

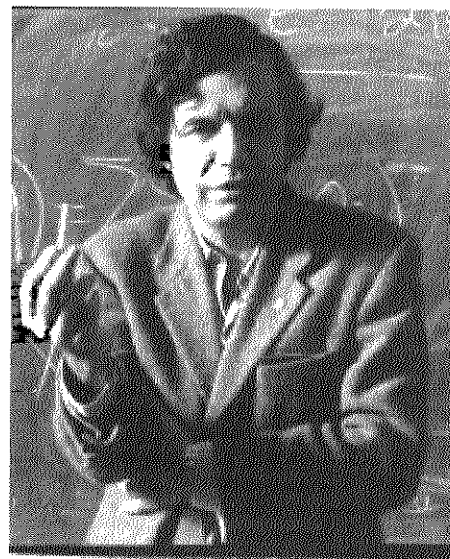
Entrevista con Giorgio Parisi

El pasado día 6 de abril se celebró en el Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid (CSIC) un acto, patrocinado por el Gobierno de Aragón, para promover la creación de un Centro de Investigación Interdisciplinar en Biocomputación y Física de Sistemas Complejos. Entre los prestigiosos investigadores de distintos países invitados al acto para apoyar la propuesta y discutir las ideas que deben guiar su actividad, se encontraba Giorgio Parisi, de la Universidad de Roma I "La Sapienza", una de las personas más conocidas e influyentes en el campo de la Mecánica Estadística, premiado con las medallas Boltzmann y Dirac. Durante el acto, en realidad durante el almuerzo, tuvo la amabilidad de charlar con REF.

Pregunta: Estamos en una reunión sobre investigación en Física de Sistemas Complejos, así que es natural empezar por preguntar: *¿Qué son los sistemas complejos?*

Respuesta: Se puede responder a esa pregunta de varias formas. Unos dirían simplemente que un sistema complejo es un sistema complicado. En tal caso, un avión, que tiene en torno a 10^5 piezas, sería un ejemplo de sistema complejo. Otros dirían que un sistema complejo es algo que no se puede entender. Yo creo que no es fácil definir en pocas palabras lo que es un sistema complejo, y por tanto, prefiero caracterizarlo por varios de sus rasgos más típicos. Para empezar, un sistema complejo puede estar en muchos estados diferentes. En este sentido, el agua no es un sistema complejo, porque sólo puede estar en unos pocos estados (gas, líquido y algunas formas de hielo); por otro lado, un animal es un sistema complejo, porque puede estar durmiendo, comiendo, corriendo, descansando, etc., y además en cualquier combinación de esos estados. Otro sistema complejo es el cerebro: Si asociamos con cada uno de nuestros pensamientos

un estado del cerebro, entonces está claro que el cerebro puede estar en un gran número de estados distintos. La siguiente característica de los sistemas complejos es que en general están mucho tiempo en un cierto estado y de repente cambian, muy rápidamente, a otro estado, en el cual de nuevo permanecen largo rato. Esto quiere decir que el sistema posee varias configuraciones más o menos estables separadas por otras inestables. Además, los sistemas complejos tienen normalmente varios niveles de descripción: Volviendo al ejemplo del animal, se podría intentar describirlo a nivel biomolecular, a nivel celular, o a nivel fisiológico, y todas estas descripciones serían correctas aunque con diferentes propósitos y dificultades. Finalmente, un ingrediente muy común de los sistemas complejos es la *frustración*, que aparece porque la interacción entre las partes o agentes del sistema involucra señales de distinto signo que conducen a respuestas incompatibles. Para entender esto mejor, pensemos en tres personas, que llamaremos A, B y C, y supongamos que C es amigo tanto de A como de B, mientras que A y B se odian cordialmente. En esta situación, si C trata de hacer algo simultáneamente con A y B, por ejemplo, ir al cine, lo más probable es que no pueda, porque A y B no se pondrían de acuerdo en la película para fastidiarse mutuamente. Este es un ejemplo sencillo de frustración, un concepto bastante antiguo dado que está en la base de la estructura de las tragedias de Shakespeare, dando lugar a su tensión dramática. Una situación frustrada de naturaleza más física podría ser la de tres espines, dos de los cuales (A y B) tienen interacciones antiferromagnéticas a la vez que interaccionan con otro (C) de manera ferromagnética. Es obvio que C no puede tomar ningún valor que minimice la energía del sistema.



