

Los elementos de la tabla periódica y la superconductividad

Gustavo Tavizón¹ y Francisco Morales²

La Asamblea General de las Naciones Unidas declaró 2019 como el año internacional de la tabla periódica. En ese año se cumplieron 150 años desde que Dmitri Ivanovich Mendeleev propuso un arreglo de los elementos con base en las características de sus átomos, creando así la Tabla Periódica. Sin duda, la tabla periódica es una piedra angular de la ciencia que ha permitido su avance, dando lugar al entendimiento y creación de todas las sustancias conocidas; obviamente, esto ha redundado en beneficio de la humanidad. Un aspecto muy particular de la tabla periódica es su relación con un fenómeno físico fascinante, la superconductividad. Este fenómeno, aunque poco conocido en el dominio público, se presenta en muchos materiales, y los elementos de la tabla periódica no son la excepción. El contenido de este trabajo consiste en la descripción de las características fundamentales de la superconductividad, algunos aspectos históricos del descubrimiento de este fenómeno, y las características superconductoras de los elementos de la tabla periódica.

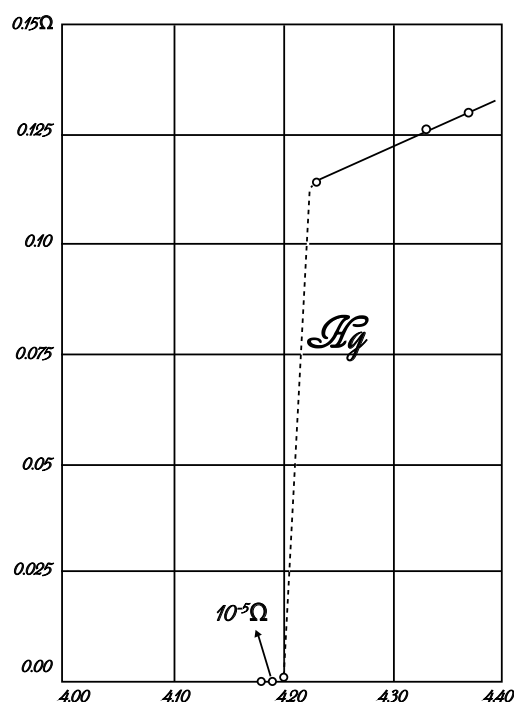


Figura 1. Gráfica obtenida por H. K. Onnes cuando descubrió el fenómeno de la superconductividad en el mercurio. El eje vertical representa la resistencia eléctrica, en Ohms, y el eje horizontal la temperatura, en Kelvin.

¹Facultad de Química, ²Instituto de Investigaciones en Materiales Universidad Nacional Autónoma de México
¹gtavizon@unam.mx, ²fmleal@unam.mx

Introducción

La superconductividad es uno de los fenómenos más estudiados en la historia de la física y la química. La razón radica en sus aspectos más básicos. Esta propiedad resulta de fenómenos cuánticos de nivel microscópico que se revelan en las propiedades macroscópicas. Son dos las propiedades macroscópicas fundamentales que permiten identificar a un material como superconductor: resistencia eléctrica cero y diamagnetismo perfecto (inducción del campo magnético en el interior del material igual a cero). Estas características implican aplicaciones extraordinarias, por ejemplo, conducción de energía eléctrica sin pérdidas de energía y generación de campos magnéticos muy intensos, mayores a los que se pueden generar con bobinas de cobre o con imanes permanentes. Es importante señalar que el fenómeno de la superconductividad se presenta a temperaturas muy por debajo de la temperatura ambiente y que la temperatura a la que aparece el fenómeno se le denomina temperatura crítica (T_c). Por esta razón las aplicaciones actuales de los superconductores requieren de métodos de enfriamiento para lograr temperaturas menores que la T_c .

Hasta hace relativamente poco tiempo, se pensaba que la superconductividad de las sustancias era un fenómeno extraordinario; ahora, se sabe que hay diferentes formas en las que puede inducirse esta propiedad en los sólidos. Se tiene la convicción -principalmente apoyada por los teóricos de la superconductividad- de que se trata de un fenómeno más bien universal y que el problema reside en encontrar las condiciones en las que puedan producirse los fenómenos cuánticos microscópicos que dan lugar a la superconductividad [1,2]. Estas condiciones están directamente relacionadas con los electrones responsables de formar una corriente eléctrica, las vibraciones atómicas y su interacción. Una forma de inducir superconductividad es la aplicación de una presión mecánica (ahora pueden conseguirse hasta 7 millones de atmósferas); de esta manera se ha conseguido observar superconductividad en muchos materiales, en particular, en elementos de la tabla periódica. Otros métodos para inducir superconductividad son: irradiación con iones muy energizados, amorfización de la estructura cristalina (creación de defectos), crecimiento epitaxial de películas extremadamente delgadas, y el dopaje de carga [1,3].

