

DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA

1. A Essência da Física Quântica

Qual é a essência da Física Quântica? Se você tivesse que resumir em duas linhas qual é sua maior diferença em relação à Física Clássica, o que você diria? Há várias respostas possíveis:

a) O nome “quântico” sugere que o essencial é a presença de quantidades *discretas*, como os “pacotes” de energia, ou de processos descontínuos.

b) Pode-se também argumentar que a maior novidade da Teoria Quântica é o papel que a *probabilidade* desempenha nela. Esta probabilidade não seria apenas expressão de nossa ignorância sobre detalhes do mundo, mas teria uma natureza “ontológica”.

c) Alguns autores consideram que a essência da Física Quântica é o *princípio de incerteza*, segundo o qual a posição e o momento de uma partícula não podem mais ser determinados simultaneamente.

d) Outros salientam que o que esta teoria tem de fundamental é o papel especial da *medição*, levando alguns, com espírito mais filosófico, a defender que o objeto quântico não pode ser separado do observador consciente.

e) O famoso paradoxo do “gato de Schrödinger” lembra de maneira pitoresca que o traço mais importante da teoria pode ser o *princípio quântico de superposição*.

f) Aqueles com viés mais matemático afirmam que o essencial na Mecânica Quântica é o uso de *grandezas que não comutam*, ou o papel insubstituível desempenhado pelos *números complexos*, ou a expressão de um a *lógica não clássica*.

g) Mais recentemente, o teorema de Bell fez muitos concluir que a grande novidade da Teoria Quântica são os estados não-fatoráveis ou “emaranhados”, que levam ao debate sobre sua peculiar *não-localidade*.

h) Alguns acham que o mais marcante é que a constante de Planck h fixa uma “escala” na natureza, separando o mundo subnanoscópico do mundo macroscópico.

i) Todas essas afirmações são pertinentes. No entanto, adotaremos como nosso ponto de partida a *dualidade onda-partícula*.

Em poucas palavras, o que caracterizaria a Teoria Quântica de maneira essencial é que ela é a teoria que *atribui, para qualquer partícula individual, aspectos ondulatórios, e para qualquer forma de radiação, aspectos corpusculares*. Esta é uma versão “geral” da dualidade onda-partícula, que refinaremos nas seções seguintes.¹

2. A Contradição entre Onda e Partícula

Para a Física Clássica, uma partícula pode ser imaginada como uma bolinha bem pequena que se locomove pelo espaço, e que em condições normais não se divide. Além dessa *indivisibilidade*, uma partícula clássica também se caracteriza por estar sempre em uma posição bem definida, e com uma velocidade precisa. Com o passar do tempo, a partícula descreve uma *trajetória* bem definida, que pode ser concebida como uma curva no espaço.

Uma onda, por outro lado, é concebida pela Física Clássica como uma excitação que se propaga em um meio, como a superfície da água, e que tem a característica de se espalhar no

¹ Este volume é uma versão abreviada do livro do presente autor, *Conceitos de física quântica*, vols. 1 e 2, Livraria da Física, São Paulo, 2003 e 2006. Às vezes farei referência a este livro, quando o material citado não estiver contido no presente volume.

espaço. O que se propaga com a onda é energia, que se identifica com o movimento oscilatório das partículas do meio. Como esse movimento das partículas pode ser tão tênue quanto se queira, podemos dizer que as ondas não possuem a característica de serem indivisíveis, mas que são *contínuas*, pelo menos em teoria. Além disso, as ondas circulares na superfície d'água claramente não descrevem uma “trajetória”, do tipo definido para partículas. Elas são *espalhadas* no espaço, sem se localizarem em um ponto bem definido. Além de serem contínuas e espalhadas, as ondas exibem uma série de fenômenos típicos, como a *interferência* (como veremos a seguir).

Dizer simplesmente que “uma coisa (sem partes) é (ao mesmo tempo) partícula e onda” é uma *contradição lógica*. Pois isso implicaria que essa coisa é indivisível e divisível (contínua), que ela segue uma trajetória e não segue (é espalhada). Não podemos admitir uma contradição nos fundamentos de uma teoria física (apesar de este ponto ser passível de discussão).

