

COMPARISON OF EXPLANATIONS OF THE DOPPLER EFFECT IN NON-RELATIVIST AND RELATIVIST PHYSICS

Novac-Claudiu CHIRIAC
Lect.univ.dr.
Universitatea “Constantin Brâncuși” din Tg-Jiu

ABSTRACT: *IN THIS PAPER WE WILL STUDY THE EXPLANATIONS OF THE DOPPLER EFFECT IN NON-RELATIVISTIC AND RELATIVISTIC PHYSICS AND COMPARE THEM. FINALLY, WE WILL DEMONSTRATE THE SUPERIORITY OF THE RELATIVISTIC POINT OF VIEW.*

KEYWORDS: *DOPPLER EFFECT, RELATIVITY THEORY, NON-RELATIVISTIC PHYSICS*

INTRODUCERE

Efectul Doppler a fost evidentiat la început în acustică, în jurul anului 1843, ca modificare a frecvenței sunetului în urma mișcării emițătorului sau a receptorului față de mediul în care se propagă sunetul. Apoi s-a constatat un fenomen similar în optică, și anume o deplasare a poziției liniilor spectrale datorită mișcării relative a emițătorului și receptorului, motiv pentru care acest efect mai este numit și efectul Doppler-Fizeau. În prezent efectul Doppler este recunoscut ca proprietate specifică oricărui fenomen de propagare a undelor.

3. EFECTUL DOPPLER ÎN FIZICA NERELATIVISTĂ

În explicația nerelativistă a efectului Doppler, datorită presupunerii că există un sistem de referință absolut, aerul în cazul sunetului, eterul în cazul luminii, etc., trebuie să distingem două cazuri:

Cazul 1. Sursa imobilă și observatorul în mișcare.

Cazul 2. Observatorul imobil și sursa în mișcare.

În primul caz, viteza undei (viteza față de reperul imobil) fiind independentă de mișcarea observatorului, este cea pe care o stabilește observatorul aflat în repaus. O vom nota cu c . Dacă lungimea de undă este λ , perioada oscilațiilor recepționate de observatorul imobil va fi $T_0 = \lambda/c$.

Dacă observatorul se mișcă cu viteza v spre sursă, pentru el unda se apropie cu viteza $c + v$, conform regulei nerelativiste de compunere a vitezelor, deci el va recepționa oscilațiile respective ca având perioada

$$T = \frac{\lambda}{c + v}.$$

Menționăm că, formal, putem evita legea de compunere a vitezelor considerând că prin mișcarea observatorului, în intervalul de timp T , egal cu perioada, observatorul constată o lungime de undă modificată, anume $\lambda \mp Tv$. Scriind că:

$$T_0 = \frac{\lambda \mp Tv}{c},$$

rezultă că

$$T = \frac{\lambda}{c \pm v}.$$

De altfel, lucrând cu viteza de fază, depășirea vitezei luminii nu contrazice principiul relativist de constanță a lui c .

Pentru frecvențe, în cazul observatorului în repaus vom avea

$$v_0 = \frac{1}{T_0} = \frac{c}{\lambda},$$

iar în cazul apropiării (respectiv îndepărtării) de sursă vom avea

$$v = \frac{1}{T} = \frac{c \pm v}{\lambda} = \frac{c}{\lambda} \left(1 \pm \frac{v}{c}\right).$$

În concluzie, în cazul sursei imobile și a observatorului în mișcare în direcția sursei cu viteza $\pm v$, frecvența semnalului recepționat diferă de frecvența recepționată în stare de repaus conform formulei

$$v = v_0 \left(1 \pm \frac{v}{c}\right). \quad (1)$$

În cazul 2, când sursa este în mișcare, viteza de propagare a undei rămâne c , ca și când sursa ar fi în mișcare față de mediul imobil. Dacă sursa se apropie de observator cu viteza v , lungimea de undă $\lambda = cT_0$ se va micșora cu valoarea vT_0 , deci observatorul va recepționa semnalul pe frecvența

$$v = \frac{c}{cT_0 - vT_0} = \frac{1}{T_0} \frac{1}{1 - \frac{v}{c}}.$$

Dacă pentru cazul când sursa se îndepărtează înlocuim pe v cu $-v$ și ținem cont că $\frac{1}{T_0} = v_0$, putem concluziona că legătura între frecvențe, dacă sursa este în mișcare, este dată de formula

$$v = v_0 \left(1 \mp \frac{v}{c}\right)^{-1}. \quad (2)$$

Efectuând dezvoltarea în serie (geometrică) a factorului $\left(1 \mp \frac{v}{c}\right)^{-1}$ se constată că formula (2) indică același fenomen ca și cel descris prin formula (1) dacă (și numai dacă) se neglijează termenii ce conțin $\frac{v}{c}$ la puteri mai mari sau egale cu doi. Se vede astfel că explicația clasică, nerelativistă, a efectului Doppler contrazice principiul de relativitate, indicând pentru cazul când și sursa și observatorul se mișcă cu viteza v o variație a frecvenței conform formulei

$$v = v_0 \frac{1 \pm \frac{v}{c}}{1 \mp \frac{v}{c}}. \quad (3)$$

Această formulă descrie corect efectul Doppler atunci când v este foarte mic în raport cu c , de exemplu în optică, pentru viteze mici în raport cu viteza luminii. Și în acustică, unde c este viteza sunetului, explicația nerelativistă este satisfăcătoare.

