

O panorama da Física actual

Ano mundial da Física. Grupo de Interese especial GIENCIA.

Santiago Cárdenas Martín.

No último século avanzou moitísimo a nosa comprensión da natureza. É asombroso o nivel de coñecemento que chegamos a adquirir sobre as partículas máis elementais das que estamos feitos e sobre a estrutura xeral do Universo.

Con todo, neste momento a Física atópase nunha situación moi peculiar. O noso coñecemento do universo baséase en dúas teorías sumamente fermosas, avanzadas e precisas nas súas predicións: a Teoría Xeral da Relatividade (TXR) e a Teoría Cuántica de Campos (TCC), pero... estas dúas teorías son incompatibles entre si!

Para completar este panorama, debemos engadir o Modelo Estándar da Física de Partículas (MEFP), que nos di cales son as partículas que forman o Universo. Poderíamos dicir que estas tres patas constitúen o noso coñecemento (incompleto) sobre a Física fundamental do noso universo.

Neste artigo imos repasar o coñecemento incluído neste tres áreas, dando unha moi breve introdución a cada unha delas, que posteriormente será ampliado noutros artigos. Finalmente, repasaremos as alternativas sobre as que se traballa para obter unha teoría unificada que acabe con este pesadelo de incompatibilidade para os físicos.

A Teoría Especial da Relatividade (TER)

Baseándose nos traballos dalgúns físicos que lle precederon, como Lorentz, Albert Einstein escribiu en 1905 dous dos seus famosos artigos que sumariaban o esencial da *Teoría Especial da Relatividade* (TER, SR: Special Relativity); naqueles momentos, simplemente Teoría da Relatividade.

A TER foi a revisión da mecánica clásica de Newton. O fito fundamental en que se baseaba era o feito de que a velocidade da luz é un parámetro constante e absoluto. Realmente é curioso que a chamase teoría da relatividade, xa que o seu axioma máis fundamental é a absolutividade da velocidade da luz.

Na mecánica de Newton, para sumar velocidades simplemente súmanse; é dicir, se imos pola estrada a 120 km/h e un coche vén en sentido contrario a 100 km/h, a velocidade relativa entre nós será de 220 km/h. Isto é algo que cadra totalmente coa nosa experiencia cotiá. Con todo, isto mesmo aplicado aos raios de luz significaría que a velocidade de aproximación de dous raios de luz en sentido contrario sería de $2 \cdot c$ (sendo c a velocidade da luz no baleiro).

O experimento de Michelson refutou este resultado. A conclusión de Einstein era que a velocidade da luz, mirese como se mire, sempre é c . E no caso anterior, malia que cada raio de luz vai á velocidade c , para un observador en repouso a velocidade entre eles tamén é c !

Para que a velocidade da luz (c) sexa infranqueable e sigan cadrando as cousas é necesario que a velocidades próximas a c pasen cousas tan estrañas como que os corpos se acurten, a marcha do tempo se reduza e as masas se incrementen.

De todo isto tamén se deducía, nun dos artigos de Einstein de 1905, que a enerxía e a masa son equivalentes, o que acabou formulando máis adiante na súa famosa e inmortal fórmula: $E=mc^2$

Aínda que todo isto pareza increíble, a TER está amplamente contrastada por todo tipo de experimentos, e de feito é totalmente compatible e está incluída dentro das dúas teorías fundamentais ás que antes nos referíamos (TXR e TCC).

A Teoría Xeral da Relatividade (TXR)

A TER non cadraba ben coa presenza de campos gravitatorios, polo que Einstein traballou a fondo tentando formular unha teoría máis xeral que si fose compatible coa gravidade.

Como resultado diso, en 1916 publicou a *Teoría Xeral da Relatividade* (TXR, GR: General Relativity). A TXR é unha das máis belas teorías físicas existentes; nun principio mostrouse como algo sumamente esotérico para os físicos da época, aínda que se fixo popular entre os matemáticos, moito máis afeitos a conceptos tan abstractos. Finalmente, a súa rotunda verificación nunha serie de experimentos -como a eclipse solar de 1919- supuxeron a súa total aceptación como teoría física totalmente sólida.