E a dualidade onda-partícula, que mencionamos na seção anterior? Ela não parece enunciar uma contradição lógica, dizendo que partículas são ondas? Parece, mas não pode! A Teoria Quântica é obrigada a conciliar de alguma maneira “onda” e “partícula” sem cair numa contradição lógica. Como fazer isso?

Veremos que existem dois tipos de enunciados diferentes para a dualidade onda-partícula. O que iremos chamar de “versão fraca” (seção I.3) tenta conciliar interferência (típico de uma onda) com a *deteção pontual* de um quantum (a indivisibilidade típica de um corpúsculo).

Já a “versão forte” desenvolvida por Niels Bohr (seção III.2) concerne a existência de interferência e de *trajetórias*.

3. Dualidade Onda-Partícula: versão fraca

Começamos estudando o caso da luz. Em torno de 1801, Thomas Young passou um feixe de luz por duas fendas próximas e conseguiu gerar franjas de interferência, o que o fez concluir que a luz é uma onda. No início do séc. XX, porém, surgiram indícios de que a luz tem um aspecto “granular” (J.J. Thomson, 1904) ou quantizado (Einstein, 1905). Thomson foi levado a essa ideia em experimentos de fotoionização, em que a luz é detectada de forma pontual em um gás. Um aluno dele, Geoffrey I. Taylor, mostrou em 1909 que um feixe fraquíssimo de luz gera o mesmo padrão de interferência que um feixe de intensidade normal, mesmo que demorando seis meses para se formar. Com os experimentos do efeito fotoelétrico (fotoemissivo), consolidou-se na década de 1920 a noção de Einstein de que a luz é detectada em pacotes de energia E , proporcionais à frequência da luz ν : $E = h\nu$. No experimento de Taylor, então, pode-se imaginar que os “grãos” ou quanta de luz, que viriam a ser chamados de “fótons”, surgem um a um, paulatinamente, gerando a franja de interferência, de aparência contínua, após o acúmulo de dezenas de milhares de registros de fótons (Fig. I.1).²

Isso pôde ser comprovado a partir da década de 1980, tanto para a luz quanto para elétrons, ao se fazerem incidir quanta individuais nas duas fendas e se observarem o acúmulo paulatino dos registros de quanta na tela detectora. Isso é ilustrado na Fig. I.2, onde os pontos vão aparecendo um após o outro, agrupando-se nas bandas do padrão de interferência, mas

² Para uma resenha histórica desses experimentos com luz, ver as pp. 294-301 de PIPKIN, F.M. (1978), “Atomic physics tests of the basic concepts in quantum mechanics”, *Advances in Atomic and Molecular Physics* 14, 281-340. Para um resumo dos experimentos com elétrons, ver: HASSELBACH, F. (1992), “Recent contributions of electron interferometry to wave-particle duality”, in SELLERI, F. (org.), *Wave-particle duality*, Plenum, New York, pp. 109-25. Para o experimento de duas fendas com elétrons, JÖNSSON, C. (1974), “Electron diffraction at multiple slits”, trad. D. Brandt & S. Hirschi, *American Journal of Physics* 42, 4-11 (orig. em alemão: 1961).

nunca nas regiões escuras de interferência destrutiva. Existem filmes mostrando a formação de tal padrão, ponto por ponto, no caso de elétrons.

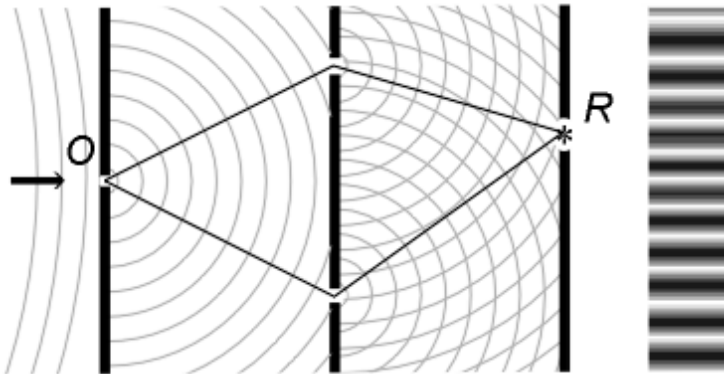


Figura I.1. Experimento de duas fendas para a luz. Por mais fraco que seja o feixe de luz, após tempo suficiente o padrão de interferência se forma.

