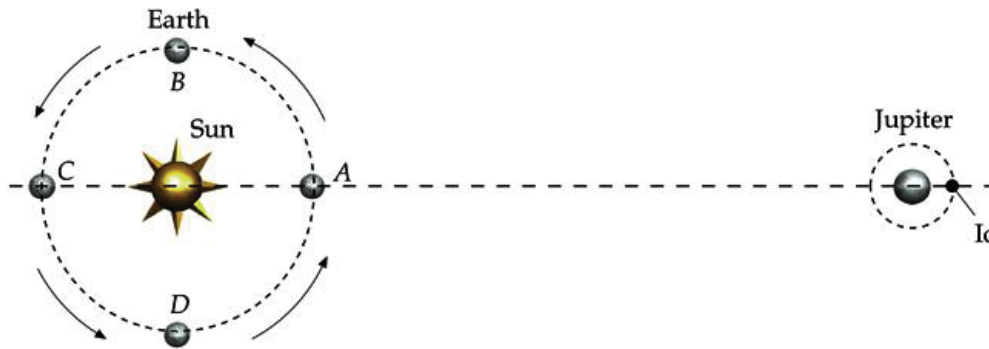


## Скоростта на светлината – ключов въпрос във Физиката. Измервания

Нютоновата теория предполага безкрайно висока скорост на разпространение на гравитационното взаимодействие. Това означава, че Класическата Механика (КМ) допуска принципната възможност за мигновено предаване на сигналите (т.е. безкрайна скорост на светлината  $c = \infty$ ). Ето защо, за експериментална проверка на КМ и Нютоновата концепция за абсолютно пространство и време е особено важно да се отговори на въпроса: *крайна или безкрайна* е скоростта на светлината  $c$  ?

Първото доказателство за крайната скорост на светлината е направено през 1675 година от датския астроном Рьомер. Той установил, че времето между две последователни еклиптики на Йо (спътник на Юпитер) нараства с около 15s, когато Земята се отдалечава от Юпитер, движейки се по траектория  $ABC$ , и обратно – намалява с 15s, когато се приближава към Юпитер по траектория  $CDA$  (Фигура 5-1). Това означава, че скоростта на светлината е крайна, т.е.  $c \neq \infty$ . За половин година (когато Земята се намира в точка  $C$ ) натрупаното



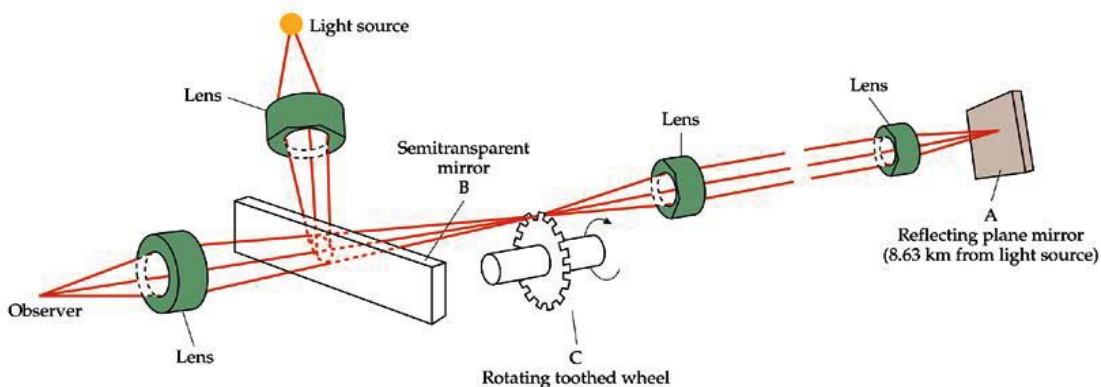
**Фигура 5-1**

закъснение (спрямо положението ѝ в точка  $A$ ), което Рьомер получил е  $\Delta t = 22 \text{ min}$ . Това е времето, за което светлината изминава разстоянието  $AC$  – диаметъра на земната орбита, който тогава е бил известен  $3 \times 10^{11} \text{ m}$ . Така за  $c$  Рьомер пресметнал:

$$c = \frac{AC}{\Delta t} = \frac{3 \times 10^{11} \text{ m}}{22 \cdot 60 \text{ s}} = 2,273 \times 10^8 \text{ m/s} \quad 5-1$$

Грешката на Рьомер идва от неточността при определянето на  $\Delta t$ , по съвременни данни  $\Delta t = 16,6 \text{ min}$ .

