

Partículas e ondas: "Os carregadores da energia do universo".

Quando ministrava aulas de estrutura da matéria aos estudantes do primeiro ano do curso de Física da Universidade Estadual de Londrina costumava iniciar a disciplina propondo a eles que me respondessem questões relacionadas a seguinte situação hipotética: Suponha a existência de dois grupos de seres humanos restritos a viver, cada um, nos espaços à esquerda e à direita de duas portas paralelas de comprimento infinito. No espaço entre as portas existe um lago que não pode ser atravessado. A largura do lago é razoavelmente grande e as regiões próximas a ele, assim como a região do próprio lago, não mantidas as escolas de maneira que a permanência de elementos de um grupo na beira do lago não pode ser percebida por elementos do outro grupo. Cada grupo acredita ser o único representante dos seres humanos no universo. Os elementos dos dois grupos não são considerados ter o conhecimento médio equivalente aos povos do início do século XX (*) e possuem material para a confecção de instrumentos rudimentares.

* No início do século XX as teorias clássicas para descrever grande parte dos fenômenos observados na natureza estavam bem estabelecidas. James Clark Maxwell desenvolveu sua teoria para os fenômenos eletromagnéticos por volta de 1860. As bases para a compreensão da propagação de ondas mecânicas datam de 1680. Newton desenvolveu a Mecânica como estudo da hoje por volta de 1680.

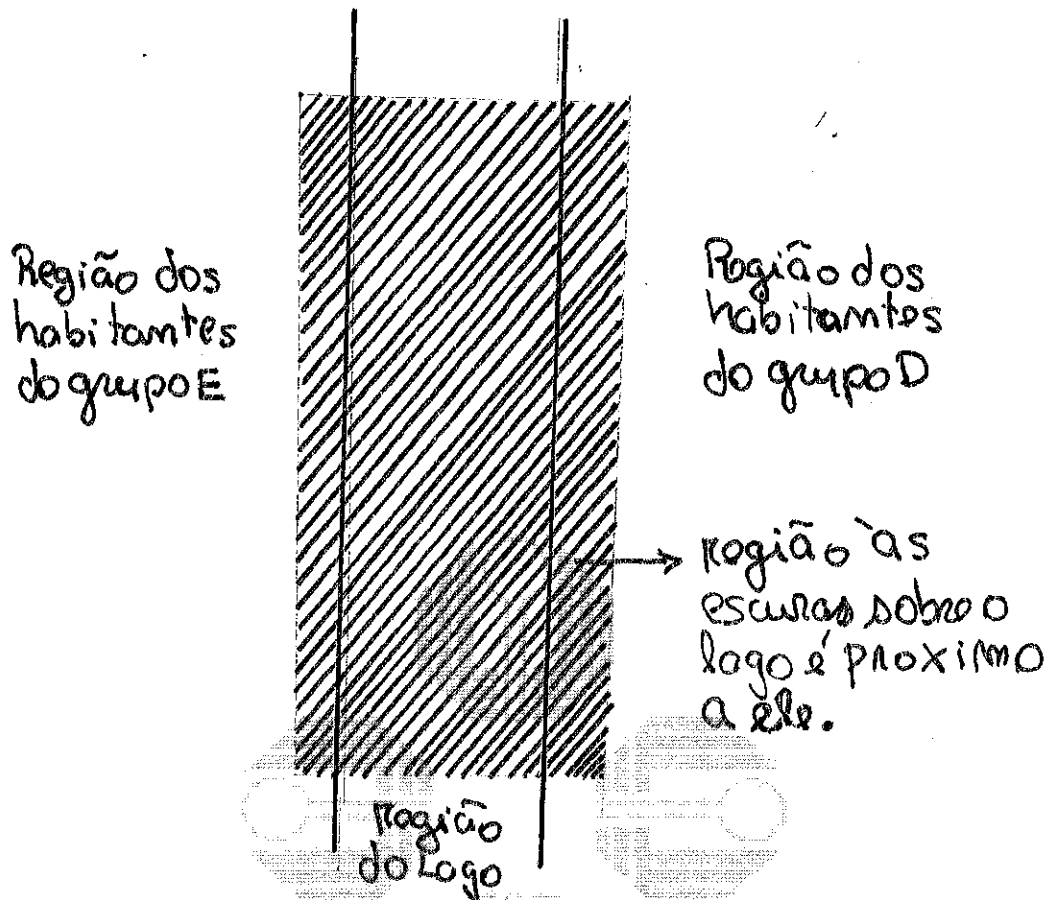
European J of Science and Tech

lentes (obstáculos) adequadas foram construídas, e o caráter ondulatório da luz foi comprovado.

O conceito da luz como "essencialmente uma onda eletromagnética", porém, não durou muito tempo. Novos experimentos introduziram o conhecimento de um novo fenômeno envolvendo a luz, o efeito fotoelétrico. Tal efeito ocorre quando se incide luz ultravioleta (onda eletromagnética de alta frequência) sobre uma placa metálica. No processo elétrons da placa são liberados. A tentativa de explicar os dados experimentais sobre o efeito fotoelétrico utilizando o modelo ondulatório da luz falha totalmente e isto levou Einstein a introduzir o conceito de corpúsculo concebido de fóton. Segundo o modelo de fótons Einstein a luz se comporta de milhões de corpúsculos (pacotes de energia) sendo que segundo tal modelo, no efeito fotoelétrico, cada pequeno pacote de energia (fóton) é responsável por ejetar da superfície um elétron da placa, em suma, um "choque" corpúsculo corpúsculo.

milhões de pacotes de energia (corpúsculos) denominados fótons. Tais corpúsculos, definidos também possuem energia, momento linear e momento angular, não apresentam massa e viajam no vácuo à velocidade c . Na visão de Einstein, no efeito fotoelétrico, cada elétron da placa ao absorver a energia de um único fóton, é arrancado do metal. Em suma, um choque corpúsculo não massivo (fóton) corpúsculo massivo (elétron).

Representação da situação hipotética proposta aos alunos.



Neste contexto dois elementos do grupo da Esquerda (E) a passear na região próxima ao lago combar. Sam sobre porque seu mundo é como é.

Porque, pergunta o primeiro, se estou na região clara e caminho paralelamente à borda do lago, posso andar por anos a fio sem nunca encontrar um fim? Se tomar uma direção perpendicular à borda do lago, me distanciando dele, o mesmo acontece. Só nesta direção a coisa é diferente e existe esta barreira escura e este lago intrinsecamente possível.

O que há de diferente? Diz o segundo. Temos lagos pequenos e espalhados por todo o nosso mundo e os dias e noites nos proporcionam períodos similares de claro e escuro.

Ono, diz o primeiro, temos regiões de terra e água, mas em média o mundo é homogêneo. A própria divisão de intervalos claros e escuros mostra uma simetria, cinquenta por cento do tempo para cada estado. Aqui não, sempre escuro e o mundo parece acabar.

