



Academia de Ciencias Matemáticas,
Físico-Químicas y Naturales de Granada

EL TAMAÑO, SI PEQUEÑO, IMPORTA

DISCURSO PARA EL ACTO DE SU RECEPCIÓN
COMO ACADÉMICO NUMERARIO POR EL

ILMO. SR. D. ROQUE ISIDRO HIDALGO ÁLVAREZ

GRANADA, FEBRERO 2012



Academia de Ciencias Matemáticas, Físico-Químicas
y Naturales de Granada

EL TAMAÑO, SI PEQUEÑO, IMPORTA

DISCURSO PARA EL ACTO DE SU RECEPCIÓN
COMO ACADÉMICO NUMERARIO POR EL

ILMO. SR. D. ROQUE ISIDRO HIDALGO ÁLVAREZ

GRANADA, FEBRERO 2012

“Ustedes saben mejor que nadie que en el conocimiento y la cultura no sólo hay esfuerzo sino también placer”.

José Mujica. (Presidente de Uruguay)

Dedicado a

Blas Cabrera Felipe, Miguel Catalán Sañudo y Enrique Moles Ormella, forjadores en 1932 del Instituto Nacional de Física y Química.

Dedicado a

Javier Verdejo Lucas, Salvador Vila Hernández y Jesús Yoldi Bereau, forjadores de un futuro mejor para todos.

EL TAMAÑO, SI PEQUEÑO, IMPORTA

ROQUE ISIDRO HIDALGO ÁLVAREZ

**Excelentísimo Señor Presidente,
Excelentísimos e Ilustrísimos Señores Académicos,
Señoras y Señores.**

Antecedentes.

Hace unos meses se celebró en Montreux (Suiza) la 7ª Conferencia Mundial sobre detergentes donde se dieron cita, entre otros muchos, los directores de las empresas Procter & Gamble, Unilever y Henkel; sus conferencias giraron alrededor de las siguientes ideas: “estrategias inspiradas en el poder de la voluntad”, “estrategias futuras”, “el desafío de una innovación sostenible”. Hubo incluso un participante, director de la empresa “Seymourpowell” que se atrevió a hablar sobre “El futuro del futuro”.

Es evidente que el futuro está presente hoy en día como tema de preocupación en todos los ámbitos, desde el económico y social hasta el científico y técnico. Estamos ante una nueva encrucijada, hay que preguntarse y tratar de averiguar qué hay en el horizonte y cuáles van a ser los nuevos paradigmas científicos y técnicos.

La investigación por sí sola no es suficiente y menos aún cuando tiene como principal objetivo la promoción dentro del escalafón funcional de quien la realiza. La mentalidad que se necesita para abordar los retos de un mundo cada vez más interconectado pero también más desigual es otra. El fin de la investigación no es satisfacer el impulso hedonista de publicar artículos en revistas de elevado parámetro de impacto¹, es capacitarnos para dar el siguiente paso, es decir, ser capaces de innovar.

Nuestra investigación tiene evidentes puntos débiles; así, por ejemplo, desde 1994 hasta 2004 la ciencia española publicó 228.337 artículos (puesto 10º a nivel mundial); esos artículos recibieron 1.642.964 citas (posición 12º), lo que implicó que el número medio de citas por artículo fuera de 7.20, lo que nos colocó en el puesto 44º a nivel mundial. Este último dato indica que nuestra investigación tiene todavía una baja visibilidad a nivel internacional. Tenemos que hacer más, mejor y difundirlo en ámbitos más amplios.

La Historia no ha muerto como algún teórico interesado en que así fuese pronosticó hace algunos años, continúa viva y obstinadamente nos enseña que las claves del presente hay que buscarlas en el pasado. La innovación no es un fenómeno nuevo en nuestro país, la conocida empresa Zeltia, fundada en 1939, es un buen ejemplo de cómo en condiciones durísimas se puede investigar e innovar en temas punteros.²

No existe ningún país social y económicamente desarrollado que no disponga de un sistema de I+D+i capaz de dar respuesta a las necesidades de su sociedad. Para ello se necesitan investigadores en las ciencias básicas capaces de ampliar los horizontes del conocimiento, de manejar las “artes del conocimiento” pero también de hacerse entender con quienes diseñan, producen y/o fabrican.

En el año 2005, el profesor Nathan Rosenberg, de la Universidad de Stanford, declaraba en una entrevista realizada en Madrid lo siguiente, “la educación superior es lo más importante. Para que un país desarrolle tecnologías complejas, necesita personas con capacidades complejas”. Más aún: ese mismo profesor afirmaba “*España va a sufrir mucho si no empieza a innovar*”. Pero qué significa innovar. Según el profesor Jesús Peña Cedillo, de la Universidad Simón Bolívar, “innovar es producir y poner en práctica con incidencia social y/o económica nuevo conocimiento; por tanto, se trata de la capacidad para generar y aplicar

¹ Soy consciente de que el impulso fundamental de cualquier buen investigador es conocer e interpretar mejor el mundo natural.

² En Zeltia trabajaron científicos de la talla de Fernando Calvet Prats, Ramón Obella Vidal, Isla Couto, Andrés León Maroto, Miguel Catalán Sañudo, Álvaro Gil Varela, Faustino Cordon Bonet e Isidro Parga Pondal algunos de los cuales habían sido expulsados de la Universidad española por defender el legal y legítimo gobierno de la IIª República Española.

conocimiento que incremente la productividad, la eficiencia o la efectividad de una comunidad u organización, permitiéndole alcanzar sus objetivos o incrementar su bienestar. El concepto se refiere tanto a las usualmente reconocidas como “innovaciones tecnológicas”, como a aquellas otras de índole social e institucional, todas representando diversas formas de generación y uso del conocimiento”. La innovación es necesariamente un hecho socioeconómico que tiene como paso previo el de la investigación que es la creación de alguna idea científica, o teoría o concepto o artefacto, que en sí mismo puede no producir ningún efecto socioeconómico importante. La innovación ha sido y continúa siendo algo consustancial al mundo de las dimensiones despreciables.

A qué llamamos “el mundo de las dimensiones despreciables”. Entenderemos mejor esta idea si decimos que es el mundo en el que se mueve la ciencia coloidal o en versión más moderna la nanociencia y la nanotecnología.

Utilizando el buscador de internet Google se encuentra que la palabra “coloides” da lugar a 126.000 resultados; si utilizamos el término en inglés “colloids” el número de resultados sube hasta los 23.100.000. Realizando el mismo proceso con los términos “nanoscience and nanotechnology” la búsqueda nos proporciona 556.000 resultados. Parece evidente que el término “colloid” se utiliza mucho más que el de “nanoscience and nanotechnology”. La explicación es evidente: el término coloide fue propuesto por Thomas Graham³ utilizando una palabra griega (κολλω) que podríamos traducir por “cola”⁴ en el siglo XIX y el de nanociencia, como explicaré más adelante, tiene ahora 50 años. Pero la pregunta que nos hacemos aquí es, ¿tienen alguna relación entre sí?

La ciencia de coloides y la nanociencia.

La pregunta anterior sugiere otra, ¿qué son los coloides y qué es la nanociencia?

Los sistemas coloidales tienen muchas propiedades especiales, algunas de las cuales nos son muy familiares. Por ejemplo, bajo determinadas condiciones los coloides pueden flocular o coagularse; la leche forma mantequilla cuando se bate y yogurt o queso en presencia del ácido láctico generado por ciertas bacterias o levaduras. Por cierto, los virus y las bacterias constituyen un importante grupo de sistemas coloidales. Los bancos de arena o los deltas se forman en la desembocadura de los ríos por la agregación de los finos limos que son arrastrados por el agua del río cuando se encuentra con el agua salada de los mares u océanos.

³ Unos años antes F. Selmi había preparado algunas dispersiones coloidales de cloruro de plata, azul de Prusia y sulfuros.

⁴ Philos. Trans. R. Soc. London **151**,183, 1861.

Las condiciones bajo las cuales se forman las dispersiones coloidales son igualmente importantes. Lavarse con un jabón produce una dispersión coloidal con la suciedad, del mismo modo que muchos procesos culinarios se diseñan para producir productos coloidales como lo es la mayonesa.

En los seres vivos también los fenómenos coloidales juegan un papel vital en materiales tales como las membranas de las células, el plasma celular, la sangre, los huesos, dientes y músculos. La formación de β -amiloides, íntimamente relacionada con la enfermedad neurodegenerativa de Alzheimer, es un proceso de agregación coloidal de péptidos en el cerebro.

Otros importantes fenómenos coloidales tienen que ver con la influencia de la materia orgánica en la fertilización y acondicionamiento del suelo, el cual es otro importante sistema coloidal. A lo largo de las eras geológicas los procesos coloidales han dado lugar a sustancias coloidales como las calizas y las areniscas porosas (cuyos intersticios fueron rellenados por el petróleo mediante un proceso coloidal); las arcillas que están formadas por láminas de tamaño coloidal y los ópalos naturales que deben su iridiscencia a nanoesferas de sílice densamente compactadas. Las ágatas y otros minerales fueron formados mediante procesos coloidales y un material tan importante como el carbón es también coloidal.

Hay constancia de que en las civilizaciones mesopotámicas y del antiguo Egipto se utilizaron estos sistemas y procesos. Desde muy antiguo los coloides han estado íntimamente relacionados con la fabricación de ladrillos, la alfarería, la preparación de argamasas y morteros y más tarde con el cemento; en el tintado y curtido de la piel, en la purificación del agua y también en la preparación de tintas y pigmentos.

Hoy en día los coloides juegan un papel muy relevante y su importancia industrial y económica se puede resumir en los siguientes puntos:

1º) En la preparación de dispersiones coloidales para usos diversos como es el caso de las pinturas, las tintas, los productos farmacéuticos y cosméticos, los alimentos, los barros de perforación de los pozos petrolíferos, los colorantes, los adhesivos y pegamentos, las espumas, los productos agrícolas y algunas pruebas de inmunodiagnóstico y sistemas de liberación de fármacos y genes.

2º) En el uso de dispersiones coloidales como paso previo en los procesos de fabricación de cerámicas, cementos y yesos, papel y soportes para catalizadores.

3º) En la utilización de fenómenos coloidales incluyendo: la detergencia, los fenómenos capilares que son determinantes en el mojado de las superficies, la extracción del petróleo de las rocas sedimentarias, la retención de humedad y nutrientes en el suelo, en el recubrimiento

de superficies, la flotación de minerales, la adsorción de impurezas en el refinado del azúcar, en la recuperación de disolventes y la deposición electroforética de pinturas.

4º) Por último, también en la destrucción de dispersiones coloidales no deseadas como sucede en la purificación del agua, el aclarado de vinos y cervezas, en la recogida y tratamiento de aguas residuales, la rotura de emulsiones de petróleo, el secado de fangos y la dispersión de aerosoles y nieblas.

Seguramente el primer trabajo científico sobre coloides es el realizado por el eminente científico inglés Michael Faraday entre 1856 y 57, quien sintetizó soles de oro que todavía hoy permanecen estables y pueden ser observados en el Museo Británico de Ciencia en Londres.⁵

La ciencia coloidal es una ciencia transversal que se define como el punto de encuentro de las ciencias básicas, es decir, la Física, la Química y la Biología con la Tecnología. Se trata además de una ciencia plural que tiene estrechas relaciones con la Química, la Física de la Materia Condensada, la Ciencia de los Materiales (incluyendo a las cerámicas y los polímeros), las superficies y las ingenierías. Esto explica el porqué un mismo grupo investigando en ciencia coloidal puede abordar al mismo tiempo y con las mismas herramientas teóricas y experimentales problemas y sistemas tan diversos como las pruebas de inmunodiagnóstico, las emulsiones bituminosas que se utilizan para hacer carreteras o los sistemas de liberación de fármacos. Es sobradamente conocido que los grupos o Institutos de investigación que trabajan en líneas multidisciplinares y transversales están en mejores condiciones de hacer frente a los retos científicos y técnicos del futuro.

