

## ■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。

**Ⓒ**: 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

光量子科学研究センター

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

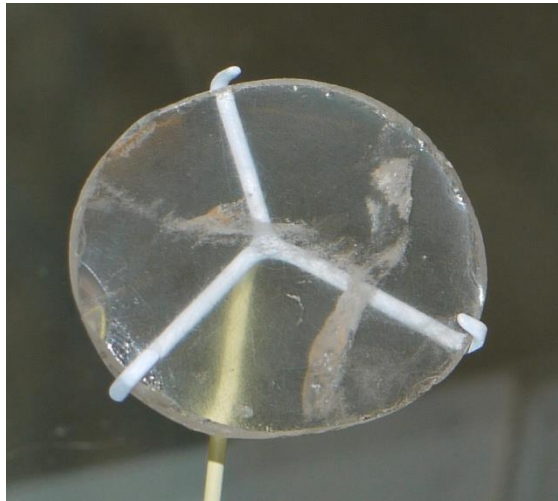


Photo by Geni  
Wikimedia Commons より転載  
[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Nimrud\\_lens\\_British\\_Museum.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Nimrud_lens_British_Museum.jpg)  
CC BY 3.0



Wikimedia Commons より転載  
[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dräkt,\\_Assyrier,\\_Nordisk\\_familjebok.png](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”

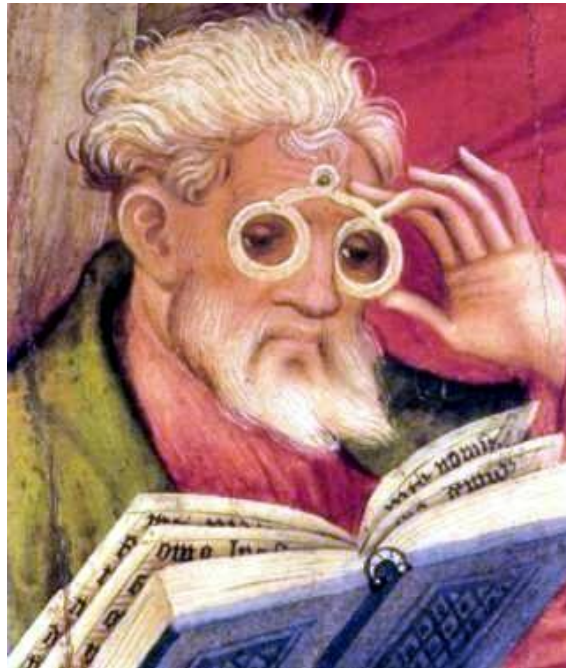


Photo by Tony McGinley  
<http://wood-pellet-ireland.blogspot.jp/2009/02/solar-power-innovation.html>



# 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

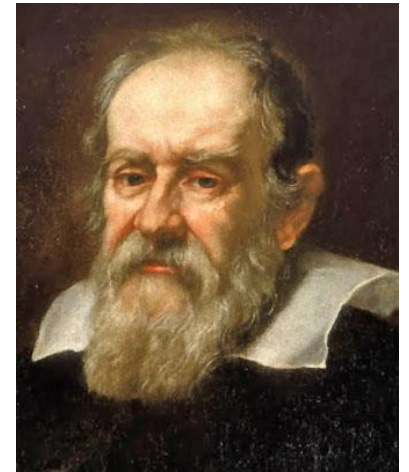


\*

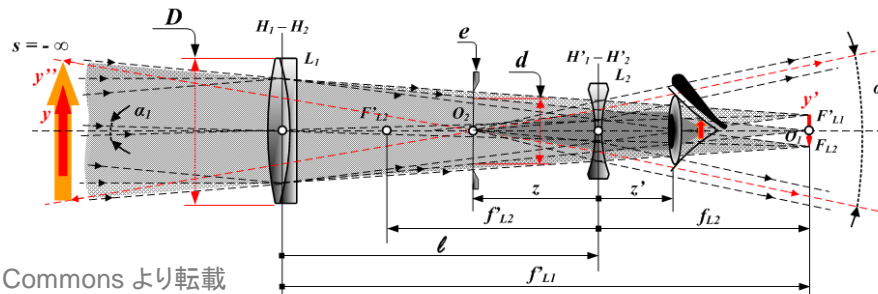


\*

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」)



ガリレオ・ガリレイ  
(1564-1642)





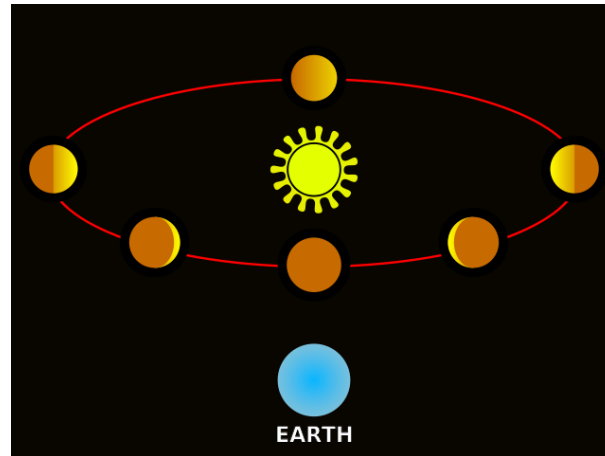
# 望遠鏡でガリレオが発見したもの

- 木星の衛星  
(1610年)



NASA/JPL/DLR  
Wikimedia Commons より転載  
<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Jupitermoon.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>

- 「太陽黒点論」  
(1613年)



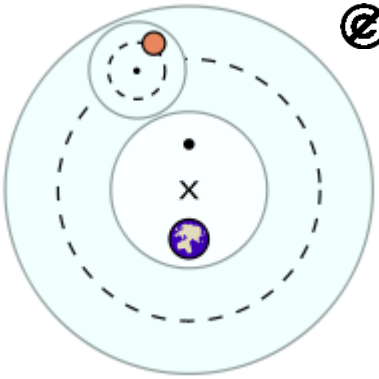
Photo by SiriusB  
Wikimedia Commons より転載  
[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sun\\_projection\\_with\\_spotting-scope.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sun_projection_with_spotting-scope.jpg)  
CC BY-SA 3.0

## 時代をゆるがす発見

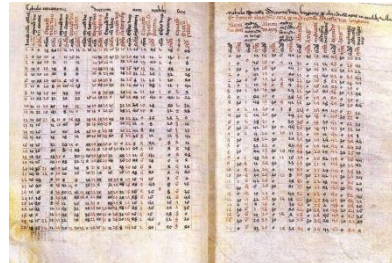
# 天動説

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)

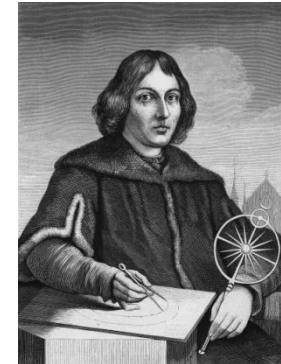
ケプラー以外のほとんどの  
職業天文学者は依然、  
天動説を信奉



# 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)

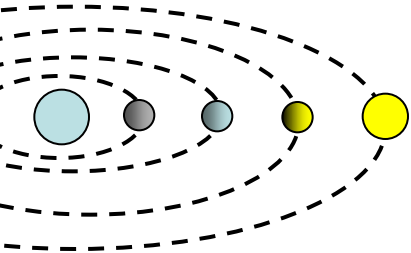


Wikimedia Commons より転載  
[http://commons.wikimedia.org/wiki/  
File:Johannes\\_Kepler\\_1610.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Johannes_Kepler_1610.jpg)

# 天動説



地、月、水、金、太、火、、、



## 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！

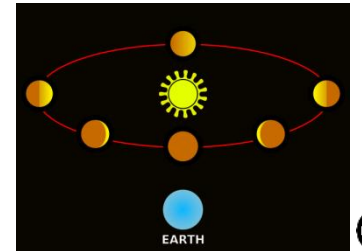
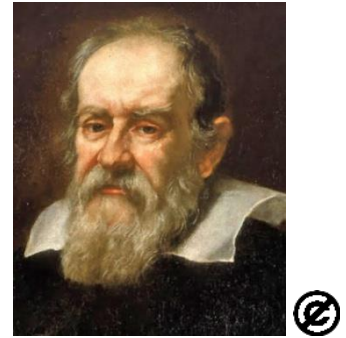
金星は常に欠けているはず

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。

ガリレオ



地球から、月、水星、金星、太陽、火星、木星、土星

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



## (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](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 a 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

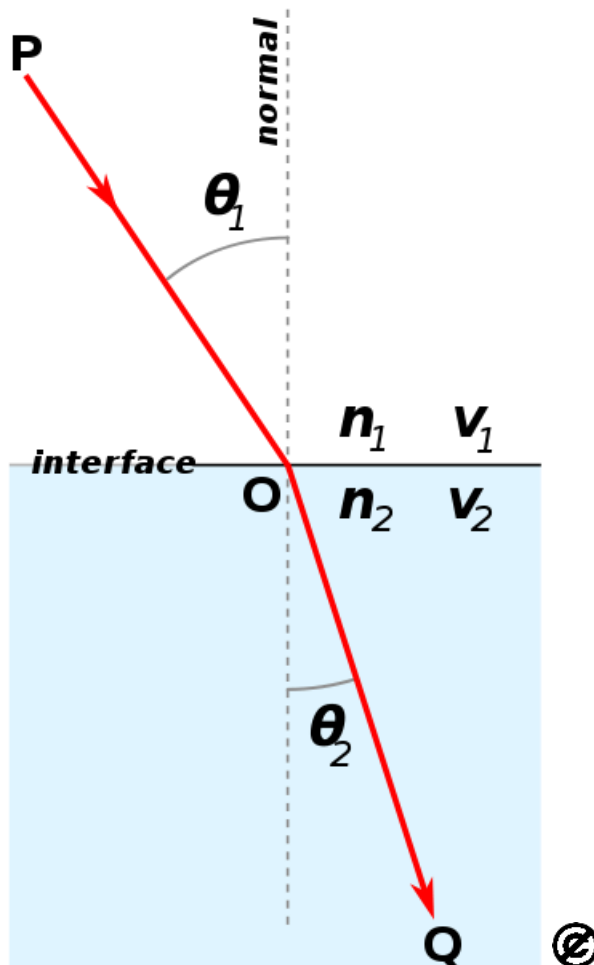


# 光学の発展

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\\_Snellius.jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Willebrord_Snellius.jpg)

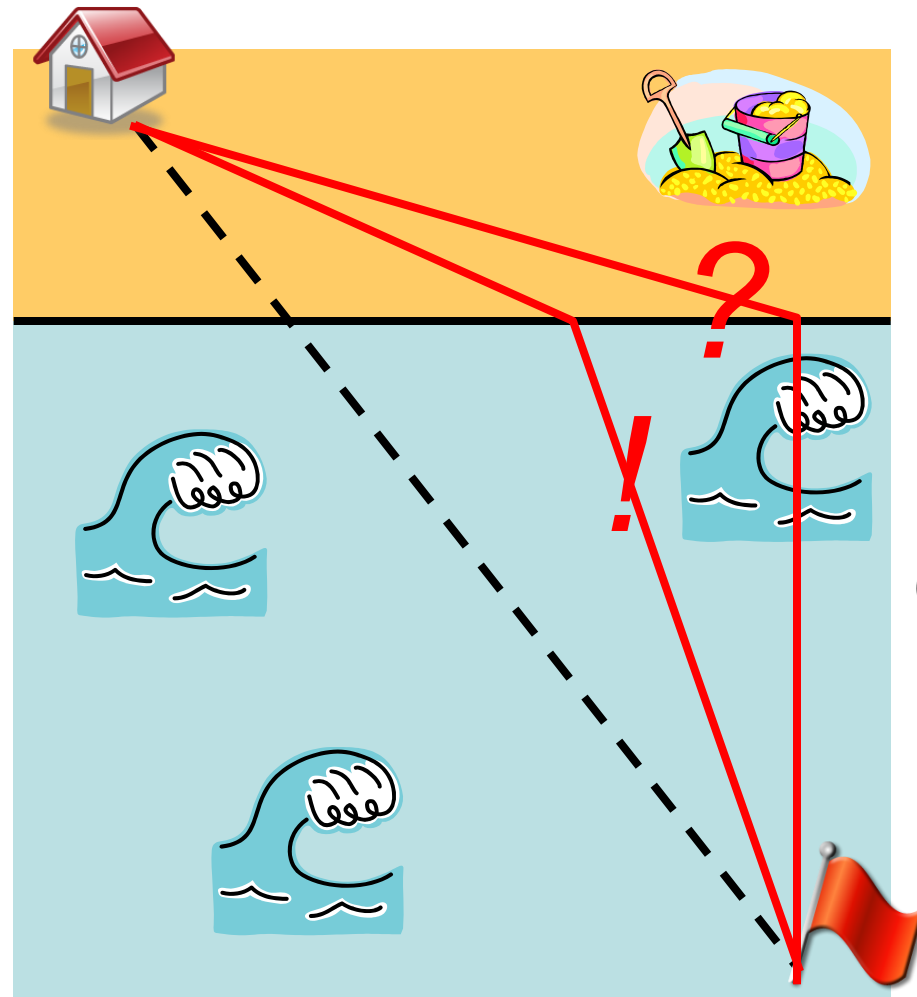
Wikimedia Commons より転載  
[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Snells\\_law2.svg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Snells_law2.svg)



