



Biblioteca de Divulgación
SERIE CIENTÍFICA

Salvador Bará

E fixemos a luz!



UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA



Salvador Bará

(Pontevedra, 1960)

Físico e profesor titular da área de Óptica da Universidade de Santiago de Compostela. A súa investigación desenvólvese no vizoso territorio arraiano no que se abrazan a fotónica, a astronomía e as ciencias da visión. É autor dun centenar de artigos científicos e informes técnicos e doutras tantas comunicacións a congresos da súa especialidade. Actualmente investiga os efectos non desexados da iluminación artificial (contaminación luminosa), e promove a recuperación do ceo estrelado e da riqueza medioambiental da noite en cooperación con diversas administracións e entidades da sociedade civil.

Ilustración de cuberta

Vincent van Gogh:

Noite estrelada sobre o Ródano (1888)

E fixemos a luz!



Biblioteca de Divulgación
SERIE CIENTÍFICA

Nº 2

Colección codirixida por

Francisco Díaz-Fierros Viqueira

Catedrático de Edafoloxía e Química Agrícola, USC

Jorge Mira Pérez

Catedrático de Electromagnetismo, USC

Salvador Bará

E fixemos a luz!

EDICIÓN COORDINADA POR
Jorge Mira Pérez

BIBLIOTECA DE DIVULGACIÓN
Universidade de Santiago de Compostela
2015-Ano Internacional da Luz



Esta obra atópase baixo unha licenza internacional Creative Commons BY-NC-ND 4.0. Calquera forma de reprodución, distribución, comunicación pública ou transformación desta obra non incluída na licenza Creative Commons BY-NC-ND 4.0 só pode ser realizada coa autorización expresa dos titulares, salvo excepción prevista pola lei. Pode acceder Vde. ao texto completo da licenza nesta ligazón: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.gl>

Esta obra se encuentra bajo una licencia internacional Creative Commons BY-NC-ND 4.0. Cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública o transformación de esta obra no incluida en la licencia Creative Commons BY-NC-ND 4.0 solo puede ser realizada con la autorización expresa de los titulares, salvo excepción prevista por la ley. Puede Vd. acceder al texto completo de la licencia en este enlace: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>

This work is licensed under a Creative Commons BY NC ND 4.0 international license. Any form of reproduction, distribution, public communication or transformation of this work not included under the Creative Commons BY-NC-ND 4.0 license can only be carried out with the express authorization of the proprietors, save where otherwise provided by the law. You can access the full text of the license at <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode>

© Universidade de Santiago de Compostela, 2015

Deseño da serie

Servizo de Publicacións e Intercambio Científico, USC

Deseño de cuberta

Ildefonso Vidal Ocampo

Servizo de Publicacións e Intercambio Científico, USC

Maqueta

Marcial Martínez

Imprenta Universitaria

Edita

Servizo de Publicacións e Intercambio Científico

Campus Vida

15782 Santiago de Compostela

usc.es/publicacions

DOI: <https://dx.doi.org/10.15304/dc.2022.884>

A meu pai

A Tere, Jorge, Pati e Javi

ÍNDICE

Presentación

Jorge Mira Pérez 9

Breve limiar 13

1. A luz que vén do ceo 17

2. Rápida como unha centella 31

3. Luz máis luz... Escuridade! 45

4. De que están feitas as estrelas? 59

5. Límite de velocidade 71

6. Grans de luz 89

7. Atrapados nun feixe de luz 103

8. Luz que cura 117

9. O lado escuro da luz 131

10. Alén do que os ollos ven 147

PRESENTACIÓN

Dado que o segundo libro desta serie científica da biblioteca de divulgación da USC foi traballado no ano 2015, a toma da decisión sobre a súa temática foi doada: debía ser sobre a luz. A razón? A Asemblea Xeral da Organización das Nacións Unidas (ONU) declarou ese ano como *Ano internacional da luz e as tecnoloxías baseadas na luz*, intentando render tributo a ese fenómeno físico esencial nas nosas vidas, alicerce da nosa comprensión do mundo. A ONU, nesa declaración feita na súa sesión plenaria, alentou a tódolos estados a aproveitar ese Ano Internacional para promover a concienciación do público sobre a importancia da ciencia e tecnoloxía da luz e o acceso aos seus coñecementos.

A USC non foi allea a esta iniciativa, e a súa serie científica quere contribuír ás actividades desenvolvidas en Galicia con este libro, unha obra feita para perdurar no tempo e servir de luminoso recordatorio desta singular celebración.

A luz é algo tan cotián que resulta sorprendente que agoche tantos segredos para o gran público... e tamén para os científicos que a estudan. Sen ir máis lonxe, non se soubo ata 1815 que é un fenómeno ondulatorio. Houbo que esperar ata 1865 para saber que ese fenómeno é eléctrico e magnético: a luz son ondas electromagnéticas, que só se diferencian das que se usan para transmitir sinais de radio ou de teléfonos móbiles na frecuencia do seu latexo.

En 1905 Albert Einstein decatouse de que esa onda se podía propagar mesmo polo baleiro e que a súa velocidade fixaba o marco para comprender o noso Universo. En 1915, el mesmo encontrou que o camiño seguido pola luz debuxa a xeometría dese Universo, sendo cerna da estrutura do espazo e o tempo.

Cincuenta anos despois encontrábanse as ondas electromagnéticas que son o resplandor do Big Bang e, nese mesmo ano 1965, deuse o paso definitivo para poder meter luz por un tubíño de fibra óptica e transportala de xeito guiado. Todos eles, feitos relativamente recentes na nosa historia. Ese período, de hai aproximadamente medio século, foi clave no desenvolvemento das tecnoloxías derivadas da luz, un eido cun pulo refulxente e chamado a revolucionar o noso modo de vida.

Galicia conta con grupos de investigadores ben situados a nivel internacional nesta área, entre os cales se conta o autor deste libro. Salvador Bará

une á súa traxectoria investigadora una excelente capacidade didáctica, da que é testemuña o seu alumnado na USC, que tan ben o valora dende diferentes perspectivas.

Pero o profesor Bará demostra ademais esa capacidade a pé de rúa, a través dun intenso traballo social a prol da difusión da ciencia, en estreito contacto coa cidadanía. Nos últimos tempos, como evolución natural desa actividade, está a ser ademais o discreto motor de diferentes iniciativas de concienciación e control da contaminación lumínica en Galicia, co obxectivo tanto de mellorarmos a nosa calidade de vida como de preservarmos ese tesouro natural que é a visión do ceo nocturno.

En resumo, a toma de decisión foi doada tanto no que atinxe á temática como á escolla do autor. Espero que o faga patente a luz que emiten as páxinas do libro que agora comeza.

Jorge Mira Pérez

Coordinador de edición

Codirector da *Biblioteca de Divulgación,*

Serie Científica, USC

Outono de 2015, Ano Internacional da Luz

BREVE LIMIAR

Este libro é unha pequena contribución ás actividades realizadas en Galicia con motivo do Ano Internacional da Luz 2015. Súmase así a un extenso conxunto de iniciativas desenvolvidas polo Comité Galego do AIL, que reúne investigadoras e investigadores das tres universidades galegas e persoas procedentes de diversas asociacións e entidades da sociedade civil. Varios aniversarios relevantes coinciden nestas datas: os 1000 anos da publicación do *Kitab al-Manazir*, tratado de óptica escrito por Ibn Al-Hazem en terras hoxe assoladas, os 150 anos da Teoría Electromagnética de Maxwell, os 100 da Teoría da Relatividade Xeral de Einstein e os 50 do descubrimento da radiación do fondo cósmico de microondas por Penzias e Wilson, e das condicións para a transmisión de luz a través de fibras ópticas por Kao. Razóns dabondo para que a Asemblea Xeral das Nacións Unidas decidise convocar esta celebración, e unha boa oportunidade

para dedicarmos un tempo a reflexionar sobre a historia da luz e o papel que xoga nas nosas vidas.

Foron moitas as científicas e científicos de todas as épocas que nos axudaron a comprender mellor a natureza da luz e inventaron as múltiples aplicacións das que hoxe desfrutamos. Nos capítulos que seguen terás noticia dalgúns deles. Non semella necesario comentar que a escolla de persoas, acontecementos, descubrimentos, invencións e controversias é, nun tema como este, certamente difícil: poucos campos da ciencia produciron tantos achados e sorpresas. A selección feita aquí é inevitablemente persoal e nesgada. Aínda que procura abranguer un amplo abano de temas relacionados coa luz, non aspira, nin de lonxe, a debuxar un cadro minimamente completo do marabilloso Universo luminoso que nos rodea. Non chegaría para iso unha biblioteca enteira.

É unha doce obriga dicir que este volume non tería visto a luz se non fose pola benevolente insistencia dun trío de J: Jorge Mira, codirector desta colección e verdadeiro apaixonado da divulgación científica en múltiples formatos, que desde o comezo apoiou e impulsou este proxecto; Juan Blanco, director do Servizo de Publicacións e intercambio Científico da USC, cuxa recoñecida profesionalidade e inesgotable paciencia son un agasallo para os autores; e de maneira moi especial Jorge Sotelo Mancebo, mozo arteixán de ollar vivo e cabeza ben amoblada que, tempo atrás, sendo aínda un

rapaz, pasoume nunha folliña de papel unha lista de intelixentes preguntas sobre a luz cuxas respostas, ou polo menos parte delas, espero que algún día atope nestas páxinas. Para eles, o meu agradecemento.

Un científico polaco con quen compartín múltiples aventuras de investigación antes e despois da caída do Muro seguramente dirá, cun sorriso cómplice, que acabo de *cometer* un libro. Espero que a pena merecida sexa leve.

1. A LUZ QUE VÉN DO CEO

*Mais o que supera con moito todo o imaxinable
(...) é precisamente ter descuberto catro erráticas
estrelas que ninguén antes ca nós coñeceu nin
observou (...)*

Galileo Galilei, *Sidereus Nuncius*, 1610

A noite do 7 de xaneiro de 1610 ía cambiar o mundo. Ninguén o sabía daquela, mais non tardarían en notarse as consecuencias. Galileo Galilei, profesor de xeometría, mecánica e astronomía da Universidade de Padua, dirixiu o seu telescopio ao ceo e o que viu deixouno sen alento.

Nesa noite despexada de inverno, cunha mestura de sorpresa e emoción que hoxe podemos sentir en primeira persoa ao lermos o seu relato dos feitos, Galileo viu cousas que ninguén antes vira: a Lúa ten montañas e vales como os da Terra; hai moitas máis estrelas das que se poden percibir

co ollo nu; a Galaxia ou Vía Láctea, vista con aumentos, non é máis que un conxunto de milleiros e milleiros desas febles estrelas... E, o máis inesperado de todo, catro pequenos puntos de luz acompañan o planeta Xúpiter no seu percorrido polo ceo dando voltas ao redor del. Meses despois descubriría que o planeta Venus cambia de forma dun día para outro, amosándonos figuras semellantes ás da Lúa. E que as manchas escuras que se ven no Sol están localizadas realmente na súa superficie e non son a sombra de corpos que se moven polo espazo, como defendían algúns. Un espectáculo celeste marabilloso, un auténtico regalo para os ollos, algo para compartir canto antes coa humanidade e que soamente tiña un pequeno problema: todo aquilo *non podía ser*.

E ademais era imposible, como di un vello coñecido. Naqueles comezos do século XVII a visión do Universo aceptada pola maioría de estudosos e filósofos compartía moitas das ideas de Aristóteles, que tan vizosos froitos deran nos dous mil anos anteriores. É certo que a física aristotélica estaba baseada en conceptos que hoxe nos parecen inxenuos e moi pouco axeitados para entender os segredos do mundo, mais era unha física moi intuitiva e permitía dar explicacións que daquela eran consideradas razoables ás cousas que sucedían. As súas afirmacións sobre o cosmos eran claras: a Terra ficaba inmóbil no centro do Universo e a Lúa, o Sol e os cinco planetas daquela coñecidos (Mercurio,

Venus, Marte, Xúpiter e Saturno) xiraban arredor dela. Os fenómenos que sucedían ao noso arredor (o mundo sublunar, o que estaba por debaixo da Lúa) eran debidos ás mudanzas e cambios sufridos polas combinacións dos catro elementos clásicos: o aire, o lume, a auga e a terra. Da Lúa para arriba todo era distinto: era o reino das formas perfectas, das esferas celestes, dos movementos circulares e uniformes e desa materia especial, descoñecida e pura, que denominaban, á falla de mellor nome, “a quinta esencia”... Esa forma de ver o mundo explicábao case todo e —con algúns cambios e adaptacións— sobrevivira a séculos de estudo e observacións astronómicas. Coincidía ademais co que se podía deducir dunha lectura literal dos libros considerados sagrados, polo que contaba co apoio decidido das xerarquías das Igrexas católica, luterana, calvinista e anglicana. Era, nunha palabra, a *Verdade*.

Que houbo máis estrelas no ceo que as que se poden percibir a simple vista foi unha auténtica sorpresa para todos. Ese inesperado descubrimento requiría urxentemente algún tipo de explicación. A fin de contas, segundo a opinión común na época, as estrelas foran postas no firmamento para servizo dos humanos: dende tempos antigos servían de reloxo nas horas nocturnas, de calendario para os labores do agro e do mar e tamén, dábase por feito, para prognosticar o incerto futuro. Pero todo iso xa

se facía coas estrelas coñecidas, as que acompañaran á humanidade dende que os primeiros ollos alzaran a vista ao ceo. Daquela, que utilidade podían ter todas esas novas estrelas ata o de entón invisibles? E, se non eran útiles, por que existían?

As montañas da Lúa e as manchas da superficie do Sol eran tamén fenómenos incómodos, demasiado terrealis para seren dignos de pertencer ao mundo das esferas inmaculadas. Montañas na Lúa! Para poder casar esa observación coas teorías da época soamente cabía unha posibilidade sensata: esas montañas tiñan que ser algunha estraña ilusión óptica. Rapidamente houbo quen creu achar a solución do misterio. Para Ludovico delle Colombe, un dos maiores detractores de Galileo, era evidente que todo podía explicarse se a Lúa, con montañas incluídas, estaba recuberta por unha capa de cristal invisible que tiña a forma exterior dunha esfera perfecta e ben pulida. Galileo, nunha das retranqueiras respostas que tanto irritaban aos seus adversarios, amosouse disposto a admitir que lle parecía unha idea excelente, sempre que con igual cortesía se lle permitise a el dicir que por riba da superficie desa esfera había montañas feitas dunha substancia transparente dez veces máis grandes que as que el observara e —por suposto— tamén invisibles.

Pero as que causaron un verdadeiro desacougo ás xentes da época foron as outras dúas observacións. Porque unha cousa estaba clara: *catro errá-*

ticas estrelas xiraban arredor de Xúpiter. E se Venus tiña fases como as da Lúa, algo que calquera podía ver cun modesto telescopio, Venus tiña que xirar arredor do Sol. Non quedaba outra. E iso si que era unha catástrofe para as crenzas tradicionais, porque segundo elas *todos* os corpos celestes *tiñan* que xirar en torno á Terra, que se atopaba no centro do Universo, e se algúns non o facían era sinal de que algo ía rematadamente mal nos fundamentos da Física de Aristóteles. O asunto era importante polas consecuencias que podía ter: O edificio do pensamento clásico era unha construción moi ben trabada que abranguía desde o estudo dos fenómenos naturais até as concepcións que xustificaban determinadas formas de exercer o poder e a política. Se fallaba unha das trabes todo o demais podía virse abaixo.

Se non todo xiraba en torno a ela quizais a Terra non estaba no centro do Universo. Aínda podía darse o caso de que ela mesma estivese en movemento! Esa revolucionaria idea non era admitida na época de Galileo, pero xa fora proposta polo astrónomo grego Aristarco de Samos no século III antes da nosa era. Así, o día e a noite e o movemento diario das estrelas serían o resultado do movemento de rotación da Terra arredor do seu eixo, e o ano co decurso das estacións sería debido á súa translación ao redor do Sol. A verdade é que iso non resultaba (nin resulta!) unha idea moi intuitiva

porque, claro, ningunha persoa sentada placidamente na terraza dun bar de calquera vila de Galicia nunha tranquila tarde de verán ten a sensación de estar movéndose a máis de 1.200 km/h cara o Leste a causa da rotación terrestre e moito menos de estar a correr a 107.000 km/h xirando en torno ao Sol. Dos máis de 800.000 km/h aos que nos movemos xunto con todo o Sistema Solar arredor do burato negro que ocupa o centro da nosa Galaxia mellor xa nin falamos. O certo é que todos temos a sensación de estarmos en repouso. Pensar que a Terra estaba inmóbil era pois o máis natural e sensato do mundo. Defender o contrario a comezos do século XVII non soamente ía en contra da mellor ciencia da época: tamén ía en contra do sentido común.

Porén, no tempo de Galileo xa se comezaban a barallar certos indicios de que as cousas podían ser doutra maneira. O modelo xeocéntrico, coa Terra no centro, tiña algúns problemas serios. Un deles tiña que ver co movemento do ceo estrelado. Se as estrelas estaban moi lonxe da Terra (algo que xa intuían, aínda que non sospeitaban que a realidade superaría todas as súas previsións), a esfera que as contiña tiña que moverse rapidísimamente para poder dar unha volta arredor de nós cada vinte e catro horas. Unha velocidade tan increíble non resultaba lóxica. Ademais, para calcular con precisión as posicións no ceo das estrelas e planetas en base a movementos circulares en torno á Terra (a tarefa

encomendada aos astrónomos desde os tempos da Grecia clásica) era necesario utilizar modelos irremediabilmente complicados: necesitábase toda unha armazón de esferas xirando excéntricamente dentro de esferas que xiraban á súa vez dentro doutras esferas. Explicar o movemento das estrelas en base á idea dunha Terra en repouso era unha complicación de dimensións astronómicas.

Admitir que a Terra rotaba arredor de si mesma e, xunto cos demais planetas coñecidos, xiraba arredor do Sol solucionaba en parte algúns destes problemas. As estrelas xa non terían que moverse a velocidades inimaxinables e para predicir a posición dos planetas no ceo podían aforrarse algunhas esferas simplificando así os cálculos astronómicos. En 1543, case setenta anos antes das observacións de Galileo, o polaco Mikolaj Kopernik, a quen en Galicia coñecemos como Copérnico, publicara un interesante libro titulado *Sobre as revolucións das esferas celestes* no que describía xeometricamente un modelo de universo heliocéntrico, é dicir, co Sol no centro e os planetas xirando ao redor del. Os cálculos certamente simplificábanse pero, todo hai que dicilo, as melloras non eran como para botar foguetes. Aforraba esferas, si, pero aínda requiría unha morea delas: as malas linguas din que nin o mesmo Copérnico sabía cantas. E o modelo copernicano non deixaba de ter os seus propios problemas: por exemplo, predicía que as posicións relativas das estrelas debían cambiar lixeiramente e

de forma periódica co decurso do ano, un fenómeno coñecido como “paralaxe”, mais tal variación non se observaba (hoxe sabemos que efectivamente existe, o que sucede é que a súa magnitude é moi pequena: cos instrumentos que tiñan na época non podían detectala). Tamén parecía predicir que o brillo do planeta Venus debería cambiar moito dun mes para outro porque a súa distancia á Terra así o fai, mais a variación observada era moito menor que a esperada: habería que agardar até o verán de 1610 para que Galileo dese coa explicación deste paradoxo.

Buscar probas físicas directas do movemento da Terra arredor do Sol guiou gran parte do traballo de Galileo nos anos previos ás súas observacións co telescopio e continuaría sendo unha preocupación durante o resto da súa vida. O problema inmediato ao que se enfrontaba Galileo é sinxelo de formular: se de verdade nos movemos arredor do Sol, por que non o notamos? Froito das súas reflexións é un dos seus legados máis importantes, o principio da relatividade galileana, que en palabras de hoxe vén dicindo que en condicións ideais cando dous observadores se moven un respecto do outro con velocidade uniforme non hai forma de distinguir cal se move e cal está en repouso. E puña como exemplo o que sucede cando se viaxa en barco por augas tranquilas: ás veces un dubida se é o barco o que se alonxa da costa ou é a costa a que se alonxa del. Hoxe esa imaxe sábenos a pouco

porque usar barcos para os nosos desprazamentos non é algo tan habitual como o era daquela. Mais calquera de vós que viaxe frecuentemente en tren terá experimentado de cando en vez esa curiosísima sensación: semella que por fin se move o teu tren e pouco despois comprobas con sorpresa que ti estás parado e que o que se move con respecto ás plataformas da estación é o tren que tes ao teu carón. Para que esa sensación sexa eficaz precisa-se que a nosa velocidade sexa uniforme ou case uniforme, porque se o noso tren vai acelerando (ou decelerando) de forma notoria o noso corpo é quen de percibir a forza que se exerce sobre nós, signo de que varía o noso estado de movemento, e a ilusión desaparece. Porén, o importante principio da relatividade galileana non demostraba que a Terra se movese. Simplemente axudaba a explicar —e de forma soamente aproximada— por que, en caso da Terra se mover, non o notariamos.

A comezos do século XVII os modelos xeocéntrico e heliocéntrico estaban pois nunha especie de empate técnico no que atinxe á súa capacidade para explicar o mundo. Certo é que o modelo copernicano se baseaba nunha Terra en movemento arredor do Sol e iso parecía contradicir flagranteamente algunhas pasaxes dos libros considerados sagrados. Como se podía casar iso co dogma tradicional católico que mantiña exactamente todo o contrario? Pois mediante unha reviravolta da curia vaticana digna de Platón: non ía contra o dogma

defender que todo sucedía *como se as cousas fosen así*. O que podía causar problemas era defender que *as cousas eran realmente así*.

Se un se mantiña na interpretación correcta podía vivir con certa tranquilidade. O libro de Kopernik podía estudarse nos seminarios eclesiásticos, e utilizar os seus métodos de cálculo, na medida en que iso aforraba traballo para conseguir os resultados astronómicos desexados, era considerada unha práctica sensata e razoable: o heliocentrismo sería así unha especie de técnica matemática útil, lexítima e sen maiores contraindicacións. De feito, e en contra dunha certa crenza algo extendida, o cóengo, case médico e doutor en dereito canónico Mikolaj Kopernik nunca tivo grandes problemas coa Igrexa. Máis ben ao contrario: sen ser crego era un importante cargo político e administrativo da súa diocese, situada na actual provincia de Warmia-Mazury, a fermosa rexión dos lagos de Polonia. A comisión do concilio de Letrán que abordou a reforma do calendario en 1513-1516 convidouno a participar e contou coas súas solventes opinións.

Mais unha cousa era usar o modelo de Copérnico como un mero truco de cálculo e outra ben distinta afirmar que a Terra realmente se movía e non era o centro do Universo. Iso si que era cruzar unha liña vermella e as consecuencias de facelo podían ser fatais: o frade Giordano Bruno fora queimado vivo no ano 1600 no *Campo de'*

Fiori, en Roma, por defender publicamente ideas parecidas. Certamente Bruno era unha persoa incómoda para a xerarquía eclesiástica e na súa condena pesaron sobre todo a súas acedas críticas contra as autoridades relixiosas, o seu desbocado misticismo, a súa vida pouco convencional, a súa irrefreable vontade de polemista e a súa inflexible insumisión. Pero tamén as súas concepcións sobre o Universo. Na sentenza que o condenou como “impenitente, pertinaz e obstinado herexe” faise referencia a oito afirmacións heréticas das que non se retractou. Desafortunadamente o texto detallado desas afirmacións non se conserva mais sabemos, por un borrador previo, que entre os oito motivos polos que foi executado estivo probablemente o de defender que o Sol era unha estrela como as demais e que había “infinitos mundos” semellantes á Terra. Galileo tiña iso ben presente. Roberto Bellarmino, que xogara un papel relevante na condena de Bruno, era en 1610 o cardeal xefe da poderosa Inquisición Romana. Manter un discreto silencio sobre a crenza na realidade do sistema copernicano era pois algo normal entre as persoas precavidas.

Pero as observacións feitas cun rudimentario telescopio nas frías noites daquel mes de xaneiro acabarían por desequilibrar a balanza e darían ao traste con esta situación. Era evidente que *había* corpos celestes que non xiraban en torno á Terra. Copérnico *podía ter razón*. O seu libro, tolerado

desde a súa publicación en 1543 porque non parecía especialmente perigoso, foi suspendido en 1618 e a súa difusión foi prohibida até que fose enmendado en aspectos substanciais, corrección que nunca se chegou a facer. O autor intelectual desa prohibición, o cardeal Bellarmino, ordenara tamén abrir unha investigación sobre Galileo que desembocou en 1616 na prohibición de difundir as súas ideas. Sen que esa fose a súa intención, estas prohibicións ilustran unha das constantes do avance do coñecemento científico: as melloras na nosa capacidade de observación, aínda que sexan pequenas, poden ser chave para esclarecer cuestións fundamentais relativas á estrutura e constitución do noso Universo. Para facer ciencia precisamos tecnoloxía.

O libro de Copérnico tivo que agardar até 1758 para ser novamente permitido nos países de influencia católica. Galileo tivo que ser máis paciente: pasarían máis de 350 anos antes de que en 1992 o Vaticano recoñecese os erros cometidos polo tribunal que xulgou as súas afirmacións científicas. O inquisidor Bellarmino foi elevado aos altares en 1930 co nome de san Roberto, e proclamado Doutor da Igrexa en 1931. A día de hoxe segue dado de alta na lista dos santos católicos. Giordano Bruno, que dixera aos seus xulgadores “máis medo debedes ter vós por pronunciar esta sentenza do que eu teño ao escoitala”, se está nalgues debe estar matinando amargamente sobre as

inxustizas cometidas en nome da relixión. Cun sorriso nos beizos, iso si, ao comprobar que o tempo deulle a razón polo menos nunha cousa: as estrelas que vemos son efectivamente outros soles ao redor dos cales xiran multitude de planetas, algúns inmensos como Xúpiter, outros moi semellantes á Terra. Desde que en outubro de 1995 os astrónomos Michel Mayor e Didier Queloz da Universidade de Xenebra confirmasen o descubrimento do primeiro planeta extrasolar as técnicas de detección acadaron unha precisión inimaxinable. A sonda espacial Kepler que desde 2009 orbita o Sol acompañando á Terra leva descubertos por si soa máis dun milleiro. No momento de escribir estas liñas o número total de exoplanetas confirmados está xa preto dos dous mil. Os infinitos mundos de Giordano estaban realmente aí.

