

NOȚIUNI DE TEORIA RELATIVITĂȚII RESTRÂNSE

1. INTRODUCERE.

La sfârșitul secolului al XIX-lea, teoria lui Maxwell asupra câmpului electromagnetic era confruntată cu problema explicării fenomenelor electromagnetice în medii în mișcare. Se știe că legile mecanicii, cât și ale legilor câmpului electromagnetic sunt formulate în **sisteme de referință inerțiale**.

De asemenea, legile mecanicii clasice, sunt verificate de datele experimentale când vitezele relative considerate au valori mult mai mici decât **viteza luminii**. În cazul vitezelor relative foarte mari, comparabile cu viteza luminii, (ex. viteza de propagare a câmpului electromagnetic) legile și principiile de bază ale fizicii trebuie să fie modificate și reformulate în funcție de o teorie mai generală, mecanica clasică constituind un caz limită al acestei teorii, cazul vitezelor mici, mult mai mici decât viteza luminii.

Această nouă teorie în care se formulează legile generale ale fenomenelor fizice în formă valabilă indiferent de valoarea vitezei corpurilor, poartă numele de **teoria relativității restrânse**.

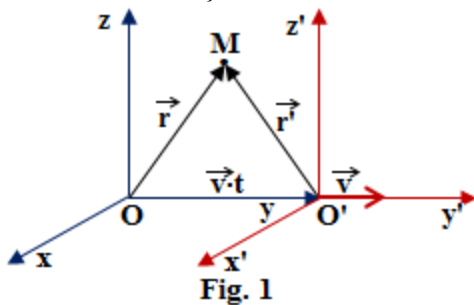
Teoria relativității restrânse nu este o teorie fizică, în sensul că ea nu este teoria vreunui fenomen particular. Teoria relativității restrânse constituie, în esență, baza teoriilor care vor fi în mod obligatoriu "relativiste" și vor purta acest nume, dar vor conserva domeniul lor explicativ particular.

Teoria relativității restrânse a fost elaborată de **A. Einstein** (1905), însă trebuie să se sublinieze rolul important al precursorilor acestei teorii precum **H. A. Lorentz**, **J. H. Poincaré** și **P. Langevin**.

Teoria relativității restrânse se limitează la cazul sistemelor de referință în mișcare rectilinie uniformă unele în raport cu altele, limitare justificată în studiul fenomenelor unde influența gravitației este neglijabilă. De altfel, datorită acestui fapt ea poartă numele de teoria relativității restrânse. Teoria relativității care ia în considerare și influența gravitațională se numește **teoria relativității generalizate**.

2. PRINCIPIUL RELATIVITĂȚII ÎN MECANICA CLASICĂ

Fie **S.I.** și **S'.I'** două sisteme de referință inerțiale (Fig. 1). Sistemul **S.I.** este în repaus, iar sistemul



S'.I' se deplasează cu viteza constantă \vec{v} . Să presupunem că, la un moment dat, undeva, într-un punct **M** al spațiului se produce un eveniment, de ex. se aprinde un bec, explozia unei petarde, etc.

Un **eveniment** este un fenomen sau lucru căruia i se poate atașa un moment în timp și o locație în spațiu unice în raport cu un sistem de referință.

Conform principiului relativității clasice, *fenomenele mecanice se petrec identic în orice sistem de referință inerțial*.

Considerăm, de asemenea, că la momentul inițial, $t = 0$, originile celor două sisteme de referință inerțiale au coincis.

Distanța măsurată până la punctul **M**, în funcție de sistemul de referință, este dată de relația:

$$\vec{r}' = \vec{r} - \vec{v} \cdot t \quad (1)$$

Sau, pe coordonate:

$$\begin{cases} x' = x - v \cdot t, \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = t \end{cases} \quad (1')$$

Relațiile (1') mai sunt cunoscute și sub numele de **grupul de transformări Galilei**, sau **ecuațiile Galilei**.

Sesizați că mișcarea este considerată unidirecțională și mai sesizați că pe lângă cele trei coordonate spațiale, **x**, **y** și **z** mai avem în vedere încă o coordonată, coordonata spațială, **t**.