O que você esperaria?

Considerações de simetria me fazem pensar que poderia existir outro espaço equivalente ao nosso do outro lado, com a mesma homogeneidade e quem sabe, com outros habitantes como nós vivendo lá. A ideia de um mundo assim mais simétrico me parece mais interessante.

E porque deveríamos esperar por um mundo simétrico?

Olhe para as árvores, crescidas em um ambiente homogêneo elas aparentemente são quase simétricas, como os peixes e aves se divididos por um plano vertical que os separe em dois da cabeça ao fôdo. Mesmo nós humanos somos, de uma maneira geral, quase simétricos. Pequenos detalhes são aceitáveis, mas na média tudo me parece mais ou menos simétrico.

Nem pensar. Que eu saiba todos temos o coração do lado esquerdo, onde está então sua simetria?

Partículas e ondas: Os propagadores da energia no universo.

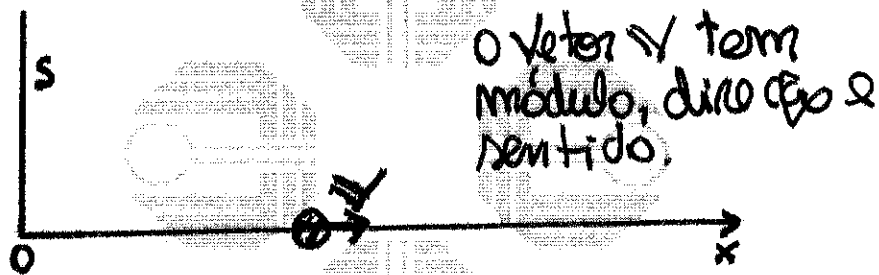
Partículas

Qualquer ser humano comum, com um grau razoável de conhecimento, detém, mesmo que intuitivamente, o conceito do que seja uma partícula. Algo que tenha massa e ocupe uma certa região do espaço. Um bom livro-texto, que procure proporcionar a um estudante o gosto pelos segredos da mecânica clássica de Newton, iniciará, definindo, entre outras coisas, o conceito de partícula. "Algo que tem massa e cujas dimensões são desprezíveis quando comparadas com os objetos do seu entorno". Não a toa, livros mais especializados iniciam seu conteúdo sobre movimento com o tópico, movimento da partícula. Só posteriormente movimento de muitas partículas são abordados. Em física moderna o conceito de partícula elemental como elétrons, prótons e neutrinos, assemelha-se mais ao conceito intuitivo do ser humano comum. Mesmo esta noção intuitiva carece ainda de um pouco mais de aprimoramento. O que é a tal massa que compõe uma partícula?

Tente responder a esta pergunta sem utilizar
conceitos mto antigos bem estabelecidos e ver
que uma resposta plausível carece ainda de
alguma reflexão. Respostas como: É o que
compõe a matéria, ou, tudo que ocupa
lugar no espaço, mto definem de forma
clara o que seja massa. O que é matéria
afinal? É aquilo que é feito de massa?
Mais adiante veremos que outros "entões"
ocupam lugar no espaço e mto não são feitos
de massa. Uma definição razoável, do
ponto de vista da física, é que massa é uma
propriedade da partícula, como uma carga,
a qual determina a intensidade com que
a partícula interage com outros corpos
massivos obedecendo as leis da gravitação.
Como a carga elétrica determina a intensi-
dade das interações eletromagnéticas. Neste
sentido massa funciona como uma "carga
gravitacional". Para os propósitos que
estamos interessados basta-mos, por enquanto,
o conceito intuitivo "algo que tem massa
e ocupa uma certa região do espaço". A isto
chamaremos partícula neste texto. Tais
partículas podem carregar energia. Como
uma bola de gude que, impulsionada pela
força elástica de um estilingue, ganha energia
cinética $\frac{1}{2}mv^2$. Esta energia pode ser
transmitida de um ponto a outro e transmitida,
ao todo ou em parte, a outros objetos também

massivos. Tudo isto se configura como propagação da energia. Além da energia que uma partícula pode transportar, uma quantidade escalar, outras duas, de caráter vetorial, são de suma importância no desenvolvimento da Mecânica. Uma delas é o momento linear da partícula.

O momento linear de uma partícula.
 Seja uma partícula que movimenta-se com velocidade \vec{v} em relação a um referencial S (suposto ser a origem do sistema de coordenadas)



A energia cinética da partícula é dada por $T = \frac{1}{2} m v^2$, uma grandeza escalar. Definiremos o momento linear da partícula (o vetor P), pela expressão.

$$P = m \vec{v} \quad (\text{uma grandeza vetorial})$$

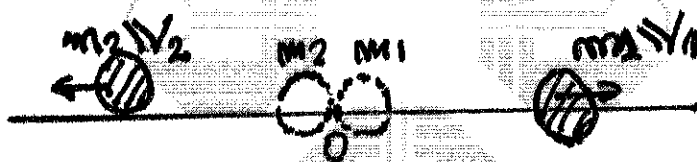
A importância desta grandeza pode ser avaliada no seguinte experimento hipotético. Suponha duas pessoas, consideradas como partículas, imóveis sobre uma base de gelo. O momento linear do sistema em relação ao ponto de origem (referencial) é nulo.

$$P = P_1 + P_2 = m_1 v_1 + m_2 v_2 = 0$$

($v_1 = v_2 = 0$). Suponha agora que uma empurre a outra e que na direção do movimento não atuem forças externas (o ar e o gelo pode ser considerado nulo). Cada corpo adquirirá velocidade, uma em sentido contrário a outra, por influência interna ao sistema de dois corpos, ver figura. Medidas da massa e velocidades dos corpos mostrará que o momento linear total do corpo será ainda nulo

$$P = P_1 + P_2 = 0 \rightarrow P_1 = -P_2$$

(observe que estamos adicionando vetores).



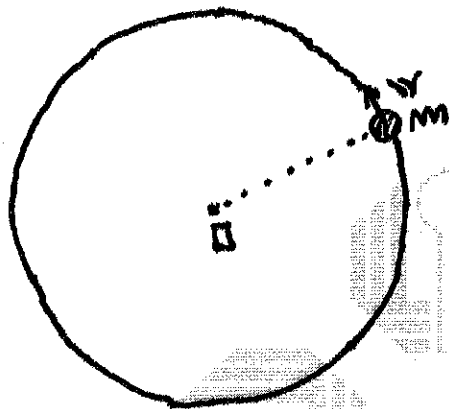
$$P = 0 \text{ antes}$$

$$P = 0 \text{ depois}$$

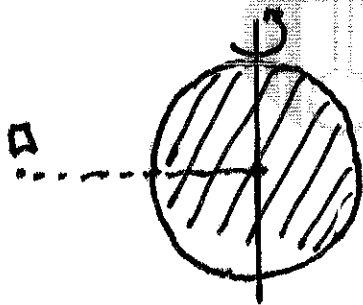
Este experimento hipotético introduz a seguinte regra básica no estudo do movimento dos corpos. "Em um sistema isolado (não há influência de agentes externos) composto de uma ou mais partículas, o momento linear total do sistema se conserva."

o momento angular.

