

# 1

## CONSIDERAȚII GENERALE

### 1.1. CÂMPUL ȘI SUBSTANȚA

*Substanța și câmpul* sunt forme fizice fundamentale, în stânsă conexiune, sub care se prezintă materia.

*Câmpul electromagnetic* este o formă de existență a materiei, deosebită de substanța corpurilor și există în regiunile din spațiu în care se pot exercita asupra corpurilor *acțiuni ponderomotoare* (forțe și cupluri) de natură electromagnetică. Prin acțiuni ponderomotoare de natură electromagnetică se înțeleg forțele și cuplurile exercitate asupra corpurilor din cauze care nu sunt de natură termică sau mecanică.

Pentru noțiunea generală de câmp (deci și de câmp electromagnetic) se poate da o definiție mai precisă. Prin câmp se înțelege o formă de existență a materiei, relativ delimitată de substanță, capabilă să realizeze interacțiunea fizică a particulelor de substanță. Câmpul se poate transforma dintr-o formă în alta, iar câmpul electromagnetic se poate transforma în substanță, ceea ce se pune în evidență în cadrul fizicii nucleare.

Cele mai multe proprietăți ale câmpului electromagnetic se studiază indirect, prin efectele pe care le produce (de exemplu efecte mecanice și termice), deoarece cele mai multe dintre modurile de manifestare ale câmpului electromagnetic nu sunt direct accesibile simțurilor omului. Numai undele electromagnetice de lungimi de undă cuprinse între  $0,4 \mu\text{m}$  și  $0,76 \mu\text{m}$  sunt direct perceptibile, fiind unde luminoase.

Un sistem fizic se consideră *izolat* dacă la un moment dat sau pe o durată finită, se neglijează interacțiunile lui cu alte sisteme din exterior. În general, sistemele nu pot fi considerate izolate și în conformitate cu principiul cauzalității, starea sistemului este condiționată și de stări ale sistemelor din exterior. Într-un sistem *neizolat*, evenimentele cauză ale unui fenomen efect nu pot aparține exclusiv unei stări anterioare a sistemului și care ar conține numai evenimente interioare acestuia; o astfel de stare cuprinde și evenimente din exterior și mulțimea evenimentelor factori cauzali interni și externi, alcătuiesc starea de determinație cauzală a fenomenului efect în sistemul neizolat. După modul în care intervin interacțiunile între sistemele fizice neizolate, se disting: *acțiuni instantanee la distanță* și *acțiuni prin contiguitate*. În primul caz, un eveniment de stare dintr-un sistem fizic care a avut loc simultan sau cel mult într-un trecut imediat apropiat cu un eveniment dintr-un al doilea sistem fizic, îl poate influența

pe acesta din urmă oricât de mare ar fi depărtarea dintre cele două sisteme. Astfel, acțiunile ponderomotoare la distanță între corpuri sunt acțiuni pe care corpurile le exercită asupra altor corpuri în fiecare moment, din pozițiile pe care le ocupă în acel moment; ele nu au nevoie de timp pentru a se transmite de la corpul care le exercită până la corpul asupra căruia se exercită, oricât de mare ar fi distanța dintre ele și satisfac *principiul acțiunii și reacțiunii*. În realitate, interacțiunile dintre sistemele fizice au proprietatea că un eveniment într-un anumit loc și la un anumit moment este influențat în primul rând și în mod direct de evenimentele care au avut loc în trecutul imediat și în vecinătatea imediat apropiată a evenimentului considerat. Acțiunile ponderomotoare între corpuri sunt, prin urmare, localizate în spațiu și întârziate, adică necesită un anumit timp spre a se propaga de la corpul care le exercită la corpul asupra căruia se exercită, întârzierea fiind cu atât mai mare cu cât distanța care le separă este mai mare. În această accepțiune în care acțiunile dintre sistemele fizice se transmit din aproape în aproape în spațiu și timp, deci cu viteză finită, ele se numesc *acțiuni prin contiguitate*. Urmează că în acest spațiu există un sistem fizic, denumit câmp, capabil să asigure transmiterea acțiunilor ponderomotoare prin contiguitate.

În studiul proprietăților corpurilor și în general ale mediului se întâlnesc:

- medii omogene și neomogene;
- medii izotrope și neizotrope.

