

Interdisciplinariedad: Comentarios desde la perspectiva de un físico

Maxi San Miguel

Departamento de Física Interdisciplinar, IMEDEA (UIB-CSIC)

Campus Universitat de les Illes Balears

E-07122 Palma de Mallorca

En dos ocasiones tuve la oportunidad de entablar un breve diálogo con Javier Benedí sobre lo que entendíamos por investigación interdisciplinar. La falta de sosiego científico nos impidió encontrar el tiempo para el diálogo más profundo que ambos queríamos tener al respecto. Como homenaje a Javier indico aquí alguna de las ideas que hubiera querido compartir con él, pero que su irreparable ausencia me ha dejado sin la oportunidad para ello.

1. Interdisciplinariedad, Multidisciplinariedad e Innovación.

Una frase común que a nadie sorprendería actualmente en boca de un científico, de un político o de un responsable de política científica es *“Dada la complejidad del problema que debemos abordar es necesario un enfoque multidisciplinar”*. La palabra multidisciplinar es aleatoriamente intercambiada por interdisciplinar o pluridisciplinar. Tampoco sorprende que eso vaya además vestido con alguna invocación a la necesidad de desarrollar nueva innovación tecnológica relevante al problema. En muchos casos estas frases no son más que un preámbulo o pretendida justificación, con las palabras clave a la moda, para solicitar más recursos económicos para una actividad que involucra a quien las dice. No obstante, detrás de esas palabras hay conceptos muy importantes para el desarrollo científico, aunque a menudo se invoquen con significados distintos o confusos. Pretendo exponer aquí unos breves comentarios personales y desordenados de cómo entienden y valoran estos conceptos una parte creciente de la comunidad científica de los físicos.

Gran parte de la educación científica del siglo pasado veía a los grandes hombres de cultura universal del Renacimiento con admiración y respeto, pero como algo histórico e irreplicable, y desde luego no como un ejemplo a imitar. El

concepto clave era el de la especialización, y el avance de la ciencia y la técnica estaba necesariamente basado en los especialistas. Esta concepción, bien arraigada y aceptada socialmente, contrasta no obstante con el hecho de la persistencia de científicos capaces de hacer contribuciones seminales o muy relevantes en áreas del saber clasificadas como distintas. Hay que notar que esto sucede normalmente en los orígenes de nuevas áreas del saber. Como un ejemplo claro se pueden citar las contribuciones durante el siglo pasado de J. Von Neumann en tres direcciones distintas: la formalización de la Mecánica Cuántica en los orígenes de esta disciplina, los primeros desarrollos de lo que ha venido en llamarse Ciencias de la Computación, y sus trabajos sobre la Teoría de Juegos y el comportamiento Económico que están en la base de las teorías económicas racionales modernas, hasta el punto de que el título de uno de sus trabajos ha dado el nombre a una de las revistas de prestigio en el campo (*Games and Economic Behavior*).

La búsqueda de lo universal debe empezar por lo particular, y la necesidad de la labor de los especialistas individuales y los frutos de esa especialización son incuestionables. Pero el progreso del colectivo humano precisa también de la generalización de conceptos, y para ello se requieren individuos y estructuras con capacidad de transmitir conceptos y procesar la información entre grupos de especialistas distintos. Ahí es donde aparece la interdisciplinariedad, que como concepto tiene más de actitud y curiosidad individual que de otra cosa. Por ello algunos preferimos hablar de científicos interdisciplinarios que de ciencia interdisciplinar. Puede hacerse un cierto paralelo con la cuestión del reduccionismo científico. Aunque la hipótesis reduccionista es hoy incuestionable para cualquier científico, en palabras del Premio Nobel de Física P. W. Anderson, ello no implica en modo alguno una hipótesis constructorista [1]: *“La hipótesis constructorista deja de valer cuando se enfrenta a las dificultades de “escala” y “complejidad”. El comportamiento de agregados grandes y complejos de partículas elementales no es entendido en términos de una simple extrapolación de las propiedades de unas pocas partículas. Por el contrario, en cada nivel de complejidad aparecen propiedades enteramente nuevas, y la comprensión de nuevos comportamientos requieren un nuevo tipo de investigación fundamental....En la*

estructura jerárquica de la ciencia los componentes elementales de la ciencia X obedecen las leyes de la ciencia Y. Pero esta jerarquía no implica que la ciencia X es sólo "Y aplicada". En cada nivel nuevos conceptos, leyes y generalizaciones son necesarios". Dentro de este contexto lo que se quiere indicar es que conocer las leyes de la Química (Y) no es suficiente para resolver los problemas de la Biología Molecular (X), de la misma manera que la especialización en Psicología (Y) no es suficiente para abordar con éxito los problemas de la Sociología (X).

