

Physics Education

Laboratory

Lecture 21

**Simulations as tool for
teaching**

Francesco Longo - 04/12/25



The conceptual representation
using computer based simulations
- inquiry based approach
(Inquiry-based learning with
Interactive Simulation)

Materials for Physics education



[SIMULATIONS](#) [TEACHING](#) [RESEARCH](#) [ACCESSIBILITY](#) [DONATE](#)  

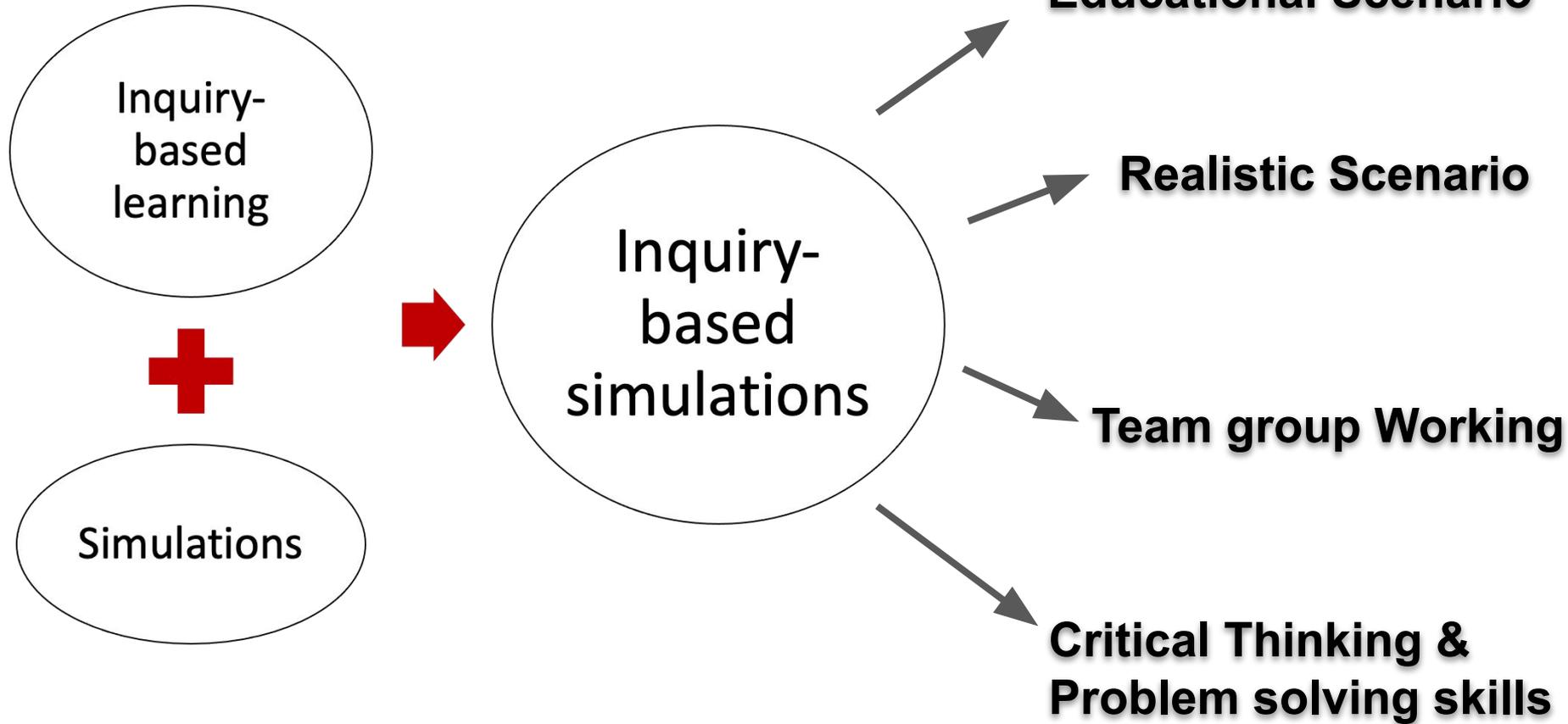
PhET's COVID-19 resources: [remote learning tips](#), [HTML5 prototype sims](#), and [browser-compatible Java sims](#).
Help us keep students learning. [Donate Now](#)



806 million simulations delivered

<https://phet.colorado.edu/>

THEORETICAL FRAMEWORK



WHAT IS AUTHENTIC INQUIRY?

“Authentic scientific inquiry refers to the research that scientists actually carry out. Authentic scientific inquiry is a complex activity, employing expensive equipment, elaborate procedures and theories, highly specialized expertise, and advanced techniques for data analysis and modeling.”

(Chinn & Malhorta, 2002)

“The cognitive models that underlie authentic experiments are fundamentally different from the cognitive models that underlie simple experiments, and the differences in models help account for why there are differences in cognitive processes and epistemology”

(Chinn & Malhorta, 2002)

SIMPLE ILLUSTRATIONS

SIMPLE OBSERVATIONS

SIMPLE EXPERIMENTS

**Increasing of Cognitive
Processes Activated in
Reasoning Tasks**

AUTHENTIC INQUIRY EXPERIMENTS

ASPECTS OF SCIENTIFIC COGNITIVE PROCESSES



Generating a research question



Designing a study to address the research question



Making observations



Explaining results



Developing theories



Studying others' research

**LEVEL / TYPE
OF INQUIRY**

Implications

FOR PHYSICS TEACHERS

When selecting which simulations adopt in their classroom activities try to explore which level/type of inquiry is activated using the teaching/learning materials available.

Create/design NEW TEACHING/LEARNING MATERIALS which let students engage in cognitive processes of **authentic inquiry**

Second research question:

How could we prepare teaching/learning materials for inquiry-based simulations which resemble AUTHENTIC SCIENTIFIC INQUIRY?



Using the framework of the ISLE - INVESTIGATIVE SCIENCE LEARNING ENVIRONMENT (Etkina et al. 2019) which is an example of authentic inquiry-based approach (Brookes et al, 2020)

METHOD

Start from the analysis conducted

For each topic, select the simulation analysed with the higher mean value in the inquiry level performed from the point of view of the cognitive processes activated

Create/design NEW teaching/learning materials which empower an ISLE - process

Administer the teaching/learning materials to a group of in-service physics teachers (training workshop)

Laboratory

Simulating ISLE

Investigative Science Learning Environment, using Computer Simulations

Paul König

Università degli studi di Trieste

June 1, 2023

Laboratory

Doing the Investigation

- Please find groups of 2–3 people.
- Every group gets a different physical phenomenon.



Exercise sheets

Reflections on “Simulating ISLE”

Attività: legge di Faraday

- troppe domande all’inizio e alcune banali e ripetitive.
- nella seconda attività alcuni salti logici: preferibile più passaggi intermedi.
- dopo la parte esplorativa iniziale, doveva essere esplicitato di disattivare gli strumenti e tornare alla configurazione iniziale.
- l’attività ha stimolato un’osservazione più attenta e attiva e la formulazione di ipotesi.

Reflections on “Simulating ISLE” -Circuit

- primo video del circuito viene fatto vedere troppo presto
- utile per associare la corrente al moto degli elettroni, utilizzo della batteria come “generatore” del moto e resistore come modulatore del moto
- aggiungendo una lampadina al circuito si mostra un utilizzo quotidiano del circuito concetto di differenza di potenziale con misure dirette nella simulazione con resistenze e generatore
- nelle relazioni inverse tra resistenza e corrente / tensione con misure dirette per ricavare legge di ohm i grafici sovrapposti possono fare confusione
- ricerca dei pattern

Reflections on “Simulating ISLE” – Geometrical Optics

Q: What do you think happens to the beams when they are passing the lens?

Think about that while drawing

L: What are the rays above the lens?? Principal / Marginal?

C: We also observed what happens, if you move the lens. (how?)

Q: Convex Lens. What does that mean?

H: Think of a hypothesis that describes the patterns ...

T: if you would change the Diameter? ...

C: Describe the difference between a Real- and a Virtual Image.

Q: What does the points with the labels 2F mean? What is the difference between the points with the labels 2F and the ones with the labels F?

Reflections on “Simulating ISLE”

Faraday

- coerenza tra esperimento del video e situazione della simulazione
- uso della simulazione molto guidato per capire il pattern di riferimento
- analizzate variazioni su singoli concetti, uno alla volta, cercando collegamenti tra aspetti della simulazioni e aspetti concettuali
- tanto testuale → meglio le rappresentazioni multiple
- gli studenti devono formare le ipotesi e testare
- difficile pensare ad esperimenti diversi da quelli visti
- difficile testare tante ipotesi contemporaneamente → come se non in laboratorio?

