
LA FÍSICA DEL PROFESOR ENTRE LA FÍSICA DEL FÍSICO Y LA FÍSICA DEL ALUMNO*

FRANCIS HALBWACHS

Artículo perteneciente al libro "PSICOLOGIA GENETICA Y APRENDIZAJES ESCOLARES".
Compilación de César Coll. Agradecemos a la Editorial Siglo XXI de España Editores S. A. y al
Compilador César Coll por su autorización para ser publicado en la Revista de Enseñanza de la
Física.

Desde hace algunos años, la enseñanza de las ciencias experimentales se encuentra en plena "renovación". Creemos que este es el momento —el momento del deshielo, antes de que el sistema no quede fijado en un nuevo estereotipo— adecuado para hacer balance y analizar los diferentes movimientos que actualmente pretenden modificar y reestructurar los programas de las ciencias experimentales —con la ambición tal vez, aunque pueda parecer ilusoria y desmesurada, de influir un poco en la dirección que parezca razonable.

A primera vista, podemos distinguir dos grandes tendencias en la base de la reforma. La primera concierne a los recientes progresos de las ciencias y, en consecuencia a todo lo que, visto bajo la perspectiva del profesor joven o "reciclado", parece anticuado en los programas tradicionales. Evidentemente esta es la tendencia que ha presidido la reforma "bourbakista" en la enseñanza de las matemáticas, la introducción precoz de los conjuntos, el abandono inexorable del viejo Euclides. La segunda tendencia sigue la moda actual de los análisis "pedagógicos" —más aún psicopedagógicos— que, además de las tentativas que inspiran en cuanto a la transformación de los métodos —de las relaciones— de enseñanza (que no serán tratadas aquí), introducen la idea general de que la inteligencia del alumno funciona de acuerdo con unos procesos específicos, distintos de los del profesor, cuyo conocimiento es esencial si queremos que el contenido y la organización de la enseñanza estén adaptados a los mecanismos espontáneos del pensamiento del alumno.

Estos son los dos aspectos que abordaremos en el campo de la enseñanza de la física. No es nuestra intención presentar un tratado detallado de didáctica, sino solamente —y tal vez como algo previo— tratar de esclarecer la doble problemática del contenido y de la finalidad de la disciplina considerada.

1. *La Física del físico*

A primera vista puede parecer que el "conjunto de conocimientos" al que nos referimos cuando hablamos de "la física" sea fácil de definir y de situar. No obstante, las cosas no son tan sencillas, pues las dificultades aparecen tan pronto como intentamos definir con precisión un programa de física para la enseñanza secundaria. Si la física hace referencia al estado actual del conocimiento del mundo físico —a la física "moderna"— observamos enseguida que en la mayoría de los casos no resulta adecuada para una enseñanza secundaria debido al estado de abstracción extrema al que se ha llegado en todos los dominios. Por otro lado, tampoco resulta convincente enseñar teorías más asequibles para los niños pero que ya pertenecen al pasado y que posteriormente han sido superadas. Todo ello queda muy bien reflejado en las imprecisiones que abundan en los manuales. ¿Debemos basar la mecánica en la noción de fuerza, como en la época de Newton, cuando el rigor de esta noción ha sido rebatido victoriosamente (?) por numerosas escuelas de mecánica teórica? ¿Podemos hablar del rayo lumínico como concepto constitutivo de la óptica geométrica cuando hace 150 años Fresnel reemplazó el con-

* "La physique du maître entre la physique du physicien et la physique de l'élève". *Revue Française de Pédagogie*, 1975, 33, 19-29. Reproducido con autorización. Traducción de Reyes de Villalonga.

cepto de rayo por el de onda? ¿Es todavía concebible que describamos la corriente como un flujo continuo de "fluido eléctrico" (púdicamente llamado carga o cantidad de electricidad) o debemos ya hablar de electrones (lo cual implica una descripción estadística que tiene en cuenta las absorciones y las emisiones de los electrones por los átomos)? Etcétera. Todas estas dudas demuestran que no es inútil precisar el estatuto de las nociones fundamentales sobre las que descansa la física del físico. Vamos a proponer a continuación unos principios que de hecho sólo han aparecido con claridad en una época reciente del desarrollo de la física.

La física no debería dividirse en física teórica y física práctica. En su forma acabada, la física se presenta siempre como un sistema de naturaleza teórica. Precisando aún más, la física es un sistema de práctica teórica en el que se procede transformando proposiciones de acuerdo con unas reglas rigurosamente determinadas. Sólo sabemos operar estas transformaciones de forma completa y rigurosa operando sobre un sistema de nociones (o conceptos) definidos axiomáticamente; estas nociones son determinadas por las relaciones que introducimos entre ellas bajo la forma de axiomas constitutivos y sin hacer referencia a ninguna noción exterior (por ejemplo, experimental), sino a otro sistema de nociones ya axiomatizadas (por ejemplo, nociones matemáticas).

Un sistema tal es así de la misma naturaleza que una teoría matemática. Implica el mismo grado de certeza. Sólo conoce dos valores lógicos, el verdadero y el falso. Es cerrado, en el sentido de que contiene exclusivamente aquello que ha sido introducido en los axiomas. Si ha sido construido respetando las reglas conocidas de coherencia y de complitud lógica, es en sí mismo justo e incontestable. Como sistema teórico, nada puede ponerlo en causa (y sobre todo no lo pueden poner en causa los hechos experimentales). A un sistema de esta naturaleza que se deriva de una determinada axiomática lo denominamos *modelo teórico*. Por ejemplo: el modelo del gas perfecto.

Un modelo teórico está construido de tal forma que puede ser puesto en correspondencia con una "situación" física real, es decir, con una serie de objetos manipulables físicamente y sobre los que podemos ejercer unas transfor-

maciones determinadas que constituyen una práctica experimental. En la medida en que existe un paralelismo (morfismo) entre el sistema de transformaciones teóricas del modelo y el sistema de transformaciones experimentales de la situación, podemos afirmar que el modelo *representa* la situación. Nos suministra una serie de operaciones llevadas a cabo mentalmente (o sobre el papel) que se encadenarán de la misma forma que las transformaciones que se producen (o que producimos) en el mundo de los objetos. El modelo nos permite manejar y modificar la situación de acuerdo con una finalidad determinada. Las situaciones físicas pertenecen a una realidad que es siempre más compleja y rica que nuestros modelos y que es de hecho inagotable. Por otra parte, la transcripción matemática (medida) de las transformaciones experimentales y sus leyes de composición nos son solamente accesibles de una forma aproximada (precisión limitada de toda medida). Es por ello por lo que, a pesar del paralelismo definido exteriormente entre modelo y situación, entre estos dos sistemas existen profundas diferencias. Estas diferencias hacen que el modelo no pueda ser considerado como una representación exacta y completa de la situación. Tarde o temprano encontraremos divergencias, ya sea cuando se consiga un orden de precisión experimental más elevado, ya sea cuando se extienda el campo de la situación a fenómenos nuevos, conexos a los antiguos y necesariamente relacionados con ellos.

