

## 1905: ANNUS MIRABILIS A FÍSICA ESTATÍSTICA DE ALBERT EINSTEIN E UN EXTENSO EXORDIO

**ARMESTO RAMÓN, Constantino**

*Instituto Almirante Salvador Moreno - MARÍN*

**ARMESTO RAMÓN, Diego F.**

*Colegio Internacional Eirís - A CORUÑA*

### O COMEZO DA MODERNA TEORÍA ATÓMICA DA MATERIA

Inspirándose nas ideas de Demócrito de Abdera (460-370 a.J.C.), a moderna teoría atómica da materia surxe, no século XIX, do intento de resolver tres problemas científicos aparentemente independentes:

1º ¿Cal é a estrutura dos gases? O modelo de gas de Boyle e Newton, - preferido polos físicos da época-, supuña que as partículas gaseosas permanecían estáticas e que se repelían. Existía outro modelo alternativo, proposto polo físico Daniel Bernoulli no ano 1738: consideraba que os gases están formados por partículas minúsculas movéndose libremente.

2º ¿Cal é a natureza da calor? Os traballos que fixeron Benjamin Thomson (conde de Rumford), Humphry Davy, Julius Robert Mayer, James Prescott Joule e Hermann von Helmholtz entre os anos 1798 e 1849 conduciron á formulación da lei da conservación da enerxía, e a considera-la calor como enerxía. Nesta conxuntura Joule mostrou, no ano 1847, que unha teoría atómica da materia podía explica-los fenómenos térmicos, ó menos cualitativamente.

3º ¿Cal é o fundamento dos fenómenos químicos? Nos anos 1808 e 1810, e para explica-los fenómenos químicos, John Dalton propoñe a hipótese de que a materia consta de átomos. Diferenciando átomos de moléculas, e empregando a teoría atómica, Amadeo Avogadro explica as reaccións entre os gases no ano 1811; xa porque escribía moi escuramente xa porque os conceptos era moi alleos á mentalidade da época, os físicos ignoraron o seu traballo ata que foi defendido por Estanislao Cannizzaro con toda contundencia e claridade no congreso de Karlsruhe do ano 1860.

## RUDOLF CLAUSIUS INICIA A TEORÍA CINÉTICA MOLECULAR DA MATERIA

A teoría cinética moderna iníciase coa publicación no ano 1857 do artigo de Rudolph Clausius "Sobre a natureza do movemento que chamamos calor". Escribe o autor "... as moléculas dun gas ... móvense con velocidade constante en liñas rectas ata que chocan con outras moléculas ou con unha superficie ... ", añaía "a presión dun gas contra unha superficie fixa ven producida polo choque e o rebote dun gran número de moléculas ". Con este modelo, realiza cálculos cuantitativos nos gases. Clausius tamén explica, cualitativamente, os estados da materia e os cambios de estado en función da axitación das moléculas que os compoñen: un líquido evapórase porque a velocidade media das moléculas resulta insuficiente para vencer as forzas de atracción das súas veciñas; pero unhas poucas moléculas, excepcionalmente rápidas, escapan da superficie incluso a unha temperatura debaixo do punto de ebulición. Inherente a esta explicación está a idea de que as moléculas se moven nun intervalo de velocidades. James Clerk Maxwell seguiu este camiño, e no ano 1860, publica un artigo inspirándose nos poderosísimos instrumentos matemáticos que crearan Laplace, Poisson e Gauss para trata-los sucesos aleatorios. Maxwell establece que, aínda que as moléculas que constitúen un gas se moven segundo as leis de Newton, as súas velocidades se distribúen nunha curva que se asemella a unha curva en campana de Gauss (aínda que asimétrica, porque existe un valor mínimo, -cero-, para as velocidades; pero non un máximo).