É importante frisar que essa formação ponto a ponto do padrão de interferência ocorre mesmo que apenas um fóton ou elétron incida por vez, por exemplo a cada segundo. Conforme ressaltou Paul Dirac em 1930: “Cada fóton portanto só interfere consigo mesmo. Interferência entre dois fótons diferentes nunca ocorre” (mais tarde, mostrou-se que a segunda asserção não é correta).³

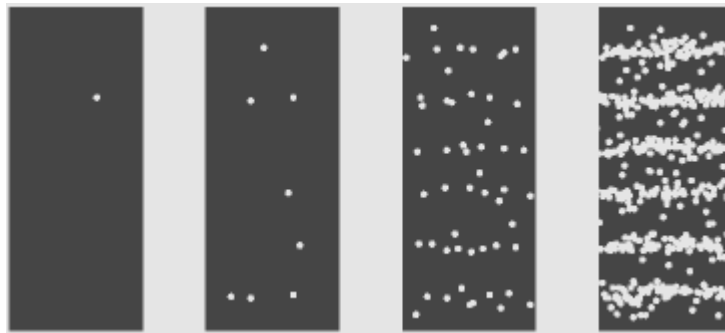


Figura I.2. Formação paulatina do padrão de interferência. No caso da figura anterior, o que ocorre é que as ionizações na placa detectora ocorrem uma a uma.⁴

Enunciemos então esta versão fraca da dualidade onda-partícula:

Para qualquer objeto microscópico, pode-se realizar um experimento tipicamente ondulatório (como um de interferência), mas a detecção sempre se dá de maneira pontual.

³ DIRAC, P.A.M. (1947), *The principles of quantum mechanics*, 3ª ed., Oxford University Press (orig. 1930), p. 9. Com relação à falsidade da segunda afirmação, ver PAUL, H. (1986), “Interference between independent photons”, *Reviews of Modern Physics* 58, 209-31.

⁴ Uma imagem real do acúmulo paulatino de elétrons aparece em: TONOMURA, A.; ENDO, J.; MATSUDA, T.; KAWASAKI, T. & EZAWA, H. (1989), “Demonstration of single-electron buildup of an interference pattern”, *American Journal of Physics* 57, 117-20.

Notemos que, nesta versão fraca, não afirmamos que os fótons ou elétrons sempre são indivisíveis ou pontuais em sua propagação, antes de atingir a tela detectora; apenas afirmamos que *quando eles são detectados* (medidos) eles aparecem de maneira indivisível e pontual. Se quisermos nos referir a estes pontos sem nos comprometermos com a existência de partículas, podemos chamá-los simplesmente de “quanta”, ou nos referirmos à ocorrência de um “evento”.⁵

Por outro lado, também não dizemos que um objeto quântico sempre se comporta como uma onda, mas sim que ele sempre *pode* exibir interferência; ou seja, é sempre possível definir uma montagem experimental (se esta for factível na prática), como a discutida acima, na qual o objeto exibe um padrão de interferência.

Temos então conjuntamente uma característica ondulatória, a interferência, e uma característica corpuscular, a detecção pontual (“bem localizada”) dos quanta. Como é possível que um mesmo experimento apresente ambas as características, ondulatória e corpuscular?

4. Cinco Interpretações Básicas

Como interpretar a versão fraca da dualidade onda-partícula? Será possível que um objeto quântico possa exibir propriedades contraditórias?⁶ O que está acontecendo na realidade, se é que podemos falar em “realidade”?

