

F22 TEORIA RELATIVITĂȚII RESTRÂNSE

Cuvinte cheie:

- sisteme de referință inerțiale
- viteza luminii în vid
- contracția lungimilor
- dilatarea duratelor
- energia și masa relativiste

Noțiuni anterioare necesare:

- mecanica newtoniană

În acest capitol veți învăța că:

- viteza luminii în vid este o constantă universală și este cea mai mare viteză cu care se pot transmite interacțiunile
- simultaneitatea a două evenimente nu este absolută
- vitezele mari nu se compun ca în mecanica lui Newton
- la viteze mari lungimile se contractă, iar duratele se dilată
- particulele care se mișcă cu viteze mari se deplasează conform legilor TRR
- masa unui corp depinde de viteza sa
- există o proporționalitate între energia unui corp și masa sa, $E=mc^2$; pe această relație se bazează energetica nucleară
- particule masive se pot transforma în particule fără masă de repaus (fotoni)
- toate acceleratoarele de particule sunt proiectate și construite pe baza legilor și a relațiilor din Teoria Relativității Restrânse (TRR)

CUPRINS F22

F22.1. Introducere

- 1.1. Puțină istorie
- 1.2. Domeniu, importanță, aplicații

F22.2. Relativitatea galileană

F22.3. Premize teoretice și experimentale ale teoriei relativității restrânse

- 3.1. Ecuțiile electromagnetismului și transformarea Galilei
- 3.2. Eterul luminos și experiența Michelson-Morley

F22.4. Principiile teoriei relativității restrânse

- 4.1. Reconsiderarea noțiunii de simultaneitate
- 4.2. Principiile teoriei relativității restrânse
- 4.3. Transformările Lorentz
- 4.4. Transformarea Lorentz specială
- 4.5. Interpretarea geometrică a transformării Lorentz speciale

F22.5. Consecințe cinematice ale transformării Lorentz

- 5.1. Măsurarea intervalului de timp. Dilatarea duratelor
- 5.2. Măsurarea lungimilor. Constrația Lorentz
- 5.3. Compunerea vitezelor
- 5.4. Aberația și efectul Doppler

F22.6. Dinamica relativistă

- 6.1. Masa și impulsul în fizica nerelativistă
- 6.2. Masa și impulsul în fizica relativistă
- 6.3. Energia relativistă
- 6.4. Corpuri care se mișcă cu viteza luminii
- 6.5. Ciocniri relativiste. Efectul Compton.
- 6.6. Defectul de masă și energia de legătură
- 6.7. Generarea și anihilarea perechilor particulă-antiparticulă

F22.7. Mecanica în spațiul Minkowsky

- 7.1. Proprietățile cuadvecturilor. Invarianți relativști.
- 7.2. Cuadriintervalul
- 7.3. Cuadriviteza
- 7.4. Cuadriacelerația
- 7.5. Cuadriimpulsul

7.6. Cuadrivectorul de undă

7.7. Probleme rezolvate.

F22.7 Teste

F22.1. Introducere

1.1. Puțină istorie

Teoria relativității restrânse (TRR) este un capitol care deschide istoria *fizicii moderne* la începutul secolului al XX-lea. Acest capitol este complet diferit de toate celelalte părți studiate anterior, pe care le vom numi “nerelativiste” sau “clasice”. (*Tema 1*)

Până spre sfârșitul secolului al XIX-lea fizica nerelativistă se prezenta ca o teorie armonioasă și cuprinzătoare. Mecanica clasică, termodinamica și electromagnetismul – care includea și optica – reușiseră să explice foarte multe fenomene. Însă teoria lui Maxwell nu explică electromagnetismul corpurilor în mișcare într-un mod care să se potrivească cu rezultatele mecanicii. Aceste fenomene sunt studiate de *teoria relativității restrânse* (ne restrângem la mișcări rectilinii și uniforme ale sistemelor de referință). Interpretările teoretice au încercat să explice comportarea luminii în corpuri în mișcare pe baza existenței *eterului*

Teoria actuală a relativității restrânse a fost elaborată de Albert Einstein, care, în 1905, a dat o explicație revoluționară tuturor rezultatelor anterioare. De aceea TRR este legată de numele său. Interpretarea lui Einstein modifică drastic ideile noastre despre spațiu și timp precum și capitolele fizicii clasice, în particular mecanica. Însă mecanica clasică era o știință cu realizări teoretice enorme și cu aplicații numeroase și diverse. Dacă se acceptă TRR, atunci mecanica nerelativistă trebuie modificată radical. De ce ar trebui să schimbăm un capitol al fizicii care se aplică în tehnică și în știință cu rezultate frumoase ? Răspunsul la această întrebare este următorul: ori se păstrează mecanica nerelativistă, și atunci electromagnetismul nu este corect explicat; ori se descrie corect electromagnetismul (și optica), dar în schimb se modifică mecanica. Măsurările electromagnetice și optice sunt printre cele mai precise pe care le putem face, mult mai precise decât cele mecanice. Acest fapt era adevărat la sfârșitul secolului al XIX-lea și a rămas adevărat până acum. De aceea fizicienii au adoptat punctual de vedere al lui Einstein, ceea ce a dus la modificarea mecanicii clasice.

Între anii 1907-1915 tot Einstein a elaborat Teoria Relativității Generale, care studiază fenomenele fizice în prezența gravitației, sau în sisteme de referință neinertiale.

1.2. Domeniu, importanță, aplicații

Teoria Relativității Restrânse este teoria actuală a fenomenelor fizice care se petrec la viteze mari, de ordinul de mărime al vitezei luminii în vid ($c \cong 3 \cdot 10^8$ m/s). După cum vom

vedea, TRR arată că viteza c nu poate fi depășită de nici un corp. Discutăm așadar despre fizica sistemelor care se mișcă cu viteze apropiate, dar mai mici decât c . Vom arăta că în cazul vitezelor mici rezultatele relativiste coincid cu cele clasice, nerelativiste. În acest fel, *fizica nerelativistă este un caz particular al celei relativiste*. Acesta este **Principiul de corespondență: o teorie mai completă și mai corectă conține vechea teorie ca un caz particular**.

Ca să fixăm ideile, sa presupunem că fizica nerelativistă este corectă până la viteze de ordinul $v \approx 0,01 \times c$, adică de aproximativ $3 \cdot 10^6$ m/s. De fapt, eroarea care se face lucrând nerelativist este de ordinul pătratului raportului dintre viteza corpului și viteza luminii în vid, raport notat cu litera grecească β . Alegerea noastră duce la erori de ordinul $\beta^2 = \frac{v^2}{c^2} \approx 10^{-4}$.