En la ciencia de coloides las aplicaciones están íntimamente unidas a los sistemas que se estudian. Les pongo un ejemplo de nuestra vida cotidiana. Como podemos observar caminando por las aceras de nuestras calles son numerosísimos los chicles que están fuertemente pegados a las losetas que forman las aceras. Este problema refleja la falta de la más elemental educación cívica de quienes así obran, pero también es expresión de un fenómeno coloidal. Ciertos polímeros presentan una elevada energía de cohesión con las superficies sólidas mientras que otros de composición química diferente tienen energías de

⁵ Faraday hizo tres observaciones claves: primera, un haz de luz era dispersado cuando atravesaba el líquido (efecto Tyndall), segunda, el color cambiaba cuando se añadía una sal y además se producía la sedimentación de las partículas y tercera, la adición de gelatina al sol de oro protegía a éste de la acción de la sal. Faraday sugirió que el tamaño de partícula determinaba tanto el color como la sedimentación y que las partículas podrían estar encerradas en “sobres” de agua o (en el caso de añadir gelatina) en “sobres” de esa “sustancia animal”. Estas especulaciones se anticipaban a muchas de las ideas que han formado la base de desarrollos posteriores. Faraday, M., Philos. Trans. R. Soc. London, **147**,145, 1857

adhesión menores. En un futuro próximo veremos en el mercado chicles preparados con polímeros que se pegan menos gracias al trabajo de investigación realizado por el grupo dirigido por el Dr. Goodwin en la Universidad de Bristol.

Tal vez el primer manual dedicado específicamente al estudio de los coloides fue el publicado en 1917 por el Dr. Wolfgang Ostwald, titulado “Introducción a la Química coloidal teórica y aplicada. El mundo de las dimensiones despreciables”. En este libro se plantea la existencia de una nueva rama de la Química Física, denominada Química coloidal que, en opinión del autor, era una ciencia diferenciada e independiente del resto de las demás ciencias y que, además, destacaba por sus innumerables aplicaciones científicas y tecnológicas⁶. Debemos recordar que el concepto de coloide surgió durante la realización de experimentos de difusión (diálisis) y se les denominó así a aquellas sustancias que o no difundían o lo hacían muy lentamente. Ostwald llegó a la conclusión de que el tamaño de la fase dispersa era el mejor criterio para definir **los límites del dominio coloidal llegando a la conclusión de que éstos estaban entre 1 y 100 nm**. Se definía así este dominio como perteneciente al mundo mesoscópico, es decir, intermedio entre lo microscópico y lo macroscópico. Según la autorizada opinión de este autor, “los coloides forman, junto con las suspensiones gruesas y las disoluciones moleculares, el grupo de los sistemas dispersos, diferenciándose de ambas sólo en su grado de dispersión”. Dentro de los sistemas dispersos existe, lógicamente, un principio de continuidad, pudiéndose pasar de unos a otros variando el grado de dispersión. Ya entonces quedó bien establecido que el estado coloidal es un estado universalmente posible de la materia y que para preparar coloides no sólo se puede utilizar la energía mecánica sino también la energía química, la eléctrica, el calor y la luz.

En este contexto son ocho las combinaciones que podemos hacer entre los tres principales estados de agregación de la materia en sistemas con una fase dispersa y un medio de dispersión: los aerosoles, las emulsiones, las espumas y las dispersiones coloidales son ejemplos bien conocidos de estas combinaciones. Ya en 1917 se planteaba Ostwald un estudio sistemático de las que él llamó, “propiedades mecánicas, ópticas, eléctricas y fisicoquímicas de las disoluciones coloidales y cómo éstas cambiaban con el grado de dispersión”.

Veamos ahora qué se entiende por nanociencia. En el mundo de hoy el prefijo “nano” ha

⁶ En este libro se recogen algunas de las conferencias que este conocido químico alemán impartió durante 1913 y 1914 en diversas Universidades de Canadá y Estados Unidos.

hecho fortuna⁷. Casi todo lo que se hace hoy en ciencia debe llevar los prefijos “nano” o “bio”.

La nanociencia ha evolucionado hasta convertirse en un gigantesco campo científico-técnico donde trabajan científicos e ingenieros, lo que explica que este nombre sea más una definición sociológica que científica.

Parece existir un consenso generalizado sobre la fecha de nacimiento de la nanociencia. Fue a finales de 1959, coincidiendo con la conferencia dada por el premio Nobel de Física, Richard Feynman, en la reunión de la Sociedad Americana de Física. Se trató de una inusual conferencia titulada “There is plenty room at the bottom”, en la que Feynman predijo la existencia de un área de investigación, inexplorada hasta entonces, relacionada con una escala justo por encima del tamaño de los átomos y las moléculas, sugiriendo que si fuera posible manipular la materia a esa escala, toda la Enciclopedia Británica se podría escribir en la cabeza de un alfiler⁸.

En julio de 2004 la “Royal Society of London” realizó el informe titulado “*Nanoscience, and Nanotechnology: Opportunities and Uncertainties*”, en el que se afirmaba:

Nanociencia es el estudio de los fenómenos y la manipulación de materiales a escala atómica, molecular y macromolecular donde las propiedades difieren significativamente de aquellas a mayor escala.

Existe la opinión generalizada de que la nanociencia y la nanotecnología tienen que ver con “la investigación y el desarrollo tecnológico a niveles atómicos, moleculares o macromoleculares en la escala de tamaños comprendida aproximadamente entre 1 y 100 nm; que tienen por objeto el conocimiento fundamental de los fenómenos y materiales a escala nanoscópica, así como crear y usar estructuras, dispositivos y sistemas que tengan nuevas propiedades y funciones, como consecuencia de su tamaño pequeño y/o intermedio”.

Es curioso pero Wolfgang Ostwald estableció como límites del dominio coloidal exactamente el mismo que 90 años después se considera el dominio propio de la nanociencia.

En opinión de Helmuth Möhwald, “no todos los científicos de este campo han reconocido cuánto la nanociencia le debe a la ciencia coloidal clásica”.

⁷ Citemos algunos términos que utilizan el prefijo nano: nanomateriales, nanoestructuras, materiales nanoestructurados, nanoimpresión, nanobiotecnología, nanofísica, nanoquímica, nanotoxicidad, nanotecnología radical, nanociencias, nanoóptica, nanoelectrónica, nanorobótica, nanosoldaduras, nanomedicina, nanoeconomía, nanonegocios, nanoleyes, nanoética, por citar solo unos pocos.

⁸ (ver www.zyvex.com/nanotech/feynman.html).

Por otra parte, este campo científico está definido por el tamaño de una dimensión y no por el tipo de material; de modo que la ciencia coloidal incluye materiales inorgánicos, orgánicos y biomateriales. Por lo tanto, está en la base de muchas fascinantes disciplinas como la biomedicina y la nanotecnología y según Möhwald, “la ciencia coloidal tiene un brillante futuro como ciencia posibilitadora (“enabling science”)”.

En opinión de Christian Joachim la definición dada por la “Royal Society of London” es confusa dado que el nombre de nanociencia debería de reservarse únicamente al estudio de un solo átomo o molécula. Se refiere, por tanto, a la posibilidad de realizar manipulaciones con átomos o moléculas. En este sentido el primer trabajo donde se consigue esto es el de Eigler y Schweizer en 1989. Estos autores fueron capaces por primera vez de manipular átomos, de uno en uno, con la punta de un microscopio de efecto túnel.

Es muy frecuente asociar el prefijo “nano” a la palabra griega *νανος* que significa “enano”. Pero la palabra nano se puede escribir también con dos enes. En el siglo VII antes de nuestra era, la Srta. *Νοῦνο* era la musa del poeta griego Mimnermus. En el siglo segundo de nuestra era, la palabra *ναννο* se refería a un pastel de queso con aceite de oliva y en el siglo tercero significaba un gran recipiente para lavar los platos. La primera vez que el prefijo nanno aparece en la literatura científica es en 1908, cuando Lohmann lo usó para clasificar organismos muy pequeños cuyas dimensiones ahora las podemos medir y son tan pequeñas como 200 nm de diámetro. Existe una extensa literatura sobre nannobacterias, nannoplantom y nannofósiles.

Se podría decir que a partir de ese momento se establecen dos vías: la de los materiales biológicos con dos enes y la de los materiales “inertes” con una única ene. Para esta última rama el prefijo nano fue oficialmente reconocido bastante tarde por el Comité Internacional de Pesas y Medidas, en 1956.

La primera vez que se plantea un dispositivo electrónico con una única molécula fue en la publicación de Aviram y Ratner en 1974. En él se predice que una única molécula de 1.5 nm de tamaño podría funcionar como un rectificador, cuando se colocara en una unión túnel metal-metal con electrodos separados un nanometro.

Con dimensiones aún más bajas se está iniciando una nueva tecnología computacional en la que la “unidad aritmética y lógica” se integrará posiblemente en una única molécula. ¿Sería esto nanotecnología o picotecnología?

La primera vez que se utilizó la palabra nanotecnología fue en 1974 por parte de Tanigushi y no para describir el objetivo de desarrollar computadoras con moléculas, sino en relación con

la ciencia de materiales y el futuro de la ingeniería de precisión. Alcanzar una precisión en la escala del nanometro en la fabricación de materiales es un objetivo fantástico para la microelectrónica y la ciencia de materiales en general. Ahora, sin embargo, necesitamos una escala de precisión atómica (0.01 nm) para manejar información o intercambiar energía con una única molécula.

Las posibilidades que el grafeno⁹ y los fullerenos¹⁰ abren dentro de la nanociencia son enormes y abarcan todos los aspectos de las tecnologías con perspectivas de futuro: energía, computación, etc.

El nexo de unión entre la ciencia de coloides y la nanociencia se basa en el enorme incremento que se produce en la relación área-volumen conforme el tamaño de partícula disminuye, de modo que las propiedades interfaciales llegan a ser muy pronto más importantes que las propiedades de volumen. En muchos casos, las aplicaciones de la nanociencia son posibles cuando se es capaz de controlar el tamaño, la forma y la composición química de las nanopartículas con el objetivo de poder correlacionar el tamaño con las propiedades fisicoquímicas. Por otra parte, hay que tener claro que la mayoría de las nanopartículas son útiles en nanotecnología si son coloidalmente estables. En la mayoría de los casos los objetivos, procedimientos y aplicaciones de ambas ciencias, la coloidal y la nanociencia, son los mismos.

Un campo en plena expansión es el del uso de nanopartículas para la liberación de fármacos pues tienen las siguientes ventajas respecto de los sistemas convencionales:

- Añadiendo nanoreceptores sobre la superficie de las nanopartículas el fármaco puede dirigirse específicamente hacia una parte del cuerpo humano. Estos receptores

⁹ El grafeno es una estructura laminar plana, de un átomo de grosor, compuesta por átomos de carbono densamente empaquetados en una red cristalina en forma de panel de abeja mediante enlaces covalentes que se formarían a partir de la superposición de los orbitales híbridos sp^2 de los carbonos enlazados. El Premio Nobel de Física de 2010 fue otorgado a Andre Geim y Konstantin Novoselov por sus revolucionarios descubrimientos sobre el material bidimensional grafeno. <http://es.wikipedia.org/wiki/Grafeno>

¹⁰ Los fullerenos son la tercera forma más estable del carbono, tras el diamante y el grafito. El primer fullereno se descubrió en 1985. Los fullerenos esféricos reciben a menudo el nombre de *buckyesferas* y los cilíndricos el de *buckytubos* o nanotubos. Reciben este nombre de Buckminster Fuller, que empleó con éxito la cúpula geodésica en la arquitectura. El fullereno más conocido es el *buckminsterfullereno*. Se trata del fullereno más pequeño con 60 átomos de carbono (C_{60}), en el que ninguno de los pentágonos que lo componen comparten un borde; si los pentágonos tienen una arista en común, la estructura estará desestabilizada. La estructura de C_{60} es la de una figura geométrica truncada y se asemeja a un balón de fútbol (domo geodésico), constituido por 20 hexágonos y 12 pentágonos, con un átomo de carbono en cada una de las esquinas de los hexágonos y un enlace a lo largo de cada arista. <http://es.wikipedia.org/wiki/Fullereno>

reconocen específicamente el tejido que debe ser tratado (diana), se unen a él y liberan las moléculas que constituyen el principio activo.

- Los tejidos sanos no se ven afectados por los efectos citotóxicos de los fármacos.
- Dado que las nanopartículas son extremadamente pequeñas pueden penetrar a través de los capilares más pequeños y son fácilmente capturadas por las células afectadas en un proceso de biovectorización. Esto provoca una acumulación del fármaco en el lugar deseado.
- El uso de nanopartículas biocompatibles permite prolongar la liberación del fármaco en el lugar adecuado durante el tiempo necesario.
- Los nanosistemas con liberación controlada del fármaco y carácter específico tienen un rendimiento y una eficacia superiores.