### O DIAÑO DE MAXWELL

William Thomson (Lord Kelvin) no ano 1852 e Rudolf Clausius no 1865 enunciaron a lei da disipación da enerxía. Estableceron a imposibilidade da existencia de máquinas térmicas cíclicas que convertan tódola calor en traballo; ou que bombeen calor en contra dunha diferenza de temperatura, sen que interveña ningún outro efecto. Clausius tamén definiu a entropía en función da calor e da temperatura. Cos traballos destes físicos quedou definido o segundo principio da termodinámica: a entropía sempre aumenta en calquera proceso que suceda nun sistema illado. James Clerk Maxwell deuse conta que aparecen paradoxas cando se consideran conxuntamente o segundo principio da termodinámica e a teoría cinética molecular da materia. No ano 1871, propuxo na súa "Teoría da calor", un experimento mental no que se vulneraba o segundo principio da termodinámica. Suxiriu que "se concibimos un ser (chamado despois diaño de Maxwell) cunhas facultades tan desenroladas que poida seguir-la traxectoria das moléculas, esta criatura, (...), sería capaz de facer o que actualmente nos é imposible realizar a nós mesmos. Viuse que as moléculas encerradas nun recipiente cheo de aire a temperatura uniforme se moven con velocidades que non son uniformes en absoluto ... Supoñamos

agora que dividimos o recipiente en dous mitades, A e B, mediante unha parede na que abrimos un pequeno buraco, e que este ser, que pode ve-las moléculas unha a unha, abre e pecha o orificio e deixa pasar, de A a B, só ás máis rápidas, e de B a A, ás mais lentas. Procedendo deste xeito, sen consumir traballo, eleva a temperatura de B e baixa a de A, en contradicción coa segunda lei da termodinámica." O diaño permitiría que unha máquina térmica funcionase continuamente sen combustible mantendo a caldeira quente e o condensador frío.

Para salva-la segunda lei déronse diferentes argumentos, incorrectos a maior parte das veces, polos que o diaño non pode actuar tal como o describiu Maxwell. A verdadeira razón pola que o diaño non viola a segunda lei descubriuse no último cuarto do século XX, co estudio dos requerimentos enerxéticos dos ordenadores. Antes de decidi-la maneira de actuar, o diaño debe adquirir información sobre a velocidade das moléculas, o que comporta producir entropía; o diaño diminúe a entropía do contorno co custo de aumenta-la súa propia entropía nunha cantidade maior.

## **BOLTZMANN E A DESORDE MOLECULAR**

William Thomson (Lord Kelvin), nun artigo publicado no ano 1874, sinala unha paradoxa que surxe na teoría física: a mecánica de Newton utilizada na teoría cinética é reversible (vendo unha película sobre os choques entre as moléculas dun gas ignoramos se a proxección vai cara adiante ou atrás), en cambio os procesos naturais espontáneos tales como o fluxo térmico ou as misturas de materia son irreversibles. Ludwig Boltzmann solucionou parcialmente a paradoxa no ano 1878; tivo que aceptar dúas suposicións: o segundo principio da termodinámica pódese vulnerar ocasionalmente en curtos períodos de tempo; e a probabilidade de tales violacións é extraordinariamente pequena nas circunstancias ordinarias. Considerando a idea de Maxwell, Boltzmann ampliou o concepto de entropía de Clausius, e aplicouno ós fenómenos non térmicos: suxire que a entropía depende das probabilidades, e a define como proporcional ó número de posibles distribucións moleculares que pode adoptar un conxunto de moléculas. Canto máis ordeada resulta unha distribución molecular é máis improbable que ocorra (por exemplo, tódalas moléculas de aire dunha habitación concentradas na metade do local), a probabilidade resulta máxima cando as moléculas distribúense da maneira máis desordeada posible. Segundo esta nova opinión, o segundo principio é unha lei estadística apropiada para grandes colectividades; pero que carece de sentido cando aplicase a unha soa molécula. Sen embargo, como se trata dunha lei estadística, existe unha remota posibilidade de que ocorra unha gran fluctuación na cal as moléculas se concentren en vez de dispersarse. Aínda que a probabilidade de tales oscilacións é ínfima, a posibilidade da súa existencia significa que o segundo principio ten uns límites dos que carecen outras leis fundamentais da física.

