

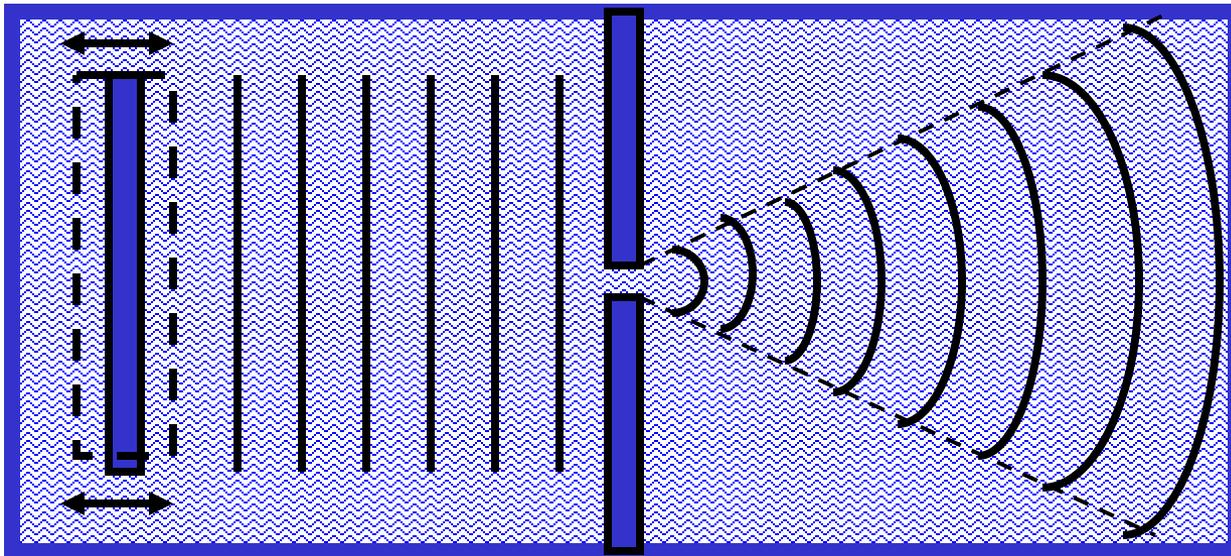
Optics:

Interference and Diffraction

- Superposition and Interference
- Young's Two-Slit Experiment
- Interference in Reflected Waves
- Diffraction
- Resolution
- Diffraction Gratings

Water Waves

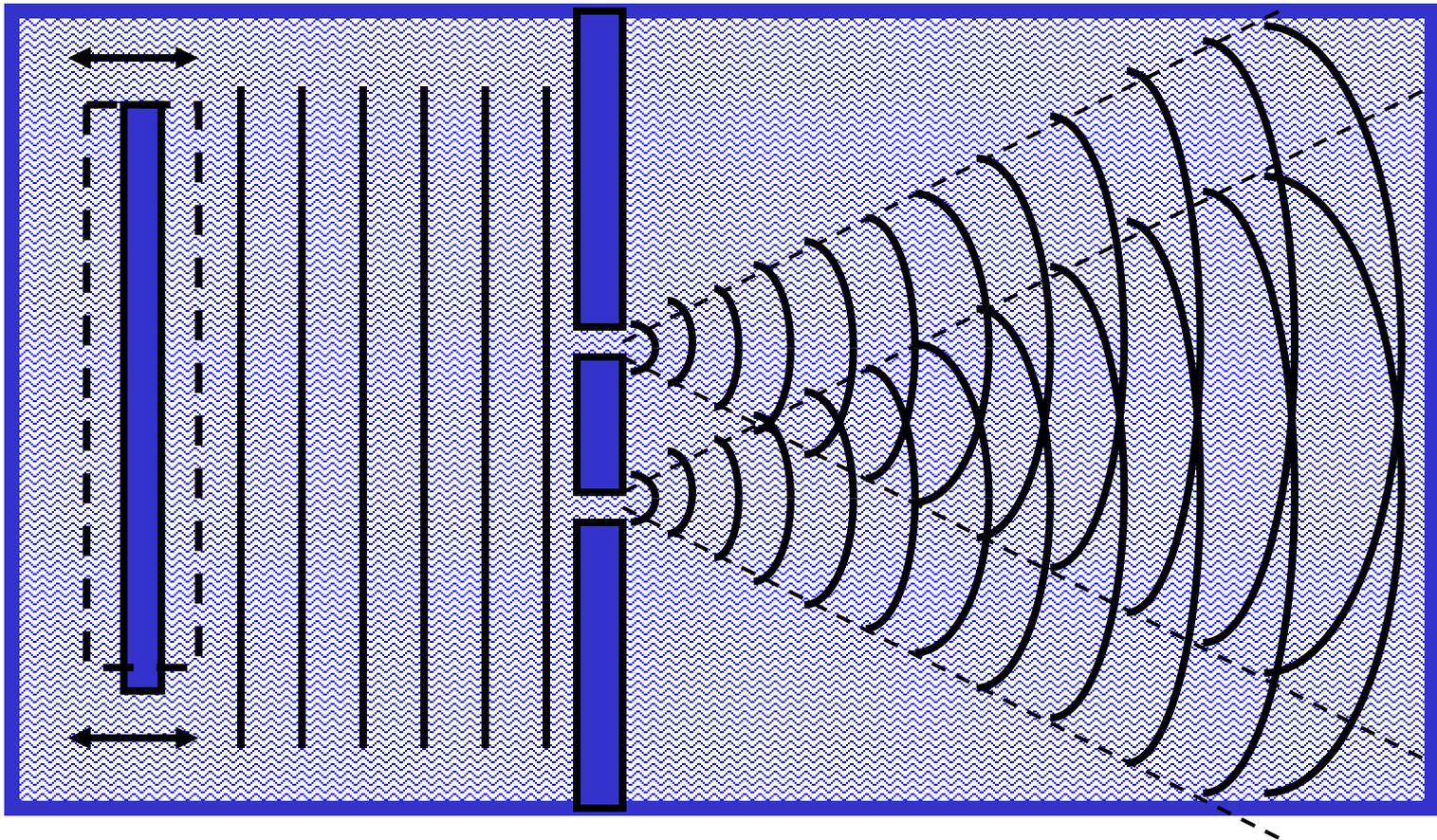
A wave generator sends periodic water waves into a barrier with a small gap, as shown below.



A new set of waves is observed emerging from the gap to the wall.

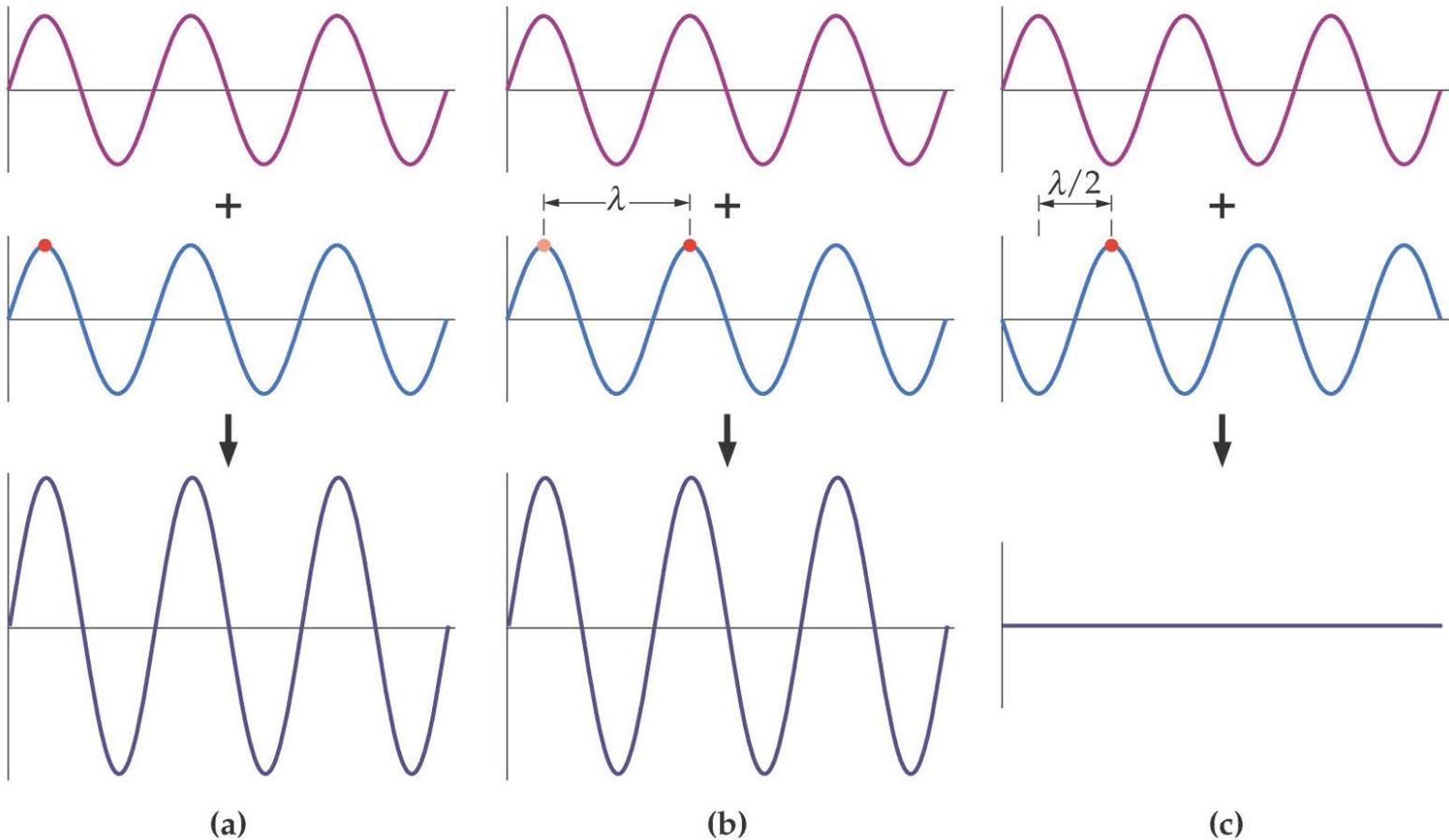
Interference of Water Waves

An interference pattern is set up by water waves leaving two slits at the same instant.



Superposition and Interference

If two waves occupy the same space, their amplitudes add at each point. They may interfere either constructively or destructively.

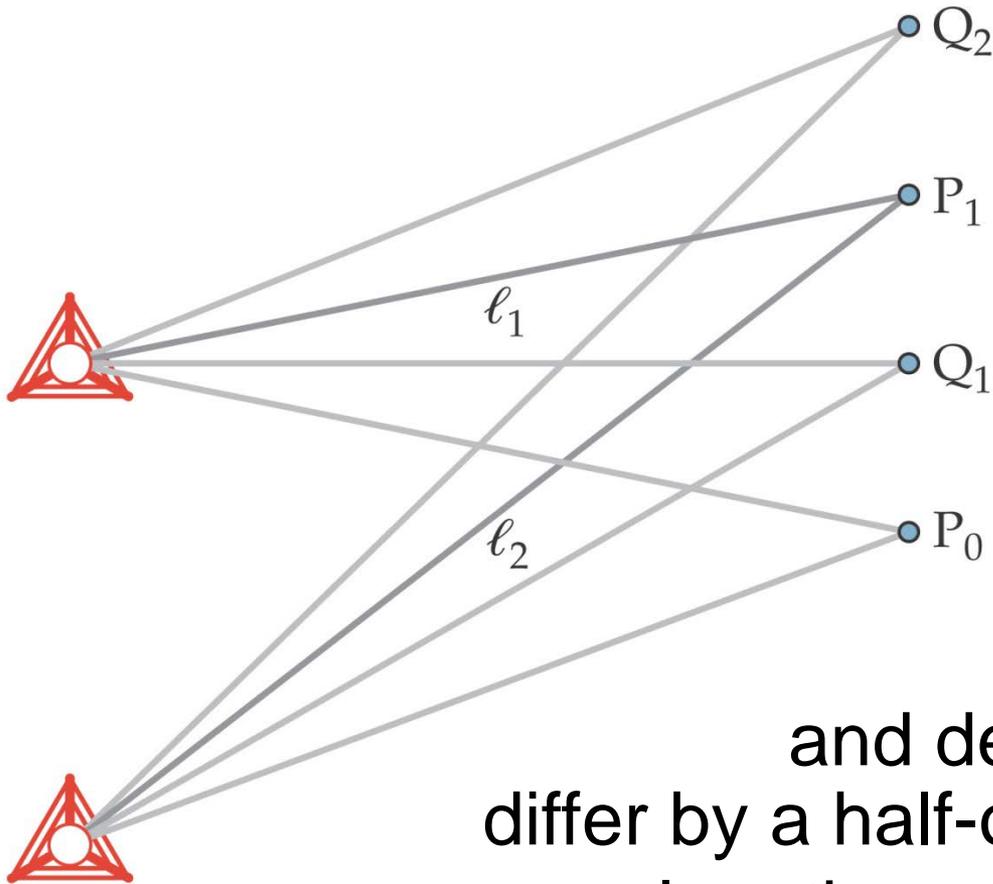


Superposition and Interference

Interference is only noticeable if the light sources are monochromatic (so all the light has the same wavelength) and coherent (different sources maintain the same phase relationship over space and time).

If this is true, interference will be constructive where the two waves are in phase, and destructive where they are out of phase.

Superposition and Interference



In this illustration, interference will be constructive where the path lengths differ by an integral number of wavelengths, and destructive where they differ by a half-odd integral number of wavelengths.

Superposition and Interference

To summarize, the two path lengths l_1 and l_2 will interfere constructively or destructively according to the following:

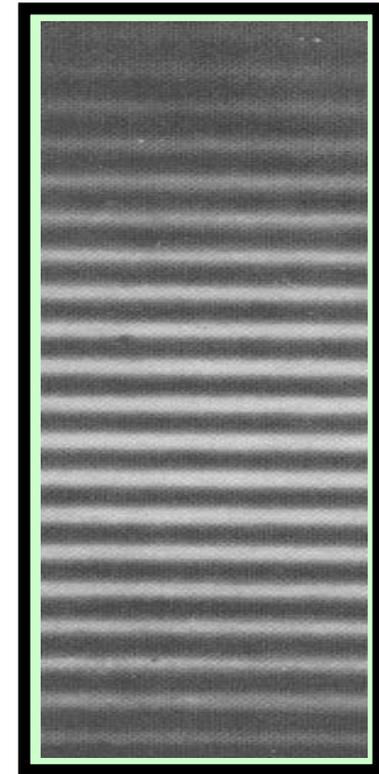
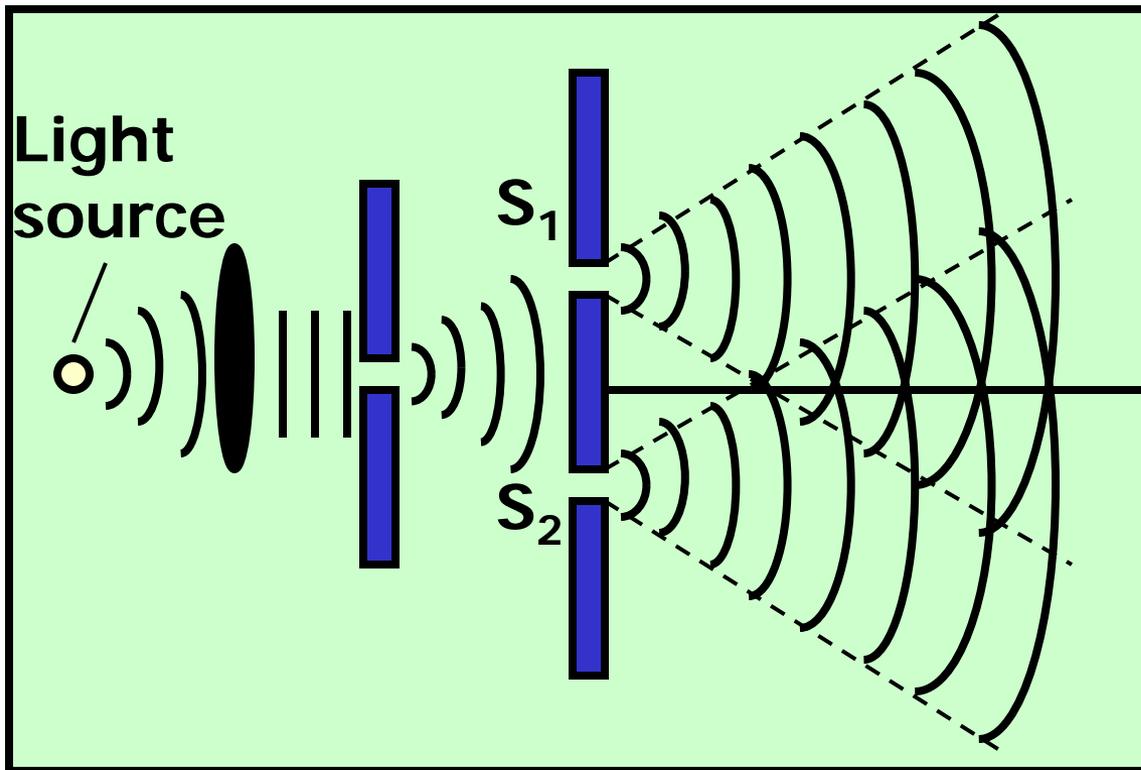
$$\ell_2 - \ell_1 = m\lambda \quad (\text{constructive interference})$$

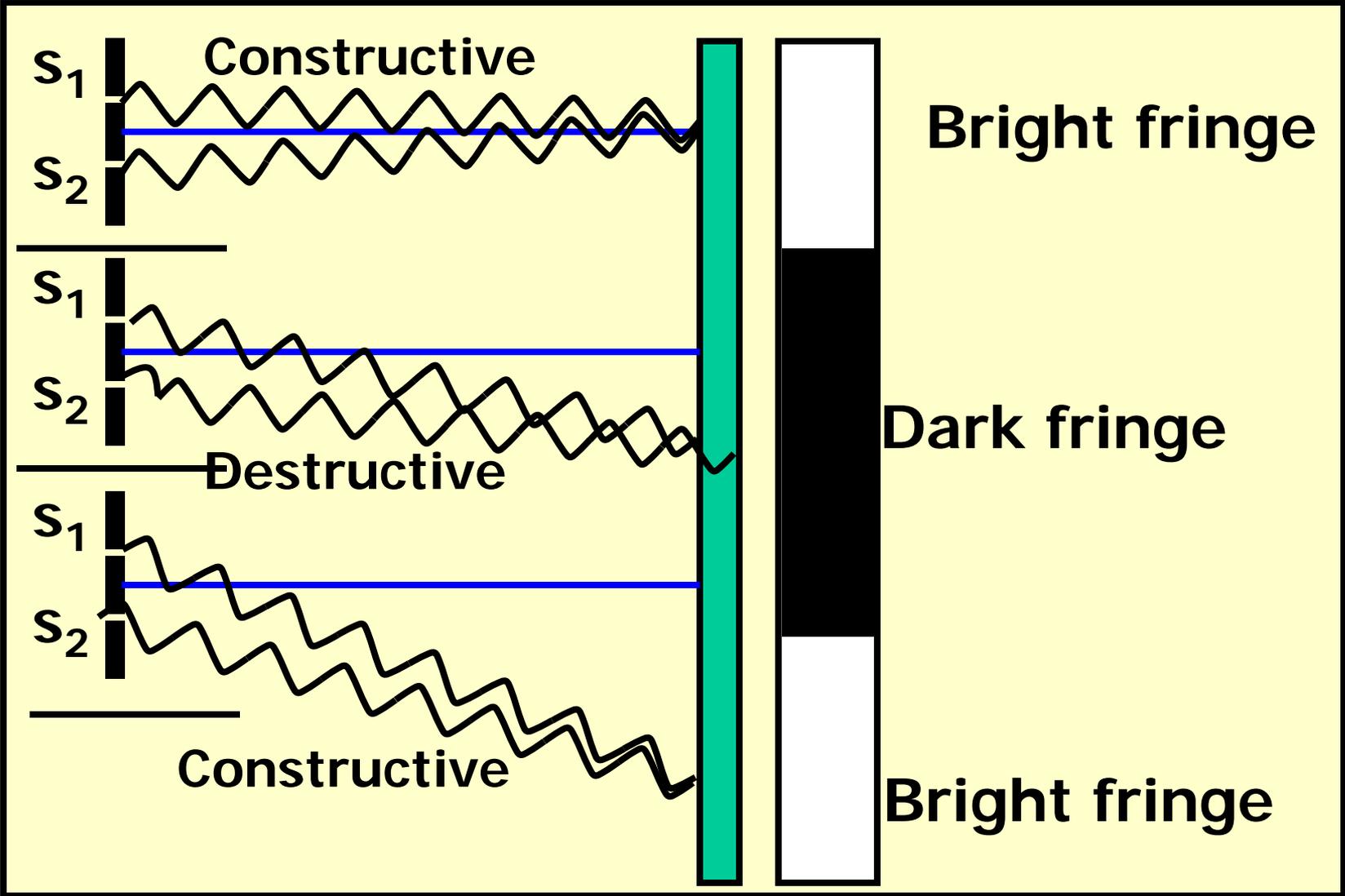
$$\ell_2 - \ell_1 = (m - \frac{1}{2})\lambda \quad (\text{destructive interference})$$

Young's Experiment

Young's Experiment

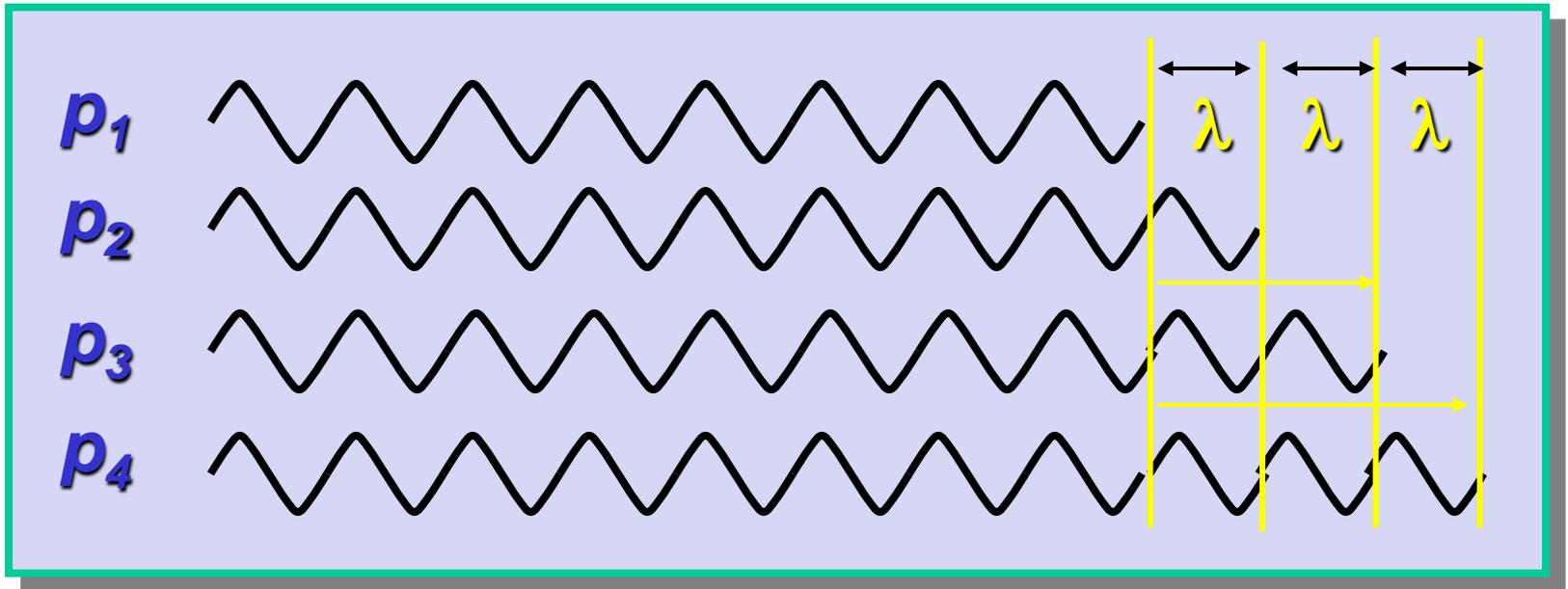
In Young's experiment, light from a monochromatic source falls on two slits, setting up an interference pattern analogous to that with water waves.





Conditions for Bright Fringes

Bright fringes occur when the difference in path Δp is an integral multiple of one wave length λ .



Path difference

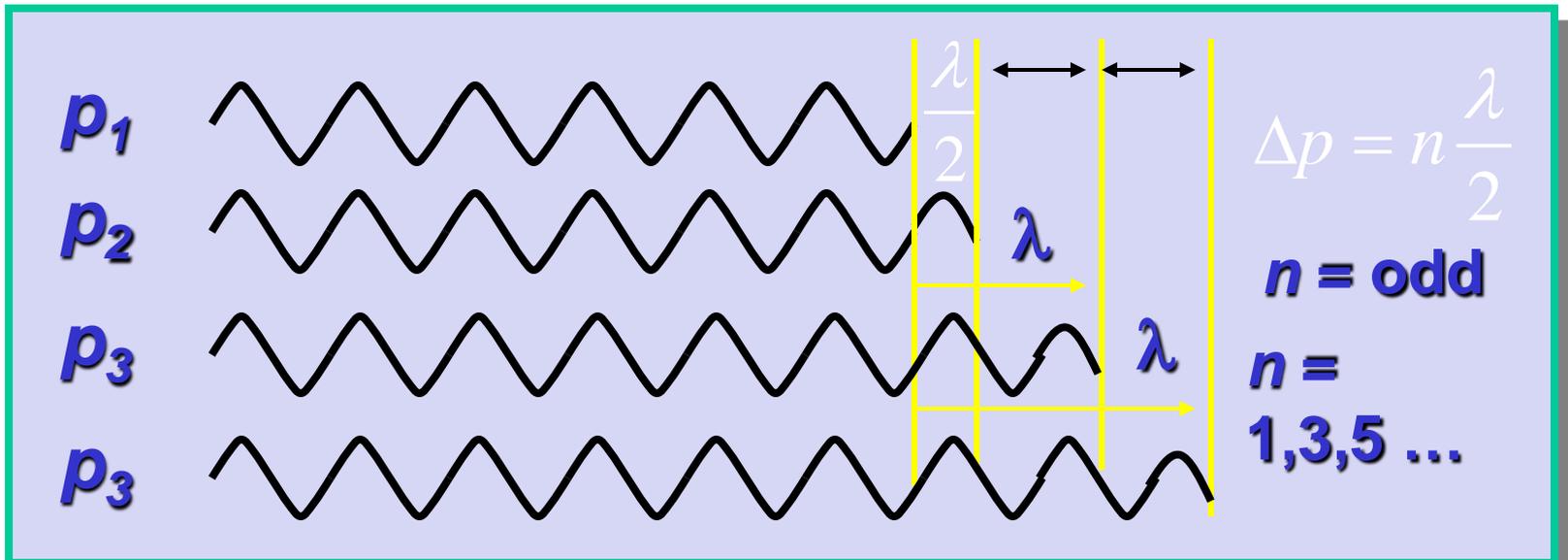
$$\Delta p = 0, \lambda, 2\lambda, 3\lambda, \dots$$

Bright fringes:

$$\Delta p = n\lambda, n = 0, 1, 2, \dots$$

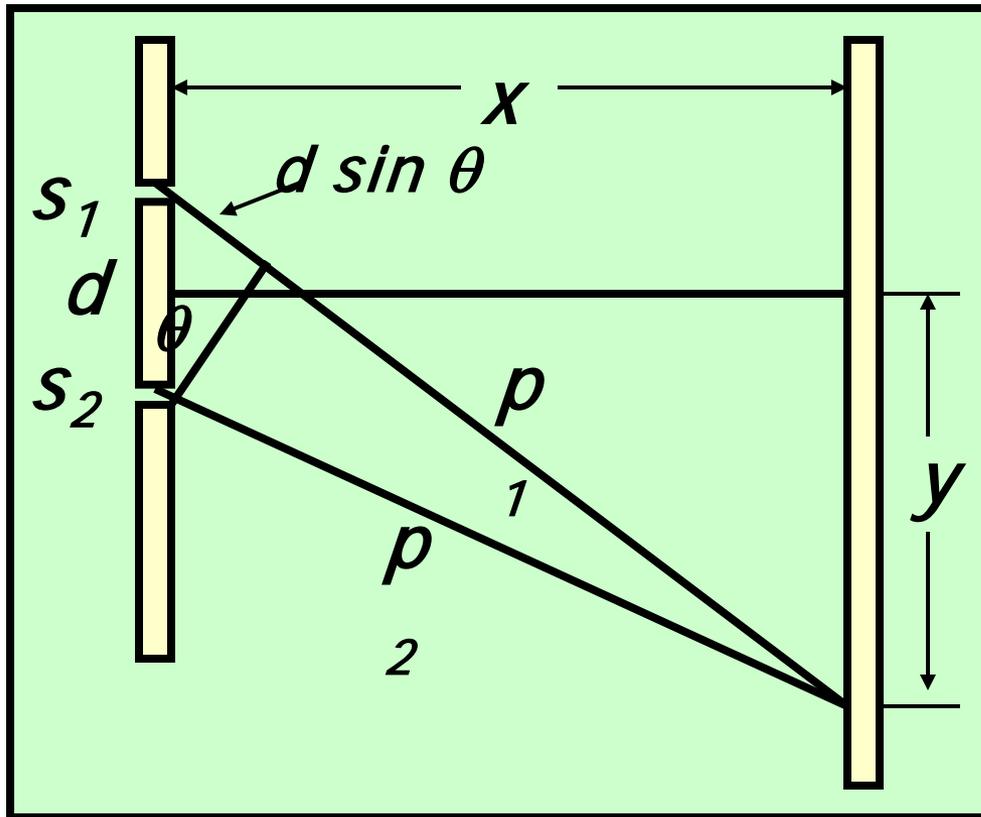
Conditions for Dark Fringes

Dark fringes occur when the difference in path Δp is an odd multiple of one-half of a wave length $\lambda/2$.