En la actualidad se están empleando ya los siguientes tipos de nanopartículas como sistemas de liberación de fármacos:

Nanopartículas poliméricas biocompatibles y biodegradables, tales como:

- Nanoesferas y nanocápsulas¹¹.
- Nanopartículas cerámicas¹².
- Micelas poliméricas¹³.
- Dendrímeros¹⁴.
- Liposomas¹⁵.

Todos estos aspectos han sido recopilados magistralmente por Morteza Mahmoudi y colaboradores, en un amplio trabajo de revisión publicado muy recientemente en “Chemical Reviews”.

Volvamos ahora a comentar algo sobre las propiedades de los sistemas coloidales. Dentro de las propiedades mecánicas, Ostwald menciona el **movimiento Browniano** (movimiento interno aleatorio y espontáneo), que para que se produzca es necesario que las partículas dispersas sean suficientemente pequeñas (diámetro menor que 0.5 μm) y el medio de dispersión suficientemente móvil como para permitir ese movimiento. La intensidad del

¹¹ En el caso de la nanoesfera el fármaco se une físicamente a una matriz de forma homogénea; mientras que las nanocápsulas son sistemas vesiculares en los que el fármaco es confinado en una cavidad rodeado por una única membrana polimérica.

¹² Se pueden fabricar de fosfato cálcico, sílice, alúmina o titanio.

¹³ Se trata de redes supramoleculares compuestas por combinaciones de ligandos hidrofóbicos e hidrofílicos entrecruzados que se autoensamblan en medio acuoso.

¹⁴ Los dendrímeros fueron descubiertos en 1980 y son monómeros ramificados que rodean un núcleo interior.

¹⁵ Los liposomas fueron descritos por primera vez en 1968 y se trata de vesículas pequeñas esféricas y artificiales que se forman utilizando fosfolípidos no tóxicos y colesterol.

movimiento aumenta conforme disminuye el tamaño de las partículas. Estamos en un momento en que Albert Einstein, Marian Smoluchowski y Jean Baptiste Perrin están dando forma teórica y confirmación experimental a este fenómeno aleatorio llamado movimiento Browniano (en honor al botánico Brown). Hoy sabemos que la causa de este movimiento es, a su vez, el movimiento de las moléculas que constituyen el medio de dispersión. Todos los átomos o moléculas se encuentran en un movimiento aleatorio debido a la agitación térmica y en un instante dado la concentración local de un pequeño elemento de volumen en el fluido puede ser mayor o menor que la concentración media global. El movimiento debido a la agitación térmica de las partículas coloidales será en el sentido de las densidades moleculares más bajas. Como éstas fluctúan de una forma aleatoria el movimiento direccional de las partículas coloidales y su velocidad está determinada por el arrastre hidrodinámico. La difusión se produce desde las zonas más concentradas a las menos. Si suponemos que nuestras partículas son esferas, el coeficiente de difusión D (m^2s^{-1}) viene dado por la conocida ecuación de Einstein-Smoluchowski. Cuando las dispersiones coloidales son más concentradas, las interacciones (hidrodinámica, electrostática o de van der Waals) con las partículas vecinas frenará su movimiento. La escala de tiempo en que podemos movernos va desde 1 ms hasta 1 ks y, por lo tanto, es de esperar que podamos observar interesantes comportamientos temporales en los sistemas coloidales.

Los sistemas coloidales se encuentran justo por encima (en tamaño) de la mecánica cuántica, pero suficientemente cerca para permitir estudiar algunas propiedades moleculares; la más conocida, el movimiento Browniano. La interacción de van der Waals es otro ejemplo de una interacción con origen cuántico, pero que podemos introducir en una descripción clásica

El tamaño de partícula es similar al alcance de las fuerzas existentes entre las partículas y la escala de tiempos del movimiento difusivo de las mismas es semejante a la escala en la cual nosotros podemos seguir los cambios que se van a producir. Estas dos circunstancias son las claves para comprender por qué muchos sistemas coloidales tienen comportamientos y texturas tan interesantes. El alcance de las fuerzas interpartículas, tanto si son fuerzas repulsivas como atractivas, es del orden del tamaño de las partículas coloidales. Para la mayoría de los sistemas coloidales las interacciones que debemos de tener en cuenta son: las electrostáticas, la de van der Waals, la Browniana y la viscosa. Mientras que las interacciones gravitatoria e inercial son generalmente despreciables.

Una parte sustancial de la ciencia coloidal moderna la constituyen los materiales y estructuras capaces de responder a estímulos externos que son uno de los puntos en los que la comunidad científica de todo el mundo está mostrando un gran interés. Como ejemplo cabe destacar que

una de las prioridades temáticas dentro del Programa Marco es el estudio, desarrollo y aplicación de estos materiales multifuncionales con el fin de poner a Europa a la altura de países como Estados Unidos y Japón en lo referente a la tecnología basada en dichos materiales.

Estos materiales, usualmente nanocompuestos, poseen propiedades que pueden ser controladas y cambiadas a petición. En esencia, tienen la capacidad de cambiar su color, forma, propiedades electrónicas y mecánicas en respuesta a cambios o alteraciones del medio (luz, sonido, pH, temperatura, voltaje, intensidad del campo magnético, etc.).

Forma de la fase dispersa.

Veamos ahora un aspecto muy interesante: como es el de la forma de la fase dispersa; por ejemplo, las burbujas de gas o las gotas de un líquido son esféricas debido al efecto de la tensión superficial.

Las partículas sólidas pueden ser esféricas pero a menudo no lo son. La forma depende de la historia de la formación del sistema. Los ópalos naturales, ya mencionados con anterioridad, son un ejemplo de cristal coloidal con partículas esféricas de sílice en una matriz de silicatos. Las partículas de sílice son sílice amorfa pero la distribución de tamaños de partícula es estrecha, de modo que las partículas forman una red cúbica centrada en las caras. Es el fenómeno de la difracción de la luz al atravesar esta estructura altamente regular la que da lugar a sus característicos colores. Cuando la desviación típica del tamaño medio es menos de un 10% de la media las dispersiones coloidales se consideran generalmente monodispersas. Si la distribución de tamaños es más ancha la dispersión se considera polidispersa. Aunque este criterio pueda parecer algo arbitrario, lo cierto es que los sistemas monodispersos tienen la posibilidad de formar cristales coloidales. Mientras que los sistemas polidispersos, no.

Los sistemas bimodales pueden también formar estructuras cristalinas si la relación entre los tamaños es la adecuada. Cuando las partículas se forman mediante un proceso de cristalización se pueden encontrar otras formas. El cloruro de plata se puede producir como dispersión coloidal en agua en forma de cubos monodispersos. La hematita se puede formar como láminas elipsoidales. Un caso muy interesante es el de las arcillas que son aluminosilicatos naturales que generalmente forman láminas. Las partículas de caolinita se forman como láminas hexagonales con una razón de aspecto de $\sim 10:1$. Las partículas de montmorillonita se pueden dispersar como cristales de una o dos capas de espesor. En otros casos se encuentran estructuras en forma de largas varillas. Basta con que una de sus

dimensiones caiga dentro del dominio coloidal para que se les considere sistemas de naturaleza coloidal. Este es el caso de las películas de jabón que teniendo dos dimensiones dentro del intervalo de tamaños macroscópicos tienen, sin embargo, su tercera dimensión dentro del dominio coloidal y su comportamiento está gobernado por fuerzas coloidales.

Los llamados coloides de asociación son aquellos que se forman con moléculas superficialmente activas llamados tensoactivos (jabones, detergentes, lípidos, etc.), que se autoensamblan para formar agregados multimoleculares de tamaño coloidal y presentan efectos controlados por fuerzas coloidales además de su comportamiento de fase. Dentro de las estructuras que estos coloides pueden formar destacan sobremanera los llamados cristales líquidos.

Los cristales líquidos son materiales con una microestructura en la que se mantienen las correlaciones orientacionales típicas de los sólidos cristalinos, pero cuyas moléculas no ocupan las posiciones fijas de una red, sino que tienen la movilidad característica de los líquidos. Hasta finales del siglo XIX los científicos describían la materia física en base a tres estados (sólido, líquido y gas). En 1888, sin embargo, un botánico (¡otra vez la Botánica!) austriaco, Friedrich Reinitzer, aisló una forma del colesterol (benzoato de colesterol) y observó que tenía dos puntos de fusión. Este investigador envió muestras de su material al físico Otto Lehman en Alemania quien estuvo investigando la cristalización de ese material con un microscopio con luz polarizada. Lehman concluyó que el fluido opaco obtenido por Reinitzer era un estado nuevo de la materia que presentaba propiedades de ambas fases, la sólida y la líquida; tal vez por eso la denominó fase de “cristal líquido”.

En 1922 Georges Friedel identificó distintas fases existentes dentro de los cristales líquidos, las cuales son: nemática, esméctica o nemática quiral. Las fases nemáticas son aquellas que tienen un orden orientacional de largo alcance pero carecen de orden posicional de largo alcance. Un mesogen se utiliza para referirse a la molécula que forma un cristal líquido (una mesofase). Los últimos avances en la síntesis orgánica han conducido a nuevas fases dentro de los cristales líquidos y ha hecho posible diseñar a medida muchas de las propiedades eléctricas y ópticas de los cristales líquidos. ¿Podemos imaginar el mundo de hoy sin los cristales líquidos?¹⁶ Muy recientemente Yiqun Bai y Nicholas Abbott han publicado un

¹⁶ Estos materiales pueden utilizarse para diferentes fines dependiendo de sus propiedades. Por ejemplo, aquellos que reflejan luz de diferente color según sea la temperatura se utilizan en termómetros. Su respuesta frente a campos eléctricos y a la luz es la base del funcionamiento de pantallas planas de televisión y ordenador, retroproyectores, cabezales de impresoras, pantallas de calculadoras, relojes o juegos electrónicos. Finalmente, los cristales líquidos son de gran importancia en la actualidad para las industrias de detergentes, cosméticos y tejidos resistentes. Los cristales

interesantísimo artículo en la revista “Langmuir” sobre avances recientes en los fenómenos coloidales e interfaciales que involucran a los cristales líquidos.

Dispersiones coloidales concentradas.

Tradicionalmente nuestras ideas de las interacciones coloidales han estado ligadas al comportamiento de sistemas diluidos de partículas coloidales y la teoría se ha basado en la descripción de las interacciones entre dos partículas aisladas. Todo está muy lejos de las condiciones prácticas en las que nosotros empleamos los sistemas coloidales.

Lo primero que debemos aclarar es lo que queremos decir por sistema diluido. Para ello tenemos que comparar la separación media entre las partículas con el alcance de las fuerzas de interacción entre ellas. En el estado diluido las partículas están tan alejadas que las interacciones entre las partículas son despreciables a esa separación promedio. La consecuencia de esto es que las partículas difunden en una forma aleatoria debida al movimiento Browniano, con un coeficiente de difusión que puede describirse mediante la ecuación de Einstein-Smoluchowski. La distribución espacial de las partículas se puede considerar uniforme, es decir, distribuidas aleatoriamente y las correlaciones espaciales son muy débiles. Esto es sólo estrictamente verdad para las dispersiones de partículas que se aproximen a esferas duras. Si hay fuerzas atractivas o repulsivas actuando entre las partículas se producirán desviaciones del comportamiento aleatorio cuando las partículas colisionen. En una fase fluida continua, el movimiento de las partículas se puede describir por la hidrodinámica adecuada para una partícula aislada. Esto es aplicable a la difusión, la sedimentación o al flujo viscoso. El comportamiento de la dispersión se puede considerar análogo al de un gas con la excepción de que el movimiento es Browniano y no balístico, es decir, dos partículas experimentarán muchos cambios de dirección antes de chocar. Lo cual significa que el concepto de recorrido libre medio sea difícil de aplicar.