O desenvolvemento da TER levava ao concepto de espazo-tempo como un ente indivisible. A TER tiña unha formulación lóxica e elegante dentro do marco dunha estrutura xeométrica tetradimensional chamada Espazo de Minkowski.

A TXR propuña dúas hipóteses espectacularmente novas naquel momento: primeiro, que a presenza dunha masa ten o efecto de curvar o espazo-tempo de Minkowski, e segundo, que a inercia fai que se viaxe en “liña recta” neste espazo-tempo, sendo realmente estas liñas rectas as xeodésicas deste espazo-tempo curvado, é dicir os camiños máis curtos.

Imaxinar que o espazo-tempo pódese curvar é un concepto sumamente abstracto que só se chega a comprender despois de manexar moi a miúdo conceptos matemáticos desta índole. É importante resaltar que non soamente se curva o propio espazo, senón que se curva o ente indivisible tetradimensional que forma o espazo e o tempo.

A TXR demostrou co paso dos anos o seu total e absoluta coincidencia con todo tipo de experimentos que se idearon. Por exemplo, hoxe en día, o sistema de satélites GPS necesita dos cálculos da TXR para obter o nivel de precisión que ten.

A Mecánica Cuántica (MC)

En 1900, a Max Planck ocorréuselle unha forma de cadrar o extrañísimo comportamento que tiña a emisión de radiación por parte do que se chamaba un “corpo negro”. Planck foi quen de crear unha formulación matemática que cadraba de forma precisa cos resultados experimentais que se obtiñan.

Pero para que iso puidese ser así tivo que considerar que a radiación se emitía en cuantos discretos de enerxía. É dicir, non se podía emitir unha cantidade calquera de enerxía, tiña que ser un múltiplo enteiro dunha determinada cantidade. Nun principio, o propio Planck consideraba que isto era unha maña matemática para que a súa formulación cadrase, pero deixaba pendente unha futura explicación física. Resultaba increíble naquel momento pensar que a enerxía puidese vir en paquetes discretos. Con todo, aquilo foi o fito fundamental que marcou a creación dunha nova teoría física revolucionaria: a *Mecánica Cuántica* (MC, QM: Quantum Mechanics).

A MC está fundamentada sobre unhas hipóteses revolucionarias e aínda máis increíbles que as da TXR. Estas son as súas principais bases:

- Tanto a materia como a enerxía (que sabemos son equivalentes pola TER) teñen un dobre comportamento como partícula e como onda, polo que toda partícula ten asociada unha frecuencia propia da súa “personalidade” de onda.
- A enerxía sempre se presenta en múltiplos enteiros dunhas cantidades mínimas que dependen da frecuencia.
- O estado dunha partícula ou dun conxunto delas represéntase por un ente abstracto chamado “vector dun espazo de Hilbert”. Este estado contén todo o que podemos saber sobre unha partícula: a súa posición, a súa velocidade, a súa enerxía, etc.
- Cada vez que medimos algo dunha partícula, o seu estado cambia irremisiblemente, dependendo da medida que efectuamos. Isto fai que nos sexa imposible medir con precisión certos pares de valores como son a súa posición e a súa velocidade. Este é o famoso Principio de Incerteza de Heisenberg.

- De feito, certos conceptos clásicos como son o de posición non existen de forma precisa para unha partícula. A posición dunha partícula realmente é unha distribución de probabilidades de onde se pode atopar. Isto lévanos a un indeterminismo da natureza e á introdución do concepto de aleatoriedade, algo que Einstein negaba coa súa famosa frase de “Deus non xoga aos dados”.

