

A TEORÍA DA RELATIVIDADE

*Alfonso Vázquez Ramallo**
Universidade de Santiago
de Compostela

ALBERT EINSTEIN E A TEORÍA DA RELATIVIDADE

A relatividade é unha teoría sobre o espacio e o tempo que modificou profundamente a nosa comprensión do universo. A diferenza da Mecánica cuántica —a outra gran revolución conceptual da Física do século XX— a Teoría da Relatividade foi a creación individual dunha soa persoa: Albert Einstein. Por esta razón, o autor destas liñas pensa que convén principiar este pequeno resumo das ideas básicas da relatividade e das súas consecuencias cun pequeno resumo biográfico do creador da dita teoría.

Albert Einstein naceu en Ulm (Alemaña) no ano 1879. Fixo os seus primeiros estudos en Múnic e ós dez anos ingresou no Gymnasium Liutpold. Considerado un mal estudante pola súa indiferencia ante o ensino que recibía, algúns dos seus profesores aconselláronlle abandona-los estudos. Sen embargo, Einstein tiña unha formación autodidacta en Física e Matemáticas. Ós dezasete anos ingresa no

Instituto Politécnico de Zúric, onde o seu desinterese polos cursos continuou e a piques estivo de suspende-los exames.

En 1900 rematou os seus estudos. Gracias á axuda dun amigo conseguiu un emprego na oficina de patentes de Berna. Este posto de traballo proporcionoulle unha certa seguridade económica que lle permitiu elabora-las súas innovadoras ideas illado das principais correntes da Física. En 1905 deu ó prelo tres artigos revolucionarios. No primeiro deles daba unha explicación do efecto fotoeléctrico, pola que recibiría o premio Nobel en 1921. No segundo artigo desenvolvía unha teoría xeral dos movementos de axitación molecular. Finalmente, no terceiro formulaba a Teoría Especial da Relatividade.

Malia o seu illamento, o seu traballo comezou a ser recoñecido, o que fixo que lle ofreceran postos docentes en Zúric, Praga e Berlín. En 1915, en plena Primeira Guerra Mundial, Einstein completou a súa formulación da Teoría Xeral da Relatividade. Despois

* Catedrático de Física Teórica.

da chegada de Hitler ó poder en 1933, emigrou ós Estados Unidos, onde ocupou un posto no Institute for Advanced Studies en Princeton. Einstein faleceu no ano 1955. Á marxe da Física, Einstein destacou polo seu pacifismo e os seus valores morais.

No que segue imos facer un percorrido polas ideas básicas da Teoría da Relatividade, comezando polos seus antecedentes históricos.

A Teoría da Relatividade tivo tal influencia na nosa percepción da realidade e do universo, e deu lugar a tal cantidade de aplicacións prácticas e tecnolóxicas, que é difícil facer unha lista exhaustiva dos seus logros directos ou indirectos. Como toda teoría científica, debe considerarse incompleta e, polo tanto, susceptible de ser modificada. Posto que a ciencia sen feitos experimentais se converte, en último termo, en especulación, procuraremos na nosa exposición incluí-las experiencias realizadas co propósito de verifica-las diferentes prediccions teóricas. O que imos relatar é unha das máis grandes fazañas intelectuais da historia da humanidade con consecuencias que persistirán durante os vindeiros séculos.

A FÍSICA A FINAIS DO SÉCULO XIX

A física clásica está construída sobre dúas columnas básicas: a Mecánica newtoniana e a Teoría electromagnética. Os logros destas dúas teorías son considerables e pode dicirse

sen esaxeración que os coñecementos derivados delas son responsables da maior parte do progreso técnico acadado a finais do século XIX.

A mecánica de Newton permitiu describir de xeito razoablemente correcto o movemento dos obxectos materiais. A aplicación das leis de movemento de Newton deu lugar a un gran desenvolvemento da enxeñería. Por outra banda, as ecuacións newtonianas explican o movemento dos planetas e outros obxectos celestes con gran precisión.

A Teoría Electromagnética de Maxwell logrou unificar, nun mesmo marco teórico, os fenómenos eléctricos, magnéticos e da luz. As ecuacións obtidas por Maxwell constitúen a culminación e a síntese de moitas leis e observacións efectuadas desde o século XVII sobre a luz, a electricidade e o magnetismo.

A Mecánica clásica ten os seus alicerces nunha determinada concepción do espacio e do tempo. De feito, na Mecánica newtoniana admítense implicitamente que o espacio e o tempo son inertes, no sentido de que o movemento dos corpos non inflúe en absoluto neles. Deste xeito, na teoría clásica suponse que é posible introducir un tempo universal, único e absoluto, que transcorre uniformemente e de igual maneira para tódolos corpos. Como imos explicar máis adiante, estes conceptos clásicos teñen que ser revisados ante a evidencia dunha serie de feitos experimentais que os contradín. O

resultado desta análise é a Teoría da Relatividade, que supón unha intensa revolución científica e filosófica, como consecuencia da cal a nosa comprensión do mundo físico cambia profundamente.

Tal como acontece habitualmente na ciencia, a mesma Física clásica contén o xerme das ideas relativistas. Para poñer de manifesto este feito só hai que descubri-las inconsistencias e incompatibilidades entre o Electromagnetismo e a Mecánica clásica. Neste sentido é importante resaltar que estas dúas teorías se comportan de xeito distinto cando se cambia de sistema de referencia.

Un sistema de referencia é un sistema de coordenadas que permite fixar a posición dos corpos no espazo e un sistema de reloxos que serve para determinalo tempo; son unha clase destacada os chamados sistemas de referencia inerciais, que se definen como aqueles nos que unha partícula que se move libremente (é dicir, sobre a cal non se exerce forza ningunha) o fai cun movemento uniforme (ou sexa, con velocidade constante). Desta definición séguese que o movemento relativo de dous sistemas de referencia inerciais é o que corresponde a unha velocidade relativa constante. Para verificar este feito abonda considerar unha partícula libre que estea en repouso con respecto a un sistema de referencia inercial K . Posto que a partícula é libre, o seu movemento noutro sistema inercial K' debe ser uniforme, é dicir, con velocidade constante. Dado

que estaba en repouso no sistema K , a velocidade da partícula medida no sistema K' debe se-la velocidade relativa de K respecto de K' , o que proba a nosa afirmación.

