

RELATIVIDADE

1. RELATIVIDADE DE GALILEO. SISTEMAS INERCIAIS

2. POSTULADOS DE EINSTEIN

2.1. Contracción espacial

2.2. Dilatación temporal

3. MASA E ENERXÍA RELATIVISTA. EQUIVALENCIAS

4. REPERCUSIÓNS DA TEORÍA DA RELATIVIDADE

1. RELATIVIDADE DE GALILEO. SISTEMAS INERCIAIS

Cando realizamos calquera experiencia que implique movemento dun obxecto sobre outro na Terra, sempre consideramos como sistema de referencia global á propia Terra, xa que esta, para nós, está estática.

Pero realmente xorden interrogantes se consideramos, como así sucede, que a Terra non está estática, senón que se move a velocidades realmente elevadas dando voltas arredor do Sol. Cabería entón preguntarnos se os experimentos que realizamos conteñen conclusións erróneas, xa que consideramos o sistema de referencia como un sistema estático cando en realidade non é así.

Este tipo de reflexións xa se levaron a cabo na época de Galileo, en pleno século XVII, e deu lugar ao enunciado do principio de relatividade de Galileo:

“Calquera experimento mecánico realizado nun sistema de referencia chegará as mesmas conclusións que ese mesmo experimento realizado sobre un sistema de referencia que se mova a velocidade constante con relación ao primeiro”.

Desta definición xurde o concepto de sistemas de referencia inerciais, que se definen como veremos a continuación.

Supoñamos que nos atopamos nunha estación de tren e que consideramos o movemento que realiza unha pequena pelota de tenis sobre a man dun rapaz, que lanza a mesma en dirección vertical. Cada lanzamento acaba coa pelota, de novo, na man do rapaz. O tren está inicialmente parado:

- a) Un observador situado na estación, fóra do tren que comezará a moverse, observa a pelota con movemento vertical sempre e cando o tren continúe parado. Unha vez o tren inicia o movemento, o observador situado na estación observa un movemento parabólico da pelota, con movemento horizontal e vertical.
- b) Un observador situado no interior do tren, que leve exactamente o mesmo movemento que este, observará en todo momento (tanto cando o tren está parado como cando comeza a moverse) un movemento vertical da pelota sobre a man do rapaz que a lanza.

Por outra banda, se neste mesmo experimento colocamos outra pelota no chan do tren, podemos realizar unha análise similar a que acabamos de facer:

- a) O observador que se atopa na estación, fóra do tren que comezará a moverse, observa a pelota parada diante de si mentres o tren non se move, e verá que a pelota **se move** xusto cando o tren **exerce unha forza sobre ela**.
- b) Para o observador que se atopa no interior do tren, a pelota está en repouso ate que o tren comeza a moverse, pero **esta retrocede** sen que **actúe ningunha forza sobre ela**.

Como vemos, a primeira experiencia pon de manifesto a importante de elixir un sistema de referencia á hora de considerar un experimento concreto. A análise dos resultados obtidos, así como o deseño do propio experimento, dependerá claramente da elección do sistema de referencia.

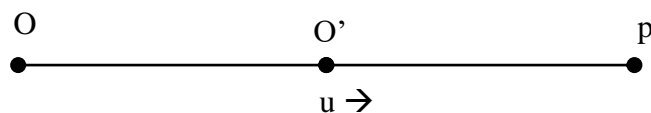
A segunda experiencia pon de manifesto o problema do incumprimento das leis de Newton para o segundo observador, posto que o obxecto comeza a moverse sen que actúe forza ningunha sobre el. Con esta segunda experiencia definimos:

Un sistema de referencia é inercial cando se atopa en repouso ou en movemento rectilíneo e uniforme respecto a outros sistema de referencia inerciais. Un sistema de referencia é non inercial cando están acelerados respecto a calquera sistema inercial.

Para nós, a Terra pode ser considerada como un sistema de referencia inercial (aínda que en realidade non é así), de forma que un sistema de referencia será inercial se se atopa en repouso ou se move con velocidade constante respecto da Terra e será non inercial se acelera ou decelera respecto da Terra.

Para concluír, podemos enunciar de novo o principio de relatividade de Galileo, expresando que non se pode distinguir se un sistema de referencia está en repouso ou se move con velocidade constante.