Despois daquela noite de inverno un deses mundos, o noso, xa non volvería a ser o mesmo. A luz que vén do ceo cambiouno para sempre.



Se tes uns prismáticos duns dez aumentos ou máis podes intentar albiscar os satélites galileanos de Xúpiter. Para saber onde está Xúpiter no ceo podes usar unha das moitas aplicacións libres dispoñibles (por exemplo *Stellarium* ou *Cartes du Ciel*). Os satélites máis doados de observar con prismáticos son Ganimedes e Calisto, os máis alonxados

de Xúpiter, mais Europa e Ío tamén son visibles en condicións favorables. Poderás notar como cambian de posición ao longo da noite e tamén dun día para outro, e sentir a emoción de ver o mesmo que Galileo viu. Se apoias os prismáticos no marco da ventá ou os montas nun trípode a imaxe será moito máis estable. Observando cun telescopio, a cen ou máis aumentos, o espectáculo é grandioso. Ten en conta que cada certo tempo un ou varios satélites poden pasar por detrás do planeta, deixando de ser visibles: aparecerán de novo unhas horas máis tarde.

2. RÁPIDA COMO UNHA CENTELLA

*Por moi rápido que viaxe a luz sempre atopa
que a escuridade chegou primeiro, e alí está,
agardando por ela.*

Terry Pratchett, *Reaper Man*, 1991

A que velocidade vai a luz? É rápida, si, mais... canto de rápida? Esta pregunta ocupou intermitentemente as máis brillantes mentes ao longo da historia humana. E a resposta atopouse no lugar e no momento menos esperados.

En tempos antigos era frecuente pensar que a velocidade da luz era infinita. Non é estraño, porque durante séculos estiveron moi de moda as teorías emisivias sobre a visión: segundo elas, veríamos porque os nosos ollos emitirían algunha caste de raios ou provocarían algún tipo de movementos no medio circundante que se propagarían até os obxectos, reflectiríanse neles e voltarían onda nós

dándonos así información sobre a posición, forma e cor das cousas. E a experiencia visual é inmediata, ou cando menos iso nos parece: basta con abriremos os ollos para ver instantaneamente as estrelas (se as nubes e a contaminación lumínica o permiten, claro). Como xa de antigo se sospeitaba que as estrelas estaban situadas extremadamente lonxe de nós, se a visión se producise por emisión non quedaría outra: a velocidade da luz tería que ser practicamente infinita. Esta idea, con diferentes variantes, sobreviviu até épocas relativamente tardías. Incluso René Descartes (1596-1650), como consecuencia das teorías mecánicas que desenvolveu no seu *Tratado sobre a Luz*, acreditaba nela.

Certo é que nunca faltaron voces discrepantes que avogasen por unha velocidade finita. Xa no século quinto antes da nosa era o filósofo Empédocles ousara afirmar que a luz tarda un certo tempo en chegarnos desde o Sol, o que lle valeu as acedas críticas do influente Aristóteles. A disputa continuou durante mil anos. Non tendo medios para comprobar cal era realmente a velocidade as discusións movíanse necesariamente no plano especulativo. Cada pensador ou pensadora procuraba chegar a unha conclusión que fose coherente cos seus principios e que reafirmase as súas teorías, pero non era quen de convencer aos demais da validez das súas conclusións.

Neste como noutros temas Galileo —o noso vello coñecido— tivo unha idea innovadora que

reflicte o novo xeito de proceder nos albores da ciencia moderna: no canto de limitarse a discutir cal podería ser a velocidade da luz, o que cumpría facer era medila. E puxo mans á obra. O seu método semellaba sinxelo: tratabase de contar con dúas persoas equipadas con cadansúa lámpada, que podían cubrir ou descubrir a vontade. Estas persoas debían separase unha certa distancia, inicialmente pequena, e facer o seguinte: a primeira descubriría a súa lámpada nun momento dado e a segunda descubriría a súa cando vise chegar a luz da primeira. O primeiro observador podería así estimar o tempo tardado pola luz en facer o traxecto de ida e volta sen esquecer, claro está, que habería un certo retraso adicional debido ao tempo de resposta do segundo observador.

A chave do método estaba en repetir o experimento a distancias cada vez maiores. O retraso adicional debido ao tempo de resposta do segundo observador seguiría sendo máis ou menos o mesmo, pero o tempo total iría aumentando paulatinamente debido ao aumento do camiño percorrido pola luz. Medindo como aumentaba o tempo coa distancia a velocidade da luz podería deducirse mediante unha simple división. Ou cando menos iso esperaba Galileo. El di que realizou o experimento entre lugares separados algo menos dunha milla e que non puido medir ningún retraso. Fose ou non certo que o fixo, porque non está nada claro que realmente o fixese, non é difícil vermos

por que o resultado tiña que ser negativo: o tempo tardado pola luz en percorrer un traxecto de ida e volta de, poñamos, 3 kilómetros en total é a centésima parte dunha milésima de segundo, algo imposible de detectar cos instrumentos dos que daquela dispoñían. Cómpre lembrar que en moitos dos seus experimentos sobre mecánica Galileo medía os tempos usando como cronómetro o bater do seu corazón.

Porén, moi pouco tempo despois deste infrutuoso intento o valor da velocidade da luz sería determinado cunha exactitude moi notable. Como foi iso posible?

A resposta ten que ver con naufraxios e tesouros, e forma parte dun dos episodios máis interesantes da historia da ciencia. A comezos do século XVII o tráfico marítimo a nivel mundial estaba en plena expansión. Grandes flotas de transporte de mercadorías unían as metrópoles europeas co Novo Mundo e co lonxano Oriente, mentres navíos militares aseguraban as rutas comerciais e impuñían pola forza novos donos a vellas terras e novas servidumes a vellas culturas. Unha das necesidades máis apremiantes para calquera patrón de barco era determinar a posición exacta do seu navío. Errar na posición aínda que fose por unhas ducias de kilómetros podía ser fatal: podían pasar lonxe das illas das que dependía o seu aprovisionamento de auga e víveres, aproar sen quere-lo

cara zonas de arrecifes, ou entrar en augas controladas por potencias inimigas. Saberem con certeza onde estaban era en moitos casos unha cuestión de vida ou morte. E non, daquela non había GPS nin outros sistemas de posicionamento global.

En xeral para coñecer a posición de calquera punto nun espazo de tres dimensións precísanse tres números, as súas coordenadas nun sistema de referencia previamente decidido. No caso dun barco navegando pola superficie do mar o problema simplifícase algo, dado que na práctica xa coñecemos un deses números: a altura sobre a superficie media do mar, que sen termos en conta os efectos das ondas e as mareas é cero (calquera outro valor sería unha desgraza). Soamente nos quedan por determinar outros dous, que tradicionalmente son a latitude (a distancia angular medida a partir do ecuador da Terra en direccións Norte ou Sur) e a lonxitude (a distancia angular en sentido Leste ou Oeste medida desde algún meridiano tomado como referencia).

O segredo para coñecer a latitude estaba no Sol e nas estrelas. A latitude vén sendo igual ao ángulo que o polo norte celeste (ou o sur, depende de en que hemisferio esteamos) forma coa liña do horizonte. O polo é o punto da bóveda celeste arredor do cal parecen xirar as estrelas no decurso da noite. No hemisferio Norte temos actualmente unha estrela moi próxima a el, a Estrela Polar ou estrela

alfa da constelación da Osa Menor, de forma que medindo a súa altura sobre o horizonte e aplicando unha pequena corrección calquera podía e pode determinar a súa latitude. No hemisferio Sur non hai ningunha estrela particularmente brillante preto do polo, porén a súa posición pode determinarse sen demasiada dificultade observando as constelacións que o rodean. Para coñecer a latitude durante as horas diurnas abonda con medir a altura do Sol sobre o horizonte a mediodía, cousa que se pode facer coa axuda dun elegante instrumento chamado sextante, e consultar unhas táboas adecuadas preparadas polos astrónomos.

Mais, que facer para determinar a lonxitude? Ningunha das opcións dispoñibles a comezos do século XVII funcionaba ben. O procedemento habitual era levar unha conta moi detallada do camiño percorrido en dirección Leste ou Oeste. Isto, que xa en por si é laborioso en terra, era extremadamente complicado no mar. A distancia percorrida no mar medíase daquela de forma moi rudimentaria utilizando unha corda con nós a intervalos regulares a cuxo extremo se ataba unha peza de madeira. A peza guindábase á auga e ía quedando detrás do barco. O número de nós da corda que se soltaban nun tempo dado indicaba a velocidade da nave e con ela podía estimar a distancia percorrida. Sabendo o rumbo do navío, podía deducirse a nova posición. Non semella necesario indicar o impreciso que era isto. Tanto é así que

os navegantes da época, entre eles os audaces capitáns pontevedreses Bartolomé e Gonzalo García de Nodal, anotaban estas distancias nos seus diarios de a bordo indicando que eran estimacións *pola fantasía*. Como para fiarse!

Os astrónomos e os xeómetros sabían que, cando menos teoricamente, había outra posibilidade: aproveitar o xiro da Terra. O principio é sinxelo. Cada lugar do planeta ten en cada momento unha hora solar local propia, determinada pola súa lonxitude. A hora solar é o tempo transcorrido desde que o Sol pasou polo meridiano do lugar (sumándolle 12h se queremos que esa sexa a hora a mediodía). Como o Sol tarda 24 horas en pasar de novo por un meridiano dado e a circunferencia da Terra ten 360 graos, unha hora de diferenza na hora local de dous lugares vén correspondendo a 15 graos de diferenza nas súas lonxitudes (360/24). Así, cando polo Sol é mediodía nun lugar determinado aínda falta unha hora para que o sexa en lugares situados a 15 graos de lonxitude cara ao Oeste. Esa é a razón primaria pola que hai diferentes fusos horarios no mundo, e pola que o Sol se pon en Fisterra uns 45 minutos máis tarde do que o fai en Barcelona.

Daquela a cousa podía ter amaño: para determinar a lonxitude dun lugar soamente había que coñecer a hora local propia e saber que hora local era *nese mesmo momento* no porto de partida.

Mais a esta brillante solución faltáballe un pequeno detalle: como saber que hora era no porto de orixe? Unha posibilidade sería levar no barco algún reloxo que a marcara, pero non, daquela non había reloxos que se puidesen utilizar no mar durante longos períodos de tempo. O reloxo de péndulo non sería inventado por Christiaan Huygens até 1657, e mesmo así ningún trebello dese tipo podía funcionar coa máis mínima marusía.

Determinar a lonxitude era un tema de tanta importancia económica e estratéxica que xa en 1598 el-Rei de España ofrecera unha cuantiosa recompensa a quen dese cunha solución práctica ao problema. Galileo “sempre veloz para converter os seus descubrimentos en beneficios económicos”, en palabras do historiador da ciencia Michael Hoskin, apareceu de novo en escena. Fixo unha orixinal proposta: os satélites de Xúpiter por el descubertos podían usarse como reloxo celeste universal. Os catro satélites Ío, Europa, Ganimedes e Calisto orbitan arredor de Xúpiter con períodos moi ben definidos que van desde as 42 horas até case 17 días e cada certo tempo dan lugar a fenómenos moi vistosos. Os satélites poden pasar por diante do planeta (tránsitos), quedar ocultados na súa sombra (eclipses), verse o máis separados posible del (elongacións máximas)... Todo un abano de interesantes sucesos que poden predicirse con moita antelación, dada a periodicidade dos movementos celestes. Non é difícil facer unha táboa

que indique en que días e a que hora local exacta van producirse eses eventos vistos desde o porto de partida. Dado que son fenómenos que poden observarse desde practicamente calquera lugar do planeta, polo menos durante certos meses ao ano, os ceos regalaban á xente do mar un reloxo universal, preciso e de custo cero. Para determinar a lonxitude soamente había que observar un deses eventos, anotar a hora local na que sucedía e comparala coa do porto de partida.

Claro que os satélites de Xúpiter hai que observarlos usando un telescopio, cousa nada doada de facer desde un barco en movemento, pero isto non desanimou a Galileo: inventou unha especie de casco co telescopio acoplado á altura do ollo de aspecto moi semellante ao dos actuais visores nocturnos para que o navegante puidese dirixir comodamente a súa mirada ao planeta. Para amortecer os movementos do barco debidos ás ondas do mar inventou un soporte con posibilidade de xirar en dous eixos, semellante ao que despois usarían os compases dos barcos, pero de tamaño suficiente como para albergar nel ao observador, que permanecería case inmóbil a pesar dos movementos do navío.

As dificultades prácticas do seu uso fixeron que o método de Galileo non triunfase no mar, pero en terra as cousas eran diferentes. Con cómodos e ben equipados observatorios astronómicos era

factible utilizar os satélites de Xúpiter para coñecer a diferenza de lonxitude entre dúas localidades calquera. E en 1671 un grupo de astrónomos daneses e franceses abordaron a tarefa de determinar a diferenza de lonxitudes entre París e a illa báltica de Hven, preto de Copenhague. Non era un mero exercicio de cálculo. O observatorio de París era un dos principais centros científicos do momento, mais as observacións astronómicas máis detalladas do século anterior foran feitas por Tycho Brahe naquela illa. Para relacionar as vellas e as novas observacións necesitaban determinar moi ben a diferenza de lonxitudes entre ambos lugares. Gian Domenico Cassini, Jean Picard, Erasmus Bartholin e Ole Römer puxeron mans á obra. Cassini xa elaborara anos antes unhas detalladas predicións sobre os fenómenos dos satélites de Xúpiter. Para sorpresa de todos as predicións semellaban fallar por uns minutos: ás veces os fenómenos ocorrían algo antes do esperado e íanse adiantando cada vez máis até que pasado un tempo comezaban a retrasarse, e así periódicamente. Os movementos celestes eran considerados inmutables, de forma que... a que podían ser debidas estas inesperadas irregularidades?

Ole Römer deu coa resposta. Xúpiter orbita o Sol a unha distancia de 780 millóns de kilómetros e dá unha volta arredor del nuns doce anos; a Terra faino a uns 150 millóns de kilómetros e tarda un ano en facer unha revolución. En consecuencia, a

distancia entre Xúpiter e a Terra varía entre unha separación máxima duns 930 millóns de kilómetros e unha mínima de 630. A luz que vén de Xúpiter até nós ten que percorrer 300 millóns de kilómetros máis nun caso que no outro, precisamente o que mide o diámetro da órbita terrestre. Römer pensou acertadamente que as diferenzas na hora á que se vían os fenómenos dos satélites de Xúpiter eran debidas ao tempo adicional que precisaba a luz para chegar á Terra, dependendo de onde esta se atopase. En setembro de 1676 predixo correctamente que unha eclipse de Ío que tería lugar a comezos de novembro se vería dez minutos máis tarde do esperado. E así foi. Segundo as súas medidas, non demasiado precisas, esas diferenzas de tempo podían chegar a ser de vintedous minutos. Concluíu pois que a luz tardaba ese tempo en cruzar a nosa órbita, polo que a súa velocidade debía ser $300 \text{ millóns de km} / (22 \text{ minutos} \times 60 \text{ segundos cada minuto})$ é dicir, uns 227.000 kilómetros... por segundo! Todos quedaron pamos. O certo é que Römer se equivocara un algo ao estimar o tempo que tarda a luz en percorrer o diámetro da órbita da Terra. Poucos anos despois Newton anunciaría que o tempo correcto deducido das observacións dos satélites de Xúpiter eran uns dezaseis minutos. Con eses novos datos a velocidade viña sendo de 312.000 kilómetros por segundo, valor moi próximo ao que actualmente coñecemos: 299.792,458

km/s. Unha velocidade incrivelmente alta. Nada podía asemellarse a ela. Pero non era infinita.

Así foi como unha necesidade estratéxica e comercial, a de coñecer a lonxitude no mar, deu lugar á determinación do valor da velocidade da luz no vacío, hoxe denominada c . Probablemente a constante máis famosa da historia da Física. É un exemplo, non único, de como ao intentar resolver problemas prácticos podemos chegar a descubrimentos de importancia fundamental para a ciencia. A procura de métodos para a determinación da lonxitude seguiu o seu curso despois de Römer, dando lugar a múltiples inventos. Entre eles os cronómetros mariños desenvolvidos por John Harrison a partir de 1735, antecesoros directos dos reloxos de mesa e pulseira que se usaron durante décadas antes de chegar a era dixital. Tamén se utilizaron durante moito tempo sinais horarias transmitidas en terra por telégrafo, e posteriormente por ondas de radio con cobertura mundial. Hoxe a localización tridimensional (en latitude, lonxitude e altura) é unha cuestión de rutina que se resolve mediante sistemas como o GPS, que calquera pode ter no seu dispositivo móbil de comunicacións. Nunha última reviravolta da historia o funcionamento correcto do GPS depende crucialmente dun axustes precisos que hai que efectuar aos seus reloxos internos a causa do diferente ritmo co que transcorre o tempo nos satélites e na superficie terrestre. As correccións calcúlanse

usando a Teoría da Relatividade Xeral desenvolvida por Albert Einstein a comezos do século XX: unha fermosísima construción teórica inicialmente desvencellada de calquera aplicación práctica. Eis como a ciencia básica lle devolveu á vida cotiá o favor recibido cando esta lle proporcionou, séculos atrás e de forma inesperada, o valor da velocidade da luz.

Que a velocidade da luz non sexa infinita ten unha importancia fundamental para entender a estrutura do noso Universo. Ten tamén unha curiosa consecuencia: se ollamos lonxe vemos o pasado. A luz que chega dos obxectos celestes máis lonxanos permítenos observar como era o Universo primitivo. Pero isto non soamente ocorre a distancias astronómicas. Ocorre a calquera distancia. A luz tarda algunhas milmillonésimas de segundo en chegar a ti desde a persoa amiga que está a falar ao teu carón. Se o pensas, todo o que ves ocorreu no teu pasado. Vives, en sentido literal, na vangarda da historia! É como para presumir, mais lembra: aos e ás demais pásanos exactamente o mesmo. O Universo gosta das simetrías.



PARA
FACERES
NA
CASA

Se queres ver o pasado olla cara ao ceo: a Lúa vela como era hai algo máis de un segundo, o Sol hai uns oito minutos, a brillante estrela Sirio hai 8 anos e medio, a fermosa Vega hai 25 anos, Arturo hai 37 anos, as Pléiades hai 444 anos... E se albiscas a Galaxia de Andrómeda, veciña da nosa Vía Láctea, estás véndoa como era hai dous millóns e medio de anos!

3. LUZ MÁIS LUZ... ESCURIDADE!

Luz...! Máis luz...!

Johann Wolfgang von Goethe (1832)

Xa o cantaba Gato Pérez: *a vida dáche sorpresas*. E unha delas, e non das máis pequenas, é que ao sumarlle luz á luz podemos obter escuridade.

Isto é moi pouco intuitivo, si. Todos sabemos que cando unha lámpada non ilumina o suficiente podemos acender outra e asunto resolto. A ningún se lle ocorrería pensar que ao prender esa segunda lámpada puidésemos perder luz na zona que queremos iluminar, que a luz que xa tiñamos alí puidese marchar a outra parte.

Parece increíble. Pero sucede. Claro que non é algo que vexamos todos os días. É moi difícil de apreciar coas lámpadas que temos na casa. Pero observando con cuidado e nas condicións adecuadas pode comprobarse que isto é realmente así.

A primeira vez que se estudou en detalle este fenómeno foi na Inglaterra de comezos do século XIX. Un polifacético físico inglés, Thomas Young, comprobou en 1803 que se nunha pantalla opaca se facían dous pequenos buratos que deixasen pasar a luz sucedían cousas daquela incomprendibles. Cada burato por separado producía unha mancha de luz máis ou menos uniforme sobre unha segunda pantalla situada a unha certa distancia da primeira pero, cando se destapaban os dous buratos, na zona común a ambas manchas non se obtiña sen máis o dobre de iluminación, que é o que todos esperarían. No canto diso aparecían franxas rectas brillantes e escuras! As escuras eran practicamente negras. As brillantes eran catro veces máis intensas que a luz producida por cada burato por separado. A cantidade *total* de luz sobre a pantalla era a correcta: sumando a que había nas zonas brillantes e nas escuras a luz producida por dous buratos era o dobre da producida por un. En total era a que tiña que ser, pero estaba redistribuída de forma inesperada no espazo. A certas zonas non chegaba ningunha luz e a outras chegaba en exceso. Era un fenómeno estraño.

Iso era moi difícil de interpretar coas teorías que estaban de moda na época. Desde os tempos de Newton a comunidade científica pensaba que a luz se comportaba como unha corrente de partículas materiais que se movían seguindo as leis da mecánica clásica. O lóxico era pensar que se un

burato na primeira pantalla producía unha certa mancha de luz, debida ás partículas que pasando por el incidían na pantalla de observación, ao abrir o outro burato simplemente aumentaría o número de partículas que chegaban á segunda pantalla e a iluminación sería maior. É o que ocorre habitualmente. Pero no experimento de Young non sucedía iso. Como explicalo? Por que ao abrir un segundo burato a luz que pasaba polo primeiro parecía cambiar de dirección?

Hai que dicir que a idea de que a luz era un chorro de partículas, aínda que aceptada por case todo o mundo a comezos do século XIX, non era a única posible. Científicos contemporáneos de Newton como o holandés Christiaan Huygens ou o inglés Robert Hooke xa propuxeran que a luz, no canto de por partículas, estaba composta por ondas. As ondas, como as que vemos na superficie do noso mar Atlántico, son perturbacións dalgunha magnitude física que se propagan oscilando no espazo e no tempo. No caso do mar, e simplificando algo as cousas, a magnitude que oscila é a altura da auga sobre o nivel medio do océano. A luz sería para eses pensadores algún tipo de perturbación dun medio descoñecido que ocupaba todo o espazo e que á falta de mellor nome chamaban *éter luminífero*. As ondas teñen propiedades moi curiosas: poden curvarse arredor dos bordos dos obstáculos, e ao atravesaren un pequeno orificio convértense en ondas esféricas ou circulares que

saen del e tenden a propagarse en todas as direccións. É doado ver isto nas ondas do mar. Se vos fixades verédelas rodear os cons e abrirse en abano ao pasar pola bocana dun porto ou polo espazo que queda entre dous barcos ancorados un detrás do outro. A diferenza das partículas clásicas, que están moi ben localizadas e non poden estar varias á vez exactamente no mesmo punto, as ondas exténdense polo espazo e, se non son demasiado intensas, poden superpoñerse nun mesmo lugar sen afectarse unhas ás outras: entrecrúzanse e seguen o seu camiño como se nada. Partículas e ondas, na mecánica clásica, sonvos cousas ben diferentes. Case poderíamos dicir que opostas.

Sendo tan distintas as súas propiedades, tamén o son as cantidades que se usan para falar delas. Para describir as partículas un debe especificar a súa posición e a súa velocidade, xunto con outras características importantes que serven para coñecer como interactúan con diversos campos de forza, como son por exemplo a súa masa ou a súa carga eléctrica. Para describir as ondas a información que debe darse é outra: cómpre coñecer en cada punto do espazo a súa amplitude (que vén sendo a altura máxima da onda sobre o nivel medio do mar, por exemplo), o seu período (o tempo que transcorre nun punto dende que a onda pasou por un máximo ou crista até que chega o seguinte) ou ben a súa frecuencia (que é a inversa do período), e tamén a súa velocidade e dirección de propagación. Coñecendo o período e a velocidade pode

determinarse doadamente a longura de onda, que é a distancia que hai entre dúas cristas sucesivas.

Utilizando unha teoría ondulatoria Huygens foi quen de dar unha precisa e preciosa explicación a fenómenos como a reflexión e a refracción da luz, que rivalizaba en elegancia coa que Newton dera a base de partículas. Pero había un problema, e non era pequeno: afectaba a unha cuestión fundamental. Se a luz é unha onda, como explicar que os feixes luminosos se propaguen en liña recta? Se víchedes unha raiola de sol entrando por un pequeno burato nunha estancia escura comprobádes que se propaga así. Mais das ondas un podería esperar un comportamento diferente. O son, por exemplo, que é o resultado da nosa forma de percibir certas ondas de presión que se propagan polo aire, non parece limitarse a propagarse en liña recta. Podemos oír falar a unha persoa aínda que estea detrás dun muro e non poidamos vela directamente. As ondas de son rodean os obstáculos. A luz, aparentemente, non. Cando o sol pega forte no verán podemos protexernos á sombra dunha boa árbore ou dun parasol de praia. Se a luz fose unha onda como o son, non debería rodealos tamén? Os fabricantes de cremas de protección solar farían o negocio do século: Non habería sombra no mundo!

