





# **Discurs del Dr. Roy J. Glauber**

**en el solemne acte de la seua investidura  
com a doctor *Honoris Causa***

València, 25 d'abril de 2008

2008

VNIVERSITAT  
D VALÈNCIA



# Índex

- 7 SPEECH GIVEN AT THE INVESTITURE AS DOCTOR *HONORIS CAUSA* IN VALENCIA
- 17 DISCURS PRONUNCIAT EN EL SOLEMNE ACTE DE LA INVESTIDURA COM A DOCTOR *HONORIS CAUSA*
- 27 DISCURSO PRONUNCIADO EN EL SOLEMNE ACTO DE LA INVESTIDURA COMO DOCTOR *HONORIS CAUSA*



## Some Recollections and Reflections on the Theory of Light

**P**LEASE LET ME TELL YOU HOW GRATEFUL I FEEL FOR THE honor you bestow on me today, and how truly humbled it makes me feel. It is, after all, understanding that we seek as scientists more than honors, and a great many more people have contributed materially to that understanding than have ever been singled out and honored so generously for it.

When I began as a student, theoretical physics was not as specialized as it is today, or as subdivided. The study of quantum mechanics was still in its adolescence. Anyone who had learned the general principles of physics and their mathematical background had easy access to any area of study. So it was not unusual to develop interests in several fields, and it has been my good fortune to be able to do just that, to work at different times on problems in nuclear physics and elementary particle theory, on electron diffraction theory, on statistical mechanics, and on what we now call quantum optics.

It was in connection with work on the high-energy collisions of elementary particles that I began visiting the great European laboratory CERN in Geneva in 1964. I found the spirit of pan-European cooperation there a true inspiration,

and in the years following made as many visits there as I could. I had the opportunity to work with several Spanish physicists there, and even to make occasional visits to Spain. It was there too that I met a young Spanish experimental physicist, Jorge Velasco, and began a long collaboration with him analyzing the nucleon-nucleon collision data that had been accumulated at CERN. It was a large computational undertaking, which kept us up many nights, since those late hours were when one had best access to the computers. In 1992 I came to Valencia in order to apply our analysis to the energy domain opened up by the Tevatron, the proton-antiproton accelerator built at Fermilab, near Chicago. Not all of this work is published yet, but the collision data will soon be extended by measurements to be carried out at the great new accelerator, the LHC, now nearing completion in Geneva. I look forward to resuming our collaboration, and to being able to go forward with the analysis, using far better computing equipment, and at more reasonable hours.

In a sense, the modern theory of light begins with the discovery of electromagnetic waves by James Clerk Maxwell. His theory of these waves remains still an essentially perfect one. It correctly describes a vast range of experiences, far more diverse than even Newton's law of gravity. It describes, for example, the behavior of light with wavelengths covering a known range of at least 25 orders of magnitude. While the



theory has no known intrinsic error, it may yet appear that there is a fundamental sense in which it is wrong. Maxwell realized early on that he had found the basis for a theory of light. And yet its fundamental ideas make no mention at all of the division of light into particles that was revealed in the 20<sup>th</sup> century. The fact that light is made of particles would seem indeed to defy the continuity implicit in Maxwell's wave equations.

What did Maxwell actually do? He believed in the universality of mechanical explanations of physical phenomena, and strove to write the known laws of electricity and magnetism as differential equations with some resemblance to the laws of motion. In the course of imagining mechanical systems to represent the behavior of the vacuum, he found he could derive the equations he wanted to represent the known laws, but only with an additional term in them that he saw as completely foreign at first, but still acceptable, since it represented a contribution that could not then have been detected. He found that if he took this new term seriously it changed the mathematical character of his equations. It meant that the fields that satisfied the equations didn't have to be localized to the immediate neighborhoods of electric charges or magnets. They could depart from their sources and travel freely through space. They would be fields in certain oscillating modes that travel as waves—with a fixed velocity given

by the coefficients in his equation. The agreement of that velocity with the measured velocity of light convinced Maxwell that these electromagnetic waves were indeed the waves of light revealed early in the century by the observations of Young and Fresnel. It took more than another 20 years before these waves could be generated and observed electrically in the laboratory — and we all know what wonders have ensued — radio, television, and the cell phone.