Cuando entre un modelo y una situación aparecen divergencias, es preciso construir un nuevo modelo que deberá, como condición previa, dar cuenta del modelo precedente, el cual aparecerá como un caso particular o como una primera aproximación del nuevo modelo. La teoría física aparece así como constituida por modelos que se encajan los unos en los otros, y es frecuente que el nuevo modelo incluya no sólo a uno sino a varios modelos.

La historia de la física, considerada a grandes rasgos y una vez resueltos los conflictos y las contradicciones que acompañan las "revoluciones científicas", consiste en una sucesión de modelos encajados que describen teorías cada vez más poderosas englobando progresivamente un mayor número de situaciones y dominios.

Estas consideraciones nos llevan a plantear un problema importante: cuando en el transcurso del progreso científico se ha construido un nuevo modelo (modelo superior) que engloba uno o varios modelos anteriores (modelos inferiores), ¿cuál es entonces el estatuto de estos modelos inferiores?, ¿deben considerarse como falsos y prescindir de ellos?, ¿deberá reducirse la ciencia a su modelo superior y considerar los diversos casos particulares o aproximados como derivados del modelo superior y estudiarlos en lo sucesivo como tales sin conservar autonomía alguna?

Está claro que desde un punto de vista didáctico esta opción es insostenible incluso en la enseñanza superior. Supondría una exposición de la física que comenzaría por las nociones más difíciles de comprender y manejar, en la que los fenómenos más comunes y aparentes con los que se relacionan intuitivamente las nociones más características figurarían sólo en anexos auxiliares. El libro que ha llevado más lejos esta opción, el curso de física teórica de Landau y Lifschitz, no ha sido capaz de llegar hasta el fin: contiene una exposición autónoma de la Mecánica clásica que debería lógicamente aparecer como deducida a título de caso límite de la Mecánica cuántica relativista. Asimismo, la teoría de los campos (electromagnetismo) toma como punto de partida axiomático el relativismo de Lagrange del campo electromagnético, mientras que el modelo "superior" ya constituido integralmente es el de la electrodinámica cuántica. Si el manual de Landau y Lifschitz hubiera llevado su planteamiento hasta las últimas consecuencias, sería casi ilegible e imposible de enseñar a quienes no conociesen ya el conjunto de materias tratadas. No podría ser más que una síntesis a posteriori, lo que ya es en parte en su forma actual.

Hay que añadir que en este caso los constantes progresos de la teoría física obligarían, con motivo de los descubrimientos teóricos importantes, a reconstruir y a reaprender capítulos importantes de la física e incluso la física en su totalidad.

Por el contrario, si se admite la concepción expuesta del modelo teórico, esto implica que cada modelo es, en tanto que teoría, perfectamente coherente y cerrado y constituye una construcción completamente justifi-

cada en sí misma, independientemente de los límites de su conformidad con la realidad experimental. La fase propiamente teórica de la edificación de un modelo no es, pues, en absoluto caduca, y conserva intacto todo su valor didáctico. Por otra parte, la conformidad con la experiencia en un campo específico y hasta un cierto grado de precisión ha justificado históricamente la adopción del modelo. Mientras el modelo no salga fuera de este campo de aplicación sigue siendo válido y continúa teniendo la potencia y eficacia que tuvo inicialmente; se sigue utilizando en el campo de la tecnología, lo que lo hace, al menos en el aspecto utilitario, objeto de estudio y de enseñanza. (Los métodos y conceptos de la óptica geométrica clásica se enseñan siempre a los ingenieros ópticos que la deben utilizar a diario y que, por el contrario, no podrían utilizar las funciones de la onda óptica de Fresnel, y aún menos los campos vectoriales de la óptica electromagnética de Maxwell).

La fase propiamente física, la de la investigación experimental del paralelismo entre modelo y situación y la de su utilización tecnológica, es asimismo totalmente válida siempre que se sepa renunciar a la idea ingenua, implícitamente aceptada por la mayoría de los físicos, de que el modelo es la realidad y que, por consiguiente, el descubrimiento de una divergencia entre el modelo y la realidad experimental nos muestra el error de creer en la representatividad de este modelo que deberá, por lo tanto, ser reemplazado por otro verdadero. Este proceso continuará necesariamente hasta el infinito y su repetición terminará por engendrar un escepticismo global sobre el valor mismo de la ciencia que conducirá inevitablemente a olvidar los éxitos extraordinarios cosechados en su momento por los sucesivos modelos de la física. Sin embargo, estos éxitos continúan siendo totalmente vigentes en la medida en que no se sobrepase el dominio de validez de los modelos. La perspectiva del físico deberá ser la de una adecuación (isomorfismo) de modelos sucesivos a parcelas limitadas de la realidad experimental, mediante la adopción de puntos de vista determinados. Un modelo debe ser por tanto rigurosamente correcto desde el punto de vista de su coherencia interna, pero frente a la realidad física sólo puede ser una verdad relativa, y la búsqueda del *mode-*

lo absolutamente verdadero es contraria al espíritu mismo de las ciencias experimentales. Este es el sentido de la lección epistemológica —y didáctica— de la física. A este respecto, desde el punto de vista de la significación y del valor del conocimiento físico, *la inclusión sucesiva de modelos* y su relación con los niveles sucesivos de la experiencia proporciona la enseñanza más profunda y completa de la física, enseñanza que constituye una síntesis dialéctica de la afirmación del valor de la ciencia y de la necesidad de su crítica. “El conocimiento tiene derecho a la verdad absoluta a través de una sucesión de errores relativos” (Engels).

