



# CARGAS ELÉCTRICAS FRACCIONARIAS. ¿SE PODRÁ DIVIDIR AL ELECTRÓN? (PREMIO NOBEL DE FÍSICA 1998)

MÁXIMO AGÜERO GRANADOS\* Y ABRAHAM MEDINA OVANDO\*\*

*Recepción: 20 de enero de 1999*

*Aceptación: 04 de mayo de 1999*

En 1998, el premio Nobel de Física fue otorgado a Robert Laughlin de la Universidad de Stanford, a Horst Stormer de la Universidad de Columbia, y los Laboratorios Bell y a Daniel Tsui de la Universidad de Princeton, todos ellos de los Estados Unidos de Norteamérica. El famoso premio se entregó por el descubrimiento y por la explicación científica del fenómeno llamado Efecto Hall Cuántico Fraccionario (EHCF). En términos sencillos, este fenómeno consiste en que la carga eléctrica es transportada a través de una capa muy delgada de material, es decir, a través de una capa de dos dimensiones, por ciertas entidades físicas que transportan fracciones o "pedazos" de la carga total del electrón.

Pero veamos un poco de historia. El efecto o fenómeno Hall fue descubierto en 1879 por Edwin Hall, cuando todavía era un estudiante de posgrado de la Universidad de Johns Hopkins en Maryland. Un voltaje a lo largo de una hoja delgada de un material conductor aparece cuando la corriente eléctrica es enviada a través de la hoja en presencia de un campo magnético perpendicular al plano de ésta. A dicho voltaje se le llama voltaje Hall. Normalmente, éste es proporcional al campo magnético aplicado. Además, como también es proporcional a la densidad de elementos que llevan carga, tal efecto ofrece un método conveniente para medir las densidades de cargas eléctricas en varios materiales, el cual es usado ordinariamente en los labora-

torios de física de la gran mayoría de las universidades del mundo.

No obstante, a bajas temperaturas las leyes de la mecánica cuántica alteran el efecto Hall significativamente, si los cargadores están confinados para moverse solamente en un plano, es decir, en un espacio de sólo dos dimensiones (por ejemplo, a lo largo de una superficie interna de una capa de algún material semiconductor). Con los avances fantásticos en la tecnología de nuestros días, estas estructuras bidimensionales con un grosor del orden atómico, son fáciles de obtener.

En 1979, Klaus von Klitzing del

\* Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma del Estado de México.

Correo electrónico: mag@coatepec.uaemex.mx

\*\* Instituto Mexicano del Petróleo.

Correo electrónico: amedina@www.imp.mx

Instituto de Max Planck, en Stuttgart, observó que bajo ciertas condiciones, la resistencia Hall se incrementaba no en forma continua sino de manera escalonada, como configurando peldaños o platos, cuando el campo magnético se incrementaba. Esto quiere decir que la resistencia también se estaba cuantificando. Von Klitzing recibió el Premio Nobel por este descubrimiento en 1985. El efecto Hall cuántico ocurre cada vez que el número de electrones  $N_e$  es proporcional a un entero multiplicado por el número de *quants* de flujo magnético  $N_m$  que atraviesan el material. A la relación  $f = N_e/N_m$  se le conoce como el factor de "llenado". El flujo magnético se cuantifica en unidades de  $h/e$ , donde  $h$  es la constante de Planck y  $e$ , la carga del electrón. Por lo tanto,  $N_m$  está determinado por el campo magnético que atraviesa el plano, dividido por  $h/e$ . A temperaturas suficien-

temente bajas, si dibujamos a la resistencia Hall  $R_h$  como función del campo magnético aplicado, se observa que existe una serie de platos con valores  $R_h = h/fe^2$ , donde  $f$  es un número entero. El valor de  $R_h$  es, por consiguiente, independiente del tipo de material en estudio y sólo depende de constantes físicas universales y del factor de llenado. Este efecto cuántico entero fue explicado teóricamente al considerar que los electrones no interaccionan entre sí y que además están bajo la acción de un potencial aleatorio.