O Principio de Relatividade de Galileo establece que as leis da Mecánica clásica son as mesmas en tódolos sistemas de referencia inerciais. Para verificar que a mecánica de Newton satisfai este principio, é esencial supoñer que o tempo é absoluto e, polo tanto, independente do sistema de referencia. Unha consecuencia inmediata desta suposición é a lei clásica de composición de velocidades, que establece que as velocidades se compoñen como unha simple suma ordinaria. Así, por exemplo, se alguén que vai nun tren en movemento lanza un obxecto, a velocidade deste medida por alguén que está parado na estación é a suma da velocidade con que foi lanzado desde o tren máis a velocidade do tren.

Contrariamente ó que acontece na Mecánica newtoniana, a Teoría Electromagnética de Maxwell non satisfai o Principio de Relatividade de Galileo. Isto é unha consecuencia de que nas ecuacións de Maxwell intervén explicitamente a velocidade de propagación das ondas electromagnéticas no baleiro. Esta velocidade coincide coa velocidade da luz no baleiro, que denotaremos por c , e é numericamente igual a trescentos mil quilómetros por segundo. De feito, pensábase que as ecuacións de Maxwell só eran válidas cando se aplicaban a un sistema de referencia en repouso absoluto, que

estaría ligado a un medio hipotético denominado éter universal. Admitíase que o éter era un medio que penetraba todo, homoxéneo e isótropo, que se atopa en repouso absoluto e enchendo todo o espazo.

No século XIX os físicos tiñan varias razóns teóricas para crer na existencia do éter; a principal era a propia natureza da interacción electromagnética. Sabíase que o electromagnetismo se propaga por medio de campos e considerábase que eses campos necesitaban un soporte material. Así pois, os campos electromagnéticos e a luz non serían máis que vibracións do éter, da mesma maneira que o son non é outra cousa que un movemento oscilatorio dun gas. É preciso sinalar que, desde o punto de vista da Física do século XIX, esta interpretación era, sen dúbida, a máis natural, xa que estaba en concordancia coa mentalidade mecanicista da época. Ademais, pensábase que a interacción gravitatoria, responsable da caída dos corpos e do movemento dos astros, tamén tiña o éter como soporte material. Deste xeito, as teorías de campos coñecidas daquela considerábanse simplemente como unha descrición dos posibles movementos do éter.

Neste contexto histórico xorde o problema de demostrar experimentalmente a existencia das velocidades absolutas. É bastante doado deseñar un experimento ideal con este obxectivo: supoñamos que temos un corpo que se move con respecto ó éter inmóbil. Imaxinemos que colocamos nel unha fonte e un detector de luz. Segundo a

lei clásica de composición de velocidades, se o corpo se move na mesma dirección e sentido da luz, esperaríase que a súa velocidade fose menor, mentres que se nos movemos na dirección contraria á da propagación da luz, a velocidade desta debería de ser maior. Emporiso, a velocidade da luz é moi grande comparada coas velocidades que se poden acadar con corpos macroscópicos. Isto quere dicir que, se medimos directamente a variación da velocidade da luz, o efecto vai ser máis pequeno cá precisión dos aparellos de medida e, polo tanto, inapreciable experimentalmente.

A solución a este problema de medición achárona os físicos americanos Michelson e Morley. No canto de medir directamente a velocidade, eles propuxeron compara-los tempos de percorrido da luz ó longo de dúas direccións distintas. Nunha das direccións o raio de luz percorría un camiño paralelo á dirección de movemento respecto ó éter, mentres que na outra dirección a luz é perpendicular á dirección de movemento. Tras ser reflectidos en espellos, os raios facíanse coincidir. Se realmente a velocidade da luz dependera da dirección de movemento, o tempo de percorrido dos dous raios sería distinto e produciríase unha figura de interferencia facilmente observable.

Michelson e Morley levaron a cabo o seu experimento por primeira vez en 1881. Como velocidade respecto ó éter utilizaron a velocidade do movemento orbital da Terra. Para sorpresa

dos dous científicos e dos seus contemporáneos, non se observou interferencia ningunha e, polo tanto, non se puido poñer de manifesto a máis mínima influencia do movemento do interferómetro na velocidade da luz. O experimento de Michelson-Morley foi repetido en varias ocasións con instrumentos de maior precisión e con idéntico resultado.

Existen outras evidencias da constancia da velocidade da luz. En 1912, outro experimento fundamental foi proposto polo astrónomo holandés W. de Sitter. Consistía en observa-la luz emitida por un sistema de estrelas dobres próximas entre si e que xiran arredor do centro de masa común. De Sitter sinalou que certas parellas destas estrelas teñen un plano orbital case paralelo á nosa visual, de xeito que cada estrela se afasta ou achega á Terra alternativamente mentres xira ó redor da súa compañeira. Se a velocidade da luz emitida pola estrela cando se afasta fose distinta da velocidade da luz emitida cando se achega a nós, poderíamos ver unha imaxe múltiple dela. Isto non se observa experimentalmente pois soamente se ven as órbitas elípticas regulares que as dúas estrelas describen unha ó redor da outra.

Moitas outras experiencias confirmaron o resultado negativo do experimento de Michelson-Morley. Sinalemos, por exemplo, unha verificación da constancia da velocidade da luz, realizada moi recentemente utilizando os sinais de radio dos satélites artificiais do sistema de posición global

GPS. Esta análise permitiu verifica-la independencia da velocidade da luz coa dirección cunha precisión de tres partes en mil millóns.

