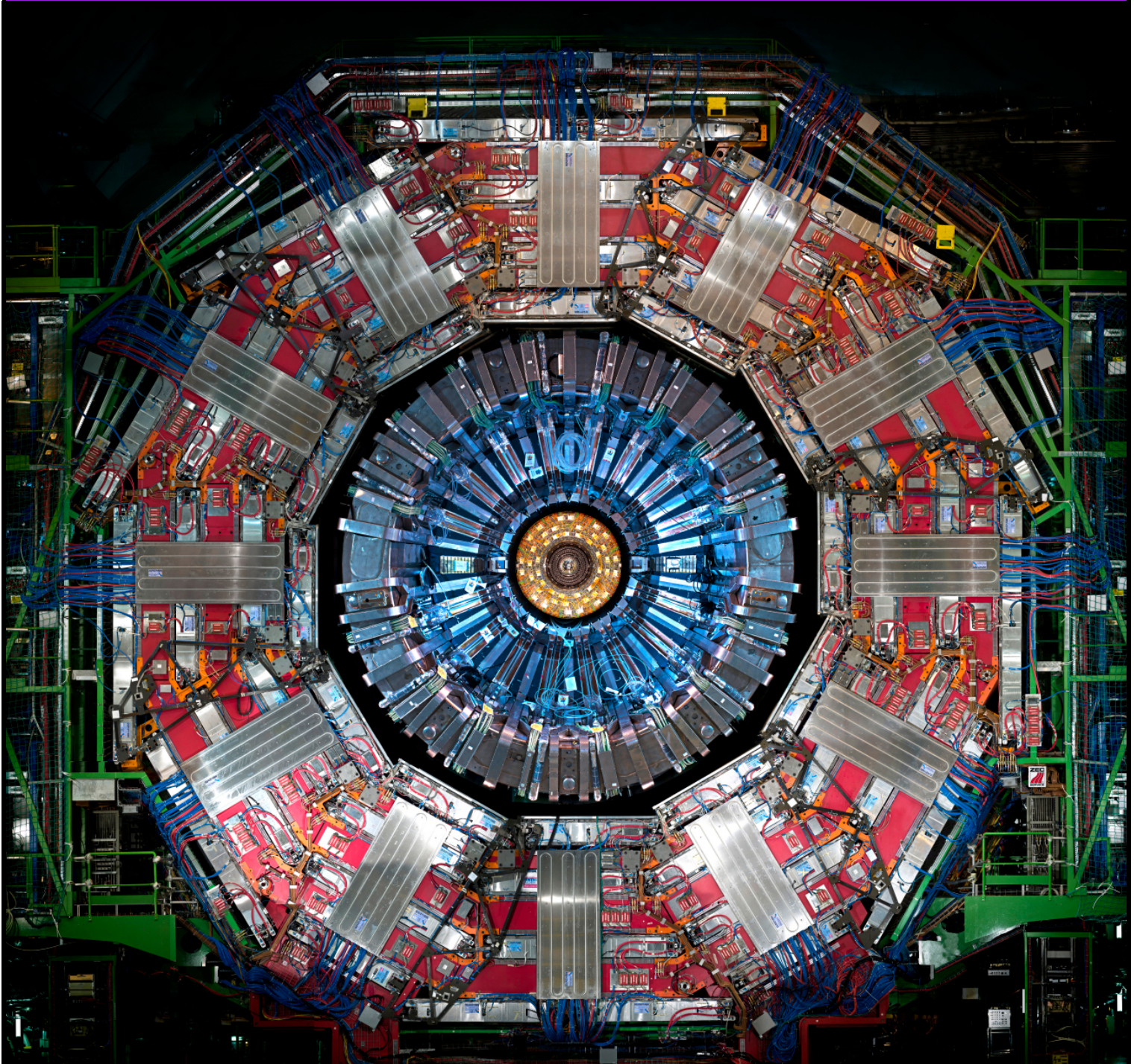


MOMENTUM

A revista estudantil da Facultade de Física da USC

Núm. 004

Novembro 2025



Detector CMS do LHC, un dos primeiros experimentos en detectar o bosón de Higgs (Fotografía de Hoch e Brice).

Índice

Entrevistas

Coñecendo a Edelstein

Luis Arcas Morcillo

1

Divulgación

Por que o bosón de Higgs non é moi «natural»

Víctor Díaz Díaz

5

A programadora invisible

Manuel Tiago Barbosa Aresta e Victoria Bello Pastor

8

A escada cósmica de distancias

Pablo Falgueras Casarejos

12

Miscelánea

Música, frases e máis

14

Filosofía

Que é un metro?

Antón Táboas Pazo

16

Somos donos das nosas decisións?

Mauro Garrido Rodríguez

18

Historia

Relatos dunha vida extraordinaria

Celia Álvarez Álvarez

20

Buracos negros antes de Einstein?

Manuel Vázquez Carreira

24

Pasatempos

Intuición, Integraís e Álgebra

28

Novembro 2025

Núm.004

Dirección

Carolina Castro Rodríguez

Mauro Garrido Rodríguez

Sebastián Táboas Pazo

Xulia Arán Paredes

Edición

Andrea Real Blanco

David Cotelo Varela

Diego Couto García

María Alonso Iglesias

Corrección

Artai Isasi Vázquez

Cristóbal Santos Sánchez

Manuel Galán Rodríguez



revistafisicausc@gmail.com



@momentum.usc



fisicaUSC/revista

principal:7aa3dc8





Coñecendo a Edelstein

Luis Arcas Morcillo

Por mor do centenario da visita de Einstein á Arxentina, falamos cun dos homes que máis sabe do pai da relatividade sobre a importancia da memoria na ciencia, a situación internacional da investigación e o panorama da divulgación.

Entramos no IGFAE e recíbenos cun sorriso na boca, aínda ten que acabar papélame (no momento que lle entrevistamos, reconece que enviou as notas de Métodos Matemáticos VI ás 3:30 horas), e pídenos esperar un minuto. José, coñecido pola maioría do alumnado da Facultade, é un home atarefado, mais aínda ten tempo para atendernos e responder amablemente ás nosas preguntas.



José Edelstein, investigador no IGFAE, docente e divulgador científico.

Nacido en Buenos Aires, a súa formación académica e posterior experiencia no ámbito investigador e divulgativo fai conta dunha carreira internacional impresionante. No entanto, lémbrenos que non sempre estivo vinculado á Física. José comezou a licenciatura en Enxeñería Eléctrica en Venezuela, a causa do exilio durante a ditadura do PRN na Arxentina. Volveu ó seu país natal en 1985 para proseguir cos seus estudos, pero, a piques de rematar (no cuarto curso de cinco), deuse de conta de que a súa paixón era a Física, polo que deixou a licenciatura e foi aceptado no Instituto Balseiro. Dende alí, unha apaixonante carreira académica arrancou: doutorando na Universidad de La Laguna, *post-docs* en Santiago, Lisboa e Harvard; así como labores de investigación no CONICET (análogo ó CSIC na Arxentina) e no *Centro de Estudios Científicos* (CEC) en Chile. Ata que finalmente a concesión da beca *Ramón y Cajal* concédelle

aquí, en Santiago, a estabilidade que todo investigador (e pai de dous nenos) busca.

Leva xa máis de vinte anos vinculado á USC e ó IGFAE, pero non esquece as súas raíces, colaborando en actividades culturais e divulgativas na Arxentina e outros países hispanoamericanos (exemplo notable é a iniciativa *Universo entre Canciones*, cuxa xira internacional tivera parada aquí en Santiago hai uns anos). Un dos máis recentes fora a celebración do centenario da visita de A. Einstein á Arxentina e ó Uruguai nunha xira internacional por mor do seu Nobel, evento no cal Edelstein participou activamente como orador e organizador.

Por que é importante seguir celebrando as visitas de Einstein no mundo?

Eu creo que a palabra clave é «legado». Primeiro está o legado que deixa ós físicos: non hai día no que non apareza o seu nome nalgún *paper* ou texto que consultes. Tamén está o legado que nós deixamos de Einstein: se non celebrásemos o día de Einstein coa importancia que merece e non nos limitásemos a simples efemérides en redes sociais, transmitimos a mensaxe de que quizais non é unha figura tan relevante. Nada máis lonxe da realidade: Einstein foi un científico moi comprometido cultural e politicamente. Foi pioneiro nos debates de desarmamento nuclear e participou activamente en discusións polos dereitos civís. Ademais, eu conecto profundamente con el polo vínculo que nos une: somos ambos os dous xudeus ateos, os meus avós tiveran que emigrar na Segunda Guerra Mundial para salvar a vida, ó igual que fixo Einstein. Así que espero que dentro de cen anos outro louco coma min se anime a organizar o segundo centenario.

Cres que é necesario facer máis exercicios de memoria histórica na ciencia? Isto é, poñer en valor figuras inxustamente esquecidas ou descubrimentos/avances relevantes que pasan desapercibidos normalmente.

Nós, como científicos, temos unha mentalidade distinta ós literatos e humanistas: centrámonos máis na obra que no autor.

Ocórreseme o seguinte exemplo: Einstein propuxo a teoría da relatividade xeral, que outros autores adap-

taron e escribiron cunha linguaxe máis limpa e precisa. Cando un estudante novo estuda relatividade xeral, baséase nos textos que outros autores redactaron en base ás ideas e traballos de Einstein: se vas directamente ós *papers* orixinais, a notación é máis confusa e seguramente haberá erros que máis tarde serían corrixidos. Isto pasa menos nas humanidades. Quen mellor expresa o ideario de Heidegger é o propio Heidegger, polo que á hora de estudar a súa filosofía un recorre directamente ós libros do autor. Moi posiblemente é por iso que se tende a venerar máis o autor que a obra en si, cousa que en ciencias naturais é menos común.

Non obstante, como humanos, non podemos esquecer que quen facemos ciencia tamén somos humanos, cada un coa súa biografía, coas súas dúbidas, coa súa tenacidade e cos seus erros e acertos. Facer exercicios de memoria na ciencia axuda a poñer en valor esta faceta e a humanizar a ciencia, o cal creo que é importante.

Na *laudatio* que pronunciaches na charla de Kip Thorne no contexto do programa *ConCiencia* nomeaches un quinteto de científicos que son clave para entender a relatividade xeral: Minkowski, Einstein, Penrose, Thorne e Hawking. Invítoche a facer un exercicio de memoria histórica: hai algún científico máis que engadirías a esta lista de grandes científicos, non só no contexto da relatividade xeral, senón dentro doutros ámbitos; que tivese marcado a túa traxectoria?

Sen ir máis lonxe, o posto de Thorne podería intercambiarse con John Wheeler, o seu director de tese e quen lle introduciu na relatividade xeral. El puxera a brillantes alumnos como Feynman, Thorne ou Misner a traballar nun campo que nos anos 60 non era tan relevante, permitindo un grande avance no campo ata os nosos días. Thorne díxome que tería posto ó seu mestre no seu lugar, pero finalmente considero que Thorne vai alí.

Outro científico que vén á miña mente é Paul Dirac. Para min, o segundo científico máis brillante do século XX: unha figura moi creativa e cunha biografía moi interesante. Tamén podería mencionar a Richard Feynman, Wolfgang Pauli... Como divulgador, asomarse á vida destes xenios revela outros personaxes, quizais menores ó lado destes, pero moi interesantes. Como científico, un pode coñecer mentes brillantes actuais, tocadas por unha variña máxica. Por exemplo, Juan Martín Maldacena: compañeiro e amigo na licenciatura e gran figura da física teórica mundial, con grandes avances na formulación cuántica da gravidade. E xa que estamos na USC, quería reivindicar a figura de Marcos Mariño Beiras. Actualmente é profesor de Física Matemática na Universidade de Xenebra. Home de grande intelixencia

matemática e intuitiva á hora de formular hipóteses. Aí tedes idea para unha futura entrevista.

Dende logo que si, grazas pola suxestión (*Risas*). Seguindo coa entrevista, quería agora preguntarche polo programa *ConCiencia*, dirixido por Jorge Mira. Nel, ademais dos vínculos que tende o encontro entre o equipo do convidado e a universidade, hai unha charla pública na que o relator fala dun tema concreto. Ás veces, pode resultar complicado seguir o tema, especialmente para a audiencia non especializada. Que recomendarías a quen asiste a unha destas charlas e non comprende o tema ou se perde durante ela?

Eu son da opinión de que as charlas teñen que ser desafiantes cos asistentes. Hai distintas escolas na divulgación, e cada cal escolle as súas preferencias á hora de expoñer un tema. En calquera caso, unha calidade indispensable é a claridade e, por exemplo, Kip [na charla da última edición de *ConCiencia*], foi moi claro, aínda que [a charla] fose un pouco máis técnica. Neste sentido, un ten feito un bo traballo se quen escoita a charla marcha con algunha dúbida e, máis importante, con gana de encontrar a resposta. Eu recomendaría que a xente tomase nota de posibles referencias: películas relacionadas co tema, libros, outros relatorios,... Se vas dar unha charla sinxela, onde todos saben de todo o que se vai falar, entón nunca traes un nobel.

Recapitulo un momento nos proxectos divulgativos nos que estás involucrado: *Amautas*, unha plataforma dixital de aprendizaxe; *Coffee Break*, un podcast de actualidade científica; *Universo entre Canciones*, un recital onde música e ciencia se fan unha. No relatorio de Kip Thorne, el dixera que a arte era unha das súas paixóns, e que gustaba de usalas para transmitir a ciencia. Ti cres que a chave da divulgación está hoxe na arte en xeral: pictórica, musical, teatral, dixital...?

Si, nunha charla que dou recorrentemente chamada *Vasos comunicantes* reflexiono sobre o vehículo que supón a arte para comunicar a ciencia, e a inspiración que pode ser a ciencia para a arte. Ademais, existen paralelismos entre ciencia e arte: cando un pintor está a comezar un cadro, non pensa, «Que dirá o público da miña obra?»; senón que primeiro o remata e despois xa recibe as críticas. Na ciencia pasa o mesmo. No entanto, a simbiose ciencia-arte non é sempre tan obvia: hai actividades que eu organizo en espazos públicos (teatros, auditorios...) que a xente pregunta se está reservado ó público especializado. Ninguén preguntaría iso a un artista. A ciencia, aínda que máis técnica e críptica, tamén é para o público, non deixa de ser unha activi-



dade humana. Hoxe temos unha gran diversificación da oportunidade: se pensas en calquera medio que che permita divulgar un tema, seguramente xa haxa alguén que estea a usalo.



José (centro) e Lore Edelstein (esquerda), xunto a Daniela de Rito (dereita), integrantes de *Universo entre Canciones*.

En relación á divulgación en redes, quería deixar un recado á xente máis nova que queira dedicarse á divulgación: centrádevos en rematar a titulación e en facer dous ou tres post-docs. É entón cando podedes comezar a divulgar activamente. Cando un se lanza a explicar un tema que aprendeu o día anterior, todo está collido con alfinetes; e se alguén sopra máis ou menos forte, todo se afunde. É necesario ter coñecementos profundos da materia, e lixeiros cambios na explicación, por moi sutís que poidan parecer, poden cambiar totalmente o sentido conceptual do que estás a explicar. Non esquezamos que os grandes divulgadores actuais e de sempre son persoas cunha grande experiencia académica. É como Messi: fai pensar que é moi sinxelo xutar á portería e marcar gol, pero detrás hai horas e horas de adestramento. O talento innato é diferencial, dende logo, pero só con el non vas chegar moi lonxe.

Quería pararme agora en *Amautas*, onde polo pago dunha subscripción tes acceso a cursos impartidos por diversos profesores e figuras referentes na divulgación actual: Santaolalla e ti mesmo (cofundadores da plataforma), Jorge Mira, Lemnismath... Notas que o interese pola ciencia en xeral e a física en particular crecera nos últimos anos? Anímase máis a xente a estudar física dentro e fora das aulas?

