

El

Glución

Las grandes preguntas de la Física

Publicación del Instituto de Física, UNAM

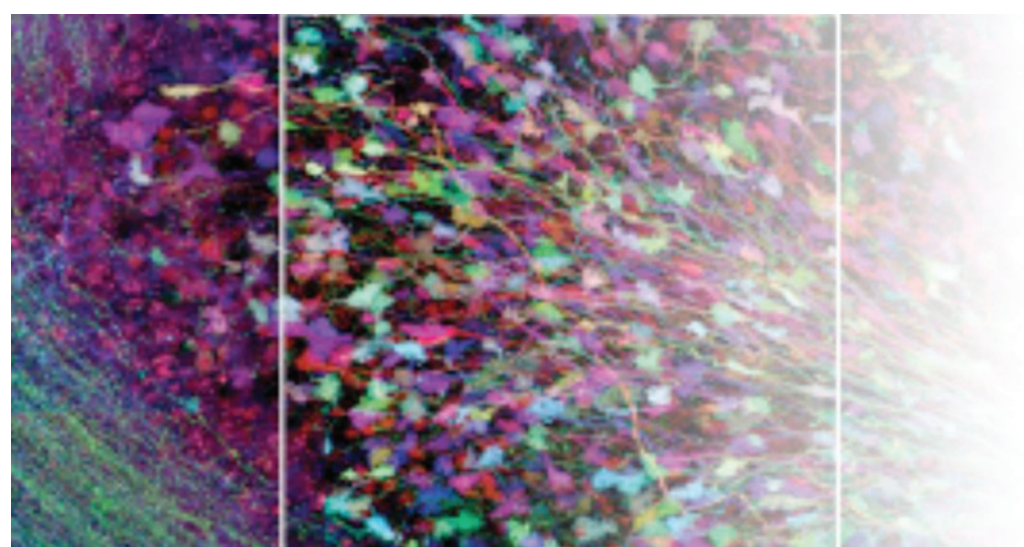
Mayo 2011, No. 16

LUIS OLIVARES QUIROZ

JORGE PEON

DANY P. PAGE





Índice

Optogenética y proteínas fluorescentes: Induciendo, silenciando e iluminando la actividad celular. <i>Luis Olivares Quiroz</i>	• 3 •
Radiación láser pulsada revela la dinámica del adn en tiempo real. <i>Jorge Peon</i>	• 7 •
Superfluidez en estrellas de neutrones. <i>Dany P. Page</i>	• 10 •

Directorio



Dr. José Narro Robles
Rector

Dr. Eduardo Bárzana García
Secretario General

Lic. Enrique del Val Blanco
Secretario Administrativo

Dr. Carlos Arámburo de la Hoz
Coordinador de la Investigación Científica

Guillermo Monsivais Galindo
Director

Comité Editorial

Raúl Esquivel Sirvent
Guillermo Ramírez Santiago
Mercedes Rodríguez Villafuerte
Víctor Romero Rochín
Manuel Torres Labansat

.....

El Gluón, las grandes preguntas de la física,
es una publicación del Instituto de Física.
Prohibida la reproducción parcial o total
del contenido, por cualquier medio impreso
o electrónico sin la previa autorización.

Dulce María Aguilar Téllez
Diseño Gráfico y Formación

Gustavo Gómez Macías
Desarrollo Web

Mario Monroy Escamilla
Apoyo Técnico

OPTOGENÉTICA Y PROTEÍNAS FLUORESCENTES: INDUCIENDO, SILENCIANDO E ILUMINANDO LA ACTIVIDAD CELULAR.

Optogenética: La Nueva Revolución Biofísica.

A finales del año pasado, la prestigiosa revista Nature seleccionó como el método experimental del año a la técnica conocida hoy en día como Optogenética (Optogenetics). Tal distinción no es de ninguna manera trivial ni azarosa. La optogenética iniciada hace aproximadamente una década, ha demostrado ya dejar de pertenecer a la ciencia ficción para insertarse monumentalmente como una técnica experimental perfectamente plausible y que está iniciando indudablemente la siguiente revolución en nuestra comprensión de los delicados mecanismos biológicos que dirigen y forman la complejidad de los seres vivos.

En esencia, la optogenética es una técnica experimental que, mediante la inserción de genes específicos, permite la expresión de proteínas sensibles a distintas longitudes del espectro electromagnético en el interior de una célula, pudiendo modificar y vigilar el comportamiento y dinámica de algunas componentes de la maquinaria celular. Uno de los ejemplos más concretos y en el cual se ha reportado un mayor éxito es la modificación del potencial electrostático en la membrana celular de células excitables como es el caso de las neuronas, las células del músculo cardíaco y células β en los tejidos del páncreas que controlan la liberación de insulina [1]. En las neuronas, por ejemplo, la depolarización e hiperpolarización de la membrana celular da origen a la activación o inhibición de las señales eléctricas (spiking) que dan origen a la comunicación inter-neuronal. De forma entonces que controlando la depolarización o hiperpolarización de la membrana neuronal es posible inducir o inhibir la frecuencia de disparo y por tanto, la funcionalidad y comunicación de estas neuronas con sus vecinas.

A fin de hacer funcionar esta técnica se requieren proteínas que puedan funcionar como interruptores de los canales iónicos que inducen la polarización, en un sentido u otro, de la membrana celular. Mucho se discutió en su momento sobre la factibilidad ya sea de hallar este sistema en la Naturaleza o de nuestra capacidad para generarlo mediante ingeniería genética. Después de identificar una proteína con características similares

en ciertas algas marinas y de cierta ingeniería genética se pudo concretar la síntesis de Channelrhodopsin-2 (ChR2), la primera proteína capaz de funcionar como interruptor de los canales iónicos de calcio, potasio y sodio que controlan los potenciales de acción (action potentials) en células excitables [2]. Cuando se expresa en una neurona y se expone a luz azul, la proteína depolariza la membrana celular forzando a la neurona a emitir una señal eléctrica (spike) [3].

Es posible también inhibir y reducir la frecuencia de disparo de las neuronas mediante la hiperpolarización de la membrana celular a través del acoplamiento de la proteína Halorhodopsina (NpHR) a la membrana celular. Al ser excitada por luz amarilla, la NpHR funciona como un interruptor que “abre” los canales de potasio permitiendo la liberación de iones K^+ haciendo que el potencial electrostático de la membrana se haga más negativo [3]. En un estado de hiperpolarización, la frecuencia de spiking de las neuronas se hace mucho menor (Figura I).