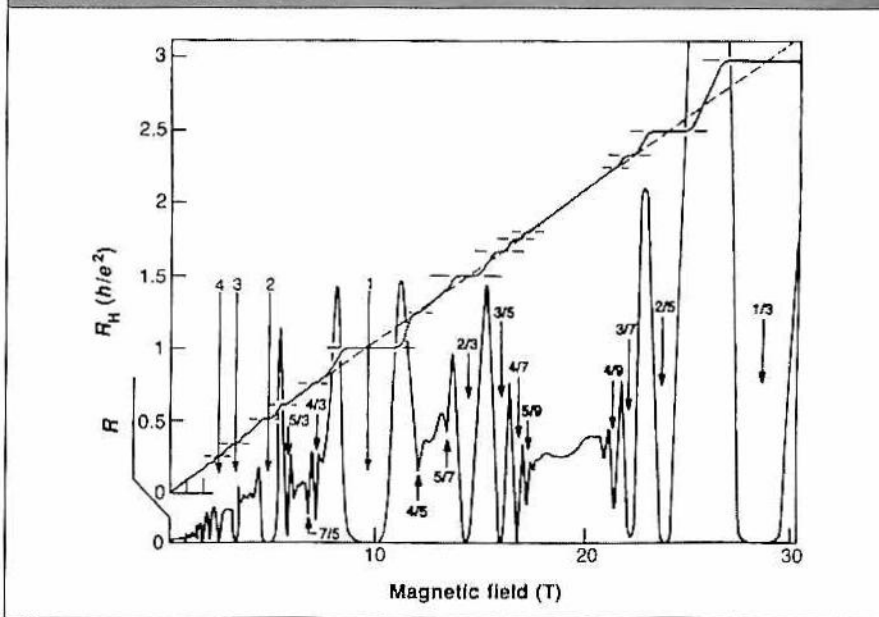
Tsui y Stormer, ambos de los Laboratorios Bell en New Jersey, trataron de investigar el mismo fenómeno, pero con materiales muchos más puros que los que usaba Von Klitzing. Ellos pudieron investigar casos extremos de campos magnéticos intensos cuando el número

cuántico del flujo  $N_m$  excedía al número de electrones  $N_e$ . Así, descubrieron que en adición al efecto cuántico entero, existía una resistencia Hall cuando el parámetro de llenado tenía el valor de  $f = 1/3$ , con la subsecuente suposición de que semejante plato también se podría observar en  $f = 2/3$ . A este fenómeno descubierto lo denominaron Efecto Hall Cuántico Fraccionario (ver figura 1).

Consecuentemente, en materiales muy puros y a bajas temperaturas, fue observada una serie de familias del EHC. Estos resultados correspondían a valores del parámetro de llenado con números impares como denominador. Tsui, Stormer y Gosard reportaron en su artículo original (Tsui, Stormer y Gosard, 1982) que la teoría que explicaba el efecto entero Hall podría tomar en consideración este valor fraccional cuántico Hall si se postulaba la existencia de partículas con cargas fraccionarias.

En 1983, un año después de que fue descubierto el EHC, Robert Laughlin, quien laboraba en el Laboratorio Nacional Lawrence-Livermore, propuso que este efecto podría ser explicado con la suposición de que con valores del parámetro de llenado  $f$  de la forma  $1/m$ , donde  $m$  es un número impar entero, el sistema forma un nuevo tipo de fluido (cuántico) que es incompresible y que posee excitaciones de cuasipartículas con cargas fraccionarias de la forma  $Q = e/m$ , donde  $e$  es la carga del electrón (Laughlin, 1983). La comparación de la función de onda propuesta por Laughlin con los resultados numéricos del cálculo de las autofunciones del sistema con un número pequeño de electrones (que fue llevado a cabo por Duncan Haldane y sus colaboradores en Princeton), mostró que los resultados coincidían con gran exactitud.

FIGURA 1. LA LINEA DIAGONAL PUNTEADA REPRESENTA LA RESISTENCIA CLÁSICA DE HALL Y LA LINEA GRUESA ESCALONADA LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES. LOS CAMPOS MAGNÉTICOS QUE CAUSAN LOS ESCALONAMIENTOS ESTÁN MARCADOS CON FLECHAS. NÓTESE PARTICULARMENTE EL ESCALON DESCUBIERTO POR STORMER Y TSUI CON EL PARÁMETRO DE LLENADO  $f = 1/3$ ; EL ALTO VALOR DEL CAMPO MAGNÉTICO, Y LOS PLATOS DESCUBIERTOS POR VON KLITZING (CON PARÁMETROS DE LLENADO ENTEROS CON CAMPOS MAGNÉTICOS DÉBILES) (SCIENCE, 1990).