P.: Esta es desde luego una descripción bastante completa de lo que los físicos entendemos por sistema complejo, pero *¿cómo lo explicaría a una persona que no sepa nada de física?*

R.: Bueno, podríamos decirle a esa persona que pensase en organizar una cena con un grupo considerable de amigos, digamos diez o doce. Por supuesto queremos colocarlos en la mesa de la mejor forma, aquella en la que disfruten más todos los comensales. Así que comenzamos por decidir una primera asignación de asientos, sobre la que luego haremos cambios de personas dos a dos, es decir, intercambiamos los asientos de dos personas para ponerlas más cerca de sus interlocutores favoritos. Una vez que hemos hecho todos los cambios de dos personas que nos parezcan apropiados, podemos considerar rotaciones de tres personas simultáneamente, que permitirían mejorar la distribución; luego estudiaríamos cambios de cuatro personas, de cinco, y así sucesivamente. De esta manera, el organizador de la cena acaba obteniendo una disposición satisfactoria, pero lo más seguro es que no sea la única posible y existirán otras alternativas. Podemos decir que este es un sistema complejo porque disposiciones prácticamente igual de satisfac-

torias pueden ser muy diferentes unas de otras, mientras que en un sistema simple hay, en general, una única situación óptima y sólo los estados parecidos a esa situación son casi óptimos.

P.: Una vez que sabemos lo que se entiende por sistemas complejos, ¿cuándo surgieron estas ideas, cuál es su origen?

R.: El interés en este tipo de problemas data de los años setenta, tras el gran hallazgo del trabajo de Wilson sobre el grupo de renormalización y la introducción del concepto de *universalidad*. Este es uno de los logros más importantes de la Mecánica Estadística: la comprensión del comportamiento colectivo emergente a partir de un punto de vista microscópico, quiero decir, la comprensión de las transiciones de fase. Las ideas del grupo de renormalización de Wilson y otros mostraron que se puede modelar un sistema desde su hamiltoniano macroscópico, que incluye las interacciones entre los componentes del sistema (tales como las moléculas de agua, por ejemplo), y derivar de ese modelo el comportamiento colectivo (es decir, la existencia de estados colectivos del agua diferentes y las transiciones entre ellos). Más aún, en este marco el principal desarrollo conceptual es la universalidad: las características principales de una transición de fase no dependen de los detalles del sistema, sino de unos pocos factores globales, tales como su dimensionalidad o sus simetrías. Tras la aplicación de estas ideas a sistemas simples, la gente pasó a considerar problemas más difíciles, y aquí es cuando aparecen los sistemas complejos. Los primeros pasos en esta dirección fueron los dedicados a la percolación y a la localización, que eran tratables dentro del grupo de renormalización; a continuación, se estudió la agregación limitada por difusión (el modelo llamado DLA, por sus siglas inglesas), pero resultó ser mucho más difícil de analizar con estas herramientas, sobre todo porque tenía rasgos extraños, como por ejemplo el comportarse fundamentalmente de la misma manera tanto en el continuo como sobre retículos. Todo este trabajo hizo que los investigadores cambiaran su

percepción de los sistemas complejos: si hasta ese momento los habían considerado una complicación innecesaria y no interesante, a partir de entonces se los vio como muy importantes y merecedores de trabajo cuidadoso. Y es importante darse cuenta de que estos sistemas complejos están también incluidos en las ideas genéricas de universalidad.

“Uno de los logros más importantes de la Mecánica Estadística en la comprensión del comportamiento colectivo emergente a partir de un punto de vista microscópico”

P.: Tras todos estos desarrollos históricos, ¿cuál es hoy en día el paradigma de sistema complejo en física?

R.: Para mí, el mejor ejemplo físico de sistema complejo es el de los vidrios de espín. Después de los primeros trabajos, la gente se dio cuenta de que los problemas físicos relacionados con estos sistemas son intrínsecamente complejos; de hecho, sabemos hoy que encontrar la configuración óptima de un vidrio de espín es un problema NP-completo. Un vidrio de espín es precisamente el tipo de problema desordenado, frustrado que mencioné antes: un sistema magnético en el que los espines pueden interactuar ferromagnética o antiferromagnéticamente. Después de dos décadas de estudio teórico, en los últimos años estos sistemas se han visto realizados experimentalmente y podemos mostrar empíricamente que son realmente complejos. Una manera sencilla de preparar un vidrio de espín en el laboratorio es fabricando una aleación de un 5% de hierro con un 95% de oro. Por razones que sería demasiado largo explicar ahora, resulta que los átomos de hierro pueden tener ambos tipos de interacciones magnéticas cuando se encuentran así insertos en una matriz de oro. Este no es el único ejemplo, hay varios más. Lo importante es que ahora tenemos evidencia experimental de que los vidrios de espín son sistemas complejos en tanto en cuanto la descripción de su estado requiere muchísimos parámetros. En

