

Principio de Integridad Universal

PIU- Ψ

Cómo opera el Pleno

¿Qué es el cosmos? ¿Qué es el Pleno? ¿Cómo opera?



red diamante · Fd3m, $Z = 4$

una explicación para entender la idea, casi sin matemáticas

Manuel Alberto Celedón Mejía

Versión divulgativa 5.6

PIU- Ψ
Principio de Integridad Universal

Cómo opera el Pleno

¿Qué es el cosmos? ¿Qué es el Pleno? ¿Cómo opera?

Un programa de investigación en física fundamental
Una explicación para entender la idea, casi sin matemáticas

Manuel Alberto Celedón Mejía
Investigador independiente • Medellín, Colombia
ORCID [0009-0002-8090-2364](https://orcid.org/0009-0002-8090-2364)
piuniversal.com

Versión divulgativa V5.6

30 de septiembre de 2026

Zenodo DOI: [10.5281/zenodo.23064146](https://doi.org/10.5281/zenodo.23064146)

Licencia Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

Cómo citar. Celedón Mejía, M. A. (2026). *PIU- Ψ — Cómo opera el Pleno*, versión divulgativa 5.6. Zenodo. [doi:10.5281/zenodo.23064146](https://doi.org/10.5281/zenodo.23064146)

El desarrollo formal completo —el corpus, el compendio matemático y los cuadernos de verificación que recalculan cada cifra— está disponible para descarga en piuniversal.com y en Zenodo, bajo la misma licencia.

La pregunta de fondo

Imagina que alguien te dijera que la gravedad que te mantiene en la silla, la luz que te permite leer esto, las partículas de las que estás hecho y los grandes misterios del cosmos —la materia oscura, que sujeta a las galaxias sin que nadie sepa de qué está hecha, y la energía oscura, a la que se atribuye que la expansión del universo se acelere— son todos la misma cosa, vista de maneras distintas. No fuerzas separadas, no ingredientes diferentes: una sola sustancia, comportándose de formas diversas.

La física arrastra desde hace un siglo un problema enorme. Hoy describimos la naturaleza con dos grandes teorías que funcionan de maravilla y que no se hablan entre sí. Por un lado, la de lo muy grande: la relatividad general, que explica la gravedad, las estrellas, las galaxias y la forma del universo entero. Por otro, la de lo muy pequeño: la mecánica cuántica, que describe las partículas, los átomos y el mundo subatómico. Cada una reina en su dominio; juntas, se contradicen. Cuando se intenta usar las reglas del mundo cuántico para describir la gravedad, las matemáticas se llenan de infinitos sin sentido y todo se derrumba. Tender ese puente —lo llaman “gravedad cuántica”, y se considera el mayor desafío sin resolver de la física fundamental— ha resistido hasta hoy a las mentes más finas. Es como tener dos mapas perfectos de la misma ciudad que, al superponerlos, no encajan.

Frente a ese problema, casi todos los intentos previos aceptan que hay dos teorías y buscan la manera de *unirlas*. PIU- Ψ invierte la pregunta: **¿y si nunca fueron dos?** ¿Y si lo grande y lo pequeño no son dos universos separados que reconciliar a la fuerza, sino dos caras de una *única* sustancia física? En PIU- Ψ esa sustancia se llama el Pleno, y de ella brota absolutamente todo lo demás.

- **Es física, no filosofía.** PIU- Ψ es un **programa de investigación en física fundamental** —la rama que busca las leyes últimas de la naturaleza—: parte de seis principios precisos, deriva sus resultados como se demuestran teoremas, y marca cada afirmación con una etiqueta que dice hasta dónde está probada.
- **No viene a reemplazar, sino a explicar.** Lo que hace es *derivar* la relatividad y la cuántica —muestra que ambas brotan de una misma raíz— y con ello **las integra desde una base común**. Las leyes que la ciencia ya tiene comprobadas seguirán funcionando igual; lo que el programa añade es la raíz y el tronco común que las sostienen.
- **Cambia la pregunta.** En lugar de forzar el encaje de dos piezas, muestra que siempre fueron una sola. Y desde esa única sustancia aborda las preguntas que la física actual deja abiertas: qué son la materia oscura y la energía oscura, por qué el espacio vacío tiene muchísima menos energía de la que predice la teoría cuántica, qué hay en el fondo de un agujero negro y en el comienzo del universo, por qué la gravedad es tan débil y por qué el mundo cuántico se comporta como se comporta.

Índice

1	De una sola ecuación, las leyes que explican la dinámica del universo	6
2	Derivar no es ajustar	12
3	Una sola sustancia que lo es todo	16
4	Cómo se organiza: un cristal con forma de diamante	18
5	Las dos cualidades de cada punto: cuánto se comprime y hacia dónde gira	21
6	Un medio firme que se endurece con la prisa	23
7	El tiempo: no un escenario, sino el latido del Pleno	25
8	La gravedad: no una fuerza que tira, sino el medio que se relaja	26
9	Los agujeros negros: un tope, no un abismo	32
10	La otra constante: el giro de un grano	35
11	El mundo cuántico: las reglas que dejan de ser punto de partida	37
12	El catálogo entero, de un solo medio	42
13	Las fuerzas y la materia: la fase que circula, el medio que se anuda	42
14	El sector oscuro: de qué está hecho el 95 % del universo	48
15	El calor del propio medio	53
16	Las estrellas: la masa a la que se acaba una vida	55
17	Lo grande y lo pequeño: un solo material, visto a dos distancias	57
18	Por qué esto es ciencia, y no un cuento bonito	60
19	El idioma con que opera el universo	65
20	El reloj cósmico: leer la hora del universo	66
21	El ciclo: el final, el rebote, y lo que quedó fijado en él	71
22	Hasta dónde llega el programa, y qué queda por decidir	75
23	Veinticuatro preguntas, contestadas desde el Pleno	79
24	Las leyes que el programa alcanza	85
25	Nota para quien quiera revisarlo	87

Cómo está hecho este documento

El texto corrido cuenta la idea completa, con imágenes de la vida diaria y casi sin matemáticas.

Los **cuadros azules** dan la versión exacta de lo que el texto acaba de contar: la ecuación, la cifra, la comprobación a la que se somete el resultado, y una etiqueta en la cabecera que dice cuánto está probado. Cada uno termina diciendo qué cambia con ese resultado. Los **cuadros rojos** resumen y ordenan lo ya explicado.

Las cuatro **etiquetas** dicen hasta dónde está probada cada afirmación: **[DERIVADO]** prueba completa; **[DLF]** deducción lógica fuerte, con la estructura probada y el álgebra por cerrar; **[CALIBRADO]** valor anclado a un dato medido, que se nombra; **[MÉTODO]** cuestión de método y no resultado propio. La §18 las desarrolla.

Cada símbolo se explica en palabras donde aparece por primera vez. Al final del libro, tras las veinticuatro preguntas, hay además un glosario con los pocos que reaparecen por todo el texto. Y la palabra **derivar** tiene aquí un sentido estricto, que la §2 define y del que depende todo lo que el programa afirma.

1. De una sola ecuación, las leyes que explican la dinámica del universo

El punto de partida de PIU- Ψ es una pregunta que muchos nos hemos hecho en algún momento —¿y si todo, la gravedad, la luz, la materia, el cosmos, fuera en el fondo lo mismo?— llevada hasta sus últimas consecuencias. Si de verdad todo es una sola sustancia, entonces de una descripción matemática precisa de esa sustancia deben poder deducirse, paso a paso, las leyes conocidas de la física.

Eso es exactamente lo que el programa hace. Su punto de partida es el primero de sus axiomas —los principios que se aceptan sin demostración y de los que se deduce el resto—, **A1**. Dice en una sola frase qué es el universo entero, y todo lo demás se sostiene en él:

Todo el universo es ENERGÍA: única, finita y conservada.

Energía: no hay dos sustancias, ni una sustancia y además un escenario donde ponerla; todo lo que hay es energía, y nada más. **Única:** no hay regiones del universo sin ella —no existe el vacío como ausencia, porque no hay un fuera—; todo cuanto ocurre es el comportamiento interno de esa energía, y ese comportamiento se puede representar con las matemáticas. **Finita:** en ningún punto se acumula una cantidad infinita. Y **conservada:** no se crea ni se destruye, solo se transforma.

De esas cuatro palabras salen los tres primeros ingredientes de la ecuación. El primero: si la energía es única y llena todo, preguntar cuánta hay por región es preguntar por una *densidad* —la escribimos ρ_P (se lee “ro sub pe”), y esa letra pequeña de abajo recuerda que su valor cae en el terreno de los tamaños más diminutos que la física reconoce, el que lleva el nombre de Planck—, y esa densidad es una propiedad del universo mismo.

El segundo sale de juntar «única» con «finita». Única quiere decir que no hay ninguna región sin ella; si en algún punto el medio pudiera vaciarse del todo, ahí habría una región sin energía, y eso es justo lo que se ha negado. Como el medio no puede vaciarse en ningún punto, tiene que quedarle siempre un resto —y un resto que no se puede cruzar es un **suelo**, un valor mínimo por debajo del cual no baja—. Finita quiere decir lo simétrico por el otro lado: en ningún punto se acumula una cantidad sin límite, de modo que hay también un **techo**. Dos topes, uno abajo y otro arriba. Y el tercer ingrediente sale de la conservación.

Si la energía solo se transforma, hay que decir *en qué*, y solo puede estar de dos maneras: **confinada**, quieta y acumulada, que es lo que llamamos materia con masa; o **propagándose**, viajando de un sitio al siguiente, que es lo que llamamos radiación. El calor de un cuerpo, la tensión de un muelle o la energía de un enlace químico no son formas aparte: son estas mismas dos, repartidas entre muchísimas piezas diminutas. Toda transformación es entonces un tránsito entre las dos, y la conservación se escribe como un balance:

$$\Delta E_{\text{confinada}} + \Delta E_{\text{propagante}} = 0$$

El triángulo Δ se lee «el cambio de»: cuánto ha aumentado o disminuido esa cantidad. Lo que sale de una rama entra en la otra, y la suma neta es cero. La famosa $E = mc^2$ de Einstein es entonces el caso particular de ese balance en el que la conversión es total.

Ese balance liga los cambios de las dos ramas, pero no reduce las dos a una: cuánta energía hay retenida en un punto no dice a qué ritmo la está pasando ese punto a su vecino. Son dos libertades distintas del mismo sitio, y ninguna se deduce de la otra. Describir el medio pide, por tanto, dos números en cada punto y no uno.

Dos cantidades así —que viven en el mismo punto sin que mover una mueva a la otra— tienen una representación natural: la flecha. Dibuja una en un papel y alárgala sin girarla: la punta se va hacia adelante, siguiendo la propia flecha. Ahora gírala sin alargarla: la punta se va de lado, perpendicular a la flecha. Los dos movimientos salen a noventa grados uno del otro, y por eso ninguno de los dos se puede hacer pasar por el otro: estirar nunca gira, y girar nunca estira. De ahí que el ángulo recto sea, en matemáticas, la manera habitual de dibujar dos libertades que no se estorban.

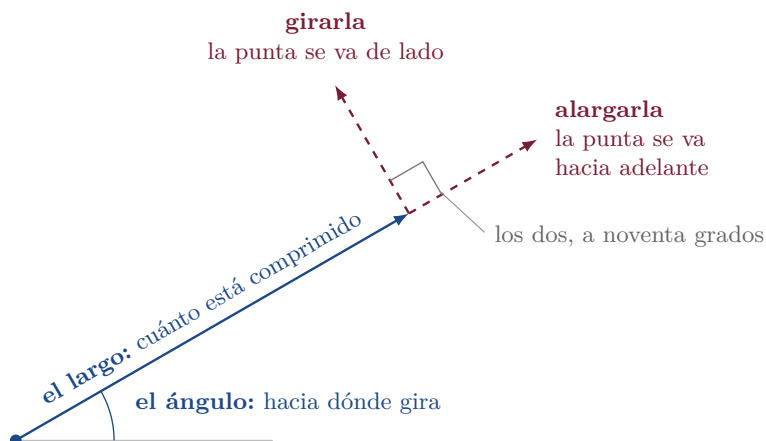


Figura 1: Los dos datos de cada punto del Pleno. El largo de la flecha dice cuánto está comprimido el medio ahí; su ángulo, hacia dónde gira. Alargarla y girarla mueven la punta en direcciones que forman un ángulo recto, y por eso ninguna de las dos se puede hacer pasar por la otra.

Las matemáticas tienen desde hace dos siglos —desde que Wessel, Argand y Gauss lo dibujaron sobre el plano— el número que es exactamente esa flecha: el *número complejo*, que lleva un tamaño y un ángulo, y en el que la unidad imaginaria i es la operación de girar un cuarto de vuelta —por eso multiplicar dos veces por i da -1 , que es media vuelta—. Cuando una magnitud tiene un valor propio en cada punto del espacio —como la temperatura en cada rincón de una habitación—, en física se dice que es un *campo*. Escribir el Pleno como un campo de números complejos, uno en cada punto, es la manera más económica de decir «una energía con dos ramas que no se estorban»: el largo de la flecha dice cuánto está comprimido el medio allí, y su giro lleva el cambio. Ese paso no es una demostración: el programa *postula* esa forma del campo, y lo que el camino desde A1 aporta es la razón física de que sea ésa y no otra.

Ese objeto —un número con tamaño y ángulo en cada punto— es justamente el que la física ya usa para describir lo más pequeño. Se llama *función de onda*, y se escribe desde Schrödinger con la letra griega Ψ (se lee “psi”): es el signo con el que se describe un electrón, un átomo, una molécula, y está en el corazón mismo del formalismo cuántico. De ella no se observa la flecha, sino su largo al cuadrado, que da la probabilidad de encontrar la partícula en cada sitio. Aquí se llega a él por el otro extremo: partiendo de qué es el universo.

Que el camino desemboque en la misma letra —pero aplicada a todo cuanto existe, y no a una partícula— es justamente lo que el programa sostiene: que lo cuántico no es un rincón oculto y aparte de la realidad, sino la textura de la sustancia única que lo forma todo. Un electrón es entonces una forma pequeña y localizada de ese mismo campo, y su función de onda, ese trozo mirado de cerca. De ahí la Ψ que acompaña al nombre. El campo del Pleno se escribe, entonces, así:

$$\Psi = S \cdot e^{i\theta}$$

que es la escritura compacta de las dos ramas de A1. La S es el largo de la flecha, la rama de la permanencia: cuánto está comprimido el medio en ese punto. Su cuadrado es la densidad de

energía allí: una ola del doble de altura no lleva el doble de energía, sino cuatro veces, y aquí ocurre lo mismo. La θ es su ángulo, la rama del cambio: hacia dónde gira. De ese ángulo no cuenta el valor, sino cómo cambia: girar todas las flechas lo mismo y a la vez no mueve nada, y lo que lleva energía es que la flecha gire con el tiempo o apunte distinto de un punto al de al lado. Y $e^{i\theta}$ es la manera matemática de decir «girado un ángulo θ »: la flecha de antes, con su largo y su giro, escrita en una sola letra. De esas dos cantidades, y de cómo cambian de un punto al siguiente, brota todo lo demás.

Esa expresión describe *qué* es el Pleno. Para saber *cómo* se comporta, la teoría añade su “ecuación fundamental”, que en PIU- Ψ se conoce simplemente como F1: una sola receta compacta —lo que los físicos llaman un *Lagrangiano*: la libreta de contabilidad de un sistema, donde se anota lo que tiene de energía por moverse menos lo que tiene guardada— que fija por completo la dinámica del medio, es decir, cómo se mueve y cómo cambia. Se construye a partir de unos pocos principios de partida —seis afirmaciones precisas sobre cómo es el Pleno, los Axiomas de PIU- Ψ — y, una vez fijada, queda cerrada, inamovible. A partir de ahí, todo lo demás se obtiene por deducción matemática, sin introducir ingredientes nuevos por el camino.

El desarrollo formal encadena **setenta y cuatro (74) derivaciones**. Treinta y nueve (39) tienen la prueba completa, sin hueco; en otras veinticuatro (24) la cadena está probada en su núcleo, con una pieza estructural por cerrar o con un número tomado del mundo. De ese mismo objeto salen las leyes de los libros de física. **Veintisiete (27)** se recogen en la lista que sigue, y están escogidas con un criterio: son las reconocidas, las que cargan el peso de la física y casi todas tienen nombre propio, desde las dos constantes en que se apoya el resto hasta el instante en que se formó la materia. El programa deriva bastantes más; éstas son las que permiten contrastarlo contra lo que ya estaba medido y confirmado:

Las dos constantes que sostienen el edificio.

1. La constante de la gravedad de Newton, G , que fija con cuánta fuerza se atraen dos masas, con su valor.
2. La constante cuántica de Planck, $\hbar$ (se lee “hache barrada”), la que fija el escalón mínimo con que la naturaleza entrega la energía —no en cualquier cantidad, sino en porciones sueltas—, también con su valor.

La gravedad y la forma del espacio.

3. Las ecuaciones de campo de Einstein, las que dicen cómo la materia curva el espacio y el tiempo, enteras: no solo con su forma, sino con el número que va delante.
4. La geometría de los agujeros negros, y un interior sin singularidad —el punto de densidad infinita en que la relatividad deja de funcionar—: densidad finita, la misma para todos, y una masa mínima por debajo de la cual ninguno existe.
5. La existencia misma de una velocidad límite, y el factor de Lorentz, que dice cuánto se dilata el tiempo y se acortan las distancias al acercarse a ella.
6. Que las ondas gravitacionales —temblores del propio espacio que se propagan, como las ondas de un estanque, cuando chocan dos objetos enormes— viajen exactamente a la velocidad de la luz, como se midió con catorce (14) cifras de acuerdo en la fusión de dos estrellas de neutrones que en 2017 LIGO y Virgo vieron en ondas gravitacionales y los telescopios en luz a la vez, GW170817.

El mundo cuántico.

7. La ecuación de Schrödinger, la que dice cómo cambia con el tiempo la onda de una partícula, como equivalencia exacta de la dinámica del propio medio.

8. La relación de incertidumbre de Heisenberg —no se pueden precisar a la vez, sin límite, la posición de una partícula y su momento, que es su masa por su velocidad—, con su mínimo exacto.
9. El techo exacto de las correlaciones cuánticas —la cota de Tsirelson—: hasta dónde pueden coincidir las medidas hechas sobre dos partículas separadas. Si cada una llevara su respuesta escrita de antemano no podrían pasar de cierto punto; la naturaleza lo rebasa y se detiene en seco un poco más allá. Los experimentos que ponen a prueba la desigualdad de Bell —de Clauser y Aspect a Zeilinger— lo miden desde hace décadas.
10. La regla de Born: por qué la probabilidad de hallar una partícula es el cuadrado del largo de su función de onda.
11. La ecuación de Dirac del electrón, con su espín —su giro propio— y su validez a velocidades cercanas a la de la luz, por dos caminos que convergen.

Las fuerzas y la materia.

12. Las ecuaciones de Maxwell del electromagnetismo para el campo libre —el de la luz que viaja lejos de las cargas—, con el fotón —el grano suelto de luz, la porción mínima en que la luz llega— saliendo sin masa y con sus dos polarizaciones, las dos maneras en que la luz vibra de lado a su avance.
13. La estructura de las ecuaciones de Yang-Mills, las de las fuerzas nucleares, y con ella el confinamiento del color: por qué los quarks —las tres piezas de que está hecho un protón— nunca aparecen sueltos. El color es la carga de la fuerza nuclear fuerte, lo que la carga eléctrica es al electromagnetismo.
14. La carga eléctrica en unidades enteras, y la neutralidad exacta de la materia ordinaria.
15. El principio de exclusión de Pauli —dos electrones no pueden ocupar nunca el mismo sitio en el mismo estado—, y con él el orden en capas de los electrones de un átomo y la tabla periódica entera.
16. Que protones y neutrones estén hechos de tres quarks, como establecieron Gell-Mann y Zweig, y el tamaño del protón con un solo dato de entrada.

El calor.

17. La estadística de Bose-Einstein —la regla con que muchas partículas de luz se reparten la energía—, obtenida contando las *configuraciones* del propio medio: cada una de las maneras distintas en que el medio puede acomodarse.
18. La ley de Stefan-Boltzmann, con su coeficiente exacto —el coeficiente es el número que va multiplicando delante de una fórmula, y es la parte más difícil de acertar—, y con ella el brillo de un cuerpo caliente.
19. La estadística de Fermi-Dirac de los electrones, del mismo conteo y con una sola diferencia: los fotones se amontonan sin límite en un mismo estado, y los electrones no.

Las estrellas.

20. El límite de Chandrasekhar, la masa por encima de la cual una estrella agotada ya no puede sostenerse y se hunde, con su coeficiente completo.

El cosmos.

21. La proporción entre materia oscura y materia ordinaria, que resulta ser un número puro de geometría —puro quiere decir que sale igual se mida en metros o en pulgadas, porque no lleva unidades detrás—.
22. Las cuatro densidades del universo —cuánta energía oscura, cuánta materia en total, y cuánta de ella es oscura y cuánta ordinaria— en cifras que caen junto a las que mide el satélite Planck: tres dentro de su margen de error, y la cuarta a poco más de uno.
23. La velocidad a la que el universo se expande, leída como la hora que marca hoy su reloj.
24. La historia entera de esa expansión, contrastada con las medidas de DESI, el mayor mapa tridimensional de galaxias, sin un solo parámetro ajustado —un parámetro es un número libre que se puede retocar hasta que las cuentas cuadren, y aquí no hay ninguno—.
25. Que la energía oscura no se diluya ni un ápice al expandirse el universo.
26. El estiramiento temporal de las supernovas lejanas: su brillo sube y baja más despacio que el de las cercanas, en la proporción exacta que marca la expansión, y los datos lo confirman.

El principio.

27. Un comienzo sin singularidad: un universo que se contrae, rebota en la pared de arriba del medio antes de llegar a su techo y, en el camino de vuelta, forma las partículas.

Cada uno de esos nombres —Newton, Einstein, Lorentz, Planck, Schrödinger, Heisenberg, Tsirelson, Bell, Born, Dirac, Maxwell, Yang, Mills, Pauli, Gell-Mann, Zweig, Bose, Stefan, Boltzmann, Fermi, Chandrasekhar— representa el trabajo de toda una vida, a veces de generaciones enteras, y cada ley fue hallada por separado, en épocas distintas, para explicar fenómenos que parecían no tener nada en común: la gravedad de los planetas, el magnetismo de un imán, el comportamiento de un electrón, el orden de la tabla periódica, la muerte de una estrella, el brillo de un cuerpo caliente, la composición del universo. Capítulos diferentes de la física, en libros diferentes. PIU- Ψ muestra que todos esos capítulos son, en el fondo, la misma historia, la del Pleno, escrita con la misma pluma y desde la misma primera línea: el tronco común del que brota un follaje que creíamos de árboles distintos.

Y eso cambia lo que se puede decir de cada una de esas leyes. Todas se sabían ciertas —están medidas, algunas desde hace siglos—, y muchas se deducen unas de otras, pero la cadena termina siempre en algo que se acepta porque se mide: la física sabía *que* se cumplían y, al llegar al fondo, no *por qué*. Que la gravedad sea tan débil como es, que la carga eléctrica venga en unidades exactas, que las correlaciones entre partículas separadas se detengan justo donde se detienen: hechos aceptados, medidos con enorme precisión, y sin explicación por debajo. En PIU- Ψ esos hechos siguen siendo los mismos y siguen medidos igual; lo que cambia es que dejan de estar en el fondo de la cadena, porque cada uno pasa a tener por debajo la razón de salir con el valor que tiene y no con otro.

El punto de partida: los seis axiomas y F1

[DERIVADO]

Seis axiomas fijan qué es el medio, y el Lagrangiano mínimo que los respeta a todos es una sola ecuación: F1.

A1: energía única, finita y conservada, sin vacío. **A2:** una pared inferior que impide al medio anularse. **A3:** un solo costo del cambio para todos los modos del medio —un modo es cada una de las maneras independientes que el medio tiene de vibrar o deformarse, como cada nota que puede dar una cuerda—, con una sola proporción entre lo que cambia con el tiempo y lo que cambia de un punto al siguiente, de modo que las leyes del Pleno son las mismas para cualquier observador. **A4:** un grano de tamaño ℓ_P , por debajo del cual no hay estructura más fina. **A5:** la fase —el ángulo de la flecha, hacia dónde apunta la manecilla— no aparece en el potencial, la energía que el medio guarda por su

forma; solo el módulo —el largo de la flecha, esa S — cuesta energía. De ahí que girar la fase entera, en todas partes y a la vez, no cambie nada de lo que ocurre. **A6**: saturación superior; el medio no admite comprimirse sin fin.

A3 no postula la relatividad, ni la velocidad de la luz. Postula una sola cosa: que el medio mida con una sola vara el cambio en el tiempo y el cambio de un punto al siguiente. De ahí se siguen, ya como teoremas, las reglas con que se traducen las medidas de un observador a las de otro que se mueve —lo que los físicos llaman el grupo de Lorentz—, la existencia de una velocidad máxima y que las leyes se vean iguales desde cualquier movimiento. Lo que está puesto en las premisas es la unicidad del costo del cambio; la relatividad se cosecha.

Leer A1 región por región da la densidad del medio, ρ_P . Y escribir la conservación como balance entre dos ramas ortogonales —el ángulo recto de la flecha: lo que el medio retiene como estructura y lo que propaga como cambio— *motiva* la forma del campo, $\Psi = S e^{i\theta}$. El campo complejo es la expresión mínima de ese balance: A2 garantiza que S sea siempre positivo, y A5, que la fase gire libremente. La forma se postula, y el camino desde A1 da la razón física de que sea esa: la motiva, no la deriva.

Con ese campo, el Lagrangiano mínimo que respeta los seis axiomas —cuatro términos, y cada uno responde a lo que un axioma exige— es F1:

$$\mathcal{L}_{F1} = \frac{1}{2} \rho_P c^2 \ell_P^2 \partial_\mu \Psi^* \partial^\mu \Psi - V(S) - \frac{\rho_P c^2 \ell_P^4}{40} (\square S)^2 - V_q^{\text{dens}}(S)$$

El símbolo ∂ dice «cuánto cambia esto al avanzar un poco», y el subíndice μ recorre las cuatro direcciones en que se puede avanzar: las tres del espacio y la del tiempo. Con eso leída, la fórmula tiene cuatro piezas. El término **cinético** —el primero, el de los ∂ — es el del cambio del campo de un punto a otro y de un instante al siguiente: es el que lo hace propagarse, y lleva en su coeficiente la densidad del medio y su grano. Y se parte exactamente en las dos ramas de A1, una para S y otra para θ , por la misma razón que hacía falta una flecha: alargarla y girarla son dos movimientos a noventa grados uno del otro, y lo que va en ángulo recto se suma por separado. Un pedazo del coste lo pone el estiramiento y otro el giro, sin nada que se reparta entre los dos. El asterisco de Ψ^* marca la misma flecha con el ángulo invertido, y multiplicar una por la otra borra el ángulo y deja el largo. El **potencial** $V(S)$, la energía que cuesta cada valor del módulo, sostiene las configuraciones estables. El **flexural**, de *flexión*, penaliza la curvatura del módulo: $\square S$ compara el valor del módulo en un punto con el promedio de su entorno inmediato, y vale cero cuando los dos coinciden: cuando el módulo no se curva allí. El $1/40$ que lo acompaña no se elige: sale de promediar, sobre todas las direcciones en que la red del diamante puede ondular, cuánto se curva el patrón de un nodo a sus vecinos. Es un número de la red. Y el de **Klauder**, V_q^{dens} , crece al acercarse S a cero, un valor que ninguna configuración alcanza; lleva el nombre de John R. Klauder, el físico que desarrolló la manera de tratar en cuántica una magnitud que solo puede ser positiva —la cuantización afín—.

Estirar una lámina y doblarla son dos maneras distintas de deformarla, y una lámina fina se resiste mucho más a la primera que a la segunda: una hoja de acero se dobla con la mano, pero no hay manera de estirla. Doblarla solo empieza a costar de verdad cuando la curva se hace tan cerrada como el grosor de la hoja. El término flexural es la resistencia del Pleno *a doblarse*, y en él el papel del grosor lo hace el grano: una ondulación mucho más ancha que ℓ_P apenas lo nota, y una del tamaño del grano cuesta caro. El material se opone a que ocurra nada más fino que él. Ese grano mide unos 10^{-35} metros: veinte (20) órdenes de magnitud por debajo de un protón —o sea, con veinte ceros de por medio—. A cualquier escala que un instrumento alcance, el medio se comporta como si fuera liso.

Ninguno de los cuatro puede eliminarse sin que el medio pierda algo que necesita: propagarse, reposar, tener grano, no anularse. F1 se escribe con **tres cantidades primarias**: la densidad ρ_P , la velocidad máxima de cambio c y el grano ℓ_P . Todo lo demás que aparece en el programa — G , $\hbar$, la escala del potencial, las dos paredes— sale de esas tres y de la geometría de la red. La forma de cada pared tiene autor: la de abajo es la de Klauder; la de arriba, la que Alan N. Gent escribió en 1996 para un caucho que ya no admite estirarse más. Y la geometría de la red la fija el mínimo de F1: si el medio tiene un grano de tamaño fijo, repetirlo para llenar el espacio admite unas pocas disposiciones, y el medio adopta la que menos energía cuesta, igual que un metal al solidificar. Esa disposición es lo que aquí se llama el cristal, y de su forma salen números puros como el $1/40$ del término flexural.

Qué cambia con esto. La física de hoy trabaja con varios objetos fundamentales, cada uno con sus constantes, y cuando un sector no cuadra se le añade un término. Aquí hay un solo objeto y no se le puede añadir nada: la gravedad, la cuántica y el cosmos no son ampliaciones de F1, son *evaluaciones* de F1. Cada resultado llega con estos mismos coeficientes o no llega.

2. Derivar no es ajustar

En física hay dos maneras de llegar a una fórmula, y la distancia entre ellas es la distancia entre describir y explicar. La primera es **ajustar**: se tiene una medición, se propone una fórmula con unas cuantas perillas y se giran las perillas hasta que la fórmula pase por los datos. Es legítimo y ha construido buena parte del conocimiento, pero tiene un límite conocido: una fórmula con suficientes perillas termina acertando siempre, de modo que acertar, por sí solo, no prueba gran cosa. La segunda es **derivar**: partir de un punto fijo y avanzar por pasos matemáticos y algebraicos en los que cada uno se sigue del anterior sin introducir nada nuevo por el camino, igual que se demuestra un teorema. Aquí no hay nada que girar, no hay nada que se pueda ajustar, y por eso el resultado puede salir mal. Que salga bien sí prueba algo.

¿Y cómo se deriva algo de F1? Un Lagrangiano es una manera precisa de llevar la contabilidad de un sistema: en cada instante toma la energía que el sistema tiene por moverse —la cinética— y le resta la que tiene guardada por su posición y su forma —la potencial—. Esa resta no mide cuánta energía hay, que no cambia; mide cómo está repartida entre las dos formas en cada tramo del recorrido.

Sumada a lo largo de una historia completa, la resta da un solo número, que se llama la *acción*. Y de todas las historias que el sistema podría seguir, la que de hecho sigue es aquella cuyo número no cambia si se imagina la historia un poco distinta: desviada en algún tramo y devuelta al mismo punto de llegada. Lo que se compara son historias, no ecuaciones: no se altera nada de la física, solo se pregunta qué le habría pasado al número si el mundo hubiera tomado un camino vecino. Es el mismo rasgo que señala el fondo de un valle: el único punto donde dar un paso a un lado o al otro deja la altura igual, mientras que en la ladera cualquier paso la cambia. Los libros lo llaman principio de acción estacionaria, o de mínima acción —lo enunció Maupertuis y le dio su forma general Hamilton; para la luz lo había visto antes Fermat—, y es una de las piezas más firmes de la física: la curva que describe una piedra lanzada al aire, la órbita de un planeta y el camino de un rayo de luz al atravesar el agua salen los tres de él.

De ahí en adelante no hay elección. Un procedimiento del siglo XVIII, el de Euler y Lagrange, toma el Lagrangiano y devuelve las ecuaciones de movimiento: cómo evoluciona el sistema, qué formas estables admite y qué cantidades se le conservan. Es el mismo que usa toda la física teórica, y no deja margen a la creatividad: aplicado al mismo Lagrangiano, dos personas obtienen siempre la misma ecuación.

De esa ecuación general a una ley conocida hay un paso más: mirarla en un **régimen** concreto. La misma ecuación se comporta de manera distinta según se la observe a velocidades pequeñas o próximas a la de la luz, a distancias enormes o del tamaño del grano, con las configuraciones desordenadas o con todas alineadas. Al restringir la mirada a un régimen, la ecuación se simplifica, y lo que queda en $\Pi U - \Psi$ es, caso tras caso, una fórmula que la física ya tenía. Eso es un *límite efectivo*, y es el mecanismo por el cual una teoría más profunda contiene a las anteriores en vez de derogarlas: la mecánica de Newton no dejó de ser cierta cuando llegó Einstein; quedó como el límite de la relatividad para velocidades pequeñas y campos débiles.

Cada vez que se elige un régimen y se hace la cuenta, la teoría no tiene margen: devuelve el número que devuelve. Si de F1 saliera una gravedad demasiado fuerte, o una radiación con el coeficiente equivocado, o una proporción de materia oscura que no cuadrara, no habría nada

que retocar —F1 es el mismo objeto en todos los casos, y una perilla que arreglase un resultado desbarataría los demás—.

Las tres cantidades primarias tampoco son perillas: son la vara con que se mide. Son la densidad del medio, ρ_P , cuánta sustancia hay en cada trozo de él; el tamaño de su grano, ℓ_P , por debajo del cual no hay estructura más fina; y la velocidad c , la única rapidez a la que el medio transmite cualquier cambio. Esas tres, y nada más, traducen las cuentas del programa a metros, kilos y segundos. Su valor dice cómo es nuestro metro, no cómo es el Pleno, y ninguno de los números que el programa deriva depende de él.

Que leyes obtenidas en regímenes sin relación entre sí —la gravedad y la carga eléctrica, el brillo de un cuerpo caliente y la composición del cosmos— salgan todas del mismo objeto sin ajustar nada es, exactamente, lo que un ajuste no puede imitar. Un ajuste reproduce; no explica. Encajar una curva en unos datos entrega un número que coincide, y nada más: si mañana la medida se afina, se vuelve a encajar. Una derivación entrega el número y además la razón de que sea ése, de modo que no se puede mover sin desmontar lo que tiene debajo. Y por eso un ajuste que acierta un sector no dice nada del vecino, mientras que aquí el mismo objeto tiene que acertar los ocho a la vez.

El procedimiento de Euler-Lagrange y el límite efectivo

[DERIVADO]

Una maquinaria estándar convierte un Lagrangiano en ecuaciones de movimiento, y mirarlás en un régimen concreto devuelve las leyes conocidas.

El paso de un Lagrangiano a las ecuaciones del sistema lo da la ecuación de Euler-Lagrange, que para un campo Ψ se escribe

$$\partial_\mu \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial (\partial_\mu \Psi)} \right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \Psi} = 0.$$

El símbolo ∂ es la derivada, la operación que mide cuánto cambia algo al avanzar un poco, y el índice μ recorre el tiempo y las tres direcciones del espacio. El primer término recoge cuánto depende el Lagrangiano de lo deprisa que cambia el campo de un punto al siguiente, y cómo varía esa dependencia a lo largo del espacio y del tiempo; el segundo, cuánto depende del valor del campo mismo. Exigir que su diferencia sea cero selecciona, entre todas las historias imaginables del sistema, aquella cuya acción no cambia al retocarla levemente. Cuando el Lagrangiano contiene además la curvatura del campo, como el término flexural de F1, la ecuación suma un tercer término del mismo tipo. Es un procedimiento cerrado: dado el Lagrangiano, la ecuación está fijada.

Esa herramienta ya devuelve la física conocida. Aplicada al Lagrangiano de una partícula clásica reproduce las leyes de Newton; al del campo electromagnético, las ecuaciones de Maxwell; y a la acción de Einstein-Hilbert, las ecuaciones de campo de la relatividad general. Aplicada a F1, devuelve la ecuación dinámica del Pleno —una para el módulo, otra para la fase— y la corriente conservada que acompaña a la simetría de la fase, por el teorema de Noether, que asocia a cada simetría una cantidad que se conserva. La simetría de la fase es la de girar todas las manecillas del medio a la vez, en todas partes y en el mismo ángulo: hecho eso, el Pleno queda como estaba. Y corriente es el nombre que recibe esa cantidad cuando no puede crearse ni destruirse en ningún punto, sino solo pasar de un sitio al vecino.

Un **límite efectivo** es lo que queda de esa ecuación al restringirla a un régimen. Formalmente es un desarrollo en un parámetro pequeño —la ecuación escrita como una suma de términos cada vez menores, en la que el primero cuenta casi todo—: el número pequeño es la velocidad comparada con la de la luz (v/c) cuando se va despacio, o el tamaño del grano comparado con la longitud de onda —la distancia entre dos crestas seguidas— cuando la onda es mucho más larga que el grano. Un tercer camino no usa ningún número pequeño: promediar sobre configuraciones, cuando lo que interesa es el comportamiento colectivo. Es una renuncia al detalle: se sustituye el estado de cada celda por el de la multitud y se pregunta qué hace la multitud, igual que se habla de la temperatura o la presión de un gas en vez de seguir una a una sus moléculas. Los términos de orden superior se desprecian y aparece una ecuación más simple, con su dominio de validez explícito.

Qué cambia con esto. Las leyes que la física fue descubriendo una a una —Newton, Maxwell, Einstein— se obtienen hoy cada una de su propio punto de partida, y no hay puente que lleve de

una a otra. El caso grave son la gravedad y la mecánica cuántica: cada una descansa sobre un punto de partida propio, y reconciliarlas es el problema abierto más viejo de la física. Con esta maquinaria, las tres salen del mismo procedimiento aplicado a distintos Lagrangianos; y aplicada a F1, del mismo objeto salen las ecuaciones de campo de Einstein y la ecuación de Schrödinger, sin negociación entre ellas, y con ellas el resto. Ése es el resultado que el programa pone por delante de todos los demás. Por eso los resultados del programa forman un árbol y no una lista: cada uno se apoya en los que tiene debajo, y cortar una rama deja sin soporte todo lo que brota de ella.

Tres cosas distintas que se dicen con la misma palabra

[MÉTODO]

Reproducir, derivar y explicar son tres operaciones distintas, y un resultado derivado afirma solo la segunda.

Reproducir es obtener un resultado conocido dentro del formalismo, con el blanco ya clavado por la física establecida: la solución de Schwarzschild —la geometría del espacio alrededor de una estrella o de un agujero negro— sale de las ecuaciones de Einstein sin materia — $R_{\mu\nu} = 0$, que es como se escribe «en esta región no hay nada que curve el espacio»— más la exigencia de que todo sea igual en cualquier dirección, y sale igual en cualquier libro de relatividad. **Derivar** es obtenerlo de F1 y los axiomas, con el álgebra a la vista y sin ninguna premisa importada que traiga ya puesto el resultado. El coeficiente 8/9 que fija la energía del campo electromagnético, por ejemplo, se obtiene sumando circulaciones sobre las caras de la red —recorriendo el borde de cada cara del cristal en que el medio se organiza y anotando cuánto ha girado la fase al volver al punto de partida—, y esa suma devuelve el número que devuelve, sin ningún sitio donde ajustarlo. **Explicar** es decir además *por qué* la naturaleza tiene esa estructura y no otra.

La etiqueta **[DERIVADO]** afirma exactamente lo segundo. Lo que se sostiene no es que un número coincida: es que la cadena entera que lleva hasta él arranca en F1 y no importa nada por el camino. Y una reproducción no asciende a derivación porque el número salga bien; el criterio es el sentido de la flecha, si la física conocida sale como límite o entra como premisa. Lo tercero la etiqueta no lo reclama: por qué el medio tiene el grano y la densidad que tiene queda fuera de lo que **[DERIVADO]** afirma.

Qué cambia con esto. Conocer el blanco de antemano ayuda a una teoría con perillas, porque le dice hacia dónde girarlas. Sin coeficientes libres no hay a dónde apuntar: la ecuación devuelve el número que devuelve, y que ese número forzado coincida además con el medido es precisamente lo que hay que explicar.

El edificio entero tiene forma de árbol, y como un árbol se sostiene: desde abajo. En el suelo, la **raíz** —los seis axiomas y las tres cantidades primarias—; sobre ella, el **tronco**, que es F1, el único objeto dinámico; de él salen las dos primeras **ramas** que el propio F1 fija (la red en que el medio cristaliza y el pozo de energía en que reposa); y arriba, el **follaje**: los ocho sectores donde el programa acaba comparándose con el mundo.

Y ninguna flecha entra desde los lados: todo lo que sube por ese árbol entra por la raíz, salvo la lectura posicional, que se toma del mundo, entra por la hoja del cosmos y dice en qué punto de su recorrido está hoy el medio. Ese recorrido es el cambio que el medio lleva acumulado, y es lo que vemos como la historia del universo. La lectura dice en qué punto de ese recorrido estamos: la hora, no la maquinaria del reloj.

Esa distinción es la que lleva la palabra **calibrado** cada vez que aparece en la cabecera de un cuadro: la forma del resultado es del programa, y el valor de hoy se lee del mundo. No quiere decir que haya un tornillo que apretar hasta que el número salga bien. Y de ahí sale una diferencia práctica ante cada cifra del libro: en una teoría con perillas acertar es lo que se espera, porque para eso están las perillas; aquí cada cifra que sale bien podía haber salido mal.