Successful as Maxwell's theory was in viewing the entire spectrum of radiation as electromagnetic in nature, there were still differences between different regions of the spectrum that his theory could not explain. Heat radiation, for example, has a continuous spectrum that ranges from low infra-red frequencies to the high frequencies of visible light. But there was no theory to explain the relatively low abundance of visible light — until Planck made the audacious suggestion that an oscillating system that radiates has only discrete energy states separated by gaps or energy quanta proportional to the frequency of oscillation. That radical assumption explained the shape of the spectrum of heat radiation, since higher frequencies could only be radiated in large energetic jumps. It provided the first breath of the quantum theory in 1900. Einstein then, five years later, suggested that all light itself was divided into quanta, and thus generated conceptual dilemmas that were not fully resolved until decades later.

Those ensuing years were full of wave-particle enigmas, but there were also the successes and mysteries of the Bohr model of the atom, which was quite successful for the hydrogen atom, but rather little else. The suggestion was made by de Broglie that a better atomic theory might be constructed by appealing to the wave-particle duality. If light waves somehow behave as particles, perhaps the particles of the atom can behave as waves. This analogy, inspired in part by optics, turned out to be spectacularly successful in 1925-26. It gave us quantum mechanics and a remarkably detailed understanding of the behavior of atoms. But it still provided no fundamental understanding of the quantization of light waves. In the first years of quantum mechanics we still used Maxwell's classical picture of radiation together with the quantum mechanical atom.

The missing theory of light quanta was found by Dirac in 1927. It came, not as a contradiction to Maxwell's picture, but in a sense as a supplement to it. Maxwell's modes of field oscillations are still there, but the amplitudes that say how strongly they are excited are not numbers in the usual sense that we can choose arbitrarily. Those amplitudes must be regarded as quantum variables subject to the same mathematical rules that had been discovered for atomic variables. (They function as operators in an abstract space defined by the quantum states available for each mode.) This very general way of specifying

quantum states, inscrutable as it may sound without the accompanying mathematics, degenerates into Maxwell's method of stating numerical amplitudes when we deal with highly excited fields, as we usually do, for example, in the radio-frequency spectrum. It does say that each mode of the field can contain only integer numbers of quanta and allows those integers to be as small as one or zero. Dirac's theory, which we now call quantum electrodynamics, has been subject to a great many experimental verifications of its predictions in all ranges of the spectrum, some to remarkably high accuracy.

Of course the behavior of light at the two ends of the spectrum is altogether different, as it also is in the middle of the spectrum, where our eyes permit us to see a restricted frequency band. At the radio-frequency end of the spectrum, we typically deal with vast numbers of quanta that behave identically, numbers so large that the division into individual quanta is almost undetectable. At the high frequency end, among the X-rays and gamma rays, the quantum populations tend to be extremely sparse. We almost never have a quantum state of two identical gamma rays. In the middle of the spectrum, where the quanta are in the visible range, we have an intermediate situation, a fair abundance of quanta, but not enough to have two or more very frequently in the same quantum state. At least that's the way it was until recently, prior to the invention of the laser.

This question of the presence of identical quanta has a great deal to do with the concept of coherence. The electromagnetic fields generated by oscillating currents in radio transmissions contain vast numbers of extremely low energy quanta, all behaving in identically the same way. They have what we call a high degree of coherence. The quanta of X-rays or gamma rays, on the other hand, are rather randomly distributed among the many available quantum states and such distributions are essentially incoherent, or we might say noisy.

Although quanta can be fairly abundant for visible light, almost all natural sources are incoherent. As long as atoms radiate almost independently of one another there will be an inevitable noisiness in the light they radiate, even if it is almost monochromatic. That noisiness was first revealed explicitly in a quantum coincidence experiment performed in 1956 by Hanbury Brown and Twiss. It was in developing a quantum theoretical explanation of that experiment that I first entered the field now called quantum optics.

All of the experiments on visible light made prior to the 50's had been based on the detection of only one quantum at a time. A new era of dealing with multi-quantum states seemed to be dawning, and one aspect of it was the prediction and measurement of statistical distributions of light quanta under a variety of conditions. Another, and more important one, was the development of the laser, which

provided relatively noiseless light beams of great intensity. It presently became the vehicle for a vastly increased range of multi-quantum experiments. Its coherence properties extend over large intervals of distance and time, as opposed to the small space-time intervals of coherence from the best of natural light sources.

What we have witnessed then, over the past 50 years, is great progress in our ability to produce coherent light beams. That ability has been moved up the frequency scale from the radio-frequency region to the visible range, and somewhat further into the ultra-violet, by means of the laser or its close relatives. There is even some use of coherent X-ray beams generated by the free electron laser. The description of all of these in quantum electrodynamical terms is the purpose of the quantum theory of optical coherence that I have tried to develop. More generally the study now called quantum optics explores the behavior of arbitrary numbers of light quanta occupying arbitrary quantum states. Many of these states have no classical or Maxwellian analogues.