Observație: Majoritatea corpurilor cunoscute și studiate de oameni au viteze mult mai mici decât limita aleasă de noi de $3 \cdot 10^6$ m/s ([Tema 2](#)). De ce trebuie totuși să folosim TRR? În ce cazuri suntem obligați să o facem? ([Tema 3](#))

După cum vom vedea mai departe (§ 6.3. *Masa relativistă*) viteza luminii în vid, c , este cea mai mare viteză cu care se poate deplasa un corp material, precum și cea mai mare viteză cu care se propagă interacțiunile și informația. Acest lucru este cunoscut încă din anul 1905, dar de-a lungul timpului au existat multe încercări de a dovedi contrariul. Să luăm exemplul unui colectiv care lucrează la laboratorul CERN din Geneva. Cercetătorii care efectuau experimentul OPERA au declarat în septembrie 2011 că au măsurat viteze ale neutrinilor mai mari decât c . Deși autorii erau specialiști recunoscuți și lucraseră cu multă grijă, mulți fizicieni s-au îndoit de corectitudinea măsurătorilor. Neîncrederea lor era bazată pe soliditatea consecințelor TRR, care afirmă cu tărie imposibilitatea unui astfel de rezultat. Abia în Februarie 2012, colaboratorii experimentului OPERA au publicat două surse de erori care au viciat rezultatul; viteza neutrinilor a revenit la valori „cuminți”, mai mici decât c . (pentru amănunte: http://en.wikipedia.org/wiki/OPERA_experiment) ([Tema 4](#)).

Așadar TRR descrie mișcarea și interacțiile dintre corpuri la viteze mari, mai mari decât aproximativ $3 \cdot 10^6$ m/s. O mare parte din dinamica particulelor microscopice – cum sunt de exemplu electronii, protonii, fotonii – este perfect descrisă de TRR, pe când explicația nerelativistă este cu totul aproximativă, devenind complet nefolositoare la energii mari. Toate marile acceleratoare de particule din lume, inclusive cele de la CERN-Geneva (<http://public.web.cern.ch/public/Welcome.html>), sunt construite pe baza rezultatelor relativiste (http://en.wikipedia.org/wiki/Particle_accelerator). Energetica nucleară se bazează în mare parte

pe celebra relație relativistă dintre masă și energie $E=mc^2$ (§ 6.5., Defectul de masă și energia de legătură). Aceeași relație permite explicarea generării și anihilării perechilor particulă-antiparticulă (§ 6.6., Generarea și anihilarea perechilor particulă-antiparticulă). Din punct de vedere strict matematic, formularea noilor teorii fizice trebuie să fie în concordanță cu consecințele TRR. În sfârșit, electromagnetismul este corect exprimat numai în forma dată de TRR.

De aceea, chiar dacă relativitatea poate părea un capitol mai exotic al fizicii, rezultatele și aplicațiile sale sunt prezente în multe domenii actuale.

F22.2. Relativitatea galileană

Reamintim că un *sistem de referință inerțial* (SRI) este un sistem de referință în care este valabil principiul inerției (F21, §2.1.2, Principiile lui Newton). Toate sistemele de referință care se mișcă rectiliniu și uniform față de un SRI sunt inerțiale (*Tema 5*).

În mecanica nerelativistă mișcarea unui sistem material este descrisă într-un spațiu cu patru dimensiuni: trei dimensiuni pentru poziția spațială la care se adaugă axa timpului. Punctele din acest spațiu cuadridimensional $\mathbf{R}^3 \times \mathbf{R}$ se numesc *evenimente*. Toate corpurile se mișcă în acest *spațiu absolut*, iar poziția lor față de un SR se modifică în cursul timpului care „*curge uniform*” (Isaac Newton). Așadar, **spațiul și timpul sunt considerate absolute** și independente de corpurile sau de câmpurile existente. Datorită mării influențe a lui Newton asupra lumii științifice, această concepție a predominat în toată fizica nerelativistă, până spre sfârșitul secolului al XIX-lea (*vezi totuși polemica dintre Leibniz și Newton, [3]*).

Ne punem *problema găsirii tuturor transformărilor de coordonate (spațiale și de timp) care păstrează principiul întâi al mecanicii, adică legea inerției*. Pentru a o studia, trebuie să introducem noțiunea de *corp material liber* (*Completarea teoretică 1*).

Un astfel de corp are deci o viteză constantă:

$$\vec{v}(t) = \vec{v}(0) = \vec{v}_0 \quad (1)$$

Prin integrare se obține ecuația traiectoriei:

$$\vec{r}(t) = \vec{v}_0 t + \vec{r}_0 \quad (2)$$

unde cu \vec{r}_0 și \vec{v}_0 am notat poziția și viteza în momentul inițial ales arbitrar ca origine a timpului. În orice SRI un corp liber se mișcă rectiliniu și uniform sau stă pe loc.

Acest principiu limitează posibilitățile de descriere a timpului la funcțiile liniare. Singurele transformări permise asupra variabilei timp sunt cele liniare:

$$t' = at + b, \quad a \text{ și } b \text{ constante} \quad (3)$$

Din pricina arbitrarului alegerii originii timpului și a unității de măsură, transformările (3) nu modifică decât scara timpului, așa că putem considera că timpul este universal și scriem:

$$t' = t \quad (4)$$

Transformările spațiale care păstrează legea inerției sunt tot liniare, și anume rotațiile și translațiile. Vom căuta acum transformările *cinematice* (adică dependente de timp) care păstrează această lege. În 1632, Galilei și-a imaginat un savant care face observații și măsurători mecanice în interiorul unei corăbii care se mișcă rectiliniu și uniform pe un lac liniștit. A ajuns la concluzia că nici o astfel de observație nu poate să pună în evidență mișcarea vasului. Într-adevăr, transformarea care trece de la un SRI (S) la altul (S') care se mișcă cu viteza constantă \vec{V} este:

$$\vec{r}' = \vec{r} - \vec{V}t \quad (5)$$

Am folosit universalitatea timpului (4). Relația (5) este descrisă în Fig. 1.

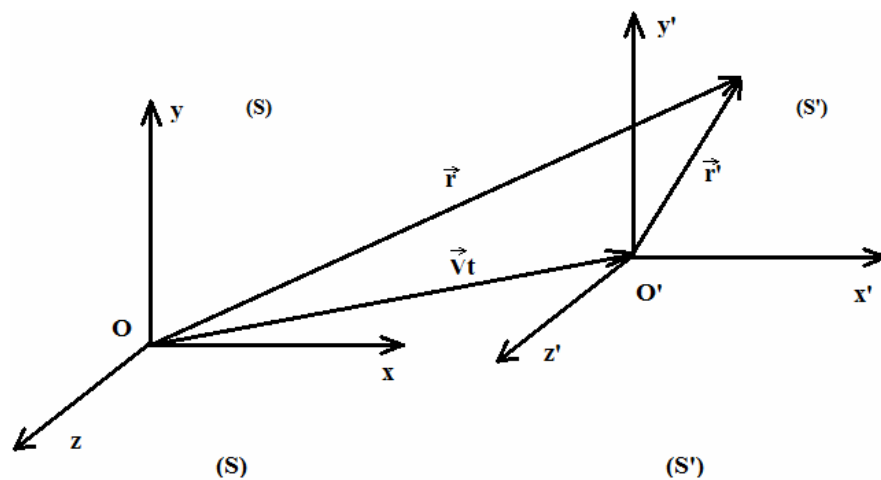


Fig. 1. Transformarea de la SRI (S) la (S')

Ecuțiile de mișcare ale unui corp de masă m în cele două sisteme de referință sunt:

$$\begin{aligned}
 m\ddot{\vec{r}} &= \vec{F} && \text{în } (S) \\
 m\ddot{\vec{r}}' &= \vec{F}' && \text{în } (S')
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

Dar relațiile (4) și (5) arată că $\ddot{\vec{r}} = \ddot{\vec{r}}'$ și, deoarece masa nu se modifică, rezultă că nici forța nu se modifică prin transformare. Aceasta înseamnă că *legile mișcării sunt invariante la o transformare între două SRI*. În particular, dacă în sistemul (S) corpul era liber (adică $\vec{F} = 0$), el rămâne liber în (S') și legea inerției se păstrează în ambele SRI.

