

# MOMENTUM

A revista estudantil da Faculdade de Física da USC

Núm. 003

Setembro 2025



Kip Thorne escribe unha dedicatoria no libro de sinaturas da Facultade de Física (Maio, 2025)

# Índice

|                                                   |           |
|---------------------------------------------------|-----------|
| <hr/>                                             |           |
| <b>Reportaxes</b>                                 |           |
| <b>Kip Thorne visita Santiago</b>                 | <b>1</b>  |
| Celia Álvarez Álvarez e Diego Couto García        |           |
| <hr/>                                             |           |
| <b>Entrevistas</b>                                |           |
| <b>Coñecendo a Carmen García</b>                  | <b>6</b>  |
| Gemma Ruíz Lavandeira                             |           |
| <hr/>                                             |           |
| <b>Divulgación</b>                                |           |
| <b>Aplicacións da física no campo da medicina</b> | <b>9</b>  |
| Daniel Bostán Boxenean                            |           |
| <b>O signo menos que vale un premio Nobel</b>     | <b>12</b> |
| Víctor Díaz Díaz                                  |           |
| <hr/>                                             |           |
| <b>Microdisertacións</b>                          |           |
| <b>Sobre a realidade do suxeito na física</b>     | <b>15</b> |
| <hr/>                                             |           |
| <b>Recuncho do Profesorado</b>                    |           |
| <b>O meu rexistro de frases de profesores</b>     | <b>16</b> |
| Manuel Galán Rodríguez                            |           |
| <hr/>                                             |           |
| <b>Historia</b>                                   |           |
| <b><i>Pikadon:</i> cando o Sol baixa á Terra</b>  | <b>18</b> |
| Santiago González Gómez                           |           |
| <hr/>                                             |           |
| <b>Filosofía</b>                                  |           |
| <b>Podemos chegar á verdade científica?</b>       | <b>21</b> |
| Mauro Garrido Rodríguez                           |           |
| <hr/>                                             |           |
| <b>Pasatempos</b>                                 |           |
| <b>Sopa de letras, Triscelectrónico e Fortuna</b> | <b>23</b> |
| Autoría Múltiple                                  |           |

Setembro 2025

Núm.003

## Dirección

Sebastián Táboas Pazo

Mauro Garrido Rodríguez

## Edición

Andrea Real Blanco

David Cotelo Varela

## Corrección

Manuel Galán Rodríguez

Cristóbal Santos Sánchez

## Deseño de Logo

Ana Díaz Caride

Elena López Miguélez



revistafisicausc@gmail.com



fisicaUSC/revista







# Kip Thorne visita Santiago

Celia Álvarez Álvarez e Diego Couto García

*Santiago de Compostela acolle o Premio Nobel Kip S. Thorne durante a súa visita o pasado mes de maio.*



Fotografía grupal de Kip Thorne con profesores e alumnos na biblioteca da Facultade de Física da Universidade de Santiago de Compostela. Fotografía de Santi Alvite.

A visita de Kip Thorne foi a cuadrexésimo sexta do programa *ConCiencia*, presente na Universidade de Santiago de Compostela dende o ano 2006. Thorne foi galardoado co Premio Nobel de Física en 2017 polas súas contribucións decisivas para o detector LIGO e a observación de ondas gravitacionais. A súa carreira científica cruzou camiños co seu afán divulgador, o que lle levou a facer contribucións como asesor científico nos filmes de *Contact*, *Interstellar* e *Oppenheimer*.

Tivemos a oportunidade de presenciar a rolda de prensa de Kip Thorne no Pazo de Xelmírez en nome da revista *Momentum*. Ademais, acudimos á clase de gravitación impartida por Javier Mas en conxunto con Kip Thorne, á súa visita da nosa biblioteca e firma de libros, e, finalmente, á súa conferencia na Facultade de Medicina e Odontoloxía que tivo por nome «*Explorando o lado curvado do noso universo: dende buracos negros e buracos de verme, ata ondas gravitacionais e viaxes no tempo*».

Con esta pequena crónica pretendemos capturar algunhas das reflexións de actualidade coas que nos deixou

o nobel tras a súa visita, mesturadas con algúns dos seus coñecementos científicos que logrou poñer ao alcance de todo o público.

## Rolda de prensa no Pazo de Xelmírez

O xoves 8 de maio ás once da mañá chega Kip Thorne ao Pazo de Xelmírez acompañado por Jorge Mira, director do Programa *ConCiencia* e catedrático da USC; José Edelstein, padriño nesta edición de *ConCiencia*; Carolee Joyce Winstein, a súa esposa, e periodistas e fotógrafos cos que nos sentamos a escoitar as respostas do invitado ao programa ante as inquietudes que varios presentaron ao longo da rolda. Tras as pertinentes presentacións comezan as preguntas.

***O primeiro periodista convida a Thorne a reflexionar sobre a competitividade na ciencia e o aumento das contribucións de Asia. Pregunta como debería actuar Europa ante esta situación.***

Kip Thorne afirma que Asia comezou as súas con-

tribucións hai uns quince anos e destaca a importancia da colaboración internacional. Lembra os seus tempos en Moscova colaborando durante un mes ao ano con científicos soviéticos como exemplo deste deber que lles corresponde a tódolos investigadores de facer un mundo mellor.

Desvía a reflexión mencionando as novas áreas de investigación no século XXI. Os campos científicos da intelixencia artificial, os materiais, a computación cuántica... foron inaugurados nas universidades. As empresas non se comezan a interesar por un sector ata que este sexa suficientemente rendíbel. O caso da intelixencia artificial é claro: este campo xorde na década dos anos sesenta pero non é ata tempos recentes que se masificou o seu uso e o investimento das empresas en melloras no campo.

Advirte que será necesario confiar na actuación de Europa ante as recentes accións, que cualifica de estúpidas, que a administración Trump está a tomar de cara ás universidades dos Estados Unidos e ás súas capacidades investigadoras. Predí que fronte á competición actual cos avances da China, as universidades europeas serán as máis importantes, tomando o papel de protexer o coñecemento e o labor investigador máis puro.

***Continuando cos temas de actualidade, preguntanlle polos beneficios e riscos da intelixencia artificial no futuro.***

Kip Thorne puntualiza que non posúe especial control sobre este dominio. Asegura que coida sempre de ter precaución ao opinar do que non sabe. En contraste coa súa seguridade respecto dos beneficios que pode proporcionarnos a intelixencia artificial, amosa incerteza ante os posíbeis prexuízos e menciona o seu amigo Stephen Hawking como exemplo de científico que si manifestaba unha forte preocupación polos perigos que estes avances poderían supor.

Toda a investigación ata 2015 fíxose nas universidades. As redes neuronais artificiais (ANN) comezaron a desenvolverse nos anos oitenta en Caltech –universidade onde Kip S. Thorne se graduou e posteriormente foi nomeado catedrático de física teórica Richard P. Feynman–. Estas ideas aplicáronse en aprendizaxe automática e viron o rápido crecemento do sector da man dos modelos extensos de linguaxe (LLM) promovidos polas grandes empresas como OpenAI. Esta evolución sucedeu de xeito similar no seu eido coas tecnoloxías cuánticas; o éxito comercial destes avances veu precedido de décadas de investigación nas universidades.



Rolda de prensa no Pazo de Xelmírez. De esquerda a dereita: Jorge Mira, Kip Thorne e José Edelstein.

***Ante a ameaza que actualmente representa a administración Trump para a universidade, que medidas deberían tomar estas institucións?***

Thorne ve necesaria unha loita pola conservación do labor realizado nas universidades estadounidenses e presaxia a oportunidade que terá Europa de acoller investigadores e enxeñeiros dos Estados Unidos no caso de que o presidente continúe danando estas institucións. Kip Thorne reflexiona sobre como en Europa debemos investir os nosos recursos en construír e mellorar as nosas universidades, e pon de exemplo a iniciativa de Macron, quen invitou a científicos a traballar en Francia ante os recortes de presupostos nos Estados Unidos.

O papel que tiveron Os Estados Unidos na acollida de refuxiados do réxime nazi será o que espera ver el desenvolvendo ás nacións europeas nas próximas décadas, retomando o papel de liderado que ten o seu país. Remarca que debemos confiar en Europa para frear estas e outras ameazas actuais, como os esforzos imperialistas de Putin. O científico experimentou a Segunda Guerra Mundial sendo un neno e teme que volva a acontecer algo similar. Moito máis que os avances tecnolóxicos, isto é o que preocupa a Kip Thorne.

***A maiores da estupidez, hai outros motivos para a guerra contra o coñecemento nos Estados Unidos?***

O nobel asevera non comprender a psicoloxía detrás do presidente e non está seguro de que pode motivar o seu comportamento. Cre que a meirande parte é estupidez, pois Donald Trump parece non comprender que está a destruír a incubadora tecnolóxica do século XXI. O goberno estadounidense ve a universidade como unha máquina de propaganda en contra do seu réxime, que promove políticas liberais e que se beneficia de inxentes cantidades de fondos públicos. O problema non é sobre políticas liberais fronte a conservadoras, pois no país xa





hai políticos de ámbolos lados uníndose contra Trump e tódalas súas políticas. Non é unha cuestión de cores, senón que todos deben unirse contra as ameazas destas políticas, ao igual que contra Putin.

### ***Ve preto o perigo dunha guerra nuclear?***

Sinala a posibilidade dunha guerra nuclear. Este perigo xa existía nos tempos da Unión Soviética a finais da década dos 60, cando Kip Thorne comezaba a pasar tempo alí. Foi testemuña das tensións da Guerra Fría e coñeceu a científicos que traballaron na creación da bomba de hidróxeno, como foi o caso de dous dos seus mentores soviéticos. Tamén coñeceu contribuidores da bomba americana como Oppenheimer e Wheeler.

Considera que na actualidade tense menos consciencia do perigo que encarna o uso de armas nucleares, a diferenza do pasado. Na URSS vivíuse moita máis destrución que nos Estados Unidos, mais ámbolos dous países sabían os riscos aos que se estaban expondo.

Comenta que, pola contra, Biden entendía ben os perigos e tiña moito coidado coas armas que concedía a Ucraína polo medo a unha guerra nuclear, quizais demasiado. Esta cuestión require de gran coidado por parte de tódolos líderes das nacións, de gran sabedoría e liderado. Manter un muro contra Putin cando as ameazas son de guerra é moi complicado.

### ***A maiores destas ameazas, supoñen os restos de foguete que se depositan en órbita un perigo para a vida na Terra?***

A caída destes obxectos en lugares da Terra nos que poidan causar danos non lle causa temor, di que este suceso é moi pouco probábel. Si que amosa preocupación polo lixo espacial, xa que supón un risco para o desenvolvemento tecnolóxico. Advirte de que non é un experto, pero que ten a sensación de que as barreiras para non subir armas ao espazo estanse a debilitar e amosa de novo a súa preocupación.

### ***Cambiando de tema, o seguinte periodista inquire se nalgunha ocasión lle preguntaron se era posíbel retroceder no tempo a raíz do filme Interstellar.***

É certo que lle preguntaron nalgunha ocasión, pois moita xente está interesada en viaxar atrás no tempo para poder cambiar algún suceso dramático que lles aconteceu nas súas vidas. Temos indicios de que existe un mecanismo físico que parece prohibir a viaxe no tempo, comprendémolo parcialmente e non sabemos se prevé esta viaxe en tódolos casos. Hawking propuxo a súa *conxectura de protección cronolóxica*, a través da cal se afirma que a historia non pode ser cambiada. Sabemos que se fose posíbel a viaxe no tempo, non seríamos capaces de cambiar o acontecido. O mecanismo que prohibe

a creación de máquinas do tempo que permitisen levar a cabo cambios na historia se describe como aquel que provoca unha "explosión" de tales máquinas. Kip Thorne traballou de forma independente nesta investigación cos seus alumnos e Hawking.

### ***E, falando dos avances da física, que futuro lle augura á súa evolución nos próximos trinta ou corenta anos?***

Kip Thorne non sabe con certeza cara a onde conducirá o futuro da física. «Cando miro cara a atrás vexo grandes cambios e grandes sorpresas, aínda que algúns desenvolvementos foron previsíbeis. Grandes desenvolvementos chegaron e chegarán. A cuestión que máis me interesa que resolveremos probablemente nese tempo é como se formou o Universo. É unha das grandes cuestións na miña opinión».

### ***Por que son as ondas gravitacionais relevantes para o estudo do inicio do Universo?***

O Universo era tan quente que a luz non se podía propagar, ao igual que o resto da radiación. Soamente podían penetrar as ondas gravitacionais, polo que estas conteñen moita información sobre o nacemento do universo. «Creo que terán un gran papel no estudo do inicio do Universo». Os físicos están a loitar por comprender a gravidade cuántica, tamén de gran relevancia para o estudo do comezo do Universo.