Donde aparece la interdisciplinariedad es precisamente en el salto entre dos niveles de la estructura jerárquica de la Ciencia, y/o en el espacio no colonizado entre dos disciplinas bien establecidas, y/o en la creación de nuevos campos del saber. Como ejemplo burdo, pero ilustrativo, podemos citar que si queremos entender por qué el agua hierve a 100° C, el reclutar especialistas en Química Molecular y en Ingeniería de Fluidos (equipo multidisciplinar) difícilmente bastaría para resolver el problema, pues la explicación no está ni el comportamiento individual de la molécula de agua ni en la mecánica de fluidos, sino a medio camino. Se precisa además la creación de nuevas ideas, conceptos y formas de pensar ajenos a esas dos especializaciones. En muchos casos esos conceptos provienen de ideas modificadas, que son transferidas de una a otra disciplina a través de los bordes inter-disciplinas. La investigación interdisciplinar no se refiere pues a un carácter pluri o multidisciplinar que implica una simple superposición de expertos o especialistas en campos diversos que ofrecen sus técnicas para la solución de un problema. Por el contrario, se refiere a la voluntad decidida de cruzar fronteras entre campos establecidos y de forzar la imaginación para transferir conceptos de unos campos a otros, partiendo de la constatación de que el estudio a través de esas fronteras es fuente de grandes progresos del conocimiento. Se requieren científicos bien establecidos y con una sólida base en las disciplinas en que se han formado, pero con la capacidad y la voluntad de abordar, mediante un diálogo interdisciplinar, problemas ajenos a, o en medio de, esas disciplinas.

El error de confundir el concepto de interdisciplinariedad con el de multidisciplinariedad corre a menudo en paralelo con el de pensar que

innovación y tecnología son desarrollos que van necesariamente juntos. Como otro burdo ejemplo que evidencia esa falacia puede citarse la creación hace bastantes décadas del Chupa-Chups. Esa presentación de un caramelo fue claramente innovadora y tuvo importantes consecuencias económicas, consecuencias acrecentadas con su posterior exportación al enorme y entonces virgen mercado de la China. Sin embargo ello no supuso ni requirió en ningún momento un avance tecnológico. Esta reflexión es relevante puesto que es un hecho bien documentado que los problemas a largo término van a involucrar una mucha mayor integración entre las ciencias biológicas y físicas y las sociales y humanidades. Muchos de los problemas a los que nos enfrentamos están en esa intersección. Muchos de los problemas del siglo XXI no van a requerir soluciones puramente tecnológicas. Requerirán soluciones de sistemas humanos que involucran ciencias económicas y del comportamiento [2]. Por tanto la actividad interdisciplinar en esta encrucijada requerirá grandes dosis de innovación, pero ella no está ligada necesariamente al desarrollo de Tecnologías Físicas. Las respuestas de desarrollo puramente tecnológico, la explotación sin límites de recursos naturales, o un conocimiento puramente clasificadorio o naturalista de tales recursos no son ya estrategias aceptables para el avance de la sociedad del conocimiento.

Hay que ser conscientes de que una dificultad esencial en la investigación interdisciplinar es la existencia de murallas ideológicas entre las disciplinas establecidas, disciplinas que se han ido creando a través de la especialización, lo que hace muy complicado el flujo de ideas entre ellas. Cada comunidad tiene sus usos y costumbres, su propia percepción de la verdad científica y su propia jerga. De facto las comunidades de cada disciplina construyen murallas para mantener fuera a los no iniciados. Es normal que los censores de una revista especializada rechacen los artículos de autores provenientes de otros campos por el mero hecho de que la presentación de un trabajo, que puede tener resultados de gran relevancia, no siga las pautas y jergas de la comunidad propietaria desde el punto de vista intelectual de la revista. Estas situaciones abonan el terreno para mantener a cada científico en su comunidad de origen y de hecho promueven la investigación incremental consistente en algunos casos en más de lo mismo y con resultados de dudosa relevancia en el avance del

conocimiento. Esto ocurre comúnmente cuando un campo pierde su comunicación efectiva con el resto de la ciencia y sobrevive usando criterios puramente internos de interés y validez. Sin embargo, la investigación que permite dar saltos cualitativos en el conocimiento, o sea la investigación origen de la innovación, está en las antípodas de la investigación incremental y requiere el esfuerzo interdisciplinar de superar las barreras entre disciplinas. En la última década se han implementado en diversos países algunos instrumentos de política científica para incentivar ese esfuerzo adicional que requiere la investigación interdisciplinar. Pero al final, el motor más potente para avanzar en esa dirección es la curiosidad científica de investigadores individuales, los investigadores interdisciplinares, dispuestos a mirar más allá de su entorno especializado para abordar cuestiones que les supongan un desafío intelectual. Esto siempre ha sido y será lo que permite el avance del conocimiento.

2. Interdisciplinariedad, Complejidad y Universalidad

Como indicaba al principio, las referencias a la actividad interdisciplinar aparecen a menudo ligadas a la de complejidad o sistemas complejos. ¿Qué se entiende por complejidad? Hay autores que han encontrado 31 definiciones distintas de complejidad [3], lo que puede dar soporte a la idea de que esta temática, junto con la de la interdisciplinariedad, no es más que una etiqueta genérica en el mercado global de la ciencia, o incluso más, el dominio de los nuevos charlatanes. No obstante, la Ciencia de los Sistemas Complejos ha pasado ya su adolescencia y aparece en múltiples foros como uno de los desafíos científicos más importantes [4] y como el contexto natural para abordar los problemas de la sociedad dominada por las tecnologías de la información [5]. Cabe también recordar que “*entender los sistemas complejos*” es uno de los seis grandes desafíos identificados en Marzo de 2001 por el US National Research Council en su informe sobre “Physics in a New Era”. Los desafíos fueron identificados por su importancia científica intrínseca, potencial de amplio impacto y aplicación, y por el previsible gran avance en la próxima década. En cuanto a la relación con la investigación interdisciplinar y en opinión

de S. Solomon: *“El ambicioso desafío de la investigación en complejidad (su destino manifiesto) es la prospectiva, cartografía, colonización y desarrollo del territorio interdisciplinar (que existe entre las ciencias tradicionales)”* [4]. Ocurre además que una característica esencial del estudio de sistemas complejos es la emergencia de conceptos generales independientes del contexto en estudio y por tanto de gran valor interdisciplinar. El resultado es que hay campos del saber que tienen el potencial de ser significativamente reformulados y/o transformados por la disponibilidad de estos nuevos conceptos.

