

EL ORO: DE LA ALQUIMIA A LA RELATIVIDAD

Asdrúbal Valencia Giraldo

Ingeniería de Materiales
Universidad de Antioquia
avalen@udea.edu.co

Introducción

Aunque la química del oro avanzó entre los siglos XV a XVIII gracias a la alquimia, el tema permaneció sin desarrollo durante varios siglos. Sin embargo, la manera impresionante como se ha expandido la química del oro en las últimas décadas ha estimulado el surgimiento de varias aplicaciones tecnológicas importantes. El oro y sus compuestos también han concitado el interés de los físicos y químicos teóricos porque el elemento sirve como único punto de referencia para el estudio de los efectos relativísticos y de correlación. Muchos fenómenos de la química del oro se pueden interpretar sobre la base de tales efectos pero otros permanecen sin resolver y no se han comprendido del todo.

La investigación del oro en la actualidad se dirige principalmente los aspectos estructurales de los marcos supramoleculares y la nanotecnología. La agregación de complejos de oro mediante varios tipos de enlaces secundarios lleva a patrones de auto ensamble que no tienen precedentes, con interesantes consecuencias para la estructura asociada con las propiedades prototípicas. En tanto que algunas de estas se pueden racionalizar, otras tienen el carácter de misterios alquímicos, debido principalmente al delicado balance de varios efectos pequeños que contribuyen a los equilibrios de un sistema dado.

Por lo anterior se hará una pequeña introducción a la alquimia y las propiedades químicas y físicas del oro, para comprender cómo estas dependen de los efectos relativísticos de la estructura electrónica de este elemento.

La Alquimia

De acuerdo con una concepción, que no todos aceptan, el término alquimia es simplemente la palabra griega de Alejandría *quêmeia* (química) con el artículo definido árabe *al* como prefijo. Los tratados de Alejandría muestran que los alquimistas realmente querían hacer transmutaciones “cambiando el color” del plomo o el mercurio por medio de varios agentes químicos; y al cobre, que se tornaba blanco con el arsénico, se le consideró una especie de plata. En Europa todo esto se cubrió de misterio y fraudes. El agente trasmutante fue llamado después por los árabes *aliksir* (elíxir) —tal vez del griego *xerion*, un polvo o cosmético— y por los alquimistas europeos, *la piedra filosofal* o *tintura* (es decir, agente que cambiaba el color). La idea se basaba en los marcados efectos del arsénico, el mercurio y el azufre al cambiar el color de los metales, y fue bastante racional en aquel tiempo.¹

Tratando de explicar las diversas propiedades de las sustancias, los alquimistas las atribuyeron a determinados elementos, que añadieron a la lista de los griegos.

Identificaron el mercurio como elemento que confería propiedades metálicas a las sustancias y el azufre como el que impartía la propiedad de la combustibilidad. Uno de los últimos alquimistas, el físico suizo del siglo XVI Theophrastus Bombast von Hohenheim —más conocido como Paracelso—, añadió la sal como elemento que daba a los cuerpos su resistencia al calor.

Según los alquimistas, una sustancia puede transformarse en otra simplemente añadiendo o sustrayendo elementos en las proporciones adecuadas. Un metal como el plomo, por ejemplo, podía transformarse en oro añadiéndole una cantidad exacta de mercurio. Durante siglos prosiguió la búsqueda de la técnica adecuada para convertir en oro un “metal base”. Como se verá más adelante, en este proceso, los alquimistas descubrieron sustancias más importantes que el oro, como el alcohol, los ácidos minerales, las sales metálicas y el fósforo.²

En realidad, no es fácil resumir en pocas palabras la labor de un alquimista. Esta se centraba especialmente en tres facetas distintas: por una parte la búsqueda de la piedra filosofal, en presencia de la cual todos los metales podían ser convertidos en oro; en segundo lugar el descubrimiento del elixir de larga vida, imaginado como una sustancia capaz de evitar la corrupción de la materia y por último la consecución de la "Gran Obra", cuyo objetivo era elevar al propio alquimista a un estado superior de existencia, en una situación privilegiada frente al Universo, figura 1.



Figura 1. La "Gran Obra" de la Alquimia tenía por objetivo a elevar al propio alquimista a un estado superior de existencia, en una situación privilegiada frente al Universo.

Fuente: <http://feastoffun.com/topics/science-facts-fiction/2011/01/27/a-new-alchemy/>

Lo cierto es que la lectura de una obra alquímica es extremadamente ardua para un no iniciado. El lenguaje alquímico parece abstracto, absurdo, incomprendible, pero en realidad es esotérico y místico, saturado de códigos, de símbolos, de referencias que confunden al profano. Trampas y desvíos son frecuentes.³

Los trabajos de los Alquimistas no fueron una actividad inútil gastada locamente en hacer oro, buscar elixires para la vida eterna o encontrar la piedra filosofal, sino que constantemente fue dando frutos, que los alquimistas calificaban como secundarios,

pero que para la humanidad han sido de gran utilidad, como es la fabricación del jabón, del vidrio, de las pastas cerámicas, del arte de la tintorería, de muchas aleaciones metálicas, de importantes medicamentos, del vinagre, del alcohol e infinidad de cuerpos, de los cuales la sociedad fue sacando mucho provecho.⁴

Lo anterior permite apreciar que los alquimistas, con todos sus trabajos, por desconcertados y desacertados que parezcan, prepararon el camino para la construcción de la ciencia química moderna, pues bastaron algunos descubrimientos a fines del siglo XVIII, para que todos los hechos quedaran ordenados y racionalmente explicados.^{5,6}

Hay, en la actualidad, dos posiciones frente a la alquimia, algunos autores han querido ver en la alquimia ideas precursoras de la ciencia atómica, y consideran que contiene restos de una ciencia real, para otros, esta palabra se acerca al mundo del misterio, de lo prohibido, incluso de lo irreal. Los alquimistas están más cerca (para el vulgo en general) de los brujos y del *abracadabra* que de la ciencia empírica, figura 2.



Figura 2. Trabajos de Alquimia

Fuentes: <http://merovee.wordpress.com/2010/07/19/nazis-tried-alchemy-to-make-gold/>;
<http://www.rachelyoga.com/wp-content/uploads/2012/01/alchemy.jpg>

Es muy frecuente la creencia de que la Alquimia, en alguna fase de su desarrollo, se convirtió en la Química. No obstante, este punto de vista es demasiado simplista. Ya se ha visto que, al contrario, la Química se convirtió inicialmente en Alquimia y la verdad es que después, a lo largo de los dos siglos que van de Paracelso a Berhaave, una parte de la Alquimia se convirtió, con pocas modificaciones, en una parte de la Química. Dicha parte es, más concretamente, la técnica de laboratorio. Es decir, no puede considerarse a toda la Química heredera de la Alquimia.

Es cierto que la influencia más importante que recibió la Química provino de la Alquimia; sin embargo, no toda ella lo hizo, sino que además posee características propias que la definen y distancian. Primero: su propósito de buscar el conocimiento de las cosas en particular; segundo: el método científico, que la eleva a condición de ciencia; y tercero: las teorías atómicas, que caracterizan sus avances.

La Alquimia se distingue de la Química, en primer lugar, por sus fines, y en segundo lugar, por su método. La finalidad de la Alquimia es la perfección de todas las cosas según su propia naturaleza, y muy especialmente la de los metales. La de la Química es

la adquisición del conocimiento concerniente a las diferentes clases de materia y la utilización de este conocimiento para todo género de finalidades.⁷

El método de la Alquimia es, primordialmente, el estudio de los textos alquimistas cuyos autores se suponía que habían conocido el procedimiento que sus lectores estaban tratando de descubrir; secundariamente, consistía este método en un examen de la naturaleza, tal como se conocía por el sentir común, para descubrir sus leyes generales y aplicarlas a los problemas alquimistas; en tercer lugar, y en un plano inferior, el método era experimental, limitándose éste, en todo caso, a procurar averiguar las condiciones en que podían ser logradas las situaciones o condiciones prescritas por los textos. El método de la Química consiste en la cuidadosa descripción de los cambios experimentados por toda clase de materias y la clasificación de tales cambios para descubrir las leyes generales. Para el químico los libros son lo que pudiéramos llamar bases de datos y no autoridades; las analogías o paralelismos entre la manera de comportarse de los seres vivos y los inertes no tienen sitio en el campo de la ciencia química y la prueba a la que se someten todas sus conclusiones es el experimento.⁸

Debe reiterarse que hay, sobre todo, hay un factor común entre la Química y la Alquimia que, sin duda, es la técnica, figura 3. Cuando Sherwood Taylor⁹ afirma que “los alquimistas fueron los primeros, y antes de la última parte del siglo XVI casi los únicos, operadores”, no pretende contradecir lo que al respecto dice Holmyard¹⁰, o sea, que los primeros alquimistas encontraron a mano todo un caudal de conocimientos técnicos y prácticos que en su mayor parte resultaban muy apropiados para llevar a cabo las operaciones que se proponían.



