

CONSTANTIN MANTEA  
MIHAELA GARABET

# FIZICĂ

F1 + F2

Manual pentru clasa a 12-a

**F1: filiera teoretică / profil real /**  
**specializările:** matematică-informatică  
și științe ale naturii;  
**filiera vocațională / profil militar MAPN /**  
**specializarea:** matematică-informatică;  
**F2: filiera tehnologică,** pentru toate calificările  
cu 1-2 ore pe săptămână

*Editura*  
**ALL**

# CUPRINS

## CAPITOLUL 1 Teoria relativității restrânse

1.1. Bazele teoriei relativității restrânse .....	6
1.1.1. Relativitatea clasică .....	8
1.1.2. Experimentul Michelson-Morley .....	10
1.2. Postulatele teoriei relativității restrânse. Transformările Lorentz. Consecințe .....	13
Simultaneitatea în teoria relativității .....	14
Relativitatea timpului .....	15
Relativitatea lungimilor .....	17
Transformarea Lorentz .....	18
1.3. Elemente de cinematică și dinamică relativistă .....	20
1.3.1. Compunerea vitezelor* .....	20
1.3.2. Principiul fundamental al dinamicii* .....	21
1.3.3. Relația masă-energie .....	22
Activități de evaluare .....	28

## CAPITOLUL 2 Elemente de fizică cuantică

2.1. Efectul fotoelectric extern .....	34
2.1.1. Legile efectului fotoelectric extern .....	34
Lucrare de laborator. Verificarea experimentală a legilor efectului fotoelectric extern în laborator virtual .....	36
2.1.2. Ipoteza lui Planck. Ipoteza lui Einstein. Ecuația lui Einstein .....	37
2.1.3. Interpretarea legilor efectului fotoelectric extern .....	38
Aplicațiile efectului fotoelectric .....	39
2.2. (*) Efectul Compton** .....	41
2.3. Ipoteza de Broglie. Difracția electronilor. Aplicații* .....	44
2.4. Dualismul undă-corpusul* .....	46
Activități de evaluare .....	49

## CAPITOLUL 3 Fizică atomică

Elemente de electrostatică – reactualizare/aprofundare* .....	52
3.1. Spectre .....	59
3.2. Experimentul Rutherford. Modelul planetar al atomului .....	61
3.3. Experimentul Franck-Hertz* .....	66
3.4. Modelul atomic Bohr .....	68
Postulatele lui Bohr .....	69
Numerele cuantice .....	73
3.5. (*) Atomul cu mai mulți electroni* .....	76
3.6. Radiațiile X .....	78
3.7. (*) Efectul LASER* .....	81
Activități de evaluare .....	90

## CAPITOLUL 4

### Semiconductoare. Aplicații în electronică

4.1. Conducția electrică în metale și semiconductori. Semiconductori intrinseci și extrinseci .....	94
4.2. Dioda semiconductoare. Redresarea curentului alternativ .....	101
Caracteristica curent – tensiune a diodei semiconductoare .....	102
Lucrare de laborator. Studiul calitativ al redresării curentului alternativ cu diode semiconductoare .....	103
4.3. (*) Tranzistoare .....	105
(*) Tranzistorul cu efect de câmp. Aplicații .....	108
4.4. (*) Circuite integrate .....	110
Activități de evaluare .....	112

## CAPITOLUL 5

### Fizică nucleară

5.1. Proprietăți generale ale nucleului .....	114
5.2. Energia de legătură a nucleului. Stabilitatea nucleului* .....	117
Modele nucleare .....	119
5.3. Radioactivitatea. Legile dezintegrării radioactive .....	121
Dezintegrarea radioactivă .....	123
Reacții nucleare. Radioactivitatea artificială .....	127
5.4. Interacțiunea cu substanța. Detecția radiațiilor nucleare. Dozimetrie .....	129
5.5. Fiziunea nucleară. Reactorul nuclear .....	135
Impactul utilizării tehnologiilor nucleare asupra societății și a naturii .....	142
5.6. Fuziunea nucleară .....	143
Despre stele .....	145
5.7. (*) Acceleratoare de particule* .....	148
5.8. (*) Particule elementare* .....	150
Activități de evaluare .....	155
Lucrare de laborator. Studiul calitativ al spectrelor – spectrul continuu, spectre de bandă, spectre discrete .....	157
Lucrare de laborator. Evidențierea experimentală a unor proprietăți ale radiației amplificate prin emisie stimulată .....	158

## Bibliografie

1. F.W. Sears, M.W. Zemansky, H.D. Young – *Fizică*
2. C. Ciubotaru, Gh.Zet, A. Vasiliu – *Fizica*
3. H. Schaim – *Fizică – PSSC*
4. P.S. Crawford Jr., *Cursul de fizică Berkeley*
5. M. Ailincăi, L. Rădulescu – *Probleme – întrebări de fizică*
6. M. Garabet, L. Strasser, M. Fronescu – *Fizică – probleme grilă și teste recapitulative pentru bacalaureat și admitere*
7. M. Garabet, I. Neacșu – *Lecții experimentale în laboratorul de fizică*

# Capitolul 1

## Teoria relativității restrânse

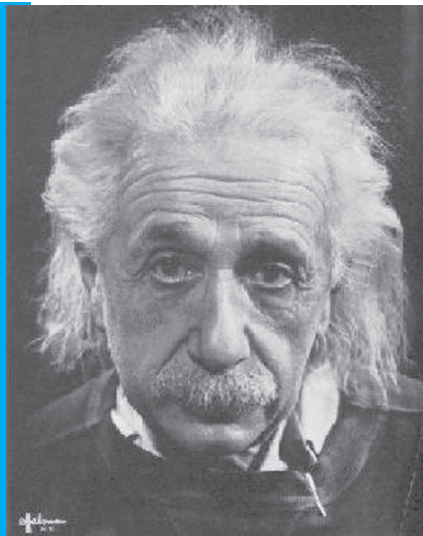
În acest capitol veți învăța despre:

- ✦ Postulatele teoriei relativității restrânse
- ✦ Transformările Lorentz
- ✦ Compunerea relativistă a vitezelor
- ✦ Relația masă – energie

**Albert Einstein (1879 - 1955)** s-a născut în Ulm, Germania, la 14 martie 1879 și și-a petrecut tinerețea la München, unde familia sa deținea un mic atelier de produse electrice.

În anul 1905, Einstein a publicat dintr-o lovitură rezultatele mai multor studii teoretice, care l-au făcut deodată cunoscut și care aveau să revoluționeze fizica. Primul și cel mai important studiu cuprinde prima expunere completă a **teoriei relativității restrânse**, în care demonstrează că teoretic nu este posibil să se decidă dacă două evenimente care se petrec în locuri diferite, au loc în același moment sau nu. Altă lucrare, asupra **efectului fotoelectric**, conține ipoteza revoluționară asupra naturii luminii. Einstein pornește de la ipoteza Planck afirmând că, în anumite circumstanțe determinate, radiația electromagnetică are o natură corpusculară (materială), sugerând că energia transportată de fiecare particulă a razei luminoase, denumită **foton**, ar fi proporțională cu frecvența acelei radiații.

Începând cu 1919, meritele lui Einstein au fost recunoscute pe plan mondial. A primit numeroase premii și distincții de la diferite societăți de fizică de pe întreg globul, printre care și **Premiul Nobel pentru fizică** în 1921, pentru explicarea efectului fotoelectric (deci nu pentru teoria relativității!!).



## 1.1. Bazele teoriei relativității restrânse

„Ce s-ar întâmpla dacă aş călători odată cu unda de lumină la viteza acesteia? Dar dacă ar trebui să alerg după o rază de lumină?... Sau dacă ai călători pe un fascicul de lumină?... Dacă ai alerga suficient de repede, oare nu s-ar mai mișca deloc?... Ce e «viteza luminii»? Dacă ea se raportează la ceva, această valoare nu poate fi raportată la altceva care să fie la rândul său în mișcare.” (Albert Einstein)



● Fig. 1.1.1. Propagarea luminii

„Teoria relativității nu-i decât un nou pas în evoluția științei, începută cu secole în urmă, un pas care păstrează relațiile descoperite în trecut, aprofundând intuițiile lor și adăugând altele noi.” (Albert Einstein)

Într-un mediu de indice de refracție  $n$  lumina se propagă cu viteza  $v = c/n$ . Mediile uzuale au indice de refracție de ordinul unității (apă:  $n = 1,333$ ; sticlă:  $n = 1,5 - 1,62$ ; diamant:  $n = 2,417$ ).