particular, ¡su estado en un cierto instante depende de la manera en que se ha alcanzado! Para comprobar esto, se toma un vidrio de espín en el laboratorio y se enfría gradual y continuamente a la vez que se mide una cierta cantidad, por ejemplo, la parte imaginaria de la susceptibilidad alterna (no es importante discutir ahora qué es esto, y de hecho se pueden medir otras cosas). Lo que se encuentra es que esa magnitud decrece suavemente, y si se calienta la muestra al mismo ritmo que se enfrió la susceptibilidad reproduce su evolución temporal en sentido inverso. Si ahora repetimos el experimento pero enfriando en pasos, es decir, bajando bruscamente la temperatura unos grados, dejando que el sistema permanezca en esa temperatura un tiempo, bajando un nuevo escalón y así sucesivamente, estos saltos se detectan como picos en la evolución temporal de la susceptibilidad. Si se calienta de nuevo la muestra pero sin saltos, gradualmente, las medidas muestran que la susceptibilidad evoluciona invirtiendo su evolución anterior, es decir, ¡la muestra recuerda el camino que siguió para enfriarse y lo reproduce sin tener en cuenta como se está calentando! Por tanto, si se quiere describir el estado del vidrio de espín se necesitan no sólo las variables físicas usuales, sino que también hay que decir cómo fue preparado, dado que el comportamiento de sistemas preparados de distinta manera es diferente aunque sus variables físicas habituales sean las mismas. Esta es una demostración experimental preciosa de que los vidrios de espín son sistemas complejos. Otras medidas, como las de resistividad en sistemas pequeños, de unos 10^7 átomos, reflejan incluso los saltos del vidrio de espín de un estado de equilibrio a otro, una de las características que mencioné al principio de la conversación, lo que constituye el fenómeno que se suele denominar *equilibrio puntuado*. Y a propósito, esto apunta otra cualidad común en los sistemas complejos, como es su extrema sensibilidad a pequeños cambios en las condiciones en que se encuentre. Esos pequeños cambios son cruciales porque pueden modificar el balance entre los distintos

estados posibles del sistema y con ello su comportamiento macroscópico. Un buen ejemplo es el ser humano: cuando su temperatura interna está en torno a los 37°C, el humano típico se comporta de manera muy distinta que cuando está a 39°C (lo que, medido en kelvin, supone un cambio de menos del 1%). Otro ejemplo son los vasos: si se dejan caer dos vasos idénticos, se romperán en muchos pedazos, pero la forma en que se rompen, el número de trozo y su tamaño serán particulares de cada vaso, porque su rotura está controlada por la infinidad de micro-inhomogeneidades que contienen y que son características de cada vaso individual.

P.: Queda claro que los vidrios de espín son sus ejemplos físicos preferidos, pero ¿qué podría decirnos sobre sistemas complejos en otros campos? Pienso, fundamentalmente, en biología, dado el tema que estamos discutiendo hoy aquí.

R.: Casi todos los sistemas biológicos son indudablemente complejos. Ya he mencionado algunos ejemplos durante la conversación, pero para aclararlo aún más podemos pensar en la bacteria *Escherichia coli*. Esta bacteria tiene unos tres mil genes, que son los que juegan el papel de actores en interacción de los que hablamos en un sistema físico. La bacteria vive debido a la interacción entre los genes: algunos de ellos fabrican proteínas, otros ordenan el comienzo o la inhibición de determinados procesos, y así sucesivamente. El comportamiento colectivo emergente en este caso es la vida de la bacteria. Estudiar esto es más o menos lo mismo que estudiar transiciones de fase, excepto por el hecho de que los genes de *E. coli*, los agentes del sistema, son todos distintos, mientras que en el ejemplo del agua todas sus moléculas son iguales. Por otro lado, todos sabemos que hay mutaciones que matan al organismo en el que se producen, a nuestra bacteria: en un sistema complejo, tan complejo como un ser vivo, pequeños cambios a nivel bajo, macroscópico, se amplifican al pasar a niveles más altos, y tienen consecuencias muy importantes (como por ejemplo la muerte de la bacteria portadora de la mutación).

P.: ¿Y en otros campos? ¿Economía, sociología, ...?