Main topics

Kinematics

Dynamics

Energy

Fluidodynamics

Calorimetry/thermodynamics

Optics

Electrostatics

Magnetism

Electromagnetism

Quantum Mechanics

Special & General relativity

Useful education tools in PER

Early Physics

Multiple Representations in Physics

Historical approaches

Problem-solving; Jeopardy problems

Physics of everyday Thinking

Project Based Education

Modelling instruction

Simulation for Educational Physics

ISLE - Investigative Science Learning

Environment

IBSE - Inquiry Based Science Education

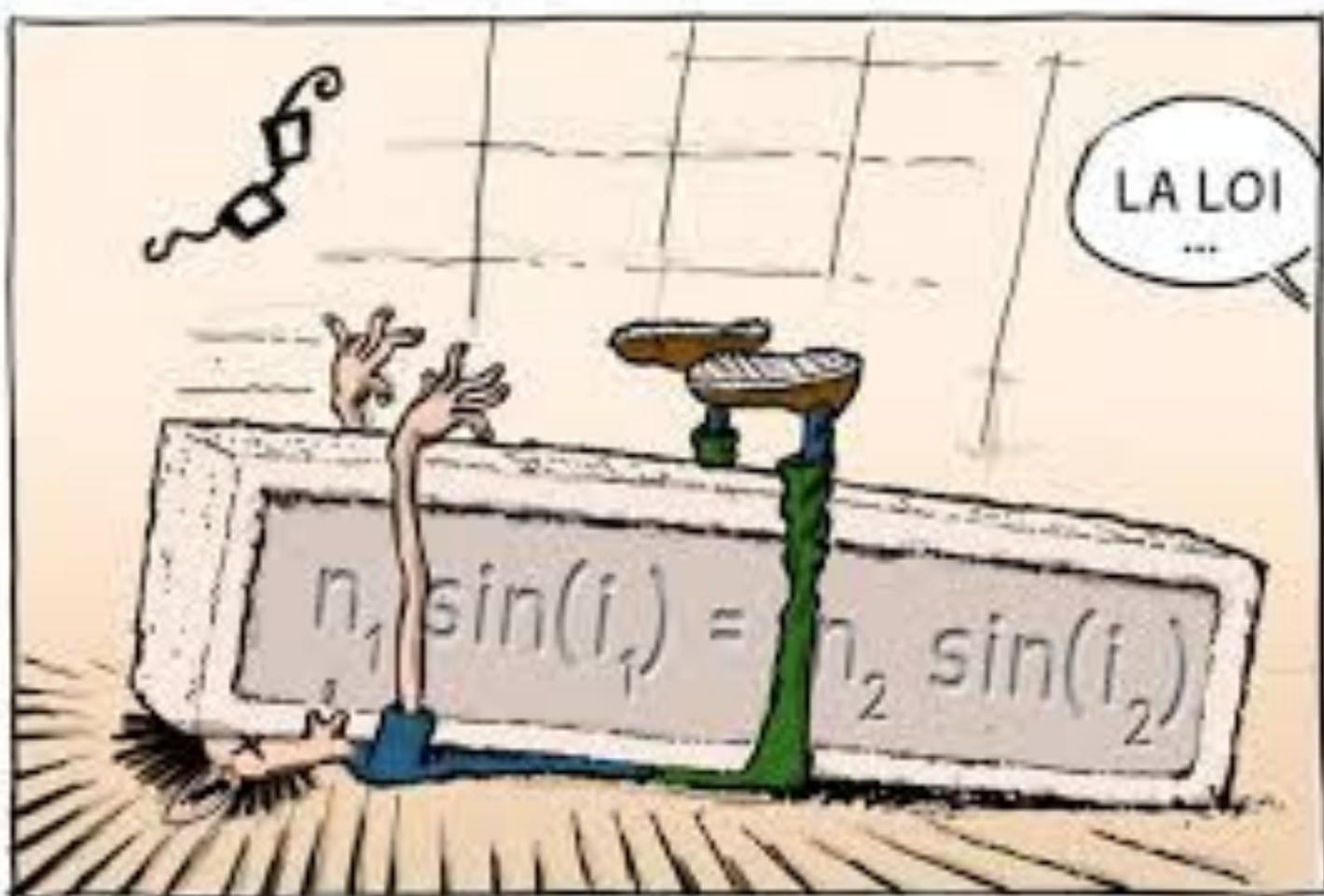
Bayesian updating method

On line educational tool-kit

Physics Education Laboratory Lecture 21

Content Knowledge for Optics
and Acoustics

Francesco Longo - 04/12/25

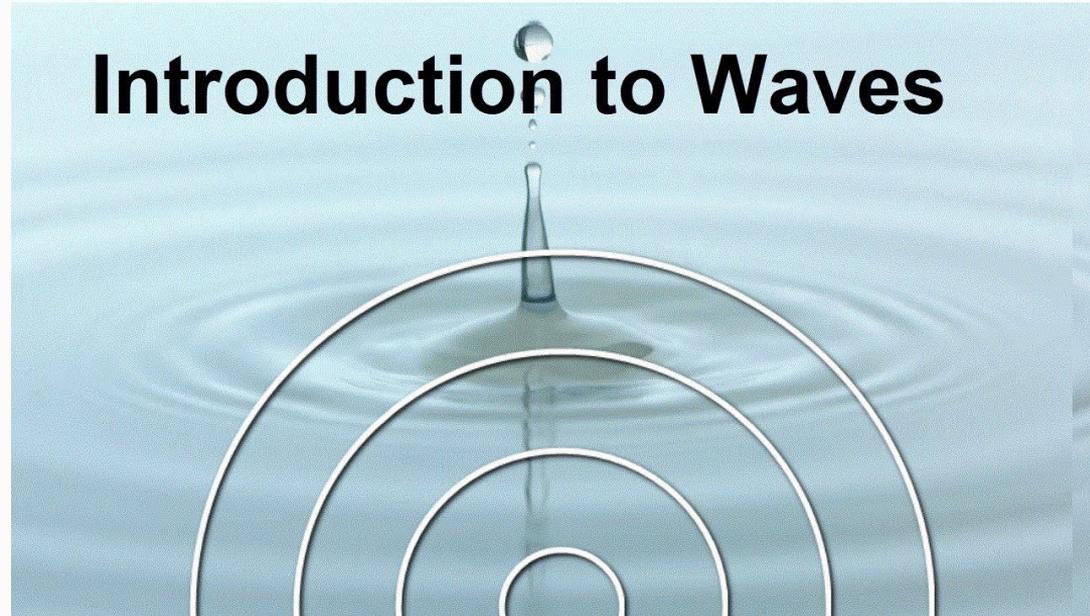


Geometric optics is when we treat light as a single beam (A ray) and study the properties. It deals with lenses, mirrors, phenomenon of total internal reflection, formation of rainbows, etc etc. In this case, the wavelike properties of light become insignificant as the objects we deal with are very huge as compared to the wavelength of light.

In **physical optics**, we consider the wave like properties of light and develop the more advanced concepts on the basis of Huygens' principle. We would deal with Young's double slit experiment and consequently with interference of light which is a characteristic of waves. We also deal with polarization and Diffraction which are also typical wavelike properties. Diffraction happens only when the obstacle's size is of the order of the wavelength of light. Maxwell's electromagnetic theory put the wave theory of light on a very firm footing. It is to be noted that reflection and refraction are explained by physical optics as well.

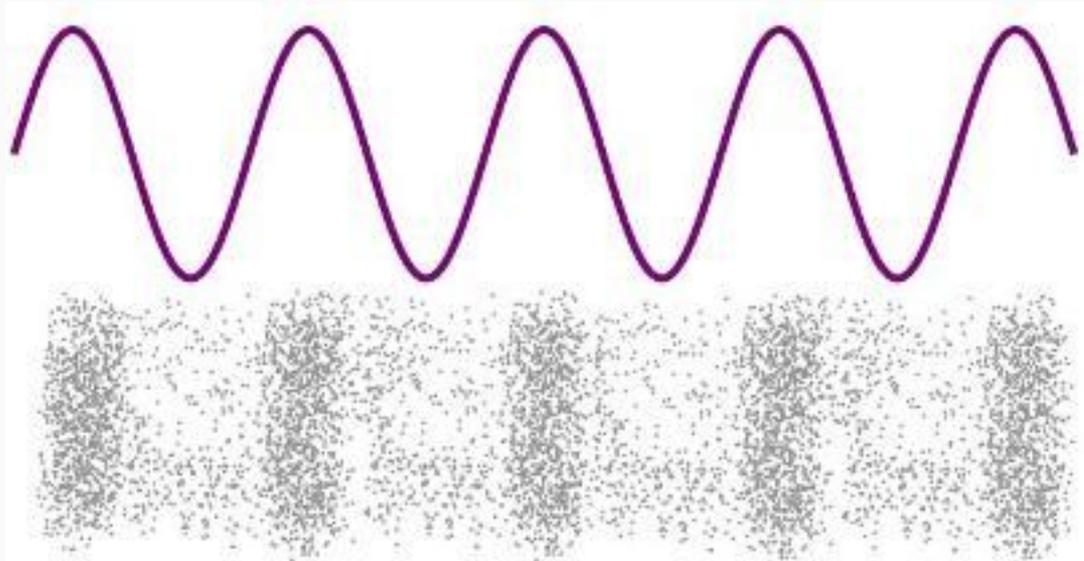
Key Concepts in Wave Physics

- Nature of Waves
- Propagation - Perturbation
- Wave equation
- Waves phenomena
- Huygens' principle



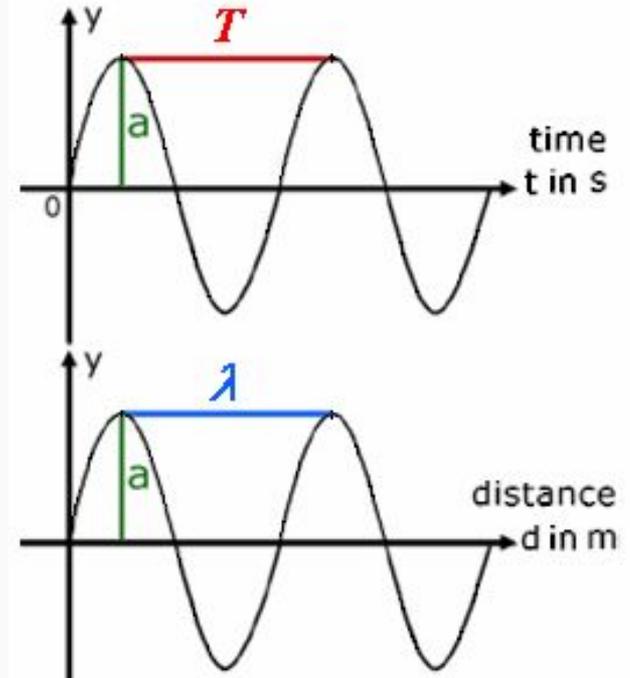
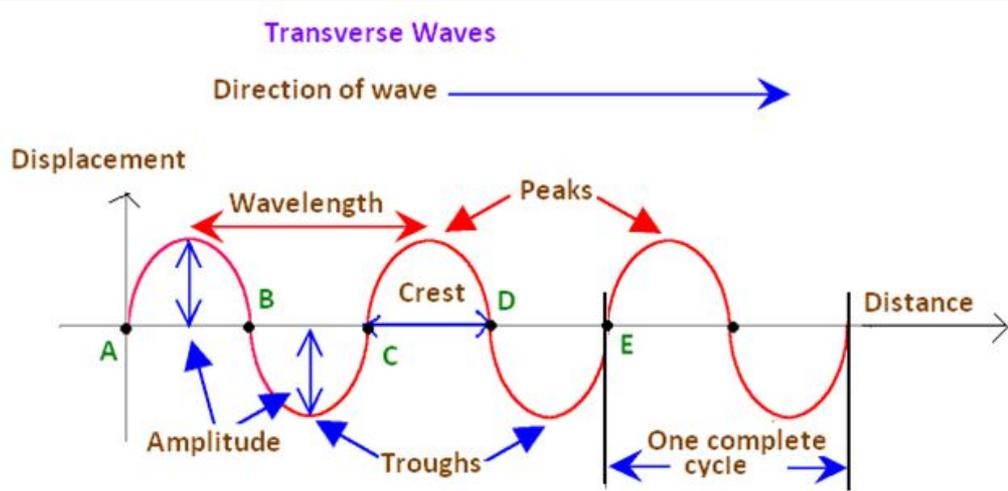
Key Concepts in Wave Physics

