

MAS ALLA
DE LAS PARTICULAS
Y DE LAS ONDAS

UNA PROPUESTA
DE INSPIRACION
EPISTEMOLOGICA
PARA LA EDUCACION
CIENTIFICA

FRANCISCO LOPEZ RUPEREZ

C·I·D·E·

MAS ALLA
DE LAS PARTICULAS
Y DE LAS ONDAS

UNA PROPUESTA
DE INSPIRACION
EPISTEMOLOGICA
PARA LA EDUCACION
CIENTIFICA

FRANCISCO LOPEZ RUPEREZ

C·I·D·E·

MAS ALLA DE LAS PARTICULAS Y DE LAS ONDAS

**UNA PROPUESTA DE INSPIRACION EPISTEMOLOGICA
PARA LA EDUCACION CIENTIFICA**

Francisco López Rupérez

**ESTUDIO FINANCIADO CON CARGO A LA CONVOCATORIA DE
AYUDAS A LA INVESTIGACION DEL C.I.D.E.**

Número 93
Colección: INVESTIGACION

López Rupérez, Francisco

Más allá de las partículas y de las ondas: una propuesta de inspiración para la educación científica / Francisco López Rupérez. — Madrid : Centro de Publicaciones del Ministerio de Educación y Ciencia : CIDE, 1994

1. Física 2. Aprendizaje 3. Educación científica 4. Epistemología 5. Interdisciplinariedad

© MINISTERIO DE EDUCACIÓN Y CIENCIA
Secretaría de Estado de Educación
Dirección General de Renovación Pedagógica
Centro de Investigación, Documentación y Evaluación
EDITA: Secretaría General Técnica
Centro de Publicaciones

Tirada: 1200 ejemplares.

Depósito Legal: M-33.861-1994

NIPO:176-94-122-9

I.S.B.N.: 84-369-2530-0

Imprime: DIN IMPRESORES

Marqués de San Gregorio, 5. 28026 Madrid

A Montse, mi mujer.

INDICE ANALITICO

1. INTRODUCCION	11
-----------------------	----

PRIMERA PARTE

UNA APROXIMACION DE CORTE EPISTEMOLOGICO

2. FISICA, EPISTEMOLOGIA Y EDUCACION CIENTIFICA. UN ENFOQUE TRANSDISCIPLINAR	17
Sobre la noción de enfoque transdisciplinar	17
Sobre el concepto de epistemología	19
El sistema física, epistemología y educación científica. Una primera aproximación	21
El análisis de las relaciones internas. Una segunda aproximación	22
La aportación del mensaje cuántico. Una tercera aproximación	35
En la perspectiva de una epistemología no cartesiana	39
Una nueva fuente de inspiración para la educación científica	41
3. EL PRINCIPIO DE INVARIANCIA COMO PARADIGMA DE PRINCIPIO EPISTEMOLOGICO	47
Simetría e invariancia en la física fundamental	48
La noción de simetría	48
Simetría, relatividad y principios de conservación	49
Más allá del marco clásico	52
Simetría y unificación	58

Metasimetría	59
Tipos de simetrías formales	60
El contenido de la clasificación	61
El principio de invariancia como principio epistemológico	65
4. HACIA UN SISTEMA DE PRINCIPIOS EPISTEMOLOGICOS	69
El principio de complementaridad	71
Sus orígenes	71
Complementaridad y representación dual	73
Complementaridad e indeterminación	75
El principio de complementaridad como principio epistemológico	77
El principio de exclusión	79
Simetría y exclusión	80
Spin y realidad material	81
Spin y complementaridad	83
El principio de exclusión como principio epistemológico	84
El principio de complejidad de lo elemental	87
Del atomismo científico a la crisis del concepto de partícula elemental	88
Obstáculos para una superación del atomismo	93
La complejidad de lo elemental como principio epistemológico	96
El principio de autoconsistencia	98
"Boostrap" o autoconsistencia	98
Autoconsistencia vs. elementalismo	102

El principio de autoconsistencia como principio epistemológico	104
Algunas relaciones internas	105

SEGUNDA PARTE

ALGUNAS IMPLICACIONES PARA LA EDUCACION CIENTIFICA

5. UN PRINCIPIO DE INVARIANCIA PARA EL APRENDIZAJE CIENTIFICO	111
En busca de un enunciado significativo	113
Sometiendo el principio a prueba	115
Algunas consecuencias primeras	125
6. LA COMPLEJIDAD DE LO ELEMENTAL EN EL APRENDIZAJE DE LOS CONCEPTOS CIENTIFICOS	129
Sobre el concepto de concepto	129
Los conceptos científicos	136
La ilusión de la simplicidad	136
La ilusión de la estaticidad	145
Conceptos y preconceptos	150
La complejidad de lo elemental en el aprendizaje de los conceptos científicos	157
Complejidad conceptual y marcos alternativos: un nuevo modelo de cambio conceptual	158
Complejidad conceptual: algunos otros principios de acción didáctica	163

7. EN POS DEL SIGNIFICADO.	
ALGUNAS IMPLICACIONES DIDACTICAS	169
El aprendizaje como construcción de significado	170
Aprendizaje y comunicación	176
Hacia un modelo integrado de conocimiento científico ...	177
A modo de conclusión final	183
REFERENCIAS	185

1

INTRODUCCION

La física encarna, hoy más que nunca, los valores del conocimiento humano. Su separación, ya remota, del árbol de la filosofía no ha restado fuerza a su vocación por la comprensión de la totalidad. La propia denominación de *filosofía natural*, otorgada en tiempos de Copérnico y Newton, expresa por sí sola su vinculación a una forma de conocimiento que se interesa por construir una visión global del mundo. Identificada con sus orígenes, y a la vez que retenía su vocación filosófica, ha sido capaz de restringir convenientemente los dominios de análisis, como una estrategia de avance y de progreso, poniendo en marcha una metodología de resolución de problemas y de construcción de conocimiento cuya característica fundamental es la de disponer de mecanismos autocorrectivos eficaces en orden a conseguir una representación cada vez más fiable de lo real.

De Galileo a Einstein, de Faraday a Feynman y más allá del balance, no siempre equivalente pero siempre ponderado, entre teoría y experimento, la física ha ido ampliando, precisando y, a un tiempo, dotando de coherencia un marco conceptual cada vez más general. Su carácter fundamental, la potencia de sus técnicas y la operatividad de sus nociones la ha situado en múltiples ocasiones como disciplina de referencia, como la ciencia básica por excelencia. Esta posición central de la física en el contexto del conocimiento científico ha inspirado en otras disciplinas lo que algunos han calificado de "oportunisto del conocimiento", esto es, una cierta aproximación a sus modos de hacer, a sus modelos, o incluso a sus contenidos con fines pragmáticos o de "explotación".

Sin embargo, y más allá de la cuota de progreso, que un enfoque

de este estilo haya podido aportar a otras disciplinas, la física fundamental alberga en su seno un potencial de conocimiento transponible insuficientemente explotado. No se trata, en este caso, de transportar el segundo principio de la termodinámica al análisis de los comportamientos sociales, por ejemplo, sino de elevar los principios, o las ideas más generales, característicos de la física contemporánea de lo cuantitativo a lo cualitativo, de un plano epistemológico más bajo a otro de mayor altura hasta alcanzar una mayor cota de generalidad y, por tanto, un dominio más amplio de aplicabilidad potencial. Detrás de semejante empresa se esconde la convicción -avalada por los positivos avances experimentados por la física fundamental a lo largo del presente siglo y compartida por un buen número de físicos teóricos cuyas contribuciones respectivas al progreso de la disciplina resultan incuestionables- de una cierta unidad fundamental del conocimiento humano que hace posible transferir significado de uno a otro de sus ámbitos.

Aún cuando una orientación como la más arriba avanzada pudiera parecer alejarse de los planteamientos típicamente científicos en pos de una suerte de metafísica o de una clase de mística singular, la intención del presente trabajo se dirige justamente en el sentido opuesto; se trata más bien de poner a prueba la fecundidad de tal inspiración a la hora de facilitar el progreso de otras áreas del conocimiento.

Por tal motivo, procederemos, en primer lugar, acotando un conjunto de disciplinas conectadas entre sí e identificándolo como un sistema de carácter *transdisciplinar*. La *física*, la *epistemología*, la *enseñanza* y el *aprendizaje* científicos, serán sus elementos componentes fundamentales. En segundo lugar, justificaremos la definición de dicho sistema y sus consecuencias apelando a argumentos que evidencien la legitimidad intelectual del enfoque antes aludido, la cual se sitúa tanto en el plano epistemológico, o relativo a la naturaleza del conocimiento así relacionado, como en el metodológico, o referente al procedimiento de construcción. En tercer lugar, ensayaremos el transferir significado, en el seno de dicho sistema, desde el panorama contemporáneo de la física fundamental a la educación científica mediante procedimientos de corte epistemológico; y, finalmente, pondremos a prueba empíricamente los principios así elaborados y sus predicciones en un contexto propio de la educación científica.

La apuesta teórica que se encierra entre las páginas del presente

ensayo consiste, finalmente, en orientar la enseñanza de la ciencia, su aprendizaje y la investigación sobre ambos, por el camino del significado; significado que se incrementa al recorrer la senda correspondiente en un doble sentido; hacia arriba, para conectarlo con ese marco general que para el conocimiento ofrece la física fundamental contemporánea cuando es leída en clave epistemológica; y hacia abajo, en busca de un conocimiento explícito de los atributos polifacéticos de los conceptos científicos que configuran su propia contextura y nos aproximan a la aprehensión de su complejidad. Ese primer movimiento de carácter más especulativo, que añade sentido al significado, será desarrollado a lo largo de la *primera parte* de la obra. De otro lado, el segundo movimiento, de naturaleza más operativa, quedará contenido en la *segunda parte*.

Después de todo, y como anticipara David Bohm, si en el seno de la ciencia se permite la búsqueda de la elegancia matemática ¿no estará también permitida la búsqueda de la elegancia conceptual?

PRIMERA PARTE

**UNA APROXIMACION
DE CORTE EPISTEMOLOGICO**

*"La invariancia es el espejismo de la ciencia,
su pan cotidiano, la base de su éxito en tanto
que magia operativa y racional"*

B.Nicolescu. Nous, la particule et le monde

2

FISICA, EPISTEMOLOGIA Y EDUCACION CIENTIFICA. UN ENFOQUE TRANSDISCIPLINAR

Sobre la noción de enfoque transdisciplinar

El conocimiento científico se ha desarrollado siempre en la incomodidad de una constante dialéctica entre dos polos extremos. De un lado, la búsqueda de una visión deliberadamente restringida, ajustada a una problemática dada, le ha permitido conseguir niveles cada vez más altos de especificidad en la correspondiente representación de parcelas de lo real, haciendo posible la indiscutible eficacia característica de esa forma de conocimiento humano. De otro lado, la ciencia no ha renunciado jamás al ideal de la unificación, a la quimera de esa perspectiva global deseable y deseada que permitiría captar el conocimiento como un todo coherente en el que quedarían integrados armónicamente sus elementos fundamentales. En ese proceso, el significado de las partes se incrementa por su conexión con el todo a través de principios simples que son orientados por una estética intelectual poderosamente atractiva tanto desde la perspectiva del espíritu humano que la postula como de la realidad que la resiste.

La evolución de la física fundamental es un ejemplo de progreso hacia la unificación. En mayor o menor medida, todos los llamados "científicos-filósofos" han apostado por ella y, en la actualidad, dicha idea preside las grandes teorías dentro y fuera de lo que se ha dado en llamar el "modelo estandar" de las fuerzas fundamentales (conjunto de teorías de las cuales se puede afirmar que por su elevada consistencia interna y empírica en un futuro próximo serán o confirmadas o extendidas pero no invalidadas por los datos experimentales) (Cohen-Tannoudji y Spiro, 1990).

Esa tensión del espíritu humano entre el conocimiento del todo y el conocimiento de las partes, junto con el correspondiente análisis de las posibilidades de integración de ambas perspectivas, ha generado algunos conceptos específicos cuyas resonancias en el ámbito de la educación son incuestionables. Me estoy refiriendo a las nociones de *multidisciplinaridad*, *interdisciplinaridad* y *transdisciplinaridad*.

Dada la pluralidad de significados que se han atribuido a cada uno de tales términos (Scurati et al,1977) tiene sentido dedicar algunas líneas a precisar el valor semántico que tendrá para nosotros cada uno de ellos con una referencia especial a la noción de *transdisciplinaridad*.

El orden más arriba respetado se corresponde con la dirección de un vector de integración disciplinar creciente. Así, el enfoque de un problema es *multidisciplinar* cuando incorpora a su resolución aportaciones procedentes de distintas disciplinas pero sin que, en el proceso, cada una de ellas pierda su individualidad, su parcela de competencia, por lo general, definida de antemano. Cuando se da un paso más hacia la integración de modo que se producen entre las disciplinas intercambios mutuos que inspiran métodos, modelos o estructuras comunes y que concluyen en la aparición de una especie de "híbridos disciplinares", estamos ante la *interdisciplinaridad*.

En el último escalón de la integración ya anunciada se sitúa la *transdisciplinaridad*. Frente a la existencia de estructuras o de métodos concurrentes o incluso análogos, característica del peldaño anterior, el enfoque transdisciplinar supone el postular la existencia de significados profundos, compartidos por un conjunto de disciplinas y que pueden circular de unas a otras configurando una red o sistema omnicompreensivo. Debido al *estatus* epistemológico elevado de ese elemento unificador que constituye el significado, las transferencias que puedan producirse entre los diferentes componentes del referido sistema constituyen elementos potenciales de progreso científico en el ámbito restringido de cada una de las disciplinas consideradas.

En un orden de ideas próximo, B.Nicolescu -conocido físico teórico francés- va aún más lejos en lo que concierne a sus expectativas con respecto del papel y del propósito del enfoque transdisciplinar, cuando afirma (Nicolescu,1988): "*La transdisciplinaridad*

no está concernida por la simple transferencia de un modelo de una cierta rama del conocimiento a otra, sino por el estudio de los isomorfismos entre los diferentes dominios del conocimiento.... Su objetivo es descubrir la naturaleza y las características de ese flujo de información y su tarea prioritaria consiste en la elaboración de un nuevo lenguaje, de una nueva lógica, de nuevos conceptos para permitir la emergencia de un verdadero diálogo entre los especialistas de las diferentes ramas del saber, diálogo que debiera ser a continuación ampliamente abierto hacia la vida social y que aportará, a largo plazo, su contribución a la emergencia de un verdadero diálogo planetario" (p.134).

Sobre el concepto de epistemología

En todos aquellos campos en los que se produce un crecimiento relativamente rápido sucede, con alguna frecuencia, un fenómeno lingüístico curioso que consiste en la coexistencia de diferentes, aunque próximos, valores semánticos para un mismo término cuyo significado preciso hay que extraerlo, de una forma indirecta, a partir de las características del contexto en el que dicho término está siendo empleado. La palabra *epistemología* constituye uno de esos casos. En el último medio siglo la reflexión sobre la ciencia en sus más variados aspectos, lógico-lingüísticos, metodológicos, histórico-críticos, psicogenéticos, semánticos, estéticos, etc. ha crecido tan rápidamente que, en la actualidad, bajo el paraguas de la epistemología -genéricamente asimilable a lo relativo a formas de conocimiento metacientífico- se esconden significados notablemente alejados de su inicial valor semántico próximo al de teoría del conocimiento científico.

En un sentido muy amplio, epistemología es hoy sinónimo de filosofía de la ciencia; su construcción es asumida, por lo general, por filósofos de formación académica con buenos, aunque no siempre suficientes, conocimientos científicos que están en condiciones de aportar todo el caudal de erudicción necesario para conectar las ideas del presente con las del pasado histórico, insertando sus reflexiones en el seno de la tradición filosófica. Frente a esta epistemología de los *filósofos-científicos* se encuentran las que se ha dado en llamar *epistemologías internas o regionales* (Bunge,1985; Blanche,1972). De acuerdo con Blanche son internas porque son elabo-

radas desde dentro por científicos interesados y son regionales porque cada una se construye de acuerdo con las necesidades de una ciencia determinada. Por su propia naturaleza, y por las características profesionales de sus protagonistas, su problemática está vinculada a problemas bien definidos y de cierta relevancia teórica cuya solución, aunque pueda trascender el ámbito de las ciencias particulares, no supone una renuncia al "estilo científico" de construcción del conocimiento. Esta epistemología, que consideraremos como científica o propia de los *científicos-filósofos*, por su vinculación más directa con la ciencia que con la filosofía, está, en cierta medida, al abrigo de la influencia de ese modo pendular o alternativo característico de la evolución de la filosofía que es reconocido por los propios filósofos (Althusser, 1985).

Algunos autores han identificado los dos enfoques de la epistemología anteriormente descritos con sendas áreas de influencia lingüística o nacional. Así, G. Gaston Granger (1989) destaca la existencia de dos sentidos diferentes del vocablo epistemología según se trate de la escuela anglosajona o de la escuela francesa. En el sentido anglosajón epistemología es sinónimo de "teoría del conocimiento" y su alcance es preferentemente filosófico. Los procesos más generales del conocimiento, su lógica y sus fundamentos son objeto preferente de este enfoque. Por contra, y sin dejar de considerar tales aspectos como básicos para cualquier teoría de la ciencia, el sentido francés del término epistemología se orienta, más frecuentemente, hacia el estudio específico del conocimiento científico y al desarrollo histórico concreto de sus propios problemas.

No cabe ninguna duda de que, como toda clasificación, la anterior supone una simplificación evidente que se tolera inicialmente por su indudable valor didáctico. En éste, como en otros casos, nos encontramos más que con una realidad dicotómica con otra de carácter dipolar en la que, junto a dos polos extremos bien definidos, tienen cabida toda una multiplicidad de situaciones intermedias. Una tal observación resulta especialmente pertinente cuando se aprecia la evolución experimentada en el presente siglo por la física fundamental, en la cual el desplazamiento de los límites del conocimiento físico ha permitido incorporar a la física problemas en otro tiempo considerados de naturaleza metafísica.

Tanto por la naturaleza de los problemas que en el presente ensayo se plantean, como por su propia vocación y por la forma-

ción de su autor, la orientación epistemológica de su contenido se aproximará más al polo científico que al estrictamente filosófico.

El sistema física, epistemología y educación científica. Una primera aproximación

La física, la epistemología -entendida en un sentido amplio- y la educación científica constituyen disciplinas cuyas relaciones mutuas, dos a dos, han sido implícita o explícitamente reconocidas desde ámbitos diversos si bien de un modo aislado.

La educación científica asume la preocupación por la enseñanza y el aprendizaje científicos no sólo en su vertiente práctica sino también en el plano teórico y de investigación. Debido en parte a su propio objeto y en parte a su aspiración disciplinar, el reconocimiento de la existencia de relaciones profundas entre *epistemología y enseñanza/aprendizaje* científicos forma parte de una especie de consenso, a veces tácito, a veces explícito, dentro de la comunidad que trabaja en el ámbito de la educación científica. Así, con cierta frecuencia aparecen en las revistas especializadas trabajos con títulos tales como "Filosofía de la ciencia, ciencia y educación científica" (Hodson,1985); "Epistemología e historia en la enseñanza de la ciencia" (Rogers,1982); "Epistemología y educación científica" (Gawthrow et al,1978); "Filosofía de la ciencia y enseñanza de las ciencias" (Terhart,1988) o "La metodología científica y la enseñanza de las ciencias: unas relaciones controvertidas" (Gil Pérez,1986) por ejemplo.

Por otra parte, se invoca muy a menudo la coherencia entre una perspectiva de aprendizaje científico y la moderna filosofía de la ciencia como un argumento de cualificación, como la apelación a un criterio de autoridad. La filosofía de la ciencia se convierte, entonces, en un tipo de conocimiento superior capaz de iluminar los procedimientos de enseñanza y las ideas sobre el aprendizaje (Terhart, 1988).

La conexión entre la *física* y su *aprendizaje* constituye, obviamente, la garantía de continuidad de una comunidad científica secular y, como en otras disciplinas, hace posible la transmisión cultural a lo largo de las sucesivas generaciones. Una buena parte de los físicos más destacados han hecho referencia explícita en sus escritos al tema del aprendizaje mediante incursiones a veces bre-

ves pero, en cualquier caso, enjundiosas. Por otra parte, teóricos de la psicología y del aprendizaje han acudido a los contenidos de la física en busca de ciertos elementos de conocimiento los cuales, por su complejidad relativamente controlable, por su referencia a lo real formalizado o por la riqueza semántica de su marco conceptual, han servido de base a un número destacado de investigaciones contribuyendo de este modo al progreso de sus respectivas disciplinas. Baste señalar, a modo de ejemplo, las tareas piagetianas, diseñadas para explorar el nivel de desarrollo cognitivo del niño o del adolescente, muchas de las cuales suponen el manejo de sistemas y de razonamientos típicos de la física elemental, o la utilización de problemas de física por el reconocido grupo de la Carnegie Mellon University -pionero en Inteligencia Artificial- como objeto modélico de investigación en resolución de problemas.

Finalmente, la reconocida "explotación" de la física por la *filosofía de la ciencia*, a la cual ha aportado sus fundamentos, sus métodos, su lenguaje y su modo de crecimiento como objeto de análisis epistemológico, muestra, junto con lo anterior y en una primera aproximación, la oportunidad de establecer un sistema en el cual todos los elementos tengan cabida. El análisis de sus relaciones internas no sólo contribuirá a una mejor definición del todo sino que puede incidir, además, en el progreso de las partes. Se trata, en definitiva, de reclamar para la física, la epistemología, la enseñanza y el aprendizaje científicos el estatuto de *sistema transdisciplinar* y tratar de extraer de ello alguna de sus provechosas consecuencias. Sirva por tanto lo anterior como el preámbulo a una segunda aproximación al tema poseedora de un mayor nivel de detalle.

El análisis de las relaciones internas. Una segunda aproximación

La figura 2.1 muestra, mediante un conjunto de grafos, las relaciones que entre los diferentes componentes del ya referido sistema se postulan. Junto a su atractivo aspecto geométrico cabe destacar la naturaleza circular de las interrelaciones tanto locales como globales allí representadas. No tienen cabida en él influencias de tipo lineal; por el contrario, cada elemento influye en los demás y es influido por ellos, definiendo así un anillo de interrelaciones que dota de cohesión al conjunto y que anticipa la existencia de aspec-

tos holísticos de esos elementos de realidad y/o de conocimiento a los que dicho sistema hace referencia. Es evidente que cada uno de sus componentes goza de la autonomía suficiente como para poder ser reconocido como tal; sin embargo, dicha autonomía se pierde cuando se eleva el plano epistemológico de análisis. En ese nivel más general, cada parte aparece conectada con el todo de un modo sustancial.

Llegados a este punto es necesario advertir que no se trata de considerar el sistema como esencialmente cerrado, tan sólo de un modo circunstancial; y ello es así por razones de tipo metodológico. Las relaciones ciencia-sociedad, por ejemplo, constituyen algo lo suficientemente importante como para que se hayan tomado seriamente en consideración en ambientes especializados. De hecho, algunos han atribuído a la educación científica, como papel específico, el de una interfase que asume y modula dicha interacción (López Rupérez, 1985). Sin embargo, ante una orientación de corte epistemológico como la que ha inspirado nuestra investigación, la consideración de este tipo de aspectos nos hubiera alejado de sus objetivos fundamentales.

El vértigo que produce la aproximación a los confines del conocimiento que el avance de la física fundamental contemporánea ha hecho posible, explica esa "huída hacia arriba" capitaneada por una pléyade de físicos teóricos cuyo prestigio científico está fuera de toda duda. Así, se ha tratado de conectar el mundo de lo místico, del espíritu, de lo imaginario o de la tradición con algunas interpretaciones de los últimos resultados de la investigación fundamental en una búsqueda deliberada de sentido (Thuillier, 1990a). Pero abrir de un modo tan radical el dominio de análisis lleva necesariamente aparejada una pérdida de potencial contrastador, dejando la puerta abierta a toda suerte de "filosofías" a veces conectadas más con la pseudociencia que con las auténticas construcciones científicas. No pretendo, ni mucho menos descalificar, con una sola frase, tales empresas intelectuales, que resultan absolutamente respetables como intentos del espíritu humano por explorar nuevos caminos de coherencia y significado; tan sólo pongo en tela de juicio la posibilidad efectiva de retener, a un mismo tiempo, su carácter científico tal y como algunos de sus protagonistas han insinuado (Nicolescu, 1985). Su fecundidad podría materializarse si son capaces de iluminar parcelas de conocimiento situadas en un nivel de generali-

dad intermedio entre los propios de las ciencias particulares y el característico de esa especie de cosmovisión a la que inicialmente hacen referencia. El presente trabajo constituye, precisamente, un intento de esta naturaleza.

Recurriendo de nuevo al apoyo que facilita el esquema de la figura 2.1 procederemos, en lo que sigue, a un análisis más detallado de las relaciones entre los diferentes componentes del sistema.

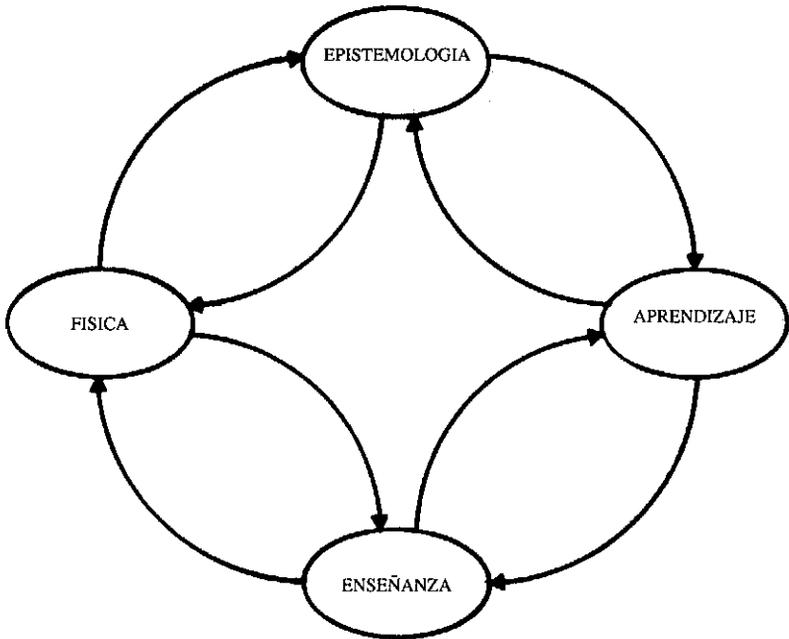


Fig. 2.1 Representación del conjunto formado por la epistemología, la física, su enseñanza y su aprendizaje. Las relaciones entre los diferentes elementos -que se justifican en el texto- parecen indicar que estamos ante un sistema transdisciplinar en el seno del cual puede producirse una transferencia o circulación de significado entre las partes que mejore su comprensión y su propia fundamentación.

i) Las relaciones entre la física y su enseñanza

La ciencia se vierte en su didáctica mediante un conjunto de transformaciones adaptativas que convierten el saber científico en objeto de enseñanza. Esta *transposición didáctica* (Chevallard, 1985) tiende a respetar la estructura de la disciplina y aporta, por tanto, a la enseñanza la *componente lógica* de la ciencia.

La enseñanza interviene, a su vez, en la construcción de la ciencia a través de la formación de los futuros científicos dotándolos de un bagaje de conocimientos y destrezas que constituyen una parte importante de su herencia social. Alguien ha dicho que la estructura conceptual de la ciencia no es otra que la estructura cognitiva que reside en la mente de los grandes científicos (Shavelson, 1974).

La enseñanza es, esencialmente, *transferencia* aunque no simple *transmisión de conocimiento*; por tal motivo y, particularmente en las etapas preliminares de la formación científica, constituye el elemento clave que hace posible la componente acumulativa del quehacer científico. En fases posteriores, asociadas a una mayor madurez personal y profesional, la enseñanza de la ciencia es sustituida por la comunicación científica mediante la cual la información relevante circula en el seno de la correspondiente comunidad, soportada en revistas especializadas, reuniones y congresos, pero conservando intactos una buena parte de los elementos claves de aquélla, de sus intenciones y de sus propósitos genéricos.

ii) La enseñanza y el aprendizaje de la física

Tal y como se ha presentado anteriormente, la enseñanza, entendida en un sentido amplio, constituye un elemento mediador entre la disciplina y su aprendizaje en la mente del sujeto. En un sentido estricto, la enseñanza puede identificarse con el acto profesoral por excelencia, con la acción docente que se hace efectiva habitualmente en el aula. Sin embargo, esa noción restringida puede ampliarse hasta identificarse con el concepto de instrucción que incluye la acción de todos los elementos curriculares previstos, sea por un profesor, sea por una institución, para promover el aprendizaje de los alumnos. En este sentido, materiales tales tan clásicos como un manual o un libro de problemas, escritos con fines didácticos, se incorporan, con entidad propia, a ese concepto

más amplio de enseñanza al que acabamos de referirnos.

El aprendizaje de la física se beneficia de la noción general de aprendizaje en tanto que *cambio de conducta de un organismo como resultado de una experiencia anterior* (Novak, 1982). En el caso de esa modalidad de aprendizaje intelectual se trata de una transformación en la mente del sujeto que lo capacita para incorporar nuevos contenidos cognitivos, para realizar nuevas tareas. La concepción del aprendizaje como logro (Hewson et al, 1988), como producto de una interacción mediada entre disciplina y sujeto, no excluye en absoluto el interés por la naturaleza de ese proceso de transformación, o cambio cognitivo, que lo hace posible. En este marco conceptual, las relaciones recíprocas entre la enseñanza y el aprendizaje de la física se hacen evidentes. La enseñanza de la física, entendida en un sentido amplio, facilita el aprendizaje de la disciplina e, inversamente, un buen conocimiento de las claves de un aprendizaje científico efectivo permite mejorar la enseñanza de la física, de sus contenidos y de sus procedimientos.

En el seno de esta relación íntima existente entre la enseñanza y el aprendizaje, algunos autores (Ausubel et al, 1976; Novak, 1982) han pretendido ver una jerarquía que privilegia el segundo frente a la primera como objetos de investigación. En ese sentido Novak afirma: *La psicología educativa debería constituir el fundamento de la teoría de la instrucción y no al revés* (p. 128). Sin embargo, y si bien es cierto que un buen conocimiento de las leyes que rigen un aprendizaje efectivo orientarán la articulación de una enseñanza más eficaz, no es posible observar o analizar con fines de investigación un aprendizaje científico (no espontáneo) sin mediar una instrucción entendida en sentido amplio. Por otra parte, y en un plano fundamentalmente práctico, una mejora de la enseñanza se traducirá, en fin de cuentas, en un aprendizaje más eficaz por parte de los alumnos. La conexión causal entre enseñanza y aprendizaje no es, pues, de tipo lineal sino más bien circular. Estamos, de hecho, ante dos realidades interactuantes en cuyo seno no se puede establecer una jerarquía bien definida sino que la mejora en uno de esos dos polos de la interacción se produce a través de la del otro y viceversa. Tal circunstancia justifica el bucle que conecta recíprocamente la enseñanza y el aprendizaje de la física en la representación del sistema descrito en la figura 2.1.

iii) *Las relaciones entre epistemología y aprendizaje científico*

En el plano de la epistemología, entendida en su acepción filosófica, la ciencia aporta su estructura, sus métodos, sus fundamentos y su historia como objeto del análisis epistemológico. Pero lejos de construir una reflexión pura, la epistemología influye tanto en la enseñanza como en el aprendizaje científicos, lo que conlleva una retroalimentación, por vía indirecta, sobre la propia ciencia. En lo que sigue centraremos la atención en el análisis de las relaciones entre epistemología y aprendizaje científico.

Algunos epistemólogos, que realizaron su obra mucho antes de que se pudiera hablar de una comunidad científica en didáctica de las ciencias, apostaron por este tipo de relaciones. Tal es el caso del insuficientemente citado G. Bachelard; su análisis crítico del desarrollo del espíritu científico le permitió avanzar orientaciones en relación con la enseñanza/aprendizaje de las ciencias las cuales, en una etapa como la presente de auge constructivista, gozan de plena actualidad. Sirvan como ejemplo algunas referencias generales extraídas de "La formación del espíritu científico" (Bachelard, 1948):

*"Los profesores de ciencias se imaginan que el espíritu comienza como una lección, que siempre puede rehacerse una cultura perezosa repitiendo una clase, que se puede hacer comprender una demostración repitiéndola punto por punto. No han reflexionado sobre el hecho de que el adolescente llega al curso de física con conocimientos empíricos ya constituídos; no se trata, pues, de **adquirir** una cultura experimental, sino de **cambiar** una cultura experimental, de derribar los obstáculos amontonados por la vía cotidiana ...(p.21). En efecto se conoce **en contra** de un conocimiento anterior...(p.15)".*

*"El historiador de la ciencia debe tomar las ideas como hechos. El epistemólogo debe tomar los hechos como ideas insertándolas en un sistema de pensamientos. Un hecho mal interpretado por una época, sigue siendo un hecho para el historiador. Según el epistemólogo es un obstáculo, un contra pensamiento....(p.20). La noción de **obstáculo epistemológico** puede ser estudiada en el desarrollo histórico del pensamiento científico y en la práctica de la educación...(p.19)".*

Otras muchas ideas presentadas en la obra referida -desde la

propia denominación de *conceptos precientíficos nucleados inconscientemente* (p.54) hasta el análisis del origen de los *obstáculos epistemológicos*- guardan una estrecha similitud con las expuestas en revisiones sobre preconcepciones o marcos alternativos (McDermott,1984; Driver et al,1985; Serrano Gisbert,1987; Driver,1988); lo cual viene a corroborar la fecundidad potencial de la reflexión epistemológica y, a un tiempo, las raíces filosóficas de esa nueva corriente de investigación en la educación científica.

Por otra parte, la obra de Piaget ha reforzado las conexiones entre epistemología y aprendizaje científico. Aun cuando Piaget no prestó demasiada atención a lo que él mismo denominó aprendizaje en sentido estricto (Piaget,1959), el desarrollo de su programa de investigación sobre epistemología genética pone de manifiesto su interés por el aprendizaje en sentido amplio, es decir, como progreso de las estructuras cognitivas mediante mecanismos de equilibración (Pozo,1987). Sin prescindir del método histórico-crítico en el análisis de la evolución de la ciencia y del ideal científico, Piaget introduce el método psicogenético que procura una explicación causal de los mecanismos intelectuales analizando su formación (Blanche 1972).

"...Si la epistemología genética ha retomado la cuestión dirá Piaget, es con la doble intención de constituir un método apto para proporcionar controles y, sobre todo, para apelar a las fuentes, a la génesis misma de los conocimientos, de la cual la epistemología tradicional no conoce más que los estados superiores, esto es, algunas resultantes. Lo propio de la epistemología genética es, pues, intentar aislar las raíces de las distintas variedades de conocimiento desde sus formas más elementales y seguir su desarrollo hacia los niveles ulteriores hasta incluir el pensamiento científico" (Piaget,1976,p.6).

Con esta original aportación piagetiana un esquema simple de relaciones entre *epistemología y aprendizaje científico* se hace circular (Fig.2.1), la epistemología concierne al aprendizaje y está concernida por él. Otros elementos del pensamiento de Piaget como su visión constructivista del aprendizaje y su valoración del análisis crítico de la historia de la ciencia en calidad de guía adecuada para orientar su didáctica (Piaget et al,1981), no han hecho más que contribuir a esa relación de cierre.

Posteriormente, el desplazamiento experimentado en la psicolo-

gía del pensamiento de la forma al contenido, de la sintaxis a la semántica o de los procesos de razonamiento a la representación (Pozo,1987), ha ejercido, sin duda, una influencia decisiva en la investigación sobre la enseñanza/aprendizaje de las ciencias. Es así como puede explicarse el interés, creciente desde la pasada década, por los aspectos específicos de la generación del conocimiento científico en los alumnos y la preocupación por las preconcepciones, los marcos alternativos o la "ciencia de los niños" (Serrano Gisbert,1987) que se incorpora a una perspectiva constructiva del aprendizaje científico, según la cual dicho aprendizaje es considerado como un proceso de desarrollo y transformación conceptual.

La acumulación de evidencia empírica, mediante la detección de preconcepciones (Driver et al,1983), se ha resuelto en la articulación de una perspectiva teórica explícitamente definida que no sólo permite explicar la evidencia acumulada sino que se convierte, además, en una guía orientadora tanto de la investigación como de la enseñanza. Se trata de la llamada "teoría del cambio conceptual" (Posner et al,1982). El modelo de cambio conceptual propuesto por Posner et al. sitúa explícitamente sus bases epistemológicas en las ideas de Thomas Kuhn (1962) sobre las revoluciones científicas, en algunas nociones extraídas de la filosofía de Stephen Toulmin (1972) sobre la evolución de los conceptos y en el falsacionismo metodológico de Lakatos y su metodología de los programas de investigación científica (Lakatos 1983). A modo de ejemplo puntual, la observada estabilidad de los marcos alternativos y la relativa lentitud del cambio conceptual recuerda indiscutiblemente la siguiente idea de Lakatos:

.."La metodología de los programas de investigación científica no ofrece una racionalidad instantánea. Hay que tratar con benevolencia a los programas en desarrollo; pueden transcurrir décadas antes de que los programas despeguen del suelo y se hagan empíricamente progresivos" (Lakatos,1983, p.16).

A la hora de proponer estrategias para promover el cambio conceptual, algunos autores han recurrido igualmente al falsacionismo metodológico en busca de orientación. Junto con la idea de que no son los hechos los que falsan una teoría sino la aparición de otra teoría mejor, Lakatos ha expuesto con toda claridad en qué condiciones una teoría es falsada por otra:

"Para el falsacionista sofisticado una teoría científica T queda

falsada si y sólo si otra teoría T' ha sido propuesta y tiene las siguientes características: 1) T' tiene un exceso de contenido empírico con relación a T, esto es, predice hechos nuevos improbables o incluso excluidos por T; 2) T' explica el éxito previo de T, esto es, todo el contenido no refutado de T está incluido (dentro de los límites del error observacional) en el contenido de T; 3) Una parte del exceso de contenido de T' resulta corroborado" (Lakatos, 1983 p.46).

Ello ha permitido, en el ámbito de la educación científica, diseñar secuencias de acciones que estimulen conflictos cognitivos entre concepciones rivales tratando los marcos conceptuales de los alumnos de una forma semejante a como Lakatos "trata" a sus teorías T y T' (Pozo, 1987; López Rupérez, 1988).

En esta línea de progresiva influencia, o inspiración, se ha extremado aún más el paralelismo entre epistemología y reflexión sobre el aprendizaje científico, postulándose un cambio metodológico además de conceptual como fundamento de una educación científica efectiva (Gil Pérez, 1986):

*"...No debe olvidarse que las concepciones aristotélicas/escolásticas sólo pudieron ser desplazadas -después de siglos de vigencia- gracias a un **cambio metodológico** nada fácil, que vino a superar la seguridad en las evidencias de sentido común, introduciendo una forma de pensamiento a la vez más creativa y rigurosa... Cabe esperar, pues, que igual ocurra con los alumnos: sólo si son puestos reiteradamente en situación de aplicar la nueva metodología...podrán llegar a superar la "metodología de la superficialidad" haciendo posible los profundos cambios conceptuales que la adquisición de los conocimientos científicos exige... El Nuevo modelo didáctico debería, pues, enfocar el aprendizaje, no sólo como cambio conceptual, sino como **cambio conceptual y metodológico**" (Gil Pérez, 1986, p.115).*

La conexión entre la reflexión sobre la construcción de la ciencia y la reflexión sobre su aprendizaje justifica, pues, por su propia naturaleza, la relación existente entre filosofía de la ciencia y educación científica algunos de cuyos aspectos acabamos de destacar.

iv) Las relaciones entre física y epistemología

La existencia de relaciones profundas entre física y epistemología constituye, hoy más que nunca, un fenómeno incontrovertible.

El desarrollo de la física moderna ha hecho de la reflexión sobre el alcance del conocimiento y sobre sus fundamentos una tarea necesaria; un paso más en ese camino hacia un mejor conocimiento de lo "real" que caracteriza el quehacer de la ciencia básica.

Un número creciente de físicos teóricos de alto nivel científico, procedentes con frecuencia de culturas beneficiarias de una sólida tradición filosófica, son protagonistas de esa nueva orientación. Sirva como ejemplo la declaración que aparece recogida en el primer capítulo del libro "*La matière-espace-temps*" de los físicos franceses Cohen y Spiro (1990):

"...Este aparato teórico, este conjunto de conceptos integrados en un formalismo matemático abstracto nos interpela fuertemente y es que las nociones de espacio, de tiempo y de materia tienen un origen a la vez empírico y filosófico. Las convergencias de la física, del empirismo y de la filosofía por aprehender lo que nos rodea traducen la unidad del pensamiento. Ciertas frases o párrafos de este libro podrían emparentarse de igual modo con la filosofía que con la física de partículas; en nuestra opinión la filosofía está presente en la física. Y el recíproco es también cierto" (p.73).

La referida conexión en el sentido *física* --> *epistemología* se deriva de la propia naturaleza de esta última disciplina que se alimenta de la ciencia y de sus productos aun cuando, a su vez, la enriquezca. Bunge (1985) a la hora de definir la epistemología por su contenido, hace referencia a una lista de ramas tales como: Lógica de la ciencia, Semántica de la ciencia, Teoría del conocimiento científico, Metodología de la ciencia, Ontología de la ciencia, etc, en la cual la esclarecedora reiteración del genitivo resultaría algo molesta si no fuera estrictamente necesaria.

Teniendo en cuenta la posición privilegiada de la física en el concierto de las diferentes ciencias de la naturaleza y a tenor de lo anterior, el insistir en la ya citada relación puede parecer ocioso. Sin embargo, la aportación de la epistemología a la física resulta, en el ámbito de la ciencia real de los laboratorios y de los centros de investigación, mucho más controvertida. Algunos investigadores han tolerado mal las críticas de los epistemólogos sobre los métodos o sobre los fundamentos de sus disciplinas que, en ocasiones, han sido interpretadas como normas dictadas por un estamento intelectual pretendidamente superior. La actitud de recelo o simplemente de ignorancia ante la filosofía de su ciencia no es del todo

infrecuente entre los investigadores en activo. La idea de que la filosofía, cuando ha intervenido en los problemas científicos ha retrasado o entorpecido el ritmo de las investigaciones y su resolución, está relativamente extendida y muchos científicos, implícita o explícitamente, asumen como propia la conocida frase de Paul Valéry: *"Il faut n'appeler science que l'ensemble des recettes que réussissent toujours. Tout le reste est littérature"*. Este "instrumentalismo o positivismo de los físicos" (D'Espagnat, 1985) constituye, por ejemplo, la filosofía de los que consideran la mecánica cuántica como una máquina de hacer cálculos y predicciones; llevados de una actitud deliberadamente pragmática, marginan de sus ocupaciones los problemas de interpretación.

Lo cierto es que la actividad científica y la propiamente epistemológica se desenvuelven en planos diferentes, de modo que los recelos de los científicos tienen de hecho una justificación epistemológica tácita. El propio Einstein, en el marco de un análisis de las relaciones entre ciencia y epistemología, resalta la distancia existente entre el contexto de trabajo del científico y el contexto correspondiente del epistemólogo profesional en unos cuantos párrafos que por su indiscutible interés y oportunidad reproducimos a continuación:

"La relación recíproca entre la epistemología y la ciencia goza de una naturaleza destacable. Dependen ambas la una de la otra. La epistemología en ausencia de contacto con la ciencia se convierte en vacía. La ciencia sin epistemología es -aun cuando sea solamente pensable- primitiva e intrincada. Sin embargo, apenas el epistemólogo, que busca un sistema claro, se ha abierto un camino hacia un tal sistema, es tentado a interpretar el contenido del pensamiento de la ciencia en el sentido de su sistema y a rechazar todo aquello que no entra en él. El científico como tal, no puede permitirse llevar tan lejos su esfuerzo en la dirección de una sistemática epistemológica. Acepta con reconocimiento el análisis conceptual de la epistemología; pero las condiciones externas, que intervienen para él a través de los hechos de la experiencia, no le permiten dejarse limitar demasiado en la construcción de su mundo conceptual por la adhesión a un sistema epistemológico cualquiera que sea. Debe pues aparecer a los ojos del epistemólogo sistemático como una especie de oportunista sin escrúpulos: aparecerá como un realista en la medida en la que intenta describir un mundo inde-

pendiente de los actos de la percepción; como un idealista desde el momento en que considera los conceptos y las teorías como libres invenciones del espíritu humano (es decir, no pudiendo ser deducidas lógicamente del dato empírico); como un positivista si considera que sus conceptos y sus teorías no están justificados más que en la medida en la que proporcionan una representación lógica de las relaciones entre las experiencias de los sentidos. Puede incluso aparecer como un platónico o pitagórico si considera que el punto de vista de la simplicidad lógica constituye un instrumento indispensable y efectivo en su investigación (Einstein,1949 p. 683-684; ver Paty,1993 p.375)

Dejando a un lado celos y desconfianzas, lo cierto es que la aseveración de que en el campo de la física la reflexión epistemológica no ha contribuido al avance de la disciplina es, a todas luces, extremada. Así, por ejemplo, algunos experimentos han sido ideados al hilo de problemas surgidos de la interpretación de la mecánica cuántica; en otros casos, la confrontación de visiones contrapuestas ha estimulado la elaboración de desarrollos teóricos en absoluto carentes de validez. Como ejemplo paradigmático de lo primero puede citarse el experimento de Aspect (Laloë,1987), que introdujo el apoyo empírico necesario para terciar en el viejo debate de naturaleza epistemológica -capitaneado en sus inicios por Einstein y por Bohr en calidad de insignes adversarios- sobre la separabilidad, a nivel cuántico, de la realidad física y su conexión con la validez de la Mecánica Cuántica ortodoxa y su teoría completa (Selleri,1986). Por su parte, el desarrollo de la teoría de variables ocultas no locales (Ortolí et al,1985) constituye un ejemplo de lo segundo. Bien es cierto que la epistemología puesta en juego, en estos casos, es una epistemología de corte interno o regional pero es que en el ámbito de la física fundamental contemporánea, en general, y de la mecánica cuántica, en particular, una tal orientación epistemológica no sólo es la única posible, dada la abstracción, complejidad y radicalidad de sus constructos teóricos, sino que, precisamente por esto, es básicamente indistinguible de la propiamente filosófica.

Finalmente, la influencia de ciertas visiones filosóficas o epistemológicas en los prolegómenos de la gestación de ideas nuevas en la mente de los científicos constituye un hecho relativamente frecuente en la historia de la ciencia y, por tanto, otro elemento de

conexión en el sentido anteriormente mencionado. A esta fuente de influencia hace referencia M. Jammer (1966) cuando advierte:

"...El efecto de las consideraciones filosóficas en la mente de los físicos se parece más a una corriente subterránea que a una línea conductora patente y bien definida. Es la naturaleza misma de la ciencia la que elimina sus antecedentes filosóficos, pero es el deber del historiador y filósofo de la ciencia recuperarlos debajo de la superestructura del edificio científico. A los efectos de esta tarea, las biografías, la correspondencia y las observaciones autobiográficas proporcionan, en general, más información que las publicaciones científicas mismas" (p.166).

Efectivamente, algunas investigaciones históricas han puesto de manifiesto el sustrato profundo de ciertas hipótesis o teorías científicas y su vinculación con concepciones de naturaleza filosófica. Sirvanos, a modo ejemplo, la referencia sucinta a dos personajes destacados de la historia de la física, a saber, Christian Oersted e Isaac Newton.

