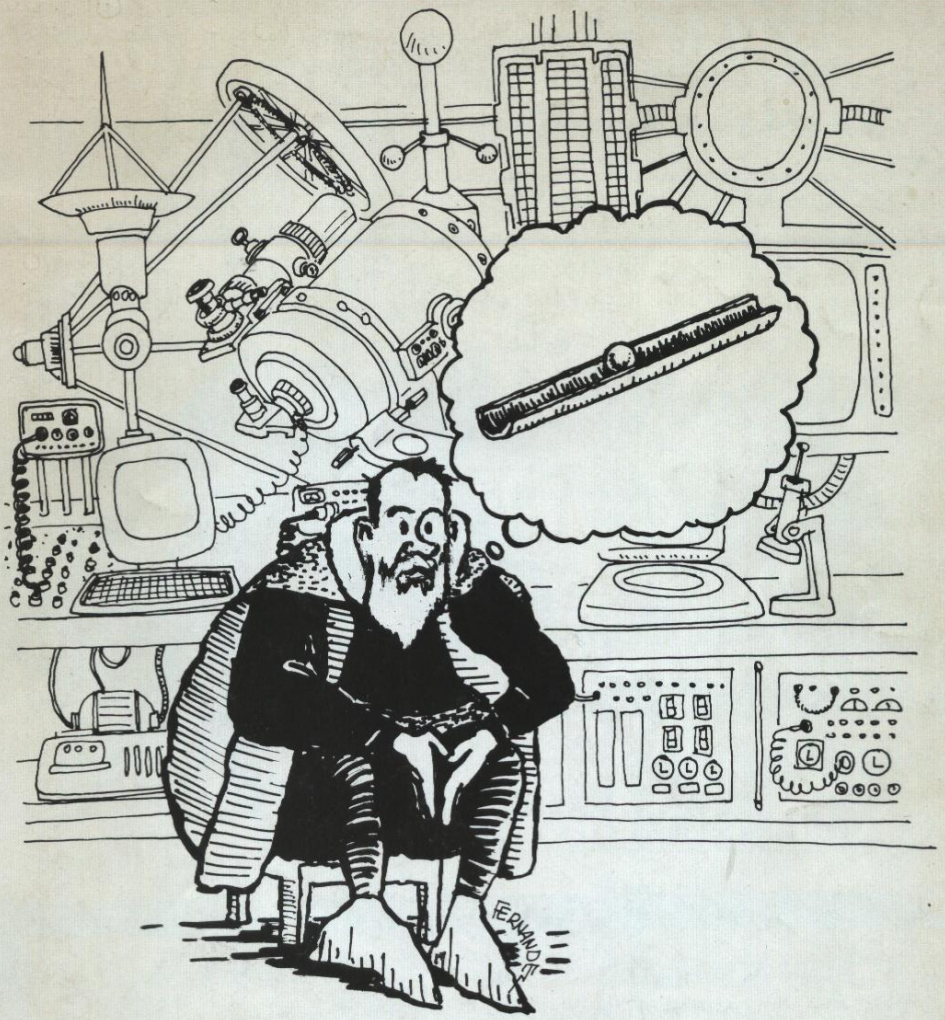
naturaleza
educación y ciencia



• Galileo: las matemáticas y el mundo • El paso de lo finito a lo infinito • La analogía como búsqueda de conocimiento • Consideraciones acerca del experimento en física • El experimento en la clase de ciencias • 7% • La organización global de la geometría y el quinto postulado • Geometría no euclídea y física • Estilos de pensamiento científico • ¿Cómo trabaja un físico teórico? • Experimento y teoría en física

NUMERO 5

I SEMESTRE DE 1991

naturaleza
educación y ciencia
ISSN 0120-4343

Revista de divulgación científica y orientación didáctica. Registro 004685 de 1983. Publicada por la Fundación Educación y Ciencia.

Del contenido de los artículos son exclusivamente responsables sus autores.

Director
Jesús Hernando Pérez

Comité Editorial
Paul Bromberg, Clara Camargo, Julian Betancourt, Jorge Charum, José L. Villaveces, Eduardo Zalamea, José Granés, Antanas Mockus, Ramón Fayad, Luis A. Briceño, Dino Segura, Jaime Ramírez

Representantes en otras ciudades:
Cali: Pedro Prieto; **Bucaramanga:** Rafael Isaacs, Luis Rodríguez; **Medellín:** Rodrigo Covaleda, Yolanda Beltrán, Regino Martínez, Orlando Mesa; **Manizales:** Daniel Alberto Arias; **Pereira:** Diego López; **Armenia:** Diego Pareja; **Florencia:** Emiro Madero; **Barranquilla:** Antonio Martínez; **Montería:** Armando Potes; **Pamplona y Cúcuta:** James Velasco; **Neiva:** Alvaro Avendaño; **Sincelejo:** Carmen Payares; **Sogamoso:** Lucía Avila.

Dirección:
Universidad Nacional, Edificio de Matemáticas y Física Of. 352. Teléfono: 2442874.
Apartado Aéreo 101332

Diseño de carátula:
Germán Fernández

Caricaturas:
Fernando Fernández
Germán Fernández
Unomás

Composición, diagramación y armada:
Amparo Dimaté C.

Editorial

PRESENTACION DEL COMITE EDITORIAL

Los artículos incluídos en el presente número de la revista Naturaleza pueden entenderse bajo una perspectiva común: la de un debate, siempre vigente y renovado, sobre las fuentes principales del conocimiento científico, su jerarquización y sus relaciones mutuas[1]. Entendido con amplitud, este debate llega a comprometer tanto a las distintas corrientes epistemológicas que intentan comprender y caracterizar el conocimiento científico como a las distintas concepciones sobre la enseñanza de las ciencias, sobre la formación del científico y sobre el quehacer individual del investigador en la búsqueda del conocimiento.

Cada corriente epistemológica, de manera explícita o implícita, privilegia determinadas fuentes del conocimiento y establece jerarquías y relaciones entre ellas. La razón, la experiencia, la evidencia de los sentidos, las ideas claras y distintas, la tradición, la autoridad, la armonía, la analogía son algunas de las fuentes de conocimiento que a lo largo de la historia han influido no sólo sobre el quehacer mismo del hombre de ciencia[2] sino también sobre la comprensión que del conocimiento se elabora en las distintas disciplinas. Los problemas de método, el concepto de verdad en

[1] Yehuda Elkana en su artículo "La ciencia como sistema cultural: una aproximación antropológica" enfatiza el orden jerárquico en las diversas fuentes de conocimiento y la influencia de este orden en las imágenes del conocimiento propias de cada época, de cada disciplina y de cada corriente de pensamiento. Véase Elkana Y. Boletín de la Sociedad Colombiana de Epistemología. Volumen III, No.10-11, 1983

[2] Por ejemplo el artículo de Konrad Lorenz "La analogía como fuente de conocimiento", que aparece en este número de la revista, muestra justamente el papel que la analogía ha jugado en las investigaciones sobre el comportamiento animal realizadas por el propio Lorenz.

NUESTRA PORTADA

¿Imaginaba Galileo que construía las bases de la nueva ciencia cuando concibió el experimento del plano inclinado para estudiar la caída de los cuerpos? Tal vez estaba demasiado ocupado en refutar la filosofía natural de Aristóteles para darse cuenta de que, en realidad, abría el espacio para un campo de la acción humana que no podía concebirse en el universo comprendido por la ciencia antigua. Y tal vez él, que amaba la escritura porque permitía "hablar a los que aún no han nacido, ni nacerán hasta dentro de mil o diez mil años" no imaginó tampoco que, en cierto sentido, estaría sentado entre nosotros en los laboratorios en los cuales se obliga hoy a la naturaleza a hablar en "lengua matemática"

las ciencias, los criterios de cientificidad, las diferencias y relaciones entre las ciencias y otros campos de la actividad intelectual, entre varios otros problemas clásicos de la epistemología, pueden ser abordados desde las relaciones que en determinado momento histórico se establecen entre las distintas fuentes de conocimiento que se consideran legítimas.

Pero, como lo insinuábamos más arriba, la reflexión desde las fuentes de conocimiento no sólo ayuda a abordar los problemas epistemológicos generales; también puede arrojar luz sobre los problemas relativos a la enseñanza de las ciencias y a la actividad individual del investigador en la elaboración del conocimiento. Con relación a estos problemas, un aspecto central que ha motivado numerosas discusiones es el del papel del laboratorio, en sus diversas relaciones con la teoría, en el caso de la enseñanza y el de la importancia relativa de los hechos de experiencia en la elaboración teórica o de los experimentos en la corroboración o refutación de argumentos racionales. Como el lector podrá percatarse al reflexionar sobre los artículos incluídos, en estos debates intervienen, por lo menos de manera explícita, dos fuentes principales del conocimiento: la experiencia y la argumentación racional. De manera implícita seguramente varias otras, como la tradición y la autoridad, están también presentes.

Los artículos que hemos incluídos en este número de la revista cubren, desde distintos enfoques y en relación tambien a disciplinas diversas, una buena parte del espectro de problemas que hemos mencionado: la reflexión epistemológica, la enseñanza de las ciencias y el quehacer individual del hombre de ciencia en la búsqueda del conocimiento. La perspectiva de las fuentes del conocimiento podrá ayudar sin duda a enriquecer los nexos entre estos problemas.

Comité Editorial

Esta publicación ha sido realizada con el patrocinio del Fondo Colombiano de Investigaciones Científicas y Proyectos Especiales "Francisco José de Caldas"

COLCIENCIAS

establecimiento público adscrito al Ministerio de Educación Nacional cuyo objetivo principal es impulsar el desarrollo científico y tecnológico de Colombia.

naturaleza

Educación y Ciencia

No. 5 I Semestre de 1991

Dirección: Universidad Nacional, Edificio de Matemáticas y Física, Of. 352, Bogotá, D.E.
Dirección Postal: Apartado Aéreo 101332, Bogotá. Teléfono: 2442874

Indice

1	**Presentación del Comité Editorial**	
5	**Galileo: las matemáticas y el mundo**	Carlos A. Hernández
21	**El paso de lo finito a lo infinito (II parte)**	Carlo Federici C.
27	**La analogía como fuente de conocimiento**	Konrad Z. Lorenz
35	**Consideraciones acerca del experimento en física**	Germán Bautista
45	**El experimento en la clase de ciencias**	Dino Segura
55	**7 %**	Richard P. Feynman
63	**La organización global de la geometría y el quinto postulado**	Luis E. Moreno A. Shirley Bromberg
72	**Geometría no euclídea y física**	Albert Einstein
75	**Estilos de pensamiento científico**	G. Buchdahl
83	**¿Cómo trabaja un físico teórico?**	V. Berezinsky
87	**Experimento y teoría en física**	Max Born
103	**De cara al pasado**	Julian Betancourt M.

CARLOS AUGUSTO HERNANDEZ

Galileo: las matemáticas y el mundo

Galileo no es un platónico puro ni un puro aristotélico; no es un puro físico teórico, ni un físico experimental puro; o bien, no es un puro racionalista, ni un positivista ni un empirista, sino que, instalado en el tronco del cual todos estos especímenes parcializados se desprenden, puede ser recogido y ensalzado por todos, vilipendiado por todos y, fragmentariamente citado, puede apoyarlos a todos.

Los trabajos de Galileo Galilei han sido objeto de aproximaciones epistemológicas muy diferentes. Incluso se los menciona como ejemplo de la posibilidad de realizar interpretaciones opuestas de la historia. Interpretaciones que, sin embargo, no necesariamente tienen que excluirse. La historia es una reconstrucción de los acontecimientos significativos. Tanto la elección de estos acontecimientos como las relaciones que se consideran relevantes entre ellos dependen de intereses determinados a su vez históricamente. Cada época hace su historia y se reconoce en ella. Por eso el iluminismo vio sólo oscuridad en la Edad Media. Como la historia es ante todo una investigación que las sociedades hacen de los procesos que configuran su identidad, ella está siempre rehaciéndose y no puede regirse por los criterios de verdad de las disciplinas fisicomatemáticas, donde, en palabras de Galileo, "así como no se da *ex parte rei* (en la realidad) el término medio entre lo verdadero y lo falso, así en las demostraciones necesarias, o se concluye indubitablemente, o se paralogiza inexcusablemente, sin dejar campo para defenderse con limitaciones, distinciones, retorcimientos de palabras y con otros giros, sino que por fuerza y en pocas palabras y al primer asalto se queda César o nada" (1).

Racionalista y platónico para Koyré, experimentalista juicioso para Stillman Drake, anarquista epistemológico para P. K. Feyerabend, filósofo moderno o científico creador, de lo que no cabe duda es de que Galileo inaugura una nueva mirada y un nuevo campo para la práctica humana. El opone a la pregunta aristotélica por la causa la descripción mate-

Carlos Augusto Hernández
Departamento de Física
Universidad Nacional
Bogotá



mática de los fenómenos. La verdad esencial, la adecuación del intelecto a la cosa es sustituida por él y desde él por la unidad entre matemática y experimento ("demostraciones necesarias" y "experiencias sensibles"). A partir de Galileo, el plan de la Filosofía natural cambia; el ideal de reconstruir teóricamente la armonía esencial del mundo cede el paso al proyecto de la precisión. Para la ciencia galileana no basta ya ver; hay que "ver" a través de una teoría matemática y, con la ayuda de instrumentos, hacer "minuciosísimas observaciones". Con Galileo se constituye, en fin, una nueva realidad: el fenómeno producido y condicionado como EXPERIMENTO; un fenómeno artificial donde se pone explícitamente de presente la finalidad de la técnica: construir situaciones ideales donde las predicciones se cumplan con toda exactitud.

Con Galileo se funda un modo particular de investigar los fenómenos del movimiento. La reflexión sobre ese acto de fundación nos enfrenta a la especificidad de una disciplina, la física, algunos de cuyos problemas filosóficos más generales se plantean y se discuten explícitamente en los textos galileanos. El estudio de estos textos puede servir de propedéutica epistemológica (por ello se centra en estos trabajos una cátedra de introducción a los problemas de la historia y la filosofía de las ciencias en el Departamento de Física de la Universidad Nacional, en la cual se discuten relaciones entre matemáticas y experimentos, entre ciencia y técnica, entre vida social y paradigmas explicativos). En estas líneas nos limitaremos a plantear algunas ideas sobre la lectura matemática que Galileo hizo de los fenómenos de movimiento; un tema recurrente de los debates epistemológicos actuales.

Como primer paso, de la infinita variedad de la naturaleza que se ofrece a los sentidos sólo lo matemáticamente representable será llevado al cuadro de la Física. Y se trata de algo muy distinto de lo que hubieran podido hacer los antiguos pitagóricos. No en balde estamos en los albores del siglo XVII, en el período de consolidación de una nueva clase preocupada por la ganancia y atenta a los avances de la técnica.

Repitamos (¡una vez más!) el famoso texto de *El ensayador* en donde se separan las cualidades de los objetos y se definen, por así decir, las propiedades esenciales del objeto de trabajo de la nueva ciencia:

> *"Digo pues, que me siento atraído por la necesidad, en seguida que concibo una materia o sustancia corpórea, de concebir a un tiempo que ella esta delimitada y representada por esta o aquella figura, que en relación con otras es grande o pequeña, que está en este lugar o aquel, en este o en aquel tiempo, que se mueve o está quieta, que toca o no toca a otro cuerpo, que es una o poca o muchas, y por ningún esfuerzo de imaginación puedo separarla de estas condiciones; pero que debe ser blanca o roja, amarga o dulce, sonora o muda, de agradable o desagradable olor, no siento que deba forzar a la mente a tener que aprehender que tales condiciones la acompañen necesariamente; antes bien, si los sentidos no nos guiaran, quizás el discurso o la imaginación por si misma, no hubiera llegado jamás a ellas" (2).*

Se determina de este modo el escenario en el cual deberán aparecer los fenómenos de la nueva ciencia del movimiento. Semejante delimitación del objeto de trabajo podría reconocerse como el discurso inaugural de la física, el punto de ruptura entre la filosofía tradicional y la ciencia del movimiento. Sólo que la encontramos palabra por palabra en un libro de filosofía del mismo período, las *Meditaciones metafísicas* de Descartes, y proviene de Demócrito; es decir, de la filosofía presocrática.

Pero para Demócrito la separación de las cualidades entre cualidades primarias -propias de las cosas mismas- y cualidades secundarias -propias de los sentidos- expresa la diferencia esencial entre apariencia y realidad: "lo dulce existe por convención; lo amargo existe por convención; el frío existe por convención; el calor existe por convención. Los átomos y el vacío existen en realidad" (fragmento 9). La realidad son los átomos inaccesibles a la experiencia. Sólo la razón permitiría conocer esta esencia matemática última y permanente que los fenómenos ocultan tras su cambio incesante, su colorido y diversidad. "Nada sabemos en realidad, pues la verdad se esconde en lo profundo" (fragmento 117) (3).

Las propiedades matemáticas de las cuales nos habla Galileo pueden ser, en cambio, directamente reconocibles en un mundo en el cual se construyen esferas cada vez más regulares, ruedas y poleas cada vez más circulares, superficies cada vez más planas, embarcaciones y pinturas planeadas con la ayuda de la geometría, instrumentos de trabajo cada vez más funcionales (como el famoso telar mecánico), y todo esto de acuerdo con las exigencias de una industria que acude, siempre en mayor medida, al cálculo y que comienza a utilizar con éxito las máquinas.

Comenzando con el pulimento de las piedras y la producción

de instrumentos el hombre fue dando a las cosas formas cada vez más regulares, creando un mundo geométrico aun antes de la geometría. Esta última, sin embargo fue sistematizada al parecer al margen de la industria. Durante siglos la geometría hizo parte de lo ideal-racional, las formas de las cosas sólo se le aproximaban. Pero en el siglo XVII la geometría y la industria pueden ser ya conscientemente conectadas; no sólo encontramos la geometría aproximada en el mundo; sabemos que podemos construir y perfeccionar las formas geométricas a través de la técnica.

Este mundo nuestro, de acuerdo con *El Timeo* de Platón, fue construido a partir de un modelo matemático. Según esto, conocer la verdad, la razón del universo, consistiría en descubrir la coherencia esencial: la armonía matemática del modelo ideal. Pero esta armonía, la verdadera realidad, no coincide en esta filosofía con el mundo de la experiencia; no pertenece al mundo de la percepción.

Para Galileo, en cambio, la idealidad no está fuera del mundo, en el modelo inaccesible a la industria humana. Las formas matemáticas perfectas son, más bien, un proyecto de la técnica.

Las matemáticas permiten proponer experiencias ideales que, gracias a la técnica, pueden realizarse con un grado cada vez mayor de aproximación de lo real a lo pensado:

"...si vos tenéis una superficie plana, tan lisa como un espejo y de materia dura como el acero y que no este paralela al horizonte, sino un poco inclinada, y colocáis sobre ella una bola perfectamente esférica y de materia grave y durísima, por ejemplo de bronce, dejada en libertad, ¿que creéis vos que haría?" (4).

Es verdad que no es lo mismo colocar una esfera real sobre un plano real que imaginar geométricamente la situación en que la esfera y el plano son idealmente rígidos:"las cosas tomadas en concreto no responden a las consideradas en abstracto" dice Simplicio, el personaje aristotélico del *Diálogo sobre los dos sistemas máximos*, y por supuesto tiene razón cuando duda de que sea posible, en el mundo real, que una esfera toque a un plano en sólo un punto. Pero no se trata de rechazar la explicación matemática porque el modelo no puede ser empíricamente realizable con perfección ideal, sino de considerar la diferencia entre las condiciones reales y las ideales y disminuir esas diferencias mejorando el modelo o modificando la experiencia.

:...Siempre que en concreto vos apliquéis una esfera material a un plano material, vos aplicáis una esfera no perfecta a un plano no perfecto, y decís que estos no se tocan en un punto. Pero yo os digo que, incluso en abstracto, una esfera inmaterial, que no sea esfera perfecta, puede tocar a un plano inmaterial, que no sea un plano perfecto, no en un punto, sino en una parte de su superficie; de modo que, hasta aquí, todo lo que sucede en concreto, sucede también en abstracto; y sería una cosa muy extraña que las cuentas y las razones hechas con los números abstractos no respondiesen después con las monedas de oro y de plata y con las mercancías concretas. Pero, ¿sabéis, Sr. Simplicio, lo que sucede? Igual que cuando se quiere que las cuentas cuadren con el azúcar, con las sedas y con las lanas, para lo cual será necesario que el contable haga sus cuentas con las cajas, las envolturas y los paquetes, así el filósofo y geómetra, cuando quiere reconocer en concreto los efectos demostrados en abstracto, será necesario que prescinda de los impedimentos de la materia, pues si sabe hacer esto, aseguro que las cuentas se encontrarán no menos ajustadas que los cálculos aritméticos. Los errores, por tanto, no consisten ni en lo abstracto ni en lo concreto, ni en la geometría ni en la física, sino en el calculador que no sabe hacer las cuentas justas" (5).

La unidad entre la matemática y el mundo no consiste sólo en la posibilidad de aproximar la descripción matemática al fenómeno que se quiere estudiar. Se requiere también aproximar el fenómeno a la matemática; producir un fenómeno que pueda ser descrito matemáticamente de la forma más aproximada posible. La ley expresada en términos de proporciones cuantitativas (o en términos algebraicos) se cumple sólo, para Galileo, en un entorno ideal -el vacío- que no presenta resistencias al movimiento. Sólo en este mundo las velocidades (aceleraciones) de la caída son las mismas para todos los cuerpos que se sueltan desde un mismo punto; sólo allí, los espacios recorridos en la caída son rigurosamente proporcionales a los cuadrados de los tiempos. Tal mundo, sin embargo, tiene el inconveniente del caballero Aguilulfo en la última novela de la trilogía *Nuestros antepasados* de Italo Calvino ... no existe.

Es demasiado complicado explicar la caída de un cuerpo liviano como una hoja de otoño. Sin embargo, la resistencia que el aire ofrece a un cuerpo pesado en un tiro parabólico es suficientemente pequeña para considerar que no afecta mucho su velocidad horizontal. Puede aceptarse que la masa que oscila en el extremo de un péndulo tiende a subir siem-





pre hasta la misma altura, aunque en unas pocas oscilaciones el efecto acumulado revele la falsedad de semejante hipótesis; en todo caso podemos disminuir las resistencias en el espacio artificial del laboratorio. Allí los fenómenos se hacen más y más cercanos a la teoría.

La realidad de la física coincide, ya desde Galileo, con la del laboratorio; al menos está más cerca del laboratorio que del mundo de la cotidianidad. Pero la naturaleza no cumple leyes distintas en el laboratorio y en el mundo fuera de él. El fenómeno del laboratorio no es simplemente un fenómeno artificialmente producido; es un fenómeno natural ordenado. Así, la ley probada únicamente en una disposición artificial de efectos se cumple universalmente. El experimento tiene como función principal aislar los fenómenos que en la experiencia común se dan "mezclados". La explicación de la experiencia sensible no es el principio del trabajo de la ciencia; más bien es una de las utopías que pueden guiar la reflexión hacia preguntas cada vez más complejas. El fenómeno inmediato es teóricamente complejo. Acceder a él es una de las más difíciles tareas de la ciencia natural. Ya lo había indicado el mismo Aristóteles, cuya labor consistió en más de una ocasión en una sistematización de la experiencia sensible:

"Ahora bien: el proceso o camino natural en el conocimiento es el que va desde las cosas que nos son conocidas o cognoscibles y evidentes a las que nos son más cognoscibles y evidentes en sí mismas, ya que no son las mismas las cosas que nos son más cognoscibles respecto de nosotros que las que son absolutamente cognoscibles... Las cosas que con relación a nosotros son inmediatamente evidentes y claras son las cosas más mixtificadas; solamente en un segundo tiempo, por medio de la distinción analítica, se hacen cognoscibles los elementos y los principios" (6).

Se llega al laboratorio con una explicación teórica, con una suposición más o menos precisa de lo que puede ocurrir. El experimento implementa técnicamente la suposición. Así el método de trabajo de Galileo está muy lejos de la propuesta baconiana, el empirismo elemental. Se diría incluso que Galileo polemiza con los partidarios del empirismo cuando dice:

"...la inducción, si tuviese que pasar por todos los particulares sería imposible o inútil: imposible, cuando los particulares fueran innumerables; y cuando fueran numerables el considerarlos todos haría inútil, o mejor nulo, concluir por inducción" (7).

Esta "distinción analítica" no ocurre, para Galileo, únicamente en la cabeza; el laboratorio (la técnica) la hace posible en el mundo real. Pero es claro que la distinción operada en el laboratorio parte de un trabajo teórico previo; de un ejercicio de la razón que separa e idealiza, que calcula y predice.

Una referencia tan obvia a la inducción sería innecesaria si el debate sobre Bacon como padre del método científico estuviera ya zanjado. Pero a pesar de las declaraciones del mismo Galileo, y de las discusiones metodológicas de los últimos años, aparecen una y otra vez "metodólogos" que pretenden hacer de la inducción el modo de operar de la ciencia moderna o que insisten en la existencia de una fantasía muy extraña para el filósofo de la ciencia actual: el "método científico". Galileo y Einstein, entre otros, hicieron observaciones que no bastaron para levantar ese equívoco. Existen incluso científicos que, conociendo diferentes métodos de trabajo en su área específica, siguen hablando en singular del "método científico". Lo que parece el colmo de la caricatura -y sin embargo no lo es- es que algunos profesionales de las ciencias humanas pretenden 'tomar prestado' el METODO de las ciencias naturales (las cuales, por supuesto, no aceptarían encerrarse en semejante jaula para trabajar, ni hubieran progresado como lo han hecho si hubieran aceptado las normas de los "metodólogos").

Los partidarios del racionalismo podrían pretender contar con Galileo en sus filas por más de una razón.

•Será objeto de trabajo para el "matemático-filósofo", para los "profesores de ciencia demostrativa", sólo aquello que pueda ser expresado matemáticamente.

•El fenómeno que cumple la función de la prueba está determinado desde las condiciones de la teoría, es un fenómeno preparado racionalmente.

•El universo de la filosofía natural es, en parte, un universo de fenómenos no producidos intencionalmente, pero observados a través del lente de la matemática (y, por tanto, ordenados desde una racionalidad formal, sistemática y crítica), y en parte un universo *construido* en el laboratorio; un universo artificial que resulta de implementar técnicamente el plan de la teoría. Como piensa Bachelard, más que una fenomenología el soporte material de esta razón matemática es una enomenotécnica.

Pero este racionalismo no puede ser ya una forma del

platonismo, por más que se apoye en experimentos mentales y se remita a condiciones ideales. La técnica separa definitivamente a Galileo del gran filósofo griego que inspiró a Ficino y a la academia Florentina. Lo que no significa que podamos ignorar las resonancias platónicas del método de exposición dialogada y de la valorización de la coherencia racional frente a la experiencia.

"Yo, sin experiencia, estoy seguro de que el efecto será tal como os digo porque así es necesario que sea; y aún más: añado que vos mismo sabéis ahora que no puede suceder de otra manera, si bien fingís o simuláis fingir que no lo sabéis" (8).

¿Retórica? Seguramente. P. K. Feyerabend y Maurice Finochiaro han puesto de presente esta dimensión indispensable del discurso de la nueva ciencia. Se trata de *convencer*, de *sensibilizar*, de crear las condiciones para cambiar una forma de evidencia (la de los sentidos) por otra (la evidencia racional de la demostración matemática). Y, en principio, no es siempre posible *demostrar* matemática y experimentalmente la verdad de una teoría; entonces es necesario mostrar que los nuevos planteamientos son verosímiles, que las viejas pruebas son falsas, que las nuevas preguntas son legítimas, que las nuevas estrategias de respuesta son más "naturales", más lógicas, más acordes con una experiencia razonada.

Como guía de una estrategia retórica o como fuente de inspiración epistemológica, lo cierto es que Platón está presente en la mente de Gaiileo (aunque no con mayor fuerza que Aristóteles, maestro y contendiente a través de los peripatéticos, de quien nunca dudó Galileo que hubiera estado entre sus partidarios de haber vivido en el siglo XVII) (9). Es común a los diálogos galileanos y a los platónicos el respeto por la evidencia matemática cuya verdad es incontestable; la voluntad de fundamentar exhaustivamente y de llevar la crítica (a través de la lógica) hasta las más radicales consecuencias; la duda frente a las afirmaciones obtenidas muya a la ligera a partir de los datos de los sentidos.

La verdad de la matemática es tanto más esencialmente verdad, cuanto que es universal y necesaria. Precisamente por ello no puede ser lo mismo "dar órdenes a un matemático o a un filósofo natural que dar instrucciones a un mercader o a un abogado" (10). La evidencia racional de la matemática es de tal naturaleza que no es posible sustraerse a ella.

"Quisiera yo rogar a esos prudentísimos padres que tuvieran a bien considerar con diligencia la diferencia que media entre las doctrinas opinables y las doctrinas demostrativas. En tal caso, y haciéndose cargo de la fuerza con que nos imponen las deducciones necesarias, se hallarían en mejores condiciones para reconocer por qué no está en la mano de los profesores de ciencia demostrativa cambiar las opiniones a gusto" (11).

Galileo no duda en comparar el conocimiento de una demostración matemática con el modo como la verdad se pone de presente a los ojos del mismo Dios:

"...tomando el entender intensive, en cuanto tal término indica intensivamente, es decir, perfectamente, afirmo que el entendimiento humano puede entender algunas proposiciones de esta manera, y, por tanto, tener de ellas absoluta certeza; así son, por ejemplo, las ciencias matemáticas, es decir, la aritmética y la geometría, de las cuales el intelecto divino sabe infinitas proposiciones más, porque las sabe todas, pero, de las pocas comprendidas por el entendimiento humano, creo que el conocimiento es igual al divino en cuanto a la certeza objetiva, puesto que llega a comprender su necesidad, y sobre ésta no parece que puede existir seguridad mayor" (12).

Por si este testimonio no fuera suficiente, los entusiastas de una razón matemática superior a toda experiencia en Galileo (o de una experiencia siempre al servicio de la razón matemática), podrían recurrir a la famosa carta de Baliani del 7 de Enero de 1639:

"Pero, volviendo a mi tratado sobre el movimiento, argumento ex suppositione [haciendo una suposición] sobre el movimiento, definido en aquel modo [aumento constante de la velocidad]; de tal modo que cuando las consecuencias no respondiesen a los accidentes del movimiento natural descendente poco me importaría, del mismo modo que nada anula o modifica la demostración de Arquímedes el que no exista en la naturaleza ningún móvil que se mueva por líneas espirales" (13).

Este texto señala una primera condicion de esta nueva ciencia, el argumento *ex suppositione*. Partimos de una suposición sobre el principio matemático que expresa la necesidad del fenómeno; la coherencia racional que liga este principio a las deducciones necesarias no depende en absoluto de la experiencia. En cambio, cuando la experiencia corrobora la deducción, también corrobora el principio del cual necesariamente esa



deducción se sigue, en el caso de que no exista un principio diferente que pueda llevar a esa misma conclusión. Pero no es legítimo inferir de los efectos la necesidad de una premisa si existe más de un principio a partir del cual se concluya idénticamente. Este último es el caso de las pruebas aristotélicas de la inmovilidad de la Tierra; es posible deducir los mismos efectos utilizados como pruebas del geocentrismo [la caída aparentemente vertical de un cuerpo abandonado en lo alto de una torre, por ejemplo] asumiendo la posición copernicana.

Las críticas de las pruebas aristotélicas ponen en evidencia que toda explicación es precaria; al fin y al cabo toda deducción parte de ciertos presupuestos. Galileo mismo asumiría en 1604 la tarea de hallar "...un principio totalmente indubitable para poder ponerlo como axioma..." (14) del movimiento de un cuerpo en un plano inclinado; pero unos años más tarde tiene que replantear la premisa que ha asumido, "...una proposición que tiene mucho de evidente, y supuesta ésta demuestro lo demás..." (Ibid) y reinterpretar las pruebas de su teoría inicial. Pero sería apresurado tomarlo por ello como modelo de una especie de criticismo positivista. Por el contrario, la defensa que realiza del heliocentrismo es un brillante ejercicio de retórica. Allí, lo posible se representa de tal modo que produce la impresión de lo necesario. Galileo sabe muy bien que una refutación del contrincante no es una prueba de lo contrario de lo que él afirma. Pero se cuida muy bien de no explicitar este asunto pese a las presiones de la iglesia. Definitivamente no razona *ex suppositione* sobre el movimiento de la Tierra; cree firmemente como Copernico en este movimiento. Tal vez no era simple retórica; tal vez Galileo distingue entre las afirmaciones de la filosofía natural que expresan el orden esencial (verdadero) del mundo y las hipótesis geométricas que el experimento debe comprobar.

La suposición que Galileo menciona en la carta a Baliani de 1639 sobre la caída a lo largo de un plano inclinado consiste en que la velocidad va creciendo "...igualmente según el crecimiento del tiempo..." y la deducción que de allí se obtiene es la misma de 1604, es decir, que "...los espacios pasados por el movimiento natural están en proporción doble de los tiempos". ¡Pero en 1604, en la carta a Sarpi, esta derivación era obtenida -erróneamente- de un principio diferente! Por entonces Galileo suponía que "...el móvil natural va creciendo su velocidad con aquella proporción con la cual se separa del comienzo de su movimiento". Viendo el error, un lector cualquiera descartaría por falso el principio de 1604 observando, por ejemplo, que de él no se deriva la relación de espacios y tiempos del experimento, y reconocería en el principio de 1639 la expresión más correcta. Pero esta solución "lógica" no advierte el importante problema de las fuentes teóricas de la filosofía natural que hizo posible la moderna ciencia del movimiento. Para un historiador reflexivo como Koyré, el error no es una simple falla lógica. El error pone en evidencia un fondo problemático. Este fondo es el aristotelismo heredado por la física parisina del *ímpetus*.

Según esta teoría, un cuerpo separado del motor que lo impulsa permanece en movimiento debido al *ímpetus* adquirido mientras era empujado. Esta virtud adquirida se mantiene en el cuerpo o se pierde gradualmente. Un cuerpo en caída recibe, por efecto de su pesantez, ímpetus sucesivos que aumentan su velocidad en el descenso y la disminuyen en el ascenso. El *ímpetus* permitía comprender la conservación de un movimiento no "natural" (como el de un cuerpo pesado que sube) luego de que el móvil se ha separado del motor; estos movimientos "violentos" sin motor extremo eran un gran problema para la física de Aristóteles. La noción de *ímpetus* se fue ligando con el tiempo a la de velocidad, y ya a finales del siglo XVI, en la época en que Galileo escribe su Mecánica, prefigura lo que luego será la *cantidad de movimiento*.

Paradójicamente esta noción cualitativa permite ya una expresión matemática del fenómeno del tipo $v_1/v_2=d_1/d_2$. No se requiere conocer el lugar natural. Basta saber que la velocidad (y el *ímpetus*) aumenta mientras el cuerpo recorre la trayectoria de la caída. La "virtud del motor guardada en el interior del móvil" ya no es una idea de Aristóteles; pero conserva la metafísica del motor y el móvil. La pesantez genera ímpetus precisamente porque el cuerpo pesado está fuera del punto de equilibrio. De aquí resulta natural asociar la velocidad de la caída con la distancia; pero carecería de sentido físico asociarla con el tiempo.

Como se advierte, el error que la lógica reconoce como una simple deducción equivocada, se ofrece al análisis histórico como una fuente de inquietudes y de nexos importantes. Descubre fuentes de la coherencia racional (nociones como equilibrio y armonía) distintas de la pura matemática, que acompañan el proceso de fundación de la nueva ciencia del movimiento y que involucran formas de validación diferentes de la demostración que hoy se exigiría. (Más aún, algunos han encontrado que estos errores revelan, en los estudiantes del siglo XX, conexiones racionales bien distintas de las que establece la teoría física).





Ahora bien, el argumento *ex suppositione* no es aún ciencia natural, es sólo un principio POSIBLE, cuyas conclusiones necesarias deben ser demostradas por la experiencia. La experiencia racionalmente orientada, el experimento, no es un simple apéndice; en ella el principio, que como principio matemático seguirá intacto después de la prueba de laboratorio, se juega su suerte como principio natural. La prueba de laboratorio es la prueba de la verdad de la teoría en el sentido de que, dados ciertos presupuestos teóricos y técnicos, se sigue necesariamente un resultado predecible y susceptible de medición. El experimento dirá si la necesidad racional del modelo coincide con la necesidad material del fenómeno.

Luego de la afirmación citada de que la experiencia no podría invalidar la coherencia puramente matemática, la carta a Baliani de 1639 continúa así:

> *"Pero en esto (la descripción del movimiento acelerado) he sido, diré así, afortunado, ya que el movimiento de los cuerpos pesados y sus accidentes responden puntualmente a los accidentes demostrados por mí del movimiento por mí definido". (15)*

Tan vigorosamente como se defendió la coherencia racional, se defenderá ahora la prueba experimental. La filosofía natural no puede hacerse en contra de una experiencia, cuando esta experiencia está ligada a una demostración racional.

> *"...Una sola experiencia o una demostración concluyente bastan para echar por tierra esta y otros cien mil argumentos probables..." (16).*

El divorcio entre matemáticas y experiencia sensible no es una cuestión de esencia, sino una limitación de ciertos discursos:

> *"Queréis culpar a los matemáticos de ignorancia, por no haber dado cuenta de que el sentido en los sensibles comunes se engaña; como si el saber si se engaña o no fuera un recóndito y profundísimo misterio y secreto de la filosofía. Pero, ¿quién ha hecho mayores y más exactas observaciones y especulaciones acerca de los engaños de la vista que los mismos matemáticos? (...) El ojo no se engaña en absoluto al recibir la especie de la madera (del remo) puesta en medio del agua, como rota, porque ella no es menos verdadera cuando viene del agua rota que cuando del aire derecha; sino que el engaño está en el discurso, que no sabe que las especies visibles en los diversos medios transparentes se refractan" (17).*

Después de un período de lectura "racionalista" de los trabajos de Galileo, que indudablemente sacó a la luz conexiones racionales esenciales entre experimento y teoría, pero que en ocasiones redujo excesivamente el papel gnoseológico y de criterio de verdad del experimento frente a la coherencia racional de la teoría, algunos estudiosos se dieron a la tarea de criticar la imagen de un Galileo puramente matemático (y filósofo platónico) y a demostrar, con documentos y repitiendo las experiencias, que efectivamente Galileo había realizado las pruebas que menciona y que había sido un cuidadoso experimentador.

Bastante se ha escrito para contestar los esquemas excesivamente racionalistas. Ya en 1942, Enrico Persico insistía en que "los experimentos hechos por Galileo fueron sin duda muchos y probablemente no los conocemos todos... Realizó además de las ya recordadas de mecánica, varias experiencias cualitativas sobre la flotación de los cuerpos, la medida del peso específico de distintas sustancias hecha con su *bilancetta*, una experiencia sobre el golpe (la *percossa*) de una caída de agua, un tentativo (naturalmente infructuoso) de medida de la velocidad de la luz... la medida del peso del aire..." (18).





La recopilación y publicación de Stillman Drake de las *Notas de Galileo sobre el movimiento* (19), permitió a los estudiosos reconstruir algunos importantes experimentos de Galileo. En ocasiones la reconstrucción dió origen a debates entre los historiadores (20). Ronald Naylor pone de presente "...el contraste entre los procedimientos experimentales originales de Galileo (que pueden inferirse de sus anotaciones) y las discusiones correspondientes de los *Discorsi* ... (*Consideraciones y demostraciones matemáticas sobre dos nuevas ciencias*)" (21). Según Naylor, las experiencias narradas en los textos fundamentales se presentan en forma simplificada, de acuerdo con un interés didáctico y sólo en las *Notas* se advierte la complejidad del experimento y la conciencia que tenía Galileo de esa complejidad. Es posible entonces llegar a conclusiones diferentes sobre el papel de la experimentación en Galileo según que se parta de los textos o de las *Notas* . Las segundas revelarían el problema real del trabajo científico (por ejemplo, se ha visto que Galileo no desconoce la falsedad de la hipótesis del isocronismo del péndulo para distintas amplitudes, pero que no estuvo interesado en difundir sus dudas, entre otras cosas por el interés que tenía en aplicar el isocronismo del péndulo en la medida del tiempo (22)). En los textos se



destacaría el interés de coherencia y simplicidad. Ya es claro, a partir de trabajo como el ya mencionado de Maurice Finachiaro (23), que la tarea del científico fundador no consistía sólo en probar o demostrar, sino en convencer.

Lo importante es que la discusión sobre los experimentos de Galileo ha demostrado de modo tangible el carácter determinante del enfoque epistemológico de quien hace la lectura. Es claro que Galileo hizo experimentos. También podemos asegurar que fue muy cuidadoso en algunas ocasiones. Pero no podemos hacer una teoría general del papel del experimento y de su relación con la teoría, en el trabajo del "filósofo geómetra". Los historiadores nos sorprenden frecuentemente con discusiones de detalle cuyo interés sólo se pone de presente cuando explicitamos el hecho de que la historia, frecuentemente, tiene como objetivo defender un punto de vista actual sobre los problemas, intereses y métodos de la ciencia. Tal vez los experimentos que más se han discutido sean los correspondientes al movimiento parabólico (folios 114, 116v y 117) (24). La insistencia en el origen teórico o experimental de algunos datos consignados por Galileo expresa el fondo ideológico del debate. Pero el que no sea fácil llegar a acuerdos sobre los métodos efectivamente usados por Galileo no quita el interés al trabajo de reconstrucción. Tal vez Galileo utilizó, por ejemplo, un reloj más preciso que el que podemos imaginarnos para medir los tiempos en el experimento de la caída por un plano inclinado. ¡Tal vez, como cree Stillman Drake, utilizó un reloj capaz de medir intervalos menores de 1/10 de segundo! Es posible que Galileo haya contado el tiempo... ¡cantando!, alcanzando una precisión insospechada con el reloj sorprendente de su voz o su laúd; que la bola marcara el tiempo de su melodía, a manera de metrónomo, mientras golpeaba pequeños obstáculos en su descenso; de modo que un mínimo desacuerdo entre ritmos y golpes era fácilmente detectable para el músico, hijo de músico, que había abandonado la medicina fascinado por las matemáticas y que había construido en su propio taller el compás geométrico militar (25).

Los debates se han dado fundamentalmente a propósito de los trabajos sobre movimiento. Pero se ha avanzado mucho también en la exploración de los métodos en el terreno de la observación astronómica y de las teorías cosmológicas relacionadas con ella. Galileo no conocía el principio del telescopio (sólo menciona las leyes de la refracción, y lo hace en modo tal que pone en evidencia su dificultad para llegar a una descripción como la de la óptica geométrica que Kepler desarrolla en 1510), pero era capaz de realizar observaciones de sorprendente precisión con la ayuda de un micrómetro consistente tal vez en un retículo trazado sobre un papel, al que se superpone ópticamente la imagen del telescopio (mirando con un ojo al retículo, con otro la imagen ampliada del objeto distante)(26).

Pero, ¿podemos acaso inferir de lo dicho que la ciencia galileana está más centrada en la experiencia que en la coherencia teórica? La respuesta más legítima es que eso no es posible; como no es posible tampoco negar que "minuciosísimas observaciones" y las "experiencias de los sentidos" constituyen junto con las "demostraciones necesarias", elementos esenciales del trabajo científico. Es claro que las experiencias galileanas no fueron solamente pensadas. "... Contra esto sirven de prueba no sólo las numerosas declaraciones explícitas de Galileo, donde él asegura haber recurrido a la experiencia, sino también las largas, minuciosas, hasta ostentosas descripciones, sea del desarrollo de los experimentos, sea de los instrumentos usados en ellos; descripciones que están abundantemente esparcidas, un poco por todas partes, en su obra" (27). Pero también es claro que tales experiencias están esencialmente ligadas a las razones matemáticas que les dan sentido (aunque haya algunas que parecen separadas de una "teorización" sistemática como las experiencias con imanes, la experiencia con la "piedra de Bolonia" -probablemente sulfuro de bario- capaz de emitir luz estando fría, la experiencia del vino y del agua unidos por un tubo muy delgado y la medida de las frecuencias sonoras mediante las marcas dejadas por el objeto vibrante). La matemática aporta el elemento fundamental de la necesidad racional. La experiencia sin matemática es un juego, un tanteo, una prueba no científica.

En el diálogo del movimiento del período pisano encontramos esta declaración sobre la matemática.

"¡Oh sutil invención, oh bellísimo descubrimiento! Callen totalmente, callen todos aquellos que creen poder llegar a la filosofía sin el conocimiento de la divina matemática. ¿Y quién negará jamás que, sólo bajo su guía se puede distinguir lo verdadero de lo falso, con su auxilio estimular la agudeza del

ingenio, que, en fin, conducido por ella, se puede comprender y entender cualquier cosa que se conozca con certeza entre los mortales?" (28).

Estudiosos muy serios como Winifried Lovell Wissan han hecho una lectura tan detallada de Galileo que pueden decir sobre bases firmes que "Galileo no tenía en la mente algo como el método hipotético-deductivo experimental moderno" (29), ya que los mismos principios de los cuales la ciencia del movimiento debería derivarse, como ciencia matemática, estaban en discusión y por lo tanto, era "... inevitable que Galileo acudiese a la experiencia tanto como a la razón para determinar cuáles proposiciones utilizar y cuáles descartar (...) Es imposible, por ejemplo, determinar *precisamente* cómo Galileo llegó a pensar en la ley de los cuadrados de los tiempos" (30).

No resulta legítimo ni saludable defender a ultranza un Galileo racionalista o a un Galileo empirista. Tampoco los científicos de nuestro tiempo pueden ser absolutamente fieles a un método. En la carta a Liceti del 15 de Septiembre de 1640, en la cual Galileo defiende su trabajo de los ataques de los aristotélicos de su tiempo, asegurando que interpreta mejor que ellos las enseñanzas del gran filósofo griego, encontramos la voluntad de establecer un equilibrio metodológico entre razones y experiencias que no pueden lograr ni el racionalismo puro ni el empirismo abstracto:

"Entre las suposiciones (en las cuales se funda el discurso científico) que Aristóteles enseña en su lógica está la que se refiere a hacerse cautos para evitar las falacias del discurso, orientándolo y adiestrándolo a silogizar bien y a deducir de las premisas concedidas la conclusión necesaria: y tal doctrina hace referencia al modo correcto de argumentar. En cuanto a esta parte creo haber aprendido de las innumerables demostraciones de los matemáticos puros, jamás falaces; tal seguridad en el demostrar que, si no nunca, al menos rarísimas veces haya caído en equivocaciones yo cuando argumento. Hasta aquí entonces yo soy peripatético. Entre las seguras maneras para conseguir la verdad está el anteponer las experiencias a cualquier discurso, no estando seguros nosotros de que en éste, al menos encubiertamente, no esté contenida la falacia, no siendo posible que una experiencia fundada sobre los sentidos sea contraria a la verdad; y esto es también precepto muy estimado por Aristóteles, y antepuesto con mucho al valor y a la fuerza de la autoridad de todos los hombres del mundo ..." (31).

Galileo mismo no podía (y no quería) instalarse en una escuela filosófica definida. Acudía a Aristóteles y a Platón en la medida en la cual podían reconocerse (siempre parcialmente) en sus doctrinas. Hemos visto su original profesión de fe aristotélica: veamos uno de los posibles ejemplos de su voluntad de presentarse como heredero de Platón:

"Para poner en el título del libro de las obras completas: de aquí se comprenderá cuál es la utilidad de las matemáticas para concluir sobre las proposiciones naturales y cuánto es imposible filosofar correctamente con la escolta de la geometría, de acuerdo con la sentencia verdadera de Platón" (32).

Galileo no es, pues, un platónico puro, ni un puro aristotélico; no es un puro físico teórico, ni un físico experimental puro; o bien, no es un puro racionalista, ni un positivista ni un empirista, sino que, instalado en el tronco del cual todos estos especímenes parcializados se desprenden, puede ser recogido y ensalzado por todos, vilipendiado por todos y, fragmentariamente citado, puede apoyarlos a todos.

