

DESDE EL REMOTO ATRACTIVO DE LOS IMANES A LA BIOMEDICINA ACTUAL: UNA APASIONANTE HISTORIA DE LA FÍSICA

ANTONIO HERNANDO GRANDE*

* Instituto de Magnetismo Aplicado, Apartado de Correos 155, CP 28230, Las Rozas, Madrid, Spain.



Figura 1. Según indica el historiador Plinio el Joven, recogiendo una vieja leyenda del poeta griego Nicandro, un pastor llamado Magnes observó con sorpresa que su cayado de hierro quedaba atrapado en una roca situada en la falda del Monte Ida. Desde ese momento la piedra se conoció como piedra de Magnes.

En este artículo se repasa muy sucintamente la historia del magnetismo del cuerpo humano, intentando distinguir lo científico de lo literario. En los apartados III y IV encontrará el lector algunos párrafos para cien-

tíficos que puede omitir sin menoscabo de la comprensión general de las ideas expuestas.

I. PARACELSO Y MESMER DOS PIONEROS DEL “MAGNETISMO ANIMAL”

A finales del siglo XV nació en Suiza un ciudadano llamado Philippus Aureolus Threophraustus Bombast von Hohenheim. Cuando murió en Salzburgo cincuenta años más tarde era famoso en Europa pero con un nombre más simple: Paracelso. Aparte de sus contribuciones a la medicina, entre las que destaca las derivadas de su sensibilidad a la importancia de la química en el funcionamiento del cuerpo humano, fue pionero en la defensa del poder terapéutico de los imanes. Su argumento se basaba en la convicción de que si los imanes eran capaces de extraer el hierro también podrían extraer las enfermedades del cuerpo. Describió y utilizó diversos métodos de extraer la enfermedad y conectarla a tierra y tuvo éxito en algunos intentos que probablemente fueran debidos más al poder de la imaginación que a las propiedades curativas de los imanes. Como indica James D. Livingston en su interesante y sugestiva obra:



Figura 2. Franz Anton Mesmer

“Driving force: the natural magic of magnets”, Paracelso sabía bastante del poder de la mente como pone de manifiesto su siguiente párrafo: *“ El espíritu es el conductor, la imaginación el instrumento y el cuerpo el material plástico. La atmosfera moral que rodea al paciente puede influir enormemente en el curso de su enfermedad. La imaginación produce efecto”* No es de extrañar que el psiquiatra Carl Jung escribiera: *“Vemos en Paracelso, no solo al pionero en el campo de la medicina química sino también en el de la ciencia empírica de psicología de la salud”*.

Como es comprensible Paracelso fue figura muy controvertida en su tiempo lo que no impidió que sus escritos tuvieran una gran influencia durante los siglos siguientes. El desarrollo posterior de los materiales magnéticos permitió en el siglo XVIII la fabricación en Inglaterra de imanes permanentes de acero al carbono cuya imanación de saturación, 20000G, era muy superior a la de los imanes naturales de magnetita y maghemita, 4000G. Tal descubrimiento estimuló e incentivó un renacimiento del interés por el poder terapéutico de los imanes. El jesuita Maximilian Hell, profesor de Astronomía en la Universidad de Viena, trataba a algunos pacientes con imanes moldeados con la forma de la zona enferma. En 1774 un médico vienés amigo de Hell utilizó imanes para intentar curar

a una señora de ataques nerviosos. El éxito que tuvo con el tratamiento sirvió de base para que se difundiera intensamente su teoría sobre el “magnetismo animal”. El nombre del médico era Franz Anton Mesmer y su teoría originó profundas controversias. Tras curar a la dama explicó su método, basado en la colocación de un imán de herradura en su tobillo y otro con forma de corazón sobre el pecho. Rápidamente la paciente experimentaba una sensación de flujo de calor ascendiéndola desde los pies como si fuera de carbón ardiente y de la misma forma desde los dos lados del pecho hasta la coronilla, hasta que se hacía insensible a los imanes. Los síntomas desaparecían y se recuperaba totalmente del malestar.

Según Mesmer, en el interior del cuerpo existía un fluido universal cuyas mareas podrían controlarse artificialmente. En el interior del cuerpo existían polos de igual o distinto signo cuyo efecto se reforzaba o se destruía. El magnetismo animal existía dentro de cada uno y los imanes externos, pertenecientes al dominio del magnetismo mineral, solo servían de canales para regular el flujo de fluido universal entre el exterior y el paciente. En 1775 y 1776 Mesmer visitó Austria, Suiza, Baviera y Hungría y tuvo un enorme éxito ya que la promesa de curar enfermedades sin bisturís ni pastillas siempre atrajo mucho al público. Un sordo comenzó a oír tras la imposición de manos de Mesmer y la afluencia de enfermos fue creciendo de modo que le resultaba imposible recibir a todos por lo que creó grupos para terapia colectiva durante cuyas sesiones los pacientes tocaban materiales imanados. El método fue evolucionando y los imanes perdieron progresivamente importancia frente a los gestos dramáticos y la imposición de manos del maestro. La cumbre de popularidad de Mesmer se alcanza en París. No deja de ser paradójico que en el centro neurálgico del Siglo de las Luces y de la Ilustración una teoría tan poco iluminadora como la de Mesmer encontrara tan mágica acogida. Un ejemplo de su popularidad se puede apreciar en la ópera cómica de Mozart ***“Cossi fan tutte”*** estrenada en Viena en 1790. Al finalizar el acto primero dos muchachos jóvenes pretenden tomar veneno como parte de una ficción para probar la lealtad de sus novias. Una servidora de las jóvenes dice entonces que conoce a un médico maravilloso con los enfermos, conocido por obrar milagros sin medicinas ni cirugías. Vuelve disfrazada de médico y portando un enorme imán bajo su vestido. Tocando a los

dos jóvenes con el imán canta: “*Aquí y allí un toque de imán, la piedra de Mesmer, que nació en Alemania y se hizo famoso en Francia*” Esta escena que requiere cierta aclaración hoy, se entendía perfectamente en 1790. También en *Los Miserables*, Víctor Hugo caracteriza a uno de los personajes por su hábito de dormir según la orientación magnética para que sus corrientes magnéticas internas llevaran la dirección correcta.