- Transverse vs Longitudinal waves



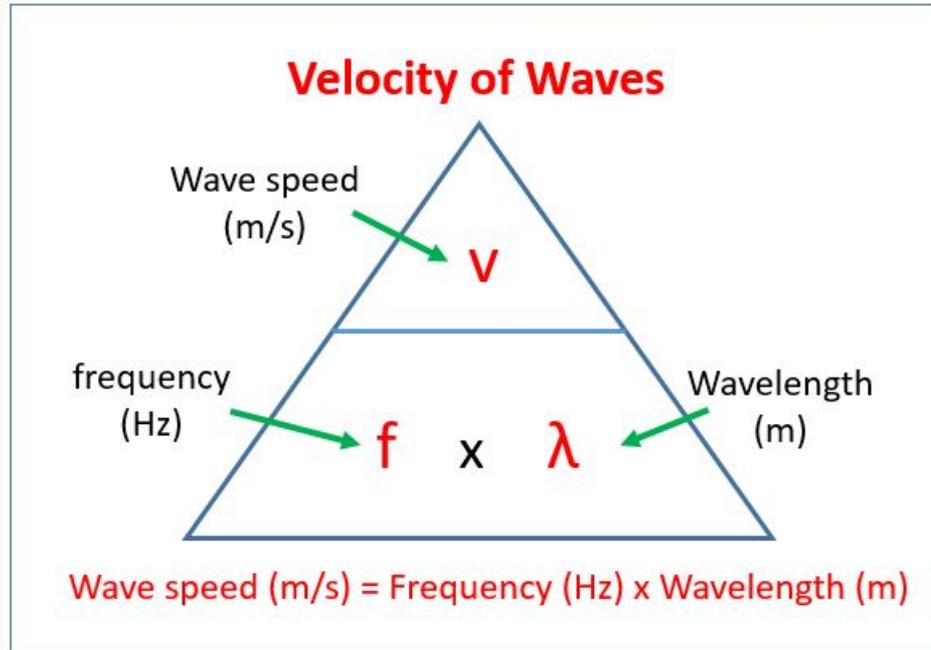
Key Concepts in Wave Physics

- Propagation / Disturbance
- Amplitude, Wavelength, Frequency, Period



Key Concepts in Wave Physics

- Velocity of wave



Key Concepts in Wave Physics

- Wave equation (how?)

The wave equation

Let $y = f(x')$, where $x' = x \pm vt$. So $\frac{\partial x'}{\partial x} = 1$ and $\frac{\partial x'}{\partial t} = \pm v$

Now, use the chain rule: $\frac{\partial y}{\partial x} = \frac{\partial f}{\partial x'} \frac{\partial x'}{\partial x}$ $\frac{\partial y}{\partial t} = \frac{\partial f}{\partial x'} \frac{\partial x'}{\partial t}$

So $\frac{\partial y}{\partial x} = \frac{\partial f}{\partial x'}$ $\Rightarrow \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 f}{\partial x'^2}$ and $\frac{\partial y}{\partial t} = \pm v \frac{\partial f}{\partial x'}$ $\Rightarrow \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 f}{\partial x'^2}$

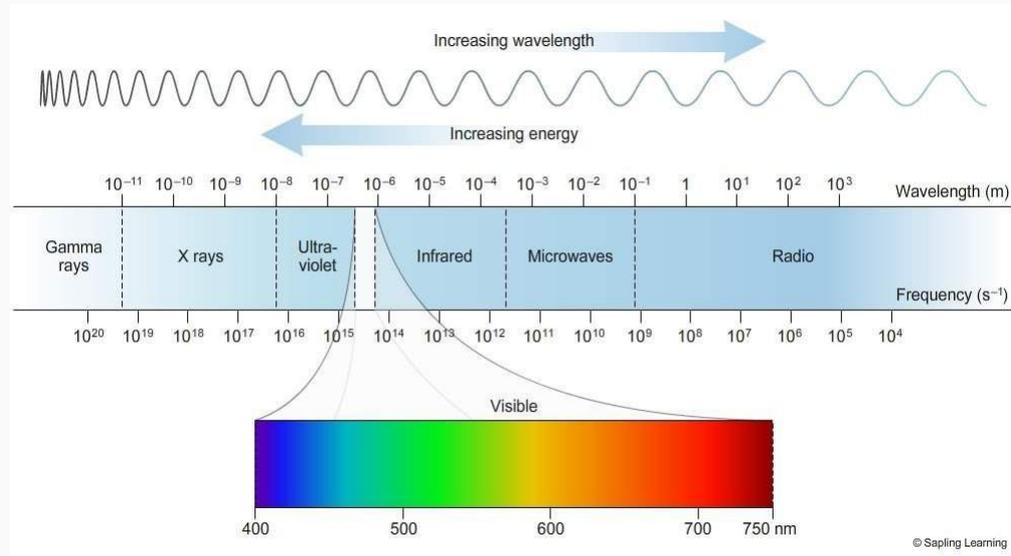
Combine to get the 1D differential wave equation:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$$

works for anything that moves!

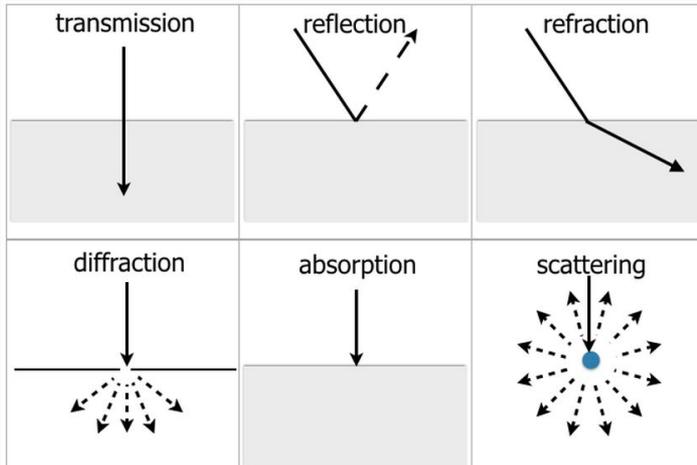
Key Concepts in Wave Physics

- The Electromagnetic spectrum

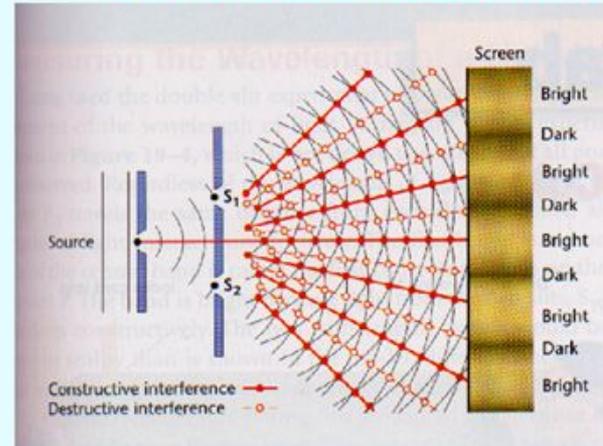


Key Concepts in Wave Physics

- Waves phenomena
- Interference
- Reflection and Refraction



Interference of Waves

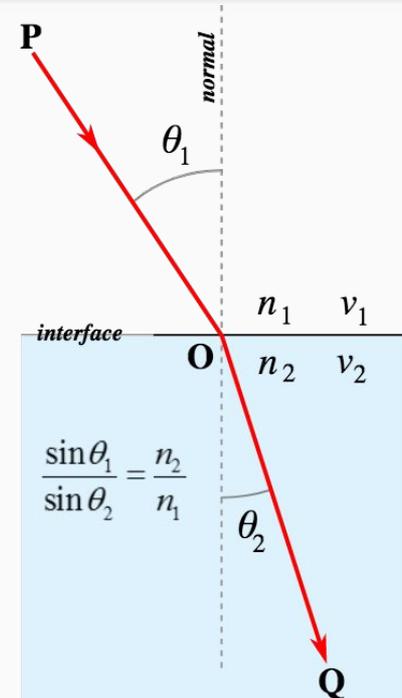
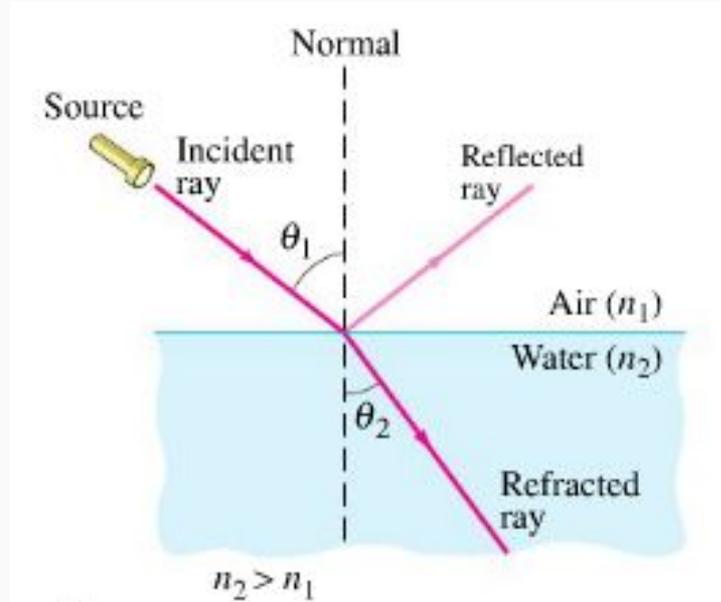


Constructive makes bright bands, destructive makes dark bands.