La conclusión de este análisis desde el punto de vista de la enseñanza secundaria es clara: la modernización de la enseñanza de la física no debe confundirse con la enseñanza de la física moderna. Los renovadores de la enseñanza de las matemáticas han considerado generalmente que el movimiento de investigación sobre los fundamentos iniciado hace cinco décadas ha revelado, con los conjuntos y la topología, los verdaderos conceptos que están —ontológicamente hablando— en la base de las matemáticas. A partir de ahí, han pensado que sería obligatorio, desde un punto de vista casi ético, introducir también estos conceptos en la base de la enseñanza de las matemáticas. Es una postura de principio de la que no nos ocuparemos aquí. Queremos decir solamente que, en el caso de la física, una obligación de esta naturaleza no tiene sentido.

Podemos hablar de un líquido o de un gas como de un “medio material continuo” caracterizado mediante parámetros hidrodinámicos y una cierta distribución de temperatura sin sentir escrúpulos por saber que, “de hecho”, nos estamos refiriendo a sistemas estadísticos de corpúsculos en movimiento desordenado. La realidad no tiene nada que ver con todo esto; existe un modelo continuo que es objeto de estudio indiscutible y que da cuenta de una cierta categoría —muy considerable— de hechos, principalmente de la vida cotidiana; y existe un modelo molecular que engloba el modelo precedente y que explica un conjunto mayor de hechos —y que es englobado a su vez por un modelo todavía más poderoso que tiene en cuenta la complejidad interna de las moléculas y sus posibilidades de transformaciones y de reacciones. Ninguno de estos mo-

delos es verdadero de forma absoluta. Cada uno de ellos es adecuado para una parcela más o menos amplia de la realidad. Tienen, de hecho, funciones distintas: el modelo continuo no puede explicar el movimiento de Brown ni los fenómenos de “fluctuaciones” que dan cuenta, por ejemplo, del color azul del cielo, pero el modelo molecular no tiene ninguna utilización en el tratamiento de los motores de gas o en la meteorología. La elección de los modelos que deben ser presentados y estudiados en un determinado ciclo de enseñanza no puede reposar sobre una “ética de la verdad”, siendo, pues, necesario que hagamos referencia a problemas de finalidad, que son ajenos a la física como ciencia con un valor en sí misma.

2. *La física del alumno*

Como en todo problema de objetivos, es necesario distinguir cuidadosamente la finalidad de la física —de la “física del físico”—, que ahora no vamos a precisar, y la finalidad de la enseñanza de las ciencias físicas. Esta última debe referirse ante todo al “sujeto” de la enseñanza, al alumno. La enseñanza de la física no es en absoluto la celebración de un culto, no se trata de ninguna iniciación a los misterios del universo, sino que debe tener como finalidad la realidad del alumno tal como es y como se desarrolla. El problema se divide, pues, en dos partes: por un lado, el de las motivaciones psicológicas del alumno, los problemas físicos que pueden plantearse a un niño o un adolescente a partir de sus preocupaciones; por otro lado, los objetivos de una enseñanza de la física para el futuro adulto que es el alumno. Estos son los dos aspectos de la “física del alumno”.

Hablaremos en primer lugar del segundo aspecto, lo que nos lleva a preguntarnos a qué finalidad responde el que los jóvenes franceses deban seguir y asimilar una enseñanza de la física y, correlativamente, *qué física* puede responder a esta finalidad.

Al ahondar en este problema vemos que se halla inmerso en una problemática mucho más amplia: la de los fines de la enseñanza secundaria en su totalidad. Es evidente —y la formación estrictamente unidisciplinaria de los profesores no puede conducir a otro resultado— que la actitud espontánea de los profesores (y la de los inspectores generales) de física es la

de transmitir a los alumnos todo lo que puedan "pasar" del cuerpo de doctrina que constituye la física del físico, cuerpo de doctrina cuya comunicación sólo alcanza realmente su cometido en el caso de los futuros físicos, profesores, investigadores, y al límite de los ingenieros. Esta opción "elitista" considera a los alumnos que más tarde no tendrán ningún contacto profesional con la física como un magma indiferenciado, no interesante y más bien perjudicial, que diluye y obstaculiza a los futuros físicos e ingenieros, los cuales constituyen la verdadera finalidad del sistema. Esta concepción queda claramente manifiesta en los programas de enseñanza secundaria que, tanto en el caso de la física como en el de otras disciplinas, están contruidos en función de los programas de la enseñanza superior a los que están estrechamente ligados, sin tener en cuenta que la mayoría de los alumnos de secundaria no tendrán acceso ni a la Universidad ni a las Escuelas Superiores, y que sólo en una proporción muy pequeña se convertirán en físicos.

Creemos que la opción principal de la pedagogía y de la didáctica modernas, la de partir de la realidad del alumno y de su futuro profesional, debe conducir a la adopción de una perspectiva exactamente opuesta: el profesor de física que se encuentra al frente de una clase tiene el deber de tener en cuenta al conjunto de la clase y evitar centrarse en algunos alumnos que manifiestan unas aptitudes o un interés especial por la física y que se perfilan ya como futuros físicos. Pero si esto es así, volvemos al problema inicial: ¿qué utilidad tiene impartir un curso de física a todos los alumnos de secundaria?

Desde el momento en que la mayoría de los alumnos no siguen una enseñanza en una disciplina determinada con vista a su profesión futura, la única salida es la opción que podemos llamar "cultural": los conocimientos que se adquirirán en la enseñanza secundaria deberán considerarse no como una preparación para una profesión, sino como *un objeto de consumo* que condiciona las aptitudes de los futuros adultos para enriquecer su vida personal y social; y esto mediante la adquisición en el transcurso de la escolaridad de una "cultura general" centrada en la toma de conciencia —comprehensión— de su entorno material y social. Tomaremos como punto de partida esta concepción de las líneas generales de la en-

señanza secundaria, concepción que se vincula con unos principios ideológicos evidentes que no justificaremos pero que el lector puede indagar fácilmente por su cuenta.

La primera cuestión que surge es: ¿qué entendemos por "entorno"? —término muy de moda y consecuentemente de uso poco preciso y aplicado a realidades muy diversas. No designaremos así al conjunto de seres y procesos con los que se encuentra el sujeto directamente en relación y en contigüidad —lo que sobre el plano didáctico equivaldría a limitar el dominio de la enseñanza a las realidades de la "vida cotidiana"—, sino por el contrario, a una organización de todo el Universo (en el tiempo y en el espacio) que parte del sujeto, de su situación concreta, y si se quiere de su vida cotidiana, y que procede por una exploración por capas concéntricas, en la que las capas más alejadas al sujeto son introducidas como explicaciones sucesivas a las capas más próximas. Esta concepción se sitúa en la línea de una vieja tradición humanista para la que "el hombre es la medida de todas las cosas", con la condición de no considerar al "hombre" como una abstracción, sino como un sujeto concreto "en situación" que, en el plano didáctico, se identifica en último término con el alumno, con todas las circunstancias concretas de su vida y con las de su futura vida de adulto.