Las posibilidades de la modificación de la frecuencia de respuesta de una célula excitable no sólo se han explorado en el campo de las neuronas. Recientemente, un grupo de investigadores en la Universidad de California, San Francisco, ha logrado inducir taquicardias, bradicardias e incluso paro cardíaco en las células cardíacas que controlan el latido del corazón en peces cebra (*Danio rerio*) mediante la expresión de proteínas de tipo interruptor canal iónico como las discutidas anteriormente,

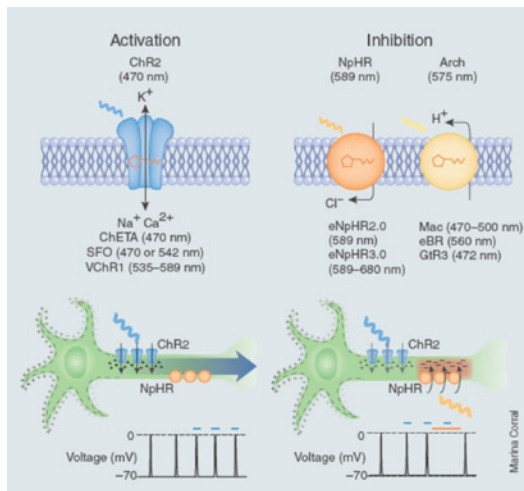


Figura 1. Ilustración del acoplamiento de las proteínas ChR2 y NpHR a la membrana celular de una neurona y que permiten, mediante su activación por luz visible, inducir o inhibir la frecuencia de disparo (spiking) de una neurona. Figura tomada de la referencia [3].

ChR2 y NpHR [4]. Los resultados de este estudio son notables. Es posible, por ejemplo, pasar de una condición de taquicardia (exceso de la frecuencia cardiaca) a una bradicardia, (descenso de la frecuencia a menos de 50 latidos /minuto) mediante la excitación de las proteínas con patrones de luz específicos. La especificidad con que es posible “marcar” las células que se desean excitar o inhibir es también un elemento crucial que abre enormes posibilidades biomédicas en el tratamiento de enfermedades cardiacas actualmente intratables y degenerativas. Los resultados publicados por Arrenberg et al son en realidad los precursores del primer marcapasos óptico [4] de la era moderna.

Iluminando el Interior Celular. “Brainbow”.

En ocasiones no se desea modificar propiamente el comportamiento de una célula, sino sólo identificarla y monitorear su comportamiento durante un proceso bioquímico determinado. El descubrimiento de la proteína verde fluorescente, (GFP, por sus siglas en inglés) en organismos marinos bioluminiscentes, la identificación del gen responsable para la expresión de la proteína y las técnicas experimentales necesarias para su implantación en mamíferos llevó a Shimomura, Chalfie and Tsien a obtener el Premio Nobel de Química en 2008 [5] y llevaría el monitoreo de la actividad celular a una escala totalmente diferente.

GFP pertenece a una familia de proteínas fluorescentes denominadas FP’s caracterizadas por una masa molecular de 25 kDa formada por 220-240 aminoácidos agrupados en una estructura de barril compacta formada por 11 hojas β que encierran a una hélice en su interior. La hélice α contiene el grupo cromóforo formado por sólo tres aminoácidos en las posiciones 65, 66 y 67 que mediante un mecanismo de intercambio de protones es fluorescente en distintas regiones del espectro electromagnético. GFP, particularmente, muestra un pico de emisión máximo en la longitud de onda correspondiente al verde al ser excitada mediante luz azul o UV [6]. Esta propiedad y el hecho de que no requerir de co-factores adicionales para su excitación, hacen a GFP extremadamente interesante a fin de “marcar” a un grupo de células en específico mediante la clonación del gen correspondiente y su expresión dentro de la célula a marcar. Dicho en una frase parece trivial y simple, sin embargo tuvieron que pasar más de 40 años para que GFP pasara desde su identificación en la medusa marina *Aequorea victoria* a la identificación del gen correspondiente, su implementación en organismos procariontas y eucariotas y la observación por primera vez del interior de organismo multicelular [5].

El primer organismo superior en ser iluminado mediante la expresión de proteínas GFP fue el nematodo *C. elegans*, el cual al ser transparente facilita la visualización directa de la emisión de luz verde de las proteínas GFP [7]. En un trabajo espectacular que alcanza ya más de tres mil citas,

Chalfie et al expresaron el gen que codifica a GFP en células eucariotas y procariotas, particularmente en los organismos *E. coli* y *C. elegans* [7]. En ambos casos, la proteína expresada mostró un alto grado de estabilidad alcanzado los 10 minutos de actividad fluorescente antes de ser degradada por la maquinaria celular. Tomando en cuenta que muchos procesos bioquímicos se desarrollan en una escala de tiempo dos o tres órdenes de magnitud menor, puede decirse que GFP es un excelente candidato para monitorear muchos procesos bioquímicos.

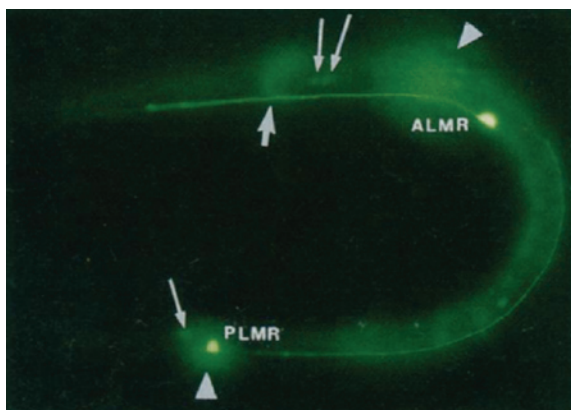


Figura 2. Expresión de la proteína GFP en la primera etapa larvar del nematodo *C. elegans* en dos células neuronales perfectamente identificadas, ALMR y PLMR. La línea delgada también iluminada muestra el nervio principal que conecta el sistema neuronal de *C. elegans*. Figura tomada de la referencia [7].

La explicación del mecanismo físico detrás de la fluorescencia de GFP y otras proteínas similares por Tsien [8] ha permitido generar una paleta muy vasta de proteínas que fluorescen en prácticamente todas las frecuencias del espectro visible. Particularmente es el caso de la familia de proteínas DsRed que tienen un pico de emisión en el rojo puesto es justo en esta longitud de onda que los tejidos de mamíferos presentan un menor grado de atenuación y absorción de la señal permitiendo una visualización más intensa y con menor interferencia.

En un trabajo publicado en Nature en 2007, Livet et al utilizaron tres proteínas fluorescentes XFP de la paleta de colores que emiten en el amarillo, cian y rojo expresándolas en el sistema neuronal de un ratón [9]. Las proteínas utilizadas son el equivalente al sistema de colores que permite iluminar los píxeles de una pantalla y generar toda una gama de colores. Esta técnica permite generar lo que se denominó brainbow, un mapa visual completo de las conexiones inter-sinápticas de la

red neuronal. Mediante combinaciones adecuadas de esta paleta básica de colores, es posible representar hasta 90 tonalidades que pueden mapear distintos axones y conexiones inter-sinápticas.