Malia os seus esforzos, o imaxinativo Christiaan Huygens non foi quen de dar cunha boa explicación de por que se propaga en liña recta un

estreito feixe de luz. De acordo coas súas propias teorías o feixe debería desfacerse rapidamente e converterse en ondas que se propagarían en todas as direccións. O motivo era sinxelo. Huygens sabía que facendo oscilar un punto illado do mar se producen ondas circulares, o mesmo que sucede cando se interrompe o camiño dunha onda e soamente se lle deixa pasar a través dun pequeno burato. Chegou daquela á conclusión de que cada punto dunha onda, ao oscilar, debía converterse á súa vez nunha fonte de ondas circulares (ou esféricas, en tres dimensións) que pronto se coñeceron como *ondiñas secundarias*. A onda propagada sería o resultado da combinación das ondiñas secundarias emitidas por todos os puntos da onda inicial. Esa combinación de ondas, para Huygens, era algo puramente xeométrico: debuxaba moitas ondiñas secundarias e logo trazaba unha liña que envolvese a todas elas, e esa era a onda resultante, sen máis. Pero esta forma de facer os cálculos predicía que non podía haber feixes estreitos de luz propagándose en liña recta de forma estable: segundo o método de Huygens tiñan que esfarelarse decontado. Pola contra, a explicación da propagación rectilínea da luz coa teoría das partículas de Newton era ben sinxela: como cada partícula de luz se propagaba en liña recta un feixe estreito formado por moitas delas tamén se propagaría así e sen desfacerse, que era precisamente o que parecía ocorrer.

Hai que dicir que por eses anos alguén observara algunhas cousas estrañas no comportamento da luz. En 1660 o italiano Francesco Maria Grimaldi decatárase de que arredor dos bordos das sombras producidas por obxectos moi delgados, como por exemplo un cabelo humano, aparecían unhas finísimas liñas de luz e de sombra daquela inexplicables. Era como se a luz virase ao achegarse aos bordos. Ás formas habituais de propagarse a luz, xa coñecidas na Grecia clásica (a propagación rectilínea, a reflexión e a refracción), Grimaldi engadiu unha nova: a *difracción*. Aínda que non se comprendía moi ben por que, a luz facía cousas raras cando se atopaba con obstáculos pequenos. Newton intentou, sen demasiado éxito, explicar este fenómeno recorrendo á atracción gravitatoria que os bordos dos obxectos exercerían sobre as partículas materiais de luz. Con iso podía explicar que os raios de luz se curvasen, pero non daba explicado por que aparecía unha fina rede de franxas claras (lugares de moita acumulación de partículas) e escuras (lugares a onde non chegaba ningunha). As franxas observadas por Grimaldi eran algo incómodo para a teoría newtoniana e poderían ter botado algunhas dúbidas sobre ela. Mais a teoría ondulatoria de Huygens, todo hai que dicilo, tampouco as daba explicado.

Por este e por outros motivos a teoría ondulatoria da luz non era demasiado afamada cando en

1807 Young publicou os resultados do seu experimento. Quen tiña fama neses anos era a teoría de Newton. E tamén Napoleón Bonaparte, que paseaba os seus exércitos por Europa.

Co experimento de Young comezaron a cambiar os ventos. O que nel se vía era dificilísimo de explicar a base de partículas de luz: estas, logo de pasaren por un burato, terían que comportarse de forma radicalmente diferente dependendo de se o outro estaba aberto ou pechado. Mais... de que misteriosa maneira podían as partículas *saber* como estaba o burato polo que *non pasaban*?. Ninguén lle atopaba sentido a isto. Pola contra, a explicación era inmediata supoñendo que a luz é unha onda. A cousa é así: a cada punto da pantalla de observación chegaba a luz de dúas ondas, as ondiñas secundarias procedentes de cada burato. Resulta que cando dúas ondas se superpoñen no espazo a perturbación resultante é a suma das que cada unha delas produciría por separado. Iso que-re dicir que se nun punto coinciden dúas ondas da mesma amplitude e unha está na crista e a outra no fondo do val, a perturbación resultante será nula. Dise entón que as ondas están “en oposición de fase” ou que interfieren destrutivamente. Se coinciden as cristas e os vales as ondas están “en fase” e a amplitude da oscilación resultante será o dobre da que produciría cada onda por separado: interfieren construtivamente. Como a enerxía das ondas vai co cadrado da súa amplitude, a enerxía será

cero nos lugares en que estean en oposición de fase e catro veces a dunha onda individual nos lugares nos que estean en fase. Aplicando iso á luz, cuxas vibracións individuais son tan rápidas que os nosos ollos non poden detectalas, teremos zonas escuras nun caso e zonas moi brillantes no outro. Para diferenzas de fase intermedias a interferencia producirá niveis de luz tamén intermedios. As zonas brillantes que se observan co dispositivo de Young son liñas rectas, e medindo a separación entre elas é posible deducir cuns sinxelos cálculos a longura de onda da luz, é dicir, a distancia que hai entre dúas cristas sucesivas. Así o fixo Young, chegando á conclusión de que esta é pequenísima: a longura de onda da luz verde-amarela é da orde de media millonésima de metro! Sabendo que as ondas de luz se propagan a uns 300.000 km/s é inmediato deducir a frecuencia da luz, é dicir, o número de veces que oscila por unidade de tempo nun punto dado: para a luz verde-amarela veñen sendo 600 billóns de veces por segundo! Non é raro que os nosos ollos non poidan decatarse da existencia desas vibracións: son increíblemente rápidas.

Precisamente porque as oscilacións da luz son tan rápidas, para podermos ver fenómenos de interferencia ao noso arredor deben darse condicións moi especiais. A principal delas é que os lugares onde se produce a interferencia construtiva (e a destrutiva) non cambien de sitio dun instante

a outro. E para que iso suceda as ondas teñen que oscilar no tempo da mesma forma, sen que unha delas dea saltos ao chou respecto da outra: dise daquela que as ondas son *coherentes*. Se non sucede isto, é dicir, se as ondas son *incoherentes*, as franxas brillantes e escuras que se forman en cada momento móvense cambiando de lugar moi rapidamente. Como os nosos ollos non son quen de seguir o seu veloz e errático movemento as franxas bórranse e temos a impresión de que a iluminación é uniforme en todos os puntos, e de intensidade dobre da producida por unha onda individual. A luz procedente do Sol, a das lámpadas de casa e a da maioría das fontes artificiais évos moi pouco coherente, polo que non observamos interferencias habitualmente. Por iso, cando acendemos dúas lámpadas, o que vemos é a suma dos seus brillos, sen que aparezan franxas de luz tapizando o noso cuarto.

Malia todo o anterior, a comezos do século XIX a inmensa maioría da comunidade científica seguía pensando que a luz era en realidade un chorro de partículas clásicas e non perdía a esperanza de que as únicas observacións que parecían contradicir iso, as de Young e as de Grimaldi, puidesen finalmente ser explicadas sen recorrer ás ondas. Con ese ánimo a Academia Francesa de Ciencias convocou en 1818 un premio para quen puidese explicar satisfactoriamente todas as propiedades da luz. Famosos científicos da época, como

Arago e Poisson, formaban parte do xurado. Un dos participantes foi un mozo enxeñeiro chamado Agustin Jean Fresnel quen, en contra das ideas da época, enviou ao concurso unha nova teoría ondulatoria. Contan que Poisson, firme defensor da teoría das partículas de luz, revisou con lupa o traballo de Fresnel e atopou que predicía algo *imposible*: se Fresnel tiña razón, no centro mesmo da sombra dun obstáculo circular debería verse un nítido punto brillante! Para Poisson iso era obviamente absurdo e unha mostra evidente da falsidade da teoría de Fresnel. O prudente Arago, que era presidente do xurado e chegaría máis tarde a ser primeiro ministro de Francia, decidiu facer o experimento levado pola curiosidade e... alí estaba o punto de luz! No centro mesmo da sombra! A historia da ciencia é ás veces revirada e ese punto de luz é hoxe coñecido como o *punto de Poisson*, a persoa que teimudamente mantiña que non podía existir.

Fresnel era un tipo espelido. A súa teoría ondulatoria podía explicar todas as propiedades da luz daquela coñecidas. Era moi poderosa e, ao mesmo tempo, tremendamente sinxela: combinaba a idea de Huygens de que cada punto dunha onda é un emisor de ondiñas secundarias coa observación de Young de que sempre que se superpoñen dúas ou máis ondas as perturbacións súmanse e as ondas interfieren. Facendo as contas así Fresnel foi quen de explicar non soamente a reflexión e refracción,

senón tamén os fenómenos de difracción (un de cuxos exemplos máis rechamantes é o punto de Poisson) e mesmo a propagación rectilínea da luz: os puntos da onda que forman un estreito feixe de luz xeran ondiñas secundarias que interfíren de forma construtiva na dirección orixinal de propagación do feixe, e de forma destrutiva nas direccións laterais. O resultado é que o feixe se propagaga esencialmente en liña recta, sen abrirse demasiado. O que fai que a propagación da luz e a do son no noso entorno cotián sexan diferentes é a súa longura de onda. A longura de onda do son é comparable ao tamaño das cousas que temos ao noso arredor. A longura de onda da luz non: é moitísimo máis pequena. Os fenómenos difractivos soamente se fan evidentes cando a longura dunha onda é comparable ao tamaño dos feixes, das aberturas ou dos obstáculos cos que se atopa. Esa é a causa pola que as humanas e humanos tardamos tanto en descubrir a existencia da difracción da luz: só se aprecia ben se observamos o que pasa a escalas moi pequenas.

Disque o gran escritor alemán Wolfgang von Goethe, amante da óptica e apaixonado estudoso da luz e da cor, pediu momentos antes de morrer que lle abrisen algo máis as contraventás da súa alcoba. A frase que pronunciou, e que ninguén coñece con certeza, pasou á historia como *Licht! Mehr Licht!* (“Luz! Máis luz!”) e é adoito empregada como un alegato a favor da era da Razón.

Hai quen sostén que o motivo real foi algo máis prosaico: Goethe soamente querería aumentar a iluminación do seu cuarto, e abrir as contras é o que calquera faría nunha época en que a luz artificial era escasa. Afortunadamente a maior parte da luz presente na natureza, e en particular a reemitida polos obxectos iluminados polo Sol, é esencialmente incoherente. Por ese motivo cando se superpoñen varios feixes de luz a iluminación aumenta uniformemente, sen que aparezan franxas de interferencia. Aínda ben. Se a luz chega a ser coherente o cuarto podía terse inzado de franxas de luz brillantes e escuras e o bo do Wolfgang tería levado a sorpresa da súa vida xusto antes de deixar este mundo. Como *Pedro Navaja*.



Queres ver as interferencias de Young cos teus propios ollos? Podes conseguilo facendo dous pequenos buratos nun cartón fino coa axuda dunha agulla de coser. Fainos tan pequenos como poidas (en canto a punta da agulla atravesese o cartón, para) e tan preto un do outro como che sexa posible (menos de un milímetro). Se pos ese cartón diante da pupila do teu ollo e miras cara unha

farola potente que se atope a uns centos de metros de distancia, preferentemente unha farola alaranxada de vapor de sodio, verás na túa retina a zona luminosa da farola sucada de finísimas liñas rectas brillantes e escuras, orientadas en dirección perpendicular á da liña que une os dous buratos. Son as franxas de interferencia da luz.

Tamén podes ver o punto de Poisson, se tes a man un punteiro láser de baixa potencia (ollo! os de máis de 5 mW son perigosos para a vista e non debes usalos en ningún caso). Pega un pequeno obstáculo circular de bordes lisos a un pedazo de vidro (unha moeda de 1 céntimo pode valer) e ilumínaa co punteiro desde distancia suficiente como para que o feixe de luz cubra a moeda por completo e sobresaia polos seus bordos. Se colocas unha pantalla (un folio en branco vale) a uns cantos metros por detrás verás no centro da sombra da moeda o punto de luz! Mírao na pantalla, non deixes que o feixe de luz do láser entre directamente nos teus ollos. Ah, e se iluminas co láser os dous buratos que antes fixeras no cartón verás sen dificultade na pantalla as franxas de Young.

4. DE QUE ESTÁN FEITAS AS ESTRELAS?

*Nunca poderemos estudar a
composición química das estrelas.*

Auguste Comte, *Curso de Filosofía
Positiva* (1835)

Hai oficios apaixonantes. O das persoas que se dedican á astrofísica e á cosmoloxía é un deles. Quen investiga neste campo non se conforman con pouco: queren saber de que está feito o Universo, como naceu e que vai ser del no futuro. Nada menos.

E teñen que facelo en condicións moi particulares. A maioría das científicas e científicos, ademais de observar o mundo tal cal é, poden realizar experimentos no laboratorio para estudar como se comportan os sistemas investigados. Os experimentos son unha forma intelixente de interrogar á natureza. Experimentar e observar é algo vital

para a ciencia porque todas as teorías científicas, para selo, teñen que ser quen de facer predicións comprobables sobre o que vai suceder, e as observacións e os experimentos son as únicas formas que temos de saber se esas predicións se axustan ou non á realidade. Se as predicións resultan ser incorrectas (e fixemos ben as cousas, claro) entón as teorías correspondentes son falsas e temos que idear teorías novas, non queda outra. Así avanza a ciencia. De nada vale que algo fose dito polo científico máis afamado se a natureza se comporta doutro xeito. En ciencia non funciona o principio de autoridade.

Mais as astrofísicas non poden facer experimentos, no sentido habitual da palabra. Polo menos de momento. Non poden facer nacer unha estrela de tamaño real. Non poden crear un universo e se non lles sae ben crear outro. Non poden facer chocar dous planetas e ver se a colisión dá orixe a unha lúa. Non poden facer interactuar dúas galaxias en condicións controladas. As vixiantes do ceo non poden facer nada diso. Soamente poden observar. Son detectives que teñen prohibido interrogar sospeitosos: o único que se lles permite é estudar as pistas que van deixando. Malia iso sabemos un montón de cousas porque, afortunadamente, do cosmos chéganos moita información. Miremos na dirección que miremos, desde o espazo exterior recibimos un pouco de todo: partículas de altas enerxías, anacos de material de todos os tamaños (todo apunta a que os dinosauros tiveron

ocasión de comprobalo, moi ao seu pesar) e ondas electromagnéticas de todas as frecuencias, desde as ondas de radio até os superenerxéticos fotóns gamma. E luz. Moita luz.

Saber de que están feitas as estrelas é algo que intrigou dende sempre a todos os pobos da Terra. Eran lanternas dos habitantes dos ceos? Pequenos buratos na bóveda celeste que deixaban ver o lume eterno que ardía detrás? Pingas de luz que os deuses repartiran para agasallo dos mortais? Pedras preciosas...? Durante a maior parte da historia da humanidade, a composición das estrelas foi tema de viva discusión, na que cada quen podía dicir máis ou menos o que lle petase sen ter que dar demasiadas explicacións. Sabíase, si, que as estrelas estaban lonxe. Moi lonxe. Tanto que ningunha persoa sensata pensaría en chegar a elas. Por iso o filósofo francés Auguste Comte escribiu ao comezo da lección 19 do seu *Curso de Filosofía Positiva* que a composición química das estrelas era un exemplo das cousas que os seres humanos nunca poderíamos saber con certeza, porque xamais teríamos medios para estudala cientificamente. Comte estaba moi interesado nos límites do coñecemento humano e seguramente puxo este exemplo coa mellor intención do mundo. Mais, aí! Mal podía imaxinar que poucos anos despois da súa morte, a medidados do século XIX, a composición das estrelas deixaría de ser un misterio! E todo foi, unha vez máis, grazas á luz.

A etapa moderna do estudo desta interesante cuestión comezou co sempre xenial Newton. Nunha serie de experimentos cruciais que realizou na segunda metade do século XVII e publicou en 1704 na súa brillante obra *Opticks*, Newton puxo fin a unha longa historia de controversias sobre a natureza da luz branca. Dispersando cun prisma as cores dun feixe de luz solar e recompoñéndoas de novo con outro demostrou convincentemente que a luz branca está composta pola mestura de todas as cores. A luz branca non era, como moitos crían daquela, a forma “orixinal” e “máis pura” da luz, nin as cores eran o resultado da súa deturpación ao atravesar determinados medios materiais. Antes ben, as radiacións luminosas máis básicas son as das cores monocromáticas, as de longura de onda ben definida, semellantes ás que podemos ver no arco da vella ou ás irisacións que se producen cando as raiolas de sol pasan a través do vidro biselado dun espello ou dunha porta da casa. Se facemos que a luz procedente dunha fenda atravesese un prisma de vidro veremos unha faixa de cores que vai cambiando dende o vermello nun extremo (as radiacións visibles de maior longura de onda) até o violeta no outro (as de menor longura de onda), pasando, nesta orde, polo laranxa, amarelo, verde e azul. Ao conxunto destas radiacións monocromáticas denomínaselle *espectro da luz*. A luz branca non é máis que a forma na que os seres humanos percibimos a mestura das radiacións de todas as cores do espectro.

Co tempo fóronse ideando métodos máis eficaces e prácticos para observar o espectro da luz que o uso dun prisma de vidro. Un prisma abre en abano as cores, pero separar sepáraas pouco. Un resultado moito mellor pode obterse coas chamadas redes de difracción. Son estruturas compostas por finísimas liñas paralelas afastadas entre si por unha distancia constante, semellantes a unha grella con moitas liñas en cada milímetro. Cando a luz incide sobre unha estrutura deste tipo as cores saen difractadas en diferentes direccións segundo sexa a súa longura de onda. Seguro que algunha vez viches as cores da luz reflectida nun CD ou DVD: desas falamos. Usando redes de difracción podemos ver o espectro moitísimo mellor do que se pode ver cun prisma. Canto máis xuntas estean as liñas da rede máis e mellor separarán as radiacións monocromáticas que forman a luz.

Unha das persoas que se especializou na fabricación e uso de redes de difracción a comezos do século XIX foi un mozo alemán chamado Joseph von Fraunhofer. Foi el quen, en 1814, inventou o primeiro aparello moderno para observar espectros, o espectroscopio. As redes que usaba eran tan finas que podía analizar os espectros con moito detalle. Observando así a luz do Sol, Fraunhofer decatouse de algo que até daquela pasara desapercibido: aquí e acolá, en lugares aparentemente ao chou do espectro, faltaba a luz dalgunha cor particular. O espectro non era continuo: estaba cheo de ocos!

Por que faltaban cores específicas no espectro da luz do Sol? Era algo misterioso e ninguén tiña unha boa explicación para tan estraño fenómeno. Case ao mesmo tempo descubriuse que ese fenómeno podía reproducirse no laboratorio: facendo pasar un feixe de luz branca por un medio material (por exemplo, un gas), o espectro resultante tiña tamén ocos: faltáballe un conxunto moi característico de longuras de onda, que dependía do gas utilizado. Todo apuntaba a que o gas dalgunha forma as absorbía. E aínda máis: se no canto de iluminar o gas o que se facía era quentalo, este ao quecer emitía luz que estaba composta, precisamente, polas cores que faltaban no espectro anterior. Cada tipo de material semellaba quen de absorber e emitir un conxunto moi particular de longuras de onda. Observar os espectros (de absorción ou de emisión) resultaba ser unha forma utilísima de detectar a presenza de substancias e identificalas. Naceu así unha das técnicas máis poderosas da Física: a espectroscopía.

Contra mediados do século XIX a espectroscopía era xa un procedemento estándar para o estudo dos materiais. Pouco a pouco as científicas e científicos fóronse decatando de que observando con detalle os espectros podían obter moita información. As longuras de onda que faltaban nos espectros de absorción (ou, equivalentemente, as que aparecían nos espectros de emisión) informaban do tipo de elementos ou compostos químicos

que había na mostra estudada. A fondura dos ocos (absorción) ou a intensidade das liñas brillantes (emisión) fornecían información sobre a concentración deses materiais: a maior concentración maior era o efecto. Pero isto non era todo: baseándose nuns xeniais traballos sobre a mecánica dos gases realizados polo escocés James C. Maxwell pronto foi evidente que o ancho das zonas do espectro nas que se absorbe (ou emite) a luz podía relacionarse directamente coa temperatura do gas. E aínda máis: se as liñas de absorción ou emisión asociadas a un elemento están desprazadas no espectro iso débese a que o medio que as produce está movéndose cara nós (se o desprazamento é cara longuras de onda menores, é dicir, cara os azuis) ou alonxándose de nós (se o desprazamento é en sentido contrario, cara o vermello). Medindo con coidado estes desprazamentos pode calcularse con moita precisión a que velocidade se move a materia.

A espectroscopía foi toda unha revolución. Xa non era necesario tocar algo para saber de que estaba feito, abondaba con estudar a luz que nos chegaba del. Se nos laboratorios de química se converteu nunha ferramenta indispensable, no mundo da astronomía fixo nacer unha nova póla da ciencia: a astrofísica. Analizando con espectroscopios a luz procedente das estrelas as astrónomas e astrónomos foron quen de indentificar os principais elementos químicos que as compoñen.

E para sorpresa de moitos e moitas, os espectros da luz estelar revelaron que as estrelas están feitas dos mesmos elementos que temos ao noso redor na Terra. Nada de quintaesencias ou éteres cósmicos. A composición química do Universo era máis familiar do que se esperaba.

Parecía haber soamente unha excepción: en 1868 Lockyer descubriu no espectro do Sol unhas liñas anómalas que non se correspondían con ningún elemento coñecido. Ao novo elemento químico así descuberto púxolle o nome de *helio*, en honra ao deus solar grego. Semellaba que despois de todo a unidade do cosmos non era tal, pero non: poucos anos máis tarde saberíase que o helio tamén está presente na Terra. Non se descubrira antes porque é un gas que reacciona moi pouco con outros elementos e pasara desapercibido. Mais o helio tamén anda por aquí: se algunha vez tivestes nas vosas mans un deses globos de feira que tenden a escapar teimudamente cara ao ceo ao menor despiste do seu propietario, ese era con case total certeza un globo cheo de helio.

Os resultados obtidos mediante as técnicas espectroscópicas son claves para entender a nosa visión actual do Universo. A espectroscopía permitiu coñecer a composición detallada das estrelas e das nubes de gas e po que existen no espazo interestelar, identificando os seus elementos químicos e determinando a súa abundancia. Soubemos así que non todas as estrelas son iguais: a súa compo-

sición varía dependendo da súa idade e das características das nubes de gas e po a partir das cales se formaron. Soubemos tamén que o Universo está basicamente composto por hidróxeno, o elemento máis lixeiro, seguido do helio e dos demais elementos químicos da táboa periódica en proporcións decrecentes. Aprendemos tamén que moitos dos elementos máis pesados se forman nas reaccións nucleares que ocorren no corazón mesmo das estrelas e que son estas, ao morrer, as que os espallan polo espazo. As estrelas, como os humanos, deixan este mundo de formas moi variadas. As de masa semellante á do Sol tenden a facelo de forma relativamente tranquila, botando suavemente o seu último alento. As moi masivas fano de forma explosiva, con efectos de luz e cor que xa quererían poder imitar moitas das pirotécnicas do país: son as afamadas supernovas. As estrelas son as fontes da diversidade química do Universo. A maior parte dos tipos de átomos que forman o teu corpo e todo o que ves ao teu arredor naceron no núcleo dunha delas ou nunha explosión de supernova. Estrelas que ao morrer déronnos a vida.

A espectroscopía permitiu tamén comprobar que o Universo está en expansión. En 1927 Georges Lemaître deducira que as ecuacións da relatividade xeral de Einstein predicían a posibilidade deste fenómeno. Segundo os seus cálculos, canto máis lonxe estivese unha galaxia máis rapidamente debería alonxarse de nós. Naquel momento non

había probas que o demostrasen, pero dous anos despois Edwin Hubble acharía esas probas ao analizar os desprazamentos cara o vermello das liñas espectrais da luz procedente de galaxias lonxanas. As galaxias alonxábanse de nós máis ou menos como estaba predito! Houbo quen pensou por un momento que iso lle devolvía á Terra unha posición privilexiada: se todas as galaxias se alonxan de nós pode que a fin de contas sexa certo que esteamos no centro dun Universo en expansión. Mais non. Non hai lugares especiais: desde calquera galaxia vese exactamente o mesmo. O exemplo que gustan de poñer os cosmólogos para explicalo é o dun globo no que están pintados moitos puntos distribuídos ao chou. Ao inchar o globo os puntos sepáranse uns dos outros e calquera punto ve que todos os demais se separan del, a maior velocidade canta maior sexa a súa distancia. O mesmo ocorre no cosmos.

A forma precisa da relación matemática que describe este fenómeno denomínase Lei de Hubble, malia que fose deducida por Lemaître e que o propio Hubble, inicialmente, non estivese moi seguro de que a interpretación de Lemaître fose correcta. Na súa época, o primeiro terzo do século pasado, estaba de moda pensar que o Universo era estacionario: críase que a gran escala debía ter a mesma pinta fose cal fose o momento en que o observases. Mais se as galaxias se separan unhas das outras iso quere dicir que tempo atrás terán

estado moito máis xuntas, incluso todas reunidas nun mesmo punto. De ser así o Universo non sempre existiu tal como o coñecemos: debeu ter un comezo ben definido, o momento preciso no que empezou a expandirse a partir dese inimaxinablemente denso punto inicial. No seu día este descubrimento causou un auténtico tremor de terra no mundo do pensamento. Albert Einstein non gostaba desta idea. En 1915 dera a coñecer a súa xenial Teoría Xeral da Relatividade, que describe como a materia curva o tecido do espazo-tempo e como este, á súa vez, determina como se move a materia. Para evitar que as solucións das súas ecuacións puidesen permitir un Universo en expansión, daquela algo inaceptable, Einstein engadiulles un termo adicional que denominou *constante cosmolóxica*. Con ese termo introducido de forma, digamos, politicamente pouco correcta, o Universo de Einstein deviña estacionario. Anos despois, ao descubrirse que a expansión do Universo realmente tiña lugar, o grande Albert lamentou amargamente ter feito iso: chegou a dicir que era a metedura de pata máis grande da súa vida. Ironías da historia, os máis recentes descubrimentos sobre a expansión acelerada do Universo suxiren que nas ecuacións relativistas debe haber un termo parecido ao que el aborreceu. Os xenios non sempre dan no albo cando se arrepiñen dos seus erros. Con razón lembraban os clásicos que incluso o mesmo Homero de cando en vez se despistaba.

