O viziune de ansamblu privind
„Teoria restrânsă a relativității”.

- ***Începem scurta noastră incursiune anevoioasă prin elaborarea bazei unui domeniu cheie în studiul efectelor care apar în cadrul fizicii particulelor accelerate la viteze apropiate de cea a luminii. „Drumul este lung dar calea scurtă...”***

Bazele teoriei relativității restrânse*(vom utiliza abrevierea TRR) sunt ferm ancorate în cadrul a două postulate simple, formulate de către Albert Einstein în anul 1905. Sâmburii TRR sunt transformările liniare Lorentz despre care vom discuta și noi în cele ce urmează:*

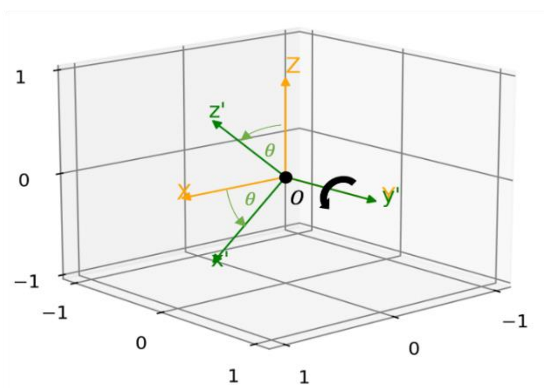
I) Postulate:

***P1*) În oricare sistem de referință inerțial legile mecanicii(și ale fizicii în general) sunt aceleași- fapt pentru care nu există un cadrul referențial privilegiat.**

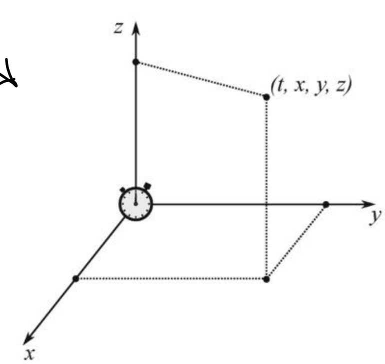
- Probabil că întrebarea cea mai simplă este: *Ce anume reprezintă un sistem de referință inerțial(abreviat SRI)?*

R: Este un ansamblu de 3 axe ortogonale(dotat cu un instrument de măsurare a timpului: ceas, cronometru...) și care efectuează o mișcare rectilinie și uniformă(în linie dreaptă și cu viteză constantă)- într-un asemenea tip de sistem de referință este valabil primul principiu al lui Newton: principiul inerției!

Orice sistem de referință care respectă legea inerției este un sistem de referință inerțial și orice sistem de referință inerțial este în MRU...
Legea inerției este legată de starea de MRU!



+



Figură 1- Ansamblu de 3 axe ortogonale + ceas = „SR”

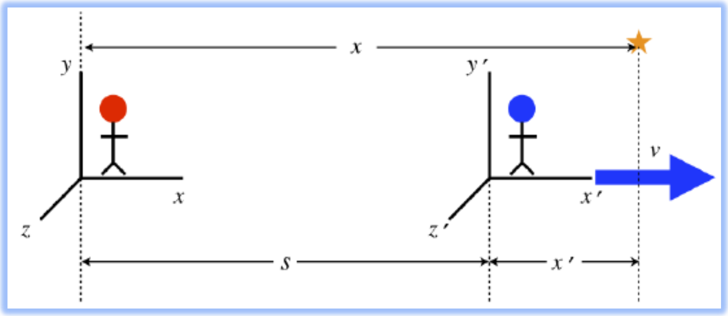


Figure 2: Un SRI S'(cinematic) aflat în stare de MRU cu viteza v, relativ la SRI S(solidar).

Supliment:

Scena pe care acționează totalitatea legilor fizicii este un cadru omogen(„nu contează unde facem experimentul”) și izotrop(„Proprietățile legilor sunt aceleași indiferent de orientare”)- spunem că legile fizicii sunt simetrice la translația temporală.

Pare destul de intuitiv și nu prea diferit de ceea ce exprimă principiul relativist al lui Galilei... Al doilea postulat este net diferit!

„Oricare sistem fizic este într-o stare relativă față de oricare alt sistem/ ansamblu de sisteme. Repausul și MRU sunt două fațete ale aceleiași monede.

Dacă ne-am situa într-un tren izolat și foarte silențios- aflat într-o stare relativă de mișcare uniformă sau de repaus, prin nici un fel de experiment efectuabil în tren nu am putea determina care este starea noastră reală(**repaus relativ sau MRU**).”

***P2*) Viteza de propagare a luminii are aceeași valoare indiferent de starea de mișcare a sursei – fiind o constantă universală invariantă la schimbarea sistemului de referință. Aceasta este unica viteză care se poate considera cu adevărat reală- ea este în același timp limita maximă a vitezelor.**

Intervalele spațiale și cele temporale nu vor mai fi percepute la fel de toți observatorii: spațiu-timpul „conspiră” spre menținerea constantă a vitezei luminii.

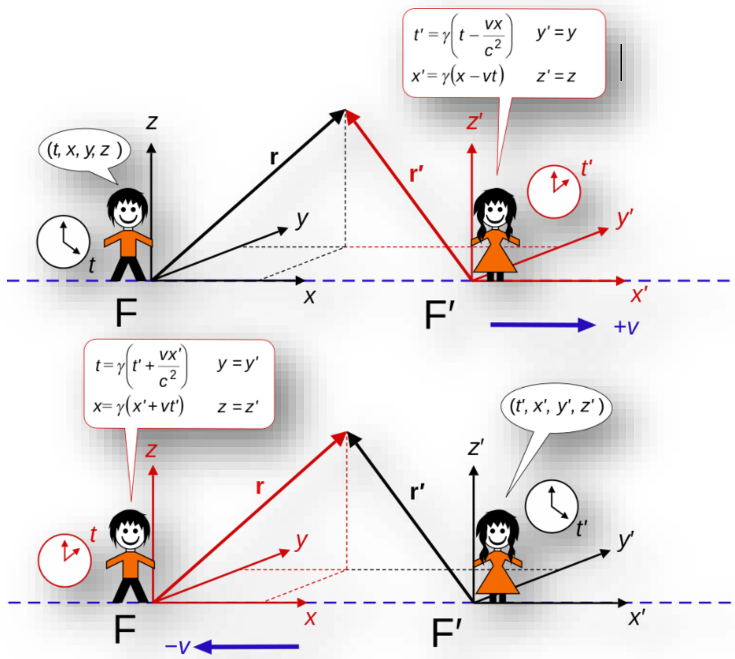
>>>

II) Transformările Lorentz directe: vs Transformările Lorentz inverse:

$x' = \gamma*(x - v*t)$	$x = \gamma*(x' - v*t')$
$y' = y$	$y = y'$
$z' = z$	$z = z'$
$t' = \gamma*(t - \frac{x*v}{c^2})$	$t = \gamma*(t' - \frac{x'*v}{c^2})$

Mai sus au fost prezentate celebrele transformări Lorentz:

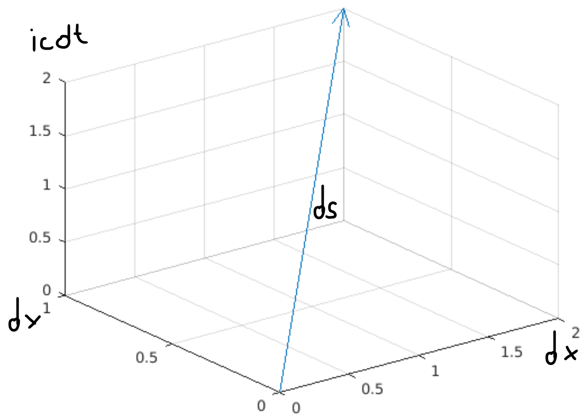
Relații(boosts sau propulsii) liniare care permit corelarea coordonatelor a două SRI-uri sau eventual interconectarea coordonatelor spațiale și temporale a două evenimente aflate în sisteme diferite.

