

**Mariana OSIAC**

**Mihaela-Tinca UDRIȘTIOIU**



**Mariana OSIAC**

**Mihaela-Tinca UDRIȘTIOIU**

# **OPTICĂ**

## **LUCRĂRI DE LABORATOR**



**EDITURA UNIVERSITARIA**

**Craiova, 2017**

**Referenți:**

**Prof. univ. dr. Radu Constantinescu**

**Lect. univ. dr. Silviu Constantin Săraru**

Copyright © 2017 Editura Universitaria

Toate drepturile sunt rezervate Editurii Universitaria

---

**Descrierea CIP a Bibliotecii Naționale a**

**României OSIAC, MARIANA**

**Optică : lucrări de laborator** / Osiac Mariana, Udriștioiu Mihaela-Tinca. -

Craiova : Universitaria, 2017

Conține bibliografie

ISBN 978-606-14-1324-9

I. Udriștioiu, Mihaela-Tinca

535

## Cuvânt înainte

Activitățile de laborator prezentate în materialul Optică-Lucrări de laborator se adresează în principal studenților din anul I de la programele de studiu de licență de la Fizică dar și acelor care doresc să își îmbogățească sau să își dezvolte cunoștințele de Optică. Prin lucrările de laborator propuse, autorii urmăresc sprijinirea studenților în construirea unei baze solide de concepte și noțiuni precum și crearea unor conexiuni între partea teoretică a Opticii și cea experimentală. Se acordă o importanță sporită încurajării studenților de a construi montaje simple, de a verifica funcționalitatea acestora, de a culege și prelucra date. Rolul acestor lucrări de laborator este acela de a le dezvolta studenților abilități practice, atât de necesare activităților desfășurate în orice laborator de Fizică.

Lucrarea cuprinde 14 teme grupate în trei capitole mari: Optica Geometrică, Elemente de Fotometrie și Optică Ondulatorie. Fiecare lucrare de laborator abordată este structurată în două părți. În prima parte a fiecărei lucrări sunt prezentate succint noțiunile teoretice necesare înțelegerii și bunei desfășurări a activităților practice de laborator prezentate în cea de-a doua parte a lucrării. Noțiunile teoretice prezentate sunt adaptate nivelului de cunoștințe matematice al studenților din anul I și urmează linia cursului.

Prima grupă de lucrări conține lucrări practice de măsurare a distanțelor focale ale lentilor convergente și divergente, determinarea indicilor de refracție ai prisme optice, lichidelor și lamei cristaline. A doua grupă de lucrări conține elemente de fotometrie, determinarea legii fotometriei și a legii Lambert. Ultima grupă de lucrări abordează fenomene de optică ondulatorie precum cele de interferență, difracție și polarizare. Tot în această parte sunt prezentate două lucrări de laborator în care sunt testate abilitățile practice ale studenților, prin construcția efectivă a interferometrelor Michelson și Mach-Zehnder.

Scopul activităților de laborator propuse în prezenta lucrare este de a evidenția cât mai clar relațiile existente între diferitele mărimi studiate și de a identifica factorii care le influențează. Activitățile de laborator au prioritar rolul de a încuraja dezvoltarea deprinderilor practice ale studenților, oferindu-le acestora posibilitatea de a lucra atât individual cât și în echipă.

Autorii mulțumesc în mod deosebit lect. dr. S.C. Săraru pentru comentariile și suportul acordat în cursul elaborării acestui material.

Craiova, 29 septembrie, 2017

M. Osiac

M. T. Udriștioiu



## 1. Noțiuni de calculul erorilor

De cele mai multe ori, în cercetările efectuate în domeniul fizicii precum și în desfășurarea experimentelor din laborator, intervin erorile. Erorile întâlnite în practică apar atât în *măsurătorile directe* (când se măsoară o lungime cu ajutorul unei rigle, o masă cu ajutorul unei balanțe, timpul cu cronometrul, etc.) cât și în *măsurătorile indirecte* (când mărimea fizică se obține prin calcul, când se apelează la rezultatul unor măsuratori directe și respectiv când sunt aplicate relații matematice. Situații de acest tip sunt întâlnite la măsurarea vitezei, accelerației, densității, constantei elastice care caracterizează un resort, etc).