# フェルマーの原理(1657)

砂浜

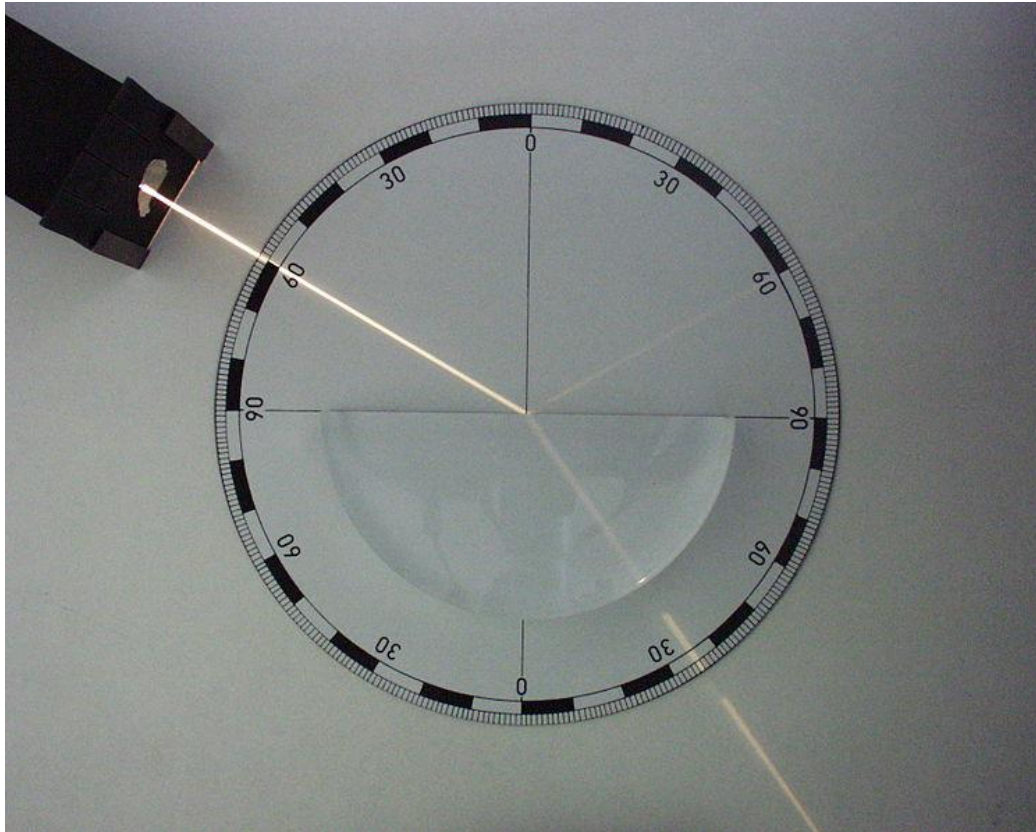
海



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 Zátanyi 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)

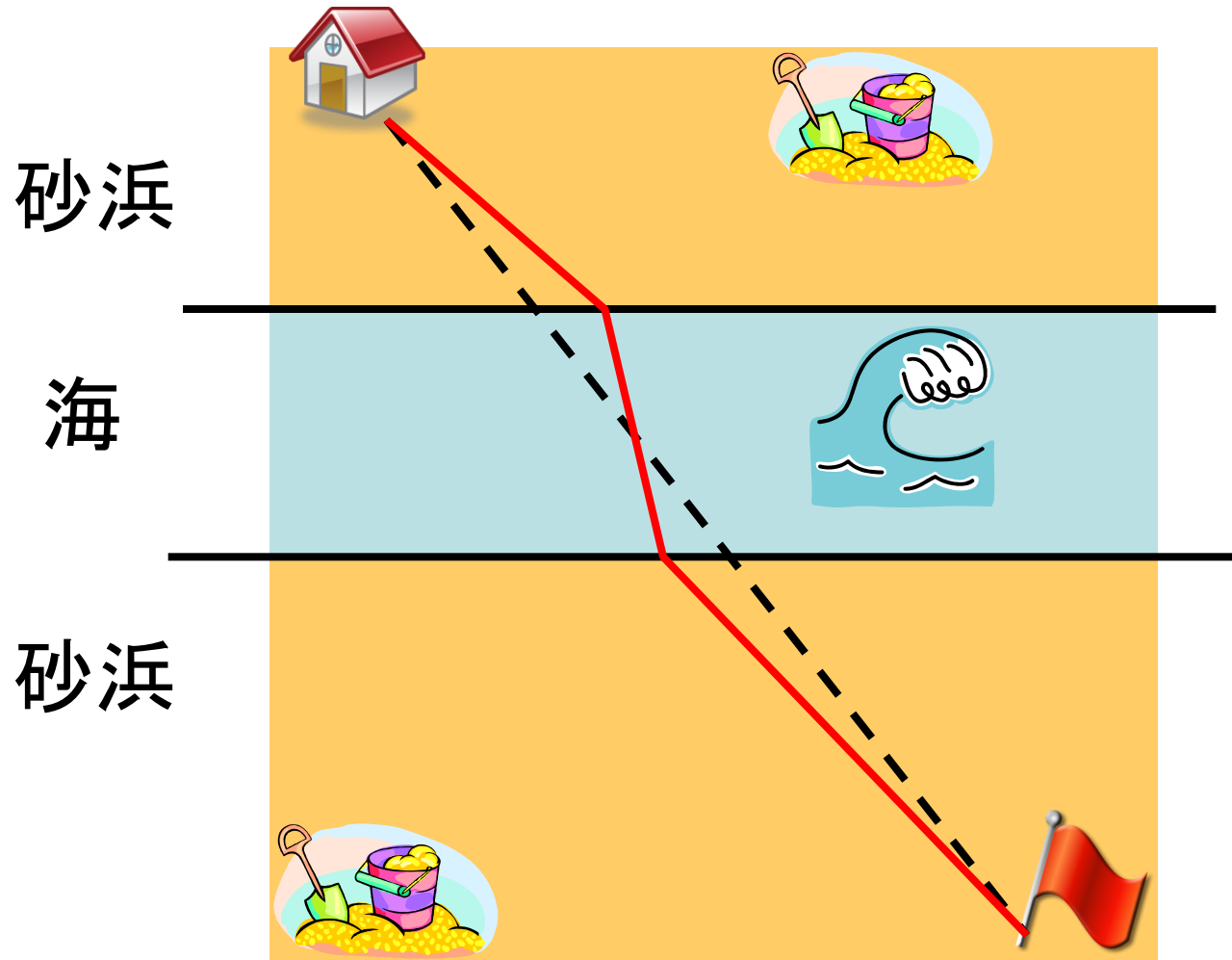
Wikimedia Commons より転載  
[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pierre\\_de\\_Fermat.jp](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pierre_de_Fermat.jp)