Se numește mediu *omogen*, mediul care are aceleași proprietăți în toate punctele. Un mediu este *izotrop* dacă are aceleași proprietăți în orice direcție.

Câmpurile de natură fizică caracterizate prin mărimi scalare sau vectoriale sunt numite *câmpuri scalare*, respectiv *vectoriale*.

## 1.2. MĂRIMI FIZICE

Sistemele fizice, interacțiunile și transformările lor se descriu cu ajutorul proprietăților acestora care pot fi puse în evidență prin analiza rezultatelor experimentale. Din mulțimea proprietăților fizice numai o parte pot fi caracterizate cantitativ, adică sunt susceptibile de a fi măsurate. Proprietățile fizice care satisfac această condiție, la care se adaugă și indicarea unităților și metodelor de măsurare, se numesc *mărimi fizice*.

Măsurarea mărimilor fizice se efectuează cu ajutorul unei metode de măsurare. Metoda de măsurare este o operație experimentală cu ajutorul căreia se poate asocia fiecărei mărimi fizice o mărime matematică numită *valoare*, în raport cu o mărime fizică de referință, numită *unitate de măsură*. Dacă  $x$  reprezintă mărimea fizică necunoscută (de măsurat), iar  $[x]$  unitatea de măsură adoptată, atunci valoarea mărimii de măsurat (măsura lui  $x$ ) este:

$$x_m = \frac{x}{[x]}. \quad (1.1)$$

### 1.2.1. Clasificarea mărimilor fizice

Mărimile fizice se clasifică după următoarele criterii:

- din punctul de vedere al introducerii într-o teorie a unui domeniu al fizicii, mărimile fizice pot fi *mărimi primitive și derivate*;
- după modul în care intervin în caracterizarea stărilor unui sistem fizic, mărimile fizice se clasifică în *mărimi de stare, accesorii și de interacțiune*;
- din punctul de vedere al sistemelor de unități, mărimile fizice sunt *mărimi fundamentale și secundare*;
- din punctul de vedere al localizării în spațiu, mărimile fizice se clasifică în *mărimi globale*, dacă sunt asociate unor regiuni (volum, suprafețe sau linii) și *mărimi locale*, dacă sunt asociate unor puncte;
- după existența sau lipsa legii de compoziție internă de tip aditiv în caracterizarea structurii lor algebrice, mărimile sunt *extensive* sau *intensive*.

**a. Mărimi primitive și derivate.** *Mărimile derivate* sunt acele mărimi care, într-o teorie dată, se introduc cu ajutorul altor mărimi de referință prin relații analitice, nefiind necesare experiențe care să pună în evidență noi proprietăți. De exemplu, accelerația  $\mathbf{a}$  se definește în funcție de viteza  $\mathbf{v}$  și de timpul  $t$  cu relația  $\mathbf{a} = d\mathbf{v}/dt$ , iar viteza cu relația  $\mathbf{v} = d\mathbf{r}/dt$ ,  $\mathbf{r}$  fiind raza vectorie. Ambele mărimi  $\mathbf{a}$  și  $\mathbf{v}$  sunt mărimi derivate. În general, o mărime derivată se definește ca funcție de alte mărimi și relația obținută constituie *relația de definiție a mărimii derivate*. Unitatea și metoda de măsurare rezultă din relația de definiție în funcție de unitățile și metodele de măsurare ale mărimilor de referință. În acest proces de definire a mărimilor, unele în funcție de altele, scade treptat numărul celor nedefinite în acest mod. Se ajunge astfel la un stadiu în care mărimile rămase nu mai pot fi definite cu ajutorul altor mărimi. Acestea se numesc *mărimi primitive* și introducerea lor se face prin interpretarea datelor experimentale. În mecanica clasică sunt mărimi primitive: lungimea, durata, masa și forța.