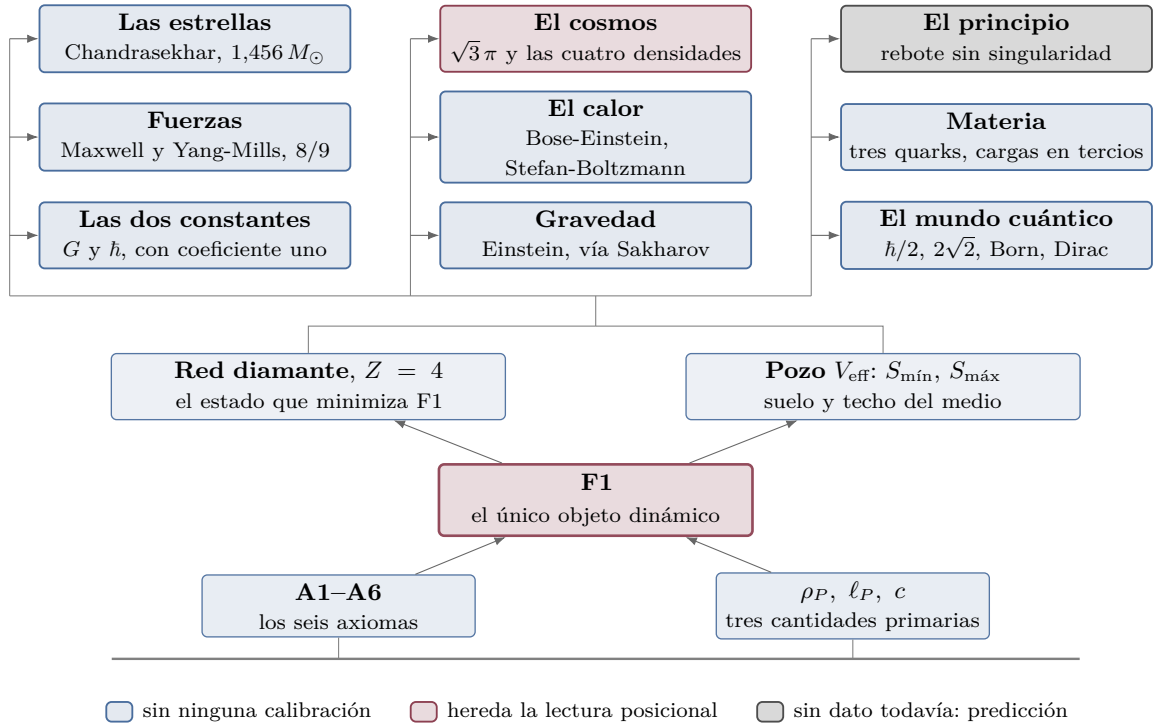


Figura 2: El árbol del programa. La red y el pozo son las dos primeras ramas que el propio $F1$ fija. Arriba brotan del mismo tronco los ocho sectores donde el resultado se contrasta con el mundo; las fuerzas y la materia, que forman un solo sector, ocupan dos hojas. El color distingue tres clases de hojas: las que no llevan ninguna calibración; la del cosmos, que hereda la *lectura posicional*, la que dice en qué punto de su recorrido está hoy el medio; y la del principio, que todavía no tiene dato con que compararse y es predicción.

3. Una sola sustancia que lo es todo

Imagina que el universo no está hecho de cosas sueltas flotando en un vacío, sino que es un único material continuo que lo llena absolutamente todo, sin huecos. Lo que llamamos “espacio vacío” no estaría vacío: sería ese material en reposo.

Una buena imagen es la de un medio elástico: una gelatina que lo llenara todo, o un bloque de vidrio que se extiende en todas las direcciones. Y todo lo que existe es una forma que adopta ese medio. Igual que las olas, la espuma y las corrientes del mar no son cosas distintas del agua, sino formas del agua, las partículas, la luz y la gravedad no son cosas distintas del Pleno, sino formas del Pleno. Una compresión aquí, un giro allá, una onda que lo recorre. Ésa es la apuesta central de PIU- Ψ , y sobre ella se sostiene todo lo demás: una sola sustancia, y el universo entero como sus incontables maneras de moverse.

La apuesta no dice que el universo esté *lleno* de una sustancia: dice que el universo *es* esa sustancia, y que no hay nada más. Un escenario donde ponerla sería algo más. Un vacío entre sus partes sería algo más. Una ley ajena a ella sería algo más. En PIU- Ψ no hay ninguna de las tres cosas, y esa ausencia es lo que obliga a que todo lo demás se derive en vez de suponerse.

La primera consecuencia es que **el vacío desaparece del inventario del universo**. Lo que la física llama vacío es, aquí, el medio en su estado de reposo: la configuración de menos energía que el Pleno admite. Y en ella el medio sigue ahí, con una densidad que no es cero ni puede serlo, porque el coste de anularla crece sin límite conforme se acerca a cero, y el medio nunca llega. La ausencia de vacío es una imposibilidad del material.

Eso cambia de naturaleza uno de los problemas más graves de la física: el desajuste más grande que se conoce entre una predicción y una medida.

La teoría cuántica atribuye energía al espacio vacío. La calcula sumando el temblor mínimo que sus campos conservan incluso cuando no ocurre nada —lo que los físicos llaman la energía de punto cero, el resto de agitación que no hay manera de quitar—. Esa energía tiene una consecuencia que se puede medir: empuja al universo a expandirse cada vez más deprisa, y el ritmo observado dice cuánta hay en realidad. Resulta haber poquísima. La suma de los temblores supera lo observado por un factor de 10^{123} : un uno seguido de ciento veintitrés ceros.

En el Pleno esa suma no se hace, y no por descuido: no hay dónde hacerla. Sumar temblores del vacío presupone que hay un vacío sobre el que sumarlos, y aquí no lo hay; lo que hay es un medio, y su energía en reposo no es una suma de temblores, sino el equilibrio entre sus dos paredes —la que le impide anularse y la que le impide comprimirse sin fin—. Es energía de estructura, la que cuesta ser el medio que es.

Y con eso el problema cambia de forma, por dos lados a la vez. El primero: ese estado de reposo —el fondo entre las dos paredes, el nivel del que el medio no baja— **es el cero de la escala, no un exceso sobre ella**. Lo que pesa en la gravedad del universo no es ese fondo, sino cuánto se aparta el medio de él, y son dos cantidades distintas que la física del vacío venía sumando como si fueran una.

El segundo: el número mismo se desmonta. Ese 10^{123} resulta ser, salvo un factor de proporción que sale de la geometría, la edad del universo contada en tics de Planck —un tic es el tiempo que la luz tarda en cruzar un grano del medio— y elevada al cuadrado. Cualquier universo que haya corrido esa cantidad de tics tiene ese número por pura aritmética. No hay que explicar por qué una densidad está afinada a ciento veintitrés (123) cifras; hay que explicar cuántos tics lleva corriendo el reloj, y eso es una edad, no una casualidad.

El medio en reposo tiene entonces su propia densidad, y es enorme. Lo que la expansión delata no es esa densidad, sino cuánto se aparta hoy el medio de su reposo, que es diminuto. Es la

diferencia entre pesar el océano y medir la altura de la marea.

La segunda es que **desaparece la distinción entre el contenido y el continente**. En la física habitual hay un espacio-tiempo y hay cosas dentro de él, y la relación entre ambos es el problema central del último siglo. En el Pleno no hay dos categorías que relacionar: lo que llamamos espacio es la extensión del propio medio, y lo que llamamos partículas son formas que ese medio adopta. El hielo del mar no está *en* el agua como una piedra está en una caja: el hielo *es* agua, en otra configuración. Tiene su contorno, se mantiene, se le puede dar la vuelta —y sigue sin ser otra sustancia—. Preguntar qué hay entre el hielo y el agua es preguntar mal.

La tercera es la que da su nombre al programa. Si hay una sola sustancia, entonces todas las leyes de la física son enunciados sobre el mismo objeto, y tienen que ser compatibles entre sí por construcción, no por casualidad ni por negociación. La gravedad y la mecánica cuántica no pueden contradecirse por la misma razón por la que dos descripciones del mismo caballo no pueden contradecirse: si lo hacen, una de las dos está mal. Eso es la *integridad* del nombre *Principio de Integridad Universal*: la unidad como restricción que el programa se impone y de la que después no puede escapar.

Y la cuarta es que una sola sustancia significa **un solo juego de propiedades**. El Pleno tiene una densidad, un grano mínimo y una velocidad máxima de cambio, y no tiene nada más. Cada vez que el programa quiere explicar un fenómeno nuevo —la carga eléctrica, el brillo de una estrella, la proporción de materia oscura— tiene que hacerlo con esas tres cantidades y con la geometría en que el medio se organiza. Por eso cada resultado que sale cuenta: no hay de dónde ajustarlo.

Y no, esto no es el éter

A finales del siglo XIX la física tenía un medio que llenaba el espacio y por el que la luz viajaba: el éter. Se lo buscó con cuidado, no apareció, y la idea cayó con razón. Quien llegue aquí con esa historia en la cabeza hace bien en desconfiar, y la comparación, punto por punto, lo aclara. Se parecen en una sola: las dos hablan de un medio. A partir de ahí no comparten nada, y las diferencias no son de matiz.

El éter estaba dentro del espacio; el Pleno es el espacio. El éter era un material que ocupaba un escenario que ya existía, como el agua ocupa una piscina. Aquí no hay piscina. Lo que llamamos espacio es la extensión del propio medio, y quitar el Pleno no dejaría un espacio vacío: no dejaría nada, ni siquiera el sitio.

El éter tenía un reposo absoluto; en el Pleno no hay respecto de qué estar quieto. Ésa fue su sentencia. Si hay un medio dentro del espacio, moverse respecto de él tiene que notarse: la Tierra debería sentir una especie de viento, y la luz debería tardar distinto según viajara a favor o en contra. Albert Michelson y Edward Morley midieron esa diferencia en 1887 con precisión de sobra y encontraron cero. En el Pleno la pregunta ni se plantea, porque no hay un segundo objeto respecto del cual medir un desplazamiento. Lo que el programa mide es cuánto se comprime el medio y cuánto gira su fase, y esas dos cosas salen iguales para cualquier observador, se mueva como se mueva.

En el éter la materia lo atravesaba; en el Pleno la materia es el medio. El éter obligaba a preguntar si la Tierra lo arrastraba consigo, si lo cruzaba limpiamente o si lo empujaba por delante, y ninguna respuesta encajaba con todas las medidas a la vez. Aquí nada atraviesa nada. Un planeta no es un objeto abriéndose paso por el medio: es una configuración del medio que se traslada, igual que el pliegue de una alfombra recorre la habitación de un extremo al otro sin que la alfombra se mueva de sitio.

El éter pedía un material imposible; el Pleno no lo pide. Para transmitir la luz —una onda transversal, y rapidísima— el éter tenía que ser más rígido que el acero. Para no frenar a los planetas, tenía que ser más sutil que el aire. Nadie consiguió imaginar un material que fuera las dos cosas, y el problema era real, no un descuido de sus defensores. Aquí no hay cuerpos moviéndose por dentro a los que hubiera que frenar, de modo que la rigidez del medio no tiene que pelearse con nada: fija la velocidad a la que se propaga cualquier cambio, y eso es todo lo que se le pide.

El éter contradecía la relatividad; el Pleno la devuelve. Para salvar el éter después de aquel experimento hubo que añadirle que los cuerpos se encogen al moverse —lo propusieron George FitzGerald y Hendrik Lorentz—, una regla puesta a mano para tapar el agujero. Einstein prescindió del medio y obtuvo ese encogimiento como consecuencia. Aquí el factor con que crecen la inercia y la energía al acercarse a la velocidad de la luz sale del propio F1 en cuanto se escribe una deformación que viaja, y de la misma cuenta se leen el momento y la energía relativistas. La relatividad no queda contradicha, ni tolerada a regañadientes: sale del medio.

El éter no explicaba nada más; el Pleno tiene que explicarlo todo. El éter era un soporte para la luz, y sólo eso. No daba la gravedad, ni la carga eléctrica, ni el espín del electrón, ni la proporción de materia oscura. Se añadía a la física y no devolvía nada a cambio: un supuesto que costaba y no pagaba. El Pleno hace lo contrario: de él salen la constante de la gravitación, la de Planck, las ecuaciones de Maxwell, las de Einstein, la estructura de la de Dirac y el reparto del sector oscuro.

El éter se retocaba; aquí no hay nada que retocar. Cada experimento nuevo obligaba a añadirle una propiedad —arrastre parcial, encogimiento, rigidez selectiva—, y cada añadido lo salvaba de esa medida y de ninguna otra. Un medio con suficientes añadidos sobrevive a cualquier cosa, y por eso terminó sin decir nada. El Pleno no admite ese trato: es un solo objeto para los ocho sectores a la vez, y un retoque que arreglara uno desbarataría los demás.

Y el éter cayó por el método correcto, que es el que se aplica aquí. Predijo algo observable, se buscó, y no estaba. Eso es exactamente lo que hay que poder hacerle a una teoría. El Pleno predice el resultado nulo de aquel experimento —no como escapatoria, sino como consecuencia de no tener un reposo privilegiado— y pone además sobre la mesa predicciones propias, cada una con su número.

4. Cómo se organiza: un cristal con forma de diamante

Aquí aparece la primera cosa que suena a contradicción. El Pleno es un material continuo, sin huecos ni piezas sueltas; y a la vez tiene una estructura interna que se repite y un tamaño mínimo por debajo del cual no hay nada más fino. ¿En qué quedamos?

En las dos cosas, porque no se estorban. El tamaño mínimo del Pleno no es el tamaño de una pieza: es el pliegue más cerrado que el medio admite. Dobla una tela. Un pliegue amplio lo haces sin esfuerzo; uno más cerrado ya cuesta; y por debajo de cierta finura la tela sencillamente se niega. No porque esté hecha de ladrillos —es continua, y no tiene huecos—, sino porque doblarla cuesta más cuanto más cerrado sea el doblez. Hay, por tanto, un doblez que no se le puede hacer, y ese límite es una propiedad de la tela, no una pieza dentro de ella.

El Pleno se comporta así, y está escrito en su ecuación: F1 lleva un término que cobra la curvatura, y la cobra a la cuarta potencia de lo fino que sea el rizo. A tamaños grandes ese coste no se nota. Al acercarse al grano se dispara, y el medio deja de admitir variaciones más finas. Ese tamaño —el del pliegue más cerrado posible— es el grano del Pleno, ℓ_P . Es uno de los seis principios de partida del programa, y está ahí por dos razones: porque todo medio físico conocido tiene una escala por debajo de la cual deja de comportarse como un continuo, y porque un medio sin

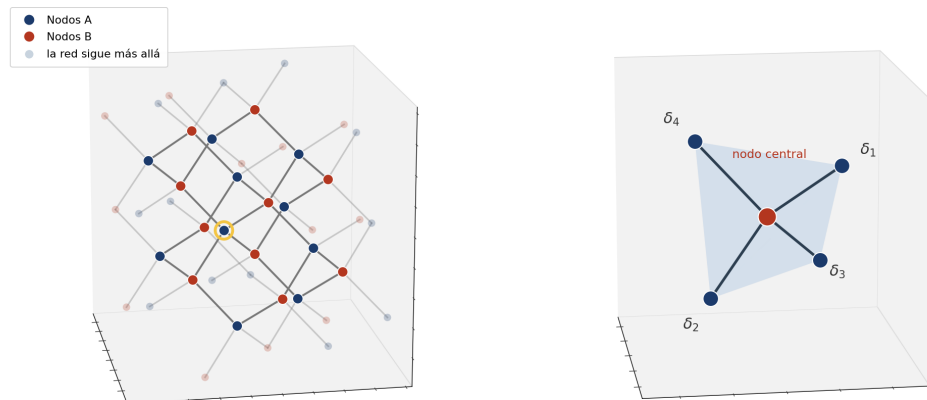
ese límite admitiría rizos tan finos como se quisiera, que es de donde salen buena parte de los infinitos que han hecho sufrir a la física del último siglo.

Con el grano en su sitio, el cristal deja de ser una sorpresa. El Pleno se estructura por dentro en un patrón regular y repetido, igual que los átomos en una piedra preciosa, y con una diferencia: entre los átomos de una gema hay huecos, y en el Pleno no los hay. Lo que se repite no son piezas puestas una junto a otra, sino el modo en que el propio medio se pliega, repetido sin costuras y sin nada entre medias.

Y no en un patrón cualquiera, sino en el mismo que tiene el diamante. En un diamante, cada átomo de carbono se une a otros cuatro, y esos cuatro no están puestos de cualquier manera: rodean al átomo, que queda en el centro, apuntando a los cuatro vértices de un tetraedro regular —una pirámide de cuatro caras iguales, todas triángulos equiláteros—, con lo que quedan lo más separados posible unos de otros. Es la única manera de repartir cuatro uniones en el espacio sin que ninguna dirección quede privilegiada, y la red que forman, trabada en las tres direcciones, hace del diamante el material natural más duro que existe.

El Pleno comparte esa arquitectura: cada una de sus celdas se enlaza con otras cuatro en esa misma disposición tetraédrica. Una celda no es un trozo de sustancia separado de los demás, sino un tramo del patrón: como cada pliegue de esa tela es un pliegue sin dejar de ser tela. Enlazarse con otras cuatro significa que el patrón de una celda se continúa en el de sus vecinas por cuatro direcciones, y que son esas cuatro en cualquier punto del medio y en cualquier orientación en que se lo mire. Esa uniformidad es la que después permite promediar sobre la red y obtener números fijos, en vez de números que dependan de dónde se mire. De esa geometría tan simple —“cuatro vecinos en forma de tetraedro”— salen muchísimos de los números del programa.

La red diamante $Fd\bar{3}m$ del Pleno saturado: una sola red con dos clases de nodo y coordinación $Z = 4$
El sustrato cristalino que el Pleno adopta en su fase de máxima compresión: cada nodo con cuatro enlaces, y todo enlace uniendo un nodo A con un nodo B
A. La red entera: tetraedros encadenados, todo enlace de A a B **B. Coordinación $Z = 4$: cuatro vecinos tetraédricos**



Vectores a primeros vecinos: $\delta_i = (\ell_p/\sqrt{3})(\pm 1, \pm 1, \pm 1)$ · parámetro de red $a_{\text{diamante}} = 4\ell_p/\sqrt{3}$ · el laplaciano discreto sobre esta red da $S_{\min} = 12(\pi^2 - 4)/\pi^4$.

Figura 3: La estructura interna del Pleno. **A la izquierda**, la red entera: una sola red cuyos nodos —las celdas del medio— se reparten en dos clases, A y B, de manera que todo enlace une un nodo de una clase con uno de la otra; los nodos pálidos del borde son la continuación de la red, porque en el Pleno no hay bordes y todo nodo tiene sus cuatro enlaces. **A la derecha**, un solo nodo con sus cuatro vecinos, que apuntan a los vértices de un tetraedro —la misma arquitectura del diamante—. De esta geometría salen los dos números puros del medio: su suelo y su techo.

La estructura de diamante no se postula, se *deriva*. El Pleno no tiene ninguna dirección privilegiada, y eso descarta casi todas las maneras de enlazar una celda con sus vecinas. Con tres enlaces el patrón queda atado dentro de un plano y suelto en la dirección perpendicular, de modo que esa dirección quedaría privilegiada por defecto. Con cuatro, apuntando a los vértices de un tetraedro,

queda trabado en las tres direcciones del espacio, y cuatro es el número más pequeño con el que eso ocurre. Y entre las maneras de apilar celdas de cuatro vecinos, la del diamante es aquella en la que menos energía le cuesta al medio doblarse. Es el mismo principio por el que el carbono, apretado por igual en todas direcciones, forma diamante. De esa única forma geométrica se desprende, encadenada y con demostración, buena parte de lo que la teoría produce: el suelo y el techo del medio, el coeficiente $8/9$ del electromagnetismo, la proporción $\sqrt{3}\pi$ entre materia oscura y ordinaria. La geometría del cristal es, a la vez, una consecuencia derivada y la rama de la que brota casi todo lo demás.

La red y los dos números puros del medio

[DERIVADO]

El suelo y el techo del medio no los fija la forma de la ecuación: los fija la forma del cristal.

El potencial de F1 tiene forma de pozo, pero la forma del Lagrangiano no dice por sí sola en qué valor del módulo cae su fondo —el suelo, donde el medio reposa— ni dónde se levanta su pared de arriba, el techo. Eso lo fija la microestructura que el medio adopta, y F1 dice cuál es: la red diamante. Cuatro vecinos por celda es el mínimo que no privilegia ninguna dirección —el caso más simple de la cota que Philippe Delsarte, Jean-Marie Goethals y Johan Seidel dieron en 1977 para repartir direcciones sobre una esfera, obtenido aquí desde A1—, y es también la coordinación que menos energía le cuesta al medio. Y entre los apilamientos posibles decide el término flexural: cobra cada ondulación a la cuarta potencia de su finura —multiplicada cuatro veces por sí misma, que se dispara muchísimo más deprisa—, mientras el cinético la cobra solo al cuadrado, de modo que al medio le sale más barato concentrar todo su patrón en una sola longitud de onda que repartirlo entre varias. Solo el apilamiento del diamante lo consigue; sus rivales hexagonales —el mismo tetraedro, con las capas alternándose en vez de repetirse— necesitan al menos dos.

El **suelo** sale de cómo ondula la red, y lo que el cociente mide es esto: *qué fracción del coste de un medio liso sobrevive en un medio con grano*. En un medio continuo, una ondulación cuesta más cuanto más fina es, en proporción exacta al cuadrado de su finura; en la red, el grano abarata las más finas. Ninguna ondulación puede ser más fina que dos celdas, porque no hay nada entre una celda y la siguiente que la dibuje; al llegar a ese tamaño deja de afinarse por mucho que se la apriete, y su coste deja de crecer. Un medio continuo, sin nada que le ponga tope, seguiría encareciéndolas sin fin. Se toma el coste real de todas las ondulaciones que la red admite —el que da el laplaciano discreto, la operación que compara el valor del campo en cada nodo con el de sus vecinos—, se promedia, y se divide por el promedio que tendría el mismo medio si fuera continuo —la curva suave que se obtiene cuando nada pone tope a lo fino, su aproximación parabólica—:

$$S_{\min} = \frac{\langle D_{\text{lat}} \rangle}{\langle D_{\text{lat}}^{\text{par}} \rangle} = \frac{12(\pi^2 - 4)}{\pi^4} = 0,7230871.$$

Los corchetes angulares $\langle \rangle$ son la notación habitual de «promedio de», arriba el de la red y abajo el del medio continuo. El resultado, 0,7231, dice que en un medio con grano sobrevive algo menos de tres cuartas partes del coste que tendría uno liso: el resto se lo ahorra la red al no poder dibujar ondulaciones más finas que sus celdas. Y es geometría del cristal, sin dinámica de por medio: no interviene el potencial, ni ninguna medida.

El pozo de F1 tiene su mínimo exactamente en ese valor, pero **eso no es la coincidencia de dos cálculos independientes**: es la ecuación con la que se despeja el único coeficiente del potencial, E_0 . Una ecuación, una incógnita. Lo que ese despeje sí entrega es que el potencial del medio **no tiene ni un solo coeficiente ajustable**. En un modelo elástico corriente ese coeficiente se mide en el laboratorio; aquí sale escrito con π y con $\sqrt{6}$, y con nada más. Y los dos ya están arriba, cada uno con su procedencia. El π viene del suelo, que es un promedio sobre las ondulaciones que la red admite, y donde se promedian ondulaciones aparece π . La raíz de seis viene del techo, del $\sqrt{2/3}$ del empaquetamiento máximo del cristal, que es la misma raíz escrita de otro modo. El coeficiente queda escrito, entonces, con el suelo y el techo del medio, y el suelo y el techo son geometría de la red.

El **techo** sale de un teorema de geometría. La manera más apretada de apilar esferas iguales es la de las naranjas en una frutería —la red cúbica de caras centradas, FCC—. Johannes Kepler conjeturó en 1611 que no hay otra más densa, y Thomas Hales lo demostró en 2005. Tratado cada grano como una esfera, el techo es cuántas veces cabe la densidad de granos de la red diamante, n_{diamante} , en esa

densidad máxima, $n_{\text{FCC}}^{\text{máx}}$; y sale al cuadrado porque la densidad del medio va como S^2 :

$$S_{\text{máx}}^{2,\text{geom}} = \frac{n_{\text{FCC}}^{\text{máx}}}{n_{\text{diamante}}} = \frac{8}{3} \sqrt{\frac{2}{3}} = 2,1773242,$$

y su raíz cuadrada es el módulo máximo —el tope de la compresión, al que el medio se acerca sin alcanzarlo—, $S_{\text{máx}} = 1,4756$. Y el coeficiente $1/40$ del término flexural de F1 sale de esa misma red, de sus cuatro vecinos por celda.

La comprobación. El despeje devuelve un número, y ese número podía ser inservible de tres maneras distintas. Podía salir **negativo**, y entonces el suelo habría sido en realidad una cumbre y el medio no reposaría ahí. Podía salir un millón de veces mayor, y habría delatado que la red y el pozo no viven en la misma escala. Sale positivo y de tamaño uno, no de tamaño un millón. Y podía dejar **dos** suelos en lugar de uno, con lo que cuál de ellos es el vacío quedaría sin decidir; al barrer todo el intervalo físico hay exactamente un cruce.

Qué cambia con esto. En cualquier material que la física describa, el suelo y el techo de su deformación son datos: se miden en el laboratorio y se meten en la ecuación. Aquí los dos se leen de la forma del cristal, y la forma del cristal tampoco se postula: la fija el mínimo de F1. Ningún número de esta cadena se añade: todos salen de ella.

5. Las dos cualidades de cada punto: cuánto se comprime y hacia dónde gira

¿Y cómo se describe lo que pasa en el Pleno? Con dos datos en cada punto, nada más —los dos de la fórmula $\Psi = S \cdot e^{i\theta}$ —:

- **Cuánto está comprimido** —es la S de la fórmula—: cuánta sustancia hay apretada en ese punto, su *compresión*. El programa la llama el *módulo* del campo: el largo de la flecha. Con ese nombre aparece en los cuadros y en el corpus. Su cuadrado es la densidad del medio allí. Va con el cuadrado, y no con la propia S , por la misma razón que cualquier onda: un oleaje del doble de altura no lleva el doble de energía, sino cuatro veces. En reposo, la compresión tiene un valor de fondo; donde hay “algo”, una partícula o un grumo de materia, se aparta de ese fondo.
- **Hacia dónde está girando** —es la θ de la fórmula—. El Pleno tiene en cada punto una especie de orientación de giro, como la manecilla de un reloj diminuto. Girar todas las manecillas a la vez no cambia nada; lo que tiene efecto es cómo cambia esa orientación de un punto al siguiente: si todas apuntan igual, el medio está en calma; si va rotando y ese dibujo avanza, eso es una onda viajando.

Con estas dos cualidades —la compresión y el giro— se entiende casi todo.

La compresión, además, nunca llega a los extremos. No puede bajar hasta cero, porque el medio no puede vaciarse, ni subir sin fin, porque la sustancia no admite apretarse más allá de un empaquetamiento máximo.

Esos dos límites son las dos paredes de un pozo. Si se dibuja cuánta energía le cuesta al medio cada grado de compresión, sale una curva con dos muros y un fondo entre ellos. Por debajo del muro de abajo el medio no puede bajar, por encima del de arriba no puede subir, y en el fondo, entre los dos, es donde descansa.

El pozo, y por qué el medio no puede salirse de él

[DERIVADO]

Las dos paredes del pozo salen de dos términos que F1 ya lleva dentro, y entre ellas queda el fondo donde el medio reposa.

Tres piezas suman el potencial del medio: la **elástica**, el coste de comprimirlo, que lleva la escala E_0 ;

El potencial efectivo del Pleno $V_{\text{eff}}(S)$: pared IR, pozo del Pleno-suelo y pared de Gent
El objeto central de PIU-Ψ: tres componentes derivados fijan el estado fundamental del medio

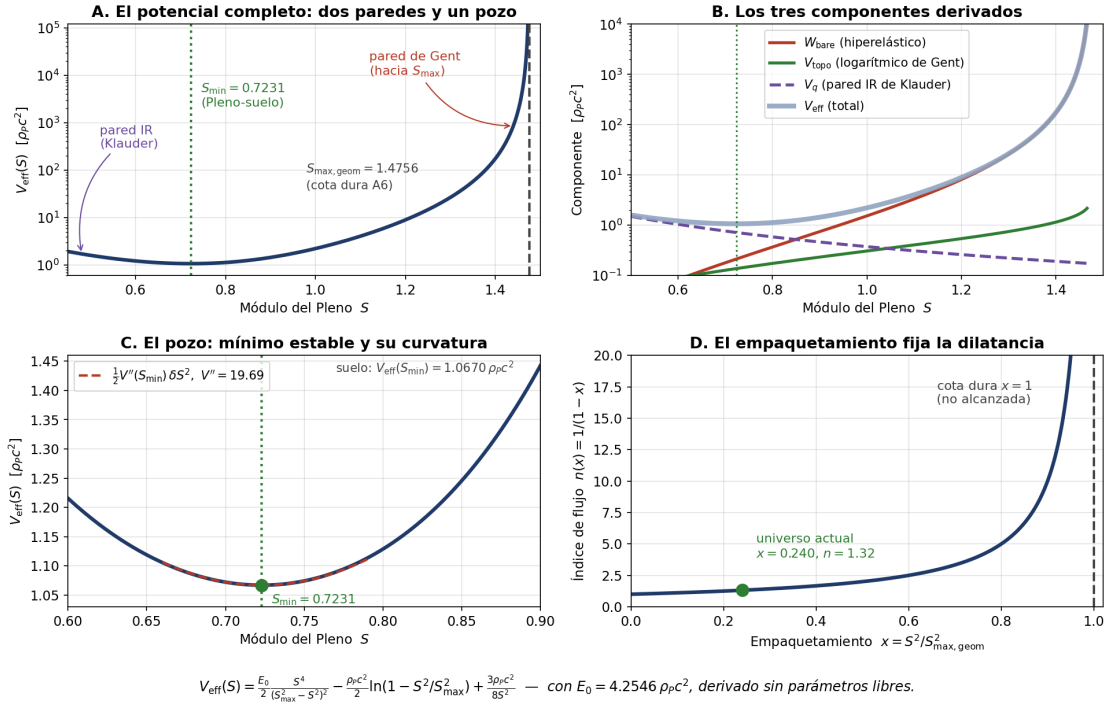


Figura 4: El potencial efectivo del Pleno, la energía que cuesta cada grado de compresión: la pared inferior que impide que el medio se anule, el fondo del pozo donde reposa hoy, y la pared dura que impide comprimirlo sin fin. Las tres están derivadas, sin una sola perilla que girar.

la de **Klauder**, el coste de acercarse a cero, que lleva el nombre de John Klauder porque sale de su cuantización afín; y la de **Gent**, el coste de acercarse al tope, que lleva el nombre de Alan Gent, quien la escribió en 1996 para el caucho. Juntas dan el potencial efectivo $V_{\text{eff}}(S)$, que dice cuánta energía cuesta cada grado de compresión del medio. La elástica y la de Gent son las dos mitades del $V(S)$ de F1, la que sostiene las configuraciones estables y la saturación que exige A6; la de Klauder es el cuarto término de la ecuación, escrito aparte porque su origen es cuántico y no elástico. Efectivo quiere decir que las tres se suman en una sola curva, y esa curva es la que el medio siente.

La **pared inferior** viene del término de Klauder, de origen cuántico, que crece sin límite conforme el módulo se acerca a cero, de modo que el medio no llega nunca a anularse. Ese origen cuántico se ve bien en un caso conocido: un electrón encerrado en una caja no puede quedarse quieto, y tanto más se agita cuanto más estrecha es la caja. Obligar al módulo a no ser nunca negativo es encerrarlo contra una pared, y la energía de ese encierro se dispara al acercarse a cero. La **pared superior** viene del término logarítmico de Gent —la forma con que se describe un caucho que llega a su límite de estiramiento—, que crece sin límite al acercarse S a su valor de saturación: el coste de comprimir la red se dispara conforme se aproxima al empaquetamiento máximo, y ese máximo tampoco se alcanza.

Entre las dos paredes queda el **fondo**, y ahí reposa el medio hoy. Su posición es $S_{\text{min}} = 0,7231$ —el mismo número que da la red—, y lo cerrado de ese fondo (la curvatura del pozo en ese punto) vale

$$\xi = \frac{V''_{\text{eff}}(S_{\text{min}})}{\rho_p c^2} \approx 19,69.$$

Las dos comillas de V'' marcan que lo que se mide ahí es la curvatura —cuánto se dobla la curva en ese punto—, y no su altura ni su pendiente. El resultado es un número sin unidades, de los que salen iguales midiendo en metros o en pulgadas, y dice con cuánta fuerza el pozo devuelve al medio a su compresión de reposo cuando algo lo aparta de ella: un fondo estrecho lo devuelve con fuerza; uno ancho, apenas.

La vara con que se mide la compresión es $S = 1$, el valor al que corresponde exactamente la densidad ρ_P . Medida contra esa vara, la compresión del medio reposa en 0,72 y no pasa de 1,48. Y como la densidad va con el cuadrado, en su configuración de reposo el Pleno tiene el 52 % de esa densidad de referencia: $\rho_{\text{Pleno-suelo}} = \rho_P S_{\text{mín}}^2 \approx 0,5229 \rho_P$.

Qué cambia con esto. Cuando un modelo necesita un potencial, lo habitual es elegirlo dentro de una familia de formas posibles hasta que salgan las cuentas. Aquí no hay elección: las tres piezas están derivadas y la escala de energía, $E_0 = 4,2546 \rho_P c^2$, sale en forma cerrada de π y $\sqrt{6}$, sin un solo símbolo libre.

6. Un medio firme que se endurece con la prisa

El Pleno tiene dos formas distintas de resistirse a que lo deformen, y de cada una brota una consecuencia célebre de la física. A la primera podemos llamarla su *firmeza*; a la segunda, su *resistencia a los cambios bruscos*.

La firmeza: cuánto cede el medio cuando lo empujas. Una buena manera de medir cómo de firme es algo es ver cuánto cede cuando lo aprietas. Hunde el dedo en una almohada: se hunde mucho. Apoya el mismo dedo, con la misma fuerza, sobre una mesa de madera: casi no cede. La almohada es blanda; la mesa, firme. “Firme” no significa más que eso: que ante un empujón dado, cede poco.

El Pleno, incluso en reposo como está hoy, cede poquísimo cuando algo lo empuja. Y es la firmeza de un medio *relajado*: hoy reposa en el fondo de su pozo. De esta firmeza en reposo sale la debilidad de la gravedad.

La resistencia a los cambios bruscos: por qué existe la velocidad de la luz. Ese medio firme se comporta normalmente como un sólido elástico: si lo deformas un poco, recupera su forma, como un resorte. Pero además tiene un carácter que depende de la *prisa*: cuanto más deprisa se le obliga a deformarse, más se resiste, y al acercarse a una prisa máxima su resistencia crece sin límite.

Hay sustancias cotidianas que hacen exactamente esto. La mezcla de maicena con agua: si la golpeas de repente, se comporta como un sólido y hasta puedes correr sobre ella; si la empujas despacio, fluye entre los dedos. Su resistencia depende de lo rápido que la fuerzas. El Pleno no es líquido en reposo como la maicena, pero comparte con ella la ley: su resistencia también crece con la prisa, y eso es lo que hay debajo del límite de la luz.

Un cuerpo que se mueve se abre paso por el medio. Una partícula, en el Pleno, es un *nudo*: una torsión del propio medio que se enrolla sobre sí misma y que ningún tirón deshace, como un nudo hecho en un anillo de cuerda cerrado. El nudo se mantiene, y el Pleno de alrededor es el que cede por delante y se recupera por detrás. Cuanto más rápido va, más deprisa tiene que ceder. Acercarse a la velocidad de la luz es obligar al medio a deformarse cada vez más deprisa, y el medio se endurece tanto que se vuelve imposible empujarlo más allá. La barrera de la luz gana así un mecanismo: es el punto donde el Pleno se atasca, y lo que cuesta acercarse a ella se puede calcular con exactitud.

Eso es la inercia. Un nudo se sostiene solo: la energía que guarda es su masa, y tenerlo quieto no le cuesta trabajo nuevo al medio. Lo que cuesta es cambiarlo de sitio. A velocidad constante ese relevo —ceder por delante, recuperarse por detrás— se hace siempre al mismo ritmo y no pide nada nuevo; acelerar es exigirle a un ritmo distinto, y eso el medio lo cobra. La inercia no es entonces algo que el cuerpo lleve dentro, sino lo que el medio cobra por rehacer su perfil a un ritmo dado. Y ese cobro no es fijo: crece con la prisa, por la misma curva de la figura, y por eso acelerar cuesta cada vez más a medida que el cuerpo se acerca a la velocidad de la luz.



Figura 5: La curva de resistencia del Pleno. Cuanto más deprisa se le obliga a deformarse, más se resiste, y al acercarse a su tope la resistencia se dispara: ahí está la velocidad de la luz. El medio de hoy está en reposo, al pie de la curva, donde se comporta como un fluido corriente.

Y sin embargo el movimiento no se frena. Si avanzar obliga al medio a acomodarse sin parar, lo natural sería esperar que un cuerpo fuese perdiendo energía por el camino y acabara deteniéndose —que un planeta llevara eones frenándose—. No ocurre, y la razón está en qué parte de ese acomodamiento se paga en calor. Mover un cuerpo le cuesta al medio tres cosas distintas: rehacer su perfil, que es la inercia; rehacerlo deprisa, que es ese mismo endurecimiento, la relatividad leída en el material; y el roce interno, que es el único de los tres que disipa energía y frena de verdad. Ese tercero solo se cobra cuando el perfil cambia bruscamente, en distancias del tamaño del grano. El de un planeta es suavísimo: se reparte sobre unos 10^{34} granos, de modo que a cada uno le toca un acomodamiento diminuto, y el roce que resulta es una parte en un uno seguido de setenta ceros (10^{-70}): cero a todos los efectos, y a cualquier velocidad. Por eso el movimiento ordinario no se paga en calor: los dos primeros costes el medio los guarda y los devuelve, y el tercero, el único que los disiparía, no llega a cobrarse.

Por qué existe un límite de velocidad

[DERIVADO]/[DLF]

La resistencia del medio crece con la prisa hasta un tope; leída en velocidad, esa curva es el factor de Lorentz, y la misma prisa, leída en el universo entero, es el ritmo de su expansión.

Todo material tiene una curva que dice cuánto se resiste según la prisa con que se le deforme. La del Pleno es

$$n(x) = \frac{1}{1-x}, \quad x = \frac{\text{tasa de deformación}}{\text{tasa máxima que el medio admite}},$$

la curva de un fluido *dilatante*, la familia de la maicena. La n es el índice de resistencia del medio: vale 1 en un fluido corriente, como el agua, y en uno dilatante crece con x y, al acercarse x a uno, se dispara sin cota; ese uno no se alcanza. Es un multiplicador: dice por cuánto hay que multiplicar lo que costaría deformar el medio con calma para saber lo que cuesta deformarlo con la prisa x . La tasa máxima es un cambio completo por celda en el tiempo que la luz tarda en cruzarla, y acota las deformaciones que cambian la forma del medio. La forma $1/(1-x)$ sale derivada de la pared de Gent, como respuesta del medio a lo apretado que está; leerla como respuesta a la prisa es un paso constitutivo, y lo que se calcula con ella lleva la etiqueta [DLF].

En eso consiste el límite de la luz. Acelerar un cuerpo es obligar al medio a reorganizarse a su alrededor cada vez más deprisa, es decir, subir x . La energía que eso cuesta crece con la resistencia del medio, y esa resistencia se dispara al acercarse x a uno. La causalidad —que ninguna cosa pueda influir sobre otra más deprisa de lo que tarda una señal en llegar— prohíbe pasar de c , y la reología —el estudio de cómo se deforman los materiales— dice lo que cuesta acercarse: una energía que se

dispara sin cota conforme la velocidad se aproxima a c , que es exactamente lo que dice el factor de Lorentz, el que Hendrik Lorentz escribió en 1904.

Lo que es cuenta y no lectura: el factor $1 - v^2/c^2$ sale del propio F1 en cuanto se escribe una deformación que viaja —nadie lo pone a mano—, y la resistencia de esa deformación crece como el cuadrado del factor de Lorentz, $\gamma^2 = 1/(1 - v^2/c^2)$. [DERIVADO]

Para un cuerpo que se mueve a velocidad v , la prisa relativa se lee como el cuadrado de su velocidad medida en unidades de la luz, $x = v^2/c^2$, y con esa lectura el índice de resistencia del medio *es* γ^2 : la inercia relativista y el endurecimiento dilatante del Pleno son la misma función. De la misma cuenta, con lo que el medio contiene en cada punto, se leen el momento y la energía relativistas, $p = \gamma mv$ y $E = \gamma mc^2$. La resistencia creciente a acelerar hacia c , que en relatividad se enuncia y se acepta, es aquí un material endureciéndose al acercarse a su tasa de deformación límite. [DLF]

Esa misma variable, formada con el ritmo al que cambia el volumen del universo entero —que es el Pleno deformándose a la mayor escala que hay—, da una identidad exacta:

$$|H| = \frac{x}{3}.$$

La H es el ritmo de la expansión: cuánto se separan por segundo dos puntos del universo por cada unidad de distancia que ya los separa, lo que la astronomía llama la constante de Hubble. La prisa relativa del medio *es* tres veces el ritmo al que el universo se expande, medido ese ritmo en la tasa máxima del medio. Y el tres son las tres direcciones del espacio. Al estirarse, el medio conserva su cantidad de sustancia: si se estira por igual en las tres direcciones, el volumen crece con el estiramiento multiplicado tres veces por sí mismo, y la compresión tiene que bajar en consecuencia. Poner esa cuenta en ritmos —cuánto cambia el volumen por segundo frente a cuánto cambia la compresión— deja exactamente un tercio entre las dos. [DERIVADO]

La identidad traduce la prisa en ritmo de expansión, y no traslada a la expansión el tope de la luz. Ese tope limita las deformaciones que cambian la forma del medio, y un universo que se estira por igual en todas las direcciones cambia de tamaño, no de forma. Lo que fija lo deprisa que se expande es la energía que el medio lleva; y lo que impide que su comienzo sea un punto de densidad sin fin es la pared de arriba del pozo, que acota cuánto se comprime el medio, no a qué ritmo cambia.

La comprobación. Que la firmeza del medio y su estructura causal se midan con la misma c no es una coincidencia que la cuenta descubra: es exactamente lo que A3 pide, y F1 está escrito para respetarlo. Un Lagrangiano con coeficientes temporal y espacial distintos —un medio con dos varas— daría ondas viajando a una velocidad distinta de la de su propia causalidad, como le ocurre a un cristal corriente, que el sonido recorre a una velocidad y la luz atraviesa a otra. Ese medio se puede escribir, y es justamente el que A3 excluye. Lo que no está postulado es lo que viene después: de esa única vara salen el factor de Lorentz, la curva de resistencia leída en velocidad y la identidad entre la prisa del medio y la expansión, y ninguno de los tres estaba obligado a salir con la forma que sale.

