


## ■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 Today OCW 学術俯瞰講義  
Copyright 2012, 五神 真

The University of Tokyo / Today OCW The Global Focus on Knowledge Lecture Series  
Copyright 2012, Makoto Gonokami

2012/10/11: 2012年度冬学期  
学術俯瞰講義

光の科学－未来を照らす究極の技術とアイデア

コーディネーター  
五神 真（理学部）



# 講義内容



- **光科学への扉**
  - 10/11: 光科学への扉 五神 真 (理学部)
- **自然の理解を進めた光技術**
  - 10/18: 光学と力学 井上 慎 (工学部)
  - 10/25: 絶対零度への挑戦 井上 慎 (工学部)
- **光を導き、活用する**
  - 11/1: 光ファイバの物理と応用 保立 和夫 (工学部)
  - 11/8: 痛みのわかる材料・構造の為の光ファイバ神経網 保立 和夫 (工学部)
- **時を極める**
  - 11/15: 時を極める 香取 秀俊 (工学部)
- **より速く、より強く**
  - 11/29: 一瞬への挑戦ー超短パルスレーザー 石川 顕一 (工学部)
  - 12/6: 高エネルギーへの挑戦ー高強度レーザー 石川 顕一 (工学部)
- **自然や人間を光で観るー原子から精神まで**
  - 12/13: 自然や人間を光で観るー原子から精神まで 小泉 英明 (日立製作所)
- **微かな光の不思議な世界**
  - 12/20: 光の正体と量子論の不思議 小芦 雅斗 (工学部)
  - 1/10: 微弱光を用いた究極の暗号 小芦 雅斗 (工学部)
- **光のデザイン**
  - 1/17: 光のデザイン 石井 幹子 (照明デザイナー)
- **光技術のこれから**
  - 1/24: 光技術のこれから 五神 真 (理学部)



2012/10/11: 2012年度冬学期  
学術俯瞰講義  
光の科学—未来を照らす究極の技術とアイデア



# 光科学への扉

東京大学 大学院理学系研究科物理学専攻 教授  
工学系研究科附属 光量子科学研究センター センター長

五神 真

<http://www.gono.t.u-tokyo.ac.jp/>

# Outline

---

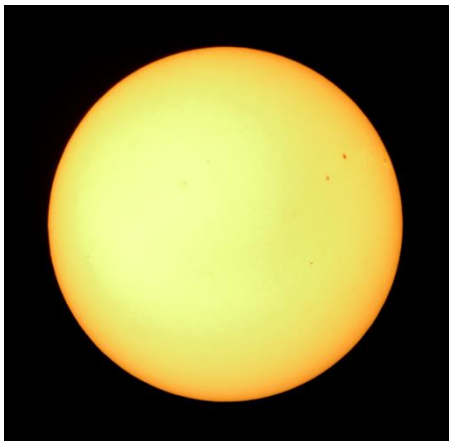
1. 光とは？
2. 光の量子性
3. レーザー
4. 講義内容紹介

# Outline

---

1. 光とは？
2. 光の量子性
3. レーザー
4. 講義内容紹介

# 光とは

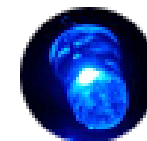


太陽

Photo: Bresson Thomas, Wikimedia Commons より転載(2012/10/25)  
[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:2012-07-26\\_16-13-01-sun.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:2012-07-26_16-13-01-sun.jpg)  
CC BY 3.0

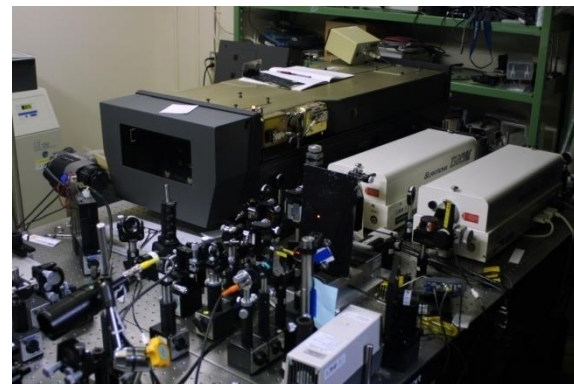


\* 虹: 山梨大学 堀 裕和氏 撮影、ご提供

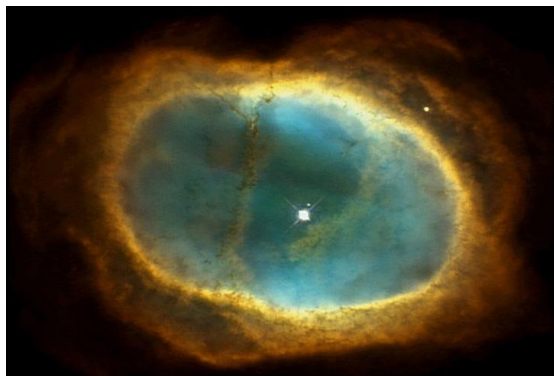


発光ダイオードの信号

CC BY-SA 3.0  
<http://ja.wikipedia.org/wiki/ファイル:BlueLED.jpg>

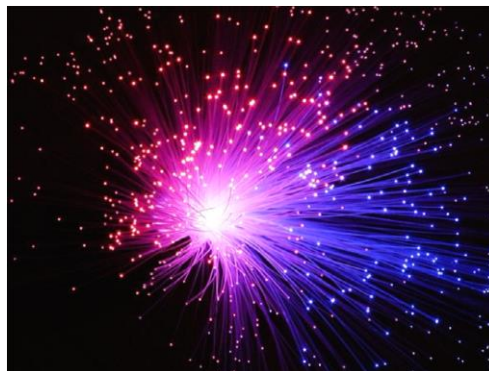


レーザー実験装置



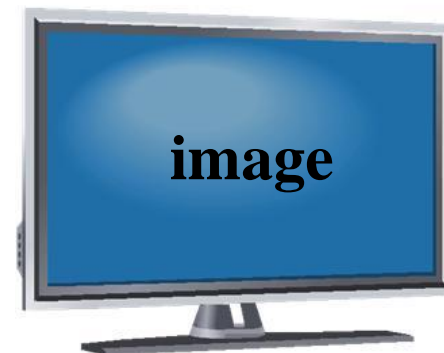
8の字星雲

Hubble Heritage Team (STScI/AURA/NASA/ESA)  
<http://www.spacetelescope.org/images/opo9839a/>  
CC BY 3.0



光ファイバー

Author: 4028mdk09, Wikimedia Commons より転載(2012/10/25)  
[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pink-blaue\\_LED\\_Fiberglasleuchte.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pink-blaue_LED_Fiberglasleuchte.jpg)  
CC BY-SA 3.0

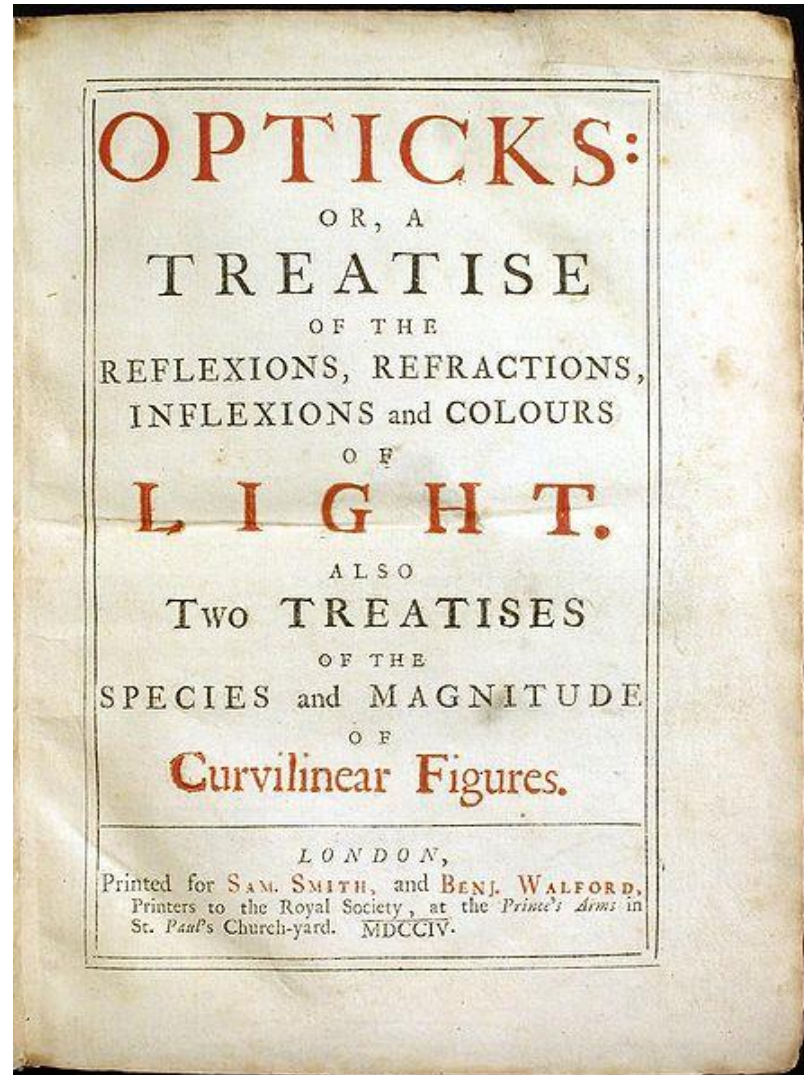


レーザーテレビ \*

# 光の科学史



1704年  
アイザック・ニュートン著  
「光学」





# 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)

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



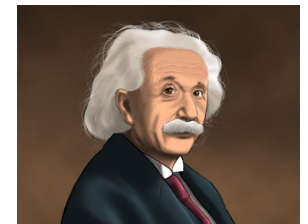
ニュートン

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

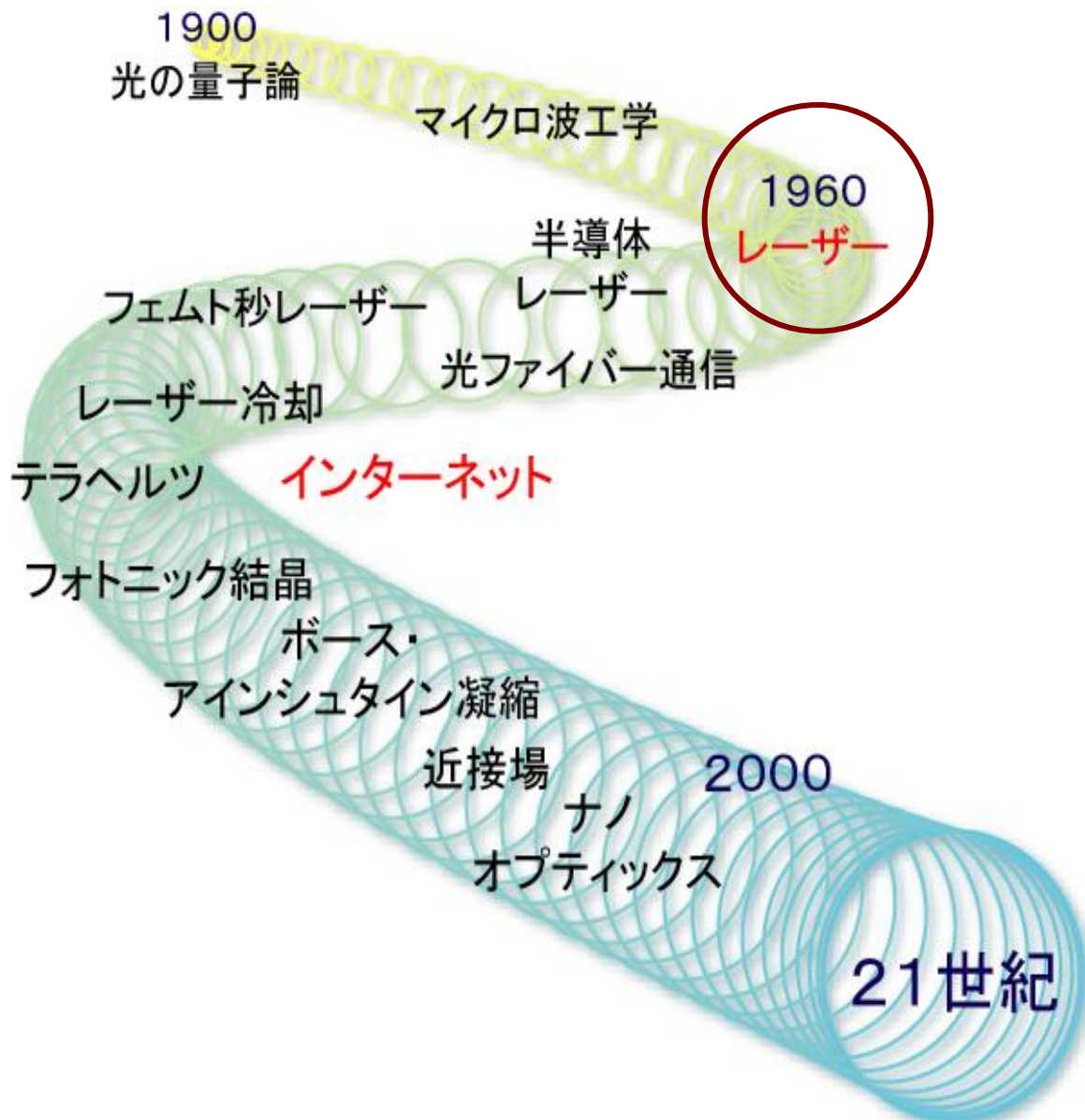
19世紀: 電磁気学の進歩  
ファラデーの電磁誘導の法則(1831)  
マックスウェル 電磁方程式(1864) 光は電磁波  
ヘルツの実験 (電磁波の確認 1889)

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



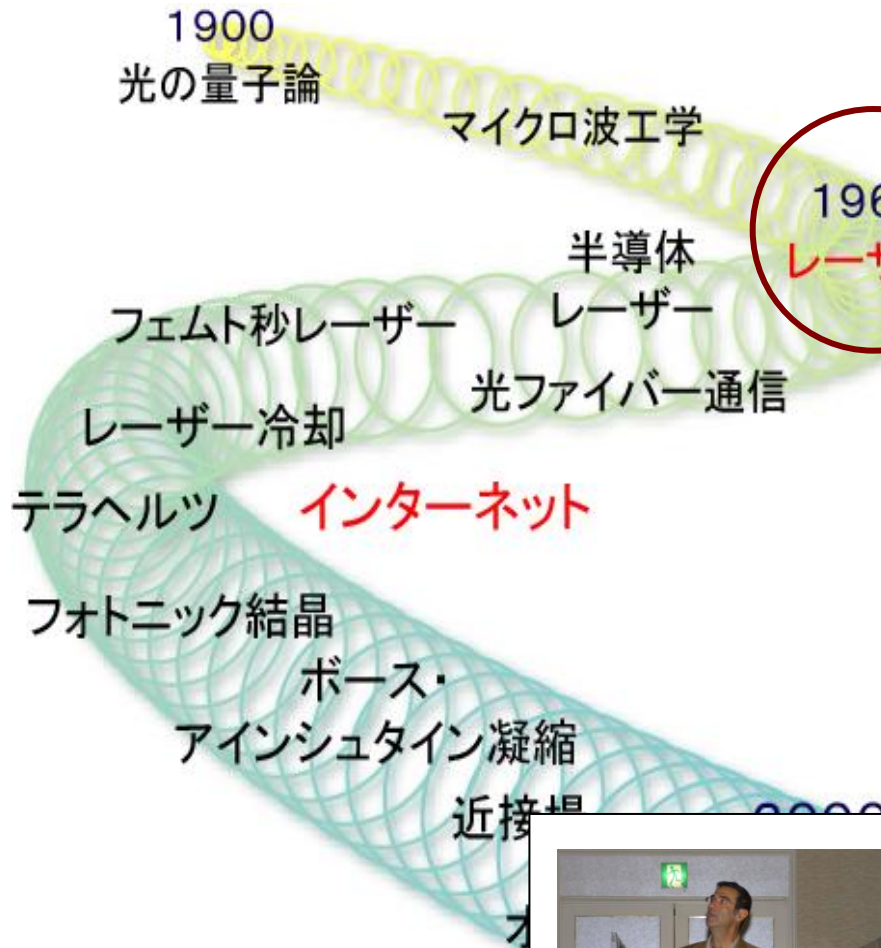
# 光科学の展開



## ノーベル物理学賞

- 1966: アルフレッド・カストレル
- 1964: チャールズ・タウンズ  
ニコライ・バソフ  
アレクサンドル・プロホロフ
- 1981: ニコラス・ブルームバーク
- 1997: スティーブン・チュ  
クロード・コーエンタヌージ  
ウィリアム・フィリップス
- 2000: ハーバート・クレマー  
ジョレス・アルフォーロフ
- 2001: エリック・コーネル  
ヴォルフガング・ケターレ  
カール・ワイマン
- 2005: ロイ・J・グラウバー  
ジョン・L・ホール  
テオドール・W・ヘンシュ
- 2009: チャールズ・カオ  
ウィラード・ボイル  
ジョージ・スミス
- 2012: セルジュ・アロッシュ  
デビッド・ワインランド

# 光科学の展開



## ノーベル物理学賞

- 1966: アルフレッド・カストレル
- 1964: チャールズ・タウンズ  
ニコライ・バソフ  
アレクサンドル・プロホロフ
- 1981: ニコラス・ブルームバークン
- 1997: スティーブン・チュ  
クロード・コーエンタヌージ  
ウィリアム・フィリップス
- 2000: ハーバート・クレマー  
ジョレス・アルフォーロフ
- 2001: エリック・コーネル  
ヴォルフガング・ケターレ  
カール・ワイマン
- 2005: ロイ・J・グラウバー  
ジョン・L・ホール  
テオドール・W・ヘンシュ
- 2009: チャールズ・カオ  
ウィラード・ボイル  
ジョージ・スミス
- 2012: **セルジュ・アロッシュ**  
**デビッド・ワインランド**



2003年日米セミナー@八ヶ岳

# 光とは？

光の性質 I: 光線 (幾何光学)

# 光の性質 I: 光線 (幾何光学)

---

- 光は高速で進む
- 光が**空気・水・ガラス・真空**の中を進むとき  
光は **直進** する
- 光が**鏡や水面**に当たるとき  
光は **反射** する
- 光が**空気中から他の物質**に入るとき  
光は **屈折** する
- 光が**1つの物質から空気中**に出るとき  
光は **屈折** する

# 光の速度

---

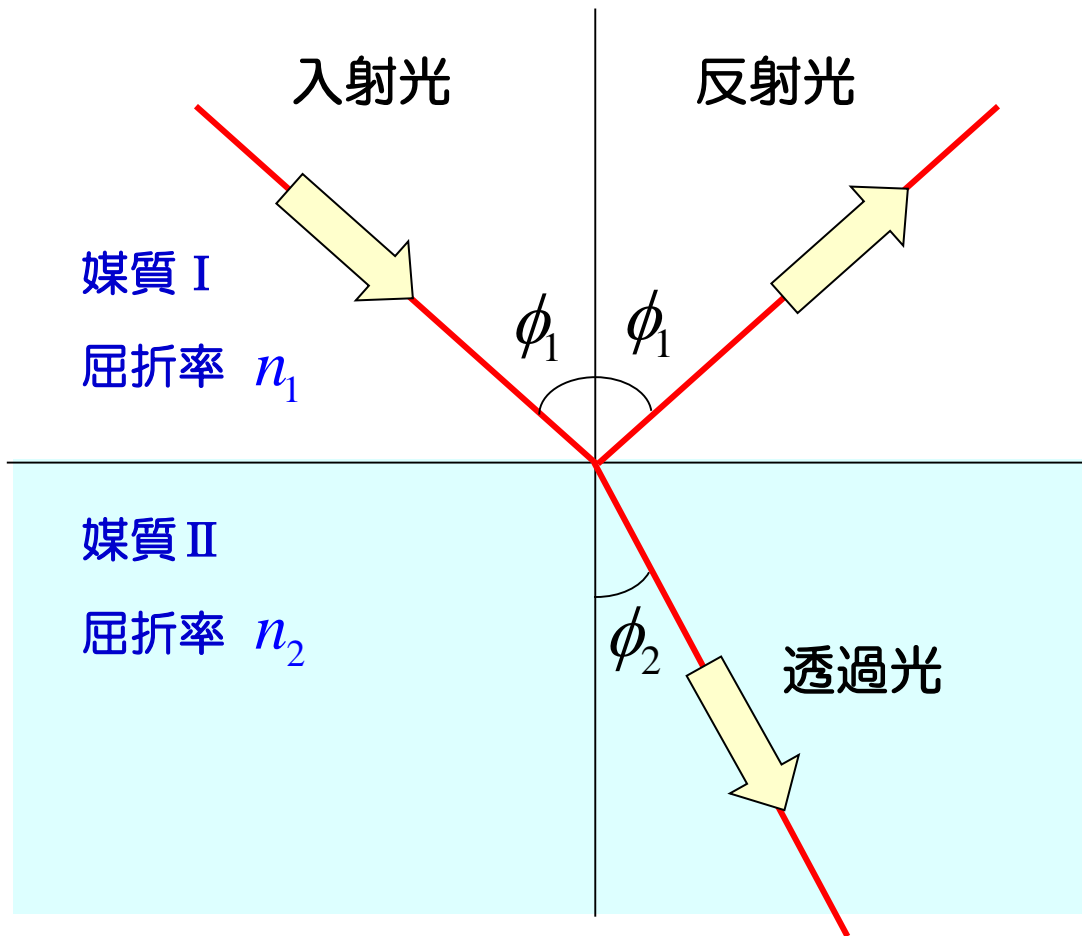
● ヒトの歩く速さ	1m/秒	4km/時
● 自転車	5m/秒	18km/時
● 新幹線	75m/秒	250km/時
● ジェット旅客機	330m/秒	1,200km/時
● 音	340m/秒	1,250km/時
● スペースシャトル (注:ミッションにより異なる)	7,700m/秒	27,700km/時
● 光	30万km/秒	10億8000万km/時

