

El maletín de herramientas del físico

Martin H. Krieger, University of Southern California, Los Angeles, USA.

El maletín de herramientas del físico puede comprender herramientas matemáticas, herramientas para los esquemas y para la modelización, incluyendo modelos tales como un sólido cristalino, un oscilador armónico, o una ley de interacción a razón del inverso del cuadrado. La noción de maletín de herramientas propicia un terreno de reencuentro para los científicos, los filósofos y los profesores a fin de comprender lo que hacen los científicos. Hacer ciencia puede ser considerado como un trabajo artesanal, utilizando, con competencia, un maletín de herramientas.

I. Introducción

Se puede pensar en el trabajo científico como en un artesano dotado de un maletín con herramientas y práctica en corporación. Se puede considerar que hay un pequeño número de tipos de herramientas y de prácticas que pueden especificarse y enseñarse (ver el cuadro I para tal maletín)

Consideremos la física como « utilirería », ella tiene la naturaleza bajo control si posee un maletín de herramientas eficaz y una práctica de tipo artesanal¹. Los físicos seleccionan y formulan cuidadosamente sus problemas de manera de poder trabajar utilizando su maletín de herramientas. Como se podrá ver, se cansan de escoger situaciones lineares (incluyendo aquellas que son aparentemente no lineares) e inventan estados fundamentales adecuados para esconder las no lineares. Los físicos explican su capacidad para aprehender la naturaleza teniendo en cuenta las jerarquías de las fuerzas (y de la monotonía de una escala de temperatura) y la estabilidad de la materia. Entonces su aproximación por la perturbación lineal debería « funcionar », ya que para cada nivel de la jerarquía, se tiene un estado estable a partir del cual es posible trabajar.

La noción de herramientas constituye un medio eficaz de comprender y describir lo que hacen los científicos. Aquí se describe solamente lo que es parte del maletín de

¹ las herramientas, por supuesto, no están reservadas a la carpintería o a la física. Las herramientas de la informática comprenden « las herramientas programas » que son empleadas para construir y organizar programas importantes, la recursividad y la estructura de datos (como aquellas reunidas en LISP); desde nuestros días, los estudios literarios utilizan la retórica clásica y lo que es llamado las estrategias « desconstruccionistas »; y los hombres de ley y los físicos hablaron de competencias y de herramientas profesionales. Pero todos los dominios no reivindican sus herramientas como herramientas. La mayoría de de las ciencias políticas y humanas se consideran en oposición a las herramientas y a los métodos. [Ver S. Wolin, Am. Poll Sci. Rev. 63; 1062 (1969)]. Así es interesante que la física se vea como siendo utilizada.

herramientas del físico y el saber-hacer y de los juicios necesarios para una práctica eficaz. Se desarrollará lo relativo a la manera cómo la teoría científica es eficaz, el hecho de que esta proporciona los buenos instrumentos para efectuar el trabajo y que ella lo justifica como siendo aquel que debe ser efectuado. En general, un artesano debe emprender selectivamente y adaptar las herramientas de otros oficios. Así, por ejemplo, la física y las matemáticas, o la física y las ciencias del ingeniero se prestan mutuamente herramientas. La noción de herramientas puede sugerir por qué las matemáticas funcionan en física.

La noción del maletín de herramientas es atractiva porque contorna la separación convencional entre teoría, hipótesis e idea por oposición a la experiencia, verificación e instrumentos. Todos esos elementos pueden ser considerados como herramientas. Las preguntas tradicionales conciernen la verdad científica, el conocimiento o la creencia no desaparece, sino que ellas permiten una aproximación relativamente más concreta.

En la sección II, se describirá cómo los físicos se conciben ellos mismos como disponiendo de un maletín de herramientas y cuáles son estas. Posteriormente se expondrá la estructura general del maletín, teniendo como objetivo la comprensión más que el detalle. (El lector interesado por el contenido del maletín de herramientas del físico puede pasar directamente a la tercera parte) El maletín descrito conviene al trabajo de explicación y de resolución de problemas de un físico. El maletín de herramientas es contemporáneo, relativo a la física de partículas y a aquella de la teoría de campos, de acuerdo con las visiones modernas de la materia condensada. Esta proviene de textos, exámenes y manuales. Finalmente, en la cuarta parte, se precisará algunas consecuencias de la toma en cuenta de la física como « provista de herramientas »

II. Los físicos y las herramientas

A los físicos les gusta considerarse como poseedores de un conjunto de herramientas, y los escritos modernos sobre las ciencias se sienten inclinados sobre esta proposición. Fermi ha sido tristemente célebre por su aproximación a los problemas de manera simple, utilizando un pequeño número de modelos (tal como el electromagnetismo) y adecuándolos cuando ello era necesario.

