

CARACTERÍSTICAS CONCEITUAIS BÁSICAS DA FÍSICA CLÁSSICA

(NOTAS DE AULA)

SILVIO SENO CHIBENI

Departamento de Filosofia - IFCH - UNICAMP

Faremos aqui uma exposição simplificada de algumas características conceituais mais importantes comuns às teorias fundamentais da física clássica, ou seja, a mecânica newtoniana e o eletromagnetismo, características estas que formam o núcleo da visão física do mundo aceita até as primeiras décadas do século XX.

A mecânica clássica assumiu sua estrutura físico-conceitual definitiva na magistral obra de Isaac Newton publicada em 1687, os *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*. Essa teoria mecânica representou a primeira tentativa bem sucedida do homem em tratar quantitativamente e de forma abrangente os fenômenos do movimento dos corpos em geral, sendo que até hoje encontra amplo campo de aplicação.

Toda a mecânica newtoniana gira em torno de três leis dinâmicas fundamentais, que permitem calcular a evolução do estado de um sistema mecânico a partir das forças que agem sobre ele em cada instante. Para um corpo “pequeno” (“partícula”), esse estado é especificado por sua posição e seu *momentum* (massa vezes velocidade). Um corpo “grande” pode ser conceitualmente dividido em “partículas”, de modo que o seu estado se caracteriza pela especificação das posições e *momenta* de cada uma das “partículas” que o compõem. Assim, conhecidas a massa, a posição e a velocidade de uma partícula em um dado instante inicial, as leis dinâmicas de Newton permitem prever sua posição e velocidade em um instante posterior qualquer, se forem especificadas as forças que atuam sobre ela durante esse intervalo de tempo.

Uma das tarefas mais importantes na física clássica era a determinação das expressões matemáticas que dão o valor da força que age sobre um corpo em função de parâmetros diretamente acessíveis à observação, como as massas, posições e velocidades de outros corpos. O próprio Newton encontrou, como é bem sabido, a forma matemática da força de atração gravitacional, uma contribuição valiosa, dada a onipresença dessa força.

Esquemáticamente, podemos representar assim o *modus operandi* básico da mecânica newtoniana:

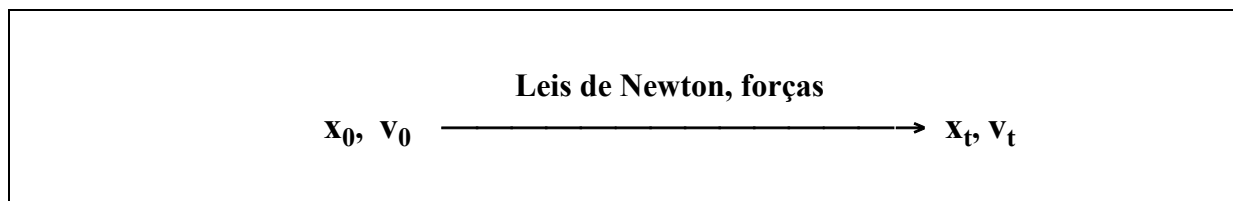


Figura 1: O modo de operação da mecânica newtoniana.

Neste ponto já podemos destacar uma das características fundamentais da mecânica newtoniana: a evolução do estado de um sistema é completamente *determinista*: os estados futuros são precisamente determinados pelo estado presente. Assim, se dispuséssemos de um conhecimento completo do estado do Universo (posição e momentum de cada uma de suas

partes) em um dado instante, poderíamos em princípio calcular toda a sua evolução futura (bem como o seu passado). Segundo a física newtoniana tudo funciona como uma grande máquina. Todas as demais teorias básicas da física clássica também são deterministas.

*

Antes de passarmos ao eletromagnetismo, é importante, para referências posteriores, mencionar brevemente as características essenciais dos *fenômenos ondulatórios*. (Para uma exposição mais completa desse assunto, consulte-se o livro *Conceitos de Física Quântica*, de Osvaldo Pessoa Jr.)

