

Más es diferente *

P. W. Anderson

Laboratorios Bell, Nueva Jersey, Estados Unidos

La ruptura de simetría y la naturaleza de la estructura jerárquica de la ciencia

Es posible que la hipótesis reduccionista sea todavía motivo de controversia entre filósofos, pero pienso que la hipótesis es aceptada sin cuestionamientos por la gran mayoría de los científicos. El funcionamiento de nuestras mentes, de nuestros cuerpos y de toda la materia animada e inanimada de la cual tenemos un conocimiento detallado, se asume que está controlado por el mismo conjunto de leyes fundamentales, el cuál, excepto bajo ciertas condiciones extremas, conocemos bastante bien.

Parece inevitable acordar acriticamente con lo que, a primera vista, surge como un corolario obvio del reduccionismo: que si cada cosa obedece las mismas leyes fundamentales, entonces los únicos científicos que están estudiando algo realmente fundamental son aquellos que están trabajando en esas leyes. En la práctica, esto involucra a algunos astrofísicos, algunos físicos de partículas elementales, algunos lógicos y matemáticos y unos pocos más. Este punto de vista -oponerse al mismo es el principal propósito de este artículo- está expresado en un pasaje bastante conocido de Weisskopf¹:

Mirando el desarrollo de la ciencia en el siglo veinte uno puede distinguir dos tendencias, a las cuales llamaré investigación intensiva e investigación extensiva, a falta de una terminología mejor. Brevemente: la investigación intensiva se dedica a las leyes fundamentales, la investigación extensiva se dedica a la explicación de los distintos fenómenos en función de las leyes fundamentales conocidas. Como siempre, distinciones de este tipo tienen algo de ambigüedad, pero en la mayoría de los casos son claras. La física del estado sólido, la física del plasma y quizás también la biología son extensivas. La física de alta energía y una buena parte de la física nuclear son intensivas. Siempre hay mucho menos investigación intensiva desarrollándose que extensiva. Una vez que nuevas leyes fundamentales son descubiertas, una gran actividad comienza en orden para aplicar los descubrimientos a los hasta entonces fenómenos inexplicados. Por lo tanto, la investigación básica tiene dos dimensiones. La frontera de la ciencia se extiende todo a lo largo de una larga línea, desde la más reciente investigación intensiva, pasando por la investigación extensiva generada por la investigación intensiva de ayer, hasta la amplia y bien desarrollada red de actividades de investigación extensiva basada en investigaciones intensivas de décadas pasadas.

Un buen indicador de la efectividad de este mensaje es que lo escuché citado recientemente por un científico líder del área de ciencia de materiales, quien quería convencer a los participantes de un congreso dedicado a los "problemas fundamentales en la física de la materia condensada" a que acepten que existían muy pocos o ninguno de tales problemas, y que nada había quedado por hacer excepto ciencia extensiva, la cual este señor parecía equiparar a la ingeniería de aparatos.

La principal falacia de esta clase de argumentos es que la hipótesis reduccionista no implica de ninguna manera una hipótesis "construccionista": La habilidad de reducir cada cosa a leyes fundamentales simples no implica la habilidad de comenzar con aquellas leyes y reconstruir el universo. De hecho, cuanto más nos dicen los físicos de partículas acerca de la naturaleza de las leyes fundamentales, menor es la relevancia que parecen tener esas leyes para los problemas muy reales del resto de la ciencia, y mucho menor aún para los problemas de la sociedad.

La hipótesis construccionista se quiebra cuando es confrontada con las dificultades gemelas de escala y complejidad. Resulta ser que el comportamiento de grandes y complejos agregados de partículas elementales no puede ser entendido en términos de una simple extrapolación de las propiedades de unas pocas partículas. En su lugar, en cada nivel de complejidad aparecen propiedades completamente nuevas, y el entendimiento de los nuevos comportamientos requiere de investigación que considero tan fundamental en su naturaleza como cualquier otra. Esto es, me parece que se pueden acomodar las ciencias más o menos linealmente en una jerarquía de acuerdo a la siguiente idea: las entidades elementales de la ciencia X obedecen las leyes de la ciencia Y.

