

ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS. A LUZ

1. SINTESE ELECTROMAGNÉTICA

1.1. Ecuacións de Maxwell

2. A LUZ

2.1. Natureza da luz

- a) Teoría corpuscular de Newton
- b) Teoría ondulatoria de Huygens
- c) Teoría ondulatoria de Fresnel
- d) Teoría electromagnética de Maxwell
- e) Natureza corpuscular da luz segundo Einstein
- f) Natureza dual da luz

2.2. Velocidade de propagación da luz

- a) Método de Römer
- b) Método de Fizeau
- c) Valor actual da velocidade da luz

2.3. Ondas electromagnéticas

- a) Características das ondas electromagnéticas
- b) Espectro electromagnético
- c) Producción de ondas electromagnéticas

2.4. Fenómenos ondulatorios da luz

- a) Reflexión da luz
- b) Refracción da luz

2.5. Aspectos relativos á interacción luz-materia

- a) Dispersión da luz. Prismas
- b) Absorción selectiva. A cor

2.6. Outros fenómenos

- c) a) Interferencias
- d) b) Polarización

1. SINTESE ELECTROMAGNÉTICA

As investigacións de Oersted, Ampère e Faraday puxeron de manifesto a estreita relación existente entre campos eléctricos e magnéticos. Oersted e Ampère demostraron que unha corrente eléctrica crea un campo magnético, e Faraday demostrou que un campo magnético variable induce unha corrente eléctrica nun circuíto.

Cara a 1860, o desenvolvemento matemático destas ideas conduciu ao físico escocés J. C. Maxwell a unha descrición unificada dos fenómenos eléctricos, magnéticos xunto cos ópticos ao predicir a existencia das ondas electromagnéticas e considerar que a luz é unha onda deste tipo: a teoría electromagnética.

O traballo de Maxwell supuxo un paso moi importante na comprensión dos fenómenos electromagnéticos. Maxwell predixo que un campo eléctrico variable xera un campo magnético e, á súa vez, un campo magnético variable xera un campo eléctrico. Postulou que as variacións dos campos eléctricos e magnéticos propáganse polo espazo en forma de radiacións electromagnéticas, a unha velocidade dada por:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$$

Esta velocidade é xustamente a velocidade da luz. Maxwell non creu que isto fose unha coincidencia e, en 1865, suxeriu que a luz é unha onda electromagnética. Ademais, afirmou que a luz visible era só unha pequena parte de todo un espectro de radiacións electromagnéticas.

As predicións teóricas de Maxwell foron confirmadas en 1887 polo físico alemán H. Hertz, quen demostrou experimentalmente que circuítos oscilantes emiten ondas electromagnéticas.

1.1. Ecuacións de Maxwell

No seu artigo de 1864 titulado "*Teoría dinámica do campo electromagnético*", Maxwell presentou as soadas ecuacións, que hoxe denominamos ecuacións de Maxwell, que unificaban os campos eléctricos e magnéticos. Estas ecuacións constitúen a base teórica do electromagnetismo clásico e relacionan os campos eléctricos e magnéticos coas súas fontes: as cargas eléctricas, as correntes e os campos variables. Pero a importancia destas ecuacións non está soamente no feito de que sexan a síntese do electromagnetismo, senón tamén nun aspecto de crucial importancia: as ecuacións de Maxwell predín a existencia de ondas electromagnéticas.

A forma matemática das ecuacións de Maxwell é complexa e a súa dedución non forma parte dos obxectivos deste curso. Por iso só as reproducimos dun modo ilustrativo.

A **primeira ecuación de Maxwell** vén ser o teorema de Gauss para o campo eléctrico:

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q_{\text{int}}}{\epsilon}$$

sendo \vec{E} a intensidade de campo eléctrico, Q_{int} a carga encerrada dentro da superficie pechada S e ϵ é a permitividade do medio. Esta lei indícanos que as liñas de forza do campo eléctrico son abertas.

A **segunda ecuación de Maxwell** coincide co teorema de Gauss para o magnetismo:

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

sendo \vec{B} o vector intensidade de campo magnético e S a superficie pechada considerada. Como o fluxo magnético a través dunha superficie pechada é nulo, as liñas de indución do campo magnético son pechadas, non existindo polos magnéticos illados.

A **terceira ecuación de Maxwell** equivale á lei de Faraday referente aos fenómenos de indución electromagnética: Un campo magnético variable produce un campo eléctrico.

As experiencias de Faraday dinnos que a variación de fluxo magnético que atravesa unha espira produce nela unha corrente eléctrica inducida. Así, se colocamos unha espira metálica perpendicularmente ao campo magnético creado, por exemplo, por un electroimán polo que circula unha corrente variable; na espira aparece unha corrente inducida. Como a espira está en repouso, sobre os electróns non actúa ningunha forza magnética, polo que para poñelos en movemento tívose que inducir un campo eléctrico que proporcione a forza electromotriz e que fai mover os electróns. Polo tanto:

$$\varepsilon = \frac{W}{Q} = \oint_C \frac{\vec{F} \cdot d\vec{l}}{Q} = \oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

Igualando as dúas expresións anteriores:

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

Dinos que as variacións de fluxo magnético no tempo a través dunha superficie non pechada inducen un campo eléctrico (*que non é conservativo*).

A **cuarta ecuación de Maxwell** vén ser a lei de Ampère xeneralizada: un campo magnético pode ser producido por unha corrente eléctrica (lei de Ampère) e por un campo eléctrico variable no tempo:

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{d}{dt} \int_S \vec{E} \cdot d\vec{S}$$

Esta lei foi enunciada por Maxwell sen ningunha comprobación experimental. Supón que, por razóns de simetría na natureza, se un campo magnético variable produce un campo eléctrico, tamén debe cumprirse o proceso inverso: un campo eléctrico variable debe producir un campo magnético.

A esta asociación de campos eléctricos e magnéticos, Maxwell denominouna *campo electromagnético*.

2. A luz

2.1. Natureza da luz

A determinación da natureza da luz deu lugar a unha das controversias máis apaixonantes da historia da ciencia. As diversas hipóteses, formuladas en distintos momentos históricos para xustificar os fenómenos coñecidos entón, íanse refugando ou modificando a medida que se alcanzaban novos coñecementos.