### ***Interstellar, Oppenheimer... Como foi achegar a física á xente máis allea a este mundo mediante o cine?***

Kip Thorne gozou de traballar con Nolan e outros integrantes do equipo en *Interstellar*. A película foi diferente a outras de Hollywood porque foi xunto cunha produtora os que comezaron a desenvolver a idea. Posteriormente, Nolan quixo contribuír ás ideas para o filme e este rematou incluíndo moitas capas de ciencia. Escribiu ademais o libro *A ciencia de Interstellar* no que trata de explicar a calquera lector os fenómenos físicos que se utilizan ao longo da longametraxe.

### ***E agora mesmo está a traballar nalgunha película? Ten algunha actualización?***

Kip Thorne comezou a creación dun novo filme con Lynda Obst, unha das persoas do equipo de *Interstellar* e coa cal mantivo unha relación moi achegada –foi posto nunha cita ás cegas con ela por Carl Sagan antes de que a anterior se convertese en produtora de filmes–. Thorne comentou de forma divertida que Lynda era a súa “esposa de Hollywood”. Lynda estaba loitando pola película e o proxecto avanzaba a un ritmo moi lento; pero faleceu hai uns meses –agora xa haberá case un

ano—. Pensa en escribir tamén un libro do filme, pois a súa publicación non requiriría de tantos recursos.

### ***E para pechar a rolda de prensa, ten algunha lembranza especial de Feynman?***

Richard Feynman foi un dos máis grandes científicos que Kip Thorne coñeceu e do propio século XXI. Coñeceu cando era estudante en Caltech e rematou facéndose un bo amigo seu. Feynman estaba moi interesado na filosofía da ciencia e lía moito sobre o tema. Interesábase polo significado de todo. Inicialmente, Feynman mostraba escepticismo con respecto á utilidade da filosofía dentro do ámbito científico. Catro anos despois de graduarse, Thorne volveu a Caltech, e Feynman recente-

mente publicara un libro de filosofía da ciencia no que daba nocións acerca de como funcionaba esta. Reflexionaba sobre a posibilidade de ver un tema dende moitos puntos de vista diferentes; sobre como o que realmente importa é ter tódolos puntos de vista en conta e non só o correcto.

O físico visitaba a Feynman cando tiña unha idea profunda para ver se era capaz de argumentarlle en contra dela; eran sesións moi enriquecedoras. Consideráboo un gran mentor e a súa forma de ver o mundo reflectida nos seus libros contribuíu ao seu sentido como ser humano. Dende logo, Feynman foi unha das grandes influencias en como traballa e como ensina Kip Thorne.



Visita de Kip Thorne á clase de Gravitación o venres 9 de maio de 2025. Fotografía de Santi Alvite.

### **Visita á Facultade: clase de Gravitación e charla na biblioteca**

Ao día seguinte desta rolda de prensa, o nobel acudiu como invitado á clase da materia de Gravitación que impartía Javier Mas na Aula Magna da Facultade de Física. Optou por achegar os seus comentarios á clase en vez de impartila el, alegando que xa estaba maior para o segundo. A parte máis técnica da charla centrouse nos temas de estudo de Thorne e Hawking, e soamente daremos breves pinceladas. Falaron da *lei da área de Hawking*, probada experimentalmente hai pouco. Thorne comentou que Hawking obtería o Premio Nobel por este logro de seguir vivo. Posteriormente, o tema centrouse no buraco negro de *Interstellar*. Comentan que a forma na que se visualiza *Gargantua* –o buraco negro– no filme non se corresponde coa realidade que se coñece para un buraco negro que distorza o tempo.

Nolan sacrificou a exactitude técnica en beneficio da claridade visual das escenas que involucraban este elemento do filme. Con moitos outros efectos sucedeu o mesmo, e o director incorporounos para facer a película máis interesante sacrificando fidelidade científica; como no caso do son –no espazo non se debería escoitar nada pois non hai aire–. Moitas veces Thorne pensaba que un suceso sería fisicamente imposible e Nolan instáballe a comprobar con cálculos se realmente o era. Ás veces discutían durante múltiples días sobre feitos científicos. O libro da ciencia detrás de *Interstellar* non se difundiu en conxunto coa estrea do filme; Lynda Obst temía que a xente non acudise a vela por medo a que a película fose demasiado científica.

Despois falaron brevemente de *Contact*. Thorne contribuíu ao filme, pero chegou tarde no seu desenvolvemento. Cando se incorporou, despediron o director e comezaron a produción sen mellorar a ciencia do final





da película.

Pasaron a comentar o descubrimento das ondas gravitacionais. Tras meses de verificación, confirmouse a detección das ondas gravitacionais; este momento foi demasiado bo para ser verdade, comenta Kip Thorne. Agardábase poder observar varias ondas cada día, pero os sistemas de detección de erros non eran nin son tan precisos como se require.

Tras as preguntas dos alumnos, rematou a clase e Kip Thorne é acompañado á biblioteca por toda a comunidade de Física. Apreciou a exposición que se lle dedicou, comentando e asinando libros que publicou como o *Gravitation*, escrito en conxunto cos físicos Charles W. Misner e John A. Wheeler. O nobel dedicou unhas palabras para esta obra en especial e dixo que o seu obxectivo principal con *Gravitation* era o de devolver a intuición física á relatividade, que é un campo monopolizado por matemáticos. Moitos compañeiros expresaron o seu descontento pola gran cantidade de palabras fronte a ecuacións que a obra rematou albergando.



Foto entre estudantes e o Nobel de física. Fotografía de Laura Quintáns.

Os alumnos tiveron a ocasión de levar os seus exemplares para que Kip Thorne llos dedicasa e de agradecerlle a súa visita. Tamén agradecemos nós esta oportunidade de reflexionar sobre diversas cuestións, algunhas das cales parecen ser alleas á física pero ás cales a visita de Kip S. Thorne coidou de pór no foco. En xeral, tanto a comunidade universitaria coma todo aquel público interesado en comprender os misterios que garda o Universo, e que a física intenta comprender e desvelar, puido achegarse a eles da man de Kip Thorne durante estes días do pasado mes de maio.

A numerosa asistencia á súa conferencia na Facultade de Medicina e Odontoloxía foi tal, que superou a capacidade do Salón de Actos. Público de tódalas idades, ocupacións e procedencias acudiu para poder escoitar a Kip Thorne explicar cuestións que para moitos poden

semellar alleas e reviradas, pero que fundamentalmente espertan a curiosidade en todos nós, seres humanos.



Kip S. Thorne escribindo unha dedicatoria no libro de sinaturas da Facultade de Física durante a súa visita á biblioteca. Fotografía de Víctor Díaz Díaz.

O labor de achegar a física e a ciencia a tódalas persoas, invitando a pensar e comprender, dende o respecto e a humildade, pode non ser doado; pero Kip Thorne amosounos mediante o seu labor divulgativo e durante o seu paso por Santiago de Compostela que si é posíbel.



Primeira e segunda edición da revista *Momentum* asinadas por Kip S. Thorne. Fotografía de Víctor Díaz Díaz.

## Referencias

- [1] U. de Santiago de Compostela, Programa ConCien-cia, (2025).

# Coñecendo a Carmen García

Gemma Ruíz Lavandeira

*Sobre a súa traxectoria e a física de partículas experimental internacional e en España.*

Carmen García García é profesora de investigación no Instituto de Física Corpuscular (IFIC), é doutora en Física pola Universitat de València. Especializada na física experimental de partículas, o seu traballo enfócase na construción de grandes detectores, a súa operación e a análise dunha gran cantidade de datos, sempre enmarcado en grandes colaboracións a escala internacional. Realizou a súa tese de doutoramento no experimento Soudan-II, en Minnesota, e posteriormente traballou nos dous grandes aceleradores do laboratorio europeo CERN (Xenebra), no experimento DELPHI do acelerador LEP e no experimento ATLAS do LHC. Ademais de traballar no CERN, Carmen foi investigadora no Rutherford Appleton Laboratory (O Reino Unido) e no Argonne National Laboratory (Os Estados Unidos).

Sen dúbida, a súa contribución máis destacada foi a súa participación no experimento ATLAS, onde contribuíu ao desenvolvemento e construción do detector interno de trazas, na vangarda da tecnoloxía. O éxito desta contribución posicionou o seu laboratorio como centro de referencia internacional en detectores de trazas, o que lles permite na actualidade afrontar un novo reto: a actualización do detector para a fase de alta luminosidade prevista para 2030, onde levará a tecnoloxía ao límite.

Por outra parte, a profesora García tamén ostentou os cargos de vicedirectora do IFIC, coordinadora da Área de Física e Tecnoloxías Físicas do CSIC, coordinadora adxunta da Área Global de Materia (tamén do CSIC) e presidenta da Comisión de Grandes Infraestruturas do CSIC. Desde a ciencia básica, contribuíu a diversos desenvolvementos tecnolóxicos, sendo fundadora da empresa de base tecnolóxica Alibava Systems.

***Moitas grazas, Carmen, por acceder a participar na revista e contarnos sobre a Física de Partículas e a investigación neste campo. Para comezar, gustaríanos saber que é o que máis te gusta do teu campo, a física de partículas, e en concreto, da física experimental.***

O que máis me gusta da física de partículas é que trata de responder algunhas das preguntas máis fundamentais sobre o Universo: de que está feita a materia?, como interactúan as partículas elementais?, por que



**Figura 1:** Doutora Carmen García García; profesora de Investigación do CSIC, no Instituto de Física Corpuscular (IFIC), centro mixto do Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) e da Universitat de València (UV).

existe masa ou simetría? E, en particular, a física experimental apaixóname porque é onde as ideas se poñen a proba. É un campo no que se mesturan teoría, tecnoloxía punta e moitísimo traballo en equipo.

O fascinante é ver como unha idea que nace en papel pode acabar dando forma a un experimento real, deseñado para comprobala ou incluso para descubrir cousas completamente novas. Apaixóname formar parte do proceso de construír detectores na fronteira da tecnoloxía, capaces de medir fenómenos que duren menos ca un pestanexo, cunha precisión increíble. Participar en todo este proceso –desde imaxinalo, construílo, facelo funcionar e entender os datos que nos dá–, como me aconteceu co experimento ATLAS, é un auténtico privilexio. Cada compoñente que construímos leva detrás anos de esforzo colectivo, innovación e enxeñaría de precisión. Ver como eses sistemas permiten facer descubertas científicas que mudan a nosa comprensión do mundo é profundamente gratificante.

Tamén é un campo moi humano, porque esixe unha colaboración internacional a grande escala e unha enorme creatividade tecnolóxica.





***Contribuíches significativamente no desenvolvemento do ATLAS (un dos detectores do LHC no CERN, Suíza), desde o teu punto de vista, que importancia ten todo o que se investiga alá? Hai científicos e científicas de máis áreas da física ou mesmo doutras disciplinas que usen eses coñecementos noutros campos?***

A investigación que se realiza no ATLAS ten unha importancia fundamental porque nos permite explorar os compoñentes máis elementais da materia e as forzas que rexen o Universo. Grazas a este tipo de experimentos puidemos confirmar o Modelo Estándar da física de partículas e descubrir o bosón de Higgs, pero tamén seguimos buscando respostas a preguntas abertas como a natureza da materia escura ou por que hai máis materia ca antimateria no Universo.

Ademais, a ciencia que facemos no ATLAS, e en xeral no CERN, non queda só dentro da ciencia básica. O desenvolvemento de tecnoloxías para construír detectores extremadamente precisos e operar con volumes masivos de datos tivo un impacto directo noutras disciplinas. Por exemplo, a tecnoloxía de detección que desenvolvemos utilízase en medicina para mellorar a imaxe médica, por exemplo, mediante técnicas como a tomografía por emisión de positróns. Tamén os avances en aceleradores teñen aplicacións no tratamento do cancro mediante tecnoloxías como a hadronterapia. A análise de datos masivos, no que o CERN foi pioneiro, tamén se aplica en áreas como a intelixencia artificial, a meteoroloxía, a economía, ou mesmo en estudos sociais.

Alén disto, no ATLAS traballamos cóbado con cóbado con enxeñeiros, informáticos, expertos en materiais e científicos de distintas ramas. Esta interdisciplinariedade é un dos grandes valores dos experimentos no CERN: non só facemos ciencia fundamental, senón que creamos coñecemento, tecnoloxía e redes humanas que se transfiren á sociedade.