Para adentrarse en el concepto de sistemas complejos conviene desenmascarar algunas falsas verdades que alguna versión del sentido común podría aceptar. La primera es la idea de que los sistemas simples se han de comportar de manera sencilla. Esa es una idea mecanicista fácilmente rebatible por la gran variedad de modelos sencillos que exhiben comportamiento complejo, o incluso sistemas dinámicos sencillísimos que muestran comportamiento caótico. La segunda es la idea complementaria de que el comportamiento complejo obedece a causas complejas. Ello implica una renuncia a entender la realidad que nos circunda y puede considerarse acientífica. El hecho es que hay comportamientos complejos que son descritos con ingredientes muy sencillos y que un modelo muy complicado no es necesariamente más realista ni da un grado de entendimiento mayor. Por último está la idea de que sistemas distintos se comportan de forma distinta. Ello está cerca de un cierto oscurantismo resultado de una superespecialización. Parte de la idea que para entender el comportamiento de un sistema es necesario entender todos y cada uno de los detalles de sus ingredientes y que por tanto ese entendimiento no es útil para quien esté interesado en otro sistema. Eso ayuda además a fortalecer las barreras interdisciplinarias. El error proviene de considerar que todas las variables son relevantes en el comportamiento de un sistema, mientras que de hecho hay variables irrelevantes y comportamientos de tipo universal en sistemas muy distintos.

Ya he indicado que en la literatura, y bajo el nombre de complejidad, se habla frecuentemente de cosas conceptualmente distintas, pero pueden

establecerse algunas características generales del comportamiento complejo asociadas al estudio de sistemas con muchas partes elementales que interactúan y dan un comportamiento colectivo. Entre ellas está la idea de que el comportamiento global no es reducible a la suma de las partes del sistema o al comportamiento típico o medio de un constituyente del sistema. Como ejemplos puede indicarse que el comportamiento global de una sociedad no es reducible (visión reduccionista) a la psicología individual de sus componentes, cuyas características individuales detalladas pueden ser irrelevantes para el comportamiento colectivo. Análogamente, el comportamiento del coche promedio o típico en una autopista nos dice muy poco de cómo un atasco de tráfico se forma o desaparece. En segundo lugar, el comportamiento complejo se refiere a una situación intermedia entre el desorden aleatorio o caótico y una situación bien ordenada. Por ejemplo, el crecimiento y organización espacial de una ciudad dista por igual de tener una distribución aleatoria que de seguir las pautas con que se organiza un asentamiento militar. La razón es que los propios ciudadanos se autoorganizan en el desarrollo de la ciudad. De hecho, la observación y el sentido común sugieren que la mayoría de los fenómenos que ocurren en la escala de las actividades diarias humanas muestran un balance delicado entre orden y desorden, dándoles un status que es intermedio entre el de un fósil y el del ruido aleatorio, lo que provoca en el observador la idea intuitiva de "complejidad". Esa situación de competición persistente y compromiso entre orden y desorden entrelazados se da cerca de los umbrales de cambio de comportamiento. Hay, además, sistemas que se automantienen en esa situación umbral, lo que recibe el nombre de criticalidad autoorganizada. Pensar que la actividad humana puede alcanzar un equilibrio lejos de cambios de comportamiento sería ignorar que el único equilibrio biológico posible, en el sentido termodinámico, es la muerte. La consecuencia más importante de esa situación entre orden y desorden es la aparición de comportamiento autosimilar, con invariancia de escala y características universales. La autosimilaridad o invariancia de escala indica que haciendo un zoom en una foto de un sistema lo que seguimos viendo es estadísticamente equivalente: Una parte de la foto reescalada al tamaño original tiene su misma apariencia, como sucede con los raíles y traviesas en la foto tomada en la dirección de una

larga vía de tren rectilínea. El que un sistema autoorganizado tenga invariancia de escala implica que su funcionamiento no viene constreñido a un tamaño óptimo, sino que puede funcionar igualmente a medida que se van agregando nuevos elementos.

En el mundo de la Física todas estas características propias de los sistemas complejos se dan en los puntos críticos, como aquél en que desaparece la diferencia entre el agua líquida y el vapor de agua. Los fenómenos críticos son fenómenos colectivos que resultan de la interacción y comportamiento cooperativo de un gran número de átomos o moléculas. La invariancia de escala se refleja en el ejemplo anterior en las gotas de líquido que contienen en su interior gotas de vapor, que contienen en su interior gotas de líquido y así sucesivamente. Ello da lugar a que no existe una longitud característica en la que estudiar el problema. Eso es el origen de la complicación esencial del problema, puesto que fenómenos físicos más tradicionales como los estudiados por ejemplo por la Física Atómica o la Astrofísica suceden en escalas de longitud características y lo que ocurre en otras escalas de longitud no es relevante al problema. Los fenómenos críticos son el paradigma físico de la complejidad [6] y su estudio detallado en la década de 1970 permitió el desarrollo cuantitativo de la idea de universalidad, dando lugar a la clasificación de las clases de universalidad en que sistemas muy distintos exhiben un comportamiento crítico idéntico. El principal mensaje de esos resultados es que muchas veces los detalles no importan. Eso es una manera de decir que el comportamiento colectivo es robusto y compartido por sistemas aparentemente muy distintos, dentro y fuera del ámbito tradicional de la Física.