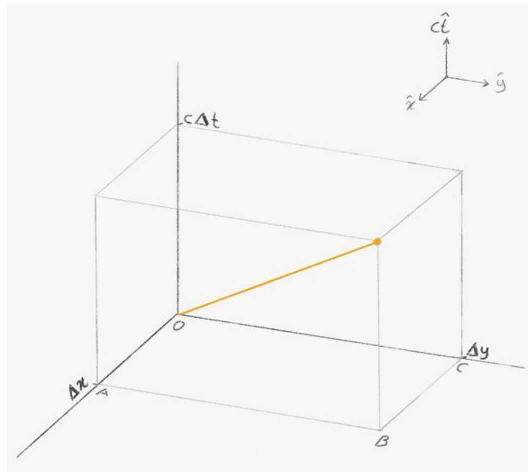


***NOTĂ*: Transformările Lorentz reliefează natura relativă a spațiului și timpului- acestea din urmă devin concepte dependente de starea relativă a observatorului care efectuează măsurătoarea(într-un alt sistem). Cadrul aplicativ al acestor transformări este un spațiu-timp cuadridimensional în care evenimentele sunt reperate drept cvadrivectori(vectori 4D).**

Rețeta este simplă: Pentru a opera într-un cadru spațio-temporal unificat se va recurge la un artificiu – vom considera un reper cartezian tipic xOyz dar în care înlocuim axa z cu ict;

Apoi se aplică Teorema lui Pitagora în 3D și se deduce lungimea așa numitului interval spațio-temporal care este adevăratul „invariant”- fiind o cantitate echivalentă pentru toți observatorii:





Figură 2- Diagrama spațio-temporală simplificată

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + (i * c * dt)^2 = dx^2 + dy^2 - (c * dt)^2$$

***Această formă pătratică se poate extinde pentru a încorpora și cea de-a treia dimensiune spațială... Se observă că intervalul relativist înglobează și distanța euclidiană; $dx^2 + dy^2 + dz^2 = d^2$- care este invariantă la rotații.**

$$\boxed{ds^2 = d^2 - (c * dt)^2;\ metrica\ Minkowski}$$

- **Forma pătratică este total invariantă la schimbarea „frame-ului" și deci la transformările Lorentz care pot fi încadrate într-o clasă specială de rotații în spațiul Minkowski. Metrica „Minkowski-ană" este diferită de cea euclidiană!**

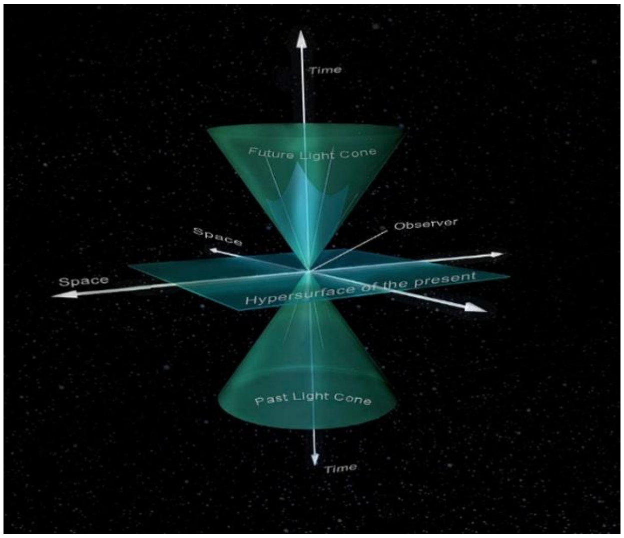
$$\boxed{ds^2 = (c^2 * d\tau^2)\ iar\ d\tau = dt/\gamma}$$

Cine este dτ? Este timpul propriu*- sau timpul măsurat de către un observator în referențialul inerțial special, în raport cu care obiectul în cauză este în repaus relativ.*
Cea mai mică valoare a lui **dτ se va înregistra la o viteză v = c.*

- *Intervalul relativist **ds** este „echivalent" cu intervalul de timp propriu doar până la o constantă c. Am considerat cazul diferențial întrucât orice tip de mișcare se poate aproxima ca fiind liniară pentru durate de timp la limită, infinitezimale.*

$$\frac{c * d\tau}{c * dt} = \sqrt{\frac{(c * dt)^2 - (v * dt)^2}{(c * dt)^2}} = \frac{1}{\gamma}$$

IV) Conul Luminos:



Figură 3- Conul luminos sau calea razelor de lumină emanate dintr-un eveniment O

Cazul 1: $ds^2 = 0$; $d^2 = (c * dt)^2$; **(light-like)**
- Conul dat este suprafața definită de toți cuadrivectorii de tip „light-like”.

Cazul 2: $ds^2 > 0$; $d^2 > (c * dt)^2$; **(space-like)**
- Distanța spațio-temporală este de natură spațială- în afara conului luminos.

Cazul 3: $ds^2 < 0$; $d^2 < (c * dt)^2$;**- (time-like)**
- Cvadriinterval de natură temporală – evenimentele despărțite de acest tip de distanță sunt în interiorul conului luminos.

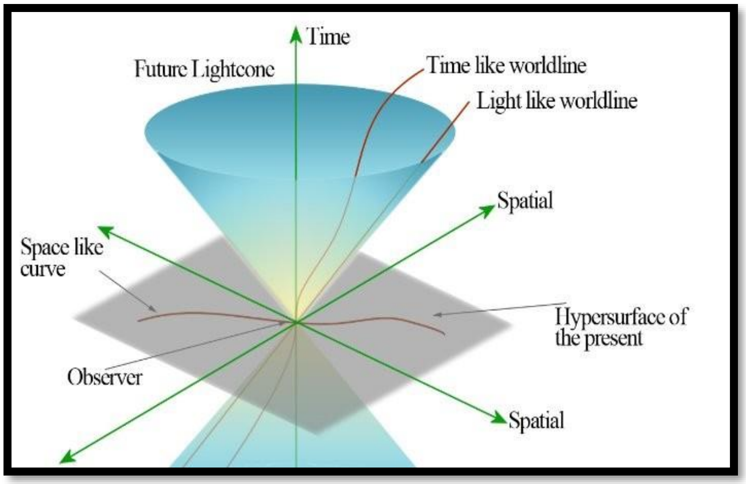
În realitate există 3 dimensiuni spațiale; în modelul din figura 3 apare o simplificare în care conul trecut se definește ca un cerc care se contractă cu viteza luminii și converge în eveniment/observator. Conul luminos trecut se comportă ca și un con luminos viitor doar că în sens invers.

Deoarece trăim în trei dimensiuni spațiale, lumina ar forma mai degrabă o sferă care se extinde(viitorul) sau care se contractă(trecutul)... acest model matematic este util în definirea cauzalității;

- ♣ **Evenimentele care sunt în interiorul conului de lumină pot fi corelate cauzal; acestea pot comunica(pot fi corelate sau se pot influența) prin semnale la viteze mai mici decât c.**

- **Evenimentele plasate în afara conului luminos nu pot fi corelate cauzal cu oricare eveniment din interiorul conului luminos(nu se pot influența reciproc, deoarece nu pot fi conectate de un semnal la viteze mai mici sau egale ca c) Doar evenimentele din și de pe conul luminos trecut ar putea să influențeze observatorul O.**

- „*Hiperconul luminos*” conține deci mulțimea tuturor „LINIILOR DE UNIVERS(WORLDLINE)” – acest cadru este ideal în definirea unui spațiu-timp cu adevărat invariant. Aici, ***geometria este de tip hiperbolic***.



Fiecare punct din spațiu-timp are asociat un con luminos propriu.