光も時間が最小になる経路を通る！





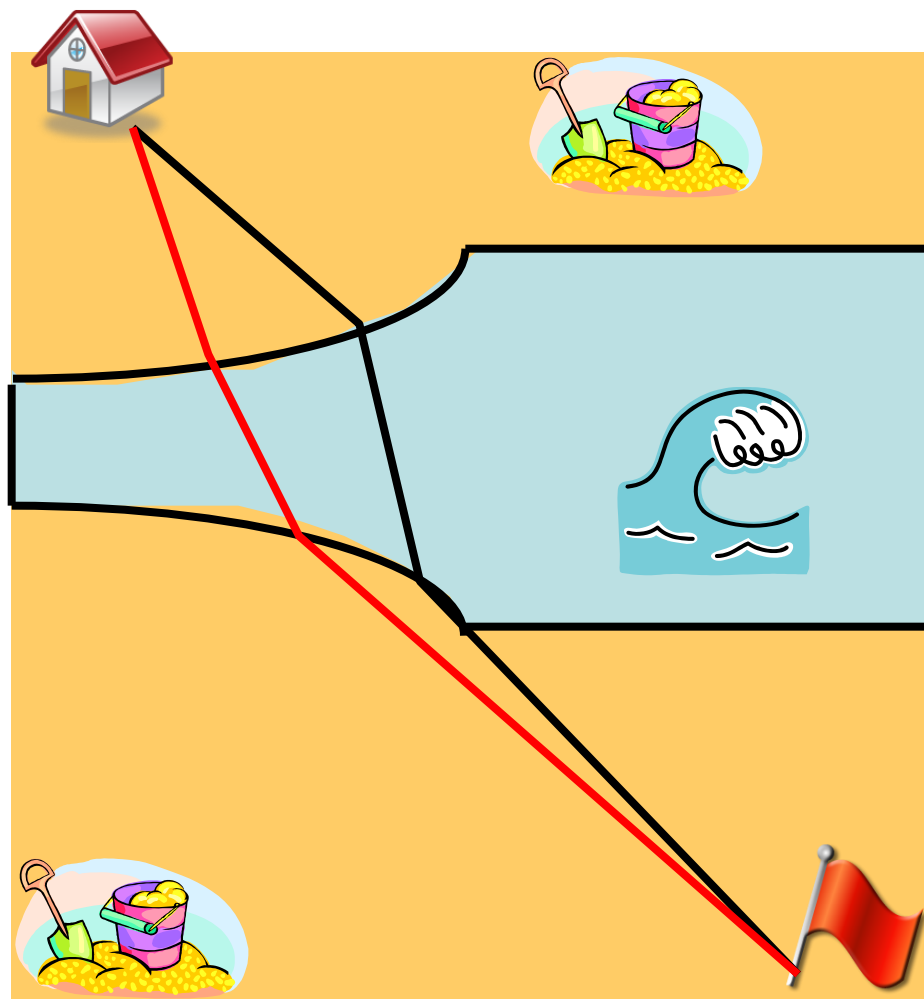
# フェルマーの原理



砂浜

海

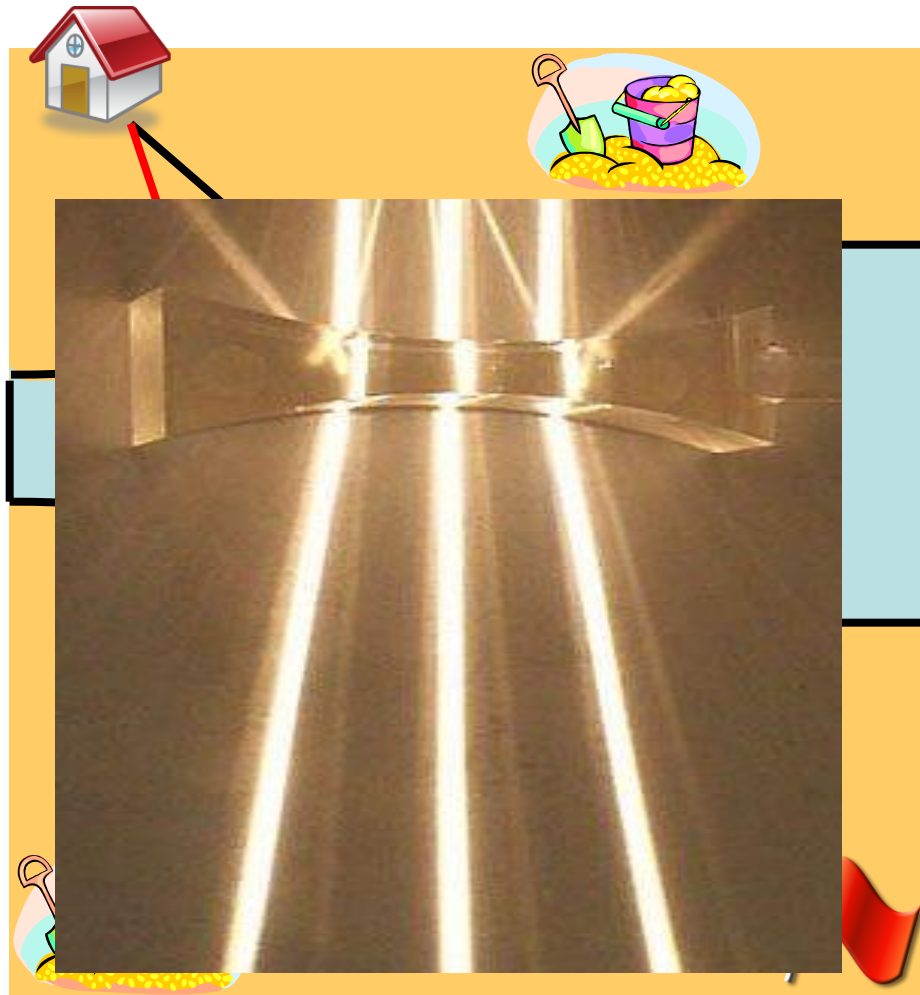
砂浜



砂浜

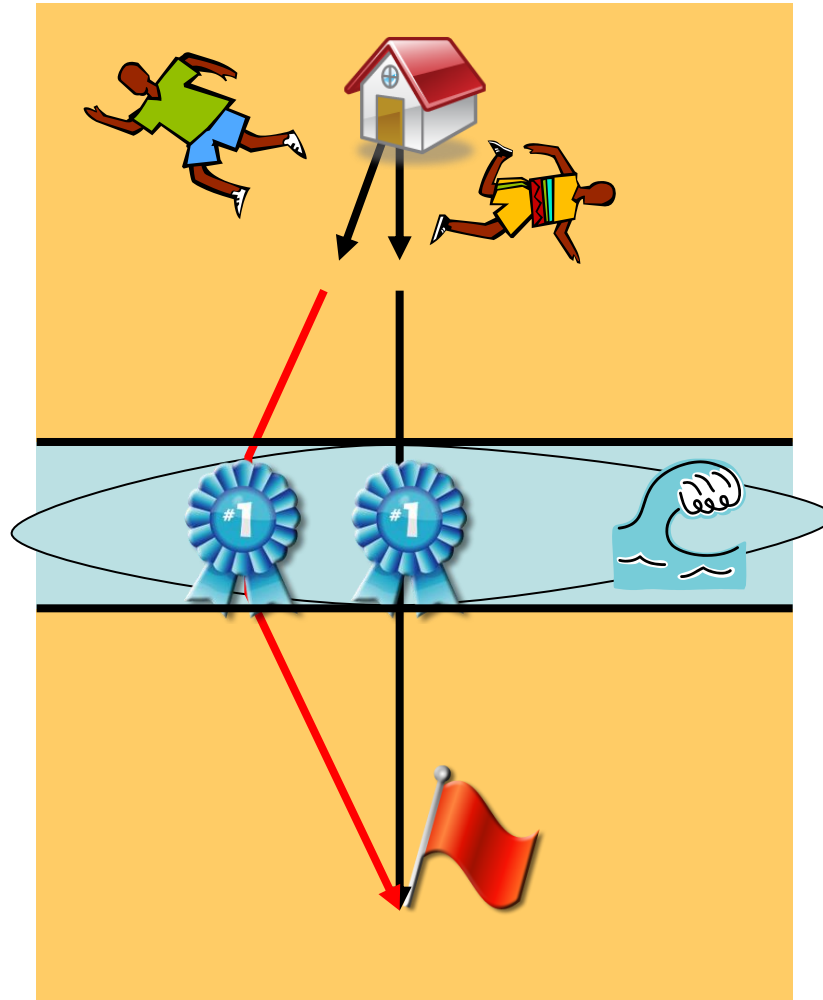
海

砂浜



By User Fir0002 on en.wikipedia, Wikipedia より転載  
[http://en.wikipedia.org/wiki/File:Concave\\_lens.jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Concave_lens.jpg)  
CC BY-SA 3.0

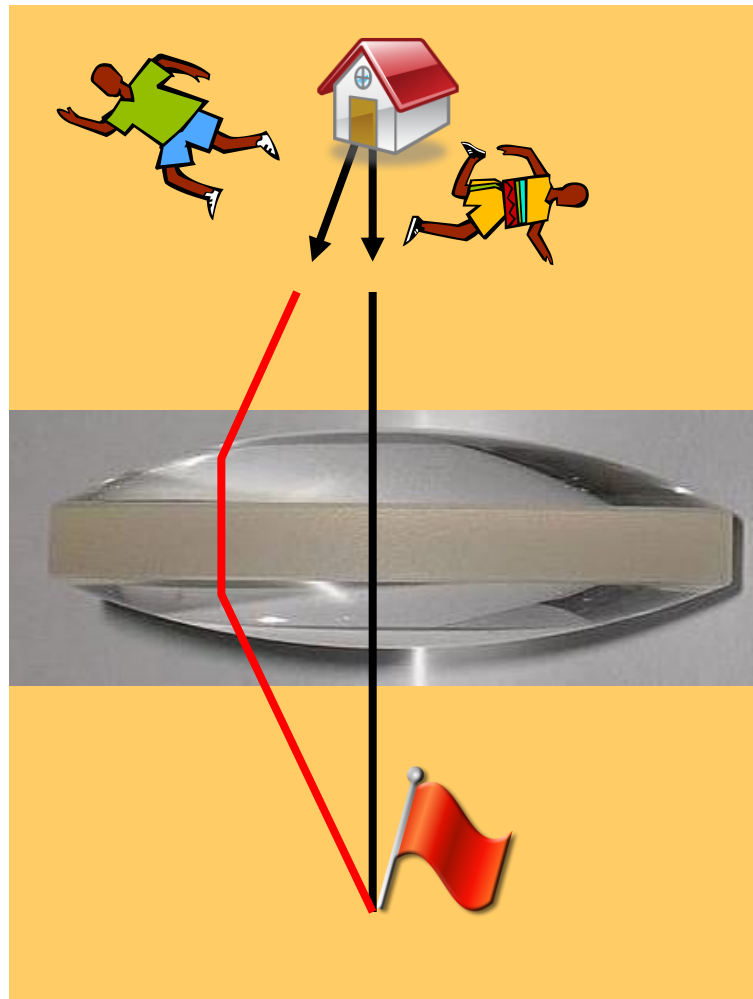




砂浜

湖

砂浜

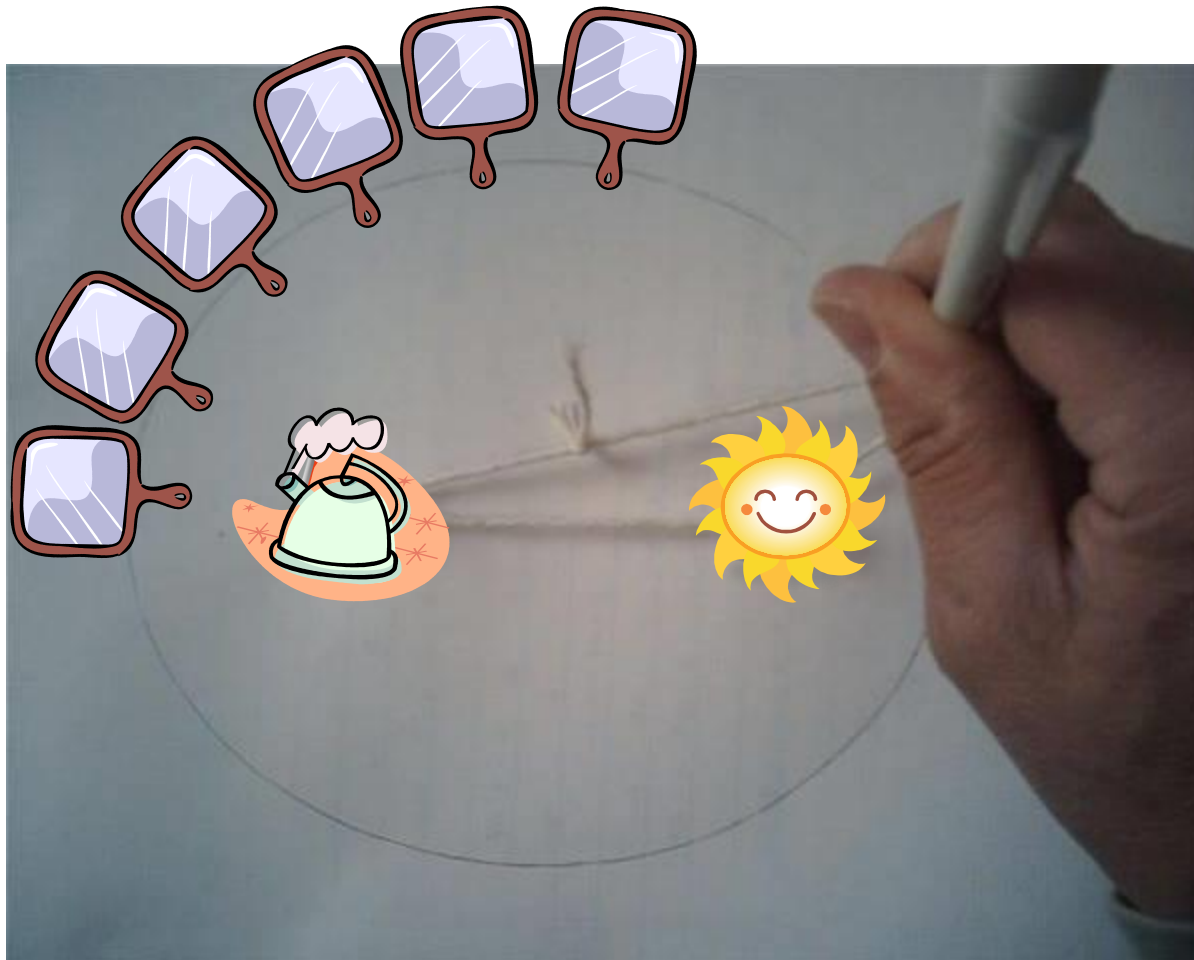


空気

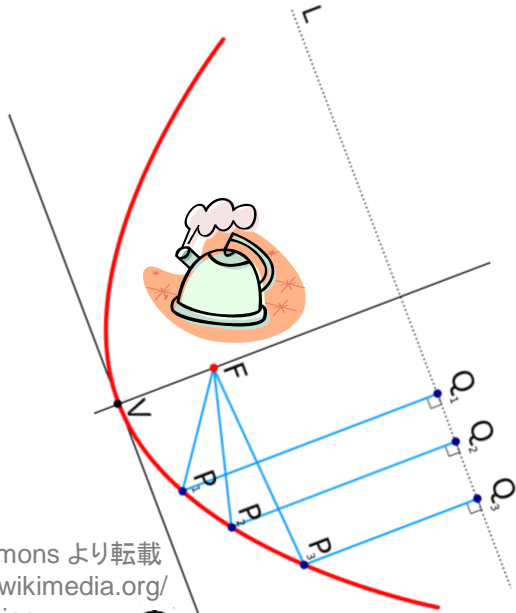
レンズ

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](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>

