

MOMENTUM

A revista estudantil da Faculdade de Física da USC

Núm. 002

Maio 2025



Lanzamento da sonda Voyager 1, NASA (1977).

Índice

Entrevistas

- Coñecendo a Ana Ulla Miguel** 1
Gemma Ruiz Lavandeira

Divulgación

- De onde xorde a ecuación de Schrödinger?** 4
Mauro Garrido Rodríguez
- O Teorema de Bohr-Van Leeuwen: o segredo está na cuántica** 7
Luis Arcas Morcillo
- O misterio da materia escura** 9
Pablo Falgueras Casarejos
- Donnie Darko: ciencia para estadounidenses?** 11
Emilia Prado Senlle
- O efecto Dzhani­bekov** 13
Martín Alberto Häderli Revuelta

Recuncho do Profesorado

- Memorias de Moscova** 15
Carlos Merino Gayoso

Historia

- Viaxeiros espaciais. Oda á Voyager 1** 18
Celia Álvarez Álvarez
- Robert Hooke. Nunca vaias contra Newton** 21
Pablo Duarte López
- Strike, you're out! Bombas, Heisenberg e un catcher** 23
Santiago González Gómez

Pasatempos

- Pasatempos** 25
Autoría múltiple

12 de maio do 2025

Núm.002

Dirección

Sebastián Táboas Pazo
Álvaro Pallas Otero
Celia Álvarez Álvarez
Daniel Vázquez Lago

Edición e Corrección

David Cotelo Varela
Andrea Real Blanco
Cristóbal Santos Sánchez
Manuel Galán Rodríguez
María Alonso Iglesias
Hugo Raíndo Lorenzo
Víctor Díaz Díaz

Deseño de Logo

Ana Díaz Caride
Elena López Miguélez



revistafisicausc@gmail.com





Coñecendo a Ana Ulla Miguel

Gemma Ruiz Lavandeira

Camiños na astrofísica, desafíos e horizontes futuros.

Biografía

Ana Ulla Miguel comezou a licenciatura en Ciencias Físicas na Universidade de Santiago de Compostela, para logo especializarse en astrofísica na Universidad de La Laguna, lugar onde obtería o seu título de doutora en 1993. Entre 1988 e 1995, ocupou diversos postos de investigación e docencia na Universidade de Tromsø (Noruega), o Laboratorio de Astrofísica Espacial e Física Fundamental (Madrid), a Axencia Espacial Europea (ESA) ou o Instituto Niels Bohr (Copenhague). Posteriormente, foi contratada posdoutoral no Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC), traballando no proxecto “*Infrared Space Observatory*” (ISO) da ESA.



Figura 1: Ana Ulla Miguel, astrofísica e catedrática na Universidade de Vigo.

Dende 1997 é docente do Departamento de Física Aplicada da Universidade de Vigo, sendo a investigadora principal do Grupo AS1 de Astronomía e Astrofísica da UVigo dende a súa creación no ano 2005 ata outubro de 2017. Dende 2022 é catedrática de astronomía e astrofísica do mesmo departamento e investigadora do grupo GEOMA (*Xeoloxía Mariña e Ambiental*) integrado no CIM (*Centro de Investigación Mariña*) da UVigo. Os seus intereses de investigación inclúen, entre outros temas, a evolución estelar en fases avanzadas, os exoplanetas ou a astrobioloxía. Forma parte do grupo galego da misión Gaia, da ESA, xunto con outros compañeiros

da Universidade da Coruña (UDC) e a Universidad de Cantabria (UC).

Entrevista

Gemma: En primeiro lugar, Ana, moitas grazas por participar na nosa revista e acceder a contestar unhas preguntas para coñecer máis sobre ti e sobre o teu traballo. É un grande orgullo poder contar co teu testemuño. Para comezar, poderías contarnos como xurdiu o teu interese por estudar Física e posteriormente Astrofísica?

Ana: Grazas a vós por convidarme para esta entrevista e parabéns pola iniciativa da vosa revista.

Dende a adolescencia souben que quería entender o mundo e o universo, ou intentalo polo menos. Buscando información (e daquela non había nin Internet, nin móbiles nin ordenadores) descubrín que, para formarme como astrofísica, o camiño natural era estudar física primeiro e especializarme en astrofísica despois. Ao final, isto pasaba por escoller o bacharelato de ciencias en Vigo, física en Santiago e astrofísica en La Laguna. E así fixen.

G: Ademais, formas parte do equipo galego que participa na misión Gaia da Axencia Espacial Europea. Non parece fácil, pero cal é o camiño para poder traballar e colaborar coa ESA? Hai facilidades para estudantes de todos os lugares para poder traballar nun futuro aí?

A: Os meus primeiros contactos coa ESA foron hai moitos anos, como observadora cun dos seus históricos satélites, o IUE (*International Ultraviolet Explorer*), en Madrid, sendo aínda estudante de doutoramento. Despois, traballei por un período breve no seu centro de ESRIN (*ESA Centre for Earth Observation*), en Italia, logo traballei co equipo do satélite ISO no IAC en Tenerife a cargo de Francisco Garzón e, dende aproximadamente 2007, colaboro co grupo de Minia Manteiga, da UDC, no satélite Gaia, que é unha das grandes misións da ESA para este século.

Hai moitas posibilidades de colaborar coa ESA, en múltiples formas, e hai moitas oportunidades para estudantes, especialmente de física ou enxeñarías. Por exemplo, cunha busca online bastante simple, atopas directamente na web da ESA “*Current opportunities for university students*”. Eu animo a todo o mundo que o

queira intentar a que busque estas oportunidades, porque na ESA hai proxectos interesantísimos e con enorme proxección de futuro.

G: A misión Gaia ten como principal obxectivo mapear tridimensionalmente a Vía Láctea. No proceso, acádanse novos descubrimentos, ata o punto de que a propia ESA a describe como a “máquina de descubrimento definitiva”. Cal é para ti a maior satisfacción da misión Gaia? E a maior dificultade que presentou ou aínda presenta este proxecto?

A: O noso grupo intégrase no que se coñece como DPAC (*Data Processing and Analysis Consortium*), unha colaboración paneuropea con máis de catrocentos cincuenta investigadores/as e tecnólogos/as de máis de vinte países. O obxectivo principal é a produción do catálogo final de datos de Gaia, cunha enorme complexidade de procesamento, validación e distribución, pero que quedará realmente como un legado científico de gran valor, para a humanidade.

Para min, só o feito de poder participar nunha colaboración internacional como esta xa me resulta moi satisfactorio, especialmente traballando con colegas da UDC e da UC. E, ao mesmo tempo, considero que a complexidade de funcionamento deste proxecto imparte moitas leccións importantes sobre a colaboración científica e humana en xeral, que ben poderíamos extrapolar a outros campos do coñecemento ou do traballo. Agora que o satélite, despois de máis de once anos, xa non pode adquirir máis datos científicos, traballar cara a elaboración do catálogo final é o reto definitivo, e bastante complexo, que nos queda por abordar.



Figura 2: Foto da Vía Láctea polo proxecto Gaia. Fonte: ESA/Gaia/DPAC, por Stefan Payne-Wardenaar

G: O ano pasado foi bastante notoria a noticia de que descubríades un buraco negro bastante masivo na Vía Láctea. Ti participaras neste achado, cal é o proceso ata obter os resultados? Sodes partícipes durante todo

o proceso do que se está a descubrir ou analizades os datos ás cegas? Que información achegan estes buracos negros para comprender mellor a galaxia?

A: Todos os datos de Gaia procésanse masivamente e de xeito sistemático para depurar resultados espurios e logo facer clasificacións por categorías, etc. E de cando en vez hai sorpresas ou verdadeiros descubrimentos, coma no caso deste buraco negro estelar que, de momento, é o máis masivo na galaxia. No procesado global dos datos traballamos todo DPAC en grupos de traballo e, dentro destes grupos, un equipo particular foi o que fixo a análise detallada do descubrimento.

Este tipo de buracos negros (BNs) correspóndense cos estadios evolutivos finais das estrelas máis masivas, que morren violentamente en forma de supernovas. E as estrelas, coa súa evolución, en xeral moldean a evolución química das galaxias que as conteñen; iso como mínimo. En particular, os BNs son laboratorios formidables para avanzar no estudo da relatividade xeral e para poñer a proba o alcance das leis da física. Tamén, para estudar as súas posibles diferenzas de comportamento cos buracos negros supermasivos dos centros galácticos, e para progresar no que se coñece como astronomía multimensaxeiro que combina información electromagnética e de ondas gravitacionais. Digamos que son obxectos extremos e exóticos de grande utilidade e bastante versátiles en investigación.

G: Gustaríame preguntar polas colaboracións internacionais. En proxectos de tan grande escala a participación de grupos de traballo de diversos países entendo que é imprescindible: é fácil unir a xente de varios lugares para traballar en equipo ou é un traballo máis independente? Consideras que hai unha busca de coñecemento e respostas en todo o mundo ou hai países máis proclives e outros que non prestan tanta colaboración?

A: Efectivamente, a colaboración internacional, pero a todas as escalas en realidade, é imprescindible para a consecución de obxectivos. A astrofísica leva a colaboración científica implícita no ADN, diría eu. Para min foi case unha das primeiras ferramentas de traballo que aprendín xa na etapa da especialización, antes do doutoramento.

E canto máis ambiciosos os obxectivos (exploración espacial, vida exoplanetaria, expansión acelerada do universo...) maiores e máis amplas colaboracións tecemos. Da miña experiencia, e ata onde eu sei, en astrofísica colaboramos de todos os xeitos que se precise e por todas as partes do mundo unha vez definido o proxecto e os obxectivos que corresponda. Creo que só así se pode en-



tender o enorme avance desta disciplina e, paralelamente, do noso coñecemento do universo dende hai pouco máis dun século.

G: Unha cuestión que se formula máis dalgunha estudante é se a ciencia é un espazo igualitario, se a busca do coñecemento está exenta de estereotipos e se en xeral é un espazo afable. Queda camiño por percorrer ou a situación é positiva ao respecto?

A: Eu coñezo moitas colegas con recoñecidísimas traectorias profesionais, desenvoltas no espazo científico que hai. Ese espazo é tan igualitario coma o espazo social e laboral no que se insira. En España hai arredor dun 30 % de astrofísicas, pero esta porcentaxe é menor nalgúns países. E nas universidades españolas hai aproximadamente un 25 % de catedráticas e un 75 % de catedráticos. Creo que estes números indican algo e si quedan aínda dificultades por superar. Penso que é labor de todos os elementos da sociedade, a nivel individual e colectivo, esclarecer por que pasa isto e poñerlle solución.



Figura 3: Participantes da 2ª Reunión do Consorcio DPAC en Sitges, España. Fonte: ESA/Gaia/DPAC

G: Nos últimos meses a situación xeopolítica global está cambiando e as alianzas territoriais como a Unión Europea están avanzando a un maior gasto tecnolóxico, algo que non todo o mundo comprende ou considera necesario. Que lle dirías a alguén que dubida da importancia de custear proxectos sobre a exploración espacial? É algo inherente ao ser humano ir en busca de respostas sobre o Universo ou os intereses residen na utilidade que poida supoñer para os países?

A: O universo é todo e abrangue todas as escalas. O investimento en ciencia e tecnoloxía sempre, antes ou despois, reverte no beneficio das sociedades que, por este razoamento, son parte do universo. E isto enténdese mellor se as sociedades teñen un mínimo nivel de cultura científica. Por exemplo: un *software* para recoñecer galaxias afastadas é útil para detectar nódulos difusos

de cancro de mama; polo tanto, seguimos investigando as galaxias, ou gastamos só en recursos médicos? A exploración espacial é imposible sen as telecomunicacións, e estas son posibles grazas a satélites. Ou ben, espérase que todo o mundo coñeza *El Quijote* ou *La Gioconda* pero que o obxectivo dun Tokamak sexa producir enerxía limpa e ilimitada por fusión, coma no interior do Sol, iso a sociedade non ten necesidade de sabelo?

Creo que abundan os exemplos da combinación de perseguir intereses de coñecemento *per se*, cos de ciencia e tecnoloxía aplicadas. Non son intereses incompatibles, senón que son beneficiosamente complementarios.

G: Que valoración farías de como está a astrofísica en España? Cres que coa incorporación de dous españois ao cadro de persoal de astronautas da ESA visibilizouse a importancia das misións e investigacións espaciais?

A: O nivel investigador e tecnolóxico da astrofísica española é moi alto. Dende que se sentaron as bases dos observatorios de Canarias, Calar Alto e Sierra Nevada, xunto coa posta en marcha de institutos de investigación asociados, que hoxe son recoñecidos mundialmente, o avance da astrofísica é realmente imparable. Polo número e tipo de proxectos, terrestres ou espaciais, nos que a nosa comunidade está involucrada, dentro e fóra do país, polas publicacións, pola calidade das teses de doutoramento defendidas... por moitos indicadores, que ademais son parámetros medibles.

Por suposto, é boa nova que a ESA incorpore máis astronautas españois aos seus equipos, e seguro que iso si contribúe a visibilizar a relevancia das misións e investigacións espaciais. E espero que tamén contribúa a fomentar novas vocacións científicas e tecnolóxicas.

G: Dende a túa experiencia, tes algún consello que poidas compartir cos estudantes de física e especialmente coas mozas que estean comezando?

A: O mesmo consello que me deron a min varias mestras e profesores dende a escola primaria e o instituto, logo investigadores e investigadoras noutras etapas máis adiante: que o intenten, que non se digan a si mesmos/as que non van poder con aquilo que queiran conseguir. Ás veces, as cousas non saen como esperamos, por diversas razóns, así que tamén hai que ter, digamos, plan B ou C, para continuar no noso camiño.

Pero intentando as cousas nunca quedaremos coa dúbida, ademais de que de todas as situacións, todas, se pode obter sempre información útil para o presente e o futuro. Ou, incluso e posiblemente, para reinterpretar o pasado.

De onde xorde a ecuación de Schrödinger?

Mauro Garrido Rodríguez

Unha bela relación entre a mecánica clásica, a óptica e a cuántica.