Conforme reemplazamos la fase continua por más partículas la concentración aumenta y nuestro sistema coloidal llega a ser una fase condensada y su comportamiento se hace más complicado. Situación similar a la que ocurre cuando un gas molecular es comprimido hasta que se forma un líquido y finalmente un sólido. Muchas de las ideas utilizadas en Termodinámica y Mecánica Estadística para describir a los líquidos moleculares son aplicables a los coloides en estado condensado. En esta fase condensada tendremos siempre interacciones (atractivas o repulsivas) fuertes entre las partículas, dando lugar a fuertes

líquidos aparecen en partículas o moléculas alargadas o con interacciones anisótropas

correlaciones espaciales y a la formación de capas con las partículas vecinas. El número de partículas en esta capa es el número de coordinación y es un reflejo tanto del tipo de fuerzas como de su valor y de la concentración o densidad en el número de partículas. Por ejemplo, si las partículas tienen un tamaño similar y las fuerzas son repulsivas se pueden formar cristales coloidales con un orden de largo alcance. La estructura es cúbica centrada en las caras y si el espaciado de la red es del orden de la longitud de onda de la luz, aparecerá el fenómeno de la difracción.

Cuando las partículas están en un medio líquido aparecen comportamientos interesantísimos que merecen la pena ser estudiados. Se pueden identificar tres modos de movimiento difusivo. Las partículas están en continuo movimiento debido a la agitación térmica o movimiento Browniano pero se encuentran limitadas a moverse dentro de su capa de coordinación. Este movimiento es bastante rápido y se conoce como movimiento autodifusivo a tiempos cortos. El movimiento es todavía aleatorio y, si tomáramos una serie de “fotos instantáneas” de un volumen determinado, veríamos cómo la densidad de partículas en esa región fluctúa alrededor del valor medio en la dispersión. La difusión de esas regiones es la llamada difusión colectiva y el coeficiente de difusión es más pequeño que para la autodifusión a tiempos cortos. Todos los líquidos se comportan de este modo y son estas fluctuaciones en la densidad local en la fase continua lo que produce el movimiento Browniano de las partículas. Ocasionalmente las fluctuaciones permitirán separaciones suficientes en una capa de coordinación como para que una partícula se mueva a su través y cambie de moléculas vecinas. Este comportamiento se conoce como régimen de autodifusión a tiempos largos.

Las propiedades de flujo reflejan este interesante comportamiento. Para ilustrar este punto consideremos un sistema simple formado por partículas uniformes entre las cuales existen fuerzas repulsivas fuertes a altas concentraciones. Las partículas están fuertemente correlacionadas espacialmente en una estructura cúbica centrada en las caras. Si nosotros deformamos esa estructura la disposición de las partículas se ve distorsionada. En este caso hemos tenido que hacer trabajo sobre la estructura y la energía es almacenada llevando a las partículas hacia una configuración de mayor energía. Se observa una respuesta elástica. Con el tiempo, las partículas pueden alcanzar una nueva configuración de menor energía con una nueva forma, mediante el mecanismo de autodifusión a tiempo largo. Si no se le aplica ninguna fuerza externa el sistema permanecerá en su nueva forma, es decir, la estructura se ha relajado y la energía elásticamente almacenada se ha disipado (calor). Esto se conoce como tiempo de relajación del esfuerzo y el material se está comportando como un material

viscoelástico. Con otras palabras, lo que nosotros estamos diciendo es que ese material tiene “memoria” y tarda varios tiempos de relajación hasta que su forma original es “olvidada”. Cuando esta escala de tiempos cae dentro de nuestra percepción normal estamos en disposición de seguir los cambios de textura y muchos coloides concentrados son manipulados para sacar ventaja de esta circunstancia.

Mantener estable una dispersión coloidal concentrada no es tarea fácil, sobre todo cuando se tienen mezclas de partículas con diferentes tamaños y cargas. La naturaleza, sin embargo, tiene éxito en esta tarea y tenemos numerosos ejemplos de células que contienen un gran número de proteínas diferentes que con frecuencia superan altas fracciones de volumen. Sin embargo, ni siquiera la Naturaleza es perfecta y en ocasiones las cosas comienzan a ir mal y las proteínas comienzan a agregarse o separarse en fases. Actualmente conocemos un buen número de enfermedades provocadas por la condensación de proteínas. Entre éstas se pueden citar las cataratas, la anemia falciforme¹⁷, así como el Alzheimer y otras enfermedades neurodegenerativas en las que la agregación de proteínas y la separación en fases juegan un papel central. Recientemente Peter Schurtenberger y Anna Stradner han realizado un interesante trabajo tratando de entender la formación de las cataratas desde el punto de vista de la Física de coloides.

La transición desde una fase diluida a otra condensada puede ser muy brusca y es función del alcance de las fuerzas, como ya se mencionó anteriormente. Consideremos de nuevo un sistema de esferas duras, un sistema que en sentido estricto sólo se puede conseguir mediante una simulación computacional pero que no hace demasiado tiempo se ha comprobado que incluso se puede lograr experimentalmente bajo ciertas condiciones (partículas recubiertas con polímeros y disolventes adecuados). En una simulación es posible considerar un volumen determinado e incrementar el volumen que es ocupado por las partículas estando todas ellas en movimiento Browniano, por supuesto. Las simulaciones indican que la transición líquido-sólido ocurre cuando la fracción de volumen ocupada por las partículas es ~ 0.5 . Por debajo de este valor tenemos un líquido viscoelástico y por encima un sólido viscoelástico. Los diagramas de fases con sistemas coloidales constituyen hoy en día uno de los temas más

¹⁷ La anemia de células falciformes, drepanocitosis o anemia drepanocítica, es una hemoglobinopatía, enfermedad que afecta la hemoglobina, una proteína que forma parte de los glóbulos rojos y se encarga del transporte del oxígeno. Es de origen genético y se da por la sustitución de un aminoácido en su conformación, esto provoca que a baja presión de oxígeno la hemoglobina se deforme y el eritrocito adquiera apariencia de una hoz; la nueva forma provoca dificultad para la circulación de los glóbulos rojos, por ello se obstruyen los vasos sanguíneos y causan síntomas como dolor en las extremidades. Los glóbulos rojos también padecen de una vida más corta provocando anemia por no ser reemplazados a tiempo. http://es.wikipedia.org/wiki/Anemia_falciforme

investigados dentro de este campo, existiendo aún aspectos muy controvertidos como es el del efecto de la gravedad y las corrientes de convección en la transición cristal-vidrio.

El renovado interés por la Física coloidal, la cual comprende el comportamiento fásico, la estructura y la dinámica de los sistemas coloidales, se debe a una serie de factores. Como ya en 1996 Poon, Pusey y Lekkerkerker indicaban, estos factores son los siguientes:

1º) La síntesis de un gran número de sistemas “modelo” con partículas cuyas formas, tamaños e interacciones son conocidas.

2º) El uso de técnicas tales como la microscopía óptica y la dispersión de rayos-X, neutrones y luz en su estudio.

3º) El conjunto de conceptos teóricos y herramientas desarrollados por la Mecánica Estadística en general, y los avances producidos en las teorías de los líquidos atómicos simples, en particular.

4º) El desarrollo de potentes computadores que permiten simular la Física de sistemas con muchos cuerpos.

Es un hecho que los avances recientes en la Física coloidal se basan en la fructífera interacción entre experimento, teoría y simulación.

Como es bien sabido, el tiempo de relajación es directamente proporcional al cuadrado del radio de las partículas y eso significa que podemos estudiar experimentalmente procesos con coloides que con sistemas atómicos son casi imposibles de estudiar. Es el caso de la cristalización y la formación de vidrios. Más aún, técnicas tales como la microscopía confocal o la de contraste de fase nos han permitido ver partículas situadas en el seno de las muestras y así construir “in situ” imágenes tridimensionales de las estructuras coloidales y, por si fuera poco, las interacciones entre las partículas se pueden ajustar o “modelar a medida”, lo que nos permite investigar experimentalmente cómo el comportamiento de un conjunto de partículas depende de sus interacciones.

Cristales coloidales.

Conceptualmente la interacción más simple entre partículas es la que se da entre esferas duras, las cuales experimentan una fuerza repulsiva infinita cuando se tocan pero ninguna otra interacción más. Para estudiar teóricamente y simular mediante ordenador a los fluidos y a los sólidos, las esferas duras son imprescindibles. Es llamativo que no existan átomos que puedan ser considerados como esferas duras pero que, sin embargo, sí que existan sistemas coloidales que se comportan muy aproximadamente como esferas duras.

El ejemplo más utilizado es el de las partículas de polimetilmetacrilato (PMMA) recubiertas con una delgada capa de un polímero flexible que se parece bastante a esferas duras. Cuando estas partículas se tocan, sus recubrimientos poliméricos se comprimen y aparece una fuerza elástica repulsiva entre ellas. Con recubrimientos de poco espesor esta fuerza aumenta rápidamente con una pequeña disminución en la distancia existente entre las partículas, aproximándose a la repulsión infinita entre esferas duras. Además, en estos experimentos las partículas tienen un índice de refracción que es similar al del medio de dispersión, haciendo que la atracción de van der Waals sea despreciable. La ausencia de atracciones interpartículas en un sistema de esferas duras implica que la temperatura crítica es cero. El comportamiento fásico de las esferas duras es similar al de un sistema termodinámico simple por encima de su temperatura crítica (gas supercrítico). No existe la fase líquida, de modo que el gas al congelarse se convierte en un sólido cristalino directamente. A primera vista la cristalización de esferas duras parece estar en desacuerdo con la idea intuitiva de que para formar un cristal son necesarias fuerzas atractivas.

En coloides es posible conseguir interacciones de alcance significativamente menor que el tamaño de la partícula. Si la interacción es atractiva (como en las mezclas coloide-polímero), se induce la formación de geles y si es muy intensa coagulación o agregación dando lugar a agregados con geometría fractal.

Estos efectos están ausentes en sistemas atómicos porque ahí no hay interacciones de corto alcance. La novedad más reciente es la posibilidad de que el fullereno C₆₀ pueda formar geles, algo que parece estar probado mediante simulaciones y experimentos.

Cuando el proceso de cristalización tiene lugar en ausencia de un solvente, lo que tenemos es un cristal fotónico. Un cristal fotónico es un material con una modulación espacial de la constante dieléctrica o, lo que es lo mismo, con una modulación periódica del índice de refracción; lo que implica que no se permite que la luz se propague a través de algunas direcciones del espacio¹⁸. Estos sistemas tienen numerosas aplicaciones pero, tal vez, las más interesantes son: moldes para nuevos materiales, micro-reactores, células solares fotoelectroquímicas, sensores químicos y biológicos, cambio de color cuando tiene lugar la detección (cristales coloidales como sensores de glucosa), tinta fotónica, etc.

¹⁸ Por su similitud en muchos aspectos con los semiconductores se les llama semiconductores fotónicos. En este caso la estructura de bandas se refiere a los fotones en vez de a los electrones. Pero estrictamente los cristales fotónicos no son exactamente semiconductores fotónicos, recordemos que un semiconductor es "un material que es aislante en $T=0$ y conductor a temperaturas más altas". El cristal fotónico no es opaco (no conduce la luz) en el cero absoluto y transparente a temperatura ambiente. Esa similitud con el silicio no la tiene. Con frecuencia se les llama semiconductor fotónico a los cristales fotónicos pero esto no es correcto.

La Naturaleza ha generado sus propios cristales fotónicos: los ópalos son cristales fotónicos formados por nanoesferas de sílice monodispersas y densamente compactadas. El científico australiano John Sanders, en 1978, fue el primero en encontrar mezclas coloidales cristalinas trabajando con ópalos naturales. La Fotónica tiene por objeto formar ópalos artificiales, para lo cual a veces hace uso de la nanorrobótica para ordenar según un determinado patrón espacial las nanoesferas constituyentes del cristal fotónico.

Retos futuros de la ciencia de coloides e interfases.

En 2010, el físico alemán Helmuth Möhwald publicó un trabajo en “Colloid and Polymer Science”, en el que se preguntaba sobre los retos futuros de la ciencia de coloides e interfases y los posibles avances capaces de darles respuesta. En su opinión los principales retos o desafíos se van a producir en las siguientes áreas:

- Estructura y dinámica de las interfases fluidas con resolución submolecular.
- Estructuras y propiedades de no equilibrio.
- Sistemas con control remoto y “feed-back” inteligente.

¿Cómo podemos afrontar este futuro desde la ciencia coloidal que se realiza en España? Un futuro posible en nuestro país pasa inexorablemente por disponer de investigadores de las ciencias básicas capaces de entender lo que significa la innovación. Para ello se debe estimular una nueva cultura que favorezca la relación de los investigadores con los sectores de la economía social y productiva que son los que diseñan, construyen, fabrican y deben vender productos innovadores en un mercado cada vez más competitivo. Para lograr ese entendimiento se requiere un lenguaje común y el desarrollo de currícula científicos que resalten también el “sentido práctico” de las ciencias básicas.

