

SÔNIA RODRIGUES MARTINS

Mecânica Quântica: uma abordagem para o ensino médio

UM GUIA PARA DESVENDAR A FÍSICA DAS PARTÍCULAS SUBATÔMICAS



CRISTALINA
2019

Prezado leitor,

Este material é um produto didático resultado de pesquisa desenvolvida no Mestrado Nacional Profissional em ensino de Física do polo da Universidade de Brasília (UnB). Ele foi elaborado com o objetivo de proporcionar o ensino de tópicos de Mecânica Quântica no Ensino Médio. Mais especificamente, ele abordará o comportamento ondulatório da matéria por meio do uso de textos e simuladores. Os simuladores que são recomendados são advindos do “*Phet interactive simulations*” da Universidade do Colorado, EUA. Os textos são de autoria própria, os quais trazem, ao fim de cada seção, uma coletânea de exercícios. Para que o Professor aplique este produto com mais eficácia, na primeira parte do material, consta um questionário cujo objetivo é detectar se o estudante possui os subsunçores apropriados, bem como realizar uma avaliação acerca da eficácia do material com base nas respostas dos estudantes ao questionário. Dessa forma, esperamos que tanto Professores como estudantes façam um bom proveito do material.

Autora

Capítulos:

1. Trabalhando os subsunçores
2. Um pouco de história
3. Dualidade onda-partícula
4. Compreendendo a barreira de potencial e o potencial degrau
5. Curiosidades quânticas

1. Trabalhando os Subsunçores

Nessa aula será aplicada a prova diagnóstica. O objetivo dessa prova é verificar se os estudantes possuem os subsunçores considerados necessários para a compreensão dos tópicos de mecânica quântico. A duração recomendada para essa atividade é de 50 minutos.

Os conteúdos que serão abordados são os seguintes: conservação de energia, ondas, difração, interferência construtiva e destrutiva, experimento de Thomas Young.

As aulas relativas a estes conteúdos só serão aplicadas se o desempenho dos estudantes no questionário prévio for aquém das expectativas, ou se o professor julgar necessário que os temas sejam trabalhados. O professor pode optar pelos recursos que preferir, contudo, recomendamos o uso de simuladores, do vídeo sobre motivação quântica e da reportagem disponibilizada.

O questionário apresentado a seguir deverá ser aplicado anterior e posteriormente ao uso do material proposto. A aplicação prévia servirá tanto para diagnosticar a existência ou não dos subsunçores (as cinco primeiras questões), bem como para comparar com o resultado posterior ao uso do material.

Questionário de Pesquisa (teste e pós-teste)



Centro Educacional em Tempo Integral Zulca Peixoto de Paiva

1. Um carro de massa 1000 kg viaja com velocidade constante de 20 m/s quando se depara com uma serra de 30 metros de altura que deve ser ultrapassada. Considere que não haja forças de atrito, tampouco qualquer força dissipativa e admita que a aceleração da gravidade seja igual a 10 m/s^2 . O carro conseguirá atingir o outro lado da montanha? Justifique a sua resposta.
2. Um homem ocupa uma região entre duas potentes caixas de som. Com a ajuda de um detector sonoro, ele percebe que, em diferentes posições, o som produzido pelas

caixas sonoras é mais ou menos intenso. Marque a alternativa que explica a constatação do homem.

- a) Nas posições onde o som é menos intenso, as ondas sonoras sofrem interferência construtiva.
- b) As diferenças de som não estão relacionadas com as caixas de som, mas sim com a acústica do ambiente.
- c) Nas posições onde o som é mais intenso, as ondas sonoras sofrem interferência destrutiva.
- d) Nas posições em que o som é menos intenso, as ondas sonoras sofrem difração.
- e) Nas posições em que o som é mais intenso, as ondas sonoras sofrem interferência construtiva.

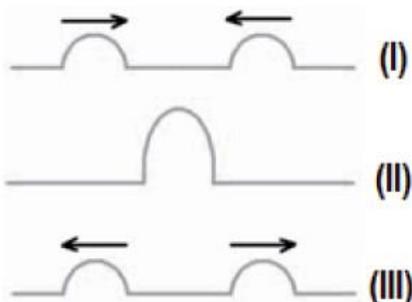
3. (Udesc) Em uma corda, dois pulsos de onda propagam-se em sentidos opostos, conforme mostra a figura.



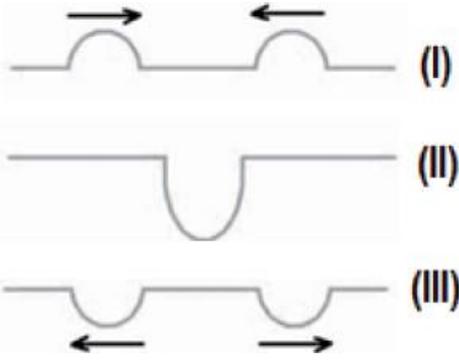
Fonte: Descomplicado.

Assinale a alternativa que representa, corretamente, a propagação dos pulsos de onda, nos seguintes momentos: antes da interferência (I), durante a interferência (II) e após a interferência (III), respectivamente.

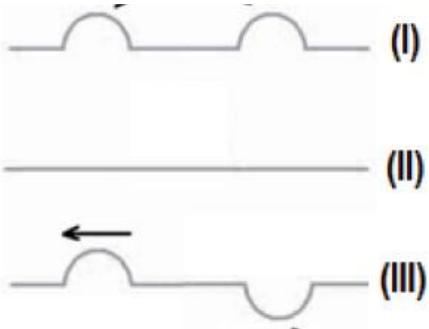
a)



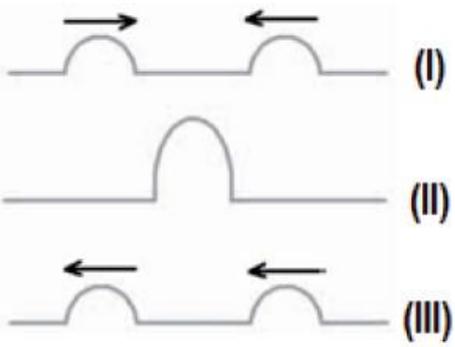
b)



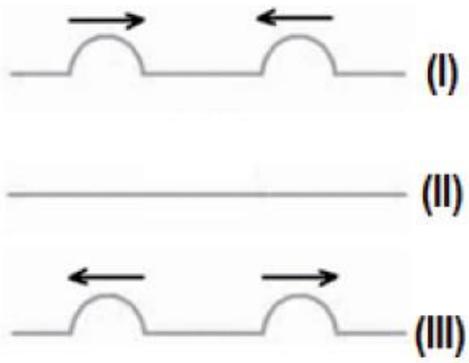
c)



d)



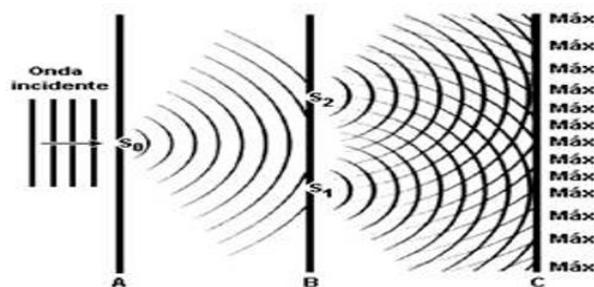
e)



4. Thomas Young (1773-1829) fez a luz de uma fonte passar por duas fendas paralelas antes de atingir um anteparo e observou no anteparo o surgimento de regiões claras e escuras. Marque a alternativa verdadeira a respeito desse fenômeno:

- a) Trata-se do fenômeno da refração, em que a luz tem condição de passar por obstáculos.
- b) Trata-se do fenômeno da difração, que ocorre somente com ondas mecânicas.
- c) Trata-se do fenômeno da difração, em que, após a passagem por pequenos obstáculos, as ondas tendem a contorná-lo.
- d) Trata-se do fenômeno da polarização, em que, após a passagem por pequenos obstáculos, as ondas tendem a contorná-lo.
- e) Trata-se do fenômeno da difração, em que, após a passagem por pequenos obstáculos, as ondas mecânicas tendem a contorná-lo.

5. (UECE) Na figura 3, C é um anteparo e S_0 , S_1 e S_2 são fendas nos obstáculos A e B.



Fonte: Descomplicado.

Assinale a alternativa que contém os fenômenos ópticos esquematizados na figura:

- a) Reflexão e difração

- b) Difração e interferência
- c) Polarização e interferência
- d) Reflexão e interferência

Caso os estudantes não tenham apresentado bom rendimento nas cinco primeiras questões do questionário prévio, recomenda-se ao Professor que ministre aulas com o objetivo de resgatar os conteúdos de ondulatória o enfoque nos fenômenos de interferência e difração. O Professor poderá utilizar a metodologia que julgar mais apropriada, porém, indicamos, fortemente, a utilização, além de qualquer outro material utilizado pelo docente, dos simuladores do *Phet interactive simulations* que aborde os fenômenos de interferência e difração. Tais simuladores são denominados Interferência de ondas e Ondas sonoras, e estão disponíveis em: <https://phet.colorado.edu/pt/simulations/category/physics/sound-and-waves>.

Os próximos textos versam, especificamente, sobre os conteúdos de Mecânica Quântica. Eles constituem a parte principal desse produto. Contudo, recomendamos que eles sejam aplicados após a revisão sobre ondulatória (organizadores prévios) tendo em vista a necessidade de os estudantes disporem dos subsunçores apropriados.

Momento Motivação Quântica

Neste tópico será apresentado aos alunos um material cujo objetivo é motivar os estudantes a estudarem os temas relacionados à mecânica quântica. O material consiste em um vídeo e uma reportagem divulgada num jornal de grande circulação.

Vídeo:

Motivacional Quântico

<https://www.youtube.com/watch?v=bF4JpcKHvRk>

Reportagem de jornal:

Jovem de MG explica física quântica com boliche e pode ganhar US\$ 400 mil:

<https://www1.folha.uol.com.br/ciencia/2018/09/jovem-de-mg-explica-fisica-quantica-com-boliche-e-pode-ganhar-us-400-mil.shtml2>.

2. Um pouco de história

Neste tópico, apresentamos um pouco da história do surgimento da física quântica. É interessante que o estudante conheça os problemas que rodeavam a ciência e que ocasionaram a procura por soluções. Com isso, os estudantes poderão ter noção de como a ciência evoluiu, além de se motivarem para o estudo dos temas propostos.

Recomendamos que esse capítulo seja trabalhado em aproximadamente 200 minutos ou quatro aulas de 50 minutos.

