélete szerint a neutrínónak nincs antirészecsképe, mint a Dirac-elméletben, hanem a neutrínó azonos az antineutrínóval, hasonlóan a foton esetéhez. Az ilyen típusú neutrínót nevezik ma Majorana-neutrínónak.

Az utóbbi években több kísérletsorozatot is végeztek a Majorana-típusú neutrínók kimutatására, a kettős bétabomlások felhasználásával. Sajnos, egyelőre konkluzív eredmény nélkül, de a mérések tovább folynak.

A Majorana-centenárium rendezvényei Rómában és Ericében már megkezdődtek.

A FIZIKA TANÍTÁSA

A DOPPLER-KÉPLETEK EGYSZERŰ LEVEZETÉSE

Légrádi Imre
Széchenyi I. Gimnázium, Sopron

Gimnáziumban a hangtan tárgyalása során kerül sor a Doppler-elv ismertetésére. Az alábbiakban azt szeretném bemutatni, hogyan beszélhetjük meg az elv legegyszerűbb eseteit egy egyenes mentén haladó objektumokra vonatkozólag.

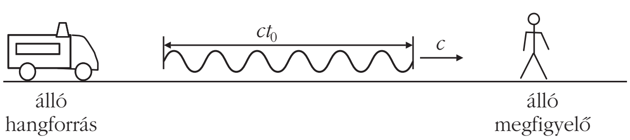
Célszerű kialakítani egy egyszerű képet, amely a hangforrásból a tér minden irányában elinduló gömbszerű hanghullámnak csak egy bizonyos irányban, mégpedig az észlelő irányában, haladó sugarát veszi figyelembe. Továbbá célszerű úgy gondolkodni, hogy a hangforrás csak egy meghatározott ideig bocsát ki hanghullámot. Ezek alapján elképzelünk egy „hangkígyót", amely kibújik a hangforrásból, az eleje elindul az észlelő felé, s hosszúságát az szabja meg, hogy a hangforrás működési ideje alatt milyen hosszú „kígyó" tudott kibújni. Ez a hangkígyó azután önállósítja magát, azaz hangforrástól és észlelőtől függetlenül c sebességgel halad a levegőben, ahol c a hang levegőbeli terjedési sebessége.

Ezzel a hangkígyóval való gondolkodásunknak a következő fő lépései lesznek:

1) Milyen hosszú hangkígyó keletkezik?

2) Mennyi idő alatt halad el a hangkígyó és az észlelő egymás mellett?

3) Az észlelő által hallott hang rezgésszámának meghatározása a hangkígyó hossza és a 2) lépésben meghatározott időtartam segítségével.



Amikor a hangkígyó odaér az észlelőhöz és elhalad mellette, akkor az észlelő annyi ideig hall hangot, amennyi idő a hangkígyónak ahhoz kell, hogy elhaladjon az észlelő mellett. Ez az időtartam t_0 ideig sugárzó, álló hangforrás és álló megfigyelő esetében, természetesen,

$$t = \frac{c\,t_0}{c} = t_0,$$

mert a ct_0 hosszúságú hangkígyó az álló levegőben szintén álló észlelőhöz képest c sebességgel halad. Ilyenkor nem is beszélünk Doppler-effektusról.

Tanulóink leghamarabb az autóverseny kapcsán ismerik el, hogy nekik is volt már részük a Doppler-effektus élményében. Ha van hanggenerátorunk, fel tudjuk idézni a versenyautó hangját, s ha gyorsan tudunk frekvenciát váltani, akkor a frekvenciaugrást is élethűen utánozhatjuk. De mindannyian be tudjuk mutatni a gumicső végére erősített, és körülbelül 1,5 m sugarú körön forgatott síp hangján észlelhető változásokat.

Hangsúlyozzuk, hogy a következőkben vizsgált esetekben a hangforrás sebessége kisebb a hang levegőbeli terjedési sebességénél. Ezt még versenyautónál is nyugodtan feltehetjük.

Az autóversennyel vagy szirénázó mentőautóval kapcsolatos eset, azaz álló észlelőhöz közeledő, majd tőle távolodó hangforrás vizsgálata.