***Dado que traballaches en distintos países como no Reino Unido (no Rutherford Appleton Laboratory), nos Estados Unidos (no Argonne National Laboratory), en Suíza ou en España, cales son as principais diferenzas entre a educación universitaria e/ou a investigación científica entre estes lugares? Ten España suficiente capital humano e económico para contribuír significativamente ao avance da Física de Partículas? En xeral, dedícase suficiente esforzo para fomentar a ciencia básica?***

Unha das principais diferenzas que observei entre países é a maior estabilidade do sistema científico. En lugares como O Reino Unido ou Os Estados Unidos, as

traxectorias científicas tenden a ser máis claras e están mellor financiadas, o que permite atraer e reter talento con maior facilidade. Tamén adoitan dispoñer de estruturas máis flexibles para incorporar a innovación tecnolóxica e transferir coñecemento ao sector privado. En cambio, en España, aínda que hai unha gran capacidade humana e científica, o sistema a miúdo sofre da falta de continuidade no financiamento, excesiva burocracia e escasa planificación a longo prazo, o que penaliza a competitividade internacional.

Dito isto, España demostrou que pode contribuír de xeito moi significativo ao avance científico e, en concreto, á física de partículas. Grupos como o noso no ATLAS lideraron desenvolvementos tecnolóxicos adiantados, crearon xeracións de investigadores e estiveron presentes en descubrimentos chave. A comunidade científica española é moi valorada fóra das nosas fronteiras, tanto pola súa formación como polo seu compromiso.

No entanto, o investimento en ciencia básica segue a ser insuficiente. A física de partículas, como outras disciplinas fundamentais, require unha visión a longo prazo e un compromiso sostido. Investir en ciencia básica non é un luxo, é unha necesidade estratéxica. Xera coñecemento, impulsa a innovación tecnolóxica, forma capital humano altamente capacitado e, sobre todo, constrúe unha sociedade máis preparada para os desafíos do futuro.

***O ano pasado foi galardoada co Premio Nacional de Investigación na categoría de Ciencias Físicas, parabéns por este gran logro! Que importancia ten o papel dos premios á hora de incentivar o avance científico? Ademais, pola primeira vez impúxose paridade de xénero nas candidaturas, cre que hai que incentivar máis a ciencia entre as mulleres, especialmente a experimental e entre as máis novas, ou o que máis falta é representar as que xa hai?***

Moitas grazas, recibir o Premio Nacional de Investigación na categoría de Ciencias Físicas foi unha grande honra e tamén unha oportunidade para visibilizar o traballo de tantos investigadores e investigadoras que, coma min, dedican a súa vida á ciencia básica desde hai décadas. Os premios son importantes porque non só recoñecen traxectorias individuais, senón que tamén axudan a poñer en valor a ciencia ante a sociedade. Visibilizan que detrás de cada descuberta hai anos de esforzo, colaboración internacional e, acotío, moita resiliencia.

Respecto á paridade nas candidaturas, paréceme unha medida necesaria. Non porque haxa mulleres con méritos científicos, senón porque moitas veces o seu traballo non se ve, non se recoñece ou non se propón. A ciencia

segue sendo un ámbito con desequilibrios estruturais, especialmente en áreas como a física experimental, onde aínda somos poucas.

Por iso, creo que hai que actuar en ambas as fronteiras: é fundamental incentivar as vocacións científicas entre nenas e mozas, mostrando referentes reais, pero tamén é urxente visibilizar e apoiar as mulleres que xa están no sistema, moitas das cales fixeron contribucións excepcionais sen obter o mesmo recoñecemento ou visibilidade que os seus compañeiros homes.

***Agora, para cambiar ao seu labor como investigadora do Instituto de Física Corpuscular de Valencia, este centro ten máis de 70 anos de historia e aínda que non puido vivir todos estes anos, gustaríanos que nos contase como mudou o labor investigador no seu centro e en España ao longo destas décadas. Cales son os seguintes retos científicos aos que se encaran?***

Este ano celebramos o 75º aniversario do IFIC, aínda que, evidentemente, eu non levo tanto tempo aquí. Porén, fun testemuña dunha transformación profunda na física experimental de partículas en España desde que comecei a miña carreira.

Poucos anos antes de rematar a miña licenciatura, púxose en marcha o Plan Mobilizador de Altas Enerxías, unha iniciativa chave para impulsar esta disciplina coincidindo co reingreso de España no CERN, após oito anos de ausencia. Nesa época, creáronse varios grupos experimentais co obxectivo de participar nos experimentos do acelerador electrón-positrón LEP, que entraría en funcionamento en 1989. Desde o meu punto de vista, ese foi un momento chave que marcou o inicio do verdadeiro desenvolvemento da física experimental de partículas no noso país.

Desde entón, a evolución foi extraordinaria. No ámbito da física de partículas en aceleradores, a madurez chegou coa participación no acelerador protón-protón LHC, que comezou a operar en 2009. Este proxecto supuxo unha transformación profunda en múltiples dimensións: científica, tecnolóxica, organizativa e estratéxica. Pasamos de depender case exclusivamente de colaboracións externas a liderar proxectos científicos e tecnolóxicos de gran magnitude, tanto a nivel europeo como internacional. Hoxe contamos con grupos que deseñan detectores de vangarda, desenvolven simulacións avanzadas e realizan análises de datos fundamentais para a física de altas enerxías.

No referente ao IFIC, o grupo experimental comezou como un pequeno equipo pioneiro en física nuclear e de partículas, con recursos limitados, pero unha enorme vocación investigadora. Hoxe é un centro de referencia

internacional, con máis de 350 persoas traballando en física experimental e teórica de partículas, astropartículas, física nuclear, así como aplicacións para a sociedade. Foi recoñecido en dúas ocasións como centro de excelencia Severo Ochoa.

Mirando ao futuro, o IFIC afronta varios retos apaixonantes: completar a actualización do detector ATLAS para o futuro HL-LHC, participar en novos experimentos para procurar materia escura ou estudar a física de neutrinos, tamén en avanzar na transferencia das nosas tecnoloxías en ámbitos como a medicina. Outro reto esencial é a retención do talento mozo: formamos investigadores excelentes, pero necesitamos que atopen oportunidades reais para consolidar a súa carreira no noso país.

Estou convencida de que o futuro da investigación no IFIC e en España pasa por combinar a excelencia científica cunha estrutura estable e un compromiso institucional sólido. Só así poderemos seguir contribuíndo tanto ao coñecemento fundamental como ás súas aplicacións para a sociedade.

***E, xa para rematar, que é o máis satisfactorio da física de partículas? Poderías deixar algún consello aos futuros físicos e físicas de Santiago?***

O máis satisfactorio da física de partículas é que, no fondo, tenta responder as preguntas máis profundas que nos podemos facer: de que está feito o Universo?, por que existe a materia?, cales son as leis fundamentais que rexen todo o que nos rodea? Participar nun campo que combina a curiosidade intelectual co desenvolvemento de tecnoloxías avanzadas e que ademais require unha colaboración humana a escala mundial, é un privilexio.

Tamén é moi gratificante ver como o traballo colectivo dá froitos, desde descubrir unha nova partícula ata construír un detector de precisión atómica. A física de partículas non se fai en solitario: constrúese entre moitos, e iso convértea tamén nunha gran lección de cooperación e humildade.

Aos futuros físicos e físicas de Santiago de Compostela diríalles que non teñan medo de facerse preguntas grandes, que procuren aquilo que lles apasiona de verdade, e que entendan que facer ciencia é unha carreira de fondo. Fai falta esforzo, paciencia e compromiso, pero tamén entusiasmo e creatividade. Non se trata só de encontrar respostas, senón de aprender a ver o mundo doutro xeito.

E, sobre todo, que non se autoimpoñan límites. A ciencia necesita todas as olladas, todas as voces, e todas as ideas. O Universo é demasiado fascinante como para non tentar entendelo.





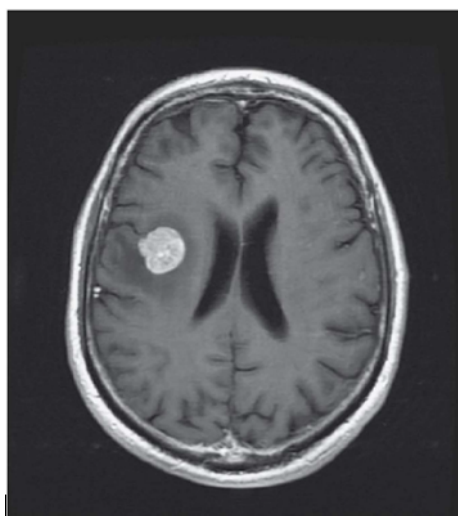
# Aplicacións da física no campo da medicina

Daniel Bostán Boxenean

*Técnicas de imaxe por Resonancia Magnética Nuclear.*

## Introdución

Acode ao Servizo de Neuroloxía un varón de 56 anos, fumador dun paquete diario durante 34 anos. Diagnosticado de carcinoma microcítico de lobo pulmonar medio (dereito) hai 15 meses, sendo positivo para PD-L1 e CD-56, parece responder ao tratamento tras oito sesións e catro meses de carboplatino e etopósido a doses elevadas segundo protocolo NCCN 2024. Na consulta refire hemiparesia contralateral e problemas na fala, polo que o relacionamos a afectación de cápsula interna e córtex. Exploración física: PA: 126/87 mmHg, FC: 85 lpm, Sa-tO<sub>2</sub>: 98%, auscultación pulmonar e cardíaca normais. Semella consciente, afebril. Porén, sospeitamos lesión do Sistema Nervioso Central, dado que presenta hiperreflexia e signo de Babinski positivo, así que derivámolo a radioloxía ante sospeita de metástase (fig. 1).



**Figura 1:** RMN en corte axial T1. Obsérvase unha masa tumoral no lobo temporal dereito, con afectación talamocortical.

Pero de que maneira Philips ou Siemens<sup>1</sup> conseguen obter tal detalle cun *doughnut* de metal xigante?

## Historia da Resonancia Magnética Nuclear

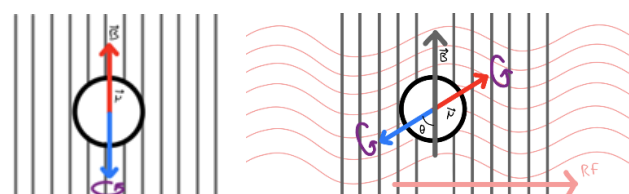
En 1938, Rabi bautiza o fenómeno da Resonancia Magnética Nuclear (NMR), consistente en que algúns núcleos teñen a capacidade de absorber e remitir enerxía en forma de radiofrecuencia (RF) se están sometidas a un campo magnético  $\vec{B}_0$ . Non foi ata 1973 que Paul Lauterbur conseguiu un método para codificar espacialmente os

sinais da NMR empregando gradientes lineais de campo. A diferenza doutras técnicas de imaxe convencionais, a NMR non emprega radiación ionizante –as ecografías tampouco, pois interpretan sinais por ultrasóns–, o que a fai unha alternativa inocua.

## Concepto básico da NMR

Na NMR diagnóstica, emprégase o átomo de hidróxeno pola sinxela razón de que os animais temos abundante H, principalmente en forma de auga e graxa (85% aprox. da masa total). Ademais, a procura do protón permite distinguir os diferentes tecidos que atopamos no corpo debido ás propiedades químicas que teñen.

O momento angular do núcleo magnetizado produce un momento magnético ( $\vec{\mu}$ ), definido pola relación xiomagnética ( $\gamma$ ) particular para cada átomo (42,58 MHz/T no hidróxeno). Como é de esperar, un conxunto de momentos magnéticos non terá aliñación ningunha ata que apliquemos un campo magnético externo ( $\vec{B}_0$ ), o que fai que os spins se ordenen co campo magnético (fig. 2 esquerda). É fundamental para entender a NMR coñecer a frecuencia de Larmor  $\omega_0$ . (fig. 2 dereita)



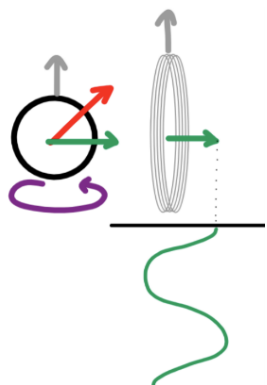
**Figura 2:** Esquerda: Núcleo aliñado a un campo magnético. Dereita: Núcleo en fase de relaxación lonxitudinal T1. Ecuación de Larmor:  $\vec{\omega} = \gamma \vec{B}$

Xa entendemos por que nuclear, e tamén por que magnética, pero por que resonancia? Os spins están aliñados –case– perfectamente con  $\vec{B}$ , pero ao “atordalos” cun pulso de radiofrecuencia (pulso RF) seguirán xirando en sentido perpendicular ao campo magnético coa mesma frecuencia  $\omega$  que o pulso RF, e esa oscilación emite un sinal medible. Pasado un tempo (variable segundo o tecido e o pulso RF), o spin volve a orientarse con  $\vec{B}$  (denominado magnetización ou relaxación lonxitudinal). O movemento que realiza durante a reorientación é a precesión (e nutación) arredor de  $\vec{B}$  cun ángulo  $\theta$ , que é de  $90^\circ$  con cada pulso RF, e decae coa relaxación lonxi-

<sup>1</sup>Xunto con General Electrics e Toshiba, as principais comercializadoras de equipos NMR hoxe en día.

tudinal, xa que lembremos que en todo momento o spin segue a rotar coa mesma frecuencia. Veremos en profundidade a interpretación dos compoñentes vectoriais e o que significan (fig. 3).

$$S(t) = \gamma N B \sin(\theta) \cos(\omega t) \quad (1)$$



**Figura 3:** En gris  $\vec{B}$ , en vermello  $\vec{\mu}$ , en verde a proxección de  $\vec{\mu}$ , que constitúe a intensidade do sinal ao introducilo nunha bobina.