En el contexto de los debates que tuvo que afrontar, Galileo acudió frecuentemente a los argumentos filosóficos de sus propios contendientes; no podemos pretender que sus declaraciones filosóficas tengan el lenguaje que hubiera sido posible si se hubiera expresado libremente (aunque en ocasiones, como cuando piensa en el título de sus obras, esté hablando consigo mismo). El camino más correcto para investigar sus puntos de vista parecería ser el examen de sus propios trabajos; pero tampoco allí es fácil defender una imagen epistemológica "pura", no resulta legítimo separar la "retórica" de los "experimentos", las generalizaciones filosóficas de los cálculos. Muchas de las argumentaciones filosóficas se basan en cuidadosos cálculos y observaciones (como en el famoso caso de las manchas solares; allí Galileo, midiendo la variación aparente de la distancia entre las manchas solares dedujo que éstas se encontraban en la superficie del sol, y por lo tanto que también éste está sometido a la variación, contra la pretensión aristotélica de la perfección e inmutabilidad de los cuerpos celestes (33)), mientras que, sin duda, tienen razón quienes señalan que no poseyó una prueba experimental concluyente sobre el argumento fundamental de la movilidad de la tierra ni le era posible deducirla de principios empíricamente fundados.

Como él mismo dice:

"Pero mi admiración y asombro, Señor Sagredo, es bien diferente de lo que os maravilla: Vos os maravilláis de que son tan pocos los seguidores de la opinión de los Pitagóricos (del movimiento de la tierra en torno al sol); y yo me admiro de cómo haya habido alguno que la haya abrazado y seguido; no puedo admirar lo

bastante la eminencia del ingenio de los que la han tomado y considerado verdadera y han hecho, con la vivacidad de su entendimiento, tal fuerza a los propios sentidos, que hayan sido capaces de anteponer lo que el discurso les dictaba, a aquello que las experiencias de los sentidos les mostraban como abiertamente al contrario" (34).

Galileo está convencido de la verdad del modelo copernicano; no tiene un experimento para probarlo; tiene, eso sí, argumentos lógicos y experiencias (imaginarias y reales) que oponer a las pruebas aristotélicas de la inmovilidad de la tierra; pero desde 1609 -cuando descubre en su telescopio los satélites de Júpiter- no tiene ya ninguna duda de la coherencia de ese sistema, y las observaciones de las fases de Venus de 1610 serán para él una ratificación de la corrección de la teoría heliocéntrica.

Galileo no defiende una hipótesis probable de Copérnico, defiende una verdad de la cual está convencido, no sólo sabe que el heliocentrismo es POSIBLEMENTE un buen modelo para explicar las apariencias, CREE ciertamente que expresa el verdadero orden del mundo.

"Aquellos que persisten en afirmar que Copérnico, como astrónomo, haya tomado solo EX HIPOTHESI la movilidad de la tierra y la estabilidad del sol, en cuanto ésta satisface mejor el salvar las apariencias y el cálculo de los movimientos de los planetas, pero que no la diera por verdadera realmente y en la naturaleza, muestran (y sea dicho sin molestarlos) haber creído demasiado a quien habla quizá más por su propia cuenta que porque haya tenido práctica en la lectura de Copérnico o en la comprensión de este asunto..." (35).

"y en cuanto se refiere al resto de ese admirable sistema, quien quiera estar seguro de la opinión del mismo Copérnico lea no una vana escritura del editor (Osiander), sino toda la obra del autor; así sin duda tocará con la mano que Copérnico ha tenido por verdaderísima la estabilidad del sol y la movilidad de la tierra" (36).

Defiende así la convicción de Copérnico para defender la suya propia. Porque si, para los astrónomos a secas, las construcciones de deferentes, ecuantes y epiciclos no son reales sino invenciones para facilitar los cálculos, esto ya no es así para "... los astrónomos filósofos, los cuales más allá de ocuparse de salvar las apariencias, buscan investigar como problema máximo y admirable la verdadera constitución del universo, ya que tal constitución es (existe) y es de único modo, verdadero, real e imposible de ser de otra forma..." (37).

Galileo es, pues, un realista (como la mayoría de los científicos, pese a que juiciosamente afirmen lo contrario); no busca construir un simple modelo de lo real, se ocupa en la investigación de la verdad. Trata de descubrir el "verdadero", el "real", el "único" orden de la naturaleza que sigue ciegamente las leyes de la necesidad. El descubrimiento de ese orden es la meta de la ciencia y no es posible que haya ciencia de lo que no es, o que podamos hacernos cuadros arbitrarios de lo real a nuestro antojo, puesto que la verdad es una, el orden es uno y "...el que busca otro distinto del único que es, busca lo falso y lo imposible" (38).

"...Siendo la naturaleza inexorable e inmutable y sin cuidado de que sus recónditas razones y modos de operar sean o no expuestos a la capacidad de los hombres, por lo que ella no trasgrede jamás las leyes que le han sido impuestas" (39).

Dos universos de la necesidad aparecen definidos según vemos: el universo de la matemática cuyas deducciones, si están correctamente realizadas, permiten igualar la certeza del entendimiento de Dios mismo y el del acontecer físico, cuya necesidad se impone sin excepciones. El acoplamiento de estos dos universos, en la medida en la cual el discurso comprenda y exprese -a través de una ley matemática- la necesidad y el orden esenciales, es lo que genera la verdad. El lenguaje en el cual lo necesario se expresa debe expresar esa necesidad.

"Aquello que en todas las ciencias demostrativas es necesario observar debemos seguirlo en este tratado (la mecánica): esto es, proponer las definiciones de los términos propios de esta disciplina y las primeras suposiciones, de las cuales, como de fecundísimas semillas, pululan y brotan consecuentemente las causas y las verdaderas demostraciones de las propiedades de todos los instrumentos mecánicos" (40).

Las matemáticas permitirán "considerar en universal" las ventajas de los instrumentos mecánicos y corregir el error de los artesanos mecánicos que pretenden "... a muchas operaciones imposibles por su naturaleza, aplicar máquinas ... en la creencia de poder mover y alzar grandes pesos con poca fuerza, engañando, en cierto modo con sus máquinas a la naturaleza, instinto de la cual, más aún, firmísima constitución en que ninguna resistencia puede ser separada por una fuerza que no sea más potente que ella" (41). La matemática devela el misterio de la palanca: la fuerza pequeña debe recorrer una mayor distancia, en modo tal que los productos de las fuerzas por las distancias son iguales. Develado el misterio de la palanca, resta mostrar cómo las demás máquinas se reducen a ella y deducir del mismo principio las

explicaciones de los distintos instrumentos mecánicos.

Cuando Sagredo, en los "Discursos", se sorprende de que las máquinas rigurosamente proporcionales no tengan la misma resistencia, cuando "...todos las razones de la mecánica tienen su fundamento en la geometría...", Salviati responde precisamente que "... se puede demostrar geométricamente que las más grandes son siempre, proporcionalmente, menos resistentes que las menores..." (42). Tomando en cuenta los factores pertinentes, aplicando las leyes de la geometría a las leyes de la naturaleza no puede haber oposición entre la geometría y el mundo ya que este mundo es esencialmente geométrico.

"La filosofía está escrita en ese grandísimo libro que tenemos abierto ante los ojos, quiero decir, el universo; pero no se puede entender si antes no se aprende a entender la lengua, a conocer los caracteres en los que está escrito. Está escrito en lengua matemática y los caracteres son triángulos, círculos y otras figuras geométricas sin las cuales es imposible entender ni una palabra; sin ellos es como girar vanamente por un oscuro laberinto" (43).

Puede decirse que la fórmula "escrito en lengua matemática" es distinta de "esencialmente matemático". En efecto: en el primer caso se trataría de un mundo referido al hombre (al lector) que utiliza un lenguaje para apropiarse, al modo de la ciencia y la técnica, de lo real. En el segundo, la matemática se presume que pertenece esencialmente al mundo. Cual haya sido, entre éstas, la opción epistemológica de Galileo, es algo que no creemos fácil de decidir.

Es verdad que se refirió muy explícitamente en sus "Cartas sobre las manchas solares" a la metafísica como una tarea vana e imposible: "Porque, o queremos especulando tratar de penetrar la esencia verdadera e intrínseca de las sustancias naturales, o queremos contentarnos con tener noticia de algunas de sus afecciones. Tratar de conocer la esencia, me parece empresa no menos imposible y fatiga no menos vana en las sustancias elementales próximas que en las remotísimas y celestes" (44).

Pero es claro, al mismo tiempo, que creía en la existencia de un orden del mundo y que tal orden estaba asociado a una forma geométrica precisa: el círculo:

"Establecido, pues, este principio, se puede concluir inmediatamente que, si los cuerpos integrales del mundo deben ser por su naturaleza móviles, es imposible que su movimiento sea el recto o cualquier otro que no sea el circular. La razón es bastante fácil y manifiesta, puesto que lo que se mueve con movimiento rectilíneo cambia de lugar; y, si continúa moviéndose, cada vez que se va alejando más del punto de donde había partido y de todos los lugares por donde sucesivamente ha ido pasando; si este movimiento le conviene naturalmente, parece claro que en un principio no estaba en el lugar propio; y, sin embargo, las partes del mundo estaban dispuestas en un orden perfectísimo. Pero supongámoslas perfectamente ordenadas: resulta evidente que, como tales, es imposible que tuvieran que cambiarse y, en consecuencia, moverse con movimiento rectilíneo, por naturaleza infinito, porque infinita e indeterminada es la línea recta; es imposible que ningún móvil tenga por naturaleza el principio de moverse en línea recta; es decir, hacia donde es imposible llegar, al no existir un término predefinido; pues la naturaleza, como dice el mismo Aristóteles, no comienza a hacer aquello que no puede ser hecho, ni comienza a moverse hacia donde es imposible llegar. Sin embargo, si alguien dijese que la línea recta, y en consecuencia, el movimiento por ella, es realizable infinitamente, es decir, sin tener nunca fin, y que la naturaleza les hubiera asignado, por así decir, algunos términos arbitrarios, y les hubiera dado instintos a sus cuerpos naturales para dirigirse hacia esos términos: yo les respondería que, dejando libre la fantasía, se podría decir que esto sucedió en el primitivo caos, donde indistintas materias andaban vagando confusa y desordenadamente; y que la naturaleza, para ordenarlas con más facilidad, se sirvió de los movimientos rectos, los cuales, de la misma manera que a los cuerpos bien ordenados los desordenan, así, sirve para ordenar con más facilidad los que están torpemente dispuestos; mas, una vez hecha la distribución y colocación óptima, es imposible que en ellos quede la natural inclinación de moverse con movimiento rectilíneo, del cual sólo se seguirá, ahora, el cambio de su propio y natural lugar, esto es, desordenarse. Podemos, pues, decir que el movimiento rectilíneo sirve para transportar las materias que han de servir para la construcción de la obra, pero que, una vez construida ésta, sólo les queda o permanecer inmóviles o, si se mueven, hacerlo circularmente; y no diríamos con Platón que incluso los cuerpos mundanos, una vez ya construidos y establecidos del todo, fueron movidos durante algún tiempo por su Autor con movimiento recto; sino que, una vez llegados a ciertos determinados lugares, fueron empujados uno a uno para que giraran, pasando del movimiento recto al circular, donde después se han mantenido e

incluso aún se conservan; pensamiento, sin embargo, profundísimo y digno de Platón y sobre el cual recuerdo haber oido razonar a nuestro común amigo 'Accademico Linceo'" (45).

Las posiciones que acabamos de esbozar no necesariamente son contradictorias. En el primer caso el filósofo geómetra se distingue del metafísico en términos del objeto de su reflexión. En el segundo se expresa un punto de vista sobre el orden del mundo, cuyos ecos platónicos es inútil tratar de ocultar (basta con leer el Timeo). Una idea de orden universal que, aunque sea distinto del que defenderá la mecánica newtoniana (al igual que Descartes, Newton postuló una inercia rectilínea allí donde Galileo sólo reconoció una inercia circular), servirá como sustituto del orden sustancial, como criterio arquitectónico para oponer la cosmología geocéntrica y para debilitar las resistencias, y podrá oponer a la inmovilidad de la tierra en el centro, un equilibrio que garantice la estabilidad y la armonía de un universo con la tierra en movimiento.

El círculo está a medio camino entre el espacio dinámico aristotélico y el espacio euclidiano (verdadero y matemático) de la mecánica newtoniana, es un principio de orden, un principio estético.Tales principios han jugado y juegan un papel esencial en la historia de las ciencias.

Si la ciencia moderna no quiere ser sólo guía para la técnica sino filosofía natural, es decir, conocimiento de la naturaleza, deberá suponer la legitimidad y universalidad de sus métodos, el acuerdo entre el modo de proceder y el objeto mismo.

"...recurrir a las imperfeccciones de la materia, capaces de contaminar las purísimas matemáticas, tampoco es suficiente para explicar la desobediencia de las máquinas, en la realidad, a las leyes abstractas e ideales de la mecánica (...) Y puesto que doy por supuesto que la materia es inalterable; es decir, siempre la misma, es evidente que de ella pueden deducirse demostraciones no menor que de las puras y abstractas matemáticas" (46).

Galileo tendrá a disposición una teoría de la estructura de la materia. Esta teoría cambiará de forma desde *"El ensayador"* donde se supone que las sustancias están constituidas de partículas más o menos pesadas, más o menos numerosas, más o menos veloces que son las responsables de las afecciones de los sentidos. También el calor es una afección, debida a la acción de partículas igneas sobre nuestro aparato sensible.

"Y tal vez mientras esta sutilización y rozamiento permanece y se mantiene dentro de unos mínimos cuantos, su movimiento es temporal y su operación únicamente calorífica; pero al alcanzar después la última y máxima disolución, en átomos realmente indivisibles, se crea la luz, con un movimiento, o mejor dicho, con una expansión y difusión instantánea y potente, no sé si debo decir por sutilidad, por su enrarecimiento, por su inmaterialidad o bien por otra condición diferente a todas éstas y no nombrada, potente digo para llenar espacios inmensos" (47)".

El atomismo le ofrece una teoría matemática (o matematizable) de la materia y la sensación.

Pietro Redondi, en su "Galileo herético" (48), muestra cómo muy probablemente fuel el atomismo la verdadera herejía de Galileo, oculta tras la cortina de humo del copernicanismo (¿cómo, en efecto, podía ser posible que la sustancia del cuerpo de Cristo coexistiese, en la hostia, con los accidentes del pan, cuando sustancia y accidentes dependían de la configuración y el movimiento de los átomos?). Sea o no suficiente la base documental de Redondi, el caso es que la teoría de la materia sufre en los "Discursos" una mutación extraordinaria. Los átomos ya no serán extensos (quanti) serán inextensos (non quanti). La materia estará constituida por algo así como un conjunto infinito de ...puntos matemáticos! La realidad última de la materia es lo infinitamente pequeño, pero de lo infinitamente pequeño no puede predicarse la masa, el peso, la forma... Esto implica una contradicción. Galileo es muy conciente de esta deficiencia de su teoría; por ello dice luego de plantearla:

"Si lo que he expuesto es de vuestro agrado, tenedlo en cuenta; y si no, reputad la cosa vana, lo mismo que todo lo que yo he dicho e id a buscar de otro la explicación más tranquilizante para vuestro entendimiento. Insisto solamente en estas dos palabras: nos encontramos entre los infinitos y los indivisibles" (49).

Esta es, sin duda, una sentencia filosófica. Algunos considerarán que no es prenda de orgullo para Galileo el que se lo distinga (como hemos hecho todo el tiempo) como filósofo. Esta última es la posición de Stillman Drake: él recuerda cómo en el *Dialogo de Cecco di Ronchiti* -que atribuye a Galileo- el personaje Mateo dice, defendiendo a los matemáticos contra los filósofos: "...¿qué tiene que ver la filosofía con la medición?" (50).

Pero el mismo Galileo no es de esa opinión: en la carta a Belisario Vinta del 7 de Mayo de 1610 dice: "Finalmente en cuanto al título y pretexto de mi servicio, yo querría, además del nombre de matemático, que S. A. añadiese el de filósofo, declarando yo que he estudiado más años la filosofía que meses la matemática

pura" (51).

En este mismo sentido el libro de Newton lleva el nombre de *Principios matemáticos de filosofía natural*. Ser filósofo en el sentido de los griegos no necesariamente es hacer metafísica y separarse del mundo; es, más bien, ser capaz de fundamentar las propias aseveraciones y buscar la sabiduría con el ejercicio de la voluntad y la razón.

Galileo es pues, sin duda, un filósofo matemático. Pero no por ello es un dilósofo platónico; es más bien un filósofo de la técnica. El mundo ideal que la ciencia nueva describe es éste que construimos cada vez más perfectamente con los instrumentos de la técnica. El mundo cotidiano sigue siendo relativamente misterioso porque es muy complejo; pero el mundo del laboratorio y el mundo de las máquinas, que penetra cada vez más y más en la experiencia de todos los días, está siendo ordenado y comprendido desde la ciencia; ésta pone las condiciones ideales para el cumplimiento de la predicción.

La ciencia matemática se cumple en el laboratorio; pero el mundo es visto progresivamente como un inmenso laboratorio y convertido efectivamente en un laboratorio gracias a la técnica.

"Aquí (en la obra de Galileo), por primera vez, no obstante que desde los siglos más lejanos la capacidad inventiva humana, el HOMO FABER, había creado máquinas e instrumentos, para solucionar los problemas contingentes del hombre, se reconoce la capacidad deductiva experimental de la máquina aplicada a la determinación de las leyes de la naturaleza; lo que significa en particulares condiciones el reconocimiento lógico y gnoseológico del instrumento técnico: la máquina es real y física, aún siendo artificial y lógica; por lo tanto funciona de necesidad según la lógica y según la naturaleza" (52).

Galileo se reclama "filósofo geómetra"; pero, ¿acaso, puede llamarse filosofía lo que hoy reconocemos como el primer capítulo de la ciencia moderna? ¿Tiene acaso la técnica algo que ver con cosas tales como la verdad? Si hemos enfatizado el hecho de que el fenómeno del laboratorio es ARTIFICIAL, ¿podemos insistir hoy en que estamos descubriendo la naturaleza como tal?

Es cierto que como ha sabido decir W. Benjamin, "...en el país de la técnica, la visión de la realidad inmediata se ha convertido en una flor imposible" (58). El conjunto entero de los elementos dispuestos para el experimento está allí para servir a los propósitos de una tarea racionalmente orientada; su lugar, su movimiento, sus características específicas (forma, dureza, peso, densidad) tienen un sentido en el contexto de la disposición integral que los reúne. La máquina se pone en relación con un criterio de exactitud que está determinado desde la teoría y desde las posibilidades e intereses de la técnica. La máquina existe como algo dispuesto para un requerimiento específico.

Pero ocurre que las máquinas, por su parte, podrán ponerse también al servicio de la exploración de las leyes de la naturaleza. Esto significa que la técnica entra explícitamente en el terreno de la exploración de la verdad. El instrumento científico (el telescopio, por ejemplo) tiene con la verdad un nexo más fundamental. La legitimidad de su uso se basa en que la técnica, al organizar la naturaleza, no puede hacer otra cosa que seguir los dictados propios de ésta. La matemática, aunque no depende, para mantener su coherencia interna, de que las relaciones que postula se cumplan o no en la realidad, es expresión legítima de la necesidad natural cuando está ligada a la experiencia racionalmente ordenada. Lo que ocurre ahora es que la verdad se concibe y se realiza en el espacio abierto por la unidad entre técnica y matemáticas.

Por fin, en esa forma de poner de presente la naturaleza no es posible burlar los límites impuestos por la necesidad. No sólo se trata de que "... intentar tratar las cuestiones naturales sin el conocimiento de la geometría es pretender hacer lo que no puede ser hecho" (55) sino de que se equivocan los mecánicos al "...querer, a muchas operaciones, por su naturaleza imposibles, aplicar máquinas sobre cuya capacidad han resultado engañados..." (56). Esto es, que la mirada misma que hace posible la técnica, está condicionada por la coherencia entre la necesidad natural, el lenguaje y el proyecto en el cual nos vemos involucrados.

El mundo que aparece a través de la lente matemática de Galileo es un mundo donde los fenómenos se comprenden a través de situaciones ideales. Y, como se ha dicho, en el espacio que la técnica hace posible, el fenómeno real se aisla, se simplifica, se aproxima con bastante exactitud al mundo real. Pero en verdad este ejercicio de la razón y de la técnica no sólo explica lo previamente dado; crea en la práctica mundos nuevos. En este sentido se invierte la relación escolástica de la verdad como adecuación del pensamiento a la cosa. Se trata ahora de una adecuación de la cosa al pensamiento, que abre espacios nuevos para la manifestación de cosas que el pensamiento debe esforzarse en explicar.

El problema del conocimiento se plantea ahora de forma distinta a como lo había propuesto la filosofía. La actitud del filósofo griego era la de contemplar críticamente lo dado. La razón debía realizar el trabajo de análisis y

síntesis de la experiencia y garantizar la distancia frente a las impresiones inmediatas que podían ser fuente de error. Pero lo que el griego buscaba era la esencia, la naturaleza de las cosas.

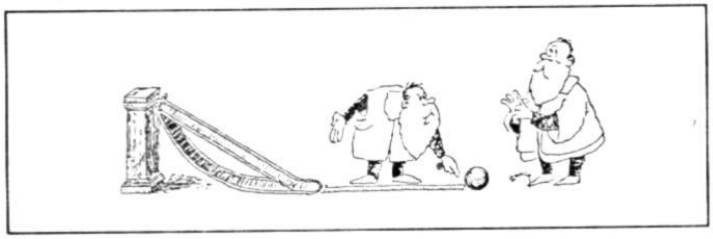
El fenómeno PRODUCIDO, en cambio, entra, por su propia naturaleza en el reino de lo disponible, de lo que aparece en el contexto de un determinado proyecto racional y esto significa que no se da simplemente como algo que acaece "simplemente", como ocurren los acontecimientos imprevistos, sino que su modo de aparecer lo dispone al empleo en la industria humana (en la guerra, en la navegación, en la construcción de edificios y máquinas): el isocronismo del péndulo será utilizado como principio de la medida del tiempo y éste como medida del movimiento, el principio de "equilibrio de los planos" y el de los cuerpos flotantes (llamado "principio de Arquímedes") (53), serán utilizados para la construcción de una balanza de densidades ("la bilancetta") y esta a su vez se empleará en las medidas de las proporciones de una aleación, lo que, por su parte, determina un posible lugar en el mercado y en la producción de objetos que involucran la mezcla de distintos metales en proporciones específicas. Las fórmulas abstractas de la física, que expresan el "secreto" de las máquinas, se pondrán al servicio de la construcción de nuevas máquinas.

A la exigencia de Bacon de la crítica de los ídolos que oscurecen el entendimiento, a la exigencia de Descartes de la duda metódica, se añade una nueva exigencia: la del conocimiento de las matemáticas y la de la organización práctica de la experiencia orientada por ellas.

Frente a las solicitudes de la técnica, la naturaleza se revela como orden geométrico. Pero sólo el filósofo-geómetra puede leer y reconstruir ese orden esencial y definir el marco de lo posible. Sólo es factible leer lo que está escrito en el universo a través de una específica dirección, de una particular circunscripción y educación de la mirada. La naturaleza está, de hecho, para Galileo escrita en lengua matemática, pero hace falta aprender geometría para comprender este texto.

En el espacio abierto por la técnica, se diría que se reemplaza la búsqueda de lo esencialmente verdadero por la seguridad de lo verificable (el mismo Galileo, como hemos indicado, rechaza la pregunta por la esencia); más aún, la verdad habría sido sustituida por la fundionalidad. Pero hemos visto también que Galileo busca explícitamente el orden único del mundo, el que verdaderamente es. Lo que ocure es que la verdad no está allí donde primero se la andaba buscando. "Entonces, ¿dónde está la verdad? La verdad está en el trabajo de la experiencia realizado por la actividad racional" (57). Este punto de vista, sintetizado por Bachelard, es el punto de vista de Galileo.

Además de las instancias de su estrategia de investigación ("observaciones cuidadosas", "experiencias razonables" y "demostraciones necesarias") Galileo posee algo más: la convicción que a través del trabajo de exploración de los fenómenos, la naturaleza no sólo se manifiesta en el espacio de lo técnicamente disponible, sino que pone al descubierto su propia esencia en el sentido de su universalidad, su coherencia y simplicidad internas, su verdad entendida, en coincidencia con los griegos, como develación de lo que estaba oculto."



NOTAS

(1) Il Saggiatore, en LE OPERE DI GALILEO GALILEI. Nuova ristampa della Edizione Nazionale (1890-1909). Firenze, G. Barbera Editore, 1964. Existe traducción española: El ensayador, Editorial Sarpe, Madrid, 1984, p.181. La página que se cita corresponde a esta edición.

(2) Galileo: El ensayador, p.292.

(3) Ver: C. Marx: Diferencia de la filosofía de la naturaleza según Demócrito y según Epicuro; Universidad Central de Venezuela, Caracas, 1973.

(4) Galileo: Diálogo sobre los dos sistemas máximos, Jornada segunda. Aguilar, Buenos Aires, 1975, p.87.

(5) Diálogo..., Jornada segunda, p. 188-189.

(6) Aristóteles: Obras. Aguilar, Madrid, 1973, p.570.

(7) Opere..., Vol.VI, p.701.

(8) Diálogo..., II, P.86 (OPERE VII, 171).

(9) Bastaría recordar la hermosísima lección de dialéctica platónica con la cual Galileo rinde homenaje al filósofo que postuló la teoría de la reminiscencia, haciendo "recordar" a Simplicio la conservación de la velocidad tangencial cuando cesa de obrar la fuerza centrípeta sobre un cuerpo que gira en el extremo del radio de una circunferencia, en la segunda jornada de los *Diálogos...* (pp. 160-165 de la edición en español).

(10) Carta a la señora Cristina de Lorena, gran Duquesa de Toscana, en J. Babini: *Galileo*, Centro Ed. América

Latina, Buenos Aires, 1967. pp. 53-54.

(11) *Ibid.*

(12) *Diálogos...*, I, p.187.

(14) Carta a Paolo Sarpi, 16 de Octubre de 1604. *OPERE...*, Vol. X, p.115.

(15) *Del Carteggio...*, p.424.

(16) *Diálogo sobre los dos sistemas máximos*, Jornada segunda, p.51.

(17) *Opere...*, Vol. III, pp. 397-398.

(18) Enrico Pérsico: *Galileo y la física*. Nel 3º centenario della morte di Galileo Galilei, Saggi e conferenze. Milano, Societá Editora vita e pensie 1942.

(19) *Galileo's Notes on Motion* (Arranged in probable order of composition and presented in reduced facsimile), by Stillman Drake. Suplemento degli ANNKLI DELL' INSTITUTO E MUSEO DI STORIA DEILA SCIENZA, FIRENZE, 1979.

(20) Cf. por ejemplo en *ISIS*, 676, 1976 la crítica de William R. Shea y Neil S. Wolff a la interpretación de Drake del folio 116 sobre el movimiento parabólico y la respuesta de Stillman Drake y James Maclahan, donde se confrontan los datos de Galileo y las reconstrucciones de estos estudiosos.

(21) Ronald Naylor: "Galileo: Real experiment and didactic demonstration", *ISIS* 66, 399 (1975).

(22) Cf. Edouardo Proverbio: *"Galileo e la misura del tempo"*, en Novitá celesti e crisi del sapere; Atti del convegno internazionale di studi galileani. Giunti Barbera, Firenze, 1984.

(23) Maurice Fianchiaro: *Galileo and the art of reasoning*, D. Reydel Publishing Company, Bordrecht, 1980.

(24) Ver, por ejemplo, Pierre Thullier: "Galileo y la experimentación". *Mundo Científico* (La Recherche), 26, 1983. Thullier reproduce el folio 117 y muestra cómo Drake interpreta los números que allí aparecen como medidas experimentales después de obtener él mismo "lecturas parecidas", mientras que Naylor realiza simplemente un cálculo teórico, y obtiene "valores idénticos (o casi)" a los números indicados por Galileo.

(25) Cf. Stillman Drake: "The role of music in Galileo's experiments". *Scientific American*, Junio 1975, pp. 98-104.

(26) Cf. S. Drake y Ch. Kowal: "Galileo observa Neptuno", *Investigación y ciencia* (Scientific American), No. 53, Febrero 1981.

(27) Carlo Maccagni: *Considerazione sul "método"*, SAGGI su G. G. Firenze, G Barbera, 1972.

(28) *Opere...*, Vol 1, p. 401.

(29) W.L. Wissan: *Mathematic and experiment in Galileo*. Annali del Instituto a Museo di storia de la scienza di Firenze; III 977, Vol. II, p. 153.

(30) *Ibid*, p. 154.

(31) *Opere...*, Vol. XVIII, p. 249.

(32) *Opere...*, Vol. VIII, pp. 613-614.

(33) Para un interesante análisis de estas cartas ver el Cap. VIII de *La philosophis naturelle de Galilée* de M. Clavelin, Ed. Armand Colin, Paris, 1968. Existe traducción al español de José Granés: *La razón y lo real*, MIMEO, U. Nacional, s/f.

(34) *Diálogo...* III, p.98.

(35) *Opere...*, Vol V, p.354.

(36) *Ibid*, pp. 362-363. Existe traducción española de estas *Consideraciones sobre el sistema copernicano* en el texto de Blanca Inés Prada: *Galileo Galilei* (su vida, su obra y su aporte al desarrollo del método de la ciencia moderna). Ed. Tercer Mundo, Bogotá, 1983, pp. 116-1272.

(37) Galileo, *Istoria e dimostrazioni intorno a la Macchie Solari*, Ed. Theoria, Roma, 1982, p.27.

(38) *Opere...* Vol Vii, p.700.

(39) Carta a B. Castelli, 21 de Diciembre de 1613. *Opere...*, Vol V, p.283.

(40) *Opere...* Vol. II, p.159.

(41) *Opere...* Vol. II, p.155.

(42) Galileo, *Consideraciones y demostraciones matemáticas sobre dos nuevas ciencias*, Editora Nacional, Madrid, 1981, pp. 68 y 70. *Opere...* Vol VIII, pp. 50-51.

(43) Galileo, *El ensayador*, p.61.

(44) Galileo, *Istoria...* p. 95.

(45) *Diálogo...* I, pp. 298.

(46) *Consideraciones y demostraciones*, pp.69-70.

(47) *El ensayador*, p.298.

(48) Cf. Pietro Redondi, *Galileo Erético*, Einaudi, Torino, 1983.

(49) *Consideraciones y demostraciones...*, p. 134.

(50) Cf. S. Drake, *Galileo against the philosophers* Zeilen & Ver Brugge ed., Los Angeles, 1976. La cita atribuida a Galileo en *Opere...*, Vol II, p. 315.

(51) *Opere...*, Vol. X, p. 353.

(52) Carlos Maccagni, Op. Cit., p. 42.

(53) *The works of Archimedes*, with the Method of Archimedes, Edited by T. L. Hesth, Dover Publications, inc, New York, 1912. Los principios aludidos son las proposiciones 6, 7 del *Equilibrio de los planos*: "Dos magnitudes, sean conmensurables o no, se equilibran a distancias recíprocamente proporcionales a las magnitudes" (p.192) y la proposición 7 de *Sobre los cuerpos flotantes*: un sólido más pesado que un fluido, si se coloca en él, descenderá al fondo del fluido y, si se pesa dentro de él, será aligerado de su peso real en el peso del fluido desplazado" (p.258).

(54) W. Benjamin: *La obra de arte en la época de la reproductibilidad técnica*, MIMEO, s/f.

(55) *Diálogo...*, II, p.180.

(56) Galileo, *Opere...*, a cura di Franz Brunetti, Vol. I, UTET, Torino, 1980, p.141.

(57) Bachelard, *El compromiso racionalista*, S. XXI ed., Buenos Aires, 1973, p.65.

CARLO FEDERICI C.

El paso de lo finito a lo infinito:

Del algoritmo euclidiano finito al algoritmo euclidiano infinito (II parte)

Discutiendo la inconmesurabilidad del lado del cuadrado con su diagonal, en la primera parte, llegamos a representar a $\sqrt{2}$ como una fracción continua infinita. ¿Qué valor tendrán otras fracciones continuas que podamos imaginar y que interpretación geométrica cabrá para ellas?

Sobre la fraccion continua infinita más sencilla

En la primera parte se vio que el cociente a/b entre la longitud de la diagonal y la de un lado de un cuadrado es igual a

$$fci\ (1.2)$$

una fracción continua infinita muy sencilla. Es bastante obvio preguntarse ahora si a y b son las longitudes de dos segmentos A y B y

$$a/b = fci\ (1,1) = 1 + \cfrac{1}{1 + \cfrac{1}{1 + \ldots}}$$

entonces ¿qué interpretación geométrica tiene o puede tener la dupla $<A,B>$ y cuál es el valor de la misma?

Es evidente que el denominador de la primera fración es igual a a/b, o sea,

$$a/b = 1 + \frac{1}{a/b}$$

De donde

$$(a/b)^2 = (a/b) + 1 \rightarrow (a/b)^2 - (a/b) - 1 = 0$$

Carlo Federici
Universidad Nacional
Bogota

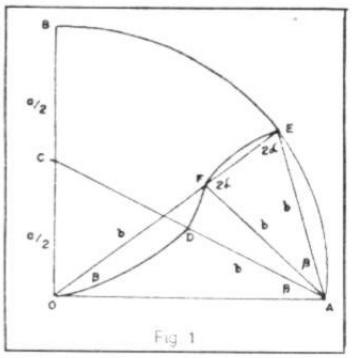


Fig. 1

y dado que $a/b>0$,

$$a/b = (1 + \sqrt{1^2 + 4})/2 = (\sqrt{5} + 1)/2$$

Es decir

$$a/b = (\sqrt{5} + 1)/2 = fci\,(1,1) = 1 + \cfrac{1}{1 + \cfrac{1}{1 + \ldots}}$$

Por otra parte la ecuación en a/b se puede escribir

$$0 = a^2 - ab - b^2$$
$$a^2 - ab = b^2$$
$$a(a - b) = b^2$$
$$a/b = b/(a - b)$$

y esta última igualdad permite que B se pueda interpretar como una parte de A media proporcional entre A y la parte restante $A - B$.

Los matemáticos griegos llamaron a B la parte o sección áurea de A. Es natural en este punto preguntarse: dado A, ¿cómo se construye B? Para tal fin es conveniente calcular b/a:

$$b/a = 2/(\sqrt{5} + 1) = 2(\sqrt{5} - 1)/(5 - 1) = (\sqrt{5} - 1)/2$$

así que

$$b = a(\sqrt{5} - 1)/2 = \sqrt{5a^2/4} - a/2 = \sqrt{a^2 + (a/2)^2} + (a/2)$$

es decir

$$b = \sqrt{a^2 + (a/2)^2} - (a/2)$$

lo que sugiere una fácil construcción de B, al mismo tiempo que se encontrará una interpretación geométrica de la dupla$<A,B>$ que explicará por qué los matemáticos griegos y no sólo los matemáticos, dieron tanta importancia a la "sección áurea".

Dado el segmento OA (véase Figura 1) de longitud a, para construir una sección áurea de longitud b y darle una interpretación geométrica procédase de la manera siguiente (en donde se distinguirán construcciones, demostraciones y notación):
(En lo que sigue las mayúsculas indican puntos)

cs_1) Constrúyase OB tal que: $AOB = \pi/2$ y $OB \equiv OA$
cs_2) Construyase C tal que: C está sobre el segmento OB y $OC \equiv CB$
cs_3) Constrúyase CA
cs_4) Constrúyase D tal que: D está sobre el segmento CA y $CD \equiv CO$

dm_1) $b = longAD = long\,AC - long\,CD = \sqrt{a^2 + (a/2)^2} - a/2$ así que b es la sección áurea de a y $a/b = b/(a-b)$

Hasta aquí para la construcción de b; para su interpretación hay

que continuar como sigue:

cs_5) constrúyase el arco de circunferencia AB con centro en O.
cs_6) consttrúyase E tal que: E está sobre el arco AB y *long* $AE = b$
cs_7) constrúyase AE
cs_8) constrúyase OE
cs_9) constrúyase F tal que: F está sobre el segmento OE y *long* $AF = b$
cs_{10}) constrúyase AF
nm_1) designese como β la medida en radianes de $\angle AOE$
nm_2) designese como 2α la medida en radianes de $\angle AEO$, $\angle AEF$, $\angle EAO$
dm_2) $\beta = \pi - (2\alpha + 2\alpha) = \pi - 4\alpha$
dm_3) long AF = long AE, entonces $\angle AFE \equiv \angle AEF \rightarrow \angle AFE = 2\alpha$
dm_4) $\angle EAF = \pi - (2\alpha + 2\alpha) = \pi - 4\alpha = \beta$
dm_5) $\angle AOE \equiv \angle AEF$ y $\angle AEO \equiv \angle AEF$ y $\angle EAO \equiv \angle EFA$
$\rightarrow \Delta AOE$ es semejante al ΔEAF
$\rightarrow a/b = b/\text{long}FE \rightarrow \ln FE = a\text{-}b \rightarrow \ln OF = \ln OE - \ln FE = a - (a\text{-}b) = b$
$\rightarrow OF \equiv FA \rightarrow \angle FOA \equiv \angle FAO \rightarrow \angle FAO = \beta \rightarrow 2\alpha = 2\beta \rightarrow \beta = \alpha$
$\rightarrow \pi = 2\alpha + 2\alpha + \beta = 2\beta + 2\beta + \beta = 5\beta \rightarrow \beta = \pi/5 \rightarrow \beta = 2\pi/10$
$b = \text{long}AE = l_{10}$ en donde l_{10} es la longitud de los lados del decágono regular inscrito en la circunferencia de centro O y radio OA.

Ahora, después de haber interpretado la sección áurea AE de un segmento OA como un lado del decágono regular inscrito en la circunferencia de radio OA será fácil darse cuenta de que "evidentemente"

$$a.b = 1 + \cfrac{1}{1 + \cfrac{1}{1 + \ldots}}$$

En efecto, en el interior del triángulo OAE de la Figura 1 se construye el triángulo $O''A''E''$ (Figura 2) y se traza la línea d, que en este triángulo cumple las mismas relaciones que b en el triángulo OAE, así mismo se construyen los triángulos $O''''A''''E''''$, etc.
Obsérvese que

$$OE = b + d + f + \ldots = a$$

y

$$AE = c + e + g + \ldots = b$$

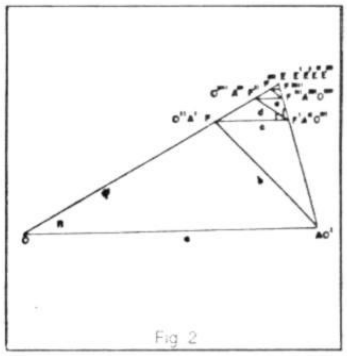
Entonces:

$a = b + c$

$$\frac{a}{b} = 1 + \frac{a}{b} = 1 + \frac{1}{\frac{b}{c}} = 1 + \frac{1}{\frac{c + e + g + \ldots}{c}}$$

$$= 1 + \frac{1}{1 + \frac{e + g + \ldots}{c}} = 1 + \frac{1}{1 + \frac{d}{c}}$$

$$= 1 + \frac{1}{1 + \frac{1}{\frac{c}{d}}} = 1 + \frac{1}{1 + \frac{1}{\frac{d + f + \ldots}{d}}} = 1 + \frac{1}{1 + \frac{1}{\frac{f + \ldots}{d}}}$$


Fig. 2



y así sucesivamente. Es interesante notar que la longitud de la poligonal $OO'O''O'''$ ... es igual a $2a+b$, ¡obviamente!

Sobre fracciones continuas periódicas monómeras

Vimos que,

$$1 + \cfrac{1}{1 + \cfrac{1}{1 + \ldots}} = (\sqrt{5} - 1)/2, \quad 1 + \cfrac{1}{2 + \cfrac{1}{2 + \ldots}} = \sqrt{2}$$

Es obvio preguntarse entonces sobre la fracción continua periódica monómera

$$x = fc_1\,(1, 3) = 1 + \cfrac{1}{3 + \cfrac{1}{3 + \ldots}}$$

Es evidente que

$$x - 1 = \cfrac{1}{3 + (x - 1)}$$

Entonces

$$x^2 + x - 3 = 0$$

Resolviendo la ecuación, se halla que

$$1 + \cfrac{1}{3 + \cfrac{1}{3 + \ldots}} = (\sqrt{13} - 1)/2$$

Es natural ahora plantearse el problema general: ¿qué vale la fracción continua periódica monómera x tal que $x = fc_1\,(c_0, c_1)$

Recordando el significado de la notación,

$$x - c_0 = \cfrac{1}{c_1 + \cfrac{1}{c_1 + \ldots}} = \cfrac{1}{c_1 + (x - c_0)} = \cfrac{1}{(x - c_0) + c_1}$$

Luego,

$$0 = (x - c_0)^2 + c_1\,(x - c_0) - 1$$

$$x - c_0 = (-c_1 + \sqrt{c_1^2 + 4})/2$$

y por lo tanto:

$$c_0 + \cfrac{1}{c_1 + \cfrac{1}{c_1 + \ldots}} = (\sqrt{c_1^2 + 2^2} - c_1)/2 + c_0$$

Sobre fracciones continuas periódicas dímeras y trímeras •



¡Ya se abrió el apetito! ¿Qué valor tiene (en terminos finitos) x tal que

$$x = c_0 + \cfrac{1}{c_1 + \cfrac{1}{c_2 + \cfrac{1}{c_1 + \cfrac{1}{c_2 + \cdots}}}}$$

fracción continua que en notación abreviada se escribe

$$x = \text{fci}\,(c_1, \overline{c_1, c_2})$$

Como se hizo en los casos anteriores,

$$x - c_0 = \cfrac{1}{c_1 + \cfrac{1}{c_2 + (x - c_0)}}$$

Despejando $(x - c_0)$ se llega a:

$$x - c_0 = (-c_1 c_2 + \sqrt{(c_1 c_2)^2 + 4 c_1 c_2}\,)/\,2c_1$$

Así que

$$c_c + \cfrac{1}{c_1 + \cfrac{1}{c_2 + \cdots}} = c_0 + (\sqrt{(c_1 c_2 + 2)^2 - 2^2} - c_1 c_2)/\,2$$

Para $c_0 = 1,\ c_1 = 1,\ c_2 = 2$ se tiene que

$$\sqrt{3} = 1 + \cfrac{1}{1 + \cfrac{1}{2 + \cdots}}$$

Análogamente,

$$(\sqrt{21} - 1)/\,2 = 1 + \cfrac{1}{1 + \cfrac{1}{3 + \cdots}}$$

Qué valor tiene (en términos finitos) x tal que

$$x = c_0 + \cfrac{1}{c_1 + \cfrac{1}{c_2 + \cfrac{1}{c_3 + (x - c_0)}}}$$

fración continua que se notaría

$$x = \text{fci}\,(c_0, \overline{c_1, c_2, c_3})$$

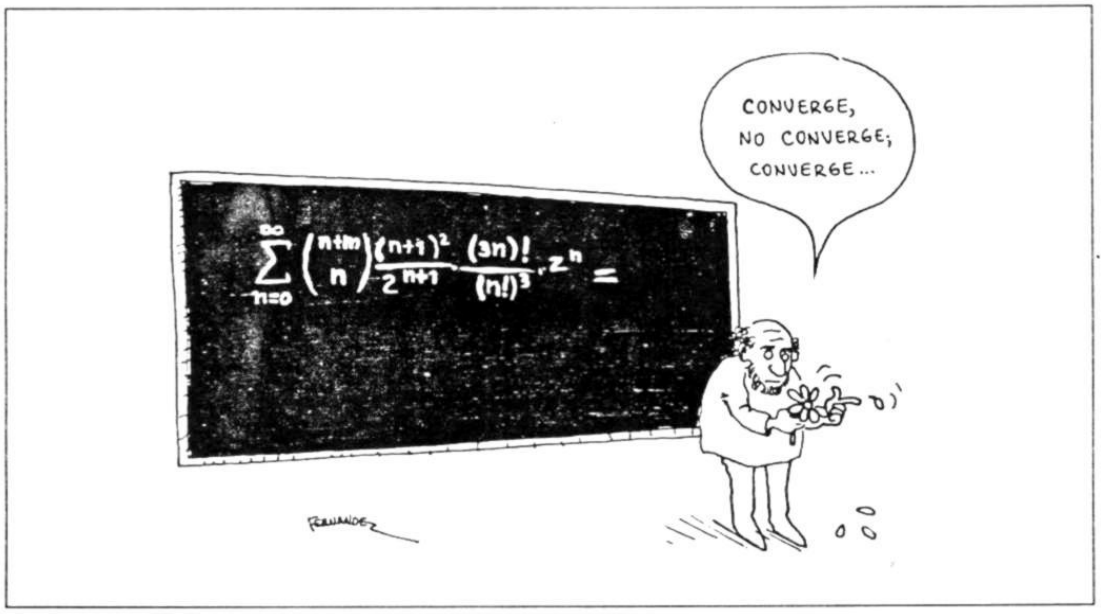
Despejando se llega a:

$$x = [\sqrt{(c_1 c_2 c_3 + c_1 - c_2 + c_3)^2 + 4(c_1 c_2 + 1)(c_1 c_3 + 1)}$$

$$- (c_1 c_2 c_3 + c_1 - c_2 + c_3)] / 2(c_1 c_2 + 1) + c_0$$

Conclusión

En general cualquier fraccion continua infinita periodica, es decir, cualquier numero de la forma $x = fci\ (c_0, c_1, \ldots, c_n)$ corresponde a un irracional (un numero de la forma $a + \sqrt{b}$ donde a y b son numeros racionales). La reciproca también es válida y se conoce como "Teorema de Lagrange".



KONRAD Z. LORENZ

La analogía como fuente de conocimiento

«A los etólogos se les acusa frecuentemente de sacar falsas analogías entre el comportamiento humano y el comportamiento animal. Sin embargo no existe algo así como una falsa analogía». En esta su conferencia de recepción del premio nobel, K. Lorenz, en lugar de presentar algunos resultados de su trabajo, como es lo usual, hace una extensa justificación del uso de la analogía en sus estudios sobre el comportamiento animal.

El concepto de analogía

En el curso de la evolución ocurre con frecuencia que, independientemente una de la otra, dos formas de vida diferentes toman caminos similares, paralelos, al adaptarse a las mismas circunstancias externas. Prácticamente todos los animales que se mueven rápido en un medio homogéneo han encontrado la manera de darle a sus cuerpos formas aerodinámicas que reducen la fricción a un mínimo. El " invento" de concentrar la luz sobre un tejido sensible a ella por medio de una lente, se ha hecho independientemente en la naturaleza animal al menos cuatro veces en diferentes *phyla*; en dos de éstas, los cefalópodos y los vertebrados, esta clase de "ojo" ha evolucionado hasta una verdadera cámara proyectora de imágenes a través de la cual nosotros mismos podemos ver el mundo.

Gracias a los descubrimientos inicialmente hechos por Charles Darwin y más recientemente por bioquímicos tenemos un conocimiento bastante sólido de los procesos mediante los cuales, en el curso de la evolución, se han alcanzado estas maravillosas estructuras. El estudioso de la evolución tiene buenas razones para suponer que la abundancia de estructuras corporales diferentes que, por su maravillosa aptitud, hacen posible la vida a tan asombrosa diversidad de criaturas bajo condiciones asombrosamente

Konrad Lorenz (1903-1989) compartió el Nobel de Medicina y fisiología de 1973 con N. Tinbergen y K. Von Frisch. Este artículo es la conferencia que pronunció el 12 de Diciembre de ese año al recibir el Premio. Traducido de la revista Science (julio 19 de 1984) por miembros del Comité Editorial.

distintas, todas deben su existencia a estos procesos que nosotros estamos habituados a incluir bajo el concepto de adaptación. Esta suposición, cuya validez no me propongo discutir aquí, forma la base del razonamiento que el evolucionista aplica al fenómeno de analogía.

Deducción del valor comparable de supervivencia a partir de similitud de forma

Cuando encontramos, en dos formas de vida no emparentadas entre sí, una semejanza de forma o de patrones de conducta que relaciona más de unos cuantos detalles menores, suponemos que ella es causada por adaptación paralela a la misma función preservadora de la vida. La imposibilidad de similaridades coincidenciales es proporcional al número de rasgos de similaridad independientes, y es, para n de tales caracteres, igual a 2^{n-1}. Si encontramos, en un velero y en un avión, o en un tiburón y un delfín, o también en un torpedo las similitudes notables que se ilustran en la figura 1, podemos suponer con seguridad que en el organismo tanto como en las máquinas hechas por el hombre, la necesidad de reducir la fricción ha llevado a adaptaciones paralelas. Aunque los puntos de similaridad independientes no son en estos casos muy numerosos, sigue siendo seguro conjeturar que cualquier otro organismo o vehículo que los posea está adaptado para el movimiento rápido.