R.: No he seguido de cerca la literatura sobre modelos de fenómenos sociales, pero mi primera impresión es que los modelos que hacemos los físicos son demasiado simples, demasiado simplificados. En economía ocurre lo mismo, pero además los modelos que usan los economistas son igualmente simples, dado que prácticamente todos ellos asumen tres hipótesis insostenibles en la práctica: que los seres humanos son perfectamente racionales, que tienen un conocimiento completo y absoluto de todos los factores que influyen en la economía y que son capaces de predecir el futuro con gran precisión. Es obvio que estas cosas no son muy ciertas, por lo que me temo que las teorías económicas generales están muy idealizadas, no son realistas. Los modelos que estudian los físicos, como el *juego de las minorías*, están también muy idealizados, pero tienen la virtud de que intentan incluir las imperfecciones de la gente (conocimiento limitado, racionalidad imperfecta, poca capacidad de predicción) y otros factores cuyos efectos sería interesante entender.

P.: ¿Pero cree que la física, o los modelos de los físicos, aportan algo relevante a esos campos?

R.: Eso depende de la actitud tanto de los físicos como de los especialistas en otros campos. Si yo fuera un economista, seguramente querría saber que pasará mañana con mi negocio o con los índices bursátiles. Un biólogo estará interesado en predecir el comportamiento de cierto animal. Y sin embargo, los físicos partimos de la filosofía de la universalidad: no discutimos el éxito de un negocio concreto o el comportamiento de un animal específico. Al contrario, la física estudia, por ejemplo, cual es la probabilidad de éxito de una cierta clase de negocios, y tal vez encontremos que esa probabilidad decrece como una potencia del "tamaño del éxito", si se puede medir algo así. Pero esta información es probablemente irrelevante para el economista. En biología se conocen empíricamente algunas leyes de este tipo: por citar una, el número de especies distin-

tas que hay en una isla es proporcional a la raíz cuarta del área de la misma. Enfrentados a una isla concreta, podremos intentar predecir el número de especies que contiene, pero no podremos predecir qué especies encontraremos específicamente en la isla. Esa respuesta es seguramente insatisfactoria para el biólogo, pero es que tampoco hay mucho más que el propio biólogo pueda hacer.

P.: ¿Entonces concluimos que las respuestas de los físicos son irrelevantes para esos otros campos?

“La aplicación de las ideas de complejidad a campos como la biología requiere encontrar las preguntas correctas, que es más difícil que responderlas”

R.: ¡No, lo que ocurre es que las cuestiones que se plantea cada comunidad son diferentes! Aún así, las respuestas que la física está dando podrían quizá ser las únicas respuestas posibles. Volvamos al ejemplo de la biología. A nivel sistémico, los biólogos son capaces hoy en día de diseñar moléculas o mecanismos que hacen muchas cosas distintas. Las entienden cuando están aisladas. Pero en algún momento esos mecanismos, esas proteínas, tendrán que trabajar juntas en un ambiente en el que interaccionarán, a lo mejor 10^4 o 10^5 de ellas ejecutando simultáneamente sus tareas. En ese momento, puedes olvidarte del problema por completo y ir a comer una pizza, o puedes usar análisis estadísticos o probabilísticos como la única manera posible de abordar el problema, incluso aunque al hacerlo pierdas información. Esta es otra característica de los sistemas complejos. Los sistemas con muchos elementos o componentes cuyo estudio por separado permite entender el funcionamiento del sistema como un todo simplemente juntando el de cada elemento no son sistemas complejos. Regresando al avión, aunque tiene muchas piezas, sabemos lo que hace cada una y no hace falta tener ninguna noción sobre sistemas complejos para entender por qué vuela. En un sistema complejo las interacciones son

cruciales. En este sentido, podríamos decir que los biólogos son reduccionistas, construyendo su ciencia a partir de la biología molecular, mientras que los físicos somos más *holistas*, ya que intentamos identificar los posibles comportamientos de los sistemas como un todo. En otras palabras, no necesitas el grupo de renormalización para entender la química de un enlace entre dos átomos o moléculas específicas, pero tampoco se necesita conocer al detalle todos los saltos que dan los electrones de una muestra ferromagnética para entender el ferromagnetismo. Los detalles sólo se necesitan si se quiere predecir la temperatura crítica de una muestra dada, única, pero no son importantes para el comportamiento crítico en sí mismo. Este es un deber importante de la física de sistemas complejos cuando se aplica a otros campos: identificar cantidades universales, magnitudes que no dependen de los detalles, y clases de universalidad, clases de sistemas que se comportan de la misma manera. Volviendo a *E. coli*, lo que hace esta bacteria depende ciertamente de los detalles de sus genes y es probablemente impredecible, pero sería un gran avance definir una clase de bacterias sobre las cuales uno puede predecir el comportamiento de algunas magnitudes comunes a todas ellas.