Na maioría de libros de texto de mecánica cuántica a ecuación de Schrödinger introdúcese axiomáticamente; como é posible non dar unha xustificación da pedra angular da cuántica? Como chegou Schrödinger á súa ecuación? Neste artigo imos explorar o xeito, elegante e profundo, co que Schrödinger chega a unha das máis importantes ecuacións da física no seu artigo de 1926, adaptándoo ao lector para unha exposición máis didáctica.

A analoxía opto-mecánica

Schrödinger lémbra-nos como, antes de ser coñecido o fenómeno da difracción da luz, esta era considerada como transportada por “raios”: a luz propagábase en liña recta nun mesmo medio, e cambiaba a súa pendente ao pasar a outros, mais mantendo sempre unha propagación rectilínea. Se un físico que só coñecese a óptica xeométrica (O.X.) quixese explicar a difracción, dinos Schrödinger, atoparíase con que os raios «*xa non serían rectilíneos e influiríanse uns aos outros dun xeito do máis curioso, en total contradición coas máis fundamentais leis da óptica xeométrica*». Na macroescala, a O.X. pode funcionar, mais cando os obxectos cos que tratamos se volven comparables coa lonxitude de onda da luz (un parámetro que por suposto na O.X. carece de sentido) esta falla estrepitosamente e temos fenómenos como os de difracción. A raíz disto, e inspirado no traballo de De Broglie, dinos: «*acaso non está un tentado a investigar se a non-aplicabilidade da mecánica ordinaria a problemas micromecánicos é quizais do mesmo tipo que a non-aplicabilidade da óptica xeométrica no fenómeno de difracción ou interferencia?*». Hai acaso unha formulación da mecánica clásica que teña que ver cun comportamento ondulatorio? Si, e era coñecida por **sir William Rowan Hamilton** en 1833. Este fixouse no parecido do principio de mínima acción mecánico co principio de Fermat óptico. Lembremos que di cada un:

- **Principio de mínima acción.** Resumidamente, consiste nunha reformulación da mecánica clásica (a chamada mecánica analítica), onde, de tódalas traxectorias posibles que pode tomar un partícula, esta só escolle aquela que fai estacionaria unha determinada cantidade denominada **acción** (isto é, que non cambia a primeira orde baixo variacións pequenas da traxectoria), de xeito que

$$\delta S = 0 \rightarrow \frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q} = 0 \quad (1)$$

onde $\mathcal{L} = T - V$ é o lagranxiano, $S = \int_{t_0, q_0}^{t, q} \mathcal{L}(q, \dot{q}, t) dt$, e a ecuación que se deriva do principio de mínima acción é a ecuación de Euler-Lagrange, que é a que rexe o movemento da partícula, o equivalente a $F = ma$ na mecánica estándar ou clásica.

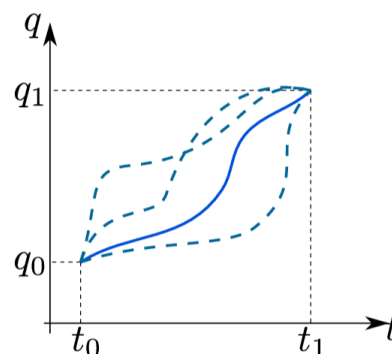


Figura 1: Traxectorias posibles para unha partícula. [4]

- **Principio de Fermat.** Postula que os raios de luz seguen as traxectorias de mínimo tempo. Lagrange xeneralizáralo matizando que realmente as traxectorias que son escollidas son as estacionarias. Ao igual que no caso mecánico, non sempre se escollen as traxectorias de mínima acción, senón as que a fan estacionaria. Este principio, de feito, pode facerse equivalente ao anterior tendo en conta un lagranxiano óptico $\mathcal{L}_{op} = n(s)$ ($n(s)$ é o índice de refracción en cada punto), sendo a nosa condición de “acción óptica” ou “camiño óptico” estacionario a seguinte

$$\delta S_{op} = \int_A^B \mathcal{L}_{op} ds = 0 \quad (2)$$

Este camiño óptico ten unha interpretación clara: é a distancia que percorrería a luz no baleiro no tempo que tarda esta en facelo nun medio con $n(s)$, posto que o índice é unha medida da relación entre as distancias percorridas nun medio e no baleiro, $n = \frac{c}{v} = \frac{dx_c/dt}{dx_v/dt} = \frac{dx_c}{dx_v}$. Se resolvemos esta



ecuación, atoparemos a **ecuación dos raios da óptica xeométrica**.

$$\frac{d}{ds} \left(n \frac{d\vec{r}}{ds} \right) = \nabla n \quad (3)$$

Así, esta analoxía levou a Hamilton á idea de que o movemento dunha partícula podería describirse como o análogo a un raio de luz propagándose nun medio inhomoxéneo ($n(s)$).

Así, **de igual xeito que os raios ópticos seguen liñas ortogonais ás superficies de fase constante** (as fronte de onda da luz), **as traxectorias das partículas seguirían liñas ortogonais ás superficies de acción constante**. A partir desta profunda idea, Hamilton propón que

$$p = \frac{\partial S}{\partial q} \quad (4)$$

É dicir, que a variación da acción coa posición (xeneralizada) dá lugar ao momento (xeneralizado) das partículas, que polo tanto se moven ortogonalmente ás superficies de acción constante.

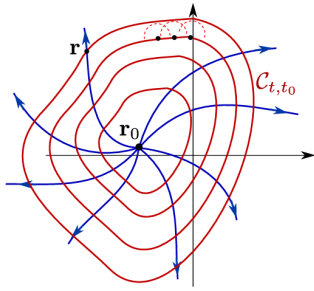


Figura 2: Relación entre as superficies de fase constante e os raios. [4]

Se combinamos este feito co principio de mínima acción, pasando primeiro polas **ecuacións canónicas** (reformulación da de Euler-Lagrange facendo o cambio de dependencia $\dot{q} \rightarrow p$, onde agora o papel de $\mathcal{L}$ faíno $\mathcal{H}$, o Hamiltoniano), atopamos a ecuación de **Hamilton-Jacobi**.

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \mathcal{H}(q, \frac{\partial S}{\partial q}, t) = 0 \quad (5)$$

Esta ecuación, aínda que non o pareza, é clave para entender a ecuación de Schrödinger. Imos reescribila e ver o caso máis simple para entendela mellor, o dunha partícula de masa m movéndose nun potencial $V(x, y, z)$, de xeito que $\mathcal{H} = E = T + V = \frac{1}{2m}(p_x^2 + p_y^2 + p_z^2) + V(x, y, z)$. Se incluímos este hamiltoniano na ecuación de Hamilton-Jacobi, e tendo en conta a suposición de Hamilton $p = \frac{\partial S}{\partial q}$ atopamos que

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{|\nabla S|^2}{2m} + V(x, y, z) = 0 \quad (6)$$

Para simplificar aínda máis esta expresión, considere-mos un hamiltoniano independente do tempo, de xeito que obteñamos unha ecuación para partículas con enerxía constante. Isto determinará a dependencia temporal da acción

$$\frac{\partial S}{\partial t} = -\mathcal{H} \rightarrow \boxed{S = (E)t + f(x, y, z)} \quad (7)$$

Deste xeito, executando a derivada temporal de S , a ecuación de Hamilton-Jacobi queda reducida a

$$|\nabla S| = \sqrt{2m(E - V)} \quad (8)$$

Posto que a enerxía cinética é $T = E - V$, isto non é máis que

$$|\nabla S| = |\vec{p}| \rightarrow \boxed{\nabla S = \vec{p}} \quad (9)$$

O gradiente da acción, perpendicular ás traxectorias, é o momento da partícula. Esta é a ecuación dos raios-mecánicos, é dicir, das traxectorias, de enerxía constante.

A analoxía opto-mecano-cuántica

Schrödinger é consciente de que ata aquí non hai nada novo. O que el propón é tomarse esta ecuación en serio. Se realmente esta é o equivalente á ecuación dos raios da O.X., e a óptica é en realidade ondulatoria, emerxendo estes delas, por que non facer o mesmo para as partículas para as súas traxectorias? Tomándonos en serio a analoxía, a ecuación de Hamilton-Jacobi asóciálles ás partículas unha fase, a acción, que debe de ser a fase dunha onda. **Se a luz cumpría unha determinada ecuación de ondas, que ecuación de ondas cumprirá unha partícula material?**

Antes de chegar a ela, temos que ter en claro que tipo de onda é a que ten a fase da ecuación de Hamilton-Jacobi: posto que provén de existir unha fase estacionaria, pódese probar moi facilmente que é equivalente á **ecuación da eikonal** da óptica, que é válida para **ondas localmente planas**, é dicir, ondas cunha variación de fase suave, con fronte de onda localmente planas.



Figura 3: Ondas localmente planas. [1]

Na mecánica clásica as únicas ondas consideradas serán localmente planas, que dan solucións exactas para as traxectorias; pero, en mecánica cuántica, ao igual que pasaba coa óptica ondulatoria e coa O.X., poderemos ter moitas máis posibilidades de ondas, **que darán lugar a movementos inexplicables mediante o concepto de raios, é dicir, de traxectorias.**

Así, antes de pasar á ecuación de Schrödinger, veremos a proba este concepto de ondas asociándolle á función de ondas Ψ (o que ondula, cuxo significado descoñecemos, análogo ao campo electromagnético da luz) dunha **onda localmente plana** (polo comentado de que a ecuación de Hamilton-Jacobi só aplica a estas) a acción $S = Et + f(x, y, z)$ como fase (lembramos que isto implica $E = \text{cte}$), recordando que debe cumprir $\nabla S = \vec{p} \rightarrow \nabla f(x, y, z) = \vec{p}$. Así,

$$\Psi = A(x, y, z)e^{i(\frac{S}{\hbar})} = A(x, y, z)e^{i(\frac{E}{\hbar}t + f(x, y, z)/\hbar)} \quad (10)$$

onde B é unha constante que permite que o que entra na exponencial sexa adimensional. Esta é a clase de ondas que corresponden á ecuación de Hamilton-Jacobi, ondas localmente planas de $E = \text{cte}$ cuxas fronteiras son moldeadas por $f(x, y, z)$.

Schrödinger di: «*un non pode resistir a tentación de supor que B sexa unha constante universal, porque nese caso*», facendo $B = \hbar$, a frecuencia desta onda é

$$\omega = \frac{E}{\hbar} \rightarrow \boxed{E = \hbar\omega} \quad (11)$$

A famosa relación de De Broglie enerxía-frecuencia!

A ecuación de Schrödinger

Para o caso simple que estamos tratando da partícula unidimensional, Schrödinger propón que Ψ cumpre unha ecuación de ondas ordinaria

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} = \frac{1}{u^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} \quad (12)$$

Agora, asume que estas ondas se moven cunha velocidade de fase dada pola ecuación de Hamilton-Jacobi, asumindo tamén solucións de enerxía constante (polo tanto, a parte temporal da acción será $S = Et$), o

cal converte a esta ecuación de ondas na **ecuación de Schrödinger independente do tempo**. Así,

$$\boxed{-\frac{\hbar}{2m} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + V(x, y, z)\Psi = E\Psi} \quad (13)$$

Que, polo dito anteriormente, é unha ecuación só válida para ondas asociadas a partículas de enerxía constante. Fixémonos en que agora non se asume unha onda localmente plana (a ecuación non foi obtida con esa premisa), co que esta ecuación é válida para ondas arbitrarias que corresponderían ás “traxectorias” cuánticas. Plasmar a importancia desta ecuación neste artigo é unha tarefa colosal que non pode abarcar aquí, mais o que fai Schrödinger inmediatamente despois de conseguila é aplicala ao átomo de Hidróxeno, reproducindo así os valores cuantificados dos niveis de enerxía, explicando o átomo de Bohr. É de interese resaltar o feito de que se poidan obter tantos resultados sen darlle á Ψ unha interpretación aínda.

Referencias

- [1] Jesús Liñares Beiras. *Apuntes de Óptica II*.
- [2] *Hamilton-Jacobi equation*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Hamilton's_optico-mechanical_analogy.
- [3] *Hamilton's optico-mechanical analogy*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Hamilton's_optico-mechanical_analogy.
- [4] Bahram Houchmandzadeh. “The Hamilton-Jacobi Equation: an intuitive approach”. En: *American Journal of Physics* 88 (2020), pp. 353–359.
- [5] E. Schrödinger. “An Undulatory Theory of the Mechanics of Atoms and Molecules”. En: *The Physical Review* (1926).
- [6] E. Schrödinger. “Quantisation as a Problem of Proper Values (Part II)”. En: *Annalen der Physik* 79 (1926).



O Teorema de Bohr-Van Leeuwen: o segredo está na cuántica

Luis Arcas Morcillo

Da imposibilidade clásica do magnetismo.

Classical magnetism is fake. Estou seguro de que con este artigo a polémica está servida. Gústame imaxinar que os nosos prezados lectores dividiríanse en dous bandos. Uns entrarán en pánico e ante a afirmación anterior queren abolir o estudo da magnetostática clásica en tódalas facultades do país. Outros, quizais máis cínicos (e con razón), pensarán que ten moito sentido que o magnetismo é unha consecuencia cuántica. A fin de contas, todo fenómeno a escala atómica debe rexer as leis da mecánica cuántica. Non obstante, este feito non era para nada coñecido no comezo do século XX, onde comeza a nosa historia. Abrochade os vosos cintos, porque avecíñanse curvas.

O magnetismo previo ao átomo

Supoño que os inicios da teoría do magnetismo son coñecidos pola maioría, pero en resumidas contas aconteceu máis ou menos así:

Dende tempos inmemoriais, antigas civilizacións xa coñecían a ferrita, un mineral que posuía a fascinante propiedade de atraer metais. Séculos despois, científicos renomados como Faraday, Lenz e Maxwell contribuíron ao primeiro formalismo dunha teoría que actualmente coñecemos como electromagnetismo (EM), nunha formulación de campos que é de moita utilidade para sentar as bases da electrodinámica. Así, o ser humano era agora capaz de simular as propiedades da ferrita a partir de cargas eléctricas en movemento nun circuíto, mostrando o vínculo profundo entre a electricidade e os imáns. No entanto, quedaba pendente unha cuestión: por que hai materiais que presentan campos magnéticos propios permanentes? Que propiedades ten a ferrita e outros materiais presentes na natureza para actuar como imáns naturais?