Numa primeira aproximação, podemos dizer que, genericamente, *ondas* são certas configurações espaciais oscilantes de determinadas grandezas pertinentes a sistemas físicos constituídos de um número grande de partículas. Temos, assim, por exemplo, ondas na superfície de um líquido, ondas em cordas esticadas, ondas sonoras no ar, líquidos e sólidos, etc. A figura abaixo representa um tipo simples de onda, a partir do qual podemos definir, de modo simplificado, algumas grandezas ondulatórias básicas:

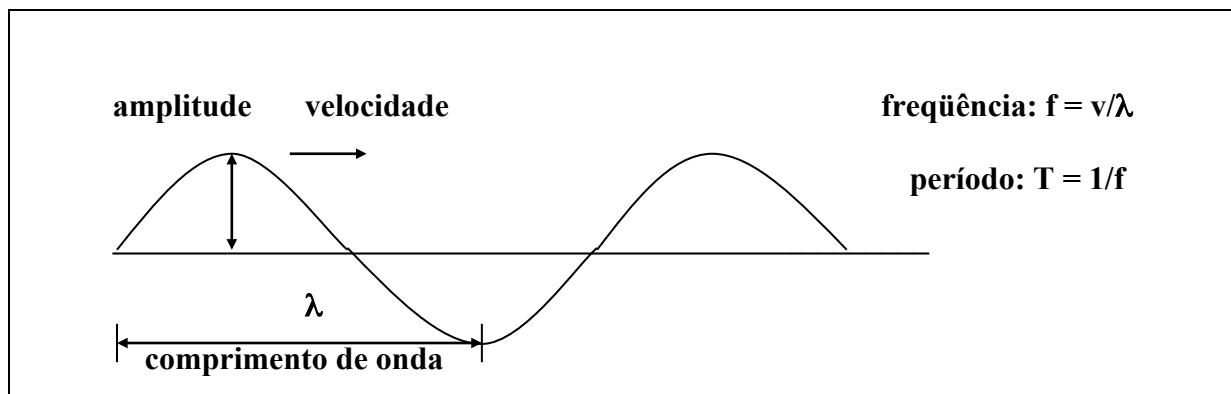


Figura 2: Ondas

A *amplitude* de uma onda é a distância máxima de afastamento em relação ao ponto de equilíbrio. O *comprimento de onda* é o comprimento de uma oscilação completa. A *velocidade* da onda é a velocidade com a qual uma “crista” se desloca. A *frequência* é o número de oscilações efetuadas em uma unidade de tempo. O *período* é o tempo de duração de uma oscilação completa (sendo pois o inverso da frequência).

Uma característica importante dos fenômenos ondulatórios usuais é o chamado *princípio de superposição*: quando duas ondas se cruzam em um mesmo meio, a onda composta é obtida somando-se em cada ponto os deslocamentos que cada uma das ondas nele produziria se estivesse sozinha. Note-se que um deslocamento “para baixo” somado com um deslocamento “para cima” produz um deslocamento menor do que qualquer um deles separadamente; a soma aqui deve levar em conta o “sinal” do deslocamento.

Um fenômeno ondulatório típico é a *difração*, que é a capacidade que as ondas têm de contornarem obstáculos em seu caminho. A figura 3 ilustra esse fenômeno, em duas situações importantes. As linhas podem ser entendidas como indicando a posição das cristas das ondas. (Para fins de visualização, pode-se imaginar que a figura representa ondas produzidas em um lago, vistas de cima.)