Qué cambia con esto. En relatividad, que nada supere la velocidad de la luz es una propiedad del espacio-tiempo: se enuncia, se acepta, y la energía que haría falta para rebasarla se calcula —pero no hay nada que se resista, solo una regla que no se deja quebrantar—. Aquí sí hay algo que se resiste, y es el material. Acelerar un cuerpo obliga al medio a reorganizarse a su alrededor cada vez más deprisa, y el Pleno es de la familia de la maicena: cuanto más deprisa se lo deforma, más duro se pone. Esa dureza es la que se dispara al acercarse al tope, y su curva, leída en velocidad, es la del factor de Lorentz. Y la misma prisa, leída a la escala del universo entero, es el ritmo de la expansión.

7. El tiempo: no un escenario, sino el latido del Pleno

Estamos acostumbrados a pensar el tiempo como un río que corre por su cuenta, independiente de todo, y a las cosas del universo como barcas que flotan en él. Primero está el tiempo; después, lo que pasa dentro. En el Pleno esa imagen se invierte.

Aquí el tiempo no existe “por fuera”. No hay un río previo. Lo que llamamos tiempo es cuánto ha cambiado el Pleno: la cuenta de sus cambios acumulados, medida contra el único ritmo de referencia que existe —la prisa máxima con que el medio puede cambiar, la misma que fija la

velocidad de la luz—. Ese ritmo no es una duración, sino un recuento: el medio no puede hacer más de un cambio completo por celda en el tiempo que la luz tarda en cruzarla, y lo que se cuenta son cambios completos, no segundos. Un segundo es un número enorme de esos pasos. Piensa en un reloj que fuera todo lo que existe: no mediría un tiempo que estuviera ahí de todos modos, porque no habría un fuera donde estuviera; su tic-tac sería el tiempo, contado latido a latido. El Pleno es así: no envejece dentro del tiempo; su envejecer es el tiempo.

Esa inversión deshace preguntas que parecían insondables. “¿Qué había antes del universo?” o “¿a qué velocidad pasa el tiempo?” resultan ser preguntas mal planteadas —como preguntar dónde está el universo entero, cuando el “dónde” solo tiene sentido dentro de él—. No hay un “antes” sin Pleno que cambie, porque el “antes” mismo es una medida de cambio; y no hay una “velocidad del tiempo”, porque no existe un segundo reloj externo contra el cual cronometrar al primero. El tiempo no es un recipiente que se pueda llenar o vaciar: es la huella que va dejando la sustancia al transformarse.

Y eso desata uno de los nudos de la gravedad cuántica. Cuando se escribe la ecuación cuántica del universo entero —la de John Wheeler y Bryce DeWitt—, el tiempo desaparece de ella: no hay ningún reloj fuera del universo contra el que medirlo. En el Pleno eso es lo esperado, porque el tiempo nunca estuvo fuera: es la correlación entre una parte del medio que hace de reloj y el resto, el mecanismo que Don Page y William Wootters describieron en 1983. Correlación quiere decir que dos partes cambian a la par, de modo que el estado de una dice el de la otra. Que sean las tres no afirma que exista un instante llamado las tres: afirma que el resto del medio está en la configuración que va con la manecilla en esa posición.

Tres cosas que a primera vista parecen distintas resultan ser una sola: el cambio acumulado del Pleno, la historia de la expansión del cosmos y el paso mismo del tiempo. Son la misma cuenta leída de tres maneras, porque medir el tiempo es contar cuánto ha cambiado el medio, y la expansión es ese mismo cambio visto a la mayor escala que hay.

De esa manera de contar sale, además, algo que la física suele presentar como un hecho bruto: que un reloj en movimiento va más despacio.

Hay un ritmo que no varía nunca, y es distinto de la prisa de la sección anterior. Aquélla comparaba la deformación del medio con la máxima que admite, y va de cero a uno. Ésta se mide contra el propio tiempo de cada cosa: el cambio total de una configuración, contado contra su propio tiempo, es siempre el mismo, porque su tiempo propio no es otra cosa que la cuenta de ese cambio. Todo lo que existe cambia, entonces, al mismo ritmo total —también lo que parece quieto—, y lo que se reparte es en qué se gasta. Una parte se va en trasladarse —en rehacer el perfil un poco más allá, el mismo relevo de la inercia—, y la que sobra es cambio interno: el que un reloj cuenta. Quietos, todo el cupo es interno, y el reloj marcha a su ritmo pleno. En movimiento, parte del cupo se gasta en avanzar, queda menos para lo de dentro, y el reloj marca menos.

El tiempo no se “dilata”, entonces, como se estira una goma: lo que ocurre es que el cambio total está acotado y hay que repartirlo. Y en el extremo, la luz gasta todo su cupo en avanzar. No le queda nada de cambio interno, y por eso no tiene reloj: entre que sale de una estrella y llega a un telescopio, por lejos que haya viajado, para ella no ha pasado tiempo propio ninguno. El factor de Lorentz, que la relatividad introduce como la regla de ese reparto, es aquí la cuenta de cuánto cambio queda para dentro.

8. La gravedad: no una fuerza que tira, sino el medio que se relaja

Durante siglos la pensamos como la describió Newton: una fuerza invisible que un cuerpo ejerce sobre otro, tirando de él a distancia. La Tierra “tira” de nosotros; el Sol, de la Tierra. Funciona

de maravilla para calcular, pero deja una pregunta incómoda: ¿cómo hace un cuerpo para tirar de otro que está lejos, sin tocarlo, a través del vacío?

Hace un siglo, Einstein dio un vuelco a esa imagen y respondió, en buena parte, esa pregunta. En su relatividad general, la gravedad no es una fuerza que tira: es la *forma* del espacio. Una masa deforma el espacio a su alrededor —lo curva—, y los demás cuerpos, al moverse, no sienten ningún tirón: simplemente siguen el camino más recto que ese espacio curvado les permite. La imagen habitual es la de una bola pesada sobre una tela tensada: hunde la superficie, y una canica que pasa cerca cae hacia ella no porque la bola la atraiga, sino porque el suelo bajo la canica está inclinado. Einstein, así, disolvió el misterio del “tirón a distancia”: no hay tirón, hay geometría. La Tierra no jala a la Luna; encorva el espacio, y la Luna sigue la curva.

PIU- Ψ responde la pregunta que Einstein dejó abierta. Einstein nos dice *que* el espacio se curva, y describe con una precisión exquisita *cómo* lo hace. Pero no dice *qué* es el espacio, ni *por qué* puede curvarse: lo toma como el escenario último, dado. El espacio no es el suelo final de la realidad: es una descripción de cómo se comporta el Pleno visto desde lejos. Lo que Einstein llama “curvatura del espacio” es, mirado de cerca, la deformación del Pleno. Para Einstein, la geometría es el *punto de partida*; para PIU- Ψ , es el *punto de llegada* —algo que emerge del medio, no algo que haya que suponer—. Einstein geometrizó la gravedad; PIU- Ψ explica de qué está hecha esa geometría. Y cuando uno hace las cuentas, las ecuaciones de Einstein reaparecen intactas dentro de PIU- Ψ : se *derivan*.

En el Pleno, la gravedad nace de la elasticidad del medio, y se entiende mirándola por sus dos lados: desde la masa y desde el Pleno.

Desde la masa, la gravedad es la cola de lo que la masa es. Una masa —una estrella, un planeta, tú mismo— es Pleno anudado: una región donde el medio se aparta de su reposo. Y esa deformación no se acaba en el borde del objeto: se va debilitando con la distancia y alcanza a todo su entorno. Lo que llamamos el campo gravitatorio de un cuerpo es la parte de afuera de esa misma deformación. No hay dos cosas, el cuerpo por un lado y su campo por otro: hay un solo perfil, apretado en el centro y cada vez más tenue hacia afuera.

Desde el Pleno, la gravedad es el medio yendo a donde le cuesta menos. Sostener una masa cuesta: hay que mantener el medio deformado a su alrededor, y el medio tiende siempre a volver a su reposo. Pero ese coste no lo fija solo la masa. Lo fija también cómo esté el medio en el sitio donde se la pone.

Si se la pone donde otra masa ya ha deformado el medio, parte del trabajo está hecho, y sostener la segunda cuesta menos. Cuanto más cerca, más deformado está el medio ahí, y más se ahorra. Ese ahorro va como uno partido por la distancia, que es la forma exacta del potencial de Newton. Y bajar el coste es lo único que hace un medio elástico: bajarlo, aquí, significa acercarse.

Las dos miradas dicen lo mismo. Como todo medio elástico, el Pleno tiende a la configuración que menos le cuesta, y el camino hacia ella es juntar las dos masas. Eso que llamamos “atracción gravitatoria” es el solapamiento de las dos deformaciones rebajando la energía del conjunto. Y a diferencia de la canica sobre la tela, que necesita una segunda gravedad que la empuje cuesta abajo, aquí no hace falta ninguna: lo que baja es la energía del propio medio.

Y la inercia es ese mismo perfil, cobrado al moverlo. Lo que cuesta acelerar un cuerpo es que el medio tenga que rehacer su perfil a un ritmo dado, y la medida de ese coste es la energía que el cuerpo retiene; lo que la gravedad lee de ese mismo cuerpo es también su energía. De ahí se sigue, sin que haya que postularlo, que la masa que pesa y la masa que cuesta acelerar sean la misma: una sola energía, leída dos veces —por su cola, que es la gravedad, y por su traslado, que es la inercia—.

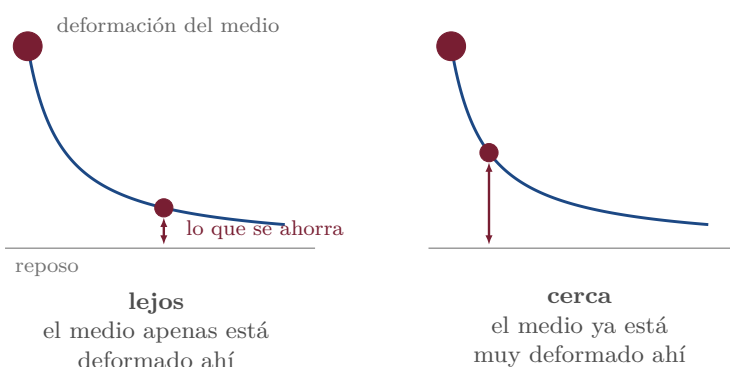


Figura 6: Por qué dos masas se juntan. La curva es la deformación que la primera masa mantiene a su alrededor: grande pegada a ella y cada vez más tenue al alejarse. Sostener la segunda masa cuesta menos cuanto más deformado esté ya el medio donde se la pone, y el segmento marca ese ahorro. Cuanto más cerca, mayor es: crece como uno partido por la distancia, que es la forma exacta del potencial de Newton.

Piensa en los cereales que flotan en un tazón de leche. Cada pieza pesa, y la tensión superficial la sostiene sin dejarla hundirse del todo, de modo que la superficie se curva un poco a su alrededor y queda un hoyuelo. Ese hoyuelo no se acaba en el borde de la pieza: sigue alrededor, cada vez más tenue.

Cuando dos quedan cerca, cada una está posada sobre la ladera del hoyuelo de la otra, y por la ladera se resbala. Las dos se acercan solas, sin tocarse, hasta juntarse. Nada tira de ellas: estar en el hoyuelo de la otra sale más barato que estar sobre la superficie plana, y eso basta. La gravedad de la Tierra hace ahí dos cosas —abre el hoyuelo y empuja por la ladera—, y fija además hasta dónde llega el efecto: a pocos milímetros, porque más allá aplanar la superficie.

En el Pleno no hay una segunda gravedad que pedir prestada. El hoyuelo es la masa, porque una masa es el propio medio deformado, y lo que empuja por la ladera es que el medio busca su coste mínimo. Y el efecto no se corta a ninguna distancia: solo se debilita como el inverso del cuadrado de la distancia, porque se reparte sobre una esfera cada vez mayor.

Y así, la vieja pregunta incómoda de Newton ni siquiera se plantea: no hay nada que tire a través del vacío, porque no hay vacío; hay un medio continuo que lo explica todo por contacto, punto a punto.

¿Y cuán débil es la gravedad? Más de lo que la intuición sospecha. Un simple imán de nevera, del tamaño de una moneda, levanta un clip y le gana así a la atracción gravitatoria del planeta entero. Entre dos protones, la atracción gravitatoria es unas 10^{36} veces más floja que la repulsión eléctrica —un uno seguido de treinta y seis ceros—. Y sin embargo es la gravedad la que da forma al universo a gran escala.

¿Cómo puede la más débil dar forma a las galaxias? Por su alcance. Las otras fuerzas, con toda su intensidad, o bien solo actúan a distancias diminutas —las nucleares no llegan más allá del núcleo de un átomo—, o bien se cancelan a sí mismas: en la materia hay tantas cargas positivas como negativas, y sus tirones eléctricos se anulan casi por completo. La gravedad, en cambio, nunca se cancela (no hay “masa negativa” que la contrarreste) y su alcance no tiene límite: se suma y se suma a través de distancias cósmicas, de planeta a estrella, de estrella a galaxia. Así, la fuerza más floja de todas, precisamente por actuar sin cancelarse sobre distancias inmensas, termina siendo la que modela el cosmos entero.

Esa debilidad descomunal es uno de los grandes enigmas sin resolver de la física: nadie sabe, en el marco habitual, por qué la gravedad es tan extraordinariamente más floja que el resto. Se acepta como un hecho, un “es así”.

Si la gravedad es el medio relajándose, lo esperable sería que un medio muy firme produjera una gravedad muy fuerte: un resorte duro tira con más fuerza que uno blando. Ocurre justo lo contrario, y la razón está en quién produce la deformación. No está puesta de antemano: la produce la masa. Una masa dada empuja con una fuerza dada, y lo que el medio cede ante ella es esa fuerza dividida por su firmeza, de modo que cuanto más firme es el medio, menos cede.

Y la gravedad es lo que se ahorra al juntar dos de esas cesiones. El ahorro se calcula en dos pasos, y cada uno mete la firmeza por un lado distinto.

Primer paso: cuánto cede el medio. Un medio mil veces más firme cede mil veces menos ante la misma masa.

Segundo paso: cuánto se ahorra con esa cesión. El ahorro va con el cuadrado de la cesión, de modo que una cesión mil veces menor ahorra un millón de veces menos; y va una sola vez con la firmeza, que lo multiplica por mil.

Un millón de veces menos, multiplicado por mil, es mil veces menos. Un medio mil veces más firme da una gravedad mil veces más débil: la firmeza, que entraba por los dos lados, acaba dividiendo. Eso es exactamente lo que mide la “constante de la gravedad”: no una fuerza, sino **cuánto cede el medio** cuando se pone una masa en él —y esa cesión es lo que un observador lejano lee como curvatura del espacio—. Que el número sea minúsculo dice que el medio es densísimo y que en reposo apenas cede. Por eso la firmeza del Pleno no se postula: se lee en la debilidad medida de la gravedad.

La constante de Newton como identidad estructural

[DERIVADO]

La constante de la gravedad resulta ser una propiedad del medio: su densidad y su grano.

Se toman dos perturbaciones del medio —dos regiones donde la compresión se aparta de su reposo— separadas una distancia r y se calcula, con F1, la energía que cuesta sostenerlas. La masa de cada una es esa misma energía dividida por c^2 : una región que se aparta más de su reposo guarda más energía y pesa más. El resultado tiene la forma $-GM_1M_2/r$ del potencial de Newton, y al comparar los dos no queda ningún factor suelto: la escala que lleva el término cinético de F1 es c^4/G . Despejando,

$$\rho_P c^2 \ell_P^2 = \frac{c^4}{G} \quad \Longleftrightarrow \quad G = \frac{c^2}{\rho_P \ell_P^2}$$

La constante de la gravedad es la velocidad de la luz al cuadrado dividida por la densidad del medio y por el cuadrado de su grano. Nada más entra en la fórmula.

La derivación da más que un encaje de unidades. Con la densidad, el grano y c se pueden fabricar muchísimas cantidades con las unidades de G : basta multiplicar esa expresión por cualquiera de los números puros del programa, como ξ o $S_{\min}$. Las unidades no deciden entre ellas; la dinámica de F1 sí: de todas esas combinaciones, la que produce es $c^2/(\rho_P \ell_P^2)$, y ninguna otra. La acción inducida de Sakharov, en el cuadro siguiente, vuelve a encontrar la misma rigidez del medio, $\rho_P c^2 \ell_P^2$, por un camino independiente.

Hasta aquí, la derivación. Leer esa constante en metros, kilos y segundos es un paso posterior, la **calibración**: traducir la densidad y el grano del medio a varas humanas. Esa traducción se declara una sola vez, hace del grano del medio la longitud de Planck y deja delante un **coeficiente** uno. La calibración no le quita nada a la derivación: le da al número humano su condición de calibrado. Para ponerlo a prueba se le antepone un número de contraste, κ_G —y otro, κ_h , a la constante de Planck, $\hbar = \rho_P c^2 \ell_P^4$, que sale de la misma pareja de densidad y grano y cuyo uno sí lo da la cuenta del giro—: el día que la densidad o el grano del medio se midan por otro camino, ese uno quedará a prueba. Dos constantes de la naturaleza salen así de dos cantidades del medio, sin libertad sobrante.

De ahí sale también la escala de fuerza del medio, $c^4/G = \rho_P c^2 \ell_P^2 \approx 1,2103 \times 10^{44}$ newtons: la tensión estructural del Pleno, la que se conoce como fuerza de Planck. Y esa escala fija el coeficiente

de la acción de Einstein-Hilbert, $c^4/16\pi G = \rho_P c^2 \ell_P^2/16\pi$: la rigidez del término de Einstein-Hilbert es la rigidez cinética de F1 leída en lenguaje geométrico, dividida por un factor geométrico puro que no contiene ningún parámetro del Pleno.

Queda una frontera. La fórmula dice de qué depende G ; para tener su número en metros, kilogramos y segundos hace falta saber cuánto valen en esas unidades la densidad y el grano del medio. Eso es una afirmación sobre la vara de medir, no sobre la derivación: una constante con unidades no tiene un valor propio hasta que se elige la vara, en esta teoría y en cualquiera. Lo que se calibra son esos dos valores, la densidad y el grano, y con G y $\hbar$ medidos dan un grano igual a la longitud de Planck. Fijada la vara una sola vez, la estructura fuerza el resto.

Qué canal lleva la gravedad a distancia. La cuenta de arriba lee la respuesta elástica de la compresión como si su alcance no tuviera límite. Lo tiene: el pozo le da masa, y esa respuesta se apaga en un cuarto de grano ($0,2589 \ell_P$). Por eso el Pleno no tiene una quinta fuerza: el alcance de ese canal queda treinta (30) órdenes de magnitud por debajo de lo que alcanzan a ver las balanzas de torsión del grupo Eöt-Wash, que la buscan. Lo que lleva la gravedad a distancia es el modo de forma del medio —el que lo alarga en una dirección y lo acorta en la perpendicular, el mismo de la onda gravitacional—, que no tiene masa, y su fuente es la energía que cada cuerpo contiene. Ahí no hay ninguna carga que normalizar, y por eso es ahí donde el coeficiente queda fijado.

La comprobación. La energía de interacción tiene tres piezas: el coste elástico del terreno que queda entre las dos masas, y el acoplo de cada una a la deformación que la otra ya ha hecho. El término elástico cancela uno de los dos acoplos, y el que sobrevive es el que trae el signo negativo, el que atrae. Con el término elástico solo, el signo saldría al revés y el medio separaría las masas en vez de juntarlas.

Qué cambia con esto. En la relatividad general y en el modelo estándar de las partículas, G entra como dato: se mide y se acepta, y ninguna de las dos la devuelve desde su propia dinámica. Aquí sale como identidad del medio, con el número de delante igual a uno, y lo minúsculo de su valor deja de ser un enigma: dice que el medio es densísimo y que apenas cede.

Las reglas y los relojes con que medimos están hechos del mismo medio que medimos. Donde el Pleno está más deformado, una regla apoyada ahí no mide lo mismo que apoyada lejos, y un segundo no dura lo mismo. Y nadie puede salirse del medio a comprobarlo: lo único que hay son medidas locales, tomadas con instrumentos a los que el estado del medio afecta.

Curvatura es el nombre de lo que ocurre cuando esas medidas locales no encajan entre sí como encajarían sobre un papel plano. No hace falta imaginar un espacio doblándose dentro de otro: basta con que el medio esté más deformado en unos sitios que en otros para que las distancias y los tiempos medidos desde dentro dejen de cuadrar. La geometría no es el escenario: es la lectura que las perturbaciones del Pleno hacen del estado del medio.

Las ecuaciones de Einstein, por acción inducida

[DERIVADO]

La ecuación entera de la relatividad general reaparece, con su coeficiente completo.

El mecanismo es el que Andréi Sakharov propuso en 1967: la *acción inducida*. El medio vibra sin cesar hasta la escala de su grano, y entre esas vibraciones están las de su modo tensorial: la deformación que lo alarga en una dirección mientras lo acorta en la perpendicular, la misma que lleva una onda gravitacional. Esa deformación es un reacomodo de la forma de la red: las celdas quedan más juntas en una dirección y más separadas en la perpendicular, sin que cambie cuánto está comprimida ninguna. Lo que vibra es la forma del patrón, no la compresión: es otra vez el giro del medio, en el nivel que necesita dos direcciones para describirse.

Curvar el medio cambia las frecuencias con que sus celdas pueden vibrar, y con ellas la energía que esas vibraciones guardan aun sin excitarlas. Esa energía pasa a depender de la curvatura, y su primer término crece en proporción directa a ella. Sumadas todas esas vibraciones —eso es integrar las fluctuaciones—, lo que queda a gran escala es la acción de la geometría, término a término.

A la izquierda va esa acción. El signo $\int d^4x$ dice que se suma sobre todo el espacio y todo el tiempo; $\sqrt{-g}$ es el factor que hace que esa suma mida lo mismo en un espacio curvo que en uno plano; y

R es la cantidad que mide cuánto se curva el espacio-tiempo en cada punto. Aplicarle el mismo procedimiento de Euler-Lagrange de antes devuelve las ecuaciones de la derecha:

$$\Gamma_{\text{ind}}[g] = -\frac{c^4}{16\pi G} \int d^4x \sqrt{-g} R + \mathcal{O}(R^2/E_P^2) \implies R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}R g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}^{(\text{Pleno})}$$

El primer miembro es la curvatura del espacio-tiempo; el segundo, lo que el Pleno contiene en cada punto. Es la ecuación de campo de Einstein, sin retoques. Los subíndices griegos de $R_{\mu\nu}$, $g_{\mu\nu}$ y $T_{\mu\nu}$ hacen lo mismo que hacía el μ de ∂_μ : recorren el tiempo y las tres direcciones del espacio, de modo que cada uno de esos símbolos no es un número suelto, sino una tabla con una casilla por cada par de direcciones. Y la E_P del término que sigue a la primera fórmula es la energía de Planck, la que guarda una celda del medio; ese término recoge las correcciones del grano, que solo cuentan cuando lo que se dobla es del tamaño de una celda.

El coeficiente sale *completo*, no “del orden de”: el factor $c^4/16\pi G$ aparece con su valor, con G ya derivada como identidad del medio. Y ese número no sale de sumar las vibraciones: de ahí salen el signo, el tamaño y que la onda gravitacional no se mezcle con nada, pero la suma, por sí sola, deja el número de delante dependiendo de cómo se la corte. El número de delante lo da el empalme con la ley de Newton ya derivada, sin sumar vibraciones ni cortar nada, y ahí el 8π de la ecuación se desarma en sus dos piezas: es $2 \times 4\pi$. El 4π es la superficie de una esfera de radio uno: la gravedad de una masa se reparte por igual en todas las direcciones del espacio, como la luz de una bombilla, y el teorema de Gauss lee esa medida de la esfera en la respuesta de largo alcance de la propia red, que a gran distancia cae como uno partido por 4π veces la distancia, salvo un factor que no lleva π . Que el medio responda igual en todas las direcciones tampoco se supone: lo da la simetría del tetraedro. El 2 sale del término $-\frac{1}{2}R g_{\mu\nu}$ del primer miembro, que a la curvatura en cada dirección le resta la mitad de la curvatura total; esa resta se llama reversión de traza. Y resolviendo la ecuación alrededor de una masa estática se lee la métrica que Karl Schwarzschild encontró en 1916, que dice punto por punto cuánto mide de verdad un paso en cada dirección y cuánto dura de verdad un segundo.

La comprobación. Sin la reversión de traza la misma cuenta devuelve 4π y no 8π : el factor 2 queda aislado por contraste, y lo pone esa resta. Y el 8π no es un coeficiente local de la red. Todo lo que la red fija entre vecinos a distancia finita lleva π solo en potencias pares —al cuadrado, a la cuarta—, o no lo lleva; un π suelto, como el de 8π , no puede salir de ahí. Sale de la respuesta de largo alcance de la misma red: la red fija la escala de la rigidez, el tipo de onda y su dispersión, y su respuesta a gran distancia fija el 4π .

Qué cambia con esto. La curvatura del espacio-tiempo no es aquí un punto de partida sino la acción elástica efectiva de un medio, y las ecuaciones de Einstein son lo que ese medio hace visto de lejos. La relatividad general queda íntegra dentro del programa, como límite efectivo y con su coeficiente exacto.

Hay una consecuencia de todo esto que ya está medida. Si la gravedad es el medio deformándose, entonces una onda gravitacional —esas ondulaciones del espacio que Einstein predijo en 1916 y que el observatorio LIGO registró por primera vez en 2015— no es una entidad aparte: es el propio Pleno ondulando, igual que la luz. Y las dos viajan exactamente a la misma velocidad. En un material corriente no ocurre: en la roca de un terremoto, las ondas que empujan llegan antes que las que sacuden de lado. La roca tiene dos firmezas distintas, una para ser comprimida y otra para ser cizallada (deslizada de lado, como una baraja al abanicarse), y cada onda ve la suya.

En el Pleno no hay dos firmezas que repartir: hay una sola vara, c , y todo lo que recorre el medio sin masa lo recorre a esa velocidad, ondula como ondula. La luz y la onda gravitacional son dos ondulaciones del giro del medio, las dos sin masa —la luz necesita una dirección para describirse; la onda gravitacional, dos, porque alarga el medio en una y lo acorta en la perpendicular—. Compartir velocidad no es entonces un acuerdo entre dos cosas: es lo único que una sola vara permite. Y hasta la corrección que el grano introduce a frecuencias altísimas es la misma para las dos.

En agosto de 2017 llegaron a la Tierra, procedentes de la misma colisión de dos estrellas de

neutrones —restos de estrellas muertas, tan apretados que una cucharada pesaría como una montaña—, una onda gravitacional, que registraron los detectores LIGO y Virgo, y un destello de luz, que registraron los telescopios espaciales Fermi e INTEGRAL. Habían viajado ciento treinta millones de años ($1,3 \times 10^8$). Llegaron separados por menos de dos segundos, lo que acota la diferencia entre las dos velocidades por debajo de *siete partes en diez mil billones* (7×10^{-16}). Para el Pleno esa coincidencia no es un dato afortunado: es lo único que podía pasar.

9. Los agujeros negros: un tope, no un abismo

De las ecuaciones de Einstein sale, resolviendo alrededor de una masa quieta, la geometría de los agujeros negros: la solución que Karl Schwarzschild encontró en 1916, con su horizonte a la distancia $r_s = 2GM/c^2$. Eso el programa lo *reproduce*: sale con el radio correcto y sin retocar nada. Lo propio empieza donde la relatividad general se queda muda: dentro.

En la relatividad, el horizonte se define por la velocidad de escape: la velocidad mínima a la que hay que lanzar algo para que se aleje y no vuelva a caer —desde la Tierra son once (11) kilómetros por segundo—. El horizonte es el lugar donde esa velocidad de escape iguala a la de la luz, de modo que ya nada puede salir. En el Pleno es algo más concreto: es la superficie donde la velocidad de escape iguala **la velocidad del sonido del medio**.

Eso choca de frente con algo que todo el mundo ha oído: que en el espacio no hay sonido, que un grito no se transmite en el vacío. Y en la física habitual es cierto. Pero sonido no quiere decir “ruido en el aire”. En física, sonido es *cualquier perturbación que viaja por un medio empujando a sus partes vecinas*: un apretón que pasa de aquí al de al lado, y de ese al siguiente, y así. Ocurre en el aire, desde luego, pero también en el agua —donde viaja cuatro veces más rápido— y en el acero, unas quince (15) veces más rápido que en el aire. Su velocidad tampoco es un capricho: la fijan la firmeza del material y su densidad, más deprisa cuanto más firme y más despacio cuanto más denso. Si en el espacio no hay sonido, no es porque el sonido esté prohibido allí: es porque no hay medio que lo lleve.

En el Pleno **siempre hay medio**, porque el medio es todo lo que hay. De modo que el Pleno tiene una velocidad del sonido en cada punto del universo, incluido ese espacio que llamamos vacío, y esa velocidad es la de la luz: en F1, la misma c que fija la firmeza del medio fija también la velocidad máxima a la que puede propagarse un cambio, y por eso las ondas del propio medio viajan exactamente a la velocidad que marca la causalidad. Eso es lo que significa que el Pleno sea relativista.

En la materia corriente las dos velocidades no se parecen en nada: el sonido en el aire va a trescientos cuarenta (340) metros por segundo y la luz a trescientos mil (300 000) kilómetros por segundo, casi un millón de veces ($8,8 \times 10^5$) más rápida. Que en el Pleno sean el mismo número es justamente lo que hace que las dos definiciones del horizonte —la de la relatividad, con la velocidad de la luz, y la del medio, con la del sonido— describan la misma superficie.

El horizonte de un agujero negro es, entonces, la superficie a partir de la cual ninguna onda del medio puede llevar un cambio hacia fuera. Dentro, el medio sigue cambiando a su ritmo, y la luz avanza a c en cada punto; lo que se pierde es la transmisión hacia el exterior, no el cambio. Y no hace falta que nada se precipite hacia un sumidero: lo que cruza el límite es la *compacidad*, cuánta masa hay encerrada para el tamaño de la región, que en el horizonte vale uno. La física estudia desde 1981, cuando William Unruh los propuso, los “agujeros negros acústicos” de laboratorio —fluidos que se aceleran hasta que el sonido ya no los puede remontar—, pero los trata como una analogía de la gravedad. Aquí no hay analogía, sino identidad: el medio es uno solo, y su velocidad del sonido es la velocidad de la luz.

En la relatividad general el colapso termina en una **singularidad**: un punto de densidad infinita

donde las ecuaciones dejan de tener sentido. Es el reconocimiento de que la teoría, en su propio dominio, deja de funcionar. Y ocurre bajo condiciones muy generales: hay teoremas que lo garantizan, los de Roger Penrose y Stephen Hawking.

En el Pleno no puede ocurrir, y la razón es de material. El medio tiene un techo de compresión —la pared superior de su pozo de energía—, y acercarlo a ese techo cuesta una energía que crece sin cota; el techo no se alcanza nunca. El colapso, entonces, no termina en un punto: termina en un **núcleo saturado**, con una densidad finita, pegada al tope del medio.

La densidad de ese núcleo es **la misma para todos los agujeros negros**, tengan la masa que tengan, porque la fija el tope del Pleno y no cuánto se le eche encima. Y ese tope se lee con dos números. La ocupación del núcleo se acerca, sin alcanzarlo, a un máximo de dos coma dieciocho veces (2,1773) la densidad de referencia del medio, la de Planck. Pero lo que pesa en la gravedad no es la ocupación entera, sino cuánto se aparta el medio de su reposo, igual que en el universo a gran escala. Descontado el reposo, lo que gravita es uno coma sesenta y cinco veces esa densidad (1,6545), y ese es el número que mediría quien pudiera pesar el núcleo. Un agujero negro de diez masas solares y otro de mil millones tienen el mismo corazón; lo que cambia es su tamaño.

Y ese interior no es un gas caliente comprimido, sino un **condensado**. Un condensado es lo que ocurre cuando un número enorme de piezas dejan de comportarse cada una por su cuenta y pasan a moverse todas al unísono, como si fueran una sola: es lo que le pasa al helio al enfriarse hasta volverse superfluido, un líquido que fluye sin rozamiento ninguno y trepa solo por las paredes del recipiente; o a una nube de átomos enfriada a unas millonésimas de grado del cero absoluto, que marcha entera al mismo paso. Lo que define un condensado no es el frío, sino que todas las piezas compartan un mismo estado; enfriar es solo la manera habitual de conseguirlo. Aquí lo consigue la compresión: es el medio entero en su configuración de saturación, al unísono y sin el desorden de un gas. Por eso el interior está frío, y el desorden del agujero negro —su entropía— no vive dentro, sino en la superficie.

El objeto entero tiene dos partes. El núcleo guarda una cuarta parte de la masa; alrededor, un halo —un campo que se extiende hacia fuera y se debilita con la distancia— guarda las otras tres cuartas partes. Y en el núcleo el medio no empuja hacia fuera, como haría un gas apretado: tira, como una goma tensa, y esa tensión es la que sostiene el objeto contra su propio peso. Todo queda acotado: la densidad, los esfuerzos y la curvatura del espacio-tiempo, que tiene un techo, el mismo para cualquier masa. Desde fuera, el objeto es el de Schwarzschild: la sombra que el programa predice para Sagitario A*, el agujero negro del centro de la Vía Láctea, mide cincuenta y tres microsegundos de arco (53,2), y el Telescopio del Horizonte de Sucesos (EHT) publicó en 2022 la medida de su anillo: $51,8 \pm 2,3$.

El horizonte crece en proporción a la masa; el núcleo, de densidad fija, crece mucho más despacio, porque a densidad fija doblar su masa es doblar su volumen, y doblar el volumen agranda el radio solo un veintiséis por ciento (26 %). Al bajar la masa, el horizonte encoge más deprisa que el núcleo, y llega un momento en que la región saturada ya no alcanza a encerrarse a sí misma. Resolver esa condición da una **masa mínima de agujero negro** —casi tres millonésimas de gramo ($2,9 \times 10^{-6}$ g), la de un grano de arena fina— por debajo de la cual ninguno es posible. El agujero negro completo, el que retiene la luz, empieza algo más arriba, en unas siete millonésimas y media de gramo ($7,6 \times 10^{-6}$ g); por debajo de esa segunda masa, el medio forma un objeto compacto que no atrapa la luz.

La masa mínima coincide con el punto en que, según la teoría de Hawking, un agujero negro terminaría de evaporarse: Hawking mostró en 1974 que los agujeros negros emiten un tenue calor y pierden masa al emitirlo, cada vez más deprisa cuanto más pequeños son. Dos razonamientos que no comparten un solo paso —uno térmico, por el calor que el agujero emite; otro geométrico, porque el núcleo deja de caber dentro de su propio límite— desembocan en la misma masa. El

programa no corrige a Hawking: llega a su mismo número por otra puerta.

Nadie ha visto el interior de un agujero negro, ni lo verá pronto: esto es una predicción. Pero cambia lo que se puede contestar cuando alguien pregunta qué hay ahí dentro. Donde la física habitual dice “ahí las ecuaciones se rompen y hace falta una teoría de gravedad cuántica que todavía no tenemos”, el Pleno dice “ahí el material llega a su tope, y esto es lo que hay”.

El núcleo saturado, y la masa mínima que se sigue

[DERIVADO]/[DLF]

Si el material tiene un tope de compresión, dentro de un agujero negro hay un núcleo de densidad finita, y de ahí se sigue una masa mínima.

La métrica de Schwarzschild sale de resolver la ecuación de campo de Einstein alrededor de una masa estática, con su radio $r_s = 2GM/c^2$. Hasta ahí, reproducción; lo propio del programa empieza en el interior.

El horizonte como superficie sónica. Los modos del medio viajan a c , y en el horizonte la velocidad de escape vale c : el horizonte es, exactamente, la superficie donde el número de Mach del Pleno vale uno —el número de Mach es la velocidad dividida por la del sonido del medio, el mismo con el que se dice que un avión vuela a Mach 1—. La gravedad acústica que la física estudia como *analogía* (el modelo de Unruh) es aquí una identidad, no un parecido: $v_{\text{escape}} = v_{\text{sonido}} = c$. No hay flujo hacia un sumidero: lo que supera la unidad es la compacidad $x_g = 2Gm(r)/(rc^2)$, con $m(r)$ la masa encerrada en el radio r . [DLF]

El núcleo. La cota dura del axioma A6 impide comprimir el medio más allá de su empaquetamiento máximo. La ocupación tiene por supremo $S_{\text{máx,geom}}^2 \rho_P \approx 2,1773 \rho_P$; lo que gravita es el exceso sobre el reposo, y su tope es

$$\rho_{\text{máx},g} = (S_{\text{máx,geom}}^2 - S_{\text{mín}}^2) \rho_P \approx 1,6545 \rho_P,$$

donde $S_{\text{mín}}$ es la compresión de reposo del medio. Es el mismo techo del que sale la pared superior del pozo, universal y no singular, y no depende de la masa del agujero negro. Ninguna configuración lo alcanza: es un supremo, y las cifras que siguen son sus valores límite. En el núcleo el esfuerzo es una tensión, $p = -\rho_g c^2$; con ella, una región a esa densidad alcanza compacidad uno en el radio

$$\ell = \sqrt{\frac{3c^2}{8\pi G \rho_{\text{máx},g}}} \approx 0,2686 \ell_P.$$

El núcleo guarda $M/4$ y un halo de campo radial, con densidad que cae como r^{-4} , guarda los $3M/4$ restantes. La curvatura queda acotada en todo punto y para toda masa: su invariante de Kretschmann —la medida estándar de cuánto se curva el espacio-tiempo— nunca supera $120/\ell^4$. Es un agujero negro *regular*, de la familia que Sean Hayward describió en 2006. [DERIVADO]

La masa mínima. Igualando el radio de la región saturada con el radio de Schwarzschild de la misma masa, $r_{\text{núcleo}}(M) = r_s(M)$, se despeja

$$M_{\text{mín}} = m_P \sqrt{\frac{3}{32\pi (S_{\text{máx,geom}}^2 - S_{\text{mín}}^2)}} \approx 0,1343 m_P \approx 2,923 \times 10^{-9} \text{ kg},$$

sin ningún parámetro libre: solo la masa de Planck —lo que pesa una celda del medio— y los dos números de la red. Desde

$$M_* = m_P \sqrt{\frac{81}{128\pi (S_{\text{máx,geom}}^2 - S_{\text{mín}}^2)}} \approx 0,3489 m_P$$

el objeto retiene la luz y tiene su horizonte en $r_+ \simeq 2GM/c^2$; por debajo de M_* es un objeto compacto sin horizonte. [DERIVADO]

La comprobación. Que la velocidad de escape y la del sonido coincidan en el horizonte no es trivial: en un fluido cualquiera son dos números distintos, y solo coinciden si el medio y la causalidad son la misma cosa. Y la masa mínima cae donde Hawking sitúa el final de la evaporación. Las dos cuentas no se contradicen: dicen lo mismo por caminos que no comparten un solo paso. Hawking mostró que un agujero negro emite un tenue calor, que emitirlo lo hace encoger, y que cuanto más encoge más

se calienta y más deprisa emite, hasta agotarse; ese final está en cierta masa. El programa llega a esa misma masa sin hablar de calor: el núcleo saturado encoge más despacio que el horizonte, y por debajo de cierta masa deja de caber dentro de él. Un argumento térmico y otro geométrico, hechos con premisas distintas, desembocan en el mismo número. Y fuera del horizonte el objeto coincide con Schwarzschild: la sombra de Sagitario A* sale 53,2 microsegundos de arco frente a los $51,8 \pm 2,3$ del EHT, a $0,6\sigma$ —seis décimas del error típico de la medida—.

Qué cambia con esto. La relatividad general predice su propio fracaso en el centro de un agujero negro: una densidad que crece sin medida y unas ecuaciones que dejan de significar nada. La respuesta habitual es que en ese punto hará falta una teoría de gravedad cuántica que todavía no existe, y ahí la física se detiene. Aquí el colapso se detiene antes, porque el material tiene con qué detenerlo: conforme se acerca a su empaquetamiento máximo, el coste de seguir comprimiéndolo crece sin cota, y ninguna cantidad de peso encima alcanza para vencerlo. Lo que queda dentro no es un punto, sino un núcleo de densidad finita, la misma en todos los agujeros negros tengan la masa que tengan, con la curvatura acotada en todo el objeto. Y ese tope no se introdujo para resolver esto: es el mismo que levanta la pared de arriba del pozo y el mismo que hace rebotar al universo. Una sola propiedad del material, pagando en tres sitios distintos. De lo que hay dentro no existe todavía medida ninguna: es predicción.

10. La otra constante: el giro de un grano

Si la firmeza del medio da la constante de la gravedad, la otra gran constante de la física —la cuántica, la de Planck, que fija el tamaño de los cuantos— sale del otro lado del campo: del giro.

El Pleno tiene grano: su pliegue más cerrado tiene un tamaño mínimo, y ese tamaño define sus celdas. Cada celda tiene su manecilla de fase, y hacer girar esa manecilla cuesta lo mismo que hacer girar la masa de la celda: tiene su misma inercia.

Y todo lo que gira con masa lleva una cantidad de giro bien definida —lo que en física se llama *momento angular*—, que crece con la masa, con lo lejos del eje que esté repartida y con la rapidez del giro; es la cantidad que se conserva cuando una patinadora recoge los brazos y gira más deprisa. La máxima velocidad a la que esa manecilla puede girar es un cambio completo en el tiempo que la luz tarda en cruzar la celda. Y el momento angular de una celda que gira así es la constante de Planck. En un átomo, el giro de un electrón alrededor del núcleo solo toma valores escalonados en múltiplos de ella, como propuso Niels Bohr en 1913. La unidad del giro cuántico es el giro de un grano.

En el marco habitual, la gravedad y la cuántica son dos teorías separadas, con dos constantes independientes, y el problema del siglo ha sido casarlas. En el Pleno son dos lecturas del mismo medio: una mide cuánto cede cuando lo aprietas, la otra cuánto gira su grano más pequeño.