Taken together, the quantum electrodynamics of Dirac and the quantum theory of the atom, seem to describe completely and accurately a vast range of physical phenomena. We now understand those things well enough to imagine practical uses for what were considered bizarre or even «spooky» quantum phenomena. One of these is the close correlation

of the nonetheless uncertain states of different quanta, whatever may be the distance between them. This phenomena, known as «entanglement» may make quantum computation, or completely secure distant communication possible.

I have tried to describe some 200 years of historic accomplishment in just a few minutes, and you must excuse me if I have somehow overlooked a few things. I want to tell you how impressed I am with the depth and comprehensiveness of all the understanding that has been developed, and with the contributions of countless devoted scientists whose work was essential to that achievement, not just the famous ones. It has been the greatest joy to join that collective effort and contribute to it in even the tiniest way.

Roy J. Glauber  
*Harvard University*





## Alguns records i reflexions sobre la teoria de la llum

**M**'HEU DE PERMETRE DIR-VOS, EN PRIMER LLOC, QUE M'estic molt agraït per l'honor que avui em dispenseu, i com d'humil em fa sentir. Amb tot, més que els honors, allò que busquem com a científics és comprendre, i és molta més gent la que ha contribuït materialment a aquesta comprensió que no la que ha estat distingida i honrada per això així de generosament.

Quan vaig començar com a estudiant, la física teòrica no estava tan especialitzada com ho està avui, o tan subdividida. L'estudi de la mecànica quàntica es trobava encara en l'adolescència. Tothom que havia après els principis generals de la física i les seues bases matemàtiques tenia un fàcil accés a qualsevol àrea d'estudi. Així, doncs, ben sovint es desenvolupaven interessos en diversos camps. La gran sort que he tingut és poder fer justament això: treballar al llarg de distintes etapes en problemes de física nuclear i teoria de les partícules elementals, en teoria de difracció d'electrons, en mecànica estadística i en el camp que avui anomenem òptica quàntica.

El meu treball sobre col·lisions de partícules elementals a altes energies em va portar a visitar per primera vegada el

gran laboratori europeu CERN a Ginebra en 1964. Hi vaig trobar un esperit d'autèntica cooperació paneuropea força inspirador, i en els anys que van seguir hi vaig fer tantes visites com vaig poder. Allà vaig tenir l'oportunitat de treballar amb diversos físics espanyols, i fins i tot de visitar ocasionalment Espanya. També hi vaig conèixer un jove físic experimental, Jorge Velasco, amb el qual vaig encetar una llarga col·laboració analitzant dades de col·lisió nucleó-nucleó que havien estat acumulades en el CERN. Va ser una gran tasca computacional, que ens va mantenir desperts moltes nits, ja que era durant aquestes hores avançades quan més fàcilment podíem accedir als ordinadors. En 1992 vaig venir a València per aplicar la nostra anàlisi al domini d'energies obert pel Tevatron, l'accelerador protó-antiprotó construït al Fermilab, prop de Chicago. Tot aquest treball no ha estat encara publicat del tot, però les dades de col·lisions seran ben aviat ampliades amb mesures que es duran a terme en el nou gran accelerador, el LHC, a punt de ser enllestit a Ginebra. Tinc ganes de reprendre la nostra col·laboració i de poder avançar en l'anàlisi utilitzant equips de còmput molt més bons. I a hores més raonables.

En cert sentit, la moderna teoria de la llum comença amb el descobriment de les ones electromagnètiques per James Clerk Maxwell. La seua teoria, després de més d'un segle, encara es manté essencialment perfecta. Descriu de forma

correcta un vasta gamma d'experiències, molt més diversa i tot que la llei de gravitació de Newton. Descriu, per exemple, el comportament de la llum amb longituds d'ona que abracen un interval d'almenys 25 ordres de magnitud. Malgrat que aquesta teoria no conté cap error intrínsec conegut, pot semblar, però, que en algun sentit fonamental és incorrecta. Maxwell es va adonar aviat que havia trobat la base per a una teoria de la llum. Tanmateix, en les idees originals que el van portar a formular aquesta teoria no es fa cap esment a la divisió de la llum en partícules que es revelaria al començament del segle XX. El fet que la llum estiga composta per partícules semblaria certament desafiar la continuïtat implícita en les equacions d'ones de Maxwell.