O descubrimento do átomo e das primeiras partículas subatómicas tivo unha gran relevancia non só a nivel experimental, senón tamén conceptual. Os electróns e protóns teñen carga igual e de signo oposto, pola súa contra, as masas son distintas, onde claramente é maior a masa do protón. Entón, ten sentido pensar que estas partículas cargadas en particular, e os átomos en xeral, son susceptibles individualmente á actuación de campos electromagnéticos. A enerxía adquirida pola pre-

senza dun campo magnético pode describirse a partir do momento magnético da partícula cargada:

$$\vec{\mu} = \frac{1}{2m}(\vec{r} \times q\vec{v}) \Rightarrow E = -\vec{\mu} \cdot \vec{B} = -\mu_z B. \quad (1)$$

O signo negativo corresponde ao feito de que a enerxía se minimiza cando o momento magnético $\vec{\mu}$ está aliñado co campo: $E = E_{\min} \Leftrightarrow \vec{\mu} \parallel \vec{B} \Leftrightarrow \vec{\mu} = \mu \hat{z}$.

Sen entrar en moitos detalles, o comportamento dos momentos magnéticos dos átomos individuais fronte a campos magnéticos permitiríanos describir o material. Se tódolos momentos están aliñados entre eles, falamos de *ferromagnetismo*: o material presentaría un comportamento de imán natural cando se introduce un campo magnético. Se os momentos magnéticos individuais están desaliñados, de tal xeito que aparentemente se opoñen ao campo externo, falamos de *diamagnetismo*. Non obstante, se a interacción parece favorable á dirección do campo, falaremos de *paramagnetismo*.

Langevin e o primeiro modelo atómico do paramagnetismo

En 1905, o físico francés Paul Langevin foi o primeiro en presentar un modelo que fose capaz de explicar a escala atómica o comportamento dos distintos materiais fronte a campos magnéticos. Actualmente estúdase como a *teoría semiclásica do paramagnetismo* [1, Sec. 2.1.4.]. Langevin propoñía que os átomos tiñan un momento magnético constante apuntando a certa rexión do espazo segundo a distribución de Boltzmann:

$$dP = \frac{1}{Z} e^{\frac{E}{k_B T}} d\Omega, \quad Z = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi e^{\frac{E}{k_B T}} d\Omega, \quad (2)$$

onde $d\Omega = \sin(\theta)d\theta d\phi$ é a diferencial do ángulo sólido. Así, dados N átomos dun material lineal nun volume V , a magnetización resultante do material é a seguinte:

$$M = \frac{N}{V} \int \mu_z dP = \frac{N}{V} \cdot L\left(\frac{\mu B}{k_B T}\right), \quad (3)$$

onde $L(y) = \coth(y) - y^{-1}$ é a función de Langevin. Dous anos máis tarde, o tamén francés Pierre Weiss propuxo outro modelo que corruxía o de Langevin e introducía o comportamento ferromagnético de diversos materiais na teoría.

As disertacións de Bohr e Van Leeuwen. Unha nova teoría.

Os problemas non tardarían en chegar. Xa por 1911, un novo Niels Bohr puxo en dúbida a teoría de Langevin, achando unha contradición infranqueable se soamente se empregaban técnicas de Mecánica Estadística. Anos máis tarde, unha estudante da Universidade de Leiden, chamada Hendrika Johanna van Leeuwen disertaría sobre o mesmo tema na súa tese doutoral, chegando ás mesmas conclusións que Bohr. Vexamos cal foi o seu razoamento e as conclusións finais [1, Sec. 1.2.2.].

Consideremos unha mostra paramagnética de N átomos, todos coa mesma masa, no seo dun campo magnético. Consideraremos exclusivamente o momento debido aos electróns, sendo o resultado xeral para outras partículas cargadas. Tense entón que cada electrón ten un momento magnético:

$$\vec{\mu} = \frac{-e}{2m}(\vec{r} \times \dot{\vec{r}}) \Rightarrow \mu_z = \sum_{i=1}^{3N} a_i(q_1, \dots, q_{3N}) \dot{q}_i.$$

É dicir, o momento magnético total nunha dirección (a dirección do campo $\vec{B}$) é unha función explícita das velocidades nas coordenadas xerais.

Consideremos ademais que o noso sistema conserva a súa enerxía, de tal feito que o total correspóndese co hamiltoniano, función de coordenadas xerais, $\vec{q}$ e os seus momentos canónicos conxugados, $\vec{p}$. Para un sistema sometido a un campo electromagnético caracterizado polos potenciais $(\phi, \vec{A})$, dáse o seguinte hamiltoniano :

$$E = H(\vec{q}, \vec{p}) = \frac{1}{2m} \sum_{i=1}^N (\vec{p}_i - e\vec{A}_i)^2 + e\phi(q_1, \dots, q_{3N}) \quad (4)$$

Podemos realizar a media os seus momentos magnéticos para achar a enerxía media do sistema $\langle E \rangle = -B \langle \mu_z \rangle$. Segundo a Mecánica Estadística (2) e o modelo de Langevin (3), podemos calcular esta media a partir da función de partición Z da mostra:

$$\langle \mu_z \rangle = \int \mu_z dP = \frac{1}{Z} \int e^{-\beta H(\vec{q}, \vec{p})} d^N(\vec{q}, \vec{p}), \quad (5)$$

onde $\beta^{-1} = k_B T$. Recordando as relacións de conxugación canónica no formalismo hamiltoniano, temos que

$\dot{q}_i = \frac{\partial H}{\partial p_i}$, e polo tanto a media cumpre que:

$$\langle \mu_z \rangle = \frac{1}{Z} \iint \sum_{i=1}^{3N} a_i(q_1, \dots, q_{3N}) \frac{\partial H}{\partial p_i} e^{-\beta H} d^{3N}(\vec{q}, \vec{p}). \quad (6)$$

No entanto, se integramos na totalidade do espazo de fases, veremos que a media é igual a cero¹. Deste modo, baixo a acción do campo, en media estatística hai tantos momentos aliñados coma desaliñados: a mostra é diamagnética.

En resumidas contas, de ser pola teoría clásica, non habería magnetismo posible, nunha clara contradición coa realidade experimental. Así, era necesaria unha nova teoría que fose capaz de explicar a presenza do magnetismo na natureza. Segundo Van Vleck [2, pp. 354-355], foi este feito o que motivou a Bohr a introducir a cuantización do momento angular orbital do electrón ao redor do núcleo de hidróxeno para formular o seu famoso modelo atómico. Así, un pode afirmar que o nacemento da cuántica está moi vinculado ao magnetismo atómico.

Conclusións

En definitiva, aínda que a teoría de Maxwell é moi útil para explicar fenómenos electromagnéticos clásicos coma a indución magnética ou mesmo a luz (o que podería dar para outro artigo), a imposibilidade de explicar o fenómeno do paramagnetismo pon de manifesto que fai falla unha teoría máis completa, que teña presente o comportamento propio dos átomos. É dicir, que, unha vez máis, a cuántica está aquí para salvarnos da catástrofe. Un desenvolvemento máis completo do rol da cuántica no magnetismo pode cursarse na materia de Nanomagnetismo e Nanotecnoloxía desta facultade.

Referencias

- [1] Stephen Blundell. *Magnetism in Condensed Matter*. Oxford University Press, 2001.
- [2] John H. Van Vleck. “Quantum Mechanics. The Key to Understanding Magnetism”. En: *Nobel Lectures, Physics 1971-1980*. 1977. URL: <https://www.nobelprize.org/uploads/2018/06/vleck-lecture.pdf>.

¹É un bo exercicio para o lector facer os cálculos, aquí vai unha pista: separe a integral múltiple no produto das integrais na posición $\vec{q}$ e o seu momento $\vec{p}$. O integrando dependente de $\vec{p}$ é impar, e polo tanto a integral anúlase.



O misterio da materia escura

Pablo Falgueras Casarejos

O descubrimento da maior parte da materia do universo e o enigma da súa composición.

Dende os anos trinta do século XX sabemos que no universo hai algún tipo de materia invisible aos nosos instrumentos debido aos efectos que esta ten no seu entorno. Un dos primeiros en obter probas firmes sobre este feito foi o físico Fritz Zwicky no ano 1933 mentres estudada o Cúmulo de Coma, un cúmulo formado por unhas mil galaxias na constelación de Coma Berenices, a algo máis de 300 millóns de anos luz. Zwicky mediu as velocidades das galaxias do cúmulo e atopou que eran moito maiores do esperado só tendo en conta a materia visible, de feito, chegaban a superar a velocidade de escape estimada para o cúmulo. En consecuencia, propuxo que debía existir algún tipo de “materia escura” que non podíamos observar responsable do movemento anómalo das galaxias. Non obstante, este achado caeu no esquecemento ata catro décadas despois. Hoxe en día sábese que Zwicky sobreestimou a cantidade de materia escura porque non tivo en conta o gas intergaláctico (aínda non descuberto), o cal achega a maior parte da masa do cúmulo.

Xa na década dos 70, a astrónoma Vera Rubin xunto con Kent Ford, analizando a velocidade de rotación de estrelas individuais en galaxias espirais, atoparon o mesmo resultado que Zwicky nas galaxias do Cúmulo de Coma corenta anos antes. A velocidade das estrelas era demasiado alta: en vez de diminuír coa distancia, mantíñase aproximadamente constante. De novo, Rubin pensou que existía máis materia da visible, a cal se acumulaba na rexión exterior (halo) das galaxias. As estimacións da cantidade de materia escura suxerían que podía ser ata dez veces máis abundante que a materia ordinaria (ou bariónica, formada por barións).

Ao longo dos anos, presentáronse novas probas que apuntan á existencia desta materia escura. Por exemplo, estudando a velocidade do gas das galaxias, e non a velocidade das súas estrelas, pódese apreciar unha maior anomalía nela. Isto débese a que o gas esténdese máis aló na periferia da galaxia que as estrelas, aínda que tardou en ser descuberto porque emite principalmente en raios X debido á súa alta temperatura. Outros obxectos do halo galáctico cuxa velocidade presenta a mesma irregularidade son os cúmulos globulares, cúmulos moi antigos formados por decenas ou centos de miles de estrelas.

Por outra banda, dende a publicación da teoría da relatividade xeral de Einstein sábese que unha masa deforma o espazo-tempo, polo que pode curvar a tra-

xectoria da luz producindo un fenómeno coñecido como lente gravitacional. Isto prodúcese cando un obxecto masivo (unha galaxia ou cúmulo de galaxias, por exemplo) interponse entre unha fonte de luz (outra galaxia distante) e o observador. Se é o caso, pódese observar a galaxia distante distorsionada debido ao efecto de lente gravitacional do corpo interposto. Estudando como ese corpo curva a traxectoria da luz pódese estimar a cantidade e distribución de masa que produce a lente gravitacional. Grazas a isto, obsérvase que unicamente a materia bariónica non podería producir as lentes gravitacionais estudadas, senón que é necesaria a presenza de máis masa para conseguilo.



Figura 1: LRG 3-757 ou a “ferradura cósmica”, un exemplo das lentes gravitacionais coñecidas como aneis de Einstein [2].

Outra proba provén da radiación do fondo cósmico de microondas (Cosmic Microwave Background, CMB, en inglés), radiación emitida durante a chamada “recombinación” uns 380 000 anos despois do Big Bang. Analizando as fluctuacións de temperatura do CMB estímase que a densidade de materia (escura e ordinaria) do universo atópase en torno ao 32 % da súa densidade crítica, o cal está en perfecto acordo coas observacións, das que se obtén que a materia bariónica supón un 5 % da densidade crítica e a materia escura un 27 %. Por certo, pénsase que a contribución da “enerxía escura” (non materia!) é igual ao 68 % restante, polo que a densidade do universo sería igual á súa densidade crítica e a xeometría deste sería plana.

Sobre as súas características, sábese que a materia

escura debe de ser “fría”, é dicir, que a velocidade das súas partículas é moito menor que a velocidade da luz. Se non fose así, o colapso gravitatorio da materia no universo temperán tería sido menos eficiente e non existiría a estrutura a grande escala actual. Tamén debe ser estable, porque a cantidade de materia escura actual debe de ser aproximadamente a mesma que a do universo temperán. Ademais, a materia escura non interacciona coa materia bariónica nin consigo mesma (a excepción da gravidade) ou o fai de forma moi débil. Un claro exemplo preséntase noutro cúmulo de galaxias, o denominado Cúmulo Bala. En realidade, trátanse de dous cúmulos en colisión, os cales xa se atravesaron hai millóns de anos. A partir de observacións en raios X, apréciase que o gas intergaláctico (en vermello na Figura 2) está atrasado respecto aos cúmulos, o cal prodúcese pola fricción das nubes de gas ao chocar. O interesante é que debido aos efectos de lente gravitacional pódese saber a distribución de materia escura (en azul), que si está superposta ao cúmulo (non retardada). Isto quere dicir que cando os cúmulos colidiron, a materia escura atravesou as nubes de gas e a si mesma sen apenas interaccionar, doutro xeito tamén se atrasaría como o gas.



Figura 2: O Cúmulo Bala na constelación de Carina. En vermello, a emisión en raios X do gas intergaláctico; en azul, a distribución de materia escura obtida a través dos efectos de lente gravitacional [4].

Iso si, se ben parece estar bastante claro que a materia escura existe aínda que non a vexamos, no que respecta á súa composición a situación é moi distinta. A día de hoxe non se coñece con certeza de que está feita, mais hai moitos candidatos a materia escura. En primeiro lugar, poderíamos preguntarnos se se trata de materia ordinaria que por algunha razón resulta invisible, o cal xa está practicamente descartado. Por exemplo, quizais sería algún obxecto compacto coma un MACHO (Massive Astrophysical Compact Halo Object), isto é, buracos

negros, planetas errantes, asteroides, etc., mais os seus efectos gravitacionais serían diferentes aos da materia escura (o caso dos buracos negros primordiais aínda se está a estudar). Tampouco poden ser nubes de gas escuras (como as nebulosas escuras), pois absorberían a luz de estrelas ou galaxias distantes, o cal non observamos; a materia escura é transparente á luz. Os neutrinos descartámoslos igualmente porque debido á súa ínfima masa terían velocidades moi altas e serían “quentes”, non fríos.