**b. Mărimi de stare, accesorii și de interacțiune.** Fenomenele, transformările, interacțiunile din sistemele fizice sunt mulțimi de evenimente care, în raport cu un eveniment de referință, se preced, sunt simultane sau se succed. În conformitate cu principiul cauzalității, pentru orice eveniment există o cauză care-l determină univoc ca efect al său. Evenimentele susceptibile de a constitui cauze se numesc *evenimente de stare*, iar mărimile care le caracterizează proprietatea de stare se numesc *mărimi de stare*. Mulțimea evenimentelor de stare simultane alcătuiește *starea sistemului fizic* în momentul respectiv, descrisă de mulțimea corespunzătoare a mărimilor de stare. În mecanica clasică, de exemplu, starea unui punct material este complet determinată de parametrii de stare: raza vectorie și impulsul. Evenimentele, respectiv mărimile care nu intervin în starea unui sistem fizic izolat, se numesc *evenimente accesorii*, respectiv *mărimi accesorii*.

Dacă sistemul fizic nu este izolat, determinarea univocă a evoluției lui este condiționată de cunoașterea interacțiunilor cu sistemele fizice din exterior. Mărimile fizice care caracterizează interacțiunile dintre sistemele neizolate sau trecerea lor dintr-o stare în alta se numesc *mărimi de interacțiune*. De exemplu, forța descrie interacțiunea unui punct material cu alte puncte materiale, sau a unui

corp cu alte corpuri, iar lucrul mecanic este o mărime care caracterizează trecerea punctului material dintr-o stare în alta.

Un grup de mărimi de stare al unui sistem fizic izolat este complet, respectiv incomplet, după cum valorile mărimilor de stare la un moment dat determină, respectiv nu determină univoc starea ulterioară a sistemului.

**c. Mărimi extensive și intensive.** Mărimile ale căror valori se adună la reunirea a două sisteme fizice se numesc *mărimi extensive*. Astfel de mărimi sunt: lungimea, volumul, masa, sarcina electrică etc.

*Mărimile intensive* sunt mărimile care caracterizează local un sistem fizic. La reunirea a două sisteme fizice identice, mărimile intensive care caracterizează sistemul rezultat sunt egale cu cele care caracterizează fiecare dintre sistemele componente. Astfel de mărimi sunt: temperatura, presiunea, densitatea de masă, densitatea de sarcină etc.

### 1.3. LEGI ȘI TEOREME

Propozițiile unui domeniu de cercetare care enunță relații între mărimi nu sunt independente și unele dintre ele pot fi demonstrate cu ajutorul altor propoziții de referință; ele se numesc *teoreme* în raport cu propozițiile de referință. Odată cu demonstrarea unora dintre propozițiile de referință, numărul celor nedemonstrate scade treptat și se ajunge astfel la un stadiu în care propozițiile rămase nu mai pot fi demonstrate unele cu ajutorul celorlalte. Aceste propoziții sunt independente între ele și se numesc *legi*. Oricare dintre teoreme poate fi demonstrată cu ajutorul exclusiv al legilor, datorită caracterului general al acestora. Dacă într-un domeniu determinat, toate teoremele pot fi demonstrate cu ajutorul unui număr de legi, acestea alcătuiesc un *sistem complet de legi*. Calitatea de lege sau de teoremă atribuită unei propoziții este relativă în raport cu stadiul de cunoaștere al domeniului. Există propoziții care la data stabilirii lor au redat cele mai generale cunoștințe în acel domeniu, denumirea de lege fiind pe deplin justificată. Ulterior, progresul științei a permis descoperirea unor propoziții mai generale, încât în formularea lor inițială, reprezintă cazuri particulare sau consecințe. Astfel, la data descoperirii, relația lui Coulomb a reprezentat cele mai generale cunoștințe despre fenomenele electrice și s-a numit multă vreme legea lui Coulomb. În stadiul actual al cunoștințelor, relația lui Coulomb se deduce din legile generale ale fenomenelor electrice și magnetice și este de fapt o teoremă. De asemenea, la data enunțării relațiilor lui Kirchhoff pentru circuite electrice acestea au avut caracter de generalitate a cunoștințelor și s-au numit legi. Se demonstrează însă că ambele relații ale lui Kirchhoff sunt consecințe ale legilor de conservare a sarcinii electrice și inducției electromagnetice.