O altă concluzie a relațiilor de transformare (4, 5) este „*legea de compunere a vitezelor a lui Galilei*” (vezi și F21, §2.1.1, *Cinemática*, sau [Completarea teoretică 2](#)):

$$\vec{v}' = \vec{v} - \vec{V}
 \tag{7}$$

Această binecunoscută compunere vectorială a vitezelor nu mai este valabilă în relativitatea lui Einstein.

Să regrupăm rezultatele din acest capitol:

- **Principiul relativității al lui Galilei: legile mecanicii sunt invariante la trecerea de la un SRI la altul**
- Transformarea cinematică la care legile mecanicii rămân invariante este dată de transformările Galilei (4) și (5):

$$t' = t
 \tag{4}$$

$$\vec{r}' = \vec{r} - \vec{V}t
 \tag{5}$$

Putem scrie transformările Galilei sub formă matricială:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ t' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -v_x \\ 0 & 1 & 0 & -v_y \\ 0 & 0 & 1 & -v_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ t \end{pmatrix}
 \tag{8}$$

În relațiile anterioare de transformare (4, 5, 8) am neglijat translația sau rotația axelor de coordonate. Pentru cazul particular în care rotația are loc în jurul axei Oz folosim [Tema 6](#) și scriem

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ t' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ t \end{pmatrix} \quad (9)$$

Consecințe.

1. Deoarece timpul este universal, simultaneitatea a două evenimente din (S) se păstrează în orice alt SRI: dacă $t_2 = t_1$, atunci $t'_2 = t'_1$.
2. Trecerea de la coordonatele spațiale din (S) la cele din (S') făcându-se prin relația (5), rezultă că distanța dintre aceste puncte este constantă, $|\vec{r}_2 - \vec{r}_1| = |\vec{r}'_2 - \vec{r}'_1|$, sau $\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} = \sqrt{(x'_2 - x'_1)^2 + (y'_2 - y'_1)^2 + (z'_2 - z'_1)^2}$. ([Tema 7](#))

F22.3. Premize teoretice și experimentale ale teoriei relativității restrânse

3.1. Ecuațiile electromagnetismului și transformarea Galilei ([Completarea teoretică 3](#))

Știm că legile mecanicii sunt aceleași în toate SRI. Dar ecuațiile lui Maxwell, care descriu electromagnetismul – și în particular optica – nu sunt invariante la transformarea Galilei. Pentru a arăta acest lucru, nu vom folosi ecuațiile lui Maxwell, care sunt mai complicate ([F46, §4.6.8. Ecuațiile lui Maxwell](#)), ci o consecință a acestora, și anume ecuația undelor electromagnetice. Pentru simplitate, presupunem că propagarea se face în vid și ne restrângem la cazul 1D. Atunci, după cum se arată în capitolul [F46, §4.7.4. Ecuația de propagare a undelor electromagnetice](#), ecuația undelor electromagnetice în sistemul (S) se scrie:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = 0 \quad (10)$$

unde ψ este una din componentele câmpului electric sau magnetic al undei, iar c este viteza luminii în vid. După cum au demonstrat experiențele celebre ale lui Michelson și Morley din anii 1880 (vezi § 3.2.) **viteza luminii este aceeași, indiferent de SRI în care o măsurăm.**

Este evident că în cazul 1D sistemul (S') se deplasează de-a lungul axei comune xx' . Cum se scrie ecuația undelor electromagnetice în sistemul (S') ? Aplicăm transformarea Galilei (4, 5) și găsim în (S'):

$$\frac{\partial^2 \psi'}{\partial x'^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \psi'}{\partial t'^2} - \frac{2V}{c^2} \frac{\partial^2 \psi'}{\partial x' \partial t'} - \frac{V}{c^2} \frac{\partial}{\partial x'} \left(V \frac{\partial \psi'}{\partial x'} \right) = 0 \quad (11)$$

Am notat cu V viteza dintre cele două SRI și am folosit independența vitezei luminii de SRI din care este măsurată. Relația (11) diferă față de (10), ceea ce înseamnă că legile electromagnetismului nu sunt aceleași în toate SRI. Deci relativitatea Galilei *nu se aplică electromagnetismului*. Trebuie găsite alte relații de trecere de la un SRI la altul, care să lase invariante legile electromagnetismului. Acest lucru a fost făcut mai întâi de Lorentz (și de Larmor) și de aceea se numesc *relațiile Lorentz*.

Particularitatea șocantă a transformărilor Lorentz este că *timpul nu mai este universal și depinde de SRI în care este măsurat.*

3.2. Eterul luminos și experiența Michelson-Morley

Ecuția care descrie undele electromagnetice se scrie sub forma (10) numai într-un SRI privilegiat, iar forma ei se modifică la trecerea în alt SRI conform (11). Făcând o analogie cu undele elastice, s-a presupus că există un mediu material, numit *eter*, prin care se propagă undele electromagnetice. Deoarece aceste unde se propagă și prin vid, este mai simplu să căutăm aici unele proprietăți ale eterului. Maxwell a arătat că în vid viteza undelor electromagnetice, ca și cea a luminii, este $c = (\epsilon_0 \mu_0)^{-1/2} \approx 3 \cdot 10^8$ m/s. Constantele vidului permitivitatea dielectrică ϵ_0 și permeabilitatea magnetică μ_0 sunt invariante la orice schimbare a SRI. Rezultă că **viteza luminii în vid este o constantă universală**, care nu depinde de mișcarea sursei sau a observatorului. Așadar viteza unui fascicul luminos emis de pe sol este egală cu viteza fasciculului luminos proiectat de pe un avion în zbor și cu cea a luminii emise de cometa Halley, care se mișcă față de Soare cu viteza maximă de 75 km/s. Această concluzie contrazice compunerea galileeană a vitezelor. S-au făcut diverse experiențe,

cele mai importante fiind efectuate în anii 1881-1887 de către Michelson și Morley. Scopul lor era de a măsura viteza Pământului față de eter, Pământul având cea mai mare viteză accesibilă, și anume 30 km/s față de Soare. Aparatul folosit este *interferometrul lui Michelson*, schițat în Fig. 2a.