X	Y
Física del estado sólido o de muchos cuerpos	Física de las partículas elementales
Química	Física de muchos cuerpos
Biología molecular	Química
Biología celular	Biología molecular
⋮	⋮
Psicología	Fisiología
Ciencias sociales	Psicología

* Artículo publicado en la revista Science del 4 de agosto de 1972

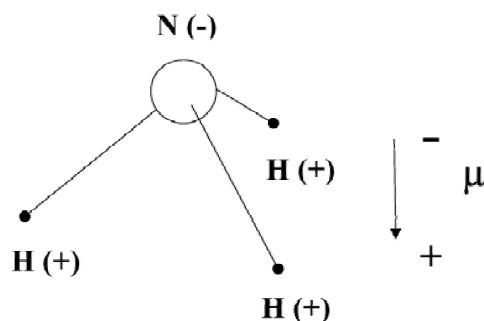
Pero esta jerarquía no implica que la ciencia X es simplemente ciencia Y aplicada. En cada nivel son necesarias leyes, conceptos y generalizaciones enteramente nuevos, requiriendo un grado tan grande de inspiración y creatividad como en el nivel previo. Psicología no es biología aplicada, ni biología es química aplicada.

En mi área de trabajo, la física de muchos cuerpos, estamos, quizás, más cerca de nuestros apuntalamientos intensivos que en cualquier otra ciencia en la cual ocurren complejidades no triviales, y como resultado de ello hemos comenzado a formular una teoría general de cómo tiene lugar el pasaje desde las diferencias cuantitativas hacia las cualitativas. Esta formulación, denominada la teoría de la "ruptura de simetría", puede ser de ayuda para dejar en claro el fracaso del recíproco constructor del reduccionismo. Daré una elemental e incompleta explicación de estas ideas y luego haré algunos comentarios más generales y especulativos acerca de analogías en otros niveles y acerca de fenómenos similares.

Antes de comenzar deseo despejar dos posibles fuentes de desentendimiento. Primero, cuando hablo de cambios de escala causando cambios fundamentales no significa la idea, bastante bien comprendida, de que los fenómenos a una nueva escala pueden obedecer leyes fundamentales diferentes -así, por ejemplo, la relatividad general es requerida en la escala cosmológica y la mecánica cuántica en la escala atómica. Aceptaré que toda la materia ordinaria obedece la simple electrodinámica y la teoría cuántica, y eso cubre realmente la mayor parte de lo que voy a discutir. (Como dije, todos debemos empezar con el reduccionismo, el cual acepto completamente). Una segunda fuente de confusión puede ser el hecho de que el concepto de ruptura de simetría ha sido tomado prestado por los físicos de partículas elementales, pero el uso que hacen del término es estrictamente una analogía, falta entender si esta analogía es profunda o no.

Permítanme entonces empezar mi discusión con un ejemplo en el nivel más simple posible, uno natural para mí porque he trabajado con él cuando era un estudiante de doctorado: la molécula de amoníaco. En aquellos tiempos todos conocían al amoníaco y lo usaban para calibrar su teoría o su aparato, y yo no era la excepción. Los químicos le dirán a usted que la molécula de amoníaco "es" una pirámide triangular con el nitrógeno cargado negativamente y los hidrógenos cargados positivamente, y que por lo tanto tiene un momento dipolar eléctrico (μ), negativo apuntando hacia el ápice de la pirámide. Pero esto me parecía muy extraño, porque me acababan de enseñar que nada tiene un momento dipolar eléctrico. El profesor nos había demostrado que ningún núcleo tiene un momento dipolar, él estaba enseñando física nuclear y como sus argumentos se basaban en la simetría del espacio y el tiempo debían haber sido correctos en general.

Pronto aprendí que, de hecho, esos conceptos eran correctos (o quizás sería más preciso decir que no eran incorrectos) porque el profesor había sido cuidadoso en decir que ningún estado estacionario de un sistema (es decir, un



estado que no cambia con el tiempo) tiene un momento eléctrico dipolar. Si la molécula de amoníaco está en la configuración asimétrica de arriba en un dado instante, no permanecerá en ese estado mucho tiempo. Gracias al fenómeno cuántico de tuneo, el nitrógeno puede filtrarse a través del triángulo de hidrógenos hacia el otro lado, dando vuelta la pirámide, y, de hecho, puede hacer esto muy rápidamente. Este es el proceso de "inversión" y ocurre con una frecuencia de cerca de 3×10^{10} veces por segundo. Un verdadero estado estacionario involucrará una superposición de la pirámide con su punta hacia arriba y su inversa, en proporciones iguales. Esta mezcla no tiene un momento dipolar (Advierto al lector otra vez que estoy sobresimplificando el problema y lo remito a los libros de texto para los detalles).

