

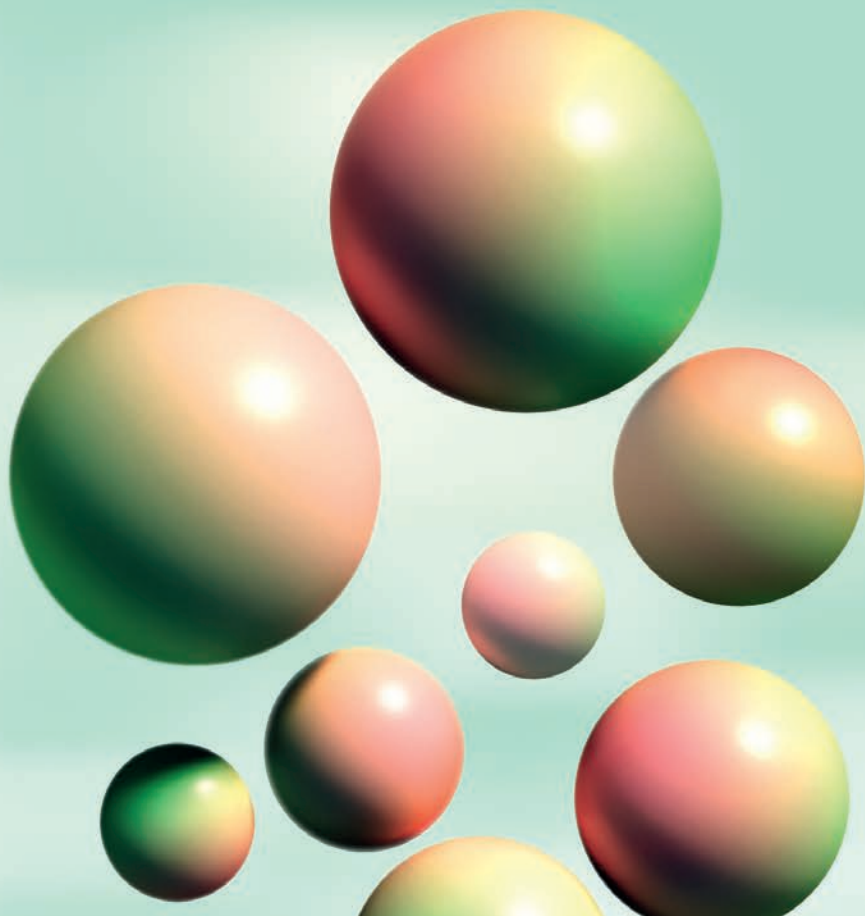
DRAKONTOS

Gerard't Hooft

Partículas elementales

En busca de las estructuras más pequeñas del universo

DK



CRÍTICA

Gerard 't Hooft PARTÍCULAS ELEMENTALES

EN BUSCA DE LAS ESTRUCTURAS
MÁS PEQUEÑAS DEL UNIVERSO

Traducción castellana de
Ignacio Zúñiga

CRÍTICA

BARCELONA

Primera edición: noviembre de 2001
Primera edición en esta nueva presentación: septiembre de 2017

Partículas elementales
Gerard't Hooft

No se permite la reproducción total o parcial de este libro, ni su incorporación a un sistema informático, ni su transmisión en cualquier forma o por cualquier medio, sea éste electrónico, mecánico, por fotocopia, por grabación u otros métodos, sin el permiso previo y por escrito del editor. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual (Art. 270 y siguientes del Código Penal)

Dirijase a CEDRO (Centro Español de Derechos Reprográficos) si necesita reproducir algún fragmento de esta obra.
Puede contactar con CEDRO a través de la web www.conlicencia.com o por teléfono en el 91 702 19 70 / 93 272 04 47

Título original: *In Search of the Ultimate Building Blocks*

© Gerard't Hooft, 1996

© de la traducción, Ignacio Zúñiga, 2001

© Editorial Planeta S. A., 2017
Av. Diagonal, 662-664, 08034 Barcelona (España)
Crítica es un sello editorial de Editorial Planeta, S. A.

editorial@ed-critica.es
www.ed-critica.es

ISBN: 978-84-17067-27-4
Depósito legal: B. 15272 – 2017
Fotocomposición: Víctor Igual