Què va fer en realitat, Maxwell? Creia en la universalitat de les explicacions mecàniques dels fenòmens físics i es va esforçar a escriure les lleis conegudes de l'electricitat i el magnetisme en forma d'equacions diferencials semblants a lleis de moviment. Imaginant sistemes mecànics que representaren el comportament del buit, va trobar que podia deduir les equacions que representarien les lleis conegudes, excepte per la presència d'un terme addicional que al principi va trobar completament estrany, però així i tot acceptable, ja que suposava una contribució que podia no haver estat detectada fins aleshores. Si el considerava vàlid, aquest nou terme canviava el caràcter matemàtic de les equacions: implicava que

els camps que satisfien les equacions no havien d'estar localitzats als voltants de les càrregues elèctriques o dels imants: es podien separar de les fonts i viatjar lliurement a través de l'espai. Serien camps en certs modes oscil·lants que viatgen com les ones —amb una velocitat fixa, donada pels coeficients de les equacions. La coincidència entre aquesta velocitat i el valor mesurat per a la velocitat de la llum va convèncer Maxwell que aquestes ones electromagnètiques eren, de fet, les ones de llum posades de manifest a la primera del segle XIX per les observacions de Young i Fresnel. Però van haver de passar més de 20 anys abans que aquestes ones pogueren ser generades i observades per mitjans elèctrics al laboratori —i tothom sap les meravelles n'han derivat: la ràdio, la televisió i el telèfon mòbil.

Malgrat que la teoria de Maxwell considerava, encertadament, que tot l'espectre de radiació era de naturalesa electromagnètica, hi havia, però, diferències entre distintes regions de l'espectre que no podia explicar. Així, per exemple, la radiació d'un cos calent posseeix un espectre continu que abraça des de freqüències infraroges fins a les altes freqüències de la llum visible, però no hi havia cap teoria que explicara la poca abundància relativa de llum visible en aquesta radiació... Fins que Planck va fer l'audaç suggeriment que un sistema oscil·lant que radia, tan sols posseeix estats d'energia discrets separats per quàntums d'energia proporcionals a la freqüència d'oscil·lació.

Aquesta suposició radical explicava la forma de l'espectre de la radiació de calor, ja que les freqüències més altes només podien ser radiades en salts energètics grans. És així com va nàixer la teoria quàntica en 1900. Cinc anys després, Einstein suggeria que la mateixa llum estava dividida en quàntums i d'aquesta manera creava uns dilemes conceptuals que no van ser completament resolts fins unes quantes dècades més tard.

Els anys que van seguir van estar plens d'enigmes ona-partícula, però també van ser testimonis dels èxits i misteris del model atòmic de Bohr, que funcionava bastant bé per a explicar l'àtom d'hidrogen, però poca cosa més. El suggeriment que es podia formular una teoria atòmica millor invocant la dualitat ona-partícula va ser de de Broglie. Si les ones de llum es comportaven d'alguna manera com a partícules, potser les partícules de l'àtom es podien comportar com a ones. Aquesta analogia, inspirada en part per l'òptica, tingué un èxit espectacular en 1925-26. Ens va proporcionar la mecànica quàntica i una extraordinària i detallada comprensió del comportament dels àtoms. Però continuava sense donar una explicació fonamental de la quantització de les ones de llum. En els primer anys de la mecànica quàntica encara utilitzàvem la imatge clàssica de la radiació de Maxwell junt amb la mecanoquàntica de l'àtom.

La teoria dels quàntums de llum que faltava la va aportar Dirac en 1927 i va arribar no com una contradicció a la im-

atge de Maxwell, sinó, d'alguna manera, com un suplement a aquesta. Les oscil·lacions dels modes del camp de Maxwell encara hi són, però les amplituds que ens indiquen el seu grau d'excitació no són nombres, en el sentit usual que podem triar-los arbitràriament. Aquestes amplituds han de ser considerades variables quàntiques subjectes a les mateixes regles matemàtiques que havien estat descobertes per a les variables atòmiques. (Funcionen com a operadors en un espai abstracte definit pels estats quàntics disponibles per a cada mode.)

Aquesta forma tan general d'especificar els estats quàntics, que podria semblar inescrutable sense les matemàtiques que l'acompanyen, desemboca en el mètode de Maxwell de fixar valors numèrics per a les amplituds quan treballem amb camps altament excitats, com solem fer, per exemple, en l'espectre de radiofreqüències. Segons la nova teoria, cada mode del camp només pot contenir nombres enters de quàntums i aquests enters poden ser tan petits com un o zero. La teoria de Dirac, que ara anomenem electrodinàmica quàntica, ha estat sotmesa a nombrosíssimes verificacions experimentals en totes les zones de l'espectre, amb una precisió notable.

