

MOMENTUM

A revista estudantil da Facultade de Física da USC

Núm. 005

Marzo 2026



Axl gato nun estado de superposición. Foto: Deivis

Índice

Entrevistas

- Entrevista: Mar Capeáns** 1
Gemma Ruíz Lavandeira

Divulgación

- Poesía e física: *De catro a catro*** 4
Sebastián Táboas Pazo
- Kepler, as dúas primeiras leis e a revolución astronómica** 7
Iago Arsequell Rodríguez
- Sobre a lóxica da física** 11
Ana Peón Nieto
- O crebacabezas da gravidade cuántica** 14
Gabriel Rodríguez Moris
- Grandes colaboracións para buscar o máis pequeno** 18
Xabier Cid Vidal

Miscelánea

- Música, frases e máis** 21
- Tributo a Outer Wilds** 23
Celia Álvarez Álvarez
- Erros, chapuzas e desatinos** 24
Ánxel Costas

Filosofía

- Érase unha vez un gato...** 26
Mauro Garrido Rodríguez

Historia

- Wow!** 29
Santiago González Gómez
- Sobre como Schrödinger case morre no concello da Estrada** 31
Manuel Galán Rodríguez

Marzo 2026

Núm.005

Dirección

Carolina Castro Rodríguez
Sebastián Táboas Pazo
Xulia Arán Paredes
Mauro Garrido Rodríguez

Edición

Andrea Real Blanco
David Cotelo Varela
Diego Couto García
María Alonso Iglesias
María Caplea Palagi
Víctor Díaz Díaz

Corrección

Manuel Galán Rodríguez



revistafisicausc@gmail.com



@momentum.usc



fisicaUSC/revista





Entrevista: Mar Capeáns

Gemma Ruíz Lavandeira

No núcleo do maior laboratorio de física do mundo.

Compostelá de nacemento, Mar Capeáns seguiu na capital galega formándose como física experimental de partículas na Universidade de Santiago de Compostela ata dar o salto ao CERN, en Suíza, nos anos noventa. No CERN comezou como investigadora no desenvolvemento de detectores de partículas co Premio Nobel de Física, Georges Charpak, e avanzou ata postos de liderado no Departamento de Física Experimental, no Sector de aceleradores e na administración do CERN. Baixo a nova Dirección Xeral de Mark Thomson, a partir de 2026, Mar Capeáns pasará a ser a nova Directora de Operacións do CERN, converténdose na primeira española en ocupar un posto de tanta importancia na dirección do maior centro de Física de Partículas do mundo. Co inicio desta nova etapa accedeu a contarnos máis sobre a Física de Partículas, a importancia da Ciencia e o futuro das colaboracións entre a Física e a Tecnoloxía.

Gustaríame comezar agradecendo o interese posto na revista e na disposición a participar nela, o teu testemuño é moi valioso para todo o alumnado, é un pracer contar con el. Sendo que es unha alumna da nosa Universidade quería preguntarche polos teus comezos como estudante na Universidade de Santiago de Compostela, que foi o que te cativou da Física e por que escolliches iniciarte na investigación de partículas.

Síntome moi agradecida e orgullosa de ser compostelá e de terme formado na USC. Comecei os meus estudos cando xa existía unha conexión entre a Facultade de Física e o CERN, algo que me resultou moi atractivo. O que verdadeiramente me cativou da física de partículas foi precisamente ver que detrás das teorías hai desenvolvementos tecnolóxicos moi potentes, detectores, aceleradores, electrónica, cómputo, e esa mestura de ciencia e técnica é o que máis me interesa. Escollín iniciarme na investigación de partículas porque me permitía combinar esa curiosidade fundamental: «de que estamos feitos?», «que leis gobernan o Universo?», pero cunha dimensión práctica, de construción de instrumentos e de análise de grandes volumes de datos.

Ás veces pode parecer que o que teñen máis importancia ou polo menos máis recoñecemento son as teorías científicas (por exemplo, no ano 2013, os pais da teoría na que se incluía o bosón de Higgs foron galardoados co Premio Nobel de Física pero un ano

antes a súa existencia fora probada no CERN) antes que a parte experimental na que converxen outras disciplinas técnicas. Cal é a túa percepción? Cres que a sociedade sabe o suficiente sobre as investigacións máis prácticas da Física? Ademais, notas esa vocación experimental entre os estudantes máis novos?



Figura 1: Mar Capeáns no CERN. (Foto: El País)

Creo que ás veces se percibe que as teorías teñen máis visibilidade, quizais porque resultan máis narrativas. Na realidade, a física avanza só cando teoría e experimento camiñan da man: sen experimentación non hai confirmación, e sen teoría non hai dirección. Detrás dun resultado científico hai décadas de deseño de instrumentos, de innovación tecnolóxica e de cooperación entre centos de persoas. No CERN vemos cada día como esas contribucións fan posible verificar hipóteses e abrir novas preguntas. Por iso, creo que cómpre reforzar esa conexión entre ciencia e sociedade, amosando que as investigacións máis prácticas, as que constrúen, miden e proban, son fundamentais. E é esperanzador ver que os estudantes teñen moita curiosidade por esa parte aplicada: por deseñar hardware, procesar datos e explorar tecnoloxías.

A túa educación comezou nunha universidade pública

e o teu traballo está enmarcado nun organismo que conta co financiamento dos estados membros. Que importancia ten un bo investimento en ciencia e como repercute o que se estuda no ámbito académico na sociedade?

A ciencia debe dar oportunidades para todos, o acceso ao coñecemento e á investigación debe estar ao alcance de todos. Investir en ciencia básica, aínda que ás veces non se vexa de inmediato, repercute na sociedade: tecnoloxías, formación, espírito crítico, innovación. O CERN, o feito de que institucións financiadas polos estados membros traballen en bloque cristaliza ese retorno colectivo.

O CERN ten unha estreita relación coa informática, cabe recordar que alá polo ano 1989 Tim Bernes-Lee e Robert Cailliau desenvolveron a World Wide Web nesta institución, sendo que a computación cuántica se ve como o futuro ao que aspirar, que papel pode xogar o CERN na súa expansión? Que beneficios, se os hai, pode aportar ás investigacións que levades a cabo? De telos, poderíanse ver nun futuro próximo?

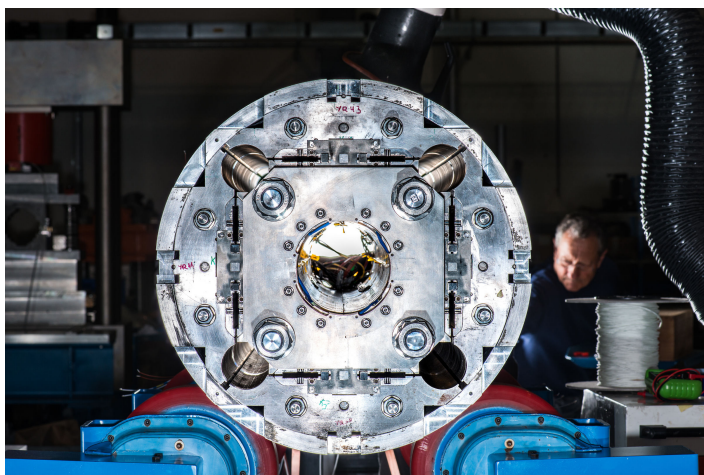


Figura 2: Proceso de fabricación de imáns para o High Luminosity LHC. (Foto: CERN)

O CERN e a informática teñen unha historia chea de pioneirismos. Dentro desta tradición, a iniciativa CERN Quantum Technology Initiative (QTI) é un bo exemplo. Lanzouse en torno ao 2020 como un programa de I+D que busca especificamente integrar as tecnoloxías cuánticas no ámbito da física de altas enerxías e na cadea tecnolóxica asociada. O obxectivo é que o CERN siga sendo motor tecnolóxico de grande escala, pero tamén que esa tecnoloxía impacte na industria e na sociedade en xeral, medrando o ecosistema cuántico europeo e internacional. Os beneficios poden ser moi concretos para as investigacións que levamos a cabo: mellor

sensibilidade nos detectores, aceleradores máis eficientes, procesamento de datos máis rápido, incluso redes de comunicación entre grandes instalacións científicas. Verémolo nun futuro próximo.

No ano 2026, Fabiola Gianotti deixa o posto a Mark Thomson como novo Director Xeral do CERN e dentro deste novo organigrama destaca como a primeira española en ocupar a Dirección de Operacións, parabéns por este logro e desexo que sexa unha etapa moi satisfactoria. Podes contarnos un pouco en que consiste esta designación e como se inclúe este posto na organización do CERN?

A partir de 2026 asumirei a Dirección de Operacións do CERN na nova estrutura organizativa, un posto que abrangue a responsabilidade de garantir que o conxunto das instalacións e servizos da organización funcionen con eficiencia, seguridade e continuidade. Buscarei fortalecer a visión da institución cara a unhas operacións máis sostibles, colaborativas e tecnoloxicamente avanzadas. Para min representa un gran reto profesional e tamén unha enorme oportunidade de contribuír de forma directa ao futuro do CERN, garantindo que a ciencia poida desenvolverse nas mellores condicións posibles e que o laboratorio continúe sendo un referente mundial en investigación, tecnoloxía e cooperación internacional.



Figura 3: Imaxe dunha recreación da primeira páxina web. (Foto: CERN)

O CERN está formado por 25 estados membros, aínda que participan científicas e científicos de case todos os países. Como se coordinan as investigacións que se levan a cabo nas instalacións de Suíza para que todos teñan acceso? Cales son os retos de seguridade e loxística aos que te enfrontas?

O CERN reúne máis de 18.000 persoas de todo o mundo, pertencentes a estados membros e numerosos países asociados. A coordinación das investigacións realízase mediante un sistema de colaboracións moi estru-



turadas: convocatorias de experimentos, adhesión de institucións, comités científicos, xestión compartida de datos e infraestruturas... Coordinamos proxectos con equipos multidisciplinares e internacionais, asegurando o acceso equitativo ás instalacións. A nivel operativo, os retos son enormes: seguridade radiolóxica, loxística de materiais e persoas, mantemento de infraestruturas e xestión sostible dun campus que funciona as 24 horas do día.

Para ir concluíndo, sería moi interesante contar coa túa opinión acerca de cales son os próximos retos da Física e que che ilusiona máis do futuro do CERN.



Figura 4: Celebración do descubrimento do Higgs. (Foto: Maximilien Brice)

A física enfróntase agora a preguntas fascinantes: que é a materia escura?, por que o Universo está feito de ma-

teria e non de antimateria?, cal é a natureza da enerxía escura? Proxectos como o LHC de Alta Luminosidade, e aceleradores e detectores máis potentes, que estamos estudando, permitirán chegar máis lonxe. Para o CERN, o que me ilusiona grandemente é que é un centro que non só responde as preguntas da física, senón que impulsa tecnoloxía, redes cuánticas, sensores de próxima xeración, computación avanzada, e iso pode facer que a ciencia fundamental teña un impacto tecnolóxico e social moito maior. Ver como investigadores de Galicia e España participan, colaboran e lideran partes deste proceso é especialmente motivador.

Como guinda final, gústanos quedar cos consellos das persoas que pasan por esta sección de entrevistas para que a vosa sabedoría e experiencia poida servir de faro aos futuros físicos e físicas ou a calquera lector interesado. No teu caso, que consello ou alegación che gustaría deixar?

Para quen está a comezar ou pensando en facer física, ou calquera disciplina científica, o meu consello sería: seguir a curiosidade pero ao mesmo tempo ir construindo capacidades técnicas: experimentación, programación, análise de datos, electrónica, traballo en equipo. A ciencia moderna non funciona en solitario, senón en colaboración: saber escoitar, compartir ideas, aprender doutros. Non se trata só de facer grandes teorías, senón de transformar curiosidade en actividade, en instrumento, en dato, en descubrimento.

O mundo necesita persoas que combinen cabeza, corazón e mans.

Poesía e física: *De catro a catro*

Sebastián Táboas Pazo

Como a física e a arte, a poesía de creación, son caras dunha mesma moeda.

La poesía es una necesidad, y he descubierto que no es rara. Además, he descubierto que, muchas veces, caminando por la calle uno oye frases poéticas dichas por personas que no saben que las frases son poéticas.

— J. L. Borges

Le preguntamos [a Rafael Dieste], pues: ¿por qué siendo ante todo poeta (...) le han preocupado las matemáticas?

— F. F. García Armesto

Preámbulo. Ciencia e... arte?

Ás veces, ao falarmos casualmente, atopamos esa postura dicotómica entre a irreconciliabilidade das ciencias e das letras, unha guerra que moitas veces levan a un discurso depreciativo entre o estudantado de diversas ramas. Sempre sorprende aquel comentario onde na ciencia se ve arte ou na arte, ciencia. Non é, acaso, Kandinsky tan bo xeómetra como Hilbert?

A ciencia e a realidade tecnolóxica, que dela se deriva, sempre xoga un papel fundamental nun traballo artístico, quizais só como marco, como contexto, mais sempre hai quen fai da ciencia integramente arte. As vangardas de principios de século XX presentaron unha revolución que respondía ao cambiante paradigma tecno-científico, claro é revisando os ismos como o ultraísmo ou o futurismo. Exemplo testemuñal é o manifesto *Le Futurisme* [1] de 1909, «IV- Declaramos que el esplendor del mundo se ha enriquecido de una belleza nueva: la belleza de la velocidad. Un automóvil de carrera con su vientre ornado de gruesas tuberías, parecidas a serpientes de aliento explosivo y furioso...».

Manuel Antonio e Einstein

Traiamos toda esta realidade artística aquí, a un Rianxo de comezos de século, a un xove poeta galego, a Manuel Antonio.

Falamos agora dunha época de grandes cambios, marcada por esa filosofía da sospeita¹, auxe da Segunda

Revolución Industrial, época convulsa, fin do imperialismo, vangardas como resistencia e, na física, case completa (sentencia Kelvin), aparece un xove Albert Einstein, acabado de doutorarse, que publica (entre outros) un artigo revolucionario, *Zur Elektrodynamik bewegter Körper* (1905), até esas famosas conferencias de 1915. Morría a física newtoniana, o tempo absoluto, e nacía a moderna relatividade que atraía todas esas cabezas fomentas de novos continentes, que atraía todas esas vangardas.



Figura 1: Manuel Antonio, entusiasta do tabaco de pipa.

O rianxeiro mostrou sumo interese por todos estes traballos revolucionarios, fervente lector das novidades científicas europeas (cónstanos que se entregara moito na ciencia alemá [2]), Nietzsche e os avances vangardistas, entre estes, estaba moi ao tanto das novidades que trouxera Vicente Huidobro na súa primeira visita a España en 1918 e da súa conferencia no Ateneo de Madrid de 1921. Entre as súas lecturas científicas destaca a súa inmersión na comprensión das investigacións e resultados de Einstein das que quedara prendido cunha ollada. Todos estes detalles son coñecidos grazas á súa correspondencia e á descrición da biblioteca do rianxeiro que fai García-Sabell. Así, nunha carta que lle escribe a Cebreiro en 1922 figura:

Merquei algún libro para me “doutorar” nela [a teoría da relatividade] e agora ando tralo seguinte: Posto que a teoría da Relatividade demostra que o Tempo e o Espazo e outras cousas son máis ou menos longas a segundo o sistema de referencia, eu vou a desenrolar a miña autividade no medio en que o Tempo teña a maisima longuedade e o Espazo a mínima.[3]

Isto é, sen lugar a dúbidas, o xerme da xénese do poe-

¹Paul Ricoeur tacha os filósofos Marx (o traballo), Freud (o subconsciente) e Nietzsche (os valores e a identidade individual) de «mestres da sospeita» no seu libro *Freud: unha interpretación da cultura* por sinalar aquelas dimensións que subxacen baixo a identidade humana.



mario *De catro a catro*, unha xénese vencellada á física, aos recentes descubrimentos dos científicos estranxeiros; poesía que se reduce á física. A marabillación do poeta é tal que conclúe a súa carta cunha certa sorna adulación:

Non se trata de parar o sol como Xosué, sinón de ir diante da ciencia alemá. ¿Como che quedou o corpo?

Este Dr. Einstein “es un tigre” como din os “ches”, pero como non é galego ¡que se lle vai facer! ten que ficar sempre por debaixo de nós.[3]

Frecuentemente Manuel Antonio compartía e debatía ideas de toda índole, entre elas literarias, con Dieste, acérrimo amigo de letras, tamén rianxeiro. Non foi excepción desta idea xerme que figura na carta a Cebreiro, anos máis tarde comentará:

Siendo muy muchachos, me encontré con la sorpresa de que Manuel Antonio lo suponía, sí [el espacio limitado, mínimo]. Me fue muy fácil persuadirle de que ese límite, siendo una frontera, implicaba una continuación al otro lado y de que aun suponiendo maciza e impenetrable esa continuación era imposible concebirla sin espacio. Vi que acababa de abrirse como una nueva luz en su cosmovisión y que estaba por ello muy sorprendido y contentísimo.[3]

O que sen dúbida foi fundamental para a creación de *De catro a catro* tal e como a coñecemos, coa súa escrita fragmentaria de espazo-temporalidade tan marcada. Xa sexa dito de paso, segundo fun investigando e documentándome para escribir este artigo que me roldaba a cabeza, atopeime con que Manuel Antonio non era un exemplo tan xenial da física na poesía como si o é Rafael Dieste coas matemáticas [4].

Relatividade na teoría poética

Baixo a pretensión de realizar unha breve análise da obra que encabeza este artigo, afondaremos no ismo que máis a roza: *o creacionismo*. Este interese polas teorías de Einstein non era exclusiva do noso poeta, senón que foi común en todos os creacionistas; xeneralizado a todas as vangardas e a moitos ámbitos, moitas veces terxiversadas.

No escrito de 1926 *El creacionismo* [5], Vicente Huidobro sentencia que «Lo realizado en la mecánica también se ha hecho en la poesía», sendo a nova teoría dinámica de Einstein un gran logro da física, por que non conquistar tamén este continente na poesía? Fai, principalmente, unha chamada a crear, que a única condición do poeta é *crear*, como xa declarara contundentemente na súa conferencia de xuño de 1916 no Ateneo de Buenos

Aires. Seguindo xa máis de cerca o criterio de Gerardo Diego, «o creador de imaxes comeza a crear por crear, non describe, constrúe; non evoca, suxire» [6].

Podemos seguir un fío na pescuda de migallas relativistas nesta teoría poética. Nese mesmo escrito de 1926 sinálase que «La poesía creacionista adquiere proporciones internacionales» en canto que a poesía para sublimar non depende dunha lingua; é un invariante do sistema de referencia, non se intúe aquí acaso unha teoría da relatividade case física?