Os conteúdos abordados neste capítulo serão: O espectro do corpo negro, a Lei de Planck, o nascimento da física quântica, computador quântico aplicação da mecânica quântica.

O texto que será apresentado é de autoria própria. O professor pode utilizar diversas ferramentas didáticas para discutir o texto com os estudantes. Recomendamos que os estudantes sejam divididos em grupos para a discussão do texto e de outras atividades que seguirão neste capítulo.

Texto: O surgimento da teoria quântica

O dia 14 de dezembro de 1900 estabeleceu um marco não apenas na história da ciência, mas também na história da humanidade, pois, com a publicação do artigo intitulado *“Sobre a Teoria da Lei de Distribuição do Espectro Normal”*, de autoria do cientista alemão Max Planck, nascia a Física Quântica. O alvorecer das primeiras ideias quânticas recebeu uma propulsão baseada na necessidade que a comunidade científica sentia em explicar fenômenos que não eram explicados pelas teorias físicas até então propostas. Problemas como a radiação do corpo negro, o efeito fotoelétrico

e a estabilidade do átomo não eram solucionados pela física Newtoniana e nem mesmo pela eminente teoria eletromagnética. Como acontece com qualquer concepção nova, as novas concepções das teorias físicas advindas com a Teoria Quântica trouxeram muitas controvérsias e geraram muitas discussões, as quais envolveram os maiores cientistas da época.

No que concerne ao trabalho de Max Planck, notamos o surgimento da ideia de quantização, pois, com o objetivo de explicar a forma com que determinado material absorve ou emite radiação eletromagnética, Planck sugeriu que essa energia seria emitida em pacotes com unidades mínimas, as quais foram denominadas *quanta*. Com essa hipótese, Planck resolveu o problema do espectro de radiação do corpo negro, mas não explicou o porquê da quantização da energia. Seguindo esse panorama, o físico alemão Albert Einstein publicou em 1905, um artigo que explicava o efeito fotoelétrico. Nesse artigo, Einstein elucidou a emissão de elétrons que ocorre quando um feixe luminoso incide numa superfície metálica. Para explicar o efeito fotoelétrico, Einstein apresentou a hipótese de que a luz era constituída de pacotes denominados fótons, assim, mais uma vez, aparecia proposta de quantização.

Contudo, assim como ocorreu no trabalho de Planck, a hipótese de que a luz é constituída de fótons, apesar de elucidar o efeito fotoelétrico, não explica o fundamento da quantização. Um problema parecido surgiu quando o físico dinamarquês Niels Bohr, em 1913, introduziu o seu modelo atômico, no qual supôs que o elétron poderia se mover somente em órbitas determinadas onde não emitia radiação eletromagnética. A radiação era emitida somente quando o elétron “saltava” de uma órbita para outra. Com esse modelo, Bohr solucionou a estabilidade atômica e explicou o espectro de radiação discreto para o átomo de hidrogênio, porém, não ficou claro o motivo pelo qual o elétron não poderia ocupar posições intermediárias no espaço. Assim, por meio desses exemplos, percebemos que a Teoria Quântica, desenvolvida até o primeiro quarto do século XX, possuía bases teóricas e conceituais frágeis, pois os princípios eram esparsos e os enunciados eram criados com a finalidade específica de atender a uma necessidade pontual. Nesse escopo, os físicos ressentiam-se de postulados autênticos e princípios gerais dos quais poderiam formular uma teoria consistente, eficiente e abrangente. Esse desejo dos físicos se tornou realidade com o surgimento da Mecânica Quântica.

A Mecânica Quântica é a teoria científica mais bem-sucedida da história da ciência. Esse fato se deve à infalibilidade, até o momento, de suas previsões serem constatadas mediante os experimentos. A Mecânica Quântica constitui a base da Física Atômica, da Física Nuclear, da Física do Estado Sólido e da Química Moderna, sendo assim, não é espantoso que um grande número de utensílios com valor tecnológico agregado tenha seus princípios de funcionamento embasados na Mecânica Quântica. Para se ter uma ideia, desde o pós-guerra, cerca de um terço do produto interno bruto dos Estados Unidos é oriundo da aplicação da Mecânica Quântica. Dessa forma, quando observarmos, por exemplo, os modernos telefones celulares e televisores, além de diversos outros equipamentos eletrônicos, devemos nos lembrar que são oriundos da vasta aplicabilidade da teoria quântica. E, ainda, há projeções que indicam que com base na segunda década do século corrente, boa parte dos empregos em manufatura no mundo estarão ligados à nanotecnologia, e, para se trabalhar nessa escala, é indispensável um conhecimento sólido em mecânica quântica. Nesse panorama, este trabalho traz uma breve discussão das principais ideias da Mecânica Quântica, com o objetivo de colaborar com a divulgação dessa importante área. Nos próximos capítulos, estudaremos alguns fenômenos pertencentes estritamente ao mundo quântico, tais como: a dualidade onda-partícula e a penetração de barreira. É instrutivo citar que esses fenômenos são explicados somente se admitirmos o novo paradigma do comportamento da matéria ora como partícula, ora como onda.

Tendo realizado a leitura e discussão do texto, recomendamos a discussão da seguinte questão problematizada.

Questão problematizada

O homem pode atravessar uma parede?



Fonte¹: Tecmundo, 2018.

E as partículas subatômicas podem atravessar “paredes”?

Após a discussão do texto e dessa situação-problema, sugerimos que os estudantes respondam as questões disponibilizadas na atividade a seguir.

Atividade

1. Aprendemos que nêutrons, prótons e elétrons são partículas com carga e massa específicas, cujos valores numéricos têm sido utilizados para cálculos principalmente em Química. Entretanto, sabemos que a Mecânica Quântica descreve o caráter dual dessas partículas. Como se justifica essa dualidade? Você conhece uma evidência experimental que leva a essa conclusão?

Descreva-a.

2. Explique, com suas palavras, de que forma os princípios da complementaridade, do não determinismo e da probabilidade são evidenciados no experimento imaginário do gato de Schrödinger.

¹ Disponível em: <<https://www.tecmundo.com.br/fisica/16020-fisicos-sugerem-que-materia-pode-atravesar-paredes.htm>>. Acesso dia: 16/10/2018.

3. Foram dados, em sala de aula, alguns exemplos de casos de nosso cotidiano que podem ilustrar o colapso da função de onda. Crie o seu exemplo.

4. Pense sobre a frase: “fulano é bom e mal ao mesmo tempo”. Essa frase faz sentido para você?

Posteriormente a resolução da atividade, sugerimos aos estudantes que utilizem o simulador com a proposta abaixo.

Simulador

Simulador *Phet*: Modelo do Átomo de Hidrogênio

https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/hydrogen-atom

Nessa proposta, os alunos deverão interagir com as simulações, orientados por questionários que serão propostos com o objetivo de mediar essa interação de forma a possibilitar o diálogo com os aspectos considerados em cada simulação. Sugerimos que o professor faça uma discussão ao término das simulações sobre os principais assuntos abordados.

Na sequência, apresentamos uma coletânea de vídeos e textos sobre mecânica quântica. Recomendamos que o professor escolha alguns deles e assista com os estudantes para posterior discussão. Os roteiros de discussão sugeridos também são apresentados a seguir.

Atividades Complementares

Assista aos vídeos: (Escolher o vídeo de acordo com a turma)

1 Nosso Amigo o Átomo - Walt Disney (1957) – dublado em Português

<https://www.youtube.com/watch?v=Tw1htytissw>

2 A Estrutura do Átomo – 1/6: Os primeiros modelos

<https://www.youtube.com/watch?v=Y6ZlyhT5azU>

3 A Estrutura do Átomo – 2/6: Menor que o menor

<https://www.youtube.com/watch?v=npzzpgeclvc>

4 A Estrutura do Átomo – 6/6: o modelo mecânico-ondulatório

<https://www.youtube.com/watch?v=EjTeUNtSf80>

5 – Os princípios da Mecânica Quântica:

https://www.youtube.com/watch?v=_jzfcTRPub8

6 – Conceitos para você começar a entender a Mecânica Quântica

<https://www.hipercultura.com/entendas-os-principais-conceitos-da-mecanica-quantica/>

Após a apresentação do vídeo, peça para os alunos, em grupos, discutirem o conteúdo deste, de acordo com o roteiro sugerido abaixo.

Roteiro de discussão:

- O que vocês acharam do vídeo?
- Qual a importância de se estudar os elétrons?
- Que mudanças ocorreram com a lei de Planck?
- Cite algumas aplicações da Física Quântica?
- Fale dos princípios da Mecânica Quântica.
- Fale do experimento mental de Schrodinger?

Outros vídeos interessantes:

1 Além do Cosmos – Mecânica Quântica – (National Geographic)

<https://www.youtube.com/watch?v=c1AKzIncvwk> (Assistir depois do slides)

2 Salto Quântico o que é.

<https://www.youtube.com/watch?v=uSipPUmYmLI>

3 FÍSICA QUÂNTICA HISTÓRIA RESUMIDA

<https://www.youtube.com/watch?v=wCfY-chIDGc>

4 O experimento da dupla fenda e a essência da física quântica

<https://www.youtube.com/watch?v=uvhV9Dozcr0>

Após a apresentação do vídeo, peça para os alunos, em grupos, discutirem o conteúdo deste, de acordo com o roteiro sugerido abaixo.

- O que vocês acharam do vídeo? (Vídeo 1)
- O que vocês acharam do vídeo? (Vídeo 2)
- O que é salto quântico?
- Qual a importância de se estudar a Mecânica Quântica?
- Que mudanças ocorreram com a lei de Planck?
- Cite algumas aplicações da Física Quântica?
- Fale dos princípios da Mecânica Quântica
- Qual a importância da lei de Bell para a mecânica quântica?
- Fale do experimento mental de Schrodinger?
- O que é tele transporte quântico?
- É possível o tele transporte humano?

Momento quebra-cuca

Neste tópico o professor deve apresentar as atividades propostas aos estudantes de forma a desafiá-los. Este momento é importante para verificar indícios de aprendizagem significativa.