As chamadas *Transformacións de Galileo* permiten intercambiar as ecuacións da traxectoria dun obxecto que se move respecto a dous sistemas de referencia inerciais. Supoñamos, como vemos na figura inferior, que temos un obxecto p . Imos a supoñer dous sistemas de referencia inerciais, O e O' . O' móvese respecto de O con unha velocidade constante u . Podemos chamar x á posición de a respecto do sistema de referencia O . E podemos chamar x' á posición de a respecto do sistema de referencia O' .



Como existe un movemento uniforme dun sistema de referencia respecto ao outro, podemos escribir que:

$$x' = x - u \cdot t$$

Que quere dicir que a posición de a respecto de O' é igual á posición de a respecto de O menos o espazo que recorre en cada instante o sistema de referencia O' (distancia que se calcula como a súa velocidade polo tempo).

Para rematar o exemplo apuntado, podemos describir o resto de coordenadas de posición respecto de O e O' do seguinte xeito:

$$y = y'$$

$$z = z'$$

$$t = t'$$

Como vemos, as coordenadas y e z coinciden nos dous sistemas de referencia, e o tempo tamén é absoluto para os dous sistemas de referencia inerciais.

2. POSTULADOS DE EINSTEIN

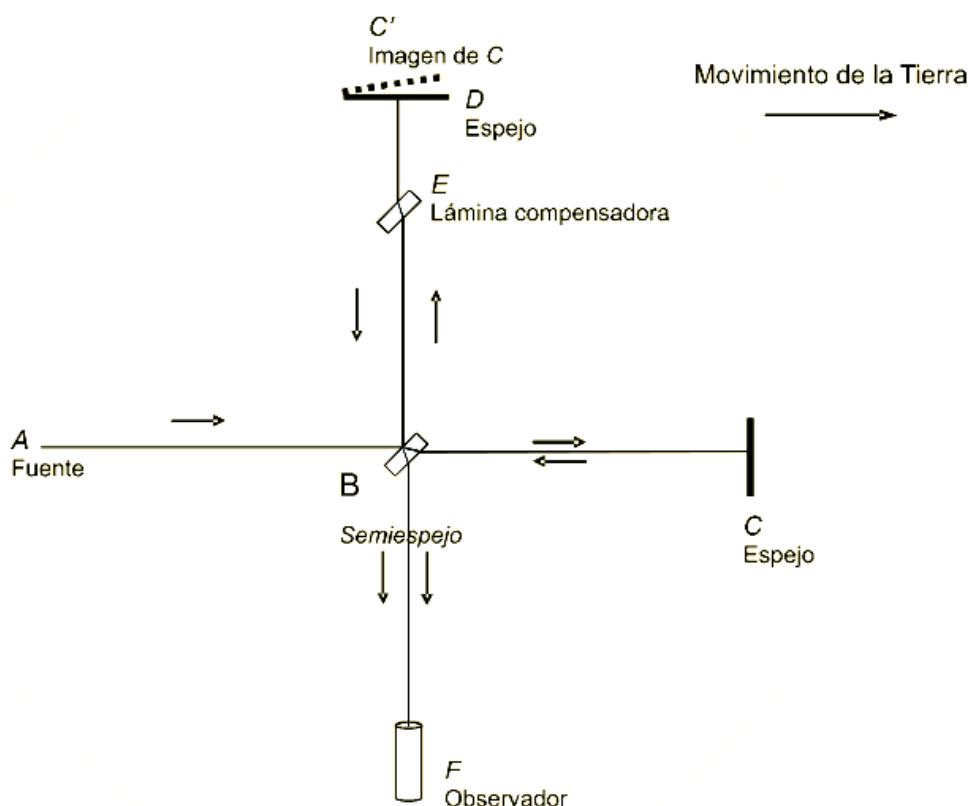
Os grandes avances da física de finais do século XIX, tendo como base a mecánica clásica de Newton e Galileo e as ecuacións de Maxwell, que axudaron a confirmar de forma definitiva o carácter ondulatorio da luz, anunciaban unha verdadeira revolución científica nos primeiros anos do século XX.

A aparición da velocidade da luz nas ecuacións de Maxwell supuña que a luz era unha onda e que, polo tanto, necesitaba de un medio material para propagarse. A este medio material se lle chamou *éter* e ninguén cuestionaba a súa existencia, aínda que existían verdadeiras dificultades para entender as súas propiedades xa que era complicado compaxinar dúas características principais que lle eran atribuídas ao éter:

- Que fose un medio o suficientemente ríxido como para propagar unha onda a tan altas velocidades
- Que non ofrecía ningún tipo de rozamento ao movemento de planetas.