Dark fringes: $\Delta p = n \frac{\lambda}{2}$ $n = 1, 3, 5, 7, \dots$

Analytical Methods for Fringes

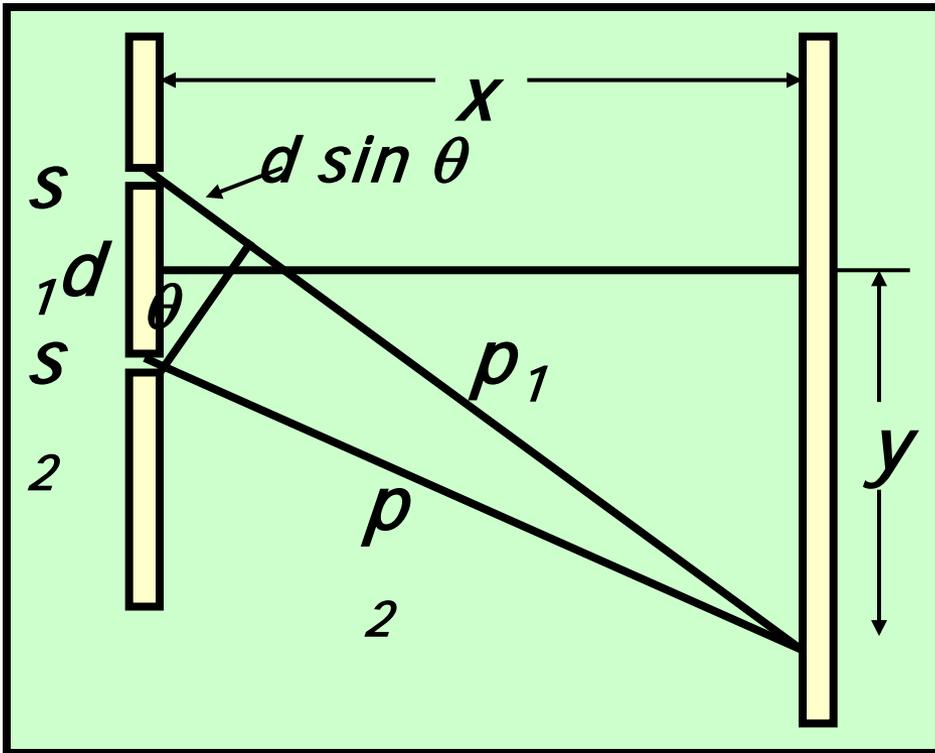


**Path difference
determines light
and dark pattern.**

$$\Delta p = p_1 - p_2$$
$$\Delta p = d \sin \theta$$

Bright fringes: $d \sin \theta = n\lambda, n = 0, 1, 2, 3, \dots$

Dark fringes: $d \sin \theta = n\lambda/2, n = 1, 3, 5, \dots$



From geometry,
we recall that:

$$\sin \theta \approx \tan \theta = \frac{y}{x}$$

So that . . .

$$d \sin \theta = \frac{dy}{x}$$

Bright fringes:

$$\frac{dy}{x} = n\lambda, \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

Dark fringes:

$$\frac{dy}{x} = n \frac{\lambda}{2}, \quad n = 1, 3, 5 \dots$$

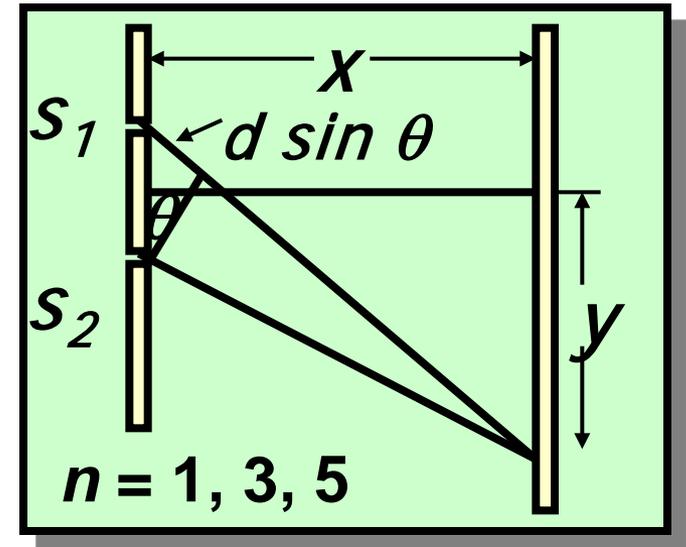
Example 1: Two slits are 0.08 mm apart, and the screen is 2 m away. How far is the third dark fringe located from the central maximum if light of wavelength 600 nm is used?

$$x = 2 \text{ m}; \quad d = 0.08 \text{ mm}$$

$$\lambda = 600 \text{ nm}; \quad y = ?$$

$$d \sin \theta = 5(\lambda/2)$$

The third dark fringe occurs when $n = 5$



Dark fringes:

$$\frac{dy}{x} = n \frac{\lambda}{2}, \quad n = 1, 3, 5 \dots$$

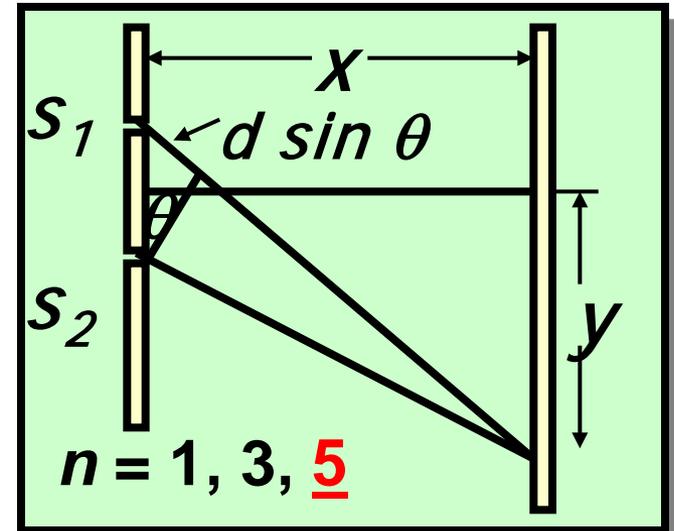
$$\frac{dy}{x} = \frac{5\lambda}{2}$$

Example 1 (Cont.): Two slits are 0.08 mm apart, and the screen is 2 m away. How far is the third dark fringe located from the central maximum if $\lambda = 600$ nm?

$$x = 2 \text{ m}; \quad d = 0.08 \text{ mm}$$

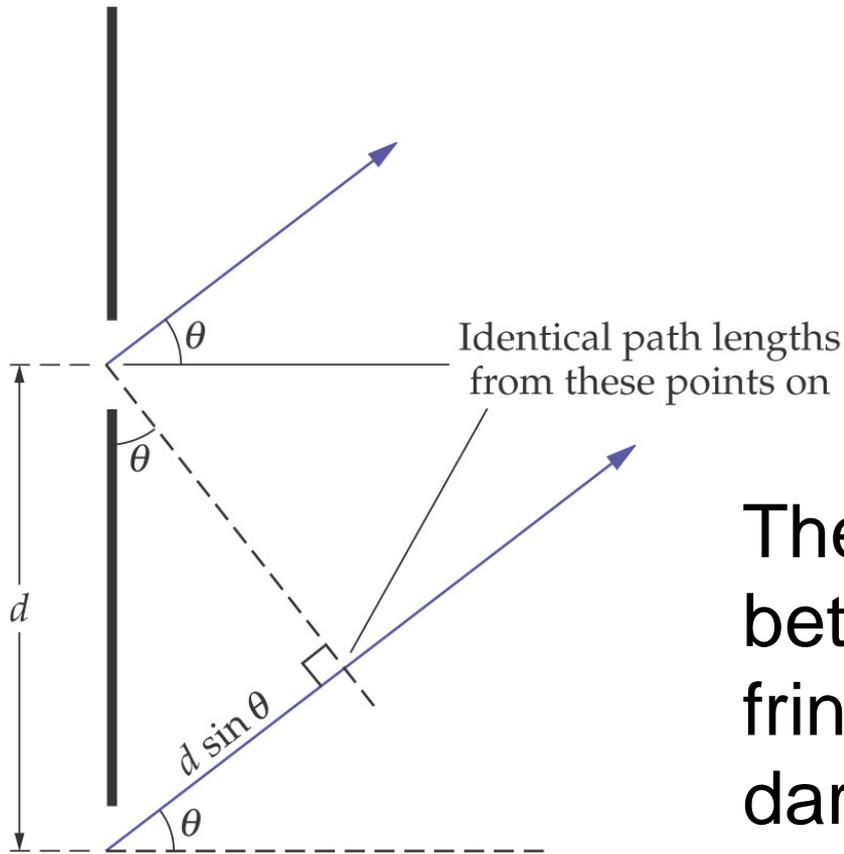
$$\lambda = 600 \text{ nm}; \quad y = ?$$

$$\frac{dy}{x} = \frac{5\lambda}{2}$$



$$y = 3.75 \text{ cm}$$

Young's Two-Slit Experiment

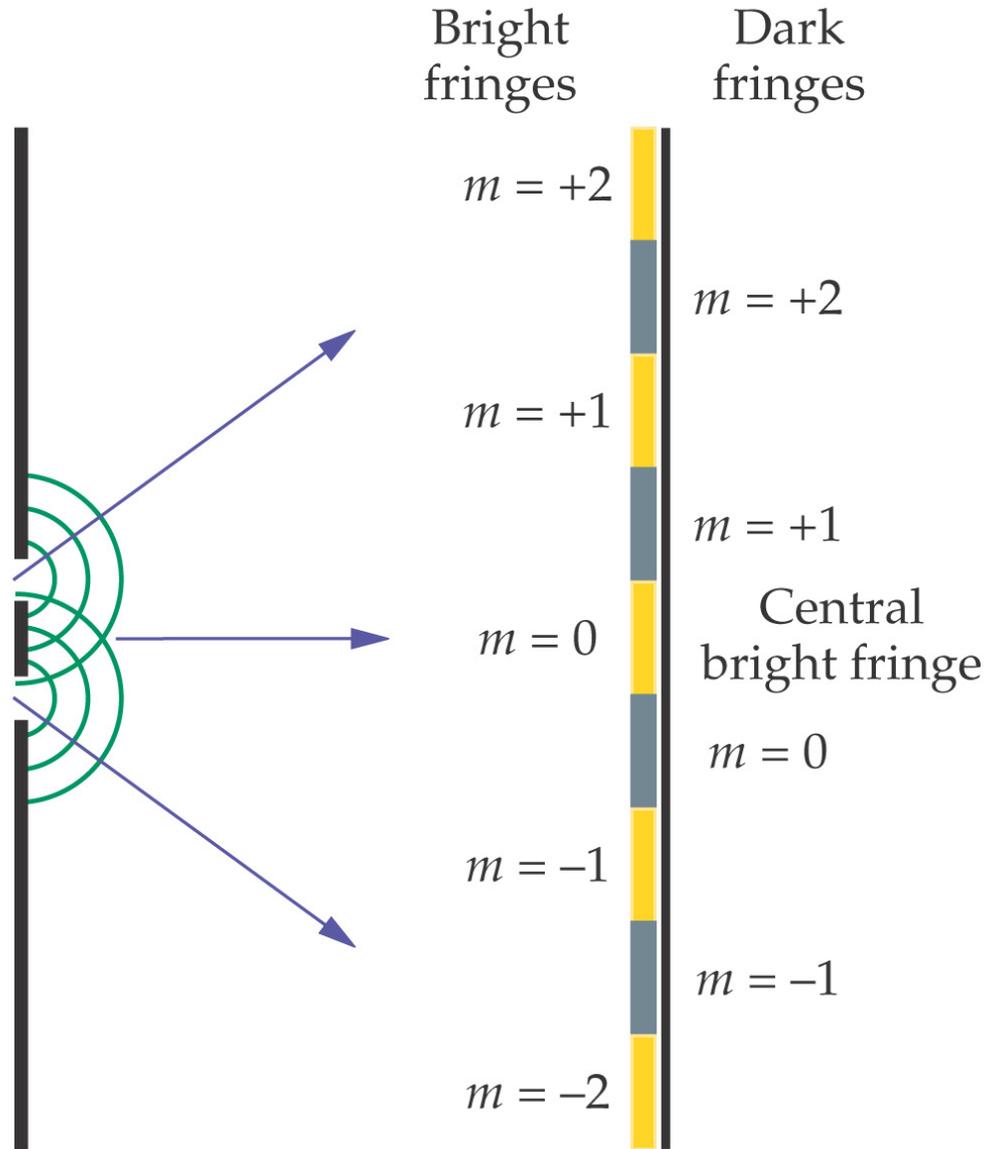


The dark fringes are between the bright fringes; the condition for dark fringes is:

$$d \sin \theta = \left(m - \frac{1}{2}\right)\lambda \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

Young's Two-Slit Experiment

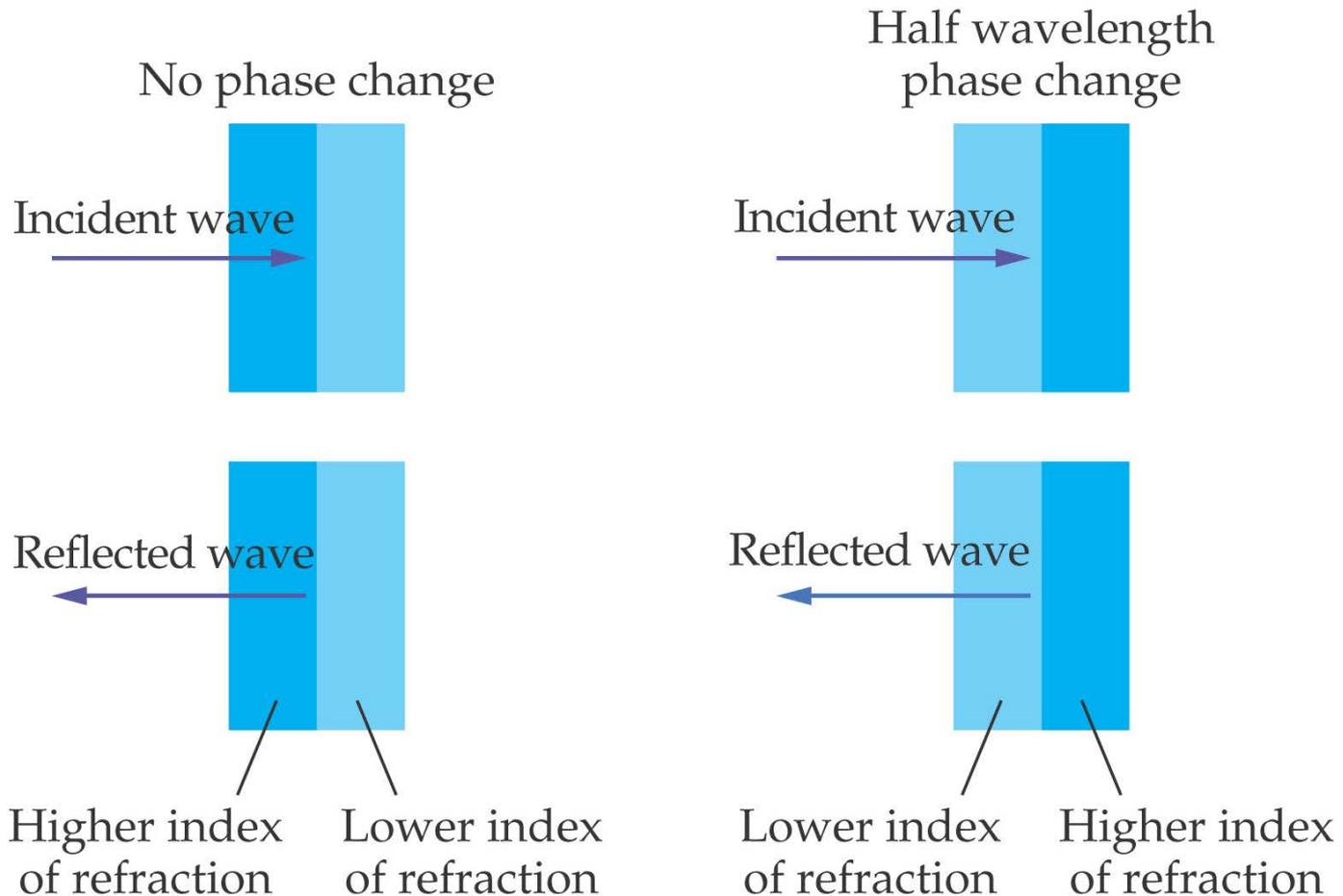
This diagram illustrates the numbering of the fringes.



Interference in Reflected Waves

Interference in Reflected Waves

Reflected waves can interfere due to path length differences, but they can also interfere due to phase changes upon reflection.



Interference in Reflected Waves

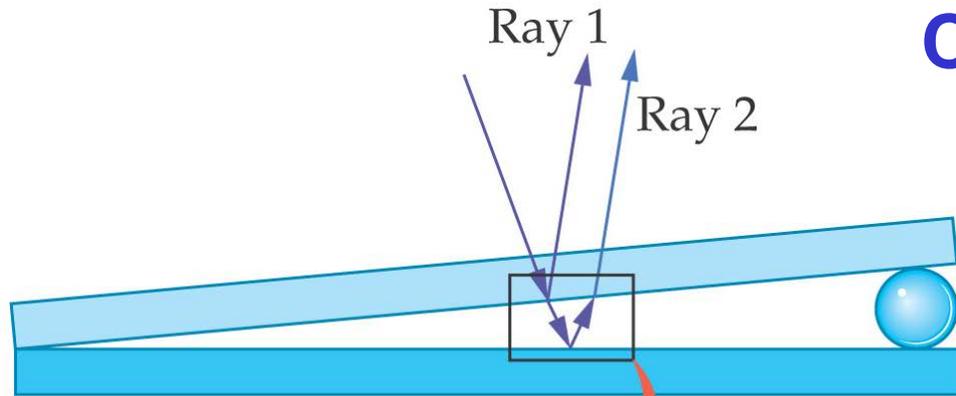
There is no phase change when light reflects from a region with a lower index of refraction.

There is a half-wavelength phase change when light reflects from a region with a higher index of refraction, or from a solid surface.

There is also no phase change in the refracted wave.

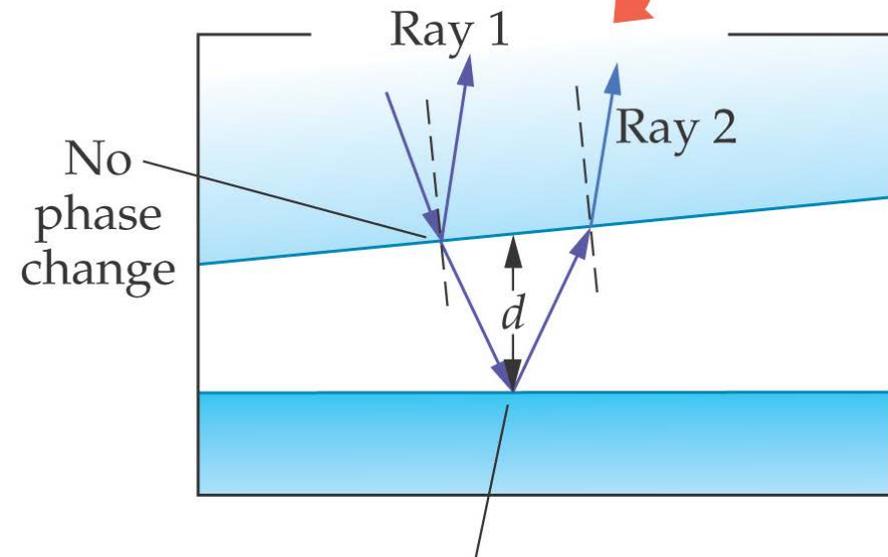
Interference in Reflected Waves

Constructive interference:



$$\frac{1}{2} + \frac{2d}{\lambda} = m \quad m = 1, 2, 3, \dots$$

Destructive interference:



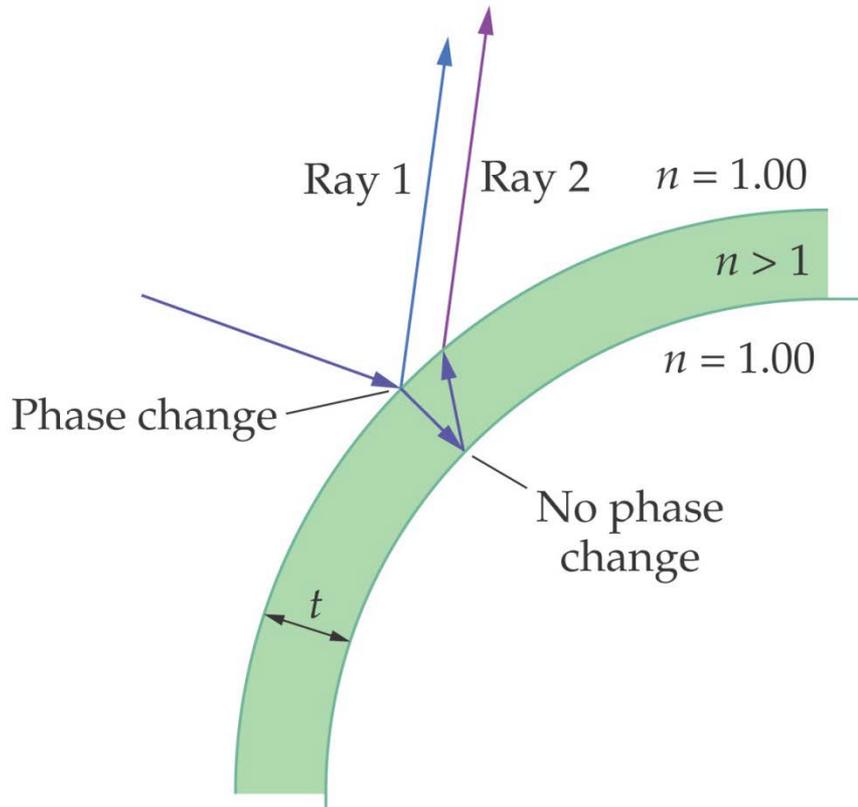
$$\frac{1}{2} + \frac{2d}{\lambda} = m + \frac{1}{2} \quad m = 0, 1, 2, \dots$$

Half wavelength
phase change

No
phase
change

Interference in Reflected Waves

Interference can also occur when light refracts and reflects from both surfaces of a thin film. This accounts for the colors we see in oil slicks and soap bubbles.



Now, we have not only path differences and phase changes on reflection; we also must account for the change in wavelength as the light travels through the film.

Interference in Reflected Waves

Wavelength of light in a medium of index of refraction n :

$$\lambda_n = \frac{\lambda_{\text{vacuum}}}{n}$$

Therefore, the condition for destructive interference, where t is the thickness of the film, is:

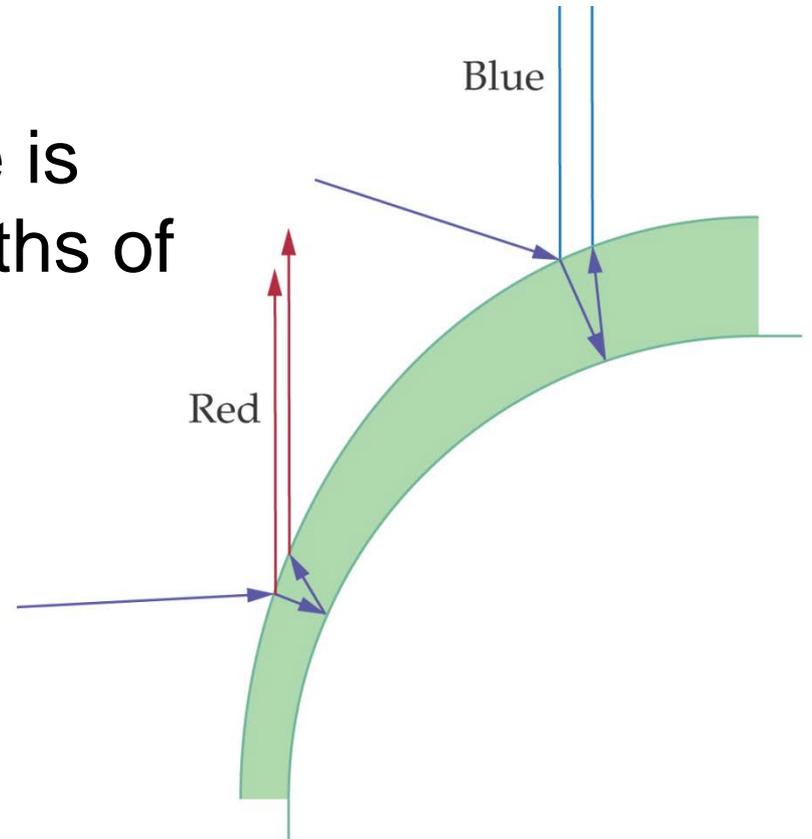
$$\frac{2nt}{\lambda_{\text{vacuum}}} = m \quad m = 0, 1, 2, \dots$$

Interference in Reflected Waves

The condition for constructive interference:

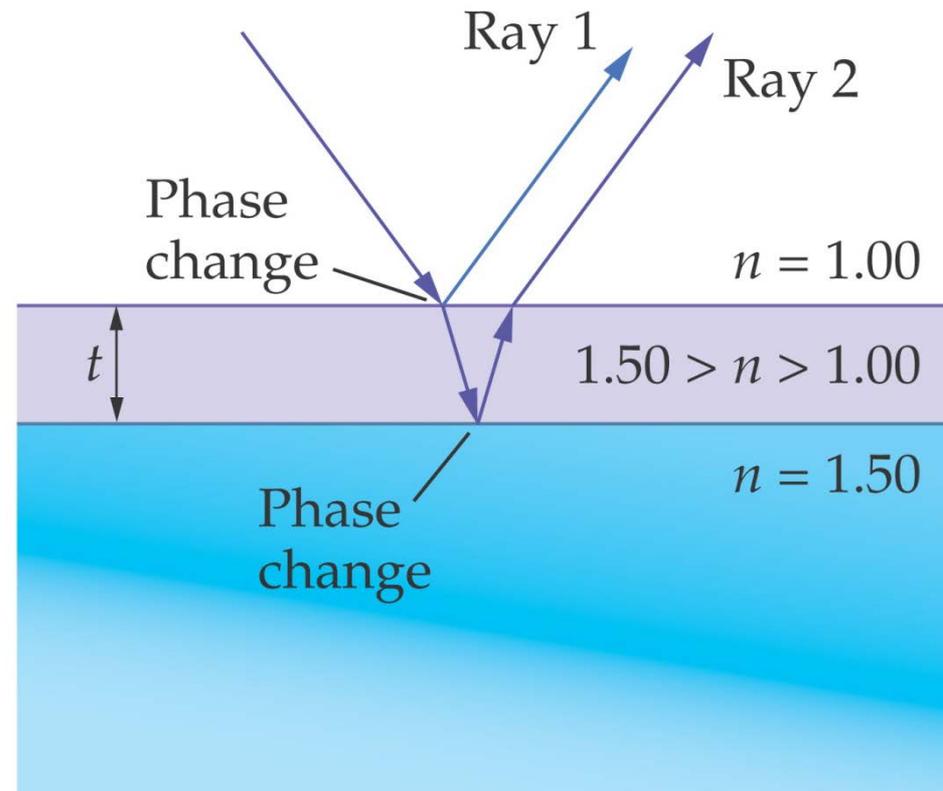
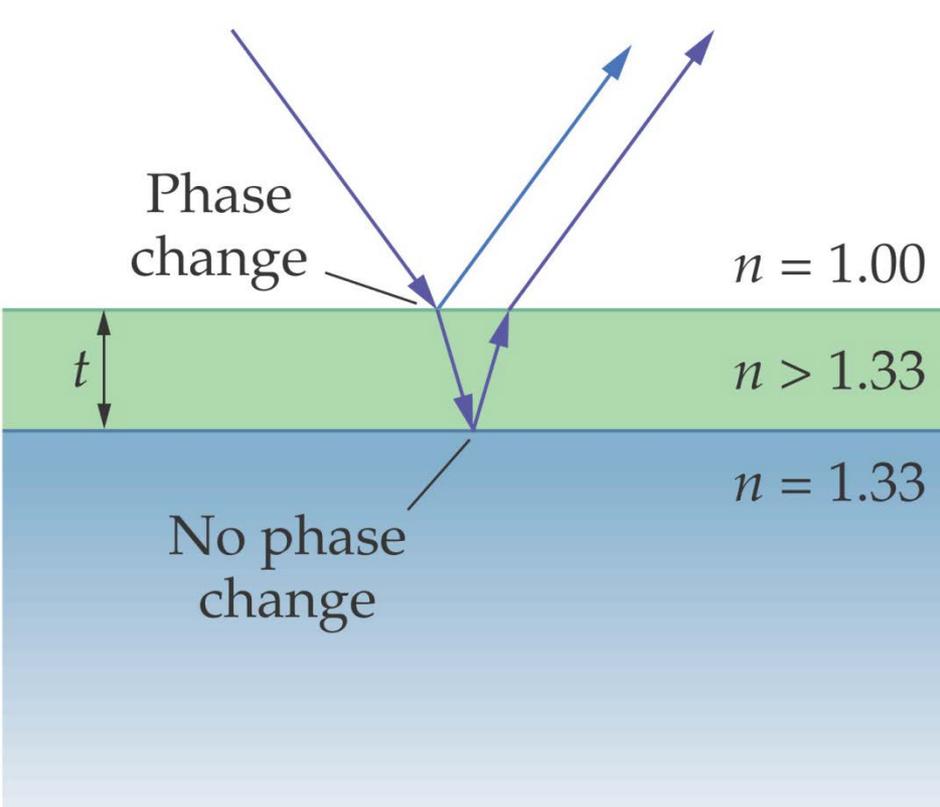
$$\frac{2nt}{\lambda_{\text{vacuum}}} - \frac{1}{2} = m \quad m = 0, 1, 2, \dots$$

The rainbow of colors we see is due to the different wavelengths of light.



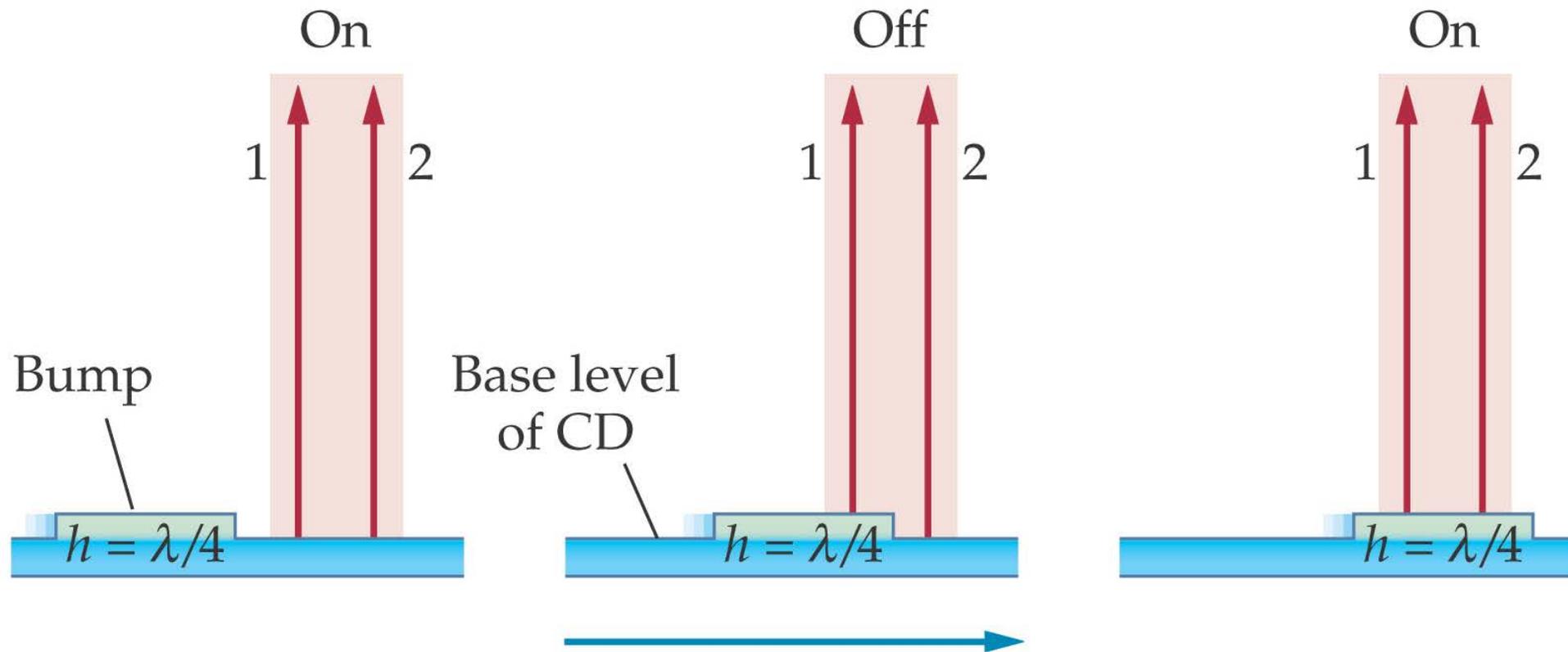
Interference in Reflected Waves

The phase changes upon reflection depend on the indices of refraction of the film and the surrounding media:



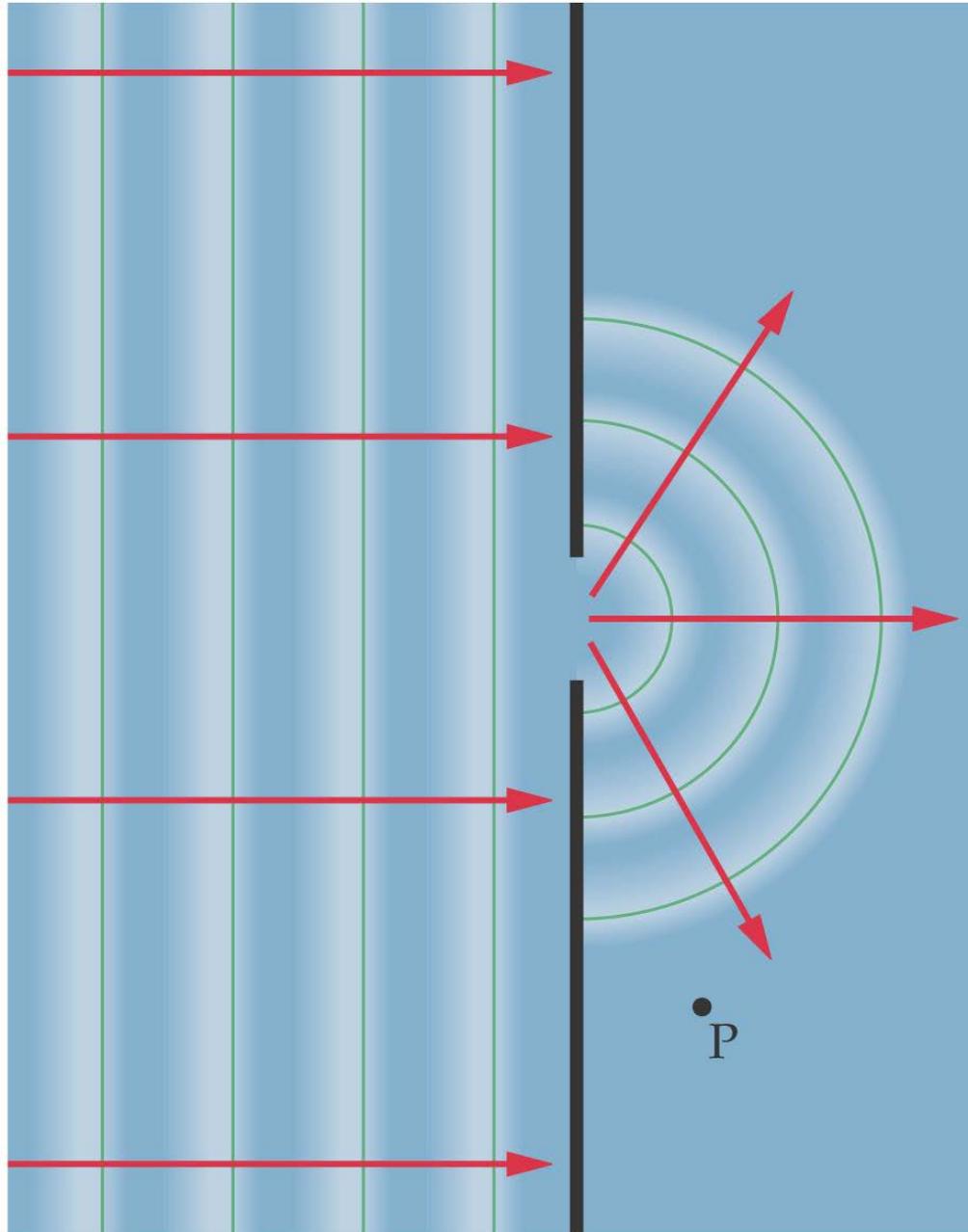
Interference in Reflected Waves

CDs (compact disks) depend on interference for their functioning. The signal is encoded as tiny bumps in the surface, and the reflected laser beam varies in intensity depending on whether it is reflecting from a bump or not.