A nivel académico é notable o aumento da nota de corte nos últimos 15 anos. Pasamos de non ter nota de corte a chegar a case 12 sobre 14 aquí en Santiago. Pasou de haber promocións nas que todos entraron con Física como a súa segunda ou terceira opción a achar unha demanda moi superior á oferta (este ano, as solicitudes de admisión ó grao alcanzaron as catrocentas aproximadamente). Este interese pola física é grazas a figuras

públicas na divulgación como por exemplo Santaolalla: o seu público máis novo proxéctase neles e busca emular os seus referentes.

Non obstante, permíteme ser cauto na miña resposta, porque tamén observo un aumento do escurantismo por parte de certos sectores, especialmente despois da pandemia da COVID-19. Fai falta conseguir que a cidadanía sexa crítica grazas a unha formación en conceptos básicos da ciencia a fin de evitar malentendidos e desinformación á hora de interpretar resultados de enquisas, estudos, etc. Por exemplo, é moi importante que a xente entenda que a ciencia se basea en preguntas, e que a verdade que manexamos non é absoluta, senón que pode cambiar parcial ou totalmente, e debe cambiar se os resultados o piden. E non por iso a ciencia perde credibilidade, senón que é máis obxectiva.

Dende logo, o espírito crítico é fundamental na sociedade, máis a día de hoxe. Con toda a túa actividade divulgadora, como compaxinas a túa carreira investigadora e docente na USC?

É moi difícil, quitando horas ó sono e á familia. Aínda que tivera incursións moi puntuais previamente, eu non empecei o meu labor divulgativo ata ser profesor na universidade. A miña experiencia á hora de escribir e falar en conferencias deu pé a un aumento de tempo investido nesta actividade. Ademais, fronte ó panorama actual, onde figuras disruptivas están a negar a importancia da ciencia na sociedade en moitos países (e lamentablemente na miña Arxentina tamén ocorre); preséntase ante min unha conxuntura: debo centrarme máis na investigación en temas vangardistas e moi restrinxidos ou dedicarme a facer chegar información máis xeral pero moi relevante á cidadanía? Eu considérome unha persoa politicamente comprometida e comunicar ciencia é para min un compromiso coa sociedade na que vivo. Isto implica moito sacrificio, estes últimos anos a miña actividade investigadora reduciuse en favor da miña carreira divulgadora. Sen ir máis lonxe, este ano espero publicar dous libros; pero espero recuperar pronto o *momentum* na investigación.

No meu parón investigador tamén puiden «abrir o espectro»: para preparar o programa *Coffee Break*. Teño que estar informado das novidades en distintas ramas da ciencia, e descubrín no proceso enfoques distintos a problemas que me interesan do meu campo de investigación, e que espero poder aplicar nun futuro. Esta retroalimentación motívame a seguir divulgando.

Parémonos nun instante nas «figuras disruptivas» das que falabas antes. Claramente sabemos a quen nos estamos a referir, e non é unha opinión illada. Lembro que Kip Thorne na súa charla en Santiago

afirmou que nos Estados Unidos a educación sofre e que é o momento de Europa de converterse na defensora do progreso científico. Na Arxentina a situación tampouco é mellor. Lamentablemente, España comparte coa Arxentina unha fuga de cerebros que parece complicada de paliar; máis estes últimos anos. Que virtudes ten o sistema español que se poderían aplicar na Arxentina e viceversa?

Unha pregunta difícil, dar contexto á situación na Arxentina levaríanos a unha entrevista de cinco horas como mínimo. España ten unha estabilidade institucional, monetaria, etc. que non hai na Arxentina. Isto obriga á gran maioría de colegas físicos a emigrar, mentres que aquí en España non me atrevería a afirmar que a maioría marchan ó estranxeiro. Non obstante, como afirma un dos meus discípulos, que está a traballar no Canadá, o sistema español ten precariedade nalgúns aspectos.

Dende España estanse a promover diferentes medidas para fomentar a estabilidade do talento nacional: bolsas *Ramón y Cajal*, institucións como *Icrea* en Barcelona ou *Ikerbasque* no País Vasco... Búscase desenvolver programas en Galicia similares ó *Icrea*. Moitas opcións, moi competitivas, certo; pero hai onde elixir.

Non obstante, na Arxentina a única vía é aplicar a carreira investigadora polo CONICET, e descoñezo se segue a haber convocatorias. Aínda se accedes, os salarios non che permiten dedicarte exclusivamente á ciencia. Á hora de traballar nun laboratorio e pedir orzamentos para experimentos, en España o diñeiro chega en tempo e forma –un euro vale considerablemente o mesmo dun ano para outro–. Na Arxentina, o valor do peso cambia da noite ó día, e normalmente o Estado demórase nos pagos, polo que moitas veces o orzamento inicial resulta insuficiente. Dado que tes que entregar o informe final igualmente, os poucos valentes que quedan teñen que «atar todo con arame», conseguindo montar un laboratorio de 5000€ con só 5€, por exemplo.

Grazas pola túa reflexión, José. A situación en ambos os dous países é complicada, pero dende logo aquí en España temos sorte de habitar no contexto europeo,

onde o valor de institucións como o CERN son exemplo de que a ciencia se valora por enriba de ideais, un oasis entre os desertos da tensión xeopolítica.

Os europeos deberían saber a sorte que teñen co CERN. Eu daríalle á institución o Nobel da Paz, soamente por conseguir que xente de diferentes nacionalidades coopere polo avance do coñecemento en beneficio da humanidade.

Xa para ir rematando a entrevista, quería lanzar unha pregunta atrevida: ti fuches patrón na visita de Stephen Hawking a Santiago en 2008. Cres que nalgún momento a figura de Hawking será tan relevante coma a de Einstein? Celebraránse as súas visitas polo mundo igual que facemos con el?

Eu creo que non, Hawking estaría de acordo comigo que Einstein é moito máis importante. Obviando o seu legado, a súa figura, ademais de excéntrica, está cuberta por un contexto histórico singular (guerras mundiais, nacemento da mecánica cuántica...). Hawking está no panteón dos grandes físicos polo seu extenso traballo: aclarou moitas dúbidas sobre a orixe do universo e a súa estrutura, así como dos buratos negros. Non obstante, coetáneos que traballaron nos mesmos campos, como Penrose, son menos coñecidos. O salto á cultura pop vén da súa discapacidade: a súa grande intelixencia a pesar dunha enfermidade terminal inspirou a súa aparición en series como *Os Simpsons*, *The Big Bang Theory*, *Star Trek*... Tamén é un exemplo de tenacidade e actitude. A súa vontade de querer gozar a vida cada segundo pese ás adversidades debería inspirar á xente que se afunde fronte a problemas que son «puro *gauge*».

A figura de Hawking será lembrada, dende logo, pero dubido que en 2108 alguén faga un aniversario da súa visita a Santiago. Eu non estarei aquí para comprobalo, pero ti quizais si.

Vai ser complicado, non é doado chegar ós 105 anos (*Risas*). Pero escrito queda, por se alguén le esta entrevista dentro de cen anos.



Por que o bosón de Higgs non é moi «natural»

Víctor Díaz Díaz

Breve explicación da relación entre o problema da xerarquía e a supersimetría.

Introdución

As teorías cuánticas de campos (QFTs) son a ferramenta máis poderosa da que dispoñemos para entender teoricamente as interaccións entre partículas. Á xa alta complexidade sobre a que se constrúen as teorías, hai ademais que engadir o feito de que, á hora de empregalas para calcular observables, debe facerse dun xeito coidadoso se non se quere obter sempre a mesma resposta: infinito.

Un resultado infinito nun cálculo teórico sempre quere dicir o mesmo: a teoría non ten poder predictivo no réxime no que se está aplicando, é necesario empregar un modelo diferente. Non obstante, traballando con algunhas QFTs é posible «domear os infinitos», de xeito que se poden facer redefinicións consistentes dos seus parámetros para conseguir resultados finitos, de maneira que as diverxencias teóricas se cancelan para non aparecer nos observables. Este proceso denomínase *regularización*, e existen diversos métodos coas súas vantaxes e inconvenientes.

Que isto sexa algo a ter en conta quere dicirnos que as nosas teorías son teorías efectivas e non son válidas en calquera escala de enerxía. Ao aplicalas a distintas escalas, deben ser modificadas proporcionalmente a través dun proceso que se denomina *renormalización*, e determina como as altas enerxías (UV, de ultravioleta) e as baixas enerxías (IR, de infravermello) se relacionan. Esta é unha cuestión de importancia capital, xa que unha teoría non renormalizable non pode proporcionar predicións observables.

Tanto o procedemento matemático de regularización e renormalización como a súa historia son temas longos e arrevesados, e merecen ser tratados de xeito extenso noutro momento. Neste artigo imos explorar o concepto relacionado da *naturalidade*, o cal non está exento de debate, aínda a día de hoxe.

O concepto de naturalidade en física

Empecemos por considerar unha QFT xenérica, que sempre poderá escribirse como

$$\mathcal{L} = \sum_i g_i O_i, \quad (1)$$

onde os O_i son operadores compostos de campos cuánticos e os g_i son os parámetros correspondentes, tales como masas e constantes de acoplamento. A acción correspondente en D dimensións será entón

$$S = \int d^D x \sum_i g_i O_i. \quad (2)$$

Seguindo o que se indicou anteriormente, imos tratar esta teoría como unha teoría efectiva válida ata unha escala Λ , denominada *cutoff*, que determina a escala de enerxía característica empregada no proceso de renormalización [1]. Deste xeito, se un operador O_i ten dimensión δ_i , este terá unidades de Λ^{δ_i} e o coeficiente correspondente terá a forma

$$g_i = c_i \Lambda^{D-\delta_i}, \quad (3)$$

onde c_i é agora adimensional.

Segundo a relación de D e δ_i , os operadores clasifícanse en tres tipos. Se $\delta_i < D$, o operador será *relevante* a baixas enerxías, xa que o coeficiente correspondente medrará de xeito polinómico en Λ . Se $\delta_i = D$, o coeficiente será constante para calquera Λ , e o operador será *marxinal*. Por último, para $\delta_i > D$ o coeficiente correspondente decrecerá de xeito polinómico en Λ e o operador será *irrelevante* a baixas enerxías. En todo caso, a escala de enerxía característica dunha teoría virá determinada polo coeficiente coa potencia maior de Λ , e unha teoría será renormalizable se todos os seus operadores son relevantes ou marxinais.

O concepto de *naturalidade* introdúcese neste momento: é de esperar que o valor numérico dos parámetros g_i sexa da orde da escala característica, o que se traduce en

$$c_i \sim \mathcal{O}(1). \quad (4)$$

Se isto se cumpre, dise que o parámetro g_i é *natural*. No caso contrario, se o valor de c_i é moi grande ou moi pequeno, dise que g_i está *finamente axustado* [2]. A primeira impresión que pode xerar esta explicación é usualmente de confusión, de innecesidade. Falar de naturalidade lévanos ao límite entre a ciencia e a filosofía, e parece un esforzo por facer que as nosas teorías encaixen dentro dunhas consideracións estéticas arbitrarias máis que corresponderse coa investigación científica.

Certamente, o concepto de naturalidade é profundamente polémico dentro da física teórica. Algúns autores formulan que é absurdo tratalo en calquera caso, outros intentan evitalo con consideracións antrópicas (que son quizais máis polémicas aínda) mentres que si existen certos argumentos no seu favor. E é que o argumento da naturalidade xa foi empregado con éxito na física: foi un elemento importante na teorización do quark c por Glashow, Illiopoulos e Maiani [3] e o cálculo da súa masa antes do seu descubrimento experimental [4].

Sexa cal sexa a resposta ao debate, é importante. Non só porque sempre é interesante entender mellor as nosas teorías, senón porque a máis importante da que dispoñemos enfróntase ao concepto de naturalidade de xeito irremediable: no Modelo Estándar, a masa do bosón de Higgs viola a naturalidade.

O problema da xerarquía e a masa do Higgs

O Modelo Estándar é unha teoría efectiva. En principio, debe de ser unha teoría válida ata a escala da gravidade cuántica, i.e. a masa de Planck M_P . Imos analizar en detalle os termos do Modelo Estándar para entender en que grao esperamos que isto sexa así. Tendo en conta o que se explicou anteriormente, se escribimos todos os termos en función de Λ , veremos que todos os termos son marxinais, renormalizables, excepto un. A masa do Higgs ten a forma

$$\mathcal{L} = m_H^2 |\Phi|^2. \quad (5)$$

Tanto o operador como o parámetro teñen neste caso $\delta = 2$, e polo tanto son relevantes a baixas enerxías. A masa do Higgs poderá expresarse entón como [5]

$$m_H^2 \sim c_H \Lambda^2, \quad (6)$$

onde c_H é adimensional e esperaríamos que $\Lambda^2 \sim M_P^2$. Isto, non obstante, manifesta unha situación incómoda. O valor medido experimentalmente para a masa é $m_H \approx 126$ GeV, é dicir, $m_H \sim 10^2$ GeV, mentres que $\Lambda^2 \sim 10^{36}$ GeV. Isto implica que $c_H \sim \mathcal{O}(10^{-34})$, o que contradí de xeito espectacular a suposición de que $c_H \sim \mathcal{O}(1)$.

Este feito ilustra o *problema da xerarquía* do Modelo Estándar: a escala electrofeble (definida pola masa do Higgs) é moito menor que a escala de Planck (definida pola masa de Planck), e isto é relevante no contexto da renormalización. Ao calcular as correccións cuánticas á masa do Higgs a primeira orde, regularizando a teoría co cutoff $\Lambda = M_P$, atópase que

$$m_H^2(\mu) = m_H^2(\Lambda) + \frac{c_H}{16\pi^2} \Lambda^2 + \mathcal{O}(\Lambda^0), \quad (7)$$

¹Simple en idea, complexo en execución.

onde $m_H^2(\mu)$ é a masa do Higgs calculada no IR a partir do seu valor no UV, $m_H^2(\Lambda)$, e o termo con Λ^2 é a corrección a primeira orde δm_H^2 . Para ter un campo de Higgs dinámico, necesitamos que a súa masa no IR non sexa infinita, e para iso δm_H^2 debe tomar un valor da orde da masa IR, o que efectivamente nos forza a que $c_H \sim \mathcal{O}(10^{-34})$.

Pero entón, debe violarse a naturalidade de xeito inevitable? Resulta que non. Se impoñemos que a naturalidade debe preservarse, existe un xeito relativamente simple¹ de solucionar o problema da xerarquía que nos leva máis aló do Modelo Estándar: debemos introducir a supersimetría.

Supersimetría

A *supersimetría*, como o seu nome indica, é unha simetría dentro dunha QFT. A súa formulación matemática é complexa, pero a idea é bastante simple: unha transformación supersimétrica Q transforma bosóns en fermións, e viceversa [6]. Así, esquematicamente, teríamos un campo fermiónico φ relacionado co campo de Higgs Φ segundo

$$Q\Phi \sim \varphi. \quad (8)$$

A corrección á masa do Higgs vén principalmente de bucles nos que se forman pares $t\bar{t}$ virtuais. O efecto importante da supersimetría é que as correccións cuánticas inducidas polo novo campo φ teñen a mesma forma que as do quark t , pero co signo cambiado. Deste xeito podemos facer que se cancelen, e así $c_H = 0$ automaticamente [7].