Figura 3. Laboratorio de Alquimia

Fuente: http://ultimatedm.com/?attachment_id=452

Es cierto que al surgir la Alquimia ya habían alcanzado un alto grado de eficacia diversas ramas de la técnica como la Metalurgia, la Cerámica, la fabricación de vidrio, la tintorería y la preparación de colorantes, el arte textil, la elaboración de cerveza y la preparación de drogas, venenos y cosméticos; pero ninguna de ellas conjugaron como la Alquimia tantas técnicas ni instrumentos, tantos experimentos ni elaboración de teorías tan complejas, más bien pecaban de pragmatismo. Los alquimistas habían desarrollado una pequeña escala técnica de separación y combinación de los elementos constitutivos

de los cuerpos, y la Química casi no añadió por su parte nada nuevo al equipo y métodos técnicos anteriores hasta que inició la práctica para la recogida y estudio de los gases, a mediados del siglo XVIII.¹¹

La transformación de la Alquimia en Química empezó con el paso de los métodos de aquella a las manos de quienes perseguían otros objetivos distintos a los del perfeccionamiento de la materia. Los primeros que los adoptaron fueron los farmacéuticos y empezaron con una técnica alquímica: la destilación; la cual dominaron y popularizaron. En este paso se produjeron curiosos libros o manuales que recopilaban recetas y secretos y daban instrucciones para llevar a cabo “destilaciones operativas, perfumes, confituras, tintes, colores, fusiones y fundiciones”. Un ejemplo de tales obras fue la conocida como: *Los secretos del Maestro Alexis* (1555). Como se ha señalado, estos libros dieron al público, en general, la idea de que la ciencia natural y, especialmente, las artes químicas podían ser útiles.

Los primeros tratados técnicos sobre materias químicas ya aparecieron en Asiria, pero apenas a mediados del siglo XVI dejaron de constar, por regla general, de fórmulas aisladas al estilo de un libro de cocina. A partir de aquel siglo se encuentran numerosos tratados sobre las artes técnicas –metalurgia, vidriería, pirotecnia, farmacia... –, que aunque poco teóricos, proporcionan excelentes datos de carácter práctico y constituyen algunos de los más antiguos antecedentes de una observación científica consciente. La *Pirotecnia* (1540) de Biringuccio es uno de los más antiguos tratados de este género; también lo es *L'Arte Vetraria* de Antonio Neri (1612); no obstante, el ejemplo más sobresaliente es el gran *De re metallica* de Agrícola, publicado en 1556. En él se encuentran los principios del análisis químico en el ensayo de gangas y comprende la utilización de pequeños hornos de laboratorio y de delicadas balanzas de precisión. Es también el principio de la manufactura química en la preparación del azufre, betún, salitre, ácido nítrico, vitriolo y sustancias semejantes, figura 4.¹²

Se debe, ante todo, tener en cuenta que la contribución característica del siglo XVI y de los primeros años del XVII a la formación de la Química no consiste en los nuevos descubrimientos, sino en la divulgación, como materia de interés general, de lo que había constituido el trabajo secreto de los maestros y artesanos.

En resumen, desde el punto de vista del autor, la Alquimia es, sobre todo, un arte oculto y una pseudo ciencia, esto se ve en los mencionados objetivos principales que persiguen sus practicantes que, de manera reiterada, son: 1 - Transformar metales, como el plomo y el cobre, en metales preciosos, como el oro y la plata (el motivo de la transmutación); 2- Crear un elixir, poción o metal que cure todas las enfermedades (el motivo médico); 3- Descubrir un elixir que lleve a la inmortalidad (el motivo de la trascendencia).

A diferencia de la Química moderna, este arte antiguo es un hacer sobre todo espiritual. Los alquimistas pudieron ser los primeros en probar sus ideas diseñando experimentos, pero debido a sus creencias y propósitos metafísicos, no alcanzaron a desarrollar métodos científicos modernos. Aunque en la Alquimia se pueden rastrear influjos sobre la Química, la Medicina, la Biología, la la Medicina, etc., la Alquimia nunca se separó de lo sobrenatural, lo mágico y lo supersticioso. Quizá por eso aún siga siendo popular, aún cuando, según muchos, no ha logrado nada de valor perdurable. De acuerdo con

ellos los alquimistas nunca han transmutado metales, nunca han encontrado ninguna panacea, y nunca han descubierto la fuente de la eterna juventud.

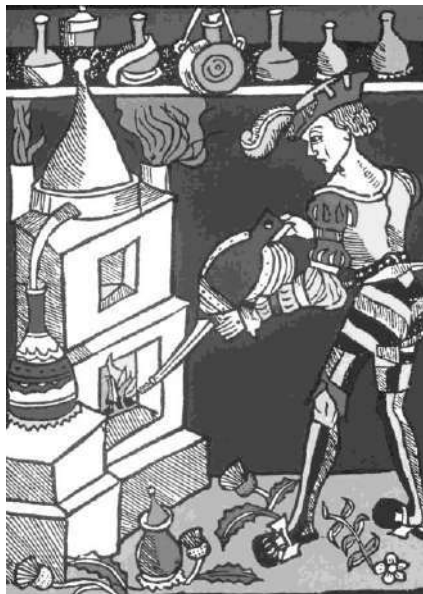


Figura 4. Un alquimista aviva el fuego del horno

Fuente: Thompson, C. J. S., *Alchemy and Alchemists*, Dover, New York, 2002, p. 100.

En la actualidad, el motivo de la transmutación es ampliamente ignorado, mientras que los motivos médicos y de la trascendencia toman fuerza en áreas como la homeopatía y la aromaterapia. Muchos alquimistas modernos combinan su arte oculto con astrología, acupuntura, hipnosis y una amplia variedad de búsquedas espirituales típicas de la Nueva Edad Media llamada Nueva Era.¹³

Para concluir este vistazo a la Alquimia debe recordarse que ésta se fundamenta en la creencia de que existen 4 elementos básicos: fuego, aire, tierra y agua; y 3 esenciales: sal, azufre y mercurio. A partir de estos 7 pilares se construyeron grandes sistemas simbólicos y metafísicos. Se dice que la antigua literatura oculta de los chinos y egipcios es la base en la que está cimentada la Alquimia. Como se ha anotado, la Alquimia fue muy popular en la Europa medieval, donde uno de los libros más sagrados de los alquimistas fue supuestamente escrito por el dios egipcio Thoth, conocido como Hermes Trismegistus (Hermes = el tres veces bendito). Hermes era el dios griego que servía de mensajero. Es así como en 1455, un manuscrito titulado *Corpus Hermeticum* comenzó a circular en Florencia, Italia. Dicho manuscrito era, supuestamente, una compilación del conocimiento alquímico, astrológico y mágico del dios egipcio. Sin embargo, ahora sabemos que ese trabajo es de origen europeo y de fecha posterior al tiempo en que Thoth prosperaba. El manuscrito está lleno de conjuros mágicos, encantamientos y otras nociones ocultas fútiles.

Entre los escritos atribuidos a Hermes Trismegisto sobresale la llamada Tabla Esmeraldina, y que acá se presenta en una traducción libre del texto latino medieval.

Verdadero, sin falsedad, cierto y muy verdadero:
lo que está de abajo es como lo que está arriba,
y lo que está arriba es como lo que está abajo,
para realizar el milagro de la Cosa Unica.
Y así como todas las cosas provinieron del Uno, por mediación del Uno,
así todas las cosas nacieron de esta Unica Cosa, por adaptación.
Su padre es el Sol, su madre la Luna,
el Viento lo llevó en su vientre,
la Tierra fué su nodriza.
El Padre de toda la Perfección de todo el Mundo está aquí.
Su fuerza permanecerá íntegra aunque fuera vertida en la tierra.
Separarás la Tierra del Fuego,
lo sutil de lo grosero,
suavemente,
con mucho ingenio.
Asciende de la Tierra al Cielo,
y de nuevo desciende a la Tierra,
y recibe la fuerza de las cosas superiores y de las inferiores.
Así lograrás la gloria del Mundo entero.
Entonces toda oscuridad huirá de ti.
Aquí está la fuerza fuerte de toda fortaleza,
porque vencerá a todo lo sutil
y en todo lo sólido penetrará.
Así fue creado el Mundo.
Habrán aquí admirables adaptaciones,
cuyo modo es el que se ha dicho.
Por ésto fui llamado Hermes Tres veces Grandísimo,
poseedor de las tres partes de la filosofía de todo el Mundo.
Se completa así lo que tenía que decir de la obra del Sol.

La Tabla Esmeraldina se denomina así porque habría sido grabada por el propio Hermes en una piedra verde, ya que los antiguos atribuían al verde las artes mágicas. Esta es la *biblia de los alquimistas*, y como se ve, consta de unas treinta líneas donde se encuentra la famosa Ley de las correspondencias, fundamental en todo el ocultismo: “lo que está de abajo es como lo que está arriba, y lo que está arriba es como lo que está abajo, para realizar el milagro de la Cosa Unica.”

Para los propósitos de este escrito debe resaltarse que uno de los propósitos de la Alquimia fue transmutar el plomo en oro. El plomo (número atómico 82) y el oro (número atómico 79) se definen como elementos por el número de protones que poseen. El cambio del elemento requiere cambiar el número atómico (número de protones), lo cual no puede hacerse por medios químicos. Sin embargo, se puede usar la Física para añadir o remover protones y cambiar n elemento en otro. Como el plomo es estable, hacerlo que libere protones requiere una gran energía, de modo que el costo de transmutarlo sería muchas veces mayor que el valor del oro resultante.