El éxito de Mesmer se vio frenado por la ortodoxia académica. En 1784 Luis XVI estableció una Comisión Real para evaluar la teoría del “magnetismo animal”. De ese mismo año data la conocida carta de Lafayette a su camarada de armas George Washington en la que le expone el descubrimiento del magnetismo animal por parte de Mesmer al que califica de gran descubrimiento. La Comisión Real estuvo formada por Antoine Lavoisier, Joseph Guillotin y Benjamin Franklin. El trabajo de esta Comisión ha sido calificado por Stephen Jay Gould como “*un documento trascendental en la historia de la razón humana*” La Comisión indicó que el fluido universal no presentaba propiedades detectables. Los resultados que encontraron tras sucesivos experimentos rigurosos mostraron que todos los efectos observados podían ser atribuibles al poder de la sugestión. Al llegar a París, justo después de publicarse el informe de la Comisión, Thomas Jefferson escribió en su diario: “*El magnetismo animal está muerto y ridiculizado*” Ya en *Las aventuras de Huckleberry Finn*, Mark Twain caracteriza a uno de los embaucadores de la obra por ser divulgador del mesmerismo.

A día de hoy podemos decir que el magnetismo animal está ridiculizado pero no muerto. Basta leer en Internet los anuncios terapéuticos de colchones, duchas, pulseras y demás objetos magnéticos para persuadirse de que la labor de Mesmer mantiene una clientela entusiasta. En Europa varios grupos de curanderos con imanes evolucionaron hacia la hipnosis. De hecho se cree que muchos de los trances ocasionados por Mesmer en sus pacientes constituían lo que a día de hoy conocemos como trance hipnótico. Como ha indicado uno de sus biógrafos, Vincent Buranelli, la tragedia de Mesmer es que descubrió y provocó hechos ciertos, la hipnosis, con una teoría falsa, el magnetismo animal. Añade Buranelli que Mesmer fue un Colón de la moderna psicología. Ambos fueron guiados a un mundo extraño y nuevo con el uso de los

imanes y ambos eran desconocedores de donde habían realmente aterrizado.

II. NACIMIENTO DE LA CIENCIA DEL MAGNETISMO

Es importante resaltar que en el intervalo de tiempo que transcurre entre Paracelso y Mesmer, concretamente en 1600, aparece el primer tratado científico sobre todo lo que de magnetismo era conocido hasta entonces. Este libro, escrito por William Gilbert, médico de la reina Isabel I de Inglaterra y titulado “*De Magnete*”, aparte de ser considerado el primer tratado científico serio, es pionero en indicar explícitamente en qué consiste el método científico. En el prólogo del libro escribe Gilbert: “*Las razones poderosas se obtienen de los experimentos seguros y de los argumentos demostrados mas que de conjeturas probables y de las opiniones de filósofos especuladores*”. Galileo escribió: “*Admiro y envidio a Gilbert por cómo una concepción tan estupenda pudo llegar a su mente. Pienso que es merecedor de extraordinario aplauso por las muchas nuevas y verdaderas observaciones que hizo*”. El comienzo del libro de Gilbert recuerda al célebre Capítulo I del libro de Santiago Ramón y Cajal sobre *Reglas y Consejos sobre Investigación Científica* donde se lee: “*..las principales fuentes de conocimiento son la observación, la experimentación y el razonamiento inductivo y deductivo..Aquella singular manera de discurrir de pitagóricos y platonianos, que consiste en explorar nuestro propio espíritu para descubrir en él las leyes del Universo ya solo inspira sentimientos de conmiseración y de disgusto. Conmiseración, por el talento consumido persiguiendo quimeras; disgusto por el tiempo y trabajo lastimosamente perdidos. La historia de la civilización demuestra hasta la saciedad la esterilidad de la metafísica en sus reiterados esfuerzos por adivinar las leyes de la naturaleza. Con razón se ha dicho que el humano intelecto de espaldas a la realidad y concentrado en sí mismo es impotente para dilucidar los más sencillos rodajes de la máquina del mundo y de la vida*”

Esta dualidad de mentalidad, la científica pura representada por Gilbert y la más literaria representada por Mesmer, es apreciable perfectamente en nuestros

días. Desde 1600 hasta hoy el conocimiento científico del Magnetismo ha progresado de forma espectacular. Sin embargo, el conocimiento de toda la biología encerrada en el cuerpo humano sigue siendo limitadísimo. Normalmente los literarios modernos escriben su fábula mejor o peor trabada basándose en este desconocimiento de la biología humana. Lógicamente, como sucedía con Paracelso o con Mesmer, el relato contiene algo de posible verdad. Aunque a veces, por ignorancia, también se atreven a especular con el funcionamiento del Magnetismo, lo que es más difícil de excusar. Los científicos, por el contrario, intentan hacer modestamente experimentos seguros con campos magnéticos y materia viva, precisamente para aprender cómo funciona la materia viva.

Al no conocerse con un mínimo de detalle el funcionamiento global de los distintos órganos que constituyen el cuerpo humano lo que se diga sobre su magnetismo será verificable en algunos casos pero no en otros y cuando no se puede verificar si una teoría es falsa significa que no es científica, al menos no lo es en el sentido de Popper. Hay hechos que si conocemos con certeza. Por ejemplo, el hidrógeno que contiene el cuerpo, en el agua y en las grasas, tiene un momento magnético nuclear asociado al spin del protón. Sabemos que el flujo sanguíneo al arrastrar iones produce campos magnéticos y sabemos la magnitud del campo que produce el bombeo continuo del corazón que es inferior a una millonésima de gauss. También conocemos con certeza que las corrientes postsinápticas mediante las cuales se comunican las señales entre neuronas producen campos magnéticos que en la superficie externa del cráneo alcanzan valores del orden de milmillonésimas de gauss, es decir, la milésima parte del campo producido en el pecho por el batir del corazón.

La medicina utilizó desde muy antiguo imanes para extraer de las vías digestivas y respiratorias, principalmente en niños, objetos extraños susceptibles de ser atraídos por el campo magnético. También parece ser generalizada la observación de que algunas fracturas óseas aceleran su consolidación cuando son sometidas a campos magnéticos locales, se desconoce, no obstante, que concreto proceso o reacción bioquímica o biofísica se ve afectada por el campo. Mucho se ha especulado sobre los posibles mecanismos celulares sensibles a los campos magnéticos, algunos como los

citados más arriba como ciertos han ratificado su certeza al ser constantemente utilizados en técnicas ya hoy familiares como la resonancia magnética nuclear o en vías de hacerse habituales como la magnetoencefalografía. Otros, sobre los que mucho se ha discutido, permanecen en el rango definido por Gilbert como generados por las opiniones de filósofos especuladores. Si bien una visión científica no permite despreciar cualquier probabilidad razonable de existencia lo desconocido, huye con más urgencia de establecer como científico lo que sencillamente a día de hoy carece de esa propiedad, aunque con el aumento de la experimentación adecuada pudiera adquirirla en el futuro.