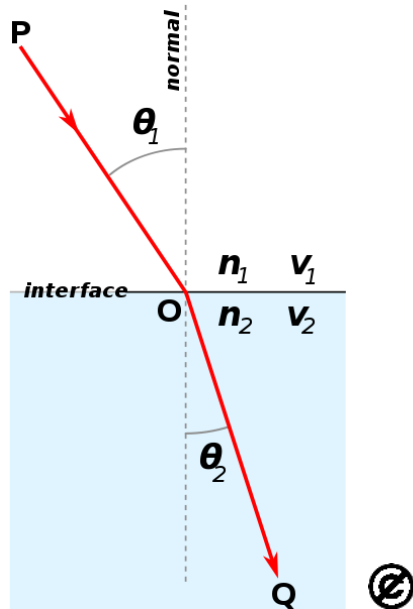


## Canberra Deep Dish Communications Complex

NASA, <http://grin.hq.nasa.gov/ABSTRACTS/GPN-2000-000502.html>

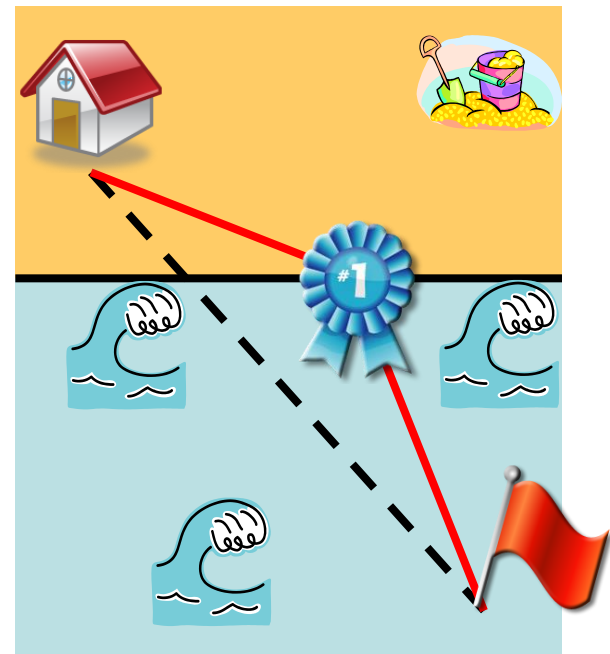
# 2通りの定式化

## 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？



関埼灯台で使われていた  
レンズ

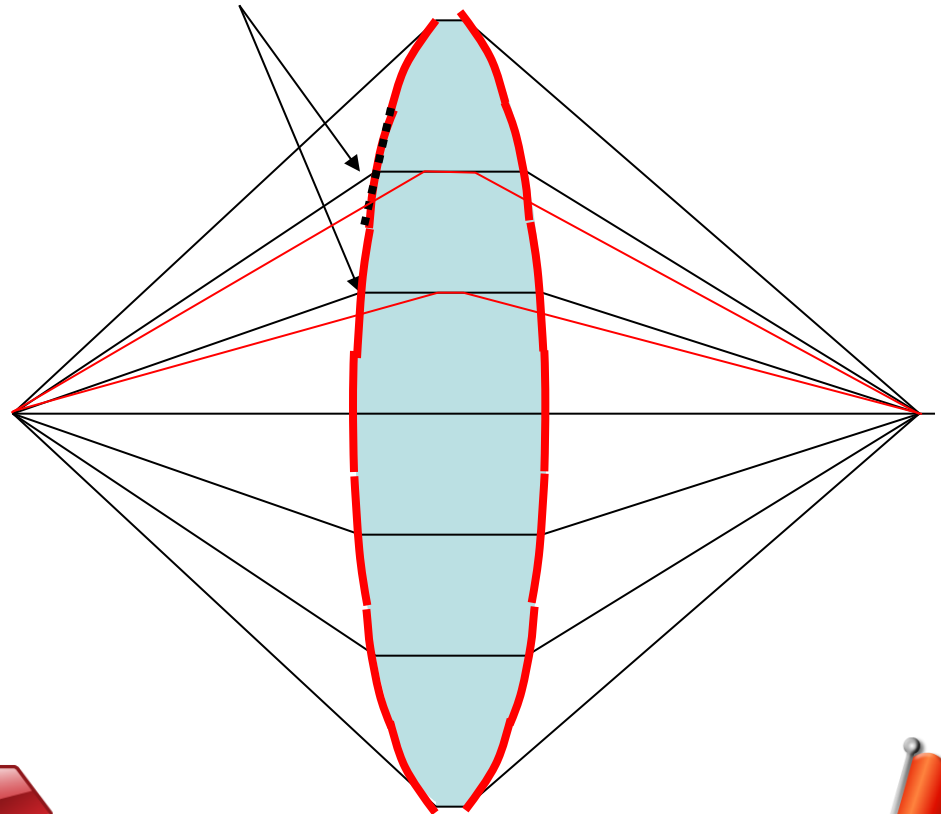
By 大分県省中, Wikimedia Commons より転載  
[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Oita\\_sekizaki\\_lighthouse\\_old\\_lense.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Oita_sekizaki_lighthouse_old_lense.jpg)  
CC BY-SA 3.0

# フェルマーの原理の反例？

スネルの法則にとって大事なものは  
接線の傾き



関埼灯台で使われていた  
レンズ



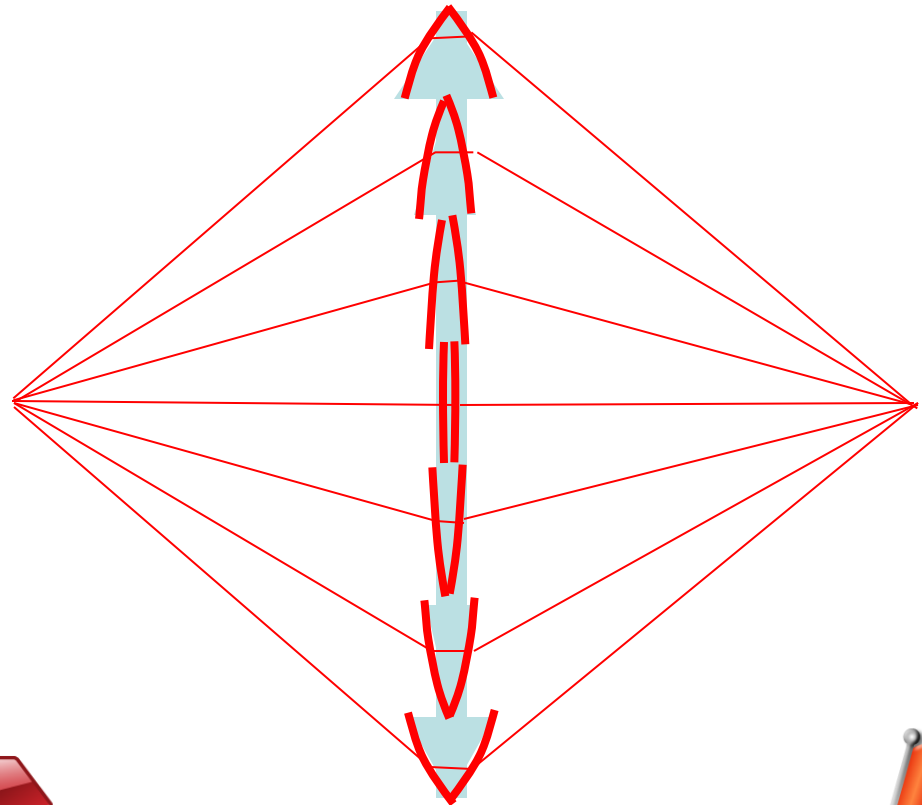
# フェルマーの原理の反例？

スネルの法則にとって大事なものは  
接線の傾き



関埼灯台で使われていた  
フレネルレンズ

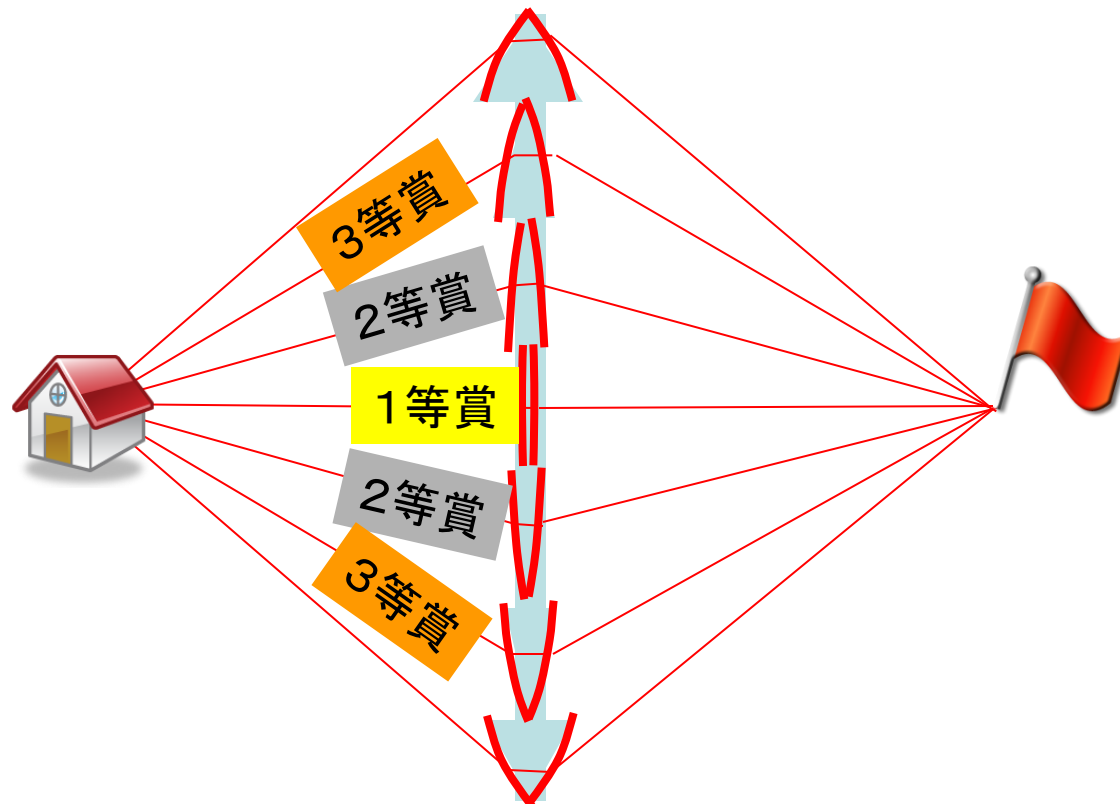
By 大分県省中, Wikimedia Commons より転載  
[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Oita\\_sekizaki\\_lighthouse\\_old\\_lense.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Oita_sekizaki_lighthouse_old_lense.jpg)  
CC BY-SA 3.0



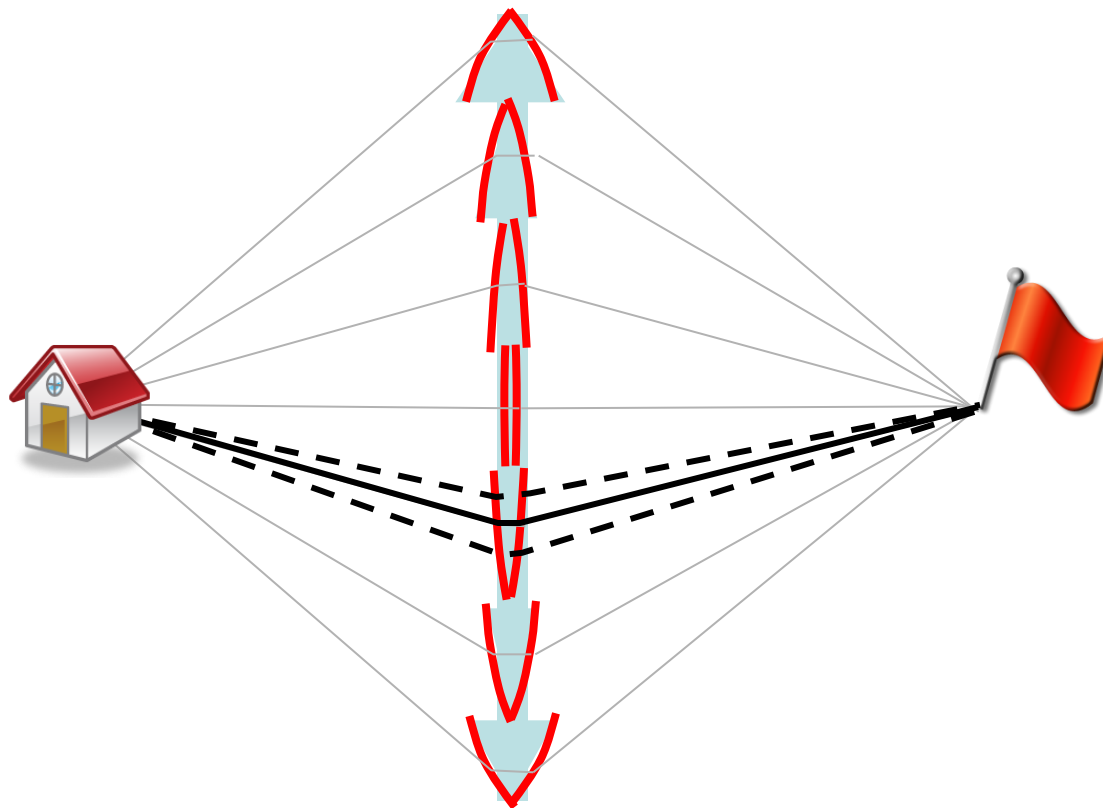
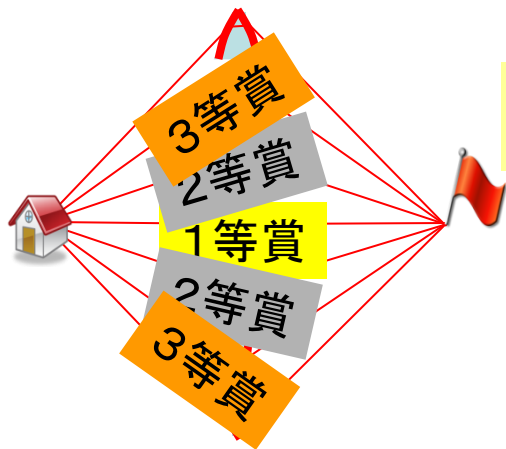
## 「フレネルレンズ」