No haré la demostración, pero el estado de un sistema, si es estacionario, debe siempre tener la misma simetría que las leyes de movimiento que lo gobiernan. Una razón puede ser dada muy simplemente: en mecánica cuántica existe siempre un camino, al menos que la simetría lo prohíba, para ir de un estado hacia otro. Así, si comenzamos en cualquiera de los estados asimétricos, el sistema hará transiciones hacia otros estados, de forma tal que solamente sumando todos los posibles estados asimétricos de una manera simétrica podemos obtener un estado estacionario. La simetría involucrada en el caso de la molécula de amoníaco es la paridad, la equivalencia entre mirar a las cosas directamente o mirarlas reflejadas en un espejo, la simetría de izquierda y derecha (El descubrimiento de ciertas violaciones de la paridad no es relevante a esta cuestión; esos efectos son muy débiles para afectar la materia ordinaria).

Habiendo visto como la molécula de amoníaco satisface nuestro teorema de que no existe un momento dipolar, podemos mirar a otros casos y, en particular, estudiar progresivamente sistemas más grandes para ver si el estado y la simetría están siempre relacionados. Existen otras moléculas piramidales similares, hechas de átomos más pesados. El fosfito de hidrógeno, PH_3 , el cual es dos veces más pesado que el amoníaco, se invierte, pero diez veces más lentamente que la molécula de amoníaco. En el trifluorido de fósforo, PF_3 , en el cual la mucho más pesada fluorina sustituye al hidrógeno, no se observa que se invierta a un ritmo mensurable, aunque teóricamente

uno puede estar seguro que un estado preparado en una orientación se invertirá en un tiempo razonable.

Podemos ir entonces a moléculas más complicadas, tales como un azúcar, con cerca de 40 átomos. Ya no tiene más sentido esperar que estas moléculas se inviertan. Cada molécula de azúcar fabricada por un organismo vivo está espiralada en el mismo sentido, y nunca se invierte, ni debido al tuneo cuántico o ni debido a la agitación térmica a temperaturas normales. En este punto debemos olvidarnos acerca de la posibilidad de inversión e ignorar la simetría de paridad: las leyes de simetría no han sido revocadas, sino rotas.

Sí, por otro lado, sintetizamos nuestras moléculas de azúcar mediante una reacción química más o menos en equilibrio térmico, encontraremos que en promedio hay tantas moléculas espiraladas para un lado como para el otro. En la ausencia de nada más complicado que una colección de moléculas libres, las leyes de la simetría nunca son rotas en promedio. Nosotros necesitamos materia viva para producir una asimetría real en las poblaciones.

En gigantescos, pero aún inanimados, agregados de átomos, un tipo diferente de ruptura de simetría puede ocurrir, otra vez conduciendo a un momento dipolar neto. Muchos cristales tienen un momento dipolar neto en cada una de sus unidades elementales (píroelectricidad) y, en algunos cristales, este momento puede ser revertido mediante un campo eléctrico (ferroelectricidad). Esta asimetría es un efecto espontáneo de la búsqueda del cristal de su estado de menor energía. Por supuesto, el estado con el momento opuesto también existe y tiene, por simetría, justo la misma energía, pero el sistema es tan grande que ninguna fuerza térmica o cuántica puede causar la conversión de uno hacia el otro en un tiempo finito, comparado con, por decir algo, con la edad del universo.

Existen al menos tres inferencias que pueden ser extraídas de esto. Una es que las simetrías son de gran importancia en la física. Por simetría entendemos la existencia de distintos puntos de vista desde los cuales un sistema parece el mismo. No es exagerado decir que la física es el estudio de las simetrías. La primera demostración del poder de esta idea puede haber sido dada por Newton, el cual pudo haberse preguntado a sí mismo: ? Y si la materia que tengo entre mis manos obedece las mismas leyes que la materia que esta allá arriba en el cielo?, es decir, ? y si el espacio y la materia son homogéneos e isotrópicos?