Publicaremos máis adiante outro artigo no que entraremos algo máis en detalle sobre estas increíbles afirmacións. Polo momento, valla dicir que a pesar da súa increíble aparencia, a MC describe con asombrosa precisión o comportamento das partículas elementais.

O Modelo Estándar da Física de Partículas (MEFP)

Cando a mecánica cuántica estaba no proceso da súa creación só se tiña certeza da existencia de tres partículas: o electrón, o protón e o neutrón. Delas sabíase que as súas cargas eléctricas eran -1, +1 e 0, respectivamente, e que as masas do neutrón e o protón eran case iguais e moito maiores que as do electrón. Sabíase que os átomos estaban formados por un núcleo con protóns e neutróns e unha capa externa de electróns.

O físico Paul Dirac chegou á conclusión de que para toda partícula elemental tiña que existir unha antipartícula, con idénticas propiedades pero con carga oposta. Por exemplo, existe unha antipartícula para o electrón, o positrón, cuxa carga é +1. Esta hipótese foi posteriormente comprobada nos aceleradores de partículas.

A MC establece como se comportan as partículas elementais, que para cada partícula ha de existir unha antipartícula e que as forzas se transmiten por partículas portadoras. Por iso existen dous tipos de partículas: as que forman a materia, chamadas Fermiones (polo físico Enrico Fermi) e as que transmiten as forzas, chamadas Bosones (polo físico Santyendra Nath Bose). Con todo, a MC non di nada sobre que partículas e que forzas son as que existen na natureza.

Os aceleradores de partículas tiveron unha actividade frenética nos últimos 50 anos, tentando identificar cales son estas partículas e forzas. De feito, o CERN (Centro Europeo para a Investigación Nuclear), que é un dos maiores laboratorios do mundo que conta con aceleradores, cumpriu os seus 50 anos en 2004. Fai uns trinta anos, a situación era desconcertante; atopáronse decenas de partículas elementais diferentes con todo tipo de propiedades. Era unha situación moi molesta pola enorme complexidade que reflectía.

Finalmente, Murray Gell-Man propuxo unha teoría, pola que recibiu o premio Nobel, na que postulou que existían unhas partículas máis elementais aínda que os protóns e neutróns, que formaban aos mesmos. Ditas partículas denomínanse Quarks e poden unirse de tres en tres para formar protóns e neutróns ou de dous en dous para formar outros moitos tipos de partículas como os piones e kaones. Isto reduciu moito o número de partículas diferentes.

Sabiamos que ademais da forza gravitatoria existe a forza electromagnética; para poder explicar como os neutróns e os protóns están unidos entre si, foi necesario postular unha nova forza chamada forza nuclear forte. Co descubrimento dos Quarks foi posible establecer unha teoría coherente da forza nuclear forte. A forza nuclear forte ten unha estraña característica chamada “liberdade asintótica” que impide que os Quarks poidan ser vistos libremente, pero a pesar diso, a teoría dos Quarks está plenamente aceptada na Física actual, xa que foi comprobada amplamente. O premio Nobel de Física de 2004 foi outorgado ao tres físicos que descubriron esta propiedade da forza nuclear forte en 1973: Gross, Politzer e Wilczek.

Ademais deste tres, existe unha cuarta forza: a forza nuclear débil, aínda que hoxe en día contamos cunha sólida teoría que establece que as forzas electromagnética e nuclear débil son diferentes vistas dunha única forza chamada electrodébil.

Todos estes descubrimentos levaron á formulación dunha teoría que establece cales son todas as partículas e forzas que existen na natureza e cales son as súas propiedades. Esta teoría é o chamado *Modelo Estándar da Física de Partículas* (MEFP, SM: Standard Model).

O MEFP dinos que os fermións (partículas que forman a materia) que existen descompóñense en tres familias e que cada familia consta dun electrón, un neutrino e dous quarks. Realmente, aos “electróns” das outras dúas familias chámaselles “muón” e “tau”. Son partículas idénticas ao electrón, salvo que de

maior masa. Ademais destas 12 partículas, existen as correspondentes 12 antipartículas: positrón, antineutrino e antiquarks en cada unha das tres familias.