# 光の屈折

---



# 光の反射と屈折 (1)



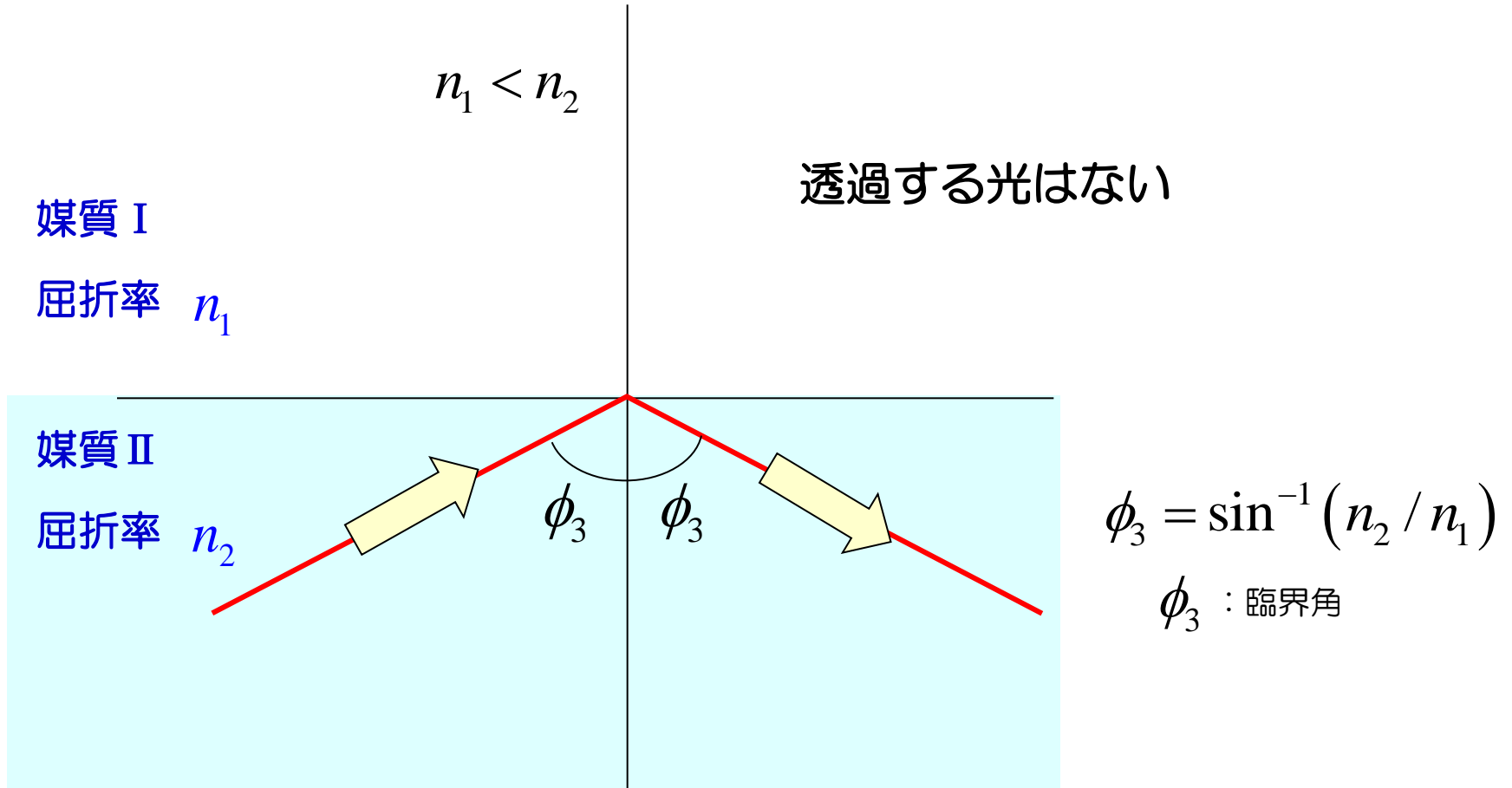
$$n_1 \sin \phi_1 = n_2 \sin \phi_2$$

$\phi_1$  : 入射角

$\phi_2$  : 屈折角

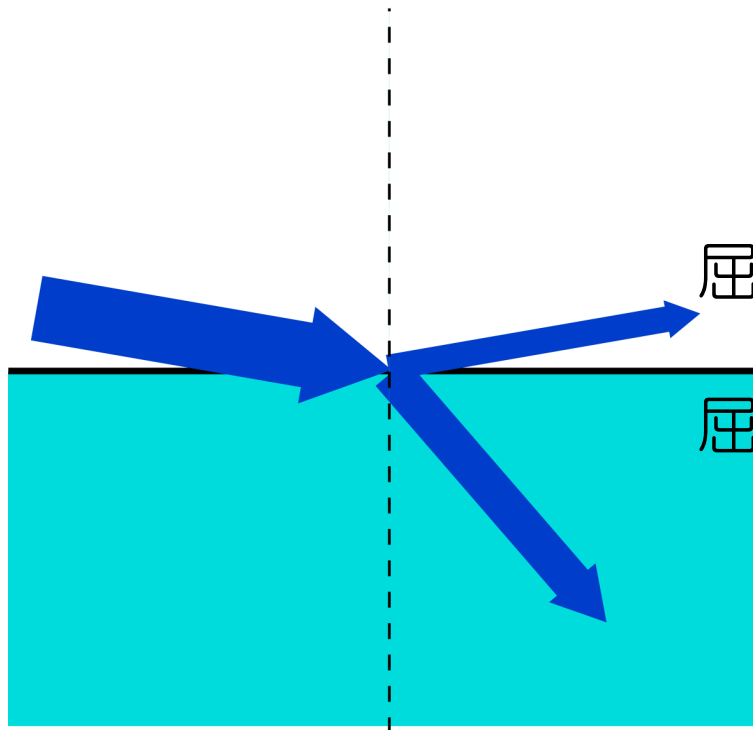


# 光の反射と屈折（2）全反射

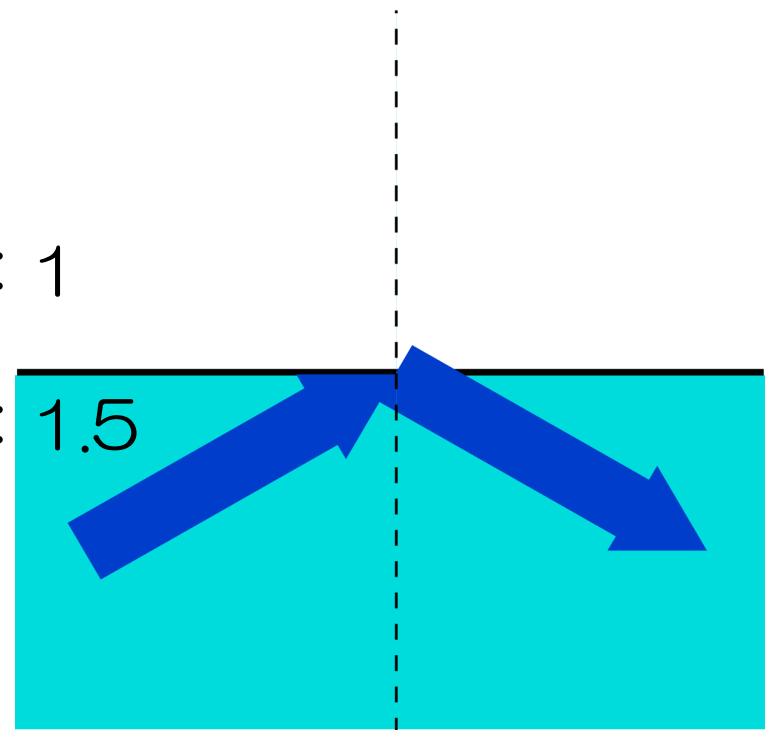


# 光の反射と屈折 (3) 全反射

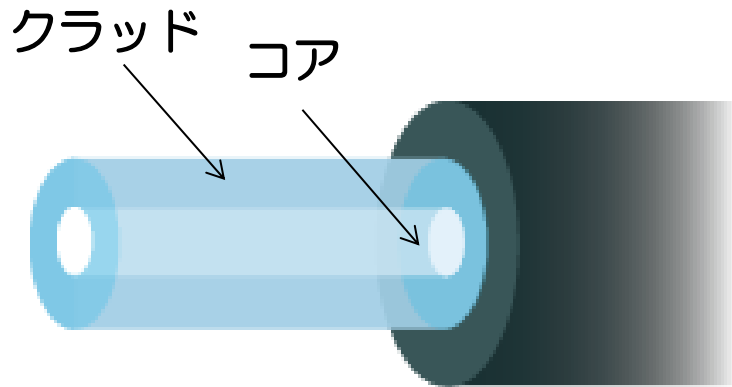
● 全反射が生じない場合



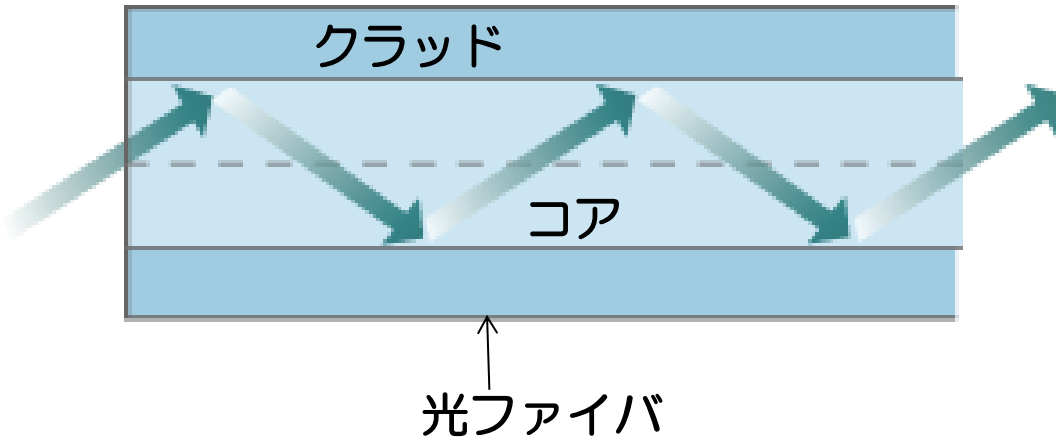
● 全反射が生じる場合



# 光ファイバー



屈折率の大きいコアを  
屈折率の小さいクラッド  
で取り囲むと...



光が全反射を繰り返して  
コアの中を進む。  
ファイバーを多少曲げて  
もOK。



第4回(11/1):光ファイバの物理と応用

第5回(11/8):痛みのわかる材料・構造の為の光ファイバ神経網

# 光を導き、活用する 保立 和夫(工学部)

光通信の低損失伝送路ー 光ファイバの多様性ー 高機能なセンサヘッド

## 通信用の光ファイバケーブル



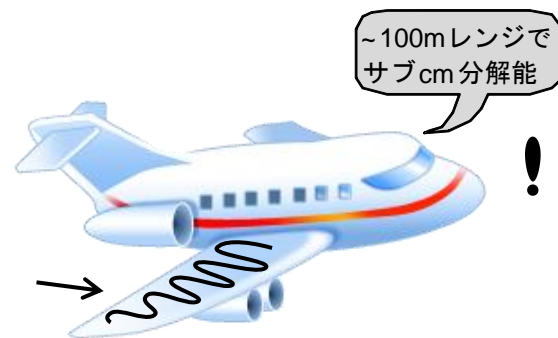
\*

光産業技術振興協会編『やさしい光技術』  
オプトロニクス社、1998年、p.24、図1「光ファイバケーブル」



\* ANA

痛みの分かる材料・  
構造の為の光ファイ  
バ神経網

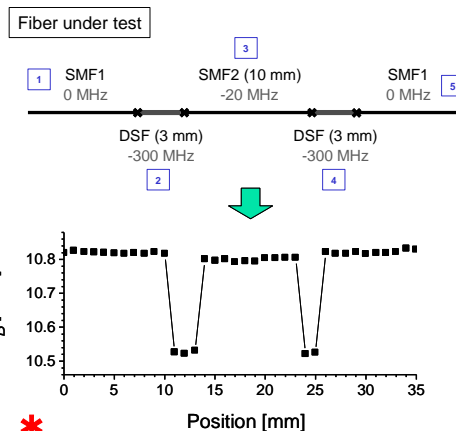


光ファイバ中での誘導ブリルアン散乱を利用した高精度歪分布

## 国際光通信用 海底ケーブル

## 1.6mmの空間 分解能を実現

Song *et al.* (2006) "Distributed strain measurement with millimeter-order spatial resolution based on Brillouin optical correlation domain analysis," *Optics Letters* 31(17), 2526-2528, p.2527, Fig.3(a).



\*



我が国初の光ファイバ  
ジャイロの実験系  
保立和夫先生ご提供

\*



\* ご提供: NTTワールドエン  
ニアリングマリン株式会社

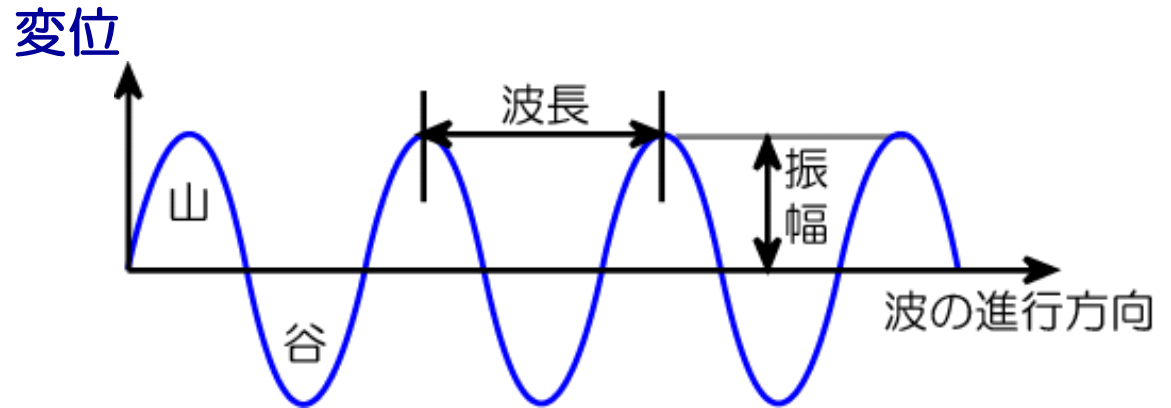
# 光とは？

光の性質 II: 波 (波動光学)

# 光の性質 II: 波 (波動光学)

## ● 波とは？

媒質の変動が  
伝わる現象



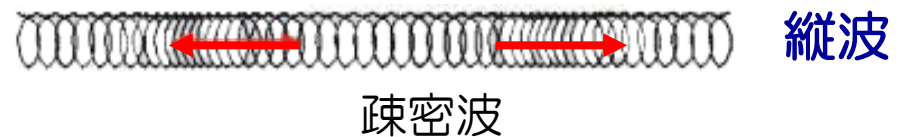
波 長  $\lambda (m)$

振動数  $f (/sec)$

速 度  $v = f \lambda (m/s)$

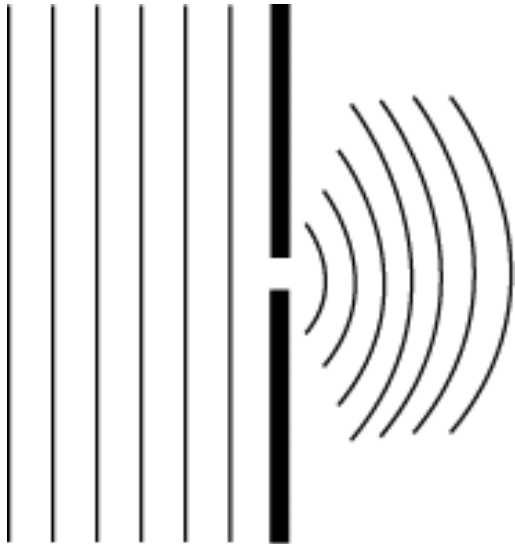


水面を伝わる波、地震のS波



# 波の性質（回折と干渉）

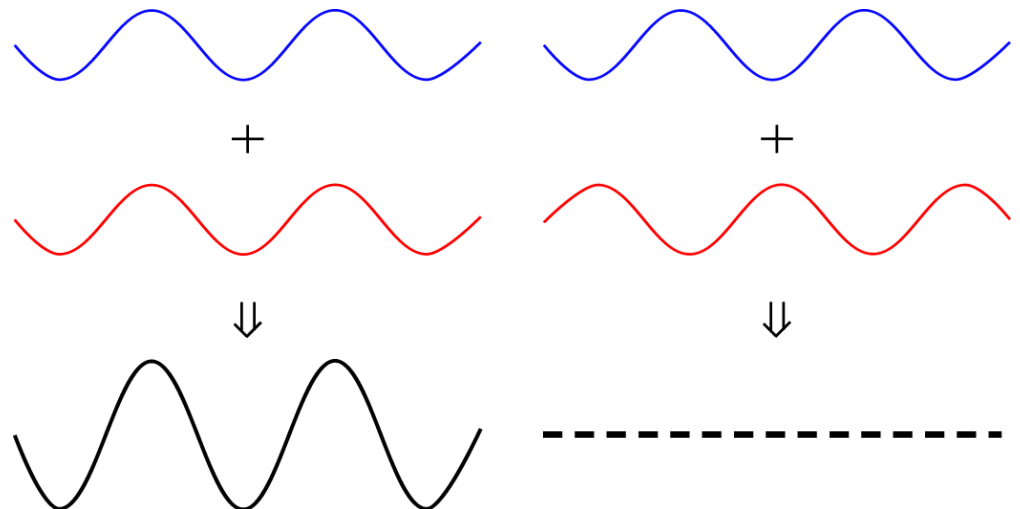
## ● 回折



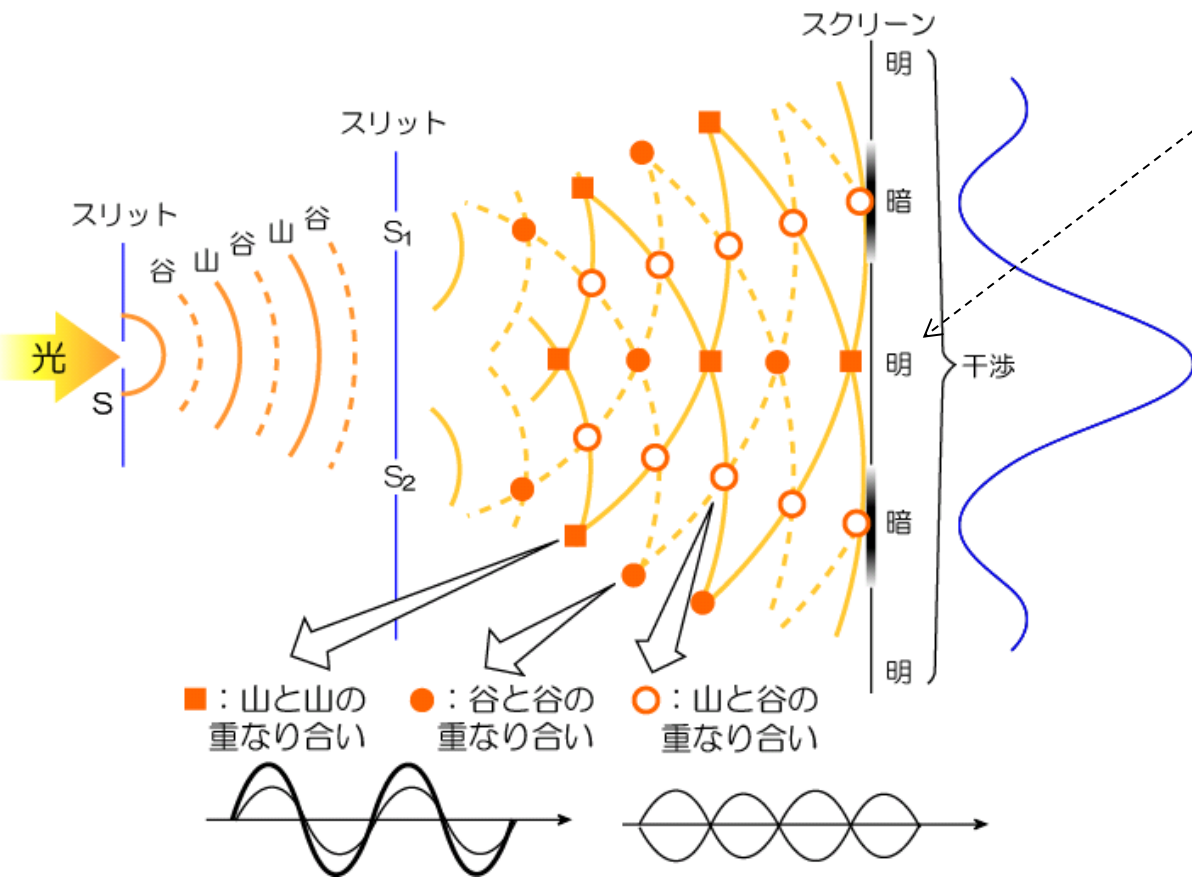
## ● 干渉

### 重ね合わせの原理

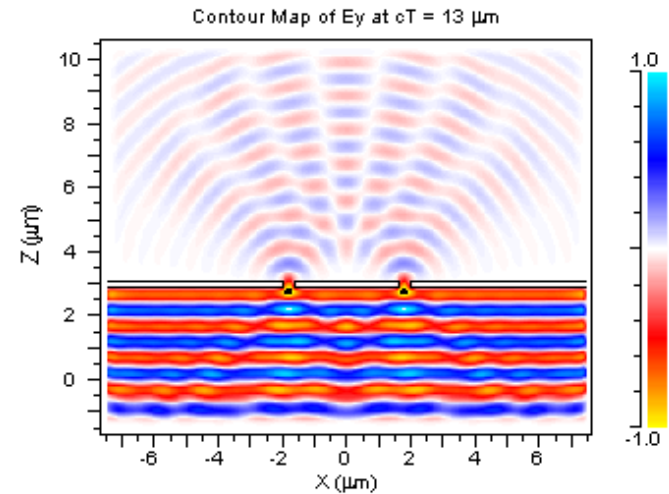
2つの波が重なり合った場所での媒質の変位  $y$  は、2つの波が単独のときの媒質の変位  $y_1$  と  $y_2$  を合成したものになる。



# 光は波？：ヤングの干渉実験 (18世紀後半)

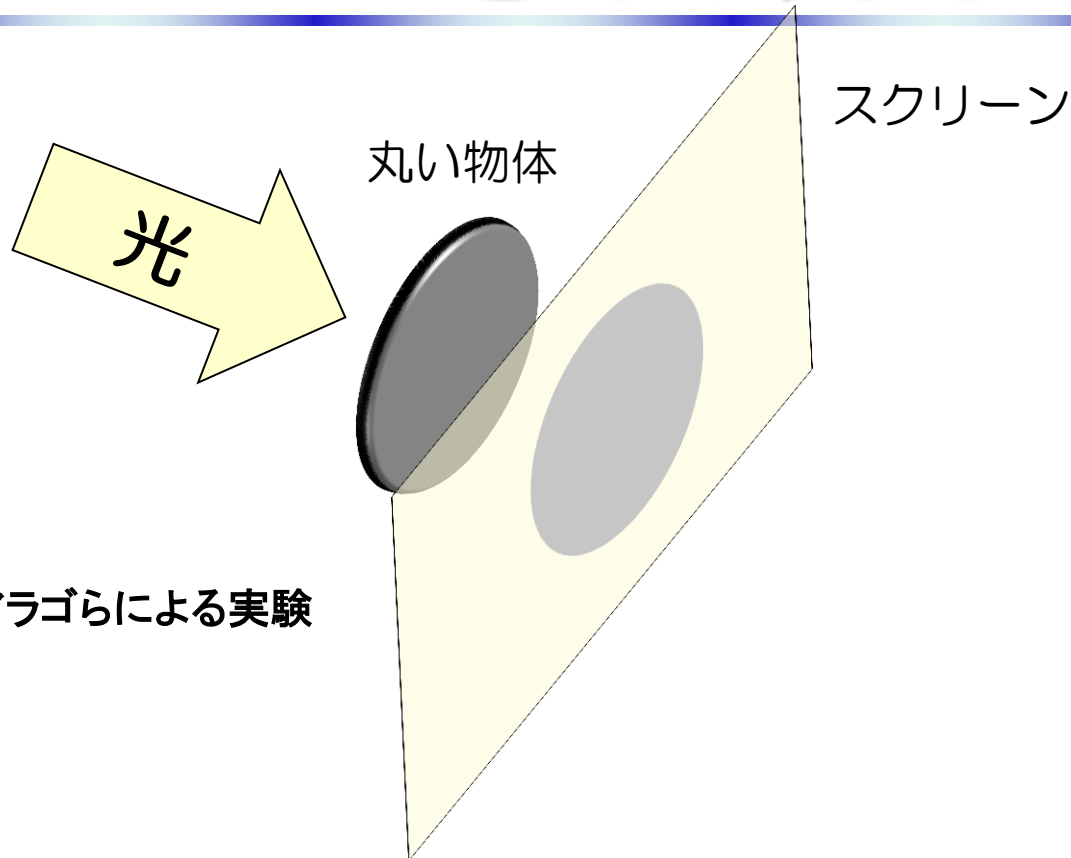


ちょうど真ん中では、  
2つのスリットからの  
山と山、谷と谷が重なるので、  
明るくなる。





# 考えてみよう

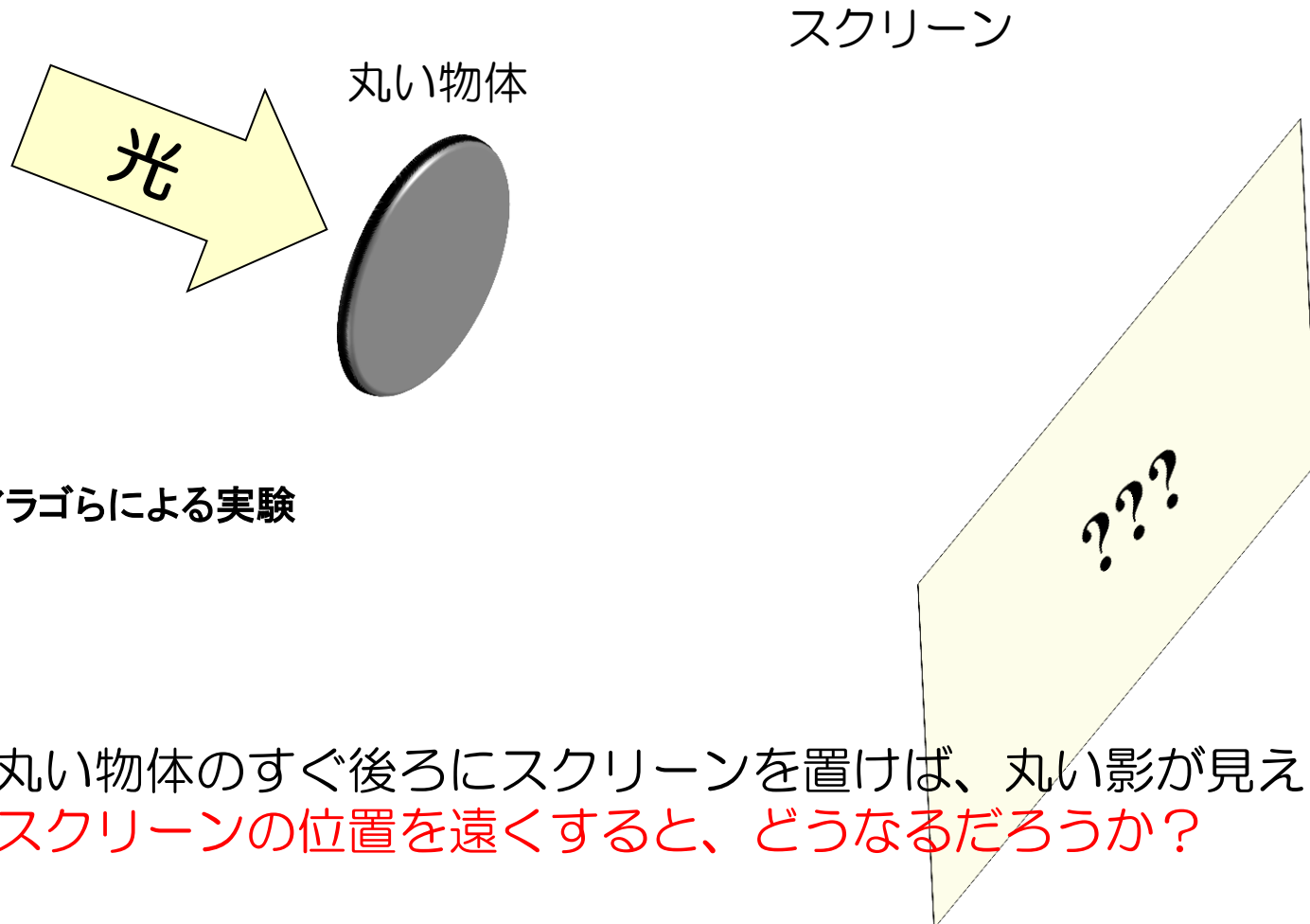


ポアソン、アラゴらによる実験  
(19世紀)