În 1999, un grup de cercetători de la Universitatea Harvard (SUA), conduși de Lene Vestergaard Hau, au demonstrat experimental (*Nature*, 397, p. 594 (1999)) că, în anumite condiții extreme, lumina se propagă cu o viteză mult mai mică. Astfel, ei au arătat că, la o temperatură de circa  $5 \cdot 10^{-8}$  K (foarte aproape de zero absolut), într-un mediu aflat într-o stare specială, numită „condensat Bose – Einstein”, care are un indice de refracție de milioane de ori mai mare decât cel al sticlei, lumina se propagă cu o viteză de circa 17 m/s !

Un astfel de sistem deschide posibilitatea unor aplicații remarcabile în domeniul calculatoarelor, telecomunicațiilor, etc. Un impediment major, atât tehnic cât și economic, în calea dezvoltării unor astfel de aplicații constă în necesitatea realizării unor temperaturi extrem de scăzute. În anul 2003, Matthew Bigelow, Nick Lepeshkin și Robert Boyd au obținut rezultate similare într-un sistem mult mai simplu: un cristal aflat la temperatura camerei (M. Bigelow et al., *Science*, 301, p. 200 (2003)).

### Viteza luminii

Lumina și teoriile asupra naturii sale au constituit obiectul de studiu al fizicienilor pentru o lungă perioadă de timp. Azi știm că lumina are caracter *dual*, putându-se comporta ca o undă electromagnetică ce se propagă în vid cu viteza de 300.000 km/s sau ca un fascicul de particule, așa cum vom vedea în capitolele următoare.

Studiul propagării luminii a jucat un rol esențial în teoria relativității. S-a crezut la un moment dat că luminii îi este necesar un mediu ipotetic prin care să se propage asemenea undelor sonore prin aer. Acest mediu a fost numit *eter*. Încercările experimentale de a detecta existența eterului s-au soldat cu rezultate negative. S-a intuit mereu că viteza de propagare a luminii este finită, ceea ce a fost demonstrat experimental.

În clasa a IX-a ați învățat că metrul reprezintă „lungimea drumului parcurs de lumină în vid în timpul de  $1/299792458$  dintr-o secundă”. Din această definiție și din legea mișcării rectilinii uniforme rezultă că viteza luminii în vid are valoarea exactă

$$c = 299\,792\,458 \text{ m/s.}$$

Valoarea vitezei luminii, fiind foarte mare, nu a putut fi determinată experimental până în anul 1676.

### Observații:

1) Prima metodă de determinare a vitezei luminii a fost propusă de Galileo Galilei în lucrarea „Dialog despre cele două sisteme principale ale lumii” apărută în 1632 la Florența. Galilei propunea ca doi oameni, având fiecare un felinar care poate fi acoperit sau descoperit după voie, să stea la o distanță mare, cunoscută, unul în fața celuilalt. Inițial ambele felinare sunt acoperite. Unul dintre oameni descoperă felinarul său. Când vede lumina, al doilea om descoperă și el felinarul său. Primul om măsoară intervalul de timp,  $\Delta t$ , scurs între momentul în care el a dezvelit felinarul său și momentul în care ajunge la el lumina de la

felinarul celui de al doilea om. Cunoscând distanța dintre oameni,  $d$ , se poate calcula viteza luminii:  $c = 2d/\Delta t$ . Metoda imaginată de Galilei, deși corectă principial, nu poate fi utilizată practic deoarece timpul  $\Delta t$  este mult mai mic decât timpul de reacție al omului. De exemplu, pentru  $d = 1$  km,  $\Delta t$  este de ordinul a  $10^{-6}$  secunde.

2) Prima determinare a vitezei luminii a fost realizată în 1676 de Olaf Roemer (1644-1710) din observații astronomice.

Prima măsurare a vitezei luminii prin mijloace terestre (neastronomice) a fost efectuată în anul 1849 de fizicianul francez Hippolyte Louis Fizeau (1819-1896). Dispozitivul utilizat de Fizeau este prezentat schematic în figura 1.1.2. Lumina provenind de la sursa  $S$  este trimisă prin lentila  $L_1$  pe oglinda semiargintată  $O_1$ .

**Observație:** O **oglină semiargintată** este o oglindă care are stratul de argint reflectător foarte subțire, astfel încât numai jumătate din lumina incidentă este reflectată, iar cealaltă jumătate este transmisă. O astfel de oglindă joacă rol de **divizor de fascicul**.

Razele reflectate de oglinda  $O_1$  dau în punctul  $F$  imaginea sursei și cad apoi pe lentila  $L_2$ . Această lentilă este plasată față de  $F$  astfel încât fasciculul luminos să fie, după trecerea prin lentilă, un fascicul paralel. La mare distanță lumina trece prin lentila  $L_3$  și se reflectă apoi pe oglinda  $O_2$ , întorcându-se pe direcția inițială. Ajungând la oglinda  $O_1$  o parte din lumină este transmisă prin lentila  $L_4$  și ajunge la ochiul observatorului.

**Observație:** În experiența lui Fizeau distanța dintre oglinda  $O_2$  și punctul  $F$  a fost  $D = 8\,633$  m.

Dispozitivul experimental conține și o roată dințată care poate obtura fasciculul luminos. Presupunem că în momentul în care fasciculul reflectat de oglinda  $O_1$  ajunge în  $F$ , roata dințată este astfel poziționată încât lumina poate să treacă (în  $F$  roata are un gol și nu un dinte). Pentru ca lumina reflectată de oglinda  $O_2$  să nu ajungă la ochiul observatorului trebuie ca, în timpul  $2 \cdot D/c$  în care lumina parcurge traseul  $F - O_2 - F$ , roata dințată să se rotească astfel încât în  $F$  să fie următorul dinte al roții dințate. În figura 1.1.3 sunt prezentate cele două poziții ale roții dințate, înainte și după rotația de unghi  $\theta$ . Fasciculul luminos trece printr-un gol al roții la ducere (fig. 1.1.3-a), iar la întoarcere este obturat de un dinte (fig. 1.1.3-b). Atunci se poate scrie relația

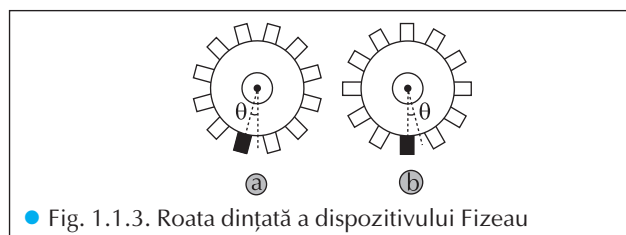
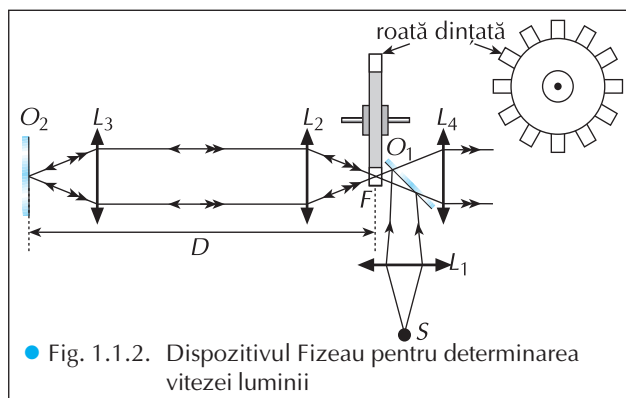
$$\frac{\theta}{\omega} = \frac{2D}{c}.$$

unde  $\omega$  este viteza unghiulară a roții dințate. Din această relație se obține pentru viteza luminii expresia

$$c = 2 \cdot D \cdot \frac{\omega}{\theta}.$$

**Observații:**

1) Cu această metodă Fizeau a obținut valoarea  $c = (315\,300 \pm 500)$  km/s.



- 2) Léon Foucault (1819 -1868) a înlocuit, în 1850, roata dințată cu o oglindă rotitoare. Cu instalația astfel modificată Foucault obține în 1862 o valoare a vitezei luminii mult mai bună:  $c = (298000 \pm 500) \text{ km/s}$ .
- 3) Introducând pe traseul parcurs de lumină un tub umplut cu apă, Foucault a dovedit că viteza luminii în apă este mai mică decât în vid. La momentul respectiv această constatare a constituit o dovadă importantă în susținerea teoriei undulatorii a luminii.
- 4) Cu același tip de dispozitiv, având distanța  $D = 35,5 \text{ km}$ , fizicianul american Albert Michelson (1852-1931) a obținut valoarea  $c = (299\,796 \pm 4) \text{ km/s}$ .

### 1.1.1. Relativitatea clasică

Mișcarea unui corp poate fi studiată relativ la diverse sisteme de referință inerțiale. Se pune atunci problema găsirii relațiilor cu ajutorul cărora se poate face trecerea de la descrierea mișcării unui punct material în raport cu un SRI (sistem de referință inerțial) la descrierea mișcării lui în raport cu un alt SRI.

Fie un SRI,  $S$ , legat de sol, și un alt SRI,  $S'$ , aflat în mișcare de translație față de  $S$  (fig. 1.1.4) cu viteza constantă  $\vec{v}_0$ , pe care o numim **viteză de transport**.