El conocimiento del Magnetismo se ha basado en la observación llevada a cabo desde los albores de la Humanidad de la atracción producida por la piedra imán sobre los minerales de hierro. La primera sistematización de todos los fenómenos observados se realizó con la edición del libro de Gilbert, “*De Magnete*” y durante el siglo XIX los experimentos rigurosos de Coulomb, Oersted, Ampere, y Faraday entre otros permitieron a Maxwell sintetizar los fenómenos electromagnéticos en cuatro leyes que resumen, mediante ecuaciones diferenciales, los resultados de todos los experimentos eléctricos y magnéticos reali-

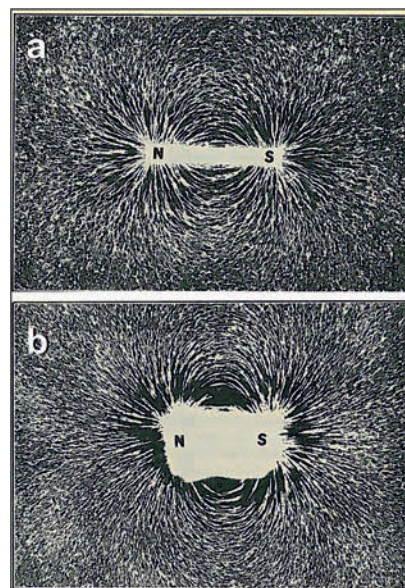


Figura 3. a. Líneas de campo magnético creado por una barra de acero imanada. Las líneas se generan por limaduras de hierro. **b.** Líneas de campo magnético creado por una barra de magnetita. Las líneas se generan por limaduras de hierro.

zados hasta el día de hoy. Las ecuaciones de Maxwell superaron intactas la crítica profunda de la física clásica que removi6 sus cimientos al comienzo de siglo XX. Estas ecuaciones predicen con precisi6n cuantitativa, casi inhumana, los resultados de los experimentos de electromagnetismo m6s refinados que abarcan desde la astrofísica a las partículas elementales. La capacidad de predicción cuantitativa es el sello irrenunciable de cualquier conocimiento que aspire a ser científico. Con el desarrollo de la Mecánica Cuántica se abrió una ventana al mundo subatómico y se pudo saber que el magnetismo de la materia es fundamentalmente debido a los espines de los electrones y al de los nucleones, protones y neutrones, El momento magnético del electr6n es dos mil veces superior al de protones y neutrones. También existen contribuciones al magnetismo de las corrientes eléctricas debidas al movimiento orbital de los electrones. Hoy conocemos con certeza c6mo el campo magnético actúa sobre átomos libres y sobre átomos en moléculas y en s6lidos sencillos. Pero seguimos sin encontrar una explicaci6n sencilla, con capacidad predictiva, del carácter magnético del hierro.

III. LA DIFICULTAD INTRÍNSECA DEL BIOELECTROMAGNETISMO: LA FOTOSÍNTESIS COMO EJEMPLO

Cuando los efectos magnéticos conocidos, o no discutidos por ning6n investigador, tratan de interpretarse en la materia viva el nivel de dificultad aumenta cualitativamente de forma brutal. Consecuentemente, la influencia que los campos electromagnéticos tienen o puedan tener sobre los procesos biológicos constituye un tema de extremada dificultad de estudio. Ya hemos visto que nuestro nivel de conocimiento no alcanza a explicar con sencillez por qué el hierro es magnético. El funcionamiento preciso de la fotosíntesis, los plegamientos y movimientos de las macromoléculas de proteínas en el citoplasma, la armonía de todos los procesos que intervienen en el desdoblamiento de los cromosomas durante la mitosis, o la regulaci6n química de las segregaciones hormonales son ejemplos cuya compresi6n profunda es objetivo de la investigaci6n de vanguardia a día de hoy. Aunque el estudio de la influencia de los campos electromagnéticos sobre estos procesos pudiera en alg6n caso arrojar luz sobre su propia naturaleza no es de extrañar que en la

mayoría de los casos sea extremadamente difícil reproducir resultados experimentales y m6s aún interpretar las posibles modificaciones debidas a la acci6n de los campos. La dificultad experimental emerge de la influencia desconocida de múltiples variables, esquivas al control, en los procesos bioquímicos. Mas arduo resulta aún explicar las posibles modificaciones inducidas por los campos en un proceso biológico determinado como consecuencia de las perturbaciones producidas por los campos en las diferentes etapas que constituyen tal proceso cuando generalmente se desconocen los detalles relevantes de dichas etapas.

Si uno lee la literatura relativa al efecto de campos electromagnéticos sobre el fenómeno de la fotosíntesis podr6 tener una panorámica magnífica de contemplaci6n de la dificultad referida. Uno de los fenómenos que m6s han invocado los investigadores en Bioelectromagnetismo como posible causa de alteraciones de procesos biológicos por los campos electromagnéticos se refiere a la cinética de radicales libres.

La transformaci6n de la energía luminosa en el aparato fotosintético de las bacterias est6 basada en la transferencia de electrones inducidos por la luz a lo largo de una cadena de oxidaci6n contenida en la membrana tilacoidal. El electr6n proviene de un donador de espín neto nulo, 1D , que es probablemente un dímero de bacterioclorofila y que es excitado por los fotones a un estado $^1D^*$. El aceptor, 1A , es supuestamente bacteriofitina también de espín total nulo. La reacci6n inicial es entonces: $^1D^* \rightarrow e^-$ y al perder el electr6n el donador se transforma en un complejo de spin $1/2$ y de carga positiva $+e$ ($+e$ es la carga opuesta a la del electr6n $1.6 \cdot 10^{-19}C$) que denominamos $^2D^+$, seg6n $^1D^* \rightarrow e^- + ^2D$. Al absorber el electr6n el complejo 1A adquiere una carga negativa, $-1.6 \cdot 10^{-19}C$ y un spin $1/2$ seg6n la reacci6n: $e^- + ^1A = ^2A^-$