Adjon az álló észlelőhöz közeledő hangforrás t_0 ideig hangot. Legyen a hangforrás saját rezgésszáma f_0. Ez az a hangmagasság, amelyet csak a mentős, illetve az autóversenyző hall. Mit is jelent ez a hangfrekvencia? Az 1 másodperc alatt lezajló rezgések számát. Ha a hangforrás t_0 másodpercig szólt, és ez idő alatt lezajlott, mondjuk, n rezgés, akkor azt is mondhatjuk, hogy

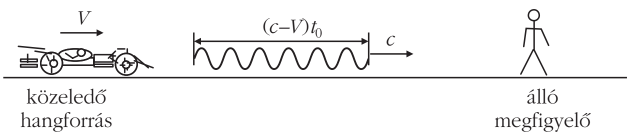
$$f_0 = \frac{n}{t_0}.$$

Ezt a gondolatot ki kell hangsúlyozni, hogy minden tanuló értse, ne csak formai megjegyzés legyen belőle.

Ezalatt a t_0 időtartam alatt a hangforrásból kilépő hullámnyalábnak, más szóval hangkígyónak a megfigyelő felé eső eleje, a levegőben c sebességgel haladva a megfigyelő felé, $c t_0$ utat tesz meg. A hangforrás V sebességgel halad utána, tehát a t_0 időtartam alatt az is megtesz Vt_0 utat. Így a hangforrásból a t_0 időtartam alatt

$$c\, t_0 - V t_0 = (c - V)\, t_0$$

hosszúságú hangkígyó „búvik ki”, és önállósítja magát, azaz, mivel sebessége nagyobb a hangforrás sebességénél azt elhagyja, és tart a megfigyelő felé.



Az *ábra* szerint a hangkígyó c sebességgel halad a megfigyelő felé. Amikor az eleje eléri a megfigyelőt, az hallani kezdi a hangot. Mindaddig hallja, amíg a hangkígyó el nem haladt mellette. Mennyi időbe telik ez? Nyilván a hangkígyó hossza, osztva a megfigyelőhöz képesti haladási sebességével:

$$t = \frac{(c - V)\, t_0}{c}.$$

Ezalatt a t időtartam alatt a megfigyelő meghallja mind az n darab rezgést, amely a hangkígyóban utazik. Így tehát a megfigyelő által hallott hang magassága

$$f_{közel} = \frac{n}{t} = \frac{n}{\frac{(c - V)\, t_0}{c}}.$$

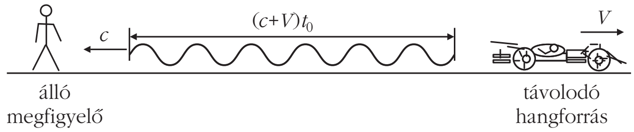
Itt fel kell ismerni, hogy $n/t_0 = f_0$ a hangforrás eredeti hangmagassága. Így, végül, a megfigyelő által hallott hang frekvenciája

$$f_{közel} = \frac{f_0}{1 - \frac{V}{c}}$$

formában írható, amelyről könnyen látszik, hogy nagyobb a hangforrás igazi rezgésszámánál, vagyis a megfigyelő magasabb hangot hall, mint a közeledő hangforrás saját hangja.

Ha a hangforrás elhaladt a megfigyelő mellett és már távolodik tőle, akkor ismét adjon t_0 időtartamig hangot f_0 frekvencián. Most a megvizsgálandó hangkígyó hossza más lesz, annak ellenére, hogy most is ugyanakkora t_0 ideig szól a hangforrás. Ugyanis a megfigyelőtől távolodó hangforrásból a megfigyelő *felé* elinduló hangkígyó eleje a levegőhöz képest ismét c sebességgel jön ki a hangforrásból, de a hangforrás V sebességgel távolodik a megfigyelőtől, ennek következtében lesz a hangkígyó hossza

$$c\, t_0 + V t_0 = (c + V)\, t_0.$$



A megfigyelő a mellette elvonuló hangkígyót most

$$t = \frac{(c + V)\, t_0}{c}.$$

ideig hallja. A hallott hang frekvenciája az előzőkben mondottak szerint

$$f_{távol} = \frac{n}{t} = \frac{n}{\frac{(c + V)\, t_0}{c}} = \frac{f_0}{1 + \frac{V}{c}},$$

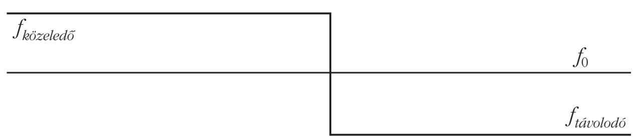
amely láthatóan kisebb f_0-nál, a hangforrás eredeti hangjának magasságánál, és persze, még kisebb a közeledéskor hallott rezgésszámnál.