El descubrimiento, asociado al experimento de Oersted, que supuso el establecimiento del primer vínculo fundamental entre Electricidad y Magnetismo, constituye un buen ejemplo de la influencia que una determinada concepción filosófica de la naturaleza puede tener en el proceso científico. Algunos historiadores de la ciencia (Thuiller, 1990b; Shanahan,1989) han aportado argumentos más que suficientes como para aceptar la influencia del pensamiento de Kant, y particularmente de Schelling, en la definición de un marco teórico que sirvió de guía a Oersted hacia la primera evidencia empírica en ese largo caminar de los físicos en pos de la unificación de las fuerzas naturales.

La necesidad de dicho marco teórico, en tanto que construcción del intelecto humano en la que integrar las observaciones empíricas, formaba parte de las ideas de Kant (Kant,1982), del que Oersted, doctor en filosofía, era un buen conocedor. De otra parte, y frente a las explicaciones mecanicistas de las fuerzas naturales defendidas por algunos de sus contemporáneos, Schelling apuesta por una visión dinámica basada en dos grandes postulados: uno de unidad y otro de polaridad. Según el primero, y como recoge Thuiller (1990b), la naturaleza constituye un todo, un sistema único y dinámico en el que las fuerzas se metamorfosean de muchas maneras; de acuerdo con el segundo, estas fuerzas son negativas unas y

positivas otras y se oponen en una especie de lucha perpetua en donde equilibrios y desequilibrios van alternándose. Ambos postulados quedan explícitamente reflejados en la obra de Oersted; de un lado, en el libro titulado "*Investigaciones sobre la identidad de las fuerzas químicas y eléctricas*" en el que anticipa el fenómeno del Electromagnetismo y, de otro, en su trabajo posterior en el que, bajo el título "*Experimentos referentes al efecto del conflicto eléctrico en la aguja magnética*", presenta su famoso descubrimiento.

En lo que a Newton respecta, el abandono de sus convicciones iniciales de corte mecanicista por otras más espiritualistas -perfectamente coherentes con la idea de acción a distancia- hizo posible la formulación de la teoría de la gravitación universal. Tal circunstancia es considerada por algunos historiadores (Thuiller, 1989; Wesfall, 1971) como una consecuencia de la componente de filosofía natural característica de la tradición alquimista con la que Newton, como es sabido, se identificó ampliamente a lo largo de su vida.

La aportación del mensaje cuántico. Una tercera aproximación

La Mecánica Cuántica, desde sus orígenes como teoría física, no ha dejado de aportar elementos para una reflexión profunda sobre las relaciones entre conocimiento y realidad. La física del siglo XIX segura de sus planteamientos, apostaba por una neta separación entre sujeto y objeto. La realidad se presentaba como algo cuya existencia objetiva era independiente de la del observador y la ciencia tenía como propósito desentrañar sus secretos.

Esta objetividad del "mundo real" cuyas partes más pequeñas existen objetivamente, del mismo modo que existen las piedras o los árboles con independencia de si nosotros las observamos o no - compartida, según Heisenberg, por los oponentes a la interpretación de Copenhague- entró en crisis, en tanto que supuesto filosófico, durante el primer tercio del presente siglo con la consolidación de la física cuántica. La dualidad onda-partícula, la reducción del paquete de ondas o el carácter no separable de la realidad cuántica, en tanto que elementos fundamentales de la teoría, han renovado, sobre una base física, el viejo debate filosófico idealismo/realismo; pero ha sido, particularmente, el problema de la medida y la intervención irreducible del observador, lo que más ha avivado el análi-

sis interpretativo sobre las relaciones recíprocas entre conocimiento y realidad. Frente al enfoque clásico, según el cual es la realidad la que suministra la base cierta del conocimiento sobre ella, el enfoque cuántico postula que el conocimiento sobre la realidad modifica la propia realidad.

En términos de imágenes, una buena descripción de la "reducción del paquete de ondas" podría ser la siguiente:

"En una charca borrosa y opaca se mueve un gran pez que se desplaza en todas las direcciones pero que permanece constantemente invisible. Desde la orilla de la charca, un pescador sólo percibe en la superficie unas olitas cuya altura y dirección le informa en todo momento sobre el trayecto probable del pez. Sin embargo, mientras éste no haya sido pescado el hombre se ve obligado a considerar que el pez se encuentra en todas partes a la vez, con probabilidades mayores o menores según el momento y el lugar. En cambio, desde el momento en el que el pez muerde la camada todas las posibilidades quedan reducidas a una sola... antes de morder el anzuelo, semejante pez "cuántico" (que sólo se hace concreto cuando es pescado) ocupará toda la charca y habrá lugares de ella en que el pez estará más concentrado y otros en que estará más diluido" (Ortolí et al, 1985 p.46).

En términos más técnicos puede decirse que la función de onda $\Psi(x,t)$ de un electrón (pez cuántico) define, antes de ser observado (pescado), su estado cuántico (estado mezcla) en términos de superposición de estados puros definidos, a su vez, por las funciones $\Psi_i(x,t)$ - que configuran un conjunto completo o base- en la forma:

$$\Psi(x,t) = \sum_i c_i \Psi_i(x,t)$$

La probabilidad de que el electrón se halle en el estado i -ésimo viene dada por c_i^2 . Si estamos interesados en medir un atributo dado u observable, A, del electrón y efectuamos la correspondiente medida sobre el sistema, por el hecho simple de medir reducimos el estado mezcla a un estado puro i que, a partir de este instante, caracterizará, hasta una nueva intervención del observador, el estado del electrón. No es posible entonces hablar de una realidad del

electrón (o del pez cuántico) independiente del observador (o del pescador). El pez se manifiesta como tal sólo cuando es pescado y el electrón exhibe sus atributos cuando es medido. El pescador, o el físico, al tratar de conocerla han alterado la realidad previa que sólo existía como potencialidad. Esta perturbación incontrolable introducida por el observador sobre el sistema a medir constituye la base de esa influencia del conocimiento sobre la realidad física, postulada por la Mecánica Cuántica, que ha llevado a ampliar la noción de realidad hasta incorporar en ella el sistema a medir, el aparato de medida y el propio observador.

Este fenómeno cuántico conocido como la "reducción del paquete de ondas" ha dado lugar a interpretaciones variadas. Para los idealistas, al estilo del premio Nobel E.P. Wigner, la función de onda representaría no un fenómeno físico objetivo sino simplemente el conocimiento que el sujeto posee del mundo atómico:

".. La reducción del paquete de ondas tiene lugar porque la impresión que se obtiene en una interacción, llamada resultado de la observación, modifica la función de onda del sistema. Por ello, la función modificada es, en general, imprevisible antes de que la impresión obtenida en la interacción entre en nuestra conciencia: es el registro de una impresión en nuestra conciencia lo que altera la función de onda, porque modifica nuestra apreciación de las probabilidades de las distintas impresiones que esperamos recibir en el futuro. Este es el momento en el cual la conciencia entra en la teoría de un modo inevitable e inalterable" (Selleri, 1986 p.113).

Para la ortodoxia de la interpretación de Copenhague encarnada en el idealismo/instrumentalismo de Heisenberg, la realidad se reduce a conocimiento (matemático):

"Las partículas elementales, en el Timeo de Platón, no son en definitiva sustancia, sino formas matemáticas. Todas las cosas son números, es una frase atribuida a Pitágoras. Las únicas formas matemáticas conocidas en aquella época eran formas geométricas, como los sólidos regulares o los triángulos que forman su superficie. No puede dudarse que en la moderna teoría cuántica las partículas elementales serán también, finalmente, formas matemáticas" (Selleri, 1986 p.167).

Para la interpretación realista principal la reducción del paquete de ondas es producido por el aparato de medida al margen de que esté o

no presente el observador; su carácter macroscópico sería el responsable de que, al interaccionar el sistema a medir con el aparato de medida, desaparecieran en aquél los efectos típicamente cuánticos.

En cualquier caso y como ha señalado Wigner:

"...sea cual sea la forma en la que se desarrollen nuestros conceptos en el futuro permanecerá, como algo notable, el hecho de que el estudio del mundo físico externo llevó a la conclusión de que el contenido de nuestra conciencia es una última realidad" (Selleri, 1986 p.114).

El impacto de esa nueva forma de pensamiento, que plantea la física cuántica sobre la mente de los más destacados científicos, ha quedado reflejado en sus escritos. Físicos tan notables como Bohr, Heisenberg, Plank o Eddington han legado mensajes, algunos de los cuales por su interés, de cara al análisis que seguirá, merece la pena traer a colación:

"..Las leyes del razonamiento humano coinciden con las leyes que gobiernan las secuencias de las impresiones que recibimos del mundo que nos rodea" (Plank,1949).

"..Propondremos esta conclusión contundente: la sustancia del mundo es la sustancia mental... La sustancia mental del mundo es, naturalmente, algo más general que nuestras mentes individuales, individuales y conscientes; pero podemos pensar que su naturaleza no es del todo extraña a los sentimientos en nuestra conciencia" (Eddington, 1952).

"..Teniendo presente la estabilidad intrínseca de los conceptos del lenguaje ordinario en el proceso del desarrollo científico, se ve que -después de la experiencia de la física moderna- nuestra actitud hacia conceptos tales como los de inteligencia, alma humana, vida o Dios, serán diferentes de los del siglo XIX, porque estos conceptos pertenecen al lenguaje ordinario y, por consiguiente, tienen una relación inmediata con la realidad" (Heisenberg, 1959).

Desde la perspectiva que el mensaje cuántico abre ante nosotros, el esquema de relaciones en el seno del sistema transdisciplinar anteriormente definido adquiere un nuevo significado, y lo relativo al contenido del conocimiento sobre lo real, a la reflexión sobre su naturaleza, su transferencia y su construcción en la mente del sujeto que aprende aparecen más estrechamente conectados entre sí en el marco de un nuevo concepto de objetividad del cual el propio individuo cognoscente forma parte.

El mundo, como nos anticipó Bohr, no es un elemento de realidad estático sino dinámico, que cambia, se modifica y se enriquece con el conocimiento que adquirimos sobre él. Y para que ese conocimiento pueda ser incrementado es condición necesaria que podamos contar a otros lo que hemos hecho y lo que hemos aprendido (Bohr,1927). En la nueva dispensación de lo cuántico la física se funde con su epistemología en un todo indisoluble. Aprender física y construirla es aprehender el mundo y transformarlo por la vía de la inteligencia tanto individual como colectiva. La enseñanza por su parte asume, en buena medida, la dimensión social de esa transferencia del conocimiento que hace posible el progreso.

La definición de la física, la epistemología, la enseñanza y el aprendizaje científicos como sistema transdisciplinar se hace, a la luz de esta tercera aproximación, aún más plausible. El análisis en profundidad de sus implicaciones y la explotación de sus consecuencias quedan, por tanto, abiertos sobre el fondo de un horizonte por su propia naturaleza difuso pero a la vez prometedor.

En la perspectiva de una epistemología no cartesiana

Durante mucho tiempo el racionalismo cartesiano ha constituido el marco epistemológico de referencia en la construcción del conocimiento científico. A este respecto el *Discours de la méthode pour bien conduire sa raison et chercher la vérité dans les sciences* (Descartes,1637) puede resumirse en sus cuatro preceptos fundamentales:

"El primero consistía en no aceptar jamás ninguna cosa por verdadera si no la reconozco evidentemente como tal, es decir, en evitar cuidadosamente la precipitación y la prevención..."

"El segundo (consistía) en dividir cada una de las dificultades a examen en tantas parcelas como sea posible y necesario para resolverlas mejor"

"El tercero (consistía) en conducir ordenadamente mis pensamientos comenzando por los objetos más simples y más fáciles de conocer, para ascender poco a poco, como por grados, hasta el conocimiento de los más compuestos..."

"Y el último (consistía) en hacer en todo caso enumeraciones tan completas y revisiones tan generales de modo que me asegurara de no omitir nada".

De estos cuatro preceptos, son probablemente el segundo y el tercero los que más han influido en la definición de la ciencia clásica y del ideal del pensamiento científico. En ellos está contenido el fundamento del enfoque analítico de los problemas, que, en la versión cartesiana, entraña la disgregación de la realidad en partes como método operativo fundamental para proceder, posteriormente, a un intento de agregación sumativa.

Tras este enfoque, subyace oculto un postulado de aditividad; no hay nada más allá de la agregación de los objetos más simples los cuales constituyen las entidades fundamentales; el todo es, por tanto, reducible a la suma de las partes. De los preceptos cartesianos no se deja trans lucir ningún interés por las relaciones entre los objetos, ni por la posibilidad de que dichas relaciones alteren las propiedades de aquéllos y pongan, por tal motivo, en cuestión su definibilidad como entidades independientes. No hay lugar, pues, para la síntesis no sumativa, para la emergencia de propiedades no atribuibles a los objetos individualmente considerados sino a su dependencia recíproca, a su interacción.

Esta prevalencia de las entidades frente a las relaciones mutuas, característica del pensamiento cartesiano, ha sido sobrepasada en el marco de la física fundamental contemporánea. Como ya anticipara Bachelard en su análisis crítico de la epistemología cartesiana (Bachelard, 1934) *"mientras que la ciencia de inspiración cartesiana hacía muy lógicamente lo complejo a base de lo simple, el pensamiento científico contemporáneo intenta leer lo complejo real bajo la apariencia simple proporcionada por fenómenos compensados; se esfuerza en encontrar el pluralismo bajo la identidad, en imaginar ocasiones de romper la identidad más allá de la experiencia inmediata prematuramente resumida en un aspecto de conjunto. Estas ocasiones no se presentan por sí mismas, no se encuentran en la superficie del ser, en la modas, en lo pintoresco de una naturaleza desordenada y variable. Es preciso ir a leerla en el seno de la substancia, en la contextura de los atributos"*. (p. 143) y continúa más adelante ... *"La ciencia contemporánea se funda sobre una síntesis primera, sitúa la claridad en la combinación epistemológica, no en la meditación separada de los objetos combinados. Dicho de otro modo, sustituye la claridad en sí por una suerte de claridad operatoria. Lejos de que sea el ser el que ilustre la relación, es la relación quien ilumina el ser"* (p.148).

Esta forma de epistemología no cartesiana está igualmente presente en el enfoque sistémico (Durand, 1990; Le Moigne, 1990) a través de sus cuatro conceptos fundamentales: el de *interacción* en tanto que acción recíproca entre los elementos de un sistema que modifica el comportamiento o la naturaleza de dichos elementos; el de *totalidad* como forma global que incluye la aparición de cualidades emergentes que no poseían los componentes del sistema separadamente considerados; el de *organización* que en su dimensión tanto estructural como funcional define las relaciones entre los componentes del sistema; y el de *complejidad*, como cualidad esencial de los sistemas, sinónimo de riqueza de información, de la cual no se puede prescindir.

Una tal perspectiva epistemológica -que encuentra su más firme fundamento en los desarrollos de la física actual- constituye también el marco de referencia de la aproximación que se aborda en el presente trabajo. Una aproximación en el que prima la relación entre los componentes de nuestro sistema transdisciplinar más allá de lo que cada uno de ellos, individualmente considerado: pueda ser, una aproximación en el que un flujo de significado circula desde el *seno de la sustancia, desde la contextura de los atributos* y vuelve a ellos para iluminarlos bajo una óptica contrastada más allá de sus perfiles iniciales.

Una nueva fuente de inspiración para la educación científica.

El avance del conocimiento científico no se produce de un modo lineal. Si bien es cierto que el carácter acumulativo del conocimiento constituye un factor permanente de progreso, no es de ningún modo el único. R. Blanché (1972) citando a L. Brunschvieg y G. Frey, distingue en el ámbito científico entre los progresos de carácter *lineal* y los de carácter *circular*; o, en otros términos, entre los avances de naturaleza *progresiva* y aquellos otros de carácter *reflexivo*. Los procesos de carácter circular suponen un ensimismamiento de las propias disciplinas científicas en sus fundamentos o en la estética de sus construcciones teóricas. En esa tarea, los científicos se alejan del contexto habitual de su trabajo de investigación disciplinar en pos de cotas más profundas de significado, las cuales, una vez alcanzadas, pueden iluminar el camino hacia niveles de progreso más elevados. La propia noción de *revolución científica*

presenta connotaciones semánticas próximas a lo circular y contiene elementos muy cercanos a los avances de carácter reflexivo que configuran las etapas o fases preliminares de toda revolución.

La definición de nuestro particular sistema transdisciplinar, por la propia topología de sus relaciones, hace referencia a ese aspecto circular o reflexivo de la elaboración científica. Junto a los bucles de interacción, anteriormente descritos, entre las parejas física/epistemología; epistemología/aprendizaje científico; aprendizaje/enseñanza de la física y física/enseñanza, cabe fijar la atención en ese "anillo externo" (ver figura 2.1) de relaciones e influencias que constituye un elemento de "cierre" del sistema. De su análisis obtendremos una nueva fuente de inspiración que anime el progreso del referido sistema en su conjunto y, particularmente, de los elementos implicados en la llamada *educación científica*.

Por encima de los detalles que conforman la estructura fina de las teorías más características de la física fundamental contemporánea, ningún observador dotado de una mínima sensibilidad intelectual puede eludir una cierta sensación de plenitud estética que se deriva de la contemplación de la unidad en la diversidad, de la simplicidad de lo complejo y, a un tiempo, de la potencia descriptiva, explicativa y predictiva de esas construcciones teóricas que se integran en un todo armonioso y coherente. Ante una tal situación -y como insinuara ya Bohr con menos elementos de apoyo de los que disponemos en la actualidad- *"es difícil escapar a la convicción de que los hechos revelados por la teoría cuántica que caen fuera del dominio de nuestras formas ordinarias de intuición, proporcionan un medio para elucidar problemas filosóficos de alcance general"* (Bohr, 1927).

El panorama que ofrece la física fundamental contemporánea -de la cual esa teoría cuántica referida por Bohr es una parte, desde luego importante, pero tan sólo una parte- sugiere que los elementos del conocimiento presentes en ella deben tener una validez más general que la reflejada en sus desarrollos cuantitativos. Bastaría elevar el plano del análisis de lo estrictamente físico- matemático a lo propiamente epistemológico para que, desde el ámbito de lo cualitativo los elementos de conocimiento así designados subtendieran una realidad más amplia que la propiamente física.

No se trata con ello de resucitar el fisicalismo de Carnap y su tesis de la unidad de la ciencia, según la cual toda proposición cien-

tífica sería expresable en un lenguaje formal extensión del propiamente físico que estaría llamado a ser la lengua universal de la ciencia (Blanche, 1972). La unidad a la que nos referimos desplaza su interés de la forma al contenido, de lo sintáctico a lo semántico o, en otros términos, pretende avanzar en pos del significado. Es precisamente buceando en el significado profundo latente en las grandes teorías físicas, por debajo o por encima -según se mire- de su idioma específico, que es posible, en nuestra opinión, dar un paso más hacia la consecución de ese objetivo ideal acariciado igualmente por filósofos y científicos que se encarna en la llamada *unidad del conocimiento* (Bohr, 1964).

En lo que concierne al presente estudio, se pretende aplicar el procedimiento intelectual más arriba esbozado en el seno del sistema transdisciplinar anteriormente descrito siendo guiados, precisamente, por las indicaciones de los grafos que configuran ese ciclo exterior. Una visión cualitativa de ciertos principios muy generales de la física fundamental haría posible, mediante una operación no trivial de transposición de significado, la formulación de otros tantos principios de naturaleza epistemológica que podrían inspirar la enseñanza y el aprendizaje científicos. Puesto que ese movimiento epistemológico de ascenso y descenso sucesivos nos devuelve al ámbito de lo empírico, la validez de los principios así formulados deberá ser evaluada por su capacidad a la hora de explicar y predecir fenómenos en el ámbito de la educación científica. Ello demuestra la vocación científica, y no meramente filosófica, de nuestro programa. Yendo aún más lejos, una mejora en la eficiencia del proceso de enseñanza/aprendizaje derivada del anterior enfoque ejercerá un efecto retroactivo sobre la propia física como disciplina y sobre el progreso del tipo de conocimiento que le es característico. El bucle se ha cerrado y el carácter transdisciplinar del sistema se hace después de todo, y si cabe, aún más evidente.

Una vez presentada la anterior perspectiva en sus rasgos fundamentales, tiene pues sentido incidir con algún detenimiento adicional en su legitimidad en tanto que procedimiento intelectual y científico. En el orden epistemológico la justificación está, creemos, mínimamente establecida y se deriva, en fin de cuentas, de la aceptación de ese principio de unidad del conocimiento ya referido. Sirva, no obstante, la siguiente cita de Bohr (1957) para reforzar la perspectiva general en la que se inserta nuestro planteamiento:

"La ampliación del marco conceptual no sólo ha servido para establecer orden en ciertas ramas del conocimiento sino que, en el análisis y síntesis de la experiencia, ha revelado analogías en dominios del conocimiento aparentemente separados, sugiriendo de este modo la posibilidad de una descripción objetiva cada vez más general... En nuestros días la exploración de nuevos campos de experiencia ha revelado condiciones insospechadas previas a toda aplicación no ambigua de nuestros conceptos más elementales, y de este modo ha dado una enseñanza epistemológica cuyo alcance llega a problemas muy alejados de la física" (p.84).

Tiene sentido, asimismo, el hacer explícitos, además, algunos argumentos de legitimación en el orden estético primero y metodológico después. En el orden estético, no cabe duda que este nuevo enfoque en la inspiración de la educación científica goza de atributos de armonía y coherencia muy parecidos a los que adornan las modernas teorías físicas. La diversidad de los elementos del sistema se resume en una unidad de fondo que añade sentido al significado. Las partes no contribuyen al todo como meros elementos yuxtapuestos sino que influyen en las demás y son influenciadas por ellas en un marco de relaciones fecundas. Frente a esta inspiración de la educación científica con base en la física fundamental, las inspiraciones más frecuentes como la de orden psicológico o la de orden filosófico, no parecen alcanzar un nivel similar de armonía y coherencia.

No deja de ser curioso que mientras que la enseñanza de la física rastreaba en la psicología la existencia de modelos que inspiraran su progreso, la propia psicología cognitiva acudía a la física en busca de contenidos o formas de conocimiento psicológicamente relevantes. No se pretende, sin embargo, desplazar radicalmente la psicología como elemento facilitador de una mejor comprensión de las características de un aprendizaje científico efectivo sino, más bien, de situarla en un nivel más próximo a lo empírico. La psicología cognitiva deberá seguir inspirando, en un proceso "abajo-arriba", procedimientos e información observacional relevantes a la investigación sobre el aprendizaje de la física pero, en nuestra opinión, ha llegado la hora de intentar apuntar más alto en la búsqueda de principios más generales que iluminen esa otra vía "arriba-abajo" que constituye uno de los elementos esenciales en la construcción del conocimiento característicos de la ciencia moderna.

En el orden filosófico, la inspiración epistemológica de la educación científica (López Rupérez,1990) ha constituido otro factor fundamental en la evolución de dicha disciplina. Dejando a un lado ese elemento de naturaleza historicista que resucitando de algún modo el principio biológico de Haeckel -según el cual *la ontogenia es una recapitulación de la filogenia*- ha buscado en la evolución científico-intelectual del sujeto en formación hitos semejantes a los aportados por el análisis crítico de la historia de la ciencia, cuya cuota de interés no vamos ahora a discutir, lo cierto es que con bastante frecuencia la ya referida inspiración epistemológica de la educación científica ha estado mediada por la interpretación, a través de una "filosofía externa", de aspectos referentes a las ciencias físicas tales como el análisis de sus métodos o de sus modos de crecimiento.

La legitimación en el orden metodológico de la inspiración de la educación científica que postulamos, hunde sus raíces en la visión que sobre la construcción del conocimiento científico aportaron los físicos-filósofos del presente siglo y que no es, en absoluto, ajena a esa evolución del marco conceptual de la física hacia posiciones cada vez más alejadas del mundo sensible. En este contexto, hacemos nuestra para esta ocasión la posición del propio Einstein a favor del libre juego de los conceptos, en tanto que supuestos del pensamiento, como mecanismo de construcción teórica (Einstein,1984). Dicha posición quedó reflejada de un modo esquemático (ver fig.2.2), en uno de los fragmentos de la carta escrita a su viejo amigo Maurice Solovine (Holton,1981; Miller,1984) y expresada en los siguientes términos:

"Yo veo la cuestión esquemáticamente así:

- 1) *Las E (experiencias sensibles) nos son dadas.*
- 2) *A son los axiomas de los cuales extraemos conclusiones. Psicológicamente, estos A reposan sobre los E. No existe ninguna vía lógica que lleve de los E a los A, sino únicamente una conexión intuitiva (psicológica) que es siempre "hasta nueva orden".*
- 3) *De los A se deducen, por vía lógica, asertos particulares S, deducciones que pueden pretender la exactitud.*
- 4) *Los S son puestos en relación con los E (prueba de la experiencia)..."*

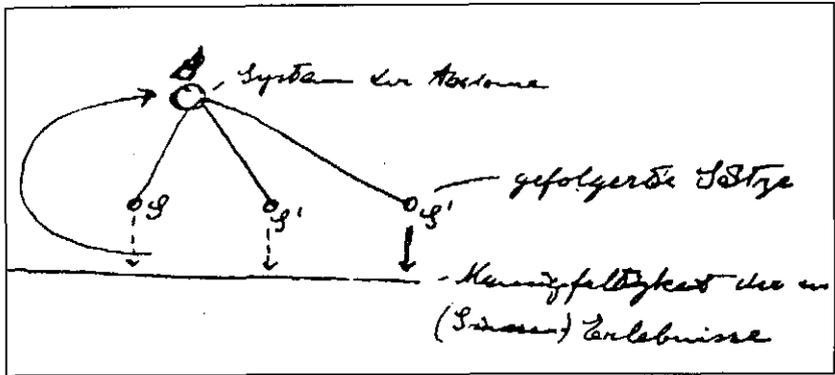


Fig. 2.2 - Esquema manuscrito de Einstein en un intento de exponer, en carta dirigida el 7 de mayo de 1932 a su amigo Maurice Solovine, su visión filosófica de la construcción del conocimiento científico.

Einstein insiste en definitiva, en el carácter esencialmente constructivo y especulativo del conocimiento científico aunque sometido, ciertamente, a la ligadura fundamental de su coordinación con la experiencia.

De otra parte, Niels Bohr en su ensayo "El postulado cuántico y el desarrollo reciente de la teoría atómica" (Bohr, 1927), viene a poner, asimismo, el acento en esas dos claves del progreso de la física cuando afirma: "La consecución de esta mayor libertad de ideas es la responsable del maravilloso progreso realizado durante la última generación que nos ha permitido penetrar aún más en la naturaleza del fenómeno"

En el presente caso, el juego conceptual que se postula, el elemento especulativo que se defiende se inspira en una transposición de significado de la física fundamental a su aprendizaje y a su enseñanza, aceptándose, en todo caso, el veredicto ineludible de la correspondencia con el nivel de lo empírico. En esencia, se trata de extender ese procedimiento de ascenso constructivista propio de la física a un ámbito más general, más comprensivo.

3

EL PRINCIPIO DE INVARIANCIA COMO PARADIGMA DE PRINCIPIO EPISTEMOLOGICO

Las reflexiones de físicos tan destacados como Bohr o como Eddington, en relación con la existencia de una validez de ciertas leyes o principios característicos de la física moderna más general que la que poseen en su contexto inmediato, resultan de plena actualidad. En la evolución tanto de la física como de otras disciplinas próximas es posible encontrar, en el umbral de un nuevo siglo, motivos más que sobrados como para admitir sin reservas su vigencia. Una vigencia que se consolida paralelamente con el progreso de las disciplinas fundamentales y que plantea la oportunidad y, si cabe, la urgencia de una reflexión cuidadosa sobre la posibilidad de una tal transposición de significado, sobre sus características y sobre sus consecuencias.

En el presente capítulo fijaremos nuestra atención sobre el principio de invariancia, o de simetría, y, al hilo de un análisis somero sobre su papel en el espacio teórico propio de la física contemporánea, trataremos de explicitar la caracterización de este tipo de principios -que se aproximan a lo que Eddington denominó *principios epistemológicos* (Eddington, 1958)- con la intención de disponer de un referente que nos auxilie en la tarea de identificar otros principios de análoga naturaleza y nos facilite su extensión a ámbitos disciplinares conexos.

SIMETRÍA E INVARIANCIA EN LA FÍSICA FUNDAMENTAL

La noción de simetría

En el lenguaje cotidiano la idea de *simetría* posee una connotación esencialmente geométrica que supone la repetición de una o más partes de un cuerpo o la regularidad de una cierta figura. En el lenguaje científico la noción de simetría está, sin embargo, ligada a una idea más general, la de *invariancia bajo transformaciones*. En palabras del conocido matemático alemán Herman Weyl (1885-1955) "*...una cosa es simétrica si hay algo que se le pueda hacer tal que, una vez hecho, la cosa parezca la misma que antes*". Un exágono, por ejemplo, es una figura que presenta simetría bajo rotaciones en torno a su centro geométrico pues girándolo un número entero de veces 60° se reproduce la figura inicial.

En el ámbito concreto de la física, la simetría consiste, en efecto, en una operación que deja invariante un sistema de interés físico de naturaleza sea material sea formal. Las estructuras cristalinas, con lo que suponen de organización regular de entidades fundamentales, tales como átomos, iones o moléculas, constituyen los mejores ejemplos de sistemas físicos de carácter material que gozan de propiedades de simetría -o de invariancia- bajo transformaciones de tipo geométrico. Sin embargo, y a pesar de su importancia a la hora de fundamentar una cristalografía científica, el valor de las simetrías de los objetos en el marco de la construcción de la física resulta casi irrelevante cuando se le compara con el de la simetría de las entidades formales, esto es, de las leyes físicas. Se dice que una ley física es simétrica respecto de una transformación si, y sólo si, resulta invariante cuando se le aplica dicha transformación. Como tendremos oportunidad de destacar más adelante, la simetría de las leyes físicas no concierne ni a los fenómenos ni tan siquiera a las magnitudes u observables que aquéllas relacionan, sino a la estructura formal de las ecuaciones que las definen. Por lo general, el conjunto de transformaciones de naturaleza análoga que dejan invariantes las leyes físicas se integran en una estructura matemática de grupo que se conoce como *grupo de simetría* y que configura formalmente la simetría en cuestión.

Simetría, relatividad y principios de conservación

La mecánica de Newton y algunos de sus posteriores desarrollos nos aportan el primer soporte racional para albergar la sospecha de que lo que esconde tras de sí la simetría es aún mas importante que aquello que nos muestra. En dicho marco teórico destaca la presencia de cuatro grandes principios, tres de conservación y uno de relatividad. El principio de *conservación del momento lineal* p , el de *conservación del momento angular* L y el de *conservación de la energía mecánica total* H , aseguran que, bajo ciertas condiciones, las correspondientes magnitudes características de una partícula en movimiento se mantienen constantes con el tiempo, es decir, se conservan. El principio clásico de relatividad es el de Galileo que afirma que *las leyes de la dinámica son las mismas para un observador en reposo que para otro animado de un movimiento rectilíneo y uniforme con respecto al primero*. Dicho principio de relatividad -que excluye la posibilidad de definir un estado de reposo absoluto, esto es, independiente del observador- puede ser formulado como principio de invariancia sin más que definir el conjunto de ecuaciones de paso entre los sistemas de coordenadas fijos a cada uno de los dos observadores considerados. Tales ecuaciones de transformación, que definen el llamado "*grupo de Galileo*", al ser aplicadas a las leyes de la mecánica las dejan invariantes, es decir, no cambia para nada su forma cuando se modifica en ellas las coordenadas de acuerdo con lo que prescriben las ecuaciones de transformación.

El principio de Galileo, formulado como principio de invariancia, constituye un ejemplo sencillo que revela alguna de las características de este tipo de principios. En primer lugar, deja al descubierto, con toda claridad, la relación existente entre invariancia y relatividad. La invariancia de las leyes físicas es sinónimo de *equivalencia entre sistemas de referencia* o, si se prefiere y siguiendo a Einstein, de equivalencia de "puntos de vista" (Balibar, 1986). Si dos observadores relacionados de una determinada manera -en nuestro caso, mediante un desplazamiento relativo a velocidad constante- pueden analizar los fenómenos según leyes idénticas es que tales puntos de vista son equivalentes; en otros términos, ninguno de ellos dispone de una posición privilegiada con relación al otro. Esta imposibilidad de determinar de forma absoluta una cierta

propiedad o estado -en este caso el de reposo (o el de movimiento rectilíneo y uniforme)- constituye lo esencial de la idea de relatividad.

En segundo lugar, *los principios de invariancia se refieren no a los fenómenos en sí, sino a las leyes que los rigen*. Para ilustrar este importante enunciado recurriremos a un ejemplo, de inspiración galileana, que se enmarca en el ámbito de aplicación de su principio de relatividad. Un observador O' situado en la cubierta de un velero que se desplaza rápidamente, en línea recta, paralelamente al espigón de un puerto y con velocidad constante, ve caer una piedra que, desde lo alto del palo mayor suelta un marinero. Desde su punto de vista, el observador O' aprecia un movimiento de caída rectilíneo y uniformemente acelerado. Sin embargo, otro observador O exterior al barco, sentado en el borde del espigón, y, por tanto, en reposo con respecto al primero, apreciará un movimiento parabólico, que resulta de la composición de dos movimientos: uno horizontal y uniforme que afecta a la piedra, dado que ésta se movía junto con el barco en el momento en que fué soltada por el marinero, y otro vertical y uniformemente acelerado debido al propio peso de la piedra. Los fenómenos que aparecen ante la vista de los dos observadores son, desde un punto de vista cinemático, diferentes. La velocidad de la piedra es relativa -depende del estado de reposo o de movimiento del observador- del mismo modo que lo es la trayectoria; sin embargo, los dos fenómenos satisfacen la misma ecuación fundamental $F = ma$. Generalizando lo anterior fuera ya del marco que ofrece el principio de relatividad de Galileo, incluso sería posible encontrar sistemas de referencia para los cuales la transformación que los conecta alterará los valores de las magnitudes F , m y a pero sin modificar la relación existente entre ellos.

El principio de invariancia alude, pues, a la equivalencia de las leyes físicas consideradas desde diferentes puntos de vista; pero, además, constituye la esencia misma del principio de relatividad que hace compatibles el carácter relativo de las cantidades físicas con el carácter absoluto, simétrico o invariante de las relaciones fundamentales que las ligan.

En tercer lugar, y aunque, a primera vista, puedan parecer independientes, existe una relación profunda entre las leyes de conservación antes citadas y la idea de invariancia. Dicha conexión entre la invariancia de las leyes y la conservación de ciertos atributos

físicos, fue establecida, por primera vez, por la matemática alemana Emmy Noether (1881-1935) mediante un teorema que lleva su nombre. El *teorema de Noether* se inscribe, inicialmente, en el marco de la *mecánica analítica* y más concretamente en el de la *formulación lagrangiana* (Goldstein, 1970).

Dicha formulación caracteriza los sistemas mecánicos mediante puntos en un espacio no geométrico conocido como *espacio de las fases*. Tal espacio abstracto posee $2N$ dimensiones en donde N constituye el número de grados de libertad del sistema considerado. Así, por ejemplo, si se trata de una partícula o punto material N es igual a tres, como corresponde al número de dimensiones del espacio euclidiano ordinario; si se trata de un sólido rígido, N vale seis incluyendo en dicho número las tres coordenadas de su centro de gravedad y los tres ángulos que permiten fijar su orientación en el espacio. A las N coordenadas generalizadas de posición q_i , que definen el llamado *espacio de configuración*, se les añade otras N que representan velocidades generalizadas, pues quedan definidas por las derivadas $q' = dq_i/dt$ de las anteriores con respecto al tiempo. El estado de un sistema se especifica mediante un punto en el espacio de las fases y su evolución mediante una trayectoria en dicho espacio abstracto.

Las ecuaciones formuladas por Lagrange como descriptoras del movimiento de los sistemas mecánicos, a diferencia de las que corresponden a la formulación Newtoniana, hacen referencia no a las fuerzas actuantes, sino a una magnitud escalar que se conoce como *lagrangiano* L del sistema y que se define como la diferencia entre su energía cinética T y su energía potencial V . En un estadio superior de formalización este conjunto de ecuaciones del movimiento, que contienen a q' , q y t como variables independientes, puede deducirse de un principio sencillo, el cual establece que entre todas las trayectorias posibles sobre el espacio de las fases el sistema elige aquella que hace mínima la integral de acción, esto es, la integral del lagrangiano L con respecto al tiempo.

Es a este nivel de abstracción que aparece el teorema de Noether para demostrar que si existe un grupo G de simetría del lagrangiano operando sobre el espacio de configuración, a cada transformación infinitesimal que deja invariante el lagrangiano le corresponde una constante del movimiento, es decir, una magnitud física que se conserva. De éste modo, los principios de conservación aparecen como

meras consecuencias de la invariancia de las leyes físicas -expresadas según una formulación lagrangiana- bajo diferentes tipos de transformaciones. Así, la aplicación de este teorema en el ámbito de la mecánica clásica establece que la *invariancia bajo traslaciones* en el espacio determina la conservación de las tres componentes del momento lineal \mathbf{p} ; la *invariancia bajo rotaciones* determina la conservación de las tres componentes del momento angular \mathbf{L} y la *invariancia bajo desplazamientos temporales* determina la conservación de la energía mecánica total H .

La conexión efectuada, a propósito del principio de Galileo, entre invariancia y relatividad puede ser extendida a los anteriores resultados que vienen a evidenciar ciertas propiedades fundamentales - de homogeneidad - del espacio y del tiempo. La invariancia bajo traslaciones espaciales expresa la imposibilidad de definir, en términos físicos, un origen absoluto de distancias; la invariancia bajo desplazamientos temporales indica la ausencia de un origen absoluto de tiempos físicamente observable; la invariancia bajo rotaciones revela la equivalencia de todas las direcciones del espacio. Tales propiedades fundamentales demuestran, en fin de cuentas, que las leyes de la mecánica se cumplen de igual modo aquí que allá, antes que después, "hacia la izquierda" como "hacia la derecha"; "hacia arriba" como "hacia abajo"; algo que a lo largo de la historia los físicos han dado por supuesto de un modo implícito y que ha constituido el telón de fondo de la garantía de comparabilidad y, por tanto, de validez interna de los resultados de sus investigaciones.

Mas allá del marco clásico

La extensión de estas ideas al marco teórico de la física moderna, ha constituido uno de los principales motores de su progreso científico. Así, la *relatividad restringida* de Einstein deriva de la aplicación de un principio de invariancia de las leyes físicas bajo un nuevo grupo de transformaciones -el *grupo de Lorentz*- que acaba con el carácter absoluto del espacio y del tiempo -de las longitudes y de los intervalos temporales-, propio de la física newtoniana, conservando, no obstante, la validez del principio de relatividad. Por otra parte, las implicaciones del teorema de Noether en el ámbito de la *mecánica cuántica* -en tanto que elemento

que articula principio de invariancia, principio de relatividad y leyes de conservación- ha ampliado el poder explicativo de la simetría hasta hacer de ella un "paquete" de significado que atraviesa la totalidad de la física.

Un modo de ilustrar la utilidad del teorema de Noether en el ámbito de la mecánica cuántica consiste en considerar la relación existente entre un principio empírico conocido desde el siglo pasado -el de la conservación de la carga eléctrica- y una clase de simetrías cuyo valor ejemplar resulta incuestionable. De acuerdo con el teorema de Noether, la conservación de la carga eléctrica de una partícula como el electrón es consecuencia de la invariancia de su lagrangiano bajo cambios de fase. La descripción mecanocuántica del estado de un electrón se efectúa mediante la función de onda compleja ψ , pero el valor de la carga correspondiente al estado en cuestión depende del cuadrado de su módulo, razón por la cual resulta independiente de la fase.

Es posible efectuar una descripción sencilla de las características esenciales de las funciones de onda armónicas recurriendo al método de los vectores rotatorios o *fasores*, según el cual ψ puede representarse mediante un vector en el plano cuyo módulo coincide con la amplitud de la función de onda y cuyo argumento representa la fase α . Puesto que α es función del tiempo, para un punto dado del espacio la función de onda ψ vendrá representada por un vector rotatorio. Ningún cambio en α afectará al módulo del vector, de modo que todos los fenómenos o los formalismos que dependan de dicho módulo, o de su cuadrado, serán invariantes bajo cambios de fase (Fig.3.1).

Una de las características consideradas como fundamental en las simetrías bajo cambio de fase es su carácter interno. Frente a las invariancias bajo traslaciones, bajo rotaciones o bajo desplazamientos en el tiempo -que tienen lugar todas ellas en el espacio-tiempo, llamado a veces *espacio externo* -, las invariancias bajo cambios de fase conciernen a un espacio abstracto definido sobre cada uno de los puntos del *espacio externo*. Retomando la descripción que ofrece el procedimiento de representación de funciones de onda mediante fasores, el espacio interno podría asimilarse en este caso al conjunto de puntos de ese círculo matemático que describe el extremo del vector mediante el que se representa la función de onda ψ . Si el cambio de fase afecta de forma diferente a los distin-

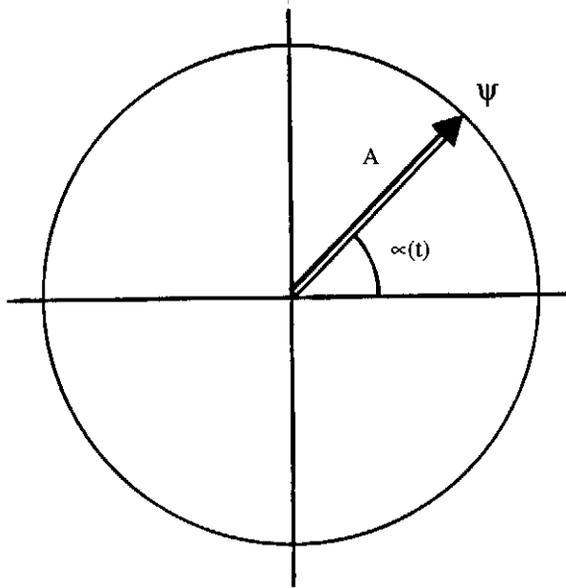


Fig. 3.1 - La amplitud A de la onda armónica $\Psi(r;t)$ y por tanto su cuadrado A^2 resultan invariantes bajo cambios de fase α . El conjunto de puntos de ese círculo matemático que describe el extremo del vector mediante el que se representa $\Psi(r;t)$ define un espacio interno o abstracto sobre cada uno de los puntos r del espacio externo en el que aquella está definida.

tos puntos del espacio-tiempo, entonces dicha transformación es *no global*, es decir, *local*. En general, las simetrías locales, es decir, que dependen del punto del espacio-tiempo considerado, reciben el nombre de *simetrías de aforo* o *simetrías de gauge* y han desempeñado un papel decisivo en la conducción de la física fundamental hacia niveles de unificación cada vez más elevados (Green, 1985, 1986; Cabibbo, 1983; Fayet, 1988).

Las *teorías de gauge* -que se apoyan en el concepto de simetría de *gauge*- permiten explicar, la existencia de las interacciones fundamentales en términos formales (Cheng, 1989; Neeman, 1979; Carmeli et al, 1989). El caso más sencillo corresponde a la interacción electromagnética. El lagrangiano del electrón libre resulta invariante bajo simetrías globales; pero cuando se aplica a las fun-

ciones de onda del electrón una transformación de *gauge* (local) se rompe dicha simetría, asociada, según el teorema de Noether, a la conservación de la carga. No obstante lo cual, es posible restablecer la invariancia del lagrangiano añadiendo a éste un término adicional que traduce la interacción del electrón con el campo electromagnético mediante la propagación de un fotón. Dicha partícula hace las veces de mensajero o intermediario, vehiculando, en definitiva, la interacción. La interacción es, por tanto, explicada de un modo formal como necesaria para preservar la invariancia del lagrangiano del electrón bajo transformaciones de *gauge*.

En la historia reciente de la física fundamental este éxito espectacular de la llamada *electrodinámica cuántica* -o teoría que describe a nivel cuántico la interacción electromagnética- ha sido ampliamente explotado, con resultados no menos asombrosos, en otros ámbitos teóricos, de modo que, en el marco de lo que se conoce como *modelo estandar* de las fuerzas fundamentales las teorías de *gauge* aportan una explicación precisa y, a la vez, elegante no sólo a la interacción electromagnética, sino también a la interacción fuerte y a la interacción débil. En los dos últimos casos la descripción de la interacción se efectúa recurriendo a un *boson de gauge* (W_{\pm} y Z^0 para la interacción débil y *gluón* para la fuerte) o partícula de *spin* entero y que, al igual que el fotón para la interacción electromagnética, constituyen las partículas de intercambio que caracterizan la correspondiente interacción.

La relación entre fuerzas y transformaciones de *gauge*, o simetrías locales, anteriormente esbozada puede ilustrarse recurriendo al papel de las fuerzas de inercia en el marco de la mecánica clásica. El grupo de transformación de Galileo deja invariante las leyes de la dinámica y, en particular, la ecuación fundamental $\mathbf{F}=\mathbf{ma}$ debido, esencialmente, al hecho de que la velocidad relativa \mathbf{v}_0 del sistema de referencia S' respecto de S -o velocidad de arrastre- sea constante sobre el espacio-tiempo (Fig. 3.2). Dicha constancia hace que la simetría bajo transformaciones galileanas sea global, es decir, independiente del punto del espacio-tiempo considerado. Sin embargo, cuando el sistema S' es un sistema acelerado con respecto a S la velocidad de arrastre \mathbf{v}_0 es una función del tiempo y la relación que aparece entre las aceleraciones \mathbf{a} , \mathbf{a}' y \mathbf{a}_0 ($\mathbf{a}=\mathbf{a}'+\mathbf{a}_0$) hace, a primera vista, inaplicable la ecuación $\mathbf{F}=\mathbf{ma}$. Estamos, en este caso, ante una transformación local -dado que \mathbf{v}^0 varía de un punto

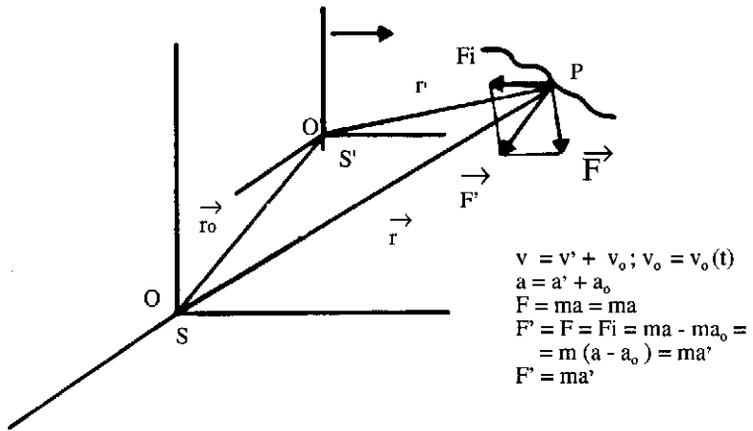
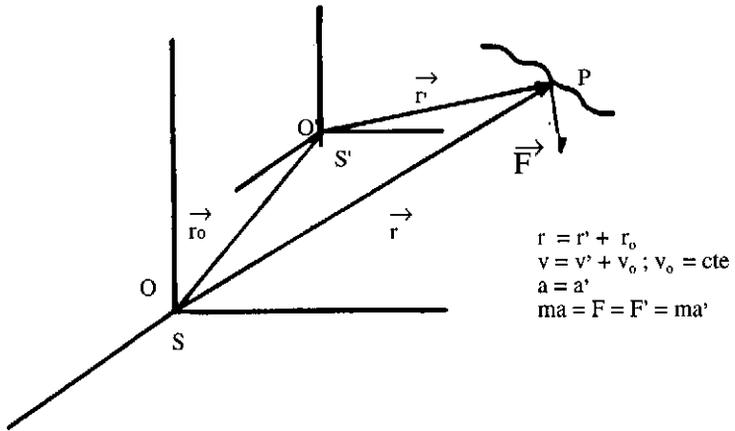


Fig. 3.2 - La fuerza de inercia F^i -que aparece exclusivamente desde la perspectiva del observador no inercial- puede ser vista como derivada de una exigencia de tipo formal, la preservación de la validez de la segunda ley de Newton bajo cambios de sistema de referencia (de inercial a no inercial). Añadida a la fuerza real F , la fuerza de inercia F^i hace que desde S' pueda aceptarse como válida la ecuación fundamental en la forma $F' = ma'$

a otro sobre el espacio-tiempo- que rompe la simetría de la ley fundamental de la Dinámica bajo transformaciones de tipo galileano. Sin embargo, es posible "poner las cosas de nuevo en su sitio", recurriendo a la introducción de un término corrector que se añade a la fuerza \mathbf{F} ; dicho término, que no es otra cosa que la llamada *fuerza de inercia* $\mathbf{F}_i = -m\mathbf{a}_0$, sumado vectorialmente a la fuerza real \mathbf{F} , restaurará la validez de la segunda ley en la forma $\mathbf{F}' = m\mathbf{a}'$, con $\mathbf{F}' = \mathbf{F} + \mathbf{F}_i$ y $\mathbf{a}' = \mathbf{a} - \mathbf{a}_0$. Desde un punto de vista formal, la existencia de la fuerza de inercia se justifica por razones de simetría, ya que permite corregir la no inercialidad del sistema S' en orden a preservar la invariancia de la segunda ley bajo transformaciones galileanas de tipo local.