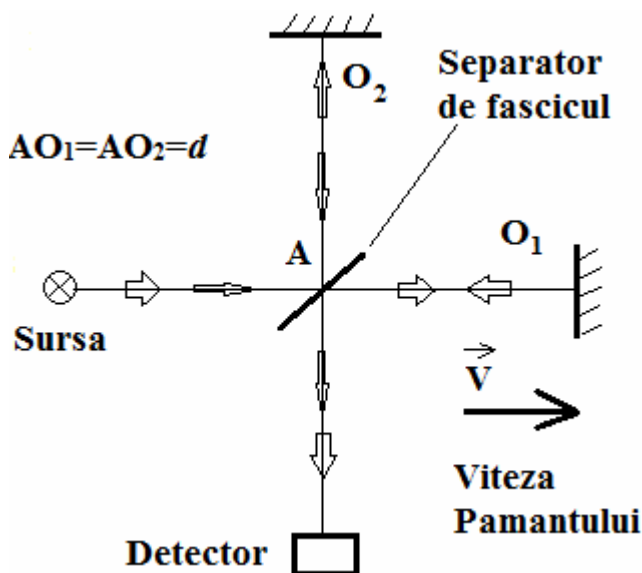


Fig. 2a. Interferometrul Michelson

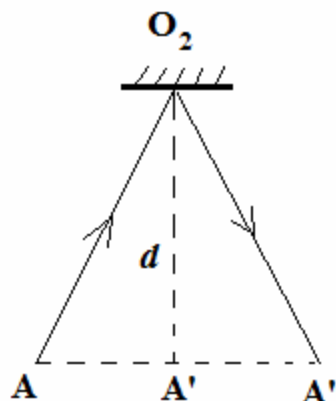


Fig. 2.b. Drumul fascicului AO₂A

Un fascicul îngust de lumină monocromatică emis de sursa S este divizat în două de către un separator aflat în A. Acesta este o lamă semitransparentă care lasă să treacă jumătate din intensitatea incidentă și reflectă cealaltă jumătate. Cele două fascicule perpendiculare astfel formate se reflectă pe oglinzile O₁ și O₂ și, trecând din nou prin separator, se suprapun în drumul lor spre detector. Acesta permite observarea cu mare precizie a franjelor de interferență (vezi F52, [Interferența luminii](#)). Aparatul este aranjat astfel încât brațul AO₁ să fie paralel cu viteza Pământului \vec{V} .

Să calculăm duratele în care lumina parcurge drumurile AO₁A pe de o parte și AO₂A pe de alta. Viteza luminii în eter este c , așadar: *(eventual in Completari teoretice ?)*

$$t_{AO_1A} = t_1 = \frac{d}{c-V} + \frac{d}{c+V} = \frac{2dc}{c^2 - V^2} \quad (12)$$

Pe direcția perpendiculară pe mișcarea Pământului lumina se propagă așa cum se vede în Fig. 2.b. În timpul în care lumina parcurge distanța AO'_2 aparatul se mișcă împreună cu Pământul pe distanța AA' . Rezultă: $AO'_2 = ct'_2 = O'_2A''$, $AA' = A'A'' = Vt'_2$. În final:

$$t_{AO_2A} = t_2 = 2t'_2 = \frac{2d}{c} \frac{1}{\sqrt{1 - V^2/c^2}} \quad (13)$$

Diferența dintre cele două intervale de timp este:

$$t_1 - t_2 = \frac{2d}{c} \left(\frac{1}{1 - \beta^2} - \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \right)$$

Deoarece $\beta^2 \approx 10^{-8} \ll 1$, aproximăm $\frac{1}{1 - \beta^2} \approx 1 + \beta^2$, și $\frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \approx 1 + \frac{\beta^2}{2}$.

Se obține $t_1 - t_2 \cong \frac{d}{c} \beta^2$. Această întârziere duce la deplasarea franjelor față de poziția lor în absența mișcării Pământului. Rotind aparatul cu 90° , diferența de drum apare în sens opus. Franjele ar trebui să se deplaseze cu mărimea $2c(t_1 - t_2) = 2d\beta^2$. Frațiunea corespunzătoare din interfranță se obține împărțind la lungimea de undă a luminii. În experiență $d=11$ m, $\lambda = 0,59 \mu\text{m}$. Calculăm $\frac{2d\beta^2}{\lambda} \approx 0,37$, adică figura de interferență ar trebui să se deplaseze cu mai mult de o treime dintr-o interfranță. Deplasarea minimă sesizabilă de cercetători era de 100 de ori mai mică. Totuși nu s-a detectat nici o deplasare.

Experiența a fost repetată în condiții mult îmbunătățite, cu diverse surse de lumină, terestre și cosmice, cu diverse lungimi de undă, dar niciodată nu s-a descoperit nici o deplasare a franjelor (http://ro.wikipedia.org/wiki/Experimentul_Michelson-Morley). Concluzia este că *nu se poate detecta mișcarea corpurilor prin eter*. De aceea, în prezent nu se mai folosește noțiunea de eter (vezi http://en.wikipedia.org/wiki/Luminiferous_aether, sau un rezumat pe românește http://ro.wikipedia.org/wiki/Eter_luminifer).

Pentru a aprofunda deosebirea dintre relativitatea lui Galilei și rezultatele experiențelor de optică, vezi [Tema 8](#) și [Tema 9](#).

F22.4. Principiile teoriei relativității restrânse. Transformarea Lorentz.

4.1. Reconsiderarea noțiunii de simultaneitate

Deoarece viteza luminii nu depinde de SRI din care o măsurăm, înseamnă că relativitatea galileeană nu este valabilă decât la limita vitezelor mult mai mici decât c . Ar trebui revăzute toate conceptele care au dus la relațiile lui Galilei, în particular universalitatea timpului.

Pentru un fizician pre-relativist, ca și pentru orice nespecialist, fraza „un fenomen petrecut pe sol este simultan cu altul petrecut într-un avion în zbor” este perfect plauzibilă. Simultaneitatea este o proprietate intrinsecă a perechii de fenomene discutate. Orice observator, oriunde s-ar găsi el, ar fi de acord cu simultaneitatea în cauză. Totul se bazează pe principiul enunțat de Newton al timpului universal (vezi F22.2, [Relativitatea galileeană](#)).

Dar pentru un fizician relativist afirmația anterioară nu este evidentă. Pentru a putea afirma că două fenomene se petrec în același timp, trebuie să dispunem de ceasuri legate de cele două puncte unde au loc fenomenele, iar aceste ceasuri trebuie să fie *sincronizate*, adică să meargă la fel. Cum putem verifica mersul sincronizat al două ceasuri ? De exemplu, le putem pune împreună, le potrivim la fel și apoi le ducem pe fiecare unde avem nevoie. Dar în acest fel sincronizarea se face o singură dată, iar dacă ulterior unul din ceasuri funcționează greșit, rezultatele nu mai sunt corecte. De aceea se preferă o altă metodă: ceasurile sunt sincronizate prin semnale pe care și le trimit reciproc. În acest fel sincronizarea este continuă ([Tema 10](#)).