Hay conformidades que conciernen a un número incomparablemente mayor de detalles independientes. La figura 2 muestra secciones transversales de los ojos de un vertebrado y de un cefalópodo. En ambos casos existe una lente, una retina conectada por nervios con el cerebro, un músculo que mueve la lente para enfocar, un iris contráctil actuando como un diafragma, una córnea diáfana en frente de la cámara, y una capa de células pigmentadas cubriéndola desde atrás -así como muchos detalles concordantes. Si un zoólogo que no conociese nada acerca de la existencia de los cefalópodos examinase tal ojo por vez primera, concluiría sin mayor problema que es en realidad un órgano para percibir luz. No necesitaría ni siquiera observar un pulpo vivo para saber esto con certeza.

El argumento de la "falsa analogía"

A los etólogos se les acusa frecuentemente de sacar falsas analogías entre el comportamiento humano y el comportamiento animal. Sin embargo, no existe algo así como falsa analogía: una analogía puede ser más o menos detallada y por lo tanto más o menos informativa. Buscando asiduamente una analogía que fuera realmente falsa, encontré un par de ejemplos tecnológicos dentro de mi propia experiencia. Una vez confundí un buque de vapor de rueda en la popa con un taller de barcos. Una embarcación estaba anclada en la ribera del Danubio cerca de Budapest. Tenía una pequeña chimenea humeante y en la popa una enorme rueda de paletas que giraba lentamente. En otra ocasión, tomé una pequeña planta eléctrica, consistente en un motor de dos tiempos y un dínamo, por un compresor. El único ejemplo biológico que pude encontrar se refería al órgano luminiscente de un gastrópodo oceánico, que fue confundido con un ojo porque tenía una lente epidérmica y, detrás de él, un epitelio cilíndrico alto conectado con el cerebro por medio de un nervio. Aún en estos ejemplos, la analogía fue falsa solamente con respecto a la dirección en la que se transmitía la energía.

El concepto de homología

Existe, en mi opinión, únicamente una posibilidad de error que puede posiblemente ser descrita como "sacar una falsa analogía" y se trata de confundir una homología con una analogía. Una homología puede ser definida como cualquier semejanza entre dos especies que puede ser explicada por su descendencia de un ancestro común que poseía el carácter que las hace semejantes. Hablando estrictamente, el término homólogo sólo puede ser aplicado a caracteres y no a órganos. La figura 3 muestra los miembros delanteros de algunos tetrápodos vertebrados escogidos para ilustrar la enorme variedad de usos que puede tener un miembro delantero y los cambios evolutivos que puede sufrir al servicio de estas funciones diferentes. A pesar de ser distintas estas funciones, y sus respectivos requerimientos, todos estos miembros están construidos sobre el mismo plan básico y consisten de elementos comparables como huesos, músculos y nervios. La gran diferencia en sus funciones hace extremadamente improbable que las múltiples semejanzas en sus formas puedan ser debidas a una adaptación paralela -en otras palabras, que sean una analogía.

Como discípulo del especialista en embriología y anatomía comparada, Ferdinand Hochstetter, tuve el beneficio de una instrucción a fondo en los procedimientos metodológicos para distinguir semejanzas causadas por una descendencia común de aquéllas debidas a una adaptación paralela. De hecho, hacer esta distinción forma gran parte del trabajo diario del evolucionista comparativo. Tal vez debería mencionar aquí que este procedimiento me ha llevado a descubrir lo que personalmente considero como mi contribución más importante a la ciencia. Conociendo el comportamiento animal como lo conocí y habiendo sido instruido en los métodos de la comparación filogenética como lo fui, no podía dejar de descubrir que los mismos métodos de comparación, los mismos conceptos de analogía y homología, son aplicables a las característica del comportamien-

to como lo son a aquéllas de la morfología. Este descubrimiento está contenido implícitamente en los trabajos de Charles Otis Whitman y de Oskar Heinroth; es solamente su formulación explícita y la comprensión del gran alcance de sus consecuencias lo que puedo reclamar como propio. Gran parte del trabajo de mi vida ha consistido en rastrear la filogénesis del comportamiento desenredando los efectos de homología y de evolución paralela. La resistencia de ciertas escuelas de pensamiento impidió el pleno reconocimiento del hecho de que los patrones de comportamiento pueden ser hereditarios y específicos de cada especie hasta el punto de ser homologables, y fue necesario un extenso artículo sobre patrones homólogos en las anátidos para lograr mi objetivo.

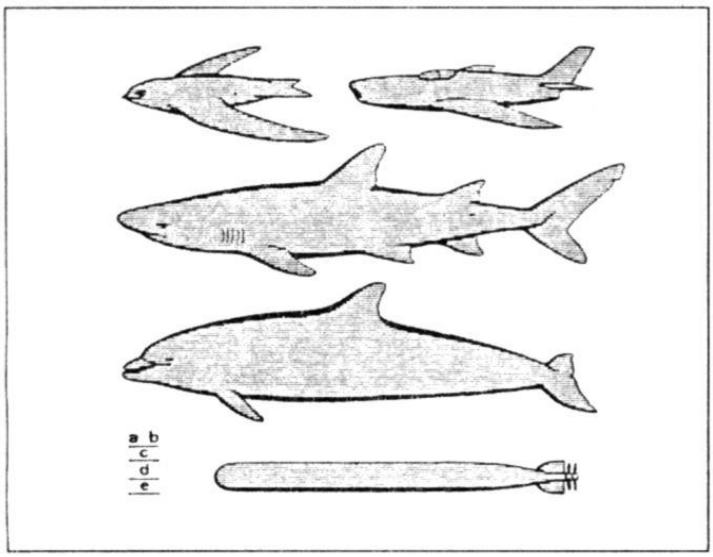


Fig 1. Analogía en la forma por adaptación a una función idéntica. Forma aerodinámica en (a) paloma, (b) avión caza, (c) tiburón, (d) delfín y (e) torpedo.

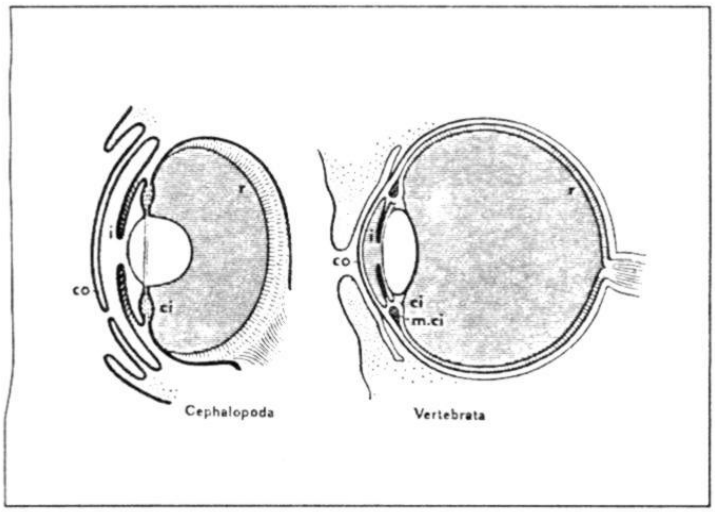


Fig 2. Analogía detallada en dos órganos receptores de luz que evolucionaron independientemente. (Izquierda) ojo de un pulpo, (derecha) ojo humano; *co* : córnea, *ci* : cuerpo ciliar, *m.ci* : músculo ciliar; *i* : iris; *r* : retina.

Homología cultural

Mucho más tarde en mi vida comprendí que, en el desarrollo de las culturas humanas, la interacción entre semejanzas inducidas históricamente y parecidos causados por evolución paralela -en otras palabras, entre homologías y analogías- era muy similar al de la filogénesis de las especies y planteaba casi los mismos problemas. Más adelante tendré ocasión de referirme a éstos; aquí quiero ilustrar la existencia de la homología cultural. La figura 4 ilustra los cambios culturales por los cuales la pieza de la armadura medieval que estaba originalmente diseñada para proteger la garganta y el pecho gradualmente se convirtió, por un cambio de función, en un símbolo de *status*. Otto Koenig en su libro *Kulturethologie*, ha hecho referencia a muchos ejemplos de persistente similaridad de caracteres inducidos históricamente, a los cuales puede aplicar legítimamente el adjetivo "homólogo".

La ritualización y el simbolismo juegan un papel en el atuendo tradicional y particularmente en los uniformes militares en sus cambios históricos de tal manera que la permanencia de semejanzas históricamente mantenidas, no es tal vez muy sorprendente. Sin embargo sorprende que la misma retención de características históricas, no solo independientemente de la función, sino en claro desafío de esta, sea observable aún en la parte de la cultura humana que uno supondría más libre del simbolismo, ritualización y conservadurismo sentimental, esto es, en la tecnología. La figura 5 ilustra el desarrollo del vagón de tren. La forma ancestral del carruaje tirado por caballos persiste tercamente a pesar de las dificultades muy considerables que entraña, como la necesidad de construir un estribo a todo lo largo del tren, sobre el cual el conductor tenía que trepar de compartimiento en compartimiento, expuesto a las inclemencias del clima y al obvio peligro de caer. Las ventajas de la solución alternativa de construir un corredor longitudinal dentro del vagón son tan obvias que ellas sirven como una demostración del enorme poder ejercido por factores tendientes a preservar características históricas en desafío a la conveniencia.

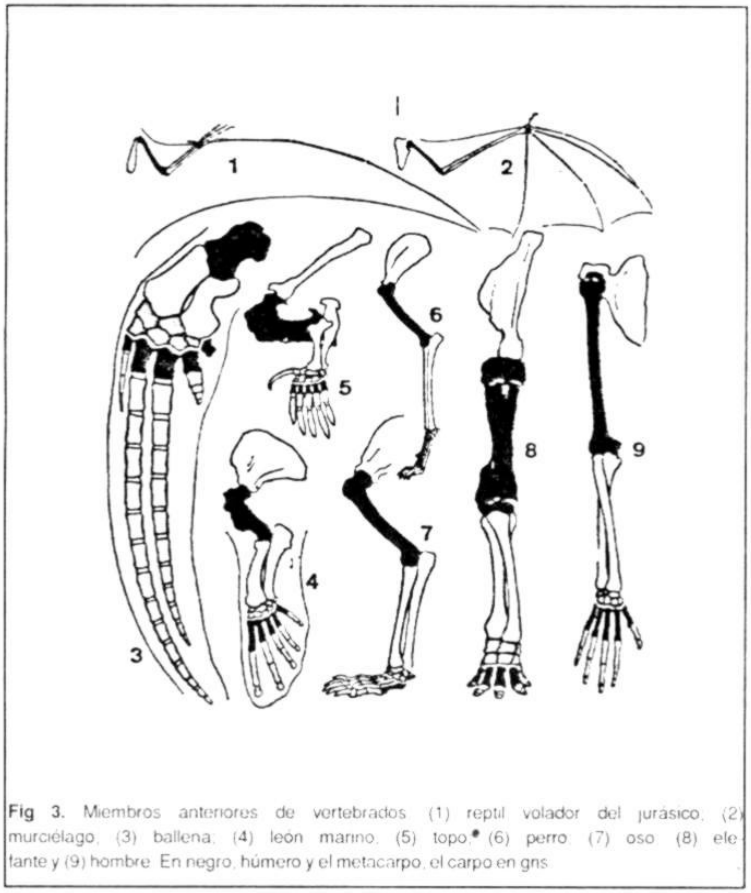


Fig 3. Miembros anteriores de vertebrados: (1) reptil volador del jurásico; (2) murciélago; (3) ballena; (4) león marino; (5) topo; (6) perro; (7) oso; (8) elefante y (9) hombre. En negro, húmero y el metacarpo, el carpo en gris.

La existencia de estas homologías culturales es de gran importancia teórica, puesto que prueba que, en el paso de información cultural de una generación a la siguiente, actúan procesos que son independientes de consideraciones racionales y que, en muchos aspectos, son funcionalmente análogos a los factores que mantienen invariancia en la herencia genética.

Deducción de la función a partir de analogías de comportamiento

Permítaseme ahora hablar del valor de las analogías en el estudio del comportamiento. No siendo vitalistas, sostenemos que cualquier patrón de conducta observable regularmente, que con igual regularidad logra valor de supervivencia, resulta de un mecanismo sensorial y nervioso desarrollado por la especie al servicio de esa función particular. Necesariamente, las estructuras subyacentes a esa función deben ser muy complicadas, y cuanto más complicadas sean, menos probable es,

como ya lo sabemos, que dos formas de vida no relacionadas, por pura coincidencia, puedan haber desarrollado patrones de comportamiento que se parezcan unos con otros en muchos caracteres independientes.

Un ejemplo notable de dos conjuntos complicados de patrones de comportamiento desarrollados independientemente en especies no relacionadas, y aún así de manera que producen un gran numero de analogías, ajenas a toda duda, lo proporciona el comportamiento de los seres humanos y el de los gansos cuando se enamoran y cuando sufren de celos. Una y otra vez he sido acusado de antropomorfismo acrítico cuando describo, en algún detalle, este comportamiento de las aves y de la gente. Los sicólogos han argüido que es engañoso utilizar términos como enamorarse, casarse o estar celoso cuando se habla de animales. Voy a proceder a justificar el uso de estos conceptos puramente funcionales. Para evaluar correctamente la gran improbabilidad de que dos complicados patrones de conducta en dos especies no relacionadas sean similares entre si en tantos puntos independientes, uno debe representarse mentalmente la complicada organización fisiológica subyacente. Considérese el grado mínimo de complicación que incluso un modelo electrónico hecho por el hombre debería poseer para simular, de la manera más simple posible, los patrones de comportamiento que están aquí bajo discusión. Imagínese un aparato, *A*, en comunicación con otro, *B*, y que se mantiene examinando continuamente si el aparato *B* entra en comunicación con un tercer aparato *C*, y que además, si descubre que así efectivamente ocurre hace lo máximo para interrumpir esta comunicación. Si uno trata de construir modelos simulando estas actividades, por ejemplo en la forma como están construidas las famosas tortugas electrónicas de GreyWalter, se da cuenta muy pronto que la complicación mínima de tal sistema sobrepasa de lejos la de un mero ojo.

La conclusión que debe obtenerse de este razonamiento es tan simple como importante. Puesto que sabemos que el patrón de comportamiento de los gansos y de los hombres no puede ser de ninguna manera homólogo -los últimos ancestros comunes de las aves y de los mamíferos fueron reptiles inferiores con cerebros diminutos y ciertamente incapaces de cualquier comportamiento social complicado -y conociendo además que la improbabilidad de que ocurran semejanzas por coincidencia sólo puede ser expresada con números astronómicos, sabemos con certeza que fue un valor de supervivencia mas o menos idéntico el que causó el desarrollo del comportamiento celoso en las aves y en el hombre.

Esto, sin embargo, es todo lo que la analogía puede decirnos. No nos dice donde reside este valor de supervivencia -aunque podemos esperar determinarlo mediante observaciones y experimentos con gansos. No nos dice nada acerca de los mecanismos fisiológicos que producen el comportamiento celoso en las especies; pueden incluso ser bien diferentes en cada caso. La forma aerodinámica se logra en el tiburón por la forma de la musculatura, en el delfín por la gruesa capa de grasa, y en el torpedo por láminas de acero soldadas. De la misma manera, los celos pueden ser -y muy probablemente son- causados por un programa heredado y fijado genéticamente en los gansos, mientras que pueden ser determinados por tradición cultural en el hombre -aunque yo no creo que éste sea el caso, por lo menos no enteramente.

Tan limitado como pueda ser el conocimiento derivado de esta clase de analogía, su importancia es sin embargo considerable. Mucha de la complicada interacción

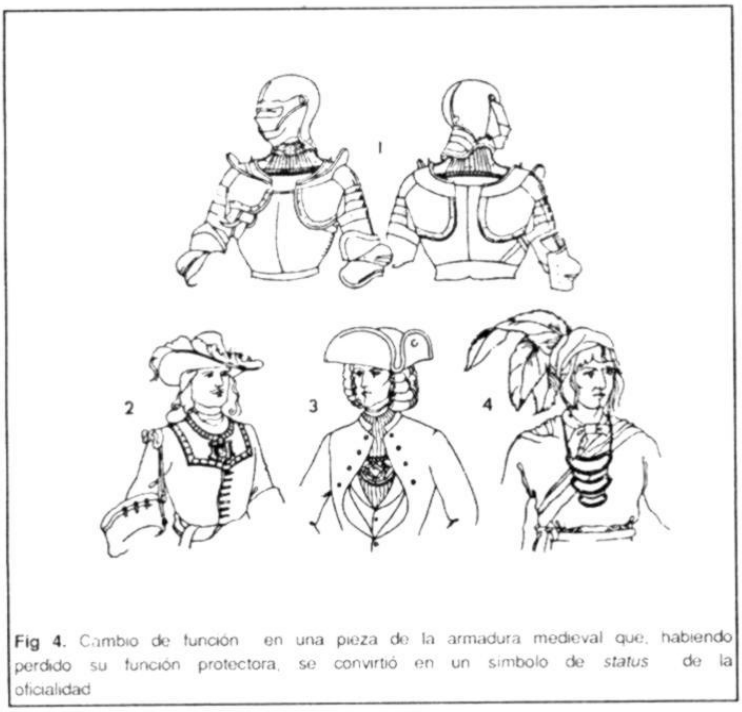


Fig 4. Cambio de función en una pieza de la armadura medieval que, habiendo perdido su función protectora, se convirtió en un símbolo de *status* de la oficialidad.

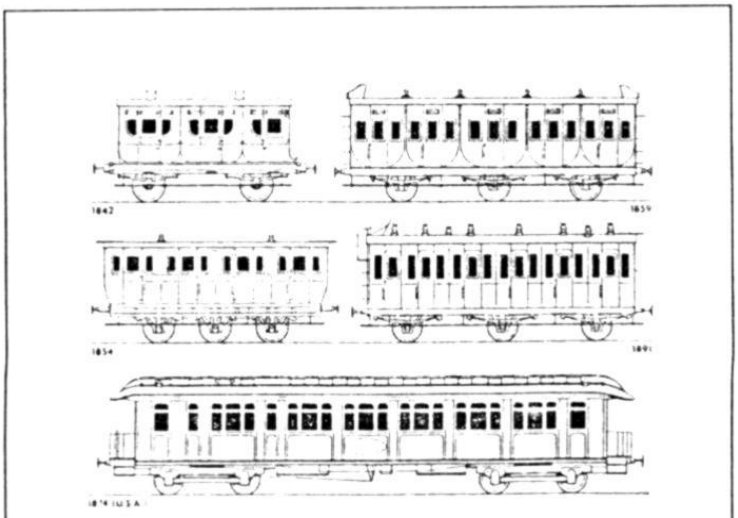


Fig 5. Homología en los productos de la técnica. En los vagones de tren persisten, en contra de los intereses del progreso técnico, caracteres del ancestro de aquellos, el carruaje tirado por caballos.

del comportamiento social humano no tiene valor alguno de supervivencia y nunca la tuvo. Luego, es importante saber si un cierto patrón reconocible de comportamiento tiene, o al menos alguna vez tuvo, un valor de supervivencia para la especie; en otras palabras que no es patológico. Nuestras probabilidades de encontrar dónde reside el valor de supervivencia del patrón de comportamiento aumentan enormemente si éste se manifiesta en un animal con el cual podemos experimentar.

Cuando hablamos de enamorarse, de amistad, de enemistad personal, de celos en estos o aquellos animales, no pecamos de antropomorfismo. Estos términos se refieren a conceptos determinados funcionalmente, como lo son los términos patas, alas, ojos y los nombres usados para otras estructuras corporales que han evolucionado independientemente - en diferentes *phyla* o animales. Nadie usa comillas cuando habla o escribe acerca de los ojos o las patas de un insecto o un cangrejo; tampoco lo hacemos cuando discutimos patrones análogos de comportamiento.

Sin embargo, cuando usamos estos términos, debemos tener muy claro si lo hacemos en un determinado momento para referirnos a un concepto basado en una analogía funcional o a un concepto fundamentado en una homología, por ejemplo, un origen filético común. La palabra "pata" o "ala" puede tener en un caso la connotación del primer tipo de concepto, y en otro la del segundo tipo. También está la tercera posibilidad de una palabra que connota el concepto de identidad casual fisiológica. Estas tres clases de conceptualización pueden o no coincidir. Cuando se está hablando de comportamiento es particularmente importante hacer una distinción clara entre ellas. Un patrón de comportamiento homólogo puede retener su forma y función

ancestrales en dos descendientes, y sin embargo llegar a ser fisiológicamente diferente. En muchos hidrozoos y en larvas (ephiras) en otras medusas el movimiento rítmico de la umbrela es causado por la generación endógena de estímulos. Sin embargo en las sifomedusas adultas el movimiento es causado por reflejos que se liberan a través del mecanismo de los así llamados cuerpos marginales. Un patrón motor homólogo puede retener su causa fisiológica original así como sus formas externas, y sin embargo sufrir un completo cambio de función. El patrón motor de "incitación" que es común a las hembras de muchos anátidos se debe a un movimiento de amenaza y tiene como función principal la de hacer que el macho ataque al adversario indicado por la amenaza de la hembra.

Este patrón motor ha perdido enteramente su función en algunas especies, por ejemplo en los patos de ojos dorados, donde se ha convertido en un puro movimiento de cortejo a la hembra. Dos patrones motores no homólogos de dos especies relacionadas pueden, por un cambio de función, ser puestos al servicio del mismo valor de supervivencia. El movimiento de prevuelo de los patos se debe a un movimiento intencional de volar, un golpe hacia arriba de la cabeza. Cuando hablamos de "movimiento de prevuelo de los anátidos" formamos un concepto funcional que los abarca a ambos. Estos ejemplos son suficientes para demostrar la importancia de mantener las conceptualizaciones funcionales, filogenéticas y fisiológicas claramente separadas. Los etólogos no son culpables de "materializaciones indebidas" o de previsiones ilegítimas de explicaciones fisiológicas cuando forman conceptos que están definidos sólo funcionalmente -como por ejemplo, el concepto de *mecanismo impulsor innato*. En realidad, son profundamente conscientes de que esta función puede ser desempeñada por el órgano sensorial mismo -como en el grillo- o por una organización complicada en la retina -como en la rana- o por los más elevados y complejos procesos en el interior del sistema nervioso central.

Deducción de mecanismos fisiológicos a partir de funciones análogas conocidas

En otro sentido bien diferente puede ser el reconocimiento de analogías una fuente importante de conocimiento. Podemos asumir con certeza que, por ejemplo, las funciones de respiración, ingestión de alimentos, excreción, propagación, etc., deben ser realizados de alguna manera por cualquier organismo viviente. Al examinar un sistema vivo desconocido, se justifica entonces que busquemos los órganos que sirven para funciones que nosotros sabemos indispensables. Nos sorprendemos si no encontramos algunas de ellas; por ejemplo, el tracto respiratorio en algunas pequeñas salamandras que respiran exclusivamente a través de su piel.

Una cultura humana es un sistema vivo. Aunque es uno de los niveles más altos de integración, su continuación depende de todas las funciones indispensables mencionadas anteriormente. Se impone la idea de que en nuestra cultura vigente una de estas funciones necesarias es insuficiente, la de excreción. La cultura humana, después de envolver y llenar todo el globo, se encuentra en peligro de ser muerta por su propia excreción, de morir de una enfermedad estrechamente análoga a la uremia. La humanidad se verá forzada a inventar una especie de riñón planetario - o de lo contrario morirá a causa de sus propios productos de desecho.

Hay otras funciones que son igualmente indispensables para la supervivencia de todos los sistemas vivos, desde las bacterias hasta las culturas. En cualesquiera de estos sistemas, la adaptación se ha logrado por el proceso ya mencionado, que depende de la ganancia de información por medio de cambios genéticos y selección natural, así como del almacenamiento de conocimientos en el código de la cadena de moléculas del genoma.

Este almacenamiento, como cualquier retención de información, de conocimiento, se logra por la formación de estructura. El conocimiento se guarda en estructuras, no sólo en la pequeña doble hélice (ADN), sino también en la programación del cerebro humano, en la escritura, o en cualquier otra forma de "banco de memoria".

La función indispensable de soporte y retención siempre ha de ser pagada con un "aumento de rigidez", en otras palabras, por un sacrificio de ciertos grados de libertad. La estructura de nuestro esqueleto nos suministra un ejemplo; un gusano puede doblar su cuerpo en cualquier punto, mientras que nosotros podemos flexionar nuestros miembros solamente donde tenemos articulaciones; pero nosotros podemos mantenernos de pie y el gusano no.

Toda la adaptabilidad de los sistemas vivos se basa en conocimiento que se deposita en estructuras; estructura significa adaptación estática, en oposición al proceso de adaptación dinámica. Por lo tanto, nueva adaptación presupone incondicionalmente el desmantelamiento de algunas estructuras. Ganar nueva información inexorablemente demanda el rompimiento de algún conocimiento previo que, hasta ese momento, había aparecido como final.

La dinámica de estas dos funciones antagónicas es universalmente común a todos los sistemas vivos. Un equilibrio armónico debe mantenerse siempre entre los factores que mantienen el grado necesario de invarianza y aquellos que tienden a romper estruc-

turas firmes y por lo tanto a crear el grado de variabilidad que es prerrequisito de cualquier ganancia posterior de información, en otras palabras, de toda adaptación nueva.

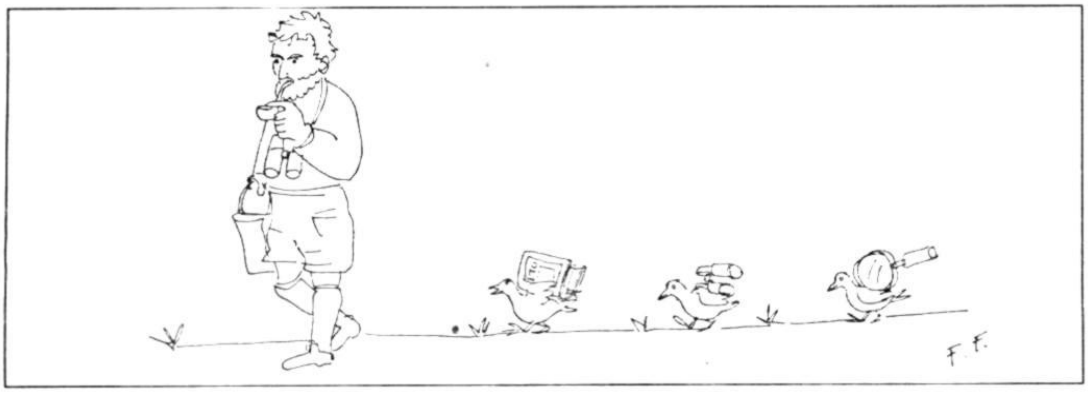
Todo esto es obviamente cierto para la cultura humana así como para cualquier otro sistema viviente cuya existencia trascienda la existencia del individuo, como por ejemplo cualquier especie de bacterias, plantas o animales. Es por lo tanto legítimo buscar esos mecanismos que, en su antagonismo armónico de preservar y desmantelar estructuras, logran la tarea de mantener una cultura adaptada a su entorno siempre cambiante. En mi último libro, La otra cara del espejo, he tratado de demostrar estos dos conjuntos de mecanismos antagónicos en la cultura humana.

La preservación de la invarianza necesaria se logra por procedimientos que curiosamente recuerdan la herencia genética. De una manera muy similar a como los nuevos nucleótidos se ordenan a lo largo de la vieja mitad de una doble hélice, para producir una copia de ella, las estructuras invariantes de la cultura se pasan de una generación a la siguiente, por un proceso en el cual las nuevas generaciones hacen una copia del conocimiento cultural que poseen las viejas. La imitación textual, el respeto por la figura paterna, la identificación con ella, la fuerza de la costumbre, el amor por las viejas costumbres ritualizadas, y, por último pero no menos importante, el conservadurismo de "pensamiento mágico" y la superstición -que como hemos visto llega a influir hasta en la construcción de los vagones de tren- contribuyen a investir las tradiciones culturales con el grado de invarianza necesario para hacerlas heredables.

Opuesto a estos mecanismos de preservación y de invarianza está el impulso específicamente humano hacia la curiosidad y la libertad de pensamiento que, para algunos de nosotros, persiste hasta cuando la senescencia le pone fin. De cualquier modo, la edad de la pubertad es la fase típica de nuestra ontogenia durante la cual tendemos a rebelarnos contra la tradición, a dudar de la sabiduría del conocimiento tradicional y a lanzarnos a la búsqueda de nuevas causas para abrazar, y de nuevos ideales.

En un trabajo que leí hace algunos años - en un simposio Nobel sobre "El lugar del valor en un mundo de realidades"- intenté analizar algunas fallas de los mecanismos antagónicos y los peligros de una enemistad entre las generaciones que surgen de estas anomalías. Traté de convencer a mi auditorio de que el problema de si el conservadurismo es "bueno" o "malo", o de si la rebelión de los jóvenes es "buena" o "mala", es una pregunta tan innane como la de si una función endocrina, por ejemplo de la glándula tiroides, es "buena" o "mala". Excesos, así como deficiencias, de cualesquiera de estas funciones causan la enfermedad. El exceso de la función de la tiroides causa la enfermedad de Basedow; la deficiencia, mixedema. Exceso de conservadurismo produce fósiles vivientes que no podrán vivir por mucho tiempo, y exceso de variabilidad resulta en la aparición de mostruos que no son de ninguna manera viables.

Entre los representantes conservadores del "establecimiento" por una parte y la juventud rebelde por otra, se ha erigido cierta enemistad que hace difícil para cada uno de los antagonistas reconocer el hecho de que los esfuerzos de ambos son igualmente indispensables para la supervivencia de nuestra cultura. En el caso de que la enemistad llegue hasta el odio, los antagonismos cesan de interactuar en la forma normal y empiezan a amenazarse uno al otro como culturas hostiles diferentes; de hecho, comienzan a dar rienda suelta a actividades cercanas a la guerra tribal. Representa esto un gran peligro para nuestra cultura, puesto que puede originar un desgarramiento total de sus tradiciones."



GERMAN BAUTISTA

Consideraciones acerca del experimento en física

Consideraciones lógicas e históricas muestran cómo el experimento en las ciencias físicas no tienen función simplemente comprobatoria de las teorías, ni cumple tan sólo con la tarea de proveer un banco de datos para que, poniendo en funcionamiento una 'máquina inductiva', aparezcan nuevas leyes.

Dos ideas comunes sobre el papel del experimento

Muchas son las ideas frecuentemente aceptadas acerca del papel desempeñado por la experimentación en el desarrollo de las ciencias naturales, pero me referiré a dos de las más comunes, limitándome al campo de la física por ser considerada a menudo como "prototipo de las ciencias".

La primera de estas ideas le asigna al experimento[1] una función *comprobatoria*: El experimento se lleva a cabo para comprobar una teoría de la Física. La segunda, considera el experimento como un buen instrumento para encontrar "nuevas leyes", nuevas regularidades en la naturaleza[2].

Estas dos ideas probablemente están relacionadas con un concepto muy generalizado acerca de la ciencia

Esta concepción puede describirse muy esquemáticamente así: una teoría científica es un conjunto H de axiomas[3] o hipótesis fundamentales que permite obtener un conjunto R de resultados empíricos al relacionar los axiomas de H con un conjunto de hechos ya observados (condiciones iniciales)[4].

Para hacer funcionar la teoría basta con tomar los axiomas de la teoría y las condiciones iniciales e introducirlos en el aparato que las relaciona para obtener las predicciones, predicciones que se pueden contrastar directamente en el laboratorio (Fig. 1).

Esta concepción de "ciencia formalizada" parece originar las anteriores ideas acerca del experimento. Cuando se hace funcio-

Germán Bautista Romero
Departamento de Física
Universidad Pedagógica Nacional
Bogotá

[1] Es conveniente clasificar los experimentos en cualitativos y cuantitativos para comodidad de análisis, aunque tal clasificación no se debe tomar en todas sus consecuencias. En este escrito, a menos que explícitamente especifique lo contrario, me referiré al experimento cuantitativo.

[2] T. S. Kuhn. La tensión esencial. FCE (1982). De esta selección, los artículos La función de la medición en la física moderna y, La tensión esencial: tradición e innovación en la investigación científica.

[3] C. Ulises Moulines. Exploraciones metacientíficas. Alianza Editorial (1982). Véase: Hacia un nuevo concepto de teoría empírica, p. 63.

[4] Usando la metáfora de Hempel: "Las teorías científicas son como máquinas ideales de hacer salchichas, por un lado entran los cerdos, por el otro salen las salchichas".

nar la máquina y se obtienen los resultados numéricos (predicciones) contrastables directamente en el laboratorio, el experimento sirve para comprobar la teoría; además, si de alguna manera ya se tienen datos numéricos obtenidos experimentalmente, se abre la posibilidad de hacer funcionar la máquina a la inversa para obtener la teoría, es decir, el experimento se convierte en fuente de nuevas leyes. Hacer funcionar la máquina en reversa es algo muy tentador: la teoría así obtenida debe ser válida con absoluta certeza, ya que se parte de datos numéricos experimentales, objetivos, puros, neutros, sin ningún sesgo teórico o ideológico. Tal vez sea este uno de los motivos que hacen tan extendida esta concepción.

Origen de estas creencias

El candidato inmediato para atribuirle el origen de estas creencias es el libro de texto. En efecto se aprende la ciencia en los libros de texto. Nosotros, los profesores, en el mejor de los casos, no hacemos sino repetir bien el texto a los estudiantes. Los libros de texto constituyen generalmente el primer contacto con la ciencia: contacto ahistórico con una ciencia ya terminada que no toma en cuenta la historia de ese conocimiento. De todas maneras es un primer contacto con las ciencias. Además, los libros de texto incluyen datos numéricos, ya sea en tablas o en gráficas o en cualquiera otra forma al final del capítulo o dentro del capítulo.

Sin embargo, no es obvio que los libros de texto induzcan la creencia de que el experimento es comprobatorio de la teoría. Si esto fuera cierto,los estudiantes de Física no aceptarían las teorías que los libros de texto les presentan sino después de que los mismos textos las comprobaran con sus tablas de datos, lo cual no es cierto: las teorías son aceptadas dentro por autoridad. Si acaso se miran los datos experimentales, esto se hace para complementar la teoría. El libro de texto no incluye los datos numéricos para "probar" la teoría; los estudiantes simplemente aceptan la teoría por autoridad del texto.

Tampoco es claro que el libro de texto induzca la creencia de que se puede hacer funcionar la máquina a la inversa. Nunca los libros de texto parten de la tabla de datos o de la gráfica para mostrar cómo funcionaría la máquina a la inversa para producir la teoría. El libro de texto siempre da la teoría y al final incluye algunos datos numéricos. La mayoría de los textos, si no todos, incluyen sólo datos que concuerdan con la teoría; pero ¿hasta qué punto concuerdan con la teoría? Es obvio que no se espera un grado absoluto de concordancia entre los datos y las predicciones de la teoría; siempre se esperan discrepancias. ¿Qué criterio se tiene para decidir si la discrepancia entre una predicción y un experimento es aceptable? No existe un criterio único y universal: el grado de tolerancia a las discrepancias es, en últimas, determinado por la comunidad de expertos en la respectiva área de la Física. Cuando se presenta la teoría se debe, pues, presentar también el grado de concordancia esperado. El libro de texto incluye precisamente los datos para "ilustrar" la teoría, es decir, para mostrar el tipo de concordancia esperada entre el experimento y la teoría.

Algunas consideraciones de tipo histórico

Para saber cuál es el papel de la experimentación en la Física se debe examinar cómo se desarrolló en realidad esta disciplina acudiendo a la historia.

Cada vez que se intenta hacer un estudio histórico surgen múltiples problemas, específicamente sobre lo válido o adecuado de las

fuentes históricas relacionadas. A pesar de esto, la fuente más inmediata y fácil de conseguir, para nuestro caso, la constituye las revistas especializadas en las cuales los científicos presentan sus resultados tal como van surgiendo: allí no se exponen las teorías acabadas y pulidas, como en los libros de texto, sino que cada hombre de ciencia va reportando sus resultados para ponerlos a consideración de la comunidad científica. Si nos atenemos a esta fuente de información, una muy pequeña fracción de las mediciones se ha dedicado a uno de los dos fines ya mencionados: descubrir nuevas regularidades cuantitativas o comprobar una teoría.

Ha habido algunas mediciones que han resultado en el descubrimiento de nuevas regularidades o que se han hecho con el propósito específico de comprobar alguna teoría; pero el porcentaje es minúsculo para que permita explicar la creencia de que el experimento se hace con uno de estos dos propósitos.

Para poder avanzar es indispensable reflexionar un poco sobre las implicaciones del surgimiento de una nueva teoría en cuanto a la relación entre los datos experimentales ya aceptados y las teorías vigentes.

El surgimiento de una nueva teoría conlleva la reorganización de un cúmulo de datos experimentales. Todos los datos experimentales existentes han sido pacientemente organizados para que concuerden con la teoría vigente; la nueva teoría implica una reorganización, es decir, implica desbaratar el orden, penosamente logrado, de los datos experimentales conocidos para ordenarlos de manera diferente. El progreso de la ciencia no es lineal: cada nuevo conocimiento no se yuxtapone simplemente a los anteriores para acercarnos progresiva e indefinidamente a un conocimiento más acertado de la realidad.

Permítaseme comparar el proceso del desarrollo de la ciencia con el proceso de armar rompecabezas. En un instante dado hemos hecho empatar las piezas en algún orden, nos quedan algunos huecos para llenar y esperamos encontrar nuevas fichas que se acomoden a estos vacíos; en esta búsqueda tropezamos con una nueva ficha que no solo no se ajusta exactamente a uno de esos vacíos, sino que nos resulta imposible acomodarla sin antes tener que desbaratar la organización que se había logrado.

En sus inicios el nuevo orden establecido por la nueva teoría es apenas potencial; la nueva teoría exige una reorganización de los datos experimentales, reorganización aún no realizada. La tarea más importante de los experimentadores en esta fase es realizar, materializar, este nuevo orden; mostrar como se aplica en la "realidad" la nueva teoría a los diferentes fenómenos físicos. El experimentador debe esforzarse por aplicar el nuevo esquema teórico a fenómenos: los ya conocidos, los nuevos y los que surjan como predicciones de la nueva teoría.

Solo en el proceso de esta reorganización (de esta realización del nuevo orden) se evidencia la importancia del experimento cuantitativo y a la vez surge la oportunidad de hacer nuevas formulaciones. Aunque el proceso se dirige a cristalizar el nuevo orden potencial, conlleva el germen de nuevas teorías y es en este aspecto donde la medición juega un papel preponderante.

Para ilustrar las anteriores afirmaciones tomaré dos ejemplos de la historia de la Física: el primero de la teoría de la relatividad, y el segundo de la mecánica de Newton.

La teoría de la relatividad, como es bien sabido, nos hace ver al mundo físico de una forma bien

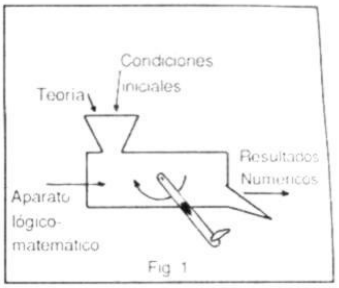


Fig. 1

diferente; tan diferente que a la mayoría nos es imposible realmente "verlo": imaginarse el espacio-tiempo no euclidiano, el campo gravitacional, etc. Sin embargo, la teoría de la relatividad resulta ser muy pobre en predicciones: si la producción de predicciones se tomara como criterio único de comprobación de una teoría, la teoría de la relatividad general sería difícilmente aceptable. No hay sino tres predicciones directas reconocidas de la teoría de la relatividad generalizada: la curvatura de la trayectoria de la luz a su paso por el campo gravitacional del sol, la explicación de las anomalías en el período de mercurio y los buenos acuerdos cuantitativos cuando se trata el corrimiento hacia el rojo del espectro de las estrellas lejanas. Esas son las tres grandes predicciones cuantitativas de la teoría de la relatividad general y no más, no se produce más números. Es una teoría tan complicada, suministra ecuaciones tan complejas que no se puede aplicar fácilmente para producir resultados numéricos. La teoría de la relatividad se puede aplicar sólo en situaciones muy simples.

Tomo ahora un ejemplo de la mecánica newtoniana por ser una teoría bien conocida y porque no se podría aducir que es un caso especial, peculiar, como lo es la teoría de la relatividad. La mecánica newtoniana es más típica en su desarrollo y además ofrece ejemplos de varios tipos de "comprobación" experimental que podríamos clasificar, por conveniencia, en pruebas experimentales directas y pruebas experimentales indirectas.

Pruebas experimentales directas son aquellos experimentos que permiten contrastar directamente una de las leyes: se dispone de una situación experimental lo suficientemente clara desde el esquema teórico para que la interpretación de los datos experimentales sea inequívoca en cuanto a la validez o no de la respectiva ley. Por ejemplo, la ley de la inercia puede probar experimentalmente, individual e inequívocamente, cada uno de las tres leyes de Newton.



Históricamente todas las "pruebas" experimentales de las leyes de Newton se dieron *a posteriori*. Sólo después de la publicación de los *Principia* de Newton empiezan a surgir las "pruebas experimentales" directas. La ley de acción y reacción es la única que puede ser contrastada directamente en su época, analizando el choque entre dos péndulos.

La primera "comprobación" directa de la segunda ley (fuerza igual a masa por aceleración) tuvo que esperar hasta que Atwood inventara su máquina un siglo después de la publicación de los *Principia*. La otra gran ley descubierta por Newton, la de la gravitación universal, resultó mucho más difícil de ser contrastada más directamente. Hubo de esperarse hasta que Cavendish inventara su balanza en 1798.

En cuanto a la primera ley de Newton -la de la inercia- que a veces se considera como la de más fácil comprobación, puede decirse que sólo en nuestra época se abrió la posibilidad de llegar a una región del espacio vacío y sin rozamiento alguno con los viajes espaciales, para comprobarla directamente.

Los ejemplos que he citado muestran que la idea de que los experimentos han servido para "comprobar" la teoría no tiene bases históricas.

La contrastación directa es tan difícil de lograr por lo difícil que resulta producir fenómenos que sean lo suficientemente simples[5] para interpretarlos directamente a la luz de la teoría. Los fenómenos que generalmente se pueden producir en el laboratorio son muy complejos, pero pueden ser usados para contrastar indirectamente la teoría. Los fenómenos reales son tan complejos y

complicados que para poder analizarlos se necesita hacer uso de todos los elementos de la teoría para poder producir datos numéricos que puedan ser contrastados directamente con el fenómeno producido en el laboratorio (con el experimento).

La situación es casi siempre tan compleja que si no se hacen aproximaciones resulta imposible analizarla. Surge, entonces, el gran inconveniente de las aproximaciones esenciales. Esenciales porque no las podemos evitar.

Hay dos tipos de aproximaciones esenciales: las teóricas, (necesarias en el análisis teorico del experimento), y, las experimentales (surgen en la concreción misma del experimento). Un ejemplo: el péndulo. En el péndulo IDEAL se puede hablar con certeza absoluta de su longitud (la cuerda es idealmente inelástica, la masa está concentrada en un punto), la fricción con el aire es cero,... etc.; pero es inevitable que un péndulo real se mueva adentro del aire y haya roce, su masa no puede hacerse puntual, etc.. Ahora bien, la teoría puede ser aplicada de una manera nítida y transparente sólo al péndulo IDEAL. Se necesita pues, hacer la aproximación inevitable del péndulo real al péndulo ideal.

Es interesante considerar los fenomenos de nuestro sistema planetario como campo de aplicación de la teoría de Newton, por su valor histórico. Si se intenta aplicar (materializar) la teoría de Newton a nuestro sistema planetario se tiene que resolver el problema de más de dos cuerpos. Newton se enfrentaba con la tarea de resolver el problema de ocho cuerpos: el sol, la luna, y los siete planetas conocidos en su época. Es bien sabido que aun hoy en día no se ha podido hallar la solución general de las ecuaciones de Newton para el caso de tres o más cuerpos; mucho menos en la época de Newton.

Era, pues, imposible materializar las leyes de Newton en este sistema planetario y así comprobarlas al contrastar las mediciones astronómicas existentes en la época con las predicciones de la teoría. Newton procede a hacer aproximaciones en el manejo de la teoría: explica, por ejemplo, el movimiento de la luna alrededor de la tierra ignorando la existencia del sol y de los demás planetas. ¡Si no se hacen aproximaciones no se puede hacer nada! Con estas aproximaciones se producen ciertas predicciones de las cuales desde el comienzo se espera que no coincidan con los datos experimentales. Esta aproximación de Newton era tan burda que inclusive en la época se sabía que había discrepancias con las medidas experimentales disponibles.

El procedimiento que se sigue en este proceso de aproximaciones esenciales es de especial importancia: estimar la magnitud de las discrepancias esperadas debido a los factores que a propósito se excluyeron para determinar hasta qué punto las discrepancias entre la teoría y el laboratorio pueden ser adjudicadas a las aproximaciones.

En otras palabras: si me encuentro con un conjunto de datos obtenidos a partir de la teoría que no concuerdan con mis datos experimentales, no puedo concluir inmediatamante que mi teoría es incorrecta o correcta, de antemano espero las discrepancias ya que se han hecho aproximaciones teóricas. Para concluir algo tengo que estimar cuál sería el efecto sobre mis datos teóricos de esas aproximaciones: efectos que ahora llamo perturbaciones.

Newton inaugura este tipo de procedimiento. Para explicar el movimiento de la luna toma el sistema luna-tierra como aislado del resto del universo. Aplica su teoría para predecir el movimiento de la luna y luego considera el efecto del sol sobre el movimien-

[5] Aquí "simple" se usa como opuesto a complejo, no como fácil o trivial

to de la luna como una perturbación. Este procedimiento, conocido hoy en día como el método de perturbaciones, es de frecuente uso entre los físicos contemporáneos.

El trabajo principal del físico consiste, pues, en establecer qué fenómenos pueden ser explicados por la teoría, luego determinar hasta qué punto (con qué grado de precisión) se puede aplicar la teoría a un fenómeno dado. Este es el trabajo de limpieza, de realización de la teoría que se debe hacer y que ocupa la inmensa mayoría de las actividades de los físicos.

En este trabajo de realización del nuevo orden -de materialización de la nueva teoría- se hace posible el surgimiento y el reconocimiento de las "anomalías": ciertos fenómenos que se resisten a ser explicados por la teoría aunque se revisen o se diseñen nuevos aparatos de laboratorio y se hagan pequeñas revisiones o nuevas interpretaciones de la teoría. Surgen, de todos modos, algunos datos cuantitativos que no encajan con la teoría y que en principio aparecen como simples anomalías, como simples curiosidades. Entre estas curiosidades vale la pena mencionar las anomalías del movimiento de mercurio, por su importancia en el desarrollo de la física. Este fenómeno conocido desde los tiempos de Newton, sólo recibió una explicación aceptable en el presente siglo con la teoría general de la relatividad.

El trabajo de materializar el nuevo orden requiere del esfuerzo de los mejores científicos. Las mentes más importantes del siglo XVIII (Newton, Lagrange, Euler...) se dedicaron a realizar el orden impuesto por la mecánica newtoniana. Un trabajo que absorbe los mejores talentos técnicos y matemáticos para poder producir a partir de la teoría datos numéricos contrastables con el experimento.

Es pues extremadamente difícil obtener predicciones cuantitativas contrastables con el experimento a partir de la teoría y en contra de la creencia popular: se piensa que una vez en posesión de la teoría, es relativamente fácil (o al menos seguro) hacer funcionar la máquina para obtener las predicciones. ¡No! Es muy difícil hacer funcionar esa máquina, y no existen procedimientos que garanticen su funcionamiento correcto.

La teoría física no consiste, pues, simplemente de las leyes, de las condiciones iniciales y de la " máquina" lógico-matemática; es, además, el conjunto de sus aplicaciones y los criterios que permitan discernir si la concordancia entre el experimento y la teoría es aceptable. Toda esta forma también parte de la teoría, no es el producto de la teoría. Cuando se incluyen datos numéricos en los libros de texto se está complementando la presentación de la teoría: se está indicando al estudiante cuál es el grado de concordancia que se espera entre la teoría y el experimento y se está dando un ejemplo de algunas aplicaciones que hacen parte integrante de la teoría. El texto recurre a esta forma de presentación porque es muy difícil definir, más aun, es imposible definir de una vez por todas cuándo un dato experimental está en concordancia razonable con la teoría. La concordancia razonable es definida por la comunidad científica y depende del área específica de trabajo, de la rama específica de la Física, de su grado de desarrollo y de la época.