É uma característica notável da Teoria Quântica que ela pode ser interpretada de diferentes maneiras, sendo que cada uma dessas interpretações é internamente consistente e, de modo geral, consistente com experimentos quânticos. Usamos a noção de *interpretação* como significando um conjunto de teses que se agrega ao formalismo mínimo de uma teoria científica, e que em nada afeta as previsões observacionais da teoria.⁷ Este formalismo mínimo (equação de Schrödinger, algoritmo das medições) exprime o aspecto *objetivo* da Teoria Quântica, com o qual todos concordam. As teses agregadas pela interpretação fazem afirmações sobre a realidade existente por trás dos fenômenos observados, ou ditam normas sobre a inadequação de se fazerem tais afirmações.

Existem dezenas de interpretações diferentes da Teoria Quântica, que podem ser agrupadas em em torno de cinco grandes grupos.⁸ Apresentaremos agora como cinco interpretações básicas, aqui simplificadas, explicam a versão fraca da dualidade onda-partícula ou o experimento das duas fendas para um único fóton ou elétron.

⁵ Notar que, a rigor, não estamos observando a entidade nanoscópica, mas sim seu efeito no detector após uma amplificação do sinal.

⁶ Fazendo uma analogia: é logicamente correto falar que “está chovendo e não está chovendo no Instituto de Física da USP”? Pensando um pouco, vemos que poderia estar chovendo antes das 14 horas e parar de chover a partir desta hora (o que é análogo à interpretação ondulatória). Ou então, que pode estar chovendo no Pelletron mas não na Ressonância Magnética (análogo ao dualismo realista).

⁷ Se houver previsões novas, deveríamos falar de uma “teoria diferente”, mas se o desacordo com a Teoria Quântica for tão pequeno que não se possa fazer um experimento crucial para escolher entre elas, é costume considerar que a teoria diferente também é uma interpretação.

⁸ Uma apresentação histórica dessas interpretações é dada por JAMMER, M. (1974), *The philosophy of quantum mechanics*, Wiley, New York. A interpretação da complementaridade (que chamaremos de “dualismo antirrealista”) é apresentada no capítulo 4 e nas seções 6.1, 6.5 e 6.8 do livro de Jammer. As teorias de variáveis ocultas (que incluem o “dualismo realista”) na seção 2.5 e no cap. 7. As interpretações ondulatórias estão espalhadas pelas seções 2.2, 2.3, 2.6, 11.2, 11.3 e 11.6. As visões corpusculares incluem a interpretação dos coletivos estatísticos, cap. 10, e a estocástica, cap. 9.

(1) *Interpretação Ondulatória Realista*⁹ (consideraremos aqui a ideia inicial de Erwin Schrödinger de que os objetos quânticos são na realidade ondas, aproximando-a da visão de John von Neumann que introduz colapsos de onda). Antes da detecção, o objeto quântico propaga-se como onda, mas durante a detecção ele “colapsa” e se torna mais ou menos bem localizado, parecendo uma partícula. Não há mais contradição porque durante um certo tempo temos uma onda espalhada, e *depois* temos uma partícula (ou melhor, um pacote de onda bem estreito), sem que ambos coexistam simultaneamente.

(2) *Interpretação Corpuscular Realista* (defendida por exemplo por Alfred Landé e Leslie Ballentine). O fóton ou o elétron seria na realidade uma partícula, o que é manifesto quando o detectamos. Não existiria uma onda associada à partícula: o que explica a formação da franja de interferência seriam as leis da Física Quântica (no caso, a equação de Schrödinger). A célebre frase de Max Born pode ser aqui utilizada: “O movimento das partículas conforma-se às leis da probabilidade, mas a própria probabilidade propaga-se de acordo com a lei da causalidade”.¹⁰

(3) *Interpretação Dualista Realista* (formulada originalmente por Louis de Broglie, e redescoberta por David Bohm). O objeto quântico apresenta duas partes: um corpúsculo (partícula) com trajetória bem definida (mas desconhecida), e uma onda associada. A probabilidade de a partícula se propagar em uma certa direção dependeria do quadrado da amplitude da onda associada, de forma que, em regiões onde as ondas se cancelam, não há partícula. Não há mais contradição porque o objeto tem *duas partes*, uma sendo só corpúsculo, e a outra só onda.

