

La forma y la física

Fang Lizhi

Traducción de Mirta Rosenberg

La belleza no es del dominio exclusivo de la literatura, el arte y la religión. En realidad, el primer grupo de estetas que se estableció entre los filósofos de la antigua Grecia fue la Escuela Pitágorica, compuesta de matemáticos, astrónomos y físicos. "Belleza" es todavía una palabra común dentro del vocabulario de la física. Cuando se presenta un trabajo en un congreso o cuando se evalúa un resultado científico publicado, escuchamos con frecuencia expresiones tales como "una bella teoría" o "un modelo mucho más elegante que el anterior". Aunque resulta difícil catalogar o formalizar este sentido estético dentro del dominio de la ciencia, es no obstante evidente para casi cualquiera que se haya abocado al estudio de la física.

El físico austriaco Ludwig Boltzmann (1844-1906) reaccionó de la siguiente manera ante el trabajo de James Clerk Maxwell (1831-79), el primer profesor de física experimental de la universidad de Cambridge:

Un músico, al escuchar los primeros compases de una obra musical puede distinguir si es de Mozart, Beethoven o Schubert. De la misma manera un matemático, al leer las primeras páginas de una demostración, puede decir si el trabajo es de Cauchy, Gauss, Jacobi o Helmholtz. Un alto grado de elegancia externa, a veces con un debilísimo esqueleto de conclusiones, caracteriza a los franceses, en tanto los ingleses, especialmente Maxwell, se caracterizan por una gran fuerza dramática. ¿Quién no conoce la teoría dinámica de los gases de Maxwell? Primero, se desarrollan majestuosamente las variaciones de velocidades. Después, de un lado hacen su entrada las ecuaciones de estado, por el otro entran las ecuaciones del movimiento central, y el caos de fórmulas asciende cada vez más. De repente resuenan las cuatro palabras: "Poner $n=5$. El malévolο demonio V (velocidad) desaparece, tal como en una obra musical se silencia una figuración perturbadora y enlo-

quecida y constante de los bajos. Como por arte de magia, todo lo que antes había parecido incontrolables es puesto en orden. No hay tiempo para decir por qué se ha hecho esta o aquella sustitución; que cualquiera que no la sienta abandone el libro. Maxwell no es un productor de programas de música; no necesita proporcionar notas explicativas. Las fórmulas aparecen libremente, resultado tras resultado, hasta que, en un último efecto sorprendente, se obtiene el equilibrio térmico de un gas pesado, y cae el telón.

Bertrand Russell describió la matemática de esta manera:

La matemática, correctamente considerada, no sólo posee verdad sino también una belleza suprema, una belleza fría y austera, como la de la escultura, sin seducción para las partes más débiles de nuestra naturaleza, sin las gloriosas trampas de la pintura o la música, aunque sublime y pura, y capaz de una severa perfección, como la que solamente el arte más grande puede manifestar. El verdadero espíritu de deleite, la exaltación, la sensación de ser más que humano, que es la piedra de toque de la más elevada excelencia, sólo puede encontrarse en la matemática con tanta seguridad como en la poesía.

Hay dos aspectos muy contrastantes en el estudio de esas ciencias naturales que incluyen a la astronomía y la física. Por una parte, la ciencia es la base de todo avance tecnológico, y tiene entonces enorme valor práctico para la sociedad, ya que el progreso tecnológico facilita extraordinariamente la fabricación de bienes y productos. Por otra parte, la motivación de la investigación científica está completamente divorciada del logro del progreso tecnológico en sí mismo. Este último está inevitablemente ligado a la aplicación práctica, en tanto la investigación se parece más bien a un emprendi-

miento artístico: surge a partir de la búsqueda y la creación de belleza.

Copérnico afirma claramente el principio de su obra esencial, *De revolutionibus orbium coelestium* (*Sobre la revolución de los cuerpos celestes*):

Entre los diversos propósitos literarios y artísticos que vigorizan las mentes de los hombres, el mayor efecto y el máximo celo, según creo, deben promover los estudios referidos a los objetos más bellos, y que más merecen ser conocidos.