El estudio de los fenómenos colectivos es el prototipo de estudios de fenómenos complejos. Al mismo tiempo ese problema de la relación entre las partes y el colectivo es ubicuo en las Ciencias y ciertamente muy antiguo. Ya Platón en el Libro de la Ciencia plantea la cuestión de la diferencia entre el todo como la suma de las partes y el todo como una entidad única que emerge de las partes y es distinto del agregado de las mismas. Esta puede ser una de las primeras reflexiones sobre lo que hoy conocemos como fenómenos emergentes. Ya me he referido al estudio de fenómenos colectivos y su

manifestación en los fenómenos críticos en la Física. Gracias a la actividad interdisciplinar existe hoy clara conciencia de la universalidad de conceptos, resultados y métodos en el estudio de fenómenos colectivos en sistemas muy distintos. Pero ahí se ha llegado desde puntos de partida distintos, transfiriendo ideas a través de los bordes *inter-disciplinas*. Por ejemplo, paralelamente en el tiempo a los estudios de los físicos, también en los años 1970 los sociólogos abordaban los mismos problemas conceptuales, que en ese contexto recibieron el nombre de problema “micro-macro” [7]. En el famoso artículo original de T. Schelling sobre segregación racial en Estados Unidos [8] se dice *“Este trabajo se refiere a los mecanismos que trasladan el comportamiento individual desorganizado en resultados colectivos”*. La misma frase podría pertenecer a cualquier artículo sobre fenómenos críticos en una revista de Física de la misma época. Schelling va más allá en su intuición sobre lo que hoy llamaríamos universalidad y variables irrelevantes al plantear [7, cap. 2] que hay una clase de proposiciones importantes *“...que son verdad para el agregado pero no en detalle, y que son verdad independientemente de cómo se comporta la gente”*. El problema sociológico en general es entender cómo el comportamiento colectivo humano emerge de las motivaciones individuales de las personas. Ejemplos son las modas, el “comportamiento en rebaño” o creación de burbujas en mercados financieros, cómo se llega a decisiones colectivas a partir de información local de cada individuo, cuándo las algaradas de unos pocos revoltosos iniciales llegan a transformaciones sociales mayoritarias, etc.

El concepto de fenómeno emergente es consustancial al estudio de fenómenos colectivos y complejidad, y de un gran calado interdisciplinar. Como anécdota personal al respecto recuerdo que tras dar una charla sobre difusión de rasgos culturales y globalización a un auditorio de físicos tradicionales, se me acercó el Prof. S. Barnett, muy reconocido especialista en los fundamentos de la Mecánica Cuántica. Tenía yo cierta inquietud por saber lo que alguien como él podía opinar de este trabajo de temática poco ortodoxa para un físico. Tras unos comentarios bastante positivos que me tranquilizaron, me dijo, no sé si implicando que no había grandes novedades bajo el sol, que mi presentación le recordaba mucho a las ideas de Hari Seldon, el protagonista

fundador de la Psicohistoria en el famoso libro *Fundación* de I. Asimov [9]. Puesto que no había leído el libro me limité a sonreír y a buscar el libro al día siguiente. El matemático Seldon es un científico peligroso por sus ideas innovadores fuera de las disciplinas establecidas y por tanto desterrado a un planeta remoto en los confines del imperio. La base de su Psicohistoria es que aunque el comportamiento de los individuos tiene una complicación inescrutable y es completamente impredecible, el comportamiento de los colectivos y sociedades grandes e incluso de las civilizaciones, es algo distinto a la suma de las acciones individuales, y resulta ser algo que puede analizarse y sobre lo que puede hacerse predicciones. Para mi sorpresa encontré al cabo de unos meses que los conceptos de H. Seldon son calificados por D. Watts [10] como su primer encuentro con la idea de emergencia en las Ciencias Sociales. D. Watts es físico (Doctor en Mecánica Teórica y Aplicada), profesor de Sociología en la Universidad de Columbia (Estados Unidos) y uno de los principales creadores de la nueva Ciencia de Redes [10,11].

Un ejemplo de otro concepto que aparece en formas, versiones y utilidades distintas en disciplinas distintas, es el que los físicos llamamos *campo medio*. Eso representa en Física la primera aproximación no trivial al estudio de un fenómeno colectivo. La idea es reemplazar la interacción entre partículas por un campo externo, el campo medio, con el que interacciona cada partícula independientemente y que representa el efecto promedio de las demás partículas sobre cada una. En Sociología [7, cap 5], se abordan problemas en los que la gente reacciona a un todo de los que ellos son parte. La gente responde a un ambiente que consiste en gente que a su vez están respondiendo a los otros. Se desarrollan entonces modelos en que se postula una población que responde a unas características promedio de la propia población, de manera análoga a una teoría física de campo medio. En Economía la situación es si cabe más clara y asociada al concepto de *mercado*. La actividad financiera se desarrolla a través de agentes financieros que interaccionan comprando y vendiendo acciones. No obstante cada uno de ellos actúa guiado por el resultado agregado que es la valoración de la acción en el mercado. Sucede que cada agente parece interaccionar sólo con un *campo medio* que es la valoración de las acciones resultante de un promedio

de interacciones. En la crónica periodística el mercado pasa a tener vida y voluntad propia, con frases habituales como “El mercado ha decidido hoy...”. En el estudio de los fenómenos colectivos complejos los físicos han desarrollado en gran detalle criterios para establecer los límites en que una aproximación de campo medio es válida y útil. La transferencia de esos resultados y conceptos a través de los bordes con otras disciplinas, apropiadamente modificados, desarrollados y enriquecidos, da lugar a una interesante ruta de actividad interdisciplinar.