Pero a espectroscopía ía ser tamén o detonante doutra revolución, máis fonda e inesperada todavía, no mundo da ciencia. Cada tipo de átomo tende a absorber e emitir luz nun conxunto de longuras de onda moi características, diferentes duns átomos a outros. Como están feitos os átomos por dentro para que isto sexa así? A resposta a esa pregunta puxo en xaque todas as certezas da Física clásica e abriu as portas á revolución cuántica.

Shakespeare escribiu unha vez que somos a materia da que están feitos os soños. Poucas cousas son tan certas e fermosas. Unha delas é que somos da materia da que están feitas as estrelas.



Se observas nun CD ou DVD os reflexos dunha lámpada verás as cores do seu espectro. O motivo é que os CDs e DVDs, a escala microscópica, consisten en rañuras moi próximas que forman unha rede de difracción: a distancia típica entre dous sucos é de 1.6 milésimas de milímetro no primeiro caso e dunhas 0.8 milésimas de milímetro no segundo.

Se ti non es moito de facer experimentos e prefires observar de vagar a natureza, olla para os diversos tipos de insectos cuxas cores semellan variar segundo o ángulo co que os mires: a difracción producida polas redes periódicas que teñen no seu corpo é unha das principais responsables dese fenómeno.

5. LÍMITE DE VELOCIDADE

*Nada viaxa máis rápido que a luz, coa posible
excepción das malas noticias, que teñen as
súas propias leis.*

Douglas Noel Adams, *Mostly Harmless* (1992)

Se algunha vez te persegue un raio de luz non intentes escapar correndo diante dela a velocidade constante. Non é unha boa idea.

Se o fas vaite pillar si ou si, porque por moito que corras a luz sempre se acercará a ti á mesma velocidade: 299.792,458 kilómetros por segundo. Iso veñen sendo máis de mil millóns de kilómetros por hora! O realmente intrigante é que iso sucederá “por moito que corras...” Non soa moi normal, xa o sei. O sentido común diría que se liscas da luz esta debería aproximarse a ti máis lentamente. Se foses máis rápido ca ela incluso poderías deixala atrás. Pero non. As cousas da natureza non che

funcionan así. Por raro que pareza a luz sempre te perseguirá á mesma velocidade, independentemente de cal sexa a túa. Non tes escapatoria.

Se isto che parece estraño, agarda a saber máis cousas. A velocidade da luz resérvanos moitas outras sorpresas.

Xa vimos que Römer, aló polo século XVII, deu co seu valor aproximado estudando os adiantos e os retrasos das eclipses dos satélites de Xúpiter. Desde sempre se soubera que a luz era moi veloz, e grazas a Römer sóubose por primeira vez canto. Mais ficaba un grande enigma por resolver: por que ten a luz *precisamente esa* velocidade e non calquera outra?

A comezos do século XIX case todos os científicos, convencidos por Fresnel de que a luz era unha onda, tiñan a resposta preparada: a luz ten a velocidade que ten que ter. E non o dicían por dicir. Nesa época sempre que falaban de ondas pensaban en ondas na materia: por exemplo en oscilacións da altura dunha superficie, como as ondas que vemos no mar, ou en oscilacións da densidade ou da presión, como as ondas de son no ar ou as ondas dos tremores de terra. Resulta que esas ondas se propagan cunha velocidade determinada, que depende das características do medio e tamén do tipo de onda. En xeral, canto máis ríxido e menos denso é un medio, máis rapidamente se propagan as ondas nel. Isto é moi útil para estudar a estrutura interna do noso planeta e tamén a

doutros corpos celestes, como a Lúa. As ondas sísmicas que producen os terremotos viaxan grandes distancias polo interior e pola superficie da Terra, e medindo con precisión os momentos nos que chegan a observatorios situados en diferentes lugares pódese obter unha gran cantidade de información sobre as propiedades e dimensións das capas que forman o interior do noso planeta. Por exemplo, se as ondas sísmicas atopan no seu camiño zonas máis ríxidas a súa velocidade será maior e chegarán con menos retardo a un observatorio dado. Os sismógrafos instalados por todo o mundo fornecen esta información aproveitando os tremores que se producen a diario.

Diciamos antes que a velocidade dunha onda non depende soamente do medio polo que viaxa, senón tamén de como é a onda. Hai dous tipos principais: as ondas que oscilan perpendicularmente á dirección de propagación, facendo abanear as cousas á dereita e á esquerda ou de arriba abaixo mentres a onda avanza cara adiante, e as que o fan na mesma dirección de propagación, facendo oscilar as cousas cara adiante e cara atrás. As primeiras chámanse “ondas *s*” e as segundas “ondas *p*”. As ondas *s* teñen unha particularidade moi especial: soamente poden propagarse en corpos sólidos.

Hai douscentos anos os científicos que estudaban a luz tiveron por un intre a sensación de avanzaren con paso firme por un camiño seguro.

As cousas semellaban ir cadrando. En poucas palabras isto é o que pensaban: debía existir algún tipo de medio material cuxas deformacións ou vibracións incrivelmente rápidas eran iso que os humanos percibimos como luz. Certos experimentos e consideracións teóricas facían pensar que a luz era, predominantemente, unha onda tipo *s*. O medio polo que se propagaba a luz tiña pois que ser un sólido ou algo moi parecido. As propiedades mecánicas dese medio (a súa densidade, rixidez, etc) determinarían a velocidade das ondas luminosas. Para entender por que a luz tiña a velocidade que tiña soamente había que coñecer que tipo de sólido era ese.

Mais o doce soño da certeza pronto deu paso ao pesadelo do desconcerto máis absoluto. Ao entrar nos detalles as cousas complicábanse moitísimo: todo eran incógnitas e enigmas sen resolver. Ese medio no que presuntamente se propagaba a luz era realmente misterioso. A súa composición era totalmente descoñecida. O único que se sabía del era o seu nome: o *éter luminífero*. Tiña nome, madia leva, e pouco máis. Críase que debía estar por todas partes, enchendo completamente o espazo e infiltrándose dalgún xeito nos materiais transparentes, como a auga, o vidro ou o aire, porque como calquera pode comprobar a luz se propaga a través deles. Mais o tal éter tiña que ser un medio realmente especial. Para que a velocidade

da luz fose tan grande o éter tiña que ser un sólido extremadamente ríxido. Moito máis do que calquera outro material coñecido. As ondas sísmicas, por exemplo, propáganse a uns cinco kilómetros por segundo a través de rochas graníticas como as que soportan o chan dunha grande parte do noso país. As ondas luminosas propáganse polo espazo sesenta mil veces máis rápido. Porén, ao tempo que incrivelmente ríxido, ese medio tiña que ser inimaxinablemente tenue: se nos chegaba luz das estrelas, da Lúa e dos planetas do Sistema Solar, era sinal de que todos eles estaban inmersos no océano de éter. Pero, como fixeron notar os astrónomos, a Lúa e os planetas levaban séculos e séculos movéndose polo espazo cunha tenaz regularidade e non había signo algún de que o éter dificultase o máis mínimo ese movemento. O éter non exercía sobre eles ningunha resistencia apreciable. O material máis ríxido resultaba ser tamén o máis tenue. Moitísimo máis tenue que o aire! Era un *éter sutil*, como algúns gustaban de dicir. Realmente ninguén acertaba a imaxinar de que podía estar feito, pero iso non impedía que todo o mundo crese na súa existencia. De que outra forma, se non, poderían propagarse as ondas de luz?

Hoxe sabemos que a idea do éter era innecesaria, porque a natureza e a propagación da luz explícanse perfectamente sen recorrer a ela. Pero non era unha idea inxenua. Os nosos antecesores no mundo da ciencia non tolearan. O que facían,

visto desde a súa perspectiva, era algo moi sensato. A partir do século xvii a física embarcárase no que hoxe se deu en chamar, de forma algo pomposa, o *programa mecanicista*. Consistía en intentar explicar todos os fenómenos da natureza en base a partículas materiais que interactuaban entre sí mediante forzas centrais, é dicir, forzas orientadas na dirección que une os seus centros. Esas partículas podían atraerse, repelerse, chocar... Dábase por feito que os medios materiais, *éter luminífero* incluído, estaban compostos por partículas que se comportaban desa forma e que as súas propiedades derivaban desa composición. Desde o punto de vista mecanicista a natureza da luz non tiña grandes misterios: viría sendo a forma na que os humanos percibimos as ondas que se propagan nese éter. Os avances no coñecemento demostraron, como veremos, que este esquema era erróneo, pero non por iso era incoherente: as e os científicos que dedicaron as súas vidas a estudar a luz dende esta perspectiva facían a mellor ciencia que se facía no seu momento.

O espazo mecanicista estaba pois inzado dunha materia descoñecida. Isto non era unha idea extraña para a época. Xa dicían os clásicos que a natureza aborrece o baleiro, e o baleiro mecanicista (como o da física actual, pero por outros motivos) estaba, abofé, ben cheo. De éteres luminíferos, de forzas eléctricas, magnéticas e gravitatorias que actuaban a distancia, de fluídos calóricos e do que

fixese falla. Claro que un espazo repleto de entidades e substancias de todo tipo mesturadas entre si, de composición descoñecida e propiedades desconcertantes, non resultaba a imaxe máis estética do mundo.

En física valoramos moito a elegancia que provén da simplicidade. A comezos do século XIX, e grazas aos traballos previos de Ampère, Faraday, Biot e tantos outros, a comunidade científica foi caendo na conta de que a electricidade e o magnetismo non eran fenómenos independentes, senón que estaban estreitamente relacionados. Cargas eléctricas en movemento, o que chamamos *correntes*, producían efectos magnéticos, e imáns en movemento eran quen de producir correntes eléctricas. Os fenómenos eléctricos e magnéticos eran en realidade formas particulares dunha única interacción: o electromagnetismo. O camiño para unificar as forzas da natureza ía dando os seus primeiros e titubeantes pasos.

A gran noticia chegou unhas décadas máis tarde. En 1865 o escocés James Clerk Maxwell publicou unha nova teoría sobre a electricidade e o magnetismo que permitía calcular doadamente a velocidade coa que se debían propagar as ondas electromagnéticas no seu correspondente éter. Para facer este cálculo soamente necesitaba saber o valor de dúas propiedades do medio —unha de tipo eléctrico e outra de tipo magnético— que levaban sendo medidas desde había xa moito tempo en experimentos que nada tiñan que ver con

ondas e que eran moi ben coñecidas. Ao calcular a velocidade das ondas electromagnéticas Maxwell descubriu que... era igual á velocidade da luz! Nas súas propias palabras:

Esa velocidade é tan semellante á da luz que temos fortes razóns para concluír que a luz (incluíndo a calor radiante, e outras radiacións se as houber) é unha perturbación electromagnética en forma de ondas que se propagan a través do campo electromagnético de acordo coas leis do electromagnetismo.

A luz era en realidade unha onda electromagnética! O éter luminífero e o electromagnético resultaban ser o mesmo medio. Os científicos e científicas reafirmáronse no seu convencemento de iren polo bo camiño. A luz, a electricidade e o magnetismo viñan sendo aspectos diferentes dunha mesma cousa, e as súas múltiples manifestacións podían explicarse como resultado das deformacións dun único medio material. A natureza, con todos os seus complicados fenómenos, íase simplificando a paso de xigante ao analizala desde o punto de vista da física. Cousas aparentemente moi dispares resultaban ser a mesma, vista desde diferentes perspectivas.

A unificación mecanicista dos fenómenos da natureza non rematou aí. O propio Maxwell, despois de estudar o comportamento dos gases, demostrou que moitas das súas propiedades podían explicarse en termos estatísticos supoñendo que estaban compostos por partículas en movemento

que tamén interactuaban entre si mediante forzas centrais. A temperatura non era máis que a manifestación macroscópica da velocidade desas partículas: a enerxía térmica viña sendo en realidade enerxía cinética! Non é de estrañar que as físicas e físicos da segunda metade do século XIX pensasen que xa tiñan ben controlada a estrutura básica do mundo e que o único que lles faltaba por saber eran algúns detalles. Moitos estaban de acordo en que a misteriosa composición do éter era unha tacha incómoda que había que resolver, pero... e que? O programa mecanicista tiña un éxito colosal.

Mal podían imaxinar que á volta da esquina agardáboas unha chea de sorpresas, e que unha das maiores viría precisamente da man da velocidade da luz. Para valorar o que significou temos que facer unha pequena excursión. Desde Galileo e Newton os científicos admitían que o tempo e a posición nos que ocorre calquera suceso son conceptos relativos, no senso trivial de que dependen do momento no que comecemos a contar o tempo e do punto do espazo desde o que midamos as distancias. Tamén admitían que a velocidade é relativa: a velocidade coa que ves moverse un obxecto varía dependendo de cal sexa a túa, como doadamente podes comprobar se observas os outros vehículos mentres viaxas por algunha estrada galega. Pero o tempo e o espazo, de seu, eran entes absolutos: había *un* tempo e *un* espazo, iguais

para todos os observadores. É certo que ninguén tiña unha forma práctica de saber se un corpo estaba en repouso absoluto ou se movía con velocidade constante nese espazo común universal pero *en principio* era razoable pensar que había corpos que se movían en termos absolutos e corpos que non. O éter luminífero, por exemplo, era o candidato perfecto para estar en repouso absoluto. Que sentido tería que se movese?

Algúns científicos pensaron que sería moi interesante medir a velocidade coa que se movía a Terra, o noso planeta, dentro dese océano universal de éter. E para iso decidiron utilizar a luz. A idea que tiñan era moi elegante: a Terra debía moverse case ininterrompidamente con respecto ao éter, porque ao cabo dun ano o noso planeta dá unha volta enteira ao redor do Sol. Como a súa velocidade cambia continuamente de dirección —e en certa medida tamén de magnitude— é obvio que non podería estar case nunca en repouso absoluto. E ao movérmonos polo éter —pensaban— a velocidade das ondas luminosas, vistas desde a Terra, debería ser diferente se nos chegan de fronte ou nos alcanzan desde atrás. É algo parecido ao que sucede cando vas nun barco e hai algo de mar de fondo: a velocidade coa que ves moverse as ondas do mar é maior cando as colles de proa (a súa velocidade e a do barco, medidas desde terra firme, súmanse) que cando veñen de popa (as dúas velocidades réstanse). A diferenza, dividida por dous, é

a velocidade do barco respecto á terra. Non é que sexa moi práctico medir desa forma velocidades no mar, porque habería que virar en redondo cada pouco e así non hai quen chegue a tempo a ningures, pero en principio podería facerse. Coa luz todo semellaba máis doado: soamente había que medir as velocidades coas que nos chega desde direccións diferentes. A diferenza entre ambas (dividida por un factor adecuado que dependería do ángulo que formasen esas direccións) indicaríanos a velocidade absoluta da Terra polo espazo.

A cousa era doada de imaxinar pero un chisco máis complicada de facer: todos sabían que a velocidade da Terra, por grande que fose, tiña que ser moitísimo menor que a da luz. Iso quería dicir que habería que medir con moitísima precisión unha diferenza minúscula entre dúas cantidades tremendamente grandes. Como facelo? Dúas persoas foron quen de imaxinar a solución. Chamábanse Albert A. Michelson e Edward W. Morley. En 1887 M&M decatáronse de que as interferencias podían servir para medir esta diferenza de velocidade. A súa idea era facer interferir dous feixes de luz que saíndo da mesma fonte percorresen camiños de igual lonxitude en direccións perpendiculares e se xuntasen logo de novo. Para iso deseñaron un enxeñoso dispositivo con espellos normais e *divisores de feixe* (espellos que deixan pasar a metade da luz e reflicten a outra metade). Ao se mover a Terra polo océano de éter carrexando consigo este

dispositivo a luz debería tardar algo máis en percorrer un dos camiños do que tardaría en percorrer o outro, porque a súa velocidade debería ser lixeiramente diferente ao longo de cada dirección, ou cando menos iso pensaban. As ondas luminosas, que saíran da fonte de luz vibrando igual, estarían algo desfasadas entre si ao interferiren, e a intensidade da interferencia non sería a máxima posible, pois esta só se dá cando dúas ondas oscilan á vez, ou como se di habitualmente, cando están *en fase*. Orientando o dispositivo en diferentes direccións a diferenza de fase entre as ondas debería variar, e con ela a intensidade observada. Michelson e Morley esperaban determinar a velocidade da Terra analizando estas variacións. Como eran xente precavida, e por se se dese a circunstancia casual de que a Terra estivese en repouso absoluto xustamente no momento de faceren as medidas, planearon repetir o experimento varios meses despois. A Terra non podía estar en repouso sempre!

O resultado foi sorprendente. O cambio de velocidade esperado non aparecía por ningures. Por moitas melloras que introducisen nos equipos experimentais e por moito coidado que tivesen ao repetir as medidas e procesar os datos o resultado non variaba: a luz parecía propagarse sempre coa mesma velocidade, independentemente da dirección considerada. A Terra parecía non moverse respecto ao éter. Como era iso posible? Estaba a Terra tamén en repouso absoluto? Eramos de novo

o centro do Universo? Ou se cadra a Terra arras- traba parte do éter con ela...? Todas as hipóteses elaboradas para intentar explicar este fenómeno resultaron ser, por uns ou outros motivos, moi insatisfactorias. O desconcerto era xeral.

A resposta a esta embarullada situación chegou en 1905, da man dun mozo alemán daquela prac- ticamente descoñecido nos círculos científicos. Tiña vinteseis anos, un ollar doce e o cabelo albo- rotado, e traballaba como técnico examinador na Oficina de Patentes de Berna. O seu nome: Albert Einstein. Un pensador infatigable, creativo e per- manentemente preocupado por separar as cousas esenciais das accesorias. Matinando sobre a luz e o movemento, e enfrontado aos dilemas que aco- saban á física da súa época, decidiu ir á raíz das cousas. Nun precioso artigo titulado *Sobre a elec- trodinámica dos corpos en movemento* propuxo que a natureza está constituída de tal forma que se un observador se move a velocidade constante respecto a outro sempre se cumpren dúas condi- cións esenciais: (a) a velocidade da luz é a mesma para os dous, con independencia de como se mo- van eles e a fonte que a emite e (b) as leis da física teñen a mesma forma para ambos observadores. Con estas hipóteses, estrañas a primeira vista e que contradicían a mecánica clásica de Newton, non facía máis que seguir a tradición do vello Galileo levándoa até as súas (pen)últimas consecuencias: se dous observadores se moven con velocidade

relativa constante, a natureza compórtase da mesma forma a ollos de ambos. Non hai forma de imaxinar ningún experimento que nos permita determinar cal deles está máis cerca do repouso absoluto. E se non hai forma de saber se alguén está en repouso absoluto este concepto deixa de ter sentido. Coas hipóteses de Einstein quedaba claro tamén que a luz non podía ser o resultado das vibracións dun medio material, tal como se pensaba na época. A luz tiña que ser outra cousa. O éter —ese medio até entón considerado imprescindible e de características tan estrañas— deixou de ser necesario de vez. O material máis ríxido e tenue xamais imaxinado esvaeceuse para sempre. Hoxe, apenas cen anos despois, ninguén o recorda xa.

Os dous principios de Albert abríronnos as portas dun Universo tremendamente elegante. Pero as súas consecuencias para as ideas tradicionais que a cultura occidental mantivera até entón sobre o espazo e o tempo foron simplemente demoleadoras. Non é estraño que resultasen moi difíciles de aceptar para as xentes da época (e para algunha xente de hoxe): se Albert tiña razón, e co tempo quedou claro que a tiña, a distancia entre dous sucesos calquera e o intervalo de tempo que transcorre entre eles non poden ser os mesmos para un observador que para outro que se mova con velocidade constante respecto ao primeiro. Cada un dos observadores verá como o tamaño das cousas que acompañan ao outro se acurta, e como reloxos exactamente iguais marcan o paso do tempo

máis lentamente se están en movemento. O espazo e o tempo deixan de ser realidades absolutas, iguais para todos, para pasar a ser cousas que dependen de cada observador. E non no sentido trivial mencionado ao comezo deste capítulo, senón dunha forma moito máis fonda: os intervalos de tempo entre sucesos e as distancias que os separan teñen valores distintos dependendo de como nos movamos. E como todos os observadores que se moven a velocidade constante son equivalentes porque non hai ningún que sexa máis “natural” que outro, o tempo e o espazo, que son o tempo e o espazo dos sucesos tal como os miden os observadores ou non son nada, deixan de ser entidades absolutas.

Debido a isto a teoría de Einstein comezou a coñecerse popularmente como a *Teoría da Relatividade* e chegou a ser un lugar común dicir, con grande solemnidade, que “todo é relativo”, frase que escoitamos aínda hoxe con certa frecuencia e que serve para argumentar con aparente eficacia tanto pola banda de Laíño como pola de Lestrove. Porén, o que Albert quería dicir en 1905 era algo ben diferente: o mundo ten o mesmo aspecto, visto por todos os observadores que se moven entre si con velocidade constante. As ecuacións da física teñen a mesma forma e a velocidade da luz é sempre a mesma. As distancias e os intervalos temporais poden cambiar dun observador a outro, pero hai unha certa combinación desas magnitu-

des que non cambia, e na que xoga un papel esencial a velocidade da luz. Eis a súa gran achega: o importante non cambia, os detalles si. Por iso a el teríalle gustado que o nome da súa teoría fose máis ben a *Teoría dos Invariantes*, é dicir, a teoría das magnitudes que non cambian. Pero xa se sabe que é quen escribe a historia, e non os seus protagonistas, quen decide o nome das cousas.

Pouco despois, nese mesmo ano, Albert publicou outro precioso artigo titulado *Depende a inercia dun corpo do seu contido en enerxía?* Con *inercia* quería dicir o que comunmente chamamos masa, ou máis precisamente masa inercial. A masa inercial mide canto se resiste un corpo a cambiar o seu estado de movemento, por exemplo a acelerarse, frear ou cambiar de dirección, cando lle aplicamos unha forza. Sempre se crera que a masa era unha característica propia, constante e inmutable da materia. Einstein demostrou brillantemente que canto maior sexa a velocidade dun corpo máis nos custará variar a forma na que se move. A masa depende da velocidade. En particular, se a velocidade dun obxecto se achega á velocidade da luz a súa masa faise cada vez máis grande, aumentando sen límite. Á velocidade da luz a súa masa sería infinita! E se a súa masa é infinita non podemos facer que o corpo se mova aínda máis rapidamente, porque para iso precisaríamos aplicarlle unha forza tamén infinita. A velocidade da luz é pois un límite absoluto de velocidade: ningún corpo mate-

rial pode chegar a ela e moito menos sobrepasala. Soamente as partículas *sen masa* (é dicir, aquelas cuxa masa sería cero se estivesen en repouso, como por exemplo os fotóns, as partículas de luz) poden moverse a esa velocidade.

Volvendo ao tema do comezo, a constancia da velocidade da luz é unha das características fundamentais do noso Universo. Así que se algún día estás ao mando dunha nave da Flota Solidaria Interestelar e un malvado navío Corosiano te ataca con armas láser non intentes deixar atrás os seus disparos. Non o conseguirás. De pouco vale escapar: o mellor que podes facer é tratar de esquivalos. Pero ollo ao piollo. Para saber en que momento vas ser atacado terás que utilizar a intuición: nada viaxa máis rápido que a luz, nin sequera a información sobre ela. Non poderás ver o disparo láser antes de que este chegue a ti. E cando o vexas, se é que o ves... será demasiado tarde.



A maior parte dos efectos relativistas soamente comezan a apreciarse ben a velocidades moi altas, próximas á da luz. Ás velocidades usuais ás que nos movemos ou se moven as cousas na nosa contorna estes efectos son de moi pequena magnitude, pero iso non quere dicir que non existan. Se estiveses á beira dunha estrada e puidesedes fixarte con detalle suficiente nas persoas que se

aloxan de ti viaxando nun coche a 100 km/h verías que o seu tempo transcorre un 0.00000000000004% máis lento que o teu, e que a súa masa é correspondentemente maior. A efectos prácticos, nada de que preocuparse. Mais se as velocidades fosen moito máis altas, como as das partículas que viaxan polo corazón dos grandes aceleradores, os cambios nas distancias, intervalos temporais e masas serían evidentes. Cando vexas andar pola rúa os teus veciños e veciñas, lembra: os vosos tempos están relacionados, pero non son os mesmos. Aínda que isto non che valerá de desculpa se chegas tarde a unha festa.

6. GRANS DE LUZ

Canto máis persegues os cuantos, mellor se esconden.

Albert Einstein a Paul Ehrenfest (1924)

É posible diminuír a intensidade da luz tanto como queiramos sen chegar a apagala de todo? Calquera diría que si. Pero a natureza, unha vez máis, ten as súas propias regras de xogo.

A imaxinación, claro, é libre. Podemos *imaxinar* unha pantalla de móbil cun bo control de brillo que nos permita ir baixando aos poucos e de forma continua a súa intensidade até que esta remate por esvaecerse por completo. Ou unha lámpada que poidamos ir atenuando devagar cun regulador adecuado até que se apague totalmente. De feito, pode que máis dunha vez teñades visto trebellos que fan algo parecido. Mais esa diminución aparentemente suave e continua da potencia da luz é

soamente unha ilusión, froito da forma na que o noso sistema visual percibe a realidade.

A maioría das físicas e físicos de finais do século XIX tamén afirmarían sen moitas dúbidas que a intensidade da luz pode reducirse a valores tan pequenos como un queira, sen chegar a alcanzar o cero. E tiñan as súas razóns para pensar así. A luz para calquera deles non era máis (nin menos) que unha onda electromagnética que pode ser detectada polo sistema visual humano. Resulta que a enerxía dunha onda de luz depende do cadrado da súa amplitude. E en principio nada nos impide imaxinar que esta amplitude poida ir diminuíndo de forma paulatina até ser infinitamente pequena.