Maxwell, Boltzmann, e despois Josiah Willard Gibbs (1839-1903) e Johannes Dederik van der Waals (1837-1923) fundaron a mecánica estadística clásica, unha ciencia que aplicaban cuantitativamente ós tres estados da materia e ás transicións de fases; e que, máis adiante, desenrolarían L. Landau (premio Nobel en 1962), L. Onsager (premio Nobel en 1968) e K. Wilson (premio Nobel en 1982). A conducta macroscópica, regular e previsible, resultaba do tratamento estadístico de moléculas cun comportamento microscópico irregular e aleatorio. A ciencia que emerxía, a mecánica estadística, relaciona as propiedades mecánicas microscópicas coas magnitudes termodinámicas macroscópicas: a enerxía cinética media das moléculas coa temperatura, o impulso lineal medio que exercen as moléculas contra as paredes do recipiente coa presión, e o número de moléculas coa entropía; relacións que nos permiten resolver problemas centrais da física.

## UN VEHEMENTE DEBATE SOBRE A EXISTENCIA DOS ÁTOMOS

No ano 1895 celebrouse un congreso en Lübeck para debati-los aspectos conflictivos da física. Nunha banda, atopábanse físicos do prestixio de Mach e Ostwald que negaban a existencia real dos átomos, aínda que os admitían como unha hipótese para entender algúns fenómenos. Noutro lado, Boltzmann consideraba ós átomos como entidades reais non hipotéticas. Arnold Sommerfeld relata que a loita entre ámbolos dous contendentes podía compararse "á loita do touro co áxil toureiro. Pero esta vez o touro [Boltzmann] venceu ó toureiro malia tódolo seu arte. Os argumentos de Boltzmann resultaron contundentes. Tódolos xoves físicos puxéronse da súa parte."

Ernst Zermelo, no ano 1896, volveu a refuta-la teoría cinética molecular. Basouse ésta vez nun teorema de Poincaré, quen demostrara que calquera sistema mecánico que sega as leis de Newton debe ser cíclico, o que contradí flagrantemente o segundo principio. Os dous físicos enredáronse nunha disputa na que ámbolos dous tiñan parte de razón e en parte estaban equivocados. Boltzmann acertaba na utilidade do modelo molecular e na interpretación estadística da irreversibilidade; e Zermelo en que a descripción molecular non pode basarse só nas leis de Newton. As discusións resultaban inacabables; e Boltzmann, xa fose porque se agravase a depresión que padecía, xa porque sentise persoalmente os ataques á teoría atómica, suicidou-se tirándose ó río Duino no ano 1906. Como epitafio, os vieneses colocaron na súa tumba:  $S = k \ln W$ . Nos parece esaxerado chamarlle, como fan algúns dos seus haxiógrafos, mártir da teoría atómica.

## A MORTE TÉRMICA DO UNIVERSO XA OCORREU

Na cuarta década do século XX, o físico James Jeans, resumiu a opinión dos seus colegas sobre a influencia da entropía no universo: "O principio físico xeral denominado segunda lei da termodinámica predí que o Universo só pode ter un fin: unha morte calórica na que tódala enerxía universal estea distribuída uniformemente e que a sustancia toda do Universo se ache á mesma temperatura. Esta temperatura sería tan baixa que imposibilitaría a vida." Acertaba, pero ignoraba o que sabemos hoxe. Segundo a teoría física vixente a morte térmica do universo xa ocorreu fai moito tempo, no primeiro segundo da súa existencia, aproximadamente fai quince mil millóns de anos.