A TEORÍA ESPECIAL DA RELATIVIDADE

Os feitos experimentais que acabamos de describir poñen de manifesto a inexistencia do éter e que, daquela,



Albert Einstein, o creador da Teoría da Relatividade.

non ten sentido falar de repouso absoluto. Isto levou a Einstein a retoma-lo Principio de Relatividade que, como xa sabemos, na súa versión clásica non é satisfeito pola Teoría Electromagnética. A reformulación deste principio implica, necesariamente, un cambio das nocións newtonianas absolutas do espacio e do tempo.

Como resultado da súa análise, Einstein formulou a Teoría Especial da Relatividade, baseada nos dous postulados seguintes:

1) Principio de Relatividade de Einstein: as leis da Física (e non soamente as da Mecánica) son as mesmas en tódolos sistemas de referencia inerciais.

2) Existe unha velocidade límite de propagación das interaccións que é a velocidade da luz no baleiro c .

O primeiro destes postulados indícanos claramente que a transformación de coordenadas e tempo entre dous sistemas de referencia inerciais debe de diferir substancialmente da transformación de Galileo, pois esta última, como xa foi mencionado, non deixa invariante as ecuacións do electromagnetismo.

No segundo postulado, Einstein elevou a categoría de principio unha característica da electrodinámica de Maxwell. Neste postulado faise a hipótese de que a velocidade máxima de propagación das interaccións no baleiro ten un carácter universal, que está ligada ás propiedades do espacio e do

tempo e non depende do tipo particular de interacción. En virtude do principio de relatividade, esta velocidade máxima debe se-la mesma en tódolos sistemas de referencia inerciais, o que está en consonancia cos resultados do experimento de Michelson-Morley.

A existencia dunha velocidade límite de propagación das interaccións implica automaticamente que a velocidade con que se poden mover os corpos materiais non pode ser superior a c . De feito, se unha partícula puidese moverse cunha velocidade maior cá da luz, o intercambio desta partícula entre dous corpos xeraría unha interacción entre eles que se propagaría cunha velocidade superior á da luz. Deste xeito, o segundo postulado de Einstein limita superiormente as posibles velocidades na natureza.

Cómpre salientar que, sen entrar en contradicción coa Teoría da Relatividade, poden atoparse puntos que se moven cunha velocidade superior á da luz, pero que, sen embargo, non transportan un corpo ou dan lugar a unha interacción. Como exemplo disto, consideremos dúas varas AB e CD , tal como se amosa na figura 1. Supoñamos que a vara CD rota con respecto ó punto C e que a vara AB está fixa. Considerémo-lo punto xeométrico P no cal as dúas varas se cortan. Se o ángulo α que forman as dúas varas é tan pequeno como queiramos e se a lonxitude das varas é arbitrariamente grande, a velocidade do punto P poder ser tan grande como se queira.

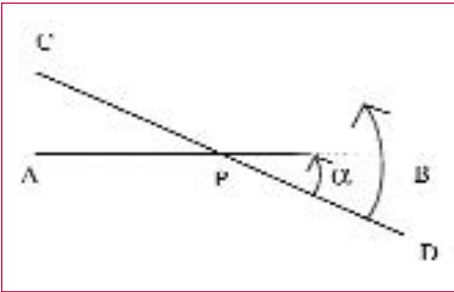


Figura 1.

Sen embargo, o punto P non corresponde a un único punto material das varas e, polo tanto, o seu movemento non vai acompañado de transporte de enerxía e non pode transmitir interaccións.

Non é difícil convencerse de que a constancia da velocidade da luz en tódolos sistemas de referencia inerciais contradí a noción clásica de tempo absoluto. Para ilustrar este feito consideremos dous sistemas de referencia K e K'. Sexan XYZ e X'Y'Z' os eixes de coordenadas de K e K' respectivamente. Supoñamos que o sistema K' se move con respecto a K ó longo dos eixes X e X', tal como se amosa na figura 2.

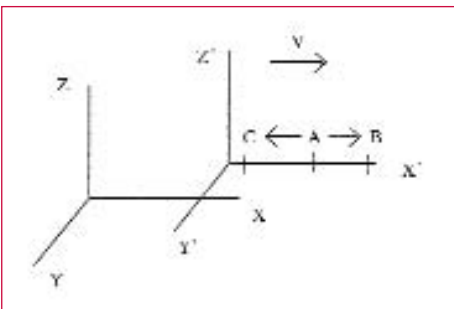


Figura 2.

Imaxinemos que desde o punto A, que está no eixe X', enviamos sinais en sentidos opostos. Sexan B e C dous puntos do eixe X' que equidistan do punto de emisión A. Os puntos B e C están en repouso no sistema K' e, posto que a velocidade da luz é a mesma en tódalas direccións, os raios de luz chegarán, no sistema K', no mesmo intre ós puntos B e C. É doado concluir que, con todo, a chegada do raio a estes dous puntos non pode ser simultánea no sistema K. En efecto, para un observador no sistema K, o punto C vai ó encontro do raio de luz, mentres que o punto B se afasta del. A velocidade da luz en K vale o mesmo que en K' e, en consecuencia, o raio alcanzará o punto C antes có punto B. Deste xeito, dous sucesos simultáneos nun sistema de referencia inercial non teñen por qué selo noutro sistema inercial, o que rompe a concepción clásica do tempo como algo absoluto e independente do estado de movemento do observador.

Dados dous sucesos arbitrarios, a súa ordenación temporal pode depender do sistema de referencia. Daquela, nun sistema de referencia un suceso pode ser anterior a outro, mentres que é posible que para outro observador inercial sexa posterior. Existe, non obstante, unha situación na cal a ordenación temporal é independente do sistema de referencia. Isto acontece cando os dous sucesos poden conectarse por medio dun sinal que se propaga a unha velocidade menor ou igual á da luz. Neste caso é sinxelo probar que o suceso que emite o sinal precede en tódolos

sistemas de referencia o suceso que a recibe. Así, no noso exemplo anterior, a emisión da luz desde o punto A prece- de sempre no tempo, en tódolos siste- mas de referencia, a chegada da luz ós puntos B e C.