Breve historia del descubrimiento de la superconductividad

Un acontecimiento importante en el descubrimiento de la superconductividad fue la licuefacción del He. Entre 1898 y 1899, James Dewar, en Gran Bretaña, había conseguido obtener hidrógeno líquido y tiempo después, hidrógeno sólido. Se inició entonces una carrera por licuar el helio, el último gas por condensar; por un lado, estaba el grupo de Dewar, y por otro, el

laboratorio de bajas temperaturas que Heike Kamerlingh Onnes había iniciado en la Universidad de Leyden, en los Países Bajos. A mediados del mes de julio de 1908, Kamerlingh Onnes consiguió la licuefacción de He y encontró que la temperatura del He líquido era de 4.2 K. Por aquellos años existía una controversia en relación al comportamiento eléctrico de los metales; algunos científicos pensaban que la resistencia eléctrica de un metal seguiría disminuyendo conforme la temperatura descendiera, y que en el límite de 0 K, el sólido debería ser un conductor perfecto; otros, bajo la lógica de que en 0 K no existiría energía cinética para los electrones, pensaban que la resistencia de los metales tendría que tender a ser infinita conforme la temperatura se disminuyera. Un tercer grupo tenía la hipótesis de que la resistencia eléctrica a temperaturas cercanas al cero absoluto debería ser constante y que dependería de la pureza del material. Onnes decidió estudiar la resistencia del Hg, ya que entonces era el metal más fácil de purificar (por destilación). En 1911 Onnes consiguió llevar al Hg a una temperatura de 4.2 K; observó que la resistencia disminuía dos mil veces, hasta hacerse la millonésima parte de su valor a 298 K. Entre las más importantes observaciones que el equipo de Onnes había observado al enfriar Hg a temperaturas tan bajas, fue que la resistencia eléctrica mostró un descenso abrupto al alcanzar una temperatura de 4.2 K, como ilustra la Figura 1. Cuando Onnes publicó sus resultados, indicaba que había accedido a un nuevo estado del Hg, en el que se mostraba la propiedad de supraconductividad (así la llamo él); al poco tiempo este término cambió por el de superconductividad que se mantiene a la fecha. Las investigaciones del equipo de trabajo de Onnes siguieron en curso y se dedicaron entonces a investigar con otros metales de alta pureza.

Un descubrimiento trascendente en la comprensión del fenómeno de la superconductividad ocurrió en 1933. Walther Meissner y Robert Ochsenfeld observaron que cuando una muestra de un material superconductor se somete a un campo magnético, la inducción de campo al interior de la muestra es cero. Este comportamiento se interpreta como un diamagnetismo perfecto, ya que la magnetización del superconductor es negativa. Actualmente a este efecto se le denomina “efecto Meissner-Ochsenfeld” o simplemente “efecto Meissner”.

La superconductividad en los elementos de la Tabla Periódica

El comportamiento periódico de los elementos en la tabla periódica significa un conocimiento muy importante del comportamiento químico y físico de los elementos conocidos. Uno de los aspectos de la distribución de los elementos en la tabla periódica se origina del hecho de que los elementos de un mismo grupo presentan el mismo arreglo de los electrones en sus niveles más externos. Dado que el comportamiento químico y muchas propiedades físicas en un sólido se pueden explicar a partir de las interacciones de los electrones más externos, los elementos de un mismo grupo de la tabla periódica tendrán propiedades físicas y químicas similares. Este comportamiento ha sido bien entendido en términos de propiedades atómicas, como volúmenes de iones y átomos, potenciales de ionización, afinidades electrónicas, valencia, etc. Este entendimiento comienza a ser menos claro cuando se pretende extender la periodicidad para explicar propiedades de átomos que hacen una colectividad (fase líquida o sólida). Así, establecer una periodicidad para la temperatura de fusión, por ejemplo, ya no es tan directo. Ante la existencia de varias

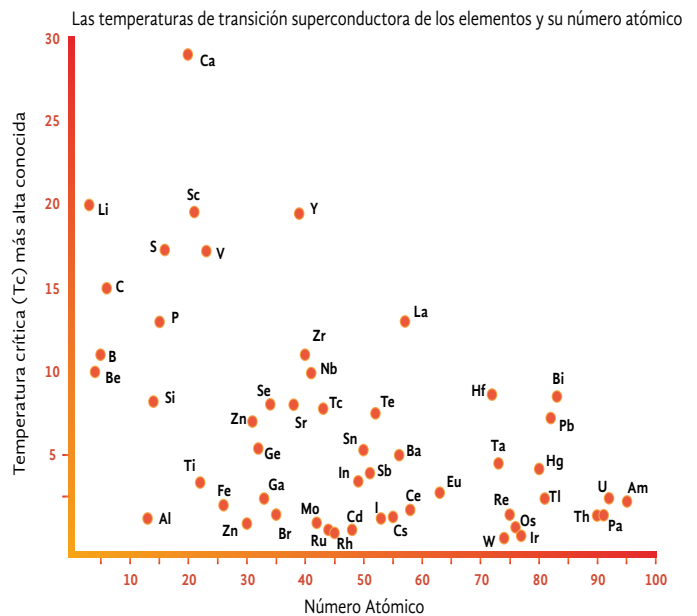


Figura 2. La temperatura de transición superconductora depende de la presión a la que un elemento es sometido, en esta figura se muestra el valor más alto de esta temperatura, en K vs. el número atómico. Como puede verse, difícilmente puede encontrarse una dependencia entre estos valores.

fases en un elemento y sus diferentes propiedades físicas, resulta necesario recurrir a los métodos de la mecánica cuántica para una mejor comprensión de dichas propiedades, con un menor apego a las reglas más inmediatas de las tendencias periódicas de los elementos. Como se mencionó antes, la mejor descripción que se tiene ahora de la superconductividad es aquella en la que se concibe a esta propiedad como el resultado de un fenómeno cuántico colectivo de los electrones de conducción, que tiene como expresiones macroscópicas una resistencia eléctrica nula y un diamagnetismo perfecto.