Legile sau teoremele se exprimă prin ecuații între mărimi, în general de forma:

$$m = L(a, b, \dots, n), \quad (1.2)$$

unde  $L$  este un operator care aplicat mărimilor  $a, b, \dots, n$  determină mărimea  $m$ . Dacă prin relația (1.2) se introduce o mărime derivată  $m$  în funcție de alte mărimi primitive sau derivate  $a, b, \dots, n$ , cunoscute în cadrul unei teorii date, relația (1.2) constituie o *relație de definiție*; dacă  $m$  este o mărime primitivă și relația (1.2) care o definește enunță totodată o proprietate nouă, relația constituie o *lege*.

Legile exprimă felul în care se produc transformările, interacțiunile, procesele și fenomenele în sistemele fizice, punând în evidență existența legăturilor interioare și exterioare.

### 1.3.1. Clasificarea legilor

Legile și teoremele unui domeniu în formularea cărora intervin numai mărimile domeniului respectiv și eventual și ale domeniului general, se numesc *legi* și *teoreme interne*, iar dacă intervin și mărimi ale altor domenii speciale ale fizicii, se numesc *legi* și *teoreme externe*. De exemplu, legea inducției electromagnetice și teorema relaxației sarcinii electrice sunt propoziții interne ale electromagnetismului, însă legea transformării energiei în conductoare și teoremele forțelor generalizate în câmp electric și magnetic sunt propoziții externe, deoarece intervin și mărimi din domeniile mecanicii și termodinamicii.

Din punctul de vedere al relației cauză - efect, legile se clasifică în *legi de stare* și *legi de evoluție*. O lege este de stare dacă exprimă conexiuni între evenimente de stare simultane și în formularea ei nu intervin derivate în raport cu timpul ale unor mărimi de stare care să nu fie și ele mărimi de stare. Ecuațiile care corespund legilor de stare se numesc *ecuații de stare*. Exemple de legi de stare sunt: legea conducției electrice a lui Ohm, legea de stare a gazelor etc. O lege este de evoluție dacă exprimă conexiuni între evenimente care nu sunt simultane, iar relația dintre evenimente este cauzală. Formulările matematice ale legilor de evoluție, numite *ecuații de evoluție*, conțin derivate ale mărimilor de stare. Unele din legile de evoluție sunt caracterizate de invarianța în timp a unei mărimi de stare și ecuația respectivă exprimă anularea derivatei acesteia în raport cu timpul. Din această categorie fac parte *legile de conservare* a energiei, masei, impulsului etc. Alte legi de evoluție sunt caracterizate de relații în care derivatele în raport cu timpul ale mărimilor de stare sunt nenule; de exemplu, legea inducției electromagnetice și legea circuitului magnetic.

În expresiile matematice ale legilor și teoremelor pot interveni *constante de proporționalitate*. Dacă valorile lor depind numai de sistemul de unități de măsură și deci se modifică la schimbarea acestuia, se numesc *constante universale*, iar dacă depind de material se numesc *constante de material*. Constantele care rămân nemodificate la schimbarea sistemului de unități de măsură și nu sunt nici constante de material, se numesc *coeficienți de proporționalitate*. Astfel, în ecuația de definiție a energiei cinetice a unui corp punctiform intervine coeficientul de proporționalitate  $1/2$ , în legea lui Ohm intervine constanta de material rezistență electrică, iar în teoremele lui Coulomb și Laplace intervin constantele universale, permitivitatea și permeabilitatea vidului.

Din punctul de vedere al acestor constante, legile se clasifică în *legi generale* dacă în formularea lor nu intervin constante de material, dar pot conține constante universale, respectiv coeficienți de proporționalitate, și în *legi de material*, dacă ele conțin constante de material. De exemplu, legile atracției universale, inducției electromagnetice și circuitului magnetic sunt legi generale, iar legile polarizațiilor temporare electrică și magnetică sunt legi de material.

## 1.4. SISTEME COERENTE DE UNITĂȚI DE MĂSURĂ

### 1.4.1. Mărimi fundamentale și secundare

În relațiile de definiție (1.2) ale unor mărimi derivate pot interveni coeficienți de proporționalitate cu valori numerice care nu se schimbă odată cu schimbarea unităților de măsură. În aceste condiții, relațiile (1.2) se numesc *forme de coerență* ale relațiilor de definiție și constantele numerice se numesc *coeficienți de coerență*. Forma de coerență a unei mărimi derivate determină măsura, unitatea și metoda de măsurare în funcție de măsurile, unitățile și metodele de măsurare ale mărimilor de referință, derivate sau primitive, care intervin în relația de definiție. În cazul mărimilor primitive, *relațiile de detectare* îndeplinesc funcția relațiilor de definiție a mărimilor derivate. Mărimile derivate sau primitive ale căror unități și metode de măsurare se definesc cu ajutorul unităților și metodelor de măsurare ale altor mărimi, se numesc *mărimi secundare*.