En condiciones normales el electr6n se transfiere, en un tiempo comprendido entre 100 y 250 picosegundos, de $^2A^-$ a un segundo aceptor 1X probablemente constituido por un complejo de hierro-ubiquinona. Si X est6 químicamente reducido en el estado $^2X^-$ no puede aceptar el electr6n y la vida media del par radical inicial ($^2D^+ + ^2A^-$) aumenta hasta 10 nanosegundos. Como consecuencia de la interacci6n hiperfina que tiende a acoplar paralelos los espines de

los dos radicales, el par formado, $^1(^2D^+ + ^2A^-)$ que es de spin total nulo, se puede transformar en un estado triplete de spin total 1, $^3(^2D^+ + ^2A^-)$. Si la recombinación ó marcha atrás del electrón se hace desde el estado de spin cero se alcanza el estado final ($^1D^* + ^1A$), pero si el par se encuentra en estado triplete, decaerá al estado final ($^3D^* + ^1A$). La recombinación se llama **geminate** si tiene lugar en un tiempo inferior al de separación de las moléculas que forma en par, por lo que en este caso las moléculas que se recombinan son las que forma el par. Cuando las moléculas de los pares formados se separan lo suficiente, la recombinación puede tener lugar entre otras moléculas D , dando lugar a la recombinación homogénea. Por tanto la presencia de pares tripletes, que puede medirse por la cantidad existente de moléculas $^3D^*$, refleja la acción de la interacción hiperfina. Si esta interacción tiene un tiempo característico más corto que el tiempo de separación de los componentes de un par, la presencia de donores en estado triplete se podrá detectar desde el comienzo de la recombinación **geminate**. Un campo magnético aplicado externamente altera la proporción de estados tripletes $^3D^*$, y esto es debido a que la precesión global de spin generada por el campo y, que tiene lugar en torno a él, destruye la coherencia de las precesiones relativas inducidas por la interacción hiperfina. Cuando la intensidad de campo aplicado excede a la de las constantes de la interacción hiperfina las transiciones entre el estado de spin nulo y el estado de spin 1 o estado triplete del radical libre desaparecen y por tanto desaparece también la generación de estados $^3D^*$.

Se ha observado experimentalmente que en el caso de la *Rhodospseudomonasspheroides* el ritmo de formación de estados $^3D^*$ disminuye con el campo magnético aunque los experimentos muestran una fuerte dependencia con el centro de reacción fotosintético que indica la importancia de las fuerzas intermoleculares en el ritmo de la reacción. En los centros de reacción las moléculas donoras yceptoras se encuentran en estado sólido. En esta breve descripción se han realizado muchas simplificaciones al considerarse despreciables las interacciones de canje, así como el efecto de las fuerza de Lorentz que pudiera ser relevante en el caso de electrones de alta velocidad de transferencia. Las distintas concentraciones de moléculasceptoras y donoras con estados de spin diferentes, reguladas por el campo magnético aplicado, pueden lógicamente modular las velocidades de las

reacciones bioquímicas que tiene lugar en los centros de reacción fotosintéticos.

Como se aprecia la influencia posible del campo magnético, en este caso, sobre la cinética de la fotosíntesis se explica mediante una sucesión de observaciones difusas y especulaciones que se articulan sobre hipótesis más o menos frágiles. La dificultad se encuentra principalmente en la complejidad del proceso global de la fotosíntesis. A nadie le extrañaría, mientras no se llegue a un conocimiento más científico del proceso total que aparecieran artículos indicando que, contrariamente a lo que se ha observado en *Rhodospseudomonasspheroides*, la formación de estados $^3D^*$ aumenta con el campo en otro tipo de bacterias o que apenas altera su densidad en otro tipo distinto. Para los tres casos se podrían establecer especulaciones más o menos plausibles capaces de dar cuenta de los resultados, cualesquiera que estos fueran.

IV. LA RESONANCIA MAGNÉTICA NUCLEAR COMO DIAGNOSIS: EL AVANCE CIERTO DEL CONOCIMIENTO EN EL CAMPO DEL BIOELECTROMAGNETISMO.

El hidrógeno es el elemento más abundante en el Universo constituyendo un 75% de la materia visible. Situémonos en el instante en que el Universo tenía un segundo de vida, cuando toda la materia estaba condensada en un plasma a 10000 millones de grados Kelvin. A estas temperaturas se pueden generar reacciones nucleares en las que un protón y un neutrón se unen para separarse después por colisiones. La energía térmica correspondiente a esa temperatura es del orden de las energías involucradas en esas reacciones nucleares. Podemos calcular las probabilidades de encontrar núcleos más complejos según se enfría progresivamente el Universo. Cuando se calculan estas probabilidades se observa que ningún núcleo de peso atómico superior al litio, con número atómico 3, pudo formarse durante el Big Bang. La probabilidad de que se formara helio era de un 25%, mientras que la de formación de litio apenas alcanzaba un uno por diez mil millones de protones. El 75% de los átomos creados eran átomos de hidrógeno. Estas predicciones han

encontrado tal acuerdo con las observaciones que se puede considerar la abundancia relativa de elementos como una prueba de la realidad del Big Bang. Solo un Universo inicialmente caliente que decreciera posteriormente su temperatura daría cuenta de las abundancias relativas observadas. El resto de los átomos de otros elementos que forman nuestro cuerpo se cocinaron en las estrellas. En el abrasador ambiente del interior de una estrella se inducen procesos de fusión que dan lugar a los elementos pesados de la clasificación periódica. Pero para que sea posible que átomos de oxígeno, carbón o nitrógeno se encuentren en el interior de nuestro cuerpo ha sido necesario que viajaran hasta él desde el núcleo de las estrellas; es precisamente la explosión de éstas la que ha permitido la diseminación espacial de estos átomos que llegando hasta la Tierra han hecho posible nuestra existencia.

Un alto porcentaje próximo al 64% de nuestra masa es agua. Las moléculas de grasas como es el caso de los triglicéridos contienen un alto porcentaje de átomos de hidrógeno. Se puede estimar que un 10% de nuestra masa está constituida por protones aislados como núcleo de hidrógeno. En un milímetro cúbico de agua hay sesenta y seis mil millones de billones ó $6.6 \cdot 10^{19}$ átomos de hidrógeno y, por tanto, el mismo número de protones o núcleos de estos átomos. Si este núcleo o protón aislado y único se imagina como una esfera tendría un diámetro de 10^{-15} m longitud que utilizada como unidad es conocida como *femtometro*. Si bien el magnetismo macroscópicamente apreciable de los materiales es en primer orden debido a los electrones que son pequeños imanes, los protones y neutrones también poseen momento magnético pero con una intensidad que es uno dividido por dos mil veces la del electrón. Sin embargo hay técnicas experimentales basadas en fenómenos físicos básicos que permiten observar los momentos magnéticos de los protones. Podemos pues imaginar a los protones, o núcleos de los átomos de hidrógeno tan abundantes en nuestro cuerpo, como pequeñas agujas imanadas o dipolos magnéticos.