Timpul se măsoară cu câte un ceas așezat în fiecare SRI. Experimental se constată că, dacă viteza de transport este mult mai mică decât viteza luminii în vid ( $c \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ ), timpul,  $t'$ , măsurat în  $S'$  este același cu timpul,  $t$ , măsurat în  $S$ :

$$t' = t.$$

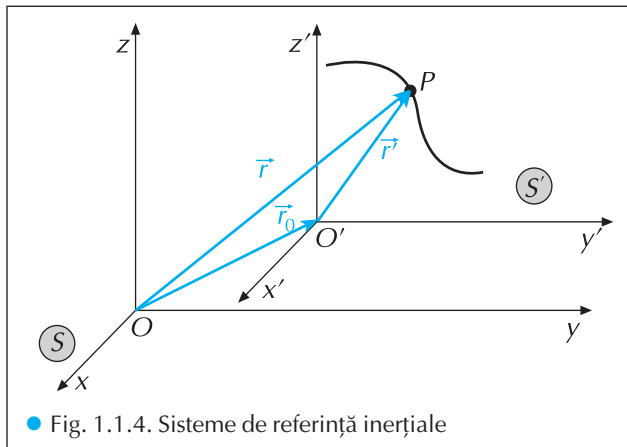
Deci, **în mecanica clasică se consideră că timpul este absolut, adică durata unui eveniment este aceeași în orice SRI.**

Presupunem că la momentul inițial,  $t'_0 = t_0 = 0$ , originile  $O$  și  $O'$  ale celor două SRI coincid. La un moment ulterior,  $t$ , originea SRI  $S'$ ,  $O'$ , are vectorul de poziție  $\vec{r}_0 = \vec{v}_0 \cdot t$  față de  $O$ .

Poziția unui punct material  $P$ , la momentul  $t$ , este determinată de vectorul de poziție  $\vec{r}$  în raport cu  $S$  și de vectorul de poziție  $\vec{r}'$  în raport cu  $S'$ . Așa cum se vede din figura 2.2.1, conform regulii triunghiului avem  $\vec{r} = \vec{r}_0 + \vec{r}'$ , adică

$$\vec{r} = \vec{r}' + \vec{v}_0 \cdot t.$$

Proiectând această relație vectorială pe axele de coordonate ale celor două SRI obținem



● Fig. 1.1.4. Sisteme de referință inerțiale

$$\begin{cases} x = x' + v_{0x} \cdot t \\ y = y' + v_{0y} \cdot t \\ z = z' + v_{0z} \cdot t \end{cases}$$

Aceste ecuații sunt numite **formulele de transformare Galilei**. Ele permit exprimarea coordonatelor unui punct material din unul dintre SRI în funcție de coordonatele sale în raport cu celălalt SRI. Din relația vectorială  $\vec{r} = \vec{r}' + \vec{v}_0 \cdot t$  obținem, prin derivare în raport cu  $t$ ,

$$\vec{v} = \vec{v}' + \vec{v}_0,$$

care exprimă **regula de compunere a vitezelor** în mecanica newtoniană.

Deoarece cele două SR considerate sunt SRI, viteza de transport,  $\vec{v}_0$ , este constantă. Atunci, din relația precedentă obținem  $\Delta\vec{v} = \Delta\vec{v}'$  și, deoarece  $\Delta t = \Delta t'$ , rezultă că

$$\vec{a} = \vec{a}'.$$

Accelerația punctului material este deci *absolută* în sensul că nu se schimbă când se trece de la un SRI la altul. Atunci, conform principiului II al mecanicii, rezultă că sunt egale, între ele, și forțele care acționează asupra punctului material în cele două SRI:

$$\vec{F} = \vec{F}'.$$

Pe această bază se poate enunța **principiul relativității** în mecanica newtoniană.

**Enunț:** Starea de repaus sau de mișcare rectilinie uniformă a unui SRI nu poate fi pusă în evidență prin nici un experiment mecanic efectuat în acest sistem de referință; legile mecanicii au aceeași formă în raport cu orice SRI.

### Observații:

1) Principiul relativității clasice a fost formulat de Galileo Galilei, în anul 1632, cu referință la fenomenele mecanice care au loc în cabina închisă a unei corăbii. De aceea este numit **principiul relativității galileene**.

2) Conform principiului relativității sistemele de referință inerțiale sunt **echivalente**: în studierea unui fenomen mecanic poate fi folosit, cu egală îndreptățire, **orice** SRI.



**Exercițiul 1.1.1.** Viteza unei bărci față de mal, în sensul curgerii râului, este  $v_1 = 54$  km/h, iar în sens opus este  $v_2 = 18$  km/h. Aflați viteza apei,  $u$ , și viteza bărcii față de apă,  $v$ .

**Soluție:** Conform regulii de compunere a vitezelor, când barca se mișcă în sensul curgerii râului viteza sa față de mal este  $v_1 = u + v$ , iar când se mișcă în sensul opus, este  $v_2 = v - u$ .

Din aceste două relații obținem:

$$2v = v_1 + v_2 \Rightarrow v = \frac{v_1 + v_2}{2} = 10 \text{ m/s}; \quad 2u = v_1 - v_2 \Rightarrow u = \frac{v_1 - v_2}{2} = 5 \text{ m/s}.$$



**Exercițiul 1.1.2.** Un avion zboară cu viteza  $v_0 = 360$  km/h față de aer. Vântul suflă de la vest la est cu viteza  $v = 20$  m/s. Avionul trebuie să înainteze spre nord. Aflați: a) viteza avionului față de sol,  $v_a$ ; b) unghiul  $\alpha$  făcut de axa longitudinală a avionului cu meridianul.

**Soluție:** Viteza avionului față de sol,  $v_a$ , trebuie să fie orientată spre nord (fig. 1.1.5). Conform regulii de compunere a vitezelor avem:  $\vec{v}_a = \vec{v} + \vec{v}_0$ . Proiectând această relație vectorială pe axele  $Ox$  și  $Oy$  obținem:

$$Ox: \quad 0 = v - v_0 \cdot \sin \alpha \Rightarrow v = v_0 \cdot \sin \alpha;$$

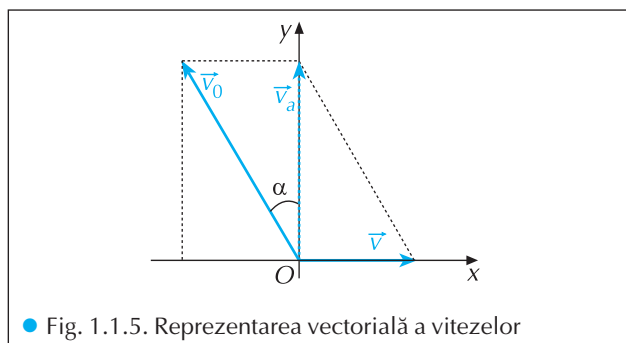
$$Oy: \quad v_a = v_0 \cdot \cos \alpha.$$

Atunci:

$$v_a^2 = v_0^2 - v^2 \Rightarrow v_a = \sqrt{v_0^2 - v^2} \approx 98 \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

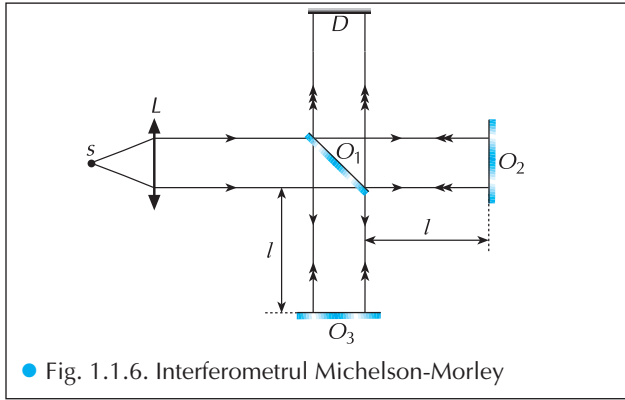
În plus,

$$\sin \alpha = \frac{v}{v_0} = 0,2; \quad \alpha = \arcsin 0,2 \cong 12^\circ.$$



## 1.1.2. Experimentul Michelson-Morley

Experimentul Michelson-Morley își propune să verifice dacă, în cazul luminii, se aplică regula clasică de compunere a vitezelor.



• Fig. 1.1.6. Interferometrul Michelson-Morley

Albert Michelson a construit în 1881 un interferometru pentru a face această verificare. Schema acestui interferometru, perfecționat ulterior împreună cu Morley, este prezentată în figura 1.1.6. Lumina provenită de la sursa  $s$  este transmisă prin lentila  $L$  pe oglinda semiargintată  $O_1$  care joacă rol de divizor de fascicul. O parte din fascicul este transmisă spre oglinda  $O_2$ , se reflectă pe aceasta, se întoarce și este reflectată (parțial) de oglinda  $O_1$  spre detectorul  $D$ . Cealaltă parte a fasciculului inițial este reflectată pe  $O_1$  spre oglinda  $O_3$ , se reflectă pe aceasta, se întoarce și este transmisă (parțial) de  $O_1$  spre detectorul  $D$ .