Finalmente, la *relatividad generalizada* es una teoría en la cual la invariancia global bajo transformaciones de Lorentz, característica de la *relatividad restringida*, se generaliza bajo la forma de una simetría local asociada a un espacio-tiempo cuya métrica varía de un punto a otro en función de la materia que contiene. La identificación entre fuerzas de inercia y fuerzas gravitatorias, postulada por Einstein bajo la forma de su conocido *principio de equivalencia*, explica el que algunos autores consideren la teoría einsteniana de la gravitación como digna predecesora de las actuales teorías de *gauge* (Green, 1986). Pero aún más, la descripción de la interacción gravitatoria admite un tratamiento semejante al del resto de las interacciones fundamentales si se postula la existencia, por el momento hipotética, del gravitón como bosón intermedio, vehículo de la correspondiente interacción.

De un modo u otro, lo cierto es que las cuatro interacciones fundamentales -electromagnética, débil, nuclear o fuerte y gravitatoria- se derivan de un principio de simetría local o de invariancia de *gauge*. Dicho principio aporta una explicación común a las diferentes fuerzas fundamentales que se sitúa, precisamente, en el terreno de lo formal, o visto de otro modo, en el de lo estético. La condición de simetría, como principio cualitativo jerárquicamente elevado, se manifestaría bajo la forma de invariancia de *gauge* en un menor nivel de generalidad. Las exigencias, en el dominio formal, derivadas de este principio más restringido de simetría, explicarían, ya en el nivel de los fenómenos, las cuatro interacciones fundamentales y, a su través, la existencia de la materia tal y como se nos presenta.

Simetría y unificación

Cuando se analiza la evolución de la física fundamental a lo largo del presente siglo se advierte, por encima de las grandes revoluciones conceptuales aportadas por la relatividad y la mecánica cuántica -o precisamente por ellas- una tendencia clara hacia la unificación y con ello una aproximación hacia la simplicidad. Una simplicidad que alberga en su seno, a buen seguro, una enorme riqueza formal y conceptual y que, a un tiempo, nos acerca a la captación del significado profundo de la totalidad. En este proceso, que desde una perspectiva conceptual trataremos de esbozar en lo que sigue, la idea de simetría ha jugado un papel fundamental como elemento unificador

El principio de simetría, a través de las teorías de *gauge*, no sólo ha facilitado la construcción de marcos teóricos capaces de abordar de un modo homólogo la descripción de las fuerzas fundamentales sino que, además, está haciendo posible la integración de dichos marcos en otros más amplios cuya capacidad unificadora es progresivamente mayor. Así, la *electrodinámica cuántica* reposa en una simetría de *gauge* definida mediante un grupo de simetría denominado $U(1)$. No obstante, dicha simetría se integra en un grupo más amplio conocido como $SU(2) \times U(1)$, extensión del grupo de simetría anterior, y que permite tratar las interacciones electromagnética y débil de un modo unificado dentro de una nueva y única teoría de *gauge*, la *teoría electrodébil*.

Por otra parte, la *cromodinámica cuántica*, o teoría de las interacciones nucleares o fuertes, constituye otra teoría de *gauge* asociada al grupo $SU(3)$ de invariancia local del lagrangiano bajo cambio de color de los quarks. Pero dicho grupo de simetría $SU(3)$ se integra en el grupo $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ que caracteriza el *modelo estandar supersimétrico* el cual describe, de un modo unificado, la interacción electrodébil y la interacción fuerte.

Este proceso de ascenso hacia la unificación total mediante la elaboración de teorías cada vez más abarcales y siempre apoyadas en el principio de simetría, termina por engullir a la interacción gravitatoria en su formulación einsteniana, integrándola, junto con las anteriores, en la *teoría de supercuerdas* (Green, 1986; Davies *et al.* 1990). Las energías puestas en juego en este proceso de total unificación (del orden de 10_{19} GeV) sobrepasa, con mucho, el

orden de magnitud de las energías accesibles mediante los más potentes aceleradores de partículas en los cuales es posible provocar colisiones que alcanzan, a lo sumo, algunas centenas de GeV, es decir, tan sólo el umbral característico de la primera unificación, la electrodébil. A pesar del carácter fuertemente teórico de los modelos correspondientes a estadios de unificación elevados, se pueden efectuar predicciones conectadas entre sí lógicamente hasta alcanzar el nivel en el que la contrastación empírica es posible. El sueño del viejo Einstein de encontrar una teoría unitaria de partículas e interacciones puede hacerse realidad a través, precisamente, de una explotación inteligente del principio de invariancia o simetría, a modo de superprincipio, cuya potencia en el marco de la física actual está fuera de toda duda.

A tenor de lo anterior, el principio de invariancia - o de simetría - se revela de una forma espléndida y, a la vez, misteriosa, como un principio simple de muy alto nivel jerárquico que subtiende las teorías físicas más elaboradas y otorga un sentido profundo a los fenómenos que aquéllas explican. Como han resaltado físicos tan implicados en el desarrollo de estas ideas como el propio Wigner, los principios de simetría constituyen "superleyes" (Levy-Leblond, 1989) que operan sobre la naturaleza tal y como se nos muestra y, muy especialmente, sobre el conocimiento que la ciencia física nos proporciona de ella. Un conocimiento complejo y abstracto cuya validez empírica viene, en parte, garantizada por el consenso científico que, apoyado en multitud de contrastaciones experimentales, la propia noción de *modelo estandar* lleva aparejado.

METASIMETRIA

La potencia de la noción de simetría, su consistencia a través de contextos teóricos diversos y su valor como elemento unificador en el seno de la ciencia fundamental parecen apuntar a la existencia de un elemento profundo; a una clara preferencia, sea de la Naturaleza, sea de nuestro conocimiento sobre ella, por una forma de simplicidad que se esconde tras un bosque de abstracciones y complejidades y que, a un tiempo, las explica. Tiene pues sentido poner a prueba, una vez más, esa especie de "validez transversal" del prin-

cipio de invariancia intentándolo llevar en el plano científico hasta sus últimas consecuencias y analizando, posteriormente, el significado de los resultados así obtenidos. Este es el sentido que pretendemos otorgar, a modo de ensayo, a la idea de *metasimetría* como operación de simetría de orden superior, actuando sobre un espacio abstracto cuyos elementos vienen a ser categorías, tipos, en definitiva, formas de simetría.

Tipos de simetrías formales

El importante papel desempeñado por el principio de invariancia en el desarrollo de la física en la segunda mitad del presente siglo ha llevado aparejada la proliferación de simetrías formales, esto es, simetrías que afectan a las leyes o a los principios antes que a los fenómenos en sí. Por razones de índole diverso, resulta interesante introducir un esquema de clasificación en el conjunto de aquellas simetrías formales que poseen un significado físico contrastado o que desempeñan un papel esencial en las teorías más recientes. Generalizando alguno de los conceptos disponibles, es posible efectuar una clasificación múltiple sobre la base de tres criterios fundamentales.

En primer lugar, y de acuerdo con la naturaleza del espacio sobre el que están definidas, las simetrías pueden clasificarse en *externas* (E) e *internas* (I). Las *simetrías externas* son aquéllas que suponen transformaciones operando sobre el espacio-tiempo. Por contra, las *simetrías internas* actúan sobre espacios abstractos. En el lenguaje de la física teórica se suele establecer una distinción entre el *espacio base* y el *espacio fibrado* o *la fibra*. El segundo se define sobre cada uno de los puntos del primero y está constituido por grados de libertad o propiedades intrínsecas de las partículas o de los objetos cuánticos. El espacio base habitualmente considerado es el espacio-tiempo de Minkowski.

En segundo lugar, y en función de la naturaleza de las propias transformaciones implicadas en la noción de simetría, éstas pueden clasificarse en *continuas* (C) y *discretas* (D). Las simetrías continuas implican transformaciones que dependen de parámetros que varían de forma continua. Las discretas se aproximan a la idea geométrica de simetría central pues dependen de un origen de carácter físico-matemático.

Finalmente, y atendiendo a la conexión existente entre espacio y transformación, es posible clasificar las simetrías en *globales* (G) y *locales* (L). Las simetrías globales están definidas idénticamente en todos los puntos del espacio base; por contra, las simetrías locales o de *gauge* dependen del punto del espacio base sobre el que se aplican.

Aunque algunos autores consideran las simetrías externas/interinas como posibilidades de las continuas (Boutot, 1990) es posible, sin embargo, proceder de un modo más general y postular el carácter ortogonal de los tres criterios de clasificación anteriormente enunciados, de modo que una simetría dada quedaría definida por una terna de categorías y sólo por una. O en otros términos, es posible parametrizar cada una de las simetrías formales conocidas mediante tres *coordenadas de simetría* i, j, k tomando cada una de ellas dos posibles valores.

El contenido de la clasificación

Tiene ahora sentido plantearse una extensión del principio de simetría hacia niveles epistemológicos más elevados y analizar, a continuación, la oportunidad de dicha extensión así como algunas de sus implicaciones posibles. Para ello y, como primer paso, proponemos un cambio en la notación de los valores de las coordenadas de simetría de la forma literal a la numérica, de acuerdo con el siguiente esquema de correspondencia:

Tipo de simetría	Coordenada	Valores literales	Valores numéricos
<i>interna/externa</i>	i	I/E	0/1
<i>continua/discreta</i>	j	C/D	0/1
<i>local/global</i>	k	L/G	0/1

El conjunto de las posibles clases de simetrías -que notaremos en la forma $\{\sigma_{ijk}\}$ - se corresponde, por tanto, con el conjunto de las posibles ternas de coordenadas $\{(i, j, k)\}$ cada una de cuyas componentes toma valores sobre el conjunto binario $\{0, 1\}$. Admitir la aplicación de un principio de simetría sobre el espacio discreto así

generado equivale a aceptar todos y cada uno de sus elementos como poseyendo un significado en el marco de las teorías de la física fundamental. Dicha simetría puede ilustrarse recurriendo a la representación gráfica del conjunto $\{(i,j,k)\}$ sobre un sistema de ejes ortogonales. Los vértices del cubo correspondiente representan, por tanto, las ocho clases de simetrías posibles (Fig.3.3) y la relación de metasimetría -definida sobre $\{\sigma_{ijk}\}$, discreta y con origen abstracto Ω - que se postula afecta a cada par de vértices extremos unidos por una diagonal, también abstracta, de ese cubo imaginario y concierne, ya sea a su existencia en tanto que grupo o clase, ya sea a su oportunidad- o posibilidad de ser- en el marco de las teorías físicas. Dicho en otros términos, los ocho elementos así obtenidos deben permitir la clasificación de las simetrías formales disponibles y, en el caso de que, tras

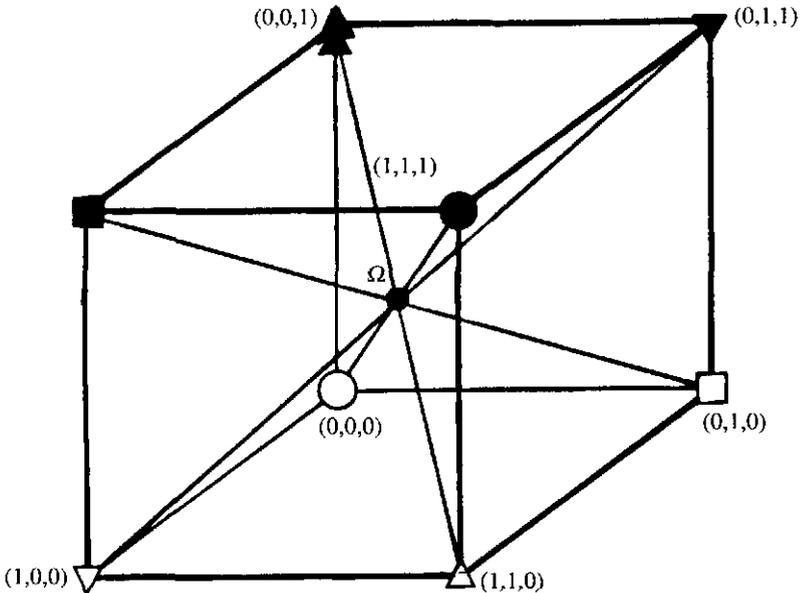


Fig. 3.3 - Este cubo imaginario constituye una representación de la idea de metasimetría postulada. Se trata de una simetría que se asemeja a las típicas simetrías centrales -en este caso con centro en Ω - pero que presenta un carácter superior en tanto que opera sobre grupos de simetrías formales especialmente relevantes en el seno de las teorías fundamentales de la física actual (ver texto).

la referida operación, quedarán clases sin contenido alguno, tales categorías deberían ser consideradas como elementos predictivos en el marco de teorías aún no disponibles. En lo que sigue, procederemos a un análisis de las diferentes categorías pertenecientes al conjunto $\{\sigma_{ijk}\}$ -por pares simétricos- así como de la naturaleza de sus respectivos contenidos, si los hubiere.

Simetrías internas, continuas y locales: (0,0,0)

Se incluyen en este grupo todas las simetrías de *gauge* asociadas a campos cuánticos. Son de destacar, dentro de dicha categoría, las simetrías relacionadas con cambios de fase que, en términos matemáticos, se designan mediante el grupo abeliano $U(1)$ y se corresponde con la explicación de la interacción electromagnética y, por tanto, con la electrodinámica cuántica como teoría de *gauge*. Asimismo, la simetría bajo cambio de color en los quarks -(grupo $SU(3)$) que explica la interacción fuerte en el marco de la llamada cromodinámica cuántica- constituye otra simetría de este tipo. Lo mismo se puede decir de la simetría bajo cambios de *isospin débil* y de *hipercarga leptónica* (grupo $SU(2) \times U(1)$), asociada a la teoría electrodébil, que permite explicar las interacciones débil y electromagnética unificadas.

Simetrías externas, discretas y globales: (1,1,1)

Pueden considerarse incluídas dentro de esta categoría aquellas simetrías discretas que están definidas de igual manera sobre no importa qué punto del espacio-tiempo, tales como la simetría por inversión temporal (T) o la simetría bajo operaciones de *paridad* (P) (inversión espacial o reflexión).

Simetrías internas, discretas y globales: (0,1,1)

La *conjugación de carga*, como operación que asocia a toda partícula, una antipartícula de igual masa, igual spin pero cargas opuestas -sean éstas bariónicas, eléctricas o leptónicas- constituye un ejemplo de esta clase de simetrías. El hecho de que estén definidas de igual forma sobre cada uno de los puntos del espacio-tiempo justifica su carácter global.

Simetrías externas, continuas y locales: (1,0,0)

Pertencen a esta categoría las simetrías características de la gravitación einsteniana, en donde la transformación de *gauge*, continua y local, se define, en este caso, no sobre la fibra sino sobre el propio espacio-tiempo.

Simetrías externas, continuas y globales : (1,0,1)

Pertencen a este grupo las simetrías geométricas clásicas que operan en el espacio-tiempo tales como invariancias bajo traslaciones espaciales, bajo desplazamientos temporales y bajo rotaciones.

Este análisis preliminar, en el que hemos conseguido clasificar una buena parte de las simetrías que desempeñan algún papel en el seno de las teorías físicas consolidadas, podría extenderse hasta agotar la práctica totalidad de este grupo de simetrías. Más allá de los límites definidos por el modelo estandar, nuevas simetrías con una fuerte, aunque fundada, componente de especulación teórica aparecen en un camino prometedor hacia la unificación de las cuatro interacciones fundamentales y la construcción de una "teoría de todo" (Cohen-Tannoudji, 1989; Davies et al. 1990). Así, en el marco de las teorías supersimétricas, la supersimetría constituye una simetría interna que, actuando sobre la fibra, transforma un fermión en un bosón y viceversa. Como generalización de las teorías de *gauge*, la supersimetría podría incluirse dentro del tipo (0,0,0). Por su parte, las teorías de supercuerdas, en las que el número de dimensiones del espacio-tiempo se amplía considerablemente con relación a la teoría einsteniana de la gravitación, implican simetrías que, como en este último caso, podrían ser catalogadas dentro de la categoría (1,0,0).

Tras lo anterior, tres tipos de simetrías, a saber, las *internas, continuas y globales* (0,0,1), las *externas, discretas y locales* (1,1,0) y las *internas, discretas y locales* (0,1,0) han quedado en esta "primera ronda" clasificatoria como formas puras, vacías de contenido. Admitiendo estrictamente el significado de la metasimetría anteriormente postulada, tales categorías constituyen auténticas predicciones respecto de nuevas simetrías de interés en el desarrollo teórico de la física fundamental. No es éste ni el momento ni el

lugar para explorar en esta dirección dentro de ese mar delicado y complejo definido por los detalles característicos de la estructura fina de las grandes teorías de punta. Los físicos teóricos podrán hacerlo si es que lo consideran de algún interés en tanto que elemento de guía. Sin embargo, la aplicación del principio de simetría llevado de esta manera más allá de su ámbito inicial nos ha permitido, a modo de ejercicio práctico, ilustrar la validez de esta noción tan potente y aproximarnos a su naturaleza en tanto que entidad conceptual apta para ordenar un espacio teórico, para proporcionar una explicación a algunos de sus componentes e, incluso, para efectuar algunas predicciones plausibles en su seno.

Que nadie espere que mediante este tipo de razonamientos seremos capaces, por ejemplo, de anticipar directamente las propiedades de partículas tales como el bosón intermedio H_0 de Higg; no es éste su ámbito de actuación ni tampoco su intención. Las posibilidades inmediatas de este tipo de principios no hay que buscarlas, por tanto, en el dominio cuantitativo, sino en el cualitativo; no en el material, o característico de los fenómenos, sino en el formal, o propio de los constructos teóricos. Y es en este sentido que el principio de invariancia ha demostrado, en reiteradas ocasiones, su valor como elemento generador de otros componentes teóricos situados en un estadio epistemológico más bajo y dotados, por tanto, de un mayor nivel de detalle.

El principio de simetría se revela, en fin, como un elemento epistemológico singular, simple y fecundo, vertebrador de nuestro conocimiento y susceptible de articular operaciones científicas de más bajo nivel. Su carácter general explica su enorme potencia y nos hace sospechar que subtiende una considerable variedad de aspectos de nuestro conocimiento sobre el mundo que permanecen aún ocultos.

EL PRINCIPIO DE INVARIANCIA COMO PRINCIPIO EPISTEMOLOGICO

Tanto las consideraciones de Bohr sobre el alcance del principio de complementariedad (Bohr, 1927, 1964) como las reflexiones de Eddington (Whittaker, 1951; Eddington, 1958) sobre la existencia de

principios cualitativos de los que podrían ser obtenidos los enunciados fundamentales de la física aluden a la característica primordial de lo que se ha dado en llamar "*principios epistemológicos*" (Whittaker, 1951; Nicolescu, 1985), a saber, su carácter general.

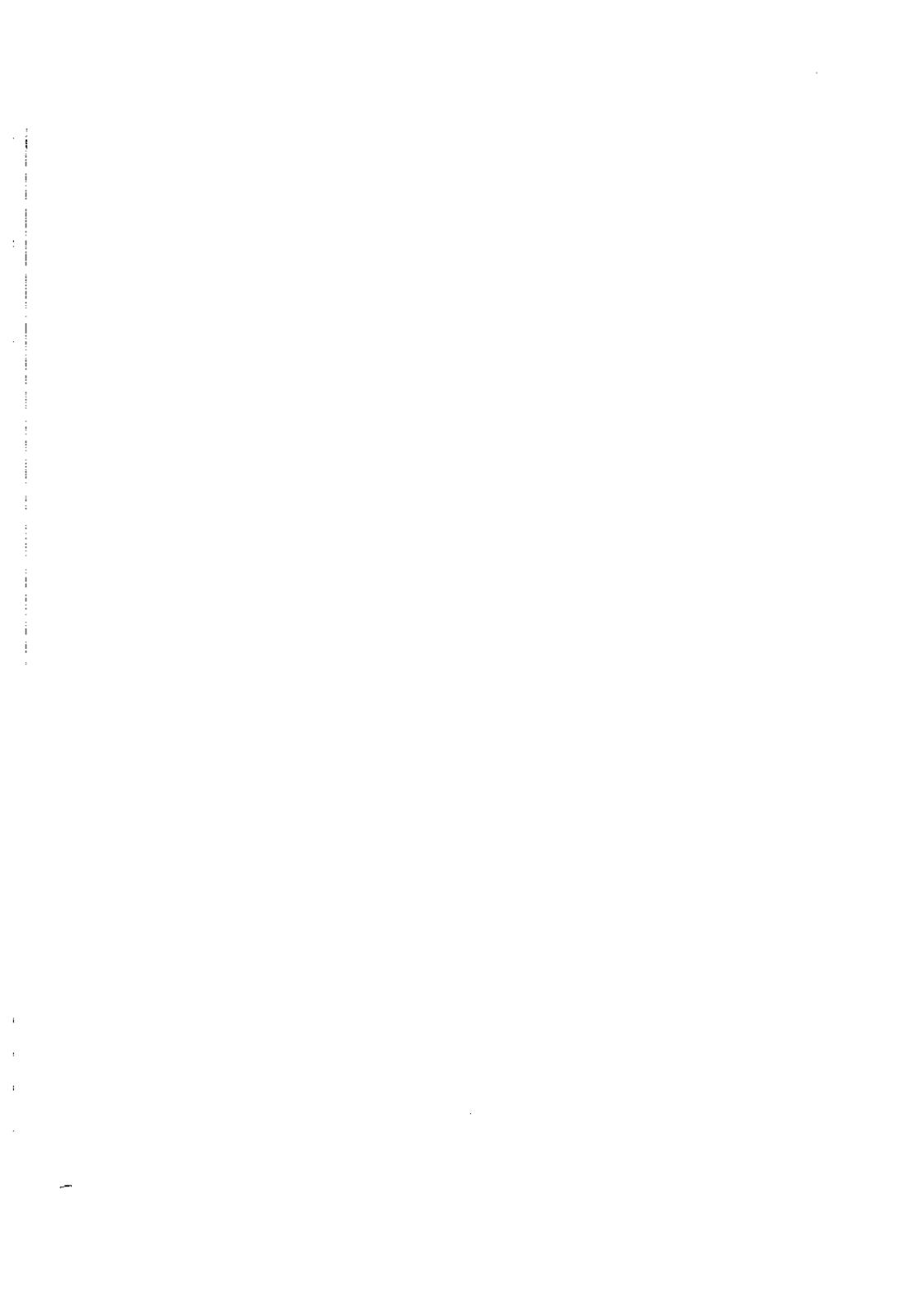
A pesar de la indudable influencia de estos dos ilustres físicos y del potencial innovador oculto tras estas ideas, lo cierto es que, desde entonces, no han sobrepasado la consideración de un simple programa filosófico situado, por tanto, a un nivel poco concreto (Eddington, 1958; Nicolescu, 1985). Sin embargo, y a la luz de los anteriores análisis sobre el papel desempeñado por la idea de simetría formal en el avance de la física fundamental, es posible considerar el principio de invariancia como un excelente ejemplo de principio epistemológico, como una referencia paradigmática que nos permita avanzar algunos pasos más hacia una mejor caracterización de esta noción singular y facilite su posterior utilización en contextos diferentes.

Los principios epistemológicos hacen referencia no a los fenómenos o a sus características observables sino al conocimiento científico de orden superior que disponemos de dichos fenómenos, de ahí su nombre. En un ámbito estrictamente científico podrían ser considerados, por tanto, como *metaprincipios*. Citando a Nicolescu (1985) "*Los principios epistemológicos poseen un carácter más general que las leyes fundamentales de la naturaleza*" (p.38). Dicho carácter general va unido a su simplicidad como elementos organizadores del conocimiento que subtienden, de modo que "*un número muy limitado de principios epistemológicos pueden explicar un gran número de leyes fundamentales*" (p.38).

Así, debido a su propia naturaleza, y a diferencia de los principios de la física, los principios epistemológicos no son enunciables en términos operacionales, sino que expresan más bien la existencia de ciertas cualidades o atributos del conocimiento que tenemos de lo real. En este orden de ideas, es preciso establecer una distinción clara entre la invariancia del lagrangiano de un electrón libre bajo cambios de fase, por ejemplo, y la idea de invariancia como principio epistemológico. En el primer caso se trata de un principio formal que opera sobre un espacio teórico bien definido de modo que sus predicciones, aunque indirectamente, son contrastables en el ámbito de la realidad física. El segundo se plantea a un mayor nivel de generalidad y se apoya en la consistencia observada en la validez

de los principios físicos de simetría así como en su potencia como elemento unificador de nuestro conocimiento sobre el mundo físico. Su carácter más general les hace potencialmente aplicables a diferentes niveles epistemológicos e incluso su significado profundo puede resultar transferible de unos dominios a otros mediante operaciones no triviales de transposición que es necesario explorar.

Su elevada posición en el seno de la jerarquía de la organización del conocimiento no les impide articular explicaciones y predicciones susceptibles de contrastación en el nivel inmediato inferior. Del mismo modo que las predicciones derivadas de las leyes fundamentales son puestas a prueba mediante la experimentación, que tiene lugar en el ámbito de los fenómenos, las que pueden derivarse de los principios epistemológicos conciernen, por su propio origen y en primer término, al ámbito de las teorías físicas, al ámbito de las relaciones entre las leyes o entre sus atributos característicos pero, además, pueden ser extendidas a ámbitos disciplinares diferentes; y esto es lo importante en el presente contexto. Este valor predictivo de los principios epistemológicos constituye, inicialmente, una simple orientación de carácter cualitativo en ese proceso de exploración especulativa y producción ideacional característico del quehacer teórico. No obstante, a medida que su influencia se propaga a lo largo de los diferentes niveles jerárquicos de organización del conocimiento puede traducirse en predicciones empíricamente contrastables. Se espera, por tanto, de ellos que desempeñen un papel bastante más preciso que el de servir simplemente de base a un programa filosófico.



4

HACIA UN SISTEMA DE PRINCIPIOS EPISTEMOLOGICOS

El *principio de invariancia* constituye el principal elemento vertebrador de la aproximación metateórica que se pretende desarrollar en el presente trabajo. Su clara dimensión operativa permitirá, sin duda, efectuar formulaciones parciales del mismo potencialmente útiles; pero en un plano más elevado, la idea más general que se esconde tras la propia noción de *principio epistemológico* empleada en esta obra es la de una forma de *invariancia semántica* de alto nivel. La posibilidad de transferir significado del ámbito de la física fundamental a otras áreas del saber no deja de hacer referencia a una cierta clase de conservación, de simetría o de invariancia de esa modalidad de conocimiento transponible que gozaría, por tal motivo, del deseado atributo de la unidad. Nos encontramos, por tanto, ante una relación semejante a la existente, en el plano científico, entre *invariancia* y *objetividad*, sólo que de orden superior. Así, la identificación, de acuerdo con Einstein, entre estos dos conceptos en su calidad de nociones solidarias, -la exigencia de objetividad implica la condición de invariancia en tanto que independencia de las leyes y de sus relaciones fundamentales cuando son vistas desde sistemas de referencia entre los que la naturaleza no establece distinción alguna (Paty,1993 p.440)- tiene su correspondencia, según nuestro enfoque y ya en un plano metacientífico, en el carácter asimismo solidario de la ideas de *invariancia semántica* y *unidad del conocimiento* consideradas a un cierto nivel de generalidad. En el ámbito científico -de la física-, la ruptura de la simetría se sitúa en la base misma del proceso de diferenciación de la realidad, de la generación de la diversidad, de la transición de lo uno a lo múltiple.

En el ámbito metacientífico, al recorrer en sentido inverso el camino del saber humano en pos de la simetría, o de la invariancia del significado, progresaríamos hacia la unidad del conocimiento; es a este nivel epistemológico alto que el principio de invariancia y el de relatividad podrían converger de un modo semejante a como sucede en el nivel propio de la ciencia física. En un orden de ideas próximo, cabe situar el significado profundo atribuido por Einstein a su *principio de relatividad*. Merlau-Ponty (1993), reputado estudioso de la obra del genial físico-filósofo alemán, destaca a este respecto lo siguiente:

...para Einstein, al final de su carrera, el principio de relatividad guardaba aún un significado filosófico mas esencial que el de una condición formal de objetividad en la expresión de las leyes físicas; significaba que los elementos constitutivos de la realidad física, aún imperfectamente determinados por la ciencia, no podían, en cualquier caso, ser concebidos mas que en su interdependencia, no teniendo ninguno de ellos una existencia autónoma. Métrica y materia, materia y energía, campos y partículas no debían comprenderse mas que en su interdependencia, y la expresión fisico-matemática de las leyes del Universo no debía dejar escapar nada a esta interdependencia (p.245).

La conexión, ya en el nivel metacientífico, entre invariancia semántica, unidad del conocimiento y transdisciplinaridad -que constituye, de hecho, el telón de fondo del presente ensayo- se manifestaría en esa conservación del significado que se postula bajo transposiciones de corte epistemológico.

De otro lado, la *simplicidad*, como atributo requerido de los principios fundamentales de las teorías físicas -noción con un contenido antes que matemático esencialmente conceptual (Paty,1993)- se ve refejada en el ya referido principio de invariancia semántica que se sitúa, de este modo, en la cúspide de todo el esquema metacientífico que se defiende y que resulta indisociable del principio de unidad del conocimiento del que viene a ser una formulación más operacional. Parece, pues, como si el presente enfoque resistiera, además, una transposición de carácter estructural desde el ámbito científico al propiamente metacientífico.

Aceptando la validez de ese principio epistemológico de rango superior, tiene sentido explorar ahora en el seno de la física enunciados susceptibles de un tratamiento similar. Eso es lo que ensaya-

remos a lo largo del presente capítulo en el que se pretende abordar el análisis de algunos ejemplos sin ninguna pretensión de exhaustividad; se trata, en definitiva, de situar explícitamente unos cuantos principios de la física contemporánea dentro de esa perspectiva metateórica avanzada en las páginas anteriores .

EL PRINCIPIO DE COMPLEMENTARIDAD

Sus orígenes

"La presidencia del Congreso ha tenido la amabilidad de invitarme a dar una conferencia sobre el estado actual de la teoría cuántica con el objeto de que sirva de introducción general sobre este tema, tan central hoy en la física, y debo confesar que sólo tras ciertas dudas he aceptado la invitación. Pues no es ya que esté con nosotros el célebre creador de la teoría, sino que entre la audiencia hay algunos físicos que por su misma participación en el notable progreso que ha tenido lugar estos últimos años, estarán con toda certeza más familiarizados que yo con los detalles del complejo formalismo matemático que se utiliza. A pesar de ello, trataré, apoyándome en consideraciones muy simples y sin entrar en los detalles técnicos de carácter matemático, de describir para ustedes una forma común de enfocar la cuestión que juzgo adecuada para dar una impresión de la tendencia general del desarrollo de la teoría desde sus mismos comienzos y que confío será de ayuda a la hora de armonizar las concepciones aparentemente conflictivas que defienden distintos científicos" (Bohr, 1927 p. 97).

Con estas palabras, y ante físicos tan destacados como W. Heisenberg, W. Pauli, L. de Broglie, M. Born y A. Sommerfeld, entre otros, Niels Bohr iniciaba la conferencia inaugural del congreso conmemorativo del centenario de la muerte de Volta en donde introdujo, por primera vez, el *principio de la complementaridad* en el panorama científico y epistemológico de la física fundamental. El hecho de que ante un público tan entendido Bohr optara por un análisis esencialmente cualitativo no puede interpretarse como algo fortuito, si se toma en consideración el elevado *estatus* que atribuiría al referido principio hasta el final de sus días. La renuncia de

Bohr, en esta ocasión, al lenguaje de las matemáticas hay que verla más bien como una apuesta, desde sus mismos orígenes, por una validez más amplia para el principio de complementariedad que aquella que concierne exclusivamente al marco conceptual de la mecánica cuántica.

Incluso restringiéndonos al punto de partida, la formulación inicial de la idea de complementariedad en el ámbito mecanocuántico es efectuada por Bohr en términos claramente filosóficos. Así, y después de destacar como consecuencia fundamental del postulado cuántico el carácter indivisible de fenómenos e instrumentos de observación, introduce su conocido principio en los siguientes términos:

"Es preciso, pues, considerar una modificación radical de la relación entre la descripción en el espacio y en el tiempo y el principio de causalidad, que simbolizan respectivamente las posibilidades ideales de observación y de definición y cuya unión es característica de las teorías clásicas. A partir de la esencia misma de la teoría cuántica debemos contentarnos con concebirlas como aspectos complementarios pero que se excluyen mutuamente en nuestra representación de los resultados experimentales" (p.100).

Esta primera formulación del principio de complementariedad deja a la vista una colección de conceptos tales como espacio, tiempo, causalidad, observación, definición, teorías, etc. respecto de los cuales la existencia de connotaciones tanto filosóficas como propiamente epistemológicas resulta evidente. En el contexto desarrollado posteriormente por Bohr, el lector mínimamente familiarizado con el marco conceptual de la física advierte que cuando habla de la descripción en el espacio y en el tiempo está pensando, en términos más próximos, en la descripción ondulatoria que se apoya en el concepto de función de onda, $\psi(\mathbf{r};t)$, y cuando se refiere al principio de causalidad, como el otro extremo de la relación, está pensando en las leyes de conservación que rigen el movimiento corpuscular en el marco clásico. En definitiva, es la conciliación entre la imagen o representación ondulatoria de la materia y la imagen o representación corpuscular, contrapuesta a la anterior en tanto que esquemas mutuamente excluyentes, lo que se esconde en una primera aproximación de carácter físico tras el enunciado primitivo del principio de complementariedad.

Complementaridad y representación dual

La dualidad onda-corpúsculo, que se pone de manifiesto de una forma admirable en la versión mecanocuántica del experimento de Young de las dos rendijas, constituye un claro ejemplo del significado del principio de Bohr en el marco de la física fundamental. Dicho experimento supuso, en su época, un medio empírico de evidenciar el fenómeno de interferencias luminosas. Las rendijas 1 y 2 (Fig.4.1) iluminadas por el foco F se convierten en dos fuentes luminosas coherentes F_1 y F_2 cuyas emisiones al ser recogidas en una pantalla posterior, dan lugar a una distribución de franjas claras y oscuras dispuestas alternativamente, correspondiendo el máximo de intensidad a la franja central. Razonando en términos de intensidades, la curva que describe cómo varía la intensidad I con la posición x , $I(x)$, sobre la pantalla no se corresponde con la suma de las curvas relativas a cada una de las dos rendijas independientemente consideradas, sino que adquiere una forma alternada específica; este modo particular de superposición no aditiva de los efectos luminosos, medidos por la magnitud intensidad, constituye lo esencial del fenómeno de interferencias y se identifica con un elemento crucial en el reconocimiento de la naturaleza ondulatoria de una realidad física dada, esto es, como algo característico del comportamiento ondulatorio.

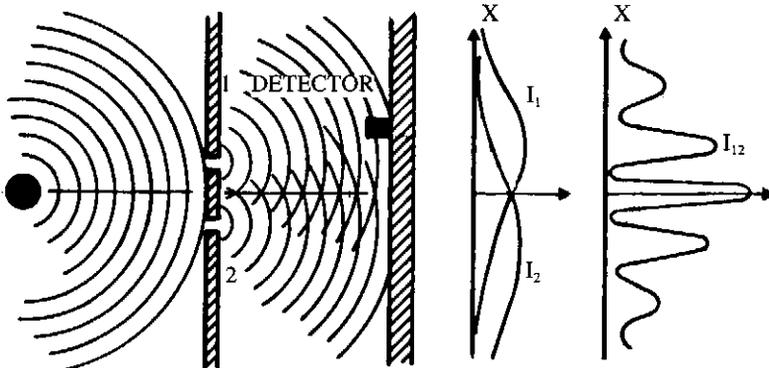


Fig. 4.1 - El experimento de Young "de las dos rendijas" es un fenómeno de interferencias típico del comportamiento ondulatorio. La superposición de las ondas procedentes de dos focos coherentes da lugar a una distribución de la intensidad resultante que no es la simple suma de las intensidades parciales (Adaptada de R. P. FEYMAN, 1971).

Si el experimento de Young se efectúa con electrones aparecen fenómenos que ponen de manifiesto el comportamiento dual, ondulatorio-corpúscular, de dicha partícula fundamental (Feynman, 1971). Así si se sitúa un detector apropiado detrás de una de las rendijas y se tapa la otra se obtendrá una curva de distribución de electrones máxima en el centro y que disminuye progresivamente hacia los extremos, análoga a la que resultaría si un experimento análogo se hubiera realizado con perdigones u otro tipo de corpúsculos materiales. Si los detectores de electrones se sitúan detrás de cada una de las dos rendijas, entonces la curva resultante es la suma de las otras dos, es decir, en nada parecida al diagrama característico del fenómeno de interferencias en el que se alternan los máximos y los mínimos de intensidad.

Al efectuar de este modo el experimento, se ha espiado al electrón, averiguando por cuál de las dos rendijas pasa; pero el seguir así el camino del electrón como partícula ha destruido la posibilidad de estudiar su comportamiento como onda. Por el contrario, cuando no se intenta determinar experimentalmente lo que le sucede al electrón al atravesar el sistema de rendijas, sus aspectos ondulatorios se hacen presentes con toda nitidez en la pantalla posterior.

Utilizando algunas cantidades numéricas como ejemplo, es posible ilustrar el fenómeno anterior de la siguiente forma. Si cada detector situado detrás de cada una de las dos rendijas registra el paso de cien electrones en cada minuto, el número total de electrones que atraviesan las dos rendijas por minuto sería de doscientos electrones. Por el contrario, si se eliminan los dos detectores de detrás de las rendijas y se coloca uno solo barriendo la pantalla, la situación cambia drásticamente, pues el detector señalará una frecuencia de electrones por minuto que variará con la posición; en el centro será de cuatrocientos electrones por minuto; caerá a cero al desplazarse hacia los lados y aumentará de nuevo y disminuirá de un modo alternativo al alejarse de la posición central o simétrica respecto de las dos rendijas.

El resultado es que cuando se observa a los electrones como partículas, su distribución tras el sistema de rendijas es diferente a la que se obtiene cuando no se observan y se les deja evolucionar libremente. El conocimiento preciso del aspecto corpúscular de los electrones destruye el conocimiento preciso del aspecto ondulatorio y viceversa. Dicho en otros términos, si deseamos averiguar por

cuál de las dos rendijas pasa un electrón dado, considerado como partícula, y montamos un experimento apropiado, obtendremos una imagen corpuscular del fenómeno para la cual son las intensidades (probabilidades) las que se suman. Por contra, si aceptamos que el electrón como onda se difunde por las dos rendijas y renunciamos a discernir entre los dos caminos alternativos, el comportamiento observable se adecúa a una imagen ondulatoria siendo, en tal caso, las funciones de onda las que resultan aditivas (ver figura 4.1).

En un sentido amplio el principio de complementaridad establece la imposibilidad de acoplar en una sola representación los resultados de observaciones relativas a fenómenos diferentes correspondientes a una misma realidad cuántica. Sin embargo, y aun cuando tales fenómenos sean incompatibles en el sentido de simultáneamente irrealizables, proporcionan, conjuntamente, una descripción completa de la objetividad cuántica; es en este sentido en el que pueden considerarse complementarios.

Complementaridad e indeterminación

La idea de complementaridad de Bohr se proyecta en el principio de indeterminación de Heisenberg para alcanzar en éste su verdadera dimensión operacional. Dicho principio traduce la imposibilidad, en el ámbito de lo microscópico, de medir simultáneamente con precisiones arbitrarias parejas de observables tales como la posición y la cantidad de movimiento, la energía y el tiempo o el momento cinético y el ángulo. En su forma más extendida, la desigualdad de Heisenberg posición-momento

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq h/2 \pi$$

indica que si se consigue medir con suficiente precisión la posición de una partícula se pierde, en igual proporción, precisión en la medida de la cantidad de movimiento, y viceversa; en cualquier caso, tal limitación está ligada a la existencia del cuanto de acción de Planck h que se hace relevante de un modo decisivo en el mundo cuántico.

La conexión con el principio de complementaridad resulta más clara recurriendo a las ideas de De Broglie sobre las ondas de materia. Si se conoce con precisión la cantidad de movimiento $p =$

mv de una partícula, su onda asociada tendrá, de acuerdo con la ecuación de De Broglie, un valor definido por $\lambda = h/p$. Se trata, por tanto, de una onda armónica de amplitud constante que se extiende de un modo uniforme a lo largo del eje X. El hecho de que su amplitud sea constante significa que la intensidad de la onda asociada -que, como es sabido, está relacionada con el cuadrado de la amplitud- se distribuye también uniformemente.

De acuerdo con la interpretación probabilística, la partícula tiene la misma probabilidad de situarse sobre cualquier punto del eje X por lo que su posición no está definida. De forma inversa, si la partícula está localizada en una pequeña región del eje X, su onda asociada será realmente un *paquete de ondas* formado por la superposición de un conjunto de ondas de frecuencias diferentes. Así, el hecho de que la posición x esté bien definida lleva consigo el que su longitud de onda λ y su cantidad de movimiento p estén mal definidas.

Volviendo a la terminología utilizada inicialmente por Bohr, lo anterior indica que la relación de indeterminación posición-momento puede ser interpretada como el exponente del carácter complementario de ambas variables y , en un sentido más amplio, de la imagen corpuscular asociada a una posición bien definida y de la imagen ondulatoria vinculada, en este caso, a una longitud de onda bien definida.

En el marco riguroso del formalismo mecanocuántico -que se establece sobre un espacio de funciones vectoriales conocido como *espacio de Hilbert*- la idea de complementaridad y su conexión con el principio de indeterminación adquiere un significado aún más preciso. Utilizando el lenguaje de *estados* de un sistema cuántico (vectores de un espacio de Hilbert) y de atributos *observables* (operadores sobre dicho espacio), una representación del sistema viene determinada por un conjunto completo de observables compatibles. En el seno del referido formalismo puede demostrarse (Messiah, 1965) que las relaciones de incertidumbre constituyen una consecuencia de las relaciones de conmutación -o, más exactamente, de no conmutación- de modo que si dos observables A y B satisfacen la relación de conmutación

$$[A,B] = A B - B A = h$$

entonces sus incertidumbres están ligadas por la relación de Heisenberg:

$$\Delta A \cdot \Delta B \geq 1/2 h$$

Pero la no conmutatividad de dos observables, o de dos conjuntos de observables internamente compatibles, equivale, de hecho, a la complementariedad de las representaciones del sistema cuántico que aquéllos suponen. Es decir, puede existir una representación determinada del sistema pero también cabe una segunda representación que lo describa correctamente y que, sin embargo, sea incompatible con respecto a la primera; a pesar de su incompatibilidad, o precisamente por ella, ambas proporcionan conjuntamente una descripción más completa del sistema cuántico en cuestión. Semejante novedad está vinculada al carácter finito del cuanto de acción de Planck y deriva de la relación de no conmutación anteriormente descrita que se convierte, así, en la expresión simbólica de la noción de complementariedad.

El principio de complementariedad como principio epistemológico

La vocación filosófica del principio de complementariedad no sólo está implícita, a través de su lenguaje conceptual y de su propio estilo, en la formulación inicial de dicho principio, sino que fue reiterada por Bohr en múltiples ocasiones a lo largo del resto de su vida. En la anteriormente referida conferencia, Bohr concluye su exposición con las siguientes palabras (Bohr, 1927):

... "Confío no obstante, que la idea de complementariedad sea susceptible de elucidar las dificultades actuales que presentan una analogía tan profunda con las dificultades de orden general en la formación de los conceptos humanos resultantes de la necesidad de establecer una distinción entre sujeto y objeto" (p.132).

Esa esperanza de Bohr de otorgar a su principio una validez más general que la estrictamente física, queda reflejada en su empeño intelectual de caminar hacia la unidad del conocimiento por la vía de la complementariedad, intención que se manifestaría a través de sus múltiples ensayos sobre el tema (Bohr, 1964, 1970).

Gerald Holton, en su ensayo sobre los orígenes de la comple-

mentaridad, resume espléndidamente tal empeño en los siguientes términos (Holton, 1981):

"... Resulta claro que, proponiendo un principio de complementaridad, Bohr procuraba, nada menos, que hacer de ello una epistemología nueva. De ahí que en una perspectiva filosófica de conjunto... encontremos situaciones que recuerdan las que conocemos en física cuántica; no es que tales situaciones nos presenten el pálido reflejo, o «vagas analogías» de un principio que no sería fundamental más que en física cuántica; antes bien, es la situación que presenta la física cuántica, que no es más que un reflejo, entre otros, de un principio omnipresente" (p.122).

Por su parte, Leon Rosenfeld, con una intención más biográfica, señala a este respecto lo siguiente: (Rosenfeld, 1968):

"A medida que su aprehensión del papel de la complementaridad en la física se hacía más profunda, al hilo de estos años creadores, estaba en mejores condiciones para dirigir su atención sobre situaciones estudiadas en psicología o en biología que presentaban también aspectos complementarios; y el examen de tales analogías, desde una perspectiva epistemológica, debería a su vez algún día iluminar los problemas mal conocidos con los que se enfrentaba la física. Bohr consacró esfuerzos considerables a la investigación de las posibilidades de aplicación de la complementaridad a otros dominios del conocimiento; prestaba tanta importancia a este trabajo como a sus investigaciones estrictamente físicas y encontraba igual gratificación en su realización"

A la luz del análisis del pensamiento de Bohr, el principio de complementaridad se aproxima francamente a lo que hemos caracterizado en las páginas anteriores bajo el término de *principios epistemológicos*. En efecto, se trata de un principio de carácter cualitativo; así fue enunciado en sus orígenes. Constituye un enunciado más general que las leyes fundamentales, como lo muestra, por ejemplo, su relación de prioridad lógica y semántica con respecto al principio de indeterminación de Heisenberg cuya posición central en el edificio teórico de la mecánica cuántica resulta indiscutible. Finalmente, su elevada posición, en el plano epistemológico, hace posible que su significado profundo sea potencialmente transferible a otros dominios de conocimiento. *"La enseñanza epistemológica que debemos al progreso de la física atómica -afirmaba Bohr- nos recuerda situaciones análogas a la que se presenta fuera*

por completo de las fronteras de la física en la descripción y ordenación de la experiencia. Ella nos va a permitir también encontrar rasgos comunes que nos ayudarán en la búsqueda de la unidad del conocimiento" (Bohr, 1964, p.92)

La referencia a un principio de invariancia que asegure la validez transversal de la noción de complementariedad está implícitamente presente en el pensamiento de Bohr, y su referencia al aprendizaje científico se hace casi explícita cuando alude a *"las dificultades en la formación de los conceptos humanos"* como ámbito plausible para explorar sobre él la aplicación de la idea de complementariedad. Por derecho propio el principio de la complementariedad tiene cabida, entonces, en nuestro programa de identificación de principios de la física fundamental susceptibles de ser elevados a la categoría de principios epistemológicos. Su explotación, en orden a guiar la investigación sobre el aprendizaje de la física, constituye una iniciativa tan sugerente como inexplorada. Con su apuesta decidida por la unidad del conocimiento es como si el propio Bohr nos invitara personalmente a ello.