A calidade máis notable é, en realidade, ese trato da dimensión espazo-temporal no poema creacionista como se fose un tecido que depende do movemento, das forzas, do observador, dunha clara implicación relativista que non se esforzan en ocultar [3]. Explica Kathleen March [7] que o xeito dos poetas de utilizar estas nocións, ou máis ben, no caso de Manuel Antonio, é «Por medio do verbo», explica que «hai varias formas de descompoñer a imaxe ou de construíla para despois anulala. (...) os verbos, a miúdo, pertencen a un campo de significado relacionado coa desaparición –ou á destrución–. (...) Moitos deles apuntan a un tempo ou lugar alonxado, a unha falta de precisión ou asequibilidade. Esto trae como consecuencia a incapacidade de asir o obxecto poético que se atopa dotado dunha constante dinamicidade.» A fin do emprego dos verbos é a anulación do tempo secuencial, da cadea lóxica (como se se pretendese escribir fóra do cono de luz dende dentro). Nun mesmo poema aparecen imaxes coespaciais cuxos verbos (que describen a acción) preséntanse tanto en pasado como en presente creando unha organización allea ao tempo lóxico. «Non hai cronoloxía obrigatoria, aínda que o ollo do lector tende a desprazarse desde a parte superior da páxina cara a abaixo» [7].

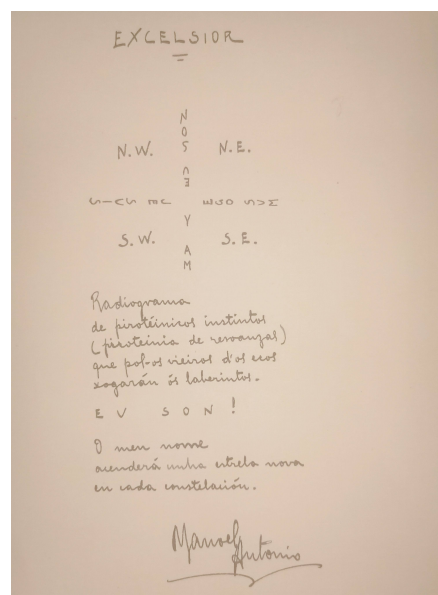


Figura 2: Copia orixinal de *Excelsior*, exposta na casa-museo.

Para combater esta verticalidade o poeta practicaba o caligrama, sùmmum cubista no poema, cuxo mellor exemplo é o poema *Excelsior*. Formas combativas máis lixeiras eran xogar coa separación e colocación dos versos, moi usuais tamén aquí. Tamén é frecuente o xogo das voces, do cambio de persoa nos verbos (ademais dos tempos), a aparición *doutros* narradores para lograr unha deslocalización crono-espacial do lector; este fenómeno lembra unha multitude de sistemas de referencia para un mesmo suceso. Coa aparición de tantas voces, en virtude de cal medimos o poema? Cal é o noso sistema absoluto?

March sinalaba o uso principal dos verbos para producir liñas de movemento e tensión, porque se «esixe o uso de termos concretos, “visíbeis”», mais está claro que Manuel Antonio non se limitou só aos verbos. A ausencia, espazos en branco, distancias aumentadas, tempos reducidos; voces, narradores fragmentarios, multitude de sistemas de referencia isomorfos; recursos sintácticos que soubo utilizar para *crear* no absoluto sentido creacionista, empapados da teoría da relatividade. Aventúrome a afirmar que, dependendo do xogo sintáctico empregado, o poeta crea imaxes *space-like* ou imaxes *time-like*.

Ao final o que máis aproveitan os creacionistas de Einstein é esa apertura do sentido² (a creación de imaxes triplas, cuádruplas..., referirase Diego), utilizar a dimensionalidade relativa (no seu sentido físico) para acadar, na creación de imaxes, unha suxestión máxima. Inventar formas insólitas, mais sen rozar o surrealismo. Aínda que moitas veces os literatos avogaran máis por unha construción interpretativa da teoría da relatividade asíndoa a teorías do tempo máis humanas, como as de Bergson (especialmente), Kant³, Prigogine (en tempos modernos) e xunto con eses conceptos do devir e do eterno retorno de Nietzsche.

De catro a catro

Rematamos agora o artigo comentando brevemente a obra do poeta rianxeiro, en concreto o poemario de *De catro a catro*. *Follas sin data dun diario d'abordo*, que tanto se mencionou até agora. Manuel Antonio preséntanos un mundo pechado no que non hai máis futuro nin máis pasado có da travesía. No poema *Travesía* xa se deixa claro as súas intencións «Troqueles reiterados/o reloxe e o Sol/alcuñaron moedas efímeras/que repetían todas/a mesma cara e a mesma cruz», pechándoo con

O minuteiro
(*tíc tac*)
asumeu o compás das travesías.

Esta concepción en certo xeito romántica (no sentido da Bildungsroman) refórzase co poder da suxestión que implicaba a mecánica relativista que ben coñecía. Estamos perante un caso de simultaneidade [7]; os tempos están superpostos e atopamos que algo está a ocorrer neste mesmo instante aínda que ocorrera na creación do Universo. Non hai un antes nin un despois que non estea vencellado á viaxe. É en virtude desta que as cousas acontecen; o sistema de referencia é a viaxe en si mesma, ela é a medida das cousas; e a viaxe carece dunha precisión cronolóxica, anulando a dimensión temporal. É evidente tamén que «non abonda coa lectura superficial da viaxe, vencellada ó movemento, porque *De catro a catro* é xa dende o título un poemario de estatismo»⁴, de aí que aquelas moedas repitan en bucle o mesmo resultado.

Acábanse os ocos e non se pode un espraiair máis, tan só vomitar unhas frases contundentes e crípticas. Este libro non só é física, a súa dimensión humana resalta sobre todo en poemas como *Sós* ou na monotonía do estatismo, e aínda así é imposible negar que nel habita un xerme. A comprensión do fondo (ou ao que se refire Baudelaire con «fondo») da obra de Manuel Antonio é irrecoñecible sen a física do momento. Non podo seguir descifrando o poemario nestas follas, non me queda máis que ir de catro en catro até que

Encherémo-las velas
ca luz náufraga da madrugada.

Referencias

- [1] *Le futurisme* (trad. R. Gómez de la Serna en *Prometeo*, VI, abril 1909); F. T. Marinetti; (LI, febreiro 1909)
- [2] *Poesías*; D. García-Sabell; (Galaxia, 1972)
- [3] *De catro a catro*; Manuel Antonio; (Editorial Galaxia, 2001)
- [4] *Rafael Dieste e a xeometría. Argumentos para unha concepción filosófica do espazo como índice de realidade.*; X. Díaz Díaz; (USC, 2012)
- [5] *El creacionismo*; V. Huidobro; (1925)
- [6] *Posibilidades creacionistas*; G. Diego; (1922)
- [7] *Espacialidade e temporalidade na poesía de Manuel Antonio*; K. March; (Grial, 1980)

²O concepto da *apertura do sentido*, polo menos así o coñecín eu, aparece en *Tensión e sentido* de M. Peyrou.

³Foi, en primeira instancia, a concepción do espazo e do tempo de Kant a que puxo en xaque á teoría do tempo e sistema de referencia absoluto de Newton e a que inspiraría moi profundamente a Einstein nas súas investigacións.

⁴Non atopei a referencia directa, pero en [3] é atribuída a Elvira Souto.



Kepler, as dúas primeiras leis e a revolución astronómica

Iago Arsequell Rodríguez

Introdución

A Revolución Científica foi un dos eventos chave da historia. Este, por raro que pareza, foi motivado por problemas non intrínsecos á Terra, senón máis alá desta. É que a pregunta de como é o que vai máis alá do ceo parécenos agora trivial, que até un neno de primaria sabe máis ou menos a resposta. En cambio, gustaríame amosar a complexidade e o esforzo requirido para solucionar esta cuestión que por séculos foi un dos maiores misterios. Nesta conxuntura, Kepler foi quen de non só responder e nos dar un grande avance no coñecemento, senón un xeito de enfrentarse ao dilema cunha mentalidade e métodos innovadores para a época. Falarase de como atopou as súas dúas primeiras leis que desenvolveu no seu libro *Astronomía Nova*, libro de suma importancia na historia da astronomía e da ciencia.

Proceso de dedución das dúas primeiras leis de Kepler

Tycho Brahe fora un nobre danés e un dos maiores astrónomos antes da invención do telescopio. Construíu un observatorio chamado Uraniborg, que se converteu no lugar cos instrumentos e medicións máis adiantadas da época. Entre os seus maiores logros áchanse medicións da posición e ángulos dos planetas cunha precisión de dous arcominutos (un minuto de arco equivale ao ancho da mina dun lapis vista a dous metros e medio de distancia). Foran medicións que sen ter telescopios nin material máis avanzado, resultan increíbles e estendéronse durante vinte anos. Tras diferenzas co rei, abandona Dinamarca e acaba en Praga onde sería astrónomo real do Sacro Imperio Romano Xermánico. Aquí é onde entra Kepler. Brahe tiña os datos, mais non a capacidade para demostrar nada. Persoalmente, tiña o seu modelo onde a Terra era o centro do Universo e o Sol orbita arredor da Terra, coa diferenza de que o resto de planetas orbitan o Sol (un modelo híbrido). Kepler, apaixonado pola idea dun universo xeométrico e deseñado por Deus, quería demostrar que nos datos se obtiñan padróns xeométricos e leis matemáticas que eran reflexo dunha vontade divina. En resumo, un tiña os datos e o outro, a capacidade de usalos.

Brahe, reticente de darlle os datos a Kepler de golpe (e moitos outros problemas), decidiu darlle os datos de Marte. Sería con este planeta co que principalmente

Kepler traballaría, o que é unha casualidade histórica: Marte é un dos planetas con órbitas máis excéntricas do Sistema Solar, polo que é máis doado chegar a resultados con el que co resto de planetas. Primeiro, repasemos uns detalles da astronomía prekepleriana.

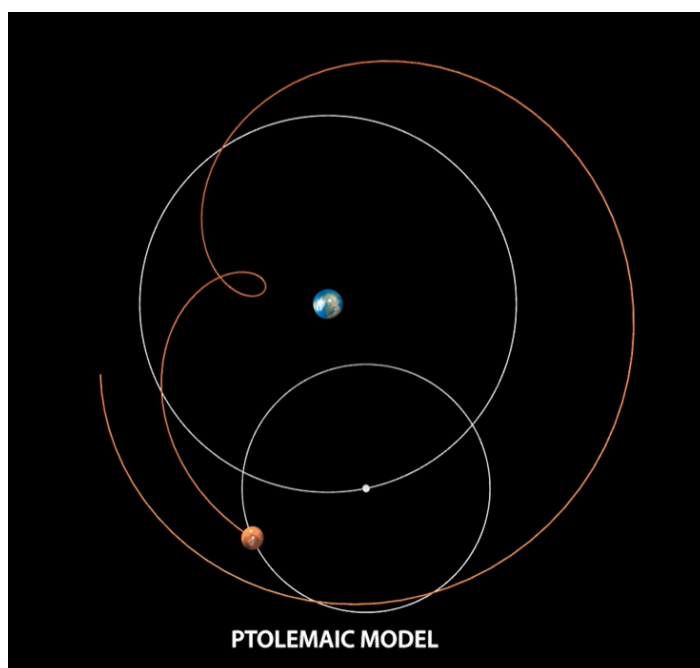


Figura 1: Modelo tolemaico [1].

A astronomía tradicional aristotélica pon a Terra no centro tal que os planetas orbitan a velocidade constante. Este modelo non concorda en absoluto coas observacións, como por exemplo co fenómeno do movemento retrógrado. Nas observacións antigas xa se observaba que os planetas se movían de oeste a leste, mais en certos tempos a velocidade diminúe (visto dende a Terra), paran e inverten o seu movemento até desaceleraren, pararen e volveren ao movemento de antes debuxando unha forma de lazo, aínda que este movemento non é igual sempre. Para este tipo de fenómenos, Tolomeo desenvolveu o seu modelo complexo que pretendía explicar e predicir as observacións que se tiñan na súa época. Para entender o sistema, describiremos os trazos máis importantes. Primeiro, a Terra é o centro do Universo. Os planetas móvense en pequenos círculos chamados epiciclos describindo unha órbita circular máis grande chamada deferente. No seu centro non se atopa a Terra, senón que esta está desprazada unha distancia. O outro trazo



máis importante é o ecuante, que é o punto oposto á Terra (isto lembra os focos dunha elipse). Este punto defínese como a localización dende a cal o movemento do centro do epiciclo é circular uniforme. Isto explica tamén por que parece variar a velocidade dos planetas. Todo este sistema que parece tan arrevesado creouse para poder predicir as observacións astronómicas e as antigas concepcións (como o movemento circular uniforme).

É posible que un modelo xeocéntrico describa a retrogradación dos planetas? Tolomeo ideou a súa teoría en boa parte para tentalo xustificar. Kepler, un xeocéntrico convencido, demostrou que si, o fenómeno pódese explicar pola diferenza de velocidade. Cando a Terra está afastada de Marte, vézelle facendo unha traxectoria recta. Pola contra, cando se aproxima a Terra a Marte (ao estar máis cerca do Sol ten unha maior velocidade) a posición aparente de Marte desacelérase producindo este fenómeno (na seguinte imaxe vese mellor).

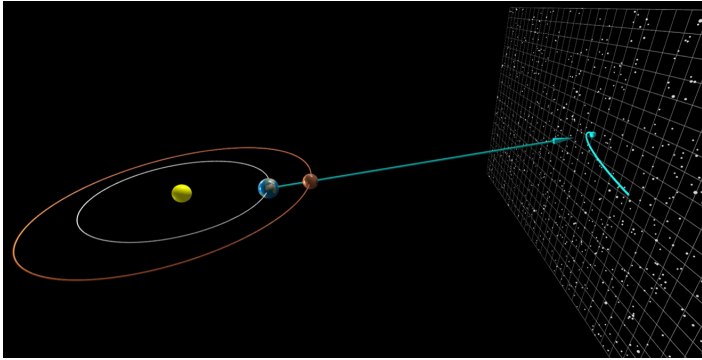


Figura 2: Retrogradación de Marte [1].

Unha dificultade engadida fora que a Terra non era un observador fixo, senón que tamén se move. Sería moito máis sinxelo observar dende o Sol, e isto pódese facer aproveitando as oposicións, momentos nos que o Sol e o planeta están aliñados nos lados opostos da Terra. Nese caso, por xeometría básica, o ángulo entre o Sol e Marte é o mesmo visto dende a Terra que dende o Sol. Se se coñece a distancia Terra-Sol, pódese usar perfectamente o Sol como referencia. Isto permite contestar unha pregunta fundamental dende tempos antigos: é a velocidade angular dos planetas uniforme? Pensadores tan sobresaíntes coma Platón ou Aristóteles estableceran que si. Kepler tomou como referencia doce oposicións, de 1580 a 1604. Se a velocidade angular fose uniforme e contando que o ano marciano son 687 días:

$$T_M = 687 \text{ días} \Rightarrow \omega_M = \frac{360^\circ}{687 \text{ días}} = 0.524^\circ/\text{días}. \quad (1)$$

Cos datos observacionais, Kepler podía predicir onde debería de estar Marte na próxima oposición. Calculando a posición das próximas o erro acumulado era moi superior aos dous arcominutos mencionados antes. É

importante notar que esta rigorosidade en ter erros aceptables é algo meritorio de Kepler nunha época na que non se acostumaba. Isto permitiulle demostrar como o movemento angular dos planetas non é constante.

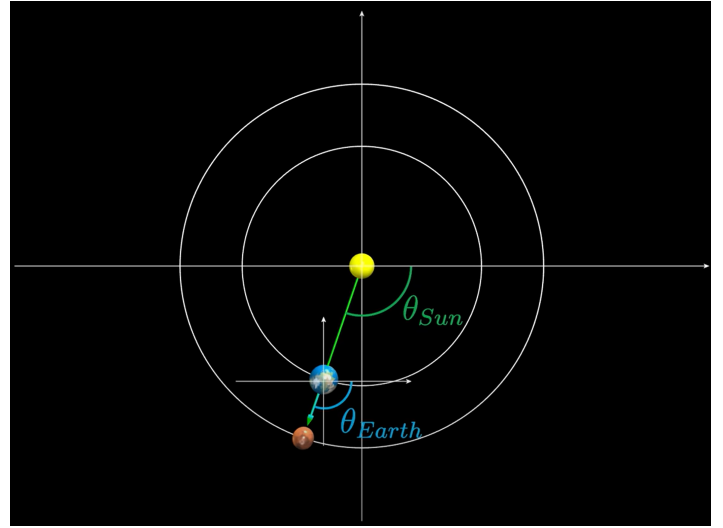


Figura 3: Oposición Marte e ángulos do Sol e Terra [1].

O seguinte paso é construír un modelo de órbita. Se a velocidade non é constante, a velocidade variará na órbita. Isto derivou en recuperar a idea do ecuante. Recuperalo provoca que, ao ter que conservar o movemento circular respecto do ecuante, Marte se mova máis rápido cando está máis afastado del (e, por tanto, está máis cerca do Sol) e máis lento cando está máis cerca (máis lonxe do Sol). Kepler incorporaría o coaidadosamente, construíndo o modelo do seguinte xeito. Primeiro, Tolomeo asume que a distancia do centro da órbita ao Sol (e_{Sol}) e ao ecuante ($e_{ecuante}$) son iguais, Kepler asumiraos como variables. Logo, debido a que a velocidade angular é constante, podemos tomar catro vectores do ecuante a Marte cuns ángulos hipotéticos (atópanse dividindo o período orbital entre os días que hai entre observacións), para comparalos cos catro vectores dos ángulos do zodíaco (vistos dende o Sol) que son os ángulos observacionais (tomando só catro posicións).

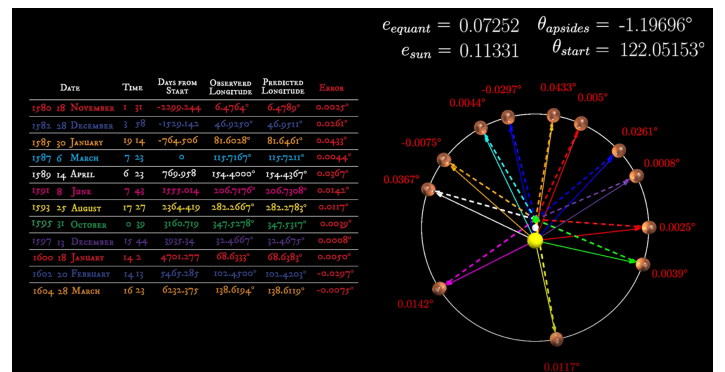


Figura 4: Variables e resultados da Hipótese Vicaria [1].



Por un axuste de computación a forza bruta podemos achar o círculo único (órbita superposta) onde intersecan os dous conxuntos de catro vectores. Este método tan tedioso que levou moito tempo resultou nun éxito ao poñer o resto de observacións, xa que deu un erro total de 2 arcominutos. O devandito modelo, chamado *Hipótese Vicaria* (*Vicaria* quere dicir *substitutiva*) pode semellar verdadeiro, pero Kepler quería comprobalo antes.