Texto 1 para os itens de 1 a 8

O espectro de corpo negro

Usar roupa preta durante o verão não é uma boa ideia porque ela absorve toda e qualquer radiação incidente sobre ela. O corpo negro não é, necessariamente, um corpo preto, ele emite radiação porque ele está quente. A barra de ferro aquecida é um corpo negro. Corpo negro é aquele que emite radiação eletromagnética por causa da temperatura. O sol emite radiação de corpo negro. Exemplos de radiação térmica: a luz visível e a luz infravermelha emitidas por uma lâmpada incandescente, a radiação infravermelha emitida por animais e detectada por câmeras de infravermelho, e micro-ondas cósmicas. O corpo negro originou-se no estudo da termodinâmica em que evidenciou a sua principal propriedade que é a de absorver toda e qualquer radiação incidente sobre ele. Todo corpo emite radiação devido ao fato de todo corpo estar associado a uma temperatura. O responsável pelo estudo mais denso da radiação térmica foi o físico alemão Robert Kirchhoff. Ele postulou duas leis importantes que contribuíram muito para os estudos da física moderna. Na primeira lei, ele relacionou a temperatura do corpo e a radiação emitida. Na segunda, ele introduziu o conceito de radiação do corpo negro. A emissão do corpo negro é perfeitamente térmica e foi descrita pela Lei de Planck. Essa lei deu origem à mecânica quântica e revela como é distribuída a densidade de energia de um corpo, a uma dada temperatura, em função de um outro parâmetro que pode ser a frequência. Essa distribuição de energia recebe o nome de Espectro de Corpo Negro.

De acordo com o texto acima e usando seus conhecimentos sobre radiação do corpo negro, examine cada item abaixo com (V) para verdadeiro e (F) para falso.

1 – () O espectro da radiação térmica era algo que sempre intrigava os estudiosos pelo fato de nunca ter sido, de fato, desvendado. Planck foi o responsável pelo estudo mais aprofundado do espectro da radiação, a lei de Planck foi uma das motivadoras da Mecânica Quântica.

2 – () A mecânica quântica nasceu, de fato, do momento em que o físico Max Planck, de forma desesperada, inverteu o processo de análise da radiação do corpo negro. Isso aconteceu porque a radiação emitida por um corpo negro era muito intensa,

gerando, então, gráficos para diferentes temperaturas. Planck queria, de forma matemática, mostrar como era possível chegar a tais gráficos, mas, partindo das funções conhecidas na física clássica, era impossível chegar aos gráficos. Então, teve a ideia de partir dos gráficos para chegar à função matemática correta e encontrou fundamentou nas teorias da termodinâmica, de Boltzmann, para, então, justificá-la.

3 – () A Teoria de Planck foi postulada a fim de mostrar que, na natureza, somente existe energia em valores discretos em quanta de ação, dando à natureza um resultado de caráter contínuo e aceitável para a física clássica conhecida até então.

4 – () A Teoria Quântica também é conhecida como mecânica quântica ou física quântica, e tem como foco principal de estudo o mundo microscópico. Os princípios da quantização da energia, propostos por Einstein e Planck, e as observações experimentais do espectro atômico dos elementos mostravam que as leis de Newton produziam resultados corretos quando aplicadas a sistemas muito pequenos, como átomos e moléculas. Para explicar o movimento dos elétrons em torno do núcleo, foi criada por Planck, Bohr, Einstein e Schrodinger uma nova teoria, a da Mecânica Quântica.

5 – () Somente com o trabalho de Erwin Schrodinger e Werner Heisenberg, em 1925, a Teoria Quântica se estabeleceu. Schrodinger postulou uma equação que permite calcular os níveis de energia e a probabilidade de se encontrar uma partícula em determinada região.

6 – () Pelas Leis de Newton, podemos descrever o movimento dos elétrons (posição e velocidade) com base nas forças que atuam sobre eles. A Teoria Quântica, por sua vez, calcula a probabilidade de se encontrar o elétron (ou outra partícula) em uma região do espaço, usando a Equação de Planck.

7 – () A mecânica quântica surgiu para explicar os fenômenos físicos que a mecânica clássica não podia, entre eles o efeito fotoelétrico, os modelos atômicos e o efeito compton. Antes disso, os físicos usavam o modelo atômico de Rutherford-Bohr para explicar essas questões. Numa análise aprofundada, esse modelo apresentava certas lacunas, mas para a época ele era suficiente.

8 – () A radiação do corpo negro teve um papel fundamental no desenvolvimento da Física Quântica porque através da compreensão desse problema Planck foi capaz de

obter um espectro para a radiação de um corpo negro que se aproxima muito bem dos espectros medidos experimentalmente.

9 – () Conforme a Teoria dos Quanta, a luz é emitida e absorvida de forma descontínua, em pequenos pacotes chamados fótons, cuja quantidade de energia é proporcional à frequência da luz. O olho humano não é sensibilizado por luz infravermelha intensa, embora um pequeno número de fótons o sensibilize na cor amarela. Isso acontece porque a frequência do infravermelho está abaixo da faixa de frequência visível do olho humano.

Questão 10

Exercícios sobre: A Quantização da Matéria
(UEPB-2006)

“Quanta do latim

Plural de quantum

Quando quase não há

Quantidade que se medir

Qualidade que se expressar

Fragmento infinitésimo

Quase que apenas mental...”

(Gilberto Gil)

O trecho acima é da música Quanta, que faz referência ao quanta, denominação atribuída aos pequenos pacotes de energia emitidos pela radiação eletromagnética, segundo o modelo desenvolvido por Max Planck, em 1900. Mais tarde Einstein admitiu que a luz e as demais radiações eletromagnéticas deveriam ser consideradas como um feixe desses pacotes de energia, os quais chamou de fótons, que significa “partículas de luz”, cada um transportando uma quantidade de energia.

Considere $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ J.s e $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19}$ J. Com base nas informações do texto acima, pode-se afirmar que:

- a) Quando a frequência da luz incidente numa superfície metálica excede um certo valor mínimo de frequência, que depende do metal de que foi feita a superfície, esta libera elétrons.
- b) As quantidades de energia emitidas por partículas oscilantes, independem da frequência da radiação emitida.
- c) saltando de um nível de energia para outro, as partículas não emitem nem absorvem energia, uma vez que mudaram de estado quântico.
- d) a energia de um fóton de frequência 100MHz é de 663.10^{-28} .

3. Dualidade Onda-Partícula

Neste capítulo será tratado do conteúdo acerca da dualidade onda-partícula. As ideias que serão apresentadas poderão parecer muito estranhas aos estudantes. Dessa forma, recomendamos ao professor que utilize ao máximo as curiosidades e aplicações deste conteúdo que se encontram disponíveis neste material.

Recomendamos que as atividades deste capítulo sejam trabalhadas em duzentos minutos. No capítulo serão discutidos os seguintes conteúdos: dualidade onda-partícula, ondas de matéria e comprimento de ondas de Broglie, entrelaçamento quântico e o tele transporte.

A discussão acerca dos temas deste capítulo deve iniciar com a questão problematizada apresentada a seguir. Essa estratégia pode funcionar como um organizador prévio.

Questão Problematizada:

Como a luz se comporta, afinal? Como onda ou como partícula?



Fonte: acervo do Google.

A fim de fomentar o debate sobre a questão problematizada, recomendamos que os estudantes assistam aos vídeos:

1 – O Que É Um Elétron? Uma Onda ou Uma Partícula?

https://www.youtube.com/watch?v=wYI52w_FQqQ

2 – Interferência(**Zulca**)

https://www.youtube.com/watch?time_continue=335&v=c3e2-5F5i8s

3 – Difração:

<https://www.youtube.com/watch?v=ANdYomBQL8U> (**ZULCA**)

Simuladores

Após assistir aos vídeos, recomendamos que os estudantes utilizem os simuladores sobre efeito fotoelétrico e pacotes de onda. Após realizar os experimentos disponíveis nos simuladores, os estudantes deverão responder às questões apresentadas.

1- Efeito Foto Elétrico

Nesta proposta os alunos deverão interagir com as simulações, orientados por questionários que serão propostos com o objetivo de mediar esta interação de forma a possibilitar o diálogo com os aspectos considerados em cada simulação. Sugerimos que o professor faça uma discussão ao término das simulações sobre os principais assuntos abordados.

https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/photoelectric

2- Pacotes de Onda e Tunelamento Quântico

https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/quantum-tunneling

Após a apresentação do vídeo, peça para os alunos, em grupos, discutirem o conteúdo deste, de acordo com o roteiro sugerido abaixo.

Roteiro de discussão:

- O que vocês acharam do vídeo? (Vídeo 1)
- Qual a importância da dualidade onda partícula para física quântica?
- O que é interferência da Onda?
- O que é difração da onda?
- Que princípios da onda devemos saber antes de dualidade onda partícula? Por quê?
- Cite algumas aplicações do princípio da dualidade onda partícula?
- Fale sobre superposição quântica.
- O que é entrelaçamento quântico.

Curiosidade quântica

No tópico curiosidade quântica, discutimos a teoria ondulatória da luz. É recomendado que os estudantes leiam e discutam esse texto.

Em 1677 Huygens lança a Teoria Ondulatória da Luz e classifica a luz com uma onda, pois acreditava que a luz vibrava os pontos do meio, da mesma forma que o

som o faz. Isaac Newton dizia que a luz era constituída por pequenas partículas. Por volta de 1704, Newton apresentou a Teoria Corpuscular da Luz, segundo a qual ela se comportava como se fosse uma partícula. Ele propôs que, se a luz fosse realmente uma onda, ela poderia contornar obstáculos, como acontece com o som.

É possível ouvir uma pessoa mesmo estando separado desta por um obstáculo, embora não possa vê-la, isso porque, no caso do som, existe a difração e, ao que tudo indica, não há difração no caso da luz. A teoria de Newton sobre o comportamento da luz tornou-se restrita porque não explica alguns fenômenos. As observações de Huygens permitiram a ele concluir que cada ponto de uma onda se comporta como uma fonte de onda secundária para os próximos pontos. Segundo Huygens a própria frente de onda gera infinitas novas ondas a partir de cada um de seus pontos dando origem uma nova frente de ondas. Para Huygens apenas as propagações que seguem a direção inicial da onda têm energia suficiente para gerar uma onda secundária. Por isso que existe a sombra nos corpos.

Albert Einstein dizia que, quando a luz incide sobre determinados metais, ela é capaz de arrancar elétrons destes. A esse fenômeno, descoberto por Henrich Hertz, damos o nome de efeito fotoelétrico. Einstein intrigou-se com o fato de a energia emitida pelos elétrons não depender da quantidade de luz que incidia sobre a placa. Por exemplo: uma luz vermelha muito forte não conseguia arrancar os elétrons da placa enquanto uma luz violeta de baixa intensidade arrancava. Então, concluiu que o ponto crucial era o comprimento da onda e usou a hipótese de Max Planck que dizia que a energia não seria contínua. Isto é, a radiação é absorvida ou emitida por um corpo aquecido não sob a forma de ondas, mas por meio de pequenos pacotes de energia. Por isso, se diz que a energia é quantizada e o fóton é a partícula que carrega essa energia.