丸い物体のすぐ後ろにスクリーンを置けば、丸い影が見える。  
スクリーンの位置を遠くすると、どうなるだろうか？

光線で考えれば影は変わらないことになるが、波であることを  
考慮すると... 答えは来週の講義で！

# 考えてみよう



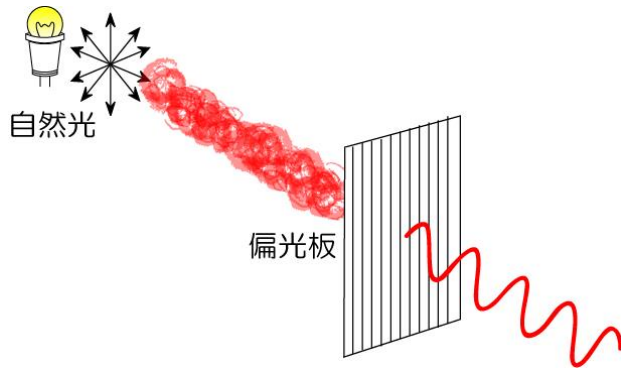
ポアソン、アラゴらによる実験  
(19世紀)

丸い物体のすぐ後ろにスクリーンを置けば、丸い影が見える。  
スクリーンの位置を遠くすると、どうなるだろうか？

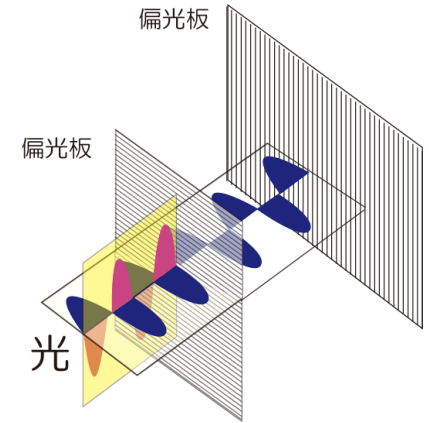
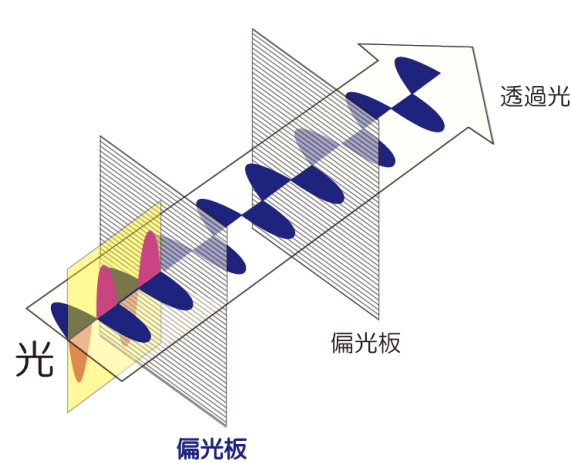
光線で考えれば影は変わらないことになるが、波であることを  
考慮すると... 答えは来週の講義で！

# 偏光

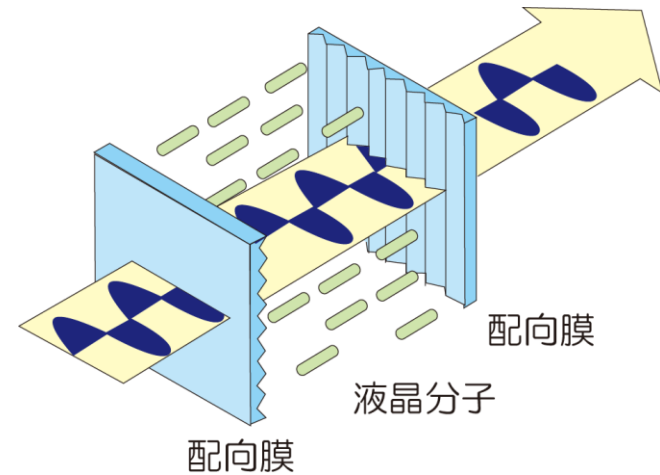
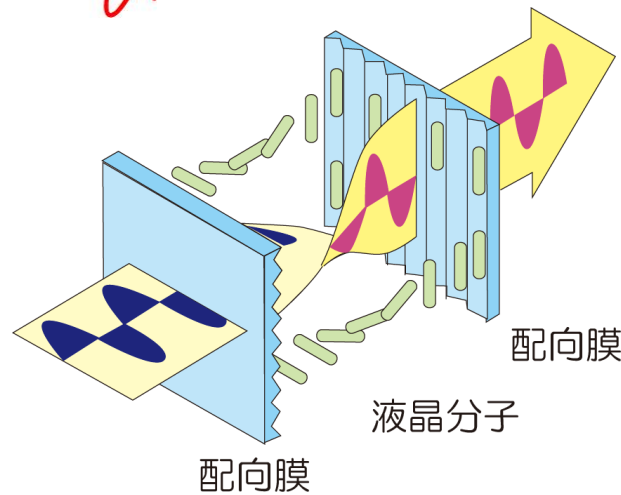
- 光は進行方向と直交する振動面をもつ（横波）



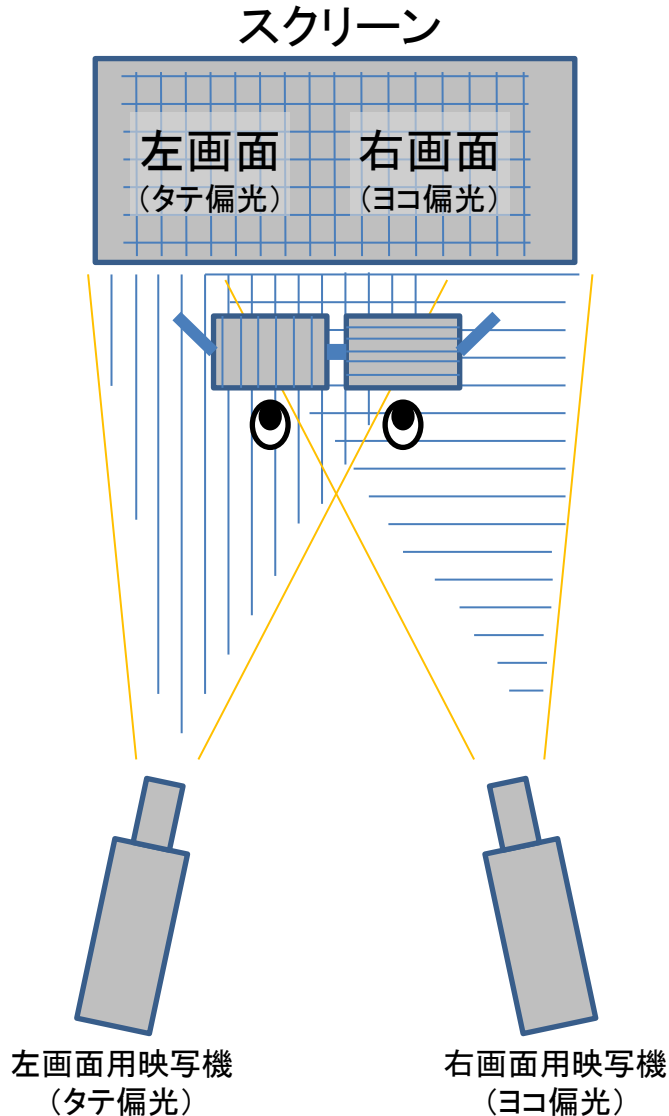
ポライザー



液晶テレビ



# 偏光を利用した3D映画



著作権の都合により、  
ここに挿入されていた画像を削除しました。

映画「アバター」(2009)

原題: Avatar

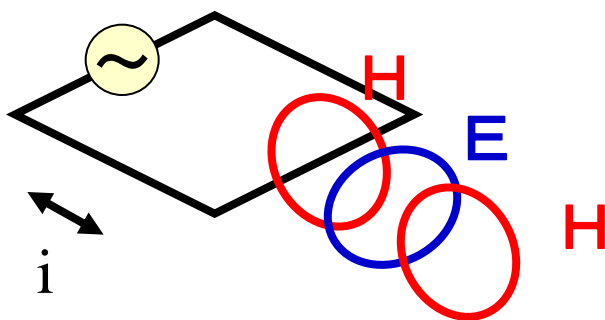
監督: ジェームズ・キャメロン

[http://ja.wikipedia.org/wiki/アバター\\_\(映画\)](http://ja.wikipedia.org/wiki/アバター_(映画))

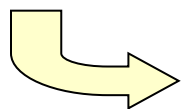
# 波の正体は？～電磁波～



電磁誘導と電磁波放射

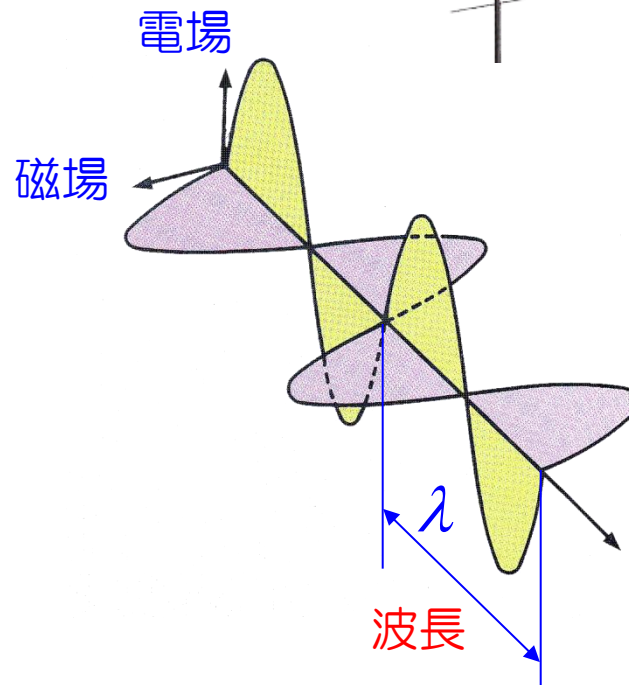


加速度運動する荷電粒子  
(イオン、電子)



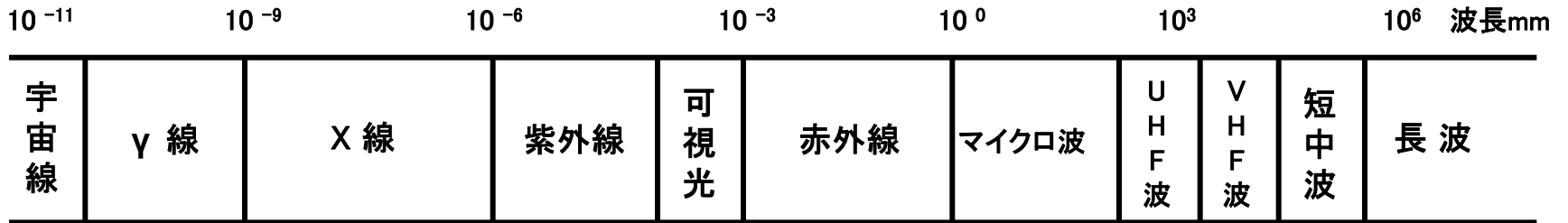
電磁波放射

電波  
真空中を伝わる  
変動する電磁場

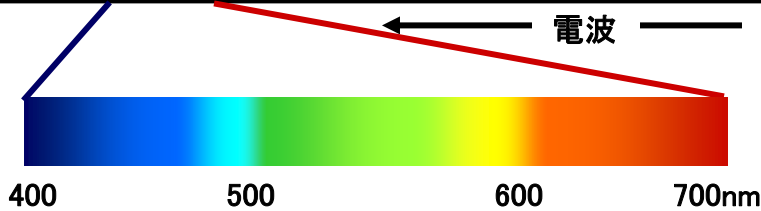


光速度は一定：  
振動が速い ⇔ 波長が短い

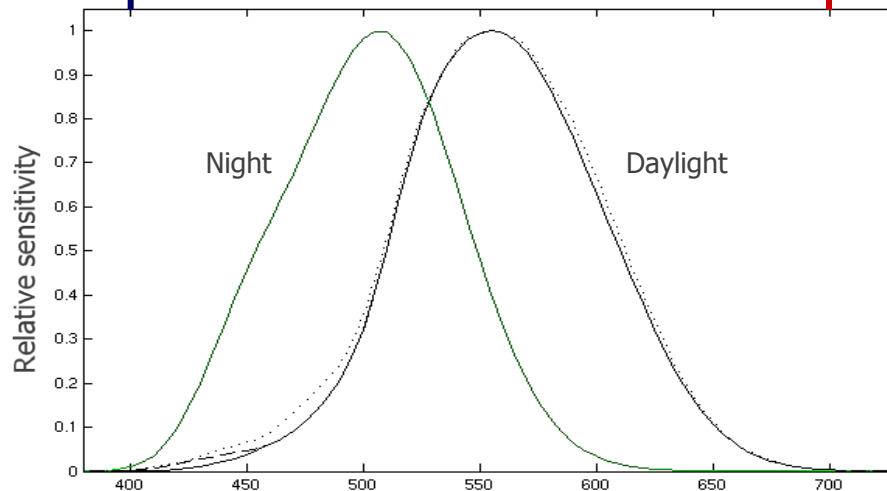
# 光と電磁波



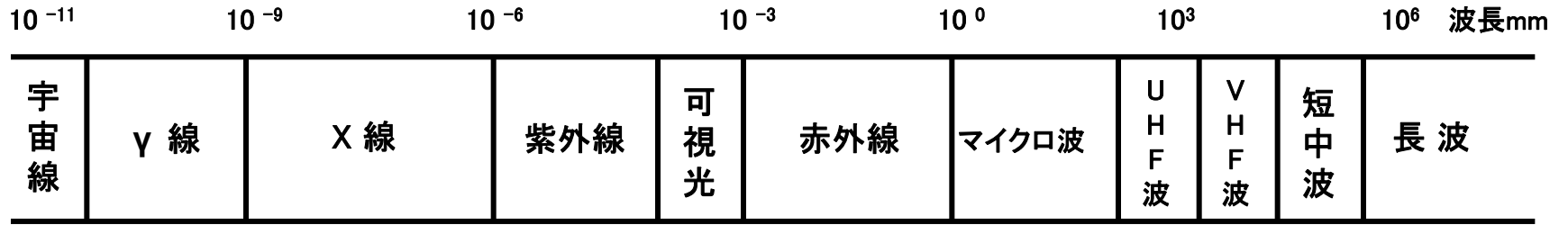
単位の換算：  
 $1 \text{ \AA} = 0.1 \text{ nm} = 10^{-7} \text{ mm}$   
 $= 10^{-8} \text{ cm}$   
 $400 \text{ nm} = 4 \times 10^{-4} \text{ mm}$



## 人間の目の感度

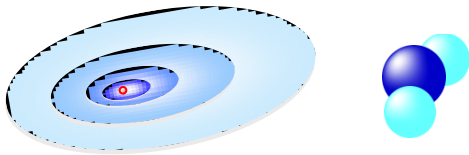


# 長さのスケール

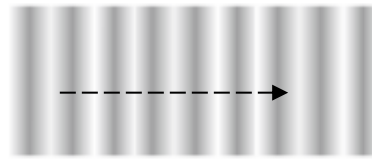


← 電波 →

原子・分子



$\sim 1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ cm}$



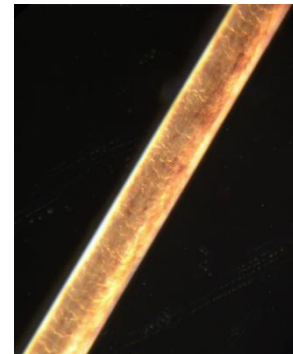
$\leftrightarrow$

$\lambda$

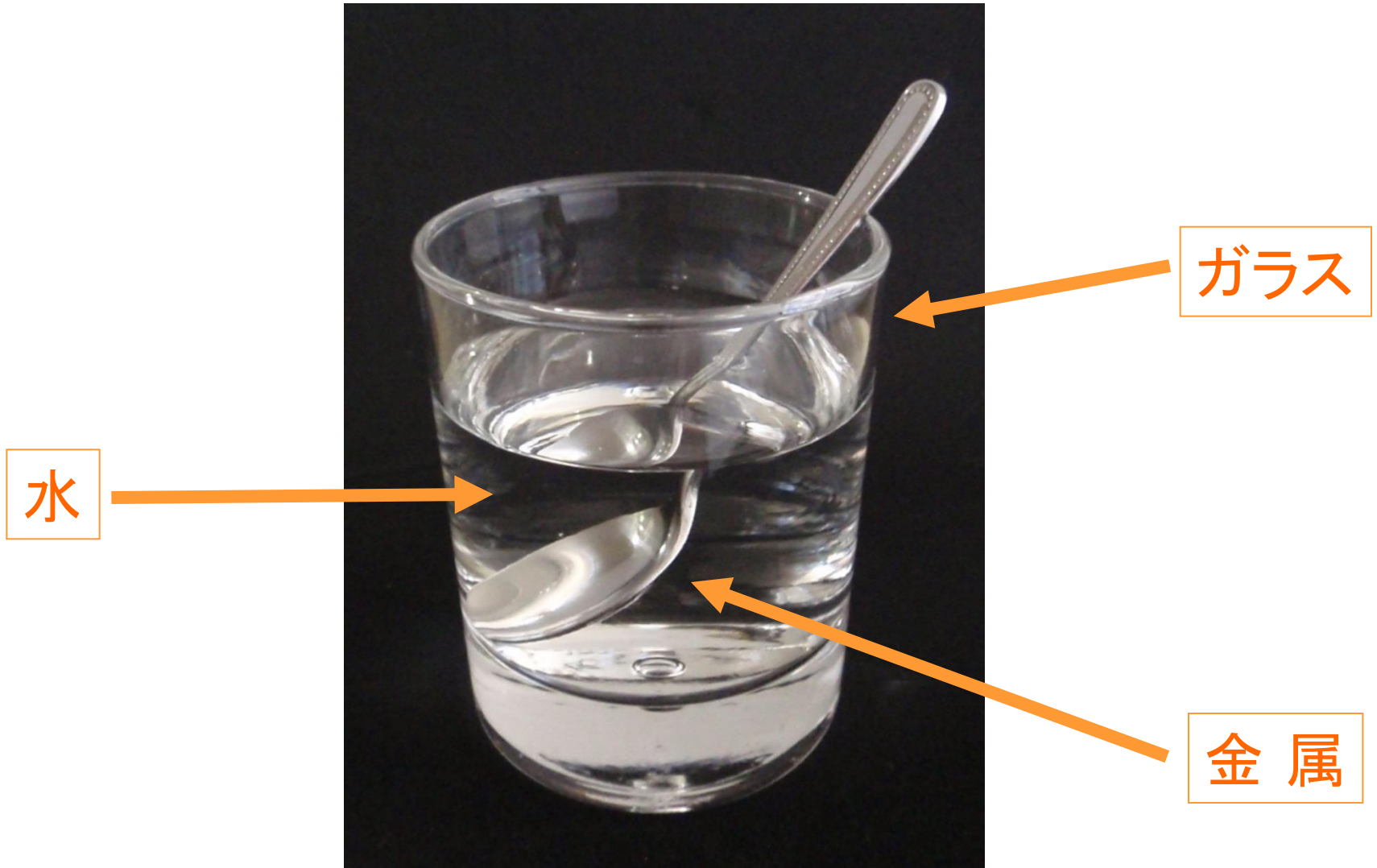
$0.5 \mu\text{m} = 500 \text{ nm}$

髪の毛

$0.1 \text{ mm} = 100 \mu\text{m}$

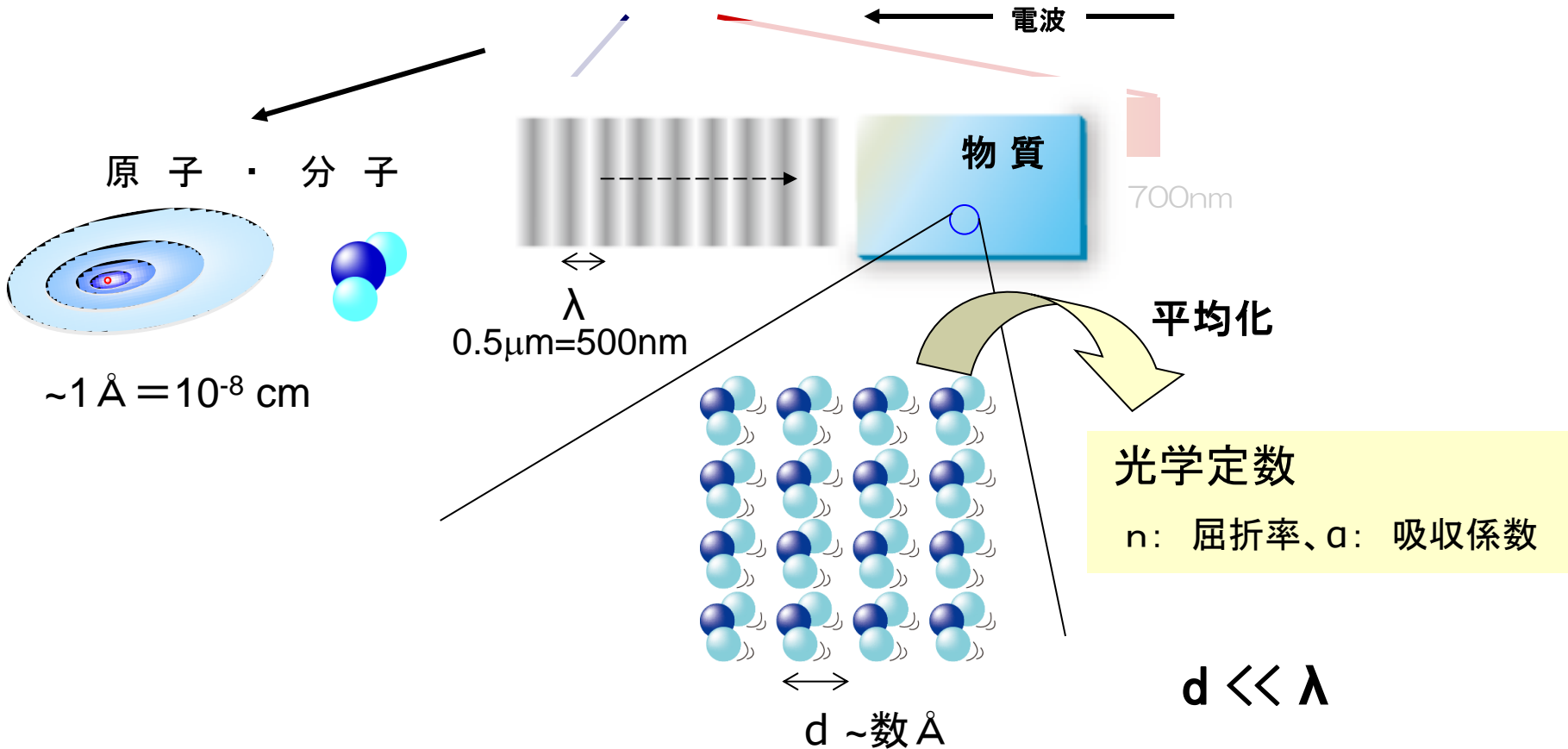
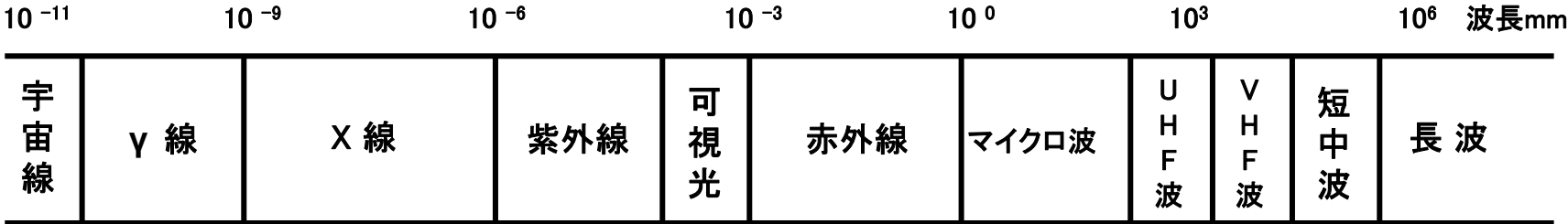


