

■本資料のご利用にあたって(詳細は「利用条件」をご覧ください)

本資料には、著作権の制限に応じて次のようなマークを付しています。
本資料をご利用する際には、その定めるところに従ってください。

* :著作権が第三者に帰属する著作物であり、利用にあたっては、この第三者より直接承諾を得る必要があります。

CC:著作権が第三者に帰属する第三者の著作物であるが、クリエイティブ・コモンズのライセンスのもとで利用できます。

②:パブリックドメインであり、著作権の制限なく利用できます。

なし:上記のマークが付されていない場合は、著作権が東京大学及び東京大学の教員等に帰属します。無償で、非営利的かつ教育的な目的に限って、次の形で利用することを許諾します。

- I 複製及び複製物の頒布、譲渡、貸与
- II 上映
- III インターネット配信等の公衆送信
- IV 翻訳、編集、その他の変更
- V 本資料をもとに作成された二次的著作物についての I からIV

ご利用にあたっては、次のどちらかのクレジットを明記してください。

東京大学 Todai OCW 学術俯瞰講義
Copyright 2012, 井上 慎

The University of Tokyo / Todai OCW The Global Focus on Knowledge Lecture Series
Copyright 2012, Inouye Shin

学術俯瞰講義「光の科学」、2012年10月18日

光学と力学

光量子科学研究中心

井上慎



THE UNIVERSITY OF TOKYO



Photon Science Center
of the University of Tokyo

先週の講義 = 光学3千年の歴史を俯瞰



今回の講義 = 光学の歴史上、印象的な
場面を「つまみ食い」



目次

1. ガリレオ: 望遠鏡と地動説
2. スネルの法則とフェルマーの原理
3. ホイヘンスの原理とニュートンの分光実験
4. ポアソン対フレネル: 粒子説vs波動説
5. まとめ

目次

1. ガリレオ: 望遠鏡と地動説
2. スネルの法則とフェルマーの原理
3. ホイヘンスの原理とニュートンの分光実験
4. ポアソン対フレネル: 粒子説vs波動説
5. まとめ

初めての光学=レンズ

紀元前

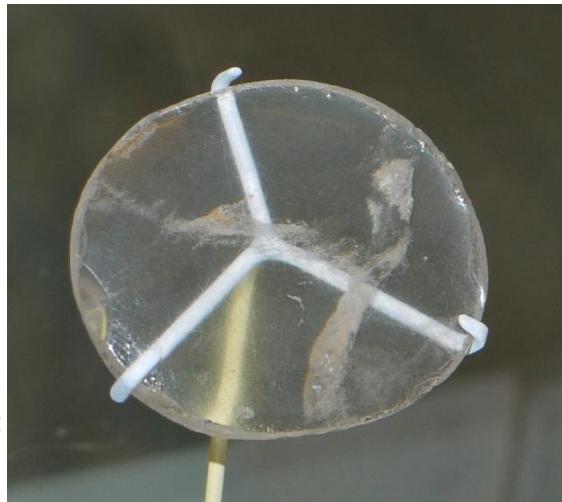
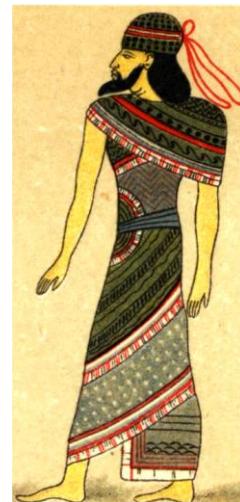


Photo by Geni
Wikimedia Commons より転載
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Nimrud_lens_British_Museum.jpg
CC BY 3.0



Wikimedia Commons より転載
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dräkt,_Assyrier,_Nordisk_familjebok.png



~750B.C. アッシリア(石英製)

用途:

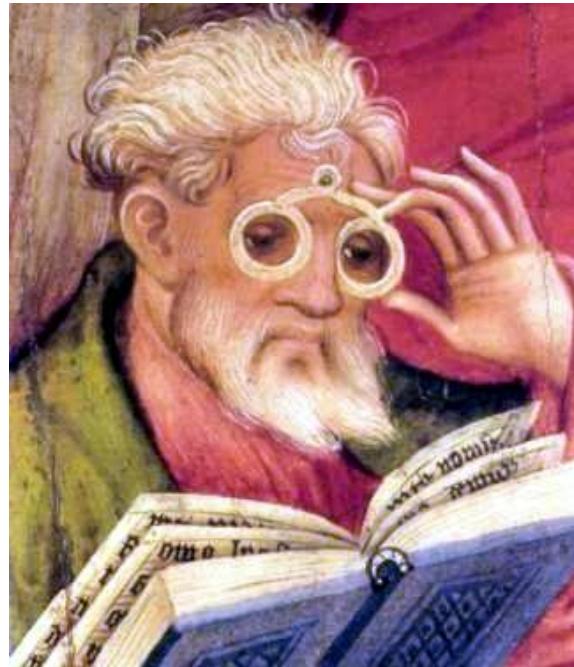
- 拡大鏡
- “Burning glass”

Photo by Tony McGinley
<http://wood-pellet-ireland.blogspot.jp/2009/02/solar-power-innovation.html>



最初のめがね

イタリア、～1286年



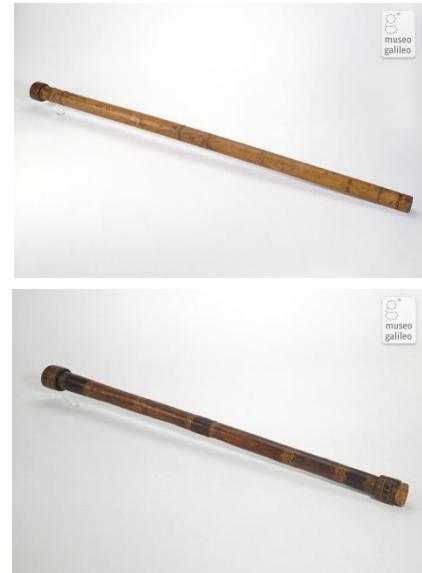
Wikimedia Commons より転載
[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Conrad_von_Soest,_'Brillenapostel'_%\(1403\).jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Conrad_von_Soest,_'Brillenapostel'_%(1403).jpg)



ガラス同業者組合(ベニス、フィレンツェ、13世紀)

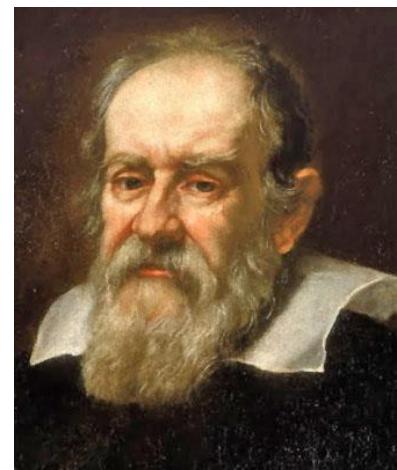
レンズ1個から2個へ

1608年、オランダで望遠鏡の発明

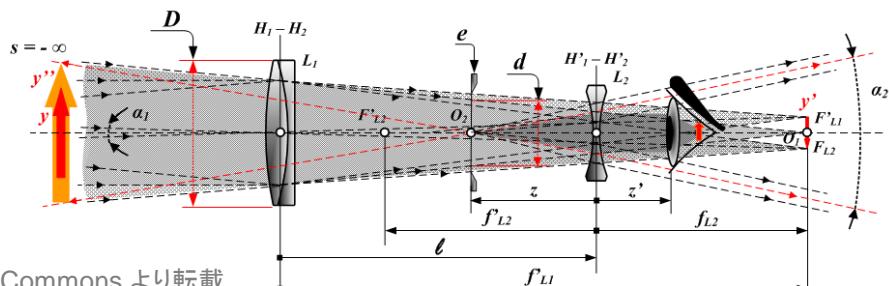


*

1609年、ベニスに滞在したガリレオ(45歳)は
望遠鏡の発明を聞き、自分のバージョンを作る
(「ガリレオ型望遠鏡」)



◎



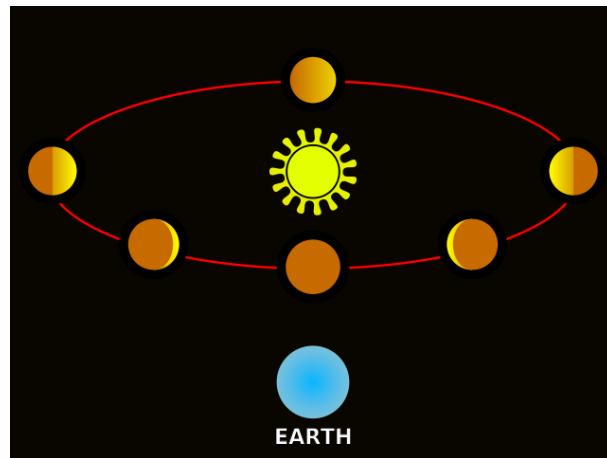
望遠鏡でガリレオが 発見したもの

- 木星の衛星
(1610年)



NASA/JPL/DLR
Wikimedia Commons より転載
[http://commons.wikimedia.org/wiki/
File:Jupitermoons.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Jupitermoons.jpg)

- 金星の満ち欠け
(1610年)



Wikimedia Commons より転載
[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:
Phases-of-Venus.svg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Phases-of-Venus.svg)

- 「太陽黒点論」
(1613年)



Photo by SiriusB
Wikimedia Commons より転載
[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:
Sun_projection_with_spotting-scope.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sun_projection_with_spotting-scope.jpg)
CC BY-SA 3.0

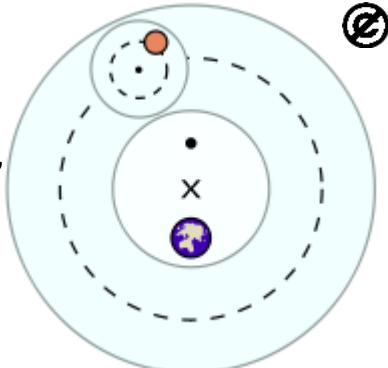
時代をゆるがす発見



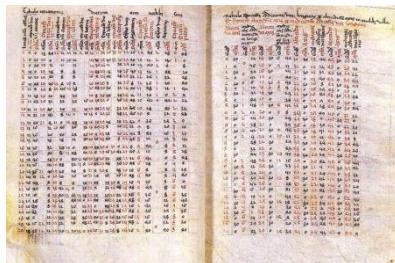
天動説

Wikimedia Commons より転載
[http://commons.wikimedia.org/wiki/
File:Ptolemaic_elements.svg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ptolemaic_elements.svg)

プトレマイオスの天動説
(1~2世紀)

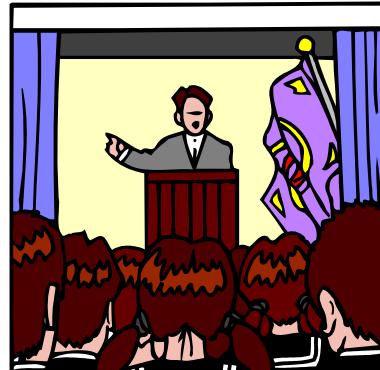


アルフォンソ天文表
(13世紀)



Wikimedia Commons より転載
[http://commons.wikimedia.org/wiki/
File:Tablas_alfonsies.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Tablas_alfonsies.jpg)

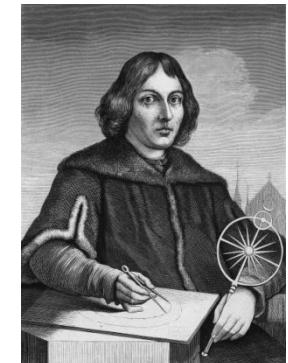
ケプラー以外のほとんどの職業天文学者は依然、天動説を信奉



地動説

Wikimedia Commons より転載
[http://commons.wikimedia.org/wiki/
File:Copernicus.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Copernicus.jpg)

コペルニクスの地動説
(1543)



ケプラー、コペルニクスを擁護(1597)

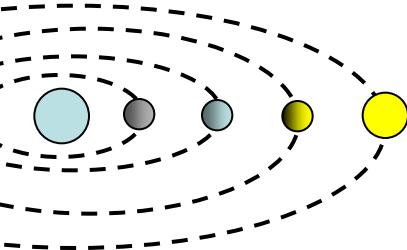


Wikimedia Commons より転載
[http://commons.wikimedia.org/wiki/
File:Johannes_Kepler_1610.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Johannes_Kepler_1610.jpg)

天動説

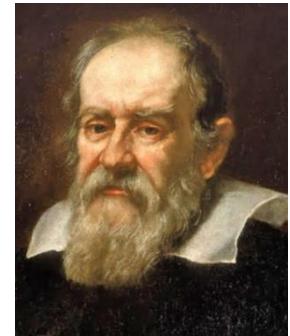


地、月、水、金、太、火、、、



地球から、月、水星、金星、太陽、火星、木星、土星

ガリレオ



ガリレオ、地動説を主張

もし太陽の周りを地球が公転するなら
月は軌道を保てずに飛んで行ってしまう
であろう

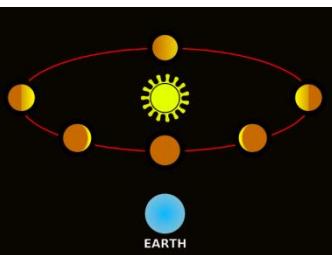
そんなことはない。事実、木星の衛
星は飛んで行っていない！

金星は常に欠けているはず

金星は月のように満ち欠けを
している

天は不変で、月より遠い場所では永
遠に変化は訪れない

太陽には黒点があり、形も位置
も時々刻々変わっている。



(地動説の代償)



第2回異端審問所審査

Cristiano Banti (1857)

http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Galileo_facing_the_Roman_Inquisition.jpg



終身刑→軟禁

新科学対話



Galileo Galilei, *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno à due nuove scienze*, Elzevir, 1638.