Y hay una señal de que no son dos cosas. La resistencia del Pleno a doblarse es una propiedad elástica, del mismo tipo que la de una lámina de acero: nada en ella suena cuántico. Al calcularla, sin embargo, sale escrita con la constante de Planck dentro. No son dos números que se parezcan por azar: es que el mismo término de F1 admite las dos lecturas —rigidez del material, o cuanto de giro—, y las dos dan lo mismo. La elasticidad del medio ya es una propiedad cuántica.

Con eso se cierra el círculo. La gravedad entregó una ecuación que liga la densidad del medio con el tamaño de su grano; el giro entrega una segunda, distinta, entre esas mismas dos cantidades. Dos ecuaciones y dos incógnitas se resuelven, y al resolverlas el medio queda medido. Ahí el programa toma dos números del mundo —los valores medidos de las dos constantes— y a cambio obtiene la densidad del Pleno y su grano. El grano que sale es exactamente la longitud de Planck, que no se había puesto en ninguna parte.

La constante cuántica es el momento angular de una sola celda, y junto con la de la gravedad cierra un sistema de dos ecuaciones.

Una celda del medio tiene un momento de inercia respecto de su fase interna, $I_\theta = \rho_P \ell_P^5$. Es la receta de siempre, masa por radio al cuadrado: la masa de la celda es su densidad por su volumen, $\rho_P \ell_P^3$, y el radio al cuadrado aporta los dos factores que faltan hasta la quinta potencia. Y puede girar como máximo a $\omega_P = c/\ell_P$ —un cambio completo en el tiempo que la luz tarda en cruzar la celda—, porque nada en el Pleno cambia más rápido que c . Que girar la fase cueste lo que cuesta mover la masa está ya en F1: su término cinético se parte en la rama del estiramiento y la del giro, y las dos llevan delante el mismo coeficiente. Su momento angular es el producto de ambos:

$$\hbar = I_\theta \omega_P = (\rho_P \ell_P^5) \cdot \frac{c}{\ell_P} = \rho_P c \ell_P^4$$

Como en G , el coeficiente que devuelve la derivación vale uno. Y con esta segunda identidad se cierra el sistema: dos ecuaciones, G y $\hbar$, con dos incógnitas, ρ_P y ℓ_P . Ahí, y solo ahí, entra la vara de medir del programa: dos valores medidos para dos incógnitas. Resuelto el sistema, el grano y la densidad del medio quedan fijados de una vez; y el grano que sale es exactamente la longitud de Planck.

La resistencia del medio a doblarse —el tercer término de F1, una propiedad puramente elástica— resulta valer $\gamma_\kappa = \hbar c/40$: una cantidad cuántica. No son dos números que coincidan: el coeficiente de ese término es $\rho_P c^2 \ell_P^4/40$, y $\rho_P c \ell_P^4$ es $\hbar$. Y el piso de la incertidumbre sale con el factor un medio que la teoría cuántica exige, más una corrección fijada por el tamaño del grano:

$$\Delta x \cdot \Delta p_{\text{medio}} = \frac{\hbar}{2} \sqrt{1 - \frac{3}{80} \left(\frac{\ell_P}{\sigma} \right)^2}$$

donde Δx es la indeterminación de la posición y Δp_{medio} la del momento que el medio transporta —el momento es cuánto movimiento lleva algo: su masa por su velocidad, y lo que cuesta pararlo—. La σ es aquí la anchura de la región en que se confina la partícula —en este cuadro, y solo en él, esa letra no significa el error típico de una medida—.

La relación de Heisenberg empareja la posición con el momento de la propia partícula, y para ese par el piso de $\hbar/2$ **sale intacto**: el programa no lo rebaja ni lo retoca. Lo que la fórmula añade es un segundo piso, para otra magnitud: el momento que el medio transporta, que no es el mismo observable. Y ahí la corrección *resta* en vez de sumar, de modo que el producto se queda un poco por debajo. El signo importa, porque las propuestas habituales de longitud mínima —el llamado principio de incertidumbre generalizado— hacen lo contrario: añaden un exceso, y con un coeficiente ajustado a mano. Aquí el signo es el opuesto y el número $(3/80)$ sale de dos piezas que tampoco se eligen: cómo dispersa la red y la forma del propio paquete de onda. El tamaño del efecto lo dice todo sobre dónde vive: en un átomo vale una parte en 10^{51} , y solo en la escala más pequeña en que el medio se relaja se vuelve comparable al piso mismo: allí la fórmula lo baja a la mitad, $\hbar/4$.

La comprobación. Dos ecuaciones con dos incógnitas tienen siempre solución; lo que no está garantizado es su forma. Salen por rutas que no comparten un solo paso —una del término cinético, otra del giro de la fase—, y un medio con otra dinámica ligaría G y $\hbar$ con otra combinación, de modo que el grano no coincidiría con la longitud de Planck. Con F1 se cumple exactamente la relación de Planck, $\ell_P = \sqrt{\hbar G/c^3}$.

Qué cambia con esto. Max Planck introdujo su constante en 1900 para dar cuenta de la luz que emite un cuerpo caliente, y su valor se ha medido desde entonces: fija la escala de toda la física cuántica y ninguna teoría dice por qué vale lo que vale. Aquí las dos constantes salen del mismo medio y de las mismas dos escalas, cada una con el número de delante igual a uno. Lo que un siglo trató como dos teorías por reconciliar es un material leído por dos lados.

11. El mundo cuántico: las reglas que dejan de ser punto de partida

La mecánica cuántica funciona. Lleva un siglo acertando y ninguna medida la ha desmentido. Lo que no hace es explicarse: en su base hay cinco reglas que la teoría da por buenas —unas las enuncia de entrada, otras las deduce de lo que enuncia— y que en ningún caso dicen por qué la naturaleza está hecha de manera que se cumplan.

- La onda de una partícula cambia con el tiempo según la ecuación que Schrödinger escribió en 1926.
- No se puede afinar a la vez dónde está una partícula y con cuánto movimiento va: es la relación que Werner Heisenberg enunció en 1927.
- La probabilidad de encontrarla en un sitio es el cuadrado del largo de su función de onda: es la regla que Max Born propuso en 1926.
- Dos partículas nacidas del mismo suceso se ponen de acuerdo más de lo que permite cualquier explicación clásica, y se detienen en un número muy concreto: 2,83.
- El electrón se describe con una ecuación que Dirac escribió a mano en 1928, y lleva consigo un giro propio, el espín, que no cesa aunque la partícula esté quieta y que la teoría le atribuye porque los experimentos lo exigen.

En el Pleno las cinco salen de cómo está hecho el medio: de que está hecho de ondas, de que su fase se puede girar entera sin que nada cambie, y de que su red reparte sus celdas en dos clases que se alternan. Ninguna de las cinco hay que ponerla.

Lo que Schrödinger dejó escrito. En 1926, Erwin Schrödinger escribió la ecuación que dice cómo cambia con el tiempo la onda de una partícula: cómo se mueve, cómo se extiende y cómo se acomoda dentro de un átomo. Resolverla para el átomo de hidrógeno devuelve, sin añadir nada, los escalones de energía que los espectroscopistas llevaban décadas midiendo.

Con ella entendemos por qué cada elemento emite su propio juego de colores y por qué los átomos se enlazan como se enlazan; con ella se predice el espectro de una molécula antes de fabricarla; y con ella se calculan hoy los materiales de un transistor, los pigmentos de una pantalla y los candidatos de un fármaco. Toda la química computacional es resolver esa ecuación.

Lo que no dice es qué es la onda. Schrödinger nunca lo zanjó, y la lectura que acabó imponiéndose la deja como un objeto abstracto de probabilidad: algo que sirve para calcular, no algo que esté en el mundo.

Por qué esa ecuación es la del medio. Escrito el Pleno como su flecha en cada punto —un largo y un ángulo, $\Psi = S e^{i\theta}$ — y tomada la dinámica de F1 en el régimen lento, la ecuación del medio se parte en dos al separar el largo del ángulo: una de continuidad, que dice que el caudal no se pierde por el camino, y otra de movimiento para ese caudal. Esas dos juntas son, por una transformación exacta que Erwin Madelung encontró en 1926 y que David Bohm desarrolló en 1952, la ecuación de Schrödinger. No una aproximación ni un parecido: la misma ecuación.

Y con ella viene lo que Schrödinger dejó abierto. La función de onda no es un objeto abstracto: es la perturbación del propio medio, con su largo y su ángulo.

Por qué la posición y el movimiento no se afinan a la vez. Cuánto movimiento lleva una partícula —su momento: su masa por su velocidad, y lo que cuesta pararla— está escrito en el ritmo al que gira su fase de un punto al siguiente. Giro apretado, mucho momento; giro suelto, poco. Y una onda encerrada en una región pequeña no puede llevar un solo ritmo: para que se apague fuera de esa región, en vez de seguir extendiéndose, hay que superponer muchos ritmos distintos, y cuanto más estrecha es la región, más ritmos hacen falta. Confinar es mezclar

ritmos, y mezclar ritmos es perder el ritmo definido. En un medio hecho de ondas no existe la configuración que tuviera a la vez la posición estrecha y el giro afinado.

El mínimo de ese compromiso es exacto, y vale la mitad de la constante de Planck. Y esa constante no es un número traído de otra parte: es el giro de una celda del medio, escrito con su densidad, su grano y la velocidad de la luz. El piso de lo que se puede saber a la vez queda así escrito en las propiedades del propio material, y no medido contra una constante traída de otro sitio.

El medio añade además un segundo piso, y para otra magnitud: el momento que él mismo transporta, que no es el mismo observable que el de la partícula. Ahí el grano resta en vez de sumar, y el producto se queda un poco por debajo. El signo importa, porque las propuestas habituales de longitud mínima hacen lo contrario: añaden un exceso, y con un coeficiente ajustado a mano. El efecto es inobservable en un átomo, y solo asoma cuando la región se estrecha hasta el tamaño del grano.

Por qué la probabilidad es el cuadrado. La fase del Pleno tiene una simetría: girar todas las manecillas a la vez, en todas partes y en el mismo ángulo, no cambia nada de lo que ocurre. Y siempre que algo se puede cambiar entero sin que cambie nada, hay una cantidad que no se mueve; es el teorema de Emmy Noether. Lo que esa simetría conserva aquí es un caudal, y un caudal se reparte por el espacio como el agua de un río entre sus brazos.

Ese caudal está hecho de dos cosas, igual que el de un río: cuánta agua hay y a qué velocidad va. Lo segundo es el ritmo al que gira la manecilla. Lo primero es el largo de la flecha multiplicado por sí mismo, y no el largo a secas. La razón está en la simetría: para construir una cantidad que no cambie cuando todas las manecillas giran, hay que emparejar la flecha consigo misma, porque al emparejarlas los dos ángulos se restan y desaparecen. Y emparejar un largo consigo mismo es elevarlo al cuadrado.

Preguntar con qué probabilidad se halla la partícula en una región es entonces preguntar qué fracción del caudal pasa por ahí. Las fracciones suman uno porque reparten un total que se conserva, y ese total viene en unidades enteras: un cuanto lleva una unidad de caudal, y el medio no puede cambiarla. La regla de Born deja de ser un postulado: es la contabilidad de algo que se conserva.

Ese es el reparto del medio. Para que sea también el de las probabilidades que mide un aparato hace falta un paso más: que al detectar se tome la muestra sin preferir unas partes del caudal sobre otras. No hay que suponerlo. El propio ruido del medio —el temblor que introduce su regulación interna— empuja cualquier reparto desigual hacia el parejo y lo sostiene ahí, y lo hace en un tiempo de Planck. La cuenta que lo muestra es de la misma familia que la que Ludwig Boltzmann usó para los gases, y que Antony Valentini trasladó a la cuántica: una medida del desajuste que solo puede bajar. Por eso nunca se ha medido una desviación de la regla de Born: cualquiera se habría borrado mucho antes de poder verla.

Y ese total se conserva también de un instante al siguiente: lo que la física llama *unitariedad*, que la probabilidad de que ocurra algo siga sumando uno mientras el sistema evoluciona. En teorías con términos como el flexural de F1, que cobran la curvatura, esa garantía suele estar en peligro: aparecen soluciones de alta frecuencia que se comportarían como partículas de probabilidad negativa, el problema que Tsung-Dao Lee y Gian Carlo Wick estudiaron en 1969. En el Pleno no llegan a existir. Esas soluciones empezarían por encima de la frecuencia más alta que la red puede sostener, porque no hay onda más corta que el grano, de modo que no son estados del medio; y la energía de cada celda, encerrada entre sus dos paredes, tiene un suelo. La evolución del Pleno sobre su red es unitaria de forma exacta, sin necesidad de aproximaciones.

Por qué las correlaciones llegan hasta 2,83 y no más. Dos partículas nacidas del mismo

suceso no son dos objetos con un hilo entre ellos: son una sola configuración del mismo medio, leída en dos sitios. Por eso sus fases siguen emparentadas por lejos que se las lleve, y por eso medir en un lado no altera lo que el otro lado ve por su cuenta: entre los dos aparatos no viaja nada.

Lo que sí depende del ángulo entre los aparatos es el acuerdo entre las dos medidas. Ese acuerdo cae siguiendo un coseno, como la sombra de una flecha que gira, porque lo que se compara son dos fases que giran. John Bell mostró en 1964 que ese acuerdo permite distinguir un mundo en que cada partícula trae su respuesta escrita de uno en que no la trae, y en 1969 John Clauser, Michael Horne, Abner Shimony y Richard Holt lo convirtieron en una prueba de laboratorio: medir cada lado en dos posiciones distintas y combinar las cuatro comparaciones que salen de ahí en un solo número. Ahí se separan los dos mundos.

Si cada partícula trajera su respuesta escrita de antemano, cada comparación solo podría valer sí o no, y esa combinación no pasaría de 2. Con el coseno del medio no se sube más poniendo una comparación en su máximo, porque el ángulo que favorece a tres saca al cuarto de su sitio. Lo mejor que se consigue es repartir: los cuatro ángulos a mitad de camino, cada comparación valiendo siete décimas largas —la raíz de dos partida por dos—, y cuatro veces eso son $2\sqrt{2} = 2,83$. Y ni un paso más. Ese techo lo demostró Borís Tsirelson en 1980 para toda la mecánica cuántica; aquí sale de la forma del medio. Los experimentos llevan décadas midiendo esa combinación por encima de 2 y nunca por encima del techo: el de Alain Aspect, en 1982, dio 2,70, justo lo que la cuántica predecía para su montaje.

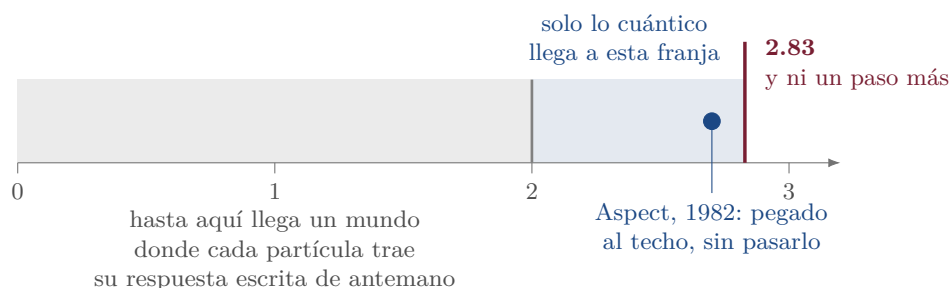


Figura 7: El techo de las correlaciones. Un mundo en que cada partícula llevara su respuesta escrita de antemano no pasaría de 2. El Pleno llega hasta $2\sqrt{2} = 2,83$ y se detiene en seco. Los experimentos que ponen a prueba la desigualdad de Bell miden desde hace décadas valores entre esos dos números, y ninguno por encima del techo.

Lo que Dirac dejó escrito. En 1928, Paul Dirac buscaba una ecuación para el electrón que valiera también a velocidades cercanas a la de la luz. La escribió a mano, exigiéndole dos cosas: que fuera compatible con la relatividad y que describiera bien un solo electrón. Lo que salió traía de propina el espín —que George Uhlenbeck y Samuel Goudsmit habían propuesto en 1925 y que hasta entonces se añadía aparte—, y una segunda solución con la energía cambiada de signo que resultó ser la antimateria, encontrada cuatro años después por Carl Anderson. Con esa ecuación describimos hoy a todos los electrones de todos los átomos, y sobre ella se levanta la electrodinámica cuántica —la de la luz y los electrones—, la teoría que entrega la predicción más precisa de toda la física.

Lo que no dice es por qué el electrón se comporta según esa ecuación y no otra. Dirac la construyó para que cumpliera sus dos exigencias, y nada en la teoría explica de dónde sale su forma ni de dónde sale el espín que trae dentro.

De dónde salen el espín y la ecuación del electrón. La pregunta que decide la forma de una ecuación de movimiento es cuánta energía cuesta moverse con cada momento. Dibujada, esa relación es una curva, y su forma dice qué clase de objeto se tiene. Para una partícula con masa

que va despacio es una parábola: doblar la velocidad cuesta cuatro veces más energía. Para algo sin masa, como la luz, es una recta. Una recta que sube igual de empinada hacia cualquier lado es, vista en las tres direcciones del espacio, un cono.

En cualquier cristal las energías permitidas no forman un continuo: forman bandas, franjas permitidas separadas por franjas prohibidas, que es lo que hace a un material conductor o aislante. En la red del Pleno hay líneas enteras donde dos bandas se tocan, y la red, por sí sola, no pasa de ahí. Lo que parte esas líneas en puntos sueltos es algo que el medio ya tiene: el giro propio está atado a la dirección en que se avanza —lo que la física del estado sólido llama acoplamiento espín-órbita, y cuya forma en la red del diamante escribieron Liang Fu, Charles Kane y Eugene Mele en 2007—, y ese lazo, el único capaz de partirlas, es el que las parte. Alrededor de cada uno de esos puntos aparece el cono. Es la misma forma que hace que en el grafeno los electrones se propaguen como si no tuvieran masa, como Philip Wallace dedujo en 1947. Y que salga redondo no es gratis: esa sola condición fija cuánto vale el lazo, y no deja otra posibilidad.

El cono trae consigo un problema. Cerca de él la energía crece como la *longitud* del momento, y una longitud es una raíz cuadrada: la de la suma de los cuadrados de las tres direcciones. Una ecuación de movimiento tiene que decir cómo cambia el campo de un instante al siguiente, paso a paso, y una raíz cuadrada de una suma no se deja partir en pasos: amarra las tres direcciones en un solo bloque.

La salida es buscar unos objetos que, multiplicados por sí mismos, den uno, y multiplicados cruzados se cancelen, porque con ellos la raíz se escribe sin raíz. Es lo que en matemáticas se llama un álgebra de Clifford, por William Clifford, que la definió en 1878, y es exactamente el lenguaje que Dirac tuvo que construir para escribir la ecuación del electrón. No uno parecido: el mismo. La ecuación de Dirac es, entonces, la raíz cuadrada de la ecuación de ondas del propio medio.

Y el espín tampoco hay que ponerlo a mano, porque el medio ya trae las dos piezas de las que está hecho. Una es la manecilla de fase, que tras una vuelta completa no vuelve igual, sino con el signo cambiado. La otra es la red, que reparte sus celdas en dos clases, A y B: cada celda pertenece a una o a la otra, y sus cuatro vecinas son siempre de la contraria. Cada pieza tiene dos valores, y dos piezas de dos valores dan cuatro combinaciones: un objeto de cuatro componentes, que es el del electrón, con su giro de valor un medio. A ese mismo objeto llegan por separado los dos caminos, el de las bandas del cristal y el de estas dos piezas. El de las bandas entrega la forma; el de las dos piezas entrega además que lo que gira es espín de verdad, que se transforma con el espacio y el tiempo y no con el cristal.

Queda la masa. El cono describe algo que no pesa, y el electrón pesa. La masa entra en cuanto algo distingue una clase de la otra: las dos ramas del cono se despegan entonces en el vértice, la recta se curva, y la curva que queda es exactamente la relación entre energía y momento de la relatividad. Lo que el medio entrega es la forma de la ecuación, el espín y esa relación. El electrón mismo no es uno de esos puntos del cristal: es una vuelta de la fase enrollada alrededor de un hueco de la red, que se desliza por ella sin soltarse; la ecuación es la que lo describe. Cuánto pesa cada partícula lo fija otra cuenta, la del tamaño de cada nudo, que esta no hace.

Las ecuaciones que el medio devuelve

[DERIVADO]

Las cinco reglas salen de tres cosas que el medio ya tiene: que está hecho de ondas, una fase que se puede girar entera sin que nada cambie, y una red cuyas celdas se reparten en dos clases.

La regla de Born. La simetría de la fase le da al medio, por el teorema de Noether, una corriente exactamente conservada:

$$j^\mu = \rho_P c^2 \ell_P^2 S^2 \partial^\mu \theta.$$

Lo que fluye es el cuadrado del largo de la flecha, S^2 , por el ritmo al que gira su ángulo, $\partial^\mu \theta$, con la

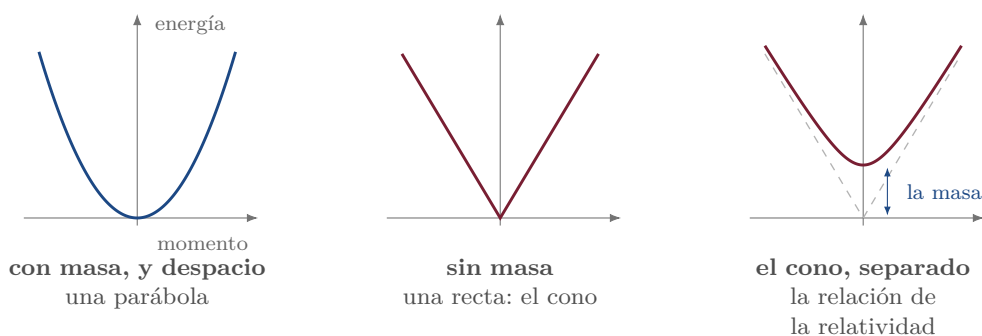


Figura 8: Cuánta energía cuesta moverse con cada momento. Para una partícula con masa que va despacio, la curva es una parábola. Para algo sin masa es una recta que sube igual hacia cualquier lado, y eso es el cono: la forma que la red del Pleno deja en los puntos donde dos bandas se tocan. Cuando algo distingue una clase de la otra, las dos ramas se despegan en el vértice; esa separación es la masa, y la curva que queda es la relación entre energía y momento de la relatividad.

densidad del medio y su grano delante para dar las unidades. El cuadrado no es una elección: es lo único que sobrevive a girar todas las fases a la vez. La probabilidad de hallar la partícula dentro de una región es la fracción de esa corriente que la región contiene:

$$P(R) = \int_R |\psi_{\text{norm}}|^2 d^3x.$$

Léase así: la probabilidad P de encontrar la partícula dentro de una región R es la suma, punto por punto de esa región, del cuadrado del largo de la flecha. Que la detección muestree ese reparto lo asegura la relajación del medio: la función H de Valentini, que mide el desajuste entre la distribución real y $|\psi|^2$, solo puede bajar, y se anula en el reparto de Born. El álgebra es exacta; la forma difusiva del ruido que la mueve es [DLF].

El techo de las correlaciones. Medir dos partículas emparentadas en los ángulos a y b da la correlación $E(a, b)$, que vale uno si las dos medidas siempre coinciden y menos uno si siempre discrepan:

$$E(a, b) = -\cos(2(a - b)).$$

El factor dos es propio de la polarización de la luz, que es la dirección en que la luz sacude al vibrar. Es la que aprovechan las gafas de sol polarizadas: un filtro así, girado media vuelta, filtra exactamente igual. El techo sale de esa forma, y es el mismo con el factor dos o sin él:

$$|S| \leq 2\sqrt{2} = 2,8284.$$

Aquí S es la combinación de cuatro correlaciones de Clauser, Horne, Shimony y Holt, no el módulo del medio, y el techo —la cota de Tsirelson— se obtiene maximizando sobre los cuatro ángulos, no comparando con el valor conocido. La física clásica no puede pasar de 2; ningún experimento ha pasado de 2,83. Y lo que cada aparato ve por separado no depende de lo que haga el otro: la no-señalización se cumple exacta, porque no hay dos sistemas comunicándose, sino un solo medio medido dos veces.

Las ecuaciones de cada régimen. Cada régimen —cada franja de condiciones en que se mire el medio, despacio o casi a la velocidad de la luz— tiene su ecuación, y las dos salen de F1 como límites. A baja energía, la separación de Madelung (sustituir $\Psi = S e^{i\theta}$ y partir la ecuación en su parte real y su parte imaginaria) da la continuidad y la ecuación de Bohm, y ese par es la de Schrödinger; sobre un condensado —un conjunto de partículas que comparten un solo estado— toma la forma de Gross-Pitaevskii, con un término de más que da cuenta de que el medio se estorba a sí mismo. En el régimen relativista sale la de Dirac.

Y la construcción de Dirac entrega cuatro cosas que no se le habían pedido. La primera es que es única: un teorema de Pauli dice que todas las maneras de construirla son la misma salvo un cambio de nombre de los ejes, de modo que no había una segunda opción que hubiera dado otra física. La segunda es qué clase de giro sale. Sale un giro frente a las rotaciones y los movimientos

del espacio-tiempo que el propio medio produce, y no solo frente a las simetrías de la red: es espín de verdad, de valor un medio, y no una etiqueta de clase que se le parezca como el pseudoespín del grafeno. La tercera es que el tiempo quede separado de las tres direcciones del espacio —entra en las cuentas con el signo cambiado—, y eso tampoco hay que imponerlo: lo exige la estabilidad del medio, porque con el tiempo y el espacio del mismo signo su energía no tendría suelo. La cuarta es que el operador de Dirac resulta ser la raíz del operador de ondas del sector de fase, y el número que lo regula es el mismo $1/40$ de la rigidez a doblarse.

Y la evolución es unitaria. Sobre la red, la energía de cada celda está acotada por abajo y sus dos paredes —la de Klauder, que impide que el medio se anule, y la de Gent, que impide que se comprima sin fin— la hacen un operador bien definido; las raíces de alta frecuencia que el término flexural añade, las del problema de Lee-Wick, empiezan en $\sqrt{20}c/\ell_P$, por encima de la frecuencia más alta de la red, $\sqrt{12}c/\ell_P$, y quedan fuera del espectro. La probabilidad total se conserva de forma exacta, no orden a orden.

La comprobación. Esta cadena entera —de la constante de Planck al mínimo de la incertidumbre, de la regla de Born al techo de las correlaciones— *no contiene un solo eslabón calibrado*: no hay en ella ningún parámetro donde absorber una discrepancia, y cualquiera de estos números podía salir mal.

Qué cambia con esto. La mecánica cuántica lleva un siglo funcionando con esas cinco reglas como punto de partida: se enuncian, o se deducen de lo que se enuncia, aciertan siempre, y nadie sabe por qué el mundo está hecho de manera que se cumplan. Aquí no se enuncian, se deducen del material, y llegan con sus números exactos —el factor un medio, el $2\sqrt{2}$ —. Lo que predice la cuántica no cambia; lo que cambia es que deja de ser una lista de reglas sin razón debajo.

12. El catálogo entero, de un solo medio

Con unas pocas ideas —un medio elástico cristalino, que se comprime y gira, firme pero capaz de fluir— el programa reconstruye el catálogo entero de cuanto existe:

- **Las partículas** —un protón, un electrón— son nudos estables del medio, y por eso vienen en cantidades enteras: un nudo está o no está, no hay medio nudo. Su masa es, a grandes rasgos, la energía que cuesta sostener ese nudo.
- **La luz** y todas las ondas electromagnéticas son ondas de la fase del medio, con sus dos polarizaciones, sin que haga falta un campo electromagnético aparte.
- **La materia oscura** es el mismo medio en otra familia de configuraciones, sin el enrollamiento —las vueltas que la fase da alrededor del nudo— que ancla a la materia ordinaria y que le da su carga eléctrica y, con ella, su trato con la luz.
- **La energía oscura** es la parte del propio medio que se mueve al unísono, en reposo en el fondo de su pozo —no el fondo mismo, que no gravita—, y es la única componente que no se diluye cuando el universo se estira.
- Y a la mayor escala de todas, **el medio no admite ser comprimido sin fin**, de modo que una contracción no termina en una catástrofe sin salida: el medio se resiste, devuelve, y da paso a una nueva expansión en la que cristaliza y forma la materia que hoy vemos.

13. Las fuerzas y la materia: la fase que circula, el medio que se anuda

El modelo estándar de las partículas describe la luz, las fuerzas nucleares y la materia con una precisión asombrosa, pero parte de lo que habría que explicar: el campo electromagnético, las cargas de cada partícula y los tres quarks del protón —las piezas de que está hecho, y que nunca se han visto sueltas— entran en él como estructura dada.

Lo que Maxwell dejó escrito. Hasta mediados del siglo XIX, la electricidad y el magnetismo eran dos asuntos distintos, con sus propias leyes, las que habían ido encontrando Coulomb, Gauss, Ampère y Faraday. En 1865 James Clerk Maxwell mostró que son uno solo: completó esas leyes con la pieza que les faltaba y las reunió en una teoría que Oliver Heaviside dejó después en las cuatro ecuaciones con que hoy se enseña. La primera dice que las cargas eléctricas son el manantial del campo eléctrico. La segunda, que no hay imanes de un solo polo: partir uno por la mitad da dos imanes, no dos mitades. La tercera, que un campo magnético que cambia empuja al eléctrico a circular: es lo que hace funcionar a cualquier generador. Y la cuarta, que una corriente, o un campo eléctrico que cambia, empuja al magnético a circular: es lo que hace girar a cualquier motor.

Juntas hacen algo más. Al combinarlas aparece una onda que viaja sola, y su velocidad no se mide: sale de la cuenta, a partir de dos constantes de laboratorio. El número que salió era el de la velocidad de la luz, y con él la conclusión de que la luz *es* una onda electromagnética. Heinrich Hertz produjo esas ondas en 1887, y esa predicción es la razón de que exista la radio. Con esas cuatro ecuaciones entendemos por qué gira un motor y por qué una antena emite; con ellas se predice cuánta corriente dará un generador y hasta dónde llegará una señal; y con ellas se diseñan la red eléctrica, la radio, el wifi, el radar, las resonancias magnéticas y todo instrumento óptico. Ciento sesenta años (160) después, ninguna medida las ha desmentido.

Lo que esas cuatro ecuaciones no dicen es de dónde sale el campo. Describen lo que el campo hace y dan por puesto el campo mismo; la energía que guarda se escribe con un coeficiente que es cuestión de unidades, no un número que la teoría entregue.

De dónde salen la luz y las ecuaciones de Maxwell. Cada enlace de la red lleva su propio giro: cuánto se tuerce la fase al pasar de un nodo al vecino. Si esos giros fueran solo la diferencia entre las manecillas de los dos extremos, al recorrer un lazo cerrado se cancelarían todos y se volvería al punto de partida sin desajuste ninguno. Pero los enlaces tienen más libertad que los nodos: por cada celda del diamante hay dos nodos y cuatro enlaces. Dos de esas cuatro maneras de torcer los enlaces salen de mover las manecillas de los nodos, y al dar la vuelta se cancelan. Las otras dos no: son torsiones que circulan de enlace en enlace alrededor de los anillos de la red, y al cerrar el lazo dejan un desajuste, una vuelta neta que no se cierra. Imagina que llevas una flecha alrededor del anillo más pequeño que ofrece el diamante —un hexágono de seis enlaces—, girándola en cada enlace lo que ese enlace tuerce: vuelves al punto de partida con la flecha girada.

Cada lazo encierra un trozo de superficie tendido en un plano, y por cada par de direcciones hay una familia de lazos con su propio desajuste. Ahí está la diferencia entre los dos campos que la física enseña por separado. El desajuste de un lazo tendido entre el tiempo y una dirección del espacio empuja a una carga aunque esté quieta: eso es el campo eléctrico. El de un lazo tendido entre dos direcciones del espacio solo actúa sobre la carga cuando se mueve: eso es el magnético. Lo que en los libros son dos campos distintos es aquí una sola cosa, mirada en dos familias de lazos del mismo cristal.

Ese desajuste, escrito como campo, *es* el campo electromagnético, y deducir de su energía las ecuaciones de movimiento, como se hace con cualquier campo, devuelve las cuatro ecuaciones de Maxwell del espacio libre de cargas: todo el electromagnetismo que viaja, y la luz. Las dos maneras de torcer los enlaces que circulan son las dos polarizaciones de la luz, las dos direcciones en que puede vibrar, y las dos viajan a c . Con las cargas —que son nudos del medio— haciendo de manantial del campo, se completan las otras. El coeficiente que acompaña a ese campo, $8/9$, dice cuánta energía guarda por cada grado de desajuste, y sale de una cuenta que se puede seguir paso a paso. La energía vive en lo que los lazos encierran; para saber cuánta guarda un nodo basta mirar los planos que abren sus enlaces. Un nodo tiene cuatro enlaces, y cuatro cosas se emparejan de seis maneras: seis parejas de enlaces, y cada pareja abre una cara, el pequeño paralelogramo que tiene por lados esos dos enlaces.

llevas la flecha alrededor de un anillo de la red y vuelves al punto de partida

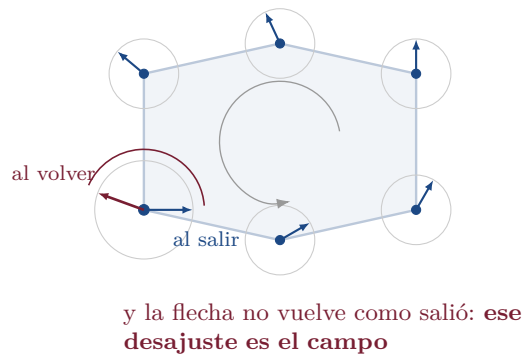


Figura 9: De dónde sale el campo electromagnético. Se lleva una flecha alrededor del anillo más pequeño de la red, un hexágono, girándola en cada enlace lo que ese enlace tuerce. Al volver al punto de partida no vuelve con el ángulo con que salió, y ese desajuste, escrito como campo, es el eléctrico y el magnético.

Lo que aporta cada cara es el área que encierra, contada con su orientación: una cara tumbada de través frente al campo aporta mucho, y una puesta de canto, nada. Las seis caras tienen todas la misma área, pero miran a seis sitios distintos, y por eso cada una aporta algo diferente. Lo notable es lo que pasa al sumarlas: se emparejan de dos en dos, y en cada pareja lo que una gana por un lado la otra lo pierde por el otro, de modo que al final la suma no depende de hacia dónde mire el campo. Sale la misma en todas las direcciones. Esa suma, con los enlaces medidos en unidades del grano, deja $8/9$. El número no se ajusta a nada: sale de contar caras y sumar áreas.

El fotón —el grano suelto de luz— sale, además, sin masa. Girar la fase entera, en todas partes a la vez, no cambia nada, y girarla muy despacio, de un extremo a otro del universo, casi no cuesta energía. Tener masa es justamente lo contrario: que ni siquiera la onda más larga salga gratis. La del fotón sí sale gratis en ese límite, y por eso no pesa; para pesar tendría que romper la simetría que lo produce. Es el teorema que Jeffrey Goldstone demostró en 1961: una simetría así deja siempre un canal sin coste mínimo de entrada —sin *gap*, en la jerga—, y ese canal es el de la luz. Los experimentos acotan la masa del fotón por debajo de 10^{-54} kilogramos.

Lo que Yang y Mills dejaron escrito. En 1954, Chen Ning Yang y Robert Mills se preguntaron qué ocurre si la simetría interna sobre la que se apoya una fuerza es de las que no conmutan, es decir, de las que dan resultados distintos según el orden en que se apliquen. La respuesta fue una familia de ecuaciones que contiene a las de Maxwell como el caso más simple, y que resultó ser la forma de las dos fuerzas nucleares: la fuerte, que mantiene unido el núcleo de cada átomo, y la débil, sin la cual el Sol no podría quemar su hidrógeno. Las fuerzas del modelo estándar de las partículas se escriben, todas, como teorías de Yang-Mills.

Lo que esas ecuaciones no dicen es cuál es la simetría. El grupo se elige porque reproduce lo que se observa, y los números que acompañan a cada fuerza se miden.

Las fuerzas nucleares, de un giro más rico. Cada celda del diamante tiene dos nodos, uno de cada clase, así que lo que el medio lleva de celda en celda no es una sola manecilla, sino una pareja; y el enlace de F1 mezcla las dos. Girar una pareja así es de una clase más rica, en la que el orden de dos rotaciones cambia el resultado. Se comprueba con un libro encima de la mesa, con la portada hacia arriba y el lomo a la izquierda. Gíralo un cuarto de vuelta sobre la mesa, como si fuera un volante, y después vuélcalo hacia ti. Ahora deshaz todo y haz las dos cosas en el orden contrario. El libro acaba mirando hacia otro lado, con los mismos dos giros. Las rotaciones del espacio son así, y en matemáticas se dice que forman un grupo no conmutativo. Con un objeto de esa clase, la misma construcción del campo añade un término, y ese término mide justamente lo que el libro acaba de mostrar: cuánto se aparta el resultado al cambiar el orden de

los dos giros. Con él, la construcción devuelve la estructura de las ecuaciones de Yang-Mills, la forma que tienen las fuerzas nucleares.

Con ellas llega una regla que la física conoce bien y no explica: qué combinaciones de quarks pueden existir sueltas. Cada quark lleva un tercio de vuelta de la fase del color —la carga de la fuerza nuclear fuerte, no la eléctrica—, y un tercio de vuelta no cierra. Al rodear a un quark solo, la fase vuelve cambiada, y ese desajuste el medio no puede deshacerlo en ningún punto: tiene que sostenerlo a lo largo de una lámina que va del quark al resto.

Cada tramo nuevo de separación alarga la lámina y es un tramo más de desajuste que pagar, de modo que tirar del quark cuesta más cuanto más lejos se lo lleva, en proporción a la distancia, y nunca se lo ve suelto. Solo existen sueltas las combinaciones en que las vueltas cierran: tres quarks, que suman una vuelta entera, y el par de un quark con un antiquark, en el que las dos se cancelan. Un quark solo, o una pareja de quarks, no cierran, y no se han visto nunca. Eso es el confinamiento del color, y aquí se sigue de la forma del medio.

Cerrar es lo que permite existir suelto, que no es lo mismo que durar. El par de quark y antiquark cierra, y por eso existe suelto: son los mesones, que los aceleradores producen a millones y que viven una fracción ínfima de segundo. El protón, además de cerrar, dura. Su número de materia —el número bariónico— es un entero que ninguna deformación del medio cambia, y sus tres remolinos están enlazados de modo que ninguno puede salir por su cuenta: por eso nadie ha visto decaer un protón.

La luz y las fuerzas: la fase que circula

[DERIVADO]

La circulación de la fase alrededor de los anillos de la red, escrita como campo, es el electromagnetismo; con un giro interno más rico, las fuerzas nucleares.

La variable del sector es la fase de enlace $a_{nm} = -a_{mn}$, una por enlace. La celda primitiva del diamante tiene dos sitios y cuatro enlaces, y el espacio de enlaces se parte en dos mitades de dimensión dos: lo que producen los sitios —el modo θ_- , con gap, y el θ_+ , longitudinal— y los *ciclos*, que son transversos. Las dos polarizaciones del fotón son esos dos ciclos. El lazo cerrado mínimo de la red es el hexágono de primeros vecinos (doce por sitio), sobre él la circulación $\oint a$ es invariante gauge exacta, y el operador de circulación da dos autovalores degenerados e isotropos, proporcionales a k^2 , en las dos direcciones transversas. Escrita como campo, su energía es:

$$E_{\text{mag}} = \frac{8}{9} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}, \quad F_{\mu\nu} = \partial_\mu a_\nu - \partial_\nu a_\mu,$$

donde a_μ es el ángulo de fase acumulado en cada dirección. Lo que dice esa pareja de fórmulas es que el campo electromagnético, $F_{\mu\nu}$, no es otra cosa que la diferencia entre lo que la fase gira al recorrer un lazo en un sentido y lo que gira al recorrerlo en el otro; y que la energía que guarda va con el cuadrado de esa diferencia, con el 8/9 delante, que sale de sumar las áreas orientadas de las seis caras que abren los pares de enlaces de un nodo. De ahí se siguen las identidades de Bianchi —las dos ecuaciones de Maxwell homogéneas, que se cumplen solas en cuanto el campo se escribe como circulación de una fase— y, por Euler-Lagrange, las otras dos en el espacio libre: $\square \mathbf{a}_\perp = 0$, con $\omega = ck$ para las dos polarizaciones. Maxwell del campo libre es [DERIVADO]; con la carga topológica de los nudos como fuente, [DLF].

Si el grupo interno no conmuta, la misma construcción añade el término $i[A_\mu, A_\nu]$, donde la A mayúscula es ese mismo ángulo acumulado cuando lo que se transporta es la pareja de fases de la celda, el doblete de los sitios A y B, y aparece la estructura de Yang-Mills. Los grupos salen como las simetrías de los objetos que el medio transporta: $SU(2) \times U(1)$ las del doblete, y $SU(3)$ las del triplete de remolinos del barión. Que ese doblete sea el del sector débil observado es la hipótesis que el programa declara con nombre propio, H-doblete.

Y la luz viaja a c sin que haya que imponerlo: la perturbación de la fase se propaga a la tasa máxima de cambio del medio. La velocidad de la luz y la velocidad límite son la misma cantidad medida de dos maneras. El canal del fotón no tiene gap: es el modo de Goldstone de la simetría de la fase.

Y con el grupo que no conmuta, la misma construcción deja además una obstrucción topológica: es

la forma en que el confinamiento del color queda escrito en la red.

La comprobación. El $8/9$ no se elige: sale de sumar circulaciones sobre las caras de la red, y si esa suma diera otro número no habría dónde reajustarlo, porque el mismo coeficiente fija la energía del campo y arrastra todo el electromagnetismo. La isotropía no se supone: se comprueba, y alargar un solo enlace la rompe. Y la ausencia de gap del fotón es exacta porque la impone la simetría; el experimento la acota por debajo de 10^{-54} kilogramos.

Qué cambia con esto. Maxwell y Yang-Mills se obtienen sin postular ningún campo electromagnético. Las teorías *gauge* son las que describen una fuerza a partir de una simetría interna: con rotaciones que conmutan, Maxwell; con rotaciones que no, Yang-Mills. Que las dos salgan de la misma construcción geométrica, y que en el caso del electromagnetismo salgan además derivados el coeficiente y las dos polarizaciones, es lo que permite tratarlas como ramas del mismo tronco y no como capítulos independientes.