Por iso, pronto xurdiu a necesidade de idear experiencias para medir a velocidade da Terra respecto do éter. Incluso o propio Maxwell falara da importancia de medir este valor da velocidade da Terra.

Unha das experiencias máis importantes levadas a cabo a finais do século XIX e neses primeiros anos do século XX consistía en medir a velocidade absoluta da Terra, tendo en conta as variacións na velocidade da luz. Albert Michelson primeiro, e posteriormente de novo acompañado de Edward Morley, deseñaron un experimento que puxeron en práctica para comprobar a existencia do éter e medir a velocidade da Terra respecto do mesmo. O experimento pódese resumir esquematicamente co seguinte debuxo:



A fonte de luz (na imaxe, A) é desviada por un semiespello (B) en dous feixes. Cada un deles vai cara un espello distinto (C e D), e deste xeito deberían chegar ao observador (F) con un intervalo de tempo de diferenza (dado que se o éter circula na horizontal, ao raio que foi cara o espello C lle levou máis tempo- é algo similar ir nadando perpendicularmente dun lado ao outro dun río e logo volver ao punto de saída ou nadar a mesma distancia que o ancho do río primeiro a favor e logo a contracorrente, tardaremos máis no último caso).

Segundo o visto neste curso, cando existe unha diferenza de camiños entre dúas ondas que se xuntan nun punto, interfírense de xeito que presentan un patrón de interferencia característico. Se varía a diferenza de camiños, varía tamén o patrón de interferencias. Para ver se así sucedía, polo efecto do movemento do éter ou da Terra, Michaelson e Morley foron rotando pouco a pouco todo o dispositivo... pero non atoparon diferenza algunha. Repetiron o experimento en distintas horas e en diferentes épocas do ano, para ter a Terra movéndose en sentidos opostos, pero tampouco tiveron a máis mínima variación no patrón de interferencias.

Así, o experimento concluíu xustamente o contrario, que o éter non existe e que **a velocidade do raio de luz é constante** e independente do movemento do observador e do movemento da fonte emisora de luz. Isto fixo que o experimento fose coñecido como o erro máis importante da historia da Física, posto que foi deseñado para confirmar unha hipótese e acabou afirmando xustamente o contrario.

Apoiado tamén nos sucesos históricos nos que se atopaba a evolución das bases da Física, Einstein elaborou a Teoría da Relatividade Especial (publicada en 1905), que era aplicable a todos os fenómenos físicos, tanto mecánicos como electromagnéticos:

Primeiro postulado de Einstein: As leis da física son as mesmas en todos os sistemas de referencia inerciais.

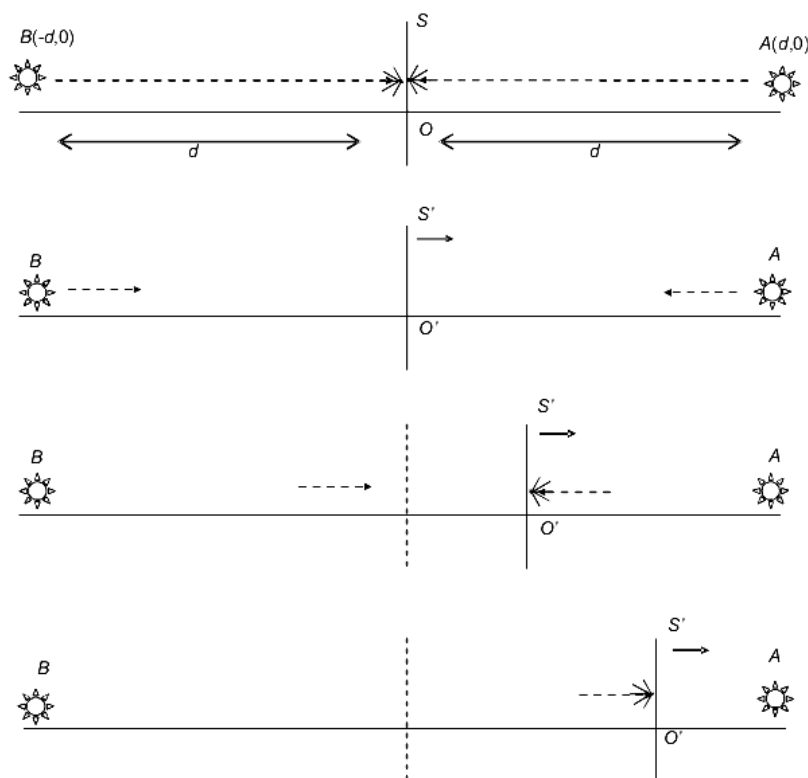
Este enunciado non é máis que unha extensión do principio de relatividade de Galileo, só que este estaba enunciado exclusivamente para a mecánica. Einstein fai aplicable este enunciado a toda a física.