邦訳:ガリレオ・ガリレイ『新科学対話』岩波文庫、1937年



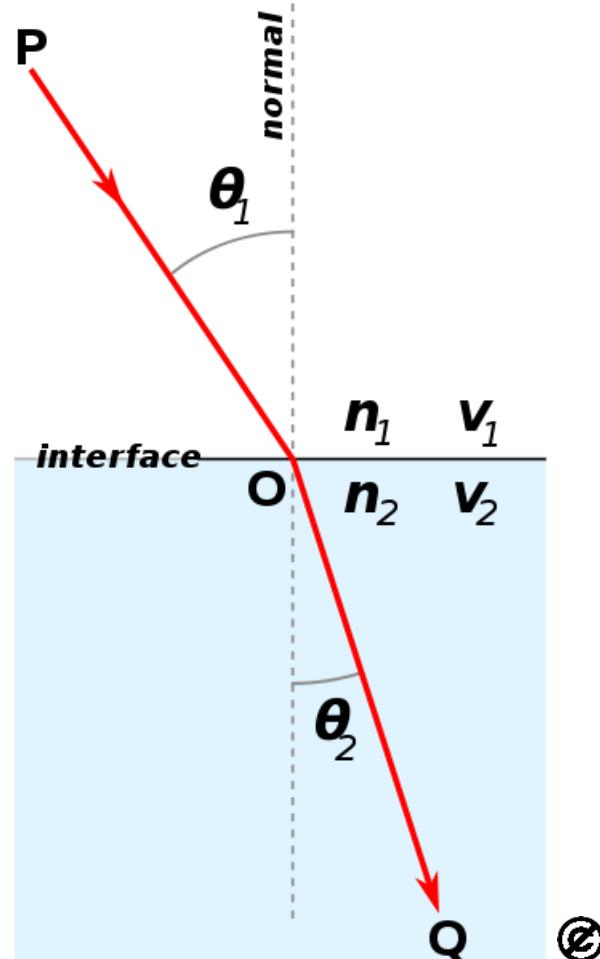
目次

1. ガリレオ: 望遠鏡と地動説
2. スネルの法則とフェルマーの原理
3. ホイヘンスの原理とニュートンの分光実験
4. ポアソン対フレネル: 粒子説vs波動説
5. まとめ

光学の発展

1621年
スネルの法則

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



理由はまだ不明



ヴィレブロルト・スネル
(1580-1626)

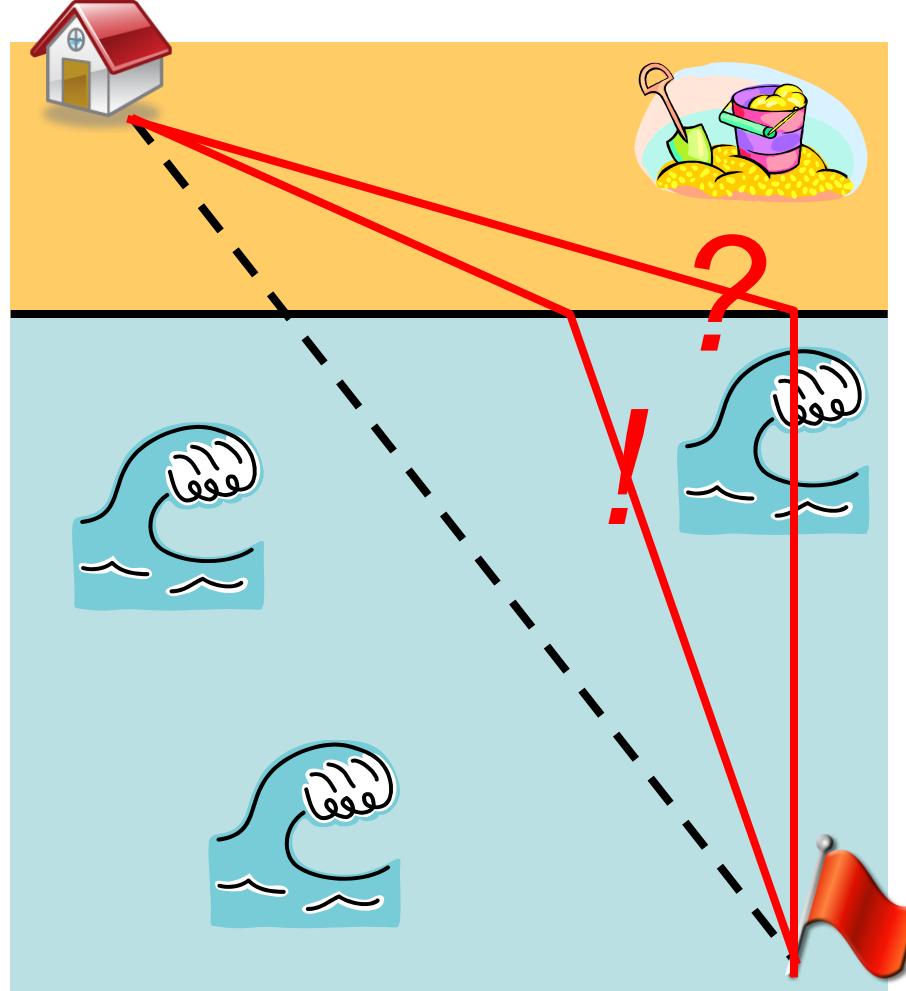
Wikimedia Commons より転載
http://en.wikipedia.org/wiki/File:Willebrord_Snellijs.jpg

Wikimedia Commons より転載
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Snells_law2.svg



フェルマーの原理(1657)

砂浜
海

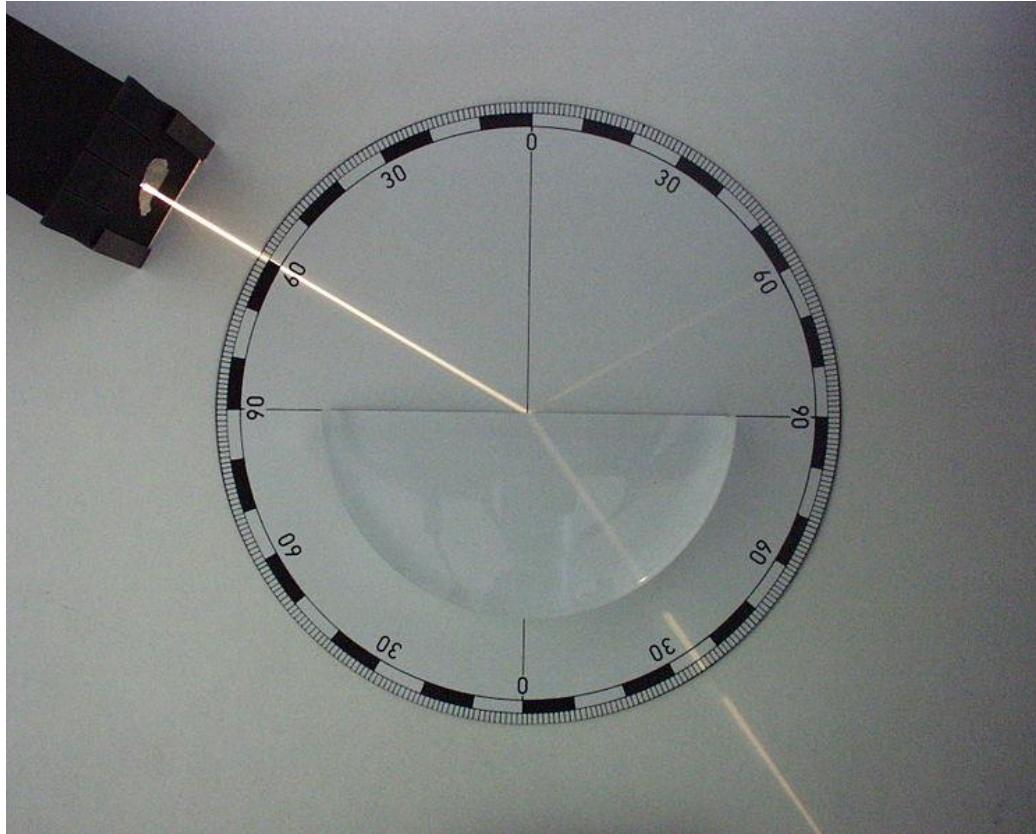


ピエール・ド・フェルマー
(1601-1665)

Wikimedia Commons より転載
[http://commons.wikimedia.org/wiki/
File:Pierre_de_Fermat.jp](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pierre_de_Fermat.jp)



フェルマーの原理(1657)



By Zátónyi Sándor (ifj.), Wikimedia Commons より転載
<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fénytörés.jpg>
CC BY-SA 3.0



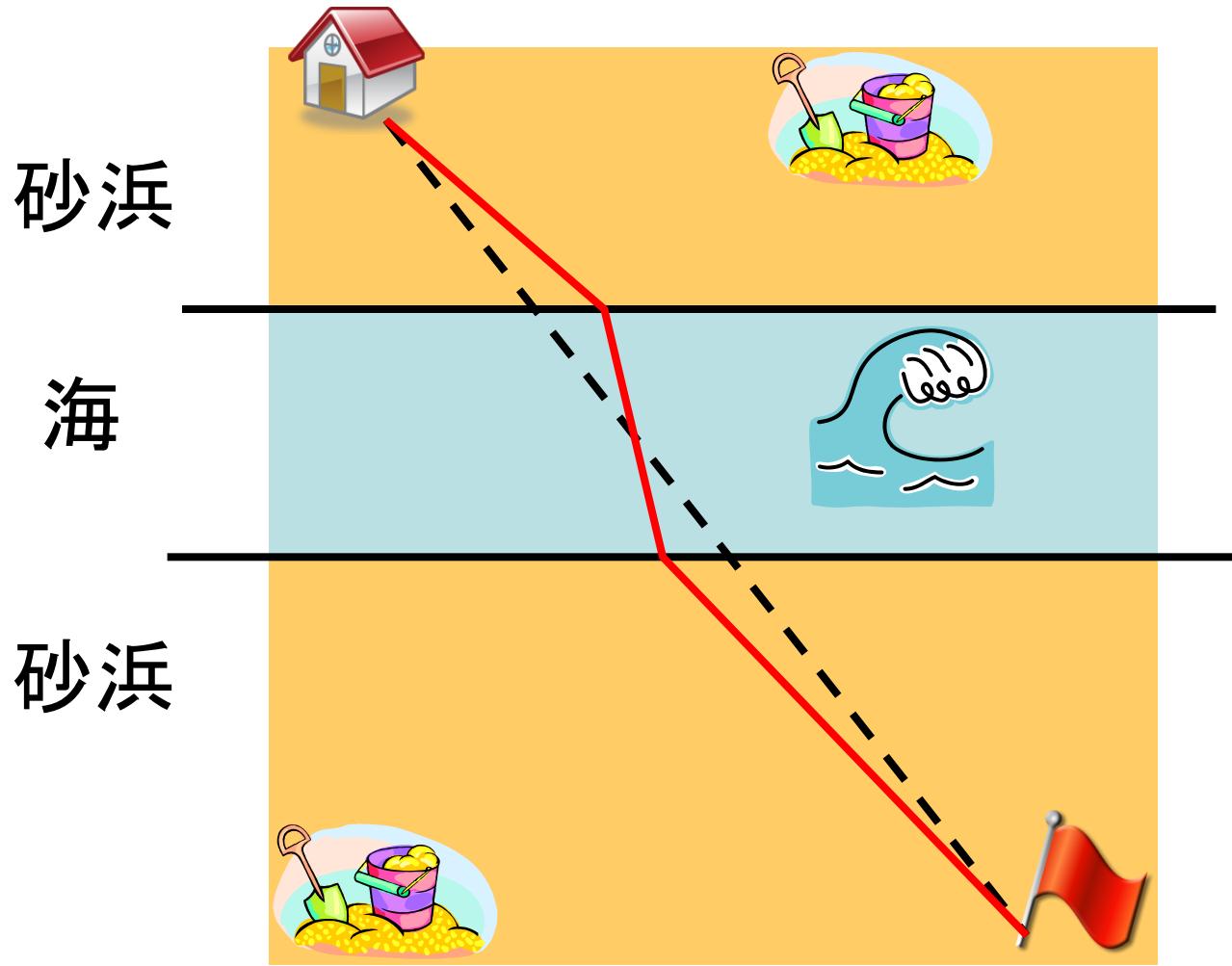
ピエール・ド・フェルマー
(1601-1665)

Wikimedia Commons より転載
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pierre_de_Fermat.jpg

光も時間が最小になる経路を通る !