# 物質中を進む光

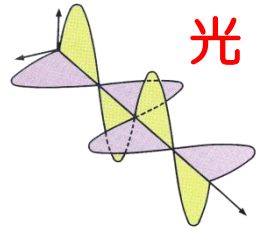




# 物質中を進む光



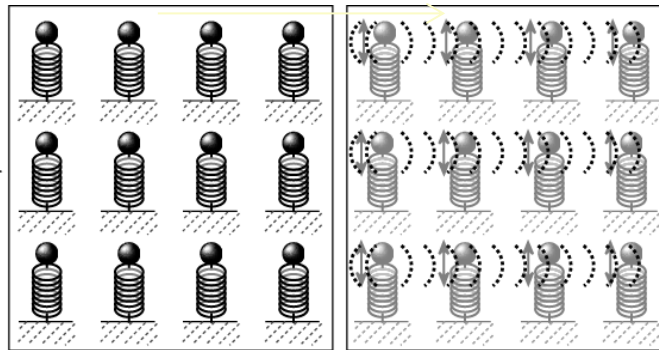
# 物質中を進む光



光：電磁場  
=電荷を動かす力



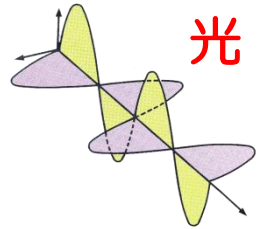
物質：電荷をもった粒子  
の集まり



光が電荷を振動させる。

振動する電荷が光を出す。

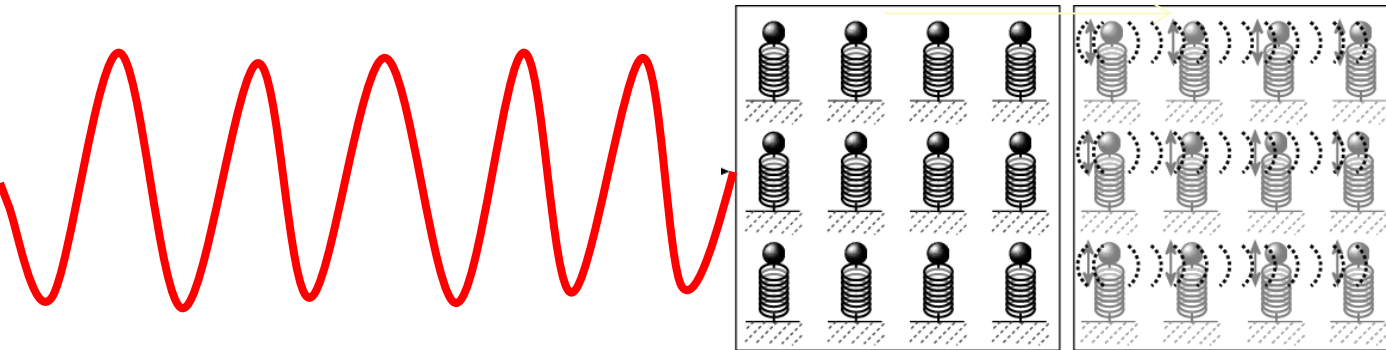
# 物質中を進む光



光：電磁場  
=電荷を動かす力



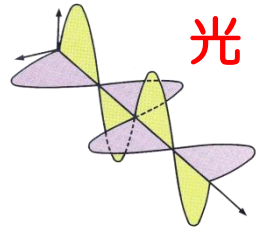
物質：電荷をもった粒子  
の集まり



光が電荷を振動させる。

振動する電荷が光を出す。

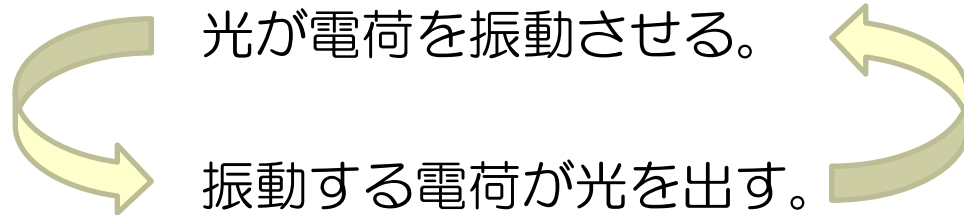
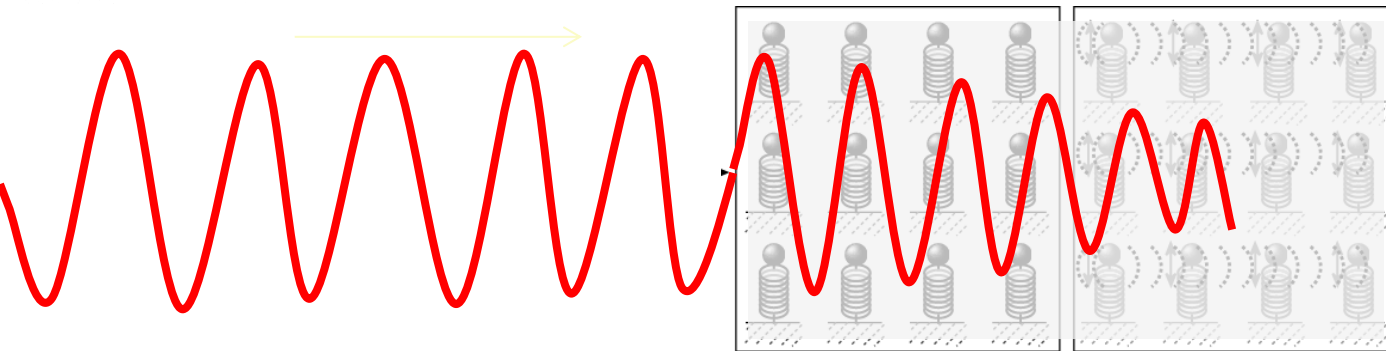
# 物質中を進む光



**光**：電磁場  
=電荷を動かす力

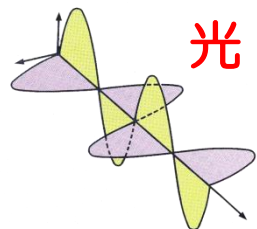


**物質**：電荷をもった粒子  
の集まり

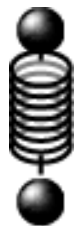


光のエネルギーが失われていく。**(吸収係数)**  
波面の進む速さが変わる。**(屈折率)**

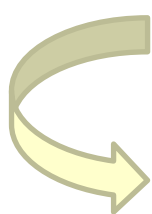
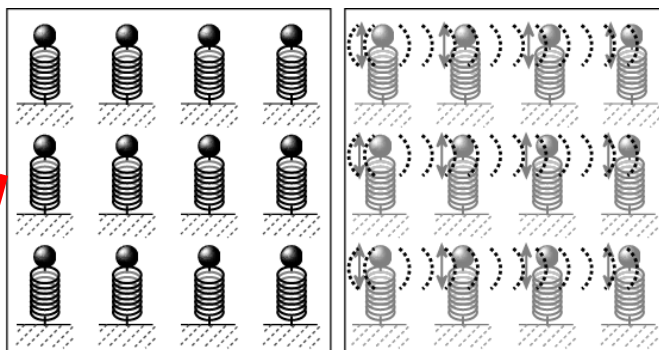
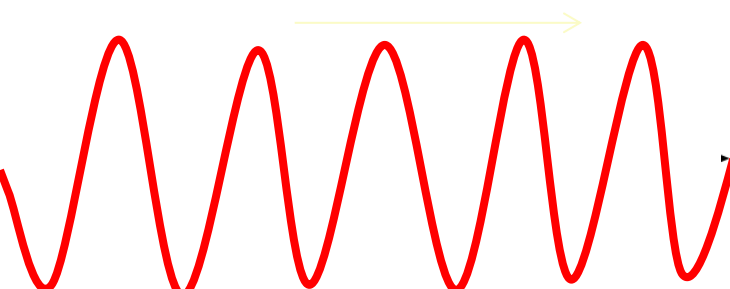
# 物質中を進む光



光：電磁場  
=電荷を動かす力



物質：電荷をもった粒子  
の集まり



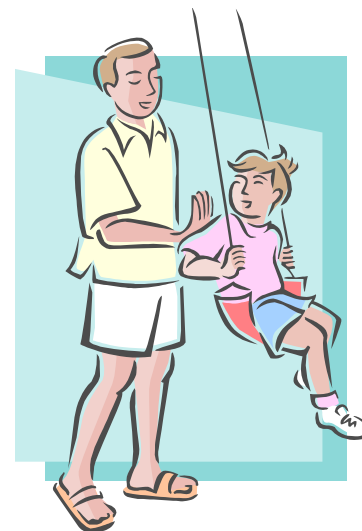
光が電荷を振動させる。

振動する電荷が光を出す。

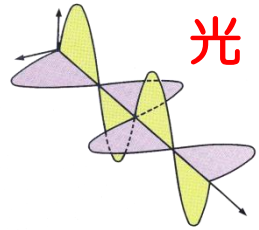


この相互作用の大きさは、同じ物質でも  
光の波長（揺する速さ）によって異なる。

\*



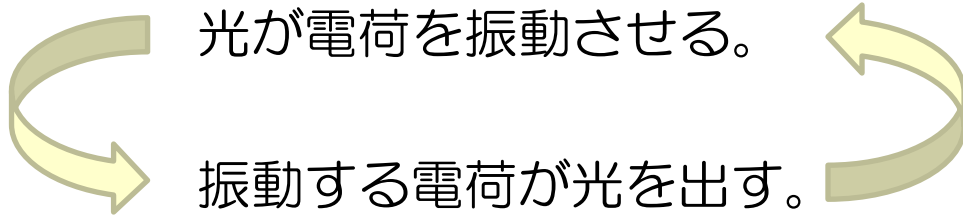
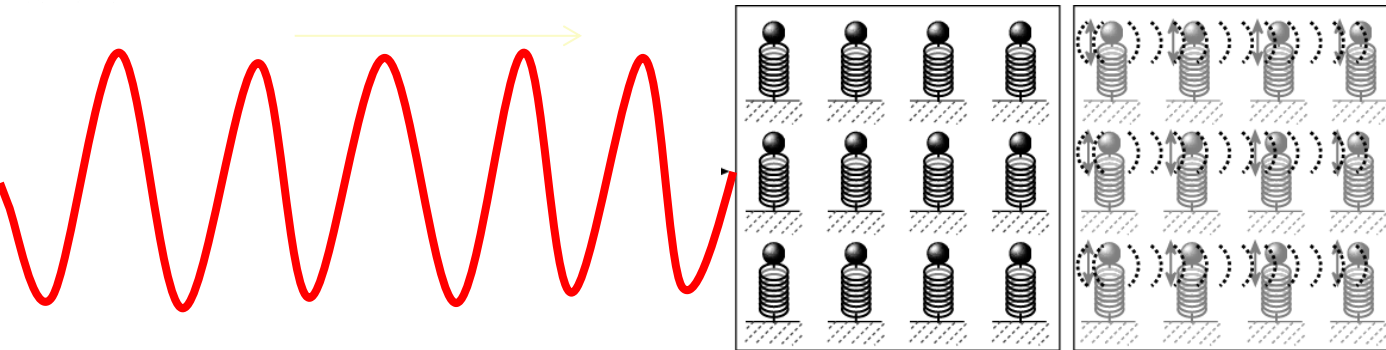
# 物質中を進む光



光：電磁場  
=電荷を動かす力



物質：電荷をもった粒子  
の集まり



光が電荷を振動させる。

振動する電荷が光を出す。

この相互作用の大きさは、同じ物質でも  
光の波長（揺する速さ）によって異なる。

光の波長によって、

吸収の度合いが変わる。

(吸収スペクトル)

屈折の度合いが変わる。

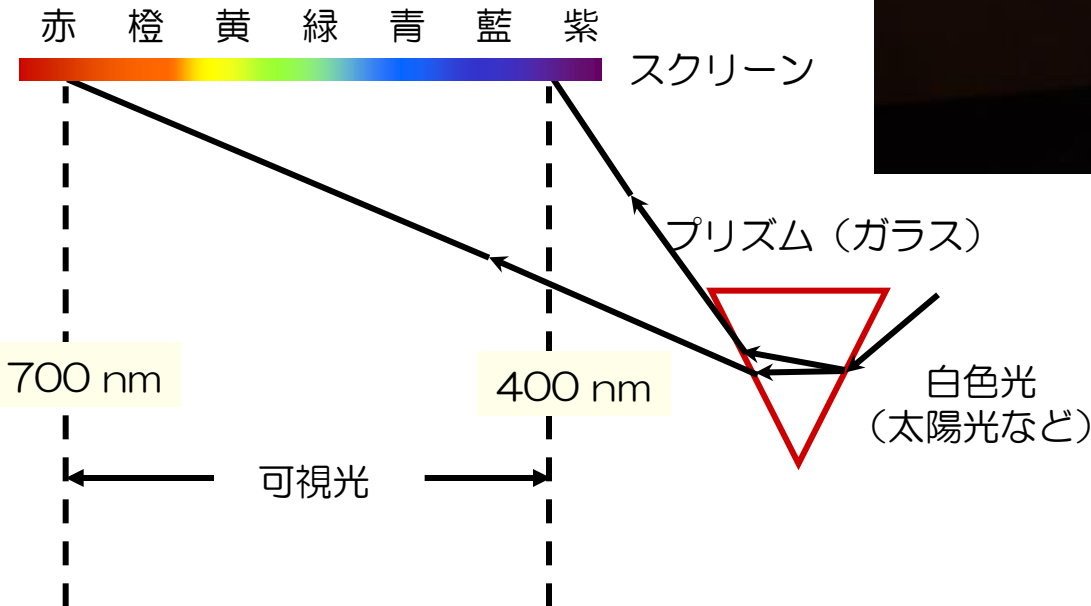
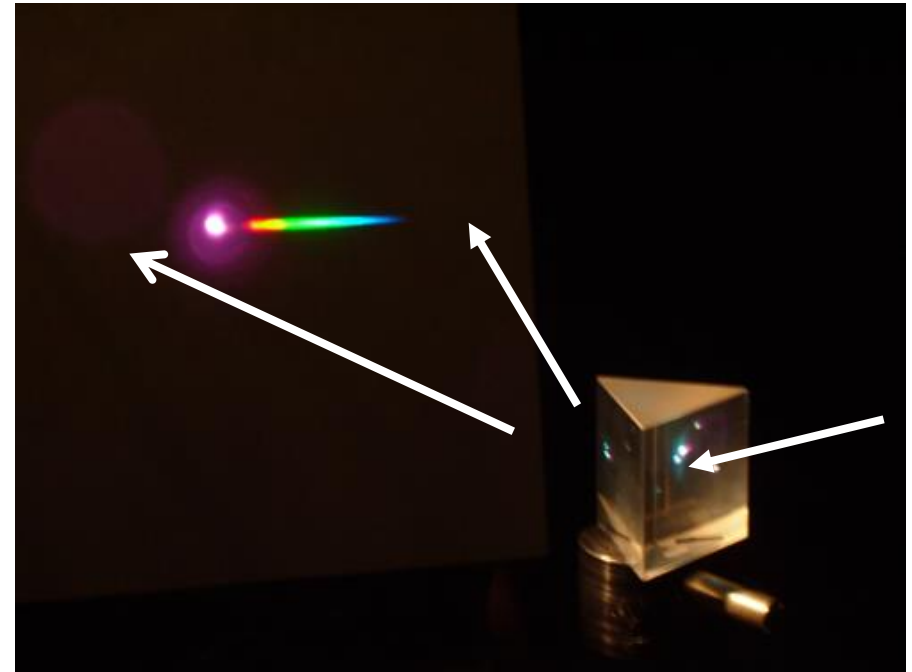
(分散)