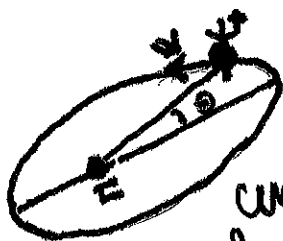
Além do movimento de translação em relação a um referencial, uma partícula pode também efetuar movimentos ditos rotacionais. Alguns exemplos são apresentados a baixo.



Partícula efetuando um movimento circular em torno do centro Π .

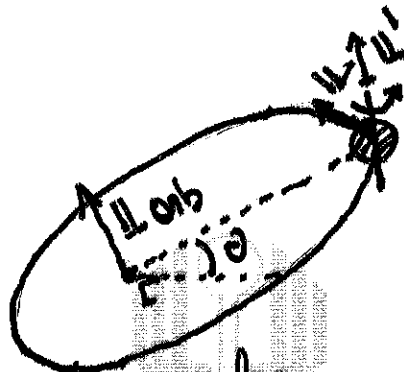


Partícula parada em relação a Π (não existe translação em relação ao referencial) girando em torno de um eixo que passa pelo centro da partícula.



Partícula efetuando um movimento de translação elíptico em torno de E e girando em torno de seu próprio eixo.

A estes movimentos angulares (alguma mudança em um ângulo esta sempre envolvida) associamos um vetor chamado momento angular e representado aqui por \mathbb{L} . O \mathbb{L} a que nos referirmos fica mais claramente especificado pela ilustração a seguir.



\mathbb{L}_{orb} = momento angular devido à órbita em torno de E. \mathbb{L} momento angular devido à rotação em torno de seu próprio eixo.

Partícula descrevendo uma órbita elíptica em um plano que contém E. A partícula gira também em torno de seu próprio eixo.

Em contramão de apenas ao movimento em torno do seu próprio eixo \mathbb{L} será \parallel ao eixo e as partes giram em um plano perpendicular ao eixo.



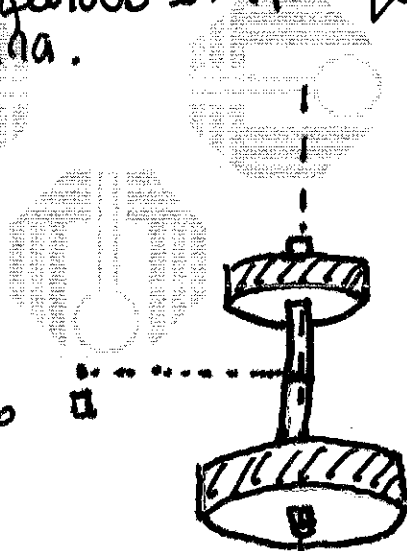
cada pequena parte do sistema gira em um plano \perp ao eixo de rotação

invertendo-se o sentido da rotação o vetor \mathbb{L} inverte seu sentido.

Independente de como a forma como expressarmos o momento angular L de uma partícula em termos de sua massa, sua posição e sua velocidade, o experimento hipotético descrito a seguir permite compreender a importância do momento angular na descrição do movimento dos sistemas mecânicos. Seja um sistema composto por duas rodas maciças e ligado por um eixo. Existe um sistema interno, na região central do eixo, o qual permite a rotação em relação a outra. O sistema, inicialmente está parado em relação ao referencial O , e não gira.

Sistema parado em relação a O (não existe translação do todo em relação ao referencial).

O momento angular do sistema é $L=0$ (nulo).



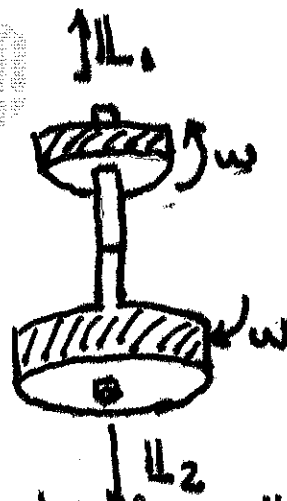
Sistema não gira! Não existe rotação em relação ao eixo pontilhado.

Suponha agora que, por algum motivo interno, uma moeda que se solte por exemplo, a parte superior do dispositivo seja forçada a girar em relação à parte inferior. Suponha ainda que após isto nada há que impeça o movimento de rotação (ausência total de atrito). A parte superior adquirirá uma velocidade angular ω_1 e a parte inferior uma velocidade angular ω_2 . Independentemente de quais sejam as massas m_1 e m_2 de cada parte, e de como estas massas estejam distribuídas nos dois subsistemas, as velocidades angulares ω_1 e ω_2 serão tais que os momentos angulares L_1 e L_2 se anulam. $L_T = L_1 + L_2 = 0$

Em outras palavras, o momento angular do sistema, que era nulo, como não há qualquer influência externa, permanece nulo.

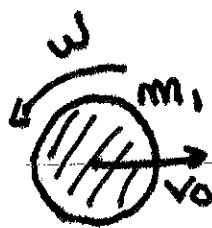
$$L_{\text{antes}} = L_{\text{depois}} = 0.$$

Uma segunda regra se estabelece. "Na ausência de influência externa, o momento angular de um sistema se conserva."

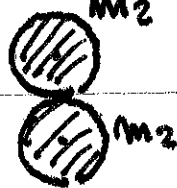


Com esta parte inicial introduzimos três grandezas físicas que podem ser associadas a uma partícula de massa m que se move com velocidade v . Sua energia cinética $T = \frac{1}{2} m |v|^2$, seu momento linear $P = mv$ e seu momento angular L . Tais quantidades são de extrema importância no estudo do movimento dos corpos, por estarem ligadas a três grandes pilares da física. A conservação da energia, do momento linear e do momento angular. Neste contexto, a situação representada a seguir, pode ser estudada e resultados podem ser preditos, baseados em leis de conservação.

Choque de partículas sobre um plano sem atrito



Partícula de massa m_2 e velocidade v_0 chocar-se com duas partículas de massa m_1 e m_2 em repouso. A partícula 1 tem momento angular L_0 .



$$P_{\text{total antes}} = P_1 + P_2 + P_3$$

$$P_{\text{total antes}} = m_1 v_0 \quad (v_1 = v_2 = 0)$$

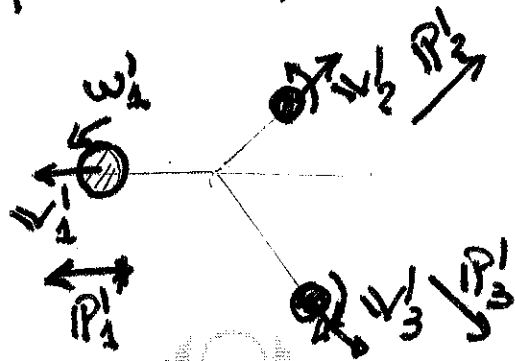
$$L_{\text{total antes}} = L_0 \quad (\text{as partículas } \textcircled{1} \text{ e } \textcircled{2})$$

$$P_0 = m v_0$$

$$L_0 = \uparrow \text{aponta p/ fora da página.}$$

m_1 tem momento angular antes do choque.