Deoarece viteza luminii nu depinde de mișcarea sursei sau a observatorului, este convenabil să folosim pentru sincronizare semnale luminoase. În cartea sa [1] „Teoria relativității”, Einstein scrie la pagina 38:

„S-a reproșat adesea teoriei relativității că ea acordă fenomenului de propagare a luminii, în mod nejustificat, un rol teoretic central întrucât ea întemeiază noțiunea de timp pe legea de propagare a luminii. Aici lucrurile stau astfel. Pentru a da noțiunii de timp o semnificație fizică, trebuie să folosim unele procese care pot stabili relații între locuri diferite. Natura proceselor alese pentru o astfel de definiție este în sine indiferentă. Este însă avantajos pentru teorie să se aleagă un proces despre care știm ceva precis. Grație cercetărilor lui Maxwell și H. A. Lorentz propagarea luminii în vid prezintă acest caracter într-o măsură mai mare decât toate celelalte procese ce ar putea fi luate în considerare.”

Oare o sincronizare cu semnale luminoase este absolută ? Aceasta ar însemna ca ceasurile să funcționeze sincron oricare ar fi mișcările lor. Dar acest lucru de întâmplă doar

dacă am dispune de o interacțiune care să se propage instantaneu, la distanță. După cum știm, lumina se propagă cu viteză foarte mare, dar finită. Nici o altă interacțiune cunoscută nu se propagă instantaneu la distanță. Deci *nu există sincronizare absolută a ceasurilor care se mișcă unul față de celălalt. Timpul este relativ la SRI din care-l măsurăm.*

S-ar părea atunci că ajungem la un cerc vicios: sincronizăm ceasurile cu semnale luminoase, dar pentru a ști viteza luminii trebuie să putem măsura timpul. Putem ieși din acest paradox folosind *sincronizarea relativă a ceasurilor care se află în repaus unul față de altul.* Procedeu acesta al lui Einstein nu necesită cunoașterea vitezei luminii.

Să presupunem că ne situăm într-un SRI. Pentru a măsura distanțele acesta este înzestrat cu rigle rigide așezate de-a lungul axelor de coordonate. Pentru măsurarea timpului nu este de ajuns să avem un singur ceas, aflat într-un punct. Cu acesta nu putem măsura timpul pentru un fenomen care se petrece foarte departe. De aceea ne imaginăm că dispunem de o mulțime de ceasuri aflate în diverse puncte ale referențialului. De la unul dintre ceasuri, de exemplu de la cel aflat în origine, se trimit semnale luminoase în toate direcțiile. Un asemenea semnal pleacă din origine în momentul t_0 . Deoarece lumina se propagă cu aceeași viteză în toate direcțiile, semnalul ajunge la ceasul aflat la distanța r_1 în momentul $t_1 = \frac{r_1}{c}$, la ceasul aflat la distanța r_2 în momentul $t_2 = \frac{r_2}{c}$, etc. În acest fel toate ceasurile aflate în repaus relativ sunt sincronizate convenabil și dispunem într-un SRI de toate instrumentele pentru a măsura distanțe și durate. Aceasta nu înseamnă că ceasurile din alt SRI devin și ele sincronizate. Același procedeu trebuie repetat pentru fiecare referențial în parte. *Duratele măsurate din sisteme diferite de referință nu vor fi identice, deoarece ceasurile din fiecare SRI sunt sincronizate numai cu celelalte ceasuri din același sistem. Nu există simultaneitate absolută.*

4.3. Principiile teoriei relativității restrânse

Bazându-ne pe paragrafele precedente, putem enunța principiile TRR introduse de Einstein în 1905:

- 1. Principiul relativității: Legile fizicii sunt aceleași în toate sistemele de referință inerțiale.**
- 2. Principiul invarianței vitezei luminii: Viteza luminii în vid este invariantă în toate sistemele de referință inerțiale.**

Pentru valoarea exactă a lui c , vezi [Tema 11](#):

$$c=299\,792\,458\text{ ms}^{-1} \quad (14)$$

4.2. Transformările Lorentz

Vrem să determinăm transformările de coordonate spațio-temporale ale unui eveniment la trecerea de la SRI (S) la SRI (S'), care se mișcă rectiliniu și uniform față de primul cu viteza \vec{V} . Notăm cele patru coordonate ale evenimentului cu (x, y, z, t) în sistemul (S) și cu (x', y', z', t') în sistemul (S'). Vom căuta relațiile de transformare impunând ca un rezultat al teoriei lui Maxwell – și anume ecuația tridimensională a undelor – să aibă aceeași formă în ambele sisteme. În sistemul (S) ecuația undelor în 3D se scrie:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = 0 \quad (15)$$

Este mai comod și mai simplu să introducem următoarele notații, datorate lui Minkowsky:

$$x_1 = x, \quad x_2 = y, \quad x_3 = z, \quad x_4 = ict \quad (16)$$

unde $i = \sqrt{-1}$ este unitatea imaginară. Folosirea coordonatei x_4 nu înseamnă introducerea unui „timp imaginar”, ci este un simplu artificiu pentru simplificarea scrierii. Într-adevăr, ecuația undelor (15) se scrie mai simplu și mai compact:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial x_3^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial x_4^2} = 0, \quad \text{sau} \quad \sum_{\mu=1}^4 \frac{\partial^2 \psi}{\partial x_\mu^2} = 0 \quad (15')$$

Transformarea Lorentz explicitează schimbarea de coordonate

$$x'_\mu = x'_\mu(x_1, x_2, x_3, x_4), \quad \mu = 1, 2, 3, 4 \quad (17)$$

Spre deosebire de transformările Galilei, aici coordonata temporală se modifică, deoarece nu există o sincronizare absolută a evenimentelor. Pentru proprietățile transformărilor Lorentz, vezi [Completarea teoretică 4](#)

4.3. Transformarea Lorentz specială

Vom folosi explicit matricea Lorentz într-un caz particular. Presupunem că sistemele (S) și (S') au axele paralele, că în momentul $t=0$ originile lor coincid și că sistemul (S') se mișcă cu constantă V de-a lungul axei comune xx' (Fig. 3):