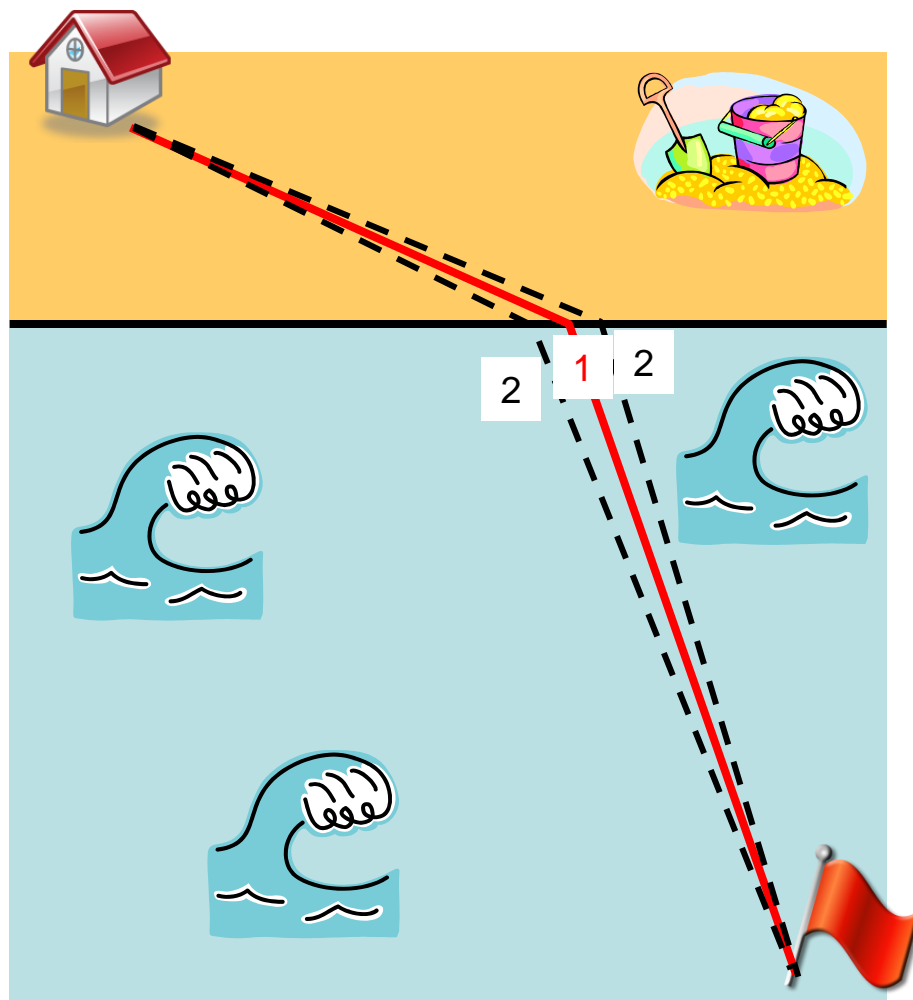
# フェルマーの原理の反例？



## フェルマーの原理の反例？



近傍の経路(向こう3軒両隣)に関してだけ時間を比べれば、  
どの経路も同じ時間がかかっている。



## 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、  
経路を連続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

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

ラグランジアン



## 質量 $m$ の質点の運動

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

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

ニュートンの運動方程式

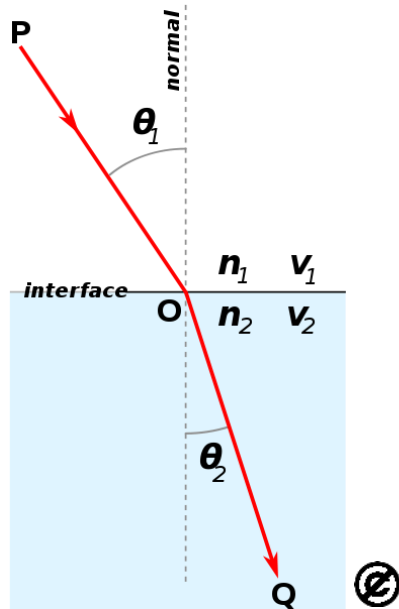
この意味するところは？

# 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

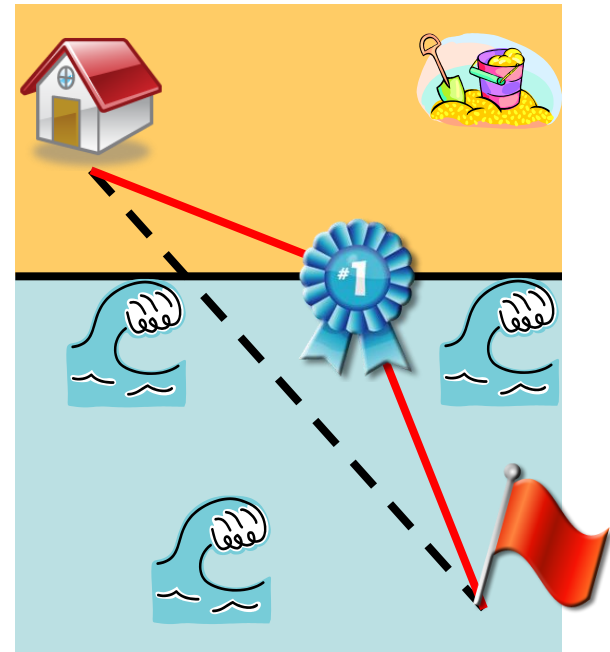
スネルの法則  
(局所的)



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

Wikimedia Commons より転載  
[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Snells\\_law2.svg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Snells_law2.svg)

フェルマーの原理  
(大局的)



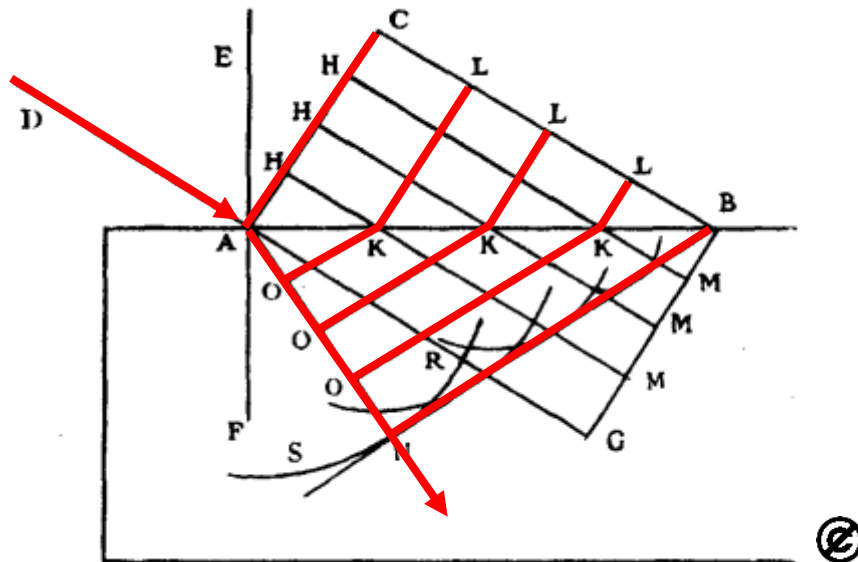
光は時間が最小になる  
経路を通る。

正確ではない

# 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.



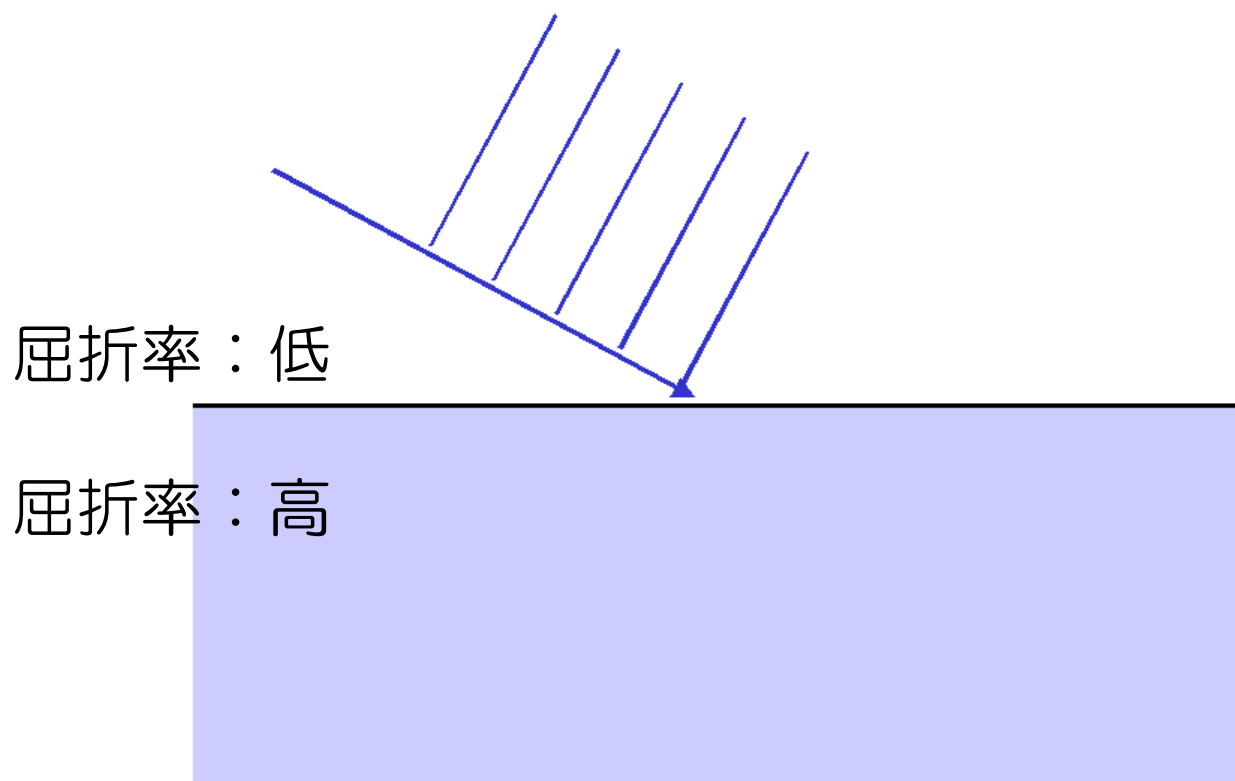
クリスティアーン・ホイヘンス  
(1629-1695)