(4) *Interpretação da Complementaridade* (elaborada por Niels Bohr). Neste caso, o “fenômeno” em questão é ondulatório, e não corpuscular, pois não podemos inferir a trajetória passada do quantum detectado (a partir da seção III.2 apresentaremos essa visão com maiores detalhes). O aspecto corpuscular que observamos na detecção se deve ao “postulado quântico” descoberto por Max Planck, e que para Bohr é o fundamento da Teoria Quântica.¹¹ Este postulado afirma que existe uma *descontinuidade essencial* em qualquer processo atômico, como por exemplo na ionização de átomos de prata na chapa fotográfica devido à ação da luz.

(5) *Interpretação Instrumentalista*. A atitude mais comum entre os físicos hoje em dia, que pode ser enquadrada no conjunto de interpretações “ortodoxas” (que inclui a visão anterior), combina uma atitude antirrealista com a tese (defendida também pelo item 2) de que a teoria quântica é uma descrição estatística, que refere-se a um coletivo estatístico, e não a partículas individuais. No experimento da fenda dupla no regime quântico, a Teoria Quântica prevê corretamente a distribuição estatística dos pontos na tela (as franjas), e esta interpretação instrumentalista não se preocupa com o que acontece antes da detecção. Ela é caracterizada jocosamente como a atitude do tipo “cala a boca e calcula”.

5. Visualizando as Interpretações Realistas do Experimento da Fenda Dupla

Consideremos agora alguns detalhes adicionais das interpretações realistas apresentadas na seção anterior, para o experimento da fenda dupla no regime quântico.

⁹ Interpretações “realistas” postulam uma imagem ou uma explicação para o que está acontecendo na realidade por trás daquilo que observamos. As interpretações antirrealistas consideram que a ciência só deve se preocupar com o que é observável ou mensurável.

¹⁰ BORN, M. (1926), “Quantenmechanik der Stossvorgänge”, *Zeitschrift für Physik* 38, pp. 803-27 (ver p. 804). Citado por JAMMER (1974), op. cit. (nota 8), p. 40.

¹¹ Planck considerou apenas o aspecto discreto das trocas de *energia*. Como já mencionamos, a tese de que as posições medidas são sempre “pontuais” só seria estabelecida na década de 1920.

(1) *Interpretação Ondulatória Realista.* A noção de colapso da onda quântica pode ser reforçada por uma tela detectora que contém uma fenda, em R . Há uma pequena probabilidade de o elétron ou fóton colapsar exatamente no buraco, de maneira que o detector não absorve a energia associada, e o quantum prossegue viagem, difratando após passar pela fenda fina, até ser detectado em uma tela posterior E (Fig. I.3). Este é um exemplo (em D) de um experimento de “resultado nulo”, a ser estudado na seção VIII.4, em que ocorre uma medição sem transferência de energia para o detector. Se D não for uma tela detectora, mas um anteparo simples, não se tem propriamente uma “medição” em D , mas o comportamento do sistema é o mesmo.