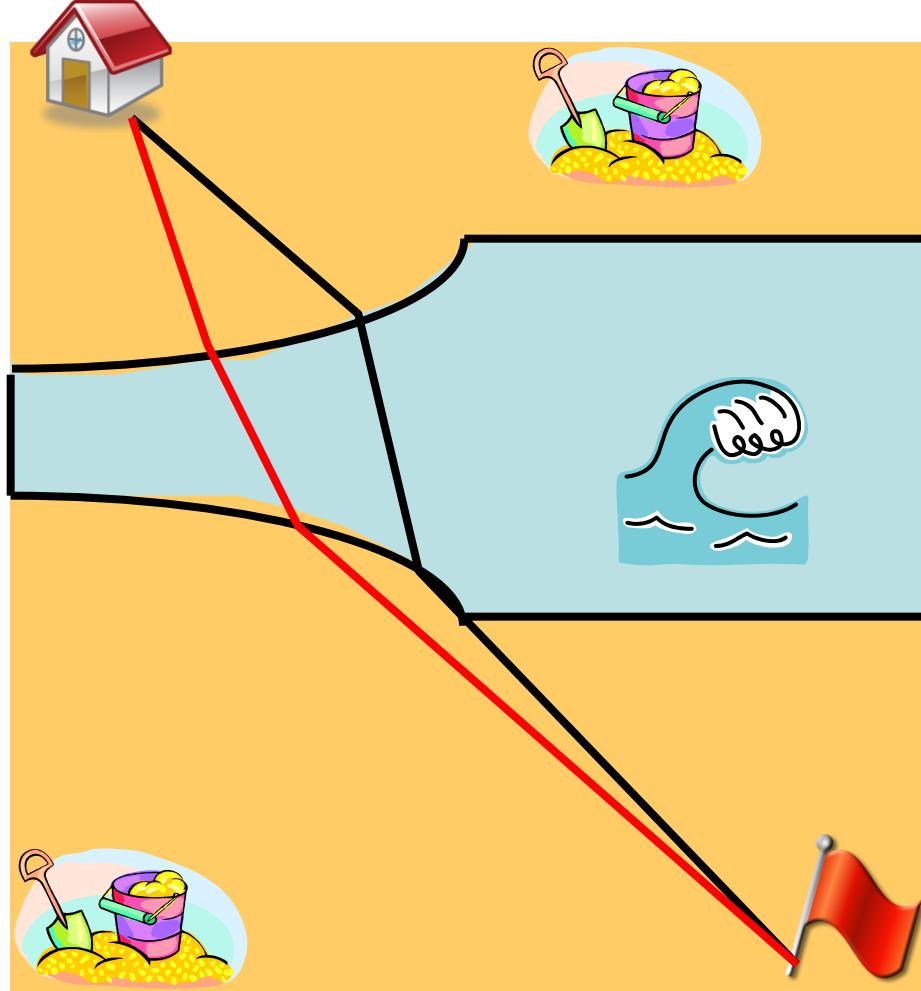
フェルマーの原理



砂浜

海

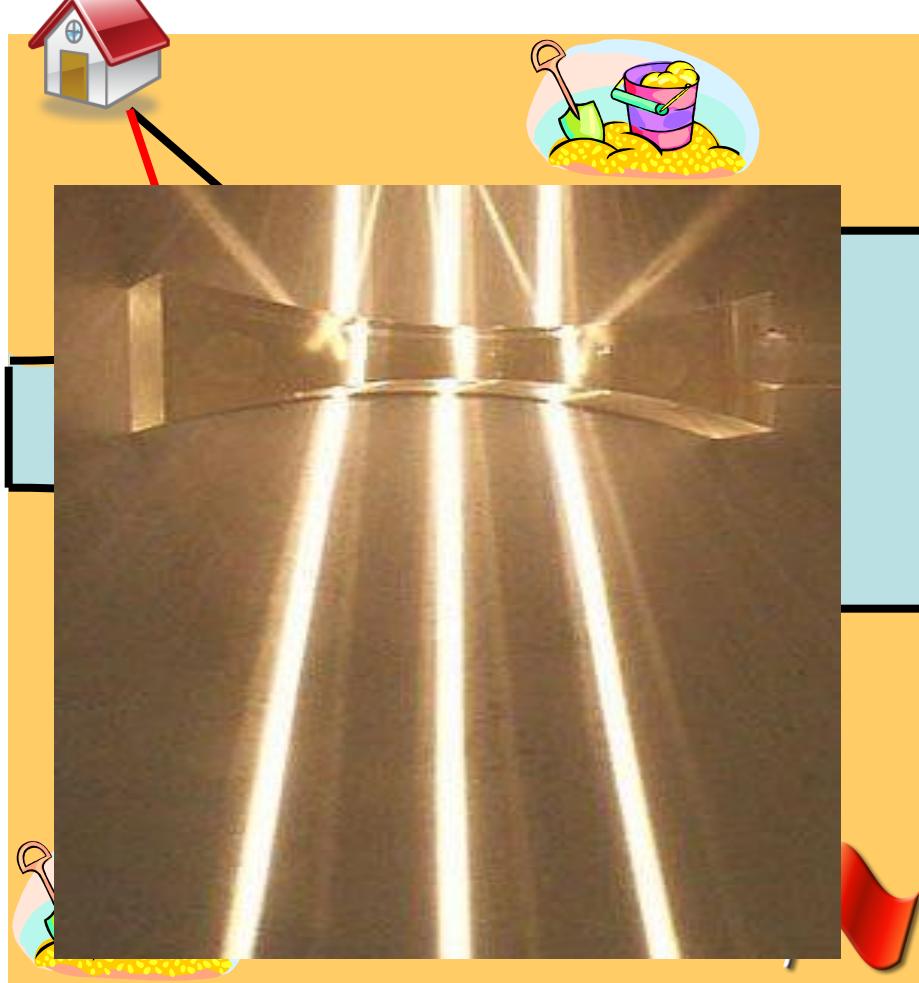
砂浜



砂浜

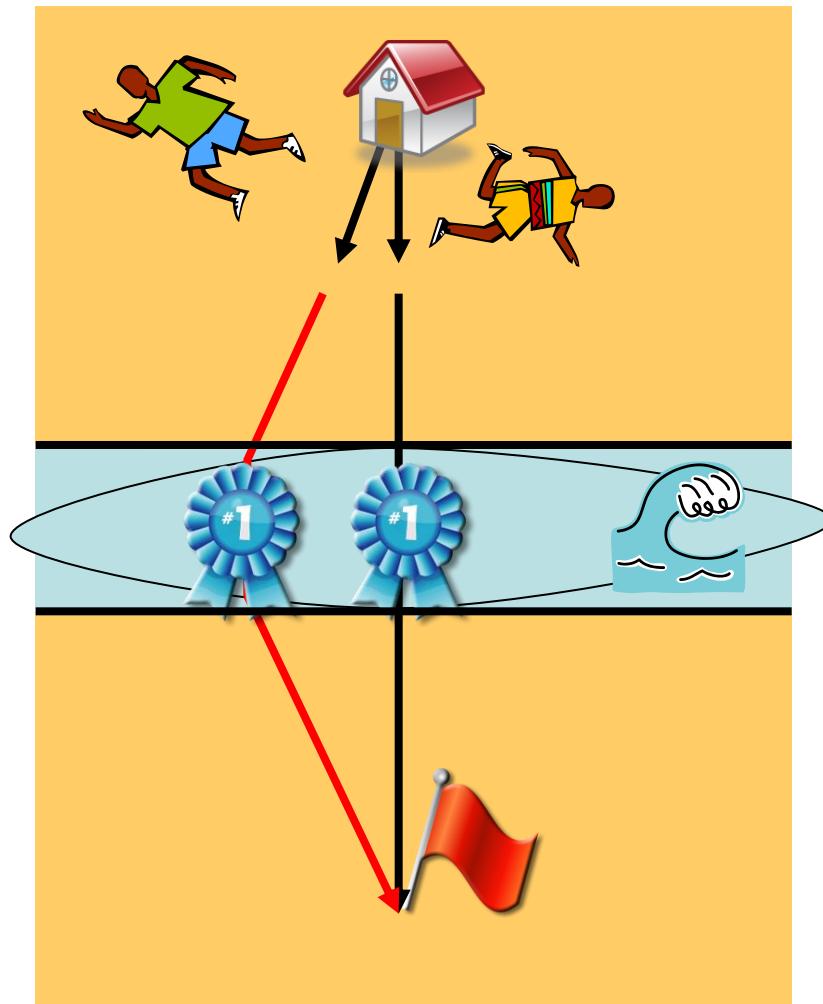
海

砂浜



By User Fir0002 on en.wikipedia, Wikipedia より転載
http://en.wikipedia.org/wiki/File:Concave_lens.jpg
CC BY-SA 3.0



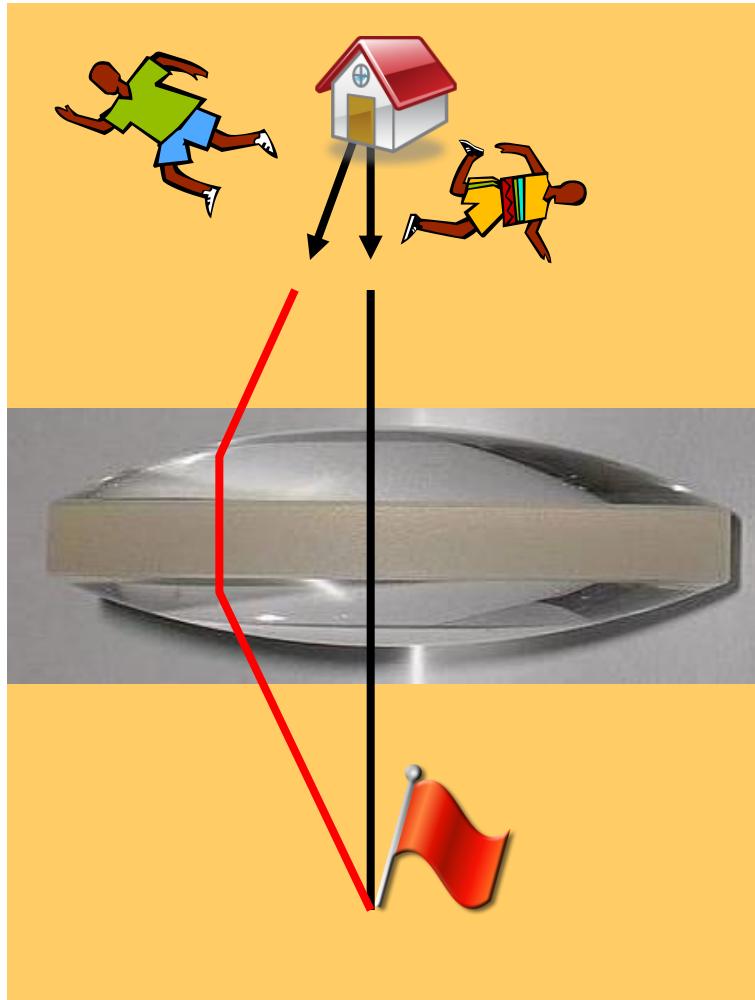


砂浜

湖

砂浜





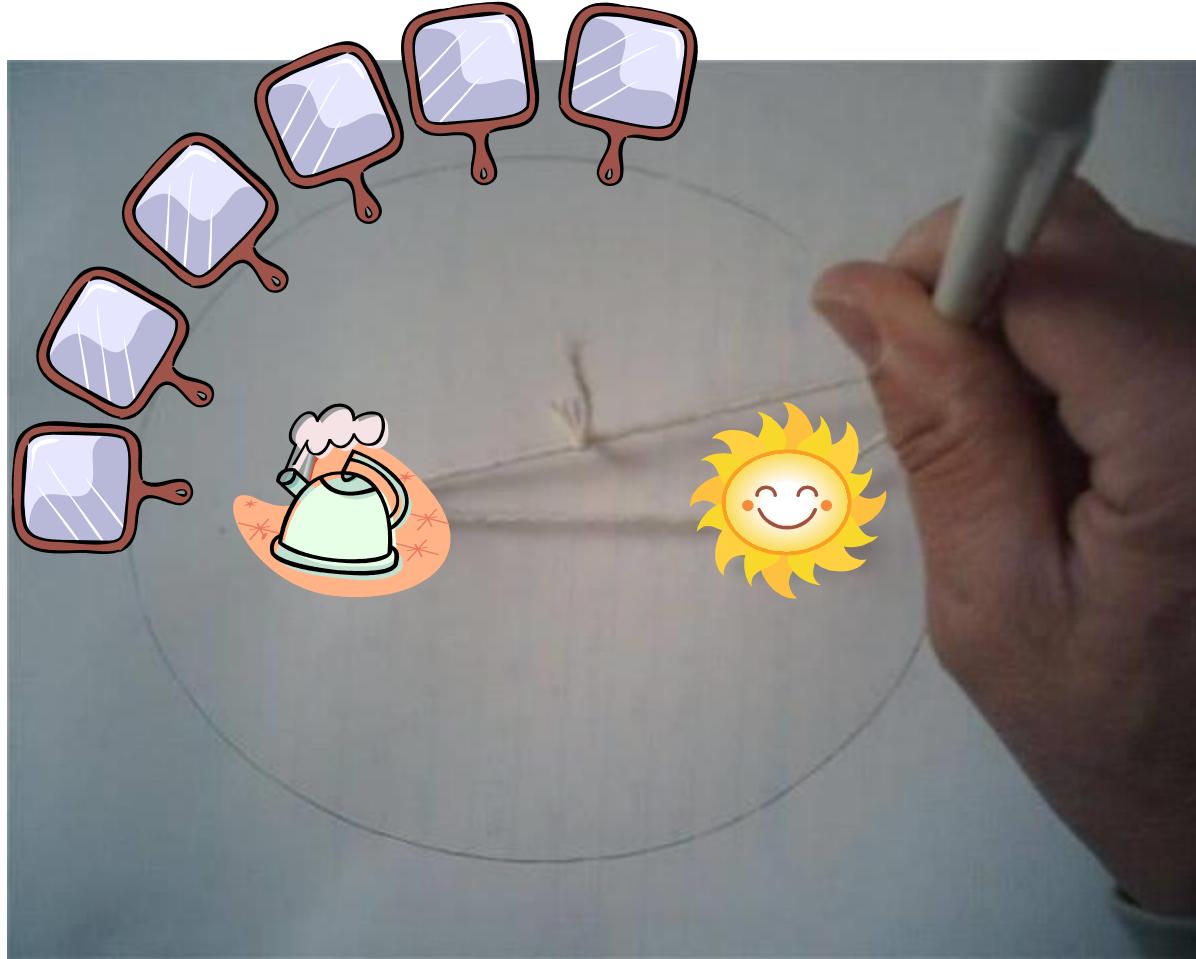
空気

レンズ

空気

By Tamasflex, Wikimedia Commons より転載
<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:BiconvexLens.jpg>
CC BY-SA 3.0