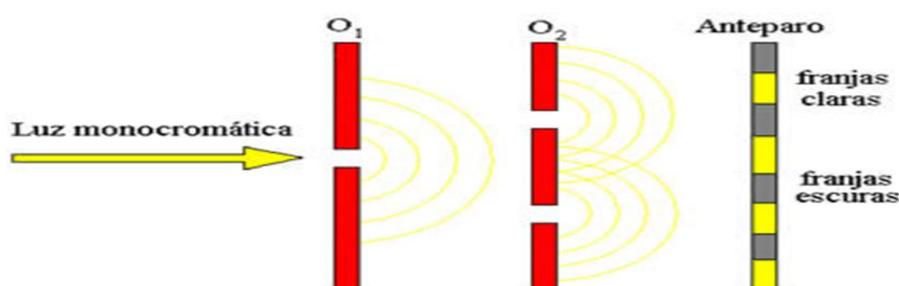
A razão pela qual o efeito fotoelétrico é tão revolucionário refere-se ao fato de que os fótons são pura e simplesmente partículas. Pela primeira vez na história, observou-se que a luz, uma onda, também agia como uma partícula, esse fenômeno ficou conhecido como a dualidade onda-partícula da luz. Em 1924 o físico Louis De Broglie afirmou que os elétrons se comportam como ondas e como partículas dependendo do experimento. Ele propôs que havia uma simetria entre o comportamento de elétrons e de fótons. Para ele se a luz apresenta comportamento

corpúscular, os elétrons deveriam manifestar comportamento ondulatório. De Broglie demonstrou esse fenômeno matematicamente por meio da equação $\lambda = \frac{h}{m.v}$. De acordo com Broglie, um elétron deve se comportar como uma onda de comprimento λ .

Podemos dizer que a Teoria da Luz começou a ganhar força quando o físico e matemático Young montou um experimento que foi capaz de revelar que a luz sofria difração.

Em seu experimento, Young usou um obstáculo, O_1 , contendo uma minúscula fenda; e na sequência, outro obstáculo, O_2 , com duas minúsculas fendas, conforme figura abaixo.

Experimento da Dupla Fenda de Young



Fonte²: alunos online, 2018.

Usando um feixe de luz monocromática, ele o fez passar pelas fendas. Após os obstáculos, Young colocou um anteparo para projetar a luz. Para a surpresa de Young, apareceram franjas claras e escuras. Com isso, ele pôde concluir que, se houve a formação de franjas, a luz sofreu difração ao passar pelas minúsculas fendas. Portanto, a luz tem um comportamento ondulatório.

James C Maxwell também deu suas contribuições sobre o comportamento da luz. Ele determinou que a velocidade das ondas eletromagnéticas no vácuo é igual a 3.10^8 m/s, o que corresponde a mesma velocidade já obtida para a propagação da

² Disponível em : <<https://alunosonline.uol.com.br/fisica/dualidade-onda-particula.html>>. Acesso em 15de março. 2018.

luz. Essa descoberta fez Maxwell suspeitar que a luz era um tipo de onda eletromagnética, o que foi confirmado por Hertz, alguns anos mais tarde. A descoberta das propriedades dessas ondas trouxe muitos benefícios para a sociedade como poder ouvir músicas ou notícias nos rádios, assistir a programas de TV, aquecer alimentos em micro-ondas, acessar à internet e mais uma infinidade de coisas.

Reunir em grupo e representar uma peça de teatro sobre: um debate sobre o comportamento da luz, entre os cientistas, Galileu Galilei, Albert Einstein, Isaac Newton, Huygens, Max Planck, Maxwell; Pierre de Fermat e outros.

- Fale da Teoria de Huygens.
- Qual a importância de se estudar a Dualidade onda-partícula?
- Que mudanças ocorreram com a Lei de Planck?
- Cite algumas aplicações da descoberta da dualidade onda-partícula?
- Fale sobre a Teoria de Newton do comportamento da luz.
- Fale da Teoria de Broglie sobre a dualidade onda partícula?
- Fale da Teoria de Maxwell sobre ondas eletromagnética.
- Demonstre o experimento de Young usando a escrita e desenhos.
- A Teoria de Einstein, dos fótons, que admite ser a luz uma corrente de fótons, invalida a experiência da interferência numa fenda dupla, de Young, em que a luz se comporta como uma onda?

As ondas de matéria e o comprimento de onda de Broglie

Dependendo do fenômeno físico que estamos analisando, devemos considerar o caráter da luz ora corpuscular, ora ondulatório. Com base na Teoria Ondulatória, alguns aspectos do comportamento ondulatório, como a difração, somente são perceptíveis quando o tamanho do obstáculo é da mesma ordem de grandeza do comprimento de onda. Assim, podemos afirmar que, quando a luz se propaga no espaço, ela se comporta como onda, mas, quando a luz incide sobre uma superfície, passa a se comportar como partícula.

As Ondas de Matéria e o Comprimento de Onda de Broglie

Nas seções anteriores, você estudou que a luz apresenta o comportamento dual de onda e partícula. Mas será que na natureza apenas a luz apresenta tal dualidade? A resposta é negativa! Assim como a luz, outras entidades físicas, inclusive partículas reais, como o elétron, podem apresentar essa dualidade, ou seja, ora se comportam como onda, ora como partícula. Louis de Broglie, físico francês, foi primeiro a conjecturar que toda matéria tem caráter dual. Nesse caminho, de Broglie postulou que o comprimento de onda de uma partícula se relaciona com sua massa e velocidade de acordo com a seguinte equação:

$$\lambda = \frac{h}{mv},$$

em que λ é comprimento de onda da partícula, m sua massa e v a sua velocidade. A constante de Planck h , tão fundamental na física quântica, é igual a $6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$.

Para que você compreenda melhor esse conceito, veja os seguintes exemplos.

Exemplo 1: calcule o comprimento de onda de Broglie de uma bola de futebol de 350g chutada com a velocidade de 144 km/h.

Resolução: para calcularmos o comprimento de onda relacionado a essa bola, basta utilizarmos a equação:

$$\lambda = \frac{h}{mv}.$$

Antes disso, precisamos escrever as unidades no sistema internacional (SI). Fazendo isso, obtemos $m = 0,35 \text{ kg}$ e $v = 40 \text{ m/s}$. Assim, temos que

$$\lambda = \frac{6,63 \cdot 10^{-34}}{0,35 \cdot 40} = 0,47 \cdot 10^{-34} \text{ m}.$$

Percebemos que o comprimento de onda da bola de futebol, dado nesse exemplo, é extremamente diminuto, sem qualquer chance de ser medido ou observado experimentalmente com a tecnologia que temos atualmente.

Exemplo 2: calcule o comprimento de onda de Broglie de um elétron que possui energia cinética igual a 240 eV.

Resolução: primeiramente, devemos colocar a energia cinética no sistema internacional, ou seja, como $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$, temos que $240 \text{ eV} = 384 \cdot 10^{-19} \text{ J}$. Uma vez que $E_c = \frac{mv^2}{2}$, temos que $mv = \sqrt{2mE_c}$. A massa do elétron é igual a $9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$. Assim, temos $mv = \sqrt{2 \cdot 9,11 \cdot 10^{-31} \cdot 384 \cdot 10^{-19}} = 83,64 \cdot 10^{-25} \text{ kg} \cdot \text{m/s}$. E, finalmente,

$$\lambda = \frac{6,63 \cdot 10^{-34}}{83,64 \cdot 10^{-25}} = 0,079 \cdot 10^{-9} \text{ m}.$$

Esse valor é, aproximadamente, o tamanho de um átomo.

Em 1937, o cientista C.J. Davisson mediu em laboratório o comprimento de onda de elétrons lentos. Em 1927, George P. Thomson havia confirmado a Equação de Broglie por meio do estudo da difração de elétrons. Esses dois cientistas compartilharam o prêmio Nobel de Física de 1937.

O fenômeno físico estudado nesta unidade pode ser visualizado por meio do simulador intitulado Interferência quântica do Phet interactive simulations, disponível em <https://phet.colorado.edu/pt/simulations/category/physics/light-and-radiation>.

MOMENTO QUEBRA-CUCA

1. Exercícios propostos

E1. Descreva com as suas palavras o que é a dualidade onda-partícula.

E2. Observe a situação descrita na tirinha abaixo.



Fonte: Paiva, 2015.

- (i) A tirinha estabelece uma analogia com qual situação peculiar da mecânica quântica?
- (ii) Explique as condições necessárias para se observar o comportamento ondulatório da matéria.

1. (UFRGS) O físico francês Louis de Broglie (1892-1987), em analogia ao comportamento dual onda-partícula da luz, atribuiu propriedades ondulatórias à matéria.

Sendo a constante de Planck $h = 6,6 \times 10^{-34}$ J.s, o comprimento de onda de Broglie para um elétron (massa $m = 9 \times 10^{-31}$ kg) com velocidade de módulo $v = 2,2 \times 10^6$ m/s é, aproximadamente:

- a. $3,3 \times 10^{-10}$ m.
- b. $3,3 \times 10^{-9}$ m.
- c. $3,3 \times 10^3$ m.
- d. $3,0 \times 10^9$ m.
- e. $3,0 \times 10^{10}$ m.

2. (UEL–2006) Em 2005 comemoramos o centenário da publicação, por Albert Einstein, de três trabalhos que mudaram a visão do homem sobre o mundo. Um

desses trabalhos discute os fundamentos do eletromagnetismo e introduz o que é hoje conhecido como Teoria da Relatividade. Noutro, a interação de um elétron com a radiação eletromagnética (Efeito Fotoelétrico) é discutida, fornecendo nova base experimental à Mecânica Quântica. Num terceiro, as consequências observáveis das bases microscópicas da Termodinâmica e Mecânica Estatística são previstas, fundamentando o que até então era conhecido como efeito Browniano. Um dos resultados notáveis da Teoria da Relatividade foi a união dos conceitos de massa (m) e energia (E). $E = mc^2$. A famosa equação em que c é a velocidade da luz no vácuo, $c = 3 \times 10^8$ m/s, fornece uma relação entre os conteúdos de massa e energia de:

3. Um corpo, e prediz, por exemplo, que, ao aquecermos uma panela com água, estamos, também, aumentando sua massa. Assim, se uma caloria, 4,18 Joules, é a quantidade de energia necessária para elevar a temperatura de 1g de água de 14,5°C para 15,5°C, assinale, dentre as alternativas a seguir, aquela que melhor expressa o correspondente incremento de massa.

- a) 5×10^{-3} kg
- b) 5×10^{-9} kg
- c) 5×10^{-17} kg
- d) 5×10^{-25} kg
- e) 5×10^{-34} kg

4. (UFSC-2007) A Física moderna é o estudo da Física desenvolvido ao final do século XIX e início do século XX. Em particular, é o estudo da Mecânica Quântica e da Teoria da Relatividade Restrita.