El matemático y físico francés Henri Poincaré es muy respetado en el mundo científico, a pesar de que Lenin lo calificara en una oportunidad de “gran científico pero un filósofo olvidable”. El comentario de Poincaré sobre la motivación de la investigación científica se ha convertido en una definición clásica del tema:

El científico no estudia la naturaleza porque es útil: la estudia porque se deleita en ella, y se deleita en su estudio porque es bella. Si la naturaleza no fuera bella, no valdría la pena conocerla, y si no valiera la pena conocerla, no valdría la pena vivir la vida. La belleza intelectual es suficiente en sí misma, y es en su nombre, más que por el futuro bien de la humanidad, que el científico se dedica a tareas prolongadas y difíciles.

Por supuesto, el valor de la ciencia estriba en su acuerdo con la verdad, es decir en su capacidad de explicar los fenómenos ya conocidos y de predecir acontecimientos futuros. La ciencia debe estar siempre en condiciones de resistir las observaciones y las comprobaciones empíricas. Obviamente, este parámetro no puede ser igualado a la búsqueda de la belleza *per se*, así que, ¿qué significa decir que “la búsqueda de la belleza” puede, al menos en parte, sustituir a la “búsqueda de la verdad”? Algunos famosos ejemplos de la historia de la ciencia plantean esta pregunta. Todos ellos parecen esclarecer un punto: el universo, o la naturaleza, tiene la propiedad de que todas las verdades son necesariamente bellas. Tal vez esta afirmación no pueda considerarse una verdad científica, pero al menos podemos afirmar, como una heurística efectiva y practicable que: “La búsqueda de la belleza conducirá inevitablemente al descubrimiento de la verdad”. A lo largo de la historia, esta heurística ha logrado éxitos, algunos de ellos espectaculares.

Un ejemplo de la manera en que los conceptos culturales de la belleza pueden ejercer influencia formativa sobre el progreso científico se encuentra en la historia de la teoría de la redondez de la Tierra. Las definiciones de una Tierra esférica se nos presentan por primera vez en los escritos de los griegos antiguos y nos topamos con ellas a menudo en diversos textos clásicos. Este concepto de la Tierra fue adoptado más tarde por la astronomía occidental. Como contraste, el concepto de esfericidad de la Tierra no fue nunca formulado claramente en la antigua China, aunque algunos comentarios hallados en ciertos escritos antiguos tal vez puedan ser interpretados como una alusión a esa teoría. Los modelos tridimensionales como los encontrados en el Templo del Cielo de Beijing, que pintan los cielos como una esfera y la Tierra como un cuadrado plano, son representativos de la visión ortodoxa china.

La razón de esta diferencia entre las astronomía china y la occidental puede atribuirse a diferentes conceptos culturales de belleza, más que a diferencias en la observación de los fenómenos. Hace dos mil años, ni los chinos ni los griegos disponían de algo que pudiera considerarse evidencias empíricas directas sobre las cuales fundamentar la conjectura de una Tierra esférica. (Sólo más tarde, cuando Colón descubrió América, y Magallanes dio la vuelta al globo, hubo una indisputable prueba de esa idea). Ambos pueblos tenían tan sólo una pequeña cantidad de observaciones astronómicas sobre las cuales fundamentar sus hipótesis acerca de la forma de la Tierra; sin embargo al verse confrontados con el mismo fenómeno, los griegos y los chinos llegaron a conclusiones muy diferentes. En ambos casos observaron que al mediodía el Sol está más bajo en el cielo en el norte que en el sur. Para los griegos, el modelo de una Tierra redonda era satisfactorio y plausible, porque ya habían absorbido completamente las nociiones pitagóricas sobre la armonía del universo y porque les resultaba evidente que los círculos y las esferas eran las formas más perfectas de la naturaleza. Fueron aún más allá y emplearon la diferencia de altura del Sol en el sur y en el norte para calcular estimativamente el radio de la Tierra, produciendo resultados muy próximos a las mediciones modernas.