Diffraction

Diffraction



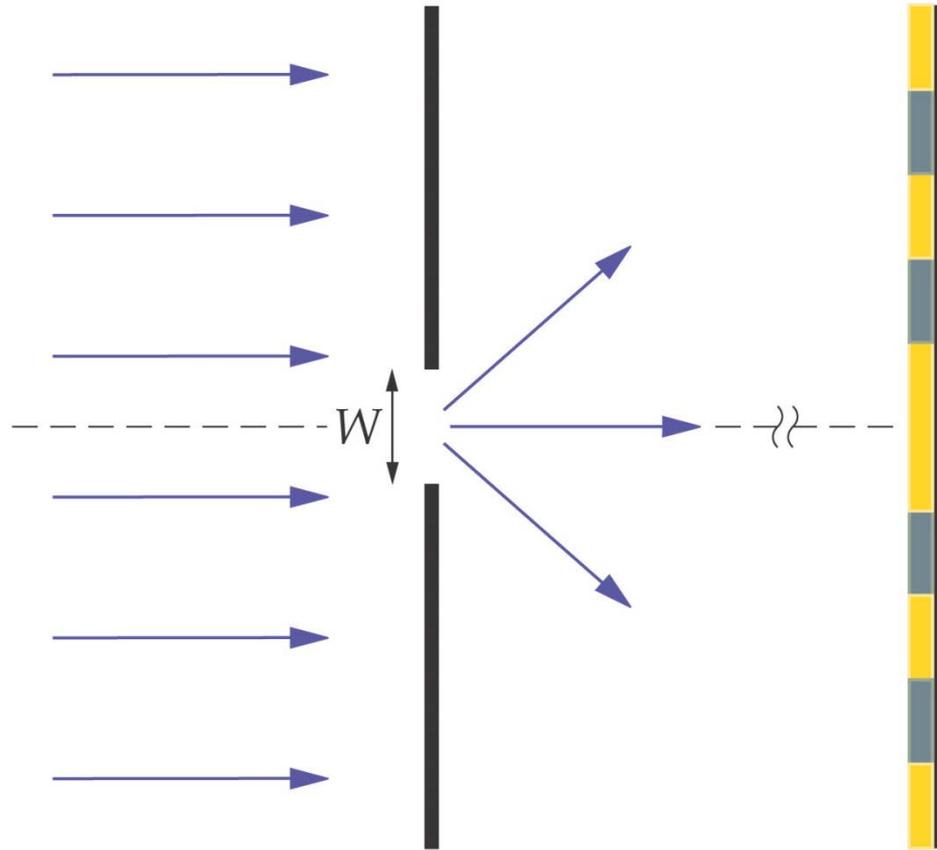
A wave passing through a small opening will diffract, as shown. This means that, after the opening, there are waves traveling in directions other than the direction of the original wave.

Diffraction

Diffraction is why we can hear sound even though we are not in a straight line from the source – sound waves will diffract around doors, corners, and other barriers.

The amount of diffraction depends on the wavelength, which is why we can hear around corners but not see around them.

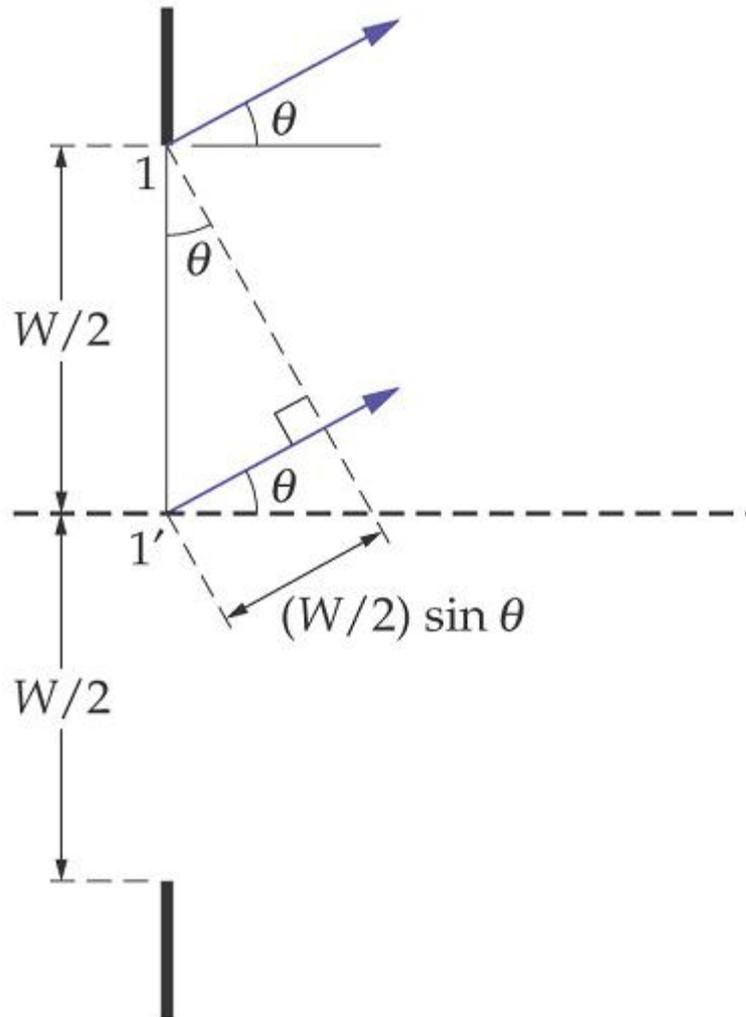
Diffraction



To investigate the diffraction of light, we consider what happens when light passes through a very narrow slit. As the figure indicates, what we see on the screen is a single-slit diffraction pattern.

Diffraction

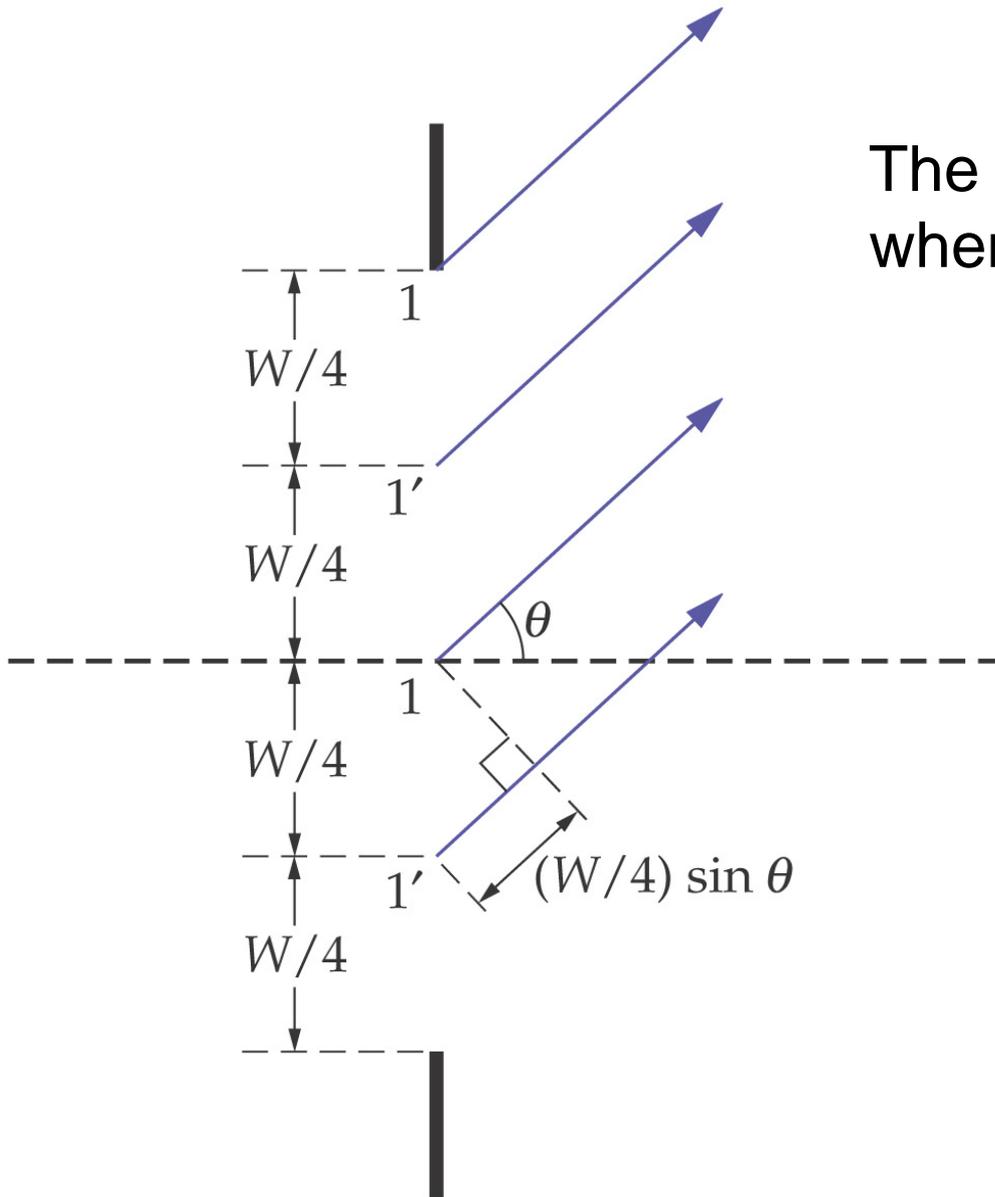
This pattern is due to the difference in path length from different parts of the opening.



The first dark fringe occurs when:

$$W \sin \theta = \lambda$$

Diffraction



The second dark fringe occurs when:

$$W \sin \theta = 2\lambda$$

Diffraction

In general, then, we have for the dark fringes in a single-slit interference pattern:

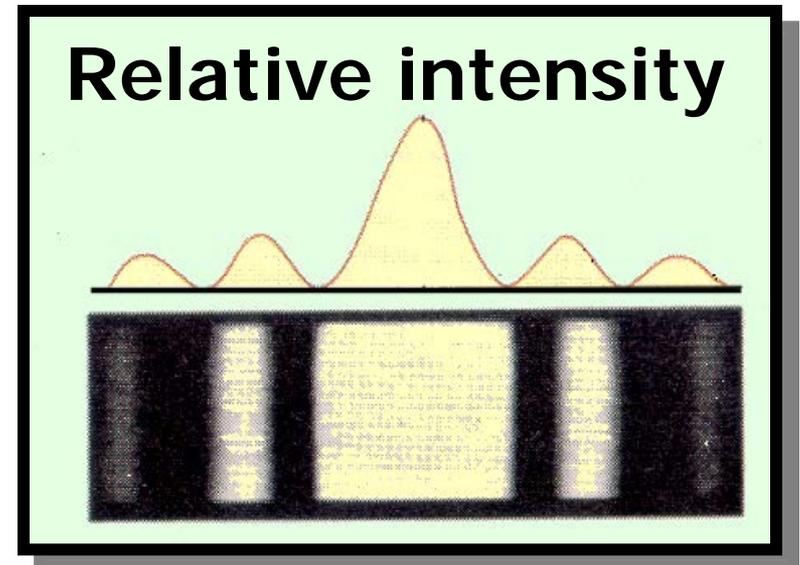
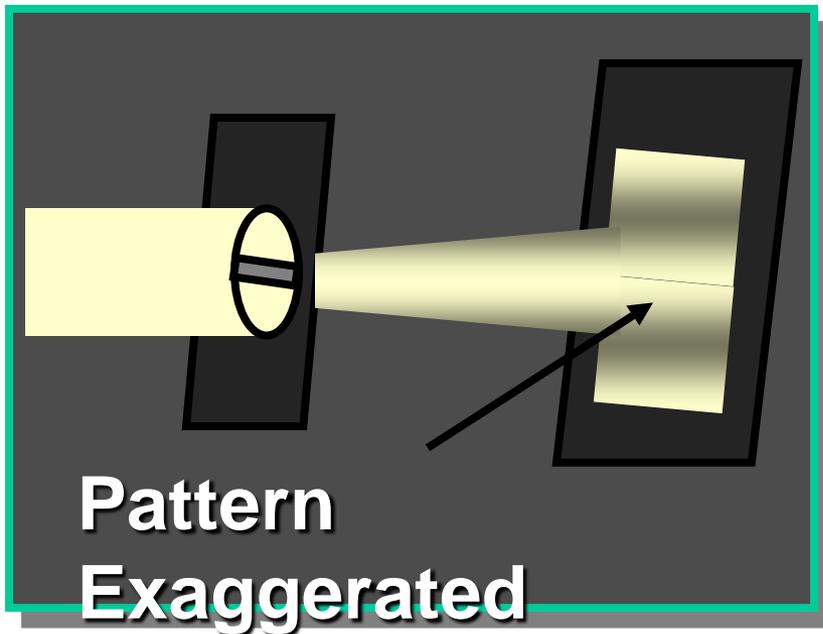
$$W \sin \theta = m\lambda \quad m = \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots$$

The positive and negative values of m account for the symmetry of the pattern around the center.

Diffraction fringes can be observed by holding your finger and thumb very close together (it helps not to be too farsighted!)

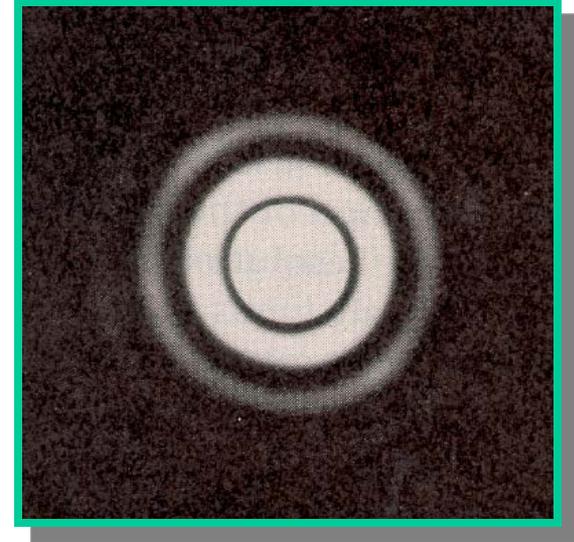
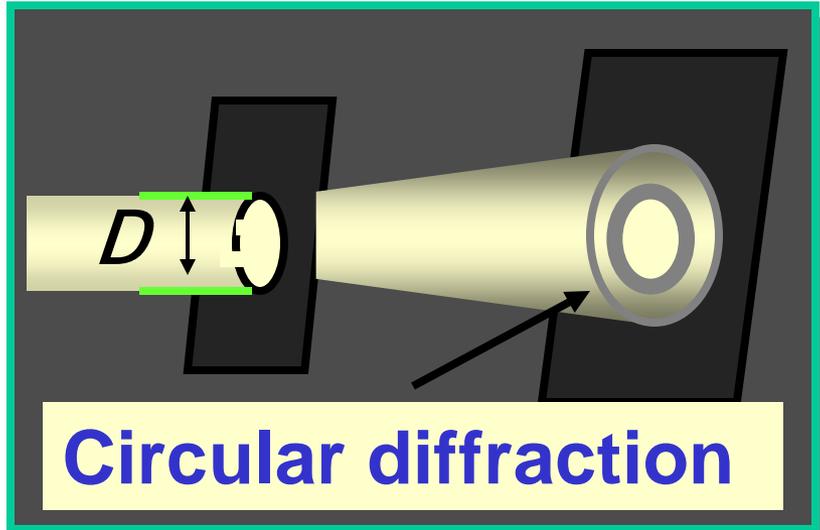
Interference From Single Slit

When monochromatic light strikes a single slit, diffraction from the edges produces an interference pattern as illustrated.



The interference results from the fact that not all paths of light travel the same distance — some arrive out of phase.

Diffraction for a Circular Opening

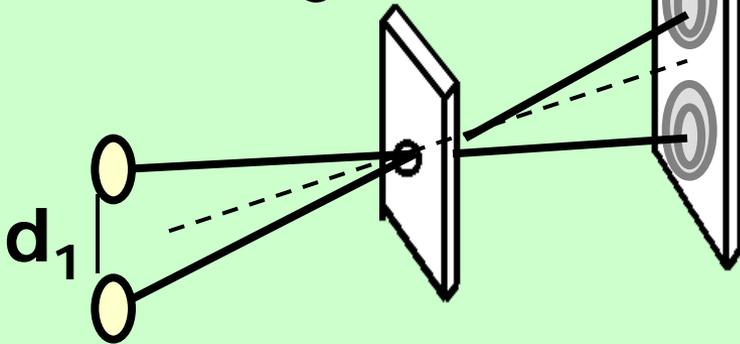


The diffraction of light passing through a circular opening produces circular interference fringes that often blur images. For optical instruments, the problem increases with larger diameters D .

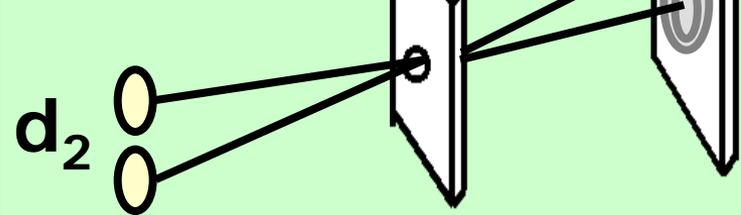
Resolution of Images

Consider light through a pinhole. As two objects get closer the interference fringes overlap, making it difficult to distinguish separate images.

Clear image of each object

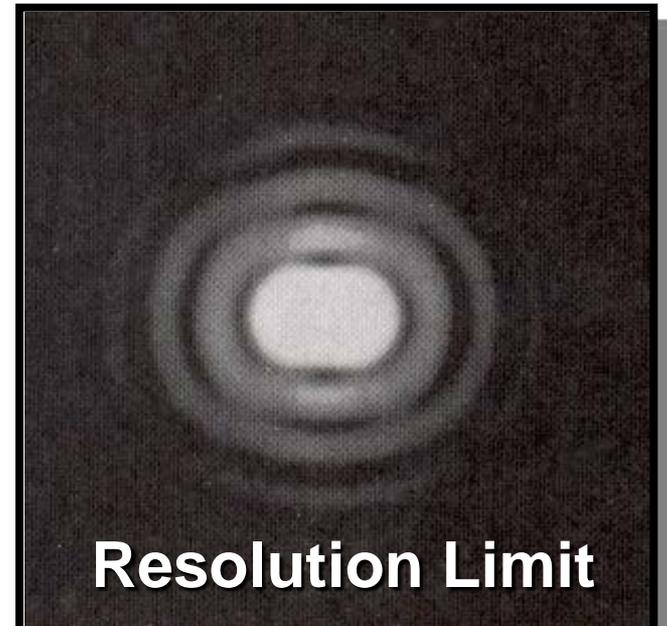
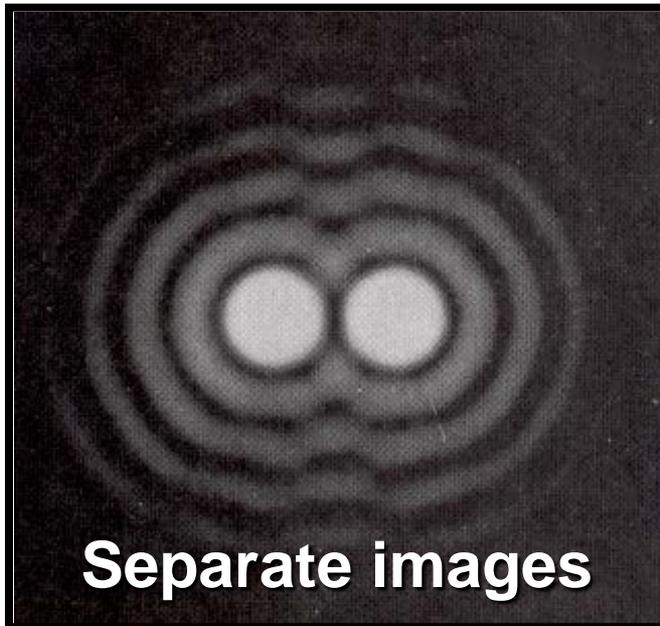
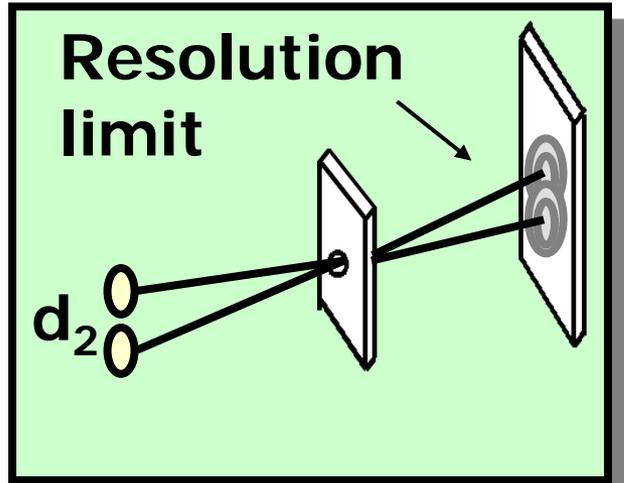


Separate images barely seen



Resolution Limit

Images are just resolved when central maximum of one pattern coincides with first dark fringe of the other pattern.



Resolution Limit

Diffraction through a small circular aperture results in a circular pattern of fringes. This limits our ability to distinguish one object from another when they are very close.

The location of the first dark fringe determines the size of the central spot:

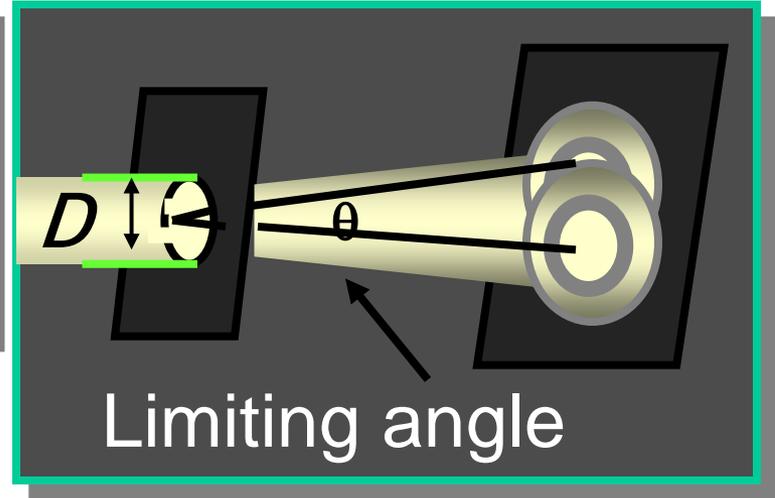
$$\sin \theta = 1.22 \frac{\lambda}{D}$$

Rayleigh's criterion relates the size of the central spot to the limit at which two objects can be distinguished:

The size of the spot increases with wavelength, and decreases with the size of the aperture.

Resolving Power of Instruments

The resolving power of an instrument is a measure of its ability to produce well-defined separate images.

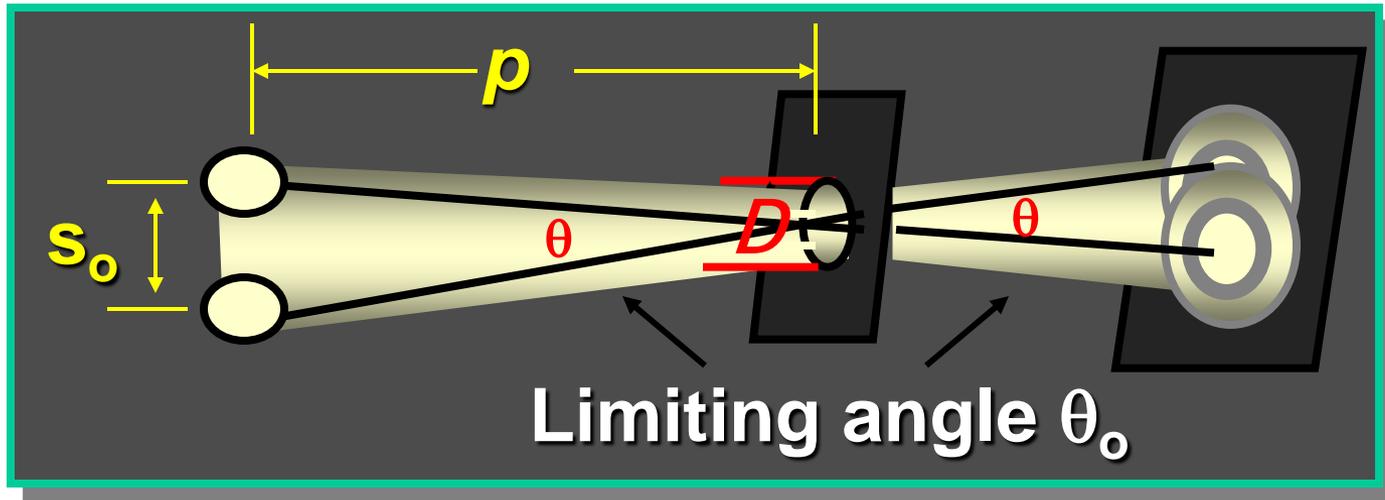


For small angles, $\sin \theta \cong \theta$, and the limiting angle of resolution for a circular opening is:

Limiting angle of resolution:

$$\theta_0 = 1.22 \frac{\lambda}{D}$$

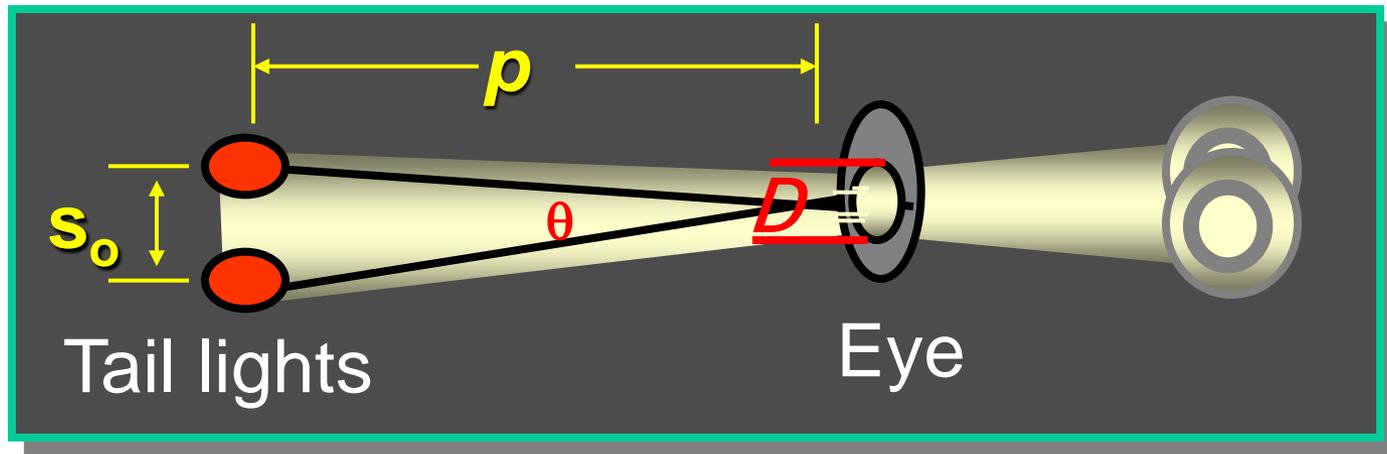
Resolution and Distance



**Limiting Angle
of Resolution:**

$$\theta_0 = 1.22 \frac{\lambda}{D} = \frac{s_0}{p}$$

Example 4: The tail lights ($\lambda = 632 \text{ nm}$) of an auto are 1.2 m apart and the pupil of the eye is around 2 mm in diameter. How far away can the tail lights be resolved as separate images?