Es la misma concepción general que nos lleva, por ejemplo, en historia, a preferir una enseñanza que, partiendo de lo contemporáneo, busca las raíces de un pasado cada vez más lejano; o que, en las ciencias de la vida, partirá de la fisiología humana para llegar a la exploración de los dominios más generales de la biología.

La enseñanza no comenzará, pues, con los gallos (o con el hombre prehistórico), como en los viejos libros de la escuela primaria; ni con la célula viva (o, como es frecuente hoy en día, con el ADN), sino que llegará finalmente a ello al término de una cadena de preguntas centradas en lo que el niño observa y manipula, centradas en lo que el niño *es* en el pleno sentido del término.

Bajo esta perspectiva, la razón de ser de una enseñanza de las ciencias físicas, destinada a introducirse en la "cultura" del conjunto de los alumnos de secundario no puede buscarse

en la "presentación" de todo lo que se sabe actualmente sobre el mundo físico —presentación que, como hemos indicado, debe subdividirse en niveles sucesivos de conocimientos. La enseñanza de las ciencias físicas deberá dirigirse al entorno material que, más allá de los hechos triviales de la vida cotidiana, concierne ante todo al entorno técnico, una civilización artificial, un conjunto de objetos fabricados por el hombre que lo rodean y lo influyen constantemente, del mismo modo que el paisaje urbano lo rodea desde el punto de vista geográfico.

Otra cuestión que se nos presenta es la de saber qué entendemos, pues, por "comprensión" de este universo de objetos técnicos y cómo se puede acceder a él por la vía didáctica.

Nos encontramos frente a un universo increíblemente heterogéneo, rico y cambiante, de tal manera que a primera vista parece imposible iniciar al alumno en las formas de funcionamiento, de uso y fabricación de los diversos objetos técnicos, aun en el caso de limitarnos a los más corrientes, a los más importantes, a los más característicos. Pero si tratamos de analizar (con vistas a su comprensión) una multiplicidad de objetos y de dispositivos técnicos, observaremos rápidamente que existen un cierto número de estructuras y problemas generales que llevan cada vez a realizar una abstracción específica, es decir, a estudiar estas estructuras generales independientemente de los objetos técnicos particulares de los que proceden (algunos de los cuales podrán subsistir a título de ejemplares típicos que facilitan y concretizan la comprensión). Veremos entonces que estas abstracciones se agrupan en dos sistemas principales que pueden dar lugar a dos disciplinas específicas:

1. *La tecnología*, que intenta explicar y esquematizar todos los problemas relacionados con la práctica (eventualmente social) de los objetos técnicos, con la organización intencional de sus funciones, y con las cuestiones generales que plantea su fabricación.
2. *La física* (más exactamente las ciencias físicas), que concierne a las propiedades generales de los materiales y de las diversas formas de la energía, propiedades que son puestas en práctica en la fabricación y utili-

zación de los objetos técnicos, y sin cuyo conocimiento estos objetos no podrían construirse ni funcionar.

Esta concepción de la física como una de las dimensiones de la comprensión del entorno material —y no como una presentación de la estructura del Universo material— es relativamente trivial. Pero si se toma en serio desde el punto de vista didáctico, es decir, si las nociones físicas se presentan siempre a partir de su uso en la técnica y como base para su comprensión, esta concepción permite plantear de forma relativamente nueva los problemas de la elección de los contenidos de la física en la enseñanza secundaria, de las relaciones que hay que subrayar entre ellos y de su secuenciación. Si no se pierde de vista la finalidad fundamental de hacer comprender lo mejor posible al adulto el funcionamiento de los dispositivos técnicos entre los cuales está llamado a vivir —y se intenta igualmente sacar partido del interés especial que muestra el niño por la comprensión del mundo técnico— llegaremos a un esquema de los contenidos de la enseñanza de la física que eliminará muchos problemas falsos.

Para cada forma de utilización técnica de la luz o de la electricidad, por ejemplo, corresponde un modelo preciso del conjunto de modelos de la física del físico. Y de esta forma, para cada nivel de profundidad en la exploración del mundo técnico, corresponderá un nivel de conocimiento teórico, sin tener que plantearse nunca el problema de la teoría "verdadera" subyacente.

Para comprender el funcionamiento de la dinamo, de la distribución y de la utilización de la energía eléctrica (continua o alterna), del teléfono, del motor eléctrico, del circuito de encendido de un motor de explosión, de un micrófono o de un magnetófono, sólo es necesario el modelo clásico de la corriente o del "fluido" continuo —tal vez apoyado por la vieja "analogía hidráulica" que tan ilustrativa resulta para la imaginación. En este nivel sería inútil, y posiblemente negativo para la comprensión directa, introducir la noción de "corriente de desplazamiento", la estructura de análisis vectorial de Maxwell o el concepto de electrón (que por otra parte no posee un poder explicativo simple en el caso de los fenómenos macroscópicos a no ser que tenga lugar en el vacío).

Por el contrario, estos nuevos conceptos, que de hecho constituyen un nuevo "modelo" de electromagnetismo, son indispensables para comprender ciertos aspectos "marginales" de los dispositivos técnicos precedentes (por ejemplo, los "parásitos" producidos por los carbones de un motor de corriente continua) y, sobre todo, en los nuevos campos abiertos por las técnicas modernas, como la producción, propagación y recepción de ondas radioeléctricas, la célula fotoeléctrica, el iconoscopio, la pantalla de televisión, el transistor, etc.

De este modo, la elección de los niveles sucesivos de modelos en la enseñanza de la física vendría determinada por la profundidad del mundo técnico a explorar. La introducción —y el momento de su introducción en la enseñanza— de las técnicas actuales condicionará claramente la de los modelos de la física.