Como contraste, los astrónomos chinos, aunque

advirtieron que esta discrepancia del ángulo del Sol indicaba que la Tierra no era perfectamente plana, produjeron un modelo de compromiso. Su hipótesis era que las ciudades en las que habitaban sin duda descansaban sobre una superficie ligeramente curva pero que la Tierra en general era de todos modos plana. Según el modelo chino, la Tierra era una tajada de semi-esfera que flotaba en un océano plano. Por lo tanto, aunque las mediciones chinas de la diferencia existente entre los ángulos del Sol en el norte y en el sur no eran menos precisas que las de los griegos, los chinos nunca las utilizaron para calcular el radio de la Tierra, ya que nunca consideraron a la Tierra como una esfera.

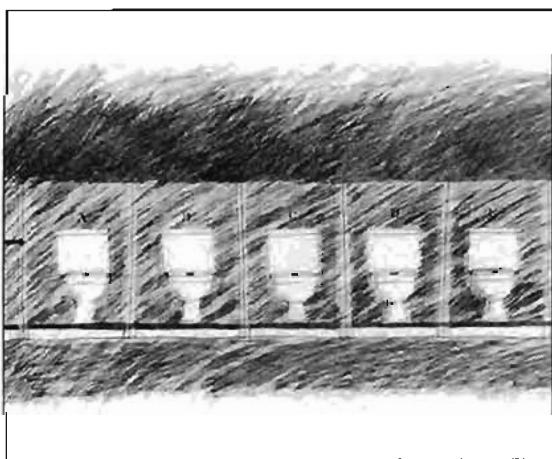
Es claro que la creatividad del pensamiento científico depende mucho de la propia imagen del mundo, y la imagen del mundo está condicionada por la propia tradición cultural. Precisamente en este sentido los conceptos culturales de la belleza pueden ejercer una influencia formativa sobre el progreso científico. El físico austriaco Ernst Mach escribió:

Al estudiar la naturaleza, no podemos evitar aplicar nuestro conocimiento de las interrelaciones que existen entre los diversos fenómenos objeto de nuestra investigación. Aquello que imaginamos como causas subyacentes de los fenómenos observados está limitado por nuestra comprensión del mundo. El hecho de que los fenómenos observados suelen parecer arbitrarios hace que nuestra percepción sea particularmente susceptible a las extravagancias de nuestra tradición cultural.

La teoría de la redondez de la Tierra es el primer triunfo famoso de la visión del mundo, culturalmente influida, que percibe al universo como fundamentalmente bello y armonioso. Un enfoque antiguo y popular de la epistemología es que el curso del conocimiento humano sigue casi siempre la secuencia “experiencia” → “comprensión” → “más experiencia” → “mayor comprensión”. En toda la literatura que obedece a este modelo epistemológico, el desarrollo de la teoría de un sistema solar heliocéntrico ha sido siempre atribuido al hecho de que el modelo anterior, centrado en la Tierra, tenía dificultades para explicar y predecir los movimientos observados de los cuerpos celestes, y así fue como llegó a desarrollarse la teoría helio-

cétrica. Esta aseveración, no obstante, no es históricamente correcta.

Lo que instó a Copérnico a desarrollar el modelo heliocéntrico no tuvo nada que ver con ninguna supuesta superioridad del modelo centrado en el Sol para explicar los movimientos de los cuerpos celestes. En realidad, todas las observaciones explicadas y predichas por el modelo heliocéntrico podían adscribirse también al modelo geocéntrico. Y siempre que el modelo geocéntrico presentaba dificultades, también las presentaba el modelo heliocéntrico. Además, las predicciones originadas por la teoría heliocéntrica de Copérnico *no eran* tan precisas como las de la teoría geocéntrica de Ptolomeo. En ningún punto del proceso que llevó a Copérnico a la enunciación de su teoría hay grandes evidencias del modelo epistemológico de “más experiencia” → “mayor comprensión”. Por cierto, si aplicamos al problema las premisas de la mecánica celeste, el modelo heliocéntrico resulta muy superior al modelo geocéntrico. Sin embargo, la mecánica celeste sólo se desarrolló unos cien años después de la muerte de Copérnico, y no desempeñó ningún papel en su formulación de la teoría: lo que instó a Copérnico a imaginar un sistema heliocéntrico fue, simplemente, su belleza. Lo que resultaba más atractivo en el nuevo modelo de Copérnico, y lo que lo hacía superior al modelo geocéntrico, era su simplicidad, su consistencia y su armonía. En la teoría geocéntrica de Ptolomeo, los movimientos de los cuerpos celestes sólo podían explicarse recurriendo a un complejo sistema de ciclos y epiciclos. En la teoría heliocéntrica, se descartaba completamente la noción de los epiciclos, y la órbita de cada una de las lunas y planetas era conside-