$$\theta_0 = 1.22 \frac{\lambda}{D} = \frac{s_0}{p}$$

$$p = \frac{s_0 D}{1.22 \lambda}$$

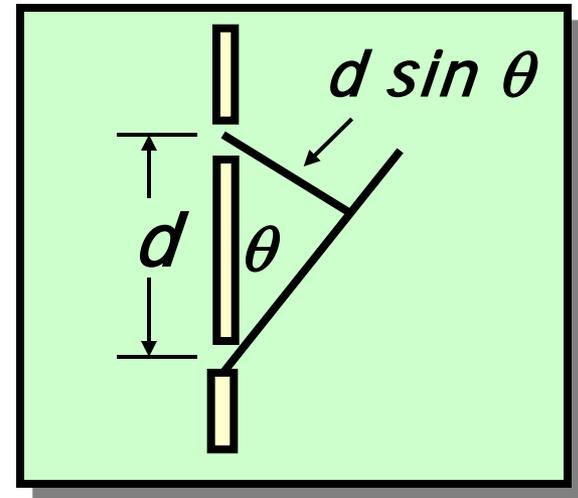
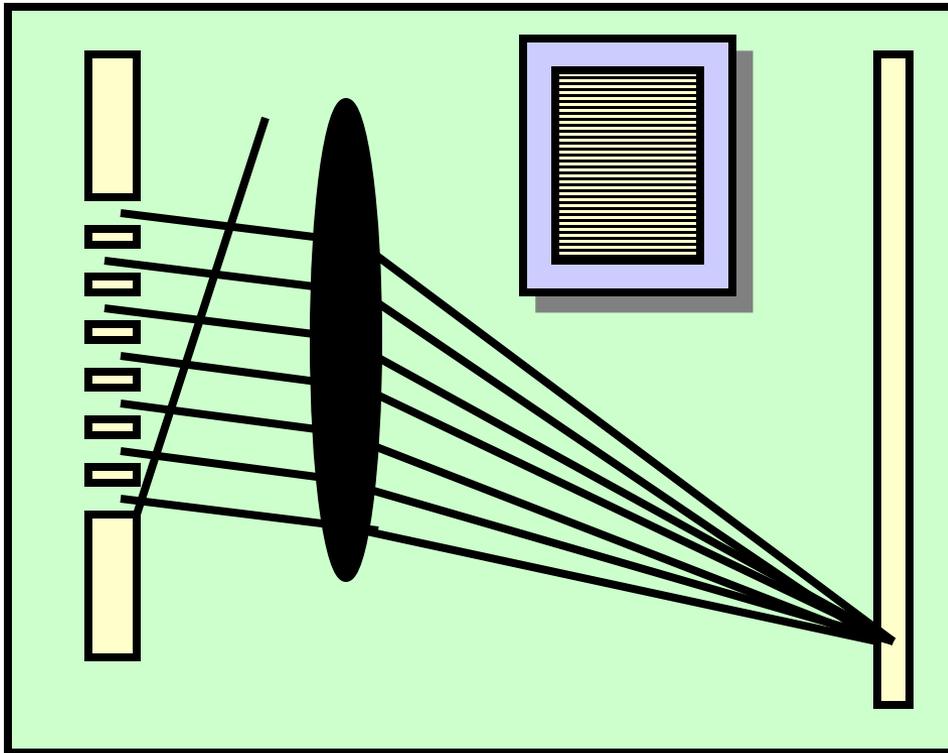
$$p = \frac{(1.2 \text{ m})(0.002 \text{ m})}{1.22(632 \times 10^{-9} \text{ m})}$$

$$p = 3.11 \text{ km}$$

Diffraction gratings

The Diffraction Grating

A diffraction grating consists of thousands of parallel slits etched on glass so that brighter and sharper patterns can be observed than with Young's experiment. Equation is similar.



$$d \sin \theta = n\lambda$$

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

The Grating Equation

The grating equation:

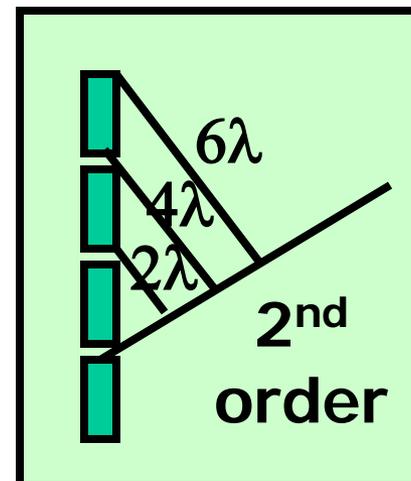
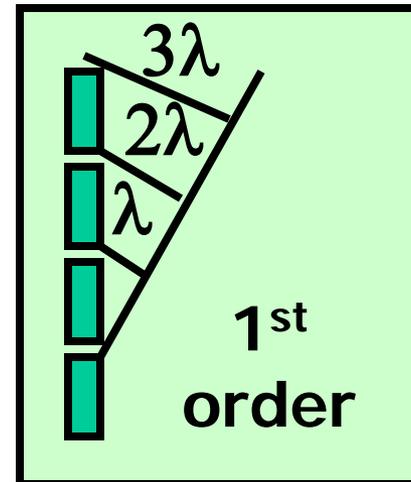
$$d \sin \theta = n\lambda \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

d = slit width (spacing)

λ = wavelength of light

θ = angular deviation

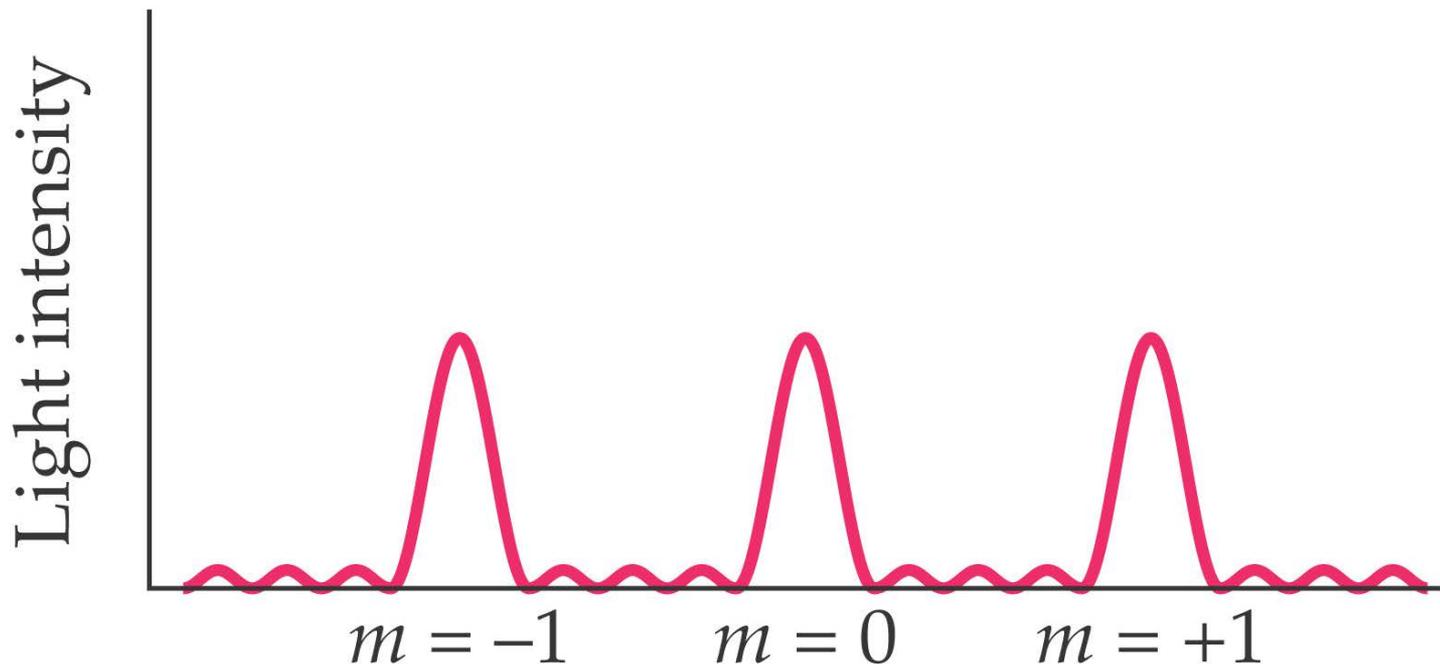
n = order of fringe



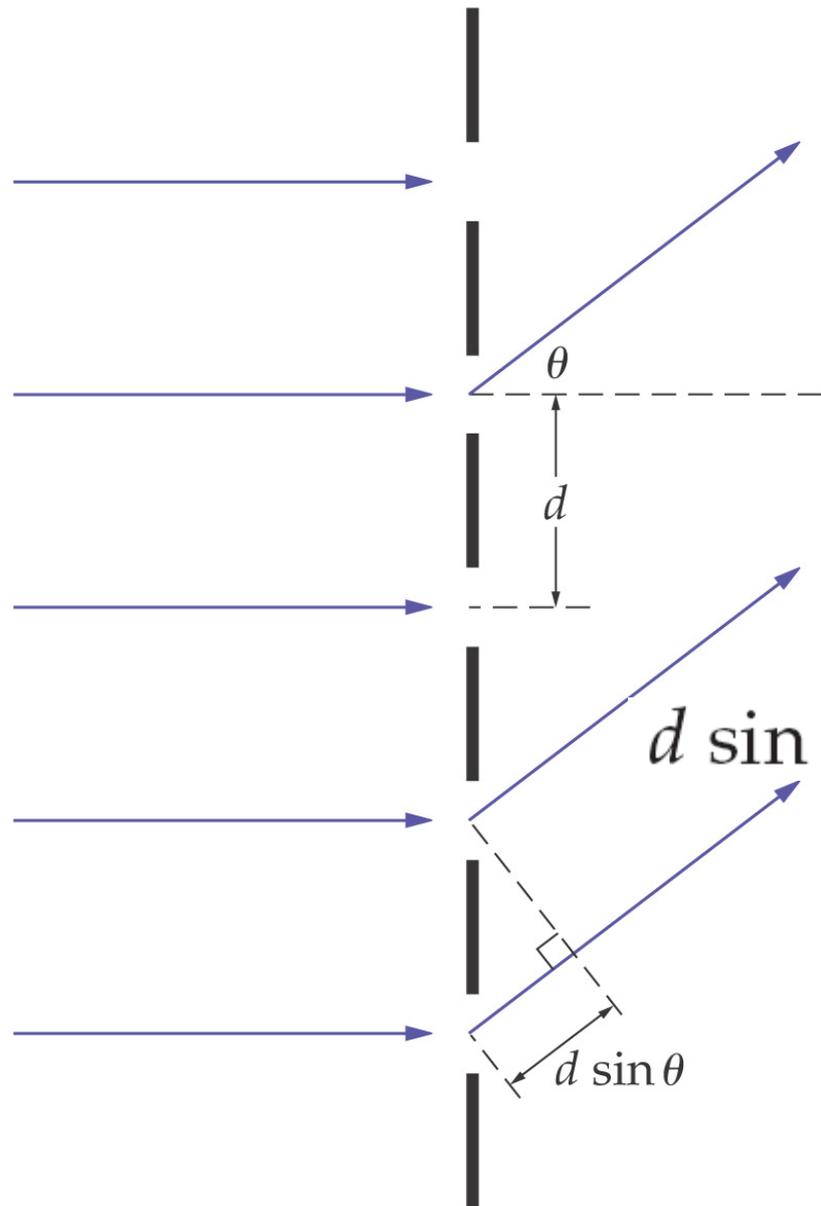
Diffraction Gratings

A system with a large number of slits is called a diffraction grating.

As the number of slits grows, the peaks become narrower and more intense. Here is the diffraction pattern for five slits:



Diffraction Gratings



The positions of the peaks are different for different wavelengths of light.

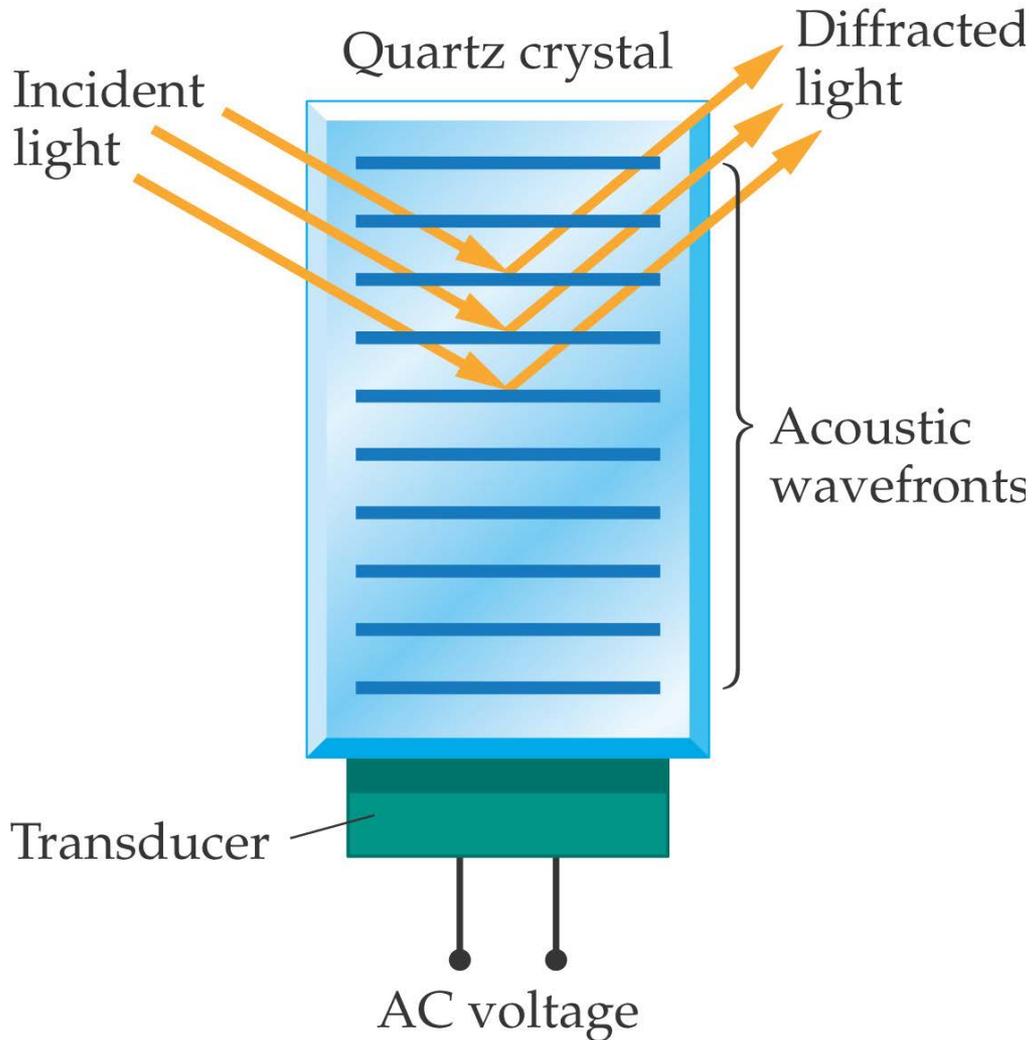
The condition for constructive interference in a diffraction grating:

$$d \sin \theta = m\lambda$$

$$m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

Diffraction Gratings

There are many ways to construct diffraction gratings.

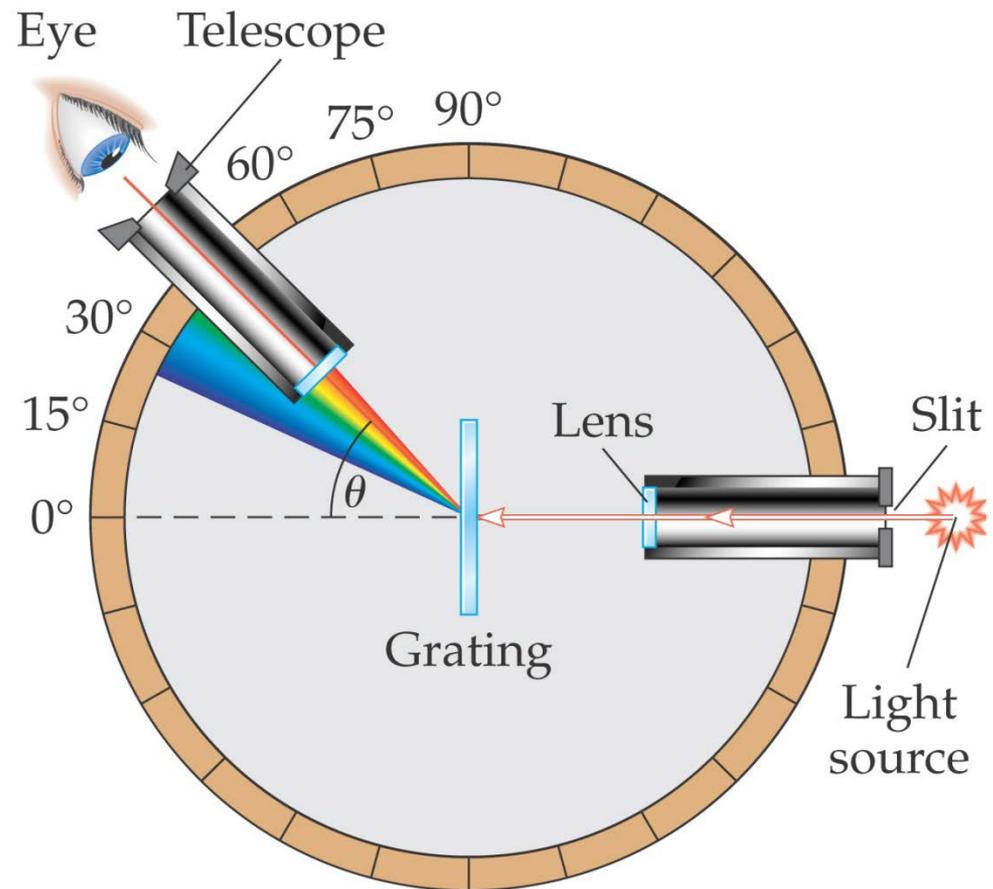


This acoustic-optic modulator diffracts light from acoustic wavefronts in the crystal. Turning the sound off eliminates the signal; changing the sound frequency modifies it.

Diffraction Gratings

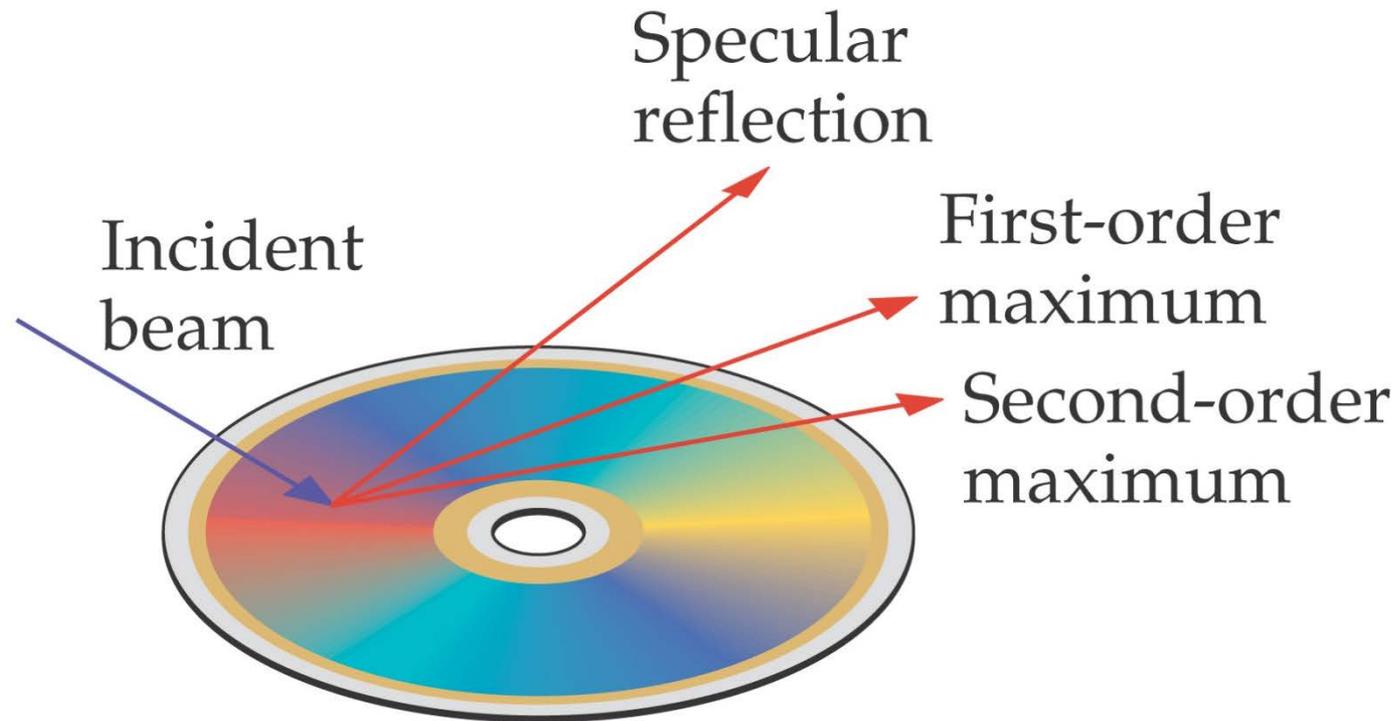
X-ray diffraction is used to determine crystal structure – the spacing between crystal planes is close enough to the wavelength of the X-rays to allow diffraction patterns to be seen.

A grating spectroscope allows precise determination of wavelength:



Diffraction Gratings

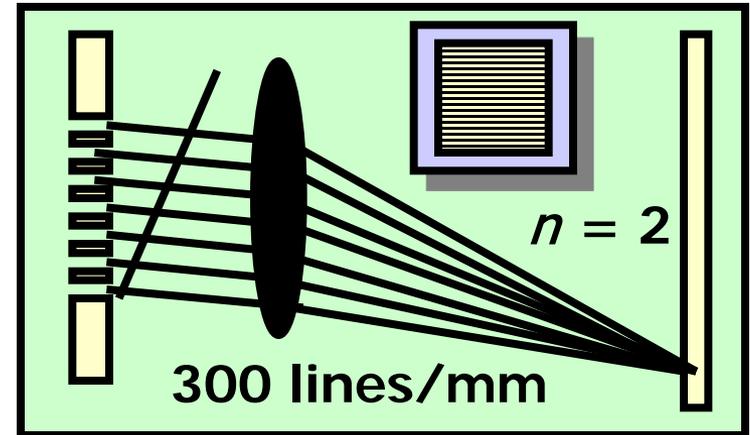
Diffraction can also be observed upon reflection from narrowly-spaced reflective grooves; the most familiar example is the recorded side of a CD. Some insect wings also display reflective diffraction, especially butterfly wings.



Example 2: Light (600 nm) strikes a grating ruled with 300 lines/mm. What is the angular deviation of the 2nd order bright fringe?

To find slit separation, we take reciprocal of 300 lines/mm:

Lines/mm \rightarrow mm/line



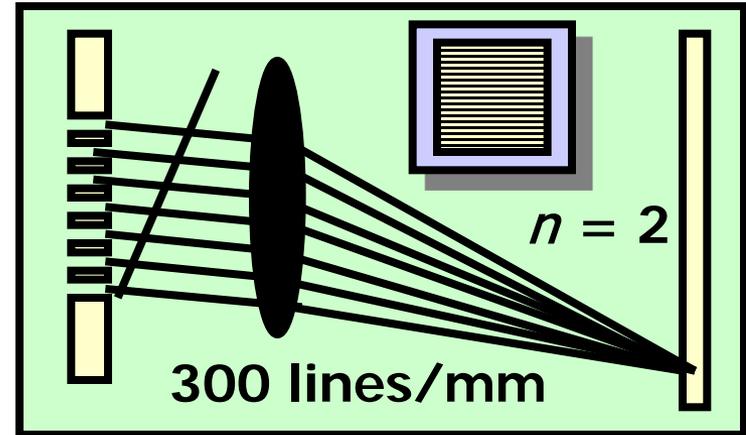
$$d = \frac{1}{300 \text{ lines/mm}} = 0.00333 \text{ mm/line}$$

$$d = 0.00333 \frac{\cancel{\text{mm}}}{\text{line}} \left(\frac{10^{-3} \text{ m}}{\cancel{1 \text{ mm}}} \right)$$

$$d = 3 \times 10^{-6} \text{ m}$$

Example (Cont.) 2: A grating is ruled with 300 lines/mm. What is the angular deviation of the 2nd order bright fringe?

$$\lambda = 600 \text{ nm}$$
$$d = 3 \times 10^{-6} \text{ m}$$



$$\sin \theta = \frac{2\lambda}{d} = \frac{2(600 \times 10^{-9} \text{ m})}{3.33 \times 10^{-6}}$$

$$\sin \theta = 0.360$$

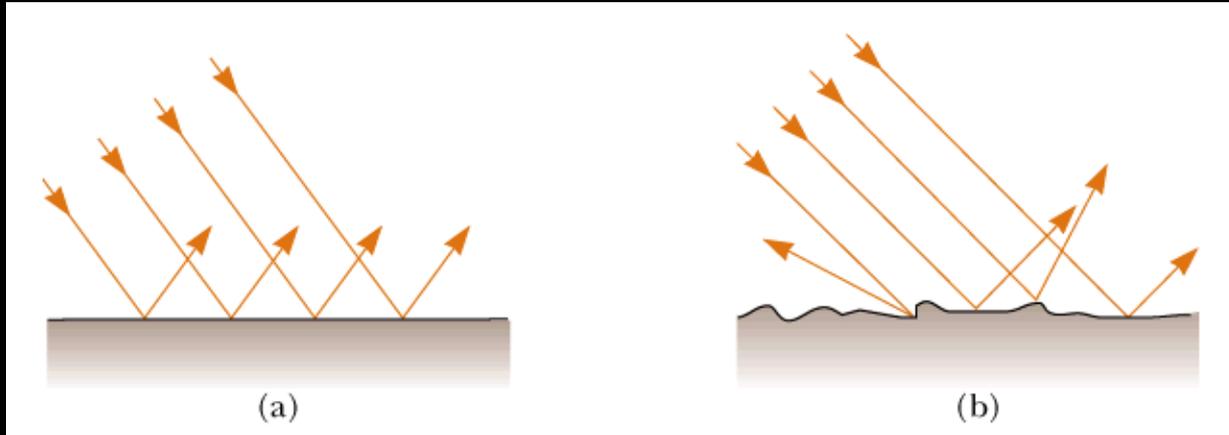
Angular deviation of second order fringe is:

$$\theta_2 = 21.1^\circ$$

Nature of Light and Laws of Geometric Optics

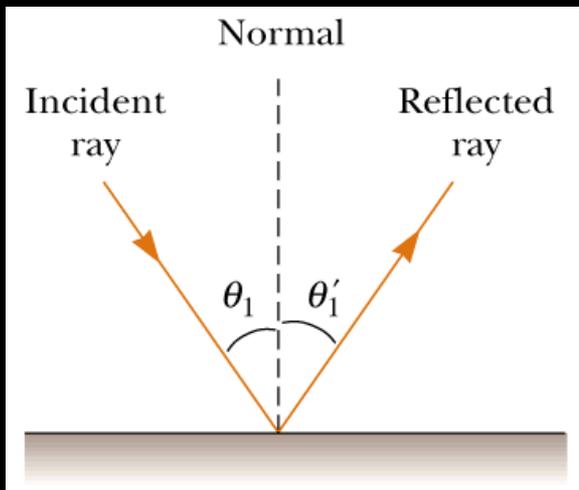
- The nature of light
- Reflection
- Refraction
 - Index of refraction
- Huygens' Principle
- Dispersion and Prisms
- Total Internal Reflection

Reflection



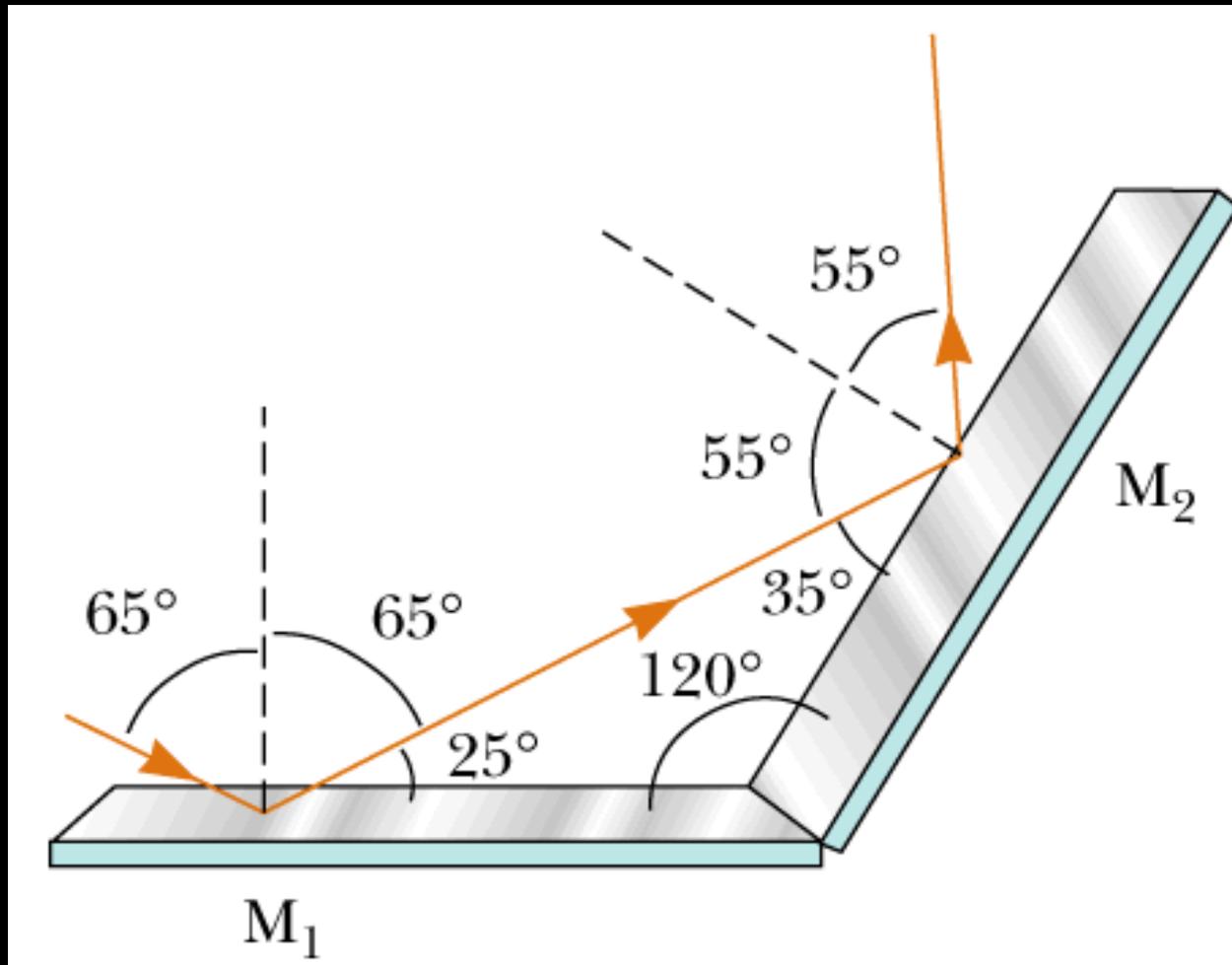
Specular Reflection

Diffuse Reflection

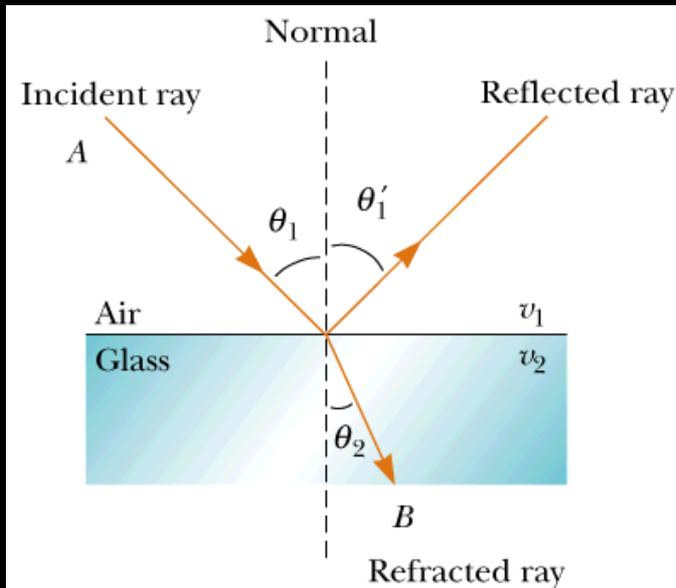


$$\theta_1' = \theta_1$$

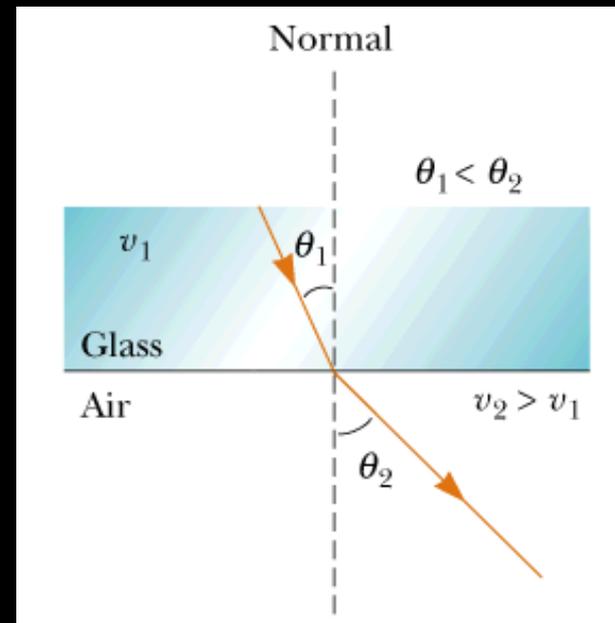
Double Reflection



Refraction



$$\frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1} = \frac{v_2}{v_1} = \text{constant}$$



Index of Refraction

$$n \equiv \frac{\text{Speed of light in vacuum}}{\text{Speed of light in medium}} = \frac{c}{v}$$

Going from one medium to another, the frequency of light does not change but its wavelength does.