Con un lenguaje *cuasi* poético Robert Oppenheimer situó perfectamente en un marco humano esa ambiciosa empresa intelectual del físico danés con unas palabras que por su fuerza y su belleza merecen ser traídas a colación (Oppenheimer, 1953):

"La fecundidad y la diversidad de la física, las más notables del conjunto de las ciencias de la naturaleza, la riqueza más familiar pero incluso extraña e infinitamente más grande de la vida del espíritu humano, acrecentada por medios complementarios, no inmediatamente compatibles, e irreductibles el uno respecto del otro, resultan más armoniosos. Son los elementos de la pena del hombre y de su esplendor, de su debilidad y de su potencia, de su muerte, de su existencia efímera y de sus logros inmortales"

EL PRINCIPIO DE EXCLUSION

El estudio del efecto Zeeman anómalo llevó al físico austríaco Wolfgang Pauli en enero de 1925 a la formulación del principio que lleva su nombre. Reconociendo que la energía y el momento angular orbital no son suficientes para caracterizar el estado del electrón en un átomo, Pauli destaca que el electrón presenta *"una ambivalencia no explicable en términos clásicos"*. Esa ambivalen-

cia no era otra cosa que el *spin*, atributo cuántico fundamental a la hora de explicar la forma en la que la realidad física se nos presenta.

En su versión restringida, el *principio de exclusión* de Pauli establece la imposibilidad para dos electrones en el interior de un átomo de ocupar estados idénticos, esto es, caracterizados por una misma colección de números cuánticos. Por tanto, si dos electrones poseen iguales los tres primeros números cuánticos n , l , m_l habrán de diferir en el cuarto, es decir, en el número cuántico de spin $m_s = \pm 1/2$. Usado en forma de regla, el principio de exclusión permitió explicar la estructura misma de la ordenación periódica de los elementos químicos y esa serie de cifras 2, 8, 18, 32, que definen las longitudes de los diferentes períodos y que para Sommerfeld, maestro de Pauli, venían a ser una nueva manifestación de las armonías pitagóricas en la historia de la ciencia.

Simetría y exclusión

Un enunciado más general del principio de exclusión concierne a propiedades de simetría de la función de onda de un sistema de electrones y establece que la función de onda total, producto de las funciones de onda orbital y de spin, debe ser antisimétrica con respecto a la permutación de electrones. Razonando sobre los llamados *determinantes de Slater*, puede demostrarse de forma sencilla que cuando se acepta la aproximación consistente en despreciar la interacción electrón-electrón (modelo de partículas independientes) el carácter antisimétrico de la función de ondas total implica la imposibilidad para dos electrones dados de poseer todos sus números cuánticos idénticos.

Cuando se progresa en un orden de generalidad creciente, se pueden relacionar las anteriores propiedades de simetría de las funciones de onda con un atributo aún más fundamental de los objetos cuánticos idénticos, a saber, su carácter indiscernible. A diferencia de lo que sucede en el marco clásico, en donde dos partículas idénticas "etiquetadas" antes de una colisión conservan el carácter distinguible después de ella, en el ámbito de lo cuántico es imposible establecer una correspondencia para cada una de las partículas idénticas del par considerado entre el antes y el después de la interacción (Fig.4.2) Poder hacerlo equivaldría, pura y simplemente, a ser capaces de seguir la trayectoria de cada una de ellas a

lo largo del proceso lo cual, como es sabido, carece de sentido en el marco de la mecánica cuántica. *"La indiscernibilidad en un fenómeno no puede ser salvada más que al precio de una perturbación que destruye el fenómeno"* (Cohen-Tannondji et al, 1990).

En términos matemáticos, esta característica fundamental de las partículas idénticas se traduce en una propiedad de simetría de las funciones de onda de los sistemas de varias partículas que asegura su invariancia, salvo el signo, bajo permutaciones de partículas idénticas. O en otros términos, las funciones de onda correspondientes a un sistema de varias partículas serán bien simétricas (signo +), bien antisimétricas (signo -) por permutación de las partículas del sistema.

Spin y realidad material

Una tal ambivalencia en las propiedades de simetría de las funciones de onda es el reflejo de esa otra ambivalencia asociada al spin. Efectivamente, el carácter simétrico o antisimétrico de la función de onda de un sistema de partículas idénticas depende del valor de su spin. Sistemas de partículas de spin semientero, como los electrones, se corresponden con funciones de onda antisimétricas bajo permutaciones entre pares de partículas idénticas, en tanto que sistemas de partículas de spin entero, como los fotones, se corresponden con funciones de onda simétricas. Los sistemas de partículas del primer tipo, denominadas genéricamente *fermiones*, obedecen a la llamada *estadística de Fermi-Dirac*; en tanto que los sistemas de partículas del segundo tipo, conocidas también como *bosones*, se rigen por la *estadística de Bose-Einstein*.

El carácter indiscernible de las partículas cuánticas idénticas junto con las propiedades de su spin explican la realidad física, en términos de materia y de interacción, tal y como la percibimos. Así, los fermiones, al estar sujetos al principio de exclusión de Pauli, no pueden coexistir en un mismo lugar y en un mismo instante; no pueden acumularse en un mismo estado cuántico. Por contra, los bosones no están limitados por restricción alguna en cuanto a una posible ocupación múltiple de estados idénticos; son superponibles, de modo que cuanto mayor es el número de bosones que ocupan un estado determinado mayor es la probabilidad, o el peso estadístico, de dicho estado. Habida cuenta de que son precisamente los boso-

nes las partículas que hacen de vehículo de las diferentes interacciones, este peculiar comportamiento explica el carácter también aditivo de las fuerzas fundamentales correspondientes.

Tales circunstancias se traducen, ya en el ámbito macroscópico, en la impenetrabilidad de la materia, en su consistencia y en su carácter estable. Así, el carácter no superponible de las diferentes partículas -protones, neutrones y electrones, todos ellos fermiones - que constituyen el átomo explica la *impenetrabilidad*: dos cuerpos no pueden ocupar, a la vez, el mismo lugar en el espacio. La *consistencia* es una consecuencia del carácter aditivo de los bosones y de su papel en la sustanciación de las fuerzas fundamentales; es la "mesa del científico" de Eddington como explicación a la mesa del hombre de la calle. Por otra parte, la suspensión transitoria del principio de exclusión llevaría aparejada una reducción drástica en el tamaño de los átomos, que provocaría una implosión de la materia de origen gravitatorio. La *estabilidad* de la materia es por tanto, y en cierta manera, una consecuencia del spin y de los comportamientos a él asociados.

Junto con las tres propiedades de la materia anteriormente descritas una cuarta, a saber, *su carácter no destructible*, está asimis-

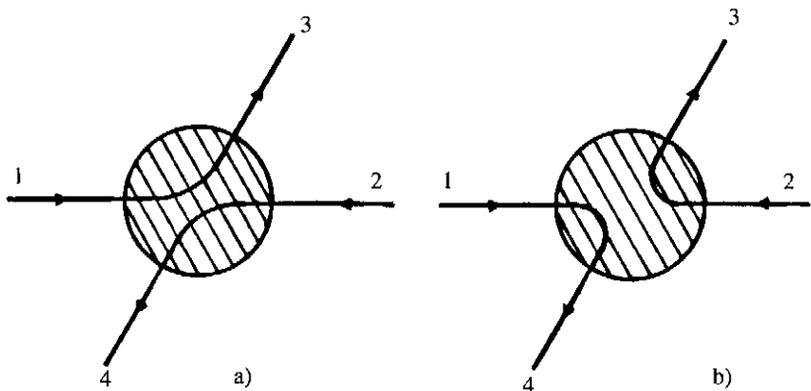


Fig. 4.2 - Si con las cifras 1, 2, 3 y 4 se quieren representar partículas idénticas, las vías de transición que se muestran en las figuras a) y b) resultan en el marco cuántico indiscernibles.

mo ligada al spin como atributo cuántico. Mientras que los bosones pueden ser creados o aniquilados en un número arbitrario, los fermiones sólo pueden serlo por parejas fermión-antifermión. Ello es debido a que en los procesos de creación o de aniquilación de partículas opera un principio de conservación de la paridad del número de espines semienteros que es una consecuencia directa de la conservación del momento angular total (suma del momento orbital y de spin). Así, si el número de partículas de spin semientero es par en el estado inicial deberá seguir siendo par en el estado final. Los pares fermión-antifermión poseen idéntico spin de modo que únicamente su creación o aniquilación, como tales pares, no supondrá la violación del referido principio.

En resumen la materia tal y como se nos presenta constituye, en una primera aproximación, un agregado estable de partículas ligadas entre sí por fuerzas de interacción de naturaleza diversa y son precisamente las propiedades asociadas al spin de los fermiones, o partículas de materia, y de los bosones, o partículas de interacción, las que dan cuenta, en términos muy generales, de esa realidad material.

Spin y complementaridad

La conexión entre el principio de exclusión y el principio de complementaridad es, antes que nada, una relación de tipo lógico, en la medida que el principio de Bohr constituye una de las premisas remotas del principio de Pauli. El carácter indiscernible de las partículas cuánticas idénticas viene a ser, como se ha dicho antes, una consecuencia de ese modo de comportamiento cuántico que lleva consigo la desaparición de la noción de trayectoria. Pero tal comportamiento se deriva, desde un punto de vista lógico, del principio de indeterminación de Heisenberg que hace de la cantidad de movimiento y de la posición de una partícula observables incompatibles, imposible de ser medidos con precisiones arbitrarias. Pero, a su vez, el principio de Heisenberg puede ser considerado como una espléndida formulación operacional del principio de Bohr.

Llegados a este punto cabe invertir el camino para destacar que el principio de complementaridad se expresa en términos cuantitativos en el de indeterminación, el cual explica el carácter indiscernible de las partículas cuánticas idénticas; propiedad que se traduce

en dos comportamientos contrapuestos, en términos de simetría de la función de onda, uno de los cuales constituye la formulación más general del principio de exclusión.

No obstante lo anterior, o precisamente por ello, cabe abordar las relaciones entre spin y complementariedad en un plano epistemológico. Esa "*ambivalencia no explicable en términos clásicos*" a la que se refería Pauli para describir el spin nos acerca, asimismo, a la idea de dualidad antagónica, y a la vez funcional, que subyace en la noción cuántica de complementariedad en tanto que elemento conceptual fundamental. De modo que no es de extrañar que vinculadas al spin surjan pares de realidades o, si se quiere, de comportamientos antitéticos pero a la vez complementarios. Asociado al spin la función de onda total de un sistema de partículas será o simétrica o antisimétrica; asociado al spin el principio de exclusión de Pauli enfrentará la identidad de los electrones con la diversidad de los estados; asociado al spin el comportamiento de los fermiones aparecerá como complementario con respecto al de los bosones y el de la materia con respecto al de la interacción resolviéndose, no obstante, en un marco superior omnicompreensivo.

Después de todo, y en ese plano menos formal que el estrictamente físico que caracteriza los análisis de corte filosófico, el spin y sus propiedades podrían constituir manifestaciones de un principio epistemológico más fundamental, el principio de la complementariedad (Fig.4.3).

El principio de exclusión como principio epistemológico

El principio de exclusión aparece, por tanto, claramente vinculado con otros principios epistemológicos considerados con anterioridad. Su conexión con el principio de simetría, a ese nivel cualitativo característico del enfoque epistemológico, se derivaría, pura y simplemente, de la vinculación formal existente entre ambos principios anteriormente esbozada. Su relación con el principio de complementariedad se beneficiaría tanto de aspectos estrictamente lógicos, a través de la indiscernibilidad, como de aspectos puramente epistemológicos, mediante el spin considerado como una manifestación de ese otro principio más general.

A la vista de lo anterior parece entonces razonable ensayar,

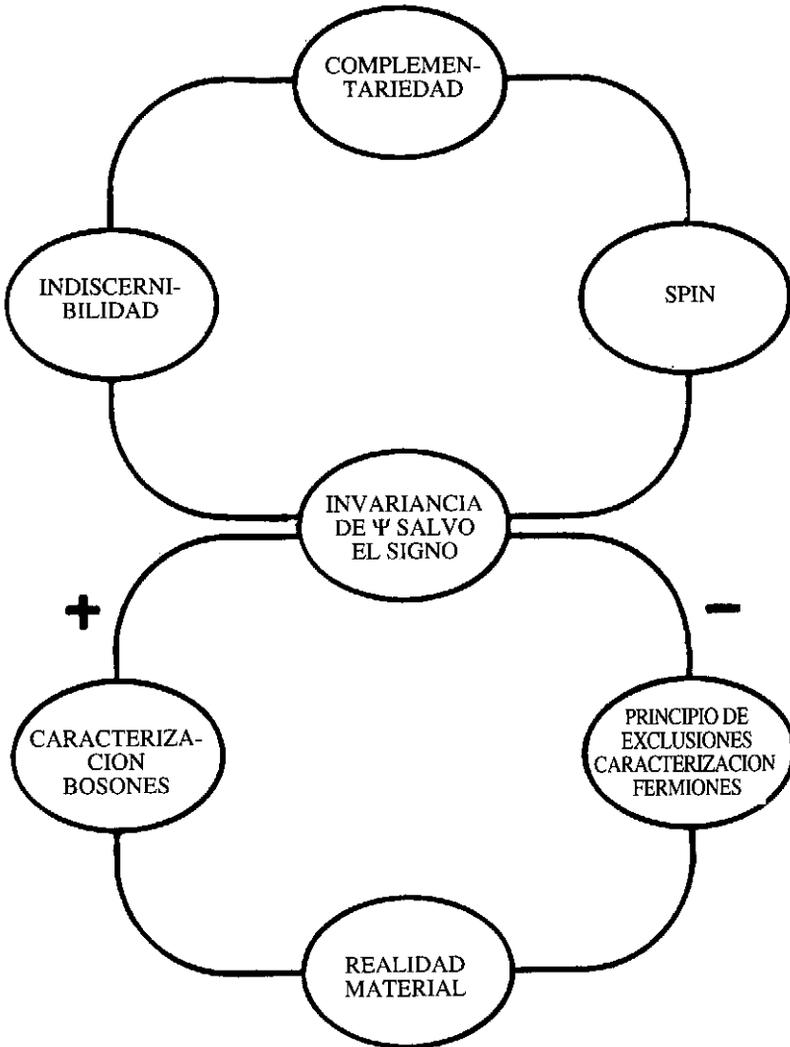


Fig. 4.3 - Esquema de relaciones entre principio de complementariedad, principio de exclusión y realidad material. Nótese como la idea de invariancia desempeña, a modo de nexo, un papel fundamental.

quiera sea brevemente, la elevación del principio de exclusión a la categoría de principio epistemológico. Para ello, nos dejaremos guiar, en lo esencial, por las ideas al respecto de Stéphane Lupasco (Lupasco, 1982, 1989), un filósofo de la ciencia de la primera mitad del siglo veinte cuyo pensamiento está siendo redescubierto por los físicos de hoy (Nicolescu, 1985, 1989).

En el contexto conceptual característico del principio de exclusión llama la atención, en una primera aproximación y por su aparente naturaleza antitética, el carácter indiscernible de las partículas idénticas, del que se deriva el referido principio, y la idea de diversificación, de apuesta por la individuación que dicho principio lleva consigo. Como si de un mago se tratara, Wolfgang Pauli, admirador impenitente del universo fascinante de la alquimia, nos recoge en el mundo de lo homogéneo para depositarnos, finalmente, en el mundo de lo heterogéneo. De lo indiscernible pasamos a lo diversificable a través de ese "artificio" que constituye el principio de exclusión. Lupasco aclara la naturaleza de semejante tránsito al destacar que el mundo de partida es el mundo de las partículas cuánticas en el cual un corpúsculo en movimiento no puede ser localizado de una forma precisa y, consiguientemente, distinguido con relación a sus compañeros; en tanto que el mundo de llegada es el mundo de los estados cuánticos que dichos corpúsculos pueden ocupar, en el cual las nociones de individualidad y diversidad cobran un significado preciso.

Este elemento de dualismo fundamental subyacente al principio de exclusión, que lo conecta con el principio de complementaridad, es acentuado y a la vez precisado por Lupasco en términos de homogenización-heterogenización. Como señala el propio Nicolescu en el prefacio de *"L'expérience microphysique et la pensée humaine"*, (Lupasco, 1989) según Lupasco *"el principio de Pauli introduce una diferencia en la supuesta identidad de las partículas, una tendencia hacia la heterogenización en un mundo que parece superficialmente abocado a la homogenización... Según la lógica de Lupasco, homogenización y heterogenización se encuentran en una relación de antagonismo energético. La heterogenización es el proceso dirigido hacia lo diferente. Surge, en tanto que concepto, del principio de exclusión de Pauli que actúa como dinamismo de individuación... Para que el movimiento sea posible es necesario que lo homogéneo y lo heterogéneo coexistan. El antagonismo*

homogenización-heterogenización es, así, un dinamismo organizador y estructurante".

El principio de Pauli se revela, a fin de cuentas, como un principio de diversidad que asegura la identidad de las entidades individuales y evita su disolución en el "*alma del grupo*" en el "*ser colectivo del sistema*". Su importante papel en el ámbito restringido de la física, en tanto que elemento organizador de la realidad material, o de nuestro conocimiento sobre ella, constituye una fuente de inspiración potencialmente transponible a otros contextos disciplinares; todo lo cual consolida su innegable vocación de principio epistemológico.

EL PRINCIPIO DE COMPLEJIDAD DE LO ELEMENTAL

La intuición atomista -consistente, esencialmente y en palabras de Jean Perrin, en "*explicar lo visible complejo por lo invisible simple*" (Perrin, 1970)- ha recorrido la historia y la prehistoria de la física desde Demócrito hasta nuestros días pasando por Newton. La búsqueda de los constituyentes últimos, de los ladrillos fundamentales de la materia ha constituido un dilatado programa de investigación al servicio permanente de dicha intuición. Caminando en ese sentido, el progreso a lo largo de la dimensión de profundidad ha aportado explicaciones cada vez más precisas sobre el comportamiento de los sistemas materiales y ha hecho el mundo más inteligible. Pero cabe interrogarse sobre esta forma de identificación tácita entre el polo de profundidad de las teorías y el de simplicidad o elementalidad de los objetos a los que aquellas hacen referencia; identificación anidada en el pensamiento científico clásico y que, por la fuerza de palabras con un significado consagrado por el uso, por la economía intelectual que las imágenes y las metáforas conllevan y, probablemente, por algún elemento más profundo de nuestro propio conocimiento, constituyen una amenaza permanente para el tránsito hacia el pensamiento cuántico o hacia el "pensamiento complejo", una amenaza para la superación de una epistemología cartesiana, para el acceso a una forma de conocimiento más flexible, más general y más generalizable.

Del atomismo científico a la crisis del concepto de partícula elemental

La idea de átomo, entendida como una imagen o como una representación intuitiva de esos componentes últimos de la materia postulados por algunos de los filósofos griegos, prendió en científicos tales como Gassendi, Boyle, o Newton. Parece ser que la convicción atomista del segundo influyó notablemente en el tercero. Así, con Boyle el átomo abandona su condición de una intuición, fundada tan sólo metafísicamente, para iniciar un proceso de consolidación en tanto que concepto científico, esto es, como noción inserta en una teoría más o menos evolucionada pero sujeta, en cualquier caso, a las exigencias derivadas de la observación y la experimentación científicas. En 1660 Boyle recurrirá a la concepción atomista de la materia para dar sendas explicaciones alternativas, una estática y otra cinética, a su famosa ley de los gases (Holton, 1976). Newton, a su vez, fue influenciado por las explicaciones de Boyle y consagró esa imagen de los átomos como pequeñas "bolas de billar"; imagen que, explícita o implícitamente, ha pervivido en las visiones mecanicistas del mundo físico. En su *Optica* (Newton, 1730), y a través de un texto con resonancias teológicas, el físico inglés nos transmite su concepción de los átomos en los siguientes términos: "...Dios al principio formó la materia con partículas sólidas, masivas, duras, impenetrables, móviles. Estas partículas primitivas siendo sólidas son incomparablemente más duras que cualquier cuerpo sólido compuesto de ellas. Y tan sumamente duras que no pueden desgastarse ni romperse en trozos..." (p.375).

A partir de Newton la hipótesis atómica se va consolidando progresivamente permitiendo explicar de un modo científico "lo visible complicado mediante lo invisible simple". Así, en 1738 Daniel Bernouilli publica, en su *Hidrodinámica*, un modelo cinético de los gases que explica la ley de Boyle en términos de movimiento interno de sus partículas constitutivas y otorga un significado de orden microscópico a los conceptos de temperatura y de presión.

Estos primeros éxitos del atomismo moderno alcanzan los dominios de la química de la mano de John Dalton para encontrar en ellos la consolidación de la hipótesis atómica que se convierte, así, en una herramienta de explicación científica verdaderamente efi-

caz. Las llamadas "leyes ponderales", como la *ley de Lavoisier* de conservación de la masa, la *ley de Proust* de las proporciones definidas o la *ley del propio Dalton* de las proporciones múltiples, son explicadas desde la noción de *átomo*. Traspasada ya la frontera del siglo XIX, Avogrado aporta nuevas bases empíricas para un atomismo renovado que abandona los viejos esquemas estáticos, presentes en el modelo de Dalton, en favor de un modelo cinético para la materia. Cannizzaro en el campo de la química y Clausius, Boltzman, Gibbs y Maxwell, entre otros, en el de la física, terminarán por convertir la hipótesis atómica en la principal clave interpretativa de las modernas ciencias de la materia.

La idea que subyace tanto en el atomismo greco-latino como en el moderno es la noción de *elementaridad*, esto es, la idea de la existencia de objetos simples que constituyen los componentes últimos de la realidad material. Por tal motivo, la contradicción existente entre el significado etimológico y el significado empírico del término átomo no afectó considerablemente a la pervivencia de la filosofía atomista más allá del atomismo científico entendido en sentido estricto. Así, por ejemplo, los experimentos sobre rayos catódicos llevaron a J.J. Thomson (1856-1940) al descubrimiento del electrón, cuya masa resultó ser una pequeña fracción de la masa del átomo más ligero, y cuya carga eléctrica, medida por Millikan (1858-1953) resultó ser la carga más pequeña observada en los iones. El electrón, en tanto que carga elemental, se convirtió en el "átomo de electricidad". Una trasposición semejante de significado se produjo a propósito de la radiación. Así, la teoría de Einstein sobre el efecto fotoeléctrico y su defensa del comportamiento corpuscular de la luz, mediante la introducción del fotón como cuanto elemental de energía electromagnética, no deja de ser una forma de atomismo, en este caso, de "atomismo de la radiación" (Paty 1988).

Lo mismo podría decirse del descubrimiento del protón efectuado por Rutherford (1871-1937) a partir de las experiencias de J.J. Thomson con los rayos canales, o de la aparición del neutrón de la mano de Chadwick en el panorama de las partículas constitutivas del núcleo atómico. La propia denominación de partícula elemental, atribuida en primer término a los corpúsculos subatómicos, nos lleva de nuevo a la evidencia, en el ámbito de la física fundamental, de un atomismo más allá de los átomos; se trataría más bien de un *elementarismo* en el cual, la noción presente en la intui-

ción atomística de los filósofos griegos deja de proporcionar el soporte etimológico al concepto científico de átomo para identificarse con la idea de componente último o de "ladrillo fundamental" según una imagen al uso. Yendo un poco más lejos en esta breve pauta de carácter histórico interesa destacar el hecho de que el desarrollo de la mecánica cuántica haya introducido al propio concepto de partícula elemental -y, por extensión, al "elementarismo" en tanto que atomismo renovado- en una crisis profunda de la que difícilmente podrá recuperarse.

En primer lugar la propia noción de partícula cuántica constituye una realidad nueva que puede acoplarse a una imagen típicamente corpuscular o a una imagen típicamente ondulatoria en función del dispositivo de observación que se emplee y del marco conceptual que lo soporte. Esta naturaleza dual de la noción de partícula cuántica - consagrada por el principio de complementariedad- justifica el que, para designarla, aparezcan en la literatura científica términos nuevos tales como "ondícula" o "cuantón", por ejemplo, con los cuales se pretende destacar la ruptura fundamental entre el concepto clásico de partícula y su correspondiente cuántico.

En segundo lugar, el descubrimiento del positrón, efectuado por Dirac en 1928, abrió las puertas al mundo de las antipartículas y, junto con él, al concepto de complejidad de lo elemental. La creación de antimateria se ha convertido en una operación habitual en los grandes aceleradores de partículas. Los electrones pueden ser creados y aniquilados de modo que su número deja de conservarse. Un átomo de hidrógeno deja de estar formado, necesariamente, por un protón y un electrón, sino que temporalmente puede estar constituido por un protón, dos electrones y un positrón, por ejemplo. Cualquier partícula puede estar constituida durante un cierto tiempo por toda una colección de partículas virtuales. Estas dificultades conceptuales sobrevenidas a la noción científica de partícula elemental fueron señaladas por el propio Dirac en los siguientes términos: *"Con el desarrollo de la idea de antimateria la noción de partícula elemental se ha hecho más vaga.... Se puede crear una partícula y una antipartícula utilizando otra forma de energía, y por tanto no se puede ya afirmar que estaban presentes en la materia inicial. No se puede ya describir de una manera simple lo que son los constituyentes últimos de la materia. Los físicos de hoy se enfrentan a una situación más complicada en la que muchas partí-*

culas aparecen como siendo tan fundamentales las unas como las otras" (Nicolescu, 1985 p.213)

En este mismo orden de ideas señalaba Heisenberg (1976) *"un protón podría obtenerse a partir de un neutrón y un pión, o a partir de un hiperón y un kaón Λ , o a partir de dos nucleones y un antinucleón y así sucesivamente. ¿Podríamos entonces decir que un protón constituye, simplemente, un continuo de materia?. Tal enunciado podría ser ni correcto ni erróneo: no existe diferencia, en principio, entre partículas elementales y sistemas compuestos. Este es, probablemente el más importante resultado experimental de los últimos cincuenta años"* (p.33).

La identificación efectuada por algunos autores del electrón como un fractal (Cohen-Tannoudji et al 1990; Baton et al, 1989) constituye un ejemplo excelente de la dimensión de complejidad oculta en lo elemental. Así, a un cierto nivel de resolución el electrón aparece como una entidad elemental; si se aumenta dicho nivel de resolución, el electrón puede emitir un fotón virtual que es finalmente reabsorbido. Pero a un nivel de resolución todavía mayor dicho fotón virtual podría materializarse en una pareja, también virtual, electrón-positrón, de vida efímera que terminaría recombinándose para generar de nuevo el fotón virtual inicial (Fig. 4.4). Como es sabido, estos procesos virtuales tienen una duración Δt permitida por la relación de incertidumbre de Heisenberg $\Delta t \cdot \Delta E \geq h$ y compatible con el principio de conservación de la energía. Al igual que sucede con la forma de los objetos fractales, la elementalidad o la complejidad no pueden ser definidas de forma absoluta sino que dependen de la escala de observación. En este mismo orden de ideas Cohen-Tannoudji et al. (1990) señalan: *"La teoría cuántica relativista de los campos constituye una ruptura profunda en nuestra relación con la elementalidad. Toda partícula observada al microscopio de los aceleradores cada vez más potentes se convierte necesariamente cada vez en más compleja (cada vez un mayor número de diagramas de Feynman intervienen). En este sentido, lo infinitamente complejo surge en el corazón de lo infinitamente pequeño. Se comprende así que incluso si, en principio, todo objeto físico es descrito por los encajes de estructuras que lo constituyen este modo de comprensión es un poco ilusorio. Esta aparición de lo complejo en la elementalidad hace, sin duda, variar la perspectiva de reducir un día toda la física a la física de partículas elementales"*.

En tercer y último lugar el descubrimiento de los *quarks* no ha hecho más que restar argumentos a los eventuales defensores de ese atomismo renovado. En primer término porque al sobrepasar, desplazándonos hacia lo muy pequeño, el límite de los hadrones - partículas subatómicas sometidas a la interacción nuclear o fuerte, tales como protones, neutrones, etc. y considerados antes del 70 como partículas elementales- la complejidad reaparece súbitamente. Así, por ejemplo, el protón resulta ser una combinación de tres quarks en la forma *uud* unidos entre sí por gluones que juegan respecto de la interacción nuclear fuerte el mismo papel que los fotones en la interacción electromagnética. Cada quark posee una amplia colección de atributos cuánticos tales como "color", "sabor", "carga eléctrica", masa o spin. Los gluones, en número de ocho, con spin 1 y masa 0, están en continuo intercambio entre los quarks, desempeñando todos ellos prácticamente la misma función: la de servir de vehículo a la interacción fuerte.

No obstante lo anterior, podría pensarse que tras esta nueva complejidad se esconde, finalmente, la elementalidad y que los quarks constituyen, precisamente, su encarnación, los últimos componentes de la materia, los ladrillos fundamentales del edificio de lo real. Sin embargo, un fenómeno singular en el mundo de las

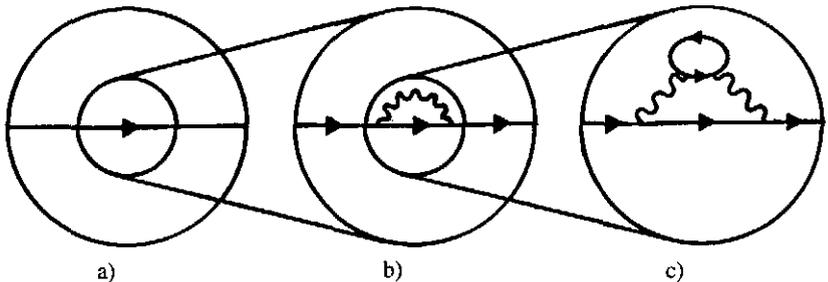


Fig. 4.4 - A un cierto nivel de resolución un electrón puede aparecer como una entidad elemental (a). Si se aumenta el nivel de resolución, el electrón podrá emitir un fotón virtual que será finalmente reabsorbido (b). Pero a un nivel todavía mayor de resolución dicho fotón podrá, a su vez, materializarse en una pareja también virtual electrón-positrón de vida efímera que terminará recombinándose para generar de nuevo el fotón virtual inicial (c). (Adaptada de Cohen-Tannoudjiet al. 1990)

interacciones conocido como *confinamiento de los quarks* viene a plantear un problema de alcance que hace desvanecerse las posibles esperanzas de asir finalmente lo elemental. El fenómeno consiste en que a cortas distancias (10^{-14} - 10^{-17} m) la fuerza gluónica entre dos quarks resulta ser directamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa; por tal motivo, cuanto más se aleja un quark del otro mayor es la fuerza de atracción entre ellos, lo que hace imposible aislar un quark en estado libre toda vez que conseguirlo requeriría una energía infinita. El quark, en tanto que partícula elemental aislable, constituye, pues, una extrapolación conceptual alejada del fenómeno y carente por ello de significado físico. De otro lado, la llamada *libertad asintótica*, libertad que experimentan los quarks a muy cortas distancias, resulta así asociada de un modo sustancial a la propia complejidad.

Baton et al (1989) resumen en pocas palabras, el panorama que ofrece actualmente la física subhadronica: "*Habiendo partido de la proliferación de los hadrones, de la clasificación y de los modelos fenomenológicos, hemos llegado a una visión totalmente diferente en la cual los hadrones son estructuras de quarks-partones cuasi libres, sumergidos en un vacío cuántico poblado de gluones y de efímeros pares de quarks y de antiquarks*" (p.108)

A la luz de las consecuencias derivadas de la aparición de la mecánica cuántica y del desarrollo de la física subhadronica, el concepto de partícula elemental evidencia aún con más fuerza sus insuficiencias. La ilusión de la elementalidad se desvanece, pues, en su búsqueda, lo elemental termina por resolverse en una complejidad inesperada. Todo un universo potencial aparece contenido en el cuerpo más pequeño. A partir de ese momento de la historia de la ciencia, la partícula elemental, como ha dicho Heisenberg (1975), nunca más será elemental.

Obstáculos para una superación del atomismo

"*Cuando se investigan las condiciones psicológicas del progreso de la ciencia, se llega pronto a la convicción de que hay que plantear el problema del conocimiento científico en términos de obstáculos*". Con este párrafo Gaston Bachelard (1948) prepara la introducción de un concepto original, el de *obstáculo epistemológico*, en tanto que causas de estancamiento, de inercia, o de retroceso

del conocimiento científico por efecto de la rémora que para todo conocimiento nuevo constituye el conocimiento anterior.

Esta importante noción que, como anticipara ya el citado epistemólogo francés, puede ser estudiada tanto en el desarrollo histórico del pensamiento científico como en la práctica de la educación, constituye una referencia obligada a la hora de analizar algunas de las claves que explicarían esa obsesión por la búsqueda de lo elemental característica del pensamiento clásico.

Cabe señalar, en primer término, los obstáculos de tipo verbal que subyacen en el atomismo y que no resultan ajenos a la idea de división. El propio Heisenberg, ofrece a este respecto una ejemplificación espléndida de alguna de las modalidades de obstáculo epistemológico identificadas por Bachelard cuarenta años antes. En su análisis crítico del concepto de partícula elemental (Heisenberg, 1976) el físico alemán destaca cómo el uso del lenguaje está condicionado por la filosofía atomista tradicional. La aplicación, sea en forma afirmativa, sea en forma interrogativa, de términos tales como simple, compuesto, divisible, indivisible o entidades subatómicas, por ejemplo, supone una aceptación implícita de que tales términos tienen un significado asegurado por una extrapolación cuya validez está garantizada simplemente por su uso cotidiano.

Sin embargo, dichos términos han perdido en buena medida su validez en el contexto científico de lo infinitamente pequeño. Como señala Heisenberg *"nuestra tarea debe ser el adaptar nuestro pensamiento y nuestro lenguaje -realmente nuestra filosofía científica- a la nueva situación creada por la evidencia experimental"*. La expresión "está constituida por" no tiene un sentido claro más que si la partícula puede ser dividida en partes con la ayuda de una pequeña cantidad de energía mucho menor que la masa en reposo de la propia partícula.

Para ilustrar esta limitación de la validez empírica de los términos científicos Niels Bohr solía contar la siguiente historia: Un muchacho entra en una tienda de dulces con dos peniques en la mano y le pide al dependiente que le de dos peniques de caramelos mezclados. El dependiente toma dos caramelos, se los da al chico y añade: "mézclalos tú mismo". La idea de mezcla tiene, en el ámbito de lo macroscópico, un límite experimental y lo mismo sucede con las expresiones "dividir en" o "estar constituido por" sólo que ahora en el ámbito de lo microscópico.

Un segundo obstáculo epistemológico para la superación del atomismo se encuentra en el propio soporte metafísico en el que reposa dicha idea. Una buena base para el análisis de dicho obstáculo la constituyen las propias reflexiones de los filósofos atomistas. Lucrecio, difusor de la doctrina de Empédocles, Demócrito y Leucipo sobre la constitución de la materia, razonaba en los siguientes términos:

"..Si no se admite en la naturaleza un último límite de pequeñez, los cuerpos más pequeños estarían compuestos de una infinidad de partes, ya que cada mitad tendría siempre una mitad y así hasta el infinito. ¿Qué diferencia habría entonces entre el universo mismo y el cuerpo más pequeño?. No se podría establecer en absoluto, pues si el universo es infinitamente extenso, tal y como se supone, los cuerpos más pequeños estarían a su vez compuestos de una infinidad de partes. La recta razón se revela contra esta consecuencia y no admite que el espíritu se adhiera a ella; así, pues, es preciso confesarse vencido y reconocer que existen partículas irreductibles a toda división y que alcanzan el último grado de pequeñez y puesto que existen, debes reconocer que son sólidas y eternas" (En Leite Lopes, 1990 p.382).

En el presente texto Lucrecio parece situar el origen de esa "obsesión por lo elemental", presente en la historia de la ciencia, en un rechazo intelectual del doble infinito -el infinito visto desde lo muy grande y el infinito visto desde lo muy pequeño- la recta razón, según el filósofo latino, se revela contra ello.

Es de destacar el que la aceptación acrítica, por parte de Lucrecio, del primer infinito ("si el universo es infinitamente extenso, tal y como se supone") constituya la base para la negación rotunda del segundo. En el pensamiento atomista no hay lugar para los dos infinitos porque yace en su seno, como elemento fuerte, el postulado implícito de una estructura de relación unidimensional y abierta. En la materia esa relación de prelación, que el concepto de división entraña, se aplicaría racionalmente a un primer objeto, el universo infinito, y por sucesivas repeticiones se llegaría al "último grado de pequeñez", al átomo "sólido y eterno". La argumentación de Lucrecio nos remite, pues, a un problema de orden topológico, entendido éste en un sentido amplio, negando toda posibilidad a una estructura relacional cerrada en la cual los dos infinitos vendrían a coincidir en uno solo. "¿Qué diferencia habría entonces entre el universo

mismo y el cuerpo más pequeño?". No se podría establecer en absoluto. Y es precisamente ello lo que, según el pensamiento atomista, "repugna a la razón". La coherencia lógica en el razonamiento de los atomistas se sitúa al servicio de una postura, de una idea o conjunto de ideas subyacentes que se sustraen a toda prueba empírica y que constituyen, por tanto, un "a priori" de carácter metafísico. Sus fundamentos últimos serían la "recta razón" o, en otros términos, el sentido común, esto es, una suerte de intuición básica constituida en garante del razonamiento.

Estos dos obstáculos epistemológicos -de carácter lingüístico y metafísico respectivamente- se refuerzan mutuamente. El primero proporciona al segundo la prueba lógica que, a su vez, se hace más plausible porque es guiada por una concepción previa que la fundamenta. Con el uso de la idea de división más allá de sus límites empíricos de aplicación -más allá, por tanto, del contexto en el que dicho concepto puede tener un significado preciso- los atomistas parecen validar, desde un punto de vista estrictamente formal, aunque ilusorio en fin de cuentas, la *metafísica de la elementalidad*; su carácter de paradigma, de visión de la realidad material ha estimulado la búsqueda de los componentes fundamentales. En dicho proceso la ciencia sin duda ha avanzado en el conocimiento de la materia, pero, probablemente, haya alcanzado ya los bordes mismos del marco, los límites del paradigma, los obstáculos para un conocimiento superior. "*La obsesión por la simplicidad* -nos dirá Morin- *ha conducido la aventura científica a descubrimientos imposibles de concebir en términos de simplicidad*" (Morin, 1990).

La complejidad de lo elemental como principio epistemológico

A diferencia de los principios anteriormente considerados, que figuran formulados como tales en el repertorio característico de la física fundamental, la referencia a un principio de complejidad de lo elemental supone, por sí misma, una elevación del plano de análisis del ámbito de lo formal cuantitativo, propio de las teorías físicas, a ese otro ámbito más general, de carácter cualitativo en el que operan los denominados principios epistemológicos. Sin embargo, y como en los casos anteriores, el principio de complejidad en lo elemental reposa en los resultados de las investigaciones en física fundamental que le proporciona así elementos iniciales de validez empírica.

La epistemología cartesiana que apoyada en los cuatro preceptos del Discurso del Método "*pour bien conduire sa raison et chercher la verité dans les sciences*" (Descartes, 1637) sirvió de referencia en el desarrollo de la física clásica se revela, a la luz de las aportaciones de la física contemporánea, francamente insuficiente. En su análisis crítico de la referida epistemología Bachelard (Bachelard, 1934) resume, y a la vez conecta entre sí, los supuestos cartesianos en los siguientes términos:

"No solamente Descartes cree en la existencia de elementos absolutos en el mundo objetivo sino, más aún, piensa que tales elementos absolutos son conocidos en su totalidad y directamente. Es a su nivel que la evidencia resulta más clara. La evidencia es entonces completa precisamente porque los elementos simples son indivisibles. Se les ve completos porque se les ve separados. De igual modo que la idea clara y distinta está completamente separada de la duda, la naturaleza del objeto simple está totalmente separada de las relaciones con otros objetos" (p. 146).

Sin embargo, las aportaciones de la física contemporánea no sólo han puesto en cuestión el significado mismo de lo simple, en tanto que concepto absoluto capaz de estructurar toda la realidad material de la mano del tercer precepto del *Discurso*, sino que han supuesto además una revalorización de la idea de relación caminando, también por ello, en un sentido opuesto al del ideal cartesiano el cual otorga un estatuto privilegiado a los objetos a expensas de conceder una menor importancia a las relaciones.

En el marco de la física clásica las partículas asumían el papel de los objetos elementales y los campos el de las relaciones entre ellas. En la física cuántica el concepto de campo y el de partícula se entremezclan y la identidad de una partícula resulta inherente a la forma en la que ella interacciona (Cohen et al, 1990 p. 298). El objeto elemental pierde su carácter de entidad independiente o separable para convertirse en una realidad que emerge de un conjunto complejo de relaciones recíprocas, de modo que, como señalara con un excepcional sentido de la anticipación Bachelard, "*Lejos de que sea el ser quien ilustre la relación, es la relación quien ilumina el ser*" (Bachelard, 1934 p.148).

El principio de complejidad de lo elemental en tanto que principio epistemológico se revela, pues, como un elemento de ruptura abierta con toda una forma de pensar científicamente, heredera

incuestionable del racionalismo cartesiano. Un nuevo paradigma parece emerger de su seno potencialmente trasponible a otros dominios del conocimiento.

EL PRINCIPIO DE AUTOCONSISTENCIA

El principio de autoconsistencia constituye un ejemplo de como una idea de carácter esencialmente cualitativo y notablemente general en sus orígenes -situada por tanto en un nivel epistemológico alto e inespecífico- puede ser convenientemente concretada y desarrollada hasta el punto de servir de base, en el ámbito de la física fundamental, a una teoría cuantitativa, dotada de una detallada formulación matemática y con una capacidad de explicación y de predicción científicas verdaderamente destacables. Su incorporación a la selección de *principios epistemológicos* recogida en el presente capítulo está justificada por la propia naturaleza inicial del principio, por su potencial de transferencia transdisciplinar. Pero, además, la idea de autoconsistencia abre un camino que permite ganar comprensión para esa noción de *complejidad de lo elemental*, recogida en el principio anterior, que queda vinculado así con el presente de un modo sustancial.

"Bootstrap" o autoconsistencia

El principio del "bootstrap" fue introducido en la física de partículas en 1959 de la mano de Geoffreu Chew profesor de la Universidad de Berkeley. El mensaje considerablemente pictórico, contenido en dicho término hace referencia a la situación de un individuo que intentase mantenerse en el aire tirando de los cordones de sus propias botas. El carácter pintoresco de esta idea anticipa una posición situada, al menos en una primera instancia, fuera de la ortodoxia científica. La filosofía del *bootstrap* o de la autoconsistencia, entendida en un sentido amplio, establece que la "*naturaleza es como es porque es la única posible consistente consigo misma*" (Chew, 1968). Hay pues una suerte de necesidad lógica en las leyes de la naturaleza y dichas leyes pueden ser determinadas únicamente mediante requerimientos lógicos de autoconsistencia (Gale, 1975).

Como ha señalado el propio Chew (Chew, 1968), planteado en términos tan generales el *principio del bootstrap*, aunque fascinante y útil constituye una idea no científica. El "bootstrap completo", como se denomina esta posición de alto nivel epistemológico, no es directamente eficaz en la formulación de una teoría física pero, sin embargo, contiene en sí mismo la potencialidad de inducir una aproximación restringida o "bootstrap parcial" de dicha idea capaz de orientar el desarrollo de modelos estrictamente científicos. La evolución de ese "bootstrap parcial" en el ámbito de la física de partículas ha conocido dos etapas sucesivas: el *bootstrap hadrónico* y el *bootstrap topológico*. Ambos desarrollos comparten como elemento central la siguiente descripción del *bootstrap restringido* aportada por uno de los protagonistas del desarrollo de esa su segunda edición (Nicolescu, 1988)

"El bootstrap es un principio dinámico que considera que las características y los atributos de una determinada entidad física son el resultado de las interacciones con las otras partículas que existen en la naturaleza: una partícula es lo que es porque todas las otras partículas existen a la vez" (p.63).

En su versión hadrónica el bootstrap se apoya en el llamado *principio de democracia hadrónica* según el cual todos los hadrones se hallan en condiciones de igualdad desde el punto de vista de la elementalidad (Cohen-Tannoudji et al, 1990). No hay, por tanto, un tipo de hadrones que sea más fundamental que otro. Cada hadrón puede desempeñar tres papeles diferentes; así, puede ser una *constituyente* en el seno de una estructura compuesta; puede ser una *partícula de intercambio* entre constituyentes, vehiculando, por tanto, la interacción que conforma la referida estructura compuesta; y finalmente, él mismo puede ser una *entidad compuesta*.

El desarrollo formal y analítico del bootstrap hadrónico se efectuó a finales de los cincuenta en el marco de la llamada *teoría de la matriz S* (Chew, 1961, 1971; Chew et al, 1964). Sus inicios se sitúan en 1943 y corresponden al programa de Heisenberg de no incorporar a las teorías físicas más que atributos o cantidades directamente ligados a la observación experimental. Por tal motivo la teoría de la matriz S (de *scattering* o difusión) intenta efectuar una descripción científica de los hadrones analizando su comportamiento antes y después de su interacción. Dicho enfoque ha sido comparado con el característico del estudio de un proceso químico, dado que de lo

que se trata es de analizar las reacciones que se producen en las colisiones entre hadrones ignorando los estadios intermedios y fijando únicamente la atención en las propiedades observables correspondientes a los estados inicial y final. Dichos observables dependen de los momentos lineales y de los momentos angulares intrínsecos o de spin de los hadrones iniciales y finales definidos experimentalmente y constituyen los diferentes elementos de la matriz S . Cada uno de dichos elementos describe una reacción nuclear particular en términos de amplitudes de probabilidad relativas a la conexión entre un estado inicial de partículas libres, definido por un conjunto dado de medidas experimentales, y un estado final de partículas libres definido de forma análoga. La matriz S constituye, pues, el receptáculo de toda la información teórica y experimental disponible.

En este punto el programa de Chew consiste, básicamente, en aceptar el principio de autoconsistencia en tanto que marco general para, a continuación, imponer de un modo axiomático algunas restricciones teóricas adicionales, soportadas en una amplia evidencia experimental, que podrían determinar de manera única la matriz S o algunos de sus elementos. En caso afirmativo, se podría disponer, por este procedimiento, de una teoría hadrónica completa derivada en última instancia del *bootstrap parcial*, es decir, de un *bootstrap* restringido por las ya referidas suposiciones adicionales.