色とりどりの世界

# 分光スペクトル

## ● プリズム分光のしくみ

シリカガラスの屈折率  
1.46961@404.7nm  
1.45542@694.3nm



分散現象を利用して、  
いろいろな波長の成分  
の大きさを測定できる。

# 虹



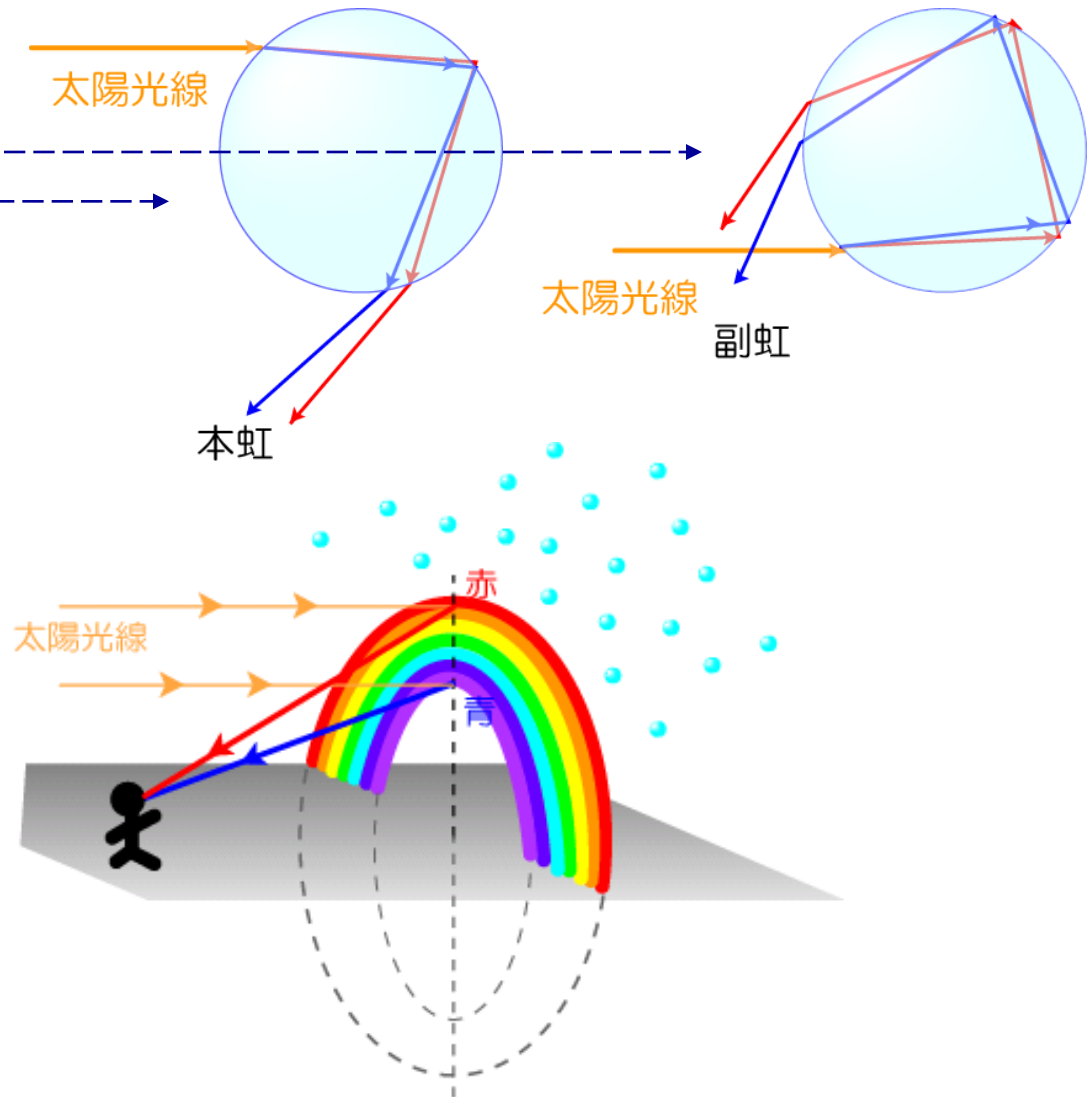
\* 山梨大学 堀裕和氏撮影、ご提供



# 虹の原理

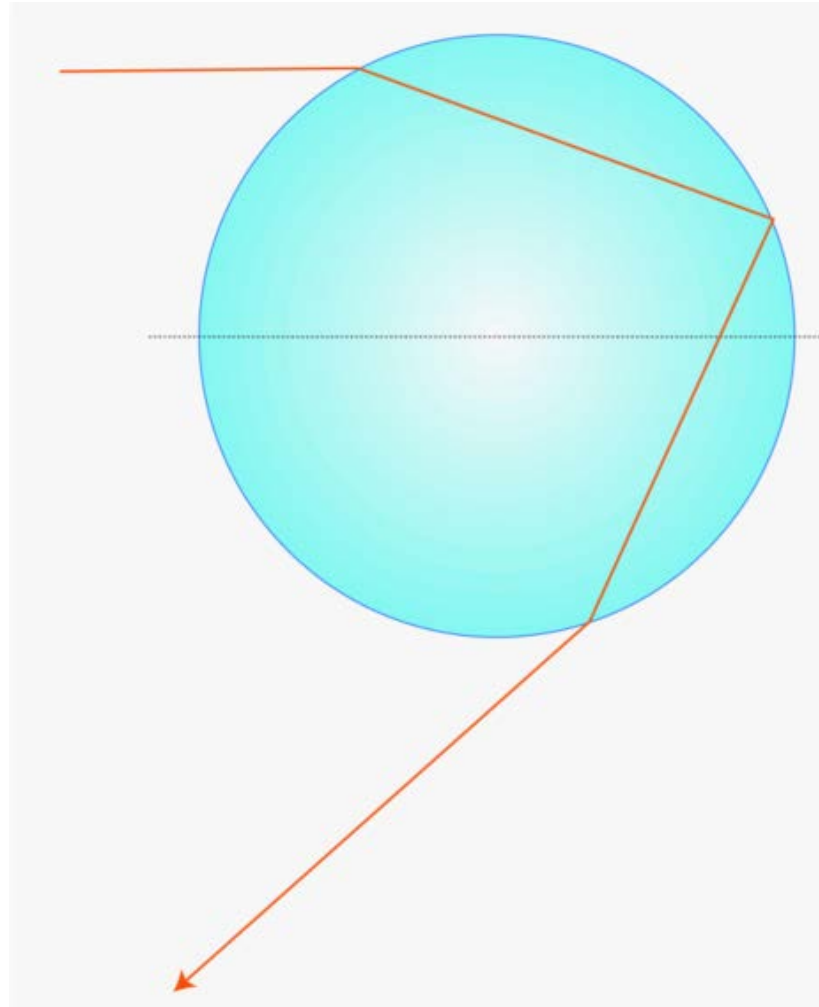


\* 山梨大学 堀裕和氏撮影、ご提供



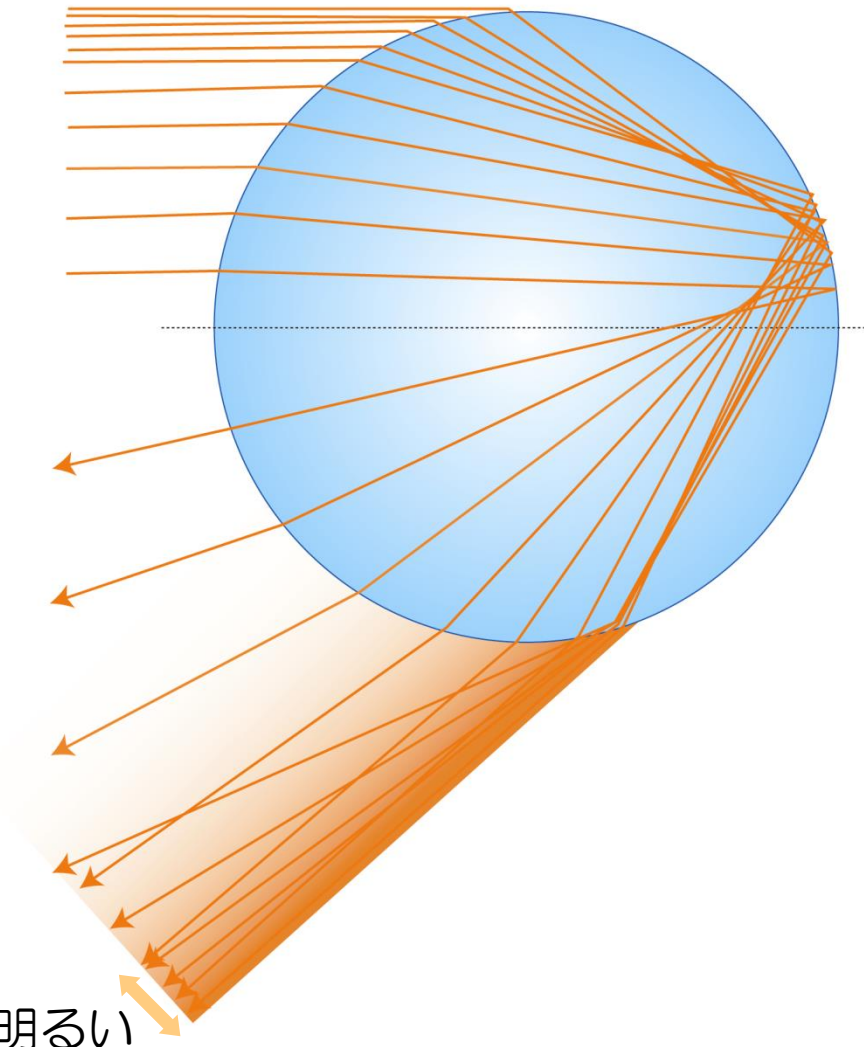
# 虹の原理

---



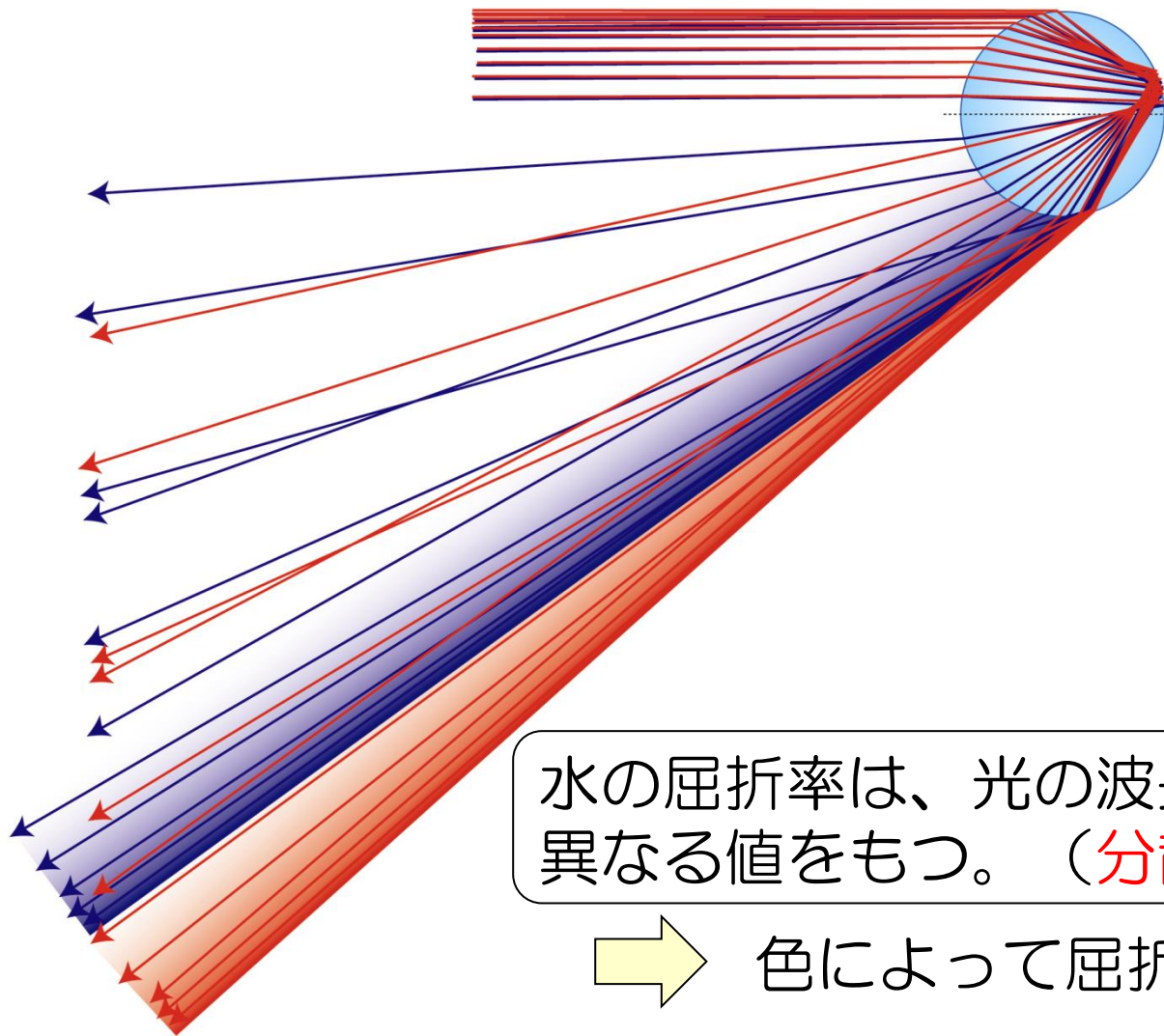
# 虹の原理

---



40° 付近が最も明るい

# 虹の原理



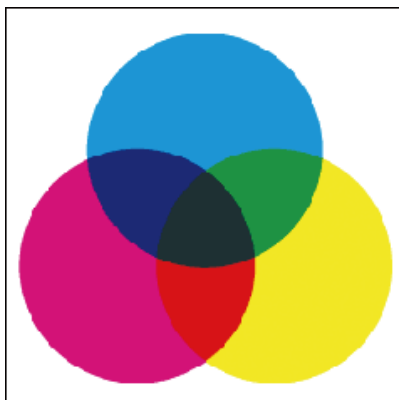
水の屈折率は、光の波長によって異なる値をもつ。（分散現象）

⇒ 色によって屈折角が異なる

# 色と光

色の3原色

シアン



マゼンタ

黄

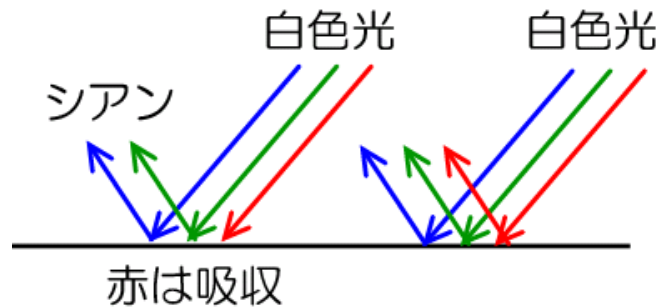
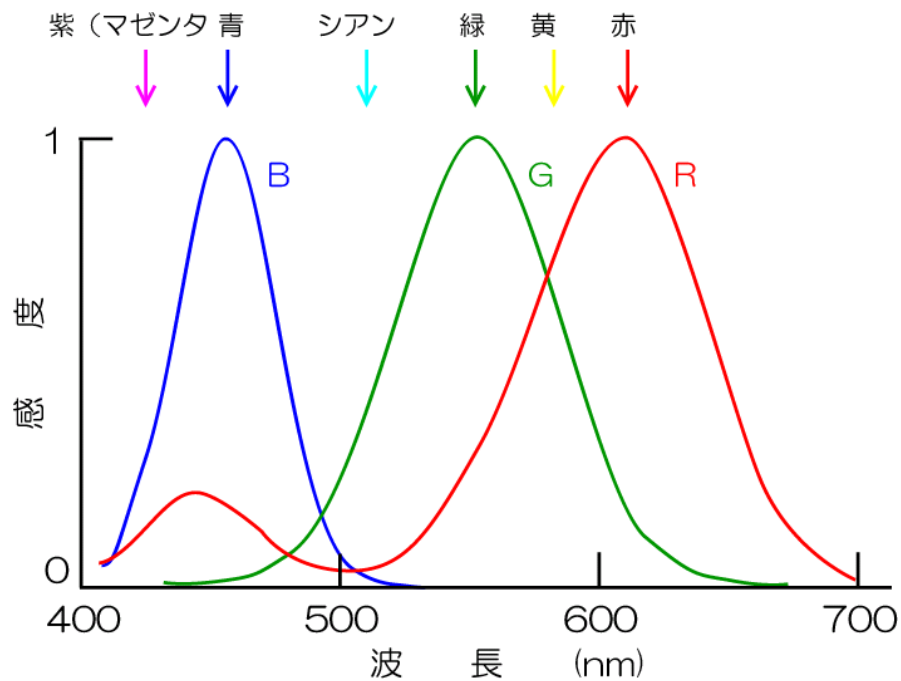
光の3原色 (RGB)

赤



緑

青



# 葉っぱは何故緑に見えるのか？

---

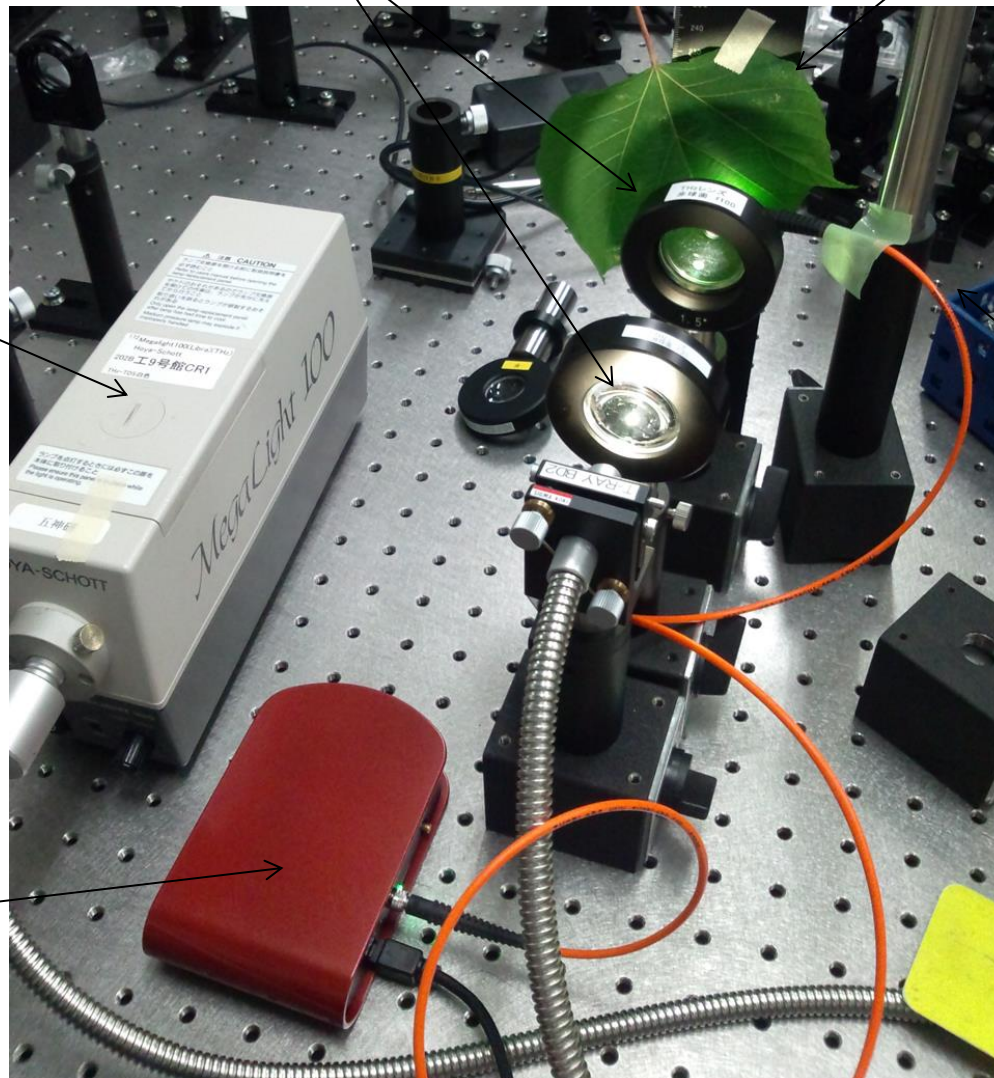


# 葉っぱは何故緑に見えるのか？

レンズ

葉っぱ

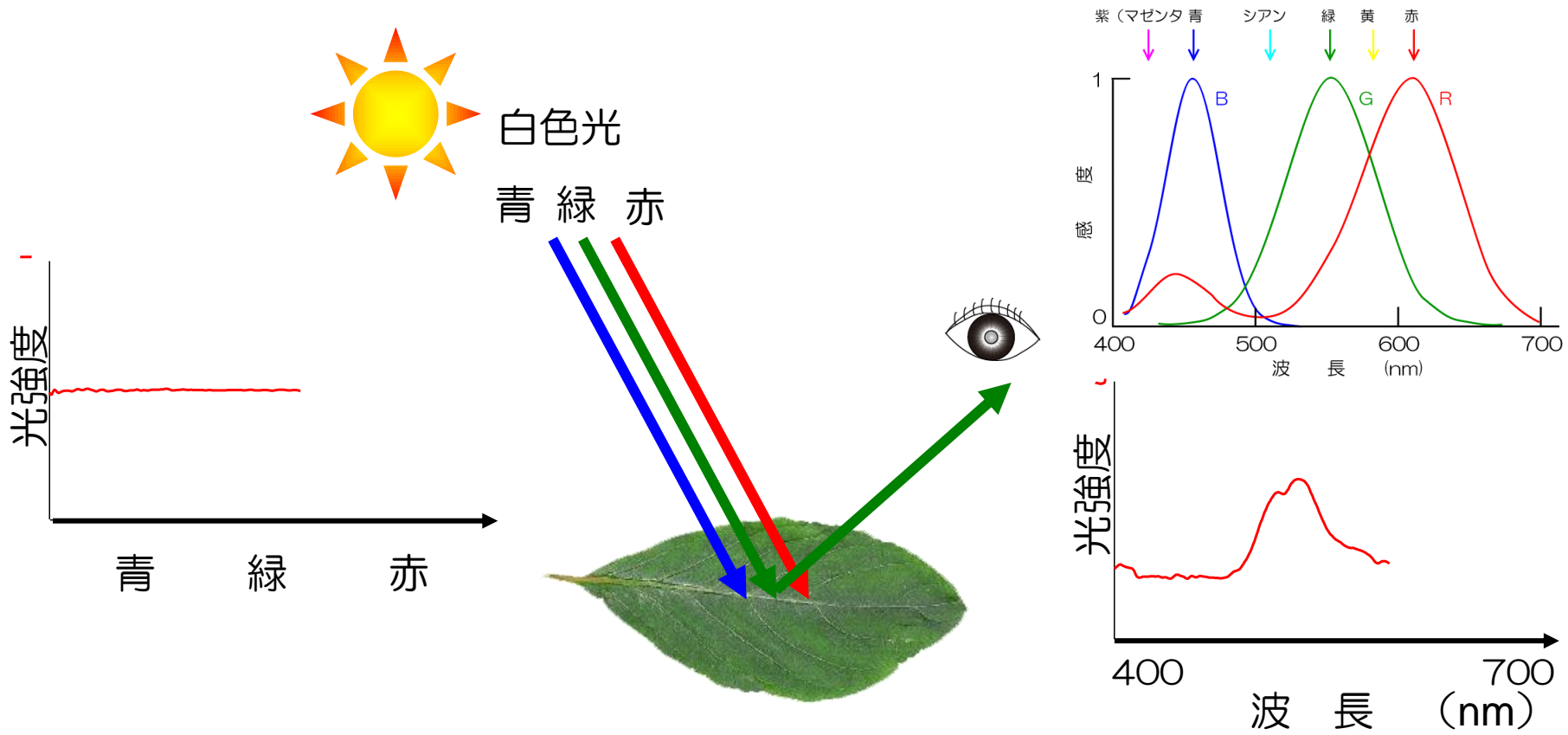
白色光源



光ファイバー

分光器

# 葉っぱは何故緑に見えるのか？

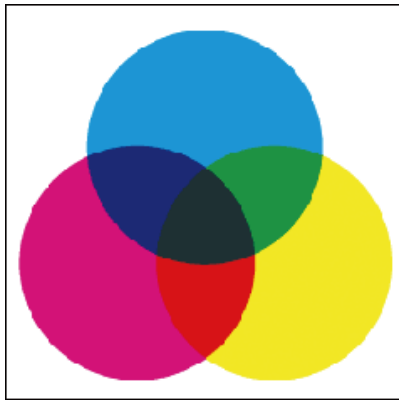




# 色と光

色の3原色

シアン



マゼンタ

黄

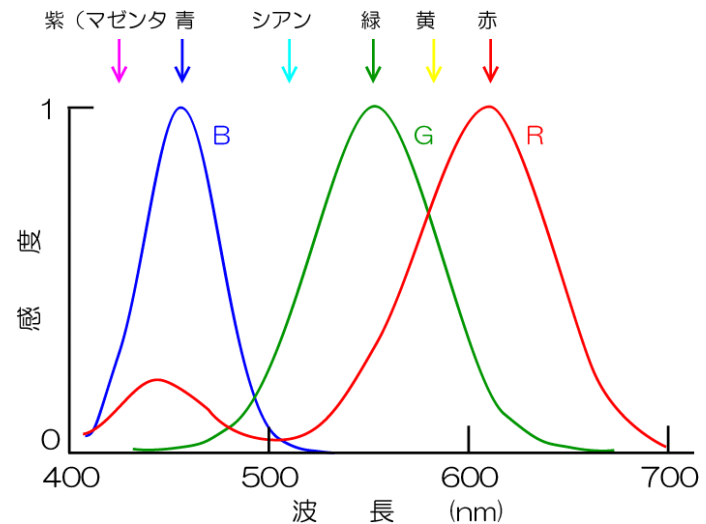
光の3原色 (RGB)

赤



緑

青





第12回(1/17):ゲスト講演

# 光のデザイン 石井 幹子(照明デザイナー)

## 経 歴

昭和37年 東京藝術大学美術学部卒業

昭和40年-41年 渡欧、フィンランド ヘルシンキ、ドイツ デュッセルドルフにて照明デザインに従事

昭和43年 帰国後、石井幹子デザイン事務所設立。以来、建築・都市等の照明デザインに従事

平成12年 紫綬褒章

## 主な著書・作品・受賞歴

作品(照明デザイン)ー

国内 東京タワー、東京港レインボーブリッジ、明石海峡大橋、姫路城、白川郷合掌集落

函館市、長崎市等の都市景観照明、愛・地球博会場照明

オペラ「蝶々夫人」(日伊共同制作)、横浜三溪園「あかり夢幻能」、

東京国立博物館「光彩時空」 他

海外 ジェッダ迎賓館(サウジアラビア)、ノースウェスタン生命保険ビル(アメリカ合衆国)、

メルボルンセントラル(オーストラリア)、パンパシフィックホテル(シンガポール)、

コンベンション・エキジビジョンセンター(香港) 他



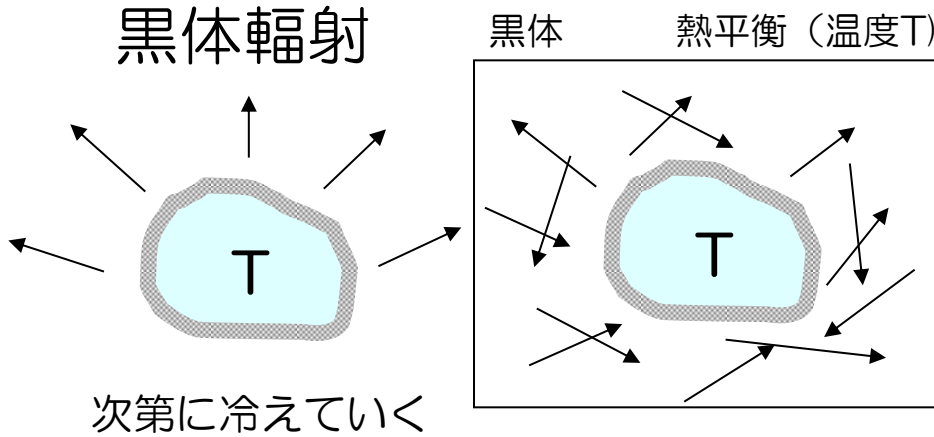
写真:(株)石井幹子デザイン事務所

# Outline

---

1. 光とは？
2. 光の量子性
3. レーザー
4. 講義内容紹介

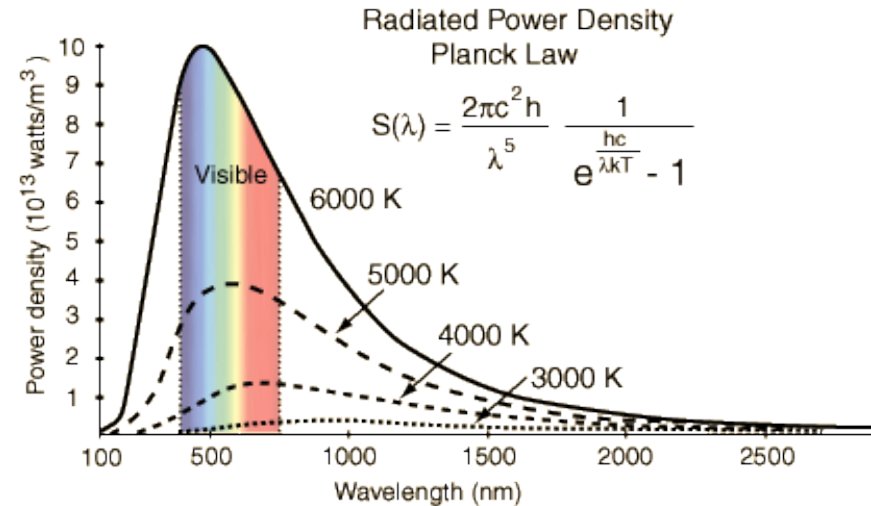
# プランクの輻射則(1900)