Assinale a(s) proposição(ões) CORRETA(S) em relação às contribuições da Física moderna:

- 01. Demonstra limitações da Física Newtoniana na escala microscópica.
- 02. Nega totalmente as aplicações das leis de Newton.
- 04. Explica o efeito fotoelétrico e o laser.
- 08. Afirma que as leis da Física são as mesmas em todos os referenciais inerciais.

16. Comprova que a velocidade da luz é diferente para quaisquer observadores em referenciais inerciais.

32. Demonstra que a massa de um corpo independe de sua velocidade.

5. (ITA-2006) No modelo proposto por Einstein, a luz se comporta como se sua energia estivesse concentrada em pacotes discretos, chamados de “quanta” de luz, e atualmente conhecidos por fótons. Estes possuem momento p e energia E relacionados pela equação $E = pc$, em que c é a velocidade da luz no vácuo. Cada fóton carrega uma energia $E = hf$, em que h é a constante de Planck e f é a frequência da luz. Um evento raro, porém possível, é a fusão de dois fótons, produzindo um par elétron-pósitron, sendo a massa do pósitron igual à massa do elétron. A relação de Einstein associa a energia da partícula à massa do elétron ou pósitron, isto é, $E = mc^2$. Assinale a frequência mínima de cada fóton, para que dois fótons, com momentos opostos e de módulo iguais, produzam um par elétron-pósitron após a colisão.

a) $f = \frac{4mc^2}{h}$

b) $f = \frac{mc^2}{h}$

c) $f = \frac{2mc^2}{h}$

d) $f = \frac{mc^2}{2h}$

e) $f = \frac{mc^2}{4h}$

Texto 1 para as questões de 1 a 6.

Um elétron em movimento manifesta uma onda de matéria com comprimento de onda de Broglie igual a 10^{-10} m. Sendo a massa do elétron igual a $9,1 \cdot 10^{-31}$ kg, sua carga é $1,6 \cdot 10^{-19}$ C e a constante de Planck igual a $6,63 \cdot 10^{-34}$ J.s.

Examine cada item abaixo com V (verdadeiro) e F(falso) conforme seus conhecimentos de dualidade onda-partícula.

- 1 – () Pela Hipótese de Broglie, a velocidade do elétron vale $7,28 \cdot 10^3$ sendo possível calculá-la usando a expressão $\lambda = \frac{h}{mv}$.
- 2 – () Utilizando o Teorema do Trabalho $W = \Delta E$ e da Energia Cinética $= Uq = \frac{1}{2}mv^2$ e desconsiderando o efeito relativístico do elétron, a DDP necessária para acelerar o elétron do repouso até a velocidade necessária é 190 V.
- 3 – () Werner Heisenberg é um cientista alemão que se propôs a mostrar, ou exprimir matematicamente, sua tese de que a posição e velocidade do elétron em torno do núcleo do átomo são impossíveis de precisar simultaneamente.
- 4 – () No efeito fotoelétrico, quando um metal é iluminado por um feixe de luz monocromática, a quantidade de elétrons emitidos pelo metal é diretamente proporcional à intensidade do feixe incidente, independentemente da frequência da luz.
- 5 – () As órbitas permitidas ao elétron em um átomos são aquelas em que o momento angular é $nh/2$ para $n=1,3,5\dots$
- 6 – () Os aspectos corpuscular e ondulatório são necessários para a descrição completa de um sistema quântico.

4. Compreendendo a Barreira de Potencial e o Potencial Degrau

Neste capítulo apresentamos a barreira de potencial e o potencial degrau. Esses modelos teóricos são bastante importantes na mecânica quântica e servem de base para a compreensão de diversas aplicações da mecânica quântica, conforme será visto no decorrer do capítulo. Recomendamos que sejam utilizados 150 minutos para trabalhar este conteúdo.

Nesse sentido, os seguintes tópicos serão abordados: barreira de potencial, potencial degrau, efeito Túnel.

O estudo deve partir da seguinte questão problematizada, de forma que o aluno estabeleça analogias entre os sistemas clássicos e os quânticos.

Questão problematizada



Fonte³: acervo do Google Imagens.

³Disponível em:

<https://www.google.com.br/search?q=imagem+do+morro+do+pao+de+açucar&rlz=1C1SQJL_pt-BRBR776BR776&tbm=isch&source=iu&ictx=1&fir=iPW7R1SI2Mm-3M%253A%252C6aFPn1>.
Acessado dia 12 de Out de 2018.

Como você faria para chegar ao outro lado do morro Pão de Açúcar?

Um veículo de 1000 kg conseguiria chegar do outro lado do morro Pão de Açúcar?

É possível chegar do outro lado do Pão de Açúcar sem ter que subir no topo e depois descê-lo?

E se você fosse uma partícula subatômica, como será que você chegaria ao outro lado? Na física clássica, se quisesse atravessar a montanha, bateria a cabeça nesta e voltaria para o meio de onde veio. E na física quântica? Como seria?

A física quântica explica como uma partícula atravessa uma barreira?

O que é o tunelamento quântico?

Após a questão problematizada, é recomendado que os estudantes assistam ao vídeo:

O Tunelamento Quântico <https://www.youtube.com/watch?v=5HcVsRyX9xs>

Após a apresentação do vídeo, peça para os alunos, em grupos, discutirem o conteúdo deste, de acordo com o roteiro sugerido abaixo.

O que vocês acharam do vídeo?

O que é a constante de Planck?

O que é o comportamento da Luz?

Qual a importância da Equação de Schrodinger?

A barreira de potencial e o efeito túnel

Prezado(a) estudante,

Nesta unidade mergulharemos numa temática muito interessante sobre mecânica quântica, estudaremos a barreira de potencial e o potencial degrau. Esses assuntos possibilitam diversas aplicações na vida prática, algumas das quais veremos

no decorrer da unidade. O estudo minucioso sobre tais assuntos exige um conhecimento matemático que vai além do que temos no Ensino Médio, pois requer que solucionemos a equação diferencial de Schroedinger. Equação que se relacionada com a Mecânica Quântica assim como com as leis de Newton se relacionam com a Mecânica Clássica. Porém, não se preocupe, pois tentaremos compensar a superficialidade matemática com clareza na apresentação dos conceitos. E, então, vamos encarar esse desafio e nos enveredar no mundo quântico? Então, vamos lá!

Imagine a seguinte situação: você está dirigindo um carro, indo de Brasília a Cristalina, cidades 120 quilômetros distantes uma da outra. Contudo, a gasolina, que tem no seu carro, somente dá para rodar no máximo 60 quilômetros. Suponha, ainda, que o único meio de se chegar em Cristalina seja no seu carro, ou seja, você não pode ir a pé, tampouco de bicicleta ou moto, tampouco pegar carona. Além disso, ninguém pode trazer gasolina para reabastecer o seu carro. Então, eu pergunto: qual é a probabilidade de você ser visto em Cristalina algumas horas após ter saído de Brasília? Certamente, você responderá que a probabilidade é nula, ou seja, você não será visto em Cristalina. Na mecânica quântica, não é bem assim! Segundo a mecânica quântica, haveria uma probabilidade, mesmo que pequena, de você ser visto em Cristalina, ou seja, de alguma forma, seria como se ocorresse um grande milagre e a gasolina fosse suficiente.

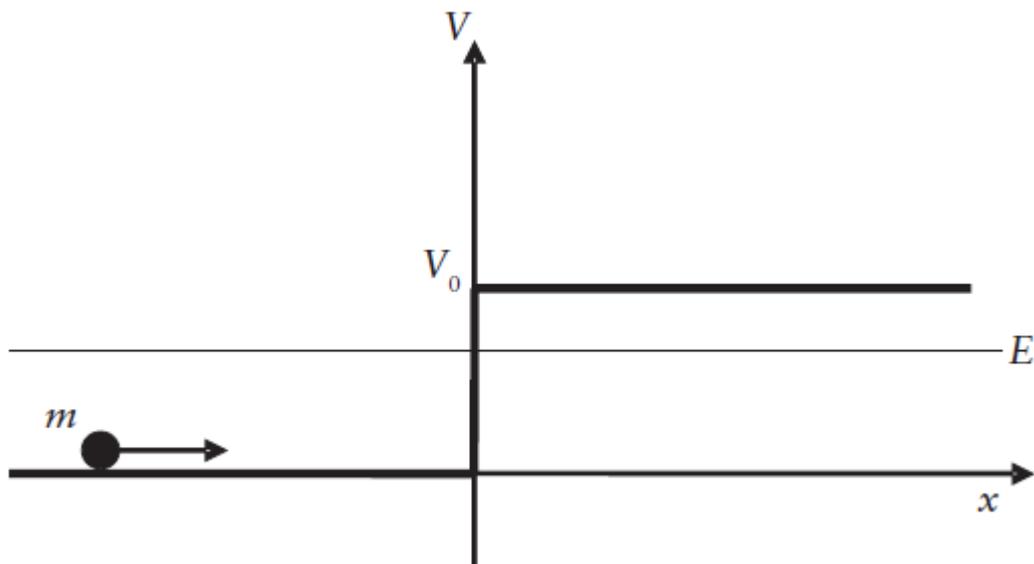
No mundo quântico, há diversos fenômenos físicos que são análogos ao que foi discutido no parágrafo precedente, tendo o potencial degrau e a barreira de potencial como bons representantes. E este será o nosso objetivo: estudar tais fenômenos quânticos.

5.3. O POTENCIAL DEGRAU

Para analisar a barreira de potencial, utilizaremos como referência a Figura 1. Nela temos uma partícula de massa m e energia total E se movendo da esquerda para direita. Essa partícula encontrará, a partir de $x = 0$, uma região de energia potencial V_0 , em que $V_0 > E$. Ou seja, a energia potencial da partícula é menor que o potencial. Do ponto de vista clássico, para a partícula passar pela região do potencial, e ser

detectada na região em que $x > 0$, sua energia total E deveria ser maior que a energia potencial do degrau, ou seja, deveríamos ter $E > V_0$. Por isso, denominamos a região $x > 0$ como região classicamente proibida. Podemos dizer que, de acordo com o que sabemos da Física Clássica, a probabilidade de se encontrar a partícula em $x > 0$ é nula; ou seja, é impossível encontrar a partícula nessa região.

Figura: potencial degrau



Fonte: Livro do Caruso.

Agora você ficará surpreso! No mundo quântico, a probabilidade de encontrar a partícula na região classicamente proibida é diferente de zero, ou seja, é possível encontrar a partícula na região $x > 0$.