Where crest meets crest or trough meets trough, we have constructive interference.
Crest plus trough cause destructive interference.

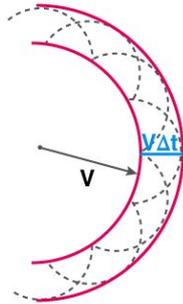
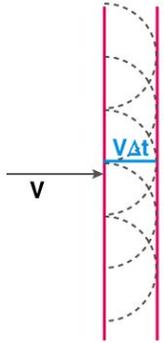
Key Concepts in Wave Physics

- Snell's law

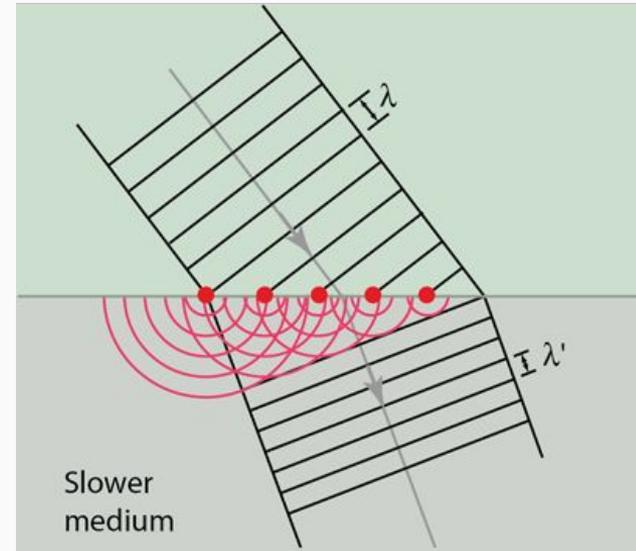
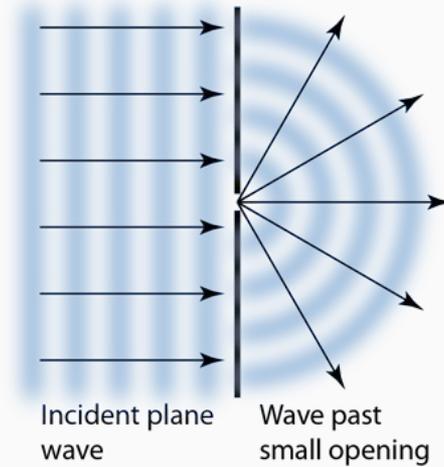


Key Concepts in Wave Physics

- The Huygens' principle



BYJU'S
The Learning App



Key Concepts in Wave Physics

- Acoustic waves
- Intensity of sound

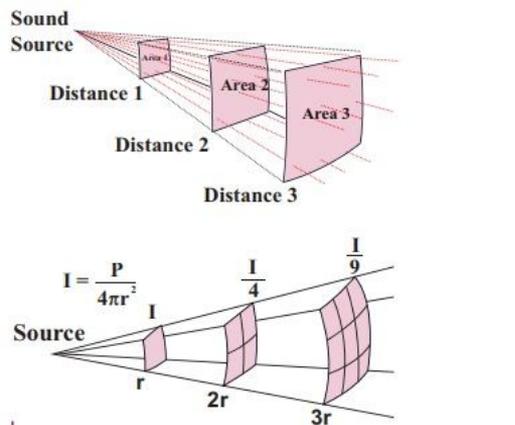
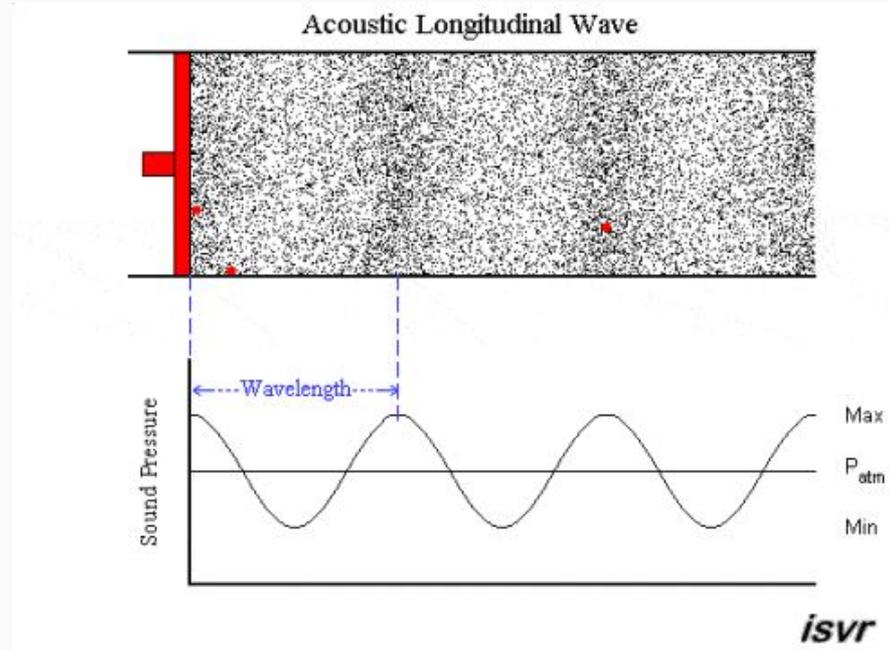
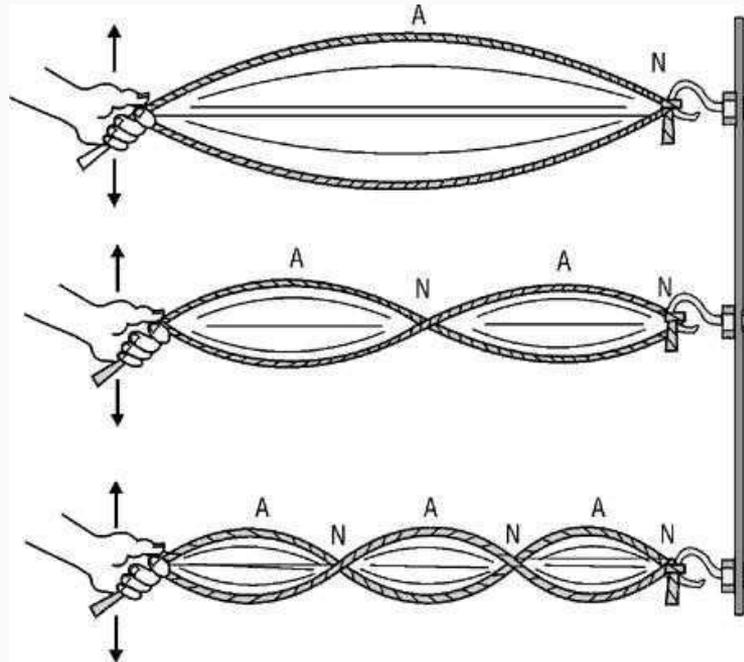