Como D. Enrique Moles en la Química y D. Blas Cabrera en la Física intentaron hace ya más de 80 años, la cultura de la innovación pasa por mejorar la enseñanza práctica de las ciencias. Es el único camino para ser capaces de innovar. La innovación como medio para resolver necesidades reales y no para crear necesidades ficticias. La conexión de la ciencia coloidal con la economía social y productiva viene de lejos y se refleja en la existencia de Institutos de investigación especializados en coloides e interfases (fluidas) en todos los países con una sólida economía productiva, como es el caso de Alemania y su Instituto Max Planck de Coloides e Interfases en Potsdam. En estos casos la investigación es mucho más que un requisito previo para lograr la estabilidad laboral; es un paso necesario para innovar y de ese

modo “poner en práctica con incidencia social y/o económica nuevo conocimiento”.¹⁹ **Es fundamental una educación que estimule el impulso hedonista a hacer cosas útiles y enseñe la manera de hacer esas cosas útiles.**

La importancia de la innovación resulta aún más clara cuando constatamos que el 90% de los intentos innovadores son fracasos a pesar de lo cual el impacto del 10% restante es tan grande que las empresas líderes continúan invirtiendo cantidades enormes de recursos en innovación. Sobre el tema de la tasa de fracasos el experto en 'desarrollo de nuevos productos', Robert Cooper de la “McGill University” en Montreal, manejaba en 1980 datos todavía más extremos: "de cada 58 ideas de productos que entran en el proceso sólo dos alcanzan el nivel de la comercialización y sólo una alcanza el éxito". Esto implica fracasos de 96.6% y 98.3%, en cada etapa mencionada. Con sus métodos innovadores este experto en la gerencia afirmaba que lograba reducirlos a cerca del 50%.

En cuanto al porcentaje de fracaso, mucho más reciente es la referencia a Richard Gephardt, presidente del “Council for American Medical Innovation”. En la prestigiosa Escuela de Gerencia Kellogg lo citan diciendo: 'dado que los costes de investigación de un nuevo fármaco superan los mil millones de dólares y que el 90% de los intentos de desarrollar uno nuevo son fracasos, las compañías farmacéuticas tendrán necesidad de dirigir sus esfuerzos en la búsqueda de nuevos fármacos a una escala mucho mayor’

Si ahora nos fijamos en organizaciones en vez de en productos, en algunos portales especializados en Pequeñas y Medianas Empresas se indica que: “Las cifras de fracaso de las Pymes son abrumadoras en cualquier país en que se analicen. Las estadísticas indican que, en promedio, el 80% de las Pymes fracasa antes de los cinco años y el 90% de ellas no llega a

¹⁹ Sobre el tema de la innovación social existen varios proyectos mencionados recientemente como muy destacados por la CEPAL (Comisión Económica para América Latina, ONU).

Observatorio Social de Maringa de Brasil, crea una herramienta de control social con apoyo de voluntarios para prevenir el desvío de fondos y la malversación de recursos públicos que asegura la transparencia en los procesos de licitación mediante la participación ciudadana. (2009)

Freshwater Cup Environmental Football League (Copa Agua Fresca de la Liga Medioambiental de Fútbol), es una liga de fútbol que entusiasma y compromete a los jugadores de fútbol, sus familias y comunidades en el cuidado del frágil entorno caribeño. (2008)

Trevo de Quatro Folhas - Estratégia de Redução da Morbimortalidade Materna, Prerinatal e Infantil (Trébol de Cuatro Hojas), es una iniciativa conjunta del sistema de salud y la comunidad en la ciudad brasileña de Sobral que apoya y capacita a las madres para enfrentar la tarea de amamantar. Y reduce la mortalidad de madres e hijos. (2007)

Defensorías comunitarias: una respuesta comunitaria a la violencia sexista en el Cuzco, Perú, un grupo de mujeres se une con un éxito notable para enfrentar y visibilizar la violencia sexista desde un enfoque de derechos, ciudadanía, democracia y equidad de género. (2006)

Let Agogo (Leche en abundancia) Haití, iniciativa de la ong VETERIMED, mejora las condiciones de vida de las familias campesinas de *Limonade* mediante una ingeniosa red de 30 micro lecherías donde se generan nuevos empleos, buena parte de los cuales los desempeñan mujeres. (2005)

los diez años”.²⁰

Hoy, en un entorno tan poco industrializado como el de la provincia de Granada hay empresas que han hecho de la innovación su razón de ser y así ser competentes en un mundo donde la competencia es muy dura. Nuestro compromiso con un futuro posible de nuestro país pasa por establecer cauces de colaboración con esas pequeñas y medianas empresas y trabajar juntos para hacer que la sociedad del conocimiento sea una realidad y no un recurso retórico vacío de contenido, propio de los que D. Antonio Machado llamaba “tenores huecos”.

El escenario es apasionante pues todavía hoy tenemos problemas de ciencia coloidal básica que no están bien resueltos, entre otros:

- Las interacciones entre coloides en sistemas densos.
- Cómo las condiciones iniciales, los potenciales interpartículas y las propiedades de flujo influyen en la creación de estructuras en los sistemas coloidales.
- La Reología de las suspensiones coloidales.²¹
- El uso de nuevos disolventes como los líquidos iónicos y los fluidos supercríticos.

Para finalizar me gustaría recordar algunos datos de la inversión económica en I+D en España en el último año. Sin financiación es difícil llevar a cabo una investigación de calidad. En 2009 el gasto en I+D en España fue de 14.582 millones de euros, lo que supuso un descenso del 0.8 % respecto del año anterior. Es la primera vez desde 1994 que esto ocurre, según fuentes del Instituto Nacional de Estadística (INE). Sin embargo, como el PIB descendió aún más, el peso del I+D subió hasta el 1.38%, tres centésimas más que en 2008 pero lejos del deseado 2% del PIB.²²

Tal vez ahora sea el momento de recordar lo que el premio Nobel de Medicina, D. Santiago Ramón y Cajal, afirmara en 1913, “.... más que escasez de medios, lo que hay es miseria de voluntad. El entusiasmo y la perseverancia hacen milagros. Desde el punto de vista del éxito, lo costoso, lo que pide tiempo, brío y paciencia, no son los instrumentos sino desarrollar y madurar una aptitud”.

20 Pymes y Emprendedores (2007). La Innovación en las Pymes. <http://www.pymesyemprendedores.com.mx/consultorio.html>

²¹ El comportamiento de los sistemas coloidales en condiciones de flujo es un tema complejo pero de gran importancia tecnológica.

²² El descenso del gasto se explica por el retroceso en el desembolso de las empresas (-4.3%), que supone el 43.3% del total, cuando en 2008 rozó el 45%. En el sector público (47.1%), el retroceso se ha quedado en el 0.8%. España sigue lejos de la media de la Unión Europea de los 27, que invierte el 1.9 % de su PIB en I+D (año 2008).

Por último, quiero agradecer a los miembros de la Academia de Ciencias Matemáticas, Físico-Químicas y Naturales de Granada el haberme propuesto como miembro de la misma. Doy las gracias a todos los académicos que se acordaron de mí y muy especialmente al profesor Fernando González Caballero, quien me enseñó a trabajar con método y dirigió mis primeros pasos en la dura pero gratificante labor de investigar.

Nunca olvidaré la inmensa alegría que nos causó a ambos nuestro primer trabajo en la revista “Journal of Non-Equilibrium Thermodynamics”, en el año de 1979²³.

Sería muy injusto si en este momento no recordara a las personas que me han ayudado a comprender mejor el mundo de la Física y de la Química; entre ellas me gustaría recordar a quienes tuve la suerte de dirigir sus tesis doctorales; desde el primero, Francisco Javier de las Nieves López hasta el que actualmente es el último, Efrén Alberto Andablo Reyes. A mi director de investigación en la Universidad holandesa de Wageningen, el profesor Bert Bijsterbosch y también a quien, probablemente, más me ha ayudado a forjarme como profesor universitario: D. Gerardo Pardo Sánchez.

Por último, quiero recordar a Miguel Cabrerizo Muñoz, quien me enseñó a valorar el trabajo bien hecho y a recordar que, como muchos siglos antes afirmó Aristóteles, “la inteligencia consiste no sólo en el conocimiento, sino también en la destreza de aplicar estos conocimientos en la práctica”. Todas estas personas me ayudaron a mejorar en el arte del conocimiento.

Por lo demás, me gustaría haberles convencido de que la investigación, junto con la innovación en el mundo de las dimensiones despreciables, es una tarea con futuro y necesaria para que nuestro país mejore sus posibilidades científico-técnicas en un mundo globalizado en la perspectiva de un futuro posible que permita: aire limpio, agua potable, alimentos saludables, una medicina segura, materiales avanzados, productos compatibles con el medio ambiente y un uso sostenible de la energía.

Les ruego que no nos resignemos a ser sólo un país de sol y playa.

Muchas gracias por su amable atención.

Atarfe (Granada) a 18 de marzo de 2011

Roque Hidalgo Álvarez

²³ F. González Caballero, G. Pardo, R. Hidalgo, J. M. Bruque. Determination of the electrokinetic coefficient L_{12} from sedimentation potential measurements. J. Non-Equilib. Thermodyn. 4, 119-126, 1979

Agradecimientos.

En la redacción de este texto he recibido la inestimable ayuda de Carmen Morente, Jacqueline Forcada, Julio Battistoni, Jesús Peña, Antonio Puertas, Antonio Fernández, Fernando Wulff, Purificación Escribano, Juan de Dios Solier, Esteban Rodríguez, Francesc Sagués y Juan Antonio García.

Bibliografía.

- Aviram, A. ; Ratner, M. *Chem. Phys. Lett.* **29**, 277–283 (1974).
- Bai, Y. ; Abbott, N.L. *Langmuir*. (En prensa).
- Cooper, R. G. *European J. Marketing*, **14 (5/6)**, 277 – 292 (1980).
- Eigler, D.; Schweizer, R. *Nature* **344**, 524–527 (1990).
- Everett, D.H. *Chemistry in Britain*. **17(8)**, 377-381 (1981).
- Gephardt, R. (2010). "Leveraging ‘unnatural partnerships’ for innovation success". En: Kellogg Innovation Network’s dialogue on the future of pharmaceuticals, Kellogg School of Management, Northwestern University.
http://www.kellogg.northwestern.edu/News_Articles/2010/innovation-success.aspx
- Goodwin, J. W. *Colloids and Interfaces with Surfactants and Polymers- An Introduction*. 2004 John Wiley & Sons, Ltd.
- Hansen, J-P.; Pusey, P. *Europhysics news* **30 (3)**, 81-83 (1999).
- Joachim, Ch. *Nature materials* **4**, 107-109 (2005).
- Lohmann, H. *Wiss. Meeresunters Kiel* **10**, 129–370 (1908).
- Mahmoudi, M ; Hosseinkhani H. ; Hosseinkhani M. ; Boutry S. ; Simchi, A.; Shane Journey, W.; Subramani, K.; Laurent, S. *Chem. Rev.* (En prensa).
- Nanoscience, and Nanotechnology: Opportunities and Uncertainties* Document 19/04 (The Royal Society, London, 2004);
<http://www.nanotec.org.uk/finalReport.htm>
- Nanoscience, Nanotechnologies* RST no. 18 (Académie des Sciences & Académie des Technologies, Lavoisier, Paris, 2004);
http://www.academiesciences.fr/publications/rapports/rapports_html/RST18.htm
- Möhwald, H. *Colloid Polym. Sci.* **288**, 123-131 (2010).
- Ostwald, W. *An Introduction to Theoretical and Applied Colloid Chemistry. The World of Neglected Dimensions*. John Wiley & Sons, Inc. London 1917.
<http://www.archive.org/stream/theoapplicolloid00ostwrich#page/n7/mode/2up>

http://www.in-cites.com/countries/spain_2005.html

Peña Cedillo, J. *Un análisis económico y político. El socialismo del siglo XXI: Redes de Innovación productiva*. Misión Ciencia. Ministerio de Ciencia y Tecnología. Caracas, 2006.

Poon, W.; Pusey, P.; Lekkerkerker, H. *Physics World April* 27-32, 1996.