As primeiras hipóteses científicas merecedoras de atención xurdiron case simultaneamente durante o século XVII e foron propostas por dous grandes científicos: o inglés I. Newton (1642-1727) e o holandés C. Huygens (1629-1695). As dúas hipóteses, aparentemente contraditorias entre si, denomináronse, respectivamente, a teoría corpuscular de Newton e a teoría ondulatoria de Huygens, e serviron de base a todas as opinións posteriores.

a) *Teoría corpuscular de Newton*

Na súa obra *Óptica*, publicada en 1704, Newton describiu que a luz ten natureza corpuscular: os focos luminosos emiten minúsculas partículas que se propagan en liña recta en todas as direccións e, ao chocar cos nosos ollos, producen a sensación luminosa.

Os corpúsculos, distintos para cada cor, son capaces de atravesar os medios transparentes e son reflectidos polos corpos opacos.

Esta hipótese xustificaba fenómenos como a propagación rectilínea da luz e a reflexión, pero non aclaraba outros como a refracción: por que uns corpúsculos luminosos son reflectidos pola superficie dun corpo ao mesmo tempo que outros penetran nela refractándose?

Para poder xustificalo, houbo de supor que a luz viaxa a maior velocidade nos líquidos e nos vidros que no aire o que posteriormente se comprobou que era falso.

b) *Teoría ondulatoria de Huygens*

Con anterioridade a Newton, Huygens na súa obra *Tratado da luz*, publicada en 1690, propuxo que: a luz consiste na propagación dunha perturbación ondulatoria do medio. Huygens cría que se trataba de ondas lonxitudinais similares ás ondas sonoras.

Esta hipótese explicaba facilmente certos fenómenos ondulatorios como a reflexión, a refracción da luz e a dobre refracción, descuberta por entón.

A pesar diso, non foi comunmente aceptada. A maioría dos científicos adheriuse á teoría corpuscular de Newton, dado o seu gran prestixio.

A maior dificultade da teoría ondulatoria residía en que non se observaron na luz fenómenos tipicamente ondulatorios como a difracción. Hoxe sabemos que a súa lonxitude de onda é tan pequena que estes fenómenos prodúcense aínda que non é fácil observalos.

c) *Teoría ondulatoria de Fresnel*

A principios do século XIX diversos avances revalorizaron a hipótese ondulatoria da luz. Algúns deles foron: as experiencias, en 1801, do médico e físico inglés T. Young (1773-1829) sobre interferencias luminosas, o descubrimento en 1808 da polarización da luz, ou as experiencias en 1815 do físico francés A. J. Fresnel (1788-1827) sobre a difracción.

Fresnel mostrou a insuficiencia da teoría corpuscular para xustificar estes descubrimentos e fixo unha nova proposta: a luz está constituída por ondas transversais.

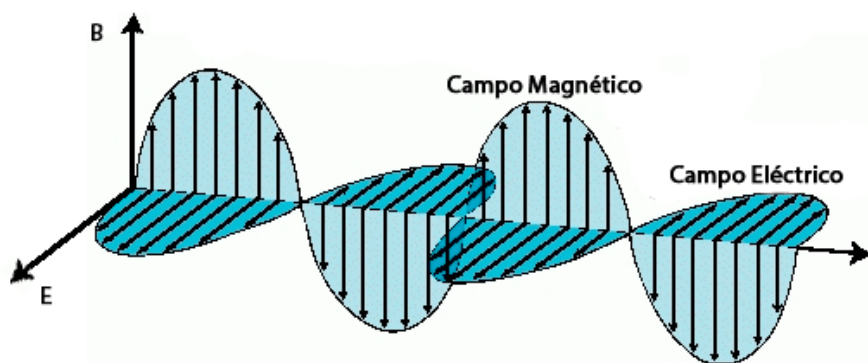
Máis tarde, en 1850, o físico francés J. Foucault (1819-1868) mediu a velocidade da luz na auga e comprobou que é menor que no aire, o que invalidaba a xustificación de Newton para a refracción.

A hipótese corpuscular, logo de 150 anos de aceptación, foi practicamente abandonada.

d) Teoría electromagnética de Maxwell

En 1864, o físico e matemático escocés J. C. Maxwell (1831-1879) estableceu a teoría electromagnética da luz. Adiantándose á comprobación experimental da existencia das ondas electromagnéticas efectuada, en 1887, polo físico alemán H. Hertz (1857-1894), propuxo que: *a luz non é unha onda mecánica senón unha forma de **onda electromagnética** de alta frecuencia*. As ondas luminosas consisten na propagación, sen necesidade de soporte material algún, dun campo eléctrico e dun campo magnético perpendiculares entre si e á dirección propagación.

Estes dous campos son funcións periódicas tanto da coordenada na dirección de propagación como do tempo:



A teoría electromagnética de Maxwell tivo aceptación xeral e, ao parecer, podía considerarse como a teoría definitiva acerca da natureza da luz.

e) Natureza corpuscular da luz segundo Einstein

O efecto fotoeléctrico, descuberto en 1887 por H. Hertz, consiste na emisión de electróns de certa enerxía, ao incidir a luz dunha determinada frecuencia sobre unha superficie metálica. Este efecto non podía ser explicado mediante a teoría ondulatoria.

A partir da hipótese cuántica do físico alemán M. Planck (1858-1947), A. Einstein (1879-1955) propuxo en 1905 que: a luz está formada por un feixe de pequenos corpúsculos ou cuantos de enerxía tamén chamados **fotóns**. É dicir, nos fotóns está concentrada a enerxía da onda en lugar de estar distribuída de modo continuo por toda ela.

A enerxía de cada un dos fotóns é proporcional á frecuencia da luz.

$$E = h \cdot f \quad h = \text{constante de Planck} = 6,625 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

Exemplo

A enerxía de certo fotón vale $5,2 \cdot 10^{-18} \text{ J}$. Calcula a frecuencia da radiación luminosa correspondente.

Solución: Aplicando a ecuación de Planck para a enerxía dun fotón $E = hf$ e despexando f da mesma obtense a solución do problema.

$$f = \frac{E}{h} = \frac{5,2 \cdot 10^{-18} \text{ J}}{6,625 \cdot 10^{-34} \text{ Js}} = 7,85 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$$

f) Natureza dual da luz

A luz ten unha dobre natureza, corpuscular e ondulatoria. Propágase mediante ondas electromagnéticas e presenta os fenómenos tipicamente ondulatorios, pero na súa interacción coa materia, en certos fenómenos de intercambio de enerxía, manifesta un carácter corpuscular. Con todo, a luz non manifesta simultaneamente ambas as características, nun fenómeno concreto compórtase ou como onda ou como partícula.