În practică se disting următoarele tipuri de erori:

1. *Erori de măsură*. Acestea apar din cauza imperfecțiunii simțurilor și aparatelor de măsură. Valorile citite sunt mai mult sau mai puțin apropiate de valoarea exactă a mărimii care se dorește a fi măsurată/determinată;
2. *Erori de rotunjire*. În calcule pot interveni numere iraționale cu o infinitate de zecimale (radicali,  $\pi$ ,  $e$ , logaritmi, etc.), caz în care este necesară folosirea unui număr limitat de zecimale;
3. *Erori de metodă* - apar atunci când nu există soluții alternative și, de cele mai multe ori, se apelează la o metodă aproximativă, ceea ce în mod evident implică o anumită eroare, chiar dacă datele inițiale sunt cunoscute și calculele sunt realizate exact.

După sensul în care se produc, erorile se mai pot clasifica în:

1. **Erori sistematice** - se produc întotdeauna în același sens, caz în care avem:
  - a) *erori instrumentale*, care apar din cauza defecțiunii aparatelor, deplasarea scalei, etc;
  - b) *erori personale* care se datorează experimentatorului;
  - c) *erori teoretice* care apar ca urmare a neglijării unor factori fizici, a unor acțiuni exterioare permanente sau a unei formule de calcul imprecise sau greșite. Erorile sistematice pot fi reduse introducând corecții adecvate;
2. **Erori accidentale** - se produc atât într-un sens cât și în celălalt și apar din cauza unor factori variabili care nu pot fi controlați de către experimentator;
3. **Erori grosolane** sau greșeli. Acestea sunt mai mari decât erorile obișnuite și se datorează neatenției experimentatorului.

## Erori absolute și erori relative

Dacă la măsurarea unei mărimi fizice  $X$  se obține o anumită valoare numerică  $x$ , mai mult sau mai puțin apropiată de valoarea reală exactă  $x_0$ , se numește **eroare absolută** (*abatere*) diferența dintre valoarea exactă și valoarea măsurată

$$\delta x = x_0 - x \quad (1.1)$$

Cum  $x_0$  nu este cunoscut, atunci nu se cunoaște nici diferența  $x_0 - x$ , însă poate fi evaluată marginea superioară a erorii absolute.

Se numește **eroare relativă** raportul dintre **eroarea absolută** și **valoarea exactă** a mărimii măsurate

$$\frac{x_0 - x}{x_0} = \frac{\delta x}{x_0} \quad (1.2)$$

De obicei, erorile sunt mici:  $|\delta x| \ll x_0$ ,  $x \approx x_0$ , astfel încât în practică se folosește **eroarea relativă aparentă**

$$\varepsilon_x = \frac{x_0 - x}{x} = \frac{\delta x}{x} \quad (1.3)$$

unde eroarea absolută  $\delta x$  (care se poate evalua) este raportată la valoarea măsurată.

**Eroarea absolută** se măsoară în aceleași unități ca și mărimea care se dorește a fi aflată. Spre deosebire de eroarea absolută, cea relativă nu are dimensiuni. Precizia unei măsuratori este dată de eroarea relativă, care, adimensională fiind, permite compararea preciziei de măsurare a unor mărimi de naturi diferite.

## Aproximații

**Rotunjiri.** Deoarece în calcule se păstrează un număr limitat de cifre, pentru a obține o eroare minimă se respectă următoarea regulă: dacă cifra neglijată este mai mare decât 5, se adaugă o unitate la cifra precedentă păstrată, iar dacă cifra este neglijată este mai mică decât 5 nu se adaugă nimic.

*Exemplu:*

$$3,814653 \rightarrow 3,81465 \rightarrow 3,8146 \rightarrow 3,815 \rightarrow 3,82 \rightarrow 3,8 \rightarrow 4 \quad (1.4)$$

Eroarea obținută nu depășește 0.5 unități din ultima cifră păstrată.