Certament, la llum es comporta de manera ben diferent en els dos extrems de l'espectre, igual que en el centre, on els ulls ens permeten veure una banda restringida de freqüències. En l'extrem de les radiofreqüències, treballem normalment amb

un nombre ingent de quàntums que es comporten de forma idèntica, nombres tan grans que la divisió en quàntums individuals amb prou feines és detectable. En l'extrem d'altres freqüències, entre els raigs X i gamma, les poblacions quàntiques tendeixen a ser extremadament esclarissades. No tenim gairebé mai dos raigs gamma en estats quàntics idèntics. En la zona central de l'espectre, on els quàntums es troben en el domini visible, la situació és intermèdia, amb una abundància raonable de quàntums, però no tants per a tenir-ne prou sovint dos o més en el mateix estat quàntic. Almenys així era fins molt recentment, abans de la invenció del làser.

La presència de quàntums idèntics té molt a veure amb el concepte de coherència. Els camps electromagnètics generats per corrents oscil·lants en transmissions de ràdio contenen un vast nombre de quàntums d'energia extremadament baixa, que es comporten de forma idèntica. Posseeixen allò que en diem un alt grau de coherència. D'altra banda, els quàntums de raigs X o gamma es distribueixen aleatòriament entre els nombrosos estats quàntics possibles i aquestes distribucions són bàsicament incoherents; en podríem dir sorolloses.

Tot i que els quàntums de llum visible poden ser raonablement abundants, quasi totes les fonts de llum natural són incoherents. Sempre que els àtoms radien de manera quasi independent els uns dels altres, hi ha un soroll inevitable en la llum que emeten, fins i tot si aquesta és gairebé

monocromàtica. Aquest soroll va ser posat de manifest per primera vegada en un experiment de coincidència quàntica efectuat en 1956 per Hanbury Brown i Twiss. Precisament va ser aleshores, en desenvolupar una explicació mecanoquàntica d'aquest experiment, que vaig entrar per primera vegada en el camp que ara rep el nom d'òptica quàntica.

Tots els experiments sobre la llum visible realitzats abans dels anys 50 s'havien basat en la detecció d'un sol quàntum en cada instant. Semblava que ens trobàvem davant el naixement d'una nova era de tractar amb estats multi quàntum. I un dels seus aspectes va ser la predicció i la mesura de distribucions estadístiques de quàntums de llum en una gran varietat de condicions. Un altre aspecte, i potser més important, va ser el desenvolupament del làser, que va subministrar feixos de llum de gran intensitat, relativament lliures de soroll. Actualment, el làser s'ha convertit en el vehicle per a un nombre cada vegada més gran d'experiments multi quàntum. Les seues propietats de coherència es mantenen al llarg d'extensos intervals de distàncies i temps, a diferència dels petits intervals proporcionats per les millors fonts naturals de llum.

Durant els últims 50 anys hem estat testimonis, doncs, d'aquest gran progrés en la capacitat de produir feixos de llum coherent. Aquesta capacitat ha anat pujant per l'escala de freqüències des de la regió de les radiofreqüències fins al



rang visible, i una mica més enllà fins a l'ultraviolat per mitjà del làser o dels seus parents pròxims. Fins i tot s'utilitzen feixos de raigs X coherents generats per làsers d'electrons lliures. La descripció de tots aquests feixos en termes de l'electrodinàmica quàntica és el propòsit de la teoria quàntica de la coherència òptica que he intentat desenvolupar. A grans trets, l'estudi conegut ara com a òptica quàntica explora el comportament de nombres arbitraris de quàntums de llum que ocupen estats quàntics arbitraris. Molts d'aquests estats no posseeixen anàlegs clàssics, maxwellians.

Sembla que l'electrodinàmica quàntica de Dirac i la teoria quàntica de l'àtom, preses totes dues juntes, descriuen de forma completa i precisa un vast rang de fenòmens físics. Ara els comprenem tan bé que podem imaginar usos pràctics fins i tot per a fenòmens quàntics que eren considerats estranys o de ciència-ficció, com és ara l'elevada correlació que presenten els estats incerts de diferents quàntums, siga quina siga la distància entre ells. Aquests fenòmens, coneguts com a "embulls", poden fer possibles la computació quàntica o la telecomunicació completament segura.