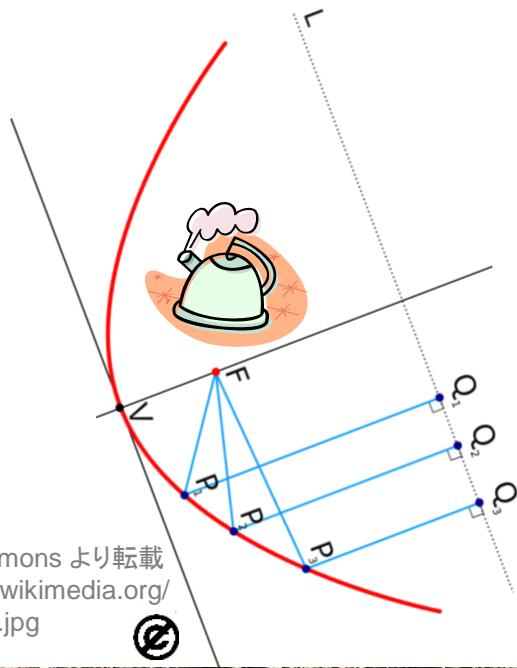


By Dino at English Wikipedia, Wikipedia より転載

http://en.wikipedia.org/wiki/File:Drawing_an_ellipse_via_two_tacks_a_loop_and_a_pen.jpg

CC BY-SA 3.0



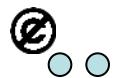


Wikimedia Commons より転載
<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:ALSOL.jpg>



Solar cooker

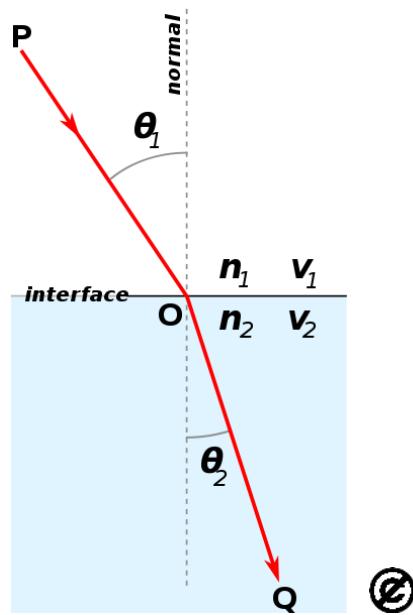
Wikimedia Commons より転載
<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:ALSOL.jpg>



Canberra Deep Dish Communications Complex
NASA, <http://grin.hq.nasa.gov/ABSTRACTS/GPN-2000-000502.html>

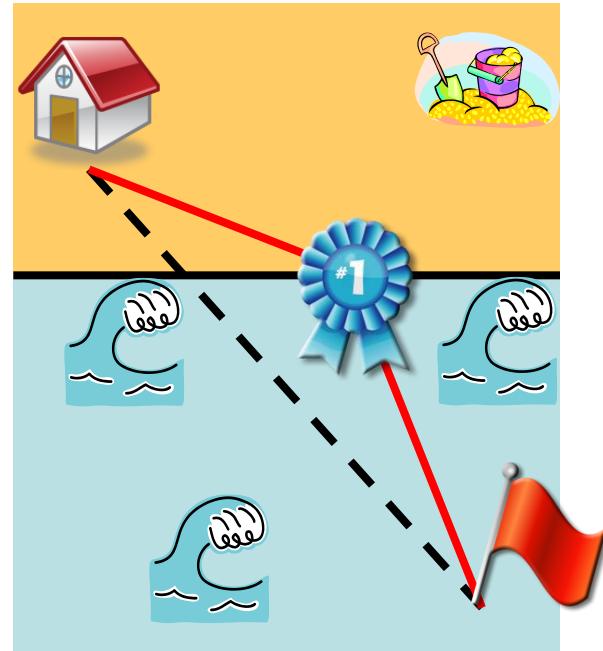
2通りの定式化

スネルの法則 (局所的)



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

フェルマーの原理 (大局的)



光は時間が最小になる
経路を通る。

正確ではない

フェルマーの原理の反例？



関崎灯台で使われていた
レンズ

By 大分帰省中, Wikimedia Commons より転載
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Oita_sekizaki_lighthouse_old_lense.jpg
CC BY-SA 3.0

フェルマーの原理の反例？

スネルの法則にとって大事なのは接線の傾き

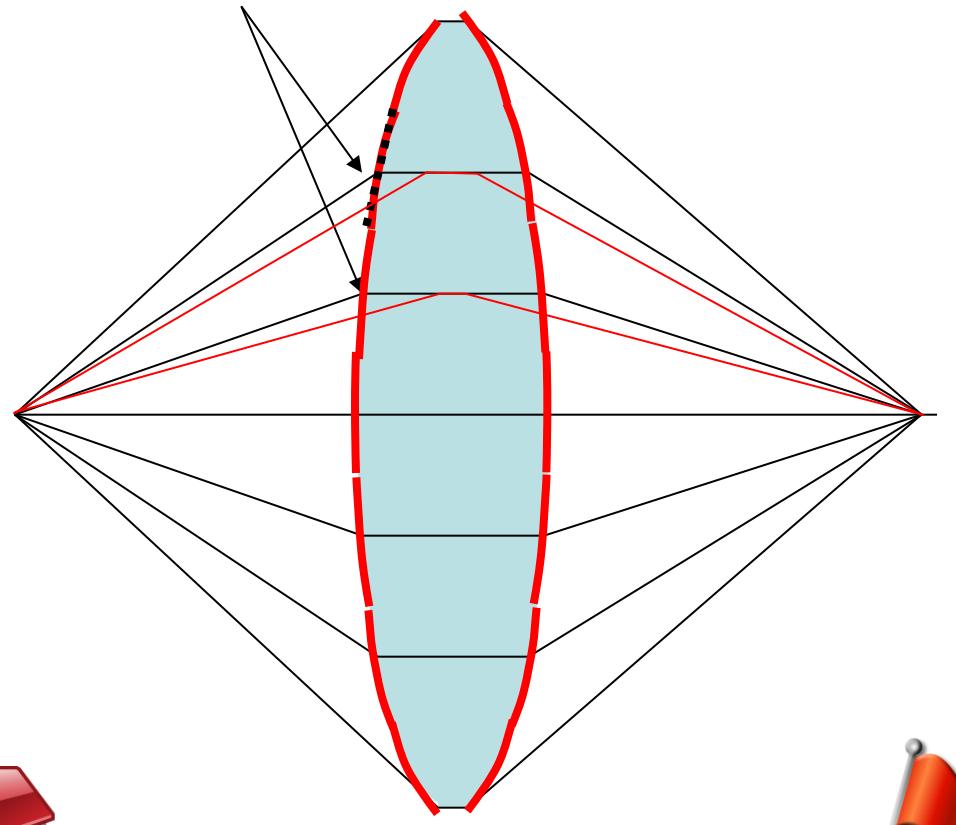


関崎灯台で使われていた
レンズ

By 大分帰省中, Wikimedia Commons より転載

http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Oita_sekizaki_lighthouse_old_lense.jpg

CC BY-SA 3.0



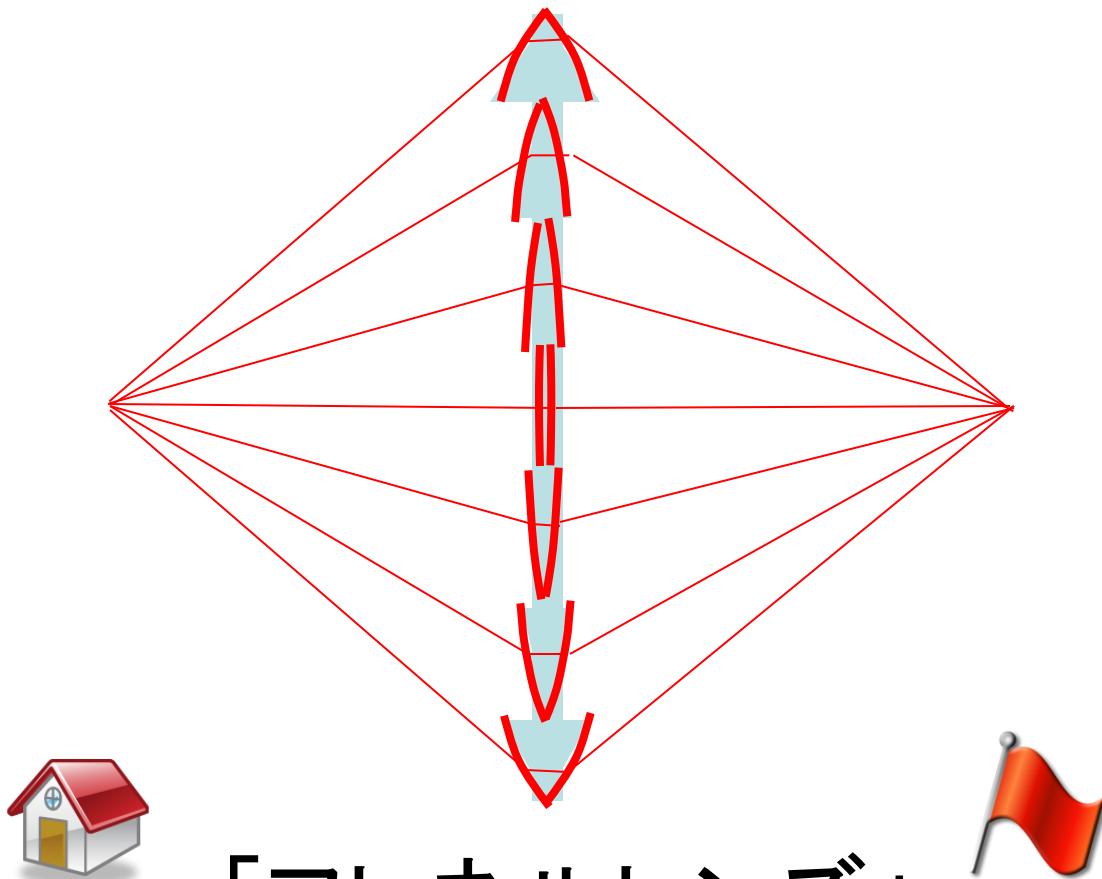
フェルマーの原理の反例？

スネルの法則にとって大事なのは接線の傾き



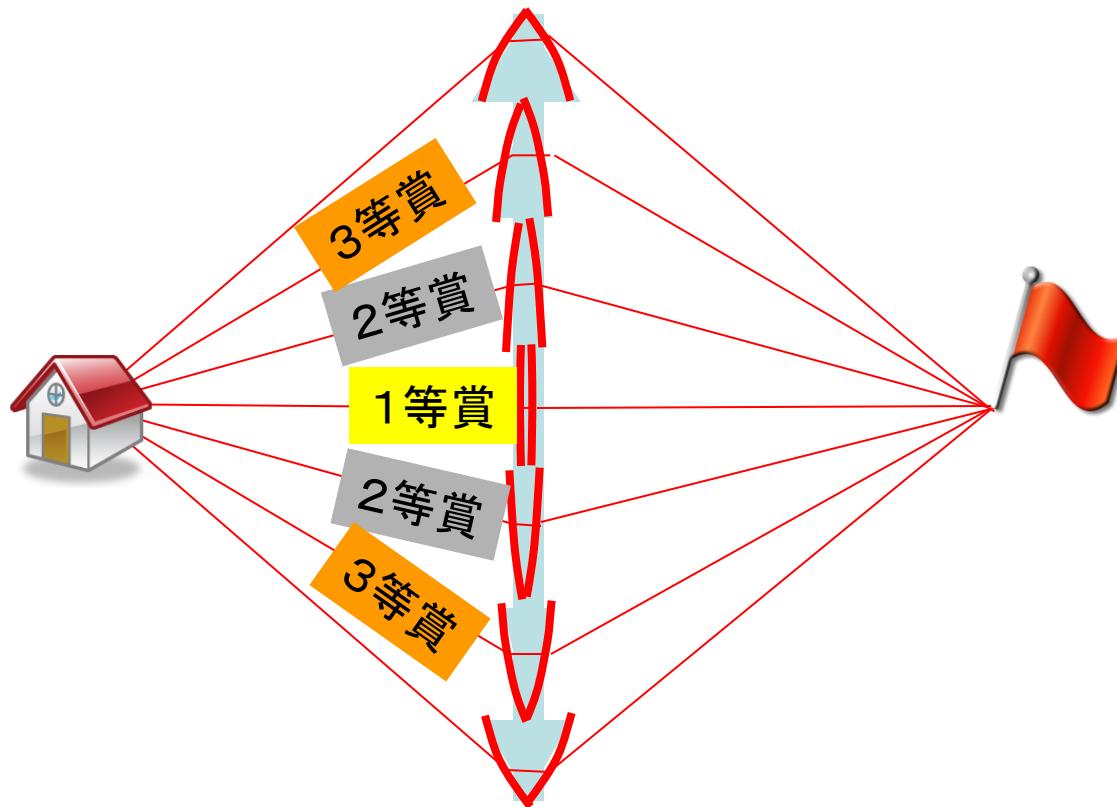
関崎灯台で使われていた
フレネルレンズ

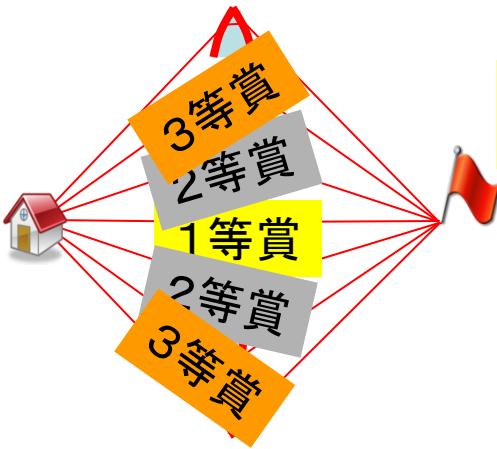
By 大分帰省中, Wikimedia Commons より転載
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Oita_sekizaki_lighthouse_old_lense.jpg
CC BY-SA 3.0