En los intentos por establecer una relación entre el fenómeno de la superconductividad, y particularmente por relacionar los valores de la temperatura crítica de transición superconductora, con las características de los elementos en la tabla periódica (Figura 2), se puede observar que los elementos de transición que son superconductores parecen seguir una tendencia con el número de electrones de valencia (electrones s y d). La Figura 5 muestra dicho comportamiento para los elementos caracterizados por capas electrónicas 3d, 4d y 5d. Note que la superconductividad ocurre cuando hay 4 y hasta 9 electrones, y que la T_c es alta para aquellos con 5 y 7 electrones de valencia.

Además de la tabla periódica, Figura 3, que se incluye en este trabajo, y que reúne la información sobre las temperaturas críticas de los elementos y las condiciones en las que se obtienen, a continuación se hacen comentarios sobre algunos elementos en particular.

Hidrógeno. Aunque la superconductividad de este elemento ha sido pacientemente esperada, debido a que se ha predicho que, a muy altas presiones, y una vez que ya no es un sólido molecular sino un sólido metálico monoatómico, el hidrógeno mostraría una temperatura de transición superconductora muy elevada (se especula que podría ser a temperatura ambiente).

● En las celdas azules están los elementos que son superconductores en condiciones normales de presión. La temperatura de transición aparece en el segundo renglón de la celda. El tercer renglón de la celda es la temperatura de transición máxima obtenida bajo presión, la cual es indicada en el cuarto renglón de la celda.

● En las celdas en color verde están los elementos que solo son superconductores sometidos a presión. Hay dos casos particulares; el primero es Be, que en forma de película delgada presenta una T_c mayor que en bulto, el segundo caso es el carbono, en el texto se comentan las características en las que presenta superconductividad.

Group 1 IA																		18 VIIIA																																															
1	H Hydrogen																2	He Helium																																															
2	3 Li Lithium 0.4 mK 20 K 20 GPa		4 Be Beryllium 26 mK 9.95 K Película																10	Ne Neon																																													
3	11 Na Sodium		12 Mg Magnesium																		17	Cl Chlorine																																											
4	19 K Potassium																		20 Ca Calcium 19.6 K 216 GPa		21 Sc Scandium 19.6 K 106 GPa		22 Ti Titanium 0.39 K 3.35 K 56 GPa		23 V Vanadium 5.38 K 16.5 K 120 GPa		24 Cr Chromium		25 Mn Manganese		26 Fe Iron 2 K 20 GPa		27 Co Cobalt		28 Ni Nickel		29 Cu Copper		30 Zn Zinc 9 K		31 Ga Gallium 1.091 K 7 K 1.4 GPa		32 Ge Germanium 1.091 K 2.4 K 32 GPa		33 As Arsenic 1.9 K 32 GPa		34 Se Selenium 2.4 K 150 GPa		35 Br Bromine 1.4 K 190 GPa		36 Kr Krypton														
5	37 Rb Rubidium		38 Sr Strontium 8 K 58 GPa		39 Y Yttrium 11.5 K 116 GPa		40 Zr Zirconium 0.546 K 11 K 30 GPa		41 Nb Niobium 9.2 K 9.9 K 10 GPa		42 Mo Molybdenum 0.92 K		43 Tc Technetium 7.77 K		44 Ru Ruthenium 0.5 K		45 Rh Rhodium 0.33 mK		46 Pd Palladium		47 Ag Silver		48 Cd Cadmium 0.52 K		49 In Indium 3.404 K		50 Sn Tin 3.722 K 5.3 K 11.3 GPa		51 Sb Antimony 3.9 K 25 GPa		52 Te Tellurium 7.5 K 35 GPa		53 I Iodine 12 K 25 GPa		54 Xe Xenon																														
6	55 Cs Cesium 1.3 K 12 GPa		56 Ba Barium 8 K 18 GPa																		72 Hf Hafnium 0.13 K 8.6 K 62 GPa		73 Ta Tantalum 4.482 K 4.5 K 48 GPa		74 W Tungsten 0.012 K		75 Re Rhenium 1.4 K		76 Os Osmium 0.655 K		77 Ir Iridium 0.14 K		78 Pt Platinum		79 Au Gold		80 Hg Mercury 0.14 K		81 Tl Thallium 2.39 K		82 Pb Lead 7.193 K		83 Bi Bismuth 8.5 K 9.1 GPa		84 Po Polonium		85 At Astatine		86 Rn Radon																
7	87 Fr Francium		88 Ra Radium																		104 Rf Rutherfordium		105 Db Dubnium		106 Sg Seaborgium		107 Bh Bohrium		108 Hs Hassium		109 Mt Meitnerium		110 Ds Darmstadtium		111 Rg Roentgenium		112 Cn Copernicium		113 Nh Nihonium		114 Fl Flerovium		115 Mc Moscovium		116 Lv Livermorium		117 Ts Tennessine		118 Og Oganesson																
LANTHANIDES																		ACTINIDES																																															
57 La Lanthanum 4.8 K 13 K 16 GPa																		58 Ce Cerium 1.7 K 5 GPa		59 Pr Praseodymium		60 Nd Neodymium		61 Pm Promethium		62 Sm Samarium		63 Eu Europium 2.75 K 142 GPa		64 Gd Gadolinium		65 Tb Terbium		66 Dy Dysprosium		67 Ho Holmium		68 Er Erbium		69 Tm Thulium		70 Yb Ytterbium		71 Lu Lutetium 12.4 K 174 GPa																					
																		89 Ac Actinium		90 Th Thorium 1.368 K		91 Pa Protactinium 1.4 K		92 U Uranium 0.8 K 2.4 K 1.2 GPa		93 Np Neptunium		94 Pu Plutonium		95 Am Americium 0.79 K 2.2 K 6 GPa		96 Cm Curium		97 Bk Berkelium		98 Cf Californium		99 Es Einsteinium		100 Fm Fermium		101 Md Mendeleevium		102 No Nobelium		103 Lr Lawrencium																			