En xeral, se dous sucesos se poden vincular causalmente entre si, é dicir, se un deles é a causa do outro, a súa ordenación temporal é a mesma para tódolos observadores. Esta propiedade denomínase principio de causalidade e resulta crucial para a consis- tencia da teoría; de feito, se non se verificase este principio sería imposible construír teorías científicas predictivas pois non distinguiríamos causas de efectos. A ordenación temporal de dous sucesos depende do observador cando, ó tratar de conectalos cun sinal, este se propaga a unha velocidade superior á da luz, o que, como sabemos, non está permitido polo segundo postulado de Einstein e, en consecuencia, estes dous sucesos non poden estar relacionados causalmente. Así, a existencia dunha velocidade límite das interaccións está ligada ó principio de causalidade e evita que existan paradoxos.

Para construí-lo formalismo ma- temático da Teoría da Relatividade, considérase un espacio vectorial de catro dimensións onde o tempo é a cuarta coordenada e os sucesos son simplemente puntos. Neste espacio vectorial defínese unha distancia entre puntos tal que dous puntos están a dis- tancia nula se os correspondentes suce- sos poden conectarse por un raio de luz. Este espacio de catro dimensións

denomínase espacio de Minkowski ou, simplemente, espacio-tempo.

Para atopar as leis de transforma- ción entre diferentes sistemas de refe- rencia inerciais só hai que obte-los cam- bios lineais de coordenadas do espacio-tempo que deixen invariante a métrica do espacio de Minkowski. A correspondente transformación de coordenadas denomínase transforma- ción de Lorentz. Se temos dous siste- mas de referencia como os da figura 2, a relación entre (x, y, z, t) e (x', y', z', t') é a seguinte:

$$t = \frac{t' + \frac{V}{c^2} x'}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} \quad x = \frac{x' + Vt'}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$$

$$y = y' \quad z = z'$$

Obsérvese que na ecuación anterior aparece o cociente entre a velocidade V do sistema de referencia K' respecto a K e a velocidade da luz c . Se V é pequena con respecto a c , a ecuación anterior redúcese á Lei de Transformación de Galileo e, en particular, os tempos t e t' son iguais. Ademais, a transforma- ción de Lorentz só está definida cando a velocidade V é estrictamente menor ca c .

É sinxelo extraer algunhas conse- cuencias importantes da transforma- ción de Lorentz. Supoñamos, en pri- meiro lugar, que temos unha regra que se atopa en repouso no sistema de

referencia K e que é paralela ó eixe X. Sexa L_0 a lonxitude da regra medida no sistema K. Imos determinar canto vale a lonxitude L para un observador ligado ó sistema de referencia K' , onde a regra se move con velocidade V. Para iso temos que determina-las coordenadas dos dous extremos da regra no sistema K' nun mesmo instante t' . Usando a lei de transformación de Lorentz para a coordenada x pódese obter a relación entre as lonxitudes en repouso (L_0) e en movemento (L):

$$L = L_0 \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}$$

A raíz cadrada que aparece no segundo membro desta ecuación é menor ca un e, polo tanto, a lonxitude



Hendrik A. Lorentz. As ecuacións de Lorentz permitiron a Einstein elabora-la teoría completa da relatividade.

en repouso L_0 (denominada lonxitude propia) é maior cá lonxitude en movemento L. Este resultado da Teoría da Relatividade denomínase contracción de Lorentz.

A transformación de Lorentz tamén nos permite obter a relación entre os tempos medidos por reloxos de dous sistemas de referencia distintos. Supoñamos que un destes reloxos se atopa en repouso no sistema K' . Consideremos dous sucesos que ocorren no mesmo punto do espazo no sistema K' e sexa τ_0 o tempo transcorrido entre estes dous sucesos medido desde K' . A τ_0 denominámolo tempo propio. Facendo uso da lei de transformación de tempos, podemos obter a relación entre τ_0 e o tempo τ medido por un observador ligado ó sistema de referencia K. Esta relación é:

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$$

Nótese que no sistema K os dous sucesos ocorren nun punto que se move con velocidade V. Da ecuación anterior séguese que τ_0 é menor ca τ , o que quere dicir que o reloxo de K' atrasa con respecto ó reloxo de K.

Hai que sinalar que se consideramos intervalos de tempos entre sucesos que ocorren no mesmo punto de K, e se comparamos estes intervalos temporais coas medidas feitas desde o sistema K' , chegaríamos á conclusión de que, contrariamente ó que acontecía antes, os reloxos de K atrasan con

respecto ós de K' . Isto non supón contradición ningunha pois as dúas comparacións das marchas dos reloxos son completamente diferentes. De feito, para establecer que un reloxo de K' atrasa con respecto ós reloxos do sistema K hai que proceder da seguinte maneira: supoñamos que nun certo instante o reloxo de K' pasa por diante do reloxo de K e, nese intre, as indicacións dos dous reloxos coinciden. Para comparar posteriormente os tempos temos que cotexa-las indicacións do mesmo reloxo de K' coas do outro reloxo de K , que agora está situado no punto polo cal o reloxo de K' estea pasando nese intre. Segundo a Teoría da Relatividade, como resultado desta experiencia concluíríamos que o reloxo de K' atrasa con respecto ós de K . Deste xeito, para compara-las marchas dos reloxos en dous sistemas de referencia precísanse varios reloxos nun deles e un reloxo no outro. Polo tanto, este proceso non é simétrico con respecto ós dous sistemas: o reloxo que atrasa é sempre aquel que se compara con varios reloxos do outro sistema.

É tamén interesante analiza-lo (mal) chamado paradoxo dos xemelgos. Imaxinemos dous xemelgos: un deles é astronauta e emprende unha viaxe a unha galaxia afastada, utilizando unha nave espacial capaz de moverse a velocidades próximas á da luz. Segundo a relatividade, ó regreso da súa viaxe o astronauta sería máis novo có seu irmán.