rada un círculo perfecto. En *De revolutionibus orbium coelestium* Copérnico afirma que lo que lo llevó a formular su teoría no fue la necesidad de lograr mayor exactitud en sus cálculos sino más bien el deseo de desarrollar un modelo del universo “de forma perfecta” y que poseyera “una maravillosa simetría”.

Johannes Kepler, el astrónomo alemán que se consideraba un pitagórico, observó en su obra *Harmonices Mundi*:

Los movimientos de los cuerpos celestes son como una gran canción, una canción continua, con muchas voces. Es una canción que debe apreciarse con el intelecto y la razón, y que no puede experimentarse directamente por medio del sentido del oído. Esta música, en cada modulación y cadencia, y según el funcionamiento preordenado de un contrapunto fijo de seis voces, parece medir y delinear el paso del tiempo.

Debemos acentuar que la descripción de Kepler del movimiento de los planetas como una especie de canción no es una extravagante metáfora literaria sino una parte intrínseca de su metodología de investigación. En muchos de sus trabajos de astronomía Kepler emplea verdaderamente una nota-

ción musical, usando el lenguaje de la música en vez de las palabras para explicar sus ideas. Con frecuencia describía las velocidades y los movimientos orbitales de cada planeta en términos de intervalos y medidas musicales, y muchos de los nombres dados a sus diversas leyes de movimiento proceden de los diagramas musicales que empleaba. En el contexto de la investigación kepleriana, la belleza no es simplemente un hilo que corre paralelo a la música y a la astronomía: es un puente que conecta ambas disciplinas.

La física del siglo xx también emplea este “puente estético”. A fines de la década de los veinte, poco después del nacimiento de la mecánica cuántica, un joven físico inglés, P.A. M. Dirac, formuló una ecuación que describía el movimiento del electrón. Una de las conclusiones más importantes de su elegante ecuación fue que debe existir en la naturaleza una simetría perfecta entre las cargas positivas y negativas. Esto significaba que como existía un electrón que tenía una carga negativa, forzosamente debía existir una partícula de carga positiva correspondiente y, más aún que las masas de ambas partículas debían ser idénticas. Sin embargo, aunque en la época de Dirac ya había amplias evidencias de que la cantidad de cargas positivas y negativas en la naturaleza eran iguales, las diversas partículas de carga positiva y negativa no parecían satisfacer la condición de simetría de la ecuación de Dirac. Existía una enorme diferencia entre la masa de los electrones de carga negativa y los protones de carga positiva. Por esta razón, al principio algunos físicos no aceptaron la ecuación de Dirac, pero el mismo Dirac y otros sentían que era demasiado bella como para descartarla. Varios años más tarde se descubrió una nueva partícula, el positrón, y las características de esta partícula se adaptaban perfectamente a las predicciones de la ecuación de Dirac, en otra reivindicación de la fe en la belleza de las leyes de la naturaleza. Los acontecimientos que rodearon la predicción y el subsecuente descubrimiento del positrón instaron a Dirac a recordar:

Creo que esta historia tiene una moraleja: que es más importante que haya belleza en nuestras ecuaciones en vez de hacer que se adapten a la experimentación. Parece que si se trabaja tratando de infundir belleza



en las ecuaciones, y se tiene verdaderamente una idea sólida, seguramente habrá progreso. Si no hay un acuerdo completo entre los resultados del propio trabajo y la experimentación, no debemos desalentarnos, porque la discrepancia puede ser producto de no haber tomado adecuadamente en cuenta ciertos aspectos menores, algo que se aclarará en cuanto la teoría tenga un desarrollo ulterior.