La segunda inferencia es que la estructura interna de un pedazo de materia no necesita ser simétrica aún si su estado total lo es. Lo desafío a usted a que parta de las leyes fundamentales de la mecánica cuántica y prediga la inversión de la molécula de amoníaco y sus propiedades fácilmente observables, sin hacer uso de la estructura piramidal asimétrica, aunque ningún "estado" tenga esa estructura. Es fascinante que sólo un par de décadas atrás² los físicos nucleares dejaron de pensar en el núcleo como un pequeña bola sin estructura, simétrica, y se dieron

cuenta que aunque realmente nunca tiene un momento dipolar, puede tomar la forma de un plato o de una pelota de fútbol. Estas formas tienen consecuencias observables en las reacciones y los espectros de excitación que son estudiado en física nuclear, pero son mucho más difíciles de demostrar directamente que la inversión del amoníaco. En mi opinión, este tipo de investigación es tan fundamental en su naturaleza como otras que uno podría etiquetar como intensivas. Pero no requiere un nuevo conocimiento de las leyes fundamentales y habría sido extremadamente difícil derivar sintéticamente de aquellas leyes; fue simplemente una inspiración, basada en la intuición de todos los días, la cual repentinamente explicaba todo un conjunto de fenómenos.

La razón básica de porqué este resultado hubiese sido difícil de derivar es muy importante para nuestro posterior desarrollo. Si el núcleo es suficientemente pequeño no existe una manera real de definir su forma rigurosamente: tres o cuatro o diez partículas dando vueltas, una alrededor de otra, no definen un plato o una pelota rotantes. Sólo cuando el núcleo es considerado un sistema de muchos cuerpos -lo que frecuentemente se conoce como el límite $N \rightarrow \infty$ - es cuando tal comportamiento es rigurosamente definible. Nos decimos a nosotros mismos: Un cuerpo macroscópico de tal forma tendría tal y tal espectro de excitaciones rotacionales y vibracionales, de naturaleza completamente diferente al de aquellos que caracterizan a un sistema sin estructura. Cuando vemos tal espectro, aunque no tan separado, o de alguna forma imperfecto, reconocemos que el núcleo es, después de todo, no macroscópico, meramente se está acercando al comportamiento macroscópico. Comenzando con las leyes fundamentales y una computadora, tendríamos que haber hecho dos cosas imposibles -resolver un problema con infinitamente muchos cuerpos y luego aplicar el resultado a un sistema finito- para que hayamos sintetizado este comportamiento.

La tercera inferencia es que el estado de un sistema realmente grande no tiene porque tener la simetría de las leyes que lo gobiernan; de hecho, tiene usualmente menos simetría. El ejemplo más sobresaliente es el cristal: construido a partir de un conjunto de átomos y de vacío, de acuerdo a las leyes que expresan la perfecta homogeneidad del espacio, el cristal repentina e impredeciblemente muestra una nueva y muy hermosa simetría. La regla general, sin embargo, aún en el caso del cristal, es que el sistema grande es menos simétrico que lo que la estructura subyacente sugeriría: simétrico como es, un cristal es menos simétrico que la perfecta homogeneidad.

Quizás en el caso de cristales esto parece ser meramente un ejercicio de confusión. La regularidad de los cristales pudo ser deducida semiempíricamente a mediados del siglo XIX sin recurrir a ningún razonamiento complicado. Pero algunas veces, como en el caso de la superconductividad, la nueva simetría -ahora llamada ruptura de simetría porque la simetría original no es más evidente- puede ser de una clase enteramente inesperada y extremadamente difícil de visualizar. En el caso de la

superconductividad, 30 años pasaron entre el momento en que los físicos estuvieron en posesión de cada ley fundamental necesaria para explicarla y el tiempo en que efectivamente fue explicada.

El fenómeno de superconductividad es el ejemplo más espectacular de simetrías rotas que pueden sufrir los objetos macroscópicos ordinarios, pero, por supuesto, no es el único ejemplo. Antiferromagnetos, ferroeléctricos, cristales líquidos y materia en muchos otros estados obedecen un cierto esquema bastante general de ideas y reglas, los que algunos teóricos de muchos cuerpos refieren bajo el título general de ruptura de simetría. No discutiré la historia, pero doy una bibliografía al final de este artículo³.