Suponha agora que m_1, m_2 e m_3 , e v_0 , sejam tais que após o choque a partícula ① tenha o sentido de seu movimento. A situação após o choque será representada pela figura.



Os momentos lineares P'_1, P'_2 e P'_3 serão tais que

$$P'_1 + P'_2 + P'_3 = P_0$$

As partículas ② e ③ adquirirão momento angular (transferido da partícula ①) de maneira que

$$L'_1 + L'_2 + L'_3 = L_0$$

A energia total do sistema também se conserva.

$$\frac{1}{2} m_1 v_0^2 = \frac{1}{2} m_1 v'_1{}^2 + \frac{1}{2} m_2 v'_2{}^2 + \frac{1}{2} m_3 v'_3{}^2$$

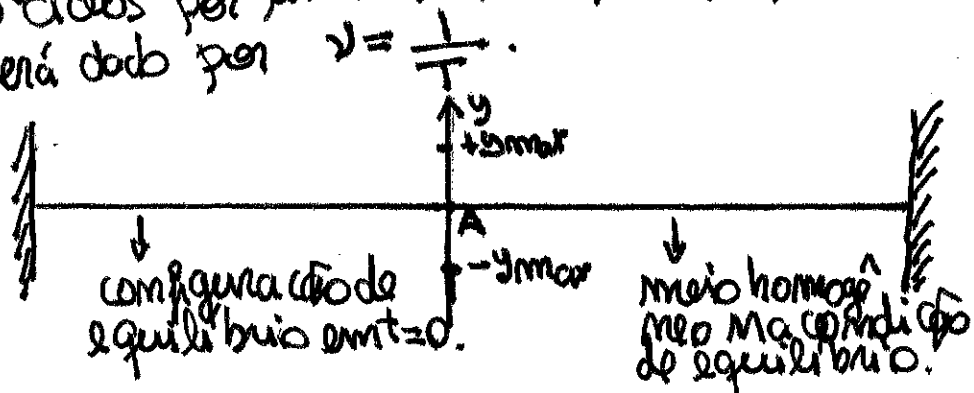
Em suma, uma partícula, objeto que tem massa e ocupa um certo volume definido no espaço, pode carregar (transportar)

energia, momento linear e momento angular. Existem ainda outras formas de energia, como a potencial elástica e potencial gravitacional, entre outras, as quais não foram levadas em conta nos estudos mas que devem ser computadas quando impormos a conservação da energia. Nos reportaremos a elas quando necessário.

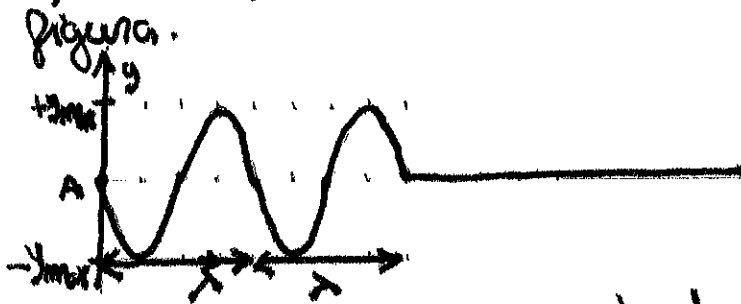
Ondas, os outros transportadores de energia no universo.

Ondas mecânicas.

Seja uma corda muito longa, tensionada, e presa em seus extremos os quais não podem se movimentar. A corda está totalmente em repouso em $t=0$. A partir de $t=0$ o ponto A, na região central da corda, passa a ser perturbado por um agente externo que o faz oscilar entre $+y_{max}$ e $-y_{max}$, de uma forma ritmada com período T . (O período é o tempo necessário para que um ciclo do movimento seja completado). Se um ciclo completa-se em T quantos ciclos ocorrem em uma unidade de tempo? Uma regra de três simples mostrará que o número de ciclos por unidade de tempo (frequência) será dado por $\nu = \frac{1}{T}$.



Se o ponto A oscilar em torno da posição $y=0$ segundo a função harmônica $y(t) = y_{\max} \sin 2\pi vt$ a configuração do sistema, a direita do ponto A, após dois períodos T , será a apresentada na



O estudante com conhecimento da função $\sin x$ verificará facilmente que em $t=2T$ o ponto A estará na posição $y=0$ e iniciando um novo movimento de subida. Observe que a perturbação terá se propagado na corda de uma distância 2λ . Os pontos mais distantes não foram ainda perturbados (velocidade de propagação da perturbação é constante para um meio homogêneo). Pode-se dizer que dois ciclos de perturbação se propagaram e caminharam a distância $d = v \cdot 2T$

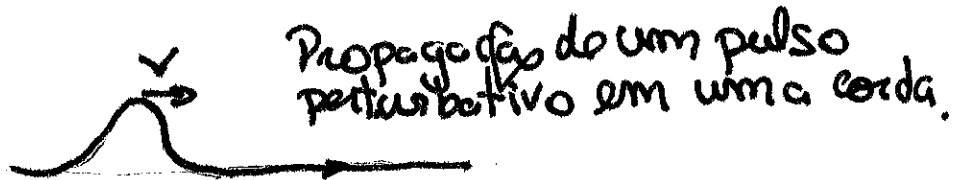
mas $T = \frac{1}{v}$, logo $\boxed{v = \lambda v}$ Equação básica para a propagação de ondas mecânicas.

Observa ainda que, em nosso modelo idealizado, os elementos Δm de corda, em suas posições x , não se movem nesta direção, efetuando apenas oscilações no eixo y em torno de $y=0$. É assim o processo de propagação de uma perturbação mecânica, ou, propagação de uma onda mecânica.