Es bien conocido que desde aquel famoso experimento de Millikan en que la carga eléctrica está cuantificada (hablando más coloquialmente está formada de pedazos) en unidades de la carga del electrón  $e$ , la mínima porción de carga que podría existir en la naturaleza era la del electrón. Por esta razón, la predicción teórica de Laughlin sobre la existencia de cuasipartículas cargadas fraccionariamente, que hizo posible la explicación del efecto Hall cuántico fraccionario, era realmente contra-intuitivo. Entonces, el EHC es un fenómeno que ocurre en un gas de electrones que están ocupando un espacio bidimensional y sujeto a un campo magnético intenso perpendicular a la superficie en la que se encuentra. Este efecto resulta de la fuerte interacción entre los electrones y por consiguiente la corriente eléctrica es transportada por los arriba mencionadas cuasipartículas. Ya existen experimentos en donde directamente se han observado a estas cargas fraccionarias. En contraste con el efecto Hall cuántico entero, que está completamente explicado en términos de electrones que no interactúan entre sí, el efecto Hall fraccionario no puede ser definido por esta suposición de electrones no-interactuantes, sino por una fuerte interrelación entre los electrones sujetos a campo magnético intenso.

El papel de las interacciones es particularmente importante para el sistema bidimensional de electrones en un campo magnético intenso. La física del fenómeno podría ser resumida así: en un campo magnético clásico, los electrones se mueven en órbitas circulares llamados ciclotrones con una velocidad angular  $\omega_c = eB/mc$ , donde  $e$  corresponde a la carga del electrón,  $B$  es el valor del campo magnético,  $m$  es la masa del electrón,

y  $c$  representa la velocidad de la luz (MacDonald, 1994). Cuando el movimiento del ciclotrón es tratado cuánticamente, los valores permitidos de energía cinética para un solo electrón en un campo magnético están cuantizados, es decir, que toman los valores siguientes  $E_n = \hbar\omega_c(n+1/2)$ , donde  $n$  es un número entero. Así, la energía cinética de la órbita ciclotrónica es independiente de la posición del centro de la órbita, y por consiguiente, existirán varios estados



LAUGHLIN

permitidos para una partícula con un valor dado de energía cinética. A los varios estados cuánticos con valores iguales de energía cinética los físicos les llaman estados degenerados. Entonces, la serie microscópica de estados degenerados con un valor común de energía cinética es conocido como nivel cuántico de Landau. El EHC ocurre cuando el número de electrones es menor que el número de estados cuánticos posibles en el menor valor de energía cinética del nivel de Landau. En este régimen, el número de estados para muchas partículas que está degenerado en ausencia de interacciones, diverge exponencialmente de la dimensión del sistema. El estudio perturbativo de las interacciones, que es usado en el líquido de Fermi (una especie de líquido formado por electrones en metales, semiconductores), falla completamente.

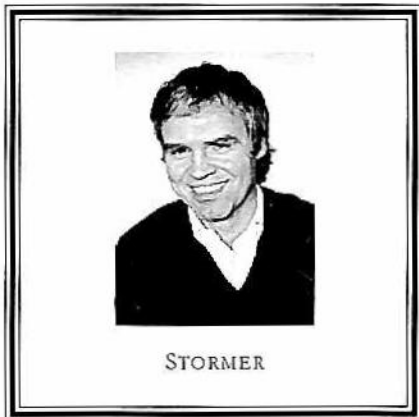
Toda la física discutida en este fenómeno ocurre en un régimen de intenso campo magnético en sistemas para los cuales la interacción electrón-electrón domina sobre la interacción electrón-desorden. La realización de semejantes sistemas requiere el desarrollo de técnicas de modulación de dopaje para la creación de capas bidimensionales de alta movilidad para los electrones. Como estos sistemas con la tecnología actual son accesibles, los experimentos han revelado una gran variedad de efectos correlacionados, muchos de los cuales son todavía muy poco entendidos. El efecto Hall cuántico fraccionario ha sido y es un excelente laboratorio en el cual una gran variedad de comportamientos de correlación ocurre en sistemas experimentales.

Trabajos posteriores en esta área han mostrado que adicionalmente a la propiedad de tener cargas eléctricas fraccionarias, las cuasipartículas también exhiben una estadística fraccionaria. A éstas las llaman también "anyons". Esto quiere decir que no son bosones (partículas con valores enteros de *spín*) ni tampoco fermiones (partículas con *spín* fraccionario). Estas nuevas entidades cuánticas están entre los bosones y los fermiones.