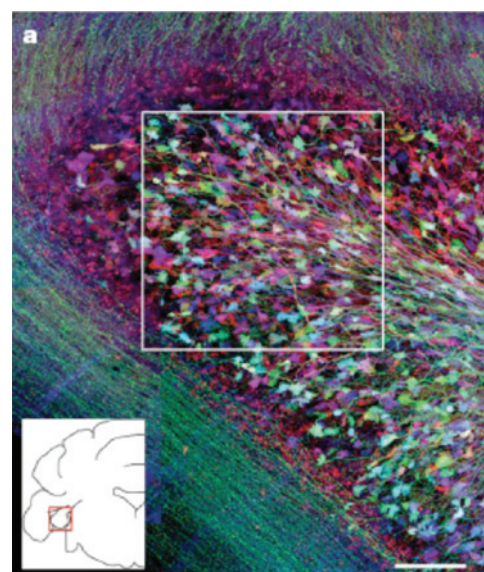


Figura 3. Sección del cerebelo de un ratón en donde se han expresado las proteínas fluorescentes XFP que emiten en la paleta básica de colores amarillo, cian y rojo. El corte comprende aproximadamente 341 axones y 93 células granulares. Tomada de la referencia [9].

Perspectivas.

Las posibilidades de la optogenética y las proteínas fluorescentes como inhibidores, activadores y monitores de la actividad celular está apenas iniciando. Los primeros experimentos muestran la viabilidad de la técnica, a la vez que sus limitaciones. Una de las mayores ventajas de la técnica es el hecho de que las proteínas XFP y los interruptores de canales iónicos Channelrhodopsina-2 y NpHR no requieren de otras enzimas o co-factores para expresarse adecuadamente, de forma entonces que su activación sólo se logra a través de la excitación por luz en la longitud de onda adecuada. Asimismo, hasta el

momento ningún estudio parece mostrar evidencia de niveles de toxicidad para las células. En el lado de las desventajas existe una problemática no del todo resuelta: la estabilidad termodinámica de las proteínas. Los trabajos de Tsien mostraron que la actividad fluorescente está asociada principalmente al hecho de que el grupo cromóforo se halla “blindado” por las once hebras beta que forman el barril de GFP y que es típica de las proteínas fluorescentes. Al desnaturalizarse, sin embargo, el grupo cromóforo queda expuesta a las enzimas del medio celular, perdiéndose todo rastro de la actividad fluorescente. Es entonces de crucial importancia generar mutantes que al mismo tiempo de ser fluorescentes sean lo suficientemente robustas para evitar la desnaturalización en condiciones aún más extremas de pH y temperatura.

Las implicaciones biomédicas en el tratamiento de muchos padecimientos hoy intratables son fascinantes. Estudios recientes del padecimiento de Alzheimer identifican como un factor importante

para la desincronización neuronal al flujo irregular de iones de Ca^{2+} . Las proteínas del tipo Channelrhodopsin-2 y NpHR podrían ser los precursores del tratamiento optogénico futuro de éste y otros padecimientos al poder ser controlados eventualmente con tal precisión que ciertos grupos de neuronas podrían ser silenciadas en tanto que otras podrían ser activadas con patrones específicos de luz. Por otro lado, patologías como taquicardias y bradicardias están también en el horizonte no lejano. Las siguientes décadas seguramente verán la explosión de estas técnicas hoy todavía en el laboratorio.

Referencias

- [1] Editorial and Primer. *Nature Methods* 8 (1), 25-25, (2011).
- [2] Zhang F, Wang LP, Boyden ES and Deisseroth K. *Nature Methods* 3, 785, (2006).
- [3] Deisseroth K. *Nature Methods* 8, 26, (2011).
- [4] Arrenberg AB, Stainier D Y R, Baier H and Huisken J. *Science* 330, 971, (2010)
- [5] The Nobel Prize in Chemistry 2008. <http://nobelprize.org>
- [6] Chudakov D M, Matz M V, Lukyanov S and Lukyanov K. A. *Physiol Rev* 90, 1103, (2010).
- [7] Chalfie M, Tu Y, Euskirchen G, Ward W W. *Science* 263, 5148, (1994).
- [8] Tsien R. *Angew Chem Int Ed* 48, 5612, (2009)
- [9] Livet J, Weismann T A, Kang H, Draft R W, Lu J, Bennis R A, Sanes J R and Lichtman J W. *Nature* 450, 56, 2007.

RADIACIÓN LÁSER PULSADA REVELA LA DINÁMICA DEL ADN EN TIEMPO REAL

La naturaleza microscópica de la materia a nivel molecular no es la única dificultad que enfrentamos para el estudio de sus fenómenos a esta escala. Resulta que, precisamente debido a las distancias involucradas, los fenómenos a este nivel ocurren en tiempos en suma breves. Dicha escala temporal puede estimarse considerando el hecho de que el movimiento vibracional en moléculas y sólidos se lleva a cabo con velocidades hasta del orden de 10 km/s, involucrando distancias de tan sólo unos angstroms, con lo cual el registro directo de eventos de transformación molecular requiere de una resolución temporal del orden de los femtosegundos (10^{-15}) y attosegundos (10^{-18}) [1].

Gracias a los desarrollos en la generación de luz pulsada que se han dado durante las últimas dos décadas, hoy en día es posible hacer observaciones directas de la dinámica de ruptura y formación de enlaces químicos, así como de los cambios de configuración electrónica que son la esencia de los fenómenos de transformación de la materia. Como se verá más adelante, esto ha permitido comprender la complejidad real tanto de procesos químicos como biológicos; e incluso, ha sido fuente de inspiración en el diseño de nuevos compuestos y materiales [2]. La esencia de muchos de los experimentos en esta área descansa en la idea de iniciar un proceso de transformación al hacer incidir sobre la muestra un pulso láser de inicio (comúnmente conocido como pulso de “bombeo”) y de seguir los cambios inducidos mediante mediciones espectroscópicas que requieren de uno o más pulsos ópticos consiguientes; éstos atraviesan la muestra después de un tiempo de evolución bien conocido, que también puede ser controlado con resolución del orden de la duración de los pulsos.

El avance más importante para la generación de pulsos luminosos con duración ultracorta (del orden de 10^{-15} s) consistió en el diseño de cavidades ópticas, donde fue posible fijar la relación de fases entre los modos longitudinales de un láser de Titanio: Zafiro, incluyéndose un ancho de banda de hasta decenas de nanómetros alrededor de la longitud de onda central de 800 nm (fenómeno conocido como de amarre de modos o “mode-locking”) [3]. Tales diseños permitieron generar secuencias de pulsos con duración de menos de 10 femtosegundos, pero

con energía de tan sólo unos cuantos nanojoules. Para lograr las intensidades necesarias en aplicaciones experimentales, el desarrollo anterior fue complementado con técnicas de amplificación por el método de dispersión-amplificación-re-compresión (“chirped pulse amplification”), según el cual, el pulso es alargado temporalmente antes de su amplificación y, más tarde, recomprimido a su duración original. Nótese que el alargamiento temporal reversible es esencial para poder amplificar pulsos ópticos al nivel de varios milijoules [4]. Finalmente, la aplicación de estos pulsos a las diferentes situaciones experimentales requiere de la transformación de su frecuencia, para lo cual ha sido esencial la aplicación de múltiples técnicas de óptica no lineal, gracias a las que es posible contar con fuentes pulsadas en prácticamente cualquier región del espectro electromagnético [5]. Es importante resaltar que a pesar de que hoy en día se pueden hacer mediciones espectrales desde la zona del ultravioleta hasta el infrarrojo lejano, la fuente inicial sigue siendo, en la mayoría de los casos, un oscilador óptico de Titanio:Zafiro que opera alrededor de 800 nm, y cuyos pulsos son transformados de múltiples maneras para las diferentes mediciones.