A amplitude dunha onda pode especificarse mediante un número real, e os números reais teñen propiedades moi curiosas: Non se poden contar, no sentido habitual do termo, hainos con tantos decimais como queiramos e entre cada dous números reais, por moi xuntos que estean, sempre hai infinitos números dese tipo. E o que é máis importante: poden ordenarse formando unha liña recta continua, sen ocos nin interrupcións de ningunha clase. En consecuencia, e a diferenza do que ocorre cos números naturais que son os que usamos para contar, non existe “o número real seguinte a outro número real”, nin “o número real máis pequeno que sexa maior que cero”. Non é que non os poidamos imaxinar ou calcular. É que non existen. Sempre hai outros números polo

medio. A finais do século XIX o matemático Leopold Kronecker dicía con certa retranca que os números naturais foran inventados polos deuses e que todos os demais, incluídos os reais, eran invento dos mortais. En calquera caso, se a amplitude dunha onda pode ter calquera valor real entón a súa intensidade pode ser tan pequena como queiramos sen chegar nunca a ser cero.

Con todo, a comezos do século XX xa había algunhas observacións que non cadraban ben con esta forma de entender a intensidade da luz. Unha delas tiña que ver co que se coñece como *radiación do corpo negro*. Esta é a radiación que emitiría un obxecto ideal que fose quen de absorber toda a radiación que lle chegue e que estea en equilibrio termodinámico coa súa contorna. O seu espectro, é dicir, a distribución da potencia emitida nos diferentes intervalos de longuras de onda, era algo ben coñecido nesa época. Resulta que depende basicamente da temperatura do corpo. O nome de *corpo negro* venlle de que, a temperatura ambiente, a maior parte da radiación que produce está concentrada na banda infravermella, que os humanos non podemos ver. Ao absorber toda a luz que lle chega e non emitir ningunha radiación visible resulta ser un obxecto totalmente negro para nosos ollos. Pero a altas temperaturas os corpos negros non son nin moito menos negros: as estrelas que vemos, comezando polo Sol, teñen espectros moi semellantes aos dun corpo negro

con temperaturas da orde dos milleiros de graos, e emiten grandes cantidades de luz visible. Pois ben, todos os intentos teóricos de explicar a forma que tiña o espectro do corpo negro e a súa dependencia coa temperatura, baseados en que unha onda de frecuencia dada podía ter calquera enerxía, resultaron infrutuosos.

Foi no ano 1900 cando Max Planck, daquela un respectado físico alemán, deduciu teoricamente a fórmula que explicaba a radiación do corpo negro coa axuda dunha hipótese a primeira vista algo estraña: unha onda de luz de frecuencia dada podía ter calquera enerxía, si, pero os intercambios de enerxía entre esa onda e a materia soamente podían producirse en cantidades fixas e iguais cada vez, como se a luz se absorbese ou emitise en forma de grans ou *cuantos* de radiación de enerxía constante e moi ben definida. A enerxía de cada cuanto de luz viña sendo proporcional á súa frecuencia. A constante de proporcionalidade, ou *constante de Planck*, é unha das chaves do noso Universo. Medida en unidades habituais é tremendamente pequena: un cero seguido de trinta e tres ceros decimais, e despois un seis. E malia que a frecuencia da luz visible medida en unidades semellantes é moi elevada (da orde dun cinco seguido de catorce ceros), a enerxía individual dun cuanto de luz, que é o produto de ambas, resulta ser ínfima.

Na época de Planck non tiñan nada claro por que, para deducir teoricamente a fórmula da radiación do corpo negro, había que supoñer que os intercambios de enerxía entre a materia e a radiación tiñan lugar en forma de cuantos. Planck fixera uso desa hipótese, si, e a súa dedución da fórmula era inmediata e realmente elegante. Todo o mundo sabía que se a luz e a materia puidesen intercambiar enerxía en cantidades continuas as contas non saían. O “truco” de Planck foi moi admirado polos seus contemporáneos, pero deixaba un certo regusto amargo: parecía unha receita matemática arbitraria, porque ninguén cría realmente que a enerxía da luz fose discontinua. O que se pensaba daquela, como moito, era que a materia debía de estar composta por algun tipo de entidades básicas chamadas *resoadores* (hoxe chamariámolos *átomos*) que só podían emitir e absorber enerxía desa forma. Como eran por dentro os resoadores para que as cousas funcionasen así? En 1900 ninguén o sabía. Mais todo o mundo daba por feito que a enerxía dunha onda de luz, en por si, podería ter calquera valor.

Outra cousa que tampouco cadraba moito era o que coñecemos como *efecto fotoeléctrico*. É un fenómeno que consiste en que ao iluminar a superficie dun material con radiación electromagnética de frecuencia adecuada despréndense electróns que saen disparados del. A explicación a grandes rasgos era sinxela: os electróns absorben enerxía

da onda electromagnética e dedican parte desa enerxía a rachar as ataduras que os manteñen ligados ao material, escapando así do mesmo. O resto é transformado en enerxía cinética, e os electróns gañan velocidade. Pero os detalles eran desconcertantes: os experimentadores observaran que, por moita enerxía que tivese a luz, se a súa frecuencia era inferior a un certo valor (que dependía do material) non saían electróns. Para que comezasen a saír a luz tiña que ter unha frecuencia igual ou superior a ese valor mínimo. Por outra banda, a velocidade máxima que gañaban os electróns non dependía da intensidade da luz, senón da súa frecuencia. O que si variaba coa intensidade era o número de electróns que abandonaban o material. Ninguén daba atopado unha explicación satisfactoria para estes *detalles*. Todo o mundo aceptaba a continuidade da enerxía da luz e deixábanse os miolos pensando como poderían ser os electróns e os materiais para que isto sucedese precisamente así e non doutra maneira.

Pero no ano marabilloso de 1905 Albert Einstein, facendo o que mellor sabía facer, mirou o problema desde un ángulo diferente e deu a coñecer outra das súas intuicións xeniais: se cadra a luz soamente pode existir en forma de pequenos pedazos ou grans de enerxía ben definida, os cuantos de radiación. A idea publicouna nun precioso artigo titulado *Un punto de vista heurístico sobre a produción e transformación da luz*. Con heurístico

quería dicir convincente, verosímil, mais se cadra non demasiado rigoroso. Ou sexa: propoñía esa idea como unha posibilidade, sen aparentemente pretender demostrar que as cousas fosen necesariamente así. Comezaba o seu artigo contando que lle chamaba moito a atención a falta de simetría que había entre a descrición física do comportamento das partículas materiais (para o que se necesitaba dar un número moi grande pero finito de datos, como as súas masas, posicións e velocidades) e o dos campos de forza (que se describen mediante funcións definidas no conxunto infinito e continuo de puntos do espazo). E continuaba dicindo:

(...) as observacións ópticas refírense a promedios temporais, antes que a valores instantáneos; e é perfectamente concebible, malia a completa confirmación experimental da teoría da difracción, reflexión, refracción, dispersión, etc, que a teoría da luz, que opera con funcións espaciais continuas, leve a contradicións cando se aplique aos fenómenos de emisión e transformación da luz

Os ósos de Maxwell, enterrado no camposanto da igrexa parroquial de Parton á beira do río Dee, en Escocia, deberon renxer ao se escribiren esas verbas. Pero Einstein pasou rapidamente das intuicións aos números e fixo un cálculo moi do gusto dos lectores científicos da época: estudou como variaba co volume unha magnitude termodinámica coñecida co nome de *entropía*, que a

grandes rasgos mide o desordenado que está un sistema. Einstein amosou que a entropía da luz varía da mesma forma na que o faría a dun gas ideal composto por partículas que tivesen precisamente a enerxía que teñen os cuantos de luz. Iso, por suposto, non é unha demostración de que a luz estea necesariamente composta por cuantos pero é un resultado tremendamente suxestivo. E para rematar o seu labor persuasivo Einstein describiu, de forma áxil e elegante, que fenómenos até entón inexplicados poderían ser entendidos facilmente se se admitise que a luz está formada por cuantos ou partículas elementais, ás que anos despois se lles daría o nome de *fotóns*.

Un deses fenómenos era, precisamente, o efecto fotoeléctrico: Einstein propuxo que cada electrón expulsado do material era o resultado da absorción dun cuanto de luz. Daquela, se a luz é toda da mesma frecuencia (monocromática) todos os cuantos terán a mesma enerxía e os electróns tenderán a saír coa mesma velocidade máxima, que virá determinada pola enerxía sobranante unha vez que á enerxía do cuanto incidente lle descontamos a enerxía necesaria para liberar o electrón das ataduras que o manteñen ligado ao material do que procede. Se aumentamos a enerxía do feixe de luz pola vía de aumentar a súa frecuencia, cada cuanto individual terá máis enerxía e xa que logo os electróns tenderán a ser máis velozes; se pola contra aumentamos a enerxía da luz sen variar a

súa frecuencia, é dicir, se o que facemos é aumentar o número de cuantos que hai no feixe, sairán máis electróns, pero igual de velozes que antes. O efecto fotoeléctrico comezaba a ter senso.

O argumento heurístico de Albert baseado na termodinámica dos gases e a súa elegante explicación do efecto fotoeléctrico, xunto coa doutros fenomenos intrigantes, foron unha auténtica sacudida para os seus lectores: a hipótese cuántica resolvía dun plumazo moitos problemas que a teoría electromagnética de Maxwell, o edificio máis precioso da física da época, non podía explicar! Porén, a aceptación da teoría de Einstein non foi inmediata: houbo que agardar case un lustro para que experimentos moi precisos realizados en diversos campos da Física (entre eles algúns relacionados con como reaccionan os corpos ao lles subministrar calor) demostrasen que os seus cálculos eran correctos. A comunidade científica recoñeceu entón que era verosímil que a luz tivese unha estrutura granular. Despois de todo, o “truco” de Planck non era un mero artificio matemático! A natureza comportábase realmente así! A partir dese momento, as físicas e físicos tiveron que cambiar radicalmente a súa forma de pensar.

Sucede habitualmente en ciencia que a resposta a unha pregunta provoca cen interrogantes novos, e este caso non foi unha excepción.

Unha das primeiras cousas que houbo que resolver foi que pasaba entón coas ondas de luz.

Porque a luz se comporta en moitos casos como unha onda: iso era algo que nin o mesmo Einstein discutía. Unha gran variedade de fenómenos, como os de interferencia ou difracción, soamente se explican ben cunha teoría ondulatoria. Mais a existencia de cuantos de radiación inevitablemente evocaba a existencia de partículas de luz que se emitían e detectaban en momentos precisos e lugares ben determinados do espazo. Partículas e ondas eran entidades ben diferentes, con propiedades case opostas... Como compaxinar ambas cousas? Que era realmente a luz? Para acabar de complicar o asunto, en 1927 uns famosos experimentos feitos por Clinton Davisson e Lester Germer en Nova York e por George E.P. Thomson en Aberdeen demostraron que os electróns se comportaban á súa vez como se fosen ondas. Xa o anunciara anos antes o físico francés Louis de Broglie (ou por chamalo polo seu nome completo Louis Victor Pierre Raymond, sétimo duque de Broglie, que daquela algúns duques tamén traballaban): as partículas debían ter comportamentos ondulatorios. Era o que faltaba. Os electróns difractábanse como a luz!

Como podían as entidades básicas da natureza comportarse ás veces como partículas e ás veces como ondas? Que eran realmente? Esta pregunta obsesionou a varias xeracións de científicos (e segue a quitar o sono ocasionalmente a máis de un

hoxe en día). A solución parcial a este crebacabezas veu da man dun dos físicos máis notables do século pasado, amigo e compañeiro de fatigas de Einstein naqueles anos da república de Weimar en que o nazismo comezaba a tecer as súas redes na sociedade alemá: Max Born. Este científico propuxo que as ondas o que facían era levar información sobre as probabilidades de atopar as partículas en determinados lugares e momentos. Despois de propagarse, interferir e difractarse, como ondas que son, a onda resultante permítenos determinar esas probabilidades. Coñecéndoas podemos saber bastantes cousas. Por exemplo, se a probabilidade nun punto determinado é sempre cero, sabemos que non imos atopar aí a partícula por moito que agardemos por ela. Se queremos dar con ela rapidamente, o mellor é buscala nos lugares nos que a probabilidade sexa máxima. E se temos moitas, moitas partículas, os lugares nos que se detectan reproducirán as figuras de interferencia e difracción ás que nos ten acostumados á luz, aínda que os anchos das franxas iluminadas serán en xeral diferentes porque dependerán da longura de onda que teñamos en cada caso.

Louis de Broglie levaría o premio Nobel de Física de 1929 “polo seu descubrimento da natureza ondulatoria dos electróns” e Davisson e Thomson compartirían o de 1937 “polo seu descubrimento experimental da difracción de electróns por cristais”. O caso de Thomson, George, non deixa de

ser curioso: seu pai, Joseph John ou “J.J.” para os amigos, xa gañara o premio Nobel en 1906, entre outras cousas por ter descuberto o electrón e as súas propiedades como partícula. A dualidade onda-partícula dos electróns sentaba á mesa nas festas da familia Thomson. Pero o tema deu para máis. Max Born levou o premio Nobel de Física en 1954 “pola súa investigación fundamental en mecánica cuántica, especialmente pola súa interpretación estatística da función de onda” e Richard P. Feynman, que describiría a propagación destas ondas de probabilidade dunha forma elegantísima mediante a xeneralización dun método que ten as súas raíces máis fondas nos venerables tempos de Huygens, acadaría ese premio en 1965. Por certo, se algunha vez vos din que pensando nestas andrómenas non se pode gañar a vida podeades retrucar que estas cousas, ademáis de ser bonitas, dan de comer: o premio Nobel leva asociada a substancial recompensa de 850.000 euros, que xa dá para pagar unhas cañas.

E Einstein...? El non o tivo tan doado. Entre a súa orixe xudía, o estraño que para moitos contemporáneos soaba iso da relatividade do espazo e o tempo, e a decidida oposición dalgún mediocre e coñecido membro da Real Academia Sueca de Ciencias, tivo que esperar até 1921 para que lle fose concedido o Nobel “polos seus servizos á Física Teórica, e especialmente polo seu descubrimento da lei do efecto fotoeléctrico.”

Na introdución do seu artigo *Un punto de vista heurístico sobre a produción e transformación da luz* escribiu o que se cadra é un dos parágrafos máis fermosos da historia da física:

De feito, paréceme que as observacións sobre a radiación do corpo negro (...) e outros fenómenos que implican a emisión ou transformación da luz poden entenderse mellor se se supón que a enerxía da luz se distribúe de forma discontinua no espazo. De acordo coa hipótese que aquí consideramos, cando un raio de luz se propaga a partir dun punto a súa enerxía non se distribúe de forma continua nun volume do espazo cada vez maior, senón que consiste nun número finito de cuantos de enerxía que se moven sen dividirse e que soamente poden ser absorbidos ou emitidos como unidades completas.

Neste artigo quero presentar esta forma de pensar e citar os feitos que me levaron por este camiño, coa esperanza de que este enfoque poida ser útil para algúns investigadores nos seus traballos.

E foi útil. Vaia se o foi. A mecánica cuántica, auténtica revolución no pensamento da física do século xx, desenvolveríase a partir dese momento con consecuencias insospeitadas para o autor desas liñas.

PARA
FACERES
NA
CASA



Á falla de laboratorio axeitado podedes facer algo que Einstein apreciaba moito e que nesta época de recortes no financiamento as e os científicos facemos cada vez con máis frecuencia: un *Gedankenexperiment*, ou experimento mental. Sabendo que a luz está formada por cuantos de enerxía, relendo o parágrafo que Einstein escribiu na introdución do seu artigo e supoñendo

que o voso sistema visual vos permitise percibir cuantos de luz individuais... Que veríades se atenuades progresivamente a luz que emiten as lámpadas do voso cuarto?

7. ATRAPADOS NUN FEIXE DE LUZ

Atrapounos un raio tractor!

Han Solo, *Star Wars* (1977)

Podemos capturar obxectos coa luz e movelos a vontade dun lugar para outro? Por increíble que pareza, e con certas limitacións, a resposta é si.

En moitas historias fantásticas a luz fai cousas como esa. Na saga da Guerra das Galaxias os plans do afouto Han Solo están a piques de fracasar por culpa do raio tractor da temible Estrela da Morte, e xa se converteu en clásica a imaxe do presunto OVNI que cun potente feixe de luz abduce unha vaca con fins descoñecidos. Debo confesar que nunca comprendín moi ben esa obsesión dos aliens co noso animal totémico, mais o tema non carece de interese: se un alien pode abducir unha vaca nós tamén podemos. As leis do Universo, a

diferenza doutras, rexen por igual para todas as especies da Galaxia. Mover o gando de acó para aló con feixes de luz non resolvería os problemas do noso maltratado sector gandeiro, pero sería toda unha revolución no mundo do transporte. Porén, é iso realmente posible?

Imos por partes. Unha das maiores sorpresas que levaron as científicas e científicos do século XIX foi descubrir que a luz pode bater nas cousas. A luz, como a auga de Bruce Lee, pode fluír mais tamén pode golpear. En linguaxe máis precisa podemos dicir que a luz é quen de producir efectos mecánicos: pode exercer forzas sobre os obxectos facendo que muden a súa velocidade, en cantidade ou en dirección, acelerándoos ou freándoos. Para que iso suceda non se precisa ningún aparello especial ou axente intermediario. Soamente luz e obxectos. Con iso chega.

A cousa ten o seu aquel, e para describir o que sucede cómpre facer unha pequena excursión pola historia da ciencia. Desde a máis remota antigüidade as persoas curiosas intentaron entender como se moven as cousas. Moitas foron as ideas e teorías que se elaboraron para comprender o movemento. Houbo que agardar á vizosa época de Galileo (si, outra vez el!) para que se puxesen os alicerces do que hoxe chamamos ciencia e todo fose collendo sentido. Algunhas décadas despois o xenial Isaac Newton, na súa obra chave *Principios Matemáticos da Filosofía Natural* (1687) sentou

de forma precisa e rigorosa as bases fundamentais da mecánica clásica. A obra de Newton foi unha revolución no campo das ideas e un best-seller total. Até en países de férrea disciplina católica se recoñeceron os seus méritos. O ilustre galego Bieito Xerónimo Feijoo Montenegro, no segundo volume das súas *Cartas Eruditas* (1745), describíao así: *En Inglaterra reina a filosofía newtoniana. Isaac Newton, o seu fundador, foi tan herexe como son polo común os demais habitantes daquela illa. Con todo, na súa filosofía non se atopou até o de agora cousa que se opoña, nin directa nin indirectamente, á verdadeira crenza. Os seus continuadores, persoas como Laplace, Hamilton e tantas outras, achegaron creativas ideas que deron forma definitiva a ese fermoso edificio. A mecánica clásica ocúpase basicamente de estudar de forma cuantitativa as relacións existentes entre o movemento dos obxectos que vemos ao noso arredor, as súas masas e as forzas que actúan sobre eles.*

Esta póla da ciencia desenvolveu ao longo da historia moitos conceptos útiles que seguen vixentes, xeneralizados e reinterpretados, na Física actual. Un deles é o concepto de *momento*, que na mecánica de Newton non se refire a un período pequeno de tempo como o seu nome parece indicar, senón ao produto da masa dun obxecto pola súa velocidade. Outro é o de *forza*, que é calquera causa capaz de facer variar o momento dun corpo, aumentando ou diminuindo a súa velocidade, ou

cambiando a súa dirección. E outro ben coñecido é o de *enerxía*, e en particular o de *enerxía cinética*, a enerxía asociada ao movemento. A mecánica clásica proporcionounos ademais os primeiros exemplos dos chamados “Principios de Conservación”: afirmacións que veñen dicindo que, se se cumpren certas condicións, hai magnitudes que ficcan constantes ao longo do tempo e que polo tanto son as mesmas antes e despois de se producir unha interacción. Por exemplo, na mecánica clásica a enerxía total consérvase. E tamén o momento, se non hai forzas netas actuando sobre os obxectos.

Os principios de conservación son tremendamente útiles: permítennos predicir o resultado dunha interacción. Son a ferramenta ideal para aquel personaxe de Barrio Sésamo que non paraba de preguntarse “que pasará a continuación...?”. Se coñecemos as masas e as velocidades de dous obxectos que van chocar, podemos deducir en que direccións e con que velocidades se moverán a partir do choque utilizando o feito de que a enerxía e o momento totais han de ser iguais antes e despois. Estes principios axudan a entender mellor o movemento dunha randeeira, o do botafumeiro compostelán e tamén o dos planetas, asteroides e cometas do sistema solar. Pero non son soamente axudas moi prácticas á hora de facer cálculos, son moito máis que iso: son guías fundamentais para coñecermos o Universo no que vivimos.

Moitas foron as ocasións ao longo da historia nas que os principios de conservación abriron a

porta a novos descubrimentos científicos. Por exemplo, ao remate da segunda década do século XX os físicos e físicas observaran con preocupación que en certas desintegracións radioactivas a enerxía e o momento finais non eran iguais aos iniciais. Os experimentos estaban ben feitos e houbo afamados científicos que pensaron que se cadra, despois de todo, esas magnitudes non se conservaban. Todo apuntaba a que os principios de conservación fallaban e habería que abandonalos. Pero en 1930 o físico austríaco Wolfgang Pauli apostou a que seguían sendo válidos e propuxo que a enerxía e o momento que se botaban en falla nesas desintegracións levábaos consigo unha nova partícula, descoñecida e invisible, á que Enrico Fermi puxo o nome de *neutrino*. Incluíndo nas contas o neutrino todo cadraba de novo. A enerxía e o momento conservábanse. Soamente había un pequeno problema: segundo se pensaba daquela, o neutrino era unha partícula imposible de detectar. Para moitos científicos da época a cousa soaba algo sospeitosa, por dicilo suavemente, e non é difícil comprender por que: oíndo por primeira vez a idea de Pauli é inevitable pensar neses pequerrechos que intentan botar as culpas de calquera desaguisado doméstico a un misterioso “nen invisible” que casualmente pasaba por alí. Vaites, vaites, así que foi o neutrino...! E disque non hai forma de velo...? Porén, era certo. Pauli tiña razón. O tal neutrino existe. Transporta a enerxía e o

momento que semellaban ter desaparecido. É unha partícula que interactúa moi pouco coa materia á que estamos afeitos e por iso é moi difícil vela, mais a pesar diso un equipo científico liderado por Frederick Reines e Clyde Cowan conseguiu detectala en 1956 mediante un enxeñoso procedemento. Esa fazaña foi recoñecida co premio Nobel de Física do ano 1995, que soamente desfrutou Reines porque Cowan morrera vinte anos antes e xa se sabe que ese premio soamente se lles concede aos vivos.

Os principios de conservación sonvos cousa seria. Foron estudados e sistematizados a comezos do século xx por unha brillantísima matemática alemá, Emmy Noether, quen como tantas outras científicas de todos os tempos foi discriminada profesionalmente soamente por ser muller. A ela impedíronlle, por ese único motivo, ser profesora da Universidade de Göttingen. Tiña daquela trinta e seis anos. Albert Einstein, que cualificou ese feito como “unha grande inxustiza”, escribía con certa desazón nunha carta dirixida ao famoso matemático David Hilbert que “non lle tería feito ningún mal á vella garda de Göttingen ter aprendido dela. Sabe o que fai, non hai dúbida”. Emmy Noether é unha persoa máis na longa lista de mulleres como Lise Meitner ou Rosalind Franklin cuxas vidas e contribucións á ciencia universal foron ocultadas ou relegadas a un segundo plano nos relatos convencionais da historia do desenvolvemento científico.

E que ten todo isto que ver coa luz? A fin de contas, a mecánica trata dos movementos dos obxectos materiais e a luz non o é, non si? Pois si e non. É certo que a luz non é un corpo material no sentido habitual do termo pero non por iso está fóra das leis da mecánica. A luz ten enerxía e ten momento. Os principios de conservación e as leis de Newton tamén se aplican —coas debidas precaucións— ás súas interaccións cos obxectos.

A luz pode influír nas cousas porque é radiación electromagnética e a materia da que está feito todo o que vemos ao noso arredor contén partículas con carga eléctrica que interactúan con ela. Os átomos están compostos dun núcleo moi denso formado por protóns (partículas con carga eléctrica positiva) e neutróns (sen carga), ao redor do cal hai unha nube de carga negativa formada por electróns. Os campos eléctricos e magnéticos da luz exercen forzas sobre as partículas cargadas e o resultado global é que se exerce unha presión sobre os obxectos que é capaz de modificar, en maior ou menor medida dependendo das circunstancias, o seu estado de movemento.

Tal como soa. A luz, de forma semellante aos obxectos que se moven, ten asociado un *momento*. O seu valor foi calculado teoricamente polo físico escocés James Clerk Maxwell en 1862. Maxwell chegou á conclusión de que se unha onda de luz ten unha densidade de potencia S , que se mide en watts por metro cadrado, entón é quen de exercer

unha presión S/c sobre un obxecto que a absorba totalmente (c é a velocidade da luz). Anos despois comprobaríase que isto é realmente así, tras unha serie de delicados experimentos realizados por Piotr Nicoláievich Lebedev en Rusia (1899) e Ernest Nichols e Gordon Hull nos Estados Unidos (1901). Hai que dicir que en condicións normais a presión da luz é moi pequena se a comparamos con outras presións que sufrimos habitualmente no noso entorno, e por iso non a notamos. Por exemplo, no mediodía do San Xoán en calquera vila de Galicia, co ceo despexado e supoñendo que a nosa cabeza absorba toda a luz que lle chega (cousa que podemos conseguir de forma aproximada usando un pucho ou chapeu completamente negro), a radiación solar pode exercer sobre nós unha forza cara abaixo dunha cenmillonésima de kilogramo. Non é moito, certamente. O valor da presión da luz é xeralmente pequeno pero non vos deixedes enganar: se esa presión se exerce de forma continua durante un longo período de tempo pode ter efectos asombrosos. Eugene Hecht cóntanos que se se tivesen ignorado os efectos da presión da radiación solar sobre as sondas espaciais do programa Viking, que viaxaron a Marte na década dos anos 70 do século pasado, esas naves teríanse desviado uns 15.000 km do seu destino!