Lembremos algúns fundamentos como a lei de Lenz, entre outros, para ter ben en conta os determinantes da amplitude e frecuencia da función. Debemos entón diferenciar moi ben dous fenómenos:

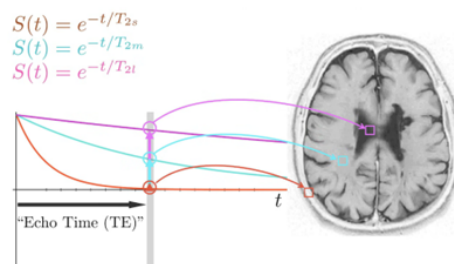
- Relaxación  $T_2$ : é o tempo que o núcleo rota pola influencia do pulso RF perpendicular ao campo magnético. Durante  $T_2$ ,  $\theta$  é máximo e constante. O sinal obtido do conxunto de protóns denomínase magnetización transversal.
- Relaxación  $T_1$ : entre o instante en que remata  $T_2$  e se alíña correctamente con  $\vec{B}$ . En  $T_1$ ,  $\theta$  vai decaendo. O sinal do conxunto é a magnetización lonxitudinal.

Cada tecido ten uns tempos de relaxación distintos, incluso pode ser que  $T_1 \neq T_2$  no mesmo tecido, por exemplo en  $T_2$  veremos o líquido cefalorraquídeo de cor branca, mentres que en  $T_1$  será negro (fig. 1), polo que cada zona emitirá un sinal distinto, que se traduce nunha imaxe de altísima precisión.

## Relaxación $T_2$

Agora ben, non estamos tendo en conta a cantidade innumerable de átomos de  $H$  que hai por unidade de volume; e aínda que comezan (tras o pulso RF) co mesmo momento angular, pasado un tempo empezan a desfasarse e decaendo  $\theta$ , o que dá como resultado unha curva de “decay” na amplitude desas oscilacións no eixo horizontal (fig. 4). Hai basicamente dous parámetros

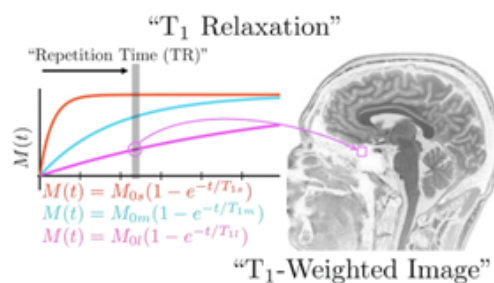
que determinan o contraste entre os tecidos. Un deles é ese *decay*, onde cada tecido ten un  $T_2$  distinto (curva distinta). O outro é  $N$ , é dicir, a densidade de núcleos xirando (a amplitude correspondente a  $t = 0$ ). Estas características son intrínsecas do tipo de tecido que estamos a estudar. Porén, o que o radiólogo pode modular é o *Time of Echo* (TE) que é o tempo que esperamos para recibir o sinal dende que se enviou o pulso RF.



**Figura 4:** Funcións *decay* en  $T_2$  para distintos tecidos. O sinal, loxicamente, é sinusoidal e decae, polo que a curva da imaxe obtémola de axustar a ecuación de forma que vemos a variación das amplitudes no tempo. Imaxe NMR de escala de grises invertida, recurso moi empregado para resaltar mellor estruturas como a duramáter.

## Relaxación $T_1$

A curva de  $T_1$  é distinta pero intuitiva. É, por así dicilo, o fenómeno inverso ou consecuente de  $T_2$ . Estando todos os núcleos xirando con ángulos distintos, xa desfasados, pasado ese tempo ( $T_1$ ) a maioría dos núcleos están remagnetizados con  $\vec{B}$ . Neste caso, obtemos unha gráfica característica que, como xa veremos, complementa ben o sinal obtido na relaxación  $T_2$  (fig. 5). Podemos tamén modular o tempo que esperamos entre estimulacións repetidas, é dicir, cada canto enviamos un pulso RF. É o que chamamos *Time of Repetition* (TR)



**Figura 5:** Curvas de  $T_1$ , coa barra gris indicando o TR. Pódese observar que un tecido con  $T_1$  longo (rosa) corresponde cunha zona con menos sinal para ese TR. Imaxe con cor invertida.

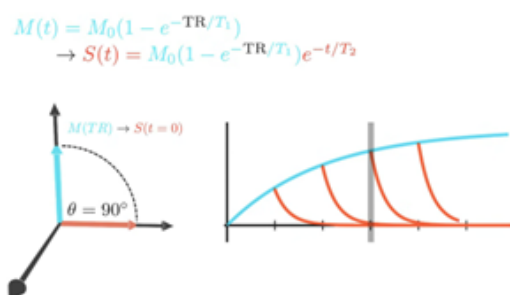
## Relacións das relaxacións

O desafío está en escoller os TE e TR adecuados para cada situación, que depende non só da “exposición” que





queiramos (como se dunha fotografía se tratase), senón das características do propio tecido. O rabdomiosarcoma é un tumor mesenquimal<sup>2</sup> de orixe embrionaria que tende a diferenciarse a músculo esquelético. Ante un estudo por NMR, o radiólogo ten que ter en conta a exploración física e a historia clínica para orientar un diagnóstico e así predicir non só o tecido que buscamos, senón o tipo de tumor (que como ten orixe mesodérmica, será semellante ao músculo circundante), polo que debe elixir as secuencias máis óptimas en función dos  $T1$  e  $T2$  da masa que buscamos.



**Figura 6:** Relación TR/TE na recepción de sinal. Un TR curto inflúe na amplitude en  $t = 0$  para a fase  $T2$  (liña laranxa). Cada nova barra laranxa é un pulso RF, o que “reinicia” un  $T2$ .

Como se pode comprobar na Figura 7, o TE depende directamente do TR, e con el o sinal que esperamos recibir dos tecidos. Un tecido hipotético cun  $T1$  máis curto, cuxa curva estaría enriba da azul, terá unha amplitude maior na curva laranxa en  $t = 0$ . O pulso RF é como pulsar *play* nun cronómetro, que dá comezo a  $T2$ . Se poñemos un TR e TE moi curtos, a relaxación transversal ( $T2$ ) non nos daría moita información, xa que estaríamos constantemente excitando eses núcleos, e sempre estaríamos nunha zona da gráfica con pouca dispersión das curvas (porque cada tecido ten unha curva distinta). É por iso que cando unha secuencia establece un TE e TR curtos, dicimos que está potenciada ou ponderada en  $T1$ <sup>3</sup>, e viceversa. Non son excluíntes, senón complementarias.

Por suposto,  $T1 + T2$  constitúe o tempo que tarda o núcleo en aliñarse totalmente con  $\vec{B}$  dende o pulso, e aínda que medimos ambos os tempos como fenómenos distintos, a realidade é que son un contínuum, e, por tanto, o vector de magnetización pódese descompoñer en dous vectores perpendiculares. A este sistema chamámoslle *rotating frame*, e vemos como ao longo do

tempo, a compoñente horizontal decae (corresponde coa magnetización transversal, que ocorre durante  $T2$ ) e o vertical medra. Recomendo indagar nestes aspectos, que carecen de interese clínico e, por tanto, non teñen lugar neste artigo.

## Polarización

Todos os camiños levan a Boltzmann. Esta ecuación determina que fracción dos núcleos están orientados de forma paralela e cantos de forma antiparalela, que con parámetros corporais resulta un número moi baixo. Nun conxunto de 99 spins, 50 arriba e 49 abaixo, a inmensa maioría cancelará os seus momentos magnéticos, e desta forma un só spin é o que emite sinal real aproveitable. No entanto, lembro que o sinal depende tamén das características intrínsecas de cada tecido, e que estamos omitindo cuestións como a non-homoxeneidade do campo magnético, o spin *echo* e moitas transformadas de Fourier.

$$S = \frac{N_{total} \gamma^3 \hbar^2 B_0^2}{4kT} \quad (2)$$

Existe unha técnica baseada en hiperpolarizar gases nobres como o Xe-129 ou He-3, dado que emiten moito máis sinal. Desta forma conseguimos unha mellor resolución en determinadas estruturas, útil, por exemplo, en estudos en asmáticos. Outro contraste útil (intravenoso) é o gadolinio.

## Do imán á pantalla

Para rematar, sabemos que a radiografía tradicional é unha proxección, e que unha tomografía son radiografías en serie que “cortan” fisicamente nun plano. A información recibida dunha NMR non é en planos; e, por tanto, non falamos de píxeles, senón de vóxeles; aínda que o plano de referencia é o campo magnético, que sempre é o mesmo<sup>4</sup> (SEMPRE a 2-7 T, incluso cando non está funcionando a máquina). Por defecto, obtemos imaxes no plano axial, pero as bobinas de gradiente (as responsables dese insoportable e característico ruído) “desprazan”  $\vec{B}$  de forma que, sen mover o equipo nin o paciente, podemos obter imaxes en tempo real en calquera plano.

A NMR cambiou por completo o enfoque diagnóstico na medicina, e conclúe unha proba máis da importancia na colaboración entre disciplinas científicas para a saúde.

<sup>2</sup>Mesénquima: tecido de orixe mesodérmico, sumado a endodermo e ectodermo, que son as tres capas xerminais de calquera tecido embrionario con capacidade de diferenciación, neste caso, a tecido conectivo (músculo, óso, graxa, cartílago...).

<sup>3</sup>Se poñemos un TR longo e un TE curto obteríamos o que se chama Proton Density Image.

<sup>4</sup>NUNCA se apaga un equipo NMR. Se pasades ao lado do CACTUS escoitaredes un son periódico, “hidráulico”. É un sistema de refrixeración de helio líquido, para manter a intensidade día e noite (sae máis barato que apagalo).

# O signo menos que vale un premio Nobel

Víctor Díaz Díaz

*Breve historia do descubrimento da liberdade asintótica e o nacemento da cromodinámica cuántica.*

## Introdución

A cromodinámica cuántica (QCD) foi o último bloque do Modelo Estándar en ser descuberto. Contra todas as expectativas, foron os esforzos por demostrar que non era posible construír unha teoría coma ela os que finalmente fixeron que se atopase.

Neste artigo vou expoñer brevemente a historia da QCD e a liberdade asintótica, un concepto intimamente ligado con esta, baseándome principalmente no discurso da entrega do premio Nobel a D. Gross [1], no que lembra a historia do traballo polo que precisamente recibiu o galardón. Os detalles técnicos e os cálculos concretos son moi longos e complicados, polo que os omitirei cando sexa posible e procurarei dar unha explicación conceptual.

## O contexto

A situación das teorías cuánticas de campos (QFTs) nos 1960s era moi delicada. Despois de ser inventadas para tratar a electrodinámica de xeito cuántico intentáronse aplicar á descrición das interaccións nucleares feble e forte, descubertas nas décadas anteriores, pero os resultados non eran satisfactorios.

O obstáculo principal era o feito de que, xa a primeira orde en teoría de perturbacións, as teorías devolvían resultados infinitos. As correccións cuánticas facían que os valores dos parámetros observables diverxesen, contradicindo claramente o feito experimental de que os seus valores son finitos e provocando que a teoría non puidese facer ningunha predición útil.

Un importante paso cara a adiante foi dado cando R. Feynman, J. Schwinger, S. Tomonaga e F. Dyson formularon o proceso da renormalización, que conseguía eliminar os infinitos e devolvía á electrodinámica cuántica (QED) a capacidade predictiva. Deste esforzo xorde a correspondencia entre teoría e experimento máis precisa que contamos a día de hoxe: o momento dipolar magnético anómalo do electrón [2,3].

No entanto, non quedaba clara a interpretación física do fenómeno da renormalización, e moitos víano como un simple truco matemático que non resolvía o problema fundamentalmente. Isto fixo que as QFTs quedasen nun segundo plano e deixaron de verse como unha ferramenta seria. Así, exploráronse outros métodos diferentes para intentar formalizar as interaccións nucleares, como

a teoría da matriz  $S$  ou a álgebra de correntes. En xeral, estes formalismos alternativos traballaban con obxectos que se poderían deducir dunha teoría de campos, pero que tamén podían determinarse por outros métodos.

