

**Simona Bratu  
Vasile Fălie**

# Fizică

Manual pentru clasa a XII - a

## F1+F2



EDITURA DIDACTICĂ ȘI PEDAGOGICĂ, R.A.

## Capitolul 1. TEORIA RELATIVITĂȚII RESTRÂNSE

1.1. Bazele teoriei relativității restrânse .....	3
1.1.1. Relativitatea clasică .....	4
1.1.2. Experimentul Michelson .....	8
1.2. Postulatele teoriei relativității restrânse.	
Transformările Lorentz. Consecințe .....	12
1.2.1. Postulatele lui Einstein .....	12
1.2.2. Transformările Lorentz .....	12
1.2.3. Consecințe cinematice .....	14
1.3. Elemente de dinamică relativistă .....	22
1.3.1. Principiul fundamental al dinamicii.	
Variația relativistă a masei .....	22
1.3.2. Relația masă-energie .....	23
Probleme propuse .....	27

## Capitolul 2. ELEMENTE DE FIZICĂ CUANTICĂ

2.1. Efectul fotoelectric extern .....	31
2.1.1. Legile efectului fotoelectric extern .....	32
2.1.2. Ipoteza lui Planck. Ipoteza lui Einstein. Ecuația lui Einstein .....	35
2.1.3. Interpretarea legilor efectului fotoelectric extern .....	37
Test de verificare .....	41
Probleme propuse .....	41
2.2. Efectul Compton* .....	44
Test de verificare .....	48
Probleme propuse .....	49
2.3. Proprietăți ondulatorii ale particulelor. ....	50
2.3.1. Ipoteza lui Broglie .....	50
2.3.2. Difrakția electronilor .....	52
2.3.3. Microscopul electronic .....	54
2.4. Dualismul undă-corpusul .....	56
Probleme propuse .....	61

## Capitolul 3. FIZICĂ ATOMICĂ

3.1 Spectre .....	67
3.1.1. Obținerea spectrelor .....	67
3.1.2. Clasificarea spectrelor .....	68
3.1.3. Analiză spectrală .....	70
3.1.4. Spectrul discret al hidrogenului. Serii spectrale .....	71
Test de verificare .....	73
Probleme propuse .....	74
3.2. Experimentul Rutherford. Modelul planetar al atomului .....	74
3.3. Experimentul Franck-Hertz* .....	78
3.4. Modelul Bohr .....	80
3.4.1. Postulatele lui Bohr .....	81

3.4.2. Condiția de cuantificare .....	82
3.4.3. Cuantificarea razelor orbitelor electronilor .....	83
3.4.4. Cuantificarea energiei totale .....	84
3.4.5. Cuantificarea vitezelor .....	85
3.4.6. Cuantificarea frecvenței de rotație a electronului pe orbită .....	86
3.4.7. Nivele de energie în modelul atomic Bohr .....	86
3.4.8. Absorbția și emisia de radiație electromagnetică de către atom .....	87
3.4.9. Ionizarea atomului.....	88
3.4.10. Spectrele atomului de hidrogen.....	88
3.4.11. Verificarea modelului atomic Bohr .....	91
Probleme propuse.....	94
3.5. Atomul cu mai mulți electroni.....	97
3.5.1. Modelul păturilor electronice .....	97
3.5.2. Ocuparea stărilor energetice ale electronilor în atom. Periodicitatea proprietăților fizico-chimice .....	99
3.6. Radiațiile X .....	101
3.6.1. Natura radiațiilor X și clasificarea lor .....	101
3.6.2. Radiații X de frânare .....	101
3.6.3. Radiații X caracteristice .....	104
3.6.4. Proprietăți ale radiațiilor X. Aplicații.....	105
3.6.5. Aplicarea unor măsuri de protecție a mediului și a propriei persoane la utilizarea radiațiilor X.....	107
Probleme propuse.....	109
3.7. Efectul LASER.....	110
3.7.1. Mecanisme cuantice prin care se realizează amplificarea radiației.....	110
3.7.2. Laseri.....	112
3.7.3. Proprietățile radiației laser .....	113
3.7.4. Aplicații ale laserilor .....	116
3.7.5. Protecția față de radiația laser .....	118
<b>Capitolul 4.* SEMICONDUCTOARE. APLICAȚII ÎN ELECTRONICĂ</b>	
4.1. Conducția electrică în metale și semiconductori.....	124
4.2. Dioda semiconductoare. Redresarea curentului alternativ .....	126
4.3. Tranzistorul cu efect de câmp. Aplicații.....	131
4.4. Circuite integrate .....	133
Test de verificare .....	139
<b>Capitolul 5. FIZICĂ NUCLEARĂ</b>	
5.1. Proprietățile generale ale nucleului atomic .....	140
5.2. Stabilitatea nucleului .....	144
5.2.1. Modele nucleare.....	144
5.2.2. Energia de legătură a nucleului .....	146