Figure 11.35 Intensity of sound waves



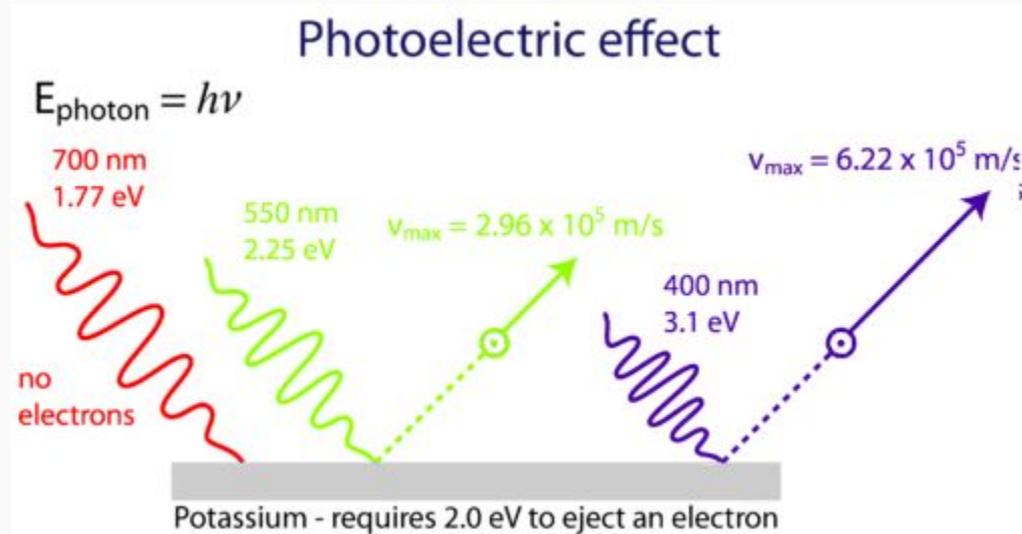
Key Concepts in Wave Physics

- Stationary waves



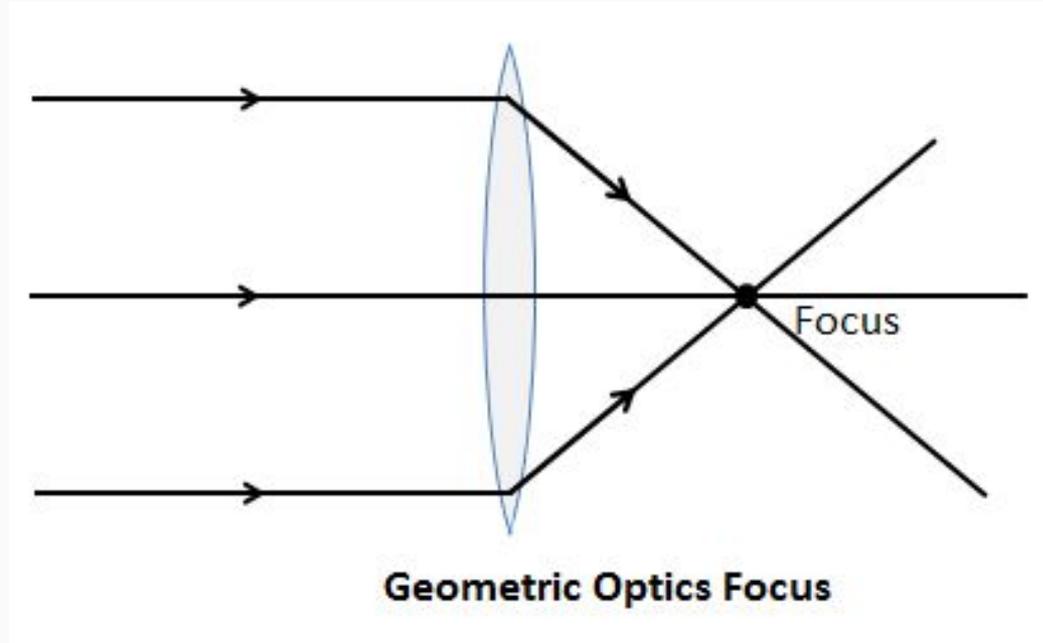
Key Concepts in Wave Physics

- Energy transported by waves



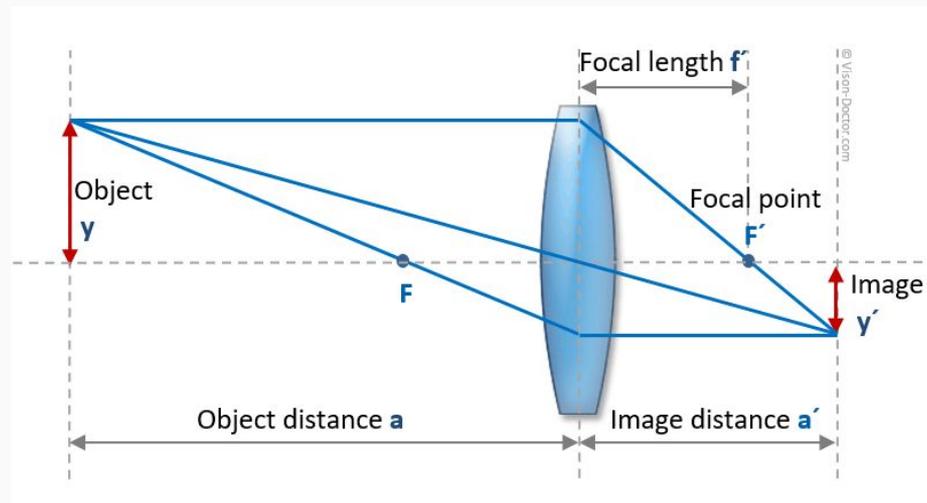
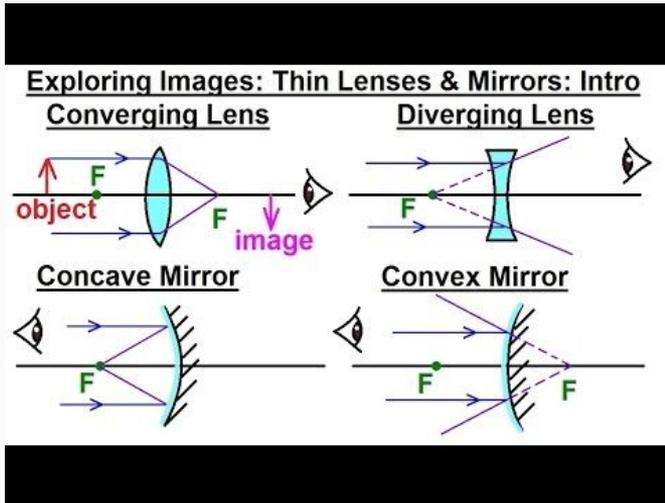
Key Concepts in Geometrical Optics

- Mirrors
- Lenses
- Prisms



Key Concepts in Geometrical Optics

- Image / Object
- Rays



Key Concepts in Geometrical Optics

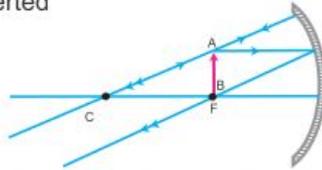
- Mirrors

Images Formed by Concave Mirror

Position of Object: at F

Position of Image: at infinity

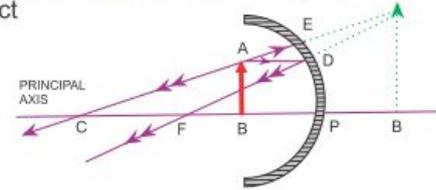
Properties of the image: highly enlarged, real and inverted



Position of Object: between F and P

Position of Image: behind the mirror

Properties of the image: enlarged, virtual and erect

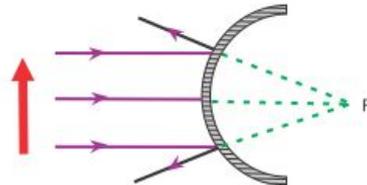


Images Formed by Convex Mirror

Position of Object: at infinity

Position of Image: at F behind the mirror

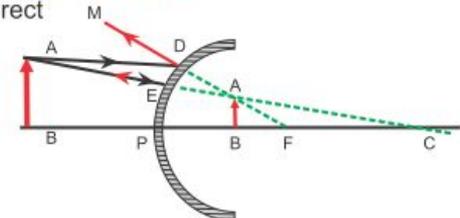
Properties of the image: highly diminished, virtual and erect