Cuando se aplica un campo magnético tienden a orientarse, como la aguja que forma una brújula, en la dirección de ese campo. En realidad los momentos magnéticos dipolares, μ , de las partículas son múltiplos de sus momentos angulares, en particular en el caso de los protones, de su momento angular, S , conocido

como spin y asociado a un giro en torno a un eje que pasa por la propia partícula. Se verifica $\mu = (e/m)S$, donde e y m son la carga y masa del protón respectivamente y $S = (1/2)h$, su spin. Ahora se comprende porque el momento del electrón es un factor 2000 veces superior al del protón, ya que su spin es el mismo y su masa es aproximadamente una dosmilésima de la de los nucleones. El par ejercido por el campo, que coincide con la derivada temporal del momento angular es $\Gamma = (e/m)S \times B = dS/dt$. El producto vectorial de esta ecuación indica que la variación de S es perpendicular a S y a B , por tanto lo que hace S es precesionar alrededor del campo que suponemos actúa según el eje z , manteniendo constante el ángulo θ que forma con el campo y, por tanto, su proyección según el eje z , justo como una peonza precesiona en torno a la vertical. En un conjunto de 10^{19} dipolos inicialmente habrá el mismo número de ellos paralelos al campo que antiparalelos. Su suma vectorial es cero y no existe un momento neto en la unidad de volumen ó imanación. Por efecto de la temperatura del entorno se producen variaciones de θ cuyo valor medio en el equilibrio tiende a disminuir para reducir la energía potencial del conjunto de dipolos en el campo. Energía que, para un dipolo, puede expresarse como el producto escalar $-\mu B$ y que es mínima cuando el momento dipolar y el campo aplicado son paralelos. La agitación térmica aunque responsable de que aparezcan cambios en θ (ya que, como hemos visto, el efecto directo del campo tiende a preservar constante este ángulo) impide que en el equilibrio se alcance el mínimo de energía potencial. Si aplicamos un campo de *10000 Gauss ó 1 Tesla* a la temperatura del cuerpo humano, *37 C*, la distribución de equilibrio termodinámico corresponde a un exceso de momentos paralelos al campo solamente de *3* por cada *millón*. Solamente aumentando el valor del campo o disminuyendo el valor de la temperatura podríamos aumentar la imanación neta.

Hay que señalar que tras aplicarse el campo para que se alcance el equilibrio térmico con el ambiente y aparezca una imanación neta tiene que transcurrir un tiempo llamado de relajación. Aunque efectivamente, dada una temperatura, T , y un campo B , la configuración de equilibrio es la misma para todos los conjuntos de momentos magnéticos idénticos, el tiempo que tardan en alcanzar ese equilibrio depende fuertemente de la naturaleza del medio en que se encuentran.

Volvamos a la precesión. La expresión del par ejercido por el campo pone de manifiesto que la derivada temporal de S se puede expresar como $\omega \times S$ que coincide formalmente con la ecuación del movimiento de precesión de un vector con velocidad angular ω que es en nuestro caso $(e/m)B$. Esta velocidad angular de la precesión corresponde a una frecuencia, o número de veces que el spin gira en torno al campo por segundo, $\nu = (e/2\pi m)B$. En un campo $B=10000$ Gauss, los protones precesan 42.57 millones de veces por segundo lo que equivale a decir que $\nu=42.57$ MHz este rango de megahercios corresponde al rango de las radiofrecuencias del espectro electromagnético.

El efecto de la temperatura, una vez aplicado y mantenido el campo B , es el de producir transiciones que varían el ángulo θ formado entre cada momento y el campo. La distribución isotrópica inicial de los dipolos evoluciona durante el tiempo de relajación hasta alcanzarse el equilibrio caracterizado por un valor medio $\cos\langle\theta\rangle_{T,B}$ que da lugar a un momento neto en la dirección del campo $\langle\mu\rangle = \mu \cos\langle\theta\rangle_{T,B}$. Es importante considerar que la variación de θ requiere ejercer un par sobre el momento angular que tenga una componente según z . Supongamos que superpuesto al campo B de 100000 Gauss orientado según z aplicamos un campo menor b , perpendicular a B orientado según el eje x . El momento μ tiene una proyección en el plano $x-y$ que vale $\mu \sin\theta$, pero esta proyección está girando en el plano con frecuencia de 42.57 MHz. Cuando durante su giro atraviesa la dirección y positiva el par ejercido por el campo b orientado según x tiene una componente z de valor $\Gamma_z = \mu \sin\theta b$, pero cuando atraviesa la dirección —y aparece un par sobre z del mismo valor pero de signo opuesto. Es decir: si el campo b está orientado según x el par neto ejercido según z en un segundo ha sido aproximadamente 21000 veces positivo y 21000 negativo por lo que su efecto neto sobre la posible variación de θ ha sido nulo. Algo muy distinto sucede si el campo actuando según x es alterno y cambia con la misma frecuencia que precesiona el dipolo. En este caso cuando la proyección está orientada según y positivo el campo b está según x positivo y cuando el dipolo se orienta según y negativo, b lo está según x negativo. El efecto es entonces acumulativo en el tiempo y el par ejercido por b siempre actúa según el mismo sentido del eje z por lo que puede inducir variaciones de θ . La acción

del campo b alterno es similar a la que ejerce una fuerza periódica sobre un columpio. Los momentos que absorben energía del campo alterno b lo hacen aumentando su energía potencial, esto es aumentando el ángulo θ que forman con el campo. Este aumento progresivo produce una disminución de la imanación neta, $M = N\langle\mu\rangle$ (donde N es el número de protones por unidad de masa) en la dirección del campo separando al sistema de su equilibrio termodinámico. La disminución de la imanación produce una variación de flujo magnético en una bobina en la que inducirá un voltaje según la ley de Faraday. Si la bobina es capaz de detectar la componente de la imanación en el plano $x-y$ observará un aumento según transcurre el tiempo en que actúa b y cuando b se anula disminuirá progresivamente hasta alcanzar su valor inicial, en el tiempo de relajación. Si el campo alterno b actúa mediante pulsos de duración t separados por intervalos de tiempo t^* superiores al tiempo de relajación en los que b es nulo la imanación en el plano $x-y$ presentará variaciones como la indicada en la figura 4 al anularse b . Cuando b se anula se reinstaura el equilibrio y M aumenta hasta alcanzar su valor de equilibrio inicial antes de aplicarse b .

