**¿Qué tiene que ver nuestra sociedad con la superconductividad?**

Nuestra sociedad y la superconductividad tienen en común que son dos *estados emergentes.* Como veremos hay muchísimos ejemplos de estados emergentes.

Detrás del concepto de estados emergentes está la idea ya expuesta por Aristóteles de que el todo es más que la suma de las partes. Todos tenemos vivencias de esta reflexión. Sin embargo, esta idea se opone a como tradicionalmente nos hemos acercado a entender la Ciencia: estudiando los elementos que la constituyen. Claramente es difícil entenderlo todo a la vez y es muy racional ir estudiando parte por parte. Este método lo ideó Descartes, en su Discurso del Método. Descartes afirmaba que el mundo era una gran máquina y para entenderlo tendríamos que entender sus elementos constituyentes. En la búsqueda de los elementos constituyentes de la materia fuimos al átomo, de ahí a los electrones, neutrones y protones y por último a los quarks y al modelo estándar. [1]

Este pensamiento sigue influenciando nuestro día a día y así cuando tenemos una dolencia seria vamos al médico especialista. Si el diagnóstico no es claro nos pueden mandar al de digestivo y luego al endocrino y luego al neurólogo y luego vuelta a empezar y en la sala de espera nos preguntamos si no sería mucho más eficiente que hubiera una comunicación fluida entre ellos. Nuestro cuerpo está claramente conectado.

Y es que aunque se han resuelto muchos problemas con el método de Descartes, muchos fenómenos cercanos de nuestro día a día no pueden ser entendidos reduciéndolos a sus elementos constituyentes. Entendiendo un átomo de hierro no podemos entender el estado magnético, entendiendo una molécula de ADN no podemos entender la vida, entendiendo una neurona no podemos entender la consciencia y aún entendiendo a las personas no podríamos entender la sociedad. El magnetismo, la vida, la consciencia y la sociedad son estados emergentes que surgen debido a la interacción entre sus elementos constituyentes (el hierro, las moléculas, las neuronas y las personas) y la interacción con su entorno. El estado emergente es entonces una propiedad que *no existía* en sus elementos constituyentes y no se puede utilizar el método de Descartes para entenderlo.

¿Cómo abordar entonces este tipo de problemas? Mi campo de investigación es la física de la materia condensada que estudia las fases líquidas y sólidas de la materia. Uno de los mayores héroes de mi campo, Phil Anderson, premio nobel de física, escribió en 1972 un artículo provocativo con el título “*More is different*“ donde explicaba el alcance y la potencia del concepto de emergencia. En este artículo Anderson argumentaba que la habilidad de reducir el todo a leyes fundamentales no implica la habilidad de empezar desde esas leyes y reconstruir el universo. Estas ideas no eran nuevas en absoluto pero todavía la aproximación de Descartes era la dominante a la hora de abordar un problema en ciencia. Anderson argumentaba que en la física de la materia condensada hay conceptos y herramientas que nos permiten atacar estos problemas, en particular la teoría de las transiciones de fase.

La teoría de transiciones de fase no se limita a la materia condensada, también se da en otras ramas de la física. En general se da siempre que tengamos un sistema de partículas que interaccionan entre ellas y/o con su entorno. El reconocido físico Lev Landau contribuyó enormemente a construir esta teoría. Landau propuso que las transiciones pasan de una fase ordenada a una fase desordenada y a la transición la denominó zona crítica. El ejemplo típico de transiciones de fase es el paso de líquido (fase desordenada) a sólido (fase ordenada) de un material cuando disminuimos la temperatura. Si por ejemplo el material fuera la sal las partículas constituyentes serían el sodio y el cloro. Cuando se pasa al estado sólido las moléculas de la sal se ordenan de una forma cúbica. También disminuyendo la temperatura podemos pasar de un material no magnético (fase desordenada) a uno magnético (fase ordenada) a una cierta temperatura crítica. Aquí, las partículas constituyentes son los electrones que poseen un pequeño momento magnético denominado spin. En la fase ordenada del imán todos los momentos magnéticos se alinean en la misma dirección creando un campo magnético propio. Aunque a primera vista el magnetismo y las fases de la sal no tienen nada que ver, la zona crítica de las transiciones *se describe con las mismas ecuaciones*. A este hecho se le denomina “fenómeno de Universalidad”, uno de los conceptos más bellos de la física. Lo más sobresaliente de la teoría es que aunque la interacción entre las moléculas de agua o la interacción entre los electrones del material es de un alcance corto que involucra solo a los vecinos más próximos, en la zona crítica todas las partículas constituyentes están correlacionadas y sienten lo que hacen desde sus vecinas más próximas a las más distantes. Es lo que se denomina un fenómeno cooperativo. La zona crítica es invariante de escala con propiedades similares en todas las longitudes y puede dar lugar a los bellos fractales.

Mi ejemplo favorito de transición de fase en materia condensada es el paso de un material a un estado superconductor cuando bajamos la temperatura. Los superconductores tienen propiedades eléctricas y magnéticas muy exóticas. No presentan resistencia al paso de la corriente eléctrica con lo que no pierden energía y además expulsan el campo magnético. Esto último da lugar a la posibilidad de observar el divertido fenómeno de levitación de o bien un imán sobre un superconductor o viceversa. Como es de esperar las posibles aplicaciones de los superconductores son enormes: cables no disipativos, imanes superpotentes, trenes que levitan...[2] La transición de fase en la que se pasa de estado normal a estado superconductor se da a temperaturas críticas muy bajas o recientemente a presiones muy altas[3] lo que limita el alcance de las aplicaciones. Se está investigando muy intensamente para conseguir temperaturas críticas más altas y optimizar estos materiales. Además, todavía no se entiende porque algunos de los materiales son superconductores. Esto hace que la superconductividad sea un fenómeno aún más apasionante para los investigadores.