Position of Object: between infinity and pole

Position of Image: behind the mirror

Properties of the image: diminished, virtual and erect



Key Concepts in Geometrical Optics

- Lenses equation

teachoo.com

Lens Formula and Magnification

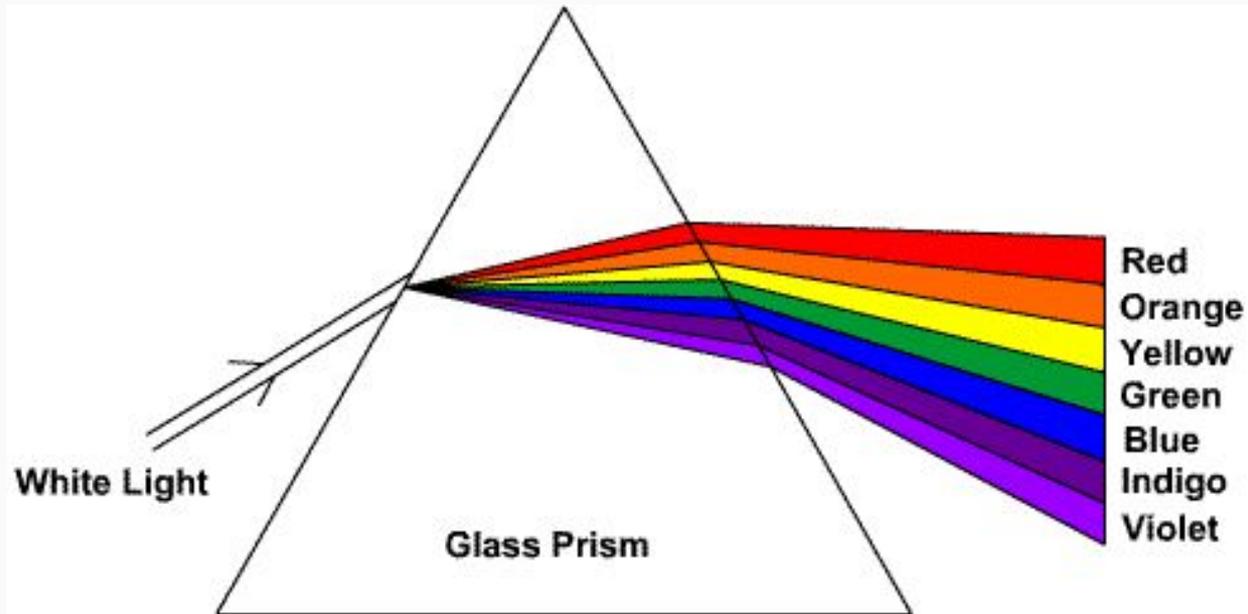
Convex Lens **Concave Lens**

Lens Formula:
$$\frac{1}{v} - \frac{1}{u} = \frac{1}{f}$$

Magnification
$$m = \frac{\text{Height of image}}{\text{Height of Object}}$$

$$m = \frac{v}{u}$$

Key Concepts in Geometrical Optics

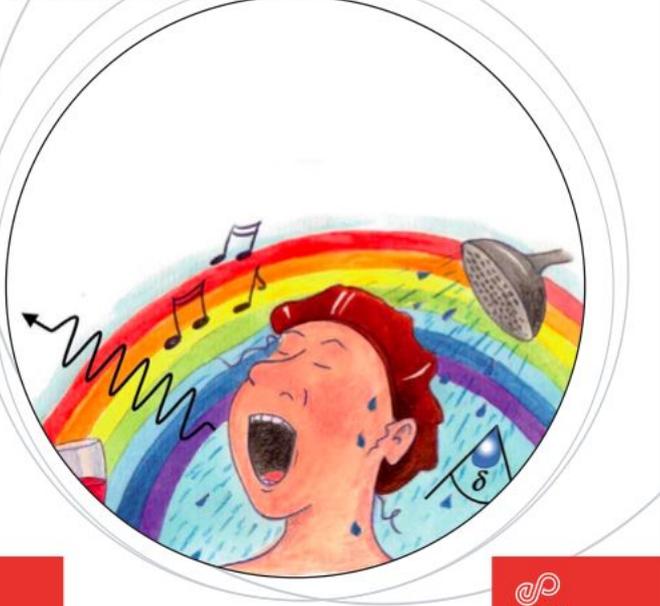


JO HERMANS

With illustrations by Wiebke Drenckhan

Physics in Daily Life

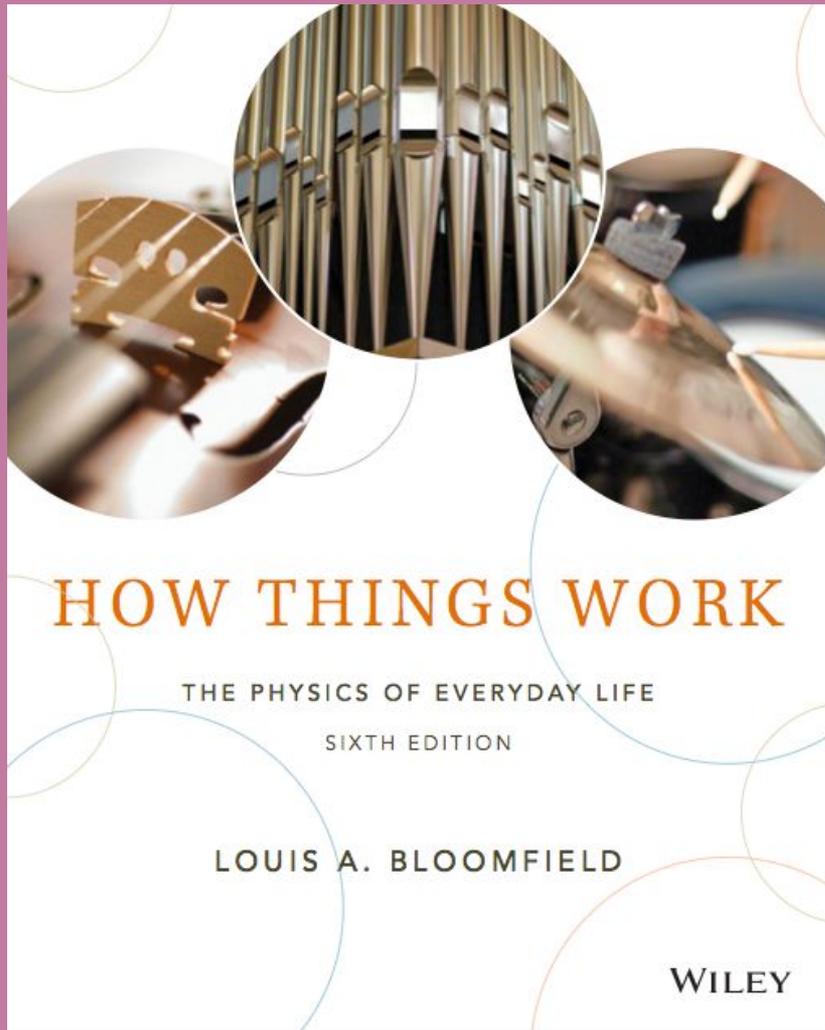
Foreword by Sir Arnold Wolfendale



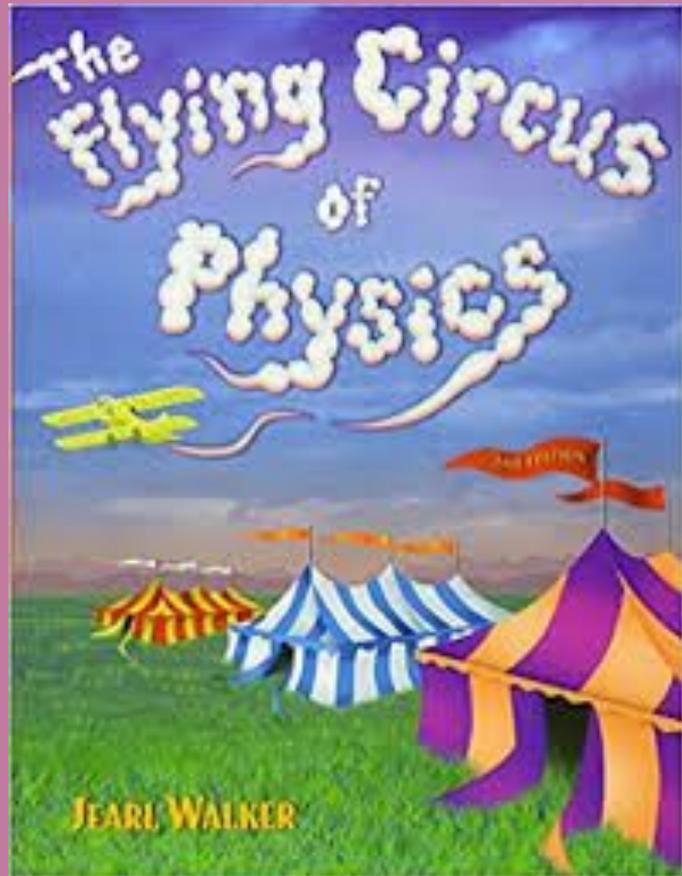

EDP
SCIENCES

https://drive.google.com/file/d/1TAIcDXSI9PVJDvXdoPfAsqpJb2G_uYki/view?usp=sharing

Ch. 3



Ch. 9, Ch. 13



<https://www.youtube.com/c/flyingcircusofphysics>

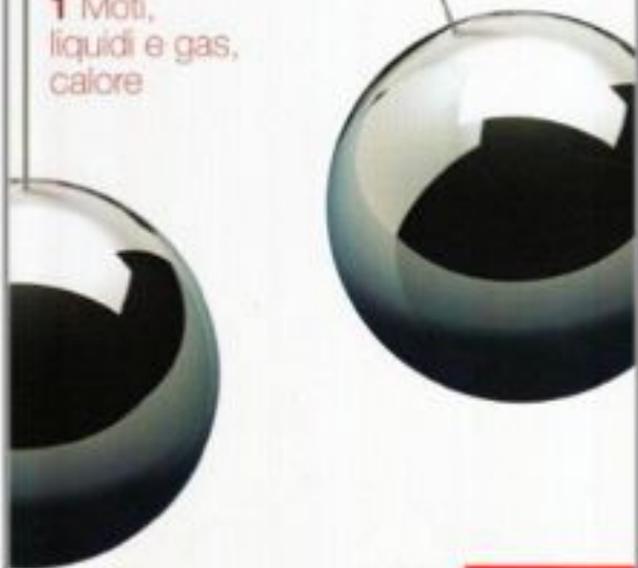


<https://www.youtube.com/channel/UChrOvC-DFkPNxKlxe-XKD3g>

Jearl Walker
**Il luna park
della fisica**

seconda edizione

1 Moti,
liquidi e gas,
calore



SAGGI **ZANICHELLI**

Jearl Walker
**Il luna park
della fisica**

seconda edizione

2 Elettricità,
magnetismo,
suono e colore



SAGGI **ZANICHELLI**

Read the index and choose one topic from daily life experience

5.50 La corrente in un filo teso alla stazione 118

6 OTTICA

Schizzi di colore dappertutto, come un arcobaleno

- 6.1 Arcobaleni 119
- 6.2 Arcobaleni bizzarri 122
- 6.3 Arcobaleni artificiali 124
- 6.4 Il cielo diurno 125
- 6.5 Colori del cielo 126
- 6.6 Montagne azzurre e bianche, nuvole rosse 128
- 6.7 Rosso di sera 129
- 6.8 Tramonti e vulcani 129
- 6.9 Anelli di Bishop 130
- 6.10 Archi di contrasto nelle nuvole 131
- 6.11 Colori del cielo durante un'eclissi solare 131
- 6.12 Quando il cielo diventa verde, meglio andare in cantina 133
- 6.13 Al tramonto il cielo allo zenit che diventa più azzurro 133

6.14	Chiazze scure e borse rosse	135
6.15	Fasce chiare e scure nel cielo	135
6.16	Foschie azzurre, rosse e marroni	135
6.17	Luci delle città lontane	137
6.18	Quanto è lontano l'orizzonte?	137
6.19	Colore del cielo nuvoloso	138
6.20	Carte nel cielo	138
6.21	Aumento di luminosità durante le nevicite	138
6.22	Aumento di luminosità durante le nevicite	138
6.23	Curiosità Raggi solari del solstizio d'inverno a Newgrange	139
6.24	Lampo verde	140
6.25	Distorsione del sole basso sull'orizzonte	141
6.26	Luna rossa durante le eclissi lunari	142
6.27	Rischiaramenti e luccichio delle stelle	142
6.28	Miraggio dell'oasi	143
6.29	Miraggio dentro un muro	144
6.30	Mostri marini, tritoni e miraggi su larga scala	145
6.31	Fantasma tra i fiori	149
6.32	Stafallamenti e luccichio delle stelle	149
6.33	Fasce d'ombra	151
6.34	Aureola di 22° e cani solari	151
6.35	Un cielo pieno di aureole, archi e punti luminosi	152
6.36	Ombra delle montagne	154
6.37	Spazzimento dell'ombra delle nuvole	155
6.38	Colori dell'oceano	156
6.39	Sentiero brillante del Sole e della Luna	157
6.40	Anelli di luce	157
6.41	Ombre e colori nell'acqua	158
6.42	Colore dell'ombra	160
6.43	Vedere la parte buia della Luna	160
6.44	Heiligenschein ed effetto di opposizione	160
6.45	Onde nei campi di grano	164
6.46	Gloria	164
6.47	Corona	165
6.48	Corone sul vetro ghiacciato	166
6.49	Nuvole iridescenti	166
6.50	Luna blu	167
6.51	Colore dei fari antinebbia	167
6.52	Colore della sabbia bagnata	168
6.53	Colori della neve e del ghiaccio	169
6.54	Firnspiegel e scintillio della neve	169
6.55	Whiteout e cecità da neve	170
6.56	Occhiali da sci gialli	171