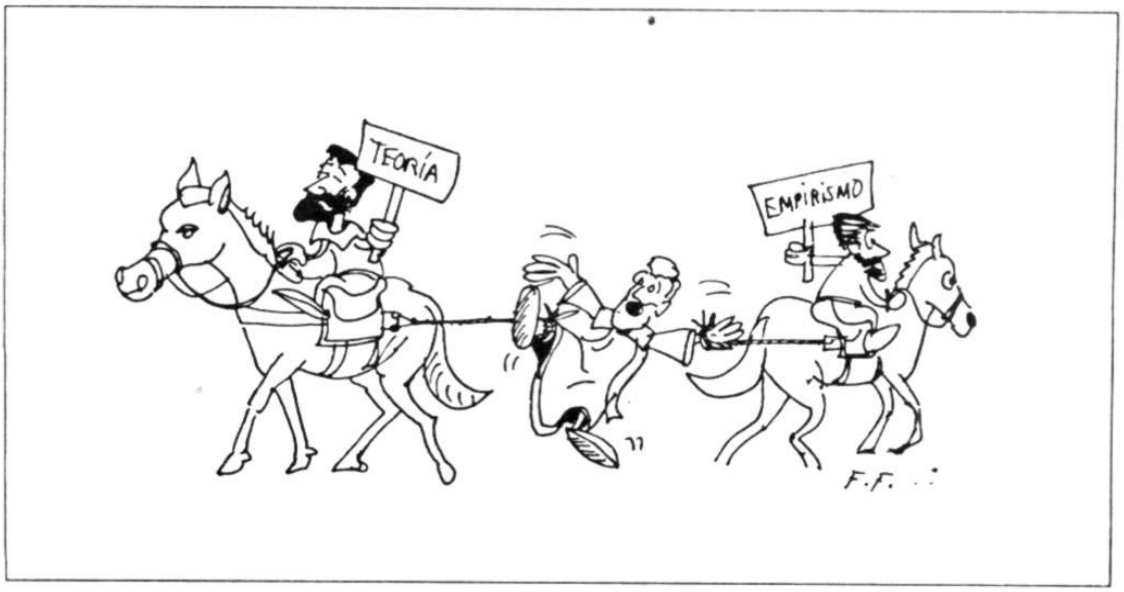
La medición

Que los resultados numéricos producidos en el laboratorio son el arquetipo de los hechos, (los resultados numéricos experimentales se suelen considerar como reconocien "verdad absoluta", sin sesgos ideológicos o filosóficos) es un estereotipo muy común. Es interesante, pues, mirar con más detenimiento lo que implica la obtención experimental de datos cuantitativos.

Es muy difícil, como ya se ha dicho, hacer un experimento que permita comparaciones cuantitativas con la teoría: se requiere de técnicas muy complicadas tanto experimentales (de tipo ingenieril) como conceptuales para poder obtener resultados numéricos. Por ejemplo: para "comprobar" la ley de la gravedad, Cavendish hubo de inventar primero la balanza de torsión, lo cual sucedió mucho después de haberse formulado y aceptado la ley de la gravedad. Cuando se tiene que hacer tanto esfuerzo para producir algo es probable que lo producido no resulte ser tan " neutro".

Cuando se hace uso de la balanza de torsión, o de dispositivos en cualquier otro experimento, no se está dejando que la naturaleza actúe libremente: se la está restringiendo, se la está obligando a producir resultados numéricos controladamente. El científico se ve obligado a luchar con la naturaleza para hacerla producir resultados numéricos. Resulta, pues, difícil pensar que esos resultados numéricos sean neutros.

El caso de Dalton y la ley de las proporciones múltiples es un ejemplo que ilustra lo antes dicho. Dalton estaba familiarizado con la literatura de su época sobre el tema; sin embargo, no aceptó un resultado experimental muy conocido en aquel entonces: Proust había concluido experimentalmente que los compuestos del óxido de cobre estaban en una relación de 1.47 (no de 1a 2 ó a 3...). Este resultado numérico, que como se comprobó más tarde resultó ser incorrecto, se debió a la carencia de técnicas suficientemente refinadas de análisis cuantitativo; se haría necesario, para



mejorar el resultado, esas técnicas. Para desarrollarlas un siglo después, los científicos se apoyaron en la ley de Dalton. Una vez que se poseyó una técnica construida de acuerdo con una teoría se la uso para probar "experimentalmente" dicha teoría.

La ruta que va de la teoría a la medición es tan compleja que casi nunca se puede recorrer a la inversa. Es casi imposible partir de los datos numéricos y recorrer la ruta hacia atrás de la teoría puesto que:

1. Casi siempre existen muy pocos puntos de contacto entre la teoría y lo cuantitativo de la naturaleza: es muy difícil crear condiciones, producir fenómenos experimentales, lo suficientemente simples para obtener resultados numéricos que puedan ser interpretados inequívocamente a la luz de la teoría.

2. La naturaleza de estos puntos de contacto es tal que a menudo exige un gran refinamiento de la instrumentación, de la técnica, de la ingeniería y de las aproximaciones y manipulaciones de la teoría.

La forma en que se reproducen las imágenes en una hoja impresa puede ilustrar lo anterior. La imagen se forma punto a punto, se necesita una inmensa cantidad de ellos para formar una imagen reconocible. Si se tienen muy pocos es imposible imaginar el objeto que se pretende representar. ¿Como se puede, entonces, recontruir la teoría a partir de tan pocos puntos de contacto experimental (a partir de tan pocos datos experimentales)?

Además, la producción de cada uno de estos puntos necesita un gran refinamiento tanto de la instrumentación como del manejo de, precisamente, la teoría que se pretende hallar.

"Los números colectados sin algún conocimiento de la regularidad que se espera casi nunca hablan por sí mismos. Ciertamente, siguen siendo solo números" [6]. Expresión de Kuhn que bien vale la pena recordar aquí. A pesar de lo ya dicho, existen algunas regularidades descubiertas a partir de los datos experimentales, pero son muy pocas y generalmente ocurren cuando el investigador conoce casi toda la información. Cito algunos ejemplos.

La ley de Coulomb: la magnitud de la fuerza F entre dos cargas eléctricas es,

$$F = K\, q_1\, q_2 / r\ (12)^2$$

y la fuerza está a lo largo de la línea que une las cargas q_1 y q_2. Antes de Coulomb ya se habían hecho muchos esfuerzos para hallar experimentalmente la ley de la fuerza entre cargas. La mayoría de los intentos consistía en medir la fuerza entre dos cargas usando una balanza, pero este procedimiento introducía muchos factores irrelevantes que oscurecían los resultados. El procedimiento era inadecuado porque se partía de una concepción (de campos) que inducía a no tomar en cuenta los elementos esenciales de la ley de Coulomb: elementos de carga y distancia entre ellos. Para señalar a los elementos de carga y a la distancia entre ellos como los factores importantes se necesita adoptar la concepción newtoniana-espacio, tiempo y partículas; dentro de esta concepción resulta natural pensar que la fuerza entre cargas puntuales deba ser a lo lar-

[6] T. S. Kuhn. Op. Cit. p. 221

go de la línea que las une y su magnitud deba decrecer como $1/r^2$.

Natural en el siguiente sentido: la isotropía del espacio implica que la partícula no puede diferenciar una dirección de otra, de donde se espera que la dirección de la fuerza sea radial; por la misma isotropía, la dependencia funcional de la norma de esa fuerza debe ser de la forma $f(r)$. Newton demostró, para el caso gravitacional, claro está, que sólo si $f(r)=k/r^2$, la influencia de una esfera es equivalente a la de una partícula de masa igual a la de la esfera, situada en su centro. Finalmente, si se asimila la carga puntual a una fuente de luz, pensando en que "algo que sale de la carga" se distribuye uniformemente por todo el espacio, de la misma manera como la energía que emite la fuente luminosa se distribuye por todo el espacio, la forma de $f(r)$ debe ser necesariamente k/r^2. Todas estas consideraciones motivaron la actitud general hacia el resultado obtenido por Coulomb: cuando publicó su "ley" no fue recibida como algo inesperado; todo mundo la estaba esperando. El único efecto que produce es convencer a algunos escépticos.

Esto ilustra el tipo de recompensa que recibe el experimentador: si hace sus experimentos bien, sus resultados deben concordar con la teoría; si el experimento no resulta, la comunidad científica tiende a calificar al experimentador como ineficiente, como incapaz de hacer las cosas bien. Sólo cuando el experimentador puede producir una divergencia que persista aún después de ser analizada por toda la comunidad científica se puede considerar afortunado. El panorama aquí cambia completamente porque estos tipos de "anomalías" eventualmente conducen a revaluaciones de las teorías.

Lo dicho aquí no implica que la naturaleza responda afirmativamente a cualquier teoría si nos esforzamos lo suficiente para obligarla a ello. La naturaleza no dará respuestas fácilmente, tenemos que esforzarnos, que obligarla; sin embargo, no responderá afirmativamente a cualquier teoría.

El experimento en épocas de no crisis

Después del surgimiento de una nueva teoría viene un periodo de relativa calma en el cual los físicos se dedican a materializar el nuevo orden; en esta época las discrepancias tienden a ser ignoradas o se les da un carácter crucial pues siempre existe la posibilidad de que sean superadas con un desarrollo mayor de la teoría. Kuhn llama a estos periodos, periodos de desarrollo normal de la ciencia.

La labor del experimentador en los períodos de desarrollo normal de la ciencia se puede resumir en los siguientes puntos:

1. Mejorar la concordancia esperada (concordancia razonable) entre la teoría y el experimento: mejorar la técnica de medición, diseñar nuevos aparatos de medida, medir con mayor precisión las constantes típicas de la teoría, etc.

2. Abrir nuevos campos de aplicación de la teoría y establecer nuevos criterios de concordancia razonable. El proceso de materializar la teoría conlleva la apertura de nuevos campos de aplicación de la misma. Cuando se abre un nuevo campo de aplicación se hace necesario dar los criterios de "concordancia razonable"

3. Como resultado de su actividad el experimentador puede encontrar que no se puedan hacer concordar con la teoría (que no pueden ser explicados por la teoría); se abre la posibilidad de mostrar que algo anda mal en la

teoría.

Si un experimentador halla este tipo de fenómenos puede considerarse muy afortunado, pues esto implicaría, a la postre, el surgimiento de otra nueva teoría. Sin embargo, se hace indispensable hacer énfasis en que para el experimentador pueda decir que ha hallado una anomalía tiene que agotar todos los caminos posibles para explicarla con el uso de la teoría vigente: revisar sus técnicas de medición, sus instrumentos, su interpretación y aplicación de la teoría para el caso particular, la presencia de factores inadvertidos, etc., y, aún cuando le sea imposible eliminar la anomalía no desecha inmediatamente la teoría: el científico sin la teoría queda totalmente inutilizado. El científico no desecha su teoría al primer tropiezo, es como el zapatero que tiene un martillo inadecuado para su trabajo pero sigue usándolo hasta poder conseguir uno mejor, pues sin el martillo el zapatero no puede hacer nada.

El papel del experimento cuantitativo

El papel más importante de la medición es el de ser árbitro entre las teorías que estén compitiendo. Cuando dos teorías pretenden dar cuenta de los mismos fenómenos, sus predicciones son muy similares cualitativamente; de tal manera que, experimentos cualitativos no permiten discernir claramente cuál es la que mejor describe los fenómenos. Además, la medición permite la producción de discrepancias muy finas pero que en muchas ocasiones han sido muy importantes.

La aparición de discrepancias entre los experimentos y la teoría no es algo nuevo o extraordinario, es la ocurrencia diaria en el trabajo del experimentador. El experimentador ha aprendido a manejar las discrepancias; esquemáticamente, las posibles maneras como las asume son:

1. Refinar el experimento o crear nuevas técnicas experimentales buscando eliminar la discrepancia. Esto conlleva la elaboración de nuevas técnicas, invención de aparatos y métodos experimentales, mejoramiento de diseños, etc. Este es, en general, el primer paso que se da cuando surge una discrepancia.

2. Refinamiento y escrutinio de las aproximaciones teóricas que se estén usando: como ya se mencionó, para que se pueda aplicar la teoría a un fenómeno concreto se necesita de muchas manipulaciones, aproximaciones e interpretaciones de la teoría. Este proceso puede introducir errores en las " predicciones" teóricas. Después de agotar los pasos del anterior parágrafo, el experimentador no rechaza la teoría (no la declara falsa) sino que muestra la necesidad de un manejo más adecuado de ella, tanto en su aspecto matemático como en el de su interpretación.

3. Considerar la discrepancia como simple curiosidad: esta actitud no es nueva, siempre ha estado presente en la comunidad científica. Ejemplos son: el movimiento anómalo de mercurio, los anillos de Newton, etc. Son muchos los fenómenos anómalos que en un momento dado son tomados como simples "curiosidades". La valoración de estos fenómenos obedece al grado de desarrollo de la teoría aceptada que orienta, en gran manera, la atención de la comunidad hacia ciertos problemas y la desvía de otros que posteriormente pueden resultar "cruciales".

4. El descubrimiento de "nuevos fenómenos": este método de "eliminar" las discrepancias experimentales cuando los anteriores métodos han fallado es muy común, además ha sido muy útil. El método consiste esencialmente en atribuir la discrepancia a agentes hasta ahora desconocidos (nuevas partículas, nuevas propiedades...)



Veamos un ejemplo para ilustrar el punto:

El espectro de emisión del helio había sido explicado por la mecánica cuántica; pero al examinarse dicho espectro con instrumentos más refinados se descubrió que las líneas de emisión se desdoblan, (aparecen dos líneas juntas en donde antes solo se observaba una). ¿Cómo explicar las nueva líneas? Se reviste al electrón con una nueva propiedad: se le asigna un spin.[7]

La revisión radical de la teoría: este es el último de los recursos a que apela el físico para obviar las discrepancias, y sólo cuando ellas sean de tal naturaleza que aparezcan en muchos contextos y resulte difícil ignorarlas. Cuando la discrepancia se torna intolerable, se genera una gran actividad en la comunidad científica para evitar una revisión radical de la teoría. No se trata de obtener una nueva teoría a partir de los datos experimentales. Sólo cuando el dato experimental resulta "intolerable" se procede a una revisión de la teoría pues la teoría es el instrumento principal de trabajo del científico, quien no puede prescindir de este instrumento a menos que posea uno nuevo que lo remplace.

La medición juega su papel más importante al evidenciar de manera inocultable las discrepancias que resulten entre la teoría y el experimento; discrepancias que eventualmente conducirán a la revisión de la teoría. La medición en este proceso de evidenciar las discrepancias provee pistas para la producción de nuevos fenómenos cualitativos. La medición juega, pues, un papel importante en el descubrimiento científico.

Otro papel importante de la medición es el de ser "árbitro" entre dos teorías. Citaré el caso de la teoría del calor para ilustrar este punto.[8]

Para explicar los fenómenos asociados con el calor coexistieron por algún tiempo dos teorías. Ambas teorías producían las mismas predicciones cualitativas. Más aún, sus predicciones cuantitativas diferían muy poco. Sin embargo, la diferencia entre estas teorías es palpable. Se trata de la teoría del "flogisto" y la "teoría dinámica del calor". Recordemos que en la teoría del flogisto el calor era considerado como una sustancia presente en todos los cuerpos, de acuerdo a la capacidad específica de cada cuerpo para almacenarla. Dicha sustancia recibió el nombre de flogisto. Cuando dos cuerpos se ponen en contacto se permite el flujo del flogisto entre los cuerpos: el flogisto fluye del cuerpo más caliente al más frío. Por otro lado, la teoría dinámica del calor -la aceptada hoy en día- asume que el calor es un tipo de energía (la energía asociada con el movimiento de desorden de los elementos microscópicos de un sistema macroscópico). La diferencia de temperatura entre dos cuerpos indica que la energía cinética promedio por grado de libertad de los sistemas es diferente.

El cuerpo más caliente tiene una energía cinética promedio por grado de libertad superior a la del frío. Cuando los dos cuerpos entran en contacto térmico, el cuerpo más caliente cede energía al más frío.

Como ya dije, ambas teorías producen las mismas predicciones cualitativas y casi que las mismas predicciones cuantitativas. Sin embargo, las pequeñas diferencias numéricas entre las predicciones producidas por las dos teorías son lo suficientemente grandes para poder ser contrastadas con una experimentación cuantitativa cuidadosa. Los resultados numéricos de todo experimento cuantitativo no son exactos: siempre se obtiene una dispersión en esos datos numéricos -como ya se hizo notar-; pero el valor de la medición estriba en que en muchas ocasiones es capaz de producir dispersiones lo suficientemente pequeñas como para poder discernir entre las predicciones numéricas, casi iguales, producidas por varias teorías aplicadas al mismo fenómeno.

En resumen: la aceptación de una teoría se da en el contexto de varias que le compiten. El experimento resulta ser un árbitro más, su papel siempre entraña comparar dos o más teorías y cada una de ellas con la naturaleza. Nunca implica simplemente comparar una teoría con la naturaleza, al menos esto no se ha dado en la historia de la Física. En esta comparación múltiple el experimento cuantitativo muestra su importancia, pues permite definir y hallar anomalías que de otra manera hubieran pasado desapercibidas, poniéndolas de cuerpo entero sin permitir que se camuflen.

Finalmente, el experimento cuantitativo puede tornarse en un ejercicio tedioso y estéril. El ejercicio de acumular datos numéricos cada vez más precisos, aunque necesario, muy pocas veces conduce a grandes avances en la ciencia. Es necesario poseer un nivel de comprensión "cualitativa" de los fenómenos involucrados para que los experimentos cuantitativos que se propongan resulten fructíferos.*

[7] El descubrimiento del neutrino en el de-caimiento ß es otro ejemplo (ver David C. Cheng, Gerard K. O'Neill. Elementary Particle Physics. Addison-Wesley Publishing. 1979. p. 135-136)

[8] Otro ejemplo interesante la teoría óptica de Newton

DINO SEGURA

El experimento en la clase de ciencias

Las formas de razonamiento, los criterios de validez y los métodos de trabajo de las ciencias naturales no pueden aprenderse en una conferencia o en un libro. Si hay algo fundamental en el trabajo práctico es que allí se da la oportunidad para que uniendo nuestra acción con nuestra reflexión contrastemos "honestamente" nuestras predicciones y demos a la razón motivos para ser creadora e imaginativa, pero también para ser cuidadosa y alerta por los controles que imponen los nexos que siempre deben existir entre la teoría y los resultados experimentales.

INTRODUCCION

Parece superfluo preguntarnos si los "experimentos" son importantes en las clases introductorias de ciencias naturales, a nivel secundario o universitario. La respuesta será siempre afirmativa, así se plantee la pregunta a profesores de diferentes niveles y aún a profesores que defienden enfoques metodológicos diferentes. Sin embargo, la opinión es mucho menos homogénea cuando se va un poco más allá y se inquiere sobre "el papel que juega el experimento" en el proceso de enseñanza aprendizaje. Aquí ya no hay consenso; no lo hay siquiera sobre lo que se entiende por "experimento", y las concepciones sobre su función en la enseñanza cubren una amplia gama de alternativas (no siempre coherentes y hasta algunas veces antagónicas) que van desde la simple motivación que a través del trabajo práctico logra el estudiante, hasta el papel del laboratorio en procesos de "redescubrir", "comprobar", "verificar", "cuestionar", "aplicar",etc. Al final, el laboratorio sigue siendo muy importante, el papel de la experiencia sigue siendo fundamental, pero no hay unidad en la razón de ello. Y sin poderlo testimoniar por un estudio estadístico, se puede afirmar que no existe diferencia significativa en los conocimientos, por ejemplo en física, que muestran los recién entrados a la universidad, entre quienes han tenido y quienes no han tenido sesiones de

Dino Segura
Universidad Distntal
Escuela Pedagógica Experimental
Bogotá

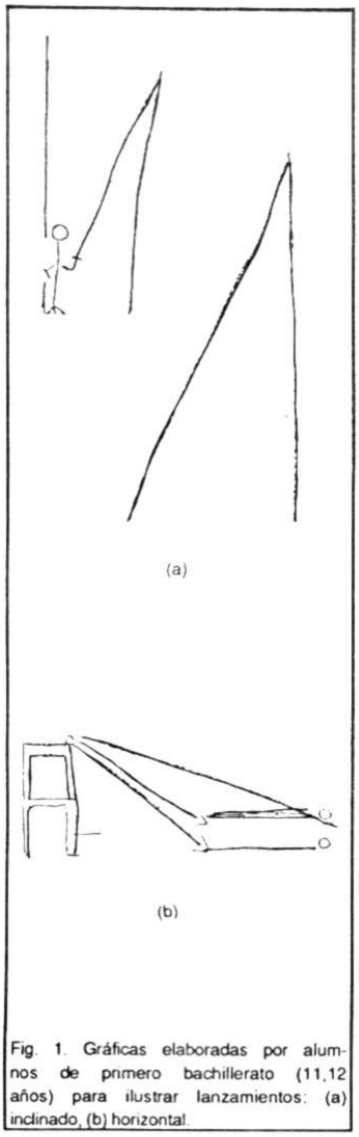


Fig. 1. Gráficas elaboradas por alumnos de primero bachillerato (11,12 años) para ilustrar lanzamientos: (a) inclinado, (b) horizontal.

laboratorio en la escuela media.

La reflexión anterior podría plantearnos la cuestión que nos ocupa en otros términos: ¿por qué las experiencias (o "experimentos") que se realizan en clase no producen resultados significativos? Y para aproximarnos a una respuesta debemos entonces examinar la cuestión desde dos ángulos. Primero: ¿cómo son esos experimentos? ¿cómo están planteados? ¿cómo se realizan? Y segundo: ¿qué pretenden? ¿para qué se ejecutan? ¿quién los ejecuta? Estos dos puntos están íntimamente relacionados y para aproximarnos a ellos es conveniente examinar dos elementos comunes: el problema de interpretación, ligado con el proceso de percepción por una parte, y por otra, la filosofía subyacente al trabajo experimental en la escuela.

Una reflexión sobre lo que es "ver"

En una ocasión tuve la oportunidad de hacer de maestro ante niños de primer año de bachillerato y simultáneamente ante maestros de primaria en un curso de licenciatura en Educación Primaria (quinto semestre). De las múltiples situaciones interesantes que surgieron en las dos clases, me referiré a una que me parece apunta a lo que estamos planteando. En los dos casos sugerí a los alumnos el siguiente ejercicio:

Quiero que ustedes dibujen en un papel la trayectoria, esto es, el camino que sigue en el aire de:

a. esta piedra (y la lancé hacia arriba con una inclinación de unos 75° con la horizontal), y

b. esta canica (que lancé sobre la mesa y que al final de ella cayó).

Los dibujos que me entregaron los niños y los adultos (25...40 años) se reproducen en la Fig. 1. De ellos prácticamente no se hizo ninguna selección (una cosa sí puedo asegurar, tanto los unos como los otros VEN bien).

Cuando se propone la misma pregunta a alumnos que ya han estudiado los fundamentos de la cinemática, las representaciones son evidentemente distintas y muestran parábolas o partes de parábolas. El resultado de la experiencia sorprendió y me recordó un texto de A. Koyré[1], en el cual se ilustran las representaciones que de movimientos similares se hacían Tartaglia y sus contemporáneos. En aquella época, claro está, tanto como en la actual, la discusión se centraba en armonizar la teoría con la observación. Y la teoría consideraba la existencia de movimientos violentos y movimientos naturales, que según unos, eran incompatibles y según otros, simultáneos. En fin, los tipos de trayectoria que se dibujaban eran como los ilustrados en la Fig. 2.

Si bien inquieta que las trayectorias dibujadas como representación del mismo movimiento difieran radicalmente, el asunto importante es que tanto los alumnos de bachillerato como los maestros de primaria y los contemporáneos de Tartaglia, VEN las trayectorias de una manera diferente a como las VEN quienes han estudiado física. Este punto sobre el cual han enfatizado muchas personas, creo que es central en el análisis que se hace de la importancia y de las características de la experimentación en clase[2]. El asunto clave es que la percepción, lo que vemos, depende de lo que sabemos. Dos personas distintas, poseedoras de conocimientos (teorías) diferentes ven, ante el mismo fenómeno, ante la misma cosa, cosas diferentes (a pesar de que ante sí tienen lo mismo).

Algunos aspectos de la actividad científica

El segundo elemento que

tomamos como punto de partida en la exposición es la concepción que se tiene de lo que es y ha sido la actividad científica. Los textos y comunicaciones científicas están organizados de una manera tal, que los lectores no iniciados se forman la idea de que el desarrollo de la ciencia ha sido siempre lineal y que en este sentido, consiste de una secuencia de "hipótesis brillantes" y "confirmaciones experimentales" matizadas de vez en cuando, con "resultados experimentales inesperados" y las consiguientes "síntesis geniales". Esta idea que se tiene comúnmente de la actividad científica, reforzada por la supuesta receta que utilizan en sus investigaciones los científicos y denominada en nuestro medio "método científico", ha conducido a concebir la construcción teórica como lo inverso a la predicción desde la teoría. En este último caso, es claro, que una vez una teoría ha logrado su *status* de validez, es posible mediante reglas muy precisas predecir comportamientos, fenómenos y resultados que pueden confirmarse experimentalmente, aunque en clase rara vez se intente. Pensar que la relación entre el fenómeno y la teoría en la construcción de ésta es simplemente lo inverso a la predicción desde ella es desconocer no solamente la historia de las ideas científicas, sino privar al quehacer en ciencia de sus atributos más humanos: la posibilidad de errar, el valor para reconocer equivocaciones y el sentido de creación al tratar de hilvanar explicaciones.

Vale la pena recordar que el orden y sistematización que exhiben los informes científicos no coinciden nunca con el derrotero que ha seguido la comunidad científica al desarrollar la investigación, se planteaba en sus albores en términos completamente distintos a aquéllos en los cuales se presentan los resultados. Las preguntas cambian al avanzar la investigación tanto, que usualmente la pregunta final sólo se puede enunciar cuando ya se tiene la respuesta.

A pesar de que los científicos al escribir los resultados de sus investigaciones las ordenan y sistematizan ocultando, sin mala fe, los tropiezos de ellas: los caminos emprendidos y luego rectificados, los errores, etc., es posible en algunos casos, como en Kepler, Galileo y Planck, seguir en sus escritos, al menos aproximadamente, las líneas de su pensamiento. El caso de Kepler está presentado de una manera muy clara y llamativa en *Patrones de descubrimiento* de Hanson Norwood Russell[3] y nos ilustra los tanteos, las equivocaciones, las fundamentaciones sorprendentes (por lo alejadas de sus resultados posteriores) que acompañaron su trabajo. Así mismo, es muy interesante conocer la evolución del pensamiento de Galileo en torno, por ejemplo, a sus estudios de la cinemática. A. Koyré en *Estudios galileanos*[4], muestra como Galileo tardó unos veinte años para pasar de considerar la rapidez como función de la distancia recorrida, a sus resultados finales cuando la rapidez es ya concebida como función del tiempo (para el caso de la caída libre). Finalmente, Planck en su autobiografía nos muestra la línea de investigación que lo guió en la formulación y solución al problema de radiación del cuerpo negro. Pero estos ejemplos nos ilustran además otro aspecto interesante de la actividad científica: los trabajos que alguien reporta como resultados de sus investigaciones no son patrimonio exclusivo de aquellos a quienes la historiografía de la ciencia otroga los méritos: se trata de temas de investigación de la comunidad científica, de una comunidad que se equivoca y duda, de una comunidad que discute y se comunica, de una comunidad en la cual se respeta pero se controvierte intensamente el trabajo de cada uno de sus miembros; no son fruto de

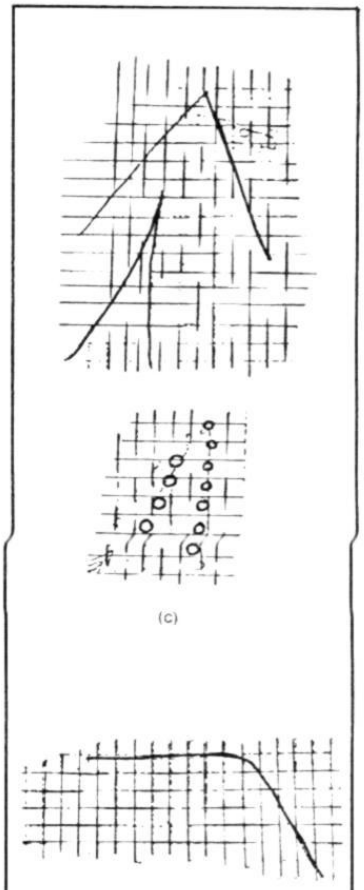
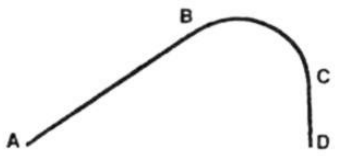


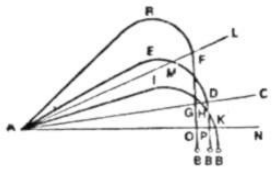
Fig. 1. Gráficas elaboradas por adultos (25, 40 años), maestros de escuela primaria, para ilustrar lanzamientos: (c) inclinado, (d) horizontal.



Trayectoria que se desprendería según A. Koyré de los análisis de Tartaglia. Esta aparece en libros dedicados al arte del cañon en el siglo XVI.



"la trayectoria del cuerpo.. se presentará como si describiera al principio una línea recta, después una curva (arco de círculo), luego de nuevo una recta" A. Koyré, "Estudios,p.108"



Trayectoria que según Koyré se desprende del análisis de Tartaglia. Koyré, "Estudios, p.112"

Fig. 2

la genialidad de un pensador solitario.

Caracterización de los experimentos didácticos

Una de las preocupaciones del maestro al planear un montaje experimental -si no la única- es encontrar una instancia empírica que le permita demostrar de forma incontrovertible y limpia el cumplimiento de un resultado teórico. Esta búsqueda está acompañada por la idea, o bien de demostrar el resultado teórico, o bien de obtener ésta a partir de la práctica. Ejemplos de esta intención son numerosos: "Experimento para formular la segunda ley de Newton", "Experimento sobre la independencia de movimientos", etc. En lo que sigue, denominamos a este tipo de experimentos, EXPERIMENTOS TIPO A.

Otro tipo de experimento (EXPERIMENTOS TIPO B) es el orientado a "sorprender al alumno". En este caso, se parte de las concepciones erróneas que los alumnos muestran sobre determinado fenómeno y se pretende a partir de la ejecución empírica mostrarles cuán equivocados estaban. Es el caso de medir el período de un péndulo en función de la masa pendular; o de comparar los tiempos de caída de cuerpos que se lanzan con diferente rapidez horizontal pero desde iguales distancias verticales al piso.

Finalmente otro tipo de práctica de laboratorio consiste en mostrar al estudiante cierto tipo de fenómenos y comportamiento que o bien no ha sido visto (por no pertenecer a lo cotidiano inmediato) o han sido vistos mal. Recordemos las experiencias con electricidad estática lograda frotando varillas de materiales diferentes, los juegos con imanes, los giróscopos, etc. Estas experiencias* que denominaremos tipo C, a pesar de que existen, no son muy apreciadas por "ser meramente cualitativas".

Consideremos ahora con algún detalle, cada uno de los tipos de experimento mencionados.

Experimentos tipo A

Este es quizás el tipo más frecuente de montaje experimental y también posiblemente el más dañino y el más fraudulento. Para visualizar claramente sus deficiencias, estudiemos detenidamente uno de ellos: la segunda ley de Newton.

El montaje típico, que es una versión ligeramente modificada de las guías de PSSC (Editorial Bedout, 1964), consiste en medir la aceleración de un cuerpo de masa variable (constante) que se mueve bajo la acción de un peso de magnitud constante (variable) que cae (Fig. 3a). En sus dos opciones se propone *deducir* la relación operacional entre la fuerza, la masa y la aceleración expresada por la segunda ley de Newton *(F=ma)*. De acuerdo con el montaje que se disponga para trabajar, al graficar *a* contra *P* se obtiene la curva *A* o la curva *B* (Fig. 3b). En el primer caso, *el profesor* ha diseñado la experiencia reduciendo al mínimo posible la fricción.

El profesor espera que ante las dos gráficas experimentales el estudiante razone así: cuando no hay fricción (curva *A*),*a* es proporcional a *P*. ¡Claro! Si la fuerza neta que se ejerce sobre el cuerpo de masa *M* fuera igual a *P*, entonces $a \propto F$, como efectivamente se quería mostrar. Si hay fricción (curva *B*), *a* resulta proporcional a *P-f*, con *f* una constante. ¡Claro! Si *f* se interpreta como una fuerza de fricción ejercida sobre *M*, la fuerza neta *F* ejercida sobre esta última sería *P-f*, y de esta manera se han comprobado experimentalmente dos cosas: la segunda ley de Newton, y la independencia de la fuerza de fricción dinámica respecto de la velocidad relativa de las dos

superficies en contacto.

Análisis de la experiencia

La simplicidad de la experiencia es sorprendente. Y los resultados son concluyentes: ¡La segunda ley de Newton es obtenida empíricamente! Pero, ¿a costa de qué?

(1) En el análisis del experimento se han hecho simplificaciones, como la influencia que pueda tener la polea en el resultado, de la cual depende en buena parte la uniformidad de la tensión a lo largo de la cuerda. Pero este no es el punto realmente grave.

(2) En el caso de la curva *A* el profesor considera correcto un razonamiento que constituye un garrafal error: si *T*, la fuerza que actúa sobre *M*, fuera igual a *P*, el peso del cuerpo que cae, ¡este último estaría en equilibrio! O sea, si se suelta a *P* desde el reposo al comenzar el experimento, ¡nada se movería! ¡Se ha demostrado la segunda ley con razonamientos que conducen a estos absurdos! Y éste que acabamos de mencionar no es el único absurdo. Veamos este: si *a* fuera proporcional a *P*, podríamos conseguir aumentando *P* un valor de *a* tan grande como quisiéramos, más grande que *g*, o que *10g*, o que *100g*.

(3) El profesor ha hecho su diseño para hacerle una trampa al estudiante. Le ha sugerido, abiertamente o no, que emplee valores pequeños de *P*. Sabe, porque conoce las leyes de Newton, que para el caso de $f \approx 0$ la aceleración se relaciona con *P* así:

$$a = P/M+m; \text{ si } M >> m$$
$$\text{entonces } a \approx P/M$$

y que la gráfica (ver Fig. 4) es indistinguible de la curva *A* en la Fig. 3b si m « M. Alguien anotaba que en este caso, en cierta medida, la unidad entre teoría y práctica es clara: la unidad entre la teoría del maestro y la práctica del estudiante.

(4) La trampa que ha tendido el profesor soslaya cuestiones tan fundamentales como:

- ¿Será que cuando una masa se demuestra como gravitacional no exhibe propiedades inerciales?
- ¿Qué significado tiene *fuerza* en el enunciado de la segunda ley?
- ¿Qué representa *M* en el mismo enunciado?

Consideraciones sobre los experimentos tipo A

Las circunstancias que rodean a este tipo de experimentos son siempre similares:

(1) Están fundamentadas en la ilusión de llegar a la teoría de manera directa a partir de la experiencia; mejor, de una experiencia. Y para lograrlo, irresponsablemente se deforma la teoría y se deforman los resultados de la experiencia.

(2) Pero la ilusión es doble. Como en nuestro ejemplo, se pretende aislar una ley de la mecánica del resto de la mecánica. ¿Quién puede soñar en un fenómeno mecánico en el cual no estén presentes *todas* las leyes de la mecánica? Con seguridad, todo fenómeno mecánico confirma a la mecánica como totalidad: la mecánica no es un conjunto de leyes yuxtapuestas; las leyes de la mecánica constituyen un sistema y tratar de separar una ley del resto del sistema es de por sí destruir al sistema mismo y quitarle significado a la ley en particular.

(3) En esta concepción didáctica se niega al estudiante como individuo pensante, como sujeto que está construyendo una *nueva* manera de ver el mundo y se pretende que VEA lo que el maestro quiere que vea, olvidándose que las perspectivas desde las cuales cada quien observa el montaje, la realización del experimento y los resultados son distin-

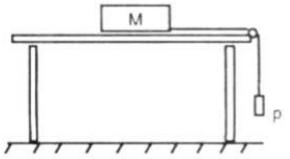


Fig. 3(a)

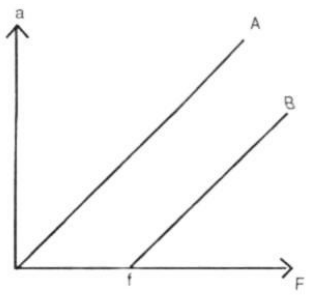
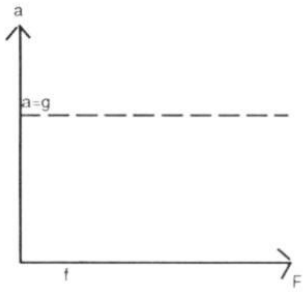


Fig. 3(b)



$$a = \frac{mg}{M+m}$$

si m<< M

$$a = \frac{mg}{M}$$

Fig. 4

tos y que consiguientemente los dos individuos VERAN cosas diferentes.

(4) Por otra parte, en el experimento como instancia epistemológica debe plantearse una relación entre el sujeto que experimenta y el fenómeno o conductas que investiga. Si el montaje no ha sido apropiado por el alumno como un instrumento para poner a prueba SUS inquietudes, SUS expectativas y SUS suposiciones, cuando ejecute el experimento estará simplemente reproduciendo acciones que no sabe a qué conducen ni por qué las realiza.

Experimentos tipo B

Estos experimentos son menos frecuentes que los de tipo A. La crítica fundamental es que aquéllos se quedan a mitad de camino. Se trata en estos experimentos de "sorprender" el sentido común de los estudiantes. Pero tal sorpresa se queda usualmente en una simple "motivación" para la clase. Tal es el caso de la "experiencia de caída libre", o del experimento que muestra "la independencia del periodo de oscilación de un péndulo respecto del valor de la masa pendular".

Para el caso de la caída libre, la experiencia es extremadamente sencilla. Se trata de contradecir empíricamente la suposición (afirmación) del estudiante respecto de la no simultaneidad con que caen cuerpos de pesos diferentes. Para tal efecto basta con una piedra y un trozo de papel (que se arruga hasta formar una pelotita) o de una moneda y un trocito de papel de dimensiones menores que aquélla, que se coloca sobre la moneda para "ver si la moneda lo deja atrás o no". Otros utilizan un tubo al vacío con una moneda y una pluma (tubo de Newton). En todo caso, la experiencia consiste en contradecir las expectativas del estudiante:"¡En contra de lo que habíamos pensado, los dos cuerpos caen simultáneamente! ¡En contra de lo que habíamos pensado, el péndulo continúa oscilando con el mismo periodo, a pesar de ser diferente el valor de la masa pendular! Y eso es todo.

Análisis de la experiencia

Evidentemente, partir de las expectativas del alumno no sólo es motivante e interesante para él, sino que además permitirá que haga suyo el experimento mismo: él sabe qué se pretende, qué se busca, cómo se está realizando, y cuando obtenga resultados sabrá si ellos concuerdan o no con lo que se estaba pensando. Sin embargo, dejar las cosas simplemente en una sorpresa es desaprovechar la oportunidad para profundizar un poco más tratando de ir hacia el fondo del asunto: ¿por qué son esas precisamente las expectativas del estudiante? En otras palabras, las predicciones que alguien enuncia respecto a un acaecer no pueden ser totalmente inconexas e independientes de su manera de ver el mundo. Ellas de alguna manera corresponden a formas de explicación (erróneas o no) que existen antes de la clase y que muchas veces son compartidas por una comunidad bastante amplia pero poco relacionada con los estudios de Física (o de la ciencia particular de que se trate).

En el ejemplo que nos ocupa, si nos preguntamos por qué el estudiante sólo considera los efectos de la masa gravitacional (y de ahí su centramiento en el peso) y olvida la masa inercial, ¿no sería tal circunstancia una buena oportunidad para que en base a cuestionamientos y preguntas nos aproximemos a formas explicativas más completas, por ejemplo recordando el papel de la masa inercial en el movimiento de caída libre? Aún más, desde la física misma la independencia del tiempo de caída respecto de la masa, no es un hecho aislado, está relacionado evidentemente con la segunda ley de

Newton, pero también -como anotábamos- con las dos propiedades de la masa inercial y la masa gravitacional. Veamos: el cuerpo puesto en el aire es objeto de una fuerza hacia abajo de magnitud

$$F = mg \qquad (1)$$

Para determinar la aceleración de su movimiento, de acuerdo con la segunda ley de Newton, tenemos que

$$a = F/m \qquad (2)$$

Así, reemplazando (1) en (2), llegamos a

$$a = mg/m$$

y simplificando

$$a = mg/m = g \qquad (3)$$

Pero en este desarrollo -en el cual hemos demostrado que si la única fuerza actuante sobre el cuerpo es el peso (caída libre) la aceleración de la caída es una constante igual a *g*- hay aspectos que pueden pasar desapercibidos:

a. La masa que aparece en (1) es la masa gravitacional.

b. La masa que aparece en (2) es la masa inercial.

c. La simplificación en (3) es una operación con profundo significado teórico: el que dos cuerpos de peso diferente caigan simultáneamente en caída libre, puede verse como una consecuencia de que la masa inercial es igual a la masa gravitacional. O a la inversa: puesto que caen simultáneamente, las dos propiedades de la masa son iguales (pero esta conclusión no es un resultado *meramente empírico; para ella media* la reflexión teórica).

Consideraciones sobre los experimentos tipo B

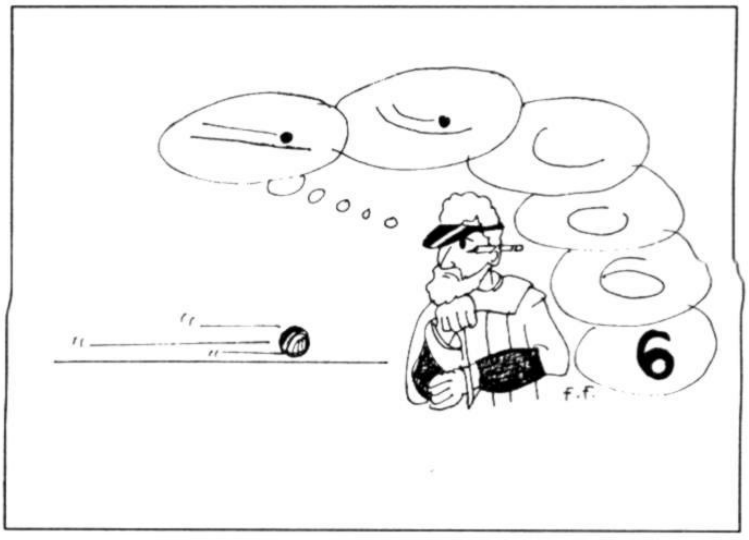
Pero las razones que los estudiantes aducen para prever un comportamiento determinado pueden ser otras y a veces inimaginables (desde el punto de vista de la teoría que maneja el maestro). Y son precisamente tales formas de explicación las que deben ponerse a prueba en la clase de ciencias. Así pues, no solamente deben ponerse a prueba las expectativas, sino que debiera investigar las raíces (teóricas o pre-teóricas) de tales expectativas a fin de que una vez identificadas, el resultado de la experiencia no solamente entre en conflicto con las expectativas aisladas, sino con toda la concepción preconceptual que las sustenta.

Para finalizar, vale la pena recordar cómo en algunas ocasiones las expectativas son correctas, pero están sustentadas erróneamente. En cierta oportunidad por ejemplo, un estudiante predijo "acertadamente" la independencia del período respecto de la masa pendular explicando luego "... porque para pesos mayores, en el descenso se logran aumentos grandes de rapidez, pero al mismo tiempo, al ascender, hay también una mayor disminución de ella, en definitiva, los efectos se compensan ..." Aparentemente este estudiante ya conocía el resultado de la experiencia con el péndulo y podría pensarse que no la necesitaba puesto que su realización no lo sorprendería.

Experimento tipo C

Estos experimentos (si así pudieran llamarse) son frecuentes en temas distantes de la vida cotidiana tales como la electricidad y el magnetismo, la óptica, las ondas, aspectos de la tecnología, etc. Y es claro que mientras no exista un referencial concreto en el mundo de los fenómenos para el tópico del cual se habla, es de dudoso efecto pedagógico hablar de él. En la medida en que se enriquezca más y más el número de conceptualizaciones a partir de experiencias de laboratorio es mucho más probable que se logre sentido respecto de lo que se está tratando. Esto es necesario, pero con seguridad, no es suficiente.

Los fenómenos que se presenten y los resultados que se logren no podrán pensarse como algo vistoso que hay que mirar; o mejor, que hay que contemplar. Para que lo visto, lo presenciado y aun lo experimentado pueda realmente enriquecer la experiencia del alumno, debe existir una relación activa entre éste y la experiencia misma. En otras palabras, la actividad "racional"



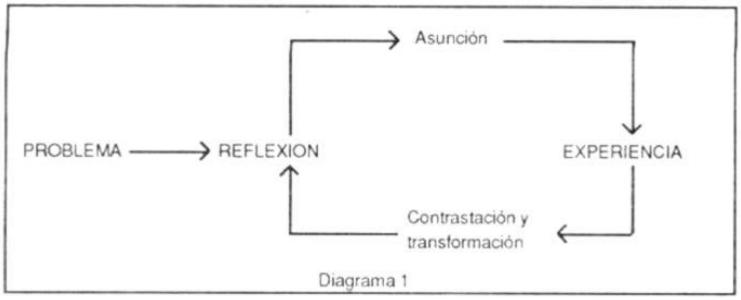


Diagrama 1

debe anteceder y a la vez culminar el proceso. En los experimentos tipo C, sin embargo, es posible que la reflexión tenga un peso mayor después de la experiencia y que ella de inició al ciclo -tal vez válido en todos los tipos de experiencia- que podría esquematizarse como muestra el diagrama 1.

Frecuentemente lo que se presenta al alumno es una colección de fenómenos que carece de preámbulo discursivo y de la confrontación-reflexión posterior a la experiencia misma. En estas condiciones, el valor de la experiencia se minimiza hasta el punto de convertirse en un detalle anecdótico, se recuerda por lo "bonito", lo vistoso o lo sorprendente, pero que carece del significado necesario para construirse en el punto de partida (en el referencial concreto) para la construcción del conocimiento.

La experiencia en el aprendizaje de la física

En las críticas a los tipos usuales de "experimento" anotadas anteriormente existe un elemento común que nos puede orientar al tratar de dilucidar cuál es el papel del laboratorio en el aprendizaje de la física: en ninguno de ellos existe una apropiación por parte del estudiante de la problemática de la clase (o de la práctica de laboratorio). Esta circunstancia que no sólo convierte al docente en el punto central de la clase, sino que convierte a la clase misma en un monólogo en el cual el profesor es quien plantea los problemas y es él quien a la vez los resuelve, se manifiesta en las sesiones de laboratorio cuando el estudiante tiene que ejecutar ciertas acciones previamente establecidas desde una óptica que no es la suya y en este sentido, tiene que ver lo que no ve y tiene que llegar a donde jamás había pensado que llegaría (ni quería llegar).

El problema de la apropiación incorpora al menos dos elementos, uno vinculado con la comprensión y en este sentido con el razonamiento, y otro relacionado con lo afectivo. Estos dos elementos interdependientes son fundamentales en la labor pedagógica. Por no plantear la problemática específica del laboratorio, no nos extenderemos aquí sobre ellos.

La experimentación en clase

Hay al menos dos buenas razones para que exista la experimentación en clase: una formativa y otra de contenido. Las formas de razonamiento, los criterios de verdad (o de validez) y los métodos de trabajo de las ciencias naturales no pueden aprenderse en una conferencia o en un libro. Si hay algo fundamental en el trabajo práctico es que allí se da la oportunidad para que uniendo nuestra acción con nuestra reflexión, contrastemos "honestamente" nuestras predicciones y demos a la razón motivos para ser creativa e imaginativa, pero también cuidadosa y alerta por los controles que imponen los nexos de la teoría y los resultados experimentales.