La idea esencial es que en el límite denominado $N \rightarrow \infty$ de sistemas grandes (la escala macroscópica) no es tan solo conveniente sino esencial darse cuenta que la materia sufrirá singulares "transiciones de fases" a estados en los cuales las simetrías microscópicas, y aún las ecuaciones microscópicas del movimiento, son, en cierto sentido, violadas. La simetría deja detrás como su única expresión ciertos comportamientos característicos, por ejemplo, vibraciones de longitudes de onda largas, de los cuales el ejemplo más familiar es el de las ondas sonoras, o el inusual fenómeno macroscópico de conducción del superconductor, o, en una muy profunda analogía, la propia rigidez de las redes cristalinas, y por lo tanto, de la mayor parte de la materia sólida. No hay dudas, por supuesto, que realmente el sistema no está violando la simetría de espacio y tiempo, sino que las está rompiendo, pero como sus partes encuentran energéticamente más favorable mantener ciertas relaciones fijas unas con otras, la simetría permite que el cuerpo responda a las fuerzas externas únicamente como un todo.

Esto conduce a una "rigidez", la cual es también una descripción adecuada de superconductividad y superfluidez a pesar de sus aparentes comportamiento tipo "fluidos". [En el primer caso, London notó este aspecto muy tempranamente⁴]. De hecho, para un hipotético ciudadano gaseoso e inteligente de Júpiter o de una nube de hidrógeno en algún lugar del centro galáctico, las propiedades de los cristales ordinarios podrían bien ser enigmas más desconcertantes e intrigantes que aquellos del helio superfluido.

No quiero dar la impresión de que todo está resuelto. Por ejemplo, existen todavía fascinantes preguntas básicas sobre vidrios y otras fases amorfas, las cuales pueden revelar aún tipos más complejos de comportamientos. Sin embargo, el rol de este tipo de rupturas de simetría en las propiedades de cuerpos materiales inertes pero macroscópicos se entiende, al menos en principio. En este caso podemos ver como el todo se vuelve no solo más sino muy diferente a la suma de sus partes.

Lógicamente el próximo paso es preguntarse si una destrucción mayor de las simetrías fundamentales del espacio y del tiempo es posible y si surge de ello nuevos fenómenos, intrínsecamente diferentes a la simple tran-

sición de fase que representa una condensación en un estado menos simétrico.

Ya hemos excluido los casos aparentemente asimétricos de líquidos, gases y vidrios (En algún sentido, ellos son los sistemas más simétricos). Pienso que el próximo paso es considerar los sistemas que son regulares y, además, contienen información. Esto es, son regulares en el espacio de forma tal que pueden ser "leído", pero contienen elementos que pueden variar de una celda a la próxima. Un ejemplo obvio es el ADN; en la vida cotidiana, una cinta de máquina de escribir o el film de una película tienen la misma estructura. Este tipo de "cristalinidad que lleva información" parece ser esencial para la vida. Si el desarrollo de la vida requiere alguna ruptura de simetría extra no está para nada claro.

Manteniéndome en el intento de caracterizar tipos de simetrías rotas que ocurren en la materia viva, encuentro que al menos un fenómeno adicional parece ser identificable y bastante universal o sorprendentemente común, esto es, el ordenamiento (regularidad o periodicidad) en la dimensión del tiempo. Cierta número de teorías de los procesos de la vida han aparecido en los cuales pulsos regulares en el tiempo juegan un rol importante: teorías de desarrollo, de crecimiento y limitaciones de crecimiento, y de la memoria. La regularidad temporal es observada comúnmente en objetos vivientes. Juega, al menos, dos tipos de roles. Primero, la mayoría de los métodos para extraer energía del medio ambiente y poner en movimiento un proceso continuo, casi estable, involucra a máquinas periódicas en el tiempo, tales como osciladores y generadores, y los procesos de la vida trabajan de la misma manera. Segundo, la regularidad temporal es un medio para manejar información, similar a la regularidad espacial que lleva información. El lenguaje humano oral es un ejemplo y es interesante notar que todas las máquinas que computan usan pulsos temporales. Un posible tercer rol es sugerido en algunas de las teorías mencionadas arriba: el uso de relaciones de fases de pulsos temporales para manejar información y controlar el crecimiento y desarrollo de células y organismos⁵.

En cierto sentido, estructura -estructura funcional en un sentido teleológico, en oposición a la forma meramente cristalina- debe ser también considerada una etapa, posiblemente intermedia entre la cristalinidad y las cadenas de información, en la jerarquía de simetrías rotas.

Acumulando especulación sobre especulación, diría que la próxima etapa podría ser jerarquía o especialización de función o ambas. En cierto punto tenemos que dejar de hablar acerca de simetrías decrecientes y comenzar a llamarla complicación creciente. Por lo tanto, con complicación creciente en cada etapa, vamos subiendo la jerarquía de las ciencias. Esperamos encontrar fascinantes y, creo, cuestiones muy fundamentales en cada etapa al intentar unir piezas menos complicadas dentro del sistema más complicado y tratar de entender los nuevos tipos de comportamiento que pueden resultar.