El fenómeno descrito fue descubierto y explicado por Bloch y Purcell en 1946 y se conoce como reso-

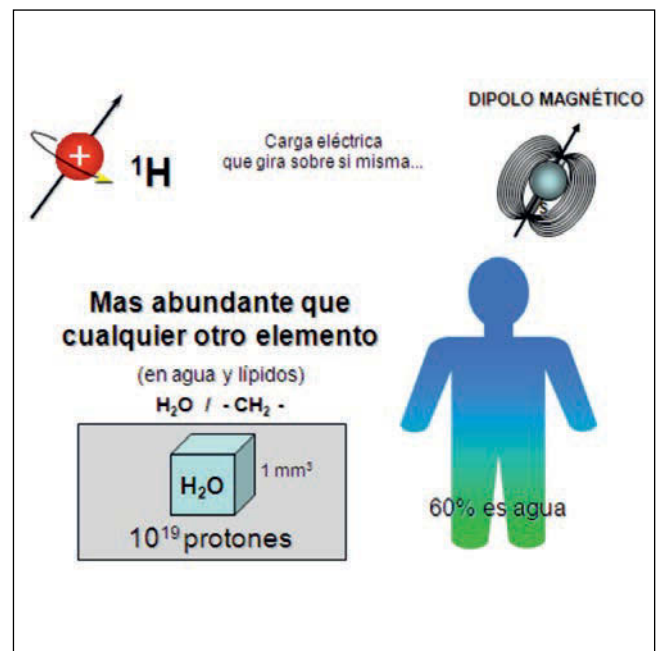


Figura 4. Se representa el dipolo magnético generado por el spin del protón (delicadeza del Dr. Javier Lafuente)

nancia magnética nuclear o RMN. Su descubrimiento les condujo a la recepción del Premio Nobel en 1952. Desde entonces la RMN ha sido una herramienta magnífica para análisis de moléculas en el campo de la química y en especial de la química orgánica y bioquímica. Nos encontramos, pues, ante un fenómeno físico bastante bien conocido y aplicado con éxito en diagnosis que puede, por tanto, considerarse dentro del ámbito de la ciencia dura.

Dos parámetros son medidos por los equipos actuales de RMN utilizados en diagnosis médica, la intensidad de la imanación y el tiempo de relajación. La imanación es tanto mayor en la resonancia cuanto mayor sea el número de protones por unidad de masa ó de volumen. Este valor permite distinguir unos tejidos de otros, supuesto que son conocidas la densidad de protones de hidrógeno en cada uno de ellos. El otro parámetro es el tiempo de relajación que como ya hemos indicado depende del entorno térmico. El mismo tejido, con la misma densidad de núcleos de hidrógeno, aunque tengan la misma imanación puede tener distintos tiempos de relajación según la naturaleza de su entorno. Es curioso que un campo alterno de muy baja intensidad sea capaz de vencer al campo constante de *10000 Gauss* sacando a la imanación de la posición en la que este campo intenso la había fijado. Es el encanto de los fenómenos de resonancia en los que pequeñas fuerzas, pero ejercidas a la frecuencia adecuada, son capaces de producir enormes efectos.

Imaginémonos ahora tumbados en la camilla de un equipo de resonancia magnética nuclear donde nos encontramos sometidos a un campo magnético uniforme $B=10000$ Gauss, campo que es en intensidad *20000* veces superior al campo magnético terrestre en el que habitualmente estamos constantemente inmersos. Nosotros no notamos nada aparte de la incomodidad, que puede llegar a ser intensa, del confinamiento en el interior del solenoide, pero nuestros núcleos de hidrógeno están precesionando y aproximándose a la dirección del campo. Si este es uniforme todos los protones precesionan a la misma frecuencia. Suponiendo que un gran ordenador midiera los tiempos de relajación y las intensidades de la imanación, cabe aún preguntarse cómo distinguiría la fuente de la señal recogida, de qué parte del cuerpo proviene, cómo se pueden obtener imágenes de las dis-

tintas partes del cuerpo. Las imágenes pueden generarse de intensidades y tiempos de relajación, asociando estos valores a distintos tonos. Pero, ¿cómo saber que la bobina detectora contiene información solo de un volumen concreto de nuestro cuerpo?

Esta respuesta la dio un profesor de la Universidad del Estado de Nueva York en Stony Brook llamado Paul Lauterbur. Propuso añadir al sistema unos carretes degradante, que son por cierto los responsables del ruido desagradable que oyen los pacientes, y que producen variaciones locales de la intensidad de campo en torno a los *10000Gauss*. De esta manera cada zona del cuerpo tiene una frecuencia propia de precesión distinta. El ordenador puede escrutar la densidad de protones y el tiempo de relajación de cada zona del cuerpo. De este modo cada pixel correspondiente a una zona determinada adquiere en la imagen un tono que se puede controlar por su tiempo de relajación, su intensidad o la combinación adecuada de ambas. Las ideas de Lauterbur y los trabajos de Mansfield sobre la transformada de Fourier en el espacio directo se consideran contribuciones básicas que permitieron el nivel de excelencia que ha adquirido a día de hoy la diagnosis mediante RMN. Es curioso señalar que el trabajo inicial de Lauterbur fue rechazado por *Nature* si bien el reconocimiento a la transcendencia científico-técnica de su contribución quedó fuera de duda con la concesión, junto a Mansfield, del Premio Nobel en 2003. En el intervalo comprendido entre 2009 y 2013 un 60% de los trabajos de investigación publicados sobre diagnosis tratan de RMN. Un magnífico texto que condensa todo lo relevante de las aplicaciones al radiodiagnóstico de la RMN es la tesis doctoral del Dr. Javier Lafuente del Hospital General Universitario "Gregorio Marañón" titulada: **"Secuencias rápidas en imágenes por RMN, valoración de parámetros de la secuencia turbo spin-eco para utilización del contraste y su utilidad clínica: Fourier parcial segmentado"** Octubre de 1998 Universidad Complutense.

No hay duda de que el magnetismo de nuestros electrones es muy, muy débil y más débil aún el de nuestros núcleos atómicos. Sin embargo, un magnetismo tan débil como el nuclear del cuerpo humano es posible que, mediante la más sofisticada tecnología, sea detectable y útil para nuestra salud. Aunque es todo muy distinto de cómo Mesmer especulaba no hay duda

de que la RMN ha detectado algo de nuestro magnetismo animal.

V. ¿ENEMIGOS DE LA SALUD?

Es una realidad incuestionable que los campos electromagnéticos producidos por los seres humanos han aumentado en intensidad y rango de frecuencias de forma exponencial desde el siglo XIX hasta nuestros días. Los sistemas de comunicaciones, telefonía móvil, emisoras de radio y televisión, radares militares y civiles, las líneas de suministro de energía eléctrica, los billones y billones de imanes que forman los discos duros, los videos, los motores y generadores, toda la tecnología participa en mayor o menor grado de la contribución de los campos electromagnéticos, CEM, artificialmente creados por los hombres. Ante esta realidad parece natural que nos hayamos preguntado por los posibles efectos nocivos que sobre la salud pudiera tener esta proliferación gigantesca de campos electromagnéticos. Esta competencia entre señales electromagnéticas por adueñarse del espacio atmosférico ha generado problemas de compatibilidad debidos a la interferencia de campos utilizados en distintas aplicaciones tecnológicas. Un ejemplo bien conocido es el de la interferencia de ondas de telefonía móvil con ondas de navegación aérea que han obligado hasta ahora a apagar los teléfonos móviles durante los vuelos. Ante la cuestión relativa a los posibles efectos nocivos como ante cualquier pregunta fundada se puede, siguiendo el comienzo del libro **“De Magnete”**, adoptar una postura crítica y científica o una postura menos científica basada en creencias y especulaciones metafísicas.