Kepler desenvolveu un método que, con só simple trigonometría, podía saber a distancia do Sol a Marte. Os planos orbitais da Terra e Marte non son iguais, senón que están inclinados cun ángulo $\alpha \approx 1.85^\circ$. Isto permite facer o seguinte triángulo entre o Sol, Marte e a Terra a partir dunha oposición onde a distancia vertical entre os planos orbitais sexa máxima. Engadindo unha segunda oposición no lado oposto, pódese facer un sistema de dobre triángulo co que se pode, coñecendo a distancia Sol-Terra (coñecida por Kepler e tendo un valor mínimo e máximo) e os ángulos do sistema, deducir a distancia do Sol a Marte e ao centro da órbita.

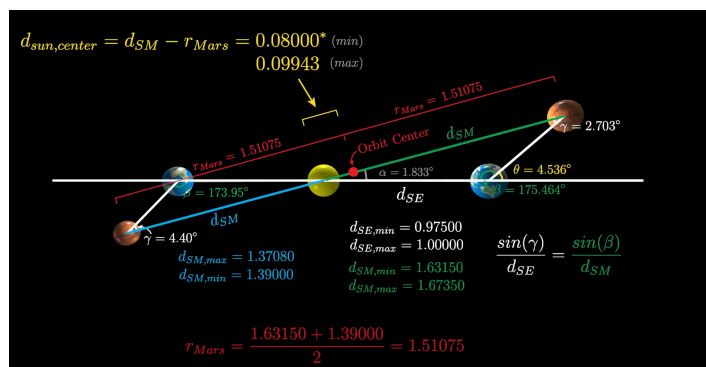


Figura 5: Problema trigonométrico xerado polas dúas oposicións [1].

Kepler descubriu que, comparando as distancias Marte-Sol preditas e utilizadas polo modelo, estas diverxían polo menos un 14% e até un 42% entre as calculadas coas medicións directas. Isto foi un gran problema, que fixo a Kepler dudar cal sería o erro, se talvez é o círculo perfecto que se supón como órbita ou o ecuante. Se se modifica a *Hipótese Vicaria* para poñer as distancias Marte-Sol calculadas, a distancia ao centro do ecuante e ao Sol é aproximadamente igual. O mesmo que o modelo de Tolomeo. A Kepler parecíalle que funcionaba, mais na súa *Hipótese Vicaria* modificada cando se calculaban as predicións, agora devolvían un erro de oito arcominutos.

Estes oito minutos son clave para revolucionar a astronomía. Non é un grande erro. O propio modelo de Tolomeo non baixaba dos dez arcominutos. Kepler non estaba convencido cos erros, xa que o das observacións era na súa como moito de dous arcominutos. En lugar de ignoralo, entendeu que necesitaba buscar novas causas e sistemas e repensar todo o que fixera até agora,

remeditar toda a astronomía. Que fan que se movan os planetas? Ninguén pretendía seriamente entender isto. Kepler imaxinou o Sol como un grande imán que facía unha forza que chamou «especie inmaterial do corpo solar». Esta forza sería inversa á distancia, da mesma maneira que a luz é máis débil canto máis dispersa está (repárese en que se tivese sabido a lei cadrática inversa da luz, podería ter sido capaz de deducir a lei da gravitación). Así, canto máis afastado da Terra, menor forza e menor velocidade. Este intento de explicación física intúe unha posible relación matemática.

Kepler sabía de como Arquímedes demostrara a relación entre a circunferencia e o diámetro dividindo o círculo entre triángulos cada vez máis pequenos. Un método que precedía ao uso de infinitesimais e que o mesmo Kepler pretendeu replicar. Se dividimos a órbita en triángulos de base d (a variación da posición do planeta) e a altura r (a posición do Sol ao planeta), a área de cada triángulo é $A = \frac{1}{2}bh = \frac{1}{2}dr$. A velocidade é inversamente proporcional á posición $v = \frac{k}{r} = \frac{d}{t}$. Entón, o tempo é directamente proporcional ao produto de r e d e inversamente proporcional a unha constante k tal que $t = \frac{rd}{k}$. Este método de triangulación é a segunda lei de Kepler, que postula que o planeta se move nun intervalo de tempo que varre áreas iguais. Kepler non sabía como determinar a posición exacta en cada momento porque a velocidade varía a cada instante, algo que co cálculo moderno sería sinxelo. Isto coñécese como o *problema de Kepler*, que motivaría o desenvolvemento do cálculo posterior. Tras crear este método, Kepler abandonaría o concepto de ecuante.

Se o aplicamos á *Hipótese Vicaria*, as predicións que nos devolven son dun erro ínfimo en certas posicións e erros enormes noutras. Isto motivou a Kepler a dar o golpe de graza á astronomía antiga: as órbitas circulares. Se modificaba a forma da órbita facendo que os lados do círculo se acercasen máis ao centro, os resultados melloraban. Kepler desenvolveu un método moi orixinal para saber a forma da órbita. Marte e a Terra teñen posicións diferentes porque se están a mover. Se puidésemos fixarnos nunha posición, poderíamos facilmente saber a posición do outro. Isto é precisamente o que conseguiu Kepler. Se tomamos unha posición de Marte, a Terra estará nunha posición determinada. Nun período marciano, Marte volverá á mesma posición, pero a Terra estará nunha distinta. Se recompilamos suficientes posicións da Terra, podemos saber a forma da Terra de maneira aproximada, xa que a sucesión de posicións revela a órbita.



Figura 6: Debuxo do propio Kepler onde mostra a Marte na mesma posición, e a posición da Terra despois de varios períodos de Marte [2].

A conclusión á que chegou Kepler foi que a forma da órbita debe ser algunha clase de forma oval. Mais, que tipo de óvalo? El pensaba que unha forma semellante á dun ovo. No entanto, hai multitude de óvalos, entre eles a elipse, que Kepler desestimou por crer que era demasiado simple e que, en tal caso, tería sido moi evidente para os gregos. Kepler desenvolveu un método de epiciclos (tanto tempo quitándoos para acabar usándoos resulta irónico) para simular a órbita que lle resultaba na forma dun ovo, pero que non servía para predicir as observacións. Comentáramos antes que daba mellores resultados se ambos os lados opostos do círculo se encollían cara ao interior, comparados á curvatura resultado da triangulación. A máxima distancia entre o círculo e esta curvatura é de 0,0049. Kepler desenvolveu paralelamente unha ecuación que lle daba o ángulo de Marte respecto ao vector posición entre o centro e o Sol que Kepler chamaría *ecuación óptica*. Por pura casualidade, tras analizar esta ecuación deuse de conta que en $5'30''$ o seu valor máximo, cando o ángulo do centro e do Sol é de 90° , se tomamos a secante de $5'30''$, o resultado daba 1,0049. Xusto a distancia máxima máis un! Se modifica o seu modelo e axusta o seu método de epiciclos para facer que as distancias Marte-Sol fosen proporcionais á secante da ecuación óptica, o seu modelo encaixaría coas observacións. Este complexo modelo xeométrico trazaba unha elipse perfecta. Aínda así, Kepler equivocouse inicialmente e, frustrado, desestimou este modelo. Emocionado por atopar novas ideas, pensou

sobre figuras xeométricas. Ao probar a elipse, deuse de conta que funcionaba e que xa a descubrira antes co devandito modelo. Tras catro largos anos, descubriuse a primeira lei de Kepler (nótese que a segunda foi anterior á primeira).

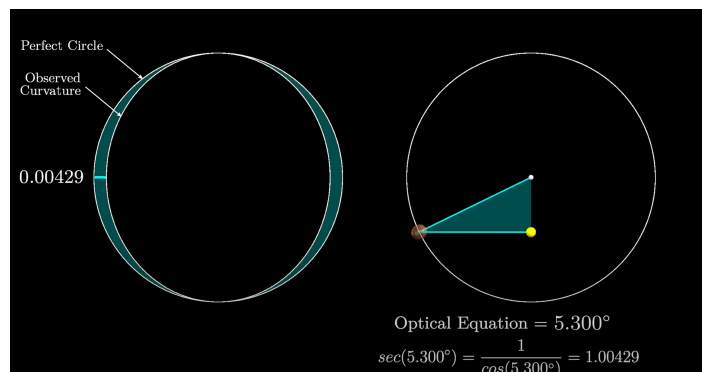


Figura 7: Esquema do problema formulado coa curvatura de círculo perfecto e observada, e a ecuación óptica e a secante [1].

Conclusión

A principal motivación deste artigo é a de amosar a relevancia de todo este desenvolvemento. Na época de Kepler, os métodos científicos eran practicamente inexistentes. El foi quen de deixar de man a tradición e preconcepcións para desenvolver unha cadea de razóns lóxicas que xustificaban as dúas leis de Kepler. É moi difícil esaxerar como de significativas foron estas leis e a futura lei de gravitación (motivada principalmente polos resultados de Kepler) para a historia e a ciencia. Comparemos a absoluta confusión e incompletitude do coñecemento humano de épocas anteriores coa claridade e simplicidade destas leis (sobre todo a da gravitación) que establecen de xeito sinxelo como se moven os astros, algo de aparente gran complexidade e misticismo. Esta é a razón do triunfo da ciencia a futuro, a esperanza de que todos os fenómenos do mundo podían ter leis tan belas e simples.

Referencias

- [1] **(En liña)** *How the bizarre path of mars reshaped astronomy*; URL: <https://www.youtube.com/watch?v=Phscjl0u6TI>
- [2] *Astronomia nova*; J. Kepler; (Green Lion Press, 2015)
- [3] **(En liña)** *Kepler's discovery*; URL: <https://www.keplersdiscovery.com/index.html>
- [4] *On the shoulders of giants: The great works of physics and astronomy*; (2003)
- [5] *The sleepwalkers: A history of man's changing vision of the universe*; A. Koestler; (Penguin Books Limited, United Kingdom, 2017)



Sobre a lóxica da física

Ana Peón Nieto

A ninguén sorprenderá se digo que este é un artigo sobre as matemáticas da física. Algúns pasarán a páxina con preguiza, outros esperarán ecuacións formais moi bonitas e globais, imposibles de manipular (isto vai polos meus pobres estudantes de Métodos II, comprendovos!). Pois non. En absoluto. Este artigo fala de lóxica matemática, unha das ramas máis teóricas, descoñecidas, e (desgraciadamente) ignoradas polos demais profesionais das matemáticas (salvo excepcións, son coma as bruxas, habelas hainas). É, por así dicilo, a teoría de cordas das mates.

O curioso do asunto é que hai moi boas cabezas pensando nas aplicacións desta disciplina á física. Non tanto como ferramenta formal, senón para resolver cuestións fundamentais. Un pouco como no caso da teoría de cordas, que xurdiu coa motivación de unificar a gravidade e a mecánica cuántica; a lóxica matemática, e máis precisamente a subdisciplina chamada teoría de modelos, inquírese sobre a base das teorías: cal é a linguaxe adecuada? Cales son os axiomas (léase postulados) que garanten o sustento da teoría? A moitos soará o teorema de incompletitude de Gödel, segundo o cal, en «matemáticas», entendida coma a ciencia na que os números enteiros son base, sempre haberá enunciados indecidi-bles (é dicir, cuxa veracidade ou falsidade non se poida demostrar).

Pero: que é a teoría de modelos? Que a fai adecuada para esta inmensa tarefa? Pois ben, dunha parte, a teoría de modelos ocúpase de calquera cousa expresable matematicamente. Por exemplo, os grupos abelianos, ou conmutativos, coma \mathbb{Z} . Para isto, escollemos unha linguaxe que inclúa a función $+$, os cuantificadores \forall , \exists , e un signo especial para o cero. Con isto podemos establecer os axiomas ou normas básicas:

$$\begin{aligned} \forall x, y & \quad x + y = y + x, \\ \forall y & \quad 0 + y = y + 0 = y, \\ \forall x \exists y & \quad x + y = y + x = 0, \\ \forall x, y, z & \quad (x + y) + z = x + (y + z). \end{aligned}$$

Dende o punto de vista da teoría de modelos, un grupo abeliano é calquera «universo» ou «estrutura» matemática que satisfaga estes axiomas. Dá igual que teña un elemento, cinco ou infinitos. Estas simples normas capturan o esencial. (Non abandonedes aínda, por favor!).

⁵O nome do primeiro barallouse para a Medalla Fields, o máis alto galardón en matemáticas (que, por certo, ostenta Witten como único físico na lista). Lamentablemente, na miña humilde opinión, Hrushovski non levou este premio. De llo ter dado, teríase visibilizado o seu enorme labor e achegado a lóxica ao matemático medio.

O máis interesante é que considerando estes axiomas, o lóxico ten tódolos posibles grupos na cabeza ao mesmo tempo. E o mesmo aplica a calquera teoría das matemáticas: para o lóxico non é cuestión deste ou dese espazo, senón de todos á vez. Isto, que pode parecer pouco práctico, dá lugar a aplicacións impresionantes en análise, por exemplo, ou xeometría. E ademais poderedes contestar aos profesores de Métodos cando vos critiquen por riscardes o diferencial dx . En efecto, na teoría dos corpos ordenados, coma os números reais, existe un universo no que o diferencial é un número coma outro calquera, máis grande ca 0, pero máis pequeno que tódolos reais positivos. Así que a riscar diferenciais sen complexo!

Pois ben, perdidos andaban os lóxicos nas súas disquisicións existenciais, cando Hrushovski e Zilber, dous lóxicos brillantes⁵, deron coas famosas estruturas de Zariski. Buscaban **A** xeometría. **A xeometría**. E deron con algo estraño aos ollos dos comúns, é dicir, uns modelos que capturaban á vez a xeometría do espazo macroscópico, no que mirar nunha orde ou noutra non afecta a observación (é dicir, é conmutativa), pero que eran non conmutativos en esencia. Coma o mundo cuántico. Disto hai moitos anos, a finais do século XX xa se aplicaban estes modelos para probar teoremas importantes, coma a conxectura de Mordell-Lang [1].

Pero Zilber, apaixonado da física, que perseguía una formulación lóxica (en tódolos sentidos) desta ciencia, viuño claro. E se podemos aproximar o mundo real, incluíndo o mundo macroscópico e cuántico, mediante estas estruturas? En colaboración con outros dous lóxicos, Solanki e Sustretov, estudaron o caso máis sinxelo: o oscilador harmónico unidimensional. Hoxe centrareime neste traballo, pero deixádeme engadir que Zilber segue no seu empeño de atopar **A** linguaxe (**A LINGUAXE**) da física dende a teoría de modelos. Nos últimos anos, catro artigos prometedores axiomatizan a mecánica cuántica (e a unifican coa cuántica estatística) mediante a lóxica do continuo [2][3][4][5]. Espero comprendelos nalgún momento para explicalos como hoxe farei co oscilador.

Comecemos polo principio: o oscilador harmónico en dimensión 1 (é dicir, un resorte cun extremo ligado a un punto, o marco, e outro que se move libremente). A

enerxía total do sistema é

$$E = \frac{m}{2}\dot{x}^2 + \frac{k}{2}x^2, \quad (1)$$

onde $V(x) = \frac{k}{2}x^2$ é a enerxía potencial, con k a constante elástica. Polo principio de conservación da enerxía, empregando algún truquiño de integración, obtense a ecuación

$$m\ddot{x} + kx = 0, \quad (2)$$

cuxa solución xeral é $x(t) = \cos(\omega t + \alpha)$, con $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$. Podemos resolver no plano considerando pares $(x(t), \dot{x}(t))$. Se chamamos $p(t) = m\dot{x}(t)$ (é dicir, o momento lineal), entón temos

$$\dot{x}(t) = \frac{p(t)}{m}, \quad \dot{p}(t) = \frac{k}{m}x(t). \quad (3)$$

Para cuantizar, imos poñer todo en notación hamiltoniana. Temos as coordenadas canónicas $p(t)$ e $q(t)$ (que neste caso son tan só o momento lineal $p(t) = m\dot{x}(t)$ e a posición $q(t) = x(t)$), nas que obtemos as ecuacións de Hamilton (que son as mesmas que antes, pero son válidas nun contexto máis amplo, para tódolos sistemas hamiltonianos)

$$\dot{p} = \{H, p\} = -\frac{\partial H}{\partial q}, \quad \dot{q} = \{H, q\} = \frac{\partial H}{\partial p} \quad (4)$$

onde $H(p, q) = \frac{p^2}{2m} + \frac{m\omega^2 q^2}{2}$ é o Hamiltoniano, neste caso, a enerxía total do sistema, e a diferenza de signos nas ecuacións débese a xeometría simpléctica subxacente. Os corchetes $\{ \cdot \}$ chámanse corchetes de Poisson, e teñen sentido para tódalas funcións $\{f(p, q), g(p, q)\}$; o que mide é a diferenza das variacións de f e g en certas direccións relacionadas co momento e posición.

Á hora de cuantizar, os observables, neste caso p e q , pasan a interpretarse como operadores actuando no espazo de Hilbert dos estados do sistema, neste caso, o espazo vectorial \mathbb{C} , adornado cunha estrutura hermítica. A avaliación de operadores interprétase como a medición. Se P, Q son os observables cuantizados, escribimos $[P, Q] = PQ - QP$. Eses corchetes son a cuantización dos corchetes de Poisson. Aplicar PQ a un estado do sistema corresponde a observar primeiro a posición e, inmediatamente despois, o momento. Sabemos que no mundo cuántico, a observación modifica o estado do sistema, máis explicitamente, $[P, Q] = -i\hbar$ onde \hbar é a constante de Planck. Temos o Hamiltoniano cuántico

$$H = \frac{P^2}{2m} + \frac{m\omega^2 Q^2}{2} \quad (5)$$

que pertence á «álgebra» de observables (unha forma curta de dicir que combinamos observacións mediante consecución e suma). Entón, as solucións $\psi(x)$ da ecuación diferencial

$$H\psi(x) = \hbar\omega \left(n + \frac{1}{2} \right) \psi(x) \quad (6)$$

para $n \in \mathbb{N}$ comprenden tódolos posibles estados enerxéticos do sistema. Así mesmo, podemos pasar dun estado $|n\rangle$ a un estado $|n+1\rangle$ e viceversa mediante os operadores de creación $a^\dagger = \sqrt{\frac{m\omega}{2k}}Q - \frac{i}{\sqrt{2\hbar\omega}}P$ e aniquilación $a = \sqrt{\frac{m\omega}{2k}}Q + \frac{i}{\sqrt{2\hbar\omega}}P$, respectivamente.