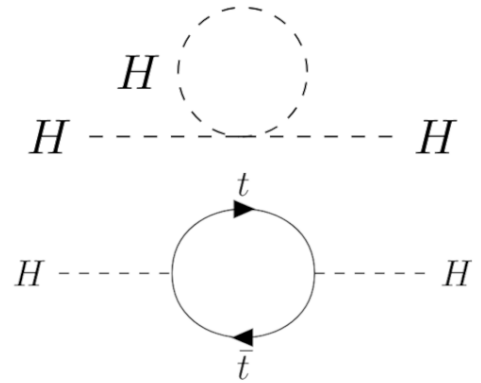


Figura 1: Correccións cuánticas a primeira orde da masa do Higgs no Modelo Estándar.

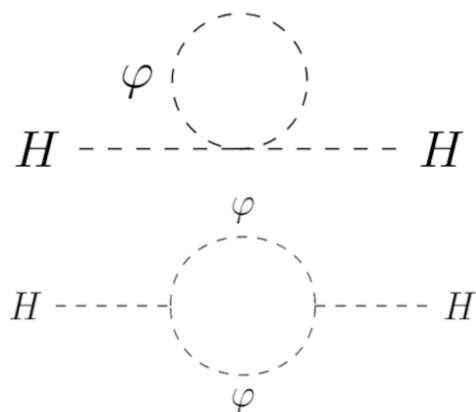


Figura 2: Correccións cuánticas inducidas polo novo campo fermiónico φ , que compensan as anteriores.

Este feito foi unha das primeiras pezas que motivaron o estudo da supersimetría, e durante moito tempo esperouse que unha extensión supersimétrica do Modelo Estándar fose o camiño a seguir. De feito, o LHC foi construído orixinalmente con dous obxectivos previsibles: producir o bosón de Higgs e partículas supersimétricas. O primeiro foi todo un éxito, pero o segundo parece cada vez máis improbable.

Malia todo, a Supersimetría non foi abandonada completamente. Existen xeitos de rompela espontaneamente de maneira que, se ben é unha simetría da teoría fundamental, non se manifesta nas baixas enerxías ás que temos acceso. Ademais, é un ingrediente imprescindible para xerar fermións nunha teoría de cordas (supercordas), e as extensións supersimétricas de teorías gauge proporcionan pistas moi importantes no estudo destas últimas, que aínda presentan numerosos problemas sen resolver.

Conclusiones

O concepto de naturalidade dentro da física teórica é moi complexo. A pesar de terse mostrado eficaz á hora de descubrir nova física no pasado, a súa validez como criterio de selección á hora de construír novas teorías non está nada asentada, e segue a ser un motivo de debate intenso entre os físicos.

Como na maior parte de casos dentro da ciencia, o mellor seguramente non sexa desbotalo completamente, pero tratar con escepticismo todas as circunstancias nas que se recorra a el. É unha cuestión máis filosófica que científica, polo que é moi importante ter coidado de empregar este concepto e outros similares como unha ferramenta máis, pero non como unha xustificación sinxela para resolver cuestións complexas de xeito apurado.

Para quen estea interesado en aprender máis sobre o tema da naturalidade e a súa situación na física teórica, recomendo moito a tese de máster de C.D. Dijkstra [8].

Referencias

- [1] *Effective field theory and the fermi surface*; Joseph Polchinski; (1999)
- [2] *Effective theories in physics*; James D. Wells; (Springer Berlin, Heidelberg, 2012)
- [3] *Phys. rev. d* p. **1285**; S. L. Glashow, J. Iliopoulos, L. Maiani; (outubro de 1970)
- [4] *Phys. rev. d* p. **897**; M. K. Gaillard, Benjamin W. Lee; (agosto de 1974)
- [5] *Lectures on naturalness, string landscape and multiverse*; Arthur Hebecker; (2023)
- [6] *Supersymmetry*; D. Skinner; (2020)
- [7] *Naturalness and supersymmetry*; K. Agashe; (1999)
- [8] *Naturalness as a reasonable scientific principle in fundamental physics*; C.D. Dijkstra; (2019)

A programadora invisible

Manuel Tiago Barbosa Aresta e Victoria Bello Pastor

E como terminou contrariando un Nobel.

*Detrás de cada home hai sempre unha muller
poñendo os ollos en branco.*

— Jim Carrey

En todos os libros están grandes mulleres da ciencia como Marie Curie, Hipatia de Alexandría ou Ada Lovelace. Mais o recoñecemento das mulleres no desenvolvemento científico é recente, a pesar que aínda hai moitos teoremas ou logros científicos atribuídos a unha autoría masculina sen ter en conta as mulleres que puideron facer diso unha realidade. Unha destas mulleres foi Mary Tsingou, unha das primeiras programadoras do primeiro supercomputador estadounidense e partícipe nun dos experimentos de máis impacto no campo da mecánica estatística e da teoría do caos.

Quen era Mary Tsingou

Mary Tsingou-Menzel naceu no ano 1928 en Milwaukee, Wisconsin e criouse no seo dunha familia grecodescendente. Por causa da Gran Depresión, na súa infancia migrou a Bulgaria en busca dunha maior estabilidade. Porén, tras o inicio da Segunda Guerra Mundial, os Tsingou decidiron volver de novo aos EEUU en 1940, procurando escapar da difícil situación que se estaba a xestar no continente europeo. No seu retorno ao país da liberdade, Mary Tsingou realizou os seus estudos de secundaria, e accedeu a unha posterior formación universitaria. Finalmente, en 1951 graduouse en matemáticas e educación na Universidade de Wisconsin. Nada máis obter o título, buscou traballo como profesora de matemáticas, mais o regreso dos veteranos tras a Segunda Guerra Mundial fixo que fose case imposible encontrar un posto na educación, sobre todo como muller.

Tsingou desexaba continuar cos seus estudos en matemáticas, e comezou a traballar de maneira simultánea no Laboratorio Nacional de Los Álamos en xaneiro de 1952, dentro da División Teórica como matemática e computadora. Neste traballo, que ela atopaba monótono e “mundano”, dedicábase a realizar cálculos para a resolución de ecuacións con calculadoras Marchant. A maioría de persoas neste posto eran mulleres mozas, acabadas de saír da universidade. Durante este período a súa carreira profesional estaba aínda nos seus inicios, pero ela non podía evitar sentir unha certa frustración

cara á percepción do seu traballo e das súas compañeiras. A pesar disto, a desigualdade de condicións provocada polo xénero non limitou a Tsingou, quen sempre mantivo a súa ambición e o seu interese por aprender.



Figura 1: Mary Tsingou na súa xuventude, traballando no laboratorio de Los Álamos.

Nada máis chegar, o laboratorio comezara a recrutar persoas para o grupo do MANIAC I, a primeira supercomputadora capaz de gañar contra un humano nunha partida de xadrez. No laboratorio ofertaban clases de computación e Tsingou apuntouse sen dubidalo dúas veces. A idea inicial era tan só asistir ás clases, mais non cambiar de grupo, pois ninguén pretendía apartarse do seu grupo de traballo, o T-1, para o grupo do MANIAC, o T-7.

Finalmente, polas súas capacidades e polas súas habilidades, transferiuse coa súa compañeira Mary Kircher e dedicáronse xuntas á computación de problemas, sobre



todo orientados ás armas. No seu momento, o MANIAC I era a maior máquina de computación do estado, e unha das máis grandes do mundo. En plena Guerra Fría, o obxectivo do goberno estadounidense era gañar a carreira á Unión Soviética no desenvolvemento da bomba de hidróxeno, e esta supercomputadora resultou fundamental nese proceso.

Ao mesmo tempo, entre 1953 e 1954 comezou a traballar co Nobel de física Enrico Fermi e os físicos John Pasta e Stanislaw Ulam, autores do problema de Fermi-Pasta-Ulam-Tsingou, ou FPUT. Esta colaboración marcaría o inicio nun dos episodios máis importantes da súa traxectoria profesional: a súa participación técnica na resolución do FPUT.

O problema FPU

Enrico Fermi, que recibira o premio Nobel de Física no ano 1938 ao demostrar a existencia de novos elementos radioactivos producidos por procesos de irradiación con neutróns, confiaba firmemente en que as novas teorías físicas fundamentais requirirían de operadores e ecuacións non lineais. A dificultade que supuñan devanditas ecuacións, ás veces imposibles de resolver analiticamente, derivaba en que non se afondara nelas. Porén, coa creación de supercomputadoras como a MANIAC I, Fermi vía unha nova ferramenta para o estudo das características non lineais.

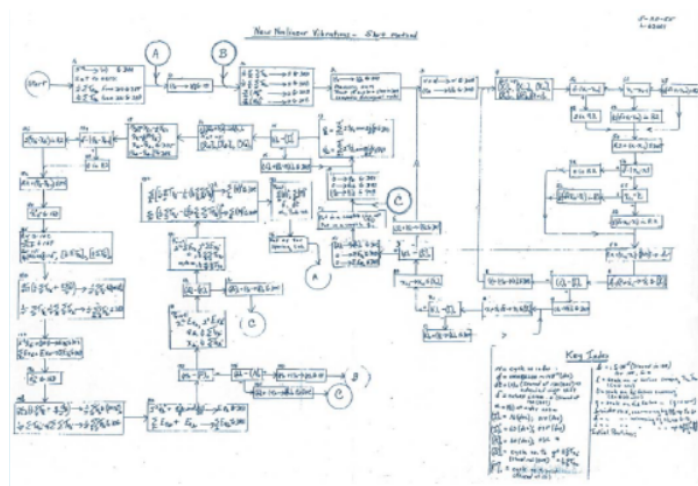


Figura 2: Algoritmo orixinal escrito á man por Mary Tsingou en 1953.

O modelo a seguiren era sinxelo: unha cadea de N partículas, con masa unidade, unidas mediante unha interacción cuadrática, cun termo non lineal débil. Dito doutra forma, intentaban representar a evolución dun cristal cara ao equilibrio térmico a través de “boliñas unidas por resortes” (o mítico oscilador harmónico acoplado). Con este modelo procuraban reafirmar a tese de

Fermi, quen defendía que nun sistema non lineal habería unha transmisión de enerxía entre os modos de oscilación, chegando finalmente a un comportamento caótico dos modos e distribuíndo a enerxía entre todos. A non linearidade presentaba até entón un desafío, pois era imposible acadar unha solución analítica. Aquí entra o papel de Tsingou, quen foi a encargada de deseñar e implementar o algoritmo e o código das ecuacións correspondentes para a súa solución.

A ecuación de partida define o desprazamento da partícula j , tendo en conta a ecuación lineal de movemento (a clásica do oscilador harmónico) e o parámetro de non linearidade (α), para definir o movemento non lineal de cada elemento;

$$m\ddot{u}_j = k(u_{j+1} + u_{j-1} - 2u_j) + 2k\alpha[(u_{j+1} - u_j) - (u_j - u_{j-1})].$$

Para calcular a enerxía de cada partícula en base ao seu desprazamento, escríbese esta ecuación do movemento en termos do hamiltoniano. É preciso ter en conta tamén o elemento non lineal, polo que a ecuación será o hamiltoniano do oscilador harmónico acoplado máis un termo non lineal

$$H = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^N \left(\frac{p_i^2}{m} + k(u_{i+1} - u_i)^2 + \frac{\alpha}{3} k(u_{i+1} - u_i)^3 \right).$$

Ao non ser lineal o sistema dinámico, non é posible atopar unha solución analítica, mais si que se pode descompoñer en modos normais

$$H = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N \left(\frac{p_j'^2}{m} + m\omega_j^2 q_j^2 \right) + \frac{\alpha}{3} \sum_{j,l,m=1}^N c_{jlm} a_j a_l a_m \omega_j \omega_l \omega_m.$$

Tras isto, calcúlanse os coeficientes non lineais c_{jml} e ponse q_j en forma exponencial. Despois, súmase para ter en consideración unha ecuación xeral e substitúese, sabendo que k vai de $-(N+1)$ a $(N+1)$

$$S_n = \sum_j^N (-i)^n F \left[\sum_k A \left(e^{i \frac{(j+i)k\pi}{N+1}} - e^{i \frac{jk\pi}{N+1}} \right) \right]^n$$

$$S_n = F \sum_j^N \left[a_k \exp \left(i \frac{(j+i/2)k\pi}{N+1} \right) 2 \sin \left(\frac{k\pi}{2(N+1)} \right) \right]^n$$

$$S_n = F \sum_j^N \left[a_k \frac{\omega_k}{\omega_0} \exp \left(i \frac{(j+i/2)k\pi}{N+1} \right) \right]^n.$$

Saltando un par de pasos intermedios, os termos non lineais serían os seguintes, tendo en conta a repetición

dos índices jlm

$$c_{jlm} = 2k \frac{(N+1)F}{\omega_0^3} Z(x)D(x) \\ = \frac{k}{\omega_0^3 \sqrt{2(N+1)}} Z(x)D(x).$$

Baixo estes cálculos, Mary Tsingou programou o MANIAC para que se desen os resultados dos cálculos. Nas iteracións iniciais, o sistema funcionaba tal como Fermi prevía: a enerxía ía pasando dun modo a outro na cadea, e finalmente o sistema termalizábase e demostraba un comportamento caótico, chegando a enerxía a todos os modos de maneira case uniforme. Porén, de maneira accidental, os cálculos deixáronse durante máis tempo do previsto. Isto non só lle levaría a contraria a Fermi, senón que abriría as portas a unha nova incógnita dentro da teoría do caos. Cando o valor de α e a forza eran baixos, a enerxía íase movendo entre modos até un punto en que volvía case toda ao modo inicial. Non se daba ese comportamento caótico que Fermi anhelaba atopar no experimento, senón que mostraba unha especie de periodicidade case exacta no seu regreso.

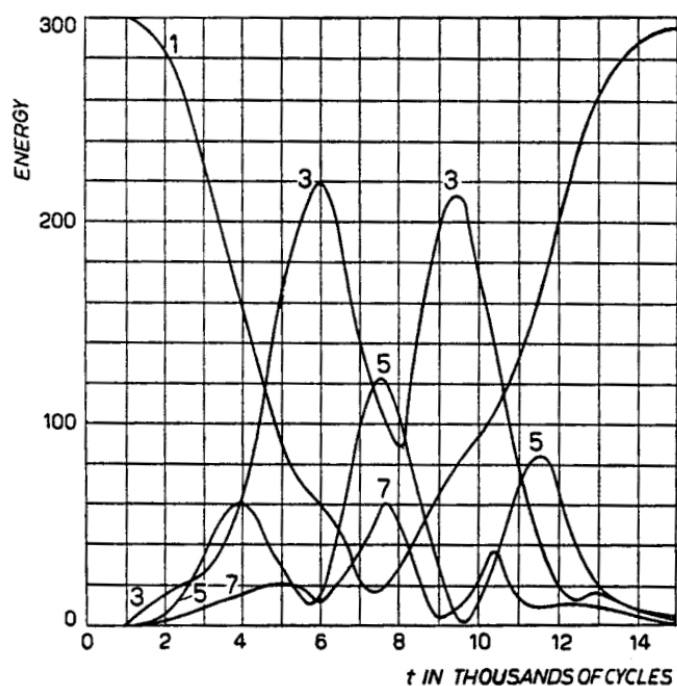


Figura 3: Resultados do experimento orixinal nos que se mostra que a enerxía volve de novo ao modo 1, ou modo inicial, tras unha cantidade determinada de iteracións.

O desenvolvemento tecnolóxico dos tempos contemporáneos permitiu que se volvесе a realizar o experimento unha serie de veces para dar novos resultados. Aínda así, os resultados publicados en 1955 foron fundamentais e relacionáronse con conceptos posteriores como a ecuación KdV e os solitóns. En efectos prácticos que todo o

mundo pode observar, este fenómeno está presente no día a día en cousas tan fundamentais como a fibra óptica, as memorias RAM, os GPS ou as ecografías. Polo tanto, o FPUT podería considerarse pioneiro no desenvolvemento da física teórica que aplicamos no presente, e con especial impacto na tecnoloxía dixital.