3. *La "estructura de recepción" y la física del profesor*

Con todo lo anterior no hemos llegado aún al final de las dificultades. El alumno no debe ser considerado únicamente como un "sujeto social", como un futuro adulto llamado a vivir en un cierto entorno tecnológico que determina la cultura científica que se le tiene que transmitir. Es al mismo tiempo un "sujeto psicológico" con un determinado nivel intelectual que funciona de un modo también particular. Tras haber esclarecido la "estructura de la física del físico" y sus relaciones con el entorno, debemos considerar también el aspecto psicológico de la enseñanza.

La física, en la forma en que actualmente se enseña, no se presenta como una mera descripción que coloca ante el alumno una serie de hechos acumulados; lo que predomina son las relaciones, e incluso las relaciones de relaciones, constituyendo un modelo que permita operar intelectualmente transformaciones (por ejemplo, matemáticas) que "representan" las transformaciones de los objetos físicos. Concebida de esta forma, la enseñanza de la física plantea toda una problemática propia de la psicología de la inteligencia. Estos problemas son tanto más arduos en cuanto que son generalmente mal percibidos por los profesores y por los teóricos de la enseñanza. En general, el orden de introducción de los contenidos de la enseñanza tal como se encuentra

en manuales y programas va de las nociones físicamente "elementales" a las nociones compuestas, o como comúnmente se dice, de lo simple a lo complejo, siendo empleados ambos términos desde el punto de vista de las nociones y no desde el de las relaciones y de su manejo por la inteligencia. Así, parece evidente que las nociones mecánicas relativas a los sistemas en equilibrio son más primitivas, más "elementales", que las que se refieren a los sistemas de movimiento; siendo el movimiento el cambio de entidades que deben ser previamente definidas en las condiciones en que no cambian. De todo ello se desprende lo que hasta hace poco parecía evidente: que se debía estudiar la estática (del punto material, de los sistemas sólidos, de los fluidos) antes de abordar la dinámica del punto o de los sistemas y la hidrodinámica.

Pero si nos situamos en la perspectiva del funcionamiento de la inteligencia del sujeto, veremos inmediatamente, a partir de las investigaciones de los psicólogos, que existe una jerarquía (y una sucesión temporal en la historia del desarrollo) entre los diversos tipos de relaciones, de tal manera que algunas de entre ellas son manejadas más precozmente y más fácilmente que otras. Esta jerarquía de relaciones que hace referencia al sujeto pensante es totalmente diferente de la jerarquía de las nociones (simples o compuestas) que se refiere al objeto en sí.

Precisando aún más, la capacidad de construir modelos físicos y de manejar las transformaciones de las relaciones dentro del marco de estos modelos —capacidad que puede tomarse como finalidad general de la enseñanza de la física— pone en juego lo que la principal escuela de la psicología de la inteligencia, la piagetiana, describe como capacidades operatorias. Estas capacidades han sido analizadas por Piaget y clasificadas en una escala genética de desarrollo mediante la noción de operaciones: las operaciones son las transformaciones elementales susceptibles de actuar sobre los modelos contruidos por la inteligencia. Las operaciones son, genéticamente, acciones transportadas al plano del pensamiento que son reversibles, susceptibles de ser combinadas y que aparecen organizadas en sistemas operatorios de conjunto. Piaget ha puesto de manifiesto el origen de las operaciones lógico-matemáticas en el niño a partir de la coordinación concreta de las acciones, de su sistematización

posterior y su inserción en sistemas completos y coherentes. Esto ha abierto el camino a la comprensión científica del desarrollo genético de la actividad operatoria, la cual, a partir de un determinado nivel de evolución, desemboca en la construcción coherente de un modelo. De este modo se ha facilitado también el camino del aprendizaje y de la enseñanza de la actividad científica central que consiste en construir y manejar modelos. Los trabajos de Piaget constituyen, pues, el hilo conductor de la didáctica científica.

La consideración de esta dimensión psicológica y genética del pensamiento físico como aptitud para asimilar y manejar modelos operatorios plantea bajo una perspectiva totalmente nueva el problema de la construcción del "currículum" de la física en la enseñanza secundaria. Subyacente a la mayoría de los programas de enseñanza secundaria está la idea que considera la inteligencia del alumno homogénea en su funcionamiento a la del profesor, con la única diferencia de que esta última contiene el conocimiento de la física mientras que la del alumno es como un recipiente vacío que espera ser llenado con el mismo contenido. Este contenido sería, pues, introducido en capas sucesivas, lo cual significa que los contenidos preexistentes en la inteligencia del alumno de secundaria consisten en el conjunto de conocimientos adquiridos desde el inicio de la escolaridad —conocimientos que estarán fácilmente a su alcance siempre que tenga acceso a los libros correspondientes de matemáticas y de tecnología.

En realidad, la inteligencia del niño no es en absoluto un molde en el que se van registrando huellas sucesivas, no es un sistema que conserva en orden lineal una serie de informaciones y de algoritmos. Se trata de un organismo activo que reacciona al contacto con la enseñanza y con todas las experiencias de la vida cotidiana. Es por encima de todo un organismo que, a través de la coordinación de sus propias acciones, se dota de una estructura determinada en la que se insertan y organizan todos los conocimientos asimilados. Esta "estructura de recepción" es para el maestro el contenido preexistente primordial, con la particularidad de que es un dato generalmente desconocido ya que tiene poca relación con la estructura de las disciplinas científicas que con anterioridad se ha pretendido enseñar al

niño. Si queremos que la enseñanza de la física tenga un mínimo de eficacia, es preciso explorar y conocer esta estructura de recepción tal y como es, no como se ha querido construir.

4. Tres ejemplos

Trataremos de precisar ahora estas ideas sobre el lugar específico que ocupa la "física del maestro" en el punto de intersección —y algunas veces de conflicto— de la física del físico y de lo que hemos llamado la "estructura de recepción" que caracteriza en el plano psicológico la física del alumno. Para ello, abordaremos brevemente tres puntos importantes: la función de la abstracción, la de la causalidad y la de la experiencia.

1) *La abstracción.* Hemos visto que el objetivo esencial de la enseñanza de la física consiste en desarrollar en el alumno la capacidad de asimilar y manejar modelos operatorios. Por otra parte, hemos insistido sobre el hecho de que para el físico un modelo reposa sobre una axiomática de la misma naturaleza que una teoría matemática, lo que hemos convenido en llamar una teoría "abstracta". Se trata de saber ahora cuál es el papel que juegan estos modelos abstractos en la física del alumno, cuál es el camino que sigue el alumno para llegar a comprender y manejar "la abstracción".