熱輻射：ミクロにみると振動する荷電粒子からの電磁波放射

電磁気学と古典力学では説明がつかない。  
プランク (1900)

## 黒体輻射のスペクトル



\* from HyperPhysics by Rod Nave, Georgia State University  
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/bbrc.html>

$E = h\nu$  を単位として物体と輻射がエネルギーをやりとりする。

$h$  : プランク定数

$(6.62607 \cdot 10^{-34} \text{ [Js]})$

$$I(\omega)d\omega = \frac{\hbar\omega^3 d\omega}{\pi^2 c^2 (\exp(\hbar\omega/k_B T) - 1)}$$

# 光の性質 III: 粒子 (量子光学)

## 光子 (Photon)

エネルギー  $E = h\nu$

運動量  $p = \frac{h\nu}{c}$

可視光 ( $400 \text{ nm} \sim 750 \text{ nm}$ )

$h\nu$  ( $1.5 \text{ eV} \sim 3 \text{ eV}$ )

熱エネルギー  $\sim k_B T$

$k_B$ : ボルツマン定数 ( $8.61735 \times 10^{-5} \text{ eV} / \text{K}$ )

常温  $300 \text{ K}$   $k_B T \sim 26 \text{ meV}$

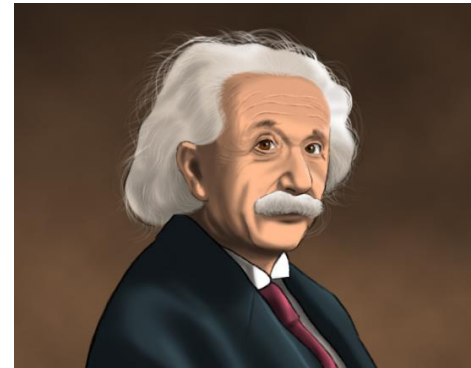
可視光光子は超高温  
光は安定なものを変化させる  
(光化学反応)

量子性が本質的に重要

$(1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J})$

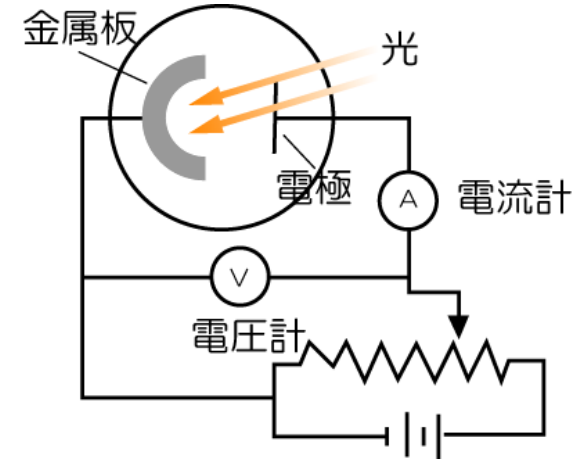
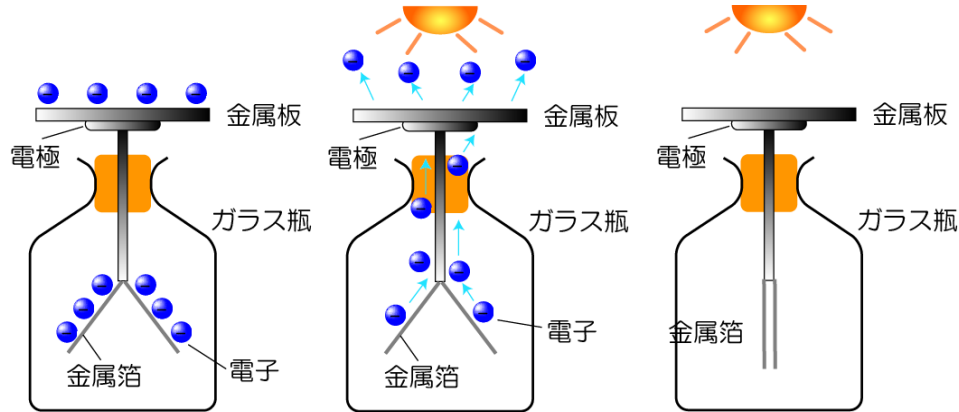
$35000 \text{ K}$

アインシュタイン  
光量子仮説 (1905)

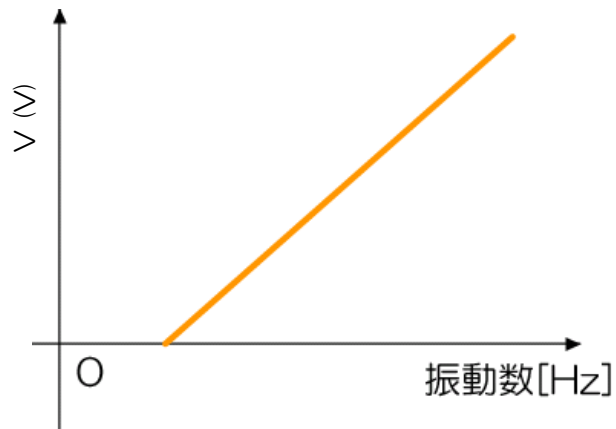


# 光電効果

## ● 光電効果



最低の電圧 (V) と振動数 (Hz)



- 光電子放出が起こる光の振動数の条件

$$h\nu \geq h\nu_{\min} = W$$

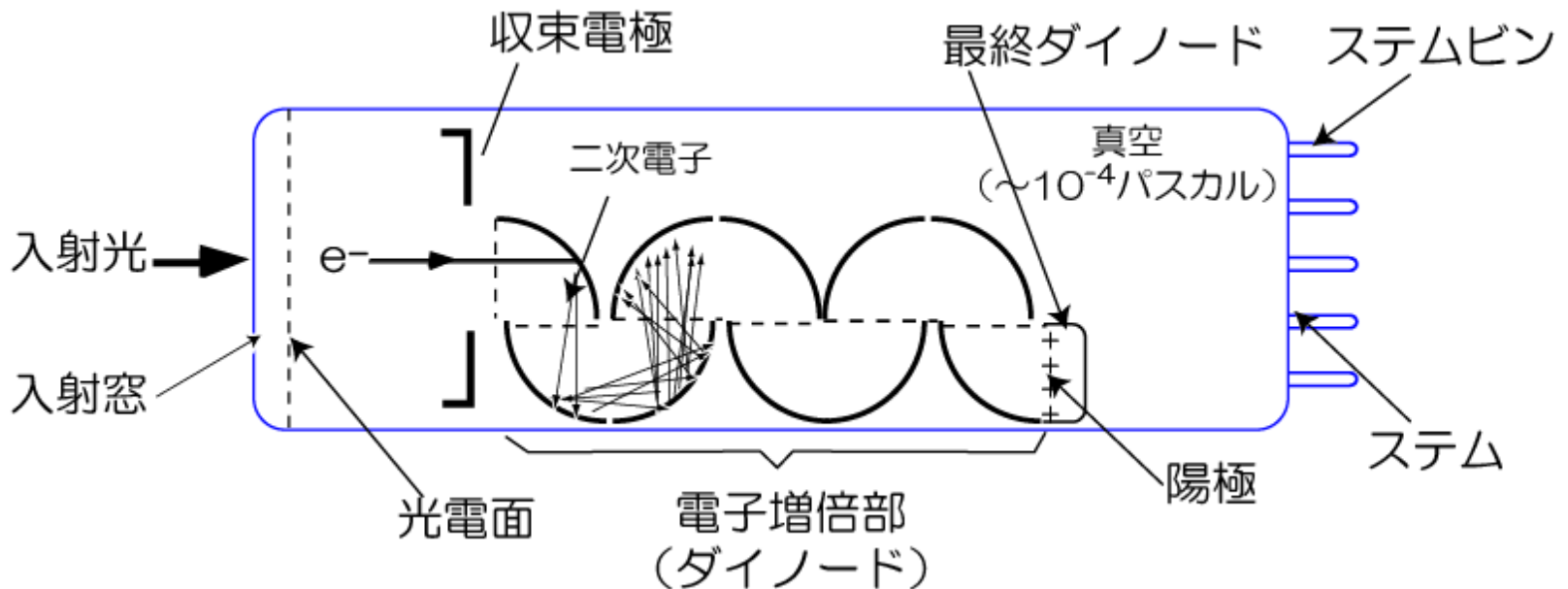
$W$  : 仕事関数

- 光電子の運動エネルギー

$$\frac{mv^2}{2} = h\nu - W$$

# 光子をとらえる

## ● フォトマルチプライヤー（光電子増倍管）の原理



光電面で発生した電子は加速されて電子増倍部（ダイノード）に衝突し、ダイノードから（加速で得たエネルギーを使って）数個の電子を放出する。（この飛び出した電子を2次電子と呼ぶ。）

これを繰り返す事によって、電子の数がねずみ算的に増幅される。これを最後に、陽極から出力抵抗を通して検出する。

# 光子をとらえる

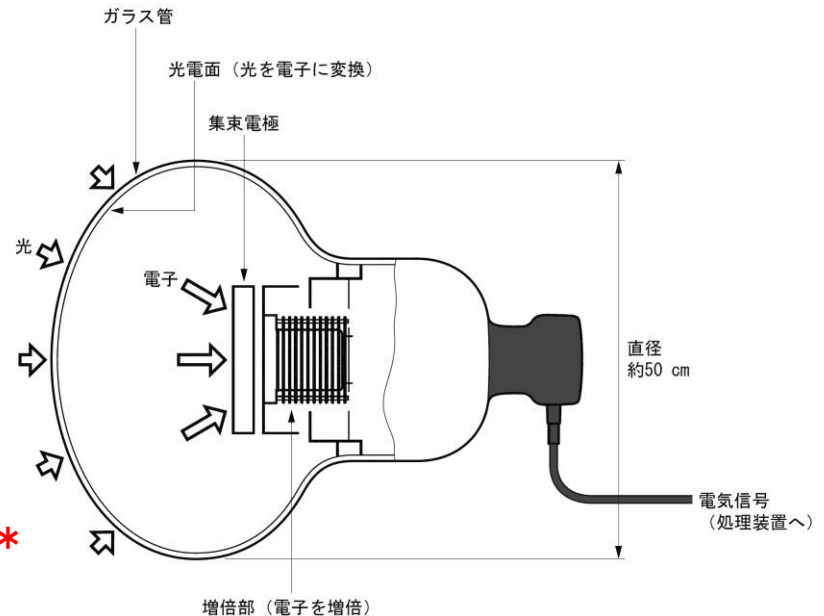
## ● フォトマルチプライヤー（光電子増倍管）



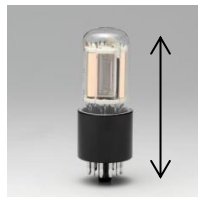
\*

### 小柴昌俊先生

スーパーカミオカンデ用光電子増倍管は、浜松ホトニクス株式会社製R3600-05で、管の大きさ・性能とも世界最高のものです。



\*

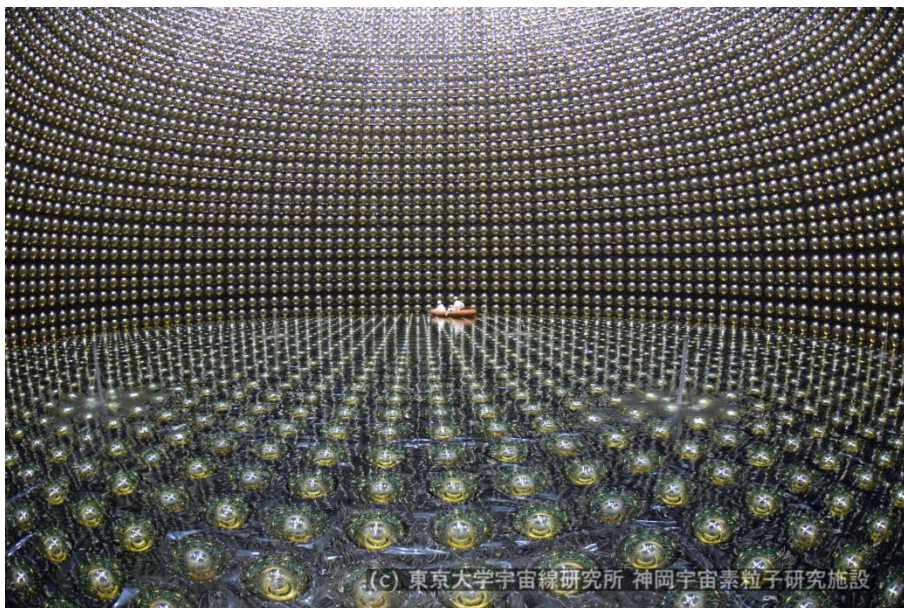


\*

約100mm ← 通常の光学実験で使用するフォトマルチプライヤー  
：浜松ホトニクス



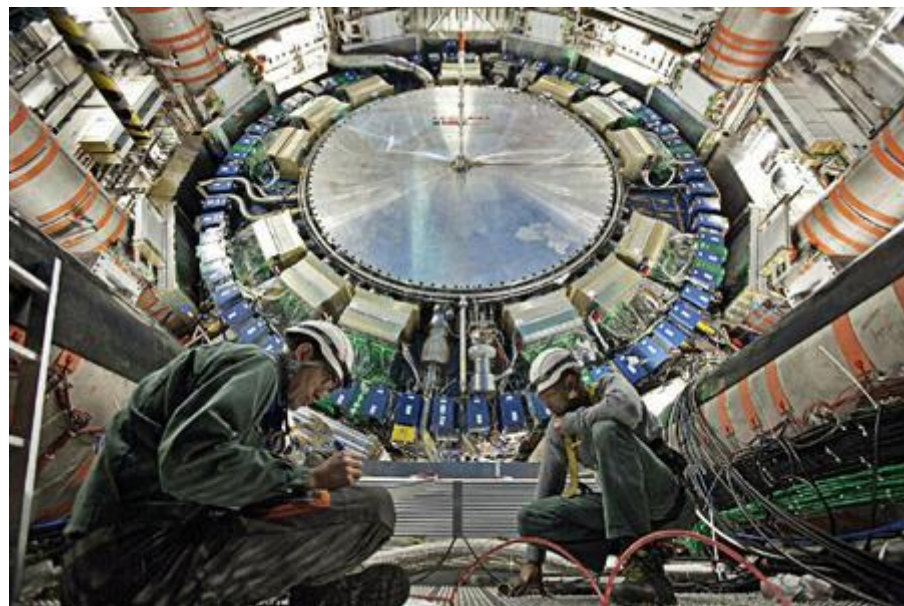
# 大発見を支える日本製の光電子増倍管



(c) 東京大学宇宙線研究所 神岡宇宙素粒子研究施設

\* スーパーカミオカンデ  
(ニュートリノ天文学)

写真提供 東京大学宇宙線研究所 神岡宇宙素粒子研究施設  
<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/gallery/> No.SK3-20 注水中3

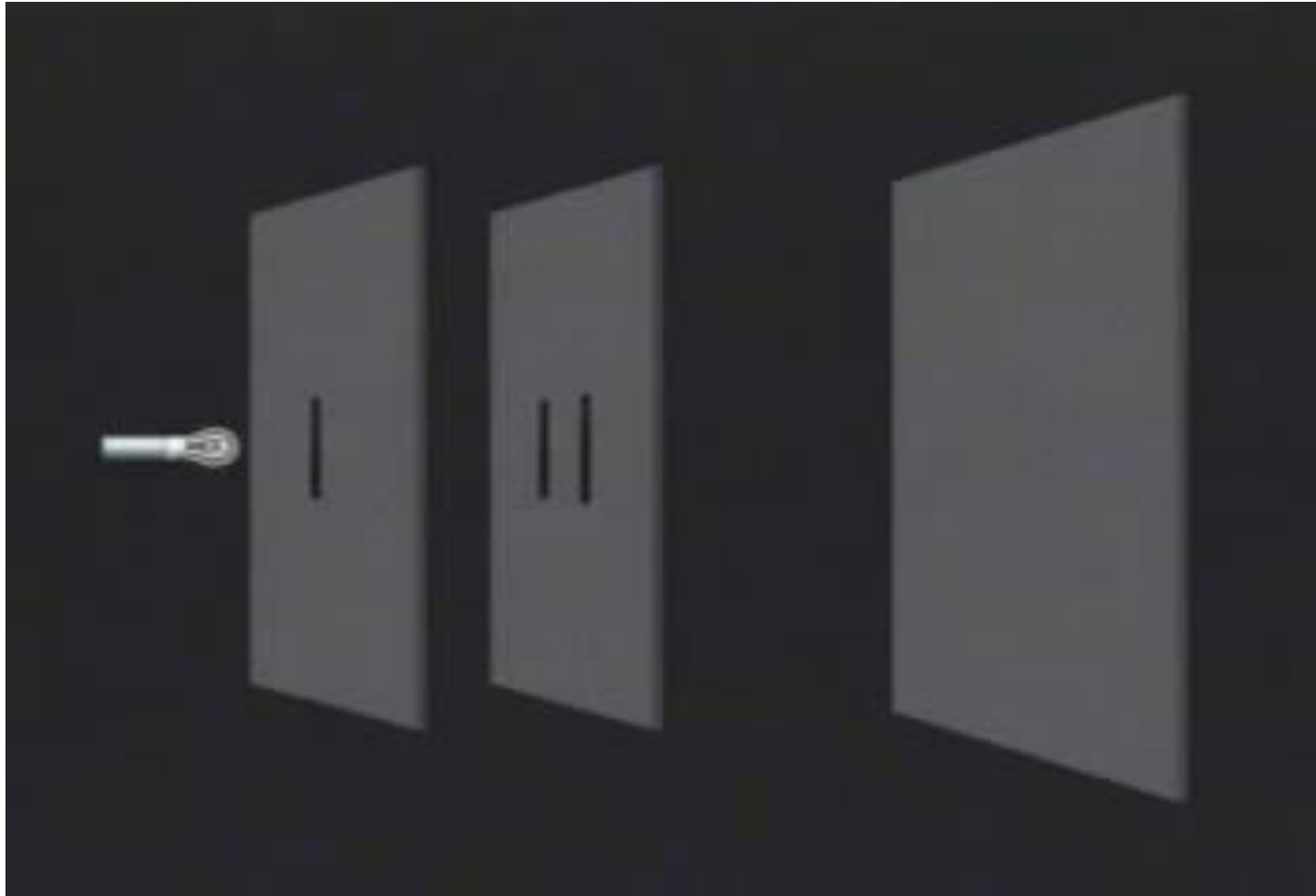


\* 欧州合同原子核研究所の  
ヒッグス粒子検出器

CERN  
<http://cdsweb.cern.ch/record/1324519> CERN-EX-1101010 02

# 光は波か粒か：光子の干渉

---



\* ERATO五神協同励起プロジェクト(H9-H14)  
「光で揃う量子たち」  
提供：科学技術振興機構(JST)

# 光子の干渉

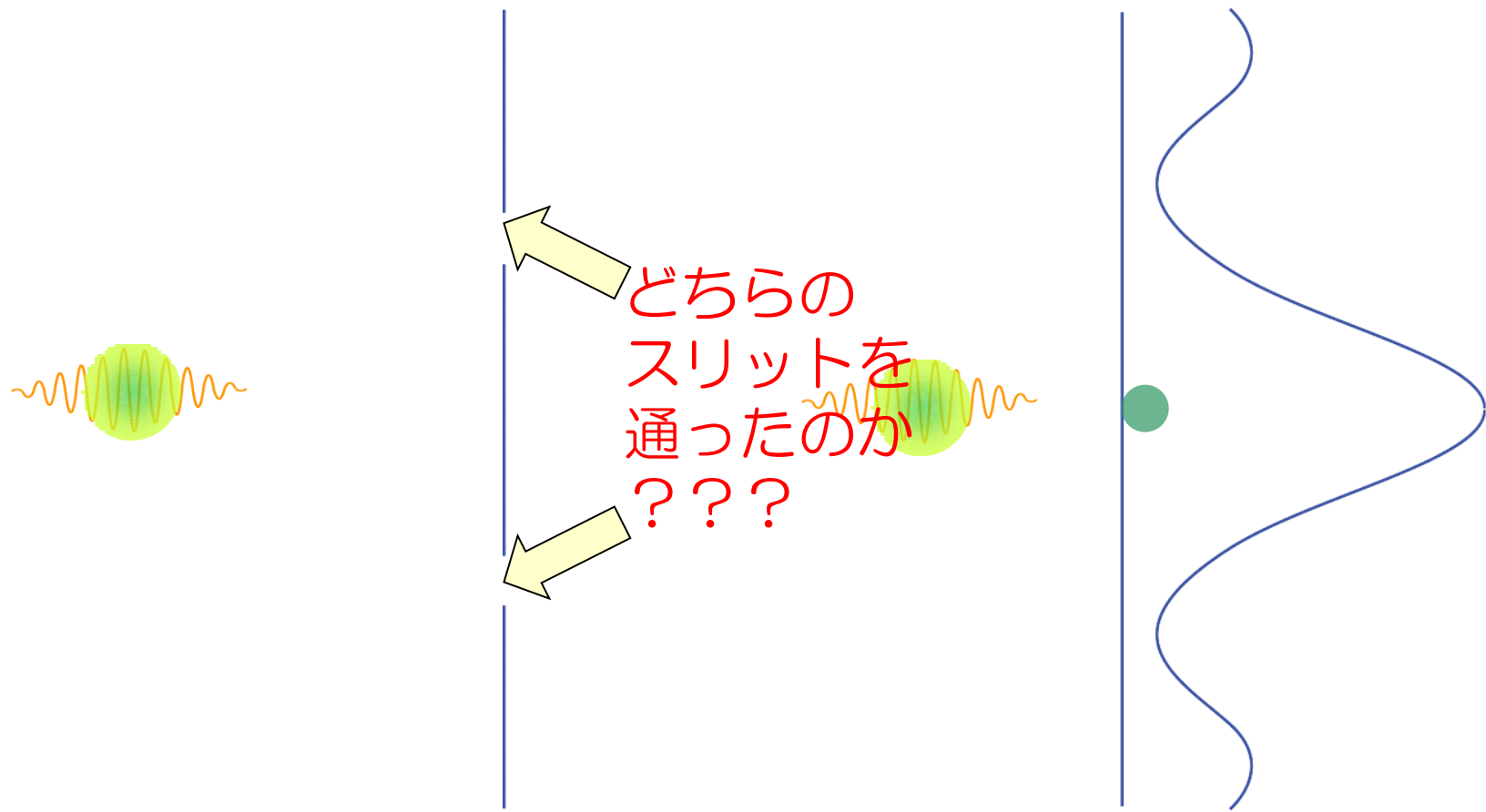
---



\* ERATO五神協同励起プロジェクト(H9-H14)  
「光で揃う量子たち」  
提供: 科学技術振興機構(JST)