**Cifre “exacte”.** Se consideră cifră “exactă” a unui număr, cifra optimă a unui număr care corespunde erorii minime. Mai exact, o cifră a unui număr este “exactă” dacă valoarea unei unități din această cifră este mai mare sau cel mult egală cu eroarea absolută a numărului. Spre exemplu, rotunjind un număr irațional, se obține un număr cu toate cifrele “exacte”, caz în care există numai eroarea de rotunjire. Astfel, nu poate fi modificată nicio cifră din numărul rotunjit fără a mări considerabil eroarea.

**Cifre semnificative.** Se consideră cifre semnificative toate cifrele exacte ale unui număr fără a se ține cont de zerourile existente în fața numărului, zerouri care indică doar ordinul cifrelor următoare și pot fi întotdeauna eliminate folosind un factor de  $10^k$ , unde  $k$  este număr întreg. Spre exemplu, constanta gazelor perfecte

$$R = 0,082 \text{ atm} \cdot \frac{\text{l}}{\text{mol}} \cdot \text{grad} = 82 \cdot 10^3 \text{ atm} \cdot \text{l/mol} \cdot \text{grad} \quad (1.5)$$

are două cifre semnificative.

Alt exemplu: dacă obținem un rezultat experimental sub forma

$$x = 0.0003 \quad (1.6)$$

deși sunt patru zecimale, precizia este grosolană; putem scrie

$$x = (3 \pm 1) \cdot 10^{-4}, \quad (1.7)$$

eroarea relativă fiind

$$\varepsilon_x = \frac{1}{3} = 33\%. \quad (1.8)$$

Dacă însă rezultatul este scris sub forma

$$x = 0.00030, \quad (1.9)$$

dat fiind faptul că ultima cifră semnificativă este zero, atunci

$$x = (30 \pm 1) \cdot 10^{-5} \quad (1.10)$$

și eroarea relativă este

$$\varepsilon_x = \frac{1}{30} = 3,3\%. \quad (1.11)$$

Din aceste exemple putem spune că nu are importanță numărul zecimalelor (poziția virgulei) ci numărul cifrelor semnificative.

### Formule pentru calcule aproximative

Mai jos sunt prezentate câteva formule utile:

$$a) (1+x)(1+y)(1+z) \approx 1+x+y+z \text{ dacă } |x| \ll 1, |y| \ll 1, |z| \ll 1 \quad (1.12)$$

$$b) (1+x)^r \approx 1+rx, \text{ dacă } |x| \ll 1 \text{ și } r \text{ este număr real} \quad (1.13)$$

Cazuri particulare:

$$a) \frac{1}{1 \pm x} \approx 1 \mp x, \quad |x| \ll 1 \text{ aici } r = -1 \quad (1.14)$$

$$b) \frac{1}{a \pm b} \approx \frac{1}{a} \left( 1 \mp \frac{b}{a} \right), \quad |b| \ll |a| \quad (1.15)$$

$$c) \sqrt{1 \pm x} \approx 1 \pm \frac{x}{2}, \quad |x| \ll 1 \text{ aici } r = 1/2 \quad (1.16)$$

$$d) \sqrt{a \pm b} \approx \sqrt{a} \pm \frac{b}{2\sqrt{a}}, \quad |b| \ll a \quad (1.17)$$

**Formulele aproximative** pentru funcții *trigonometrice, exponențiale și logaritmi* sunt

$$a) \sin x = \operatorname{tg} x = x \quad (1.18)$$

$$b) \cos x \approx 1 - \frac{x^2}{2}, \text{ unde } x \text{ este exprimat în radiani} \quad (1.19)$$

$$c) e^x \approx 1+x, \quad a^x = e^{x \ln a} \approx 1+x \ln a \quad (1.20)$$

$$d) \ln(1+x) \approx x, \text{ dacă } |x| \ll 1 \quad (1.21)$$

### Erori de citire

Prin erori de citire înțelegem acele erori provenite din măsurarea directă a unei mărimi fizice precum măsurarea lungimii cu o riglă, a timpului cu un cronometru, a masei cu o balanță, etc. Nu putem cunoaște exact *eroarea de citire* însă putem totdeauna evalua *eroarea maximă de citire*.