O T que faltaba

Pese a realizar un importante labor dentro da investigación do problema FPUT, Mary Tsingou non obtivo recoñecemento durante moito tempo. A principal razón á que se lle atribúe esta decisión foi que ela non estivo involucrada no propio proceso de escritura do problema, senón que se dedicou a programar o ordenador e a interpretar algunhas gráficas. A decisión de non incluír inicialmente a Tsingou como coautora espertou controversias co paso dos anos. No período contemporáneo ao experimento, as persoas dedicadas á programación sempre figuraban como autores neste tipo de traballos, polo que a exclusión da científica era incomprensible. O argumento que xustificaba a súa exclusión, aquel que eliminaba o seu nome por non teren participado directamente na escritura do problema, viuse rebatido despois de analizar en detalle o rol que xogou Enrico Fermi. O físico italiano tampouco estivera involucrado na redacción do artigo, posto que falecera no ano 1954, un ano antes da publicación do experimento.

The problems in question do not seem to admit of analytic solutions in closed form, and heuristic work was performed numerically on a fast electronic computing machine (MANIAC I at Los Alamos).* The ergodic behavior of such systems was studied with the primary aim of establishing, experimentally, the rate of approach to the equipartition of energy among the various degrees of freedom of the system. Several problems will be considered in order of increasing complexity. This paper is devoted to the first one only.

We imagine a one-dimensional continuum with the ends kept fixed and with forces acting on the elements of this string. In addition to the usual linear term expressing the dependence of the force on the displacement of the element, this force contains higher order terms. For

* We thank Miss Mary Tsingou for efficient coding of the problems and for running the computations on the Los Alamos MANIAC machine.

Figura 4: Nota de páxina con 2 liñas de agradecemento á “señorita Mary Tsingou” pola codificación do problema no MANIAC de Los Álamos.

Foi no ano 2008 cando se reconsiderou o rol que xogara Tsingou no traballo. O físico francés Thierry Dauxois escribiu no número de xaneiro un artigo para a revista *Physics Today*, titulado “Fermi, Pasta, Ulam and a mysterious lady”. Nesta peza explicaba o labor elemental



que desenvolveu Tsingou no proceso, descrito como a deseñadora do código computacional. Cabe mencionar que, no artigo orixinal publicado en 1955, incluíanse unhas liñas de agradecemento á científica pola súa participación, pero sen recoñecela como coautora do traballo. Esta mención espertou inquedanza entre a comunidade científica, posto que nunca se falaba da cuarta integrante do equipo, da nomeada por Dauxois como “dama misteriosa”. Despois de ter investigado sobre a súa función, Mary Tsingou pasou a ser unha das coautoras por ter codificado os resultados e ter programado os ordenadores empregados no experimento.

No resto da súa vida profesional, Tsingou dedicouse a traballar en diferentes proxectos como científica. Un dos máis salientables foi a súa participación nos cálculos do proxecto da Iniciativa de Defensa Estratéxica (ou proxecto Star Wars), ideado por Ronald Reagan durante a Guerra Fría para protexer Os Estados Unidos con armas nucleares estratéxicas. Ademais disto, traballou na obtención de solucións numéricas para as ecuacións de Schrödinger, colaborou con John Von Neumann para estudar a mestura entre dous fluídos de distintas densidades e retomou na década dos 70 o problema FPUT, esta vez da man do científico James Leslie Tuck, co obxectivo de estudar frecuencias máis longas. A científica xubilouse finalmente no ano 1991, e pasou a vivir unha vida discreta xunto co seu marido en Los Álamos.

Por todo o que tivo feito na súa traxectoria, Mary Tsingou marcou un antes e un despois na historia da física computacional e, sen dúbida, foi un dos maiores expoñentes femininos na ciencia do século XX. O FPUT non podería terse realizado sen Tsingou, mente encargada de darlle forma ao mesmo, deseñando e programando o código numérico. Sen o seu traballo, a exploración dos sistemas non lineais e o posterior desenvolvemento da teoría do caos non terían seguido o mesmo camiño. O seu exemplo continúa inspirando as novas xeracións de físicas e matemáticas, pois o seu legado científico transcenderá o tempo.

Referencias

- [1] *T. dauxois, fermi, pasta, ulam, and a mysterious lady*; (American Institute of Physics, École Normale Supérieure, Lyon, 2008)
- [2] *A wrong righted*; (2008)
- [3] *Entrevista a mary tsingou*; Janet Abbate; (2002)
- [4] *La dama misteriosa que ayudó a abrir el campo de la física no lineal y el uso de simulaciones por ordenador para estudiarla*; Rocío P. Benavente
- [5] *El experimento de Fermi-Pasta-Ulam-Tsingou, simulación con interacciones no lineales*; Alejandro Mata Ali; (USC)

A escada cósmica de distancias

Pablo Falgueras Casarejos

O conxunto de métodos que permite medir distancias no Universo.

A diferenza da nosa vida cotiá, para medir distancias cósmicas non podemos utilizar instrumentos convencionais (un metro, un calibre...), necesitamos buscar outras formas enxeñosas para estudar a escala do Universo. Para este propósito, existe un conxunto de métodos (a maioría indirectos) que son válidos nun certo rango de distancias e os cales están calibrados por outro método nun rango inferior. Todos eles forman a denominada “escada cósmica de distancias”. A continuación, comentaremos os máis relevantes.

En primeiro lugar, para obxectos próximos dentro do Sistema Solar, é posible emitir sinais de radar cara a un corpo onde se reflicten e regresan á Terra. Desta maneira, coñecida a velocidade da luz e medindo o tempo que tarda en ir e volver o sinal, pódese calcular con moita precisión a distancia ao obxecto. O problema é que para distancias maiores a unhas 10 unidades astronómicas (au), as ondas reflectidas son demasiado tenues para ser detectadas. Neste sentido, as misións Apollo situaron varios retrorreflectores (espellos que reflicten a luz cara á fonte) na Lúa, que aínda seguen activos.

Se queremos medir distancias maiores, por exemplo, a estrelas próximas, podemos utilizar un dos piares fundamentais da “escada cósmica”, co cal se calibran os demais métodos: a paralaxe. Para observar este fenómeno, basta con mirar un dos nosos dedos cun só ollo, e despois, co outro. Veremos que o dedo cambia lixeiramente a súa posición debido a que cada ollo capta imaxes distintas. De feito, ese cambio é maior canto máis cerca se atopa un obxecto. Grazas a que a Terra orbita arredor do Sol, se realizamos dúas observacións separadas por seis meses (en puntos opostos da órbita), poderemos medir a paralaxe anual de estrelas próximas a nós. Precisamente, de aquí provén a definición do parsec (pc), que é a distancia ao Sol á cal un corpo celeste se observa baixo un ángulo de paralaxe igual a 1 segundo de arco.

Para imaxinar o pequeno que é ese ángulo, podemos comparalo co diámetro angular do Sol ou a Lúa, que é de medio grao aproximadamente, o que equivale a 30 minutos de arco ou 1 800 segundos de arco. Ademais, os ángulos de paralaxe son aínda menores, xa que a estrela máis próxima (Próxima Centauri) atópase a unha distancia maior a 1 pc, polo que a súa paralaxe anual é menor a 1 segundo de arco (en torno a 0.77”). Isto quere dicir, que para as demais estrelas, ao estar máis lonxe, os ángulos son aínda máis pequenos. Non obstante, misións

como o telescopio espacial Gaia ou o instrumento WFC3 do telescopio espacial Hubble son capaces de alcanzar resolucións duns 20 microsegundos de arco, permitindo medir distancias de ata 5 000 pc.

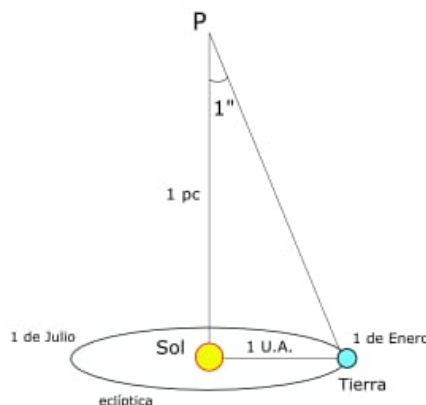


Figura 1: O parsec, a unidade de distancia máis empregada en astronomía.[1]

Iso si, dado que só o tamaño da Vía Láctea estímase en 30 000 pc, precisamos doutros métodos para distancias maiores. Aquí atopamos o seguinte chanzo da escada, un tipo de estrelas variables moi especiais denominadas Cefeidas. Grazas a que son moi luminosas, poden detectarse ata a varias decenas de megaparsecs. As Cefeidas son estrelas variables pulsantes, é dicir, estrelas cuxa luminosidade varía de forma periódica debido á expansión e contracción das súas capas externas. O interesante é que existe unha relación entre o seu período de pulsación e a súa luminosidade intrínseca. Este descubrimento correspóndelle á astrónoma Henrietta S. Leavitt, quen en 1908, estudando estrelas variables na Pequena Nube de Magalhães (SMC), decatouse de que aquelas cun período máis longo eran máis brillantes, e as que tiñan un período máis curto eran máis tenues, supoñendo que se atopaban todas aproximadamente á mesma distancia ao pertencer á SMC.

O que sucede agora é que coñecendo o período dunha Cefeida, podemos calcular a súa luminosidade intrínseca. Ao comparala co seu brillo aparente na Terra, pódese deducir o lonxe que está tendo en conta que o fluxo recibido diminúe co cadrado da distancia (supoñendo un universo estático e euclídeo, na práctica o cálculo pode ser un pouco máis complexo). Este tipo de obxectos cuxa luminosidade podemos determinar son coñecidos como “candeas estándar”.



O problema é que unicamente utilizando Cefeidas, só podemos coñecer as distancias relativas entre elas; para saber a distancia real debemos calibrar a relación período-luminosidade. A solución é utilizar o método da paralaxe para determinar a distancia a Cefeidas próximas, calibrando así esa relación, para despois estimar a distancia a outra Cefeida máis afastada onde non se pode empregar a paralaxe.

Aínda que as variables Cefeidas son moi brillantes, necesitamos outro tipo de candeas estándar para distancias todavía maiores: as supernovas, concretamente as de tipo Ia. Estes fenómenos comparten a mesma orixe, todos eles prodúcense cando unha anana branca (remamente dunha estrela pouco masiva, como o Sol) absorbe material dunha estrela compañeira nun sistema binario. As ananas brancas non colapsan pola súa gravidade debido á presión de dexeneración dos electróns. Iso si, esta oposición á gravidade ten un límite, o límite de Chandrasekhar, o cal se corresponde cunhas 1.44 masas solares. Cando a anana branca absorbe material da outra estrela e supera ese límite, prodúcese unha supernova Ia. Aínda que todas se orixinan da mesma maneira, non teñen necesariamente a mesma luminosidade, mais si é parecida. O que sucede é que teñen unha curva de luz idéntica: existe unha relación entre o máximo de luminosidade e o tempo que esta tarda en diminuír (por exemplo, ata a metade do máximo). Desta forma pódese determinar a luminosidade intrínseca da supernova e comparala co brillo vista desde a Terra.



Figura 2: SN 2025rbs, unha supernova de tipo Ia descuberta en xullo deste ano na galaxia NGC 7331. (Fotografía do autor)

Novamente, é preciso calibrar esa relación, polo que

se recorre ás variables Cefeidas. Se detectamos unha supernova Ia nunha galaxia próxima onde tamén haxa Cefeidas, despois poderemos estimar a distancia a outra galaxia máis lonxe onde xa non se poidan detectar as estrelas variables. En resumo, coñécense as distancias ás supernovas Ia grazas ás Cefeidas, que a súa vez requiren da paralaxe (de aquí provén o nome de “escada”).

Finalmente, para medir as distancias máis grandes adóitase utilizar o desprazamento ao vermello da luz. Sábese grazas á lei de Hubble que as galaxias distáncianse de nós máis rápido canto máis lonxe se atopan debido á expansión do espazo-tempo, polo que as liñas de absorción dos seus espectros desprázanse cara a lonxitudes de onda maiores. Ao comparar as observacións cun espectro de referencia obtido nun laboratorio, mediremos o desprazamento ao vermello para finalmente determinar a distancia á galaxia.

Estes unicamente son algúns dos métodos utilizados para medir as enormes distancias no universo. Para concluír, tamén poderíamos mencionar outros como a correlación coa secuencia principal do diagrama H-R (Hertzsprung-Russell), no que se clasifican as estrelas polo seu espectro e luminosidade; as estrelas variables RR Lyrae, similares ás Cefeidas pero con períodos de pulsación máis curtos; a relación de Tully-Fisher entre a velocidade de rotación das galaxias espirais e a súa luminosidade; a relación de Faber-Jackson entre a dispersión de velocidades das estrelas en galaxias elípticas coa súa luminosidade, e máis. Ao final, todos estes métodos son complementarios entre si e axúdannos a comprender un pouco mellor o noso lugar no cosmos.

Referencias

- [1] *Wikimedia commons*
- [2] *Introduction to cosmology*; Barbara Sue Ryden; (Addison-Wesley, 2003)
- [3] *Grandes estruturas del universo*; Eduardo Battaner López; (RBA, 2015)
- [4] *El Big Bang y el origen del universo*; Antonio M. Lallena Rojo; (RBA, 2021)
- [5] *225 Preguntas sobre la naturaleza del universo...*; Mariano Abril Domingo; (Marcombo, 2018)
- [6] *Galaxia*; Joan A. Català; (RBA, 2018)
- [7] *El universo en tu mano*; Christophe Galfard; (Blackie Books, 2015)



Música, frases e máis

Frases célebres

Manuel Galán Rodríguez

Inicio esta sección na revista Momentum achegando todas as frases que poida entre a anterior edición da revista e a seguinte. Evidentemente, sempre se admiten colaboracións para futuras edicións. Espero que vos guste!

¿Recordáis las palabras de Fernando Simón de que como mucho iba a haber 1 ó 2 casos? Pues en esta asignatura va a ser igual: va a haber como mucho 1 ó 2 suspensos.

— Diego Martínez,
Física computacional avanzada, 2025.

Igual estáis pensando que estoy haciendo una cosa extraña. Os lo va a dejar de parecer dentro de un minuto porque la voy a complicar más.

— Néstor Armesto,
Teoría cuántica de campos, 2025.

Y a mí [me da pereza] la física. Y la vida en general.

— Víctor Pardo,
Electromagnetismo I, 2025.

El péndulo está un poco bailarín... no sabe para dónde va. Es como yo hoy, no sé para dónde voy.

— Jaime Álvarez,
Técnicas Experimentais II, 2025.

A potencia [solar] que chega aquí [polo norte] é moi pequena. Isto o saben ben os pingüinos.

— Carlos Montero,
Óptica I, 2025.

[dd/mm/aaaa]

David Tarrío Outeiriño

Unha luz branca atravesa o meu cerebro. Os ollos palpan. Unha das miñas mans golpea con forza o interruptor da parede. Un torrente de claridade inunda as miñas córneas. As sabas retórcense en posicións inesperadas. A lembranza dun soño escorrega pola cartilaxe da miña orella dereita. Levántome a pesar da insoportable sequidade matinal. A entrada en escena da miña propia consciencia sacude as miñas entrañas.

Fixo os ollos no chan. Movo o pé dereito. O meu corpo acompaña o movemento e comezo a camiñar. Unha cabicha esmagada. Choiva. Un millar de sons. Pernas loitando por dar o seguinte paso. Cabezas perdidas na cidade. Sons de armas de fogo. Un home cunha guitarra negra. Unha muller con seis dedos en cada man. Movo

o pé esquerdo. Loito por evitar caer no chan mollado. Floto sobre un manto verde. Unha pega mirándome fixamente. Algún pensamento. O paso do tempo.