Cele două fascicule care ajung în  $D$  interferează și dau o figură de interferență.

Acesta este instrumentul cu care se efectuează experimentul Michelson-Morley.

Se consideră două sisteme de referință inerțiale, unul,  $S$ , legat de stelele fixe și altul,  $S'$ , legat de Pământ, în care se află interferometrul Michelson.  $S'$  se află în mișcare față de  $S$ ; viteza lui este viteza orbitală a Pământului,  $v$  ( $\approx 30$  km/s).

Fie  $c$  viteza luminii în  $S$ . Atunci, conform regulii clasice de compunere a vitezelor, în  $S'$  viteza luminii care se propagă în interferometru de la  $O_1$  la  $O_2$  este  $c' = c - v$  (fig. 1.1.7-a), iar viteza luminii care se propagă de la  $O_2$  la  $O_1$  este  $c'' = c + v$  (fig. 1.1.7-b). Atunci, timpul total în care lumina parcurge în  $S'$  traseul  $O_1O_2O_1$  este

$$t_1 = \frac{l}{c-v} + \frac{l}{c+v} = \frac{2l}{c} \cdot \frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}}.$$

În cazul propagării luminii pe traseul  $O_1O_3O_1$  situația este prezentată în figura 1.1.8-a, b. Lumina trebuie să aibă în  $S'$  o astfel de viteză ( $u$  și, respectiv,  $u'$ ) încât, prin compunere cu viteza de transport a lui  $S'$ ,  $v$ , să rezulte viteza  $c$  în  $S$ . Din figură rezultă că viteza luminii în  $S'$  este dată, pe ambele trasee,  $O_1O_3$  și  $O_3O_1$ , de expresia

$$\sqrt{c^2 - v^2}.$$

Corespunzător, timpul total în care este parcurs traseul  $O_1O_3O_1$  (în  $S'$ ) este

$$t_2 = \frac{2l}{\sqrt{c^2 - v^2}} = \frac{2l}{c} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Deoarece  $v/c = 10^{-4} \ll 1$  se pot folosi aproximațiile

$$\frac{1}{1-x} \approx 1+x, \quad \sqrt{1-x} \approx 1 + \frac{1}{2} \cdot x, \quad |x| \ll 1.$$

Se obțin atunci, pentru  $t_1$  și  $t_2$ , expresiile

$$t_1 \approx \frac{2l}{c} \cdot \left(1 + \frac{v^2}{c^2}\right), \quad t_2 = \frac{2l}{c} \cdot \left(1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{v^2}{c^2}\right).$$

Diferența între timpii de parcurgere ai celor două trasee,  $O_1O_2O_1$  și  $O_1O_3O_1$ , este

$$\Delta t \equiv \frac{l \cdot v^2}{c^3}.$$

Se rotește interferometrul cu  $90^\circ$  astfel încât traseul  $O_1O_3O_1$  să fie orientat pe direcția mișcării Pământului, iar  $O_1O_2O_1$  perpendicular pe această direcție. Diferența între timpii de parcurgere ai traseelor are aceeași valoare absolută dar are sens opus față de cazul anterior. Corespunzător, diferența de fază dintre cele două unde în planul detectorului se schimbă și, de aceea, se modifică și pozițiile maximelor de interferență.

**Esența experimentului Michelson-Morley constă în măsurarea deplasării franjelor de interferență ca urmare a rotației interferometrului.**

Suma modulelor diferențelor de timp corespunzătoare celor două poziții ale interferometrului este  $2 \cdot \Delta t$ . Corespunzător, deplasarea franjelor, în număr de franje, este

$$n = \frac{2 \cdot \Delta t}{T} \equiv \frac{c}{\lambda} \cdot \frac{2 \cdot l \cdot v^2}{c^3} = \frac{2 \cdot l}{\lambda} \cdot \frac{v^2}{c^2},$$

unde  $T = \lambda/c$  este perioada undelor de lumină.

În experimentul efectuat de Michelson și Morley lungimea brațelor interferometrului a fost  $l = 11$  m, iar lungimea de undă  $\lambda = 5,9 \cdot 10^{-7}$  m. Folosind valorile numerice date se obține  $n = 0,37$  franje. Sensibilitatea interferometrului permitea observarea unei deplasări de 0,01 franje. *Experimental s-a constatat că la rotirea interferometrului nu apărea nici o deplasare a franjelor de interferență.*

Calcululele precedente, care au condus la expresia lui  $n$ , sunt bazate pe regula clasică de compunere a vitezelor dată de mecanica newtoniană. Experimentul Michelson-Morley arată deci că **regula clasică de compunere a vitezelor nu este aplicabilă în cazul luminii.**

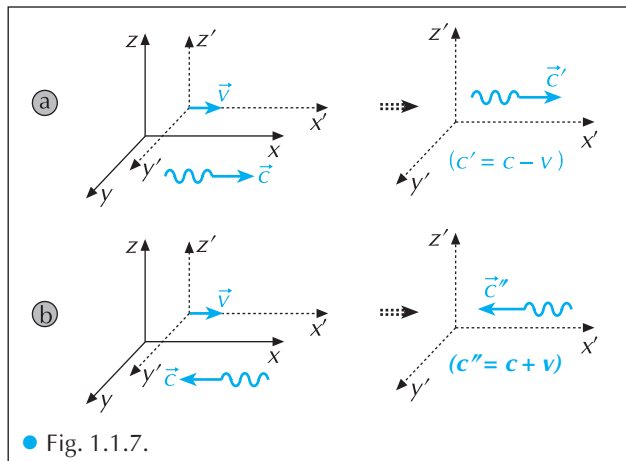


Fig. 1.1.7.

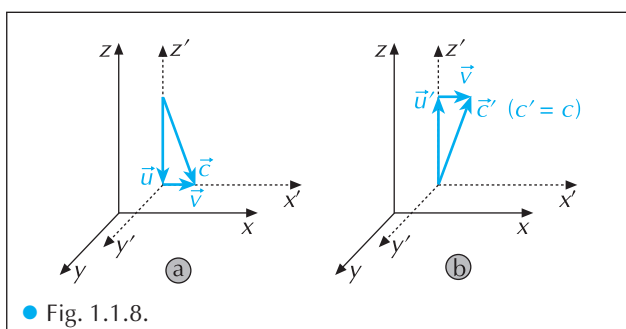


Fig. 1.1.8.

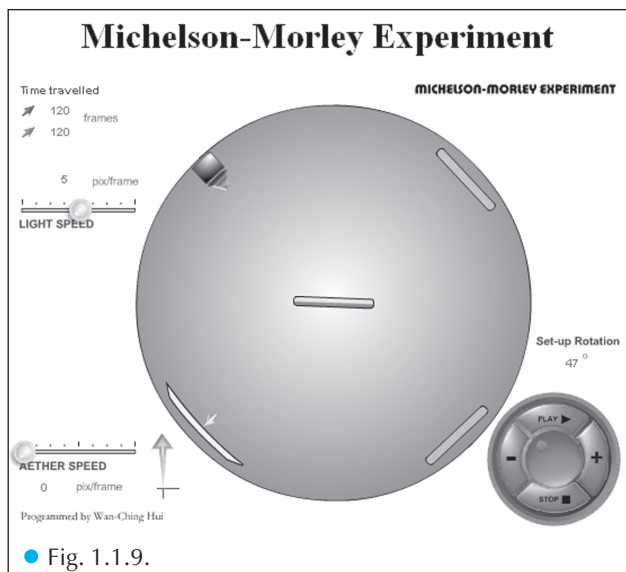


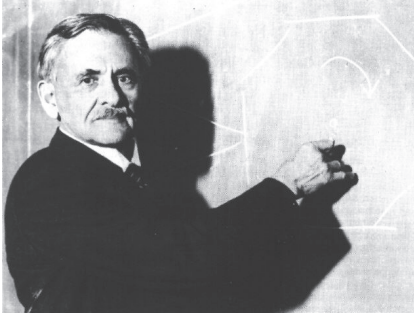
Fig. 1.1.9.



**Experiment virtual:** la adresa: [http://galileoandstein.physics.virginia.edu/more\\_stuff/flashlets/mmxpt6.htm](http://galileoandstein.physics.virginia.edu/more_stuff/flashlets/mmxpt6.htm), veți găsi o modelare a experimentului Michelson-Morley (fig. 1.1.9). Încercați să măsurați intervalele de timp necesare luminii pentru a călători între sursă și oglinzile interferometrului. Rotiți interferometrul, reluați procedura și veți verifica independența vitezei luminii de direcția ei de propagare.