Figura 3. Tabla periódica de los elementos en donde se presentan las temperaturas críticas determinadas en condiciones normales (fondo azul) y en condiciones de presión o en condición de dimensión menor que 3 (fondo verde).

No existen pruebas experimentales de que el hidrógeno muestre superconductividad, aún a las altas presiones a las que ha sido sometido (140 GPa). La gran reactividad del hidrógeno monoatómico y su extraordinaria difusividad hacen muy difícil someterlo a altas presiones.

Los metales alcalinos. De los 30 elementos de la tabla periódica que muestran transición superconductor a la presión de una atmósfera, entre los alcalinos, solamente el Li tiene una modesta T_c de 0.4 mK. En cambio, cuando es sometido a una presión de 50 GPa muestra una transición superconductor a 20 K [4]. Para el Na se ha estimado que podría ser superconductor ($T_c = 1.2$ K) en altas presiones, 160 GPa [5], pero dicho fenómeno no se ha observado experimentalmente. Aunque anticipada, la superconductividad del K y Rb no se ha observado, aún a altas presiones [6]. Para el Cs se ha encontrado que con una $T_c = 1.3$ K, este metal se hace superconductor a una presión de 12 GPa [7].

Los metales alcalinotérreos. Entre los alcalinotérreos únicamente el Be (hexagonal) presenta una transición superconductor en condiciones de una atmósfera de presión y su T_c vale 0.026 K; en cambio, cuando se consigue preparar como una película delgada (200 Å), a partir de la condensación de sus vapores, su T_c alcanza 9.85 K [8,9]. En los casos de Ca, Sr y Ba, estos presentan una fase

superconductor a altas presiones y la temperatura de transición depende del valor de la presión aplicada. Para Ca, la máxima T_c es de 29 K y se consigue a 216 GPa [10]; para Sr la T_c máxima vale 8 K a 58 GPa [11] y para Ba vale alrededor de 5 K a 20 GPa [12]. Una explicación del comportamiento de Ca, Sr y Ba en altas presiones contempla su transformación en metales de banda d por efecto de la presión [13].

Los elementos de transición. Con el criterio de exhibir transición superconductor a una atmósfera de presión, se puede hacer la primera separación de este amplio grupo de metales. De los elementos de este grupo, con configuración electrónica del tipo d^1 , y en el que también se incluiría a Lu, solamente el La presenta, a presión normal, una T_c de 4.8 K para una fase hexagonal, y T_c de 6 K para una fase cúbica; el resto de ellos, Sc, Y, y Lu, son superconductores de alta presión y cuyo valor máximo de T_c depende casi linealmente de la presión aplicada. La T_c para Sc es de 19.6 K a 107 GPa; para Y es de 20 K a 115 GPa [14]; para La (fase cúbica) es de 12 K a 13 GPa y de 7 K (fase hexagonal) a 2 GPa; para Lu es de 12.4 K a 174 GPa [15–17]. Luego, del grupo 4 al 10, con excepción de Cr-Ni y Pt, todos son superconductores con $T_c < 10$ K. Los elementos del grupo 11: Cu, Ag y Au, los mejores conductores eléctricos de la tabla periódica, no exhiben

superconductividad a presión normal. Los del grupo 12: Zn, Cd y Hg son superconductores a presión normal. Entre los datos por mencionar de este grupo de elementos es que Nb presenta la temperatura crítica más alta bajo presión normal, 9.25 K, y que en condiciones de alta presión, V exhibe también una T_c alta, 17.2 K a 120 GPa [1]. El Tc, que es un metal en el que todos sus isótopos son radiactivos, muestra una temperatura crítica de 8.2 K [18]. Para los elementos con un ordenamiento magnético de largo alcance (antiferromagnético o ferromagnético): Cr, Fe, Co y Ni, no se ha reportado superconductividad en condiciones de presión normal. Cuando por efectos de la presión aplicada hay una fase no magnética, ésta puede presentar transición superconductora. Esta observación puede también extenderse a los elementos “cercanamente magnéticos”: Pd y Pt, en los que tampoco se ha observado una fase superconductora de bulto [14,19]. Se ha reportado que en Cr existe una fase cúbica centrada en la cara (FCC), crecida epitaxialmente entre un par de películas de Au, cuya T_c es de 3.0 K y representa una fase metaestable de Cr. Los autores de la investigación atribuyen la superconductividad a la formación de un compuesto de Au-Cr-Au [20]. Para Fe a presiones de 15-30 GPa se forma una fase no magnética (HCP), con una T_c máxima de 2.0 K [21]. Para Pd podría esperarse una transición superconductora relativamente alta; sin embargo, ésta no se ha observado a temperaturas de 1.7 mK; en cambio, cuando en películas delgadas de Pd se han inducido defectos estructurales mediante irradiación con iones He^+ , se ha conseguido hacer que Pd sea superconductor en una presión normal a 3.2 K [22].