5.2.3. Energia de legătură pe nucleoni. Stabilitatea nucleului .....	147
5.2.4. Reacții nucleare .....	151
Probleme propuse .....	156
5.3. Radioactivitatea. Legile dezintegrării radioactive .....	157
5.3.1. Definiții și proprietăți ale transformărilor radioactive .....	157
5.3.2. Tipuri de radiații nucleare .....	158
5.3.3. Legea dezintegrării radioactive .....	161
5.4. Interacțiunea radiației nucleare cu substanța.	
Detectia radiațiilor nucleare. Dozimetrie .....	164
5.4.1. Interacțiunea radiației nucleare cu substanța .....	164
5.4.2. Detectarea radiațiilor nucleare .....	165
5.4.3. Dozimetrie .....	167
5.4.4. Aplicațiile radioactivității .....	168
5.4.5. Aplicarea unor măsuri de protecție a mediului și a propriei persoane față de radiațiile nucleare .....	169
Probleme propuse .....	174
5.5 Fisiunea nucleară. Reactorul nuclear .....	175
5.5.1. Efectele fisiunii nucleare .....	176
5.5.2. Reacția de fisiune în lanț .....	177
5.5.3. Reactorul nuclear .....	179
5.5.4. Fisiune necontrolată. Arma nucleară .....	182
5.5.5. Estimarea posibilelor efecte ale accidentelor nucleare, respectiv ale utilizării armamentului nuclear de fisiune .....	183
5.5.6. Aprecierea critică a impactului utilizării tehnologiilor nucleare .....	186
5.6. Fuziunea nucleară .....	189
5.6.1. Energia eliberată prin reacția de fuziune nucleară .....	189
5.6.2. Descrierea evoluției stelelor din perspectiva energeticii nucleare .....	190
5.6.3. Evaluarea perspectivelor utilizării fuziunii nucleare ca sursă de energie a viitorului .....	194
5.6.4. Evaluarea posibilelor efecte ale utilizării armamentului nuclear de fuziune .....	196
5.7. Acceleratoare de particule* .....	198
5.7.1. Acceleratorul liniar rezonant .....	198
5.7.2. Acceleratoare circulare .....	201
5.8. Particule elementare* .....	207
5.8.1. Clasificarea particulelor elementare .....	208
5.8.2. Modelul quarcurilor .....	210
Răspunsuri la testele de autoevaluare .....	216
Anexe .....	217
Bibliografie .....	220

# TEORIA RELATIVITĂȚII RESTRÂNSE

## 1.1. BAZELE TEORIEI RELATIVITĂȚII RESTRÂNSE

Teoria relativității restrânse, formulată în anul 1905 de către Albert Einstein, este una dintre teoriile fundamentale ale fizicii. Punctul de plecare pentru înțelegerea relativității restrânse a lui Einstein îl reprezintă principiul relativității enunțat de Galilei.



**Galileo Galilei** (1564-1642), savant și scriitor italian. A fost unul dintre fondatorii mecanicii moderne (*Discursi i dimonstrazioni matematiche, intro due nuove scienze*, 1638) și a jucat un rol major în folosirea matematicii pentru explicarea legilor fizicii.

După părerea lui Galilei mișcarea și repausul nu au existență proprie, având sens numai mișcarea unui corp în raport cu un alt corp, altfel spus mișcarea corpurilor depinde de observator adică de sistemul de referință.

### Sisteme de referință inerțiale

Aprecierea stării de mișcare sau de repaus a unui corp implică în mod necesar existența unui corp de referință, la care să fie raportată poziția corpului. Iar pentru ca descrierea mișcării corpului să fie completă, trebuie să se cunoască în fiecare moment poziția acestuia. De aceea corpului de referință i se atașează un sistem de axe de coordonate  $Oxyz$  și un dispozitiv care permite măsurarea timpului, de exemplu un ceasornic sau un cronometru (fig. 1.1).

Toate observațiile făcute asupra fenomenelor studiate depind de sistemul de referință ales. Cele mai folosite pentru descrierea fenomenelor fizice sunt sistemele de referință inerțiale sau galileiene.

