

*Discurso de investidura como Doctor "Honoris Causa" del  
Excmo. Sr. Anthony J. Leggett*

*5 de mayo de 2011*

Excelentísimo Sr. Rector, Autoridades Universitarias, Profesores, Señoras y Señores:

Es para mí un gran honor y un gran placer recibir un doctorado honorario de la Universidad Complutense, una de las más antiguas y distinguidas de Europa y en todo el mundo. Recuerdo que cuando comencé mi carrera de investigación en 1961, la Física en España, a pesar de los esfuerzos de unos pocos héroes, era apenas una tenue señal en el radar; durante el último medio siglo ha sido muy gratificante para mí verla florecer y gradualmente ocupar el lugar que le corresponde en la escena europea y mundial, y desde finales de los ochenta, gracias en particular a mi asociación con el Dr. Fernando Sols, que es actualmente profesor en esta universidad, he podido realizar repetidas y muy fructíferas visitas a este país. Por todo ello, es un gran privilegio dirigirme hoy a ustedes.

En realidad, mi entrada en la física no fue nada convencional; en mi época de colegial no encajaba en el estereotipo del científico en ciernes que desarma la radio para ver cómo funciona (si lo hubiera hecho, ¡estoy seguro de que nunca la habría vuelto a montar!) De hecho, hasta que tuve poco más de veinte años, apenas tuve contacto alguno con la ciencia; mi primer título universitario (el llamado "Oxford Greats") versó sobre literatura clásica, historia antigua y filosofía, y fue de manera indirecta, a través de mi interés en la filosofía, como me acerqué a la física. En esas circunstancias, ustedes podrían pensar que, en primer lugar, a lo largo de mi carrera yo debería haber mantenido un interés en las cuestiones filosóficas planteadas por la física, y en segundo lugar, que eso me debería haber llevado automáticamente a trabajar en temas que convencionalmente son conocidos como "fundamentales", concretamente, física de partículas elementales y cosmología. La primera suposición es correcta, pero la segunda no lo es; de hecho, si bien es cierto que he mantenido un fuerte interés en aspectos verdaderamente fundacionales tales como el problema de la medida en mecánica cuántica (sobre el cual hablaré más adelante), el campo de la física en el cual he empleado la mayor parte de mi tiempo y mis esfuerzos durante los últimos cincuenta años es lo que actualmente se conoce como "física de la materia condensada". A continuación les explico las razones.

¿Qué es exactamente la "física de la materia condensada"? Uno puede pensar en muchas definiciones diferentes, que van desde la más restringida (esencialmente lo que se solía llamar "física del estado sólido"), hasta la más amplia (el estudio de cualquier sistema de muchos objetos en interacción, incluyendo el cosmos y el mercado de valores). A este efecto, propongo la

siguiente definición, algo arbitraria: la física de la materia condensada es el estudio de cualquier sistema de partículas físicas cuyas interacciones mutuas no son despreciables, a cualquier escala entre el nivel atómico y el cosmológico. Esto incluye por lo tanto, no solo las materias tradicionales, física del estado sólido y del estado líquido, sino también la mayor parte de la astrofísica, la biofísica y la física química. De modo más general, esta definición incluye casi automáticamente cualquier problema de física que sea relevante a la escala humana.

¿Por qué es interesante este tipo de física? La primera y más obvia respuesta es que cualquier avance tecnológico basado en la física que pueda ser directamente relevante para el quehacer humano, debe operar a escala humana, y por lo tanto debe pertenecer automáticamente al ámbito de la física de la materia condensada; pensemos en los transistores, diodos emisores de luz, dispositivos de cristal líquido, detectores magnetocardiácos, etc. Pero a pesar de su importancia, no es esta consideración lo que me llevó a trabajar en este campo; más bien fue el desafío puramente intelectual, y es sobre esto sobre lo que hoy quiero hablar.

Permítanme comenzar haciendo de abogado del diablo. Presento a continuación varias citas de distinguidos teóricos de física de partículas elementales que reflejan una visión muy generalizada del interés e importancia relativos de los diferentes campos de la física:

“Ciertamente emergen teorías importantes en otras ciencias (distintas de la física de partículas elementales y la cosmología), pero... ¿hasta qué punto son realmente fundamentales? ¿Acaso no son el resultado de una compleja interacción entre muchos átomos, algo sobre lo que Heisenberg y sus amigos nos enseñaron hace tiempo todo lo que debemos saber? [S. Glashow, Physics Today, Feb. 1986, p. 11]

“Nadie piensa que los fenómenos de las transiciones de fase y del caos... se habrían podido entender sobre la base de la física atómica sin ideas científicas creativas, pero ¿duda alguien de que los materiales reales exhiben esos fenómenos debido a las propiedades de las partículas de las que están compuestos?” [S. Weinberg, Nature 330, 435 (1987)]