Algúns dos candidatos máis prometedores son os WIMPs (Weakly Interacting Massive Particle, ou partículas masivas que interactúan debilmente), dos cales o neutralino é un bo exemplo. Os neutralinos son as partículas supersimétricas máis lixeiras e posúen características interesantes compatibles coas da materia escura. Outras partículas moi estudadas son os axións, que aparecen en propostas para resolver o problema CP forte na cromodinámica cuántica. Iso si, debemos recordar que neutralinos ou axións son aínda partículas hipotéticas non detectadas experimentalmente. En realidade, para responder que é a materia escura atopamos dende partículas exóticas cuxa existencia non ten demasiado apoio teórico ou a posibilidade de que haxa dimensións extras, ata a simple ausencia de materia escura. Estas últimas teorías (chamadas MOND) suxiren unha modificación no comportamento da gravidade a grandes distancias, o cal explicaría as altas velocidades das estrelas ou galaxias xa comentadas. Non obstante, estas teorías non poderían explicar os efectos de lente gravitacional observados.

En definitiva, temos moitas probas da existencia da materia escura e coñecemos algunhas das súas características, mais o seu constituínte é incerto. Aínda que xa están descartados algúns candidatos e moitos outros probablemente descartaranse no futuro, terase que seguir investigando para resolver este enigma

Referencias

- [1] A. Casas González. *La materia oscura*. Un paseo por el Cosmos. RBA, 2021.
- [2] *ESA/Hubble-NASA*.
- [3] Lawrence M. Krauss. *La Quinta esencia: la búsqueda de la materia oscura en el universo*. Madrid: Alianza, 1992.
- [4] *X-ray: NASA/CXC/M.Markevitch et al. Optical: NASA/STScI; Magellan/U.Arizona/D.Clowe et al. Lensing Map: NASA/STScI; ESO WFI; Magellan/U.Arizona/D.Clowe et al.*



Donnie Darko: ciencia para estadounidenses?

Emilia Prado Senlle

Breve disertación sobre a ciencia no filme Donnie Darko.

Existen moitas películas que tratan de incorporar a física nas súas tramas. O exemplo máis notable é, probablemente, *Interstellar*, coas súas viaxes polo tempo e distintas realidades. Ademais, algo que adoitan compartir estes filmes é a súa constante presenza en vídeos con títulos coma: «10 películas que farán estoupar a túa mente!!!!» Que se viaxes no tempo, se universos paralelos... Unha lea. Claro que a confusión e a intelixencia non son sinónimos, e o público xeral non tende a ser un bo crítico da rigorosidade científica. Polo tanto, ao veren estes filmes que tanto xogan co espectador, a pregunta real debería ser: é confuso porque é intelixente, ou simplemente porque é estúpido?



Figura 1: Fotograma, Donnie e Frank [2].

Cando buscas Donnie Darko na Internet, a maior parte dos resultados van ser unha versión de: «final de *Donnie Darko explicado con CIENCIA!!!!*». Trátase dunha película comunmente coñecida polo seu final confuso e a súa enrevesada cronoloxía. Foi dirixida por Richard Kelly e rematou sendo considerada unha película de culto estadounidense tralo seu seu lanzamento en 2001 e, máis tarde, en 2004, de *Donnie Darko: The Director's Cut*, significativamente máis extensa ca a orixinal. A trama segue a Donnie Darko, un adolescente que sofre de importantes problemas psicolóxicos e comeza a alucinar cun coello xigante chamado Frank. Este coello salva a súa vida dun accidente e avísao da inminente chegada do fin do mundo. A partir de entón, Donnie vese obrigado a cumprir coas ordes de Frank, o que produce unha serie de actos violentos ata o final, no que casualmente viaxa no tempo para salvar o seu mundo da destrución.

A explicación máis común en vídeos de YouTube adoita ser unha: Donnie, ao sobrevivir ao incidente, entrou nun universo paralelo que colapsará en pouco tempo. Antes de que iso poida ocorrer, viaxa a través do tempo ata o seu universo de orixe, morre, e salva os seus amigos da apocalipse. Soa un pouco estúpido de primeiras, mais o certo é que, se indagamos un pouco, podemos dar nas bases do filme con nomes do mundo da física.

Donnie Darko explicado con ciencia!

Un concepto en que esta obra insiste moito é na de destino e determinismo, que se presenta visualmente na forma dunha masa que se estende dende o peito de cada ser ata o lugar onde vai estar no futuro; e aínda que semella estraño, este é un concepto físico existente, aínda que algo reinterpretado. Os físicos David Deutsch e Michael Lockwood explican que a vida forma unha especie de “verme” de 4 dimensións, cunha cola que representa a orixe da vida, e unha cabeza na que se atopa a morte [1]. Así, un obxecto como o vemos no presente non é máis que a intersección nun espazo tridimensional entre este e o seu “verme”. Por suposto, a película céntrase máis no aspecto filosófico desta cuestión; se podemos ver o futuro, significa que é inevitable? Existe o destino? Está xa decidido que vou ser un fracasado? O cal é unha pregunta moi interesante, e moi explorada dende tempos do determinismo mecanicista do Renacemento ata a actualidade. Con todo, esta cuestión científica e filosófica vese rapidamente destruída polo propio guión. Donnie, en resposta ás dúbidas filosóficas do seu profesor de ciencias, di: «non [está decidido] se quedas na Canle de Deus» [2]. Así, fácil. Deus.

Podería opinarse que este intento por explicar o físico mediante o místico, ou de incluír a Deus dunha forma tan repentina e fóra de lugar no argumento, pódese ignorar un pouco ao ter en conta que o filme supón, en gran medida, unha crítica á mentalidade cerrada e tradicionalmente relixiosa dos suburbios americanos. Ademais, ao recorrer á versión de corte do director da película, ofrécesenos unha explicación sobre o universo de Donnie moito máis completa ao incluír extractos do libro de Roberta Sparrow, outra personaxe da película. Este leva

o nome de *A Filosofía das Viaxes no Tempo*, e fala sobre a formación de Universos Tanxentes extremadamente inestables a partir de incidentes no Universo Primario. Iso explicaría todo o tema da fin do mundo, pero... realmente ten sentido?

É obvio que os universos paralelos ou múltiples non son un tema inexplorado pola física moderna. Por exemplo, para explicar a ‘superposición’ das partículas subatómicas en múltiples estados instantáneos, Hugh Everett refírese ao que posteriormente se bautizou como a *Interpretación de Mundos Múltiples*. Esta describe que cada un dos estados nos que atopamos unha partícula ocorren simultaneamente, só que en distintas ramas do universo e cada vez que tratamos de observala, o universo divídese en distintas realidades paralelas [3]. É claro que esta non é unha tese demasiado consolidada no mundo científico, xa que non hai forma de demostrala experimentalmente. Pero existe e é obvio que Donnie Darko bebe destas ideas; nun universo, Donnie está vivo, e noutro, morto.

Pois, entón, estas realidades non deberían interactuar de ningunha forma, non si? Como pode ser que Donnie volva ao seu universo orixinal ao final da película? Ou que Frank, que é en realidade o amigo morto de Donnie, volva atrás no tempo para avisar da fin do mundo? Pois ben, a película realmente non o explica. O libro de Roberta Sparrow menciona as viaxes no tempo, mais cunha explicación vaga e demasiado mística para ser científica, «*A Auga e o Metal son os elementos chave para as Viaxes no Tempo. A Auga é o elemento barreira para a construción de Portais de Tempo que conectan Universos no Vórtice Tanxente*» [2].

Con todo, na física, existe quen tratou estes problemas. Por exemplo, Kurt Gödel e a súa métrica de Gödel, coa que pretendeu solucionar as ecuacións de campo de Einstein. Esta presenta a existencia de cadeas causais pechadas, nas que o evento orixinal se causa a si mesmo [5]. Claro que esta é unha teoría que se cuestiona profundamente como verdadeira (véxase o paradoxo do avó). Aínda así, é algo interesante de explorar; a pesar de que a película nin tan sequera trate de facelo, máis aló de referirse a unha viaxe no tempo inexplicable, a partir dun buraco no espazo-tempo inexplicable, e cunhas con-

secuencias... dubidosas. É obvio que así vai quedar un final, como mínimo, confuso.

Cine e... ciencia?

Por suposto, isto non significa que unha película deba ofrecer unha explicación pormenorizada, argumentada e cun sentido científico rigoroso. Ao final, é ficción, e perdería un pouco a graza se houbera que incluír unha bibliografía citada en Harvard ao final dos créditos. E o certo é que a trama ten as súas bases, ata certo punto. Con todo, resulta dubidoso cando unha obra trata de parecer profundamente complexa e intelixente cando non é máis que uns cantos conceptos físicos empregados ao servizo do guión; e cando a conversación máis científica que podemos escoitar nela é a explicación dun profesor de instituto sobre o que son os vectores no espazo. Ao final do día, tampouco se pode culpar disto a un filme tan claramente feito para o público estadounidense xeral.

Referencias

- [1] M. Deutsch D. e Lockwood. “The Quantum Physics of Time Travel”. En: *Scientific American* 273 (1994), pp. 68–74. DOI: <https://doi.org/10.1038/scientificamerican0394-68>.
- [2] *Donnie Darko: The Director's Cut*. 2004.
- [3] J. Gribbin. *Historia de la ciencia, 1543-2001*. SERIE MAYOR II. Crítica, 2004. ISBN: 9788484326076.
- [4] J. Gribbin. *The Many-Worlds Theory, Explained*. 2020. URL: <https://thereader.mitpress.mit.edu/the-many-worlds-theory/>.
- [5] R. Núñez. *Paradojas temporales en relatividad especial*. 2021. URL: <https://www.ificc.cl/extension/seminarios-de-filosofia-de-la-ciencia/paradojas-temporales-en-relatividad-especial/>.
- [6] Wisecrack. *DONNIE DARKO: Is It Deep or Dumb? – Wisecrack Edition*. 2019. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=xksMpeMHbTE>.



O efecto Dzhanibekov

Martín Alberto Häderli Revuelta

Un fenómeno físico que conecta aos mongois, Euler e... a fin do Mundo?

É a vez de adentrarse nunha das conexións máis curiosas da física: como poderían conectarse o Imperio mongol, a fin da carreira espacial entre a URSS e os EUA, a apocalipse e, como non, Euler? Prepárate, porque quizais terminamos dando... algunha que outra volta; imos, pois, falar do **Efecto Dzhanibekov**.

A historia

O punto de partida da nosa aventura é o 11 de febreiro de 1985, no medio da que é popularmente recoñecida como a etapa máis tensa da Guerra Fría. Os sistemas de control da estación espacial soviética Salyut 7 fallaron e perdeuse o contacto coa nave. Ao non haber tripulantes nese momento, a estación espacial comezou a vagar sen control, rotando sobre o seu eixe axial, que é o eixe principal con menor momento de inercia. Isto foi crucial, dado que segundo a dinámica do corpo ríxido o movemento dun corpo que xira sobre un dos seus eixes principais é estable sempre e cando teñan asociados ou o menor ou o maior momento de inercia (recordaremos isto máis adiante). Consecuentemente, aínda existía unha pequena posibilidade de iniciar unha misión espacial para tentar reparar os fallos e recuperar o control sobre a Salyut 7. Porén, era necesario recrutar os cosmonautas adecuados e aí é onde entra en escena o noso protagonista: **Vladimir Aleksandrovich Krysin**.



Figura 1: Estación espacial Salyut 7.

Vladimir naceu no actual Uzbekistán e estudou Física na Universidade de Leningrado para posteriormente graduarse como instrutor de voo nas Forzas Aéreas Soviéticas, onde logo foi seleccionado como cosmonauta. Á idade de 22 anos casou con Liliya Dzhanibekova, descendente directa de Janibeg, un líder medieval dun dos

reinos que quedaron logo da disolución do Imperio Mongol. Como consecuencia de que o pai de Liliya non tiña fillos varóns, Vladimir decidiu adquirir o apelido da súa muller como forma de honrar os seus ancestros e continuar coa liña de descendencia, pasando a chamarse **Vladimir Dzhanibekov**. Durante os seguintes anos, Dzhanibekov participou en cinco misións espaciais, e foi nesta última onde descubriu o efecto que toma o seu apelido, mais non nos adiantemos.

Regresemos ata o 6 de xuño de 1985 no cosmódromo de Baikonur, actual Kazakhstán. Ás 06:39:52 dese mesmo día engalou de alí a nave Soyuz-U2, a bordo con Dzhanibekov e un enxeñeiro de voo co fin de recuperar a Salyut 7. Dado o feito de que o xiro da estación era estable, os soviéticos puideron facer as manobras para se aproximaren o suficiente á nave e facer coincidir as rotacións conseguindo finalmente recuperar o control da estación espacial, así converténdose esta nunha das fazañas máis notables da astronáutica. Unha vez comprobaron que o aire era respirable, os cosmonautas entraron na estación e comezaron a facer as reparacións necesarias. Dezanove días despois, ocorrería o achado. Mentres Dzhanibekov desempacaba a subministración do envío espacial Progress-24, unha porca con dúas ás saíu xirando do seu sitio. O problema veu cando logo duns segundos, este elemento cambiou de orientación e púxose a xirar noutro sentido como se de maxia negra se tratase. O cambio de orientación na rotación dun obxecto que en principio non estaba a xirar nese eixe é o que actualmente se denomina como **efecto Dzhanibekov** ou tamén **teorema da raqueta de tenis**.

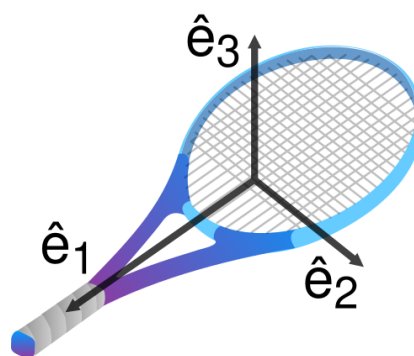


Figura 2: Eixes principais dunha raqueta de tenis.

No noso día a día podémolo visualizar facilmente, por exemplo, se colles o teu tubo de pasta de dentes, o

agarras dende o lado oposto á tapa (co logo cara arriba) e o lanzas sobre si mesmo, se tes a maña necesaria (moita) para volvelo agarrar, verás que agora está boca abaixo. Este fenómeno é moito máis visible nas raquetas de tenis, de aí o seu nome. Un posible efecto secundario é que o coñecedor do fenómeno vai pasarse unha semana lanzando obxectos co fin de comprobalo, e co fin de evitalo, imos tentar explicar a física do asunto.