Igual que en el caso del magnetismo los protagonistas de la transición de fase al estado superconductor son los electrones. En un material los electrones que conducen la corriente eléctrica son compensados por los iones que se encuentran formando una red cristalina. A temperatura alta hay resistividad que se produce cuando estos electrones interaccionan entre si y con las vibraciones de la red iónica. A baja temperatura en la fase superconductora sin embargo, los electrones se emparejan formando los denominados pares de Cooper y fluyen todos a una en una onda colectiva siguiendo las reglas de la física cuántica. De nuevo se pasa de una fase desordenada con resistencia a una fase ordenada que es una onda colectiva al bajar la temperatura.

Cuando lo que queremos describir son sistemas biológicos el problema es mucho más complejo. Una de las dificultades es que estamos tratando con sistemas de no-equilibrio, es decir, que evolucionan con el tiempo y tienen *historia*. Pero la historia no solo existe en los seres vivos, también en el mundo inanimado existen sistemas en no equilibrio. Como resultado de esa historia obtenemos los bonitos y diversos copos de nieve. Curiosamente algunas bacterias también se organizan en estructuras parecidas a copos de nieve.[4] ¡De nuevo con las mismas ecuaciones! Hay además multitud de ejemplos en los que se pueden utilizar conceptos de transición de fase en sistemas que evolucionan en el tiempo: en manadas de mamíferos, bancos de peces, enjambres de abejas, colonias de hormigas. En el siguiente artículo utilizan la teoría de Landau para entender el movimiento de las bandadas de estorninos.[5] Así, algunos aspectos de la física de equilibrio también son útiles en la física de no equilibrio.

En un rango completamente diferente hay propuestas en neurociencia en las que se argumenta que en nuestro cerebro los fenómenos cooperativos juegan un papel fundamental en determinar la dinámica del cerebro. Nuestro cerebro parece estar en la zona de critica en medio del orden y el desorden. De esta forma puede conseguir la dualidad esencial para que funcione: debe mantener algo de orden para asegurar un funcionamiento coherente y reproducible y a la vez permitir un cierto grado de desorden que permita flexibilidad.[6]

Como os estáis dando cuenta la lista de problemas que se puede tratar con estas técnicas es enorme y solo he escogido unos cuantos. ¿Y nuestra sociedad? ¿Tiene algo que decir la física en como construimos las ciudades, nos movemos en espacios abiertos, votamos y formamos alianzas y grupos? Efectivamente la física se puede usar para comprender ciertos aspectos del mercado económico y para revelar estructuras escondidas en redes sociales. En estos problemas se entiende como surge el conflicto y la cooperación.[4]

Fuera del ámbito del estudio de la socio-física la idea de emergencia ha calado como filosofía social. Por ejemplo, en el ámbito de la empresa se denomina sinergia. Stephen R. Covey argumenta en un influyente libro en EEUU[7] que las mejores empresas y familias son las que las relaciones humanas no se basan en:

1. ni tu, ni yo (ni como ni dejo comer)
2. tú o yo (típica competición)
3. yo te respeto y tu me respetas (suma de las partes)

En las mejores empresas se usa la cuarta solución:

1. más, más (el todo es más que la suma de las partes)

En el punto 4 la idea es que todos contribuyan para producir una lluvia de ideas de la que surja al final algo completamente nuevo y mejor.

Cuando escribí los agradecimientos de mi tesis utilicé la analogía de comparar la transición a un estado superconductor con la revolución en una sociedad. En vez de bajar la temperatura hasta la temperatura crítica se tendría que pasar a la presión social crítica en la que pasamos de un estado de personas

individualistas a un estado colectivo donde todos queremos conseguir lo mismo. Recientemente escuché una charla TED[8] al hilo de esta idea. David Steindl-Rast argumentaba que lo que queremos conseguir todos es ser felices y que la forma de hacerlo es ser agradecidos localmente, con nuestra familia, nuestros vecinos, nuestros compañeros, por las cosas que tenemos... Y según él habría un momento en el que se produjera una transición a un estado en el que todos seríamos felices, transición que será una verdadera revolución en la que no haya nadie por encima de nadie pero todos conectados en una red. Es una utopía sugerente y no pude evitar pensar en las transiciones de fase.

[1] Véase Cap. 46 ¿Qué es un quark? ¿Cuántos tipos de partículas fundamentales hay?

[2] Véase por ejemplo: <http://www.icmm.csic.es/superconductividad/>

[3] A.O. Drozdov,M.I. Eremets, I.A. Troyan, V. Ksenofontov y S.I. Shylin, Nature 525, 73 (2015)

[4] Philip Ball, Critical Mass, how one thing leads to another. Editorial Arrow Books.

[5] Alessandro Attanasi et al. , Nature Physics DOI: 10.1038/NPHYS3035

[6] Dietmar Plenz, Critical Brain, *Physics* **6**, 47 (2013)

[7] Stephen R. Covey. Los siete hábitos de la gente altamente efectiva. Editorial Paidós.

[8] https://www.ted.com/talks/david\_steindl\_rast\_want\_to\_be\_happy\_be\_grateful?