Comprobouse posteriormente que a dobre natureza da luz é aplicable tamén ao comportamento de certas partículas, como os electróns. Esta natureza dual da materia, a semellanza da luz, foi proposta en 1924 polo físico francés L. de Broglie (1892-1987) e constitúe un dos fundamentos básicos da física moderna.

2.2. Velocidade de propagación da luz

Desde un primeiro momento aceptábase que a velocidade da luz debía ser moi elevada e durante moito tempo chegou a pensarse que era infinita. Ata a época de Galileo, era común ata a crenza de que a velocidade da luz era instantánea. A pesar destas conviccións xeneralizadas, e como xa comentamos, o problema da determinación da velocidade da luz en distintos medios converteuse, en tempos de Newton, en pedra angular para decidir entre teorías contrapostas.

Galileo supuxo que a luz se propagaba a unha velocidade finita, aínda que moito maior que a do son. Tratou en balde de determinala, pero achandou o camiño cara á elaboración de métodos para o seu determinación.

Na historia do estudo da luz houbo dous métodos que son considerados clásicos, aparte do de Michelson. Trátase do método de Römer e do de Fizeau.

a) Método de Römer

A primeira medición aproximada do valor da velocidade da luz tivo lugar en 1676 e débese ao astrónomo danés Olaf Römer (1644-1710). O seu éxito debeuse ao emprego de distancias astronómicas.

Römer estudou as ocultacións dos satélites galileanos de Xúpiter (Ío, Europa, Ganímedes e Calisto) ao pasar por detrás do planeta. Centrou a súa atención nel e chegou a determinar que, cando Xúpiter se atopaba á mínima distancia da Terra, o tempo ou período entre dúas "saídas sucesivas da sombra" era de 42 horas 28 minutos, período que se mantiña con asombrosa regularidade.

Observou, con todo, que, se se efectuaba a medida cando a Terra se atopaba na súa posición máis afastada de Xúpiter, o período incrementábase en 22 minutos. Olaf Römer supuxo, con gran acerto, que ese atraso non só se debía a ningunha anomalía no movemento do satélite, senón ao lapso de tempo que tardaba a luz en percorrer a distancia adicional.

Se esa distancia adicional era o diámetro da órbita terrestre ao redor do Sol (d), a diferenza de períodos era igual á vez que tardaba a luz en percorrer esa distancia. Xa que logo:

$$T' - T = \frac{d}{v}$$

Cos datos sobre o diámetro da órbita terrestre dos que se dispuña naquel momento (non demasiado precisos), tanto el como Huygens chegaron a establecer que:

$$v = 2,14 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

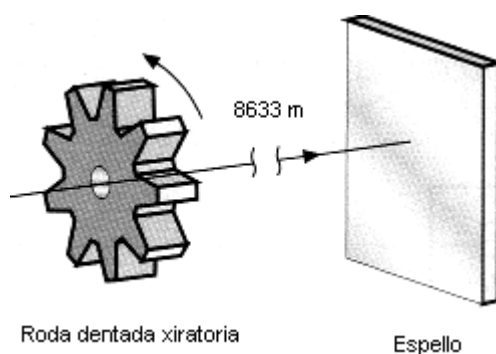
conclusión que permitiu desterrar a idea errónea de que a velocidade da luz era infinita.

b) Método de Fizeau

O enorme valor da velocidade da luz establecido por Römer permitía extraer dúas conclusións: en primeiro lugar, que a velocidade da luz é finita e, en segundo lugar, que resultaría tremendamente difícil deseñar un experimento nun laboratorio terrestre para medila.

Con todo, en 1849, Armand H. L. Fizeau (1819-1896) ideou un enxeñoso dispositivo que lle permitiu medir a velocidade da luz, e co que obtivo un valor máis aproximado ao actual que o de Römer.

O seu dispositivo constaba basicamente dunha roda dentada xiratoria de 720 dentes e un espello situado a unha distancia de 8633 m (figura 2). Mandábase un pulso de luz que, logo de pasar entre os dentes da roda, chegaba ao espello, onde se reflectía e emprendía o camiño de volta. Dependendo de como se axustase a velocidade de rotación do disco, o pulso reflectido podía atravesar ou non a roda dentada. A certa velocidade de rotación, o pulso reflectido non chegaba ao ollo do observador; con todo, ao aumentar devandita velocidade de rotación, o pulso volvía facerse visible.



Isto quería dicir que o pulso, na súa viaxe de ida e volta de 17266 m, tardara o mesmo que a roda en virar desde un oco ao seguinte. Coñecendo a velocidade de rotación da roda, Fizeau chegou a estimar como valor da velocidade da luz:

$$v = 3.13 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

c) Valor actual da velocidade da luz

Modernas investigacións levadas a cabo utilizando diversos métodos permitiron establecer como valor aceptado para a velocidade da luz no baleiro, que se designa habitualmente coa letra c , o seguinte:

$$c = 2,997924562 \cdot 10^8 \text{ m/s} \pm 1,1 \text{ m/s}$$

Este valor adóitase redondear a $3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

2.3. Ondas electromagnéticas

J. C. Maxwell desenvolveu a súa teoría do campo electromagnético entre 1861 e 1864, e predixo a existencia e as características das ondas electromagnéticas. Maxwell achou que estas debían de propagarse á velocidade da luz e que a luz non era máis que unha forma de radiación electromagnética.

As ondas electromagnéticas son transversais e consisten na propagación, sen necesidade de soporte material algún, dun campo eléctrico e dun campo magnético perpendiculares entre si e á dirección de propagación.