## O comportamento ultravioleta das QFTs

Os anos seguintes traeríanlle máis problemas aínda ás QFTs da man de L. Landau e outros colegas seus que emprega na súa contra precisamente os resultados proporcionados pola renormalización.

Para entender o ataque de Landau debemos empezar por presentar a conclusión máis importante que se deriva do proceso de renormalización: as constantes de acoplamento das QFTs non son realmente constantes, dependen da escala de enerxías na que se observe. O xeito de cuantificar esta dependencia é a través da función  $\beta$ , definida como

$$\beta(g) \equiv \frac{dg}{d \ln \mu} = \mu \frac{dg}{d\mu}, \quad (1)$$

onde  $g$  é unha determinada constante de acoplamento e  $\mu$  é a escala de enerxía [4].

Un xeito simple de regularizar unha teoría que presente infinitos é establecer un corte na escala de enerxías, un valor  $\mu = \Lambda$  moito maior que a escala observable  $\mu = m$  que evita que as partículas virtuais cheguen a ter momento infinito e produzan diverxencias. Así, fíxase o valor das constantes de acoplamento no ultravioleta,  $g(\Lambda)$ . Os posibles valores de momento que se atopen entre o corte e a escala observable intégranse, o que modifica o valor das constantes de acoplamento para enerxías inferiores ao corte. Este procedemento dá resultados útiles, pero idealmente quixeríamos estender o corte ao infinito, de xeito que a teoría sexa aplicable a calquera escala de enerxías. Para QED, e o resto de QFTs que se coñecían no momento, a función  $\beta(g)$  verifica a relación [5]

$$\int_{g(m)}^{g(\Lambda)} \frac{dg}{\beta(g)} = \ln \frac{\Lambda}{m}. \quad (2)$$

É obvio que no límite  $\Lambda \rightarrow \infty$  o lado dereito da ecuación diverxe. Para o lado esquerdo, pola súa parte, poden darse dous casos [6]:

1) Que a función  $\beta$  tamén diverxa, de xeito que  $g(\Lambda) \rightarrow \infty$  para algún valor finito de enerxía e o pará-





metro presenta o que se coñece como *polo de Landau*. Isto volve a teoría inconsistente a altas enerxías.

2) Se a función  $\beta$  se mantén positiva e medra de xeito máis rápido que  $\mathcal{O}(g)$ , o lado esquerdo de (2) aproxímanse a un valor finito, de xeito que

$$\int_{g(m)}^{\infty} \frac{dg}{\beta(g)} = \ln \frac{\Lambda_{\max}}{m}. \quad (3)$$

A primeira orde, podemos aproximar este valor finito da enerxía como  $\Lambda_{\max} \approx me^{\beta_2/g(m)}$ , onde  $\beta_2$  é unha constante positiva, de xeito que  $\Lambda_{\max} \rightarrow \infty$  implica  $g(m) \rightarrow 0$  para calquera  $m$  e a teoría é *trivial*, de xeito que non hai interaccións. Isto contradí claramente as observacións experimentais.

En calquera caso, atopamos un problema que non podemos evitar. Todas estas conclusións son aplicables a QED, e xa que sabemos que a interacción electromagnética existe, vémonos forzados a concluír que a teoría non pode ser válida a escalas de enerxía arbitrariamente altas. Isto indica que se necesita unha teoría máis completa nese réxime, pero non supón un problema inmediato porque a maior parte de procesos de interese ocorren a enerxías inferiores.

Non obstante, a argumentación de Landau ten unha importancia maiúscula ao pretender describir a interacción forte cunha QFT, porque as escalas de enerxía de interese correspóndense con aquelas nas que as teorías poden dar problemas. Isto parecía ser o golpe definitivo ao propósito de describir as interaccións nucleares con teorías de campos.

## A liberdade asintótica

O argumento de Landau era forte, pero non infranqueable. O problema da trivialidade cuántica podía evitarse de dous xeitos se se relaxaban as expectativas formadas a partir de QED: se a función  $\beta$  non medra de xeito máis rápido que  $\mathcal{O}(g)$  ou se se volve negativa a partir dalgún valor  $g_* > g(m)$ . Unha teoría tal denominábase *asintoticamente libre*. No entanto, isto era pouco máis que unha resposta *ad hoc*, e ningunha das teorías coñecidas producía eses resultados. O propio Landau aseveraba que non podía existir ningunha teoría que fose asintoticamente libre [7].

A seguinte peza nesta historia son os experimentos de *deep-inelastic scattering* (DIS). Nestes procesos fanse interactuar electróns con protóns a tan alta enerxía que os primeiros son capaces de interactuar con elementos constituíntes dos últimos, e os resultados experimentais parecían indicar que, a moi altas enerxías, os protóns comportanse como unha colección de tres partículas libres puntuais de spin 1/2 [8,9], o cal parecía requirir unha teoría de campos que fose asintoticamente libre.

Nos anos seguintes, as teorías de campos serían revividas por numerosos éxitos, especialmente coa unificación electrofeble, pero a fricción destas cos resultados do DIS mantívose. Neste contexto foi no que D. Gross se propuxo demostrar que non existían teorías cuánticas de campos renormalizables que presentasen liberdade asintótica, dando por rematada finalmente a discusión [1]. Xunto con C. Callan, conseguiron demostrar que as observacións experimentais de DIS só podían corresponderse cunha teoría con liberdade asintótica [10] e posteriormente, xunto con S. Coleman, que as teorías con interaccións escalares, tipo Yukawa ou gauge abelianas (como QED) non eran asintoticamente libres [11]. As teorías gauge non abelianas (Yang-Mills) quedaban excluídas da investigación orixinal porque os métodos empregados non funcionaban nelas e o seu tratamento era aínda moi complicado. Posteriormente, Gross e F. Wilczek decidiron rematar o traballo e calcular a función  $\beta$  para teorías Yang-Mills, para o que tamén contaron co apoio de H.D. Politzer, que era estudante de Coleman nese momento. Para unha teoría gauge non abeliana, a función  $\beta$  ten a forma

$$\beta(\alpha) \equiv \mu \frac{d\alpha(\mu)}{d\mu} = \frac{\alpha^2}{\pi} b_1 + \mathcal{O}(\alpha^3), \quad (4)$$

onde  $\alpha = g^2/4\pi$  e  $g$  é a constante de acoplamento. O obxectivo era precisamente calcular o parámetro  $b_1$  e demostrar que era positivo.

Gross e Wilczek chegaron a un primeiro resultado en febreiro de 1973: a teoría non era asintoticamente libre. O parámetro  $b_1$  era positivo, de xeito que a función  $\beta$  era positiva. Pero, dispostos a publicar os resultados e dar por rematado o traballo, Gross atopou un erro. Nun punto dos cálculos, escribían un signo erróneo nun dos termos. Corrixírono, e deste xeito obtíñan un signo diferente para o parámetro  $b_1$ . Pouco despois, Politzer rematou de facer os cálculos pola súa parte, chegando ao mesmo resultado. O que atoparon foi [12,13]

$$b_1 = - \left( \frac{11}{6} C_A - \frac{2}{3} \sum_R n_R T_R \right). \quad (5)$$

Esta expresión é válida para unha teoría  $SU(N)$  xeral, e depende de múltiples parámetros con orixe en teoría de grupos que non vou explicar en detalle. A importancia capital deste resultado está no signo global. Para un amplo rango de posibilidades, as teorías Yang-Mills son asintoticamente libres, e especificamente na teoría consistente cos resultados experimentais tense que  $b_1 = -3.5$ .

Deste xeito nacía a cromodinámica cuántica como unha teoría gauge non abeliana, despois de que o esforzo por demostrar que unha teoría tal non era posible fose

detido no último momento unicamente por un signo, algo tan simple e fácil de omitir por equivocación.

## Interpretación física da liberdade asintótica

Unha vez discutida a natureza matemática da renormalización e a liberdade asintótica, é interesante intentar dar un significado físico a estes fenómenos.

En primeiro lugar, consideremos unha carga puntual de magnitude  $e$ . O potencial producido por dita carga puntual é proporcional á distancia á que se observe segundo

$$U(r) \sim \frac{e}{r}. \quad (6)$$

Este é un feito ben coñecido na electrostática clásica, pero que pode explicarse tamén dende a perspectiva do grupo de renormalización se identificamos

$$e(m) = \frac{e(\Lambda)}{r}, \quad (7)$$

onde  $m \sim r^{-1}$  en unidades naturais. Isto é una consecuencia de que, nun contexto relativista, variar a distancia é similar a variar a enerxía, e polo tanto podemos calcular a función  $\beta$  correspondente como función da distancia.

A interpretación física do feito consiste en imaxinar o baleiro como un medio dieléctrico cheo de pares electrón-positrón. Ao colocar unha carga puntual, os pares alíñanse compensando o campo da carga puntual, de xeito que a carga efectiva que se observa a distancias finitas é diferente da carga real que se introduciu. Canto maior sexa a distancia, máis forte é o apantallamento e menor é a carga efectiva. Por outra banda, o que sucede nas teorías asintoticamente libres é precisamente o contrario. Colocar unha «carga non abeliana» no baleiro causaría que os pares presentes neste se alíñasen de xeito que o efecto se magnificase, dando lugar a un campo moito máis intenso e que a carga efectiva, en lugar de apantallarse, medre.

O que está a suceder é, de feito, algo moi similar ao que ocorre de xeito macroscópico ao someter un material a un campo electromagnético. Clasicamente, todos os materiais son dieléctricos e colocalos en presenza dun campo electromagnético causa que este sexa apantallado. Non obstante, cando se introducen consideracións cuánticas, algúns materiais poden ser agora paramagnéticos, de xeito que colocalos na presenza dun campo electromagnético fai que estes produzan o seu propio campo e contribúan a aumentar a intensidade total [14].

No caso que nos ocupa a nós, o comportamento clásico correspóndese co carácter abeliano e o comportamento cuántico correspóndese co carácter non abeliano. De

xeito resumido, a diferenza entre os dous casos débese ás propiedades dos bosóns que transmiten a interacción correspondente (fotóns e gluóns): os bosóns abelianos non teñen carga mentres que os non abelianos si, facendo que poidan interactuar entre eles e dando orixe a novos fenómenos.

## Conclusiones

A historia do descubrimento da liberdade asintótica e o nacemento da cromodinámica cuántica é un exemplo claro dun feito que adoita ignorarse á hora de presentar o avance científico: o camiño da investigación está cheo de ideas equivocadas, erros de cálculo e moita sorte. A QCD formulouse ao intentar demostrar que sería imposible de facerse. Para min é unha das mellores historias da física e o que a fai mellor é, como no caso de toda boa historia, as ensinanzas que contén.

Se esta historia ten unha mensaxe útil para calquera estudante de ciencias debe ser a seguinte: á hora de facer cálculos é moi importante que todos e cada un dos pasos que se dean sexan coherentes. Un simple signo non só ten unha relevancia «numérica», na que o resultado pode estar máis ou menos preto do correcto, senón que pode ter implicacións conceptuais moi importantes á hora de interpretar a teoría da que se derivan. A perspectiva de que «un signo non é tan importante» só pode entenderse unha vez que a teoría está ben asentada, e unha discrepancia deste tipo pode identificarse totalmente cun erro de cálculo. No entanto, ao traballar con teorías novas e obter resultados por primeira vez non existe nada que nos guíe máis que os propios cálculos que facemos, polo que é moi importante evitar erros deste tipo.

## Referencias

- [1] Rev. mod. phys., **77**, 837 (2005).
- [2] Phys. rev. lett., **130**, 071801 (2023).
- [3] Phys. rev. lett., **109**, 111807 (2012).
- [4] R. P., Field theory: A modern primer, (1981).
- [5] S. M., Quantum field theory, (2007).
- [6] Dokl. akad. nauk SSSR, **102**, 489 (1955).
- [7] L. L.D., Fundamental problems in Theoretical Physics in the Twentieth Century: A Memorial Volume to Wolfgang Pauli, 245 (1960).
- [8] Phys. rev. lett., **23**, 930 (1969).
- [9] Phys. rev. lett., **23**, 935 (1969).
- [10] Phys. rev., **D8**, 4383 (1973).
- [11] Phys. rev. lett., **31**, 851 (1973).
- [12] Phys. rev. lett., **30**, 1343 (1973).
- [13] Phys. rev. lett., **30**, 1346 (1973).
- [14] Momentum, **2**, 7 (2025).