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{c/n_1}{c/n_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

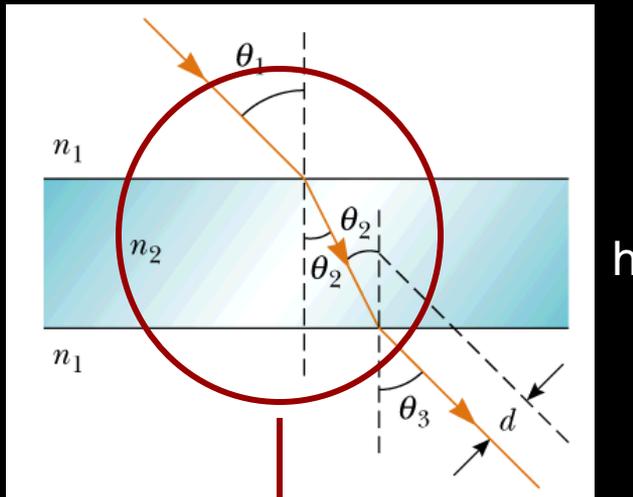
If one of the medium's is vacuum ($n=1$),

$$n = \frac{\lambda}{\lambda_n}$$

Snell's Law of Refraction

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

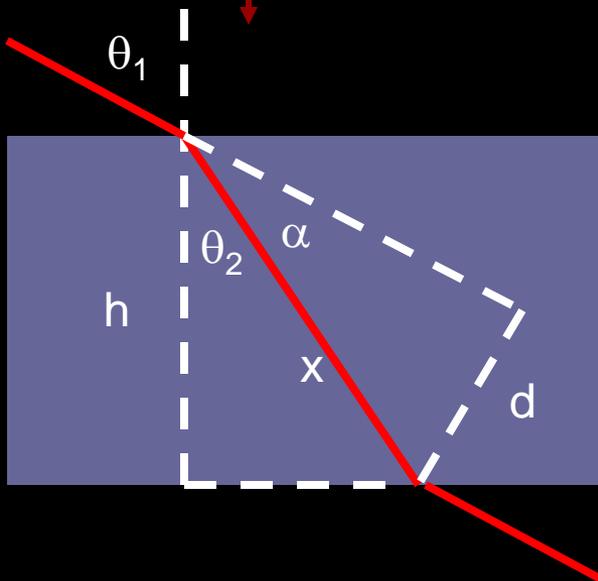
Light Propagation Through a Slab



$$\sin \theta_2 = \frac{n_1}{n_2} \sin \theta_1$$

$$\sin \theta_3 = \frac{n_2}{n_1} \sin \theta_2$$

$$\sin \theta_3 = \frac{n_2}{n_1} \frac{n_1}{n_2} \sin \theta_1 = \sin \theta_1$$



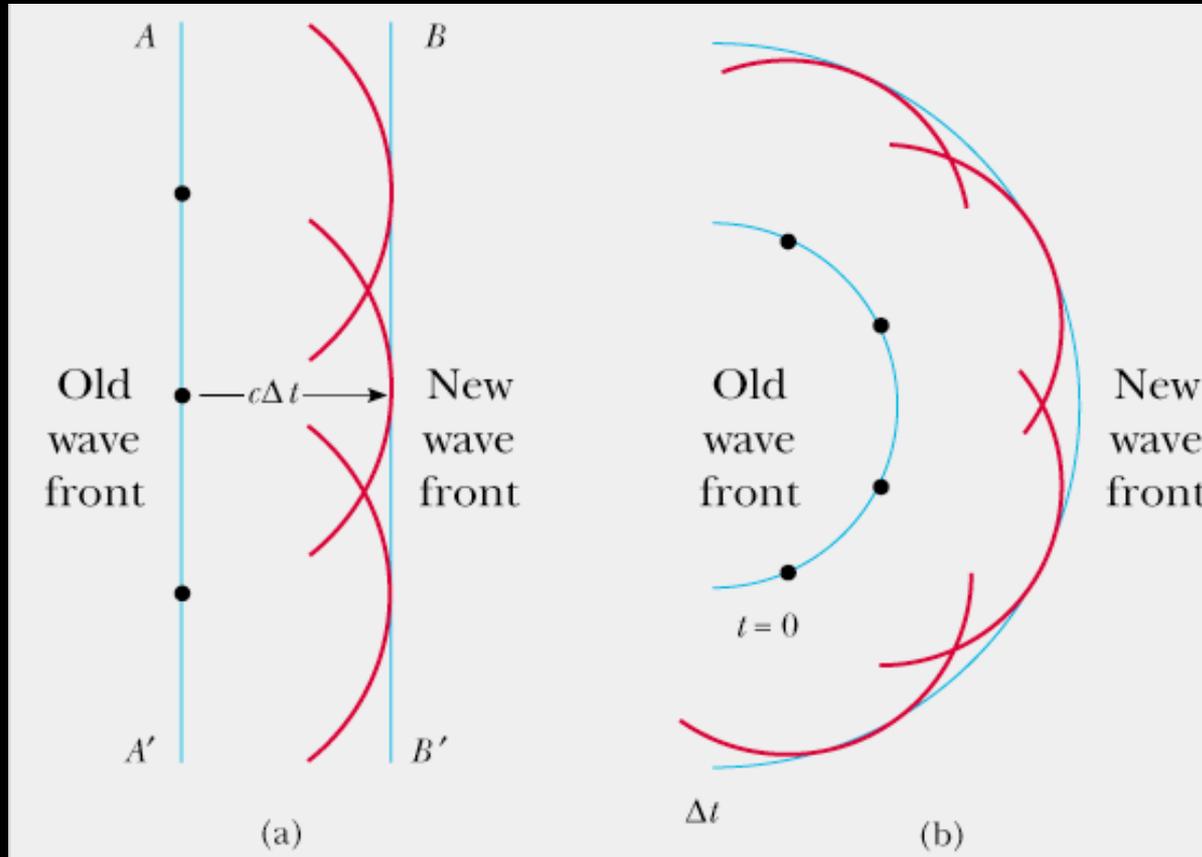
$$x = \frac{h}{\cos \theta_2}$$

$$d = x \sin \alpha$$

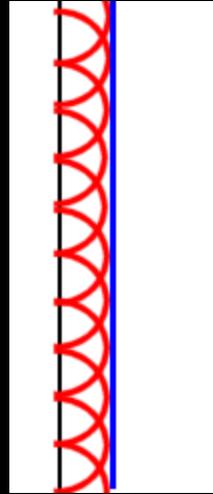
$$\alpha = \theta_1 - \theta_2$$

$$d = \frac{h}{\cos \theta_2} \sin(\theta_1 - \theta_2)$$

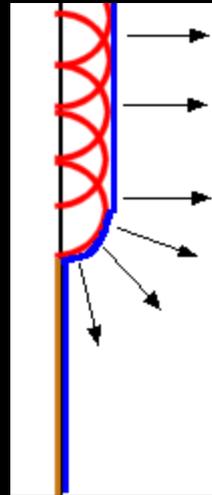
Huygens' Principle



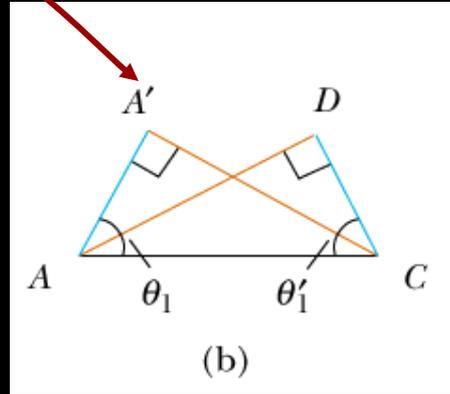
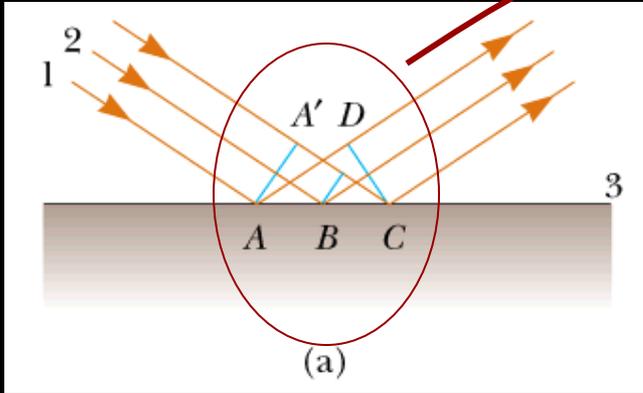
Huygen's principle & Plane waves



Huygen's principle & diffraction



Huygens' Principle Applied to Reflection and Refraction

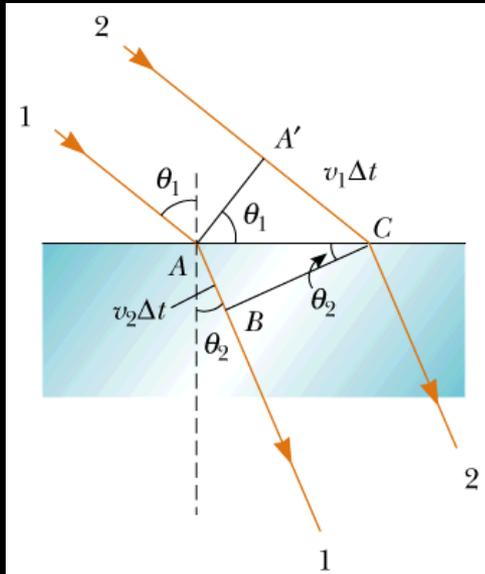


$$\sin \theta_1 = \frac{A'C}{AC}$$

$$\sin \theta'_1 = \frac{AD}{AC}$$

$$A'C = AD$$

$$\theta_1 = \theta'_1$$



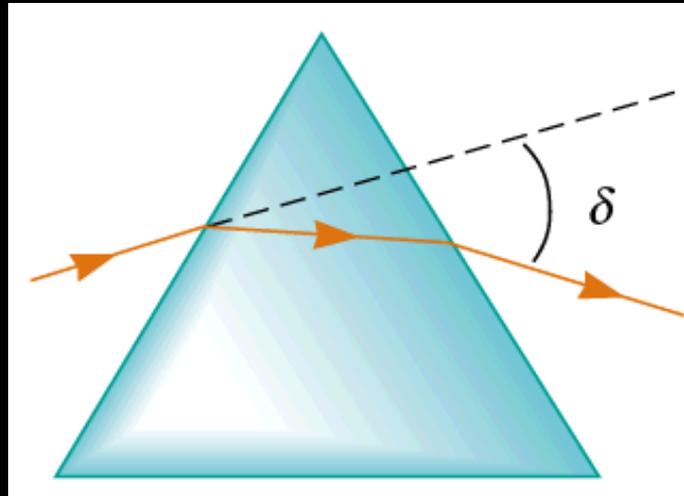
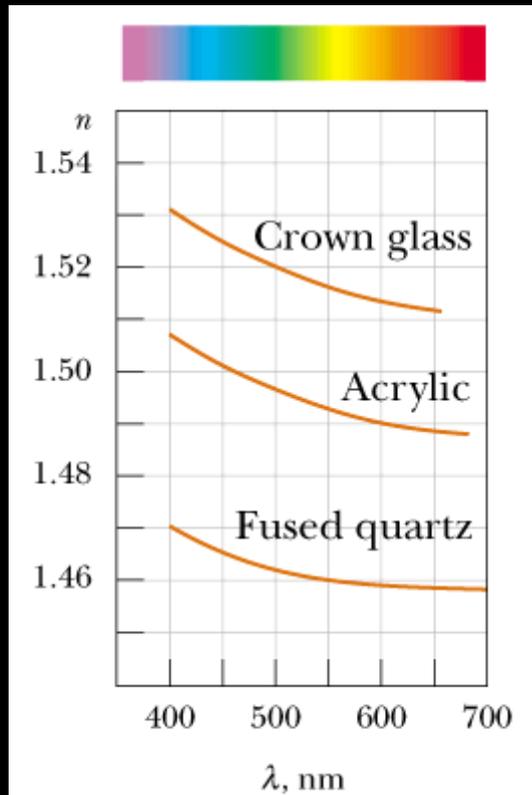
$$\sin \theta_1 = \frac{v_1 \Delta t}{AC}$$

$$\sin \theta_2 = \frac{v_2 \Delta t}{AC}$$

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{c/n_1}{c/n_2}$$

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

Dispersion and Prisms

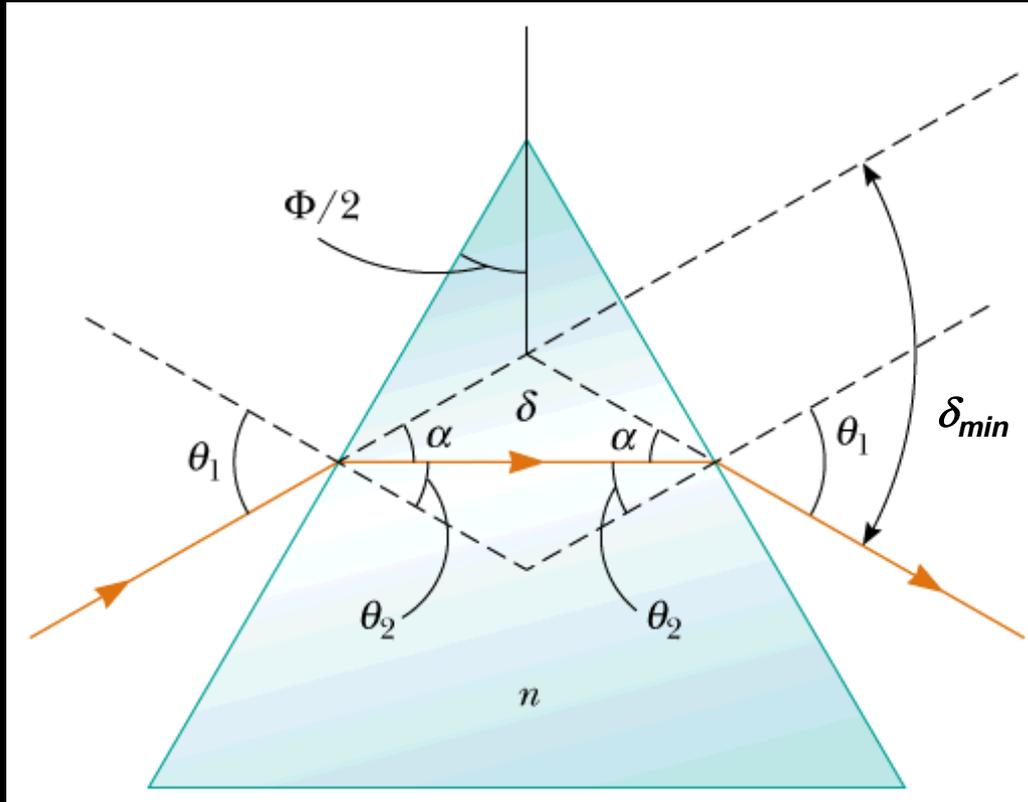


angle of deviation

$$n = n(\lambda)$$



Measuring n Using a Prism



$$\theta_2 = \frac{\Phi}{2}$$

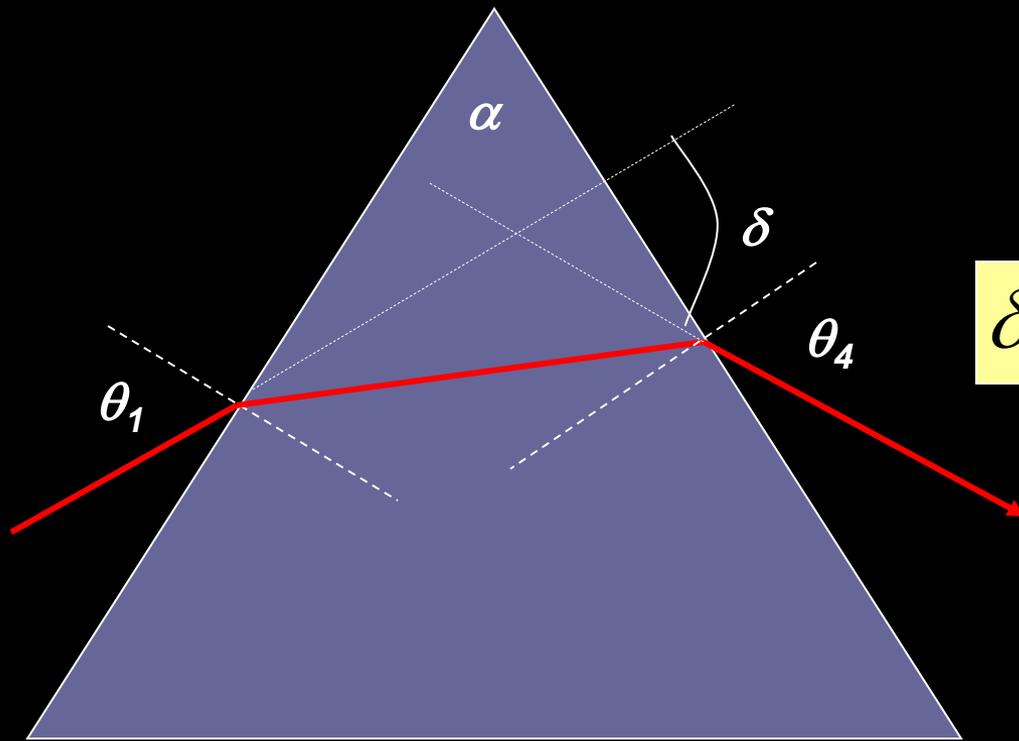
$$\theta_1 = \theta_2 + \alpha = \frac{\Phi}{2} + \frac{\delta_{min}}{2}$$

$$\sin \theta_1 = n \sin \theta_2$$

$$\sin \left(\frac{\Phi + \delta_{min}}{2} \right) = n \sin \left(\frac{\Phi}{2} \right)$$

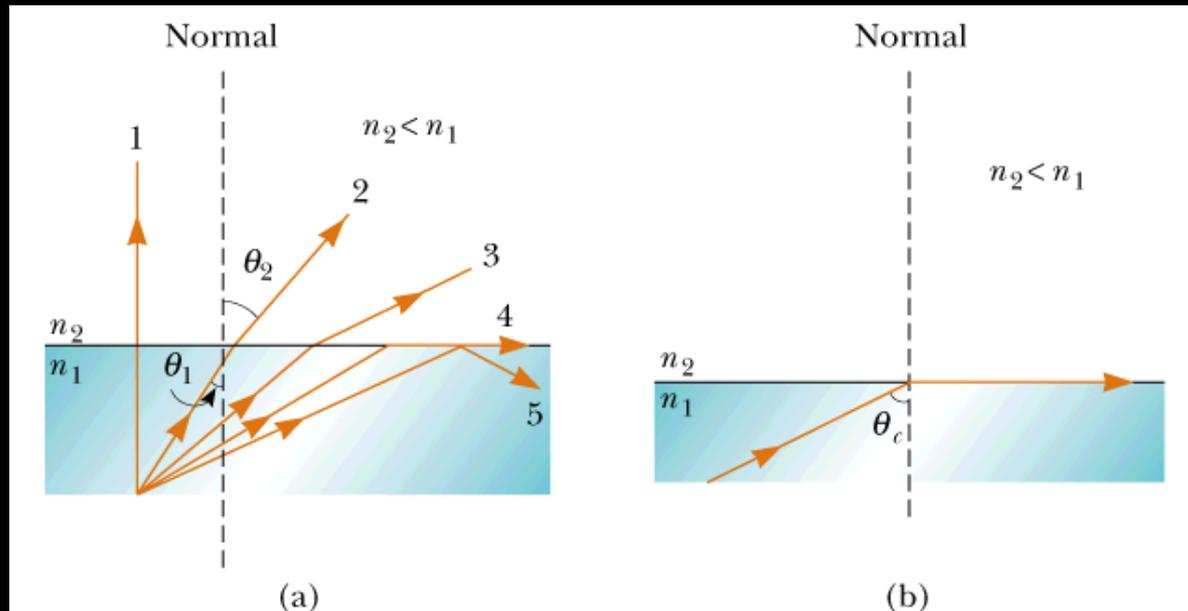
$$n = \frac{\sin \left(\frac{\Phi + \delta_{min}}{2} \right)}{\sin \left(\frac{\Phi}{2} \right)}$$

Angle of Deviation



$$\delta = \theta_1 + \theta_4 - \alpha$$

Total Internal Reflection



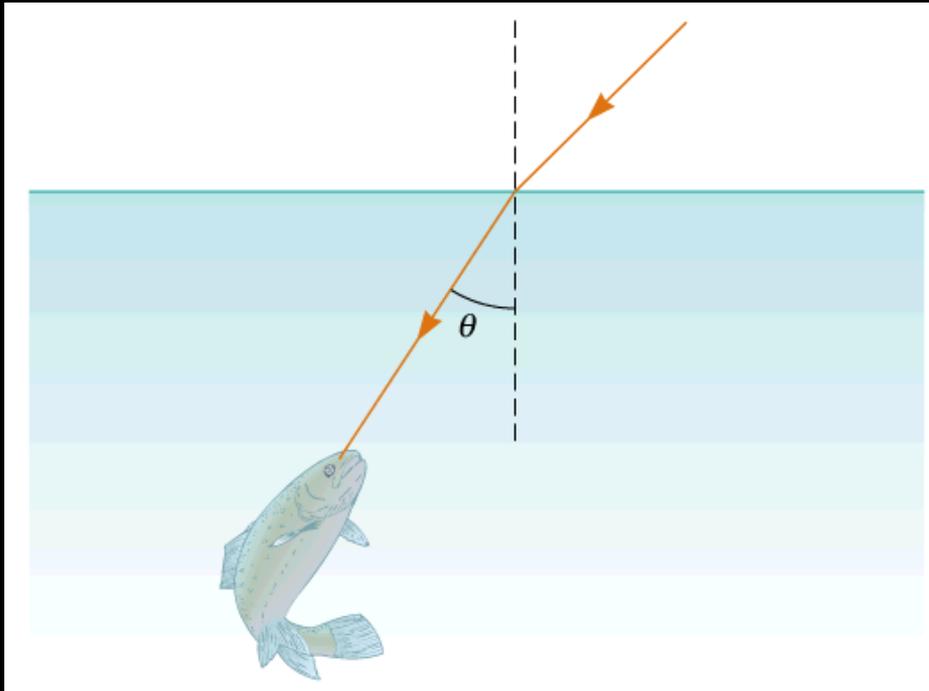
Critical Angle, θ_c

$$n_1 \sin \theta_c = n_2 \sin 90^\circ$$

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1}$$

Only for $n_1 > n_2$

View From a Fish Eye



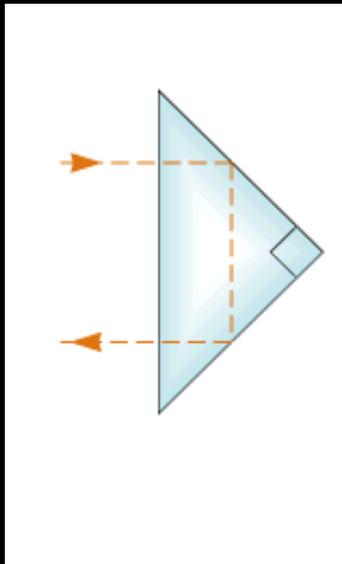
$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1} = \frac{1}{1.33} = 0.752$$
$$\theta_c = 48.8^\circ$$

For $\theta < \theta_c$: The fish sees above the water

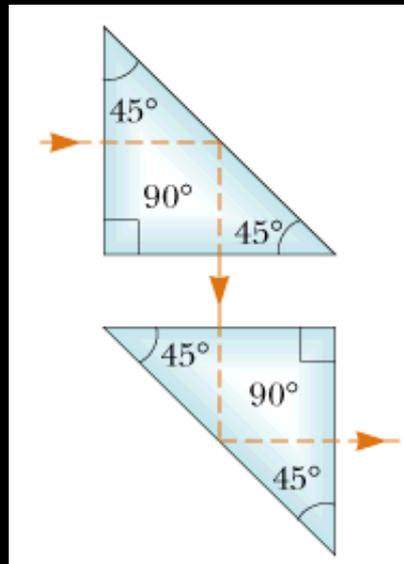
For $\theta = \theta_c$: The fish sees the shoreline

For $\theta > \theta_c$: The fish sees the pond bottom

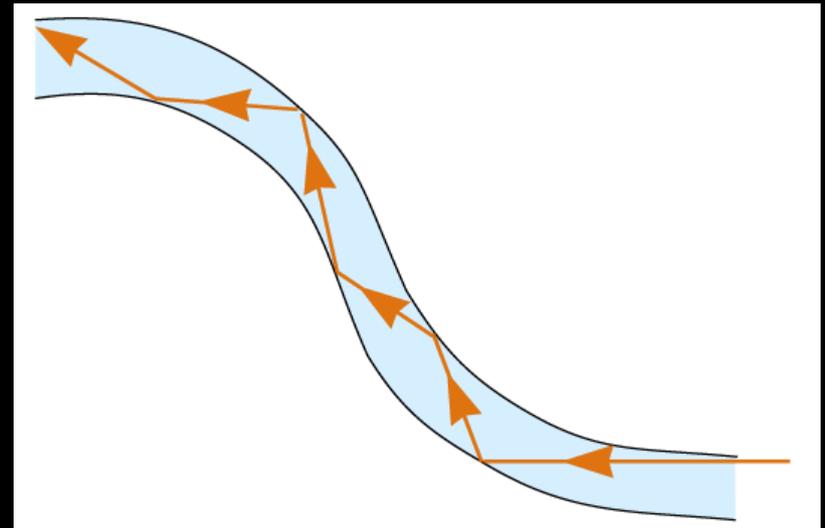
Applications of TIR



Retroreflector

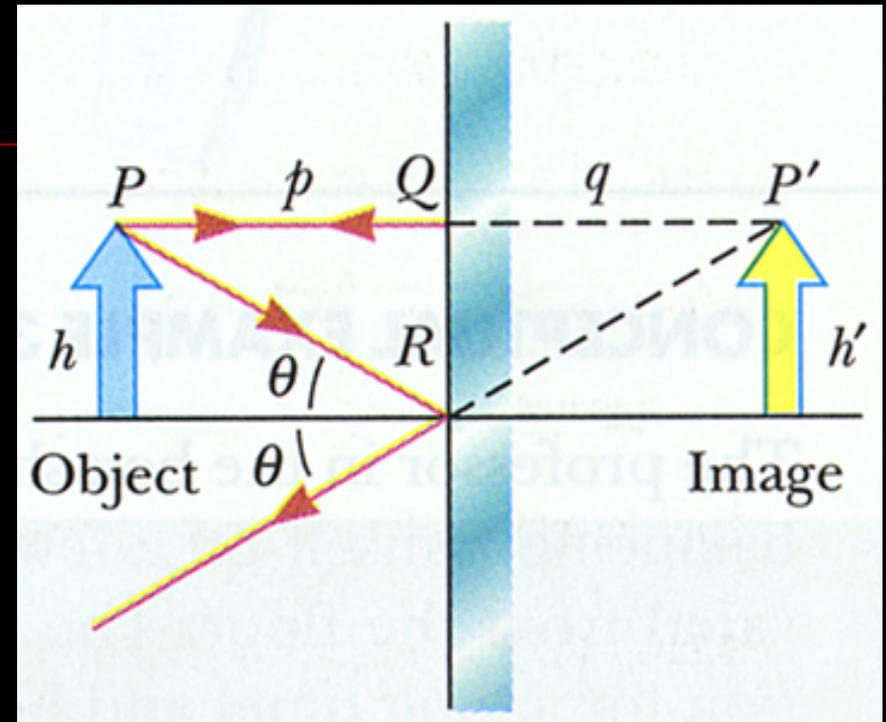
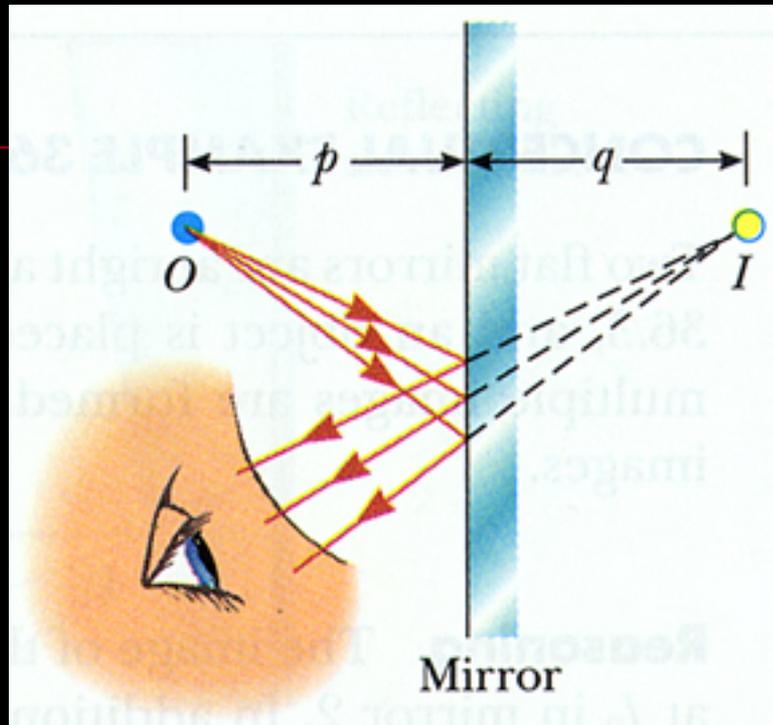


Periscope



Fiber Optic Cable

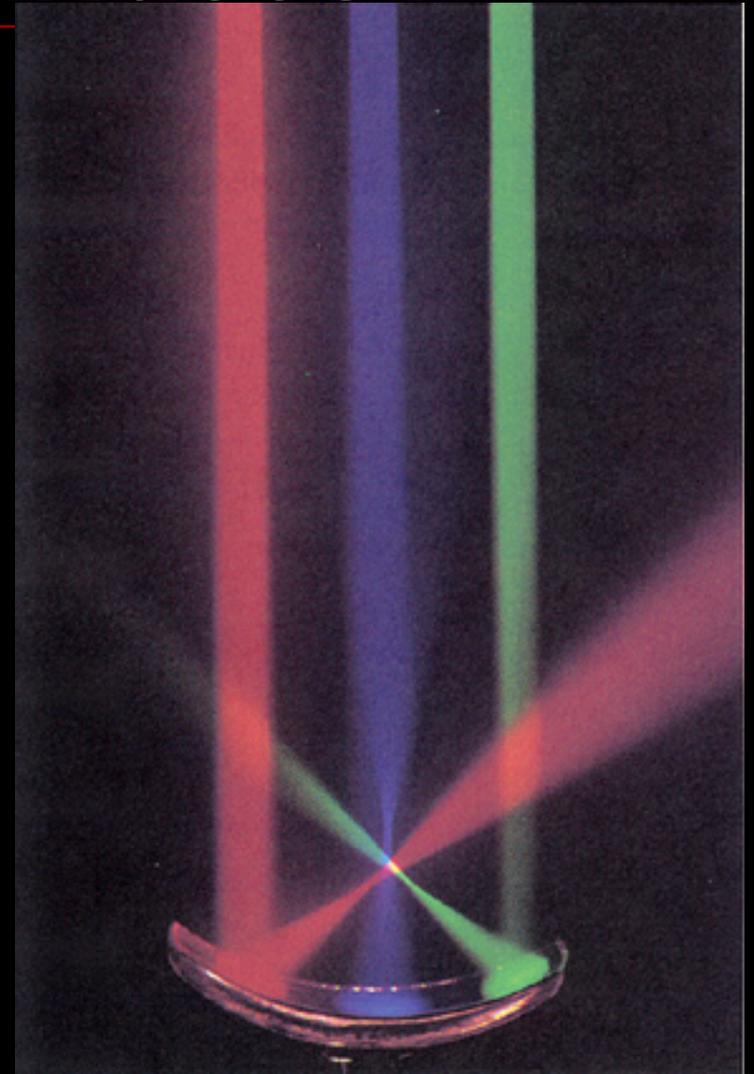
Plane Mirrors



- Illustrating formation of an image by a plane mirror.
- Since QR is common to both triangle PQR and triangle P'QR and θ is the same angle at vertex P and vertex P' the right triangles are congruent, and $p = -q$, also $h = h'$ or the lateral magnification (M) is +1.
- The image is upright, the same size and left-right reversed.