A predición de Maxwell sobre a existencia das ondas electromagnéticas foi confirmada en 1887 polo alemán H. Hertz, que produciu e detectou este tipo de ondas.

a) Características das ondas electromagnéticas

- Son orixinadas por cargas eléctricas aceleradas.
- Consisten na variación periódica do estado electromagnético do espazo. Un campo eléctrico variable produce un campo magnético variable, este á súa vez orixina un campo eléctrico e así, sucesivamente, ambos se propagan no espazo.
- Non necesitan soporte material para propagarse.
- Nelas os vectores dos campos eléctrico e magnético, \vec{E} e \vec{B} , varían de xeito sinusoidal co tempo e a posición, polo que lles son aplicables as ecuacións dadas para as ondas harmónicas:

$$E = E_0 \sin(\omega t - kx)$$

$$B = B_0 \sin(\omega t - kx)$$

- Os módulos dos vectores \vec{E} e \vec{B} , nunha posición e nun tempo determinados, compren:

$$\frac{E}{B} = c \quad \text{sendo } c \text{ a velocidade da onda}$$

- A velocidade das ondas electromagnéticas depende do medio de propagación. O seu valor no baleiro vén dado pola expresión:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$$

$$\epsilon_0 \text{ (constante dieléctrica do baleiro)} = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-2}$$

$$\mu_0 \text{ (permeabilidade magnética do baleiro)} = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ TmA}^{-1}$$

Se se substitúen estes valores na expresión dada, compróbase que $c = 3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$.

- As ondas electromagnéticas tamén compren as relacións entre velocidade, lonxitude de onda e frecuencia:

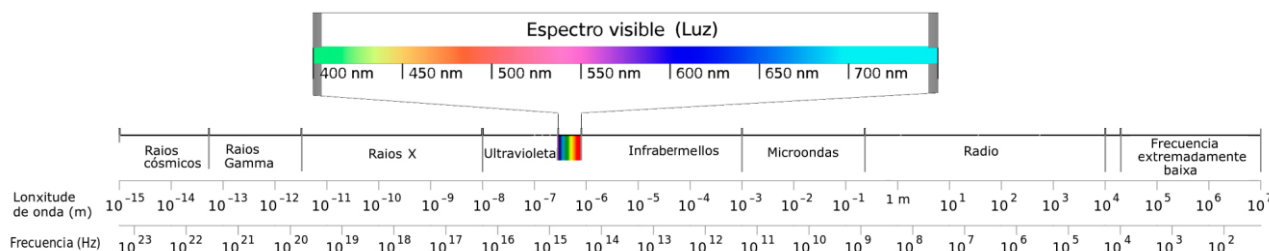
$$\lambda = cT \Rightarrow \lambda = \frac{c}{f}$$

b) Espectro electromagnético

Denomínase espectro electromagnético ao conxunto de todas as radiacións de diferente frecuencia en que pode descomperse a radiación electromagnética. Dado que a velocidade de propagación de todas elas no baleiro é a mesma, entón a frecuencia e a lonxitude de onda relaciónanse segundo a expresión:

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

O espectro electromagnético divídese tradicionalmente en sete zonas. Con todo, esta división non presenta límites nítidos.



Vexamos as características das ondas correspondentes ás zonas do espectro:

- **Ondas de radio.** Son as que teñen unha lonxitude de onda máis longa: desde millóns de metros ata uns 30 cm (frecuencia entre 10^2 e 10^9 Hz). Neste intervalo atopamos as ondas longas de radio, cuxas lonxitudes de onda son da orde de quilómetros; as de radio AM (centenas de metro), as de FM e televisión (metros) e as de onda curta (centímetros).
- **Microondas.** Comprenden o intervalo de lonxitudes de onda que abarca desde os 30 cm ata 1 mm (frecuencia entre 10^9 e $3 \cdot 10^{11}$ Hz). O rango de frecuencias das microondas coincide coas frecuencias de resonancia de vibración das moléculas de auga, o que popularizou o seu emprego nas cocinas dos fogares (forno microondas) para a cocción dos alimentos (que teñen un elevado contido de auga). Igualmente, a súa facilidade para penetrar na atmosfera deu pé a que se utilicen nas comunicacións con vehículos espaciais.

- **Infravermello (IR).** As súas lonxitudes de onda esténdense desde 1 mm ata os 10^{-6} m, aproximadamente (frecuencia entre $3 \cdot 10^{11}$ e $3 \cdot 10^{14}$ Hz). Son emitidas por corpos quentes, como as brasas dunha cheminea. Practicamente a metade da enerxía radiada polo Sol corresponde a este tipo de radiación.
- **Visible.** Denomínase así porque é a que os nosos ollos son capaces de captar. A este tipo de ondas é ao que nos referimos comunmente como "luz" e constitúe a rexión máis estreita do espectro, pois abarca só as lonxitudes de onda comprendidas entre 10^{-6} m e 390 nm (frecuencias entre $3 \cdot 10^{14}$ e $7 \cdot 10^{14}$ Hz). Se subdivide, á súa vez, nas famosas cores do arco iris:
 - Vermello: 620 a 1000 nm.
 - Laranxa: 590 a 620 nm.
 - Amarelo: 550 a 590 nm.
 - Verde: 490 a 550 nm.
 - Azul: 430 a 490 nm.
 - Violeta: 390 a 430 nm.
- **Ultravioleta (UV).** Como o seu nome indica, son as radiacións que se atopan "máis aló do violeta", con lonxitudes de onda que abarcan desde os 390 nm ata 1 nm (frecuencias entre $7 \cdot 10^{14}$ e $3 \cdot 10^{17}$ Hz). A súa enerxía é suficiente para romper enlaces químicos ou producir ionizacións. É a responsable do ton moreno da nosa pel ao tomar o sol. Foron descubertas por Johann Ritter en 1881.

A rexión ultravioleta do espectro solar divídese en tres partes: UV-A, que abarca o rango de 320 nm a 390 nm; UV-B, que vai de 280 nm a 320 nm, e a denominada UV-C, que corresponde a lonxitudes de onda inferiores a 280 nm. A intensidade de radiación UV-C que chega á superficie da Terra é practicamente nula, pois por fortuna é absorbida pola capa de ozono. A radiación UV-B, pola súa banda, é tamén absorbida parcialmente pola devandita capa, de modo que a intensidade que chega á superficie do noso planeta é compatible co desenvolvemento da vida. Con todo, unha redución do espesor da capa de ozono supón un aumento exponencial da intensidade da compoñente B da radiación UV. Deste xeito, as doses de radiación UV-B poderían chegar a ser daniñas para os seres vivos. No caso do ser humano, unha dose elevada de UV-B podería afectar ao sistema inmunitario, así como á pel e aos ollos, onde pode ata ocasionar cancro e cegueira, respectivamente. Pero os efectos prexudiciais do exceso desta radiación UV-B non se limitan ao ser humano: tamén pode chegar a impedir o crecemento das plantas ou producir danos no plancto mariño, o que podería dar lugar a un desequilibrio ecolóxico importante.