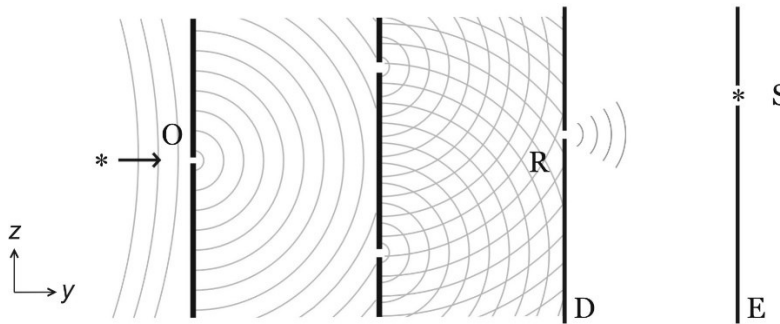
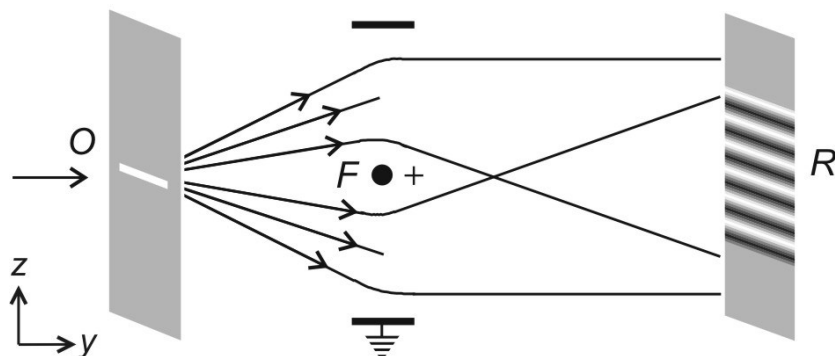


Figura I.3. Experimento de duas fendas no regime quântico para o caso em que o quantum incide em uma fenda R na tela detectora, e prossegue viagem até ser detectado no ponto S .

(2) *Interpretação Corpuscular Realista.* Vimos que esta interpretação explica as franjas de interferência dizendo que são as leis da Física Quântica que guiam as partículas de tal forma a gerar interferência. Não haveria uma onda real. Esta saída é semelhante àquela que adotará a “mecânica bohmiana”, que elimina a onda (ou potencial quântico) da visão dualista realista (ver seção XIV.3). Porém, baseado em uma antiga proposta de William Duane (1923), Alfred Landé sugeriu a partir de 1952 que o padrão de difração para elétrons poderia ser explicado a partir da interação da partícula com a rede cristalina do anteparo (que contém as duas fendas), sendo que esta rede daria “soquinhos” discretos na partícula, resultando na franja de difração com bandas discretas. Tal explicação, porém, não funciona para experimentos sem anteparos rígidos, como o do “biprisma eletrostático de elétrons”, desenvolvido por Gottfried Möllenstedt & Heinrich Düker em 1954.¹² Este equipamento consiste simplesmente de um filamento fino com carga elétrica positiva disposta entre duas placas aterradas (Fig. I.4). Uma onda plana que incide no biprisma ao longo da direção $+y$ é dividida em duas partes, adquirindo componentes de movimento na direção $\pm z$. Estas componentes então interferem em um anteparo.

Figura I.4. Interferência de elétrons usando um biprisma eletrostático de elétrons. O nome “biprisma” vem do arranjo análogo a este, realizado por Fresnel para a luz.



¹² Isso foi apontado por ROSA, R. (1979), “Electron interference: Landé’s approach upset by a recent elegant experiment”, *Lettere al Nuovo Cimento* 24, 549-50. Ver também HOME, D. & WHITAKER, M.A.B. (1992), “Ensemble interpretation of quantum mechanics: a modern perspective”, *Physics Reports* 210, 224-317. Com relação ao trabalho de Landé, ver JAMMER (1974), op. cit. (nota 8), pp. 453-65. Para o experimento de Möllenstedt & Düker, ver HASSELBACH (1992), op. cit. (nota 2).

(3) *Interpretação Dualista Realista.* É interessante visualizar qual é a trajetória que um corpúsculo seguiria, de acordo com esta interpretação, no experimento da fenda dupla. David Bohm fez um esboço desta trajetória em seu artigo de 1952, e no Cap. XIV veremos simulações computacionais delas. Na Fig. I.5, vemos o movimento de vai-e-vem do “surfista” que é guiado pelas ondas em superposição. Nas regiões correspondentes às franjas escuras, a interpretação causal de Bohm prevê velocidades do corpúsculo acima da luz.