Spațiul cu trei dimensiuni se numește spațiu Euclidian. Îl cunoaștem de la orele de geometrie. Dacă spațiului Euclidian îi adăugăm a patra dimensiune, timpul t , spațiul se numește spațiu Minkowski.

Postularea relației $t' = t$ reflectă *caracterul sincron (simultan)* a două evenimente în concepția clasică, newtoniană, conform căreia, timpul „**curge**” identic în toate sistemele de referință inerțiale, adică **timpul are caracter absolut (este invariant)**.

Derivând rel. (1) la timp obținem:

$$\frac{d\vec{r}'}{dt'} = \frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{v} \quad (2)$$

Cu observația că: $\vec{u} = \frac{d\vec{r}}{dt}$ și $\vec{u}' = \frac{d\vec{r}'}{dt'}$ (3)

Analizând rel. (2) și (3), se observă că: $\vec{u}' = \vec{u} + \vec{v}$ (4), relație care reprezintă **legea (relația) de compunere a vitezelor în mecanica clasică**.

Derivând încă odată la timp rel. (4) la timp obținem:

$$\frac{d\vec{u}'}{dt'} = \frac{d\vec{u}}{dt} \quad (5),$$

cu observația că: $\frac{d\vec{u}'}{dt'} = \vec{a}'$ și $\frac{d\vec{u}}{dt} = \vec{a}$ (relații cunoscute din clasa a IX-a).

Se observă în continuare că $\vec{a}' = \vec{a}$, *în mecanica clasică accelerația este invariantă*.

Dar, postulăm în continuare: *în mecanica clasică masa este invariantă $m=m_0$* și ținând cont de principiul fundamental al dinamicii, rezultă în mod implicit $\vec{F}' = \vec{F}$ deci, *legile mecanicii clasice se formulează la fel în toate sistemele de referință inerțiale*. Această formulare reprezintă *principiul relativității în mecanica clasică* și este o consecință a transformărilor Galilei și a tuturor ipotezelor specifice, referitoare la mărimile invariante. Cu alte cuvinte, mișcarea rectilinie uniformă de ansamblu a corpurilor, față de un sistem de referință inerțial oarecare nu ar trebui să influențeze desfășurarea proceselor în care sunt implicate aceste corpuri.

3. TEORIA ETERULUI

Din cele prezentate mai sus rezultă că principiul relativității în mecanica clasică se poate aplica și fenomenelor electromagnetice, a căror desfășurare ar trebui să fie identică în orice sistem de referință inerțial. Fapt neobservat experimental! De exemplu: legea de compunere a vitezelor, rel. (4), ar trebui să se aplice și câmpului electromagnetic. Dar din teoria lui **J. C. Maxwell** rezultă că viteza câmpului electromagnetic este constantă și egală cu viteza luminii.

De asemenea, starea câmpului electromagnetic depinde de starea de mișcare a corpurilor încărcate cu sarcină electrică.

Încercând să rezolve aceste contradicții, existente între mecanica clasică și teoria câmpului electromagnetic, fizicienii au emis ipoteza conform căreia câmpul electromagnetic se propagă printr-un mediu universal, cu proprietăți deosebite, numit **eter**.

Dezvoltarea a fost în continuare puternic marcată de încercările atât teoretice cât și experimentale, de a descifra proprietățile fizice ale eterului luminos, conceput ca mediu suport al undei luminoase și care ar umple întreg spațiul cosmic cât și interiorul tuturor corpurilor.

H. Hertz utilizând ideile lui **G. G. Stokes**, a considerat că eterul este total antrenat de corpurile în mișcare, formulând în acest sens o teorie care însă nu a putut interpreta în mod corect fenomenele care apar de exemplu la deplasarea unui dielectric în câmp exterior.