Moi distinta é a incidencia dos raios UV-A, beneficiosa para a vida no planeta. Entre as súas virtudes, figura a de ser un catalizador de vitaminas e a de contribuír á fixación do calcio nos ósos, de aí a importancia de tomar o sol, sempre que sexa de forma moderada e con niveis adecuados de radiación UV-B.

- **Raios X.** As súas lonxitudes de onda atópanse comprendidas entre 1 nm e 10^{-11} m (frecuencias entre $3 \cdot 10^{17}$ e $3 \cdot 10^{19}$ Hz). Así pois, o tamaño destas lonxitudes de onda é equiparable ao dos átomos e ás distancias interatómicas nos corpos sólidos. Isto converteunos en instrumentos especialmente útiles en cristalografía á hora de determinar as disposicións atómicas nun cristal polo método de difracción de raios X, así como en

medicina, onde se empregan nas radiografías. A súa elevada enerxía fainos especialmente perigosos, polo que as doses aplicadas nas radiografías mídense coidadosamente.

- **Raios gamma (γ).** As súas lonxitudes de onda van desde os 10^{-11} m, onde acaban os raios X, ata perderse en valores infinitesimais (frecuencias superiores a $3 \cdot 10^{19}$ Hz). En consecuencia, a súa frecuencia é elevadísima, así como a súa enerxía, o que fai que sexan moi perigosos para calquera forma de vida. Con todo, atoparon curiosamente gran utilidade na radioterapia para combater as células cancerosas. As pequenísimas lonxitudes de onda determinan que, neste caso, a natureza corpuscular prevaleza sobre a ondulatoria. Prodúcese no transcurso das reaccións nucleares e só son absorbidos polo chumbo ou o formigón de certo grosor.

Exemplo: Cal é o período e a frecuencia da radiación gamma de 10^{-13} m?

Solución: aplicando a ecuación $c = \lambda f$, obtemos a frecuencia

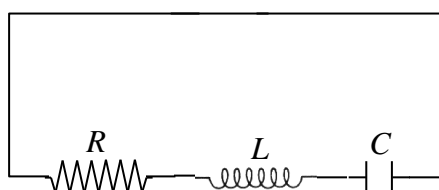
$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}}{10^{-13} m} = 3 \cdot 10^{21} Hz$$

E como o período é o inverso da frecuencia $T = \frac{1}{f} = \frac{1}{3 \cdot 10^{21}} = 3,33 \cdot 10^{-22} s$

e) *Produción de ondas electromagnéticas*

Sábese que as cargas en movemento emiten enerxía mediante a emisión de ondas electromagnéticas. Imaxinemos un circuíto constituído por un condensador e unha autoindución:

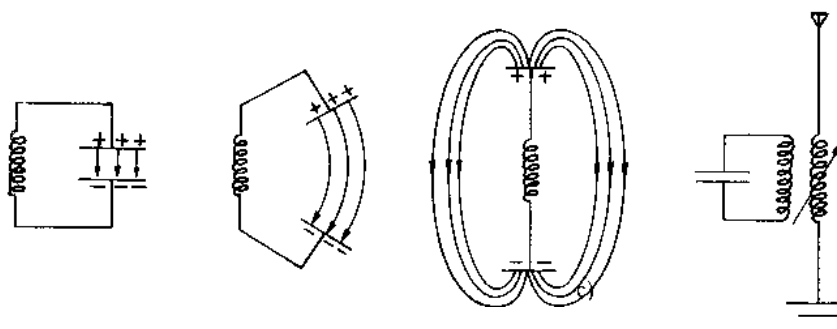
Se partimos do condensador cargado e a resistencia é moi pequena ($0,1 \Omega$), este descargárase ó través da bobina de xeito que a extracorrente fai que se cargue en sentido contrario. Este proceso repetiríase ata perder toda a enerxía polo efecto Joule. Este é o chamado *circuíto oscilante*.



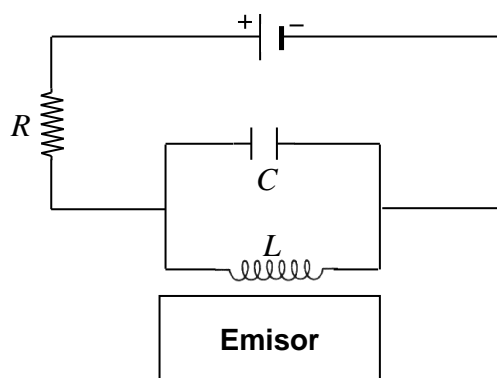
Na realidade sempre teremos unha emisión de enerxía pola produción de ondas electromagnéticas, se ben será moi pouca nun circuíto pechado como o anterior. Pero é posible unha maior e permanente emisión de ondas mediante:

- Alimentación do circuíto para compensar as perdas.
- Conexión dun circuíto aberto en resonancia co anterior (para que I sexa máxima e tamén o poder irradiador).

O proceso para obter un emisor de ondas electromagnéticas sería:



E o circuito en resonancia estaría alimentado por un xerador:



2.4. Fenómenos ondulatorios da luz

Neste epígrafe imos estudar os fenómenos da reflexión, refracción, dispersión e absorción desde o punto de vista da natureza ondulatoria da luz.