Consideremos agora massa a tensão em um pequeno elemento de massa da corda Δm localizado em um ponto B distante de A. Após um certo tempo $t = \frac{BA}{v}$ o elemento começará a efetuar o mesmo movimento que o ponto A. Aprendendo um pouco mais sobre este movimento, denominado movimento harmônico simples, veremos que a energia mecânica associada ao elemento será dada por

$$E = \underbrace{\frac{1}{2} \Delta m v^2}_{\text{Energia cinética}} + \underbrace{\frac{k y^2}{2}}_{\text{Energia potencial elástica}} = \text{Constante.}$$

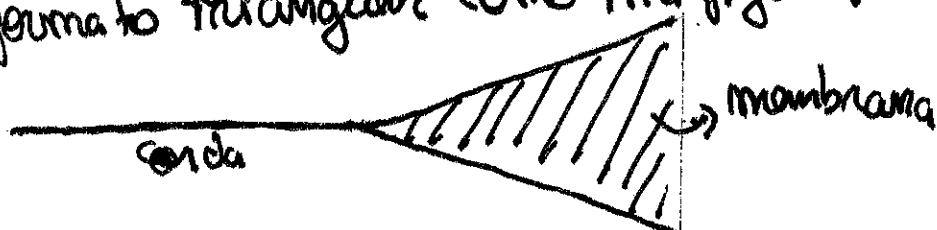
Onde aqui k é a constante elástica da corda. Independentemente de entendermos todas estas equações o importante é compreender que: Um elemento Δm em B, inicialmente em repouso, $\vec{v} = 0$, adquire, após um certo tempo t , a energia E , que passa a ser constante. Ora, de todos os elementos anteriores (a esquerda de B), tem pelas energias constantes, onde estará a energia que está sendo bombeada continuamente pelo agente externo? A resposta é, propagando-se no meio corda. Em suma, sem haver transporte de matéria (mas há movimento das partes do meio no eixo x), energia, e momento linear, propagam-se em um meio, vindo de um ponto A a um ponto B. Embora não expliquemos detalhadamente como o momento, um único pulso pertubativo propagar-se na corda com a mesma velocidade e obedecer às mesmas leis físicas.



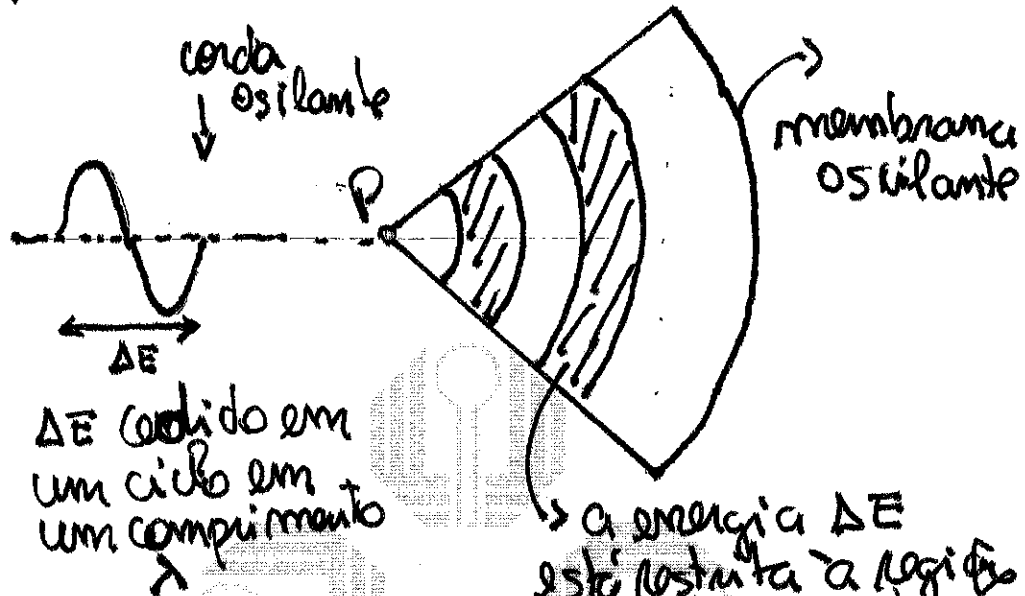
Resumindo, onda mecânica é a propagação de uma perturbação em um meio sem que haja transporte de matéria. Se a perturbação for harmônica a frequência ν da perturbação é determinada pela fonte (agente perturbador). A velocidade de propagação da perturbação, v , é determinada pelo meio. Para perturbações harmônicas (ou periódicas) o comprimento de onda da perturbação relaciona-se a v e ν pela equação

$$v = \lambda \nu$$

Qual o tamanho de uma onda? Com os argumentos que apresentaremos agora mostraremos que, diferentemente de partículas que apresentam um volume definido (ocupam uma região bem definida no espaço), não podemos associar a uma onda tal propriedade. Para a propagação unidimensional discutida anteriormente poderemos associar a um ciclo perturbativo o comprimento de onda λ , dentro de um λ alguma energia ΔE pode ser associada (ΔE é a energia fornecida em um ciclo pelo agente perturbador). Considere agora um sistema em que a corda, torna-se a partir de algum ponto, uma membrana em forma triangular como na figura



Supondo a extremidade externa da membrana como parte de uma semi circunferência e fixa, a propagação da energia (perturbação) ocorrerá mais ou menos como na ilustração.



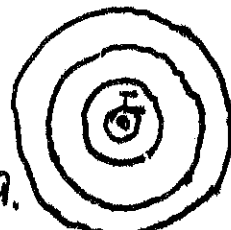
ΔE contido em um ciclo em um comprimento λ

a energia ΔE está restrita a região entre duas frentes de onda (que caracterizam um ciclo). A amplitude aqui é menor que na corda e vai diminuindo continuamente.

Observe que a quantidade ΔE espalha-se mais e mais na membrana, diminuindo a amplitude de oscilação ~~propor~~ medida que distancia-se do ponto P.

Em resumo, a massa onda mecânica que se espalha continuamente, não podemos associar qualquer região do espaço muito bem definida. Como uma onda na água cuja frente de onda adquire raios cada vez maiores com o tempo.

frentes de ondas concêntricas na água.



Superposição de ondas e o fenômeno de interferência.

Suponha que uma corda seja perturbada por uma fonte de frequência ν_1 de maneira que um ponto, na posição x , oscile segundo a função $y_1(x, \nu_1, t)$. Observe que pontos em posições diferentes oscilam segundo funções diferentes, enquanto um está em y_{max} , por exemplo, outros estarão em qualquer valor entre $\pm y_{max}$. Suponha agora que o meio fosse perturbado por outra fonte independente de frequência ν_2 a previsão para $y(x, t)$ fosse $y_2(x, \nu_2, t)$. Perturbações simultâneas dos dois agentes externos produzindo ao ponto a oscilação segundo a expressão $y(x, t) = y_1(x, \nu_1, t) + y_2(x, \nu_2, t)$.