În 1892 **H. A. Lorentz** a elaborat teoria electronică a electricității, care lua în considerare structura discontinuă a acesteia. În cadrul acestei teorii, eterul era considerat ca fiind în repaus absolut. În acest mod

rezulta posibilitatea obținerii unui sistem de referință privilegiat, față de care s-ar putea raporta mișcarea tuturor corpurilor și care ar fi, din acest punct de vedere, identic cu spațiul absolut preconizat de Newton.

Dacă eterul ar fi în repaus absolut, neantrenat de mișcarea nici unui corp, ar putea fi pusă în evidență experimental existența unui “vânt eteric” datorat mișcării Pământului pe orbita sa în jurul Soarelui. Un astfel de experiment, pentru a fi concludent, ar trebui să fie un experiment (așa numit) de ordinul doi în raport cu $\beta = v/c$, adică să poată pune în evidență modificări de ordinul β^2 , astfel încât precizia rezultatelor să poată decide definitiv fie în favoarea eterului antrenat fie a celui neantrenat de mișcarea corpurilor. Un astfel de experiment a fost realizat în 1881 de A. Michelson și reluat, cu unele perfecționări, de **Michelson și Morley** în 1887.

Rezultatul acestui experiment crucial a fost însă negativ! Ceea ce înseamnă că ipoteza eterului în repaus absolut este și ea falsă. În concluzie: ***totul se petrece ca și cum viteza luminii ar avea o valoare constantă, independentă de starea de mișcare a sistemului de referință și de direcție.***

4. PRINCIPIILE RELATIVITĂȚII RESTRÂNSE :

Plecând de la analiza noțiunilor de spațiu și timp din mecanica clasică și de la rezultatul experimentului Michelson și Morley, A. Einstein formulează în 1905 următoarele două principii care stau la baza teoriei relativității restrânse:

1. **Legile fizicii sunt invariante (păstrează aceeași formă), față de sistemele de referință inerțiale, altfel spus: nu există sistem de referință inerțial privilegiat.**
2. **Viteza luminii în vid este o constantă universală, fiind independentă de mișcarea sistemului de referință și de direcția în care este emisă.**

Din primul principiu rezultă că nu numai legile mecanicii sunt invariante în raport cu sistemele de referință inerțiale, așa cum fusese stabilit în mecanica clasică și exprimat matematic prin transformările Galilei, ci toate legile fizicii (deci și ale electrodinamicii) sunt invariante față de aceste sisteme de referință.

Relativitatea restrânsă modifică noțiunile newtoniene de spațiu și timp afirmând că timpul și spațiul sunt percepute diferit în sensul că măsurătorile privind lungimea și intervalele de timp depind de starea de mișcare a observatorului.

Din cel de-al doilea principiu al relativității restrânse rezultă inexistența unui timp absolut, existând numai un timp local, astfel încât în locul transformărilor Galilei vor trebui găsite alte transformări, care să țină seama de aceste fapte.

Postulatul al doilea al relativității a condus la reconsiderarea unor noțiuni spațio-temporale fundamentale ca: simultaneitatea, durata unui proces (sau intervalul de timp dintre două evenimente), respectiv distanțele ce separă în spațiu diferitele evenimente.

Teoria relativității restrânse, are la bază cele două postulate ale lui A. Einstein și se aplică numai sistemelor de referință inerțiale, de unde a și primit numele de „restrânsă”.

Mișcarea accelerată a sistemelor de referință, în care se iau în considerare și influențele gravitaționale, este studiată în cadrul teoriei relativității generalizate.

5. TRANSFORMĂRILE LORENTZ

Transformările Lorentz (stabilite de H. A. Lorentz) sunt o consecință a postulatelor teoriei relativității. În fizică, **transformările Lorentz** fac conversia între două măsurători diferite, efectuate de doi observatori diferiți, asupra spațiului și timpului, atunci când un observator este în mișcare uniformă și rectilinie în raport cu celălalt. Astfel, dacă într-un punct al spațiului (Fig. 1) se produce un eveniment, coordonatele spațio-temporale ale acestuia, în raport cu unul dintre sistemele de referință inerțiale S.I., respectiv S'.I'. sunt date de relațiile:

$$x' = \frac{x - v \cdot t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = \frac{t - \frac{v}{c^2} \cdot x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (6)$$

Cunoscute și sub numele de **transformările Lorentz**. Relațiile inverse se obțin prin înlocuirea lui v cu $-v$.