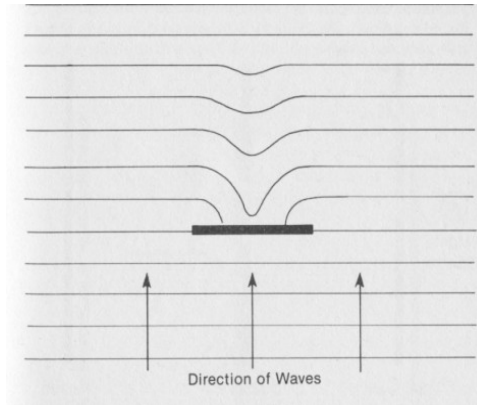
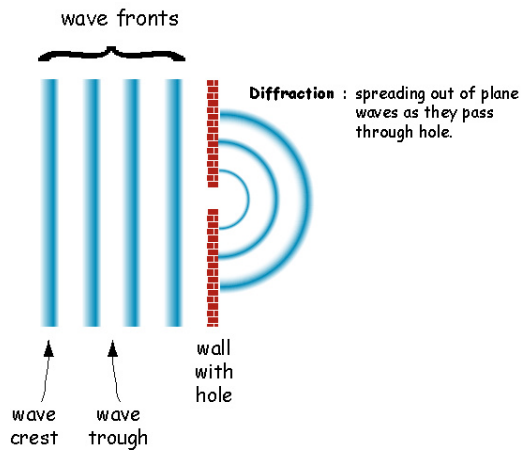


Figura 3: O fenômeno da difração

Outro fenômeno ondulatório característico é a *interferência*, que ocorre quando duas ondas de mesmo comprimento de onda se propagam em um mesmo meio. Em virtude do princípio de superposição, serão formadas regiões em que a amplitude da onda resultante é máxima (*interferência construtiva*) e outras em que é mínima (*interferência destrutiva*, que pode significar amplitude nula, se as amplitudes das ondas componentes forem exatamente iguais), além de regiões intermediárias. A figura 4 ilustra esse fenômeno. As linhas marcadas por 'C' indicam as regiões de interferência construtiva; as marcadas por 'D' indicam as regiões de interferência destrutiva. Se na região marcada pela linha vertical AB forem colocados medidores de intensidade da onda (que, em um ponto, é essencialmente o quadrado do deslocamento máximo naquele ponto), os resultados obtidos poderiam ser expressos no gráfico à direita da figura.

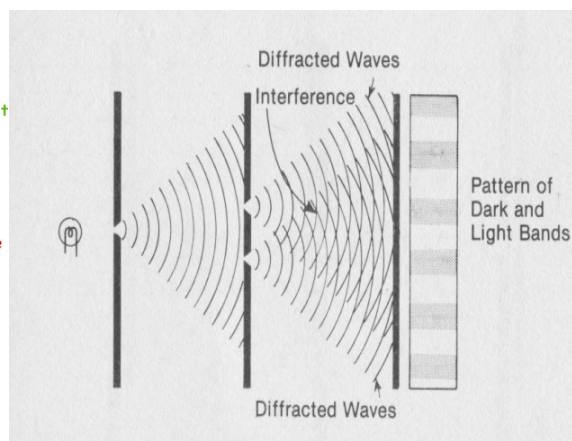
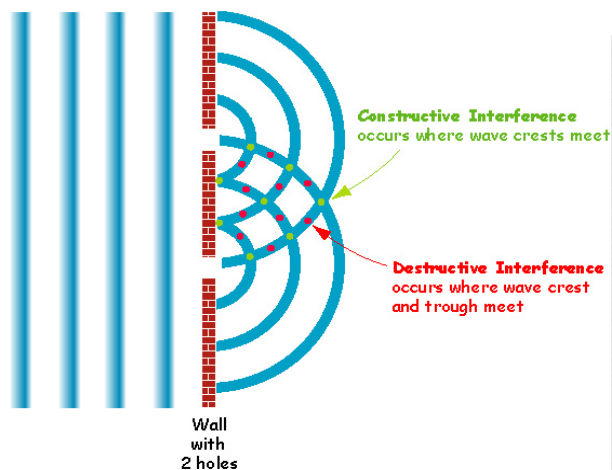


Figura 4: O fenômeno da interferência

Vejam agora como essas “marcas registradas” dos fenômenos ondulatórios, ou seja, difração e interferência, nortearam as investigações acerca da natureza da *luz*. O que aprendermos aqui será também útil em nossas discussões posteriores.