Dúas portas en serie. Unha subida en espiral. Entro nunha habitación co teito en diagonal. Diferentes personaxes xesticulan nun escenario sen decorar. As miñas uñas rezuman tinta. Sintonizo sentenzas incongruentes. Escollo respirar profundamente.

Voaxa branca sobre un fondo agrisado. Voaxa agrisada sobre un fondo branco.

Transmisión en directo. Transmisión en directo.

Unha figura ó outro lado da rúa.

Unha ollada e unha afirmación xorda.



Praceres descoñecidos: $E = mc^2$ de B.A.D.

Carlos Carballeira Romero

A expresión da equivalencia entre masa e enerxía é, posiblemente, a ecuación da física máis implantada no imaxinario popular. Por iso, cando lle propuxen ao equipo directivo de *Momentum* realizar unha serie de artigos con escolmas de cancións inspiradas na física, tiven bastante claro que $E = mc^2$ ía ser o punto de partida. O título deste recuncho, *Praceres descoñecidos*, tampouco é casual... pero a súa explicación queda adiada para unha futura entrega.



Portada do single $E = mc^2$ da banda B.A.D. (*Big Audio Dynamite*) que chegou ao posto 11 da *UK singles Chart*. No centro (con gabardina) Mick Jones, membro fundador, cantante e compositor de *The Clash*.

Froito da súa popularidade, $E = mc^2$ ten sido fonte de inspiración para artistas/músicos de diferentes estilos que van dende o rap á música electrónica, pasando polo pop de radiofórmula máis comercial encarnado por Mariah Carey. Porque, por sorprendente que vos poida parecer, antes de se converter na pregoeira oficial do Nadal nos EEUU a cantante de Nova York publicou non só unha canción, senón un álbum enteiro, titulado $E = mc^2$. Iso si, Mariah deulle unha volta ás implicacións da celeberrima ecuación declarando que o seu significado é *emancipación igual a Mariah Carey multiplicado por dous*. Queda claro que, antes de recibir clases de física, a boa de Mariah ten que darlle un repaso

xeral ás matemáticas básicas.

Descartada Mariah Carey pola súa heterodoxa reinterpretación da fórmula de Einstein, había dúas serias candidaturas á primeira entrega desta sección. Unha delas era o álbum $E = mc^2$ (con canción homónima) do italiano Giorgio Moroder, todo un pioneiro da música electrónica, *techno* e do *synthpop*. Porén, todo un gañador de tres premios Óscar (un a mellor B.S.O., e dous a mellor canción) quedou finalmente descartado pola miña escolla final: o tema $E = mc^2$ que a banda B.A.D. (acrónimo de *Big Audio Dynamite*) escolleu como segundo single do seu álbum de debut. O motivo desa decisión é que B.A.D. foi o proxecto que creou Mick Jones, membro fundador, compositor e *frontman* de *The Clash*, logo de marchar (ou de que o botasen) da mítica banda de punk-rock. E se $E = mc^2$ está implantado no imaxinario popular, non o están menos os primeiros acordes de *Should I stay or should I go*, todo un himno creado por Mick Jones fai máis de corenta anos que vai saltando de xeración en xeración. Esta conexión entre un dos físicos máis influentes e unha das bandas máis influentes non se podía deixar pasar por alto.

A saída de Jones de *The Clash* veu acompañada tamén dunha muda cara a sons máis comerciais (ou emerxentes) nos anos 80. De este xeito, sen abandonar de todo o *punk*, B.A.D. experimentou co *pop*, co *dance*, co *hip hop* e co *funk* cunha acollida favorable por parte do público. Así, o single $E = mc^2$ chegou ao número 11 na lista de *singles* do Reino Unido. Iso si, se botades un ollo ao vídeo ou á letra da canción, non esperedes unha disertación sobre física: o tema está inspirado en varias das películas do cineasta británico Nick Roeg e, de feito, a maior parte da letra e do vídeo son, respectivamente, frases e secuencias extraídas das mesmas. Unha delas, titulada *Insignificance* (1985), ten como argumento o hipotético encontro de catro iconas dos anos 50 do século pasado nun hotel de Nova York: Marilyn Monroe, o seu marido e estrela do béisbol Joe DiMaggio, o senador McCarthy (impulsor da caza de bruxas anticomunista nos EEUU por aqueles anos) e Albert Einstein. Velaí por que a canción se titula $E = mc^2$ e as alusións á relatividade e ao transcorrer do tempo na letra. Alguén pensará que, entón, a relación coa física é feble. Se é o voso caso, lembade que, cando anos antes compuxo *Should I stay or should I go*, Mick Jones resumiu á perfección o dilema que afronta a diario calquera postdoc ou estudante de doutoramento.

Que é un metro?

Antón Táboas Pazo

Designadores ríxidos; relación entre linguaxe e mundo.

Pregunta inicial

Que queremos dicir cando falamos sobre que tal cousa ten un metro de longo ou un litro de volume? Seguro que esta é unha pregunta habitual entre os cativos cando aprenden as unidades de medidas na escola. Tal pregunta asemella ser inocente e doada de responder: que un metro mida «un metro» débese a que os científicos en 1799 estableceron a convención de que certa barra gardada nunhas oficinas de París medía un metro, e o termo «metro» designa esa lonxitude a partir desa barra.

Porén, esta pregunta aparentemente sinxela ten moita máis miga da cal un pode sospeitar. Outro neno podería obxectar: «Mais se a barra é de metal, pódese dilatar coa calor». E con isto xorde a seguinte dúbida: se a barra de metal que designa un metro muda de tamaño, hai algún momento no cal deixe de medir un metro?

De novo, a resposta a esta pregunta resulta sinxela: «os científicos encargados de determinar que esa barra designa “un metro” acordarán que mide “un metro” en tales e cales condicións» (definición de 1927). Malia isto, a pregunta non desaparece tan doadamente. Como pode ser que a barra que designe a unidade de «un metro» non mida un metro baixo certas condicións?

Kripke e os designadores ríxidos

Para aclarar esta cuestión, podemos acudir ás teses do filósofo Saul Kripke (1940–2022). No seu famoso artigo *Naming and necessity*² (1970) introduce o concepto de «designador ríxido»³, co cal propón unha nova maneira de entender a relación entre a linguaxe e o mundo.

Kripke introduce esta noción como unha crítica á teoría descritivista dos nomes propios, defendida por autores como Frege e Russell, segundo quen o significado dun nome vén dado por unha descrición asociada (por exemplo, «Aristóteles» significaría «o mestre de Alexan-

dre Magno»). A proposta de Kripke supón, pois, unha ruptura coa tradición analítica ao afirmar que os nomes propios non describen, senón que refiren directamente aos individuos, e ademais fano de maneira ríxida, é dicir, en todos os mundos posibles onde ese individuo exista.

Un dos obxectivos de Kripke foi clarificar os termos que a tradición filosófica adoitou mesturar: *a priori*/*posteriori* e necesario/*continxente*. Segundo Kripke, necesidade e continxencia son categorías metafísicas (teñen que ver co modo en que o mundo é), mentres que *a priori* e *a posteriori* son categorías epistemolóxicas (teñen que ver co modo en que coñecemos o mundo).

Así, un enunciado é necesario cando é verdadeiro en todo mundo posible e non podería ser doutra maneira; é continxente cando, aínda que de feito é verdadeiro, podería non selo. Un enunciado é *a priori* cando pode coñecerse independentemente da experiencia e *a posteriori* cando soamente pode coñecerse por medio da experiencia⁴. Para Kripke, ningunha destas dúas categorías (necesidade e aprioricidade) están contidas unha na outra⁵. De tal modo que non todo o que é necesario é *a priori*, nin todo o que é *a priori* é necesario⁶. Kripke entende que os enunciados analíticos son verdadeiros en virtude do seu significado e que son verdadeiros en todos os mundos posibles en virtude do seu significado.

Kripke foi quen popularizou, e formalizou, a noción de «mundos posibles» na análise filosófica. Entende estes «mundos posibles» como situacións contrafácticas⁷, é dicir, caracterizacións puramente lóxicas do tipo: «nalgún mundo posible Pedro Sánchez non é presidente do goberno no ano 2024», isto non quere dicir que exista un mundo tal⁸, simplemente é un «experimento mental» dunha situación na cal Pedro Sánchez non foi presidente do goberno no ano 2024.

Do exemplo anterior pódense sacar varias conclusións para entender a cuestión inicial deste artigo. Podémos-

²Texto onde aparece a súa conferencia do día 20 de xaneiro de 1970 onde expón o que será tratado neste artigo.

³Boa parte das teses de *Naming and Necessity* xa foran formuladas con anterioridade por Ruth Barcan Marcus (1921–2012), quen expuxo esas ideas en varias conferencias ás cales o propio Kripke asistiu. A influencia é evidente, malia que o recoñecemento explícito brilla pola súa ausencia.

⁴Os exemplos típicos de enunciados que poden coñecerse *a priori* son os das matemáticas: $2 + 1 = 3$. Non fai falta máis nada que coñecer regras e funcións para saber realizar unha suma; non fai falta ir ao mundo.

⁵Neste punto é probable (se liches o pé de páxina anterior) que os enunciados *a priori* sexan necesarios: é moi intuitivo pensar que necesariamente $2 + 1 = 3$, mais agarda un pouco para saber como desliga Kripke estas dúas categorías de verdade.

⁶A tradición (os positivistas lóxicos) consideraba que si.

⁷A caracterización lóxica é: $\neg P \Rightarrow Q$.

⁸Existen posicións filosóficas deste tipo. Por exemplo, o realismo modal de David Lewis que entende os mundos posibles como países estranxeiros.



Ile preguntar a alguén que nos defina a Pedro Sánchez, que diga que cre que é esencial a el. Unha das posibles respostas que alguén poida dar é que «ser presidente do goberno no ano 2024» é esencial a «Pedro Sánchez». No entanto, postulamos un mundo posible (w_1), onde Pedro Sánchez non é presidente do goberno no ano 2024; e aínda así recoñecemos a esa persoa como «Pedro Sánchez», aínda que non faga ningunha das actividades que consideramos esenciais no noso mundo (w_0) ou aínda que se chame «Michèle Mouton». Isto ocorre porque, segundo Kripke, os nomes son designadores ríxidos, é dicir: refiren o mesmo individuo en todos os mundos posibles onde ese individuo exista. Pedro Sánchez será Pedro Sánchez aínda que se chame «Javier Ibarra».

O argumento de Kripke

Volvamos agora ao caso inicial e poñamos como exemplo o seguinte enunciado:

- (1) «un metro é a lonxitude de B , onde B é certa barra que hai en París».

Desta oración podemos extraer dúas interpretacións:

- A barra mide exactamente un metro.
- A barra fixa a referencia dun «metro».

Se respondemos *a*, estaríamos dicindo que a barra mide necesariamente un metro de longo o que implicaría dicir que (1) é unha verdade necesaria, e por tanto, *a priori*. Malia isto, se sometemos a unha certa temperatura a barra, esta dilatarase e aumentará a súa lonxitude, o que mostra que a lonxitude é unha propiedade accidental. Antes xa dixemos que (1) é unha verdade necesaria, unha mesma proposición non pode ser necesaria e contingente ao mesmo tempo.

Se respondemos *b* estaríamos a dicir: hai unha determinada lonxitude que se desexa demarcar e se demarca mediante unha propiedade accidental; isto é: hai unha barra desa lonxitude. Se é accidental podemos dicir: «Se a barra B en t_0 someteuse a calor, a barra B en t_0 non tería un metro de lonxitude». Isto ocorre porque noutro mundo posible a barra podería ser máis ou menos longa e continuaríamos a dicir que esa barra mide un metro. O que facemos con (1) é estipular a referencia da expresión «un metro», estipulando que «un metro» ten que ser un designador ríxido da lonxitude de B en t_0 . Do que se segue que non é unha verdade necesaria que B teña un metro de longo en t_0 .

Polo tanto, o enunciado (1) non expresa unha verdade necesaria, senón unha forma de fixar a referencia. Non usamos a barra para atribuírlle a propiedade «un metro», senón que a usamos para fixar a referencia dunha unidade.

Toparse con isto último asemella curioso, porque temos que:

- Dicir que « B ten un metro de longo» é un enunciado contingente.⁹
- Ao dicir que « B ten un metro de longo» parece que se sabe *a priori* que a barra B ten un metro de longo.

Conclusiones

O caso do metro móstranos unha idea moi suxestiva: algo pode ser contingente e pode coñecerse *a priori*. É contingente porque podería empregarse outra barra ou variar as dimensións desta, para estipular que é un metro. Agora ben, é *a priori* porque unha vez estipulado, isto é, unha vez establecida a definición de que o metro padrón é un metro, fíxase a referencia dun metro. Kripke di que empregamos a barra para fixar a referencia «un metro». É dicir: no enunciado «a barra B mide un metro», a expresión «un metro» é un designador ríxido (refírese a unha certa lonxitude en todos os mundos posibles), mentres que a expresión «a barra B » non designa nada rixidamente.

Aínda que dende 1973 chamámoslle «un metro» á distancia percorrida pola luz no baleiro en $1/299\,792\,458$ partes dun segundo e non se empregue unha barra de platino para fixar a lonxitude dun metro, o termo «a distancia percorrida pola luz no baleiro en $1/299\,792\,458$ partes dun segundo» continúa a funcionar como un designador ríxido xa que segue fixando a referencia dun metro, aínda que sexa mediante un feito físico diferente. Podemos imaxinar un mundo posible onde a luz tardase máis ou menos en percorrer esa distancia, e aínda así chamariamos «un metro» a esa lonxitude.

En definitiva, o que asemellaba ser unha cuestión técnica – que é un metro? – resulta ser unha xanela á filosofía da linguaxe e á metafísica.

Referencias

- [1] *El nombrar y la necesidad*; S. Kripke; (Instituto de investigaciones filosóficas, 1985)
- [2] *The metre – History of the definition of the metre*; (Bureau International des Poids et Mesures)

⁹Enunciado que pode ser doutro modo noutro mundo posible. Sempre e cando «un metro» sexa un designador ríxido.

Somos donos das nosas decisións?

Mauro Garrido Rodríguez

Entre o determinismo clásico, a aleatoriedade cuántica e o «eu».

Que é o libre arbitrio?

Día a día experimentamos con claridade que somos donos das decisións que tomamos conscientemente: cando digo «vou dar un paseo», mentalmente fixen unha balanza de opcións e determineime por unha delas, é dicir, podo afirmar, mirando cara ao pasado, que «puiden non ter dado un paseo». Estar obrigado a dar un paseo é o oposto de ser libre. Así, dicimos: «*Son libre se, tendo feito A e non B, puidese ter actuado de xeito distinto e facer B no canto de A*». Lingüisticamente, esta é unha sentencia contrafactual (*contra os feitos*, contradicindo o que realmente ocorreu), á que, como vimos, sempre lle damos validez (é dicir, que consideramos verdadeira a posibilidade de poder contradicirlos feitos nunha realidade alternativa), polo que tamén é un **presuposto metafísico**.