Argumentemos brevemente. Prescindindo da constante cosmolóxica (ou doutra forma de enerxía escura con gravidade repulsiva), pódese considera-los compoñentes do universo como un gas que chea todo, ó que se lle pode aplica-la termodinámica. O gas ten catro elementos: a materia visible que forma as galaxias e as estrelas, a materia corrente invisible e a materia escura exótica. As observacións astronómicas permiten calcula-la densidade da materia visible en, aproximadamente, un átomo de hidróxeno por cada metro cúbico (a tódolo máis, multiplicamos esa cifra por sesenta se lle sumamos tódalas posibles partículas de materia escura invisible). O cuarto compoñente do gas o forma a radiación de fondo de microondas que describiron Penzias e Wilson no ano 1965. A partir das medidas da súa temperatura (2,7° K) estímase a súa densidade en varios centos de millóns de fotóns por cada metro cúbico. Comparando ámbalas dúas cifras -materia e radiación- encontramos que existen, aproximadamente, varios centos de millóns de fotóns por cada partícula material. Por tanto, a entropía do universo actual (proporcional ó número de partículas) está no gas de fotóns e non nas partículas de materia. E a teoría do big-bang establece que estos fotóns se formaron no primeiro segundo de vida do universo. A entropía total existente apenas aumentaría nunha ínfima fracción, aínda que tódolo hidróxeno (e en xeral toda partícula material) do universo se consumira nas estrelas, ou desaparecera nos buracos negros, ou se desintegrara (por agora sabemos que, para conta-los anos que vive un protón, por termino medio, se necesita dun número que contén máis de trinta e tres cifras).

Ademais, se o modelo que describe os acontecementos que ocorreron no primeiro segundo do universo é correcto, podemos predicir que existe no universo unha radiación dos esquivos neutrinos a 2° K; gas aínda non detectado, porque non dispoñemos da tecnoloxía adecuada. De confirmarse esta predicción, a entropía do universo residiría, ademais de no gas de fotóns, no gas de neutrinos.

## A FÍSICA ESTADÍSTICA CLÁSICA DE ALBERT EINSTEIN

Como a elaboración das teorías da relatividade especial e xeral converteu a Albert Einstein no maior xenio da física do século XX, córrese o risco de olvida-las extraordinarias aportacións que fixo ós outros campos da física. Estaría equivocadamente quen pensase que Einstein dedicou a maior parte do seu esforzo ós diversos aspectos da relatividade: él mesmo confesou "Pensei cen veces máis sobre os problemas cuánticos que sobre a teoría xeral da relatividade". Apaisonouse polos problemas cuánticos que se plantexaban na física de comezos de século; e aborounos cun talento estadístico excepcional.

Einstein, referíndose ós seus estudos anteriores ó ano 1905, escribiu: "Sen coñece-las investigacións de Boltzmann e de Gibbs que apareceran antes, e que de feito trataban o tema de forma exhaustiva, desenrolei a mecánica estadística, e a teoría cinético-molecular basada nela. O meu principal propósito ó facelo foi achar feitos que testemuñaran a existencia de átomos de tamaño definido".

No ano 1905 Albert Einstein publicou seis comunicacións nos *Annalen der Physik* que ían cambia-los fundamentos da física: Coa 1ª cambia tódolo coñecido no século XIX sobre a natureza da luz proponendo a hipótese do cuanto de luz para explica-lo efecto fotoeléctrico: por este traballo concedéuselle o premio Nobel no ano 1921. Coa 2ª determina as dimensións moleculares: serviulle como tese doctoral e é o seu traballo máis citado na literatura científica. Na 3ª e na 6ª, ámbalas dúas consecuencias da anterior, explícase o movemento browniano. A 4ª comunicación é a primeira publicación sobre a relatividade especial: modifica os conceptos de tempo e espaciao, considerados absolutos desde Newton. A 5ª é a segunda publicación sobre a relatividade especial: contén a conversión de enerxía en masa, e a famosa ecuación  $E = m.c^2$ .