Lo interesante de estas citas es que ambas se plantean como preguntas retóricas. Aún a riesgo de parecer cínico, debo decir que para mí el uso de una pregunta retórica muy a menudo oculta el hecho de que, en el subconsciente, el orador no está tan seguro de la respuesta como nos querría hacer creer. A continuación mencionaré dos contraargumentos que se oponen a los puntos de vista expresados en las anteriores citas; el primero es similar a algunas observaciones hechas por otros teóricos de la materia condensada como Anderson y Laughlin, pero el segundo es mucho más radical y personal.

En primer lugar, podemos admitir que si las propiedades de los átomos fueran muy diferentes de lo que son, entonces el comportamiento de los

objetos macroscópicos cotidianos, que están compuestos por átomos, también sería bastante distinto. ¡Pero lo contrario también se cumple! Por lo tanto, ¿en qué sentido el comportamiento de los objetos macroscópicos viene determinado por el de los átomos y no al revés? ¿Por qué asumimos implícitamente que el hecho de que los objetos grandes estén formados por objetos pequeños, implica que las propiedades de estos últimos son la causa del comportamiento de aquellos? Me pregunto si esto no se debe a que subconscientemente (¡algunos de nosotros!) recordamos nuestra experiencia de la infancia de desmontar la radio para “ver cómo funciona”. Pero la radio funciona tal y como lo hace precisamente porque algún agente humano ensambló deliberadamente sus componentes de una forma particular y con un motivo concreto; por el contrario, la abrumadora mayoría de los sistemas estudiados en física de la materia condensada no presenta indicios de esa aristotélica “causa final”.

Por supuesto, es cierto que la mayoría de físicos de la materia condensada creen que “en principio” deberíamos ser capaces de derivar el comportamiento de objetos macroscópicos complejos a partir de una descripción en términos únicamente de los componentes individuales atómicos y (usualmente) de sus interacciones de pares. ¿Y qué? ¿Significa eso que las consecuencias de dichas interacciones son menos “fundamentales” que los átomos por sí mismos? Permítanme intentar ilustrar este punto de vista con una analogía tomada de las ciencias sociales: supongamos que un sociólogo propusiera que estudiando el comportamiento de un número suficiente de parejas de personas confinadas en islas desiertas, podría inferir “en principio” el rendimiento económico o el comportamiento político de las naciones. Creo que sería ridiculizado, y de forma merecida, puesto que es bien sabido que la interacción entre dos individuos está profundamente influenciada por el entorno social en el que ocurre. Por lo tanto, la afirmación de que la política y la economía se comportan tal y como lo hacen “debido a” las propiedades de los individuos y a sus interacciones de pares, aun siendo literal y formalmente cierta, es esencialmente vacua. ¿Por qué entonces (la mayoría de nosotros) adoptamos un punto de vista diferente cuando nos referimos a la física?

Elaborando un poco más la analogía con la situación en las ciencias sociales, así como “economía” o “política” difícilmente pueden ser definidas en el ámbito de la interacción dentro de una pareja, del mismo modo hay muchos fenómenos que tienen lugar en sistemas de materia condensada que simplemente no tienen análogo para átomos aislados o pequeños conjuntos de éstos (este tipo de consideración normalmente se agrupa con otras similares bajo el amplio término de “emergencia”, aunque personalmente no creo que dicha palabra añada nada especial). Permítanme poner un ejemplo, aunque probablemente sea algo técnico: En general, un electrón girando alrededor de un átomo no está en un estado que equilibrio (el cual es no circulante), y por lo tanto volverá a dicho estado rápidamente (típicamente en una billonésima de segundo). Hasta donde sabemos, lo mismo le ocurriría a un único electrón o, para el caso, a un único átomo, circulando en un gran contenedor anular (aunque el experimento sería difícil de llevar a cabo). Sin embargo, si llenamos