He intentat descriure uns 200 anys d'assoliments històrics en pocs minuts i per tant m'haureu d'excusar si he passat per alt algunes coses. Us vull manifestar, però, que em trobe impressionat per la profunditat i l'exhaustivitat de tot el que hem arribat a comprendre, i de les contribucions d'innombrables

científics la dedicació dels quals ha estat essencial per a aconseguir-ho. I no solament la dels famosos. Ha estat un enorme goig unir-me a aquest esforç col·lectiu i aportar-hi la meua minúscula contribució.

Roy J. Glauber  
*Harvard University*

## Algunos Recuerdos y Reflexiones sobre la Teoría de la Luz

**P**ERMÍTANME DECIRLES CUÁN AGRADECIDO ME SIENTO POR el honor que hoy me dispensan y cómo de humilde me hace sentir. Después de todo, más que los honores, lo que buscamos como científicos es comprender, y es mucha más gente la que ha contribuido materialmente a esa comprensión que la que ha sido distinguida y honrada por ello así de generosamente.

Cuando comencé como estudiante, la física teórica no estaba tan especializada como lo está hoy en día, o tan subdividida. El estudio de la mecánica cuántica estaba aún en su adolescencia. Quienquiera que hubiese aprendido los principios generales de la física y sus bases matemáticas tenía fácil acceso a cualquier área de estudio. Así, no resultaba infrecuente desarrollar intereses en varios campos, y ha sido mi gran fortuna poder hacer justo eso, trabajar a lo largo de distintas etapas en problemas de física nuclear y teoría de las partículas elementales, en teoría de difracción de electrones, en mecánica estadística, y en lo que hoy llamamos óptica cuántica.

Mi trabajo sobre colisiones de partículas elementales a altas energías me llevó a visitar por primera vez el gran laboratorio

europeo CERN en Ginebra en 1964. Encontré inspirador el espíritu que vi de una auténtica cooperación paneuropea, y en los años que siguieron hice tantas visitas allí como pude. Allí tuve la oportunidad de trabajar con varios físicos españoles, e incluso de realizar visitas ocasionales a España. Fue allí también donde encontré a un joven físico experimental, Jorge Velasco, y comencé una larga colaboración con él analizando datos de colisión nucleón-nucleón que habían sido acumulados en el CERN. Fue una gran tarea computacional, que nos mantuvo levantados muchas noches, ya que era durante esas tardías horas cuando se tenía el mejor acceso a los ordenadores. En 1992 vine a Valencia para aplicar nuestro análisis al dominio de energías abierto por el Tevatrón, el acelerador protón-antiprotón construido en el Fermilab, cerca de Chicago. No todo este trabajo ha sido publicado todavía, pero los datos de colisiones serán pronto ampliados por medidas que han de llevarse a cabo en el nuevo gran acelerador, el LHC, ahora próximo a su finalización en Ginebra. Tengo ganas de reanudar nuestra colaboración y de poder avanzar con el análisis, utilizando equipos de cómputo mucho mejores, y a horas más razonables.

En cierto sentido, la moderna teoría de la luz comienza con el descubrimiento de las ondas electromagnéticas por James Clerk Maxwell. Su teoría, tras más de un siglo, todavía permanece esencialmente perfecta. Describe correctamente

una vasta gama de experiencias, mucho más diversa incluso que la ley de gravitación de Newton. Describe, por ejemplo, el comportamiento de la luz con longitudes de onda que abarcan un intervalo conocido de, al menos, 25 órdenes de magnitud. Aunque la teoría no contiene ningún error intrínseco conocido, puede parecer sin embargo que, en algún sentido fundamental, es incorrecta. Maxwell pronto se dio cuenta de que había encontrado la base para una teoría de la luz. Y sin embargo, en las ideas originales que le llevaron a su teoría no se hace mención alguna a la división de la luz en partículas que se revelaría a comienzos del siglo XX. El hecho de que la luz esté compuesta por partículas parecería de hecho desafiar la continuidad implícita en las ecuaciones de ondas de Maxwell.