La única forma de apreciar a la ciencia como un proceso; como una actividad humana, como una búsqueda entramada de creatividad, imaginación y razonamiento y como un quehacer salpicado de tropiezos, errores y dificultades, es aprenderla así. Y para ello no se puede partir de "la verdad", esto es, desde la teoría, falseando los datos de laboratorio e imaginando situaciones inexistentes para pretender una vía rectilínea entre el dato y la generalización, entre la experiencia y la teoría formalizada.

Si a través de la clase de física se pretende "formar" al estudiante, debe embarcársele en una actividad que le permita poner a prueba sus predicciones, que le exija "prever lo que sucedería si...", que le obligue a imaginar interpretaciones y explicaciones alternativas, que le de la oportunidad de ver derrotados sus supuestos ante el resultado de la experiencia. Sólo así, en la difícil tarea de controlar variables, de corregir montajes, de tener en cuenta los errores de medida y de reflexionar sobre lo mismo desde perspectivas diferentes, es posible adquirir un verdadero sentido de lo que es una ciencia natural, del significado de una generalización, de sus límites de validez y de su carácter no definitivo.

Pero el laboratorio debe cumplir una tarea complementaria: el problema de los contenidos. La ciencia vista como un resultado es un elemento orientador en la organización de la experiencia y en general de la clase. Si bien es cierto que la actividad misma es el elemento formativo al concebir la ciencia como un proceso, no podemos olvidar que a diferencia del investigador, en la creación de la ciencia como

quehacer colectivo y social, en el aula de clase, en el laboratorio y en fin, en la escuela, el alumno está en inter-relación con su maestro y es el maestro quien poseyendo la teoría, puede orientar la actividad misma a partir de interrogantes, de planteamiento de situaciones nuevas no vistas por el alumno hacia problemas que conduzcan a la pequeña colectividad de la clase hacia aproximaciones sucesivas a la teoría. Esta labor que de ninguna manera es fácil debe ejercerse dentro de un equilibrio que permita que, por parte del estudiante se visualice siempre la actividad como propia y al mismo tiempo, que ella se oriente en peldaños ascendentes hacia la teoría.

Dentro de esta concepción el laboratorio debe formar un todo dentro de la actividad enseñanza-aprendizaje. Si para todos es claro que no es posible hablar de algo que no posea referentes en la experiencia, también debería ser claro que mientras el alumno no este poniendo a prueba sus propias teorías al ejecutar las actividades de laboratorio cualquier resultado a que llegue, sea éxito o fracaso, no tendrá ningún significado para él.

Ahora bien, la sola actividad de laboratorio -por muy completos e ingeniosos que sean los montajes- no conducen de manera alguna a la teoría. Entre la experiencia y la teoría media toda una actividad de reflexión, de tanteo, de imaginación y de creatividad de la cual forman parte las extrapolaciones y los experimentos imaginarios -que son los únicos "confirmatorios" cuando se trata de enunciar leyes aisladas.

Lo dicho hasta aquí plantea para el maestro la problemática del laboratorio de una manera completamente distinta a la tradicional. Mientras el maestro actualmente está preocupado fundamentalmente por encontrar la posibilidad de montar experimentos confirmatorios (de la teoría que el estudiante no sabe), la propuesta que resulta es que se busque el montaje de experimentos que fallen (para la pre-teoría del estudiante).

¡Claro que deben existir también experimentos confirmatorios! Pero el montaje de ellos debe ser autonomo del estudiante. Estos experimentos, (que hemos denominado problemas-experimento), el ser inspirados por la teoría total y no por una "ley" en particular, deben poner a prueba una "cultura experimental" adquirida en el ejercicio mismo del laboratorio y por ello corresponder a cursos avanzados en los cuales se construye un montaje para confirmar el resultado de un problema previamente resuelto desde la teoría y en el cual se deben tener en cuenta las fluctuaciones originadas en la medición y en la imprecisión de los instrumentos.

Finalmente, conviene recalcar el papel importante que en la dinámica de la clase juega el curso como colectividad. Por una parte, diferentes estudios han confirmado que las concepciones pre-teóricas que utilizan tanto los niños como quienes no han estudiado física, son muy cercanas entre si, pero que ellas no aparecen de manera espontánea, sino que se evidencian más bien en las discusiones entre compañeros. Defendiendo un punto de vista se descubre la firmeza de los argumentos. Por otra parte, mientras no se rompa el vínculo de autoridad que existe entre los alumnos y su maestro es muy difícil lograr situaciones abiertas a la contradicción y el diálogo: el papel del maestro cambia así al pasar de ser un solucionador de problemas, a ser un cuestionador y un orientador en las discusiones.

Posiblemente las cosas se harán así más lentas y complicadas pero lo planteado sólo tiene sentido para quienes se han preguntado alguna vez por qué no se aprende en clase. Por esto valdría la pena preguntar si no es conveniente intentar un método que se oriente a aprender lo fundamental aún cuando el cubrimiento programático no sea total. En cuanto a la complicación que resulta de proponer un método en el cual se estará siempre en la espera de lo inesperado, conviene reafirmar que este planteamiento está dirigido a quienes no tienen preparada su clase desde hace años y ven el ejercicio de su profesión desde una óptica creativa y comprometida con los resultados que de ella se logran.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

[1] Koyré Alexandre. *Estudios de historia del pensamiento científico*. Siglo XXI Ed., Mexico, 1976.

[2] Toulmin Stephen. *The Philosophy of science -an introduction*. Harper torchbooks, New York, 1960.

[3] Hanson R. Norwood. *Patrones de descubrimiento. Observación y explicación*. Alianza Universidad Ed., Madrid, 1977.

[4] Koyré Alexandre. *Estudios Galileanos*. Siglo XXI Ed., Mexico, 1981.

RICHARD P. FEYNMAN

7 %

Las anécdotas personales que cuenta Feynman alrededor del descubrimiento de una ley de la naturaleza, la explicación del decaimiento beta, ilustran vividamente aspectos de la actividad del científico. La narración cubre varios planos de la vida de la ciencia: desde el éxtasis que produce el descubrimiento en los protagonistas pasando por los mismos fenómenos de la naturaleza que se intentan explicar, hasta lo que constituye el principal motivo para haber incluido el artículo en este número la importancia relativa de los argumentos racionales frente a los hechos experimentales como fuentes y jueces de la explicación científica.

El problema era encontrar las leyes correctas del decaimiento beta. Había dos partículas, llamadas *tau* y *theta*, que parecían tener casi exactamente la misma masa, sólo que una se desintegraba en 2 piones y la otra en 3. No sólo parecían tener la misma masa; tenían también el mismo tiempo de vida media, una coincidencia graciosa. Todos estaban interesados en el tema.

En un congreso en el que participé, se reportó que cuando estas dos partículas se producen en un ciclotrón a diferentes ángulos y con diferentes energías, aparecían siempre en la misma proporción, la misma cantidad de *taus* y *thetas*.

Una posibilidad, por supuesto, era que se tratara de la misma partícula, decayendo algunas veces en 2 piones y otras veces en 3. Pero nadie admitiría esto, porque hay una ley, la ley de paridad, basada en la suposición de que todas las leyes de la física son simétricas respecto a su imagen especular, según la cual una cosa que puede decaer en 2 piones no puede también decaer en 3.

En esa época yo andaba siempre rezagado. Todos se veían competentes y yo no sentía que

Este artículo fue traducido por el Comité Editorial de "Surely you're Joking, Mr. Feynman" Adventures of courious character W. N. Norton of Company N. York. London. 1985. Corresponde a un capítulo del mencionado libro que se titula The 7 percent solution. El libro apareció ya en versión española y lo aquí publicado tiene la autorización de Alianza Editorial, responsable de la edición en español.

Recuadro 1

La violación del principio de conservación de la paridad en las interacciones débiles constituyó una mayúscula sorpresa -más de lo que hace suponer una apuesta de 50 a 1 como la de Feynman o de 100 a 1 como la de Pauli-. Esto explica que haya sido objeto de muchos artículos de divulgación. Martin Gardner dedica los últimos artículos de su libro *Izquierda y derecha en el cosmos*, publicado en inglés en 1964 (en español recientemente reeditado en la Biblioteca científica Salvat, No.14) al tema. Creemos interesante, además de remitir al lector a este magnífico libro, transcribir algunos comentarios suyos.

"... Como tantas otras revoluciones en física, ésta aconteció como el resultado de una obra matemática, teórica, enormemente abstracta. Ninguno de los tres experimentos que primero derribaron la paridad habrían sido realizados en la época que lo fueron si Lee y Yang no hubieran dicho a los experimentadores lo que tenían que hacer..."

Gardner cita también a su colega divulgador, el físico Jeremy Bernstein. Transcribimos el párrafo completo.

"En 1928 tres físicos de la Universidad de Nueva York habían descubierto realmente una violación de la paridad en la degradación del isótopo radiactivo de radio. El experimento había sido repetido con refinadas técnicas en 1930. "No solamente cada vez -relataba el experimentador-, sino incluso en todas las lecturas de cada ensayo, con pocas excepciones", el efecto era observable. Pero esto ocurría en un tiempo -como dice Berstein- en que no había contexto teórico en el cual colocar estos resultados. Fueron rápidamente olvidados"

me mantuviera a su nivel. Compartía una habitación con un muchacho llamado Martin Block, un experimentalista, quien una noche me dijo: "¿Por qué ustedes insisten tanto en esta regla de la paridad? De pronto *tau* y *theta* son la misma partícula. ¿Cuáles serían las consecuencias si la regla de la paridad estuviera equivocada?". Pensé durante un minuto. "Querría decir -dije- que las leyes de la naturaleza son diferentes para la mano derecha y para la mano izquierda, que hay alguna manera de definir la mano derecha mediante fenómenos físicos. No sé qué tan terrible sea esto aunque debe conducir a malas consecuencias: ¿Por qué no le pregunta a los expertos mañana?"

"No, no me escucharán dijo. Pregunte usted"

Así que al día siguiente en la reunión cuando estábamos discutiendo el problema *tau-theta*, Oppenheimer dijo: "necesitamos escuchar algunas ideas, más arriesgadas, acerca de este problema". Entonces me puse de pie: "Hago esta pregunta a nombre de Martin Block: ¿cuáles serían las consecuencias si la regla de la paridad estuviera equivocada?"

Murray Gell-Mann a menudo me molesta por la manera como hice la pregunta, diciéndome que no tuve el coraje de hacerla a mi nombre. Pero no fue esa la razón. Pensé que podía ser una idea muy importante.

Lee, (de Lee y Yang), respondió algo complicado, y como era costumbre no entendí muy bien. Al culminar la reunión Block me preguntó por lo que había dicho Lee y le manifesté no haber entendido, pero que hasta donde yo podía decir, la cuestión permanecía abierta -todavía existía la posibilidad, sin que fuera muy probable.

•

Norm Ramsey me preguntó si él podría hacer un experimento buscando una violación a la ley de la paridad, a lo que repliqué: "la mejor manera de explicarle lo que yo pienso es que yo le apuesto 50 a 1 a que usted no encontrará nada."

"Es suficiente para mí" -dijo. Pero nunca lo hizo.

Murray me contó que más tarde, cuando dio unas conferencias en Rusia, empleó la idea de la violación de la ley de la paridad como un ejemplo de las cosas ridículas y locas que las personas estaban considerando para desenmarañar el rompecabezas *tau-theta*.

De todas maneras, Madame Wu descubrió experimentalmente la violación de la ley de la paridad, abriendo un manojo de nuevas posibilidades para una teoría del decaimiento beta y así mismo desatando una gran cantidad de experimentos posteriores. Algunos mostraban electrones viniendo de los núcleos y girando (spin) a la izquierda y algunos a la derecha y había todo tipo de experimentos, todo tipo de descubrimientos interesantes acerca de la paridad. Pero los datos eran tan confusos que nadie podía ordenarlos.

En este punto se llevó a cabo un congreso en Rochester, la Conferencia Anual de Rochester. Yo, como siempre andaba a la zaga. Lee expuso su trabajo sobre la violación de la paridad. El y Yang habían llegado a la conclusión de que la paridad se violaba y ahora estaba explicando su teoría acerca del asunto.

Durante la conferencia yo me estaba quedando en casa de mi hermana en Siracusa. Llevé el artículo a casa y le dije: "no puedo entender las cosas que Lee y Yang están diciendo, todo este asunto es muy complicado."

"No -dijo ella- lo que usted quiere decir no es que usted no

las pueda entender, sino que usted no las inventó, que no puede imaginar su propia manera al escuchar el trabajo. Lo que usted debería hacer es imaginar que es nuevamente un estudiante, subir con el artículo, leer cada línea y analizar las ecuaciones. Así lo entenderá muy fácilmente."

Acepté su consejo, examiné todo el artículo y lo encontré muy obvio y simple. Estaba temeroso de leerlo creyendo que era muy difícil.

Me traía a la memoria algo que yo había hecho hace mucho tiempo con ecuaciones asimétricas a la izquierda[1] y derecha. Ahora me pareció claro cuando miré las fórmulas de Lee, que la solución era mucho más simple: todo venía acoplado a la izquierda[2]. Para el electrón y el muón mis predicciones eran las mismas de Lee excepto que yo cambié algunos signos. No me percaté de esto en ese entonces, pero Lee había tomado únicamente el ejemplo más simple del acoplamiento de muón[3], sin probar que todos los muones estarían completamente a derecha mientras que con mi teoría, este resultado surgía automáticamente. Por consiguiente yo tenía de hecho una predicción por encima de la suya. Mis signos eran diferentes, pero no me di cuenta que yo también tenía esta cantidad correcta.

Predije algunas cosas que nadie había experimentado hasta ahora, pero cuando llegué al neutrón y al protón no pude conseguir que encajara bien con lo que en ese entonces conocía acerca de su acoplamiento: era un desorden.

Al día siguiente, ya en la conferencia, una persona muy amable llamada Kent Case quien iba a exponer un artículo sobre alguna cosa, me dio 5 minutos del tiempo que le corespondía para presentar mi idea. Dije que estaba convencido que todo estaba acoplado a la izquierda y que los signos para el electrón y el muón estaban invertidos, pero que yo aún peleaba con el neutrón. Después los experimentadores me hicieron algunas preguntas acerca de mis predicciones y entonces viajé a Brasil durante el verano.

De regreso a los Estados Unidos quise saber cómo estaba la situación del decaimiento beta. Fui al laboratorio de la profesora Wu en Columbia, quien no estaba, pero otra dama me mostró todo tipo de datos, todo tipo de números caóticos que no encajaban en nada; los electrones que de acuerdo con mi modelo debían aparecer girando (spinning) a izquierda en el decaimiento beta aparecían girando a derecha en algunos casos. Nada encajaba.

Cuando regresé a Caltech, pregunté a los experimentadores cuál era la situación con el decaimiento beta. Recuerdo a tres muchachos, Hans Jensen, Aaldert Wapstra y Felix Boehm, sentándome en un butaco y comenzando a contarme todos estos hechos: resultados experimentales de otras partes del país y sus propios resultados experimentales. Como conocía qué tan cuidadosos eran estos muchachos, puse más atención a sus resultados que a los resultados de los otros. Sus resultados solos no eran tan inconsistentes; la confusión aparecía cuando se juntaban con los otros.

Una vez terminaron de meterme todos estos datos, dijeron: "la situación es tan confusa que inclusive algunas de las cosas que se han aceptado durante años están siendo cuestionadas, como aquélla de que el decaimiento beta del neutrón es *S* y *T*, Murray dice que pueden aun ser *V* y *A*, todo está tan confuso."

[1] Traducción de left and right unsymmetrical equations.

[2] "coupled to the left".

[3] muon coupling.

PARIDAD (Recuadro 2)

Puesto en términos muy gráficos, el principio de la conservación de la paridad dice que si un fenómeno físico ocurre, entonces su imagen vista en un espejo también debiera ocurrir en la realidad. Esto se puede traducir en lenguaje matemático, diciendo que si la descripción de un cierto fenómeno se hace en términos de vectores tales como la posición (**r**) y el momento lineal (**p**) entonces la descripción que corresponde a los valores (-**r**) y (-**p**) también corresponde a un fenómeno posible.

Como ejemplo tenemos una colisión entre dos partículas **A** y **B**. A la izquierda se ilustra la colisión "original" y a la derecha la colisión correspondiente de paridad opuesta.



La conservación de la paridad implica que ambas situaciones deben darse con igual frecuencia.

Las magnitudes escalares como la masa o la carga eléctrica no se ven afectadas por la operación de paridad, así como tampoco los "pseudovectores" (productos vectoriales entre dos auténticos vectores) entre los cuales tenemos aquéllos que representan al campo magnético o al momento angular. La misma colisión anterior en presencia de un campo magnético **H**, transformaría como se ilustra.



A diferencia de otros vectores, **H** no cambia. Este contraste en las propiedades de vectores y pseudovectores es fundamental para comprender los efectos empíricamente observables que resultan de la violación de la paridad en un determinado fenómeno.



Salté del butaco diciendo: "Entonces lo entiendo toooooodo".

Creyeron que estaba bromeando, pero aquel asunto con el cual yo tuve problema en la conferencia de Rochester -la desintegración del neutron y el protón: todo encajaba menos eso, y si era *V* y *A* en lugar de *S* y *T*, eso también encajaría. Luego, ¡yo tenía la teoría completa!

Esa noche calculé toda clase de cosas con la teoría. Lo primero que calculé fue la rapidez de desintegración del *muón* y del neutrón. Debían estar conectados uno al otro si la teoría fuera cierta, por cierta relación, y era correcta hasta un 9%. Bastante cercano, 9%. Debería ser mejor, pero algo es algo.

Continué chequeando otras cosas que encajaban. Estaba muy excitado. Por primera vez, la única vez -en mi carrera conocía una ley de la naturaleza que nadie conocía. Todo lo que había hecho hasta entonces era tomar la teoría de algún otro y mejorar el método de calcular, o tomar una ecuación como la ecuación de Schrödinger para explicar un fenómeno como en el caso del helio. Conocemos la ecuación y conocemos el fenómeno pero, ¿cómo funciona el asunto?

Pensé en Dirac quien tuvo su ecuación durante un tiempo -una nueva ecuación que le decía cómo se comportaba el electrón- y yo tenía esta nueva ecuación para el decaimiento beta que no era tan vital como la ecuación de Dirac pero que era buena. Esta era la única vez que descubría una ley nueva.

Llamé a mi hermana a Nueva York para agradecerle haberme hecho sentar y trabajar el artículo de Lee y Yang en la conferencia de Rochester. Luego de sentirme siempre a la zaga y poco confortable, ahora yo estaba en el punto; había hecho un descubrimiento, justamente a partir de su sugerencia. Me sentía capaz nuevamente de entrar en la física, para decirlo de alguna manera y quería agradecérselo a ella. Le conté que todo encajaba bien excepto el 9%.

Mi excitación crecía a medida que calculaba cosas que encajaban, encajaban automáticamente sin forzarlas. Había comenzado a olvidarme de ese 9% porque todo estaba saliendo correctamente.

Trabajé muy duro a lo largo de la noche, sentado en una mesita en la cocina, cerca de la ventana. Era tarde, entre dos y tres de la mañana, y ahí estaba yo, haciendo estos cálculos para que todo encajara sólidamente. Afuera todo era oscuridad y silencio... Súbitamente, un ruido fuerte, tac, tac, tac, viniendo de la ventana, y a través del vidrio, casi completamente contra la ventana, la palidez de una cara. El grito de terror que pegué todavía debe escucharse en alguna parte.

Era una amiga, reclamándome por no haberla llamado inmediatamente a mi regreso de vacaciones. La hice entrar y traté de explicarle que estaba muy ocupado, que justo en ese momento había descubierto algo, algo muy importante. "Por favor vete. Y permíteme terminarlo."

-No -dijo. No te molestaré. Me sentaré en la sala.

-Bueno, está bien, pero es muy difícil -le dije.

Exactamente, no se sentó en la sala. Se cuclilló, o algo así, en un rincón de la cocina, sus manos unidas entre sus rodillas, "sin intención de molestarme..." ¡Por supuesto, su propósito era sacarme de quicio! ¡Y qué bien lo consiguió! No pude pasar por alto

su presencia. Me disgusté mucho y no logré mantenerme en mis casillas. Debia hacer estos cálculos; estaba terriblemente excitado haciendo un descubrimiento importante y de alguna manera esto era más importante para mi que mi amiga -por lo menos en ese momento. No recuerdo cómo finalmente conseguí sacarla, pero fue difícil.

Al cabo de unas horas más de trabajo me dio hambre. Caminé por la calle principal hacia un pequeño restaurante situado a cinco o diez cuadras, como hacia de tiempo atrás tarde en la noche. Las primeras veces era usual que me detuviera la policía, porque yo iba caminando, pensativo y de pronto me detenia -surge una idea tan difícil que no se puede seguir caminando, es necesario estar seguro de alguna consecuencia, así que me detenia con mis manos extendidas, diciéndome a mi mismo: "La distancia entre éstos es de ésta manera y entonces el asunto..." Moviendo así las manos, parado en el asfalto, aparecia la policía: " Su nombre, su direccion, qué hace."

- ¡ Oh!, estaba pensando; vivo cerca y acostumbro ir al restaurante.

Luego de un par de veces se enteraron de quién se trataba y no me volvieron a detener.

Llegué al restaurante y mientras como en medio de la excitación siento la necesidad de contarle a alguien. Le digo a una dama que acabo de hacer un descubrimiento. Entonces ella arranca: es la esposa de un bombero o algo así, se encuentra muy sola - toda esta basura que no me interesa... en fin. Estas cosas pasan.

La siguiente mañana al llegar al trabajo fui donde Wapstra, Boehm y Jensen y les conté: "conseguí que todo funcionara. Todo encaja."

Christy, quien también estaba allí, dijo: "¿Qué constante de decaimiento beta empleo?"

-La del libro de tal y tal.

- Pero si ya se ha encontrado que es incorrecta. Las medidas recientes han mostrado que está errada en un 7%.

Entonces recordé lo del 9%. Se trataba para mi de una especie de predicción: habia conseguido en casa esta teoria según la cual el decaimiento del neutrón estaba errado en un nueve por ciento, y ellos me cuentan en la mañana siguiente que de hecho ha sido cambiada en un 7%. Pero ¿ha cambiado de 9 a 16 lo que es malo o de 9 a 2, lo que me sirve?

Justo en ese momento me llama mi hermana de Nueva York: - ¿Qué hay del 9%, qué sucedió?

- He acabado de descubrir que hay nuevos datos: 7%...

- ¿En qué dirección?

- Estoy tratando de hallarla. Te llamo más tarde.

Estaba tan excitado que no podia pensar. Como cuando se está tarde para coger un avión y no se sabe si se esta tarde o no y en el desespero alguien nos dice que los relojes se han corrido en una hora. Pero, ¿en qué dirección? En la excitacion es difícil pensar.

Así que Christy se metió en una oficina, yo en otra, los dos en silencio de manera que pudiéramos pensar. esto se mueve en este sentido y entonces esto se mueve en este sentido... -no era realmente difícil; tan solo era excitante.

Salimos los dos, y coincidimos: en 2%, que está muy bien dentro del error experimental. Después de todo si ellos cambian la constante en 7%, el 2% puede ser perfectamente un error expe-

VIOLACION DE LA PARIDAD EN EL DECAIMIENTO ß (Recuad. 3)

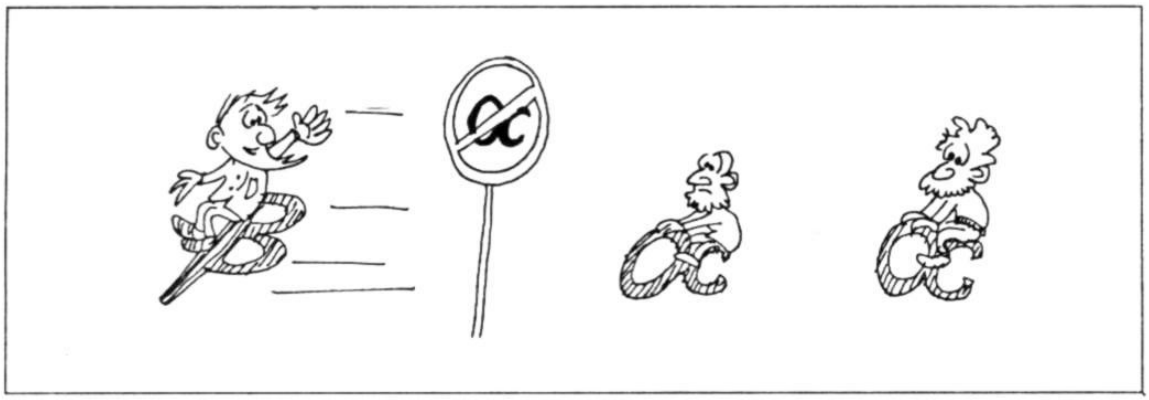
Aún cuando la radiación ß fue identificada desde los inicios de las investigaciones sobre la radiactividad natural, la comprensión de sus mecanismos no comenzó sino hasta después del descubrimiento del neutrón en 1932. De los primeros hechos establecidos acerca del neutrón es que, una vez aislado del núcleo, decae con vida media de unos once minutos de acuerdo con la fórmula

$$n_0^1 \qquad p_1^1 + e_1^0 + \nu_e$$

Este es el decaimiento ß más elemental. La presencia (necesaria) del antineutrino (ν_e) fue confirmada sólo hasta 1952 y es el arquetipo de violación de la paridad. Sin embargo, su detectación es tan difícil que, en principio es mucho más sencillo aprender sobre el decaimiento ß y la paridad observando el electrón. El electrón saliendo se lo puede describir en términos de dos estados posibles: el spin está orientado en la misma dirección que el momento lineal o en dirección opuesta. Estas dos posiciones se corresponden respectivamente con las figuras siguientes:



¡Pero estas mismas figuras corresponden a imágenes de paridad opuesta! El vector momento lineal invierte su sentido mientras el spin es un pseudovector y por lo tanto no es afectado por la operación de paridad. Si la paridad se conserva en el decaimiento beta, esto tiene la consecuencia estadística de que habría tantos electrones emitidos con spin paralelo al momento lineal (dextrógiros) como electrones con el spin en contra (levógiro). En la práctica esto no ocurre, la mayoría son levógiros y a medida que su energía cinética es más alta el carácter levógiro se acentúa. En el caso de los neutrinos este fenómeno de ruptura de la paridad es perfecto: todos los neutrinos son levógiros y todos los antineutrinos son dextrógiros.



rimental. Llamé a mi hermana: "2%". La teoría era correcta.

En realidad nuestra deducción era incorrecta: el error era el 1% por una razón que no habíamos apreciado pero que más tarde Nicola Cabibbo la entendió. De manera que la discrepancia de 2% no era atribuible toda a un error experimental.

Murray Gell-man y yo escribimos un artículo sobre la teoría. La teoría era bastante clara, relativamente simple, y encajaba con numerosos datos. Pero como les he contado, había una enorme cantidad de datos caóticos. Y en algunos casos, fuimos tan lejos como hasta asegurar que los experimentos estaban equivocados.

Un buen ejemplo de esto fue un experimento realizado por Valenti Telegdi, en el cual él midió la cantidad de electrones que salen en cada dirección cuando se desintegra el neutrón. Nuestra teoría predecía que el número sería el mismo en todas las direcciones mientras que Telegdi encontró que en una dirección aparecía un 11% más que en las otras. Telegdi era un excelente experimentador, muy cuidadoso. Y en alguna ocasión, dando una charla se refería a nuestra teoría diciendo: "el problema con los teóricos es que ellos nunca le ponen atención a los experimentadores".

Telegdi también nos envió una carta que sin ser exactamente severa, mostraba sin embargo que estaba convencido de que nuestra teoría estaba equivocada. Al final escribió: "la teoría F-G (Feynman-Gell-Mann) del decaimiento beta no es F-G."[4]

- ¿Qué haremos con esto? - preguntó Murray. Usted sabe que Telegdi es muy bueno."

- Tan solo esperemos -dije.

Dos días después llegó una carta nueva de Telegdi. Un completo converso. Encontró a partir de nuestra teoría que había desechado la posibilidad de que el protón despedido hacia atrás del neutrón no fuera el mismo en todas direcciones. Había supuesto que era el mismo. Pero añadiendo las correcciones que nuestra teoría predecía en lugar de las que él estaba utilizando, los resultados se enderezaban y estaban de completo acuerdo.

Yo sabía que Telegdi era excelente. Era difícil ir contra la corriente en su caso, pero estaba convencido por ese entonces de que algo debía andar equivocado en su experimento y que él debía encontrarlo -sería mucho mejor encontrándolo de lo que seríamos nosotros. Por eso propuse que no trataríamos de indagar, sino que esperáramos.

Fui donde el profesor Bacher y le conté de nuestro éxito. Bien -dijo- aparece ahora usted diciendo que el acoplamiento neutrón-protón es *V* en lugar de *T*. Todo el mundo creía que era *T*. ¿Dónde está el experimento fundamental del cual se concluía que era *T*? ¿Por qué no busca los primeros experimentos y encuentra dónde está el error en ellos?

Busqué el artículo original sobre el experimento según el cual se concluía que el acoplamiento neutrón-protón era *T* y me sorprendió una cosa. Recordé en ese momento haber leído antes (en los días cuando yo leía todos los artículos del *Physical Review* -en ese entonces era más pequeño). Y recordé, ahora que veía este artículo nuevamente, haber mirado la curva experimental y haber pensado: "esto no está probando nada".

Pues bien, dependía de uno o dos puntos en el puro extremo de todo el rango de valores, y hay un principio según el cual un punto en el extremo del rango de los valores, el último punto, no es muy bueno, porque si lo fuera habría otro punto más y yo me di cuenta que la idea global de que el acoplamiento protón-neutrón era *T* se basaba en ese último punto

[4] R. P. Feynman, H. Gell-mann, Phys. Rev. 109, 193 (1958) Futher-good, o sea, no sirve.

que no es concluyente ¡Recuerdo haberlo notado en ese entonces!

Y cuando me interesé en el decaimiento beta directamente, leí todos los informes realizados por los "expertos en decaimiento beta", que decían que el acoplamiento era *T*. Nunca recurrí a los datos originales; únicamente leí los informes, como narcotizado. Si yo hubiera sido un buen físico, cuando pensé en la idea original, allá en la Conferencia de Rochester, debí haber preguntado inmediatamente qué tan fuerte es la convicción de que el acoplamiento es *T*. Esta hubiera sido la forma sensata de hacerlo. Habría reconocido de inmediato que yo ya había notado que no estaba satisfactoriamente comprobado.

A partir de entonces nunca di mucho crédito a lo que decían los "expertos". Calculé todo por mi cuenta. Cuando me dijeron que la teoría de los quarks era muy buena, conseguí que dos PhD, Finn Ravndal y Mark Kislinger vieran todos los trabajos conmigo, de manera que yo pudiera comprobar que la cosa estaba realmente dando resultados que encajaran bien y que fuera una teoría significativamente buena. Nunca cometeré nuevamente el error de leer las opiniones de los expertos. Por supuesto usted únicamente vive una vida, y usted comete todos sus errores, y aprende qué no se debe hacer, y entonces su vida también termina.



LUIS E. MORENO A.
SHIRLEY BROMBERG

La organización global de la geometría y el quinto postulado

Las propuestas de geometrías no Euclideanas ejercieron sobre la filosofía y las ciencias naturales una influencia decisiva. Pero esas geometrías posibles no surgieron de la necesidad de sistematizar nuevos hechos empíricos, sino como parte de un proceso de «depuración lógica», entendiendo ésta como reducción del número de postulados fundamentales o, de acuerdo con la interpretación de los autores de este artículo, como afinamiento de algo que desentona en la organización global de la geometría de Euclides.

I. Organización local de la geometría

La matemática griega introdujo dos características ausentes en las matemáticas de civilizaciones anteriores: la deducción y el método axiomático. La geometría pre-helénica consistía en una serie de reglas obtenidas vía la experimentación, la observación de analogías y la intuición. Era una ciencia empírica cuyo objetivo principal estaba en las aplicaciones inmediatas.

Los griegos por su parte, a partir de Tales de Mileto insistieron poco a poco en la necesidad de que las proposiciones debían irse estableciendo mediante el razonamiento deductivo. En su momento, esto fue una idea enteramente nueva que continuó desarrollándose en las manos de Pitágoras y su escuela.

En la actualidad, aunque se conoce bien (¡no todo lo bien que sería deseable!) la matemática griega y su historia, no es fácil dar una respuesta categórica a la pregunta sobre cómo se tomó conciencia entre los griegos de la necesidad de introducir el método deductivo como método de demostración de un teorema. Recordemos: "teorema" en su etimología original quiere decir *objeto de una visión*. Es

Luis E. Moreno A.
Shirley Bromberg
Centro de Investigación y Estudios avanzados del IPN. Sección de Matemática Educativa

El presente artículo es una adaptación de algunos capítulos del texto LOS FUNDAMENTOS DE LA GEOMETRIA EVOLUCION CONCEPTUAL DE EUCLIDES A HILBERT, que los autores están próximos a concluir

decir, un teorema es una proposición cuya veracidad debe poderse ver. Para que ello sea posible debe tenerse que tal proposición sea evidente (es decir, *visible* de inmediato) o bien, la hacemos visible mediante una demostración. Como haya sido, estamos seguros de que la constatación de la fuerza del método deductivo provocó una reflexión sobre el método mismo.

A modo de ilustración de lo que intentamos decir, demostremos la proposición:

> El ángulo inscrito en una semicircunferecia es un ángulo recto.

Se trata de demostrar que $\angle BAC = 90°$ (Fig. 1). Para ello trazamos el radio *DA*. Aplicando el *teorema de Tales* (los ángulos de la base de un triángulo isósceles son iguales entre sí) concluimos:

$$\angle BAD = \alpha_1 = \angle ABD \; ; \; \angle DAC = \alpha_2 = \angle ACD$$

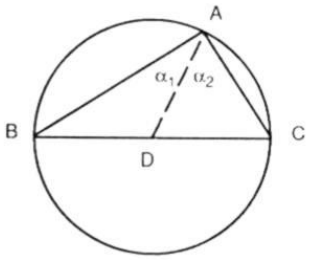


Fig. 1

La suma de los ángulos de un triángulo es 180°. Por lo tanto en el triángulo ΔABC tendremos:

$$\angle ABC + \angle BCA + \angle CAB = 180°$$

O sea que:

$$\alpha_1 + \alpha_2 + (\alpha_1 + \alpha_2) = 2(\alpha_1 + \alpha_2) = 180°$$

de donde

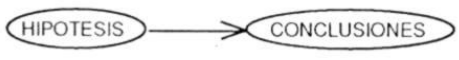
$$\angle BAC = \alpha_1 + \alpha_2 = 90°$$

Hemos establecido la validez del resultado a partir de otros dos hechos geométricos que dimos por conocidos de antemano. Pero, con ayuda de esta proposición recién demostrada podemos demostrar otra, y luego otra, y asi, por ejemplo, llegar a la siguiente dependencia lógica:

HIPOTESIS
1) Los ángulos de la base de todo triángulo isósceles son iguales entre sí.
2) La suma de los ángulos de todo triángulo es 180°.

CONCLUSIONES
1)El ángulo subtendido por una semicircunferencia es un ángulo recto.
2) El ángulo subtendido por un arco (arbitrario) de una circunferencia, uno de cuyos lados es un diámetro, es igual a la mitad del ángulo central subtendido por el mismo arco (ver Fig. 2a).
3) El ángulo subtendido por un arco, ninguno de cuyos lados es un diámetro, es igual a la mitad del ángulo central subtendido por el mismo arco (ver Fig. 2b).

Podemos decir que el esquema anterior:



constituye una organización local. Organización en el sentido de que sabemos cuáles proposiciones son "primero", y cuáles vienen de "último".

II. Organización global de la geometría. Los elementos de Euclides.

Las consideraciones anteriores sobre el método deductivo y la organización local que produce, constituyen el germen del llamado "método axiomático" desarrollado en Grecia. El método deductivo nos permite organizar localmente un conjunto de teoremas, nos permite saber cuáles dependen de cuáles. ¿Será posible entonces encontrar una sistematización global de la geometría conocida? En otras palabras, ¿podremos encontrar unos enunciados suficientemente simples para deducir a partir de ellos, de una forma ordenada, los resultados conocidos de la geometría?

Seguramente fue ésta la forma (u otra equivalente) en que Euclides se planteó la reorganización lógica del conocimiento geométrico de su tiempo. La mayoría de los teoremas de la geometría euclidiana eran ya conocidos cuando Euclides se planteó la sistematización de este conocimiento.

Los ELEMENTOS de Euclides conforman una obra monumental. Allí Euclides enunció unos pocos postulados y fue capaz de deducir gradualmente, partiendo de estos postulados, 465 teoremas que constituían todo el conocimiento geométrico de su tiempo. Esta obra constituye el primer testimonio de *organización global* de una disciplina matemática.

Euclides comprendió que *no todo puede demostrarse*. Al construir una estructura lógica (*i.e.*: una organización global) una o más proposiciones deben aceptarse sin demostración. Las demás se deducen de éstas. En la geometría, las proposiciones primitivas (axiomas y postulados) fueron sugeridas por la experiencia y la intuición. Eran proposiciones que, partiendo de la observación, parecían ser verdaderas o "más o menos verdaderas". Dada la experiencia desarrollada mediante el método deductivo, podía esperarse que una teoría así elaborada estuviese en sus resultados, bastante ajustada al espacio físico.

A partir de definiciones de circunferencia, triángulo, ángulo, ángulo recto, diámetro, paralelismo y otras[1], Euclides enuncia cinco postulados para la geometría plana:

1) Dados dos puntos P y Q del plano, se puede trazar el segmento de recta que los une.

2) Un segmento de recta puede prolongarse (indefinidamente) de ambos lados.

3) Dados dos puntos C y A, existe una circunferencia de centro C y radio $r = CA$.

4) Todos los ángulos rectos son congruentes.

Hasta aquí, los postulados son bastante obvios. Satisfacen pues, el

$\alpha = (1/2)\gamma$

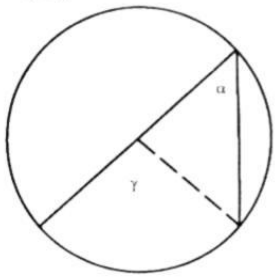


Fig. 2a

$\alpha = (1/2)\beta$

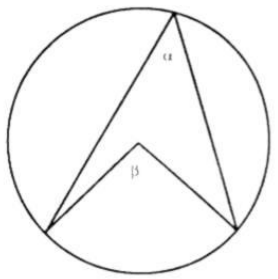


Fig. 2b

[1] Euclides define la condición de paralelismo entre dos rectas así: "Dos líneas son paralelas cuando están en el mismo plano y al ser prolongadas indefinidamente en ambas direcciones no se intersectan", y define ángulo recto así: "Cuando una recta incide sobre otra y forma con ella ángulos iguales, ellos se llaman rectos".

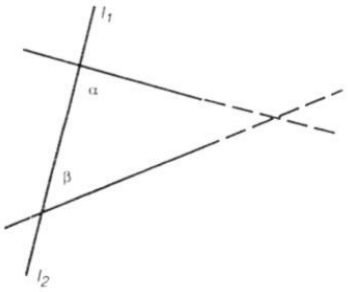


Fig. 3. Quinto postulado

ideal griego de que aquello que se postula debe ser "evidente por si mismo". Sin embargo, en el 5o. postulado esto cambia de repente. Veamos:

> 5o. POSTULADO
>
> Si cuando una recta transversal intersecta a dos rectas dadas, los ángulos interiores de un mismo lado suman menos de 180° entonces, al prolongarse las dos rectas, ellas se intersectan del lado de estos ángulos.

Esperábamos un postulado que nos dijera *explícitamente* algo sobre el comportamiento de las paralelas. Pero no. ¿Por qué enunció Euclides como 5o. postulado una proposición tan larga, que tiene hipótesis y una conclusión, y que no resulta tan evidente como las anteriores?

Una formulación (lógicamente) equivalente es la siguiente:

> 5o. POSTULADO
>
> Dada una recta l y un punto P que no esté sobre la recta l, existe *una única* recta m que pasa por P y que es paralela a l.

Esta nueva versión parece "obvia", porque estamos acostumbrados a pensar en términos euclideanos. Sin embargo, haciendo énfasis en que los postulados son abstracciones de nuestra experiencia, esto nos permite apreciar las diferencias entre el 5o. postulado y los anteriores. Los dos primeros son abstracciones de nuestra experiencia de trazar líneas rectas: es claro que dos puntos determinan una recta; es claro que todo segmento puede prolongarse. El tercer postulado es una abstracción de nuestra experiencia trazando circunferencias con un compás... El 5o. postulado es distinto en cuanto no podemos verificar experimentalmente si dos rectas se intersectan puesto que *sólo podemos trazar segmentos de rectas.* De allí que nuestro único recurso sea verificar el paralelismo *indirectamente.*

He aquí la razón que, en nuestra interpretación, llevó a Euclides a enunciar el 5o. postulado de una manera tan "complicada". Sin embargo, esto no fue comprendido así por sus contemporáneos quienes consideraban que más que postulado, el 5o. parecía un teorema y desde entonces, se propusieron demostrarlo a partir de los cuatro primeros postulados y por supuesto haciendo uso donde fuese necesario de todos aquellos teoremas demostrados a partir de estos primeros cuatro postulados.

Cuando examinamos el libro I de Elementos de Geometría, que trata de la geometría plana, podemos observar que de manera natural se divide en tres partes:

i) Las primeras 26 proposiciones tratan casi exclusivamente de la geometría del triángulo.
ii) Desde la proposición 27 hasta la 34 (inclusive) trata de la teoría

de las paralelas.
iii) La última parte, de la 35 a la 48, estudia las relaciones entre áreas de triángulos, cuadrados y paralelogramos. Finaliza con el teorema de Pitágoras y su recíproco.

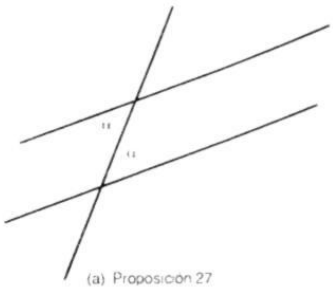
Debemos observar que Euclides no empleó el quinto postulado en la demostración de las proposiciones de la primera parte. Estas 26 proposiciones son válidas independientemente de si aceptamos o no el quinto postulado: no tiene nada que ver con él. ¿Por qué es importante esta observación? Llama la atención el hecho de que Euclides se demoró en usar el quinto postulado. Muchas de las primeras 26 proposiciones pueden demostrarse de forma más sencilla usándolo. Euclides trató de ir lo más lejos posible sin emplearlo, pues él tampoco parecía satisfecho con la naturaleza de "postulado" de tal proposición. Inclusive las primeras dos proposiciones de su teoría de las paralelas las demuestra sin emplear el 5o. postulado:

27: Si al intersectar una transversal dos rectas dadas forma con ellas ángulos alternos internos iguales, entonces las dos rectas son paralelas.

28: Si al cortar una transversal dos rectas dadas el ángulo exterior que la transversal forma con una de las rectas es igual al ángulo interior opuesto (del mismo lado de la transversal), entonces las dos rectas serán paralelas (ver Fig. 4)

Esta demora (interpretada como reticencia) por parte de Euclides para emplear el quinto postulado desde un comienzo hizo sospechar a los geómetras que se trataba de una proposición "disfrazada" de postulado. Más aún, tal sospecha tomaba cuerpo porque, técnicamente, el postulado de las paralelas es el recíproco de la proposición 17, demostraba sin ayuda del quinto postulado, que dice:

> Dado un triángulo cualquiera, la suma de dos cualesquiera de sus ángulos es menor que 180°.



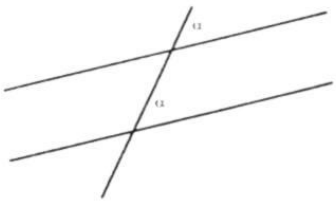
(a) Proposición 27

¿Cómo era posible que el recíproco de una proposición fuese un postulado? De manera que desde sus comienzos el postulado de las paralelas sugirió a los geómetras que debían intentar demostrarlo. La historia de estos intentos es larga: 23 siglos. De allí surgió la geometría no euclideana.

III. Proposiciones equivalentes al quinto postulado. Demostración de Legendre

La versión del quinto postulado que se utiliza con mayor frecuencia, llamada *postulado de Playfair,* dice así:

> Por un punto exterior a una recta puede trazarse una única paralela a dicha recta.



(b) Proposicion 28

Fig. 4

Pero puede demostrarse que esta proposición es equivalente a la siguiente:

La suma de los ángulos de un triángulo es 180°

Esta equivalencia nos dice que es precisamente en la geometría euclideana en donde la suma de ángulos de un triángulo es 180°, y sólo en tal geometría.

Wallis (1616-1703) demostró la equivalencia entre el quinto postulado y la siguiente proposición:

Al comparar dos triángulos entre sí los ángulos de uno de ellos pueden ser iguales a los del otro, y sin embargo los triángulos no ser congruentes (se dice que los triángulos son semejantes).

¡Sólo en la geometría euclidea puede darse! ¡Y no es menos sorprendente a primera vista la equivalencia que demostró Gauss!:

Pueden construirse triángulos de área tan grande como se quiera.

Adrien M. Legendre (1752-1833) fue uno de los muchos geómetras que intentó demostrar el quinto postulado a partir de los postulados restantes y de las primeras 28 proposiciones del libro I de los *Elementos*. Su demostración fue así:

Sabía que el 5o. postulado era equivalente al teorema sobre la suma de los ángulos de un triángulo. Por lo tanto debía demostrar que las dos hipótesis, suma de los ángulos de un triángulo mayor que 180°, o menor que 180° llevaría a una contradicción.

Proposición
La suma de los ángulos de un triángulo no puede ser mayor que 180°.

Prueba
Supongamos que existe un triángulo ΔABC cuyos ángulos suman $180° + \alpha$, $\alpha > 0$. Vamos a llegar a una contradicción.

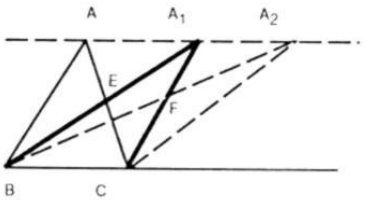


Fig. 5. Demostración de Legendre.

Llamamos B el ángulo menor (Fig. 5). Sea E el punto medio de AC. Trazamos BA_1 tal que $BE = EA_1$, claro está, siendo B, E y A_1 colineales. Por la proposición 4 del libro I, los triángulos ΔA_1EC y ΔABE son congruentes. Esto permite relacionar los ángulos de los triángulos ΔA_1BC y ΔABC, pudiéndose concluir fácilmente que

Suma de los ángulos de ΔABC = suma de los ángulos de ΔA_1BC.

Además, en la figura 4 tenemos que en el triángulo ΔABC, $\angle ABC = \angle A_1BC + \angle ABA_1 = \angle A_1BC + \angle BA_1C$. Si BA_1 fuese bisectriz estos dos ángulos serían iguales. Si son desiguales, uno es mayor que y otro menor que la mitad del todo. O sea, uno de los ángulos agudos del triángulo ΔA_1BC es menor o igual que la mitad de $\angle ABC$.

Ahora repetimos la construcción: tomamos F punto medio de CA_1 y duplicamos el segmento BF hasta A_2. Por las mismas razones, la

suma de los ángulos de ΔA_2BC es $180° + \alpha$. Y uno de los ángulos agudos es menor o igual que $(1/2)^2 \angle ABC$. Al cabo de n pasos, habremos obtenido un triángulo cuyos ángulos suman $180° + \alpha$, y uno de sus ángulos agudos es menor o igual que $(1/2^n)\angle ABC$. Llamemos este ángulo β_n. Tomando n suficientemente grande podemos lograr que

$$\beta_n \leq (1/2^n)\angle ABC$$

Esto implica que la suma de *dos* ángulos del n-ésimo triángulo es estrictamente mayor que 180°. Esto contradice la proposición 17 del libro I: dado un triángulo cualquiera, la suma de dos cualesquiera de sus ángulos es menor que 180°. No puede tenerse, en consecuencia, que la suma de los ángulos de ΔABC sea $180° + \alpha$. Y esto se ha demostrado *independientemente* del postulado de las paralelas.