Ramón y Cajal, S. *Reglas y consejos sobre investigación biológica*, tercera edición, 1913, página 144.

Rosenberg, N. Sociedad. *EL PAÍS* 8 de mayo de 2005.

Schurtenberger, P.; Stradner, A. Newsletter No. 8. Dec. 2010. <http://www.eu-softcomp.net>

Taniguchi, N. *Proc. Int. Congress Prod. Eng. Part 2*, 18 (JSPE, Tokyo, 1974).

Recopilatorio:

Son muchos los avances científicos y técnicos que en los últimos 100 años se han dado dentro de la ciencia de coloides e interfases. Esta relación incluye algunos de ellos:

Avances científicos:

1º) Determinación del número de Avogadro sobre bases exclusivamente moleculares. Movimiento Browniano. Ecuación de Einstein-Smoluchowski y experimentos de Perrin.

2º) Ecuación de poblaciones, cálculo de la velocidad de agregación y teoría electrocinética. Ecuaciones de Smoluchowski.

3º) Descripción de las interfases cargadas. Doble capa eléctrica. Modelo de Gouy-Chapman.

4º) Teoría de estabilidad de los coloides liofóbicos de Derjaguin, Landau, Verwey y Overbeek (DLVO)²⁴.

5º) Escalado dinámico y fractalidad en la cinética y dinámica de agregación.

6º) Nuevos mecanismos de agregación coloidal como el de vaciamiento (“depletion”) y puenteo (“bridging”)

7º) Diagramas de fase de sistemas coloidales en función de la densidad de partículas.

Avances técnicos:

1º) Control de la forma, tamaño, composición y monodispersidad de las partículas.

2º) Preparación de los cristales coloidales (incluyo los cristales líquidos) y su aplicación al campo de la tecnología.

3º) Pruebas de inmunodiagnóstico basados en la ampliación de la reacción antígeno-anticuerpo mediante el uso de coloides.

²⁴ El título de la tesis de María Antonia Zorraquino Zorraquino presentada en Madrid en 1930 y realizada en el Laboratorio de Investigaciones Bioquímicas de la Facultad de Ciencias de Zaragoza fue “*Investigaciones sobre estabilidad y carga eléctrica de los coloides*”. Una prueba más del papel fundamental de la mujer en el campo de la Ciencia de Coloides e Interfases en España.

- 4º) Sistemas de dosificación de fármacos de forma selectiva.
- 5º) Preparación de coloides sensibles a estímulos externos como los magnéticos o los microgeles. Los primeros se emplean en la obtención de imágenes de tumores y mediante hipertermia en el tratamiento de algunos tipos de cáncer y los segundos como dosificadores de principios activos.
- 6º) Formación de ópalo artificiales (cristales fotónicos) que han dado lugar al nacimiento de una nueva ciencia, la Fotónica.
- 7º) Preparación de alimentos funcionalizados.
- 8º) Materiales superhidrofóbicos que ni se mojan ni, por lo tanto, se manchan.
- 9º) Pinturas con capacidad bactericida que impiden la extensión de enfermedades parasitarias como el Chagas o el dengue.
- 10º) Preparación de emulsiones de Pickering, micro y nanoemulsiones.
- 11º) Purificación de aguas residuales mediante fotocatalizadores.
- 12º) Emulsiones asfálticas para la construcción de carreteras.
- 13º) Síntesis de aerogeles.
- 14º) Preparación de geles físicos.
- 15º) Microfluídica con sistemas coloidales.
- 16º) Pegamentos capaces de unir superficies con baja energía superficial.

Fue Albert Einstein el primero en considerar que los coloides eran como átomos grandes y utilizando esta idea hoy podemos analizar:

- Los procesos de nucleación y cristalización.
- Las transiciones de fase de no-equilibrio.
- Las vibraciones transversales y longitudinales en una red.
- Los procesos de relajación estructural.
- Los fenómenos bidimensionales.

Campos en los que, ya hoy, se aplica la nanociencia:

Fabricación, caracterización y herramientas:

Nano y micro: métodos de computación, herramientas de simulación y programación.

Nanofabricación: manufacturación e instrumentación.

Caracterización de materiales nanoscópicos.

MEMS y NEMS²⁵: fabricación, dispositivos y aplicaciones.

Materiales avanzados:

Nanoestructuras y dispositivos de carbón.

Síntesis y aplicaciones de nanopartículas.

Materiales compuestos.

Materiales y dispositivos nanoestructurados.

Películas, superficies y recubrimientos nanoestructurados.

Nanotecnología de polímeros.

Materiales bio-nano.

Materiales para la liberación de fármacos y genes.

Nanotecnología blanda.

Nanofluidos.

Nanomateriales para catálisis.

Materiales y tecnologías para la energía solar.

Electrónica y microsistemas:

Nanoelectrónica y fotónica.

Exactitud micro y nano.

Micro- y nanofluídica.

Diseño y materiales para la fabricación de inyectores de tinta.

Fabricación, dispositivos y aplicaciones MEMS y NEMS.

Nano y micro: Métodos de computación, herramientas de simulación y programas.

WCM²⁶-modelado compacto.

Nanofabricación: Manufacturas e instrumentación.

Envasado avanzado.

Componentes semiconductores.

Medicina y Biotecnología.

Biosensores, diagnóstico, instrumentación e imagen.

Materiales bio-nano.

²⁵ Sistemas Microelectromecánicos (Microelectromechanical Systems, MEMS) y Sistemas Nanoelectromecánicos (Nanoelectromechanical Systems, NEMS)

²⁶ Un WCMS es un sistema de programación utilizado para controlar un conjunto dinámico de materiales de portales de internet (documentos HTML, imágenes y otras formas de medios).

Materiales para la liberación de fármacos y genes.

Nanopartículas en tecnologías de la imagen.

Nanotecnología del cáncer.

Nanotecnología neurológica.

Ciencias médicas nano.

Sangre, pulmón y corazón.

Micro- y nanoflúidica.

Energía y medio ambiente.

Ambiente, salud y seguridad.

Materiales para la Química verde.

Nanomateriales para tecnologías limpias y sostenibles.

Tecnologías del agua.

Nanotecnologías limpias en tecnologías clásicas basadas en el gas y el petróleo.

Materiales y tecnologías para la energía solar.

Almacenamiento de la energía y nuevas técnicas de generación.

Bioenergía.

Tecnologías para las energías renovables.

Construcción y edificios verdes.

Remediación, emisiones, basura.

Aplicaciones industriales de las tecnologías limpias.

El factor humano:

Jean Baptiste Perrin, Marian Smoluchowski y Katharine Blodgett, tres de los muchos científicos y científicas que durante el siglo XX contribuyeron al desarrollo de la Ciencia de Coloides e Interfases:

Jean Baptiste Perrin²⁷



(Lille, 1870 - Nueva York, 1942) Físico francés, famoso por sus investigaciones sobre el movimiento Browniano, que ofrecieron la primera demostración definitiva de la existencia del átomo. Hijo de un capitán de infantería, cursó sus estudios secundarios en Lyon, donde su padre estaba destinado, y se trasladó luego a París, ingresando en la “École Normale Supérieure” en 1890.

Al término de su formación, una beca le permitió retrasar el momento de incorporarse a la enseñanza, consagrándose a la investigación y presentando su tesis doctoral en 1897 sobre “*Les rayons cathodiques et les rayons Roentgen*”. Dos años antes había publicado una importante memoria en los "Comptes rendus" de la “Académie des Sciences”, en la que ofreció argumentos en favor de considerar que los rayos catódicos estaban constituidos por partículas en movimiento cargadas negativamente.

En 1898 inició su carrera docente en la Sorbona como encargado de un curso de Física Química, materia de la que fue nombrado catedrático en la Facultad de Ciencias en 1910. El año anterior había publicado sus investigaciones sobre el movimiento Browniano de partículas en disolución acuosa, argumentando que dicho movimiento era consecuencia del bombardeo incesante de las partículas por las moléculas del agua, y ofreciendo estimaciones del tamaño de las mismas y del valor del Número de Avogadro²⁸ más exactas que las

²⁷ http://www.biografiasyvidas.com/biografia/p/perrin_jean.htm

²⁸ Resulta llamativo comprobar cómo todavía hoy se continua trabajando en la determinación del número de Avogadro. Muy recientemente, B. Andreas, Y. Azuma, G. Bartl, P. Becker, H. Bettin, M. Borys, I. Busch, M. Gray, P. Fuchs, K. Fujii, H. Fujimoto, E. Kessler, M. Krumrey, U. Kuetsgens, N.

disponibles hasta entonces; los resultados de sus experiencias fueron aceptados como prueba de la existencia de las moléculas y Jean Baptiste Perrin recibió el Premio Nobel de Física en 1926 por sus trabajos sobre la estructura discontinua de la materia.

En 1918 fue nombrado miembro de la “Royal Society” y en 1923 ingresó en la “Académie des Sciences”. En 1936 formó parte del gobierno del Frente Popular presidido por Léon Blum, como subsecretario de Estado para la investigación científica, cargo desde el que promovió el “Palais de la Découverte” (1937) y el “**Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS, 1939)**”. De entre sus obras cabe mencionar “*Osmose et parois semi-perméables*” (1900), *Principios de Química-Física* (1901), *Los átomos (Les Atomes, 1912)* y “*Les éléments de la physique*” (1930).

Marian Smoluchowski²⁹



(Vorderbrühl, cerca de Viena, 1872 - Cracovia, 1917). Físico, considerado polaco, que fue un pionero de la Física Estadística.

Smoluchowski estudió Física en Viena teniendo como maestros a Franz S. Exner y Joseph Stefan. Aunque Smoluchowski y Ludwig Boltzmann no se conocieron personalmente, nuestro personaje siempre estuvo muy influenciado por las ideas de Boltzmann. Después de estancias en otras Universidades (Paris, Glasgow, and Berlín), se desplazó hacia Lviv en 1899, trabajando en su Universidad antes de instalarse definitivamente en Cracovia. En 1913 Smoluchowski llegó a Cracovia como Director del Departamento de Física Experimental.

Después de la finalización de la Gran Guerra las condiciones para trabajar se volvieron extremadamente difíciles. El moderno edificio construido unos años antes, donde se encontraba el espacioso Departamento de Física se había convertido en un hospital militar. Trabajar en ese edificio fue uno de los motivos que tuvo Smoluchowski para trasladarse a Cracovia. Forzado por las circunstancias Smoluchowski se vio forzado a trabajar en un

Kuramoto, G. Mana, P. Manson, E. Massa, S. Mizushima, A. Nicolaus, A. Picard, A. Pramann, O. Rienitz, D. Schiel, S. Valkiers, y A. Waseda, han publicado un trabajo titulado “Determination of the Avogadro Constant by Counting the Atoms in a ²⁸Si Crystal” PRL 106, 030801 (2011)

²⁹ http://en.wikipedia.org/wiki/Marian_Smoluchowski

departamento en el que sus clases de Física experimental se vieron privadas de las técnicas más elementales.

Smoluchowski realizó una gran labor docente y sus clases de Física experimental contaron con numerosos estudiantes entre los que destacan: Jozef Patkowski, Stanislaw Loria y Waclaw Dziewulski. Sus aficiones fueron muy variadas desde la práctica del ski y la escalada que practicó en los Alpes y en los montes Tatra, hasta la pintura (acuarelas) y tocar el piano.

Fue miembro de la Sociedad Copérnico de Ciencias Naturales y de la Sociedad Polaca de Ciencias y Letras.

Su producción científica incluye trabajos fundamentales sobre la teoría cinética de la materia. En 1904, él fue el primero en observar la existencia de fluctuaciones en la densidad de los gases y en 1908 fue el primer físico en relacionar el fenómeno de la opalescencia crítica con las fluctuaciones en la densidad. Su investigación trató también de explicar el color azul del cielo como una consecuencia de la dispersión de luz y las fluctuaciones en la atmosfera, así también cómo explicar el movimiento Browniano de las partículas. En ese tiempo Smoluchowski propuso formulas que actualmente llevan su nombre y que se utilizan para determinar el tamaño medio de partículas en una dispersión, el potencial zeta de partículas cargadas eléctricamente y para describir la cinética de agregación de los coloides.

En 1906, independientemente a como lo realizó Albert Einstein, él describió el movimiento Browniano. Smoluchowski propuso una ecuación que llegó a ser una importante base de la teoría de los procesos estocásticos.³⁰

Smoluchowski murió en 1917 víctima de una epidemia de disentería.