Como na mecânica, também em óptica a primeira teoria digna desse nome foi formulada por Newton, que em 1704 publicou em Inglês a importante obra intitulada *Opticks*. Essa teoria assume que a luz consiste de feixes de partículas, que se propagam segundo as leis da mecânica. Além do sucesso da recém criada teoria mecânica, a motivação fundamental de tal hipótese residia no fato de que os objetos ordinários projetam sombras nítidas, quando a fonte luminosa tem um tamanho aparente pequeno (como o Sol, visto da Terra, uma vela, colocada a uma certa distância, etc.). Ao tempo de Newton, raciocinava-se que se a luz fosse de natureza ondulatória, isso não ocorreria, observando-se, ao invés, efeitos de difração, que borrariam as sombras. A teoria newtoniana da luz explicava não somente essas observações, mas também os fenômenos de reflexão e refração, bem como a decomposição da luz nas cores do arco-íris.

Antes de Newton, ainda no século XVII, o grande físico holandês Christiaan Huygens havia proposto uma teoria *ondulatória* da luz, segundo a qual ela consistiria de vibrações de uma substância sutil, a que se chamou “éter luminífero”. Mas a teoria de Huygens não era suficientemente articulada e precisa, e foi logo eclipsada pela teoria corpuscular de Newton, que prevaleceu durante todo o século 18. As únicas vozes discordantes nesse século foram a de Benjamin Franklin e a do mais famoso matemático da época, o suíço Leonard Euler.

Tal situação viria a reverter-se a partir do início do século seguinte. Em 1801 o inglês Thomas Young realizou um experimento no qual pôde observar efeitos luminosos com uma configuração típica de interferência. O experimento consistia essencialmente em iluminar com a luz de uma fonte de tamanho aparente pequeno um anteparo contendo dois orifícios diminutos e muito próximos um do outro, como na Figura 4.

Young e o francês Augustin Fresnel elaboraram uma teoria ondulatória da luz que podia explicar qualitativa e quantitativamente o experimento de Young (que naturalmente não podia ser explicado por uma teoria corpuscular), assim como a reflexão e a refração da luz. Explicava ainda por que nas situações ordinárias a luz aparentemente não se difrata, nem interfere (sombras nítidas). Segundo a teoria de Young-Fresnel, os efeitos de difração só são perceptíveis quando as dimensões do objeto (ou buraco) são comparáveis ao comprimento de onda da onda em questão; se forem muito maiores que esse comprimento de onda, a difração ainda ocorre, mas não pode ser detectada sem aparelhos (inexistentes à época). Com base em experimentos auxiliares, essa teoria permitiu calcular o comprimento de onda da luz, como variando entre 0,0001 e 0,001 milímetro, aproximadamente.

Dado seu extraordinário sucesso, a teoria ondulatória da luz reinou absoluta desde Fresnel até as primeiras décadas do século XX. Voltaremos a esse assunto mais tarde. Passemos agora a uma descrição sucinta do *eletromagnetismo*.

Até a surpreendente descoberta do dinamarquês Hans Christian Oersted em 1820, de que uma corrente elétrica em um fio exerce ação magnética sobre uma bússola em sua proximidade, poucos concebiam a existência de qualquer correlação entre os fenômenos elétricos e magnéticos. (E mesmo a conexão entre os fenômenos galvânicos e de eletricidade estática mal havia sido encontrada.) Essa descoberta de Oersted foi logo seguida por outras não menos importantes, feitas pelo físico inglês Michael Faraday, que mostraram o efeito oposto: pode-se gerar uma corrente elétrica em um circuito movimentando-se ímãs em sua vizinhança (ou produzindo-se correntes elétricas variáveis em um circuito próximo). Os fenômenos elétricos e magnéticos estão, pois, indissociavelmente ligados; passaram, desde então, a constituir um único campo de estudo, o eletromagnetismo.

Observemos que é sobre tais descobertas e teorias desenvolvidas para explicá-las que repousa grande parte do desenvolvimento tecnológico verificado no final do século XIX e início deste, e que está presente em nosso cotidiano. O fenômeno descoberto por Oersted está na base dos motores elétricos, dos alto-falantes, dos relês, das campainhas, etc.; o descoberto por Faraday é o fenômeno de que depende o funcionamento dos geradores e transformadores de energia elétrica.