La transmutación del plomo en oro no solamente es posible teóricamente, sino que se ha logrado. Hay reportes de que Glenn Seaborg (1912 - 1999), premio Nobel de Química en 1951, transmutó una pequeña cantidad de plomo en oro, siguiendo la ruta del bismuto, en 1980.¹⁴ Hay un reporte anterior (1972) donde los físicos soviéticos en un

laboratorio de investigación nuclear cerca del lago Baikal, en Siberia, descubrieron accidentalmente la reacción para tornar el plomo en oro cuando vieron que la protección de plomo de un reactor experimental había cambiado a oro.

Actualmente los aceleradores de partículas transmutan los elementos rutinariamente. Una partícula cargada se acelera mediante campos electromagnéticos en rutas circulares o lineales, la cual al impactar un material despega los protones o neutrones produciendo un nuevo isótopo o un nuevo elemento. También los reactores nucleares se usan para crear elementos, aunque las condiciones están menos controladas.

En la naturaleza los elementos se crean añadiendo protones a los átomos de hidrógeno dentro del reactor nuclear de una estrella, de modo que se producen elementos cada vez más pesados, hasta el hierro (número atómico 26). Este es el proceso llamado nucleosíntesis. Los elementos más pesados que el hierro se forman en la explosión estelar de una supernova. En una supernova se puede formar plomo a partir del oro, pero no a la inversa.¹⁵

Propiedades Químicas del Oro

El oro es llamado un *metal noble* (un término alquímico) porque no se oxida en condiciones normales. Su símbolo químico es *Au*, que viene de la palabra latina *aurum*, de ahí los términos derivados como aúreo, aúrico, auroso, aurífero, etc.

El oro fue uno de los primeros metales que el hombre conoció porque en la naturaleza se encuentra en estado nativo, es decir, libre, sin combinarse con otros elementos y porque es hermoso e imperecedero y de él se pueden hacer exquisitos objetos.

El oro es un elemento y, junto con la plata y el cobre, es un miembro del grupo IB de la tabla periódica, los denominados metales de acuñación. Su número atómico es 79, su peso atómico es 197.2 y la configuración electrónica es $[\text{Xe}]6s^14f^{14}5d^{10}$. Como se ve en la figura 5, el oro tiene una posición especial en la tabla periódica. El oro sólo tiene un isótopo estable (con masa 197) con spin nuclear de $s = 3/2$. Debido a sus propiedades físicas este núcleo no es accesible a las técnicas convencionales de espectroscopia NMR, sin embargo, debido a la disponibilidad de isótopos radioactivos de platino, el oro ^{197}Au es lo que se llama un núcleo de efecto Mössbauer, y la espectroscopia γ de retroceso libre se ha usado ampliamente para elucidar los estados de oxidación, los números de coordinación y las geometrías del oro en sus compuestos.¹⁶

	s^1 d^{10}	s^2 d^{10}	s^2p^1 d^{10}	
Ni	Cu	Zn	Ga	Ge
Pd	Ag	Cd	In	Sn
Pt	Au	Hg	Tl	Pb

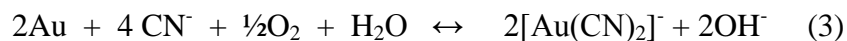
Figura 5. Posición del oro en la tabla periódica de los elementos

La configuración electrónica es $[Xe]6s^14f^{14}5d^{10}$ da origen a una gran cantidad de compuestos, el oro(I) tiene una configuración de capa cerrada $[5d^{10}]$ que es análoga a la del cobre (I) $[3d^{10}]$ y plata(I) $[4d^{10}]$.

Los principales estados de oxidación del oro son +1 (auroso) y +3 (aúrico), aunque se han mencionado otros estados de oxidación, como se muestra en la tabla 1. Una razón plausible para explicar la estabilidad de los estados de oxidación del oro es la energía de ionización, su elevado valor para la primera ionización, 890 kJ/mol, es el resultado de la contracción relativística del orbital 6s, del cual se remueve este electrón. Mientras que el valor para la tercera ionización, estimado en 2900 kJ/mol, es relativamente bajo y está de acuerdo con la estabilidad del estado +3, reforzado por el gran campo ligando que parte del ión $5d^8$, de modo que la preferencia del oro por el estado +3, se debe a efectos relativísticos, un tema que se resumirá más adelante. Esto se traduce en un elevado potencial de electrodo:



Debido a estos potenciales el oro es insoluble aún en los ácidos fuertes calientes. Por las razones anteriores el oro no es atacado por el oxígeno (no se empaña), pero se disuelve en cianuro bajo condiciones oxidantes formando el complejo $[Au(CN)_2]^{-}$, esta propiedad se utiliza para hacer que el oro pase a soluciones acuosas:



y también se disuelve en *agua regia*—mezcla de una parte de ácido nítrico y tres de ácido clorhídrico—, llamada así porque disuelve al rey de los metales, para dar el complejo $[AuCl_2]^{-}$. La reacción es:

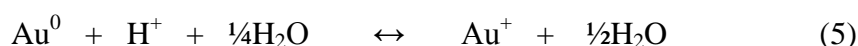


El oro además reacciona con los halógenos y por tanto se puede disolver en mezclas de halógenos y haluros iónicos en un solvente polar, por ejemplo en $\text{Cl}_2/\text{Et}_4\text{NaCl}/\text{MeCN}$ o $\text{I}_2/\text{KI}/\text{MeOH}$. Debe recordarse que el oro, como la plata y el cobre, se amalgama con el mercurio.

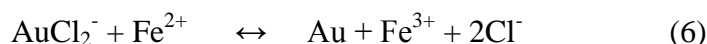
Tabla 1. Estados de oxidación del oro ¹⁷

Estado de oxidación	Casos
-1	Con metales muy electropositivos, por ejemplo: $\text{Cs}^+ \text{Au}^-$
+1	Ocurre con muchos ligandos, frecuentemente con coordinación 2
+2	Es raro, y se estabilizaría con ciertos ligandos
+3	Común, con muchos ligandos la coordinación es plana cuadrada
+4	Muy raro, se sospecha de un caso
+5	Con el flúor como ligando en coordinación 6
+7	No confirmado, con el flúor como ligando

La solubilidad del oro es muy sensible a las reacciones de oxidación- reducción:



Debido a lo anterior en la naturaleza el oro puede ser lixiviado y transportado por fluidos hidrotérmicos oxidantes y se precipita cuando el fluido entra a un ambiente reductor, por ejemplo en presencia de hierro:



Además de estas propiedades químicas, el otro atractivo del oro es su relativa escasez en la corteza terrestre, pues se estima que en la litosfera superior el contenido promedio es de 0.005 ppm, y va desde 0.003 ppm en la caliza y el granito-riolita hasta 0.03 ppm en las rocas sedimentarias. Los elementos que más frecuentemente se asocian mineralógicamente con el oro son la plata y el cobre. En la naturaleza el oro se encuentra como: a - metal nativo, donde se puede separar con métodos mecánicos o por amalgamación o cianuración; b- asociado con sulfuros, ya sea como partículas libres o diseminado en los sulfuros, de los cuales el más común es la pirita; c- como teluros, que se mezclan con el oro nativo y los sulfuros, la calaverita y la krennerita son minerales que contienen 25% de oro; d- en otros minerales, como en arsénico y antimonio, con minerales de zinc y plomo, en porfiritas de cobre y en materiales carbonáceos. También se encuentra oro en el agua del mar en cantidades de 0.1 a 0.2 mg/tonelada, dependiendo del lugar donde se tome la muestra.¹⁸ Todo este conocimiento de la química, la mineralogía y la geología del oro es fundamental en su extracción, pero ese no es el tema central de estas notas.¹⁹

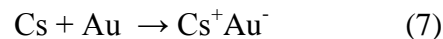
Los compuestos más comunes de oro son el cloruro aúrico y el ácido cloroaúrico que se usa en fotografía. Además del isótopo estable ya mencionado, el oro tiene 18 isótopos; el ¹⁹⁸Au, con una vida media de 2.7 días, se usa para tratar el cáncer y otras enfermedades. El disodio aurothiomalato se aplica intramuscularmente para tratar la artritis. El oro se consigue comercialmente con una pureza de 99.999+%.

Es decir, de modo práctico, el oro se puede disolver con:

- Agua regia = HCl + HNO₃
- Cianuro de Potasio KCN
- Cianuro de Sodio NaCN
- Con soluciones que producen cloro, generalmente soluciones que contienen:
 - Nitratos, cloruros, sulfatos, ácidos
 - Ácido clorhídrico y sulfatos
 - Algunos sulfatos como Fe₂(SO₄)₃
- Soluciones de Bromo
- Soluciones concentradas de FeCl₃ a alta temperatura.

Individualmente los ácidos clorhídrico y sulfúrico no tienen acción sobre él. Con el teluro se presenta como los minerales Silvanita y la Calaverita

De manera extraña, como se ve en la tabla 1, el oro también establece un record en el extremo bajo de los estados de oxidación en el sentido de que puede formar compuestos estables donde es el componente aniónico, es decir, Au⁻, el anión aururo.²⁰ Esto fue observado por primera vez por Zintl y por Biltz en el decenio de 1930,^{21, 22} y luego por Sommer,²⁰ quien hizo reaccionar cesio elemental con oro para obtener Cs⁺Au⁻ y notó que el oro debe tener una muy alta afinidad electrónica (2.039 eV para el oro y 1.202 eV para la plata)^{22 - 24}



No es sorprendente que el Au⁻ fuera descubierto mucho antes que el Na⁻, que se hizo notorio en el decenio de 1970. La existencia del Au⁻ no está restringida a fases binarias sencillas, también puede constituir fases ternarias donde representa un anión.