## LECTURĂ

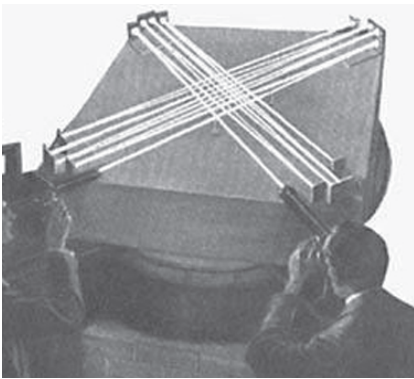
### ALBERT ABRAHAM MICHELSON



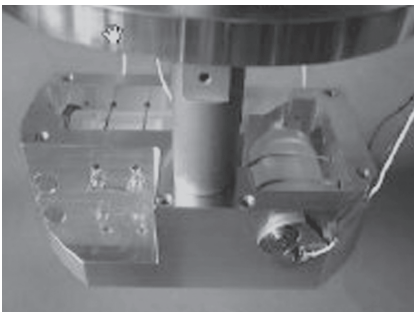
Albert Abraham Michelson



Edward Williams Morley



Interferometrul Michelson – Morley



Versiunea actuală a interferometrului Michelson – Morley

**Albert Abraham Michelson**, fizician american de naționalitate germană, a determinat viteza luminii ca o constantă fundamentală și a efectuat cercetări spectroscopice și metrologice. A primit premiul Nobel pentru fizică în anul 1907.

La 17 ani Michelson a fost admis la Academia Navală de la Annapolis a Statelor Unite. A absolvit academia în 1873 iar, apoi, în perioada 1875 – 1879 a fost instructor de științe la aceeași academie.

În 1878 Michelson a început să studieze problema determinării cu mare precizie a vitezei luminii. Deoarece rezolvarea acestei probleme necesita cunoștințe avansate de optică, el a plecat în 1880 în Europa, unde a studiat timp de doi ani la Berlin, Heidelberg și Paris, demisionând în 1881 din marina SUA. După întoarcerea în Statele Unite, el a determinat valoarea vitezei luminii ca fiind de 299 853 km/s.

Încă din perioada în care studia în Europa, Michelson a început să construiască un interferometru, dispozitiv destinat pentru separarea unui fascicul de lumină în două fascicule care să se propage pe două direcții perpendiculare, pentru ca apoi să le unească, din nou într-un singur fascicul. Din numărul și lărgimea franjelor de interferență se putea compara viteza luminii pe cele două direcții perpendiculare de propagare.

Din 1883 a fost profesor de fizică la *Case School of Applied Science*, în Cleveland, unde a continuat să perfecționeze experimentul său cu interferometrul. Din 1887, cu ajutorul chimistului **Edward Williams Morley**, a reușit să ajungă la rezultate și mai rafinate privind ceea ce numim astăzi experimentul Michelson – Morley.

Michelson a argumentat că, folosind lumină monocromatică cu o anumită lungime de undă, se poate elabora un standard pentru determinarea unei unități de măsură a distanțelor. Propunerea sa a fost general acceptată abia în 1960.

Folosind interferometrul construit de el, Michelson:

a) a determinat în 1893, metrul standard, prin utilizarea luminii roșii emise de o probă de cadmiu încălzită;

b) a măsurat în 1920, prin utilizarea unui interferometru cu brațele de 6 metri și a unui telescop cu diametrul de 254 cm, diametrul stelei Betelgeuse ca fiind de 386.160.000 km (de 300 de ori mai mare decât diametrul Soarelui). Aceasta a fost prima determinare destul de precisă a dimensiunilor unei stele.

În 1923 Michelson a revenit la problema determinării precise a vitezei luminii. Prin perfecționarea interferometrului construit de el, Michelson a găsit pentru viteza luminii valoarea de 299 774 km/s. Această valoare era cu numai 2 km/s mai mare decât cea acceptată în anii 1970.

Într-o versiune modernă a experimentului Michelson-Morley, un grup de cercetători de la Universitățile Konstanz și Duesseldorf din Germania au trimis fascicule laser în două cavități identice de safir, perpendiculare una pe cealaltă. Analiza undelor staționare formate, a căror frecvență depinde de dimensiunile cavităților și de viteza de propagare a luminii în acea direcție, a relevat inexistența oricăror diferențe, confirmând încă o dată constanța vitezei luminii.

## 1.2. Postulatele teoriei relativității restrânse. Transformările Lorentz. Consecințe

Experimentul Michelson-Morley arată că figura de interferență nu se modifică la rotirea interferometrului. Aceasta înseamnă că timpul în care lumina parcurge brațele interferometrului nu depinde de poziția aparatului. De aici rezultă că viteza luminii în sistemul de referință inerțial  $S'$  nu depinde de direcția și de sensul ei de deplasare în acest SRI, în contradicție cu rezultatul teoretic bazat pe regula clasică de compunere a vitezelor.

„Exemple asemănătoare și eșecul încercărilor de a detecta o mișcare a Pământului în raport cu «mediul ușor» conduc la presupunerea că nu numai în mecanică, dar nici în electrodinamică fenomenele nu au vreo proprietate corespunzând ideii de repaus absolut, ci în toate sistemele de coordonate în care sunt valabile aceleași legi electrodinamice și optice, după cum a fost deja demonstrat pentru cantitățile din prima categorie.” (Albert Einstein)

Rezultatul experimentului Michelson-Morley se explică simplu dacă se acceptă **principiul constanței vitezei luminii**.

**Enunț:** Viteza luminii este independentă atât de starea de mișcare a sursei luminoase cât și de cea a observatorului, și este aceeași în toate sistemele de referință inerțiale, în toate direcțiile.

**Observație:** Principiul constanței vitezei luminii a fost formulat în anul 1905 de A. Einstein (1879 - 1955).

În plus, Albert Einstein a generalizat și principiul relativității galileene din mecanica clasică, extinzându-l la toate fenomenele fizicii. În această formă generală el este numit **principiul relativității restrânse** al lui Einstein.

**Enunț:** Starea de repaus sau de mișcare rectilinie uniformă a unui SRI nu poate fi pusă în evidență prin nici un experiment fizic efectuat în interiorul acestui sistem de referință; legile fizicii au aceeași formă în raport cu orice SRI.

### Observații:

- 1) Pe baza acestor două principii Albert Einstein a dezvoltat teoria relativității restrânse (1905).
- 2) Denumirea de relativitate *restrânsă* reflectă faptul că această teorie ia în considerare numai sistemele de referință inerțiale. Ulterior (1911) Einstein a generalizat această teorie luând în considerare și sistemele de referință neinerțiale. Această nouă teorie este numită **teoria relativității generale** sau, uneori, **teoria relativistă a gravitației**.

„Principiul relativității poate fi în general formulat astfel: Legile naturii percepute de un observator sunt *independente de mișcare* lui... Combinând acest principiu al relativității cu constanța vitezei luminii în vid, ajungem pe cale pur deductivă la ceea ce se numește astăzi «teoria relativității»... Semnificația ei constă în faptul că furnizează condițiile pe care trebuie să le satisfacă orice lege generală a naturii, deoarece teoria ne spune că fenomenele naturale se petrec astfel încât legile nu depind de mișcarea observatorului la care sunt raportate spațial și temporal fenomenele.” (Albert Einstein)

În mecanica newtoniană timpul este considerat absolut, în sensul că, așa cum scrie Newton, el se scurge „uniform și fără vreo legătură cu vreun obiect exterior”. Aceasta înseamnă că, dacă două evenimente sunt simultane într-un SRI, ele sunt simultane în orice alt SRI. În plus, dacă un fenomen are o anumită durată într-un SRI, el va avea aceeași durată în orice alt SRI. De exemplu, dacă se lasă un corp să cadă dintr-un tren aflat în mișcare rectilinie uniformă atunci durata căderii corpului până pe sol este aceeași fie că este măsurată în tren, fie că este măsurată pe sol.

Această concepție asupra timpului, scrie Einstein, „ar fi întemeiată din punct de vedere fizic dacă s-ar putea trimite la distanță semnale instantanee sau dacă s-ar ști că starea de mișcare a unui ceasornic nu are influență asupra mersului său”.

În mecanica newtoniană energia cinetică este dată de expresia  $E_c = m \cdot v^2/2$ . Atunci  $v^2 = 2E_c/m$ . W. Bertozzi a efectuat un experiment în care a determinat viteza unor pulsuri de electroni, accelerați inițial în câmp electric, în funcție de energia lor cinetică. Aceasta este determinată de tensiunea de accelerare:  $E_c = e \cdot U$ . În figura 1.2.1 este prezentată dependența dată de mecanica clasică și rezultatele obținute experimental de Bertozzi. Acest experiment arată, ca și multe altele, că  $c$  este viteza limită pentru mișcarea corpurilor. Lumina se propagă cu viteza  $c$ . Nu există deci nici o posibilitate de a transmite semnale instantanee. Semnalele cele mai rapide care pot fi transmise sunt cele luminoase.