Tras este recordatorio, volvamos ao noso, aínda que de maneira un tanto camuflada. A idea dos tres lóxicos é lóxica: para cada $N \in \mathbb{N}$, consideran un espazo L_N consistente nunha recta \mathbb{A} (quizais co infinito $\mathbb{P}^1 = \mathbb{A} \cup \{\infty\}$, pensade nos reais co infinito, ou os complexos co infinito; en realidade, pensade en todos á vez, porque uns son os puntos reais da recta, e os outros, os puntos complexos) e, sobre cada punto $x \in \mathbb{A}$, o grupo de raíces N -ésimas da unidade (ou \mathbb{Z}_N se o preferides). Estes son os números z tal que $z^N = 1$. Por exemplo, se $N = 2$, $z = \pm 1$, que observamos que corresponden aos valores $e^{\frac{2k\pi i}{2}}$ para $k = 0, 1$. Para N xeral, obteremos $e^{\frac{2k\pi i}{N}}$ para $k = 0, \dots, N-1$. Este grupo \mathbb{Z}_N (é un grupo esencialmente porque se poden multiplicar elementos e seguimos dentro, o 1 pertence a \mathbb{Z}_N , e ademais tódolos elementos teñen inverso) representa os posibles estadios do sistema no punto x sobre o que vive, ata enerxía N . Para conseguir tódolos estadios enerxéticos haberá que considerar tódolos N 's xuntos⁶. Obsérvase que temos

$$\pi : L_N = \mathbb{P}^1 \times \mathbb{Z}_N \longrightarrow \mathbb{P}^1 \quad (7)$$

que a cada punto $\ell = (x, \gamma) \in L_N$ asígnalle o $x \in \mathbb{P}^1$ sobre o que «vive». Así, a fibra $\pi^{-1}(x)$ representaría os estados do sistema en x .

Os operadores de creación (resp. aniquilación) pódense modelizar considerando tripletes $(\ell, \ell', b) \in A^\dagger \subset L_N \times L_N \times \mathbb{A}$ con $\ell \in \pi^{-1}(x)$, $\ell' \in \pi^{-1}(x+1)$, $b^2 = x$ (de maneira que $(\gamma\ell', \gamma\ell, b_\gamma) \in A^\dagger$ para todo $\gamma \in \mathbb{Z}_N$ e algún $b_\gamma \in \mathbb{A}$) (resp. $(\gamma\ell', \gamma\ell, b_\gamma) \in A \subset L_N \times L_N \times \mathbb{A}$ con $\ell' \in \pi^{-1}(x+1)$, $\ell \in \pi^{-1}(x)$, $b_\gamma^2 = x$). Se o triplete $(\ell, \ell', b) \in A^\dagger$, interpretamos que pasamos do estado ℓ (que identificamos con algún $|M\rangle$) no punto x ao estado $\ell' \sim |M+1\rangle$. Coma en principio os estados represéntanse mediante puntos da recta, podemos identificar o estado x con $|M\rangle$, e $x+1$ con $|M+1\rangle$. O grupo vén a conto porque en principio, o oscilador podería encontrarse noutro estado enerxético no punto x , polo que $\gamma\ell$ representaría un sistema no que x é $|M + \frac{2\pi i}{N} \log \gamma\rangle$. A

⁶Isto non é problemático, pois coma veredes unha vez acabemos, as construcións son compatibles coa relación $N < N+1$, no sentido de que $L_N \subset L_{N+1}$, e as operacións de creación e aniquilación de L_{N+1} inducen as de L_N .



vantaxe desta linguaxe é que non necesitamos identificar M exactamente, só saber que o sistema está nalgún estado, en consonancia coa cuántica⁷.

Hai unha certa duplicidade na definición, xa que o feito de crear está na aparición de ℓ e ℓ' no mesmo triplete (sobre puntos diferentes), pero usamos o punto da base para levar a conta de cantos estados enerxéticos modificamos. Como basta saber que estados se modifican nun paso, e despois noutro, etc, basta considerar o estado inicial e o punto final. De feito, os autores dan outra construción posible (e equivalente nun sentido adecuado [6]).

Identificamos, dentro de $L_N \times \mathbb{A}$, os puntos $(\ell\gamma, \gamma^{-1}y)$ para todo $\gamma \in \mathbb{Z}$; é dicir, consideramos o conxunto $[(\ell, y)] = \{(\ell\gamma, \gamma^{-1}y) : \gamma \in \mathbb{Z}\}$ como un único punto. Entón, o conxunto $\mathcal{H}_x = \{[\ell, y] : \pi(\ell) = x\}$ é un espazo vectorial para o produto por escalares $t \cdot [\ell, y] = [\ell, ty]$ e suma

$$[\ell_1, y_1] + [\ell_2, y_2] \stackrel{\exists[\ell_1, y'_2]=[\ell_2, y_2]}{=} [\ell_1, y_1] + [\ell_1, y'_2] \quad (8)$$

$$= [\ell_1, y_1 + y_2], \quad (9)$$

sobre o que se poden definir os operadores

$$0a^\dagger[(e, y)] = [(e', yz)], \quad a[(e', y)] = [(e, yz)] \quad (10)$$

onde $(e, e', z) \in A^\dagger$, ou $(e', e, y) \in A$. Ben, a cuestión é que considerar A^\dagger ou a^\dagger , A ou a , non cambia a lóxica do asunto, pois as teorías de cada un destes espazos (é dicir, tódolos teoremas satisfeitos por cada un deles) son equivalentes nun sentido adecuado que permite obter unha da outra.

E agora me diredes: pero isto non é xeometría? Onde está a lóxica? Pois a lóxica está en que nada disto se pode enunciar formalmente no mundo da xeometría **clásica**. Pódese se utilizamos os reais (a clave é o uso dunha raíz cadrada na definición das relacións, cuxas dúas solucións reais, positiva ou negativa, son identificables coa creación ou aniquilación). Pode que isto non pareza revolucionario, pero espérase que os exemplos en teoría de modelos veñan da xeometría complexa, e este non o cumpre. O que si que é máis interesante é que L_N

vive sobre a recta, que **SI** que é complexa, no sentido de que podemos coller puntos reais ou complexos sen cambiarmos nada. Un recubrimento finito dunha recta que non é complexo (coma o L_N aquí presente) é **MOI** insólito. A súa existencia débese á subxacencia de xeometría non conmutativa, que se percibe no feito de que os operadores de creación e aniquilación non conmutan, do mesmo modo que a posición e o momento cuánticos non conmutan. De feito, se miramos a obxectos máis refinados, coma os automorfismos do recubrimento $L_N \rightarrow \mathbb{A}$, veremos que o comportamento é estraño, e codifica a relación $[P, Q] = -i\hbar$. Para construímos espazos desta índole, temos que movernos ao mundo das xeometrías de Zariski puras, fundamentalmente modelo-teóricas, non provenientes de ningún espazo clásico.

Recapitulando: a lóxica permítenos construír un espazo, que pode parecer xeométrico, pero non o é, onde vive o oscilador harmónico cuántico. Aínda que é un exemplo sinxelo, é tamén o primeiro exemplo físico que se consegue modelizar completamente con ferramentas lóxicas. Así mesmo, prové un dos primeiros exemplos dunha xeometría de Zariski non proveniente da xeometría clásica, o cal engade interese a estas teorías. Non sei a vós, pero a min éncheme de expectación...

Referencias

- [1] *The mordell–lang conjecture for function fields* p. **667–690**; Ehud Hrushovski; (1996)
- [2] *Dirac - von Neumann axioms in the setting of Continuous Model Theory*; Boris Zilber; (2025)
- [3] *Axioms of Quantum Mechanics in light of Continuous Model Theory*; Boris Zilber; (2025)
- [4] *On the logical structure of physics*; Boris Zilber; (2024)
- [5] *Physics over a finite field and Wick rotation*; Boris Zilber; (2023)
- [6] *The quantum harmonic oscillator as a Zariski geometry* p. **1149–1168**; Vinesh Solanki, Dmitry Sustretov, Boris Zilber; (2013)

⁷A raíz $b^2 = x$ ten que ver con como actúan os operadores cuánticos, é importante, e de feito é o *quid* desta construción tamén.

O crebacabezas da gravidade cuántica

Gabriel Rodríguez Moris

Discusión sobre un dos enigmas máis escorregadizos da física contemporánea.

Como nace o enigma?

Explicar o maior número de fenómenos da natureza do xeito máis sinxelo e conciso posible é un dos obxectivos máis ambiciosos da física. En particular, a finalidade última consistiría en atopar unha teoría que explique de maneira unificada as 4 interaccións fundamentais coñecidas ata o momento. Pese ós éxitos acadados a finais do século XIX e ó longo do XX, fáltanos unha peza crucial por encaixar neste *puzzle*, intimamente ligada ós propios conceptos de espazo e tempo e á significación da mecánica cuántica.

A primeira gran revolución no programa de unificación tivo lugar no século XIX, cando os fenómenos da electricidade e do magnetismo, que inicialmente parecían desconexos, acadaron unha explicación conxunta con base no que coñecemos como a interacción electromagnética. A incompatibilidade entre esta e os principios da mecánica newtoniana atopou resolución co nacemento da relatividade especial, e posteriormente, a natureza non relativista da gravidade newtoniana, desembocou no nacemento da relatividade xeral en 1915: a teoría clásica actual (por clásica referímonos a non cuántica) que explica a interacción gravitatoria a partir de deformacións do espazo e do tempo, producidos por materia e calquera tipo de enerxía en xeral. A xeometría do espazo-tempo 4-dimensional vén dada polo tensor métrico $g_{\mu\nu}$, que nos permite medir distancias espaciais, intervalos temporais e, en última instancia, diversos observables físicos. Este obxecto xeométrico determínase a partir da distribución de materia e enerxía a considerar, dada polo tensor de enerxía-momento $T_{\mu\nu}$, segundo as ecuacións de Einstein:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}, \quad (1)$$

sendo $R_{\mu\nu}$ e R o tensor de Ricci e o escalar de curvatura, respectivamente, que dependen da métrica e das súas dúas primeiras derivadas espazo-temporais dun xeito altamente non linear, e Λ , a constante cosmolóxica. No límite de campo feble e velocidades moi inferiores a c , a ecuación (1) redúcese á ecuación de Poisson para o potencial gravitatorio newtoniano usual Φ (principio de correspondencia).

Nos anos posteriores, leváronse a cabo numerosos intentos, nunca completamente exitosos, de unificar o electromagnetismo e a gravidade nun único marco teórico fundamental; entre eles, cabe mencionar a teoría

de Kaluza-Klein. Nesta, o potencial A_μ (ou equivalentemente os campos \mathbf{E} e \mathbf{B} , para as persoas menos familiarizadas coa formulación covariante do electromagnetismo), representante da interacción electromagnética, introdúcese ó engadir formalmente unha quinta dimensión na teoría da relatividade xeral, e xogando coa súa xeometría a partir do funcional de acción [1]. Porén, a loita por unificar clásicamente electromagnetismo e gravidade viuse eclipsada polo auxe da teoría cuántica e do nacemento de dúas novas interaccións fundamentais necesarias para explicar fenomenoloxía a escala subatómica: as interaccións nucleares débil e forte.

O progreso nos métodos de cuantización de lagrangianos clásicos, a comprensión das simetrías en teoría de campos, e a incorporación da relatividade especial á mecánica cuántica dando orixe á física de partículas elementais, culminou coa formulación da electrodinámica cuántica (QED) a mediados do século pasado. Nela, o potencial electromagnético convértese nun operador que representa o campo cuántico do fotón, que é a «excitación enerxética mínima» de campo electromagnético, e actúa sobre estados de partículas cargadas dun espazo de Hilbert (ou Fock),

$$A_\mu \rightarrow \hat{A}_\mu. \quad (2)$$

Na nosa notación, cantidades cun acento circunflexo denotan operadores cuánticos. QED permitiu explicar en sumo detalle múltiples fenómenos que o electromagnetismo clásico non era capaz de describir de xeito preciso, por exemplo no campo da física atómica, e deu lugar a algunhas das predicións máis precisas de toda a física. Existen varias maneiras de cuantizar o electromagnetismo clásico, sendo un dos métodos máis instrutivos o da integral de camiño de Feynman (para unha exposición pioneira e detallada véxase [2]). Para as persoas curiosas, cabe mencionar que, aínda a nivel clásico, as ecuacións de Maxwell poden derivarse en última instancia impondo que o lagrangiano que describe as partículas cargadas de spin 1/2 (como electróns), e que dá orixe á ecuación de Dirac, sexa invariante baixo o que se coñece como o grupo de simetrías $U(1)$, relacionado coa invariancia das funcións de onda en mecánica cuántica baixo cambios de fase locais. A correspondente cantidade conservada que resulta do teorema de Noether é nada menos que a carga eléctrica total.

Posteriormente, co desenvolvemento das teorías de



Yang-Mills, observouse que as interaccións nucleares tamén atopan unha descrición axeitada, aínda que máis complexa que a do electromagnetismo debido a non-linearidades nas ecuacións, en termos de teorías cuánticas de campos sobre as que se esixen certas simetrías internas básicas, particularmente $SU(2)$ para a interacción débil e $SU(3)$ para a forte. Estas simetrías dan orixe, matematicamente, ós campos cuánticos que median as interaccións nucleares, a saber, os chamados bosóns W^+ , W^- e Z^0 no caso da interacción débil, e g no caso da forte (son os análogos do fotón no caso da electrodinámica).

Tras décadas de desenvolvemento no campo da física de partículas, marcadas por varios fitos como o desenvolvemento da cromodinámica cuántica (QCD) para explicar a interacción forte ou a proposición do campo de Higgs, detectado finalmente no CERN no 2012, construíuse a finais do século pasado un formalismo no marco da teoría cuántica de campos que explica, a partir dunha única densidade lagranxiana \mathcal{L}_{SM} , as interaccións entre a materia e as forzas nucleares e a electromagnética a nivel cuántico. Este formalismo é o que coñecemos como modelo estándar (SM) da física de partículas:

$$\mathcal{L}_{SM} \equiv \begin{array}{l} \text{Descrición cuántica do electromagnetismo} \\ \text{e das interaccións nucleares.} \end{array}$$

Por si só, e a pesar de tódolos éxitos que acadou, o SM conta aínda con varios problemas teóricos e experimentais por resolver, o que deu lugar á busca de *physics beyond the standard model* nas últimas décadas (véxase por exemplo [3]). Entre eles, cabe mencionar o problema da masa dos neutrinos, cruciais nas interaccións débiles: o SM predí que estes teñen masa nula, pero experimentalmente atópase o contrario. A solución inmediata, que é engadir termos de masa para os mesmos en \mathcal{L}_{SM} , implicaría outras inconsistencias, polo que a descrición dada polo SM é, dalgunha forma, incompleta.

Tanto o electromagnetismo como as forzas nucleares aceptaron unha formulación nun mesmo marco teórico con base na mecánica cuántica e na relatividade especial, pero que ocorre coa gravidade? A idea é que a teoría descrita por \mathcal{L}_{SM} goza, á hora de cuantizar os campos, dunha propiedade coñecida como renormalización, que permite eliminar unha serie de infinitos que aparecen ó facer cálculos en teoría de perturbacións e carecen de sentido físico. Por outro lado, a densidade lagranxiana de Einstein-Hilbert \mathcal{L}_{EH} , que da lugar ás ecuacións (1), non posúe esta característica, de xeito que, co noso coñecemento actual, unha teoría cuántica da relatividade xeral perdería o seu poder predictivo. De calquera xeito, as outras 3 interaccións procuraron da cuantización debido a inconsistencias non resoltas por tratamentos clásicos pero, é necesario, fenomenologicamente, cuantizar o campo gravitatorio?

sicos pero, é necesario, fenomenologicamente, cuantizar o campo gravitatorio?

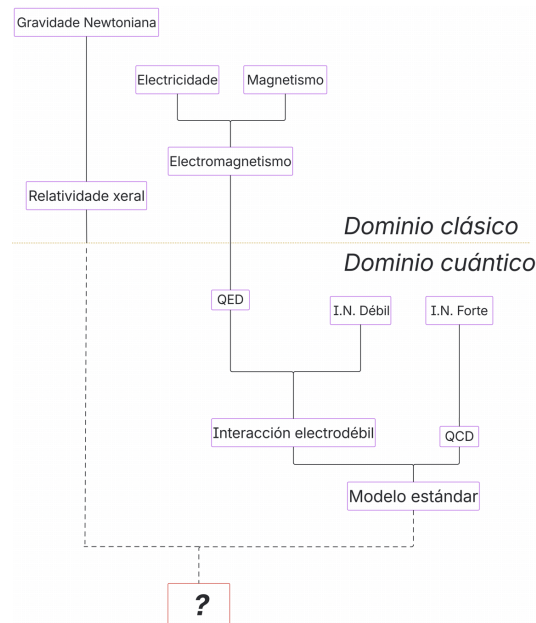


Figura 1: Esquema do programa de unificación das interaccións fundamentais da física ata a actualidade.

Se ben non existe evidencia experimental directa de que a gravidade debe cuantizarse (e esta é quizais unha das maiores causas polas que aínda non se atopou unha teoría cuántica da gravidade satisfactoria), si existen varios argumentos ó seu favor. Un dos máis coñecidos é o que segue: se, a nivel fundamental, os campos que representan diferentes tipos de materia, tanto fermións (e.g. electróns) como bosóns (e.g. fotóns), adoptan unha descrición cuántica, entón o tensor de enerxía-momento que aparece no membro dereito das ecuacións de Einstein (1) convértese nun operador cuántico [4]. Por exemplo, nun sistema no que o campo electromagnético actúa como fonte da curvatura do espazo-tempo e unha descrición cuántica do campo é necesaria, tense

$$T_{\mu\nu}^{EM}(A_\alpha) \rightarrow \hat{T}_{\mu\nu}^{EM}(\hat{A}_\alpha), \quad (3)$$

onde $T_{\mu\nu}^{EM}$ é o tensor de enerxía-momento correspondente a un campo electromagnético representado por A_μ , ben coñecido en electrodinámica. Pero, entón, o membro esquerdo da ecuación (1) deixa de ter sentido se non se converte tamén nun operador cuántico; é dicir, a nivel fundamental, parece que debe terse $g_{\mu\nu} \rightarrow \hat{g}_{\mu\nu}$. Non obstante, como xa mencionamos previamente, ningún dos intentos realizados para obter unha teoría de gravidade cuántica resultou ser satisfactorio. Por iso, diferentes ideas sobre a cuestión da natureza cuántica da gravidade foron propostas ó longo da segunda metade do século XX e seguen a propoñerse na actualidade. A continuación, expoñemos certas características peculiares da gravidade,

seguidas dalgúns dos problemas que xorden ó intentar cuantizala.