A física do fenómeno: Por que?

Co obxectivo de explicar o porqué deste fenómeno temos que desempoar os nosos apuntamentos de Mecánica Clásica II e recordar que o movemento xiratorio dun obxecto (sólido ríxido en termos físicos) depende principalmente da dirección en que xiremos o corpo e o “esforzo” que supón manter a rotación neste eixe. É dicir, custa menos enerxeticamente xirar un cilindro sobre o seu eixe axial que se o xiramos sobre un eixe perpendicular a este coa mesma velocidade angular. As ferramentas matemáticas que nos dan esta información son o vector de velocidade angular ($\vec{\omega}$) e o tensor de inercia ($\mathbb{I}$). Pero aínda queda a parte máis importante: obter o movemento do obxecto (as ecuacións do movemento), que se conseguen unha vez se resolvan as ecuacións de Euler que relacionan as compoñentes da velocidade angular e do tensor de inercia (tamén chamados momentos de inercia) nun determinado sistema de referencia. Como estamos a traballar nun espazo de 3 dimensións, as compoñentes da velocidade angular e momentos de inercia tamén serán 3, por simplicidade: $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ e I_1, I_2, I_3 .

En principio, este sistema de ecuacións diferenciais pode ser sinxelo de resolver se o obxecto é moi simétrico, pero este non é o caso da porca ou da raqueta de tenis, polo que temos que esforzarnos máis para obter información destes movementos. Como xa adiantamos anteriormente, se consideramos un xiro maioritario nun dos eixes principais e xiros minoritarios nos outros eixes, chegamos a que as ecuacións de Euler nos din que o movemento naquel eixe principal asociado ao momento de inercia intermedio ($I_1 > I_2 > I_3$, por exemplo) é inestable, feito que explica a aparición do efecto Dzhanibekov. *Pero entón non temos unha solución analítica para o movemento?* Si existe, o problema é que involucran ferramentas matemáticas máis profundas, como as funcións elípticas de Jacobi [4] ou o elipsoide de Poincot [1], polo que non imos entrar en detalles.

Aplicacións e consecuencias: Apocalipse?

Unha das razóns polas que o goberno soviético ocultou este fenómeno foi principalmente polo medo a que a Terra, ao ser un corpo que non é perfectamente simétrico, puidese sufrir este mesmo efecto, o que, evidentemente, sería catastrófico. Non obstante, a masa da Terra está disposta tal que xira sobre o seu eixe de menor inercia e polo tanto, de forma estable, evitando a apocalipse. Igual que coa Terra, ocorre o mesmo cos demais planetas, polo que é xusto preguntarnos por que os planetas xiran sobre o seu eixe de menor inercia e isto é consecuencia directa da conservación do momento angular herdado do disco protoplanetario que formou o Sistema Solar. Aínda así, detectáronse unha serie de lúas orbitando aos planetas gasosos que si amosan este efecto e, máis interesante aínda, publicouse recentemente que unha variedade de púlsar chamado magnetar tamén pode sufrir este mesmo efecto por culpa do seu campo magnético extremo e provocar ondas gravitacionais [2]. Finalmente, tamén se teorizou coa posibilidade de empregar este efecto para a construción de naves que aproveiten o fenómeno para cambiar o sentido da viaxe, o que reduciría considerablemente o peso e o combustible necesario para estas misións [3].

Referencias

- [1] L. Van Damme, P. Mardešić e D. Sugny. “The tennis racket effect: A mathematical description”. En: *Physica D: Nonlinear Phenomena* 338 (2017), pp. 17–27. ISSN: 0167-2789. DOI: [10.1016/j.physd.2016.06.003](https://doi.org/10.1016/j.physd.2016.06.003).
- [2] E. M. Kantor e M. E. Gusakov. “The Dzhanibekov Effect as a Possible Source of Magnetar Activity”. En: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 522.4 (2023), pp. 5146–5154. DOI: [10.1093/mnras/stad1308](https://doi.org/10.1093/mnras/stad1308).
- [3] Takeyuki Ono. “A Comprehensive Study of the Dzhanibekov and Tennis Racket Phenomena”. Tese de mestrado. University of California, San Diego, 2022. URL: <https://escholarship.org/uc/item/5vc9b9jp>.
- [4] Edward John Routh. *The Advanced Part of A Treatise on the Dynamics of a System of Rigid Bodies*. Macmillan e Co., 1892. URL: <https://archive.org/details/advancedpartoftr00routrich>.



Memorias de Moscova

Carlos Merino Gayoso

*Dpto. Física de Partículas - Facultade de Física, IGFAE
Universidade de Santiago de Compostela*

En homenaxe a Alexei B. Kaidalov

O estudo da Física Hadrónica e da interacción forte responsable de manter os nucleóns (protóns e neutróns) dentro do núcleo atómico e os quarks (as partículas fundamentais que senten esta interacción) confinados nos hadróns ten sido unha das liñas de investigación máis importantes na Física dende o fin da Segunda Guerra Mundial e durante estas primeiras décadas do século XXI. Os avances asombrosos neste campo débense tanto ao traballo teórico máis fundamental e destacado, como aos fitos experimentais acadados polas grandes colaboracións experimentais internacionais que en laboratorios como o Centre Européen pour la Recherche Nucléaire (CERN), de Xenebra (Suíza), desafían cada día os límites tecnolóxicos e de obtención e análise de datos. Esperamos que nos conduzan a novos horizontes e retos científicos, entre eles o da obtención sistemática e completa descrición dun novo estado da materia, o plasma de quarks e gluóns (QGP), unha fase na que os quarks e gluóns están deconfinados, e que recupera o estado da materia no universo instantes despois do Big-Bang e antes da formación da materia hadrónica.

O grupo de Fenomenoloxía do Departamento de Física de Partículas e do Instituto de Física de Altas Enerxías (IGFAE) da Universidade de Santiago de Compostela leva traballando moitos anos no desenvolvemento de modelos fenomenolóxicos que permitan avanzar na predición e descrición dos datos experimentais dende a perspectiva teórica da Cromodinámica Cuántica (QCD). Esta é a teoría cuántica de campos baseada no grupo de Lie non-abeliano $SU(3)$, que describe a interacción forte no Modelo Standard no que se codifica o coñecemento certo que, hoxe en día, co consenso da comunidade científica, e ratificado polo experimento, temos da realidade física e material do Universo.

En moitas ocasións, este labor de investigación das/os físicas/os do grupo de Santiago de Compostela tense levado, e segue a levarse a cabo agora mesmo, en colaboración con facultades, laboratorios e centros de investigación destacados de moitos outros países como Alemaña, Armenia, China, Estados Unidos de América, Francia, Portugal, Ucraína, etc.

Neste senso, unha colaboración especialmente frutífera ten sido a desenvolvemento con grupos da antiga Unión Soviética, berce dunha das grande escolas e tradicións

da Física do século XX, apoiada nalgúns das figuras máis insignes da historia da Física, como Lev Davidovich Landau, que tiveron que levar adiante o seu labor de investigación e maxisterio nunhas circunstancias vitais marcadas por uns tempos difíciles e moitas veces trágicos.

Unha figura capital na Física Hadrónica desta escola rusa foi Alexei Borisovich Kaidalov (1940-2010), do Instituto de Física Teórica e Experimental (ITEP), de Moscova. Coñecín persoalmente a Alexei Kaidalov durante os últimos anos da década dos 80 do século pasado, durante a preparación da miña tese de doutoramento baixo a dirección de Alfons Capella (o Profesor Carlos Pajares era codirector da tese na USC), no Laboratoire de Physique Théorique et des Hautes Énergies (LPTHE) da Université de Paris-Sud, Paris XI, en Francia, onde Alexei realizaba unha estadia de investigación para traballar con Alfons e con Jean Tran Than Van. Lembro que, dende o primeiro momento, Alexei me causou unha grande impresión, que se viu reforzada pola paciencia e o tempo que investiu en discutir de Física co mozo estudante de doutoramento que era eu nese momento.



Figura 1: Alexei B. Kaidalov, Carlos Merino e Konstantin G. Boreskov durante unha pausa para o café/té no ITEP de Moscova (Rusia), nalgún momento en xaneiro-febreiro de 1993 (foto do arquivo de Carlos Merino).

Algún tempo despois da defensa da miña tese de doutoramento, Alexei veu a Compostela para participar, xunto con Konstantin G. Boreskov e o gran Karen A. Ter-Martirosian (alumno de Landau e mestre de Alexei, pero tamén de Gribov, Polyakov, Migdal, Zamolodchikov, e tantos outros), no XXII International Symposium

on Multiparticle Dynamics, organizado polo Profesor Carlos Pajares. O feito de que físicos con tanta sona e dunha institución tan prestixiosa como o ITEP estivesen na nosa Facultade resultou moi inspirador nese momento para as/os novas/os doutoras/es que estabamos a comezar as nosas carreiras científicas. Durante a conferencia, Alexei e Konstantin invitáronme a visitar ITEP, onde pasei un mes en xaneiro-febreiro de 1993. Ademais da extraordinaria experiencia de estar naqueles tempos nunha institución tan importante na historia da física teórica do século XX e de poder apreciar de primeira man o legado de figuras extraordinarias como Isaak Yakovlevich Pomeranchuk (do que recibe o seu nome o Pomerón, a traxectoria de Regge cos números cuánticos do baleiro que explica o aumento da sección eficaz hadrónica coa enerxía), do que Alexei foi o último alumno de doutoramento, puiden gozar dunha introdución entrañable á cultura rusa e das invitacións a compartir vodka e sakuska (os entrantes fríos que se serven como parte da comida imprescindible para acompañar a inxesta do vodka).

Vodka é o diminutivo da palabra rusa *voda*, que significa auga. O vodka foi durante moito tempo un pilar económico fundamental do sistema tsarista, mais a finais do século XIX, a produción masiva sen ningún control, nin no procedemento nin nos ingredientes, deu lugar a unha crise de falecementos, casos de cegueira, etc. que forzara ao Tsar a tomar medidas, aínda coa perda que isto podía causar ás finanzas do estado e da casa imperial. Como consecuencia desta decisión, encargóuselle a Dmitri Ivánovich Mendeléyev que atopase un método para fixar a produción regrada e evitar a proliferación de vodkas nocivos para a saúde. Mendeléyev descubriu que se se lle prendía lume a estas bebidas alcohólicas destiladas, estas ardían por enriba dos 40º de alcohol e estableceu este criterio para definir o vodka legal, que dende ese momento non pode ter unha concentración máis grande de alcohol. A partir de entón, os funcionarios do estado visitaban as granxas e as destilerías nas que se producían a bebida destilada e simplemente lle prendían lume: se a concentración de alcohol era superior aos 40º o líquido ardía e o destilador perdía o que producira. O que non ardía era o que despois a xente podía beber, pero afeitos a concentracións de alcohol moito máis grandes, ao catalo o bebedor os rusos reaccionaban decindo vodka! (auguiña!). Sexa como for, a inmensa maioría dos rusos concordan en que a Táboa Periódica foi a segunda contribución máis importante de Mendeléyev á Humanidade (a primeira foi, sen dúbida, o vodka).

Nunha desas ocasións nas que fun invitado a unha reunión no apartamento dun dos membros do ITEP para

falar, beber vodka e comer sakuska, lembro que cando chegabamos ao lugar do encontro a media tarde, despois de saír do laboratorio, Konstantin G. Borekov mais eu faciamos os últimos metros a pé, a temperatura era moi baixa (varios graos por debaixo de cero graos Celsius), e a sensación térmica era de moito frío. Despois, ao cabo de varias horas, xa de noite, arredor da medianoite, ao saírmos do edificio para coller o último metro de volta a Profsoiuznaia (Unións Profesionais-Sindicatos), a estación no suroeste de Moscova máis preta á residencia na que me aloxaba, aínda que a temperatura era moito máis baixa e o aire era glacial, tiven a impresión de non sentir tanto frío como á chegada e comenteillo a Borekov que, cun sorriso na boca e alzando o dedo índice da man dereita cuberta pola luva, díxome: "Querido Carlos, agora xa entendes por que os rusos bebemos vodka!".

Máis tarde, a principios de 1994, cando eu estaba a realizar un postdoc no LPTHE, Alexei veu pasar uns meses no laboratorio. A súa presenza tivo un impacto inmediato na actividade investigadora do grupo dirixido por Alfons Capella, o que se traduciu na publicación de varios papeis adicados á descrición da física de baixo- x e publicados en revistas internacionais de primeiro nivel, e dos que tiven o privilexio de ser coautor.

Nestes anos en París, que Alexei visitou máis veces e durante moitos anos despois, coincidín con Alexei en moitas conferencias e *meetings*, en particular en Les Rencontres de Moriond, organizados cada mes de marzo por Jean Tran Than Van nos Alpes, ben en Les Arcs ou Méribel (Francia), ben en La Thuile (Italia), e onde as fazañas no esquí de Alexei case igualaban a brillantez das súas charlas de Física. Sempre me admirou como Alexei era quen, despois de adicar as tardes a esquiar e de pasar moitas horas a discutir coas/os participantes teóricos e experimentais na conferencia que viñan pedir-lle a súa opinión e o seu consello sobre os problemas máis diversos nos que estaban a traballar, de preparar unha charla final tan precisa e completa, que proporcionaba unha imaxe clara e total da actividade e dos resultados científicos presentados durante a conferencia, e das súas perspectivas de futuro. É ben coñecida a anécdota de cando no instante despois de finalizar e enviar para a súa publicación, con outros colegas, un papel moi importante que tiña requirido un esforzo moi grande, mentres os outros colegas respiraban relaxados, Alexei, sen solución de continuidade, simplemente se dirixiu ao seu escritorio, colleu (antes da existencia dos ordenadores persoais) papel e lapis e comezou a escribir, impasible, o seguinte artigo, que tiña xa redactado de principio a fin na súa cabeza.