Cuadro 1- El maletín de herramientas del físico

1- Herramientas matemáticas

- a. Cálculo y aproximación
 - combinatoria, estadística, asintótica
 - b. Estructura
 - geometría, simetría, leyes de la conservación
 - c. Lineal y límites
 - cálculos, procedimientos de optimización, representaciones lineales
2. Herramientas para hacer diagramas
- a. Geometría y espacial
 - vectores y gráficos
 - b. Expresiones algebraicas y símbolos estructurados
 - formas canónicas
3. Retórica
- a. Herramientas
 - (1) Medios:
 - vacío del espacio-tiempo, átomo de hidrógeno, cristal, medio continuo elástico, fluido, gas
 - (2) Objetos:
 - Partículas y excitaciones, osciladores, campos y ondas; operadores lineales incluyendo las ecuaciones diferenciales y los grupos; correlaciones; propiedades incluyendo la energía, la cantidad de movimiento y los operadores de traslación
 - (3) Interacciones:
 - objetos con objetos y con medios (potenciales, intercambio de partículas, campo de fuerza, difusión)..
 - b. Aproximaciones
 - (1) Estrategias:
 - vacío empujado o estado fundamental, equilibrio, potenciales conservadores, analogía y heurística, homología de ecuaciones y de soluciones; (2)
- Lugares comunes:
- métodos cualitativos (por ejemplo Migdal): deviene familiar con las duras realidades materiales como las funciones de onda de Coulomb; investigar contribuciones importantes, la física se sitúa entre dos polos; utilizar una imagen clásica, completada por reglas cuánticas; las cosas disminuyen, pero las asíntotas son importantes; conocer bien los POZOS de potencial, los osciladores, las transiciones en una partícula, los medios que se pueden polarizar....
-

Los cálculos y las estimaciones de orden de magnitud hechos a partir de conversaciones de pasillos o en el restaurante hacen parte de la leyenda de la física. País comienza su estudio reciente de Einstein con una biografía científica en una frase: « mejor que cualquiera, sabía cómo inventar principios de invarianza y hacer uso de fluctuaciones estadísticas » El curso de física teórica de Landau, « el mínimo teórico » es bien conocido. Menos célebre es la lista talismánica o emblemática de sus « diez mandamientos », sus fórmulas y sus modelos más útiles, grabados en la piedra, que le fue dada por sus alumnos con motivo de sus cincuenta años. Los métodos de diagramas de Feynman constituyen herramientas para expresar la física y para calcular. Peierls da una lista de modelos estándares en física que comprenden: los modelos hipotéticos, fenomenológicos, aproximados, simplificados, instructivos, analógicos y de

pensamiento (Gedanken), Kenneth Wilson describió un nuevo conjunto de herramientas basado en el tratamiento numérico y la informática²

Los físicos ofrecen igualmente consejos para seleccionar un problema sobre el cual trabajar, el buen nivel de dificultad con el cual comenzar, o bien dónde investigar nuevas leyes. Por ejemplo, Dyson según Bragg: « No intente revivir triunfos pasados. No haga las cosas simplemente porque están de moda. No se atemorice de la indiferencia de los teóricos »³. Como tipos de consejos y de prudencia, Peierls describe las sorpresas en física teórica, como las intuiciones y los enfoques iniciales se revelan inexactos⁴. A.B. Migdal escribió un texto de mecánica cuántica el cual tenía como objetivo exponer a los alumnos « cómo hacerlo » de manera cualitativa, como un verdadero profesional. Se trata de un maletín de herramientas completo y explícito, se resumen ciertos de sus consejos en el cuadro I (ítems 3b(2) bajo el título « lugares comunes »⁵

Un maletín de herramientas del físico puede ser separado en tres partes: matemática, representación o diagrama, y descripción o retórica. Como puede constatarse en el cuadro I, el maletín comprende modelos de medios como un cristal, modelos de objetos tales como una partícula, y modelos de interacciones como una colisión. La práctica comprende estrategias y lugares comunes, como la investigación de estados de equilibrio. La utilización de un maletín de herramientas exige competencias técnicas para una manipulación experta de expresiones matemáticas o diagramas. Ello exige igualmente un juicio, para evaluar y decidir cuál herramienta o modelo es adaptado a una situación, o cuándo una estrategia tendrá tendencia a ser eficaz.

A. Las herramientas en general

Las herramientas son cosas que se utilizan para realizar un trabajo. Estas parecen objetivos, y son bellos y bien compartidas, mientras que el saber - hacer es personal e imitado. Un maletín de herramientas aparentemente abstracto u objetivos es asociado a la

² E.M. Purcell, Am. J. Phys. **51**, 11 (1983); P.B. James and J.S. Rigden, Am. J. Phys. **50**, 1069 (1982); G. Holton, The scientific imagination (Cambridge U.P., Cambridge, 1973); A. Pais, « Subtle is the lord ... » The science and life of Albert Einstein (Oxford U.P., New York, 1982); A. Livanova, Landau: A Great Physicist and teacher (Pergamon, Elmsford, NY, 1980); R. Peierls, Contemp. Phys. **21**, 3 (1980); University of Chicago Graduate Problems in Physics With Solutions, edited by J.A. Cronin, D. F. Greenberg, and V.L. Telegdi (Addison-Wesley, Reading, MA, 1967).

³ F. Dyson, Phys. Today **23**, 23 (September 1970); R. P. Feynman, The Character of Physical Law (MIT Press, Cambridge, MA, 1965).

⁴ R. Peierls, Surprises in Theoretical Physics (Princeton U.P., NJ, 1979).