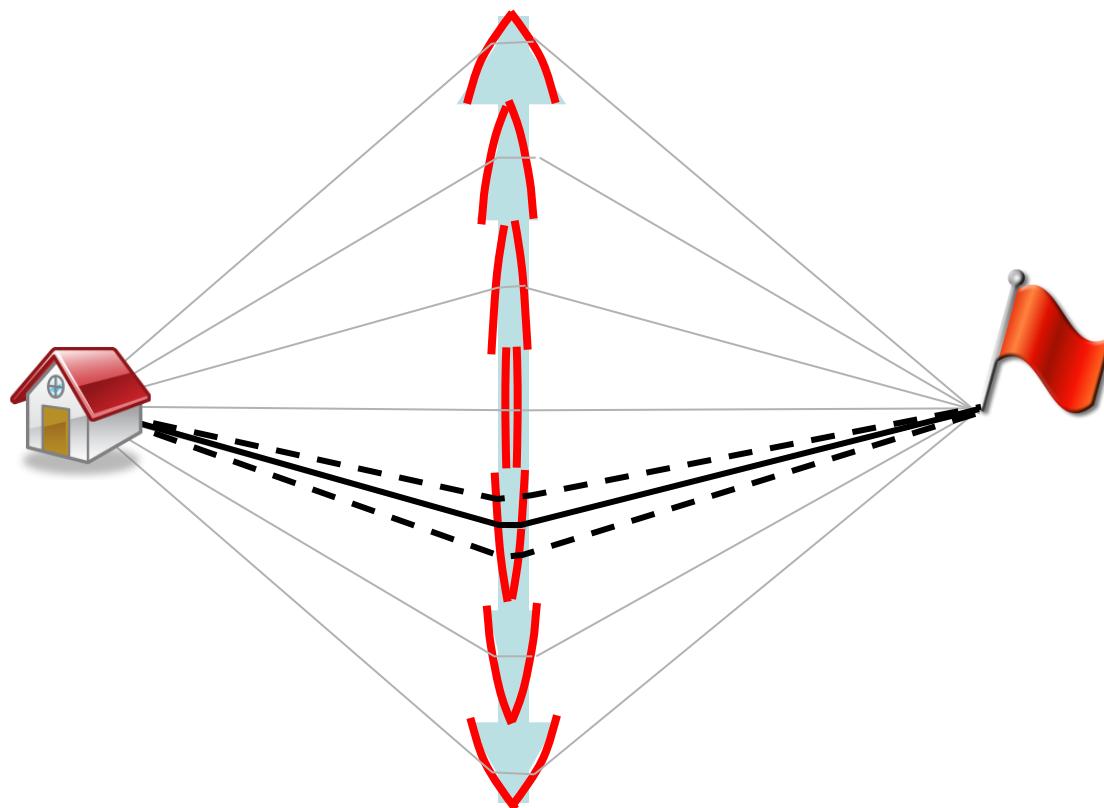
「フレネルレンズ」

フェルマーの原理の反例？

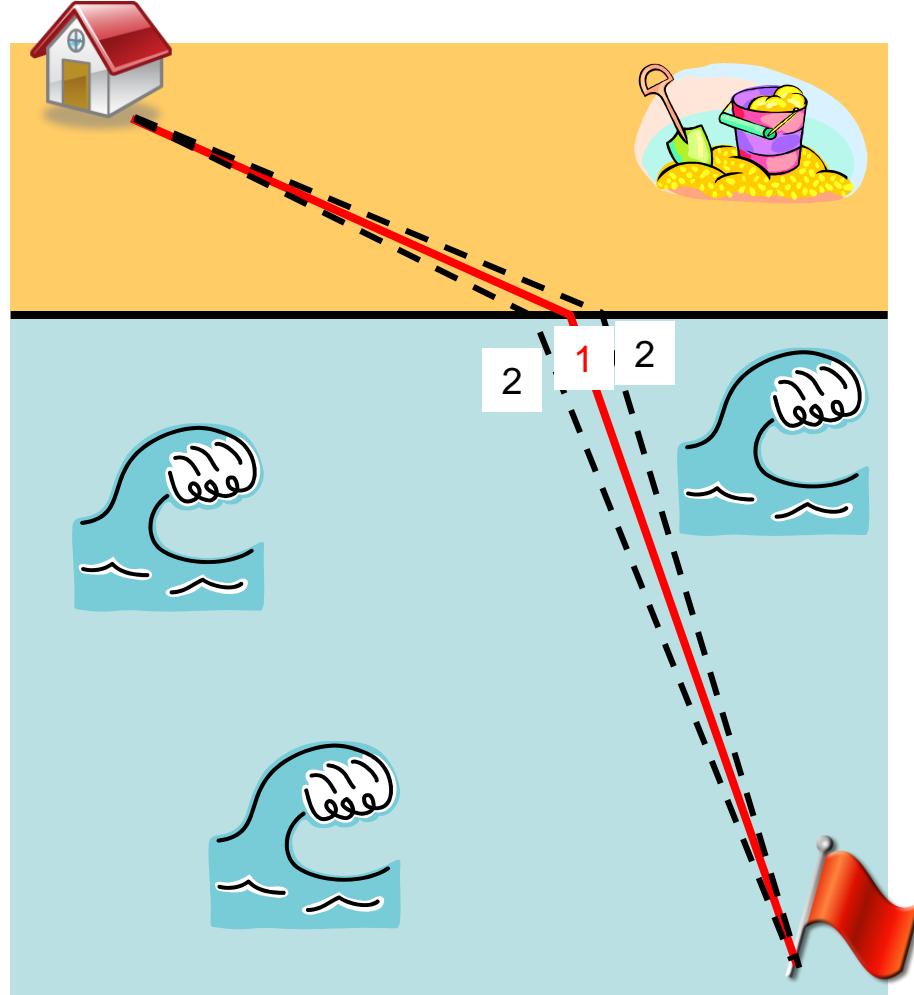




フェルマーの原理の反例？



近傍の経路(向こう3軒両隣)に関してだけ時間比べれば、どの経路も同じ時間がかかる。)



フェルマーの原理の正確バージョン

光は 2 点間を結ぶあらゆる可能な経路の内、
経路を連續的にわずかに変えたときに、
その光学的距離(経路を通過する時間)の変化が
ほとんど起こらないような経路をとる。

$$\text{時間} = \frac{\text{(幾何学的)距離}}{\text{光の速さ}} = \frac{\text{屈折率} \times \text{(幾何学的)距離}}{c}$$

$$\delta S = \delta \int_A^B n(s) ds = 0$$

疑問

質量を持つ物質も同じように
何かを最小*にするように
運動するのではないか？

* :微分がゼロという意味

$$\delta S = \delta \int_{x_A}^{x_B} L(x(t), \dot{x}(t), t) dt = 0$$



ラグランジアン

質量 m の質点の運動

$$L = \frac{m}{2} \dot{x}(t)^2 - U(x(t)) \quad \text{とすると、}$$

$$\delta \int_{x_A}^{x_B} L dt = 0 \quad \xleftrightarrow{\text{等価！}} \quad m \ddot{x}(t) = -\frac{\partial U}{\partial x}$$

ニュートンの運動方程式

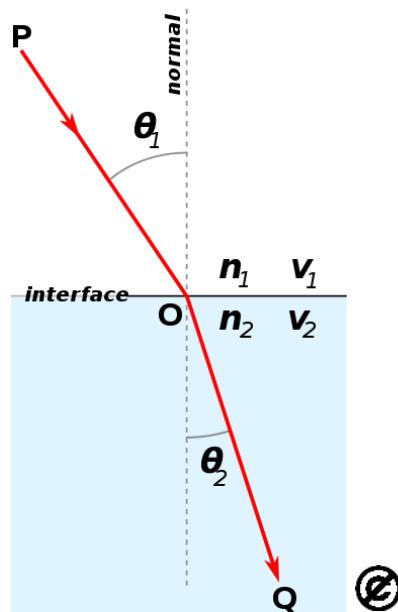
この意味するところは？

目次

1. ガリレオ: 望遠鏡と地動説
2. スネルの法則とフェルマーの原理
3. ホイヘンスの原理とニュートンの分光実験
4. ポアソン対フレネル: 粒子説vs波動説
5. まとめ

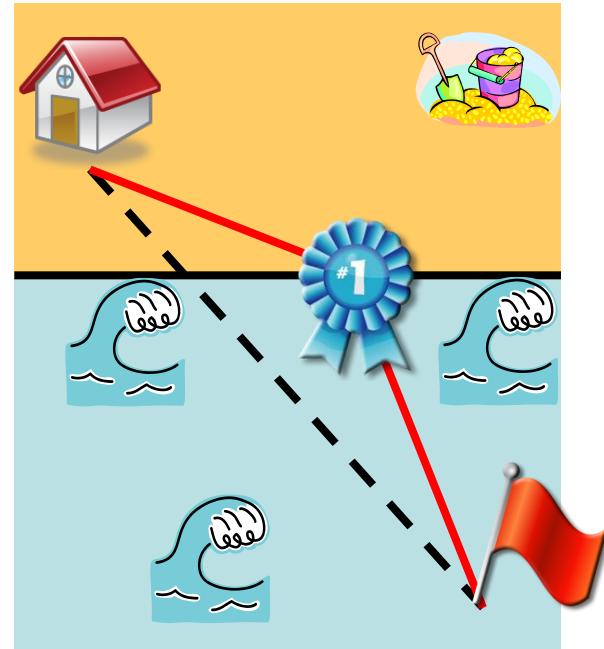
2通りの定式化

スネルの法則 (局所的)



何故？

フェルマーの原理 (大局的)



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

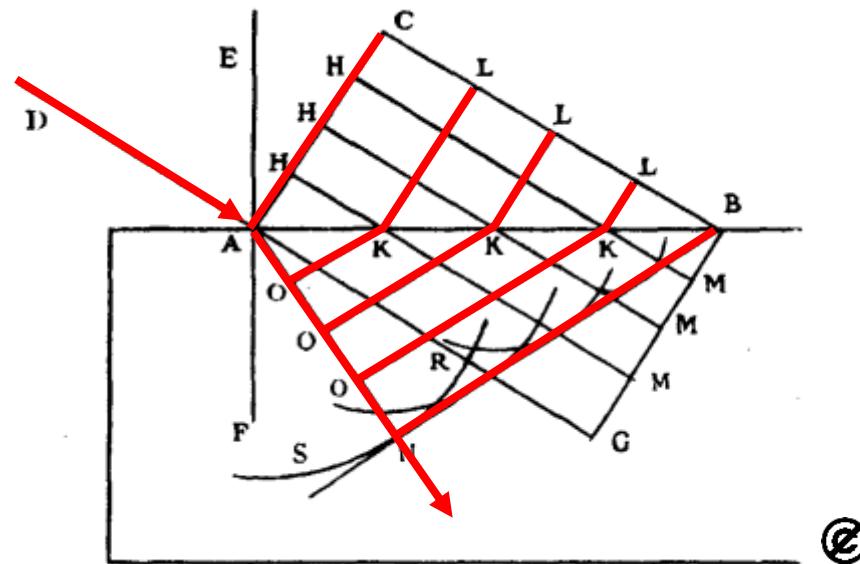
光は時間が最小になる
経路を通る。

正確ではない

ホイヘンスの原理(1678)

「波面」を考えよ

素元波の包絡面が
新たな波面となる



Christiaan Huygens, *Traité de la lumière*, Pieter van der Aa, 1690, p.35.