Agora você vai descobrir como os cientistas chegaram a tal conclusão! Os físicos que demonstraram pela primeira vez esse resultado basearam-se nas soluções da Equação de Schroedinger. Eles resolveram a Equação de Schroedinger em duas regiões: para $x > 0$ e para $x < 0$. Após encontrarem a solução, eles as relacionaram e com isso chegaram à expressão da probabilidade de detecção da partícula na região $x > 0$.

Dessa forma, a probabilidade de se detectar a partícula em $x > 0$ é dada pela equação:

$$p(x > 0) = p(0)e^{-2Kx},$$

em que $K = \sqrt{\frac{2m(V_0 - E)}{\hbar^2}}$ e $p(0)$ representa a probabilidade de detectá-la na origem ($\hbar = 1,05 \cdot 10^{-34} J \cdot s = 6,58 \cdot 10^{-16} eV \cdot s$ é a constante de Planck dividida por 2π).

Para compreender melhor essa equação, façamos o exemplo apresentado na sequência.

Exemplo 1: neste exemplo vamos estudar a aplicação da equação da probabilidade para um objeto pertencente ao nosso mundo clássico. Vamos escolher um objeto muito diminuto e, então, estimar a distância de penetração de barreira que faria a probabilidade de detectar tal partícula decaísse a 1% de seu valor na origem. Para esse fim, considere que a partícula analisada seja um grão de poeira com massa igual a $m = 1,0 \cdot 10^{-14} kg$ e velocidade $v = 10^{-3} m/s$ (essa velocidade é típica da agitação térmica de uma partícula com tais parâmetros). Considere, ainda, que a altura do degrau seja o dobro da energia cinética da partícula.

Resolução: A energia total do grão de areia é igual à sua energia cinética, por se tratar de uma partícula livre. Nesse caso, temos:

$$E = \frac{1}{2}mv^2,$$

$$E = \frac{1}{2} \cdot 1,0 \cdot 10^{-14} \cdot (10^{-3})^2,$$

$$E = 0,5 \cdot 10^{-20} J.$$

Nesse caso, de acordo com a informação do problema, temos $V_0 = 1,0 \cdot 10^{-20} J$.

Com isso, temos que

$$K = \sqrt{\frac{2m(V_0 - E)}{\hbar^2}} = \sqrt{\frac{2.1,0 \cdot 10^{-14} \cdot (1,0 \cdot 10^{-20} - 0,5 \cdot 10^{-20})}{(1,05 \cdot 10^{-34})^2}} = 9,5 \cdot 10^{16} m^{-1}.$$

Dessa forma, a probabilidade de detectar a partícula na região $x > 0$ é dada por

$$p(x > 0) = p(0)e^{-2 \cdot 9,5 \cdot 10^{16} \cdot x} = p(0)e^{-19 \cdot 10^{16} \cdot x}.$$

Como a probabilidade de encontrá-la na origem é $p(0)$, temos que a razão $\frac{p(x > 0)}{p(0)}$ é dada por

$$\frac{p(x > 0)}{p(0)} = e^{-19 \cdot 10^{16} \cdot x}.$$

Como queremos descobrir a distância de penetração para a qual $p(x > 0)$ seja 1% de $p(0)$, temos

$$\frac{p(x > 0)}{p(0)} = e^{-19 \cdot 10^{16} \cdot x} = 0,01.$$

Resolvendo a última equação, extraíndo o logaritmo natural de ambos os membros da equação, obtemos

$$\begin{aligned} \ln(e^{-19 \cdot 10^{16} \cdot x}) &= \ln(0,01) \\ -19 \cdot 10^{16} \cdot x &= -4,605, \\ x &= 0,2424 \cdot 10^{-16} m = 2,424 \cdot 10^{-17} m. \end{aligned}$$

Essa distância de penetração $2,424 \cdot 10^{-17} m$ é sete ordens de grandeza menor que o tamanho de um átomo, o que indica a impossibilidade de uma partícula “clássica” penetrar uma barreira. Nos exercícios dessa unidade, você fará um cálculo análogo para um elétron em vez do grão de areia, e notará que a distância de penetração será bastante ampliada.

Momento Quebra Cuca

Texto para exame como verdadeiro (v) ou falso(f).

No começo do século XX, os cientistas desenvolveram uma teoria capaz de descrever a dinâmica de sistemas microscópicos. Essa teoria, conhecida como mecânica quântica, obteve grande sucesso na descrição dos átomos e das ligações entre átomos que formam moléculas e sólidos. Julgue o item a seguir, relacionado à mecânica quântica e a alguns de seus resultados.

() Segundo a mecânica quântica, uma partícula em um poço de potencial infinito não pode ter energia total nula.

2 – Um feixe de elétrons de 2 eV incide sobre uma barreira de potencial retangular de 4 eV de altura e 1 nm de espessura.

a) Qual a probabilidade de transmissão T ?

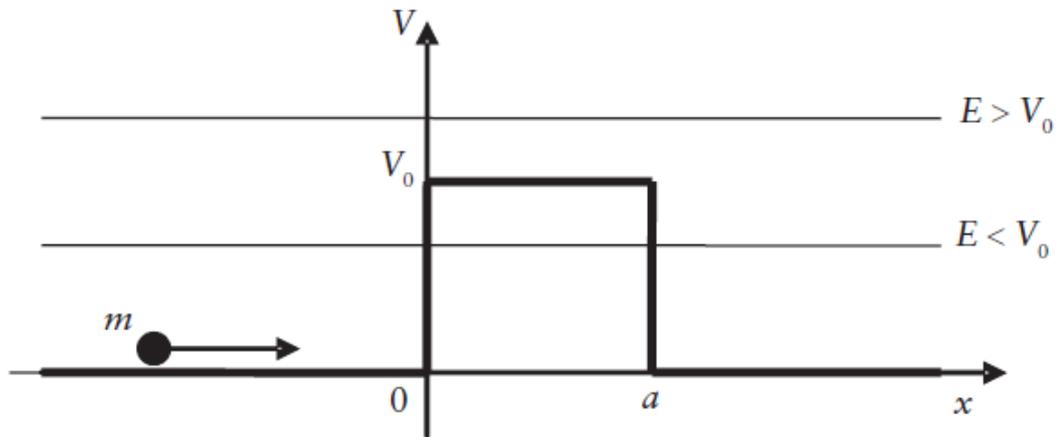
b) Qual o valor de T para elétron de 6 eV ?

3 – Supondo que podemos ajustar a espessura da barreira do exercício 2 A, qual o valor desta para que 1 elétron, de cada 1000 incidentes, tunelasse por meio dela?

5.3 A BARREIRA DE POTENCIAL

Na barreira de potencial, a situação é análoga à do potencial degrau. A energia total da partícula incidente é menor que a energia potencial da barreira. Porém, a probabilidade de detectar a partícula na região depois da barreira é diferente de zero. Ou seja, mais uma vez, a partícula pode ser encontrada na “região classicamente proibida”. A análise dessa situação será baseada na Figura 2.

Figura 2: barreira de potencial



Fonte: Livro do Caruzo.

Conforme pode ser observado na Figura 2, uma partícula de massa m e energia total E incide numa barreira com energia potencial V_0 e de largura a . A expectativa da mecânica clássica é que a partícula não tivesse qualquer chance de ser detectada na região após a barreira, ou seja, na região $x > a$.

A explicação teórica desse fenômeno segue, mais uma vez, a prescrição da Equação de Schroedinger, ou seja, resolvemos a Equação de Schroedinger em três regiões: $x < 0$, $0 < x < a$ e $x > a$. Após encontrarmos as soluções, estas são relacionadas e, por fim, obtemos a expressão da probabilidade. Essa expressão é dada por:

$$P(x > a) = \frac{16k^2K^2}{(k^2 + K^2)} e^{-2Ka},$$

em que: $K = \sqrt{\frac{2m(V_0 - E)}{\hbar^2}}$ e $k = \sqrt{\frac{2mE}{\hbar^2}}$.

Perceba que a probabilidade decai exponencialmente com a largura da barreira, ou seja, quanto maior a barreira menor será a probabilidade de detectar a partícula na região classicamente proibida. Os conceitos apresentados aqui ficarão mais claros com o exemplo 2 apresentado a seguir.

Atividade

1 – Barreira de Potencial e o Tunelamento Quântico

https://www.youtube.com/watch?v=E_ekYLEL3HQ

Exemplo 2: um elétron com energia total igual a 2 eV incide numa barreira de potencial de altura 4 eV e largura 10^{-10} m . Qual é a probabilidade de ele ser detectado na região depois da barreira?

Resolução: para solucionar esse problema, basta calcularmos os valores de $K =$

$\sqrt{\frac{2m(V_0 - E)}{\hbar^2}}$ e $k = \sqrt{\frac{2mE}{\hbar^2}}$ e em seguida utilizarmos a expressão

$$P(x > a) = \frac{16k^2K^2}{(k^2 + K^2)} e^{-2Ka}.$$

Fazendo esses cálculos, obtemos (vale lembrar que $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ e que a massa do elétron é igual a $9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$)

$$K = \sqrt{\frac{2m(V_0 - E)}{\hbar^2}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 9,11 \cdot 10^{-31} \cdot (4 - 2) \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{(1,05 \cdot 10^{-34})^2}} = 7,27 \cdot 10^9 \text{ m}^{-1}.$$

$$k = \sqrt{\frac{2mE}{\hbar^2}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 9,11 \cdot 10^{-31} \cdot 2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{(1,05 \cdot 10^{-34})^2}} = 7,27 \cdot 10^9 \text{ m}^{-1}.$$

Com isso, chegamos a

$$P(x > a) = \frac{16k^2K^2}{(k^2 + K^2)} e^{-2Ka} = \frac{16(7,27 \cdot 10^9)^2(7,27 \cdot 10^9)^2}{((7,27 \cdot 10^9)^2 + (7,27 \cdot 10^9)^2)} e^{-2(7,27 \cdot 10^9)10^{-10}} = 0,94.$$

Ou seja, a probabilidade de o elétron ser encontrado na região classicamente proibida é alta, pois é da ordem de 94%!

Os fenômenos abordados neste capítulo podem ser visualizados por meio do simulador intitulado Tunelamento quântico do Phet interactive simulations, disponível em: <https://phet.colorado.edu/pt/simulations/category/physics/quantum-phenomena>.

MOMENTO QUEBRA CUCA

1 – Um elétron está no interior de um poço quadrado de 10 eV de profundidade. a. Se a energia do estado fundamental do elétron no poço é de 8 eV, calcule:

a) A largura do poço.

b) Repita o item anterior para o caso em que 8 eV seja a energia do primeiro estado excitado.