Първото наземно измерване на скорост на светлината е направено през 1849 година от френския физик Физо. На хълм близо до Париж (виж Фигура 5-2), Физо поставил светлинен източник. През въртящо се зъбно колело и колиматор, светлинният лъч се изпраща до огле-

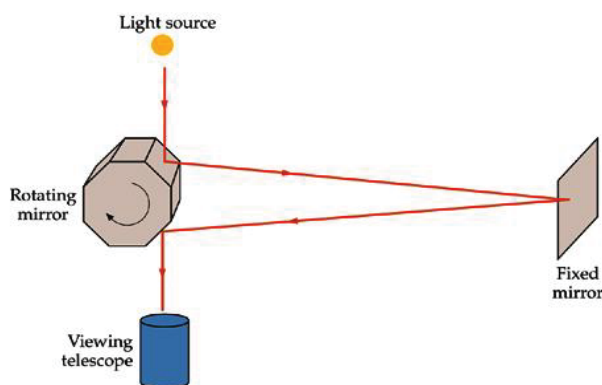


**Фигура 5-2**

дало, поставено на съседния хълм на разстояние 8.63 km. Отразеният лъч се възпрепятства от съседния зъб на въртящото се колело и в окуляра се вижда светлина. При честота на въртене  $\nu = 25,21\text{ Hz}$ , отразеният лъч преминава през съседния отвор и се наблюдава в окуляра. Времето  $\Delta t$ , за което светлината изминава разстоянието до огледалото и обратно, може да се пресметне (броят на зъбците на колелото е 720), и за  $c$  се получава:

$$\Delta t = \frac{1}{25,21 \cdot 720} = 5,509 \times 10^{-5} \text{ s}, \quad c = \frac{2l}{\Delta t} = \frac{2 \cdot 8630}{5,509 \times 10^{-5}} = 3,133 \times 10^8 \text{ m/s} \quad 5-2$$

Методът на Физо бил подобрен през 1862 година от друг френски физик – Фуко. Вместо зъбно колело той използвал осмоъгълна въртяща се огледална призма (Фигура 5-3).



Фигура 5-3

За времето, за което призмата се завърта на  $1/8$  оборот, светлината достига до огледалото и се връща, като попада в окуляра при повторното си отразяване от призмата. Резултатът на Фуко бил значително точен:

$$c = 298\,000 \pm 500 \text{ km/s} \quad 5-3$$

По същия начин Фуко измерил и скоростта на светлината във водата и показал, че тя е по-ниска отколкото във въздуха. Станало ясно, че светлината взаимодейства с веществото при своето разпространение.

Американският физик Майкелсън подобрил значително точността на метода на Фуко и през 1926 година получил най-точния до тогава резултат, който влязъл в международните таблици на физичните величини:

$$c = 299\,796 \pm 4 \text{ km/s} \quad 5-4$$

През 1960г., американският физик Майман конструира първия рубинов лазер. Използването му в експеримента на Майкелсън подобрява многократно точността на измерването и през 1973г. е получен следния резултат:

$$c = 299\,792\,458 \pm 1,2 \text{ m/s} \quad 5-5$$

Развитието на експерименталната техника и технологии позволява по-нататъшно прецизиране на метода и намаляване на грешката при измерването. Резултатът получен през 1983г. е именно този, с който борави съвременната наука:

$$c = 299\,792\,458 \pm 0,4 \text{ m/s} \quad 5-6$$

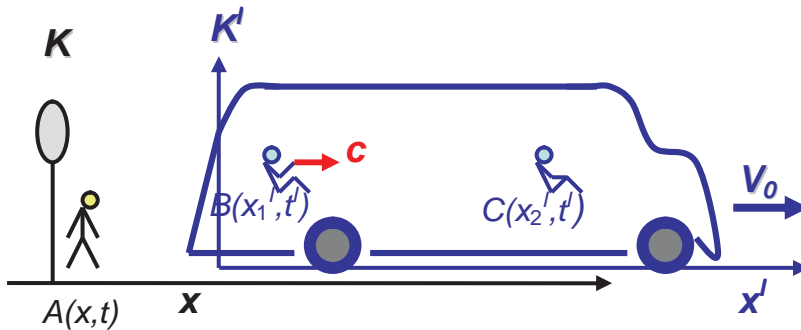
**Лекция 6: Специална Теория на Относителността.**  
**Концепция на Айнщайн за пространство-временния континуум.**  
**Трансформации на Лоренц. Следствия**