Bien podría no ser útil trazar un paralelo entre la forma en que aparece la complejidad en los casos más

simples de la teoría de muchos cuerpos y de la química, y la forma en que aparece en los verdaderamente complejos casos biológicos y culturales, excepto quizás vale decir que, en general, la relación entre el sistema y sus partes es intelectualmente una calle de una sola mano. Se espera que la síntesis sea todo pero es imposible; el análisis, por otro lado, puede no sólo ser posible sino también fructífero de muchas maneras: sin un entendimiento de la ruptura de simetría en superconductividad, por ejemplo, Josephson probablemente no hubiese descubierto su efecto. (Otro nombre para el efecto Josephson es "fenómeno de interferencia mecanocuántico macroscópico": efectos de interferencia observados entre funciones de ondas macroscópicas de electrones en superconductores, o de átomos de helio en helio líquido superfluido. Estos fenómenos han extendido enormemente la precisión de las mediciones electromagnéticas, y es esperable que jueguen un gran rol en futuras computadoras, entre otras posibilidades, de forma tal que a la larga pueden conducir a algunos de los mayores logros tecnológicos de esta década⁶). Otro ejemplo: por cierto, la biología ha tomado un aspecto completamente nuevo a partir de la reducción de la genética a bioquímica y biofísica, lo cual tendrá consecuencias indecibles. Entonces no es cierto, como un artículo reciente⁷ lo expusiera, que cada uno de nosotros debe "cultivar su pro-

pio valle, y no intentar construir rutas sobre las cadenas de montañas ... entre las ciencias". En su lugar, debemos reconocer que tales rutas, mientras son frecuentemente los atajos más cortos hacia otra parte de nuestra propia ciencia, no son visibles desde el punto de vista de una ciencia sola.

La arrogancia de los físicos particulares y su investigación intensiva ya es algo del pasado (el descubridor del positrón dijo "el resto es química"), pero aún no hemos recuperado de la arrogancia de algunos biólogos moleculares, quienes parecen decididos a reducir cada característica del organismo humano a "solo" química, desde el resfrío común y las enfermedades mentales, hasta el instinto religioso. Seguramente hay más niveles de organización entre la etología humana y el ADN que los que hay entre el ADN y la electrodinámica cuántica, y cada nivel puede requerir una nueva y completa estructura conceptual.

Para finalizar, quiero dar dos ejemplos, tomados de la economía, de lo que espero haber dicho. Marx dijo que las diferencias cuantitativas se transforman en cualitativas, aunque un diálogo en Paris, en los 1920's, deja las cosas mucho más en claro:

FITZGERALD: Los ricos son diferentes a nosotros.

HEMINGWAY: Sí, ellos tienen más plata.

¹ V. F. Weisskopf, en Brookhaven Nat. Lab. Publ. 888T360 (1965). Ver también Nuovo Cimento Supl. Ser 1 4, 465 (1966); Phys. Today 20 (No. 5), 23 (1967).

² A. Bohr y B. R. Mottelson, Kgl. Dan. Vidensk. Selsk. Mat. Fys. Medd. 27, 16 (1953).

³ Simetría rota y transiciones de fase: L. D. Landau, Phys. Z. Sowjetunion 11, 26, 542 (1937); Simetría rota y movimiento colectivo general: J. Goldstone, A. Salam, S. Weinberg, Phys. Rev. 127, 965 (1962); P. W. Anderson, Concepts in Solids (Benjamin, New York, 1963), pp. 175- 182; B. D. Josephson, tesis Trinity College, Cambridge University (1962). Casos especiales: antiferromagnetismo, P. W. An-

derson, Phys. Rev. 86, 694 (1952); superconductividad, — ibid. 110, 827 (1958); ibid. 112, 1900 (1958); Y. Nambu, ibid. 117, 648 (1960).

⁴ F. London, Superfluids (Wiley, New York, 1950) vol. 1.

⁵ M. H. Cohen, J. Theor. Biol. 31, 101 (1971).

⁶ J. Clarke, AMER. J. Phys. 38, 1075 (1969); P. W. Anderson, Phys. Today 23 (No. 11), 23 (1970).

⁷ A. B. Pippard, Reconciling Physics with Reality (Cambridge Univ. Press., London 1972).