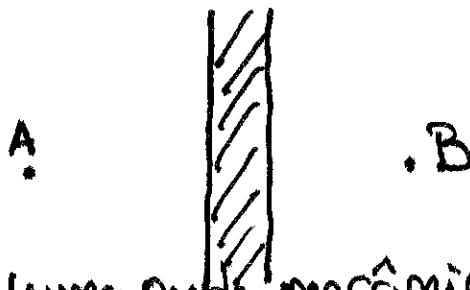
Tal disposição gera um fenômeno típico de ondas, chamado interferência. Para compreendermos como isto se dá vamos supor que em dado instante a previsão devida à fonte 1 seja $y_1(x, \nu_1, t) \neq 0$ e que $y_2(x, \nu_2, t) = -y_1(x, \nu_1, t)$, então:

$$y(x, t) = 0 \text{ (neste instante.)}$$

Diz-se que, neste instante, as ondas estão interferindo destrutivamente. É claro que, dependendo das amplitudes das perturbações, das frequências, e da diferença de fase entre elas, tal interferência possa nunca cancelar todo o movimento, ou as vezes, cancelá-los. A interferência podendo ser destrutiva, parcialmente

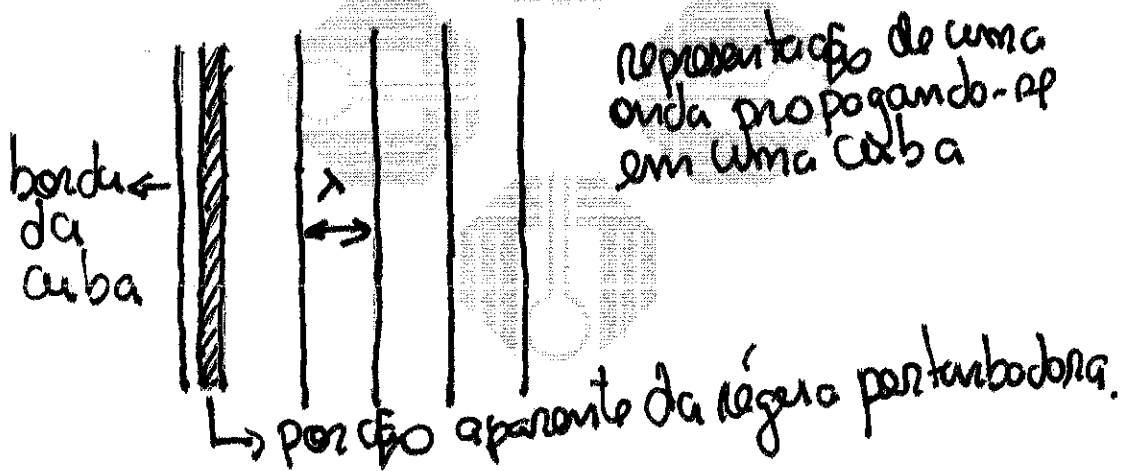
destrutiva, parcialmente construtiva ou construtiva. Se $y_1(x, v_1, t)$ e $y_2(x, v_2, t)$ for tais que $y_1(x, v_1, t) = -y_2(x, v_2, t) = 0$ para todo $o t$, o ponto nunca oscilará. Um detector de energia incidente (sua testa por exemplo) colocado neste ponto, constatará que ali nunca chega energia. Tal não acontece com o detector de duas pedras (partículas) chegam simultaneamente ao detector (testa). Uma pedra jamais dá no efeito da outra, duas pedras na testa são duas pedras na testa. Ondas, portanto, ao se superpor propagam-se como se as outras não existissem e o meio responde segundo a superposição dos efeitos de cada onda, interagindo, ora construtivamente, ora destrutivamente.

Difração: As ondas percorrem caminhos curvos. Seja um ponto A separado de B por uma parede alta conforme a figura abaixo. Alguém de A, atirando uma pedra, a mão ser que por um caminho partícula que usa o campo gravitacional, não pode atingir B.

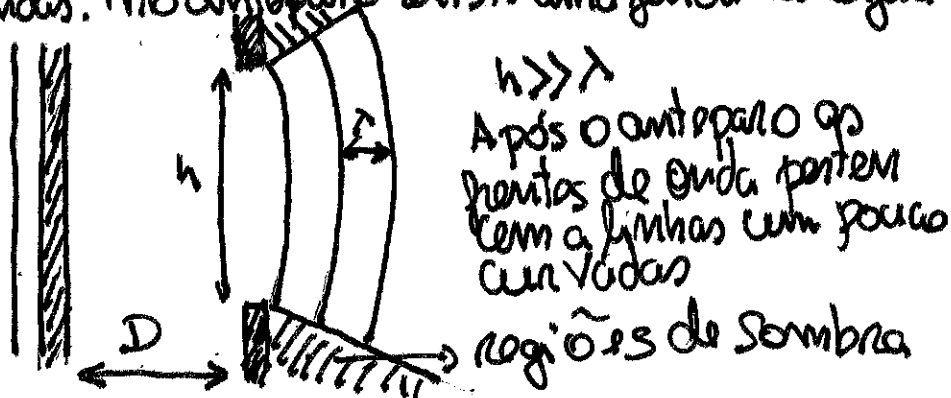


O som (uma onda mecânica que se propaga no meio ar), no entanto, pode ser ouvido em B. Diz-se que ondas podem percorrer outros caminhos tortuosos.

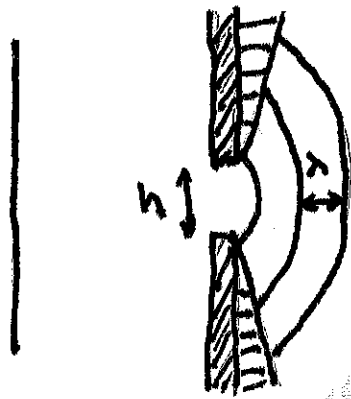
O fenômeno de difração é uma característica muito importante do mesmo pode ser compreendida a partir do seguinte experimento hipotético (que pode ser repetido por qualquer observador que assim o deseje). Tome uma cuba retangular muito longa e muito comprida (para que efeitos devido a reflexões nos bordos possam ser desprezados, perturbada em uma de suas bordas por um ruído a qual oscila com frequência ν . Na figura abaixo uma representação de parte do sistema é dada. As linhas verticais representam frentes de onda.



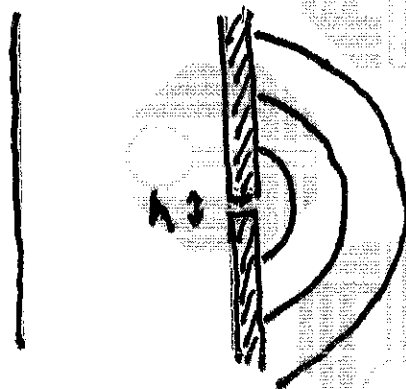
Nas figuras a seguir introduzimos a uma distância D da borda, anteparos bloqueadores das ondas. No anteparo existe uma fenda de largura h .



Mas regiões do "Sombra" o meio praticamente não oscila.