Галилей първи изказва твърдението, че *механичните явления не зависят от избора на ИКС* (Лекция 2). Обобщавайки тази концепция за всички физични явления и отчитайки безспорния експериментален факт за *крайната скорост на светлината* (Лекция 5), Айнщайн формулира два постулата, на базата на които изгражда Специалната Теория на Относителността (СТО).

**Постулат 1:** *Природните закони са еднакви във всички ИКС.*

**Постулат 2:** *Скоростта на светлината във вакуум е постоянна във всички ИКС.*

За илюстрация на основните идеи на СТО ще разглеждаме събития, протичащи в две ИКС:  $K$  – свързана с автобусната спирка и  $K'$  – свързана в движещия се с постоянна скорост  $V_0$  автобус (Фигура 6-1). На спирката стои Алекс с координати  $(x, t)$ , а в автобуса



**Фигура 6-1**

се взят Виктор и Сашо с координати съответно  $(x'_1, t')$  и  $(x'_2, t')$  в  $K'$ . Ако Виктор светне с фенерче по посока на Сашо, то светлинният импулс в  $K'$  ще се движи със скорост  $c$ . Според закона на Галилей за събиране на скорости (2-6), скоростта на светлинния импулс за Алекс (измерена в  $K$ ) ще бъде по-голяма от  $c$  (6-1), което противоречи на *Постулат 2* на СТО.

$$v_A = v_0 + c > c \quad 6-1$$

Следователно законът на Галилей за събиране на скорости не е верен, защото допуска безкрайна скорост на разпространение на светлината. Това означава, че концепцията на Нютон за *абсолютното пространство и време* (виж Лекция 2), от която следва законът на Галилей за събиране на скорости, също трябва да бъде ревизирана. СТО се базира на *концепцията на Айнщайн за пространство-временния континуум*, според която:

***пространството и времето са характеристики на материята и зависят от нейното движение. Вселената представлява пространствено-временен континуум.***

Математически израз на тази концепция, както и на двата постулата на СТО, са *трансформациите на Лоренц*:

$$\begin{cases} x = \gamma(x' + v_0 t') \\ t = \gamma\left(t' + \frac{v_0}{c^2} x'\right) \end{cases}, \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v_0^2}{c^2}}} \quad 6-2$$

Лоренцовата променлива  $\gamma$  расте от 1 (при  $v_0 \ll c$ ) до безкрайност (при  $v_0 \rightarrow c$ ).

Следователно при ниски скорости на движение  $\gamma = 1$ , а членът  $\frac{v_0}{c^2} x'$  може да се

пренебрегне. Така Лоренцовите трансформации (6-2) преминават в Галилееви (2-5), т.е. Нютоновата механика се явява частен случай на СТО, валидна при ниски скорости на движение  $v_0 \ll c$ .

Ще разгледаме три важни следствия от трансформациите на Лоренц.

**Следствие 1:** *Относителност на едновременността.* Нека в  $K'$  Виктор и Сашо едновременно изстрелят сигнални ракети в момент  $t'$  (Фигура 6-2). В  $K$  Алекс ще види ракетата на Виктор в момент  $t_1$ , а ракетата на Сашо – в момент  $t_2$ :