Los estudios recientes de Piaget sobre las formas de la abstracción en el niño nos suministran a este respecto unas ideas muy valiosas —aunque los resultados obtenidos con niños más pequeños no puedan aplicarse tal cual al conjunto de alumnos de la enseñanza secundaria. Piaget ha demostrado la existencia de dos niveles en el proceso psicológico de la abstracción; estos dos niveles —la abstracción "empírica" y la abstracción "reflexionante"— se suceden dentro de cada dominio particular, pero pueden reencontrarse en cada uno de los "estadios" que definen las estructuras generales sucesivas de la inteligencia. La abstracción empírica forma conceptos abstraídos directamente a partir de los datos observables, comparando los que se parecen y haciendo "abstracción" de sus diferencias, lo que permite, a partir de sus rasgos comunes, formar un concepto restringido (y por lo tanto "abstracto") susceptible de intervenir en relaciones relativamente generales, algunas de las cuales, las que carac-

terizan interacciones, continúan precisamente las "operaciones" en el sentido preciso mencionado anteriormente. La abstracción reflexionante, por otra parte, opera sobre operaciones, es decir, sobre relaciones ya abstraídas. Es una abstracción de segundo grado que, por supuesto, reposa sobre la adquisición y el manejo previo de las operaciones; es decir, que presupone la formación de abstracciones empíricas.

Por ejemplo, las nociones generales de sólido, líquido y gas constituyen abstracciones empíricas que resultan de las propiedades comunes observables a diversos sólidos (o líquidos o gases) que difieren entre sí por su color, peso, temperatura, etc. Asimismo, los conceptos de fusión (o de solidificación), de vaporización (o licuefacción) se forman a partir de las observaciones relativas a los cambios particulares de estado. Por el contrario, la afirmación general de que todo cuerpo puede hallarse en estado sólido, líquido o gaseoso y puede pasar de un estado a otro constituye una abstracción reflexionante que plantea una distinción general entre el tipo de sustancia (cuerpo puro, por ejemplo) haciendo abstracción del estado en que se encuentra, y el estado físico, haciendo abstracción del tipo de sustancia. Esta abstracción generalizada permite al niño, cuando es capaz de asimilarla, hablar de hierro fundido o de aire líquido sin haberlos visto nunca y anticipando algunas de sus propiedades.

Desde el punto de vista didáctico es muy importante analizar y seguir el proceso de adquisición de estos dos tipos de abstracción, de saber en cada dominio cuándo el alumno es psicológicamente capaz de asimilar y de manejar los dos tipos de conceptos abstractos. En efecto, los modelos operatorios sólo pueden constituirse en el nivel de la abstracción reflexionante, que proporciona el instrumento preciso de las transformaciones efectuadas por la inteligencia en el marco de un modelo concreto.

El concepto de fuerza, por ejemplo, se adquiere a partir de fuerzas de "naturaleza" particular: fuerza muscular, fuerza de tracción de un vehículo, fuerza transmitida a través de un hilo, fuerza magnética, fuerza de gravedad (esta última muy difícil de relacionar con las otras). Las propiedades comunes a estas diferentes fuerzas (deformación de resortes, puesta en

movimiento de cuerpos con masa) permite formar un concepto general, la fuerza, definido por la capacidad de producir efectos determinados. Se trata de una abstracción empírica. Es muy importante conocer a qué edad el niño es capaz, desde el punto de vista operatorio, de pensar en la fuerza olvidando las diferencias de naturaleza física y reteniendo solamente los efectos comunes a todas las fuerzas particulares. Algunas investigaciones de la escuela de Piaget han demostrado —y nosotros lo hemos podido comprobar en situación escolar— que esta capacidad aparece entre los doce y catorce años, más precozmente en lo que concierne a los efectos dinámicos y posteriormente en lo que hace referencia a los efectos estáticos.

Por el contrario, la fuerza como vector, es decir, "esquematzable" mediante una flecha, que puede componerse con otras, que se puede proyectar, etc., es del dominio de la abstracción reflexionante. Supone la capacidad de formar reglas generales relativas a las operaciones con fuerzas. Resulta indispensable para constituir un modelo operatorio de la mecánica (tanto en estática como en dinámica) que permita calcular y prever los efectos físicos que resultarán de situaciones compuestas, es decir, que permita construir un sistema científico que supere el enunciado de leyes elementales y triviales, sistema que constituye efectivamente la meta de la enseñanza de la mecánica. Esta abstracción reflexionante es más tardía que la precedente. Hacia los catorce años existe de forma incipiente, pero sólo para prever un efecto dinámico; para componer fuerzas en equilibrio precisará algo más de tiempo. En cualquier caso podemos afirmar que la propuesta clásica de introducir el concepto de fuerza únicamente después de haber enseñado el cálculo vectorial en matemáticas bajo la forma directamente abstracta de "espacios vectoriales" apela al tipo de abstracción más elevado, la axiomatización, y violenta de esta forma el curso natural de la inteligencia con los deplorables resultados que los físicos pueden constatar a diario y que persisten todavía en la "física del alumno" por lo menos hasta su ingreso en la Facultad.

2) *La causalidad*. Los modelos actuales de la física han suprimido generalmente la noción de "causa" considerándola con justicia como un residuo antropomórfico. Las explicaciones

propias de estos modelos se refieren a leyes de conservación o evolución (termodinámica), a principios de optimalización (condiciones de integral estacionaria), a relaciones de interacción (electromagnetismo) o a relaciones de estructuras de naturaleza aún más abstracta que reposan en último término en una axiomática (relatividad, mecánica cuántica). La confusión ya señalada entre la modernización de la enseñanza de la física y la enseñanza de la física moderna produce una tendencia a expulsar la causalidad del campo de la enseñanza. Las nuevas propuestas para la enseñanza de la mecánica en secundaria obedecen a esta idea y se basan esencialmente en las relaciones de conservación.

Sin embargo, los estudios de los psicólogos han demostrado la "pregnancia" fundamental de la relación de causalidad en las explicaciones de los niños y de los adolescentes. La causalidad, para Piaget, consiste en proyectar sobre el mundo de los objetos (en atribuir a los objetos) las estructuras operatorias que el niño ha construido mentalmente a partir de la coordinación de sus acciones. Es cierto que esta proyección es antropomórfica. No obstante, no consiste en atribuir (mágicamente) a los objetos las capacidades de acción propias del sujeto, sino las estructuras operatorias formadas a partir de estas capacidades de acción; y como estas estructuras operatorias constituyen por otra parte el origen de todo el pensamiento lógico-matemático, la lógica y las matemáticas se relacionan con la física a través de la causalidad, es decir, que gracias a la causalidad el sujeto deviene capaz de formar modelos operatorios en física.