Es decir que el acuerdo con la observación experimental no es el único parámetro para juzgar la validez de un resultado científico. Por eso las publicaciones especializadas en física no vacilan en publicar resultados que no están de acuerdo con las evidencias experimentales predominantes.

En 1954, C.N. Yang y su asociado Robert Mills escribieron un trabajo sobre la simetría dimensional que contenía resultados completamente en desacuerdo con las evidencias experimentales. Según esta teoría, debía existir una partícula con una masa de reposo cero, pero todas las evidencias experimentales excluían esa posibilidad. A pesar de ello, la teoría fue publicada y bien recibida por la comunidad de la física. La simetría de la teoría Yang-Mills, conocida como "la teoría de medición de campos", era simplemente demasiado atractiva para ignorarla. Se convirtió en un campo de gran interés en la década de los sesenta, y durante los últimos veinte años, durante el desarrollo de la investigación de las leyes de la mecánica, ninguna faceta de la física ha dejado de ser tocada por la teoría de medición de campos. Una vez más, el criterio de la "belleza", sorteó el estrecho rango del "experimentalismo", la noción de que la experimentación es lo más importante. El profesor Yang ha hablado acerca de otro resultado que se desprende de la teoría de medición de campos, la existencia de "monopolos magnéticos". La existencia de los monopolos magnéticos todavía está en duda, sin embargo, porque ningún investigador ha podido hasta el momento observarlos en la naturaleza. La respuesta de Yang a estas dudas ha sido sostener que su predicción es tan satisfactoriamente bella que es imposible imaginar que la naturaleza carezca de monopolos magnéticos.

Una de las tareas de la física moderna es lograr una TDT, una "Teoría del Todo", es decir, una teoría unificada de las leyes de la mecánica. El mundo de la física confía en que eventualmente se logrará

desarrollar esa teoría, ya que la historia de la física es una serie ininterrumpida de éxitos en cuanto a descubrir teorías unificadas cada vez mayores. Sin embargo, en la formulación de una TDT no pueden llevarse a cabo experimentos de laboratorio de manera directa. Las consideraciones estéticas han reemplazado necesariamente a los parámetros y principios empíricos en la evaluación de las investigaciones TDT. Actualmente, el grupo de investigación más optimista es el abocado a una teoría de "supercuerdas", un dominio que ha atraído a los más talentosos físicos moleculares y astrofísicos de la nueva generación. La convicción fundamental de estos físicos es que una teoría acorde con las condiciones siguientes posiblemente sea única y que, basándose en esas condiciones, se podría dilucidar el origen del universo. Estas condiciones son 1) la mayor armonía: la teoría debe permitir que el universo manifieste la mayor y más ideal simetría; 2) la mayor completitud: debe ofrecer una definición completa de todas las fuerzas del universo que interactúan entre sí; 3) la mayor consistencia posible: debe ser una teoría en la que el universo manifieste un alto grado de unidad interna y regularidad, con todas sus partes actuando de acuerdo entre sí.

Casi podría decirse que la teoría de las supercuerdas se adhiere, en el sentido más clásico, al principio estético de Pitágoras:

Armonía + Complejidad + Consistencia = Verdad.

No deseo dar la impresión de que la belleza en física sólo debe igualarse con la simetría. Por el contrario, la física suele investigar fenómenos altamente caóticos y arbitrarios, así como otros que muestran un alto grado de simetría. Puede decirse que el físico antiguo prefería explicaciones basadas en los principios de regularidad, proporción y equilibrio, y que el físico moderno parece igualmente atraído por el desorden, el caos y el desequilibrio. El trabajo de Einstein en 1905, sobre la relatividad, revelaba profundas simetrías del tiempo y el espacio, lo relativo y lo absoluto. Sin embargo el mismo año presentó otro trabajo sobre el movimiento browniano, presentando una teoría extremadamente refinada sobre uno de los procesos más azarosos de la naturaleza. En el siglo xix el matemático Charles Hermite observó: "Las cosas que no son elegantes no tienen lugar dentro de la ciencia rigurosa; son simplemente escoria". Como contraste, el