La dificultad asociada a la falta de conocimiento en detalle de muchos de los complejíssimos procesos biológicos obliga a admitir la necesidad de investigar tales efectos con el rigor característico de los experimentos seguros, aunque como veremos más abajo la experimentación ha sido bastante exhaustiva; pero dado que los avances tecnológicos son muy rápidos comparados con la duración de vida humana y que esta es muy corta comparada con el ritmo del aumento del conocimiento hay que adoptar criterios políticos y sociales que basados en el conocimiento científico a día de hoy sean capaces de sintetizar un mínimo de seguridad con las ventajas derivadas de los usos de las tecnologías referidas. En resumen, durante el tiempo necesario

para encontrar una contestación científicamente rigurosa de la cuestión es posible que el uso de la tecnología haya tenido tiempo suficiente para dañarnos. Por tanto, hay que improvisar soluciones inteligentes e inmediatas que siendo lo más respetuosas con el estado actual del conocimiento científico añadan algún margen razonable de seguridad. Debido a la descompensación entre el ritmo al que surgen nuevas tecnologías y el ritmo al que se alcanza la comprensión de todas sus implicaciones resulta inevitable vivir la evolución y el desarrollo sin una fracción de riesgo.

Hay que reconocer que cualquier avance tecnológico conlleva una inquietud que nace de la componente más conservadora que todos compartimos y que debe subyacer en alguna parte de nuestros genes ya que, sin duda, constituye paradójicamente una defensa evolutiva. Quizás sea esa enorme diferencia de ritmos entre la evolución natural y la evolución cultural la que nos hace rechazar instintivamente las novedades. Se dijo que la salud no podría ser indemne a la velocidad del automóvil. Pero este argumento no fue aplicable al caso del amianto del que muy posteriormente a su uso se supo que era un agente cancerígeno. No todo lo nuevo es inocuo, aunque quizás lo sea más que lo que tenemos propensión a pensar. Es evidente que la complejidad de los procesos bioquímicos —que hemos tratado de ilustrar con anterioridad para el caso de las más simples bacterias con el ejemplo de la fotosíntesis— no permite concluir absolutamente nada cierto sobre los efectos de los CEM sobre la salud. Pero la necesidad de esa síntesis entre seguridad y uso de los CEM, que surge de que hay poca gente dispuesta a prescindir de Internet, de la telefonía móvil de la radio o de la energía eléctrica mientras no exista certeza de su carácter patógeno, ha obligado a los países, y en nuestro caso a la Unión Europea, a realizar un esfuerzo de revisión bibliográfica científica de lo conocido sobre estos efectos. Se considera conocido aquello que constituye un resultado de experimento fiable. A continuación del análisis de lo bien establecido la UE se ha encargado de elaborar una serie de recomendaciones.

Es cierto que existen miles de artículos al respecto (solo referentes a los posibles efectos sobre la salud humana hay publicados 25000 trabajos) pero finalmente todos recurren, aparte de los mejor conocidos efectos térmicos, a tres posibles causas de interacción del campo con la salud, estas son: la presencia en las

células de nanopartículas ferrimagnéticas; la modificación que la presencia de campos magnéticos pudiera introducir en la cinética de recombinación de radicales libres, presentes en las múltiples reacciones biológicas catalizadas por proteínas —como hemos discutido en el caso de la fotosíntesis— y finalmente, el efecto ciclotrónico que se induciría por campos electromagnéticos variables en el tiempo que se combinan con el campo magnético estático del ambiente.

Debe tenerse siempre en consideración la diferencia que existe entre campos magnéticos constantes en el tiempo y campos magnéticos alternos. Los campos magnéticos variables en el tiempo generan un campo eléctrico que según la ley de Faraday viene dado por la relación: $\text{rot}E = -(\text{dB}/\text{dt})$. El campo eléctrico generado por el campo magnético variable en el tiempo actúa sobre las cargas eléctricas que poseen los iones o bien los radicales cargados de las macromoléculas cuya química es responsable de los fenómenos característicos de la vida. Este campo eléctrico puede influir en la configuración de las moléculas de proteína y modificar de este modo la acción enzimática de la misma. Este efecto está mucho menos referido en la literatura y aunque no puede ser invocado cuando se aplican campos magnéticos estáticos sí que puede ser muy relevante bajo la acción de campos de frecuencia media o alta.

Si conviene, sin embargo, establecer las siguientes consideraciones: Solamente las demostraciones matemáticas que tratan sobre objetos ideales son sujetos de certeza. Todas las ciencias naturales, física, química y biología carecen de certezas absolutas excepto en lo que se refiere a la medida de sus magnitudes con la incertidumbre ineludible del error experimental. Las ciencias experimentales construyen teorías sobre principios que permiten explicar los resultados experimentales y deducir nuevos fenómenos y experimentos. Basta que un resultado experimental, entre millones que la sustenten, contradiga la teoría para que ésta deba revisarse. Esta falta de certeza absoluta de la ciencia no ha sido obstáculo, sino más bien estímulo, para el avance indiscutible de la ciencia y del conocimiento científico.