El pensamiento causal no sólo constituye una etapa intermedia esencial —podríamos incluso decir indispensable— en la construcción de los modelos de la física, sino que se ha constatado también que hasta etapas avanzadas de la adolescencia las explicaciones causales son las explicaciones por excelencia, las que satisfacen al niño por encima de cualquier otra. Cuando se coloca a los niños ante una afirmación "estructural" (por ejemplo, la dirección de la luz se acerca a la normal cuando deja el aire y penetra en el agua), o frente a una evidencia experimental (por ejemplo, los cuerpos sumergidos en el agua pesan menos), no están satisfechos ni son capaces de asimilar y manejar rigurosamente la relación introducida en el enunciado hasta que se les responde a los

"porqué" que plantean inmediatamente (siempre y cuando estén en condiciones de poder exteriorizar espontáneamente sus reacciones). Ahora bien, estos "porqué" suelen significar aproximadamente: "¿por qué causa?". Si se les responde que "es así" porque lo pueden constatar ellos mismos haciendo y repitiendo las experiencias, quedan insatisfechos y la relación no penetra efectivamente en su sistema cognitivo, no es asimilada como un componente nuevo de su conocimiento.

Así pues, parece que debe tenerse en cuenta este hecho psicológico general en la presentación de los diversos contenidos de la física, aun cuando la física del físico se haya desprendido del "porqué" en provecho del "cómo", es decir, haya centrado su interés sobre la estructura de la relación y su representación abstracta en el lenguaje matemático más congruente. Por esta razón nos parece que la iniciación a la dinámica —ya se lleve a cabo mediante la aceleración o mediante las variaciones de la cantidad de movimiento— debe centrarse sobre el concepto de fuerza, que en su concepción más general es precisamente la causa por excelencia.

Asimismo, en la introducción —al menos en la elemental— a la electrocinética, es preciso reflexionar sobre la presentación, ya sea como causas, ya sea como efectos, de los aspectos del fenómeno que para el físico aparecen simplemente unidos por relaciones bilaterales expresadas a través de una igualdad. El niño no comprenderá en profundidad estas relaciones a menos que las mismas se presenten de forma direccional: una causa que actúa sobre un sistema, caracterizado por ciertas cantidades, y produce un cierto efecto conforme a una ley determinada. Por ejemplo (sólo un ejemplo a discutir o, mejor aún, a comprobar por medio de una experiencia didáctica): un generador de fuerza electromotriz E producirá en un circuito cerrado de resistencia R una corriente de intensidad I dada por $I = E/R$. Siendo E la causa, R la característica del sistema e I el efecto.

Esta relación de causalidad psicológicamente fundamental deberá ser posteriormente discutida y relativizada de forma que el alumno llegue al nivel de las concepciones estructurales modernas. Pero los estudios —muy fragmentarios todavía— efectuados sobre este punto nos hacen pensar que la causalidad es la

fuente principal de la comprensión hasta un estadio intelectual relativamente avanzado, y que suministra todavía una ayuda indispensable a los estudiantes de los primeros cursos de la Facultad.

3) *La experiencia.* (Este aspecto del problema didáctico se presenta aquí basándonos en una investigación que estamos llevando a cabo con alumnos de trece-catorce años sobre la iniciación a la Dinámica). La enseñanza de la Física adopta generalmente como punto de partida la fórmula —incontestable— de “la física es una ciencia experimental”. Es cierto que hasta en la construcción teórica el estrecho contacto con la experiencia es indispensable y que la mayor parte del trabajo de investigación del físico es un trabajo de laboratorio. Pero nos ha parecido —y la mecánica es evidentemente un campo en el que las cosas aparecen de forma particularmente característica— que una enseñanza elemental que sitúe su punto de partida en un análisis directo de los hechos experimentales por el alumno (ya sea a partir de experiencias efectuadas en su presencia por el maestro, ya sea a partir de manipulaciones libres) tomaría las cosas al revés y resultaría contradictoria tanto con los procesos naturales de la inteligencia como con la historia del desarrollo de la ciencia.

Los dispositivos dinámicos habituales nos presentan siempre el resultado complejo de diversas causas entrelazadas, y tanto la observación como la manipulación directa de la realidad no puede conducir sino a conclusiones oscuras: en la gran mayoría de los movimientos encontrados en la práctica, a las fuerzas “motrices” se sobreponen los fenómenos de frotamiento y de resistencia, y esta pluralidad de causas hace —y ha hecho durante dos mil años— ininteligible la mecánica, haciendo sobresalir irresistiblemente el esquema aristotélico de causalidad y covariación entre fuerza y velocidad (constante). Una experiencia fácil de comprender debe ser cuidadosamente “preparada” por medio de procedimientos que permitan eliminar los factores no pertinentes. Ello presupone por lo tanto que se sepan distinguir ya los diversos factores y que se dirija la atención hacia la relación que se quiere estudiar aisladamente. Presentando a los alumnos, como se hace habitualmente, una experiencia ya simplificada, se les evita el trabajo intelectual anterior a la definición y distinción de los factores, trabajo que es esencial para el

desarrollo de su propia capacidad operatoria. Así, hoy en día se utilizan frecuentemente para la enseñanza “experimental” de la mecánica procedimientos que suprimen el frotamiento como las “mesas sopladoras”, cuya concepción y realización, dirigidas a hacer el fenómeno “sencillo”, son de hecho muy sofisticadas; presentando al alumno un dispositivo complicado y misterioso, en el que además los móviles muestran un comportamiento totalmente insólito. Estos procedimientos no pueden, a nuestro juicio, convencerlos de que están estudiando un aspecto elemental de la realidad.