A pesar de que el *bootstrap hadrónico* atrajo la atención de los físicos teóricos a lo largo de toda la década de los sesenta, la complejidad de la formulación matemática, inducida, particularmente, por alguna de las restricciones teóricas antes citadas, constituyó una de las razones de su abandono. Junto a ella, la consolidación del "modelo de quarks", contrapuesto en principio a la idea de democracia hadrónica, y el hecho de que el *bootstrap hadrónico* hiciera referencia únicamente a la interacción fuerte -en una época en la que el camino hacia la unificación de todas las interacciones fundamentales de la mano de las teorías de *gauge* estaba a punto de iniciarse con resonantes éxitos experimentales- hicieron del *bootstrap hadrónico* una formulación teórica no consolidada, aun a pesar de la concordancia nada despreciable observada entre teoría y experimento. No obstante es obligado destacar que algunos de los desarrollos actuales sobre campos cuánticos tienen su origen en el *bootstrap hadrónico*. Así la consideración de los hadrones como

objetos que se extienden a modo de pequeñas cuerdas cuyas extremidades pueden ser asimilables a los quarks, presente en las actuales teorías de cuerdas y supercuerdas cuánticas (Green, 1986), es tributaria de la idea del bootstrap a través de uno de sus desarrollos, el modelo de Veneziano (Nicolescu, 1985).

Pero, además, la fuerza de la idea de autoconsistencia, en tanto que marco metateórico capaz de orientar desarrollos particulares potencialmente útiles para el progreso científico, ha dado lugar a una renovación amplia de la teoría del bootstrap, a una nueva aproximación que, como ha señalado Nicolescu (Nicolescu, 1985), permite conciliar el principio de la autoconsistencia con la existencia de los quarks y se extiende no sólo a las interacciones fuertes, sino también a las débiles y a las electromagnéticas. Se trata del *bootstrap topológico*. Dicho enfoque teórico incorpora la topología, en tanto que "ciencia de las formas", como una herramienta adecuada para afrontar la unidad en la diversidad característica del mundo subatómico. La idea de invariancia topológica hace compatible la existencia de una sola forma con la de sus múltiples manifestaciones que derivan de ella por transformaciones continuas; y, asimismo, permite que lo continuo de una forma dada coexista con lo discontinuo de formas diferentes.

El bootstrap topológico abandona el principio de democracia hadrónica e introduce una jerarquía de niveles de realidad -el mundo subcuántico, el mundo cuántico y el mundo macroscópicamente observable- cada uno de los cuales viene caracterizado por un grado diferente de complejidad topológica. Y es en el mundo subcuántico, de complejidad topológica nula, donde la idea de autoconsistencia goza de su máximo significado: las topologías de complejidad nula se autodeterminan, no pueden ser construídas a partir de topologías de mayor grado de complejidad, es decir, gozan de la propiedad única de generar de nuevo topologías de complejidad nula mediante combinaciones entre ellas (Nicolescu, 1985). Esta autoconsistencia topológica al nivel de complejidad nula determina el espectro de las "partículas", los subconstituyentes fermiónicos y bosónicos y sus propiedades. Dichos subconstituyentes, en sí mismos, no son directamente observables sino indirectamente a través de las propiedades o manifestaciones de dichas partículas en esos niveles de mayor grado de complejidad en los que aparece la realidad observable. A pesar de las analogías que pudie-

ran establecerse entre subconstituyentes fermiónicos y quarks, cabe destacar que aquéllos no son ni entidades físicas ni ladrillos fundamentales de la materia sino que constituyen la encarnación misma de la autoconsistencia, desempeñando a la vez ese doble papel de constituyentes de las partículas cuánticas y de vehículos de la interacción que es característico de un bootstrap físico parcial.

Autoconsistencia vs. Elementarismo

Tanto el principio del bootstrap como el elementarismo, en tanto que atomismo entendido más allá de la estricta idea de átomo, constituyen esquemas explicativos típicamente científicos que se insertan en sendos paradigmas, o visiones de la realidad, en principio contrapuestos. El segundo se beneficia de la herencia epistemológica newtoniano-cartesiana que pone el acento en las entidades antes que en la relación, en los objetos simples -considerados en sí mismos como previos, cuyos atributos son responsables de una posible interacción mutua- antes que en su interacción; el primero, por el contrario, se alinea con una visión no cartesiana de la complejidad material según la cual es la relación lo que constituye la "materia prima" de la realidad. La creación y la aniquilación de partículas son esencialmente, en este nuevo enfoque, fenómenos de relación. Los atributos y, por extensión, la propia identidad de una partícula no se pueden concebir como propiedades que caracterizan una entidad individual, o aislada, sino que constituyen el resultado de las interacciones con otras partículas; recurriendo a uno de los postulados más emblemáticos del bootstrap, puede recordarse que según dicha perspectiva teórica *una partícula es lo que es porque todas las otras partículas existen a la vez.*

Esa contraposición de marcos, situada en un nivel epistemológico muy general, tiene su repercusión en otros niveles de menor grado de generalidad. Así por ejemplo, la repulsión característica del pensamiento atomista frente a la idea de un infinito alojado en el mundo de lo muy pequeño -como algo "opuesto a la recta razón"- se desvanece en el marco del bootstrap y esa clase de infinito se incorpora de una forma natural a la descripción del microcosmos. De acuerdo con la hipótesis de Chew no sólo es concebible la existencia de un número infinito de hadrones o de tipos de hadrones (Gale, 1975) sino que, en el marco del bootstrap, incluso un número

infinito de condiciones de autoconsistencia determina de una manera única las partículas existentes (Nicolescu,1985).

Por otra parte, y coherentemente con el abandono del concepto de partícula como entidad fundamental, la teoría del bootstrap propone una renuncia radical a toda ecuación del movimiento -herramienta conceptual tan característica de la tradición newtoniana-; dicho elemento es sustituido en el bootstrap hadrónico por un sistema formado por un conjunto infinito de ecuaciones acopladas -no lineales- derivadas de esas restricciones impuestas al bootstrap completo, anteriormente referidas; sistema que, convenientemente resuelto, podría aportar una solución única para la matriz S y, consiguientemente, para el problema del bootstrap hadrónico.

Cabe finalmente destacar la contraposición que presentan la autoconsistencia y el elementarismo, en tanto que paradigmas, a la hora de abordar la complejidad. El atomismo, en perfecta sintonía con el ideal cartesiano, resuelve lo complejo en lo simple para, posteriormente, procediendo por agregación de las partes, reconstituir el todo; y ese mismo esquema es compartido, en lo esencial, por el elementarismo, sólo que sustituyendo en este caso los átomos por otros ladrillos aún más fundamentales de la materia. Por su propia esencia y tradición, el atomismo requiere de átomos, de constituyentes últimos, de partículas fundamentales, de ahí las dificultades insuperables que se le plantean en el plano lógico-epistemológico para extender un proceso de partición *ad infinitum* en el mundo submicroscópico. En tanto que esquema explicativo está perfectamente preparado para desmenuzar lo complejo en entidades simples pero falla a la hora de aportar una explicación consistente que permita entender la complejidad de lo elemental sin tener que recurrir, necesariamente, a otras entidades aún más fundamentales. Parece como si esta lógica explicativa, que tanto ha contribuido al progreso de las ciencias físicas, encontrara en un determinado nivel de realidad sus propios límites de validez.

Frente a este enfoque "individualista", característico del pensamiento de corte atomista, destaca en el bootstrap su renuncia al recurso a los "fundamentones" (Chew,1971) y su apuesta por lo global, en definitiva, su aproximación holística a lo real. La complejidad es vista, en la perspectiva de la autoconsistencia, como una pura emergencia desde un nivel de realidad en el que prima la rela-

ción; relación capaz de explicar la multiplicidad de lo uno, la diversidad presente en el seno de lo fundamental.

Ambos enfoques entran, en fin, lógicas explicativas muy diferentes; el primero ha constituido durante mucho tiempo la referencia de lo científico en el pensamiento occidental y, precisamente por ello, forma parte de las categorías de análisis y construcción de sus disciplinas particulares para una muy amplia fracción de científicos en ejercicio. El segundo, como el anterior, hunde también sus raíces en el pensamiento de la Grecia clásica, y más concretamente en el *homeomerismo* de Anaxágoras (Gaisser et al, 1977) pero debido, al menos en parte, a su escaso desarrollo constituye una opción epistemológica considerada con frecuencia como heterodoxa o como marginal y que, sin embargo, parece constituir un firme candidato -en tanto que paradigma alternativo- a ocupar el lugar del atomismo y de su trasfondo epistemológico.

El principio de autoconsistencia como principio epistemológico

La consideración de la autoconsistencia como principio epistemológico posee un carácter singular si se compara con los otros principios hasta ahora analizados. El principio de invariancia, el de complementaridad o el de exclusión, por ejemplo, en su versión de principios epistemológicos, se han obtenido siguiendo un proceso *abajo-arriba* en el que partiendo de su destacada posición en tanto que principios propios de la física fundamental, se les ha pretendido elevar hasta un nivel más general -de carácter cualitativo- situándolos así en disposición de poder ser transferidos a otros dominios de conocimiento y, en especial, al ámbito de la investigación sobre la enseñanza y el aprendizaje científicos.

Por el contrario, el principio de autoconsistencia nace ya con los atributos que caracterizan un principio epistemológico, de modo que ese proceso *arriba-abajo* que en el seno de la física fundamental ha convertido dicho principio primero en el bootstrap hadrónico y después en el bootstrap topológico, con sus ramificaciones teóricas respectivas, constituye en sí mismo un ejemplo de aplicación del esquema adoptado en el presente ensayo y una cierta garantía de validez de ese procedimiento de transferencia de significado que el referido esquema lleva consigo.

En tanto que principio epistemológico, el principio de autoconsistencia presenta un parentesco notable con la *filosofía de la complejidad* (Morin,1990) o viceversa. Así, a la hora de enunciar tres principios fundamentales de este nuevo paradigma, Morin establece los siguientes:

Un *principio dialógico*, que nos permite mantener la dualidad en el seno de la unidad asociando términos a la vez complementarios y antagonistas. Un *principio de recursión organizativa* según el cual los productos y los efectos son al mismo tiempo causas y productores de aquéllo que los produce. Un *principio hologramático* el cual afirma que no solamente la parte está en el todo sino que el todo está asimismo en la parte.

Lo que se aprende sobre las calidades emergentes del todo -afirma Morin-, todo que no existe sin organización, vuelve sobre las partes. Así pues es posible enriquecer el conocimiento de las partes por el todo y del todo por las partes, en un mismo movimiento productor de conocimiento (Morin,1990 p.101). Esta apuesta por ese holismo fuerte que constituye el tercer principio se sitúa francamente próxima a la idea de autoconsistencia característica del bootstrap total.

ALGUNAS RELACIONES INTERNAS

La idea de sistema no sólo hace referencia a un conjunto definido de elementos sino también, y muy especialmente, a la existencia de relaciones mutuas entre ellos. Entre la definición de sistema de J. Lesourne como "*conjunto de elementos ligados entre sí por un conjunto de relaciones*" y la definición de von Bertalanffy como "*totalidad organizada compuesta de elementos solidarios que no son definidos más que los unos por su relación con los otros en función de su lugar dentro de esta totalidad*" (Durand,1990), media, tan solo, una acentuación en el papel de las relaciones recíprocas en tanto que constituyentes del propio sistema; pero ambas dejan a la vista una noción que va más allá de la de mera colección de elementos. Coherentemente con este significado del término, se trata ahora de subrayar algunos de los componentes relacionales

presentes en ese sistema -desde luego abierto y por tanto dinámico- de principios epistemológicos descritos anteriormente.

Como apuntáramos ya en el comienzo del presente capítulo, el principio de invariancia desempeña, a la vez, el papel de principio epistemológico y de *metaprincipio epistemológico*, desde el momento en que la conservación del significado bajo transposición transdisciplinar, que la intencionalidad asignada por nosotros a la noción de principio epistemológico conlleva, no deja de aludir a una forma aún más general de simetría. Su relación con el resto de los principios resulta, por este motivo, privilegiada, sin perjuicio de que dicha relación pueda estar asimismo presente a otro nivel de conocimiento epistemológicamente más bajo.

Por ejemplo, la idea de invariancia -salvo el signo- de la función de onda constituye, en el plano teórico, un nexo relacional entre el principio de exclusión y el de complementaridad (ver fig.4.3) pero conecta, asimismo, ambos principios a ese nivel metateórico en el que ambos pueden ser considerados como principios epistemológicos. Esta forma de recursividad nos remite, en cierta manera, a la idea de autoconsistencia, formulada en términos de esa especie de implicación circular existente entre el conocimiento del todo y el conocimiento de las partes, entre la perspectiva global y los análisis parciales, entre el nivel metateórico y el nivel estrictamente científico.

Por su parte, la conexión entre el principio de complementaridad y el de exclusión es, en fin de cuentas, la que corresponde a la relación entre la dualidad fundamental característica del primero y la idea de diversidad propia del segundo. Una relación, por tanto, de mayor a menor nivel de generalidad semejante en ese sentido a la que mantienen el principio de autoconsistencia y el de complejidad de lo elemental en la que el primero aporta una explicación plausible y consistente para el segundo.

Finalmente el principio de complementaridad y la noción de autoconsistencia, considerada como una forma de holismo, están conectadas en el ámbito mecanocuántico de un modo sustancial. De las ideas de Bohr se colige que la parte no tiene sentido en sí misma sino en su relación con el todo; los objetos cuánticos poseen propiedades observables sólo en la medida que las comparten con los sistemas con los que interactúan. En un plano más general cabe atisbar otra interesante relación entre autoconsistencia y comple-

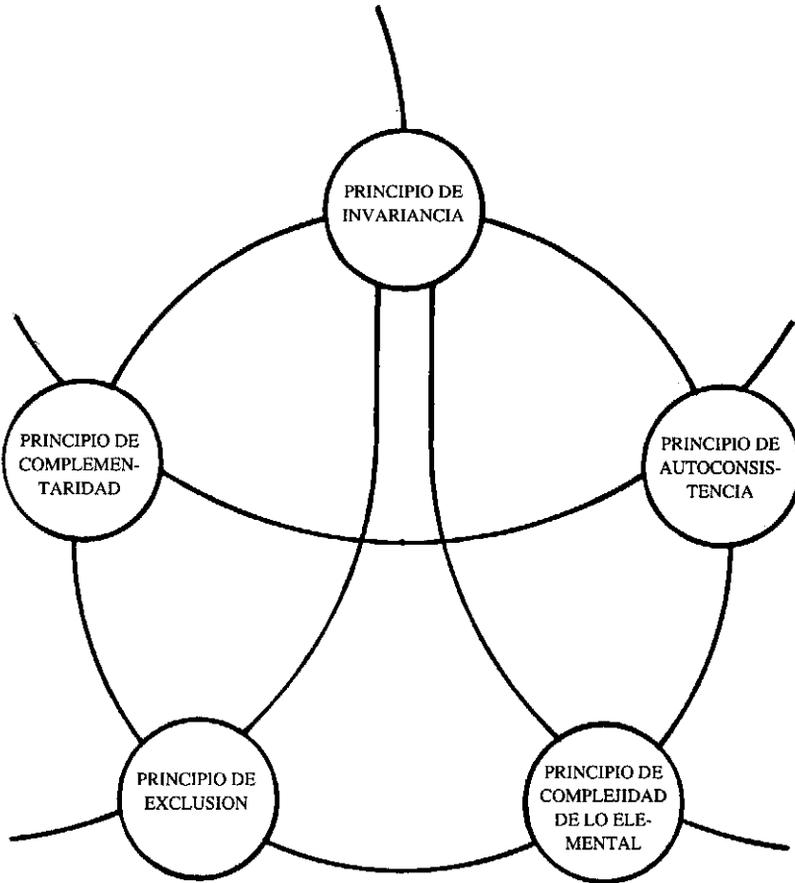


Fig. 4.5 - Representación esquemática del sistema de principios epistemológicos anteriormente considerados. En él se ha obviado deliberadamente el sentido de las relaciones y se insinúa el carácter abierto -no exhaustivo- de la descripción.

mentaridad. Leída aquélla en clave de ésta, la descripción global -u holística- y la descripción analítica -o atomística- de la realidad constituyen representaciones del mundo aparentemente incompatibles pero que pueden proporcionar, conjuntamente, una descripción completa de nuestro universo observable y conceptual.

SEGUNDA PARTE

ALGUNAS IMPLICACIONES PARA LA EDUCACION CIENTIFICA

"En realidad, no hay fenómenos simples; el fenómeno es un tejido de relaciones. No hay naturaleza simple, sustancia simple; la sustancia es una contextura de atributos. No hay idea simple, porque una idea simple, para ser comprendida, debe insertarse en una sistema complejo de pensamientos y de experiencias"

G. Bachelard. Le nouvel esprit scientifique

5

UN PRINCIPIO DE INVARIANCIA PARA EL APRENDIZAJE CIENTIFICO

La consideración de la posibilidad de trasladar un principio de invariancia, o de simetría, más allá del ámbito de la física tiene antecedentes históricos en la obra de Kurt Lewin (1890-1947), padre de la psicología social. No es casualidad que dicho intento se enmarque dentro de su preocupación por la epistemología comparada -teoría comparada de la ciencia-. Para Lewin (1991) *"la teoría comparada de la ciencia tiene como meta el estudio de las propias ciencias, no en el sentido de interesarse por los objetos concretos que cada una de ellas pretende abarcar sino en el de procurar un marco de referencia común... Dicho marco de referencia, por ser precisamente común impide que puede ser equiparada, y mucho menos reducida, a una teoría del método"* (p.35). En esta perspectiva, las relaciones entre física y psicología son vistas por Lewin no como una asimilación de los datos psicológicos a los físicos, en la forma propugnada por el positivismo, sino como *"una forma de establecer semejanzas globales de naturaleza metateórica y paralelismos en cuanto a los procedimientos de estudio y fases de desarrollo"* (p.59).

Una muestra de tal programa intelectual lo constituyen en la obra citada los capítulos titulados *Principio de conservación en la psicología* y *Conservación, identidad y cambio en la física y en la psicología*, en los cuales Lewin se recrea en el análisis de las condiciones y de las posibilidades de aplicación del referido principio físico en el mundo psíquico. En todas sus consideraciones, el plano en el que se desenvuelve Lewin es el plano de las leyes que relacionan entre sí los objetos. *"De lo que se trata en toda epistemología comparada -según Lewin- es de ver en qué medida los objetos del*

mundo psíquico se acogen o no a la misma dinámica, a las mismas leyes que el funcionamiento de los objetos físicos o biológicos" (p. 79). A lo largo de la obra citada con frecuencia se advierte que la idea de conservación que, a efectos comparativos y de transposición, Lewin toma prestada de la física es el tipo de noción presente en el principio de Lavoisier o en el principio de conservación de la energía, por ejemplo; es decir, Lewin considera en sus análisis una forma de invariancia de un nivel epistemológico relativamente bajo, esto es, relativamente próximo al mundo de los objetos físicos o psíquicos. *"Si fuera posible -afirma Lewin- que los objetos físicos, sean estos átomos o energía, se transformaran en psíquicos, entonces el principio de conservación debería ser válido para estos últimos"*.

Este mismo planteamiento -consistente en situar la posible analogía entre las ciencias físicas y las ciencias sociales al nivel de los fenómenos o de las leyes que los rigen- ha llevado a algunos autores (Searle, 1985) con actitudes intelectuales mucho menos abiertas que las de Lewin, a negar rotundamente la posibilidad de cualquier forma de conexión entre lo físico y lo social o lo psicológico; ningún *principio puente* entre los rasgos sociales y físicos del mundo puede salvar lo que se considera una discontinuidad radical derivada del carácter intrínsecamente mental de los fenómenos sociales y psicológicos. No vamos a entrar en una discusión sobre el concepto de física (decimonónica) que se maneja, o sobre el caudal de posibilidades de relación entre lo físico y lo mental que deja tras de sí la irrupción en la historia de la ciencia de la física cuántica (Zohar, 1990; Bohm, 1951, 1987; Mansfield et al, 1989; Marshall, 1989) pero sí conviene destacar las diferencias que, respecto de la aproximación de Lewin, supone la transposición del principio de invariancia del ámbito de las ciencias físicas al ámbito de la investigación sobre su aprendizaje que aquí se plantea.

Frente a la invariancia referida a la dinámica de los *objetos*, presente en la idea de conservación que maneja Lewin, es la invariancia referida a la dinámica de principios o de leyes -en definitiva de entidades formales- bajo diferentes operaciones de transformación lo que caracteriza esa clase de principios físicos -los principios de simetría- cuya potencia explicativa y predictiva resulta cuando menos asombrosa. Considerado como principio epistemológico, la idea de invariancia de las leyes bajo operaciones de transformación

posee un nivel lo suficientemente elevado como para constituirse en un auténtico "nexo semántico" entre física y ciencias sociales.

Al margen de las posibles relaciones entre lo físico y lo mental derivadas de una interpretación plausible de la mecánica cuántica, el procedimiento consistente en elevar el plano de análisis del nivel de los "fenómenos" o de los "objetos" al nivel de las relaciones entre ellos permite, yendo aún más allá, situar sobre esta segunda plataforma ese verdadero *principio-puente* de carácter metateórico que constituye el principio de invariancia como principio epistemológico. Este es el camino que seguiremos en lo que sigue.

En busca de un enunciado significativo

Habida cuenta del papel que ha desempeñado el principio de invariancia en el progreso y la unificación de las teorías de la física fundamental contemporánea su transposición -en tanto que principio epistemológico -al ámbito de la educación científica constituye una tarea respecto de cuyos resultados cabe albergar singulares expectativas. Llegados a este punto es necesario precisar que una tal articulación no tiene por qué traducirse en un único principio, operando en el espacio que concierne a la enseñanza y/o al aprendizaje científicos; esta nueva perspectiva teórica, por su propia naturaleza, abre las puertas a nuevas exploraciones, a nuevos enunciados, que consoliden la fecundidad del enfoque general.

En lo que al presente trabajo concierne postularemos un sólo principio de invariancia; lo formularemos, lo someteremos a diferentes tipos de contrastación empírica, extraeremos consecuencias y discutiremos, finalmente, algunas implicaciones en ese nivel epistemológicamente más bajo que caracteriza el mundo de la educación científica.

Como ya postuláramos en una anterior investigación de corte empírico, ...*"a partir de un cierto nivel umbral, las características esenciales de un aprendizaje científico eficaz son invariantes bajo cambios en la complejidad de la estructura cognitiva del sujeto que aprende; dicho de otro modo, los procesos de orden cognitivo que controlan un aprendizaje efectivo son básicamente análogos, independientemente de que se apliquen a estructuras conceptuales más o menos elaboradas o complejas"* (López Rupérez, 1989).

Los especialistas en educación científica asociarán, probable-

mente, el contenido del anterior enunciado con la conocida metáfora del "estudiante como científico" (Driver et al,1983) o incluso con la idea expresada de forma explícita por Novak de que *la creación de conocimiento es un fenómeno de aprendizaje por parte del creador* (Novak,1985). Por lo que, llegados a este punto, parece razonable efectuar algunas precisiones al respecto. La metáfora del estudiante como científico ha inspirado ciertamente el desarrollo de muy respetables programas de enseñanza de la física tales como el proyecto Nuffield o el PSSC. En todos ellos un elemento inspirador común estaba patente; a saber, la existencia de un método científico bien definido compartido en lo esencial por todos los científicos y vinculado fuertemente al nivel de lo empírico. Junto a ello, una apuesta de corte psicológico (Finley,1983) desplazaba la atención del aprendizaje científico hacia los llamados "procesos de la ciencia" o destrezas características del llamado "método científico".

La puesta en cuestión, en el ámbito epistemológico, de la existencia de un único método científico, como tal, junto con la nueva orientación procedente de la filosofía de la ciencia, que aparcando algunas de las prescripciones derivadas del empirismo lógico tomaba en consideración el constructivismo emergente -con antecedentes situados, precisamente, en el ámbito de la física fundamental (Einstein,1984; Paty,1993)- hicieron finalmente, en la década de los ochenta, de la metáfora del estudiante como científico un mero recurso y no toda una filosofía de la educación científica como lo había sido en la de los setenta. En el ámbito psicológico, los resultados aportados por la psicología cognitiva y por la corriente de investigación en resolución de problemas añadieron, a partir de una cierta base empírica, sombras nuevas sobre la oportunidad de poner el acento en los procesos de la ciencia por encima de los contenidos específicos.

Aunque en el enfoque que corresponde a la aplicación del principio de invariancia en la educación científica subyace la idea de comparación entre el comportamiento del físico y el del estudiante de física se trata, en este caso, de apelar no a la metáfora del *estudiante como científico*, propia de la orientación anteriormente citada sino, mas bien al contrario, a la del *científico como estudiante*.

En lo que a la frase de Novak respecta hay que decir que se enmarca en una visión constructivista del aprendizaje científico, de inspiración tanto psico-pedagógica como epistemológica, que con-

sidera aquél como un proceso de transformación y cambio conceptuales y al estudiante como el constructor de su propio conocimiento (Novak, 1988). Por encima del significado concreto, en mi opinión insuficientemente explorado, que semejante declaración tiene en el contexto de una tal perspectiva teórica, lo cierto es que su trasfondo ha estado presente en la mente de físicos ilustres que lo han reflejado en sus escritos, las más de las veces, en un sólo párrafo. Sirva como ejemplo la siguiente afirmación de Leopold Infeld en la que se hace eco de las palabras del propio Einstein (ver Holton, 1981; p. 229) de quien fue amigo personal y colaborador:

"Los métodos científicos del razonamiento parecen tan diferentes de los utilizados en nuestra vida corriente en razón de que son más refinados, elaborados y solicitados; con todo, en lo esencial, son los mismos" (Infeld p.16).

Las correspondientes citas de Einstein hacen, no obstante, referencia a ese concepto más general de "pensamiento científico" que incluye a la noción de razonamiento lógico en tanto que instrumento pero que conecta directamente con la idea de creación como elemento esencial del pensamiento efectivo.

Sometiendo el principio a prueba

La vocación científica, y no meramente filosófica, de la perspectiva teórica esbozada en los anteriores capítulos nos obliga a someter a prueba la validez del principio antes enunciado, siquiera sea de un modo tentativo, efectuando predicciones susceptibles de algún tipo de contrastación empírica.

Como ha señalado el físico-filósofo francés Michel Paty (Paty, 1988) la ciencia madura no funciona solamente sobre la base de ese modo audaz de *predictividad total* de la cual el descubrimiento del planeta Neptuno por Urbain Leverrier -a partir de los desarrollos de la teoría newtoniana de la gravitación- constituye un ejemplo arquetípico. La fuerza de un principio, de un modelo o de una teoría se mide también por su capacidad para explicar descubrimientos experimentales imprevistos pero ya efectuados. Se trata en tal caso y según Paty, de una *predictividad retrospectiva* o diferida. En lo que sigue, trataremos de poner a prueba el poder predictivo de nuestro principio de invariancia en cada uno de ambos frentes.

i) Las concepciones espontáneas de los alumnos frente a la filosofía espontánea de los científicos

En esta última década se ha desarrollado un importante volumen de investigaciones de carácter empírico (Serrano, 1981; Pozo, 1987; Driver et al, 1985; Hierrezuelo et al, 1989; Carmichael et al, 1990) que han puesto de manifiesto la existencia en la mente de los alumnos de un conocimiento previo o preexistente a la instrucción científica y que compite fuertemente con ella. Dicho conocimiento espontáneo parece estar organizado en unidades relativamente estables constituyendo lo que se conoce como *preconcepciones* o *marcos alternativos*, los cuales han sido definidos por Driver et al. (1983) como "*organizaciones mentales impuestas por el individuo sobre sus experiencias sensoriales, que se ponen de manifiesto por las regularidades en las respuestas a situaciones problemáticas*".

El llamado "movimiento de las concepciones alternativas" (Gilbert et al, 1983) ha aportado suficiente evidencia experimental como para elevar el fenómeno de las preconcepciones o la existencia de la llamada "ciencia de los niños" a la categoría de hecho observado, cuando menos en el ámbito del aprendizaje de las ciencias físicas. Revisiones bibliográficas realizadas sobre este fenómeno han identificado algunas características generales de las *concepciones espontáneas de los alumnos* (CEA) (Driver et al, 1985). Aun cuando volveremos a ello en el próximo capítulo, nos interesa ahora destacar los siguientes rasgos :

- a) Corresponden a un pensamiento dominado por la percepción.
- b) Son estables o resistentes al cambio.
- c) Son personales, lo que no excluye la posibilidad de que sean básicamente coincidentes.
- d) Pueden ser incoherentes.

Llegados a este punto, y acogiéndonos a una forma de predictividad diferida, nuestro principio de partida permite predecir la existencia de concepciones espontáneas en los científicos respecto de un ámbito de conocimiento metacientífico. Además, tales concepciones habrán de presentar, *mutatis mutandis*, bastantes elementos análogos con relación a las concepciones espontáneas que sobre ciencia se observan en los alumnos.

El conocimiento científico constituye una forma de conocimiento superior respecto del meramente perceptivo; aun cuando las ciencias empíricas se apoyan en los hechos no se deducen automáticamente de ellos, sino que suponen su interpretación desde constructos teóricos muy elaborados cuyos postulados se encuentran, por lo general, bastante alejados del nivel estrictamente empírico. Por contra, las concepciones de los alumnos operan a modo de *prototeorías* (López Rupérez, 1991) las cuales, aun cuando suponen la construcción de ciertos esquemas interpretativos de la realidad, se hallan muy próximos al ámbito de lo sensible. Por tal motivo, la comparación entre la "ciencia de los niños" y la "ciencia de los científicos" hay que verla mediada por un salto cualitativo de naturaleza epistemológica semejante al que pueda existir entre la "ciencia de los científicos" y la filosofía de la ciencia.

La existencia de concepciones espontáneas entre los científicos respecto de la filosofía de la ciencia ha sido denunciada y descrita por el filósofo francés Althusser (1918-1988) digno representante de ese nivel metacientífico desde el cual se pueden advertir las anomalías o discrepancias que aparecen como consecuencia de una conceptualización espontánea efectuada en un nivel epistemológicamente inferior. Por desgracia, la denominada por Althusser *filosofía espontánea de los científicos* (FEC) (Althusser, 1985), no llega a disfrutar del mismo estatus observacional consolidado del que gozan las concepciones espontáneas de los alumnos; ello es así, en parte, porque el someter a los propios científicos a los rigores de la observación sistemática es bastante más difícil que hacerlo con los sujetos en formación. Sin embargo, y en sus aspectos esenciales, la caracterización efectuada por Althusser resulta francamente familiar a cualquiera que haya vivido durante un intervalo de tiempo suficientemente dilatado las interioridades de esos recintos, llamados laboratorios de investigación, en donde se genera el conocimiento científico.

Althusser considera la FEC formada por el conjunto de ideas, conscientes o no, que los científicos tienen en lo que concierne a su práctica científica y a la ciencia en general. Entre sus características fundamentales destacamos las siguientes:

- a) Está dominada por su propia experiencia de la práctica científica inmediata y cotidiana.

- b) No deja lugar a la duda filosófica que pone en entredicho la validez del quehacer científico, la existencia del objeto conocido, de su conocimiento y del propio método.
- c) Contiene un elemento extracientífico constituido por convicciones o creencias.
- d) Presenta, en su conjunto, algunos aspectos incoherentes o contradictorios.

Interesa ahora destacar las analogías existentes entre la FEC y las CEA. Tanto en uno como en otro caso, aunque a diferente nivel, es la experiencia básica -como señalara con bastante anticipación Bachelard- el origen del "primer obstáculo epistemológico" (Bachelard, 1948); es la consistencia de las condiciones en que se efectúan sus respectivas prácticas diarias (científica y no científica respectivamente) la principal fuente de seguridad; una seguridad que contribuye a eludir el análisis crítico efectuado a un nivel epistemológicamente superior. Esa es una de las razones por las que las CEA son tan resistentes al cambio y, a un tiempo, el motivo de que proliferen en el ámbito de la ciencia profesional un materialismo -o un objetivismo- compartido que es raramente problematizado. Tal circunstancia ha sido denunciada por los nuevos físicos-filósofos, como Nicolescu (1985), en párrafos como los siguientes:

"Es preciso subrayar que incluso los "padres fundadores" de la física moderna, a excepción, en cierta medida, de Bohr, no han osado franquear ese umbral (la imagen de un mundo fuertemente dominado por el realismo clásico). Esta actitud revela una relación interesante de contradicción entre los físicos y sus propios descubrimientos, relación de contradicción que merecería, por otra parte, ser estudiada con mayor profundidad." (p.240)

"...deploro esta especie de negligencia perezosa de tantos físicos ante el discurso metacientífico y propiamente filosófico sobre el doble problema de los orígenes de la ciencia y de las consecuencias que ella entraña.." (Michel Cazenave citado por Nicolescu, 1985 p.240).

La presencia en las CEA de elementos contradictorios, desde el punto de vista del profesor, se plantea de un modo análogo en la FEC a los ojos del filósofo de la ciencia. Althusser destaca tales incoherencias entre lo que él llama el *elemento I* o "intracientífico" de la FEC, que constituye un conjunto de convicciones de carácter

materialista y objetivista y el *elemento 2* o "extracientífico" formado por creencias filosóficas, religiosas o idealistas, que suministran una serie de valores ajenos a la práctica científica. El carácter parcialmente incoherente de los planteamientos epistemológicos del científico profesional ha sido señalado por Einstein de una forma que guarda una analogía probablemente aún más estrecha con el proceder observado en los alumnos respecto de sus concepciones espontáneas. En una de las citas anteriormente recogida (ver pág.30) Einstein escribe:

"Las condiciones externas que se manifiestan por medio de los hechos experimentales no le permiten (al científico) ser demasiado estricto en la construcción de su mundo conceptual mediante la adhesión a un sistema epistemológico. Por eso tiene que aparecer ante el epistemólogo sistemático como un oportunista poco escrupuloso..."

Por otra parte, no deja de ser curioso que la rémora del lenguaje haya sido denunciada por profesores-investigadores (Astolfi, 1988) y por físicos-filósofos (Nicolescu, 1985) como uno de los factores que podría explicar algunos de los rasgos de las concepciones espontáneas que respecto del nivel científico presentan los alumnos y que en relación con el nivel metacientífico exhiben, asimismo, los científicos.

Con todas las limitaciones derivadas de una simplificación como la que se oculta tras nuestro principio de invariancia, parece sin embargo que la predicción por él generada se atiene a los "hechos observados" y descritos por filósofos, científicos y especialistas en educación científica; o, formulado en otros términos, este sencillo postulado es capaz de explicar las analogías que hemos hecho explícitas entre las concepciones espontáneas de los alumnos en el dominio científico y las concepciones espontáneas de los científicos en el ámbito de la filosofía de la ciencia.

ii) El comportamiento ante la resolución de problemas de física de los alumnos buenos resolventes frente al de los físicos expertos

La resolución de problemas constituye la componente central del trabajo científico. La producción de conocimiento y el propio desarrollo de la ciencia son esencialmente el resultado de plantear-

se, en cada caso, los problemas adecuados y de encontrar, consecuentemente, las respuestas oportunas. La resolución de problemas concierne, asimismo y de un modo capital, a la didáctica de la física. La adquisición de las destrezas correspondientes constituye, desde luego, la principal dificultad con la que se enfrentan los estudiantes y, en la medida correspondiente, los profesores que han de transmitirlos en niveles de instrucción secundarios y terciarios; pero, además, resulta un elemento imprescindible para propiciar un aprendizaje científico efectivo y completo. Por su parte, los psicólogos del conocimiento han considerado la resolución de problemas de física correspondientes a un contexto académico, como un área de investigación especialmente relevante debido a su nitidez en tanto que modelo suficientemente simple y, a un tiempo, razonablemente rico y complejo. Tampoco los especialistas en inteligencia artificial, interesados en la simulación, desde sistemas informáticos, del razonamiento humano, han ignorado el potencial heurístico que podría obtenerse de la construcción de *sistemas expertos* operando en el ámbito de la resolución de este tipo de problemas.

Del cuadro anteriormente descrito emerge el problema de la resolución de problemas de física como una cuestión directamente vinculada con el conocimiento científico y con su construcción. Epistemología, ciencia, psicología cognitiva, ingeniería del conocimiento y educación científica, se dan cita en torno a dicho problema. Tal circunstancia hace del ámbito de la resolución de problemas de física, un contexto especialmente adecuado para someter de nuevo a contrastación empírica la validez del principio antes formulado. En el seno de una investigación más amplia (López Rupérez, 1991) dicho principio de invariancia inspiró la formulación de una hipótesis más adaptada al contexto concreto de la resolución de problemas, en los siguientes términos:

"Las características de la resolución de problemas observables en los alumnos buenos resolventes son básicamente coincidentes con las de los físicos expertos".

La idea que subyace en dicha hipótesis consiste en aceptar que existen ciertos atributos fundamentales que caracterizan las representaciones eficaces más allá de las diferencias que pueden atribuirse a la expertez. No cabe duda de que los sujetos expertos disponen de una base de conocimientos mucho más amplia y que su experiencia les proporciona una gran cantidad de conocimiento

tácito y auxiliar (Reif, 1981). Tales ventajas se dejarían sentir, probablemente con toda nitidez, ante la resolución de problemas abiertos referidos a un dominio amplio de contenido como pueden ser las auténticas investigaciones científicas, circunstancia en la cual las diferencias son adecuadas a la escala del problema. Sin embargo, en la resolución de problemas cerrados -esto es, que tienen solución dentro de un dominio restringido de conocimientos- la hipótesis anterior predice un comportamiento similar si se deja a un lado la variable tiempo de resolución. Dicha predicción fue puesta a prueba a través de un análisis comparativo entre las características fundamentales del comportamiento de los expertos, descritas en estudios previos, y las del comportamiento de los alumnos buenos resolventes aportadas por la referida investigación.

De las investigaciones sobre las diferencias observables en el comportamiento de los expertos en la resolución de problemas de física frente al de los novatos, pueden extraerse los siguientes rasgos fundamentales que constituyen, de hecho, una especie de patrón procedimental básico y relativamente bien definido.

- a) Los sujetos expertos construyen una descripción, o representación inicial del problema, cualitativa o de bajo nivel de detalle antes de implicarse en el desarrollo de ecuaciones (Larkin et al, 1979; Chi et al, 1981).
- b) El experto parece generar tempranamente algún tipo de representación conceptual más o menos global del enunciado (Chi et al, 1981).
- c) El proceso de resolución seguido por los expertos está dirigido por una estructura de conocimiento basada en principios generales (Chi et al, 1981).
- d) Los esquemas de los expertos contienen, además, conocimiento procedimental que incluye condiciones explícitas de aplicabilidad. Las orientaciones efectivas que asisten a los expertos no radican tanto en el conocimiento de términos y de enunciados verbales o proposicionales, como en lo que ellos significan en un contexto dado (Chi et al, 1981).
- e) Los expertos resuelven con frecuencia, los problemas trabajando hacia adelante, de los datos hacia las incógnitas (Larkin, 1980).
- f) El experto construye, siempre que es posible, una representa-

ción física, es decir, en términos de componentes o mecanismos del mundo real que le permite, entre otras cosas, efectuar inferencias directas a partir de ciertas características y relaciones que no están explícitas en el enunciado pero que pueden ser deducidas de este tipo de representaciones (Chi et al, 1982; Larkin, 1980).

- g) Los expertos realizan a lo largo del proceso de resolución un doble papel; el papel de actor, en el sentido de trabajar en la resolución buscando caminos y desarrollándolos y, a un tiempo, el papel de supervisor, analizando críticamente el trabajo anterior, evaluando paso a paso su actuación y reorientándola si es preciso (López Rupérez, 1987; Nickerson et al, 1985).
- h) Los expertos dedican cierto tiempo a efectuar una evaluación final de los resultados obtenidos y de los procedimientos de resolución empleados (Larkin et al, 1979; Larkin, 1980).

La hipótesis más general de nuestra investigación, vinculada a su vez a ese principio teórico de más alto nivel, convierte las características fundamentales del comportamiento de los expertos en auténticas predicciones respecto del comportamiento de los buenos resolventes. En lo que sigue, haremos explícita la relación existente entre lo observado y lo predicho:

- a) Todos los alumnos buenos resolventes parten de un análisis cualitativo y de una cierta representación conceptual, por lo general poco precisa aunque acertada, del enunciado, lo que se corresponde con las predicciones derivadas de las características a) y b) del comportamiento de los sujetos expertos.
- b) Los alumnos buenos resolventes presentan una organización del conocimiento en la que, por encima de sus aspectos generales, destaca su estructura fina, la riqueza semántica de sus componentes y su nivel de especificidad, lo que les permite efectuar un número relativamente elevado de inferencias; tal resultado se corresponde con la predicción derivada de la característica d) del comportamiento de los expertos.
- c) Los alumnos buenos resolventes se destacan por el rendimiento que obtienen de la representación figurativa del enunciado y que se traduce en un número relativamente elevado de inferencias de esta naturaleza. Dicho resultado puede ser

considerado, de acuerdo con nuestra hipótesis de partida, como una predicción derivada de la característica f) del comportamiento de los expertos.

- d) Los alumnos buenos resolventes efectúan tareas autocorrectivas a lo largo de todo el proceso de resolución; ello les permite eliminar errores no mucho después de que se hayan producido. Los buenos resolventes someten a prueba cada avance relativamente importante hacia la solución y es, de este modo, que consiguen salvar los errores procedimentales e incluso algunos de tipo conceptual. Dicho resultado, que aparece con toda claridad en el análisis de los correspondientes protocolos verbales, constituye, de hecho, una predicción derivada de la característica g) del comportamiento de los expertos.
- e) Los alumnos buenos resolventes efectúan, con bastante frecuencia, algún tipo de evaluación de los resultados. Dicha característica puede considerarse como el punto final de esa tendencia autocorrectiva ya señalada y se corresponde, asimismo, con la predicción relativa a la característica h) del comportamiento de los expertos anteriormente señalada.
- f) Las predicciones derivadas de las características c) y e) del comportamiento de los expertos resultan también validadas por los datos observacionales, aunque de una manera menos evidente que las anteriores. Así, y aun cuando los buenos resolventes trabajaron, por lo general, de los datos hacia las incógnitas en los problemas considerados en la ya referida investigación, también lo hicieron los malos resolventes. Sin embargo, hemos de señalar que tampoco es ésta una de las notas más consistentes del comportamiento de los expertos, ya que cuando los problemas se complican también ellos trabajan hacia atrás, esto es, de las incógnitas hacia los datos (Larkin et al,1980). Por otra parte, la existencia de principios generales en el razonamiento estuvo presente tanto en los buenos como en los malos resolventes, aun cuando las diferencias estribaron en la utilización que hicieron de ellos, en la riqueza semántica de tales principios en la memoria del estudiante y en el conocimiento preciso tanto de sus condiciones de aplicabilidad como de las reglas de uso de los conceptos implicados.

La relación existente entre nuestra investigación y las investigaciones expertos/novatos anteriormente descritas no se reduce simplemente a una cierta continuidad metodológica sino que, cuando se consideran globalmente los resultados de ambas, emerge de dicho análisis conjunto una coherencia que, por su trascendencia, nos proponemos destacar.

Las características de los expertos -transformadas en nuestra investigación, en predicciones respecto del comportamiento de los estudiantes buenos resolventes- corresponden, básicamente, a una síntesis de los resultados no refutados en los estudios expertos/novatos disponibles. Pero es más, cuando se analiza la ambiciosa investigación de Chi et al (1982) y se compara, en términos de resultados, con la nuestra se observa una concordancia francamente amplia; hasta el punto de poderse afirmar que nuestros resultados replican, básicamente, los correspondientes suyos sino fuera por esa restricción, importante desde un punto de vista fundamental, de la dimensión **expertos/novatos** al segmento alumnos **buenos resolventes/** alumnos **malos resolventes**, que distingue nuestro enfoque.

Así, Chi et al (1982) no encuentran diferencias sistemáticas entre expertos y novatos en lo que respecta al número de ecuaciones generadas; tampoco las hallamos nosotros entre alumnos buenos y malos resolventes. Observan que los novatos también efectúan análisis cualitativos iniciales; nosotros también. Señalan que el análisis cualitativo se lleva a cabo, con frecuencia, a lo largo del proceso de resolución, análogamente a lo observado por nosotros y que nos ha llevado a identificar la representación como un proceso dilatado de construcción ideacional. No observan diferencias entre ambos grupos en lo que respecta al conocimiento superficial pero sí en lo relativo al conocimiento profundo que incluye principios, procedimientos y reglas de aplicación; nosotros tampoco observamos diferencias en lo que respecta a los aspectos generales del conocimiento pero sí en lo que concierne a los aspectos finos de la estructura cognitiva, a la riqueza semántica de sus componentes y a su nivel de especificidad, lo cual se traduce en la producción de un mayor número de inferencias que se articulan en procedimientos de resolución efectivos. Precisamente este tipo de observaciones nos ha llevado a postular la *especificidad* como característica fundamental de las representaciones eficaces.

Yendo aún más lejos, algunas diferencias expertos/novatos presentadas por tales investigadores podrían desdibujarse si se pasa a considerar los novatos más competentes en lugar de los menos competentes. Así, por ejemplo, cuando se analizan los resultados y las condiciones del estudio 5 de Chi *et al*, (1982) en el que se denuncian las carencias que presentan los sujetos novatos en su conocimiento fundamental de los principios de la física, se observa que los novatos empleados en dicho estudio fueron estudiantes de nivel B, es decir, menos competentes. Algo semejante sucede en el estudio 8, en el que se sitúa el origen de las dificultades de los novatos en su limitada capacidad para generar inferencias y relaciones que no están establecidas explícitamente en el enunciado; también en este estudio los novatos fueron estudiantes de nivel B.

Aunque de forma no todo lo explícita que sería necesario, la ambigüedad en la diferenciación expertos/novatos frente a la más operativa, e incluso interesante, de buenos y malos resolventes es insinuada, esporádicamente, por los referidos investigadores en diferentes momentos del artículo. Así en la pag. 62 se puede leer: "*Los estudios previos han sugerido que los novatos, en general, tienen un conocimiento que es deficiente en una variedad de aspectos (quizás con la excepción de los estudiantes A)*". Un poco antes en la pag. 54, afirman: ..."*Una tercera deficiencia en la base de conocimientos de los novatos, al menos para los estudiantes B,....*"

Así, pues, aun cuando no podemos afirmar, en sentido estricto, que este tipo de resultados repliquen los correspondientes nuestros, confirman, desde luego, nuestra perspectiva, la hipótesis más general de nuestra investigación y validan, en cierta medida, el principio teórico que las sustenta, que no es otro que un principio de invariancia para el aprendizaje científico.

Algunas consecuencias primeras

La validación empírica del principio de invariancia nos permite avanzar en un sentido epistemológicamente descendente en busca de orientaciones de la práctica docente asimismo contrastables. Para conseguirlo cabe entonces apelar a la condición del científico como sujeto de aprendizaje, analizar las características que hacen del suyo un tipo de aprendizaje eficaz, que transforma y enriquece su conocimiento y lo dota de los atributos que se manifiestan, pos-

teriormente, en un pensamiento creador para, a continuación, apelando al referido principio de invariancia, trasponerlas al ámbito de la enseñanza y del aprendizaje científicos en el nivel de los estudiantes.

Una reorientación semejante en la fuente de inspiración de la investigación sobre didáctica de la física, en particular, y de las ciencias, en general, puede derivarse, asimismo, de un análisis crítico de una de las alternativas más manejada, que consiste en considerar la historia de la ciencia como una fuente de inspiración para analizar la evolución conceptual del individuo en formación. Aun cuando se trata de una perspectiva teórica fuertemente implantada en la correspondiente comunidad científica, algunos autores han llamado la atención sobre las limitaciones de dicho paralelismo a la hora de dar cuenta de algunas de las observaciones empíricas en el ámbito de la didáctica de las ciencias (Marín et al, 1992) y aún otros, han llegado a afirmar que el *"paralelismo entre el cambio histórico de la ciencia y el cambio en la organización de los conceptos en el individuo puede ser menos adecuado y menos esclarecedor de lo que se ha considerado hasta ahora"* (Stenhouse, 1986).