A fin da liberdade: o demo de Laplace

Pero, que di a física a respecto da validez deste suposto? O certo é que, se consideramo-lo Universo a grande escala, e inclusive nas nosas vidas cotiás, a mecánica clásica está no seu intervalo de validez. Que nos pode dicir sobre o libre arbitrio? Collamo-las Leis de Newton. O que nos permiten é, coñecendo o estado inicial dun sistema (é dicir, a posición e velocidade das partículas involucradas), determina-lo seu estado futuro, de xeito que

$$\begin{aligned} &\{\vec{r}_1(0), \vec{v}_1(0)\}, \{\vec{r}_2(0), \vec{v}_2(0)\}, \dots, \{\vec{r}_N(0), \vec{v}_N(0)\} \\ &\quad \downarrow \sum_{i=1}^N F_{ij} = m_j \frac{d^2}{dt^2} \vec{r}_j \\ &\{\vec{r}_1(t), \vec{v}_1(t)\}, \{\vec{r}_2(t), \vec{v}_2(t)\}, \dots, \{\vec{r}_N(t), \vec{v}_N(t)\}. \end{aligned} \quad (1)$$

Isto é, se coñecemos-lo estado inicial con total precisión, tamén coñeceremos con total exactitude o estado final, así como toda a dinámica en cada momento: o futuro está contido no pasado. As leis de Newton son, polo tanto, **deterministas causais**: cada causa leva univocamente a un efecto. E se todo está composto de átomos, incluídos nós mesmos... Non aplicará isto tamén ao ser humano? Isto é precisamente o que se preguntou Pierre-Simon Laplace en 1814, co seu famoso experimen-

to mental do «demo de Laplace» (pese a que este nunca o chamou «demo»), onde expoñía o seguinte [1]:

«*Un intelecto que nun momento determinado coñecese tódalas forzas que moven a natureza e tódalas posicións de tódolos elementos que a compoñen, se este intelecto fose o suficientemente vasto como para someter estes datos a análise, abarcaría nunha soa fórmula os movementos dos corpos máis grandes do Universo e os do átomo máis diminuto; para tal intelecto nada sería incerto, e o futuro, ao igual que o pasado, podería estar presente ante os seus ollos.*»

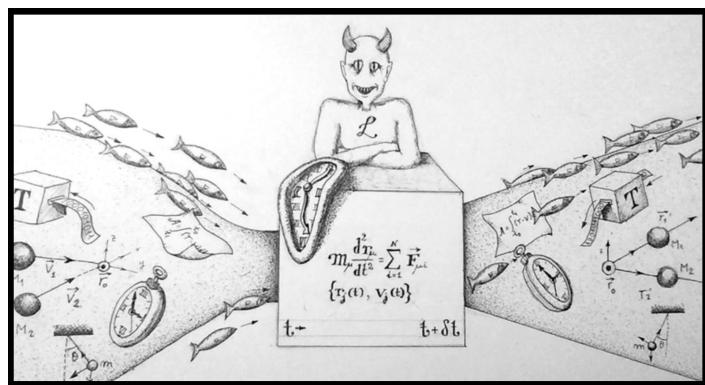


Figura 1: Ilustración do Demo de Laplace [2].

Segundo este experimento mental, cada acto, cada movemento, cada pensamento e cada decisión transcendental que puidésemos facer, sería coñecido polo demo: en esencia non habería diferenza entre as nosas vidas e as bólas nunha partida de billar, todo estaría predeterminado dende o inicio.

A contradición coa nosa experiencia inmediata

Por suposto, non vivimos coma se o demo de Laplace existise. Día a día experimentamos coa máxima claridade posible que somos libres e que somos donos das nosas decisións, polo que algo nos escapa. Un xeito de entender isto é que quizais poidamos seguir dicindo que somos libres nun universo determinista se nos contentamos cunha liberdade menos metafísica e fundamental, dicindo: «*Son libre (ou teño libre arbitrio) se podo actuar baixo os meus propios desexos e razóns, sen estar sometido á coacción externa*». É certo que, visto dende o punto de vista metafísico, esta liberdade sabe a pouco: que esteamos coaccionados ou non, incluso os nosos



proprios desexos, xa sería algo predeterminado e, polo tanto, algo que non podemos cambiar (se o Universo funciona de xeito determinista). Pero, se descoñecemos esta información, se non falamos co demo, acaso non podemos dicir que somos libres en certo senso?

Nas nosas sociedades humanas o concepto de libre arbitrio é totalmente fundamental. Existe a responsabilidade se todo está determinado dende o principio? Como se pode condenar alguén por un delito cando xa estaba escrito que cometería ese delito? Por suposto, o determinismo absoluto fai da responsabilidade un absurdo: incluso a decisión sobre que sistema xudicial usar e se basealo ou non no concepto de liberdade estaría tamén determinada. Este artigo especulando acerca da imposibilidade do libre arbitrio tamén o estaría.

O indeterminismo esencial: é a Mecánica Cuántica a solución?

Imos continuar a falar deste concepto de libre arbitrio máis metafísico, pese a que tamén hai moito máis que dicir da posibilidade de liberdade nun mundo estritamente determinista: o exposto brevemente aquí non é a última palabra, por suposto.

O certo é que o determinismo (ou o *universo mecánico*), como paradigma científico, acumulaba éxito tras éxito en tódalas ciencias: a natureza comportábase como un inmenso reloxo, onde era só a nosa ignorancia o que nos impedía ve-lo movemento de tódalas pezas do mecanismo.

Pero claro está, chegou o século XX e con el, a Mecánica Cuántica: o mundo non sería nunca máis o mesmo, e a nosa concepción del, tampouco. A Cuántica demostráanos que existe unha indeterminación, unha aleatoriedade a nivel fundamental na natureza: non pola nosa ignorancia, senón debido a como é. O único determinismo que a Cuántica nos concede é un de probabilidades, un que non é causal: unha mesma causa pode producir diferentes efectos, aínda que podemos saber exactamente como as probabilidades de cada efecto evolucionan co tempo a través da ecuación de Schrödinger

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \hat{H} \Psi$$

$$\Psi(0) \longrightarrow \Psi(t). \quad (2)$$

Pero o que nos di é que, en esencia, a natureza é aleatoria. Entón, realmente a cuántica danos liberdade co seu carácter aleatorio, asumindo que xoga algún rol, por pequeno que sexa, no noso cerebro (nun sistema tan grande e quente non agardariamos fenómenos cuánticos en principio)? Xa o estamos dicindo: é algo aleatorio. É

como dicir que, ante a decisión de mover ou non o brazo para coller un vaso, esta fose totalmente determinada polo resultado de cara ou cruz dun lanzamento de moeda (considerando o lanzamento como un proceso totalmente aleatorio). Non sabemos que resultado sairá nin é algo que estea determinado, mais, é isto o que chamamos decidir por nós mesmos? Polo tanto, a Cuántica tampouco nos dá ese libre arbitrio metafísico que andamos buscando.



Figura 2: Schrödinger en Santiago de Compostela, 1934 (Fotografía do arquivo do IGFAE).

O «eu» que escapa ao Universo

Se nos detemos un momento, parécese intuír algo: todo o que somos son causas externas. A que nos referimos cando queremos afirmar «*eu son libre*»? Que queda do «*eu*» se subtraemos de nós a xenética, as condicións sociais, o noso pasado... Parecese que, para sermos libres, precisásemos ser alleos ao Universo, escapar incluso da limitación que nos impón segui-las súas leis; como ben diría Schrödinger: [3]

«*Eu*» — *son a persoa, se é que existe algunha, que controla o «movemento dos átomos», de acordo coas leis da Natureza.*

Así, se quixésemos afirmar que o ser humano é metafisicamente libre, teríamos que chegar ao extremo de dicir que ten algo que o fai esencialmente diferente ao resto de corpos no Universo, que ten que sobreporse incluso ás leis que o rexen e dirixir segundo as leis naturais os mesmos átomos que o compoñen, afirmar, en definitiva, «*Polo tanto, eu son Deus Todopoderoso*». [3]

Referencias

- [1] *Demo de laplace*; Wikipedia
- [2] Richard Solé
- [3] *¿Qué es la vida?*; Erwin Schrödinger

Relatos dunha vida extraordinaria

Celia Álvarez Álvarez

Memorias e leccións da vida de Jane Goodall.

Introdución

O pasado 1 de outubro faleceu a prestixiosa primatóloga e antropóloga Jane Goodall, maiormente coñecida polo seu traballo de investigación sobre a vida social dos chimpancés salvaxes do Parque Nacional Gombe Stream, en Tanzania. En paralelo á investigación, tamén levou a cabo un labor de activismo en materia de benestar animal e conservación.

Unha pequena científica

Non é iso o que constitúe un pequeno científico? Curiosidade, facer preguntas, non obter a resposta correcta, facer o intento de descubrir pola conta dun, cometer un erro, non se render e aprender a ser paciente...

— Jane Goodall

A historia de como Jane Goodall se converteu nunha científica comeza na súa infancia. A pequena Jane adoraba pasar tempo fóra, xogando e descubrindo a natureza. Jane vivía en Londres coa súa nai, pero adoraba os animais e o campo.

Cando Jane tiña catro anos, pasou un tempo nunha granxa do campo inglés. A pequena nena integrouse nos labores do lugar recollendo os ovos que poñían as galiñas e preguntando insistentemente “de onde sae o ovo?”, “se aquí está o ovo, onde está o oco na galiña?”. Ninguén parecía interesado en explicarlle á curiosa rapaza de onde viñan eses ovos, polo que un día foi ela mesma a que se dispuxo a pescudalo. Jane pasou catro horas dentro do galiñeiro e saíu correndo cun brillo nos ollos para contarlle á súa nai a marabillosa historia de como unha galiña pon un ovo. Durante ese tempo ninguén sabía onde a nena se atopaba e a preocupación foi tal que incluso chamaron á policía. Non obstante, a nai de Jane non se enfadou con ela, nin a reprende por estar desaparecida durante esas catro horas, senón que sentou a escoitar a historia que a súa filla estaba tan emocionada por contarlle.

Quizais, se nese intre esa nai tivese pisado a curiosidade científica desa nena, agora non estaríamos falando de Jane Goodall.

Os comezos en Gombe

Viaxar a África e vivir con animais era todo o que a moza Jane soñaba con facer. Cando o tempo chegou, ir á universidade non era unha opción economicamente asumíbel para a familia de Jane, polo que a rapaza conseguiu un traballo de camareira. Gardaba cada propina para poder, algún día, ir a África.

En 1957, durante a súa estancia na colonia e protectorado de Kenya traballando como secretaria, Jane púxose en contacto co paleontólogo keniano-británico Louis Leakey, co único desexo de poder conversar acerca dos animais. Louis Leakey estaba convencido de que o estudo dos grandes simios podería proporcionar indicios sobre o comportamento dos primeiros homínidos e buscaba un investigador de chimpancés. Jane Goodall non tiña nin título nin experiencia, pero a Louis Leakey non pareceu importarlle. Todo o que estaba a buscar era alguén de mente aberta, apaixonado polo coñecemento, namorado dos animais e cunha paciencia monumental. Tras a recadación de fondos e unha formación básica previa, Goodall foi enviada en 1960 ao Parque Nacional de Gombe Stream.

Que unha moza solteira se instalase na África salvaxe non era considerado seguro naqueles tempos, polo que Jane tivo que escoller un acompañante. Foi a súa nai a que se presentou voluntaria, que aproveitou para montar unha clínica e proporcionar medicinas aos pacientes locais. Jane sempre contou co apoio incondicional da súa figura materna: nunca se opuxo ás súas aspiracións. «*Soamente es unha nena, non podes facer iso. Por que non soñas con algo que poidas lograr?*» Son palabras que Jane Goodall escoitou durante a súa vida, pero nunca ditas pola súa nai. Durante os inicios do seu labor investigador, os chimpancés escapaban de Jane, estaban horrorizados. Nunca antes viran un simio branco. Sentada, Jane observou por semanas e semanas aqueles animais a través dos seus binoculares, agardando que dalgún xeito a comezasen a aceptar.

O Home, fabricante de ferramentas

Tras un tempo, Jane comezou a recibir visitas dun dos chimpancés, que atopara plátanos polos que retornaba con frecuencia. O pelo branco no seu queixo foi un trazo distintivo que permitía a Jane identificalo e a razón do seu alcume, *David Greybeard*. Cando Jane



avistaba un grupo de chimpancés no bosque, recoñecía de inmediato a presenza de David, quen non fuxía e, en cambio, sentaba tranquilamente. O resto de chimpancés, preparados para correr, miraban cara a David e debían pensar algo como “ela non debe ser tan perigosa despois de todo”.

A medida que ía coñecendo os membros do grupo, Jane púxolles nomes: *David Greybeard*, coa súa personalidade tranquila, adoitaba estar acompañado por *Goliath*, o macho de maior rango naquel momento; *Mr. McGregor*, un macho de avanzada idade cun carácter belixerante; e despois estaba *Flo*, de nariz bulboso e orellas esfañadas, xunto coa súa filla pequena *Fifi*. Cando Jane ollaba na mirada dun chimpancé vía unha personalidade pensante e razoadora ollando de volta. Canto máis aprendía sobre eles, máis se decataba do semellantes que eran aos humanos en moitos aspectos.

Ao comezo da década dos anos sesenta, era crido por moitos científicos que soamente os humanos tiñan mentes. Só os humanos eran capaces do pensamento racional. Afortunadamente, Jane Goodall non fora á universidade e non sabía esas cousas. Sentía como se estivese aprendendo acerca doutros seres capaces de sentir alegría, pena, medo e celos. Do mesmo xeito, durante moito tempo tívose a crenza de que eramos as únicas criaturas na Terra que usaban e creaban ferramentas.

Jane camiñaba pola longa e enmarañada vexetación do bosque cando, de súpeto, viu unha forma escura encurvada sobre un montículo de cor dourada no que habitaba unha termiteira. Apurando para coller os seus binoculares, Jane divisou as costas dun chimpancé macho que non logrou identificar. O que puido ver, en cambio, foi como este apañaba follas de herba e as introducía polo buraco da termiteira. Cando o animal se retirou, Jane puido ver que se trataba de David Greybeard; pero non foi ata que ela mesma colleu unha folla de herba e a introduciu polo buraco, que comprendeu o que David estaba a facer. Ao retirar a folla, decatouse de como os térmites se aferraban a ela. *O Home, fabricante de ferramentas* era como se distinguía os humanos doutros seres. E alí estaba David Greybeard, usando unha ferramenta. Uns días despois, Jane seguiu observando os chimpancés. Pescaban formigas, usaban follas como esponxas para absorber auga, abrían nocos cun martelo de madeira... o rudimentario comezo da fabricación de ferramentas. Parecía que os humanos tiñan que ser redefinidos.

A idea de que un animal puidese usar e crear unha ferramenta foi tan impactante que a comunidade científica non deu crédito aos testemuños de Jane Goodall. Algúns tentaron desacreditar as observacións porque Jane era unha muller moza e sen formación. No entanto, o resultado foi a obtención dunha bolsa da *National Geo-*

graphic Society, coa que Jane puido continuar os seus estudos e coa que, a maiores, mandarían un fotógrafo para documentar o proceso.

O amor dunha nai

Hugo fumaba. Sempre había cabichas no chan e a Jane non lle agradaba. El era un perfeccionista e iso facía a Jane tolear. Pola contra, era un home aposto e a súa voz era calma.

A primeira noite que Hugo van Lawick pasou no campamento, Jane escoitou as historias acerca dos filmes que creara na súa infancia e de como sempre quixo fotografar animais. Así que tiñan algo en común. Os dous amaban pasar tempo ao aire libre, en contacto coa natureza, e os dous amaban o traballo que estaban desempeñando, co que acabaron levándose moi ben.

Para cando o tempo de Hugo en Gombe estaba chegando ao seu fin, este se converteu en alguén moi importante para Jane. Ela sabía que o ía botar en falta. Tras a partida, Jane e Hugo intercambiaron varios telegramas.

WILL YOU MARRY ME STOP

LOVE STOP HUGO

YES STOP LOVE
JANE

=DO YOU LIKE EMERALDS STOP

WHAT SIZE IS YOUR FINGER=

LOVE HUGO

LOVE EMERALDS STOP
LOVE YOU STOP
JANE

Hugo e Jane casaron, sen facer plans a futuro. Querían volver a Gombe e facer filmes. Cando retornaron, foron recibidos cunha marabillosa sorpresa: Flo dera a luz ao seu infante, Flint. E con Flint chegou a oportunidade de iniciar un estudo que podería durar ata cincuenta anos. Era a primeira vez que se observaría unha relación dunha nai chimpancé co seu infante de cerca, e na natureza.