Por qué la carga eléctrica viene en unidades enteras. Un nudo del medio no se deshace tirando de él, igual que un nudo hecho en un anillo de cuerda cerrado no sale sin cortar la cuerda. Y la carga eléctrica de una partícula resulta ser, sencillamente, *el número de veces que la fase se enrolla* alrededor del nudo. Una cuenta de vueltas.

Una vuelta de la fase alrededor de un nudo tiene que cerrar, porque la fase de cada punto es una sola: al rodear el nudo y volver, la manecilla ha de coincidir consigo misma, y eso solo ocurre tras un número entero de vueltas. Lo que anda suelto solo puede llevar un número entero de vueltas. Por eso la carga viene en unidades exactas y no en cualquier valor —no hay otra manera de enrollar algo—. Los quarks llevan tercios, y por eso mismo no andan sueltos: solo existen dentro de las combinaciones que cierran, donde los tercios suman entero.

La neutralidad de la materia: dos vueltas opuestas que suman cero. La materia ordinaria es eléctricamente neutra: la carga positiva del protón cancela exactamente la negativa del electrón. Los experimentos han comprobado esa cancelación hasta una parte en 10^{21} —si hubiera un desajuste de una parte en mil trillones, ya se habría visto—. En el modelo estándar de las partículas eso se acepta como dato: las cargas se asignan de modo que se cancelen, y la teoría no dice por qué valen lo que valen. Aquí sí: si la carga es un número de vueltas, el protón lleva una vuelta y el electrón esa misma vuelta en sentido contrario. Una vuelta menos una vuelta es cero, y entre dos enteros no cabe una diferencia de una parte en mil trillones.

Y hay una segunda razón, que es la que cierra el argumento: el medio no puede enrollar una vuelta sola. Deshacer una vuelta exigiría llevar la compresión hasta cero en algún punto, y el muro de abajo —el de Klauder— lo impide. Las vueltas solo aparecen y desaparecen de dos en dos, una en cada sentido, de modo que la cuenta total sigue siendo la que era: de un medio que empezó sin carga solo puede salir materia neutra.

De ahí sale también la química. Hay un teorema, el de espín y estadística, que Wolfgang Pauli demostró en 1940: todo lo que gira con espín un medio está obligado a comportarse de una manera muy concreta, y dos de esos objetos no pueden ocupar nunca el mismo estado. Eso es el principio de exclusión, que el propio Pauli había enunciado en 1925. En la física habitual el teorema descansa en tres supuestos —que las leyes no cambien con el movimiento, que ninguna influencia viaje más rápido que la luz y que la energía tenga un suelo—, y en el Pleno los tres son propiedades del medio. El electrón tiene espín un medio —es lo que entrega la construcción de Dirac del mundo cuántico—, y por eso lo cumple.

El protón y el neutrón llegan a lo mismo por otra puerta, la de la topología: la rama de las matemáticas que estudia lo que no cambia cuando algo se estira o se dobla sin llegar a cortarlo, como un nudo, que sigue siendo el mismo nudo por mucho que se retuerza la cuerda. Su número de materia es un enlace entre dos líneas del medio, y hay un teorema —el de David Finkelstein y Julio Rubinstein, de 1968, en la forma que Frank Wilczek y Anthony Zee le dieron en 1983 para

esta clase de enlaces— que obliga a todo nudo con ese número impar a comportarse igual.

Y es el principio que hace que los electrones de un átomo, en vez de amontonarse todos en el nivel más bajo, se vayan apilando en capas sucesivas. Las capas son las que dan a cada elemento su carácter químico, y su orden es exactamente el orden de la tabla periódica. Toda la química —por qué el sodio reacciona con furia y el neón con nada, por qué el carbono forma cadenas y con ellas la vida— se entiende desde ese principio. En la mecánica cuántica se añade como postulado. Aquí es una consecuencia de cómo está hecho el medio.

Y por qué los quarks son tres. El protón lleva una vuelta de materia, y esa vuelta se reparte en tres remolinos enlazados a la manera de los anillos borromeos —tres anillos entrelazados de forma que se sostienen entre sí y que, si se quita cualquiera, los otros dos se sueltan—. Que sean tres no se elige: lo fija el cristal. La simetría de cada nodo del diamante, la del tetraedro, reparte las maneras de girar en familias, y la que corresponde a este giro tiene exactamente tres miembros.

Esa vuelta de la materia se reparte en tres partes iguales, un tercio cada remolino. Pero la carga eléctrica es otra cuenta distinta sobre esos mismos tres remolinos, y ahí el reparto no tiene por qué ser parejo: lo único que se exige es que el conjunto cierre.

Como la unidad de esa escalera es el tercio, la condición de cierre se lee sobre los numeradores, y funciona como un reloj que solo tuviera tres horas: los tres números enteros tienen que sumar un múltiplo de tres. Es la regla que Blomquist, Syrwid y Babaev demostraron en 2021 para los tríos de remolinos enlazados de esta clase. Dos tercios, dos tercios y menos un tercio —los enteros 2, 2 y -1 — suman tres, cierran, y dan carga total uno: es el protón. Dos tercios, menos un tercio y menos un tercio suman cero, cierran también, y dan carga total cero: es el neutrón.

Son exactamente las cargas que los físicos miden en los quarks, y también la asimetría que observan, dos iguales y uno distinto, que aquí sale de que los tres remolinos no son intercambiables.

Y el nudo tiene medidas, no solo forma. El protón y la partícula Δ —una resonancia que los aceleradores producen y que se deshace enseguida— son el mismo trío en dos estados de giro, y la diferencia de sus masas es la energía de hacerlo girar más deprisa. Con el tamaño medido del protón, la cuenta da doscientos sesenta y cuatro megaelectronvoltios (264) frente a los doscientos noventa y tres medidos (293): el noventa por ciento (90 %), sin ajustar nada.

La materia: nudos, carga entera y tres quarks

[DERIVADO]/[DLF]

Contar las vueltas y los enlaces de los nudos del medio da la carga entera, la química y los tres quarks.

El protón y el neutrón son solitones de la clase M: configuraciones del doblete de la celda, $\Phi = (\varphi_A, \varphi_B)$, cuyo número bariónico B es el *invariante de Hopf* de ese doblete —el enlazamiento de dos líneas del campo, como establece el teorema de Gudnason y Nitta—. Es un entero que ninguna deformación cambia, y existe porque el medio no se anula en ningún punto: sin esa condición, el invariante no estaría definido. No es un skyrmión de $SU(2)$, el objeto que Tony Skyrme propuso en 1961: el medio no admite ese blanco, y lo que se enlaza son las dos componentes del doblete. Lo que impide que el nudo colapse —el teorema de Derrick diría que colapsa— es el término cuártico de Faddeev, que resulta ser el mismo término de Maxwell con su 8/9: el solitón de materia y el fotón se apoyan en el mismo término del medio.

La carga eléctrica es el número de vueltas. La carga es el *winding* —las vueltas enteras de la fase alrededor del defecto—: la unicidad de la fase en cada punto obliga a $\oint d\theta \in 2\pi\mathbb{Z}$, y un entero no admite valores intermedios. El electrón es un defecto de winding -1 , anclado en un hueco de la red; el protón suma $+1$ sobre sus tres remolinos. De ahí salen dos exactitudes que la física estándar da por buenas sin explicarlas: que toda carga libre sea un múltiplo exacto de la del electrón, y que la materia sea neutra, confirmada por el experimento hasta una parte en 10^{21} . El winding total se conserva por la topología de la fase, y la pared de Klauder, que mantiene $S > 0$, impide deshacer una vuelta.

De ahí sale también la química. Los dos fermiones de la materia lo son por dos vías. El electrón, por la construcción covariante de Dirac: espinor de Lorentz de espín un medio y teorema de espín-estadística, con sus tres premisas derivadas del medio. Los bariones, porque su invariante de Hopf es impar: el criterio de Finkelstein-Rubinstein, en la forma de Wilczek y Zee, da la fase $(-1)^B$ al girarlos una vuelta completa. Ahí está el principio de exclusión de Pauli, y con él la tabla periódica.

Y los tres quarks. El número tres es la dimensión del triplete del grupo de simetría del nodo del diamante (el grupo binario tetraédrico, $2T$). La vuelta $B = 1$ del protón se lee como tres vórtices enlazados de forma borromea, cada uno con un tercio del número bariónico, y la congruencia de Blomquist, Syrwid y Babaev, $\sum_j q_j \equiv 0 \pmod{3}$ sobre los numeradores, devuelve las cargas observadas, en tercios: $(2, 2, -1)$ para el protón, que suman uno, y $(2, -1, -1)$ para el neutrón, que suman cero. [DLF]

Y el trío gira. El nucleón y la Δ son los estados $J = \frac{1}{2}$ y $J = \frac{3}{2}$ del mismo rotor, y la separación de sus masas es

$$\Delta m = \frac{9(\hbar c)^2}{2m_p c^2 R_p^2} \approx 264 \text{ MeV},$$

con el radio medido del protón, $R_p = 0,8408 \text{ fm}$, frente a 293 MeV observados: el 90 %. La Δ sale en 1202 MeV frente a 1232 . La fórmula es [DERIVADO]; la comparación, [DLF].

Qué cambia con esto. Que la materia venga en unidades enteras, que la carga esté cuantizada, que los quarks sean tres y no dos ni cinco, y que exista el principio de exclusión, son hechos que el modelo estándar describe con precisión pero no explica: los toma como estructura dada. Aquí son consecuencias de que el medio se anude, y el mismo rotor, con el tamaño medido del protón, da la separación entre el nucleón y la Δ al noventa por ciento (90 %).

Todo esto, con *una sola sustancia*. Está el Pleno, y sus distintas maneras de comprimirse, girar, ondular y fluir.

14. El sector oscuro: de qué está hecho el 95 % del universo

De cada cien unidades de contenido del universo, noventa y cinco (95) son de dos clases que nadie ha identificado: una masa invisible que mantiene unidas a las galaxias, y algo a lo que la física habitual atribuye la aceleración de la expansión y que escribe en sus ecuaciones sin saber qué es. En el Pleno las dos son el mismo medio en dos estados distintos.

La materia oscura, y por qué es oscura. Esa masa invisible que mantiene unidas a las galaxias, y que decenas de experimentos llevan décadas buscando sin haberla visto nunca, es otra familia de configuraciones del mismo medio. Las partículas ordinarias son nudos cuya fase se enrolla alrededor de ellos, y de ese enrollamiento nacen la carga eléctrica y la luz. La materia oscura es un grumo más liso: pesa, porque deforma el medio, y su fase gira, pero gira toda a la vez, al compás, sin enrollarse alrededor del grumo. Le falta justamente el enrollamiento, que es la circulación que produce el electromagnetismo.

Por eso es oscura: no es que “apenas interactúe” por casualidad, es que no tiene el mecanismo que genera luz, de modo que no puede brillar ni reflejar nada, ni deja en un detector otra huella que su peso. No es una partícula exótica de otra naturaleza: es el mismo Pleno, organizado sin ese enrollamiento. Materia ordinaria y oscura son primas hermanas: una anudada y luminosa, la otra lisa y muda.

Y la proporción entre las dos se puede calcular. La materia oscura, sin nudo que la sujete a la red, se redondea libremente, y su frontera es una esfera. La ordinaria, anudada, queda clavada a los cuatro enlaces de su celda, y su frontera es el tetraedro que esos enlaces forman, inscrito en esa misma esfera. Cuánta se forma de cada clase va con el área de su frontera.

Y que el peso vaya con el área de la frontera, y no con el volumen, tiene su razón. Dentro del grumo el medio está apretado contra su pared de arriba, la de Gent, y ahí ya casi no puede

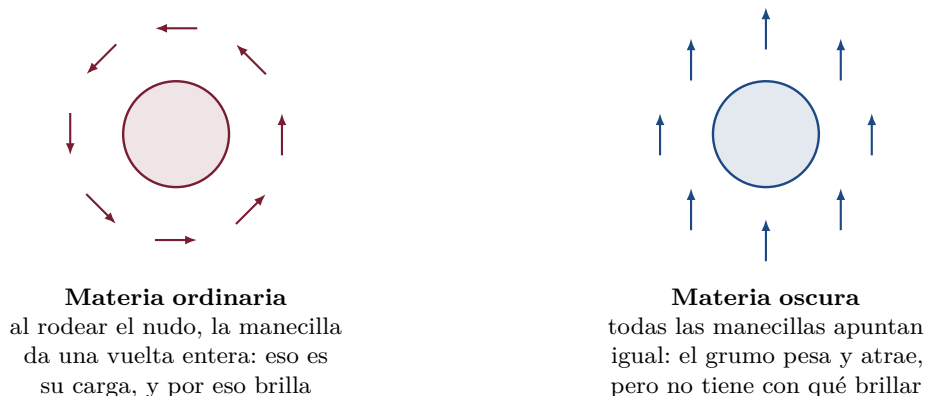
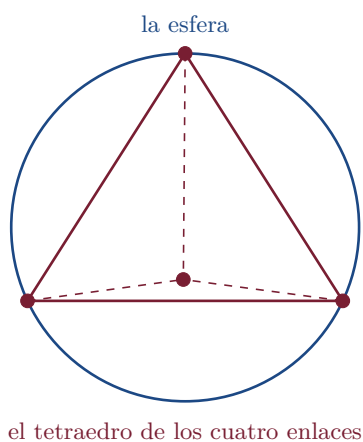


Figura 10: Las dos maneras de agruparse que el medio admite. **A la izquierda**, la materia ordinaria: al rodear el nudo, la manecilla de la fase da una vuelta completa, y esa cuenta de vueltas es su carga eléctrica. **A la derecha**, la materia oscura: las manecillas giran todas a la vez, sin enrollarse alrededor de nada. Pesa igual; lo que no tiene es con qué brillar.

temblar: la pared ahoga las fluctuaciones del interior. Lo único que le queda libre es la superficie. Contar de cuántas maneras puede vibrar el grumo es entonces contar los modos de su frontera, y ese número va con el área.

La proporción de oscura a ordinaria es, por tanto, el área de la esfera dividida por la del tetraedro. Y a ese cociente hay que añadirle un factor dos que pone el giro de la materia ordinaria: al electrón hay que darle dos vueltas completas para devolverlo a su estado de partida, de modo que leído como rotación observable cuenta la mitad. La razón resulta ser un número puro, $\sqrt{3}\pi$, o sea 5,44, y lo que miden los satélites es $5,375 \pm 0,077$: cae dentro del margen de error, sin un solo parámetro ajustado. En el modelo cosmológico estándar, cuánta materia oscura hay por cada gramo de materia ordinaria es un número que se mide y se acepta sin que nadie sepa por qué vale lo que vale.



La oscura no está anclada a nada, y su frontera toma la forma más barata de todas: la esfera.

La ordinaria está anudada a los cuatro enlaces, y su frontera tiene que apoyarse en ellos.

Figura 11: De dónde sale la proporción entre las dos materias. La oscura, sin nudo que la ancle, se redondea, y su frontera es la esfera; la ordinaria queda prendida a los cuatro enlaces de su celda, y su frontera es el tetraedro que esos enlaces forman, inscrito en esa misma esfera. El área de la una dividida por la de la otra, con el factor dos que pone el giro, es $\sqrt{3}\pi$.

La proporción del sector oscuro: un cociente de áreas

[DERIVADO]

La razón entre las dos clases de materia es el cociente de dos áreas.

Las dos clases de materia se distinguen en una sola cosa: si el medio está prendido a los enlaces del

cristal o no lo está. La anudada tiene la fase enrollada, y su número de vueltas —un enlazamiento, lo que en matemáticas se llama invariante de Hopf, por Heinz Hopf— lo conserva la topología; la lisa son las *Q-balls* que describió Sidney Coleman en 1985, que no se enrollan y a las que sostiene la carga conservada de su giro. Y esa diferencia decide qué forma toma la frontera de cada una.

La materia oscura no lleva enrollamiento que la ancle a la red. Su frontera queda libre, y una frontera libre adopta la forma más barata que existe para encerrar un volumen: la esfera. Es el teorema isoperimétrico, y es la razón por la que una pompa de jabón sale redonda en vez de cuadrada. La materia ordinaria sí se anuda, y el enrollamiento la prende a los cuatro enlaces de cada nodo, de modo que su frontera tiene que apoyarse en ellos: la forma que cuatro puntos así dictan es el *tetraedro de coordinación*, inscrito en esa misma esfera. Ninguna de las dos formas se elige; son las dos únicas que el medio ofrece.

Lo que pesa cada clase va con el área de su frontera, de modo que la proporción entre las dos es la proporción entre esas dos áreas. Y falta un factor 2, que tampoco se elige. La materia ordinaria es fermiónica, y un objeto fermiónico vive en un espacio de giros que da dos vueltas por cada vuelta del mundo observable: es lo que separa al electrón, que necesita dos vueltas completas para volver a su estado inicial, de una peonza, que vuelve con una. Al contar el peso de la materia ordinaria en lo que un observador puede ver, ese doble recubrimiento se proyecta y su peso queda reducido a la mitad exacta —el cociente exacto lo da el teorema de Peter y Weyl—. La materia oscura no sufre esa reducción, porque no es fermiónica.

De ahí sale el dos, y sale por el sitio que menos se espera: la mitad está en el *denominador* del cociente, con la materia ordinaria, y dividir por un medio es multiplicar por dos. Por eso la proporción se dobla:

$$\frac{\Omega_{MO}}{\Omega_b} = \frac{2A_{\text{esfera}}}{A_{\text{tetraedro}}} = \frac{2(4\pi R^2)}{(8\sqrt{3}/3)R^2} = \sqrt{3}\pi \approx 5,4414$$

donde cada Ω es la fracción del contenido del universo que le toca a esa clase: Ω_{MO} a la oscura y Ω_b a la ordinaria. La medición del satélite Planck (2018) da $5,375 \pm 0,077$. Es un acuerdo a **0,86 σ** con *cero* parámetros libres. La letra σ (se lee “sigma”) es la unidad en que se mide una discrepancia: una sigma es el margen de error típico de esa medida, de modo que 0,86 significa que la diferencia entre lo calculado y lo medido es menor que el propio error del instrumento.

La comprobación. La comparación se hace contra las densidades leídas directamente de las alturas de los picos del fondo cósmico de microondas —la luz más antigua del universo, cuyas ondulaciones dicen cuánta materia de cada clase había—, y no contra números que ya son la salida de un ajuste previo.

Y comparar dos densidades tiene una ventaja sobre medir una sola. Para convertir lo que el cielo muestra en una densidad hay que saber a qué ritmo se expande el universo, y ese ritmo no se conoce con total exactitud: cada una de las dos densidades arrastra, por eso, un margen de duda. Pero es el mismo margen en las dos, porque el ritmo entra en ellas de la misma manera. Al dividir una por la otra, esa duda compartida desaparece del resultado, y el cociente que queda es más firme que cualquiera de los dos números por separado.

Qué cambia con esto. Cuánta materia oscura hay por cada unidad de materia ordinaria es hoy un número que se mide y se anota, y ninguna teoría dice por qué vale eso. Y las dos formas no se escogieron para que la cuenta cuadrara: son las únicas dos que el medio ofrece, y el tetraedro es el mismo de los cuatro enlaces del que ya salieron el suelo y el techo. La proporción del cosmos está escrita en la forma del cristal, no hay perilla ninguna que girar, y aun así el número cae dentro del margen de lo medido.

La materia, la radiación y el fondo son tres estados de la misma sustancia, y cada uno tiene su **ecuación de estado**, que la física resume en un número llamado *w*: la presión de ese estado dividida por su propia densidad de energía. Es un número sin unidades, porque mide cada estado contra sí mismo. Y de ese cociente se sigue, por pura conservación de la energía, qué le pasa a su densidad cuando el universo se estira. La cuenta es la de un pistón. Al crecer el volumen, lo que hay dentro se reparte en más sitio, y eso ya diluye; si además empuja, gasta energía en empujar una pared que se aleja. La presión es entonces lo que dice cuánto se pierde de más: nada si no

empuja, algo si empuja, y si en vez de empujar tira, la energía no se pierde, se repone.

La materia son grumos anudados, y un grumo no empuja: su presión es nula y su w vale cero, de modo que al estirarse el medio los grumos solo quedan más separados y su densidad cae con el volumen. Vale igual para la ordinaria y para la oscura.

La radiación son ondas, y una onda sí empuja, con un tercio de su densidad. Empuja en la dirección en que viaja, y las ondas viajan en las tres direcciones por igual, de modo que sobre una pared cualquiera solo se apoya una de cada tres: su w vale un tercio. Y su densidad cae más deprisa, porque además de separarse cada onda se alarga, y al alargarse pierde energía: la energía de una onda va con su frecuencia, y estirarse es bajar de frecuencia.

La energía oscura —la física habitual le atribuye la aceleración de la expansión y la añade a sus ecuaciones sin saber qué es— es la parte del propio Pleno que se mueve al unísono: el condensado de su fase, en reposo en el fondo del pozo. Aun donde no hay partículas ni ondas, esa parte está presente en todas partes, como el agua quieta de un océano sobre la que se levantan todas las olas. Y lo que se estira cuando el universo se expande no es un recipiente que contenga al Pleno: es el Pleno mismo distendiéndose.

Hay que separarla del suelo mismo. El fondo del pozo tiene su propia energía, del orden de la densidad del medio, y esa energía es el **telón**: el cero desde el que se cuenta todo lo demás, el fondo permanente que está detrás de la escena y no forma parte de ella. El telón no gravita. Si gravitara, la energía oscura sería ciento veintitrés (123) órdenes de magnitud mayor de lo que se observa, y ése es, en su forma habitual, el problema de la constante cosmológica. Lo que gravita es lo que el medio tiene hoy por encima de ese suelo, y la energía oscura es la parte de ese exceso que sigue al unísono.

Está, entonces, en reposo en el fondo del pozo, y ahí la cuenta del pistón cambia de signo. La presión es lo que un medio entrega cuando se le deja ocupar un poco más de sitio: un gas entrega energía al expandirse, y por eso empuja. El medio en reposo hace lo contrario. Abrir volumen nuevo en él no entrega nada: cuesta, y cuesta en proporción exacta al volumen abierto, porque cada porción nueva llega con la misma densidad de energía oscura ya puesta. Una presión que es un coste en vez de una entrega vale esa misma densidad con el signo cambiado, de modo que su w , que divide la presión por la densidad, vale -1 .

Puesto en la cuenta del pistón, ese valor dice que la densidad de energía oscura se queda como está por mucho que crezca el volumen: estirar el medio no la cambia. El Pleno lo entrega exacto, y sin ajustar nada. Y ese coste es el mismo se mire desde donde se mire: un medio en reposo no tiene ninguna dirección ni ninguna velocidad que lo distinga, de modo que no hay observador para el que la cuenta salga distinta.

De ahí se sigue lo que hoy se observa. Como la materia se rarifica y la energía oscura no, la fracción que la energía oscura representa en el balance del universo va creciendo. **Crece su peso, no su densidad**: es lo demás lo que mengua. Cuando el universo medía la mitad que hoy, la energía oscura pesaba algo más de una quinta parte del total (0,2152); cuando medía un tercio, menos de una treceava parte (0,0751); hoy pesa casi siete décimas (0,6869). Y lo que crece es ese peso, no la parte del medio que se mueve al unísono: esa fracción no sube, se relaja, y ha bajado desde que quedó fijada (0,7185) hasta hoy (0,6869).

Donde el Pleno se separa de la constante cosmológica —la energía fija del espacio que Einstein introdujo en 1917 y que el modelo cosmológico estándar recupera: al no diluirse, acelera la expansión para siempre— es en el destino. En el Pleno lo que mueve el fondo no es la energía, sino la pendiente del pozo, y en el fondo del pozo esa pendiente es nula: una energía que no ejerce fuerza no produce movimiento. La energía oscura no se diluye mientras el medio termina de relajarse, y aun así el ritmo de expansión tiende a cero: esa densidad se agota cuando la

relajación acaba, y el telón, que sigue ahí, no mueve nada. El suelo se queda donde está; lo que desaparece es la cuesta que quedaba por bajar.

Las densidades, una a una, y un fondo que no se diluye

[DERIVADO]/[CALIBRADO]

Las cuatro densidades salen de la proporción entre las dos materias y de una sola lectura posicional: la hora que marca hoy el reloj cósmico.

El cociente de áreas fija la *proporción*, no las cifras. Los valores individuales heredan además una *lectura posicional*: dónde se encuentra hoy el medio en su recorrido, igual que la hora que marca un reloj —la maquinaria es teoría; la hora, se lee—. En este sector esa lectura es la fracción de condensado f_c , la parte del medio que hoy se mueve al unísono. Esa parte es la energía oscura, y el resto, atrapado en nudos y grumos, es la materia: por eso $\Omega_{EO} = f_c$ y $\Omega_m = 1 - f_c$, y la materia se reparte a su vez entre oscura y ordinaria en la proporción $\sqrt{3}\pi$. Es una sola lectura para todo el sector: se toma una vez, y de ella salen las cuatro densidades.

Y ni siquiera ese número viene entero del mundo, porque una parte de él se calcula. Se puede partir en dos factores que se multiplican: uno que sale de la geometría del cristal y está derivado, y otro que es la lectura propiamente dicha. Solo el segundo viene del mundo:

$$f_c = \underbrace{0,2401}_{\text{geometría}} \times \underbrace{2,8604}_{\text{estado}} = 0,6869,$$

donde el primer factor es cuánto ocupa el medio en reposo de su capacidad máxima, el cuadrado de su suelo dividido por el de su techo: pura geometría. El techo sale de comparar el cristal de diamante con el empaquetamiento de esferas más apretado que existe, el de la conjetura de Kepler, que Thomas Hales demostró. El segundo compara con ese suelo el nivel de ocupación que el condensado mantiene hoy, y es lo que se toma del mundo. Con ello cae detrás todo el bloque de densidades:

Cantidad	PIU- Ψ	Planck 2018	Acuerdo
$\Omega_{EO} = f_c$	0,6869	$0,6847 \pm 0,0073$	$0,30\sigma$
$\Omega_m = 1 - f_c$	0,3131	$0,3153 \pm 0,0073$	la misma
Ω_{MO} (oscura)	0,2645	$0,265 \pm 0,007$	$0,07\sigma$
Ω_b (ordinaria)	0,0486	$0,0493 \pm 0,0006$	$1,2\sigma$

Las dos primeras filas son una sola comparación, no dos aciertos: el modelo con que se leen los datos supone un universo plano, de modo que las dos fracciones suman uno, y acertar una es acertar la otra.

La energía oscura, además, es el condensado de fase en reposo en el fondo del pozo, y de ahí que su presión sea la misma en todas las direcciones y para cualquier observador —en la escritura de la relatividad, su tensor de energía es proporcional a la métrica—: su w vale exactamente -1 , sin ninguna sobra.

La comprobación. Y si a esa cuenta le sobrara algo, solo podría sobrarle por un lado: el término cinético no puede ser negativo, y eso obliga a $w + 1 \geq 0$. Apartarse de -1 exige que el medio, además de estar en el suelo, se esté moviendo un poco, y moverse añade siempre energía y una presión del signo corriente. Eso solo puede subir w , nunca bajarlo. La teoría veta así la región “fantasma” en que w sería menor que -1 . Y la señal de energía oscura variable que los análisis de DESI creen ver apunta al lado contrario, el que un medio en reposo aparenta cuando se lo mira con un molde hecho para cazar cambios —la parametrización de Chevallier, Polarski y Linder—.

Qué cambia con esto. El sector oscuro es el noventa y cinco por ciento (95 %) del contenido del universo, y en el modelo cosmológico estándar esas densidades salen de parámetros libres que se ajustan a los datos, sin razón debajo. Aquí las cuatro dejan de ser parámetros y pasan a ser consecuencias. En este sector, lo único que se toma del mundo es una lectura —en qué punto de su recorrido está hoy el medio—, y de esa lectura una parte tampoco se toma: se deriva de la geometría del cristal. Las cuatro caen a menos de una sigma y cuarto ($1,2\sigma$) de lo que mide el satélite Planck, y la energía oscura y la materia total, que son una sola comparación, a tres décimas de sigma ($0,30\sigma$).

15. El calor del propio medio

¿Qué es la temperatura, si todo lo que existe es una sola sustancia? En la física habitual, el calor se trata con su propio aparato —la termodinámica y la mecánica estadística—, con sus propias reglas sobre cómo se reparten la energía muchas partículas. Aquí no cabe ese préstamo: si el Pleno es lo único que hay, el calor tiene que ser algo que le pasa al Pleno, y sus leyes tienen que salir de contarlos.

Y salen. La temperatura, en esta lectura, es el desorden del giro: cuando las orientaciones de todas las celdas están acompasadas, el medio está frío —es el condensado, que es la energía oscura—; cuando cada celda gira por su cuenta, sin acuerdo con sus vecinas, el medio está caliente. Temperatura y desacuerdo entre los giros son, aquí, una sola cosa.

Y como el medio tiene un techo de compresión, también tiene una temperatura máxima: el punto donde el gas de vibraciones —el calor mismo, que aquí son ondas del medio— alcanza el techo de densidad del medio, el mismo de su pared de arriba, y ya no cabe más calor. Calentar es llenar el medio de vibraciones, y las vibraciones pesan: cuantas más hay, más apretado queda el medio que las lleva. Cuando el calor se acerca a ese techo ya no queda dónde meter la vibración siguiente, y ahí se acaba la escala de temperaturas. Y ese punto se calcula. Las vibraciones que el medio admite son las de su cristal, cada familia en su propia banda de frecuencias, y contándolas todas el techo cae en algo más de dos veces y un tercio la temperatura de Planck ($2,3545 T_P$), la escala de temperatura que se forma con las mismas medidas del grano y que lleva el nombre de Max Planck.

Imagina que repartes monedas idénticas entre varias alcancías. Como las monedas son iguales, dos repartos no se distinguen por cuál moneda fue a dónde, sino solo por cuántas monedas quedaron en cada alcancía; y hay repartos que se pueden conseguir de muchísimas maneras y repartos que casi no se pueden conseguir de ninguna. El equilibrio es el reparto que más maneras tiene de darse.

Las alcancías, en el Pleno, son sus modos. Un modo es una de las maneras independientes que tiene el medio de vibrar: una ondulación con su longitud de onda y su frecuencia propias, que puede llevar más o menos vibración sin estorbar a las demás. Es lo de una cuerda de guitarra, donde caben la nota fundamental y sus armónicos y nada más. Las vibraciones del medio se reparten entre sus modos exactamente así, y basta hacer esa cuenta, sin traer de fuera ninguna ley del calor, para que salga la estadística de Bose-Einstein, la que describe cómo se reparten la energía los fotones y toda la familia de los bosones, las partículas que pueden amontonarse sin límite en un mismo estado.

Esa regla la escribieron Satyendra Nath Bose y Albert Einstein en 1924, y dice cuántas partículas idénticas cabe esperar en cada estado cuando ninguna estorba a las otras. Con ella se predice el color exacto de la luz que emite un cuerpo caliente —es la ley que Max Planck halló en 1900, y aquí sale del mismo conteo— y el espectro del fondo cósmico de microondas, y con ella se diseñan el láser y las trampas de átomos ultrafríos. En la física habitual se deduce suponiendo que las partículas son indistinguibles y que todas las configuraciones son igual de probables: el conteo se pone, no se deriva.

E integrando esa ocupación sobre los modos sale la ley de Stefan-Boltzmann, la que dice cuánto irradia un cuerpo caliente —el doble de caliente, dieciséis (16) veces más brillante—, con su coeficiente exacto.

La midió Josef Stefan en 1879 y la dedujo Ludwig Boltzmann en 1884. Es la que permite tomarle la temperatura a algo sin tocarlo: el termómetro de oído, la cámara infrarroja, la temperatura de una estrella a partir de su brillo, y el balance de energía con que se calcula el clima de la Tierra. Su coeficiente, sin embargo, lleva dentro la constante de Planck y la de Boltzmann, que en la

física de hoy son números medidos: la ley se deduce, pero el número que la encabeza se hereda. La termodinámica del Pleno no se toma prestada de otra teoría: se deduce del conteo de sus propias configuraciones.

Bose-Einstein y Stefan-Boltzmann, por conteo

[DERIVADO]

Las dos estadísticas del mundo y la ley del brillo salen de contar configuraciones del propio medio.

Se expande F1 hasta segundo orden alrededor del reposo, y cada modo de la fase queda como un oscilador armónico, un resorte ideal que vibra con su frecuencia ω_k fijada por el medio. Se cuenta luego de cuántas maneras pueden repartirse vibraciones *indistinguibles* entre esos osciladores. Es combinatoria pura, la de las alcancías, y da la *entropía* por modo —la entropía es, sencillamente, de cuántas maneras distintas se puede conseguir un mismo reparto: cuantas más, mayor—:

$$\sigma(n)/k_B = (1+n) \ln(1+n) - n \ln n.$$

Lo que esa expresión dice es de cuántas maneras se puede tener n vibraciones en un modo, contadas en escala logarítmica —el $\ln$ es el logaritmo, la manera de manejar cuentas que se disparan, y k_B es la constante de Boltzmann, el número que traduce temperatura a energía—. Y se pide equilibrio usando la definición nativa de temperatura, $1/T = dS/dE$, donde S es aquí la entropía —no el módulo del medio—: el inverso de la temperatura dice cuánto crece esa cuenta de maneras al añadir un poco de energía. Eso fuerza la ocupación media:

$$\langle n \rangle = \frac{1}{e^x - 1}, \quad x = \frac{\hbar\omega}{k_B T}$$

que es la estadística de Bose-Einstein. Y que no haya tope de ocupación no hay que suponerlo: se ve en qué clase de cosa es el modo de la fase. Es una ondulación del ángulo, y a una ondulación siempre se le puede sumar otra encima en el mismo modo, como se suman dos olas en el mismo sitio del mar. Un nudo, en cambio, está o no está: donde hay uno no cabe otro. De ahí que las dos familias cuenten distinto —el modo de la fase es un bosón de Goldstone, con su momento angular en múltiplos enteros de $\hbar$ —. El mismo conteo, hecho sobre configuraciones que *sí* tienen tope de ocupación, entrega la otra estadística de la física, la de **Fermi-Dirac** —Enrico Fermi y Paul Dirac, 1926—, con la que se describen los electrones de los metales y los semiconductores, y la que sostiene el límite de Chandrasekhar. Y el tope tampoco se supone. Para el electrón lo trae su propia ecuación, la de Dirac, que ya salió del medio: de ella vienen a la vez sus dos sentidos de giro y que donde hay uno no quepa otro. Para los nudos de la materia lo trae el criterio de Finkelstein y Rubinstein —en la forma que Wilczek y Zee le dieron para los nudos enlazados—, el mismo del principio de exclusión, aplicado a los que llevan un número impar de vueltas.

Integrando esa ocupación sobre todos los modos se obtiene la entropía por unidad de volumen:

$$\frac{s}{k_B} = \frac{g_*}{2\pi^2} \int_0^\infty k^2 \sigma_k dk = \frac{2\pi^2}{45} g_* \left(\frac{k_B T}{\hbar c} \right)^3,$$

El signo $\int$ es una suma: suma el aporte de todos los modos, uno tras otro. Y el g_* cuenta las variantes independientes que tiene cada onda —dos para la luz, una por cada polarización—. De esa entropía sale la densidad de energía: en un gas de radiación las dos van ligadas, y la energía es tres cuartos del producto de la entropía por la temperatura. Como la entropía crece con el cubo de la temperatura, la energía crece con su cuarta potencia. Eso es la ley de Stefan-Boltzmann, con su coeficiente y sin ajuste. En la comprobación numérica, la ocupación se obtiene resolviendo la ecuación por bisección, *sin* usar la fórmula de Bose-Einstein deducida, y con ella se integra a ciegas. El resultado, 0,877298168985721 para dos polarizaciones, es el coeficiente de la entropía de la fórmula de arriba, $2\pi^2 g_*/45$ con $g_* = 2$, y coincide con la forma cerrada en las quince (15) cifras de la doble precisión.

La comprobación. Si la combinatoria hubiera devuelto otra ocupación media, no habría dónde corregirla. Y un error en el conteo habría separado los dos números en la primera cifra, no en la decimosexta.

Qué cambia con esto. La estadística de los fotones y la ley que dice cuánto brilla una estrella —ésta con su coeficiente exacto— salen de contar configuraciones de la misma sustancia de la que salen la gravedad y la carga. Una rama entera de la física que se creía independiente resulta ser una consecuencia del mismo Lagrangiano.

Y de ese mismo recuento sale la otra estadística del mundo. Los fotones se amontonan sin límite en un mismo estado; los electrones, no: donde ya hay uno no cabe otro. Esa diferencia, que parece un capricho de la naturaleza, resulta ser aquí una sola cosa —si la configuración está anudada o no está anudada—, y la de los electrones se llama estadística de Fermi-Dirac. Es la que decide, dentro de una estrella, cuánto peso pueden aguantar sus electrones.

De la misma cuenta sale una *ventana* para la fricción de los fluidos. Todo fluido tiene fricción interna: es lo que en la cocina se llama espesor, mucha en la miel y poca en el agua. La física conjetura, sin haberlo demostrado, que ningún fluido puede bajar de cierto mínimo. Ese mínimo no es el de la fricción a secas, porque la miel tiene mucha y el agua poca y ninguna de las dos anda cerca de límite alguno: lo acotado es la fricción comparada con el desorden del propio fluido, con su entropía —lo que le cuesta pasar un empujón de una capa a la siguiente por cada manera que tiene de estar revuelto—. Todos los fluidos medidos lo respetan.

En el Pleno, que exista ese mínimo es forzoso: el medio está siempre lleno, y ningún modo puede aislarse de sus vecinos para dejar de rozar. Lo que el Pleno añade es el otro extremo, un techo. Cuanto más le cuesta al medio pasar un empujón de una capa a la siguiente, más tarda en pasarlo, y ningún proceso del medio puede ser más lento que su propio reloj térmico —el que le marca su temperatura, y que corre más deprisa cuanto más caliente está—.

Entre las dos cotas queda una franja estrecha, de una a $4\pi/5 = 2,5133$ veces el mínimo universal que conjeturaron Pavel Kovtun, Dam Thanh Son y Andrei Starinets en 2005. Y ahí dentro cae el plasma de quarks y gluones que producen los aceleradores —la sopa en que se deshacen los protones cuando se los machaca a millones de grados—, el fluido más perfecto que se ha medido. El propio Pleno también cae dentro: con el tiempo de relajación que fija su término de flexión, su fricción queda un treinta y dos por ciento por encima del mínimo (1,3232 veces). Los gases atómicos ultrafríos, veintiún (21) órdenes de magnitud más fríos, se quedan al doble de ese techo, unas cinco veces el mínimo, y en el sentido que el propio medio ordena: sus vibraciones tienen un umbral mínimo de energía, y un medio así relaja más despacio.

16. Las estrellas: la masa a la que se acaba una vida

La gravedad, la cuántica y el calor se juntan en algo que los telescopios ven todas las noches: la muerte de una estrella.

Cuando una estrella como el Sol agota su combustible deja de tener con qué empujar hacia afuera, y su propio peso la aplasta. El derrumbe no sigue sin fin: se detiene, y lo que lo detiene son sus electrones. Por el principio de exclusión de Wolfgang Pauli —el mismo que ordena la tabla periódica— dos electrones no pueden ocupar el mismo estado, de modo que apretarlos cuesta cada vez más, y esa negativa a compartir sitio es la que sostiene a la estrella. Los sitios se llenan por abajo, y al apretar la estrella quedan menos sitios lentos libres: el electrón que no cabe donde ya hay otro tiene que conformarse con uno más rápido. Apretar obliga a correr, y un enjambre de electrones obligados a correr empuja hacia afuera. El resultado es una *enana blanca*: un objeto del tamaño de la Tierra con la masa del Sol, en pie no por estar caliente, sino porque sus electrones se niegan a apilarse.

Pero esa negativa tiene un tope. Si la estrella pesa demasiado, sus electrones tendrían que moverse más deprisa que la luz para seguir sujetándola, y no pueden. Por encima de cierta masa la enana

blanca no existe: la estrella sigue cayendo hasta volverse una estrella de neutrones o un agujero negro. Ese umbral es el **límite de Chandrasekhar**, que Subrahmanyan Chandrasekhar calculó en 1931, y vale alrededor de 1,44 masas solares. Es uno de los números más comprobados de la astrofísica: decide el destino de cada estrella del cielo, y además es lo que hace que cierta clase de supernovas estalle siempre con el mismo brillo —lo que, a su vez, permitió a los equipos de Saul Perlmutter, Brian Schmidt y Adam Riess descubrir en 1998 que la expansión del universo se acelera—.

En PIU- Ψ ese número se calcula entero, y la cadena no toma prestada la astrofísica estelar: la construye con piezas del propio medio. Entran la $\hbar$ del giro de un grano y la G de la firmeza; el conteo de Fermi-Dirac, que dice cuántos electrones caben; y el tope de velocidad del medio dilatante, porque el límite existe precisamente por él: sin un techo a la velocidad, la presión de los electrones crecería sin freno y *no habría* masa máxima.

Lo único que entra de fuera es de qué está hecha la estrella. Y eso no es una constante de la teoría, sino el dato del objeto: la fórmula de Newton tampoco trae dentro las dos masas que uno quiera pesar, hay que dárselas. El resultado son 1,456 masas solares frente a las 1,44 conocidas.

Y ese dato, puesto a trabajar, se convierte en una predicción. La masa límite va como el inverso del cuadrado de cuántos nucleones —las piezas del núcleo: protones y neutrones— carga la estrella por cada electrón —la misma dependencia que la fórmula clásica, aquí con cada una de sus piezas sacada del medio—: el helio, el carbono y el oxígeno llevan dos nucleones por electrón, el hidrógeno uno y el hierro algo más de dos. El tope cambia, entonces, con la composición: 5,83 masas solares si fuera de hidrógeno, 1,456 para helio y para carbono-oxígeno, 1,256 para hierro. Las poblaciones de enanas blancas de composición distinta tienen que mostrar esos topes.

La masa a la que muere una estrella

[DERIVADO]

El límite de Chandrasekhar sale del medio; la composición de la estrella entra como dato del objeto, no de la teoría.