¿Qué es lo que realmente hizo Maxwell? Él creía en la universalidad de las explicaciones mecánicas de los fenómenos físicos, y trabajó con afán para escribir las leyes conocidas de la electricidad y el magnetismo como ecuaciones diferenciales con algún parecido con leyes de movimiento. En el curso de imaginar sistemas mecánicos que representarían el comportamiento del vacío, encontró que podía deducir las ecuaciones que representarían las leyes conocidas, salvo por la presencia de un término adicional que al principio encontró completamente extraño, aunque no obstante aceptable, ya que representaba una contribución que podía no haber sido detectada

hasta entonces. Encontró que si consideraba válido este nuevo término, éste cambiaba el carácter matemático de sus ecuaciones. Implicaba que los campos que satisfacían las ecuaciones no tenían que estar localizados en las inmediaciones de las cargas eléctricas o de los imanes. Podían separarse de sus fuentes y viajar libremente a través del espacio. Serían campos en ciertos modos oscilantes que viajan como ondas— con una velocidad fija dada por los coeficientes en sus ecuaciones. La coincidencia entre esa velocidad y el valor medido de la velocidad de la luz convenció a Maxwell de que estas ondas electromagnéticas eran, de hecho, las ondas de luz puestas de manifiesto a principios del siglo XIX por las observaciones de Young y Fresnel. Hubieron de pasar más de 20 años antes de que estas ondas pudieran ser generadas y observadas por medios eléctricos en el laboratorio —y todos sabemos qué maravillas han seguido: radio, televisión, y el teléfono móvil.

Exitosa como fue la teoría de Maxwell en ver todo el espectro de radiación como electromagnético en su naturaleza, sin embargo había diferencias entre distintas regiones del espectro que su teoría no podía explicar. La radiación de un cuerpo caliente, por ejemplo, posee un espectro continuo que abarca desde frecuencias infrarrojas hasta las altas frecuencias de la luz visible, pero no existía una teoría para explicar la poca abundancia relativa de luz visible en esa radiación ...hasta que Planck hizo la audaz sugerencia de que un sistema oscilante

que radía sólo posee estados de energía discretos separados por cuantos de energía proporcionales a la frecuencia de oscilación. Esa suposición radical explicaba la forma del espectro de la radiación de calor, ya que las frecuencias más altas sólo podían ser radiadas en saltos energéticos grandes. Dio lugar al primer aliento de la teoría cuántica en 1900. Einstein, cinco años después, sugirió que la propia luz estaba dividida en cuantos, y así creó dilemas conceptuales que no fueron completamente resueltos hasta décadas más tarde.

Los años que siguieron estuvieron llenos de enigmas onda-partícula, pero también fueron testigos de los éxitos y misterios del modelo atómico de Bohr, que funcionaba bastante bien para explicar el átomo de hidrógeno, pero poco más. La sugerencia de que una teoría atómica mejor podría ser construida invocando la dualidad onda-partícula fue hecha por de Broglie. Si las ondas de luz se comportan de alguna forma como partículas, quizá las partículas del átomo pueden comportarse como ondas. Esta analogía, inspirada en parte por la óptica, resultó ser espectacularmente exitosa en 1925-26. Nos dio la mecánica cuántica y una extraordinaria y detallada comprensión del comportamiento de los átomos. Pero seguía sin dar una comprensión fundamental de la cuantización de las ondas de luz. En los primeros años de la mecánica cuántica todavía utilizábamos la imagen clásica de la radiación de Maxwell junto con la mecanocuántica del átomo.

La teoría de los cuantos de luz que faltaba fue encontrada por Dirac in 1927. Llegó no como una contradicción a la imagen de Maxwell sino, en cierto sentido, como un suplemento a ella. Las oscilaciones de los modos del campo de Maxwell están todavía allí, pero las amplitudes que nos dicen cuán fuertemente están excitadas no son números en el sentido usual de que podemos escogerlos arbitrariamente. Tales amplitudes deben ser consideradas como variables cuánticas sujetas a las mismas reglas matemáticas que habían sido descubiertas para las variables atómicas. (Funcionan como operadores en un espacio abstracto definido por los estados cuánticos disponibles para cada modo.) Esta forma tan general de especificar los estados cuánticos, inescrutable como podría parecer sin las matemáticas que la acompañan, desemboca en el método de Maxwell de fijar valores numéricos para las amplitudes cuando tratamos con campos altamente excitados, como hacemos usualmente, por ejemplo, en el espectro de radiofrecuencias. La nueva teoría dice que cada modo del campo solo puede contener números enteros de cuantos y permite que dichos enteros sean tan pequeños como uno o cero. La teoría de Dirac, que ahora llamamos electrodinámica cuántica, ha sido sometida a numerosísimas verificaciones experimentales en todas las zonas del espectro con notable precisión.