**Se numește sistem de referință inerțial (sau galileian) un sistem de referință  $S'$ , în mișcare rectilinie și uniformă în raport cu un alt sistem de referință  $S$ , aflat în repaus sau de asemenea în mișcare rectilinie și uniformă.**

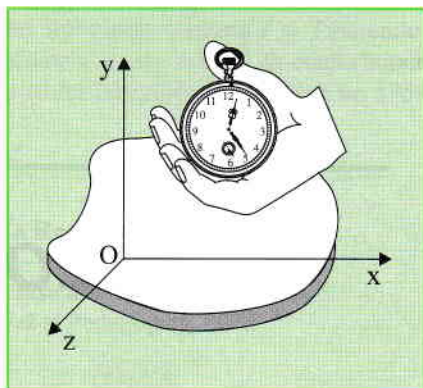


Fig. 1.1. Sistem de referință

De exemplu, Pământul sau orice alt corp de pe suprafața sa constituie o foarte bună aproximație a unui sistem inerțial. Acest sistem este folosit pentru studiul mișcărilor corpurilor de pe suprafața Pământului sau din apropierea sa. Evident, un asemenea sistem de referință nu este fix, deoarece Pământul are o mișcare de rotație în jurul axei sale (mișcarea diurnă) și de rotație în jurul Soarelui (mișcarea orbitală, efectuată cu o viteză de ordinul  $3 \times 10^4$  m/s). Soarele, care este o stea mobilă, se rotește în jurul centrului galaxiei noastre cu o viteză de ordinul  $3 \times 10^5$  m/s și o accelerație de  $3 \times 10^{-10}$  m/s<sup>2</sup>, galaxia noastră se deplasează în raport cu alte galaxii etc.

### 1.1.1. Relativitatea clasică

Principiul relativității clasice a fost enunțat prima dată de Galilei. O formulare a sa poate fi făcută pornind de la grupul de transformări ale lui Galilei.

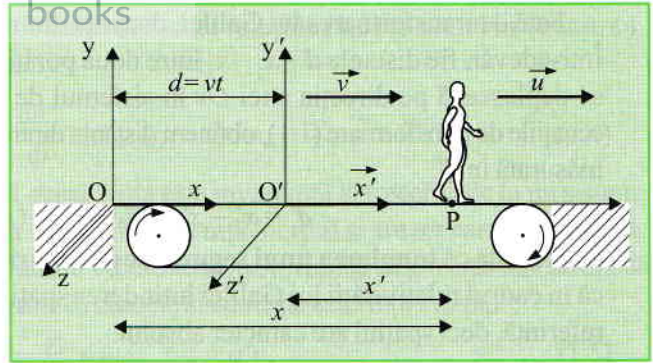
#### Transformările lui Galilei

Transformările lui Galilei leagă coordonatele unui punct, în care se petrece un eveniment, dintr-un sistem de referință inerțial  $S$ , de coordonatele lui dintr-un alt sistem de referință inerțial,  $S'$ . Deducerea acestor relații se face pe baza următoarelor premise:

1. Un eveniment (fenomen localizat în spațiu și timp) este caracterizat prin patru coordonate: trei coordonate spațiale ( $x, y, z$ ), ale locului unde se petrece evenimentul, și o coordonată temporală ( $t$ ), reprezentând momentul producerii evenimentului.

2. Timpul este absolut, fapt care duce la simultaneitatea absolută (două evenimente, care sunt simultane într-un sistem de referință, rămân simultane

Fig. 1.2. Două sisteme de referință inerțiale



în orice alt sistem de referință) și la durată absolută (durata dintre două evenimente dintr-un sistem de referință rămâne aceeași în orice alt sistem de referință).

3. Spațiul este euclidian independent de timp. Deci, spațiul este absolut (invariant), iar lungimile, suprafețele, volumele și unghiurile se păstrează în același raport în diferite sisteme de referință.

Fie două sisteme de referință inerțiale,  $S$  și  $S'$  (fig. 1.2). Sistemul  $S$ , considerat fix, se află în punctul  $O$  de pe sol, la intersecția dintre axele de coordonate  $Ox$ ,  $Oy$ ,  $Oz$  și scara timpului  $t$ , iar al doilea sistem,  $S'$ , se află în punctul  $O'$  (de pe o bandă rulantă care se mișcă față de sol cu viteza  $\vec{v}$  constantă), la intersecția dintre axele de coordonate  $O'x'$ ,  $O'y'$ ,  $O'z'$  (paralele cu axele  $Ox$ ,  $Oy$ ,  $Oz$ ) și scara timpului  $t'$ . Pe banda rulantă se deplasează o persoană cu viteza constantă  $\vec{u}$ .