Para mostrar la versatilidad de las técnicas espectroscópicas modernas, nos enfocaremos en una línea de investigación reciente: Se presenta a continuación el estado del arte en las exploraciones sobre la evolución de los estados electrónicamente excitados de los componentes del ácido desoxirribonucleico (ADN).

La Fotofísica del ADN

El estudio por espectroscopia ultrarrápida de las bases nitrogenadas que conforman el ADN (adenina, timina, guanina y citosina), ha revelado que estas moléculas cuentan con propiedades insospechadas con anterioridad y que, al menos en parte, explican las razones por las cuales fueron evolutivamente seleccionadas durante el desarrollo de los sistemas biológicos más primitivos.

La luz solar es esencial para la vida en la tierra ya que gracias a ella se dan los procesos fotosintéticos y se estabiliza la temperatura terrestre. A pesar de esto, los fotones que recibe la tierra incluyen radiación con longitudes de onda en el ultravioleta ($\lambda < 400$ nm), la cual es altamente dañina por su alta capacidad para inducir transformaciones fotoquímicas degradativas. De hecho, fue durante las primeras etapas de la evolución química y biológica, cuando la densidad de radiación UV en la superficie terrestre alcanzó su grado máximo, dado que no fue sino hasta la generación indirecta de la capa de ozono por las plantas primitivas, que esta región del espectro pudo ser filtrada por las capas superiores de la atmósfera [6]. La gran densidad de esta radiación aparentemente desencadenó una “selección natural fotoquímica” de la cual, al parecer, las bases del ADN sobrevivieron gracias a sus mecanismos fotofísicos, que las vuelven intrínsecamente fotoestables, según se descubrió mediante técnicas de espectroscopia ultrarrápida según se relata a continuación.

A principios de la década pasada, algunos grupos de investigación decidieron estudiar la dinámica resultante de la absorción de luz UV por las diferentes bases nitrogenadas; esto requirió de la adaptación de diversas técnicas de espectroscopia ultrarrápida, a la zona del UV [7,8]. Los experimentos se realizaron de la siguiente manera: se hizo incidir un pulso de luz UV (266 nm, 10 fs) en muestras de nucleósidos en solución acuosa, que lleva a las moléculas a estados electrónicamente excitados (estados S_1). En general, las moléculas orgánicas que han sido llevadas a tales estados o configuraciones electrónicas son sumamente reactivas, debido a que, en presencia de otros compuestos, existen reacciones de transferencia de electrones que dan origen a especies radicalarias (aniónicas y catiónicas), las cuales, a su vez también son sumamente reactivas. La evolución de las moléculas en este estado se detectó mediante otros pulsos de luz que indujeron transiciones consiguientes ($S_1 \rightarrow S_n$), y cuya señal de absorbancia óptica indicó la población de moléculas que aún existían en el estado originalmente formado. Existe otro tipo de experimentos con los que se detectaron con resolución de femtosegundos a los

fotones que son emitidos de manera espontánea desde el estado S_1 [9]. Esto se logró al hacer interactuar a los fotones emitidos con fotones de un pulso de medición (frecuentemente llamado pulso de “compuerta”), lo cual redundó en señales sobre la intensidad de emisión en función del tiempo. Ambos tipos de experimentos pueden ser interpretados para medir el tiempo que las moléculas fotoexcitadas permanecen en el estado S_1 . Para sorpresa de los investigadores, este tipo de experimentos reveló que, a diferencia de la gran mayoría de las moléculas orgánicas, los nucleósidos decaen del estado S_1 en tiempos de tan sólo algunos cientos de femtosegundos [6,10].

Asimismo, en una nueva serie de experimentos fue posible determinar que la población de moléculas en el estado S_1 decaía a la par que recuperaba la población del estado electrónico basal (estado de origen, antes de la excitación), con lo que el sistema regresa a su situación de equilibrio en tiempos del orden de 10^{-13} segundos y donde la energía inicialmente absorbida se disipa en forma de colisiones con el disolvente acuoso. El fenómeno de relajación y las observaciones experimentales respectivas se resumen en la Figura 1. Es muy importante subrayar que este comportamiento es muy diferente al de la gran mayoría de los cromóforos, los cuales permanecen electrónicamente excitados en el estado S_1 por varios nanosegundos.

El fenómeno de relajación que fue descubierto por observaciones espectroscópicas ultrarrápidas, ha sido también estudiado mediante cálculos

mecánico-cuánticos, los cuales permiten mapear las superficies de energía potencial de las moléculas en sus diversos estados electrónicos. Resultante de tales cálculos, hoy en día se ha esclarecido que el mecanismo de la relajación de los componentes está asociado a la existencia de las llamadas “intersecciones cónicas” entre las superficies de energía potencial del estado S_1 y el estado basal. Las intersecciones cónicas son puntos o zonas en las superficies de energía potencial en las que ambos estados electrónicos tienen la misma energía. Debido a esto, cuando el sistema explora sus conformaciones nucleares en el estado S_1 , va a dar directamente a una especie de trampa energética en donde existe un muy fuerte acoplamiento entre el estado excitado y el basal. Esto último se traduce en una evolución del sistema hacia la superficie del estado basal [11]. Una vez que ha sucedido

esto, la molécula puede perder su exceso de energía (originalmente energía electrónica) mediante interacciones con el disolvente que la rodea. De nuevo, vale la pena resaltar que el mecanismo aquí descrito, presente en los constituyentes del ADN, no se encuentra frecuentemente en la mayoría de las moléculas orgánicas, indicándo que muy probablemente existieron mecanismos evolutivos que seleccionaron a las cuatro bases: adenina, timina, citosina y guanina, para conformar nuestro material genético.

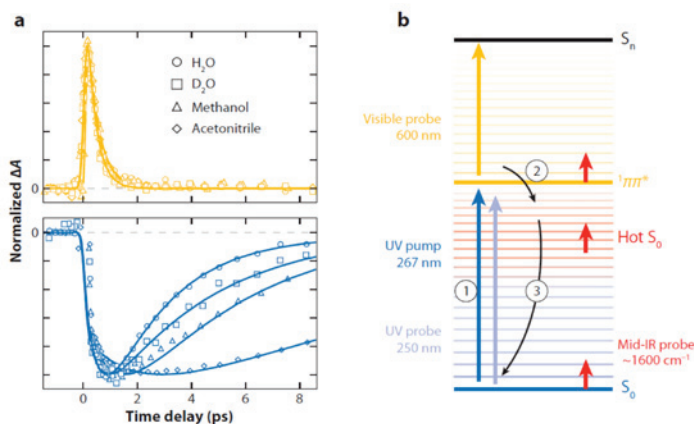


Figura tomada de: C.T. Middleton, K. de La Harpe, C. Su, Y.K. Law, C.E. Crespo-Hernandez and B. Kohler *Annual Review of Physical Chemistry* 60 217 (2009). Figure 2. a, b.