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

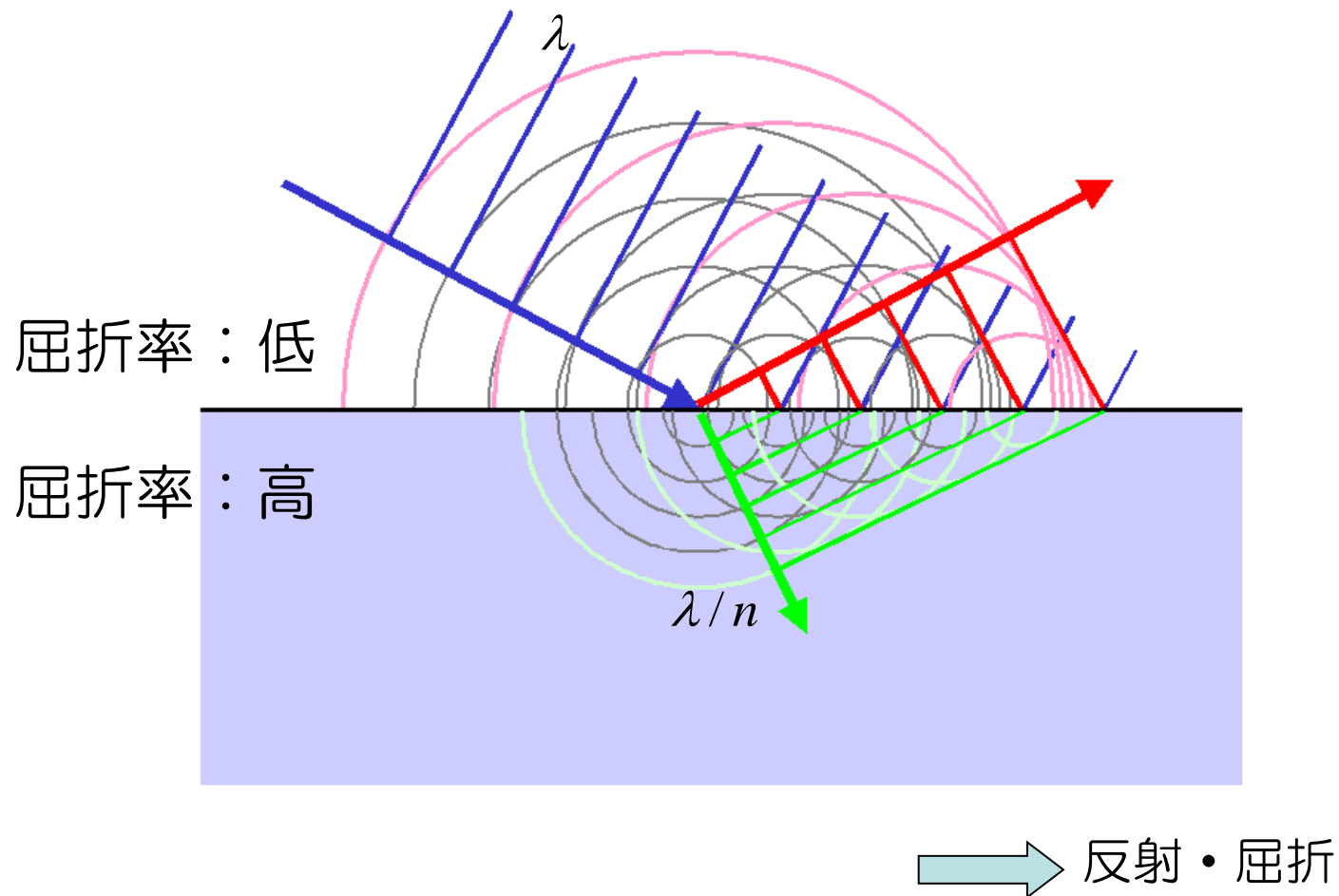


# 波と光線 - ホイヘンスの原理

---



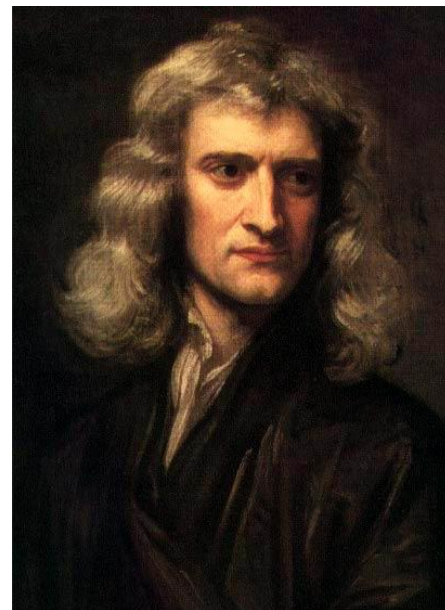
# 波と光線 - ホイヘンスの原理



# 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**



©

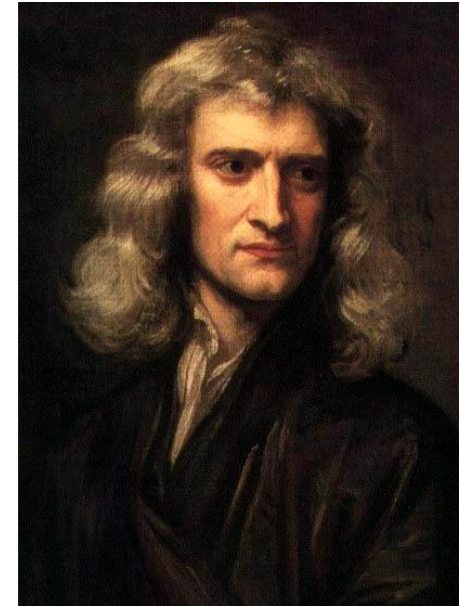
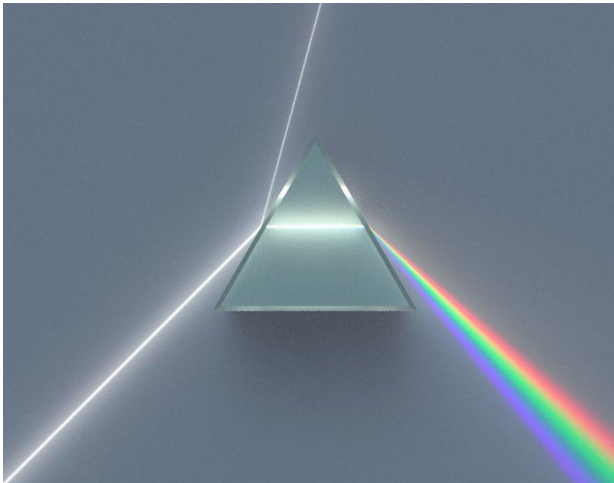
アイザック・ニュートン  
(1642-1727)

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

\*

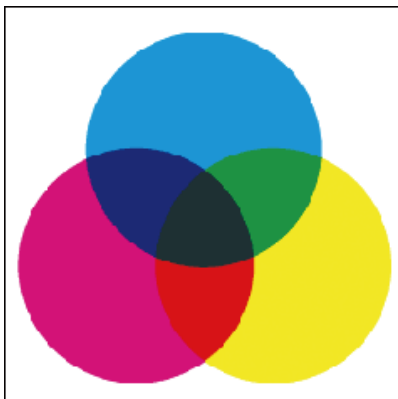
五神真先生ご提供



色の3原色

シアン

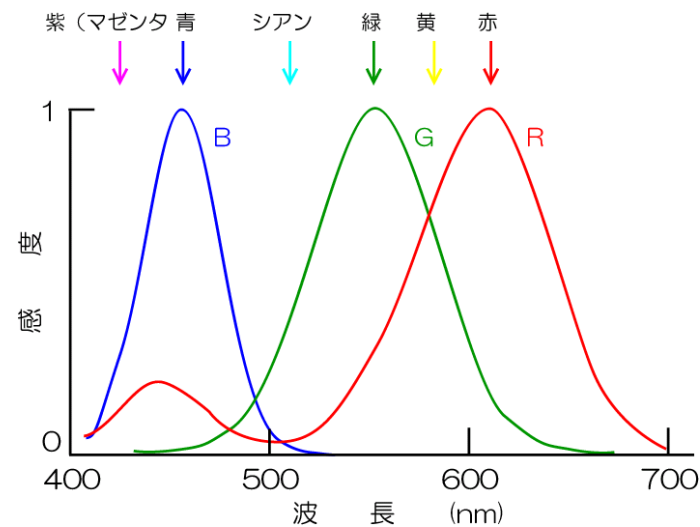
マゼンタ



黄

\*

五神真先生ご提供

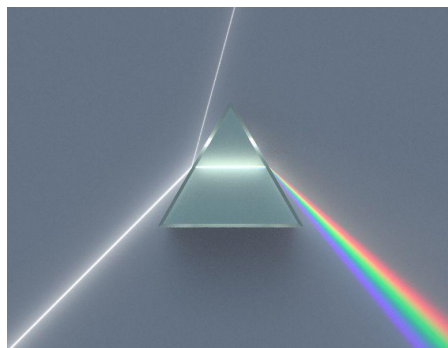


\*

五神真先生ご提供

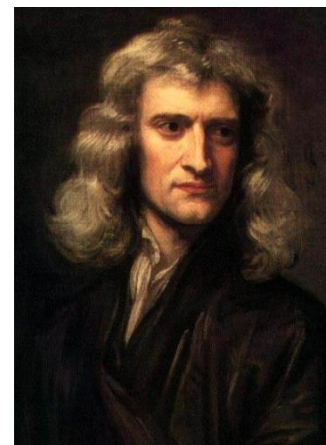
# 光学におけるニュートンの貢献

## 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](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dispersive_Prism_Illustration.jpg)

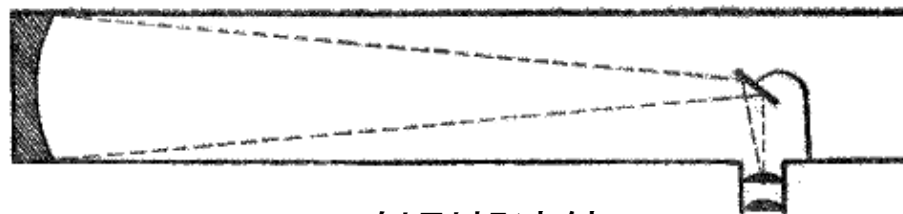
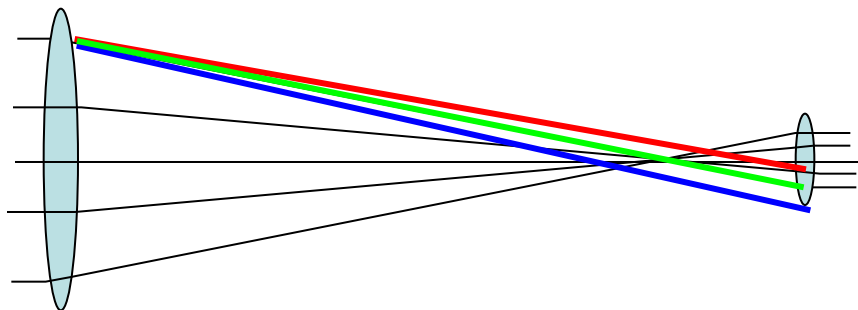
CC BY-SA 3.0



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\\_Télescopes\\_du\\_monde/03](http://fr.wikisource.org/wiki/Les_Plus_Grands_Télescopes_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」



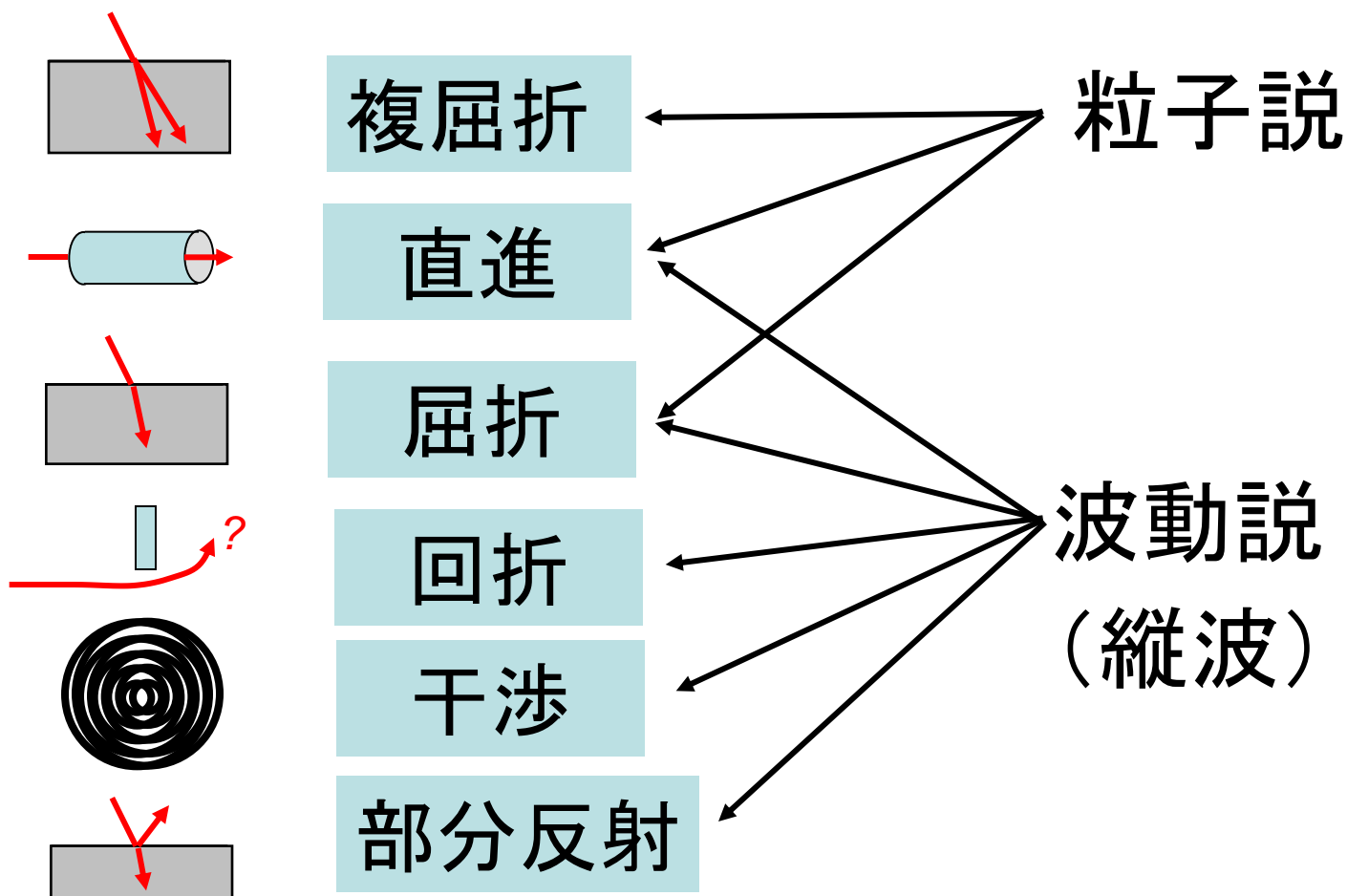
# 目次

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](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)