O posible paradoxo xorde do feito de que, desde o punto de vista do

astronauta, o que se move non é el senón o seu irmán. Polo tanto, poderíamos pensar que este último debería ter menos idade á fin da viaxe. Isto, sen embargo, non é correcto pois os sistemas de referencia ligados ós dous irmáns non son equivalentes. En efecto, o astronauta regresa á Terra, o que quere dicir que describe unha traxectoria pechada e, a diferenza do seu irmán, un sistema de coordenadas ligado a el non é inercial. Así pois, non existe ambigüidade e o irmán máis vello é certamente aquel que ficou na Terra.

Convén observar que despois destas viaxes espaciais é posible adianta-lo futuro pero nunca se pode viaxar ó pasado. Isto último, que acontece en moitas narracións de ciencia ficción, violaría o principio de causalidade e soamente se podería facer, no contexto da Teoría Especial da Relatividade, viaxando a velocidades superiores á da luz, algo que, como xa sabemos, está prohibido polos postulados da teoría.

Estas diferencias entre as indicacións de dous reloxos en función do seu estado de movemento son mínimas cando as velocidades ás que se moven son pequenas comparadas coa velocidade da luz. Isto é o que acontece coas velocidades máximas que a tecnoloxía actual nos permite acadar en trens, avións, foguetes e outros medios de transporte. Polo tanto, para poder aprecia-las diferencias temporais predicidas pola Teoría Especial da Relatividade nestes casos debemos dispoñer de reloxos de extraordinaria

precisión. Ende ben, o progreso da Física proporcionáanos instrumentos de medida do tempo coa exactitude requirida.

Todo proceso físico que se repite de xeito uniforme pode ser utilizado como reloxo. As medicións máis precisas do tempo son aquelas feitas por medio dos denominados reloxos atómicos. O funcionamento destes reloxos está baseado no feito de que os átomos emiten radiación cunha frecuencia ben determinada. Así, por exemplo, os átomos dun isótopo do cesio de peso molecular 133 teñen un estado fundamental desdoblado en dous pola interacción magnética entre os electróns e o núcleo. Este desdoblamento coñécese co nome de estrutura hiperfina. A frecuencia da radiación emitida na transición dun electrón entre estes dous niveis serve para defini-lo segundo patrón no sistema internacional de unidades.

As transicións entre diferentes niveis dun átomo poden utilizarse para sintonizar un dispositivo electrónico con gran precisión e, deste xeito, construír un reloxo atómico. Para facérmolos unha idea da exactitude que se pode conseguir, basta mencionar que cun reloxo construído cun máser de hidróxeno (que utiliza un mecanismo similar ós reloxos de átomos de cesio) pode chegarse á fantástica precisión dun segundo en cen millóns de anos, suficiente para detecta-los efectos relativistas nos corpos que se moven en velocidades moito máis pequenas cá da luz.

Nunha serie de experimentos realizados nos anos sesenta e setenta, varios reloxos atómicos foron colocados en avións durante horas para verifica-los efectos relativistas. De feito, ademais da dilatación temporal que depende da velocidade, existe un efecto gravitatorio que varía coa altura do voo. Estes dous efectos foron comprobados nestas experiencias cun grao aceptable de precisión (1 %).

A dilatación relativista do tempo pasa de ser un pequeno efecto a ser enorme cando nos achegamos á velocidade da luz. Isto non é posible coa tecnoloxía actual para os corpos macroscópicos pero, sen embargo, é perfectamente factible para partículas subatómicas. De feito, nin sequera é necesario accelera-las partículas ata velocidades próximas á da luz, pois a Terra está sendo bombardeada arreo polos raios cósmicos, que son núcleos atómicos que viaxan a través do espacio interestelar a velocidades próximas á da luz. Estes núcleos colisionan coas moléculas do aire das capas altas da atmosfera e dan lugar a moitas partículas que chegan de continuo á superficie da Terra.

A maior parte das partículas que se orixinan na colisión dos raios cósmicos coas moléculas do aire son muóns. Os muóns son partículas da familia do electrón, pero unhas duasetas seis veces máis pesadas. Ademais, os muóns son inestables, pois desintégranse en electróns e neutrinos. O seu tempo de vida media en repouso é de dúas millonésimas de segundo. Se o

tempo de vida media dos muóns non dependese da velocidade, aínda viaxando á velocidade da luz, estes percorrerían uns seiscentos metros por termo medio e, polo tanto, non chegarían á superficie da Terra. Tendo en conta que os muóns que chegan á superficie terrestre son creados a uns quince quilómetros de altura, é evidente que a súa vida media en movemento debe de ser maior cá vida media en repouso. É sinxelo estima-lo valor da vida media en movemento: basta dividi-lo espacio percorrido polos muóns (quince quilómetros) pola velocidade da luz. O resultado desta división é de cincuenta millonésimas de segundo, é dicir, unhas vintecinco veces máis cós muóns en repouso. Vemos que neste caso a dilatación temporal relativista non se trata dunha pequena corrección senón, ó contrario, dun efecto moi grande.

Na actualidade os muóns poden producirse artificialmente nos aceleradores de partículas. En 1976 realizouse unha experiencia no Laboratorio Europeo de Física de Partículas (CERN) onde se estudiou a vida media de muóns que se movían a unha velocidade igual a 0,9994 veces a da luz. Medindo a vida media dos muóns en movemento e comparando o resultado da medida coa fórmula relativista (posto que coñecemos con exactitude a velocidade dos muóns) demostrouse que o valor experimental coincide coa predicción da Teoría da Relatividade cunha precisión superior a dúas partes por mil.