Realitaea posedă astfel o structură locală: **evenimentele din apropiere se influențează reciproc într-un timp finit.**

MATEMATICĂ: **Facem apel la așa numita convenție de sumare Einstein:**

$$ds^2 = \sum_{\mu=0}^{3}\sum_{\nu=0}^{3}(g_{\mu\nu} * dx^\mu * dx^\nu) = dx^\mu * g_{\mu\nu} * dx^\nu,\ \ iar\ \ g_{\mu\nu} = 0\ \ ptr.\ \ \mu \neq \nu$$

sau desfășurat: $$ds^2 = (dx^0, dx^1, dx^2, dx^3) * \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} dx^0 \\ dx^1 \\ dx^2 \\ dx^3 \end{bmatrix}$$

$$g = \begin{bmatrix} g_{00} & g_{01} & g_{02} & g_{03} \\ g_{10} & g_{11} & g_{12} & g_{13} \\ g_{20} & g_{21} & g_{22} & g_{23} \\ g_{30} & g_{31} & g_{32} & g_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}\ sau\ \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}\ (conventional)$$

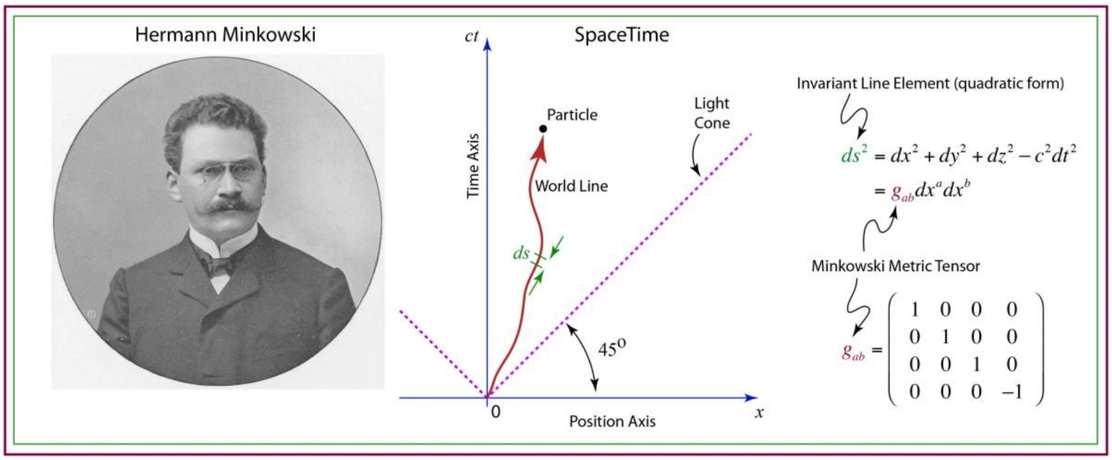
Această matrice se mai numește **tensor metric**(sau metrică Minkwoski)- ea cuprinde și metrica euclidiană dar diferă prin semnătură; **(-,+,+,+).**

***OBS*: Cvadrivectorii cu indice inferior se numesc „covarianți" iar cei cu indice superior „contravarianți". Între cei doi există deci o legătură matematică.**

În acest context, covarianța desemnează un concept asemănător invarianței și este mai mult caracteristică unei ecuații de a conserva forma sa generală atunci când obiectele conținute se transformă.

Orice eveniment fizic se reprezintă ca un set de 4 coordonate(set numit cvadrivector).

$dx^{\mu} = (dx^0, dx^1, dx^2, dx^3) = (ct, x, y, z)$ **(contravariant- original)**



$dx_{\mu} = g_{\mu v} * dx^{v}$ **(covariant) și** $dx^{\mu} = g^{\mu v} * dx_{v}$ **(contravariant)**

Iar: $g^{\mu v} = (g^{-1})_{\mu v}$ **și** $g^{\mu v} = g^{v\mu}$ (***metrica este simetrică și codează geometria!***)

- ***Vom putea scrie***: $ds^2 = dx_{\mu} * g^{\mu v} * dx_{v}$

Invariantul relativist este produsul scalar dintre doi cuadrivectori- inclusiv transformările Lorentz sunt invariante la produsul scalar Minkowski.

- **Produsul scalar se definește simplu:** $x * y = " x_{\mu} * y_{v} * g^{\mu v} " = x^{\mu} * y_{v} = x^{v} * y_{\mu}$

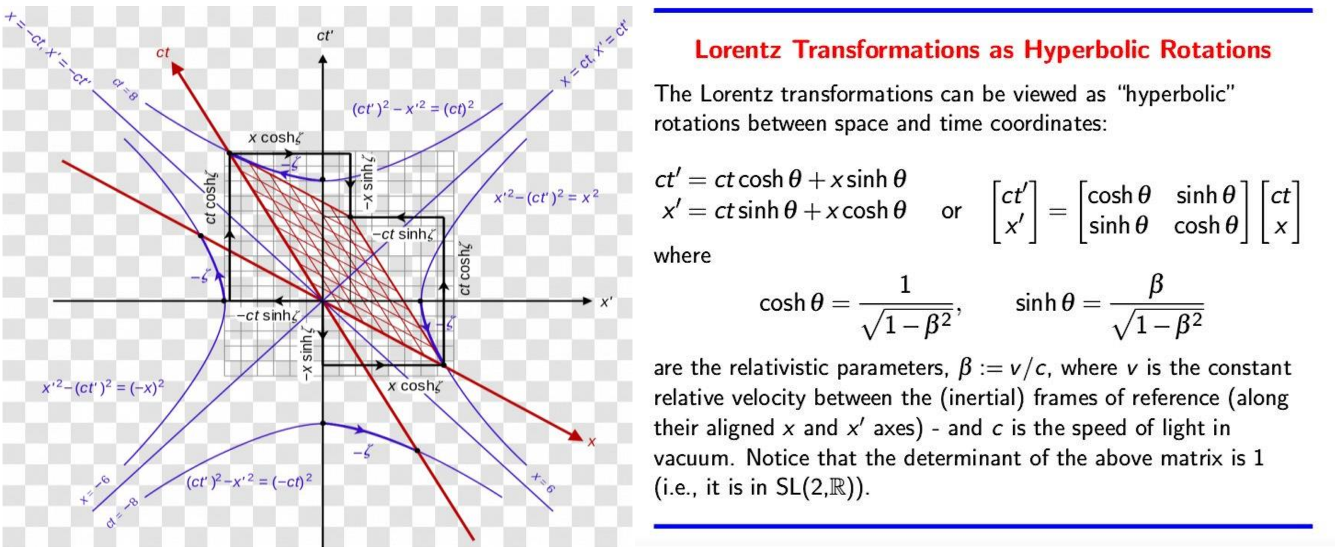
V) Transformările Lorentz prin cvadrivectori:

- ***Cvadrivectorii*** **permit rescrierea transformărilor Lorentz în cea mai generală formă admisibilă:**

1) $\boldsymbol{dx^{0\prime} = \gamma * (\, dx^0 - \beta * dx^1)}$ **sau** $\boldsymbol{c * t' = \gamma * (c * t - v * x/c),\ \beta = v/c}$
2) $\boldsymbol{dx^{2\prime} = \ dx^2}$
3) $\boldsymbol{dx^{3\prime} = \ dx^3}$
4) $\boldsymbol{dx^{1\prime} = \gamma * (\, dx^1 - \beta * dx^0)}$

Astfel a fost stabilită conexiunea între cvadrivectorii:

$$\boldsymbol{dx^{\mu} = (dx^0, dx^1, dx^2, dx^3)\ \text{și}\ \ dx^{\mu\prime} = \left(dx^{0'}, dx^{1\prime}, dx^{2\prime}, dx^{3\prime}\right)}$$



Figură 4- O ilustrare a legăturii între transformările Lorentz și rotațiile hiperbolice.

$$\boldsymbol{dx^{\mu\prime} = \sum_{v=0}^{3} (\Lambda_v^{\mu} * dx^v) = \ \Lambda_v^{\mu} * dx^v},\ \ \textbf{cu}\ \boldsymbol{\mu = (0,1,2,3)}$$

$$\boldsymbol{\Lambda = \begin{bmatrix} \Lambda_{00} & \Lambda_{01} & \Lambda_{02} & \Lambda_{03} \\ \Lambda_{10} & \Lambda_{11} & \Lambda_{12} & \Lambda_{13} \\ \Lambda_{20} & \Lambda_{21} & \Lambda_{22} & \Lambda_{23} \\ \Lambda_{30} & \Lambda_{31} & \Lambda_{32} & \Lambda_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma & -\gamma * \beta & 0 & 0 \\ -\gamma * \beta & \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}$$ – este matricea generală de transformare a coordonatelor.