Como se indica en los renglones anteriores, miles de publicaciones científicas, sobre el tema de salud y CEM, con resultados no siempre congruentes han apa-

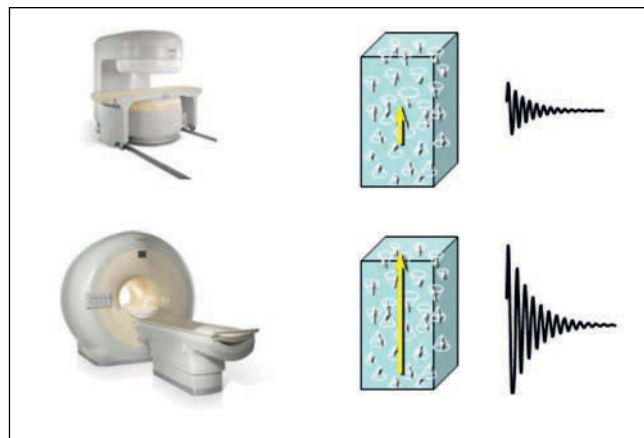


Figura 5. La señal inducida en la bobina que detecta la imantación transversal al campo estático B al apagarse el pulso de radiofrecuencia. La frecuencia de la oscilación es la frecuencia de la resonancia y el tiempo que tarda en amortiguarse es el tiempo de relajación. (delicadeza del Dr. Javier Lafuente)

recido en los últimos años. El problema tiene también una serie de connotaciones sociales y políticas que aún contribuyen mas a la dificultad de encontrar un mínimo consenso a partir de los artículos publicados ya que las noticias de los medios se mezclan con los trabajos científicos en la formación de opiniones alejadas en su origen en muchos casos de los requisitos exigidos por una auténtica opinión científica. Ante este panorama tan confuso es de gran utilidad recurrir a Instituciones de prestigio que han elaborado normativas a partir del análisis exhaustivo de la literatura científica publicada en revistas del SCI. En 1998 el Comité conocido como *International Commission Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP)* trabajando bajo los auspicios de la OMS estableció los límites de intensidades de CEM para las distintas frecuencias de los mismos tras analizar los artículos publicados. Estos límites se establecen con un margen de precaución como aquellos para los que CEM de intensidad inferior a los límites nunca se ha conocido rigurosamente que hubieran producido efectos de daño sobre la salud.

El planteamiento de los grupos más exigentes con las medidas de precaución está basado en el hecho de que nadie puede asegurar que los CEM no puedan influir negativamente en la salud humana. Aunque es obvio que vivimos gracias a la energía electromagnética que nos llega del Sol, que estamos sumergidos en campos eléctricos y magnéticos atmosféricos, que las interacciones electromagnéticas que gobiernan la

química de la vida constituyen la base física de la biología y que la acción de CEM de la misma intensidad que los CEM existentes en la Naturaleza es de esperar que no produzcan daños importantes, el principio esgrimido por estos grupos de extrema sensibilidad no deja de ser cierto. En efecto, nadie puede decir con certeza absoluta que los campos electromagnéticos de intensidad inferior a un cierto umbral aplicados durante un cierto intervalo de tiempo a un ser humano no hacen daño a la salud. Lo que si se puede decir y de hecho dice con rotunda nitidez la página web de la Organización Mundial de la Salud, OMS (ó WHO en inglés), fechada en 2012 es: *A number of national and international organizations have formulated guidelines establishing limits for occupational and residential EMF exposure. The exposure limits for EMF fields developed by the International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP)- a non-governmental organization formally recognised by WHO, were developed following reviews of all the peer-reviewed scientific literature, including thermal and non-thermal effects. The standards are based on evaluations of biological effects that have been established to have health consequences. The main conclusion from the WHO reviews is that EMF exposures below the limits recommended in the ICNIRP international guidelines do not appear to have any known consequence on health.*

En este párrafo se resume lo que es el estado actual de la ciencia respecto al efecto de los campos electromagnéticos sobre la salud. Dice la OMS en 2012, que La Comisión Internacional de Protección sobre la Radiación No Ionizante, tras revisar la literatura científica, mas de 25000 artículos publicados en revistas reconocidas y recogidas en el Science Citation Index durante los últimos treinta años y la mayoría sobre campos de 50 ó 60 Hz, al ser los más comunes hasta ahora, así concluye: *que no parecen producir daños conocidos sobre la salud para intensidades de campo inferiores a los límites de exposición fijados por esta misma Comisión en 1998.* Si se puede decir, por tanto, que el análisis de una enorme cantidad de datos permite inferir que no se detectan daños producidos por campos cuya intensidad se mantiene inferior a un cierto umbral. No obstante en el mismo documento de la OMS ó WHO se recoge, como se muestra a continuación, que existen algunos vacíos en el conocimiento de los efectos biológicos de los campos que

justifican mantener las investigaciones en el sentido de profundizar en ellos. Los efectos biológicos desconocidos no tienen asociado necesariamente ningún carácter de daño a la salud ya que en ese caso se habría indicado en el párrafo anterior en que se reconoce que no se detectan daños conocidos; finalmente, la OMS indica: *In the area of biological effects and medical applications of non-ionizing radiation approximately 25,000 articles have been published over the past 30 years. Despite the feeling of some people that more research needs to be done, scientific knowledge in this area is now more extensive than for most chemicals. Based on a recent in-depth review of the scientific literature, the WHO concluded that current evidence does not confirm the existence of any health consequences from exposure to low level electromagnetic fields. However, some gaps in knowledge about biological effects exist and need further research.*

No debe extrañar ni presentar contradicción con lo comentado el que muchos trabajos publicados, muchos investigadores científicos y que varias organizaciones sociales y políticas soliciten que se aumenten las precauciones y se rebajen las intensidades definidas por el ICNIRP. Estas solicitudes y/o sugerencias no cambian la definición científica de la línea que define el límite de intensidades por debajo del cual no existe evidencia de daño conocido par la salud.

Las intensidades límites indicadas por la ICNIRP, han sido aceptadas por la OMS, la Agencia Internacional contra el Cáncer, y la Comisión Europea en la Recomendación 1999/519/CE. El Comité de Expertos del Ministerio de Sanidad y Consumo creado en 2000 y el Comité Asesor de Radiofrecuencias y Salud creado bajo los auspicios de la Fundación Complutense en 2005. En estos párrafos de la OMS y en los documentos del ICNIRP, aceptados por muchas asociaciones científicas de prestigio, es donde se encuentra el máximo esfuerzo de síntesis de una literatura científica tan extremadamente compleja.

CONCLUSIÓN

Las sombras de Paracelso y Mesmer continúan gravitando en el entorno del Magnetismo de hoy. Junto a los siempre presentes especuladores filosóficos otros

más austeros investigadores han continuando abriendo el camino del conocimiento científico sobre el magnetismo real de nuestro cuerpo, el asociado a los electrones, protones y corrientes eléctricas que fluyen por nuestras arterias y comunican nuestras neuronas. Las consecuencias de este conocimiento científico sí que están siendo ciertamente beneficiosas para nuestra salud. A veces se tiende a asociar la poesía más con la fábula y ficción científica que con la propia ciencia. ¿No es hora de que descubramos la estética en la verdad científica? ¿No es bello saber que la mayoría de nuestra masa está formada por protones que son brújulas que permiten observarnos por dentro con una nitidez nunca soñada?



Figura 6. El mesmerismo permanece vivo en 2014. Foto tomada en Francia este año. (Delicadeza del Dr. Juan Rojo)