Propiedades Físicas y Mecánicas del Oro

La estructura cristalina del oro es cúbica de cara centrada con un parámetro de red de 28,8 nm y número de coordinación 12, funde a 1063° C y ebulle a 2600° C, formando un vapor rojizo. Se ha observado que cuando el oro se calienta fuertemente salen humos que pueden dorar un pedazo de plata que se expone a ellos. La volatilidad casi no se observa a 1000° C, pero a 1250° C es cuatro veces mayor; el cobre y el zinc la aumentan más que el plomo, pero la mayor volatilidad la induce el telurio. Se ha observado que el oro se volatiliza cuando se destila su amalgama y también se disipa si se pasa una corriente eléctrica fuerte por una lámina o un alambre de oro puro.²⁵

Como se anotó, por muchos años la temperatura de solidificación del oro se dijo que eran 1063° C; y esta sirvió como punto de calibración para la International Temperature Scales (ITS-27 y ITS-48) y la International Practical Temperature Scale (IPTS-48). En 1968, se adoptó una nueva International Practical Temperature Scale (IPTS-68), la cual exige que el punto del oro sea realmente 1064.43° C y su punto de ebullición 2856 °C.

El oro, en el mercado mundial se pesa en onzas troy, una onza troy es igual 31.10348 gramos y un gramo equivale a 15.4324 granos, de modo que un grano troy son 0.0648 gramos y así una onza troy equivale a 480 granos troy. En la tradición española otra medida de peso es el castellano, que son 4.6 g, es equivalente a la cincuentava parte del

marco de oro. El castellano de oro también es igual a 8 tomines y un tomín, que es la tercera parte del adarme, son 12 granos castellanos.²⁶

En forma pura el oro tiene lustre metálico y es del color amarillo del sol, pero mezclado con otros metales como plata, cobre, níquel, platino, paladio, telurio y hierro, adquiere varios tintes que van desde el blanco de la plata hasta el verde y el anaranjado – rojo. Cuando está finamente dividido, como en el púrpura de Cassius, o cuando se precipita de soluciones, el color es rojo rubí, mientras que en láminas delgadas transmite una luz verdosa. Es conveniente anotar que el púrpura de Cassius es un precipitado de oro finamente dividido e hidróxido de estaño, formado a partir de la interacción de cloruro de oro y cloruro de estaño, que se emplea para el coloreado de cristales de rubí.²⁷

El oro es casi tan blando como el plomo y más que la plata y normalmente se alea para endurecerlo, en estado puro es el más maleable y dúctil de todos los metales, 1 g de oro puede batirse para dar una lámina de 8000 cm², es un metal blando. Un solo grano (0.073 g) de metal se puede estirar en un hilo de 150 m de longitud y una onza oro (35.1 g) que recubra un alambre de plata es capaz de alargarse hasta 1300 m.

La presencia de diminutas cantidades de cadmio, plomo, bismuto, antimonio, arsénico, estaño, telurio y zinc fragilizan el oro. El oro se puede soldar fácilmente en frío y el metal finamente dividido, en el estado en que es precipitado de las soluciones, se puede comprimir entre discos.

Se estima que todo el oro del mundo extraído hasta ahora, cabría en un cubo de 20 m de lado. La densidad del oro a 20° C es de 19.3 g/cm³, pero se ha encontrado que esta depende considerablemente de la temperatura, la forma de precipitación y el grado de deformación que tenga. Cuando el oro se obtiene por precipitación de soluciones de sulfato férrico la densidad varía entre 19.55 y 20.72. La del oro fundido varía entre 18.29 y 19.37 y por compresión en dados se puede elevar de 19.37 a 19.41; sin embargo recociendo se recupera la densidad previa y se encuentra que es de 19.40.

Es buen conductor del calor y la electricidad, a 0° C tiene una conductividad equivalente a 70% de la de la plata; obviamente, el valor de este coeficiente depende fuertemente de la pureza del metal, la presencia de unas pocas milésimas de plata la rebajan un 10%. Su conductividad térmica es similar a la de la plata. En estado puro su resistividad eléctrica es de 2.4 Ωcm. El calor específico varía entre 0.0298 (de acuerdo con Dulong y Petit) y 0.03244 (según Regnault). El coeficiente de expansión térmica por cada grado, entre 0 y 100° C, es de 14.661 x 10⁻⁶ o de 15.136 x 10⁻⁶ cuando se ha recocido. Su coeficiente de conductividad térmica es de 319 W/m°K. El espectro de emisión tiene sus líneas más brillantes en 6277, 5960, 5955 y 5836 en el anaranjado y el amarillo, y 5230 y 4792 en el verde y el azul.

El oro en estado endurecido tiene una dureza de 49 Brinnell, una resistencia a la tracción de 200 MPa, un alargamiento del 2% y un módulo de elasticidad de 74 GPa; en estado recocido la dureza es de 28 Brinnell, la resistencia a la tracción es de 120 MPa y el alargamiento del 40%.²⁸

Como se observa, el endurecimiento del oro no le da dureza suficiente como para hacer armas o herramientas, por ello desde el principio se usó por su belleza; además, debido

a su maleabilidad era fácil hacer con él placas, hilos y por tanto brazaletes, anillos y otros ornamentos y joyas. Por esta razón los orfebres fueron de los primeros trabajadores del metal que existieron.

Efectos Relativistas

Como se ha señalado, el átomo de oro no sólo es único porque es noble, es decir tiene el potencial de oxidación más elevado, sino que también tiene la mayor afinidad electrónica de todos los metales. En cuanto a su electronegatividad, el oro está clasificado cerca del yodo, y de hecho los aniones aururos pueden reemplazar los aniones de yodo en las redes de las sales sin convertirlas en aleaciones o causar reacciones redox.²⁹

Durante muchos años estas extraordinarias propiedades redox se han adscrito tentativamente a una discontinuidad observada en los elementos post lantánicos, es decir, *la contracción lantánida*, que se define a lo largo de la serie *4f* de la tabla periódica y es la disminución progresiva del tamaño de los átomos y sus especies en estado (III) en función integrada de la carga nuclear y en menor proporción de de las correcciones relativistas.

Dentro del bloque *d* de la tabla periódica que va desde el grupo 3 hasta el 12 se pueden diferenciar tres series, que se denominan *1ª*, *2ª* y *3ª* serie, también serie *3d*, *4d* y *5d*, respectivamente.

Los metales de la *2ª* y *3ª* serie son muy similares, especialmente en los primeros grupos. Estas similitudes son el resultado de lo que se conoce como *contracción lantánida*. En el grupo 3, el ytrio (Y) y el lantano (La) muestran un comportamiento químico diferenciado que es consecuencia de los diferentes radios iónicos, energía de ionización, energía de solvatación, etc. Sin embargo, la inserción de los 14 elementos lantánidos entre el lantano y el hafnio (estructura electrónica general para un átomo lantánido en su estado fundamental: [Xe] 4fⁿ 5d⁰ 6s²; n = 1 a 14), lleva consigo un gran aumento de la carga nuclear efectiva; se están ubicando electrones en los siete orbitales *f*, con la particularidad de que los electrones de estos orbitales penetran poco hacia el núcleo del átomo y proporcionan un apantallamiento débil frente a la atracción que ejerce el núcleo sobre los electrones situados en orbitales más exteriores.

Tabla 2. Configuración de los elementos de la contracción la lantánica

Elemento	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
Configuración electrónica del átomo (todos parten de la config. del [Xe])	4f ¹ 5d	4f ³ 6	4f ⁴ 6	4f ⁵ 6	4f ⁶ 6	4f ⁷ 6	4f ⁷ 5d ¹	4f ⁹ 6	4f ¹⁰ 6	4f ¹¹ 6	4f ¹² 6	4f ¹³ 6	4f ¹⁴ 6	4f ¹⁴ 5d ¹
	¹ 6s ²	s ²	s ²	s ²	s ²	s ²	6s ²	s ²	s ²	s ²	s ²	s ²	s ²	6s ²

Configuración electrónica del ion Ln^{3+}	$4f^1$	$4f^2$	$4f^3$	$4f^4$	$4f^5$	$4f^6$	$4f^7$	$4f^8$	$4f^9$	$4f^{10}$	$4f^{11}$	$4f^{12}$	$4f^{13}$	$4f^{14}$
Radio (pm) del ion Ln^{3+} (coordinación 6)	102	99	98.3	97	95.8	94.7	93.8	92.3	91.2	90.1	89	88	86.8	86.1

Por esto, en la intersección de la 3ª serie con el grupo 4, se reducen los radios, y las energías de ionización aumentan hasta valores cercanos a los del zirconio (Zr); el zirconio y el hafnio son muy parecidos, fue muy difícil el descubrimiento del hafnio, que pasaba desapercibido en minerales donde estaban conjuntamente ambos por sustituciones isomórficas (Niels Bohr fue el que predijo que el elemento de número atómico 72 debería ser muy similar al zirconio). Estos efectos se pueden ver a lo largo de la serie $4f$ —conjunto de los elementos lantánidos de cerio a lutecio— y se extienden a lo largo del sexto periodo de la tabla periódica, conectando con los elementos del bloque p. El ejemplo más claro de esta contracción lantánida se detecta en la variación gradual del tamaño de los iones Ln (III), desde La (III) hasta Lu (III). Sin embargo, el perfil de la variación en los radios metálicos no es tan ideal debido a discontinuidades notables encontradas en europio e yterbio. Hay que resaltar que en el conjunto $5f$, o elementos actínidos, también se tiene un sistema similar denominado "contracción actínida".