Los elementos de la serie de los lantánidos. Entre estos elementos, solamente aquellos que presentan los orbitales 4f llenos (La y Lu) son superconductores a presión normal, La con $T_c = 6$ K y Lu con $T_c = 0.1$ K [23], aunque debe mencionarse que no existe otro reporte que confirme esta propiedad en baja presión (Lu a 174 GPa, tiene $T_c = 12.4$ K). El resto de los lantánidos, con el momento magnético asociado con sus orbitales 4f internos, no muestra superconductividad. Las excepciones importantes dentro de la serie de los lantánidos están representadas por Ce y Eu, que en condiciones de alta presión muestran transición superconductora a 1.7 K para Ce a 5 GPa, y a 2.75 K para Eu a 142 GPa.

Los elementos de la serie de los actínidos. Estos elementos se caracterizan por un llenado progresivo de los orbitales 5f conforme se avanza en la serie. El estudio de las propiedades de estos elementos, principalmente de los más pesados, se dificulta por varias razones. En primer lugar, la cantidad disponible de ellos es muy escasa (Fm, Md, No, Lr); los elementos transuránicos son muy difíciles de investigar, porque al ser muy radiactivos se dificulta su manejo con seguridad; también presentan un calentamiento propio que impide el acceder a muy bajas temperaturas, además de mostrar un decaimiento que

conduce a la degradación e impurificación de las muestras [24]. En presión normal, el Th tiene una $T_c = 1.37$ K; el Pa con $T_c = 1.43$ K; para U únicamente la fase ortorrómbica con $T_c = 0.8$ K es superconductora, y las fases tetragonal y cúbica con T_c en 0.8 y 2.1 K, se estabilizan con la ayuda de otros elementos. El Am presenta dos fases superconductoras, una con T_c de 0.79 K (fase α , hexagonal) a presión normal, y otra de 1.1 K (β , fase cúbica); bajo presión, a 6 GPa tiene T_c de 2.2 K. Para α -Np y α -Pu existen estudios que pronostican transición superconductora, pero en ninguno de ellos se ha observado esta transición a temperaturas superiores de 0.5 K. Cm, Bk y Cf, por presentar orden magnético, no se consideran como potenciales superconductores en presión normal [24].

Elementos del grupo p, grupos 13-15

a) Elementos del grupo 13 (B, Al, Ga, In y Tl). El boro muestra una T_c que depende de la presión aplicada, a 175 GPa muestra una T_c de 6.0 K, en tanto que ésta es de 11.2 K a 250 GPa [25]. Los elementos restantes de este grupo, Al, Ga, In y Tl presentan superconductividad a una presión normal. Para Al (bulto) la transición superconductora se presenta a 1.2 K [26], en tanto que en nanopartículas de Al recubiertas con Al_2O_3 (core-shell), esta ocurre a 3.9 K [27]. Para Ga, la fase estable, α -Ga, presenta una T_c de 1.2 K, la fase β , metaestable, muestra 6.04 K [28], y en películas amorfas de Ga se ha observado una T_c de 8.6 K [29]. Todos los elementos de este grupo, con excepción de B, presentan una fase que es superconductora a una presión normal.

b) Elementos del grupo 14 (C, Si, Ge, Sn y Pb). Entre los primeros superconductores conocidos está el Pb con una T_c de 7.2 K. Para