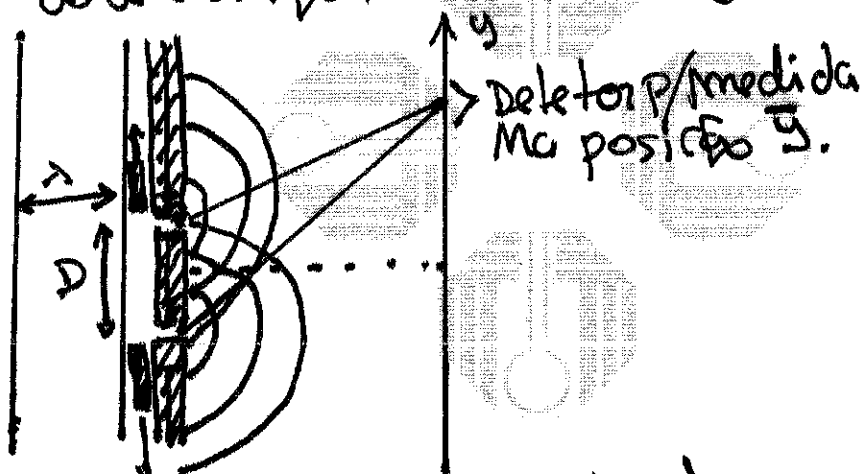
$h \approx \lambda$
 as regiões de sombras são mais restritas as curvas que contém as frentes de onda são mais pronunciadas.



$h \ll \lambda$. As curvas que contém as frentes de onda propagada p/ a direita, no limite em que $h \rightarrow 0$, tendem para semi. circunferências perfeitas. Não existia mais regiões de sombra e todo o meio à direita oscila.

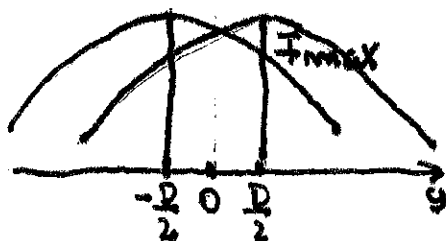
O experimento que descobriremos determinará o fenômeno (típico de ondas) chamado de difração. Capacidade de mudar a configuração (forma) das frentes de onda que se propagam, tornando-as curvas, quando um obstáculo, ou fenda, é colocado em seu caminho. A difração das ondas torna-se mais acentuada (mais aparente) quando as dimensões da fenda (ou obstáculo) toma alguns valores da ordem ou menores que λ .

Os fenômenos de difração e interferência, típicos de ondas (mas o modelo de partícula aparenta não apresentar estas propriedades), pode ser resumido na seguinte situação. Seja um par de fendas dispostos como na figura ($\lambda \ll D$). Sobre as fendas incidem ondas com comprimento de onda λ . No anteparo E (ao longo de todo ele) detectores podem medir a intensidade de de energia incidente por ponto. Existem dispositivos que permitem que uma, ou outra, ou nenhuma fenda seja fechada. Os resultados para a intensidade I em função de y (posição do detector) são mostrados a seguir.

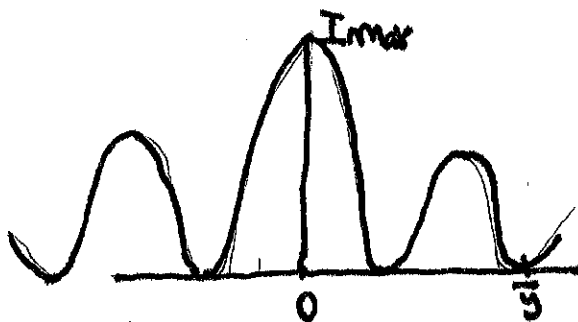


dispositivos bloqueadores das fendas

Padrões observados de Intensidade no experimento

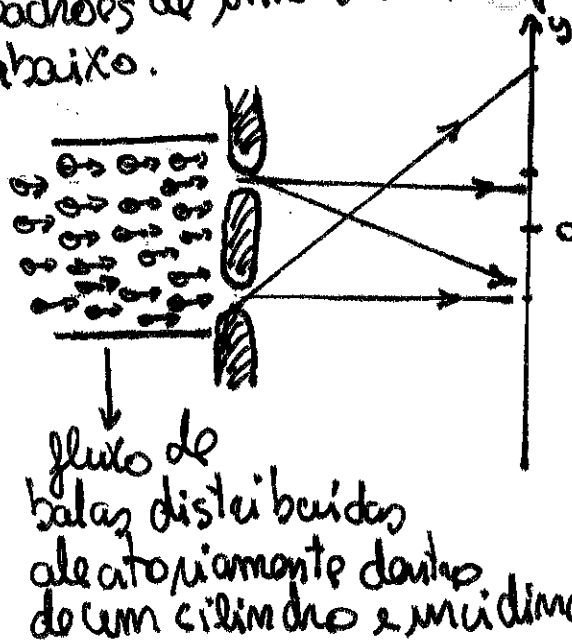


Experimentos com uma, ou outra, fenda fechada. O máximo de intensidade corresponde ao ponto mais frontal a fenda. Os outros pontos também são atingidos pela onda devido à difração.



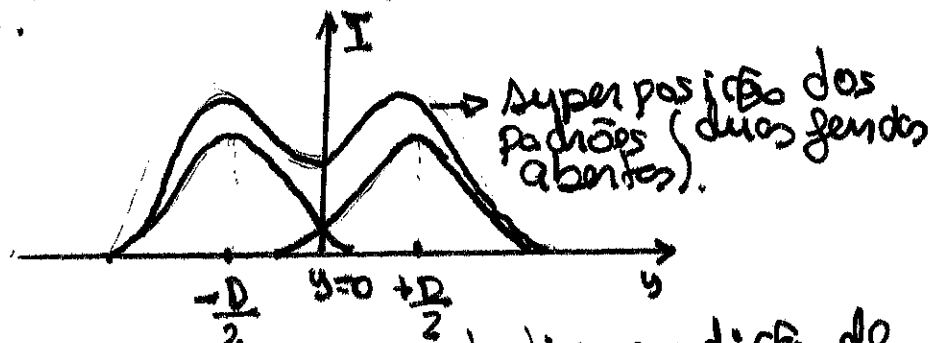
Padrão observado no experimento com duas fendas abertas. I_{max} em $y=0$ é maior que os máximos individuais.

Existem pontos como y onde I é nula. A figura é simétrica em relação ao ponto 0. Em y , a onda incidente no anteparo proveniente da fenda superior percorre o caminho L_1 , a outra L_2 , ambas interferem em y cancelando-se completamente (interferência destrutiva). Em outros pontos a interferência passa a ser construtiva mas a intensidade cai devido ao "espalhamento" da energia proveniente das duas fontes (fendas), existem então, os máximos secundários. Vejamos agora o que esperaríamos se nossas ondas incidentes fossem trocadas por bolas de uma metralhadora (partículas) as quais passaremos a denominar por corpúsculos (algo com volume definido e massa). Nossa nova situação e os padrões de intensidade esperados são apresentados abaixo.