MECÁNICA RELATIVISTA

Na Mecánica clásica, as interaccións entre partículas materiais represéntanse mediante unha enerxía potencial, que é función das coordenadas das partículas que interactúan. É doado decatarse de que este xeito de describi-las interaccións supón unha propagación instantánea destas e, polo tanto, é inconsistente co segundo postulado da Teoría Especial da Relatividade. Por outra banda, as ecuacións da Mecánica newtoniana non son as mesmas se se fai unha transformación de Lorentz, o que quere dicir que non satisfán o principio de relatividade de Einstein. Por estas razóns queda claro que hai que construír unha nova mecánica (a Mecánica relativista) que sexa compatible cos dous postulados de Einstein.

Para que unha teoría verifique o principio de relatividade de Einstein ten que ser posible establecer unha formulación consistente dela no espacio-tempo. Isto conséguese utilizando magnitudes vectoriais con catro compoñentes: tres espaciais e unha temporal. Unha formulación deste tipo dise que é covariante relativista. A Teoría Electromagnética de Maxwell pode ser formulada deste xeito, o que asegura que as súas leis se verifican en tódolos sistemas de referencia inerciais.

Para establece-las leis relativistas do movemento dos corpos cómpre atopalos vectores con catro compoñentes que conteñan a información das propiedades mecánicas dun sistema.



James Clerk Maxwell foi quen introduciu no século XIX o modelo estatístico no que se basea a teoría da cinética da materia.

Dúas destas propiedades son a enerxía e o impulso. No contexto matemático do espacio-tempo é doado probar que a enerxía e o impulso forman parte dun mesmo vector cuadrídimensional. Isto é moi importante porque supón unha certa equivalencia entre dúas magnitudes que son moi distintas na Mecánica newtoniana.

Unha consecuencia da unificación da enerxía e o impulso é o feito de que a inercia, é dicir, a resistencia dun corpo a poñerse en movemento,

aumenta coa velocidade e tende a infinito cando a velocidade do corpo se achega á da luz. Isto é consistente coa existencia dunha velocidade límite. Imaxinemos que aplicamos unha forza constante sobre un corpo. Na Mecánica newtoniana este corpo tería unha aceleración constante e, polo tanto, a súa velocidade incrementaríase indefinidamente. O impulso dunha partícula relativista sobre a cal actúa unha forza constante aumenta tamén cun ritmo constante. Sen embargo, cando a partícula acada unha velocidade próxima á da luz, a súa inercia tende a infinito e, polo tanto, aínda que o seu impulso medra indefinidamente, a súa velocidade aproxímase asintoticamente á velocidade da luz. Este tipo de comportamento relativista é hoxe en día verificado a cotío nos aceleradores de partículas.

Outra propiedade moi importante é o valor da enerxía dunha partícula nun sistema de referencia no que esta se atopa en repouso. A partir das ecuacións relativistas pódese demostrar que a dita enerxía é igual á masa da partícula multiplicada pola velocidade da luz ó cadrado. Esta afirmación é a chamada Lei de Equivalencia entre a masa e a enerxía, e pode expresarse matematicamente pola ecuación $E=mc^2$, unha das máis coñecidas da Física.

No contexto da Mecánica relativista é posible ter partículas de masa nula; o exemplo máis común é o fotón, que é o cuanto de luz. Unha partícula de masa nula móvese por forza á velocidade da luz e a súa enerxía E está

relacionada co seu momento p pola ecuación $E=pc$. É importante subliñar que non existe ningún sistema de referencia no que o fotón se atope en repouso. De existir tería que viaxar á velocidade da luz, cousa que é imposible pois a transformación de Lorentz non está definida para $V=c$. Por esta razón non ten sentido falar dun fotón en repouso e, de feito, sabemos que, segundo os postulados de Einstein, a luz se move á mesma velocidade en tódolos sistemas de referencia e polo tanto a velocidade do fotón sempre debe ser igual a c .

A Mecánica relativista desempeñou un papel esencial na comprensión da natureza cuántica da luz. Nótese que se supoñemos que a luz está constituída por fotóns, estamos adoptando unha interpretación corpuscular da radiación electromagnética. Isto supón unha certa unificación entre a materia e a radiación e, de feito, a Cinemática relativista é esencial para entender os procesos de interacción entre a materia e a radiación, tales como, por exemplo, o efecto Compton (dispersión da luz por electróns) ou os procesos de aniquilación de partículas e antipartículas, nos que a materia se transforma en radiación.

A enerxía total dunha partícula é a suma da súa enerxía en repouso (que depende da súa masa) e da enerxía cinética (que depende da súa velocidade). En calquera proceso físico ten que se conserva-la enerxía total das partículas e non necesariamente algunha destas dúas contribucións por separado.

Isto significa que, en particular, a masa non ten por qué conservarse. De feito, hai moitas reaccións en Física nuclear nas que a suma das masas dos produtos finais é menor cá suma das masas das partículas antes de se iniciar a reacción. Nin sequera o número de partículas ten que ser constante e, así, existen moitos procesos nos que se crean novas partículas ou nos que as partículas iniciais se aniquilan dando lugar a outras novas no estado final da reacción.

Sempre que nun proceso haxa unha diminución da masa total, e polo tanto das enerxías en repouso das partículas, necesariamente debe incrementarse a enerxía cinética. Deste xeito, neste tipo de proceso estamos convertendo a masa en enerxía. Este é precisamente o fundamento teórico da enerxía nuclear. Para ter unha idea das ordes de magnitude nesta equivalencia entre masa e enerxía, o máis apropiado é facer un sinxelo cálculo numérico. Supoñamos que convertemos un quilogramo de materia en enerxía. Por medio da ecuación $E=mc^2$ é inmediato verificar que un quilogramo de materia corresponde a 9×10^{16} joules. Esta enerxía é equivalente á que se libera na combustión de quince millóns de barrís de petróleo.