2017. Impreso y encuadernado en España por Huertas Industrias Gráficas S. A.

●

Índice

<i>Prefacio: una disculpa</i>	9
1. El principio del viaje hacia lo pequeño: cortando papel.	13
2. Hacia las moléculas y los átomos	17
3. El misterio mágico de los cuantos	23
4. Velocidades deslumbrantes	31
5. El zoo de las partículas elementales antes de 1970	39
6. La vida y la muerte	51
7. Los locos Kaones	57
8. Los Quarks invisibles	65
9. ¿Campos o cordones?	71
10. La bonanza Yang-Mills	83
11. El vacío superconductor: la máquina de Higgs-Kibble.	95
12. Modelos.	105
13. Coloreando las interacciones fuertes	115
14. El monopol magnético	129
15. <i>Gypsy</i>	135
16. La brillantez del modelo estándar.	143
17. Anomalías	157
18. La engañosa perfección.	167
19. Pesando neutrinos	171
20. El gran desierto	177
21. Technicolor	183
22. La gran unificación	189
23. La supergravedad	195
24. El espacio-tiempo de once dimensiones	203
25. Sujetando la supercuerda	207

26. En el agujero negro	217
27. Las teorías que aún no existen	225
28. El dominio de la ley de lo más pequeño	229
<i>Glosario</i>	237
<i>Índice alfabético</i>	247

1

*El principio del viaje hacia lo pequeño:
cortando papel*

Empecemos nuestro viaje hacia el mundo de lo pequeño con lo que podemos ver a simple vista y con esas leyes de la física a las que estamos acostumbrados. Tome un gran trozo de papel y dóblelo para hacer un avión. Puede partir el papel por la mitad y hacer dos aviones más pequeños. También podría volver a cortar cada uno de los trozos y hacer aviones cada vez más pequeños. Las propiedades del papel y las reglas para doblarlo en forma de avión no cambian excepto que los aviones serán cada vez de menor tamaño. Progresivamente, sin embargo, según se continúa cortando el papel en trozos cada vez más pequeños, se irá haciendo más difícil hacer los aviones y, finalmente, se encontrará con que sólo le quedan pequeñas fibras de lo que una vez fueron trozos de papel utilizables. La propiedad de «poder ser doblado en un avión» se ha perdido.

Una situación similar es la que encontramos si empezamos a repartir un cubo de agua en cubos más pequeños. Las propiedades físicas del agua tales como que fluye de arriba abajo seguirán siendo las mismas hasta que, al final, no tengamos más que una gota de agua. Uno no puede verter gotas de agua de arriba abajo, hay que sacudirlas.

Todos los niños que juegan con coches de juguete o muñecas saben que se puede imitar el mundo de los mayores a una escala menor. El escritor Jonathan Swift se basó en este hecho para escribir sus famosas historias. Un aventurero llamado Gulliver llegó a la tierra de Lilliput, en la cual habitaban personas diminutas. Allí todo era muy pequeño: la naturaleza, las plantas y animales, todo estaba escalado a tamaño pequeño. Él mismo se veía allí como un gigante: «el hombre montaña». Llegó incluso a extinguir un peligroso fuego en el palacio real orinando sobre él.

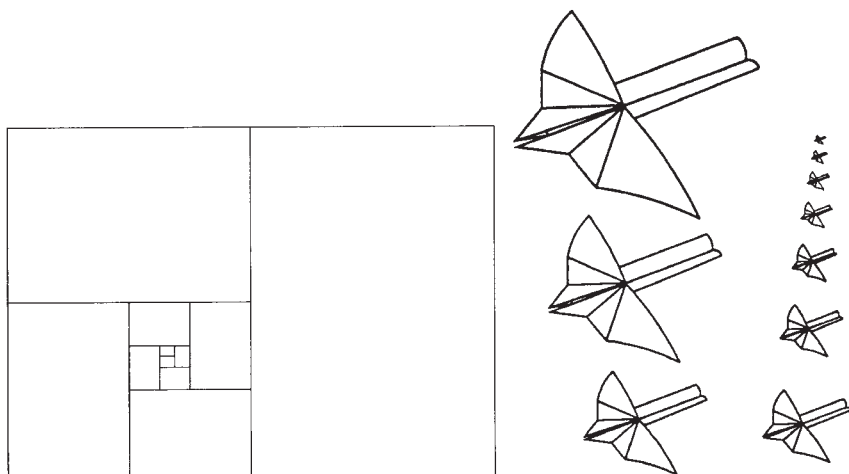


FIGURA 1. Cortes de papel y los aviones que se hacen con ellos.