Al margen de su indudable atractivo en el orden estético -se trataría en fin de cuentas de la formulación de otro principio de invariancia- semejante principio de análisis presenta, entre otros, algunos problemas de ajuste o de inadecuación. En primer lugar se trata de conjugar una perspectiva de cambio social, reflejada en la interpretación histórica, con una perspectiva de cambio individual propia del aprendizaje científico. La complejidad real del primer proceso y de las variables intervinientes hace imprescindible el introducir simplificaciones que posibiliten el acoplamiento de ambas perspectivas, aún a costa de desvirtuar los términos de la comparación. Pero, además, tales simplificaciones se hacen efectivas en la interpretación particular de una corriente historiográfica determinada y, al final, la "concordancia observada" se puede situar en un nivel fuertemente mediado, entre una interpretación de la historia de la ciencia y una interpretación del aprendizaje científico. Inversamente, una falta de acuerdo entre las características del aprendizaje de un concepto científico y la evolución histórica del concepto correspondiente podría ser perfectamente atribuible a una inadecuada interpretación histórica. Los resultados de la comparación, por uno u otro motivo, corren el riesgo, nada despreciable, de

ir acompañados de una relativa precariedad en la validez de las conclusiones.

Parece entonces más coherente reducir la dimensión del referente a la escala individual y establecer, por tanto, la comparación de individuo a individuo. Esta novedad en el enfoque del problema de la inspiración de la didáctica de las ciencias ha sido aportada, en cierto sentido, por la relativamente reciente orientación del estudio del comportamiento de los expertos frente al de los novatos, tanto en la resolución de problemas correspondientes a dominios de contenido ricos semánticamente, como a contextos referidos estrictamente al aprendizaje de disciplinas científicas. Sin embargo, y junto a las críticas más arriba referidas en cuanto a la oportunidad de una tal distinción, una limitación importante de los estudios expertos/novatos estriba en el hecho de fijar exclusivamente la atención en el comportamiento del experto correspondiente a estadios finales de su formación, analizando las características del conocimiento acumulado y prescindiendo de esa riqueza propia de la dimensión histórica o de cambio con el tiempo. Dicha dimensión temporal constituye el eje del aprendizaje como fenómeno constructivo y podría aportar información valiosa para mejor comprender dicho fenómeno referido, en nuestro caso, a un contexto escolar.

La inspiración que se deriva de esa metáfora del *científico como estudiante* retiene, por tanto, lo mejor de los dos enfoques anteriores, a saber, el interés por las características del pensamiento del científico individualmente considerado, compartida por la orientación correspondiente a los estudios expertos/novatos, y la importancia de poner el acento en la dimensión temporal que es característica de la inspiración historicista del aprendizaje científico.

El interés manifestado por historiadores, psicólogos y científicos (Miller, 1984; Holton, 1981) por la identificación de las características del pensamiento creador mediante el estudio de casos referidos a las biografías de científicos destacados se orienta en un sentido semejante. En tales estudios la "historia individual" de la ciencia es usada, o cuando menos aportada, en calidad de laboratorio para la psicología cognitiva. No obstante, en nuestro enfoque la conexión de aquella con el aprendizaje científico resulta explícita y si cabe más relevante.

6

LA COMPLEJIDAD DE LO ELEMENTAL EN EL APRENDIZAJE DE LOS CONCEPTOS CIENTIFICOS

SOBRE EL CONCEPTO DE CONCEPTO

La aproximación a la idea de concepto constituye una operación intelectual cuya utilidad va más allá de la que corresponde a una mera introducción de un capítulo que va a abordar lo concerniente a la complejidad de los conceptos científicos; y es que en este análisis recursivo sobre el concepto de concepto nos toparemos irremisiblemente, aunque a un nivel relativamente general, con algunos de los problemas característicos del análisis de un concepto científico.

Cuando se trata de hacer una aproximación relativamente superficial -aunque no por ello exenta de rigor- a la noción de concepto, no hay mayor problema en aceptar que estamos ante elementos fundamentales de pensamiento y de significado; dicha noción es utilizada en un sentido amplio como sinónimo de idea; los conceptos constituyen, pues, la "sustancia" de nuestro pensamiento, aquello con lo que nuestra mente trabaja; sin conceptos la vida mental sería verdaderamente caótica. Sin embargo, cuando se trata de aportar una definición que contenga un contenido semántico más preciso aparecen notables discrepancias entre los expertos y es que, como sucede con la mayor parte de los conceptos científicos, el concepto de concepto constituye una entidad cognitiva semánticamente compleja que se asemeja más a una configuración dinámica y polifacética que a un objeto estático y lineal. La posición intelectual, o disciplinar, del "observador" condicionará, por tanto, la visión de dicha configuración que, además, *estará sujeta a los cambios* asociados al progreso del conocimiento relativo al correspondiente dominio temático.

Para aproximarse al concepto de concepto los expertos hacen referencia, con frecuencia, a dos términos que ayudan a acotar su significado, a saber *instancias* y *atributos*. La *instancia* de un concepto constituye un ejemplo de dicho concepto; un objeto material o formal que lo ejemplifica. Las instancias se clasifican en *perceptivas* y *no perceptivas*, según sean o no accesibles sensorialmente. Por su parte, los *atributos* vienen a ser los rasgos o propiedades del concepto que colectivamente lo definen o caracterizan. Se suelen clasificar en *críticos* y *variables*. Un *atributo crítico* (o atributo relevante) es aquel que define al concepto; los atributos críticos contribuyen al conjunto de características comunes que son compartidas por todas las instancias o ejemplos del concepto. Un *atributo variable* (o atributo irrelevante) es un atributo que puede estar presente en un ejemplo del concepto pero no en otro, o incluso puede ser compartido por un ejemplo y un no-ejemplo. Al igual que las instancias de un concepto los atributos pueden clasificarse en *perceptivos* y *no perceptivos*.

Aun cuando más adelante tendremos oportunidad de incidir en las principales visiones de la idea de concepto, el carácter polifacético -desde el punto de vista de su significado- del término concepto queda reflejado en la aproximación de White (1979) quien, de una manera escueta, establece cuatro significados diferentes para dicho término, a saber:

a) **Concepto como capacidad de clasificar.** Según Gagné (1977) poseer un concepto equivale a disponer de la capacidad para clasificar instancias del concepto en ejemplos y no ejemplos. La posesión de un concepto se manifestaría, pues, en destrezas para el reconocimiento de dicho concepto.

b) **Concepto como capacidad de ejemplificar.** Versión ligeramente diferente de la anterior que identifica el concepto con aquello que se requiere para producir instancias, para generar ejemplos del concepto.

c) **Concepto como conocimiento proposicional.** Más que destrezas de clasificación o de ejemplificación la idea de concepto se corresponde con la de conocimiento proposicional asociado a una definición dada.

d) **Concepto como una organización compleja** en la que se incluyen proposiciones, destrezas, imágenes y episodios.

De acuerdo con esta acepción alguien que posea el concepto de energía deberá conocer muchos hechos sobre él; será capaz de presentar instancias del concepto, estará en condiciones de resolver problemas que lo incluyan y, finalmente, deberá ser capaz de compartir una buena parte de su conocimiento sobre él con otros.

Con frecuencia, las definiciones de concepto que se aportan son de tipo operacional y no de tipo constitutivo. En tales casos se indica en qué se manifiesta o cómo es posible reconocer la posesión, por parte de un sujeto, de un concepto dado pero no se establece un enunciado descriptivo que lo relacione con otras nociones conocidas. Esta circunstancia -asociada sin duda a la cuota de carácter primario que en este caso el concepto en juego posee- se ha manifestado en otros intentos de definir la noción de concepto. Así Klausmeier y colaboradores (Klausmeier et al, 1974) formulan su concepto de concepto especificando una colección de atributos y valores que son compartidos por muchos conceptos de diferentes disciplinas; en suma, los referidos autores aplican, a la definición formal del término "concepto", los resultados del análisis conceptual (Flavell, 1970) -que apuntan a la utilidad de identificar los atributos críticos y los atributos variables como un procedimiento para clarificar el significado de un concepto dado- identificando ocho atributos fundamentales del concepto correspondiente, a saber, facilidad de ser aprendido ("learnability"), capacidad de ser usado ("usability"), validez, generalidad, potencia, estructura, perceptibilidad de las instancias o ejemplos y número de instancias.

La facilidad de un concepto para ser aprendido varía de unos conceptos a otros en función, por ejemplo, del grado de perceptibilidad de sus instancias. Los conceptos con instancias perceptibles se aprenden más fácilmente que aquéllos otros con instancias no perceptibles. El referido atributo depende, asimismo, de las experiencias previas del sujeto con el concepto y de la edad, considerada ésta no como un mero dato cronológico sino como el producto del aprendizaje y de la maduración intelectual.

La capacidad de un concepto para ser usado depende del nivel al cual el concepto es aprendido. Así, un concepto asimilado al nivel formal permite al individuo:

- Extender el concepto a nuevas instancias y distinguir instancias de no instancias.
- Reconocer las relaciones entre el concepto considerado y otros relacionados con él jerárquica o taxonómicamente.
- Reconocer conexiones de tipo probabilístico, correlacional, o de causa-efecto entre el concepto en cuestión y otros próximos.
- Resolver problemas que implican el uso del concepto.

La *validez* de un concepto hace referencia al grado de acuerdo existente entre los expertos en relación con su definición. Según este punto de vista, los conceptos de las ciencias físicas tendrían un mayor grado de validez que los de las ciencias sociales. Por otra parte, el aprendizaje de un concepto dado aumentaría su validez en la medida que aproximaría su significado al de los expertos.

El nivel de *generalidad* de un concepto está definido por su posición en el sistema jerárquico o taxonómico al que dicho concepto pertenece. Los conceptos situados en posición más elevada en la correspondiente taxonomía poseen menor número de atributos críticos y son, por tanto, más generales. La *potencia* conceptual es un atributo relacionado con la importancia del concepto para facilitar el aprendizaje de otros conceptos con él relacionados. Un concepto que sea esencial para asimilar otros conceptos será más potente que cualquiera de ellos. La *estructura* de un concepto concierne a las relaciones internas que mantienen entre sí sus atributos críticos. La *perceptibilidad de las instancias* hace referencia a la medida en la que los ejemplos del concepto pueden ser aprendidos mediante los sentidos, es decir, manipulados, vistos, oídos, etc... Y, finalmente, el *número de instancias* expresa, en forma cuantitativa, la extensión del concepto en la memoria del sujeto.

Otro ejemplo de la pluralidad de modalidades de concepto -más próximo esta vez, al ámbito de las ciencias- y cuya diferenciación puede ser útil en las tareas propias del análisis conceptual, lo constituye la clasificación introducida por Herron *et al.*, (1977) a propósito, particularmente, de los conceptos en química. Dichos autores establecen ocho categorías diferentes de conceptos:

- conceptos con numerosas instancias perceptibles (*espectroscopio*)

- conceptos con instancias no perceptibles (*átomo*)
- conceptos con atributos críticos no perceptibles (*elementos químicos*)
- conceptos que requieren conocimientos de principios (*mol*)
- conceptos que implican representaciones simbólicas (*símbolo químico*)
- conceptos que designan procesos (*destilación, oxidación, electrolisis*)
- conceptos que designan atributos o propiedades (*masa, carga eléctrica*)
- conceptos que describen atributos o propiedades (*molaridad, pH*)

De otro lado, y desde una óptica estrictamente psicológica, E.E. Smith y D.L. Medin (1981) describen tres visiones diferentes de la noción de concepto, a saber, *la visión clásica, la visión probabilística y la visión por ejemplares*, que resumiremos en lo que sigue.

i) La visión clásica

Se remonta a Aristóteles y sostiene que todas las instancias o ejemplos de un concepto comparten propiedades comunes y que dichas propiedades comunes constituyen la condición necesaria y suficiente para definir el concepto. Para ilustrar dicha visión los referidos autores aportan como ejemplo el análisis del concepto geométrico de *cuadrado*. Dicho concepto es, en general, representado mediante cuatro propiedades: figura cerrada, con cuatro lados, iguales en longitud y con sus cuatro ángulos iguales. Estas cuatro propiedades proporcionan una descripción unitaria del concepto "cuadrado", es decir, constituyen aquellas propiedades que cualquier cuadrado debe necesariamente poseer. Disponer, por tanto, de un concepto equivale, según la visión clásica, a tener una descripción unitaria de todos los miembros de la clase especificando las propiedades que cada miembro debe tener.

ii) La visión probabilística

A diferencia de la visión clásica -en la cual todas las instancias de un concepto comparten un conjunto bien definido de propiedades o atributos críticos (descripción unitaria)- en la llamada visión

probabilística, algunas instancias o ejemplos de la clase poseen más propiedades críticas que otros, pudiendo aquéllos ser considerados más representativos del concepto en cuestión. Considérese, por ejemplo, el concepto de taza. Dicho concepto puede definirse tomando como base las siguientes propiedades: objeto cóncavo, que puede contener líquidos, que tiene un asa, y que puede ser empleado para beber líquidos calientes. Estas cinco propiedades parecen ofrecer una descripción unitaria del concepto *taza*. Sin embargo, tal descripción es aplicable a algunas tazas pero no a otras. Así, por ejemplo, las tazas que se emplean en los restaurantes chinos carecen de asas. Una taza fabricada con unos materiales inapropiados sigue siendo una taza aunque sus escasas propiedades como aislante térmico no permitan utilizarla como recipiente adecuado para tomar bebidas calientes. Por otra parte, si se eliminan las dos últimas propiedades del concepto *taza* se desvanece la especificidad de la descripción ya que otros objetos, como los boles, podrían igualmente adscribirse a la clase correspondiente.

Por tal motivo, algunos autores (Labov, 1973) introducen la visión probabilística de concepto, como una de las alternativas a la visión clásica. En tal caso la representación de un concepto no puede quedar restringida a un conjunto bien definido de atributos necesarios y suficientes, sino más bien es una especie de medida de la tendencia central que presentan las propiedades de las diferentes instancias del concepto.

iii) La visión por ejemplares

La segunda alternativa a la visión clásica la constituye la llamada visión por ejemplares. Tal conceptualización de la noción de concepto renuncia a una descripción unitaria para aceptar como válida la aproximación al concepto que ofrecen las descripciones de diferentes miembros de la clase, esto es, de diferentes ejemplares. En suma, los conceptos estarían representados por sus ejemplares más que por un resumen abstracto de propiedades. Tvesky y Kahneman (1973) plantean el siguiente ejemplo ilustrativo de la necesidad de introducir esta tercera visión de concepto. Considérese la clase de todos los pacientes psiquiátricos que presentan tendencias suicidas; analizando la forma de trabajar de los psiquiatras clínicos se aprecia que ellos no proceden definiendo una descrip-

ción unitaria, tal y como correspondería a la visión clásica, ni tan siquiera estableciendo una adscripción del paciente a la correspondiente clase en términos probabilísticos. La clase de personas con tendencias suicidas no puede acogerse a una única descripción, sino más bien a descripciones separadas que corresponden a diferentes pacientes o grupos de pacientes (ejemplares) que son considerados como miembros de la referida clase.

En resumen, la identificación de las tres diferentes visiones de conceptos anteriormente descritas puede efectuarse, según Smith y Medin, sobre la base de las respuestas obtenidas a las dos preguntas siguientes: a) ¿Existe una descripción o representación unitaria del concepto?. b) En caso afirmativo, las propiedades o atributos contenidos en la referida descripción, ¿son válidas para todos los miembros de la clase?. La respuesta negativa a la primera cuestión identifica la *visión por ejemplares*; la respuesta positiva a la primera pregunta y negativa a la segunda caracteriza la *visión probabilística* y la contestación positiva a ambas determina la llamada *visión clásica* (fig. 6.1).



Fig. 6.1 - Esquema clasificatorio adaptado de Smith et al (1981) que relaciona las tres visiones o aproximaciones a la noción de concepto consideradas en el texto en función de sus propiedades fundamentales.

LOS CONCEPTOS CIENTIFICOS

La ilusión de la simplicidad

Vinculada con la llamada visión clásica aparece, con frecuencia, la consideración de los conceptos considerados como una especie de "átomos lógicos", de unidades elementales de cognición (White, 1979; Markosa, 1982), que se integran en una organización jerárquica del conocimiento la cual puede ser descompuesta en pequeñas partes y estudiadas independientemente, si bien respetando un cierto orden definido por la naturaleza de la correspondiente jerarquía conceptual. Dicha visión atomista y cartesiana -que evoca indudablemente una cierta conexión con los modelos de aprendizaje de Ausubel (1968) y Gagné (1970), entre otros viene a identificar el sistema de conocimiento público, y por tanto intersubjetivo, con una especie de "cristal" (Piatelli-Palmarini, 1980) que correspondería a una estructura cognitiva de carácter lógico, fundamentalmente estática, de la cual el conocimiento privado o intrapersonal sería una parte (Gilbert et al, 1983). Como ha señalado Pines (1985), en ocasiones las definiciones de carácter estipulativo de algunos conceptos científicos pueden dar la falsa imagen de que los conceptos son efectivamente unidades elementales.

Consideremos como ejemplo el concepto de energía. La forma habitual de introducir dicho concepto en un curso de física general consiste en una definición de carácter estipulativo que lo identifica con la *capacidad para producir un trabajo*; con bastante frecuencia el concepto de trabajo que dicha definición evoca en la mente de los alumnos se corresponde con la noción vulgar asociada a la idea de esfuerzo muscular (López Rupérez et al, 1983). Estamos ante un caso en el que el *significado interno* de un concepto científico es sustituido, sutilmente por su *significado externo*, generando la ilusión de que la energía constituye un concepto cuya definición es independiente de la de otros conceptos científicos.

Algo similar podría decirse de la primera definición Newtoniana de masa que aparece en los *Principia* y que la presenta como *cantidad de materia*; en este caso, el concepto de materia parece ser considerado como un concepto descrito por su significado externo, significado que hace posible una representación de dicho concepto el cual, por su falta de conexión con otros de igual naturaleza, se

torna en *concepto primitivo*. En lo que sigue, abordaremos desde tres perspectivas diferenciadas la cuestión de la complejidad de los conceptos científicos.

i) Su carácter esencialmente relacional

Frente a ese enfoque atomístico al que se acaba de aludir, cabe destacar el carácter esencialmente relacional de los conceptos científicos. Cada concepto físico es lo que es porque otros muchos conceptos existen a la vez implicados, junto con el anterior, en una amplia malla de relaciones.

Hempel (1981) utiliza una metáfora que ilustra algunos de los aspectos de ese enfoque relacional de los conceptos científicos:

"La sistematización científica requiere el establecimiento de diversas conexiones mediante leyes o principios teóricos, entre diferentes aspectos del mundo empírico que son caracterizados por conceptos científicos. De este modo los conceptos de la ciencia son los nudos de una red de interrelaciones sistemáticas en los que las leyes y los principios teóricos forman los hilos" (p. 138-139).

No se trata de interpretar, en este caso, la metáfora anterior -usada con frecuencia por otros autores (Pines, 1985; Brown, 1981)- desde una perspectiva clásica atribuyendo a los nudos una entidad propia, como si se tratara de esferas en un modelo de red cristalina, sino más bien de aceptar que el concepto científico constituye un artefacto de la relación, una especie de condensación de todas las relaciones que en él se entrecruzan.

La adopción de semejante visión de los conceptos científicos resulta perfectamente coherente con esa nota de carácter holístico que, de mano de la mecánica cuántica, se ha introducido en el pensamiento científico contemporáneo. David Bohm, en su texto ya clásico *Quantum Theory* (Bohm, 1951), abunda en semejante analogía en los siguientes términos:

"Parte del significado de cada elemento de un proceso de pensamiento aparece originarse en su indivisible e incompletamente controlable conexión con otros elementos. Similarmente algunas de las propiedades características de un sistema cuántico (por ejem-

plo la naturaleza ondulatoria o corpuscular) depende de indivisibles e incompletamente controlables conexiones cuánticas con los objetos que le rodean. Así, los procesos de pensamiento y los sistemas cuánticos son análogos en que no pueden ser analizados en demasía en términos de elementos diferentes, porque la naturaleza intrínseca de cada elemento no es, una propiedad existente separadamente de otros elementos e independientemente de ellos sino que es, en cambio, una propiedad que nace parcialmente de sus relaciones con otros elementos. En ambos casos un análisis en diferentes elementos es correcto sólo si su nivel de aproximación no supone una alteración de las diferentes partes indivisibles conectadas que podrían resultar de aquél".

Y refiriéndose de nuevo al proceso de pensamiento añade:

"Un intento de analizarlo en partes separadas destruye o cambia su significado. Con todo existen ciertos tipos de conceptos, entre los que se encuentran aquellos que implican la clasificación de objetos, para los cuales es posible, sin producir ningún cambio esencial, despreciar la indivisible e incompletamente controlable conexión con otras ideas" (p.169-170).

Insistiendo en algunas de las consecuencias prácticas de la referida analogía descrita en el texto anterior, y coherentemente con el enfoque general del presente trabajo, cabría destacar -con vistas a su empleo posterior- la relación existente entre la naturaleza de los conceptos y el nivel de aproximación desde el que nos acerquemos a ellos. A un nivel de aproximación semánticamente macroscópica los conceptos pueden aparecer, o ser presentados, con el aspecto de "átomos lógicos" o unidades elementales de significado, pero cuando descendemos a una aproximación microscópica, o de mayor nivel de detalle semántico, la anterior concepción se desvanece y la simplicidad de los conceptos científicos deviene una ilusión.

ii) Los matices de un concepto: su estructura fina

Recurriendo a un símil, un concepto científico podría compararse con una gema tallada que presenta múltiples caras o facetas bien diferenciadas para aquel observador que desde una posición suficientemente próxima la contempla. El carácter frecuentemente polifacético de los conceptos científicos es una consecuencia -en todo o en parte, según los casos- de su naturaleza relacional. Ese

conjunto variado de matices, propiedades o atributos que se le hace explícito al experto tras un análisis detallado e intencional del concepto, constituye, en parte, lo que hemos denominado su *estructura fina*.

Considérese, a modo de ejemplo, la segunda ley de Newton expresada en la forma $F = ma$. En una aproximación superficial, o de bajo nivel de detalle, F constituye una fuerza, asociada -por referencia a su significado relativamente externo- con la idea de agente capaz de producir una deformación, m designa la masa entendida como cantidad de materia y a es la aceleración en tanto que rapidez de segundo orden, es decir, rapidez con la que varía una rapidez. Realmente esta aproximación poco diferenciada de los conceptos en juego resulta escasamente operativa salvo en ejemplos triviales propios de una aproximación francamente elemental. Aun cuando la representación de los conceptos implicados pueda resultar de este modo más asequible, por estar aquéllos conectados con su significado externo- con referencias claras a lo perceptivo- dicha representación dispondrá de un nivel relativamente bajo de riqueza semántica y la ley correspondiente será asimilada con un carácter básicamente descriptivo.

Si se efectúa un análisis más fino de cada uno de los conceptos en juego nos encontraremos con el siguiente panorama:

Fuerza F

F es una magnitud vectorial que lleva por tanto implícita la propiedad de la superposición que presentan este tipo de magnitudes. En definitiva, F representa la suma vectorial de todas las fuerzas que actúan sobre el cuerpo en cuestión. En el caso habitual de la mecánica de un cuerpo que se desliza por un plano F ha de incluir, cuando menos, la fuerza del peso P , la reacción R del plano y las fuerzas de rozamiento F_{roz} y de tensión T , si las hubiere. Se abre, por tanto, una especie de muñeca rusa en el seno de la cual aparece una complejidad probablemente inesperada para el estudiante. Así, $P = mg$ es una fuerza vertical; F_{roz} está relacionada con la normal N mediante la ecuación $F_{roz} = \mu N$, donde N es el módulo de la componente normal al plano de la resultante de todas las fuerzas que actúan sobre el cuerpo, exceptuando la reacción R , -que es preciso calcular- y μ es el coeficiente de rozamiento. Además, la anterior

ecuación empírica es de naturaleza escalar resolviendo, por tanto, únicamente lo relativo al módulo de \mathbf{F}_{roz} ; en lo que concierne a la dirección y sentido hay que saber que \mathbf{F}_{roz} es una fuerza resistente que tiene por dirección la del movimiento y por sentido el contrario. \mathbf{R} es la reacción del plano que equilibra la componente normal \mathbf{N} de la resultante \mathbf{F} , estando por tanto definida en la forma $\mathbf{R} = -\mathbf{N}$. Finalmente, \mathbf{T} es la tensión de la cuerda, si la hubiere, es decir, la fuerza que se habría de ejercer sobre el cuerpo para que, suponiendo que diéramos un corte a la cuerda, éste se siguiera moviendo con igual aceleración.

Aun cuando, por razones obvias, carece de sentido seguir por menorizando aquí elementos más finos de significado del concepto de fuerza que se esconden en la segunda ley de Newton, es sabido que tras el símbolo \mathbf{F} efectivamente existen, de modo que las definiciones, aclaraciones o descripciones anteriormente introducidas no permitirían, por sí solas, resolver un problema práctico de mediano nivel de dificultad. No obstante, cabe señalar un atributo del concepto de fuerza que surge, en primera instancia, de la relación existente entre \mathbf{F} y \mathbf{a} , a saber, el carácter paralelo de ambos vectores; habida cuenta de la relación entre \mathbf{a} y \mathbf{v} dicho atributo de \mathbf{F} equivale al carácter, en general, no paralelo de \mathbf{F} y \mathbf{v} o, lo que es lo mismo, de \mathbf{F} y de la dirección del movimiento.

Aceleración \mathbf{a}

El concepto de aceleración, expresado en forma operacional como $\mathbf{a} = d\mathbf{v}/dt$, nos remite al concepto de vector velocidad como función vectorial dependiente de un parámetro t y al de su derivada. Se entremezclan aquí, como es característico de toda la física, conceptos físicos y operaciones matemáticas introduciendo nuevas dimensiones en el significado de los conceptos. Así, la anterior expresión, más allá de su aparente simplicidad conceptual en tanto que rapidez con la que varía el vector velocidad \mathbf{v} , contiene un nivel de significado elevado. El vector velocidad es un vector tangente a la trayectoria que tiene, por tal motivo, la misma dirección y sentido que el movimiento. Ello se expresa en la forma $\mathbf{v} = v\mathbf{u}_T$, siendo v el módulo de \mathbf{v} y \mathbf{u}_T un vector unitario tangente a la trayectoria. Estamos aquí ante la expresión de una doble información, una de carácter escalar puro contenida en v , y otro de carácter vec-

torial "puro" (módulo unidad) contenida en \mathbf{u}_T . El concepto de aceleración \mathbf{a} alberga, pues, en su interior una mezcla de información sobre la variación con el tiempo del vector velocidad considerado en su aspecto escalar y también en su aspecto direccional; ignorar alguno de ellos conduce a errores conceptuales frecuentemente detectados. Las oportunas operaciones matemáticas permiten expresar lo anterior en términos de componentes intrínsecas en la forma conocida:

$$\mathbf{a} = \frac{dv}{dt} \mathbf{u}_T + \frac{v^2}{\rho} \mathbf{u}_N$$

donde otro montón de nuevos conceptos, tales como derivada del módulo de \mathbf{v} , radio de curvatura ρ o vector unitario \mathbf{u}_N normal a la trayectoria, aparecen simultáneamente.

Masa m

m es una magnitud escalar que aparece en la segunda ley de Newton como una constante de proporcionalidad entre fuerza y aceleración. Se trata, consiguientemente, de un concepto cuyo carácter relacional resulta inmediato. Así, la definición descriptiva de masa como una medida de la inercia -u oposición que presentan los cuerpos a ser acelerados- se deriva de una interpretación de la segunda ley; los conceptos de fuerza y aceleración, con toda su complejidad, entran a formar parte en un nivel de comprensión no superficial, semánticamente hablando, del concepto de masa. Por otra parte, el carácter aditivo de la masa en tanto que magnitud escalar supone el interpretar m como la masa de todo aquello que está afectado de la misma aceleración \mathbf{a} por efecto de la fuerza neta \mathbf{F} .

En resumen, la conceptualización de la realidad física, admite diferentes niveles de aproximación a través de los cuales la dimensión de profundidad y la dimensión de complejidad van convergiendo en el sentido de una riqueza semántica creciente. Ese conjunto de matices, propiedades o atributos de un concepto físico, definidos a un nivel relativamente profundo de significado, nos remiten a la *estructura fina* del concepto.

iii) Aplicabilidad de los conceptos y reglas de uso

La dimensión de aplicabilidad constituye un lugar común en la caracterización de los conceptos científicos. La idea, expresada por Wittgenstein, de que comprender un concepto equivale a conocer sus reglas de uso -no en el sentido de establecer una lista exhaustiva de ellas sino en el de ser capaz de aplicarlas correctamente- viene a poner el acento, precisamente, en esa dimensión esencial de los conceptos científicos.

Di Sessa (1979), en este mismo orden de ideas, señala lo siguiente:

"Considérese la comprensión que un experto puede tener de la física, por ejemplo. Pregúntesele por un concepto y obsérvese la forma de su respuesta. El paradigma es que genera una situación en la cual se puede observar la acción del concepto, o genera un proceso que involucra al concepto... Del mismo modo, nuestro experto raramente contesta en términos formales; ni explica de dónde se puede deducir la idea ni lo qué se consigue de ella por deducción. "Fuerza" se explica con más frecuencia en términos de su función, como la interacción entre partículas que, en caso de ser conocidas, permite calcular el movimiento" (p.243)

El propio Khun ha presentado en diferentes ocasiones una idea próxima según la cual el significado de un concepto, o de una relación conceptual, se genera no a través de su mera descripción verbal sino *"más bien como si se dieran a uno, a la par, las palabras y los ejemplos concretos de cómo funcionan en cada caso. Naturaleza y palabras son aprendidas simultáneamente (Khun,1975a pg. 272)*. Las siguientes referencias del mismo autor desarrollan con algún detalle adicional dicha perspectiva.

"Generalmente -afirma en su "Respuesta a mis críticos" (Khun,1970)- a estas situaciones de problemas se les considera meras aplicaciones de una teoría que ya se ha aprendido. El estudiante las hace para practicar, para adquirir facilidad en el uso de lo que ya conoce. Es indudable que esta descripción es correcta después de que se hayan hecho bastantes problemas, pero no creo que valga nunca para los comienzos. Antes bien, hacer problemas es aprender el lenguaje de una teoría y adquirir el conocimiento de la naturaleza inmerso en ese lenguaje" (p.442). En su **Posdata** (Khun,1969) insiste de nuevo en esta idea: *"Después de que el*

estudiante ha resuelto muchos problemas sólo entonces gana mayor destreza para resolver más. Pero al principio y después de algún tiempo, el resolver problemas es saber cosas consecuentes sobre la naturaleza. En ausencia de tales ejemplares las leyes y la teoría que con anterioridad ha aprendido podrían tener poco contenido empírico" (p.287).

Con bastante frecuencia las reglas de uso de un concepto en física constituyen una especie de conocimiento tácito, anejo al propio concepto y que parece tener que aprenderse únicamente con la experiencia. Aunque volveremos a considerar más adelante esta cuestión, lo cierto es que un esfuerzo de explicitación de dichas reglas de uso resulta imprescindible para economizar tiempo en el proceso de construcción del concepto. Pero no basta con establecer esa lista a la que se refiere Wittgenstein sino que es necesario saberla aplicar; y para poder hacerlo con garantías de éxito debe estar ordenada de modo que sea operativa. Nos situamos entonces ante la necesidad de organizar el conjunto de reglas de uso de un concepto, o de una ley, en una secuencia de etapas, o algoritmo, que nos garantice la aplicación del concepto o conceptos en un contexto complejo aunque relativamente estandar. Como apunta Khun, al principio y después de algún tiempo el resolver problemas constituye una forma de mejorar la comprensión de los conceptos, después de lo cual el estudiante no sólo estará en condiciones de prescindir del algoritmo explícitamente definido sino que, además, será capaz de emplear todo el conocimiento así compilado en el correspondiente concepto en contextos mucho más abiertos. En tales casos, la resolución de problemas de física supone el manejo de los conceptos, en tanto que unidades complejas de conocimiento, incorporados a la realización de una tarea que requiere un planteamiento personal creativo, una producción divergente por parte del sujeto.

El énfasis en el enfoque algorítmico explícito de las reglas de uso de los conceptos constituye tan sólo un medio de uso limitado y temporal pero, en nuestra opinión, necesario para facilitar el aprendizaje de esa dimensión de la complejidad conceptual más allá de una aproximación descriptiva, semánticamente superficial o de bajo nivel de detalle.

Consideremos, a modo de ejemplo, el concepto de *trabajo mecánico* *W*, dejando por el momento a un lado todo lo relativo a aquellos atributos y reglas de uso del concepto que están relaciona-

dos con su conexión con la noción de energía. Una aproximación al concepto de trabajo de bajo nivel de detalle nos permite introducirlo como el producto de *fuerza* x *desplazamiento*. Sólo si una fuerza desplaza su punto de aplicación podremos hablar de trabajo mecánico. Es claro que, con vistas a su aplicabilidad, el concepto resulta diáfano, pero en el momento que se generaliza para fuerzas variables en la forma

$$W = \int_{\gamma^1}^2 \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r}$$

resulta absolutamente imprescindible para el novato no sólo conocer lo que significa la anterior expresión de W en términos descriptivos sino disponer, además, de una serie de reglas que faciliten su cálculo, reglas que pueden ser del siguiente estilo:

1) *Calcular el producto escalar del integrando*

$$\mathbf{F} \cdot d\mathbf{r} = F_x dx + F_y dy + F_z dz$$

2) *Expresar, en paramétricas, la ecuación de la curva θ que conecta los puntos inicial y final*

$$x = x(t) \quad ; \quad y = y(t) \quad ; \quad z = z(t)$$

3) *A partir de las anteriores ecuaciones obtener las expresiones de las diferenciales correspondientes a las variables x, y, z*

$$dx = x'(t)dt \quad ; \quad dy = y'(t)dt \quad ; \quad dz = z'(t)dt$$

4) *Sustituir las relaciones anteriores en la expresión del trabajo como integral.*

5) *Definir los límites de integración de acuerdo con los valores extremos que tome el parámetro t en los puntos inicial y final.*

6) *Efectuar la integral definida correspondiente.*

La aplicabilidad del concepto constituye, pues, de acuerdo con lo anterior, un elemento imprescindible para una comprensión profunda

del mismo que explica, en parte, su complejidad y contribuye de un modo sustancial a su riqueza semántica. Citando a Bachelard cabe afirmar que *la aplicación es complicación* (Bachelard, 1934), pero una complicación -o si se quiere una complexificación- que resulta ineludible en el aprendizaje y en la propia construcción de los conceptos científicos; *"un concepto se ha tornado científico en la proporción en que se ha tornado técnico, en la medida en que es acompañado por una técnica de realización"* (Bachelard, 1948 p.74).

La ilusión de la estaticidad

Como hemos apuntado más arriba, la "visión clásica" de la noción de concepto apuesta por la idea de simplicidad y, de una forma concomitante, presupone el carácter relativamente estable de los conceptos en tanto que representaciones mentales. Como han señalado Smith y Medin (1981) la *estabilidad* de un concepto puede ser considerada como un atributo intraindividual e interindividual. En el primer caso la idea de estabilidad conceptual hace referencia a una ausencia de evolución o de cambio en la definición del concepto a partir de sus propiedades o atributos; en el segundo se trata de una forma de intersubjetividad que se manifiesta en que una colectividad comparte, en la representación de un concepto dado, un conjunto idéntico de atributos que identifican para cada uno de los miembros de dicha colectividad el mismo concepto.

Por su parte, la idea de *estaticidad* hace referencia más a un sistema conceptual -definido por un conjunto formado por conceptos, en tanto que unidades semánticas simples, y por las correspondientes relaciones entre ellos- que a un concepto aislado. Es claro que ambas nociones -estabilidad y estaticidad conceptuales- sólo pueden ser consideradas como diferentes en el seno de una visión clásica en la que los conceptos mantienen su carácter de unidades básicamente individuales. Desde una visión fundamentalmente relacional de los conceptos no es posible establecer una distinción tan neta entre un concepto y el conjunto de relaciones que mantiene con otros conceptos de un mismo sistema conceptual por lo que las nociones de estabilidad y de estaticidad, tal y como han sido introducidas más arriba, se entremezclan.

En el ámbito del aprendizaje la estabilidad conceptual ha sido destacada por Ausubel cuando afirma que los aspectos básicos del

aprendizaje del nuevo material son la estabilidad, la claridad y la organización previa del conocimiento existente en el sujeto que aprende (Ausubel et al, 1976). En perfecta concordancia con tales planteamientos se halla la asimilación del conocimiento humano a una estructura espacial de tipo euclidiano que puede ser representada en términos gráficos, mediante esquemas bidimensionales o mapas. Aun cuando existe una considerable variedad de este tipo de representaciones (López Rupérez, 1991) son los mapas tipo Novak los más conocidos en el ámbito de la educación científica (Novak et al, 1983, 1984). De hecho, el propio Novak fue de los primeros en emplear la denominación *mapa conceptual* para designar una representación bidimensional y jerárquica de una estructura conceptual. Para Novak, la jerarquización que la elaboración del mapa conceptual conlleva, se inspira en la teoría de Ausubel del aprendizaje significativo, de modo que los conceptos del sistema en cuestión se distribuyen, haciendo explícitas sus relaciones, según un criterio jerárquico de inclusividad conceptual decreciente; los conceptos más generales e inclusivos se sitúan en la parte superior de la representación y sucesivamente se van incorporando los conceptos menos inclusivos en posiciones jerárquicamente más bajas (ver fig. 6.2).

La referencia a una estructura conceptual de carácter estático está presente no sólo en Novak sino en un número importante de investigadores y de trabajos (Preece, 1978; Shavelson, 1972, 1973; Johnson, 1967; Thro, 1978; Kempa et al, 1983; Gussarky et al, 1988). Como hemos señalado en otro lugar (López Rupérez, 1991) el carácter estático de la estructura conceptual que se postula es, en parte, una consecuencia de la inspiración geométrica del modelo. La metáfora de espacio euclidiano que con frecuencia se emplea no hace referencia a la variable tiempo y los métodos que se manejan admiten, en principio, una configuración conceptual fija que puede ser captada y, posteriormente, representada con la ayuda de técnicas en ocasiones fuertemente matematizadas.

Esta imagen estática de la configuración de un sistema conceptual en la mente de un estudiante, o incluso de un científico, sólo puede ser considerada como una aproximación limitada y parcial que ignora el carácter esencialmente dinámico de la cognición a propósito tanto de la creación de conocimiento por parte de los científicos como del aprendizaje, o construcción de significado, por

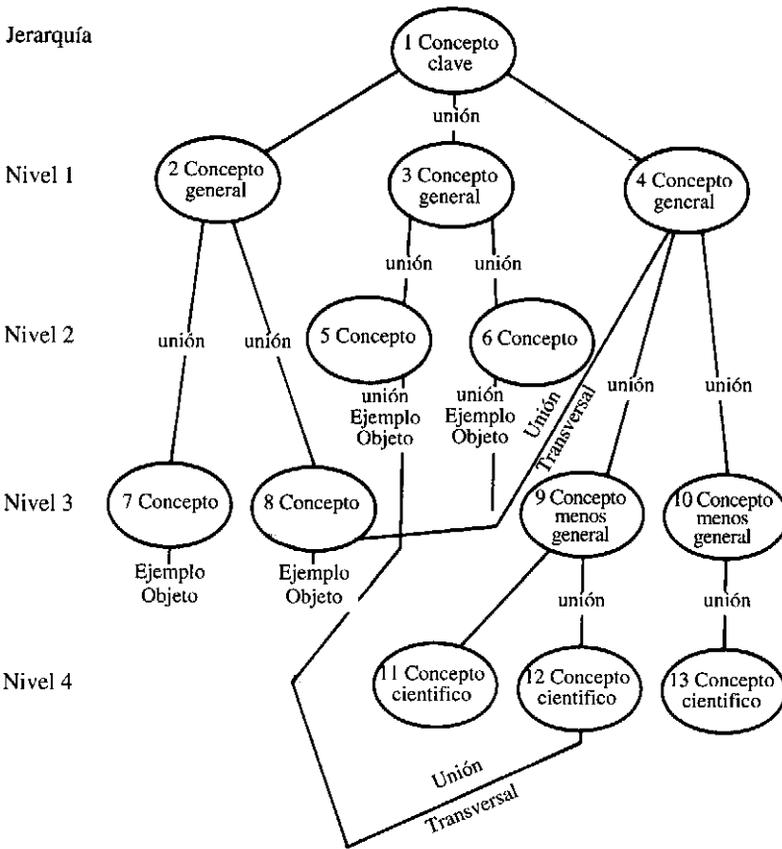


Fig. 6.2 - Representación de un modelo genérico de mapa conceptual tipo Novak (adaptado de Novak et al,1984). En él se señalan sus elementos fundamentales y se destaca su estructura jerárquica.

parte del estudiante. Su validez sólo podría ser aceptada si se hace declaración explícita de sus limitaciones. En primer lugar, se trataría de una especie de "foto fija" que concierne a un momento dado de la historia del correspondiente proceso cognitivo. En segundo lugar, hace referencia únicamente a un aspecto parcial del conocimiento conceptual, esto es, a su dimensión declarativa, ignorándose en ella cualquier alusión al conocimiento procedimental, asociado

al uso y aplicación de los conceptos más allá de su descripción puramente verbal o simbólica. En tercer lugar, corresponde a una aproximación de bajo nivel de detalle, en la que cada elemento conceptual se asemeja más a un "átomo lógico" que a otra cosa. Se ignora, con frecuencia, en este tipo de representaciones la *estructura fina* de cada uno de los conceptos implicados y, quizás precisamente por ello -es decir, por el carácter semánticamente macroscópico de la correspondiente aproximación- la estructura conceptual se muestra como algo relativamente estable en tanto que reflejo de la estructura lógica de la disciplina en cuestión o de una porción de ella. La ilusión de la estaticidad sería entonces una consecuencia, al menos en parte, de la ilusión de la simplicidad, toda vez que los aspectos más dinámicos del conocimiento están relacionados con su dimensión profunda más que su dimensión superficial y es precisamente a un nivel relativamente profundo al que la complejidad de un concepto científico se hace manifiesta.

Ambas formas de percibir los sistemas conceptuales -enfoque atomístico y enfoque estático- han sido alineadas con los supuestos y las preferencias epistemológicas del positivismo lógico (López Rupérez, 1991; Gilbert, 1983). La analogía entre los sistemas conceptuales y los sistemas físicos resulta en este punto ilustrativa. Una estructura cristalina como la del diamante, por ejemplo, aparece al observador, que a un nivel macroscópico capta la globalidad del sistema, como un objeto francamente estable. Cuando la escala de observación se sitúa al nivel de los átomos, si bien la estaticidad desaparece por efecto de la agitación térmica, el cristal en tanto que sistema mantiene una configuración relativamente estable. Sin embargo, un dinamismo radical y a la vez específico se pone en evidencia cuando traspasamos el umbral de lo subatómico; en tal circunstancia dinamismo y complejidad se funden en un solo concepto.

La representación de un sistema conceptual recurriendo a la metáfora consistente en asimilar el conocimiento conceptual a una red -en la que se basan, entre otros, los "*conceptual mappers*"- no es, en principio, incompatible con el carácter evolutivo de los sistemas conceptuales. Brown (1988), aceptando como bueno el referido símil describe la mecánica de la inestabilidad conceptual en los siguientes términos:

"Algunos de los hilos que entran en un nudo particular se eliminan, otros son reorientados y se introducen algunos hilos nuevos.

El concepto conserva algunas de sus antiguas características puesto que algunos de los antiguos hilos han quedado intactos, pero también pierde algunas de las antiguas relaciones y adquiere otras nuevas y de este modo adquiriremos una versión nueva de un viejo concepto".

Aunque el citado filósofo de la ciencia emplea este esquema para interpretar las revoluciones científicas en general y la de la mecánica relativista en particular, lo cierto es que resulta adecuado para interpretar algunas de las claves de la evolución conceptual en el aprendizaje científico.

Los cambios conceptuales, sea en su dimensión "evolutiva", sea en su dimensión "revolucionaria" constituyen, de hecho, la componente central del aprendizaje científico. Sin embargo, el carácter ilusorio de la estaticidad no sólo se pone de manifiesto en el aprendizaje entendido en sentido estricto, sino también en aquellas otras situaciones en las cuales el conocimiento disponible ha de ser utilizado. En tales circunstancias, el conocimiento conceptual se asemeja más a un fluido que modifica su forma, que se adapta a las exigencias del problema, que surge y que se reconstruye ante él, que a una estructura rígida que se aplica o deposita sobre el mundo del problema (López Rupérez, 1991). En el proceso de resolución, el conocimiento aporta una cierta fluidez y el problema exige, además, una cierta especificidad y es por efecto de esa interacción entre conocimiento y problema que aquél se especifica haciéndose posible la construcción de la solución.

Esta orientación del conocimiento como un fluido, y de su comportamiento o especificación ante la resolución de un problema dado, nos recuerda el proceso mecanocuántico de medida (ver capítulo 2); las propiedades de un sistema cuántico constituyen atributos potenciales que se hacen efectivos a causa de la interacción entre el sistema y el correspondiente aparato de medida, interacción que realiza ciertas propiedades de una forma bien definida. Recurriendo de nuevo a la imagen del "pez cuántico" dicho pez constituye una especie de "fluido cuántico", con un grado de densidad variable, antes de ser pescado y resulta materializado en una sola de sus posibles determinaciones en el momento que el "pez" muerde el anzuelo. De un modo semejante el conocimiento -buena parte del cual es tácito- se explicita y especifica durante el proceso de resolución de un problema dado.

CONCEPTOS Y PRECONCEPTOS

No se trata de efectuar aquí una descripción exhaustiva del "movimiento de las concepciones alternativas" (Gilbert et al,1985), como ha sido denominada la importante corriente de investigación asociada a las preconcepciones o marcos alternativos de los alumnos, sino más bien de situarla en la perspectiva de la complejidad conceptual. No obstante, y a fin de facilitar el análisis posterior, resaltaremos en lo que sigue ciertas características de estas preconcepciones tal y como han sido descritas en la literatura especializada (Driver et al,1985) algunas de las cuales fueron ya mencionadas, aunque con otros fines, en el capítulo anterior.

a) ***Constituyen una forma de pensamiento dominado por la percepción*** Las concepciones espontáneas tienen su origen en la actividad cotidiana de los estudiantes; los diferentes razonamientos que efectúan para resolver una situación problemática se basan en características observables.

b) ***Corresponden a enfoques limitados***. Con frecuencia, los estudiantes consideran sólo aspectos limitados de situaciones físicas y tienden a interpretar los fenómenos en términos de propiedades absolutas o cualidades adscritas a los objetos más que en términos de interacciones entre los elementos de un sistema.

c) ***Contienen como componentes conceptos indiferenciados***. Las ideas espontáneas de los alumnos presentan frecuentemente un rango de connotaciones considerablemente más amplias y a la vez menos precisas que las que corresponden al pensamiento científico. Tales nociones tienden a ser más inclusivas y globales dando lugar por ello a diferencias de interpretación con respecto a las concepciones propiamente científicas.

d) ***Se integran en estructuras organizadas***. Dichas estructuras o marcos poseen un limitado nivel de coherencia interna operando como teorías causales poco formalizadas, con una fuerte dependencia del contexto, lo que explica que marcos contradictorios entre sí puedan coexistir en la mente del sujeto y ser empleados ante situaciones problemáticas que serían abordables desde un mismo esquema científico.

e) **Corresponden a un aprendizaje espontáneo.** Esta característica, que engloba en cierto modo a las anteriores, incluye el carácter pragmático de las concepciones espontáneas las cuales se construyen para facilitar la interacción del individuo con su entorno, para explicarlo, o para predecir su comportamiento.

f) **Son resistentes al cambio.** La instrucción científica convencional parece no ser suficiente como para sustituir las preconcepciones por concepciones científicas. Los marcos alternativos no se abandonan por simple exposición a los conceptos científicamente correctos.