As aplicacións da radioactividade e a enerxía nuclear son, hoxe en día, moi numerosas. Ademais do seu uso militar e das centrais nucleares, podemos sinalar as aplicacións médicas (como técnica de diagnóstico e tratamento) ou en Arqueoloxía (para datar con precisión os restos). É tamén

importante destacar que as reaccións nucleares de fisión son as responsables da radiación emitida polo Sol e as outras estrelas. Ademais, estas reaccións serven para sintetiza-los elementos químicos pesados a partir do hidróxeno primordial e, polo tanto, son cruciais para a existencia da materia tal como se dá en toda a súa diversidade no noso planeta. Así pois, se non se puidese transformar materia en enerxía simplemente non existiríamos nin nós nin o noso planeta.

A TEORÍA XERAL DA RELATIVIDADE

A Lei da Gravitación Universal de Newton describe a atracción gravitatoria entre dúas masas en termos dunha interacción instantánea que, como xa sabemos, é incompatible coa Teoría da Relatividade. Einstein era plenamente consciente deste problema e púxose a traballar nel nada máis formula-la Teoría Especial da Relatividade. O seu punto de partida foi unha característica importante da interacción gravitatoria: o principio de equivalencia.

A segunda lei de Newton establece que a aceleración que experimenta unha partícula é proporcional á forza que se exerce sobre ela. A constante de proporcionalidade é a chamada masa inercial. En principio debemos distingui-la masa inercial da masa gravitatoria, que é a que aparece na expresión da forza da gravidade na Lei da Gravitación Universal. Newton supuxo que estas dúas masas son

iguais. Esta hipótese estaba baseada na observación experimental (que se remonta a Galileo Galilei no século XVI) de que os corpos caen coa mesma aceleración con independencia da súa masa. No século XIX, esta igualdade entre a masa inercial e a masa gravitatoria foi verificada con moita máis precisión polo físico húngaro Eötvös, que utilizou unha balanza de torsión. Na actualidade, a igualdade entre as masas inercial e gravitatoria está comprobada experimentalmente cunha precisión dunha parte en cen mil millóns.

Se tódolos corpos sofren a mesma aceleración nun campo gravitatorio con independencia da súa masa, é claro que a interacción gravitatoria pode anularse escollendo un sistema de referencia non inercial que se mova coa aceleración da gravidade. Así, por exemplo, un observador situado nun ascensor en caída libre non detectaría a atracción gravitatoria exercida pola Terra sobre os diferentes corpos que viaxan con el no ascensor. Existe entón unha certa equivalencia entre o campo gravitatorio e un sistema de referencia non inercial.

Esta equivalencia entre un sistema de referencia acelerado e o campo gravitatorio ten un carácter local. Para ilustrar este punto imaxinémo-lo campo gravitatorio da Terra. Este campo depende da distancia do punto ó centro da Terra e anúlase cando nos afastamos infinitamente del. Escollendo un sistema de referencia acelerado, podemos anula-lo campo gravitatorio

nun punto arbitrario, pero non é posible facelo simultaneamente en tódolos puntos do espacio. Deste xeito, a diferenza entre un sistema non inercial e un campo gravitatorio é o seu diferente comportamento global.

Cambiar de sistema de referencia non é outra cousa que facer un cambio de coordenadas no espacio-tempo e, deste xeito, un sistema de referencia non inercial é simplemente un sistema de coordenadas curvilíneas no espacio-tempo. A situación é similar á que se dá na xeometría ordinaria. Así, por exemplo, un plano pode ser parametrizado en coordenadas cartesianas (en termos de dúas distancias) ou en coordenadas polares planas (en termos dunha distancia e un ángulo). A descrición dun plano en coordenadas curvilíneas é formalmente moi similar á dunha superficie curva. De feito, toda superficie semella localmente un plano (o seu plano tanxente). Por esta razón, para un observador na superficie da Terra non é obvio que esta teña forma esférica. Evidentemente hai maneiras de distinguir entre unha superficie plana e outra que non o é por medio de medidas efectuadas en diferentes puntos que poñan de manifesto a curvatura da superficie.

Baseado na analoxía coa teoría de superficies, Einstein propuxo que o campo gravitatorio pode ser representado como unha curvatura do espacio-tempo. A presenza dunha masa distorsiona o espacio-tempo e modifica a súa xeometría. O espacio e o tempo pasan así de ser un marco pasivo onde

teñen lugar os acontecementos, a converterse en participantes activos na dinámica. Einstein denominou a súa teoría da gravitación como Teoría Xeral da Relatividade, en contraste coa teoría especial que soamente se ocupa dos sistemas inerciais e os espacio-tempos planos.

A teoría elaborada por Einstein é de grande elegancia e simplicidade e permite facer unha serie de predicións que poden ser verificadas experimentalmente. Unha destas predicións é que a luz se desvía da súa traxectoria como consecuencia do campo gravitatorio. En 1915 Einstein calculou o valor concreto da desviación da luz ó pasar preto do Sol. Esta predicción fíxoa en plena Primeira Guerra Mundial, o que non foi obstáculo para esperta-lo interese do astrónomo británico Eddington que, en 1919 (uns poucos meses antes do final da guerra), organizou unha dobre expedición co obxectivo de verificar a predicción relativista nunha eclipse de sol. As medidas realizáronse na illa de Príncipe (fronte á costa da Guinea española) e na cidade brasileira de Sobral, e confirmaron a predicción de Einstein. Este éxito tivo un grande efecto na opinión pública mundial e fixo moi popular a Teoría Xeral da Relatividade. Estas medidas foron repetidas con máis precisión ó longo dos anos noutras eclipses e o resultado sempre foi concordante coa teoría.

Na actualidade, as mellores observacións da desviación gravitatoria da luz son as realizadas cos quársares, aproveitando o feito de que algúns

deles se observan no ceo con ángulos moi próximos e que nun período moi preciso do ano pasan por detrás do Sol. Medindo entón a variación do ángulo relativo, pode estimarse o efecto relativista de desviación da luz. Os valores observados coinciden coa predición da Teoría Xeral da Relatividade cun erro dun 1 %. Outra consecuencia da atracción gravitatoria da materia sobre a luz son as chamadas lentes gravitacionais, nas que a desviación gravitatoria da luz produce imaxes múltiples dun mesmo obxecto. A primeira evidencia deste efecto obtívose en 1979, cando se observaron dous quásares moi próximos e similares que resultaron ser unha imaxe dobre dun único quásar.