În vederea reducerii numărului coeficienților de coerență, este preferabil să se atribuie acestora valori numerice egale cu unitatea. Deoarece teoremele se demonstrează cu ajutorul legilor și a relațiilor de definiție al căror număr este în general mai mic decât al mărimilor primitive și derivate, nu toți coeficienții de coerență sunt independenți și deci nu este posibil să fie aleși toți egali cu unitatea. De exemplu, dacă se alege coeficientul de coerență egal cu unitatea în relația de definiție a vitezei, pentru coeficientul energiei cinetice a unui punct material rezultă  $1/2$ . În operația de determinare și pentru mărimile primitive a unităților și metodelor de măsurare cu ajutorul relațiilor de coerență ale relațiilor lor de detectare, se ajunge la un stadiu în care pentru mărimile rămase nu mai este posibil să se deducă în același mod unitățile și metodele de măsurare ale acestora. Aceste mărimi se numesc *mărimi fundamentale* și unitățile, respectiv metodele de măsurare se stabilesc în mod independent prin indicarea unui obiect, stare, proces etc. Mărimile fundamentale pot fi primitive sau derivate, iar calitatea de fundamentală sau secundară a unei mărimi depinde de sistemul de unități adoptat. Astfel, în mecanică, forța deși este o mărime primitivă nu este mărime fundamentală în sistemul internațional de unități.

### 1.4.2. Sisteme coerente de unități de măsură

Alegerea numărului de mărimi fundamentale dintre mărimile derivate sau primitive disponibile este, în principiu, arbitrară și la stabilirea lor efectivă intervin condiții tehnice de metrologie (de exemplu, precizie ridicată). Sistemul complet de

unități de măsură al mărimilor fundamentale în funcție de care se determină univoc unitățile de măsură ale tuturor mărimilor se numește *referențial* sau *sistem coerent de unități de măsură*. În mecanică numărul mărimilor fundamentale este egal cu trei: lungime, timp și masă. La mărimile fundamentale ale mecanicii, termodinamica adaugă o nouă mărime fundamentală - temperatura. Fotometria introduce mărimea fundamentală intensitatea luminoasă, iar electromagnetismul contribuie cu încă o mărime fundamentală – intensitatea curentului electric de conducție. În anul 1960, Conferința Internațională de Măsuri și Greutăți a adoptat Sistemul Internațional de Unități de Măsură (SI), definit prin alegerea unităților de măsură ale mărimilor fundamentale: lungime, timp, masă inertă, temperatură termodinamică, intensitate luminoasă și intensitate a curentului electric de conducție. Unitățile sistemului SI se numesc: metru (m) pentru lungime, secundă (s) pentru timp, kilogram (kg) pentru masa inertă, grad Kelvin (K) pentru temperatura termodinamică, candelă (cd) pentru intensitatea luminoasă și amper (A) pentru intensitatea curentului electric de conducție.

## 1.5. CÂMPUL ELECTROMAGNETIC ÎN TEORIA MACROSCOPICĂ

### 1.5.1. Ipotezele teoriei macroscopice a fenomenelor electrice și magnetice

Fenomenele electrice și magnetice nu sunt accesibile direct simțurilor umane, ci indirect prin intermediul unor efecte secundare de natură mecanică, termică, chimică etc. Experimental s-a stabilit că pot exista stări specifice ale corpurilor în care acestea manifestă proprietăți noi, diferite de cele de natură mecanică, termică, chimică. Pentru descrierea cantitativă a acestor proprietăți trebuie introduse mărimi de stare noi, ireductibile la cele mecanice, termice etc. Aceste mărimi sunt numite *mărimi electrice și magnetice*.