Debe anotarse que la contracción lantánida tiene un 20% de peso atribuible a los efectos relativistas. La contracción lantánida tiene mayor potencia si se consideran los efectos relativistas directos de contracción para los orbitales exteriores s y p . Lo mismo habría que considerar para la contracción actínida.

La contracción lantánida y la actínida no son los únicos fenómenos de esta naturaleza en la tabla periódica relacionado con la carga nuclear efectiva y los efectos relativistas directos de contracción, sino que también se observa contracción atómica en series de la tabla periódica para otros periodos como en el 4º, generando en la 1ª serie del bloque d lo que podemos denominar como "contracción escándica". En esta contracción escándica no influyen efectos relativistas como los descritos, ya que se está en la 1ª serie, o serie $3d$ del bloque d , donde tenemos elementos más ligeros y estos efectos son insignificantes.

Sin embargo, aunque esta tendencia general no se puede cuestionar, ella no explica los máximos potencial redox y afinidad electrónica para el elemento oro ($Z = 79$) relativa a otros elementos con números atómicos $Z = 72 - 83$, como se ve en la figura 6. Fue sólo *la combinación con efectos relativísticos* lo que permitió una reproducción cuantitativamente convincente de las tendencias en las características de los elementos en cuestión. El concepto sencillo de la contracción *relativística del orbital s*, simultánea con la *expansión del orbital d* lleva a una descripción cuantitativamente útil de los estados electrónicos en el ámbito frontera/valencia comparado con el átomo hipotético no relativístico. El aumento en la energía de s y la afinidad electrónica relacionada con la

configuración 6s es obvia y sirve como primera clave de los efectos electrónicos que se esperan.³⁰

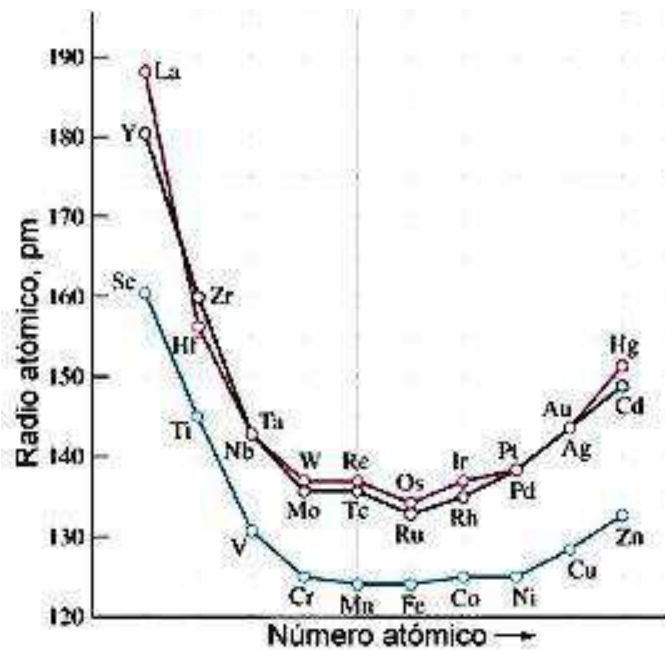


Figura 6. La contracción lantánica

Sobre esta base se puede decir que el color amarillo del oro masivo se puede atribuir a la pequeña discontinuidad entre la banda 5d completa (orbitales expandidos) y el nivel de Fermi de la banda 6s medio llena (orbitales contraídos), que son mucho mayores que el conjunto de orbitales no relativísticos.³¹⁻³³

La misma imagen sencilla es también instrumental en predecir los radios reducidos del oro atómico y de sus iones. Las investigaciones sistemáticas han demostrado de varias series análogas de compuestos de cobre, plata y oro han mostrado que el oro en su estado de oxidación +1 es mucho menor que la plata, y de hecho, cae entre la plata y el cobre.^{34, 35}

En este punto es conveniente hacer una pequeña introducción a lo que son los efectos relativísticos en la química. El tamaño anómalo del oro es común a los elementos de la sexta fila de la tabla periódica y, como se indicó, esto se ha explicado con la *contracción lantánica*, es decir la disminución del apantallamiento del núcleo debido a la inclusión de los electrones 4f (efecto de la capa f), lo que causa la contracción de las capas de valencia y con *los efectos relativísticos grandes*, que ocurren debido a la elevada velocidad de los electrones cuando se mueven cerca del núcleo. En 1905 Albert Einstein publicó su artículo sobre la teoría especial de la relatividad y mostró que la masa de un objeto que se mueve aumenta con la velocidad. Sin embargo, en 1926 Erwin Schrödinger³⁶ formuló su famosa ecuación que dice que la masa del electrón no depende de su velocidad. No obstante, 10 años antes Sommerfeld explicó la estructura fina del hidrógeno teniendo en cuenta los efectos relativísticos.^{37, 38} Finalmente, en 1928 Dirac logró la síntesis entre la mecánica cuántica y la relatividad.^{39, 40} Él demostró que el

acoplamiento spin órbita era un efecto puramente relativístico que todos los electrones, incluidos los s , tenían un momento angular, que consistía en la suma del momento angular del orbital y del spin.

En el contexto de los cálculos de la estructura electrónica, la diferencia entre los tratamientos de la mecánica cuántica no relativística (Schrödinger) y relativística (Dirac) se denominan efectos relativísticos, donde se distinguen tres aspectos:

1. Efecto directo: Ocurre *una contracción de los orbitales s y p* debido al aumento relativístico de la masa junto con un decremento del radio de Bohr:

$$a_0 = \frac{4\pi\epsilon_0\hbar^2}{mZe^2} \quad (8)$$

2. Efecto directo: El desdoblamiento spin –órbita en el tratamiento relativístico se hace importante, y en vez del momento angular del orbital l y el momento angular del spin s se debe usar su suma vectorial $j = l + s$.
3. Efecto indirecto: Ocurre *una expansión de los orbitales d y f* debido que los orbitales s y p ambos adentro y fuera de los orbitales d y f se ha contraído apantallando la atracción nuclear que experimentan estos últimos orbitales.

Cuando se discute el primer efecto con más detalle es necesario hacer énfasis en que la masa de la partícula aumenta cuando la velocidad se acerca a la velocidad de la luz. El electrón s , que no tiene momento angular orbital, es el que se aproxima más al núcleo y por tanto gana la mayor velocidad. Para los átomos pesados (Z grande, a_0 muy pequeño) los electrones internos $1s$ y $2s$ tienen velocidades que se aproximan lo suficientemente a la de la luz, y experimentan aumentos de masa sustanciales. Como resultado, a_0 se reduce más y esos electrones pasan aún más tiempo cerca del núcleo, lo que lleva a la contracción del radio promedio y a menores energía orbitales. Con esta contracción de las capas s más internas, los electrones s más externos también se acercan al núcleo y experimentan efectos similares. El efecto sobre los orbitales p muestra una tendencia similar, pero menor. Más aún, un tratamiento de acuerdo con Dirac muestra que la degeneración de los orbitales p se eleva, dividiéndolos en dos conjuntos, $p_{1/2}$ y $p_{3/2}$. La magnitud de la contracción de la subcapa $p_{1/2}$ es comparable a la de la $s_{1/2}$, en tanto que la de $p_{3/2}$ se contrae mucho menos. Por consiguiente, los efectos relativísticos son una de las razones para la substancial estabilización de los orbitales s y p .

Otra razón son los efectos clásicos de la estructura de las capas d y f que se contraen simultáneamente, que son experimentados por los elementos de la sexta fila de la tabla periódica, en particular el oro, el platino y el mercurio. Así la carga nuclear es aumentada por 24, pues sólo está apantallada débilmente por los electrones d y f añadidos.

El acoplamiento del spin y el orbital es el segundo efecto relativístico, es la interacción del spin del electrón con el momento angular debido al movimiento orbital de los electrones. Su fuerza es proporcional al gradiente del campo eléctrico en el átomo. Esta

energía spin – orbital, que se observa por la disociación de las líneas espectrales, se hace mayor para los elementos más pesados. Y, en efecto, es conveniente tomar esta energía como una medida de la necesidad de usar la teoría relativística para describir los fenómenos químicos. Como se ha mencionado, exceptuando los orbitales *s* donde no hay momento angular orbital *m*, la interacción spin – órbita divide la capa de un *l* dado en subcapas con momento angular total $j = l + 1/2$ y $j = l - 1/2$. Por ejemplo, el caso en que $l = 1$ y $j = 1/2$ es llamado $p_{1/2}$. En este caso el número cuántico magnético m_j (o la componente de *j* en a lo largo de una dirección dada) puede tomar dos valores posibles $+ 1/2$ y $- 1/2$. Por consiguiente, la capa $p_{1/2}$ puede acomodar dos electrones. De manera similar la capa $p_{3/2}$ puede recibir hasta cuatro electrones con m_j igual $+ 3/2$, $+ 1/2$, $- 1/2$, o $- 3/2$.