Colaborei con Alexei durante case vinte anos, en funcións de estrutura, disociación difractiva, difracción



hard, produción de barións estraños, funcións de estrutura nuclear e demais, e somos coautores dunha decena de papeis, pero son plenamente consciente de que esta bagaxe representa unha parte mínima do labor titánico e dos logros fundamentais que Alexei Kaidalov ten achegado á Física de Partículas. Posiblemente, Alexei foi o maior experto mundial en difracción, e unha lista moi breve das súas contribucións máis importantes podería ser a seguinte: **1.** A consideración das desintegracións non-leptónicas e radioactivas de hiperóns; **2.** A identificación das sinaturas dos cortes running de reggeóns nos datos experimentais; **3.** A reformulación do modelo de intercambio dun pión no marco do enfoque reggeónico e as consecuencias cuantitativas na descrición dunha gran cantidade de datos experimentais; **4.** A análise dos procesos de disociación difractiva a altas enerxías; **5.** O desenvolvemento das regras de suma para a dispersión reggeón-hadrón, que permite predicir algunhas resonancias de spin elevado; **6.** A formulación do Modelo de Cordas Quark-Gluón (QGSM) para a multiprodución a enerxías altas e moi altas, que permitiu a descrición cuantitativa dunha gran cantidade de datos experimentais en colisións hadrón-hadrón, hadrón-núcleo e núcleo-núcleo; **7.** A descrición da produción de partículas en colisións de ións pesados e dos efectos de apantallamento nuclear inelástico; **8.** A análise dos quarks pesados a da produción de pares de leptóns en colisións sobre albos nucleónicos e nucleares.

Ao longo da súa extraordinaria carreira, Alexei Kaidalov foi autor e coautor de máis de trescentos artigos científicos publicados, dos que máis de vinte teñen cen ou máis citas, mantivo colaboracións con moitos grupos doutros países e foi membro da colaboración experimental ALICE, do CERN. As/os profesoras/es Néstor Armesto, Elena González Ferreiro e Carlos A. Salgado, do Departamento de Física de Partículas da Facultade de Física e do IGFAE da USC, traballaron tamén con Alexei Kaidalov e son coautoras/es con el de artigos publicados en revistas especializadas.

Alexei Kaidalov foi un mestre respectado e admirado por colegas e amigos de todo o mundo, primeiro polas súas moitas e moi importantes, a miúdo fundacionais, orixinais achegas ao campo da Física de Partículas, pero tamén en especial pola súa gran xenerosidade ao trans-

mitir ás novas xeracións de físicas e físicos, a través de explicacións claras, intuitivas e rigorosas, o seu profundo coñecemento dos principios e regras que rexen os procesos físicos. Ademais da súa adicación en corpo e alma á Física, Alexei foi unha persoa optimista (marabilloso cantante do repertorio popular ruso), de mente cultivada e aberta, que valoraba moito a familia e a amizade e que estaba moi orgulloso do seu país e da súa cultura¹.

Colaborar con Alexei Borisovich Kaidalov ten significado para min, ao poder aproximarme á excelencia na Física e a apreciar un exemplo de ética no traballo e de integridade na vida, que nos debe guiar na seriedade e xenerosidade cara aos demais no noso labor académico e de investigación e que, ademais, nos debe reafirmar no convencemento da valía das/os graduadas/os na Facultade de Física da USC para, a través do traballo persoal, colaborar activamente de xeito positivo coas físicas e físicos de calquera outra universidade ou centro de investigación do mundo.

Agradecementos

O autor quere felicitar os membros da DAF polo seu traballo a prol da vida e actividade da Facultade, e ao estudantado pola iniciativa de recuperar a revista da Facultade, plataforma na que compartir experiencias e inquiredanzas, alumnas/os, profesoras/es e persoal de administración e servizos, que desexo se vexa referendada polo éxito. Agradezo a Sebastián Táboas e a todo o Comité Editorial da revista a súa invitación a contribuír con este artigo neste segundo número e a súa paciencia á hora de ser indulxentes co prazo de entrega do mesmo, e a Belén Merino a súa revisión do texto. Espero que este segundo número de *Momentum* teña continuación en moitos máis números no futuro.

Referencias

- [1] C. Merino. “Tribute to Alexei Borisovich Kaidalov”. En: *Journal of Physics: Conference Series* 607.1 (abr. de 2015), p. 012001. DOI: [10.1088/1742-6596/607/1/012001](https://doi.org/10.1088/1742-6596/607/1/012001). URL: <https://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/607/1/012001>.

¹Curiosamente, cando no ano 2013, os organizadores do *1st International Kaidalov Workshop on the Phenomenology of High Energy Particle Physics*, adicado á memoria de Alexei, me pediron que escribira unha lembranza [1] (en inglés) sobre el, os amigos e colegas rusos que leron o manuscrito antes da súa publicación pedíronme que non utilizase o termo cosmopolita, que nas demais linguas ten unha connotación positiva e eu empregábaa como un eloxio, porque en ruso, e dende os primeiros anos da Revolución Bolxevique, *kosmopolitichnyy* ten o sentido negativo de axente estranxeiro, persoa decadente ou traidor.

Viaxeiros espaciais. Oda á Voyager 1

Celia Álvarez Álvarez

De como a Voyager 1 partiu dende a Terra ata o espazo profundo.

Na beira do océano cósmico.

«A superficie da Terra é a beira do océano cósmico. Dela aprendemos a maior parte do que sabemos. Recentemente metémonos un pouco no mar, vadeando o xusto para mollarnos os dedos dos pés ou, como moito, para que a auga nos chegase aos nocellos. A auga parece convidarnos a continuar. O océano chámamos. Hai unha parte de nós que sabe que vimos de alí. Desexamos volver. Non creo que estas aspiracións sexan irreverentes, mesmo se poden desagradar os deuses, sexan cales foren os posibles deuses.»

Carl Sagan, *Cosmos* (adaptación).

A misión de investigación espacial Voyager, fundada pola NASA, está constituída por dúas sondas interestelares irmás: a Voyager 1 e a Voyager 2.

Durante a travesía do Voyager 1 tiveron lugar investigacións exploratorias dos sistemas planetarios xoviano e saturniano e do medio interplanetario. O estudo abrangueu a mellora na nosa comprensión das dinámicas atmosféricas de Xúpiter e Saturno, dos seus campos gravitatorios, das súas magnetosferas, das interaccións dos satélites con todos estes factores, das composicións atmosféricas e superficiais de satélites como Titán ou os catro satélites galileanos: Ío, Europa, Ganímedes e Calisto, da Gran Mancha Vermella de Xúpiter ou dos aneis de Saturno.

Para iso, a Voyager 1 levou a bordo instrumentos para desenvolver once investigacións científicas, entre elas: o *Imaging Science System* (ISS), que permitiu capturar espectaculares imaxes do sistema solar; o *Infrared interferometer spectrometer and radiometer* (IRIS), que permitiu obter perfís de enerxías e temperaturas; o *Tri-axial Fluxgate Magnetometer* (MAG), que investiga os campos magnéticos de planetas e do espazo interplanetario; o *Low Energy Charged Particle Instrument* (LECP), que mide propiedades de electróns ou ións de plasma detectados; ou o *Plasma Wave Subsystem* (PWS), que tamén se utiliza no estudo de magnetosferas e da interacción local onda-partícula. Actualmente só o MAG, o LECP e o PWS se atopan activos.

A sonda obtén a súa enerxía de tres xeradores termoeléctricos de radioisótopos, que funcionan grazas á desintegración do óxido de plutonio. Estes xeradores converten calor producido na desintegración radioactiva en

enerxía eléctrica. A potencia dos xeradores diminúe co tempo debido á semivida do combustible e á degradación dos termopares, polos cales se converte enerxía térmica en eléctrica mediante o efecto Seebeck. Durante a navegación utilízanse sinais do rastreador solar e estelar para conservar a antena de radio do Voyager orientada cara á Terra activando pequenos propulsores do sistema de propulsión da Voyager.

Viaxe. Navegando polo sistema solar.

Dúas naves Voyager ían ser lanzadas durante a ventá voltas a esa expresión dun mes que comezaba a finais de agosto de 1977, coincidindo cun aliñamento especial dos planetas exteriores que permitiría o uso dos seus campos gravitacionais para cambiar a velocidade e dirección da sonda e así facilitar a súa viaxe dun cara ao seguinte.

Orixinalmente programada para partir doce días despois da Voyager 2, a Voyager 1 tivo a súa engalaxe a bordo do vehículo de lanzamento *Titan IIE* tras ser aprazado en dúas ocasións para previr os problemas que sucederan tralo lanzamento da Voyager 2. A partida definitiva da sonda sucedeu o 5 de setembro de 1977 ás 12:56:00 UTC dende a Estación da Forza Espacial de Cabo Cañaveral (Florida, EEUU), cun lanzamento impecable e preciso. O 6 de setembro, un día despois da partida, a Voyager despediuse da Terra e da Lúa mandando a súa primeira foto do noso fogar e o seu único satélite.

Pouco despois da saída da Voyager da órbita terrestre todos os instrumentos científicos acendérose para aproveitar as características que se comparten a Terra e a Lúa con Xúpiter, Saturno e os seus satélites; realizáronse observacións útiles para a súa calibración. Trinta días despois do lanzamento comeza oficialmente a fase de cruceiro ata o encontro con Xúpiter. Os instrumentos para o estudo de campos e partículas na Voyager investigaron durante este tempo a rexión interplanetaria Terra-Xúpiter. A Voyager 1 adiantou á Voyager 2 tras adentrarse no cinto de asteroides.

Oitenta días antes do encontro con Xúpiter comezaron as observacións do planeta e dos satélites galileanos. A esta distancia a cámara ISS da Voyager pode obter unha resolución comparable ou mellor que a alcanzable na Terra. A Voyager 1 alcanza o seu achegamento máis próximo a Xúpiter o 5 de marzo de 1979: a sonda so-



brevoou o satélite xoviano Amaltea, descubriendo a súa forma alongada; seis horas despois, a Voyager atoparase a uns 350.000 km do centro de masa de Xúpiter para logo sobrevoar Ío, Europa, Ganímedes e Calisto.



Figura 1: Xúpiter cos satélites Ío (esquerda) e Europa.

Descóbrese o sistema xoviano de aneis e dúas lúas, Thebe e Metis, desvélase que a Gran Mancha Vermella se trata dunha grandísima tormenta que recorda a un ciclón e avístanse e detéctanse os primeiros volcáns activos e o primeiro lóstrego máis aló da Terra. A Voyager 1 comeza a súa viaxe cara a Saturno deixando ao redor de 180.000 fotografías do sistema xoviano, incluíndo películas a cor das dinámicas das nubes xovianas.

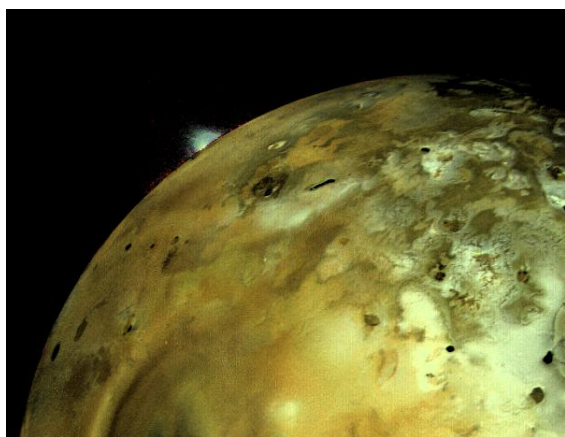


Figura 2: Explosión do volcán Loki en Ío.

O 9 de novembro de 1980 sucede o encontro coa lúa máis grande de Saturno, Titán, e co propio Saturno. Descóbreanse Atlas, Prometeo e Pandora, tres “pequenas” lúas das máis de duascenas que actualmente se coñecen orbitando este xigante gasoso. As órbitas de Prometeo e Pandora ao redor dos aneis F de Saturno confirman a teoría da existencia de “satélites pastores” que producen ocos nos aneis e fixan gravitacionalmente os seus bordos. Recóllense vistas da brillante superficie de Encélado e obsérvanse formas enigmáticas nos aneis de Saturno que se pasarían a denominar raios, cuxa orixe non se comprende completamente na actualidade.



Figura 3: Saturno con Tetis (arriba-dereita) e Dione. As sombras dos aneis e de Tetis proxéctanse nas nubes do planeta.

Life on Titan?

Titán é a segunda lúa máis grande do sistema solar tras Ganímedes e tamén é o único lugar do sistema solar á parte do noso planeta en cuxa superficie se pode atopar líquido estable en forma de ríos, lagos e mares. A súa densa atmosfera neboenta e dourada está composta principalmente por nitróxeno e pequenas cantidades de metano e etano. Os sinais de radio recibidos da Voyager 1 permitiron descubrir a existencia dunha superficie xeadada en Titán, baixo a cal existe un océano formado principalmente por auga que podería albergar formas de vida, quizais a escala microscópica. A misión *Dragonfly* enviará unha aeronave rotatoria robótica, será lanzada en xullo de 2028 e chegará a Titán en 2034.



Figura 4: Concepción artística dunha tormenta de po en Titán con Saturno de fondo.

Misión estendida. Saíndo do sistema solar.

O 14 de novembro de 1980 comeza a misión estendida da Voyager 1. Recibindo un impulso gravitacional, a sonda comeza a afastarse do plano da eclíptica do sistema

solar e dez anos máis tarde, o 14 de febreiro de 1990, toma o *Retrato de familia* do sistema solar a petición do astrónomo Carl Sagan: un mosaico composto de sesenta cadros individuais, as últimas imaxes capturadas pola Voyager 1 antes de apagar a súa cámara ISS para sempre. A Voyager 1 xa non voará preto de ningún outro obxecto astronómico en todo o tempo no que durará o seu subministro enerxético polo que se prioriza o uso deste en tarefas de recolección de datos do vento solar e do espazo interestelar. A estas alturas, os febles sinais das sondas Voyager son capturadas pola *Deep Space Network* da NASA, con complexos en Goldstone (California), Madrid e Canberra (Australia) que albergan grandes antenas de ata setenta metros de diámetro.