Figura 1. (a) Gráfico superior: Señal de absorbancia transitoria del estado S_1 como función del tiempo para 9-metiladenina en diversos disolventes. Gráfico inferior: Señales de absorbancia transitoria del estado electrónico basal para la misma molécula. Como se puede apreciar, la señal asociada a S_1 (transiciones $S_1 \rightarrow S_n$, flecha color naranja en el diagrama (b)) decae en menos de 300 fs debido a la recuperación de la población del estado electrónico basal. Dicha recuperación es seguida por el enfriamiento vibracional del sistema en la escala de varios picosegundos en los diversos disolventes (retorno de la señal a la línea base en varios picosegundos).

(b) Diagrama que indica las transiciones involucradas en el proceso: (1) Absorción de luz UV para generar el estado S_1 ($\pi-\pi^*$). (2) Conversión $S_1 \rightarrow$ estado electrónico basal. (3) Enfriamiento vibracional en el estado basal.

Bibliografía

- [1] A.H. Zewail *Angew. Chem., Int. Ed.* 39, 2586, (2000)
- [2] A.H. Zewail *Chem. Phys.* 378, 1, (2010)
- [3] D.E. Spence, P.N. Kean and W. Sibbett *Optics Lett.* 16, 42, (1991)
- [4] S. Backus, C.G. Durfee, III, M.M. Murnane and H.C. Kapteyn *Review of Scientific Instruments* 69, 1207, (1998)
- [5] K.R. Wilson and V.V. Yakovlev *J. Opt. Soc. Am. B* 14, 444, (1997)
- [6] C.T. Middleton, K. de La Harpe, C. Su, Y.K. Law, C.E. Crespo-Hernandez and B. Kohler *Ann. Rev. Phys. Chem.* 60, 217, (2009)
- [7] J.M.L. Pecourt, J. Peon and B. Kohler *J. Am. Chem. Soc.* 123, 10370, (2001)
- [8] P.M. Hare, C.E. Crespo-Hernandez and B. Kohler *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 104, 435, (2007)
- [9] J. Peon and A.H. Zewail *Chemical Physics Letters* 348, 255, (2001)
- [10] J.M.L. Pecourt, J. Peon and B. Kohler *J. Am. Chem. Soc.* 122, 9348, (2000)
- [11] L. Serrano-Andres and M. Merchan *J. Photochem. Photobiol., C* 10, 21, (2009)

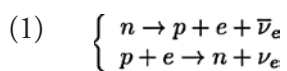
SUPERFLUIDEZ EN ESTRELLAS DE NEUTRONES

Estrellas de Neutrones

Las estrellas de neutrones son los objetos más densos observables en el Universo. Sólo son superadas por el interior de los hoyos negros, que no es observable. En colisiones relativistas de iones pesados, en RHIC o en el LHC, es posible alcanzar densidades superiores, pero con una enorme densidad de energía (cientos de GeV por nucleón), mientras que la materia en el interior de una estrella de neutrones es altamente degenerada.

En la Fig. 1 se presenta lo que, teóricamente, consideramos es la estructura de una estrella de neutrones. Con un radio de unos 10 km, el 98% de la masa se encuentra a densidades supra-nucleares en el núcleo de la estrella, mientras que una capa de aproximadamente un kilómetro de espesor, la corteza, está formada de núcleos atómicos. En la superficie tenemos una atmósfera, de unos cuantos centímetros de espesor, donde se forma el espectro térmico que podemos observar. A una densidad $\rho \sim 10^4 \text{ g cm}^{-3}$ la materia está totalmente ionizada y cuando $\rho > 10^6 \text{ g cm}^{-3}$ los electrones forman un gas de Fermi relativista. Dada la enorme energía en este gas de electrones, resulta energéticamente favorable fusionar parte de los electrones con protones, lo que resulta en núcleos cada vez más ricos en neutrones conforme aumenta la densidad. Cuando $\rho \sim 5 \times 10^{11} \text{ g cm}^{-3}$, el número de neutrones es tal que no caben más en los núcleos. Hemos alcanzado el punto de “goteo” de neutrones, donde además de los núcleos y el gas de electrones, tenemos un gas “libre” de neutrones. Al acercarse a la densidad nuclear, $\rho_0 \sim 2.8 \times 10^{14} \text{ g cm}^{-3}$, los núcleos se fusionan y entramos al “núcleo” de la estrella (“core” en inglés). En la zona de transición es muy probable que encontremos núcleos no esféricos, muy alargados (“espaguetis”) y bidimensionales (“lasañas”), lo que comúnmente se llama la fase “pasta” (ver recuadro “A” en la Fig. 1). Dadas las altas presiones en la corteza ésta debe ser sólida, muy probablemente en forma cristalina (recuadro “B” en la Fig. 1).

En el núcleo de la estrella, empezamos con un líquido cuántico de neutrones, protones y electrones. Las interacciones débiles, tipo β , como

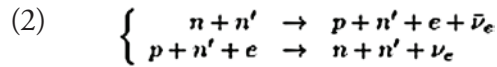


permiten ajustar las densidades n_n y n_p de nucleones. Debido a las diferencias de masas, la primera de estas reacciones ocurre espontáneamente en el vacío mientras que la segunda requiere de energía cinética en el estado inicial. En un medio denso las energías relevantes no son las masas, sino los potenciales químicos de las partículas, los cuales incluyen la masa, la energía cinética de Fermi y la energía potencial. Esta última requiere de un modelo de las interacciones fuertes a densidades supra-nucleares; el equilibrio energético y efecto de las reacciones β , determinan n_n y n_p . El resultado es que a $\rho = \rho_0$ los nucleones se distribuyen en una proporción de 5% de protones por 95% de neutrones, aunque la fracción de protones aumenta con la densidad. Nuevas partículas pueden aparecer a mayores densidades, como hiperones o condensados de mesones (π^- o K^-). El núcleo interior de la estrella, está marcada en oscuro en la Fig. 1, con un gran signo de interrogación, ya que existe la posibilidad de se alcance la densidad suficiente para inducir desconfinamiento de los quarks. Refiero el lector a [1] para más detalles y referencias a los trabajos originales.