Debido al desdoblamiento spin – órbita la capa $p_{1/2}$ está por debajo de la capa $p_{3/2}$ correspondiente y por tanto se llena primero. La interacción spin – órbita también se puede tratar como una interacción magnética, pero con el campo magnético generado el movimiento del orbital de un electrón dentro del átomo mismo. El efecto relativístico del enlace *p* debe ser más prominente para el talio donde el átomo tiene un solo electrón $p_{1/2}$ de valencia.

Las capas con mayor momento angular, *d* y *f*, experimentan, sobre todo, un efecto relativístico “indirecto”, que es ocasionado por la relajación relativística de otras capas. En particular, la contracción del seminúcleo *s* y *p* (es decir, las capas *s* y *p* con los mismos números cuánticos y casi la misma extensión espacial como la capa *d/f* bajo consideración, aunque con energías muy diferentes) llevará a un apantallamiento más efectivo de los orbitales *d* y *f* y por tanto a una estabilización energética.

Ambos efectos, la contracción del orbital *4f* y la contracción relativística de las capas *s/p*, son de la misma magnitud general, y la última se hace más importante para los elementos mucho más pesados que los lantánidos.^{40, 41} Sin embargo, en el caso de los orbitales *5d* el efecto relativístico está en dirección opuesta: la capa *4f* llena contrae al orbital *5d*, pero los efectos relativísticos lo expanden. De todos modos, se puede considerar la superposición de los efectos relativísticos y los orbitales particularmente fuertes encontrados en el platino, el oro y el mercurio, como los responsables de las peculiaridades observadas en estos elementos.

Las consecuencias de los efectos relativísticos sobre las propiedades químicas de los elementos en la tabla periódica han sido ampliamente discutidas por Grant,⁴² Pyykkö y Desclaux⁴³, y posteriormente por Jansen.^{44, 45} En particular P. Pyykkö en una serie de artículos de revisión^{46 – 52} ha expandido el alcance de las posibilidades respecto a los resultados experimentales. A su vez M. Jansen ha mostrado la influencia de los efectos relativísticos especialmente sobre la química del oro y el platino, con base en la evidencia experimental.^{44, 45} Los primeros cálculos relativísticos teóricos de las estructuras atómicas por I. P. Grant⁴³ y, más ampliamente por J. P. Desclaux,⁵³ proporcionaron una primera base cuantitativa para el estudio del significado del movimiento relativístico en las propiedades físicas y químicas de los elementos. Desde entonces se han publicado una cantidad de revisiones^{42, 54 – 58} y monografías^{59 – 64} mostrando los logros de la teoría. Más aún, la bibliografía entera en este campo está muy bien documentada por Pyykkö, como se encuentra en la Web.⁶⁵ Pero la conclusión esencial, que se puede derivar, es que los cálculos basados en la ecuación de Schrödinger no son adecuados para la discusión de la propiedades químicas de los

átomos pesados, las cuales sólo se pueden describir con la ecuación de Dirac o sus aproximaciones.

Cualitativamente, los efectos resultantes de tomar en cuenta la dependencia de la masa del electrón con su velocidad se puede estimar de los resultados de Gran⁴³ y Desclaux.⁵² Un gráfico ilustrativo de la contracción del orbital 6s como función del número atómico ha sido publicado por Pyykkö y Desclaux⁴⁴, figura 7, el cual muestra que el oro y el platino exhiben una gran contracción relativística del orbital 6s.

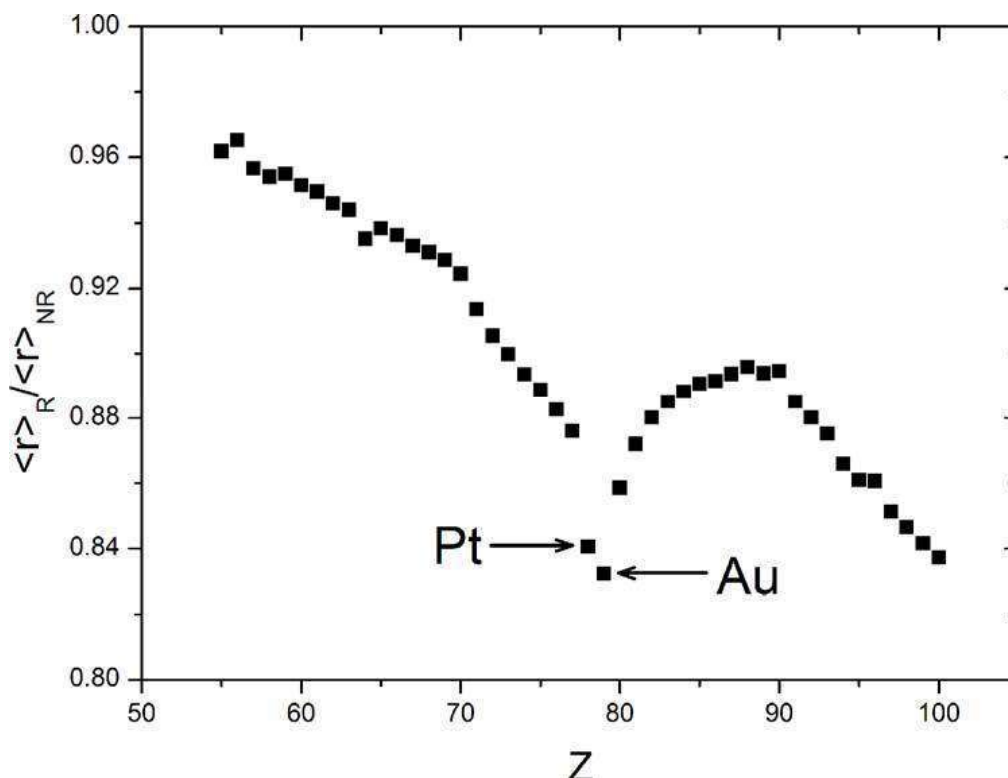


Figura 7. Contracción relativística del orbital 6s para los elementos con Z de 55 a 100, basada en los cálculos de Desclaux.⁵³

Los efectos relativísticos sobre las energías orbitales y por tanto sobre las energías de excitación, los potenciales de ionización y afinidades electrónicas, son notables en muchos datos relevantes químicamente, en particular la electronegatividad. Los efectos relativísticos sobre el tamaño de un átomo se reflejan en la polarizabilidad del elemento,^{66, 67} y también en las propiedades de enlace. Las explicaciones sencillas de los efectos relativísticos sobre las propiedades moleculares que cubren todos los casos son difíciles de dar,⁶⁶ porque deben considerarse muchos efectos opuestos de orden más elevado (el cambio relativístico de la constante de la fuerza, el cambio relativístico de segundo orden de la pendiente de la curva de potencial, o el efecto de la correlación diferencial del electrón). Pero en muchos casos sencillos, sobre todo cuando el enlace comprende fundamentalmente los electrones más externos *p* y *s*, se experimenta una contracción relativística de la longitud del enlace.

Los datos presentados en la figura 7 llaman la atención hacia el oro y se relacionan con otros hechos ya mencionados, que también son excepcionales: así la energía de ionización del oro es la más elevada entre los elementos del mismo período (Au – 9.23eV, Pt – 9.0, Tl – 6.11 eV, Pb – 7.45).⁶⁸

Otra característica del oro –ya señalada– es su mayor afinidad electrónica (2.31eV) entre todos los metales,⁶⁹ figura 8, ya se indicó que se aproxima a los valores de los halógenos (yodo -3.06 eV). Los parámetros de red del oro ($a = 4.078 \text{ \AA}$) son menores que los de la plata isoestructural ($a = 4.086$).⁷⁰ Todo esto demuestra el efecto de la estabilización relativista del orbital 6s del oro.

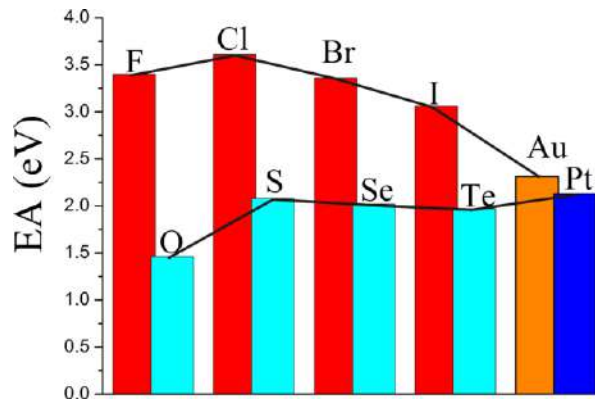


Figura 8. Afinidad electrónica de los halógenos (rojo), los calcógenos (verdeazul), el oro (naranjado) y el platino (azul).⁷¹

Como ya se mencionó, un ejemplo clásico de la existencia del oro como anión monovalente es la composición del compuesto CsAu, que es como una sal, la cual, como ya se dijo, fue descubierto por W. Biltz y F. Weibke en 1938 en la forma de cristales anaranjados rojizos, lo cual fue confirmado después por A. Sommer. Se encontró que el compuesto cristaliza con estructura tipo CsCl.⁷²⁻⁷⁴ El compuesto es semiconductor y el carácter iónico del enlace con un electrón extra en el átomo de oro, que forma unión aururo de carácter negativo ha sido validado por estudios con ESCA,⁷⁵ Mossbauer,⁷⁶⁻⁷⁸ y XANES.⁷⁹⁻⁸⁰