Una enana blanca se sostiene por la presión de sus electrones apretados unos contra otros, y por encima de cierta masa esa presión ya no alcanza:

$$M_{\text{Ch}} = \frac{\sqrt{3\pi}}{2} I_3 \frac{(\hbar c/G)^{3/2}}{(\mu_e m_u)^2} \approx 1,456 M_{\odot},$$

frente al valor conocido de unas 1,44 masas solares. En ella, $\hbar$ y G son las identidades del giro de un grano y de la firmeza del medio; $I_3 = 2,0182$ es el único paso numérico de toda la cuenta, la integración del perfil de la estrella; y $\mu_e m_u$ es la masa que la estrella carga por cada electrón. El perfil es cómo se reparte la materia de dentro afuera, densísima en el centro y cada vez más rala hacia la superficie; lo fija el modo en que la presión crece con la densidad, e I_3 resulta de sumarlo capa a capa.

La cadena tiene cuatro eslabones, y ninguno admite elección. El primero cuenta cuántos electrones caben: cada casilla de velocidad admite dos, uno por cada sentido de giro del electrón ($g = 2$), y de ahí sale la densidad de electrones. El segundo convierte ese enjambre en presión: como los electrones van en todas las direcciones por igual, de cada empujón solo una tercera parte aprieta contra una pared dada, y de ahí sale el factor un tercio. El tercero mira el caso extremo, con los electrones viajando casi a la velocidad de la luz, y entonces la presión crece como la densidad elevada a $4/3$. Y el cuarto es el que sorprende. Cuánto peso puede sostener cada capa de la estrella depende de cómo crece la presión con la densidad; fijado ese cómo —y el caso extremo lo fija en $4/3$ —, queda decidido capa por capa cuánta materia lleva cada una. Eso es justamente lo que la ecuación clásica del interior estelar —la de Lane-Emden con índice tres, por Jonathan Homer Lane y Robert Emden— da por supuesto, y aquí sale solo. Hasta el número de delante, $\sqrt{3\pi}/2$, sale derivado.

La comprobación. Con $g = 1$ en lugar de $g = 2$, la masa se corre en un factor $\sqrt{2}$. Y en el régimen no relativista el índice del perfil cambia y sencillamente *no hay* masa límite: el tope existe porque el cálculo exige el tope de velocidad c , no por otra razón.

Qué cambia con esto. Chandrasekhar acertó, y su fórmula sigue en pie, con su coeficiente completo: lo que cambia es de dónde salen sus piezas. En la cuenta clásica, la constante de la gravedad y la cuántica se toman medidas, y cómo se reparte la materia dentro de la estrella se resuelve con una ecuación que se escribe aparte. Aquí las dos constantes son propiedades del medio, y ese reparto no hay que suponerlo: lo decide la propia cuenta. De todo el límite, lo único que sigue viniendo de la observación es de qué está hecha la estrella. Y precisamente por eso la composición deja de ser un dato y pasa a ser un resultado con consecuencias: cada clase de enana blanca tiene su propio tope, y los tres están calculados.

17. Lo grande y lo pequeño: un solo material, visto a dos distancias

El muro de la física es éste: lo muy grande (la gravedad, el cosmos) y lo muy pequeño (las partículas, lo cuántico) se describen con dos teorías magníficas que no encajan entre sí, y en un siglo nadie ha conseguido unirlos.

El programa no intenta pegarlas, porque no acepta que sean dos. La gravedad sale de la firmeza del medio; la constante cuántica, del giro de su grano; y las dos salen del mismo coeficiente, evaluado por lados distintos. La gravedad y lo cuántico no son, entonces, dos mundos que reconciliar a la fuerza, sino el mismo material mirado desde dos distancias: de cerca se ve grano, giro y cuantización; de lejos, curvatura y cosmos. El abismo no se cruza. Se disuelve, porque nunca hubo dos orillas.

De ahí sale también la respuesta al atasco que arruinó los intentos anteriores. Ese atasco nace de tratar la gravedad como una fuerza fundamental y querer “cuantizarla”: aplicarle las reglas de lo cuántico, en las que todo campo tiembla a todas las escalas. Al sumar esos temblores hasta distancias cada vez más pequeñas, sin límite, las cuentas se llenan de infinitos. En las otras fuerzas esos infinitos se recogen en unas pocas constantes medidas; en la gravedad harían falta infinitas, y la teoría deja de predecir nada.

Aquí ese atasco no llega a formarse, por dos razones. En el Pleno la gravedad no es fundamental —emerge del medio a gran escala—, y no hay que cuantizarla, igual que a nadie se le ocurre “cuantizar” las olas del mar sabiendo que son agua. Y la segunda razón es más material: los infinitos aparecen cuando se admiten estructuras infinitamente finas, y este medio no las admite. Tiene grano. Preguntarle qué ocurre a una escala menor que su celda es como preguntar qué dibujo hay dentro de un píxel: la pregunta no tiene contenido, y el material mismo es el que la anula.

Los dos modos del medio, y el corte que pone el grano

[DERIVADO]

El medio admite dos ondas, y su grano impide que las cuentas se llenen de infinitos.

Perturbar el Pleno ligeramente da dos ondas que no se mezclan: una en el módulo (cuánto se comprime) y otra en la fase (hacia dónde gira). Que no se estorben, al menos en la primera aproximación, es lo que permite seguirlos por separado.

Las dos fórmulas que siguen usan los dos símbolos con que se describe cualquier onda: ω es su frecuencia —cuántas veces por segundo sube y baja— y k mide lo apretada que va, mayor cuanto más corta es su longitud de onda.

El modo del módulo es *masivo*: su frecuencia no baja de un valor mínimo —ni la onda más larga sale gratis, y eso es lo que significa tener masa—,

$$\omega^2 = c^2 k^2 + \omega_0^2, \quad \omega_0^2 = \frac{\xi c^2}{\ell_P^2}, \quad \xi = 19,69,$$

donde ξ es la curvatura del pozo en su fondo, calculada del potencial. Esa masa mínima es enorme —del orden de la del grano—, y el modo lleva congelado desde la cristalización: no queda ninguna dinámica de fondo que pueda mover w de -1 , siendo w el cociente entre la presión de un contenido y

su propia densidad de energía. Excitar ese modo, aunque sea apenas, cuesta una energía del tamaño de la del grano, y en el universo de hoy no hay nada capaz de pagarla. La cristalización es el episodio en que el medio se ordenó en cristal.

El modo de la fase viaja a la velocidad de la luz. Sobre la red lleva una corrección diminuta, que solo se nota a longitudes de onda cercanas al grano:

$$\omega^2 = c^2 k^2 \left[1 - \frac{(k \ell_P)^2}{20} + \dots \right],$$

y el signo importa tanto como el número: es negativo, de modo que la textura del medio frena la onda y nunca la adelanta. Una corrección con el signo contrario habría puesto ondas por encima de c y roto la velocidad límite del medio.

Y no hay una corrección para la luz y otra para la gravedad, porque las dos son ondulaciones de la misma fase. La ondulación de la fase admite tres formas, según cuántas direcciones hagan falta para describirla: una sin dirección ninguna; una con una dirección, que es el fotón; y una que alarga el medio en una dirección mientras lo acorta en la perpendicular, que es la onda gravitacional. Las tres son ondulaciones de la misma fase, en niveles contiguos, y viajan por los mismos enlaces de la red, de modo que comparten exactamente la velocidad y exactamente esta corrección. Es también la razón de que en F1 no haga falta añadir ningún campo electromagnético: lo que en la física habitual es un campo aparte, aquí es uno de los niveles de la fase que el medio ya tiene.

A las longitudes de onda más cortas —el *ultravioleta*, en la jerga de los físicos— la ecuación que liga la frecuencia con la longitud de onda deja de tener una sola respuesta y pasa a tener dos: la onda de siempre, y una segunda respuesta que solo asomaría al acercarse la ondulación al grano. Esa segunda nunca llega a ser una onda de verdad: tendría que ser más corta que el grano, y en un medio con paso fijo no hay onda más corta que su paso. De ahí sale el corte: el medio no admite curvaturas más cerradas que su grano, y esa negativa es lo que impide que las cuentas diverjan.

Y esa misma cuenta cierra una pregunta que en otras teorías queda abierta: si la probabilidad se conserva. En las teorías con correcciones de este tipo —las de Tsung-Dao Lee y Gian Carlo Wick, de 1969—, la segunda respuesta aparece como un estado extraño con el que no se sabe qué hacer, porque amenaza con que las probabilidades dejen de sumar uno. En el Pleno la pregunta no llega a plantearse: la red no sostiene frecuencias por encima de un techo ($\sqrt{12} c / \ell_P$), y la segunda respuesta empezaría más arriba ($\sqrt{20} c / \ell_P$), fuera de lo que el medio puede llevar. Sobre la red, la evolución del medio conserva la probabilidad de manera exacta, sin aproximación ninguna: es lo que los físicos llaman *unitariedad*.

Qué cambia con esto. Los infinitos que arruinan los intentos de cuantizar la gravedad se atajan normalmente con un corte introducido a mano y justificado a posteriori. Aquí el material tiene grano, y ese grano está en los axiomas: que las cuentas no se llenen de infinitos a distancias diminutas no es un remedio aplicado después, es una propiedad de la sustancia.

De que el medio tenga grano se sigue una predicción. Un material con textura no es del todo transparente. Si se le hace pasar luz de energía suficientemente alta —tan alta que su longitud de onda se acerque al tamaño del grano—, la luz empieza a notar la textura y su velocidad se aparta un poquito. Eso le ocurre a cualquier material con grano.

Lo propio del Pleno es que su grano no es liso: es un cristal, con cuatro enlaces por celda apuntando a las puntas de un tetraedro. Esas cuatro puntas apuntan a cuatro vértices alternos de un cubo, a lo largo de las cuatro diagonales de su cuerpo, de modo que esas cuatro direcciones traen consigo los ejes del cubo. Y un cristal tiene direcciones. La predicción, entonces, es que el efecto sea algo mayor en unas direcciones del cielo y algo menor en otras, y que lo haga siguiendo el dibujo de un cubo: igual a lo largo de sus aristas, distinto por las diagonales de su cuerpo. Entre la dirección en que el efecto es máximo y aquella en que es mínimo hay una relación exacta, siete tercios ($7/3$).

Eso queda lejos de poder medirse: la energía a la que asomaría es unos setenta y cinco millones de veces mayor ($7,5 \times 10^7$) que la mejor cota que hoy existe para un retraso de esta clase, el que

crece con el cuadrado de la energía. Esa cota la obtuvo en 2024 el observatorio LHAASO con el estallido de rayos gamma GRB 221009A, cuya luz viajó miles de millones de años y llegó sin que sus fotones más energéticos se hubieran retrasado. No es una predicción para esta década. Pero está definida en signo, en tamaño y en dirección.

Y si el Pleno es un cristal, ¿por qué el espacio nos parece igual hacia todas partes? Porque los cuatro enlaces del tetraedro, promediados, se comportan exactamente como una esfera para toda onda mucho más larga que el grano, que son todas las que se pueden medir; las direcciones del cristal solo asoman cuando la onda se acerca a su tamaño. Y que un cristal con direcciones salga de leyes que no prefieren ninguna es lo corriente: las ecuaciones de un imán no distinguen ninguna dirección, y el imán, al enfriarse, acaba apuntando a una.

La huella que el grano deja en el cielo

[DERIVADO]

La huella direccional es un patrón cúbico con una razón exacta, siete tercios, entre su máximo y su mínimo, y las ondas largas ven ese cristal como una esfera.

La corrección a la dispersión depende de la dirección así:

$$C(\hat{n}) = \frac{1}{20} - \frac{1}{18} K_4(\hat{n}),$$

donde $\hat{n}$ es la dirección en que se mira y K_4 mide cuánto se aparta esa dirección de los ejes del cristal. El primer término es la parte que no depende de la dirección; el segundo, la que sí, y su promedio sobre todas las direcciones es cero. Y esa fórmula no es un ajuste con dos piezas elegidas a conveniencia: con la simetría de este cristal solo hay dos maneras posibles de que la corrección dependa de la dirección —la que no depende de ella y la que depende como K_4 —, de modo que son las dos únicas piezas que caben.

Traducido a lo que un observatorio mediría —la energía a la que la dispersión empezaría a notarse—, esa energía a la que el efecto asomaría no es la misma en todas partes: hay que subir más mirando a lo largo de una arista del cubo y menos mirando por una diagonal de su cuerpo, con un factor 1,5275 entre los dos extremos. Ese factor y la razón 7/3 de la dispersión son el mismo dato dicho de dos maneras. La energía a la que la dispersión asoma va como el inverso de la raíz de la corrección, de modo que elevar 1,5275 al cuadrado devuelve 2,33, que es 7/3. La parte del efecto que no depende de la dirección queda aparte, y vale $2\sqrt{5}$ veces la energía de Planck, unas 4,47. Y el fotón y la onda gravitacional se retrasan por igual: la corrección la pone el paso de un enlace al siguiente, y ese paso no distingue polarizaciones. Por la misma razón, las dos polarizaciones de la luz viajan a la par. No es lo corriente: un cristal cúbico sí puede separarlas —John Burnett y sus colegas lo midieron en el fluoruro de calcio en 2001—, y el del Pleno no lo hace.

Un cristal que las ondas largas ven igual hacia todas partes. Un cristal tiene direcciones privilegiadas; el espacio, hasta donde se ha medido, es isótropo, es decir, igual se mire hacia donde se mire. Las dos cosas no chocan. Los cuatro enlaces del tetraedro están tan bien repartidos que, para cualquier cuenta que dependa del cuadrado de la dirección, promediarlos da exactamente lo mismo que promediar sobre la esfera entera —en matemáticas eso se llama un 2-diseño esférico—. De modo que toda onda mucho más larga que el grano ve un medio sin direcciones, y la dirección solo asoma en un término mucho más pequeño, el que depende de la dirección elevada a la cuarta, que es el de K_4 . Y el mecanismo por el que un estado con direcciones sale de leyes que no prefieren ninguna —el del imán que se enfría— tiene nombre en física: *ruptura espontánea* de simetría. Las ecuaciones del Pleno no distinguen ninguna dirección; lo que rompe la isotropía es la configuración que las minimiza.

Si el cristal no conserva su orientación a gran escala, solo sobrevive la parte que no depende de la dirección. Si la conserva, el patrón lleva ejes fijos en el cielo; si no, promediar sobre orientaciones anula la parte direccional de manera exacta.

La comprobación. Hay microestructuras que cancelarían esta huella por completo, pero cancelarla exige o bien otra geometría de enlaces, o bien una segunda constante con la que ajustar. El Pleno no tiene ninguna de las dos: los axiomas le fijan cuatro enlaces equidistantes en una configuración única, sin un solo ángulo que se pueda girar.

Qué cambia con esto. Las teorías que suponen una escala mínima coinciden en que debe dejar

alguna huella, y ahí se detienen: cada una admite un abanico de huellas posibles, con un parámetro que se ajusta después. Aquí no hay parámetro: la forma de la huella, su tamaño y la dirección en que se nota salen los tres fijados por la geometría del cristal, y están calculados, aunque todavía no hay medida que los confronte.

18. Por qué esto es ciencia, y no un cuento bonito

Por debajo de cada imagen de este documento hay un programa de investigación formal, sujeto a las mismas exigencias que cualquier física profesional. El Pleno se describe con **matemáticas explícitas**: parte de principios enunciados con precisión, deriva sus resultados como quien demuestra teoremas, somete cada paso a verificación —recalculando los números con código independiente, que no lleva precargado ningún resultado— y clasifica cada afirmación según su grado de certeza.

Explica leyes que ya sabíamos ciertas. Las veintisiete (27) leyes, constantes y hechos de la lista salen de su única ecuación. Estaban medidos y confirmados, algunos desde hace siglos, pero la cadena de razones terminaba en algo que se acepta porque se mide: la física sabía *que* se cumplían y, al llegar al fondo, no *por qué*. Aquí cada una llega con la suya.

Una ley validada conserva su validez sea cual sea el camino por el que se llegue a ella, y esa parte del programa descansa sobre ciencia vieja y sólida, observada en miles de experimentos. **El aporte es la raíz**: un mismo origen para leyes que hoy viven en libros separados.

Todo el programa cabe, de hecho, en trece (13) renglones.

El programa, en números

De un solo enunciado —el universo es energía única, finita y conservada— y un solo objeto dinámico sale todo lo demás:

- 1 ecuación: $F1$, el único objeto dinámico
- 6 axiomas, que fijan qué es el medio
- 3 cantidades primarias: la densidad ρ_P , el grano ℓ_P y la velocidad c
- 74 derivaciones encadenadas
- 63 con la cadena probada al menos en su núcleo —y 39 con la demostración entera terminada, sin un remate pendiente—
- 27 leyes, constantes y hechos de los libros, escogidos para la lista por reconocibles y por cargar peso —el programa deriva bastantes más—
- 342 afirmaciones dentro de esas derivaciones, cada una con su grado de certeza declarado en el compendio matemático
- 203 de ellas con la demostración cerrada: tres de cada cinco
- 97 con el núcleo del argumento probado y un remate algebraico por terminar
- 37 dicen *calibrado*: ni un solo coeficiente ajustado, sino la vara con que medimos o la hora que marca el medio
- 5 restantes: tres hipótesis declaradas como tales y dos remitidas a un cabo
- 20 cabos abiertos —la agenda del programa—, cada uno con su nombre, su sitio y su clase, y ninguno es una deuda de la que dependa lo ya derivado
- 0 coeficientes ajustados a los datos

Sin coeficientes ajustados, cada eslabón de las setenta y cuatro (74) se sigue del anterior sin insertar suposiciones nuevas por el camino, y ninguno tiene una perilla donde absorber una diferencia. Lo que sí se toma del mundo son dos números para traducir las unidades del medio a las nuestras, y la lectura de dónde está hoy el cosmos en su recorrido. Ninguno de ellos es un número de la ley. Y el reparto está publicado entero, afirmación por afirmación: no hay una sola que no lleve dicho hasta dónde está probada. Es la contabilidad que permite revisar un programa sin tener que creer en él.

Acierta con el número completo, y sin parámetros. Los aciertos del programa son de dos clases. Los primeros son *coeficientes exactos*: la teoría no llega a una ley “salvo un factor”, sino con el número completo delante. El mínimo de la incertidumbre de Heisenberg sale con su factor un medio; el límite de Chandrasekhar, con su coeficiente entero; la cota de Tsirelson para las correlaciones cuánticas, exacta; el estiramiento temporal de las supernovas lejanas, exacto y confirmado por los datos.

Los segundos son *predicciones sin parámetros*. Las proporciones del cosmos —cuánta energía oscura, cuánta materia en total y cuánta de ella es oscura u ordinaria— salen de la geometría del cristal y de una sola lectura del reloj. Las cuatro caen a menos de una desviación y cuarto de lo que miden los satélites; la energía oscura y la materia total, que son una sola comparación, a tres décimas, y la materia oscura a menos de una décima, sin una sola perilla que girar. Una desviación es el margen de error típico de la medida: una o menos es tan buen acuerdo como la medida permite, y a partir de tres la diferencia pide explicación.

En todo el árbol de resultados, lo que se toma del mundo cabe en dos familias. La primera es la **vara**: los dos números con que las unidades del medio se traducen a las nuestras. Su valor dice cómo es nuestro metro, no cómo es el Pleno, y ninguna teoría —tampoco las establecidas— puede derivarlo.

La segunda es la **lectura posicional**: dónde se encuentra hoy este universo en su recorrido, el análogo de la hora que marca un reloj. El programa toma del mundo esa posición, y nada más que esa posición. Y una posición sobre un recorrido se lee con dos instrumentos distintos, que hacen falta los dos. Uno mide *hacia dentro*: qué parte del contenido del cosmos que no vemos se mueve hoy al unísono, una fracción entre cero y uno. El otro mide *hacia fuera*: la constante de Hubble, el ritmo al que el universo se expande.

Ninguno de los dos se deduce del otro, porque miden cosas de tamaños incomparables, y el mérito del programa está en haberlos separado: sabida esa posición, las densidades del universo y la curva entera de su expansión quedan fijadas sin retocar nada más. El programa publica además el libro mayor de esas lecturas, cada una con su sitio: dos cantidades de estado —la ocupación, que se lee hacia dentro, y el arco recorrido, que se lee hacia fuera—, una escala que quedó congelada en los constituyentes de la materia cuando ésta se formó, y que se lee en el protón, y la vara. Ningún parámetro de ley. Ningún coeficiente de la teoría se ajusta a los datos. Y en toda la cadena de lo cuántico, de la constante de Planck al techo de las correlaciones, no hay una sola calibración: ni un solo número tomado prestado de una medida para que las cuentas salgan.

Y acierta no una vez, sino muchas. Llegar desde un origen nuevo a una ley conocida podría ser casualidad afortunada. Pero $\text{PIU-}\Psi$ llega a veintisiete (27), hacia fenómenos que no tienen nada que ver entre sí. Una ganzúa abre muchas cerraduras porque se acomoda a cada una; una llave de dientes fijos que abre veintisiete cerraduras distintas dice otra cosa: que las veintisiete tienen por dentro el mismo mecanismo. Cuando una sola idea reproduce el mundo cuántico, la masa de las estrellas, el electromagnetismo, la radiación de un cuerpo caliente y las proporciones del cosmos, en algún punto deja de ser razonable hablar de coincidencia. Es lo que los científicos llaman *poder unificador*.

A cada una de esas leyes, por separado, alguien ha intentado derivarla alguna vez, y en algún caso se consigue. Lo que no tiene antecedente es obtenerlas **todas del mismo objeto y sin un solo coeficiente libre**, de manera que el número que entrega la constante de la gravedad sea el mismo que entra en la constante cuántica, y que mover una pieza para salvar un sector desbarate los demás. Ésa, y no la longitud de la lista, es la afirmación del programa.

En qué sectores acierta, y por qué importa que sean éstos

Sector	Qué entrega	Contra qué se contrasta
Las dos constantes	la de la gravedad y la cuántica (G y $\hbar$), desde la densidad del medio, su grano y la velocidad de la luz, con el número de delante igual a uno	el valor medido de ambas, sin sobrante: lo que se contrasta es ese número de delante
Gravedad y forma del espacio	cómo la materia curva el espacio y el tiempo: las ecuaciones de Einstein enteras, con el número que las encabeza (el $c^4/16\pi G$ completo); y el interior de los agujeros negros	la carrera entre la luz y la onda gravitacional que llegaron juntas en 2017 (GW170817), iguales hasta siete partes en diez mil billones; el interior, sin dato todavía
El mundo cuántico	la ecuación de Schrödinger como equivalencia exacta del propio medio, el límite de lo que se puede saber a la vez ($\hbar/2$), el techo de las correlaciones ($2\sqrt{2}$), la regla que convierte la onda en probabilidad (la de Born) y la ecuación del electrón (la de Dirac)	los experimentos sobre la desigualdad de Bell, en óptica cuántica
Fuerzas y materia	el electromagnetismo con su coeficiente 8/9 y la estructura de las fuerzas nucleares (Maxwell y Yang-Mills); la carga entera y la neutralidad del átomo; la negativa de dos electrones a compartir sitio (Pauli); los tres quarks	la masa nula del fotón; la neutralidad, a una parte en 10^{21} ; el radio del protón con un solo dato de entrada, 0,851 femtómetros frente a 0,841 medidos
El calor	cómo reparten su energía las partículas de luz y las de materia (Bose-Einstein y Fermi-Dirac) y cuánto irradia un cuerpo caliente (el coeficiente de Stefan-Boltzmann), por puro conteo	la viscosidad del plasma de quarks, dentro de la ventana; la de los gases ultrafríos, por encima y en el orden que fija el mismo medio
Las estrellas	la masa a la que una enana blanca colapsa	1,456 frente a 1,44 masas solares
El cosmos	la proporción entre materia oscura y ordinaria ($\sqrt{3}\pi$), las cuatro densidades del cosmos, la curva de la expansión ($H(z)$) y el estiramiento temporal de las supernovas	el satélite Planck, el mapa de galaxias DESI, las supernovas del rastreo DES
El principio	un universo que se contrae, rebota sin singularidad en la pared de arriba del medio y, en el camino de vuelta, forma las partículas	todavía ningún dato: es predicción

Esa lista pesa más que su longitud por tres razones. **Ningún par de esos sectores comparte instrumento.** Un interferómetro de ondas gravitacionales, una mesa de óptica cuántica, un acelerador de iones pesados y un mapa del cielo no pueden equivocarse de la misma manera, de modo que acertar en cada uno no es un acierto repetido, sino aciertos independientes. **No se pueden arreglar por separado.** El coeficiente que entrega G es el mismo que entra en $\hbar$, y el número que fija el techo del pozo es el que reaparece en el reparto del cosmos; mover una pieza para salvar un sector desbarata los otros.

No todos pesan lo mismo. Los resultados cuánticos no toman ni un número de ninguna medida. Los del cosmos se apoyan todos en el mismo dato: la hora que marca hoy el reloj del universo. Y el de fuerzas y materia da el tamaño del protón con un solo dato de entrada y un error de algo más del uno por ciento (1.19%), no en la quinta cifra.

Fórmulas tan cortas se parecen a la numerología en la forma, y se separan de ella en el punto decisivo. La ley de Titius-Bode ordenaba las distancias de los planetas con una fórmula elegante que acertó lo bastante para que se le buscara un planeta —y que hoy nadie considera una ley—. Eddington dedicó años a los “números grandes”: coincidencias entre razones cosmológicas enormes que parecían pedir explicación y no la tenían. Con suficientes combinaciones de π , raíces

y enteros pequeños, algo acabará coincidiendo con algo.

Las dos historias comparten un rasgo: la fórmula se buscó después de conocer el número, y ningún mecanismo la ataba. Aquí ninguna se busca: cada una sale de F1, y la cuenta que da una da también las demás.

La objeción, además, se puede medir, y con dos preguntas distintas: ¿cuántas fórmulas simples caerían sobre estos valores por azar? y ¿cuántos marcos teóricos completos reproducirían *todo* el conjunto de hechos? Las dos cuentas dejan la casualidad muy atrás. La primera la desfavorece por un factor de unas seiscientos setenta mil veces ($6,7 \times 10^5$); la segunda, por unas treinta y cuatro mil ($3,4 \times 10^4$), que siguen siendo sesenta y cinco (65) con el supuesto más adverso al programa.

¿Y si todo fuera casualidad? Dos cuentas que la desfavorecen

[MÉTODO]

Contada de dos maneras distintas, la casualidad explica los aciertos mucho peor que la estructura del programa, aun con los supuestos más adversos.

Son dos preguntas distintas, y por eso sus resultados no se multiplican ni se promedian.

La pregunta estrecha: ¿cuántas fórmulas caerían ahí? Se le pide al computador que escriba todas las fórmulas que se pueden construir combinando los ingredientes habituales de la numerología —1, 2, 3, 4, π , y e , que es otro número fijo como π — con sumas, restas, multiplicaciones, divisiones y raíces, encadenando hasta cinco operaciones. Salen 3778 fórmulas distintas.

Luego se cuenta cuántas de ellas caen, por azar, dentro del margen de error de los valores observados. Que dos de ellas acierten a la vez $\sqrt{3}\pi$ y f_c , dentro del margen que dan las medidas, tiene una probabilidad menor que 3×10^{-4} . Y contando sobre el espacio completo de expresiones enumeradas, leer esas dos razones como fórmulas afortunadas queda desfavorecido por un factor de unas seiscientos setenta mil veces ($6,7 \times 10^5$).

La pregunta amplia: ¿cuántos marcos teóricos reproducirían el conjunto? Se responde con un factor de Bayes —la herramienta de comparación de hipótesis que Harold Jeffreys construyó sobre la regla de Thomas Bayes—: cuántas veces más probable es el conjunto de aciertos si detrás hay una estructura real que si son coincidencias. En la escala de Robert Kass y Adrian Raftery con que se leen estos factores, a partir de veinte (20) se habla de evidencia fuerte, y a partir de ciento cincuenta (150), de muy fuerte; aquí sirve solo de referencia de orden de magnitud.

Entran quince (15) resultados, admitidos bajo cuatro criterios fijados *antes* de contar: que acertar o fallar se distinga de verdad; que no quede margen para retocar nada; que el valor a acertar estuviera publicado de antemano; y que la medida venga de un instrumento que no se haya usado ya para otro de los aciertos. Los quince se leen, de hecho, con quince instrumentos que no comparten mecanismo. Otros catorce (14) quedan *fuera* del cómputo, no por incorrectos, sino por no aportar evidencia independiente. El resultado:

$$BF \approx 3,4 \times 10^4, \quad \text{rango [65 a } 1,2 \times 10^9 \text{]}$$

El rango recoge lo severa que se haga la penalización por eslabones compartidos.

Qué descuenta esa penalización. Descuenta contar dos veces un mismo eslabón cuando aparece en varios resultados, que es lo que inflaría la cifra artificialmente. La economía del marco se cobra en otro sitio y a favor: una sola ecuación sin perillas hace que cada resultado salga *forzado*, y por eso cada probabilidad individual es pequeña. Un marco con una estructura distinta por dominio ajustaría cada sector por separado y tendría probabilidades mucho mayores —acertar es fácil cuando la estructura se diseñó para ese dominio—. Las probabilidades pequeñas y la correlación entre resultados tienen la misma causa, y no es posible quedarse con una sin pagar la otra.

La comprobación. Triplicando *todas* las probabilidades y aplicando además una penalización severa, el factor sigue por encima de 10. Triplicar esas probabilidades es conceder que acertar por azar era tres veces más fácil de lo estimado, que es la concesión que más favorece a la casualidad. Bajo el supuesto más punitivo —equivalente a declarar que los quince (15) resultados son casi un solo hecho— sigue valiendo 65. Y retirando un resultado cada vez, ninguna omisión individual lo baja más de cuatro veces y media (4.5).

La otra mitad del expediente: las coincidencias que no se usan. El programa registra también las que encontró y descartó. Dos promedios de la misma banda de vibraciones del cristal coinciden al tres por mil (0,7253 frente a 0,7231), y aun así no se usan: al deformar el cristal se separan en sentidos opuestos, y veinticuatro (24) fórmulas simples caen igual de cerca. Y cuando dos cantidades de sectores distintos coinciden en cinco cifras —el periodo de la vibración del módulo y la media longitud de onda de su respuesta estática—, la coincidencia se resuelve en forma cerrada: las dos serían exactamente iguales si la curvatura del pozo valiera veinte (20), y como la diferencia entra al cuadrado, un uno y medio por ciento (1.5 %) de distancia se vuelve tres partes en cien mil (3×10^{-5}). Decide el origen, no la proximidad.

Qué cambia con esto. Lo que estas dos cuentas establecen es que la explicación alternativa —que los aciertos sean coincidencias numerológicas— queda desfavorecida bajo cualquier elección razonable de supuestos, incluidas las diseñadas para perjudicar al programa.

A eso se añade la coherencia entre sectores: que el mismo medio, con las mismas dos escalas, dé a la vez la constante de la gravedad, la constante cuántica, el mínimo exacto de Heisenberg y la masa a la que muere una estrella.

Cada resultado se desarrolla con su matemática explícita y lleva su grado de certeza en una etiqueta. Donde el argumento está entero pero falta cerrar una cuenta, la etiqueta lo dice. Y cuando el programa se apoya en un resultado que no es suyo, lo toma tal como está publicado, con el nombre de quien lo obtuvo, sin tocarle ni un número para que le encaje.

Qué dice cada etiqueta

[DERIVADO]	prueba completa, sin hueco: el resultado se sigue paso a paso desde F1 —como la constante de la gravedad, que sale de la firmeza del medio y del tamaño de su grano—
[DLF]	deducción lógica fuerte: el argumento está entero y sin hueco conceptual, y lo que falta es cerrar una cuenta. Es más que una conjetura y menos que una demostración
[CALIBRADO]	valor anclado a un dato medido, con el dato dicho —como la hora del cosmos, que es dónde está hoy el medio en su recorrido—
[MÉTODO]	cuestión de método: no enuncia un resultado propio —como la cuenta de cuánto explicaría la casualidad—

Van en la cabecera de cada cuadro azul. Un cuadro con dos etiquetas separadas por una barra reparte su contenido entre las dos.

La comprobación responde a **dos preguntas distintas**, y no hay que confundirlas. La primera: ¿dice el libro lo mismo que devuelve el cálculo? Ahí no se admite ni una cifra de diferencia, y ninguna de las comprobaciones puede fallar. La segunda: ¿coincide el cálculo con lo que se ha medido en el cielo o en el laboratorio? Ésa solo tiene sentido donde hay algo medido con qué comparar.

Una igualdad como la de G no admite cifra de acuerdo, y la razón es ésta: como la vara de medir del programa se fija precisamente con G y con $\hbar$, la fórmula devuelve el valor medido de G pase lo que pase, por la manera misma en que está montada. Lo único que ahí se puede comprobar es el número que va delante, y ese número sale uno.

La comprobación de un programa así tiene una forma concreta. No basta con que las cuentas del autor cierren: hace falta que un código escrito aparte, que no lleve dentro ninguna respuesta, vuelva a hacerlas desde el principio y obtenga lo mismo.

Cómo se comprueba, y qué queda abierto

La verificación la hacen tres cuadernos de cálculo que viajan con el paquete, y que cualquiera puede descargar y ejecutar.

El **numérico** recalcula desde sus fórmulas de primeros principios las cantidades de **seiscientos diecisiete (617) filas** y emite **seiscientos cuarenta y ocho (648) veredictos**: quinientos setenta

y tres (573) contra el corpus y setenta y cinco (75) contra el compendio. Declara únicamente ρ_P , ℓ_P y c , y obtiene G y $\hbar$ dentro del propio cuaderno; lleva además una fila de control que *lee su propio código* y falla si alguna de las dos se reasigna a mano. Más de tres de cada cinco de sus filas (373 de 617) **no tocan ninguna vara humana**: son números puros, y en un número puro no hay unidades donde esconder un desajuste.

El **simbólico** rehace **trescientas doce (312) afirmaciones** con los símbolos en vez de con los números, de modo que no hay redondeo que pueda tapar un error, y casi todas sus filas (192 de 194) llevan al lado la alternativa equivocada: la fila pasa solo si las dos dan resultados distintos. La razón es que una comprobación puede pasar sin comprobar nada —si la fórmula correcta y una equivocada devuelven el mismo número, la fila habría pasado con cualquiera de las dos—. Exigir que discrepen garantiza que la fila distinga. Las dos filas restantes llevan la marca “por construcción” y su motivo.

El **auditor** recorre las fuentes de los cuatro documentos y compara **cuatro mil novecientos cinco (4905) cifras impresas** contra su *forma cerrada*: la fórmula exacta de la que esa cifra sale, escrita con números fijos y nada más, sin ningún valor tomado de una medida. Discrepancias: **ninguna**. Tiene dos puntos ciegos, y los declara. No puede asignar a su fórmula una cifra impresa con menos de cuatro cifras de precisión —1,456 tiene cuatro; 1,4, dos—. Y una cifra que se aparte de su forma cerrada mucho más allá de su último decimal no la reconoce como suya: queda “sin catalogar” en vez de marcarse como error.

Los tres corren además en modo de autoprueba con averías introducidas a propósito —un decimal cambiado en su última cifra, un signo invertido, una constante desplazada— y se exige que las detecten todas.

Hasta dónde está probada cada cosa. Una derivación se compone de varias afirmaciones, y cada una lleva dicho aparte su grado de certeza; por eso hay muchas más afirmaciones etiquetadas que las setenta y cuatro (74) derivaciones. De las **trescientas cuarenta y dos (342)**, **doscientas tres (203)** tienen la demostración cerrada —tres de cada cinco— y **noventa y siete (97)** más tienen probado el núcleo del argumento, con un remate algebraico por terminar. Otras treinta y siete (37) se apoyan en un número medido, y son las de siempre: o bien un número para traducir las unidades del medio a metros y kilos, o bien la hora que marca hoy el reloj del cosmos. Las cinco restantes son tres hipótesis declaradas como tales y dos remitidas a un cabo.

Las preguntas abiertas —los *cabos*, en el vocabulario del programa— son **veinte (20)**, cada una con el criterio exacto con que se cerraría y con su clase declarada, y ninguna es una deuda de la que dependa lo ya derivado. Cinco son confrontaciones con la medida, que un dato puede decidir; quince (15) son de enriquecimiento, trabajo que amplía el programa sin que nada de lo obtenido se apoye en él. Aparte van siete que dependen de otro cabo, una vía de verificación abierta a quien quiera recorrerla —simular F1 sobre la red por el método de Monte Carlo— y cinco fronteras declaradas, que marcan dónde termina el alcance del programa.

Al final del libro, una ficha por cada uno de esos veintisiete (27) resultados dice qué es cada ley, de quién es, qué nos permite y contra qué se contrasta.

Detrás de cada afirmación hay, además, un desarrollo formal completo: un corpus de seiscientos treinta y dos (632) páginas donde cada derivación se hace paso a paso, y un compendio matemático que condensa las demostraciones con su álgebra intermedia y su análisis de unidades.

19. El idioma con que opera el universo

Los números que el programa deriva tienen todos el mismo aire de familia, y cada uno llega con un nombre propio detrás. La proporción entre las dos materias del cosmos es $\sqrt{3}\pi$; el coeficiente del electromagnetismo, $8/9$; el suelo del medio, $12(\pi^2 - 4)/\pi^4$; el techo de las correlaciones cuánticas que fijó Tsirelson, $2\sqrt{2}$; la rigidez del medio a doblarse, $1/40$; y el número que encabeza las ecuaciones de Einstein, $2 \times 4\pi$.

Ninguno es una cifra arbitraria con muchos decimales. Todos son *razones*: un área dividida por otra, una suma sobre las caras de un tetraedro, la medida de una esfera de direcciones. Y siempre con las mismas piezas — π , unas cuantas raíces, enteros pequeños que cuentan vecinos o vértices—

recombinándose.

Ése es el aspecto que tienen los números de una teoría que no los mide, sino que los lee de una forma geométrica. Y muestra que las magnitudes del Pleno se escriben en un *idioma*: unas pocas palabras elementales —la geometría de la celda, el número de vecinos, la medida de la esfera— y unas reglas fijas para combinarlas.

La diferencia entre tener una lista y tener una gramática es la misma que hay entre memorizar frases sueltas de un idioma y aprender a hablarlo. En la física habitual las constantes de la naturaleza se miden y se aceptan: son frases que uno repite sin entender. Aquí se puede preguntar *por qué* un número vale lo que vale —y a veces anticipar cuánto valdrá, por su lugar en la gramática, antes de calcularlo por otra vía—. Una gramática no solo explica lo ya escrito: permite escribir frases nuevas. Ésa es la diferencia entre leer el universo y entender la lengua en que está escrito.

Números puros: constantes que no necesitan vara

[DERIVADO]/[DLF]

Hay constantes que hay que medir y constantes que se leen de una geometría.

Casi todas las cantidades de la física llevan unidades y, con ellas, una vara de medir elegida por convenio: un metro, un kilogramo. Un *número puro* es una cantidad que el medio produce sin ninguna vara —el mismo número lo obtendría cualquier civilización, en cualquier sistema de unidades—. Que el programa los genere es lo que permite hablar de una gramática y no de una lista de constantes medidas.

La proporción entre materia oscura y ordinaria es $\sqrt{3}\pi$: el área de una esfera dividida por la del tetraedro inscrito en ella, con el factor dos que pone el carácter fermiónico de la materia ordinaria. El coeficiente del electromagnetismo es 8/9: lo que devuelve la suma de circulaciones sobre las caras de la red. Ninguno de los dos se mide: los dos se leen de una forma geométrica, y solo después se contrastan con el mundo.

En el sector térmico las unidades se van solas, y se ve cómo. La cota de viscosidad de Kovtun, Son y Starinets —la que ningún fluido medido ha rebajado— se escribe normalmente con la constante de Planck y la de Boltzmann, y el suelo de viscosidad del Pleno cae justo en ella: medida en unidades de esa cota, la franja del medio empieza en uno exacto. El techo que el Pleno le pone al otro extremo de la franja es $4\pi/5$, y el medio cae dentro sin ajuste: a su temperatura máxima, un treinta y dos por ciento (32,32 %) por encima del suelo. Y hay un tercer número puro: el que compara lo que tarda el medio en reaccionar cuando se lo agita con el ritmo más rápido al que el calor puede hacerlo vibrar,

$$\frac{5\sqrt{5}}{2\pi} = 1,7794,$$

sin un solo símbolo libre. Lo mismo ocurre con el coeficiente que fija la profundidad del pozo, $E_0 = 4,2546 \rho_P c^2$, cuyo número queda cerrado en π y $\sqrt{6}$, y con el punto en que la energía oscura iguala a la materia, $\sqrt{2} S_{\min} = 1,0226$ (el reparto fija ese punto en forma cerrada; cuándo se cruza lo dice la lectura de hoy).

Qué cambia con esto. Cuando una constante sale como número puro, deja de ser un dato que hay que medir y pasa a ser algo que se puede *leer*: se ve de qué geometría viene y por qué no podía valer otra cosa.

20. El reloj cósmico: leer la hora del universo

Hay un número que la astronomía mide con esmero: el ritmo al que el universo se expande, conocido como la constante de Hubble, H_0 , por Lemaître, que lo planteó en 1927, y Hubble, que lo midió en 1929. En la física habitual es un dato que se mide y se acepta —un número más en la lista de “es así”—.

En el Pleno, el tiempo es el latido del medio, contado en unos “tics” ínfimos —los más pequeños que la física conoce, los llamados tics de Planck—. El ritmo de expansión del universo no es un

ingrediente fundamental, sino una *lectura*. PIU- Ψ da para ese ritmo una fórmula cerrada con tres piezas: la geometría del Pleno, el ritmo del tic de Planck y el estado en que se encuentra hoy el medio. Las dos primeras salen enteras de la teoría; la tercera es la lectura del reloj cósmico en este momento. Leída con la hora de hoy, esa fórmula devuelve **sesenta y siete (67) kilómetros por segundo por megapársec** —cada megapársec de distancia, unos tres millones ($3,26 \times 10^6$) de años luz, suma sesenta y siete kilómetros por segundo a la velocidad con que se aleja una galaxia—, que es el valor que miden los satélites.

Ese número no es una constante eterna grabada en la naturaleza, sino la lectura de un reloj en un instante dado —la “hora” del cosmos—. Preguntar “¿por qué la expansión vale justo eso y no otra cosa?” es como preguntarle a un reloj “¿por qué son las tres y no las cinco?": el mecanismo del reloj es cosa de la teoría, y la teoría lo tiene; la hora concreta depende de en qué punto de su recorrido está el universo. La curva entera es teoría; el punto de la curva en que estamos hoy es lo que el reloj marca ahora.