APLICAÇÕES QUÂNTICAS

Microscópio Eletrônico de Tunelamento Quântico

Agora você verá que os modelos apresentados de fato são aplicados no estudo de situações práticas da natureza. Um bom exemplo dessas aplicações é o microscópio eletrônico por tunelamento. Como o próprio nome já menciona, o funcionamento desse microscópio é baseado no tunelamento de barreira de potencial. Esse aparelho foi inventado em 1981 na IBM de Zurique pelos físicos Gerd Binnig e Heinrich Rohrer, os quais foram laureados com o Prêmio Nobel de Física de 1986. O microscópio de varredura por tunelamento foi o primeiro dispositivo capaz de gerar imagens reais de superfícies com resolução atômica!

O microscópio de tunelamento usa o tunelamento quântico para detectar as alterações na distância entre sua ponta minúscula e uma superfície condutora. A amostra que está sendo analisada recebe uma tensão elétrica e a ponta começa a se mover sobre ela. Medindo alterações na corrente produzidas na medida em que os elétrons tunelam entre a amostra e a ponta do microscópio. Com base nesse princípio, os cientistas conseguem desenhar um mapa preciso da topologia da superfície do material com precisão atômica.

Outra aplicação importante é o importante processo do decaimento alfa. O decaimento alfa é um fenômeno que consiste na emissão espontânea de uma partícula alfa por um núcleo atômico instável (radioativo) e são constituídos por dois prótons dois nêutrons ligados pela força nuclear forte. Para o decaimento alfa ocorrer, isto é, escapar do núcleo radioativo, primeiramente ela é formada dentro do núcleo,

e, posteriormente, sofre tunelamento (penetra) por meio de uma barreira de energia potencial coulombiana que representa o poço de potencial nuclear com profundidade finita, cuja altura da barreira é, muitas vezes, maior que a energia cinética da partícula alfa emitida, e essa barreira, é formada pela combinação da força nuclear atrativa e da força de repulsão coulombiana entre a partícula e o restante do núcleo. O fato de a partícula alfa escapar da atração coulombiana, isto é, da barreira de potencial, só é explicado com a Teoria Quântica que estudamos nesta unidade. Apesar de a probabilidade de penetração de barreira ser pequena, a ocorrência desta é percebida de forma prática.

O universo das aplicações desses fenômenos não se restringe aos dois já apresentados. Se você já emendou dois fios elétricos, fazendo a denominada gambiarra, certamente, já fez uso do efeito túnel. Os fios que compramos, normalmente, vêm revestidos com uma fina camada de esmalte que deve ser raspada antes de fazermos a emenda de dois fios. Entretanto, isto geralmente não é feito, e, portanto, questionamos: se há uma fina camada de isolante separando os dois fios que estão juntos, como o chuveiro funciona? A resposta está justamente no efeito túnel. Entre os fios emendados, há uma energia potencial que os elétrons devem superar para que haja a condução de eletricidade. Essa barreira é ultrapassada graças ao efeito de penetração de barreira que o elétron é submetido. Muitas outras aplicações desses efeitos existem. Fica como tarefa você realizar uma pesquisa mais detalhada para levantar algumas. Que tal?

O efeito túnel e a penetração de barreira, apesar de se apresentarem bem estranhos aos “olhos clássicos”, são bem conhecidos no estudo das ondas. Ou seja, eles são observados, por exemplo, na análise de ondas eletromagnéticas ou acústicas. Se admitirmos a hipótese das ondas de matéria proposta por De Broglie, tais efeitos podem ser visto como manifestações do comportamento ondulatório da matéria. E isso é bem notável se compararmos os efeitos discutidos nos exemplos que analisavam um grão de areia e um elétron. No elétron, os efeitos são bastante plausíveis pois ele possui um comprimento de onda de Broglie bem maior que do grão de areia. Reflita sobre isso. O tunelamento quântico foi desenvolvido com base no

estudo da radiatividade que é um fenômeno no qual algumas substâncias emitem radiações que atravessam corpos opacos por meio da luz.

Atividade

1 – Identificar a importância conceitual e prática do efeito-túnel na Física.

Poderíamos ter discutido, também, o efeito túnel e o potencial degrau para o caso em que a energia total da partícula fosse maior que o potencial. Nesse caso, segundo a perspectiva clássica, deveríamos ter probabilidade de encontrar a partícula na região $x < 0$ nula. Porém, é possível mostrar que tal probabilidade existe, caracterizando o efeito ondulatório da matéria.

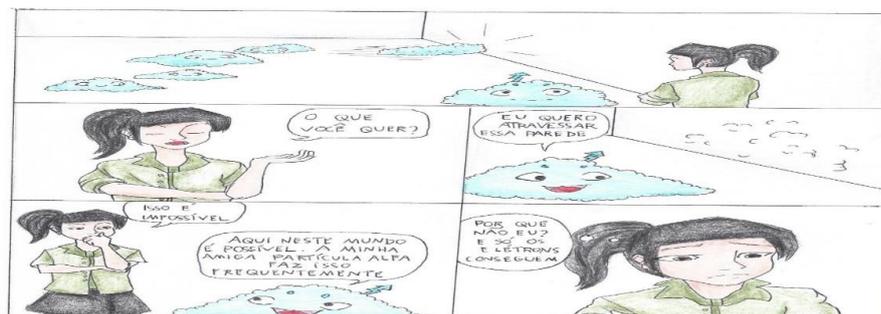
MOMENTO QUEBRA-CUCA

Exercícios Propostos

E1. Descreva com as suas palavras o que é o efeito túnel e o potencial degrau.

E2. Observe a situação descrita na tirinha abaixo.

Figura 3: atravessar paredes



(iii) A tirinha estabelece uma analogia com qual situação peculiar da mecânica quântica?

(iv) No último quadrinho, o garoto disse que só os elétrons conseguem tunelar uma barreira. Essa afirmação é verdadeira? Quais condições são necessárias para que o tunelamento de barreira ocorra?

E3. Um próton cuja energia total é $5,1 \text{ eV}$ aproxima-se de uma barreira de potencial cuja altura V_0 é $6,8 \text{ eV}$ e cuja espessura é $a = 750 \text{ pm}$. Qual é a probabilidade de se detectar o elétron na região classicamente proibida? E se a partícula incidente fosse um elétron, qual seria a probabilidade? Compare os dois resultados e justifique a diferença encontrada.

UM EXEMPLO DE TUNELAMENTO QUÂNTICO NA SUA CASA

As pessoas, no dia a dia, entram em contato com a física quântica e nem sabem. um exemplo simples disso refere-se ao tunelamento quântico em que você monta um aparelho elétrico qualquer de sua casa com dois fios comprados nas lojas de materiais de construção esses fios vêm revestidos com uma camada de esmalte que deve ser retirada antes de juntar os dois fios e no instante que você liga os fios sem retirar esse esmalte, que é um isolante, como o elétron consegue atravessar a aquela barreira e levar energia aos aparelhos? Segundo o mundo Clássica de Isaac Newton, um elétron jamais conseguiria atravessar tal barreira, mas, no mundo quântico, a função de Schrodinger, que descreve a probabilidade de se encontrar uma partícula, diz ser possível penetrar a barreira de potencial, e é por isso que, mesmo tendo uma barreira impedindo o elétron de atravessá-la, o elétron a atravessa por tunelamento quântico e o aparelho funcionam normalmente. Não podemos esquecer que um simples olhar do observado pode mudar tudo na física dos pequenos corpo

5. CURIOSIDADES QUÂNTICAS

Neste capítulo apresentaremos algumas curiosidades relacionadas à mecânica quântica. A ênfase será dada ao princípio da incerteza e à equação de Schroedinger.

O princípio da incerteza de Heisenberg

As ondas de matéria constituem um aspecto realmente estranho no que compreende o mundo quântico. No entanto, muitas outras propriedades que escapam do senso comum ainda serão tratadas no presente trabalho. Nesse caminho, apresentaremos o Princípio da Incerteza de Heisenberg, que estabelece a limitação em fazer uma medição da posição e do momento de uma partícula simultaneamente. Segundo esse princípio, publicado em 1927, quanto mais precisa for a medida da

posição de uma partícula, mais imprecisa será a medida do momento, e vice-versa. Se fossemos analisar o nosso mundo clássico segundo o Princípio da Incerteza, um carro se movendo numa rodovia somente poderia ter um dos dois parâmetros bem determinado, a sua posição ou a sua velocidade; assim se tornaria complicado saber, precisamente, onde o carro está em que Δx representa a incerteza na medida da posição, e Δp representa a incerteza na medida do momento. É importante salientar que a restrição não é em relação à precisão com que p ou x podem ser medidas, mas em relação ao produto $\Delta x \Delta p$ numa medida simultânea de ambos. O que tira o Princípio da Incerteza do alcance das nossas experiências cotidianas é o fato de h ser pequeno. É possível demonstrar que a relação de incerteza apresentada constitui consequência das hipóteses ondulatórias apresentadas por de Broglie. E, assim como toda a mecânica quântica, o Princípio da Incerteza foi interpretado de diversas formas, há uma interpretação que estabelece uma relação entre tal princípio e o nosso livre arbítrio!

A EQUAÇÃO DE SCHROEDINGER

A Teoria Quântica necessitava de um tratamento teórico que fornecesse uma base conceitual sólida, como ocorre com as outras teorias da física. O desenvolvimento da Teoria Quântica dependia desse fator, já que, em sua fase inicial, não havia explicação para a inserção das hipóteses de quantização, apenas se sabia que as introduzindo, se obtinham os resultados experimentais. No entanto, esse panorama já estava se modificando quando de Broglie sugeriu a hipótese das ondas de matéria. Apoiado no trabalho de Broglie, o físico Erwin Schroedinger desenvolveu, no ano de 1925, a Equação de Onda cuja solução representaria as tais ondas de matéria. É justo citar que de Broglie tentou deduzir uma equação para ondas de matéria, mas a equação proposta por ele não foi tão bem-sucedida como a de Schroedinger. A Equação de Schroedinger permitiu calcular, corretamente, as energias dos estados estacionários e explorar as cores presentes nos espectros de raios dos elementos, tendo se apresentado como a formulação teórica adequada para a descrição dos sistemas atômicos. Numa análise unidimensional, a Equação de Schroedinger pode ser escrita como

$$-\frac{\hbar^2}{8\pi^2m} \frac{d^2\varphi(x,t)}{dx^2} + V(x,t)\varphi(x,t) = \frac{i\hbar}{2\pi} \frac{d\varphi(x,t)}{dt}.$$

Quando buscamos a solução dessa equação, estamos procurando a função $\varphi(x,t)$, que descreve o sistema quântico em questão. A função $\varphi(x,t)$ é denominada função de onda ou amplitude de probabilidade. Merece destaque o fato de não conhecermos ao certo o significado da função $\varphi(x,t)$, mas sabemos que $|\varphi(x,t)|^2$ representa a densidade de probabilidade de encontrar a partícula ou o sistema em determinada região do espaço. E, ainda, caso calculemos a integral $\int |\varphi(x,t)|^2 dx$, obtemos a probabilidade de a partícula ser encontrada numa determinada região do espaço. Outro ponto importante da equação é o potencial $V(x,t)$ que nos informa como a partícula (ou o sistema) interage com o meio, ou seja, o potencial é a “impressão digital” do problema em questão. A Equação de Schroedinger torna-se bem-sucedida, pois mostra-se aplicável a diversas situações, e, assim, a mecânica quântica, além de repetir cálculos já confirmados por resultados experimentais, passa a estabelecer previsões. Com o sucesso da equação proposta por Schroedinger, a mecânica quântica torna-se expressa, matematicamente, e adquire maturidade.