O MEFP dínos tamén que existen tres forzas fundamentais na natureza: a forza electrodébil que se transmite polo fotón (bosón da forza electromagnética) e os bosóns débiles W^+ , W^- e Z ; a forza nuclear forte que se transmite por 8 tipos de partículas chamadas gluóns, e a forza gravitatoria que, como veremos un pouco máis adiante, é a que non acaba de “cadrar”. Se chegase a “cadrar”, transmitiríase por unha suposta partícula que non puidemos ver até agora chamada “gravitón”.

A Teoría Cuántica de Campos (TCC)

O que contamos sobre a MC é sumamente estraño, pero aínda hai máis cousas raras. Resulta que continuamente se están creando partículas virtuais por todas partes. Por exemplo, para analizar o camiño dun electrón entre uns puntos A e B debemos analizar a posibilidade de que vaia en liña recta tal cal, pero debemos tamén analizar todo tipo de posibilidades, como que a medio camiño saia del un fotón e que logo volva, e mesmo posibilidades máis estrañas.

Isto, xunto ao feito de que a mecánica cuántica na súa formulación orixinal non ten en conta os efectos relativistas, motivou un desenvolvemento posterior da mecánica cuántica no que se denominaron *teorías cuánticas de campos* (TCC, FQT: Field Quantum Theory). Realmente existen dúas teorías cuánticas de campo. A máis consolidada é a *ElectroDinámica Cuántica* (EDC, QED: Quantum ElectroDynamics) que detalla a interacción das partículas da forza electrodébil e a *CromoDinámica Cuántica* (CDC, QCD: Quantum ChromoDynamics) que detalla a interacción das partículas coa forza nuclear forte.

A EDC foi desenvolvida por varios físicos ao redor de 1948. Entre outros, o mesmo Paul Dirac e o famoso e polifacético Richard Feynmann, que recibiu o premio Nobel en 1965 por iso. O desenvolvemento da CDC, moito máis recente, foi merecedor de varios premios Nobel, o último en 2004.

Hai que resaltar o feito de que a TCC inclúe totalmente á TER en todos os seus cálculos, polo que a TER é totalmente compatible tanto coa TXR como coa TCC.

A EDC é probablemente a teoría física máis precisa que existe. Moitos dos resultados que predicir puideron ser comprobados nos aceleradores de partículas até con doce díxitos decimais de precisión. A CDC é unha teoría amplamente aceptada, pero non puido ser totalmente verificada debido a que para realizar os seus cálculos completos é necesaria unha capacidade computacional da que non dispomos. Nestes momentos trabállase no desenvolvemento de computadores avanzados dedicados especificamente a realizar cálculos da CDC, mediante unha técnica chamada Lattice-QCD. Espérase que nos próximos anos podamos ter unha confrontación precisa dos resultados teóricos da CDC cos dos experimentos.

A incompatibilidade da TXR coa TCC. A procura dunha Teoría de Gravitade Cuántica (TGC)

Como comentamos ao comezo do artigo, a TXR, a TCC e o MEFP constitúen o noso coñecemento actual sobre o máis fundamental da nosa natureza. Este tres teorías supoñen un gran logro do coñecemento humano. Con todo, temos un gran problema: A TXR e a TCC son incompatibles.

Cando temos un problema no reino do moi pequeno (picómetros ou femtómetros) a TCC ofrécenos cálculos precisos de todo o que ocorre a esa escala. Por outra banda, cando temos problemas en presenza de grandes campos gravitatorios como son as estrelas, a TXR dáunos resultados impecables.

O problema é que se queremos facer un cálculo sobre o que lles ocorre ás partículas elementais en presenza de grandes campos gravitatorios, como se necesita nos buracos negros, as dúas teorías ofrecen resultados dispares e non compatibles. Non sabemos como establecer unha teoría que inclúa a ambas as teorías e que permita eliminar esa incompatibilidade.