Pero ... ¿cuál es la naturaleza de estas cuasipartículas con cargas fraccionarias formadas por electrones? El estudio de correlaciones fuertes entre los electrones en espacios bidimensionales sujetos a un campo magnético intenso sigue siendo una área abierta a la investigación internacional. Los esfuerzos de muchos países han permitido descubrimientos de nuevos fenómenos que podrían explicar la naturaleza de las cuasipartículas. Una de las posibles explicaciones tiene raíces profundas en las

teorías de entidades no lineales llamadas solitones, en las que las excitaciones colectivas del estado líquido (donde los electrones tienen una fuerte correlación entre sí), origina el efecto Hall cuántico fraccionario. Específicamente, ya existen evidencias de la existencia de texturas de *spín* cargadas en el efecto Hall cuántico llamados *skyrmiones* que son instantones con carga topológica en el espacio de fase (Barret *et al.*, 1995).

Los instantones son solitones (algo semejante a ondas solitarias) que “viven” en un espacio euclideo. Este último es un espacio-tiempo común, con la sola diferencia de que el tiempo ahora está multiplicado por el número imaginario  $i = \sqrt{-1}$  (Rajaraman, 1982). El nombre de *skyrmion* se le dio a estos solitones en honor al físico teórico británico T. Skyrme (1922-1987), quien introdujo una idea paradójica “demencia” sobre partículas. Al estudiar la interacción no lineal de los campos mesónicos, descubrió que éstos pueden formar solitones, así que propuso una hipótesis valiente: los solitones se deben




de considerar como si fueran los protones y neutrones que se observan experimentalmente. Esta hipótesis contradecía todas las teorías sobre partículas de entonces y tuvo que aislarse por más de 20 años hasta que

nuevamente fue recordada. La teoría de Skyrme es demencial porque el protón no puede estar hecho de mesones, ya que entraría en contradicción con ciertas leyes de conservación de cargas. Pero a los solitones no se les debe conceptuar como que están hechos de mesones, de la misma manera que no se puede considerar a la dislocación en cristales como formada de ondas elásticas que corren por el cristal. Volviendo al punto, se ha encontrado que el *skyrmion* cercano al valor de llenado  $f = 1.3$  es el estado relevante de la cuasipartícula en la presencia de campo magnético intenso.

Así, la teoría del efecto Hall cuántico ha tomado ideas desarrolladas en otras áreas de la física y ha trasladado también innovaciones a otros campos, como en el caso de estudios relativos a superconductividad, entre otros. Uno de las grandes aplicaciones de este efecto fraccionario serán realizadas en la tecnología de comunicaciones y en la explicación tal vez de la naturaleza intrínseca de los *quarks*, que son los ladrillos de la materia.

Finalmente, mencionaremos algunos datos biográficos de los laureados. Laughlin nació en California en 1950 y estuvo en Stanford desde 1984. Se doctoró en el MIT (Instituto Tecnológico de Massachusetts) en 1979, bajo la dirección de John Joannopoulos con un trabajo sobre teoría cuántica de vidrios. Stormer nació en Frankfurt, Alemania, en 1949, y se doctoró en la Universidad de Stuttgart en 1977; su tesis doctoral versaba sobre modelos de gotas de la unión electrón-vacancias. Al comienzo de 1998 llegó a ser profesor de la universidad de Columbia. Tsui nació en Henan, China, en

1939, y se doctoró en la Universidad de Chicago con una investigación referente a superficies de Fermi en ferromagnéticos. En 1982 llegó a ser profesor de ingeniería eléctrica en Princeton. 



**BIBLIOGRAFÍA**

Barret, S.; Tycko, R.; Pfeiffer, L. y West, K. (1995). *Phys. Rev Lett.* 74: 5112.

Chakraborty, T. y Pietilainen, P. (1995). *The Quantum Hall Effect*. Springer-Verlag, Berlín.

Eisenstein and Stormer, H. (1990). “The Fractional Quantum Hall Effect”, en *Science*. p. 1510-1516.

Laughlin, R. (1983). *Phys. Rev. Lett.* 50: 1395

MacDonald, A. in Les Houches, Session LXI, 1994, *Physique Quantique Mesoscopique*, edited by Akkermans, E. *et al.*, Elsevier, 1985.

Physics Nobel Prize Goes to Tsui, Stormer and Laughlin. *Physics Today*, Diciembre 1998.

Rajaraman, R. (1982). *Solitons and Instantons* (North-Holland), Amsterdam.

Skyrme, T. (1961). *Proc. R. Soc.* A262, 233.

Tsui, D.; Stormer, H. y Gossard, A. (1982). *Phys. Rev. Lett.* 48: 1559.