# Sobre a realidade do suxeito na física

## Un conxunto de actos derivados do oficio de estudar física

*David Tarrío Outeiriño*

Realizar algún tipo de cálculo ilexible mentres agarras firmemente un bolígrafo azul ata facelo rebentar. Engurrar o cello ata que o cerebro che sobresaia por algún orificio inesperado mentres un son acuoso adorna o acto. Engraxar a máquina ata que esta volva estoupar nun millón de anacos, cubertos dun líquido beixe que deberá ser reinxectado cunha agulla de gran calibre no centro da maquinaria. Utilizar unhas pinzas de plástico verde para tensar firmemente as pálpebras, sendo este un requisito indispensable para optimizar o acto de observación. Retirar e modificar o encéfalo coidadosamente ata soñar co previamente calculado. Aprender para logo arrastrar os pés descalzos, ata expulsar o aprendido a través dos cortes. Manter a mirada completamente fixa nunha parede, xa que o tempo investido en habilitar unha secuencia de pensamentos lóxico-matemáticos vai

seguido inevitablemente dunha actividade solitaria, fría e sobria. Pasar tempo con alguén en estrito silencio, en decúbito supino, a pesar de que algúns estudos suxiran a posición do loto. Renunciar a calquera tipo de crenza intrapersonal, rezando e pedindo axuda a algún tipo de forza humanoide, todo isto efectuado sen a axuda de substancias ou bebidas psicoactivas. Revisar os cálculos a diario, hora tras hora, con excesiva obsesión a pesar, na maioría dos casos, da pouca importancia do que está escrito. Chorar e berrar desconsoladamente, xa que o coñecemento pode converterse en paranoia, dor neurálxica e un existencialismo seguramente insufrible. Levantar os brazos, incansables e ansiosos, fronte a unha paisaxe surrealista, ao bordo do vacío. E, por suposto, buscar, procurar a verdade. Buscando o que sexa que a verdade signifique.

## Da xenialidade. Ou aquilo no que talvez consista a física

*Sebastián Táboas Pazo*

Crear. Crear e crer. Sentar nunha cadeira dalgunha clase calquera para prestar atención, desentrañar algunha incógnita da realidade que permanecía oculta até hai uns minutos, sempre deriva a unha única pregunta, sempre me pregunto en que consiste ese labor do físico. En tomar miles de datos para logo encadralos nalgunha teoría? Simplemente continuar consolidando un paradigma científico? Acaso non hai xenialidade na física? Non logro atopar emoción en redescubrir esas ecuacións que unha vez revolucionaron a historia. Talvez sexan estas paredes brutalistas, que invocan unha noite branca en Siberia, ou talvez sexa esa explicación repetida ano tras ano. Todo debe ser un acto de fe. Arrastra-la man mecanicamente, resolver ecuacións diferenciais, esborrar papeis e emborracharse de tinta. Todo é un acto de fe para crer que estas matemáticas describen a realidade. Debe ser nesta fe que reside o verdadeiro labor da física, en crer, ou algo así diría Kierkegaard; tamén poida ser que habite nestas matemáticas que decidimos domar á nosa forma, coa que decidimos crear. Utilízalas para traducir, para formular un problema específico e, finalmente, explica-lo seu comportamento. Di Gasset

que «*la metáfora es el álgebra superior de la poesía*»; as lagranxianas deben se-la álgebra superior da física. Atopa-la descrición do sistema. Atopa-la idea feliz que resolva o noso problema. Crear. Talvez facer física sexa como facer poesía, poñer en virtude das palabras –das matemáticas– un pensamento ilexible.

Ao final, si debe haber xenialidade, porque somos ignorantes prestidixitadores das matemáticas, porque, ao final, decidimos crer e simplemente crear unha boa idea trala frustración de rompe-la cachola de non saber como resolver esta integral. Talvez sexamos unha amalgama de vagabundos pretendendo atopar unha verdade, atopando a iluminación na verificación das nosas elucubracións, nese milleiro de datos –esta debe se-la nosa fe– que o corroboran. Talvez non necesitemos debuxar polas marxes, saírnos do paradigma, para logra-la xenialidade. Talvez a nosa xenialidade resida nesas centenarias ecuacións que herdamos, pois somos algunha clase de prestidixitador, porque elas son algunha clase de pinceis cos que podemos crear unha enxeñosa solución. Facer física moitas veces antóllaseme como escribir poesía.





# O meu rexistro de frases de profesores

Manuel Galán Rodríguez

*Catro anos apuntando as xoias da facultade.*

Á vista de non dispor dun artigo dalgún dos nosos profesores, escollemos que aquí o presente redactor plasmase algunhas frases memorábeis dos mesmos.

Para empezar, supoño que ti, querido lector, terás ouvido falar algunha vez do meu rexistro de frases célebres de profesores da Facultade de Física da USC que teño na miña conta persoal de X (@manolo\_o\_galan), que animo que leas, en caso de que estiveses interesado. En caso afirmativo, entendo que tamén che chamará a atención este artigo, co que te convido a que sigas lendo.

Unha primeira pregunta que che pode estar xurdindo neste momento é, como se me deu por levar a cabo todo este rexistro? Se cadra, algún dos máis veteranos estará pensando que a recompilación de frases que realizou David Castaño, xa hai uns cantos anos, puido ter algo que ver, aínda que a realidade é bastante máis complexa como detallarei a continuación.

No meu percorrido polo Sistema Educativo Español, á altura do curso de 4ºESO, coincidíume de ter varios profesores bastante simpáticos, cuxas clases eran bastante amenas. Un día, ocorréuseme que quería manter un rexistro para que así cando fose maior puidese recordar vellos tempos. Entre estas xoias podemos destacar “*Manuel, eu nunca reflexionei tanto sobre a acentuación!*” da profesora de Galego ou a de “*Puerta OR, como la matrícula de los coches de Orense*” do de Tecnoloxía, falando de portas lóxicas.

Esta recompilación evidentemente non foi levada a cabo mediante a plataforma Twitter, pois eu aínda era un rapaz de 15 anos, demasiado novo para esas cousas. O lugar escollido foi un arquivo en Microsoft Word que tiña no meu computador e que aínda se encontra polas súas profundidades. De cando en vez, cando pasa pola miña cabeza ese asunto, vou e consúlto, e aínda paso un bo tempo rindo.

Esta colección de xoias mantívose despois en 1ºBAC, aínda que con menor intensidade. Despois, xa veu o confinamento, que o seguiu un 2ºBAC moito máis aborrecido, que sentou mal tanto a profesores como a alumnos, o que supuxo unha interrupción de devandita recompilación.

Cando estaba, non lembro ben se a finais de 2ºBAC estudando Historia de España, ou se xa a comezos do 1º curso do Grao en Física, apareceume en Twitter un fio de frases célebres dun tal David Castaño que me fixo

moita graza. Daquela, evidentemente, de ningún dos docentes, non tiña nin idea de quen eran, aínda que si que me serviu para facerme unha idea do que me estaba esperar nos vindeiros anos.

O conto das frases quedou aí, e non volveu aparecer, ata que comezou o 2º cuatrimestre de primeiro. Nesa primeira semana, a comezos de febreiro de 2022, coñecín a un profesor moi simpático chamado Alfredo Amigo<sup>5</sup>, entre outros. O sábado seguinte, 5 de febreiro, era unha tarde fría de inverno e dixeran, vou apuntar frases. E aí comezou todo. Durante ese mesmo cuatrimestre fun apuntando máis frases de profesores, onde destacaban como supoñeredes, as de Eva Acosta, se cadra publicando algunha parvada de máis, coa inmadurez lóxica dun rapaz de 18 anos.

Non obstante, se es Eva Acosta, Toni ou Alfredo Amigo e estás lendo isto, lamento dicirche que non vas poder ler as túas propias frases. A comezos de setembro de 2022, cando inicié sesión en Twitter no portátil que teño cando estou en Compostela, deume erro, e non puider acceder máis á miña propia conta, tiven que crear unha nova. Por tanto, todas as frases que apuntei durante o primeiro curso non as ides poder ler, xa que non se encontran dispoñibles.

No entanto, o resto das xoias que hai, isto é, as de segundo, terceiro e cuarto, si que están abertas ao público. Farei aquí un resumo a modo de recompilación, incluíndo tamén algunha frase de primeiro que fun quen de recuperar:

*Todos tivemos unha crisis cando fomos adolescentes e por iso decidimos estudar Física.*

— Carlos Merino,  
Física de Partículas Elementais, 2025.

*O tempo é a inversa da enerxía. Canto máis vello te fas, menos enerxía tes.*

— Carlos Merino,  
Física de Partículas Elementais, 2025.

<sup>5</sup>Alfredo, se estás lendo isto tomando unhas garimbas na cafetería, que che aproveiten!



*Claro, é que esta frase non está moi ben redactada e eso que a redactei eu, eh!? Unbelievable.*

— Carlos Merino,  
Física de Partículas Elementais, 2025.

*De Métodos V sabedes un huevo de curvas e superficies. Moito máis ca min, porque esa parte eu non a din.*

— Santos,  
Mecánica Clásica III, 2023.

*Dos por uno, uno. ¡Jajajajaja! ¡Perdón! ¡Dos por uno, dos! ¡Yo no he dicho dos por uno, uno! ¡Lo negaré!*

— Eva Acosta,  
Métodos Matemáticos IV, 2022.

*Al de Métodos lo llamábamos épsilon porque era pequeñito y despreciable.*

— Eva Acosta,  
Métodos Matemáticos IV, 2022.

*Vamos a suponer que esta pared es rígida, lo cual no es cierto del todo, puesto que no es la primera vez que le doy un golpe y vibra.*

— Enrique Zas,  
Física Xeral II, 2022.

*La energía mundial ni se crea ni se destruye, solo se encarece. Esta es la nueva Ley de Conservación de la Energía Mundial.*

— Jaime Álvarez,  
Mecánica Clásica I, 2022.

*Mi coeficiente de reflexión está tendiendo a cero. Cada vez reflexiono menos, pero cada vez transmito más.*

— Jaime Álvarez,  
Mecánica Clásica I, 2022.

*Todos los días por estas fechas hay estudiantes observando charcos. Esta es una buena frase para Twitter.*

— Jaime Álvarez,  
Mecánica Clásica I, 2022.

*Un teorema matemático no depende de las condiciones en las que se está demostrando, a no ser que el matemático esté fumado o drogado.*

— Paco Ares,  
Electromagnetismo II, 2023.

*Si los fotones estuvieran sometidos al Principio de Exclusión de Pauli no se podría derretir un tanque con un láser.*

— Bernardo Adeva,  
Física Cuántica I, 2023.

*La delta de Dirac se puede decir que funciona de esa forma, aunque es una aberración. Pero vamos a usarla de esa forma.*

— Suso Liñares,  
Óptica II, 2024.

*Marie Curie es la única persona con dos premios Nobel diferentes: Química y Física. Digo premios Nobel de verdad, porque hay gente con premio Nobel de Química y de la Paz y cosas así.*

— Manuel Caamaño,  
Física Nuclear e de Partículas, 2024.

*Cuando fui a ver Oppenheimer al cine estaba mi novia diciendo que me callara todo el tiempo. Yo estaba «¡BUAAAA, ESO TAMBIÉN LO VIMOS EN CLASE!».*

— Manuel Caamaño,  
Física Nuclear, 2025.

*Hay dos opciones: aceptamos el principio cosmológico y seguimos dando clase o no lo aceptamos y marchamos. Si queréis no lo aceptamos y nos vamos.*

— Jaime Álvarez,  
Astrofísica e cosmoxía, 2025.

*Podía acabar en un sitio mejor. Como yo, yo también podría acabar en un sitio mejor.*

— Jaime Álvarez,  
Astrofísica e Cosmoxía, 2025.

# Pikadon: cando o Sol baixa á Terra

Santiago González Gómez

*Que lle ocorre a un humano na zona cero dunha explosión nuclear? Terroríficos debuxos dos superviventes de Hiroshima reflecten o inferno vivido en agosto de 1945.*

**AVISO:** Os feitos aquí relatados e as imaxes incluídas poden resultar altamente perturbadores ao lector. É necesario coñecer os horrores da guerra nuclear para evitala nun futuro, pero aconséllase á xente sensible ler con precaución.

O 6 de agosto de 1945, Os Estados Unidos soltaron a primeira bomba atómica sobre Hiroshima, O Xapón. Tres días despois, unha segunda bomba caeu en Nagasaki. Estes bombardeos nucleares, que saldaron con centos de miles de mortes, desataron unha destrución nunca antes vista na Terra e precipitaron a rendición do Imperio Xaponés, dando fin á Segunda Guerra Mundial.

Foron as bombas un mal menor? Eran necesarias? Nunca o saberemos. Porén, o horror que experimentaron os habitantes de Hiroshima e Nagasaki, especialmente aqueles que non morreron inmediatamente, é innegable. Imos tentar presentar aquí que lle ocorreu á xente que se atopaba en Hiroshima aquel fatídico día.