Neutrinos

Producidas en explosiones de supernovas, con temperaturas iniciales superiores a los 50 MeV $\sim 50 \times 10^{10}$ K, las estrellas de neutrones jóvenes se enfrían por emisión de neutrinos, hasta llegar a una edad de unos 100,000 años, a partir de

lo cual la pérdida de energía por emisión de fotones térmicos en la superficie empieza a dominar. El proceso de emisión de neutrinos más eficiente es el descrito en la Eq. (1), llamado “Urca directo”, con una emisividad $\epsilon_{DUrca} \approx 10^{27} (T/10^9 \text{ K})^6 \text{ erg cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$. Esto implica que un metro cúbico de materia podría producir una luminosidad ($L = 3.8 \times 10^{33} \text{ erg s}^{-1}$) de neutrinos cuando $T=10^9 \text{ K}$. Sin embargo, la reacción (1) tiene una fuerte limitante: la conservación del momento, la cual requiere un concentración de protones superior al 15%; por lo cual el proceso Urca directo está cinemáticamente prohibido. Sin embargo, existen procesos como



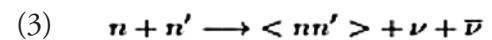
que proporcionan el momento faltante, aquí el neutrón n' es una partícula del medio. Nótese que el proceso (2), llamado “Urca modificado” por involucrar dos fermiones degenerados, comparado con el proceso (1) es mucho menos eficiente, $\epsilon_{MUrca} \approx 10^{21} (T/10^9 \text{ K})^8 \text{ erg cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$, con una dependencia en la temperatura de la forma T^8 en lugar de T^6 . El proceso (2) es el mecanismo estándar de enfriamiento y el proceso (1) sólo actúa a densidad altas, es decir en estrellas muy masivas.

Superfluidez y Superconductividad

La teoría BCS de superconductividad está basada en la formación de pares de Cooper y en la aparición de una brecha $\Delta(T)$ en el espectro de excitaciones, cuando la interacción entre fermiones es atractiva. La presencia de una brecha y consecuentemente la existencia de pares de Cooper en núcleos fue observada en 1958, poco tiempo después de la formulación de la teoría BCS y es un ingrediente esencial en los modelos de estructura nuclear. Para momentos $p < 1.5 \text{ fm}^{-1}$ la interacción nuclear n-n o p-p es atractiva en el canal 1S_0 (en notación espectroscópica: singlete de espín, momento angular orbital $L=0$ y $J=L+S=0$). Esto lleva a predecir que los neutrones deben de formar un superfluido en la corteza interna de una estrella de neutrones mientras que los protones, debido a su baja concentración, formarían un superconductor en el núcleo exterior. En el núcleo de la estrella el momento de Fermi de los neutrones es superior a 1.5 fm^{-1} y el canal 1S_0 se vuelve repulsivo. Sin embargo la formación de pares de Cooper en triplete de espín, en el canal atractivo 3P_2 , es

posible. A mas altas densidades es probable que los hiperones y/o los quarks formen superfluidos/superconductores. El interior de una estrella de neutrones es un paraíso para pares de Cooper, pero el calcular precisamente el tamaño de la brecha $\Delta(T)$, y el valor de T_c , es una pesadilla para el físico teórico. El caso del helio-3 es un ejemplo de ello y en el caso del apareamiento 3P_2 de los neutrones a densidades supra-nucleares las predicciones para Δ van desde casi 0 hasta más de 5 MeV.

La presencia de una brecha Δ en el espectro de excitaciones implica que cuando $T \ll T_c$ estas son fuertemente suprimidas, aproximadamente por un factor de Boltzmann $\exp(-\Delta(T)/T)$. En consecuencia, el calor específico C_v , así como todos los procesos de emisión de neutrinos en los cuales esta componente apareada participa, están exponencialmente suprimidos. Sin embargo, la transición de fase es de segundo orden, es decir continua. Cuando $T \sim T_c$, como es bien conocido en el caso de los superfluidos/superconductores terrestres, el calor específico C_v aumenta en un factor del orden 2.5. Otro aspecto del desarrollo progresivo del condensado es el constante rompimiento y formación de pares de Cooper, cuando $T \sim T_c$, y la posibilidad de que el condensado decaiga en un par neutrino - anti-neutrino:



donde $\langle nn' \rangle$ representa el condensado de pares de Cooper. Este “proceso de Cooper” puede ser mas eficiente que el Urca modificado (2) por mas de un orden de magnitud.

Enfriamiento y Superfluididez

Esta breve descripción permite esbozar el panorama de la evolución térmica de estrellas de neutrones: a partir de su nacimiento se enfrían por emisión de neutrinos y cuando alcanzan edades del orden de 10^5 años su evolución se determina por la emisión superficial de fotones.

La tasa de emisión de neutrinos es muy sensible a la composición de la materia a densidades supra-nucleares: cualquier cambio a la composición relativa de neutrones a protones resulta en emisividades de neutrinos altísimas y enfriamiento muy rápido. Tenemos un zoológico completo de modelos de materia ultra densa, casi todos prediciendo un enfriamiento rápido. Por otra parte, el enfriamiento rápido puede ser moderado por el apareamiento de las partículas, mientras la brecha, o la temperatura crítica, sea suficientemente grande. Nos encontramos con el problema de la casi imposibilidad de calcular con suficiente precisión el tamaños de las brechas relevantes y el hecho de que la emisión de neutrinos es controlada por estas brecha de manera exponencial. Las dos revisiones [2] y [3] presentan mas detalles sobre los mecanismos de enfriamiento.

Del lado observacional, tenemos una docena de estrellas de neutrones jóvenes con temperaturas estimadas. Sus altas temperaturas superficiales, entre 0.5 y 2×10^6 K, indican que ningún proceso Urca directo está actuando en ellas, al menos que esté fuertemente suprimido por apareamiento de las partículas que participen en el proceso. El “modelo mínimo” de enfriamiento [4] fue desarrollado con el fin de presentar un punto de referencia con el cual comparar estas observaciones e identificar posibles candidatas a estrellas conteniendo algún tipo de materia “exótica”. Este modelo excluye a priori cualquier forma de materia densa que resulte en enfriamiento rápido, es decir una alta concentración de protones, condensados de mesones, hiperones y quarks desconfiados. Sin embargo considera el efecto de la superconductividad / superfluididez de protones / neutrones, es decir el apareamiento, y el aumento en la emisión de neutrinos por el proceso de Cooper durante la transición de fase. Resulta que los procesos Urca modificados por sí mismos no son suficientemente eficientes para explicar la evolución de las estrellas mas frías pero sí se pueden interpretar las observaciones tomando en cuenta el proceso de Cooper, bajo una condición: la temperatura crítica máxima, T_c , para el apareamiento 3P_2 de los neutrones debe estar entre $1/2$ y 2×10^9 K [5]. En este rango de valores de T_c el proceso de Cooper domina el enfriamiento a edades entre unos cientos hasta unas decenas de miles de años de edad.

En el caso contrario debemos suponer la presencia de algún tipo de materia extra para entender la evolución de estas estrellas de neutrones jóvenes. En conclusión, hasta hace poco tiempo nos encontrábamos en una situación que requería de alguna nueva pista para poder avanzar.

El Caso de Cas A

Casiopeia A es un remanente de supernova en la constelación de Casiopeia. Por su interés astronómico, la NASA decidió inaugurar el satélite de rayos X Chandra, su “primera luz”, con una imagen de este remanente en agosto del 1999 (ver Fig. 2). ¡En el centro de la imagen apareció la estrella de neutrones, “Cas A”, formada por la supernova! Con una edad de unos 330 años es la estrella de neutrones más joven conocida. Al analizar 10 años de observaciones del remanente, y de su estrella, Craig Heinke y Wynn Ho encontraron que Cas A se había enfriado en un 4% del año 2000 al 2009 [5] y que ¡su flujo se había reducido en un 20%! Esta evolución es incompatible con casi todas la predicciones teóricas.