Să considerăm un SRI  $S$  și un ceasornic plasat în originea acestuia. Acest ceasornic nu poate fi utilizat pentru a determina intervalul de timp dintre evenimente care au loc la distanță de el. În adevăr, deoarece nu se pot transmite semnale instantanee nu se pot compara din punct de vedere al timpului evenimentele respective.

Einstein consideră că „pentru completarea definiției timpului se poate folosi principiul constanței vitezei luminii în vid”.

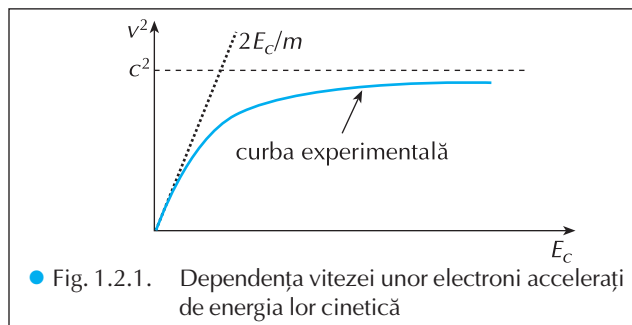
Se consideră ceasornice *identice* plasate în originea lui  $S$  și într-un punct oarecare, la distanța  $d$  de origine, ambele în repaus față de  $S$ . Când ceasornicul din origine arată  $t_1 = 0$  se transmite un semnal luminos spre al doilea ceasornic. Când primește semnalul luminos al doilea ceasornic trebuie să indice timpul  $t_2 = d/c$ . Un ceasornic plasat în orice punct, în repaus față de  $S$ , este astfel **sincronizat** cu ceasornicul din originea lui  $S$ . Cu ceasornicele astfel sincronizate se poate determina timpul corespunzător evenimentelor care au loc în orice punct din sistemul de referință inerțial considerat.

**Observații:**

1) Acest mod de definire a timpului se referă numai la cel al lui  $S$  deoarece se utilizează ceasornice aflate în repaus față de  $S$ .

2) Prin **eveniment** se înțelege un fenomen care are loc într-un punct determinat, de coordonate  $(x, y, z)$ , la un moment dat de timp,  $t$ . Un eveniment este deci caracterizat de 4 (patru) mărimi  $(x, y, z, t)$  numite **coordonate spațio-temporale**.

Această definire a timpului prin sincronizarea ceasornicelor are o consecință majoră: **simultaneitatea a două evenimente este relativă** și nu absolută, ca în mecanica newtoniană. În adevăr,



doă evenimente care au loc în punctele  $A$  și  $B$  sunt simultane dacă două semnale luminoase emise din  $A$  și  $B$  în momentele în care au loc cele două evenimente ajung în același moment în punctul  $C$ , situat la mijlocul segmentului  $AB$ . Pentru un observator aflat în repaus în  $C$ , în condițiile de mai sus, cele două evenimente sunt simultane. Dacă observatorul se mișcă rectiliniu uniform de la  $A$  spre  $B$  cele două evenimente nu mai sunt simultane. Dacă în SRI  $S$  cele două

evenimente au loc simultan, în SRI  $S'$ , legat de observatorul în mișcare, evenimentul din  $B$  are loc la un moment *anterior* momentului la care are loc evenimentul din  $A$ . Din principiul constanței vitezei luminii rezultă deci că simultaneitatea evenimentelor este relativă, adică nu se conservă la schimbarea sistemului de referință.

### Relativitatea timpului

Se consideră un SRI  $S'$  în mișcare cu viteza  $v$  față de un SRI  $S$  (mișcarea se face pe direcția  $Ox$ , fig. 1.2.2-a). Se consideră o oglindă aflată în repaus în  $S'$  la distanța  $d$  de axa  $O'x'$  și un observator aflat în repaus în originea  $O'$  a lui  $S'$ . Observatorul emite un semnal luminos pe direcția  $O'y'$ . Semnalul luminos se propagă până la oglindă, este reflectat de aceasta în punctul  $A$  și se întoarce în  $O'$ . Cele două evenimente din  $S'$ , emisia și, respectiv, recepția semnalului luminos, au loc în același punct ( $O'$ ) din  $S'$ . Intervalul de timp dintre cele două evenimente, măsurat cu un ceasornic aflat în repaus în  $O'$ , este  $\Delta t'$ . Deoarece distanța parcursă de semnalul luminos cu viteza  $c$  este, în  $S'$ ,  $2d$ , se găsește că:

$$\Delta t' = \frac{2d}{c}.$$

Se presupune că la plecarea semnalului luminos originile  $O$  și  $O'$  au coincis. Urmărind fenomenele din  $S$  (fig. 1.2.2-b) se constată că semnalul luminos parcurge traseul  $OAB$ . Punctul  $B$  coincide cu poziția lui  $O'$  în momentul recepției semnalului luminos. Lungimea traseului  $OAB$  este dată de expresia

$$2L = 2\sqrt{d^2 + \frac{v^2 \cdot \Delta t^2}{4}}.$$

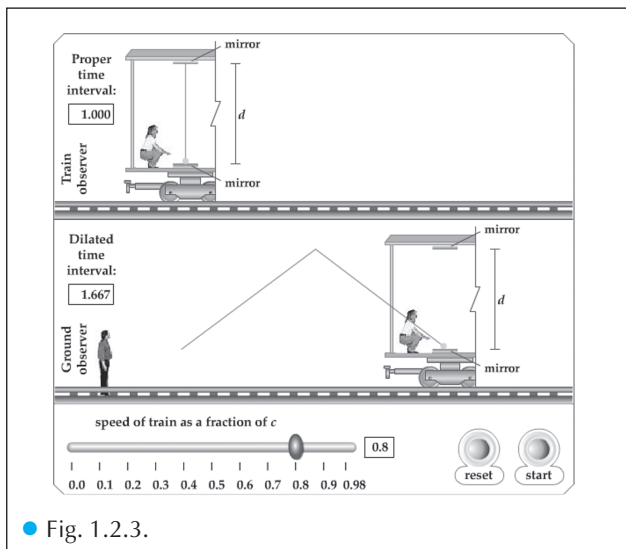
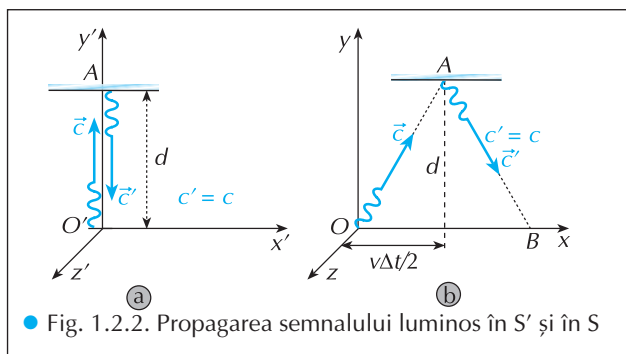
Corespunzător, intervalul de timp,  $\Delta t$ , în care este parcursă această distanță, măsurat cu ceasornice sincronizate, în repaus față de SRI  $S$ , este dat de expresia

$$\Delta t = \frac{2L}{c} = \frac{2}{c} \cdot \sqrt{d^2 + \frac{v^2 \cdot \Delta t^2}{4}}.$$

**Observație:** Observatorul  $O'$  din  $S'$  poate folosi un singur ceasornic pentru măsurarea timpului, plasat în originea SRI  $S'$ , deoarece ambele evenimente, emisia și recepția semnalului luminos, au loc în același punct din  $S'$ . În schimb, observatorul  $O$  aflat în repaus în originea SRI  $S$  trebuie să folosească *două* ceasornice sincronizate, plasate în  $O$  și  $B$  (fig. 1.2.2-b).

Eliminând  $d$  din expresiile lui  $\Delta t$  și  $\Delta t'$  se obține relația

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$



**Experiment virtual:** la adresa: [http://www.uwsp.edu/physastr/kmenning/flash/AF\\_3906.swf](http://www.uwsp.edu/physastr/kmenning/flash/AF_3906.swf), puteți studia dilatarea intervalelor de timp în sistemul de referință legat de pământ, față de sistemul propriu de referință (fig. 1.2.3). Același fenomen poate fi studiat și la adresa: [http://www.walter-fendt.de/ph14ro/timedilation\\_ro.htm](http://www.walter-fendt.de/ph14ro/timedilation_ro.htm).