Flo era todas as cousas que unha nai chimpancé debía ser: protectora pero non sobreprotectora, agarimosa, lúdica, tolerante e usaba a distracción en vez do castigo para ensinar ao seu infante. Fifi amosaba preocupación polo seu pequeno irmán e Flo impedía delicadamente que se achegase a el. Isto non durou moito pois, pronto, Flo permitiu a Fifi xogar con Flint e coidalo, esta converteuse nunha grande axuda para a súa nai.

O contacto próximo con Flo e a súa familia deixou unha fonda pegada no espírito de Jane.

E Grub chegou. Jane e Hugo tiveron un fillo. Non se sentaran a falalo, simplemente sucedeu naturalmente. Despois de que Flo dera a luz, Jane pensou que podería observar ao seu fillo. Jane planeaba levar a cabo

un estudo do desenvolvemento do seu cativo, tomando notas e capturando vídeos, como fixera cos chimpancés. Pero non funcionou. Jane quería estar presente en todo momento. E como todas as nais, Jane quería darlle a Grub o mellor inicio posíbel na vida. Como fonte de consello, dispoñía da súa nai, pero tamén dispoñía de Flo. Non cabía dúbida para Jane en canto ao moito que as súas observacións dos chimpancés a axudaron a ser unha mellor nai; e en canto a súa experiencia de converterse nunha nai, axudouna a comprender mellor o comportamento maternal nos chimpancés.

Tempos escuros

Hugo fora destinado ao Serengeti e Jane quedara en Gombe para continuar co seu estudo. Novos e xoves investigadores foron destinados para acompañar a Jane. Grub quedou en Gombe, coa súa nai. Pero tempos escuros chegaron. Unha epidemia de polio estendeuse entre os chimpancés. Era horribel, un tras outro os membros do grupo comezaban a mostrarse arrastrando as súas extremidades. McGreggor non podía usar ambas as pernas e máis un brazo. Podería levarse a cabo a vacinación dos chimpancés, aínda que xa houbese algúns afectados. Non obstante, para McGreggor xa era demasiado tarde. Esperar a que a natureza seguise o seu curso só prolongaría o seu sufrimento, tiña que ser executado. Jane non podía ver un animal sufrir así. Despois do incidente, prohibiuse o contacto directo cos chimpancés e Gombe xa nunca foi o mesmo.

Jane trataba de educar o seu fillo e sentíase illada, botaba en falta a compañía de Hugo. A vella Flo convertérase en avoa, pois, agora, Fifi tiña un infante do que coidar, dando paso a unha nova xeración na familia. Flint era xa un adolescente, e tiña unha idade na cal a maioría de machos xa pasaban tempo lonxe da súa nai. Pero Flint seguía dependendo por completo de Flo, e cada vez que non obtiña a atención da anciá nai, comezaba unha intensa rabecha.

Grub xa tiña idade para ir á escola, polo que Jane tomou a decisión de que comezaría o colexio en Inglaterra e viviría coa súa avoa. Jane sentiu unha gran pena cando se despediu de Grub e volveu para Gombe. No Nadal e en primavera, Jane volvería ao Reino Unido e, nos veráns, el a visitaría en Tanzania.

E Flo faleceu. Cruzaba un regato de gran corrente de auga. A escena resultaba pacífica, coma se o seu corazón parase de palpar de súpeto. Flint sentaba na beira do regato preto do corpo de Flo, e achegábase pedindo que o reconfortase como sempre fixo durante a súa vida. A depresión de Flint empeoraba, deixou de comer, e adoitaba estar illado. Finalmente enfermou, parecía que sen a súa nai xa non tivese ánimos para vivir. Cerca

de tres semanas despois da morte de Flo, Flint faleceu tamén.

Tras a morte de Flo, a comunidade de chimpancés que tan ben coñecía Jane comezou a dividirse. Un grupo de chimpancés desprazouse cara ao sur do territorio, separándose e perdendo o seu dereito de ser tratados como membros da comunidade. A calma dese mundo idílico foi perturbada e comezou unha guerra. O grupo que se movera cara ao sur, quedou completamente aniquilado.

Jane non imaxinaba que os chimpancés fosen capaces de semellante brutalidade, pois sempre pensara que a guerra era un comportamento puramente humano. Cusoulle asimilar que o lado escuro e malvado da natureza humana estaba profundamente arraigado nos xenes herdados dos nosos antepasados.

O matrimonio de Jane e Hugo viuse afectado pola distancia. O traballo de Hugo agora estaba no Serengeti e quedar en Gombe afastaríao dos seus obxectivos. Era dificultoso continuar o matrimonio soamente por Grub, e as discusións entrambos tornáronse frecuentes. Hugo desexaba que Jane o acompañase no Serengeti, pero o estudo en Gombe significaba moito para ela.

A separación resultou moi triste para todos, especialmente para Grub. Pero a experiencia de Jane no bosque outorgáralle perspectiva. No bosque, a morte non está escondida e rodea a un en todo momento. O ciclo permanente da vida: os chimpancés nacen, fanse maiores, enferman e logo morren; e sempre están os membros mozos para perpetuar a vida da especie.

Cada un de nós

O noso intelecto creceu enormemente en complexidade dende as nosas orixes hai dous millóns de anos e soamente os humanos fomos capaces de desenvolver unha linguaxe oral sofisticada. Por primeira vez na evolución, unha especie é capaz de ensinar aos seus membros máis mozos acerca de obxectos e sucesos non presentes, de pasar a sabedoría adquirida a través de éxitos e erros do pasado. Coa linguaxe podemos preguntar como ningún outro ser vivo pode facer, esas preguntas acerca de quen somos e por que estamos aquí. E este intelecto altamente desenvolto significa que temos unha responsabilidade cara ás outras formas de vida do noso planeta, cuxa existencia se ve ameazada polo comportamento irreflexivo da nosa especie.

A vida de Jane Goodall nesa época era mellor que calquera cousa que ela nunca tivera imaxinado; a pesar de todo, seguía pasando o seu tempo no campo, estaba escribindo un libro e, á investigación en Gombe, chegaban novos estudantes. Pero sabía que os chimpancés en África estaban desaparecendo e deuse conta de que debía aumentar a concienciación ao respecto.



Os humanos non estamos exentos da extinción e debemos tomar conciencia do importante que é preservar o medio ambiente e o resto de especies que o habitan. O que cada un de nós fai ten un impacto. Cada día que vivimos temos un impacto no planeta e podemos escoller que clase de impacto queremos ter. Cada un de nós é unha única persoa e os problemas globais pódennos provocar desesperación. Pero podemos comezar pensando na nosa comunidade, que podes facer na túa comunidade? Podes comezar facendo algo que a mellore, animar a outros a que che axuden. Verás que podes facer unha diferenza. E iso séntese ben. Quererás facer máis e inspirarás a máis persoas. E quizais te atrevas a pensar globalmente.

Estas son algunhas das ideas tras o activismo de Jane Goodall, ao cal se adicou dende entón e ata o seu último día.

Cando boto a vista atrás á miña vida, parece que tiven unha sorte extraordinaria, aínda que, como sempre di a miña nai, Vanne, a sorte foi só unha parte da historia, ela sempre creu que o éxito vén a través da determinación e o traballo duro e que a culpa non está nas nosas estrelas, senón en nós mesmos, que somos subordinados. Certamente creo que iso é certo, pero aínda que traballei duro toda a miña vida, debo admitir que as estrelas tamén parecen ter xogado o seu papel.

— J.G.

Nota da autora

Se o lector chegou ao final deste artigo, quizais se pregunte cal é o sentido que ten incluílo nunha revista

universitaria de física. Con esta pequena nota pretendo transmitir a miña humilde crenza de que a Física non está illada doutras disciplinas e de que como aspirantes a, ou xa, físicos, científicos e por riba de todo, humanos (pois tamén contemplo o caso de que o lector sexa alleo á ciencia e de que se atope lendo esta revista por interese ou casualidade); non debemos descoidar a nosa humanidade. Os valores e as motivacións que Jane Goodall expresou durante a súa vida e que deixou co seu legado, lograron espertar o meu recordo pola miña humanidade, que ás veces se perde entre o barullo do diario.

Segundo a RAG, a definición de *humanidade* é a seguinte: “*comprensión, compaixón e benevolencia cara aos demais*”. Considero a historia de Jane Goodall como un exemplo de amor cara aos animais, cara á natureza e cara á vida. O interese de coñecer e descubrir as verdades da natureza é innato aos seres humanos, polo que penso que, de certo modo, esta curiosidade tamén é capaz de espertar amor en nós por todo aquilo que nos rodea como elementos dun conxunto ou dun *todo*. Ás veces, resúltame bo lembrar o motivo polo que estou estudando física e polo cal sempre debo tentar respectar todos os elementos do Universo, do cal eu tamén formo parte.

Referencias

- [1] *Jane goodall's last interview*; Jane Goodall; (2025)
- [2] *Jane goodall: An inside look (full episode)*; National Geographic
- [3] *Jane goodall: Discussing chimpanzee behavior (full episode)*; Neil deGrasse Tyson / National Geographic
- [4] *Jane goodall* – wikipedia
- [5] *Demonic ape – horizon*; BBC; (2004)

Buracos negros antes de Einstein?

Manuel Vázquez Carreira

Como Michell e Laplace teorizaron por primeira vez os buracos negros.

Introdución

Os buracos negros son, sen ningunha dúbida, das cousas máis sorprendentes que se descubriron en física o século pasado. A día de hoxe seguen sendo un enigma e unha enorme fronte aberta en investigación. Teorizar con precisión os buracos negros non tería sido posible sen a teoría da Relatividade Xeral de Einstein nin as investigacións de Thorne, Wheeler e Hawking, entre moitos outros. Con todo, como veremos a continuación, a historia sorpréndenos cun caso no que a curiosidade humana permite idear conceptos tan adiantados ao seu tempo, que requiriron dunha matemática tan avanzada para a súa resolución, coa que incluso os propios matemáticos crían que se terían librado de nós, os físicos.

Esta é a historia de como John Michell e Pierre Simon Laplace formularon os primeiros conceptos sobre buracos negros de maneira independente, máis dun século antes da Relatividade Xeral.

Contexto histórico

Ambas as formulacións teñen lugar nas décadas dos 80 e 90 do século XVIII. A esas alturas da historia, Europa sufría os radicais cambios causados pola Revolución Francesa e a caída dos reinos absolutistas. A Ilustración amosou os seus froitos co triunfo do pensamento liberal. A física daquela época vivía unha especie de período de transición entre dúas grandes revolucións científicas: a revolución newtoniana do século XVII que preparou o terreo para as posteriores revolucións da electrodinámica e da estrutura da materia no século XIX.

Só 100 anos antes do inicio da nosa historia, Sir Isaac Newton publicaba en 1687 *Philosophæ Naturalis Principia Mathematica*, asentando as bases da física moderna coas súas leis do movemento e da gravitación universal.

Dúas consecuencias deste desenvolvemento foron os protagonistas da nosa historia: Michell e Laplace. Ambos chegaron a unha conclusión común: *existen estrelas tan masivas que fan curvar tanto a luz, que nin sequera esta pode escapar da atracción gravitacional*¹⁰ A continuación estudaremos como chegou cada un a esta conclusión.

Hipótese de Michell

John Michell (Eakring Nottinghamshire, 1724) foi un matemático e reverendo inglés. Destacou principalmente nos campos da xeoloxía e da astronomía. É coñecido, ademais, como o pai da sismoloxía moderna, xa que foi o primeiro en rexistrar os terremotos para a súa análise, ademais de inferir que se poderían propagar por ondas sísmicas. Na astronomía, John Michell realizou un importante traballo sobre estrelas binarias. Aplicando teoría da probabilidade a distribucións estelares (sendo así o primeiro astrónomo estatístico), demostrou que a maioría dos sistemas binarios que se ven no espazo son como o sistema *Tatooine* de *Star Wars* (estrelas que orbitan arredor de outras) e non unha casualidade de perspectiva. Outra grande achega foi a exitosa predición dos buracos negros, que é o obxecto deste artigo. Esta obra publícase en 1784, baixo o nome «*excesivamente longo e laborioso*».[1]

On the Means of Discovering the Distance, Magnitude &c. of the Fixed Stars, in Consequence of the Diminution of the Velocity of Their Light, in Case Such a Diminution Should be Found to Take Place in any of Them, and Such Other Data Should be Procured from Observations, as Would be Further Necessary for That Purpose.

— Colin Montgomery

senón que ademais deu a ferramenta para detectalos. Ferramenta coa que se detectou Cygnus X-1, o primeiro buraco negro descuberto e un temazo da banda Rush.

...since their light could not arrive at us; [...], we could have no information from light; yet, if any other luminous bodies should happen to revolve about them we might still perhaps from the motions of these revolving bodies infer the existence of the central ones with some degree of probability...

— John Michell

¹⁰Algo curioso desta historia é que non hai un único descubridor deste fenómeno, xa que, ao existir conflito entre Inglaterra e Francia, Laplace non soubo do artigo de Michell cando saíu.



Agora ben, Michell non só elucubra que poderían existir buracos negros e como detectalos. Senón que, empregando o valor estimado da velocidade da luz que se coñecía entón, realiza unha análise das dimensións que debería ter unha estrela para que se dean as condicións de *estrela escura*. Michell empregou un método xeométrico para realizar o estudo. Como se me fai incomprendible este método, xa que dista radicalmente de calquera metodoloxía estudada en calquera curso de física, vou explicar o procedemento en termos actuais que se nomea en [1]¹¹.

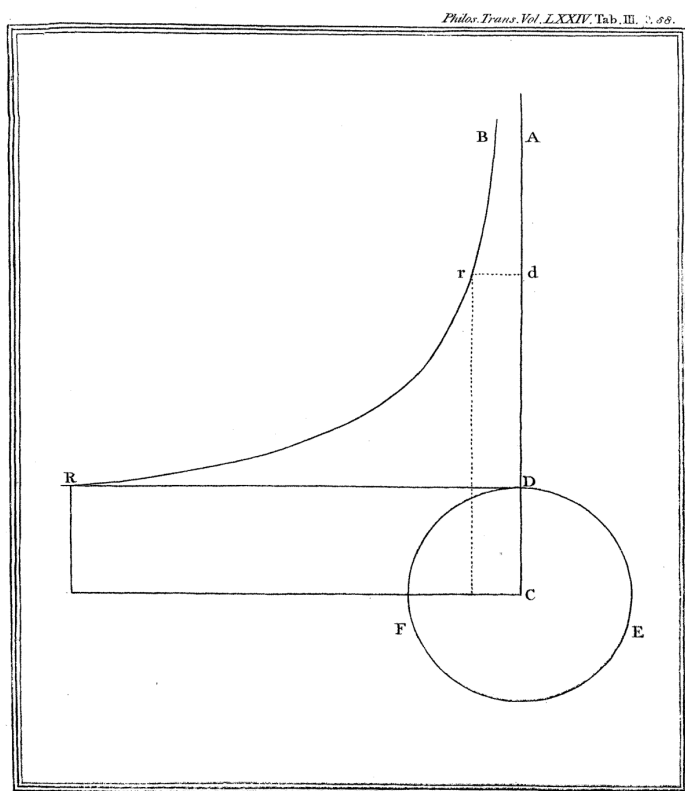


Figura 1: Diagrama orixinal empregado en [2] para a análise xeométrica. A figura *per se* non se atopa no artigo arquivado pola Royal Society, pero atópase en [1].