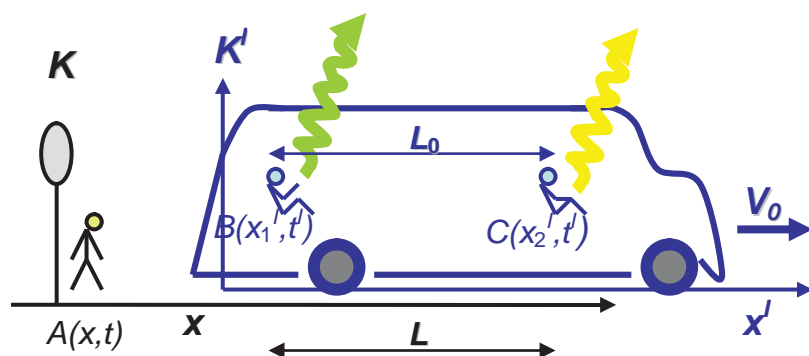
$$t_1 = \gamma \left( t' + \frac{v_0}{c^2} x'_1 \right); \quad t_2 = \gamma \left( t' + \frac{v_0}{c^2} x'_2 \right); \quad \Rightarrow \quad t_1 < t_2 \quad 6-3$$

Следователно за Алекс изстрелването на ракетите не е едновременно. Той вижда първо ракетата на Виктор, а после ракетата на Сашо.

**Следствие 2:** *Свиване на пространството.* Нека в  $K'$  (Фигура 6-2) разстоянието между Виктор и Сашо е  $L_0 = x'_2 - x'_1$  (т.н. собствена дължина). В  $K$  за Алекс това разстояние ще бъде  $L$ :

$$x'_1 = \gamma(x_1 - v_0 t); \quad x'_2 = \gamma(x_2 - v_0 t); \quad L_0 = x'_2 - x'_1 = \gamma(x_2 - x_1) = \gamma L \quad 6-4$$

Следователно за Алекс  $L < L_0$ , т.е. пространството по посока на движението се свива.



Фигура 6-2

**Следствие 3:** *Забавяне хода на времето.* Нека в  $K'$  за Виктор дадено събитие има продължителност  $\Delta t_0 = t'_2 - t'_1$  (т.н. собствено време). В  $K$  за Алекс продължителността на това събитие ще бъде  $\Delta t$ :

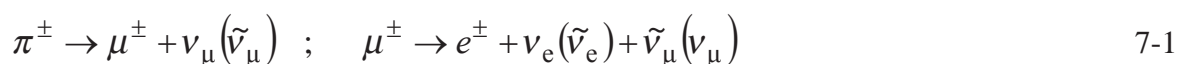
$$t_1 = \gamma \left( t'_1 + \frac{v_0}{c^2} x'_1 \right); \quad t_2 = \gamma \left( t'_2 + \frac{v_0}{c^2} x'_1 \right); \quad \Delta t = t_2 - t_1 = \gamma(t'_2 - t'_1) = \gamma \Delta t_0 \quad 6-5$$

Следователно  $\Delta t > \Delta t_0$ , т.е. за Алекс е изминало повече време отколкото за Виктор. Това означава, че в движещата се  $K'$  времето тече по-бавно.

Трудно е да си представим как пространството се свива по посока на движението, как времето забавя своя ход в движещата се ИКС или как едновременността се губи при преход от една ИКС към друга. Това е така, защото „здравият разум“ се базира върху ежедневиия ни опит, т.е. при скорости на движение много по-ниски от скоростта на светлината, където правилността на Нютоновата механика е безспорна.

## Лекция 7: Детекция на мюони – първо експериментално потвърждение на СТО. Релятивистки закон за събиране на скорости

Мюоните ( $\mu^\pm$ ) са лептони с маса 105,7 MeV (т.е. 207 пъти по-тежки от електрона). Открити са през 1936г. в космическите лъчи от американските физици Андерсън и Недермайер. През 1947 японският физик Юкава обяснява механизма на раждане и разпадане на мюона:

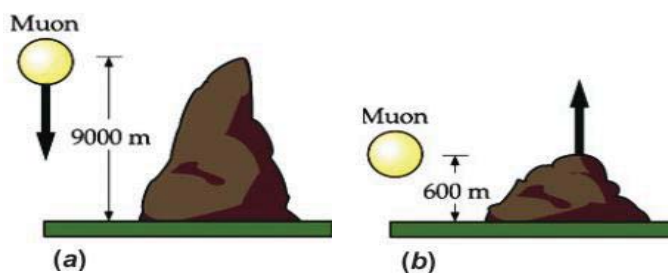


Мюон се ражда при разпад на  $\pi$  – мезон (двукваркова частица) и се разпада на електрон, електронно и мюонно неутрино (7-1). Измерено е собственото време на живот на мюона  $t_0 = 2,2\mu\text{s}$ . Мюоните се раждат в йоносферата на височина 9 км и се движат със скорост  $v = 0,9978c$  (Фигура 7-1a). Ако релятивисткият ефект на забавяне хода на времето не съществува (т.е.  $t = t_0$ ), то мюонът ще измине едва 658м.(7-2) до своя разпад и няма да достигне земната повърхност.