⁵ Los métodos de Migdal reflejan una situación en la cual los computadores no están relativamente disponibles. Wilson sostuvo argumentando una ciencia teórica basada sobre el cálculo, con un conjunto diferente de herramientas y de modelos. A.B. Migdal, Qualitative Methods in Quantum Theory (Benjamin, Reading, MA, 1977); K. Wilson, CERN Courier **23**, 172 (June 1983).

práctica de su utilización - cómo trabajar y cómo organizar el trabajo- por parte de un artesano. Las cajas de herramientas de un carpintero comportan ciertamente martillos y tijeras, pero los carpinteros utilizan clavos y trabajan con madera, ellos saben como martillar, trabajan regularmente durante horas con otros artesanos, y su trabajo consiste en construir algo. El contenido y la práctica del maletín de herramientas depende del período histórico en el cual el trabajo es efectuado. Los tipos de materiales que son trabajados (madera, metal, átomo, materia condensada) y lo que es construido. Hay herramientas estándares, así como aparatos personales hechos de bloque. El término « maletín de herramientas » sugiere un pequeño número de herramientas de una gran sutileza de empleo permitiendo el trabajo conjunto.

Las herramientas pueden ser conceptuales, como en la descripción de Kuhn de los problemas ejemplares o estándares y de la práctica paradigmática. Ravetz desarrolla explícitamente el modelo de herramientas con numerosos detalles, describiendo las herramientas como plurifuncionales, robustas, elaboradas, estandarizadas etc.⁶ En una historia reciente de la física contemporánea de partículas, los teóricos del dominio son descritos como presentando un interés por la explotación de sus herramientas y de su experiencia, y la llegada de un problema que le conviene es descrito como permitiéndoles trabajar. Anteriormente, ellos eran « mecánicos sin herramientas » para calcular el quantum de débil energía en cromodinámica, cuando las propiedades de las partículas ya eran bien conocidas⁷. Hacking considera las partículas como ondas, medios para intervenir sobre el mundo que producen efectos bien definidos y pudiéndose medir. El expresa: « las entidades teóricas de una gran longevidad, que no desaparecen cuando son manipuladas, revelan ser generalmente maravillosos errores.⁸

Otra versión del instrumentalismo, más literal y materialista, deviene importante. Los científicos estimulan a los responsables nacionales para que se responsabilicen de los aparatos vitales en su trabajo, como los telescopios y los sincrotrones. Ellos presentan sus investigaciones como guías por los instrumentos, más que por las personas o las ideas. Un énfasis más fuerte es puesto en la importancia de lo artesanal y de los instrumentos, y sobre sus límites y capacidades en la investigación científica. Factores particulares de la

⁶ T.S. Kuhn, *The Structure of Scientific Revolutions* (Univ. Of Chicago Press, Chicago, 1970); J. Ravetz, *Scientific Knowledge and its Social Problems* (Clarendon, Oxford, 1971); M. Heidegger, *Being and Time* (Harper and Row, New York, 1962). Ver igualmente sobre las competencias, M. Polanyi, *Personal Knowledge* (Univ. Of Chicago Press, Chicago, 1958). Heidegger emplea la utilización de herramientas como una imagen central en su trabajo, Wittgenstein utiliza la práctica artesanal en parte inicial de *philosophical Investigations* (Macmillan, New York, 1968). Las « herramientas » y el « artesano » son metáforas de una filosofía que trata de la función opuesta a la esencia, de la práctica opuesta a las ideas, de la tecnología opuesta a la naturaleza.

⁷ A. Picckerling, *Constructing Quarks* (Univ. Of Chicago Press Chicago, 1984); see also, J.T. Cushing, *Synthese* **50**, 5 (1982).

instrumentación y la interpretación de lo que esos instrumentos producen (datos), son designados como que juegan un papel sutil en la fabricación de la ciencia. Los antropólogos, utilizan la estructura de la antropología cultural y material, muestran cómo herramientas tales como los aceleradores y los detectores organizan la cultura y la producción de la ciencia.⁹

Se puede distinguir dos tradiciones para describir herramientas, el objetivo y lo situacional. En la tradición objetivo, una herramienta es un objeto, como un martillo o un microscopio, poseyendo ciertas capacidades. Una persona entrenada toma una herramienta y la utiliza para hacer algo. Tal herramienta puede ser fabricada por un fabricante de herramientas y una vez que está realizada, entonces se encuentra disponible para su empleo. En los tiempos modernos, la fabricación y la utilización son frecuentemente distintas, a pesar de que artesanos eficaces modifican herramientas para usos particulares o para convenir a sus propias particularidades. Una herramienta es aquí principalmente pasiva, objetivo y modular¹⁰.

Las competencias son capacidades para utilizar herramientas y ellas devienen automáticas y no observables. Para diferentes utilizadores, lo que se considera ser una misma herramienta, puede tener competencias y prácticas diferentes. Los cristalógrafos y los físicos de partículas elementales utilizan la misma teoría de grupos, pero de manera diferente. Esto es lo que es considerado una misma herramienta. Se adquiere mayor competencia en la utilización de una herramienta con la práctica, por ejemplo con la realización de muchas integrales, se adquieren variadas competencias, por ejemplo resolver un oscilador armónico como parte de una ecuación diferencial $F = m \cdot a$, un problema de Euler - Lagrange, o por las variables acción y ángulo.

En la tradición situacional, las herramientas son definidas en términos del trabajo a efectuar. Estas son medios para controlar el mundo, de manipularlo, de domesticar sus numerosos grados de libertad. Cuando ello no funciona, puede descubrirse las herramientas como tales, como cosas abstractas, objetivos¹¹. Se resalta el martillo cuando se desprende su cabeza. Nuestra atención es atraída por una expansión asintótica cuando hay divergencia. Dentro de esta tradición, el mundo existe en la medida de que este es

⁸ I. Hacking, *Representing and Intervening* (Cambridge U.P., Cambridge, 1983), p. 275.