Deoarece radicalul de la numitor este subunitar rezultă că intervalul de timp  $\Delta t'$  este mai mic decât  $\Delta t$ . Intervalul de timp  $\Delta t'$  măsurat în același punct al unui SRI este numit **țimp propriu**. Relația precedentă arată că **intervalul de timp dintre două evenimente, măsurat într-un alt SRI, este întotdeauna mai mare decât țimpul propriu**. Acest efect este numit **dilatarea timpului**.

**Observație:** Pentru viteze de transport foarte mici comparativ cu viteza luminii, din relația precedentă rezultă că  $\Delta t = \Delta t'$ , în acord cu relativitatea galileeană.

Efectul de dilatare a timpului este dovedit de numeroase rezultate experimentale. Pe baza acestui efect se explică detectarea la nivelul solului a unor particule elementare, mezonii  $\mu$ , care sunt generate în atmosferă la înălțimi de 20 – 30 km. Aceste particule au un timp de viață propriu  $\Delta t' = 1,5 \cdot 10^{-6}$  s (măsurat cu un ceasornic aflat în repaus în SRI care se mișcă solidar cu mezonul) și se deplasează, față de Pământ, cu o viteză aproximativ egală cu  $0,9998 \cdot c$ . Presupunând că  $c = 3 \cdot 10^8$  m/s, rezultă că distanța parcursă în acest timp este aproximativ egală cu 450 m și deci, aparent, mezonii  $\mu$  nu ar putea fi detectați la nivelul solului. De fapt nu trebuie luat în considerare intervalul de timp propriu  $\Delta t'$ , ci intervalul de timp  $\Delta t$  dintre generarea mezonului și, respectiv, detectarea lui măsurat cu ceasornice sincronizate **aflate în repaus în raport cu solul**. Folosind expresia relativistă a lui  $\Delta t$  se obține  $\Delta t = 7,5 \cdot 10^{-5}$  s. În acest timp mezonul parcurge o distanță de aproximativ 22,5 km. Astfel se explică faptul că mezonii  $\mu$  pot fi detectați la nivelul solului.



**Exercițiul 1.2.1.** O rachetă se deplasează față de Pământ cu viteza  $0,8 c$ . După 1200 s de la pornire, măsurate de ceasul rachetei, se trimite un semnal luminos spre Pământ. Aflați: a) când sosește semnalul pe Pământ, după ceasul rachetei; b) când sosește semnalul pe Pământ, după un ceas de pe Pământ.

**Soluție:** Un observator din rachetă constată că în timpul  $\tau_0 = 1200$  s racheta a parcurs distanța

$$D_0 = v \cdot \tau' = 0,08 \cdot c \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 1200 \text{ s} = 960 \cdot c \text{ m.}$$

Pentru observatorul din rachetă, semnalul luminos parcurge această distanță în timpul:

$$\tau'_0 = \frac{D_0}{c} = 960 \text{ s.}$$

Aceasta înseamnă că, după ceasul rachetei, semnalul luminos ajunge pe Pământ la momentul:

$$T_0 = \tau_0 + \tau'_0 = 1200 \text{ s} + 960 \text{ s} = 2160 \text{ s.}$$

Pentru un observator de pe Pământ semnalul luminos este emis la momentul:

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{1200 \text{ s}}{\sqrt{1 - 0,8^2}} = 2000 \text{ s.}$$

În acest timp racheta a ajuns la distanța:

$$D = v \cdot \tau = 0,8 \cdot c \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 2000 \text{ s} = 1600 \cdot c \text{ m.}$$

Pentru a parcurge această distanță până la Pământ semnalul luminos are nevoie de timpul:

$$\tau' = \frac{D}{c} = 1600 \text{ s.}$$

Aceasta înseamnă că, după ceasul de pe Pământ, semnalul luminos ajunge la Pământ la momentul:

$$T = \tau + \tau' = 2000 \text{ s} + 1600 \text{ s} = 3600 \text{ s.}$$

## Relativitatea lungimilor

Se consideră o tijă aflată în repaus în SRI  $S'$ , așezată în lungul axei  $O'x'$  (fig. 1.2.4-a). Tija are fixată la un capăt o oglindă, iar la celălalt capăt o sursă de lumină. Notăm cu  $L'$  lungimea tijei în SRI  $S'$  în care ea se află în repaus. Timpul necesar unui semnal luminos pentru a parcurge traseul sursă-oglină-sursă (fig. 1.2.4-a, b) este

$$\Delta t' = \frac{2 \cdot L'}{c}.$$

Fie un SRI  $S$  care are axele paralele cu axele lui  $S'$  și care se deplasează în lungul axei  $O'x'$ , în sensul negativ al acestei axe, cu viteza de transport  $v$ . Să considerăm propagarea semnalului luminos în SRI  $S$ . În figura 1.2.4-c este prezentată situația în momentul emiterii semnalului luminos: se presupune că originile celor două sisteme de referință inerțiale coincid în acest moment. În momentul în care semnalul luminos ajunge la oglindă și se reflectă (fig. 1.2.4-d) tija este deplasată față de poziția inițială cu distanța  $d = v \cdot \Delta t_1$ . Corespunzător, drumul parcurs de semnalul luminos până la reflexie este

$$L + v \cdot \Delta t_1 = c \cdot \Delta t_1,$$

deci 
$$\Delta t_1 = \frac{L}{c - v}.$$

După reflexia pe oglindă, până la recepția sa la sursă, semnalul luminos parcurge distanța

$$L - v \cdot \Delta t_2 = c \cdot \Delta t_2,$$

deci 
$$\Delta t_2 = \frac{L}{c + v}.$$

Timpul total necesar semnalului luminos pentru a parcurge traseul sursă-oglină-sursă, măsurat în SRI  $S$ , este dat de expresia

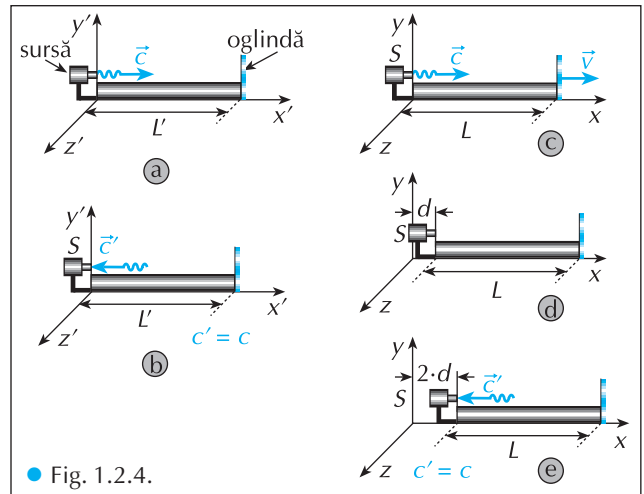
$$\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2 = \frac{2 \cdot L}{c} \cdot \frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}}.$$

Folosind expresiile obținute aici în relația care dă dilatarea timpului se găsește în final că:

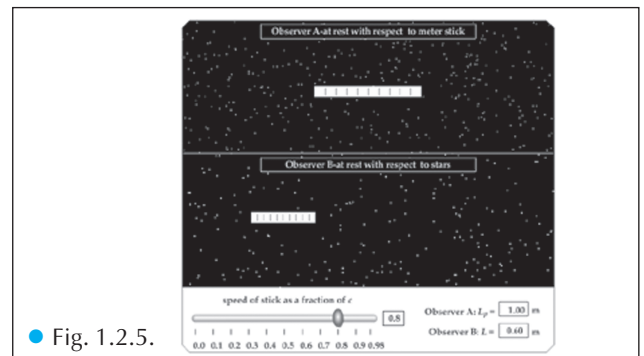
$$L = L_0 \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}.$$

Din această relație se constată că:

**lungimea tijei într-un sistem de referință inerțial față de care ea se mișcă rectiliniu uniform este mai mică decât lungimea ei în sistemul de referință inerțial în care ea se află în repaus.**



● Fig. 1.2.4.



● Fig. 1.2.5.



**Experiment virtual:** la adresa: [http://www.uwsp.edu/physastr/kmenning/flash/AF\\_3911.swf](http://www.uwsp.edu/physastr/kmenning/flash/AF_3911.swf), puteți studia contracția lungimii unei tijei aflate pe direcția de mișcare, în sistemul de referință față de care tija se mișcă rectiliniu uniform (fig. 1.2.5).

**Observații:**

- 1) Lungimea tijei,  $L_0$ , măsurată în SRI care se mișcă solidar cu ea, este numită **lungime proprie**. Lungimea tijei în orice alt SRI, față de care tija se mișcă rectiliniu uniform, este mai mică decât lungimea proprie. Acest fenomen este numit **contractia lungimilor**.
- 2) Pentru o viteză de transport mult mai mică decât viteza luminii, din relația precedentă rezultă  $L = L'$ , în acord cu relativitatea galileeană.
- 3) Este important de reținut că **tija nu se modifică** în nici un fel. Relația precedentă arată numai că, datorită principiului constanței vitezei luminii, măsurând lungimea tijei în SRI diferite, aflate în mișcare unul față de altul, se obțin rezultate diferite.
- 4) Procedura utilizată în această secțiune, de a imagina un aranjament experimental și de a raționa pe configurația imaginată, este numită **experiment mental**.