No caso da luz, os fenómenos da reflexión e a refracción poden ilustrarse dun xeito moi conveniente facendo uso da chamada aproximación do raio. Nunha primeira aproximación, as súas características fundamentais son:

- Denomínase raio á liña que indica a dirección de propagación da enerxía radiante.
- Os raios son en todo instante perpendiculares ás fronteiras de onda.
- Os raios son rectilíneos cando a propagación ten lugar nun medio isotrópico.

a) Reflexión da luz

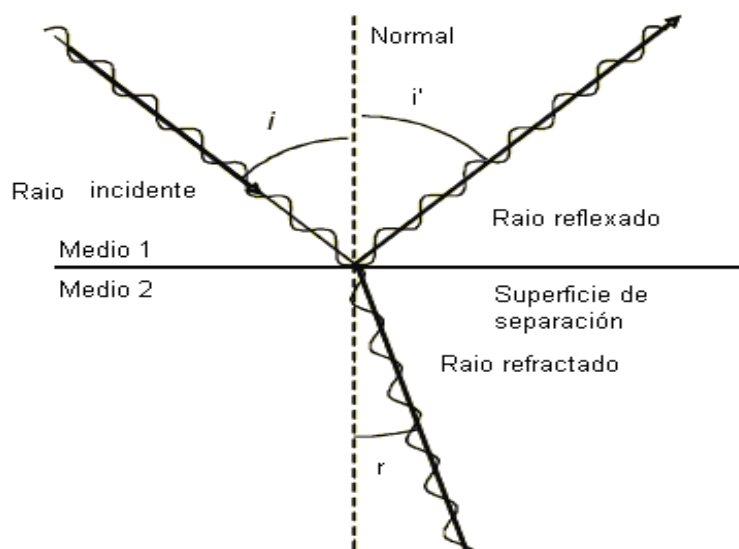
Cando un raio luminoso incide na superficie de separación de dous medios distintos, parte da enerxía luminosa segue propagándose no mesmo medio (refléctese) e parte pasa a propagarse polo outro medio cunha velocidade distinta (se refracta).

Usando a aproximación do raio, denomínase raio incidente a aquel que representa a luz que incide sobre a superficie, raio reflectido ao que representa a fracción de enerxía luminosa reflectida e raio refractado ao que representa a fracción de enerxía que se propaga polo novo medio.

Se o raio incidente forma un ángulo \hat{i} coa perpendicular á superficie, pode demostrarse experimentalmente que:

- O raio incidente, o raio reflectido e a normal á superficie atópanse no mesmo plano, chamado plano de incidencia.
- O ángulo de incidencia (\hat{i}) e o de reflexión (\hat{i}') son iguais: $\hat{i} = \hat{i}'$

Estes dous feitos agrúpanse no que se coñece como **lei da reflexión**.



b) Refracción da luz

No estudo do fenómeno da refracción é importante realizar as seguintes consideracións previas:

- A velocidade da luz é maior no baleiro que nos medios materiais.
- No baleiro, a velocidade das radiacións luminosas non depende da lonxitude de onda destas, senón que é constante. Con todo, nos medios materiais si depende dela.
- A frecuencia das radiacións luminosas é igual no baleiro que nos medios materiais, non así a lonxitude de onda.

Leis da refracción

- O raio incidente, a normal á superficie no punto de incidencia e o raio refractado están situados no mesmo plano.
- A razón entre o seno do ángulo de incidencia \hat{i} e o do ángulo de refracción \hat{r} é unha constante igual á razón entre as respectivas velocidades de propagación do movemento ondulatorio (lei de Snell)

$$\frac{\sin \hat{i}}{\sin \hat{r}} = \frac{v_1}{v_2}$$

Índice de refracción absoluto

En canto á velocidade da luz, cada medio material está caracterizado por un número ao que chamamos índice de refracción:

O índice de refracción absoluto n dun medio é a razón entre a velocidade da luz no baleiro c e a velocidade v de propagación no devandito medio.

$$n = \frac{c}{v}$$

No baleiro, o índice de refracción é $n = 1$ e, aproximadamente, tamén no aire. Nos outros medios materiais, n é maior que a unidade, xa que c é sempre maior que v .

Nos medios dispersivos (o único medio non dispersivo que hai é o baleiro, aínda que tamén se poden considerar como tal todos os gases a baixas presións), o índice de refracción depende da lonxitude de onda, λ , da radiación luminosa xa que a velocidade v da luz nun medio dispersivo depende de λ :

$$n = \frac{c}{v} = \frac{c}{\lambda \nu}$$

e ν depende do foco emisor, sendo independente do medio material no que se propague a luz. Por esta razón, o índice de refracción dáse para unha lonxitude de onda, xeralmente para a luz amarela do sodio ($\lambda = 5890 \cdot 10^{-10} \text{ m}$).

Exemplo

O índice de refracción da auga é $n_1 = 1,33$. Determina a velocidade da luz na auga.

Dato: $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

Solución: a velocidade da luz en calquera medio sempre é menor ca no baleiro. Comprobarémolo para este caso concreto.

$$n = \frac{c}{v} \rightarrow v = \frac{c}{n} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{1,33} = 2,25 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

Consideremos dous medios transparentes e isotropos distintos aos que chamaremos 1 e 2. Se dividimos os seus índices de refracción, obtemos:

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\frac{c}{v_2}}{\frac{c}{v_1}} = \frac{v_1}{v_2}$$

Chamamos **índice de refracción relativo** do medio 2 respecto do medio 1 ao cociente de dividir os correspondentes índices de refracción absolutos.

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1}$$

Recordando a segunda lei da refracción, obtemos:

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\text{sen } \hat{i}}{\text{sen } \hat{r}}$$

De onde se deduce unha nova expresión para a **lei de Snell da refracción**:

$$n_1 \text{sen } \hat{i} = n_2 \text{sen } \hat{r}$$

Exemplo: Un raio de luz láser incide cun ángulo de 45° respecto á normal sobre a superficie dun lago en calma. Calcula o ángulo de reflexión e o ángulo de refracción.

Dato: índices de refracción: $n_{1,\text{aire}} = 1$; $n_{2,\text{auga}} = 1,33$

Solución: segundo a lei da reflexión o ángulo de incidencia é igual ao ángulo de reflexión.

$$\hat{i} = \hat{r} = 45^\circ$$

Segundo a lei de Snell da refracción:

$$n_1 \text{sen } \hat{i} = n_2 \text{sen } \hat{r}$$

Substituíndo os datos coñecidos dos índices de refracción

$$\text{sen } \hat{r} = \frac{n_1}{n_2} \cdot \text{sen } \hat{i} \rightarrow \text{sen } \hat{r} = \frac{1}{1,33} \text{sen } 45^\circ = 0,5$$

que corresponde a un ángulo de 30° . Este ángulo é menor ca o de incidencia, como era de esperar

Por outra banda, observemos un feito importante, xa comentado antes: cando a luz pasa dun medio a outro, a súa frecuencia non cambia, pois axiña que chega unha fronte de onda incidente, xorde un refractado. Se a frecuencia non varía e si o fai a velocidade, e posto que $v = \lambda f$, cabe concluír que a lonxitude de onda cambia ao pasar a outro medio. A partir das expresións anteriores, compróbase que se a lonxitude de onda incidente é λ_1 e a refractada é λ_2 , entón:

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2} \Rightarrow \frac{n_2}{n_1} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \quad \text{polo que} \quad \lambda_2 = \lambda_1 \frac{n_1}{n_2}$$

Ángulo crítico (ou límite) e reflexión total

Consideremos un raio de luz que se propaga polo aire cun ángulo de incidencia \hat{i} . Ao entrar na auga se refracta cun ángulo \hat{r} que responde á lei de Snell. A medida que a incidencia é máis rasante (\hat{i} é maior), \hat{r} aumenta. Con todo, o maior ángulo posible de refracción terá lugar cando a incidencia sexa practicamente rasante, é dicir, cando $\hat{i} \cong 90^\circ$. Ese ángulo límite de refracción coñécese como ángulo crítico, \hat{r}_c , e calcúlase do seguinte xeito:

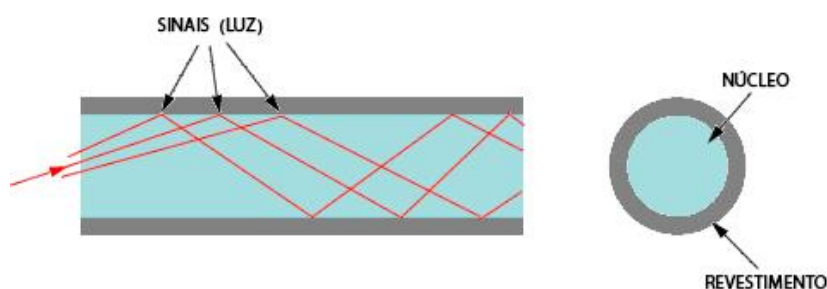
$$n_1 \text{sen } 90^\circ = n_2 \text{sen } \hat{r}_c \quad \text{é dicir} \quad \text{sen } \hat{r}_c = \frac{n_1}{n_2}$$

Se consideramos que o medio 1 é o baleiro ($n_1 = 1$) ou ata o aire, cuxo valor é aproximadamente 1, o ángulo crítico será tal que:

$$\sin \hat{r}_c = \frac{1}{n_2}$$

Imaxinemos agora que a propagación da luz ten lugar á inversa, é dicir, pasa de propagarse pola auga ao aire. A simetría do problema, que á súa vez se reflicte na lei de Snell, lévanos á seguinte consideración: se o raio incidente que se propaga pola auga forma un ángulo de incidencia \hat{i} igual ao ángulo crítico correspondente á auga, o raio refractado no aire sairá en dirección practicamente rasante ou paralela á superficie da auga. Pero **se o ángulo de incidencia é superior ao ángulo crítico, non haberá refracción**. Producirase a **reflexión total** e a luz seguirá propagándose polo mesmo medio.

Esa é precisamente a base do funcionamento das **chamadas fibras ópticas**. Se un feixe de luz se propaga por un medio transparente en forma de tubo (por exemplo vidro ou plástico), de modo que o ángulo de incidencia con respecto ás paredes do tubo supere o ángulo crítico, prodúcese a reflexión total interna. Este proceso esténdese ao longo de todo o tubo, que se converte así en guía da luz.



Esta técnica experimentou un espectacular desenvolvemento no campo das telecomunicacións e na medicina. Neste último, os endoscopios permiten iluminar e observar zonas recónditas dos nosos órganos internos ao introducir neles cables de feixes de fibra óptica de pouco grosor.

2.5. Aspectos relativos á interacción luz-materia

a) *Dispersión da luz. Prismas*

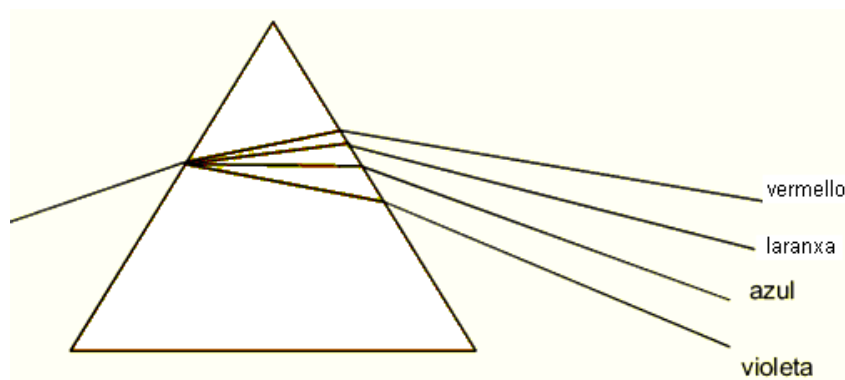
Un feixe luminoso calquera é unha mestura de ondas de frecuencias (e, por conseguinte, de cores) moi variables. No baleiro, a velocidade de propagación da luz é a mesma, independentemente da frecuencia. Con todo, en determinados medios materiais, a velocidade de propagación si é función da frecuencia.

Do estudo experimental da variación do índice de refracción coa lonxitude de onda en diversos medios pódese sacar unha conclusión común: o índice de refracción aumenta lixeiramente a medida que a lonxitude de onda diminúe. É dicir:

O índice de refracción aumenta lixeiramente coa frecuencia.

Cando un medio ten esta dependencia entre o índice de refracción e a frecuencia, dise que presenta dispersión.

Este fenómeno foi o que observou Isaac Newton ao facer que as cores da luz branca se dispersasen ao atravesar un prisma. Cando a luz branca incide en dirección oblicua sobre unha das caras do prisma, sofre refracción ao entrar nel. Con todo, como o índice de refracción depende da frecuencia, cada cor sufrirá a súa refracción particular en distinto ángulo. Posto que o índice de refracción é maior para o violeta e o azul e menor para o vermello, as cores que máis se desvían son os dous primeiros. Dese xeito, ao saír do prisma e sufrir unha segunda refracción, as cores aparecen claramente divididos.



A imaxe que se recolle na pantalla, onde aparecen as cores claramente diferenciadas, denomínase espectro continuo da luz branca. O poder separador dun prisma depende do material transparente utilizado. A desviación do conxunto do feixe ao atravesar o prisma adoita medirse en función do ángulo de desviación da luz amarela, que aparece equidistante do vermello e do violeta. Por outra banda, o ángulo que abarca o abanico das cores dispersadas dáanos a medida da dispersión do prisma. A desviación e a dispersión están directamente relacionadas, de modo que canto maior é a primeira, maior é tamén a segunda.