Nuestro método para introducir la distinción entre fuerza motriz (aceleradora) y fuerza de frotación se basa en el hecho (que concuerda con un resultado de Piaget) de que un niño de trece años al que se le presente (tanto en la realidad como en un supuesto hipotético) el caso de un tren impulsado sobre una vía horizontal y abandonado a sí mismo se pregunta las razones por las que se detiene al cabo de un rato. Es posible entonces hacerle imaginar una situación en la que habiendo reducido a cero todos los factores de frotamiento, el tren rodaría indefinidamente; es decir, es posible hacerle descubrir, mediante la sola reflexión, el principio fundamental de la inercia. Esta es la línea de pensamiento que condujo a Galileo al enunciado de este principio. Desde el momento en que el niño es capaz de suprimir los frotamientos mentalmente y de razonar sobre una situación ideal, es inútil desde el punto de vista del pedagogo preocuparse y ocuparse en realizar efectivamente esta situación. Lo esencial está adquirido: el frotamiento constituye ya un concepto distinto que juega solamente el papel de un factor perturbador y que puede separarse virtualmente.

El terreno aparece entonces despejado para estudiar la relación elemental de causalidad entre la fuerza activa y las variaciones del movimiento. Para ello, la primera “experiencia”, la del tren que avanza sin frotamiento bajo la acción de una locomotora, puede concretarse a través de un film, o también mediante alguna experiencia personal de los alumnos que hayan viajado en ferrocarril. Pero en todo caso la función de esta experiencia —real o imaginaria— no es la de establecer o verificar la ley: una fuerza constante produce una aceleración constante. Tiene la misión de suministrar al alumno un soporte concreto a una relación operatoria fundamental, de hacérsela en-

tender y manejar. De este modo, la comprensión de la relación causal no solamente es adquirida con bastante regularidad, sino que incluso hemos conseguido con relativa frecuencia que los alumnos descubran por anticipado las relaciones fuerza-aceleración y masa-aceleración. Por el contrario, las tentativas que hemos efectuado —a partir de los gráficos suministrados por la Sociedad Nacional de Ferrocarriles— para seguir el “método experimental” ordinario, es decir, para hacer descubrir la ley mediante el análisis de la experiencia real, han constituido un fracaso, pues conducían a los alumnos a una gran abstracción y confusión.

Finalmente, una vez comprendida la ley elemental en las condiciones de un sistema ideal (sin frotamiento), los alumnos no tienen ninguna dificultad en combinar los conceptos de fuerza motriz y de frotamiento para llegar de esta manera a la experiencia real.

Así (en situación escolar) los alumnos saben explicar el funcionamiento de un pequeño tren “Lego” con pilas que adquiere casi inmediatamente un movimiento uniforme, diciendo que “el frotamiento impide la aceleración”. También (en condiciones de experimentación) nos han explicado que un tren real no consigue en realidad alcanzar las velocidades que implicaría un movimiento uniformemente acelerado diciendo: “acelera cada vez menos porque el aire es cada vez más fuerte cuando el tren va más deprisa”.

No dudamos en decir que este tipo de respuestas muestra una asimilación enteramente satisfactoria del rol causal de la fuerza, sin que el éxito aparezca disminuido por el hecho de que, en rigor, ambas explicaciones son falsas. (En el caso del tren *Lego*, la velocidad límite uniforme es debida a las condiciones eléctricas: crecimiento de la fuerza contra-electromotriz con la velocidad. En el caso del tren real, la velocidad que no debe sobrepasarse está sencillamente regulada por el conductor, que reduce la fuerza motriz de forma que esté dentro de las normas de seguridad). El esquema de un tren arrastrado por una fuerza de tracción constante está muy lejos de corresponder a la situación real.

Para nosotros el papel que juega la experiencia —y las manipulaciones que intervienen en otros temas— no es enseñar al alumno a leer

las relaciones matemáticas en una situación real. Más bien sirven para ayudarle a formar y clarificar conceptos “concretos”, es decir, que corresponden a clases de objetos o fenómenos con los cuales la observación (sobre todo cualitativa) y la práctica manipulatoria lo ponen directamente en contacto, y para formar mentalmente las relaciones operatorias que unen estos conceptos, tal como sugieren las relaciones causales que unen estos fenómenos.

Esta concepción de la experimentación, que pretende construir sobre el plano de la psicología cognitiva los conceptos y las relaciones de la física, difiere muy profundamente de la que, por imitación de la física del físico, aparece generalmente en los manuales con dos funciones:

- 1) Definir con precisión, en el plano mismo de la epistemología física, las nociones y sobre todo las magnitudes a tener en cuenta: las cantidades físicas no pueden ser manejadas e introducidas en las leyes hasta que se haya precisado exactamente cómo se pueden obtener sus valores, es decir, hasta que se hayan descrito y definido con precisión los procedimientos de medida (pero en general el dispositivo efectivo de medida de una magnitud física presupone numerosos conocimientos que van mucho más allá de la simple definición de la magnitud física estudiada. Esta definición de una magnitud por su medida introduce por consiguiente un círculo vicioso análogo al que hemos señalado a propósito del aislamiento experimental de las leyes “elementales”).

- 2) Establecer una certeza específica en lo que concierne al acuerdo entre las leyes físicas y un sistema de experiencias. (Pero la ley afirmada tiene siempre un enunciado exacto mientras que las experiencias —sobre todo en condición escolar— suministran siempre resultados aproximados. La certeza así adquirida es siempre relativamente débil y la impresión que deja en los alumnos es que la física es una ciencia muy aproximativa).

Las verdaderas características de la experimentación y de su rol probatorio respecto a la teoría deberán ser cuidadosamente detalladas —una vez que el alumno ha construido la teoría— incluyendo trabajos prácticos donde se podrán estudiar los problemas de incertidumbre, de error de cálculo, etc. Pero esto sólo será posible si la base teórica no se deriva de la

experiencia, sino que, por el contrario, la precede para permitir comprenderla tal y como ha ocurrido siempre a lo largo de la historia de los descubrimientos científicos.

Conclusión

Las observaciones que hemos hecho no tienen por objeto tratar exhaustivamente todos los problemas planteados por la enseñanza de la física en la escuela secundaria, y menos aún resolverlos. Su objetivo es únicamente clarificar esta problemática distinguiendo tres pla-

nos que generalmente se interfieren en la práctica y la teoría de esta enseñanza: el plano de la física, tal como el físico de profesión la ha aprendido y practicado desde siempre; el de la finalidad de la enseñanza de la física, considerando el futuro de todos los alumnos de secundaria; y por último, el plano del funcionamiento genético de la inteligencia, tal como se manifiesta en la práctica de la enseñanza, que constituye lo que hemos denominado la "física del profesor" y que es el objeto mismo de la didáctica científica.