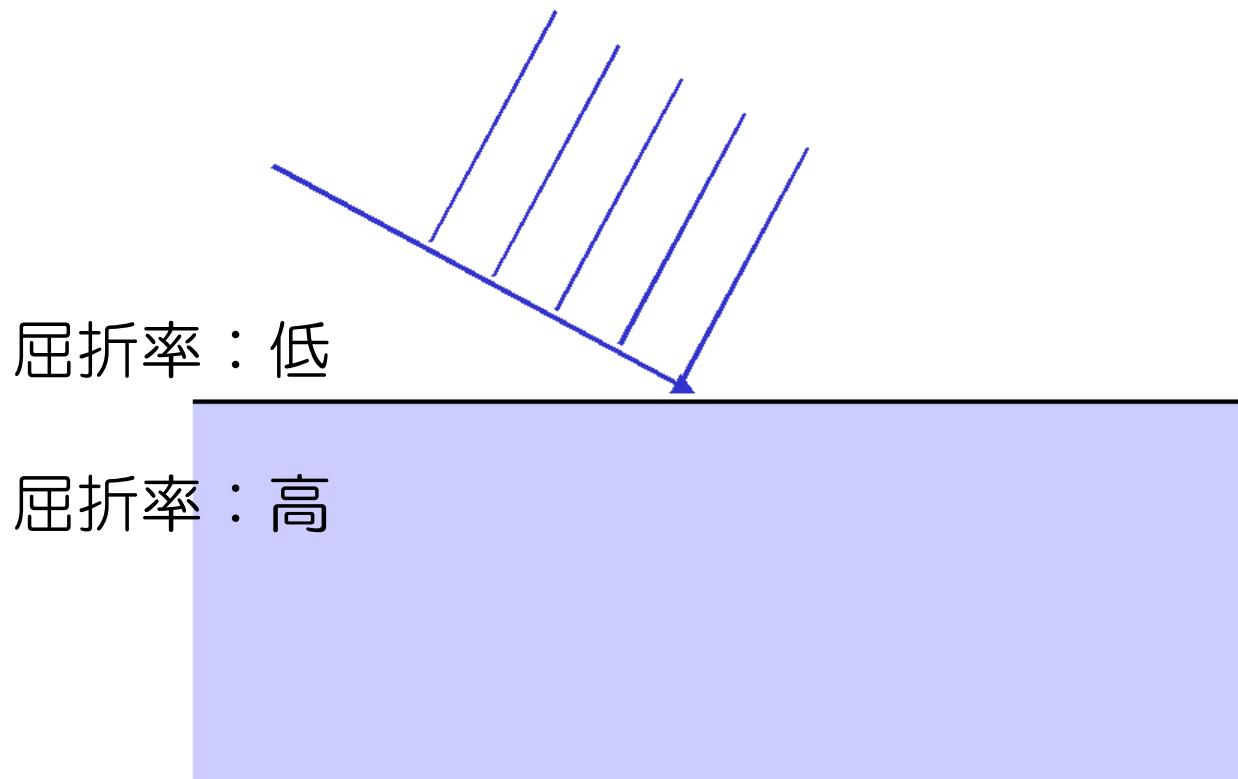


クリスティアーン・ホイヘンス
(1629-1695)

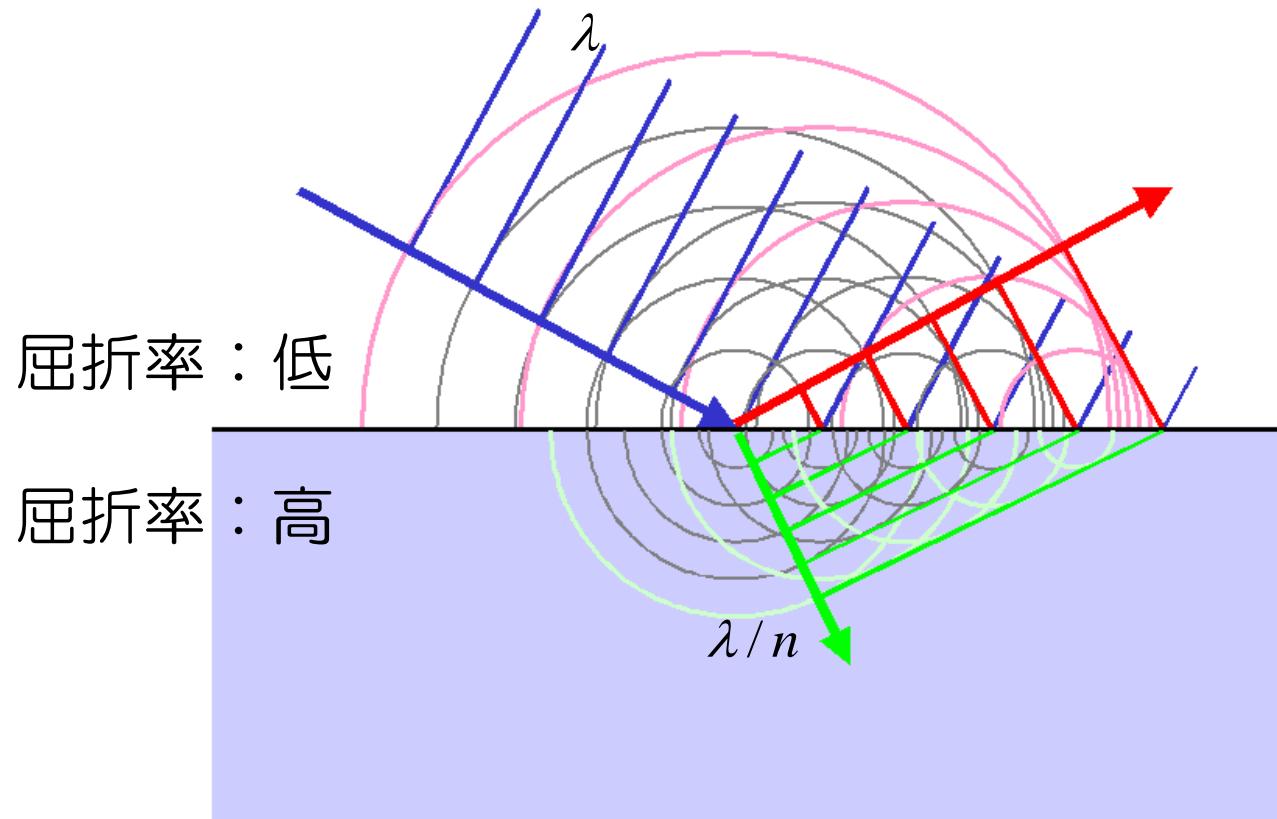
Wikimedia Commons より転載
[http://commons.wikimedia.org/wiki/
File:Christiaan_Huygens.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Christiaan_Huygens.jpg)



波と光線 – ホイヘンスの原理



波と光線 – ホイヘンスの原理

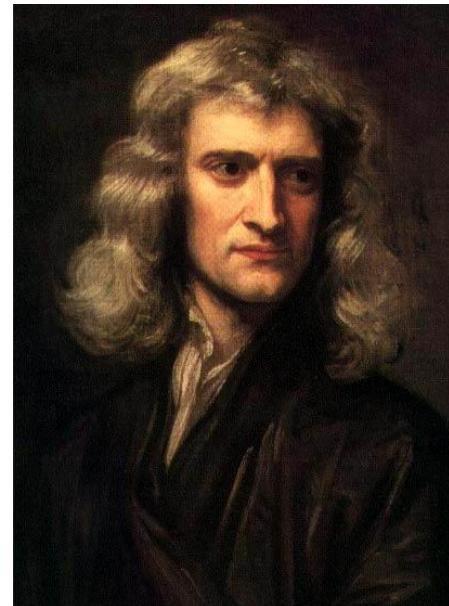


→ 反射・屈折

ニュートンの登場

奇跡の年(1665、22歳)

- ・万有引力 ---地動説を完成
- ・微分積分学 ---解析学、物理学の支柱
- ・光学



アイザック・ニュートン
(1642-1727) 

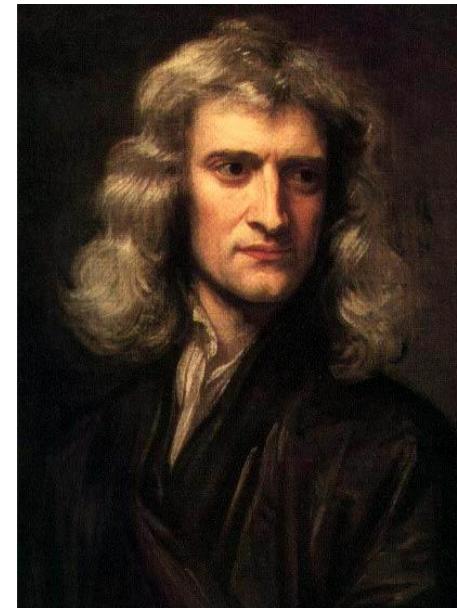
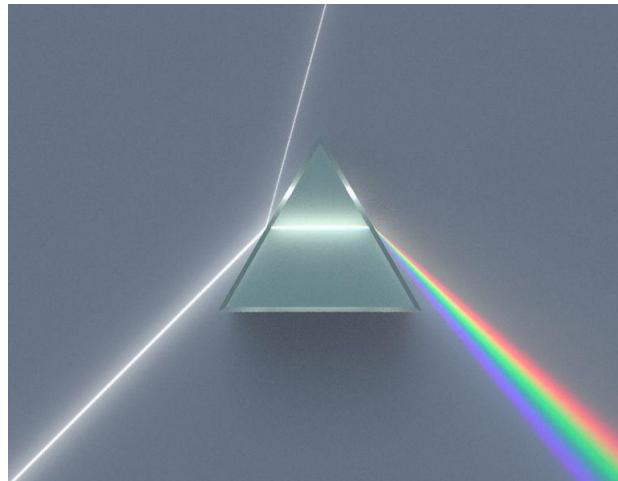
Wikimedia Commons より転載
<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:GodfreyKneller-IsaacNewton-1689.jpg>



光学におけるニュートンの貢献

プリズムによる白色光の分解(~1670)

By Spigget; derivative work by Cepheiden. Wikimedia Commons より転載
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dispersive_Prism_Illustration.jpg
CC BY-SA 3.0



アイザック・ニュートン
(1642-1727)

Wikimedia Commons より転載
<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:GodfreyKneller-IsaacNewton-1689.jpg>

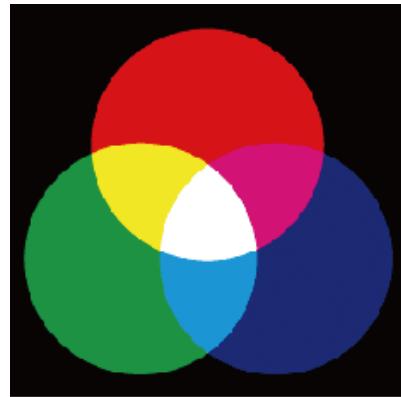
赤、緑、青をまた合わせれば白色光ができる
確認してみよう



色と光

光の3原色 (RGB)

赤



緑

青

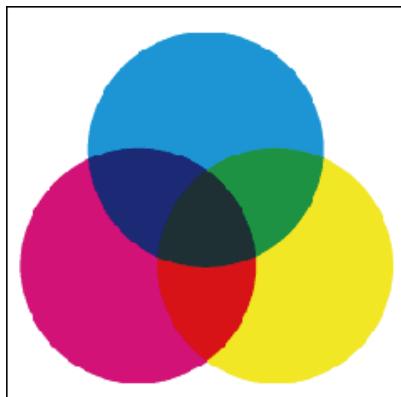
*

五神真先生ご提供

シアン

色の3原色

マゼンタ



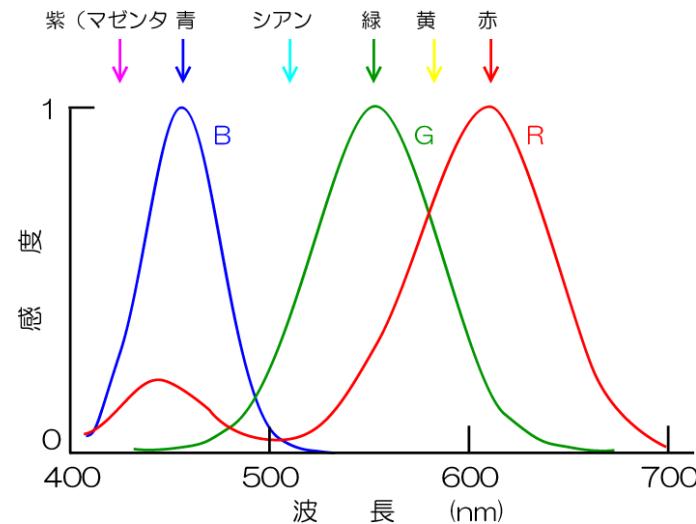
黄

*

五神真先生ご提供



◎

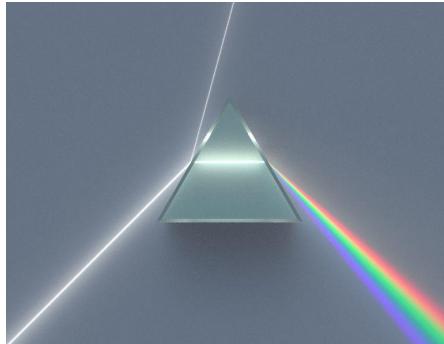


*

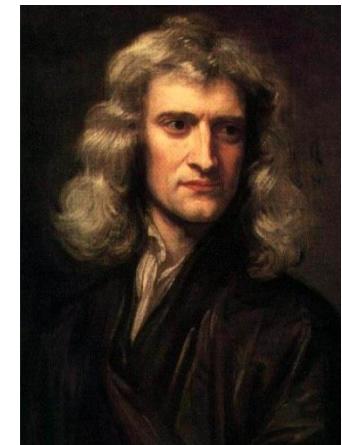
五神真先生ご提供

光学におけるニュートンの貢献

プリズムによる白色光の分解(~1670)