Na década de 1860, o físico escocês James Clerk Maxwell sistematizou a descrição teórica dos fenômenos eletromagnéticos. Suas pesquisas culminaram na formulação de quatro equações fundamentais, cuja validade não foi de nenhum modo afetada pelas transformações ocorridas na física no século XX. Dessas equações Maxwell pôde deduzir a existência de *ondas eletromagnéticas*, algo completamente fora das cogitações da época, mas que foram confirmadas pelos experimentos realizados por Heinrich Hertz, em 1887. Abriu-se então o caminho para os desenvolvimentos teóricos que levaram ao telégrafo sem fio, ao rádio, à televisão, às microondas, ao radar, etc.

Maxwell pôde também calcular a velocidade de propagação das supostas ondas, e, para seu espanto, verificou que o valor obtido – cerca de 300 000 quilômetros por segundo – era o mesmo da velocidade da luz, encontrado empiricamente por Fizeau, entre outros. Essa coincidência extraordinária sugeria que a luz deveria ser uma forma de onda eletromagnética. Aprofundando suas investigações, Maxwell conseguiu deduzir conexões quantitativas precisas entre os parâmetros ópticos e os parâmetros eletromagnéticos, reduzindo assim a óptica ao eletromagnetismo, domínios até então tidos como completamente independentes.

Antes de prosseguirmos, precisamos ainda tecer algumas considerações sobre dois outros conceitos importantes na física: o de *campo* e o de *átomo*.

Tem havido profundas divergências de interpretação em torno do conceito de *campo*, ao longo da história e em cada época, entre diferentes cientistas e filósofos. Existe, porém, uma interpretação mínima mais imediata, aceita por todos, segundo a qual os campos podem ser tidos como instrumentos matemáticos que facilitam o cálculo das forças que agem sobre um dado corpo. As divergências surgem quando se pergunta se eles são meros instrumentos de cálculo ou algo além disso, e qual a natureza desse algo.

Ilustremos a interpretação instrumentalista dos campos tomando o caso do campo gravitacional. A lei da gravitação universal de Newton descreve a força gravitacional entre duas partículas de massas M e m separadas por uma distância r por meio da expressão $F = GMm/r^2$, onde G é uma constante, conhecida por *constante da gravitação universal*. (A forma matemática completa dessa expressão inclui ainda a especificação de que a força F atua na direção da linha que une as partículas.)

Consideremos agora uma situação em que seja necessário calcular a força gravitacional exercida por um mesmo corpo (de massa M , digamos) sobre vários outros, como no estudo do movimento dos planetas em torno do Sol. Em todas as expressões que dão as diversas forças aparecerá uma parte comum, que não faz referência às características dos diversos corpos atraídos pelo corpo de massa M , a saber, o fator GM/r^2 . Multiplicado pelas massas dos vários corpos, esse fator fornece diretamente as forças que o corpo de massa M exerce sobre eles (levando-se em conta, em cada caso, a distância r apropriada). Esse fator só depende de uma propriedade da “fonte” das forças (M) e de um termo espacial (r); pode, pois, ser calculado para todos os *pontos do espaço* em torno da “fonte”, antes mesmo de se ter em vista um corpo específico que venha a estar presente neste espaço.

Pode-se descrever essa situação alegoricamente dizendo-se que o corpo central de massa M “cria” um “campo de forças” ao seu redor, de intensidade GM/r^2 e direção dada pela linha de junção do ponto ao corpo central, e que esse campo age sobre os corpos nele

colocados. Note-se que em princípio trata-se apenas de uma maneira de expressão; ao invés de se dizer que um corpo exerce uma força sobre um outro, diz-se que ele cria um campo, e que o campo age então sobre o segundo corpo. À primeira vista, esse recurso pode parecer desnecessário, e a rigor isso é verdade; é possível fazer física (clássica, ao menos) sem introduzir-se o conceito de campo. Mas por conveniência de cálculo é muitas vezes preferível trabalhar em termos de campos, como acontece no caso do campo magnético. (Aliás, foi no contexto do eletromagnetismo que a noção de campo foi introduzida, por Faraday.)