A gravidade e os intentos de cuantización

En primeiro lugar, é importante mencionar algunhas diferenzas esenciais entre o campo gravitatorio e as outras interaccións fundamentais. Nestas últimas, os campos cuantizados viven nun espazo-tempo preestablecido, dado pola métrica de Minkowski da relatividade especial $g_{\mu\nu}|_{\text{rel. esp.}} = \eta_{\mu\nu}$. Esta métrica representa un espazo-tempo fixo sen curvatura, é dicir, a ausencia de gravidade. Non obstante, en relatividade xeral, o campo a cuantizar é a propia métrica, é dicir, o obxecto que nos permite medir distancias, tempos, e que determina a propia estrutura causal do espazo-tempo! Asemade, as simetrías que interveñen en \mathcal{L}_{SM} , cruciais á hora de cuantizar, son chamadas simetrías internas, pois están relacionadas cos graos de liberdade internos das partículas (e.g. carga eléctrica ou spin), e non con transformacións xerais sobre o espazo-tempo⁹ que, como dixemos, está fixo en relatividade especial. Non obstante, a simetría fundamental en relatividade xeral correspóndese coa covariancia das ecuacións con respecto a calquera tipo de cambio de coordenadas «espazo-temporais» elixidas para describir procesos: tódalas ecuacións en relatividade xeral deben adoptar a mesma forma independentemente das coordenadas empregadas.

Representando o conxunto continuo de puntos espazo-temporais por \mathcal{M} , dise, en linguaxe algo máis técnica, que as ecuacións da relatividade xeral deben permanecer invariantes baixo a acción de elementos do grupo de difeomorfismos do espazo-tempo \mathcal{M} . Este grupo denótase por $\text{Diff}(\mathcal{M})$, e xoga un papel análogo a $U(1)$, $SU(2)$ e $SU(3)$ nas outras interaccións, que operan nos espazos internos como vimos de comentar. Interesante é tamén que observamos, por exemplo, que as partículas de carga nula non «senten» a interacción electromagnética (e similar para as interaccións nucleares coas propiedades físicas «internas» correspondentes). Por outra banda, tal e como indica a ecuación (1), toda a materia/enerxía interacciona a nivel gravitatorio sen excepción. Porén, aínda que é posible realizar analoxías matemáticas formais no ámbito da xeometría diferencial entre a relatividade xeral e o modelo estándar, parece existir unha diferenza conceptual máis profunda entre a gravidade e as outras interaccións. Isto vese reflectido cando a métrica se intenta cuantizar de formas análogas ós outros campos.

Unha recopilación de *approaches* históricos por cuantizar a relatividade xeral pode atoparse no capítulo 14

de [4]. Pese a seren conceptualmente diferentes, tódolos formalismos acaban por chegar a un punto morto. Un dos máis populares escribe a métrica segundo

$$g_{\mu\nu}(x) = \eta_{\mu\nu} + \gamma_{\mu\nu}(x), \quad (4)$$

onde se considera que $\gamma_{\mu\nu}$ é un campo que vive no espazo-tempo fixo de Minkowski usual dado por $\eta_{\mu\nu}$ e contén a información gravitatoria do sistema a considerar. Aquí, x denota o conxunto de coordenadas espazo-temporais empregadas. O campo a cuantizar é, neste formalismo, $\gamma_{\mu\nu}$. Desafortunadamente, ó por coherencia co resto do texto tentar facer cálculos perturbativos típicos na teoría cuántica de campos para realizar predicións físicas, obtéñense diverxencias «non salvables» por todas partes, consecuencia da non-renormalizabilidade mencionada na sección anterior.

Outro método amplamente considerado e máis adoptado para realizar cálculos non perturbativos é o da integral de camiño, particularmente ilustrativa á hora de «entender» como funciona a mecánica cuántica da partícula puntual non-relativista, e que gozou dun amplo éxito á hora de cuantizar as interaccións descritas polo modelo estándar [2]. Neste formalismo, cada amplitude de probabilidade cuántica relevante avalíase a partir dunha integral funcional dos campos a considerar, é dicir, unha integral na que as variables de integración son formas funcionais en lugar de coordenadas usuais; as medidas de integración funcionais denótanse tipicamente cunha \mathcal{D} . Os integrandos están ponderados pola exponencial da acción S da teoría a cuantizar, $\exp(i/\hbar S)$. No límite clásico, no que $\hbar \rightarrow 0$, as traxectorias clásicas, obtidas segundo o principio de mínima acción, son as dominantes. Consideremos como exemplo un proceso descrito por QED, no que os estados cuánticos inicial e final se denotan respectivamente segundo $|i\rangle$ e $|f\rangle$. Esquemáticamente, a amplitude cuántica entre os mesmos escríbese

$$\langle f|i\rangle_{\text{EM}} \sim \int \frac{\mathcal{D}A_\mu}{U(1)} \prod_i \mathcal{D}\phi_i e^{i/\hbar S_{\text{EM}}[A_\mu, \{\phi_j\}]} \quad (5)$$

Aquí, o conxunto $\{\phi_i\}$ representa os campos que interaccionan electromagneticamente (e.g. o campo do electrón). A expresión $\mathcal{D}A_\mu/U(1)$ emprégase de maneira formal para indicar que se debe integrar só sobre as funcións A_μ que representan configuracións físicas diferentes, é dicir, sobre aquelas que non están relacionadas polas transformacións *gauge* ben coñecidas en electromagnetismo para o potencial, pertencentes ó grupo $U(1)$. Similarmente, nunha teoría métrica da gravidade cuántica, escribiríase (neste caso, os campos ϕ_i poden

⁹Olo, \mathcal{L}_{SM} si é invariante baixo as transformacións de Lorentz da relatividade especial, que relacionan sistemas de referencia inerciais e son tan só un caso particular de transformacións xerais de coordenadas.



representar calquera tipo de materia)

$$\langle f|i \rangle_{\text{grav.}} \sim \int \frac{\mathcal{D}g_{\mu\nu}}{\text{Diff}(\mathcal{M})} \prod_i \mathcal{D}\phi_i e^{\frac{i}{\hbar} S_{\text{grav.}}[g_{\mu\nu}, \{\phi_j\}]} \quad (6)$$

Non obstante, varios problemas xorden ao adoptar este enfoque. En primeiro lugar, a arbitrariedade no uso de coordenadas en relatividade xeral dificulta a definición fisicamente relevante da «amplitude cuántica de transición dunha métrica inicial a outra final»: o tempo t deixa de ser unha etiqueta externa empregada para describir a evolución dun sistema, como ocorre no caso das outras interaccións, e convértese nunha cantidade dinámica ou moldeable. De feito, a propia definición de «intervalo temporal» depende da métrica fixa que se estea a considerar, pero aquí non temos unha métrica fixa! Así e todo, certos avances e hipóteses no marco da integral de camiño aplicada a solucións cosmolóxicas da relatividade xeral foron propostos empregando o formalismo hamiltoniano da mesma (véxase, por exemplo, [5]). Outro problema notorio resulta do feito de que a medida de integración $\mathcal{D}g_{\mu\nu}$ nin sequera está ben definida matematicamente. En realidade, a ausencia dunha definición rigorosa de medidas funcionais é un problema máis xeral en teoría cuántica de campos, o que podería indicar que outra descrición máis fundamental das interaccións, talvez radicalmente diferente, é necesaria.

Comentarios finais

É un consenso amplamente aceptado que tanto a relatividade xeral, que «explica ben o mundo macroscópico», coma o modelo estándar da física de partículas, que «explica ben o mundo microscópico», son, independentemente, teorías efectivas nos seus rangos de validez (como foi nos anos 30 do século pasado a teoría de Fermi da interacción débil), e que outras descricións máis fundamentais están aínda por ser descubertas. Dende a última metade do século pasado e á vista do fracaso de cuantizar a relatividade xeral por medio dos métodos tradicionais da teoría cuántica de campos, propuxéronse múltiples formalismos novos para resolver o problema da gravidade cuántica. Algúns deles desembocaron en hipóteses ben coñecidas e que seguen a estudarse hoxe en día, como son a teoría de cordas ou a gravidade cuántica de bucles. No entanto, na actualidade seguimos sen dispoñer dunha teoría satisfactoria que dea conta dos problemas fundamentais nas anteriores seccións.

En realidade, nin sequera está garantido que a gravidade sexa fundamentalmente cuántica, pese ás pistas teóricas que indican que si o é, como a que mencionamos na primeira sección. Unha idea alternativa interesante é que a gravidade é unha propiedade macroscópica emerxente na natureza, que xorde a partir de graos de

liberdade microscópicas aínda non coñecidos, do mesmo xeito que hoxe sabemos que, en termodinámica e mecánica estatística, a temperatura proporciona unha imaxe macroscópica efectiva dos graos de liberdade correspondentes a partículas microscópicas que interaccionan. Esta idea podería enlazar coa sorprendente analogía formal entre as leis da termodinámica e as leis da mecánica de buratos negros (véxase e.g. [6]).

Un problema (crucial, na opinión do autor) é a dificultade de elaborar experimentos que permitan detectar efectos cuánticos no nivel no que a gravidade xoga un papel importante. Como é ben sabido, a interacción gravitatoria é notoriamente máis feble que as outras tres, e a escala de enerxías que se debería acadar en aceleradores de partículas para comezar a observar devanditos efectos, algo inferior á chamada escala de Planck dada aproximadamente por $E_P \simeq \sqrt{\hbar c^5/G} \sim 10^{19}$ GeV, non alcanzamos a comprendela na actualidade por varias ordes de magnitude. Así e todo, existen tamén outros ámbitos nos que se están a propoñer ideas que nos poden achegar á determinación da natureza cuántica ou clásica da gravidade, como por exemplo experimentos relacionados coa decoherencia cuántica, que trata de explicar a transición entre os dominios cuántico e clásico dos sistemas físicos [7]. En calquera caso, todo parece indicar que a natureza está a xogar ás agachadas conosco, e que unha reformulación dos conceptos físicos máis fundamentais é, dalgún xeito, necesaria. Ó fin e ó cabo, como nos demostrou a comunidade científica da primeira metade do século XX, as transformacións máis revolucionarias na nosa forma de comprender a natureza xorden de escapar de ideas preestablecidas.

Referencias

- [1] *Kaluza-klein theory in perspective*; M. J. Duff; (1994)
- [2] *Quantum mechanics and path integrals*; Richard P. Feynman, Albert R. Hibbs; (McGraw-Hill, New York, NY, 1965)
- [3] *Lectures on physics beyond the Standard Model* p. **985–1017**; Hyun Min Lee; (Springer Science and Business Media LLC, maio de 2021)
- [4] *General relativity*; Robert M. Wald; (The University of Chicago Press, 1984)
- [5] *Wave function of the Universe* p. **2960–2975**; James B. Hartle, Stephen W. Hawking; (American Physical Society, decembro de 1983)
- [6] *Black hole thermodynamics* p. **1430023**; Steve Carlip; (outubro de 2014)
- [7] *Testing classicality of gravity by gravitation decoherence* p. **065026**; Vladislav P. Stefanov, Dmitri S. Mogilevtsev, Ivan Y. Rybak, e outros/as; (American Physical Society, marzo de 2025)

Grandes colaboracións para buscar o máis pequeno

Xabier Cid Vidal

A sociedade das Reunións Continuas

Luns, 9 da mañá. A semana comeza coma sempre, mirando a lista de reunións que vou ter. Non deixo de sorprendeme pola cantidade delas ás que acudín nos anos que levo traballando na física de partículas experimental. Posiblemente esteamos a falar dunha media dunha reunión por día, e de máis dunha hora de duración cada unha! E estou seguro de que o meu caso non é dos máis esaxerados.

Recordo cando se chanceaba sobre o nome do meu actual experimento, CMS. Díciase que xa non facía referencia ao seu famoso solenoide (*Compact Muon Solenoid*), senón a que eramos unha *Continuous Meeting Society* (Sociedade de Reunións Continuas). E, non obstante, non hai outro xeito: non podemos facer física de partículas experimental sen reunirmos, é dicir, sen colaborar.

O salto a CMS e a nova era no IGFAE

Despois de ser membro da colaboración LHCb desde hai máis de 15 anos, recentemente dei o salto a CMS. Ambos son grandes experimentos que rexistran o resultado das colisións do LHC, o Gran Colisor de Hadróns. Situado no CERN (Xenebra, Suíza), o LHC é o maior, máis potente e máis enerxético colisor de partículas da historia. A miña chegada a CMS supón un fito emocionante, xa que se trata dun novo experimento no IGFAE. Isto abre un abanico inmenso de novas oportunidades científicas para a Facultade de Física da USC, permitindonos participar nun detector de propósito xeral que cobre un programa físico brutal. A diferenza doutros experimentos máis específicos, CMS foi un dos dous deseños que nos levou ao descubrimento do bosón de Higgs, e o seu enorme solenoide superconductor permítelle curvar con precisión trazas de partículas para cazar desde as escorregadizas partículas supersimétricas ata as desintegracións máis exóticas asociadas á materia escura. Ter acceso á inxente cantidade de datos deste xigante multiplicará as liñas de análise e o impacto das investigacións que levaremos a cabo na nosa universidade.

As colaboracións máis grandes do LHC, ATLAS e CMS, responsables do descubrimento do bosón de Higgs, contan con máis de 6000 membros cada unha na actualidade. Como referencia histórica, as colaboracións UA1 e UA2 do CERN, que descubriron os bosóns W e Z

nos anos 80 do século pasado, contaban cada unha con menos de 150 colaboradores. Canto máis fundamental e pequeno é o que queremos buscar, máis persoal científico fai falta! E uso «persoal científico» en lugar de «físicos e físicas» intencionadamente, pois o papel doutros campos, como o da enxeñaría, é crucial en física de partículas. Desde a enxeñaría informática, que precisamos para manexar a inmensa cantidade de datos coa que debemos tratar (o LHC, cando funciona, xera máis datos que Facebook ou Instagram), ata profesionais en enxeñaría de por manter coherencia co resto do texto estruturas que deseñan as cavernas nas que, a 100 m baixo terra, temos que instalar os nosos experimentos.

A ilusión do traballo individual

Os medios de comunicación tenden a vendernos a idea da ciencia como o resultado dun esforzo individual. É verdade que moitos dos grandes avances científicos ao longo da historia viñeron da man de xenios increíbles, e tamén o é que sen o talento individual a ciencia e a tecnoloxía non poden progresar. Pero hoxe en día é difícil imaxinar unha disciplina na área científico-tecnolóxica na cal non sexa necesario o traballo en equipo. Evidentemente, o nivel de colaboración non é igual en todas as áreas, pero estou bastante seguro de que é necesario na actualidade un certo grao en todas elas.



Figura 1: Council Chamber do CERN. (Foto: CERN)

En relación a esta cuestión, quero mencionar a famosa serie de televisión «The Big Bang Theory». É certo que contribuíu a popularizar o noso traballo, e, incluso, hai quen asegura que houbo un boom no núme-



ro de matriculados universitarios en física grazas a ela. Non obstante, cando a vía, non podía evitar sentir que o meu traballo na física de partículas non estaba ben representado. Entendo que os creadores han de tomar licenzas artísticas, pero... apenas hai colaboracións! E de habelas, só ocorren entre os protagonistas, malia que un dos personaxes principais é experimental. Por non mencionar que o CERN só aparece referenciado de forma moi esporádica. Todos estaremos de acordo en que calquera persoa que investigue en física de partículas na actualidade usa a palabra CERN ou LHC varias veces á semana polo menos.

Neste sentido, o IGFAE ten unha longa e exitosa historia dentro do CERN demostrando o valor das colaboracións. Un bo exemplo é o meu antigo experimento, LHCb, unha colaboración de tamaño medio (uns 1800 membros) onde o instituto é un dos grupos máis grandes.

A «República» dunha colaboración: Como nos organizamos?

A estrutura destas colaboracións é complexa. En xeral, divídense en grupos relacionados cos temas de física nos que se traballa e outros máis técnicos, relacionados con aspectos como a reconstrución, identificación de partículas ou sistema de disparo. Ademais, existen grupos relacionados cos diferentes subdetectores cos que conta o experimento. Cada grupo conta habitualmente con dúas persoas coordinadoras para poder abarcar todo o traballo. Para entender mellor como funciona, poderíamos establecer un paralelismo cunha república.



Figura 2: Foto grupal da colaboración CMS. (Foto: CERN)

Poder Executivo: A maioría das colaboracións están lideradas por unha Portavocía (*Spokesperson*), similar á presidencia, que exerce como cara pública do experimento, e ten a misión de establecer as liñas fundamentais da colaboración. Hai ademais vice-portavocías, que exercen de complemento. Existe tamén o posto clave de

Coordinador ou Coordinadora da Física (*Physics Coordinator*), a medio camiño entre a Portavocía e os grupos de física. Esta persoa coordina os grupos e actúa como cara visible en moitos congresos. Todos eles, xunto coas persoas coordinadoras dos grupos (que serían como ministros ou ministras), representan o poder executivo. Por exemplo, temos a sorte de contar na USC e IGFAE con María Vieites, investigadora Ramón y Cajal e actual vice-coordinadora da física de LHCb.

Poder Legislativo: Está formado polos institutos de investigación na denominada Xunta da Colaboración (*Collaboration Board*), que debe ratificar todas e cada unha das decisións. Esta Xunta reúne varias veces ao ano, e cada instituto ten un voto nela. Para rematar o paralelismo, os experimentos teñen unha Constitución que establece as normas e é ratificada pola Xunta. Ademais, a Xunta encárgase de decidir que novos institutos poden formar parte da colaboración.

Eleccións e votacións

Tal e como establecen as constitucións dos experimentos, as posicións directivas escóllense mediante procesos moi estritos. No caso concreto de CMS, as regras teñen as súas particularidades. Así, para a Portavocía (*Spokesperson*), utilízase o voto directo e individual de todos os membros da colaboración con dereito a autoría. É un exercicio puro de democracia directa onde científicos e científicas deciden o seu líder. A Coordinación de Física, pola contra, non se somete a unha votación xeral aberta. Ao ser un cargo clave para a xestión técnica, é nomeado directamente pola Portavocía para garantir un equipo cohesionado. Para moitas posicións executivas, envíanse candidaturas, que son moi tidas en conta para tomar a decisión final.

En todo caso, a última palabra sobre calquera cargo tena sempre a Xunta da Colaboración. Calquera destes procesos democráticos ou de selección implica a necesidade de movementos políticos. Existen varios factores a ter en conta: nacionalidade, xénero, institución, idade... Consegir un cargo executivo nunha colaboración é un aspecto importante para o currículo científico, polo que normalmente hai máis dunha candidatura para cada posto. Copiando do inglés, falamos da necesidade de ter «sombreiro»; loxicamente, canto máis grande o sombrero, máis grande a responsabilidade.

A loxística global

Volvendo ás reunións do principio: son abundantes e necesarias, e tamén representativas do funcionamento dunha colaboración. Normalmente teñen unha certa periodicidade (sobre todo semanal ou bisemanal) e com-



binan unha sala física no CERN cunha virtual. A sala virtual faise en plataformas en liña como Zoom.

Cando un debe reunirse con colaboradores de todo o mundo, atopar unha hora axeitada pode ser todo un reto! De feito, a única hora válida cando nos xuntamos con xente de América e de Asia é a sobremesa europea, arredor das 2 da tarde. Implica un madrugón para os americanos e traballar ata tarde para os asiáticos, pero é a única solución. As reunións desenvólvense utilizando ferramentas como PowerPoint ou LaTeX. E o que máis hai nas reunións é diálogo e discusión, moita discusión! Toda esta estrutura é intrincada e complexa, pero é fundamental para que podamos facer ciencia. Non poderíamos facela sen as colaboracións, pero non podemos preterder coordinar a miles de científicos e científicas sen un mínimo de organización.