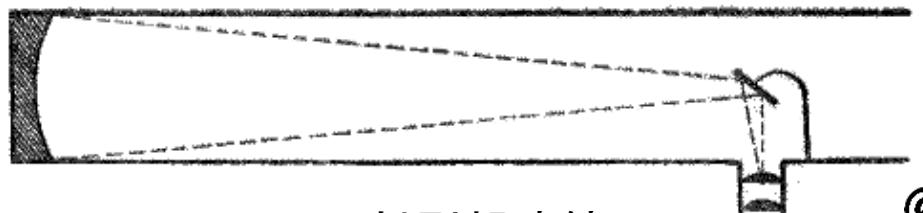
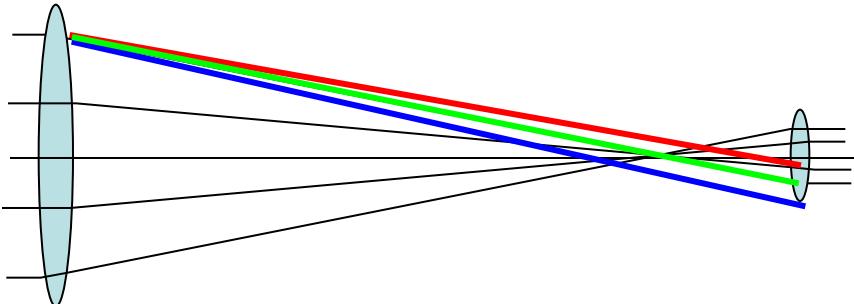
By Spigget; derivative work by Cepheiden. Wikimedia Commons より転載
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dispersive_Prism_Illustration.jpg
CC BY-SA 3.0



アイザック・ニュートン
(1642-1727)

Wikimedia Commons より転載
<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:GodfreyKneller-IsaacNewton-1689.jpg>

反射型望遠鏡(1668)



反射型望遠鏡

C. Flammarion (1873) "Les Plus Grands Télescopes du monde" (3/3), *La Nature* 24, p.371.
http://fr.wikisource.org/wiki/Les_Plus_Grands_T%C3%A9lescopes_du_monde/03

粒子説 「光は粒子であって、それがエーテルを振動させる」



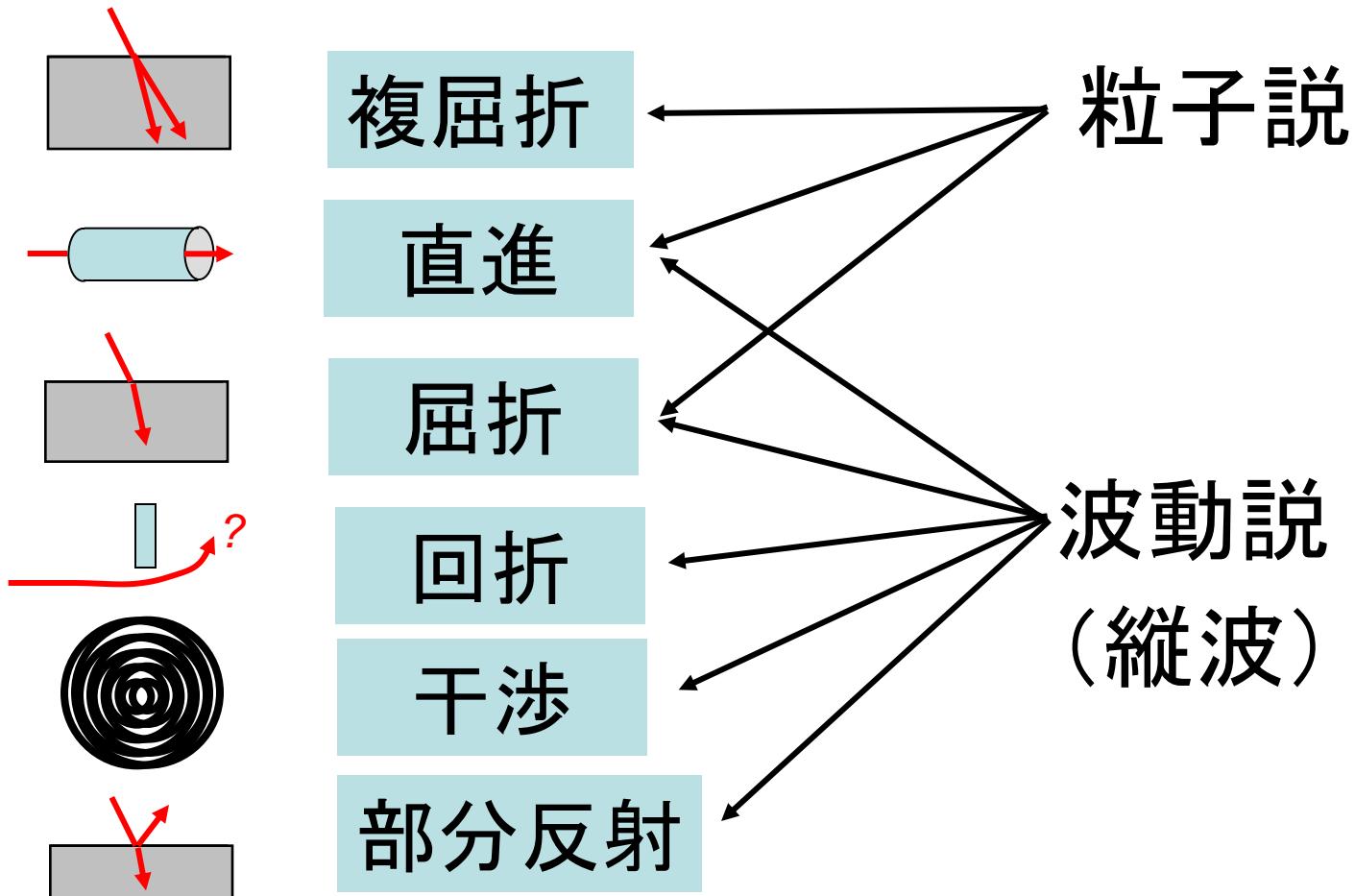
目次

1. ガリレオ: 望遠鏡と地動説
2. スネルの法則とフェルマーの原理
3. ホイヘンスの原理とニュートンの分光実験
4. ポアソン対フレネル: 粒子説vs波動説
5. まとめ

光の正体は
粒子か波動か？



ニュートンのころに分かっていた光の性質



“ポアソン・スポット”

フランス科学アカデミー

1818年、光が粒子か波動かをめぐる
コンペを開催

応募者：フレネル



オーギュスタン・ジャン・フレネル
(1788-1827)



Wikimedia Commons より転載

http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Augustin_Fresnel.jpg

ポアソン(ニュートン派)

(内心)「誤りに決まっている」

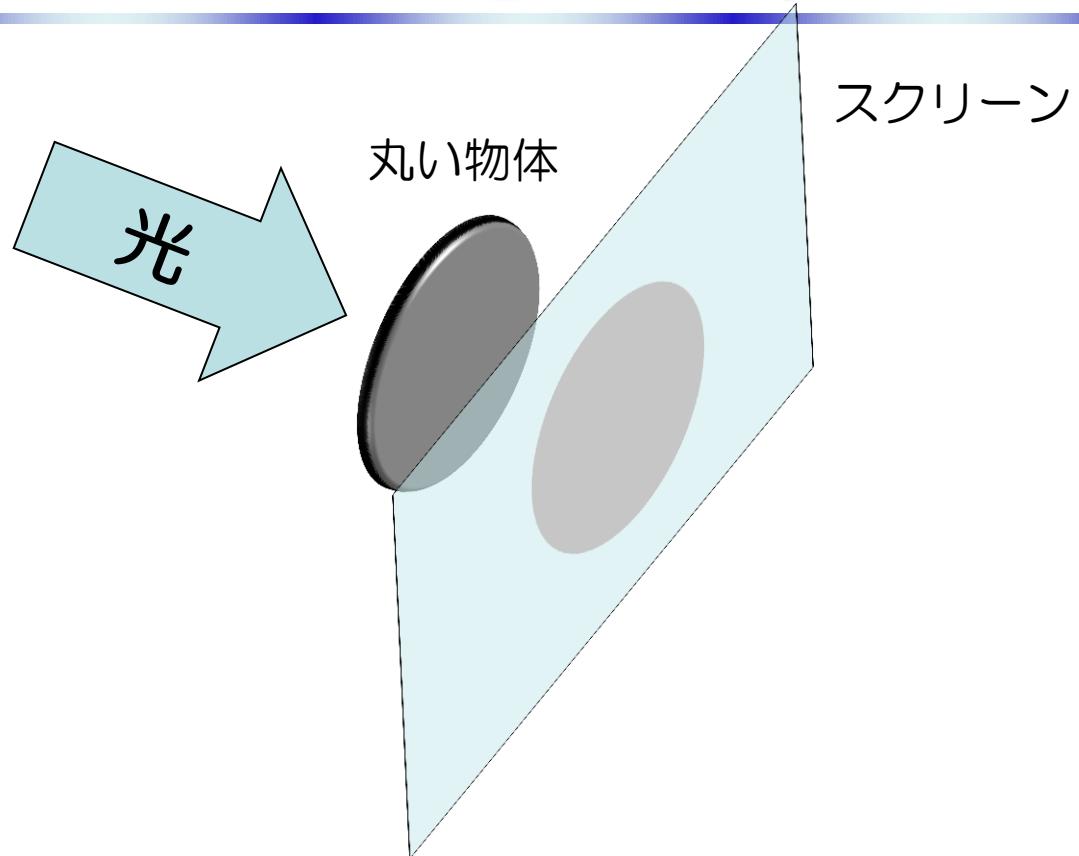


シメオン・ドニ・ポアソン
(1781-1840)

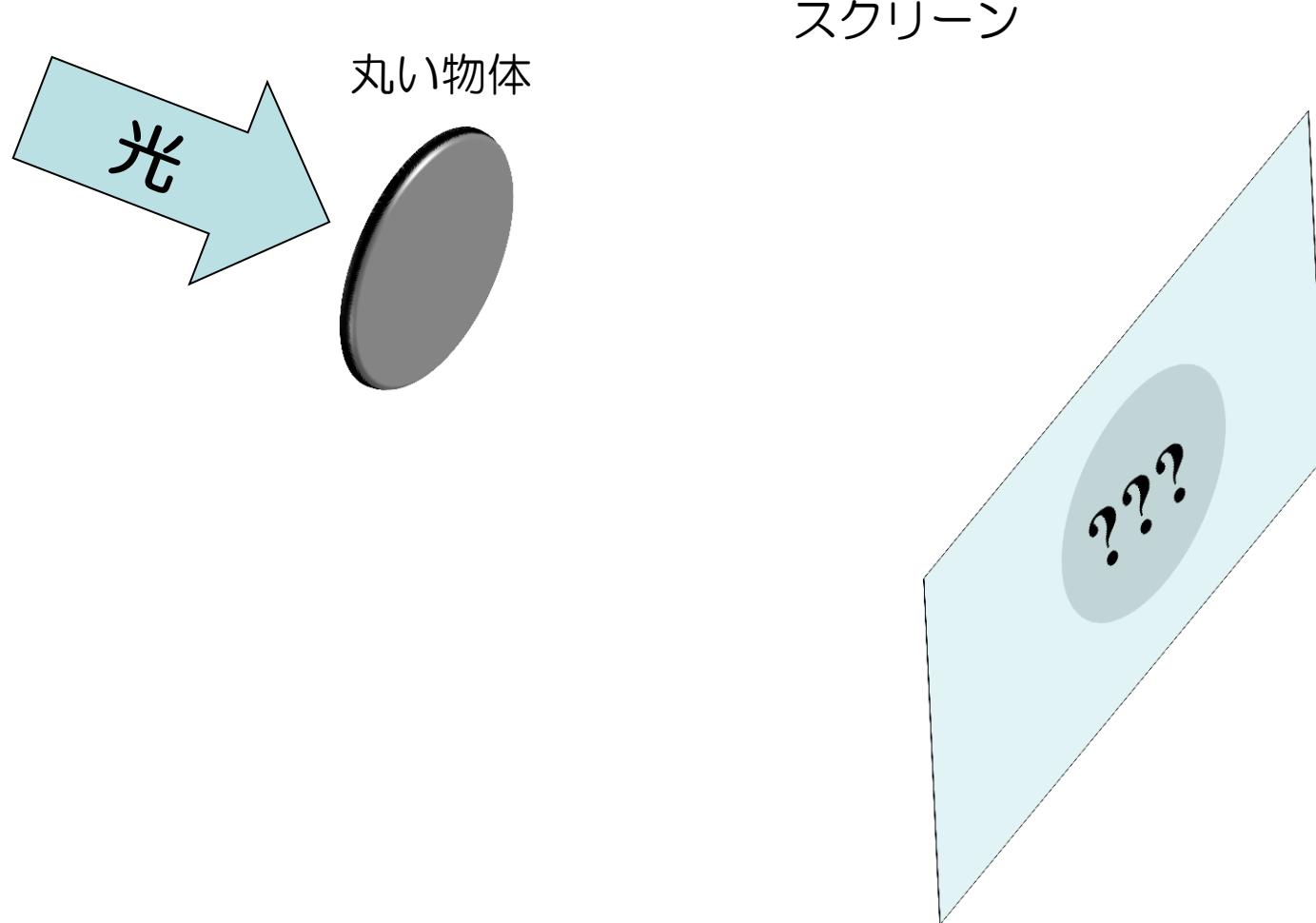
Wikimedia Commons より転載
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Simeon_Poisson.jpg