3. Los físicos y la interdisciplinariedad

Ojeando hoy las mejores revistas internacionales de Física o las mejores revistas generalistas de Ciencia es habitual encontrar artículos de físicos sobre temas variopintos tales como propagación de enfermedades, dilemas sociales, sincronización de aplausos en un concierto, estudios de tráfico, control de multitudes, difusión de culturas, mercados financieros, leyes de crecimiento de la red que da soporte material a internet, fenómenos de crecimiento urbano, modelos de formación de opinión, comportamientos colectivos de luciérnagas que son atracciones turísticas en Oriente, etc. ¿Es eso Física? Al menos no parece que sea la Física de la que nos hablaron en nuestros años de educación preuniversitaria, ni probablemente en los universitarios. Sin embargo, la pregunta no parece importarles mucho a los propios físicos...

La Física es una disciplina antigua y bien establecida. No obstante, hay que recordar que nació como Filosofía, que, en cierta medida, tiene una vocación de ciencia universal y que los objetos que estudia han ido cambiando en el tiempo. De hecho lo que estudian los físicos ha cambiado mucho más que cómo lo estudian. En cierta medida puede decirse que la Física cambia, pero los físicos permanecen. Muchos físicos aceptarían la definición de que la Física es aquello que hacen los físicos. Dos muestras de lo que piensan en este contexto los físicos de sí mismos son las siguientes. La primera es la frase casi mística de J.C. Maxwell : “...es la función peculiar de las ciencias físicas el llevarnos a los confines de lo incomprensible” [12]. La segunda es la descripción (sobre la que no haré comentarios) que da D. Watts de la llegada

de los físicos a una nueva ciencia [10, cap.2]: *“Sucede que los físicos son casi perfectamente adecuados para invadir las disciplinas de los demás, siendo no sólo extraordinariamente listos, sino además y en general, mucho más cuidadosos que la mayoría en los problemas que eligen estudiar. Los físicos tienden a verse a sí mismos como los señores de la jungla académica, considerando sus propios métodos por encima de los de cualesquiera otros y guardando celosamente su propio territorio. Pero sus alter ego son felices tomando prestadas ideas y técnicas de cualquier sitio si parece que puedan ser útiles, y están encantados de irrumpir en el problema de los otros. Por irritante que esta actitud sea para todos los demás, la llegada de los físicos a un área de investigación a menudo preludia un periodo apasionante y de grandes descubrimientos. Los matemáticos hacen lo mismo ocasionalmente, pero nadie más desciende con tal furia y en tan gran número como los físicos hambrientos, adrenalizados por el aroma de un nuevo problema.*

En este desembarco de físicos en las más variadas orillas y a través de diversas fronteras interdisciplinarias (que algunos querrían descalificar como mero travestismo científico), una pregunta interesante que se plantea hoy en día es cuál es el ámbito de las llamadas Ciencias de la Naturaleza. Alternativamente la pregunta es si los físicos debieran limitarse al ámbito general de las Ciencias de la Naturaleza en las que tradicionalmente se ha encuadrado a la Física. Una forma sugerente de plantear esta pregunta apareció en un chiste de Máximo en el diario El País el 8 de Julio de 2002 a raíz de una crisis de Bolsa. En la viñeta un interlocutor preguntaba si la volatilización del dinero de la Bolsa sin ir a ningún sitio no iba en contra de las leyes de la Física. El otro interlocutor respondía: *“Sí, pero la Economía no es una ciencia de la materia sino una especulación del espíritu”.*

H. A. Simon, en su maravilloso libro sobre “Las Ciencias de lo Artificial”, analiza la cuestión de hasta qué punto los fenómenos artificiales pueden caer propiamente dentro del ámbito de la Ciencia. Distingue que los fenómenos naturales tienen un aire de necesidad y obedecen la “ley natural”, mientras que los artificiales tienen un aire de contingencia. Las ciencias de lo artificial se refieren no a lo necesario, sino a lo contingente, no a cómo son las cosas, sino

a como pudieran ser o pueden ser diseñadas. En ese sentido incluye a la Ingeniería entre las Ciencias de lo Artificial. Al margen de tales discusiones, cercanas a veces a la epistemología, nuestra sociedad y con ella los científicos, acepta, ya sin dudas, la importancia de la realidad virtual, de los intangibles de la llamada nueva economía y de los valores del conocimiento como contrapunto a la explotación de los recursos naturales. Todo ello con implicaciones socioeconómicas sobre las que no hace falta insistir. Surge, pues, la nueva frontera del estudio de las realidades no "naturales", y los físicos, conforme a su tradición y llevando la Física más allá de las Ciencias de la Naturaleza están respondiendo en número creciente al nuevo desafío. Se trata de afrontar el reto de describir los mecanismos de funcionamiento de los sistemas complejos creados por el hombre, incluyendo en ellos a la propia sociedad humana [13].