As comunicacións 2ª, 3ª e 6ª debíanse ó interese de Einstein por dous problemas fundamentais para a física de comezos do século XX: a existencia das moléculas e a base molecular da física estadística. No ano 1910 a realidade molecular xa estaba establecida sen discusión porque os diversos métodos de conta-las partículas daban o mesmo resultado; nos anos anteriores realizouse o traballo de probar que os átomos eran reás, de determina-lo seu tamaño e de contalos. Einstein contribuiu a esta tarefa calculando o número de Avogadro nos seus artigos 2º e 3º, e incluso no 1º no que propón a hipótese do cuanto de luz. No artigo 2º, estudando as propiedades dunha disolución de azucre, atopa que as fluctuacións das moléculas producen a difusión, e obtén ecuacións para determina-lo número de Avogadro e as dimensións moleculares a partir de medidas de viscosidade e de difusión. Nos artigos 3º e 6º estudia unha suspensión de partículas nunha disolución; demostrou que o movemento de Brown das partículas microscópicas corresponde ás fluctuacións causadas polo choque das moléculas do líquido coas partículas en suspensión e relacionou a fluc-

tuación media das partículas co tamaño molecular e o número de Avogadro. ¡Inxeniosa idea!, as partículas en suspensión compórtanse como as moléculas nunha disolución e cun microscopio calcula o número de Avogadro. En palabras de Einstein "A concordancia entre estas consideracións e a experiencia, ... , persuadiu ós, por aquel entón, numerosos escépticos [Ostwald e Mach] da realidade dos átomos", ademais "O seu maior significado [do movemento browniano] ... é, ... que un ve directamente baixo o microscopio parte da enerxía térmica en forma de enerxía mecánica", é dicir demostraba que eses movementos que chamamos calor son reás.

Cando a luz atravesa un gas cerca do punto crítico aumenta a súa dispersión. Smoluchovski atribuíu o fenómeno ás grandes fluctuacións da densidade causadas pola existencia de moléculas: a color azul do ceo quedaba explicado deste xeito. No ano 1910 Einstein realizou os cálculos cuantitativos que confirmaban a hipótese, e de paso obtivo novas maneiras de medi-lo número de Avogadro. Foi o seu último traballo sobre a física estadística clásica.

## OS FUNDAMENTOS ESTADÍSTICOS DA TEORÍA CUÁNTICA DA LUZ

Aínda que a aportación de Einstein a fundamentación molecular do segundo principio da termodinámica non foi importante, o dominio que adquiriu na maneira de expresa-las magnitudes macroscópicas en función do movemento molecular resultou moi fecundo, porque tódolos descubrimentos que fixo na teoría cuántica tiveron a súa orixe no xenial manexo da mecánica estadística. A hipótese do cuanto de luz -o novo paradigma da óptica-, os traballos sobre a física do estado sólido, a fundación da estadística cuántica, ou a súa aproximación ós fundamentos da mecánica ondulatoria basáronse en argumentos obtidos con cálculos estadísticos. Non é casualidade que el mesmo cuñase a frase "principio de Boltzmann" para aludir á fórmula  $S = k \ln W$ .

Mediante procedementos estadísticos, Einstein calculou o cambio de entropía das moléculas dun gas material cando varía o volume; despois fixo o mesmo coa radiación; comparando ámbalas dúas formulas atopa na radiación uns entes análogos ás moléculas -cuantos de materia-: e así postulou a existencia dos cuantos de luz.

Aplicou o análise de fluctuacións, que tan útil lle fora na estadística clásica, a outros sistemas nos que intervén a radiación. Esta metodoloxía conduciulle a comprender fenómenos da luz ata entón descoñecidos, tales como a natureza corpuscular da luz e a súa dualidade onda-corpúsculo; servíulle para efectuar un tratamento dos procesos de radiación espontáneos e inducidos (fundamento teórico do láser); e tamén para deduci-la fórmula de radiación dun corpo negro.