În punctele  $O$  și  $O'$  se află câte un cronometru. Acestea sunt declanșate simultan când originile celor două sisteme de coordonate coincid ( $O = O'$ ); în acest moment,  $t = t' = 0$ .

La un moment  $t$ , observatorul din sistemul  $S$  sesizează că persoana care se deplasează pe banda rulantă trece printr-un punct  $P$ . Pentru acest observator, punctul  $P$  are coordonatele  $x$ ,  $y$ ,  $z$  și  $t$ . Același eveniment este sesizat și de observatorul din sistemul  $S'$ , în același moment ( $t = t'$ ). Pentru acest observator, punctul  $P$  are coordonatele  $x'$ ,  $y'$ ,  $z'$  și  $t'$ . Deoarece la momentul  $t$  distanța  $OO' = vt$ , relațiile care leagă coordonatele punctului  $P$  din cele două sisteme de referință sunt următoarele:

$$x = x' + vt, y = y', z = z', t = t' \quad (1.1)$$

sau

$$x' = x - vt, y' = y, z' = z, t' = t \quad (1.2)$$

Relațiile (1.1) și (1.2) reprezintă transformările lui Galilei. Cunoscând coordonatele unui eveniment într-un sistem de referință dat,  $S$ , putem calcula coordonatele acestui eveniment în orice alt sistem de referință  $S'$ , aflat în mișcare rectilinie uniformă față de cel dat.

Față de transformarea lui Galilei, distanța dintre două puncte este invariantă. Într-adevăr, fie distanța  $d = x_2 - x_1$  între două poziții  $P_1$  și  $P_2$  ale mobilului  $P$ , care se deplasează pe direcția axei  $Ox$  în sistemul de referință  $S$ . Având în vedere ecuațiile de transformare (1.1), obținem distanța dintre cele două poziții ale mobilului, măsurată în  $S'$ :

$$d' = x'_2 - x'_1 = (x_2 - vt) - (x_1 - vt) = x_2 - x_1.$$

Rezultă că **lungimea unui segment este invariantă**. Această concluzie arată că în cadrul relativității lui Galilei întinderea spațială nu depinde de sistemul de referință, deci spațiul are caracter absolut.

### Legea compunerii vitezelor

Viteza mobilului  $P$  (persoana care se deplasează pe banda rulantă pe direcția  $Ox$ ) în cele două sisteme de referință,  $S$  și  $S'$ , se obține derivând în raport cu timpul relațiile (1.1), unde  $v = \text{const}$ , iar  $t = t'$ :

$$\frac{dx}{dt} = \frac{dx'}{dt} + v \quad ; \quad \frac{dy}{dt} = \frac{dy'}{dt} \quad ; \quad \frac{dz}{dt} = \frac{dz'}{dt}$$

sau

$$u_x = u'_x + v \quad ; \quad u_y = u'_y \quad ; \quad u_z = u'_z. \tag{1.3}$$

Pentru același mobil  $P$  am obținut viteze diferite în cele două sisteme de referință: mobilul se deplasează în sistemul de referință  $S'$  cu viteza  $u'_x$ , iar în sistemul de referință  $S$ , cu viteza  $u_x = u'_x + v$  ( $v$  fiind mărimea vitezei cu care se deplasează sistemul  $S'$  față de sistemul  $S$ ). Prin urmare, viteza este o noțiune relativă, iar mărimea ei variază în funcție de sistemul de referință.

### Principiul relativității în mecanica newtoniană

Studiul desfășurării fenomenelor fizice impune:

a) formularea unui număr de legi fundamentale, ce caracterizează evoluția fenomenelor studiate;

b) precizarea sistemelor de referință în care sunt valabile legile respective.

Astfel, trebuie să răspundem la următoarea întrebare: în ce sistem de referință sunt enunțate legile mecanicii newtoniene?

Poziția unui mobil este perfect determinată prin coordonatele sale, în orice sistem de referință; la fel și traiectoria sa, viteza și accelerația sa. Problema precizării sistemului de referință, în care sunt enunțate legile mecanicii, se pune atunci când se face legătura dintre mișcarea mobilului și cauza care o produce (forța caracteristică a diferitelor tipuri de interacțiuni).