Durante otro viaje, las fuerzas milagrosas del destino llevaron a Gulliver a un país llamado Brobdingnag, donde la gente y todos los seres animados e inanimados eran mucho más grandes que él. Allí era un enano, mimado por una niña pequeña llamada Glumdalclitch. Al final, Gulliver es recogido en su jaula por un águila que lo deja caer en el mar donde lo rescatan unos marineros de tamaño normal que escuchan su historia con incredulidad.

Y tenían razón en no creerle. No importa lo bien contadas que estén, esas historias tienen puntos oscuros. Sabemos, por ejemplo, que las llamas de las velas pequeñas son aproximadamente del mismo tamaño que las de las velas grandes. ¿De qué tamaño eran las llamas de las velas en Lilliput? Y cuanto más se piensa más cuestiones surgen: ¿cómo eran de grandes las gotas de la lluvia en Lilliput y en Brobdingnag?, ¿eran las leyes físicas para el agua diferentes allí que en nuestro propio mundo? Y, finalmente, los físicos preguntarían: ¿de qué tamaño eran los átomos en esos lugares?, ¿qué clase de reacciones químicas podrían tener lugar con los átomos del cuerpo de Gulliver?

Con esas preguntas las historias fallan. La verdadera razón por la que los mundos de *Los viajes de Gulliver* no pueden existir es que las leyes de la naturaleza no permanecen exactamente iguales cuando se cambia la escala. A veces esto es evidente en las películas de desastres, donde qui-

zá se ha construido una maqueta a escala para simular una gran ola o un rascacielos incendiado. Los mejores resultados se obtienen cuando el factor de escala para el tiempo se elige igual a la raíz cuadrada de la escala espacial. Así, si el rascacielos se construye a escala de 1:9, hay que rodar la película a un $1/3$ de su velocidad real. Pero incluso así, el ojo entrenado notará las diferencias entre lo que sucede en la película y lo que se observaría en el mundo real.

En resumen, las leyes que gobiernan el mundo físico tienen dos características importantes: muchas leyes de la naturaleza permanecen invariables cuando cambia la escala, pero hay otros fenómenos, tales como una vela encendida o las gotas de agua, que no cambian del mismo modo. La implicación final es que el mundo de los objetos muy pequeños será completamente diferente del mundo ordinario.

Hacia las moléculas y los átomos

Justamente en el mundo de los seres vivos la escala crea importantes diferencias. En muchos aspectos, la anatomía de un ratón es una copia de la de un elefante, pero mientras que un ratón puede trepar por una pared de piedra prácticamente vertical sin mucha dificultad (y se puede caer desde una altura varias veces mayor que su propio tamaño sin hacerse gran daño), un elefante no sería capaz de realizar semejante hazaña. Con bastante generalidad se puede afirmar que los efectos de la gravedad son menos importantes cuanto menores sean los objetos que consideramos (sean vivos o inanimados).

Cuando llegamos a los seres unicelulares, se ve que para ellos no hay distinción entre arriba y abajo. Para ellos, la tensión superficial del agua es mucho más importante que la fuerza de la gravedad. Basta observar que la tensión superficial es la fuerza que da forma a una gota de agua y comparar el tamaño de esa gota con los seres unicelulares, muchísimo menores, para que sea evidente que la tensión superficial es muy importante a esta escala.

La tensión superficial es una consecuencia de que todas las moléculas y los átomos se atraen unos a otros con una fuerza que nosotros llamamos fuerza de Van der Waals. Esta fuerza de Van der Waals tiene un alcance muy corto. Para ser precisos, diremos que la intensidad de esta fuerza a una distancia r es aproximadamente proporcional a $1/r^7$. Esto significa que si se reduce la distancia entre dos átomos a la mitad, la fuerza de Van der Waals con la que se atraen uno a otro se hace $2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 = 128$ veces más intensa. Cuando los átomos y las moléculas se acercan mucho unos a otros quedan unidos muy fuertemente a través de esta fuerza.