O problema é que a TCC é unha teoría que supón un espazo-tempo non curvado e non sabemos como cadrala nun espazo-tempo curvado. E a TXR é unha teoría continua na que non teñen cabida os cuantos da TCC.

Por iso, o gran reto da física actual é dar cunha hipotética teoría que inclúa e da que se poidan deducir ambas as teorías. Dita teoría denominaríase unha Teoría de Gravidade Cuántica (TGC, QG: Quantum Gravity).

Os dous candidatos principais a TGC: A Teoría de Cordas (TC) e a Gravidade Cuántica de Bucles (GCB)

Nestes momentos existen dúas grandes liñas de investigación a posibles candidatos a unha TGC. Unha é a Teoría de Cordas (TC, ST: String Theory) e a súa evolución a Teoría-M (TM) e a outra é a Gravidade Cuántica de Bucles (GCB, LQG: Loop Quantum Gravity). A TC é a máis popular e algo máis antiga. Poderíamos dicir, facendo unha aproximación algo liberal, que a TC é a evolución da TCC para poder incluír á TXR e que a GCB é a evolución da TXR para poder incluír á TCC.

Un dos grandes problemas aos que se enfronta a TCC é que supón que as partículas elementais non teñen dimensión algunha. É dicir, que son puntuais, infinitamente pequenas. Isto xera un enorme problema nos cálculos facendo aparecer infinitos que son eliminados por un método matemático pouco ortodoxo chamado normalización.

A TC elimina este problema supondo que as partículas son realmente unhas cordiñas. Nalgunhas versións da TC supón cordas cos seus cabos libres e noutras versións supón cordas pechadas. A moderna extensión da TC é a TM, de 1995, e establece non só a existencia de cordas unidimensionales, senón a de elementos de dimensión 2 e maiores chamados n-branas (as cordas serían 1-branas).

A TC e a TM para ser coherentes necesitan que o noso espazo teña 10 dimensións en lugar de 3 e que o MEFP sexa ampliado por un modelo maior chamado supersimetría que establece a existencia dun “supercompañeiro”, até agora nunca observado, para cada fermión e cada bosón.

Para que poida haber 7 dimensións espaciais nunca vistas é necesario supor que estas están curvadas e que son de tamaño moi pequeno. Isto é un concepto bastante abstracto, aínda que totalmente factible. Máis adiante publicaremos un artigo dedicado á TC no que tentaremos profundar neste concepto.

A GCB, doutra banda, dinos que tanto o espazo como o tempo non son continuos, senón discretos. É dicir, que existe un “tamaño” de volume mínimo indescompoñible (uns 10^{-35} m) e un “paso” de tempo mínimo indescompoñible (uns 10^{-43} s). O máis interesante da GCB é que establece que o espazo-tempo é unha rede duns elementos mínimos chamados espíns (spins). A materia pasa a ser un estado destes espíns, non sendo algo diferente do propio espazo. Estes espíns xa foron postulados por primeira vez por Roger Penrose na súa teoría de twistors.

A comunidade física atópase bastante dividida polos que traballan na TM e os que o fan na GCB. Hai mesmo chistes sobre iso. ;-)

A GCB non necesita de máis dimensións nin de supersimetría, aínda que sería compatible coa súa posible existencia. De feito, é posible que a TM e a GCB acaben sendo ambas as correctas e compatibles. Podería ser que as branas da TM sexan conxuntos de espines e que a GCB sexa un marco máis profundo para a TM. Debido á gran división que hai entre os investigadores que traballan en cada liña, esta última posibilidade, iniciada polo físico Le Smolin (do bando da GCB), foi moi pouco traballada.

Calquera dúbida, suxestión ou comentario podedes facelos a: scardenas@grupoei.com