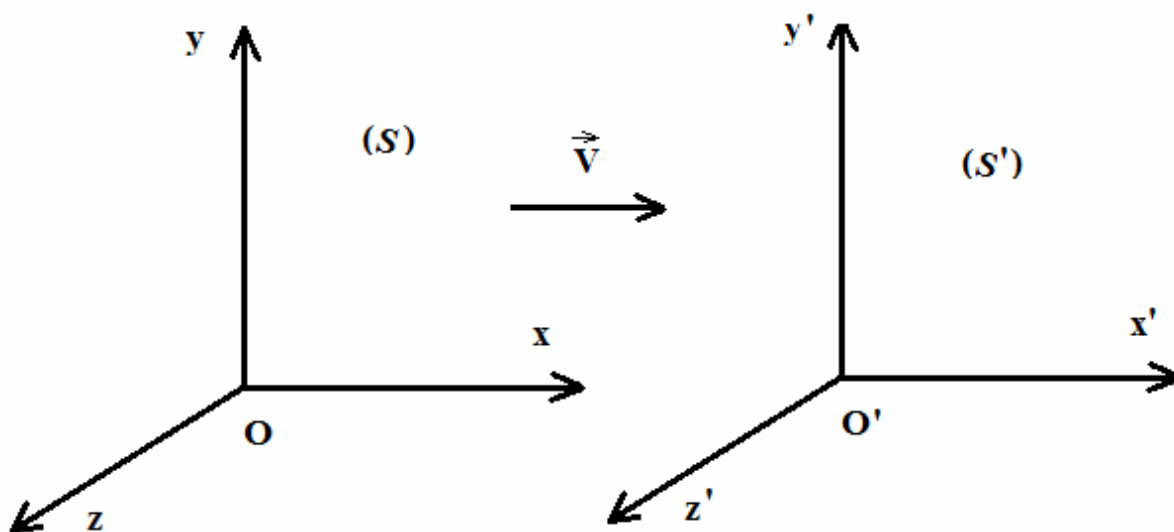


Fig. 3. Mișcarea sistemelor de referință în transformarea Lorentz specială

În tot restul capitolului vom avea nevoie numai de această forma particulară. Deoarece în momentul $t=0$ originile sistemelor coincid, putem sincroniza ceasurile din (S') astfel ca în acest moment să fie definită și originea $t'=0$. Mișcarea făcându-se numai de-a lungul axei comune xx' , celelalte coordonate spațiale nu se modifică:

$$y' = y, \quad \text{sau} \quad x'_2 = x_2, \quad z' = z, \quad \text{sau} \quad x'_3 = x_3 \quad (22)$$

Matricea Lorentz se simplifică:

$$\begin{pmatrix} x'_1 \\ x'_2 \\ x'_3 \\ x'_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} & \alpha_{14} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \alpha_{41} & \alpha_{42} & \alpha_{43} & \alpha_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{pmatrix}$$

Continuarea calculelor se găsește în [Completarea teoretică 5](#).

Cu notațiile din [Completarea teoretică 5](#) putem scrie matricea Lorentz specială sub forma:

$$\alpha = \begin{pmatrix} \gamma & 0 & 0 & i\beta\gamma \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -i\beta\gamma & 0 & 0 & \gamma \end{pmatrix} \quad (32)$$

Transformarea Lorentz directă este dată de

$$\begin{cases} x'_1 = \gamma(x_1 + i\beta x_4) \\ x'_2 = x_2 \\ x'_3 = x_3 \\ x'_4 = \gamma(-i\beta x_1 + x_4) \end{cases} \quad (33)$$

sau, revenind la coordonatele (x, y, z, t)

$$\left\{ \begin{array}{l} x' = \gamma(x - Vt) = \frac{x - Vt}{\sqrt{1 - V^2/c^2}} = \frac{x - Vt}{\sqrt{1 - \beta^2}} \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = \gamma\left(t - \frac{Vx}{c^2}\right) = \frac{t - \frac{Vx}{c^2}}{\sqrt{1 - V^2/c^2}} = \frac{t - \frac{Vx}{c^2}}{\sqrt{1 - \beta^2}} \end{array} \right. \quad (34)$$

Transformările descrise de relațiile (32-34) se numesc *speciale*, deoarece mișcarea referențialului (S') se face numai de-a lungul axei xx' .

Transformarea inversă, de la sistemul (S') la sistemul (S) se obține ca în [Tema 12](#). Rezultatele sunt:

$$\alpha' = \begin{pmatrix} \gamma & 0 & 0 & -i\beta\gamma \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ i\beta\gamma & 0 & 0 & \gamma \end{pmatrix} \quad (32')$$

Transformarea Lorentz inversă este dată de

$$\left\{ \begin{array}{l} x_1 = \gamma(x'_1 - i\beta x'_4) \\ x_2 = x'_2 \\ x_3 = x'_3 \\ x_4 = \gamma(i\beta x'_1 + x'_4) \end{array} \right. \quad (33')$$

sau, revenind la coordonatele (x, y, z, t)

$$\left\{ \begin{array}{l} x = \gamma(x' + Vt') = \frac{x' + Vt'}{\sqrt{1 - V^2/c^2}} = \frac{x' + Vt'}{\sqrt{1 - \beta^2}} \\ y = y' \\ z = z' \\ t = \gamma\left(t' + \frac{Vx'}{c^2}\right) = \frac{t' + \frac{Vx'}{c^2}}{\sqrt{1 - V^2/c^2}} = \frac{t' + \frac{Vx'}{c^2}}{\sqrt{1 - \beta^2}} \end{array} \right. \quad (34')$$

Transformările Lorentz sunt mai complicate decât cele ale lui Galilei (4 și 5, sau 8), atât din punct de vedere pur matematic, cât și conceptual. Modificarea timpului la trecerea de la un SRI la altul este o operație cu totul nouă și a întâmpinat o anumită rezistență printre fizicienii de la începutul secolului al XX-lea. Totuși numai această transformare conservă legile electromagnetismului la schimbarea referențialului și de aceea trebuie luată în considerare în studiul proceselor care au loc la viteze mari.

La viteze mici, transformările Lorentz trec în relațiile Galilei ([Tema 13](#)).

Rezultă că mecanica clasică este un caz particular al celei relativiste și că principiul de corespondență (pag. 4) este satisfăcut.

4.4. Interpretarea geometrică a transformării Lorentz speciale

Relația (9) din cap. 3 prezintă matricea unei rotații spațiale în jurul axei Oz , în fizica nerelativistă. Forma matricială a transformării Lorentz (32) seamănă cu relația (9), dacă facem notațiile:

$$\gamma = \cos \varphi, \quad i\beta\gamma = \sin \varphi, \quad \text{adică} \quad \operatorname{tg} \varphi = i\beta = i\frac{V}{c} \quad (35)$$

Transformarea Lorentz este deci echivalentă unei rotații de unghi φ în planul (x_1, x_4) , așa cum se arată în Fig. 4.

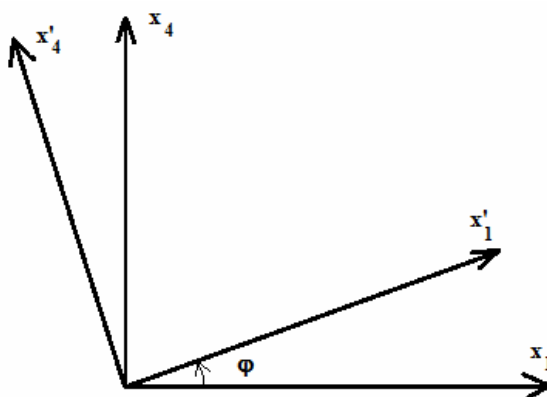


Fig. 4. Interpretarea geometrică a transformării Lorentz

După cum vom arăta în § 4.3. nici un corp material nu se poate mișca cu viteze mai mari decât c . De aceea, există un unghi maxim pentru care $\operatorname{tg} \varphi_{\max} = i$, iar rotațiile cu unghiuri mai mari nu au înțeles fizic.