4. EXPLICAȚIA RELATIVISTĂ A EFECTULUI DOPPLER

Să presupunem că o sursă de vibrații electromagnetice este în repaus față de un sistem de referință Ω_0 , emițând în originea acestuia. Acest observator recepționează în punctul $P(x, 0, 0)$ o undă de frecvență ν_0 și amplitudine a , de forma

$$\rho_0(t, x) = a \sin 2\pi\nu_0 \left(t - \frac{x}{c} \right), \quad (4)$$

unde termenul $\frac{x}{c}$ asigură sincronizarea fazelor (prima buclă a sinusoidei emise să fie recepționată tot ca primă buclă de sinusoidă).

Să considerăm acum că în direcția axei Ox se mișcă un alt observator Ω , cu o viteză v . El va recepționa unda tot cu amplitudinea a , deoarece oscilațiile electromagnetice sunt transversale, iar segmentele transversale direcției de mișcare nu suportă efectul de contracție. Frecvența undei recepționate va fi ν , iar mărimile t și x se vor schimba conform formulelor lui Lorentz. Principiul de relativitate ne asigură că Ω va recepționa un semnal de aceeași formă ca și (4), deci, folosind și principiul contracției vitezei luminii deducem că expresia undei recepționate de Ω în P va fi

$$\rho(t', x') = a \sin 2\pi\nu \left(t' - \frac{x'}{c} \right). \quad (5)$$

Identificând expresiile (4) și (5) ale undei, prin intermediul formulelor Lorentz, egalitatea $\rho_0(t, x) \equiv \rho(t', x')$ devine

$$a \sin 2\pi\nu_0 \left[t' + \frac{v}{c^2} x' - \frac{1}{c} (x' + vt') \right] \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{-1/2} \equiv a \sin 2\pi\nu \left(t' - \frac{x'}{c} \right).$$

Regrupând după t' și x' obținem

$$\sin 2\pi\nu_0 \left[\left(1 - \frac{v}{c} \right) t' - \left(1 - \frac{v}{c} \right) \frac{x'}{c} \right] \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{-1/2} \equiv \sin 2\pi\nu \left(t' - \frac{x'}{c} \right),$$

ceea ce ne indică următoarea legătură între frecvențe

$$\begin{aligned} \nu &= \nu_0 \frac{1 - \frac{v}{c}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \\ &= \nu_0 \sqrt{\frac{1 - \frac{v}{c}}{1 + \frac{v}{c}}}. \end{aligned} \quad (6)$$

Dacă în loc să se îndepărteze cu viteza v observatorul Ω se apropie cu aceeași viteză, modificarea frecvenței este dată tot de formula (6), în care înlocuim v cu $-v$, adică

$$\nu = \nu_0 \sqrt{\frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}}}. \quad (7)$$

Concluzii

Comparația celor două explicații ale efectului Doppler arată superioritatea punctului de vedere relativist. Astfel, în loc de două formule (1) și (2), ca în cazul clasic, explicația relativistă indică o singură formulă, anume

$$v = v_0 \sqrt{\frac{1 \mp \frac{v}{c}}{1 \pm \frac{v}{c}}} \quad (8)$$

Rezultă astfel că efectul este același dacă sursa se mișcă sau observatorul se mișcă, esențială fiind mișcarea relativă a lor. Într-adevăr, compunând formulele (6) și (7) rezultă că dacă sursa se mișcă împreună cu observatorul în aceeași direcție, frecvența undei recepționate nu se schimbă. Se mai observă că, după amplificări convenabile, formula (8) se mai poate scrie sub forma:

$$v = v_0 \frac{1 \mp \frac{v}{c}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{1 \pm \frac{v}{c}}, \quad (9)$$

Astfel că, neglijând termenul $v^2 c^{-2}$, această formulă se reduce la oricare din formulele (1) sau (2), care dau explicația nerelativistă. Cu alte cuvinte, explicația clasică a efectului Doppler este un caz particular al explicației relativiste, anume pentru viteze mici în raport cu c , când se poate neglija termenul $v^2 c^{-2}$. Semnele în formulele (9) apar schimbate față de formulele (1) și (2), dar reamintim că în studiul nerelativist semnele de deasupra corespund aproprierii dintre sursă și receptor, în timp ce în abordarea relativă a fenomenului, semnele de sus corespund îndepărtării acestora, deci în fond formulele respective concordă.

Desigur abordarea relativistă a efectului Doppler nu are rost în cazul undelor sonore, unde vitezele în cauză sunt neglijabile în raport cu viteza limită c . În plus, în acustică este esențială raportarea la aer, sau alt mediu de propagare, ca suport fix, în timp ce eterul, ca mediu în care se propagă undele electromagnetice, este eliminat de teoria relativității restrânse.

BIBLIOGRAFIE

1. Einstein A. (1957). *Teoria Relativității*. Editura Tehnică, București.
2. Gill T.P. (1965). *The Doppler effect. An introduction to the theory of the effect*, Logos Press, London.
3. Pop N., Pacurar A. (2015). *Fizică generală în aplicații*, Editura Politehnica, București.
4. Popescu I. (1982). *Fizică*, Editura Didactică și Pedagogică, București.
5. Savelyev I. (1982). *Fundamentals of theoretical Physics*, Editura Mir, Moskova