Se observă că în cazul $v \ll c$, ecuațiile Lorentz sunt identice cu ecuațiile Galilei!

Sesizați și de această dată că am considerat mișcarea unidirecțională într-un spațiu quadridimensional, spațiul cu patru dimensiuni, spațiul Minkowski.

6. CONSECINȚELE TRANSFORMĂRILOR LORENTZ.

Principiile teoriei relativității restrânse, exprimate matematic în transformările Lorentz, au condus la o modificare radicală și esențială a imaginii noastre asupra Universului.

A. DILATAREA TIMPULUI. Conform teoriei relativității restrânse, intervalul de timp dintre două evenimente nu mai are caracter absolut. Dacă intervalul de timp dintre două evenimente (sau durata unui proces), care se petrece într-un anumit loc în sistemul $S'I'$, este $\Delta t'$, atunci intervalul de timp Δt dintre aceleași două evenimente în sistemul S.I., față de $S'I'$, care se deplasează cu viteza constantă \vec{v} , este dată de relația:

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (7)$$

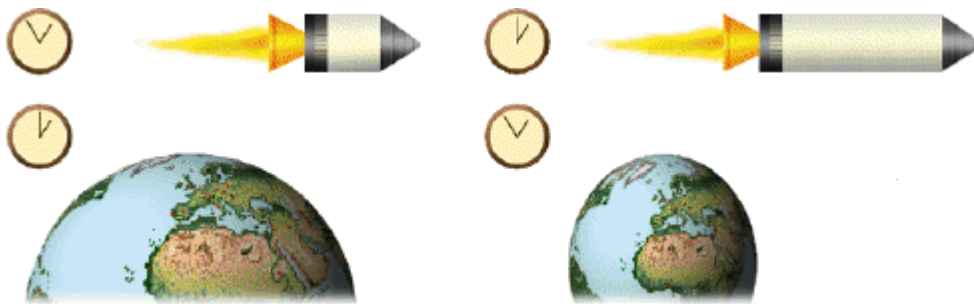
Aceasta înseamnă că *durata unui proces este minimă în acel sistem de referință, față de care locul unde se petrece acest proces este fix*. Spunem că are loc un proces de „**dilatare**” a timpului. Această concluzie a dat naștere unui paradox, numit „**paradoxul gemenilor**”

B. RELATIVITATEA SIMULTANEITĂȚII. Două evenimente care se produc în locații diferite, dar care au loc simultan pentru un observator, ar putea apărea ca având loc la momente diferite pentru un alt observator (lipsa simultaneității absolute).

C. CONTRACȚIA LORENTZ SAU CONTRACȚIA DISTANȚELOR. Dimensiunile corpurilor sau, în general, distanțele dintre ele au caracter relativ.

Distingem două cazuri:

- direcțiile pe care se măsoară lungimile în cele două sisteme de referință inerțiale S.I. și $S'I'$ sunt într-un plan perpendicular pe direcția vitezei relative \vec{v} ;
- direcțiile menționate sunt paralele cu viteza \vec{v} .



Văzută de pe Pământ o rachetă ce călătorește cu o viteză comparabilă cu viteza luminii pare a se micșora. Timpul, pe rachetă, va trece mai încet decât pe Pământ.

Văzut de pe o rachetă ce călătorește cu o viteză comparabilă cu viteza luminii, Pământul apare „strivit”. Timpul, pe Pământ va trece mai repede.

În primul caz, este natural să presupunem că cele două dimensiuni sunt aceleași în ambele sisteme de referință. Aceasta este o consecință a postulatelor lui Einstein.

În al doilea caz lungimea l a unui obiect măsurată în sistemul S.I. este dată de relația:

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (8)$$

Această relație ne arată că lungimea corpurilor (respectiv, distanța dintre

evenimente) se „contractă” pe direcția mișcării lor, fiind maximă în sistemul de referință propriu.