La luminosidad térmica de fotones de la estrella es $L_x \approx 10^{34}$ erg s^{-1} mientras que la tasa de enfriamiento observada, junto con una estimación del calor específico, requiere que la estrella esté perdiendo energía térmica a una tasa de 10^{38} erg s^{-1} . ¿Cuál puede ser el agente de enfriamiento que supere al de fotones por 4 órdenes de magnitud? Sólo puede ser la emisión de neutrinos.

Aunque un comportamiento como el de Cas A es sorprendente,

había sido descrito teóricamente con anterioridad (ver, e.g., la Fig. 6 en [5] o Fig. 8 en [2]). Después de afinar detalles, la interpretación resultó clara [7,8]: tras un lento enfriamiento previo, la temperatura interna T de Cas A alcanzó, en las últimas décadas, la temperatura crítica de superfluidez de los neutrones, T_c , lo cual disparó la fuerte emisión de neutrinos por el proceso Cooper. La figura 3 ilustra esto con tres modelos: a edades superiores a los 100 años, sin superfluidez ($T_c=0$), el enfriamiento es lento; al contrario, con una T_c demasiado alta ($T_c=10^9$ K), el enfriamiento rápido ocurre demasiado temprano y posteriormente el enfriamiento es también lento; mientras que con $T_c=5.5 \times 10^8$ K el enfriamiento rápido, pero transitorio, ajusta perfectamente las observaciones. Además de ser, posiblemente, la primera evidencia directa de la existencia de superfluidez a densidades supra-nucleares, esto nos proporciona una “medición” bastante robusta de la temperatura crítica T_c para los neutrones y los detalles del enfriamiento rápido implican también que los protones deben de ser superconductores con una temperatura crítica más alta. Si la interpretación resiste al tiempo, y el enfriamiento continua durante varias décadas como lo predice el modelo, estaríamos viendo en tiempo real una gran concentración de neutrones pasando por la transición de fase de superfluidez.

El Futuro: ¿Exótico?

Lo bizarro de un superfluido estelar ha recibido mucha cobertura mediática (ver, e.g., [9]). Sin embargo, lo más importante de estos resultados es que podemos, por lo menos en el caso de Cas A, borrar la zona oscura y el signo “?” en el centro de la Fig. 1. Hace seis meses estábamos todavía caminando en medio de una jungla de modelos, pero sólo uno de ellos parece sobrevivir a la observación del enfriamiento de Cas A que podría ser la “Piedra de Rosetta” de la física de materia ultra-densa. Es ciertamente sólo media piedra: hay evidencias de estrellas que sufren emisión de neutrinos todavía mucho más intensa como son los casos de SAX J1808.4-3658 y 1H 1905+00. Estos dos objetos están en sistemas binarios con acreción transitoria: cuando termina una fase de acreción esperamos ver la superficie caliente de la estrella,

sin embargo, ésta simplemente desaparece de la vista. Esto indica la presencia de algún proceso Urca directo. Por haber padecido acreción durante cientos de millones de años, o más, estas estrellas son probablemente más masivas que las

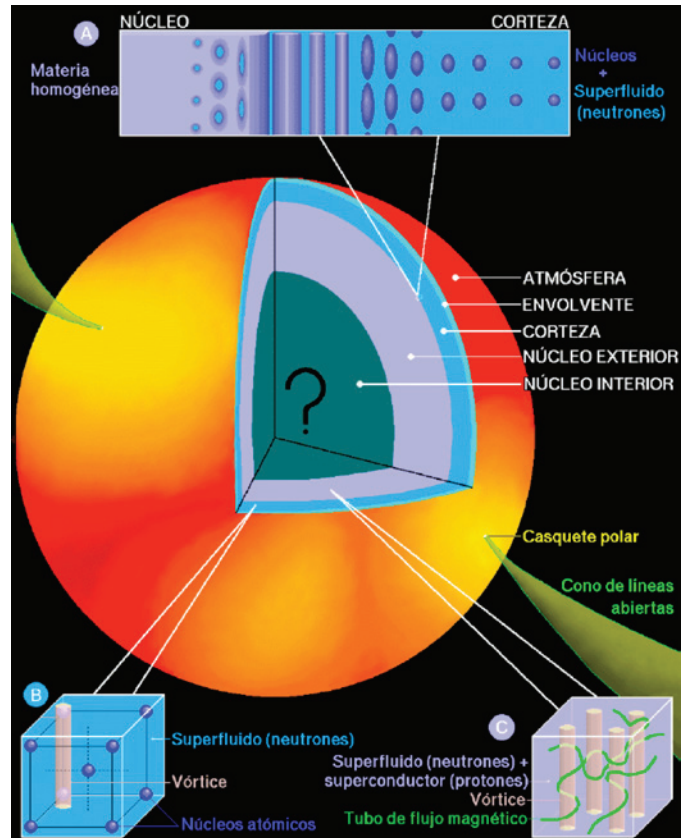


Fig. 1 Visión “artística” de una estrella de neutrones. (D. Page, en “Fronteras del Universo”, Ed. M. Peimbert, 2000, Fondo de Cultura Económica)

estrellas de primera generación como Cas A. Al considerar densidades más altas, alcanzadas en estrellas más masivas, el signo “?” vuelve a aparecer. Sin embargo, el entender con un sorprendente lujo de detalle, la estructura y la evolución de una estrella “mínima” como Cas A, nos abre el camino para identificar más claramente objetos realmente “exóticos”.

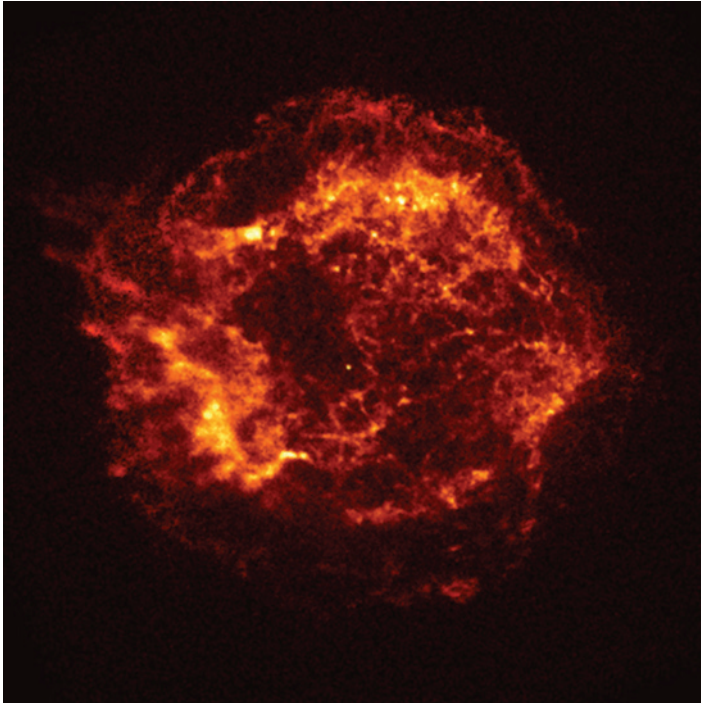


Fig. 2 El remanente de supernova Casiopeia A en rayos X: primera luz de Chandra, en agosto del 1999. El punto brillante en su centro es la estrella de neutrones, descubierta en esta observación. (Crédito: NASA/CXC/SAO)