P.: ¿Cree que la complejidad, o el estudio de los sistemas complejos, se convertirá en una nueva rama de la física, o por el contrario, que permanecerá dentro del marco de la Mecánica Estadística?

R.: Creo que la complejidad es una evolución de la Mecánica Estadística, que además involucra una ruptura conceptual porque en física intentamos normalmente hacer predicciones para

sistemas concretos. El hecho de que no podamos controlar todas las interacciones de un cierto sistema complejo nos lleva a intentar predicciones probabilísticas. Esto conlleva utilizar la probabilidad a un nivel superior al que se hace en Mecánica Estadística, pero también la probabilidad cuántica es diferente conceptualmente de la clásica y tenemos una Mecánica Estadística Cuántica. Así que en mi opinión el marco mecano-estadístico puede ser suficiente.

P.: ¿Y en cuanto a la complejidad en los estudios de física? Hoy en día, la complejidad aparece en los programas de doctorado, ¿pero cree que es necesario introducir conceptos de complejidad en la licenciatura?

R.: Creo que algunas de las ideas básicas que estamos discutiendo se podrían presentar en la licenciatura. La gente que deja la universidad con el título de licenciado debería ciertamente haber conocido estas ideas en alguna medida. Por supuesto, esas personas no necesitan discusiones técnicas largas y difíciles, pero sí creo que se beneficiarían de un conocimiento básico de lo que quiere decir complejidad.

P.: Por último, para terminar esta conversación, y dado que usted va a ser el director de un Centro de Mecánica Estadística y Complejidad en Roma, cuya creación acaba de aprobarse, ¿cree que una institución como la que se está presentando aquí, el Centro de Biocomputación y Física de Sistemas Complejos, será útil, y si es así por qué?

R.: El Centro que vamos a abrir en Roma es un factor cuatro más pequeño que el que se propone hoy aquí. Un factor dos viene de que seremos sólo físi-

cos, no tendremos biólogos como se quiere hacer aquí, y el otro factor dos viene de que seremos todos teóricos, no habrá experimentales. Esto es así por cómo se gestó nuestro Centro: se abrió un período de presentación de propuestas, que debían ajustarse a unas normas concretas, mientras que el Centro de Biocomputación es una iniciativa de un grupo de gente independiente del gobierno. De hecho, nosotros queremos expandirnos a partir del Centro inicial, buscando dinero de distintas fuentes, para incluir a la gente que no tenemos de momento. Pero en cuanto al Centro de Biocomputación y Física de Sistemas Complejos, creo que va ser verdaderamente útil debido a su interdisciplinaridad intrínseca. La aplicación de las ideas de complejidad a otros campos, a la biología, requiere muchísimas discusiones para encontrar las preguntas correctas, lo que es más difícil que contestarlas. Entonces, el intercambio de ideas es crucial, y no basta leer artículos porque en general los físicos no entendemos los artículos de los biólogos y viceversa. Una vez escribí un artículo sobre inmunología y supe que había conseguido aproximarme al punto de vista de los biólogos porque mis colegas físicos simplemente no lo entendían. Superar estas barreras de lenguaje es algo que requiere muchas horas de charla, y esa charla necesita un lugar. Creo que eso es precisamente lo que aporta el Centro y lo que será la clave de su éxito.

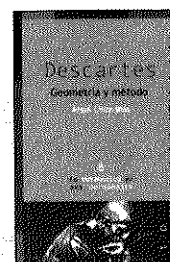
Angel Sánchez

La conocida editorial Nivola, en su serie científicos para la historia, nos presenta el número 8, dedicado a Descartes: **Geometría y Método**. Este matemático es el pilar sobre el que se asienta la corriente racionalista que establecerá las bases de reflexión para la ciencia moderna. Descartes consagró su vida a diseñar el método para que la reflexión especulativa progresase sobre una base firme.

AULA DOCUMENTAL
DE INVESTIGACIÓN
www.auladoc.com



C/ Martín de los Heros, 66
28008 Madrid
Tel 91 542 82 82
Fax 91 559 30 60
<http://www.auladoc.com>



disponible al precio de
2700 ptas