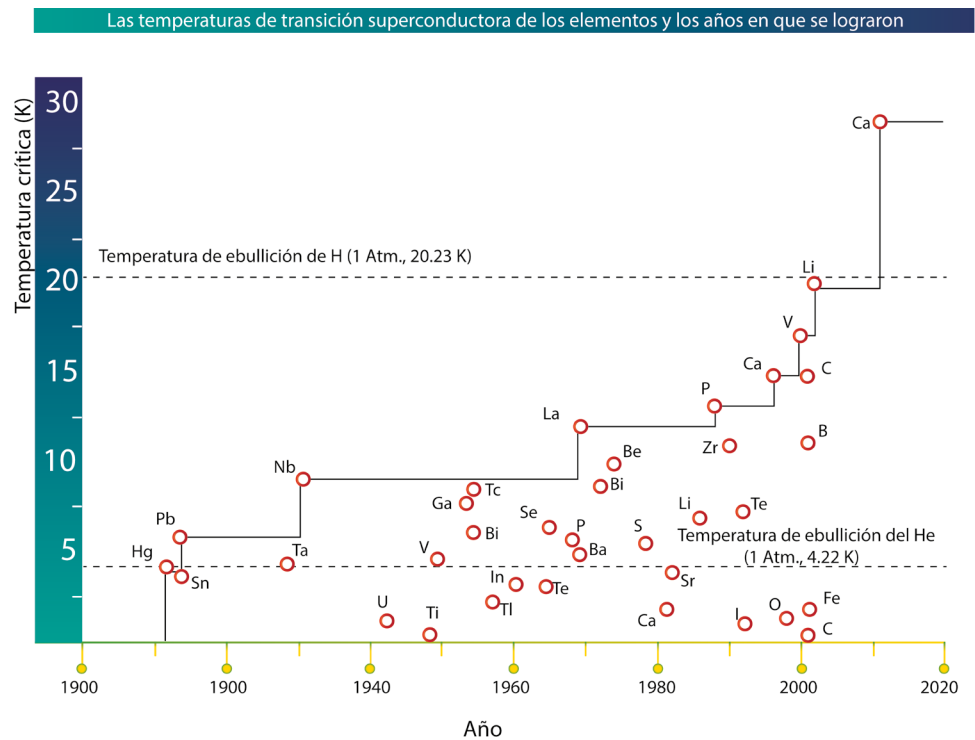


Figura 4. La temperatura de transición superconductora (T_c o K) depende de la presión a la que un elemento es sometido, en esta figura se muestra el valor más alto de esta temperatura vs. el año de descubrimiento.

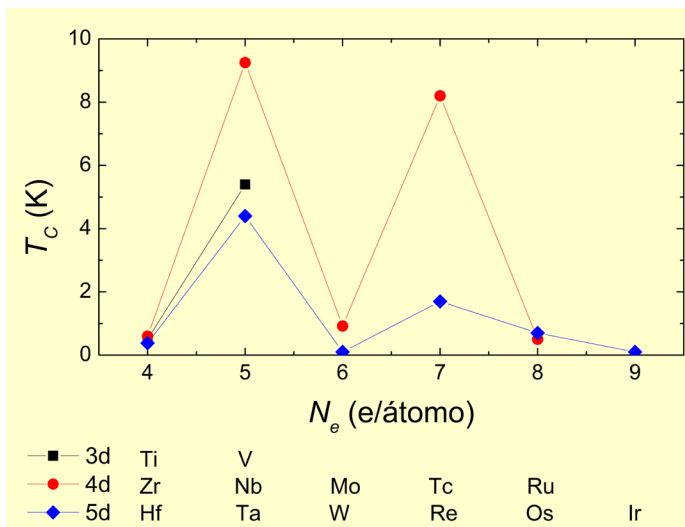


Figura 5. Temperatura crítica, T_c , de los elementos de transición que son superconductores. Note que la T_c es más alta para los elementos con 5 y 7 electrones.

el carbono se conocen ahora una gran cantidad de alótropos, los más conocidos son el grafito, el diamante, las nanoesferas de carbono (C_{60} , por ejemplo), los nanotubos de pared simple y múltiple, y el grafeno. Entre estos alótropos, ni grafito ni diamante (aquí polimorfos) se conocen como superconductores, aunque la cantidad de superconductores con otros elementos intercalados en estos es muy amplia y las temperaturas de transición conocidas son muy variadas [30]. En su forma elemental, el carbono puede ser superconductor con una estructura de tubos de pared simple embebidos en una matriz de zeolita con canales de 4 Å de diámetro, la T_c máxima observada fue de 20 K [31]. Recientemente se encontró que el grafeno puede mostrar superconductividad cuando dos láminas sobrepuestas de este material son giradas, una con respecto a la otra, en un ángulo mágico que resultó ser de 1.1° ; la temperatura de transición que se reportó fue de 1.7 K [32]. Silicio y germanio son superconductores de alta presión; Sn y Pb presentan una fase superconductora a presión normal de 3.72 y 7.19 K, respectivamente, y la temperatura crítica de una fase de Sn a 11.3 GPa alcanza 5.3 K.

c) Elementos del grupo 15 (N, P, As, Sb y Bi). El nitrógeno, a diferencia de los demás elementos de este grupo, es un elemento que no ha sido reportado superconductor aun a muy altas presiones (2.4 millones de atmósferas, donde deja de ser un sólido de moléculas diatómicas para formar un sólido de átomos). Por otro lado, los elementos restantes se hacen superconductores de alta presión. En P la T_c más alta es de 9.5 K a 32 GPa, y se mantiene la controversia sobre a qué fase corresponde, si a la de P negro (ortorrómbico) o a una similar a la de P blanco (cúbica simple) [33]. Recientemente, en monocristales de P negro a 12 GPa, se ha mostrado que la transición superconductora de esta fase de P (llamada A7) ocurre a 7.2 K [34].

d) Elementos del grupo 16 (O, S, Se, Te, Po). Los elementos de este grupo, con excepción de Po, son superconductores a muy alta presión ($P \geq 35$ GPa). En 1998 se reportaron dos experimentos importantes para el oxígeno; por un lado, la metalización del sólido que se presenta a 95 GPa, y por otro, una transición superconductora de 0.6 K, que aparece a presiones $P \geq 100$ GPa

[35]. En el caso de Po, ninguno de sus 33 isótopos es estable, y para la fase α del mismo (la única cúbica simple a presión normal de los elementos de la tabla periódica), se ha propuesto que por efectos de contracción de su volumen, podría ser superconductora con T_c de 7.11 K [36].