Why spherical surfaces?

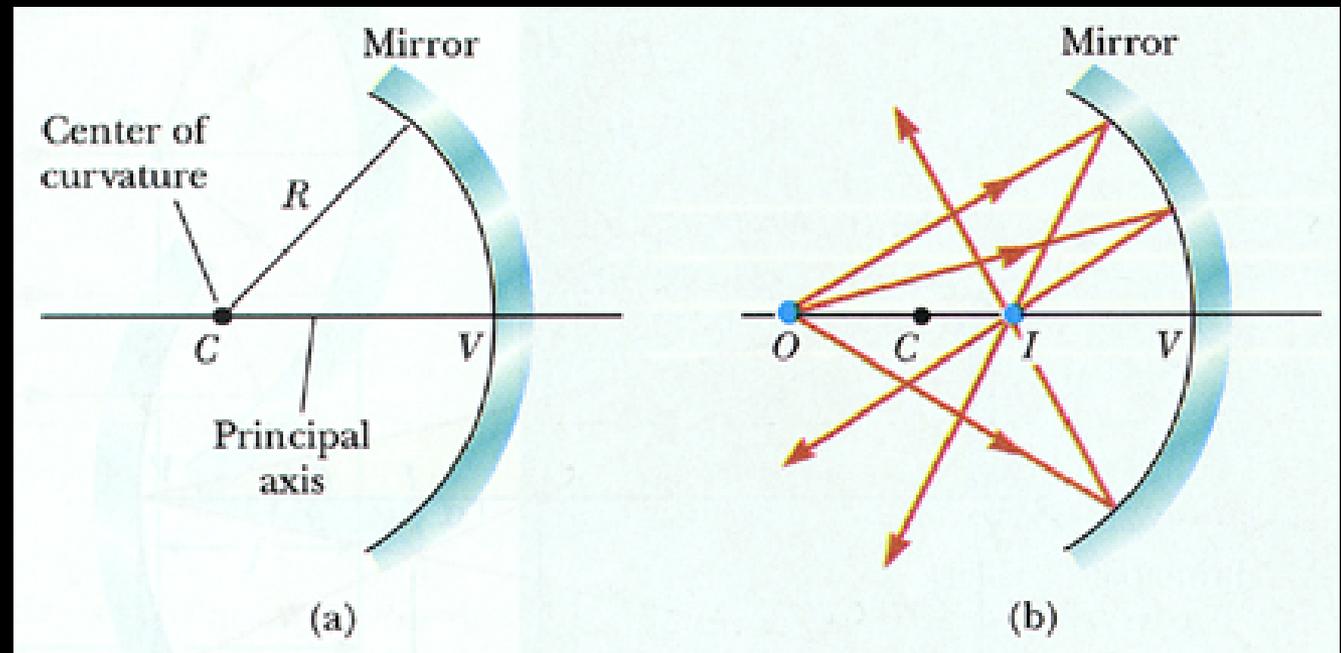
- Easily made
- Good approximation to more complex surfaces such as parabolic
- Ubiquitous



Spherical Mirrors

■ Definitions for the following terms

- Center of curvature (C)
- Radius of curvature (R or r)
- Principle Axis (or symmetry axis)
- Vertex (V)

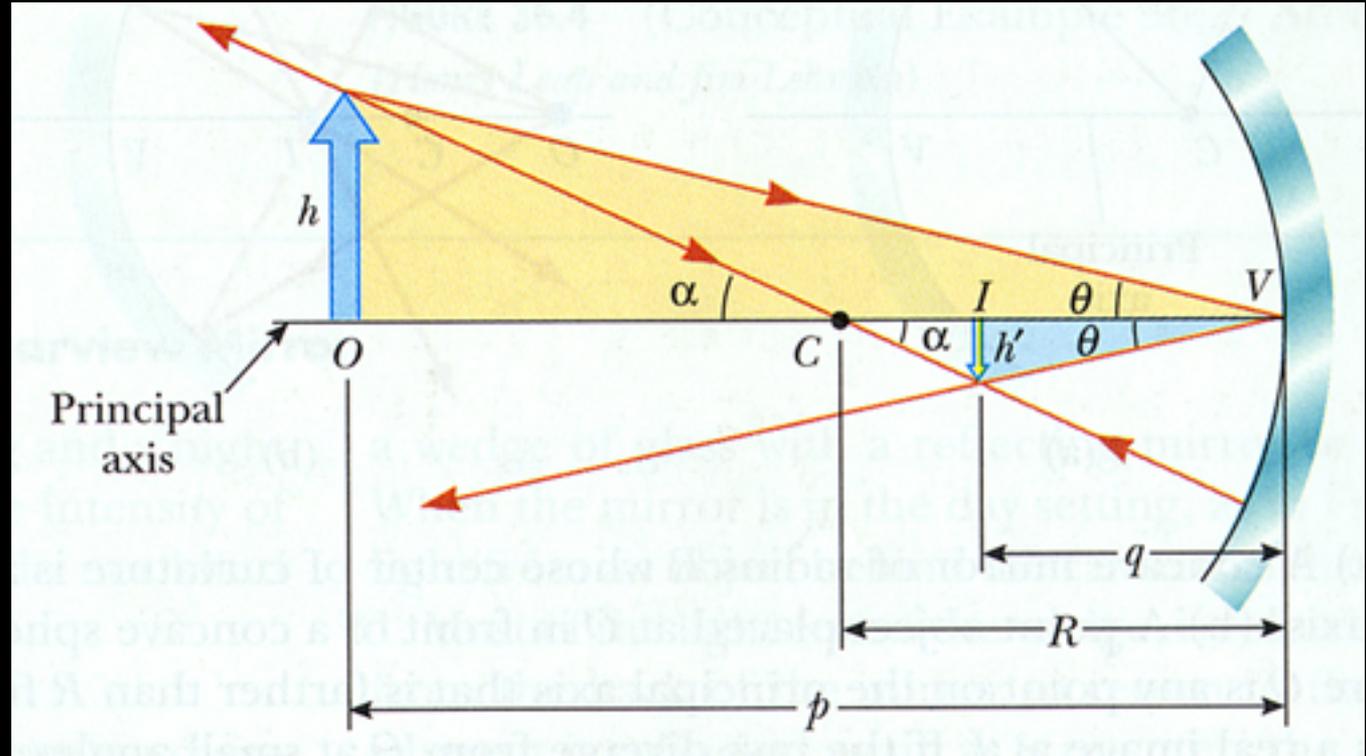


Spherical Mirrors

Note: Ray through C retraces itself

$$\tan \theta = \frac{h}{p} = -\frac{h'}{q}$$

$$-\frac{q}{p} = \frac{h'}{h} = M$$



$$\tan \alpha = \frac{h}{p - R} = -\frac{h'}{R - q}$$

$$-\frac{h'}{h} = \frac{R - q}{p - R} = \frac{q}{p}$$

$$\frac{R - q}{q} = \frac{p - R}{p}$$

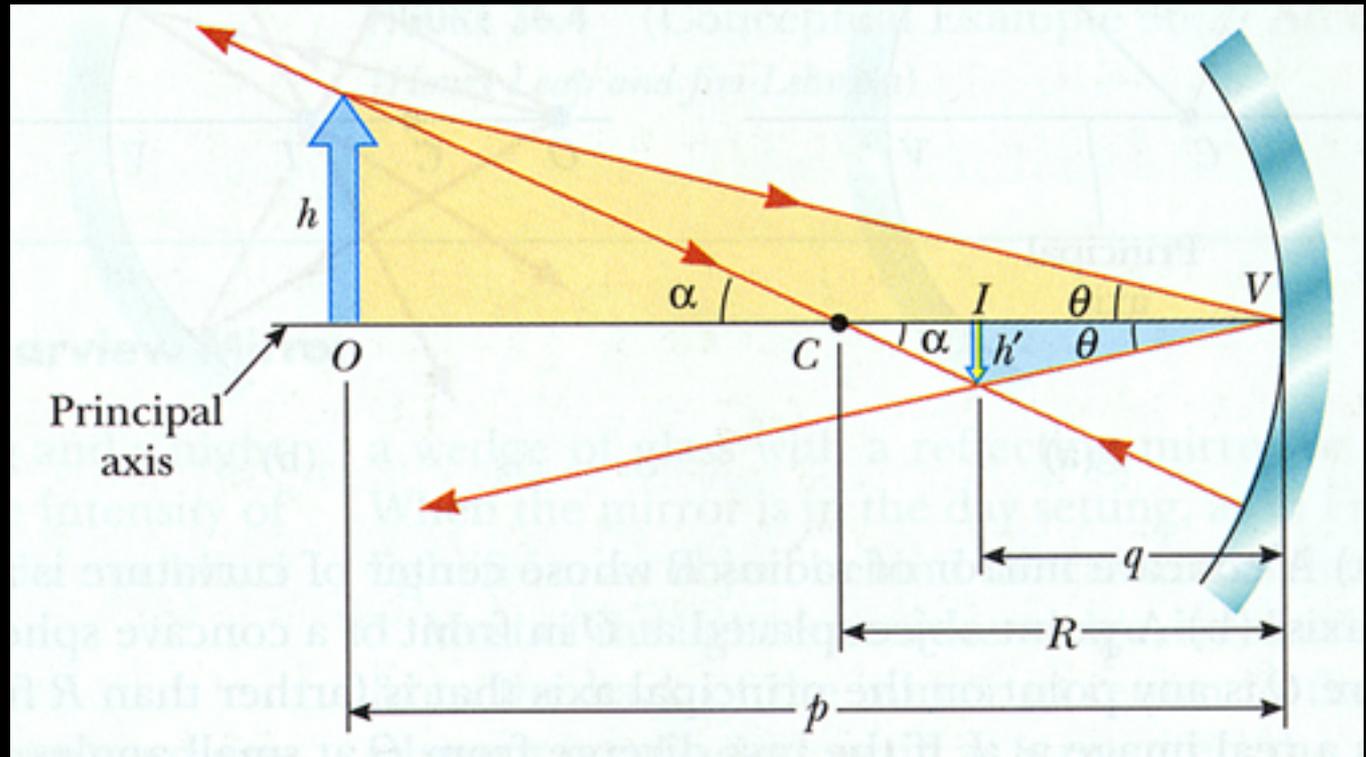
Spherical Mirrors

$$\frac{R}{q} - 1 = 1 - \frac{R}{p}$$

$$\frac{R}{q} + \frac{R}{p} = 2$$

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{2}{R}$$

$$M = -\frac{q}{p}$$



Spherical Mirrors

Focus and focal length

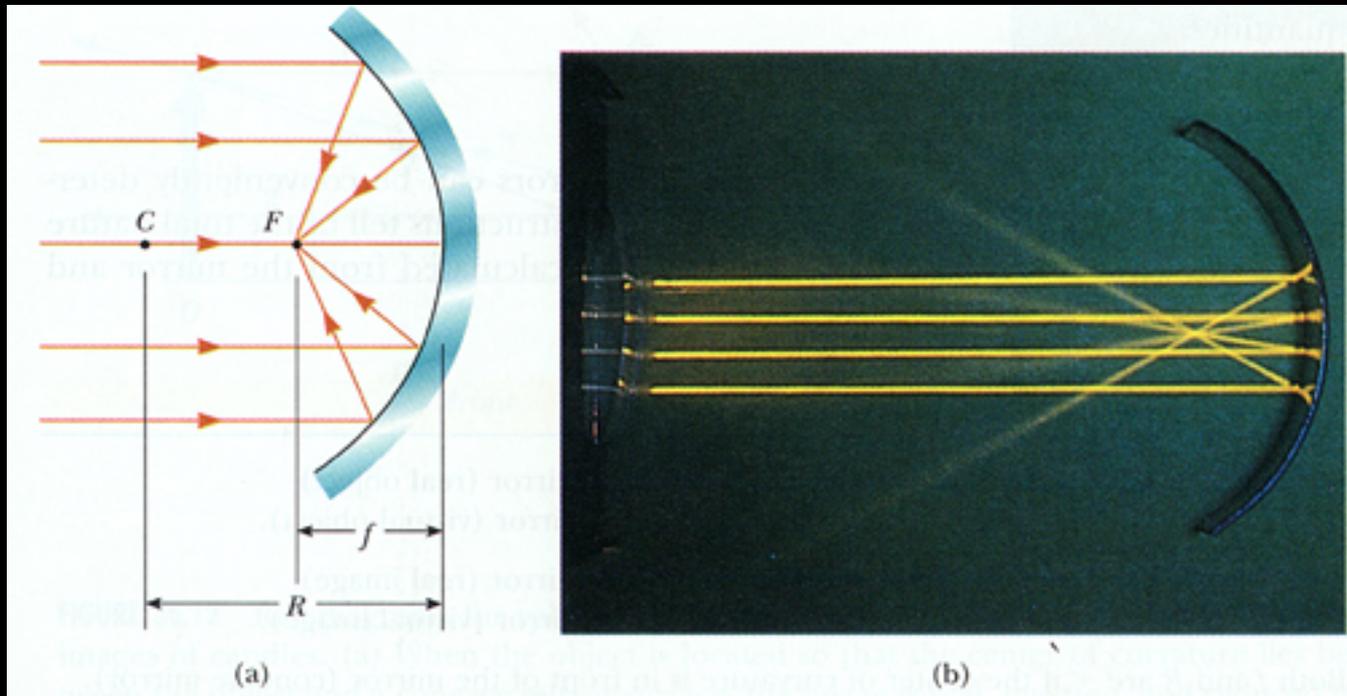
$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{2}{R}$$

$$\frac{1}{\infty} + \frac{1}{q} = \frac{2}{R}$$

$$q = f$$

$$f = \frac{R}{2}$$

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f}$$



Spherical Mirrors

Sign Convention

Front, or real, side	Back, or virtual, side
p and q positive Incident light 	p and q negative
Reflected light 	No light
Convex or concave mirror	

TABLE 36.1 Sign Convention for Mirrors

p is + if the object is in front of the mirror (real object).

p is - if the object is in back of the mirror (virtual object).

q is + if the image is in front of the mirror (real image).

q is - if the image is in back of the mirror (virtual image).

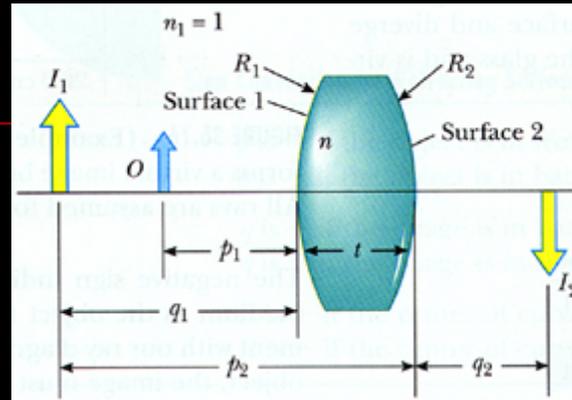
Both f and R are + if the center of curvature is in front of the mirror (concave mirror).

Both f and R are - if the center of curvature is in back of the mirror (convex mirror).

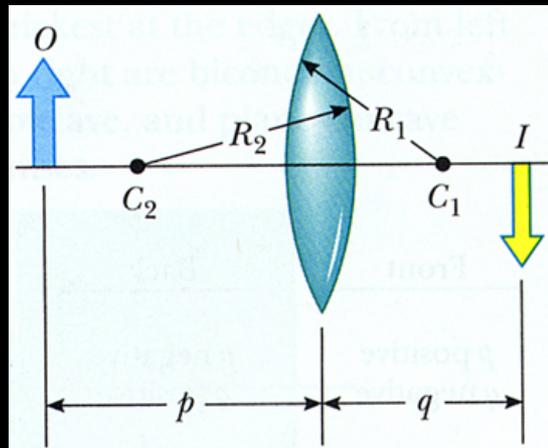
If M is positive, the image is upright.

If M is negative, the image is inverted.

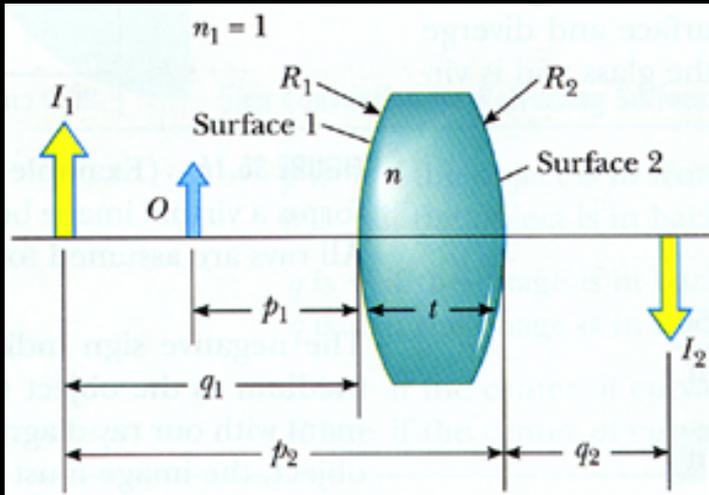
Thin Lenses



- Two spherical refracting surfaces back to back
- Thickness of lens is small (negligible)



Thin Lenses



$$\frac{n_2}{q_1 + t} + \frac{n_1}{q_2} = -\frac{(n_2 - n_1)}{R_2}$$

At the left surface

$$\frac{n_1}{p_1} - \frac{n_2}{q_1} = \frac{(n_2 - n_1)}{R_1}$$

At the right surface

$$\frac{n_2}{p_2} + \frac{n_1}{q_2} = \frac{(n_1 - n_2)}{R_2}$$

And $p_2 = q_1 + t$

$$\frac{n_1}{p_1} - \frac{n_2}{q_1} + \frac{n_2}{q_1 + t} + \frac{n_1}{q_2} = \frac{(n_2 - n_1)}{R_1} - \frac{(n_2 - n_1)}{R_2}$$

For a thin lens in air, t is negligible and n_1 is equal to 1

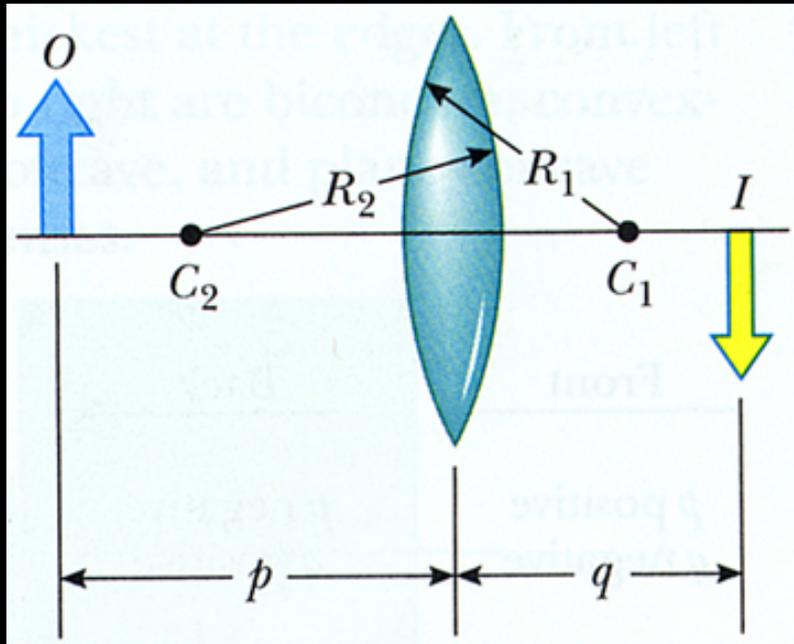
$$\frac{1}{p_1} + \left(-\frac{n_2}{q_1} + \frac{n_2}{q_1 + t} \right) + \frac{1}{q_2} = \frac{(n_2 - 1)}{R_1} - \frac{(n_2 - 1)}{R_2}$$

$$\frac{1}{p_1} + \frac{1}{q_2} = \frac{(n_2 - 1)}{R_1 - R_2}$$

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{(n - 1)}{R_1 - R_2}$$

Thin Lenses

We find that when we look at the focus of the lens



$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f}$$

Thin Lenses

Sign convention

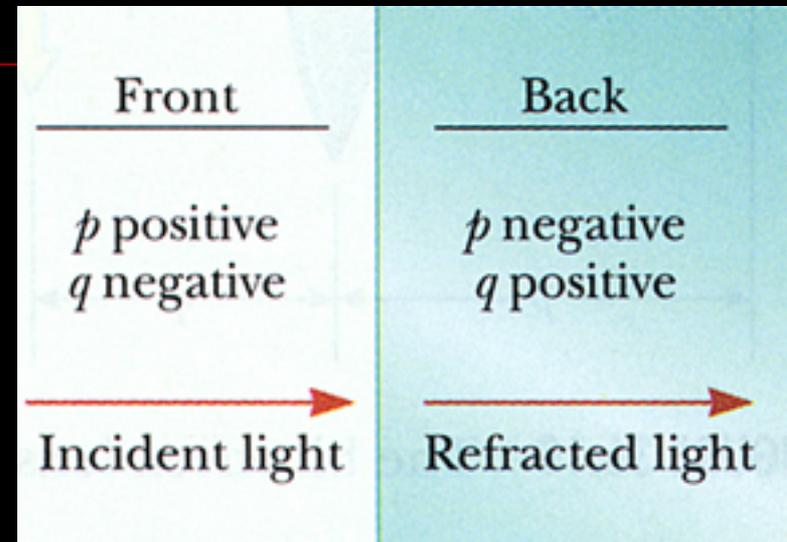


TABLE 36.3 Sign Convention for Thin Lenses

p is + if the object is in front of the lens.

p is - if the object is in back of the lens.

q is + if the image is in back of the lens.

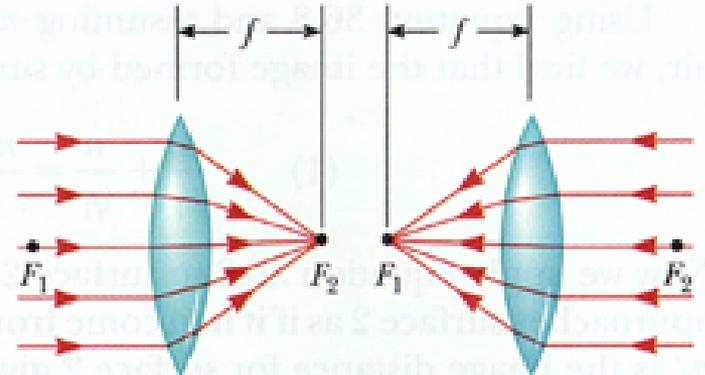
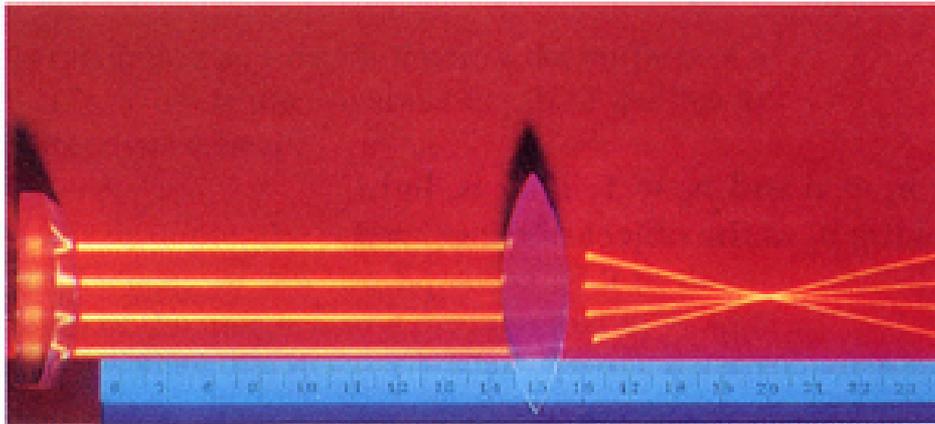
q is - if the image is in front of the lens.

R_1 and R_2 are + if the center of curvature is in back of the lens.

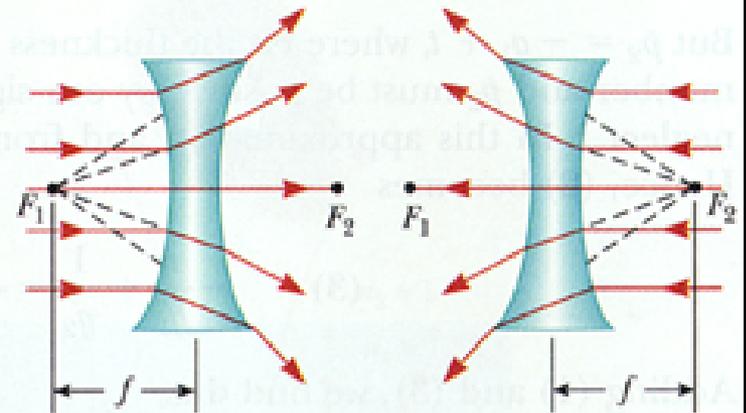
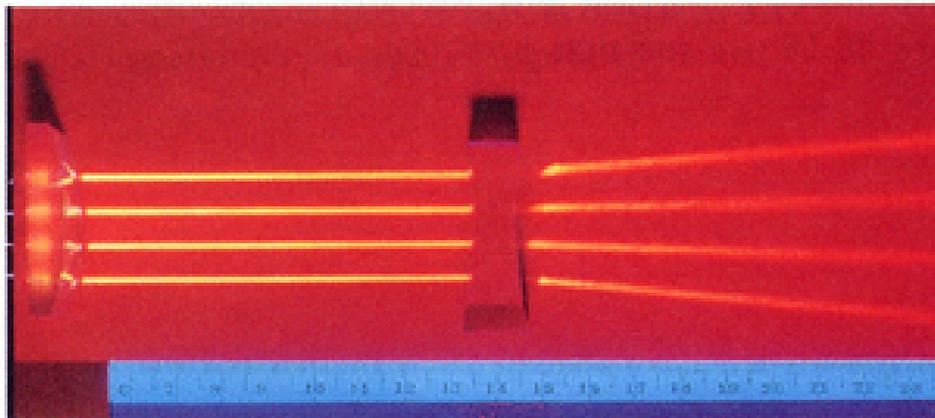
R_1 and R_2 are - if the center of curvature is in front of the lens.

Thin Lenses

Converging and Diverging Lenses



(a)

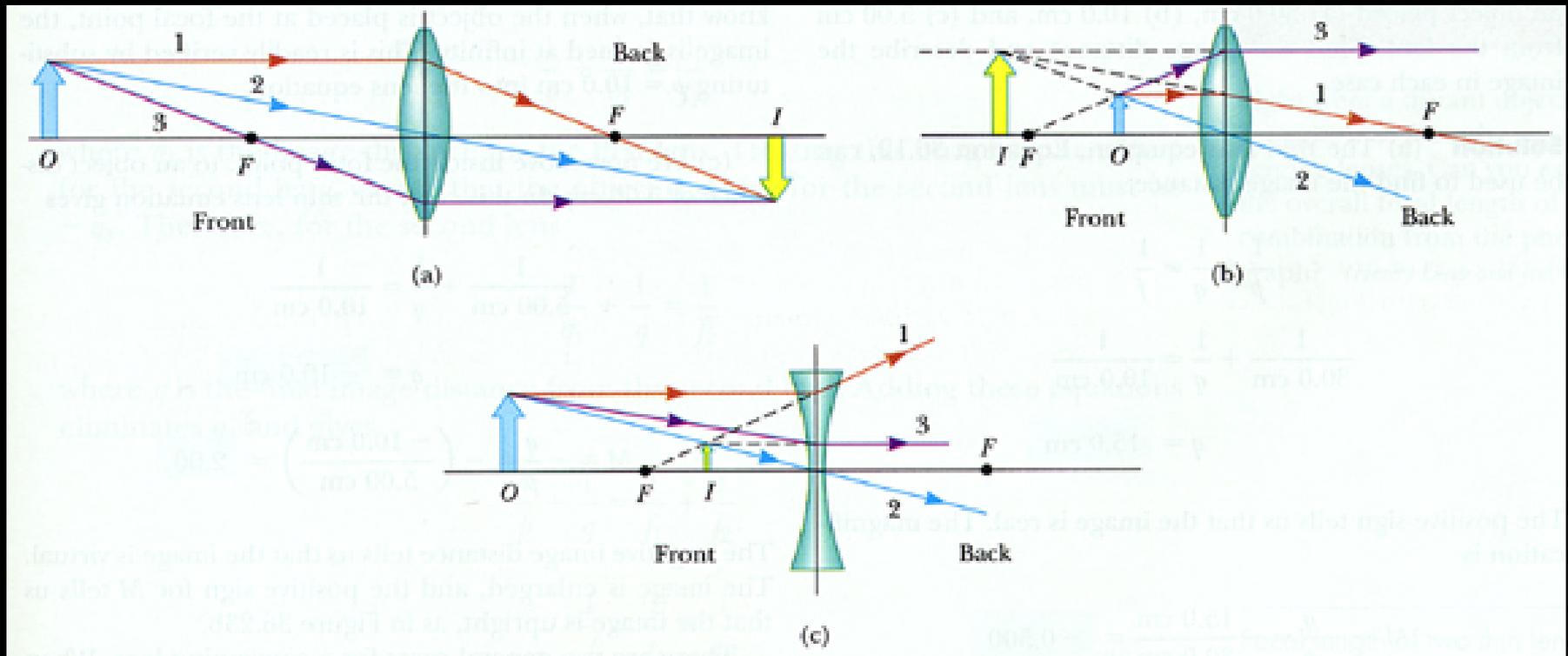


(b)

Thin Lenses

Converging and Diverging Lenses

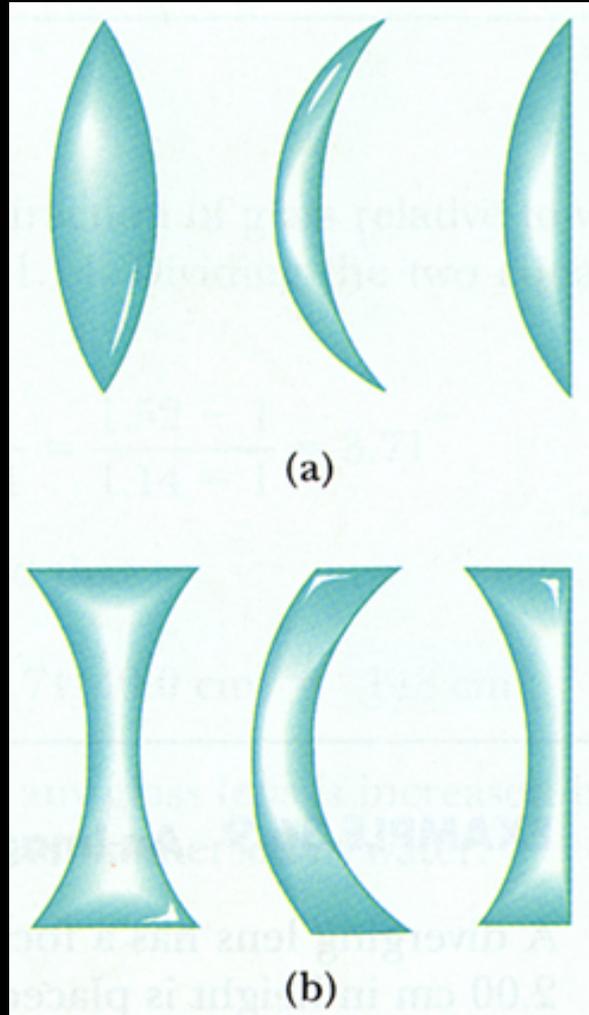
Principle Rays



Note: Rays 1,2, and 3 are called principle rays. See your text.