⁹ M. Harwit, *Cosmic Discovery* (Basic, New York, 1982); D.D. Price, *Nat. Hist.* **93**, 49 (January 1984) B. Latour and S. Woolgar, *Laboratory Life* (Sage, Beverly Hills, 1979); H. Garfinkel, M. Lynch, and E. Livingston, *Philos. Social Sci.* **11**, 137 (1981); P. Galison, *Rev/ Mod. Phys.* **55**, 477 (1983); S. Traweek, in *Les Savoirs dans les Pratiques Quotidiennes*, edited by C. Beliste and B. Schiele (Editions du Centre National de la Recherche Scientifique, Paris, 1984).

¹⁰ Kuhn, Ref. 6; Ravetz, Ref 6; A.H. Dupree and H. W. Dupree, « Performer Crafts and Instrument Maker Crafts: The Persistence of Craft Traditions in Industrial Transformation » Mimeo, 7 May 1979.

¹¹ Heidegger, Ref. 6; A.R. Luria, *Cognitive Development: Its Cultural and Social Foundation* (Harvard U.P., Cambridge, MA, 1976).

manipulado, las herramientas existen solamente en la práctica, la práctica es tomada y ejecutada solamente en medios específicos y para tareas específicas.

Las dos tradiciones son complementarias, y cada tradición hereda de un problema complementario. La tradición objetiva debe rendir cuenta de cómo las herramientas son utilizadas y son utilizables en situaciones variadas así como también de su rol. La tradición situacional trata de cómo las herramientas son consideradas como objetivos, separables, extraídos de sus contextos originales, como universales, disponibles para todos. No obstante, las dos tradiciones coinciden en el hecho de que una herramienta es algo que puede ser considerado como objetivo y compartido, que es afectado por la manera como es utilizado, que el mundo que descubrimos y hacemos está íntimamente ligado a las herramientas que se utilizan. Las herramientas tienen una gran sutileza de empleo y dependen de sus utilizadores¹².

Los maestros de un artesano emplean herramientas de las maneras más inventivas y más sutiles y producen más bellos objetos que los objetos usuales¹³. Sus producciones son piezas de maestros, pero no suficientemente distintas o difíciles para que no puedan ser reproducidas por otros una vez que vean como se realizan.

Aquellos que han tenido suficientemente suerte para mirar a Enrico Fermi en el trabajo han quedado maravillados de la velocidad y la facilidad con las cuales era capaz de producir una solución a casi todos los problemas de física sobre los que centraba su atención. Una vez que había escuchado suficientemente para saber en que consistía el problema, trabajaba en la pizarra negra y la solución brotaba de su fuente. Se conservaba en forma haciendo un gran número de problemas, sea para los cursos que administraba, las conferencias que daba o papeles que escribía. Frecuentemente, encontraba sus propias soluciones a los problemas que escuchaba, en seminarios o producto de discusiones con aquellos que venían a hablar de física con él. Las soluciones de Fermi eran casi más simples y más fáciles a comprender que aquellas que eran obtenidas por la persona que había planteado el problema¹⁴.

El estilo y los métodos de Fermi han sido apreciados, aprendidos y después enseñados a varias generaciones de físicos. Sus notas de cursos han devenido textos, su enfoque repetido por sus estudiantes a sus propios estudiantes.

¹² Ver referencia 6, y por ejemplo, M. Harris, *Culture, People and Nature* (Harper and Row, New York, 1980).

¹³ Ver por ejemplo R. P. Feynman, R.B. Leighton, and M. Sands, *The Feynman Lectures in Physics* (Addison-Wesley Reading, MA 1964). Sobre la práctica de Feynman, Ver F. Dyson, *Disturbing the Universe* (Harper and Row, New York, 1979).

¹⁴ *Physics Vade Mecum*, edites by H.L. Anderson (American Institute of Physics, New York 1981).

Un maletín de herramienta y un artesano encuentran el éxito si ellos realizan un trabajo importante¹⁵. Una corporación progresa porque sus artesanos han encontrado a la vez el trabajo a hacer y un mercado para sus productos. Es en un contexto de herramientas y de artesanos que una práctica es metódica, clara, natural y simple, y es en términos de herramientas y de lo artesanal que un estilo personal es creado.

III. El maletín de herramientas

Una versión fácil del maletín de herramientas de un físico debería comprender sistemas de modelos específicos tales como los sólidos cristalinos o las pompas de calor, objetos específicos tales como las partículas Newtonianas o los campos de Maxwell, y modos de enfoque tales como la teoría del potencial, las formulaciones del espacio de las fases, y los principios de menor acción. Hay, por ejemplo, como Peierls los describe, un pequeño número de modelos de gas o atómicos, o tipos de interacciones interatómicas que son frecuentemente utilizados¹⁶.

Aquí se describirá el maletín de herramientas de manera más esquemática (ver cuadro 1). Se propone que el maletín de herramientas y la competencia del físico sean compuestas de tres elementos: (1) las matemáticas, (2) los dibujos o los diagramas, y (3) la descripción o la retórica correspondiente aproximadamente a un número y a una estructura, a un dibujo y a un patrón (estructura) y al lenguaje y a los argumentos. Las herramientas (3a) comprenden el modelo de los mundos o medios (3a(1)) que utilizamos haciendo física, los modelos de objetos (3a(2)) que constituyen cada medio, los modelos de interacciones (3a(3)) entre los objetos y el medio, y las estrategias (3b(1)) para formular y trabajar sobre un problema.