SR față de care un corp este în repaus se numește *sistem propriu de referință*. Mișcarea corpului se reprezintă în spațiul Minkowsky printr-o curbă numită *linie de univers*. Deoarece în SR propriu orice corp stă pe loc, în acest sistem linia de univers este o dreaptă paralelă cu axa x_4 ; dacă acel corp se află în origine, linia sa de univers în SR propriu este chiar axa x_4 . Mișcarea uniformă se reprezintă printr-o dreaptă, cea accelerată printr-o curbă:

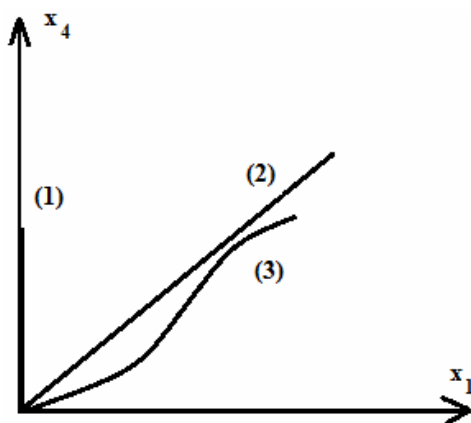


Fig. 5. Linii de univers: (1) repaus (SR propriu); (2) mișcare uniformă; (3) mișcare accelerată

F22.5. Consecințe cinematice ale transformării Lorentz

În cele ce urmează considerăm că sistemul (S') se mișcă cu viteza V față de (S) în sensul pozitiv al axei Ox , ca în cazul transformării Lorentz speciale.

5.1. Măsurarea intervalelor de timp. Dilatarea duratelor.

Procedeeul de sincronizare din § 4.1. se aplică numai ceasurilor din același SRI. Să studiem măsurarea intervalelor de timp în două SRI. Presupunem că în SR propriu al unui obiect măsurăm durata dintre două evenimente A și B , care au loc în același punct $x_A = x_B$: $\tau = t_B - t_A$. Acesta se numește *intervalul de timp propriu*. Intervalul de timp dintre aceleași evenimente măsurat în (S') este, conform relațiilor (34), dat de

$$t'_B - t'_A = \gamma(t_B - t_A) = \frac{\tau}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad (36)$$

Intervalul de timp măsurat dintr-un referențial mobil este mai mare decât intervalul de timp propriu. Se spune ca *timpul se dilată*. Rezulta că *simultaneitatea își pierde caracterul absolut*. Într-adevăr, să considerăm că în punctele x_A și x_B din sistemul (S) au loc două evenimente simultane $t_A = t_B$. Față de (S'), intervalul de timp dintre evenimente nu mai este nul, și anume $t'_B - t'_A = \frac{V}{c^2} \gamma(x_A - x_B) \neq 0$.

O problemă legată de relativitatea simultaneității este posibilitatea inversării ordinii în timp a evenimentelor. Aceasta ordonare este strâns legată de cauzalitate, cauza precedând întotdeauna efectul. O inversare a ordinii cauzei și efectului ar fi incompatibilă cu principiul cauzalității. Vom arăta că așa ceva nu se întâmplă: ordinea evenimentelor care interacționează se păstrează în orice SRI. Presupunem că evenimentele A și B sunt legate cauzal printr-o interacțiune care se propagă cu viteza $u \leq c$, unde $u = \frac{x_B - x_A}{t_B - t_A}$. Atunci:

$$t'_B - t'_A = \gamma \left(t_B - t_A - \frac{V}{c^2} (x_B - x_A) \right) = \gamma(t_B - t_A) \left(1 - \frac{uV}{c^2} \right)$$

Deoarece atât u , cât și V sunt mai mici decât c , $\frac{t'_B - t'_A}{t_B - t_A} > 0$ și succesiunea în timp a evenimentelor în interacțiune se păstrează.

5.2. Măsurarea lungimilor. Contrația Lorentz

Coordonatele transversale nu se modifică prin transformarea Lorentz, așa încât și lungimile transversale rămân invariante. Altfel stau lucrurile cu lungimile măsurate pe direcția mișcării. Să considerăm o bară rigidă așezată de-a lungul axei Ox , cu lungimea proprie $l_0 = x_B - x_A$. În sistemul (S') trebuie măsurăm capetele barei în același moment $t'_A = t'_B$

[\(Completarea teoretică 6\)](#)

Folosind transformările Lorentz inverse găsim:

$$l_0 = x_B - x_A = \gamma[x'_B - x'_A + V(t'_B - t'_A)]$$

deci

$$l' = \frac{l_0}{\gamma} = l_0 \sqrt{1 - \beta^2} \quad (37)$$

Lungimile măsurate pe direcția de mișcare, dintr-un sistem mobil, sunt mai mici decât lungimile proprii. Aceasta este *contractia Lorentz*. Această contracție explică rezultatul negativ al experienței Michelson ([Tema 14](#))

5.3. Compunerea vitezelor

Diferențiem relațiile Lorentz (34) ținând cont că V este constantă:

$$\begin{cases} dx' = \gamma(dx - Vdt) \\ dy' = dy \\ dz' = dz \\ dt' = \gamma\left(dt - \frac{V}{c^2} dx\right) \end{cases}$$

Componentele vitezei unui corp pe axele de coordonate sunt $v_x = \frac{dx}{dt}$, $v_y = \frac{dy}{dt}$, $v_z = \frac{dz}{dt}$

în sistemul (S) și $v'_x = \frac{dx'}{dt'}$, $v'_y = \frac{dy'}{dt'}$, $v'_z = \frac{dz'}{dt'}$ în sistemul (S'). Relațiile anterioare duc la:

$$\begin{cases} v'_x = \frac{v_x - V}{1 - \frac{Vv_x}{c^2}} \\ v'_y = \frac{v_y \sqrt{1 - \beta^2}}{1 - \frac{Vv_x}{c^2}} \\ v'_z = \frac{v_z \sqrt{1 - \beta^2}}{1 - \frac{Vv_x}{c^2}} \end{cases} \quad (38)$$

Încercați rezolvarea temelor [Tema 15](#), [Tema 16](#), [Tema 17](#), [Tema 18](#).

Generalizarea temelor 17 și 18 este imediată: *dacă un corp se deplasează cu viteza c în sistemul (S), atunci el se va deplasa cu aceeași viteză în orice SRI.*

Folosind transformările relativiste (38) se poate arăta că la trecere de la un SRI la altul viteza corpurilor nu depășește niciodată viteza luminii în vid ([Tema 19](#)). În același sens se poate calcula viteza relativă a doi protoni din acceleratorul LHC de la CERN (Large Hadron Collider, vezi <http://public.web.cern.ch/public/en/lhc/Computing-en.html>). Protonii se deplasează în sensuri opuse, fiecare cu o viteză egală cu 99,9999991% (<http://public.web.cern.ch/public/en/lhc/Facts-en.html>) din viteza luminii în vid ([Tema 20](#)). În ambele cazuri, vitezele calculate sunt mai mici decât c , chiar dacă foarte apropiate de această viteză limită.

5.4. *Aberația luminii și efectul Doppler*

F22.6. Dinamica relativistă

6.1. *Masa și impulsul în fizica nerelativistă*

Începem prin reamintirea unor noțiuni cunoscute din mecanica elementară.