Calculăm accelerația mobilului derivând relațiile (1.3) și având în vedere că  $v = \text{const}$  și  $dt = dt'$  se obține:

$$a_x = \frac{du_x}{dt} = \frac{du'_x}{dt} = a'_x, \quad a_y = a'_y, \quad a_z = a'_z, \quad \vec{a} = \vec{a}'. \quad (1.4)$$

Rezultatul obținut arată că accelerația este invariantă la trecerea de la un sistem de referință inerțial la un alt sistem de referință inerțial și are un caracter absolut față de sistemele inerțiale. Având în vedere acest lucru, rezultă că și relația fundamentală a mecanicii are aceeași expresie în ambele sisteme de referință inerțiale:

$$\vec{F} = \vec{F}' = m\vec{a}, \quad (\vec{a} = \vec{a}'). \quad (1.5)$$

Masa  $m$ , fiind un scalar invariant, deci neafectând transformările (1.1), expresia (1.5) demonstrează că relația fundamentală a mecanicii newtoniene rămâne invariantă față de transformările lui Galilei. Această proprietate constituie principiul relativității în mecanica newtoniană sau principiul relativității al lui Galilei. El se poate exprima astfel:

**Legile fenomenelor mecanice sunt aceleași în toate sistemele de referință inerțiale fiind invariante la trecerea de la un sistem de referință inerțial la un alt sistem de referință inerțial.**

Sistemele inerțiale prezintă o proprietate fizică foarte importantă: mișcarea acestora nu influențează fenomenele fizice din cuprinsul lor. Căderea liberă a corpurilor, mișcarea pendulelor etc. se execută la fel, fie că sistemul inerțial se află în repaus, fie că se află în mișcare rectilinie și uniformă.

Prin generalizare, trebuie să admitem că:

Este imposibil să se pună în evidență o stare de mișcare rectilinie uniformă prin experimente de mecanică.

## Principiul relativității al lui Galilei și electromagnetismul

Principiul relativității galileiene nu este aplicabil fenomenelor de natură electromagnetică.

Contradicția dintre mecanica newtoniană și electromagnetism pleacă de la forța Lorentz, exercitată de câmpul electromagnetic asupra particulelor încărcate:

$$\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B}) \quad (1.6)$$

Această forță, care depinde de viteza  $\vec{v}$  de deplasare a particulelor, nu poate fi încadrată în rândul forțelor din mecanica newtoniană independente de viteză.

În aceste condiții toate fenomenele electromagnetice vor apărea modificate pentru diferiți observatori din diferite sisteme de referință inerțiale. În aplicarea principiului relativității din mecanica newtoniană la fenomenele electromagnetice, apar unele aspecte speciale, legate de faptul că starea câmpului electromagnetic, și chiar valoarea forței electromagnetice, depind de starea de mișcare a corpurilor

cu sarcină electrică care le generează, aspecte ce sunt în totală contradicție cu relațiile de transformare ale lui Galilei.

## CONCLUZII

Mecanica newtoniană nu este compatibilă cu fenomenele electromagnetice. Incompatibilitatea provine din faptul că interpretarea rezultatelor experimentale s-a făcut pe baza principiului relativității galileiene, care nu este aplicabil fenomenelor electromagnetice. Pentru a înlătura această incompatibilitate, unii fizicieni au propus reformularea legilor fenomenelor electromagnetice în așa fel încât acestea să fie compatibile cu mecanica newtoniană. Einstein a preconizat, dimpotrivă, o modificare a mecanicii newtoniene, care să corespundă la condițiile de invarianță a legilor fenomenelor electromagnetice. Einstein a intuit corect deficiențele relativității clasice, bazate pe relațiile de transformare ale lui Galilei. El a pus bazele unei mecanici noi – mecanica relativistă – renunțând la noțiunile de spațiu absolut și de timp absolut. El a avut în vedere între altele rezultatul unui experiment efectuat de fizicienii Michelson și Morley (1887), prin care s-a demonstrat că viteza luminii în vid este o mărime constantă, invariantă în raport cu orice sistem de referință inerțial.

### 1.1.2. Experimentul lui Michelson

Oamenii de știință din secolul al XIX-lea, care s-au orientat în mod deosebit spre studiul opticii, au dezvoltat teoria ondulatorie a luminii. Aceștia asimilau unda luminoasă cu o undă elastică transversală. Conform acestui model, trebuia să existe un mediu material elastic prin care să se propage undele luminoase, cum ar fi aerul pentru undele sonore. Astfel, s-a admis existența unui mediu ipotetic drept suport al undelor luminoase, numit *eter*, răspândit peste tot în Univers, și care pătrundea în toate corpurile.