Segundo postulado de Einstein: A velocidade da luz é a mesma en todos os sistemas de referencia inerciais, calquera que sexa a velocidade da fonte.

Este segundo postulado toma un valor tremendamente importante porque fai erróneas as transformacións de Galileo. Fanse necesarias outras transformacións, propostas por Lorentz e coas que se conclúe o seguinte:

- a) O tempo que miden dous observadores diferentes non ten por que coincidir. Perde o seu carácter absoluto. Este punto é complicado de asimilar polo sentido común, porque vén a dicir que pode pasar un tempo concreto para un observador e un tempo diferente para outro que se mova respecto a ese.
- b) Non é posible superar a velocidade da luz. Se puidéramos superar a velocidade da luz, poderíamos viaxar no tempo (do pasado ao presente e futuro)
- c) As transformacións de Lorentz son similares ás de Galileo (que contan con máis de 500 anos) sempre e cando as velocidades consideradas sexan pequenas respecto ás da luz. Para velocidades moi elevadas, próximas á velocidade da luz, as transformacións de Galileo perden sentido físico e non son aplicables.

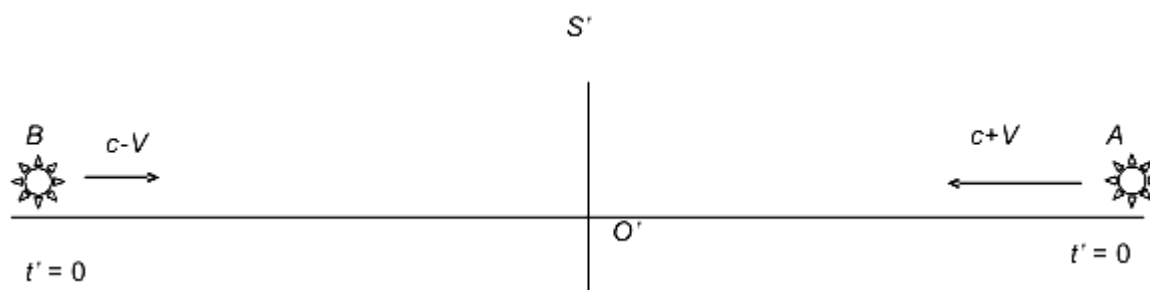
Con todo, existen diferencias ben importantes como as que acabamos de sinalar nas Transformacións de Lorentz, de forma que faise absolutamente necesario coñecer as súas bases. Supoñamos dous sistemas de referencia S e S' , tal que S' se move con velocidade constante V respecto de S ao longo do eixo X , como vemos no debuxo inferior.



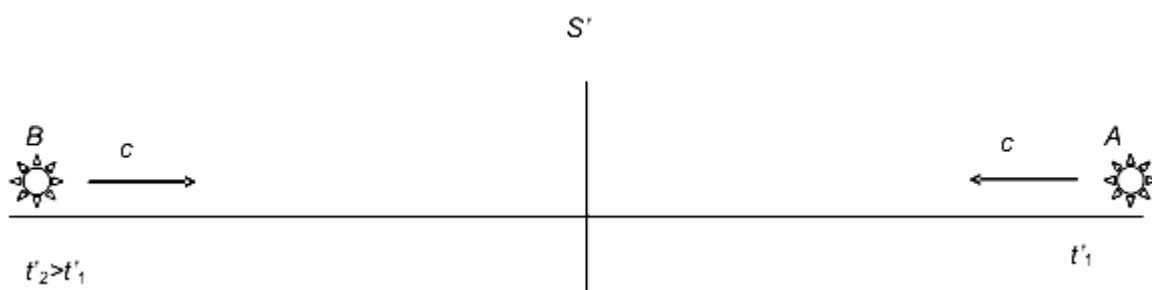
As orixes O e O' coinciden para o tempo $t = t' = 0$. Nese mesmo instante, dende A e B (equidistantes da orixe O) se emiten dous sinais luminosos.