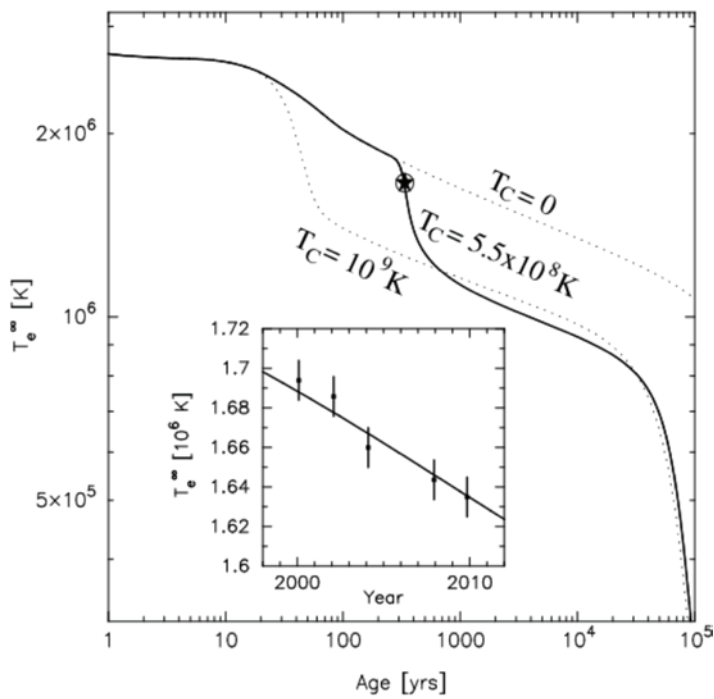
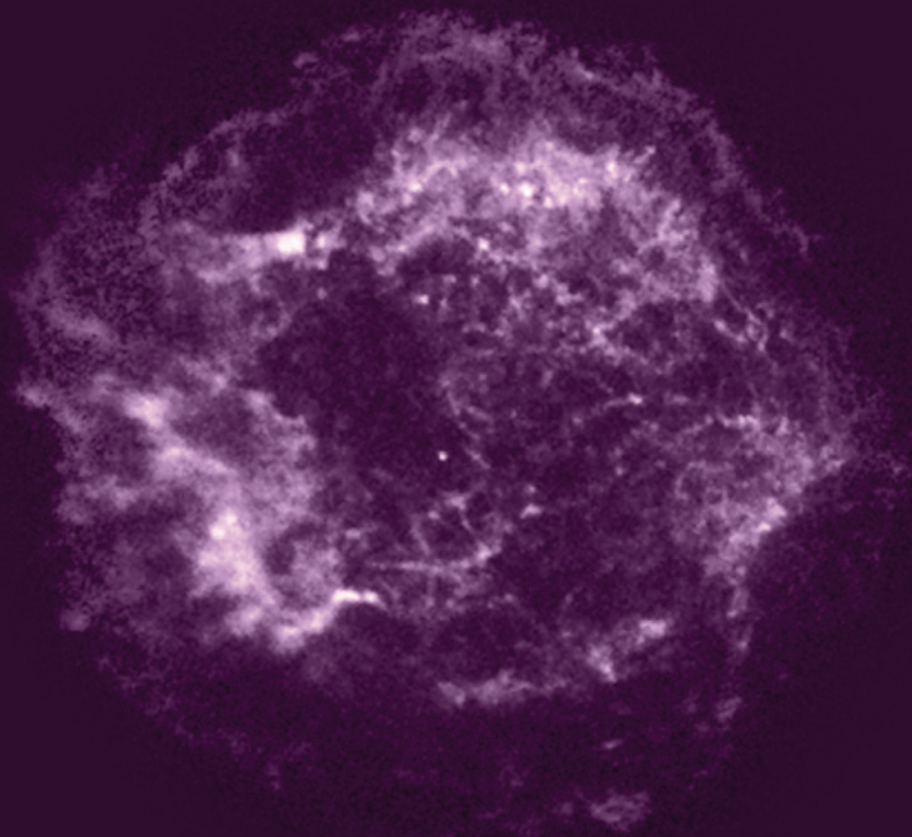


Fig. 3 Tres modelos de enfriamiento, temperatura efectiva "al infinito" T_e^∞ vs edad: ver texto para descripción. La estrella marca el valor observado de Cas A y el recuadro detalla el ajuste del modelo con las cinco observaciones de Chandra. (Adaptado de la Ref. [8])

Referencias:

- [1] Page, D., & Reddy, S., “Dense Matter in Compact Stars: Theoretical Developments and Observational Constraints”, *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* 56, 327, (2006)
- [2] Yakovlev, D. G., & Pethick, C. J., “Neutron Star Cooling”, *Annu. Rev. Astronom. & Astrophys.* 42, 169, (2004)
- [3] Page, D., Geppert, U., & Weber, F., “The Cooling of Compact Stars”, *Nucl. Phys. A* 777, 497, (2006), numero especial sobre Nuclear Astrophysics.
- [4] Page, D., Lattimer, J. M., Prakash, M., & Steiner, A. W., “Minimal Cooling of Neutron Stars: A New Paradigm”, *Astrophys. J. Suppl.* 155, 623, (2004).
- [5] Page, D., Lattimer, J. M., Prakash, M., & Steiner, A. W., “Neutrino Emission from Cooper Pairs and Minimal Cooling of Neutron Stars”, *Astrophys. J.* 707, 1131, (2009)
- [6] Heinke, C. O., & Ho, W. C. G., “Direct Observation of the Cooling of the Cassiopeia A Neutron Star”, *Astrophys. J. Lett.* 719, 167, (2010)
- [7] Shternin, P. S., Yakovlev, D. G., Heinke, C. O., Ho, W. C. G., & Patnaude, D. J., “Cooling Neutron Star in the Cassiopeia-A Supernova Remnant: Evidence for Superfluidity in the Core”, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.: Lett.* 412, 108, (2011)
- [8] Page, D., Prakash, M., Lattimer, J. M., & Steiner, A. W., “Rapid Cooling of the Neutron Star in Cassiopeia A Triggered by Neutron Superfluidity in Dense Matter”, *Phys. Rev. Lett.* 106, 081101, (2011)
- [9] “Cassiopeia A: NASA’s Chandra Finds Superfluid in Neutron Star’s Core”: <http://chandra.harvard.edu/photo/2011/casa/>



Instituto de Física, UNAM
Ciudad Universitaria, Mayo de 2011, No. 16
www.fisica.unam.mx/elgluon