O uso freqüente, porém, acabou acostumando os físicos e engenheiros a pensar em campos como coisas substanciais, com existência própria. Essa tendência reforçou-se ainda mais a partir da constatação de dois fatos. Primeiro, obteve-se evidência de que todas as forças da Natureza não agem instantaneamente, gastando um certo tempo para alcançar os corpos distantes. Assim, se pensarmos em termos de campos, podemos imaginar que eles só aos poucos se modificam, em decorrência de alguma alteração ocorrida na fonte, e que os corpos distantes continuam ainda sob a ação do campo local, ainda não afetado pela mudança na fonte.

Depois, no caso específico do campo eletromagnético, a interpretação “substancialista” ganhou ímpeto com a descoberta de dificuldades sérias envolvendo o suposto meio no qual as ondas eletromagnéticas “ondulariam”. Tal meio, o chamado *éter*, nunca pôde ser detectado experimentalmente; além disso, os cálculos mostram que deveria possuir propriedades estranhas, aparentemente inconciliáveis, como uma extrema rigidez (para dar conta da enorme velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas) e uma extrema rarefação (para possibilitar o livre movimento dos corpos)! Em consequência desses problemas, o conceito de éter foi sendo deixado de lado, e começou-se a pensar no campo eletromagnético como algo autônomo e substancial, que não necessita de um “suporte” para existir. Hoje em dia, a interpretação dos campos é objeto de acesos debates, intensificados e complicados com a “quantização dos campos” proposta pela teoria quântica dos campos.

*

A origem do conceito de *átomo* remonta à Grécia do século 5 a.C., quando Leucipo e Demócrito propuseram que tudo era formado de átomos em movimento no vazio. Aristóteles, porém, logo em seguida se oporia a essa idéia, adotando, em seu lugar, a doutrina dos quatro elementos, de Empédocles, e fornecendo provas da impossibilidade do vazio. As opiniões aristotélicas prevaleceram, e foram aceitas até, pelo menos, o advento da ciência moderna, no século 17. A mecânica newtoniana não continha, ao contrário da aristotélica, nada que contrariasse a teoria atomista, e um contemporâneo ilustre de Newton, Robert Boyle, explicitamente adotou essa teoria (se não no sentido estrito, da existência de partículas *indivisíveis*, pelo menos no sentido da existência de corpúsculos que se movem no vazio). Com base em tal concepção da estrutura da matéria, Boyle deu início ao desenvolvimento da teoria cinética dos gases, precursora da mecânica estatística.

No século 18, um defensor importante do atomismo foi Antoine Lavoisier, e no início do século seguinte essa doutrina conquistou amplos espaços entre os químicos devido às valiosas contribuições de John Dalton, complementadas pelas de Gay-Lussac e Amadeo Avogadro, entre outros.

Entre os físicos a aceitação da teoria atômica foi mais lenta. O desenvolvimento da mecânica estatística por Maxwell, Boltzmann e Gibbs foi um fator importante nessa aceitação. No início do século XX a questão ainda estava em aberto, mesmo entre parte dos químicos. Ficaram famosas naquela época as objeções dos chamados “energeticistas”, liderados pelo famoso químico Wilhelm Ostwald, prêmio Nobel, e de anti-realistas, encabeçados pelo físico e filósofo Ernest Mach, que consideravam os átomos como meros artificios de cálculo.

Essa disputa milenar só encontrou termo, pelo menos entre os cientistas, com uma série de eventos desencadeada pela publicação, em 1905, de um artigo da autoria de Einstein, que à época tinha um modesto emprego num escritório de registro de patentes, em Berna. Nesse artigo explicava-se pela primeira vez em termos quantitativos um curioso fenômeno descoberto em 1828 pelo botânico escocês Robert Brown. Brown observou ao microscópio grãos de pólen em suspensão em um líquido, e notou que efetuavam um movimento caótico e incessante. O movimento, que ocorre com qualquer partícula de tamanho reduzido (0,001 milímetro ou menos) suspensa em um fluido (água, ar, etc.), ficou conhecido como *movimento browniano*, e, embora sem explicação satisfatória, não esteve no centro das atenções dos cientistas até que foi explicado a partir da hipótese atomista por Einstein.