A Teoría Xeral da Relatividade resolveu un problema da Teoría da Gravitación Universal de Newton que levaba pendente desde a metade do século XIX. Este problema era o do desprazamento do perihelio do planeta Mercurio. Como é ben coñecido, os planetas móvense arredor do Sol en órbitas elípticas. De feito, as perturbacións producidas polos movementos dos outros planetas producen pequenas desviacións respecto ás traxectorias elípticas, unha das cales é o lento desprazamento do punto da órbita máis próximo ó Sol (o perihelio). Estas desviacións poden ser calculadas con grande éxito na teoría newtoniana e, deste xeito, Adams e Le Verrier foron capaces de predicir no século XIX a existencia e localización do planeta Neptuno a partir das perturbacións da

órbita de Urano. Existía, con todo, unha diferenza de 43 segundos de arco por século entre os valores calculados e observados para o desprazamento do perihelio de Mercurio. Einstein demostrou en 1915 que a Teoría da Relatividade dá conta desta diferenza. As medidas actuais das órbitas dos planetas con radares de alta potencia confirman este resultado.

Outros tipos de tests experimentais da relatividade refírense ó retardo temporal dos sinais e ó desprazamento cara ó vermello das raias espectrais. Estes efectos foron verificados experimentalmente con gran precisión en medidas realizadas no laboratorio e con foguetes e sondas espaciais. Neste sentido é interesante sinalalas medidas do retardo temporal efectuadas coas sondas Viking na superficie de Marte que permitiron verifica-la corrección relativista cun erro do un por mil.

Tamén é interesante mencionar unha das predicións máis espectaculars da Teoría Xeral da Relatividade: os buratos negros. Estes obxectos fórmanse cando unha masa moi grande é comprimida nun volume moi pequeno, co que se xera unha rexión do espaciotempo que non pode comunicarse co exterior. Existe hoxe en día un certo consenso entre os astrofísicos en que estes obxectos existen nalgúns sistemas binarios de estrelas, nos quásares e nos núcleos activos das galaxias (véxase o artigo de J. M. F. Labastida neste mesmo número da REVISTA GALEGA DO ENSINO).

En definitiva, a Teoría Xeral da Relatividade é na actualidade unha ferramenta imprescindible para poder interpreta-las observacións do Cosmos e para elaborar modelos que nos permitan avanzar na súa comprensión.

RELATIVIDADE E MECÁNICA CUÁNTICA

A Mecánica cuántica describe os fenómenos físicos que ocorren a escalas de distancia atómicas (para máis detalles consúltese o artigo de J. Sánchez Guillén neste número da REVISTA GALEGA DO ENSINO). A Teoría Especial da Relatividade é imprescindible para poder entende-la física dos procesos nos que interveñen velocidades próximas á da luz. Se estes dous requisitos sobre distancias e velocidades se satisfán simultaneamente é evidente que, por razóns físicas de consistencia, a teoría relevante ten que ser cuántico-relativista.

A chamada Mecánica cuántica relativista foi un primeiro intento de conciliar estas dúas grandes teorías físicas do século XX. O procedemento utilizado para estende-la Mecánica cuántica ó dominio relativista é o de construír novas ecuacións de onda compatibles cos principios da relatividade especial. Particularmente interesante é a ecuación de onda construída por Dirac, que proporcionou unha teoría relativista do electrón. Quizais a máis espectacular das prediccións da ecuación de Dirac foi a existencia das antipartículas, con propiedades moi

similares ás partículas, e que se aniquilan, dando lugar a radiación, cando se poñen en contacto con elas. O descubrimento do positrón nos raios cósmicos foi unha confirmación de que as ideas de Dirac son correctas.

A pesar dos seus éxitos, a Mecánica cuántica relativista tamén presentaba graves inconsistencias. Para resolver estes problemas desenvóléronse as chamadas Teorías cuánticas de campos, nas que se abandona a formulación de teoría dunha partícula en favor dun formalismo de moitas partículas, onde o número destas non é necesariamente constante. As Teorías cuánticas de campos son as utilizadas para formula-lo chamado modelo estándar da Física das partículas elementais, que describe con grande éxito a física de tódalas interaccións elementais da materia agás a gravidade. Sinalemos, a modo de exemplo, que o principio de exclusión de Pauli e o tipo de estatística cuántica satisfeito polas diferentes partículas elementais son unha consecuencia do carácter cuántico-relativista destas teorías. É interesante lembrar neste punto que o principio de Pauli é un ingrediente crucial para entende-la disposición dos electróns nos átomos e, consecuentemente, determina as propiedades químicas destes.

A construción dunha teoría cuántica consistente que incorpore os principios da relatividade xeral é un problema aínda non resolto. De feito, a elaboración dunha teoría cuántica da gravidade é a meta de moitos dos

traballos máis actuais en Física teórica. A teoría de supercordas é a máis cualificada candidata para construí-la chamada «teoría de todo» que unifique tódalas interaccións da natureza sen excepción.

Einstein dedicou, sen éxito, os últimos anos da súa vida a tratar de atopar unha teoría unificada. Esta é unha tarefa para o século XXI que, probablemente, requirirá algunhas revolucións conceptuais e novos métodos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Einstein, Albert, *Sobre la Teoría de la relatividad especial y general*, Madrid, Alianza Editorial, 1984.
- [2] Schwinger, Julian, *El legado de Einstein*, Biblioteca Scientific American, Barcelona, Prensa Científica, 1995.
- [3] Sánchez Ron, José Manuel, *El origen y desarrollo de la Relatividad*, Madrid, Alianza Editorial, 1983.