A comezos do século xx Albert Einstein amosou que o momento asociado a un fotón é h/λ , onde h é a constante de Planck e λ a longura de onda da

luz no vacío. Como a constante de Planck é moi pequena o momento dun fotón visible é pequenísimos se o comparamos co dun obxecto habitual: Habería que reunir 10^{27} fotóns de luz verde (un 1 seguido de vinteseite ceros) para conseguir un momento total de $1 \text{ kg}\cdot\text{m/s}$, que vén sendo o momento que ten o litro de leite que levas na bolsa da compra cando vas andando de camiño a casa. Onde vai parar! Pero os feixes de luz conteñen moitos fotóns. Un punteiro láser de 5 mW emite aproximadamente trece mil billóns de fotóns por segundo. Moitos, moitísimos máis que cartóns de leite hai no mundo.

E agora vén o interesante para deseñar un raio tractor: cada vez que a luz atopa no seu camiño un obxecto e é reflectida, absorbida ou refractada (desviada ao atravesar unha superficie) o seu momento cambia. Lembrede que o momento é unha magnitude vectorial, é dicir, ten un determinado valor ou módulo (por exemplo S/c) mais tamén ten unha dirección que coincide coa dirección de movemento. Se varía a dirección, aínda que non o faga o módulo, o momento varía. E para que o momento total se conserve o cambio do momento da luz debe ser compensado por outro, de igual magnitude pero de sentido contrario. Onde está ese momento compensador? Debeu gañalo o obxecto que reflectiu, absorbeu ou refractou a luz, non queda outra. Así que se un obxecto desvía a luz cara a esquerda el mesmo tenderá, en virtude do

principio de conservación do momento, a moverse en sentido contrario, cara a dereita, de forma que o cambio de momento total sexa nulo. De acordo con isto cando un obxecto absorbe totalmente a luz que incide sobre el adquirirá o momento que esta levaba e tenderá a moverse na dirección na que aquela se propagaba. E se a luz se reflicte perpendicularmente nun espello ou nunha superficie ben pulida e volta cara atrás polo camiño inicial, o obxecto que a reflectiu gañará un momento igual ao dobre do que tiña a luz incidente, pois esa é a diferenza entre os momentos dos raios incidente e reflectido.

Hai outra forma de velo: Isaac Newton ensinounos que para conseguir cambiar o momento de algo hai que exercer sobre ese algo unha forza durante un certo tempo. Podemos dicir que un prisma de vidro, ao desviar a luz, exerce unha forza sobre ela. O “herexe inglés” ensinounos tamén que se un obxecto exerce unha forza sobre outro este último vaise vengar inmediatamente exercendo sobre o primeiro unha forza igual pero de sentido contrario. É a súa famosa Terceira Lei, tamén coñecida como o Principio de Acción e Reacción. Venvos sendo unha versión mecánica da antiga Lei do Talión, aquela do “ollo por ollo”, aínda que neste caso é máis ben “newton por newton” porque ese é o nome que lle damos á unidade na que medimos as forzas no Sistema Internacional. Así que se o prisma exerce unha forza sobre os

raios de luz, facéndolles cambiar o seu momento, estes exercerán unha forza igual e de sentido contrario sobre aquél, que tenderá a moverse en consecuencia.

Os efectos de transferencia de momento producidos pola luz son xeralmente moi pequenos e difíciles de ver porque, como xa comentamos, o momento da luz non é grande e os obxectos macroscópicos adoitan ter bastante masa. Como o momento é o produto da masa pola velocidade, se a luz transfire un momento moi pequeno a un obxecto de masa moi grande a velocidade que gañará este será realmente ínfima. Ademais por todas partes hai forzas de rozamento que poden impedir que os corpos se movan. Ou polo menos iso parece a primeira vista: cando o rozamento impide aos corpos moverse respecto ao chan o momento da luz é transferido ao conxunto do planeta Terra e este varía a súa velocidade. Porén, como a masa da Terra é inimaxinablemente grande o cambio na súa velocidade é practicamente cero e non temos forma de detectalo.

Pero se os obxectos son pequenos e poden desprazarse libremente, a luz pode movelos con certa facilidade. Microesferas de plástico, células individuais e obxectos de tamaño semellante poden desta forma ser manexados a vontade. Se un fai os cálculos con detalle descubrirá que en xeral eses obxectos tenderán a moverse cara a zona na que a luz sexa máis intensa, debido ao que se coñece

como *forza de gradiente*. Para atrapar un obxecto podemos usar pois un feixe de luz que sexa máis intenso no centro que nos bordos, como o que sae dun punteiro láser, focalizándoo con axuda dunha lente para que no foco a intensidade sexa máxima. Os obxectos que estean no radio de acción do feixe quedarán confinados nesa rexión focal. Claro está que a fracción de luz que se reflicta no obxecto e a que poida resultar absorbida por el tenderán a movelo cara adiante e sacalo da trapela na que quedou recludo, pero deseñando ben o sistema e facendo ben as contas podemos evitar que se escape da zona focal. Movendo dun lado a outro o feixe de luz ou variando a posición do seu foco mediante unhas lentes con zoom podemos arrastrar a vontade a partícula atrapada. Mover cousas coa única axuda da luz focalizada é posible, e faise hoxe de forma rutineira en laboratorios de todo o mundo.

As forzas derivadas da presión da radiación teñen múltiples aplicacións tecnolóxicas: desde as chamadas pinzas ópticas, amplamente utilizadas en bioloxía celular e microtecnoloxía até as trapelas para arrefriar e atrapar átomos con luz láser que en 1997 lles valeron o Premio Nobel de Física a Steven Chu, Claude Cohen-Tannoudji e William D. Philips. A presión da radiación pode utilizarse tamén como medio de propulsión de naves no Sistema Solar: a primeira demostración experimental foi feita pola sonda interplanetaria xaponesa IKA-ROS, lanzada en 2010, que utilizou unha vela de

douscentos metros cadrados de superficie como medio para conseguir aceleración aproveitando a presión da radiación solar. Mais a presión da radiación xoga tamén un papel inesperado e imprescindible nas nosas vidas: é a que impide que o Sol colapse gravitatoriamente baixo o peso do gas e o plasma que o forman. A presión da radiación é un factor chave para a estabilidade das estrelas durante unha grande parte da súa vida. E da estabilidade do Sol depende a nosa propia.

Podemos entón abducir gando cun feixe de luz? Un estaría tentado a dicir que si, pero hai algúns problemas fundamentais que con toda seguridade farán fracasar os nosos plans. Para comezar, as vacas pesan o seu. Movelas con luz requiriría usar feixes intensísimos para que a transferencia de momento puidese producir algún efecto útil. Mais daquela enfrontariámonos cunha dificultade aínda maior: as vacas non son transparentes. E iso si que non ten remedio. Absorberían esas grandes cantidades de radiación e resultarían vaporizadas de forma case instantánea. Non, non é previsible que un día as vacas voen polo ceo penduradas dun raio de luz. Os aliens ladróns de gando terán que buscar outro procedemento para as súas falcatrueadas. E que hai de Han Solo...? A verdade é que un feixe de radiación electromagnética dificilmente podería abducir unha nave como o *Falcón Milenario*. O Han, milhomes sen rival á hora de facerse o duro, éravos tamén un pouco choromiqueiro.

PARA FACERES NA CASA



Pode que ti mesmo, ou algunha persoa amiga, teñas na casa un obxecto decorativo chamado *Radiómetro de Crookes*. Se non o coñeces, unha búsqueda de imaxes pola rede darache unha idea de como é. Vén sendo unha pequena esfera de vidro da que se extraeu a maior parte do aire e dentro da cal hai catro aspas que poden xirar arredor dun eixo vertical. En cada aspa hai unha pequena

placa, prateada por un lado e ennegrecida polo outro. Ao iluminar este obxecto con luz as aspas xiran. A explicación na que todos pensamos algunha vez, incluído o propio inventor do trebello, consiste en que a presión da radiación é maior sobre a cara prateada, que reflicte case totalmente a luz, que sobre a ennegrecida, que a absorbe (ver o texto anterior para saber por que). Así que este muíño de luz debería xirar de forma que as caras escuras vaian por diante e as prateadas por detrás. Porén... sucede exactamente o contrario! O muíño móvese ao revés! Se che gustan os misterios científicos, pensa por que podería ser. Unha pista: o gas que queda dentro da esfera ten moito que ver no asunto. Pero non te desanimas: a resposta non é sinxela. Moitos científicos, Einstein incluído, tentaron dar con ela sen éxito durante anos. A solución podes atopala en calquera boa web de ciencia.

8. LUZ QUE CURA

Aaaaaaach!

Un peculiar extraterrestre curando con luz
a ferida do pequeno Elliot, *E.T.*, 1982

Un vello tópico da ciencia ficción atribúelles aos habitantes doutros mundos asombrosas capacidades de curar. Até o alien máis chaíñas da Galaxia é quen de cicatrizar unha ferida usando un dedo que brilla! No planeta Terra aínda non chegamos a tales niveis de eficacia, madía leva, pero imos dando pasos. Resulta que a luz non é soamente un vehículo que transmite información visual sobre o mundo que nos rodea. A luz é moito máis. Convenientemente utilizada é tamén un poderoso instrumento que permite tratar de forma eficaz moi diversas doenzas.

Todas e todos temos experiencia directa dos múltiples efectos que a luz e as radiacións de longuras de onda veciñas (o infravermello e o ultravioleta) producen sobre os nosos corpos. É fermoso gozar da morna quentura do Sol á raxeira nunha mañá clara de inverno, cousa normal poñerse máis ou menos moreno ou morena no verán, e raro será non ter sufrido algunha vez a desagradable sensación de queimadela tras unha xornada de praia sen tomar as debidas precaucións de protección solar. Pero as relacións da luz cos nosos corpos van moito máis aló: aínda que son fenómenos menos visibles e poden pasarnos desapercibidos, utilizamos diariamente a luz ambiente para sintetizar vitamina D e para sincronizar os osciladores internos que regulan os nosos ritmos circadianos (os ciclos diarios de variación de temperatura corporal, produción hormonal, alerta e descanso, etc). A ausencia de luz suficiente polo día ou o seu exceso pola noite, de forma prolongada no tempo, poden dar lugar a importantes disfuncións. Por outra banda a luz, adecuadamente concentrada, é quen de transformar e mesmo de destruír os tecidos orgánicos. Algunha vez teredes probado a facer lume enfocando cunha lente os raios do Sol sobre un papel!

Sabendo que a luz pode producir efectos ben definidos sobre os nosos corpos, a idea de utilizala como instrumento cirúrxico ou como axuda no tratamento de certas enfermidades non tardou en ser proposta. Porén, durante moitos anos as aplicacións médicas da luz foron poucas e ocuparon un

lugar relativamente modesto no arsenal terapéutico da sanidade moderna. O motivo é que as fontes tradicionais (o Sol, claro, e tamén as lámpadas de incandescencia ou de descarga) non resultan demasiado prácticas para este tipo de aplicacións. Mais este panorama cambiou radicalmente coa invención da excepcional fonte de luz chamada *láser* e coa popularización do seu uso a partir dos anos sesenta do século pasado.

Os láseres emiten luz cunhas características moi especiais. Tres son as propiedades que a fan moi interesante en medicina:

— É unha radiación practicamente monocromática, o que quere dicir que a súa potencia está moi concentrada nunha banda estreitísima de longuras de onda. É pois unha radiación de gran pureza espectral coa que podemos provocar de forma selectiva certas reaccións químicas e acelerar ou frear procesos moi variados que dependen decisivamente da longura de onda da luz.

— Pode focalizarse de forma moi eficaz, é dicir, podemos centrala en volumes moi pequenos do espazo conseguindo así enormes densidades de potencia. A radiación dun feixe láser pode chegar a concentrarse —coa axuda de lentes ou espellos adecuados— nun círculo pequenísimo, de diámetro semellante á súa longura de onda (estamos falando de media millonésima de metro). Desesta forma podemos actuar con moita intensidade sobre zonas limitadas e moi ben definidas dos tecidos do

noso corpo, sen afectarmos negativamente a zonas cercanas que non necesitan tratamento.

— E ademais a radiación láser pode producirse con formatos moi variados. Hai láseres que emiten de forma continua un feixe de potencia constante e outros que emiten pulsos de luz de potencia e duración variables. A potencia media dun pulso vén sendo igual á súa enerxía total dividida pola súa duración: enerxías moi modestas, concentradas no tempo en forma de pulsos moi curtos, poden dar lugar a potencias elevadísimas. Hoxe en día prodúcese rutineiramente pulsos de duración inimaxinablemente pequena, da orde dos femtosegundos (un femtosegundo ou *fs* é unha milésima de billonésima de segundo, 10^{-15} s), con potencias asociadas da orde do terawatt (un billón de watts, 10^{12} W) e aínda maiores. Potencias semellantes ás que producen os lóstregos nunha treboada!

Ser quen de concentrar poderosamente a enerxía no espectro, no espazo e no tempo. Velaí o que fai do láser unha ferramenta única.

Cando a luz incide sobre os tecidos do noso corpo pasan cousas moi interesantes a escalas molecular e atómica. Como sabemos, os átomos e as moléculas poden intercambiar enerxía co medio que os rodea. Poden pasar dun nivel baixo a un nivel alto de enerxía mediante a absorción de un ou varios cuantos de luz (fotóns), e caer do nivel superior ao inferior mediante a emisión dos mesmos. Resulta verdadeiramente útil o feito de que

os átomos e as moléculas que absorben fotóns poden seguir camiños moi variados para volver ao seu estado inicial. Poden, por exemplo, reemitir un único fotón da mesma enerxía que o que absorberon. Tamén poden, no canto diso, ir emitindo un conxunto de fotóns menos enerxéticos de forma que a súa enerxía total sexa igual á daquel. Ou dedicar parte da enerxía a incrementar a intensidade das vibracións moleculares, ou a súa velocidade de rotación: estes fenómenos, que macroscopicamente adoitamos percibir como calor, producen un aumento da temperatura dos tecidos biolóxicos que pode ser utilizado proveitosamente con diversos fins. Todos estes procesos preservan a composición química do medio, pero non son os únicos posibles: as moléculas que absorberon enerxía tamén poden desexcitarse provocando reaccións químicas que produzan novos compostos. As moléculas grandes mesmo poden rachar en anacos facendo aparecer moléculas máis pequenas e con propiedades diferentes. En casos extremos, se as intensidades e longuras de onda son as adecuadas, a absorción de radiación pode arrincar masivamente electróns dando lugar á formación de plasmas, que son nubes de ións e electróns a elevadísima temperatura. Os plasmas eliminan directamente material da superficie afectada, producen efectos térmicos nas áreas circundantes e poden provocar microexplosións capaces de rachar eficazmente as ligazóns existentes nos tecidos do corpo.

As aplicacións clínicas dos láseres son variadísimas e baséanse en aproveitar, de forma controlada, os mecanismos de desexcitación arriba comentados. Os pulsos de luz utilizados na maioría dos casos teñen densidades de enerxía comprendidas entre 1 mJ/cm^2 (un milijoule por centímetro cadrado) e 1 kJ/cm^2 (un kilojoule por centímetro cadrado). A diferenza entre eses extremos vén sendo de seis ordes de magnitude, é dicir, os pulsos máis enerxéticos son un millón de veces (10^6) máis intensos que os menos enerxéticos. Graduando a enerxía dos pulsos podemos conseguir diferentes efectos. Pero o que realmente dá flexibilidade a esta tecnoloxía non é tanto variar a enerxía dos pulsos como xogar coa súa particular combinación de duración e potencia. A enerxía dun pulso é o produto deses dous factores, de forma que podemos transferir a un tecido unha mesma dose de enerxía de formas moi diversas. A duración dos pulsos, por exemplo, pode ir desde unha exposición continua de varias horas até os femtosegundos, con densidades de potencia típicas que van desde os mW/cm^2 (miliwatts por centímetro cadrado, 10^{-3}) até os inimaxinables PW/cm^2 (un PW ou petawatt é un milleiro de billóns de watts, 10^{15}). Dependendo de como sexa esa combinación, os fenómenos de desexcitación que tenderán a producirse serán diferentes. Por suposto, a longura de onda da luz e o número de pulsos por segundo que usemos para irradiar os tecidos xogarán tamén un

papel fundamental á hora de determinar que procesos se van producir e como se van desenvolver. A continuación describimos os principais procesos de interacción con tecidos vivos, en orde crecente de potencia do pulso ou —equivalentemente, para unha enerxía dada— en orde decrecente de duración do mesmo. Todos estes mecanismos de interacción teñen aplicacións na medicina do século XXI.

Os procedementos *fotoquímicos* caracterízanse por usar pulsos de luz de baixa densidade de potencia, da orde de 1 W/cm^2 , e longos tempos de exposición, de segundos a horas. Entre os máis utilizados actualmente en clínica están os coñecidos como terapias fotodinámicas. Consisten en subministrar á persoa doente un composto denominado xenericamente fotosensibilizador que é quen de producir efectos moi tóxicos nas células que o rodean, pero que soamente se activa se é iluminado por radiación de longura de onda axeitada. Despois de absorber a radiación o fotosensibilizador desexcítase convertendo moléculas de osíxeno moi pouco reactivas en moléculas altamente oxidantes que atacan as células e levan á súa morte na zona iluminada. Este tipo de procedemento é particularmente axeitado para tratar diferentes doenzas da retina humana, porque a radiación láser con longuras de onda entre 400 e 1400 nm pode atravesar case sen atenuación os medios oculares, que son transparentes para ela, e chegar á retina, onde

pode ser absorbida polo fotosensibilizador. Lembremos que unha das vantaxes da radiación láser é que podemos focalizala con moita precisión nas áreas concretas e ben definidas sobre as que queremos actuar: podemos activar así o fotosensibilizador soamente nas zonas enfermas, evitando que afecte ás zonas sas situadas ao redor. As terapias fotodinámicas poden utilizarse para combater a proliferación desordenada de pequenos capilares sanguíneos na retina, asociada a enfermidades como a dexeneración macular asociada á idade (DMAI OU ARMD, *age-related macular degeneration*), responsable da metade dos casos de cegueira na idade adulta nos países industrializados. Estas terapias atopan tamén aplicación no tratamento de certos tumores así como nalgúns problemas dermatolóxicos, pois a radiación óptica pode penetrar na pel até uns cantos milímetros de profundidade especialmente se é luz vermella ou radiación no infravermello cercano.

Se aumentamos a densidade de potencia de cada pulso até niveis de dez a un millón de W/cm^2 e facemos que a súa duración estea comprendida entre uns minutos e unha millonésima de segundo (10^{-6} s), a luz láser pode producir efectos *térmicos* moi interesantes para a práctica clínica. Podemos xerar calor de forma controlada en zonas moi ben localizadas, aproveitando de novo as ideais propiedades de focalización dos láseres. Dependendo de canto elevemos a temperatura os efectos que

conseguiremos sobre os tecidos humanos serán diferentes. A temperatura corporal normal é duns 37 °C. A partir dos 42 °C comezan a aparecer fenómenos de hipertermia que provocan a detención de certos procesos celulares. Por encima dos 60 °C prodúcese a coagulación do sangue, a desnaturalización de proteínas e a necrose de tecidos. Aos 100 °C a auga presente nos tecidos ferve e dá lugar á formación de burbullas, podendo producir microexplosións que romperán os tecidos e removearán material. Por riba dos 150 °C os tecidos comezarán a carbonizar. Combinando adecuadamente a potencia, a duración dos pulsos, a súa longura de onda e o número de pulsos por segundo poderemos provocar preferentemente uns efectos ou outros. Cómpre non perder de vista que co paso do tempo a calor irá propagándose desde a zona orixinalmente iluminada cara as zonas cercanas, tanto por difusión (conducción térmica) como, en menor medida, transportado directamente por fluídos como o sangue.

Na práctica clínica actual os efectos térmicos utilízanse sobre todo para conseguir a coagulación de capilares sanguíneos, a necrose de tumores e a ablación térmica de tecidos. As aplicacións son múltiples: dende a coagulación de capilares en doenzas como a DMAI ou a retinopatía diabética até o tratamento de roturas de retina, a apertura de orificios ou canles de drenaxe en determinadas estruturas do ollo para evitar o aumento sen control

da presión intraocular asociada ao glaucoma (outra importante causa de cegueira), e moitas outras. Actualmente está a investigarse a utilización de técnicas fototérmicas para activar nanopartículas, que son partículas con dimensións de milmillonésimas de metro (10^{-9} m) capaces de transportar diversos fármacos destinados a actuar sobre células determinadas. En todos os tratamentos fototérmicos é importante evitar que a temperatura aumente demasiado nas zonas adxacentes á que se quere tratar, a fin de non deteriorar tecidos sans. Por suposto, compre asegurarse que non se acada o umbral de carbonización, pois iso se traduciría nun importante aumento da opacidade, o cal provocaría unha gran absorción de enerxía do láser sen aportar vantaxes clínicas relevantes. Tamén se basean en efectos fototérmicos a maioría das aplicacións cosméticas que se anuncian insistentemente a través dos medios de comunicación, como a depilación por láser ou o rexuvenecemento da pel (Que haberá de malo en aparentarmos ter a idade que realmente temos...?).

Incrementando a densidade de potencia até as decenas de millóns (10^7) ou decenas de milleiros de millóns (10^{10}) de W/cm^2 , e reducindo a duración dos pulsos até as decenas de nanosegundos (un nanosegundo é unha milmillonésima de segundo, 10^{-9} s) pode producirse *fotoablación*. A fotoablación consiste na ruptura de moléculas longas e complexas mediante radiación ultravioleta, a fin

de fragmentalas en moléculas máis pequenas, rachar os seus enlaces coas moléculas que as rodean e retiralas dos tecidos. A aplicación máis coñecida da fotoablación son as operacións de cirurxía refractiva ás que algunha xente se somete para poder prescindir, polo menos durante un certo tempo da súa vida, das gafas e lentes de contacto. Nestas operacións utilízanse xeralmente láseres pulsados de longura de onda 193 nm, que eliminan parte do tecido transparente da córnea humana a un ritmo dunha fracción de micra de profundidade por pulso. O resultado que se busca é modificar adecuadamente o perfil da superficie da córnea, que é a principal lente do ollo, para desa forma corrixir defectos refractivos como a miopía, a hipermetropía e o astigmatismo, e incluso outros máis complicados coñecidos co nome xenérico de aberracións oculares de alta orde.

As posibilidades do láser non rematan aquí. Usando pulsos aínda máis potentes, da orde dos increíbles billóns (10^{12}) de W/cm^2 , e con duracións da orde dos femtosegundos, pode provocarse a ionización masiva da zona iluminada dando lugar á *formación dun plasma* a elevadísimas temperaturas que permite retirar material dos tecidos. Esta é unha técnica eficaz para o tratamento directo dalgunhas caries dentais aínda que a súa complexidade e custo, e tamén algúns efectos secundarios, fan que o seu uso non se teña estendido. Pero a

formación de plasmas atopou recentemente interesantísimas aplicacións cirúrxicas: Cando pulsos de potencias iguais ou superiores ás citadas se focalizan no interior dos tecidos a formación do plasma produce microexplosións, e as ondas de choque resultantes dan lugar á rápida formación e colapso de burbullas de gas (cavitación) que destrúen ligazóns e permiten cortar tecidos con moitísima precisión. É o proceso denominado *fotodisrupción*. As técnicas baseadas na fotodisrupción úsanse hoxe de forma rutineira para mellorar algúns pasos das operacións de cirurxía refractiva, resolver certas opacidades do ollo, tratar o glaucoma, fragmentar cálculos renais ou borrar tatuaxes, entre outras moitas aplicacións.

O láser é un interesantísimo substituto dos instrumentos mecánicos ou eléctricos para o corte e soldadura de tecidos corporais. A radiación láser pode producirse con facilidade e de forma controlada nunha grande variedade de longuras de onda e formatos de pulso. Pode levarse sen dificultade ao lugar requirido mediante o emprego de fibras ópticas, e ademáis de cortar coagula e desinfecta. É, en moitos sentidos, un bisturí ideal.

**PARA
FACERES
NA
CASA**



Probablemente non teñas na casa ningún instrumento de diagnóstico ou terapéutico baseado en láseres, pero moitos dos centros públicos de saúde contan con eles. Se vas a algún servizo especializado bota un ollo e pregunta: sorprenderase da variedade de aplicacións dos láseres no ámbito da saúde.

9. O LADO ESCURO DA LUZ

A noite está varrida da Terra...!

O bibliotecario de *La chispa mágica*,
de Armando Cotarelo Valledor (1923)

O mércores 2 de abril de 1851 o profesor de Química Antonio Casares acendía, probablemente por primeira vez na península ibérica, unha lámpada de luz eléctrica. Foi no claustro da Universidade de Santiago de Compostela. Aquel arco voltaico alimentado por baterías iluminou a noite cunha intensísima luz que deixou asombrada á sociedade compostelá. Segundo as crónicas da época era dunha brillantez que “non se resiste” e permitía “ler facilmente unha carta a cincuenta pasos de distancia”. O abraio foi xeral. Anos despois aquel acontecemento sería recollido por Cotarelo Valledor nun relato do que procede a cita que encabeza estas liñas.