Aceptando (¡Quién la acepte!) la centrifugación de físicos hacia actividades interdisciplinarias lejanas a Física tradicional, cabe preguntar qué pueden aportar como ingrediente original suyo a dichas actividades. Quizás en la actividad de los físicos en problemas biológicos es donde esta cuestión ha sido ya más debatida. Un punto de vista al respecto es el expresado en un artículo de opinión de la revista Nature bajo el expresivo título de "Persiguiendo simplicidades arrogantes" [14]. Discute que, comentando el impacto de la Física en la Biología después de la segunda guerra mundial, L. Szilard (físico convertido en biólogo) afirmaba: *"Lo que los físicos trajeron a la biología no son unas habilidades adquiridas en la Física, sino más bien una actitud: la convicción, que pocos biólogos tenían en ese tiempo, de que los misterios pueden resolverse"*. Continúa el artículo discutiendo que los físicos siempre tienden a empezar a un nivel sencillo y que no hay que infraestimar la irritada reacción de comunidades establecidas a propuestas de gran simplicidad, siendo parte de esa reacción una defensa improcedente de los límites tradicionales de su disciplina. A este respecto insiste en que, en particular en un proyecto interdisciplinar, es importante saber distinguir entre la simplicidad de una idea clarividente y propuestas tan simples como ignorantes.

La capacidad de los físicos para modelar de manera sencilla diferentes fenómenos es quizás una característica esencial de su forma de hacer Ciencia y, de la misma manera que en la Biología, algo que pueden aportar en muchos otros campos. Esa es la verdadera vocación interdisciplinaria de los físicos, la que permite avances en el conocimiento y comprensión de fenómenos. Eso va mucho más allá de la subcontratación de técnicos especialistas para la que a menudo son requeridos los físicos en proyectos de carácter más multidisciplinario que interdisciplinario. Ejemplos de esos proyectos son las ofertas a físicos para actuar como técnicos de análisis de datos biológicos o financieros o para aportar a la medicina nuevas técnicas físicas útiles en el diagnóstico o tratamiento de enfermedades.

Los modelos, en el sentido en que refiero aquí a ellos, son útiles cuando reproducen las características esenciales de un comportamiento de una manera transparente. Es decir, cuando incluyendo sólo ingredientes esenciales permiten identificar, entender y describir los mecanismos responsables de un comportamiento. En la Física de los fenómenos colectivos el modelo paradigmático es el famoso modelo de Ising, que nació en 1925 como un modelo de magnetismo [6], pero que representa la simplificación esencial de un conjunto de elementos binarios que interactúan con sus vecinos. Por ello, y más allá del magnetismo, hoy es de uso frecuente en campos tan dispares como estudios de DNA o de votaciones políticas. El modelo de Ising no ha ayudado en el diseño de nuevos materiales magnéticos y los especialistas en ellos a menudo han mirado ese modelo como un juguete lejano a la realidad por no incluir ninguno de los detalles característicos de los distintos materiales magnéticos. Pero nadie pone en duda la relevancia conceptual que ese modelo ha tenido en la comprensión de los fenómenos críticos y los grandes avances científicos que se han seguido de su estudio. De igual manera, modelos que pueden juzgarse irrealistas en campos como las Ciencias Sociales al no incluir toda la complejidad del individuo humano, pueden ser un instrumento muy eficaz en la comprensión de fenómenos colectivos sociales. Cuando menos pueden ser un instrumento eficaz para definir cuáles son las preguntas posibles y relevantes a hacer sobre esos sistemas. En cierta medida no estamos lejos

de la descripción que hacía Pablo Picasso del arte como de aquella mentira que nos ayuda a entender la realidad.

Los modelos tienen además una gran importancia interdisciplinar. A propósito de la introducción de modelos en Sociología reflexiona T. Schelling [7, cap.3] que si un modelo satisface el requerimiento básico de simplicidad a menudo describirá sistemas físicos, fenómenos sociales, comportamiento animal, etc., porque de hecho esos modelos describen patrones de comportamiento recurrente. Reconocer la amplia aplicabilidad de un modelo implica reconocer que se está estudiando un fenómeno genérico o muy básico y no una idiosincracia. Al mismo tiempo, el compartir uno de tales modelos es uno de los mejores instrumentos de comunicación entre disciplinas. Schelling pone como ejemplo los modelos llamados de “masa crítica”, que caracteriza como aquellos en que una actividad se automantiene una vez que la medida de tal actividad llega a un valor mínimo. Además de ejemplos físicos tal situación aparece en epidemiología, supervivencia y extinción de especies, sistemas lingüísticos, integración racial, movimientos políticos, etc.