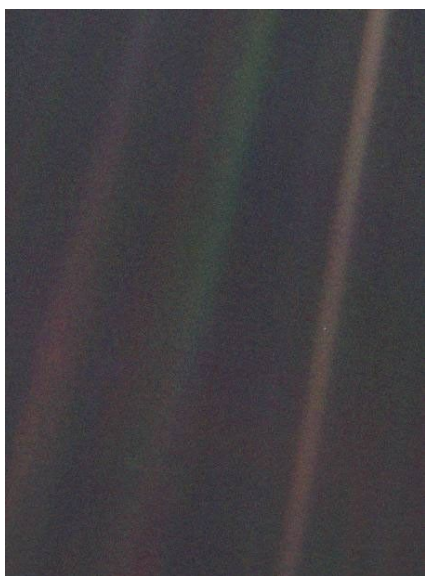


Figura 5: *Pale Blue Dot*: imaxe da Terra tomada pola Voyager 1 para o *Retrato de familia*. A Terra, vista a unha distancia de seis mil millóns de quilómetros, aparece coma un pequeno punto azulado na franxa vermella da dereita.

O 17 de febreiro de 1998 a Voyager 1 sobrepasa a distancia do Pioneer 10 e convértese no obxecto feito polos humanos máis afastado da Terra, a unha distancia de dez mil millóns de quilómetros. En decembro de 2004 a Voyager alcanza a fronte de choque de terminación. Este é o límite coa última gran rexión de dominio do vento solar, a heliosfera. O 25 de agosto de 2012 a Voyager 1 convértese no primeiro obxecto humano no espazo interestelar atravesando a fronteira da heliosfera, coñecida co nome de heliopausa. A Voyager 1 “escoitou” os *sons interestelares*. Vibracións do denso plasma interestelar permitiron medir por primeira vez a densidade do medio interestelar. Grazas á nosa tecnoloxía podemos transformar esas vibracións eléctricas do plasma en zumbidos agudos e inqedantes que provocan calafríos.

Entre 2021 e 2024 a Voyager enfrontou varios desafíos relacionados coa corrupción de datos e a súa transmisión á Terra, probablemente pola degradación dos seu aparellos tras décadas de exposición á radiación espacial. Deste ano a unha década, espérase que a Voyager xa non dispoña de enerxía para alimentar ningún dos instrumentos a bordo e perderemos o seu sinal para sempre.

Message in a bottle.

Agárdase que a Voyager 1 entre na nube de Oort nuns trescentos anos. Esta é a rexión de procedencia dos cometas de período longo e está situada a case un ano luz do Sol e a un cuarto da distancia deste a *Próxima Centauri*, a estrela máis próxima ao sistema solar. A sonda tardará uns trinta mil anos en saír dela sen rumbo particular cara a ningunha estrela. Estará destinada a errar por toda a eternidade a través da Vía Láctea. Pasará moito tempo viaxando, lonxe de ningunha illa estelar e portando o *Golden Record*. As Voyager son un primeiro grito cheo de esperanza que a humanidade lanzou dende a beira do océano cósmico para darse a coñecer, unha mensaxe que di *hai alguén aí?*

«Quizais os rexistros nunca sexan interceptados. Quizais ninguén en cinco mil millóns de anos os atope. Cinco mil millóns de anos é moito tempo. En cinco mil millóns de anos, todos os seres humanos extinguiranse ou evolucionarán noutros seres, ningún dos nosos artefactos sobrevivirá na Terra, os continentes alteraranse ou destruíranse de forma irrecoñecible e a evolución do Sol queimar a Terra ata convertela en ‘crumble’ ou a reducirá a un remuíño de átomos.

Lonxe do fogar, intactas por estes acontecementos remotos, as Voyagers, portadoras das lembranzas dun mundo que xa non existe, seguirán voando.»

Carl Sagan, *Pale Blue Dot* (adaptación).

Referencias

- [1] Oliver Berry et al. *El Universo: Guía de Viaje*. lonely planet, 2019.
- [2] NASA JPL. *Voyager 1 – Spacecraft Images – NASA Photojournal*. Accessed: 2025-04-28.
- [3] NASA NSSDC. *Voyager 1 Spacecraft Display*. Accessed: 2025-04-28.
- [4] Carl Sagan. *Cosmos*. Editorial Planeta, 2014.
- [5] NASA Science. *Voyager Mission Timeline*. Accessed: 2025-04-28.



Robert Hooke. Nunca vaias contra Newton

Pablo Duarte López

Sobre como se pode pasar de ser a gran figura da túa época a ser case esquecido.

A todos nesta facultade sóannos os grandes científicos da historia, levamos escoitando falar dalgúns deles dende o instituto, ou incluso antes: Newton, Hooke, Boyle e tantos máis levan anos roldando nas nosas mentes, mais coñecemos realmente algo deles á parte dun par de fórmulas co seu apelido? Se quizais nunca vos parastes a pensar na vida que hai detrás destas figuras, pódovos asegurar que agochan historias moito máis interesantes do que un imaxinaría. Neste pequeno artigo mostrarei-vos a vida de Robert Hooke porque, crédemme, fixo moito máis ca estudar resortes.



Figura 1: Retrato póstumo de Robert Hooke por Rita Greer. Fonte: Wikimedia Commons

Quen foi Robert Hooke?

Seguro que este científico inglés non é ningún descoñecido para vós, despois de todo, se estades nesta facultade nalgún momento tivestes que ver a famosa lei da elasticidade que leva o seu nome: $F = -k \cdot \Delta x$. Malia que sexa a principal razón pola que é coñecido pola maioría de nós a día de hoxe, a súa contribución á ciencia do século XVII non foi cousa menor. Dende o seu traballo como principal axudante nos laboratorios de Boyle ata a súa inestimable axuda á hora de reconstruír a cidade tralo grande incendio de Londres de 1666, pasando tamén pola astronomía e a cronometría; Hooke deixou a súa pegada nas distintas áreas da ciencia e da enxeñaría

do momento e ata chegou a ser nomeado presidente da Royal Society.

A súa *magnum opus*, *Micrographia*, supón un antes e un despois no que a microscopía se refire, nela detállanse cincuenta e sete observacións realizadas cun microscopio que o mesmo Hooke construíu, acompañadas por detallados debuxos. Quizais, a achega máis destacada (e a razón pola que o coñecerán os compañeiros e compañeiras da facultade de bioloxía) sexa que en *Micrographia* é onde se emprega por primeira vez o término “célula” ao describir unhas estruturas presentes nun anaco de cortizo. Esta obra, ao estar escrita en inglés, na lingua vernácula (algo totalmente inusual para a época), e non en latín, foi un escrito que recibiría a atención dos seus coetáneos facilitando a accesibilidade; converteuse no primeiro *best seller* científico de todos os tempos.

Rivalidade con Newton

Sereivos franco, se comecei a facer un artigo sobre a vida de Hooke non foi polas súas múltiples achegas á ciencia, por moi interesantes e variadas que estas fosen, senón pola continuada rivalidade que el tivo con nin máis nin menos que Isaac Newton.

Todo comezou cando, pouco despois da publicación de *Micrographia*, Newton comezou os seus propios experimentos coa luz, en concreto, o que fixo botar chispas foi o estudo por parte de Newton do mesmo fenómeno que estudara e describira Hooke por primeira vez na súa obra mestra. Este fenómeno trátase dunha serie de aneis concéntricos que xorden ao pór en contacto dúas superficies translúcidas, unha plana e outra curva.² Isto non suporía ningún problema de non ser porque Newton en ningún momento lle deu a Hooke o crédito que este merecía por ser el o descubridor do fenómeno. Foi así como iniciou a súa rivalidade, por unha banda, Hooke, esixindo o crédito que merecía; pola outra, Newton, demasiado orgulloso como para recoñecer que o seu traballo non foi totalmente orixinal. A situación escalou durante anos, ata que a Royal Society, organización á que ambos pertencían e da cal Hooke era presidente, viuse obrigada a intervir para evitar que caese a reputación da mesma, polo que fixo que ambos tiveran unha reconciliación pública. Foi neste contexto onde Newton, nunha carta a modo de desculpa, escribe a súa tan aclamada frase

²Curiosamente, este fenómeno coñécese como aneis de Newton, malia que non foi o primeiro en describilos.

«Se puiden ver máis aló, foi porque me atopaba sentado sobre os ombreiros duns xigantes».

Ben, paremos por un momento, porque isto foi o que me fixo escribir este artigo nun primeiro lugar. Para dar contexto, Robert Hooke era un home pequeno, corcovado e cunha deformación no lombo á raíz de diversos problemas na súa infancia. Pois ben, disque, cando Newton escribiu a frase antes mencionada, quixo tirar un último ataque público a Hooke, reconece que toma o coñecemento que achegaron os grandes sabios do pasado, eses “xigantes” dos que fala, pero nunca de alguén coma Robert Hooke, quen, fisicamente, era de todo menos xigante. Un pensaría que esta historia remataría aquí, cunha desculpa pública de ambos e Newton tendo a última palabra, pero non, non será así.

Trala súa morte

No momento en que morre Hooke, suceden dúas cousas: por unha banda, Newton convértese en presidente da Royal Society; pola outra, publícase *Opticks*, unha extensa obra escrita por Newton sobre óptica, a cal levaba varios anos sen publicar, agardando a morte de Hooke, para evitar calquera posible crítica por parte deste³. Por se non for pouco, durante o cambio da sede da Royal Society, supervisado por Newton, trasladáronse os cadros dos múltiples presidentes que esta tivera; curiosamente, o único que nunca volveu a aparecer foi o de Robert Hooke. Este era o único retrato que existía del, polo que non se conserva ningunha imaxe del en vida.

Trala morte de Hooke, a súa figura como gran científico foi desaparecendo pouco a pouco e as súas achegas

fóronse minimizando ou atribuíndo a outros durante os séculos posteriores. Non foi ata tempos relativamente recentes cando algúns científicos e historiadores comezaron a reivindicar de novo a importancia da súa figura na ciencia e na enxeñería, chegando a darlle o título de “O Leonardo da Vinci inglés”.

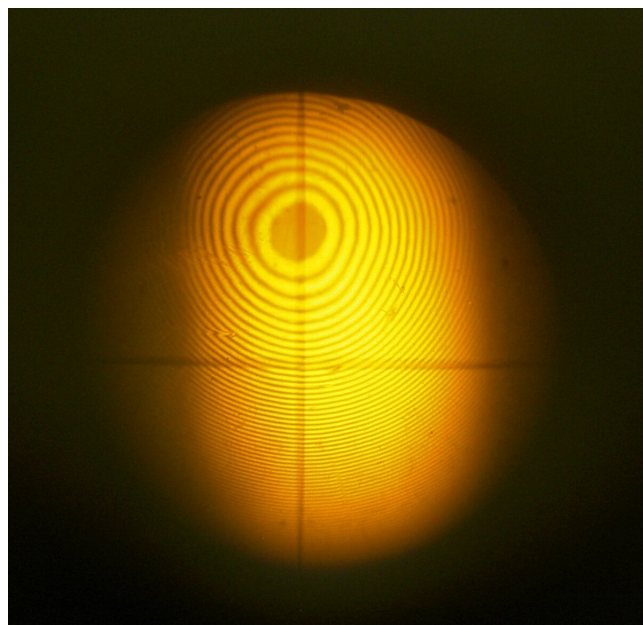


Figura 2: Exemplo dos *aneis de Newton*. Fonte: Wikipedia

Referencias

- [1] J. Gribbin. *Historia de la ciencia, 1543-2001*. SERIE MAYOR II. Crítica, 2004. ISBN: 9788484326076.

³Newton defendía un modelo corpuscular da luz mentres Hooke defendía o modelo ondulatorio, o que levou a máis debates entre eles.



Strike, you're out! Bombas, Heisenberg e un catcher

Santiago González Gómez

As vidas dun beisbolista e dun dos pais da Física Cuántica, cruzadas por unha historia de espías e o proxecto atómico da Alemaña nazi.

Heisenberg e o proxecto Uranio

Cando en setembro de 1939 estourara a Segunda Guerra Mundial, Werner Heisenberg, un dos pais da física cuántica, foi requirido polo goberno nazi xunto con outros destacados físicos alemáns. O estudo da fisión nuclear atopábase en auge e Alemaña quería estudar a viabilidade de construír unha bomba que empregase este novo campo como elemento destrutivo. Comezaba así o *proxecto Uranio*, o análogo alemán ao *proxecto Manhattan* estadounidense.

A posición de Heisenberg era delicada. Aínda que se opoñía ao réxime nazi, tamén era un fervente patriota alemán, e temía que unha derrota de Alemaña na guerra resultase nunha ocupación soviética de Europa, algo que consideraba bastante peor que o dominio nazi. Por outra banda, tampouco tiña moita elección sobre a súa participación no proxecto; non só pola posibilidade de perder o seu traballo, senón porque a súa relación con científicos xudeus antes da guerra facíao sospeitoso a ollos de moitos nazis.



Figura 1: Heisenberg e Bohr nun encontro en 1941. Fonte: Niels Bohr Archive.

Sexa como for, Heisenberg pasara dous anos investigando intensamente ata concluír, en 1941, que malia ser posible construír a bomba (tanto de uranio como de plutonio), esta levaría demasiado tempo e consumiría demasiados recursos alemáns. Heisenberg consideraba ademais que os rivais de Alemaña chegarían ás mesmas conclusións. Os líderes nazis aceptaron a súa opinión e o *proxecto Uranio* pasou a investigar a posibilidade de construír un reactor nuclear que producise enerxía eléctrica.

Para Heisenberg, o posible desenvolvemento dunha bomba nuclear supuña un dilema moral importante, así

que chegar a esta conclusión foi, dende logo, un alivio. Porén, a idea (ou mellor dito, o medo) de ter que construír unha bomba nuclear nun futuro nunca abandonou a súa cabeza. Aproveitando unha visita a Dinamarca, deixou caer ao seu vello mentor Niels Bohr as súas dúbidas morais sobre a produción de armamento atómico. Bohr creu que Heisenberg lle estaba a tender algún tipo de trampa deseñada pola Gestapo e preferiu cambiar de tema.

“O home máis intelixente do béisbol”

Para o ano 1942 e, ao outro lado do Atlántico, Os Estados Unidos iniciaban o seu propio programa atómico: o *proxecto Manhattan*. Pero remontémonos algo máis atrás no tempo...