Los resultados de la espectroscopia NMR con ^{133}Cs , para caracterizar los electrones localizados, señaló el carácter iónico del CsAu.⁸¹⁻⁸³ De acuerdo con los experimentos, los cálculos de la estructura de bandas han mostrado una laguna definida entre las bandas, confirmando la transferencia de carga del cesio al oro, independientemente del método de cálculo.⁸⁴ Sin embargo, de acuerdo con los cálculos sin tener en cuenta la contracción relativista del orbital 6s, el compuesto exhibiría propiedades metálicas y no semiconductoras.⁸⁵

En general, todos los resultados obtenidos con este tipo de compuestos muestran que los principales efectos en el nivel del orbital atómico son la estabilización energética y la contracción radial de la capa 6s, acompañadas de la desestabilización y la expansión de la capa 5d. Así, que los efectos relativistas –sobre todo– y orbitales influyen sobre las propiedades del oro. Esto es así porque hace que los electrones s están más ligados y los d más sueltos que sus contrapartes en la plata, por ejemplo.⁸⁶

La Relatividad y las Propiedades del Oro

Ya se vio como estos fenómenos modelan las propiedades fisicoquímicas del oro, pero, en realidad, todos estos efectos expanden la química del oro muy por fuera de los límites normales de los elementos del Grupo 11 (los metales de acuñación) y dan una química notablemente rica a este metal noble.^{87, 88}

Es decir, la contracción de los orbitales 6s estabilizan esos electrones, que son más difíciles de ionizar y en consecuencia, difíciles de obtener como cationes. Esto también explica la afinidad electrónica y la posibilidad de aceptar electrones de ciertos aniones.

Además, la laguna energética entre los orbitales 5d, 6s y 6p disminuye, la configuración cerrada de la capara 5d₁₀, que ya no es inerte químicamente y se puede explicar la interacción entre dos centros de oro (I) con cargas iguales. Por ello son bien conocidos los compuestos de coordinación de oro (I) que tienen enlace aurofílico, es decir interacciones de capa cercana (d₁₀ – d₁₀) entre los átomo de oro monovalente. Fenómeno que se ha observado en una variedad de compuestos mononucleares y multinucleares de oro (I) y se han descrito en muchos estudios experimentales y teóricos.^{89, 90}

Por último, la desestabilización de los orbitales 5d explica la facilidad de formación del oro (III), lo que prácticamente no se da en la plata y el cobre.⁹¹

Finalmente, las propiedades ópticas también dependen de los efectos reseñados. Así la plata casi no absorbe fotones de color y se comprende que absorbe los fotones ultravioleta, y refleja todos los fotones visibles de una forma más o menos igual, lo que le da el color plateado. La frecuencia ultravioleta coincide con un electrón que salta de un orbital a otro. En el caso de la plata es del orbital 4d al 5s. También el oro absorbería la frecuencia ultravioleta cuando su electrón del orbital 5d salte al 6s. Pero el orbital 6s está contraído y por eso el salto del 5d al 6s coincide con un fotón azul (que tiene menos energía que el ultravioleta). Cuando se absorbe la luz de frecuencia azul, se reflejan los colores más rojos, lo que produce el color dorado. Así que el color del oro, tal vez su principal característica, depende de la relatividad.

Así por la ruta del oro se recorre el largo camino de la alquimia a la relatividad.

Referencias

01. Eliade, Mircea, *Herreros y alquimistas*, Alianza, Madrid, 1990, p. 136.
02. Taylor, Sherwood, *Los alquimistas fundadores de la química moderna*, Fondo de Cultura Económica, Medellín, 1957, p. 149.
03. <http://perso.wanadoo.es/getn/alquimia/alquimia.htm>, 2006
04. Valencia Giraldo, Asdrúbal, “La moderna alquimia: la industria química”, *De la técnica a la modernidad*, Editorial Universidad de Antioquia, Medellín, 2004, p. 149.
05. <http://www.todotarot.com.ar/Avisos/alquimiavisos.htm>, 2006
06. Strathern, Paul, *El sueño de Mendeleiev: de la alquimia a la química*, Siglo XXI, Madrid, 2000.
07. Thompson, Charles, *Alchemy: source of chemistry and medicine*, Sentry, New York, 1974, p. 43.

08. Ancízar-Sordo, Jorge, "Los alquimistas", *Educación Antioqueña*, Vo 02, Ene. – Feb. 1940, p. 8.
09. Taylor, Sherwood (1957), *Op. Cit.*, p. 222.
10. Holymard, E. J., *Alchemy*, Dover, New York, 1990, p. 43.
11. Taylor, Sherwood (1957), *Op. Cit.*, p. 223.
12. ----, *Ibíd*, p.225.
13. Burckhardt, Titus, *Alquimia: significado e imagen del mundo*, Plaza & Janés, Barcelona, 1976, p. 122.
14. "Turning lead into gold";
<http://thelongestlistofthelongeststuffatthelongestdomainnameatlonglast.com/trivia4.html>
15. Helmenstine, A. M., "Turning Lead into Gold";
<http://chemistry.about.com/cs/generalchemistry/a/aa050601a.htm>
16. Bowmaker, G. A., "Gold chemistry", *Gold, Progress in Chemistry, Biochemistry and Technology*, h. Schmidbaur (ed.), John Wiley, Chichester, 1999, p. 841.
17. Cotton, S. A., *Chemistry of Precious Metals*, Chapman and Hall, London, 1997, p. 274.
18. "Carcterísticas del oro", *Noticias de joyería*;
http://www.raulybarra.com/notijoya/archivosnotijoya/oro_caracteristicas.htm, consultado en 2004
19. Yannopoulos, J. C., *The Extractive Metallurgy of Gold*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1991, p. 4.
20. Sommer, A., "Alloys of gold with alkali metals", *Nature*, Vol. 152, 1943, p. 215.
21. Zintl, E., J. Gobeau and W. Z. Dullenkpf, *Z. Phy. Chem.*, Vol. A 154, 1931, p. 1.
22. Biltz, W.und F. Weike, "On the Valency and Chemical Compression of Metals Alloyed with Gold", *Z. Anorg. Allg. Chem.*, Vol. 236, 1938, p. 12.
23. Mudring, A.V., Jansen, M., "Base-induced disproportionation of elemental gold", *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.*, Vol. 39, 2000, p. 3066.
24. Pyykkö, P., "Relativity, gold, closed-shell interactions and $CsAu^*NH_3$ ", *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.*, Vol. 41, 2002, p. 3573.
25. <http://www.1911encyclopedia.org/G/GO/GOLD.htm>, 2004
26. *Diccionario de la lengua española*, Real Academia Española, Madrid, 2001, p. 1488.
27. <http://www.prodigyweb.net.mx/degcorp/Quimica/Oro.htm>, 2004.
28. Avner, Sydney, *Introducción a la Metalurgia Física*, McGraw Hill, México, 1966, p. 426.
29. Mudring, A.V., et al., "Cesiumauride ammonia(1/1), $CsAu^*NH_3$: A crystalline analogue to alkali metals dissolved in ammonia?", *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.*, Vol. 41, 2002, p. 120.
30. Eliav, E., U. Kaldor and Y. Ishikawa, "Open-shell relativistic coupled-cluster method with Dirac-Fock-Breit wave functions: Energies of the gold atom and its cation", *Phys. Rev.*, Vol. 49, 1994, p. 1724.
31. Hess, B. A. (ed.), *Relativistic Effects in Heavy-Element Chemistry and Physics*, John Wiley, Chichester, 2003, p. 307.
32. Christensen, N.E. and B.O. Seraphin, "Optical properties and the energy-band structure of gold", *Proc. of the 1971 Spring Meeting of the Optical Society of America*, 1971, p. 39.