Proposición
La suma de los ángulos del triángulo ΔABC es $180° - \alpha$, $\alpha > 0$

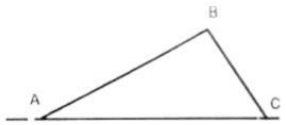
Prueba
Sea $\angle BAC$ (Fig. 6) el ángulo menor. Tomando el lado AC como eje, giramos el triángulo hacia abajo 180°, y obtenemos el triángulo ΔACH (b). Luego giramos 180° todo el triángulo ΔACH alrededor de la línea m como eje. Conseguimos el triángulo ΔCJK (c). Seguidamente, lo deslizamos hacia arriba, a lo largo de la línea BCJ. Tenemos así el triángulo ΔDBC, congruente con ΔBAC (d), con la siguiente correspondencia entre los ángulos:

$$\angle BAC = \angle CDB \; ; \; \angle ABC = \angle BCD \; ; \; \angle ACB = \angle DBC$$

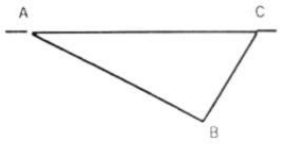
Trazamos por D una recta *cualquiera* EF (Fig. 7), que intersecte las prolongaciones de los lados AC y AB. Ahora, por hipótesis, la suma de los ángulos de ΔABC y ΔBCD es igual a $180° - \alpha$. Por la proposición anterior, podemos asegurar que la suma de los ángulos de ΔDCE y ΔFBD es menor o igual (no puede ser mayor) que 180°. Si sumamos todos los ángulos de estos cuatro triángulos, y restamos de esta suma tres ángulos planos, tenemos que la suma de los ángulos de ΔAEF es menor o igual que $180° - 2\alpha$. Entonces, si existe un triángulo ΔABC cuyos ángulos suman $180° - \alpha$, podremos construir otro triángulo ΔEAF cuyos ángulos sumen menos de $180° - 2\alpha$. Repitiendo la misma construcción, llegaríamos a construir un triángulo partiendo de ΔABC cuyos ángulos sumen menos de $180° - 2n\alpha$. Para n suficientemente grande se puede llegar a tener un triángulo cuyos ángulos sumen... un número negativo. ¡Absurdo!

No existe entonces un triángulo ΔABC cuyos ángulos sumen menos de 180°. La única posibilidad será entonces que siempre la suma de los ángulos de un triángulo sea igual a 180°.›

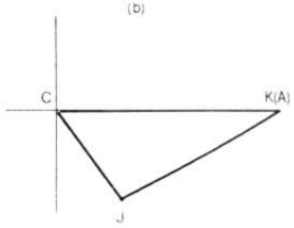
Si la prueba anterior fuera correcta entonces Legendre habría demostrado que la suma de los ángulos de cualquier triángulo es 180°, lo que es equivalente al postulado de las paralelas. Luego, este 5o. postulado sería una consecuencia de los postulados restantes de Euclides. Pero ... *la prueba contiene un error*. El error consiste en dar por válido que siempre desde el punto D podemos trazar una recta que corte a las prolongaciones de AC y AB. *Esto es válido si y sólo*



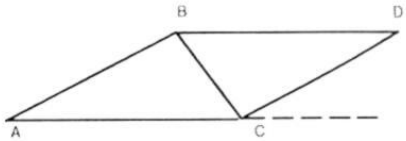
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 6

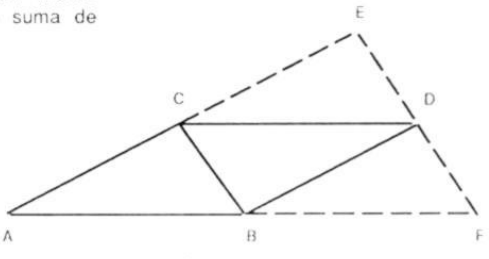


Fig. 7

si es válido el 5o. postulado . Por lo tanto, hay una "petición de principio": Legendre emplea algo equivalente a lo que desea probar durante la demostración.

IV. Lobachevski

Bolyai (1802-1860) y Lobachevski (1793-1856) construyeron una geometría en la cual no se verifica el postulado de las paralelas. Su trabajo fue desarrollado bajo la convicción de que la nueva geometría era lógicamente consistente, aunque *la demostración* de que el postulado de las paralelas es independiente de los restantes postulados debió esperar hasta Hilbert (1903). Sobre esta convicción dice Lobachevski en su obra *Nuevos elementos de geometría* (1835):

> "Es bien conocido que hasta la fecha la teoría de las paralelas ha permanecido incompleta. Los esfuerzos infructuosos realizados desde tiempos de Euclides, y a lo largo de un período de más de dos mil años, me han llevado a la convicción de que los conceptos involucrados en esta investigación no contienen la verdad de lo que se desea probar ... Convencido de la justeza de mi conjetura ... escribí mis argumentos en 1826 ..."

Es claro que Lobachevski está pensando en que el quinto postulado no puede deducirse de las proposiciones de lo que ha dado en llamarse *geometría neutra* , o sea, los cuatro primeros postulados y las 28 primeras proposiciones.

Como punto de partida, Lobachevski tomó la geometría neutra y una proposición contradictoria con el quinto postulado:

> Dada una recta l en un plano, y un punto exterior B a dicha recta, pueden trazarse al menos dos rectas paralelas a l que pasan por B.

La teoría geométrica que se desarrolla a partir de estos postulados fue concebida como una *geometría posible* . Veamos algunos de sus resultados:

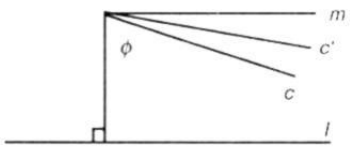


Fig. 8

Si se acepta la existencia de por lo menos otra paralela, por ejemplo c (Fig.8), una recta como c' no puede cortar la línea l . Si lo hiciera formaría un triángulo, y necesariamente c, que queda interior a este triángulo, cortaría también a l . Luego, todas las rectas situadas entre c y m son también paralelas a l . Pero si se va reduciendo el ángulo ϕ , se termina en algún momento construyendo una recta que si corta a l . El ángulo ϕ_0 por debajo del cual toda recta que pasa por B corta a l , y por encima del cual ninguna lo corta, se llama *ángulo de paralelismo.*

ϕ depende de la longitud AB (medida en el plano de Lobachevski), así: si AB aumenta, ϕ disminuye. Si AB disminuye, ϕ aumenta. Más aun: a medida que AB tiende a infinito, ϕ tiende a cero (¡piénsese en esto!).

Cuadrilátero de Saccheri

Un cuadrilátero $ABCD$ en el cual $A = B = 90°$ y $AD = BA$ se llama

cuadrilátero de Saccheri (Fig. 9). Claro, en la geometría euclidiana esta figura es un rectángulo usual. Pero en la geometría de Lobachevski las cosas no ocurren así. No se cumple que $D = C = 90°$, pues *esto equivale al postulado de las paralelas.* Se puede demostrar que en la geometría de Lobachevski $C = D = 90°$. Además en esta geometría a lo más tres ángulos de un cuadrilátero cualquiera son rectos y el otro es menor de 90°. De aquí puede demostrarse que la suma de los ángulos de un triángulo es menor que 180°. Y a partir de los cuadriláteros de Saccheri se encuentra que

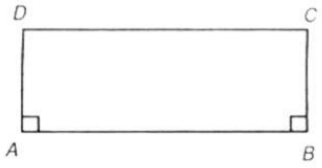


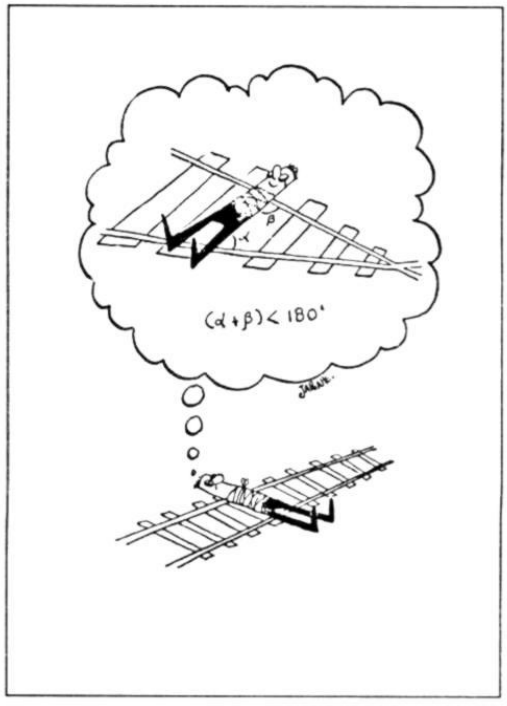
Fig. 9

> Si dos triángulos ΔABC y $\Delta A'B'C'$ tienen sus ángulos respectivamente iguales, entonces son congruentes.

Otros teoremas sorprendentes, aunque algunos ya los podíamos esperar:

- No hay triángulo cuya área sea tan grande como se quiera
- La longitud de una circunferencia no es proporcional a su radio

Es importante recordar, ya para terminar, que lo que intentó hacer Lobachevski fue mostrar la independencia del quinto postulado y la geometría neutra, construyendo una geometría sin contradicciones lógicas en la cual se negara el quinto postulado. Pero él no logró *demostrar* que su geometría posible estaba garantizada contra contradicciones.



ALBERT EINSTEIN

Geometría no euclídea y física*

Bastante antes de que el ropaje de la geometría euclídea fuese demasiado estrecho para la física, se afirmó en los matemáticos la convicción de que, junto a la geometría euclídea, existen otros con igual derecho lógico de existencia. Forzosamente se planteó la cuestión de si la física necesita tener como fundamento la geometría euclídea y no otra.

El estudio de las relaciones entre la Geometría no euclídea y la Física conduce necesariamente al de las relaciones entre la Geometría y la Física, en general. Estas últimas son las que me propongo examinar en esta ocasión, prescindiendo en lo posible de las cuestiones que son objeto de discusión de la Filosofía.

No hay duda alguna que en los tiempos antiguos la Geometría era una ciencia semiempírica, una especie de Física primitiva. Un punto era un cuerpo de cuya extensión se hacía abstracción; una recta se definía como conjunto de puntos que aparecían confundidos al mirarlos en dirección conveniente, o como imagen de un hilo tenso. Se trataba, pues, de conceptos, que -como ocurre siempre con los conceptos- no proceden exclusivamente de la experiencia, ni son consecuencia lógica de ella, pero que se establecen en relación directa con hechos reales. Las propiedades de puntos, rectas, igualdad de segmentos o de ángulos eran al mismo tiempo desde el punto de vista del conocimiento, propiedades de ciertos fenómenos observados en objetos de la Naturaleza.

La Geometría así constituida se transformó en una ciencia matemática al reconocer que la mayor parte de sus propiedades se podían deducir de un corto número de ellas, los llamados axiomas, por una vía puramente lógica; pues toda ciencia que se ocupa exclusivamente con relaciones *lógicas* entre objetos previamente dados, con arreglo a leyes preestablecidas, es Matemática. La deducción de las relaciones adquirió entonces el mayor interés; pues la construcción independiente de un sistema lógico -no influido por la experiencia externa insegura, dependiente del azar-

*Revista Matemática Hispano-Americana

fue siempre un incentivo irresistible para el espíritu humano.

Como no reducibles lógicamente a otros, y testimonios de su origen empírico, quedaron en el sistema de la Geometría sólo los conceptos fundamentales punto, recta, segmento, etc., y los llamados axiomas. El número de estos conceptos fundamentales lógicamente irreducibles y de axiomas fué reducido a un mínimo. El esfuerzo realizado para sacar a la Geometría de la turbia esfera del empirismo, condujo entonces, inadvertidamente, a una trasposición espiritual, análoga, en cierto modo, al proceso de deificación de los más admirados héroes de los tiempos mitológicos. Poco a poco se iban considerando como "evidentes" los conceptos fundamentales y axiomas de la Geometría, esto es, como objetos y cualidades de representación dadas en el espíritu humano, de tal suerte, que a los conceptos fundamentales de la Geometría corresponden objetos de la intuición interna y que una negación de un axioma geométrico no puede realizarse sin agravio del buen sentido. Y ya en este punto se presenta el problema de la adaptabilidad de aquellos fundamentos a los objetos de la realidad, y aún podemos añadir que tal problema es, precisamente, el mismo que da lugar al concepto kantiano del espacio.

Un segundo motivo para el desarrollo de la Geometría independientemente de sus fundamentos empíricos lo suministró la Física. Según la concepción más depurada de la naturaleza de los cuerpos sólidos y de la luz no existen objetos naturales cuyas propiedades corespondan *exactamente* a los conceptos fundamentales de la Geometría euclídea. El cuerpo sólido no es rígido, y el rayo de luz no representa con justeza la línea recta ni, más generalmente, una figura unidimensional. Conforme a la ciencia moderna, ninguna experiencia corresponde sólo exclusivamente a la Geometría, sino a la Geometría unida a la Mecánica, Optica, etc. Pero como, por otra parte, la Geometría debe preceder a la Física, puesto que las leyes de la última no pueden ser expresadas sin el auxilio de la primera, aparece la Geometría como precediendo lógicamente a toda experiencia y a toda ciencia experimental. Así se llegó a que, no sólo para los matemáticos y filósofos, sino también para los físicos del principio del siglo XIX, los fundamentos de la Geometría euclídea apareciesen como algo absolutamente inconmovible.

Se puede añadir que durante todo el siglo XIX, cuando el físico no dirigía su atención directamente a la teoría del conocimiento, se le presentase la situación todavía más simple, más esquemática, más rígida. Su punto de vista inconsciente correspondía a estas dos tesis: los conceptos y los teoremas fundamentales de la Geometría euclídea son evidentes. Tomando ciertas precauciones realizaron el concepto geométrico de segmento por medio de cuerpos sólidos provistos de señales y el de la línea recta con rayos de luz.

El superar esta situación era un trabajo duro que exigió un siglo próximamente. Es digno de notarse que dicho trabajo tuvo su origen en investigaciones matemáticas puras bastante antes de que el ropaje de la Geometría euclídea fuese demasiado estrecho para la Física. A los problemas del matemático pertenece el de fundar la Geometría sobre un mínimun de axiomas. Entre los axiomas de Euclides, se encontró uno que pareció a los matemáticos de menor evidencia inmediata que los restantes y que se pretendió referir a estos, es decir, demostrarlo por medio de ellos. Era el llamado axioma de las paralelas. Pero al ver que todos los esfuerzos encaminados a lograr tal demostración fracasaban, debió de surgir poco a poco la sospecha de que dicha demostración era imposible, es decir, que este axioma era independiente de los demás. Y, en efecto, se llegó a demostrar esta sospecha, pues se construyó un edificio sin contradicción lógica, el cual se distinguía de la Geometría euclídea tan sólo en haber sustituido por otro el axioma de las paralelas. El haber acogido firmemente estos pensamientos y haberlos desarrollado con plena convicción, será siempre mérito imperecedero de Lobatschewski por un lado y de Bolyay (padre e hijo) por otro.

De esta manera se afirmó en los matemáticos la convicción de que, junto a la Geometría euclídea, existen otras con igual derecho lógico de existencia, y forzosamente habría de plantearse la cuestión de si la Física necesita tener como fundamento precisamente, la Geometría euclídea y no otra. También se presentó el problema en la forma más precisa: ¿ es válida la Geometría euclídea *en* el mundo físico o lo es otra Geometría?

Se ha discutido mucho sobre si esta última pregunta tiene sentido. Para dilucidar la cuestión debe aceptarse con todas sus consecuencias uno de los dos puntos de vista. Puede aceptarse que el [cuerpo] geométrico es prácticamente realizado en principio por medio de los sólidos naturales, aunque con relación a la temperatura, exigencias mecánicas, etc., hayan de tenerse en cuenta ciertas reglas; este es el punto de vista de los físicos prácticos. Entonces, al segmento de la Geometría corresponde un objeto natural, y con ello todos los teoremas de la Geometría adquieren el carácter de enunciados sobre los cuerpos reales. Helmholtz fué el representante más caracterizado de este punto de vista y puede añadirse que sin él la teoría de la relatividad hubiera sido prácticamente imposible.

Pero se puede negar en principio la existencia de objetos que correspondan a los conceptos fundamentales de la Geometría. En este supuesto, la Geometría sola no contiene enunciado sobre objetos reales; a éstos se refiere la Geometría, conjuntamente con la física. Esta concepción, que permite la exposición sistemática de una Física acabada del modo más perfecto fué aceptada especialmente por Poincaré. Desde este punto de vista, el contenido total de la Geometría es convencional: cuál sea la Geometría preferida depende de cómo se pueda presentar una Física [sencilla], concordante en sus aplicaciones con la experiencia.

Adoptaremos el primer punto de vista como el más en armonía con el estado actual de nuestro conocimiento. Desde él la pregunta relativa a la validez o invalidez de la Geometría euclídea, tiene un sentido claro. La Geometría euclidea, y en general la Geometría, mantiene, como antes, el carácter de ciencia matemática, cuando la deducción de sus teoremas a partir de los axiomas queda reducida a pura lógica; pero se convierte en una ciencia física cuando los axiomas contienen afirmaciones sobre objetos naturales, acerca de cuya exactitud tan sólo la experiencia puede decidir. Pero siempre tenemos necesidad de demostrar el hecho, de que la idealización, que existe en la ficción de los cuerpos (medibles) como cuerpos naturales pueda reconocerse un día que es injustificada o por lo menos que sólo está justificada en ciertos fenómenos naturales. La teoría general de la relatividad ya ha demostrado la no justificación de este concepto para un espacio de extensión tal que, en sentido astronómico, no sea pequeño. La teoría de los quanta eléctricos podría demostrar la no justificación del concepto para extensiones del orden de magnitud atómica. Ya Riemann había reconocido la posibilidad de ambas cosas.

El mérito de Riemann con respecto al desarrollo de nuestras ideas sobre las relaciones entre la Geometría y la Física, es doble. Primero creó la Geometría elíptico-esférica, frente a la hiperbólica de Lobatschewski, mostrando así por vez primera la posibilidad de que el espacio geométrico pueda ser de extensión finita en sentido métrico. Esta idea fué comprendida pronto y condujo a la cuestión, muchas veces planteada, de si el espacio físico es infinito.

Pero en segundo lugar tuvo Riemann el atrevido pensamiento de crear una Geometría incomparablemente más general que la de Euclides y que las no euclideas en sentido estricto. Así creó la [Geometría de Riemann], la cual (como las geometrías no euclideas en sentido estricto) sólo es euclidea en lo infinitamente pequeño: dicha Geometría constituye la extensión de la teoría de superficies de Gauss a un continuo de un número cualquiera de dimensiones. Con respecto a esta Geometría más general, las propiedades métricas del espacio y, en consecuencia, las posibilidades de situación de infinitos sólidos infinitamente pequeños en un campo finito no están determinadas por los axiomas de la Geometría exclusivamente. *En lugar de desanimarse por tal conocimiento, y para concluir una* interpretación física de un sistema, Riemann tuvo el atrevido pensamiento siguiente: la manera de comportarse los cuerpos en presencia de realidades físicas, podía ser condicionada por medio de fuerzas. Llegó, así, por medio de una especulación matemática pura al pensamiento de la inseparabilidad de la Geometría y la Física, cuyo pensamiento, setenta años más tarde, adquirió realidad con la teoría general de la relatividad, en virtud de la cual, Geometría y Teoría de la gravitación se funden en una sola unidad.

Después que la Geometría de Riemann ha sido simplificada por Levi-Civita con la introducción del concepto del corrimiento paralelo infinitesimal, aún ha sido más generalizada por Weyl y Eddington, con la esperanza de que con el nuevo sistema más amplio de conceptos pudieran tener cabida en ella las leyes electromagnéticas. Cualquiera que sea el éxito que se logre con estos esfuerzos, siempre podrá decirse con plena razón: las ideas derivadas de la Geometría no euclídea, se han comportado en la Física teórica moderna como eminentemente fructíferas.



G. BUCHDAHL

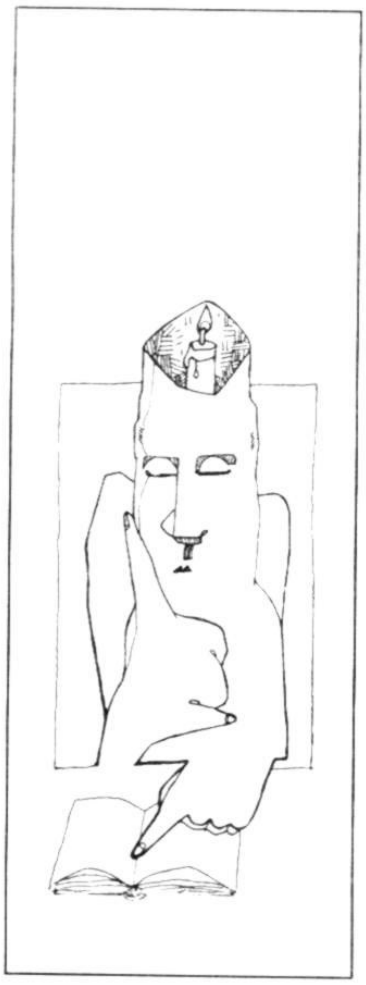
Estilos de pensamiento científico*

Resumiendo lo dicho: la historia de la ciencia, desde el punto de vista de la lectura aquí descrita, no es tanto una historia del avance progresivo en nuestra comprensión y descubrimiento de los 'hechos de la naturaleza', sino la consideración de diferentes maneras de ver las cosas, donde 'las cosas' que se observan son, en grado considerable, el resultado del proceso de 'conversión en real' (realización) que se adelanta en términos de una u otra teoría.

Me han solicitado contribuir a esta conferencia aportando algunas ideas desde el punto de vista de un historiador y filósofo de la ciencia, y de un historiador de filosofía. El título de mi trabajo, *Estilos de pensamiento científico*, intenta destacar la importancia y la utilidad del concepto de 'estilo' en cualquier reflexión sobre la importancia de la dimensión histórica de la ciencia, tanto respecto de su contenido como de su estructura metodológica. Al centrarme en el 'estilo' intento por un lado dirigir la atención hacia ciertas analogías relativas al concepto de estilo en la historia del arte, y por otro resaltar algunas ideas centrales que en años recientes han sobresalido en el área de la historiografía de la ciencia.

Primero, respecto del arte y su historia. La existencia de un 'estilo' enfatiza el hecho de que el arte nunca es simplemente representacional; lo que importa, tanto en la creación como en nuestra apreciación de los trabajos artísticos, es el hecho de que en éstos el mundo se representa, o sea es 'mirado', desde ciertos puntos de vista. Así, en pintura, al contemplar la transición del período pre-Giotto al período post-Giotto, o la transición del impresionismo al abstraccionismo, importan primordialmente las respuestas sensitivas y formales de parte del artista a su mundo -el método por medio del cual él expresa estas respuestas así como sus propias sensibilidades. No interesa tanto el detalle del sujeto que está siendo representado sobre el lienzo, o de la piedra que esculpe, sino más

G. Buchdahl
University of Cambridge
*Tomado de: Using History of Physics in innovatory Physics Education.
Ed: Bevilacqua, Kennedy.



bien el hecho de que a través de esos trabajos el artista expresa su propia visión del mundo, y esto desde su propio punto de vista, en términos de su propio conjunto de valores formales. Claro está, aún hablar de un 'mundo' visto por el artista a 'su' manera, no representa correctamente la cuestión, porque cada una de las diferentes imágenes nos proporciona una cantidad de mundos distintos; *no* hay *un* mundo 'simplemente dado' o 'pre-dado'. Importa es el 'cómo', el 'estilo', no 'lo que describe'.

Ahora bien, hasta hace poco se habría dicho que esta manera de ver la situación artística, aún siendo válida y adecuada, tendría poca relevancia para alguien que intentara caracterizar la situación en la ciencia. Evidentemente, se objetaría, lo que importa en la ciencia es la'descripción'; la comprensión científica es una manera de suministrar el mundo 'tal cual es', tanto 'en la superficie' como respecto de la 'estructura interna' de las cosas. Sin embargo, el consenso general de quienes han reflexionado sobre la situación en la ciencia, por lo menos durante los últimos 30 años, es que esta manera de concebir la creatividad científica posiblemente sea tan engañosa como cuando se concebía que el objetivo del arte era darnos el mundo 'descriptivamente', mediante el pincel del pintor o el cincel del escultor. Nadie, por supuesto, ha tenido una influencia mayor en producir el cambio de actitud hacia la ciencia y su historia, así como a su metodología -por lo menos, en la imaginación popular que Thomas Kuhn, quien, en su influyente libro *La estructura de las revoluciones científicas*, publicado en 1962, describe precisamente la situación como la he caracterizado en la visión del arte: diferentes científicos, a través de sus diferentes 'paradigmas', ven el mundo a su propia manera, desde su propio punto de vista.

Ahora, en parte Kuhn aquí estaba haciendo eco (así lo reconoce él mismo) de las ideas de un autor que ya había adelantado puntos de vista similares sobre la naturaleza de la ciencia 30 años antes: Ludwick Fleck; con la diferencia de que en lugar de hablar de 'paradigmas', Fleck emplea el término 'estilo', como lo atestigua el mismo título de su libro: *Génesis y desarrollo de un hecho científico: Introducción a la teoría del estilo depensamiento y del colectivo de pensamiento* -publicado en 1935, un año después de la *Lógica de la investigación científica* de Popper. No puedo aquí adentrarme en detalles de las consideraciones de Fleck; citaré simplemente un par de pasajes que hablarán por sí mismos, los cuales resumen apropiadamente sus ideas generales sobre la ciencia y su historia:

"En la historia del conocimiento científico no existe relación formal de lógica entre las concepciones y la evidencia. La evidencia se amolda a las concepciones tanto como las concepciones se amoldan a la evidencia. Después de todo, las concepciones no son sistemas lógicos, no importa qué tanto aspiren a ese status. Son unidades de estilo que se desarrollan o se atrofian, así como se funden con sus pruebas en otras. En analogía con las estructuras sociales, cada época tiene sus concepciones dominantes, sus remanentes del pasado y los rudimentos de las futuras. Una de las tareas más importantes de la epistemología comparativa es encontrar cómo las concepciones e ideas vagas pasan de un estilo de pensamiento a otro, cómo emergen a manera de pre-ideas generadas espontáneamente, y cómo se preservan a manera de estructuras rígidas y resistentes debido a cierto tipo de ilusiones de armonía (op. cit., pp.27-28. El subrayado es mío).

La observación y el experimento están sujetos a un mito muy popular. Al sujeto cognoscente se le ve como a un conquistador: ... vine, vi, vencí... En campos más modernos, más extraños y aún es importante primero que todo aprender a observar y a formular preguntas apropiadas, la situación descrita no se consigue -y quizás nunca es así originalmente en ningún campo- hasta tanto la tradición, la educación y la familiaridad no hayan producido una disposición para la percepción y acción convertidas en un estilo (esto es, dirigidas y coartadas); hasta tanto una respuesta no aparezca en buena parte preformada en la pregunta, y una decisión se confíe tan solo a un "sí" o un "no", o de pronto a una determinación numérica; hasta tanto los métodos y los aparatos no lleven a cabo por nosotros automáticamente la mayor parte de nuestro trabajo mental (op.cit., p.84).

Luego: períodos científicos diferentes, con sus estructuras teóricas distintas, incorporan "unidades de estilo" que "dirigen y coartan la percepción". El paralelo con las áreas de conocimiento y acción artísticas y literarias será evidente, y la audiencia aquí presente no debe pasar por alto la utilidad de un enfoque como este en el intento del profesor de física por establecer algunas relaciones significativas entre la materia que enseña y las humanidades. Si se hace una lectura de la historia de la ciencia desde este enfoque, ésta no sería más un catálogo de errores e interpretaciones equivocadas; señala más bien la existencia de muchas visiones paradigmáticas o estilos de pensamiento distintos; una visión de la historia que no necesita negar que algunas de estas 'visiones' pueden producir resultados técnicos más poderosos que otras.

Esta última observación nos trae, sin embargo, otro conjunto de consideraciones. El enfoque en términos de 'paradigmas', o 'estilos', se propone aquí como una forma de mirar la teorización científica. Nos dice que no sólo la comprensión de los hechos depende de la teoría; en cierto sentido, también la existencia de los hechos mismos depende de ésta. La teoría se ve así no sólo como un instrumento para la sistematización y explicación de unos, hechos, que se consideran como ya dados, sino que en mayor o menor grado la teoría se ha convertido en un artefacto 'constructivo' que, por así decirlo produce en primer lugar una 'realización'* de los 'hechos'. Este último punto no es nuevo: es un lugar común en la filosofía de la ciencia de los últimos 50 años que las llamadas 'entidades teóricas', o 'términos' de una ciencia son una función de una u otra teoría particular. Lo nuevo es la generalización de Quine, según la cual no sólo los 'términos teóricos' sino todos los constituyentes que conforman el 'nivel observacional' de una teoría son así mismo una función de este proceso constructivo de 'realización teórica'. Es simplemente una consecuencia de la doctrina de Quine-Duhem acerca de la interpretación semántica esencial de los niveles teórico y observacional de cualquier ciencia. No necesito extenderme más sobre este punto.

Resumiendo lo dicho: la historia de la ciencia, desde el punto de vista de la lectura aquí descrita, no es tanto una historia del avance progresivo en nuestra comprensión y descubrimiento de los 'hechos de la naturaleza', sino la consideración de diferentes maneras de ver las cosas, donde 'las cosas' que se observan son, en grado considerable, el resultado del proceso de 'realización' que se adelanta en términos de una u otra teoría.

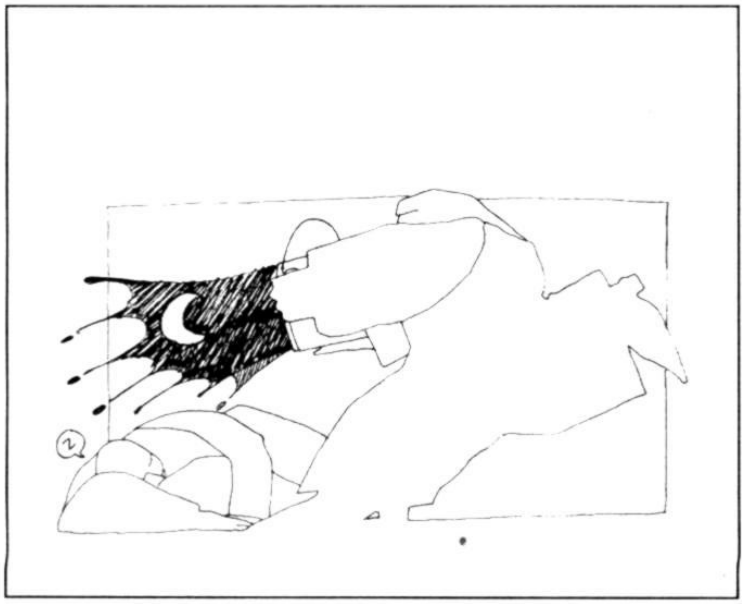


*Realización en el sentido de 'convertir en real' (realization)

Sin embargo -moviéndonos ahora a la etapa siguiente- a su vez las teorías están controladas por alguna metodología correspondiente; y nos interesa a nosotros aquí como historiadores que el tópico de la metodología tiene a su vez una historia, un hecho que a su turno nos brinda evidencia, no tanto de un avance progresivo hacia un método óptimo de teorización de la naturaleza, como de la existencia de diferentes maneras de construir lo que es acercarse a la naturaleza de las cosas; donde la expresión, 'acercarse a la naturaleza de las cosas' debe también interpretarse a la manera constructiva-realizacional, antes descrita.

Voy a explicar: la metodología tiene una historia. Esta historia es primordialmente una crónica de diferentes enfoques acerca de aquellos elementos considerados esenciales para cualquier construcción adecuada de las teorías científicas. Un estudio de la historia en esta materia revela tres tendencias generales, o tipos de énfasis, por no decir estilos, en términos de los cuales han sido formulados enfoques metodológicos. Vale la pena precisar estas tres formulaciones, en parte porque el tema quedó algo vago en los escritos que ya cité, me refiero a los de Fleck y Kuhn, y en parte porque mayor precisión en nuestra manera de pensar acerca de la metodología nos ayudará en seguida a extraer más adecuadamente las implicaciones filosóficas de todo el ejercicio.

De los tres tipos de énfasis en las consideraciones sobre la naturaleza del pensamiento científico uno puede denominarse, de un modo general, baconiano. Este enfatiza la evidencia experimental y observacional, la formación de hipótesis y su procesamiento mediante varios 'métodos', los que a su vez han sido formulados de diferentes maneras durante la historia del tema: inducción, hipotético-deductivo; más recientemente, confirmación, falsación y corroboración, estadística bayesiana, etc., etc.. Claramente, este tipo de metodología es una expresión de la tradición empirista, asociada y contemporánea con el surgimiento de la ciencia moderna a partir del siglo XVII.



Sin embargo, hay también un segundo modo de pensar enclavado en los orígenes de la ciencia moderna, aunque va bastante más atrás en la historia del pensamiento: está asociado a la tradición racionalista en la filosofía y en la ciencia. Los trabajos de Descartes sobre los fundamentos de la dinámica conforman uno de sus ejemplos más importantes. En éstos se intenta desarrollar las leyes básicas de las ciencias mayormente sobre consideraciones conceptuales, en lugar de basarse en la observación empírica. Otros ejemplos de esta tendencia pueden hallarse en algunos períodos del siglo XIX; por ejemplo, aquél asociado con el origen de los principios de conservación. Así, Robert Mayer, uno de los 'descubridores' (como se les dice) del principio de conservación de la energía lo fundamenta en la ley de la causalidad en la forma 'la causa es igual al efecto'; y E. Meyerson, en las influyentes consideraciones filosóficas sobre la historia de la física moderna contenidas en su libro *Identidad y realidad*, ha rastreado concienzudamente el desarrollo de una cantidad de principios físicos modernos, llegando a encontrar ciertos patrones de argumentación puramente conceptuales. Similarmente, el célebre libro clásico de E. A. Burtt, *Fundamentos metafísicos de las ciencias físicas modernas* suministra un rico cuadro de evidencias que muestran cómo el desarrollo de la ciencia moderna debe mucho a consideraciones puramente conceptuales y metafísicas.

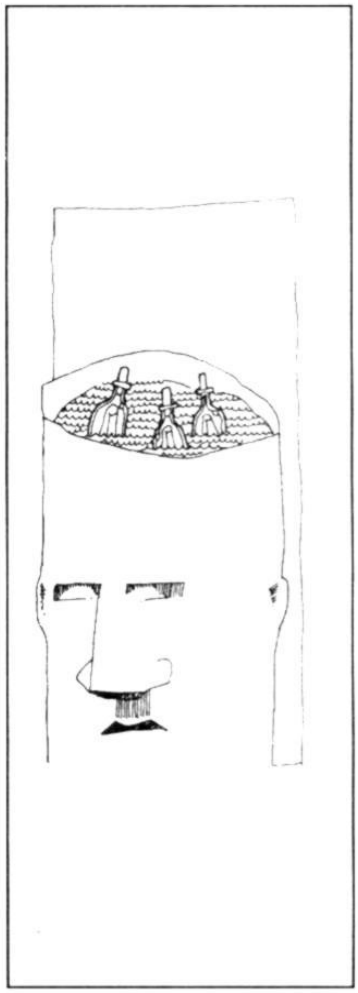
Un tercer hilo conductor en el desarrollo de las ideas modernas sobre el método tiene su origen en las nociónes de armonía y coherencia racional, que forman un elemento esencial en el desarrollo del concepto de lo que es una teoría científica, mirada como un *sistema* de hipótesis que despliegan su coherencia lógica *entre sí* y con sistemas teóricos cercanos. Este tema central

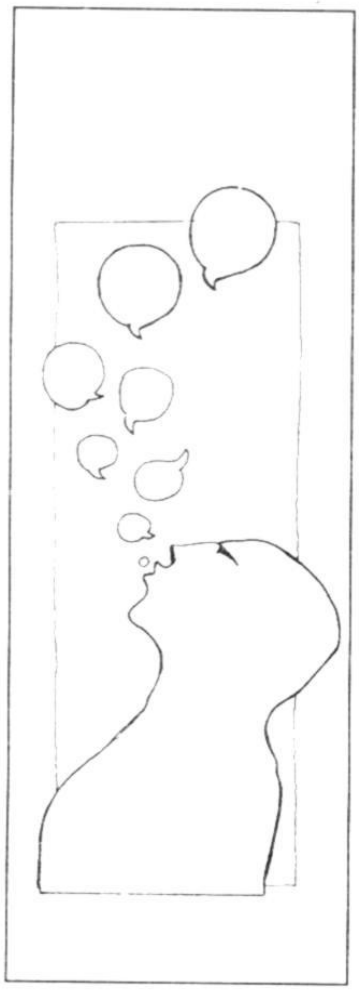
de armonía sistemática tiene también raíces profundas en la historia del pensamiento que llegan hasta los griegos, si bien emerge más explícitamente en muchos escritos filosóficos de los siglos XVII y XVIII. Así, tanto Leibniz como Berkeley fundamentan la idea de un sistema, de un diseño estructural, sobre el pensamiento del Creador mismo; una versión teológica de la idea metafísica según la cual la naturaleza constituye realmente un todo armónico. Esta es una idea que ha inspirado a muchos pensadores físicos posteriores; me basta con mencionar a Einstein, cuya motivación básica estaba en lo esencial, enraizada en la visión de que diferentes cabos sueltos en áreas aparentemente muy desligadas debían reconciliarse entre sí formando una unidad armónica.

Pero la noción de sistematicidad está, insuficientemente caracterizada cuando se la mira tan sólo como una expresión de la exigencia de coherencia lógica. Un aspecto adicional, y quizás más importante es cómo el proceso de sistematización opera casi universalmente bajo la guía de ciertas máximas o principios dominantes que (sin sorpresa) resultan ser expresiones del estilo particular de pensamiento científico en cuestión. La idea de 'simetría' formó un componente importante en el pensamiento de Einstein; la idea de exigir la reducción de una multitud de efectos a un agente idéntico subyacente está aún más profundamente enraizada -pensemos tan sólo en la hipótesis atómica de los griegos y de los siglos XVII y posteriores; o, de nuevo, la idea ya mencionada de energía y la noción de conservación que la acompaña. Otras ideas 'reguladoras' como éstas son de carácter más formal, tales como las máximas de simplicidad y economía que han jugado un papel tan importante en el desarrollo de las teorías físicas.

Y esto no es todo. Ciertos tipos preferidos de explicación, como podemos llamarlos tiñen profundamente el desarrollo de las teorías físicas. Hace ya muchos años, K. Lewin escribió un influyente artículo intitulado *El conflicto entre los modos de pensamiento aristotélico y galileano en la psicología contemporánea* -un conflicto que se extiende, claro está, más allá de los confines de dicha ciencia (por cierto, en años recientes este tipo de conflicto se ha podido percibir también en el desarrollo de enfoques diferentes de la teoría social). La diferencia entre explicar en términos de clases y sustancias, por un lado, y en términos de leyes de interacción, por el otro, es un ejemplo de lo que se quiere decir aquí. Otro ejemplo es la distinción entre enfoques teleológicos y mecánicos en la física, o en las ciencias biológicas. Encontramos un tercer ejemplo en los diferentes tipos de enfoque que formaron buena parte del campo de batalla de la física y la química del siglo XIX, enfrentamiento, que se prolongó hasta el siglo actual: pienso en el enfoque 'macro' en contraposición a uno 'micro' con respecto a fenómenos físicos diferencia a la que también se alude en términos de tipo de teoría fenomenológica en contraposición a atomística (o superficie vs. estructura profunda) ilustrada por las famosas batallas entre la escuela de los energetistas (Ostwald, Mach) y los adherentes a Boltzmann.

El llamar la atención hacia estas diferencias (casi ideológicas) en los estilos básicos de pensamiento físico, ligados como lo están a metodologías que cada quien prefiere, puede ayudar a sacar a los estudiantes de la creencia errónea según la cual su tema de estudio consiste simplemente en un recital de hechos y teorías; en su lugar para él puede quedar claro que están involucradas suposiciones 'metafísicas' profundamente arraigadas que determinan la dirección de la investigación.





Hasta este punto he dado la impresión de que la historia de la ciencia muestra tres hilos conductores separados y bien diferenciados que se expresan además por medio de tres acercamientos metodológicos diferentes hacia el tema, de estudio; tres 'estilos' globales de metodología: la empirista, la racionalista y la 'sistemáticista'. Sin embargo, sería un error suponer que la ciencia en cualesquiera de sus etapas de crecimiento ha mantenido estos tres hilos totalmente aislados entre sí; se trata más bien de una cuestión de énfasis, orientada por una cantidad de causas diferentes, tanto accidentes de tipo técnico como preconceptos intelectuales de carácter más profundo. Mientras para el baconiano el centro de gravedad de la justificación de sus hipótesis está puesto en su fundamento inductivo, no olvida del todo la importancia de la coherencia sistemática. Así mismo, mientras Descartes puede intentar situar las bases de su dinámica sobre la acción conservativa de Dios, también es enfático en afirmar que sus principios son consistentes con la experiencia; cuando a este respecto fallen, se debe a la existencia de condiciones materiales en juego que interfieren con la descripción idealizada dada en los principios. Y similarmente para el caso en el cual la búsqueda de sistematicidad determina la dirección de la indagación.

Parece entonces más apropiado articular una metodología bien estructurada en términos de un enfoque que considere los tres hilos conductores que hemos distinguido hasta ahora a la manera de componentes cuasivectoriales interactuantes. Si deseamos describir a manera de resumen los tres criterios que resultan de nuestros distintos hilos conductores diríamos que las condiciones que cualquier hipótesis debe satisfacer de acuerdo con ellos, son: ¿tiene la hipótesis una evidencia experimental adecuada? Segundo, ¿es racionalmente coherente? Y finalmente, ¿tiene sentido?

Explico brevemente a través de un ejemplo célebre: cuando Newton formuló su teoría de la Gravitación hubiera podido reclamar en su apoyo excelente evidencia experimental, así como gran poder de síntesis. Por otra parte, él mismo tuvo serias dudas respecto de si la acción a distancia (implícita en su teoría) tenía sentido, si expresaba algún tipo de 'posibilidad real' -de hecho él negaba esto por completo. Mientras que en el continente esto motivó el rechazo inicial de su teoría la presión de parte de la abrumadora evidencia y del poder de síntesis motivó subsecuentes intentos de proporcionar alternativas conceptuales a la noción de materia que mostrarían la posibilidad real de la *actio-in-distans*, que armonizara con los componentes inductivos y sistematizadores de la teoría de Newton; uno de los más famosos esfuerzos en este sentido fue el de Kant en sus *Fundamentos metafísicos de la ciencia natural*.

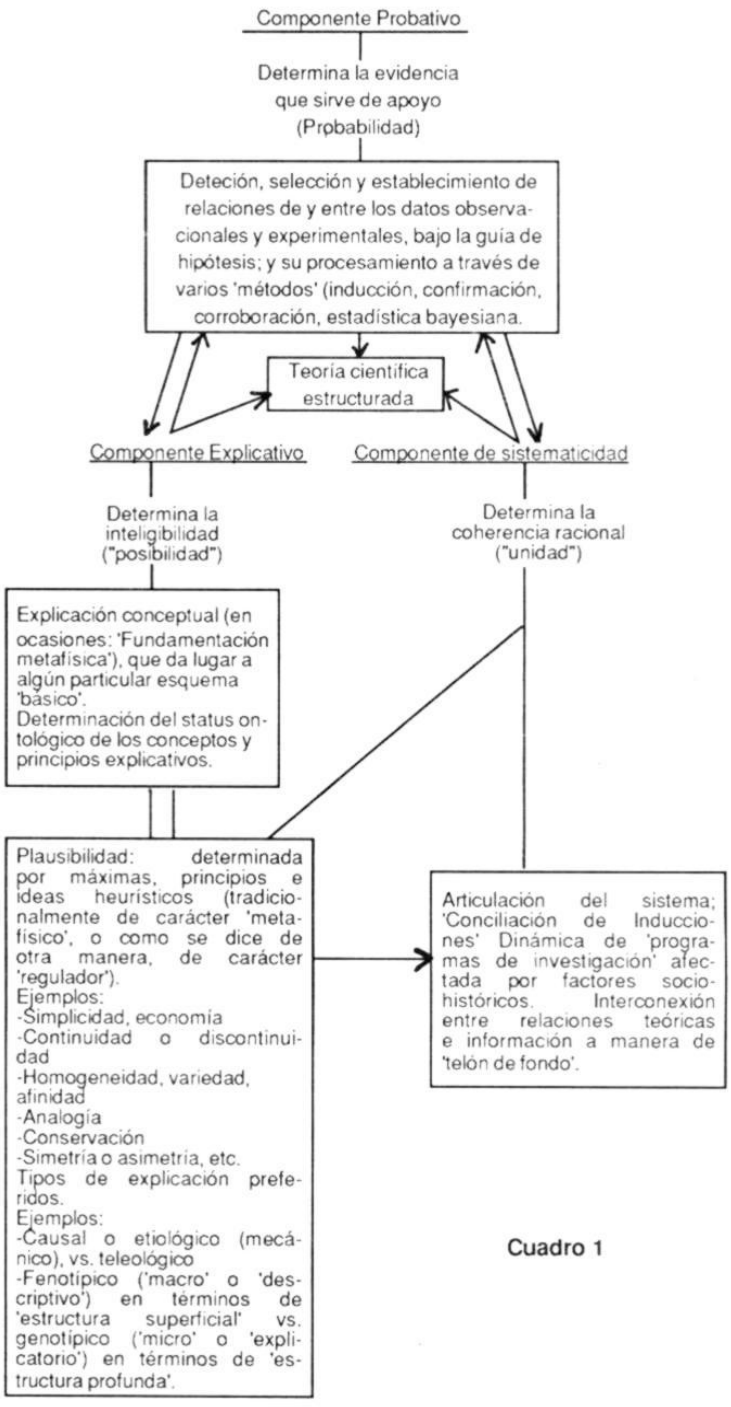
El cuadro 1 señala el esquema triádico que hemos explicado, visto como un conjunto de componentes interactuantes; las flechas señalan el grado de interacción entre ellas. El primer enfoque que conscientemente postulaba el requisito de satisfacer no sólo una sino todas las tres componentes parece deberse a Kant mismo, en alguno de sus escritos sobre metodología de la ciencia, argumentando que además de poseer evidencia inductiva, se debe mostrar que algunas hipótesis sugeridas satisfacen también el requisito de coherencia sistemática tanto como el de 'tener sentido' o sea, el requisito de ser 'realmente posible'. Algo más tarde se puede encontrar un esquema metodológico similar en los escritos del historiador y filósofo de la ciencia William Whewell, quien sostenía que el crecimiento científico involucraba la coligación de

hechos bajo la guía de ideas teóricas las cuales a su vez sólo surgen luego de un extenso período de explicación conceptual, culminando en una etapa posterior en lo que llama un período de 'simplificación de teorías' y 'conciliación de inducciones', equivalente a un proceso de integración sistemática.

Es interesante cómo en la representación de Whewell se supone que el esquema metodológico surge a partir de un escrutinio del desarrollo efectivo de la ciencia. Sin embargo, hay poca duda de que su mismo enfoque histórico está influenciado, por el esquema metodológico que aunque vagamente se anticipa , y ese esquema sirve como principio de selección para componer la historia. Al igual que en el proceso de elaboración de las teorías científicas, la escritura de la historia evoluciona junto con algún esquema metodológico correspondiente, en una empresa intelectual en la cual historia y esquema metodológico se influyen mutuamente.

Notablemente, después de Whewell el enfoque triádico recibió poca atención explícita en los escritos de los filósofos de la ciencia -hasta tiempos recientes- quizás debido a la prevalencia de la ideología básicamente empirista que dominó la segunda mitad del siglo XIX y la primera mitad del XX. Mientras que historiadores de las ideas científicas como Meyerson y Burtt (ya mencionado) y, después de ellos de pronto Alexandre Koyré, enfatizan el aspecto racionalista del desarrollo científico durante el siglo XVII (correspondiente a nuestro componente explicativo); el énfasis dominante se centró principalmente sobre los detalles involucrados en el componente probativo, tanto en los escritos de corte primordialmente lógico-positivista, como en aquéllos -Popper- que enfatizan sobre la comprobación o falsación de hipótesis. Unicamente en años recientes, con el adve-

COMPONENTES METODOLOGICOS DE LAS TEORIAS CIENTIFICAS



Cuadro 1



nimiento de las ideas metodológicas más sofisticadas de Kuhn y posteriormente de Lakatos y Laudan, se hizo sentir la necesidad de mayor precisión, en particular la necesidad de una articulación más compleja de las ideas metodológicas que tuviese en cuenta estos últimos desarrollos. Esta nueva situación, condujo a su vez a revitalizar y comprender mejor los aspectos más antiguos de la ciencia y su historia, por fuera del empirismo. Un factor adicional ha sido una conciencia creciente acerca de la importancia de la estructura conceptual, que hallamos presupuesto en la mayoría de las formulaciones teóricas científicas, así como la comprensión de que los principios que incorporan estos esquemas rara vez tienen el status de hipótesis de simple comprobación empírica. Como lo ha dicho L. Laudan, descubrimos cómo los problemas que encontramos en la ciencia no son meramente de naturaleza empírica, sino, frecuentemente de tipo conceptual.