Gústame pensar nas nosas colaboracións como unha

gran familia, e realmente o noso grao de identificación dentro dela é elevado. Cando estamos no CERN, xuntámonos cos membros da nosa colaboración de forma case inconsciente, en moitos casos antepoñendo este criterio á nacionalidade. Nas colaboracións traballan conxuntamente persoas de países que pode que sexan rivais, e incluso inimigos no terreo político, o cal sería inimaxinable fóra do ámbito científico. Do mesmo xeito que cando necesitamos atopar algo pequeno na casa, como as chaves, toda a familia se une como un equipo para logralo, as colaboracións de física de partículas fan o mesmo para buscar novos fenómenos nas escalas máis pequenas. Neste caso, non é unha elección, é unha obriga.

En tempos tan convulsos nos que institucións, gobernos e organismos deberían buscar o acordo ante os grandes retos, por riba das diferenzas, as colaboracións científicas deberían servirnos de exemplo.



Música, frases e máis

Praceres descoñecidos: *Unknown Pleasures* de Joy Division

Carlos Carballeira

Aínda que este número de *Momentum* chegará días despois ás vosas mans, estou escribindo estas liñas en vésperas do día máis triste do ano: o *Blue Monday*. Así quedou bautizado haberá uns vinte anos o terceiro luns do mes de xaneiro, logo de que un profesor dun centro asociado á Universidade de Cardiff, chamado Cliff Arnall, calculase (desenvolveu unha fórmula para tal fin...) que a combinación do rigor climático do inverno, a costa de xaneiro, e a depresión posnatal, facían desa data unha xornada especialmente deprimente.



Portada orixinal de *Unknown Pleasures*, álbum de debut de *Joy Division* (1979). A imaxe, que mostra unha secuencia de pulsos de radiofrecuencia emitidos polo primeiro púlsar descuberto (o PSR B1919+21), é unha das máis icónicas da historia da música.

Antes da ocorrencia de Arnall, *Blue Monday* foi o título da canción coa que a banda de Manchester *New Order* revolucionou a música electrónica e de baile no ano 1983. O uso pioneiro que fixo *New Order* dos sintetizadores e da programación rítmica na súa discografía en xeral e nese tema en particular, foi un fito clave na transición entre o *post-punk* e xéneros como o *techno*, o *house* e o *synth-pop*. A listaxe de artistas que recoñeceron explicitamente a súa influencia inclúe, entre outros moitos, a *Moby*, *The Chemical Brothers* ou *The Killers*. De feito, estes últimos adoptaron o seu nome dunha banda ficticia que aparece no videoclip do tema *Crystal* de *New Order* (2001). Moi preto de nós, o grupo *indie* de Boiro *Triángulo de Amor Bizarro* leva tamén o nome

doutro dos grandes éxitos de *New Order*.

New Order emerxeu das cinzas doutra banda que, aínda que efémera, foi tan ou máis influente na música posterior: *Joy Division*. O seu álbum de debut, *Unknown Pleasures* (1979), definiu unha nova estética musical que transitaba dende a exuberancia e os excesos do punk ata un estilo moito máis contido, con bases rítmicas melódicas, letras introspectivas e unha produción moi traballada que foi definido como *post-punk*. Pero ademais, ese álbum tamén ten conexión coa (astro)física non por unha canción, se non pola súa portada: Stephen Morris, batería da banda, atopou unha imaxe hipnótica na *Cambridge Encyclopedia of Astronomy* e amosoulla a Peter Saville, deseñador da discográfica *Factory Records* (recoméndovos a película *24 hour party people* sobre a historia desa compañía). Invertendo as cores do diagrama orixinal, Saville creou unha imaxe minimalista, sen título nin nome da banda, de liñas brancas sobre fondo negro que xeraba misterio arredor do disco. O misterio permaneceu durante décadas, e non foi ata 2011 cando se descubriu que tal imaxe fora orixinalmente publicada en *Scientific American* no ano 1971 polo astrónomo Harold D. Craft, quen a creou como parte da súa tese de doutoramento na que analizaba os pulsos de radiofrecuencia do primeiro púlsar detectado na historia (o PSR B1919+21). Os púlsares xiran sobre si mesmos a gran velocidade emitindo ondas de radio, como un faro no espazo, e cando a Terra se interpón na súa traxectoria detéctase un pulso nese rango do espectro. A imaxe creada por Craft era a representación de varios pulsos consecutivos amoreados en vertical.

A historia de *Joy Division* foi curta coma un pulso, xa que a prematura morte de Ian Curtis (cantante e letrista) desencadeou, despois do disco póstumo *Closer*, a súa desaparición e reinvención en forma de *New Order*. Con todo, *Unknown Pleasures* tivo unha influencia decisiva en xéneros como o *indie*, o gótico e o rock alternativo en xeral, e a súa portada converteuse nunha icona popular moito antes de que se coñecese a súa orixe. De feito, non é raro ver xente vestindo camisetas con esa imaxe incluso pola nosa facultade. Ata Primark chegou a comercializalas, como tamén fixo con portadas de discos de bandas como *Nirvana* ou *AC/DC*. Velaquí a súa orixe... e tamén a do nome deste recuncho.



Frases célebres

Manuel Galán Rodríguez (e colaboracións)

Hai algunha neurona por aí que me está jodendo.

— Raúl de la Fuente Carballo, Óptica I

Santos debería salir en la Momentum, que también tiene frases buenas. No tan inteligentes como las mías, pero buenas.

— Jaime, Mecánica Clásica I

Lo que tenemos es una esfera partida, como la canción de Corazón partido, pues una esfera partida...

— Vicente Muñuzuri, Física Xeral I

Si hago girar esta figura no sé qué me da. Me da pavor.

— Vicente Muñuzuri, Física Xeral I

Cogéis el coso este azul que se usa de aislamiento en las casas, en esta facultad no, pero en las casas, sí.

— Vicente Muñuzuri, Física Xeral I

Tiene que dar cero la suma [diferencia de energía de un ciclo], es la prueba del algodón, -500-500+1200... Pues no da cero.

— Vicente Muñuzuri, Física Xeral I

No puedo estar cantando Enrique Iglesias en clase, por eso no he dado espacio afín.

— Ana Peón, Métodos Matemáticos II

Esta aula pertence á facultade de Física? Entón aquí aplica a Lei da Decana: non se pode beber auga, non se pode traer comida, nin bebida, nin nada.

— Carlos Merino, Teoría cuántica de campos

Non só nas relacións sociais ten que haber flow, senón tamén nas teorías cuánticas de campos.

— Carlos Merino, Teoría cuántica de campos

Manuel, podes saír un momento da aula? [...] Porque vou dicir unha frase... Para momentos grandes, non para grandes momentos...

— Carlos Merino, Teoría cuántica de campos



Tributo a Outer Wilds

Celia Álvarez Álvarez

Espertas de súpeto e a tranquilidade do ceo nocturno arróupate. A calor dun lume quenta o teu rostro mentres gardas un anaco do teu espertar para contemplar o firmamento. Ves as estrelas afastadas, moitas das cales terán planetas arredor delas. Quizais algún sexa coma o teu, verde e azul, con abundante vida que o habita.

Un fulgor atravesa o ceo, será unha estrela fugaz?

E aló no alto saúdate un maxestoso veciño; amósase imponente e turbulento. Din que trala súa atmosfera gasosa se agocha un infinito e hostil océano. Acórdaste da túa misión e apresúrate a erguerse. Aproveitas para asar un malvarisco, cómelo e emprendes o teu camiño. No teu traxecto coñeces outros coma ti. Uns máis maiores, absortos no seu traballo ou sentados nunha cadeira descansando. Deséxanche moita sorte na túa viaxe. Algúns amósanse escépticos, outros preocupáanse pola túa vida e outros miran cara aos seus pés sen pararse a contemplar as estrelas.

Os máis cativos xogan mergullados nas súas fantasías, sen comprender por que te tes que ir. Pero ti non dubidas. Todo este tempo de preparación ten que servir para algo. Sabes que outros xa foron antes que ti e isto écheche de determinación. Antes de partir fas memoria de todo o aprendido, e fascínaste polo que a túa especie foi capaz de lograr. A gratitude, a curiosidade e a emoción enchen o teu espírito a cada paso que das cara ao teu incerto futuro. Dirixes unha última ollada cara ás túas orixes, cara ao teu fogar. Pos o teu traxe, abrochas o cinto e arrancas a túa nave.

A música dos viaxeiros espaciais acompáñate en todo momento e reconfórtate saber que a túa misión é compartida por outros exploradores coma ti. No teu sistema solar habita o recordo dunha civilización extinta, os Nomai. Aínda que aparentasen moi diferentes, compartían esa mesma inquedanza que ti tes polo Universo. Poboaron a túa cálida Terra, onde un familiar lume sempre agardará acendido, e exploraron a súa pequena lúa de roca. Tamén estiveron no oco e fráxil planeta veciño, así como naquel xigante e profundo planeta de auga e nos áridos xemelgos que danzan un a carón do outro ocupando a órbita máis próxima arredor do vello e alaranxado Sol. Esta especie deixou escrituras tralo seu paso como recordo da súa existencia, e ti tes o privilexio de poder descubri-la.

Isto é un tributo a Outer Wilds.

Con frecuencia lémbrome de Outer Wilds: do seu mundo

único e da inmersiva narrativa que este contén; dos seus personaxes e do que cada un e en conxunto representan; dos sentimentos que comunica e da especial forma na que o fai. Estas lembranzas sempre me fan sorrir e emocionarme. Atreveríame a dicir que Outer Wilds é a razón orixinal pola que decidín estudar física.

Outer Wilds é un xogo que permite acceder á súa historia en infinidade de xeitos. Confía na inicial curiosidade do xogador como motor do seu progreso e brinda absoluta liberdade para explorar calquera lugar de ningunha forma en concreto.

Gústame pensar que os humanos inspiramos as filosofías de todas as especies que o xogo presenta. Conservo especial simpatía polos Nomai. Eles movíanse motivados pola busca do coñecemento e construían as súas comunidades arredor deste. Gardaban un respecto absoluto polo Universo e pola materia que o habita, estivese viva ou non. Ao longo do Universo queríanse e protexíanse os uns aos outros fronte as adversidades que este mesmo lles presentaba. Atesouraban a súa sabedoría con humildade e esperanza. Compartían connosco tamén o medo cara ao descoñecido e cara á brutalidade da natureza, cara ao inevitábel paso do tempo e a morte.

Outer Wilds non se centra en explicar a orixe desta perfecta harmonía entre os Nomai. É difícil contemplar unha traxectoria natural que leve ao ser humano a alcanzar un consenso global e a decidírnos e coordinarnos en busca de algo máis, que nos supere en dimensións pero que nos una. Polo camiño aínda queda moito para que a humanidade estea preparada para independizarse dos seus propios problemas. Pero mentres tanto esta ficción comparte un sentimento e penso que pode inspirar a realidade. Cada peza de arte garda significados diferentes para cada un de nós e este é o que garda para min Outer Wilds.



Erros, chapuzas e desatinos

Ánxel Costas

Historias mal feitas para facelo mellor.

Non é mentira algunha que moitísima xente quede abraiada coa cantidade de avances e descubrimentos que veñen da man da física, capaces de desafiar o sentido común da xente menos entendida. E é que, ás veces, a física parece maxia e nós, os (case) físicos, magos. Pero estes avances non se fan da noite á mañá, pois hai unha gran cantidade de persoas que traballaron e traballan duro durante moitos anos para acadar estes fitos na nosa historia. Mais non todos estes esforzos foron parar a bo porto, máis ben ao contrario, foron ocultos no fondo do caixón da vergoña no soto da humillación e tirada a chave polo pozo do esquecemento. E creo que é hora de destapar os trapos sucios que levamos agochando tanto tempo, pois a humildade é algo que podemos esquecer facilmente ao crer que comprendemos o Universo e as súas forzas, e cómpre lembrala de cando en vez. É por iso que veño contarvos a vós, meus ben queridos lectores, varias «cafradas» que se fixeron en física, para que saibades que unha integral mal feita ou un signo mal posto non é tan grave, a non ser que sexa financiado, creado, exposto, explotado e posteriormente oculto. Todo o demais son erratas que pode ter calquera persoa ao pensar rápido (todos sabemos que é por iso e non porque as mates ás veces se nos fan costa arriba). Así que, parodiando a frase coa que Lord Kelvin meteu a pata: «Está todo ben feito en física, salvo un par de problemas que hai que ocultar»; vouvos contar tres destes problemas que foron «ocultos» (ou non tanto), a modo de tres contos de Nadal.

Os raios N

O gran protagonista desta historia (que rolda o ridículo colectivo) foi Prosper-René Blondlot, un dos oito físicos da Academia das Ciencias de Francia. Mentres traballaba cos raios X en 1903, percibiu variacións do brillo cando realizaba fotografías dun entreferro, o que interpretou como un novo tipo de radiación, que decidiu chamar raios N (pola universidade de Nancy onde traballaba). Este descubrimento levou a 300 artigos e 120 físicos afirmar a existencia desta nova radiación, presente en case todos os corpos, salvo en madeiras verdes e algúns metais tratados. Ben, parece que está todo correcto e non hai ningún problema se tanta xente estaba de acordo. Entón, onde está a trampa? Todo foi destapado por Robert W. Wood, quen xa tiña fama de desmentir resultados excéntricos. Nunha visita ao laboratorio de

Blondlot para a demostración dos raios N, Wood (nun momento de lucidez propia dun pillabán), aproveitando-se da escuridade necesaria para o experimento, decidiu quitar un prisma que amplificaba supostamente este fenómeno sen que ninguén se decatase. O resto da sala dixo que seguía vendo estes raios N, o cal xa era unha alarma xigante da mentira que era todo, pero para confirmar, tamén decidiu cambiar un arquivador metálico por un andel de madeira que, supostamente, non debería emitir esta radiación. As demais persoas presentes seguían vendo o efecto luminoso, co cal xa quedou máis que claro que toda esa xente era uns farsantes ou, como moito, unhas vítimas da autosuxestión (colectiva). Pero quen somos nós para xulgar, se tamén temos «falseado» resultados nos laboratorios para aprobar as materias dos profesores? Esta historia non é máis que unha lección de que os resultados acadados non sempre son os que cremos que son, e que ter un compañeiro de laboratorio capaz de levarnos a contraria é necesario para pórnos os pés na terra.

Neutrinos máis rápidos que a luz

Imos ver se un século despois dependemos algo do ridículo caso anterior. Esta historia sitúase no 2011, sendo o CERN, e concretamente o experimento OPERA, o centro do foco, os físicos que traballaban neste proxecto tiveron un resultado inusual. Resulta que os neutrinos medidos semellaban superar a velocidade da luz, 60 nanosegundos máis rápidos. Se isto fose medido por algún alumno da facultade de Física, o máis probable é que o devandito alumno fixese maxia e os valores medidos cambiasen de golpe, dando lugar a uns resultados fermosísimos dentro do esperado, pero no CERN traballa xente máis seria e querían saber a que se debía tal anomalía. E é que os resultados presentáronos como iso, unha anomalía, curáronse en saúde antes de anunciar un descubrimento (vese que a historia anterior foi escarmento dabondo). Despois de varios meses investigando o porqué destes resultados, atopáronse os culpables: un cable de fibra óptica mal conectado e un oscilador de reloxo defectuoso, os cales introducían un erro sistemático nos resultados. Ás veces a culpa non é dos físicos, senón dos materiais, pero o dano xa estaba feito: miles de teorías conspiranoicas, queixas populares sobre os fondos para os experimentos para un cable mal conectado, moitísimos filmes de ciencia ficción de mala



calidade... Quizais por isto teñamos pánico a presentar uns resultados (públicos ou ao profesor) sen saber se son correctos, pois os acertos traen avances, pero os desacertos traen moitas dores de cabeza. A ensinanza desta historia é revisar a montaxe dos experimentos se non queres pasar os próximos días pelexando cuns valores carentes de sentido. Despois deste incidente, comezou a soar a frase «un cable frouxo pode ser máis rápido que a luz».

A explosiva nova do Mars Climate Orbiter

Esta pequena anécdota remóntase a 1999. Aquí non hai nin autosuxestión nin problemas coa montaxe do experimento, estamos ante unha situación de descoido (por non dicir estupidez) puramente humana. Un pequeno erro que custou 301 millóns de euros (axustando á inflación de hoxe en día, uns 535 millóns), tirados ao lixo, ou máis ben, á atmosfera de Marte. A misión da sonda espacial era estudar a atmosfera do planeta vermello durante dous anos terrestres, pero nunca puido realizarse. A medida que a sonda se acercaba ao planeta, os controladores decatáronse de que había que realizar demasiadas correccións, máis das esperadas, e aí comezaron as sospeitas, polo que decidiron pedir unha investigación. Os responsables do proxecto, como bos responsables, decidiron desestimar a petición de investigación, e posteriormente evadiron as acusacións alegando que a petición de investigación non se realizara formalmente (comportamento máis propio dun político que de xente adicada á ciencia). Pero, cal foi o accidente? Pois que a sonda foise apartando da órbita esperada a medida

que se acercaba a Marte, até que pasou a só 57 km de altura, cando se esperaba que pasase a 150 km. Por suposto, a sonda quedou completamente esnaquizada pola fricción coa atmosfera. Agora que xa coñecemos o accidente, como bos físicos deberíamos preguntarnos cal foi o problema. As unidades. As malditas unidades. Esas mesmas que nos levan dicindo dende o colexio «47 que? mazás? centímetros?». Un non é consciente do importantes que son até que perde 301 millóns en apenas segundos. A sonda empregaba unidades do Sistema Internacional, pero os controladores da NASA traballaban con unidades imperiais (se os estadounidenses non levasen a contraria no sistema de medida, este erro non tería acontecido, ou polo menos non por este motivo). A diferenza entre ambos os sistemas foise acrecentando a medida que a sonda avanzaba pola súa órbita, a pesar das correccións dos controladores, até acabar estrelándose. Que podemos aprender de todo isto? Como primeiro e mínimo, non fiarse da xente que empregue unidades de medida distintas ao Sistema Internacional e, como segundo, que hai que revisar as contas. Sempre revisar as contas, pois nunca sabes onde podes atopar un erro que pode arruinar o teu exercicio (ou arruinar-te economicamente).

Espero que estas tres pequenas historias fagan manternos humildes, e facernos recapacitar sobre as vergoñas históricas que agochamos e das cales podemos aprender moito. E lembrade, meus queridísimos lectores, que cando acabedes de ler este pequeno artigo deberíades de ter presente as unidades, montar ben o experimento e ter un bo compañeiro que vos corrixa de ser necesario, para evitar ter erros, chapuzas e desatinos.