El conocimiento espontáneo de los alumnos ha sido considerado como poseyendo atributos semejantes a los de las teorías científicas de modo que, en el ámbito del aprendizaje, las propuestas de cambio conceptual que permitirían desplazar el conocimiento espontáneo por el conocimiento científico han gozado de una fuerte inspiración epistemológica (Postner et al,1982; Stike et al,1985; Pozo 1987). La analogía postulada entre "la ciencia de los científicos" y "la ciencia de los niños" (Gilbert et al,1983) ha abierto la puerta de la educación científica a todo el caudal de análisis y reflexión aportado por la llamada nueva filosofía de la ciencia (Brown,1988).

Así, y por lo general, las propuestas de cambio conceptual se sitúan, por la propia naturaleza de su inspiración, a un nivel meta-científico poseyendo un *estatus* epistemológico elevado. El cambio conceptual, en la acepción del término propia del movimiento de las concepciones alternativas, constituye un cambio en la forma de ver las cosas, o en palabras de Carey (1985), una *reestructuración fuerte* que implica modificaciones en el dominio de fenómenos explicados por la teoría, en la naturaleza de dichas explicaciones y en los propios conceptos que constituyen el centro de la teoría, los cuales son afectados de un cambio profundo de significado.

Las *reestructuraciones débiles*, como las que acompañan a la transición de novatos a expertos, consisten, según el referido autor, en procesos de diferenciación y generalización conceptuales que hacen posible la transformación de un concepto e incluso la aparición de otros nuevos pero sin ruptura con el núcleo teórico correspondiente. En tales casos, siempre según Carey, no puede hablarse de cambio conceptual.

La distinción introducida por Carey (1985) se corresponde con la propuesta por West (1982) al establecer dos tipos de cambios en los sistemas conceptuales de los alumnos: los *cambios evolutivos* y los *cambios revolucionarios*. Los primeros suponen la mejora en cuanto a riqueza y precisión semántica de los marcos de los estudiantes en tanto que los segundos suponen un cambio o reestructuración profunda en el conocimiento del estudiante. El paralelismo evidente que existe entre las nociones anteriores, o equivalentes, y los periodos de *ciencia normal* y *ciencia revolucionaria* en el análisis de Khun (1970a) ha sido señalado por Zycberstajn (1983). Llegados a este punto cabe preguntarse si en el ámbito del aprendizaje científico es posible establecer una separación tan pronunciada entre uno y otro tipo de cambio conceptual.

Algunas investigaciones empíricas (López Rupérez, 1991) han puesto de manifiesto cómo errores conceptuales o preconceptos, presentes en alumnos buenos resolventes de problemas de física en un estadio inicial de la representación correspondiente a un problema de mecánica, se salvan o desaparecen en una etapa posterior como si fueran desplazados por efecto de la construcción de esa malla de significado que se entreteje en el proceso de resolución. La validez de la componente preconceptual se desvanece en la mente del sujeto a medida que éste avanza en la construcción de la representación. Tal circunstancia pone en evidencia la existencia de interacción entre ambos tipos de cambio a propósito, cuando menos, del espacio conceptual local que es afectado por la resolución de un problema dado.

No obstante lo anterior, procede volver a las características fundamentales de los marcos alternativos para efectuar un análisis desde el punto de vista de la naturaleza de los conceptos subsumidos en aquéllos. Las características a, b y e anteriormente referidas, ponen claramente en evidencia que estamos ante conceptos definidos por su significado externo, con escasos atributos ya que están conectados con un número relativamente pequeño de otros conceptos y que son, por tal motivo, relativamente pobres en significado. Aun cuando se integren en estructuras organizadas, la escasa riqueza semántica de sus componentes se traduce en una interacción entre conocimiento y problema de bajo nivel de especificidad; ese ajuste grosero entre conocimiento y problema permite explicar la coexistencia de marcos incoherentes entre sí aplicándose a una

misma situación problemática. El conocimiento espontáneo, que nutre los marcos alternativos de los alumnos, es un conocimiento general, poco preciso; y como anticipara Bachelard (1948), "*Un conocimiento que carezca de precisión, o mejor, un conocimiento que no esté dado con sus condiciones de determinación precisas no es un conocimiento científico. Un conocimiento general es casi fatalmente un conocimiento vago*" (p.86).

¿Puede entonces establecerse una analogía entre los marcos alternativos y las teorías científicas?. Mi respuesta es que únicamente si se consideran éstas en el sentido de un conjunto de ideas eje escasamente formalizadas y apenas desarrolladas, es decir, construidas a un nivel fundamentalmente cualitativo; la noción de teoría estaría siendo entendida en el sentido débil de *perspectiva teórica*, más próximo al ámbito de las ciencias sociales y humanas que al de las ciencias físicas. Es sabido que en las teorías físicas, en tanto que cuerpos coherentes y formalizados de conocimientos, no sólo existen las ideas marco de naturaleza *cuasi* filosófica, cuya importancia nadie discute, sino que, además, tales ideas se resuelven en una multiplicidad de conceptos interrelacionados que definen el contenido de un conocimiento complejo y considerablemente específico; y es esa malla densa, y a la vez flexible, de significado la que recubre, parcial o totalmente, a su objeto propio en un intento de describirlo, explicarlo o predecir su comportamiento. El cambio conceptual no se puede producir, por tanto y únicamente, a ese elevado nivel de generalidad que se atribuye a los marcos alternativos sino que en algún momento de la confrontación entre el conocimiento espontáneo y el conocimiento científico el progreso a lo largo de la dimensión de profundidad -o si se quiere de complejidad- se hace inevitable.

Uno de los procedimientos ampliamente recomendados para estimular en la mente del alumno el cambio conceptual es el de situarle en condiciones de *conflicto cognitivo*. Para que el alumno pueda comprender la superioridad de la nueva teoría -afirma Pozo (1989)- es preciso enfrentarlo a situaciones conflictivas que supongan un reto para sus ideas. En otras palabras, el alumno ha de darse cuenta de que su teoría previa es errónea en ciertas situaciones en las que conduce a predicciones que no se cumplen.

Peter W. Hewson, uno de los inspiradores del llamado "modelo de cambio conceptual" (Hewson,1981; Postner et al,1982), resume

el planteamiento contenido en dicho modelo en los siguientes términos: *"El aprendizaje supone una interacción entre las concepciones nuevas y las ya existentes, cuyo resultado depende del carácter de la interacción"* (Hewson, 1992). Por otra parte, y coherentemente con la fuerte inspiración epistemológica que subyace en las explicaciones del cambio conceptual, algunos autores han asumido como referencia la perspectiva del progreso científico de Lakatos (Poza, 1987; López Rupérez, 1989) según la cual no son los hechos los que falsen una teoría sino la aparición de una teoría mejor. De acuerdo, por tanto, con dicha perspectiva, el conflicto cognitivo debería constituir, ante todo, una confrontación "interteórica".

La pregunta que surge entonces de forma inmediata es ¿a qué nivel se ha de producir tal confrontación?; ¿al característico de los marcos alternativos o al propio de las correspondientes teorías científicas?. Una teoría científica, o una porción de ella, planteada con un bajo nivel de especificidad semejante al del marco alternativo correspondiente será capaz de efectuar predicciones escasas y relativamente generales o incluso imprecisas. En tal caso, es poco probable que un enfrentamiento de estas características pueda desplazar un conocimiento espontáneo fuertemente arraigado. Si la confrontación se produce al nivel de las teorías científicas entonces no sólo habrá de ir precedida de una aproximación a la descripción científica correspondiente, en tanto que sistema conceptual, si no que los propios marcos alternativos deberán ganar en especificidad adquiriendo una apariencia verdaderamente científica para poder ser confrontados con aquéllas en términos relativamente equiparables en el plano conceptual.

Aun cuando en una posterior aproximación volveremos de nuevo a ello, consideraremos como ejemplo las concepciones espontáneas de los alumnos sobre las relaciones entre fuerza y movimiento, ampliamente descritas en la literatura y que pueden resumirse en los siguientes enunciados (Gilbert et al, 1983):

- 1) Si un cuerpo está en movimiento hay una fuerza actuando en la dirección del movimiento.
- 2) Un movimiento constante requiere una fuerza constante.
- 3) Si un cuerpo no se mueve no existe ninguna fuerza que actúe sobre él.

Habida cuenta del carácter ambiguo, o indiferenciado, en este contexto de la idea de movimiento -que se refleja en la confusión frecuente entre los alumnos y descrita en numerosas investigaciones entre las nociones de velocidad y aceleración (Di Sessa, 1982; Trowbridge et al, 1980, 1981; White, 1983)- ¿cómo podrán confrontarse la concepción espontánea de la dinámica y la correspondiente científica?. Las predicciones derivadas de la concepción científica se extienden, como es sabido, sobre nociones cinemáticas precisas que conforman la estructura fina del concepto de movimiento. Por contra, el hecho de elaborar una predicción desde el marco alternativo correspondiente no va a mejorar, de un modo automático, la calidad de las "concepciones de llegada" relativas a la referida predicción, las cuales estarán afectadas, en principio, de una dosis de indiferenciación semejantes a las propias de las "concepciones de partida". Puede afirmarse entonces que las concepciones científicas y las correspondientes espontáneas resultarán inconmensurables a menos que éstas sean adecuadamente preparadas para la confrontación.

La analogía supuestamente existente entre el proceso de cambio conceptual en los alumnos y las "revoluciones científicas" constituye de hecho uno de los puntos fuertes del movimiento de las concepciones alternativas; de modo que, coherentemente con dicho planteamiento, cabe dirigir la mirada a los cambios de paradigma acontecidos en la ciencia madura en busca de alguna luz adicional sobre el cómo guiar eficazmente ese cambio conceptual tan deseable desde la perspectiva de la educación científica. Sin pretender efectuar un análisis historiográfico detallado sobre las claves de la "revolución relativista" lo cierto es que la propia descripción de su principal protagonista nos indica cuál fue el camino. En sus *Notas Autobiográficas* Einstein (1984) reconstruye, de forma más o menos aproximada, el proceso en los siguientes términos:

"Tras diez años de reflexión ese principio resultó de una paradoja con la que topé ya a los dieciséis años: si corro detrás de un rayo de luz con la velocidad c (velocidad de la luz en el vacío), debería percibir el rayo luminoso como un campo electromagnético estacionario, aunque espacialmente oscilante. Pero semejante cosa no parece que exista, ni sobre la base de la experiencia ni según las ecuaciones de Maxwell. De entrada se me antojó intuitivamente claro que, juzgada la situación por semejante observador,

todo debería desarrollarse según las mismas leyes que para un observador que se hallara en reposo con respecto a la tierra. Pues ¿cómo podría el primer observador saber o constatar que se encuentra en un estado de rápido movimiento uniforme?"

"Como se ve, en esta paradoja se contiene ya el germen de la teoría especial de la relatividad. Naturalmente, hoy nadie ignora que todos los intentos de aclarar satisfactoriamente esa paradoja estaban condenados al fracaso mientras el axioma del carácter absoluto del tiempo, o de la simultaneidad, siguiera anclado inadvertidamente en el inconsciente. El identificar claramente este axioma y su arbitrariedad representa ya en realidad la solución del problema. En mi caso, el pensamiento crítico que hacía falta para descubrir este punto central lo fomentó especial y decisivamente la lectura de los escritos filosóficos de David Hume y Ernst Mach. Era necesario comprender claramente qué significaban las coordenadas espaciales y el valor temporal de un suceso en física".

Tres elementos clave se desprenden del texto anterior, a saber:

- Diez años de reflexión
- Una inmersión profunda en las bases de la mecánica y del electromagnetismo
- Un cambio de punto de vista estimulado, probablemente, desde instancias metacientíficas.

Aun cuando aspectos de más alto *estatus* epistemológico están presentes entre las claves de la revolución relativista, el mensaje de progreso en la dirección de la profundidad, en tanto que condición ineludible del cambio, resulta tan evidente que cabe preguntarse por qué razón el interés por los aspectos finos del conocimiento es frecuentemente desplazado, en los modelos de cambio conceptual, por la atención dominante a los aspectos metacientíficos, sea de corte epistemológico, sea de corte metafísico. Lo que se desprende, de forma palmaria, del análisis del nacimiento de la mecánica relativista -con vistas a iluminar algunas de las claves del cambio conceptual- es que, en el cambio, el nivel de diferenciación conceptual de partida resulta tan importante como el de llegada. Aun cuando entre ambos niveles pueda producirse esa fractura semántica que subyace a la idea de revolución, existe una cierta contigüidad de los

conceptos correspondientes, en tanto que unidades complejas, que hace posible su confrontación.

A la vista de lo anterior, y en el marco de la educación científica, una separación franca entre los cambios conceptuales de carácter evolutivo y los de carácter revolucionario no puede efectuarse más que a un nivel meramente filosófico. En un contexto propio del aprendizaje científico los cambios de corte evolutivo constituyen una condición necesaria, aunque no suficiente, para hacer posible esos otros de naturaleza "revolucionaria".

La resistencia experimentada por un buen número de concepciones alternativas a ser modificadas no sólo cuando el estudiante es sometido a una instrucción tradicional sino también, y lo que es más importante, cuando la instrucción recoge estrategias emanadas de un modelo de cambio conceptual de inspiración epistemológica (Fredette y Lochhead, 1981; Engel y Driver, 1986; Shuell, 1987; Duschl y Gitomer, 1991), aumentan el interés de planteamientos más abarcales que pudieran resultar, por ello, más efectivos. La consideración del *principio de complejidad* aplicada al aprendizaje de los conceptos científicos puede constituir, en tal circunstancia, un elemento de guía.

LA COMPLEJIDAD DE LO ELEMENTAL EN EL APRENDIZAJE DE LOS CONCEPTOS CIENTÍFICOS

En su canto a la epistemología no cartesiana Bachelard (1934) parece querer adelantarnos la referencia a esa validez transversal característica de los principios epistemológicos -a propósito, particularmente, de lo que nosotros hemos denominado *principio de complejidad de lo elemental*- cuando afirma "*En realidad, no hay fenómenos simples, el fenómeno es un tejido de relaciones. No hay naturaleza simple, sustancia simple; la sustancia es una contextura de atributos. No hay idea simple, porque una idea simple debe estar inserta, para poder ser comprendida, en un sistema complejo de pensamientos y de experiencias*" (p.152).

La complejidad presente en la conceptualización del comportamiento de la materia se hace, asimismo, notoria en la conceptualización del aprendizaje de los conceptos científicos y semejante apuesta por la complejidad tiene claras implicaciones prácticas en la orientación de la educación científica, algunas de las cuales serán consideradas en lo que sigue.

Complejidad conceptual y marcos alternativos: un nuevo modelo de cambio conceptual

De la concepción de los conceptos como entidades complejas se ha derivado un análisis crítico de la noción de cambio conceptual al uso. Tiene pues sentido extender ahora dicho análisis concretando una estrategia didáctica orientada a promover el cambio conceptual y, a la vez, compatible con la antes referida concepción. Con el fin de facilitar al lector la comparación con otros modelos ya disponibles (ver revisión de Pozo, 1989), ordenaremos el conjunto de estrategias que constituyen el modelo de instrucción propuesto en fases o etapas del siguiente modo.

Fase 0. Diagnóstico y proacción

Se trata de una fase preliminar en la que deberá incluirse una acción de diagnóstico o identificación de las preconcepciones presentes en el grupo de alumnos a los que va dirigida la instrucción y su grado de extensión. La abundante literatura disponible al respecto (Driver et al, 1985; Hierrezuelo et al, 1989; Carrascosa et al, 1992) puede facilitar, en uno u otro sentido, la tarea del profesor. No obstante, y habida cuenta del carácter recidivo -en función del contexto- de la aparición de los marcos alternativos, es posible hacer caso omiso de las diferencias individuales a este respecto y aplicar el tratamiento que sigue de un modo general en niveles correspondientes a la instrucción secundaria sobre la base exclusiva de los resultados de la bibliografía cuya consulta definiría, en tal caso, la correspondiente operación de diagnóstico.

Con el fin de enmarcar, en términos de significado, la unidad objeto de enseñanza/aprendizaje se proporcionarán a los alumnos ocasiones para adquirir una visión de conjunto de dicha unidad que otorgue sentido a una posterior consideración de mayor nivel de detalle. Esta primera aproximación, con fines claramente proactivos, se efectuará a un nivel esencialmente cualitativo, en el que se hagan converger planteamientos generales con aspectos próximos a los intereses de los alumnos.

Fase 1. Exposición de las ideas de los alumnos

Se harán explícitas las ideas de los estudiantes sin ponerlas en ningún modo en tela de juicio. El profesor, en interacción directa con sus alumnos, deberá efectuar un trabajo de ingeniería del conocimiento haciendo explícitas las concepciones espontáneas de aquéllos y formulándolas de forma razonablemente coherente aunque a ese nivel puramente descriptivo que es característico de esta clase de conocimiento. La vinculación de las preconcepciones con su base perceptiva propia se pondrá en evidencia recurriendo a ejemplos que consoliden los fundamentos empíricos del marco correspondiente.

Fase 2. Reformulación de las preconcepciones en terminos científicos

En esta fase se reelaborará el conocimiento consolidado en la fase anterior para dotarlo de una cierta textura científica. Para ello:

- a) Se incrementará la precisión de los conceptos implicados tratando de respetar, no obstante, su significado original.
- b) Se formularán los conceptos en términos formales o analíticos.
- c) Se destacarán las relaciones entre los diferentes conceptos subsumidos en el marco alternativo correspondiente.
- d) Se interpretarán los ejemplos expuestos en la fase anterior coherentemente con los resultados de esta operación de ajuste o estructuración del conocimiento espontáneo.

Fase 3. Formulación de la concepción científica

Se introducirá la formulación de la concepción científica correspondiente como un enfoque alternativo, tratando de aligerar, tanto como sea posible, el peso del criterio de autoridad que acompaña indefectiblemente, desde la perspectiva de los alumnos, a los enunciados provenientes de la ciencia oficial. El esquema será formalmente análogo al descrito en las fases 1 y 2, es decir:

- a) Se introducirá de forma descriptiva el marco científico correspondiente.

- b) Se incrementará la precisión de los conceptos implicados.
- c) Se formularán los conceptos en términos formales o analíticos, explicitando la malla conceptual asociada al marco.
- d) Se establecerán ejemplos pertinentes y se procederá a una interpretación o explicación de tales ejemplos desde el nuevo marco.

Fase 4. Confrontación de ambas concepciones

La confrontación a la que se alude supone algo más que una mera comparación entre los aspectos puramente descriptivos de cada una de las concepciones en conflicto sino que entraña, además:

- a) Un análisis comparativo de los conceptos implicados y de sus relaciones desde la perspectiva de la complejidad conceptual; esto es, poniendo el acento en el significado de los conceptos enfrentados mediante la consideración de su estructura fina con la enumeración de atributos semejantes y diferentes para cada uno de los conceptos en competencia que integran las correspondientes concepciones rivales. Este aspecto de la confrontación hace imprescindible la ejecución previa de las fases 2 y 3.
- b) Una interpretación cruzada de los ejemplos aportados con anterioridad como elemento de consolidación de cada uno de los marcos en conflicto, que permita poner en evidencia la superioridad de las concepciones científicas.
- c) Una aproximación empírica que refuerce, cuando sea posible, la base perceptiva de la concepción científica. En el ámbito de la física no es suficiente la referencia a experimentos mentales sino que es necesario, además, el diseño de prácticas de laboratorio que permitan la interacción en la mente del estudiante entre los aspectos perceptivos del fenómeno y los aspectos no perceptivos o puramente formales.

Fase 5. Aplicación reiterada de la nueva concepción en contextos variados

Aunque no se excluye en esta fase la referencia a contextos de laboratorio, se trata, principalmente, de proporcionar al estudiante

oportunidades de comprobar la validez del marco científico en la resolución de un repertorio amplio de problemas. Dicho repertorio deberá ser seleccionado y ordenado de modo que:

- a) Permita al alumno obtener inicialmente una elevada tasa de éxitos, lo que reforzará la confianza en el nuevo marco.
- b) Incluya no sólo problemas numéricos sino también aquellos otros que requieren en una mayor proporción razonamientos cualitativos.
- c) Incluya enunciados en los cuales la interferencia de las preconcepciones puede resultar decisiva como factor de fracaso en el proceso de resolución.

Consideremos a modo de ejemplo, y sin pretender ser exhaustivos, algunas orientaciones para la aplicación del modelo anterior a la introducción de los fundamentos de la dinámica. Se iniciará la *Fase 0* con una introducción sobre el objeto de la dinámica. Dicha introducción puede incorporar referencias históricas que permitan a los alumnos distinguir entre la perspectiva cinemática y la perspectiva dinámica en el estudio del movimiento. La referencia a ejemplos de actualidad de interés dinámico, lanzamiento de satélites, naves espaciales, predicción de trayectorias, etc. puede completar la función proactiva de dicha introducción que deberá permitir a los alumnos situarse, en una primera aproximación de bajo nivel de detalle, en la problemática de la relación entre las fuerzas que actúan sobre un cuerpo y las características del movimiento correspondiente. Una alusión más fina a las características de la concepción científica debería ser evitada.

Tomando como elemento de diagnóstico general la consulta a la literatura especializada, los marcos alternativos *fuerza-movimiento* pueden resumirse en los tres enunciados antes citados (Gilbert, 1983):

- 1) Si un cuerpo está en movimiento hay una fuerza actuando en la dirección del movimiento.
- 2) Un movimiento constante requiere una fuerza constante.
- 3) Si un cuerpo no se mueve no existe ninguna fuerza que actúe sobre él.

Tras la aplicación de la *Fase 1* en la forma más arriba descrita la reformulación de las preconcepciones en términos científicos (*Fase 2*) supondrá, en este caso, lo siguiente:

- a.1) Habida cuenta del carácter relativamente ambiguo del concepto de movimiento en tanto que aspecto mensurable al que se alude en los anteriores enunciados, se deberá precisar su verdadero significado en la mente de los alumnos presentándolo como sinónimo, en este caso, de velocidad. Ello conllevará la introducción del concepto científico correspondiente en tanto que magnitud vectorial, haciendo hincapié en todos sus atributos y, particularmente, en su carácter de vector tangente a la trayectoria que posee, por tanto, la misma dirección que el movimiento.
- a.2) Se deberá precisar el concepto de fuerza actuante F como sinónimo -en una aproximación superficial o espontánea- de "fuerza tractora" que es la asociada en términos perceptivos al movimiento. Se trata en definitiva de la fuerza que "tira" del cuerpo. Será necesario especificar sus atributos en tanto que magnitud vectorial.
- b) La fuerza "tractora" se notará en lo sucesivo por F y el movimiento en su expresión formal por v .
- c) Se propondrá como marco unificador de 1), 2) y 3) la expresión

$$F = c v \quad \text{con } c = \text{cte}$$

que establece la proporcionalidad entre los vectores F y v . A continuación, se someterá a prueba el carácter unificador o inclusivo de dicho enunciado respecto de los tres anteriores:

- 1) $F = c v$ significa que los vectores F y v son paralelos y dado que v tiene la dirección del movimiento, la anterior expresión predice que la dirección de la fuerza coincidirá siempre con la dirección del movimiento.
- 2) Dado que c es una constante, si F es constante la velocidad v -tomada como primera expresión del movimiento- se mantendrá constante.
- 3) Si un cuerpo no se mueve, $v = 0$ y, de acuerdo con el marco alternativo unificador, la fuerza F será también nula.

La formulación de la concepción científica (*Fase 3*) requerirá no sólo su introducción en términos descriptivos (a) si no, además, la precisión del significado de los conceptos de aceleración a , de fuerza resultante \vec{F} y de masa m . Dicha operación requerirá una profundización en el conjunto de atributos de cada concepto y en sus relaciones.

Las fases anteriores habrán supuesto, de hecho, una preparación para que la confrontación de los marcos en conflicto (*Fase 4*) sea lo más efectiva posible. Se trata, por tanto, de comparar el significado de \vec{F} en ambos enunciados señalando sus analogías y sus diferencias, procediendo análogamente con v y a .

Los análisis de ejemplos y no ejemplos desde perspectivas teóricas cruzadas y la realización de, al menos, una práctica de laboratorio diseñada *ex profeso*, preparará la ejecución de la fase final (*Fase 5*) en la cual los alumnos tendrán oportunidad de comprobar reiteradamente la fecundidad de la concepción científica y el profesor podrá, además, controlar el grado de desplazamiento del marco espontáneo por el correspondiente científico.

Complejidad conceptual: algunos otros principios de acción didáctica

Como corresponde a la fuerza de su heurística positiva (Lakatos, 1976) el movimiento de las concepciones alternativas tiende, con alguna frecuencia, a ignorar el hecho de que no todos los problemas que se plantean en el aprendizaje de los conceptos científicos están relacionados con el fenómeno de las concepciones espontáneas. Aun a pesar del importante volumen de investigaciones orientadas a elucidar la "ciencia del alumno", lo cierto es que la fracción de situaciones, respecto de todas las posibles, en las cuales la interferencia de los preconceptos es verdaderamente importante, está limitada por la propia naturaleza de dichos constructos. Así, su carácter espontáneo está vinculado a su base perceptiva: "*el pensamiento espontáneo de los alumnos es un pensamiento dominado por la percepción*" (Driver et al, 1985). Como señala Pozo, surgen de la interacción espontánea con el entorno cotidiano y sirven, ante todo, para predecir "la conducta" de ese entorno (Pozo, 1989). Tienen, por tanto, una función explicativa pero de corte pragmático. Por tales motivos si se revisa el amplio repertorio conceptual pro-

pio de la física, se advierte que el número de conceptos afectados por esta *perspectiva perceptivo-pragmática*, aun cuando importante en términos absolutos, no lo es tanto en términos relativos. O, dicho de otra forma, existen multitud de conceptos, alejados del ámbito perceptivo, que no conciernen al entorno cotidiano de los alumnos y cuyo manejo resulta, desde ese punto de vista pragmático, cuando menos superfluo.

Es precisamente en ese ámbito en el que la idea de *error conceptual*, entendida como fallo en el proceso de construcción del concepto científico correspondiente -idea que puede perfectamente coexistir con la de *preconcepción* en tanto que fenómeno cognitivo próximo al anterior, aunque diferente- cobra su pleno sentido. Así, la influencia de una insuficiente especificación de los atributos críticos de un concepto se propaga a través de esa especie de malla relacional característica de la estructura conceptual a la que el concepto en cuestión pertenece, generando errores conceptuales inevitables en otros conceptos próximos. Por ejemplo, una escasa especificación de los atributos del concepto de velocidad como magnitud vectorial da lugar a errores en el concepto de aceleración; y esto no sólo sucede a nivel de los estudiantes de física sino también a nivel de los profesores de dicha disciplina. El caso más "ilustre" que conozco a este respecto, y que merece la pena traer a colación, ha quedado registrado en la importante revista americana *Journal of Research in Science Teaching*. En el vol. 26 n° 6 pg. 557-558 (1989) el profesor Dileep V. Sathe, tras destacar la importancia de evitar los errores conceptuales que en el proceso de enseñanza puedan ser introducidos por los propios físicos, o profesores de física, denuncia algunos fallos de este tipo presentes, según él, en el análisis gráfico de la aceleración (ver fig. 6.3) del movimiento de un péndulo simple presentado por Reif en un artículo publicado con anterioridad en la misma revista (Reif, 1987). No pretendemos reproducir aquí todas las críticas de Sathe ni tampoco la respuesta completa de Reif recogida a renglón seguido (Reif, 1989) en el mismo número, pero sí nos detendremos, a modo de ejemplo, en lo referente al punto C del caso representado en la fig. 6.3. Sathe afirma a este respecto "*Efectivamente, siendo C el punto medio no debería representarse en él flecha alguna porque no hay aceleración. Ello es debido a que en C, $\theta = 0$ -el desplazamiento angular respecto de la posición media- y, por tanto, la fuerza restauradora (mgsen θ) se anula*".

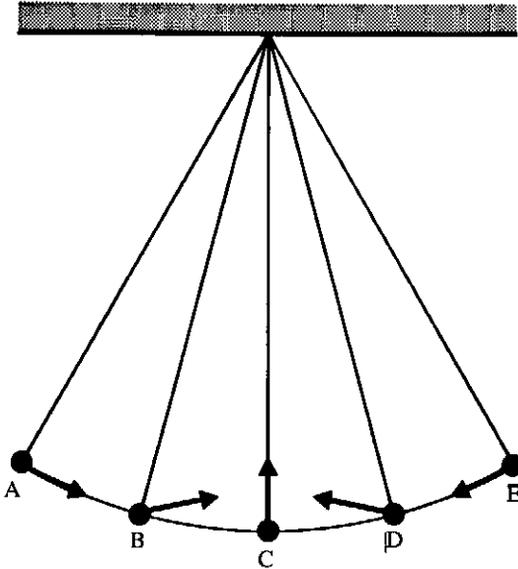


Fig. 6.3 - Representación de las aceleraciones asociadas al movimiento de un péndulo simple en diferentes puntos de su recorrido según Reif

El error conceptual que Sathé exhibe públicamente -al tratar de denunciar el supuesto error de Reif- tiene, probablemente, su origen en el concepto de velocidad que se maneja y que supone la exclusión implícita de los atributos relacionados con los aspectos direccionales de dicha magnitud. Así, considerando la velocidad como escalar, el hecho de que tal magnitud se mantenga constante en C anula la posibilidad de que en dicho punto aparezca alguna aceleración, lo cual se racionaliza recurriendo a la segunda ley de Newton y al valor nulo en C de la correspondiente fuerza retardadora. Se ignoran, por tanto, los atributos relativos al aspecto direccional de la velocidad y, consiguientemente, se hace caso omiso de la existencia de una componente normal de la aceleración asociada a la curvatura de la trayectoria, de la cual no puede en ningún caso dar cuenta la fuerza restauradora que actúa en la dirección de la tangente a dicha trayectoria.

De la perspectiva teórica de la complejidad conceptual se deriva un modo de aproximación a la enseñanza y al aprendizaje de los

conceptos en física que ha de resultar compatible, necesariamente, con la propia noción de complejidad. En tal sentido, la acción didáctica debería beneficiarse de una estrategia general de aproximación a la estructura conceptual objeto de enseñanza a diferentes niveles tomando en consideración, cuando menos, aspectos tales como el carácter relacional de los conceptos, la estructura fina de cada concepto y su aplicabilidad y reglas de uso, aspectos todos ellos considerados anteriormente.

Así, en un primer nivel de aproximación, con fines puramente descriptivos y de iniciación, un enfoque de tipo "atomístico" -en el que los conceptos se traten de introducir, cuando ello sea posible, en conexión con su significado externo- es perfectamente aceptable en un estadio en el que la referencia a los aspectos intuitivos de los conceptos, los razonamientos por analogía, o el uso de metáforas, tienen plena validez.

En una segunda aproximación el destacar la dimensión relacional de los conceptos se hace absolutamente imprescindible y ello puede efectuarse desde una perspectiva "gruesa", en el que los conceptos se conectan entre sí configurando una imagen "macroscópica" del sistema conceptual en cuestión. La elaboración a este nivel y por parte de los alumnos de mapas conceptuales tipo Novak (Novak et al, 1984) puede constituir un medio de consolidar en la memoria de aquéllos un esquema de organización del conocimiento conceptual significativo y susceptible de ser transformado, en el sentido de especificado, en posteriores aproximaciones.

En una tercera aproximación se debería profundizar en la estructura fina de cada concepto, efectuando un análisis de sus atributos tan exhaustivo como sea posible. Es claro que tanto en esta aproximación, como en la anterior, se pretende avanzar en la dirección de una ganancia de significado, de una mayor riqueza semántica, por lo cual y tratándose de conceptos de carácter formal, su dimensión simbólica resulta ineludible en tanto que elemento de representación del conocimiento.

La explicitación de las condiciones de aplicación de los conceptos y las reglas de uso constituye una posterior aproximación, en la cual las fronteras entre conocimiento conceptual y conocimiento procedimental se diluyen completamente (ver capítulo 7). De hecho esta cuarta aproximación no deja de ser una prolongación de la tercera en la medida que tales aspectos de los conceptos constitu-

yen una parte esencial de lo que hemos venido denominando su *estructura fina*. A este nivel, los mapas conceptuales tipo Novak resultan insuficientes y su elaboración debería ser sustituida por la de *mapas de conocimiento* (López Rupérez, 1991), los cuales suponen una organización material del sistema conceptual correspondiente diferente; en este caso, los distintos niveles de aproximación se verían reflejados en diferentes hojas de las cuales la primera podría perfectamente corresponderse con un mapa conceptual tipo Novak.

A pesar de que la presentación anterior parece referirse a etapas de aplicación general y sucesiva, la aproximación por niveles de complejidad constituye una perspectiva de la enseñanza y del aprendizaje de los conceptos en física y no un conjunto de recetas de corte algorítmico. Por tal motivo el profesor deberá adaptar con flexibilidad dicha perspectiva a las circunstancias imperantes en cada caso tales como nivel académico, características de los alumnos, naturaleza del sistema conceptual en cuestión, etc.

En resumen, la perspectiva de la complejidad conceptual no sólo ilumina la noción de cambio conceptual en el aprendizaje científico sino que, además, extiende su capacidad orientadora hacia el resto de los conceptos no afectados directamente por el fenómeno de las preconcepciones; y es precisamente en este último ámbito -en mi opinión insuficientemente atendido, en términos relativos, por la investigación en educación científica- en el que se ventila, en buena medida, el éxito o el fracaso de los alumnos, la satisfacción o la frustración en el aprendizaje de disciplinas como la física que, por razones estrictamente cognitivas, presentan un nivel de dificultad intrínseca elevado.

EN POS DEL SIGNIFICADO. ALGUNAS IMPLICACIONES DIDACTICAS

La noción de significado aparece ligada de un modo sustancial - particularmente en un contexto científico- al conocimiento conceptual. Para el conocido impulsor de la semiología, Ferdinand de Saussure, significado, equivale *grosso modo* a "concepto" (Mounin, 1990). Pero, por otro lado, cuando se trata de efectuar una aproximación a la propia noción de concepto se presentan éstos como entidades cognitivas que constituyen auténticos "paquetes" de significado (Pines, 1985). Esta implicación recíproca entre ambas nociones sitúa el problema del significado en la perspectiva de la complejidad conceptual anteriormente esbozada, complejidad que nos remite a la relación como elemento base, como materia prima de lo que entendemos por significado.

La propia naturaleza del significado, que se acaba de destacar, apunta al carácter esencialmente dinámico de éste, el cual se vincula a un proceso constructivo por parte del individuo; dicho proceso de ningún modo se agota en un estadio terminal, relativamente próximo, sino que se extiende indefinidamente a lo largo de la experiencia cognitiva del sujeto. En esta perspectiva, el aprendizaje científico -en tanto que proceso- se orienta en un sentido de complejificación conceptual creciente que coincide con el de un gradiente de significado. El lema "en pos del significado" que constituyó el *leit motiv* inicial del presente trabajo ha de ser interpretado, pues, como en pos de un incremento de significado.

Por otro lado, la orientación transdisciplinar adoptada en esta monografía ha pretendido añadir sentido al significado vinculando de una forma radical el marco propio de la didáctica de la física con ese otro marco más profundo de la física fundamental a través

de ciertos "principios puente" que constituyen lo que a lo largo de la primera parte hemos denominado *principios epistemológicos*.

Junto a ese proceso de la educación científica en busca de un marco epistemológico ciertamente significativo, y coherentemente con él, se ha tratado de explorar la utilidad de dicha perspectiva a la hora de fundamentar y de orientar tanto la investigación como la práctica en el seno de esa joven disciplina. En consonancia con dicho planteamiento intentaremos, en este capítulo final, reforzar la validez de una tal perspectiva metateórica con unos pocos análisis y algunas otras implicaciones de ellos derivadas que terminan por alcanzar de lleno el mundo de la enseñanza.

El aprendizaje como construcción de significado

La perspectiva según la cual el sujeto que aprende no constituye un mero receptor de conocimiento, una especie de espejo de lo que escucha o de lo que lee (Resnick, 1983) sino que elabora, construye o reconstruye significado mediante un proceso activo que constituye la esencia del aprendizaje intelectual, se ha convertido, como es sabido, en la manifestación de un consenso emergente especialmente fuerte dentro del panorama actual de la educación científica (Linn, 1987; Driver, 1988; Novak, 1988).

No pretendemos, por tanto, incidir en la descripción del constructivismo, en su evolución histórica o en sus bases filosóficas, sino trataremos más bien de echar una leve mirada sobre la problemática del aprendizaje científico, en tanto que construcción del significado, iluminados por la orientación, de inspiración epistemológica, que se deriva de la primera parte de nuestro trabajo. Tal orientación resulta especialmente oportuna habida cuenta de que, como ha señalado Driver (1988), *"aunque se ha hecho alguna investigación básica, en general estamos en un estado inicial en la comprensión de cómo se construyen los conceptos científicos y, en particular, de cómo el conocimiento físico basado en el formalismo matemático, se relaciona con la comprensión intuitiva"* (p.114).

La reflexión sobre cómo se construye el significado en el aprendizaje científico puede ser convenientemente orientada, en primer término, por una referencia al principio de invariancia en tanto que principio epistemológico. En el capítulo 5 presentamos la explota-

ción del postulado del *científico como estudiante* -o, lo que es lo mismo, de la creación del conocimiento como aprendizaje- como una de las consecuencias de la incorporación del referido principio epistemológico a la perspectiva de la educación científica. A pesar de que el análisis biográfico de los científicos ha constituido una herramienta de la historiografía de la ciencia escasamente empleada en el pasado, lo cierto es que como ha señalado Fernández Buey (1981) citando a Taton "*la biografía científica aparece como la mejor vía para estudiar el proceso de creación y analizar las influencias respectivas entre sus diferentes elementos*" (p.199).

Esta misma consideración ha sido compartida, entre otros, por Gerald Holton y manifestada en el análisis de corte biográfico del pensamiento de Einstein, de su credo epistemológico y de su personalidad así como en el interés del referido autor por explorar la psicología de los hombres de ciencia (Holton,1981); y por Abraham I. Miller en su intento de describir la psicología de la formación de los conceptos científicos y de caracterizar el pensamiento creador en ciencia (Miller,1984). No obstante lo anterior, la novedad de nuestro enfoque estriba, por un lado, en su vinculación explícita con el principio de invariancia como principio epistemológico y, por otro, en la intención deliberada de vincularlo a la educación científica como una herramienta de progreso en el conocimiento de las claves de una enseñanza y de un aprendizaje científicos eficaces. Ambos aspectos del enfoque ya descrito -que se orientan en un sentido metateórico, uno, y fundamentalmente práctico, otro- añaden significado a este tipo de investigaciones y las revaloriza. No pretendemos efectuar aquí una explotación exhaustiva de semejante perspectiva, que constituye más bien todo un programa de investigación; no obstante, y con una intención meramente ilustrativa, trataremos de arrojar alguna luz sobre ciertos aspectos del complejo problema de cómo los científicos construyen el conocimiento, destacando algunas coincidencias en las opiniones o reflexiones de grandes físicos en una aproximación muy general al problema que nos ocupa.

En una referencia de carácter biográfico al gran espectroscopista español Miguel Catalán, Leonardo Villena transcribe con las siguientes palabras el consejo recibido de boca de tan ilustre físico-químico para convertirse en un investigador de excelencia: "*Elige un tema y machaca en él*" (Villena,1988). Esta frase u otras seme-

jantes constituyen, de hecho, un tópico en el mundo de la investigación; es el consejo preferido del científico experto al principiante que inicia su carrera como investigador. Se trata de un heurístico de orden superior apto para conseguir buenos resultados que está reflejando uno de los condicionantes básicos de un pensamiento científico eficiente. En un sentido que guarda una estrecha relación con la recomendación de Catalán a Villanueva, se pronunció el propio Newton cuando tuvo que referirse a la forma mediante la cual sacaba adelante sus investigaciones *"Mantengo el tema constantemente ante mí -afirmaba Newton- hasta que los primeros esquemas se abren lentamente, poco a poco, hasta arrojar una clara e intensa luz"* (Christianson, 1986 p.161).

Leopold Infeld, amigo personal y colaborador de Einstein a lo largo de su vida, describe una de las características del quehacer científico del genio en los siguientes términos: *"Lo cierto es que después de 1921 y hasta el presente Einstein ha abordado repetidas veces un problema nuevo y difícil, construyendo y reconstruyendo teorías, rechazándolas y comenzando de nuevo, transitoriamente satisfecho con sus resultados y descartándolos cuando no se mantenían a la altura de sus elevadas normas de simplicidad y belleza. En la actualidad aún trabaja en este problema. Su tenacidad en aferrarse durante años a un problema, en volver a éste una y otra vez, es lo que constituye el rasgo característico del genio de Einstein"* (Infeld, 1983 p.174).

Rosenfeld, en su artículo dedicado a la contribución de Niels Bohr a la epistemología (Rosenfeld, 1963) al referirse a la forma de trabajar del gran físico danés, reproduce un comentario personal de Bohr: *"Trabajé sobre ello en Copenhague (se refería el propio Bohr a su investigación sobre la determinación de la tensión superficial del agua que llevó a cabo durante sus años de estudiante y que le valdría la medalla de oro de la Academia de Ciencias danesa) pero los experimentos no tenían fin; siempre reparaba en nuevos detalles que pensaba debería primero comprender. Al final mi hermano me echó fuera de allí, lejos del laboratorio, y tuve así que avanzar en la redacción del informe"* (p.49). P. Robertson -citado por Ferrero Melgar en Bohr (1988)- insiste en este modo de comportamiento del genio danés en los siguientes términos *"Para Bohr un manuscrito era por definición algo en lo que había que hacer modificaciones y cada versión era considerada como una aproximación"*

sucesiva hacia una representación más clara y precisa de su pensamiento" (p.27). Finalmente, el propio Rosenfeld (1963) destaca lo que en su opinión constituye una parte de la grandeza de Bohr, con las siguientes palabras: "Podría perseguir un problema durante años, con absoluta tenacidad, mirándolo desde todos los ángulos, retomando la misma cuestión una y otra vez, pero sabiendo cuando parar".

Todos los comportamientos que acabamos de referir suponen, en cualquier caso, una inmersión duradera y profunda del científico en el mundo del problema en tanto que condición necesaria de un modo de pensamiento efectivo. Cabe, sin duda, preguntarse por los ingredientes que se esconden dentro de esa breve "receta del sabio" atribuida a Catalán y que resume el comportamiento de un buen número de físicos ilustres, de los cuales Newton, Einstein y Bohr constituyen tan sólo una muestra significativa. Al centrarse en un tema dado el científico consigue una buena parte de los siguientes logros de orden cognitivo:

- **Enriquece su marco conceptual.** Mediante el estudio detenido del problema mejora la caracterización de los conceptos en juego, añadiendo nuevos atributos que aparecen como resultado de una profundización y de la consiguiente densificación de esa red de conexiones, de esa malla de significados que recubre el mundo del problema.
- **Aprende o mejora el uso de técnicas de carácter sea matemático sea experimental,** lo que le permite manejar los conceptos en contextos teóricos y/o empíricos más densos y/o más amplios.
- **Formula hipótesis y/o diseña experimentos,** estableciendo protocolos para su desarrollo y ejecución.
- **Resuelve problemas abiertos,** es decir, genera nuevos conocimientos.
- **Adquiere saber heurístico.** La resolución reiterada de problemas le proporciona un conocimiento estratégico -con frecuencia de carácter tácito- que conforma ese "buen olfato", característico del investigador experto, para detectar problemas relevantes, ignorados por los otros, e intuir posibles vías de solución.

No se trata lo anterior de una secuencia lineal, sino más bien de algunos de los componentes de un proceso de carácter cíclico en el

cual el enriquecimiento del marco conceptual aumenta con su uso, según un esquema en espiral que transforma la matriz conceptual inicial en un marco denso en significado. Dicho proceso puede desembocar finalmente en la invención, emergencia o construcción de nuevos conceptos, de marcos más amplios, de nuevas teorías.

Junto con el programa de análisis biográfico de los científicos como un medio de elucidar las claves de un aprendizaje científico eficiente, el principio de invariancia nos remite a otra perspectiva conexas con respecto a la anterior de carácter asimismo genética, que podría resumirse en la pregunta ¿cómo se hace un experto?. De este modo se entrea la puerta del aprendizaje científico al conocimiento que aporta la inteligencia artificial y, particularmente, la ingeniería del conocimiento (Mate et al, 1988).

La transposición de lo que sintéticamente hemos denominado la "receta del sabio" al ámbito de la educación científica nos lleva a efectuar una crítica epistemológicamente fundada de lo que constituye una práctica corriente en la enseñanza de las ciencias en nuestro país. Programas muy cargados obligan, con frecuencia, a profesores y a alumnos a efectuar una aproximación superficial o relativamente superficial, semánticamente hablando, a los temas, cuyo conocimiento en la memoria de los estudiantes -en ocasiones mezcla heterogénea de definiciones y de reglas- presenta notorias deficiencias de integración y, por tanto, de significatividad conceptual. Tales deficiencias en la forma en que el conocimiento está organizado y en su nivel de riqueza semántica no sólo le resta eficacia a la hora de ser utilizado en contextos prácticos -como el que corresponde, por ejemplo, a la resolución de problemas- sino que, además, reduce notablemente su permanencia en la memoria del sujeto. Dicha afirmación, que se ve confirmada por los resultados de la psicología cognitiva (Craik y Cochart, 1972; Anderson, 1979; Otero, 1985), no es más que la expresión de esa otra, tan frecuente en el mundo de los "prácticos" de la enseñanza, según la cual lo que un alumno estudia una semana antes del examen lo olvida una semana después.