Se describirá brevemente la parte de las matemáticas y aquella relativa a los diagramas de un maletín de herramientas, y seguidamente se discutirá en detalle la parte descriptiva o retórica. Aparentemente, las matemáticas son consideradas como una competencia y un conjunto de herramienta. Me arriesgo a hacer una descripción sinóptica de tal competencia: un físico debe ser capaz de contar y de hacer aproximaciones (cuadro I, ítem 1a), de donde, en el maletín de herramientas, la presencia de herramientas de combinatoria, estadísticas y asíntotas. Se debe dominar estructuras (1b), y es por ello que se encuentra en la geometría y el cálculo variaciones, los principios de simetría y las leyes de conservación y las reglas de propagación para las ondas y las influencias de los

¹⁵ G. Kubler, *The Shape of Time* (Yale U.P., New Haven, CT, 1962).

¹⁶ Peierls Referencia 2

bornes. Hay un dominio de los principios de linealidad, límites y estabilidad (1c): en los cálculos, procedimientos de optimización, y en las representaciones lineales.

Admitiendo que la física pueda explicar por qué las matemáticas son útiles, se podría comenzar por justificar la utilización de las matemáticas como se presenta a continuación. Desde el punto de vista de la física, el conteo y la aproximación (1a) se refiere habitualmente a las fluctuaciones y a las perturbaciones y su pequeña talla, lo que es verdad para muchas situaciones para las cuales el físico está preocupado. Las estructuras (1b) tratan del pequeño número de buenas clasificaciones en la naturaleza, de nuevo en la medida de que los físicos sean preocupados. En cuanto a la linealidad y límites (1c) tratan del hecho de que existe una jerarquía de fuerzas bien separadas, medidas en términos de su importancia, y que hay objetos estables que pueden ser linealmente (o casi) perturbados; Construido en el sentido de ese sub-conjunto de las matemáticas, se encuentran los principios más profundos del mundo como los físicos lo comprenden. Así las matemáticas parecen naturalmente aplicarse a la física.

Un segundo conjunto de herramientas está constituido por las herramientas dibujos y aquellas para realizar diagramas (tabla I, ítem 2), figuras que representan el mundo, y a partir de las cuales se puede « escribir sobre » y « leer » la física. Esas figuras pueden ser consideradas como geométricas y espaciales (2a) o estructuradas a partir del álgebra y de símbolos estructurados (2b). Los vectores, los diagramas de Feynman y las representaciones de las condiciones de los límites son de la primera clase, mientras que las expresiones covariantes y las formas canónicas de las ecuaciones son de la segunda. Por supuesto, los diagramas deben ser interpretados correctamente. Un Lagrange Simétrico puede tener un estado fundamental asimétrico (como en la congelación); el paralelismo en una esfera no es el mismo que en un plano.

Admitamos que la física pueda explicar todo lo que es diagrama. Podría decirse que hacer diagramas (2) expresa el hecho de que la física trata literalmente de las uniones y de los flujos, y puede así tener leyes de conservación. Los vectores y otras nociones de ese tipo, y las expresiones covariantes son herramientas para expresar más o menos automáticamente los flujos y las leyes de conservación. La física es igualmente una historia de simetrías y de categorías sistemáticas, tales como los grupos, para organizar los fenómenos. Los diferentes simbolismos estructurados son concebidos para hacer ese trabajo.

La tercera competencia (cuadro I, ítem 3) es un dominio de las herramientas descriptivas y retóricas de lo artesanal, o de la modelización, lo que podría ser llamado « el arte de

abordar la naturaleza » como lo indica Rabi¹⁷. Las herramientas son aquí los modelos invocados cuando se afronta una situación, modelos que hacen de la naturaleza algo de lo que se puede hablar. Ellos incluyen los modelos de los medios (3a(1)) de los objetos (3a(2)), y de las interacciones (3a(3)). Hay igualmente competencias estratégicas más explícitas (3b(1)) tales como la investigación de cantidades conservándose, y la utilización de lugares comunes (3b(2)) tales como aquellos sugeridos por Migdal.

Lo que es característico de ese modo de descripción o de retórica es que los medios, los objetos y las interacciones son fácilmente separables, y que pueden ser combinadas de manera aparentemente arbitrarias - el medio x con el objeto y y con el mecanismo de interacción z . Para un físico, la naturaleza corresponde a las partes casi aisladas y sin embargo combinables. Los estados de la materia son separados por transiciones de fases netas; las partículas tienen propiedades bien definidas, y hay una jerarquía de las interacciones fundamentales.

Herramientas físicas y saber-hacer

Cuando los físicos enfocan una situación en tanto que físicos, ellos la consideran inmediatamente *como* un mundo físico o un *medio*. Los medios (cuadro I, ítem 3a(1)) incluyen: el vacío del espacio-tiempo, un átomo o un sistema solar, un sólido cristalino ordenado, un medio continuo elástico (incluyendo las gotas de líquido y las superficies de tambor), los fluidos y los gases.