Esto desactiva uno de los mayores escándalos de la física moderna: el factor 10^{123} entre la energía del vacío que predice la teoría cuántica y la que de verdad se observa, al que se ha llamado “la peor predicción de la historia de la física”. Leído desde el Pleno, ese monstruo se domestica, y la cuenta se puede seguir en tres pasos.

Primero: la densidad del cosmos va con el cuadrado de su ritmo de expansión. Segundo: ese ritmo es, a grandes rasgos, uno partido por la edad del universo —cuanto más viejo, más despacio se expande—. Y tercero: esa edad, contada en tics de Planck, es un número enorme. Encadenando los tres, la densidad del cosmos comparada con la del medio sale como uno partido por el cuadrado de ese número enorme. El 10^{123} deja de ser un ajuste fino imposible y pasa a ser la edad del universo en tics, elevada al cuadrado. Sigue siendo un número gigantesco; lo que ya no es es un misterio.

El estiramiento del medio tiene una consecuencia ya medida. Cuando estalla una supernova lejana, su brillo sube y baja a lo largo de unas semanas. Como el universo se ha estado expandiendo mientras esa luz viajaba, nosotros no vemos ese ascenso y descenso con su duración original: lo vemos *estirado en el tiempo*, como una película pasada más despacio.

La luz misma llega estirada —su longitud de onda crece, y su color se corre hacia el rojo—, y la predicción es limpia: la duración del estallido se estira exactamente en el mismo factor que la onda. Si la luz llega con la onda duplicada, el estallido dura el doble. Los astrónomos escriben ese estiramiento como el factor de la luz elevado a un exponente, y el rastreo de supernovas DES lo mide sobre mil quinientas cuatro (1504) de ellas (White y colaboradores, 2024): $1,003 \pm 0,011$. La teoría dice 1, exacto y sin ningún parámetro.

Una luz que simplemente se cansara por el camino daría 0. Ésa fue la alternativa clásica a la expansión, la “luz cansada” que propuso Fritz Zwicky en 1929: que la luz perdiera energía al atravesar el espacio y se enrojeciera sin que nada se estirara; entonces la onda llegaría alargada, pero el estallido duraría lo que duró. El modelo estándar también da 1, porque lo supone al postular un espacio que se expande; aquí sale del medio. Es un acuerdo a un cuarto de desviación ($0,27\sigma$), la luz cansada queda fuera a unas noventa (90), y la duración de un estallido no se puede ajustar.

La hora del reloj cósmico

[DERIVADO]/[DLF]

El ritmo de expansión tiene una fórmula de tres piezas, y solo una de ellas se toma del mundo.

La fórmula es

$$H_0 = \sqrt{\frac{8\pi}{3}} \frac{c}{\ell_P} \sqrt{\Theta_0} ,$$

producto de una constante geométrica, el ritmo del tic de Planck c/ℓ_P —el reloj más rápido que existe— y Θ_0 , que es la posición de hoy leída hacia fuera, en escala —el reparto del cosmos es la otra lectura, hacia dentro, en amplitud, como f_c ; son dos instrumentos sobre la misma marcha, y ninguno se convierte en el otro—, y vale

$$\Theta_0 = \frac{3}{8\pi N_{\text{tic}}^2} \approx 1,66 \times 10^{-123}, \quad N_{\text{tic}} \approx 8,5 \times 10^{60},$$

donde N_{tic} es sencillamente la edad del universo contada en tics de Planck. Con esa lectura, la fórmula reconstruye los 67 km/s por megapársec que miden los satélites. Y no es un reloj aparte: es la identidad del límite de velocidad, leída al revés —la misma prisa relativa del medio que en lo pequeño pone la velocidad de la luz, en lo grande marca la hora—.

Con la posición fijada, la historia entera de la expansión queda decidida por la forma del pozo, sin margen para retocarla. Contra las distancias que mide DESI, un mapa de millones de galaxias, da $\chi^2 = 6,54$ frente a 6,53 del modelo estándar —estadísticamente idéntico, con los mismos grados de libertad, pero con los parámetros derivados en vez de ajustados—. El χ^2 suma, punto por punto, el cuadrado de cuánto se aparta la curva de cada medida, contado en unidades de su error: una curva que pasa bien por n medidas da un χ^2 cercano a n . Los grados de libertad son los puntos medidos menos los parámetros que se ajustaron con ellos: lo que queda de comprobación una vez descontado lo que la curva pudo acomodar. Ese empate no es un empate. El modelo estándar llega a su cifra con parámetros que salen de ajustarlo a otros datos; la forma de la curva del Pleno la escribe de antemano su pozo, y no tiene nada que mover. Y el estiramiento temporal de las supernovas lejanas sale exacto, $b = 1$ frente a $1,003 \pm 0,011$ observado: acuerdo a $0,27\sigma$ sin ningún parámetro.

La comprobación. La fórmula no tiene margen; lo que podía fallar es la curva sobre la que se lee. Con la edad que el ajuste del fondo de microondas le asigna al universo, un fondo que se expandiera a 73 km/s por megapársec exigiría un universo más viejo que su propio tiempo de Hubble —uno partido por el ritmo de expansión, que es la edad que el universo tendría si siempre se hubiera expandido al ritmo de hoy—: 1,03 veces ese tiempo. Un medio con $w = -1$ y la fracción de materia del programa llega a 0,953, y no más. Los 67 caen dentro, sin forzar nada. Y hay un reloj que no pasa por el ajuste de ningún modelo: la edad de las estrellas más viejas. Si pasan de trece mil quinientos millones de años ($1,35 \times 10^{10}$), la misma curva no admite un fondo por encima de 69.

Qué cambia con esto. Un modelo que ajusta ese número no puede decir por qué vale lo que vale; una fórmula que lo lee como hora, sí: vale eso porque el universo está en el punto del recorrido en que está.

Esa lectura ordena además un enigma que trae de cabeza a los astrónomos. Al medir el ritmo de expansión de dos maneras se obtienen números distintos. Una lo deduce del fondo cósmico de microondas, la luz más antigua del universo, emitida cuando tenía unos trescientos ochenta mil años (380000), leído con el modelo estándar, y da alrededor de sesenta y siete (67). La otra lo mide en el universo cercano, escalón a escalón, con estrellas y supernovas cuya distancia se conoce, y da alrededor de setenta y tres (73). A esa discrepancia la llaman “la tensión de Hubble”, y en el modelo habitual nadie sabe explicarla.

PIU- Ψ dice dos cosas sobre ella, y la primera exige una distinción que en el debate suele perderse. Los setenta y tres (73) del universo cercano son una medida correcta de lo que miden: el ritmo al que se alejan las galaxias que tenemos a mano. Lo que está en discusión no es esa medida, sino otra cosa: cuál de los dos números es el *ritmo de fondo* del universo entero. Y ahí el programa se decanta por el bajo.

El alto queda descartado como fondo, y no por preferencia. Con la edad que se le asigna al universo, y con la cantidad de materia que el programa deriva —algo menos de un tercio del contenido—, un fondo de setenta y tres (73) exigiría que el universo se hubiera expandido antes más despacio que ahora, y eso solo lo consigue una energía oscura cuya densidad vaya creciendo con el tiempo; un medio que se relaja hacia su reposo no puede fabricarla. Los sesenta y siete (67), en cambio, la curva del Pleno los aloja sin forzar nada. Y el descarte tiene holgura: resiste cuatro veces lo que esa cantidad de materia puede variar dentro de su margen.

La segunda es que la incompatibilidad —la “tensión”— no es una anomalía física que reclame nueva materia o nuevas fuerzas, sino un espejismo que produce el propio método de medida: un efecto que no está en el cielo, sino en la manera de leerlo. El sesenta y siete (67) del fondo de microondas no es una lectura directa: es el valor que el modelo estándar necesita para que ese fondo le encaje, calculado con su *plantilla*, la forma de curva de expansión que el análisis da por supuesta para convertir lo que ve en números. Cuando con esa plantilla se analiza un medio como el Pleno, que no es el suyo, las dos formas de medir parecen chocar aunque el fondo sea uno solo: la brecha entre sesenta y siete y setenta y tres (73) aparece por el molde con que se leen los datos, no porque el universo esconda dos ritmos de expansión en pugna.

De ahí sale una predicción, y con su signo dicho: esa discrepancia debe *atenuarse o disolverse* cuando la expansión se mida con observables que no pasen por esa plantilla. Hay uno a mano. Una esfera de galaxias mide lo mismo a lo ancho que a lo largo de la línea de visión, y comparar esas dos medidas no exige ninguna regla prestada. Si la historia de expansión con que se convierten ángulos y corrimientos al rojo —cuánto se ha enrojecido la luz por el camino, que es la manera de saber a qué distancia está lo que se mira— en distancias es la equivocada, la esfera sale achatada.

Lo mismo vale para la otra noticia de la cosmología reciente: que la energía oscura podría estar debilitándose. Lo insinúa DESI, un rastreo que cartografía millones de galaxias para seguir la expansión a lo largo de miles de millones de años, cuando combina sus datos con los del fondo de microondas y las supernovas. El programa sostiene que esa señal es el mismo tipo de espejismo —el reflejo de forzar una energía oscura constante dentro de un molde que espera una variable—, y que se atenúa al medirla sin ese molde. Medida sobre esa forma de las estructuras del cielo, sin piezas prestadas, la señal se reduce a menos de la mitad. No se anula.

Esa idea — H_0 como hora y no como constante— deja resueltas cuatro cosas a la vez. Deja de ser un misterio por qué la expansión vale justo lo que vale. El “uno seguido de ciento veintitrés ceros” se convierte en una cuenta de tics elevada al cuadrado. El setenta y tres (73) queda excluido como valor de fondo. Y el exponente con que se estiran las curvas de luz de las supernovas lejanas sale exacto. Tres cosas que el modelo estándar no sabe hacer y una que solo supone; aquí caen juntas porque no eran cuatro problemas.

Tres anomalías que se reducen a un solo hecho

[DERIVADO]/[DLF]

Las tres anomalías son el mismo medio leído con una plantilla ajena: un reloj al que se le exige una constante.

Ninguna de las tres nace de una medida mal hecha. Los datos son buenos y dicen lo que dicen; lo que cambia es el molde con que se convierten en números, que es el del modelo estándar y no el del Pleno.

El peor ajuste fino de la historia. Ese factor 10^{123} es Θ_0 dado la vuelta: el cuadrado de la edad del universo medida en tics de Planck. No hay nada que cancelar.

El H_0 del universo joven. Aquí está la clave de las dos anomalías, y es que los dos números no son de la misma clase. El valor local, alrededor de 73, es una medida: se obtiene escalón a escalón con estrellas y supernovas. El valor que se atribuye al universo primordial, alrededor de 67, **no se mide**: es el número que el modelo estándar necesita para que el patrón del fondo cósmico le encaje, y para obtenerlo hay que suponer de antemano una curva de expansión e integrarla. La discrepancia célebre no compara, entonces, dos medidas: compara una medida con la salida de un ajuste. Cambiada la curva que se supone, cambia esa salida, y no porque el cielo haya cambiado.

La energía oscura “variable” de DESI. Un medio que reposa quieto, con su w clavado en -1 , mirado con un molde hecho para cazar cambios, deja exactamente la sobra que los análisis están leyendo como un cambio.

Qué cambia con esto. La literatura las trata como tres problemas independientes, cada uno con su propia familia de soluciones propuestas. Aquí las tres son la lectura de un solo medio, que marca una hora en vez de guardar una constante, hecha con una plantilla que no es la suya. Las medidas siguen

siendo buenas; lo que no encaja es el molde. Y ninguna de las tres pide un ingrediente añadido.

La prueba sin regla: el cociente que cancela lo prestado

[DERIVADO]

Casi toda comparación cosmológica necesita alguna regla prestada de otro modelo; dividir una distancia por otra no necesita ninguna.

Cuando una teoría se compara con los datos del cosmos, arrastra normalmente cosas que no derivó: el horizonte sonoro —la distancia que el sonido alcanzó a recorrer en el plasma primitivo, que queda impresa en el reparto de las galaxias y sirve de regla en el cielo—, la calibración del brillo de las supernovas, la plantilla con que se ajusta la curva. Si el acuerdo sale bien, nunca se sabe del todo cuánto se debe a la teoría y cuánto a lo prestado. Las estructuras del cielo no tienen, en promedio, una dirección preferida: una esfera de galaxias mide lo mismo a lo ancho que a lo largo de la línea de visión. Si al convertir ángulos y corrimientos al rojo en distancias se usa una historia de expansión equivocada, la esfera sale achatada o estirada (es la prueba de Alcock y Paczyński). Se mide la misma estructura en las dos direcciones y se toma el cociente:

$$F_{\text{AP}}(z) = \frac{D_M(z)}{D_H(z)} = E(z) \int_0^z \frac{dz'}{E(z')}.$$

En él, z es el corrimiento al rojo, que marca a qué distancia se mira; D_M y D_H son las distancias que se deducen del tamaño a lo ancho y de la profundidad a lo largo de la visual, y $E(z)$ es el ritmo de expansión de entonces dividido por el de hoy. Al dividir desaparecen la escala absoluta, el horizonte sonoro y toda calibración; sobrevive únicamente la *forma* de la curva de expansión, que es lo que el potencial derivado fija.

Sobre ese observable el programa no tiene libertad ninguna: sus dos entradas —la fracción de materia, $\Omega_m = 1 - f_c = 0,3131$, y la ecuación de estado del fondo, $w = -1$ — están fijadas antes de mirar el dato. Contra los seis corrimientos al rojo que DESI DR2 publica,

$$\chi^2 = 6,669 \text{ sobre seis puntos y ningún parámetro ajustado,}$$

es decir, 1,111 por grado de libertad, y ningún punto se desvía más de 1,69 veces su error.

La misma comparación sirve para medir la señal de energía oscura variable sin la infraestructura prestada. Sobre el dato desnudo, dejar que la ecuación de estado varíe mejora el ajuste apenas $\Delta\chi^2 = 1,66$ —a lo sumo 1,3 desviaciones—, frente a las 2,8 a 4,2 que reporta el análisis que combina DESI con el fondo de microondas y las supernovas. Al quitarle las piezas prestadas, la señal se atenúa; no se anula.

La comprobación. Sustituyendo la fracción del programa por $\Omega_m = 0,35$, el χ^2 sube en 6,86. La curva no acepta cualquier valor.

Qué cambia con esto. Una teoría que ajusta bien puede estar ajustando bien sencillamente porque tiene con qué. Aquí no hay con qué: la curva está escrita antes de mirar el dato, y el dato no la mueve. Eso sí, hay que decir con cuidado qué significa aquí “sin ajustar nada”. El punto del recorrido en que está hoy el medio sí se toma del mundo: es la hora del reloj cósmico, y se lee una vez, antes que todo lo demás. Lo que no se tocó fue nada para cuadrar con *estas* galaxias en concreto: la curva ya estaba escrita cuando se miraron.

Las 1,3 desviaciones que sobreviven no las produce el medio, y se puede decir por qué. Las dos paredes del pozo —el techo por arriba, el suelo por abajo— solo se dejan sentir mientras el medio va bajando hacia el fondo; una vez sentado en el fondo, están tan lejos que no lo tocan. Y el medio lleva sentado ahí desde poco después del rebote: cuando un telescopio mira lo más lejos que alcanza, lo que ve es un medio que lleva en reposo un número de tics de Planck con sesenta (60) ceros. Su corrección a la curva de expansión, a esas distancias, es exactamente **cero**. Y ningún sector del Pleno puede apartar el fondo de ese reposo. Lo que queda abierto es de otra clase. Esa pizca de señal aparece en el dato desnudo, y crece hasta tres o cuatro desviaciones en el análisis que junta el mapa de galaxias con el fondo de microondas y las supernovas, donde para leer cada pieza hay que dar algo por supuesto. Si sale de la medida misma o del molde con

que se juntan las tres lo decide el dato desnudo, con sus covarianzas completas y sin plantilla.

21. El ciclo: el final, el rebote, y lo que quedó fijado en él

La palabra “expansión” no significa lo mismo en las dos descripciones. En la imagen habitual, el espacio *se crea*: el universo es un escenario que se agranda, y puede agrandarse sin fin. En el Pleno no hay escenario que agrandar. Lo que llamamos expansión es el medio estirándose, y el número de celdas del medio no cambia: son las mismas de siempre, cada vez más estiradas. Es la diferencia entre un tejido vivo que crece fabricando células nuevas por todas partes y una malla ya tejida que se estira, donde no aparece un solo hilo más.

Esa diferencia decide el final. Un escenario que se crea puede seguir creciendo para siempre; una malla que se estira acaba dando de sí todo lo que tenía. Y la razón física es la misma. En una curva de energía, lo que empuja es la *pendiente*, no la altura. Una bola puesta en una ladera rueda; puesta en el fondo del valle se queda quieta, aunque ese fondo esté a mil metros sobre el nivel del mar. Lo que mueve la expansión del universo no es, entonces, cuánta energía hay en el suelo del pozo, sino lo inclinado que esté el terreno donde el medio se encuentra. Y en el fondo no está inclinado. El suelo se queda donde está; lo que desaparece es la cuesta que quedaba por bajar.

De modo que **la expansión no sigue para siempre**: el ritmo al que el universo se estira tiende a cero. No hay aquí el destino de De Sitter del modelo estándar —en el que la expansión se estabiliza en un ritmo positivo, se acelera indefinidamente y las galaxias acaban perdiéndose de vista unas de otras—. Las dos descripciones coinciden en lo que hoy se puede medir, y divergen por completo en el futuro.

El ciclo tiene dos fases: el *crunch*, el gran aplastamiento, y el rebote.

No cicla todo. El Pleno se reparte en dos poblaciones que se comportan de manera opuesta. El condensado en reposo —la energía oscura, el sesenta y nueve por ciento (69 %) del contenido— es homogéneo y **no se agrupa**: en él la presión se reequilibra a la velocidad de la luz, de modo que un exceso local se allana antes de llegar a formarse, y la gravedad no tiene de qué tirar. Por eso no participa del colapso: es el océano, que no se amontona. La materia —el treinta y uno por ciento (31 %) restante, la ordinaria y la oscura juntas— es lo único que la gravedad concentra, y lo único que cicla: son las olas, que suben y rompen sobre él.

De ahí sale además **por qué el universo no colapsa entero**: más de dos tercios de su contenido no se agrupa. Solo el treinta y uno por ciento (31 %) puede caer, y la materia disponible para cada ciclo está acotada por esa misma fracción.

Y el motor del crunch es la gravedad. No la gravedad local de una nube de materia —eso se queda corto por unas seiscientas mil veces ($5,9 \times 10^5$)—, sino la gravedad del contenido entero actuando a la vez: la contracción del universo como un todo. Al contraerse, el medio se comprime; comprimido, sube por su pared; y de ahí vuelve. Ése es el ciclo.

Por qué no puede haber una singularidad. La historia habitual empieza en un instante de densidad infinita del que sale todo y en el que las ecuaciones dejan de significar nada. En el Pleno eso no puede ocurrir, por la misma razón que en los agujeros negros: el medio tiene un techo de compresión, y la energía que cuesta acercarse a él crece sin cota. Como la energía del universo es finita, la compresión se detiene siempre antes: allí donde la pared superior de la curva de energía iguala la energía que hay, el medio da la vuelta. Eso no depende de ningún freno ni de ninguna viscosidad: lo garantiza la forma misma de la curva. Un universo que se contrae no termina en un punto. El medio se resiste, lo devuelve, y **rebota**. Lo que llamamos el principio es el instante en que dio media vuelta.

Quién comprime. No puede ser la gravedad de la propia región. Llevar el medio hasta la zona de la pared exige una densidad de energía de unas mil seiscientas ochenta (1680) veces la propia del Pleno; lo más que la gravedad de una región densa de materia puede aportar son 0,0028 de esas mismas unidades. Faltan 5,77 órdenes de magnitud —casi seiscientas mil veces—. Una región que colapsa por su propio peso no llega ni de lejos: se estabiliza apenas por encima del fondo y ahí se queda. Quien comprime el medio hasta el rebote, por tanto, es la gravedad del universo entero contrayéndose a la vez, no la de una región por sí sola.

Y qué hace la viscosidad. La vuelta la da la pared; la viscosidad decide cómo se da. La resistencia del medio a los cambios bruscos crece cuanto más deprisa se le obliga a deformarse. Es lo de la maicena: el dedo entra si se mete despacio, y rebota si se golpea. En el rebote, la energía que la compresión guardó se suelta de golpe: la deformación se acelera, la viscosidad crece con ella, y la energía que sobra se queda en el medio como calor.

Sin esa viscosidad creciente el medio da la vuelta igual, porque la vuelta la pone la pared, pero sale deformándose del orden de mil veces (10^3) más deprisa que la tasa máxima a la que admite una cizalla. No es una imposibilidad: el rebote es una dilatación igual en todas las direcciones, sin cizalla, en la que nada tiene que propagarse de un punto a su vecino, y esa prisa es la energía de la compresión convertida en movimiento. Con la viscosidad, la integración numérica —dejar que el computador siga la ecuación instante a instante y vea adónde lleva— muestra que la deformación se acerca a esa tasa máxima y nunca la alcanza, se suelte el rebote desde donde se lo suelte.

Y por eso el rebote es limpio. El medio no rebota varias veces contra la pared ni se queda vibrando junto a ella. Hoy, en su reposo, el medio está *muy* poco amortiguado. Hay una escala para medir eso: cuando el amortiguamiento vale uno, un sistema apartado de su sitio vuelve sin pasarse, sin una sola oscilación; por debajo de uno oscila, y cuanto más bajo, más veces oscila antes de calmarse. El del medio en reposo vale una centésima escasa (0,0116), de modo que si se lo perturbara estaría oscilando muchísimo tiempo. Y comprimirlo no ayudaría: un resorte más duro oscila más, no menos.

Lo que hace el trabajo es la viscosidad. Como crece con la prisa, cuando la deformación llega casi a su tasa máxima —al 98,84 %— el amortiguamiento ha pasado de esa centésima a valer uno, y de ahí en adelante sigue creciendo sin cota a medida que la prisa se acerca a un límite que ninguna trayectoria alcanza. Cerca del punto de retorno el medio ya no se comporta como un resorte: es la maicena golpeada de repente, que encaja el golpe sin vibrar. El rebote da la vuelta una sola vez y sale, en unas treinta veces el intervalo de tiempo más corto que el medio admite: lo que tarda la luz en cruzar una celda.

Lo que quedó fijado en el camino de vuelta. Al expandirse, el medio se enfría y cruza un punto en el que *cuaaja*. La imagen es la del agua que se congela: mientras es líquida no tiene direcciones ni estructura; al cristalizar aparecen los ejes, los planos y los defectos, y quedan fijados. El Pleno hace algo equivalente, y pasa de la geometría más compacta que existe —doce vecinos por celda, el empaquetamiento de las naranjas en el mercado, que Kepler conjeturó como el más denso posible y Hales demostró— a la red diamante de cuatro vecinos con la que opera hoy.

Esa transición no es instantánea. Reorganizar de doce vecinos a cuatro libera una cantidad de calor considerable, el mismo calor latente que entrega el agua al helarse: una estructura más ordenada guarda menos energía que la de partida, y la diferencia sale en forma de calor. Y el medio no puede terminar de cristalizar hasta evacuarlo. Mientras lo evacúa se queda en una *meseta*: un tramo en el que las condiciones apenas cambian. Y esa meseta es la ventana en que se forman las partículas.

De ahí se sigue que todos los electrones del universo son idénticos. La física estándar lo atribuye a

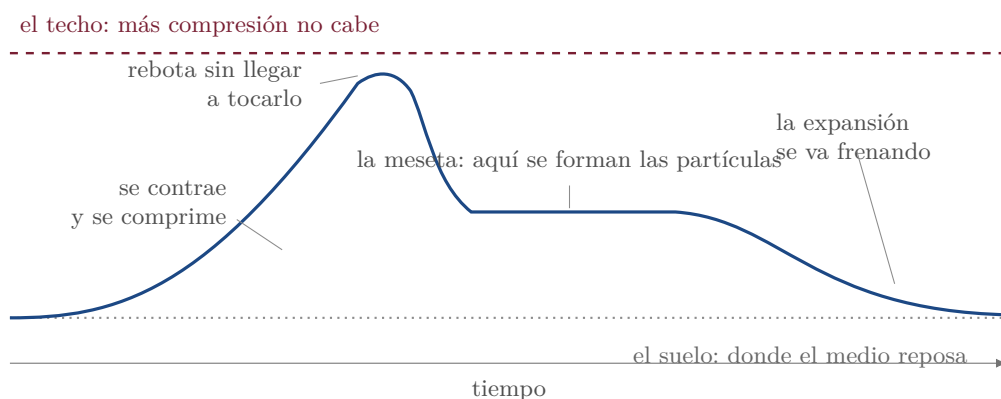


Figura 12: El ciclo, de un vistazo. El medio se contrae y se comprime, sube hacia su techo sin llegar a tocarlo y rebota; en el camino de vuelta se queda un tramo en la meseta, que es donde se forman las partículas, y después baja a su suelo, donde sigue hoy con la expansión frenándose.

que todos son ondas de un mismo campo; aquí ese campo es el Pleno, y la meseta añade por qué ninguno salió distinto: todos se formaron en las mismas condiciones, durante la misma meseta.

Lo que no quedó fijado ahí. En ese instante no quedaron fijadas las constantes del universo. Lo que la energía oscura es, por ejemplo, *no* nace en el rebote: es el condensado de fase del medio, en reposo en el fondo del pozo, y ese fondo está ahí por lo que el medio es, con rebote o sin él, y en su derivación no entra un solo dato de la historia cósmica. Lo que la cristalización decide es el *reparto* entre lo que quedó coherente y lo que quedó atrapado como materia. Cómo se decidió cuánto medio quedó acompasado y cuánto quedó atrapado en nudos, el programa lo razona como un congelamiento del tipo que describieron Kibble y Zurek —regiones que se ordenan cada una por su cuenta dejan nudos allí donde se encuentran—; cuánto quedó de cada cosa, no lo calcula: lo lee del cielo, igual que lee la hora del reloj cósmico.

Cada partícula es uno de esos defectos del cristal: el mismo medio en otra configuración, con parte del volumen atrapada. Hay una sola sustancia antes y después.

Qué se puede contrastar. Ese episodio de paso —el transitorio, como se lo llama— no es observable ni puede serlo: ocurre con el medio cerca de su máxima compresión, y entre él y la observación más temprana que existe —la formación de los primeros núcleos, un segundo después del principio— median cuarenta y tres (43) órdenes de magnitud en tiempo, es decir, con cuarenta y tres ceros de por medio. Lo que se contrasta no es el suceso, sino los sellos que dejó grabados: de este rebote salen unas ondulaciones iniciales de tamaño casi igual en todas las escalas, grandes y pequeñas —lo que los cosmólogos llaman un espectro casi invariante de escala—, que es justo lo que el cielo muestra, y salen **sin necesidad de inflación**. En el modelo estándar ese trabajo lo hace la inflación: una expansión descomunal en la primera fracción de segundo, impulsada por un campo propio (el inflatón) que se postula para ello. Aquí lo hace el rebote, que la teoría ya contiene, y el mecanismo se puede seguir. Lo que ondula no es la compresión del medio —ésta tiene un coste de entrada altísimo y está congelada—, sino su giro, que no cuesta nada mover. Y durante la contracción el medio se comporta como polvo: lo que hay en él son nudos contables, y unos nudos que se conservan y se van juntando al contraerse el espacio se diluyen exactamente como se diluye la materia sin presión. Eso no se supone, se sigue de qué está hecha la materia aquí. Y con el medio comportándose así, la cuenta estándar de cómo crecen las ondulaciones durante una contracción —la de Mukhanov y Sasaki, en la forma que Wands, y después Finelli y Brandenberger, estudiaron para una contracción de materia— devuelve, sin tocar nada más, ondulaciones del mismo tamaño en todas las escalas. El tamaño igual no se pide: sale. Sobre él, el cielo muestra una inclinación pequeña a favor de las escalas grandes —el *casi*—, y su signo el programa lo deriva: es el de la presión del medio en el momento

en que cada ondulación queda congelada. Que salga hacia el lado que se observa pide que ese momento caiga donde el medio está más diluido que en su reposo, y fechar ese momento es un cabo abierto. El valor, 0,965, se lee del cielo.

Dónde estamos, y hacia dónde vamos. En la rama de la expansión, después del rebote. El medio cristalizó, formó en esa cristalización lo que hoy llamamos materia, y bajó enseguida al fondo de su curva de energía, donde reposa desde entonces. La materia se rarifica; el peso relativo del fondo crece, porque él no se diluye; el ritmo de expansión baja. Ésa es la posición, y ése es el sentido de la marcha.

Lo que falta para cerrar el ciclo. Que el final de la expansión dé paso a la contracción siguiente es una pieza **abierta**. La ecuación del ciclo lleva un empuje que viene del conjunto: la contracción del universo entero, tirando de cada punto del medio. Ese empuje está en la ecuación, pero su forma exacta no está deducida desde los axiomas, y la integración lo pone en cero. Ese cero es un recurso de cálculo, no un resultado del programa.

Y qué no dice el programa. El rebote tiene su ecuación, sus coeficientes derivados y su integración numérica; no tiene el grado de detalle que alcanza el resto del edificio. Antes del rebote hubo una contracción, porque sin ella no habría nada que rebotara; lo que no hay es un “antes” del Pleno, porque el “antes” es una medida de cambio y sin medio no hay cambio que medir. El programa describe un ciclo, pero **no afirma que haya habido una sucesión de ciclos, ni cuántos**, porque falta el eslabón que empalma el final de una expansión con la contracción siguiente. Lo que la ecuación describe con detalle es la transición por la que este universo pasó; de ahí no se sigue una cadena, y el programa no la reclama. Y no dice de dónde salió el medio. El programa describe cómo opera el Pleno; no explica por qué hay un Pleno en vez de nada. Ésa es una pregunta legítima, y está fuera de su alcance.

El rebote: la ecuación del ciclo y su regulación

[DERIVADO]/[DLF]

Una sola ecuación describe el ciclo: dos motores la mueven, la pared superior de la curva de energía da la vuelta, y la viscosidad del medio disipa lo que sobra para que la vuelta sea limpia.

La compresión del Pleno, mirada a la escala del universo entero y por igual en todas partes, se comporta como un oscilador cuya resistencia no crece de forma proporcional, sino cada vez más deprisa —un oscilador de Gent con amortiguamiento dilatante—. En ella, un punto sobre una letra quiere decir «a qué ritmo cambia», y dos puntos, «a qué ritmo cambia ese ritmo»:

$$\rho_P \ell_P^2 \ddot{S} + \eta(\dot{\gamma}) \dot{S} + \frac{dV_{\text{eff}}}{dS} = F_{\text{ext}}, \quad \dot{\gamma} = \frac{2|\dot{S}|}{S},$$

donde V_{eff} es el potencial derivado, η la viscosidad que crece con la prisa, $\dot{\gamma}$ la tasa de deformación —lo deprisa que el medio está cambiando de forma— y F_{ext} el empuje que el conjunto ejerce sobre cada punto: la contracción cosmológica. Todos los coeficientes están derivados; el único término sin fórmula exacta es F_{ext} , que la integración pone en cero. La forma con que la viscosidad crece con la prisa, $\eta \propto 1/(1-x)$, es una elección constitutiva, y lo que depende de ella lleva la etiqueta **[DLF]**.

La vuelta la da la pared, no el freno. El potencial V_{eff} crece sin cota antes del techo $S_{\text{máx,geom}}$, y la energía total E_{tot} es finita y no crece. De ahí, para todo instante,

$$\bar{S}(t) \leq V_{\text{eff}}^{-1}(E_{\text{tot}}) < S_{\text{máx,geom}},$$

donde $\bar{S}$ es la compresión media y V_{eff}^{-1} lee, sobre la rama comprimida de la curva, a qué compresión corresponde una energía dada. La compresión nunca pasa del punto en que la pared iguala la energía disponible. Ese crecimiento lo ponen los términos elásticos que llevan el techo —el hiperelástico y el de Gent—; ni la viscosidad ni su factor dilatante intervienen. **[DERIVADO]**. La pared de abajo, la de Klauder, hace lo mismo del otro lado: impide que el medio se extinga ($S > 0$) y da el punto de retorno cuando, tras el rebote, el medio pasa de largo su suelo por inercia.

Los dos motores, y su asimetría. El crunch lo fuerza la contracción, que ocurre al tamaño y al ritmo del universo entero; el rebote es el medio soltando su elasticidad, al tamaño y al ritmo del grano. Uno es lento y el otro rapidísimo, y la asimetría no está en el freno.

Eso lo dicen las dos barras del $|\dot{S}|$ en la ecuación del ciclo: la viscosidad depende de la prisa con que el medio cambia de forma, no del sentido en que la cambia. A un mismo grado de compresión y a una misma prisa, el medio frena igual subiendo que bajando.

Está en el resorte. Subiendo, el medio va contra su propia fuerza de recuperación, que además se endurece conforme se acerca al techo: la compresión es cuesta arriba, y por eso es lenta, tan lenta que al medio le da tiempo de ordenarse mientras ocurre. Bajando, esa misma fuerza empuja en el sentido del movimiento, y el rebote no es más que la descarga de lo que la compresión guardó. El mismo freno, con el resorte al revés. Cuánto rompe esa simetría del freno la dependencia térmica cerca del techo es un cabo abierto del programa.

Por qué la autogravedad no basta. Con $\Delta\varepsilon(S) = V_{\text{eff}}(S) - V_{\text{eff}}(S_{\text{mín}})$, llevar el módulo a la zona de la pared exige $\Delta\varepsilon(1,45) \approx 1,68 \times 10^3 \rho_P c^2$, mientras que la autogravedad local aporta $\approx 2,8 \times 10^{-3}$: un factor $5,9138 \times 10^5$, o 5,77 órdenes de magnitud. Integrada la ecuación con esa fuerza, el sistema se estabiliza en $S \approx 0,743$, apenas sobre el fondo.

La razón de amortiguamiento. Con $m = \rho_P \ell_P^2$ y $k = V_{\text{eff}}'' = \xi_{\text{loc}} \rho_P c^2$,

$$\zeta = \frac{\eta(\dot{\gamma})}{2\sqrt{mk}} = \frac{\zeta_0}{1-x}, \quad \zeta_0 = \frac{1}{2\sqrt{20} S_{\text{máx,geom}}^2 \sqrt{\xi_{\text{loc}}}},$$

que en el suelo de hoy vale $\zeta_0 = 0,0116$: el modo radial está muy subamortiguado. Al comprimir, ξ_{loc} crece y ζ_0 *baja*. El cruce a sobreamortiguado no lo trae la curvatura, sino el factor $1/(1-x)$ de la dilatación: $\zeta = 1$ en $x = 1 - \zeta_0 = 0,9884$, y ζ crece sin cota hacia el polo $x = 1$, que ninguna trayectoria amortiguada alcanza.

La comprobación. Repetida la integración con amortiguamiento constante en vez del dilatante, y soltando desde $S = 1,45$, la tasa de deformación llega a $3,9 \times 10^3$ en unidades de c/ℓ_P . No es una violación: el rebote es dilatación homogénea y no tiene cizalla, de modo que la cota $\dot{\gamma}_{\text{máx}} = c/\ell_P$, que acota la cizalla, no lo restringe; esa tasa es energía potencial convertida en cinética. Soltando desde $S = 1,0329$, la compresión a la que el medio cristaliza, sin el factor dilatante el medio pasa de largo su suelo hasta $S = 0,3865$ y tarda 76,66 tics de Planck en asentarse; con él, sólo hasta 0,6551, y se asienta en 31,54. Barriendo el punto de partida desde $S_0 = 0,9$ hasta $S_0 = 1,45$, con la viscosidad dilatante $x_{\text{máx}}$ crece de 0,989 a 0,999999 sin cruzar nunca $x = 1$, y el resultado no cambia aunque se rehaga la cuenta con pasos cada vez más finos, que es la manera de comprobar que no es un espejismo del método.

Qué cambia con esto. La singularidad inicial es, en la relatividad general, un teorema: el de Penrose y Hawking. Los modelos que la evitan suelen hacerlo añadiendo materia exótica o eligiendo condiciones iniciales. Aquí no se evita: es *inaccesible*, porque el material no admite esa compresión, y la cota que lo impide es la misma pared de la que salen el techo del pozo y el núcleo de los agujeros negros. Que la vuelta ocurra antes del techo está demostrado sin apoyarse en la viscosidad, y seguir la ecuación instante a instante, con todos sus coeficientes salidos de la teoría, no lleva ningún número libre. Que en ese vuelco quedara decidido cuánto medio siguió acompasado —la energía oscura— y cuánto quedó atrapado en nudos —la materia— se sigue del argumento, pero cuánto quedó de cada cosa no se calcula aquí: se lee del cielo.

22. Hasta dónde llega el programa, y qué queda por decidir

PIU- Ψ es un edificio matemático que reproduce leyes confirmadas y que acierta, con alta precisión y sin ajustes, allí donde se le puede comparar con la realidad. Es el trabajo de un investigador independiente, abierto a la revisión de la comunidad científica. Lo derivado no depende de lo que falta, y lo que no se deriva cabe en tres apartados.

Lo calibrado cabe en dos familias: la vara, con que las unidades del medio se traducen a las nuestras, y la lectura posicional, la hora que marca hoy el reloj cósmico. Y de las dos, la de la vara está cerrada con demostración. Como la velocidad de la luz está fijada por convención en el sistema de unidades, quedan exactamente dos anclas —la densidad del medio y su grano—, y el programa demuestra que dos es el número que hace falta: ni una ni tres. La lista de lo que hay

que anclar no se puede alargar.

La lectura posicional tiene además su libro mayor, que dice cuánto se lee del mundo y qué queda fijado con cada lectura. Leer dónde está un sistema sobre su trayectoria no es ajustar su ley, igual que mirar la hora no es fabricar el reloj. La cuenta completa son dos cantidades de estado —el arco recorrido, que es la hora del reloj cósmico, y la ocupación, que es el reparto entre energía oscura y materia—, una escala del mundo pequeño que quedó congelada cuando el medio cristalizó, y la vara. Lo demás cuesta cero: la compresión del medio cae a su suelo desde cualquier punto de partida y olvida de dónde salió, y su fase reposa con $w = -1$. Y ningún número de la ecuación se ajusta a un dato: el programa no tiene un solo parámetro de ley.

Lo que se toma prestado no es una pieza de la teoría, sino una propiedad de la cosa concreta que se está calculando. En el límite de Chandrasekhar salen del propio medio el coeficiente completo y hasta el número que describe cómo se reparte la materia desde el centro de la estrella hacia fuera; lo que entra de fuera es la composición de la estrella, que, puesta a trabajar, se convierte en una predicción: un tope distinto para cada composición.

Lo abierto son veinte (20) cabos, y ninguno es portante: ninguna afirmación del programa lo presupone. Cinco son falsables —cerrarlos abre una confrontación nueva con el mundo— y quince (15) son de enriquecimiento: ni sostienen nada ni abren confrontación, y añaden detalle a lo que ya se deriva. Dos de ellos tocan preguntas célebres. Uno es el sector débil, la fuerza nuclear responsable de ciertas desintegraciones radiactivas. Cada fuerza se transmite por un mensajero propio: el electromagnetismo tiene uno, el fotón, y la débil necesita tres, mucho más pesados, que son los que la hacen tan corta de alcance. De ese sector quedan cuentas por hacer: de dónde sale su escala y el peso de sus mensajeros, y cuánto se aparta el medio de una simetría que la fuerza débil observada cumple hasta una parte en mil (10^{-3}). El otro es la cascada que fijaría la masa del electrón: por qué el electrón pesa lo que pesa es, en PIU- Ψ igual que en el modelo estándar, una pregunta sin responder. Ninguno de los dos afecta a lo derivado.

Lo que el Pleno resuelve, lo que reformula y lo que deja abierto

Problema abierto	Qué hace con él el Pleno
Dos teorías que no encajan	las deriva del mismo medio; la gravedad no se cuantiza, el grano impide los infinitos y la evolución sobre la red es exactamente unitaria —no pierde información—: el problema cambia de naturaleza
Por qué la gravedad es tan débil	porque el medio es rigidísimo: G no mide una fuerza, mide cuánto cede el Pleno al apretarlo, y cede poquísimo
Constantes que solo se miden	G y $\hbar$ salen como propiedades del medio, y los números puros, de su geometría
Las reglas de la cuántica	el límite de lo que se puede saber a la vez, la regla de Born, el techo de las correlaciones, el espín y la negativa de dos electrones a compartir sitio llegan como consecuencias
Carga entera, confinamiento, tres quarks	la carga es el número de vueltas que da la fase alrededor de un nudo, y las vueltas vienen enteras; los tercios de los quarks solo cierran de tres en tres
Las singularidades	el techo de compresión las hace inaccesibles, en los agujeros negros —cuyo interior queda cerrado, con un núcleo de densidad finita— y en el principio
La materia oscura	el mismo medio con su fase girando sin enrollarse, en proporción $\sqrt{3}\pi$ con la ordinaria
La energía oscura y los 10^{123}	el condensado del medio en reposo en el fondo del pozo, con $w = -1$ exacto; el número gigantesco es la edad del universo en tics, al cuadrado
Tensión de Hubble y señal de DESI	el mismo medio leído con el molde de otro modelo: las medidas son buenas, el molde no es el suyo. Las dos se atenúan al medirlas sin ese molde; la de DESI, sobre el dato desnudo, cae a 1,3 desviaciones
Las ondulaciones primordiales	las siembra el rebote, sin inflación
La flecha del tiempo	el tiempo es el cambio acumulado del medio, contado, y no un escenario; su sentido se apoya en la segunda ley del medio, que sale de contar sus configuraciones
Sin resolver	la escala de la fuerza débil y el peso de sus tres mensajeros; las masas de los leptones; el eslabón que empalma un ciclo con el siguiente; por qué el medio tiene la densidad y el grano que tiene; por qué hay un Pleno en vez de nada

Queda una apuesta, y es lo único que ni el álgebra ni los cuadernos pueden decidir. No está en juego lo que PIU- Ψ reproduce de la física ya validada: esas leyes son ciertas hoy, y su certeza no se la presta el programa ni se la puede quitar. Lo que está en juego es la ruta.