Pouco imaxinaba don Armando o premonitorias que chegarían a ser as súas palabras. Se hoxe levantase a cabeza comprobaría con sorpresa que deu no albo: en pouco máis de tres xeracións os seres humanos fomos quen de facer desaparecer a noite de moitos lugares do planeta.

Vaia por diante que a luz artificial é sen ningunha dúbida un dos inventos *top ten* da humanidade. Non é estraño que moitas culturas a considerasen un regalo dos deuses, e outras a recompensa a un heroico esforzo dos mortais. Liberounos das ataduras impostas polo ciclo diurno de luz e escuridade e permitiunos estender a nosa actividade até chegarmos á sociedade de vintecatros horas na que hoxe vivimos. Dispor de luz artificial é un innegable factor de progreso. Grazas a ela podemos aproveitar a noite para convivir coas persoas amigas, facer tarefas cotiás, desfrutar do tempo de lecer ou percorrer as rúas dos nosos barrios. E tamén para traballar e consumir sen interrupción, o que pon moi contentos a algúns consellos de administración. Até tal punto forma parte das nosas vidas que xa nin reparamos nela, excepto cando se vai. Hoxe non poderíamos —nin quereríamos— vivir sen luz.

Así e todo, postos a iluminar, a verdade é que os seres humanos non sempre destacamos polo noso sentido común. Moita da luz producida nos países desenvolvidos é simplemente innecesaria ou resulta directamente prexudicial. Sobre todo aquela

que usamos para iluminar sen xeito: a que emitimos cara zonas que non necesitan ser iluminadas, a horas nas que ninguén a necesita, en cantidades excesivas, ou con espectro inadecuado. Por iso nos últimos tempos escóitase falar cada vez máis da *contaminación luminosa (ou lumínica)*, un termo que fai referencia aos efectos indesexados da iluminación artificial.

Hai cidades e vilas tremendamente sobreiluminadas pola noite en todos os países do mundo, e Galicia non é unha excepción. Seguro que coñeces máis de unha. O seu brillo pode verse claramente desde o espazo nas fotografías feitas polas tripulacións da Estación Espacial Internacional. Se vives nunha delas probablemente che custará durmir ben sen baixar as persianas, porque a luz dos farois da rúa invadirá o teu cuarto. En amplas zonas das nosas cidades hai un exceso de luz e non son poucos os sistemas de alumeadado que están moi pobremente deseñados: debido a iso cada vez son menos as persoas que poden deitarse e deixarse levar ao mundo dos soños contemplando escintilar as estrelas, ou espertar sentindo na pel as primeiras raiolas do sol. A pouco que indagues, descubrirás que na túa veciñanza hai quen pode ler un libro a medianoite sen necesidade de acender unha soa lámpada: a luz que entra polas xanelas da súa casa chega de sobra. Esas situacións son manifestacións dun problema coñecido como *luz intrusa*.

Outra tacha dos actuais sistemas de alumeado exterior é que con certa frecuencia producen *encandeamiento* ou *cegamento*, dificultando a visión das persoas que van a pé ou conducen pola vía pública. Se no teu barrio xa quitaron os farois de vapor de sodio (de cor amarela-laranxa) e puxeron LEDs brancos pode que ao miralos directamente notes que o seu brillo é excesivo e provoca unha sensación algo desagradable. Mesmo pode que non che deixen ver ben o que hai ao seu arredor, como sucede cando as luces dun vehículo che dan de fronte pola noite. Ter máis luz, como ben saben as persoas expertas en ciencias da visión, non sempre significa ver mellor. Para ver ben o que necesitamos é unha iluminación suficiente, con boa homoxeneidade e que non nos cegue. Porque xa o dicía Rosalía: *moita luz deslumbra os ollos*.

Se paseas de noite por algúns centros urbanos sorprenderase da cantidade de estímulos luminosos que hai. Luces dos farois da rúa, focos das tendas e bares, taboleiros de LEDs ultrabrillantes, anuncios luminosos, semáforos intensos de máis... Tal acumulación de fontes de luz non sempre axuda a entender a paisaxe da cidade. Paradoxalmente o que fai ás veces é escurecela, tornala máis confusa. É o que se denomina unha *maraña de luces*. Hai un barrio en Compostela, con abundantes farois, no que os pasos de peóns están sinalizados á altura dos ollos con tubos fluorescentes verticais dun azul eléctrico intenso. Pode que os deseñadores

tivesen a boa intención de facilitar a localización deses pasos, mais a sensación que un ten como camiñante é de desconcerto: tantas luces acaban embarullando. E confunden tamén aos condutores de vehículos. Hai barrios nos que ser peón pola noite é un deporte de risco. Pasa na terra e pasa no mar. Comentan algúns patróns o difícil que resulta distinguir os sinais luminosos que indican as entradas a porto, perdidos no enxame multicolor das luces das vilas.

Se ollas cara o ceo desde un lugar así o máis probable é que, no canto dun fermoso pano de veludo negro cheo de estrelas e constelacións, o que vexas sexa unha esvaída bóveda de cor laranxa ou dun gris desagradable. Con sorte poderás albiscar, se cadra, algúns dos astros máis brillantes. A contaminación lumínica fixo desaparecer das noites urbanas o ceo estrelado. E vai facendo desaparecer tamén as noites escuras do rural. Os fotóns non coñecen fronteiras nin lindes de concellos: a luz emitida por unha cidade pode perturbar a escuridade do ceo nocturno a máis de cen quilómetros de distancia. A consecuencia de todo iso é un indesexado *aumento do brillo do ceo*.

Iluminar a noite, ademais, non é de balde. Ten o seu custo.

Ou máis ben os seus custos, pois son varios e diversos. O máis evidente, porque doe no peto, é o económico. A quinta parte da electricidade producida no mundo usámola para fabricar luz. Por

cada habitante do planeta emitimos unha cantidade de luz equivalente á de catro potentes lámpadas que estivesen funcionando sen interrupción durante toda a noite, todas as noites do ano. E somos máis de sete mil millóns de persoas! As cifras *per cápita*, claro, soamente nos dan unha visión parcial da realidade: a luz artificial, como outros moitos bens, está desigual e inxustamente repartida. Amplas zonas do mundo teñen falta dela; noutras haina en exceso. Pero globalmente dedicamos moitos recursos á iluminación: o gasto total representa arredor do 1.2% do produto interior bruto mundial e é unha das partidas máis substanciosas nos orzamentos de moitos concellos.

Ademais deste custo explícito hai outros, igual de reais, que a primeira vista poden pasarnos algo máis desapercibidos. Un deles é que para xerar a electricidade necesaria para producir toda esta luz botamos á atmosfera inxentes cantidades de gases de efecto invernadoiro. A Axencia Internacional da Enerxía estimaba en 2005 que estas emisións eran de 1900 millóns de toneladas de dióxido de carbono ao ano, equivalentes ás emisións totais combinadas de Francia, Reino Unido, Alemaña e Italia xuntas, ou ao 70% das emisións producidas por todos os vehículos lixeiros do mundo.

Outro custo oculto son os danos producidos aos organismos vivos no seu medio natural. A vida no planeta Terra desenvolveuse durante centos de millóns de anos baixo ciclos estables de luz e

escuridade: o ciclo diúrno asociado á rotación da Terra, o mensual asociado á Lúa, o da diferente duración dos días e das noites asociado ás estacións... Falar de ciclos de luz e escuridade é falar de dispoñibilidade de enerxía e da posibilidade de recibir información do mundo que nos rodea. Non é pois de estrañar que a maioría das formas de vida coñecidas respondesen a esta periodicidade con adaptacións evolutivas que lles permiten, entre outras cousas, *anticipar* a chegada da noite ou adiantarse aos cambios de estación. Así poden tirar o mellor partido das súas oportunidades. Por exemplo, as aves migratorias poden iniciar a tempo as súas longas viaxes cando o acurtamento das horas de luz e o alongamento das noites anuncian que o verán vai rematando e o outono está a chegar.

A noite é un espazo moi habitado. Moitas especies animais foron colonizando evolutivamente o medio nocturno e facendo del o seu fogar: estímase que máis do 60% dos invertebrados e o 30% de especies de vertebrados son nocturnas. Non, o noso planeta non descansa: a noite está chea de vida e actividade. E noite, neste contexto, significa esencialmente *escuridade*.

Hoxe sabemos que a introdución de luz artificial no medio nocturno pode producir múltiples perturbacións a nivel de organismos, poboacións, especies e ecosistemas. Os efectos observados inclúen disrupcións no metabolismo, nos procesos

reprodutivos, na procura de alimento, no equilibrio entre depredadores e presas, na orientación, nas migracións... Un só farol acendido pola noite é abondo para atraer grandes cantidades de insectos, o que á súa vez provocará o desprazamento de parte dos seus depredadores. Estes últimos poden tirar vantaxes da nova situación, ao teren moitas presas concentradas nun pequeno espazo, pero non todos son quen de adaptarse a cazar no entorno de farois iluminados: é o que lles sucede a algunhas especies de morcegos. Noutros casos a luz artificial xera un *ruído* difícil de salvar, afectando sobre todo ás especies que usan sinais luminosos como forma de comunicarse: cando foi a última vez que vistes unha leira chea de vagalumes...? Cada vez que iluminamos un espazo natural cambian nel as regras do xogo. Por iso, se necesitamos usar luz no exterior pola noite, debemos valorar cuidadosa e responsablemente os seus efectos negativos e minimizalos tanto como estea na nosa man. Hai quen suxire que a luz artificial en horas nocturnas debería ser tratada como un axente contaminante máis.

A exposición nocturna á luz artificial ten tamén efectos relevantes sobre a saúde das persoas. Os seres humanos, aínda que frecuentemente tendemos a esquecerlo, non estamos fóra do alcance das leis da bioloxía nin somos inmunes aos cambios que se producen na nosa contorna. Diversos estudos epidemiolóxicos e ensaios no laboratorio teñen posto de manifesto as correlacións existentes

entre a exposición á luz artificial en horas nocturnas e o aumento do risco de padecer diversos tipos de doenzas ou de ver agravada a súa evolución. En particular, existen evidencias suficientes sobre o papel disruptor que a luz nocturna ten sobre a *ritmicidade circadiana*, tanto en modelos animais como en humanos. Moitas variables fisiolóxicas como a presión arterial, a temperatura corporal, a concentración de diversas hormonas no sangue, etc, van cambiando de valor ao longo do día. A súa variación está regulada por un oscilador central, formado por un conglomerado de neuronas situadas no hipotálamo, e varios osciladores periféricos, cuxo período, en ausencia de estímulos externos, é moi próximo pero non exactamente igual a vinte e catro horas. De aí o adxectivo *circadiano*: de duración cercana a un día. Para non ir acumulando un desaxuste progresivo co paso dos días, o oscilador neuronal central necesita ter algún mecanismo que lle permita poñerse en hora. Son varios os estímulos ou *Zeitgeber* (“os que dan o tempo”) que axudan a mantelo sincronizado. O máis importante é precisamente a luz, ou mellor dito, a alternancia diaria de luz e escuridade. Se a nosa exposición á luz non está acompañada co ritmo do noso oscilador central, o desfase resultante tradúcese en síntomas que todos temos experimentado algunha vez, se cadra tras unhas noites de festa rachada ou uns días excesivamente madrugadores. É o mesmo fenómeno que está na base

do *jet-lag*, ese desaxuste que se produce cando o corpo, despois dunha viaxe transmeridiana, se atopa de súpeto nun lugar onde o ciclo diario de luz e escuridade non está en fase co seu ritmo interno. Son necesarios uns cantos días para ir recuperando a sincronización.

Que a exposición á luz en horas nocturnas está correlacionada con determinados cambios fisiolóxicos é algo comprobado. Pero correlación, claro está, non necesariamente significa causalidade. Hai moitas correlacións que son un mero froito do azar. Non resulta difícil atopalas, están por todas partes: a taxa de divorcios no estado de Maine, no período 2000-2009, seica está correlacionada en máis dun 99% co consumo per cápita de margarina no conxunto dos Estados Unidos, mais ninguén ten motivos serios para pensar que ambos fenómenos estean relacionados. Se se tratase de chocolate aínda poderíamos falar (onde vai parar!), pero non consta que comer margarina a culleradas solucione ningún desalento en caso de ruptura de parella. Porén, a relación entre a luz e o sistema de regulación circadiana é diferente: existe un mecanismo coñecido e cada vez mellor estudado que fai pensar que as correlacións observadas son moi probablemente a manifestación dunha relación causal.

Este mecanismo ten moito que ver cun revolucionario descubrimento realizado por un equipo de investigación da Universidade de Brown (Providence, USA), encabezado por David M. Berson.

En 2002, Berson anunciaba a existencia na retina humana dun terceiro tipo de células receptoras de luz, totalmente diferente das coñecidas até agora. Desde tempo atrás sabíase que a visión humana depende de dous tipos de células fotorreceptoras situadas na retina do ollo: os conos e os bastóns. Os conos, dos que existen tres clases, son os responsables da visión diúrna. Funcionan cando hai niveis altos de luz, e permítennos apreciar as cores e ver as cousas con moito detalle. Os bastóns, pola súa banda, son os fotorreceptores cos que vemos cando a cantidade de luz é moi pequena e os conos xa non responden a ela. Os bastóns non nos permiten distinguir as cores (de noite, como se sabe, todos os gatos son pardos) e tampouco nos proporcionan imaxes tan nidas como as dos conos. Os sinais eléctricos producidos por conos e bastóns combínanse en diferentes capas intermedias de células nerviosas da retina e activan complexas respostas que viaxan a través do nervio óptico até as zonas do cerebro encargadas do procesado das imaxes e da percepción visual. Pois ben, o equipo de Berson descubriu que unha pequena parte desas células intermedias, distribuídas por toda a retina, teñen a capacidade de detectaren luz por si mesmas. Non soamente procesan a información que lles chega de conos e bastóns: son receptoras directas de luz. Esas células, coñecidas como células ganglionares intrinsecamente fotosensitivas ou *ipRGC* polas súas iniciais en inglés, envían os

seus sinais directamente ao hipotálamo, a zona do cerebro onde se atopa o oscilador circadiano central. Os múltiples estudos realizados desde o seu descubrimento non fixeron máis que reforzar a idea de que este terceiro tipo de fotorreceptor é o principal sensor que o noso corpo ten para avaliar a cantidade de luz presente no seu entorno e, en base a esa avaliación, enviar ao noso cerebro a información sobre se é de día ou é de noite. As *ipRGC* son moi sensibles á luz azul, respondendo de forma intensa á radiación con longuras de onda entre os 460 e os 480 nm. Non é de estrañar, entón, que a luz desa banda sexa, precisamente, a máis eficaz para producir desaxustes pola noite no sistema de regulación circadiano humano.

As *ipRGC* reaccionan tamén á luz artificial, porque nada distingue un fotón natural dun fotón artificial da mesma frecuencia: todos son exactamente iguais. Xa que logo, se pola noite chega luz á nosa retina, sobre todo se o seu espectro contén longuras de onda azuis, as *ipRGC* enviarán ao hipotálamo un sinal moi claro dicindo que é *de día* e o noso corpo tenderá a reaccionar de acordo con iso. Produciranse cambios fisiolóxicos para adaptármonos á situación de “día”, pero será dun xeito forzado porque a esas horas o corpo non esperaría facelo de forma natural. Se nos expoñemos durante longos períodos da nosa vida á luz nocturna, sobre todo se o facemos de xeito irregular, o noso benestar pode resentirse de formas diversas,

tal como indican recentes investigacións no ámbito das ciencias da saúde. Aló polos anos oitenta *Os Resentidos* cantaban con retranca sobre a xente “que de noite e de día usa ghafas de sol...”. Mira ti. Se cadra algún día chegará a ser recomendable.

Last but not least, a contaminación lumínica ten tamén consecuencias negativas para o patrimonio cultural e científico da humanidade. Cada vez hai menos lugares no planeta onde instalar os grandes telescopios e os sensibles instrumentos de medida que nos axudan a coñecer o Universo no que vivimos e, con el, a coñecernos nós mesmos. Observatorios que hai unhas cantas décadas foron os máis importantes do mundo están hoxe dedicados a tarefas residuais, cando non practicamente fóra de uso, debido a que o resplandor do ceo producido polas cidades cercanas aumentou co paso dos anos até acadar límites insostibles. E se a contaminación lumínica afecta á ciencia, que dicirmos da creación artística... Se os poetas do Rexurdimento nos visitasen desde o alén seguramente pasarían certos apuros para recoñecer as paisaxes da súa mocidade. Os sempre faladores rumorosos, na costa verdecente, cada vez din menos cousas ao raio transparente do prácido luar: pouco pode facer a tenue luz da Lúa contra a potente luz dos farois que inzan as pistas e recunchos do noso país, adoitado acendidos a altas horas para uso de ninguén. Hai quen di que Pablo Neruda talvez dubidaría se

escribir ou non os versos máis tristes esta noite (*titan, azules, los astros a lo lejos...?*). E se Van Gogh ousase pintar hoxe a súa fermosa serie de cadros das noites estreladas, máis de un pensaría que tiña unha imaxinación excesivamente desbordante ou que en Holanda, xa se sabe, venden de todo.

O ceo estrelado foi desde sempre parte da paisaxe nocturna da humanidade. As historias máis fermosas están debuxadas nel. Mais desde o meu barrio apenas poden verse, nunha noite despexada, un par de ducias de estrelas. E iso que sobre o barrio de San Pedro escintilan os mesmos milleiros de estrelas que nos quitan o alento nos ceos limpos e escuros de Xares e Trevinca; están aí, sobre as nosas cidades, acompañando as nosas noites, pero non podemos velas porque a luz desbaldida cara o ceo nolo impide. Non deixa de ser triste que a veciñanza de Compostela, e de tantos outros lugares do mundo, non poida ver xa a Vía Láctea, a nosa galaxia. O que moitos chaman *O Camiño de Santiago* non pode verse desde aquí.

A boa nova é que a contaminación lumínica é unha das formas de contaminación que teñen solución máis doada. Probablemente a máis doada de todas, xunto coa acústica. No momento en que un foco contaminante se apaga, se redirecciona ou se axusta convenientemente en intensidade e espectro, a súa luz deixa de perturbar o medio ambiente. Os últimos fotóns emitidos son absorvidos ou atravesan a atmosfera á velocidade da luz

e a escuridade volve a reinar no entorno outrora incorrectamente iluminado. Que facermos, pois? Podemos comezar, persoal e colectivamente, por iluminar soamente o que necesitemos iluminar, ás horas nas que debamos iluminalo, cunha cantidade de luz suficiente e non excesiva, e co espectro adecuado. Podemos promover que se revise periodicamente a política de iluminación dos espazos públicos no noso concello. Podemos diminuír, con medidas moi sinxelas, a pegada luminosa das nosas actividades nos espazos naturais. Precisamos, si, unha nova cultura da luz. Unha cultura que nos axude a comprender que a luz artificial é un medio e non un fin en si mesma, e que nos faga ser conscientes das súas vantaxes e inconvenientes, a fin de tomar decisións responsables á hora de usala.

O Parlamento de Galicia, na súa sesión do 29 de setembro de 2015, aprobou co apoio de todos os grupos unha declaración institucional en defensa do ceo nocturno promovida por diversas entidades da sociedade civil. Cento sesenta e catro anos despois do pioneiro experimento de Antonio Casares, o control da contaminación luminosa comeza a estar na axenda. O reto é sinxelo: iluminarmos ben para ver e vivir mellor.

Porque queremos o ceo. Non nos conformamos con menos.

PARA FACERES NA CASA



Podes comprobar como afecta a intrusión luminosa á túa casa apagando todas as luces do interior e subindo as persianas das xanelas en canto sexa noite. Deixa pasar uns minutos para que os teus ollos se vaian afaendo ao novo nivel de iluminación. Cantas tarefas de casa podes realizar sen necesidade de acender ningunha luz adicional?

Se queres colaborar no estudo da contaminación lumínica a nivel mundial existen diversos programas de ciencia cidadá promovidos por universidades e centros públicos de investigación nos que podes participar. No momento de escribir estas liñas están activos *Globe at Night*, *Cities at Night*, *Loss of the Night*, *TimeLine*... Unha busca pola rede levarate a eles, ou aos que os sucedan no futuro. Anímate a colaborar!

10. ALÉN DO QUE OS OLLOS VEN

Hai outros mundos, pero están neste.

Frase atribuída ao poeta Paul Éluard (1895-1952), que en realidade non se chamaba así

Cres que sabes como é o mundo que te rodea? Desconfía. É tanta a información que nos entra polos ollos que doadamente podemos caer no erro de pensar que o mundo é exactamente así: tal como o vemos. Pero nada máis lonxe da realidade. Hai moitas cousas aí fóra que os nosos ollos non son quen de ver.

O noso sistema visual é o resultado dunha marabillosa adaptación evolutiva. Permite que nos relacionemos de forma moi eficaz coa nosa contorna dándonos unha inmensa cantidade de datos sobre a posición, forma, movemento, textura e cor dos obxectos. Porén, a súa capacidade para captar

información do que ocorre ao noso redor é limitada. Os ollos non poden velo todo. Non é estraño: manter en funcionamento calquera sistema biolóxico, e moi en particular o visual, ten o seu custo en termos de enerxía. Semella normal que a selección natural favorecese aqueles sistemas visuais que, co menor custo enerxético, proporcionen a información que cada especie necesita para adaptarse ás condicións do medio. Ser eficaz e conter o consumo enerxético implica concentrarse en detectar as cousas esenciais para a supervivencia. O resto pode agardar.

Certo é que os humanos e as humanas non che somos unha especie boa de contentar. Sempre soñamos con ir moito máis aló do que os nosos ollos ven, e abofé que o conseguimos. Para poder asomarnos a ese mundo invisible e albiscar os segredos ocultos da natureza desenvolvimos multitude de sensores coa axuda da óptica, a electrónica e as tecnoloxías fotónicas. Cada novo sensor que inventamos permitiunos coñecer aspectos inesperados do mundo que nos rodea e empurrounos a crear novas teorías sobre a natureza; cada nova teoría, á súa vez, permitiunos imaxinar e construír novos sensores. A ciencia e a tecnoloxía avanzan así, bailando en parella e facéndose mutuos agasallos. Grazas a ese permanente xogo de intercambios o noso coñecemento do mundo vaise facendo cada vez máis preciso e exacto.

Neste último capítulo falaremos dalgunhas das cousas que non podemos ver sen a axuda de instrumentos especiais e que, no entanto, están aí. Nestes precisos instantes. Ao teu arredor.

Hai moitos tipos de radiación que non vemos

Os fotorreceptores dos nosos ollos son sensibles á radiación electromagnética. Pero ademais dos fotóns, asociados a esa interacción, hai outras moitas partículas movéndose no noso entorno: electróns e núcleos de helio procedentes de desintegracións radiactivas, partículas cargadas procedentes do espazo exterior e, sobre todo, neutrinos. Moreas e moreas de neutrinos, partículas elementais producidas en inmensas cantidades nas reaccións nucleares que teñen lugar no Sol, e que interactúan tan feblemente coa materia que disque poden atravesar máis dun ano luz de chumbo antes de seren absorbidos. Calcúlase que decenas de milleiros de millóns de neutrinos procedentes do Sol atravesan cada centímetro cadrado da túa pel cada segundo. Tamén entran polos teus ollos, si. Pero practicamente todos pasan de largo. Para os neutrinos os humanos somos transparentes. Como se non esti vésemos. Iso si que é un golpe na autoestima.

Só vemos unha pequenísima parte da radiación electromagnética

Os nosos ollos detectan soamente unha minúscula fracción da radiación electromagnética, a que

ten longuras de onda comprendidas entre as 0.4 e as 0.7 millonésimas de metro, aproximadamente. Esas longuras de onda forman o que chamamos o *espectro visible* (si, hai que admitir que non nos matamos elixindo o nome) e cando as percibimos vemos o que denominamos *luz*. Pero o espectro electromagnético é infinitamente máis extenso. Non podemos ver as radiacións de longuras de onda maiores, como a infravermella, as microondas ou as ondas de radio naturais ou artificiais que agora mesmo atravesan en todas direccións o lugar no que te encontras. Tampouco podemos ver a radiación de longuras de onda máis curtas, como a ultravioleta, os raios X ou os altamente enerxéticos fotóns gamma. Moitos fenómenos do Universo emiten grandes cantidades de enerxía nesas inmensas rexións do espectro electromagnético ás que nós somos cegos.

Non percibimos directamente o espectro da luz

A cor é sen dúbida unha das percepcións máis rechamantes que temos os seres humanos. Cada longura de onda individual do espectro visible ten para nós unha cor ben característica. Postas unha a carón doutra, en orde crecente de longuras de onda, forman un espectro semellante ao do arco da vella, espectro que podes ver doadamente se decompós a luz de calquera lámpada coa axuda dunha rede de difracción (un CD ou DVD, por exemplo). As longuras de onda máis curtas corresponden ás cores violetas e azuis, e as máis longas

ás laranxas e vermellas, coas verdes e amarelas en posicións intermedias. Se mesturamos varias longuras de onda o noso sistema visual responde dunha forma moi curiosa: percibimos unha cor totalmente nova, diferente de cada unha das cores individuais que a forman. Vendo a cor resultante non somos quen de saber cales son as cores espectrais que a compoñen! Se queremos saber cal é o espectro dun feixe de luz non nos queda outra que separar as súas longuras de onda coa axuda dunha rede ou un prisma. Isto contrasta co que sucede co noso sistema auditivo: o equivalente ás cores espectrais serían notas musicais como as producidas por un diapasón. Somos quen de decatarnos de que varias notas diferentes soan simultaneamente, como doadamente poderás comprobar se na túa veciñanza hai varios rapaces ensaiando á vez con frutas doces para clase de música. O noso sistema visual non dá feito iso. É incapaz de proporcionarnos información detallada sobre a composición espectral da luz que lle chega. Aínda máis: luces con espectros moi diferentes poden provocarnos a mesma sensación de cor. É o que se chama *metamerismo*.