A mecánica clásica concluiría que os sinais luminosos de A e B chegan simultaneamente ao sistema de referencia S . Tamén chega a esta mesma conclusión a mecánica relativista. Do mesmo xeito, a mecánica clásica e a mecánica relativista coinciden en sinalar que a luz de A chega antes a S' que a luz de B .

Agora ben, os motivos e a explicación do fenómeno son ben diferentes. Dende o punto de vista clásico e situándonos en S' , A chega antes porque a distancia recórrese en menor tempo ao levar maior velocidade (a da luz máis a do propio sistema de referencia aproximándose a A). B chega máis tarde porque a distancia recórrese en maior tempo ao levar menor velocidade. É dicir, visto dende o sistema de referencia S' , ambos sinais saen simultaneamente, pero A leva maior velocidade que B .



Para un analista relativista, dende S' obsérvanse dous sinais luminosos que se atopan á mesma distancia e que viaxan á mesma velocidade (á velocidade da luz, c), xa que o segundo postulado apunta que a velocidade da luz é absoluta e non depende do sistema de referencia tomado. Por que chega antes entón a luz de A que a de B? Pois porque non son lanzados simultaneamente: a teoría relativista enuncia que non podemos continuar pensando como unha magnitude absoluta para diferentes sistemas de referencia inerciais, de forma que tanto as coordenadas espaciais como temporais non teñen porque coincidir en diferentes sistemas de referencia inerciais.



Aínda que non describiremos as transformacións de Lorentz de forma matemática, cabe ter en conta e resaltar as diferencias con respecto ás de Galileo, e que xa foron enumeradas ao comezo do tema:

- O tempo para dous sistemas de referencia inerciais non ten porque coincidir
- A velocidade da luz é constante e considérase o valor máximo posible da velocidade
- As dimensión dos obxectos vistos dende sistemas de referencia inerciais diferentes poden ser distintas, como veremos a continuación.

2.1. Contracción espacial.

As transformacións de Lorentz proporcionan as ecuacións matemáticas necesarias para a descrición da contracción espacial. Aínda que non estudiamos as ecuacións das transformacións de Lorentz, imos a describir de forma simple como se contrae o espazo cando se acadan velocidades relativistas:

$$l = l' \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Onde, como ate o de agora, a magnitude l é a distancia dun obxecto vista dende un sistema inercial en repouso e l' é a distancia dun obxecto medida dende un sistema inercial en movemento rectilíneo respecto ao anterior.

2.2. Dilatación temporal.

Do mesmo xeito que acabamos de ver para o espazo, tamén podemos describir unha ecuación para a dilatación temporal. A duración dun suceso nun sistema inercial en repouso exprésase deste xeito:

$$t_2 - t_1 = \frac{t'_2 - t'_1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

3. MASA E ENERXÍA RELATIVISTA. EQUIVALENCIAS

A partires dos cambios producidos polas transformacións de Lorentz e os postulados de Einstein, faise necesario introducir cambios en conceptos como a masa e a enerxía:

Masa relativista: a masa dun obxecto cambia dependendo da velocidade á que se move, de forma que un mesmo obxecto pesa diferente se está en repouso que movéndose a velocidades apreciables fronte á da luz. Matematicamente, exprésase do seguinte xeito:

$$m = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \cdot m_0$$

Onde m é a masa do obxecto, m_0 é a masa do mesmo cando se atopa en repouso, v é a velocidade do obxecto, e c é a velocidade da luz. Deste xeito, se a velocidade do obxecto é nula, o denominador faise igual a 1, e a masa do obxecto coincide co seu valor en repouso, como é lóxico porque acabamos de dicir que está parado. Se a velocidade é pequena, o valor do denominador tamén é próxima á unidade, de forma que as masas tamén son similares en repouso ou en movemento. Pero se a velocidade do obxecto faise suficientemente grande e adquire valores apreciables fronte á da luz, entón o denominador é menor que a unidade e existen diferencias apreciables entre a masa do obxecto en repouso e en movemento.

Enerxía cinética relativista: Ao efectuar cambios na masa dun obxecto que se move, estamos tamén modificando a súa enerxía cinética. Cabe lembrar que a enerxía cinética calcúlase de forma clásica como $E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$. Polo tanto, cando a velocidade aumenta, tamén cambia o valor da masa (e non coincidirá co valor da masa en repouso). Pódese demostrar finalmente que a enerxía cinética relativista calcúlase como: $E_c = \Delta m \cdot c^2$

O símbolo Δ indica variación, como xa sabemos, e c é a velocidade da luz, como acabamos de ver.