Thin Lenses

Converging and Diverging Lenses

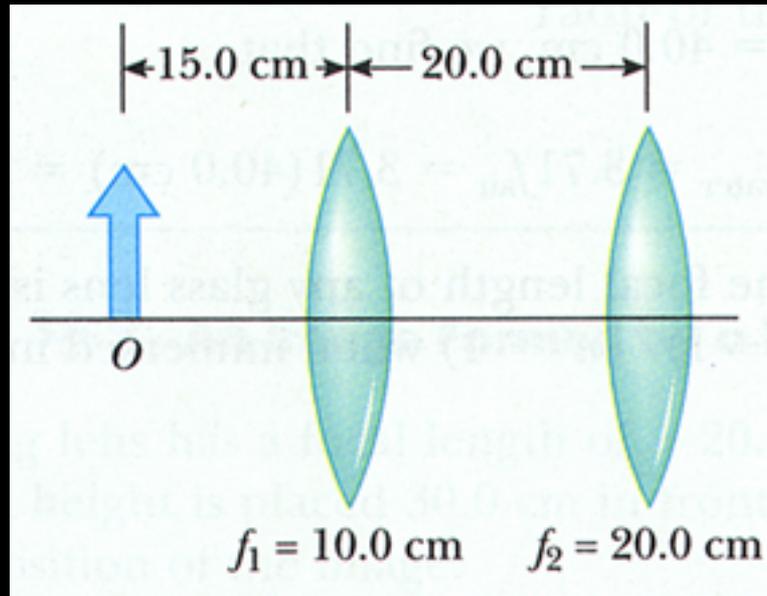


Thin Lenses

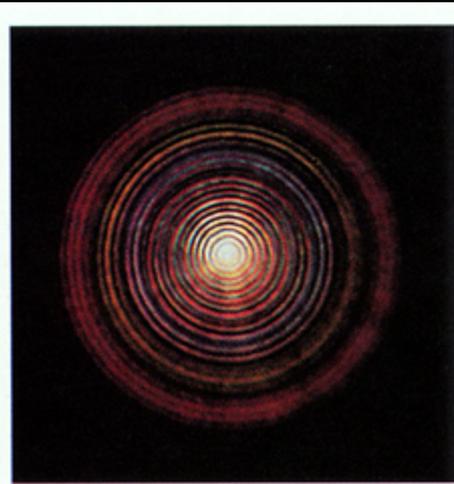
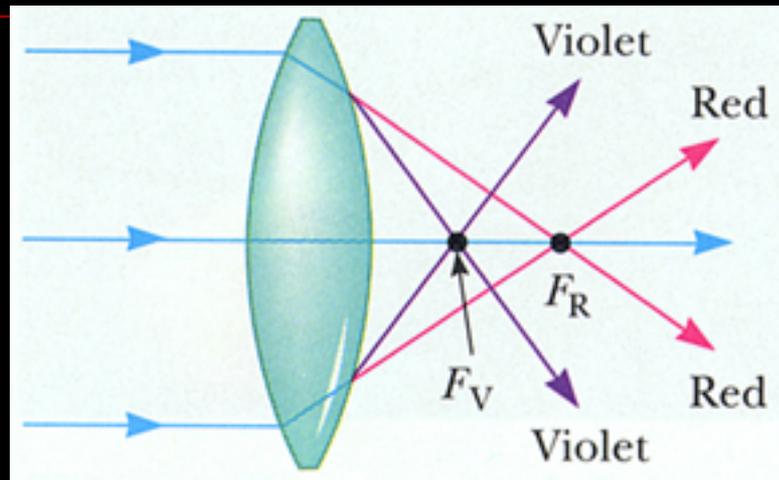
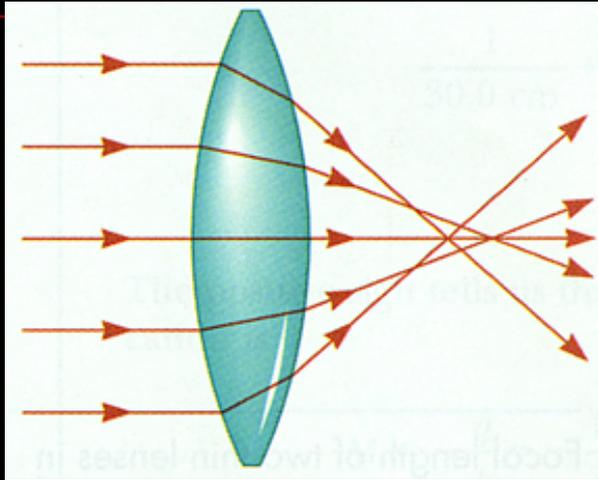
Multiple Lens Systems

How do you locate the final image?

Where is the final image?

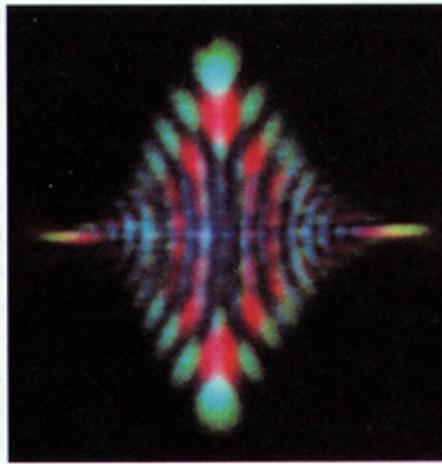


Lens Aberrations



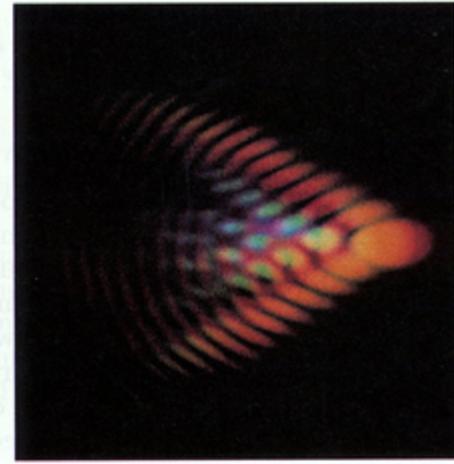
(a)

Spherical & chromatic



(b)

Astigmatism



(c)

Coma

TERMOMETRIA

- Stati termici e temperatura
- Misura della temperatura (termometri)
- Dilatazione termica
- Legge fondamentale della Termologia

CALORIMETRIA

- Propagazione del calore
- Capacità termica e calore specifico
- Calore latente

La Temperatura

Nella vita di tutti i giorni, la temperatura è considerata come la misura di quanto un oggetto sia freddo o caldo.

Molte proprietà della materia cambiano con la temperatura. Ad esempio, la maggior parte dei materiali si espandono se riscaldati. Una barra di ferro è più lunga quando è calda che quando è fredda; le strade e i marciapiedi di cemento si espandono e si contraggono leggermente al variare della temperatura; la resistenza elettrica della materia cambia con la temperatura; a temperature più alte, solidi come il ferro brillano di un colore arancione o addirittura bianco.

La temperatura è una misura dell'agitazione termica di una sostanza ovvero una misura indiretta dell'energia cinetica media delle molecole che costituiscono la sostanza.

TERMOLOGIA

DEFINIZIONE DI TEMPERATURA

T ci fa pensare alla sensazione di caldo/freddo (soggettiva)

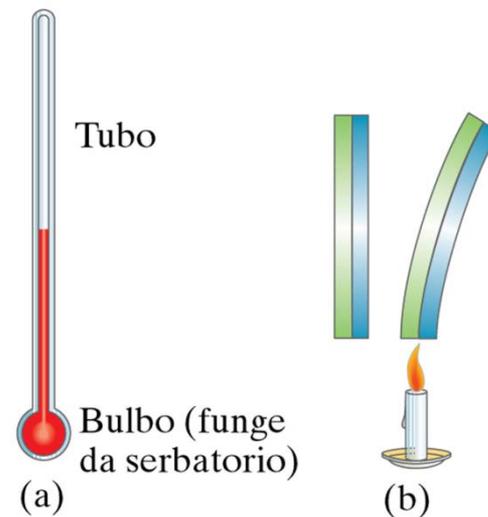
OGNI CORPO ci dà una certa SENSAZIONE di caldo/freddo

STATO TERMICO *T* = particolare “maniera di presentarsi” del corpo che mi dà data sensazione *S* di caldo/freddo

Come trasformo sensaz. sogg. in oggettiva?

I termometri

Gli strumenti che misurano la temperatura sono chiamati termometri. I termometri più comuni si basano sull'espansione di un materiale in seguito a un aumento della temperatura. La prima idea di termometro, che fu di Galileo, faceva uso dell'espansione di un gas. I termometri odierni consistono di un tubo di vetro cavo riempito di mercurio o di alcool colorato con un colorante rosso. Nei comuni termometri a liquido in contenitori di vetro, il liquido si espande più del vetro quando la temperatura aumenta, perciò il livello del liquido nel tubo cresce. Termometri molto precisi fanno uso delle proprietà elettriche della materia come i termometri a resistenza, le termocoppie e i termistori.



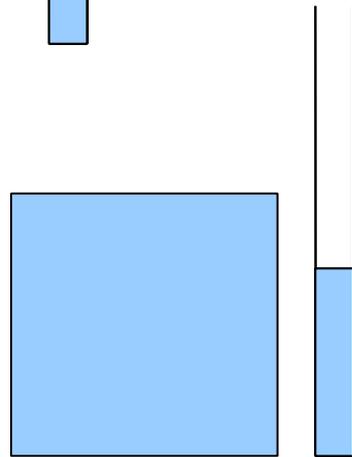
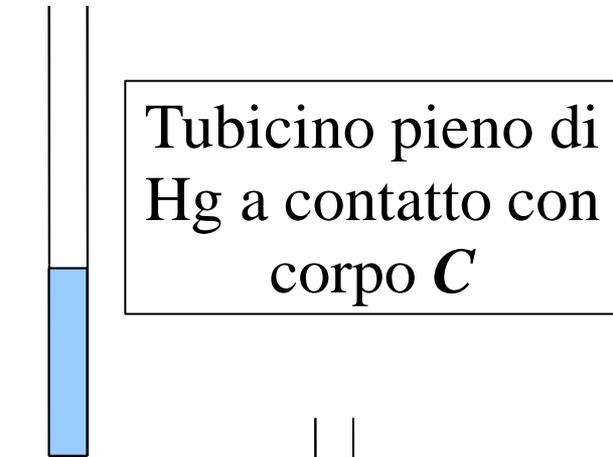
COSTRUZIONE DEL TERMOSCOPIO

Strumento che ci rende oggettiva la sensazione di caldo/freddo

PRINCIPI DI FUNZIONAMENTO:

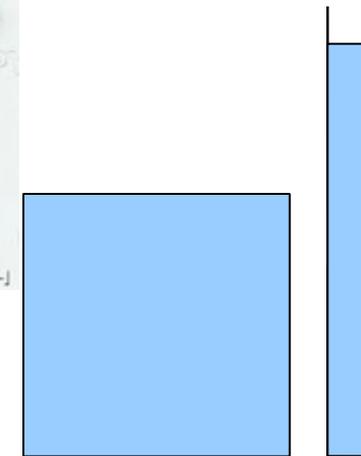
- 1) **DILATAZIONE TERMICA** (constatazione): se varia lo stato termico del corpo, varia anche il suo volume proporzionalmente alla variazione di T
- 2) **EQUILIBRIO TERMICO** (constatazione): due corpi che danno sensazioni S diverse, se messi a contatto dopo un certo Δt danno stessa sensazione

USANDO I DUE PRINCIPI prendo una sostanza termoscopica (dentro un contenitore) e la pongo a contatto del corpo di cui voglio avere *info* sullo stato termico T



Stato T_1

Anche Hg assume stesso stato T_1
[EQUILIBRIO]



VARIAZIONE DI VOLUME
[dilatazione t.] in seguito al
raggiungimento dell'equilibrio

CHE UTILIZZO HA?

Serve per **CONFRONTARE** due stati termici T_1 e T_2 relativi a due corpi differenti!

Se $V_1 = V_2$, allora $T_1 = T_2$ [stessa sensazione di “caldo”]

Se $V_1 > V_2$, allora $T_1 > T_2$ [più netta la sensazione di “caldo”]

Se $V_1 < V_2$, allora $T_1 < T_2$ [meno netta la sensazione di “caldo”]

**MA NON HO ASSOCIATO UN VALORE
NUMERICO!!**

Devo trasformare il termoscopio in TERMOMETRO
FISSANDO UNA **SCALA TERMOMETRICA!**

SCALA TERMOMETRICA: viene fissata facendo due operazioni:

- 1) FISSO due stati termici DI RIFERIMENTO ed attribuisco una misura a ciascuno di essi
- 2) SUDDIVIDO in n parti questo intervallo

SCALE USATE IN FISICA:

CELSIUS o
CENTIGRADA

KELVIN o ASSOLUTA

Differiscono solo per i diversi valori attribuiti agli stati termici di riferimento

SCALA CELSIUS O CENTRIGRADA

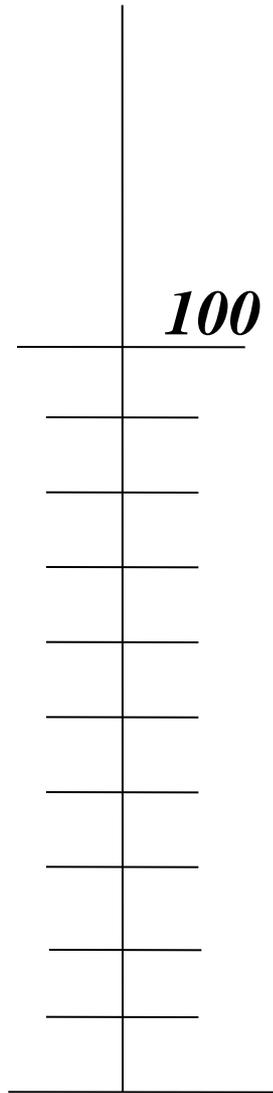
STATI DI RIFERIMENTO:

→ **Acqua distillata bollente** a $P = 1 \text{Atm}$ → VALORE $T_1 = 100$



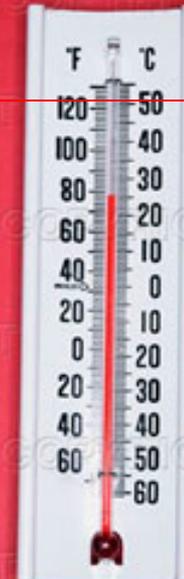
→ **Ghiaccio fondente** (H_2O distillata solida) a $P = 1 \text{atm}$ →
VALORE $T_0 = 0$





L'intervallo fra T_0 e T_1 viene “suddiviso” in 100 parti uguali
(si usa termoscopio, dividendo la differenza di altezza della colonna di Hg contenuto fra i due stati termici)

GRADO CENTIGRADO ($^{\circ}\text{C}$) = ciascuna delle 100 parti in cui viene suddiviso l'intervallo $\Delta T = T_1 - T_0$



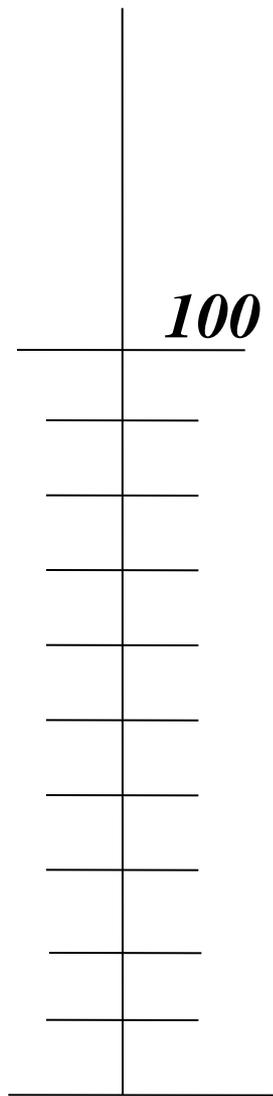
SCALA KELVIN O ASSOLUTA

STATI DI RIFERIMENTO:

→ **Acqua distillata bollente** a $P = 1 \text{ Atm}$ → VALORE $T_1 = 373,16$

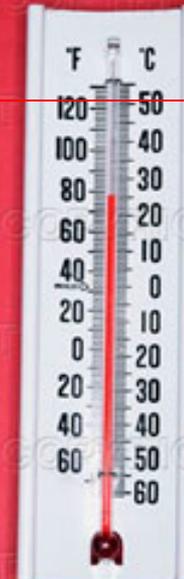
→ **Ghiaccio fondente** (H_2O distillata solida) a $P = 1 \text{ atm}$ → VALORE $T_0 = 273,16$

Come mai questi valori "strani"? In realtà il "punto di zero" viene fissato facendo riferimento alla legge di dilatazione termica dei gas (vedi)



L'intervallo fra T_0 e T_1 viene “suddiviso” in 100 parti uguali
(*si usa termoscopio, dividendo la differenza di altezza della colonna di Hg contenuto fra i due stati termici*)

GRADO KELVIN ($^{\circ}\text{C}$) = ciascuna delle 100 parti in cui viene suddiviso l'intervallo
 $\Delta T = T_1 - T_0$



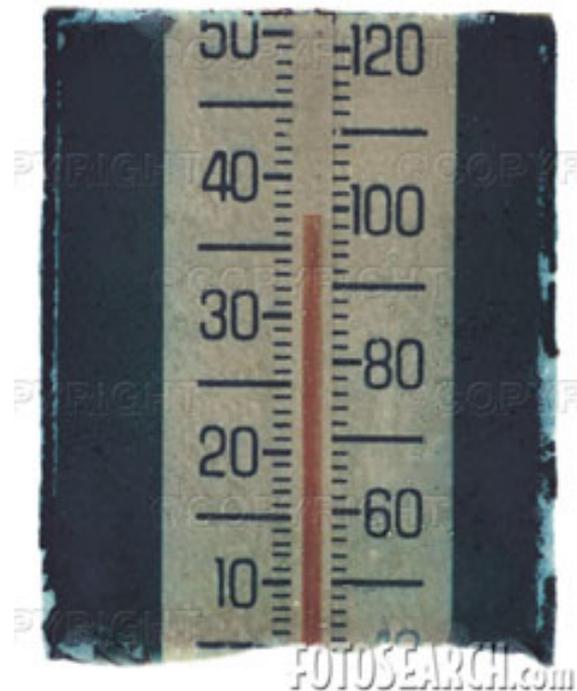
PASSAGGIO DA °K ↔ °C

Le due scale sono solo "sfasate" di 273,16°, quindi:

- PER PASSARE DA T in °C a T in °K SI AGGIUNGE 273,16
- PER PASSARE DA T in °K a T in °C SI TOGLIE 273,16

Es. $120^{\circ}\text{C} = 120 + 273,16 = 393,16^{\circ}\text{K}$

Es. $120^{\circ}\text{K} = 120 - 273,16 = -153,16^{\circ}\text{C}$



IMPORTANTE!



La misura di una data T è diversa, ma quella di un ΔT è la stessa!

→ **Misurare ΔT in °K o in °C E' LA STESSA COSA!**

$120^{\circ}\text{K} \neq 120^{\circ}\text{C}$, ma $\Delta T = 120^{\circ}\text{K} = 120^{\circ}\text{C}$



Questo perchè l'”ampiezza” delle due scale è sempre la stessa!



DEFINIZIONE DI TEMPERATURA

Con un termoscopio tarato (fissata la scala) posso **ATTRIBUIRE** un valore numerico allo stato termico ***T***

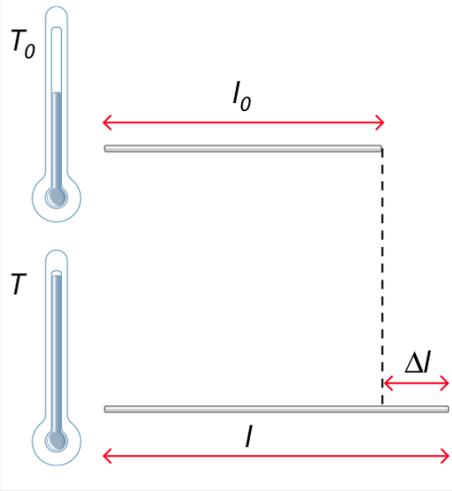
TEMPERATURA T = *grandezza fisica che dà una misura quantitativa oggettiva dello STATO TERMICO di un corpo, rispetto ad una scala di riferimento*



La dilatazione termica

• **Dilatazione termica: aumento di volume dei corpi dovuto all'aumento della temperatura.**

Il filo di ferro subisce un aumento di lunghezza $\Delta l = l - l_0$ quando la temperatura aumenta di ΔT .



Se una dimensione **prevale** sulle altre due (come per un filo o un'asta) si parla di **dilatazione lineare**

Dilatazione lineare: l'aumento di lunghezza Δl ($\Delta l = l - l_0$) dipende dalla sostanza di cui è fatto il corpo ed è **direttamente proporzionale**:

-alla lunghezza iniziale l_0 del corpo;

-alla variazione di temperatura ΔT ($\Delta T = T - T_0$) subita dal corpo.

La dilatazione termica

• Legge della dilatazione lineare

The diagram shows the linear expansion formula $\Delta l = \lambda \cdot l_0 \cdot \Delta T$ centered within a yellow circle. Four red lines connect the variables to their respective labels: Δl to "allungamento (m)", λ to "coefficiente di dilatazione lineare (K⁻¹ o °C⁻¹)", l_0 to "lunghezza iniziale (m)", and ΔT to "variazione di temperatura (K o °C)".

coefficiente di dilatazione lineare (K⁻¹ o °C⁻¹)

allungamento (m)

$\Delta l = \lambda \cdot l_0 \cdot \Delta T$

lunghezza iniziale (m)

variazione di temperatura (K o °C)

Nel **SI** il **coefficiente di dilatazione lineare** λ si misura in K⁻¹

$$\lambda = \frac{\Delta l}{l_0 \cdot \Delta T} = \frac{\text{m}}{\text{m} \cdot \text{K}} = \frac{1}{\text{K}} = \text{K}^{-1}$$

La variazione di temperatura $\Delta T = T - T_0$ ha lo stesso valore numerico espressa in K e in °C, pertanto λ ha lo stesso valore in K⁻¹ o in °C⁻¹

La dilatazione termica

Tabella 1 Coefficienti di dilatazione lineare di alcuni solidi (K^{-1} o $^{\circ}C^{-1}$)					
Metalli			Leghe		
Alluminio	24×10^{-6}	Argento	19×10^{-6}	Acciaio	1×10^{-5}
Ferro	12×10^{-6}	Oro	14×10^{-6}	Ghisa	1×10^{-5}
Piombo	29×10^{-6}	Platino	9×10^{-6}	Bronzo	2×10^{-5}
Rame	16×10^{-6}	Zinco	17×10^{-6}	Ottone	2×10^{-5}

ESEMPIO 1 Un filo di ferro lungo 1,0 m che aumenta la temperatura di 100 $^{\circ}C$, subisce un allungamento di 1,2 mm. Infatti:

$$\begin{aligned}\Delta l &= \lambda \cdot l_0 \cdot \Delta T = (12 \times 10^{-6} \text{ } ^{\circ}C^{-1}) \times (1,0 \text{ m}) \times (100 \text{ } ^{\circ}C) = \\ &= (0,000012 \times 1,0 \times 100) \text{ m} = 0,0012 \text{ m}\end{aligned}$$

Nelle stesse condizioni, un filo lungo due metri si allungherebbe del doppio.

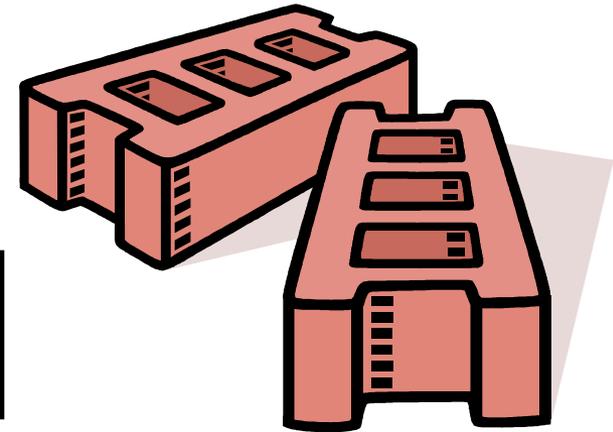
DILATAZIONE TERMICA [SOLIDI]

LINEARE

(per corpi 1D con una dimensione trascurabile rispetto alle altre: rotaie, fili)



VOLUMICA (corpi 3D)



SUPERFICIALE (2D): piastre e lamine



La dilatazione termica

• Legge di dilatazione volumica (solidi e liquidi)

The diagram shows the formula $\Delta V = k \cdot V_0 \cdot \Delta T$ centered in a yellow circle. Four red lines connect the variables to their respective labels: ΔV to 'variazione di volume (m³)', k to 'coefficiente di dilatazione volumica (K⁻¹ o °C⁻¹)', V_0 to 'volume iniziale (m³)', and ΔT to 'variazione di temperatura (K o °C)'.

variazione di volume (m³)

coefficiente di dilatazione volumica (K⁻¹ o °C⁻¹)

$\Delta V = k \cdot V_0 \cdot \Delta T$

volume iniziale (m³)

variazione di temperatura (K o °C)

Nel **SI** il **coefficiente di dilatazione volumica** k si misura in K⁻¹

Per i **solidi**, $k \approx 3 \cdot \lambda$ (il coefficiente di dilatazione **volumica** è circa il **triplo** di quello **lineare**).

Per i liquidi, k è molto maggiore rispetto al caso dei solidi

LEGGE DELLA DILATAZIONE TERMICA LINEARE

$$\Delta L = L_0 \cdot \lambda \cdot \Delta T$$

Ogni sostanza ha un suo λ (ricavato sper.)

LEGGE DELLA DILATAZIONE TERMICA SUPERFICIALE

$$\Delta S = S_0 \cdot 2 \lambda \cdot \Delta T$$

LEGGE DELLA DILATAZIONE TERMICA VOLUMICA

$$\Delta V = V_0 \cdot 3 \lambda \cdot \Delta T$$

Es. rotaie: chi costruisce una linea ferroviaria deve essere attento alla dilatazione termica lineare!

ΔT = escursione termica diurna dell'ambiente in cui sono i binari

$$\Delta L = L_0 \lambda \cdot \Delta T$$

Es. $\Delta T = 50^\circ$ (es. Centro USA)

$$\lambda_{\text{metallo}} = 7 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \quad L_0 = 10\text{m}$$

$$\Delta L \cong 30\text{mm}$$

Devo prevedere degli spazi vuoti tra un binario e l'altro!



DILATAZIONE TERMICA (volumica) DEI GAS

Sotto alcune ipotesi (modelli semplici), per P costanti e T non troppo basse:

$$V_T = V_0 (1 + \alpha \cdot T)$$

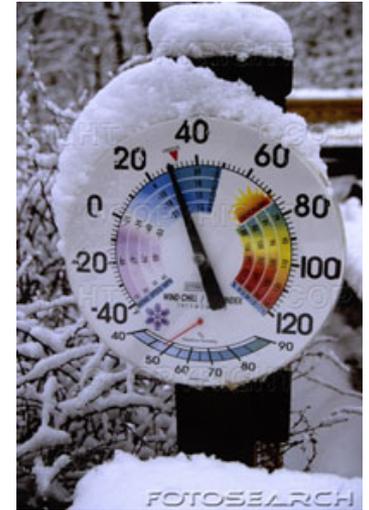
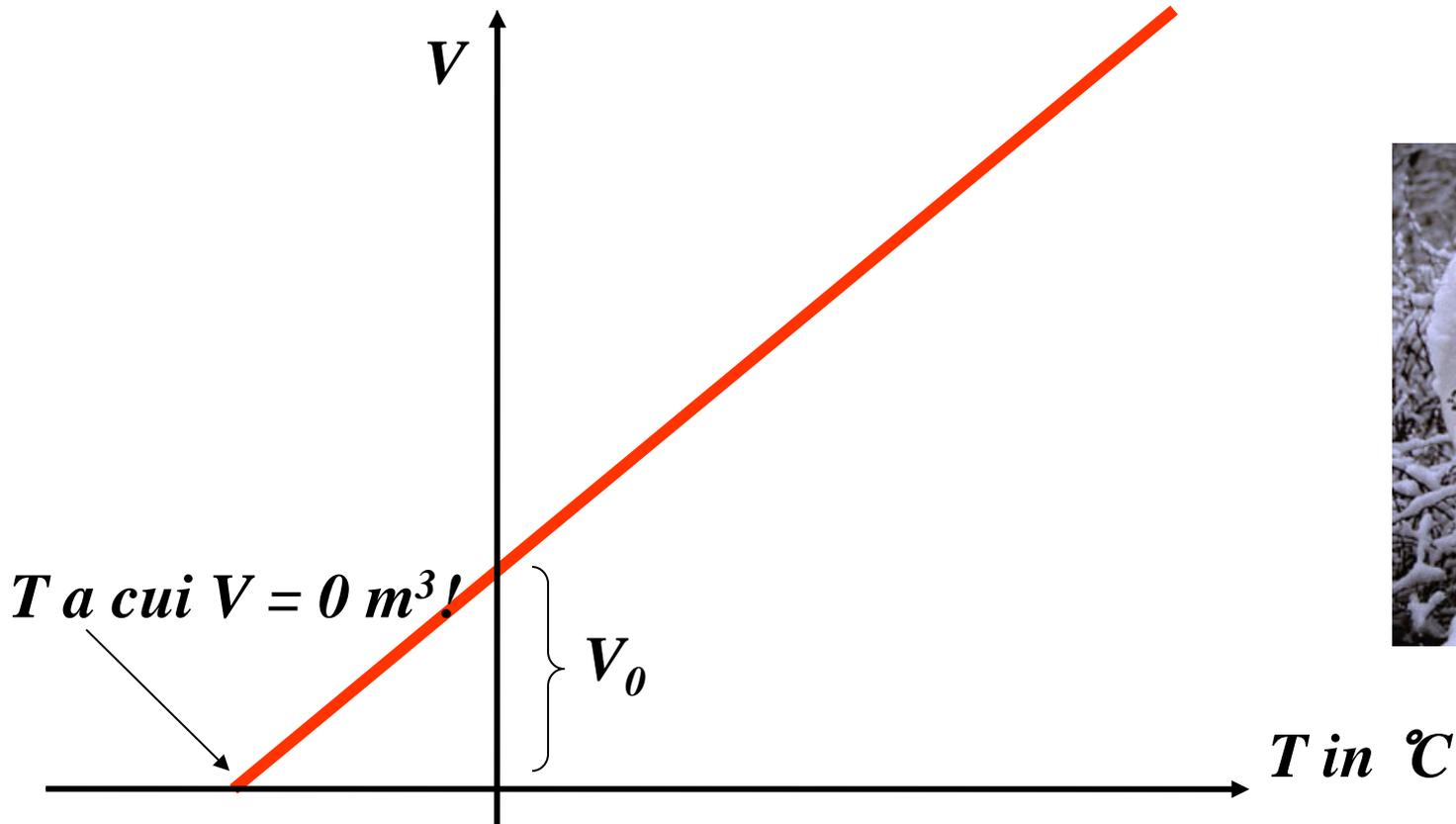
$\alpha = 1/273,16 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ per TUTTI I GAS!! [Costante di dilataz. termica dei gas]

T espressa in gradi centigradi. V_0 = volume che il gas ha alla temperatura di 0°C

Sperimentalmente, tutti i gas, sottoposti alla stessa variazione di temperatura subiscono la stessa variazione di volume!