**Figura 1:** Fungo nuclear visto dende as aforas de Hiroshima. Susumu Horikoshi, 6 anos no bombardeo.

## O inferno na terra

*Little Boy*, a bomba que estourou sobre Hiroshima, non detonou ao chegar o chan, senón 600 m sobre a superficie. Unha detonación aérea asegura que a onda expansiva chegue o máis lonxe posible. *Little Boy* estaba armada con 64 kg de uranio-235. O funcionamento da bomba, a grandes liñas, era o seguinte: mediante o uso de explosivos convencionais, un pequeno proxectil deste uranio era lanzado contra un maior obxectivo cilíndrico de uranio. Ao xuntárense, acadábase a masa crítica, iniciando a reacción nuclear. A explosión resultante foi

equivalente a uns 15 quilotóns de TNT.

Os habitantes de Hiroshima puideron ver un cegador resplandor branco (de aquí vén o alcume *pikadon*, literalmente luz estrondosa, que os xaponeses deron ás bombas), seguido dunha enorme onda expansiva. A presión xerada por *Little Boy* non era suficiente para matar unha persoa, pero si para lanzala varios metros polos aires e provocarlle importantes feridas. Tamén era suficiente para derrubar todos os edificios nun raio dun quilómetro e medio. Agás certas estruturas de formigón, Hiroshima foi completamente aplanada. Gran parte da xente morreu esmagada polos entullos ou quedou irremediabilmente atrapada.

Parte da enerxía da explosión, liberada en forma calorífica, xerou unha bóla de lume cunha temperatura superficial similar á do Sol, incendiando todo material inflamable preto da zona cero. A temperatura era suficiente para descolorar permanentemente a rocha, de tal xeito que persoas, postes, bicicletas... que tapaban certas partes dos edificios deixaron sombras permanentes impresas.



**Figura 2:** Corpsos carbonizados. Unha nai cun bebé mantense ergueita, correndo, na posición que tiña ao morrer. Yasuko Yamagata, 17 anos no bombardeo.

Con respecto ás persoas que se atopaban suficientemente preto da zona cero, todas morreron de xeito inmediato. Aínda que aqueles que se atopaban moi, moi





preto, si foron vaporizados (que posiblemente é a imaxe que temos moitos de nós do resultado dunha bomba atómica), a meirande parte foron carbonizados; é dicir, foron expostos a unha calor tal (e durante un tempo suficiente) que os seus tecidos se deshidrataron e foron convertidos en carbón.



**Figura 3:** Procesión de vítimas queimadas coa pel colgando. Kichisuke Yoshimura, 18 anos no bombardeo.

Isto tamén lle sucedeu á xente que quedou atrapada e sucumbiu aos numerosos lumes provocados pola bomba. Aquelas persoas que se atopaban lixeiramente máis lonxe sufriron queimaduras profundas, provocadas pola calor arrastrada pola onda expansiva dende o epicentro. A algúns derretéronlles a carne e os globos oculares. Estas queimaduras foron capaces de incinerar a maior parte da roupa; aquela que non desapareceu deixou en moitas ocasións os seus padróns gravados para sempre na pel de debaixo.

Os que sobreviviron ás súas queimaduras e conseguiron saír dos entullos atopáronse camiñando entre a desolación. A mestura da intensa calor e a onda expansiva foi capaz de arrincar a pel dos brazos, pernas ou costas de moitos dos superviventes, deixando expostos músculos e ósos. As queimaduras foron especialmente graves na cara e nos brazos, que eran en moitas ocasións as partes máis expostas. De xeito instintivo, para evitar que lles quedasen pegados, os superviventes comezaron a camiñar cos seus brazos estendidos, similarmente á imaxe que temos os occidentais dos zombis; e os xaponeses, das pantasmas.

En resumo, as rúas de Hiroshima enchéronse de procesións de mortos en vida, brazos adiante, coa pel colgando da punta dos dedos ou arrastrándose detrás deles. Estas “Santas Compañías” de xente dirixíanse cara aos ríos, xa que a calor era insuportable e á maioría asaltoulles unha sede inhumana. As testemuñas describen á xente

botándose aos ríos, que baixaban cheos de cadáveres. Moitos tamén beberon; a maioría destes morreron pola contaminación da auga.



**Figura 4:** Cruzando o río cheo de cadáveres. Toshiko Kihara, 17 anos no bombardeo.

## A radiación

Como a detonación foi aérea, non houbo cinza radioactiva (*fallout*) na zona cero. Os restos de radioisótopos da explosión ascenderon á atmosfera ata albergárense na estratosfera. Este é o proceso durante o cal se forma a famosa nube con forma de fungo. Entre media hora e unha hora despois da explosión, estes restos condensaron o vapor de auga e comezaron a precipitar, de volta á cidade, en forma dunha chuvia negra, espesa e lodosa. De novo, moitos dos afectados beberon da choiva, morrendo polos efectos da radiación.



**Figura 5:** Nai busca un lugar no que cremar o seu fillo calcinado. Matsumuro Kazuo, 32 anos no bombardeo.

O feito de que non se depositaren grandes cantidades de restos radioactivos na cidade é o que provocou que a

xente puidese repoboar o terreo de xeito case inmediato, a diferenza de Pripiat (Chernóbil), que segue a ser inhabitable a día de hoxe. Porén, os presentes no momento do bombardeo si foron irradiados con partículas alfa, beta e gamma. Moitos dos que recibiron unha dose letal de radiación morreron antes polas queimaduras ou os entullos que por esta; porén, aqueles que conseguiran sobrevivir ao impacto inicial morreron semanas despois con cadros dolorosísimos que inclúen caída do pelo, vómitos e escumación negra na boca, febres altas, diarrea e hemorrxias xeneralizadas. Os médicos non comprendían esta morte súbita e silenciosa que sobreviña a xente que parecera ilesa pola explosión.



**Figura 6:** Muller sedenta bebe da choiva negra. Takakura Akio, 19 anos no bombardeo.

Moitos dos que recibiron doses radioactivas non mortais acabaron desenvolvendo enfermidades graves a longo prazo, especialmente cancros (en particular leucemia). As forzas de ocupación estadounidenses estudaron durante anos os efectos radioactivos en moitas destas persoas,

que se converteron en cobaias humanas. Porén, nunca comunicaban aos afectados as enfermidades que estaban desenvolvendo, e moito menos proporcionaron algún tipo de tratamento. Os estadounidenses tamén prohibiron á prensa falar sobre os bombardeos e os seus efectos. Cando as forzas de ocupación marcharon, a desinformación entre o resto da poboación xaponesa era tal que os superviventes (*hibakusha*) foron amplamente discriminados, por medo a que a súa simple presenza puidese contaxialos con algunha enfermidade. Moitos superviventes tamén optaron por non ter fillos, temendo as posibles malformacións ou enfermidades que poderían causarlles.

### Debuxos dende a zona cero

Moitas das cousas relatadas polos *hibakusha* poden parecer inverosímiles. As cámaras non chegaron ata Hiroshima ata días despois, e moito material foi censurado logo polos estadounidenses. Con todo, algúns superviventes animáronse a debuxar as imaxes gravadas na súa mente, que nos permiten facernos unha idea de que viviron aquel día. Todas as imaxes están sacadas de [1], e constitúen só unha pequena porción, a menos perturbadora, de todos os debuxos producidos polos *hibakusha*. Anímase o lector a ver máis imaxes das gardadas en [1].

*Descansade en paz, pois non repetiremos o erro.*

— Tadayoshi Saika,  
No cenotafio de Hiroshima

Loitemos a prol do desarme nuclear.

### Referencias

- [1] H. P. M. M. P. Database, A-bomb Drawings by Survivors, (n.d.).
- [2] M. V. Cultures, Ground zero 1945. pictures by atomic survivors, (n.d.).
- [3] B. Sanderson, Atomic people, (2024).





# Podemos chegar á verdade científica?

Mauro Garrido Rodríguez

*Onde a física e a metafísica se confunden.*

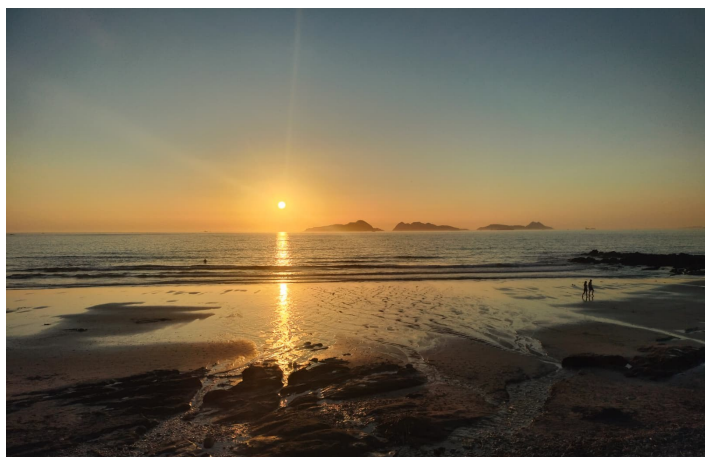
## Que é a verdade? As verdades científicas ou «da existencia»

É posible realmente coñecer a verdade? Podemos saber que algo será verdade sempre? Dito doutro xeito: existe a verdade, e de existir, poden os seres humanos coñecela?

Reflexionemos primeiro que entendemos por verdade. Parece claro que unha verdade, para ser tal, debe selo sempre, baixo calquera circunstancia e para todo o mundo: as verdades circunstanciais non son universais, e polo tanto hai algo *verdadeiro* que se lles escapa, polo que non son verdades en rigor. Así, a verdade fala da *esencia*: do que as cousas son en si; non do que aparentan, non do que nos mostran, senón do que son.

Inspirándonos no filósofo Karl Jaspers [1], podemos facer unha distinción xeral entre dous tipos de verdade: as do existente e as da existencia.

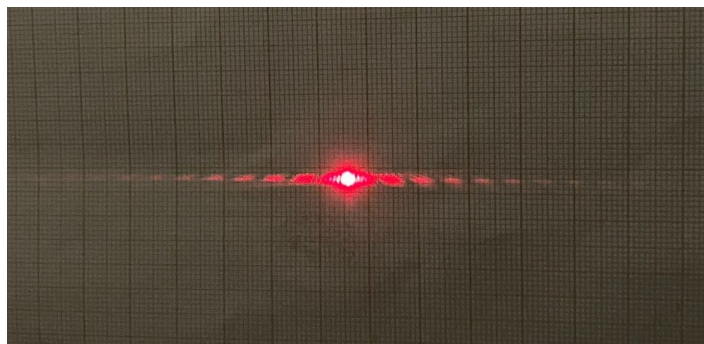
As da existencia ou «científicas» son as que trataremos neste artigo: sono sobre o mundo, sobre o universo; analizamos o mundo natural e, en base á experiencia, enunciarnos postulados, leis e conclusións derivadas destes. Así, parte da verdade científica é o que a experiencia demostra estatisticamente, na repetición dos nosos experimentos. Verdade é dicir: os corpos caen cara á superficie da Terra, a luz crea un padrón de difracción nunha pantalla ao pasar por unha fenda, o Sol ponse polo horizonte, ... Porque en todos estes casos se repetimos o experimento, volveremos obter o mesmo resultado.



**Figura 1:** Atardecer sobre as Illas Cíes, Vigo (Fonte: imaxe persoal)

## A verdade ontolóxica

Pero a física vai máis alá. Busca, non só describir o mundo natural, senón tamén predicilo (construír modelos que funcionen), e, non contenta con isto, **descubrir que o constitúe e como é**, a un nivel fundamental. Recuperando os exemplos que puxemos antes: a forza da gravidade é a responsable da atracción entre corpos con masa, a luz é unha onda, a Terra é un xeoide e xira arredor de si mesma cunha determinada inclinación con respecto ao plano da eclíptica mentres orbita arredor do Sol... Agora non só describimos o que sucede, senón que damos unha imaxe do mundo e dos elementos que o compoñen, de xeito que baixo estes supostos *ontolóxicos* (do grego antigo *onto-logos*, relativos ao estudo do *ente*, do que «é») podemos describir e predicir o que sucederá. Isto é, a verdade, o real para a ciencia.