Tot experiența a arătat că, atunci când se găsesc în asemenea stări, între corpuri se exercită interacțiuni (forțe și cupluri) de natură diferită de interacțiunile mecanice numite *interacțiuni electromagnetice*. Aceste interacțiuni sunt efectul acțiunii exercitate asupra corpurilor de un sistem fizic distinct de ele, numit *câmp electromagnetic*. Câmpul electromagnetic poate exista atât în afara cât și în interiorul corpurilor și reprezintă suportul fizic care permite transmiterea interacțiunilor electromagnetice din aproape în aproape în timp și spațiu, la orice distanță. Câmpul electromagnetic este deci purtător de energie și impuls.

Corpul, aflat în stări electrice și magnetice specifice, își asociază un câmp electric sau magnetic propriu și acesta va exercita asupra oricărui alt corp aflat într-o stare similară forțe și cupluri corespunzătoare. Câmpul electric și câmpul magnetic sunt legate organic, constituind componentele complementare ale câmpului electromagnetic.

Teoria fenomenelor electrice și magnetice inițiată de Faraday și desăvârșită de Maxwell pentru medii imobile și de Hertz pentru medii în mișcare lentă, este o

teorie *fenomenologică*, *macroscopică* și *nerelativistă*. Caracterul fenomenologic rezultă din modul în care mărimile și legile teoriei se stabilesc prin analiza datelor experimentale, respectiv prin sinteză inductivă și generalizare, nefiind necesare ipoteze care să postuleze imposibilitatea verificării lor prin experiență. Caracterul macroscopic rezultă din faptul că se admite un model continuu al substanței (materiei), adică în această teorie nu se ia în considerare structura la scară atomică. În conformitate cu acest model, mărimile fizice sunt proprietăți locale cu repartiție continuă în spațiu și evoluție continuă în timp. Chiar și unele discontinuități, cum sunt cele de la suprafața corpurilor, se presupun cazuri limită în care densitatea de masă a corpurilor tinde extrem de repede către zero; în acest sens prin *vid* se înțelege o stare limită de rarefiere a substanței corpurilor.

### 1.5.2. Clasificarea regimurilor câmpului electromagnetic

Din punct de vedere al modului de variație în timp a mărimilor electrice și magnetice, se disting: *regimul staționar* și *regimul variabil în timp*.

În regim staționar mărimile nu variază în timp, dar au loc transformări de energie; din această categorie fac parte regimurile de *câmp electric staționar* (*electrocinetica*) și de *câmp magnetic staționar*. Regimul staționar neînsoțit de transformări de energie se numește *static* și anume: de *câmp electrostatic* (*electrostatica*) și de *câmp magnetostatic* (*magnetostatica*).

Regimurile variabile în timp în care se ia în considerare numai viteza de variație în timp a uneia dintre inducțiile, fie electrică fie magnetică, se numesc *cvasistaționare*. În regim *cvasistaționar anelectric* sau *magnetic* se neglijează intensitatea curentului electric hertzian, iar în regim *cvasistaționar amagnetic* sau *electric* se neglijează tensiunea electromotoare indusă de fluxul magnetic variabil în timp. Regimul general variabil se mai numește și *regim nestaționar*.

Prezentarea sistematică a teoriei câmpului electromagnetic necesită introducerea inductivă a mărimilor primitive, urmată de definirea mărimilor derivate. Pentru introducerea mărimilor primitive se concep anumite experimente idealizate, astfel încât să intervină numai acele aspecte ale fenomenelor care sunt caracterizate de aceste mărimi. În toate cazurile, se consideră regimul static sau staționar de desfășurare a fenomenelor, ceea ce permite separarea efectelor electrice de cele magnetice. Valabilitatea concluziilor se generalizează inductiv pentru cazul regimului nestaționar. Experimentele idealizate reprezintă cazuri limită ale experimentelor reale. În majoritatea cazurilor, metodele de măsurare descrise pentru introducerea mărimilor primitive nu sunt utilizabile direct decât cu o precizie redusă. Ele reprezintă însă o abstractizare a mulțimii experimentelor care au dus la introducerea mărimilor respective.

Mărimile primitive se introduc inductiv prin studiul efectelor fenomenelor electromagnetice și sunt exprimate în raport cu mărimile neelectrice care caracterizează aceste efecte. Mărimile derivate se definesc în raport cu mărimile primitive, fără a mai fi necesare experimente.