físico moderno John A. Wheeler comentó: "Es posible pensar que quien el día de mañana no esté familiarizado con los fractales sea considerado un ignorante en ciencia". En este caso, los fractales se asocian con lo poco elegante. ¿Es posible hallar alguna belleza en el desorden, el caos y el desequilibrio? Según palabras de Hermann Weyl: "La asimetría casi nunca se debe a una completa ausencia de simetría". Es interesante que en las artes suela señalarse que la simetría perfecta no es habitualmente el estado de cosas más deseable o más bello. Más bien, lo que resulta satisfactorio es alguna combinación de simetría y desorden. Y tal vez hasta podría decirse que la física moderna ya ha empezado a descubrir pruebas de esta "fórmula" estética.

Como podría esperarse, la física moderna está ahora dedicada a comprender las relaciones existentes entre simetría y asimetría, regularidad y desorden, equilibrio y desequilibrio, orden y caos. Lo que se ha descubierto hasta el momento es que la simetría pueda espontáneamente dar origen a la asimetría, que hay un orden esencial subyacente al caos, que el equilibrio depende del desequilibrio, y que la organización puede surgir de lo azaroso. En el arte y la música modernos, la armonía con frecuencia surge de la disonancia, los ritmos desarticulados de los metros estrictos, y los fragmentos caóticos se reúnen para crear un sentido de unidad. Todo esto parece indicar que estas obras están creadas en cierto sentido en concordancia con los principios estéticos de la física. David Bohm ha dicho con respecto a la relación entre el arte y la física: "La física es una forma de intuición, igual que una forma del arte". Y la forma que adopta esta intuición implica creatividad, estructuración y un libre

juego de la imaginación. El físico inglés John Tyn dall dijo: "Los experimentos y observaciones correctas son los cimientos del edificio de la ciencia, pero la imaginación desempeña el rol del arquitecto". Einstein expresó la misma idea en términos aún más claros:

Si es cierto que esta base axiomática de la física teórica no puede extraerse de la experiencia sino que debe ser inventada libremente, ¿podemos albergar la esperanza de encontrar alguna vez el camino correcto? Estoy convencido de que podemos descubrir, por medio de construcciones puramente matemáticas, los conceptos y las leyes que los interconectan, que nos proporcionan la clave para la comprensión de los fenómenos naturales. La experiencia puede sugerirnos los conceptos matemáticos apropiados, pero sin duda esos conceptos no pueden deducirse de la experiencia. La experiencia sigue siendo, por supuesto, el único criterio de utilidad física de una construcción matemática. Pero el principio creativo reside en la matemática. En cierto sentido, por lo tanto, creo que es cierto que el pensamiento puro puede aprehender la realidad, tal como lo soñaron los antiguos.

En general, la física encarna dos extremos de un espectro, y el desarrollo de la física se ha basado en las contribuciones de estos dos polos opuestos, exemplificados en pares complementarios tales como: experimentación versus imaginación; lógica versus intuición y objetividad versus juicio estético subjetivo. En la historia de la física hay muchos ejemplos que sirven para señalar la interdependencia y la naturaleza contingente de estos pares de opuestos. Hasta se puede decir que la estrecha interrelación e interdependencia de los hechos objetivos y el juicio estético subjetivo es *en sí misma* una de las grandes bellezas de la física. Einstein lo advirtió muy tempranamente cuando observó: "Lo más incomprendible del universo es el hecho de que sea comprensible". A partir de la afirmación de Einstein podemos derivar dos deducciones lógicas: sólo somos capaces de comprender un universo en el cual puedan desarrollarse seres capaces de comprenderlo, y la única clase de universo comprensible es aquel capaz de desarrollar seres capaces de comprenderlo. Tal vez estas inferencias interdependientes constituyan una prueba de la compatibilidad entre el hecho objetivo y el juicio estético.