Este foi o procedemento polo que Newton logrou demostrar que, en contra da crenza popular naquel entón, as cores non proviñan do interior da sustancia, senón que se debían á descomposición da luz branca.

b) Absorción selectiva. A cor

Seguramente, algunha vez observarías que unha peza de roupa que comprada na tenda tiña unha cor determinada, cando a levas pola rúa adquire outra tonalidade.

A visión da cor é unha resposta fisiolóxica e psicolóxica ao estímulo da radiación que incide nos nosos ollos. É dicir, a cor non é unha propiedade intrínseca dos obxectos senón a forma en que as persoas interpretamos as diferentes frecuencias que forman parte da luz.

A cor dun obxecto depende da luz que incide sobre el e da natureza do propio obxecto. Un corpo de cor negra é aquel que absorbe toda a radiación incidente. Pola contra, un obxecto que reflicte toda a luz que incide sobre el vese da cor da luz coa que foi iluminado (branco se utilizamos luz branca, é dicir, a mestura de todas as cores).

Polo tanto, a cor observada é o resultado da absorción selectiva dalgunhas das frecuencias que pertencen ao espectro visible. O resto das frecuencias chega aos nosos ollos logo de ser reflectidas ou transmitidas polo obxecto.

Doutra banda, os corpos que emiten luz por algún mecanismo físico-químico vense da cor da radiación emitida.

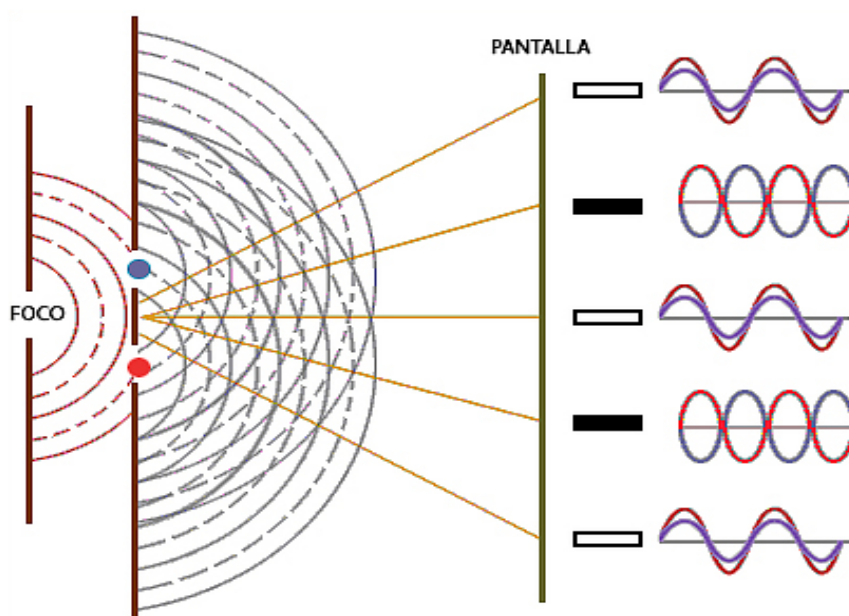
2.6. Outros fenómenos

Como onda, a luz pode someterse a unha serie de situacións nas que manifesta a súa natureza.

a) Interferencias

Cando dúas ondas luminosas se superpoñen nun punto producen interferencias. O caso máis relevante dáse cando as ondas que interfieren posúen a mesma frecuencia e lonxitude de onda, á vez que manteñen unha diferenza de fase constante, cando isto sucede dicimos que se trata de ondas coherentes (un exemplo é o láser).

O fenómeno de interferencias da luz foi estudiado por Young (no ano 1801) mediante unha célebre experiencia na que utilizaba un foco de luz con unha única frecuencia (monocromático) que logo pasaba por dúas fendas e chegaba a unha pantalla onde se podía apreciar o efecto debido á interferencia da luz, tal e como se ilustra na seguinte figura:



Dependendo da situación dos puntos sobre a pantalla se observa que existen zonas de luz intensa e zonas escuras. A razón disto é que as ondas percorren camiños distintos ata chegar á pantalla: se a diferenza de percorrido é un múltiplo enteiro da lonxitude de onda haberá interferencia construtiva (zonas iluminadas) pero se é un número impar de metades de lonxitude de onda haberá interferencias destrutivas (zonas escuras):

Construtivas: $\Delta x = n \cdot \lambda$

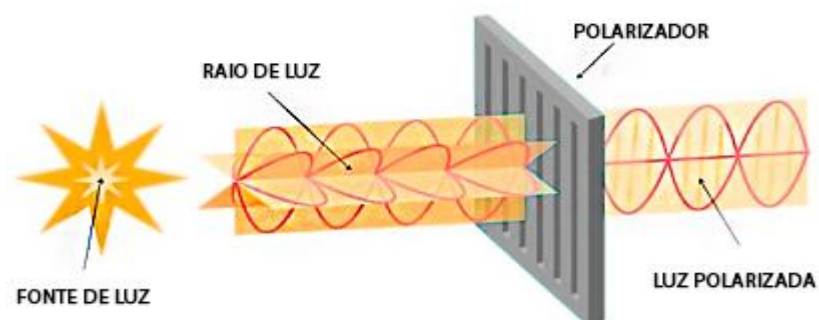
$n = 0, 1, 2, 3, \dots$

Destrutivas: $\Delta x = (2n+1) \cdot \lambda/2$

b) Polarización

Debido a que a luz é unha onda transversal, pode ser polarizada. De feito, cando un raio se reflicte, emerxe fortemente polarizado na dirección paralela ao plano de reflexión.

A gran maioría das fontes habituais de luz non emiten raios polarizados, así que se queremos obter luz polarizada, debemos de facela pasar por un **polarizador**. Existen polarizadores naturais (cuarzo, turmalina) pero tamén se poden fabricar mediante a unión de cadeas moleculares longas convenientemente dispostas (coma os filtros Polaroid, constituídos por hidrocarburos).



Os polarizadores tamén poden actuar coma filtros, como é o caso das gafas de sol que impiden a chegada aos ollos de gran parte da luz reflectida, o máis común é que proveña da auga ou da neve.