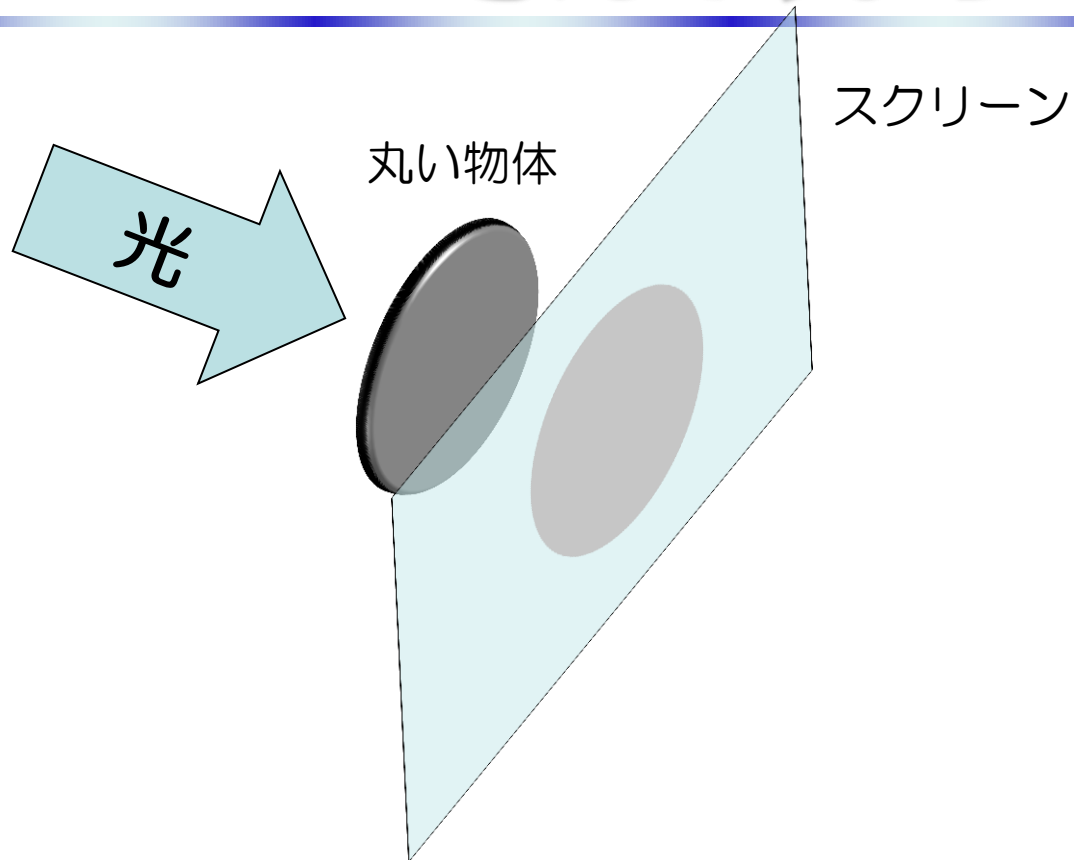
Wikimedia Commons より転載  
[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Simeon\\_Poisson.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Simeon_Poisson.jpg)





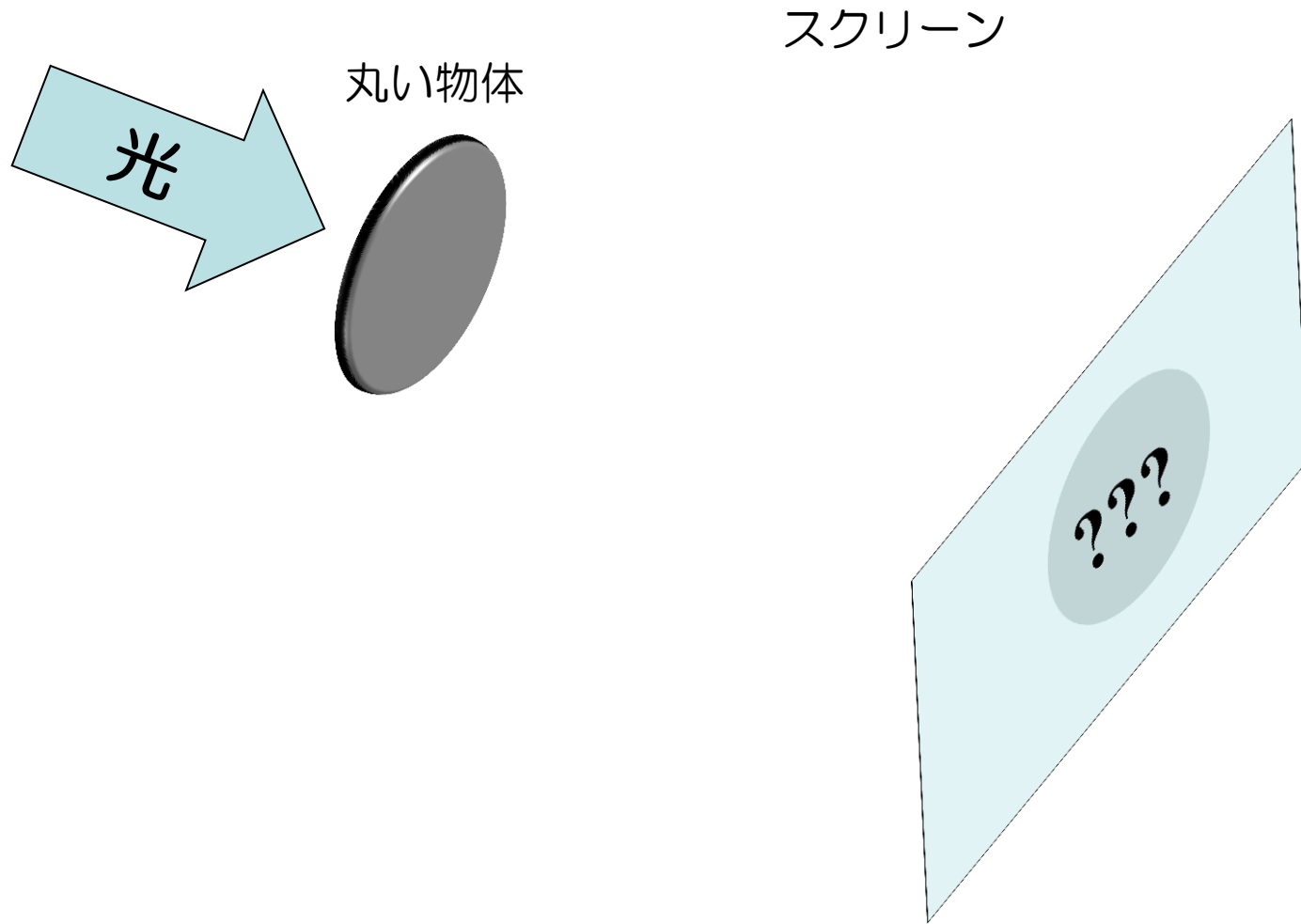
# 考えてみよう

---

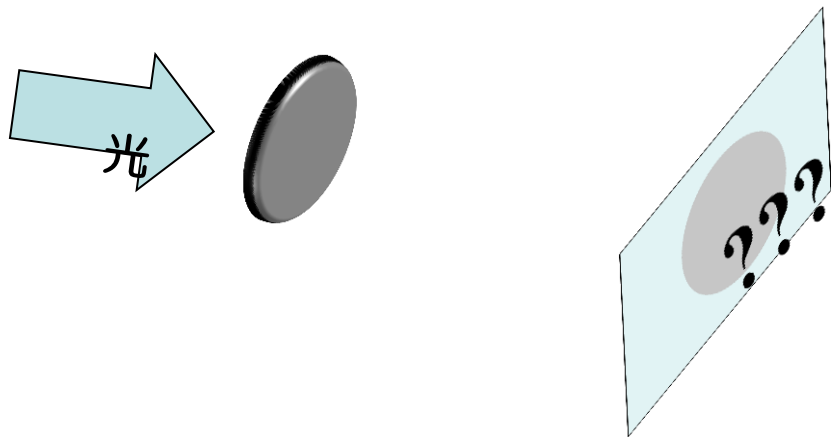


# 考えてみよう

---



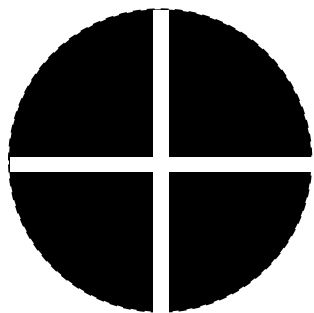
# 考えてみよう



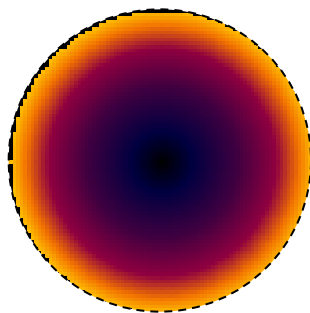
ポアソン

「計算すると下のようになる」

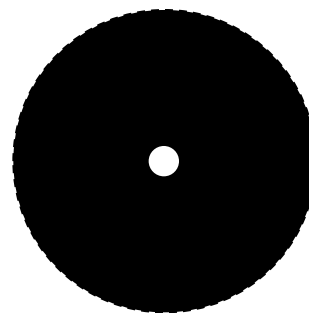
(A)  
十字に明るくなる



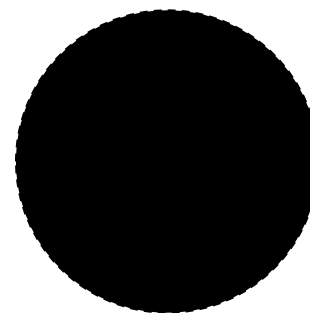
(B)  
影が色づく



(C)  
中央に輝点が出る



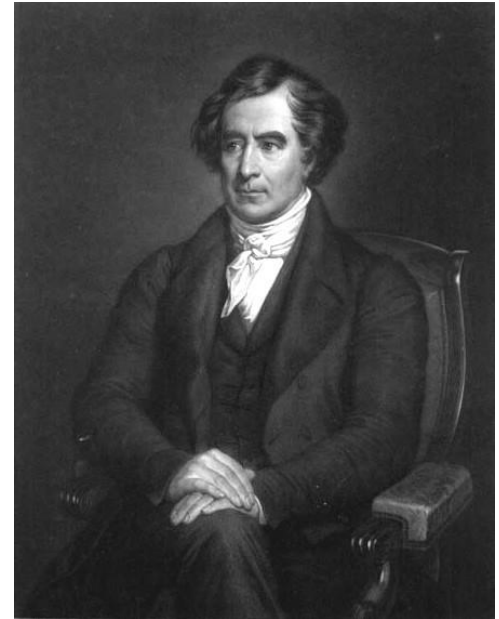
(D)  
直後の影と同じ



「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)