Érase unha vez un gato...

Mauro Garrido Rodríguez

Como se probaría que está vivo e morto e que significa isto.

O infame *gedankenexperiment*

Todos os estudantes de física do universo coñecido escoitamos algunha vez falar sobre o paradoxo do gato de Schrödinger e, malia isto, en ningún momento dos nosos estudos lle demos nin tan sequera un mínimo tratamento. A percepción xeral, quizais, é que este paradoxo é unha mera popularización da Mecánica Cuántica ou, peor, que é un problema xa resolto, histórico, pero sen relevancia actual. O certo é que a través deste *gedankenexperiment* Schrödinger pretendía sinalar os problemas conceptuais e de conexión co mundo clásico que a mecánica cuántica (a chamada Interpretación de Copenhague) presentaba e presenta. Así, nun artigo de 1935 [1] no que discutía a situación da cuántica estándar e dos seus problemas interpretativos, o austríaco escribía o seguinte: ¹⁰

Un pode incluso establecer casos bastante ridículos. Un gato está encerrado nunha cámara de aceiro, xunto ao seguinte diabólico dispositivo (que debe estar protexido fronte á interferencia directa do gato): nun contador Geiger hai unha pequena cantidade de substancia radioactiva, tan pequena, que quizais no curso dunha hora un dos átomos decaía, pero tamén, con igual probabilidade, se cadra ningún; se ocorre, o tubo do contador descárgase e a través dun relé, libera un martelo que rompe un pequeno frasco de ácido cianhídrico. Se se deixa que todo este sistema funcione por si só durante unha hora, diríase que o gato aínda vive se mentres tanto ningún átomo decaeu. O primeiro decaemento atómico teríao envelenado. A función Ψ do sistema enteiro expresaría isto contendo o gato vivo e o gato morto (perdóese a expresión) mesturados ou difusos en partes iguais.

— Schöringner

Así, neste artigo exploraremos o xeito no que podemos trasladar propiedades cuánticas a obxectos clásicos, se isto é posible e que é o que realmente queremos dicir cando afirmamos que o gato «está vivo e morto á vez».

¹⁰É de interese resaltar que o paradoxo non ocupa en absoluto un rol central no seu artigo, é un mero exemplo dentro dun capítulo onde discute a natureza ontolóxica da función de ondas.

¹¹O mesmo sucederá co gato, será necesario o sacrificio de centos deles en condicións semellantes de saúde.

Medindo o inmedible

Como é que un átomo pode «contaxiar» as súas propiedades cuánticas a un ente macroscópico como un gato? Como sabemos, a desintegración dun átomo radioactivo é un fenómeno puramente aleatorio: é imposible predicir cando vai emitir radiación. O átomo, por si só é, polo tanto, intratable como sistema físico: precisamos facer experimentos con moitos átomos idénticos para obter resultados dos que extraer estatisticamente conclusións físicas ¹¹. Esta é a gran verdade á que nos enfrenta a mecánica cuántica estándar. Xa, neste intre e sen aínda progresar no experimento mental, podemos intuír que era o que Schrödinger quería criticar: o antirrealismo, a noción de que un único átomo é intratable, e que se cadra extraer conclusións acerca da realidade deste máis alá do seu comportamento estatístico é algo que pode resultar paradóxico.

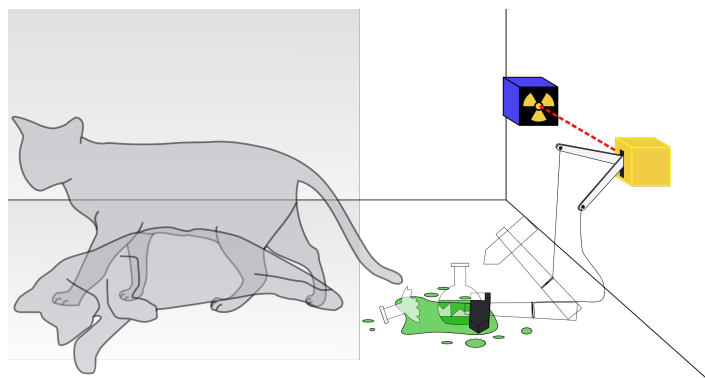


Figura 1: Alternativas do Gato de Schrödinger. (Foto: Wikipedia)

Describamos polo tanto como o átomo inflúe sobre o gato. Supoñamos que o átomo ten dous estados posibles: excitado e desexcitado. A cuántica ditamina o seguinte: existe un obxecto matemático, Ψ , que codifica, coma un «catálogo de expectativas» [1], todas as posibilidades alternativas dun sistema físico concreto, así como a interferencia entre estas posibilidades. A clave está no de «interferencia entre posibilidades», posto que senón a cuántica sería análoga a unha teoría da probabilidade clásica; por exemplo, nada nos impide facer, para unha



moeda

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|cara\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|cruz\rangle. \quad (1)$$

A diferenza estriba en que as distintas posibilidades do sistema poden dalgún xeito solaparse, e que este solapamento vén dado por unha fase relativa Φ . A miúdo facémonos unha imaxe disto co experimento da dobre fenda: o electrón «pasa» por dous sitios á vez, pensamos nel coma unha onda que se difracta e interfere consigo mesma tal e como as ondas do mar, incluso o imaxinamos como espaxiado, disolto no espazo. Pero esta imaxe, se ben reconfortante, non se corresponde coa realidade. O prisma do catálogo de expectativas é máis axeitado: o que oscila coma unha onda é precisamente a fase de cada possibilidade; no caso da base de posición, na dobre fenda, a fase asociada a cada punto do espazo.

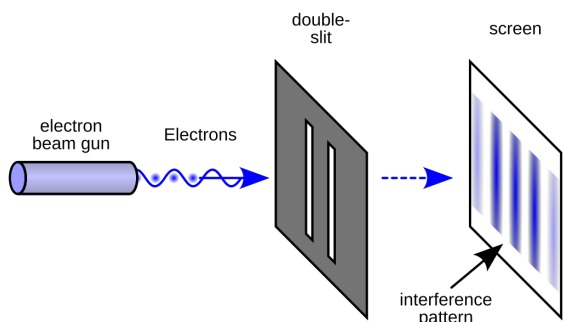


Figura 2: Experimento da dobre fenda. (Foto: Wikipedia)

E é máis axeitada porque a interferencia non só se dá no espazo físico, nunha pantalla que presenta un padrón de interferencia, como en óptica ondulatoria. A interferencia dáse coas velocidades, co spin, co momento... En calquera base. E no caso que nos ocupa, entre o estado de excitación dun átomo e a vitalidade dun gato.

Así, ao principio, o estado do átomo será análogo ao da moeda (1 = excitado, 0 = desexcitado)

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|1\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|0\rangle. \quad (2)$$

Pero algo marca a diferenza: a fase evoluciona co tempo en relación coa enerxía, **de acordo coa ecuación de Schrödinger**: é outro xeito de vela, como a ecuación que rexe a evolución de interferencia entre posibilidades. Posto que neste caso traballamos precisamente na base de enerxía, cada unha das posibilidades terá asociada unha fase $\phi = \frac{E}{\hbar}t$, tal que

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|1\rangle + e^{i\Phi}|0\rangle); \quad \Phi = \frac{E_2 - E_1}{\hbar}t. \quad (3)$$

Este é o movemento ondulatorio que existe nunha base bidimensional: unha rotación no plano complexo de frecuencia $\omega = \frac{E}{\hbar}$. Vexamos como este termo é o responsable de que o gato estea vivo e morto á vez.

Se o átomo se excita, entón o veneno libérase. Se pola contra non o fai, este non se libera. Isto entrelaza ambas as posibilidades, herdando a fase relativa do átomo, de xeito que

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|1, \text{veneno}\rangle + e^{i\Phi}|0, \text{non veneno}\rangle). \quad (4)$$

Por último, se o veneno se libera, o gato morre, e se non se libera, entón mantense vivo: volve suceder o entrelazamento e obtemos ¹²

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|1, \text{veneno, morto}\rangle \quad (5)$$

$$+ e^{i\Phi}|0, \text{non veneno, vivo}\rangle). \quad (6)$$

Pero isto non remata aquí: como accedemos a este estado? A través dun detector. Podería ser, por exemplo, unha cámara equipada cun software de intelixencia artificial que recoñece o estado vital do gato (aínda que un experimentador humano tamén valería). En calquera caso, vemos que sucede o mesmo, que se dá o entrelazamento

$$|\Psi, D\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|1, \text{veneno, morto, } M\rangle \quad (7)$$

$$+ e^{i\Phi}|0, \text{non veneno, vivo, } V\rangle). \quad (8)$$

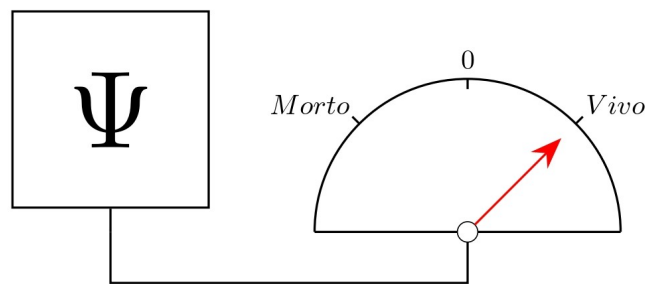


Figura 3: Detector de estado vital.

Por que, entón, obtemos un único resultado, se a cadea de entrelazamentos non cesa? Este é o chamado **problema da medida**, que Schrödinger tamén aborda no artigo citado, e que clasicamente, dentro da Interpretación de Copenhague, se resolvía a golpe de postulado, o de colapso. Abordaremos este problema na seguinte sección, pois garda relación coa imposibilidade técnica de realizar este experimento mental.

Por agora contentémonos co colapso: cando un mide, o estado decídese por unha possibilidade ou outra. Pero,

¹²Resaltar que este paradoxo non resolve a discusión de cando é o punto exacto no que morre un ser vivo: «morto» e «vivo» son etiquetas que designan o estado de cada un dos átomos do gato cando o veneno é liberado e cando non o é, respectivamente.

que diferenza existe entón co caso da moeda clásica, se sempre que medimos o estado do gato, está vivo *ou* morto? A fase Φ está presente, pero non se manifesta nas nosas medidas. Precisamos un observable que sexa sensible a esta fase. Para simplificar, vexamos primeiro que instrumento temos que empregar para observar a interferencia do átomo:

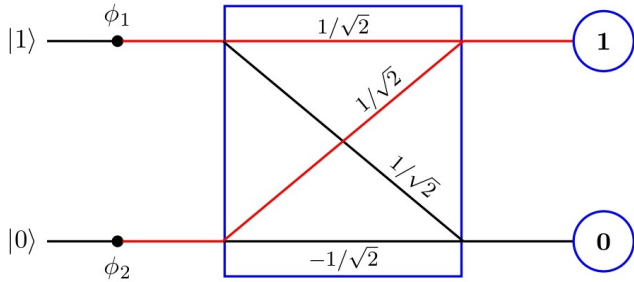


Figura 4: Porta de Hadamard con detectores de excitación.

Esta é a chamada «porta de Hadamard». No noso caso, consiste nunha cavidade que, mediante radiación electromagnética, pode facer que o átomo se excite por absorción ou que se desexcite por emisión estimulada coa mesma probabilidade. A base na que mide é precisamente a que combina estado excitado con desexcitado ¹³

$$|1\rangle \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle), \quad (9)$$

$$|0\rangle \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - |1\rangle). \quad (10)$$

Se sometemos o átomo a esta medida, o estado entrelazado quedará como

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{2} [(1 + e^{i\Phi}) |0\rangle + (1 - e^{i\Phi}) |1\rangle]. \quad (11)$$

De xeito que, se nos fixamos, por exemplo, na probabilidade de que o medidor de estado excitado se active

$$|\langle 1|\Psi\rangle|^2 = \text{sen}^2(\Phi/2). \quad (12)$$

Obtemos interferencia! A existencia da fase fará que o átomo estea excitado con máis ou menos probabilidade. O análogo poderíamos facer co gato, sempre e cando dispuxésemos dun dispositivo que puidese reconfigurar os átomos do gato dun estado vital a outro, isto é: revivilo.

A interpretación da superposición

Pero supoñamos que podemos revivilo o gato. Que demostraríamos con este experimento? Demostraríamos

¹³O signo menos no segundo estado de medida é debido a que ambos deben de ser ortogonais e á súa vez ser unha combinación de excitado e desexcitado.

¹⁴E xa nin falemos da decoherencia entre os estados vitais do gato.

que o felino, antes de medilo, non está nin vivo (pois só con $|\Psi\rangle = |0$, non veneno, vivo, V) non observamos interferencia) nin morto (con $|\Psi\rangle = |1$, veneno, morto, M) tampouco podemos observar interferencia) *nin dous gatos, un vivo e outro morto* (temos a certeza de que sempre empregamos un gato) nin, por suposto, un gato nin vivo nin morto. O problema é que estas son todas as opcións lóxicas. O único que podemos facer é postular un novo modo de *ser* que chamaremos **superposición** [2]. Este é realmente o maior misterio ao que nos enfrenta a Mecánica Cuántica, que este experimento mental leva máis alá: **Que se sente estar en superposición?** É esta a pregunta central das interpretacións da mecánica cuántica.

Estamos en superposición? A decoherencia

Como xa adiantamos, o proceso de medida xa non se entende actualmente co postulado do colapso: este levaba a considerar os aparellos de medida como algo en esencia diferente, e incluso a postular que era a consciencia humana a que provocaba os colapsos. A moderna teoría da decoherencia simplemente afirma o seguinte: todo está en superposición, pois é o que dita a ecuación de Schrödinger, **pero a coherencia** (isto é, a fase relativa entre estados) **pérdese debido á interacción co ambiente**.

O ambiente actúa coma unha especie de medidor: que o veneno sexa liberado ou non, por exemplo, causa estados totalmente distintos do ambiente: isto provoca que a información de se se liberou se filtre ao ambiente, quede aí; nese intre o entrelazamento esténdese entre todas as moléculas de aire, e é coma se tivésemos executado unha medida. O gato está ou vivo ou morto ¹⁴. Pero é importante recalcar o seguinte: todo segue en superposición, só que entre moitísimos graos de liberdade. Se executásemos unha medida análoga á porta de Hadamard pero considerando todo o ambiente (o cal é a todas luces extremadamente difícil), recuperaríamos de novo esa fase Φ . Se non queremos volver postular o colapso, todo nos conduce ao seguinte: unha función de onda global Ψ para todo o Universo.

E ben, como se sente estar en superposición?

Referencias

[1] “The present situation in quantum mechanics: A translation of schrödinger’s «cat paradox» paper.” p. **323–38**; John D. Trimmer; (1980)
 [2] *Quantum mechanics and experience* p. **206**; David Z. Albert; (Harvard University Press, 1992)



Wow!

Santiago González Gómez

De como un código alfanumérico impreso polo radiotelescopio Big Ear segue fascinándonos case 50 anos despois.

15 de agosto, 1977. Jerry Ehman, que traballaba como voluntario no radiotelescopio Big Ear da Universidade Estatal de Ohio, revisaba as lecturas do aparello. O Big Ear adicábase a escanear o ceo, recibir sinais de radio, e imprimir as lecturas en follas de papel. Máis concretamente, este radiotelescopio buscaba sinais de banda estreita, que aínda que poden ocorrer na natureza, son emisións que adoitan asociarse con seres intelixentes. Os datos que revisaba Ehman referíanse á intensidade de sinal recibida por diversas canles, que se imprimía como un ratio sinal/fondo. Así, por exemplo, se se rexistraba un sinal 4 veces máis forte que o ruído de fondo, imprimíase un catro. Para aforrar espazo, os números do 10 en adiante representábanse con letras: A para 10, B para 11, e así sucesivamente. De súpeto, Ehman topouse coa seguinte lectura, agora mundialmente famosa:

6 E Q U J 5.

Falamos dun sinal que, no seu pico, chegou a $30,5 \pm 0,5$ a intensidade do fondo. Ehman rodeouno e comentouno cunha única palabra que acabou por darlle nome: *Wow!*

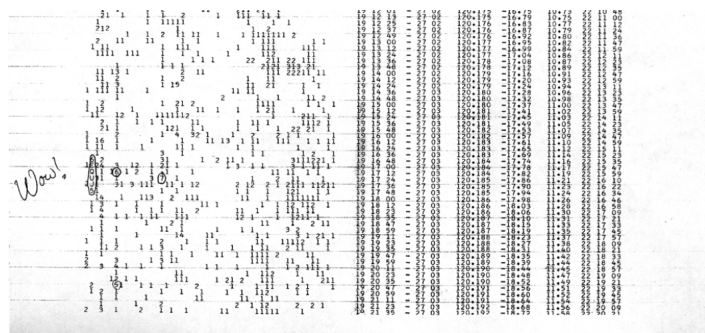


Figura 1: Detalle do printout no que Ehman observou o sinal *Wow!* [1].

O sinal

Pero, que *escoitou* o Big Ear naquel verán de 1977? Para podermos comezar coas conxecturas, cómpre coñecermos algo máis do sinal. Na figura 2 podemos observar unha recreación da forma do sinal a partir dos puntos medidos. O sinal durou uns 72 segundos (pasaron uns 12 segundos entre cada par de medicións), e a súa forma encaixa co obxectivo do radiotelescopio pasando por diante dunha fonte fixa no ceo. Aínda que a gráfica resulta lixeiramente asimétrica, isto explícase polo deseño do Big Ear e nada ten que ver co sinal orixinal

[2]. A súa frecuencia é duns 1420 MHz, terriblemente preto da frecuencia da transición hiperfina do hidróxeno. Ademais, o sinal *Wow!* está moi localizado no espectro (menos de 10 kHz de largo de banda).

1420 MHz é unha frecuencia de grande importancia en astronomía, tanto que está prohibido empregala na Terra para transmisións de radio para non interferir coas medicións radioastronómicas. Primeiro, porque se observa moito: o hidróxeno é o elemento máis común no Universo e ademais pode emitir esta radiación espontaneamente. Segundo, porque corresponde a unha onda de radio que pode atravesar masas de po opacas á luz, permitíndonos ver o que hai detrás.