Katharine Burr Blodgett³¹



(Schenectady (New York) 1898-1979). Katharine Blodgett fue la primera investigadora contratada por General Electric en 1917, y la primera mujer en doctorarse en Física en la Universidad de Cambridge en 1926.

Katharine Burr Blodgett nació en Schenectady (New York) en 1898. Su padre, abogado de

³⁰ Smoluchowski, M. (1906), "[Zur kinetischen Theorie der Brownschen Molekularbewegung und der Suspensionen](#)".

³¹ http://en.wikipedia.org/wiki/Katharine_Burr_Blodgett

General Electric (GE), murió poco antes de que ella naciera. Ella fue al Bryn Mawr College, y en el último año de sus estudios visitó GE. Su guía durante esa visita fue Irving Langmuir, quien había conocido a su padre. Langmuir animó a Katharine a realizar estudios en Química y Física. Después de cursar un máster en la Universidad de Chicago en 1918, Blodgett volvió a GE para trabajar como ayudante de Langmuir³².

Después de que Blodgett hubiera trabajado como ayudante de Langmuir durante unos años, éste le recomendó ampliar sus estudios y completar su formación fuera de GE. En 1924 se marcha a la Universidad de Cambridge donde trabajó con Ernest Rutherford y escribió su tesis sobre el comportamiento de los electrones en el vapor de mercurio ionizado. Ella fue la primera mujer en recibir el título de Doctora en Física en Cambridge en 1926. Ese mismo año regresó a los Estados Unidos reincorporándose a la plantilla de GE como científica investigadora. Al principio continuó colaborando con Langmuir en la mejora de las bombillas pero más tarde en 1933 volvió a trabajar de nuevo con películas superficiales. Para entonces las películas monomoleculares se habían estudiado bastante y se conocían sus principales propiedades; de modo que Blodgett y Langmuir comenzaron el estudio de películas más gruesas. Blodgett desarrolló un método para transferir las películas de jabón desde una superficie acuosa a otra sólida como un metal o el vidrio y encontró que repitiendo el proceso era capaz de tener películas de estearato de bario capa a capa, llegando incluso a tener hasta 3000 capas. Esta técnica se conoce ahora como el método de Langmuir-Blodgett.

Posteriormente Blodgett indagó en las aplicaciones de estas películas. Observó que incluso el vidrio más limpio refleja como mucho el 10% de la luz incidente dificultando la visión a su través. Blodgett pensó que sus películas jabonosas podrían resolver ese problema.

Como ella podía controlar el espesor de las películas de jabón depositando una capa molecular cada vez sobre la superficie del vidrio, supuso que se podría desarrollar un recubrimiento con el espesor justo para evitar la mayor parte de las reflexiones sobre la superficie del vidrio. Con este objetivo construyó una película con un espesor igual a $\frac{1}{4}$ de la longitud de onda de la luz visible (aproximadamente 1388 Angstroms). De esta forma, la luz que se reflejara hacia fuera del cristal habría viajado la mitad de la longitud de onda más que la luz que fue reflejada hacia fuera de la película superficial y así la mayoría de las reflexiones se cancelarían. También ajustó la composición química de la película con el fin de que el índice de refracción mejorara el efecto de cancelar la reflexión y así fue capaz de

³² Langmuir ganó el premio Nobel de Química en 1932 por desarrollar un método para producir películas monomoleculares de aceite sobre agua.

eliminar prácticamente toda la reflexión, haciendo el vidrio casi invisible.

El 16 de marzo de 1938, Blodgett recibió la patente 2.220.660 de los Estados Unidos por el “Método de preparación y estructuración de películas”. Esta fue una de las seis patentes que Blodgett recibió a lo largo de su vida. También publicó en “*Physical Review*” en 1939 un trabajo titulado, “Uso de la interferencia para eliminar la reflexión de la luz en vidrios”.

El método original para recubrir superficies mediante jabón no se pudo aplicar tal cual en productos comerciales porque los recubrimientos eran demasiado blandos y se desprendían fácilmente de las superficies de los vidrios. Poco después de su descubrimiento, otros grupos desarrollaron recubrimientos duraderos y mejoraron los métodos de producción. Estos recubrimientos han sido utilizados, desde entonces, para reducir las reflexiones en lentes para gafas y cámaras, microscopios, parabrisas, televisiones y pantallas de ordenador.

General Electric anunció el descubrimiento en diciembre de 1938 e inmediatamente tuvo un gran impacto mediático. Blodgett y su llamado “vidrio invisible” aparecieron en *Time*, *Life*, y *The New York Times*. La repercusión de Blodgett y de su trabajo se debió, en parte, al hecho de que era una mujer quien lo había hecho, lo cual era muy infrecuente en aquellos tiempos.

Durante la Primera y Segunda Guerras Mundiales, Blodgett desarrolló adsorbentes para gases venenosos, un método para descongelar las alas de los aviones y mejoró las bombas de humo. También desarrolló una “escala del color” para medir el grosor de los recubrimientos, realizó más investigaciones sobre las películas, estudió los vidrios conductores de la electricidad y desarrolló un método para limpiar las superficies sólidas de impurezas mediante descargas eléctricas en gases, método que se utiliza en la fabricación de dispositivos con semiconductores.

Blodgett se retiró en 1963 después de una larga carrera en GE. Murió en 1979 a la edad de 81 años, habiendo recibido numerosos premios por sus trabajos, así por ejemplo, la Sociedad Química Americana la honró con la medalla Francis P. Garvin. Resulta llamativo, no obstante, que no fuera incluida en el número publicado por *Science*, en 1953, con motivo del 75 aniversario de los laboratorios de investigación de GE.

CONTESTACIÓN DEL EXCMO. SR. D. FERNANDO GONZÁLEZ CABALLERO

Excelentísimos e Ilustrísimos Señores Académicos,

Queridos amigos y familiares del nuevo Académico Numerario, Ilmo. Sr. D. Roque Isidro Hidalgo Álvarez,

Señoras y Señores,

Como suele ocurrir con tantas otras cosas de la vida, uno se queda con el sabor de las últimas palabras, con lo último que ha oído o, quien sabe, con lo que más le ha agradado oír. Y digo esto porque, tras escuchar el excelente discurso que acaba de pronunciar el Profesor Hidalgo Álvarez, aún resuenan en mis oídos sus palabras de reconocimiento hacia éste que les habla, pero también hacia otras personas, entrañables por su valía humana, que duda cabe, y que han contribuido, con su visión de futuro y su dedicación a las tareas de formación de sus colaboradores, a conseguir que la sociedad en general y la Universidad en particular, sean cada vez mejores, y que las personas que hoy están en la primera línea de la actividad universitaria sean también unos buenos profesionales; me refiero a la alusión que acabamos de escuchar en reconocimiento de nuestros Maestros, cuya dedicación nunca será suficientemente valorada pero cuyos resultados están a la vista de todos. Como pequeña licencia personal, permítanme que comparta las palabras de gratitud expresadas por nuestro nuevo Académico hacia el Profesor Pardo Sánchez, nuestro común amigo y sobre todo Maestro, del que ambos hemos recibido con generosidad sus consejos, su saber ser y saber estar.

Y dicho esto, quiero también expresar mi satisfacción y profundo agradecimiento hacia la Junta de Gobierno de esta Academia de Ciencias de Granada por el honor que me concede al contestar, en su nombre, en este acto de ingreso como nuevo Académico de Número, al discurso pronunciado por el Ilmo. Sr. D. Roque Isidro Hidalgo Álvarez, así como destacar los

aspectos más sobresalientes de su Currículum Vitae y de su labor investigadora.

No es ajeno a esta satisfacción personal el hecho de haber compartido amistad y trabajo con el nuevo Académico, como Director de su Tesis de Doctorado primero, y luego como compañero del Departamento, entonces de Física Fundamental, en una época – mediada la década de los años 70- en la que se fraguó mucho de lo que hoy es la moderna Universidad de Granada y su papel relevante en áreas punteras de la docencia y de la investigación en Física, en nuestro caso en el campo de la Termodinámica. Me gusta recordar, en ocasiones como las que hoy vivimos, con motivo de ingresos de nuevos Académicos que compartimos vivencias en aquella época, que aquellos fueron años inolvidables para todos los que formamos parte de aquel equipo humano, por el sano compañerismo en el que las tertulias, y la estrecha convivencia eran caldo de cultivo de un apasionado ambiente que favorecía la creación científica. Eran los años, por cierto, en los que se gestó la creación en Granada de los estudios de Física y donde el entonces becario de investigación Roque Hidalgo también participaba, creando con su seriedad y su trabajo en el Laboratorio (intenso y riguroso, cualidades estas que nunca le han faltado) ese buen ambiente al que me he referido. Junto con otros compañeros, cuyos nombres están en la mente de todos los que compartimos trabajo en esa época, el hoy nuevo Académico contribuyó a fraguar en nuestro entorno vital ese *espíritu universitario*, semilla de todo lo que fue después... y es hoy.

Porque, efectivamente, uno de los recién licenciados que se incorporaron al Departamento aquel curso académico 75-76 fue Roque Hidalgo. Llegaba en un momento muy delicado de nuestra reciente historia política y donde “casi todo estaba por hacer”. Y desde luego, todo estaba por hacer en lo que se refiere al panorama científico en nuestro país. Pero, como acaba de mencionar el Profesor Hidalgo, “las claves del presente hay que buscarlas en el pasado”, y las claves del pasado eran muy simples: trabajábamos duro, no había fines de semana y nuestra “obsesión”, si se me permite utilizar esta palabra, era obtener buenos resultados en el laboratorio para luego intentar “publicar en revistas internacionales”, algo que por entonces era una aventura, desconocida por supuesto para la mayoría de los universitarios, al menos de la Universidad de Granada. Lo acaba de citar el Profesor Hidalgo en su conferencia: nunca olvidará (yo tampoco lo podré olvidar) la inmensa alegría que nos causó a ambos nuestro primer trabajo internacional, en el *Journal of Non-Equilibrium Thermodynamics*, el año 1979. Explicar lo que vivimos en esos momentos es algo que no se puede hacer, sobre todo si lo explicas a nuestros becarios de hoy, que nos observarían entre incrédulos y divertidos, y en todo caso, sin la perspectiva que dan los años. Pero lo cierto es que aquel artículo marcó realmente el comienzo de una época en la que la captación de los

recursos de investigación, que comenzaron a aparecer en las convocatorias del Ministerio de Educación, y la transformación de esos recursos en equipos para investigación y luego en publicaciones en revistas de prestigio internacional (de “excelencia” se dice hoy), constituyó el eje conductor de todas nuestras actividades. Simplemente, podríamos decir que en aquellos años se gestó en nuestro entorno un modo, un estilo de trabajar, que ha perdurado hasta nuestros días, basado en el trabajo exigente y siempre buscando la máxima calidad.

La personalidad del Profesor Hidalgo, qué duda cabe, ha tenido mucho que ver con los niveles de calidad que hoy están presentes en la actividad investigadora del Departamento al que los dos pertenecemos. Quizá sin pretenderlo, pero en el texto que acabamos de escuchar hay numerosas citas que son indicadoras de estos rasgos que de manera tan notable marcan el estilo personal del Profesor Hidalgo. A modo de ejemplo, haré notar que el discurso se abre con una cita del Presidente José Mújica en la que se afirma que “...en el conocimiento y la cultura no sólo hay esfuerzo sino también placer”. Más adelante, cita a nuestro Ramón y Cajal cuando decía (refiriéndose a la actividad investigadora) que “...lo costoso, lo que pide tiempo, brío y paciencia, no son los instrumentos sino desarrollar y madurar la aptitud”, y más adelante insiste: “...el entusiasmo y la perseverancia hacen milagros”. Conceptos, todos ellos, que pueden reconocerse fácilmente en el talante de nuestro nuevo Académico.

Si me permiten, completaré estos comentarios a modo de presentación del Profesor Hidalgo Álvarez, con algunas notas biográficas y de su currículum.