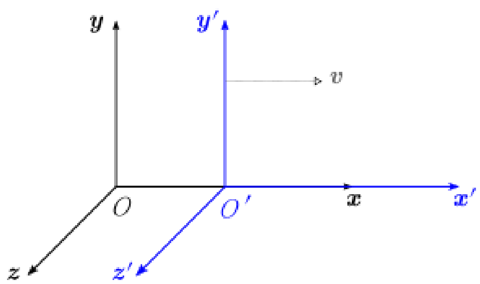
Matrici de rotații:

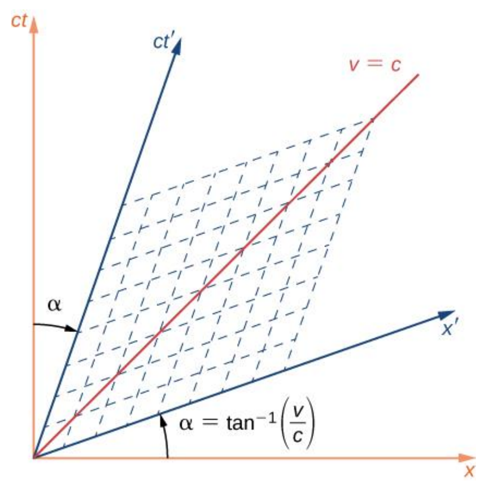
$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}. \qquad \begin{pmatrix} ct' \\ x' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cosh\phi & -\sinh\phi \\ -\sinh\phi & \cosh\phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} ct \\ x \end{pmatrix},$$

Figură 5- Rotație clasică ***Rotație hiperbolică.***

Se observă că putem face substituția: $\boldsymbol{\gamma = cosh(\ \Phi)}$ ***și*** $\boldsymbol{\gamma * \beta = sinh(\Phi)}$ **- de unde și ideea de rotație hiperbolică: orice schimbare de „frame” poate fi privită ca pe o transformare geometrică a sistemului.**

Teoria relativității restrânse poate fi integral dedusă și pe seama analizei diagramelor de spațiu-timp; consecințele sunt amețitoare.





VI) Consecințe:

A) ***Relativitatea simultaneității:***

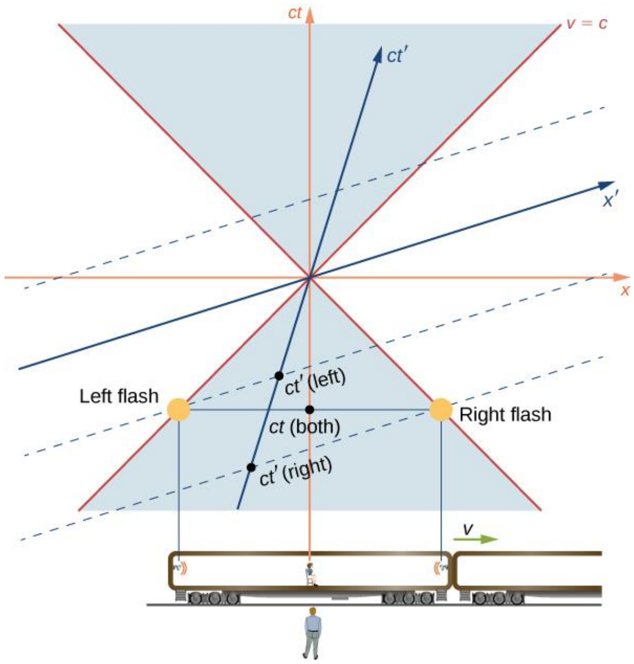
Două evenimente separate spațial care au loc în același moment de timp în sistemul S(simultan), nu au loc simultan și în sistemul S'(ele vor părea separate din punct de vedere temporal)- fapt care implică relativismul timpului- fiecare punct din spațiu are asociat un timp propriu și nu există un timp absolut;

*Dacă **t1=t2*** => $\Delta t = 0$ ($\boldsymbol{\hat{\imath}n\ sistemul\ S}$);

$$\boldsymbol{t2' - t1' = \gamma * \left(\Delta t - \frac{\Delta X * V}{c^2}\right) = -\gamma * \frac{\Delta X * V}{c^2},}\ \ (\boldsymbol{\hat{\imath}n\ sistemul\ S'});$$

=> ***<u>t1' nu mai coincide cu t2'</u> (saltul în timp este cu atât mai mare cu cât evenimentele sunt mai distanțate spațial). Dacă evenimentele se suprapun, nu are loc nici un fel de salt temporal.***

Diferiți observatori aflați în sisteme de referință diferite vor evalua măsurători utilizând axe temporale proprii - orientate diferit(deși amândoi vor avea dreptate, chiar dacă liniile lor de univers nu coincid);



Simultaneitatea este un fenomen dependent de cadrul inerțial... Pentru observatorul aflat pe margine/peron(solidar relativ la vagon), emisiile celor două lămpi apar ca fiind simultane!

--

Din perspectiva persoanei din „frame-ul” vagonului, cele două evenimente nu vor mai fi pe „linia simultaneității”. Transformările Lorentz sunt asociate cu o „deplasare unghiulară” a celor două axe!

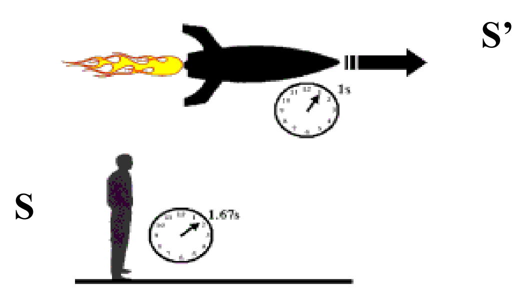
B) Dilatarea temporală.

Să spunem că observatorul din sistemul S’ se mișcă relativ la cel din sistemul S, cu viteza constantă v. Observatorul din S’ măsoară intervalul de timp t2’-t1’... atunci cum va percepe această durată observatorul din sistemul solidar S?

$\mathbf{t_1 = \gamma*(t_1' - \frac{x_1'*v}{c^2})}$

$\mathbf{t_2 = \gamma*(t_2' - \frac{x_2'*v}{c^2})}$

$\mathbf{t_2 - t_1 = \gamma*(t_2' - t_1' + 0)}$; am considerat $\mathbf{x_2' = x_1'}$(*observatorul în mișcare este static relativ la propriul lui referențial*)



$Astfel$: $\Delta t = \gamma * \Delta t'$ **- Observatorul din sistemul S va percepe o durată de timp mai lungă decât cea percepută de observatorul din S'. Același lucru este valabil și pentru cazul lui S'; el va măsura o durată aferentă mai lungă în sistemul lui S.**

Factorul de dilatare a duratelor temporale se numește factor Lorentz.

C) Contracția Lorentz a lungimilor.

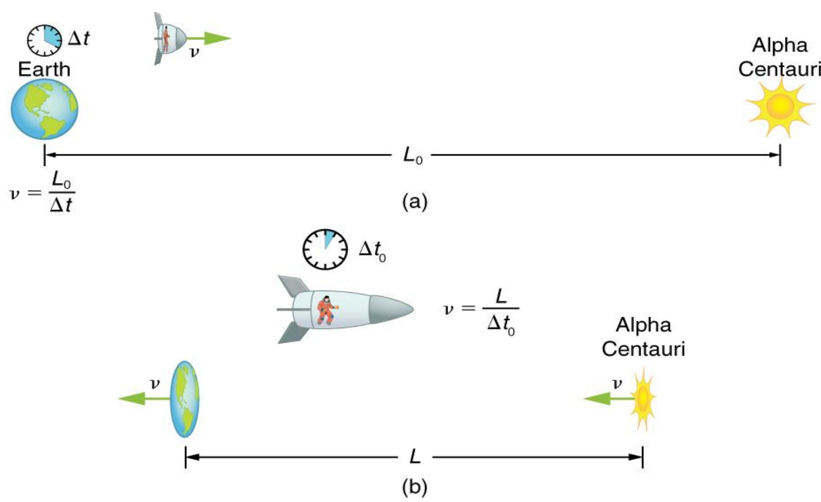
Vom cosidera o rachetă aflată în stare de MRU în raport cu sistemul S, paralelă cu axa Ox' a lui S'(care este sistemul său propriu): valorea lungimii acesteia va fi de $x_2' - x_1'$(în sistemul S'). Din perspectiva unui observator aflat în sistemul de referință S(pe Terra), lucrurile stau astfel:

$x_1 = \gamma*(x_1' + v* t_1')$
$x_2 = \gamma*(x_2' + v* t_2')$
$x_2 - x_1 = \gamma*(x_2' - x_1' + v * t_2' - v * t_1')$ **și consider** $t_2' = t_1'$.