# 光子の干渉の説明

---





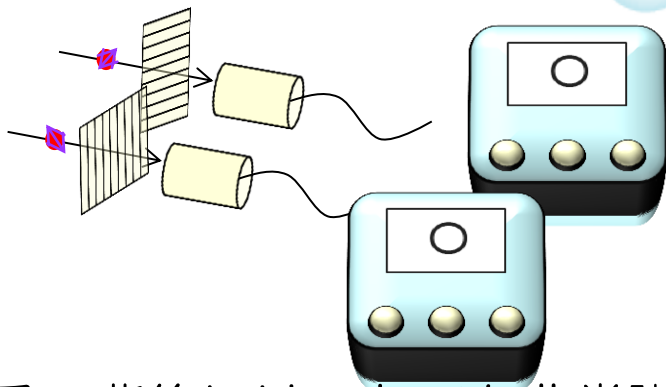
第10回(12/20):光の正体と量子論の不思議

第11回(1/10):微弱光を用いた究極の暗号

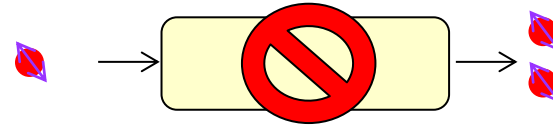
# 微かな光の不思議な世界

小芦 雅斗(工学部)

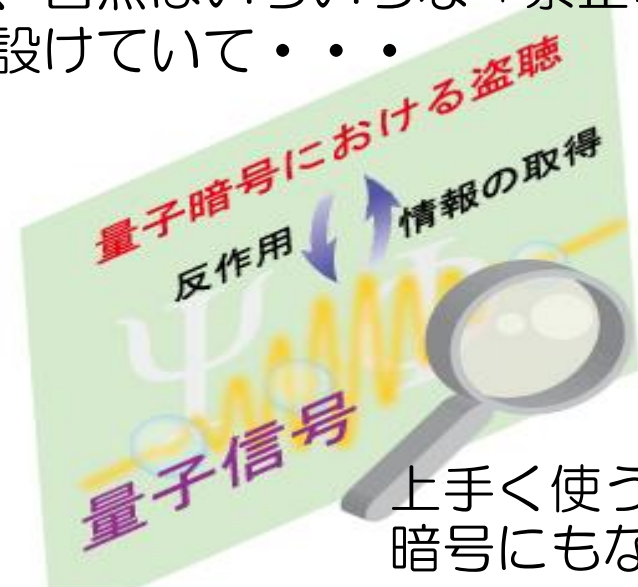
波でもあり粒子でもある  
「光」って何者でしょうか？



その背後には、とても非常識な  
「からくり」が潜んでいます。



その非常識が現実世界に現れないように、自然はいろいろな「禁止事項」を設けていて・・・



上手く使うと究極の  
暗号にもなるのです。

禅問答のような話に聞こえますが、わかりやすく説明しますのでお楽しみに！

# Outline

---

1. 光とは？
2. 光の量子性
3. レーザー
4. 講義内容紹介

# レーザーが普通の光とちがうところ①

---

1つの方向に一直線に進む

(太陽、電球、蛍光灯、ろうそく、蛍など)

「指向性」

日光

プリズム

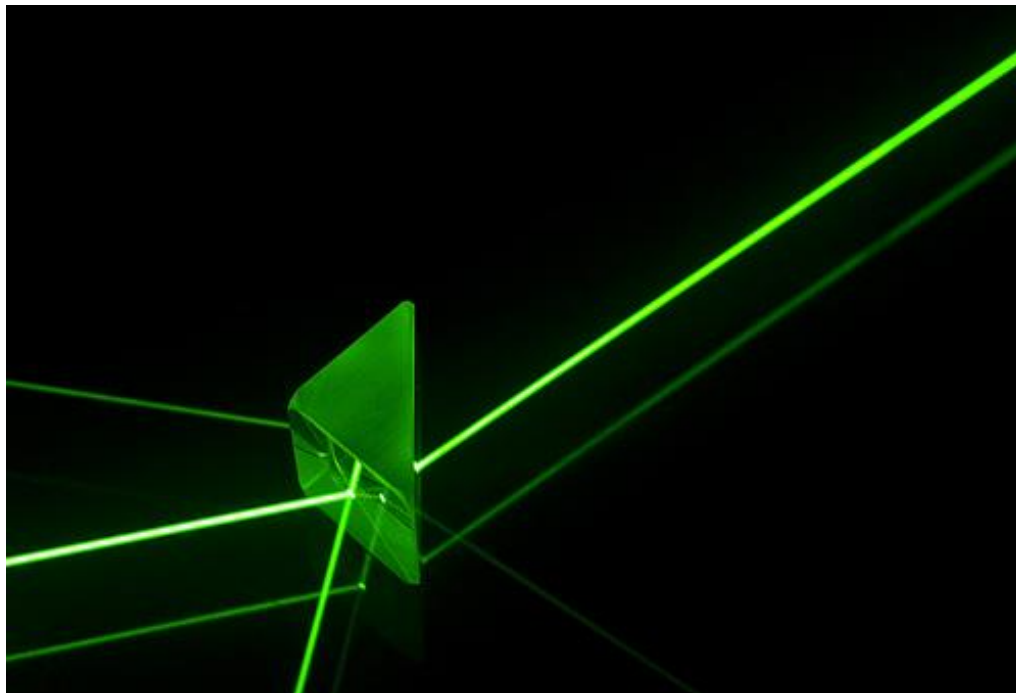
普通の光は、無数の色の重ね合わせ

様々な色(虹色)の光に分かれる



# レーザーが普通の光とちがうところ②

---



\*

© mattbellphoto 2007

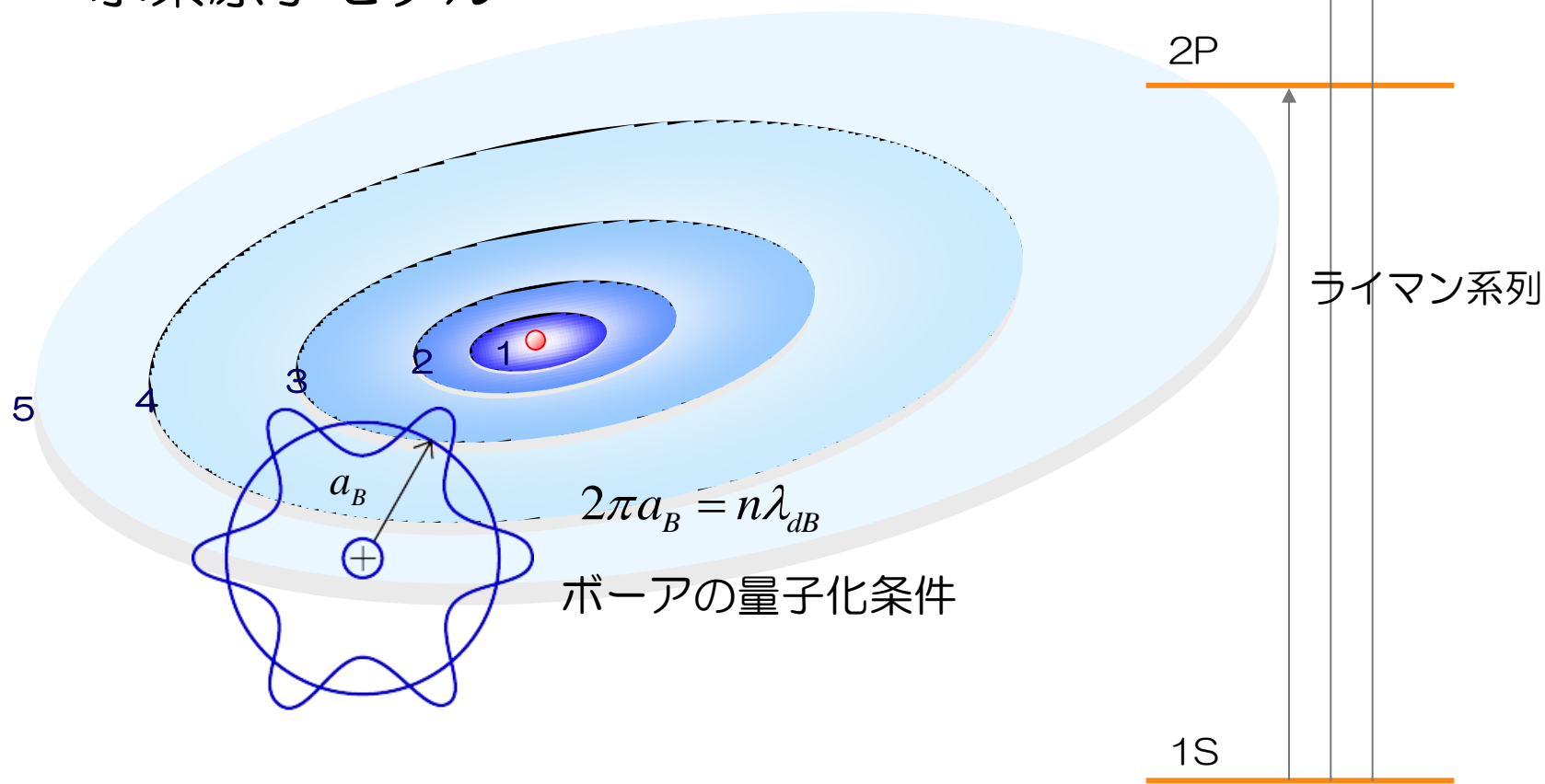
<http://www.flickr.com/photos/mattbell/1591769889/>

「単色性」

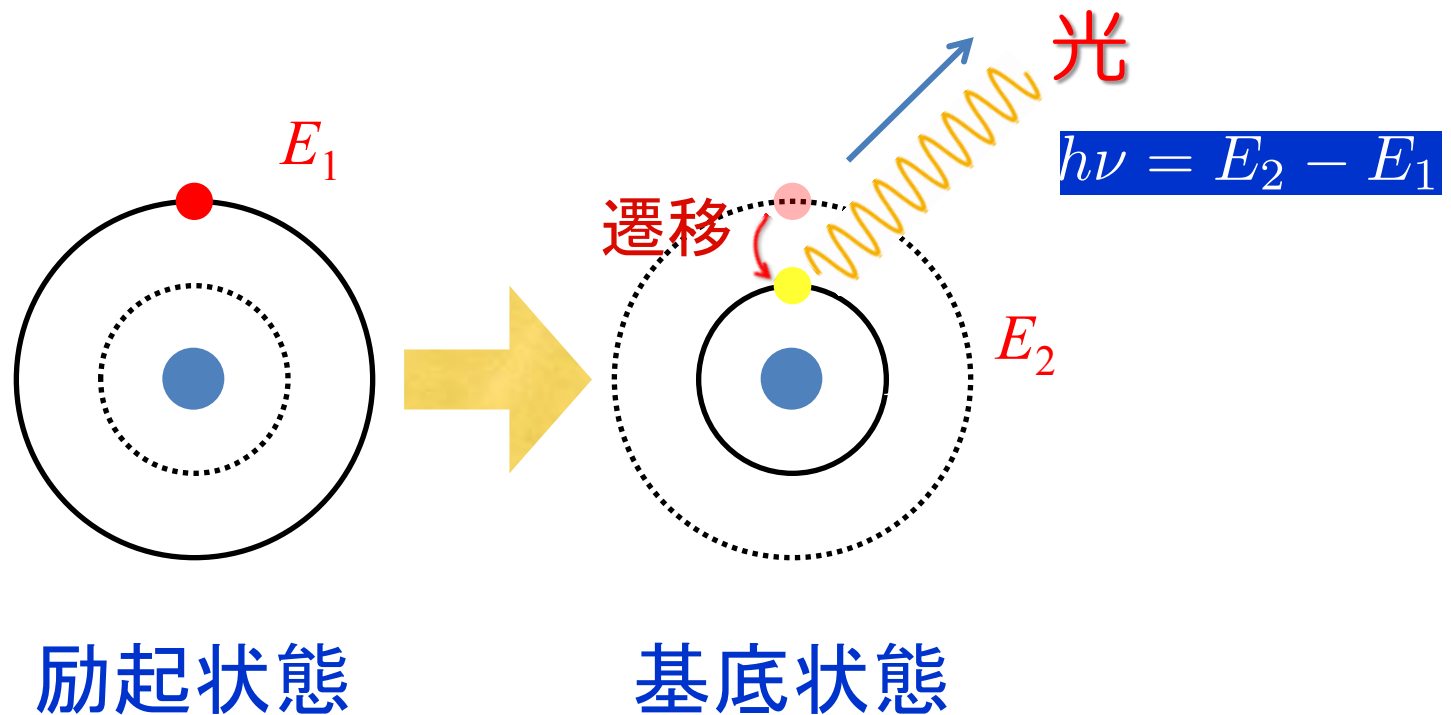
1つの色だけをふくんでいる

# 光と原子

- 原子のエネルギー準位構造  
水素原子モデル



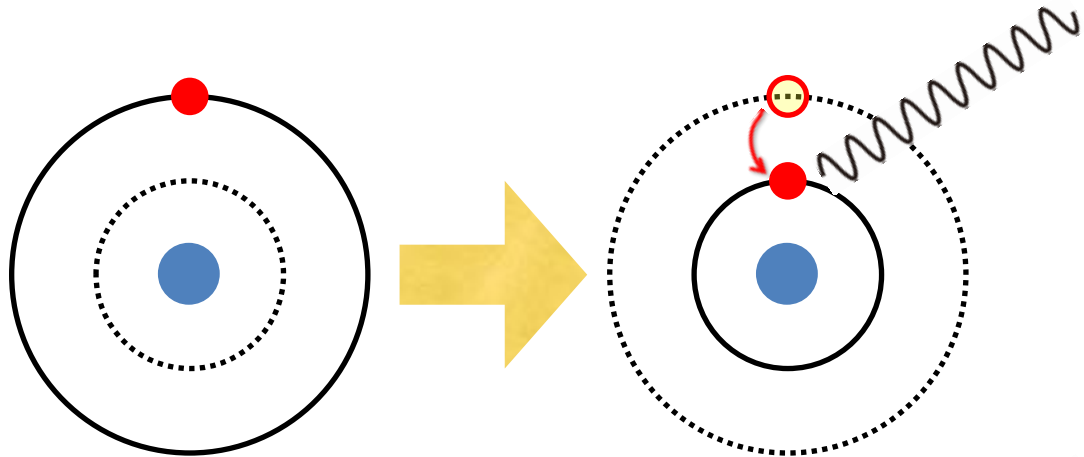
# 電子が原子の中で軌道を遷移すると光が発生する



# 光の放出は2種類ある

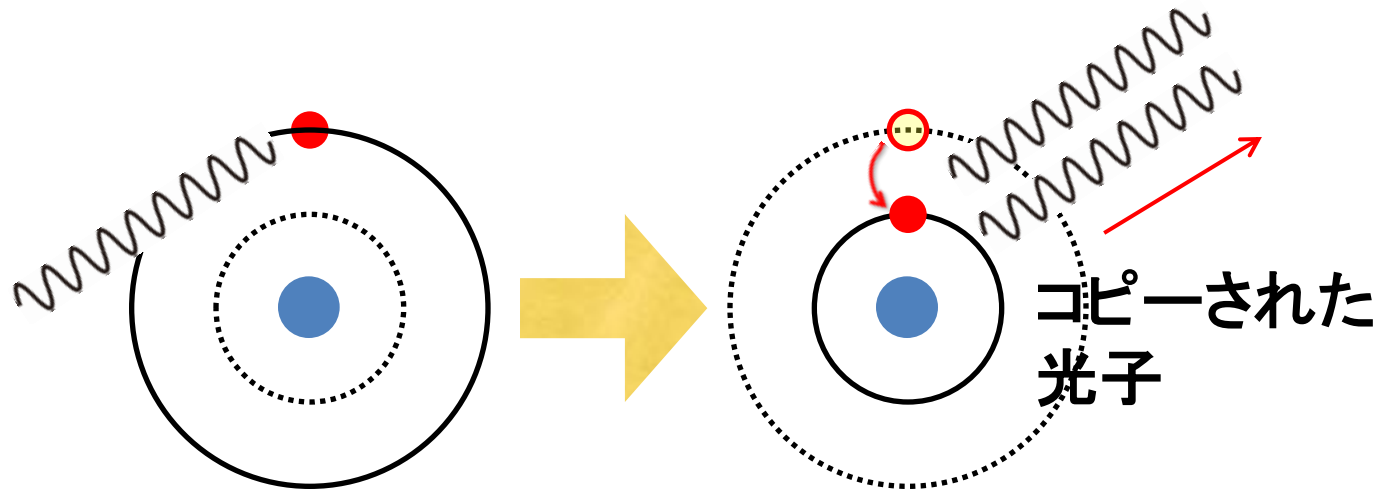
## 自然放出

勝手に光を出す



## 誘導放出

入ってくる光につられて光を出す



## 自然放出

勝手に光を出す



User: Bantosh, Wikimedia Commons より一部を転載(2012/10/25)  
[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Shibuya\\_night.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Shibuya_night.jpg)  
CC BY-SA 3.0



\*

## 普通の光

## 誘導放出

入ってくる光に  
つられて光を出す



User: DX Broadrec, Wikimedia Commons より一部を転載(2012/10/25)  
[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Saga\\_kita\\_High\\_School\\_No,89-Hanshin\\_Koshien\\_Stadium\\_2007.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Saga_kita_High_School_No,89-Hanshin_Koshien_Stadium_2007.jpg)  
CC BY-SA 3.0



\*

## レーザー

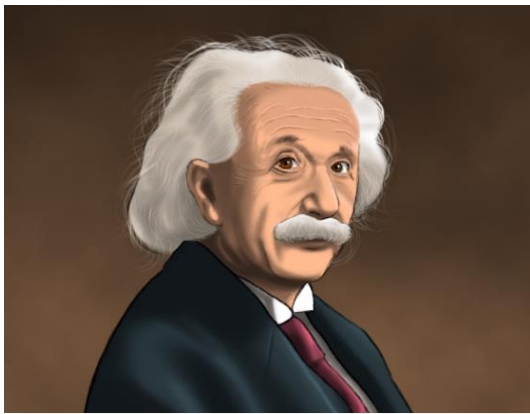
入射光と同じ色、進行方向の光が出る→単色性&指向性

# レーザー LASER

---

Light **A**mplification by **S**timulated  
**E**mission of **R**adiation

誘導放出による光の増幅

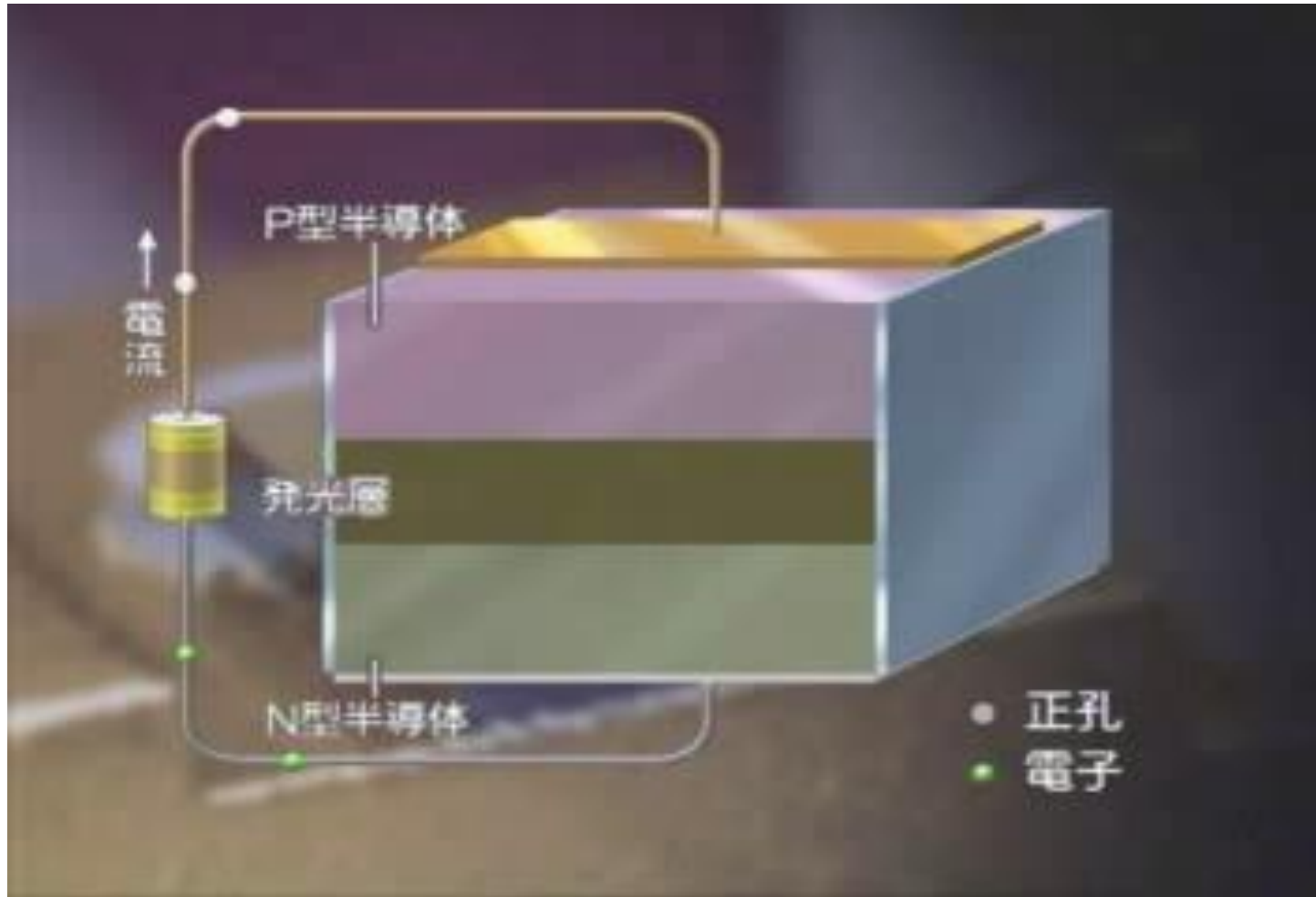


誘導放出を理論的に予言したのは

アインシュタイン

1916年

# レーザー



\* ERATO五神協同励起プロジェクト(H9-H14)  
「光で揃う量子たち」  
提供: 科学技術振興機構(JST)

# レーザー

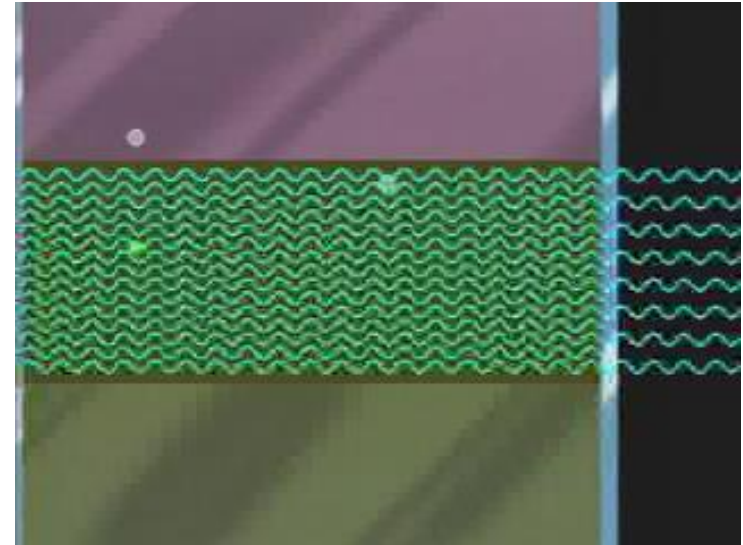
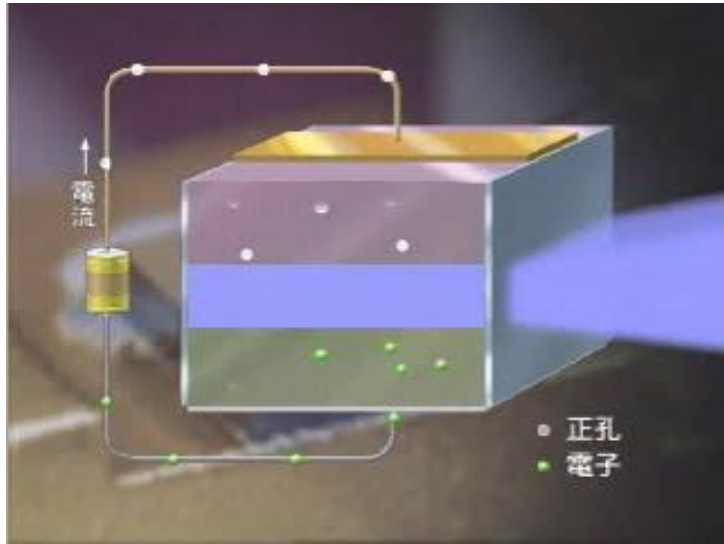
---