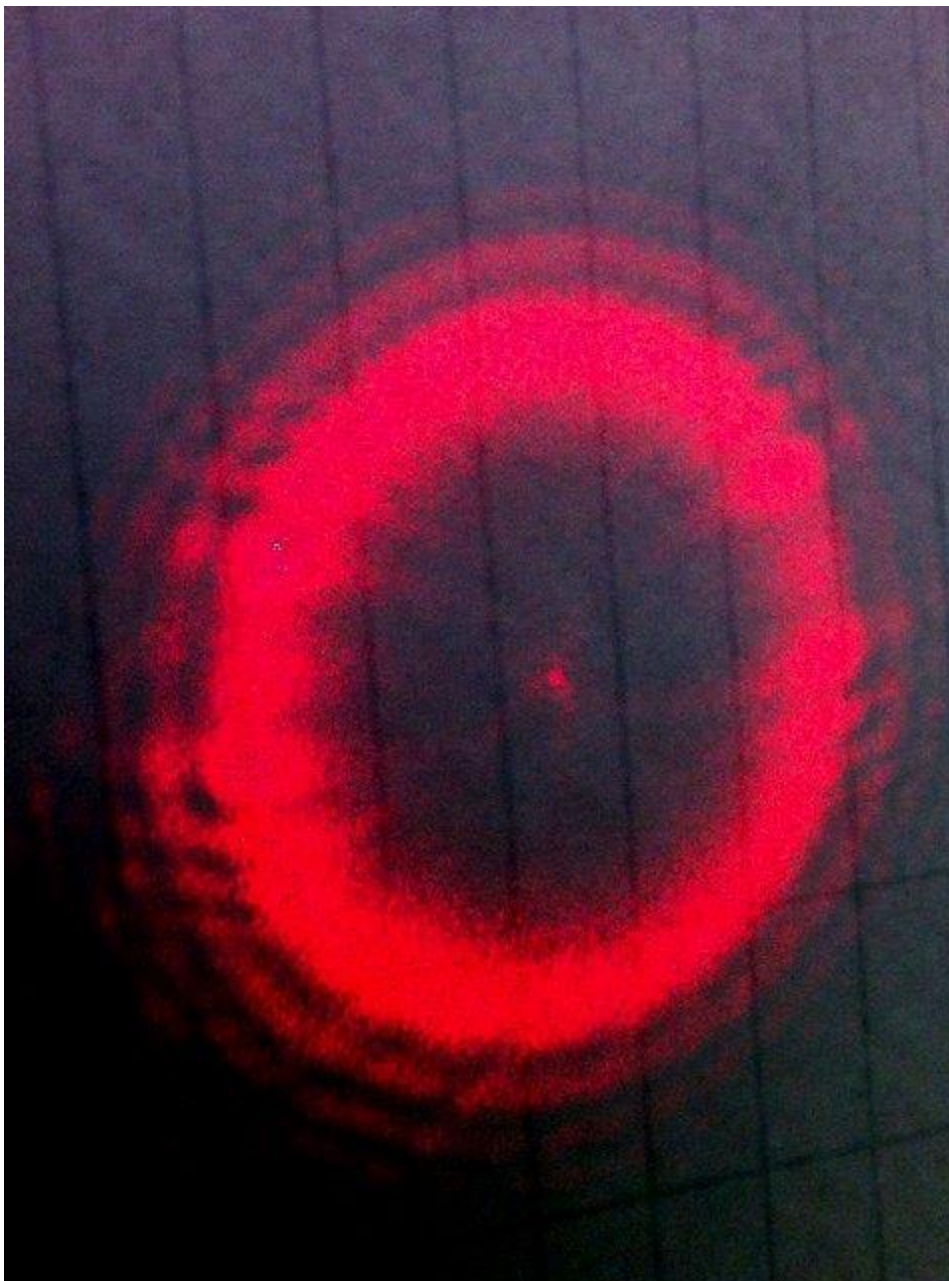
Wikimedia Commons より転載

[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Arago\\_Francois\\_portrait.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Arago_Francois_portrait.jpg)

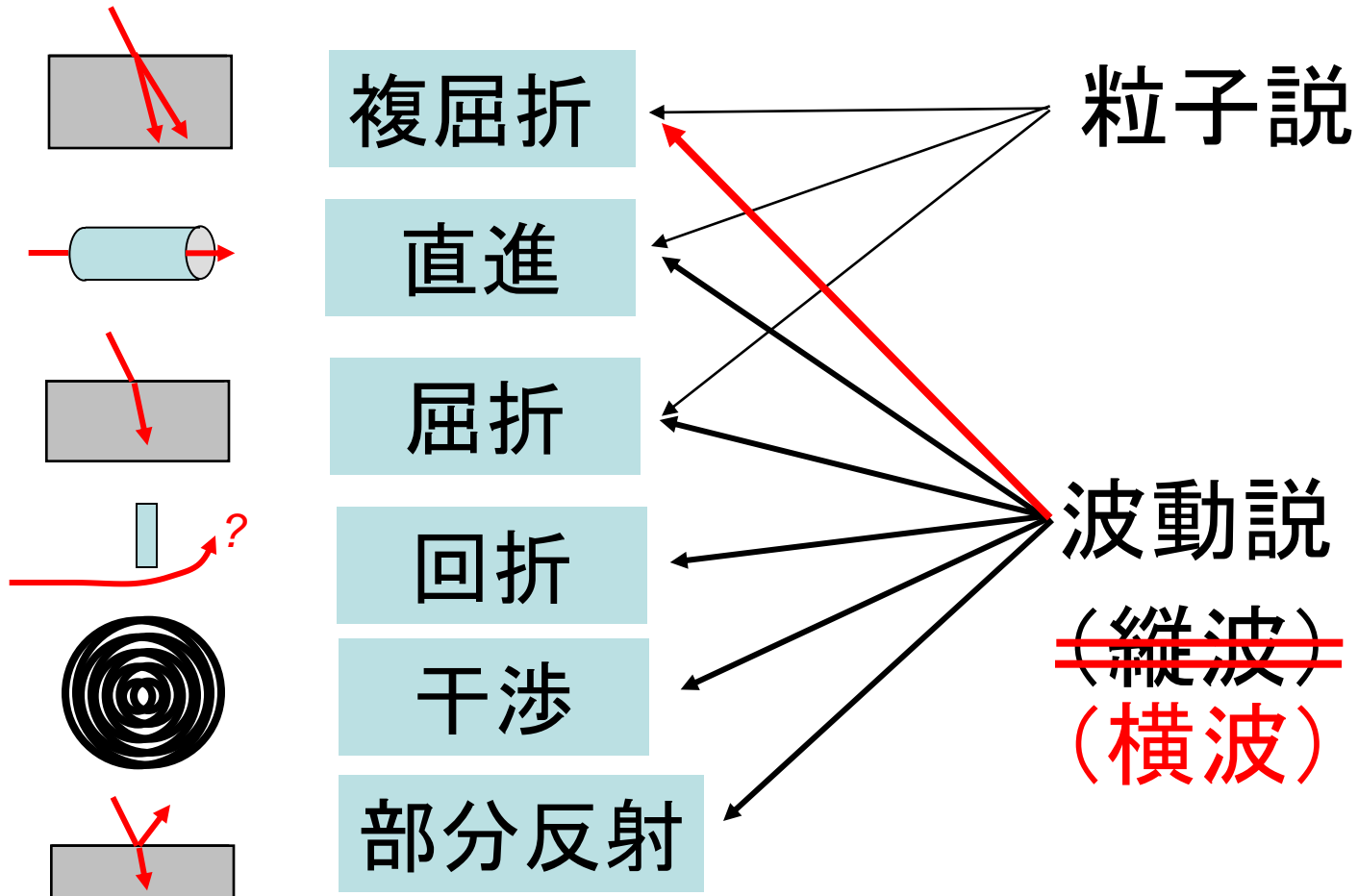
(第25代フランス首相

1848年5月9日 – 1848年6月24日)





# 光の性質



# 電磁波の登場

マックスウェル方程式

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

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

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

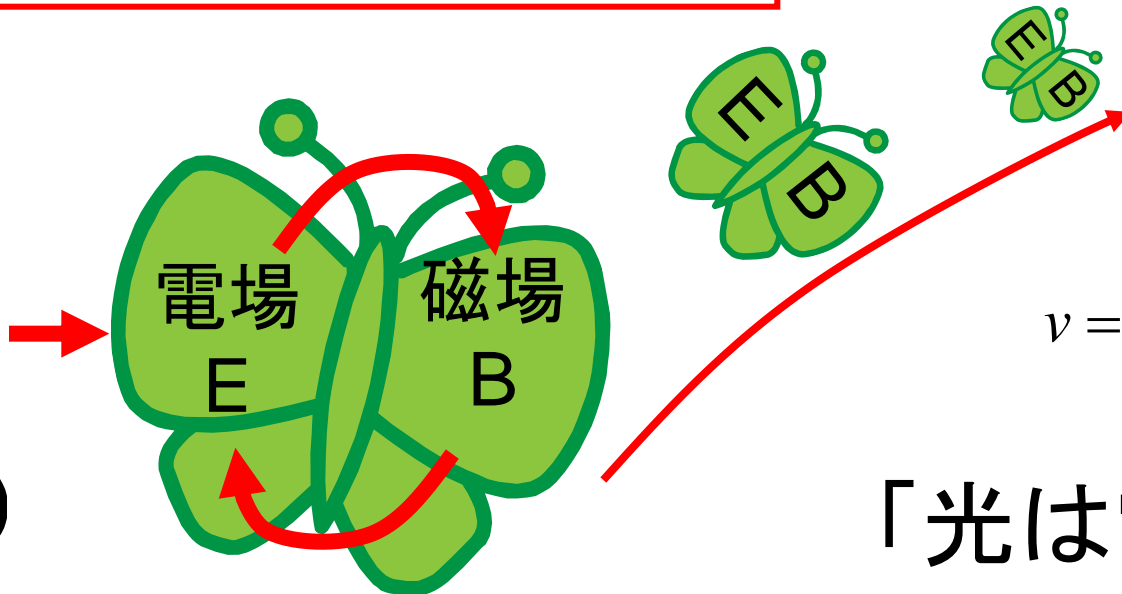
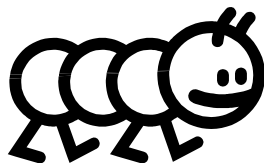
$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$



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](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:James_Clerk_Maxwell.png)

運動する  
電荷



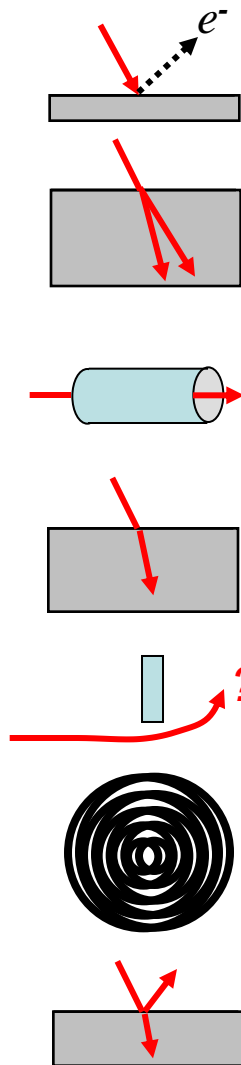
$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \sim c$$

「光は電磁波」



# 光の性質

アインシュタインの  
光量子仮説へ



光電効果

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)

# 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)

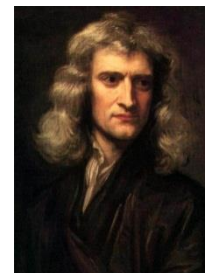
Wikimedia Commons より転載  
(2012/10/31)  
[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Christiaan\\_Huygens.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Christiaan_Huygens.jpg)

光の波動説 (1678年ホイヘンス)

「光は粒子であって、  
それがエーテルを振動させる」  
(1671年 ニュートン)



ホイヘンス



ニュートン

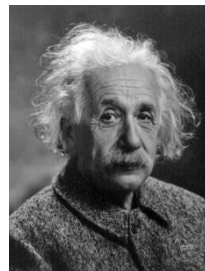
18世紀後半: 光学の進歩(ヤング、フレネル)「光の回折」  
偏光現象  
光は横波

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

19世紀: 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  
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

アインシュタイン



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)