考えてみよう



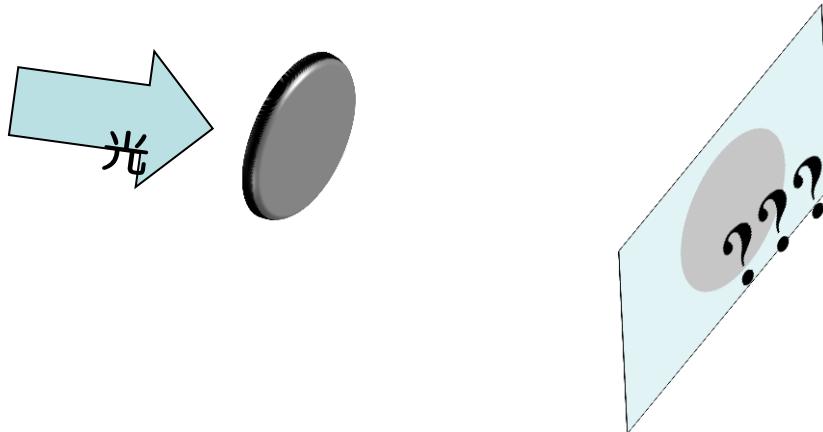
考えてみよう



考えてみよう

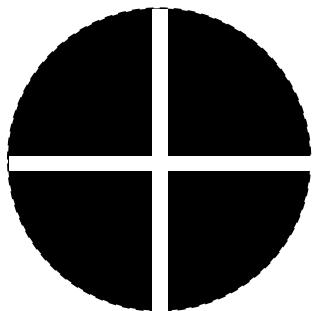


ポアソン

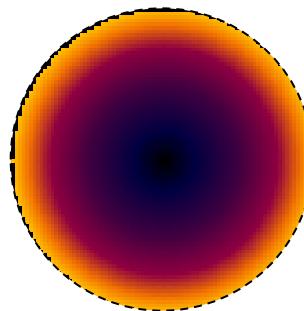


「計算すると下のようになる」

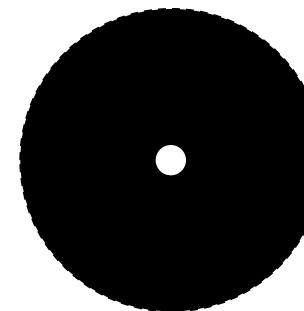
- (A)
十字に明るくなる



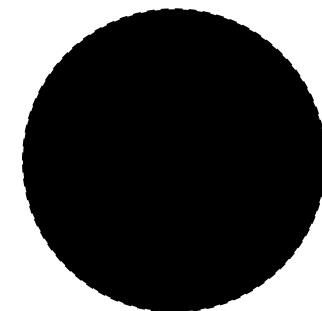
- (B)
影が色づく



- (C)
中央に輝点が出る



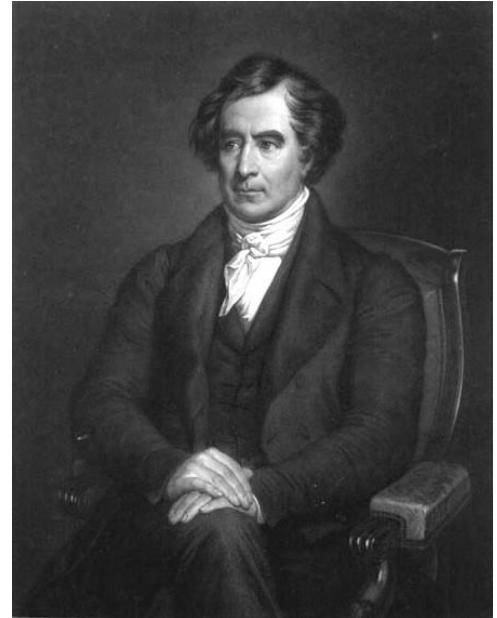
- (D)
直後の影と同じ



「この結果は常識に反するので、**波動説は誤り**（ポアソン）」

アラゴ(委員長)

「実験して確かめるべき」

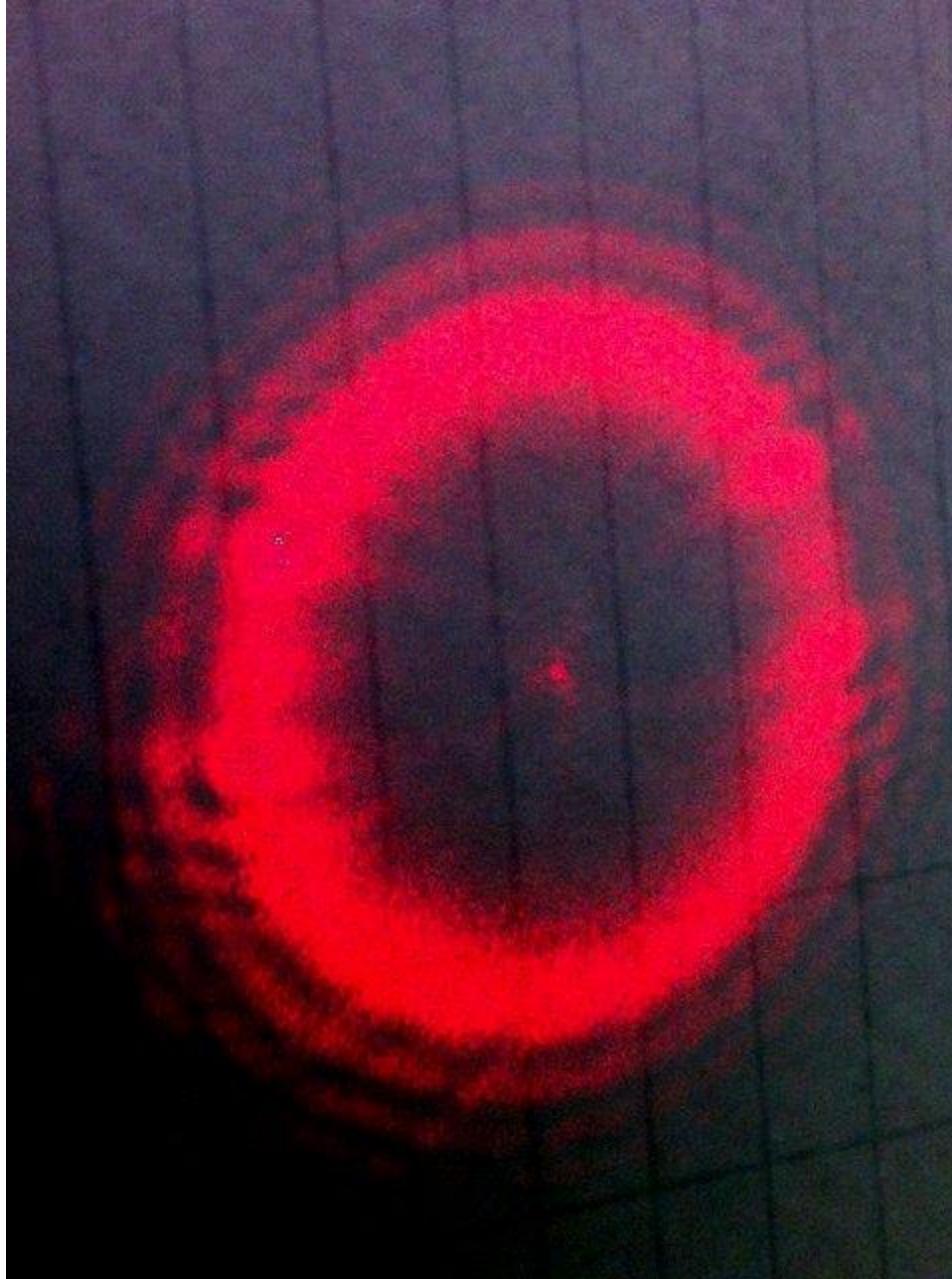


フランソワ・アラゴ
(1786-1853)

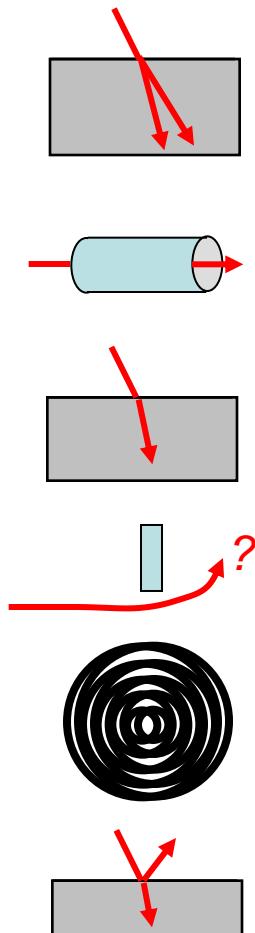
Wikimedia Commons より転載
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Arago_Francois_portrait.jpg

(第25代フランス首相
1848年5月9日 – 1848年6月24日)





光の性質



複屈折

直進

屈折

回折

干渉

部分反射

粒子説

波動説

~~(縦波)~~
(横波)

電磁波の登場

マックスウェル方程式

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

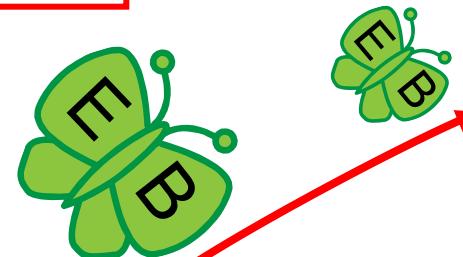
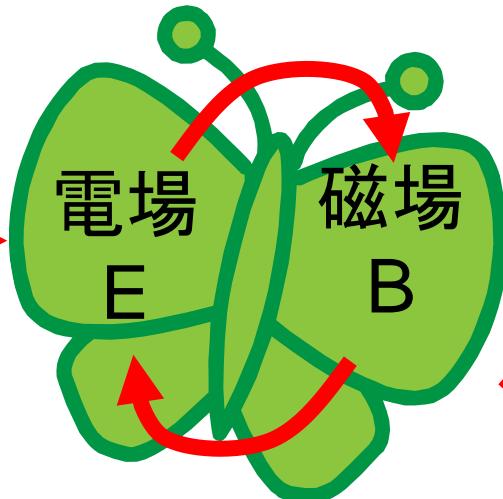
$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$



ジェイムズ・クラーク・マックスウェル
(1831–1879)

Wikimedia Commons より転載
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:James_Clerk_Maxwell.png

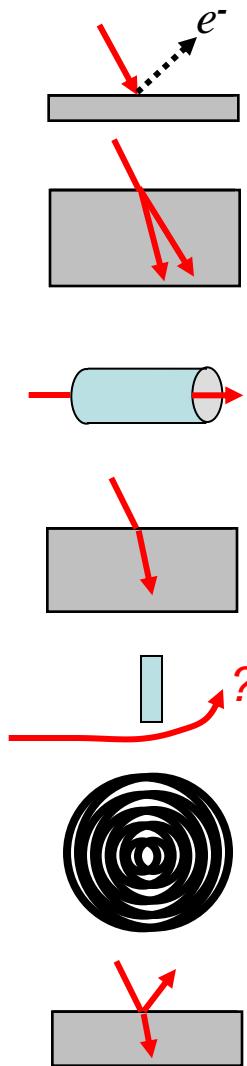
運動する
電荷



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

「光は電磁波」

光の性質



光電効果

複屈折

直進

屈折

回折

干渉

部分反射

アインシュタインの
光量子仮説へ

粒子説

波動説
(縦波)
(横波)

光の科学史

古代ギリシャ:

太陽光の集光による採火 オリンピックの聖火
測地・測量

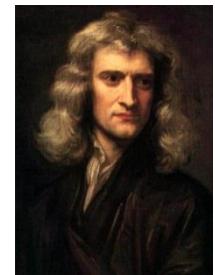
17世紀:

最小作用の原理による屈折現象の説明(フェルマー)
望遠鏡 (ガリレイ、ケプラー、ニュートン)

Wikimedia Commons より転載
(2012/10/31)
[http://commons.wikimedia.org/wiki/
File:Christiaan_Huygens.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Christiaan_Huygens.jpg)



ホイヘンス



ニュートン

18世紀後半:

光学の進歩(ヤング、フレネル)「光の回折」

Wikimedia Commons より転載
(2012/10/31)
[http://commons.wikimedia.org/wiki/
File:GodfreyKneller-IsaacNewton-1689.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:GodfreyKneller-IsaacNewton-1689.jpg)

偏光現象

光は横波

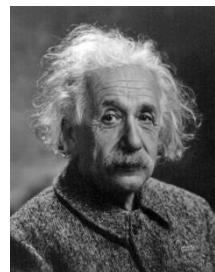
電磁気学の進歩

ファラデーの電磁誘導の法則(1831)

マックスウェル 電磁方程式(1864) 光は電磁波

AINSHUTAIN

ヘルツの実験 (電磁波の確認 1889)



20世紀:

アインシュタイン 特殊相対性理論 (1905)

電磁気学との統一

光の速度は運動系によらず一定

Wikimedia Commons より転載
(2012/10/31)
[http://commons.wikimedia.org/wiki/
File:Albert_Einstein_Head.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Albert_Einstein_Head.jpg)