Acest eter universal, în cazul în care ar fi imobil, ar putea juca rolul unui sistem de referință absolut, față de care s-ar putea raporta mișcarea tuturor corpurilor.

Pentru a putea răspunde corect acestei probleme se cerea confirmarea pe bază experimentală a existenței eterului.

#### Scopul experimentului lui Michelson

Fizicianul american Albert Abraham Michelson (1852-1931), printr-un experiment rămas celebru, și-a propus să determine viteza absolută a Pământului în mișcarea sa în jurul Soarelui, în raport cu eterul imobil. Experimentul respectiv a fost repetat între anii 1881-1887, în diferite locuri de pe suprafața Pământului, folosindu-se un aparat de tip interferometru, foarte sensibil, construit de Michelson, și care îi poartă numele. În anul 1887, Michelson a efectuat experimentul în colaborare cu omul de știință american Edward W. Morley (1838-1923).

În experimentul său Michelson s-a bazat pe principiul relativității galileiene, deci pe relațiile de transformare ale lui Galilei. Astfel, el a considerat un sistem de referință  $S$ , legat de eterul imobil, mediul în care lumina se propagă cu viteza  $\vec{c}$ , și un al doilea sistem de referință  $S'$ , legat de Pământ sau, în particular, de instrumentul folosit (interferometrul), care se deplasează cu viteza  $\vec{v}$  în raport cu eterul imobil.

Conform legii galileiene de compunere a vitezelor, ar trebui ca lumina să se propage la suprafața Pământului:

- cu viteza  $c_1 = c - v$ , în sensul mișcării Pământului pe orbita sa în jurul Soarelui;
- cu viteza  $c_2 = c + v$ , în sensul opus mișcării Pământului pe orbita sa în jurul Soarelui;
- cu viteze intermediare pe celelalte direcții.

Aparatul a cărui schemă de principiu este dată în figura 1.3 se compune dintr-o sursă  $S$  de lumină monocromatică, două oglinzi plane  $O_1$  și  $O_2$  așezate perpendicular între ele, o lamă separatoare de sticlă  $L$  semitransparentă, așezată la  $45^\circ$  față de cele două oglinzi.

Lama separatoare, elementul esențial al interferometrului, este acoperită pe una dintre fețele sale cu un strat subțire de argint. În felul acesta, ea lasă să treacă o parte din lumina incidentă și reflectă cealaltă parte a sa. Interferometrul mai cuprinde și un dispozitiv  $D$ , folosit pentru a observa franjele de interferență. Brațele interferometrului sunt egale:  $OO_1 = OO_2 = l$ . Aparatul este așezat pe o platformă mobilă, care se poate roti în jurul unui ax ce trece prin punctul  $O$  (centrul instalației), și este orientat astfel ca direcția  $OO_2$  să coincidă cu direcția de mișcare a Pământului în jurul Soarelui.

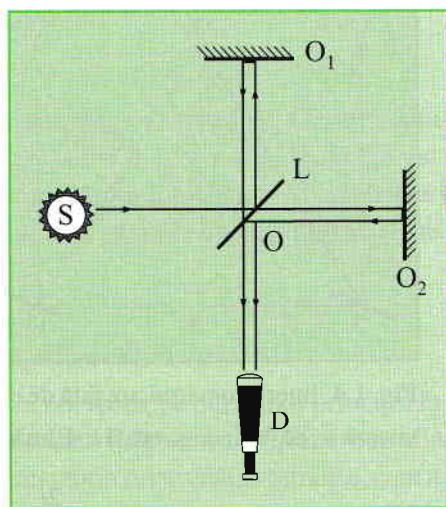


Fig. 1.3. Interferometrul Michelson

### Principiul de funcționare a interferometrului

De la sursa  $S$  de lumină monocromatică pornește un fascicul  $SO$ , care este separat în două fascicule de către lama separatoare  $L$ : primul,  $OO_1$ , obținut prin reflexie, cade normal pe oglinda  $O_1$ , iar cel de al doilea,  $OO_2$ , obținut prin transmisie, cade normal pe oglinda  $O_2$ .

Fasciculele  $OO_1$  și  $OO_2$ , reflectate de oglinzile  $O_1$  și  $O_2$ , se întorc la lama separatoare  $L$ . Aici, rezultă două fascicule care vor fi orientate spre dispozitivul  $D$ , unde se poate urmări fenomenul de interferență în urma suprapunerii celor două