indice

6.57	Quando il ghiaccio si fa scuro	172
6.58	Nuvole chiare e scure	172
6.59	Nubi nottilucenti	173
6.60	Guardarsi allo specchio	174
6.61	Riflessi sull'acqua e specchi sulla scena	174
6.62	Il fantasma di Pepper e la testa decapitata	176
6.63	Inclinazione delle finestre delle torri di controllo	177
6.64	Immagini in due o tre specchi	177
6.65	Caleidoscopi	179
6.66	Labirinti di specchi	181
6.67	Tiro a segno laser	182
6.68	Triangoli scuri tra gli addobbi natalizi	182
6.69	Da scintillanti a neri più nero del nero	185
6.70	Catarifrangenti	186
6.71	Curiosità Atterraggi al buio al di là delle linee nemiche	187
6.72	Specchi unidirezionali	187
6.73	Specchietti retrovisori interni	188
6.74	Specchietti retrovisori esterni	189
6.75	Il bar delle Folies-Bergère	189
6.76	Arte rinascimentale e proiettori ottici	190
6.77	Arte anamorfica	191
6.78	Luce e buio dei lampioni	192
6.79	Immagini multiple dei doppi vetri	192
6.80	Il riflettore più potente del mondo	193
6.81	I raggi assassini di Archimede	194
6.82	Curiosità Illuminare l'arbitro	195
6.83	Luci spettrali al cimitero	196
6.84	Come il pescatore vede il pesce	196
6.85	Come il pesce vede il pescatore	197
6.86	Leggere attraverso buste chiuse	199
6.87	Curiosità Mangiatori di spade ed esofagoscopia	200
6.88	Optica del box doccia	200
6.89	Magie con la rifrazione	202
6.90	L'uomo invisibile e animali trasparenti	203
6.91	Strade distorte dalla rifrazione	205
6.92	Innaffiare le piante alla luce del sole	206
6.93	Accendere il fuoco con il ghiaccio	206
6.94	Diamanti	207
6.95	Opali	208
6.96	Effetto alessandrite	209
6.97	Zaffiro stellato	209
6.98	Figure in un bicchiere di vino, sulla finestra e in una goccia d'acqua	210
6.99	Ombre con bordi e fasce luminose	211

xv

- 6.100 Fasce chiare e scure sull'ala 213
- 6.101 CURIOSITÀ Onde d'urto dell'automobile Thrust SSC 215
- 6.102 La fotocamera stenopeica e il suo contrario 215
- 6.103 Immagini del sole sotto gli alberi 217
- 6.104 Luci attraverso uno schermo, righe fra le dita 217
- 6.105 Graffi chiari e ragnatele colorate 219
- 6.106 Striature luminose sul parabrezza 221
- 6.107 Riflessi su un disco di vinile 223
- 6.108 Colori creati da oggetti con sottili scanalature 224
- 6.109 Anticontraffazione: elementi otticamente variabili 225
- 6.110 Anelli colorati su uno specchio appannato o polveroso 226
- 6.111 Colore del latte nell'acqua 228
- 6.112 Colore del fumo dei fuochi da campo 228
- 6.113 Effetto ouzo 229
- 6.114 Colori di macchie d'olio, pellicole di sapone e pentole di metallo 229
- 6.115 Colori strutturali di insetti, pesci, uccelli e del fondoschiena di scimmie 229
- 6.116 Perle 235
- 6.117 Protuberanze sugli occhi degli insetti e sugli aerei *stealth* 235
- 6.118 Piante iridescenti 237
- 6.119 Anticontraffazione: inchiostri otticamente variabili 238
- 6.120 Saturazione del colore nei petali dei fiori 239
- 6.121 Giallo brillante dei pioppi tremuli 239
- 6.122 Colori degli occhi 240
- 6.123 Diventare blu dal freddo 240
- 6.124 Screziature 241
- 6.125 Colori alla luce fluorescente 243
- 6.126 Occhiali da sole polarizzati 244
- 6.127 Polarizzazione del cielo 245
- 6.128 Orientamento delle formiche 248
- 6.129 Colori, macchie e polarizzazione 249
- 6.130 Assenza di colore in schiume e polveri macinate 251
- 6.131 Lucentezza del velluto nero e dello smalto 252
- 6.132 Colori del vetro verde e del velluto verde 253
- 6.133 Pelle di pesca e apparente morbidezza 254
- 6.134 Feste con Twinkies e vaselina 254
- 6.135 Colori della carne 255
- 6.136 Una birra piccola 256
- 6.137 «Lava più bianco» 257
- 6.138 Moneta che scompare 257
- 6.139 Occhiali da sole e smog 258
- 6.140 Lucentezza dell'oceano 259
- 6.141 Nastro blu sul mare all'orizzonte 259
- 6.142 L'oscurità cala all'improvviso 260

6.143 Scie
6.144 Nu
6.145 Lu
6.146 In
6.147 Ri
6.148 N
6.149 L
6.150 P
6.151 F
6.152
6.153
6.154
6.155
6.156

7.1
7.2
7.3
7.4

7.1

7.1

7.1

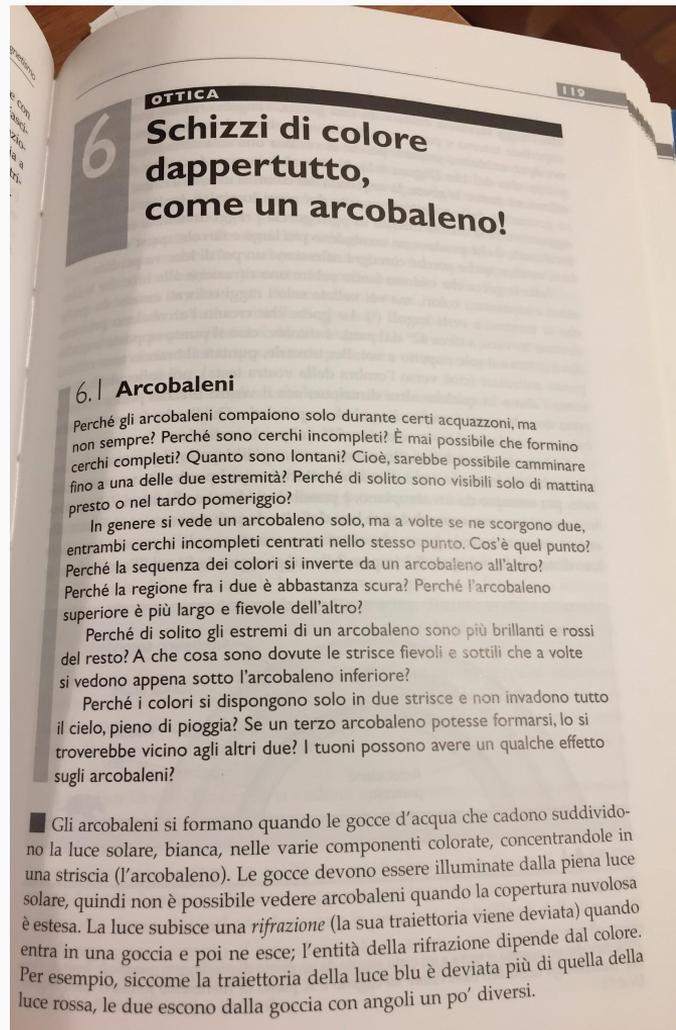
7.1

7.1

- 6.143 Scie di condensazione colorate 260
- 6.144 Nubi madreperlacee 261
- 6.145 Luce violetta del crepuscolo 261
- 6.146 Increspatura nel cielo 262
- 6.147 Riga che attraversa la pioggia lontana 262
- 6.148 Notti chiare 263
- 6.149 Luce zodiacale, *gegenschein* e altre luci notturne 263
- 6.150 Riflessi dell'orizzonte marino 264
- 6.151 Focalizzare la luce con una sfera metallica piena 265
- 6.152 Strane rotazioni in uno specchio curvo 266
- 6.153 Colore del fumo di sigaretta 267
- 6.154 Vedere nell'ultravioletto 267
- 6.155 Alfabeto diffratto 267
- 6.156 Giochi con i riflessi 268

Il Luna Park della Fisica

L'Arcobaleno



Se le dimensioni delle gocce sono grosso modo uniformi, è possibile vedere i fiocchi archi soprannumerari; in caso contrario, questi si sovrappongono troppo per essere distinguibili, perciò si vede soltanto un debole e diffuso alone biancastro.

Fra i modelli teorici degli arcobaleni, i più semplici funzionano bene nel caso di gocce più grandi di 0,1 mm circa, ma gocce più piccole richiedono modelli molto più complessi, ancora in corso di studio.

I tuoni fanno oscillare le gocce e quindi ne distorcono la forma, con il risultato di rendere i colori indistinti o di farli scomparire. Questo può succedere anche a causa di oscillazioni create nelle gocce dallo sbalottamento cui l'aria le sottopone mentre cadono, soprattutto se esse sono grandi.

6.2 Arcobaleni bizzarri

Perché alcuni arcobaleni sono bianchi e altri rossi? Come si spiega la rarità e la povertà di colori degli arcobaleni che si vedono alla luce della luna? Che forme e colori hanno gli arcobaleni che si vedono nella nebbia, su una nuvola o su un prato coperto di rugiada? Quando si vede un arcobaleno nel cielo sopra uno specchio d'acqua e allo stesso tempo un arcobaleno sulla superficie liquida, il secondo è un semplice riflesso del primo?