Nacido en La Carolina (Jaén) un 17 de julio de hace ya unos años en el seno de una familia numerosa, a él le gusta resaltar que siempre ha estudiado en centros públicos de enseñanza (Escuela Unitaria, Instituto Técnico de La Carolina, Universidad Laboral de Alcalá de Henares, Universidad de Granada). Se considera a sí mismo un “trabajador de la enseñanza”, habiendo demostrado a lo largo de su trayectoria profesional su compromiso social. Fue representante del movimiento de los PNN (Profesores No Numerarios) en la Universidad de Granada y participó en la fundación del Sindicato de Enseñanza de Comisiones Obreras en 1977. El atractivo histórico de la conocida como “edad de plata de la ciencia española”, periodo comprendido que va desde 1931 hasta 1939, también le ha llevado a hacer algunas incursiones en temas de historia contemporánea, de la que es buen conocedor.

En su currículum él dice que le hubiera gustado seguir el ejemplo de su bisabuela y ser maestro en Trevélez, pero aunque inició estudios de Magisterio en Córdoba, no los terminó. Estudió Químicas en la Universidad de Granada, obteniendo su Licenciatura en 1975 y posteriormente (1979) el doctorado en Ciencias -Sección de Físicas por la Universidad de Granada, con la calificación de Premio Extraordinario y posteriormente Premio de la Caja

General de Ahorros de Granada. En su época de formación posdoctoral, realizó una estancia de dos años (1984-1985) en el Departamento de Química Física Coloidal de la Universidad de Wageningen, en los Países Bajos, donde trabajó bajo la dirección del profesor Bert Bijsterbosch. Como persona y como científico esa estancia marcó, sin duda, su trayectoria posterior. Profesor Adjunto por oposición en Termología y también en Mecánica y Termodinámica en 1983, es desde 1992 Catedrático de Física Aplicada en la Universidad granadina. Ha dirigido 21 Tesis Doctorales y publicado 235 artículos de investigación en revistas internacionales. Entre 1986 y 1988 fue Vicedecano de la Facultad de Ciencias de la UGR. Ha sido Presidente de tres comités organizadores de congresos internacionales celebrados en Granada, entre 1999 y 2010. El grupo de investigación que lidera ha sido Premio del Consejo Social de la Universidad de Granada a la transferencia de conocimiento al sector productivo y un trabajo suyo, publicado en 2003 con otros miembros del grupo de investigación, recibió el Premio a la Excelencia a la Investigación en la misma Universidad. Ha sido presidente del Grupo Especializado de Coloides e Interfases de las RSEF y RSEQ desde 2006 hasta 2009. En la actualidad coordina el Master Interuniversitario de Ciencia y Tecnología de Coloides e Interfases en el que participan siete universidades españolas (Granada, Pablo Olavide de Sevilla, Málaga, Valencia, Vigo, Complutense y Santiago de Compostela); “es una forma de hacer país”, le gusta decir a Roque Hidalgo con frecuencia. Por otra parte, es o ha sido asesor de comités editoriales de varias revistas científicas internacionales, destacando las revistas “Soft Matter” y “Journal of Colloid and Interface Science”. Ha colaborado en diversos medios de comunicación, opinando particularmente sobre cuestiones educativas.

Al Profesor Hidalgo Álvarez le gusta acabar el relato de su currículum, y solo por eso, y con su autorización lo traigo aquí, diciendo que “ha editado un libro, ha plantado un árbol y está a la espera de que alguien le explique cómo se hacen los hijos”.

Permítanme ahora algunas reflexiones en torno al tema elegido por el nuevo Académico para su discurso. Bajo el título “El tamaño, si pequeño, importa”, el autor toma precisamente *el tamaño* como hilo conductor de una disertación acerca del mundo mesoscópico, intermedio entre el microscópico, lo muy pequeño y el macroscópico, lo observable a la escala humana. Los contenidos del discurso se desarrollan estructurados en tres secciones bien diferenciadas. La primera, que el autor llama modestamente “antecedentes”, es en realidad una profunda reflexión acerca del papel que la investigación básica desempeña en lo él que llama “la nueva encrucijada”, que obliga a la autocrítica y al pronunciamiento ante los retos que la sociedad

tiene planteados en los momentos actuales. Llama la atención la opinión del Profesor Hidalgo, en el sentido de considerar que la investigación, entendida como creación de conocimiento, por si sola, no es suficiente, sino que debe responder a las necesidades reales de la sociedad. La investigación, en su opinión, debe ser el paso previo a la *innovación*, entendida ésta como “la puesta en práctica del conocimiento generado, en beneficio de la sociedad, haciendo que ésta alcance sus objetivos o incremente su bienestar”. De esta manera, la investigación, asociada a la innovación, cobran un sentido social y económico, que no tendría por si sola.

La segunda parte del discurso es una erudita disertación sobre lo que hace ya un siglo fue definido por Wolfgang Ostwald como “el mundo de las dimensiones despreciables”, el mundo también llamado “del estado coloidal”, ese dominio de la Naturaleza en la que los objetos tienen dimensiones que, con criterio un tanto ambiguo, están en el rango de 1 a 100 nm. Pero, permítanme apuntarlo ya en este momento. La lectura de esta sección de su discurso pone de nuevo, de manera no explícita, ciertamente, pero muy claramente de manifiesto, que el interés y yo diría también que la admiración del Profesor Hidalgo hacia este campo de la ciencia, en continua evolución desde sus inicios, está basado en que *la innovación* ha sido y sigue siendo consustancial con todos los avances habidos en este campo. La ciencia y las tecnologías desarrolladas en el ámbito de los sistemas coloidales están precisamente en la base de multitud de aplicaciones que hoy hacen cómoda nuestra vida y desde luego nos hacen que disfrutemos de ellas en campos absolutamente diversos, como la alimentación, la higiene, la agricultura, la medicina, etc. De todo ello hemos recibido en el discurso del Profesor Hidalgo detallada información, que sin duda les habrá hecho a ustedes sentirse partícipes de la misma satisfacción que los investigadores sentimos cuando trabajamos con estos sistemas.

Pero no es mi intención reproducir, ni recrearme de nuevo con tantos ejemplos, con tantas situaciones de interés cotidiano, ligadas al mundo de los sistemas coloidales. Permítanme sin embargo que resalte algunos aspectos que me han parecido de especial interés y que el Profesor Hidalgo ha comentado en lo que he denominado “la segunda parte” de su discurso. El primero de ellos es el énfasis puesto en resaltar que la ciencia coloidal es, efectivamente, una ciencia transversal; en palabras suyas, “un punto de encuentro de las ciencias básicas (Física, Química, Biología) con las aplicadas” (con las tecnologías o si prefieren el término, con las ingenierías). Este hecho permite comprender el valor añadido de los grupos de investigación que, como el que lidera nuestro nuevo Académico, trabajan en líneas multidisciplinarias y por ello están en mejores condiciones de abordar y resolver

problemas de naturaleza muy diversa. El Prof. Hidalgo ha citado, a este respecto, lo aparentemente dispar del abordaje científico de un test de inmunodiagnóstico en Medicina, de unas emulsiones bituminosas para cubrimiento de carreteras, en Ingeniería Civil, o bien el diseño de una suspensión farmacéutica del tipo “retard”, es decir, con liberación controlada del fármaco. Todas ellas son situaciones que pueden abordarse desde la base conceptual de la ciencia del estado coloidal.

Otro aspecto que considero de interés en el discurso es la visión que se aporta, también desde un punto de vista conceptual, sobre los nexos de unión entre la ciencia coloidal y la nanociencia, campos científicos ambos que, aunque articulados sobre la base del “tamaño de la materia” o de los sistemas que se consideran, tienen objetivos, procedimientos y aplicaciones que son comunes en numerosos casos; y en todos ellos, la estabilidad coloidal de los sistemas implicados es requisito necesario para su utilidad en las aplicaciones nanotecnológicas. En otras palabras, como predijo Einstein y después demostró experimentalmente Jean-Baptiste Perrin, las partículas coloidales, relativamente grandes, se comportan de la misma forma que sus homólogas, mucho más pequeñas, del universo molecular. En cierto sentido, en palabras de Wilson Poon, los coloides se comportan como “*big atoms*”, como “átomos grandes”.

En la última parte de su discurso, el Prof. Hidalgo se plantea los retos y las dificultades que la ciencia de coloides e interfaces afronta en la actualidad, y cuales son las vías de solución que éstos tienen. Y resulta realmente paradójico hablar de una ciencia como es la de los coloides, cuyos orígenes se remontan a mediados del siglo XIX, años en que ya Faraday describía las características del oro coloidal, y que sin embargo se manifiesta con una actualidad y una vitalidad asombrosas, abordando continuamente nuevos problemas de índole teórica, como aquí se ha dicho, por ejemplo los relacionados con el conocimiento de las interacciones en suspensiones concentradas, pero focalizando dichos problemas en la explotación tecnológica de los resultados, relacionados en su mayoría con los nuevos materiales en el mundo “inorgánico” y con los sistemas biológicos en el de ciencias naturales y de la vida. La Ciencia Coloidal se beneficia continuamente de los avances en la moderna computación y de los desarrollos de técnicas de observación in situ, que permiten el conocimiento de las interacciones a nivel molecular, como ocurre con las pinzas de laser y los aparatos de medida de fuerzas superficiales, llegando incluso al nivel de átomos, como la moderna microscopía de fuerza atómica.

Y me gustaría acabar estos comentarios, quizá algo áridos para los que no están en

contacto directo con la investigación en estos temas, diciendo que todas las cosas de la vida tienen su percepción estética. Los científicos y los técnicos rara vez enfocan sus temas de trabajo desde una perspectiva artística o humanística. Solo en algunos casos lo hacen desde una perspectiva social (y el discurso que hemos escuchado hace unos momentos es buena prueba de ello). Pero lo cierto es que, como afirma de Gennes³³, la percepción estética puede ayudar a identificar y explorar vínculos entre las distintas disciplinas cultivadas por el intelecto humano. También el mundo de los coloides ofrece aspectos ligados a la belleza de los sistemas que considera. Y mucho se ha escrito sobre “la belleza de los coloides”. ¿Quién no ha visto las hermosas figuras que se generan en las estructuras fractales?. ¿Quién no ha visto las “caprichosas” formas de un cristal molecular, obtenido después de dejar sedimentar una suspensión de partículas de tamaño coloidal?. El análisis de las estructuras espaciales formadas por la materia condensada blanda en general, por los coloides (sistemas de muchos cuerpos) en particular, muestra que éstas se generan espontáneamente de acuerdo a la distribución más probable de los objetos observados. Esta tendencia de las “cosas muy numerosas” a organizarse por sí mismas, a ensamblarse a sí mismas, siguiendo dinámicas internas que las llevan a adquirir configuraciones aparentemente caprichosas (de ahí su belleza), no es sino la manifestación de un principio general. Los seres vivos, por ejemplo, forman cadenas alimenticias y los coloides lo hacen como auténticas figuras escherianas. El auto-ensamblado espontáneo genera regularidades, geométricas en unos casos como he mencionado, pero también mecánicas o culturales. No importa cuan distintas parezcan estas manifestaciones colectivas. El principio general es siempre el mismo: las cosas ocurren de la manera más probable. Hablar de belleza y de coloides simultáneamente solo puede hacerse desde la convicción de que las “ciencias duras” y las bellas artes son parte de lo mismo. Ello es una prueba más de que la Ciencia es obra de las personas y de que nuestra comprensión de la naturaleza depende de la forma en que la interpretamos y la representamos.

Y es que, quizá, deberíamos estar de acuerdo con el Profesor Theodore Roszak³⁴, cuando afirmaba que “la concepción científica de la realidad no es más que una ilusión”.

E ilusión es precisamente lo que necesitamos y lo que nos puede motivar, lo que nos

³³ “Fragile objects: soft matter, hard science, and the thrill of discovery” de Pierre-Gilles de Gennes y Jacques Badoz, Springer-Verlag New York, Inc. (1996).

³⁴ “The making of a Counter Culture”, Theodore Roszak, Stanford University Press, 1968

motiva de hecho a todos los que formamos parte de esta Corporación que es la Academia de Ciencias de Granada, para seguir trabajando y conseguir con el esfuerzo de todos que nuestros objetivos salgan adelante. Por ello, quiero acabar como empecé, expresando nuestra satisfacción por contar entre nuestra nómina de Académicos a la relevante personalidad que es el Profesor Hidalgo Álvarez, mi querido amigo, felicitando al nuevo Académico, dándole la bienvenida, a la par que agradeciéndole su disposición positiva a colaborar con las tareas propias de esta Institución, y deseándole toda clase de venturas y felicidad, a él y también a su familia.

Muchas gracias,

He dicho.