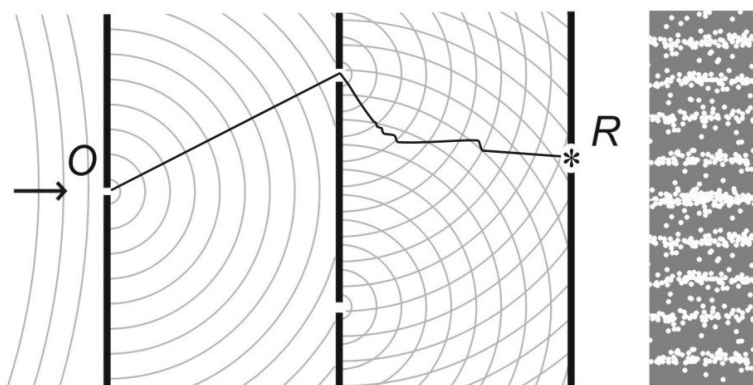


Figura I.5: Trajetória “surrealista” do corpúsculo no experimento da fenda dupla, segundo a interpretação de Bohm.

6. Regime Quântico: Ondas de Baixa Intensidade

Vimos um fenômeno tipicamente quântico, que foi obtido tomando-se um fenômeno descrito pela Física Clássica Ondulatória (interferência de luz), e reduzindo a intensidade do feixe de luz até a escala em que possam ser detectados pacotes individuais de energia. De maneira análoga, muitos dos mistérios da Física Quântica, como o princípio de incerteza e o efeito túnel, são fenômenos descritos na Física Ondulatória Clássica, e que passam a ser fenômenos quânticos quando se reduz a intensidade do feixe e se melhora a sensibilidade dos detectores. Podemos resumir essa abordagem dizendo que o regime quântico é a *Física das Ondas para baixas intensidades*, quando propriedades corpusculares passam a ser medidas.

Para entender o comportamento da luz no regime quântico, é preciso considerar que a energia de cada fóton detectado é dada por $E = h\nu$, onde ν é a frequência da luz. O momento associado a este fóton é dado por $p = h/\lambda$, onde λ é o comprimento de onda. A lei da energia do fóton é devida a Albert Einstein (1905), baseando-se no trabalho pioneiro de Planck (1900), que definiu a constante h . O momento do fóton foi obtido em 1909 por Einstein e também por Johannes Stark, sendo generalizada para todas as partículas por Louis de Broglie (1923). Lembremos que para partículas com massa m não nula, $p = mV$, onde V é a velocidade da partícula. Para a luz, assim como para qualquer forma de onda, $\nu \cdot \lambda = V$. Em suma:

$$E = h\nu \quad \text{e} \quad p = h/\lambda . \quad (\text{I.1})$$

Pela abordagem descrita acima, muitas características essenciais da Física Quântica já se encontram na Física Ondulatória Clássica. Um exemplo disso é a diferença que existe, para as ondas clássicas, entre *intensidade* e *amplitude*, que remonta à distinção entre a energia E armazenada em uma mola de constante k , e sua amplitude (extensão máxima): $E = \frac{1}{2}kA^2$. Numa onda transversal em uma dimensão (como a gerada em uma corda), a amplitude mede o deslocamento transversal da onda que se propaga, e esta amplitude é proporcional ao quadrado

da energia que se propaga. A intensidade I da onda, que para ondas em três dimensões é a energia por unidade de tempo e de área, é assim proporcional ao quadrado da amplitude ψ :

$$I \propto \psi^2. \quad (\text{I.2})$$

No regime quântico, a intensidade corresponde ao número de quanta detectados. Assim, em uma região delimitada do espaço, o número de quanta detectados será proporcional ao quadrado da amplitude da onda associada àquela região. Se tivermos preparado experimentalmente apenas um quantum (um fóton, um elétron), a *probabilidade* de detectá-lo em uma certa região será proporcional ao módulo quadrado da amplitude ψ da onda (onda esta que é expressa em termos de números complexos) associada àquela região:

$$\text{Prob.} \propto |\psi|^2. \quad (\text{I.3})$$

Esta é a *regra de Born*, proposta por Max Born, em 1926.