Pentru definiția masei, în fizica pre-relativistă se poate folosi metoda ciocnirilor dintre două corpuri (F21, § 2.1.2., *Dinamica*). În aceste experimente se măsoară vitezele corpurilor înainte și după ciocnire și se calculează variațiile acestora, notate cu Δv_1 și Δv_2 . Experiențe numeroase, efectuate cu diferite perechi de corpuri, arată că fiecărui corp i se poate atașa o mărime bine determinată, numită *masă* (sau *masă inerțială*), notată cu m_{0i} . Indicele „0”, care înseamnă „masa corpului în repaus”, sau masa la viteze mici) va fi justificat ulterior. Raportul maselor corpurilor care se ciocnesc este dat de relația:

$$\frac{m_1}{m_2} = -\frac{\Delta v_2}{\Delta v_1} \quad (39)$$

Dacă unul dintre corpuri se alege drept etalon și se determină variațiile vitezelor, relația (39) permite aflarea masei celuilalt corp ([Tema 21](#)).

În fizica nerelativistă se demonstrează experimental *legea conservării masei*: într-un proces de ciocnire care are loc într-un sistem izolat suma totală a maselor este constantă:

$$\sum_i m_{0i} = \text{constant} \quad (40)$$

Să scriem legea a doua a dinamicii sub forma dată de Newton, pentru un corp, sau pentru n corpuri, în al doilea caz notând cu \vec{F}_{ext} rezultanta forțelor exterioare care acționează asupra sistemului:

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}, \quad \sum_i \frac{d\vec{p}_i}{dt} = \vec{F}_{\text{ext}} \quad (41)$$

Aici $\vec{p}_i = m_i \vec{v}_i$ este impulsul particulei i , de masă m_i și viteză v_i .

Dacă forța exterioară este nulă, rezultă conservarea impulsului unui sistem izolat:

$$\sum_i \vec{p}_i = \sum_i m_{0i} \vec{v}_i = \text{constant} \quad (42)$$

Ultimul rezultat pe care-l reamintim este definiția energiei cinetice a unui corp:

$$E_{\text{cin}} = \frac{m_0 v^2}{2} \quad (43)$$

Notăția m_0 pentru masa corpului, va deveni clară mai târziu.

6.2. Masa și impulsul în fizica relativistă

Încă înainte de primul război mondial s-au făcut primele experiențe cu particule având viteze mari, în special cu particule β^- , adică electroni provenind din dezintegrări radioactive.

Primele măsurători precise asupra particulelor β^- au fost făcute în 1940, iar în 1964 Bertozzi a făcut o experiență care să măsoare viteza și energia cinetică a acestor particule (vezi [5], p. 340). Rezultatul acestor experiențe, ca și a multor altele, făcute în acceleratori de toate tipurile, au arătat fără nici un dubiu că *la viteze mari definiția obișnuită a impulsului $\vec{p} = m_0\vec{v}$ nu este corectă, că masa nu se conservă în forma dată de relația (40), că energia cinetică a unui corp nu este dată de relația (43) și că viteza unui corp nu poate depăși viteza luminii în vid* (http://en.wikipedia.org/wiki/Tests_of_relativistic_energy_and_momentum). Relațiile corecte relativiste se găsesc dacă în loc de masa obișnuită, numită *masă de repaus*, se introduce în formule *masa de mișcare*, care depinde de viteza corpului:

$$m(v) \equiv m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \gamma m_0 \quad (44)$$

Aici m_0 este masa inerțială a corpului, adică masa în sistemul propriu de referință, în care corpul este în repaus. ([Completare teoretică 7](#)).

De fapt este aproape evident că impulsul particulelor rapide nu poate fi definit ca în fizica nerelativistă, deoarece transformarea vitezelor nu se face după relațiile lui Galilei. Vom demonstra acest lucru în cazul particular al ciocnirii elastice centrale dintre două bile identice, care se îndreaptă una spre cealaltă de-a lungul axei $O'x'$ din sistemul (S') cu vitezele $+v'$ și $-v'$. Ciocnirea fiind elastică, după interacțiune fiecare bilă se întoarce înapoi cu viteza egală și de sens opus cu cea inițială. Să studiem acum același proces din sistemul (S), care se mișcă cu viteza $-V$ de-a lungul axei comune xx' . Situația din fizica nerelativistă este tratată în [Tema 22](#).

În relativitate, vitezele celor două corpuri măsurate din sistemul (S) sunt date de

$$v_1 = \frac{v' + V}{1 + \frac{v'V}{c^2}} \quad v_2 = \frac{-v' + V}{1 - \frac{v'V}{c^2}}$$

Introducem aceste valori în conservarea impulsului scrisă ca în [Tema 22](#) $m_1v_1 + m_2v_2 = M_{\text{tot}}V$ și după câteva simplificări găsim

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{1 + \frac{v'V}{c^2}}{1 - \frac{v'V}{c^2}} = \frac{\sqrt{1 - \frac{v_2^2}{c^2}}}{\sqrt{1 - \frac{v_1^2}{c^2}}} \quad (45)$$

Pentru ultima egalitate vezi [Completare teoretică 8](#). Relația (45) arată că masa depinde de

viteză invers proporțional cu radicalul $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$:

$$m(v) = \frac{\text{const}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Scriind relația anterioară pentru viteză nulă $v=0$, se obține constanta egală cu *masa de repaus* m_0 , adică în definitiv relația (44), care definește *masa de mișcare*:

$$m(v) = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (44)$$

Impulsul relativist se definește folosind masa de mișcare:

$$\vec{p} = \frac{m_0 \vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = m(v) \vec{v} = \gamma m_0 \vec{v} \quad (46)$$

6.3. *Energia relativistă*

Bibliografie

1. Albert Einstein, *Teoria relativității*, Ed. Tehnică 1957.
2. Albert Einstein, *Teoria relativității pe înțelesul tuturor*, Ed. Humanitas, 2010.
3. Ezio Vailati, *Leibniz și Clarke, corespondența filosofică*, Ed. Tehnică, 2000.
4. Max Born, *Teoria relativității a lui Einstein*, Ed. Științifică, 1969.
5. Charles Kittel, Walter D. Knight, Malvin A. Ruderman, *Mecanica*, vol.1 din Cursul de Fizică de la Berkeley, Ed. Didactică și Pedagogică, 1981.

6. Gheorghe A. Stanciu, Alexandru I. Lupașcu, *Fizica vol. I*, Ed. I.P.B., 1989.
7. Lewis Carroll Epstein, *Teoria relativității în imagini*, Ed. ALL, 1996
8. Robert Resnick, *Introduction to Special Relativity*, John Wiley & Sons, 2005
9. Foarte multe informații se găsesc în Wikipedia, în limba engleză sau pe românește;
propunem titlurile:

- http://en.wikipedia.org/wiki/Special_relativity,
- http://ro.wikipedia.org/wiki/Teoria_relativității_restricționate
- http://en.wikipedia.org/wiki/Introduction_to_special_relativity
- http://en.wikipedia.org/wiki/History_of_special_relativity.