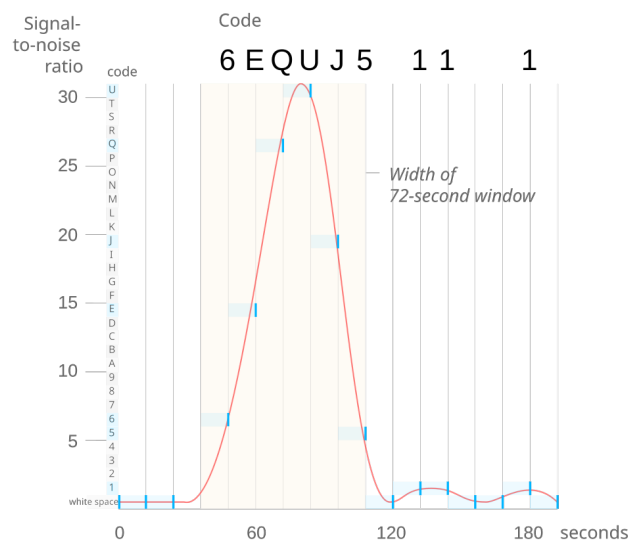


Figura 2: Perfil do sinal. (Foto: Wikipedia)

Precisamente que o sinal tivese esta frecuencia reforza a hipótese de atribuílo a unha raza extraterrestre. Os seres humanos sabemos da importancia desta frecuencia como padrón natural do cosmos, e cando precisamos dunha unidade de tempo o máis universal posible coa que encriptar as mensaxes que mandamos nas nosas sondas espaciais por se as atopasen intelixencias extraterrestres (en particular, as placas da Pioneer e o disco de ouro da Voyager), elixiuse precisamente a inversa desta frecuencia como unidade. Non sería esperable que seres intelixentes doutros planetas emitisen os seus sinais intergalácticos nesta frecuencia por idénticas razóns?¹⁵

Se nos inclinamos pola teoría de que o sinal *Wow!* ten orixe extraterrestre, unha pregunta natural sería,

¹⁵Nun artigo 18 anos anterior á detección do sinal *Wow!*, propónse 1420 MHz como a frecuencia máis prometedora para procurar mensaxes dalgunha sociedade extraterrestre [3].

codificaba algún tipo de información? A resposta é que, se o facía, non chegou ata nós. Para obter información dunha onda, esperaríamos que esta estivese modulada, que oscilase entre un par de frecuencias ou amplitudes, e isto non é o que escoitou o Big Ear. Porén, isto non quere dicir que o sinal non estivese modulado: lembremos que o radiotelescopio medía cada 12 segundos, e a información púidose perder nesa fiestra temporal. Precisamente a «falta de información» codificada no sinal *Wow!* é o que deixa aberta a posibilidade moi real de que en realidade poida ser explicada cunha orixe natural.

Outra pregunta que aínda non respondemos sobre o sinal é tamén moi natural: ben, de onde procedía? Lamentablemente, é outra da que non sabemos a resposta, alomenos con gran precisión. Resulta que o Big Ear estaba deseñado de tal xeito que escaneaba dúas rexións celestiais simultaneamente, e non temos maneira de distinguir en cal das dúas rexións se atopaba a fonte do sinal. Iso si, este deseño permítenos facer unha reflexión curiosa: resulta que o movemento do Big Ear era tal que a segunda rexión volvía pasar por onde estivera a primeira 3 minutos antes. Como o sinal *Wow!* só se detectou unha vez, temos unha de dúas posibilidades: ou a fonte transmitiu durante un período indeterminado antes do escáner da primeira rexión e extinguiuse nos 3 minutos que tardou en «chegar» a segunda rexión, ou a transmisión iniciouse nese intervalo de 3 minutos entre escaneamentos [4]. Sexa como for, todo apunta a que o sinal *Wow!* foi un evento moi puntual, que tivemos moita sorte de captar e, en efecto, durante case 50 anos fomos incapaces de recibir outro sinal similar destas dúas rexións.

As posibles orixes

Imaxinemos que, como bos escépticos, non nos fiamos de que o sinal *Wow!* sexa de orixe extraterrestre. Que outras posibles explicacións temos? Ben, dende logo, non esperamos que a fonte sexa unha estrela ou un planeta, que debería de emitir en continuo (polo tanto, nun amplo largo de banda). Tamén foron propostos e descartados un par de cometas como responsables.

Como a frecuencia da liña hiperfina do hidróxeno está protexida na Terra, tampouco esperamos que nós sexamos os causantes. Con todo, non corramos tanto a descartar esta hipótese. Que esta frecuencia estea internacionalmente prohibida non quere dicir que ninguén a puidese usar. Porén, outros problemas descartan a posibilidade dunha orixe humana. Ningún satélite nin aeronave coñecida se atopaban nesa zona do ceo cando se mediu o sinal *Wow!*, e aínda que o estivesen, calquera destes dous obxectos moveríase demasiado rápido para podermos recrear o padrón medido. Tampouco é realista

que o que se medise fose un sinal emitido no chan que se reflectiu nalgún anaco de lixo espacial, basicamente polas características dinámicas que tería que ter a órbita deste espello para observar o sinal da figura 2.

Unha teoría amplamente discutida é a do escintileo interestelar. Puidera ser que o sinal fose amplificado por algún efecto de tipo coherente ao atravesar o medio interestelar dende a súa orixe ata nós. Porén, o problema desta e outras teorías é que non resolven a cuestión da orixe. A relevancia da teoría do escintileo estelar é que permitiría a transformación dun sinal continuo de maior largo de banda no sinal observado, que por suposto é un mecanismo que non pode ignorarse.

Se cadra a explicación natural máis satisfactoria é a de [5]. Atopando similitudes entre o sinal *Wow!* e radiación moito menos intensa proveniente de nubes de hidróxeno, os seus autores teorizan que o sinal *Wow!* puido ser causado pola reemisión, por parte dunha destas nubes de hidróxeno, dalgún fenómeno superradiante, como un chorro dun magnétar (un tipo de púlsar cun fortísimo campo magnético).

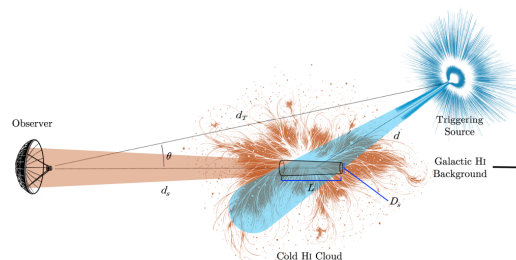


Figura 3: Fenómeno de amplificación e reemisión dun chorro radiante por parte dunha nube de hidróxeno [5].

O certo é que, a un ano do 50º aniversario do sinal *Wow!*, seguimos sen ter respostas concretas para moitas das súas incógnitas. Aínda que unha orixe extraterrestre non está descartada, en palabras de Ehman, non podemos «draw vast conclusions from half-vast data». Sen máis deteccións similares, só queda especular...

Referencias

- [1] *The Big Ear Wow! Signal (30th Anniversary Report)*; Jerry Ehman
- [2] *The tantalizing “wow!” Signal*; John Kraus
- [3] *Searching for interstellar communications* p. 844–846; Philip Morrison, Giuseppe Cocconi; (1959)
- [4] *Shouting at stars: A history of interstellar messages*; Lemmino
- [5] *Arecibo wow! I: An astrophysical explanation for the wow! Signal*; Abel Méndez, Kevin Ortiz Ceballos, Jorge I. Zuluaga; (2024)



Sobre como Schrödinger case morre no concello da Estrada

Manuel Galán Rodríguez

Seguro que todos os que estades a ler isto escoitastes falar algunha vez de Erwin Schrödinger, mesmo antes de terdes pisado un pé na Facultade de Física. Este destacado físico austríaco é amplamente coñecido polo seu famoso experimento do Gato de Schrödinger. Menos coñecidas, se cadra, son as súas falcatrudas amorosas nun hotel en Arosa (Suíza), mais hoxe vou detallar como foi a súa estada por Santiago de Compostela en 1934.

Desde 1911 véñense realizando as conferencias Solvay, unha serie de congresos sobre física e química realizados en Bélxica. Foi nunha delas, en setembro de 1933, onde Blas Cabrera, que terá o papel de Jorge Mira na nosa historia, tivo o pracer de ser o primeiro físico español en participar, e tamén se cre que coñeceu alí en persoa a Schrödinger. De alí a uns meses, Cabrera foi nomeado reitor da Universidade Internacional de Verán de Santander, co que convidou o Nobel a impartir un curso nela en agosto de 1934.



Figura 1: Erwin Schrödinger dando a conferencia o día 3 de agosto de 1933 no Paraninfo (Santiago de Compostela). (Fonte: GCiencia)

Casualmente, uns poucos días antes, tiña lugar en Galiza o XIV Congreso da Asociación Española para el Progreso de las Ciencias¹⁶, que reuniría máis de trescentos congresistas durante unha semana, comezando o mércores 1 de agosto de 1933. Por tanto, Cabrera tomou a decisión de convidar tamén a Schrödinger¹⁷, para que dese alí unha charla sobre mecánica cuántica

ondulatoria (Figura 1) o venres 3 de agosto ás 18:00 no Paraninfo (Santiago de Compostela).

O discurso tratou da revolución que supuxo a mecánica cuántica na física, onde destacou o papel das medicións na mecánica cuántica, e as súas diferenzas coa mecánica clásica. Máis tarde, tratou sobre as nocións de espazo e tempo dunha partícula, onde critica o concepto do sólido ríxido ideal: na mecánica cuántica só sistemas infinitamente pesados poden considerarse ríxidos, pois os niveis enerxéticos son finitos. A conferencia remata resaltando a dificultade para reconciliar as dúas teorías da física moderna: a relatividade e a mecánica cuántica.

O devandito congreso contou coa presenza de xente de todas as disciplinas¹⁸, como destacados membros do Seminario de Estudos Galegos, tales como Filgueira Valverde, Cuevillas ou Otero Pedrayo. Non obstante, contou coa ausencia dalgúns dos principais químicos da época como Fernando Calvet ou Isidro Parga Pondal, profesores na USC por aquela altura.

Porén, a prensa galega parece que fixo caso case omiso da conferencia do brillante físico austríaco daquela sexta feira, se cadra por un aviso tardío da súa presenza. O *La Voz de Galicia* resaltaba na edición do día seguinte, do sábado 4, o protagonismo de Ortega y Gasset na segunda xornada, desenvolta desta vez na Coruña¹⁹. A mención a Schrödinger só se reducía a «el profesor francés M. Sehroedinfer (sic)»²⁰. Este mesmo xornal, o domingo, incorporaría unha pequena fotografía da conferencia, errando de novo no complicado nome do protagonista da nosa historia.

A contraportada do *El Pueblo Gallego* dese sábado describía en detalle o congreso, mais deixando a Schrödinger nunha posición inferior:

SECCIÓN DE FÍSICA Y QUÍMICA Disertó ayer en esta sección el insigne premio Nobel, profesor Schrodinger, a quien sus ecuaciones diferenciales interpretativas de las teorías mecánicas ondulatorias, así como sus matrices curicas (sic) harían suficientemente famoso, si otros muchos trabajos no hubieran conseguido

¹⁶Concretamente, as conferencias estaba previsto que estivesen repartidas entre A Coruña, Santiago de Compostela, Pontevedra e Vigo.

¹⁷Crese que foi quen o invitou, pero non se sabe con completa seguridade.

¹⁸De feito, físicos eran máis ben poucos, pois Schrödinger comezou a súa intervención desculpándose do contido da súa comunicación, moi avanzado para a audiencia, poñendo como escusa a pouca antelación coa que o convidara Cabrera.

¹⁹Espóiler: ao final a Ortega y Gasset non lle deu tempo a chegar.

²⁰Repárese que se equivocaron tanto no nome como no xentilicio.

hacerlo destacar. A su simpatía personal une el joven sabio la especial de verse exilado del país que le vio nacer por los bárbaros odios de raza que no se detienen ante las cumbres de las ciencias. Tan solo en esta crónica daremos brevemente la nota periodística de la emoción enorme que produjo la presencia de este sabio en el auditorio que ayer le escuchó en la Sección tercera.

O sábado día 4, as conferencias do congreso trasladaríanse até A Coruña, onde Cabrera realizaría unha intervención. Non sabemos se Schrödinger acompañou a Cabrera até alí, pois a prensa da época non ofrece a suficiente información. Posibelmente si, pois ese mesmo día a mediodía estaba prevista unha intervención de Ortega y Gasset criticando a «barbarie do especialismo» na ciencia, e a Schrödinger encantáballe a filosofía.

No entanto, a chegada de Ortega y Gasset atrasaríase un día, o que impediu que tivese lugar a devandita conferencia. Pola contra, o público si puido gozar doutras intervencións, como as do propio Cabrera, Otero Pedrayo, as do historiador Rafael Altamira ou as do vizconde de Eza, presidente da asociación que organizou o congreso; todas realizadas no teatro Rosalía de Castro. Daquela, Schrödinger non falaba español, mais si francés, italiano, latín e inglés (e alemán, evidentemente) que lle terían permitido seguir moitas das conferencias.

A seguinte xornada do congreso era o domingo. Ese día estaban previstas dúas excursións polo val do Ulla, ás que asistirían, a pesar do mal tempo, unhas 250 persoas. Unha destas saídas era ao pazo de Santa Cruz de Ribadulla (Vedra), e a outra, que acabou en traxedia, foi ao pazo de Oca (A Estrada), á que asistirían unhas setenta persoas.

De súpeto, mentres estaban os convidados nun bufete organizado polos marqueses de Camarasa, caeu o chan do salón (Figura 2), precipitándose os alí presentes desde unha altura de 5 m, deixando gravemente feridas máis de cincuenta persoas e unha morte. En definitiva, un desafortunado suceso que podería chegar pasar calquera día na nosa facultade (esperemos que non), tal e como está construída.

Non sabemos con seguridade se Schrödinger quedou ese domingo en Santiago de Compostela ou se foi até A Estrada ou até Vedra, pois a prensa da época non achega a suficiente información. O máis probábel que estivese en todos eses sitios e en ningún ao mesmo tempo. Bromas á parte, posibelmente quedase en Santiago, pois dese domingo data unha carta escrita en follas con *Hotel Compostela* na cabeceira, conservada no arquivo Zubiri, onde se pode ver que estaba a preparar as conferencias que daría máis tarde. O que é seguro é que non formou parte do medio cento de feridos no accidente.

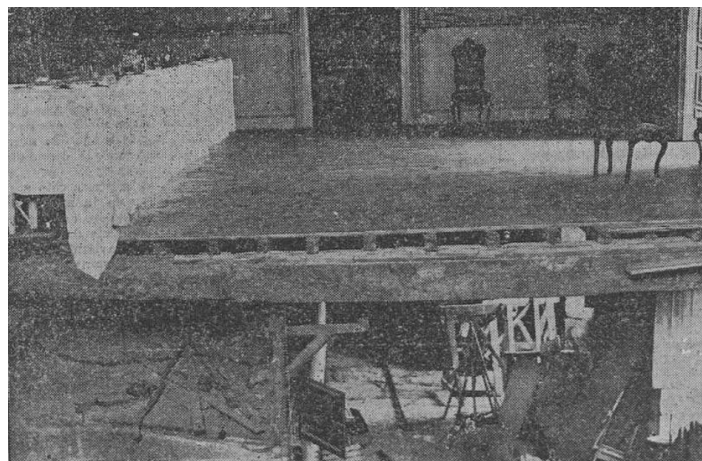


Figura 2: Imaxe do trágico suceso no pazo de Oca (A Estrada) acontecido a 5 de agosto de 1933. (Fonte: GCiencia)

Evidentemente, e dada a traxedia, o congreso quedou suspendido. Estaba previsto que rematase no teatro García Barbón en Vigo, coa intervención de Gregorio Marañón e de Niceto Alcalá-Zamora, o presidente da República. Polo que a Schrödinger respecta, este colleu rumbo cara a Santander, onde ofrecería seis conferencias. Nunca volvería a Galiza, aínda que si volveu a España dous anos máis tarde, acompañado da súa esposa, nunha viaxe duns oito mil quilómetros a bordo dun BMW. Cabrera e outros compañeiros tentaron procurar a posibilidade de outorgarlle unha cátedra na Universidade de Madrid, sen éxito. A crise política naqueles anos en España e a posterior ditadura franquista provocaron que até o propio Cabrera tivese que verse exiliado.

Xa para finalizar, que tería pasado se o accidente daquel domingo 5 de agosto de 1933 tivese sido fatal para Schrödinger? Que consecuencias tería para a física? O que é seguro é que o famoso experimento mental do Gato de Schrödinger non podería ter chegado a idearse, pois este desenvolveuse en 1935, co que xamais podería acabar sendo substituído polo paradoxo do Pazo de Oca.

Referencias

- [1] **(En liña)** *A semana na que Schrödinger non morreu no pazo de Oca* ; URL: <https://culturagalega.gal/noticia.php?id=25553>
- [2] **(En liña)** *O accidente mortal do que se salvou Erwin Schrödinger no Pazo de Oca*; URL: <https://www.gciencia.com/retro/o-accidente-mortal-do-que-se-salvou-erwin-schrodinger-no-pazo-de-oca/>
- [3] *La mecánica ondulatoria llega a España: Schrödinger en la Universidad Internacional de Santander, agosto de 1934* p. 201–226; Enric Pérez Canals, Gonzalo Gimeno, Mercedes Xipell Gómez Del Moral, e outros/as; (outubro de 2020)

Un Momentum!

Aquí está a revista por e para estudantes da Facultade de Física USC! Cansos de que o momento lineal e angular guíen as nosas traxectorias?, imos escribir unha nova historia; entrevistas, divulgación, filosofía da ciencia e moitos artigos dispares cargamos coa inercia de formar unha nova fiestra para o alumnado. Tes nas túas mans esta oportunidade, deixa que o magnetismo te leve e participa, sé parte deste proxecto: escribe, le, comparte, suxire... A revista é real e as túas ideas poden ser máis que imaxinación, non dubides en deixar a túa pegada neste recuncho físico, onde hai física máis aló das aulas.

Agradecementos:

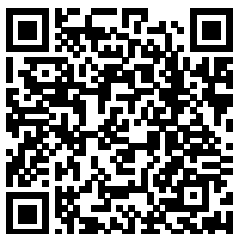
Dende a dirección da revista, queriamos agradecervos a todos por achegarvos a este proxecto. Non hai revista sen lector! Mais, para facela, estivo moita xente implicada que non podemos pasar por alto. Sentímonos moi orgullosos de contar cun equipo tan esmerado que roza a perfección no traballo, grazas aos nosos editores e correctores unha vez máis. Tamén a todas aquelas persoas en calidade de redactoras que crearon o contido para este novo número. Sen eles non sería posible continuar con este proxecto.

Agradecemos a eses docentes constantes que apoian a revista, a Ana Peón pola súa ilusión de escribir, a Gabriel Rodríguez que leva a revista até Dresden. Ademais, grazas a Manuel Rey por abrírnos a porta para colaborar co IGFAE.

Finalmente, grazas tanto ao equipo decanal da nosa facultade como á vicerreitoría de estudantes e cultura.

Esperamos que recibades con entusiasmo este novo número na meseta deste segundo cuatrimestre e sexa un pequeno alivio no asfixiante día nesta facultade.

Edicións anteriores:



WhatsApp:



Co financiamento de:



VICERREITORÍA DE ESTUDANTES
E CULTURA



INSTITUTO GALEGO
DE FÍSICA
DE ALTAS ENERXÍAS



Rede CIGUS
Centros de investigación do
Sistema Universitario de Galicia



Cofinanciado por
la Unión Europea



Fondos Europeos