En 1934, un equipo de *all-stars* do béisbol estadounidense fixo unha xira polo Xapón, onde o béisbol comezaba a ser un deporte cada vez máis popular. Xunto a todas as estrelas, viaxou co equipo un *catcher* mediocre, que levaba anos saltando de equipo a equipo na liga sen destacar especialmente: Moe Berg. Berg, de orixe xudía, ten sido descrito como “o beisbolista máis estraño da historia” ou “o home máis intelixente do béisbol”. Aínda que non era un xogador especialmente destacado, si era tremendamente astuto, e tiña unha habilidade innata para os idiomas, de aí que estudara a fondo polo menos sete diferentes. Precisamente, a razón pola que Berg viaxara ao Xapón en 1934 era pola súa capacidade para falar xaponés.

Cando Os Estados Unidos entraran na Segunda Guerra Mundial, Berg alistouse e pasou por varios destinos lonxe da fronte. En 1943, uniuse á OSS, a precursora da actual CIA, onde fora moi valorada a súa capacidade para os idiomas. Berg realizou primeiramente varias misións como espía en Iugoslavia, onde investigaba grupos partisanos que Os Estados Unidos consideraba apoiar.

Cara a 1943, Berg comezou a traballar no *proxecto Larson*, unha operación cuxo obxectivo inicial era reclutar a físicos italianos e levalos aos Estados Unidos para que colaborasen no *proxecto Manhattan* e outras misións armamentísticas. Berg acabou por percorrer varios lugares de Europa entrevistando a físicos, non só

para tentar convencerlos de que se mudasen aos Estados Unidos, senón tamén para obter información sobre Heisenberg. Os estadounidenses sospeitaban que Heisenberg dirixía un proxecto atómico para os alemáns, e despois de que Bohr, a quen os aliados sacaron de Dinamarca en 1943 e levaron ao Reino Unido para que colaborase con eles, comentase as conversacións que Heisenberg tivera con el en 1941; era indispensable determinar como de preto estaba o alemán de desenvolver a temida bomba. A OSS chegou a considerar a posibilidade de secuestralo, pero isto nunca chegou a suceder.

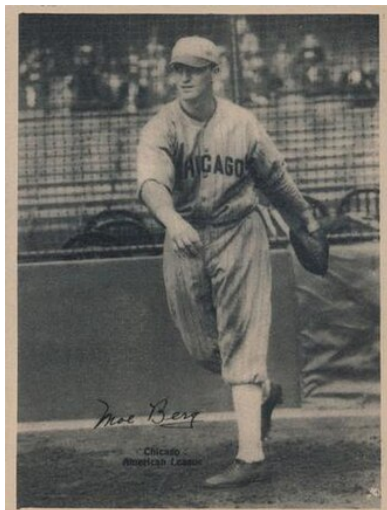


Figura 2: Cromo de Berg mentres xogaba para os Chicago White Sox. Fonte: Wikipedia.

En 1944, a OSS soubo que Heisenberg ía dar unha conferencia en Zürich, territorio neutral. A Berg, que por suposto falaba alemán, asignóuselle a misión de asistir á dita conferencia e tentar determinar se este estaba preto de construír a bomba atómica. Se o espía contase coa máis mínima sospeita de que Heisenberg supoñía un perigo, tiña ordes de levantarse no medio da conferencia e dispararlle.

Berg non só acudira á conferencia facéndose pasar por estudante de física, senón que tamén estivo presente nunha festa á que o teórico alemán asistira na súa estancia en Zürich. O beisbolista saíu do evento á vez que Heisenberg e entablou diálogo con el no camiño de volta; non houbo nada nestas conversas que fixese sospeitar a Berg. O patriota alemán admitira durante a festa que a guerra estaba perdida para os alemáns, algo que Berg xulgou que non diría alguén que estaba a piques de rematar unha bomba atómica. Tamén reflexionou que, aínda que tería sentido matar a Heisenberg en 1942 nos inicios dun suposto proxecto de bomba atómica alemá, para o 1944 xa sería demasiado tarde. Finalmente, decidiu non asasinar a Heisenberg e as súas vidas separáronse para non volver a atoparse nunca máis.

Unha granxa en Cambridge

Moito se ten discutido sobre o papel de Heisenberg no *proxecto Uranio*, considerando que o *proxecto Manhattan* si foi exitoso. De verdade tentou fabricar a bomba e simplemente non o conseguiu por incompetencia? Ou sabotou o *proxecto Uranio* por motivos morais, convencendo ao resto dos seus integrantes da imposibilidade de construír a bomba?

Esta dúbida tamén asaltou aos estadounidenses cando en 1945 capturaron a Heisenberg e o resto de físicos alemáns do *proxecto Uranio*. Todos eles foron trasladados á *Farm Hall*, unha mansión campestre inglesa preto de Cambridge que estaba infesta de micrófonos para espiar as súas conversas. O 6 de agosto, os aliados aseguráronse de que Heisenberg e os demais escoitasen a transmisión de radio do bombardeo de Hiroshima. Heisenberg inicialmente negouse a crer que a bomba fose atómica, argumentando que a masa crítica (a masa mínima de material radioactivo necesario para soste a reacción nuclear) necesaria para unha bomba desas características debía ser dúas toneladas polo menos, imposible de fabricar para os estadounidenses. Para decatarse do errado desta afirmación, nótese que a bomba detonada posteriormente sobre Nagasaki contiña 64 kg de uranio enriquecido.

Que ocorreu? Mentía Heisenberg ao réxime nazi dando un valor falso da masa crítica para impedir a fabricación da bomba? Non é tan sinxelo. Días despois, fixo os cálculos e expuxo aos seus compañeiros como cría que os estadounidenses fabricaran a bomba, estes cálculos resultaron ser moi correctos. Os físicos do *proxecto Manhattan* concluíron que o alemán simplemente *nunca antes realizara os cálculos* da masa crítica. Heisenberg estaba moito máis interesado no desenvolvemento dun reactor que no dunha bomba e, imaxinándose un valor desorbitado para a masa crítica, simplemente decidiu non facer os cálculos. Posiblemente prefería vivir no descoñecemento a afrontar o dilema moral da construción da bomba.

Dende logo, ás veces é abafador pensar como as decisións do individuo menos esperado son capaces de cambiar o rumbo da historia.

Referencias

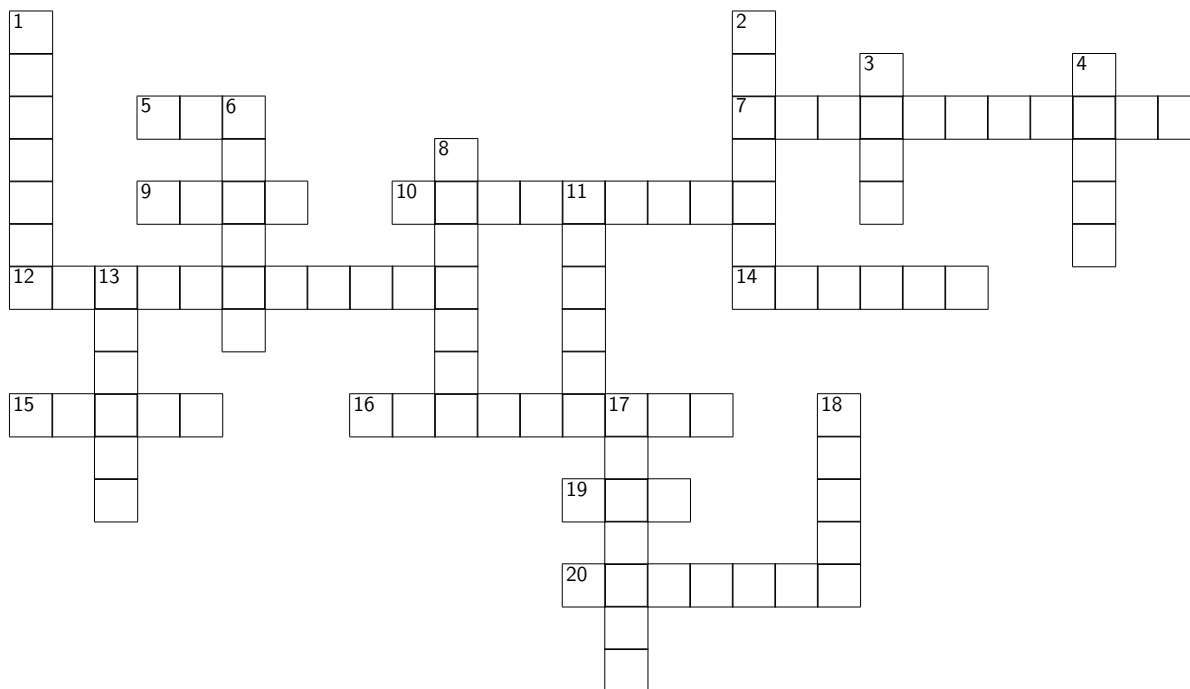
- [1] Nicholas Dawidoff. *The catcher was a spy: The mysterious life of Moe Berg*. Vintage, 2011.
- [2] Klaus Gottstein. *Werner Heisenberg and the German Uranium Project 1939 - 1945. Myths and Facts*. Set. de 2016. URL: <http://arxiv.org/abs/1609.02775>.



Pasatempos

Autoría múltiple

Encrucillado *Luis Arcas Morcillo*



Vertical

- 1 O legado de Foucault na facultade
- 2 Probablemente un peixe manchado
- 3 Centro de investigación europeo máis internacional
- 4 Son lunares ou diagramas
- 6 Ver dobre en cuántica débese a este efecto
- 8 Disposición atómica ordenada
- 11 Rama científica especializada no estudo da natureza e comportamento da materia, así como a forza e a enerxía
- 13 Canta enerxía?
- 17 Teno esta revista
- 18 Precede ao efecto non relativista

Horizontal

- 5 Onda e corpúsculo
- 7 Voltaxe = ... × Resistencia
- 9 Se non se sabe o que é, posiblemente é isto
- 10 O gran libro (polo menos en EM)
- 12 En esencia, todo son ... (pl.)
- 14 Físico nacido en Natividade
- 15 Afrodisíaco planeta
- 16 Elemento W
- 19 Unidade de masa atómica
- 20 Principio de ..., o primeiro de tres

Solucións en orde alfabética, ofuscadas co cifrado ROT13 (buscade en internet **rot13 decode** para ver as solucións):

PNHFN PREA PEVFGNY PHNAGB SNFRF SÍFVPN TEVSSVGUF VAREPVN VAGRAFVQNQR YHM
ZBZRAGB ARJGBA BFPVYNQBERF CBVFFBA CÉAQHYB HZN IRAHF IBYSENZVB MRRZNA ÉGRE

Exercicios para relaxarnos *Álvaro Pallas Otero*

(Fonte: @Ankxparch en Instagram)

$$\text{i) } \sum_{k=0}^{\infty} \frac{4(-1)^k}{2k+1}$$

$$\text{ii) } \lim_{n \rightarrow \infty} n \left(\int_0^1 \sqrt[n]{x^2 + 1} dx - 1 \right)$$

Colgando cadros Víctor Díaz Díaz

Queremos colgar un cadro dunha parede empregando n cravos, de xeito que quitando **un único cravo calquera** o cadro caia polo seu peso, ignorando fricción. Para o caso $n = 1$ (caso trivial), a solución sería a mostrada figura contigua 1. O problema consiste en encontrar unha solución para polo menos $n = 3$ gráfica o/e analítica. Tamén, pódese construír unha solución xeral analítica (non única) para un n arbitrario recorrendo á teoría de grupos.

Referencias

- [1] Erik D. Demaine et al. "Picture-Hanging Puzzles". En: *Theory of Computing Systems* 54.4 (set. de 2013), pp. 531–550. URL: <https://arxiv.org/abs/1203.3602>.



Figura 1: Solución para $n = 1$.

Física ou Fortuna #1: Vaime chover na praia? Adrián Vázquez Velasco

Iniciamos neste número unha sección recorrente de desafíos físicos: "Física ou Fortuna". O obxectivo será intentar estimar un problema que non ten unha resposta obvia. Cun formulario online, recolleranse as respostas daqueles que queiran participar. Animamos a todos os lectores a cubrir o formulario e pasar un bo momento esforzándose para as respostas tanto (ou tan pouco) como vexan oportuno. En base aos resultados, elaborárase unha clasificación á que se irán engadindo as cuestións dos seguintes números.



Nesta edición, queremos proporvos como reto unha serie de cuestións sobre a choiva na costa este verán. Para iso, tomaranse os datos da AEMET **dende o 1 de xullo ata o 31 de agosto deste ano** (62 días en

total), en trece estacións meteorolóxicas da costa galega, escollidas por seren facilmente accesibles en tempo real na súa web. En concreto, as do mapa da esquerda.

As cuestións a intentar predicir son as seguintes:

1. Cal será a *precipitación acumulada en mm de auga* (con resolución de 0.1 mm) recollida na **media entre todas as estacións** nos 62 días? É dicir, a media dos respectivos totais de precipitación.
2. Elabora unha *orde de maior a menor precipitación acumulada* entre as medias das **5 zonas costeiras** especificadas.
3. Cal será o *número mínimo de días con precipitacións* entre as **13 estacións** e en cal delas se dará? Cal será o *número máximo de días con precipitacións* entre as **13 estacións** e en cal se dará?

O formulario é accesible a través do Linktree e pechase o **domingo 15 de xuño ás 23:59** coa fin de evitar ter en conta predicións meteorolóxicas concretas, pero deixando moita marxe por estar en época de exames.



<https://linktr.ee/pasatempos.momentum>

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.

Grazas a todas esas persoas que recibiron acaloradamente a nosa primeira entrega e axudounos a mellorar coas súas suxestións. Especiais grazas ao estudantado que se esmerou na redacción, edición e corrección deste número en medio da recta final do cuadrimestre.

Grazas a Ana Ulla, por participar nesta nova entrega dun proxecto que está apenas comezando, e a Gemma Ruiz, por permitírnos coñecer esta compañeira tan espectacular.

Grazas a Carlos Merino por participar con toda a súa bondade esta vez escribindo un artigo e transmitíndonos toda a súa ilusión polo proxecto.

E grazas finalmente tanto ao equipo decanal da nosa facultade como á vicerreitoría de estudantes e cultura polo seu apoio e colaboración en todo momento neste proxecto, cubrindo ademais esta última a financiación da edición impresa.

Edicións anteriores:



Participa! (WhatsApp)



Co financiamento de:



VICERREITORÍA DE ESTUDANTES
E CULTURA