**Exercițiul 1.2.2.** Procedând ca în această secțiune construiți un experiment mental și arătați că, în cazul în care tija este orientată *perpendicular* pe direcția vitezei de transport, deci paralel cu una dintre axele  $O'y'$  sau  $O'z'$  (vezi figura 1.2.4), *fenomenul de contracție nu se manifestă*.

**Transformarea Lorentz**

Transformarea de coordonate Galilei din mecanica newtoniană conduce la o regulă de compunere a vitezelor care este invalidată de principiul constanței vitezei luminii în cazul vitezelor de transport comparabile cu  $c$ . Se pune problema de a găsi o altă transformare de coordonate care să fie în acord nu numai cu principiul relativității ci și cu principiul constanței vitezei luminii. Această transformare de coordonate, mai generală, în acord cu principiul constanței vitezei luminii, este numită **transformarea Lorentz**.

**Observație:** Primul fizician care a folosit transformarea Lorentz a fost W. Voigt (1887). J. Larmor a folosit transformarea Lorentz pentru a explica (1900) rezultatul experimentului Michelson-Morley. În 1904 H.A. Lorentz a dedus aceste transformări din condiția ca ecuațiile Maxwell din electrodinamică să fie **covariante** (adică să își mențină forma) la trecerea de la un SRI la altul. Reamintim că ecuațiile Maxwell sunt ecuațiile pe baza cărora este dezvoltată teoria câmpului electromagnetic.

Se consideră două sisteme de referință inerțiale,  $S$  și  $S'$ , având axele corespunzătoare paralele. Se presupune că  $S'$  se mișcă față de  $S$  cu viteza  $v$  în lungul axei  $Ox$ . Sunt valabile relațiile  $y' = y$ ,  $z' = z$ . Pornind de la transformarea Galilei presupunem că relația de transformare pentru coordonata  $x$  este o transformare liniară, generalizată prin introducerea unui factor,  $k$ , de proporționalitate

$$x' = k \cdot (x - v \cdot t).$$

Conform principiului relativității – în ambele SRI trebuie să rezulte aceleași legi fizice – se poate scrie o relație analogă pentru  $x$

$$x = k \cdot (x' + v \cdot t').$$

Dar, conform metodei de sincronizare a ceasornicelor discutată anterior,  $t = x/c$ , iar  $t' = x'/c$ . Folosind aceste relații se găsește că:

$$x' = k \cdot \left(1 - \frac{v}{c}\right) \cdot x, \quad x = k \cdot \left(1 + \frac{v}{c}\right) \cdot x'.$$

Înmulțind aceste două relații membru cu membru se găsește pentru  $k$  expresia

$$k = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Folosind această expresie se pot scrie relațiile de transformare

$$x' = \frac{x - v \cdot t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad x = \frac{x' + v \cdot t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

din care rezultă apoi, folosind relațiile  $t' = \frac{x'}{c}$  și  $t = \frac{x}{c}$ ,

$$t' = \frac{t - \frac{v}{c^2} \cdot x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad t = \frac{t' + \frac{v}{c^2} \cdot x'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Transformarea Lorentz care face trecerea de la coordonatele din SRI  $S$  la cele din SRI  $S'$  este dată de relațiile

$$x' = \frac{x - v \cdot t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = \frac{t - \frac{v}{c^2} \cdot x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Transformarea Lorentz inversă, care face trecerea de la coordonatele din  $S'$  la cele din  $S$  este dată de relațiile

$$x = \frac{x' + v \cdot t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad y = y', \quad z = z', \quad t = \frac{t' + \frac{v}{c^2} \cdot x'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

### Observații:

- 1) Când  $v \ll c$  ecuațiile transformării Lorentz se reduc la forma ecuațiilor de transformare Galilei.
- 2) Din ecuațiile transformării Lorentz rezultă că viteza luminii,  $c$ , este viteză limită în natură. În adevăr, pentru o viteză de transport  $v > c$  expresia de sub radical devine negativă, iar radicalul devine imaginar.



**Exercițiul 1.2.3.** Folosind relațiile de transformare Lorentz deduceți expresiile obținute anterior pentru dilatarea timpului și, respectiv, contracția lungimilor.

**Soluție:** Se consideră un SRI  $S'$  aflat în mișcare cu viteza  $v$  față de un SRI  $S$  (mișcarea se face pe direcția comună a axelor  $Ox$  și  $O'x'$ ). Considerăm apoi două evenimente care au loc în același punct din SRI  $S'$  la momentele  $t'_1$  și  $t'_2$ . Conform relațiilor de transformare Lorentz, cele două evenimente, văzute de un observator din  $S$ , au loc la momentele:

$$t_2 = \frac{t'_2 + \frac{v}{c^2} \cdot x'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad t_1 = \frac{t'_1 + \frac{v}{c^2} \cdot x'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

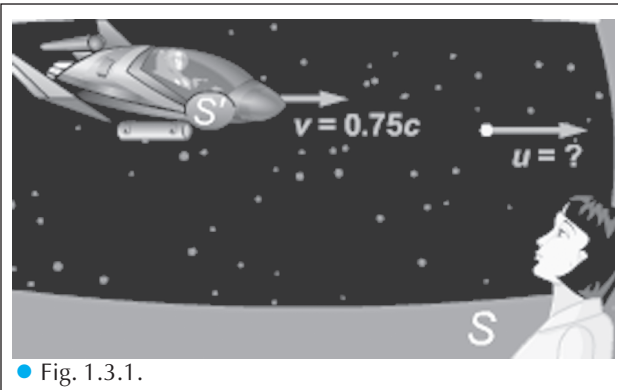
Din aceste două relații rezultă că:

$$\Delta t \equiv t_2 - t_1 = \frac{t_2' - t_1'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

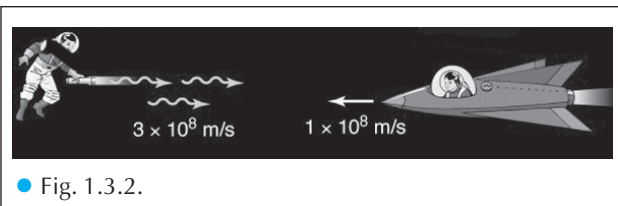
Procedând în mod asemănător deduceți relația pentru contracția lungimilor.

## 1.3. Elemente de cinematică și dinamică relativistă

### 1.3.1. Compunerea vitezelor\*



● Fig. 1.3.1.



● Fig. 1.3.2.

Lumina punctiformă din imaginea din figura 1.3.1 se deplasează față de rachetă cu viteza  $u = 0,6 c$ . Ce viteză are ea față de observatorul inerțial  $S$ ?

În acord cu mecanica newtoniană, viteza cu care se propagă fasciculul de lumină emis de către lanterna comonautului din figura 1.3.2, față de racheta care se apropie ar trebui să aibă valoarea de  $4 \cdot 10^8$  m/s. Potrivit Teoriei Relativității Restrânse, viteza de propagare a fasciculului față de rachetă va fi  $3 \cdot 10^8$  m/s.

Considerăm un sistem de referință inerțial,  $S$ , și un altul,  $S'$ , având axele paralele cu cele corespunzătoare ale lui  $S$  și aflat în mișcare cu viteza de transport  $V$  în lungul axei  $Ox$ . Un observator aflat în repaus în  $S'$  studiază mișcarea unui corp aflat în mișcare rectilinie uniformă față de  $S'$  după direcția axei  $O'x'$ . El constată că la

momentul  $t_1'$  corpul este situat într-un punct de coordonată  $x_1'$ , iar la un moment ulterior  $t_2'$  este situat într-un punct de coordonată  $x_2'$ . Viteza corpului față de SRI  $S'$ ,  $v'$ , este dată de relația

$$v'_x = \frac{x_2' - x_1'}{t_2' - t_1'}.$$

Folosind ecuațiile transformării Lorentz se găsește că diferențele din expresia de mai sus sunt date de relațiile

$$x_2 - x_1 = \frac{\Delta x - V \cdot \Delta t}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}, \quad t_2 - t_1 = \frac{\Delta t - \frac{V}{c^2} \cdot \Delta x}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}},$$

unde  $\Delta x = x_2 - x_1$ ,  $\Delta t = t_2 - t_1$ . Folosind aceste două relații în expresia lui  $v'_x$  se obține relația relativistă de compunere a vitezelor

$$v'_x = \frac{v_x - V}{1 - \frac{V}{c^2} \cdot v_x}.$$

\* Acest conținut NU este obligatoriu la filiera tehnologică, pentru calificările profesionale cu 1 oră de fizică pe săptămână.