Ciertamente, el comportamiento de la luz en los dos extremos del espectro es completamente diferente, al igual que



lo es en el centro, donde nuestros ojos nos permiten ver una banda restringida de frecuencias. En el extremo de las radiofrecuencias, trabajamos normalmente con un ingente número de cuantos que se comportan de manera idéntica, números tan grandes que la división en cuantos individuales es apenas detectable. En el extremo de altas frecuencias, entre los rayos X y gamma, las poblaciones cuánticas tienden a ser extremadamente ralas. Casi nunca tenemos de dos rayos gamma en estados cuánticos idénticos. En la zona central del espectro, donde los cuantos se encuentran en el dominio visible, tenemos una situación intermedia, una abundancia razonable de cuantos, pero no tanto como para tener con frecuencia dos o más de ellos en el mismo estado cuántico. Al menos así era hasta muy recientemente, antes de la invención del láser.

Este asunto de la presencia de cuantos idénticos tiene mucho que ver con el concepto de coherencia. Los campos electromagnéticos generados por corrientes oscilantes en transmisiones de radio contienen un vasto número de cuantos de energía extremadamente baja, que se comportan todos ellos de manera idéntica. Poseen lo que llamamos un alto grado de coherencia. Los cuantos de rayos X o gamma, por otro lado, se distribuyen de manera aleatoria entre los muchos estados cuánticos y tales distribuciones son básicamente incoherentes; podríamos decir ruidosas.

Aunque los cuantos de luz visible pueden ser razonablemente abundantes, casi todas las fuentes de luz natural son incoherentes. Mientras los átomos radíen de manera casi independiente unos de otros, habrá un ruido inevitable en la luz que emiten, incluso si ésta es casi monocromática. Ese ruido fue puesto de manifiesto por primera vez en un experimento de coincidencia cuántica en 1956 por Hanbury Brown y Twiss. Fue al desarrollar una explicación mecano-cuántica de ese experimento cuando entré por primera vez en el campo ahora llamado óptica cuántica.

Todos los experimentos sobre la luz visible realizados antes de los años 50 habían estado basados en la detección de un solo cuanto en cada instante. Una nueva era de tratar con estados multicuanto parecía estar naciendo, y un aspecto de ella fue la predicción y medida de distribuciones estadísticas de cuantos de luz bajo una gran variedad de condiciones. Otro, y más importante, fue el desarrollo del láser, que proveyó de haces de luz de gran intensidad relativamente libres de ruido. En la actualidad se ha convertido en el vehículo para un número cada vez mayor de experimentos multicuanto. Sus propiedades de coherencia se extienden a lo largo de extensos intervalos de distancias y tiempos, en contraposición a los pequeños intervalos proporcionados por las mejores fuentes naturales de luz.

Así, de lo que hemos sido testigos, a lo largo de los últimos 50 años, es del gran progreso en nuestra capacidad

de producir haces de luz coherente. Esa capacidad ha ido subiendo por la escala de frecuencias desde la región de las radiofrecuencias hasta el rango visible, y algo más allá hasta el ultravioleta por medio del láser o de sus parientes próximos. Incluso hay algún uso de haces de rayos X coherentes generados por láseres de electrones libres. La descripción de todos ellos en términos de la electrodinámica cuántica es el propósito de la teoría cuántica de la coherencia óptica que he intentado desarrollar. De forma más general, el estudio ahora conocido como óptica cuántica explora el comportamiento de números arbitrarios de cuantos de luz que ocupan estados cuánticos arbitrarios. Muchos de estos estados no poseen análogos clásicos, maxwellianos.

Tomadas juntas, la electrodinámica cuántica de Dirac y la teoría cuántica del átomo parecen describir de forma completa y precisa un vasto rango de fenómenos físicos. Ahora los comprendemos lo suficientemente bien como para imaginar usos prácticos para los que eran considerados fenómenos cuánticos raros e incluso de ciencia ficción. Uno de ellos es la elevada correlación de los estados inciertos de diferentes cuantos, cualquiera que sea la distancia entre ellos. Estos fenómenos, conocidos como “enredo” pueden hacer posibles la computación cuántica o la telecomunicación completamente segura.

He intentado describir unos 200 años de consecuciones históricas en unos pocos minutos, y me deben excusar si he pasado por alto algunas cosas. Quiero decirles cuán impresionado me hallo por la profundidad y exhaustividad de toda la comprensión que ahora tenemos, y de las contribuciones de innumerables científicos cuya dedicación fue esencial para esa consecución, no sólo la de los famosos. Ha sido un enorme gozo unirme a ese esfuerzo colectivo y contribuir a él si quiera en la forma más minúscula.

Roy J. Glauber  
*Harvard University*