Hai moitas máis cores que as que somos quen de ver

Os humanos podemos percibir cores porque contamos con tres variedades diferentes de *conos*, as células fotorreceptoras que nos permiten

ver con detalle cando hai suficiente iluminación. Na retina temos varios millóns de conos, que son de tres tipos dependendo das longuras de onda ás que son máis sensibles. Temos así os conos-S (do inglés *short*), cuxo máximo de sensibilidade está nas longuras de onda curtas que percibimos como azuis (420 nanómetros), os conos-M (*medium*) que teñen o máximo nas longuras de onda que nos parecen verdes (534 nm) e os conos-L (*large*) que responden sobre todo á luz que ten para nós unha cor verde-amarela (564 nm). Cada tipo de cono, por suposto, non responde soamente á longura de onda para a cal é máxima a súa sensibilidade: responde tamén, aínda que menos intensamente, ás longuras de onda veciñas, en bandas que se solapan parcialmente entre uns conos e outros. Cando a luz dunha determinada composición espectral chega á nosa retina excita os conos con diferente intensidade, dependendo da cantidade de enerxía que teña na banda do espectro á que cada cono é sensible. O noso sistema visual analiza a proporción de radiación recibida por cada tipo de cono e en función diso permítenos percibir unha ou outra cor. Por exemplo se os conos S captan máis radiación que os M e L, tenderemos a percibir un ton azul. E se, pola contra, os L captan moita máis radiación que os M e S o que veremos será un ton vermello. O vermello é se cadra a cor máis característica e rechamante de todas. Non deixa de ser curioso que os humanos non teñamos

fotorreceptores cuxa máxima sensibilidade estea no vermello! É a relación entre os sinais producidos nuns conos e outros o que está na base da nosa percepción da cor.

Se os tres tipos de conos responden de forma diferente ás distintas longuras de onda do espectro é principalmente porque cada un deles detecta a luz mediante un pigmento visual lixeiramente distinto, cuxa sensibilidade espectral varía dependendo de cal sexa a súa composición química detallada. Que sucedería se os nosos tres pigmentos fosen sensibles a outras longuras de onda? Sen dúbida veriamos un mundo moi diferente. As abellas, por exemplo, teñen fotorreceptores con sensibilidades semellantes ás dos nosos conos S e M, pero no canto de ter os L teñen un tipo especial de fotorreceptor cuxo máximo de sensibilidade está nos 340 nanómetros, en plena rexión ultravioleta. Usando cámaras especiais podemos intentar aproximarnos a como ve unha abella e... sorpresa! As flores que para nós teñen unha cor uniforme teñen para elas unha rica variedade de debuxos e marcas. Captar radiación na banda ultravioleta permítelles ás abellas, e a outros insectos, detectar mellor as flores que son interesantes para a súa supervivencia.

A maior parte dos mamíferos, coa excepción dos humanos e algúns tipos de primates, teñen dous tipos de pigmentos nos conos. Outras especies, como o polbo das nosas costas, soamente teñen un: A súa visión é con toda probabilidade

en branco e negro, é dicir, está baseada na percepción de diferentes niveis de gris. No extremo oposto temos á *langosta mantis* (ou *boxeadora*), un agresivo crustáceo dos mares tropicais cuxos ollos teñen un total de dezaseis fotopigmentos distintos. Aínda non sabemos con certeza como funciona o procesado da cor nesas langostas, pero podeades apostar a que o mundo que ven os seus ollos é ben diferente do noso!

Non vemos simultaneamente todo o que nos rodea

É unha obviedade: só temos dous ollos e apuntan cara adiante. Iso quere dicir que sen axuda de instrumentos non podemos ver todo o que sucede ao noso redor ao mesmo tempo. Para escanear o espazo temos que xirar a cabeza e/ou rotar os ollos coa axuda dos músculos que os manteñen suxeitos ás súas órbitas.

Cada un dos nosos ollos por separado é quen de abranguer un campo visual bastante amplo pero que non cobre todo o espazo: desde o punto no que fixamos a mirada esténdese uns 62 graos cara arriba, 74 graos cara abaixo, outros 62 graos cara o nariz (dirección *nasal*) e uns 110 graos cara as orellas (dirección *temporal*). Certo é que soamente podemos ver con detalle os obxectos que están na parte central dese campo visual, cuxas imaxes se forman sobre a *fóvea* do ollo. O campo visual foveal ten un diámetro aproximado duns dous graos, que vén sendo o ancho co que se ve o dedo polgar

co brazo estendido. Esa é a zona que utilizamos para ler, ver imaxes e recoñecer caras. Fóra desa rexión a nosa vista perde rapidamente agudeza, aínda que somos quen de detectar moi ben vultos e movementos.

Os campos visuais dos nosos dous ollos solápanse parcialmente, permitíndonos ver con cada un deles os obxectos desde unha perspectiva lixeiramente diferente. Desa forma podemos percibir as distancias e as posicións relativas das cousas que nos rodean. A visión binocular permítenos desfrutar da *estereopse*, é dicir, da capacidade de percibir o mundo en tres dimensións a partir de imaxes bidimensionais obtidas desde puntos de vista diferentes. É unha cualidade utilísima para as especies depredadoras ou recolectoras de froitos, dado que estimar ben as distancias e posicións élles algo esencial para sobreviviren.

Pero non soamente se nos escapa o que sucede ás nosas costas. Hai unha ampla zona *dentro* do campo visual de cada ollo onde non somos quen de ver. É o que se chama a *zona cega*. É unha rexión situada a uns 15 graos do centro do campo visual en dirección temporal e ten un tamaño sorprendentemente grande: entre 5 e 6 graos en horizontal e uns 7-8 en vertical. Aí caben unha ducia de Lúscas en cada dirección! A zona cega corresponde ao lugar da retina por onde sae do ollo a rede de células que transmite o sinal dos fotorreceptores formando o nervio óptico que o conecta co cerebro. A ausencia de fotorreceptores nesa rexión fai

que non teñamos información visual das imaxes que se forman nela. Non nos decatamos deste inmenso oco no noso campo visual porque o noso cerebro axúdanos a ignoralo “enchéndoo” de contido en función do aspecto que teñen as rexións que o rodean. Pero aí o tes. Están pasando cousas diante de ti que non podes ver.

Non podemos ver as cousas moi pequenas

Hai moitísimas cousas pequenas que tamén están aí e tampouco podemos ver. Habería que dicir pequenas e grandes, porque o factor clave é o seu tamaño angular, é dicir, o ángulo que forman os seus extremos vistos desde o noso ollo. O sistema visual humano, en promedio e se non ten defectos que o impidan, é quen de distinguir estruturas que teñan un tamaño angular igual ou maior que un minuto de arco. Para facérmonos unha idea, este é o tamaño co que se vería unha moeda de 1 euro desde 80 metros de distancia ou unha pizza familiar desde algo máis dun kilómetro (depende do tamaño exacto da pizza). Se enfocamos cos nosos ollos á distancia máis cercana á que somos quen de facelo (varía coa idade, pero soen tomarse uns 25 centímetros como referencia para un adulto sen problemas de visión) o detalle máis pequeno que podemos ver é dunhas 70 micras ou milésimas de milímetro. Isto é algo menos que o grosor típico dun cabelo humano, que ten arredor de 100 micras. Tendo en conta que as bacterias teñen tamaños da orde dunhas poucas micras e que rara vez

superan as vinte, non é estraño que a humanidade pasase a maior parte da súa historia ignorante da existencia de microorganismos. Hoxe, grazas á publicidade televisiva dos produtos de limpeza, todo o mundo sabe (ou sospeita) que hai bacterias na cociña.

Como dicíamos, a clave é o tamaño angular. E un obxecto moi grande pode ter para nós un tamaño angular moi pequeno, se está suficientemente lonxe. A Lúa chea ten un diámetro aproximado de 30 minutos de arco, o que quere dicir que a vemos cun nivel de detalle parecido ao que tería nunha foto de 30x30 píxeles. Non é moito, a verdade. O tamaño angular da Lúa varía lixeiramente en función do momento en que a vexamos: a súa distancia a nós varía dependendo da súa posición na órbita arredor da Terra, e varía tamén coa hora do día, porque cando vemos a Lúa cercana ao horizonte estamos un pouco máis lonxe dela que cando está sobre as nosas cabezas. Pero máis ou menos así a vemos, como unha imaxe de menos de un kilopíxel. Á distancia típica da Lúa, uns 385000 km, un minuto de arco corresponde a algo máis de 100 km: ese é o tamaño mínimo das estruturas que podemos ver nela a ollo nu. Por iso houbo que esperar ao telescopio de Galileo para podermos comprobar que a Lúa non é unha esfera pulida e perfecta, senón que ten montes e vales, e moitas outras cousas máis. E por iso tampouco verás a simple vista a bandeira do Apollo XI, por moito que o intentes.

Non podemos ver con claridade o que pasa moi preto dos nosos ollos

Pode semellar unha brincadeira, pero é certo. Se un obxecto está moi preto dos nosos ollos, non o imos dar enfocado sobre a nosa retina. E, dependendo de como sexa o obxecto, pode que nin nos decatemos de que está aí.

Moitas veces compárase o funcionamento do ollo co dunha cámara fotográfica. A comparación non é totalmente afortunada, pero ten o seu punto. Por exemplo, para obter imaxes nidas de obxectos situados a distancias moi diferentes é necesario enfocar a cámara, e o mesmo pasa co ollo. Unha das formas posibles de enfocar é mover para adiante e para atrás as lentes do obxectivo da cámara até que a imaxe se vexa moi ben. A maior parte dos obxectivos fotográficos traballan así. Facer isto nun ollo é algo complicado porque hai que mover a súa lente interna, o cristalino, mais así e todo a maioría dos peixes enfocan precisamente desa maneira. Pero hai outro xeito posible de enfocar imaxes: no canto de cambiar a posición da lente podemos cambiar a súa forma. Se curvamos máis a súa superficie, facéndoa máis redonda, podemos enfocar obxectos máis cercanos. Ese é o procedemento que usamos a maioría dos mamíferos, humanos incluídos: variamos a curvatura das superficies do cristalino mediante un músculo que temos no ollo e dese xeito enfocamos de lonxe ou de cerca, dependendo da tarefa visual que queiramos realizar.

A este proceso denomínaselle *acomodación*. Curiosamente esta solución biolóxica foi copiada recentemente polos enxeñeiros ópticos para fabricar pequenas lentes de foco variable mediante unha celda que contén dous líquidos cuxa superficie de separación cambia de curvatura segundo a voltaxe eléctrica aplicada, posibilitando así o enfoque sen necesidade de mover compoñentes mecánicos.

Sexa cal sexa a solución adoptada, para un ollo de lonxitude fixa e unha lente de posibilidades limitadas sempre hai un punto do espazo a partir do cal os obxectos máis cercanos non se poden enfocar con claridade na retina. É o que se chama *punto próximo de acomodación*. Un obxecto situado a distancias menores vese borroso. E se está situado suficientemente cerca do ollo a súa imaxe na retina estará tan desenfocada que se verá como un fondo máis ou menos uniforme que fará que diminúa o contraste co que se ven outros obxectos que estean enfocados correctamente. Pero el mesmo pode non ser visible.

Por certo, o punto próximo de acomodación vaise alonxando do ollo consonte cumprimos anos. O cristalino vai perdendo flexibilidade e cada vez cóstalle máis deformarse e acadar a curvatura requirida para enfocar de cerca. Unha persoa emétrope (é dicir, que non teña miopía, hipermertopía nin astigmatismo) pasará de poder enfocar ben a uns 8 centímetros do ollo cando ten dez anos de idade a ter dificultades para enfocar a menos de

50 centímetros ao cumprir os cincuenta. O alonxamento do punto próximo é un proceso continuo que se produce desde que nacemos. Sucede, si, que hai un momento da vida, tipicamente entre os corenta e os cincuenta anos, en que é habitual notar por primeira vez que é difícil enfocar ben á distancia usual de lectura: un decátase de que pronto vai necesitar usar gafas ou lentes de contacto para poder ver ben tanto de cerca como de lonxe. Esta redución progresiva da amplitude de acomodación non é unha doenza, senón unha manifestación da evolución fisiolóxica normal do ollo humano. Cando causa dificultades para ver de cerca a condición resultante chámase *presbicia*. Hoxe en día temos unha ampla gama de axudas para persoas présbitas. As máis habituais son as lentes progresivas ou multifocais, en forma de gafas, lentes de contacto ou mesmo lentes intraoculares.

Hai cousas que suceden demasiado rapidamente para que poidamos velas

O noso sistema visual non soamente ten limitacións espaciais, tamén as ten temporais: non somos quen de percibir separadamente eventos que se suceden a gran velocidade. Por exemplo, se acendemos e apagamos un LED de forma periódica e cada vez máis rapidamente, comprobaremos que consonte aumentamos a frecuencia (o número de veces que o acendemos por segundo) menos diferenza veremos entre telo *on* e *off*, até

que chegará un momento en que nos parecerá que brilla de forma estable cunha intensidade constante e aproximadamente igual á metade da inicial. A frecuencia á que se produce esa sensación de que a intensidade é constante denomínase *frecuencia crítica de fusión*, e depende de moitos factores: as intensidades máxima e mínima, a longura de onda ou o espectro da luz, a posición da fonte luminosa dentro do campo visual, a exposición previa a outras fontes de luz, a idade, a fatiga... En condicións de iluminación elevada, para visión baseada nos conos, esta frecuencia pode chegar a ser de 60 *hertz* (un *hertz* é un ciclo por segundo) aínda que tipicamente é bastante menor. Por esa nosa limitación non somos quen de ver como bate as ás un colibrí: móveas nada menos que 80 veces por segundo. Unha abella pode facelo 200 veces por segundo! Cando os eventos son así de rápidos soamente somos quen de ver un promedio do fenómeno oscilatorio que realmente se está producindo. O mesmo sucede coas oscilacións do campo eléctrico asociado á luz visible: ocorren varios centos de billóns de veces por segundo!

A nosa incapacidade para percibir separadamente eventos moi rápidos é a base do cinema, dos debuxos animados e das imaxes que ves na pantalla do teu dispositivo móbil: unha sucesión rápida de imaxes estáticas produce en nós a sensación dun movemento continuo.

Non podemos ver as cousas pouco contrastadas

O sistema visual humano ten unha increíble capacidade para ver en condicións moi diferentes de iluminación ambiente. A iluminancia que chega aos nosos ollos no mediodía dunha mañá despexada de verán pode ser mil millóns de veces maior que a que chega nunha noite escura e sen Lúa na que só brillan as estrelas, pero os nosos ollos son quen de afacerse a ver nesas situacións extremas. A clave desa extraordinaria habilidade radica en que os dous tipos de fotorreceptores visuais, os conos e bastóns, están especializados en detectar luz en rangos de intensidades moi diferentes: os conos nas condicións de iluminación típicas do día (visión *fotópica*) e os bastóns nas condicións típicas da noite (visión *escotópica*). A calidade da visión baseada en conos (detallada e con percepción de cor, como xa comentamos) non é igual que a baseada en bastóns (máis borrosa e monocroma), pero o certo é que as e os humanos podemos ver en entornos tremendamente diferentes. Necesitamos, iso si, entre vinte e trinta minutos para acadar a nosa máxima sensibilidade visual se pasamos bruscamente dun espazo moi iluminado a un espazo escuro. É o tempo que require o proceso que se denomina *adaptación á escuridade*. A sensibilidade dos bastóns, unha vez adaptados, é moi grande: disque poden responder con sinais medibles á absorción de moi poucos fotóns. O proceso inverso, é dicir, o paso dun lugar escuro a outro moi

iluminado, require menos tempo de adaptación pero tampouco é inmediato: normalmente leva algo menos de cinco minutos. En calquera caso, a cantidade de luz ambiente non é o principal factor limitante para que poidamos percibir os obxectos.

O que limita a nosa capacidade de detectar a presenza dun obxecto é o seu contraste co fondo que o rodea. O contraste entre unha imaxe e o fondo pode definirse de diversas formas, pero unha moi común, proposta por Michelson, é a seguinte: é a diferenza dos brillos da imaxe e do fondo dividida pola súa suma. Se imaxe e fondo brillan igual, o contraste é cero. Se o brillo de calquera dos dous é cero o contraste é máximo e ten o valor 1. Para detectar unha imaxe sobre o fondo o noso sistema visual necesita que o contraste entre ambos sexa superior a un certo valor mínimo, chamado *umbral de contraste*, que depende de moitos factores: do tamaño angular do obxecto, da súa cor, do brillo do fondo... É precisamente a falta de contraste suficiente a que nos impide ver as estrelas durante o día. Na dirección na que hai unha estrela o brillo total é a suma do brillo da estrela e o brillo do aire responsable da cor azul do ceo. Este último, claro, é moito máis intenso que o da estrela. Daquela, aínda que o brillo total é algo maior na dirección da estrela, o seu contraste co brillo da contorna é moi pequeno e queda por debaixo do noso umbral de detección. Esa é a razón pola cal non vemos as estrelas polo día, e non o feito de

que o brillo do aire impida dalgún xeito o paso da súa luz, cousa que obviamente non sucede. A luz das estrelas chega a nós exactamente igual polo día que pola noite! O que sucede en horas nocturnas é que o aire xa non brilla porque non lle dá o sol, e a luz das estrelas destaca moi ben sobre o fondo escuro do ceo. O contraste nesas condicións é moito maior. Un mesmo obxecto pode ser ou non perceptible dependendo do que brille o fondo que o rodea. Por iso a contaminación lumínica fai desaparecer as estrelas.

Para sermos precisos, un ceo nocturno despexado e sen Lúa e non contaminado luminicamente en realidade nunca chega a ser completamente negro: brilla algo, aínda que moi feblemente, pola emisión espontánea dos átomos que forman a atmosfera excitados polo choque con partículas do vento solar, e pola difusión no aire da luz procedente das estrelas e galaxias que nos rodean. Tamén contribúen ao brillo do fondo do ceo a luz do Sol reflectida polo po presente no sistema solar, e a tenue luz de todas as estrelas e galaxias que están na nosa liña de visión. Iso marca un límite ao brillo mínimo dos obxectos celestes que podemos percibir cos ollos. Aínda que algunhas galaxias como a nosa Vía Láctea ou a de Andrómeda poden percibirse a simple vista, case todas requiren o uso dalgunha axuda óptica para poderen ser vistas. Para ver o máis parecido a un ceo case completamente

negro é preciso vestirse de astronauta e saír da atmosfera terrestre. O límite de detección vén nese caso determinado pola sensibilidade absoluta dos bastóns, é dicir, polo número mínimo de fotóns que un fotorreceptor debe detectar simultaneamente a fin de producir un sinal eléctrico distinguible do inevitable ruído causado pola axitación térmica dos seus átomos.

Non percibimos a polarización da luz

A polarización indica como vibra a forza eléctrica que as ondas de luz exercen sobre as partículas cargadas. En xeral esta forza cambia de dirección rapidísimamente e de forma case aleatoria dun momento a outro, pero danse situacións nas que vibra de forma moito máis regular. Cando a forza oscila mantendo a súa dirección dise que a luz está polarizada linealmente. Este tipo de luz atópase frecuentemente na natureza. Aínda que as fontes de luz naturais (Sol, estrelas, lume...) emiten en xeral luz non polarizada, esa luz pode polarizarse, cando menos parcialmente, ao reflectirse nunha superficie suave (por exemplo, a da auga dun lago ou río) ou ao espaxarse nas moléculas de aire se as vemos desde unha dirección adecuada (por exemplo, a 90 graos de onde se atope o Sol). Ser quen de percibir a polarización da luz é tremendamente útil para moitas especies animais. Non son poucos os insectos que a usan para a orientarse no espazo ou para detectar a presenza

de auga a distancia. Pero os ollos humanos non son quen de vela, salvo en condicións moi particulares. Para coñecer o estado de polarización da luz precisamos da axuda de certos materiais ópticos, como os chamados *polarizadores* e as *láminas de retardo de fase*, algúns dos cales poden atoparse na natureza. Disque os navegantes viquingos que asolaban as costas europeas entre os séculos VIII e XI utilizaban unha pedra especial (se cadra *cordierita*, ou pode que *espato de Islandia*, unha variedade de calcita) para coñecer a dirección de polarización da luz do ceo e poder así orientarse no mar mesmo sen veren directamente o Sol. Sexa ou non certo que os temidos nórdicos usaron a chamada *sólarsteinn* ou *pedra solar* como axuda á navegación, a técnica, en principio, parece practicable. Así calquera chega de Escandinavia a Catoira.

Non sabemos o que está sucedendo agora mesmo

Xa vimos que a velocidade finita da luz fai que non poidamos saber en tempo real o que está sucedendo neste preciso momento en calquera punto que estea separado de nós. A luz procedente deses sucesos tarda certo en tempo en alcanzarnos, e ningún outro sinal informativo pode propagarse máis rapidamente ca ela. Por iso comentabamos nun capítulo anterior que cada un de nós está na vangarda do tempo: todo o que vemos sucedeu no noso pasado. Pero a velocidade finita da luz non é o único factor que nos fai ver o mundo *con retraso*. O noso sistema visual tarda un certo tempo

en enviar ao cerebro os sinais producidos polos conos e bastóns, e precisamos dun tempo adicional para converter eses sinais en percepción consciente. Cando nos decatamos de algo, ese algo xa sucedeu uns 150 milisegundos antes. O mundo vai sempre máis adiantado ca nós!

A fasquía do Universo depende pois crucialmente dos sensores que utilizemos para observalo. Os seres humanos achegámonos a el de forma natural a través dos nosos sentidos, e moi en particular da visión, un sistema de detección marabilloso e limitado ao mesmo tempo. A ciencia e a tecnoloxía modernas, con axuda de intelixentes medios, permitíronnos superar estas limitacións e comezar a descubrir os outros mundos que tamén están neste. A imaxe científica do Universo non é xa única nin principalmente visual: todos os tipos de radiación coñecidos e todas as longuras de onda do espectro electromagnético proporcionánnos cada día moreas de nova información. Múltiples instrumentos en laboratorios experimentais, observatorios situados nos altos cumios da Terra ou a bordo de sondas espaciais, grandes aceleradores de partículas e detectores subterráneos de neutrinos contribúen a enriquecer a nosa visión do mundo. Pero os ollos seguen a ser a nosa principal fonte de información na vida cotiá. Chamamos *luz* á sensación que nos produce a radiación que eles detectan. Non houbo luz antes de haber xente. Fomos nós quen *fixemos a luz*.

PARA FACERES NA CASA



Hai moitas cousas que podes facer na casa para comprobar que hai mundo alén do que ves, pero ímosche propoñer só unha: comprobar que cada un dos teus ollos non pode ver unha parte importante do que ten diante, aínda que o teu cerebro che faga pensar que si. Trátase de localizar a *zona cega*. Non é complicado, pero se cadra terás que entrenar un pouco. Fai o seguinte:

pecha un ollo e estende os teus brazos diante do outro ollo coas mans pechadas e soamente os dedos índices levantados e xuntos. Mantén a vista fixa nun dos dedos mentres vas separando pouco a pouco o outro, lateralmente, en dirección temporal (se estás usando o ollo dereito, a dirección temporal é a túa dereita. E se usas o esquerdo, a esquerda) É moi importante que manteñas centrada a mirada no primeiro dedo, sen caer na forte tentación de seguir co ollo o movemento do segundo. Este debes percibilo mediante a túa visión periférica: esa é a única habilidade que deberás practicar, pois o impulso natural será mover o ollo. Se fas todo con cuidado chegará un momento en que a punta do segundo dedo desaparecerá da tua vista como se a cortasen! O motivo é que a súa imaxe caerá na zona cega da retina, que é o lugar polo que as células nerviosas que levan o sinal dos fotorreceptores abandonan o ollo formando o nervio óptico. Esa zona da retina non ten fotorreceptores e, xa que logo, non nos proporciona sinal visual. No momento en que parte do dedo desaparece é particularmente difícil evitar a tentación de xirar o ollo para ver que pasou, pero debes resistila: se o xiras a imaxe volverá a caer sobre unha zona con fotorreceptores e veralo de novo enteiro. Practicando un pouco poderás facerte unha idea dos límites da túa zona cega. Probablemente sorprenderaste do grande que é. Cando temos os dous ollos abertos o outro ollo capta imaxes desa zona, o que contribúe a non decatármonos da súa existencia. Pero mesmo cando só uses un ollo terás a sensación de que a zona cega non existe: o noso cerebro é quen de reencher ese oco con información do espazo circundante.



Poucos fenómenos naturais teñen tanto poder de estimular a imaxinación e a creatividade da humanidade como a luz. A luz estivo na cerna de todas as revolucións científicas, pois o noso Universo non se comprende sen ela. Nestas páxinas atoparás algúns triscos da súa historia, resóns da vida das persoas que nos axudaron a coñecerla e balbordes das controversias que provocou. Tamén terás noticia dalgunhas das súas aplicacións máis recentes, e dos problemas e interrogantes que o seu uso suscita. Unha pequena xanela aberta, nada máis: o inmenso e maravilloso mundo da luz non cabe en ningún contedor de escala humana. Esta obra é igualmente un contributo ás actividades realizadas en Galicia con motivo do Ano Internacional da Luz 2015 e súmase así a un extenso conxunto de iniciativas desenvolvidas polo Comité Galego do AIL.

*Os temas candentes da ciencia actual
tratados por especialistas da USC
de xeito ameno e accesible