A análise xeométrica de Michell (en termos modernos)

Supoñamos dous corpos: un grande atractor de masa M e raio R , e unha partícula de masa m . O grande atractor (ou corpo central) e a partícula atraíense mutuamente mediante unha forza $F = G \frac{Mm}{r^2}$, onde podemos substituír a densidade do corpo central, ρ , e $K = 4\pi/3$ tal que

$$F = K \frac{\rho m}{r^2} R^3. \quad (1)$$

Podemos deducir a velocidade da masa m , que co-

responderá con

$$v^2 = \frac{2K\rho R^3}{r} \Rightarrow v^2 \propto \rho|_{r=\text{cte}} \quad (2)$$

Por tanto, imos fixar r na superficie do corpo central, $r = R$,

$$v^2(r = R) = 2K\rho R^2, \quad (3)$$

de onde deducimos unha curiosa propiedade: ao ser $2K$ unha constante, a velocidade ao cadrado da partícula conservarase mentres non varíe o produto ρR^2 . En termos matemáticos...

$$\frac{v^2}{\rho R^2} = 2K = \text{const.} \quad (4)$$

Esta v será a velocidade orbital da partícula na superficie do corpo central. Agora metámonos coa velocidade de escape, definida por Michell como *“the same velocity a body would have if it fell from infinity to the surface”*. Imos calculala mediante xogadas arcaicas que tivo que empregar Michell na súa época. Para iso, imos meternos no sistema Terra-Sol.

A velocidade orbital da partícula na superficie do Sol será 14,65 veces a velocidade orbital da Terra arredor do Sol

$$v_{\text{orbit}}(r = R_S) = 14,65 v_{\text{orbit}}(r = r_{\text{Terra}} = 1 \text{ UA}). \quad (5)$$

Agora, a traxectoria dunha partícula que cae desde o infinito (i.e., enerxía nula) será parabólica. Por tanto, a velocidade de escape na superficie do Sol será

$$\begin{aligned} v_{\text{parabol}}(r = R_S) &= \sqrt{2} v_{\text{orbit}}(r = R_S) = \\ &= 20,72 v_{\text{orbit}}(r = r_{\text{Terra}}) \end{aligned} \quad (6)$$

e, por tanto, $v_{\text{parabol}}(r = R_S) = v_{\text{escape}}(\text{Sol})$. Por que Michell relaciona a velocidade de escape na superficie do Sol? Moi sinxelo, porque na época a velocidade da luz coñecía-se como 10310 veces a velocidade orbital da Terra ao redor do Sol [3] (Oh, sorpresa, a partícula de masa m será un fotón OMG!). Deste xeito, podemos realizar unha comparación directa entre a velocidade de escape e a velocidade da luz.

$$\frac{c}{v_{\text{escape}}(\text{Sol})} = \frac{10310 v_{\text{orbit}}(r = r_{\text{Terra}})}{20,72 v_{\text{orbit}}(r = r_{\text{Terra}})} = 497. \quad (7)$$

Por tanto, unha estrela será escura se a súa velocidade de escape é, cando menos, 497 veces a velocidade de escape do Sol. Poderíamos dicir entón: *Se existise unha estrela coa mesma densidade que o Sol, pero cuxo raio fose aproximadamente 500 veces maior, a luz non podería escapar dela e sería invisible para nós.*

¹¹Igualmente animo ó lector a botarlle un ollo ao artigo orixinal [2], xa que ten certo interese histórico ver como se realizaba a física antigamente. Tamén vén explicado en [1].

...if the semi-diameter of a sphere of the same density with the sun were to exceed that of the sun in the proportion of 500 to 1, a body falling from an infinite height towards it, would have acquired at its surface a greater velocity than that of light, and consequently, supposing light to be attracted by the same force in proportion to its vis inertiae, with other bodies, all light emitted from such a body would be made to return towards it, by its own proper gravity

— Michell [2]

Idea de Laplace

Pasamos agora a Laplace. Pierre Simon Laplace (Beaumont-en-Auge, 1749) foi un matemático, astrónomo e físico francés. Foi un dos científicos máis influentes da súa época, chegando a ser coñecido como o *Newton francés*. A súa obra máis coñecida é *Mécanique Céleste* (1799–1825), na que reformula a mecánica newtoniana para aplicala a sistemas astronómicos complexos. Nesta obra, Laplace desenvolve a teoría nebular do sistema solar, que postula que o sistema solar se formou a partir dunha nube de gas e po en rotación. Esta teoría foi un precursor importante das teorías modernas sobre a formación de sistemas planetarios. Laplace fixo todo iso e máis cousas que se ven na carreira, polo que non as comentarei. Centrarémonos agora na súa predición dos buracos negros.

Ao contrario de Michell, Laplace non expón todo nun só artigo, senón que, nun primeiro momento, presenta a suposición de que poden existir este tipo de corpos celestes e, anos máis tarde, divulga unha “proba matemática”. O contexto no que publica isto é, nada máis nin nada menos, o da Revolución Francesa. Desde 1773, Laplace atopábase na Academia francesa, onde anos antes aprendera física e matemáticas da man de D’Alembert.

En 1794 cae Robespierre e, con el, a súa etapa do Terror. É entón cando o sistema educativo francés experimenta un enorme cambio que conduce á institucionalización da sociedade francesa moderna. Neste contexto fúndanse diversas institucións científicas, incluíndo o *Institut de France*, onde un ano despois Laplace sería elixido presidente. É por iso que cesa as súas actividades como profesor na Academia e dedícase á redacción da súa obra *Exposition du Système du Monde*, publicada en dous volumes en 1796.

No sexto capítulo do quinto libro desta obra [4] La-

place arrisca a enunciar cualitativamente a existencia de estrelas tan masivas que nin sequera a luz podería escapar delas.

Unha estrela luminosa da mesma densidade que a Terra, e cuxo diámetro fose duascenas cincuenta veces maior que o do Sol, non deixaría que ningún dos seus raios nos alcanzase en virtude da súa atracción; é, pois, posible que os maiores corpos luminosos do Universo sexan, por ese mesmo feito, invisibles.

— Laplace

Ante a potente declaración de Laplace, un lector esceptico preguntouse: Como é iso posible? Así, Franz Xaver von Zach escribiulle a Laplace unha carta na que lle esixía unha demostración matemática da súa afirmación. Laplace responde e en 1799 publícaa na revista alemá *Allgemeine Geographische Ephemeriden*, editada polo mesmo von Zach [5]. Tamén existe unha tradución ao inglés desta demostración en [6].

A “proba matemática” de Laplace

Supoñamos unha estrela de masa M e raio R , e un fotón de masa¹² m , a unha distancia r do centro da estrela.

Agora empregamos a conservación da enerxía en $r = R$ e nun r arbitrario, tendo en conta que a velocidade en R sexa c , a velocidade da luz no baleiro. Por tanto,

$$\frac{mc^2}{2} - G\frac{Mm}{R} = \frac{mv^2}{2} - G\frac{Mm}{r}. \quad (8)$$

Obviamente elimínanse as masas m . Agora particularizamos o cálculo no límite $r \rightarrow \infty$, onde a velocidade do fotón é nula. É dicir, queremos que o noso fotón chegue ao infinito e alí quede quieto. Esa é a nosa condición de contorno no problema. Deste xeito

$$\frac{c^2}{2} - G\frac{M}{R} = 0 \quad \Rightarrow \quad c = \sqrt{\frac{2GM}{R}}, \quad (9)$$

que é a moi coñecida formulina da velocidade de escape. A clave do negocio agora é o xenio de Laplace ao substituír a masa M da estrela pola súa densidade ρ e o seu volume

$$c = R\sqrt{\frac{8\pi}{3}\rho G}, \quad (10)$$

onde empregamos que $M = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho$. Imos agora desenvolver un pouco do método orixinalmente empregado por Laplace. Este non desenvolve, como Michell, o proceso matemático no que chega á conclusión das proporcións

¹²Let me cook



necesarias para que unha estrela sexa escura. En lugar diso, Laplace, a partir das proporcións enunciadas en [4], amosa que a súa idea ten sentido extraendo dela un valor coñecido. Neste caso, Laplace substituiría os valores pertinentes para despexar da ecuación o valor da densidade terrestre. Deste xeito asegurábase de que o lector comprendese que a súa proposición tiña sentido. O problema dese método é que é moi aburrido. Do mesmo xeito que con Michell, non concibo como comprender a súa metodoloxía orixinal. Por tanto, farei unha exposición análoga, só que en vez de despexar a densidade terrestre, despexarei a velocidade da luz empregando a ecuación anterior e os valores propostos por Laplace en [4].

Substituímos agora o raio da estrela por $R = 250R_S$, onde $R_S = 6.9634 \cdot 10^8$ m, e a densidade por $\rho = \rho_T = 5514$ kg/m³. Por tanto

$$c_{Laplace} = 250R_S \sqrt{\frac{8\pi}{3} \rho_T G} = 3.057 \cdot 10^8 \text{ m/s.} \quad (11)$$

O cal ten un erro porcentual respecto do valor actual do 1,96%. Nada mal. Deste xeito demostramos, de maneira indirecta mediante a confirmación do valor dunha magnitude coñecida, que a proposición de Laplace ten sentido.

Discusión

Michell e Laplace foron dous xenios que conseguiron chegar a un resultado moi adiantado ao seu tempo. Non é tarefa sinxela imaxinar como sería un obxecto tan estraño como un buraco negro naquela época, e moito menos facelo por primeira vez. Hai que comprender que, naquela altura, a mecánica newtoniana tiña os mesmos anos que ten hoxe a mecánica cuántica, e aínda se debatía a natureza corpuscular ou ondulatoria da luz. Ademais, se Young tivese feito o seu experimento da dobre fenda antes de 1784, é probable que a ningún destes dous se lle ocorrera a idea de que unha *partícula* de luz fose atraída por un corpo o suficientemente masivo.

O obxectivo deste artigo non só é aprender un pouco sobre a historia da física, senón tamén intentar imaxinar o que pasaba polas mentes destes dous xenios. Saír un día a deitarse a mirar as estrelas e visualizar o cosmos. Mirar a constelación do Cisne e saber que, nas profundidades, se agocha unha forza misteriosa e invisible: o

buraco negro de Cygnus X-1. Por suposto, eles descoñecían este astro escuro, pero invita a facerse unha idea do que tiña cada un nas súas mentes.

Gustaríame rematar, unha vez máis, coa *Exposition du Système du Monde* de Laplace. Un pouco máis abaixo do enunciado das proporcións da estrela escura, escribe

...finalmente, os movementos específicos de todos estes grandes corpos que, obedecendo a súa atracción mutua e, probablemente, a impulsos primitivos, describen inmensos orbes; tales serían, en relación coas estrelas, os principais obxectos da astronomía futura.

— Laplace

Referencias

- [1] *Michell, laplace and the origin of the black hole concept* p. **90–96**; Colin Montgomery, Wayne Orchiston, Ian Whittingham; (2009)
- [2] *On the Means of Discovering the Distance, Magnitude, c. of the Fixed Stars, in Consequence of the Diminution of the Velocity of Their Light, in Case Such a Diminution Should be Found to Take Place in any of Them, and Such Other Data Should be Procured from Observations, as Would be Farther Necessary for That Purpose. By the Rev. John Michell, B. D. F. R. S. In a Letter to Henry Cavendish, Esq. F. R. S. and A. S.* p. **35–57**; John Michell; (Royal Society, 1784)
- [3] *Bradley — Sala «Luz», Museo Virtual del CSIC*; Museo Virtual del CSIC; (n.d.)
- [4] *Exposition du système du monde*; Pierre-Simon Laplace; (Cambridge University Press, 2009)
- [5] *Beweis des Satzes, daß die anziehende Kraft bei einem Weltkörper so groß sein könne, daß das Licht davon nicht ausströmen kann* p. **1–6**; Pierre Simon Laplace; (1799)
- [6] *The large scale structure of space-time*; Stephen W. Hawking, George F. R. Ellis; (Cambridge University Press, 1973)
- [7] *Star wars: Episode IV - a new hope*; (20th Century Fox, 1977)
- [8] *Cygnus x-1: Book one: The voyage*; Rush; (1977)

Intuición, Integrais e Álgebra

Uns problemas *máis* intuitivos

Para crear a nova revista da facultade estivemos investigamos sobre as anteriores, na primeira, *A gota de Millikan*, aparecía unha sección de “paradoxos” e inspirados nestes propoñemos estes problemas que poden tanto resolver por intuición como formular as ecuacións que subxacen.



Esquerda: Imaxe do problema 1. **Dereita:** Imaxe do problema 3 (fonte: *El profesor Layton y la villa misteriosa*).

1. Faise pasar unha corda longa por unha polea. Pendúrase un acio de plátanos dun extremo da corda mentres un mono do mesmo peso se colga do outro extremo. Que sucederá cos plátanos cando o mono comeza a gabear pola corda?
2. A túa rutina da mañá antes de ir a clase consiste sempre en tomar un café con leite, mais hoxe vas apurado, tes un exame, son case as nove e aínda segues en casa. Coas présas fixeches o teu café extremadamente quente, de que xeito, agregando o leite, consegues que se arrefría antes? Esperando cinco minutos e logo botar o leite frío ou botando o leite frío e despois esperar cinco minutos?
3. Temos unha balanza de dous brazos e oito masas. Destas 8 masas, 7 pesan o mesmo e unha é máis lixeira. Cal é o número mínimo de medidas, e que medidas son, para determinar exactamente cal das masas é a máis lixeira?
4. Quentar un pedazo de ferro con forma de donut fai que o diámetro do oco aumente ou diminúa?

Uns problemas *menos* intuitivos

Para que teñas que darlle varias voltas á cabeza e talvez repasar algo de física e matemáticas.

- Para comezar, algo máis simple

$$\int \tan(x) dx$$

- Unha raíz cadrada pode cambialo todo!

$$\int \sqrt{\tan(x)} dx$$

- Cun premio de 2.5 puntos, podes integrar o seguinte? (Xuño 2023, MM6)

$$\int_0^{\infty} \frac{x^{3/2}}{x^3 + 1} dx$$

- Sabes que é un *monoide*? É un grupo onde se relaxa a existencia de elemento inverso. Proba que o conxunto $\mathcal{P}(X)$ (o conxunto de todos os subconxuntos de X) xunto coa operación unión $\cup$ é un monoide. Cal é o elemento neutro?
- Sabes que é un *grupo*? Próbao demostrando que o conxunto $\{1, 0\}$ coa operación dada pola porta lóxica XOR é un grupo.
- Sabes que é un *anel*? Busca algún exemplo que non sexan matrices.
- Sabes que é un *espazo vectorial*? É un grupo máis un anel. Defíneo completamente sen usar frechas ou exemplos en $\mathbb{R}^2$ ou $\mathbb{R}^3$.
- Sabes que é unha *álgebra*? Non é máis ca unha parella de aneis. Ocorreseche algún exemplo?

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.

Sentímonos moi orgullosos de contar cun equipo tan esmerado que roza a perfección no traballo, grazas aos nosos editores e correctores unha vez máis. Tamén a todas aquelas persoas en calidade de redactoras que crearon o contido para este novo número. Sen eles non sería posible continuar con este proxecto.

Grazas a todos os docentes que nos compartiron o seu ben ver de *Momentum* neste inicio de curso. Especiais grazas a Carlos Carballeira Romero por animarse a plasmar un proxecto, que comparte xunto con José Manuel Sánchez de Santos, de ciencia na música, como tamén a José Daniel Edelstein Glaubach por facer oco na súa axenda para unha entrevista.

A todos eses alumnos de novo ingreso que se acercaron ao proxecto ilusionados e se animaron a participar, esperemos que por medio deles esta revista perdure moitos máis anos.

Finalmente, grazas tanto ao equipo decanal da nosa facultade como á vicerreitoría de estudantes e cultura polo seu apoio e colaboración en todo momento.

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

Edicións anteriores:



Participa! (WhatsApp)



Co financiamento de:



VICERREITORÍA DE ESTUDANTES
E CULTURA