Manejando as equações da mecânica estatística com grande mestria, Einstein pôde mostrar que as flutuações estatísticas no movimento dos átomos eram capazes – contrariamente ao que todos imaginavam – de ocasionar desequilíbrios momentâneos suficientemente grandes na força resultante que eles exercem, por impacto, sobre as partículas brownianas, para produzir os movimentos observados. Calculou a dependência desses desequilíbrios em função do tamanho das partículas, da temperatura e da densidade do fluido, bem como de parâmetros atômicos. As equações assim obtidas foram, nos anos subsequentes, confirmadas experimentalmente por uma série de cuidadosas experiências conduzidas por Jean-Baptiste Perrin. A evidência que os resultados experimentais forneceu foi bastante para convencer a virtual totalidade dos cientistas que se opunham ao atomismo; até mesmo o obstinado Ostwald capitulou.

Estabelecida a natureza corpuscular da matéria, restava a tarefa difícil de investigar as propriedades de tais corpúsculos, para se determinar, entre outras coisas, se eram ou não realmente átomos no sentido estrito do termo. Explorações neste sentido já vinham se realizando de modo pouco sistemático desde o último lustro do século 19, estimuladas por algumas descobertas surpreendentes.

Em 1895, Wilhelm Röntgen observou um fenômeno que só podia ser explicado pela existência de um tipo desconhecido de “raios”, emitidos de seu aparelho de raios catódicos, chamando-os *raios X*. No ano seguinte, Henri Becquerel descobriu outro efeito igualmente inusitado, a *radioatividade*, no qual “raios” de outra natureza eram emitidos espontaneamente por certas substâncias. Em 1897, J. J. Thomson realizou delicada experiência em Cambridge, Inglaterra, com a qual forneceu evidência esmagadora para a existência de “partículas de carga elétrica”. Tais partículas foram batizadas com o nome de *elétrons*. Em 1902, Ernest Rutherford e Frederick Soddy verificaram em Montreal que a radioatividade acarretava a *transmutação dos elementos* radioativos, confirmando assim uma idéia na qual somente os alquimistas acreditavam. Nos anos que se seguiram, Rutherford descobriu que, na realidade, as substâncias radioativas emitiam dois tipos de radiação. Denominou-os *radiações alfa e beta* (a radiação gama só foi descoberta bem mais tarde; a radiação beta consiste de elétrons; a alfa foi depois compreendida como formada de dois prótons e dois nêutrons, ou seja, núcleos de átomos de hélio). Em 1909, Rutherford, já de volta à Inglaterra, realizou, junto com seus colaboradores Hans Geiger e Ernest Marsden, na Universidade de Manchester, uma experiência em que se projetava radiação alfa sobre delgada película de ouro. Diante dos resultados altamente surpreendentes desta experiência, Rutherford propôs um modelo para o átomo no qual quase toda a sua massa estaria concentrada em uma região central, onde também residiria a carga elétrica positiva do átomo; orbitando esse núcleo estariam os elétrons de Thomson. O modelo foi aperfeiçoado pelo físico dinamarquês Niels Bohr, que em 1913 apresentou a sua teoria atômica, mais tarde apelidada de “teoria quântica velha”. Nessa teoria, as órbitas eram “quantizadas”, i.e., só podiam ter diâmetros de determinados valores.