Johannes Diderik van der Waals (1837-1923) se graduó en 1873 en Leiden con una tesis que le haría famoso. Estaba escrita en holandés y se titulaba «Over de continuïteit van de gas- en vloeistofoestand» (Sobre la continuidad del estado líquido y gaseoso). En esa época la existencia de las moléculas y los átomos no estaba completamente aceptada, pero Van der Waals demostró que las propiedades de los gases y los líquidos se podían entender muy bien suponiendo que esas pequeñas partículas ocupan cierto volumen en el espacio y que en cuanto se separan suficientemente unas de otras, se atraían. El famoso físico inglés James Clerk Maxwell, muy impresionado con este trabajo, resaltó que había sugerido a unos cuantos investigadores que empezaran a estudiar holandés.^[5] En 1910 Van der Waals recibió el premio Nobel, pero el holandés nunca llegó a ser una lengua científica internacionalmente aceptada como lo fueron, siglos antes, el latín y el griego, y, después, el alemán, el francés y el inglés. Hoy en día, para pesar de algunos, toda la ciencia se hace en inglés.

Los tamaños de los seres unicelulares, animales y vegetales, se miden en micrómetros o «micras», donde una micra es un 1/1.000 de un milímetro, aproximadamente el tamaño de los detalles más pequeños que se pueden observar con un microscopio ordinario. El mundo de los microbios es fascinante, pero no es el objeto de este libro. Nosotros debemos continuar nuestro viaje hacia el mundo de lo pequeño y llegar hasta los átomos y a las moléculas mismas. En este punto, la fuerza de Van der Waals nos abre paso a un reino de fuerzas mucho más sofisticado: las de la química.

El químico ve los átomos como objetos más o menos esféricos de un diámetro de uno a varios ángstrom, donde un ángstrom es 1/10.000 de una micra, es decir, 10^{-10} metros (una diez mil millonésima parte de un metro). Prácticamente toda la masa^[6] de un átomo se encuentra en un pequeño grano situado en su centro, llamado núcleo, sobre el que hablaremos más adelante.

A pequeñas distancias, las fuerzas entre átomos se hacen extremadamente complicadas; parece como si estuvieran equipados con ganchos y

[5]. Véase H. B. G. Casimir, *Haphazard Reality*, Harper & Row, Nueva York, 1983.

[6]. El lector que no esté familiarizado con el concepto de «masa» puede apañarse con la receta de que todos los objetos sobre la Tierra tienen masas iguales a sus pesos (las masas también se miden en gramos o kilogramos), pero el peso es la fuerza con la cual la Tierra atrae el objeto hacia su interior. En una nave espacial su masa es la misma que en la Tierra pero su peso es prácticamente cero.