Enerxía total relativista: Dixemos que $E_c = \Delta m \cdot c^2$ é a enerxía cinética, que podemos expresar $E_c = m \cdot c^2 - m_0 \cdot c^2$. Se temos en conta que m_0 é a masa dun obxecto en repouso, e que aparece na ecuación de enerxía cinética (debida ao movemento dos corpos), debemos supoñer que $m_0 \cdot c^2$ é unha enerxía asociada ao corpo en repouso. Así pois, a enerxía total dun obxecto será $E = m \cdot c^2$

Esta ecuación é a famosa ecuación de Einstein que relaciona a masa e a enerxía dun corpo. Como vemos, ambas magnitudes están relacionadas por unha constante (acabamos de estudar no apartado anterior do tema, que a velocidade da luz é constante), c^2 . A ecuación, polo tanto, constitúe o principio de equivalencia entre a masa e a enerxía.

“En calquera sistema de referencia inercial, a enerxía relativista total dun sistema illado mantense constante”

Como se pode ver na propia ecuación (lembrar que a velocidade da luz é $3 \cdot 10^8$ m/s), a unha masa de 1 quilogramo equivale a $9 \cdot 10^{16}$ J de enerxía. Isto quere dicir que a cantidade de enerxía necesaria para inducir un cambio na masa é tremendamente grande, de forma que non son apreciables na nosa vida cotiá. Si son apreciables nos procesos nucleares, onde a enerxía liberada por cambios de masa é tremendamente grande, como sucede coa bomba atómica.

4. REPERCUSIÓNS DA TEORÍA DA RELATIVIDADE.

A relatividade de Einstein avanzou aínda máis se cabe nos cambios de paradigmas da física de comezos do século XX. Algún deses cambios seguen sendo tremendamente complexos de asimilar para a sociedade en xeral, como o feito de que o tempo non sexa universal. Para ilustrar isto, deseñouse un experimento ficticio que serve para explicalo:

Supoñamos que un astronauta ten un fillo e, minutos despois, sube a unha nave espacial que acadar velocidades elevadas (próximas á da luz, de 300.000 Km/segundo). Se pasase moito tempo no espazo, á súa volta á Terra podería chegar a darse o caso de que el fose máis novo que o seu propio fillo, xa que tempo para el “pasaría” de forma máis ‘lenta’ que para o seu fillo.

Como é lóxico, este experimento ficticio fai aínda máis increíble o enunciado da contracción temporal, porque vai totalmente en contra do noso sentido común e da nosa percepción espacial e temporal na vida cotiá. Pero cabe ter en conta que, ao longo da historia, a percepción da natureza por parte do ser humano ten xogado malas pasadas: pensemos por exemplo o momento histórico onde se discutía sobre a forma da Terra: todos os indicios recollidos da percepción mostraban que a Terra era plana, pero existía algún indicio (que claramente ía contra o sentido común da época) que postulaba que a Terra era esférica. Actualmente non temos absolutamente ningunha dúbida da forma da Terra... do mesmo xeito que nun futuro posiblemente a sociedade ao completo non terá dúbida ningunha acerca da relatividade do tempo.

De feito, a demostración empírica da contracción temporal descrita existe e está perfectamente documentada. Nos aceleradores de partículas (onde as partículas pequenas poden acadar velocidades realmente elevadas) compróbase que a vida media das partículas que se moven a grande velocidade varía respecto ás que se atopan en repouso. Ademais, tamén se fixo algún experiencia con avións ultrasónicos e reloxos de extrema precisión para comprobar as variacións que sofre o tempo cando as velocidades acadadas son elevadas.

Deixando de lado a variación do tempo, os intercambios entre masa e enerxía deron lugar a estudos de partículas, dende a súa aplicación militar coa bomba atómica ate as actuais tecnoloxías de obtención de enerxía coa fisión nuclear (e os innumerables estudos de obtención de enerxía de fusión).

Todo isto, aínda sen mencionar a Teoría Xeral da Relatividade escrita e publicada por Einstein en 1916, hai pouco máis de 100 anos, e que serviu para entender de forma máis clara o universo e as forzas que nela existen.

Por último, cabe reflexionar acerca da evolución da ciencia e do coñecemento do mundo a través da mesma. Sempre cabe a posibilidade de que esteamos diante doutro paradigma científico que nos faga renegar dos coñecementos actuais.