Los medios son frecuentemente tratados desde el punto de vista de su evolución en el tiempo, ellos tienden a tener una gran simetría y una de las más grandes temperaturas (por ejemplo, sólido / líquido / gas o átomo / núcleo / cuarzo). Cuando la temperatura aumenta, cada medio « funde » en uno de los siguientes (uno dentro del otro) y el número de grados de libertad aumenta. Hay « fases de transición » entre ellas. En cada uno de esos medios, hay fluctuaciones, y generalmente, esas fluctuaciones aumentan con la temperatura. Fluctuaciones elevadas o susceptibles de ser (en las fases de transición) se suceden con estados estables regulares o fuertemente amortizados¹⁸. Esta imagen heurística de los medios está inspirado por los modelos actuales de orígenes del universo y partículas elementales, todo como aquellos de la materia condensada¹⁹.

¹⁷ I.I Rabi, Columbia Today, 6, (Winter 1977).

¹⁸ Estricto sentido, esto es una explicación de las fases de transición de segundo orden.

¹⁹ Henry Adams cuenta una historia similar en « The Rule of Phase Applied to History (1909) » in A Henry Adams Reader, edited by E. Stevenson (Anchor, Garden City, 1958).

Cuando decide un medio, el físico identifica inmediatamente cosas con ese medio, utilizando modelos como las partículas. Llamando esas cosas *objetos*, lo que parece crucial concerniente a esos objetos (3a(2)) es que cada objeto es individual y sin embargo adicional-típicamente lineal y superpuesto- incluyendo a él mismo, está hecho de cosas bien complicadas. Los objetos son demográficos. El efecto total de un grupo de objetos es un problema de adición de sus efectos individuales marginales. Hay frecuentes reglas de conservación, y así, no tiene importancia la manera cómo se hace la adición. Si se demuestra que no es posible hacer tal adición demográfica, se busca entonces los modos normales de los estados propios que permiten tales adiciones.

Los objetos pueden ser cosas o entidades “motoras” (nosotros trataremos estos últimos). En tanto que cosas, parecen ser partículas, osciladores, campos y ondas. Notadas por su ausencia, se encuentran las estructuras reales, tales como las palancas y los astiles. Su sustancia y su extensión las delegan dentro del dominio de la ingeniería, donde los efectos de la escala y de la no linealidad son tomadas en cuenta.

Un medio puede ser un objeto dentro de otro medio, como un gas de electrones puede llenar un cristal. Existen igualmente modos de transformación entre los objetos. Una partícula puede ser considerada como una onda, o una onda como un oscilador. Un cristal tomado como un campo simétrico en N cuerpo es considerado como un espacio poblado de partículas tales como fotones. Porque esas transformaciones no se hacen solamente a una escala única sino entre escalas, una hipótesis atómica nos dice <mire más delicadamente>.

Dado que mi descripción del maletín de herramientas es esquemática, dentro del uso efectivo, las herramientas son tomadas de una manera completamente específica. Un sólido cristalino es fácilmente cúbico, un átomo será el átomo de hidrógeno, un gas será perfecto o de Van Der Waals, un campo será el campo electromagnético de Maxwell, y una interacción será en inverso del cuadrado.

Los medios y los objetos interaccionan, a fin de cuentas cambian posiblemente por vinculación con su estado inicial. La interacción (cuadro I, ítem 3a(3)) necesita actores,

medios y resolución. Los objetos pueden interactuar entre ellos en un medio (dos electrones en el vacío), un objeto puede interactuar con un medio dentro del cual es insertado (un electrón dentro de un cristal); o un objeto puede interactuar con un medio tomado como un objeto (un electrón rebotando sobre un cristal, los dos dentro del vacío). Las interacciones pueden ser expresadas en término de fuerza y de influencias (por contacto, propagado a través de un medio, o a distancia), o en términos de intercambios de informaciones, o de energías, y de respuestas dentro de un medio polarizado. De hecho, una interacción puede ser considerada como una auto-expansión. Los objetos y el medio que interactúan en lo sucesivo y que pueden ser cambiados pueden todavía una vez más evolucionar de manera independiente – hasta un próximo episodio de interacción. Esto se explica en la matriz de difusión, por la existencia de constantes de velocidad, como las variables de acción y de ángulo, y por las cuasi- partículas estables representando una <suma> de la mayor parte de las interacciones.

Las entidades motoras son medios para la interacción, transportando los medios y los objetos los unos hacia los otros. Las ecuaciones diferenciales <desplazan> los objetos y los empujan hacia adelante en el tiempo. La teoría de los grupos muestra como ellos pueden ser combinados. Las funciones de correlación o de transferencia relacionan lo que ocurre en una parte de un medio con otra. Las propiedades conservadas como la energía o el momento angular conduce a los operadores de traslación [$\exp(-iHt)$, $\exp(-ipx)$, $\exp(-iJ)$] que hacen pasar un mundo a un mundo similar para los tiempos, lugares y orientaciones diferentes. Las entidades motoras, explicadas como las operaciones lineales, son combinadas y sumadas para acceder a la naturaleza, tanto como los objetos son en general combinados para fabricar la naturaleza. Pero contrariamente los objetos en tanto que cosas, el espacio que ellos ocupan es explícitamente matemática o formal.

Poblar un medio con objetos interactivos conlleva a movilizar todas las herramientas para reportar una situación. Sin embargo, una explicación física exige el utilizar las herramientas de manera eficaz. Se necesita un modo para cuestionar la naturaleza²⁰.