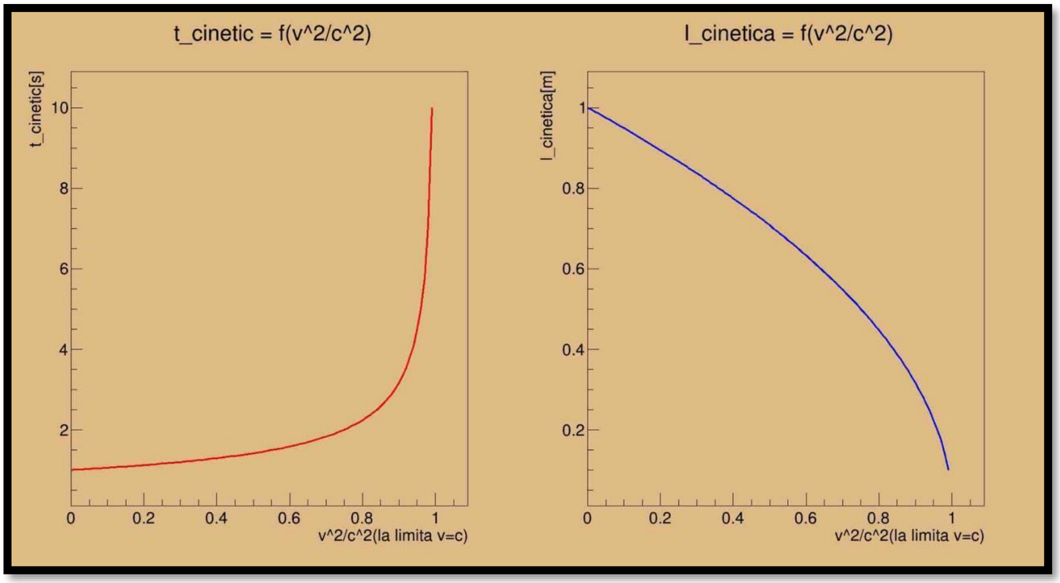
***Distanța dintre două evenimente simultane(în S') va fi diferită funcție de referențialul din care este măsurată.**

$x_2 - x_1 = \gamma*(x_2' - x_1')$

$\Delta x = \Delta x'/\gamma$ **- Tija va părea contractată pe direcția de mers- din punctul de vedere al observatorului S, static.**



Un observator de pe Terra va vedea cum nava care se mișcă rectiliniu și uniform se contractă pe direcția de înaintare. Din perspectiva unui observator situat în navă, restul obiectelor externe ar părea să sufere o contracție pe direcția de mers. Distanța percepută până la Alpha Centauri va fi mai mică decât aceeași distanță măsurată de pe Pământ!



Figură 6 - Se observă că pentru v = c, factorul Lorentz devine 0 iar Lungimea cinetică tinde la 0. Timpul cinetic tinde și el la infinit... Se subînțelege de ce viteza luminii nu poate fi depășită.

D) Compunerea vitezelor:

Vom considera că obiectul se mișcă cu viteza medie v în sistemul de referință S;

$$\boldsymbol{v} = \frac{\Delta \mathbf{x}}{\Delta \mathbf{t}} = \frac{\mathbf{x_2 - x_1}}{\mathbf{t_2 - t_1}}$$

În sistemul de referință S', obiectul capătă o altă viteză;

$$\boldsymbol{v_x}' = \frac{\Delta \mathbf{x}'}{\Delta \mathbf{t}'} = \frac{\mathbf{x_2' - x_1'}}{\mathbf{t_2' - t_1'}} = \frac{(\mathbf{x_2 - x_1}) - (\mathbf{t_2 - t_1}) * \boldsymbol{u}}{(\mathbf{t_2 - t_1}) - (\mathbf{x_2 - x_1}) * \boldsymbol{u}/\boldsymbol{c}^2} = \frac{\boldsymbol{v_x} - \boldsymbol{u}}{1 - \frac{\boldsymbol{v_x} * \boldsymbol{u}}{\boldsymbol{c}^2}}$$

Aici u este viteza relativă; se observă că legea de compunere a vitezelor nu mai este pur aditivă;

O: Presupunând că v = c, se va obține că: v' = $\frac{c-u}{1-u/c} = c$
Rezultatul este o dovadă a auto-consistenței TRR; fotonul nu are un SR propriu!

<u>Regula inversă de compunere a vitezelor este:</u>

$$\boxed{v_x = \frac{v_{x'}+u}{1+\frac{v_{x'}*u}{c^2}}}$$ **- am dedus astfel compunerea vitezelor după axa OX.**

După restul axelor(Oy și Oz):

$$v'_y = \frac{dy'}{dt'} = \frac{dy}{dt*\gamma*(1-\frac{dx*u}{dt*c^2})} = \frac{v_y*\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}{(1-\frac{v_y*u}{c^2})}$$

$$v'_y = \frac{dy'}{dt'} = \frac{dy}{dt*\gamma*(1-\frac{dx*u}{dt*c^2})} = \frac{v_y*\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}{(1-\frac{v_y*u}{c^2})}$$

VII) Impulsul realtivist:

Există o cantitate hibridă numită viteză proprie iar pentru o particulă, această mărime se definește ca distanța parcursă de ea, măsurată din sistemul de referință al laboratorului și timpul ei de mișcare, măsurat în referențialul propriu.

$$\theta = \frac{dx}{d\tau} = \gamma * \frac{dx}{dt} = \gamma * v$$

- Cvadrivectorul viteză se poate scrie: $v^{\mu} = (c, v_x, v_y, v_z)$;

Impulsul se va scrie astfel:

p $= m_0 * \theta = m_0 * v * \gamma = \frac{m_0*v}{\sqrt{1-(\frac{v}{c})^2}}$ această mărime se va conserva în orice sistem de referință inerțial.

Cvadrivectorul impuls capătă o formă interesantă:

$p^{\mu} = m_0 * \gamma * (c, v_x, v_y, v_z)$;

Primul termen se poate scrie: $\frac{m_0*\gamma*c^2}{c}$ **;**
Bingo! numărătorul este chiar energia totală E- vom aborda și alte metode pentru a putea ajunge la această relație.

VIII) Forța relativistă:

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = m_0 * \gamma * \frac{d\vec{v}}{dt} + \vec{v} * m_0 * \frac{d\gamma}{dt} = m * \vec{a} + \frac{m * |\vec{a}|}{1 - \left(\frac{|\vec{v}|}{c}\right)^2} * \frac{|\vec{v}| * \vec{v}}{(c)^2}$$

➔ Se poate vedea cu ochiul liber că există o componentă || v; ***forța și accelerația nu mai sunt obligatoriu coliniare! Forța capătă un caracter relativ(dependent de observator)***

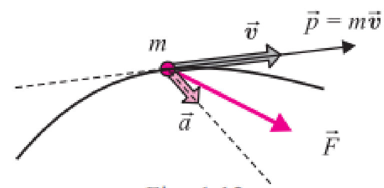


Fig. 1.12.

IX) Echivalența dintre masă și energie:

!!! Pornim de la teorema de variație a energiei cinetice:

$$\frac{dEc}{dt} = \frac{dL}{dt} \text{ și noi știm că } P = \frac{dL}{dt} = \vec{F} * \vec{v}$$

$$P = m * \vec{v} * \frac{d\vec{v}}{dt} + v^2 * \frac{dm}{dt} = (c^2 - v^2) * \frac{dm}{dt} + v^2 * \frac{dm}{dt} = c^2 * \frac{dm}{dt}$$

Prin integrare se va obține;

$$Ec = (m - m_0) * c^2 = (\gamma - 1) * m_0 * c^2 = E - E_0$$

Energia cinetică a unui mobil este diferența dintre energia lui totală E și energia sa de repaus E0.