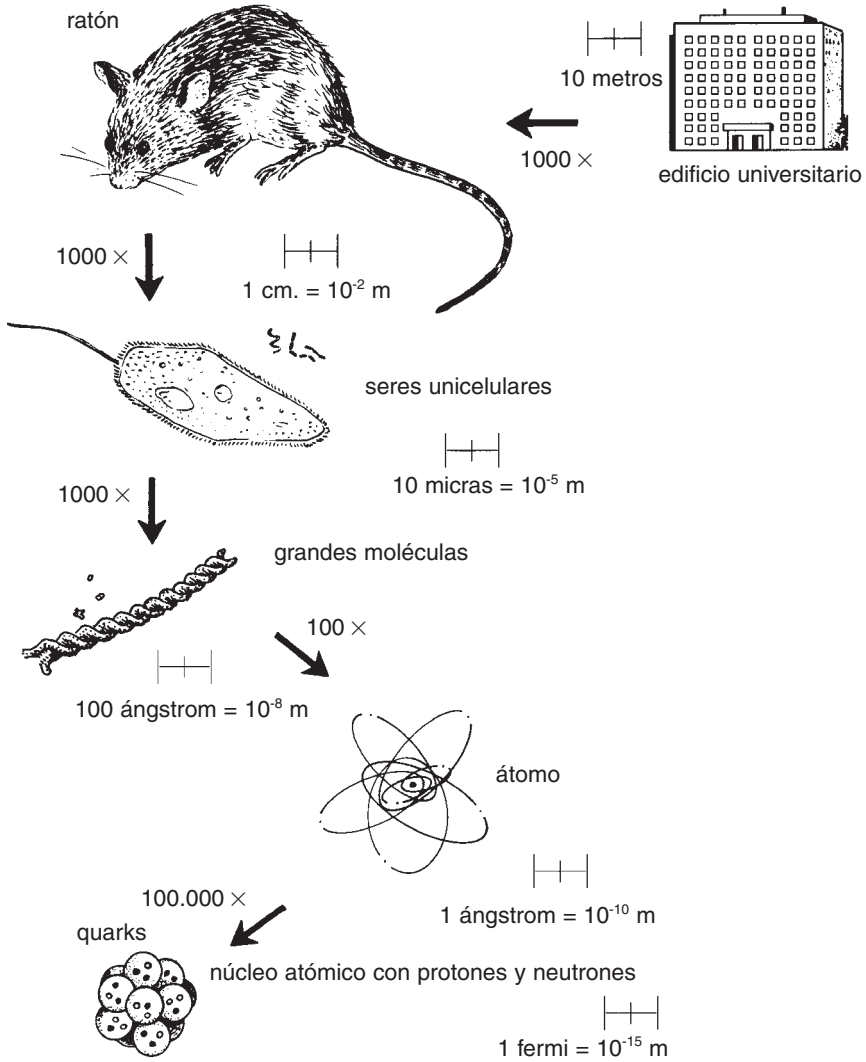


FIGURA 2. Tamaños relativos.

hembrillas con los cuales se pueden unir unos a otros. Los grupos voluminosos de varios átomos que se pueden formar de esta manera se llaman moléculas.

Consideremos, por ejemplo, el átomo de oxígeno, O, que tiene dos ganchos, y el átomo de hidrógeno, H, que tiene una sola hembra. Un

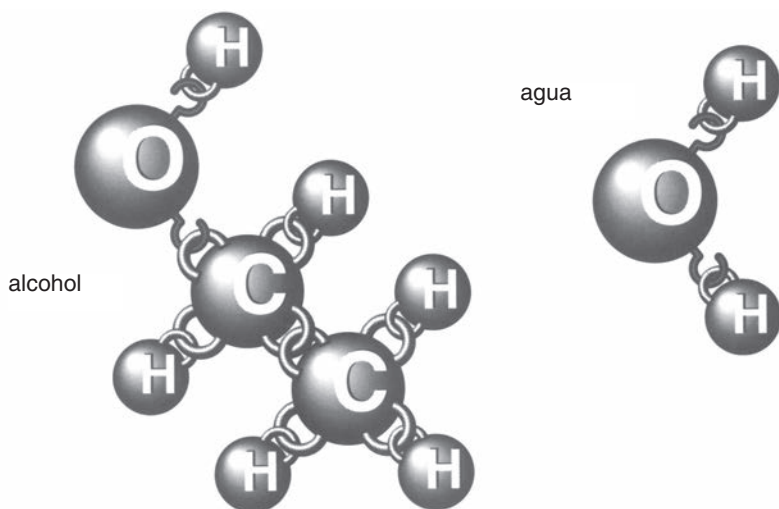


FIGURA 3. Los átomos se pueden unir entre ellos como si tuvieran ganchos y hembrillas.

átomo O y dos átomos H se pueden unir para formar una molécula de agua, H_2O . Dos hembrillas también se pueden unir entre ellas (por ejemplo, H_2 es una molécula de gas de hidrógeno), y lo mismo puede ocurrir con dos ganchos (O_2 es una molécula de gas oxígeno), pero esta unión no es tan rígida. Los dos ganchos en el átomo de oxígeno no están situados uno enfrente de otro, sino que forman un ángulo de unos 104° , y algo similar se puede decir de muchos otros tipos de átomos. Consecuentemente, las moléculas adquieren formas complicadas. Una de las piezas de construcción más interesantes es el átomo de carbono, C, que tiene cuatro hembrillas que se enganchan bastante bien con las hembrillas de otros átomos de carbono. Muchas de las moléculas en los seres vivos están formadas por cadenas de átomos de carbono.