Sin embargo, la aplicación más clara de un enfoque triádico, por cierto una que ha ejercido considerable influencia sobre el pensamiento metodológico reciente está en los escritos de Imre Lakatos, al distinguir él entre lo que llama el 'núcleo metafísico' de una teoría, con su 'heurística negativa' (en conjunto equivalente a nuestro componente explicativo), la 'heurística positiva', (que corresponde a nuestra componente probativa) y, finalmente la red entrelazada de hipótesis y teorías, llamada 'programa de investigación científica', (equivalente a nuestra componente de sistematicidad. Traigo estas comparaciones para enfatizar la continuidad histórica que puede establecerse así entre nuestro pasado científico-metodológico y las ideas actuales sobre metodología.

Claramente, el aparato triádico, y las diversas ideologías que han inspirado sus componentes, pueden emplearse para recordarle al estudiante de física que su materia no es un depósito puro de hechos pre-dados en el que se debe tan sólo escarbar por medio de la teorización científica, sino, más bien, que el proceso teórico mismo exhibe una dinámica histórica de creación, cuya inspiración metodológica refleja aquellas preconcepciones filosóficas que a su vez funcionan como presuposiciones o condiciones necesarias para la construcción del tejido mismo del 'hecho' científico. No hay forma más rápida de 'relativizar' la existencia del 'hecho' que insertarlo en la historia, y así llamar la atención acerca de sus conexiones con el esquema global de pensamiento -filosófico y, más generalmente, ideológico.

V. BEREZINSKY

¿Cómo trabaja un físico teórico?

El cordial enfrentamiento entre físicos teóricos y experimentalistas se patentiza en esta nota humorística elaborada por un experimentalista... antes de que un teórico redactara una semejante.

Siempre he pensado -aunque ha sido peligroso expresar estos pensamientos en voz alta- que el teórico no tiene ningún papel que desempeñar dentro de la física. Decir esto delante de los teóricos es peligroso. Ellos están convencidos de que los experimentos sólo son necesarios para verificar los resultados de sus cálculos teóricos. Pero en realidad todo es al revés: las leyes se establecen experimentalmente, y luego las explican los teóricos. Sin embargo, como es bien sabido, ellos pueden explicar cualquier resultado. En una ocasión habíamos completado un experimento importante sobre la determinación de la relación entre dos cantidades físicas *A* y *B*. Corrí al teléfono y llamé a un teórico famoso que estaba ocupado con el mismo problema.

-Hemos terminado. ¡*A* es mayor que *B*!

-Esto es completamente comprensible. Ni siquiera tenía que haber hecho su experimento. *A* es mayor que *B* por las siguientes razones...

-¡Oh, no! ¿Le dije que *A* era mayor que *B* ? ¡Metí la pata, *B* es mayor que *A*!

-Entonces es aún más comprensible. Le diré por qué...

Los experimentadores fracasados usualmente se convierten en teóricos. Desde que eran estudiantes se han dado cuenta de que por el simple hecho de permanecer 5 o 10 minutos cerca de cualquier aparato, aun sin tocarlo, éste ya sólo sirve para llevarlo directamente al basurero. Esto los acompaña durante toda su vida. En una ocasión, después de un seminario, el famoso teórico alemán Sommerfeld dijo a sus oyentes: "Y ahora veamos cómo opera este aparato, construido bajo el principio que hemos desarrollado". Los teóricos entraron en fila detrás de Sommerfeld al laboratorio, se quitaron las gafas y los doctos admiraron el aparato. Sommerfeld, triunfante, encendió el interruptor y el aparato se quemó.

En el trabajo de todos los teóricos hay una punto en común:

El original de este artículo apareció en el libro soviético *Los físicos se siguen riendo*. Editorial MIR, Moscú, 1968. Esta versión en español fue tomada de la revista CONTACTOS número 2, editada por la UAM, México D.F.



todos trabajan de manera distinta. No vaya a pensarse que quiero decir algo positivo acerca de su trabajo, nada podría estar más alejado de mis pensamientos. Los teóricos clásicos trabajaban con métodos anticuados. Empezaban el trabajo en rebaños y luego se dispersaban hacia la soledad por caminos y veredas, y por horas, días y meses contemplaban todo lo que veían. Un gorrión cantaba, ellos miraban el gorrioncito; un pez salpicaba en el río, ellos se acostaban y observaban la trayectoria del pez. Tal método los complacía grandemente porque todos los teóricos son detallistas terribles, pero disimulan cuidadosamente. Llámate teórico, y la inactividad se convierte en una contemplación extrema de objetos. Se puede pensar que esto no es así sino que, por ejemplo, Newton se sentó bajo un árbol, a esperar el momento en que la manzana le cayera para poder descubrir la ley de la gravitación universal. Nada de eso: simplemente estaba evadiendo su trabajo. Yo no estoy diciendo que haya sido poco descubrir la ley gracias a la manzana, pero adjudicarse todo el mérito sí lo fue.

Sin embargo, en nuestros tiempos tal método de trabajo se considera irremediablemente anticuado. Ahora los teóricos prefieren empezar a trabajar de atrás para adelante. Esto empezó por Einstein.

Hacia fines del siglo XIX el físico americano Michelson estableció (nótese) experimentalmente que es imposible alcanzar un rayo de luz. Sin importar qué tan rápido corriera uno tras el rayo, este siempre se escaparía a la velocidad de trescientos mil kilómetros por segundo.

Habiéndose arremangado la camisa, el físico teórico se puso a trabajar: colocó su mecedora bajo el cielo nocturno y fijó su mirada en las brillantes estrellas. A pesar de quedarse mirando largo rato, no fue capaz de dar una explicación razonable del experimento de Michelson. Sin embargo, Einstein empezó por el final: supuso que la luz posee tal propiedad y punto. Los teóricos pensaron un poco, algunos por diez años, otros por veinte o por el tiempo necesario y concluyeron: "¡Brillante!".

Como quiera que haya sucedido, ahora vemos que los hechos experimentales, claros, directos y comprensibles, se encuentran detrás del trabajo teórico. Aún a la mitad de un reporte de trabajo, completamente inundado y oscurecido con argumentos y fórmulas matemáticas, cualquier teórico puede inmeditamente pescar del mar de las matemáticas aquellas conclusiones que esperaba obtener desde el comienzo. Pero resulta aún mejor si es imposible comprobar estas conclusiones experimentalmente.

En general, a los teóricos les gusta examinar efectos que en

principio no son observables. Por ejemplo, Dirac propuso que existe un mar uniforme de electrones con una energía negativa que no puede ser observada. Sin embargo si se extrae un electrón de este mar, aparece un agujero en su lugar, el cual suponemos que es un electrón cargado positivamente; un positrón.

Ideas similares no eran nuevas para Dirac, como lo demuestra una historia que aún circula en Cambridge. Cuando aún era estudiante, Dirac asistió a un congreso de matemáticas donde se les planteó el siguiente problema, entre otros. El texto preciso no está disponible, así que lo relataré.

Tres pescadores llegaron a una isla desierta y lanzaron sus anzuelos. Los peces pronto picaron; los pescadores estaban tan abstraídos pescando que no se percataron de que cayó la noche y de cuánto habían pescado, así que tuvieron que pasar la noche en la isla. Dos de ellos se durmieron en seguida, cada uno acurrucado bajo su lancha; pero el tercero tenía insomnio y decidió irse a su casa. No despertó a sus compañeros. Dividió los pescados en tres partes. Resultó que había un pescado de sobra. Después de pensarlo un momento, lo lanzó al agua, recogió su parte y se marchó.

A medianoche, el segundo pescador se despertó. Como no sabía que el primer pescador se había ido, también dividió los pescados en tres montones y, como podrá anticiparse, sobró un pescado. El pescador, que no se distinguía por su originalidad, lanzó lejos el pescado y se fue con su porción. El tercer pescador se levantó por la mañana. Como aún no se había lavado, sin darse cuenta de que sus compañeros ya no estaban ahí, se apresuró a dividir los pescados. Los repartió en tres partes iguales, lanzó el pescado sobrante al agua, tomó su parte y* eso fue todo.

El problema consistía en determinar el número mínimo de pescados que podían haber tenido los pescadores.

Dirac propuso la siguiente solución: había (-2) pescados. Después de que el primer pescador lanzó un pescado al agua había (2)-1= -3. Entonces se retiró, llevando en su costal (-1) pescados y quedaban (-3)-(-1)= -2 pescados en la isla. El segundo y tercer pescadores simplemente repitieron la acción de su compañero.

Podrían contarse muchas historias acerca de los teóricos y de su trabajo, pero me han dicho que un teórico está escribiendo un ensayo que lleva por título "Cómo trabajan los físicos experimentales". Eso, por supuesto, será presentado de cabeza. Afirma que los teóricos predicen todas las leyes, y que los experimentales simplemente las confirman. Así que me apresuré a concluir, solamente, que no sé cómo firmar. No me atrevo a usar mi verdadero nombre: ¿cómo podría trabajar después? No podría discutir nada con ningún teórico. Por tanto firmaré así: UN EXPERIMENTADOR CON BUENAS INTENCIONES.

MAX BORN

Experimento y teoría en física

No hay autopistas filosóficas en la ciencia señalizadas con letreros epistemológicos... Estamos en una selva y encontramos nuestro camino por ensayo y error, contruyendo la vía detrás de nosotros a medida que avanzamos.

Es natural que el ser humano considere útil e importante el trabajo de sus manos o de su cerebro. Así, nadie formulará cargos contra un ardiente experimentalista que se jacte de sus mediciones y mire un poco despectivamente la física de "tinta y papel" de su amigo teórico, el que a su vez se halla muy orgulloso de sus encumbradas ideas y desprecia los dedos sucios del otro. Sin embargo, en los últimos años este tipo de amigable rivalidad ha cambiado para dar lugar a algo más serio. En Alemania una escuela de experimentalistas extremos, dirigida por Lenard y Stark ha llegado hasta el punto de rechazar la teoría como una invención de los judios y declarar el experimento como el único genuino método científico 'ario'. También existe un movimiento en dirección opuesta que, aunque no de carácter racial, no es menos radical, afirmando que a una mente bien entrenada en matemáticas y epistemología, las leyes de la naturaleza se le manifiestan sin necesidad de apelar al experimento. Dos astrónomos distinguidos, Milne y Eddington, siguen esta filosofía, aunque parece que ella los ha guiado en diferentes direcciones.

No es mi propósito aquí discutir las fascinantes teorías de estos hombres; mas bien, deseo dirigir su atención hacia la filosofía de Eddington que proclama el triunfo de la teoría sobre el experimento. Soy un físico teórico (de origen judío) y se podría esperar que me regocijara con esta filosofía. Pero no es así.

Al contrario, creo que estas ideas constituyen un considerable peligro para el sano desarrollo de la ciencia. Es esta convicción la que me ha inducido a aceptar su sugerencia de abordar este difícil tema. Sin embargo no deseo argumentar con Eddington, en el terreno de principios filosóficos profundos ni competir con él en su insuperable maestría para la dialéctica de la controversia; lo que deseo mos-

Max Born (1882-1970) dictó una conferencia con este título en Inglaterra ante la Durham Philosophical Society y la Pure Science Society, el 21 de Mayo de 1943. Cambridge University Press publicó una versión corregida de la conferencia en 1943, y la Editorial Dover la ha reproducido en varias ocasiones desde 1956. La presente versión en español es una traducción efectuada por algunos miembros del comité editorial a partir de la versión de la Dover.

trarles en una forma simple es la relación mutua entre la teoría y el experimento a lo largo del desarrollo histórico propiamente de la ciencia y ofrecer una opinión equilibrada sobre la situación presente y las futuras posibilidades.

Pero aún este modesto programa no es nada fácil debido al hecho de que un científico activo tiene poco tiempo para emplear en la historia de la ciencia. He leído poco, demasiado poco, en los originales y la mayor parte de mi conocimiento es de segunda mano, tomado de los textos, manuales y enciclopedias. Hay sin embargo dos puntos que me fortalecen. Conozco algunas de las piezas maestras clásicas en física y matemáticas, lo suficiente para tener certeza acerca de la base histórica y personal sobre la que se han desarrollado. Y segundo, soy lo suficientemente viejo para decir que durante mi propia vida he visto el desarrollo de la física moderna, valga decir una parte considerable de la totalidad de la física. Esto me parece que suministra material suficiente para formar una opinión.

Explorando la historia de la ciencia, notamos cierto ciclo, periodos de expansión experimental alternando con periodos de desarrollo teórico. Las teorías tienen la tendencia a ser cada vez más abstractas y generales. Culminan en principios que son inicialmente rechazados por los filósofos pero luego asimilados. Tan pronto como llegan a formar parte de un sistema filosófico comienza un proceso de dogmatización y petrificación. Este rasgo es ya notable en las ciencias cuantitativas más antiguas, las matemáticas y la astronomía. No hay duda que el primer conocimiento geométrico descubierto por los sumerios, babilonios y egipcios fue puramente empírico. Los griegos descubrieron la interdependencia lógica de los hechos geométricos y fundaron la primera ciencia deductiva formulada en el trabajo de Euclides. Si usted es un matemático moderno puede quizá mirar la geometría como un producto del pensamiento puro, tomando los axiomas y los postulados como definiciones y el sistema completo como un juego entretenedor. Pero esto ciertamente no es lo que los filósofos griegos quisieron dar a entender con su geometría: ellos creían que estaban tratando con propiedades de cosas reales. El hecho de que las predicciones de sus teorías fueran confirmadas por la experiencia en todas las cosas los llevó a la convicción de que los axiomas de la geometría euclídea eran verdaderos.

El sistema de Euclides ha vivido 2000 años. Ha sobrevivido a la decadencia y caída de la civilización greco-romana y a los demás cataclismos de la historia. Ha pasado por todas las fases de dogmatización más o menos conscientes. Aun después del amanecer de la era científica moderna con su revisión crítica de las opiniones tradicionales no fue puesta en duda la validez de las afirmaciones de Euclides, sino que su posibilidad fue objeto de especulaciones filosóficas. Kant dió por supuesto que tenemos conocimiento directo y exacto acerca de ciertas cosas como espacio, tiempo, causalidad, etc. y explicó esto mediante la hipótesis de que realmente tenemos que ver no con las cosas mismas sino con las formas de nuestra intuición de tales cosas. Es plausible que estas formas de pensamiento nos estén dadas *a priori*, es decir, previas a la experiencia. El principal ejemplo de Kant sobre el conocimiento *a priori* fue el de los teoremas de la geometría, *ipso verbo* queriendo decir el canon de Euclides.

La idea de que podemos producir conocimiento *a priori* tiene sus raíces en el hecho histórico de la persistencia de la geometría griega, sustituida por una teoría más general solamente en nuestros días. La razón real que explica la longevidad de esta geometría es la precisión con que describe el comportamiento de los cuerpos en nuestro recinto terrestre. Las primeras dudas surgieron no del acervo de la evidencia experimental sino de las bases lógicas. Algunos matemáticos hallaron el axioma de las líneas paralelas menos evidentes que los otros y comenzaron a preguntarse si no podrían demostrarlo a partir de estos. Todos los esfuerzos fueron en vano y al final el trabajo se dirigió (primero por Gauss pero sin publicar) independientemente por Bolyai y Lobachevsky a probar la independencia del axioma de las paralelas construyendo una geometría en que no se cumpliera. Estas construcciones de la geometría no euclídea tuvieron éxito. Gauss incluso realizó medidas tratando de encontrar cuál geometría es válida en el mundo real. El y su sucesor Riemann claramente comprendieron el carácter empírico de la geometría. Riemann creó las bases matemáticas sobre las que Einstein, en nuestro tiempo, tuvo éxito en reducir la geometría a una parte de la física con su teoría general de la relatividad.

La historia de la astronomía es paralela a la geometría, con la diferencia de que algunos filósofos griegos tenían ya ideas claras acerca de la forma esférica de la Tierra, la posición central del sol en el sistema planetario y las distancias reales entre sus miembros, ideas que se perdieron o fueron suprimidas en los años del oscurantismo. La iglesia aceptó la filosofía y la ciencia griegas en la forma que les dieron Aristoteles y Ptolomeo. Mirando este fenómeno histórico desde nuestro punto de vista podemos decir que el estancamiento de la ciencia en la edad media se debió a una veneración excesiva de la mente en oposición a los fenómenos materiales, lo cual condujo a una preferencia por las especulaciones teóricas sobre la experimentación.

Por cierto, el comienzo de la ciencia moderna en el renacimiento consistió en una nueva filosofía

que consideró la experimentación sistemática como la fuente principal del conocimiento. F. Bacon fue su profeta, Galileo y Newton sus verdaderos fundadores. La filosofía escolástica fue atacada por Descartes y otros filósofos, quienes usaron principalmente argumentos lógicos y metafísicos; sin embargo las teorías del universo de estos racionalistas no nos convencen pues no están basadas en suficiente evidencia y observación experimental. La diferencia esencial entre nuestro tiempo y la edad media consiste en renunciar a la tradición y establecer la experiencia como la verdadera fuente del conocimiento. El renacimiento significó no solamente el redescubrimiento de la literatura griega sino también el renacimiento del espíritu griego, del escepticismo y al mismo tiempo de la actitud constructiva de la filosofía griega. Se estableció entonces el método del razonamiento inductivo, que lleva de las observaciones particulares a las leyes generales. Este método también puede ser objeto de un análisis filosófico; es claro que presupone no solamente una creencia fundamental en la existencia de las leyes naturales sino también criterios para distinguir las regularidades genuinas de las accidentales y otros principios de este tipo. Pero no puedo tratar acerca de estos problemas abstractos. Sólo deseo afirmar que la revolución que reemplazó el escolasticismo por la ciencia moderna ha destronado el método deductivo de su posición dominante y lo ha colocado en su lugar. Tanto Galileo como Newton tenian absoluta claridad acerca del carácter inductivo de la nueva filosofía; las teorías que formularon gracias a la síntesis de resultados experimentales se utilizaron para sugerir nuevos experimentos y si estas pruebas resultaban favorables la teoría se consideraba confirmada. Ese es el método legítimo de la ciencia, una combinación de la deducción y la inducción, como se describe en innumerables libros de texto. Pero ésta no es la historia completa.

Tanto Galileo como Newton se mostraban ansiosos de evitar especulaciones metafísicas (*hypothesis non fingo*) . Pero poco tiempo después cuando las leyes de la mecánica se conocían completamente, hallamos intentos de derivarlas de principios que por su formulación sugieren algún origen no empírico. El más exitoso de estos principios es el de mínima acción. Una idea teológica, ciertamente, guió a Maupertuis hacia él: la naturaleza actuaba de una forma similar a la de un ser humano con un propósito definido que trataba de realizar con la más pequeña cantidad de acción posible.¿Por qué razón la expresión matemática que dio a esta acción era tan estimada por la naturaleza para que ésta la gastase lo más parsimoniosamente posible es, por supuesto, difícil de explicar. Sabemos hoy que en realidad los movimientos no corresponden a verdaderos mínimos de acción, excepto para pequeños intervalos de tiempo, sino para estados estacionarios y consideramos el principio de la mínima acción sólo como una herramienta muy útil y poderosa para condensar ecuaciones diferenciales complicadas en una expresión pequeña.

El poder de este principio, en la forma que Hamilton le dio, reside en el hecho de que no sólo la mecánica clásica de partículas y cuerpos rígidos, sino así mismo la elasticidad, la hidrodinámica, el electromagnetismo y todas las modernas teorías de campo relacionadas con las partículas elementales (electrones, protones, mesones) pueden formularse con su ayuda. Para dar un ejemplo consideremos el electromagnetismo.

Para este propósito asumamos la existencia de un potencial escalar φ y un potencial vectorial $\mathbf{A}$ e introduzcamos con el fin de abreviar los nombres $\mathbf{E}$ y $\mathbf{H}$ para los vectores

$$\mathbf{E} = -\operatorname{grad}\varphi - (1/c)\,\partial\mathbf{A}/\partial t$$
$$\mathbf{H} = \operatorname{rot}\mathbf{A} \qquad (1)$$

Entonces el principio de acción para la electrodinámica en el espacio vacío está dado por

$$\partial\int\int(\mathbf{E}^2-\mathbf{H}^2)\,dv\,dt = 0 \quad (2)$$

donde dv es el elemento de volumen y la integración se extiende sobre el espacio y el tiempo considerados, mientras que el símbolo ∂ representa una pequeña variación de los potenciales.

Los resultados de esta variación son condiciones en forma de ecuaciones diferenciales, que resultan ser las ecuaciones de Maxwell para el espacio vacío:

$$\operatorname{rot}\mathbf{H} = (1/c)\,\partial\mathbf{E}/\partial t$$
$$\operatorname{rot}\mathbf{E} = (1/c)\,\partial\mathbf{H}/\partial t \quad (3)$$

donde $\mathbf{E}$ y $\mathbf{H}$ se interpretan como los vectores de campo eléctrico y magnético.

El principio variacional tiene algo convincente en la manera como condensa un gran dominio de fenómenos en una expresión pequeña y su bondad se acrecienta si se considera desde el punto de vista de un matemático que conoce el principio de la relatividad y sabe que $\mathbf{E}$ y $\mathbf{H}$ conjuntamente conforman un seisvector que tiene propiedades definidas de transformación para cambios de sistemas de referencia, es decir, que transforma obedeciendo las transformaciones de Lorentz de espacio y tiempo. Porque existen sólo dos invariantes,

$$\mathbf{E}^2 - \mathbf{H}^2 \text{ y } (\mathbf{E}.\mathbf{H})^2$$

y como la acción electrodinámica debe ser invariante, puede ser función solamente de éstos; añádase el postulado de que las ecuaciones resultantes deben ser lineales, y se tiene que la acción debe ser cuadrática y se llega directamente a la expresión dada atrás.

Esto parece ser razonamiento directo a partir de primeros principios. Con el conocimiento y el cerebro penetrante de nuestro matemático, las ecuaciones de Maxwell

son el resultado de pensamiento puro y la laboriosa faena de los experimentalistas anticuada y superflua.

Debo explicarles necesariamente la falacia de este punto de vista. Reside en el hecho de que ninguna de las nociones utilizadas por los matemáticos, como potencial, vector potencial, campo de vectores, transformaciones de Lorentz, sin hablar del principio de acción en sí mismo, son evidentes o dadas *a priori* . Aún si un matemático extremadamente dotado las hubiese ideado para describir las propiedades de un mundo posible, ni él ni nadie tendría la más mínima idea de cómo aplicarlos al mundo real. El problema de la física es cómo los fenómenos tal como se observan con la ayuda de nuestros sentidos asistidos con instrumentos pueden reducirse a nociones simples,apropiadas para tomar mediciones precisas y para ser empleadas en la formulación de leyes cuantitativas. Hay un largo trecho desde la primera observación de los fenómenos eléctricos simples, como la atracción de pequeñas partículas o la observación de pequeñas chispas, hasta los conceptos de campo eléctrico y potencial; y un camino todavía mayor hasta la interacción de éstos con las fuerzas magnéticas y al sistema de las ecuaciones de Maxwell que los relaciona entre sí.

Cuando yo era un estudiante, hace cuarenta años, la idea de un campo en el vacío nos era muy extraña, asimilable difícilmente. Desde este punto al desarrollo completo de la relatividad con su aparato formal de transformaciones de Lorentz, invariantes, vectores covariantes y tensores hay también una jornada larga y tediosa. La relativización del tiempo nos fue impuesta: el artículo de Einstein fue posterior a los experimentos de Michelson y Morley y aun el mismo Lorentz era renuente a ceder su éter absoluto y estacionario y aceptar la equivalencia de tiempos diferentes admitidos por sus transformaciones.

El orden de los eventos históricos muestra claramente la verdadera posición del principio variacional: se sitúa al final de una larga cadena de razonamiento como una condensación satisfactoria y hermosa de los resultados. Quizá haya contribuido a encontrar esos resultados (aunque lo dudo en este caso del electromagnetismo). Pero tiene poco que ver con la formación de los nuevos conceptos fundamentales característicos de la electrodinámica. La concepción revolucionaria que distingue la electrodinámica de la mecánica clásica es el campo. Se puede ver en el trabajo de Faraday cómo brota de sus observaciones de dieléctricos, de propiedades diamagnéticas y paramagnéticas. Pero necesita la matemática poderosa de Maxwell para ser formulado. Sin embargo, esto no era matemática pura y simple, sino un acto admirable de adivinación. Los hechos conocidos en la época hubieran llevado (para el vacío) no al conjunto completo de ecuaciones (3) sino, en lugar de la primera, a

$$\mathrm{rot}\,\mathbf{H} = 0$$

El paso decisivo de Maxwell consistió en adicionar el término faltante

$$(1/c)\,\partial\mathbf{E}/\partial t$$

sin base empírica apropiada, guiado primero por los modelos mecánicos del éter, luego por razones de belleza y perfección matemáticas, o de cualquier manera que quieran para describir este acto genial. Es este el término que conduce a la predicción de las ondas con velocidad finita *c*, a la teoría electromagnética de la luz, a la radiocomunicación y a toda esa energía de radio moderna.

Por cierto, es este un ejemplo brillante de las posibilidades que existen para el físico teórico: puede localizar deficiencias en la perfección de una teoría y tratar de subsanarlas por medio de lo que podríamos llamar 'conjeturación matemática'. Si tiene éxito, si la teoría modificada produce fenómenos confirmados por nuevos experimentos, podemos llamar a estas predicciones 'sintéticas'. Este tipo de profecía es más raro pero mucho más impresionante - al menos en mi opinión- y generalmente de mucha mayor importancia que el tipo 'analítico' normal de profecía científica basada en la teoría bien establecida. Del último tipo hay tantos ejemplos que es difícil escoger uno característico. Ocurren en la vida cotidiana de un físico o de un ingeniero que diseña un aparato y espera que trabaje 'de acuerdo a su plan'.

Si ustedes entran a un cuarto y ven la cabeza y el cuerpo de un hombre tras un escritorio estarán seguros de que tendrá piernas aunque no las vean y no se sorprenderán si confirman su opinión (claro, pueden estar equivocados si se trata de un tullido). Bien, es exactamente esto lo que sucede en el curso ordinario de la ciencia, con la única diferencia de que las formas, no observadas sino esperadas, son menos obvias que aquéllas del cuerpo humano y deben ser deducidas por medio de algunos cálculos.

Por otra parte lo que yo quiero dar a entender por una predicción sintética se puede ilustrar con el lado oculto de la luna, oculto como las piernas del hombre detrás del escritorio. Supongamos que, en el momento que se descubrió la forma esférica de la parte visible de la luna hubiera una escuela de filósofos que insistiera en que se debe hacer siempre la hipótesis más simple y que un plano es la superficie más simple. Los astrónomos habrían entonces declarado que la luna es un hemisferio con un reverso plano, en perfecto acuerdo con las observaciones disponibles hasta ese momento. Sin embargo bajo la influencia de otras experiencias las ideas acerca de lo que es simple cambian. Cierto día

alguien halló que el borde circular donde el plano y la esfera se encuentran estaba en contra de su idea de simplicidad y que una esfera completa es una superficie más perfecta. No quisiera describirles la prolongada y violenta discusión acerca de la idea filosófica de simplicidad y perfección que sobrevendría, y que llevaría, en tiempos del "Gobierno superficialista", al juicio de nuestro modernista ante la inquisición y a ser quemado en la hoguera. Pero algún tiempo después nuevas observaciones revelan la existencia de pequeñas oscilaciones de la luna que permiten ver pequeñas porciones de la cara oculta y se pone de presente la inexistencia de un borde abrupto, o sea, la continuidad de la superficie. Ahora la nueva teoría se acepta ampliamente y a su autor se le alaba como mártir de la verdad. Y cuando los moderados lunacheviques han sido vencidos por los radicales bolacheviques se ha vuelto peligroso negar que la luna es una bola perfecta -aunque todavía nadie haya visto la parte más central de la cara oculta.*

La adición que efectuó Maxwell del término faltante es justamente como suavizar una rugosidad de una forma, aunque esta forma sea aquí una estructura matemática de tipo más refinado que una esfera.

Permítanme extenderme un poco en esta concepción de forma que he usado. Lo que yo quiero expresar es la misma idea que los sicólogos modernos (Von Ehrenfels, Koehler, Wertheimer y otros) han introducido bajo el término alemán "Gestalt" para descubrir los procesos elementales relacionados con la percepción de las impresiones sensoriales. Como hecho experimental se tiene que impresiones sensoriales simultáneas no son independientes entre sí, como un mosaico, sino que forman una unidad síquica con una forma definida. No se ven manchas coloreadas que luego se componen en un proceso secundario sino se ve el hombre tras el escritorio. Una melodía es un buen ejemplo de una forma: se oye el todo junto con los tonos componentes pero es obviamente más que estos tonos componentes. Una de mis ideas favoritas es que la pregunta "¿cuál es la realidad descrita por las fórmulas de la física teórica?" puede contestarse aplicando la misma concepción con la anotación suplementaria de que las "formas" de las cosas físicas son las invariantes de las ecuaciones. Estas tienen el mismo tipo de realidad -quiero decir: realidad objetiva en el mundo externo como cualquier forma de las cosas que nos son familiares, por ejemplo la del cuerpo humano. Y no veo que la predicción analítica en la ciencia difiera mucho del procedimiento cotidiano sin el cual no podríamos vivir y por el cual esperamos que una forma reconocida por unos cuantos criterios esté completa, con todo el resto de sus características propias. Una predicción sintética, sin embargo, se basa en la hipótesis de que la forma real de cierto fenómeno parcialmente conocido difiere de lo que parece ser. Si el experimento se confirma produce nuevo conocimiento y aunque hipotético, se trata de un método legítimo. Pero su éxito depende en alto grado de la intuición y por ello es bien difícil de aprender.

Creo que esta diferenciación es útil para apreciar el valor de los descubrimientos científicos. Ilustrémoslo con algunos ejemplos.

Uno de los casos más célebres es el descubrimiento que hizo Galle del planeta Neptuno, siguiendo las predicciones teóricas hechas por Adams e independientemente por Leverrier, sobre la base de pequeñas perturbaciones en el movimiento de otros planetas. Fue una hazaña admirable de habilidad matemática, paciencia y confianza en los resultados. Pero sin minimizar esto se puede decir que no amplió el alcance de la teoría: fue una predicción analítica, una aplicación de las formas bien conocidas de la mecánica Newtoniana.

Muy similar es la situación respecto de la celebrada predicción de la refracción cónica por Hamilton que se cita frecuentemente como ejemplo del poder de la teoría. No quiero en lo más mínimo negar este poder. Pero no hay duda de que este descubrimiento se basó en una teoría dada y consistió en desentrañar hábilmente propiedades involucradas en las superficies de onda de Fresnel. Desde el punto de vista de la clasificación sugerida pertenece a la clase de las predicciones analíticas.

Algo bien diferente ocurre con la predicción de Einstein de la deflexión de la luz por el sol derivada de su teoría de la relatividad general. Porque esta teoría es una generalización fundamental de la teoría de Newton. Deseo tomar este ejemplo para mostrarles que si bien Einstein intentó adivinar, disponía de bases sólidas en los hechos físicos para sus conjeturas, de manera que se justifica aquí emplear el término 'síntesis'. El acto de la imaginación científica consiste en adivinar la importancia de un hecho que en este caso era conocido desde los tiempos del propio Newton pero que no suscitó la curiosidad de muchas generaciones de físicos. Este hecho es la proporcionalidad de la masa inercial y la masa gravitacional que fue asumida por Newton y luego confirmada por Bessel, Eotvos y otros con un alto grado de precisión. El problema de explicar esto estaba más allá del alcance de Newton y sus sucesores; pero lo extraño reside en que durante dos siglos no fue considerado por estos sucesores como un problema. La posibilidad de una solución dependió de una larga secuencia de investigación: la sustitución de la idea de una fuerza actuando a distancia por la de un campo exten-

*En la versión en inglés se evidencia una sátira política: la pronunciación de los términos "moon-sheviks y Ballsheviks del original se parece demasiado a Menchevique y Bolchevique para tratarse de un accidente (N. del E.)

diéndose con velocidad finita; el establecimiento de la relatividad lineal y finalmente pero no menos importante las generalizaciones hipotéticas de la geometría euclídea adelantadas por Gauss, Riemann, Ricci, Levi-Civita y otros. Todo esto era necesario, y el enigma de los dos aspectos de la masa enfocó en la mente de Einstein. La nueva teoría es una síntesis gigantesca de una larga cadena de resultados empíricos, no una onda cerebral espontánea. La relatividad general expresa leyes físicas en un lenguaje geométrico y al mismo tiempo reduce la geometría a una parte de la física. Posee una nueva apariencia apriorística en grado similar o mayor que la geometría euclídea. Esto se debe a su perfección matemática, sin la cual no la reconoceríamos como una teoría. Pero si nos sentimos satisfechos como para considerarla acabada estamos equivocados. Pronto resultó que la teoría de la relatividad general no era definitiva. No contribuyó a entender la naturaleza de la materia, la existencia de diferentes partículas elementales y campos; han intentado generalizaciones Einstein mismo, Weyl, Eddington y otros. Pero la posibilidad de una conjetura exitosa parece pequeña. De todo esto no ha surgido nada definido aparte del hecho de que hay mucho campo para teorías posibles más allá del modelo original de Einstein.

Consideremos ahora la otra rama fundamental de la física moderna, la teoría cuántica. La precedió una serie de descubrimientos experimentales -rayos catódicos, rayos X, radioactividad, etc.- muchos de los cuales mostraron luego que sobrepasaban el poder de la mecánica clásica y de la electrodinámica. Pero ninguno de ellos condujo directamente al descubrimiento de la cuantización de la energía; ustedes saben que Planck (en 1900) fue forzado hacia ella -debería decir, decepcionado- por el fracaso de las leyes clásicas en dar cuenta de las propiedades del calor radiante. Descubrió su fórmula de radiación interpolando leyes semiempíricas para longitudes de ondas muy cortas y muy largas y después sugirió tentativamente su interpretación en términos de cuantos finitos de energía. El prolongado período de 25 años previo a la aparición de la mecánica cuántica se caracteriza por la acumulación de más y más evidencia empírica acerca de la realidad de la cuantización y de la completa ineficacia de los conceptos clásicos para habérselas con ella. Puedo mencionar sólo algunos descubrimientos destacados: la explicación de Einstein del efecto fotoeléctrico; su teoría del calor específico de los sólidos; la interpretación que dio Bohr al principio de combinación de Ritz en las líneas espectrales y su verificación experimental por Frank y Hertz seguida de la teoría general de Bohr sobre la estructura atómica y la tabla periódica de los elementos; los efectos Compton y Stern-Gerlach; la solución del embrollo de las bandas espectrales y el descubrimiento en ellas de las reglas cuánticas e innumerables más. Las ideas vagas acerca del quantum se hacían más claras con cada descubrimiento; los retoques ligeros a los principios fundamentales no eran suficientes, una revolución profunda se estaba gestando.

La mecánica cuántica que fue resultado de este proceso tiene aparentemente dos raíces independientes, la mecánica matricial y sus generalizaciones (Heisenberg, Born, Jordan, Dirac) y la mecánica ondulatoria (de Broglie, Schrodinger). Antes de discutir estas ideas desde el punto de vista de la física permítaseme decir algunas palabras acerca de las herramientas matemáticas. Ambos aspectos de la mecánica cuántica están basados en alto grado en el trabajo de Hamilton. Así se reconoce con frecuencia para la mecánica ondulatoria; Hamilton preparó el camino dilucidando la relación entre la óptica geométrica y la teoría ondulatoria y demostrando la estrecha analogía entre el principio de Fermat en óptica y la propia formulación de Hamilton del principio de mínima acción en dinámica. Pero la otra forma de la mecánica cuántica que se caracteriza por el uso de operadores y matrices también puede hacerse remontar hasta una concepción fundamental de Hamilton. Celebramos este año el centenario de la invención por Hamilton, de los cuaterniones, el primer ejemplo de álgebra no conmutativa. Esta descolorida expresión no excita la imaginación como lo hace la frase geométrica no euclideana, que claramente indica la ruptura con una antigua tradición de pensamiento y el amanecer de una época nueva. Pero el trabajo de Hamilton señala un viraje del mismo orden de magnitud. Trató de generalizar la representación de vectores en un plano mediante números complejos $z=x+iy$ a vectores en el espacio. La idea era tener una contraparte analítica de las construcciones geométricas (por ejemplo: la suma geométrica de dos vectores a y b se representa analíticamente $a + b$).

Hamilton halló una generalización natural de los números complejos ordinarios en cuatro términos (cuaterniones) para los que son válidas todas las leyes del álgebra excepto una, la conmutativa de la multiplicación: ab difiere de ba. Este fue el comienzo del álgebra moderna que se puede comparar justamente con la geometría riemaniana en cuanto a su influencia no sólo en las matemáticas sino también en la física. Los cuaterniones en sí mismos no resultaron tan fértiles como esperaron Hamilton y algunos de sus discípulos más entusiastas. Una construcción más general, las matrices de Cayley, han demostrado ser la herramienta versátil para innumerables investigaciones matemáticas y físicas. Aprendí su empleo cuando era un joven estudiante (fueron mis profesores de álgebra Rosanes y Minkowski) y las he aplicado a diferentes problemas de física teórica (por ejemplo la teoría de redes para los cristales). De manera que he tenido la suerte de reconocer la multiplicación simbólica de Heisenberg (que discutiré luego) como un

ejemplo del bien conocido cálculo matricial y de ser el primero, hasta donde yo sé, en escribir la extraña ecuación

$$pq - qp = h/2\pi i$$

(publicada en conjunto con Jordan) en la cual los símbolos del anticonmutador representan cantidades físicas (coordenada q y mometum p). Casi simultáneamente Dirac estableció la mecánica no conmutativa en una forma muy general y satisfactoria. Hoy el cuerpo de la física teórica se basa en estos métodos matemáticos.

Frecuentemente se dice que fue una idea metafísica la que llevó a Heisenberg a la mecánica matricial y esta afirmación la usan los creyentes en el poder de la razón pura como un ejemplo a su favor. Pues bien, si se le preguntara a Heisenberg él rechazaría enfáticamente este punto de vista. Como trabajamos juntos creo conocer el discurrir de su pensamiento. En ese entonces todos estábamos convencidos de que la nueva mecánica debería estar basada en conceptos nuevos con apenas una ligera conexión con las ideas clásicas, como expresa el postulado de correspondencia de Bohr. Heisenberg creía que las cantidades que no tuvieran relación directa con el experimento debían eliminarse. Deseaba sustentar la nueva mecánica sobre la experiencia tan directamente como fuera posible. Que esto sea un principio 'metafísico', bueno, no puedo contradecirlo; sólo deseo decir que este es justamente el principio fundamental de la ciencia moderna como un todo, el que la distingue de los sistemas filosóficos escolásticos y dogmáticos. Pero si se la toma (como muchos lo han hecho) como queriendo decir que se eliminan de la teoría todos los no-observables lleva a sinsentidos. Por ejemplo la función de onda ψ de Schrodinger es uno de tales no observables, pero por supuesto Heisenberg posteriormente la aceptó como un concepto útil. Heisenberg estableció no un principio dogmático sino heurístico. Halló por un acto de intuición científica los conceptos espurios que debían eliminarse. Trataré de describir esto.

Según Bohr los electrones se mueven alrededor de los núcleos atómicos en órbitas similares a las de los planetas alrededor del sol. La mecánica clásica usa el método de Fourier para describir tales movimientos cuasiperiódicos. Cada coordenada se expande como la suma de movimientos armónicos, el primer de los cuales tiene una frecuencia ν_1, la fundamental, y las siguientes frecuencias son múltiplos de ella, $\nu_2 = 2\nu_1$, $\nu_3 = 3\nu_1$,..., los tonos superiores.

Las líneas espectrales de los átomos, sin embargo, no muestran rastro de estos armónicos $\nu_n = n\nu_1$; en vez de esto obedecen una regla descubierta por Ritz. Todas las frecuencias en un espectro pueden expresarse con la ayuda de un conjunto de "términos" T_1, T_2,..., en la forma $\nu_{nm} = T_n - T_m$; ellos forman por tanto un arreglo cuadrático con dos subíndices

$$\begin{bmatrix} 0 & \nu_{12} & \nu_{13} & \cdots \\ \nu_{21} & 0 & \nu_{23} & \cdots \\ \cdots & & & \end{bmatrix}$$

Los espectroscopistas experimentales solían ordenar en estos arreglos sus medidas de grupos de líneas llamados multipletes, y ahora parece extraño que estos arreglos nunca hubieran sugerido a un físico preparado en matemáticas la idea de una matriz. Pero no sucedió en esta forma. El progreso fue mucho más indirecto y basado en mucha más evidencia. Primero Bohr identificó los términos T_n con los valores de la energía para los estados estacionarios aplicando la ley de Planck en la forma $E_n = hT_n$. Luego siguió una larga serie de consideraciones deduciendo fórmulas cuánticas a partir de fórmulas clásicas por medio de cierto tipo de conjeturación matemática guiada por la correspondencia (Bohr, Heisenberg y Kramers, Born). Estas fórmulas bien confirmadas por el experimento, sugirieron a Heisenberg la idea de que estas fórmulas cuánticas se podrían expresar por medio de cierta multiplicación simbólica; la pista para este formalismo es la observación de que de las reglas de Ritz se sigue la ley de combinación aditiva de las frecuencias

$$\nu_{nk} + \nu_{km} = \nu_{nm}$$

de aquí la regla de combinación multiplicativa para las amplitudes

$$e^{i\nu_{nk}t} \cdot e^{i\nu_{km}t} = e^{i\nu_{nm}t}$$

Esto conduce en seguida a la multiplicación de Heisenberg, pronto identificada con el bien conocido cálculo matricial (Born y Jordan). La primera confirmación de la nueva teoría y de sus generalizaciones (números q de Dirac, operadores de Schrodinger) se halló en la identidad de los resultados en casos simples con las fórmulas previamente obtenidas por correspondencia.

Fue entonces esencialmente una línea inductiva de razonamiento la que condujo a la teoría más abstracta conocida en la física, en la cual los observables se representan por cantidades no conmutativas (matrices u operadores) y sus valores numéricos por sus valores propios.

Bien diferente fue el origen de la mecánica ondulatoria. Los experimentos de J. J. Thomson parecían haber establecido en firme el carácter corpuscular de los rayos catódicos, y nadie esperaba que pudieran producir figuras de interferencia. Es por consiguiente correcto considerar como un triunfo de la intuición la asociación que hizo de Broglie de las ondas con los corpúsculos. Pero también aquí

las bases empíricas son bien claras. La relatividad especial había mostrado que:

1. Las tres componentes del momentum p y de la energía ε forman un cuadrivector, es decir, tienen ciertas propiedades definidas de transformación.
2. Las tres componentes de un vector de onda (un vector de longitud $k = 1/\lambda$ donde λ es la longitud de onda) en la dirección normal al frente de onda y la frecuencia ν también se comporta como un cuadrivector.
3. La teoría cuántica de Planck, en ese entonces bien confirmada por los experimentos, afirma que con cada energía ε hay asociada una frecuencia ν tal que $\varepsilon = h\nu$.

Estos hechos sugieren fuertemente que con cualquier partícula hay asociada una onda cuyo vector de onda es paralelo al momentum de la partícula y satisface

$$p = hk$$

Esta es la ley de de Broglie. El estudió las consecuencias para las ondas planas e indicó la interpretación de las condiciones de cuantización de Bohr con la ayuda de ondas estacionarias. Pero, ¿qué predijo? Hasta donde yo sé, nada. Entonces, ¿se descubrieron experimentalmente las figuras de interferencia de los rayos catódicos? No hay verdad en eso tampoco. Los hechos reales fueron estos: orientados por una observación de Einstein mi colega Franck y yo reflexionamos sobre el significado de las ondas de de Broglie. Cierto día recibí una carta de Davisson en América dando cuenta de mediciones sobre la reflexión de electrones por cristales de níquel con la pregunta de si nosotros podríamos hallar sentido a los extraños máximos y mínimos de sus curvas. No puedo recordar en detalle cómo relacionamos esto con de Broglie. Algunas observaciones de Einstein tuvieron algo que ver; también consideraciones acerca del efecto Ramsauer (esto es, el incremento del rango de electrones libres en algunos gases cuando disminuye la velocidad de los mismos). En todo caso, convencimos a Elsasser, discípulo de Franck, a trabajar en el asunto. El halló la explicación correcta y la fórmula de de Broglie se confirmó. La demostración final de la difracción de electrones por cristales se debe a Davisson y G. P. Thomson. Es un hecho histórico notable que el hijo del hombre que estableció la naturaleza corpuscular de los rayos catódicos estuviera destinado a revelar sus rasgos ondulatorios.

Esta es la verdadera historia que no reduce en lo más mínimo el logro de de Broglie. Este es el camino natural del desarrollo científico.

Fue Schrodinger quien hizo ver la verdadera fecundidad de estas ideas. El descubrió su conexión con el trabajo de Hamilton en dinámica y en óptica geométrica y estableció la ecuación de onda general que se cumple no sólo para electrones libres sino también para los electrones ligados a los átomos. A él se debe la representación de las cantidades físicas mediante operadores lineales. Este método tiene la ventaja considerable de transformar las extrañas ecuaciones de la física no conmutativa al análisis ordinario. Si por ejemplo el momentum p se representa por el operador diferencial $(h/2\pi i)d/dq$, la regla de conmutación

$$pq-qp=h/2\pi i$$

se reduce a la afirmación trivial de que para cualquier función $f(q)$ se cumple

$$d/dq\,[qf(q)]- q\,d/dq\,[f(q)]= f(q).$$

Sustituyendo tales operadores diferenciales en la ecuación de la mecánica para la energía se obtiene la ecuación de onda de Schrodinger. Debe recordarse que esta síntesis poderosa de la teoría ondulatoria y la mecánica surgió independientemente de la mecánica matricial; Schrodinger demostró más tarde la equivalencia de los dos métodos junto con numerosas aplicaciones a problemas antiguos y nuevos.

Sin embargo la nueva teoría era muy formal. Nadie sabía qué significaba realmente la función de onda de Schrodinger. Nuevamente la solución a esta cuestión no fue libre invención del pensamiento; fue una imposición de los hechos experimentales. Los experimentos en colisiones atómicas, aprendidos de mi colega experimental James Franck, me sugirieron la interpretación estadística de las ondas de de Broglie. El desarrollo de la mecánica cuántica muestra cómo la acumulación de observaciones y mediciones produce lentamente fórmulas abstractas para su descripción condensada y que la comprensión de su significado viene después. Esta comprensión se consiguió con las consideraciones de Heisenberg sobre la imposibilidad de mediciones precisas y simultáneas de la posición y la velocidad, y de otras parejas de cantidades 'conjugadas' (relaciones de incertidumbre), consideraciones seguidas por un gran número de investigaciones matemáticas abstractas bordeando la epistemología y la filosofía (Jordan, Dirac, Neumann y otros).

La esencia de la interpretación estadística es ésta: el cuadrado de la función de Scrodinger ψ para un conjunto de partículas representa la posibilidad de hallar la partícula en los sitios (o con las velocidades o con las energías) indicados por sus argumentos. Sería muy atractivo extenderse sobre esta materia fascinante, especialmente sobre las relaciones de incertidumbre y sobre la cuestión de la causalidad y el determinismo en la física. Pero esto caería fuera del marco de esta conferencia y debo limitarme a algunas observaciones. De acuerdo con la mecánica clásica la configuración y las velocidades de todas las partes de un sistema cerrado en un momento dado determinan completamente su movimiento futu-

ro. En mecánica cuántica también hay una cantidad determinada por su valor inicial, a saber, la función ψ ; sin embargo no podemos hallar la configuración y las velocidades de las partículas a partir de ψ sino solamente la probabilidad de cierta configuración, o de cierto conjunto de velocidades. Luego, la situación conrespecto al determinismo es fundamentalmente diferente.