A doua metodă:

$$Ec = \int_0^u F\,dx = \int_0^u m_0 * u * \frac{d}{dt}(u * \gamma)\,dt = \frac{m_0 * u^2}{\sqrt{1-\left(\frac{u}{c}\right)^2}} - m_0 * c^2 + m_0 * c^2 * \frac{1-\left(\frac{u}{c}\right)^2}{\sqrt{1-\left(\frac{u}{c}\right)^2}}$$

Ajungem la aceeași relație; $Ec = E - E_0$

Energia de repaus: $E_0 = m_0 * c^2$ **și** energia relativistă/totală $E = m * c^2$

- Există o formulă care leagă energia totală de impuls și aceasta se poate deduce din triunghiul dreptunghic alăturat:

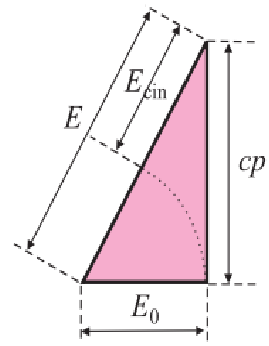
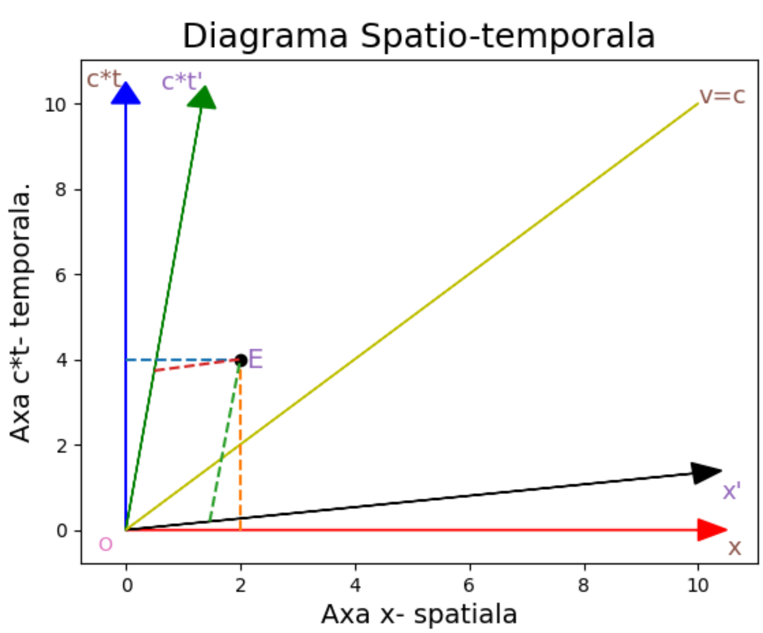


Fig. 1.13.

$$E^2 = c^2 * p^2 + {m_0}^2 * c^4$$

Sau din; $p^{\mu} * p_{\mu} = \left(\frac{E}{c}\right)^2 - p^2 = (m_0 * c)^2$

Această relație dezvăluie legătura dintre energia unui foton și impulsul său; „E = pc”!
Putem spune că fotonul experimentează „tot spațiul într-un singur loc și tot timpul într-un singur moment”.
Pentru un foton, timpul nu capătă un înțeles - fotonul apare ca fiind comprimat în două dimensiuni spațiale !?

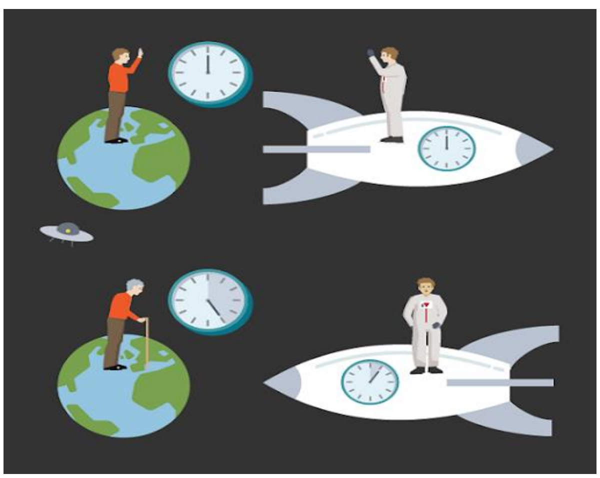


Din moment ce observatorii din sistemele de referință S și S' nu se contrazic reciproc la final, au dreptate atunci când afirmă că percep duratele temporale și pe cele spațiale într-un mod diferit. Axele spațio-temporale apar astfel rotite unele relativ la altele. A spune că tranziția de la un referențial la altul este echivalentă cu o rotație hiperbolică(a axelor sistemului) pare acum un fapt evident.

Accelerația unui sistem fizic poate fi văzută ca pe un salt continuu de la un sistem de referință inerțial la altul (având o viteză mai mare) - în fiecare clipă sistemul propriu al obiectului va coincide cu un sistem de referință inerțial. Calculele se vor efectua mereu în sisteme de referință inerțiale.

X)Paradoxuri:

- ### Paradoxul gemenilor:



Paradoxul gemenilor este cea mai bună dovadă a lipsei conceptului de simultaneitate absolută: fiecare observator are propriul său plan de simultaneitate aferent SR.

- **Se pune problema astfel: dacă doi gemeni(A și B) au aceeași vârstă la momentul inițial, care va fi diferența dintre vârstele lor daca geamănul B pleacă într-o călătorie spațială la o viteză relativistă;**

Situația ar părea simetrică **căci pentru A(observatorul aflat pe Terra), B ar părea să îmbătrânească mai lent iar ceasurile din rachetă ar părea să ticăie mai lent;**

La fel și din punctul de vedere al lui B, ceasurile de pe Terra ar părea să bată mai lent și A va îmbătrâni pentru el ceva mai lent – fiind perceput de B ca și când s-ar îndepărta de nava sa cu o viteză opusă.

<u>Cine și cât îmbătrânește deci la final sau care va fi vârsta lui B relativ la A?</u>

- ***Analizăm situația din punctul de vedere al observatorului A(staționar), aflat în SR terestru;***

Vom presupune că B se mișcă rectiliniu și uniform relativ la A. Durata călătoriei lui B va fi de 8 ani din punctul de vedere al lui A – după această durată, pentru A va părea că B ajunge la destinație.

Dacă considerăm viteza lui B că fiind de 86.66% din c (v = 0.866*c) atunci din SR al lui A distanța parcursă de B va fi d = 0.866*8*c = 6.92*c.
B ar vedea că parcurge o distanță contractată, anume $6.92 * \frac{c}{\gamma}$ = 3.46*c, $\gamma = 2$
Durata călătoriei(din punctul lui B de vedere) va fi de doar 3.466*c/0.866*c = 4 ani.

- **Pentru B ar trece doar 4 ani la dus... durată care în sistemul lui A apare ca fiind 8 ani. Situația este simetrică și la întors: după ce se vor revedea A va constata că este cu 8 ani mai bătrân decât B; pentru B s-ar fi scurs 8 ani – echivalentul a 16 ani pentru A.**

<u>Matematic</u>:

$$\Delta t_B = \frac{d_A * \sqrt{1-\beta^2}}{v} = 4\ ani - \ durata\ la\ dus\ \text{î}nregistrat\text{ă}\ din\ SR\ al\ lui\ B$$

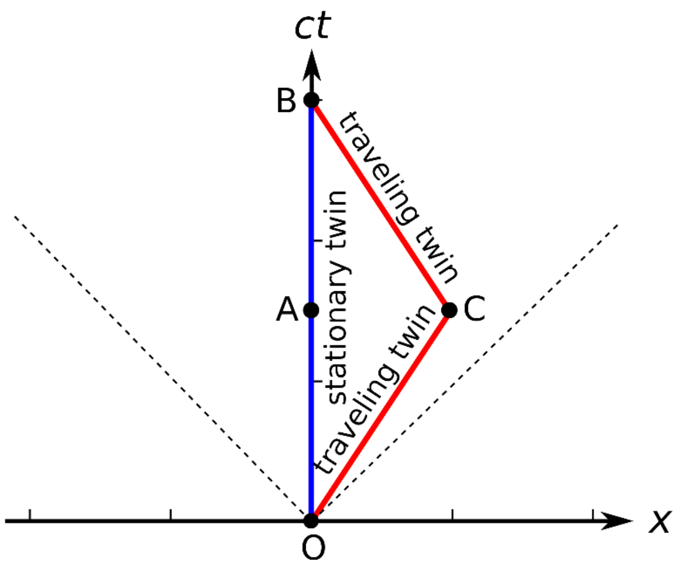
$$\Delta t_A = \frac{d_A}{v} = 8\ ani - durata\ la\ dus\ \text{î}nregistrat\text{ă}\ din\ SR\ al\ lui\ A.$$

$$d_A = distan\text{ț}a\ m\text{ă}surat\text{ă}\ de\ A\ \text{ș}i\ pe\ care\ B\ o\ are\ de\ parcurs.$$