$$L_0 = v \cdot t = 0,9978 \cdot 299792458 \cdot 2,2 \times 10^{-6} = 658\text{м} \quad 7-2$$

В действителност, уредите на земната повърхност регистрират мюонни потоци, което може да се обясни с удължаването на времето на живот на мюона (т.е.  $t = \gamma t_0$ ) в  $K$ , ИКС свързана със Земята (виж 6-5). Следователно в  $K$  мюонът ще измине 9870м. до разпада си (7-3).

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = 15; \quad L_0 = v \cdot \gamma t_0 = 0,9978 \cdot 299792458 \cdot 15 \cdot 2,2 \times 10^{-6} = 9870\text{м} \quad 7-3$$



Фигура 7-1

Достигането на мюоните до земната повърхност може да се обясни и с релятивисткия ефект на свиване на пространството (виж 6-5). Нека  $K'$  е ИКС, свързана неподвижно с мюона. В  $K'$  собственото време на живот на мюона е  $t_0 = 2,2\mu\text{s}$ , но земната повърхност се движи към него със скорост  $v = 0,9978c$ . Тогава за мюона разстоянието до Земята ще се съкрати  $\gamma$  пъти (Фигура 7-1b) и ще бъде само 600м. (7-4). Следователно двата релятивистки ефекта,

$$L = \frac{1}{\gamma} L_0 = 600\text{м} \quad 7-4$$

забавяне хода на времето и свиване на пространството, са тясно свързани. За наблюдател от Земята мюонът живее 15 пъти по-дълго. От гледна точка на мюона, разстоянието до земната повърхност е 15 пъти по-късо.

Нека си представим, че сме астронавти и пътуваме към Сириус със скоростта на мяона. За нашите приятели на Земята разстоянието до Сириус (9 светлинни години) няма да се промени, но ние ще остаряваме 15 пъти по-бавно и ще живеем по-дълго от тях. Ние на космическия кораб няма да усетим, че за нас времето тече по-бавно, но пристигайки на Сириус ще установим, че сме изминали 15 пъти по-късо разстояние. Следователно проявата на релятивистките ефекти при движение със субсветлинна скорост ще позволят на човека да достигне в близко бъдеще до отдалечени обекти в дълбокия Космос.

Както видяхме в Лекция 6, законът на Галилей за събиране на скорости не е верен, защото допуска безкрайна скорост на разпространение на светлината (6-1). За да получим релятивисткия закон за събиране на скорости ще приложим Лоренцовите трансформации (6-2) за диференциално малко преместване  $dx$ , което се извършва за време  $dt$ .

$$\begin{cases} dx = \gamma(dx' + v_0 dt') \\ dt = \gamma\left(dt' + \frac{v_0}{c^2} dx'\right) \end{cases} \quad 7-5$$

Разделяйки почленно двете равенства и вземайки предвид (1-2), получаваме:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{dx' + v_0 dt'}{dt' + \frac{v_0}{c^2} dx'} = \frac{\frac{dx'}{dt'} + v_0}{1 + \frac{v_0}{c^2} \frac{dx'}{dt'}} \Rightarrow v = \frac{v' + v_0}{1 + \frac{v_0}{c^2} v'} \quad 7-6$$

Нека се върнем към ситуацията от Лекция 6, в която Виктор светва с фенерче по посока на Сашо (виж Фигура 6-1). Скоростта на светлинния импулс за Алекс, който е на спирката, ще бъде също  $c$  (7-7), вместо  $v_0 + c$ .

$$v = \frac{c + v_0}{1 + \frac{v_0}{c^2} c} = \frac{c\left(1 + \frac{v_0}{c}\right)}{1 + \frac{v_0}{c}} = c \quad 7-7$$

Дори автобусът да се движи със скоростта на светлината (т.е.  $v_0 = c$ ), за Алекс скоростта на светлинния импулс ще бъде също  $c$  (7-8):

$$v = \frac{c + c}{1 + \frac{c}{c^2} c} = \frac{2c}{2} = c \quad 7-8$$

Следователно релятивисткият закон за събиране на скорости (7-6) забранява превишаване на скоростта на светлината  $c$  в нито една ИКС.