dicho contenedor con helio líquido a una temperatura inferior a dos grados por encima del cero absoluto y hacemos rotar dicho helio, el electrón (o el átomo) no se relajará sino que seguirá circulando durante tanto tiempo como nos molestemos en observarlo (esto es parte del fenómeno que llamamos “superfluidez”). Permítanme esbozar la explicación usando la siguiente analogía: imaginemos que toman un objeto de forma anular (un aro, una rueda de bicicleta...), enrollan una cuerda un cierto número de veces (llamémoslo  $n$ ) y después atan los extremos de la cuerda el uno al otro. Pueden convencerse fácilmente (¡o verificarlo experimentalmente!) que, teniendo en cuenta que no está permitido cortar ni la cuerda ni el aro, no importa cuánto agiten la cuerda, nunca podrán cambiar el “número de enrollamiento”  $n$ . Esto es un ejemplo sencillo de lo que en física se llama una ley de conservación topológica. Sin adentrarme en los detalles técnicos, resulta que un electrón en un átomo, o un átomo en el contenedor anular, se describe como algo similar a la cuerda enrollada a lo largo de un aro; un número de enrollamiento igual a cero corresponde a un estado en el que no hay circulación, mientras que un valor distinto de cero corresponde a un movimiento circular. La diferencia importante entre un átomo individual y la miríada de átomos que forman el helio líquido es que, en el primer caso es relativamente sencillo “cortar la cuerda”, mientras que en el último caso, como consecuencia del comportamiento colectivo de los átomos, es prácticamente imposible. Por lo tanto, el átomo se relaja fácilmente hacia el estado (no circulante) de equilibrio mientras que el helio permanece circulando para siempre. Ningún cálculo basado en átomos individuales o pequeños grupos de átomos interactuantes podría haber predicho este comportamiento.

Esta situación (que ha sido entendida, al menos cualitativamente, durante muchos años) es un ejemplo sencillo de la forma en que los efectos colectivos (de “muchos cuerpos”) pueden producir un comportamiento que es cualitativamente distinto al de los átomos individuales o a pequeños grupos de éstos. Un ejemplo aún más intrigante está relacionado con el tema de la “computación cuántica topológica”. Se cree que explotando las sutiles propiedades de la mecánica cuántica aplicadas a sistemas de muchas partículas (propiedades que no tienen análogo alguno para átomos individuales), puede ser posible construir un ordenador que no sólo opera mediante principios intrínsecamente mecano-cuánticos (por lo tanto ganando varios órdenes de magnitud en la velocidad con la que puede realizar cierto tipo de operaciones), sino que, a diferencia de propuestas previas, está libre de errores. Aunque esta idea es todavía de carácter teórico, es un ejemplo fascinante de la forma en que la mecánica cuántica y la física de materia condensada pueden intersectar para generar ideas totalmente nuevas.

Vuelvo brevemente sobre mi segundo contraargumento al punto de vista expresado en las dos citas dadas anteriormente. ¿Nos encontramos en un escenario en el que toda la física, a la escala de la vida ordinaria, puede explicarse, incluso en principio, en términos las leyes que describen los átomos individuales (etc.)? Este parece ser el punto de vista adoptado por defecto, y yo no tendría ninguna dificultad especial en aceptarlo si no fuera por

una dificultad de primer orden. Me refiero a la llamada paradoja de la medida cuántica. Esta paradoja puede expresarse aproximadamente como sigue: si creemos (como la mayoría de los físicos, incluyendo el que les habla) que la materia a escala de electrones o de átomos individuales es descrita completamente por las leyes de la mecánica cuántica, entonces parece concluirse, a primera vista, que un electrón o un átomo enfrentados con dos o más posibilidades sobre cómo actuar no tienen que elegir una u otra sino que, por así decirlo, pueden explorar ambas posibilidades en paralelo. Pero si los objetos cotidianos están (de nuevo como todo el mundo cree) compuestos por electrones y átomos, entonces lo mismo debería deducirse para dichos objetos, y como fue demostrado en un famoso artículo de Erwin Schrödinger en 1935, uno debería ser capaz de diseñar situaciones en las cuales un gato dentro de una caja cerrada no está, en cierto sentido, ni vivo ni muerto, sino explorando ambas posibilidades en paralelo. Claramente, esto choca con nuestro sentido común, ya que nuestra expectativa es que, cuando abramos la caja e inspeccionemos el gato, lo encontremos vivo o muerto. Aunque se han publicado literalmente miles de artículos en los últimos 75 años que han pretendido haber resuelto esta paradoja, mi opinión personal es que ninguno de ellos lo ha conseguido; y yo contemplaría como una posibilidad muy real el que puedan existir nuevas leyes de la física que entren en juego en algún punto entre el nivel del átomo y el del gato. Si esto fuera así, ¡nadie sería capaz de seguir sosteniendo que la física de la materia condensada es simplemente una “derivación” y no un área fundamental de la física! Gran parte de mi investigación durante los últimos 30 años ha estado dedicada a explorar formas de verificar experimentalmente si esto es cierto.

Por lo menos, espero que lo que he dicho en los últimos minutos ayude a explicar por qué he hecho de la física de la materia condensada el trabajo de mi vida. Únicamente me queda agradecerles el honor que hoy me otorgan y desear a la Universidad Complutense un feliz y próspero futuro.