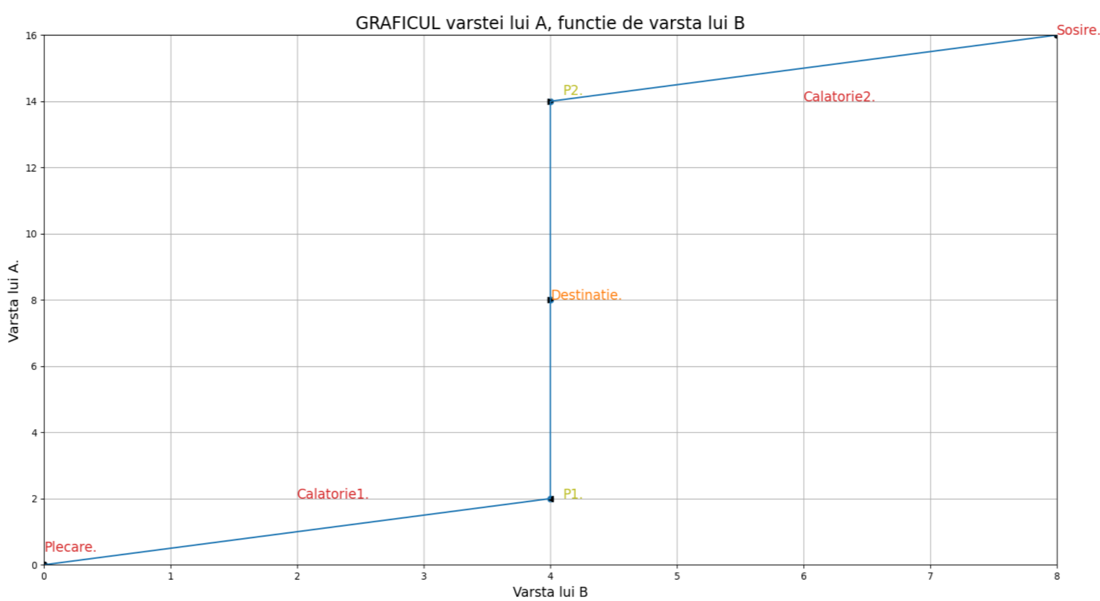
Din punctul de vedere al observatorului călător B, acesta va vedea cum A se depărtează în raport cu el, la o viteză de -v(în prima etapă a plecării). În cei 4 ani de călătorie, B va constata că pentru A vor fi trecut 4/$\gamma = 2\ ani$.

<u>ÎN MOMENTUL</u> în care B ajunge la destinație efectuează un salt în simultaneitate – sau „primul salt temporal”. În sistemul de referință la plecare(călător), A pare cu adevărat mai tânăr... dar în sistemul de la destinație(echivalent cu cel al pământului), A va fi mai bătrân cu 4 ani decât B: la întoarcere situația este simetrică în sensul în care B accelerează schimbând referențialul și odată întors pe Terra se produce al doilea salt temporal!

- **Contraintuitiv este că vârsta lui A face un salt atunci când B își modifică viteza sau altfel spus atunci când B efectuează schimbarea sistemului de referință.**



Figură 7 Diagrama spațio-temporală care ilustrează liniile de univers ale celor doi frați.



Din grafic se observă că atunci când B ajunge la destinație(în P1), face o tranziție de la sistemul referențial avut în decursul călătoriei1 la sistemul referențial echivalent cu cel al Terrei, atunci când are loc un „shift” în vârsta lui A, de la 2 la 8 ani. Al doilea „shift” se produce la venire, atunci când B este forțat să schimbe din nou sistemul de referință: trecând din referențialul călător C2 la cel de pe Terra(sosire).

„Variațiile de accelerație induc un salt în simultaneitate care are loc odată cu comutarea de la un referențial la altul(rotirea axelor spațio-temporale).” Prezentul universal este un concept clasic și fără corespondent real- el se ajustează după starea referențialului iar evenimentele nu au poziții absolute nici măcar în timp.

- Inversarea ordinii evenimentelor:

Știm că schimbarea sistemului de referință induce salturi temporale ale evenimentelor îndepărtate; întrucât simultaneitatea este relativă atunci și momentul „acum” capătă o natură relativă. Dar dacă(ipotetic) depășim viteza luminii?

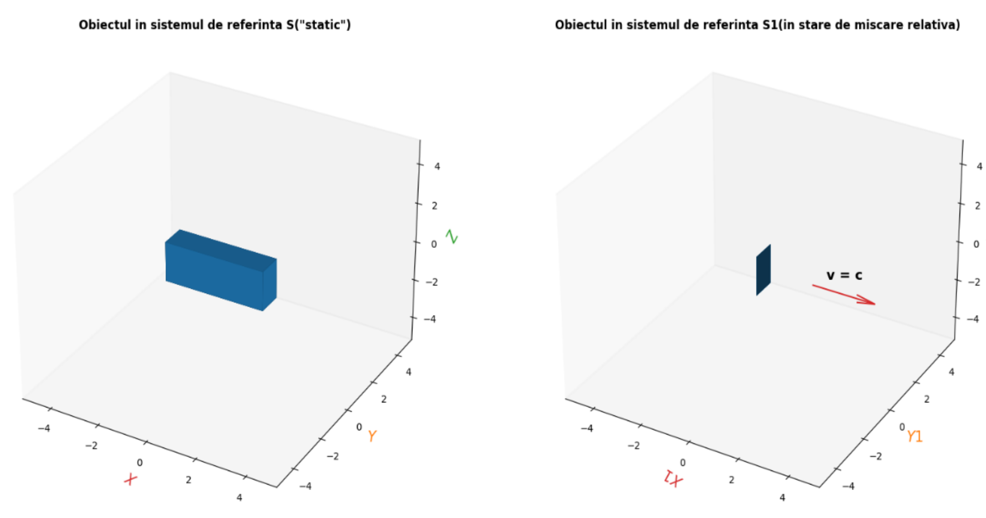
$$\Delta \boldsymbol{T} = \boldsymbol{\gamma} * \Delta \boldsymbol{t} * \left(\mathbf{1} - \frac{\Delta \boldsymbol{x}}{\Delta \boldsymbol{t}} * \frac{\boldsymbol{v}}{\boldsymbol{c}^2}\right)$$

Să spunem că un observator plasat în sistemul S trage cu gloanțe „tahionice” care au viteza ipotetică de 4*c. După 10 ns, glonțul își atinge ținta în același sistem S. Dacă privim scena dată dintr-un sistem de referință S’ care se deplasează cu viteza **v = 0.5*c** relativ la S, atunci devine limpede că;

$$\Delta \boldsymbol{T} = \mathbf{1.55} * \mathbf{10} * (\mathbf{1} - \mathbf{0.5} * \mathbf{4}) = -\mathbf{15.5}\ \boldsymbol{ns}$$

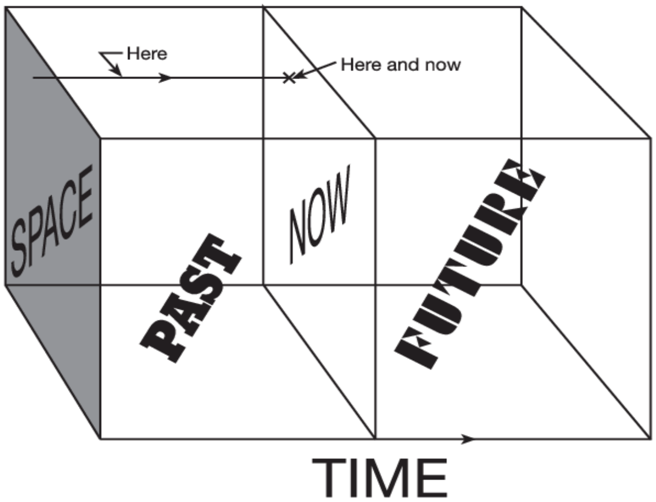
Astfel ordinea celor două evenimente ar fi inversată din perspectiva lui S’; glonțul ar izbi ținta abia după apăsarea pe trăgaci. După același principiu cineva ar putea să trimită mesaje în trecut...