Un aspecto importante de la utilidad de modelos sencillos, y sobre el que generalmente no se insiste mucho, es su capacidad para demostrar conceptos equivocados o descartar supuestos que se dan por obviamente válidos. Ante afirmaciones gratuitas, que pueden parecer razonables, sobre los mecanismos responsables de un determinado fenómeno, es conveniente ver si en un modelo sencillo ese mecanismo da de hecho lugar a lo previsto. Las sorpresas y resultados contraintuitivos son frecuentes. Como ejemplo podría proponerse un “juego de la política”: En una novela de actualidad política [15], un ministro del gobierno español del presidente J. M. Aznar define la política como un juego de rol en que solo hay dos reglas. La primera es sobrevivir en el propio grupo y la segunda destruir al grupo contrario. Sería interesante implementar un modelo de agentes sociales basado en estas dos reglas sencillas y ver si los fenómenos colectivos resultantes describen nuestra observación de las luchas políticas. Hay un aspecto complementario de la utilidad de modelos de fenómenos colectivos y que va en la dirección opuesta en la dicotomía micro-macro: Los modelos son necesarios cuando se quiere extraer alguna

consecuencia sobre comportamiento o propiedades individuales a partir de la observación del fenómeno colectivo. Por ejemplo, la observación de las facciones resultantes de las luchas políticas no permite concluir nada sobre acciones y motivaciones individuales en ausencia de un modelo del juego político.

Por último, el estudio de modelos sencillos de fenómenos genéricos plantea la cuestión de en qué medida la Ciencia debe responder por su capacidad de predicción, o alternativamente o simultáneamente por proporcionar un entendimiento y conceptualización de fenómenos y mecanismos. En la Física la palabra predicción ha jugado tradicionalmente un papel fundamental. Su significado ha cambiado en el pasado y continúa cambiando. Con el cambio de paradigma resultado del advenimiento de la Ciencia de los Sistemas Complejos la palabra predicción ha adquirido un significado más general y débil. La consecuencia positiva es que el ámbito de la Física se hace mucho mayor y las construcciones de la Física encuentran muchas más aplicaciones [16]. El interés está más en predecir tipos de comportamiento (quizás con cierta probabilidad), que en predecir una cifra significativa más en una constante microscópica física fundamental. Aparece por tanto un cierto énfasis en la comprensión, acompañada de otra visión de lo que es importante en la predicción.

En resumen, los desarrollos impulsados en campos tales como manejo de la información, redes complejas, organización empresarial, análisis de mercados o estudios de formación de opinión y de cooperación social, implican una ciencia aplicada basada en el establecimiento de nuevos conceptos interdisciplinarios y realidades virtuales a partir del estudio genérico de sistemas complejos. Se trata de la punta de lanza de los estudios de físicos fuera del ámbito tradicional de las "Ciencias Naturales", con un fundamento epistemológico distinto al enfoque reduccionista tradicional, y en la frontera intelectual de los valores de la nueva sociedad del conocimiento [6]. Tal punto de vista es una de las respuestas a las voces injustificadas que hablan de la Física como ciencia del siglo pasado y sin grandes desafíos para el futuro.

4. Nuevas Ciencias

La aparición reciente de nuevas comunidades científicas, o quizás nuevas Ciencias, en el espacio inter-disciplinas tradicionales ilustra muchas de las ideas expuestas en los párrafos anteriores. A modo de ejemplos pueden citarse las que aparecen ahora en la literatura bajo los nombres de Econofísica, Sociofísica y Ciencia de Redes.

La idea de modelización de fenómenos sociales desde la Física puede parecer algo nuevo, pero de hecho T. Hobbes con su Leviathan (1651) ya proponía un modelo mecánico de la sociedad humana y el filósofo político A. Comte acuñó el término “Física Social” en 1830 [12]. El uso de los procesos estocásticos en socioeconomía desde el punto de vista de la Física también tiene cierta tradición [17]. En la actualidad, lo que ha surgido y se ha establecido bajo el nombre de Econofísica [18] se refiere fundamentalmente al análisis de los muy abundantes datos sobre mercados financieros, en un intento de tener cierta capacidad de predicción en el corto plazo. El énfasis está aquí en el análisis de datos usando métodos de procesos estocásticos y de sistemas dinámicos caóticos. Desde este punto de vista se trata en gran parte de un esfuerzo técnico especializado. Por el contrario lo que empieza a conocerse como Sociofísica responde más a las ideas interdisciplinarias expuestas anteriormente, siguiendo el uso de modelos simplificados que incorporen mecanismos esenciales y permitan la comprensión de fenómenos genéricos en la dinámica de sistemas sociales. El nombre de Sociofísica no es particularmente acertado y podría incluso verse el nombre de la Psicohistoria de Seldon-Asimov [9] como un precedente. Pero en cualquier caso, una comunidad va apareciendo tras esa etiqueta. Como ejemplo de los problemas en consideración puede citarse el paradigma de cuándo emerge un consenso social o por el contrario en la misma sociedad aparece un estado polarizado con distintas opciones sociales que coexisten. Este problema aparece en modelos de segregación social [8], formación de opinión, diseminación de cultura [19] y teorías de influencia social.