## PRIMEIRA CORRECCIÓN CUÁNTICA Á ESTADÍSTICA DO ESTADO SÓLIDO

No ano 1906 Einstein fundou a teoría cuántica do estado sólido ó da-la explicación, básicamente correcta, a un dos problemas da teoría cinética molecular clásica: as anomalías que presentaban as calores específicos dos sólidos. A lei de Dulong e Petit ten unha interpretación sinxela: os átomos dun sólido, por efecto da axitación térmica, vibran arredor da súa posición de equilibrio sen trasladarse nin rotar. Como cada vibración ten tres grados de liberdade, a enerxía para cada grado de liberdade é a metade de  $kT$ , e a enerxía consta de dous termos cinética e potencial: a enerxía do número de Avogadro de moléculas resulta ser  $N \cdot 3 \cdot 2 \cdot (k \cdot T / 2) = 3 \cdot R \cdot T$ . En consecuencia, a calor específico é  $24,9 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$ , un valor independente da temperatura, e que coincide co de moitos sólidos á temperatura ambiente. As desviacións entre os datos e a teoría aparecen a temperaturas baixas, tanto é así que nas proximidades do cero absoluto o valor experimental diminúe tendendo a cero; ademais nalgúns sólidos, como o carbono, nin sequera á temperatura ambiente o valor é  $24,9$ .

Ante o fallo estrepitoso da teoría estadística clásica, Einstein calculou a enerxía media total dun oscilador utilizando a ecuación cuántica de Planck. "Se a teoría da radiación de Planck vai ó miolo do asunto, entón debemos esperar tamén contradicións entre a teoría cinética actual e a experiencia noutras áreas da teoría da calor; contradicións que poden resolverse seguindo este novo camiño." Einstein elaborou un modelo de sólido considerando que os átomos nunha rede cristalina oscilan de forma independente e cunha única frecuencia en torno ás súas posicións de equilibrio. O modelo non só lle conduciu a unha fórmula da que se deduce a regra de Dulong e Petit a altas temperaturas, senón que por primeira vez a calor específico se iguala a cero cando se anula a temperatura absoluta. As propiedades deste modelo, publicado no 1906, resultáronlle moi útiles a Nerst, que traballaba cos fundamentos do terceiro principio da termodinámica. No ano 1910 Nerst escribía "... as calores específicos fanse cero a moi baixas temperaturas... . Isto concorda cualitativamente coa teoría desenrolada por Herr Einstein...".

## O NACEMENTO DA FÍSICA ESTADÍSTICA CUÁNTICA

Vinte anos durou a creatividade científica de Einstein: desde 1905 ata 1925, ano no que fixo a súa última contribución importante á física: un estudio da estadística cuántica das moléculas, que se chamará estadística de Bose-Einstein. No ano 1924, un xove hindú, a quen lle rexeitaran publica-las súas investigacións, envíalle un manuscrito a Einstein e rógalle que propoña a súa publicación. O seu nome é Satyendra Nath Bose e no artigo deducíase a lei de Planck cun novo método.



Einstein traduciu o artigo ó alemán, apoiou a súa publicación e quen era un físico descoñecido alcanza renome internacional. Bose presenta, sen darse conta, ideas revolucionarias: non se conserva o número de fotóns e desaparece o axioma de que as partículas son distinguibles e independentes. El mesmo ignoraba que "o que facía era algo distinto do que fixera Boltzmann". Einstein entendeu e aplicou xenialmente os novos conceptos "O método aquí usado suministra tamén a teoría cuántica do gas ideal, como mostrarei polo miúdo máis adiante". Para Einstein, que nese momento buscaba unha teoría unificada, os seis meses (1924-1925) que lle dedicou ó tema constituía un intermedio " iso é soamente de paso" escribiu. E soamente de paso funda con Bose a primeira estadística cuántica.

Bose deducira a ecuación de Planck utilizando un método novo de contar fotóns, que foi aplicado por Einstein a un gas molecular cuántico. No seu estudio Einstein atopou o primeiro exemplo dunha transición de fase deducida de forma estadística, a chamada condensación de Bose-Einstein. "... neste caso, un número continuamente crecente de moléculas, ... pasa ó primeiro estado cuántico, mentras que as restantes moléculas ... ten lugar unha separación; unha parte condénsase, a outra queda como gas ideal saturado." No ano 1925 Einstein menciona o hidróxeno, o helio e o gas de electróns como os mellores candidatos para observa-la condensación: equivocouse. Ata un ano despois non se descubriu a estadística de Fermi-Dirac (aplicable ós electróns e ás partículas con espín semientero) e a diferenza entre ámbalas dúas estadísticas cuánticas non se aclarou ata o ano 1927. A condensación de Bose-Einstein considerouse imaxinaria ata que, no ano 1938, se propuxo como explicación da transición de fase He I - He II , descuberta dez anos antes.