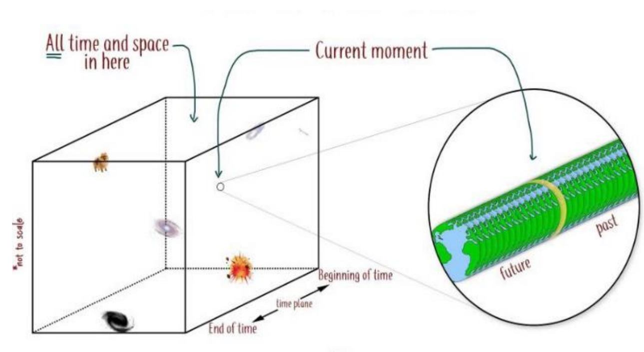
!!! ACUM PARE EVIDENT DE CE NU PUTEM SĂ-NE MIȘCĂM MAI REPEDE DECÂT c? *În plus*, *la o viteză* ***v = c*** *obiectul apare ca fiind 2D:*



Figură 8- a doua perspectivă este cea văzută de un observator în stare de repaus relativ la S1

XI) O nouă perspectivă îndărătnică;





Figură 8 - „Universul-bloc”;

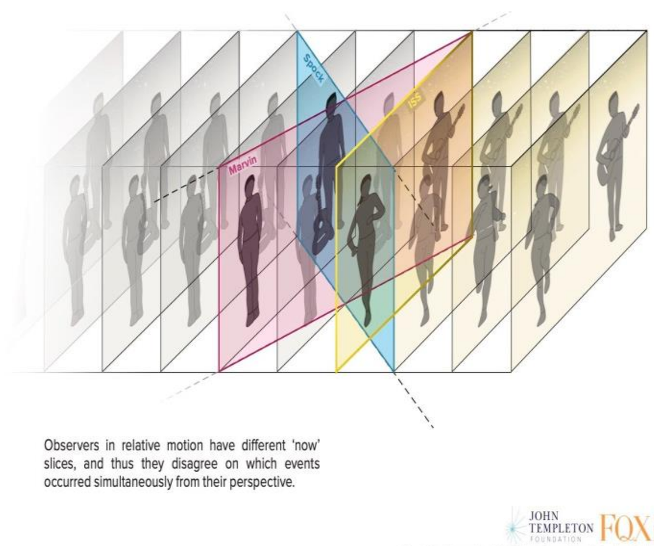
Această viziune redată în imagine suprimă o dimensiune spațială; tot spațiul este redus la o foaie 2D(simplificare). Obiectele în repaus relativ vor trasa o linie orizontală numită linie de univers... iar ceea ce numim „acum/now” se reduce la o secțiune prin bloc și care conține toate evenimentele punctuale considerate simultane în propriul sistem de referință.

Întrucât simultaneitatea este relativă, doi observatori aflați în stare relativă de mișcare nu vor percepe aceeași „foaie a simultaneității”- deci ceea ce înțelegem prin acum devine relativ la observator – observatorii nu vor cădea de acord nici măcar asupra ordinii evenimentelor.

„Acum” pentru mine nu este echivalent cu „acum” pentru tine dacă ne mișcăm diferit.

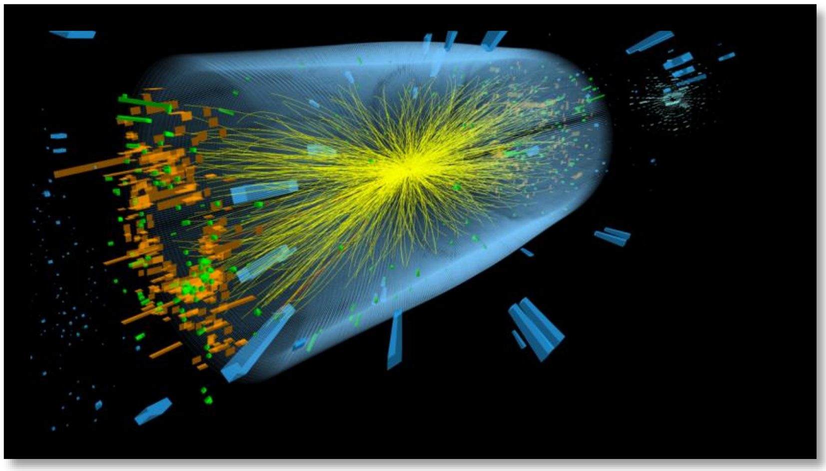
Fiecare observator va avea propria lui secțiune transversală prin bloc; evenimentele trecute precum și cele viitoare par să „coexiste” într-un „bloc înghețat”.

Nu există o separare absolut fixă între trecut și viitor iar prezentul relativ este „ușor difuz” – cauzalitatea rămâne în picioare!



XII) Motivația pentru studiul TRR:

Cele mai evidente aplicații ale TRR sunt coliziunile/ciocnirile între particulele relativiste(procese la nivele energetice înalte); ciocnirile sunt acele tipuri de procese de interacțiune care se produc atât de repede încât forțele externe(precum forțele electrice și cele gravitaționale) nu au o influență apreciabilă;



Figură 9 - o ilustrare artistică a coliziunilor dintre particulele accelerate într-un accelerator.

- ***După natura lor, ciocnirile relativiste sunt clasificate în;***

(a) „*Sticky/Plastice*": energia cinetică scade, energia de repaus și masa cresc.

(b) „*Explozive*": energia cinetică crește, energia de repaus și masa scade.

(c) „*Elastice*": energia cinetică, energia de repaus și masa sunt conservate.

***Ciocnirile elastice*: sunt singurele tipuri de coliziuni în care are loc conservarea masei; în restul tipurilor de coliziuni este necesară aplicarea relației de echivalență dintre masă și energie. Ciocnirile „explozive" pot fi privite ca descompuneri de particule.**

În analiza dinamicii relativiste, vom putea afirma că într-un proces de ciocnire inelastică are loc conversia unei fracțiuni din energia cinetică în energie de repaus sau vice-versa.

La scara macroscopică, energiile de repaus sunt enorm mai mari decât cele interne, astfel încât diferențele de masă sunt total neglijabile în viața de zi cu zi și foarte mici chiar și la nivel atomic.

Surse accesate în sprijinul elaborării documentului dat:

1) Griffiths D. Introduction to elementary particles (Wiley, 1987)(T)(405s).djvu (msu.ru)

2) Fizica din simetrii Jakob Schwichtenberg

3) Teoria relativității restrânse - Wikipedia

4) Teoria relativitatii restranse (rasfoiesc.com)

5) Principiile teoriei relativitatii restranse (scritub.com)

6) p001-006 - 2007.p65 (elibrariescolara.ro)

7) NOTIUNI-DE-TEORIA-RELATIVITATII-RESRANSE1.pdf (manualdefizica.ro)

8) Fizica 12 F1+F2 Petrescu 2009 nativ.pdf (edu.ro)

9) The block universe. One dimension has been discarded and space is... | Download Scientific Diagram (researchgate.net)

10) Particle Physicists Turn to AI to Cope with CERN's Collision Deluge - Scientific American

11) File:Twin Paradox Basic Spacetime Diagram.svg - Wikimedia Commons

12) Richard Muller, Acum. Fizica timpului

13) File:Lorentz boost x direction standard configuration.svg - Wikimedia Commons

14) Twin paradox - Wikipedia

15) Light cone - Wikipedia

16) OpenStax CNX

17) 5.5 The Lorentz Transformation - University Physics Volume 3 | OpenStax

18) Time Dilation (colorado.edu)