Apesar dos resultados alcançados por meio da aplicação da Equação de Schroedinger, devemos destacar que a mecânica quântica é uma teoria probabilística. Sendo assim, seu caráter baseado em probabilidades desperta angústia em muitos físicos que se contrapuseram à emergente teoria. Um dos maiores críticos da mecânica quântica foi Albert Einstein, justamente um dos fundadores da física quântica. Um dos motivos que levou Einstein a sustentar oposição à Mecânica Quântica referiu-se ao caráter probabilístico da teoria.

Einstein era realista e, dessa forma, atribuía à natureza uma realidade objetiva, a qual o homem procura conhecer a verdade por meio da ciência. Assim, acreditava na existência de uma teoria determinista para descrever o comportamento das partículas a nível microscópico. Einstein chegou a afirmar que “Deus não joga dados”, fazendo uma alusão ao descrédito que atribuía a uma teoria que descrevesse a natureza por meio de probabilidades. Nesse sentido, Einstein era, também, crítico da escola de Copenhague, a qual aceitava com naturalidade a nova concepção introduzida pela emergente teoria. Tal escola interpretava a natureza probabilística da

mecânica quântica como a contrapartida teórica das dificuldades inerentes aos processos de medida dos sistemas físicos. Nesse sentido, Einstein não admitia o conformismo expresso pela escola de Copenhague. Entretanto, mesmo contrária a uma das maiores mentes da ciência, a mecânica quântica avançou devido aos brilhantes resultados e aplicações. Hoje podemos afirmar que quase todo conhecimento que temos do mundo atômico é atribuído à mecânica quântica.

O GATO DE SCHROEDINGER

Um efeito quântico muito interessante e conhecido pelos leigos é o gato de Schroedinger. Com o objetivo de explicar as minúcias das soluções da equação fundamental da mecânica quântica, Schroedinger propôs o experimento imaginário no qual utiliza um gato que, supostamente, pode estar vivo ou morto ao mesmo tempo. Esse exemplo trata de uma forma simples de analisar o Princípio da Superposição das soluções da Equação de Schroedinger. Tal princípio afirma que se, para um determinado problema, a Equação de Schroedinger admitir duas soluções distintas $|\alpha\rangle$ e $|\beta\rangle$, então, o sistema pode ser descrito por meio da superposição das duas soluções, o que é matematicamente escrito como

$$|\varphi\rangle = |\alpha\rangle + |\beta\rangle$$

em que os estados $|\alpha\rangle$ e $|\beta\rangle$ existem simultaneamente. Contudo, quando observarmos o sistema, ou seja, quando efetuarmos uma medição, um dos estados colapsa (deixa de existir) e o outro é então detectado. Nesse sentido, o referido gato de Schroedinger faz alusão a essa curiosa propriedade quântica, conforme explicitamos a seguir.

Considere um gato preso numa caixa em que há um recipiente com material radioativo que tem 50% de chance de emitir uma partícula radioativa a cada hora, e um contador Geiger. O contador Geiger é um aparelho utilizado para detectar radiação. Se o material liberar partículas radioativas, o contador percebe a sua presença e aciona um martelo, que, por sua vez, quebra um frasco de veneno. Evidentemente, ao se passar uma hora, somente terá ocorrido um dos dois casos possíveis: o átomo emitiu uma partícula radioativa ou não a emitiu (a probabilidade que ocorra um ou outro evento é a mesma). Como resultado da interação, no interior

da caixa o gato estará vivo ou morto. Porém, isso não poderemos saber a não ser que se abra a caixa para comprovar as hipóteses. Se tentarmos descrever o que ocorreu no interior da caixa, servindo-nos das leis da mecânica quântica, chegaremos a uma conclusão muito estranha. O gato viria descrito por uma função de onda extremamente complexa resultado da superposição de dois estados, combinando 50% de “gato vivo” e 50% de “gato morto”. Ou seja, aplicando-se o formalismo quântico, o gato estaria por sua vez “vivo” e “morto”; correspondente a dois estados indistinguíveis! Assim, a função de onda que representaria o estado do gato seria dada por

$$|\varphi\rangle = |vivo\rangle + |morto\rangle.$$

A única forma de averiguar o que “realmente” aconteceu com o gato será realizar uma medida: abrir a caixa e olhar dentro. Em alguns casos, encontraremos o gato vivo e, em outros, um gato morto. Isso ocorre porque ao realizar a medida, o observador interage com o sistema e o altera, rompendo a superposição dos dois estados, fazendo com o que o sistema seja observado em um dos dois estados possíveis. E isso é uma forma simplista de explicar o que chamamos de colapso da função de onda, que é uma característica inerente ao processo de medição em mecânica quântica.

ENTRELAÇAMENTO QUÂNTICO

Outra interessante propriedade da mecânica quântica que, por sua vez, também foge do senso comum, é o emaranhamento. Para entender essa propriedade, considere uma superposição de estados constituída por duas componentes. O emaranhamento quântico nos diz que, se uma observação for feita sobre uma das componentes do sistema, essa observação afeta o resultado da observação feita sobre uma outra componente, que pode estar em um local bem distante da primeira, sem que haja qualquer interação entre elas. Como um exemplo pictórico, tomemos dois irmãos, Paulo e João. Paulo mora no Brasil, enquanto João vive em Portugal. Suponha que Paulo e João tenham, cada um, camisetas de 4 cores distintas. Num dia qualquer, Paulo vai até o guarda-roupas e retira uma das camisetas ao acaso. No

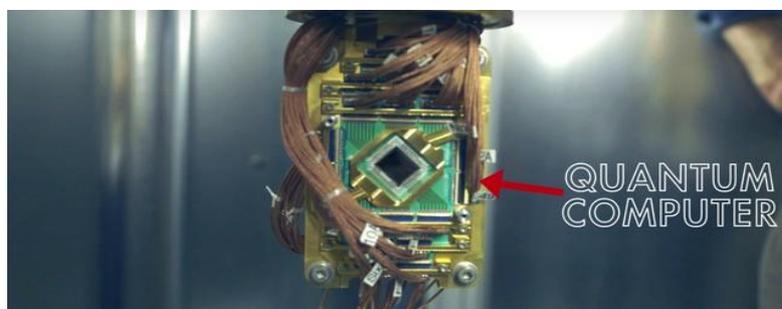
mesmo momento, João também faz o mesmo. Se a propriedade do emaranhamento fosse aplicada a esse caso, e as camisetas dos dois irmãos constituíssem estados emaranhados, quando observássemos a camiseta retirada por Paulo no Brasil, seria possível conhecer a cor da camiseta que João retirou em Portugal. E um detalhe interessante refere-se ao fato de que não houve qualquer comunicação entre os irmãos. O emaranhamento encontra diversas aplicações, dentre as quais se destacam as suas contribuições à computação quântica, informação quântica e tele porte quântico.

COMPUTADOR QUÂNTICO

Neste tópico é disponibilizado ao estudante uma curiosidade acerca da mecânica quântica. Neste capítulo trazemos uma aplicação moderna da teoria quântica.

O computador quântico

Figura 4: Computador Quântico



Fonte⁴: acervo do Google Imagens.

Um computador quântico é um dispositivo que executa cálculos fazendo uso direto de propriedades da mecânica quântica, tais como entrelaçamento quântica, sobreposição e interferência.

⁴ Disponível em:

https://www.google.com.br/search?q=imagem+do+computador+quantico&rlz=1C1SQJL_pt-BRBR776BR776&tbm=isch&source=iu&ictx=1&fir=XyFNk6uKUdTp7M%253A%252CE4glpjRRlg,Acesso em 24 de set.2018.

Vídeos complementares:

1 – Computador quântico mudará o mundo que vivemos! Você está preparado?

<https://www.youtube.com/watch?v=psxriulyit4>

2 – Computador quântico – tudo sobre

<https://www.youtube.com/watch?v=ENL5mpjDmZc>

Após a apresentação do vídeo, peça para os alunos, em grupos, discutirem o conteúdo deste, de acordo com o roteiro sugerido abaixo.

- O que vocês acharam do vídeo? (Vídeo 2)
- Qual a importância da mecânica quântica na descoberta do computador quântico?
- Que princípios da mecânica quântica foram usados para fazer o computador quântico?
- Cite algumas aplicações da Física Quântica além do computador?
- Qual a diferença do computador Quântico e dos outros computadores?
- Fale sobre superposição quântica.
- O que é entrelaçamento quântico.

O professor pode recomendar aos alunos a leitura dos seguintes textos complementares sobre computação quântica:

1 – O que é e como funciona um computador quântico? Disponível em

<https://super.abril.com.br/mundo-estranho/o-que-e-e-como-funciona-um-computador-quantico/>

2 – IBM abre seu computador quântico para o mundo todo

<https://super.abril.com.br/tecnologia/ibm-abre-seu-computador-quantico-para-o-mundo-todo/>

Recomendamos que o professor leia o texto juntamente com os estudantes, utilizando a estratégia que julgar mais eficaz, a qual pode ser a divisão dos estudantes em grupos. Após a leitura e discussão do texto, as seguintes atividades podem ser feitas:

- Curiosidades Quânticas Superposição de estados e o Gato de Schroedinger

<https://www.youtube.com/watch?v=bW1gYq3L9u0>

Após a apresentação do vídeo, peça para os alunos, em grupos, discutirem o conteúdo deste, de acordo com o roteiro sugerido abaixo.

Roteiro de discussão:

- O que vocês acharam do vídeo?
- Qual a importância da superposição de estado quântico?

Mostre, por meio da escrita e de desenhos, o experimento do gato de Schroedinger.