**Figura 2:** Difracción da luz no laboratorio de Técnicas Experimentais III (Fonte: imaxe persoal)

## As verdades científicas tamén inclúen presupostos «metafísicos»

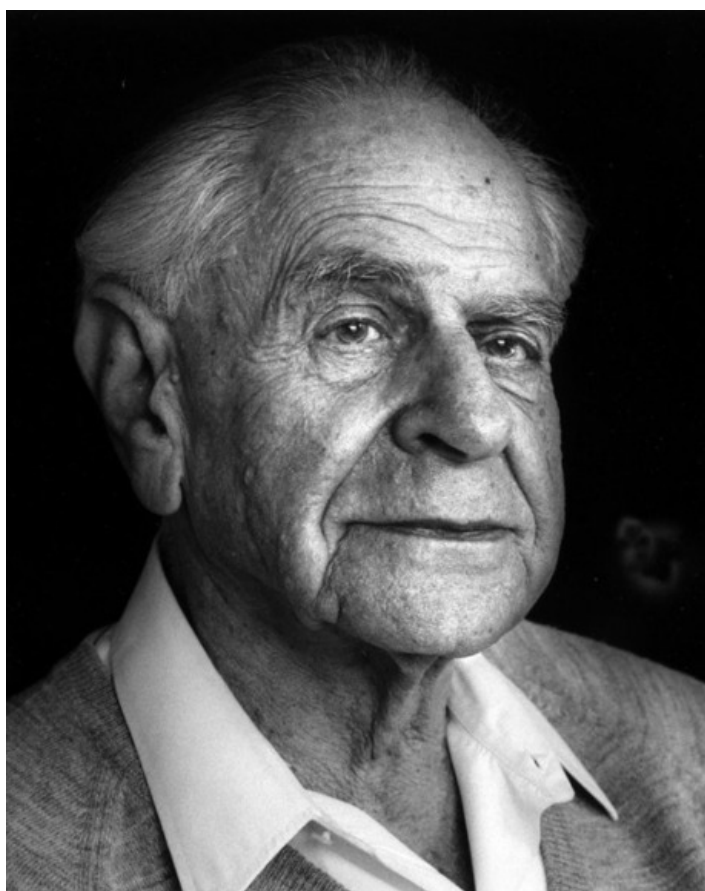
É máis: detrás destes tres exemplos hai un presuposto que tradicionalmente chamariamos «filosófico», que non demostramos; e que, no entanto, empregamos non só nestes exemplos, senón durante toda a nosa historia ata o século XX: o principio metafísico de **contrafactualidade** [2]: asumimos que tódalas variables tiñan valores definidos aínda cando non as mediamos, que o campo electromagnético estaba en tódolos puntos do espazo... En xeral, facemos un suposto contrafactual cando dicimos que «un sistema físico tería propiedades ben definidas aínda cando non esteamos medindo as devanditas propiedades».

Coa chegada da cuántica, este suposto, que en principio parecía tan evidente que se admitía de xeito implícito,



quedou contra as cordas, aínda que na macroescala se cumpre en boa aproximación. A nivel atómico as partículas non seguen traxectorias definidas e, por exemplo, non é posible asignar unha única velocidade para unha partícula nun mesmo estado e nun mesmo experimento: antes de facer a medición, non tiña un valor definido da súa velocidade.

As desigualdades de Bell achegan aínda máis evidencia: unha situación na cal, nun sistema de partículas entrelazadas, asumir uns valores definidos (as famosas *variables ocultas*) leva a resultados que non se corresponden co que se obtén experimentalmente (se ben é certo que estas teorías de variables ocultas, que son contrafactuais, poden rescatare se admitimos influencias máis rápidas que a luz, aínda que quedan en dúbida).



**Figura 3:** Karl Popper, filósofo da ciencia (Fonte: [3])

Así, a física tamén depende de «*verdades metafísicas*», como o presuposto fundamental necesario para a mes-

ma idea de ciencia: que existe un mundo real ata certo punto independente do observador (realismo ontolóxico), que este mundo natural ten regularidades estables e que é *intelixible*, que a mente humana pode coñecer estas regularidades.

## Ciencia, filosofía e falsabilidade

Por suposto, tamén temos que ser conscientes das limitacións da ciencia: cando os nosos postulados predín ben e non fallan ante ningún experimento, dicimos que chegamos á verdade, e que a nosa imaxe do mundo é representativa de como funciona a realidade. Mais isto é, por suposto, unha ilusión: xamais poderemos estar seguros de ter a última palabra; sempre pode haber un experimento que negue as nosas premisas ou que evidencie fenómenos aínda non explicados. Así, a ciencia persegue a verdade, mais sen nunca chegar a atrapala. Por iso, neste artigo sempre falamos de «*falsabilidade*» e non de «*verificabilidade*», porque xamais é posible *verificar* un determinado enunciado científico, como ben nos fixo ver Karl Popper.

Mais isto da falsabilidade, **e que a ciencia só se debe ocupar do falsable**, é moitas veces utilizado para menosprezar o papel da filosofía na ciencia... Sendo certo, non é argumento para desdeñala, posto que ademais de ter a capacidade de guiar a empresa científica, non remata aí o seu papel: en moitas ocasións un presuposto metafísico que xulgabamos imposible de pór a proba acaba resultando ser falsable, ou polo menos posto en dúbida pola evidencia.

A existencia dos átomos tamén se consideraba un presuposto indemostrable ata hai relativamente pouco, cando físicos e filósofos como Mach e Ostwald sinalaban o atomismo como unha *metafísica inútil*.

## Referencias

- [1] K. Jaspers, *Filosofía de la Existencia*, (n.d.).
- [2] B. d'Espagnat, *On physics and philosophy*, (n.d.).
- [3] K. Popper, (n.d.).
- [4] N. D. Mermin, *Is the moon there when nobody looks? Reality and the quantum theory*, *Physics Today* (n.d.).



# Sopa de letras, Trisceletrónico e Fortuna

Autoría Múltiple

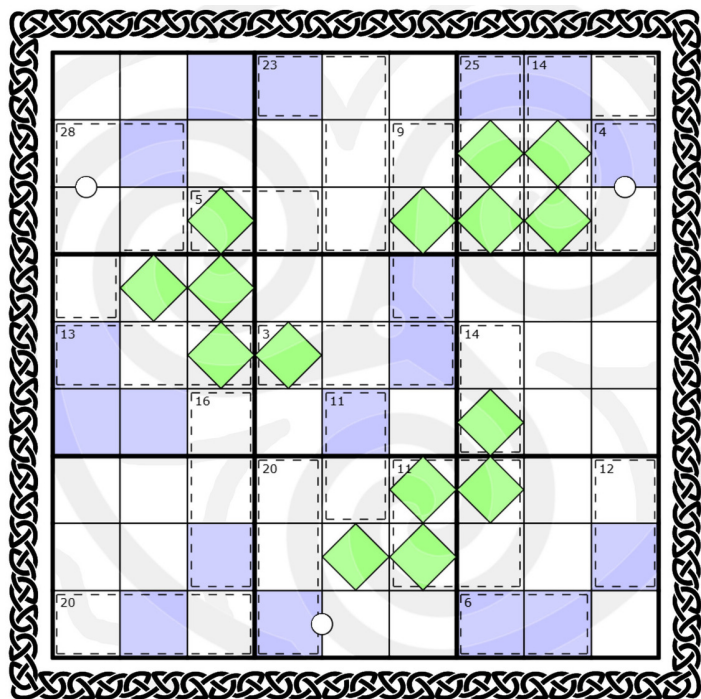
*Pasatempos para facer a comida na cafetería de física máis amena.*

## Sopa enerxética Adrián Vázquez Velasco

Mediante o produto, cociente e composición das magnitudes e constantes da seguinte sopa, podes obter **sete fórmulas para a enerxía** en distintos contextos da física. Serás capaz de atopalas todas?

|   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| P | Y | L | A | S | R | R | U | G | R | A | V | I | D | A | D | E | N |
| E | A | A | T | E | M | P | E | R | A | T | U | R | A | Y | F | U | I |
| S | A | A | V | V | E | I | C | A | R | G | A | C | P | L | L | A | V |
| W | R | L | E | O | E | M | A | A | O | A | I | R | A | R | O | H | B |
| H | E | B | T | M | G | L | L | R | C | A | D | R | A | D | O | I | T |
| D | R | A | E | U | A | A | O | E | N | E | E | I | C | C | A | P | I |
| O | B | O | P | O | R | S | D | C | S | E | N | N | O | E | T | O | S |
| U | A | A | U | L | I | A | A | R | I | O | O | I | E | T | R | T | C |
| S | L | I | E | L | A | A | T | R | O | D | O | D | O | L | E | E | T |
| F | R | E | C | U | E | N | C | I | A | I | A | E | E | Y | S | N | T |
| M | I | Y | M | N | T | D | C | O | T | D | E | D | R | Y | P | C | L |
| M | A | L | N | T | T | A | E | K | I | C | E | S | E | W | I | I | A |
| R | O | S | T | D | C | A | D | R | A | D | O | A | Y | L | E | A | D |
| U | H | L | A | I | N | T | E | N | S | I | D | A | D | E | U | L | N |
| E | I | Q | E | B | O | L | T | Z | M | A | N | N | L | D | S | Z | M |
| G | A | E | E | S | E | D | W | H | N | E | B | I | O | U | O | O | P |
| C | T | B | A | C | I | A | M | A | S | A | S | E | O | O | A | U | I |
| R | I | N | D | U | T | A | N | C | I | A | C | D | S | N | D | H | S |

## Triscelectrónico Adrián Vázquez Velasco



Aplican as normas usuais dos sudokus. Ademais:

1. **Celas entrelazadas.** Cada un dos (tres) pares de celas separados por un círculo branco conteñen dous números consecutivos.
- 2A. **Enchido de capas.** Os números dentro dunha caixa (indicada con liñas a raias) deben sumar o que indica o número na súa esquina superior esquerda, tras aplicar os modificadores orbitais seguintes:
- 2B. **Orbitais de electróns.** Hai tres tipos de celas: ‘s’ (branco), ‘p’ (azul, en grupos de 3) e ‘d’ (rombos verdes, en grupos de 5). Os seus efectos son:
  - As celas ‘s’ non aplican ningún modificador ás sumas
  - Dentro de cada grupo de celas ‘p’, unha engade +1 ao valor do dígito que conteña (de cara ás sumas de caixas), outra non afecta á suma, e outra réstalle un.
  - Dentro de cada grupo de celas ‘d’, é o mesmo pero de  $-2$  a  $+2$ . Isto é, en cada grupo hai unha (e só unha) cela que engade cada valor de  $\{-2, -1, \pm 0, +1, +2\}$ .

3. **Principio de exclusión local.** Ningunha cela pode estar contigua (ortogonal ou diagonalmente) a outra co mesmo exacto tipo de orbital e número.

Ligazón web para unha resolución máis amena:  
<https://f-puzzles.com/?id=2a88em54>

Para aqueles que non estean moi familiarizados cos sudokus con caixas, recomendo resolver este crebacabezas previamente: <https://logic-masters.de/Raetselportal/Raetsel/zeigen.php?chlang=en&id=000809>.

## Física ou Fortuna #2: A ollo de bo cubeiro Adrián Vázquez Velasco

Probablemente a maioría de vós vistes algunha vez que se se lle pregunta a un público cantos caramelos ou fabas hai nun bote e se se toma a media xeométrica, o resultado tende a aproximarse bastante ben ao número real. Isto adoita denominarse intelixencia colectiva.

Pois ben, para esta edición, imos intentar replicar exactamente esa mesma experiencia. Coa publicación deste número, colocárase na facultade de Física un tarro con obxectos de tamaño reducido. O obxectivo do desafío deste mes será intentar adiviñar coa maior precisión posible as cantidades reais que hai en devandito bote.

A enquisa pecharase **tres semanas** trala publicación do número e a súa ligazón poderá atoparse tanto ao lado do bote como no linktree dos pasatempos: <https://linktr.ee/pasatempos.momentum>



Tamén, xa que comezamos un novo curso académico, imos iniciar unha clasificación dende cero segundo os resultados acadados nos desafíos de Física ou Fortuna que se vaian proponendo en cada número. Como no anterior número, podedes dedicarlle tanto ou tan pouco tempo como consideredes; ao fin e ao cabo, isto é Física ou Fortuna. Sorte!



# 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, queríamos 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.

A todas aquelas persoas novas que se interesaron na participación e nos leron. Especiais grazas ao estudantado que se esmerou na redacción, aos nosos inestimábeis editores que perfeccionaron o código durante o verán e á corrección que nos saca outra vez dos apuros.

Grazas a Carmen García García por interesarse no proxecto e querer compartir as súas experiencias, grazas a Gemma Ruiz por conseguirmos esta oportunidade.

Grazas a Celia Álvarez e Diego Couto pola reportaxe a Kip Thorne, na que tanto se esmeraron cando estaban a piques de se graduar.

E grazas finalmente tanto ao equipo decanal da nosa facultade como á vicerreitoría de estudantes e cultura polo seu apoio e colaboración en todo momento neste proxecto.

Esperamos que vos agrade este novo número neste comezo de curso!

Edicións anteriores:



Participa! (WhatsApp)



Co financiamento de:



VICERREITORÍA DE ESTUDANTES  
E CULTURA