Presupunem că trebuie măsurată o lungime cu o riglă obișnuită, caz în care se poate lua eroarea de măsură

$$\delta x \approx 0.5mm. \quad (1.22)$$

Dacă se lucrează cu un șubler având cea mai mică diviziune  $1/10 \text{ mm}$  atunci

$$\delta x \approx 0.05mm. \quad (1.23)$$

La cronometrări putem lua  $\delta t = 0.2s$  sau chiar mai mult, din cauza timpilor morți de la pornire și oprire. Dacă se măsoară o mărime  $X$  (lungime, masă, etc) și se repetă această măsurătoare de  $N$  ori, în aceleași condiții și cu aceeași precizie, se obțin următoarele valori  $x_i$  cu  $i = 1, 2, \dots, N$  grupate în jurul valorii reale  $x_0$ .

Erorile *accidentale* au două proprietăți importante și anume:

1. Valorile  $x_i$  sunt dispuse simetric în jurul valorii reale  $x_0$ .
2. Erorile mari în modul sunt mai puțin numeroase în timp ce erorile mici în modul sunt mai numeroase.

În concluzie, pentru un șir de  $N$  măsuratori de egală precizie, valoarea cea mai probabilă sau cea mai bună a mărimii măsurate este *media aritmetică* a rezultatelor obținute.

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (1.24)$$

Eroarea mediei aritmetice este mai mică de  $\sqrt{N}$  ori (dacă  $N \geq 10$ ) decât eroarea unei măsurători individuale. Eroarea mediei aritmetice ( $N \geq 10$ ) este dată de *eroarea pătratică medie*

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N (\bar{x} - x_i)^2} \quad (1.25)$$

Rezultatul final al unui șir de  $N$  măsuratori se scrie sub forma:

$$x = \bar{x} \pm \sigma. \quad (1.26)$$

Rezultatele  $x_i$ , care sunt în totală discrepanță cu  $\bar{x}$ , sunt erori grosolane și trebuie eliminate. Cu datele rămase se calculează *media aritmetică* și *eroarea pătratică medie*.

## Erorile funcțiilor

În fizică majoritatea mărimilor fizice se măsoară indirect, prin calcul, cu ajutorul unor formule în care sunt introduse mărimi care sunt măsurate direct. Dacă se cunosc erorile argumentelor, trebuie să calculăm eroarea care rezultă pentru funcție. În cele ce urmează este de interes determinarea erorii maxime a funcției cunoscând erorile maxime ale argumentelor.

Se notează **modulul erorii absolute**  $\delta x$

$$\delta x = |x_0 - x| \quad (1.27)$$

scris echivalent sub forma

$$x_0 = x \pm \delta x \quad (1.28)$$

și cu  $\varepsilon_x$  **modulul erorii relative**,

$$\varepsilon_x = \frac{\delta x}{|x|}, \quad (1.29)$$

de unde rezultă

$$\frac{x_0 - x}{x} = \pm \varepsilon_x. \quad (1.30)$$

Presupunem că erorile sunt suficient de mici

$$\delta x \ll |x|, \quad (1.31)$$

$$\varepsilon_x \ll 1. \quad (1.32)$$

astfel încât se pot folosi formule pentru calcule aproximative.

Se vor calcula pentru început erorile maxime ale funcțiilor simple:

### a) Suma

Se pornește de la suma algebrică:

$$f = ax + by \quad (1.33)$$

a cărei valoare exactă este  $f_0 = ax_0 + by_0$ . Coeficienții  $a$  și  $b$  reprezintă niște constante exacte, eroarea absolută a sumei având expresia

$$f - f_0 = a(x - x_0) + b(y - y_0) = \pm a\delta x \pm b\delta y. \quad (1.34)$$