e) Elementos del grupo 17 (F, Cl, Br, I, At). El Br sometido a presión experimenta una transición en la que pasa de un sólido molecular a un “sólido monoatómico” a una presión de 80 GPa; luego se transforma en un superconductor a presiones mayores de 90 GPa, con una $T_c = 1.5$ K. El yodo, semejante al Br, también sufre varias transiciones con la presión. Inicialmente es un sólido molecular y eléctricamente es un aislante. A presiones de alrededor de 15 GPa se metaliza (i.e., eléctricamente se comporta como un metal) y a una presión de 21 GPa sufre una disociación para pasar a ser un sólido monoatómico. Finalmente, se transforma en un superconductor de $T_c = 1.2$ K a 26 GPa [37,38].

f) Grupo de los gases nobles (He, Ne, Ar, Kr, Xe, Rn, Og). Ninguno de los elementos de los gases nobles ha mostrado transición superconductora, aun a muy altas presiones. La ausencia de esta propiedad en los gases nobles ha sido asociada con una interacción muy débil del tipo electrón-fonón y un bajo coeficiente del calor específico electrónico [3].

Como comentario final, se puede decir que la búsqueda de una correlación entre la T_c y la periodicidad de los elementos superconductores en la tabla periódica ha resultado infructuosa. Como puede verse en la Figura 2, encontrar una dependencia entre la temperatura crítica y el número atómico, se presenta como una tarea difícil. Lo anterior queda aclarado si se consideran las ideas fundamentales de la teoría propuesta en 1957 por Bardeen, Cooper y Schrieffer (BCS). En esta teoría, dos ingredientes son indispensables: los modos de oscilación de los átomos (en la mecánica cuántica se denominan *fonones*) y la densidad de electrones en el estado más alto de energía que pueden ocupar, conocida como densidad de estados electrónicos al nivel de la energía de Fermi. Estas dos características dependen en primera instancia, y visto de una manera sencilla, de la masa del átomo y de la valencia. Si estas características no son las adecuadas, la superconductividad no se presenta, pero cuando ésta se presenta, la T_c depende de esas características. La aplicación de una presión a los elementos, en general a cualquier sólido, modifica las frecuencias de vibración de los átomos y también la densidad de estados al nivel de Fermi; si los valores de esos parámetros son adecuados, la superconductividad se presentará, o si el elemento ya es superconductor la temperatura crítica se puede incrementar, aunque también puede ocurrir lo opuesto. Las técnicas experimentales para producir altas presiones han tenido un gran desarrollo y esto ha permitido estudiar los elementos sometidos a presiones más altas. Se ha encontrado que algunos incrementan notablemente su T_c . La Figura 4 muestra gráficamente cómo ha evolucionado la T_c de los elementos a través de los años. Hasta ahora no se conoce una teoría de la superconductividad que prediga dicho estado, incluida la teoría BCS, que es la más exitosa en describir el estado superconductor de los elementos y de muchos compuestos y aleaciones superconductoras.

Agradecimientos: los autores aprecian la ayuda recibida de Vianey Islas Bastida (Facultad de Química, UNAM) en la elaboración de los gráficos de este trabajo.