Mássas bolas tem dimensões menores que λ mas são objetos macroscópicos. Algumas bolas ricochetam nas bordas das fendas e seguem desviadas. Muitas passam direto sem desvios.

Padrões oscilatórios para a intensidade de corpusculos no anteparo com, uma fenda aberta, e duas fendas abertas.



Observe que em massa expectativa a adição de padrões não mostra algum ponto de máximo individual (não há interferência construtiva), nem pontos com $I=0$ onde I_1 ou I_2 eram diferentes de zero (interferência destrutiva). Partículas (corpusculos clássicos), não experimentam o fenômeno da interferência (típicos de ondas). Como dissemos anteriormente, duas pedradas são sempre duas pedradas.

O experimento hipotético que acabamos de descrever, se realizado por qualquer observador, se refere aos resultados anteriormente descritos. Quando trabalhamos com ondas, propagação de energia, momento linear e momento angular, os fenômenos de interferência e difração se apresentam. Trabalhando com corpusculos macroscópicos, partículas com massa, volume definido, e que transportam energia, momento linear e momento angular, os fenômenos de difração e interferência não se apresentam. Temos portanto dois tipos de entes transportadores de energia no universo, corpusculos e ondas. Mas este não é ainda o fim da história.

Paralelamente ao estudo do efeito fotoelétrico estava sendo desenvolvido as bases da chamada mecânica quântica (teoria para descrição de fenômenos associados a sistemas muito pequenos como átomos e elétrons). Neste contexto, Louis De Broglie, utilizando argumentos da Mecânica de De Broglie que elétrons devem apresentar também comportamento ondulatório, "se a luz (que apresenta comportamento ondulatório) também apresenta comportamento corpuscular, então, elétrons, que são partículas (corpúsculos) devem também apresentar características ondulatórias. Movimentos experimentos foram imaginados e realizados e o caráter dual das partículas foram comprovados. Em primeiro a natureza se apresenta a nós com dois tipos de pontos, ambos duais. Corpúsculos de massa m que viajam com velocidade v no vácuo e propagam-se apresentando características ondulatórias (~~de~~ experimentam os fenômenos de interferência e difração). Elétrons corpúsculos com massa m e volume definidos que também propagam-se como ondas. **

de duas fontes
** Um experimento com corpúsculos (utilizando elétrons ou outras partículas fundamentais) também apresentará o padrão de interferência típico de ondas no campo E de as fontes foram da ordem do comprimento de onda associado à partícula.

fendas (obstáculos) e degrados foram construídas e o caráter ondulatório da luz foi comprovado. O conceito de luz como "essencialmente uma onda eletromagnética", porém, não durou muito tempo. Muitos experimentos mostraram um novo fenômeno envolvendo a luz, o efeito fotoelétrico. Tal fenômeno ocorre quando luz ultravioleta (onda eletromagnética de alta frequência) incide sobre uma placa metálica arrancando elétrons da mesma. Tentativas de explicar os dados experimentais sobre o efeito fotoelétrico utilizando o modelo ondulatório da luz falham totalmente e isto levou Einstein a propor um modelo corpuscular da luz. Tratando a luz como minúsculas de pacotes de energia (corpúsculos), os quais carregavam energia, momento linear e momento angular, mas apresentavam massa zero e viajavam no vácuo à velocidade c , Einstein descobriu que o efeito fotoelétrico era o resultado de um choque corpúsculo corpúsculo (fóton de luz e elétron). Com este novo tratamento os dados experimentais puderam ser ~~explicados~~ explicados e o conceito de luz como um conjunto de corpúsculos chamados fótons passou, também, a ser considerado. Este novo modelo foi também utilizado para explicar um novo efeito chamado Compton (espalhamento de raios X por elétrons) e a hipótese de Einstein justificou-se para a luz como um novo paradigma. Estabeleceram um novo paradigma na física. "A luz ~~tem~~ possui características ondulatórias (propagar como uma onda) mas também características de corpúsculo (partícula) e observada como uma partícula". Em língua germânica diz-se que a luz é um ente dual.

Ondas eletromagnéticas e as leis da física.
A resposta para a pergunta; Onde estará
uma dada porção da corda localizada na posi-
ção x , no instante t , a partir de uma
perturbação harmônica que se inicia em
no ponto A? é dada pela função $y(x,t)$.
Valores numéricos de grandezas físicas,
como a posição do elemento da corda em t , só
podem ser obtidos de duas maneiras. Pela
observação (medida), ou pela previsão
(encontrar $y(x,t)$, uma função para t qualquer).
Medidas estabelecem um fato, mas, sem
considerações adicionais não permitem
previsões. Uma função $y(x,t)$, construída
sobre bases adequadas, permite as tais pre-
visões, um avanço no conhecimento do sistema
em estudo. Mas de onde vem $y(x,t)$? Tal
função é solução da equação fundamental
para a descrição de fenômenos ondulatórios,
a equação de onda. As leis físicas, antes
que com palavras, necessitam ser expressas
em termos de equações matemáticas. Somente
com estas equações, soluções para elas podem
ser obtidas e previsões numéricas podem
ser efetuadas. $y(x,t)$ é portanto solução
da equação de onda mecânica e um exemplo
do que acabamos de afirmar. James C. Maxwell,
a partir do todo conhecimento adquirido por
outros grandes físicos sobre fenômenos eletri-
cos e magnéticos, sintetizou todo este

conhecimento em quatro equações básicas, as equações de Maxwell. Tais equações constituem a base do eletromagnetismo e todos os fenômenos até então conhecidos podem ser descritos por soluções destas equações. O sucesso de uma teoria não se mede apenas por sua capacidade de descrever fenômenos conhecidos. Se, adicionalmente, novos fenômenos foram previstos, corroborados, tal sucesso está garantido. Manipulando as quatro equações de Maxwell, na ausência de correntes e distribuições de carga (vácuo), ~~isso~~ obteve duas equações de onda para os campos magnético e elétrico. Estava prevista a existência de ondas eletromagnéticas que podiam propagar-se sem a necessidade de um meio. Tais ondas foram produzidas e a teoria do eletromagnetismo de Maxwell galgou o posto de um dos pilares da física clássica. Nesse novo contexto a luz, para a qual ainda não existia um modelo convincente, ganha o status de "uma onda eletromagnética, com uma velocidade já definida, no vácuo, $c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$, valor este fruto da teoria eletromagnética e de medidas precisas das constantes do eletromagnetismo ϵ_0 e μ_0 . Neste ponto chamamos a atenção para um aspecto muito importante de fenômenos ondulatórios. Embos que apresentam aspectos ondulatórios tem as propriedades típicas de ondas, interferência e difração, manifestadas quando obstáculos (fendas), da ordem de seu comprimento de onda, estão em jogo. A luz do modelo de onda eletromagnética os comprimentos de onda do que chamamos luz foram calculados, as