Una orientación potencialmente eficaz de la enseñanza de las Ciencias debería dar oportunidad a los alumnos y a los profesores para desarrollar un aprendizaje de tipo recursivo a diferentes niveles de aproximación y para beneficiarse de enfoques convergentes en relación con un tema dado. La confrontación de perspectivas

TABLA 7.1

Resumen de los criterios de elaboración de un informe científico y de su adaptación cuando se trata de un informe de laboratorio (López Rupérez, 1987)

	TRABAJO CIENTIFICO	TRABAJO DIDACTICO
TITULO	Debe ser claro y concreto Ni muy largo ni muy corto. Preciso y específico.	En el caso de que no venga dado de antemano, deberán seguirse los mismos criterios que en un trabajo científico.
AUTORES	Se respeta el orden de contribución al trabajo, particularmente, en lo que concierne al diseño y desarrollo de los aspectos experimentales y de obtención de resultados.	El criterio de respetar el orden de contribución al trabajo, considerado en su conjunto, debe ser tenido en cuenta.
RESUMEN	En él se recoge, de forma breve, el propósito de la investigación, los resultados más relevantes y las conclusiones principales. Todo ello en 150 ó 250 palabras.	Aunque no tenga el mismo sentido que en un trabajo científico, puede incluirse este apartado, si se pretende que el informe de laboratorio simule un artículo publicable en una de las revistas especializadas.
INTRODUCCION	Contiene una descripción somera del problema investigado, con una referencia a los métodos empleados y un avance breve, pero claro, de la contribución del trabajo al conocimiento científico.	Quando sea posible puede situarse el problema analizado experimentalmente en su correspondiente marco histórico aunque con una extensión limitada. En cualquier caso, deberá incluirse una referencia a los aspectos conceptuales o de fundamentos. Debe, asimismo, presentarse el propósito de la experiencia y una somera referencia a los procedimientos empleados.
PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	Se describen los materiales empleados, el procedimiento de obtención o las fuentes y se hace referencia a los métodos o técnicas experimentales empleadas, mencionando, no sus aspectos generales sino los específicos para la investigación realizada.	Se describirán con cierto detalle los materiales, componentes y montaje de la práctica, así como el procedimiento seguido para la obtención de los resultados. Se recurrirá, cuando sea necesario, a esquemas ilustrativos.
RESULTADOS	Se presentan y describen los resultados experimentales con la ayuda de tablas o gráficas que recogen la información representativa pero no la reiterativa o la irrelevante. De acuerdo con el esquema global del artículo se destacan y comentan los más significativos pero no se discuten ni explican.	Deberá comprender la mayor parte de la información relevante contenida en el cuaderno de laboratorio aunque ordenada y presentada en forma de tablas y gráficas siguiendo criterios científicos. Los resultados más importantes deberán ser, asimismo, destacados y comentados.
DISCUSION	Se relacionan, interpretan y discuten los resultados obtenidos. Se contrastan con la información disponible en la bibliografía y se trata de presentar, tanto explicaciones como consecuencias coherentes. Se resumen las conclusiones o aportación del trabajo al conocimiento científico.	Se presenta el proceso de búsqueda de regularidades en el conjunto de los datos experimentales. Se obtienen las fórmulas empíricas, se comparan con otras disponibles y se discuten aspectos tales como límites de validez, fuentes de error, etc. Se finaliza con una conclusión a modo de resumen de la discusión.
REFERENCIAS	Se emplea, en cada caso, el sistema de referencias indicado expresamente por la revista a la que vaya a enviarse el artículo.	Quando se incluyan referencias se seguirá cualquiera de los sistemas habitualmente utilizados en las publicaciones científicas. El sistema número es, no obstante, el más cómodo de emplear.

descriptivas, analíticas, de tipo práctico o de naturaleza experimental convenientemente guiadas, permitirían a los estudiantes simular, en fin de cuentas, el comportamiento preferido por los "sabios" aunque en una escala de tiempos obviamente comprimida. La integración de este conocimiento complejo de un modo altamente significativo constituye una operación que requiere del alumno mucho más tiempo que el habitualmente empleado y del profesor una expertez no siempre disponible en la gestión de este tipo de operaciones que constituyen la clave de un aprendizaje efectivo y potente desde un punto de vista funcional.

Aprendizaje y comunicación

La construcción de conocimiento por parte de los científicos y de los expertos, en general, viene a ser una forma eficiente de construcción de significado cuyas leyes resultan, en lo esencial, invariantes bajo cambios en el nivel de experiencia intelectual de los sujetos protagonistas. El aprendizaje científico, aun cuando no suponga una construcción de significado en un sentido intersubjetivo lo constituye sin duda para el sujeto que aprende. Se trata, en un sentido estricto, de un proceso reconstructivo. En esa reconstrucción de conocimientos que se produce en la mente del estudiante de la mano de la comunidad científica -considerada ésta en un sentido lo suficientemente amplio como para incorporar en su seno a los profesores de ciencias- el papel de la enseñanza resulta decisivo. Mediante ella lo intrasubjetivo se funde con lo intersubjetivo, y lo hace por la vía de la comunicación interpersonal, directa o mediada; a través, en definitiva, del lenguaje.

Resulta conocida la postura claramente constructivista de Niels Bohr, para quien el mundo no es algo acabado e inalterable que sea posible considerar al margen de los sujetos cognoscentes sino un mundo que cambia con el saber que estos adquieren sobre él. Pues bien, a la pregunta ¿en qué condiciones es posible incrementar nuestro conocimiento? Bohr respondía: "*La condición necesaria es que podamos contar a otros lo que hemos hecho y lo que hemos aprendido*" (Bohr, 1927 p.40). Esta idea, mediante la cual el físico danés consagra la dimensión colectiva, o social, de la física tiene absoluta vigencia en el ámbito de la educación científica. Enseñanza y aprendizaje científico, construcción y comunicación del cono-

cimiento quedan así vinculados de un modo sustancial. Dicha vinculación no se limita tan sólo a aportar un significado al acto de enseñar coherente con una perspectiva constructivista, sino que pone el acento en una dimensión del aprendizaje, por lo general, escasamente desarrollada en los enfoques didácticos al uso. De la combinación entre el enunciado de Bohr, aplicable en primer término a la construcción de la física en tanto que disciplina científica, y el principio de invariancia se deriva el interés por la comunicación como elemento clave en la construcción, o reconstrucción, de significado que se pone en juego en el aprendizaje científico.

Al menos dos clases de situaciones de aprendizaje de corte comunicativo deberían organizarse de una forma sistemática, e integrarse en el desarrollo de un curso de ciencias, orientadas ambas a mejorar la eficiencia del proceso de construcción de significado. Unas de tipo oral en las que los alumnos tuvieran la oportunidad de exponer sus ideas a los otros, sobre cuestiones problemáticas, susceptibles, por tanto, de debate y de crítica recíproca. Otras basadas en la elaboración de textos escritos que impliquen una reconstrucción del conocimiento por parte del estudiante. El enfoque, por ejemplo, consistente en orientar la elaboración de los informes correspondientes a las prácticas de laboratorio como si se tratara de artículos para ser publicados en revistas especializadas (López Rupérez, 1987) (ver tabla 7.1) resulta perfectamente coherente con la anterior perspectiva.

Hacia un modelo integrado de conocimiento científico

Como destacamos en el capítulo 4 la perspectiva epistemológica de la complejidad está estrechamente vinculada con una filosofía de lo global (Harris, 1988) que considera el universo material, o nuestro conocimiento sobre él, como un todo en el que las partes están relacionadas entre sí de un modo sustancial. La idea de organización -a modo de invariante- recorre los diferentes niveles del sistema manifestándose, una y otra vez, a través de todos y cada uno de ellos. Una escala jerárquica de diferenciación se hace patente en una progresión de estratos de complejidad creciente que resultan compatibles, no obstante, con un comportamiento fluido o flexible del sistema.

La cuestión de la organización del conocimiento científico está

directamente vinculada con la eficiencia del aprendizaje correspondiente, de modo que se abre para ambos una nueva vía de influencia de la perspectiva de la complejidad en tanto que elemento de guía. Filósofos, psicólogos cognitivos y especialistas en educación con el propósito de introducir un poco de orden en el complejo mundo del conocimiento humano recurren, con frecuencia, a una distinción entre, al menos, dos tipos de conocimientos: el *conocimiento declarativo* y el *conocimiento procedimental*. Tal distinción, que plantea con otros términos la diferencia establecida con anterioridad por Ryle (1949) entre "conocer qué" y "conocer cómo", ha sido considerada, de hecho, como una pieza clave para la comprensión de diferentes aspectos del aprendizaje científico (Gagné, 1980; Frederiksen, 1984; Greeno, 1980, 1978; Larkin, 1980a; Shuell, 1985; White, 1985; West et al, 1985).

De acuerdo con Gagné (1980), el *conocimiento declarativo* se denomina también "conocimiento verbal" no porque sea necesariamente almacenado sólo bajo la forma de palabras sino porque se manifiesta de ese modo a través de enunciados o proposiciones. Es el tipo de conocimiento implicado en las descripciones de objetos, de conceptos o de relaciones. En el ámbito de la educación, la consideración del conocimiento conceptual como una forma de conocimiento declarativo ha constituido una posición ampliamente compartida (Champagne et al, 1985; Gagné, 1977; Ausubel, 1968; Otero, 1985).

Enfrentado a este tipo de conocimiento y representando una dimensión bien diferenciada de la anterior se sitúa, con frecuencia, el *conocimiento procedimental* como el constituido por un conjunto de destrezas o habilidades que permiten al individuo desarrollar procedimientos para la realización de una tarea ya sea intelectual ya sea psicomotora (Shnell, 1985). Los procedimientos especifican las acciones u operaciones que se deben efectuar para resolver un problema o conseguir una meta definida.

Una distinción franca entre estas dos modalidades del conocimiento es asimismo compartida por especialistas en ciencia cognitiva y por expertos en inteligencia artificial, estando asociada tal destitución a una visión clásica de la noción de concepto, sea como "átomos lógicos" o entidades primitivas (Sierra Pazos, 1987) sea como conjunto de objetos, sucesos, situaciones o símbolos que tienen ciertas características comunes. (Coll, 1991 p.89). Sin embargo,

cuando se parte de una noción de concepto acorde con la perspectiva de la complejidad, la barrera divisoria entre ambas formas de conocimiento se difumina progresivamente de modo que se hace difícil establecer con precisión dónde termina una y dónde comienza la otra. Como hemos señalado en el capítulo anterior, las condiciones de aplicación y las reglas de uso de un concepto o de un "racimo conceptual" constituyen, de hecho, una componente destacada de su estructura fina y tales reglas no dejan de ser elementos básicos del conocimiento procedimental en el ámbito científico.

En la figura 7.1 se representa, metafóricamente en forma de pirámide, los componentes del conocimiento científico que constituyen, en buena medida, el objeto de la educación científica; en dicha pirámide se integran los siguientes elementos:

A. Conocimiento verbal. Que incluye el conocimiento de términos, de proposiciones o de enunciados. Entendido en un sentido amplio supone también el conocimiento de sus respectivas expresiones simbólicas.

B. Conocimiento de conceptos. Supone el conocimiento de los atributos de los conceptos en juego y de sus relaciones internas dentro del sistema conceptual.

C. Conocimiento sobre el uso de los conceptos. Incluye las reglas de uso de los conceptos, sus condiciones de aplicabilidad, sus límites de validez y, en general, los aspectos básicos de la dimensión operacional -o, si se quiere, funcional- de los conceptos científicos.

D. Conocimiento de algoritmos. Comprende la integración de destrezas relativamente elementales, presentes de un modo incipiente en el escalón anterior, en sistemas procedimentales complejos o relativamente complejos. Constituye una forma de conocimiento compilado, esto es, organizado y almacenado de manera que resulte recuperable de un modo sencillo por parte del individuo y facilite su uso frecuente. El conocimiento algorítmico admite una estructura de diferentes niveles de complejidad encajados.

E. Conocimiento heurístico. Constituye una forma de conocimiento que facilita o sirve para el descubrimiento. Aunque posee una naturaleza por lo general más incierta o difusa que la del anterior, permite, con frecuencia, orientar la utilización de

los algoritmos en una dirección conveniente. Si bien los heurísticos son considerados como un producto de la experiencia, es posible una identificación de los mismos con fines didácticos analizando de un modo sistemático el comportamiento de sujetos expertos en su ámbito de competencia.

En esta representación integrada del conocimiento científico cada escalón se apoya en el anterior y, en cierto modo, lo incluye. Así, si se dispone de un adecuado nivel de comprensión de los conceptos, las palabras para describirlos se encontrarán, por lo general, con relativa facilidad. Pero, a su vez, un conocimiento de carácter no solo memorístico sobre el uso de los conceptos científicos constituye un estadio más avanzado de progreso en la dirección de un aumento de significado que incorpora, necesariamente, los elementos del estadio anterior. Lo mismo se podría decir del resto de los escalones superiores. Así, un algoritmo carente de contenido conceptualmente significativo, presentará una efectividad francamente limitada si el procesador de la información es un ser humano. De igual modo, los heurísticos más efectivos resultan ser aquellos que hacen referencia a un dominio de contenido específico.

El solapamiento entre el conocimiento declarativo, el conocimiento propiamente conceptual y el conocimiento procedimental se ha hecho patente en el esquema anterior (ver figura 7.1 pág. 181), reflejando, de este modo, la transición suave entre las diferentes formas de conocimiento postulada por el correspondiente modelo. Por otra parte, el poder inclusor de cada escalón aumenta en el sentido en el que aumenta el significado. El paralelismo semántico entre inclusividad y significación constituye, como es sabido, uno de los elementos clave de la teoría de Ausubel del aprendizaje conceptual. De acuerdo con Ausubel (Ausubel et al, 1976) el aprendizaje significativo tiene lugar cuando *"ideas expresadas simbólicamente son relacionadas de modo no arbitrario, sino sustancial (no al pie de la letra) con lo que el alumno ya sabe en particular con algún aspecto relevante de su estructura de conocimiento (por ejemplo una imagen, un símbolo) que tenga significado, un concepto o una proposición"* (p.41). Este proceso de *inclusión*, que constituye la esencia de la teoría de Ausubel, hace referencia a las diferentes aproximaciones que en términos de aprendizaje puede efectuar el individuo a un sistema de ideas, de hechos o de concep-

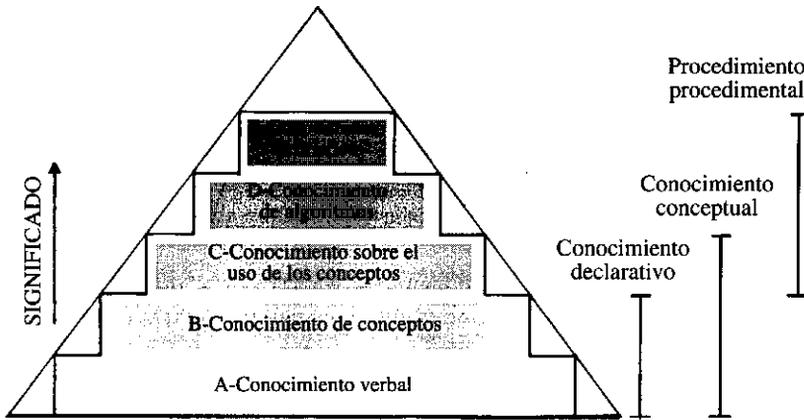


Fig. 7.1 - Representación metafórica de la estructura del conocimiento más directamente implicado en la educación científica.

tos, pero efectuados, básicamente, dentro del marco de lo que hemos denominado anteriormente conocimiento conceptual.

El modelo que aquí se propone posee otro *estatus* epistemológico, ya que la inclusión hace referencia no a diferentes versiones evolutivas de un mismo espacio de conocimiento conceptual sino a formas o modalidades de conocimiento que resultan relevantes en el aprendizaje científico. El carácter, en nuestro caso, también fundamental de la *inclusión significativa* se hace más evidente sustituyendo el anterior modelo piramidal por un *modelo de capas* como el que se representa en la figura 7.2. Las líneas de trazos, que definen los límites de cada modalidad de conocimiento pretenden reflejar el carácter abierto de dichos límites y, consiguientemente, el carácter dinámico de la integración cognoscitiva que se presenta. El aumento de significado, que se produce, en principio, en la dirección de una inclusión creciente define, de hecho, un trayecto de ida y vuelta que también en este caso se asemeja mucho más a un proceso cíclico que a otro lineal. Así, la ganancia de significado conceptual mejora el conocimiento verbal, la aplicación de los conceptos mejora el significado de estos que mejora a su vez el conocimiento verbal, etc. *Inclusión significativa* y *significación dinámica* o evolutiva vienen a ser dos aspectos importantes de un

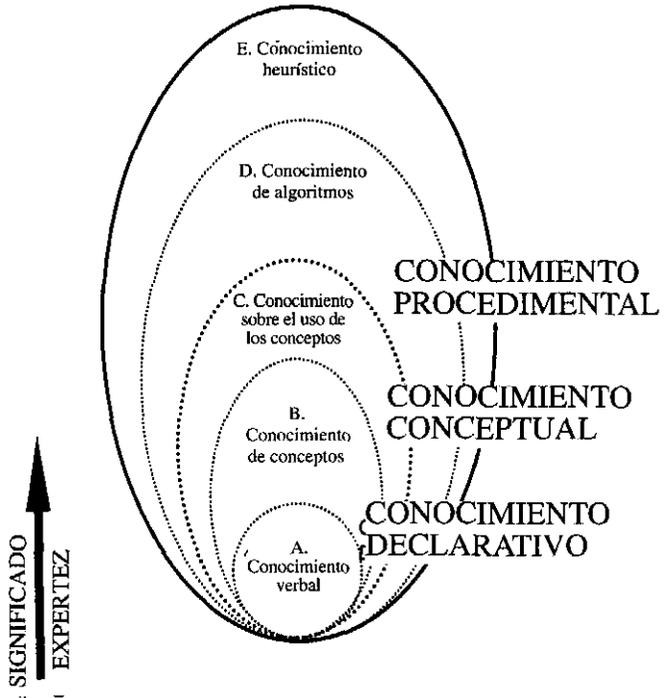


Fig. 7.2 - La dimensión de inclusión significativa de la organización del conocimiento que se propone se hace explícita en la figura mediante un modelo de capas.

modelo en el cual las ideas de jerarquía flexible, interacción entre las partes, organización y, en fin de cuentas, complejidad constituyen el sustrato epistemológico fundamental.

La construcción del conocimiento se incorpora, de este modo, a la perspectiva de la complejidad y el modelo antes descrito viene a incidir de nuevo en la necesidad de poner el acento durante ese proceso constructivo que constituye el aprendizaje científico, en todos y cada uno de los elementos relativamente diversos en él contenidos. La enseñanza de las ciencias debería tomar en consideración dicha propuesta organizativa para desarrollarla de un modo planificado en el contexto del aula. El diseño de programas de enseñanza que permitan al estudiante reconstruir la estructura fina de los con-

ceptos, compilar las correspondientes reglas de uso, adquirir saber heurístico e integrar coherentemente lo anterior en una organización cognitiva global o de conjunto, constituye una alternativa insuficientemente explorada cuyo desarrollo podría mejorar notablemente la eficacia del proceso enseñanza-aprendizaje, cuando menos, en el ámbito de las ciencias físicas.

A modo de conclusión final

"Son muchas las actitudes que uno puede asumir en la física - afirmaba Heisenberg-: puede uno tratar de formular teorías fenomenológicas, puede reflexionar sobre esquemas matemáticos rigurosos, puede examinar una filosofía y así sucesivamente" (Heisenberg, 1968). Y en ese *así sucesivamente* hemos querido incorporar, en esta ocasión, una aproximación epistemológica, y a la vez pragmática, a algunos de los grandes principios de la física fundamental contemporánea con la intención de otear en un horizonte de significado más amplio que el que corresponde a sus enunciados particulares. La apuesta por la formulación de aquéllos en términos cualitativos, bajo la forma de *principios epistemológicos*, ha constituido un recurso para transgredir las fronteras de la física -vigiladas, por lo general, celosamente por sus protagonistas- en busca de un marco más amplio, de una nueva luz, de una nueva fuente de inspiración para la construcción de otras formas de conocimiento; en particular, para una nueva orientación de la educación científica.

Cabe precisar que el recurso a lo cualitativo lo hemos contemplado, en este caso, como una búsqueda de lo metacuantitativo, de lo que está más allá de las formulaciones formales o analíticas de los principios. Visto de esta manera, y en contra de las primeras apariencias, estaríamos ante una forma de abstracción de orden superior y, por tal motivo, ante una plataforma privilegiada para acceder a niveles de generalidad más elevados, a perspectivas cognoscitivas más abarcales, más globales. Tal plataforma reposa, no obstante, -y esto es importante destacarlo- sobre el soporte relativamente sólido que ofrece la física fundamental contemporánea como construcción de una representación fiable y coherente de lo "real" contemplado a muy diversas escalas. Los llamados principios epistemológicos pueden constituir, entonces, una especie de "puentes"

entre las ciencias físicas y otras formas de conocimiento científico; y las distancias existentes entre las ciencias de la materia y las del hombre podrán verse de este modo reducidas.

En el presente trabajo hemos intentado aplicar semejante programa al ámbito de la enseñanza y del aprendizaje científicos a modo de muestra, desde luego, limitada y parcial. Una búsqueda más intensa que la nuestra podría dar lugar a la formulación de una colección más amplia de principios epistemológicos y a una explotación de los mismos, con fines de utilidad, mucho más completa. En tal caso, la educación científica podría ser ampliamente beneficiaria de una nueva fuente de inspiración que haría buena la confianza de Bohr -expresada repetidamente en sus escritos- en la validez de un principio general de unidad del conocimiento:

"La revisión de los principios necesaria para una aplicación unívoca de nuestros conceptos elementales a la comprensión de los fenómenos atómicos, tiene un alcance que sobrepasa con mucho el dominio particular de la física" (Bohr, 1964; p.3).

Esta misma convicción personal ha constituido, en fin de cuentas, el motor último del ensayo que aquí se concluye.

REFERENCIAS

- ALTUSSER,L.(1985): *Curso de filosofía para científicos*. Planeta Agostini, Barcelona.
- ANDERSON,J.R. y REDER,L.M.(1979): An Elaborative Explanation of Deep Processing. En *Levels of Processing in Human Memory* L.S. Cermak y F.I.M. Craik (Eds). Hillsdale, New York.
- ASTOLFI,J.P.(1988): El aprendizaje de conceptos científicos: aspectos epistemológicos, cognitivos y lingüísticos. *Enseñanza de las Ciencias* 6(2) 147155.
- AUSUBEL,P.D.(1968): *Educational psychology: a cognitive view*. Holt Pinehart and Winston, New York.
- AUSUBEL,P.D., NOVAK,J.D. y HANESIAN,H.(1976): *Psicología educativa. Un punto de vista cognoscitivo*. Trillas, México.
- BACHELARD,G.(1934): *Le nouvel esprit scientifique*. (16ª ed. 1984) PUF, Paris.
- BACHELARD,G.(1948): *La formación del espíritu científico*. (14ª ed.1987). Siglo XXI, Madrid.
- BALIBAR,F.(1986): *Galilée, Newton lus par Einstein. Espace et relativité*. P.U.F., París.
- BATON,J.P., COHEN-TANNOUDI,G.(1989) *L'horizon des particules*. Gallimard, Paris.
- BLANCHE,R.(1972): *L'Epistémologie*. P.U.F. París.
- BOHM,D.(1951): *Quantum Theory* cap 8. PrenticeHall Inc. New York.
- BOHM,D.(1987): *La totalidad y el orden implicado*. Ed. Kairos, Barcelona.
- BOHR,N.(1927): *La teoría atómica y la descripción de la Naturaleza* Alianza Universidad, Madrid, 1988.
- BOHR,N.(1964): *Física atómica y conocimiento humano*. Aguilar, Madrid.
- BOHR,N.(1970): *Nuevos ensayos sobre física atómica y conocimiento humano*. Aguilar, Madrid.
- BOHR,N.(1982): *La teoría atómica y la descripción de la naturaleza*. Alianza Editorial, Madrid.

- BOUTOT, A. (1990): El poder creador de las Matemáticas. *Mundo Científico* 98(10) 78-86.
- BROWN, H.I. (1988): *La nueva filosofía de la ciencia*. Tecnos, Barcelona.
- BUNGE, M. (1985): *Epistemología*. Ariel, Barcelona.
- CABIBBO, N. (1983): L'Unification des forces fondamentales. *La Recherche* 148(14) 12161224.
- CAREY, S. (1985): *Conceptual Change in Childhood*. M.I.T. Press, Cambridge, Mass.
- CARMELI, M., HULEIHIL, K.H. y LEIBOWITZ, E. (1989): *Gauge Fields. Classification and Equations of Motion*. World Scientific, Singapore.
- CARMICHAEL, P., DRIVER, R., HOLDING, B., PHILLIPS, I., TWIGGER, D. y WATTS, M. (1990): *Research on Student's Conceptions in Science: A Bibliography*. CSSME University of Leeds, Leeds.
- CARRASCOSA, J. y GIL PEREZ, D. (1992): Concepciones alternativas en mecánica. *Enseñanza de las Ciencias* 10(3) 314-328.
- CAWTHON, L.R. y ROWELL, J.A. (1978): Epistemology and Science Education. *Studies in Science Education* 5, 31-59.
- COHEN-TANNOUJJI, G. y SPIRO, M. (1990): *La Matière-espace-temps*. Gallimard, París.
- COLL, C. (1991) *Psicología y curriculum*. Paidós, Barcelona.
- CRAIK, F.I.M. y LOCKHART, R.S. (1972): Levels of Processing: A Framework for Memory Research. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior* 11, 671-676.
- CHAMPAGNE, A., GUNSTONE, R. y KLOPFER, L. (1985): Instructional Consequences of Student's Knowledge about Physical Phenomena. *Cognitive Structure and Conceptual Change* 61-90.
- CHENG, T.P. y LI, L.F. (1989): *Gauge Theory of Elementary Particle Physics*. Clarendon Press, Oxford.
- CHEVALLARD, Y. (1985): *La transposition didactique*. La pensée sauvage, Grenoble.
- CHEW, G.F. (1961): *S-Matrix Theory of Strong Interactions*. W.A. Benjamin Co., New York.
- CHEW, G.F. (1968): "Bootstrap": A Scientific Idea?. *Science* 161, 762-765.
- CHEW, G.F. (1971): Hadron Bootstrap Hypothesis. *Physical Review D* 4(8) 2330-2335.
- CHEW, G.F. y JACOB, M. (1978): *Strong Interaction Physics*. W.A. Benjamin Co., New York.
- CHI, M.T.H., FELTOVICH, P.J. y GLASER, R. (1981): Categorization and Representation of Physics Problems by Experts and Novices. *Cognitive Science* 5, 121-152.
- CHI, M.T.H., GLASER, R. y REES, E. (1982): Expertise in problem solving. En R. Sternberg (Ed) *Advances in the psychology of human intelligence* Vol. I, 7-75, LEA, Hillsdale NJ.
- CHRISTIANSON, G.E. (1986): Newton. Vol I p. 161, Salvat, Barcelona.
- DAVIES P.C.W. y BROWN J. Eds. (1990): *Supercuerdas. ¿Una teoría de todo?*. Alianza Editorial, Madrid.

- DESCARTES,R.(1637): *Discours de la méthode*. Flammarion (Ed. 1966), París.
- D'ESPAGNAT,M.(1985): *Une incertaine réalité*. Gauthiers-Villars. París.
- DIRAC,P.A.M.(1978): *The Prediction of Antimatter*. The 1st HR Crame Lecture. Publicación de la Universidad de Michigan.
- DI SESSA, A.(1979): On Learnable Representations of Knowledge: A Meaning from the Computational Methaphor. *Cognitive Process Instruction*. J. Lockhead y J. Clement (eds). The Franklin Ite. Press, Philadelphia.
- DI SESSA, A.(1982): Unlearning Aristotelian Physics: A Study of Knowledgebased Learning. *Cognitive Science* 6, 3775.
- DRIVER,R. y ERICKSON,G.(1983): Theories in Action. Some Theoretical and Empirical Uses in the Study of Student Conceptual Frameworks. *Studies in Science Education* 10, 37-60.
- DRIVER,R., GUESNE,E. y TIBERGHIE,A. (Eds.)(1985): *Children's Ideas in Science*. Open University Press, Philadelphia.
- DRIVER,R.(1988): Un enfoque constructivista para el desarrollo del curriculum en Ciencias. *Enseñanza de las Ciencias* 6(2) 109-120.
- DURAN, D.(1990): *La Systémique*. P.U.F., Paris.
- DUSCHL,R. y GITOMER,S.(1991) Epistemological Perspectives on Conceptual Change: Implications for Educational Practice. *Journal of Research in Science Teaching* 28(9), 839-858.
- EDDINGTON,A.(1952): *La naturaleza del mundo físico*. Ed. Sudamericana, Buenos Aires.
- EDDINGTON,A.(1958): *The Philosophy of Physical Science*. The University of Michigan Press, Michigan.
- ENGEL,E. y DRIVER,R.(1986): A Study of Consistency in the Use of Student's Conceptual Frameworks across Different Task Contexts. *Science Education* 70(4) 473-496.
- EINSTEIN,A.(1949): en Schilpp,P.A., *Albert Einstein, Philosopher-Scientist*. The Library of Living Philosophers. Evanston.
- EINSTEIN,A.(1984): *Notas autobiográficas*. Alianza Editorial, Madrid.
- FAYET,P.(1988): La supersymétrie et l'unification des interactions fondamentales. *La Recherche* 197 (19) 334-345.
- FERNANDEZ BUEY,F.(1991): *La ilusión del método*. Ed. Crítica, Barcelona.
- FEYNMAN,R.P.(1971): *Física Vol.III: Mecánica cuántica*. Fondo Educativo Interamericano, Bogotá.
- FINLEY,F.N.(1983): Science Process. *Journal of Research in Science Teaching* 20(1) 47-54.
- FLAVELL,J.H.(1970): *Concept Development* en P.H. Mussen (ed). Carmichael's manual of child psychology. Vol. 1, 983-1059, Willey, New York.
- FREDERIKSEN,N.(1984): Implication of Cognitive Theory for Instruction in Problem Solving. *Review of Educational Research* 54(3) 363-407.
- FREDETTE, N. y LOCHHEAD, J.(1981): Student's conceptions of electric current. *The Physics Teacher* vol. 18, 194-198.
- GAGNE,R.M.(1977): *The Conditions of Learning* (3ª ed) Holt, Rinehart & Winston, New York.

- GAGNE, R.M. (1980): Learnable Aspects of Problem Solving. *Educational Psychologist* 15(2) 84-92.
- GAISSER, J.H. y GAISSER, T.K. (1977): Partons in Antiquity. *American Journal of Physics* 45(5) 439-442.
- GALE, G. (1975): Leibniz, Chew and Wheeler on the Identity of Physical and Philosophical Inquiring. *Review of Metaphysics* 29, 323-333.
- GIL PEREZ, D. (1986): La metodología científica y la enseñanza de las ciencias: unas relaciones controvertidas. *Enseñanza de las Ciencias* 4(2) 111-121.
- GILBERT, J.K. y WATTS, S.M. (1983): Concepts, Misconceptions and Alternative Conceptions: Changing Perspectives in Science Education. *Studies in Science Education* 10, 61-98.
- GOLDSTEIN, H. (1970): *Mecánica clásica*. Aguilar, Madrid.
- GRANGER, G.G. (1989): Epistémologie. *Enciclopedia Universalis* vol. 8, 565-572 París.
- GREEN, M.B. (1985): Unification of Forces and Particles in Superstrings Theories. *Nature* 314, 409-414.
- GREEN, M.B. (1986): Supercuerdas. *Investigación y Ciencia* 122, 26-39.
- GREENO, J.G. (1978): Understanding and Procedural Knowledge in Mathematics Instruction. *Educational Psychologist* 12(3) 262-282.
- GREENO, J.G. (1980): Trends in the Theory of Knowledge for Problem Solving. *Problem Solving and Education: Issues in Teaching and Research*. D.I.TUMA y F.REIF (Eds). 9-23 LEA, Hillsdale.
- GUSSARKY, E. y GORODETSKY, M. (1988): On the Chemical Equilibrium Concept: Constrained Word Associations and Conception. *Journal of Research in Science Teaching* 25(5) 319-333.
- HARRIS, E.E. (1988): *New Conceptions of the Universe*. George Mason University Symposium, Washington.
- HEISENBERG, W. (1959): *Física y filosofía*. Ed. La Isla, Buenos Aires.
- HEISENBERG, W. (1975): *Development of Concepts in the History of Quantum Theory*. *American Journal of Physics* 43(5).
- HEISENBERG, W. (1976): *The Nature of Elementary Particles*. *Physics Today* 32-39
- HEMPEL, C.G. (1981): *La filosofía de la ciencia natural*. Alianza Editorial, Madrid.
- HERRON, J.D., CANTU, L.L., WARD, R. y SRINIVASAN, V. (1977): Problems Associated with Concept Analysis. *Science Education* 61(2), 185-199.
- HEWSON, P.W. (1981): A Conceptual Change Approach to Learning Science. *European Journal of Science Education* 3(4) 383-396.
- HEWSON, P.W. (1992): El cambio conceptual en la enseñanza de las ciencias y la formación de Profesores. CIDE (Documento fotocopiado).
- HEWSON, P.W. y HEWSON, M.G. (1988): An Appropriate Conception of Teaching Science: A View from Studies of Science Learning. *Science Education* 72(5) 597-614.
- HIERREZUELO, J. y MONTERO, A. (1989): *La ciencia de los alumnos: su utilización en la didáctica de física y Química*. LAIA/MEC, Barcelona.

- HODSON,D.(1985): Philosophy of Science, Science and Science Education. *Studies in Science Education* 12, 25-67.
- HOLTON,G.(1976): *Introducción a los conceptos y teorías de las ciencias físicas*. Ed. Reverté, Barcelona.
- HOLTON,G.(1981): *L'imagination Scientifique*. Gallimard, París. Traducción al francés de Thematic Origins of Scientific Thought: Kepler to Einstein, Cambridge (Mass.) University Press, 1973 y The Scientific Imagination: Case Studies Cambridge, Cambridge University Press, 1978.
- INFELD,L.(1983): *Einstein. Su obra y su influencia en el mundo de hoy*. Ed. Leviatán, Buenos Aires.
- JAMER,M.(1966): *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*. Mc GrawHill, New York.
- JOHNSON,P.E.(1967) Some Psychological Aspects of Subjectmatter Structure. *Journal of Educational Psychology* 58(2) 75-83.
- KEMPA, R.F. y NICHOLLS,C.E.(1983): Problem-Solving Ability and Cognitive Structure: An Exploratory Investigation. *European Journal of Science Education* 5(2) 171-184.
- KHUN,T.S.(1970a): *Postscript*, en The Structures of Scientific Revolutions, University of Chicago Press, Chicago (Posdata en la estructura de las resoluciones científicas. Fondo de cultura económica, México 1971).
- KHUN,T.S.(1970b): Reflections on my critics en *Criticism and the growth of knowledge* Lakatos y Musgrave (eds). Cambridge University Press, Cambridge (*Crítica y desarrollo del conocimiento* Grijalbo, Barcelona,1975).
- KLAUSMEIER,H.J., SCHWENN,E. y FRAYER,D.A.(1974): *Conceptual Learning and Development. A cognitive View*. Academic Press, New York.
- LABOV,W.(1973): *The Boundaries of Words an Their Meaning* en New ways of analyzing variation in English. Ed. C.T.N. Bailey and R.W. Shuy, vol. 1. Georgetown University Press, Washington.
- LAKATOS,I.(1983): *La metodología de los programas de investigación científica*. Alianza Ed. Madrid.
- LALOE,F.(1987): Las sorprendentes predicciones de la mecánica cuántica. *Mundo Científico* 65(7) 94-104.
- LARKIN,J.H. y REIF,F.(1979): Understanding and Teaching Problem Solving in Physics. *European Journal of Science Education* 1,191203.
- LARKIN,J.H.(1980): Teaching Problem Solving in Physics. The Psychological Laboratory and the Practical Classroom. En D. TUMA y F. REIF (Eds). *Problem Solving and Education Issues in Teaching and Research*. LEA, Hillsdale.
- LE MOIGNE,J.L.(1977): *La théorie du système général*. P.U.F. París.
- LEITE LOPES,M.(1990): *Atome*. Enciclopedia Universalis, vol 3 p.382.
- LEVY-LEBLOND,J.M.(1989): *Symétrie et espace-temps* en La Symétrie aujourd'hui. Ed. E. Noëi. Editions du Seuil, París.
- LEWIN,K.(1991): *Epistemología comparada*. Tecnos, Madrid.
- LINN,M.C.(1987): Establishing a research base for Science Education: Cha-

- llenges and Recommendations. *Journal of Research in Science Teaching* 24(3) 191-216
- LOPEZ RUPEREZ, F.(1985): Educación científica y Enseñanza de las Ciencias. *Mundo Científico* 5(50) 915-916.
- LOPEZ RUPEREZ, E.(1983): Las nociones de trabajo y energía. Análisis conceptual y didáctico. *Bordon* 249, 499-506.
- LOPEZ RUPEREZ, F.(1987): *Cómo estudiar física*. MEC/Vicens Vives, Barcelona.
- LOPEZ RUPEREZ, F.(1988): *Bases para el diseño de módulos EAO en física*. Centro Anaya de Investigación. Documento interno.
- LOPEZ RUPEREZ, F.(1990): Epistemología y didáctica de las ciencias. Un análisis de segundo orden. *Enseñanza de las Ciencias* 8(1) 65-74.
- LOPEZ RUPEREZ, F.(1991): *Organización del conocimiento y resolución de problemas en física*. CIDE-MEC, Madrid.
- LUPASCO,S.(1982): *Les trois matières*. Ed. Cohérance, Strasbourg.
- LUPASCO,S.(1989): *L'expérience microphysique et la pensée humaine*. Ed. du Rochier, París.
- MANSFIELD,V. y SPIEGELMEN,J.M.(1989): *Quantum mechanics and Jungian Psychology: building a brigde*. *Journal of Analytical Psychology* 34, 3-31.
- MARIN MARTINEZ,N. y JIMENEZ GOMEZ,E.(1992): Problemas metodológicos en el tratamiento de las concepciones de los alumnos en el contexto de la filosofía e historia de la ciencia. *Enseñanza de las Ciencias* 10(3) 335-339.
- MARKOVA,I.(1982): *Paradigms Thought and Language*. John Wiley & sons. Chichester.
- MARSHALL, (1989): *Consciousness and Bose-Einstein Condensates*. *New Ideas in Psychology* 7(1) 73-83.
- MATE HERNANDEZ,J.L. y PAZOS SIERRA,J.(1988): *Ingeniería del conocimiento. Diseño y construcción de sistemas expertos*. SEPA, Córdoba Argentina.
- MC DERMOTT,L.C.(1984): An Overview of Research on Conceptual Understanding in Mechanics. *Physics Today* 37, 7-24.
- MERLAU-PONTY,J.(1993): *Einstein*. Flammarion, París
- MESSIAH,A.(1965) *Mecánica cuántica Vol.I*. Tecnos, Madrid.
- MILLER,A.I.(1984): *Imagery in Scientific Thought*. Ed. Birkhäuser, Boston.
- MORIN,E.(1990): *Introduction à la pensée complexe*. ESF Editeur, París.
- MOUNIN,G.(1990): Structure et sens en *Encyclopaedia Universalis* 20, 873-876. París.
- NEEMAN,Y.(1979): *Symétries, jauges et varietés de groupe*. Les Presses de l'Université de Montréal.
- NEWTON,I.(1730): *Opticks, or a Treatise of the Reflections, Refractions, Inflections and Colours of Light*. Córdor (Citado en PATY,1988 p.113).
- NICKERSON,R.S., PERKINS,D.N. y SMITH,E.L.(1985): *The Teaching of Thinking*. Hillsdale, LEA.

- NICOLESCU,B.(1985): *Nous la particule et le monde*. Ed. Le Mail, París.
- NICOLESCU,B.(1988): *La Science, le sens et l'évolution. Essai sur Jakob Bohème*. Ed. du Félin, París.
- NICOLESCU,B.(1989): Prefacio de *L'expérience microphysique et la pensée humaine*. (Lupasco,1979) Ed. du Rochier, París.
- NOVAK,J.D.(1982): *Teoría y práctica de la educación*. Alianza Universidad, Madrid.
- NOVAK,J.D. y GOWIN,D.B.(1984): *Learning How to Learn*. Cap. 2. Cambridge University Press, Cambridge.
- NOVAK,J.D, GOWIN,D.B. y JOHANSEN,G.T.(1985): The Use of Concept Mapping and Knowledge vee Mapping with Junior High School Science Students. *Science Education* 67(5) 625-645.
- NOVAK,J.D.(1988): Constructuivismo humano: un consenso emergente. *Enseñanza de las Ciencias* 6(3) 213-223.
- OPPENHEIMER,J.R.(1953): *Science on the Commun Understanding*. Simon and Schuster, New York.
- ORTOLIS,S. y PHARABOD,J.P.(1985): *El cántico de la cuántica. ¿Existe el mundo?*. Gedisa, Barcelona.
- OTERO,J.(1985): El aprendizaje de los conceptos científicos en los niveles medio y superior de la enseñanza. *Revista de Educación* 278, 39-66.
- PATY,M.(1988): *La matière derobée. L'appropriation critique de l'objet de la physique contemporaine*. Ed. des Archives contemporaines, París.
- PATY,M.(1993): *Einstein philosophe*. P.U.F. París.
- PERRIN,J.(1970): *Les Atomes* (1913). Gallimard, París.
- PIAGET,J.(1959): *Apprentissage et connaissance*. P.U.F. París.
- PIAGET,J.(1976): *L'Epistémologie Génétique*. P.U.F. París
- PIAGET,J. y GARCIA,R.(1981): *Psicogénesis e historia de la ciencia*. Siglo XXI, México.
- PIATELLI-PALMARINI, M.(1980): *Language and Learning: The Debate between Jean Piaget and Noam Chomsky*. Rontledge and Kegan Paul, London.
- PINES,A.L.(1985) Toward a Taxonomy of Conceptual Relations and the Implications for the Evaluations of Cognitive Structures en *Cognitive Structure and Conceptual Change*. L.H.T. West y A.L. Pines (eds). Academic Press, New York.
- PLANCK,M.(1949): *Scientific Autobiography and other Papers*. Philosophical Library, New York.
- POSNER,G.J.,STRIKE,K.A.,HEWSON,P.W.y GERTZOG,H.(1982): Acommodation of a Scientific Conception: Toward a Theory of Conceptual Change. *Science Education* 66(2) 211-277.
- POZO,J.I.(1987): *Aprendizaje de la ciencia y pensamiento causal*. Visor, Madrid.
- POZO,J.I.(1989): *Teorías cognitivas del aprendizaje*. Ed. Morata. Madrid.
- PREECE,P.F.W.(1978): Exploration of Semantic Space: Review of Research on the Organization of Scientific Concepts in Semantic Memory. *Science Education* 62(4) 547-562.

- REIF, F. (1981): Teaching Problem Solving. A Scientific Approach. *The Physics Teacher*, may, 310-314.
- RESNICK, L. B. (1983): Mathematics and Science Learning: A New Conception. *Science* 220, 477-478
- ROGERS, P. J. (1982): Epistemology and History in the Teaching of School Science. *European Journal in Science Education* 4(1) 1-10.
- ROSENFELD, L. (1963): Niels Bohr's Contribution to Epistemology. *Physics Today* oct. 47-53.
- ROSENFELD, L. (1968): *Niels Bohr in the Thirties*. en Rozental (ed). Niels Bohr: His Life and Work as Seen by his Friends and Collegues. Noth Holland Amsterdam, Publishing Co.
- RYLE, G. (1949): *The Concept of Mind*. Hutchinson, London.
- SCURATI, C. y DAMIANO, E. (1977): *Interdisciplinaridad y didáctica*. Adara, La Coruña.
- SEARLE, J. (1985): *Mentes, cerebros y ciencia*. Cátedra, Madrid.
- SELLERI, F. (1986) *El debate de la teoría cuántica*. Alianza Universidad, Madrid.
- SERRANO GISBERT, T. (1987): Los marcos alternativos de los alumnos, un nuevo enfoque de la investigación sobre el aprendizaje de las ciencias. *Bordón* 268, 363-386.
- SHANAHAN, T. (1989): Kant Naturphilosophie and Oersted's discovey of electromagnetism: a reassessment. *Studies in History and Philosophy of Science Sept* 287-305.
- SHAVELSON, R. J. (1972): Some Aspects of the Correspondance between Content Structure and Cognitive Structure in Physics Instruction. *Journal of Educational Psychology* 63(3) 225-234.
- SHAVELSON, R. J. (1973): Learning from Physics Instruction. *Journal of Research in Science Teaching* 10(2) 101-111.
- SHAVELSON, R. J. (1974): Methods for Examining Representatios of a Subject-matter Structure in a Student' Memory. *Journal of Research in Science Teaching* 11(3) 231-249.
- SHUELL, T. J. (1985): Knowledge Representation Cognitive Structure and School Learning: A Historical Perspective. *Cognitive Structure and Conceptual Change* 117-129.
- SHUELL, T. J. (1987): Cognitive Psychology and Conceptual Change: Implication for Teaching Science. *Science Education* 71(2), 239-250.
- SIERRA PAZOS, J. (1987): La ingeniería del conocimiento y su aplicación en el Sistema Educativo. *Bordón* 269, 523-547.
- SMITH, E. E. y MEDIN, D. L. (1981): *Categories and Concepts*. Havard University Press, Cambridge, Mass.
- STRIKE, K. A. y POSNER, G. J. (1985): *A Conceptual Change View of Learning and Understanding*. *Cognitive Structure and Conceptual Change*. L. H. T. WEST y A. LEON (eds) 211-230 Academic Press, New York.
- TERHART, E. (1988): Philosophy of Science and School Science Teaching. *International Journal in Science Education* 10(1) 11-16.

- THUILLIER,P.(1989): Isaac Newton: un alquimista distinto de los demás. *Mundo Científico* 95(9) 944-957.
- THUILLIER,P.(1990a): ¿Volverá la mecánica cuántica a reencantar el mundo?. *Mundo Científico* 88(10) 88-94, y sus referencias.
- THUILLIER,P.(1990b): De la filosofía al electromagnetismo: el caso Oersted. *Mundo Científico* 102(10) 562-568.
- TRHO,M.P.(1978): Relationships between Associative and Content Structure of Physics Concepts. *Journal of Educational Psychology* 70(6) 971-978.
- TROWBRIDGE,D.E. y McDERMOTT,M.C.(1980): An Investigation of Student's Understanding of the Concept of Velocity in One Dimension. *American Journal of Physics* 48, 1020-1028.
- TROWBRIDGE,D.E. y McDERMOTT,M.C.(1981): An Investigation of the Concept of Acceleration in One Dimension. *American Journal of Physics* 49, 242-253.
- TOULMIN,S.(1977): *La comprensión humana I. El uso colectivo y la evolución, de los conceptos*. Alianza Editorial. Madrid 1977.
- TVESKY, A. y KAHNEMAN,D.(1973): Availability: A Heuristic for Judging Frequency and Probability. *Cognitive Psychology* 5, 207-232.
- VILLENA,L.(1988): Miguel Catalán, un líder truncado de la física española. *Revista Española de física* 2(3) 52-56.
- WEST,L.H.T.(1982): The Researchers and Their Work en C. Sutton y L. West (eds). *Investigating children's existing ideas about science*. University of Leicester, School of Education, Leicester.
- WEST,L.H.T., FENSMAN,P.J.y GARRAND (1985): Describing the Cognitive Structures of Learners Following Instruction in Chemistry. *Cognitive Structure and Conceptual Change* L.H.T. WEST y A.L. PINES (Eds). 29-48. Academic Press, Orlando.
- WESTFALL,R.S.(1980): *Never at Rest: A Biography of Isaac Newton*, Cambridge University Press.
- WHITE,R.T.(1979): Describing Cognitive Structure. Artículo presentado a la *Australian Association for Educational Research*, Melbourne, Noviembre, 198-212.
- WHITE,R.T.(1985): Interview Protocols and Dimensions of Cognitive Structure. *Cognitive Structure and Conceptual Change* L.H.T. WEST y A.L. PINES (Eds). 51-58. Academic Press, Orlando.
- WHITE,B.Y.(1983): Sources of Difficulty in Understanding Newtonian Dynamics. *Cognitive Science* 7, 41-65.
- WHITTAKER,E.(1951): *Eddington's Principle in the Philosophy of Science*. Cambridge University Press, Cambridge.
- ZOHAR,D.(1990): *La conciencia cuántica*. Plaza & Janés, Barcelona.
- ZYLBERSTAIN,A.(1983): *A Conceptual Framework for Science Education: Investigating Curricular Material and Classroom Interactions in Secondary School Physics*. Tesis Ph.D. no publicada. (Citado en Gilbert et al,1983).



Ministerio de Educación y Ciencia

Secretaría de Estado de Educación

Dirección General de Renovación Pedagógica