Referencias

1. Buzea, C.; Robbie, K. Assembling the puzzle of superconducting elements: a review, *Supercond. Sci. Technol.* **2005**, *18*, R1–R8.
2. U. of N.D. McKenna Hall, Workshop on The Possibility of Room Temperature Superconductivity and Related Topics, (2005) June 10th and 11th, <https://www3.nd.edu/~its/rts/index.html>
3. Buzea, C. Recent Developments in Superconductivity Research. A century of Superconductivity -updates of the periodic table of superconducting elements. Barry P. Martins, Ed., 1st, Nova Science Publishers, Inc., New York, NY, 2007.
4. Shimizu, K.; Ishikawa, H.; Takao, D.; Yagi, T.; Amaya, K. Superconductivity in compressed lithium at 20 K, *Nature*. **2002**, *419*, 597–599.
5. Tutchton, R.; Chen, X.; Wu, Z. Is sodium a superconductor under high pressure?, *J. Chem. Phys.* **2017**, *146*, 014705.
6. Shi, L. D. A. Papaconstantopoulos, Theoretical predictions of superconductivity in alkali metals under high pressure, *Phys. Rev. B*. **2006**, *73*, 184516.
7. Schilling, J. S. Superconductivity in the alkali metals, *High Press. Res.* **2006**, *26*, 145–163.
8. Falge, R. L. Superconductivity of hexagonal beryllium, *Phys. Lett. A*. **1967**, *24* 579–580.
9. Granqvist, C.-G.; Claesson, T. Superconducting transition temperatures of vapour quenched beryllium, *Phys. Lett. A*. **1974**, *47*, 97–98.
10. Sakata, M.; Nakamoto, Y.; Shimizu, K.; Matsuoka, T.; Ohishi, Y. Superconducting state of Ca-VII below a critical temperature of 29 K at a pressure of 216 GPa, *Phys. Rev. B*. **2011**, *83*, 220512.
11. Mizobata, S.; Matsuoka, T.; Shimizu, K. Pressure Dependence of the Superconductivity in Strontium, *J. Phys. Soc. Japan*. **2007**, *76*, 23–24.
12. Dunn, K. J.; Bundy, F. P. Pressure-induced superconductivity in strontium and barium, *Phys. Rev. B*. **1982**, *25*, 194–197.
13. Mc Mahan, A. K. Pressure-induced changes in the electronic structure of solids, *Phys. B+C*. **1986**, *139–140*, 31–41.
14. Debessai, M.; Hamlin, J. J.; Schilling, J. S. Comparison of the pressure dependences of T_c in the trivalent d-electron superconductors Sc, Y, La, and Lu up to megabar pressures, *Phys. Rev. B*. **2008**, *78*, 064519.
15. Wittig, J.; Probst, C.; Schmidt, F. A., Gschneidner, K. A. Superconductivity in a New High-Pressure Phase of Scandium, *Phys. Rev. Lett.* **1979**, *42*, 469–472.
16. Wittig, J. Pressure-Induced Superconductivity in Cesium and Yttrium, *Phys. Rev. Lett.* **1970**, *24*, 812–815.
17. Maple, M.B.; Wittig, J.; Kim, K. S. Pressure-Induced Magnetic-Nonmagnetic Transition of Ce Impurities in La, *Phys. Rev. Lett.* **1969**, *23*, 1375–1377.
18. Dougherty, R.; Kimel, J. D. Superconductivity Revisited, 1st Ed., Taylor & Francis Group, LLC, 2013.
19. Slocombe, D. R.; Kuznetsov, V. L.; Grochala, W.; Williams, R. J. P.; Edwards, P. P. Superconductivity in transition metals, *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.* **2015**, *373*, 20140476.
20. Khan, H. R.; Superconducting Gold Alloys. A review of the state of the art, *Gold Bull.* **1984**, *17*, 94.
21. Zhimizu, K. et al. Superconductivity in the non-magnetic state of iron under pressure, *Nature*. **2001**, *412*, 316.
22. Stritzker, B.; Superconductivity in Irradiated Palladium, *Phys. Rev. Lett.* **1979**, *42*, 1769.
23. Nikulin, E. I.; Volkenshtein, N. V.; Startsev, V. E. Superconductivity of lutetium, *JETP Lett. (Engl. Transl.)* **1973**, *17*, 337.
24. Griveau, J.-C.; Colineau, É. Superconductivity in transuranium elements and compounds, *Comptes Rendus Phys.* **2014**, *15*, 599–615.
25. Eremets, M. I. Superconductivity in Boron, *Science (80-)* **2001**, *293*, 272–274.
26. Cochran, J. F.; Mapother, D. E.; Mould, R. E. Superconducting Transition in Aluminum, *Phys. Rev.* **1956**, *103*, 1657–1669.
27. Smolyaninova, V. N.; Zander, K.; Gresock, T.; Jensen, C.; Prestigiacomo, J. C.; Osofsky, M. S. et al., Using metamaterial nanoengineering to triple the superconducting critical temperature of bulk aluminum, *Sci. Rep.* **2015**, *5*, 15777.
28. Campanini, D.; Diao, Z.; Rydh, A.; Raising the superconducting T_c of gallium: In situ characterization of the transformation of α -Ga into β -Ga, *Phys. Rev. B*. **2018**, *97*, 184517.
29. Kuz'menko, V. M.; Mel'nikov, V. A.; Rakhubovskii, V. I. Mechanisms of spontaneous crystallization of amorphous metallic films, *Sov. Phys. JETP*. **1984**, *59*, 612.
30. Kubozono, Y.; Eguchi, R.; Goto, H.; Hamao, S.; Kambe, T.; Terao, T. et al., Recent progress on carbon-based superconductors, *J. Phys. Condens. Matter*. **2016**, *28*, 334001.
31. Tang, Z. K. Superconductivity in 4 Angstrom Single-Walled Carbon Nanotubes, *Science (80-)*. **2001**, *292*, 2462–2465.
32. Cao, Y.; Fatemi, V.; Fang, S.; Watanabe, K.; Taniguchi, T.; Kaxiras, E.; et al., Unconventional superconductivity in magic-angle graphene superlattices, *Nature*. **2018**, *556*, 43–50.
33. Zhang, R.; Waters, J.; Geim, A. K.; Grigorieva, I. V. Intercalant-independent transition temperature in superconducting black phosphorus, *Nat. Commun.* **2017**, *8*, 15036.
34. Li, X.; Sun, J.; Shahi, P.; Gao, M.; MacDonald, A. H.; Uwatoko, Y. et al., Pressure-induced phase transitions and superconductivity in a black phosphorus single crystal, *Proc. Natl. Acad. Sci.* **2018**, *115*, 9935–9940.
35. Shimizu, K.; Sahara, K.; Ikumo, M.; Eremets, M. I.; Amaya, K. Superconductivity in oxygen, *Nature*. **1998**, *393*, 767–769.
36. Szczyński, R.; Durajski, A. P.; Pach, P. W. Superconductivity in α -polonium at the reduced volume, *J. Phys. Chem. Solids*. **2014**, *75*, 224–229.
37. Shimizu, K.; Yamauchi, T.; Tamitani, N.; Takeshita, N.; Ishizuka, M.; Amaya, K.; et al., The pressure-induced superconductivity of iodine, *J. Supercond.* **1994**, *7*, 921–924.
38. Amaya, K.; Shimizu, K.; Eremets, M. I.; Kobayashi, T. C.; Endo, S. Observation of pressure-induced superconductivity in the megabar region, *J. Phys. Condens. Matter*. **1998**, *10*, 11179–11190.