Los métodos estadísticos se habían usado ampliamente en la termodinámica antes del desarrollo de la mecánica cuántica. Se miraron como una expresión de nuestra falta de conocimiento, con la idea de fondo de que esta falla podía ser enmendada. En la nueva teoria hay un límite natural para el mejoramiento de nuestra información y la estadística llega a ser una parte integral de la mecánica misma.

La termodinámica estadística se ha convertido en una parte central de la física y es necesario dar un vistazo a su desarrollo.

La termodinámica es el ejemplo clásico del método inductivo. Las dos leyes fundamentales, concernientes a la conservación de la energia y a la existencia y al incremento monótono de la entropia, son expresiones condensadas de experiencia acumulada, a saber, de la imposibilidad de construir un móvil perpetuo y una máquina que pueda tomar calor de una fuente (como el mar) y transformarlo completamente en trabajo mecánico (móvil perpetuo de segundo grado). Whittaker ha llamado una afirmación de este tipo "principio de impotencia" y ha expresado la idea de que unos cuantos de estos son suficientes para deducir el conjunto de la física. La relatividad, por ejemplo, es la consecuencia de nuestra imposibilidad de enviar señales con velocidad ilimitada y la *mecánica cuántica puede reducirse a nuestra imposibilidad de medir* simultáneamente coordenadas y momenta, etc.. Como quiera que sea, quiero enfatizar el punto de que todos estos principios, en particular los termodinámicos, no son dados *a priori* sino que son el resultado de una larga experiencia. El hombre jamás ha reconocido la derrota excepto después de un esfuerzo obstinado. Sin embargo, en este contexto, el caso de Robert Mayer necesita consideración especial. Era un médico y su imaginación científica se dirigió hacia el problema de la equivalencia del calor y el trabajo mecánico por una observación fisiológica: la diferencia de calor de la sangre humana en los trópicos y en nuestros climas moderados. A partir de este extraño punto de partida halló finalmente un método para calcular el equivalente mecánico del calor usando propiedades simples de los gases. Pero cuando sometió su artículo para publicación los editores lo rechazaron debido a que se hallaba ricamente adornado de consideraciones filosóficas y metafísicas. En aquel entonces esto no constituía una recomendación para una teoría física. Por otra parte las medidas dispendiosas de Joule y el razonamiento matemático de Helmhotz fueron aceptados sin dificultad. Fue duro para Mayer y quizá injusto, pues, como reconocieron Joule y Helmhotz más tarde, Mayer presentó evidencia convincente. Tratemos de aprender de este suceso lamentable. Si rechazamos algunos argumentos filosóficos esto no significa que rechacemos cualquier teoria a la cual se refieran. Les ruego recordar esto cuando tenga que criticar algunos autores modernos.

La característica sorprendente de la termodinámica es que unas pocas afirmaciones simples y negativas lleven a consecuencia tan largo alcance como la existencia de la temperatura absoluta y de la entropía y a un gran numero de relaciones numéricas entre cantidades *medibles, como calor especifico, compresibilidad, afinidades químicas*, etc.. Sin embargo, la termodinámica es a pesar de su nombre, sólo una conexión formal entre las propiedades térmicas y las dinámicas. La identidad real del calor y el movimiento fue establecida por la teoria cinética, primero de los gases y luego de sistemas generales. Todos ustedes conocen la idea fundamental: no es necesario ni posible conocer cada detalle del movimiento de los innumerables átomos en un trozo de materia; para predecir fenómenos medibles es suficiente conocer su comportamiento promedio. Así se introduce la estadística en la mecánica. Los principios de la mecánica estadística fueron desarrollados paso a paso, por ensayo y error, desde la primera formulación debida a Maxwell de la ley de distribución de velocidades hasta las generalizaciones más complejas de Boltzmann, Gibbs, Fowler y Darwin. Estos principios involucran naturalmente el concepto de probabilidad y participan en su carácter controvertible. Hasta donde yo veo el único sustento de la doctrina de la probabilidad en la física (aunque esto no sea satisfactorio para una mente devota de lo absoluto) sustento que no es más misterioso que la ciencia en general, es la actitud empírica: las leyes de probabilidad son válidas, lo mismo que cualquier otra ley física, en virtud de la concordancia entre sus consecuencias y el experimento. El desarrollo de la física estadística es una demostración de este punto de vista. Cada estadística depende de la escogencia de casos con iguales probabilidades o de manera más general de la escogencia del peso que se da a cada distribución. Es cierto que las propiedades de invariancia de las ecuaciones de la mecánica clásica restringuen en algún grado esta elección (por el así llamado teorema de Liouville), pero el resultado de que el peso estadístico es proporcional a la extensión en el espacio de fase (espacio de coordenadas y momenta) puede justificarse únicamente *por la concordancia de sus consecuencias con las observaciones.*

Lo mismo se cumple para las modificaciones introducidas por la

teoría cuántica. La descripción de los pesos estadísticos es aún más simple para los sistemas cuantizados: cada estado de energía dada que mediante medios físicos no pueda separarse en varios estados tiene el mismo peso. Esta suposición ha sido puesta a prueba por numerosos ejemplos. Por ejemplo si es aplicada al caso de los osciladores eléctricos emitiendo y absorbiendo radiación se obtiene para esta última la ley de Planck.

Pero justamente este ejemplo puede también considerarse desde un punto de vista distinto y conduce entonces a un resultado nuevo y fundamental. De acuerdo con de Broglie la radiación misma debe obviamente ser equivalente a un gas de cuantos de luz o fotones, al cual puede aplicarse directamente la estadística cuántica (sin emplear osciladores absorbentes o emisores). Si ahora estos fotones se tratan como partículas genuinas, teniendo su propia individualidad, no se obtendría la ley de Planck. Se tiene que asumir en su lugar que dos estados que difieran únicamente por el intercambio de dos fotones son indistnguibles físicamente y estadísticamente tienen que ser contados solamente como un estado. En otras los fotones no tienen individualidad. Bose y Einstein han extendido esta suposición a otros gases y han demostrado que para temperaturas extremadamente bajas y presiones elevadas debe haber desviaciones de las leyes de los gases ordinarios.

Desafortunadamente estas condiciones son difícilmente obtenibles en un experimento, y el interesante resultado acerca de la falta de individualidad de partículas habría permanecido como una especulación teórica si no hubiera sido respaldado por una manera de razonamiento bien diferente.

Esta provino de la espectroscopía. El primer paso fue el descubrimiento del spin del electrón por Goudsmit y Uhlenbeck, que tuvo lugar antes de los días de la mecánica ondulatoria, y fue una interpretación de los hechos empíricos en términos de la mecánica del electrón. Estos hechos consistían en la observación de que muchas líneas espectrales mostraban una estructura fina (dobletes, tripletes, etc.) que no podría explicarse suponiendo que el electrón fuera una partícula sin estructura; podría explicársele asignándole un movimiento de rotación sobre sí mismo al electrón si este spin se trataba por las reglas de la mecánica cuántica ya conocidas (efecto Stern-Gerlach).

El segundo paso estaba bien relacionado con la espectroscopía. La clave para entender los espectros atómicos es el principio de combinación de Ritz que ya hemos discutido: todas las líneas de un espectro pueden obtenerse tomando las diferencias $\nu_{nm} = T_n - T_m$ de un conjunto de términos T_1, T_2,... Pero desde un principio fue evidente que no todas estas diferencias correspondían a líneas observables reales, y debieron formularse las llamadas reglas de selección y exclusión. Cuando Bohr tuvo éxito en interpretar los términos T_n como niveles de energía de las órbitas de los electrones, y consiguió asignar números cuánticos definidos a cada uno de los electrones, resultó que no sólo debían excluirse numerosas transiciones entre los dos estados electrónicos, sino que incluso algunos estados mecánicamente posibles no ocurrían. Pauli formuló este principio de exclusión de una manera extremadamente simple: no existen los estados en los cuales dos electrones tendrían el mismo conjunto de números cuánticos; y más aún, si dos conjuntos de números cuánticos difieren solamente por el intercambio de aquéllos de un electrón con aquéllos de otro electrón, ellos representan uno y sólo un estado del átomo en su conjunto.

Reconocemos aquí también la ausencia de individualidad de las partículas, pero sobre la base de mucha más evidencia directa. Pues no debemos olvidar que el principio de exclusión de Pauli reposa sobre hechos observados como la no existencia del nivel inferior del átomo de helio (ambos electrones con el mismo conjunto más bajo de números cuánticos) y está apoyado por innumerables consecuencias. La más importante de éstas es la explicación que dio Bohr del sistema priódico de los elementos que se apoya esencialmente en la idea de capas llenas de electrones implicada por el principio de Pauli.

Desde el punto de vista de la mecánica ondulatoria la situación puede describirse del siguiente modo: considere una función $\psi(n_1, n_2)$ en la cual n_1, n_2 son los números cuánticos de dos partículas indistinguibles. Como ya lo mencioné, el cuadrado de ψ representa la probabilidad de encontrar las partículas en los estados n_1, n_2, y la ausencia de individualidad se expresa

$$\psi^2(n_1, n_2) = \psi^2(n_2, n_1).$$

Para ψ existen dos posibilidades:

$$\psi(n_1, n_2) = \psi(n_2, n_1)$$
$$\text{ó } \psi(n_1, n_2) = -\psi(n_2, n_1)$$

El segundo caso implica para valores iguales de n_1 y n_2

$$\psi(n, n) = -\psi(n, n) = 0$$

Que es obviamente la expresión del principio de exclusión de Pauli. Resultó que no este caso, sino el primero de ellos (ψ simétrico en sus argumentos) corresponde a la estadística de Bose y Einstein, mientras el otro caso (ψ antisimétrico en sus argumentos) indica un comportamiento bien distinto, las consecuencias estadísticas para este último caso, que se cumple no sólo para electrones sino también para protones (y otras partículas), han sido trabajadas por Fermi y Dirac.

Estas propiedades de simetría de las funciones de onda y del principio de exclusión de Pauli son una

parte esencial de la mecánica cuántica. Espero haberlos convencido de que se deducen de un prolongado proceso inductivo en el cual destellos de imaginación se alternan con observaciones e interpretaciones cuidadosas de los hechos. Fue un período de cooperación ideal entre el experimento y la teoría. No era ni el experimentador ufanándose sobre la pureza empírica de sus resultados, ni el teórico reclamando conocimiento *a priori*, sino colaboración y estímulo mutuos.

Una vez establecidas, la mecánica cuántica y la estadística cuántica por supuesto permitieron realizar incontables predicciones analíticas, muchas de las cuales fueron confirmadas por experimentos.

La estructura electrónica de los átomos y las moléculas pudo someterse a cálculos de manera semejante a como ocurrió con el sistema planetario en el siglo que postcedió a Newton.

Los resultados más importantes son la explicación de los espectros de líneas y de bandas, de la naturaleza del estado metálico y de la valencia química. La cantidad de predicciones o experimentos confirmados fue abrumadora. Heisenberg realizó una de las más admirables predicciones: la existencia de dos tipos de átomos de hidrógeno, parahidrógeno y orto-hidrógeno.

La física teórica parecía definitiva y triunfantemente estar por delante del experimento.

Pero, claro, únicamente por un breve periodo. Nuevamente vino una ola de descubrimientos experimentales muchos de los cuales constituyeron una completa sorpresa y ni siquiera de manera implícita estaban contenidos en la teoría ya aceptada.

Muchos de estos estaban relacionados con la radioactividad, los rayos cósmicos y el núcleo atómico. Quizás el descubrimiento más inesperado fue el del neutrón (Chadwick). Este cambio completamente nuestras ideas acerca de la estructura del núcleo y abrió la vía para el tratamiento por medio de la mecánica cuántica. En general puede decirse que desde alrededor de 1930 el experimento estuvo por delante de la teoría. Pero hay dos notables predicciones teóricas, de nuevas partículas elementales: el positrón y el mesón.

Estos descubrimientos, sin dejar de ser admirables, no son productos de la razón pura sino el resultado final de una prolongada cadena de investigación empírica. El positrón está conectado con la ecuación de onda lineal de Dirac para el electrón con spin. Darles la historia de esta ecuación necesitaría una conferencia completa. Puede ser suficiente decir que el spin del electrón, el cual, como expliqué antes, fue descubierto por inducción típica de hechos espectroscópicos, el carácter de multiplete de ciertas líneas (Uhlenbeck y Goudsmit), fue encajado en la mecánica cuántica al introducir un conjunto de matrices simples representando los dos estados para la dirección del spin (Pauli), y que todo paso en el desarrollo de la teoría del spin fue inspirado y comprobado por evidencia espectroscópica. Dirac le dio la última pulida descubriendo que la generalización relativística natural de la ecuación de onda de Schrodinger, conducía automáticamente al spin. De qué manera la solución de las soluciones de la ecuación de Dirac trajo a la luz estados de energía negativa, y como pudo Dirac reconciliar estos con nuestras ideas tradicionales sobre la energía interpretando los estados no ocupados como positrones es una cuestión muy técnica para mencionarla aquí. Pero debo mencionar que primero creyó que las partículas positivas predichas en su teoría eran protones y esto fue corregido por la experiencia. Los reconoció como electrones positivos cuando fueron realmente descubiertos en los rayos cósmicos (Anderson, Blackett).

En el caso del mesón, trataré de indicar algunas de las ideas que llevaron al físico japonés Yukawa a sugerir la existencia de nuevas partículas con una masa intermedia entre la del electrón y el protón. El punto de despegue era la existencia de fuerzas de muy corto alcance que mantienen juntos en el núcleo a neutrones y protones. Yukawa observó que un potencial de la forma

$$\frac{e^{-(r/a)}}{r}$$

tendría las propiedades requeridas si la constante de longitud a se escogiera del orden de las dimensiones nucleares (10^{-13} cm); este potencial es una generalización del potencial de Coulomb $1/r$ de las fuerzas electrostáticas (carga 1) y satisface no la ecuación de Laplace $\Delta O = 0$ sino la ecuación ligeramente modificada $\Delta O = O/a^2$. Ahora, de la misma manera que la electrostática puede considerarse como un caso especial de la electrodinámica descrita por las ecuaciones de Maxwell, se puede construir un campo dinámico de Yukawa que contenga el campo atrás mencionado como el caso estático. Cada componente del campo satisface, en lugar de la ecuación de onda ordinaria

$$\Delta\Phi - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2\Phi}{\partial t^2} = 0$$

la ecuación modificada de Yukawa

$$\Delta\Phi - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2\Phi}{\partial t^2} = \frac{\Phi}{a^2}$$

Las ecuaciones completas del campo pueden obtenerse de un principio de acción que difiera del que mencionamos atrás para la electrodinámica por un término

$$-\frac{1}{2}a^2(\Phi^2 - A^2)$$

añadido al integrando.

Ahora, estas ecuaciones tienen soluciones que representan ondas planas, tal como ocurre con las ecuaciones de Maxwell, y, de acuerdo con el principio general de de Broglie, debe haber partículas asociadas con estas ondas de la misma manera como los fotones se asocian con ondas de luz. De acuerdo con la teoría de la relatividad la energía ε de una partícula de masa m depende de su momentum p por la fórmula

$$\left(\frac{\varepsilon}{c}\right)^2 = m^2c^2 + p^2 \qquad (5)$$

Si se introducen aquí las relaciones de Planck y de de Broglie $\varepsilon = h\nu$, $p = hk$, se obtiene

$$\left(\frac{\nu}{c}\right)^2 = \left(\frac{mc}{h}\right)^2 + k^2 \qquad (6)$$

De otro lado la ecuación de Yukawa (4) conduce a la misma relación entre ν y k para una onda $O = A\,sen\,2\pi(\nu t - kx)$ siempre y cuando

$$\frac{mc}{h} = \frac{1}{2\pi a} \qquad (7)$$

Esta es una relación entre el alcance a (aproximadamente 10^{-13} cm) de las fuerzas nucleares y de la masa m de las partículas asociadas con el campo vibratorio de Yukawa, y se obtiene

$$m = \frac{h}{2\pi ac} = \frac{6 \cdot 10^{-27}}{2\pi \cdot 10^{-13} \cdot 3 \cdot 10^{10}} =$$

$$= 3 \cdot 10^{-25}\,g \qquad (8)$$

que es alrededor de 100 veces mayor que la masa del electrón (10^{-27}g) pero definitivamente menor que la del protón (1800 veces la masa del electrón). De esa manera Yukawa predijo una nueva partícula, ahora llamada mesón, que se descubrió realmente un poco de tiempo después en la radiación cósmica.

De nuevo esto no aparece como el resultado de principios a priori sino como una síntesis ingeniosa del conocimiento bien establecido con una suposición nueva simple.

Espero que estos ejemplos serán suficientes para mostrarles a ustedes de qué manera se forman y se usan las teorías.

Charles Darwin, mi predecesor en mi cátedra de Edinburgo dijo en alguna ocasión algo como esto: "El hombre ordinario puede ver una cosa que se encuentra una pulgada en frente de su nariz; unos cuantos pueden ver a una distancia de dos pulgadas; si alguien puede ver algo a tres pulgadas, es un genio". He tratado de describirles algunos de los actos de estos hombres de dos o tres pulgadas. La admiración que les profeso no se disminuye al reconocer que la experiencia de todo el género humano los condujo hacia el sitio correcto en el cual ellos husmearon con sus narices. Tampoco me he esforzado en analizar la idea de la belleza o de la perfección o la simplicidad de una ley natural, ideas que a menudo han orientado hacia la conjetura correcta. Estoy convencido de que un análisis de esta naturaleza no llevaría a nada, porque estas ideas están ellas también sujetas a desarrollo. Aprendemos cosas nuevas de cada situación nueva y no estoy inclinado a aceptar teorías acabadas acerca de leyes invariables del intelecto humano.

Pero ahora debo regresar a mi punto de partida y aplicar los resultados obtenidos a los problemas actuales no resueltos de la física, y en particular a la filosofía de Eddington. A pesar de los logros brillantes del último período, la situación de la física teórica es tan problemática como lo ha sido siempre -si exceptuamos ya pasados orgullosos tiempos victorianos, cuando los problemas se creían resueltos. Existen bastantes partículas elementales: fotones, electrones y positrones, neutrones y protones, mesones cargados y no cargados (neutretos) y quizás neutrinos. A cada uno se asocia una función de onda y cada una tiene constantes características (masa, carga) que aparecen en la respectiva ecuación de onda. Pero difícilmente estos campos guardan alguna relación mutua y no tenemos ninguna teoría que explique las relaciones adimensionales de las diferentes constantes (por ejemplo la relación 1845 entre las masas del protón y el electrón). Particularmente misterioso es un número adimensional que debido a haber aparecido primero en espectroscopía (Sommerfeld) lleva el nombre de constante de estructura fina, el cociente $hc/2\pi e^2$ (e la carga del electrón), empíricamente cercana a 137. Tenemos una teoría cuántica del núcleo que ha producido muchos resultados importantes, pero que parece tan provisional como la teoría cuántica de Bohr antes del descubrimiento de la mecánica cuántica. Más seria es la enfermedad de los "infinitos". Los hay de dos tipos, representados por dos casos simples: la energía electrostática de una esfera cargada de radio r es, sin contar factores numéricos, e^2/r; se hace infinita cuando el radio tiende a cero. Luego una carga puntual tiene una energía (o masa, de acuerdo con la ley de Einstein) infinita. Más todavía, la energía de un oscilador cuantizado no es $h\nu n$ (como supuso originalmente Planck), sino $h\nu(n+1/2)$; luego, existe (para $n=0$) una energía $(1/2)h\nu$ y cada sistema que pueda considerarse (de acuerdo con la teoría de Fourier) como la superposición de un número infinito de osciladores armónicos (como el caso de una cavidad llena de radiación) tiene entonces una energía infinita de punto cero. Infinitos similares aparecen en muchas consideraciones relativas a la interación entre las partículas y la radiación y una buena cantidad de ingenio se ha em-

pleado para deshacerse de ellos. Dirac, Price y otros han modificado las definiciones de energía y momentum en la mecánica y en la electrodinámica para eliminar la energía propia infinita. Yo mismo he concluido que este infinito muestra una deficiencia fundamental de las ecuaciones de Maxwell y las he reemplazado por un conjunto generalizado y aunque estas ecuaciones son no lineales y aparentemente intratables, tienen mayor posibilidad de acercarse a la verdad según aparecen en una nueva teoría desarrollada por Schrodinger, una síntesis de gravitación, electrodinámica y teoría del mesón.

El otro tipo de infinitos producido por el número infinito de frecuencias ha sido abordado con mayor o menor éxito (por Dirac, Heitler y Peng, y otros).

Eddington ha estado preocupado por todas estas dificultades tanto como nosotros, y ha hecho interesantes intentos para superarlos. Su idea guía es que una dificultad esencial en una teoría casi siempre puede rastrearse hasta un error epistemológico, a un concepto erróneo o muy estrecho. Con esto estoy de acuerdo. Pero cuando intenta corregir estos errores por medio de construcciones sobre lo que considera evidencia epistemológica, me niego a seguirlo. Tengo dudas sobre la visibilidad frente a su nariz. Por ejemplo, obtiene valores numéricos para dos de los números adimensionales mencionados arriba, y la relación entre las masas del protón y el electrón.

Estas están expresadas en términos de las propiedades de un "espacio de fase" abstracto. La teoría matemática de este espacio de números E es muy hermosa y está presentada de una manera que sugiere la construcción más natural del pensamiento. Pero no puede negarse el hecho de que nadie había aún considerado los números E antes de que Dirac desarrollara la teoría del spin, la cual a su vez es el punto culminante de una larga serie de abstracciones forzadas por el experimento. Y si los números E hubieran existido en matemáticas, como han existido "álgebras" similares no conmutativas, nadie hubiera podido adivinar que podrían usarse en física, ni el significado que podrían tener, antes de que se hubiera extraído de las observaciones, la existencia y las propiedades del spin. Eddington relaciona las constantes físicas adimensionales con el número de dimensiones de sus E-espacios y su teoría conduce a la función

$$f(n) = (1/2)\, n^2 (n^2 + 1)$$

la cual para números enteros consecutivos $n = 2,4,6,\ldots$, toma los valores $10,136,666,\ldots$

Ahora, en la época en la cual Eddington comenzó su trabajo el valor experimental de $hc/2\pi e^2$ era cercano a $36 = f(4)$. Experimentos posteriores indicaron un valor mayor, y hoy por hoy es muy cercano a 137. De acuerdo con esto Eddington, adaptó su teoría añadiéndole una unidad.

La relación entre las masas la obtuvo también en términos de estos enteros, esto es, como la relación de dos raíces de la ecuación cuadrática

$$10x^2 - 136x + 1 = 0$$

que es 1847.9, cercano al valor experimental 1836.5 (y ha sido corregida aún más).

No puedo criticar la deducción de estas expresiones, pues no he conseguido entenderlas. De todas maneras, unas cuantas coincidencias de este tipo, que no son verdaderas predicciones sino expresiones de cantidades conocidas experimentalmente, me parecen tan solo una evidencia débil para una gran teoría. Y difícilmente se encuentran otras predicciones. Ni el neutrón ni el mesón se predicen. Y si bien se calculan el número de partículas del universo, hay poca esperanza de confrontarlo experimentalmente - aunque admito que puede ser un concepto muy útil. Lejos estoy de atracar las teorías de Eddington, o de dudar de sus resultados. Me regocijaría si a la postre resultaran correctas. Pero no atribuiré este (posible) éxito a las teorías filosóficas de Eddington, como una doctrina que podría ser seguida por otros, sino a su genio e intuición personales.

Pasemos finalmente a echar un vistazo a la teoría de Milne que mencioné al comienzo. Reclama él también haber deducido leyes universales de la naturaleza a partir de principios epistemológicos puros. Uno de estos es el "método operacional" de definición. El físico Bridgman dio este nombre a un procedimiento bien común entre los científicos. Consiste en exigir que una cantidad física no se defina mediante la reducción verbal a otros conceptos familiares, sino percibiendo las operaciones necesarias para producirla y medirla. Es una regla sana, una reacción contra el verbalismo y el fetichismo de las palabras. Es muy útil en la física clásica, donde se tiene que ver con cantidades accesibles a las mediciones directas, como en la termodinámica (el mismo Bridgman es un experto en este campo) o en electrodinámica. Por ejemplo es razonable introducir la temperatura describiendo las operaciones termométricas o definir el campo eléctrico refiriéndose a las fuerzas sobre pequeños cuerpos cargados de prueba, pero la definición operacional está bien fuera de lugar si se quiere extender la idea de campo a los núcleos atómicos y a los electrones y la pasa mal en la teoría cuántica. La mecánica ondulatoria tiene un catálogo de "observables". Pero eso no significa que las cantidades correspondientes estén representadas por variables cuyos valores podrían medirse; están representados por operadores diferenciales o integrales cuyos valores propios pueden medirse. No puedo imaginar qué "operación" experimental podría diseñarse para definir un operador

matemático. Más aun, ya he mencionado que hay conceptos en mecánica ondulatoria que no son observables, por ejemplo, la función de onda de Schrodinger; en principio no existen medios para observarla, luego no hay definición "operacional". Sin embargo esto puede no tener importancia para Milne, pues él está principalmente interesado en astronomía. Veamos cómo utiliza el principio operacional.

Todo conocimiento empírico acerca de las estrellas se basa en la luz que nos viene de ellas y en su interpretación con ayuda de instrumentos terrestres: telescopios, espectroscopios, relojes. Milne restringe su consideración fundamental al uso tan solo de relojes. Rechaza admitir como observable la distancia en el espacio interestelar y propone reducir este concepto a afirmaciones acerca del arribo de señales de tiempo. Para este propósito supone la existencia de obsevadores sobre cuerpos celestes que disponen de relojes y señales de tiempo como las que nosotros poseemos. La operación elemental para investigar el espacio consiste en esto: enviamos una señal de luz en un tiempo dado t en nuestro reloj; ésta alcanza a un observador sobre otra estrella y se refleja regresando hasta nosotros, llegando en el tiempo t_2 medido en nuestro reloj con la información sobre el tiempo t del arribo de la señal leída en los relojes de la estrella distante. De estos datos, t_1, t_2, t (repetidos frecuentemente) propone Milne deducir los fundamentos de la geometría, la cinemática y aun la dinámica del universo.

Los relojes y las señales de Milne por supuesto son imitaciones del método bien conocido empleado por Einstein para mostrar que la idea de la simultaneidad absoluta es absurda, y deducir las transformaciones de Lorentz. Pero hay una diferencia fundamental: las señales de luz de Einstein viajan únicamente entre dos estaciones sobre el mismo cuerpo celeste, no desde una estrella a otra. Su modelo es únicamente una abstracción y una simplificación de una observación real, expresada por los resultados negativos de los experimentos de Michelson y Morley. Además, las transformaciones de Lorentz no se encontraron de esta manera (se habrían llamado transformaciones de Einstein); sino que ya se conocían. Fueron deducidas (por Lorentz) estudiando las ecuaciones de Maxwell, y las empleó en su explicación del experimento de Michelson. Como es usual en la física la deducción epistemológica de Einstein vino después del descubrimiento formal, abriendo los ojos de aquéllos que aún permanecían fieles a la idea de un tiempo absoluto.

De otra parte las operaciones de Milne no son idealizaciones de experimentos reales. Para mí, parecen invenciones sobrenaturales: luz terrestre reflejada desde una estrella fija, ¿quién ha visto una cosa de estas? ¿Será posible que en toda la historia futura de la humanidad alguien pueda verla? Y observadores con relojes en otras estrellas, relojes iluminados por la luz proveniente de nosotros que podemos leer cuando regresen - u observadores proporcionándonos gentilmente el tiempo leído en sus relojes cuando nuestra señal arribe; no acierto en reconocer en tales fantasías la idea realista de definición operacional.

Pero esto no es todo. Milne tiene otras suposiciones y principios epistemológicos. Sus observadores no están sobre una estrella arbitraria, sino en galaxias o nebulosas espirales las cuales de acuerdo con la astronomía estelar moderna son universos isla, innumerables y distribuidos uniformemente con bastante regularidad a través del espacio. Cada una de ellas consiste en millones y millones de estrellas, como nuestra propia galaxia. Pero Milne las considera como simples partículas, puntos a los cuales asigna una masa. Luego emplea el principio de uniformidad, es decir, que un observador hallará las mismas leyes de la naturaleza y el mismo aspecto general del universo (con ayuda de sus relojes y señales de tiempo descritas arriba) en cualquier galaxia en la que se sitúe. Esto se llama un principio espistemológico. Pero un " hecho" empírico también se emplea en la formulación de Milne, la existencia de un cero absoluto de tiempo, un momento de creación. Por cierto. detrás de esta suposición extraña está un conjunto de observaciones astronómicas, el corrimiento hacia el rojo de las líneas espectrales de las nebulosas espirales. Se ha observado que este corrimiento al rojo aumenta cuando aumenta la distancia a las nebulosas, y si se interpreta como un efecto Dopler, indica que el sistema completo de galaxias se expande en todas direcciones. Este extraño hecho ha provocado muchas especulaciones, y se ha mostrado (Lemaitre, Robertson y otros) que la teoría de la relatividad general de Einstein permite soluciones de las ecuaciones de campo que representan un universo en expansión como éste. Pero como únicamente es observable la distribución instantánea de velocidades, queda un campo muy variado de hipótesis acerca del pasado y el futuro del universo, si el universo vibra como un todo, o se expande desde un estado inicial de tremenda concentración. Milne elige la última alternativa y la da como un hechu: el mundo fue creado $2x10^9$ años atrás a partir de una acumulación de masas en un espacio pequeño.

La explicación que proporciona Milne del proceso de expansión que se ha dado desde esta época consiste en la observación simple de que las masas inicialmente agrupadas al comienzo de los tiempos tenían diferentes velocidades y estaban en todo momento ordenadas de tal manera que mientras más alta la velocidad de una estrella, más remota debería estar. Ciertamente, este es el resultado de observaciones del corrimiento hacia el rojo de líneas espectrales cuando se

interpreta como efecto Dopler. En alguna ecuación Schrödinger me hizo caer en cuenta que la situación le trae a la mente a una persona mirando una carrera de caballos y preguntándose por qué aquellos caballos que están al frente son aparentemente más veloces, cuando, de pronto, se impresiona al caer en cuenta de la interpretación "cinemática" obvia. Parece que lo mismo le ha ocurrido a Milne en tal grado que él ha tenido que emplear una dosis increíble de ingenio para reconciliar sus suposiciones con el principio de relatividad y deducir a partir de él y de su postulado de uniformidad las leyes de la naturaleza, incluyendo la gravitación y el electromagnetismo.

Un físico ordinario difícilmente puede seguir este alto vuelo de ideas. El espacio interestelar no es vacío y la materia reacciona con la luz (por dispersión, absorción y reemisión). Las señales de luz que viajan tremendas distancias entre las galaxias pueden ser afectadas de manera esencial por esta interacción. No parece sano excluir esta posibilidad desde el comienzo, fundando toda la geometría y la cinemática sobre las señales de luz y esto bien aparte de las otras objeciones que ya se hicieron atrás. De hecho, si se admite el método de Milne para hacer la topografía del espacio con señales de luz y relojes únicamente entre sistemas vecinos relativamente cercanos (donde puede despreciarse la presencia de materia interestelar, se obtiene, como Robertson ha mostrado, un universo de Einstein del tipo ya mencionado (Lemaitre, Robertson). Debe considerarse, además, que la interacción de las ondas de luz con la materia interestelar puede contribuir e incluso producir el corrimiento hacia el rojo.

Finalmente, la edad del universo de Milne parece bien corta comparada con la de nuestro planeta. Conforme a métodos radiactivos confiables, las rocas de la corteza terrestre se formaron por lo menos hace 1.5×10^9 años, es decir, tres cuartos de la duración de todo el universo.

Pero no soy experto en estas cuestiones cosmológicas y no intento poner de relieve algunos puntos débiles de la teoría. Esto sería injusto, porque la audacia de la idea de deducir la estructura del mundo de unos pocos principios y la habilidad para sobreponerse a dificultades formidables no puede más que admirarse. No quiero desestimular a nadie que se sienta con la vocación de embarcarse en una jornada tan plena de aventuras.

Pero creo que no hay autopistas filosóficas en la ciencia señalizadas con letreros epistemológicos. No; estamos en una selva y encontramos nuestro camino por ensayo y error, construyendo la vía detrás de nosotros a medida que avanzamos. No encontramos señales en los cruces, son nuestros scouts quienes las erigen, para ayudar al resto. Las ideas de Eddington y Milne pueden ser señales como éstas. La dificultad estriba en que aquellas apuntan en direcciones opuestas: dos teorías, ambas clamando estar construidas sobre principios a priori, pero bien diferentes y contradictorias entre sí.

Mi conferencia habrá conseguido su propósito si ustedes no encuentran en esta contradicción nada de lo cual sorprenderse; es exactamente lo que los científicos empíricos esperarían. Mi consejo a aquéllos que deseen aprender el arte de la profecía científica es no apoyarse sobre la razón abstracta, sino descifrar el lenguaje secreto de la naturaleza a partir de los documentos de la naturaleza: los hechos de la experiencia.

JULIAN BETANCOURT M.

De cara al pasado

Las palabras pronunciadas por el Profesor Julián Betancourt, de la Universidad Nacional de Colombia, quien compartió el Premio de Ciencias de la Fundación "Alejandro Angel Escobar" por su trabajo sobre elaboración de cerámicas superconductoras, no pueden ser más pertinentes en momentos en que desde los centros académicos colombianos, se está demandando una decidida voluntad que incorpore a la ciencia como una de las actividades culturales de nuestra sociedad para que los jóvenes de hoy, quienes se estremecen con la música que se escuchaba hace veinte años, consoliden el proyecto humano que estamos en mora de construir en nuestro país.

¿Han revisado últimamente el baul de los recuerdos? Pertenezco a una generación para la cual buena parte de ese baul se da en blanco y negro. Hace poco vi una fotografía. Era una fotografía de medio cuerpo, el cual estaba un poco girado hacia la izquierda. La tez: blanca. La nariz: ligeramente parabólica. Las cejas algo enmarcadas. Los cabellos oscuros, presentaban suaves ondulaciones y eran largos, pero no extremadamente largos.

Miraba esta foto cuando por artes que desconozco, una poderosa mano transforma la nariz. Unas veces la alarga, otras la achata, la baja un poco o la sube otro tanto.

No era solamente la nariz la que cambiaba. El cabello casi siempre crecía y algunas veces llegaba a estar exageradamente largo. La mano, los hacia lisos para inmediatamente ensortijarlos. Los teñía, cambiando el color desde el negro azabache hasta el rubio casi albino.

La boca, el mentón, los pómulos, la frente y los ojos, cambiaban de forma prodigiosa. Ante aquel espectáculo mis labios dibujaban una ligera sonrisa y a veces eran propensos a la risa.

Les confieso que no soy dado a revisar mis recuerdos en blanco y negro, que ahora deben estar matizados con un sepia cada vez más fuerte. La fotografía que desencadenó lo arriba narrado era la del

Julián Betancourt M.
Departamento de Física
Universidad Nacional de Colombia
Bogotá

Señor Presidente, elegido en los últimos comicios. Francamente no me ejercitaba en las artes de la caricatura, ni era una retaliación vana y futil por un supuesto descalabro electoral.

No... bien mirada la cuestión era la foto del Señor Presidente y no era. Era la imagen de mi generación. La generación de los años sesenta, la generación de los cabellos largos y las faldas cortas.

Los rostros no fueron las única imágenes que llegaron a mi mente. Llegó "Spidy González" y por supuesto, como un pequeño ciclón. Y la negra, la negra Celina con su Pollera Colorá y su batir de tambores. Con la Plaga nos llegaron algunos virus y con ellos, el sarampión revolucionario: Marx, Mao, Marcuse las famosas tres M de la época.

Y como dijera Mao: una sola chispa incendiará la pradera. Elvis, Jonny Halliday, Antoine, Bob Dylan, los Beatles, los Rolling Stones, los Monkies y sus émulos criollos los Speakers, nos pusieron en frenético movimiento: Twist and show, Satisfation, let it be, la Bamba, Lupe y muchas otras quedaron en nuestra memoria. Y por supuesto el Jefe, continúa siendo el Jefe.

Ese universo musical lleno de sones, guarachas, porros, cumbias, boleros y rocks, nos unia por encima de las ideologías. También nos unia el ser jóvenes: éramos románticos y generosos. Creiamos en la posibilidad de cambiar el mundo. La década de los sesenta fué la década de las utopías.

Utopias diversas, cocinadas en diferentes fuentes, a veces contradictorias, siempre etéreas, constituyeron un tejido que contribuyó a darle un sabor especial a ser joven en los años sesenta.

Veintiún años después de esa década, para mí memorable, uno se pregunta ¿qué quedó de ella? Nuestros cabellos se han acortado enormemente y en algunos casos han desaparecido casi en su totalidad. No precisamente a causa de la moda sino por la tenacidad de una calvicie irreversible.

Los cabellos largos y las faldas cortas se deben buscar no en nosotros ya cuarentones, sino en los veintiañeros del presente. Después de los años sesenta las modas no sorprenden, ni mucho menos son irreverentes como lo fueron en aquella época. Con los años sesenta se supera un provincialismo parroquial, por lo menos en sus signos más externos: la moda.

Aquella época constituyó para cientos de colombianos el encuentro con la política. Izquierda y derecha. El problema del poder, el Estado, las clases sociales, el devenir de la nación, la injusticia social fueron temas que en una u otra forma nos tocaron. Muchos hicieron de la política su forma de vida y algunos con enorme éxito.

¿Será una mera casualidad que entre el pasado Presidente y el actual, haya más de veinticinco años de diferencia?

¿La irreverencia hacia las generaciones mayores que tuvo su máxima intensidad en los sesenta, habrá jugado un papel en este proceso? ¿Habrá sido internalizada por nosotros y evolucionado de una forma meramente contestataria a formas mucho más lúcidas y eficaces? ¿En definitiva, cúal será la influencia de aquellos años

sobre la nación colombiana? Lo anterior no es evidente, como nada es evidente acerca de nuestro pasado mediato. La cuestión es para pensarla.

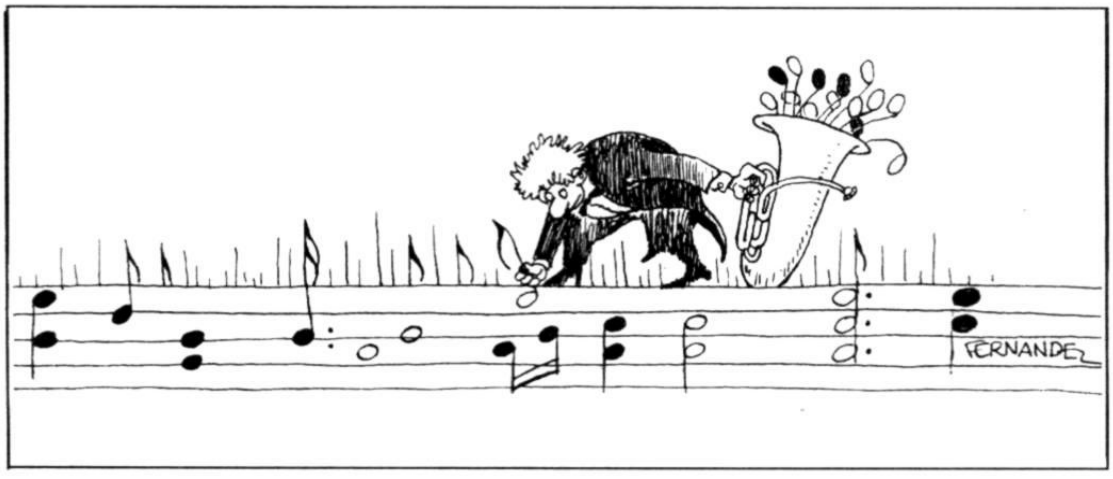
En aquellos años se gesta un proceso de profesionalización del trabajo universitario basado en disciplinas científicas. Bajo la reforma Patiño, se integra y departamentaliza la Universidad Nacional. Se crea la Facultad de Ciencias que sustenta siete carreras científicas. Sin embargo no fue la primera facultad o división académica que tuvo que ver directamente con las ciencias naturales en nuestra Universidad. Una mirada superficial sobre el desarrollo de estas unidades, muestra de manera palpable las angustias de las ciencias naturales en nuestro país. Así como la indiferencia casi total de la nación al desarrollo de las llamadas ciencias físicas en la primera mitad de este siglo.

No fué nuestra generación la que gestó el proceso arriba mencionado, pero si la que, en gran medida, le ha tocado soportarlo. Ha sido un esfuerzo enorme de la Universidad Nacional y de la incipiente comunidad científica afincada en ella. No es gratuito que los dos premios de ciencias dados por la Fundación Alejandro Angel Escobar hallan correspondido a sendos trabajos presentados por investigadores de nuestra Universidad.

El desarrollo científico en nuestro país, ha sido un desarrollo silvestre, en otras palabras, ha carecido siempre de una voluntad política nacional. A pesar del reciente Año Nacional de la Ciencia y la Tecnología, de la Ley en Ciencias y Tecnología, a pesar de todo ello, que hacen pensar que algo está cambiando, se ha producido recientemente un hecho que ilustra de manera dramática la carencia de una vocación política nacional sobre ciencia y tecnología. Me refiero a la convocatoria y al temario de la ASAMBLEA CONSTITUCIONAL. La Universidad y en general la Educación no aparecen por ninguna parte en este proceso. El espíritu de la ciencia y la investigación es exótico y desconocido para las personas encargadas del proceso de la ASAMBLEA CONSTITUCIONAL. Cuando se habla de poner a tono con los tiempos modernos a la CONSTITUCION, se niega precisamente uno de los elementos de la modernidad: la CIENCIA.

La sociedad está en mora de reconocer que la inversión en ciencia y tecnología es fundamental si se quieren encontrar alternativas de desarrollo, incluso en ella se puede jugar la soberanía nacional. No creo que sea mera retórica decir en los actuales momentos que la ciencia es otra forma de hacer política.

Tenemos un pasado esquivo en ciencia. Mutis, la Expedición Botánica, Caldas, la Expedición Corográfica, Triana y muchos otros son hitos en la historia científica del país pero al mismo tiempo muestran un proceso angustioso. Avatares que se encuentran de manera dramática en el desarrollo del Museo de Ciencias fundado por Santander, allá en los años veintes del siglo pasado. No existen prácticamente museos de la ciencia en Colombia. Ellos son una expresión de la lucha de una sociedad por la ciencia. Avatares de la ciencia y de una comunidad científica extremadamente frágil y siempre en formación es lo que nos muestra la historia reciente y pasada de la ciencia en Colombia.



El fortalecimiento de la frágil comunidad científica nacional va más allá de la mejora radical de las condiciones en que se desarrolla su quehacer. Toca problemas de fondo de la cultura del país. Es necesario sintetizar nuestras tradiciones con las corrientes modernas, representadas en gran medida en la ciencia y así lograr una identidad cultural a tono con la modernidad. Para llegar a esto creo que es necesario caminar hacia el futuro de cara al pasado.

No sólo de pan vive el hombre. Recordando los años sesenta uno se pregunta si en las difíciles condiciones del país, sea necesario construir un universo de utopías. No se si esto pueda hacerse, ni si la palabra correcta sea utopía, cuando el sueño es posible, realizable. Me refiero a aquellos logros, vivencias, procesos y objetivos que lo hacen sentir a uno orgulloso de ser colombiano. Sea lo que fuere, se debe buscar para Colombia el respeto en el ámbito internacional por sus Derechos Humanos, su Democracia, su Ciencia, su Tecnología, su Arte, en fin por su Cultura. Si ello fuere así: ¡HABRA FUTURO!

AGRADECIMIENTOS

Debemos agradecer a la Fundación Alejandro Angel Escobar por el Premio en Ciencias que nos ha otorgado, el cual es un reconocimiento a la investigación en ciencias básicas, alimento espiritual de la tecnología.

Aprovecho esta ocasión para felicitar a Doña María Restrepo de Angel y a la Junta Directiva de la Fundación por sus 35 años de actividades fructíferas, que tienen el reconocimiento de todo el país.

Debemos agradecer a la Universidad Nacional de Colombia y a su Facultad de Ciencias, por el invaluable aporte a la formación de la comunidad científica de la nación.

Al Departamento de Física que congrega a la comunidad de físicos más importante del país, comunidad que ha socializado todo un saber en 30 años, proceso que ha permitido realizar este trabajo- y otros muchos, infortunadamente poco publicitados.

Al Departamento de Química de la Universidad Industrial de Santander por el aporte dado con los rayos X.

A INGEOMINAS por el apoyo prestado por los análisis realizados con la microsonda de la Institución.

A COLCIENCIAS por el soporte financiero.

Al Centro Internacional de Física por el apoyo recibido.

A Doña Aminta Mendoza por la realización de las gráficas.

A Uds, por haberme escuchado.

Julián Betancourt M.



C. I. F.

CENTRO INTERNACIONAL DE FISICA

El Centro Internacional de Física (CIF) es una institución privada sin ánimo de lucro, que fue fundada el 4 de diciembre de 1985.

El CIF tiene como objetivo principal el desarrollo científico y tecnológico de América Latina y en particular de la región Andina y del Caribe.

Para lograr este objetivo, el CIF:

1. realiza investigación en sus propios laboratorios y en cooperación con laboratorios o grupos de otras instituciones:
2. realiza cursos, seminarios o conferencias en áreas de la Física, la Tecnología y otras disciplinas afines, relevantes para el desarrollo de América Latina:
3. promueve el establecimiento en la región de industrias de base tecnológica, brindándoles el necesario apoyo o asesoría.

Cabe destacar que para realizar estas actividades el CIF ha utilizado al máximo las competencias en la región, sobre todo en el sector universitario, con el cual se ejecutan muchas de ellas.

Una característica importante del CIF es su carácter regional, el cual se manifiesta en la organización de eventos fuera del país, sino también en que sus programas, tanto de cursos como de investigación, reflejan las exigencias más apremiantes de la región.

La importacia del CIF para los programas, nacional en Colombia y regional en la región Andina, ha tenido reconocimiento por parte de Colciencias y de la junta del Acuerdo de Cartagena, (JUNAC), respectivamente.

El CIF fue declarado Proyecto Especial de Colciencias en 1984, y con la JUNAC se ha firmado un convenio de cooperación, que reconoce al CIF la función de agencia ejecutora de los programas de Ciencia y tecnología de la junta en la región.

Hasta la fecha, e incluyendo las actividades realizadas aun antes de la fundación formal del CIF, éste ha organizado 112 eventos. Aproximadamente el 20% de ellos ha tenido lugar en nueve países latinoamericanos diferentes de Colombia. Aproximadamente 6500 científicos han participado en estos eventos, en calidad de profesores o asistentes. Desarrolla igualmente los primeros proyectos de investigación en sus laboratorios de Biofísica y de Microprocesadores y avanza en la preparación de los de fibras Opticas y Optoelectrónica y de corrosión. Además ha constituido grupos de investigación en campos y partículas, en Teoría de Grupos y en Astrofísica. Apoya también los esfuerzos regionales de investigación de Enseñanza de la Física y en otras áreas de interés.

Próximamente iniciará las actividades propias del programa de incubación de empresas.

Las raíces que tiene el CIF en la comunidad científica latinoamericana se puede mostrar con la existencia de 34 acuerdos de cooperación que tiene el centro con instituciones de diecisiete países, entre los cuales tienen importancia especial los convenios con instituciones de otros países de la región andina.

El CIF es gobernado por un consejo de Administración en el cual están representadas las instituciones creadoras del CIF y ACIF y un grupo de científicos fundadores. El consejo de Administración nombra cada cuatro años a los dos directores del CIF (ejecutivo y alterno) y cada tres años a los catorce miembros del consejo científico internacional.

El CIF es gobernado por un Consejo de Administración en el cual están representadas las instituciones creadoras del CIF y ACIF y un grupo de científicos fundadores. El Consejo de Administración en la cual están representadas las instituciones creadoras del CIF y ACIF y un grupo de científico internacional

En la actualidad Abdus Salam es el presidente del Consejo Científico Internacional. En el pasado co-presidió ese Consejo con el profesor Leon Lederman.

El CIF ha sido financiado por varias fuentes; entre ellas, las principales han sido: COLCIENCIAS y el ICFES nacionalmente y el ICTP, UNESCO, y JUNAC internacionalmente. Otras instituciones y organismos nacionales e internacionales le han brindado apoyos puntuales de gran importancia.