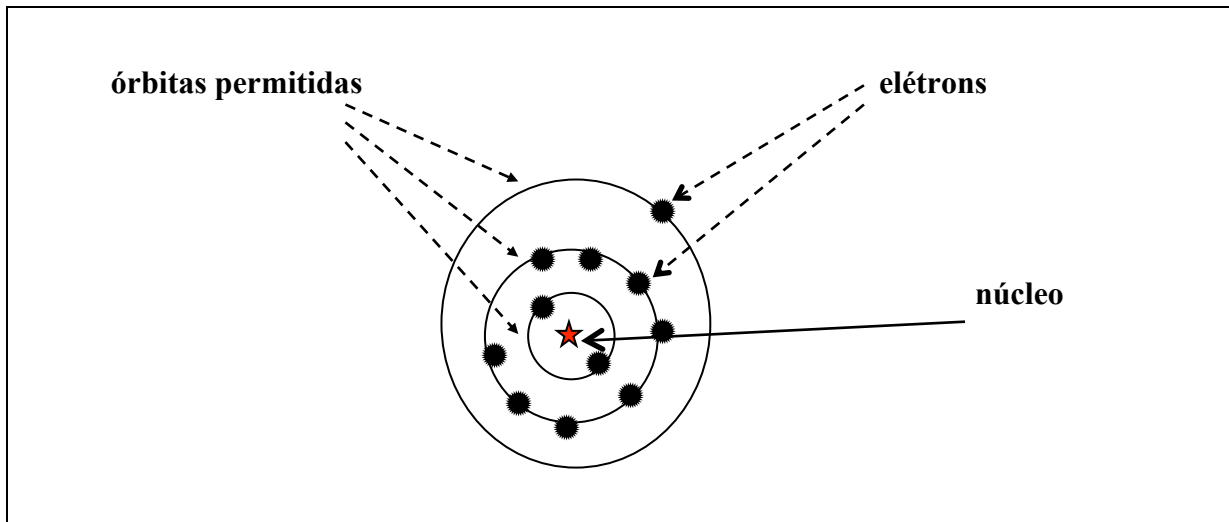


Figura 5: O modelo atômico de Bohr (átomo de sódio).

A teoria atômica de Bohr explicava quantitativamente o espectro de radiação do hidrogênio; para átomos mais complexos, as previsões não eram precisas, chegando mesmo a ser completamente erradas. Mas qualitativamente o modelo atômico bohriano fornecia explicações muito atraentes para grande parte das propriedades químicas da matéria, sendo por isso usado até hoje pelos químicos, pelo menos enquanto recurso de visualização. Paradoxalmente, esse modelo possui características flagrantemente incompatíveis com as teorias clássicas básicas, a mecânica newtoniana e o eletromagnetismo: a quantização das órbitas e sua estabilidade eletromagnética. Deve-se acrescentar que segundo a mecânica quântica o modelo de Bohr também é inadequado.

Possuímos agora alguns elementos que possibilitam a enumeração de algumas características conceituais importantes da visão clássica do mundo proposta pela física (*incluindo* as teorias da relatividade especial e geral – essa é uma observação importante). Simplificadamente, destacamos as seguintes:

1. DETERMINISMO. Os estados futuros de um sistema físico estão rigorosamente fixados por seu estado presente e pelas forças que sobre ele atuam. Segundo as teorias deterministas o mundo seria como um grande relógio.

2. SEPARABILIDADE. Para efeito de análise física, os corpos sempre podem, na física clássica, ser subdivididos em um número qualquer de partes; cada uma delas terá propriedades *intrínsecas*; ou seja, é possível atribuir propriedades locais a cada uma dessas partes, sem referência direta às demais partes. As propriedades do todo são completamente redutíveis às das partes.

3. LOCALIDADE. As influências de um corpo sobre outro (através de forças, campos, ondas, partículas, ou o que seja) se propagam com *velocidade finita*. A isto podemos acrescentar a *atenuação das forças*: todos os campos de força contemplados pelas teorias clássicas diminuem de intensidade com a distância à fonte, até se tornarem praticamente nulos.

4. LINEARIDADE DOS EFEITOS FUNDAMENTAIS. O efeito de duas causas atuando simultaneamente é igual à soma dos efeitos que cada uma delas produziria caso atuasse isoladamente. (Essa propriedade dos efeitos fundamentais – que só através da linguagem matemática pode ser definida de modo rigoroso – já foi ilustrada acima com o princípio de superposição, que rege os fenômenos ondulatórios.)

5. ONTOLOGIA: PARTÍCULAS E/OU CAMPOS. No caso das teorias construtivas da física clássica, podemos dizer que assumem ou admitem partículas e/ou campos com propriedades correlacionáveis com o auxílio de suas leis teóricas.