Existe un cierto número de tales estrategias de cuestionamiento (cuadro I, ítem 3b(1)). La más crucial es la de encontrar un buen estado fundamental o vacío, tales como una red cristalina o unas cuasi partículas dentro de esa red, el vacío físico del espacio-tiempo, los pares de Cooper en un estado fundamental de Bardeen-Cooper-Schrieffer (BCS), el estado S de un átomo de hidrógeno, o de un gas perfecto. Un estudio de las perturbaciones o de las excitaciones del estado fundamental es interesante para la búsqueda de informaciones concernientes a su estructura. Puede ser posible encontrar potenciales conservativos, como los potenciales eléctricos o termodinámicos, que se caracterizan por la evolución del estado fundamental de manera casi estática; lo que hace interesante la invención de nuevas partículas, tales como la entropía, para tener una buena conservación.

Se pueden mencionar otras dos estrategias.

La primera es aquella correspondiente a la analogía y a la heurística. Si puede comenzar a tratar un cuerpo negro como un gas perfecto, o la luz como una partícula, o las fuerzas nucleares como fuerzas potenciales, hágalo. Pero, recuerde usted que las mismas preguntas tienen las mismas soluciones, y que hay analogías físicas detrás de esto²¹.

²⁰Yo debo señalar que yo puse en paralelo mi descripción del maletín de herramientas y las descripciones de la retórica, el arte clásico de cuestionar, puesto que cuestionando la naturaleza, nosotros producimos igualmente las demostraciones convincentes para nosotros mismos y para los otros. Los medios corresponden a géneros, los objetos a tropa, las interacciones a intrigas, las estrategias a formas de ataque y los métodos cualitativos a lugares comunes.

²¹Feynman, referencia 3. Y el simple hecho que dos sistemas tengan las mismas ecuaciones no significa que ellos sean idénticos – las aproximaciones utilizadas para obtener esas ecuaciones pueden ser diferentes.

La segunda estrategia concierne a aquello que puede ser denominado la plenitud restringida de la naturaleza²².

Cuando usted cuestione la naturaleza, no se sorprenda si un <buen> mundo estable no siempre es el mejor de los mundos posibles, sino simplemente aquello que está suficientemente a la moda u ordenado. Estadísticamente, los equilibrios tienen numerosos equivalentes macroscópicos de estados microscópicos, de manera combinada, algunas estructuras son más estables y se refuerzan más ellas mismas que muchas otras. Los gases, los mercados en economía, y la ley macroscópica del inverso de los cuadrados son ejemplos de la astucia de la naturaleza o de la mano invisible²³.

Podemos resumir las estrategias de la siguiente manera: agarre cualquier cosa fija que permita investigaciones simples y por lo tanto productivas. Utilice todo aquello que usted sepa sobre una situación, para estudiar otra que parezca similar, y suponga que usted puede de una manera u otra comprender el mundo.

Creando este maletín de herramientas esquemáticas, me faltaron consideraciones hacia herramientas cruciales.

Los diagramas son frecuentemente pedazos de aparatos, más que vectores o álgebra.

La termodinámica concebida en términos de pompas de calor, la electricidad en términos de resistencias y de capacidades, y la óptica concebida como espejos, lentes y rayos luminosos pueden ser adaptados a este maletín, pero ellos no pertenecen realmente. En parte este maletín se concentra sobre el mundo microscópico y en parte, este maletín de herramientas así como el conjunto de competencias y estrategias para utilizar, están en relación con la resolución de problemas papel-lápiz.

Cuando los problemas provienen más directamente de la experiencia y de la investigación empírica, se debe imaginar inclusiones en este maletín. Habrá a la vez herramientas de investigación y de reconocimiento²⁴. Para la investigación, existen herramientas lógicas, tales como la electrónica o los filtros, para identificar eventos, amplificadores para hacerlos más marcados, y los estimuladores o sondas para buscar y encontrar casos interesantes. Para el reconocimiento, existen herramientas y competencias de simulación o de empatía, forma de representarse cómo, por ejemplo un electrón podría actuar dentro de un aparato, herramientas para saber tratar la disimulación, para tratar la forma en la cual la suerte y los trucos producen eventos; y herramientas para la emulación, para poner en lugar situaciones a fin de que ellas sean idénticas, para permitir una reproducción y dar resultados estables (es decir, buenos datos). Dentro de un buen maletín de herramientas, la resolución de problemas y las herramientas experimentales están íntimamente conectadas, de manera que, como lo sugiere Hacking, una partícula sea una mejor sonda, y que los filtros y los amplificadores sean mejores mecanismos de interacción.

IV. La física considerada como herramienta.

Estas herramientas y competencias nos dan una versión de la naturaleza que es aditiva, lisa, sorda o inanimada. La naturaleza es una <suma> de sus partes; las partes interactúan sin problema como en los cálculos, y las discontinuidades pueden ser mostradas como desaparecen, digamos dentro de una dimensión superior; y las herramientas son objetivos, independientes del contexto, ellos no tienen memoria o deseos por ellos mismos, solos nosotros, los artesanos los tenemos²⁵. La modalidad de

²²Lovejoy, *The Great Chain of Being* (Harvard U.P., Cambridge, MA, 1936).

²³H. Simon, *The sciences of the artificial* (MIT Press, Cambridge, MA, 1969); S. Kirkpatrick, C.D. Gellatt, Jr., and M.P. Vecchi. *Science* **220**, 671 (1983).

²⁴Ver Hacking, referencia 8, bajo la representación y la intervención, Crushing, referencia 7, para otra visión dentro de la teoría de matrices S.

²⁵El hombre económico y racional dentro de una microeconomía neoclásica es paralelamente lisa, adaptable y objetiva. A. Marshall dentro de sus *Principles of Economics* (Macmillan, London, 1890, 1920) declara

este maletín de herramientas es un espejo de la imagen de la sociedad moderna compuesta de individuos.