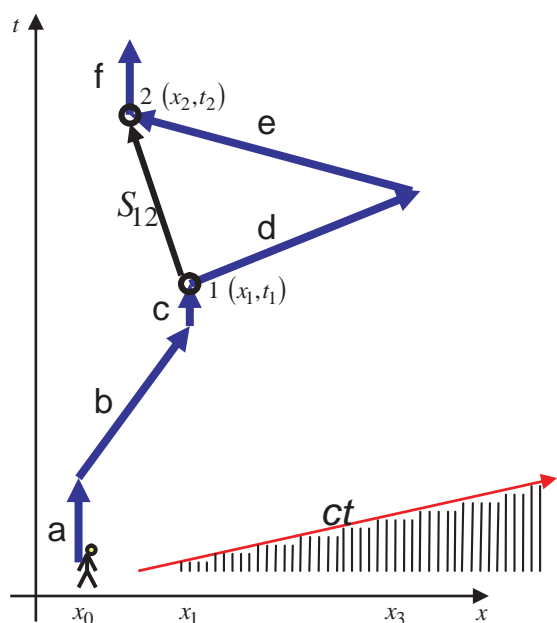
В случай на движение с ниски скорости (т.е.  $v_0 \ll c$ ), вторият член в знаменателя на (7-6) клони към нула и от релятивисткия закон за събиране на скорости се получава закона на Галилей (2-6), а от Лоренцовите трансформации (6-2) се получават Галилеевите трансформации (2-5). Следователно Класическата Механика на Нютон се явява частен случай на Релятивистката Механика при ниски скорости на движение ( $v_0 \ll c$ ).

## Лекция 8:    **Пространство на Минковски. Интервал. Релативистка маса, импулс и енергия**

Всяко движение се извършва в пространство-времето. В Лекция 2 обсъдихме Нютоновата концепция, според която: *пространството и времето са абсолютни и не зависят от движението на Материята*. Това означава, че ако премахнем всички материални тела от Вселената, ще остане само „абсолютно празно пространство”, а ходът на времето ще е постоянен и винаги от минало към бъдеще, независимо от съществуването или отсъствието на Материя, нито от нейното движение. Тази концепция напълно съответства на здравия разум и е продиктувана от ежедневиия ни опит. Два века по-късно Айнщайн доказа, че Нютоновата концепция е вярна само за скорости на движение много по-малки от скоростта на светлината ( $\vec{v} \ll c$ ).

В Класическата Механика движението на тяло се описва с изменението във времето на радиус-вектора в триизмерна декартова координатна система:  $\vec{r}(t) = \{x(t), y(t), z(t)\}$ .

В Релативистката Механика всяко събитие зависи от четири величини  $\{x, y, z, t\}$  и се изобразява с точка в четиримерно пространство-време, наречено *пространство на Минковски*. На всяка частица в това пространство (даже и на неподвижната) съответства линия, наречена *жизнена линия*. Когато движението на частицата е праволинейно, то се описва в двумерно пространство-време  $\{x, t\}$ . Да разгледаме движението на Алекс в такова



**Фигура 8-1**

пространство (Фигура 8-1). Неговата жизнена линия, когато той стои неподвижно в точка  $x_0$ , се изобразява с отсечката **a** (т.е. той се движи само във времето). Отсечка **b** е жизнената му линия, когато се движи от  $x_0$  към  $x_1$  със скорост  $v_1$ . В  $x_1$  стои за малко неподвижен (отсечка **c**), след което тръгва към  $x_3$  със скорост  $v_2 > v_1$  (отсечка **d**), връща се обратно (отсечка **e**) и застава неподвижно в  $x_2$  (отсечка **f**). Жизнената линия на светлинен импулс, разпространяващ се по  $x$ , се изобразява с отсечката  $ct$ . По-полегата отсечка от  $ct$  означава движение със свръхсветлинни скорости. Следователно заштрихованата област, лежаща под  $ct$  е забранена. В нея причинно-следствената връзка между последователни събития се нарушава.