A mellettünk elhaladó versenyautó hangjának jelentős ugrását hallhatjuk tehát, magas hangról mély hangra. A frekvenciaugrás rajzos szemléltetésekor ügyeljünk arra, hogy a közeledéskor hallott frekvencia és a hangforrás valódi frekvenciájának különbsége nagyobb, mint a hangforrás valódi frekvenciájának és a távolodáskor hallott frekvenciának a különbsége:

$$\frac{f_0}{1 - \frac{V}{c}} - f_0 = f_0 \frac{V}{c - V} \quad \text{közeledéskor, illetve}$$

$$f_0 - \frac{f_0}{1 + \frac{V}{c}} = f_0 \frac{V}{c + V} \quad \text{távolodáskor.}$$

Jól látható, hogy a közeledéskor adódó tört nagyobb. A grafikus ábra tehát ilyen:



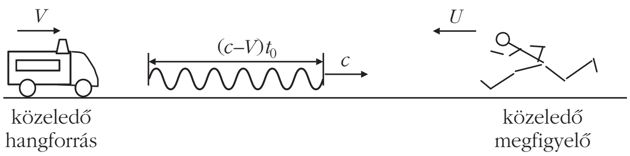
A teljes frekvencia ugrás

$$f_0 \frac{V}{c - V} + f_0 \frac{V}{c + V} = f_0 \frac{2\, c\, V}{c^2 - V^2}$$

nagyságú. A további lehetséges eseteket szintén a hangkígyó sugallta szemléletes kép alapján vezethetjük le.

Egymás felé közeledő, majd egymástól távolodó hangforrás és észlelő esete.

Az álló talajhoz és levegőhöz képest a hangforrás mozogjon V sebességgel, a megfigyelő mozogjon vele ellentétes irányban U nagyságú sebességgel. Mindkét sebesség kisebb a hang levegőbeli terjedési sebességénél. A hangforrás bocsásson ki ismét t_0 ideig f_0 frekvenciájú hangot.



A megfigyelő felé haladó hangkígyó hossza $(c-V)\,t_0$, f_0-t ismét kifejezhetjük a t_0 időtartam alatt lezajlott rezgések számával, azaz $f_0 = n/t_0$. A megfigyelő a levegőhöz képest, a hangkígyóval szemben, U nagyságú sebességgel halad negatív irányban, a hangkígyó pedig a levegőhöz képest most is c sebességgel halad pozitív irányban, így a megfigyelőhöz képesti sebességének nagysága $c+U$. A megfigyelő annyi ideig hallja a hangot, amíg a hangkígyó és ő elhaladnak egymás mellett:

$$t = \frac{(c-V)\,t_0}{c+U}.$$

Ez idő alatt a megfigyelő n darab rezgést hall, tehát az általa észlelt rezgésszám:

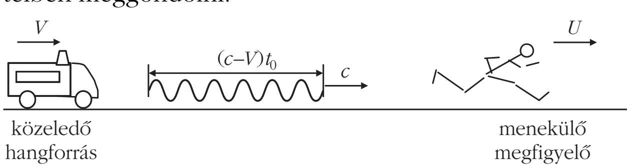
$$f = \frac{n}{t} = \frac{n\,(c+U)}{(c-V)\,t_0}.$$

A hangforrás saját, $n/t_0 = f_0$ rezgésszámát bevezetve, a V sebességű hangforrással szemben U nagyságú sebességgel haladó megfigyelő által észlelt hang frekvenciája:

$$f = \frac{c+U}{c-V}\,f_0.$$

Ez a frekvencia, a képletből láthatóan, mindenképpen nagyobb a hangforrás saját frekvenciájánál.