La física, considerada como un artesanado provisto de un maletín de herramientas, es verdadera porque el maletín de herramientas funciona y conduce a trabajos interesantes. Ella se concentra sobre fenómenos reproducibles y explicables, en el seno de una tradición histórica que da al artesano una idea de lo que significa trabajar y ser interesante. Cuando el maletín de herramientas no funciona o se convierte en un interés limitado, nuevas herramientas y prácticas deben ser inventadas, nuevas sondas, filtros y modelos creados. Las nuevas herramientas pueden ser consideradas como adaptaciones de las antiguas, mismo si estas son utilizadas de manera relativamente diferente. Por ejemplo, la teoría moderna de las interacciones débiles es simplemente considerada como otra etapa en la tradición de las ecuaciones de Maxwell para el electromagnetismo.

Una descripción del maletín de herramientas comienza a ser adecuada si ella contiene de manera razonable textos estándares, exámenes y manuales escolares. Las reacciones de las prácticas del artesano y de los miembros de la corporación a una tal descripción son igualmente importantes. Eso debería tocar la cuerda sensible del reconocimiento. La descripción debería parecer familiar y justa, ser un “por supuesto”. En lo sucesivo, la creencia largamente compartida en un maletín de herramientas y la admiración para los maestros que lo utilicen, significa que si un maletín de herramientas es propuesto y parece relativamente adecuado, él tiene posibilidades de tocar la buena cuerda sensible. Él ocasiona debates concernientes a detalles específicos y su articulación, y eso es justamente a partir de esos debates que la adecuación del maletín de herramientas propuesto es juzgado.

El maletín de herramientas propuesto y el conjunto de competencias que forman parte pueden ser más completos. ¿Cómo se modifica tal maletín dentro de las diferentes instituciones, naciones y épocas, y cómo las herramientas entran y salen del maletín? (un buen problema sería estudiar el destino del oscilador armónico durante los últimos siglos.) Ayuda este a observar la repartición del trabajo – los artesanos fabrican los instrumentos o los ponen en ejecución o los utilizan – cuando se hace la física?²⁶ ¿Cuál es el rol del estilo y de la moda en la utilización de las herramientas?²⁷ ¿Existen maletines de herramientas comparables en química, en biología o geología?

¿Cómo se hace la formación del compañerismo^{iv}? ¿La formación se hace quedando centrada sobre ella misma o también a partir de los componentes que le son asociados? ¿Cómo los maestros escogen a sus discípulos?²⁸ ¿Cuáles son los ejemplos y los contra ejemplos que sobresalen cuando un punto debe ser transmitido? ¿Cómo son tratados el error y la sorpresa?²⁹

eso en términos de <principios de continuidad>. Ver igualmente M.H:Krieger; J.Poll. Anal. Management **5**, 779 (1986). Otro ejemplo de la forma de dar el mundo adaptado al físico es el reciente interés para el <caos>, un medio de comprender los aspectos de fenómenos <no lineales> insolubles dentro de una forma que los físicos pueden manipular de manera convencional.

²⁶Dupree, referencia 10.

²⁷M.H. Krieger, Fundam. Sci. **2**, 425 (1981).

Uno de los desarrollos interesantes en física durante estas últimas décadas fue la emergencia de equipos de investigaciones importantes y de la burocratización, aquella que acompaña a la utilización de detectores estandarizados y al auge de programas que manipulan los símbolos. Lo que era hasta entonces un artesano es ahora manufacturado. ¿Cómo el trabajo de la ciencia ha sido modificado en la época de la reproducción mecánica?³⁰

El trabajo científico es un artesanado que demanda las competencias. El maletín de herramientas de un físico no es más que el principio de la descripción de lo que hace el científico, cómo lo hace y cómo está ligado a la estructura de la naturaleza tal como la descubre.

AGRADECIMIENTOS

Yo empecé este artículo en el Centro Nacional de Humanidades en la Fundación Van Leer de Jerusalén

Los trabajos más recientes han sido defendidos por la Fundación Educacional Exxon para una beca de “Science, Technology, and Society Research fellowship” en el Instituto de Tecnología de Massachussets y para la “Russell Sage Foundation”.

Reproducido con el permiso de American Journal of Physics **55** (11), November 1987
PP.
1033 – 1038

Nota del traductor

ⁱ La Palabra Inglesa “pattern” no fue traducida como modelo; esta palabra fue reservada para la traducción de “model”. Igualmente se tradujo “patterned” por “estructurado”.

ⁱⁱ “diagrammatic tools” fue traducida como herramientas “para hacer los diagramas”. Se escogió traducir diagram y diagrammatic con la misma palabra “diagrama” y no por dos palabras diferentes “diagrama” para el nombre y esquemático para el adjetivo.

ⁱⁱⁱ Se tradujo “pattern” como patrón porque la palabra estructurada ya fue empleada.

^{iv} [coaching en inglés]

²⁸S. Traweek describió ese proceso para el campo de la física de las partículas elementales en los Estados Unidos y en Japón . Ver su libro por aparecer, *Particle Physics Culture* (Harward University Press).

²⁹ Peierls, referencia. 4; C.Bosk. *Forgive and Remember* (Univ. of Chicago Press, Chicago, 1979).

³⁰W. Benjamín, *Illuminations* (Schocken, New York, 1969).