33. Christensen, N.E. and B.O. Seraphin, "Relativistic Band Calculation and the Optical Properties of Gold", *Phys. Rev. B*, Vol. 4, 1971, p.3321.
34. Christensen, N.E."Relativistic Band Structure Calculations", *Int. Journal Quant. Chem.*, Vol. 25, 1984, p. 233.
35. Bayler, A., A. Schier, G. Bowmaker and H. Schmidbaur, "Gold Is Smaller than Silver. Crystal Structures of [Bis(trimesitylphosphine)gold(I)] and [Bis(trimesitylphosphine)silver(I)] Tetrafluoroborate", *J. Am. Chem Soc.*, Vol. 118, 1996, p. 7006.
36. Schrödinger, E., "An Undulatory Theory of the Mechanics of Atoms and Molecules", *Phys. Rev.*, Vol. 28, 1926, p. 1049.
37. Sommerfeld, A., "Zur quantentheorie der spektrallinien", *Ann. Phys.-Berlin*, Vol. 51, 1916, p. 1.
38. Sommerfeld, A., "Zur Quantentheorie der Spektrallinien", *Ann. Phys.-Berlin*, Vol. 51, 1916, p. 125.
39. Dirac, P. A. M., "The Quantum Theory of the Electron", *Proc. R. Soc. Lond. Ser. A-Contain. Pap. Math. Phys. Charac-ter*, Vol. 118, 1928, p. 351.
40. Dirac, P. A. M., "The Quantum Theory of the Electron II", *Proc. R. Soc. Lond. Ser. A-Contain. Pap. Math. Phys. Charac-ter*, Vol. 117, 1928, p. 610.
41. Bagus, P. S., Y. S. Lee and K. S. Pitzer, "Effects of relativity and of the lanthanide contraction on the atoms from hafnium to bismuth", *Chem. Phys. Lett.*, Vol. 33, 1975, p. 408.
42. Pitzer, K. S., "Relativistic Effects on Chemical Properties", *Acc. Chem. Res.*, Vol. 12, 1979, p. 271.
43. Grant, I. P., "Relativistic calculation of atomic structures", *Adv. Phys.*, Vol. 19, 1970, p. 747.
44. Pyykkö, P. and J. P. Desclaux, "Relativity and the periodic system of elements", *Acc. Chem. Res.*, Vol. 12, 1979, p. 276.
45. Jansen, M., "Effects of relativistic motion of electrons on the chemistry of gold and platinum", *Solid State Sci.*, Vol. 7, 2005, p. 1464.
46. Jansen, M., "The chemistry of gold as an anion", *Chem. Soc. Rev.*, Vol. 37, 2008, p. 1824.
47. Pyykkö, P., "Relativistic Quantum chemistry", *Adv. Quantum Chem.*, Vol. 11, 1979, p. 353.
48. Pyykkö, P., "Relativistic effects in structural chemistry", *Chem. Rev.*, Vol. 88, 1988, p. 563.
49. Pyykkö, P., "Relativity, gold, closed-shell interactions and CsAu.NH₃", *Angew. Chem.*, Vol. 114, 2002, p. 3723.
50. Pyykkö, P., "Theoretical chemistry of gold", *Angew. Chem. Int. Ed.*, Vol. 43, 2004, p. 4412.
51. Pyykkö, P., "Theoretical chemistry of gold. II", *Inorg. Chim. Acta*, Vol. 358, 2005, p. 4113.
52. Pyykkö, P., "Theoretical chemistry of gold III", *Chem. Soc. Rev.*, Vol. 37, 2008, p. 1967.
53. Desclaux, J. P., "Relativistic Dirac-Fock expectation values for atoms with $Z = 1$ to $Z = 120$ ", *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, Vol. 12, 1973, p. 311.
54. Bartlett, N., "Relativistic effects and the chemistry of gold", *Gold Bull.*, Vol. 31, 1998, p. 22.
55. Christiansen, P. A., W. C. Ermler and K. S. Pitzer, "Relativistic Effects in Chemical Systems", *Annu. Rev. Phys. Chem.*, Vol. 36, 1985, p. 407.

56. Heß, B. A., "Relativistic effects in heavy-element chemistry", *Ber. Bunsen-Ges. Phys. Chem. Chem. Phys.*, Vol. 101, 1997, p. 1.
57. Kaltsoyannis, N., "Relativistic effects in inorganic and organometallic chemistry", *J. Chem. Soc., Dalton Trans.* 1997, p. 1.
58. Schwerdtfeger, P., "Relativistic effects in properties of gold", *Heteroat. Chem.*, Vol 13, 2002, p. 578.
59. Malli, G. L. (Ed.), *Relativistic Effects in Atoms, Molecules, and Solids*, NATO ASI Series, New York, 1983.
60. Pyykkö, P., *Relativistic Theory of Atoms and Molecules: Part 1*, Springer, Berlin, 1986.
61. Pyykkö, P., *Relativistic Theory of Atoms and Molecules: Part 2*, Springer, Berlin, 1993.
62. Pyykkö, P., *Relativistic Theory of Atoms and Molecules: Part 3*, Springer, Berlin, 2000.
63. Schwedtfeger, P. (Ed.), *Relativistic Electronic Structure Theory, Part 1: Fundamentals*, Elsevier Science B.V., Amsterdam, 2002.
64. Schwedtfeger, P. (Ed.), *Relativistic Electronic Structure Theory, Part 2: Applications*, Elsevier Science B.V., Amsterdam, 2004.
65. Pyykkö, P., *Database "RTAM"*. <http://rtam.csc.fi/>.
66. Kellö, V., M. Urban and A. J. Sadlej, "Electric dipole polarizabilities of negative ions of the coinage metal atoms", *Chem. Phys. Lett.*, Vol. 253, 1996, p. 383.
67. Kunz, C. F., C. Hättig and B. A. Heß, "Ab initio study of the individual interaction energy components in the ground state of mercury dimer", *Mol. Phys.*, Vol. 89, 1996, p. 139.
68. Mackay, K. M. and R. A. Mackay, *Introduction to Modern Inorganic Chemistry, 5th ed.*, Stanley Thornes (Publishers) Ltd, Cheltenham, 2000, p. 27.
69. T. Andersen, H. K. Haugen and H. Hotop, "Binding energies in atomic negative ions, III", *J. Phys. Chem. Ref. Data*, Vol. 28, 1999, p. 1511.
70. P. Villars and L. D. Calvert, *Pearson's Handbook of Crystallographic Data for Intermetallic Phases, 2ed*, ASM International, Ohio, 1991.
71. Saltykov, V., *The Relativistic Effect in Intermetallic Phases of Gold, Platinum and Thallium*, Max-Planck-Institut für Festkörperforschung, Stuttgart, 2011, p. 5.
72. Kienast, G. J. Verma and W. Klemm, "Das Verhalten der Alkalimetalle zu Kupfer, Silber und Gold", *Z. Anorg. Allg. Chem.*, Vol. 310, 1961, p. 143.
73. Spicer, W. E., A. H. Sommer and J. G. White, "Studies of the Semiconducting Properties of the Compound CsAu", *Phys. Rev.*, Vol. 115, 1959, p. 57.
74. Zachwieja, U., "Einkristallzüchtung und Strukturverfeinerung von RbAu und CsAu", *Z. Anorg. Allg. Chem.*, Vol. 619, 1993, p. 1095.
75. Knecht, J., R. Fischer, H. Overhof and F. Hensel, "ESCA Study of Compounds of Gold in the Oxidation State -1", *J. Chem. Soc., Chem. Commun.*, Vol. 21, 1978, p. 905.
76. Wertheim, G. K. et al, "Charge transfer in CsCl-structure intermetallic compounds", *Phys. Rev. B*, Vol. 20, 1979, p. 860.
77. Batchelor, R. J. T. Birchall and R. C. Burns, "Gold-197 Mössbauer analysis of alkali-metal-gold intermetallics and (2,2,2-crypt-M⁺)Au⁻ compounds: existence of Au⁻ in the solid state", *Inorg. Chem.*, Vol. 25, 1986, p. 2009.

78. Stanek, J., S. S. Hafner and F. Hensel, "Phase transition of CsAu at high pressure", *Phys. Rev. B*, Vol. 32, 1985, p. 3129.
79. Feldmann, C. and M. Jansen, "Cs₃AuO, das erste ternäre Oxid mit anionischem Gold", *Angew. Chem.*, Vol. 105, 1993, p. 1107
80. Pantelouris, A., G. Küper, J. Hormes, C. Feldmann and M. Jansen, "Anionic Gold in Cs₃AuO and Rb₃AuO Established by X-Ray Absorption Spectroscopy", *J. Am. Chem. Soc.*, Vol. 117, 1995, p. 11749.
81. Dupree, R., D. J. Kirby, W. Freyland and W. W. Warren, "Observation of NMR of the Formation of Localized Electronic States in an Ionic Liquid Alloy", *Phys. Rev. Lett.* Vol. 45, 1980, p. 130.
82. Dupree, R., D. J. Kirby and W. W. Warren, "Melting-induced electron localization: ¹³³Cs NMR study of solid and liquid CsAu", *Phys. Rev. B*, Vol. 31, 1985, p. 5597.
83. Tinelli, G. A. and D. F. Holcomb, "NMR and Structural Properties of CsAu and RbAu", *J. Solid State Chem.*, Vol. 25, 1978, p. 157.
84. N. E. Christensen, "Structural phase stability of B₂ and B₃₂ intermetallic compounds", *Phys. Rev. B*, Vol. 32, 1985, 32, p. 207.
85. Koenig, C., N. E. Christensen and J. Kollar, *Phys. Rev. B*, Vol. 29, 1984, p. 6481.
86. Bartlett, Neil, "Relativistic Effects and the Chemistry of Gold", *Gold Bulletin*, Vol. 31, 1999, p. 21.
87. Codina, A. et al., "Do aurophilic interactions compete against hydrogen bonds? Experimental evidence and rationalization based on *ab Initio* calculations", *J. Am. Chem. Soc.*, Vol. 124, 2002, p. 6781.
88. Bayler, A. et al, "Gol is smaller than Silver", *J. Am. Chem. Soc.*, Vol. 118, 1996, p. 7006.
89. Schmidbaur, H., "The Aurophilicity Phenomenon: A Decade of Experimental Findings, Theoretical Concepts and Emerging Applications", *Gold Bulletin*, Vol. 333, 2000, p. 3.
90. Pykkö, P., "Strong closed-shell interactions in inorganic chemistry", *Chem. Rev.*, Vol. 97, 1997, p. 597.
91. Bardají, M. and A. Laguna, "Gold Chemistry: The Aurophilic Attraction", *J. Chem. Ed.*, Vol. 76, 1999, p. 201.