D. COMPUNEREA VITEZELOR. Vitezele nu se adună pur și simplu, ca în cazul mecanicii newtoniene. Legea de compunere a vitezelor în mecanica clasică nu mai este valabilă.

De exemplu dacă o rachetă se mișcă cu viteza v_1 față de un observator, și din ea pleacă o altă rachetă cu viteza v_2 relativă la rachetă, a doua rachetă nu depășește viteza luminii în raport cu observatorul.

Viteza relativă este dată de relațiile:

$$v_r = \frac{v_1 \pm v_2}{1 \pm \frac{v_1 v_2}{c^2}} \quad (9)$$

dacă rachetele se mișcă pe aceeași direcție, în același sens, sau în sensuri diferite, sau:

$$v_r = \sqrt{v_1^2 + v_2^2 - \frac{v_1 v_2}{c^2}} \quad (9')$$

Dacă rachetele se mișcă pe direcții perpendiculare.

E. INERȚIA ȘI IMPULSUL. Când viteza unui obiect se apropie de cea a luminii din punctul de vedere al unui observator, masa obiectului pare să crească făcând astfel mai dificilă accelerarea sa în sistemul de referință al observatorului, rel. (12).

F. ECHIVALENȚA MASEI ȘI ENERGIEI, $E = mc^2$. Energia înmagazinată de un obiect în repaus cu masa m este egală cu mc^2 . Conservarea energiei implică faptul că în orice reacție, o scădere a sumei maselor particulelor trebuie să fie însoțită de o creștere a energiilor cinetice ale particulelor după reacție. Similar, masa unui obiect poate fi mărită prin absorbția de către acesta de energie cinetică.

7. ELEMENTE DE DINAMICĂ RELATIVISTĂ

Teoria relativității restrânse presupune, așa cum am văzut până acum, o nouă concepție despre spațiu și timp, ceea ce implică și o reformulare a principiilor dinamicii.

În mecanica clasică, principiul al doilea al dinamicii:

$$m \cdot \vec{a} = m \cdot \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \vec{F} \quad (10)$$

are aceeași formă pentru toate sistemele de referință inerțiale. De aici rezultă că, dacă acționăm supra unui corp cu o forță constantă un timp îndelungat, viteza corpului poate crește oricât de mult.

Dar, conform postulatului al doilea al lui Einstein, viteza unui corp sau viteza de transmitere a unei interacțiuni nu poate fi mai mare decât viteza de propagare a luminii în vid $c = 3 \cdot 10^8 m/s$.

Einstein a arătat că la baza dinamicii relativiste se poate pune principiul fundamental al dinamicii în forma

sub care a fost enunțat de Newton:
$$\frac{\Delta(m\vec{v})}{\Delta t} = \frac{\Delta\vec{p}}{\Delta t} = \vec{F} \quad (11)$$

În continuare, ceea ce suferă modificări esențiale este noțiunea de masă a corpului. Spre deosebire de mecanica clasică, în mecanica relativistă *masă nu mai este invariantă*, ci depinde de viteză conform relației:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (12)$$

relație cunoscută sub numele de **relația relativistă dintre masă și viteză**.

Relația (11) se mai poate scrie:

$$m = m_0 \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}} \quad (13)$$

Această relație se poate dezvolta în serie de puteri:

$$m = m_0 + \frac{1}{2} \cdot \frac{m_0 \cdot v^2}{c^2} \quad (14) \quad \text{sau} \quad (m - m_0) \cdot c^2 = \frac{m_0 \cdot v^2}{2} = E_c \quad (14')$$

Unde E_c este, evident, energia cinetică a corpului. Rezultă de aici că energia totală a unui corp este dată de relația:

$$E = m \cdot c^2 \quad (15)$$

cunoscută sub numele de **relația relativistă dintre masă și energie**, sau **relația lui Einstein**.