Pero que la ruta llegue no es un dato neutro sobre la ruta. Una ley confirmada no necesita volver a probarse porque se la alcance desde otro punto de partida, y llega intacta; lo que cambia con cada llegada es lo que sabemos del punto de partida. Un camino que desemboca una vez en un sitio conocido puede ser suerte. Uno que desemboca en veintisiete (27), repartidos en ocho sectores que no se hablan entre sí, y en muchos casos con el número completo delante, ya no se explica igual de bien por suerte, y eso es exactamente lo que la cuenta de la casualidad midió.

Para que esas llegadas no dijeran nada del origen haría falta una de dos cosas: que el álgebra estuviera mal, o que el resultado se hubiera forzado. Las dos se pueden mirar. El álgebra está escrita paso a paso y tres cuadernos independientes la recalculan entera, cifra por cifra. Y forzar un resultado exige un sitio donde forzarlo —una perilla, un coeficiente libre, un margen donde meter la diferencia—: F1 no tiene ninguno, y es el mismo objeto en los ocho sectores, de modo

que un retoque que arreglara uno desbarataría los otros siete.

Y el programa hace además predicciones propias:

- Las proporciones del cosmos, calculadas desde la geometría del cristal y una sola lectura del reloj.
- La energía oscura con $w = -1$ exacto, cuyo peso relativo crece a medida que la materia se diluye —y, al cabo, un ritmo de expansión que tiende a cero en vez de una aceleración eterna—.
- La tensión de Hubble y la señal de DESI como artefactos del método de medida, que se atenúan al medirlas sobre observables que no presuponen el modelo —la de DESI, sobre el dato desnudo, cae a 1,3 desviaciones—.
- Que a energías altísimas la luz y la onda gravitacional se retrasen por igual, con una escala de energía calculada —raíz de veinte ($\sqrt{20}$) veces la de Planck, setenta y cinco millones de veces ($7,5 \times 10^7$) por encima de la cota que pone el observatorio LHAASO—, y que ese retraso siga en el cielo el dibujo de un cubo —mayor a lo largo de las cuatro diagonales de su cuerpo y menor a lo largo de sus aristas—, con una relación exacta de siete tercios ($7/3$) entre los dos.
- Un núcleo sin singularidad para todo agujero negro, con la misma densidad gravitante en todos: 1,6545 veces la densidad del medio.
- Un tope de masa distinto para cada composición estelar.

Y, sobre todo, la idea que las sostiene a todas: que esas leyes dispersas sean, en realidad, caras de una sola sustancia.

Si la apuesta resulta acertada, habremos descubierto que el universo entero es una sola cosa que se comprime y gira, y que las leyes que creíamos separadas fueron siempre una sola.

En conjunto: una sola cosa mal entendida

El hecho de partida es incómodo: la física, pese a todos sus triunfos, sigue siendo un rompecabezas con piezas que no encajan —lo muy grande y lo muy pequeño descritos por teorías que se contradicen, y cerca del noventa y cinco por ciento (95 %) del universo hecho de algo que sabemos que está ahí pero no entendemos—. Son huecos reales, reconocidos, que llevan décadas resistiéndose. Y frente a ellos, PIU- Ψ hace una pregunta distinta: ¿y si no fueran muchas cosas mal encajadas, sino una sola cosa mal entendida?

Plantearla no probaría nada por sí solo. Lo que cuenta es cómo se persigue esa pregunta: no con un relato cómodo, sino con matemáticas que reproducen leyes ya confirmadas, con una precisión alta y sin números ajustados a mano. Así es, justamente, como la ciencia ha dado sus mayores saltos: alguien sospecha que fenómenos separados son manifestaciones de algo más profundo, y luego lo somete a la prueba de los datos. Newton unió la manzana y la Luna; Maxwell unió la electricidad, el magnetismo y la luz; PIU- Ψ une lo cuántico y lo cósmico bajo una sola sustancia, y muestra que Newton, Maxwell y Einstein escribían, sin saberlo, capítulos del mismo libro.

Con el Pleno, varias cosas cambian de categoría a la vez. El vacío deja de ser nada y pasa a ser un medio en reposo. El espacio y el tiempo dejan de ser el escenario y pasan a ser la extensión y el latido de ese medio. Las constantes dejan de ser datos que se miden y pasan a ser propiedades que se leen, y la de Hubble deja de ser una constante y pasa a ser una hora. Los postulados de la cuántica dejan de ser reglas y pasan a ser consecuencias. La física no pierde ninguna de sus leyes; gana la razón de que sean las que son.

No es casualidad, entonces, el nombre que lleva el programa: *Principio de Integridad Universal*. Es un *Principio* porque todo se sostiene en una sola raíz —seis axiomas y tres cantidades— y en la ecuación que brota de ella, de la que lo demás se deduce, en lugar de un catálogo de reglas sueltas. Habla de *Integridad* en su doble sentido: el de unidad (un universo íntegro, entero, no fragmentado en piezas que no se hablan) y el de coherencia (un edificio que no se contradice consigo mismo ni se rompe en infinitos). Y es *Universal* porque no se reserva un rincón: abarca todo cuanto existe, de la partícula más diminuta al cosmos entero, con una sola explicación. El nombre es la motivación del programa hecha palabra: la búsqueda de la unidad íntegra de todo lo que hay. Y el símbolo Ψ que aparece junto a sus siglas recuerda de dónde parte todo: del Pleno, escrito como la función de onda de un universo que late, en el fondo, como una sola cosa.

23. Veinticuatro preguntas, contestadas desde el Pleno

Cada respuesta se sostiene por su cuenta y usa solo lo que el libro ya ha explicado.

1. Si los átomos están casi vacíos, ¿por qué no puedo atravesar una pared?

Porque no hay ningún vacío que atravesar. Lo que dentro de un átomo se llama espacio vacío es medio en su estado de reposo, tan lleno como el resto: un átomo no es un puñado de bolitas separadas por nada, sino una configuración del mismo material continuo.

Y lo que detiene tu mano no es un choque entre bolitas. Tu mano y la pared son dos regiones de Pleno anudado, y los nudos que forman sus electrones no pueden ocupar el mismo sitio en el mismo estado: es el principio de exclusión de Wolfgang Pauli, que en el Pleno sale del propio carácter de esos nudos. A eso se suma la repulsión eléctrica entre las capas exteriores de sus átomos. Por eso, bastante antes de que algo llegue a atravesarse, lo que cede es tu mano.

2. ¿Por qué las cosas caen?

Una masa mantiene el medio deformado a su alrededor, cada vez menos cuanto más lejos. Cuando dos masas están cerca, esas dos deformaciones se solapan, y al medio le cuesta menos sostener una compartida que dos separadas. Caer es el camino hacia la configuración que menos cuesta.

Nada tira de nada. La Tierra no jala a la manzana: el medio entre las dos se relaja al acercarlas, y eso que se relaja es lo que sentimos como peso.

3. ¿Por qué cuesta tanto empujar un carro pesado, y cuesta lo mismo frenarlo?

Un carro es Pleno anudado, y moverlo significa que el medio de alrededor cede por delante y se recupera por detrás. Mientras va a velocidad constante, ese relevo se hace siempre al mismo ritmo y no pide nada nuevo. Acelerar es exigirle más deprisa, y el medio se resiste tanto más cuanto más deprisa se le pide.

Frenar es cambiar el ritmo igual que acelerar, y por eso cuesta lo mismo. Y un carro más pesado tiene más perfil que reacomodar, de modo que cuesta más en las dos direcciones. Eso es la inercia: lo que el medio cobra por rehacer su perfil a un ritmo dado.

4. ¿Cómo puede un imán de nevera levantar un clip, ganándole a la gravedad del planeta entero?

Porque las dos fuerzas salen de propiedades distintas del mismo medio. El magnetismo nace del giro de la fase: al recorrer un anillo diminuto de la red y volver al punto de partida, el giro no vuelve como salió, y ese desajuste es el campo. La gravedad nace de otra cosa: de la firmeza del medio. Y un medio tan denso como el Pleno cede poquísimo cuando se pone una masa en él: esa cesión minúscula es toda la gravedad que hay.

Si a la escala del cosmos es la gravedad la que se impone, es por otra razón. Las cargas eléctricas se cancelan entre positivas y negativas y a gran escala casi se anulan; la masa solo suma y nunca se cancela. Por eso pierde contra un imán de nevera y gana sobre distancias de galaxias.

5. ¿Qué hay entre la Tierra y el Sol, si dicen que es vacío?

Medio, en su estado de reposo. Eso es lo que la física llama vacío: la configuración de menos energía que el Pleno admite, con una densidad que no es cero ni puede serlo, porque el coste de anularla —la pared de Klauder— crece sin límite conforme se acerca a cero, y el medio nunca llega.

Tiene densidad, tiene un grano mínimo, transmite la luz y la gravedad, y es exactamente la misma sustancia de la que están hechos la Tierra y el Sol. Lo que cambia de un sitio a otro no es de qué está hecho, sino cuánto está comprimido.

6. ¿De qué está hecha la luz, y por qué nada puede ir más rápido que ella?

De lo mismo que todo lo demás. Cada enlace del medio lleva un giro de la fase, y la luz es una torsión de esos giros que circula de enlace en enlace y se propaga por la red.

Esa propagación va a la tasa máxima a la que el medio admite cambiar: una vuelta completa por celda en el tiempo que la luz tarda en cruzarla. Ir más rápido sería pedirle al medio que cambie más deprisa de lo que puede, y su resistencia crece sin cota al acercarse a ese ritmo. La velocidad de la luz no es un tope añadido: es el ritmo propio del material.

7. ¿Qué es el calor? ¿Por qué el café se enfría y nunca al revés?

El calor es desorden en el giro del medio. Cuando las manecillas de fase de todas las celdas van acompasadas, el medio está frío; cuando cada una gira por su cuenta, está caliente. La temperatura mide cuánto desacuerdo hay entre esos giros.

Un café caliente es una región donde los giros van especialmente desacompasados, rodeada de otra donde lo están menos. Ese desacuerdo se va pasando de celda en celda, y hay muchísimas más maneras de quedar repartido que de quedar concentrado. Por eso el café se enfría y el cuarto no se calienta de golpe: no es que algo lo empuje en esa dirección, es que casi todos los caminos llevan al reparto.

8. ¿El tiempo pasa de verdad? ¿Por qué no se puede volver atrás?

El tiempo es el cambio del medio, contado. Donde nada cambia no hay tiempo que medir, y por eso preguntar a qué velocidad pasa el tiempo es preguntar a qué ritmo cambia el cambio.

Y no se puede volver atrás por la misma razón por la que un café no se recalienta solo. El cambio del medio se reparte entre incontables configuraciones, y hay muchísimas más maneras de quedar repartido que de quedar concentrado. Volver atrás exigiría que todas remontaran a la vez hacia el reparto improbable del que salieron.

9. ¿Por qué un reloj en un satélite no marca la misma hora que uno en el suelo?

Porque el tiempo es el cambio del medio, contado, y el medio no cambia al mismo ritmo en todas partes. Cerca de una masa está más comprimido, y un medio más comprimido se reacomoda más despacio: allí todo ocurre con algo más de calma, y un reloj —de péndulo, de cuarzo o atómico, da igual— marca menos segundos. Arriba, donde el medio está más suelto, marca más.

Hay un segundo efecto, y tira en sentido contrario. El medio tiene un ritmo máximo al que puede cambiar, y un reloj que se mueve deprisa gasta buena parte de ese ritmo en desplazarse; lo que le queda para latir es menos, y se atrasa respecto de uno quieto.

Los dos efectos son reales y se miden a diario. En un satélite de navegación el de la altura gana al de la velocidad, y sin corregir la diferencia el sistema erraría kilómetros en un solo día. Lo que el programa aporta no es la corrección —ésa la física ya la tenía— sino de dónde sale: las dos salen de la misma ecuación del medio, y ninguna de las dos hay que ponerla a mano.

10. Si el espacio fuera un cristal, ¿no lo notaríamos?

Un cristal se nota cuando algo lo recorre con un detalle parecido al tamaño de su grano. El del Pleno mide unos 10^{-35} metros, y un protón —que ya es de las cosas más pequeñas que sabemos señalar— es cien trillones de veces (10^{20}) más grande que eso. Todo lo que hoy se puede medir es larguísimo comparado con el grano, y a esa escala el medio se comporta como si fuera liso.

Hay además una razón geométrica. Los cuatro enlaces del tetraedro, promediados, se comportan exactamente como una esfera para cualquier onda mucho más larga que el grano: la forma del cristal se borra sola, sin que haya que suponer nada.

Las direcciones del cristal solo asomarían a energías enormemente mayores que las que hoy se alcanzan, y ahí el programa no se encoge de hombros: dice cómo asomarían. La luz iría un pelo más despacio, y no lo mismo en todas las direcciones del cielo, sino siguiendo el dibujo de un cubo. Y entre la dirección en que más frenaría y aquella en que menos hay una relación exacta, siete tercios ($7/3$). Esa forma y esa relación son la firma de una red de diamante.

11. ¿Por qué todos los electrones del universo son exactamente iguales?

Porque todos se formaron en la misma ventana. Cuando el medio cristalizó, el reordenamiento liberó una cantidad de calor considerable, y hasta evacuarlo el medio se quedó en una meseta: un tramo en que las condiciones apenas cambiaban.

Las partículas se formaron durante esa meseta, todas bajo las mismas condiciones. Y son configuraciones del mismo medio con el mismo número de vueltas: un nudo está o no está, y no hay margen para que uno salga un poco distinto de otro.

12. Si todo es la misma sustancia, ¿por qué hay tantas clases de partículas distintas?

Por la misma razón por la que con una sola cuerda se pueden hacer nudos distintos. Lo que cambia de una partícula a otra no es el material, sino la forma en que el medio está anudado: cuántas vueltas da la fase alrededor del nudo y con qué patrón se sostiene. Y como las vueltas vienen enteras —media vuelta no cierra—, las posibilidades son unas cuantas y bien separadas, no una gama continua. De ahí que haya tipos de partícula, y no un surtido de partículas ligeramente distintas entre sí.

Aquí está también el origen de los tercios de los quarks, que tanto extrañan. Lo que el medio exige no es que cada nudo lleve una carga redonda, sino que el conjunto cierre, y la condición de cierre se cumple de tres en tres. Por eso los quarks no se encuentran sueltos, y por eso los tríos que forman —dos de una clase y uno de otra— dan justo la carga del protón y la del neutrón.

De cuántas clases hay en total, el programa no entrega la lista completa, y lo dice en su lugar: por qué el electrón pesa lo que pesa sigue sin responderse aquí, igual que sigue sin responderse en el modelo estándar.

13. ¿Por qué hay cosas que no se pueden saber a la vez?

Cómo se mueve una partícula está escrito en el ritmo al que gira su fase de un punto al siguiente: giro apretado, mucho momento —el momento es la cantidad de movimiento que lleva, su masa por su velocidad—; giro suelto, poco.

Y una onda encerrada en una región pequeña no puede llevar un solo ritmo. Para apagarse fuera de esa región, en vez de seguir extendiéndose sin fin, hacen falta muchos ritmos superpuestos que

se cancelen unos a otros por fuera y se refuercen por dentro. Cuanto más estrecha es la región, más ritmos hay que mezclar, y menos definido queda el ritmo resultante: confinar es mezclar ritmos, y mezclar ritmos es perder el ritmo definido.

De modo que en un medio así la configuración que tuviera a la vez la posición estrecha y el movimiento afinado sencillamente no existe. No es que no se pueda medir bien: es que no hay tal cosa que medir.

14. ¿Qué ocurre exactamente cuando se mide algo del mundo cuántico?

Antes de medir hay una configuración del medio repartida por una región: una onda de verdad, no un velo de ignorancia sobre dónde está ya la partícula. Un detector es, a su vez, una región enorme de medio anudado, y ponerlos en contacto acaba con ese reparto: la configuración extendida se acomoda en una de las formas que el detector admite, y esa es la que queda registrada.

Que salga una y no otra no hay que añadirlo como regla aparte. El medio tiene un ruido propio —un ir y venir incesante a la escala más pequeña que existe—, y ese ruido es lo que hace impredecible cuál toca cada vez. El azar no se postula: se hereda del material.

Y con qué probabilidad toca cada una tampoco se postula. La fase del medio conserva un caudal, ese caudal se reparte por regiones como el agua de un río entre sus brazos, y la fracción que corresponde a una región resulta ser el cuadrado del tamaño del campo allí. Eso es la regla de Born, que la cuántica enuncia como postulado. Y ese mismo ruido empuja al medio hacia ese reparto y lo sostiene ahí, en el tiempo más corto que el medio admite: por eso nunca se ha visto una desviación.

15. ¿Por qué mueren las estrellas?

Una estrella se sostiene mientras la presión de su interior compensa su propio peso. Cuando se le acaba el combustible, lo único que le queda para aguantar es la negativa de sus electrones a ocupar el mismo estado —el principio de exclusión de Pauli—: donde ya hay uno, no cabe otro.

Esa negativa tiene un tope. Si la estrella pesa demasiado, sus electrones tendrían que moverse más rápido que la luz para seguir sujetándola, y no pueden. Por encima de cierta masa la estrella ya no puede detenerse y sigue cayendo. Ese límite lleva el nombre de Chandrasekhar, que lo calculó en 1931. El programa lo calcula con las piezas del propio medio y le salen 1,456 masas solares, frente a las 1,44 del valor canónico.

16. ¿Qué hay dentro de un agujero negro?

Medio comprimido casi hasta su tope. El Pleno tiene un techo de compresión, y acercarlo a él cuesta una energía que crece sin cota, de modo que el colapso no termina en un punto de densidad infinita: termina en un núcleo saturado, con densidad finita.

Esa densidad es la misma para todos los agujeros negros, tengan la masa que tengan, porque es la densidad de saturación del medio y no depende de cuánto se le eche encima. Uno de diez masas solares y otro de mil millones tienen el mismo corazón; lo que cambia es su tamaño. Y lo que ese corazón pesa no es toda la ocupación del medio, sino lo que excede al medio en reposo: 1,6545 veces la densidad del medio, en todos por igual.

17. ¿Es verdad que no sabemos qué es el 95 % del universo?

En el modelo estándar, sí: la materia oscura y la energía oscura se miden bien y se aceptan sin saber de qué están hechas. En el Pleno las dos son el mismo medio en dos configuraciones distintas.

La energía oscura es la parte del medio que se mueve al unísono, en reposo en el fondo de su pozo, y está en todas partes, también donde no hay nada más. Y la materia oscura es medio

agrupado, con su masa y su peso, pero sin el enrollamiento —las vueltas que la fase da alrededor del nudo— que ancla la materia ordinaria a la red. Ese enrollamiento es justamente lo que hace que la materia ordinaria emita y absorba luz; sin él, el nudo pesa y atrae como cualquier otro, pero ni brilla ni hace sombra. Que es exactamente lo que los astrónomos quieren decir cuando la llaman oscura.

La proporción entre las dos materias sale de la geometría del cristal, $\sqrt{3}\pi$: hay unas cinco veces y media más materia oscura que ordinaria (5,44), que es lo que miden los satélites.

18. Esto del Pleno, ¿no es el éter que la física descartó hace un siglo?

No, y la diferencia es justo la que decidió aquel experimento. El éter estaba *dentro* del espacio, y por eso tenía un reposo propio: la Tierra, al moverse respecto de él, debía notar una especie de viento, y la luz debía tardar distinto según fuera a favor o en contra. Michelson y Morley midieron esa diferencia y encontraron cero.

Aquí no hay viento que medir. El Pleno no está dentro del espacio: *es* el espacio, y no hay un segundo objeto respecto del cual estar quieto. Lo que el programa mide —la compresión del medio y el giro de su fase— sale igual para cualquier observador, se mueva como se mueva. El resultado nulo de aquel experimento no es algo que el programa tenga que esquivar: es lo que predice. Las demás diferencias, una por una, están en «Y no, esto no es el éter», en la §3.

19. Entonces, ¿Newton, Maxwell y Einstein estaban equivocados?

No, y el programa no los corrige: llega a lo mismo por otra puerta. La ley de la gravitación de Newton sale del medio en cuanto se lo mira despacio y de lejos; las cuatro ecuaciones de Maxwell salen de seguir el giro de la fase por los anillos de la red; el factor de Lorentz, con que crecen la inercia y la energía al acercarse a la velocidad de la luz, sale del propio F1 en cuanto se escribe una deformación que viaja, y de esa misma cuenta salen el momento y la energía relativistas con su forma exacta. Las fórmulas que la física tiene medidas valen exactamente lo que valían: son ciertas hoy, y lo son al margen de por qué.

Lo que cambia no es el contenido, es el estatus. Cosas que se aceptaban como puntos de partida —que haya un tope de velocidad, que la probabilidad sea el cuadrado, que el electrón tenga espín, que la carga venga en paquetes enteros— dejan de ser el comienzo del razonamiento y pasan a ser su final. Y cantidades que solo se podían medir e introducir a mano pasan a calcularse: la constante de la gravitación, la de Planck, la proporción entre materia oscura y ordinaria.

Es la misma clase de cambio que trajo Maxwell al mostrar que la luz no era un fenómeno aparte, sino electricidad y magnetismo en movimiento. Nadie tuvo que desdecir una sola medida de óptica; lo que se ganó fue la razón de que fueran las que eran.

20. Si el universo se expande, ¿hacia dónde? ¿Y qué había antes del principio?

Hacia ningún sitio, porque no hay un afuera. Lo que llamamos espacio es la extensión del propio medio, y expandirse es que el medio se estira. Preguntar hacia dónde se expande es como preguntar dónde está el universo entero: el “dónde” solo tiene sentido dentro de él.

Y antes del principio hubo medio, comprimido y subiendo por su pared, que lo devolvió antes de llegar al techo. El “antes” deja de ser un problema en cuanto el tiempo es el cambio del medio: mientras hubo medio cambiando, hubo tiempo que contar.

21. ¿Cómo empieza y cómo acaba el universo, y por qué el programa afirma eso?

El programa describe un ciclo. Hacia atrás, el medio venía comprimido y subiendo por su pared de arriba; antes de llegar al techo rebotó, y ésa es la expansión que seguimos viendo. Hacia adelante, esa expansión se va frenando hasta detenerse. Que después el contenido vuelva a caer,

en un gran aplastamiento y otro rebote, es la pieza que el programa tiene abierta: la ecuación del ciclo lleva ese paso, pero su forma exacta no está deducida.

Lo afirma porque las dos puntas salen de la misma curva, y esa curva no se eligió: la trae F1 dentro. La pared de arriba es un techo de compresión que vuelve imposible la singularidad —el colapso termina en un núcleo saturado, no en un punto—, y por eso en el principio hay un rebote y no un origen absoluto. Y lo que empuja la expansión no es la energía que el medio guarda en el fondo del pozo, sino la cuesta que le queda por bajar: cuando el medio llega al fondo, la cuesta se acaba y con ella el empuje, de modo que el ritmo de expansión tiende a cero. Ahí el programa se separa de la constante cosmológica del modelo estándar, que al no diluirse aceleraría la expansión para siempre.

En los dos extremos, entonces, la curva dice lo mismo: el principio no es un punto de densidad sin límite, y el final no es una expansión eterna.

22. ¿Cómo pueden salir tantas cosas distintas de una sola ecuación?

Porque no se le añade nada por el camino. F1 se escribe con tres cantidades —la densidad del medio, su velocidad máxima de cambio y su grano— más la forma que el medio adopta al organizarse. A partir de ahí cada resultado se obtiene mirando esa misma ecuación en un régimen distinto: a velocidades pequeñas o próximas a la de la luz, a distancias enormes o del tamaño del grano, con las configuraciones alineadas o revueltas.

Al restringir la mirada a un régimen, la ecuación se simplifica, y lo que queda es, caso tras caso, una fórmula que la física ya tenía. Por eso los resultados no se pueden tomar por separado: forman un árbol, y una pieza movida para arreglar un sector desbarataría todos los demás.

23. ¿Por qué las matemáticas describen tan bien la naturaleza?

Primero está la naturaleza. Las matemáticas son el instrumento que la humanidad fue construyendo, siglo tras siglo y sobre lo que iba observando, para entenderla, describirla y anticipar lo que haría después. Se afinaron contra el mundo durante milenios, y de ahí les viene el acierto: no es que la naturaleza siga a las matemáticas, es que las matemáticas se hicieron siguiéndola a ella.

Lo que el programa añade es una razón de por qué sirven *tan* bien. Si el universo es un material con una forma determinada, sus regularidades son propiedades de esa forma: proporciones, ángulos, cuentas de vecinos y de vértices. Y describir formas es justamente lo que las matemáticas saben hacer.

Por eso los números del programa tienen el aspecto que tienen. La proporción entre materia oscura y ordinaria resulta ser el área de una esfera dividida por la del tetraedro inscrito en ella; el coeficiente que fija cuánta energía guarda el campo electromagnético sale de sumar las seis caras de una celda, contada cada una según hacia dónde mira. No son medidas traducidas a símbolos: son cuentas hechas sobre una figura.

24. Si todo es una sola sustancia, ¿yo también soy Pleno? ¿Qué me diferencia de una piedra?

Sí, igual que la piedra, el aire de la habitación y la luz que te permite leer esto. No hay dos clases de cosa, y no hay ninguna frontera donde una empiece y la otra acabe.

Lo que te distingue no es de qué estás hecho, sino cómo está anudado y organizado: qué configuraciones adopta el medio en ti, cómo se sostienen unas a otras y con qué precisión se copian. La diferencia entre tú y una piedra es enteramente de estructura —y es toda la diferencia que hace falta.

24. Las leyes que el programa alcanza

Las veintisiete de la lista, una por una: qué dice cada ley, de quién es, qué nos permite entender, predecir o construir, y qué entrega el programa. El mecanismo de cada una está en su sección.

Las dos constantes.

La constante de la gravedad, G . Newton, 1687; Cavendish la midió en 1798. Dice con cuánta fuerza se atraen dos masas. Con ella calculamos las órbitas de los planetas, predecimos las mareas y ponemos satélites en su sitio. El programa la entrega como propiedad del medio, $G = c^2/\rho_P \ell_P^2$, con el número de delante igual a uno.

La constante de Planck, $\hbar$. Planck, 1900. Dice que la energía se entrega en escalones y fija el tamaño del escalón. Con ella entendemos por qué los átomos son estables, predecimos el color de la luz que emite cada gas y se diseñan el láser, el LED y el transistor. El programa la entrega como el giro de un grano del medio, $\hbar = \rho_P c \ell_P^4$, también con el número de delante igual a uno.

La gravedad y la forma del espacio.

Las ecuaciones de campo de Einstein. Einstein, 1915. Dicen cómo la materia curva el espacio y el tiempo. Con ellas entendemos la órbita de Mercurio y la desviación de la luz al pasar junto al Sol, y sin ellas el GPS erraría kilómetros al día. El programa las entrega enteras, con el coeficiente $c^4/16\pi G$ completo, y dice de dónde sale su $8\pi = 2 \times 4\pi$: el 4π es la medida de la esfera que el teorema de Gauss lee en la respuesta a larga distancia de la propia red, y el 2 lo pone la reversión de traza.

La geometría de los agujeros negros. Schwarzschild, 1916. Dice cómo son el espacio y el tiempo alrededor de una masa quieta, y dónde está su horizonte. Con ella se leen las imágenes de los telescopios de horizonte. El programa la reproduce con su radio correcto, y añade un interior cerrado, sin singularidad, con un núcleo cuya densidad gravitante es la misma en todos: 1,6545 veces la del medio. Eso último es predicción, sin dato con qué contrastarla.

La velocidad límite y el factor de Lorentz. Lorentz, 1904; Einstein le dio su sentido en 1905. Dice cuánto se dilata el tiempo y se acortan las distancias al acercarse a la velocidad de la luz. Con él se diseñan los aceleradores de partículas y se corrige el reloj de cada satélite. El programa lo entrega como la curva de resistencia del propio medio.

Las ondas gravitacionales a la velocidad de la luz. Einstein las predijo en 1916; LIGO las registró por primera vez en 2015. El programa las hace ondulaciones del mismo medio que la luz, con la única velocidad límite que ese medio tiene, de modo que compartir velocidad no es un acuerdo entre dos cosas. Contraste: la onda y el destello de agosto de 2017 llegaron iguales hasta siete partes en diez mil billones (7×10^{-16}).

El mundo cuántico.

La ecuación de Schrödinger. Schrödinger, 1926. Dice cómo cambia con el tiempo la onda de una partícula. Con ella entendemos los escalones de energía de un átomo, se predice el espectro de una molécula antes de fabricarla y se calculan los materiales de un transistor o los candidatos de un fármaco. El programa no la postula: escrito el campo como $\Psi = S e^{i\theta}$, la dinámica de F1 en el régimen lento *es* esa ecuación, por una transformación exacta.

La relación de incertidumbre. Heisenberg, 1927. Dice que la posición de una partícula y su movimiento no se pueden afinar a la vez sin límite. Con ella entendemos por qué un átomo no se colapsa y se predice el tamaño mínimo de cualquier estructura. El programa la entrega con su piso exacto, la mitad de la constante de Planck.

El techo de las correlaciones. Bell la planteó en 1964 y Tsirelson fijó el techo en 1980. Dice hasta dónde pueden coincidir las medidas hechas sobre dos partículas separadas. Con ella se certifica el azar de un generador cuántico y se prueba la seguridad de una clave cuántica. El programa la entrega exacta: $2\sqrt{2} = 2,8284$, y ningún experimento lo ha rebasado.

La regla de Born. Born, 1926. Dice que la probabilidad de hallar una partícula en un sitio es el cuadrado del largo de su función de onda. Con ella se predice el resultado de cualquier medida cuántica, que es el cálculo que sostiene toda la química computacional. El programa la entrega como el reparto de una cantidad que se conserva.

La ecuación de Dirac. Dirac, 1928. Describe al electrón a velocidades cercanas a la de la luz, y trae dentro el espín. Con ella entendemos la estructura fina de los espectros y se calcula el magnetismo del electrón con doce (12) cifras. El programa la entrega en su estructura por dos vías que convergen, con el espín saliendo del medio y no añadido.

Las fuerzas y la materia.

Las ecuaciones de Maxwell. Maxwell, 1865. Cuatro ecuaciones que unen la electricidad, el magnetismo y la luz. Con ellas entendemos por qué gira un motor, predecimos hasta dónde llega una señal, y se diseñan la red eléctrica, la radio, el radar y las resonancias magnéticas. El programa las entrega sin postular el campo, con el coeficiente $8/9$ derivado y el fotón como el canal sin gap —sin masa— del giro de la fase, con sus dos polarizaciones en los dos ciclos transversos de los enlaces de la red. Las ecuaciones del campo libre salen derivadas; su acople a las cargas tiene la estructura probada y el álgebra por cerrar.

La estructura de Yang-Mills. Yang y Mills, 1954. Generalizan a Maxwell para las simetrías internas que no conmutan, y son la forma de las dos fuerzas nucleares. Con ellas se predice lo que ocurre en un acelerador y se calcula cómo arde el Sol. El programa entrega su estructura desde la misma construcción geométrica, y con ella el confinamiento del color.

La carga entera y la neutralidad de la materia. Hecho medido, sin autor. Dice que toda carga libre es un múltiplo exacto de la del electrón y que un átomo es neutro. Con ello se entiende que la materia no se desarme sola por repulsión eléctrica. El programa la hace un número de vueltas de la fase, y la neutralidad sale exacta: el experimento la confirma hasta una parte en 10^{21} .

El principio de exclusión. Pauli, 1925. Dice que dos electrones no ocupan nunca el mismo estado. Con él se entiende el orden de la tabla periódica, y con él se calcula el comportamiento de cada material, desde un semiconductor hasta una aleación. El programa lo entrega desde la topología del nudo, y no como postulado añadido.

Los tres quarks del protón. Gell-Mann y Zweig, 1964. Dicen de qué está hecho un protón y con qué cargas. Con ello se entiende el catálogo entero de partículas que producen los aceleradores. El programa entrega los tres, sus cargas en tercios y la asimetría de dos iguales y uno distinto, y, con un solo dato de entrada, el tamaño del protón: 0,851 femtómetros frente a 0,841 medidos, un 1,19 %.

El calor.

La estadística de Bose-Einstein. Bose y Einstein, 1924. Dice cómo se reparten la energía las partículas que pueden amontonarse en un mismo estado. Con ella se predice el espectro del fondo cósmico de microondas y se diseñan el láser y las trampas de átomos ultrafríos. El programa la entrega contando configuraciones del propio medio, sin traer ninguna ley del calor.

La ley de Stefan-Boltzmann. Stefan la midió en 1879 y Boltzmann la dedujo en 1884. Dice cuánto irradia un cuerpo caliente: el doble de caliente, dieciséis (16) veces más brillante. Con

ella se toma la temperatura de una estrella desde su brillo y se calcula el balance de energía del clima. El programa la entrega con su coeficiente exacto, del mismo conteo.

La estadística de Fermi-Dirac. Fermi y Dirac, 1926. Dice cómo se reparten la energía las partículas que no admiten dos en el mismo estado. Con ella se describen los electrones de metales y semiconductores, y se calcula el interior de una enana blanca. El programa la entrega del mismo conteo, con el tope de ocupación saliendo de la ecuación de Dirac.

Las estrellas.

El límite de Chandrasekhar. Chandrasekhar, 1931. Dice la masa por encima de la cual una estrella agotada ya no se sostiene y se hunde. Con él se predice el destino de cada estrella del cielo y se calibran las supernovas que miden el universo. El programa lo entrega con su coeficiente completo: 1,456 masas solares frente a 1,44.

El cosmos.

La proporción entre materia oscura y ordinaria. Medida por los satélites, sin explicación en el modelo estándar. El programa la entrega como un cociente de áreas, un número puro: $\sqrt{3}\pi = 5,4414$ frente a $5,375 \pm 0,077$, un acuerdo a $0,86\sigma$ sin un solo parámetro ajustado.

Las cuatro densidades del universo. Medidas por el satélite Planck. Dicen cuánta energía oscura, cuánta materia en total y cuánta de ella es oscura u ordinaria. Con ellas se calcula la historia entera del cosmos. El programa las entrega desde la proporción anterior y una sola lectura del reloj, y las cuatro caen dentro de $1,2\sigma$.

La constante de Hubble. Lemaître en 1927 y Hubble en 1929. Dice a qué ritmo se expande el universo. Con ella se fija la escala de distancias de toda la astronomía. El programa entrega su fórmula entera, y es un producto de tres piezas: una razón geométrica fija, el ritmo del tic de Planck, y en qué punto de su recorrido está hoy el medio. Las dos primeras las da el programa, y no hay en ellas nada que ajustar; la tercera se lee del universo de hoy, y es lo único que se lee. Por eso H_0 no es una constante de la naturaleza: es la hora que marca ahora el reloj del cosmos.

La curva entera de la expansión. El programa entrega $H(z)$ —el ritmo de expansión a cada época— desde esa misma lectura, y la contrasta con los seis puntos del mapa de galaxias DESI sin un solo parámetro ajustado.

La energía oscura que no se diluye. Medida como una densidad que no cambia al expandirse el universo. Con ella se explica que la expansión se acelere. El programa la entrega como el condensado de fase del medio, en reposo en el fondo del pozo, con su $w = -1$ exacto y sin sobra, y veta la región en que w sería menor.

El estiramiento temporal de las supernovas. Predicho por la expansión misma. Dice que el brillo de una supernova lejana sube y baja más despacio que el de una cercana. El programa lo entrega exacto, y los datos de las supernovas de DES lo confirman.

El principio.

Un principio sin singularidad. El programa entrega un universo que se contrae, da la vuelta en la pared superior de su curva de energía antes de llegar al techo de compresión, y forma la materia en el camino de vuelta. No hay ningún dato con qué contrastarlo: es predicción.

25. Nota para quien quiera revisarlo

Ninguna de las respuestas de este libro pide fe, y el programa tampoco pide que se le acepte como verdad: pide que se le revise. La diferencia importa, porque lo segundo se puede hacer y lo primero no.

Lo que vuelve posible la revisión es que no hay dónde esconder un error. F1 no tiene coeficientes libres, de modo que ningún resultado se puede reajustar si sale torcido: **cada número queda expuesto tal como sale**. El corpus está abierto, con cada derivación paso a paso, cada afirmación etiquetada según lo probada que esté, y tres cuadernos que recalculan las cifras. Quien quiera refutarlo no necesita las seiscientas treinta y dos (632) páginas: le bastan una derivación y un número que ya conozca.

El programa tiene varias piezas y no todas sirven para lo mismo: este libro cuenta la idea; la página reúne y ordena el material; los papers tratan resultados sueltos. **La evaluación técnica —matemática, física, científica— se hace sobre el corpus y el compendio matemático**: el primero trae cada derivación paso a paso con su etiqueta de estatus, y el segundo el álgebra intermedia y el análisis de unidades. Ahí es donde hay que dirigirse para juzgar, y ahí es donde hay que apuntar a una inteligencia artificial a la que se le encargue revisarlo. Un dictamen formado sobre este libro no es un dictamen sobre el programa.

Y hoy eso cuesta menos que nunca. Una primera pasada —el álgebra, las unidades, la coherencia entre secciones, si un resultado citado dice lo que se le atribuye— está al alcance de cualquiera con una tarde y una herramienta de las que ya se usan a diario. La invitación es ésa, y va en la dirección incómoda: pedirle a esa herramienta que *encuentre el error*, no que confirme el acierto.

La herramienta falla en las dos direcciones. Preguntada si un trabajo así es correcto, una inteligencia artificial tiende a contestar lo que se espera —descartarlo por su parecido con lo que suele estar mal—, y preguntada por el dueño del trabajo, tiende a complacerlo. Las dos respuestas valen igual: nada. Lo que sí devuelve resultados fiables son las preguntas acotadas, las que tienen respuesta correcta al margen de la simpatía: ¿cuadran las unidades de esta ecuación?, ¿este paso se sigue del anterior?, ¿esta cita dice lo que aquí se le atribuye? Para eso el corpus lleva una nota dirigida a revisores, humanos y automáticos, con una sola regla de fondo: ninguna valoración del conjunto antes de haber auditado el material que la sustenta.

Después de mirar, aceptar y rechazar son las dos respuestas legítimas. Antes de mirar solo hay una: todavía no lo sé.

Los símbolos que reaparecen

$\Psi = S e^{i\theta}$	el Pleno: el campo único —una magnitud con un valor en cada punto— del que todo lo demás es una forma
S	<i>módulo</i> , que el texto llama también la <i>compresión</i> : cuánto está comprimido el medio en un punto; su cuadrado es la densidad allí
θ	<i>fase</i> : hacia dónde gira el medio en ese punto
ρ_P, ℓ_P, c	las tres cantidades primarias: la densidad del medio; su grano, el tamaño mínimo de su estructura, que cae en la escala que la física llama de Planck; y la tasa máxima de cambio, la misma a la que viaja la luz
G	la constante de la gravedad de Newton: fija con cuánta fuerza se atraen dos masas
$\hbar$	la constante de Planck: fija la escala a la que el mundo se vuelve cuántico
$\mathcal{L}_{F1}$	F1, el Lagrangiano del Pleno: la única expresión de la que sale cómo se mueve y cambia el medio
$S_{\min} = 0,7231$	el suelo del pozo —la curva de energía del medio—, donde el medio reposa hoy; su energía es el telón, el cero desde el que se cuenta todo lo demás
$S_{\max} = 1,4756$	el techo: la compresión máxima que admite el cristal en que se organiza el medio
E_0	la escala de energía del pozo, su único coeficiente: vale $4,2546 \rho_P c^2$ y está escrito exactamente con π y $\sqrt{6}$
$\xi = 19,69$	curvatura del pozo en su fondo: con cuánta fuerza devuelve al medio a su reposo cuando algo lo aparta
x	prisa relativa: tasa de deformación medida en la unidad c/ℓ_P , la tasa máxima a la que el medio admite una cizalla
$f_c = 0,6869$	qué fracción del medio se mueve hoy al unísono: la <i>ocupación</i> , una de las dos lecturas posicionales —dónde está el medio sobre su recorrido— que el programa toma del mundo
Θ_0, N_{tic}	la otra lectura posicional, el <i>arco</i> recorrido: la hora del reloj cósmico; N_{tic} es la edad del universo contada en tics de Planck
Ω	fracción del contenido del cosmos: Ω_{EO} energía oscura, Ω_m toda la materia, Ω_{MO} materia oscura, Ω_b materia ordinaria (bariónica)
σ	error típico de una medida, la unidad con que se dice cuánto se aparta de ella un valor. En dos cuadros técnicos la misma letra nombra otra cosa, y ahí se dice cuál

Dónde seguir

Todo el material del programa está disponible para descarga en **piuniversal.com** y en Zenodo, bajo licencia Creative Commons.

Corpus PIU-Ψ V5.6

el programa completo, cada derivación paso a paso, con cada afirmación etiquetada según lo probada que esté (632 pp. en español, 634 en inglés; 329 ecuaciones numeradas); su inventario de cabos: veinte, ninguno portante —cinco falsables, quince de enriquecimiento—

Compendio matemático

el álgebra intermedia y el análisis de unidades; es la pieza que lleva la clasificación resultado a resultado (150 pp. en español, 151 en inglés): 342 marcas —203 derivado, 97 DLF, 37 calibrado, 3 hipótesis, 2 cabo—, de modo que tres de cada cinco son derivado la idea contada entera, sin demostraciones, en español y en inglés

Este libro

Cuadernos de verificación

los tres que recalculan y auditan las cifras: el numérico, 648 de 648 verificaciones (573 contra el corpus y 75 contra el compendio, sobre 617 filas; el 60 % en unidades del propio medio, antes de que exista vara alguna); el simbólico, 312 de 312 (194 filas, 192 con control negativo); y el auditor, 4905 cifras auditadas, ninguna que no cuadre

Versión 5.6, 30 de septiembre de 2026. Edición española e inglesa equivalentes: misma estructura, mismas ecuaciones, misma clasificación resultado a resultado. El depósito vive en Zenodo con el DOI 10.5281/zenodo.23064146; el de la versión anterior, V5.5, lleva el DOI 10.5281/zenodo.22313421.

piuniversal.com • Manuel Alberto Celedón Mejía • Medellín, Colombia

Zenodo DOI: 10.5281/zenodo.23064146