Hoxe sabemos que a superconductividade que presentan os metais a moi baixas temperaturas, ou a superfluidez que mostra o helio cando se encuentra próximo ó cero absoluto, así como tódolos fenómenos nos que intervén un gas de fotóns (ou de calquera partícula con espín nulo ou enteiro) se estudian recorrendo á estadística de Einstein e Bose. E como colofón: Eric Cornell, Wolfgang Ketterle e Carl Wieman foron premiados co Nobel do ano 2000 por obter un novo estado da materia: sintetizaron un condensado de Bose-Einstein con átomos metálicos, quer dicir, fixeron cos átomos de materia o que xa se lograra cos fotóns de luz cando se crearon os láseres.

## AS RAÍCES ESTADÍSTICAS DA MECÁNICA ONDULATORIA

A mecánica ondulatoria -unha das posibles formulacións da mecánica cuántica- ten as súas raíces nos descubrimentos de Einstein. Opina De Broglie: "Durante o ano 1923, despois de larga reflexión en soledade e meditación tive bruscamente a idea de que o descubrimento feito en 1905 por Einstein debía xeralizarse a tódalas partículas materiais, e especialmente ós electróns". Relata

Schroedinger: "Mostrei recentemente que a teoría do gas de Einstein pode fundamentarse considerando ondas estacionarias que obedezan á lei de dispersión de De Broglie... as consideracións sobre o átomo poderían presentarse como unha xeralización daquelas". O mesmo análise de fluctuacións estadísticas que, aplicado á radiación, lle servira a Einstein para predecir a dualidade onda-corpúsculo dos fotóns no ano 1923, cando o aplica ós gases moleculares -no ano 1924- obtén termos semellantes nas súas fórmulas. Xenialmente os atribúe á existencia de ondas de materia, confirmando a hipótese de De Broglie apenas uns meses despois de que este a elaborara.

Durante un tempo, Einstein creu que a teoría cuántica estadística -como el a chamaba- tiña inconsistencias lóxicas, máis tarde convenceuse que era unha descripción incompleta da natureza. Einstein nunca abandonou a búsqueda dunha teoría que, respetando a causalidade, incorporara os fenómenos cuánticos, cría que a relatividade e a teoría cuántica fusionaríanse nunha teoría de campo unificado que ata agora ninguén conseguiu atopar.

## BIBLIOGRAFÍA

- Bennet, Ch.: "Demonios, motores y la segunda ley". Investigación y Ciencia, enero, 1988, pp. 60-68.
- Bernstein, J.: "El padre renuente de los agujeros negros". Investigación y Ciencia, agosto, 1996, pp. 40-45.
- Boltzmann, L.: Escritos de mecánica y termodinámica. Madrid, Alianza, 1986.
- Brock, W.: Historia de la química. Alianza. Madrid, 1998.
- Dirac, P.: "Una teoría armoniosa que la naturaleza habría podido elegir". El Correo de la Unesco, mayo, 1979, pp. 17-23.
- Einstein, A.: Notas autobiográficas. Madrid, Alianza, 1984.
- Hoffmann, B.: Einstein. Barcelona, Salvat, 1984.
- Holton, G y Brush, S.: Introducción a los conceptos y teorías de las ciencias físicas. Barcelona, Reverté, 1979.
- Ostrinker, J. y Steinhardt, P.: "El universo y su quintaesencia". Investigación y Ciencia, marzo, 2001, pp. 66-74.
- Pagels, H.: La búsqueda del principio del tiempo. Barcelona, Antoni Bosch, 1988.
- Pais, A.: "El Señor es sutil ...". Barcelona, Ariel, 1984.
- Toral, R.: "Nobel de Física. Condensado de Bose-Einstein". Investigación y Ciencia, noviembre, 2001, pp. 22-23.
- Weinberg, S.: Los tres primeros minutos del universo. Madrid, Alianza, 1984.