Importanța relației constă în faptul că, pentru prima dată, cineva a demonstrat că cele două concepte: de masă și de energie nu pot fi separate. Sau altfel spus: **dacă într-un punct al Universului există masă, acolo trebuie să existe și energie și invers.**

8. ACTIVITĂȚI DE FIXARE A CUNOȘTINȚELOR ȘI EVALUARE

A. Formulați răspunsuri pentru următoarele întrebări:

1. Ce este un sistem de referință inerțial?
2. Cine și când (aprox.) a măsurat pentru prima dată **viteza luminii**? Care a fost concluzia?
3. Scrieți relația de compunere a vitezelor în mecanica clasică?
4. Cum se numește teoria în care legile generale ale fizicii sunt formulate în formă valabilă indiferent de valoarea vitezei corpurilor?
5. Ce este un eveniment, în accepțiunea limbajului fizic?
6. În ce an și pentru ce contribuție la dezvoltarea fizicii a primit Albert Einstein **premiul Nobel** pentru fizică?
7. Ce este un invariant?
8. Ce se înțelege prin „*character absolut*” al conceptelor de spațiu și timp, în mecanica clasică?
9. Ce se înțelege prin caracterul simultan a două evenimente?
10. Cine a formulat pentru prima dată o teorie unitară a *câmpului electromagnetic*?
11. Ce este *eterul*?
12. Care sun cele două teorii referitoare la existența eterului și în ce constau acestea?
13. Care este obiectivul și concluzia experienței Michelson și Morley?
14. Enunțați principiile Teoriei Relativității Restrânse.
15. Care este importanța postulatului al doilea al Teoriei Relativității Restrânse?
16. Care sunt consecințele Teoriei Relativității Restrânse?
17. Ce este masa de repaus?
18. Care este relația relativistă dintre masă și viteză?
19. Care este relația relativistă dintre masă și energie?
20. În ce constă importanța relației relativiste dintre masă și energie?

B. Rezolvați:

1. O barcă se deplasează cu viteza $v=52\text{km/h}$ pe un râu care curge cu viteza $u=5\text{m/s}$. Calculați viteza bărcii față de Pământ, când se deplasează atât în sensul curgerii râului cât și în sens invers.
R: $u'_1 = 20\text{m/s}$; $u'_2 = 10\text{m/s}$
2. Un avion se deplasează cu viteza $v=144\text{km/h}$, pe direcția est-vest. Vântul bate cu viteza $u=30\text{m/s}$, pe direcția nord-sud. Care va fi viteza avionului față de Pământ?
R: $u' = 50\text{m/s spre sud - vest}$
3. Ce viteză trebuie să aibă un corp pentru ca lungimea sa să se micșoreze de două ori?

$$R: u' = 86,60\% c$$

4. O rachetă se deplasează în spațiu cu viteza $v=0,8c$. Care este contracția timpului înregistrată de cosmonauți?

$$R: \Delta t' = 1,29\Delta t$$

5. O rachetă se deplasează în spațiu cu viteza $v=0,6c$. De câte ori crește masa rachetei?

$$R: \Delta m = 25\%m_0$$

6. Ce viteză trebuie să aibă o particulă pentru ca masa ei să crească de trei ori față de masa de repaus?

$$R: v = 94,28\% c$$

7. O particulă se mișcă cu viteza $v=0,75 c$. Să se afle raportul m/m_0 pentru această particulă.

$$R: m/m_0 \cong 1,52$$

BIBLIOGRAFIE:

1. Mantea C., Garabet M – Fizica F_1+F_2 , manual pentru clasa a 12-a, Editura ALL Educational, 2007
2. Ciubotaru D., ș.a. – FIZICA, Manual pentru clasa a XII-a, Editura Didactică și Pedagogică, București – 1994.
3. Vlăducă Gh., ș.a. – PROBLEME DE FIZICĂ PENTRU CLASELE XI-XII, Editura Didactică și Pedagogică, București – 1983.
4. Cone G., Stanciu Gh. - PROBLEME DE FIZICĂ PENTRU LICEU, vol. II, Editura Academiei, 1988
5. <http://inforisx.incerc2004.ro/sursa.htm>
6. <http://ro.wikipedia.org/>
7. http://www.walter-fendt.de/ph14ro/timedilation_ro.htm