Itt érdemes felvetni azt az esetet, amikor az észlelő „menekül” a hangforrás elől, természetesen $U < c$ sebességgel. Ezt az utóbb kapott képletben U előjelének cseréjével kapjuk, de gyakorlásképpen érdemes megint részleteiben meggondolni.



Ebben az esetben a hangkígyó utoléri az észlelőt, majd el is hagyja. Együttlétük időtartama

$$t = \frac{c-V}{c-U}\,t_0.$$

Az észlelő által érzékelt hang rezgésszáma

$$f = \frac{n}{t} = \frac{n\,(c-U)}{(c-V)\,t_0} = \frac{c-U}{c-V}\,f_0.$$

Nos, erről nem tudjuk előre megmondani, hogy f_0-nál kisebb vagy nagyobb-e. Ez U és V egymáshoz képesti nagyságától függ, de ha a hangforrás és észlelő közeledéséhez ragaszkodunk, akkor $U < V$, a hallott hang magasabb f_0-nál.

Másik érdekes eset az, ha a megfigyelő és a hangforrás ellenkező irányban, ugyanazon az egyenesen távolodnak egymástól. A megfigyelő sebessége U nagyságú, ugyanakkor a hangforrás sebessége V nagyságú. Most is adjon ki a hangforrás t_0 időtartamon át hangjelet, és álljon ez a hangkígyó is n darab rezgésből. A megfigyelő után repülő hangkígyó hossza most $(c+V)\,t_0$.

Miután utolérte a hangsebességnél kisebb sebességgel haladó megfigyelőt, ahhoz képest a sebessége csak $c-U$ lesz, de elhagyja. Így a megfigyelő az n darab rezgést most

$$t = \frac{c+V}{c-U}\,t_0$$

időtartam alatt észleli. Az általa hallott hang frekvenciája tehát

$$f = \frac{n}{t} = \frac{n\,(c-U)}{(c+V)\,t_0} = \frac{c-U}{c+V}\,f_0,$$

amely frekvencia, mint a képletből látható, feltétlenül kisebb a hangforrás saját frekvenciájánál.

Az előbbi két eset természetesen magába foglalja azt is, amikor a hangforrás áll, és csak a megfigyelő mozog. Ez $V = 0$ helyettesítéssel kell, hogy adódjék. Iskolai gyakorlásként azonban érdemes meggondoltatni a hangkígyó alkalmazásával.

A fentiekben nem tárgyaltunk minden lehetséges esetet, az elmondottak csak a „hangkígyó” módszertani ötletének megvilágítására szolgáltak.

A róla elnevezett jelenségről *Doppler* 1842-ben fejtette ki elgondolását *Über das farbige Licht der Doppelsterne* (A kettőscsillagok színéről) című, Prágában megjelent munkájában. Mint az a címből látható, nem a hangtani jelenség volt figyelmének középpontjában, hanem a kettőscsillagok fénye. A Doppler-elv azért is fontos a fizika tudománya számára, mert a színképvonalak eltolódásának vizsgálata segítségével csillagászati ismeretekhez is jutottunk.

További említésre méltó érdekesség, hogy az álló helyzetű kisülési csőben gerjesztett gázatomok által kibocsátott fény vizsgálata során tapasztalható jelenség, a spektrumvonalak kiszélesedése is Dopplerre emlékeztet. Tekintve a gázban azokat az atomokat, amelyek mindegyike – azonos gerjesztettségénél fogva – ugyanazt a frekvenciájú fényt bocsátja ki, ezek fénye a spektroszkópban mégsem egyetlen vékony fényvonal lesz. Hanem, mivel a Maxwell-féle sebességeloszlás szerint különböző egyedi sebességgel mozognak össze-vissza, egy részük a spektroszkóp felé, más részük attól távolodva, érvénybe lép Doppler elve, s az atom által ténylegesen kisugárzott f_0 frekvencia helyett annál kisebb és annál nagyobb frekvenciákat is észlelünk, ami a spektroszkópban úgy jelenik meg, hogy a spektrumvonal kiszélesedik.