SIGNIFICATO DI α

$$V_T = V_0(1 + \alpha T)$$



$$0 = V_0 + V_0 \alpha T \rightarrow T = -1 / \alpha = -273,16^{\circ}\text{C}$$

= ZERO ASSOLUTO!

LO ZERO ASSOLUTO

La temperatura di $-273,16\text{ }^{\circ}\text{C}$ è detta ZERO ASSOLUTO: è la temperatura (ideale!) a cui un gas avrebbe volume zero!
Non è possibile andare al di sotto! (perdo senso fisico, perchè il gas avrebbe volume negativo!)

Nella realtà non si può toccare lo zero assoluto, perchè subentrano fenomeni particolari (indagabili con la meccanica quantistica): impossibile far avvicinare così tanto le particelle da ridurre a zero il volume...

La dilatazione termica

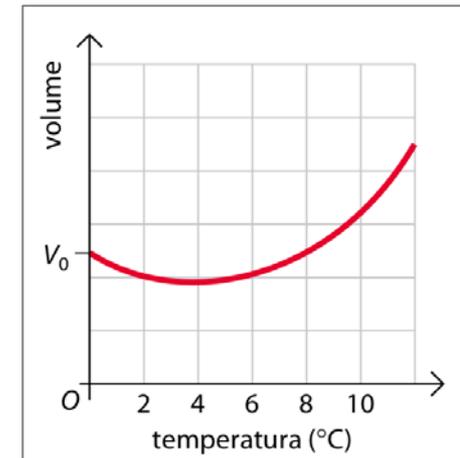
Tabella 2 Coefficienti di dilatazione lineare di alcuni liquidi (K^{-1} o $^{\circ}C^{-1}$)

Mercurio	$1,82 \times 10^{-4}$	Alcol	10×10^{-4}
Glicerina	5×10^{-4}	Etere	15×10^{-4}
Acqua	$4,6 \times 10^{-4}$	Latte	$8,0 \times 10^{-4}$

Comportamento anomalo dell'acqua

Nell'intervallo tra $0^{\circ}C$ e $4^{\circ}C$ il volume dell'acqua non cresce con l'aumentare della temperatura, ma diminuisce (il coefficiente di dilatazione è negativo).

Al di sopra di $4^{\circ}C$ l'acqua si dilata normalmente



La legge fondamentale della termologia

Per aumentare la temperatura di un corpo bisogna fornirgli una quantità di calore, che dipende dalla massa e dalle caratteristiche del corpo

Stati di equilibrio termodinamico

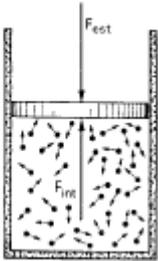
Lo stato di un sistema termodinamico è noto quando è noto il valore che i parametri di stato hanno in ogni punto del sistema. Se il valore dei parametri di stato è costante nel tempo, lo stato si dice stazionario

Si dice che un sistema termodinamico chiuso è in uno stato di equilibrio termodinamico quando si sia realizzato:

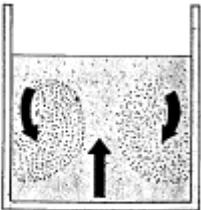
- Un equilibrio meccanico
- Un equilibrio termico
- Un equilibrio chimico

Equilibrio termodinamico

Equilibrio meccanico



L'equilibrio meccanico si stabilisce fra le forze che il sistema esercita sull'ambiente esterno e le forze esterne agenti sul sistema



NON EQUILIBRIO TERMICO

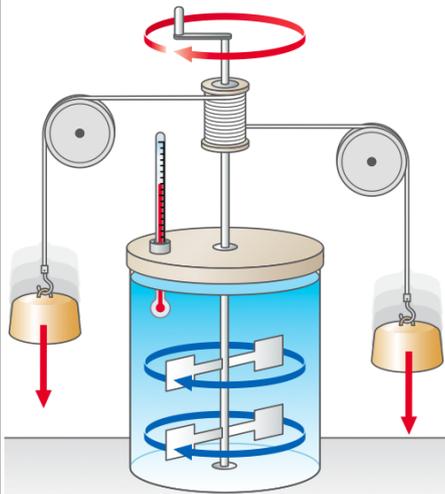
L'equilibrio termico si ha fra le varie parti del sistema considerato, nonché fra questo e l'ambiente esterno, ciò vuol dire che tutte le parti del sistema hanno la stessa temperatura

L'equilibrio chimico garantisce che non sono in corso reazioni che alterino la composizione relativa del sistema.

Un sistema termodinamico, se lasciato isolato per un tempo sufficientemente lungo, raggiunge uno stato di equilibrio termodinamico

La legge fondamentale della termologia

I due pesi cadendo fanno girare le pale del mulinello, che mescolano l'acqua e fanno aumentare la sua temperatura.



• **Per aumentare la temperatura di un corpo occorre trasferirgli energia.**

Il trasferimento di energia può avvenire con uno scambio di calore (contatto con una fiamma o un corpo più caldo, ...) o con uno scambio di lavoro

• **Esperimento di Joule**

Per fare crescere di 1 K la temperatura di 1 kg di acqua, occorre compiere un lavoro pari a circa 4180 J

La legge fondamentale della termologia

Tabella 1 Calore specifico in J/(kg·K)

Acqua	4180
Alcol etilico	2430
Benzina	2100
Olio d'oliva	1650
Petrolio	2140
Mercurio	138
Ottone	376
Acciaio-Ferro	480
Ghisa	500
Oro	134
Argento	238
Rame	390
Alluminio	880
Piombo	128
Bronzo	380

•La **capacità termica** C di un corpo è il **rapporto** tra l'**energia** ricevuta e la **variazione di temperatura**:

$$C = \frac{\Delta E}{\Delta T}$$

Nel **SI** la **capacità termica** si misura in **J/K**

La capacità termica C è **proporzionale** alla massa m .

La costante di proporzionalità è il **calore specifico** c :

$$\frac{C}{m} = c$$

Il calore specifico c è caratteristico di ogni sostanza; nel **SI** si misura in **J/(kg·K)**

La legge fondamentale della termologia

• Legge fondamentale della termologia

energia scambiata (J) ————— volume iniziale (m³)

calore specifico $\left(\frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}\right)$ ————— variazione di temperatura (K)

$$\Delta E = c \cdot m \cdot \Delta T$$

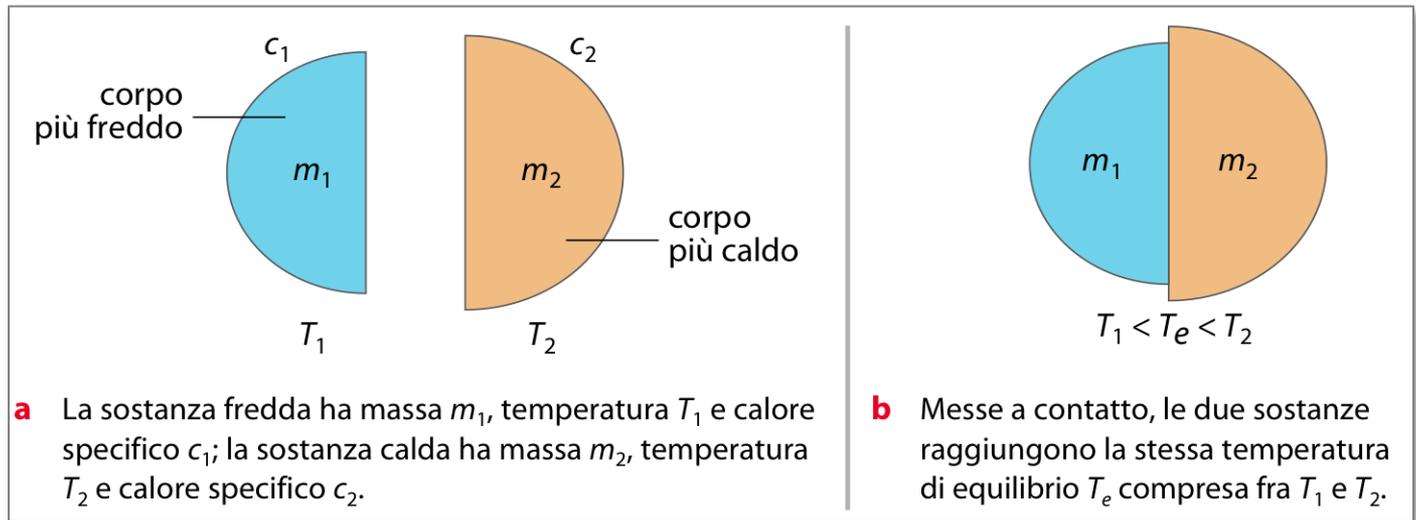
L'**energia** scambiata **dipende dalla sostanza** (attraverso il calore specifico c)
ed è **direttamente proporzionale**:

- alla massa della sostanza;
- alla variazione di temperatura ΔT .

La legge fondamentale della termologia

•**Equilibrio termico:** due corpi a temperatura T_1 e T_2 posti a contatto, scambiano energia e si portano a una temperatura di equilibrio T_e

L'energia è scambiata tra un corpo e l'altro sotto forma di **calore**



La legge fondamentale della termologia diventa:

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta T$$

La legge fondamentale della termologia

- Il corpo caldo cede calore e si raffredda: $Q_{\text{ceduto}} = m_2 \cdot c_2 \cdot (T_e - T_2)$
- Il corpo freddo acquista calore e si riscalda: $Q_{\text{acquistato}} = m_1 \cdot c_1 \cdot (T_e - T_1)$
- Poiché $T_1 < T_e < T_2$, Q_{ceduto} è negativo e $Q_{\text{acquistato}}$ è positivo.
- Se non c'è dispersione di calore, tenendo conto dei segni si ha:

$$Q_{\text{acquistato}} = -Q_{\text{ceduto}} \quad m_1 \cdot c_1 \cdot (T_e - T_1) = -m_2 \cdot c_2 \cdot (T_e - T_2)$$

La **temperatura di equilibrio** T_e è:

$$T_e = \frac{(m_1 \cdot c_1 \cdot T_1 + m_2 \cdot c_2 \cdot T_2)}{m_1 \cdot c_1 + m_2 \cdot c_2}$$

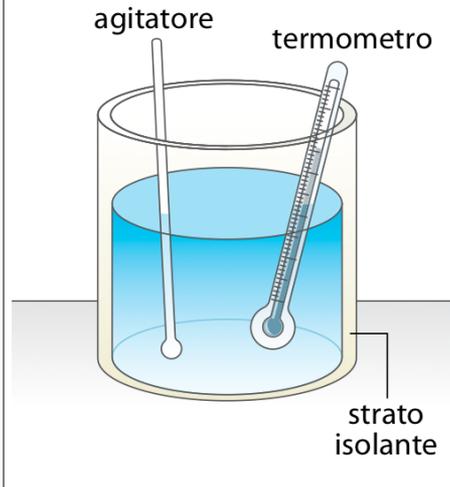
Se $c_1 = c_2$ (stessa sostanza) T_e è:

$$T_e = \frac{m_1 \cdot T_1 + m_2 \cdot T_2}{m_1 + m_2}$$

La legge fondamentale della termologia

Misura di calore specifico con il calorimetro delle mescolanze.

Il calorimetro è formato da un recipiente che contiene acqua, un agitatore e un termometro. Le pareti del calorimetro sono rivestite di materiale isolante.



Nel calorimetro: acqua (massa m_1 , temperatura T_1)

Si aggiunge un corpo di massa m_2 a temperatura T_2 : il sistema va in equilibrio a temperatura T_e

$$(m_1 + m_e) \cdot c_1 \cdot (T_e - T_1) = -m_2 \cdot c_2 \cdot (T_e - T_2)$$

m_e : **equivalente in acqua del calorimetro**, tiene conto del calore assorbito dal calorimetro

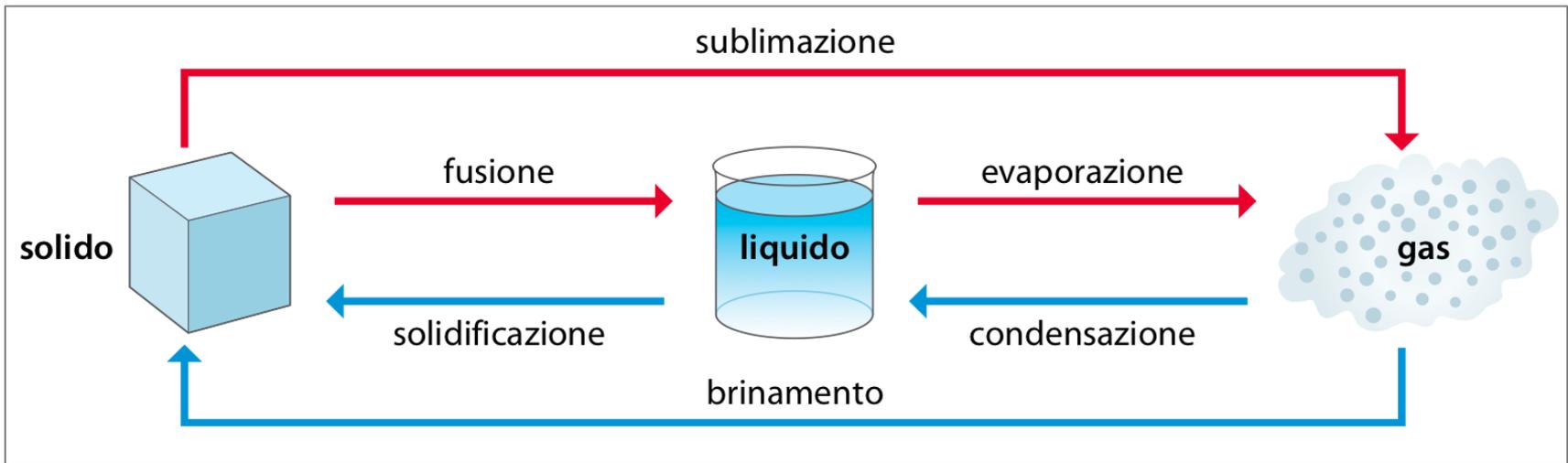
Misurando T_e si può determinare il **calore specifico sconosciuto c_2**

Il calore latente

Durante un cambiamento di stato la temperatura di una sostanza rimane costante; il cambiamento di stato avviene per sottrazione o cessione di calore

Il calore latente

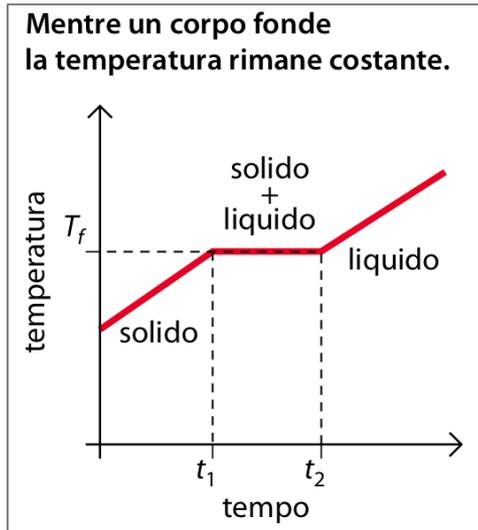
- **Cambiamento di stato:** passaggio di una sostanza da uno stato di aggregazione a un altro



Durante un cambiamento di stato la temperatura resta costante

Il calore latente

- **Fusione:** passaggio dallo stato solido allo stato liquido
- La **fusione** avviene per assorbimento di calore



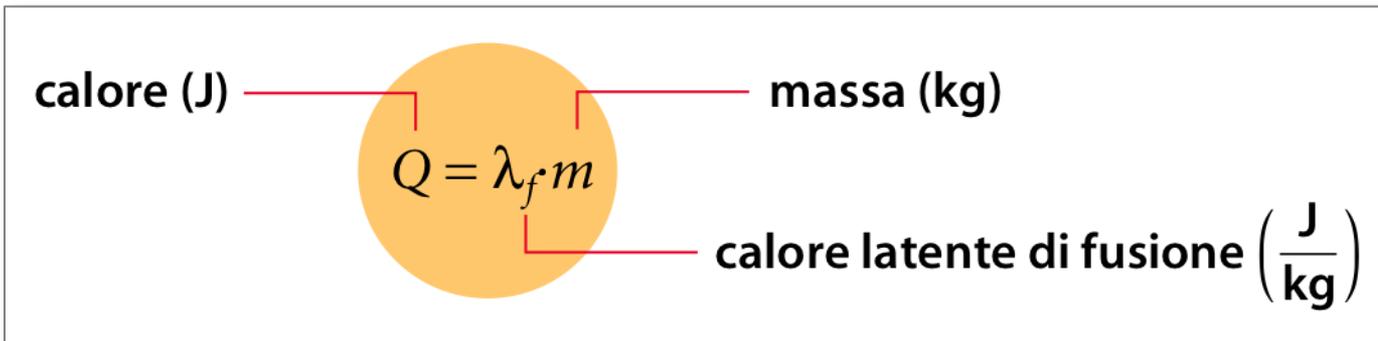
Il solido **assorbe calore**: la sua **temperatura sale** fino alla **temperatura di fusione** T_f - inizia il cambiamento di stato

Fusione: il solido **continua ad assorbire calore**, ma la **temperatura resta costante** al valore T_f

A **fusione completata**, se il corpo **continua ad assorbire calore**, la sua **temperatura cresce**

Il calore latente

•Se una **massa m** di sostanza solida si trova alla **temperatura di fusione T_f** , la **quantità di calore Q necessaria per farla fondere è direttamente proporzionale a m**



calore (J) — $Q = \lambda_f m$ — massa (kg)

calore latente di fusione $\left(\frac{\text{J}}{\text{kg}}\right)$

La costante di proporzionalità λ_f , caratteristica di ogni sostanza, è il calore latente di fusione, nel SI si misura in **J/kg**

Il calore latente

ESEMPIO 1 Per fondere un pezzo di ghiaccio di 1,0 kg che si trova alla temperatura di 0 °C ($\lambda_f = 334\,000$ J/kg), occorre la seguente quantità di calore:

$$Q = \lambda_f \cdot m = (334 \times 10^3 \text{ J/kg}) \times (1,0 \text{ kg}) = 3,34 \times 10^5 \text{ J}$$

Tabella 1 Temperatura di fusione e calore latente (a pressione normale)

Sostanza	T_f (°C)	λ_f (kJ/kg)
Idrogeno	-259	59
Azoto	-210	26
Ossigeno	-219	14
Alcol etilico	-114	105
Mercurio	-39	12
Ghiaccio	0	334
Piombo	327	25
Argento	961	105

- Il cambiamento di stato **inverso** della fusione è la **solidificazione**: avviene alla **stessa temperatura della fusione**, con **cessione di calore** da parte del liquido
- Il **calore latente di solidificazione** è il calore ceduto dalla massa unitaria di liquido durante la solidificazione, ed è uguale al calore latente di fusione.

Il calore latente

- **Evaporazione:** passaggio dallo stato liquido allo stato gassoso
- L'evaporazione avviene per assorbimento di calore

Tabella 2 Temperatura di ebollizione e calore latente di evaporazione (a pressione normale)

Sostanza	T_e (°C)	λ_f (kJ/kg)
Idrogeno	-253	452
Azoto	-196	201
Ossigeno	-183	213
Alcol etilico	78	854
Acqua	100	2250
Mercurio	357	272
Piombo	1750	871
Argento	2193	2336

Molti liquidi evaporano anche (in superficie) a temperatura ambiente

Nell'**ebollizione** il cambiamento di stato interessa tutto il volume di liquido e avviene a temperatura costante (**temperatura di ebollizione**)

La temperatura di ebollizione dipende dalla pressione

Il calore latente

•Se una **massa** m di sostanza solida si trova alla **temperatura di evaporazione** T_e , la **quantità di calore** Q necessaria per farla evaporare è **direttamente proporzionale a** m :

$$Q = \lambda_v \cdot m$$

λ_v , è il calore latente di evaporazione, nel SI si misura in **J/kg**

La **condensazione** è il cambiamento di stato **inverso** della evaporazione, e avviene alla **stessa temperatura**, con **cessione di calore** da parte del liquido (il calore latente di condensazione è uguale a quello di evaporazione)

La propagazione del calore

Il calore si propaga da punti a temperatura più alta a punti a temperatura più bassa

PROPAGAZIONE DEL CALORE



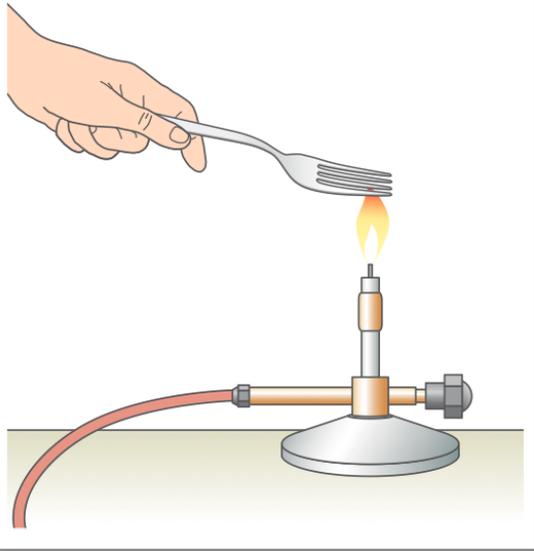
Propagazione a causa di urti microscopici di particelle (presuppone contatto)

Propagazione a causa del moto nel suo insieme di un fluido convettore a T alta (es. termosifoni)

Propagazione attraverso radiazione IR elettromagnetica o micro-onde (non presuppone contatto)

La propagazione del calore

La punta della forchetta viene scaldata sul fuoco; dopo un po' il calore si propaga fino al manico.



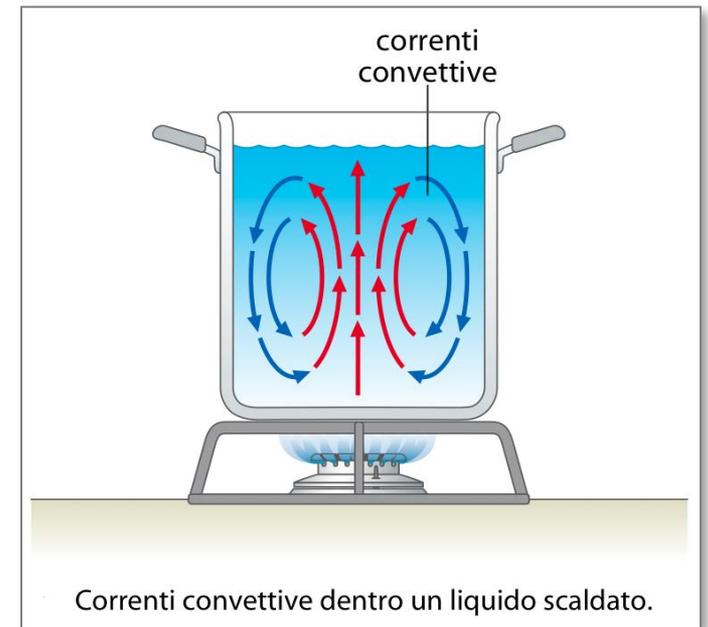
- All'interno di un solido il calore si propaga per **conduzione**
- La conduzione del calore è dovuta alla trasmissione di vibrazioni tra atomi vicini all'interno del solido.
- Si ha **trasmissione di energia** all'interno del solido, ma **non si ha trasporto di materia**

La propagazione del calore

- All'interno di un **fluido** (liquido o gas) il calore si propaga soprattutto per **convezione**.

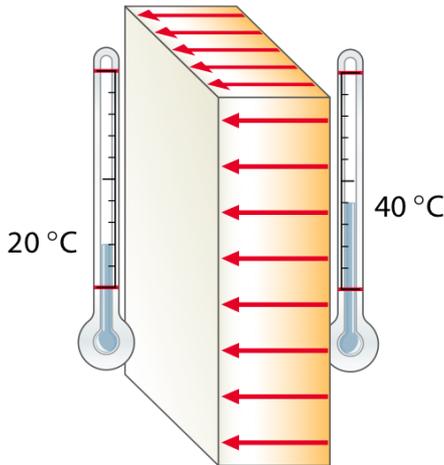
Il fluido, scaldandosi, varia la sua densità: il fluido più caldo tende a salire, e quello più freddo scende a prendere il suo posto

Si innescano delle correnti convettive che coinvolgono tutto il fluido: si ha **trasmissione di energia** nel fluido, e si ha anche **trasporto di materia**



La propagazione del calore

Il calore passa dalla parete più calda a quella più fredda. La rapidità del passaggio dipende dalla differenza di temperatura, dallo spessore della parete e dal tipo di materiale.



• Legge di Fourier della conduzione

• La quantità di calore che si propaga per conduzione in un tempo Δt attraverso una parete di area A e spessore d , ai due lati della quale è mantenuta una differenza di temperatura ΔT , è:

$$Q = k \cdot \frac{A \cdot \Delta T \cdot \Delta t}{d}$$

k : **coefficiente di conducibilità termica**, caratteristico del materiale. Nel SI il coefficiente di conducibilità termica si misura in $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

La propagazione del calore

•Le sostanze con un **coefficiente di conducibilità termica elevato**, per esempio i **metalli**, sono **buoni conduttori di calore**.

•Gli **isolanti termici**, per esempio i **gas**, o i materiali che **inglobano aria** nella loro struttura, hanno una **bassa conducibilità termica**

Tabella 1 Coefficiente di conducibilità termica di alcune sostanze in $W/(m \cdot K)$ a $20\text{ }^\circ\text{C}$

Argento	430	Gesso	1,3
Rame	390	Laterizi	0,6
Alluminio	235	Vetro	0,5 ÷ 0,9
Zinco	116	Legno	0,1 ÷ 0,4
Ferro	67	Gomma	0,15
Bronzo	190	Sughero	0,05 ÷ 0,11
Ottone	120	Cemento	0,4 ÷ 1,7
Ghisa	60	Aria secca	0,025
Acciaio	50	Lana di roccia	0,043
Ghiaccio	2,1	Poliuretano esp.	0,024

La propagazione del calore

- Nella trasmissione per **irraggiamento**, il calore viene scambiato come **radiazione elettromagnetica**, che si propaga anche nel vuoto.
- Tutti i corpi **emettono radiazione elettromagnetica** (**visibile** per i corpi più caldi, **infrarossa** per quelli più freddi).
- La **potenza irradiata** da un corpo di superficie A alla temperatura T (misurata in kelvin) è espressa dalla **legge di Stefan-Boltzmann**:

$$\text{potenza irradiata} = \frac{Q}{\Delta t} = c \cdot A \cdot T^4$$

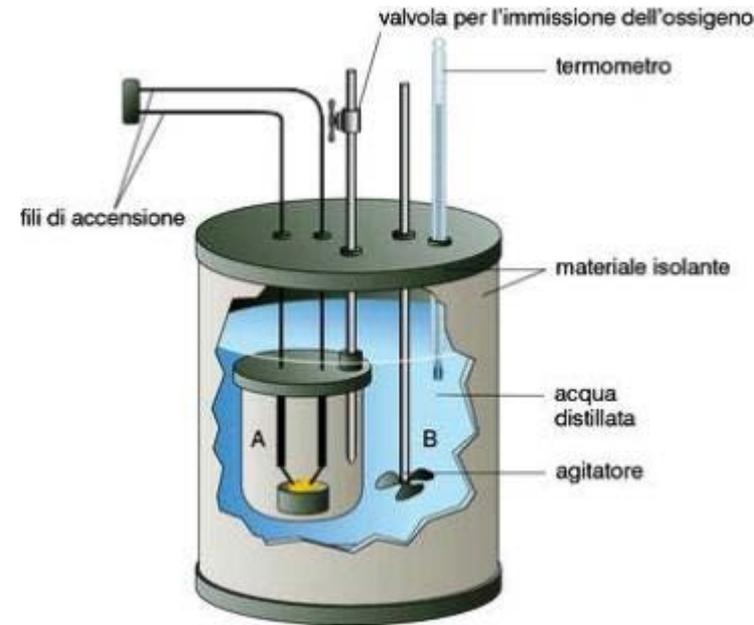
La costante c dipende dal materiale che costituisce la superficie.

Quando la radiazione elettromagnetica incide su un corpo, viene in parte **riflessa** e in parte **assorbita**, riscaldando il corpo stesso

Il calorimetro

Lo strumento usato per misurare il calore si chiama calorimetro. Esistono diversi tipi di calorimetri che, pur se basati su fenomeni diversi, sono tuttavia fra di loro sostanzialmente equivalenti.

Se un recipiente contiene una miscela di acqua e ghiaccio fra di loro in equilibrio e se il recipiente viene posto per un certo tempo a contatto con un sistema più caldo si riscontra che una parte del ghiaccio fonde, senza tuttavia che cambi la temperatura della miscela. Il calore che il recipiente (calorimetro) ha ricevuto è misurato dalla quantità di ghiaccio che si è fuso. Fra i vari modelli di calorimetro a ghiaccio, alcuni sono molto sofisticati come il calorimetro di Bunsen e consentono una misura assai precisa della quantità di ghiaccio disciolta.



Unità di misura

Come unità di misura del calore, per lungo tempo la più usata è stata la caloria, definita come la quantità di calore che va sottratta a un grammo di acqua per far passare la sua temperatura da $15,5^{\circ}\text{C}$ a $14,5^{\circ}\text{C}$.

La taratura del calorimetro a ghiaccio può essere effettuata tenendo conto che per sciogliere un grammo di ghiaccio a 0°C sono necessarie circa 79,7 calorie. Si può dire che il calore è l'energia che si scambia tra corpo e ambiente solo in virtù della differenza di temperatura tra corpo e ambiente. Oggi si va sempre più diffondendo 'adeguamento alla convenzione internazionale che suggerisce di misurare il calore nelle stesse unità di misura dell'energia meccanica, cioè in joule.

1 kJ	1 kWh	1 kcal	1 BTU	1 kg_p·m	1 kg_p·m
1 kJ	1	$2,778 \times 10^{-4}$	0,2388	0,9478	$1,020 \times 10^2$
1 kWh	3600	1	859,8	3412	$3,671 \times 10^5$
1 kcal	4,187	$1,163 \times 10^{-3}$	1	3,968	$4,269 \times 10^2$
1 BTU	1,055	$2,941 \times 10^{-4}$	0,2519	1	$1,076 \times 10^2$
1 kg_p·m	$9,807 \times 10^{-3}$	$2,721 \times 10^{-6}$	$2,342 \times 10^{-3}$	$9,295 \times 10^{-3}$	1

Trasformazioni termodinamiche

Trasformazioni fra stati di equilibrio

- Chiameremo così quelle trasformazioni che portano il sistema da uno stato iniziale di equilibrio a uno stato finale anch'esso di equilibrio

Trasformazioni cicliche

- Una trasformazione si dice ciclica se lo stato iniziale e quello finale sono fra di loro identici

Trasformazioni quasi statiche

- Sono definite come trasformazioni durante le quali il sistema passa solo attraverso stati di equilibrio (esse rappresentano solo uno schema teorico)

Trasformazioni reversibili

- Se è possibile eseguire una trasformazione che riporti il sistema allo stato iniziale, seguendo a ritroso la stessa sequenza di stati intermedi

Trasformazioni termodinamiche

Trasformazioni irreversibili

- O non sono sequenze di infiniti stati di equilibrio
- O subentrano effetti dissipativi
- Oppure accadono entrambe le cose

Trasformazioni spontanee

- A partire da uno stato di equilibrio, un sistema termodinamico può allontanarsi da esso per portarsi in un altro stato (di equilibrio o no), solo se il sistema stesso non è isolato. Da uno stato lontano dall'equilibrio, il sistema, lasciato isolato, compie spontaneamente una trasformazione portandosi in uno stato di equilibrio

Trasformazioni lontane dall'equilibrio

- Può accadere che un sistema termodinamico ce si trasforma rimanga sempre lontano dall'equilibrio. Ciò accade di norma quando il sistema non è isolato né chiuso

Calore e temperatura