Разстоянието между събитие 1 с координати  $\{x_1, t_1\}$  и събитие 2  $\{x_2, t_2\}$  се нарича *интервал*  $S_{12}$ . В четиримерното пространство-време  $\{x, y, z, t\}$ , интервалът  $S_{12}$  има следния математичен вид:

$$S_{12} = \sqrt{c^2(t_2 - t_1)^2 - (x_2 - x_1)^2 - (y_2 - y_1)^2 - (z_2 - z_1)^2} = \sqrt{c^2 t_{12}^2 - l_{12}^2} \quad 8-1$$

$l_{12} = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}$  е разстоянието между събитията в тримерното Нютоново пространство. Важно свойство на интервала  $S_{12}$  е, че той е инвариантен по отношение на преход от една ИКС към друга.

$$S_{12} = \sqrt{c^2 t_{12}^2 - l_{12}^2} = \text{const} \quad \text{във всички ИКС} . \quad 8-2$$

Въпреки че и двата члена в (8-2) се менят при преход от една ИКС към друга (виж Лекция 6 (6-4) и (6-5)), то интервалът  $S_{12}$  остава инвариантен.

Ако  $ct_{12} > l_{12}$ , то  $S_{12}$  е реален и се нарича *времениподобен интервал*. За събития разделени с времениподобен интервал е в сила причинно-следствената връзка (събития 1 и 2 на Фигура 8-1). Ако  $ct_{12} < l_{12}$ , то  $S_{12}$  е имагинерен и се нарича *пространственоподобен интервал*. Събития разделени с пространственоподобен интервал не могат да си взаимодействат. Те се намират в заштрихованата област на Фигура 8-1 и за тях причинно-следствената връзка е нарушена.

В Класическата Механика *инертността* се дефинира от Първия закон на Нютон като свойство на телата да се противопоставят на външно въздействие (виж Лекция 2). Масата  $m$  се въвежда като количествена мярка за инертност и е константа за дадено тяло. Тя зависи само от плътността и обема му:  $m = \rho V$ . В действителност, инертността на телата расте с нарастване на скоростта им на движение. Релативистката маса  $m_r$  описва количествено това свойство на телата.

$$m_r = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} m = \gamma m \quad , \quad 8-3$$

където  $m$  е масата в покой.

В Релативистката Механика (при субсветлинни скорости на движение), импулсът на затворена механична система, така както го дефинирахме в лекция 4 (4-1), не се запазва. Това е така, защото инертността е относителна. Релативисткият импулс (8-4) и пълната енергия на частица (8-5) получаваме от (8-3). За затворена механична система те се запазват във всички ИКС.

$$\vec{p} = m_r v = \gamma m v \quad 8-4$$

$$E = m_r c^2 = \gamma m c^2 \quad 8-5$$

Като решим системата от три уравнения (8-3), (8-4) и (8-5) спрямо  $E$ ,  $\vec{p}$  и  $m$ ; получаваме важна връзка между пълната енергия на частица, нейния импулс и масата ѝ в покой:

$$E = c \sqrt{\vec{p}^2 + m^2 c^2} \quad 8-6$$

Ако частицата е в покой, т.е.  $\vec{p} = 0$ , от (8-6) следва:

$$E_0 = m c^2 \quad 8-7$$

$E_0$  е енергията на частица в покой. Това е знаменитата формула на Айнщайн, превърнала се в емблема на модерната Физика. Именно (8-7) е формулата, която всеки си представя, когато се заговори за Физика. Многократно доказана експериментално, сега тази връзка между маса и енергия ни изглежда проста и ясна. В началото на 20 век обаче, това съвсем не е било така. От гледна точка на Класическата Механика, масата и енергията са две независими категории, а светлината се разпространява мигновено и няма никаква връзка с масата и енергията на тяло в покой. Ето защо е било толкова трудно да се възприеме Специалната Теория на Относителността през далечната 1905 година, въпреки че крайната скорост на разпространение на светлината е била вече експериментален факт.