In rari casi, vicino alla parte inferiore di un arcobaleno normale si può vedere una striscia di colori che sembra verticale. Da che cosa ha origine? Gli arcobaleni normali vengono prodotti dalla luce visibile. Anche la luce infrarossa e quella ultravioletta producono arcobaleni?

■ La separazione dei colori negli arcobaleni è minore se le gocce d'acqua sono più piccole. Uno dei motivi è che, se il diametro della goccia è minore, i colori hanno meno probabilità di separarsi al suo interno; se le gocce sono abbastanza piccole, essi si sovrappongono e formano un arcobaleno bianco.

Gli arcobaleni rossi possono formarsi quando il sole è basso sull'orizzonte; in questa situazione la luce solare deve attraversare l'atmosfera per un lungo tratto, quindi la diffusione della luce da parte delle molecole d'aria le sottrae gran parte della componente blu, a uno degli estremi dello spettro visibile, così che le gocce sono illuminate più che altro da luce rossa.

Di notte possono apparire arcobaleni formati dalla luce della luna; sembreranno però sbiaditi perché al buio l'occhio umano vede male i colori. Questi arcobaleni vengono notati di rado perché sono fiocchi, e anche perché nessuno si aspetta di vedere arcobaleni di notte.

Si possono vedere arcobaleni nella nebbia, su banchi di nuvole o su prati coperti di rugiada, ma sono difficili da individuare, perché spesso le gocce sono tanto piccole che non danno luogo a colori distinti e gli archi potrebbero confondersi nel bagliore diffuso. Si tratta di strisce bianche, a forma di iperbo-

6.2 Arcobaleni

li o ellissi

tale. È an

superficie

Se si f

vedere st

ce rifless

mare un

re una o

ficie del

bili di t

rispetto

so non

nella fo

An

mità c

chio c

poi il

possibile vederlo. E anche possibile vedere un arcobaleno su uno specchio d'acqua, se la superficie è in parte ricoperta di gocce sospese.

Se si forma un arcobaleno normale sopra uno specchio d'acqua, è possibile vedere sulla superficie liquida un arcobaleno riflesso, che però non è un semplice riflesso del primo perché è formato da un insieme diverso di gocce. Per formare un arcobaleno riflesso, i raggi luminosi devono entrare nelle gocce, subire una o due riflessioni al loro interno, uscirne e poi venire riflessi dalla superficie dell'acqua prima di propagarsi nella vostra direzione. Le gocce responsabili di tutto questo si trovano a un angolo differente nel vostro campo visivo rispetto a quelle che formano l'arcobaleno normale; perciò l'arcobaleno riflesso non si sovrappone a quello normale (per esempio sarà un po' diverso sia nella forma sia nella posizione rispetto ad altri oggetti, come una nuvola).

Anche le strisce apparentemente verticali, a volte visibili vicino alle estremità di un arcobaleno normale, sono prodotte da luce riflessa da uno specchio d'acqua; in questo caso, però, la luce prima viene riflessa all'angolo giusto per illuminare la luna? In casi rari si può vedere un arcobaleno aggiuntivo completo che circonda quello normale (e che spesso viene identificato per errore con l'arcobaleno terziario). L'arcobaleno normale è centrato nel punto antisolare; quello aggiuntivo, invece, è centrato in un punto spostato verso l'alto rispetto al punto antisolare, a causa del cambiamento nella geometria del sistema dovuto alla riflessione. Se sono visibili solo le estremità dell'arcobaleno aggiuntivo, esse possono sembrare verticali, benché in realtà siano incurvate.

tempo

l'esso

e si può

origine?

he

qua sono

e, i colori

abbastan-

orizzonte;

n lungo

sottrae

ile, così

embre-

Questi

nessuno

i prati

e sono

ebbero

perbo-

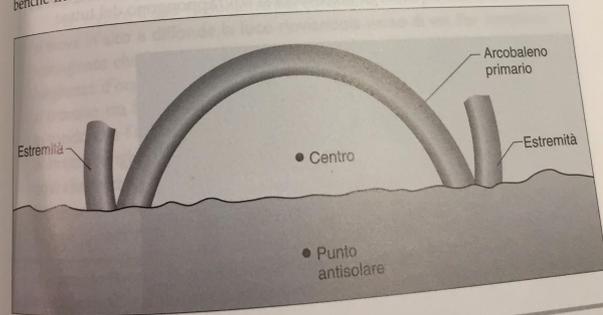


FIGURA 6.2

Problema 6.2. La luce riflessa dall'acqua può formare un arcobaleno centrato in un punto che si trova più in alto rispetto al centro dell'arcobaleno primario. Qui sono rappresentate soltanto le estremità dell'arcobaleno aggiuntivo.

Anche le componenti ultravioletta e infrarossa della luce solare possono formare strisce dell'arcobaleno, che sono invisibili per l'occhio umano e presentano colori quali vengono intesi di solito, ma che possono essere rivelate con strumenti appositi.

6.3 Arcobaleni artificiali

Quando viene spruzzata acqua vicino a voi e alla luce diretta del sole, come mai appaiono due arcobaleni che si intersecano? Quando un riflettore viene puntato verso l'alto con un certo angolo durante una notte piovigginosa, perché si possono vedere due strisce brillanti nel fascio di luce (Figura 6.3)?

In alcuni luoghi è possibile vedere un fenomeno simile a un arcobaleno sulla strada, anche se questa è asciutta. In rari casi si sono sentite storie di arcobaleni nel fango e in altri posti sorprendenti. Da che cosa hanno origine questi colori?

Si possono vedere arcobaleni puntiformi su una singola goccia d'acqua che pende da una graffetta, se si dirige verso di essa un fascio di luce in una stanza buia. Con un po' di pazienza si possono rendere visibili punti colorati che corrispondono ai primi dodici ordini di arcobaleni (cioè a un numero di riflessioni interne che arriva a dodici).

■ Quando le gocce d'acqua sono vicine, ciascun occhio le vede da una prospettiva diversa; è per questo che si osservano due arcobaleni che si intersecano. Quando le gocce sono lontane, gli occhi le vedono da una prospettiva praticamente identica e quindi gli arcobaleni si sovrappongono del tutto.

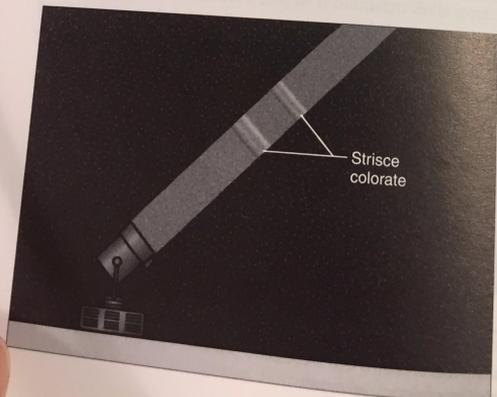


FIGURA 6.3

Problema 6.3. Strisce colorate visibili nel fascio di luce di un proiettore in una notte piovigginosa.

La luce dalle gocce giustamente proiettore all'arcobaleno così che di sfere sfere tenti e numero luce è bizzarra d'acqua sue c

La luce del riflettore viene rifratta e suddivisa nelle componenti colorate dalle gocce di pioggia che intercettano il fascio; alcune si trovano all'angolo giusto per inviare verso di voi i raggi colorati. La striscia più lontana dal riflettore corrisponde all'arcobaleno naturale primario (quello più in basso), l'altra all'arcobaleno naturale secondario. Al ruotare del fascio, la posizione delle gocce che inviano i raggi colorati verso di voi si sposta su e giù lungo il fascio, così che si muovono anche le strisce. Esse hanno colori sbiaditi soprattutto perché di notte l'occhio umano distingue male i colori.

Gli arcobaleni che si formano su strade asciutte sono dovuti a minuscole sfere di vetro trasparente, che a volte vengono distribuite sulle strisce riflettenti dipinte sull'asfalto per renderle più visibili di notte. Se si staccano in un numero sufficiente e si sparpagliano sulla strada, le sfere scompaiono nella luce diretta del sole in colori proprio come gocce d'acqua. Gli altri arcobaleni bizzarri sono più difficili da spiegare, ma è probabile che siano dovuti a gocce d'acqua, pezzetti di vetro o altri oggetti che suddividono la luce bianca nelle sue componenti colorate.

6.4 Il cielo diurno

Perché di giorno il cielo è chiaro? A quanto pare, in qualche modo l'atmosfera deflette la luce verso di voi; ma se l'aria è trasparente, perché la luce non la attraversa senza venire deflessa?

A questa domanda si risponde spesso chiamando in causa la diffusione di Rayleigh, un modello che tratta la diffusione della luce da parte delle molecole d'aria. Albert Einstein ha fatto notare che, se questa fosse la risposta completa, di giorno il cielo sarebbe scuro.

Per seguire il suo ragionamento, considerate una molecola d'aria che si trova in alto e diffonde la luce rinviandola verso di voi. Per semplicità immaginate che la luce solare abbia una sola componente, con una certa lunghezza d'onda. Vi arriva anche la luce diffusa da altre molecole che si trovano tra la prima molecola e voi; una di loro sarà posizionata in modo che l'onda luminosa rinviata da essa sarà sfasata esattamente di mezza lunghezza d'onda rispetto a quella rinviata dalla prima molecola, così che le due onde si elideranno e il risultato sarà il buio (Figura 6.4). Siccome in media ogni molecola dovrebbe avere una compagna che elide la luce inviata nella vostra direzione, non dovrete riceverne affatto e il cielo dovrebbe essere buio tranne che nella direzione del sole. Giusto?

■ La luce viene diffusa dalle molecole d'aria secondo il modello di Rayleigh, quindi il ragionamento di Einstein dovrebbe funzionare. Ma, come ha notato Einstein stesso, il cielo non è scuro perché la densità dell'atmosfera non è uniforme; inoltre le molecole si muovono di continuo e per breve tempo si ammassano, eliminando la possibilità che a ogni istante dato la luce diffusa da