Una de las mayores innovaciones científicas de final del siglo XX es sin duda la aparición de lo que se ha llamado Ciencia de Redes y sobre la que ya existen un buen número de libros de divulgación [10,11]. Refiero al lector a esos libros para una descripción más precisa y detallada que los breves comentarios siguientes. Para un físico de nuestro tiempo es novedoso y estimulante que esta ciencia no se refiera a algo vedado a nuestra intuición y experiencia diaria, como es por ejemplo el mundo de las partículas subatómicas, sino que trate en general de nuestro medio ambiente real (que ya es distinto del “natural”). Trata del mundo de la gente, de las relaciones de amistad, de rumores, culturas, enfermedades, comunicación electrónica, crisis financieras, apagones eléctricos, aeropuertos colapsados, organización empresarial o terrorista, colaboraciones científicas, relaciones sexuales, etc. En la “*era conectada*” [10] vivimos inmersos en redes de todo tipo que conectan objetos en formas diversos y que condicionan y determinan cómo se relacionan y operan el conjunto de esos objetos. Tales redes aparecen en los ecosistemas naturales relacionando especies en “redes de alimentación”, en las redes de relación social, sistemas eléctricos, internet, etc. Tradicionalmente tales redes se trataban, fundamentalmente desde el mundo de la Socioeconomía y la Biología, como aleatorias. Esto es, que cualesquiera dos objetos están conectados con igual probabilidad. Simultáneamente los físicos basaban la gran mayoría de sus estudios de objetos en interacción en modelos en que esos objetos forman los nodos de una red regular en la que interaccionan con sus vecinos.

Tres hechos han revolucionado esta situación y llevado a la Ciencia de Redes: a) El reconocimiento explícito y cuantitativo en base a análisis de datos de que tales redes tienen propiedades topológicas complejas distintas por igual de las redes aleatorias que de las regulares. b) La constatación de que las mismas propiedades aparecen de manera ubicua y universal en redes de objetos tan distintos como las redes de alimentación, las de colaboración científica o internet. c) El desarrollo de modelos simples que permiten reproducir esas propiedades topológicas de las redes complejas y entender su origen. Entre esas propiedades destacan las de “pequeño mundo” y las de “escala libre”. La propiedad de “pequeño mundo” indica que con un número

pequeño de pasos (del orden de 6) entre objetos intermedios pueden conectarse cualesquiera dos objetos de la red. Además esto es compatible con que la red sea compacta, es decir que preferentemente hay en la red subgrupos de elementos bien conectados, lo que no sucede en una red aleatoria. La propiedad de “escala libre” se refiere a que estas redes son autosimilares, presentando invariancia de escala, propiedad que ya comenté anteriormente como una de las características de los sistemas complejos.

La emergencia de la Ciencia de Redes es un muy buen ejemplo de actividad interdisciplinar con investigadores provenientes de orígenes científicos muy diversos, pero motivados por un nuevo problema y siendo capaces de modificar y transferir conceptos entre disciplinas. Los físicos y matemáticos traen consigo una gran experiencia en modelos numéricos y proceso de crecimiento y agregación útiles en el estudio de formación de redes, pero es necesario conjugar eso con los conceptos desarrollados durante muchos años por sociólogos, psicólogos y antropólogos sobre comportamiento individual, incentivos institucionales, normas culturales y la relación entre estructura social y estructura de la red [10].

Agradecimiento: Agradezco a todos los compañeros del Departamento de Física Interdisciplinar del IMEDEA las múltiples discusiones colectivas que me han permitido perfilar muchas de las ideas expuestas aquí, y que me consta que no todos comparten en todos sus aspectos.

Bibliografía

1. P.W. Anderson, *More is different*, Science **177**, 393 (1972).
2. P. Eisenberger, en *Physics Today*, March 1995, p 42.
3. J. Horgan, *From complexity to perplexity*, Scientific American June 1995, p. 74.
4. S. Solomon and E. Shir, *Complexity; a science at 30*, Europhysics News, March 2003, p. 54.
5. Ralph Dum, *Focus Document: Complex Systems*, Comisión Europea, Programa de Tecnologías de la Sociedad de la Información, 2001; *Complexity Tools in Evaluation of Policy Options for a Networked Knowledge Society*, Comisión Europea, Dirección General de la Sociedad de la Información. Junio 2003.

6. F. Guinea, E. Louis y M. San Miguel, *La ubicuidad como futuro de la Física Estadística y No Lineal*, Revista Española de Física (2003).
7. T. Schelling, *Micromotives and Macrobehavior* (Norton, New York) 1978.
8. T. Schelling, *Dynamic models of segregation*, J. Mathematical Sociology 1, 143 (1971)
9. I. Asimov, *Foundation* (Una versión disponible en la actualidad es la de Harper Collins Publishers, London) 1995.
10. D. Watts, *Six degrees: The science of a connected age* (Norton, New York) 2003.
11. A. Barabasi, *Linked: The new science of networks* (Perseus, Cambridge) 2002; M. Buchanan, *Nexus: The groundbreaking new science of networks* (Norton, New York) 2002
12. P. Ball, *The physical modelling of society: a historical perspective*, Physica A 314, 1 (2002)
13. J. Epstein and R. Axtell, *Growing artificial societies: Social Sciences from the bottom up*, MIT Press, Cambridge, Mass. (1996)
14. *Pursuing arrogant simplicities*, Nature 416, 247 (2002)
15. A. Martínez, *El caso del gato simbotas* (Aguilar, Madrid) 2002
16. G. Parisi, *¿Cómo resuelve un físico un problema complejo?*, Conferencia en Statphys 20, Paris (1998), arXiv:cond-matt/0205297
17. E. W. Montroll, *Social Dynamics and the quantifying of Social forces*, Proc. Nat. Acad. Sci. 75, 4633 (1978).
18. R. Mantegna and H. Stanley, *An Introduction to Econophysics*, Cambridge University Press 2000
19. K.Klemm, V. M. Eguíluz, R. Toral and M. San Miguel, *Globalization, Polarization and Cultural Drift*. J. Economic Dynamics and Control (2003)