Hay más de 100 clases diferentes de átomos y en cada una de esas clases las fuerzas de los átomos son características y, en mayor o menor medida, diferentes de las de los otros átomos. Las sustancias formadas por una sola clase de átomos se llaman elementos químicos. La palabra «átomo» procede del griego $\alpha\tau\omicron\mu\omicron\varsigma$, que significa «indivisible» y el uso de la palabra «elemento» sugiere que hemos llegado a los ladrillos básicos con los que está formada la materia. De hecho, esta es la imagen que

se tenía a mediados del siglo XIX cuando se acuñaron estos términos, pero hoy sabemos que esto es falso, que los átomos se pueden dividir y que, de esta manera, los elementos han dejado de ser verdaderamente elementales. Nosotros continuamos con esta nomenclatura, aunque sea formalmente incorrecta, porque ya nos hemos acostumbrado a ella. ¡Pero no espere que la humanidad haya aprendido esta lección! Las palabras «partículas elementales» son igualmente inadecuadas. De la misma manera, ¿qué se puede pensar de palabras como «música moderna» o «música post moderna», etc.? Seguramente llegará el día en el que volveremos a tener que lamentar la introducción de semejante terminología.

Quizá la imagen de los átomos como pequeñas esferas con ganchitos y hembrillas no le parezca suficientemente científica. Es cierto, nosotros hablamos de «fuerzas de enlace químico» cuando nos referimos a la forma en que los átomos se unen unos a otros. Mi descripción de estas fuerzas ha sido de alguna manera fantasiosa porque hay un aspecto de ellas que quiero resaltar: ¡las leyes de la naturaleza que rigen las fuerzas del enlace químico son perfectamente conocidas! Seguramente esta afirmación le sorprenda. Podría preguntarse ¿está toda la química terminada aunque los periódicos nunca hayan mencionado ese descubrimiento tan revolucionario? Bien, mi respuesta es no; lo que ocurre es simplemente que las ecuaciones fundamentales que describen las fuerzas del enlace químico están perfectamente establecidas, pero desgraciadamente todos los cálculos que se realizan a partir de esas ecuaciones son tan enormemente complicados que estamos obligados a utilizar técnicas aproximativas. No siempre es fácil estimar la precisión de estas técnicas matemáticas, que a menudo es muy pobre. Incluso las moléculas más sencillas como las del agua o el alcohol, se estudian mejor mediante sencillas mediciones experimentales con las propias sustancias que haciendo cálculos *ab initio* a partir de nuestras ecuaciones. Actualmente, las técnicas matemáticas aproximativas, que están muy desarrolladas, vienen a decirnos que la descripción de los átomos como esferas con ganchitos y hembrillas no está tan mal después de todo.

Desde luego que no existen ni los ganchitos ni las hembrillas. Lo que da al átomo su forma casi esférica son los electrones, partículas cargadas eléctricamente que se mueven alegremente alrededor del núcleo. El electrón es muy ligero: su masa es solamente $1/1.836$ de la del núcleo más ligero (el del hidrógeno). La carga eléctrica del electrón es de signo opues-

to a la del núcleo, de manera que los electrones están fuertemente atraídos al núcleo y se repelen mutuamente. Si la carga eléctrica total de los electrones en un átomo iguala a la del núcleo, para lo que generalmente se necesitan varios electrones, se dice que el átomo está en equilibrio o que es eléctricamente neutro.

La fuerza a la que obedecen los electrones, la denominada fuerza electrostática o de Coulomb, es matemáticamente bastante sencilla y, sin embargo, los electrones son los responsables de las importantes propiedades a las que nos hemos referido como «enlace químico». Esto se debe a que las leyes de movimiento de los electrones son muy especiales porque están regidas completamente por «la mecánica cuántica». La teoría que llamamos mecánica cuántica se completó a principios del siglo xx. Es una teoría paradójica, difícil de entender o explicar, pero al mismo tiempo interesante, fantástica y revolucionaria. La física teórica actual no se puede imaginar sin la mecánica cuántica, que es también el centro de toda la física teórica de las partículas elementales. Tendré que hablar mucho más de la mecánica cuántica más adelante, pero no haré ningún intento de explicar las fuerzas del enlace químico usando esta teoría (¡aunque sea posible!).

No solamente los electrones, sino también el núcleo atómico y los átomos en su conjunto obedecen a las leyes de la mecánica cuántica, pero como el núcleo y los átomos son mucho más pesados que los electrones las consecuencias de ello son menos drásticas. Para casi todos los propósitos, el químico puede considerar los átomos como bolas de billar entre las que surgen fuerzas muy especiales cuando se aproximan mucho unas a otras.