- \* ERATO五神協同励起プロジェクト(H9-H14)  
「光で揃う量子たち」  
提供: 科学技術振興機構(JST)



# レーザー (1960: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)



\*

## レーザー光：そろった光

- 広がらない → 望遠鏡
  - 強い → レーザー核融合
  - 周波数をそろえる → 原子時計
  - 時間 → 極超短パルス  $10^{-14}$ 秒  
(化学反応をスローモーションで見る)
- 距離を測る → 天文学

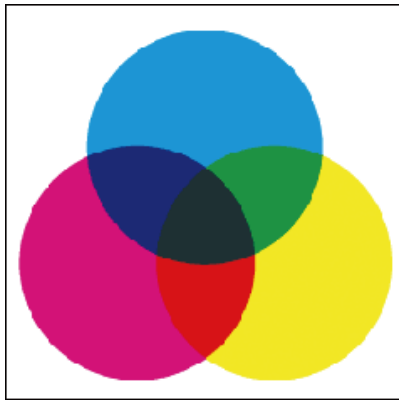
\*

ERATO五神協同励起プロジェクト(H9-H14)  
「光で揃う量子たち」  
提供：科学技術振興機構(JST)

# レーザーのスペクトル観察

色の3原色

シアン



マゼンタ

黄

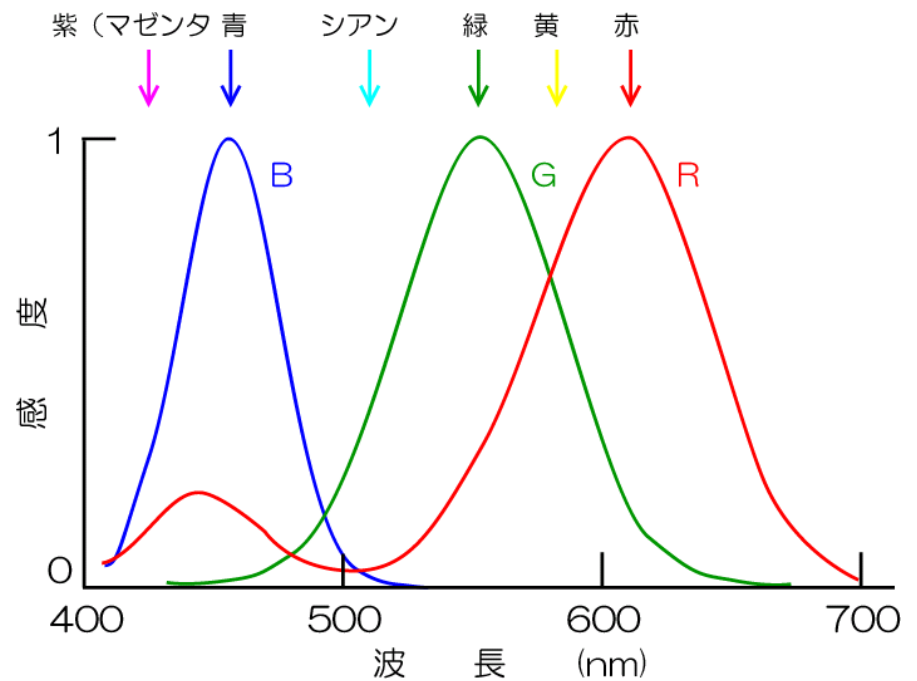
光の3原色 (RGB)

赤



緑

青



# レーザーの向こうに何かがあるか？

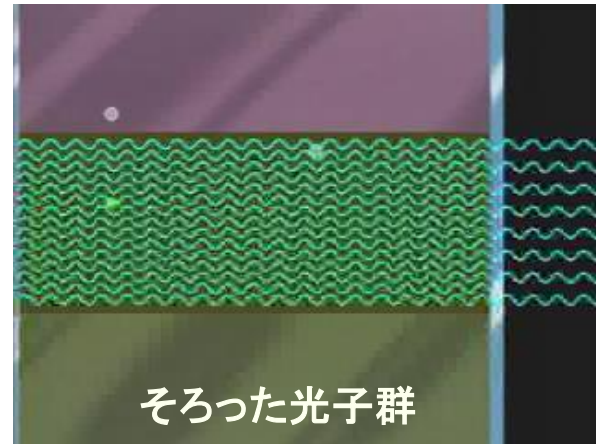
レーザー

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (1960)

強度大

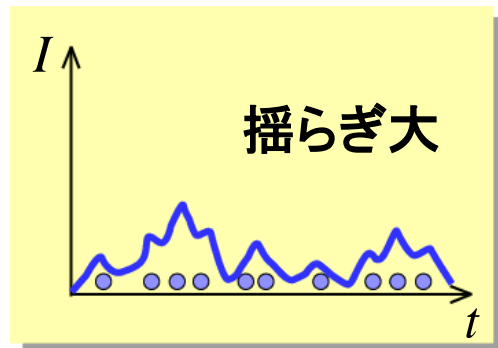


$$\sqrt{N}/N \ll 1$$



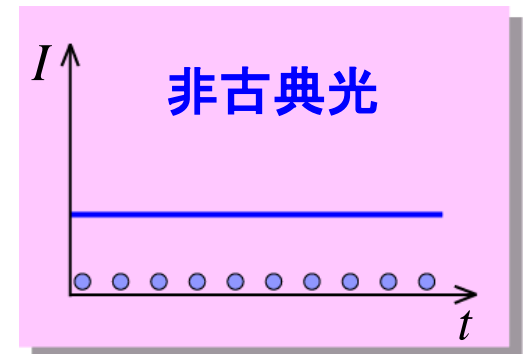
\* ERATO五神協同励起プロジェクト(H9-H14)  
「光で揃う量子たち」  
提供: 科学技術振興機構 (JST)

極微弱

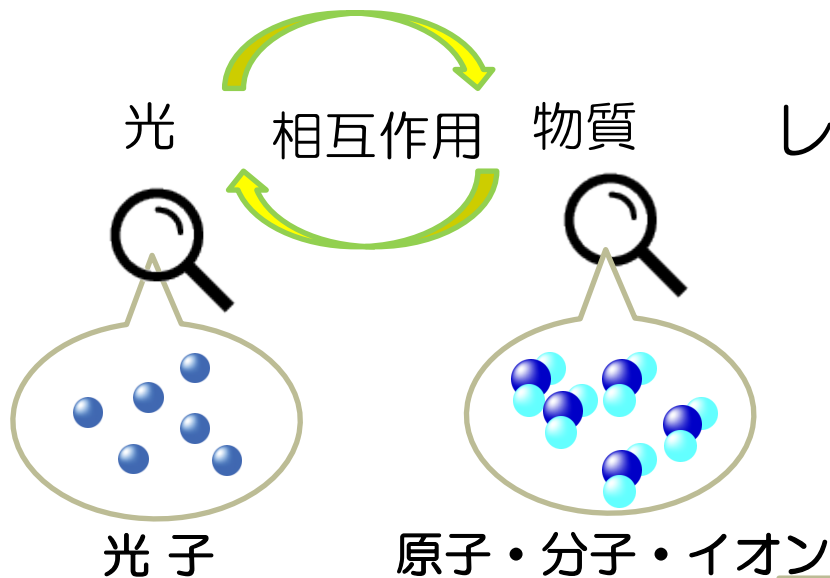


$$\sqrt{N}/N \sim 1$$

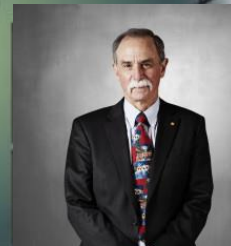
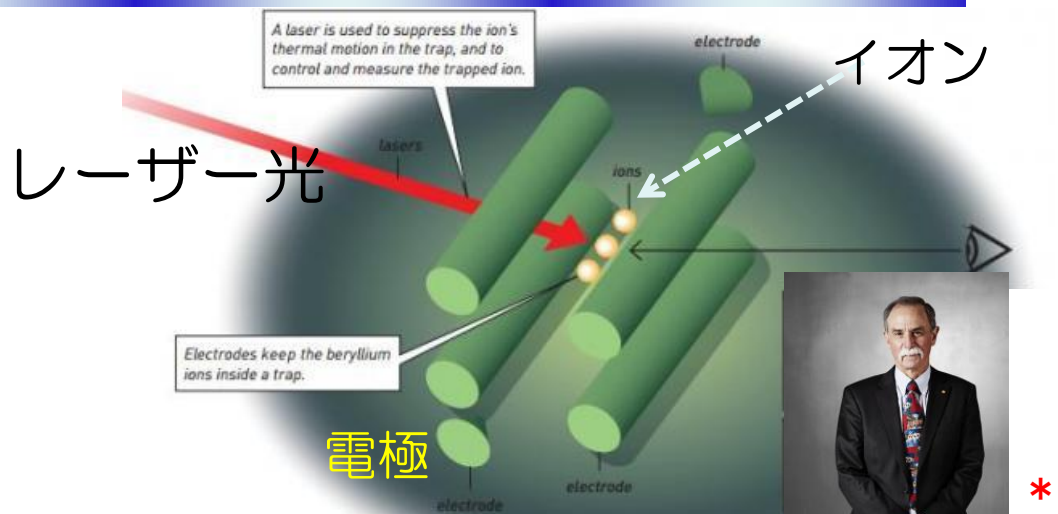
微小光共振器  
+ 非調和媒質  
による制御



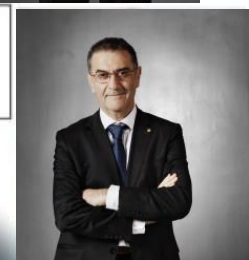
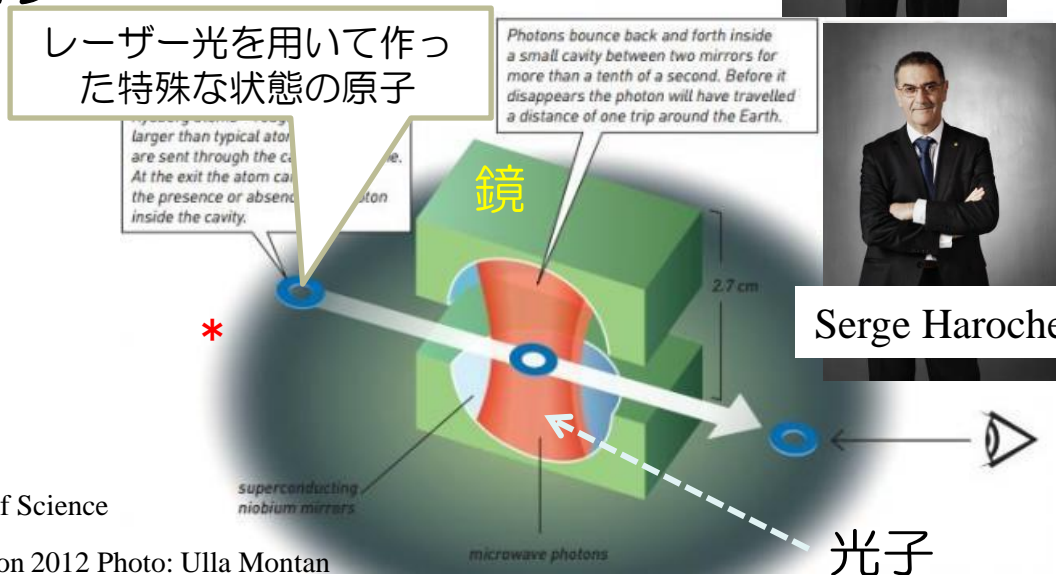
# New! 今年のノーベル物理学賞



ミクロの粒子を一個～数个しっかりと閉じ込めたまま、相互作用をうまく使い、粒子たちの状態を精密に測定したり、望みの状態を作り出す。



David J. Wineland \*



Serge Haroche \*

<右図>

Figure 2 and Figure 3 in "Particle control in a quantum world"  
The Nobel Prize in Physics 2012 © The Royal Swedish Academy of Science

Picture of David J. Wineland and Serge Haroche: © Nobel Foundation 2012 Photo: Ulla Montan

# Outline

---

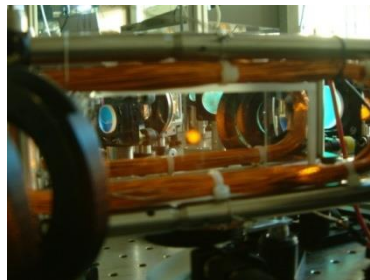
1. 光とは？
2. 光の量子性
3. レーザー
4. 講義内容紹介

# 講義内容



## ● 自然の理解を進めた光技術

井上 慎 (工学部)



\* 井上慎先生ご提供



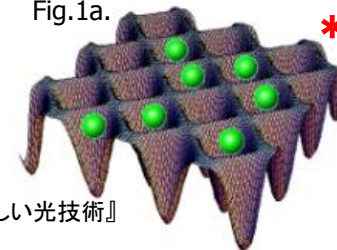
## ● 光を導き、活用する

保立 和夫 (工学部)



\*

Takamoto et al. (2005) "An optical lattice clock," *Nature* 435(7040): 321-324, p.321, Fig. 1a.



\*



## ● 時を極める

香取 秀俊 (工学部)



光産業技術振興協会編『やさしい光技術』  
オプトロニクス社、1998年  
p.24図1「光ファイバケーブル」

\*



## ● より速く、より強く

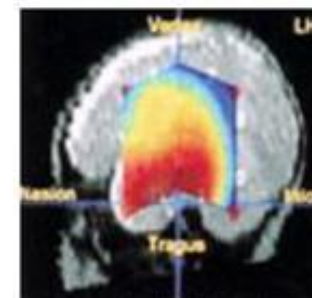
石川 顕一 (工学部)



## ● 自然や人間を光で観る—原子から精神まで

小泉 英明 (日立製作所)

LLNL  
<https://www.llnl.gov/news/newsreleases/2012/Jul/NR-12-07-01.html>



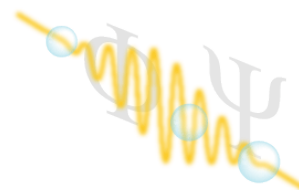
\*

小泉ら(2004)「脳と心を観る—無侵襲高次脳機能イメージング」『電子情報通信学会誌』第87巻第3号、207-214、p.212、図8(a)



## ● 微かな光の不思議な世界

小芦 雅斗 (工学部)



## ● 光のデザイン

石井 幹子 (照明デザイナー)



\*

(株)石井幹子デザイン事務所



## ● 光技術のこれから

五神 真 (理学部)



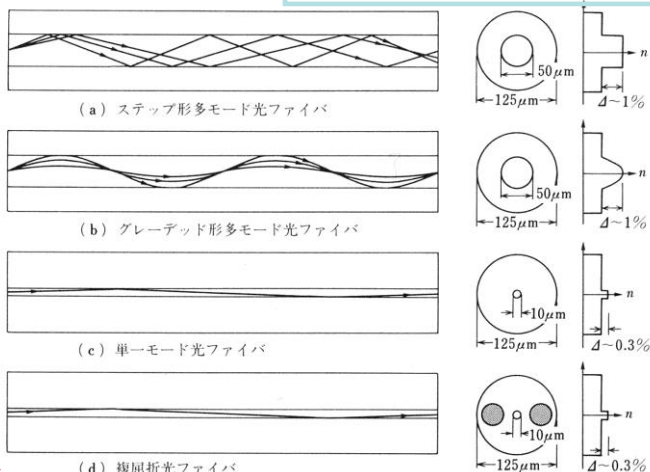
第4回(11/1):光ファイバの物理と応用

第5回(11/8):痛みのわかる材料・構造の為の光ファイバ神経網

# 光を導き、活用する 保立 和夫(工学部)

\* 保立和夫先生ご提供

光通信の低損失伝送路ー光ファイバの多様性ー高機能なセンサヘッド



\* 大越孝敬編『光ファイバセンサ』オーム社、1986年、p.19、図2・3

## 光ファイバの導波原理

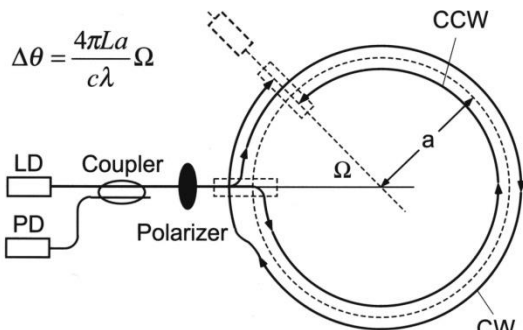
・1km長光ファイバの透明度は95% ・100Gbit/sの高速通信も可能



通信の光ファイバケーブル (光産業技術振興協会編“やさしい光技術”より)

・1,000本の光ファイバを束ねたケーブル等が、国際海底通信や光加入者網用に敷設されて活躍している。

\* 光産業技術振興協会編『やさしい光技術』オプトロニクス社、1998年、p.24、図1「光ファイバケーブル」

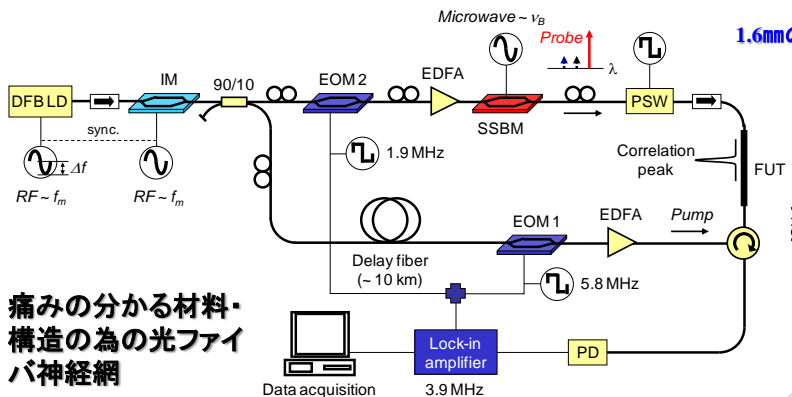


## 光ファイバジャイロの光学系構成

・長尺光ファイバコイルを左右逆回りに伝搬した2光間には、この系の慣性空間に対する角速度に比例した位相差が現れる(相対論に基づくサニャック効果) ・数年で1回転という極微小回転の測定を可能とし、航空機やロケットの慣性航法センサとして活躍

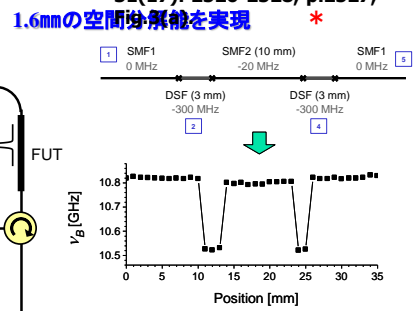


Song et al. (2006) Optics Letters 31(17): 2526-2528, p.2527,



## 痛みの分かる材料・構造の為の光ファイバ神経網

・光ファイバ中で生じる誘導ブリルアン散乱は光ファイバに加わる伸縮歪に比例した周波数シフトを示す。・位置選択的に誘導散乱を発生させる技術によって光ファイバに沿う歪分布を測定可能

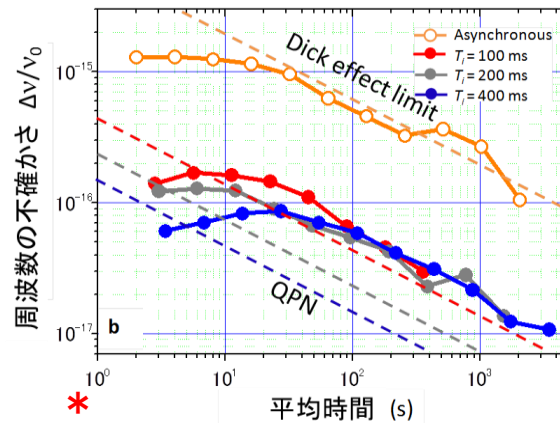
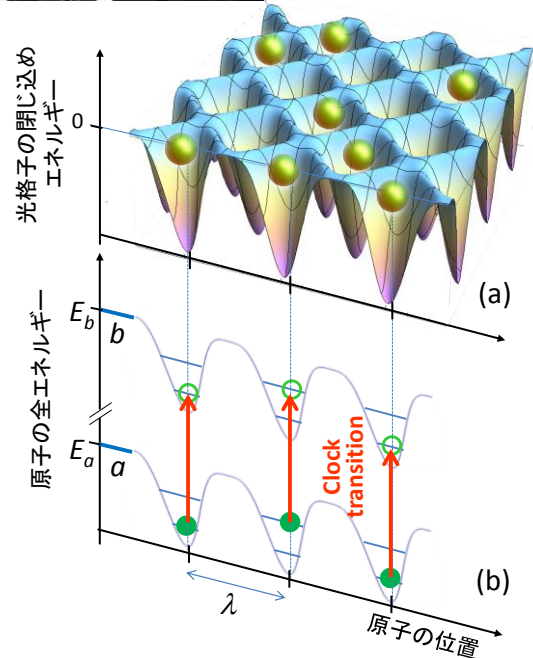




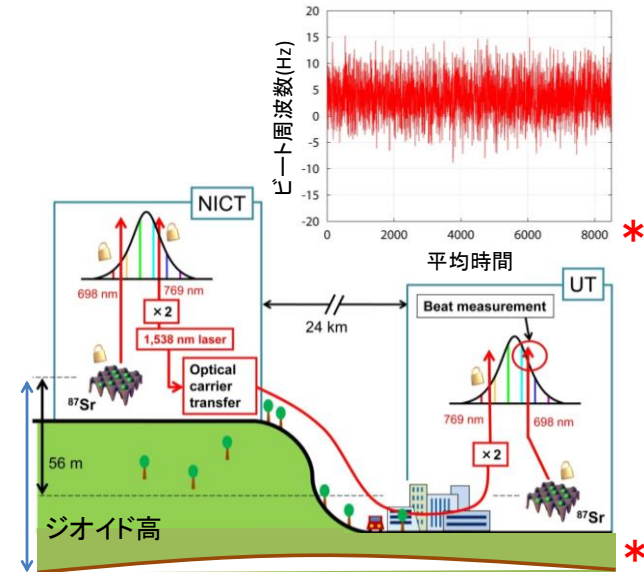
第6回(11/15)

# 時を極める 香取 秀俊(工学部)

## 光格子時計の量子限界安定度の実現



## 光格子時計のリンク： 相対論的測地学へ



平均時間2000秒で、 $1 \times 10^{-17}$ の安定度を実現( $10^3$ 原子の量子限界)。地上での高低差10cmに対応する重力シフトを観測可能→時空の歪みを見る時計へ

Takamoto *et al.* (2011) "Frequency comparison of optical lattice clocks beyond the Dick limit," *Nature Photonics* 5: 288–292, p.290, Fig.4.b.

遠隔地間の光格子時計比較で2地点の重力シフトを読み出す。次世代の原子時計は、我々の日常生活に、相対論的世界観を導入する。

Yamaguchi *et al.* (2011) "Direct Comparison of Distant Optical Lattice Clocks at the  $10^{-16}$  Uncertainty," *Applied Physics Express* 4: 082203, p.2, Figs.1, 2(a).

\* 香取秀俊(2011)「光格子時計による時空間のリアルタイム計測」『表面科学』第32巻第12号、797-800、p.799、Fig.1

魔法波長のプロトコルで、 $10^3$ – $10^6$ 個の原子を光格子に捕獲し、観測→超高精度かつ超高安定な原子時計を実現。

- 物理定数の恒常性の検証
- 相対論的測地学への応用
- 本邦発の次世代時間資源による社会インフラ整備。秒の再定義へ。

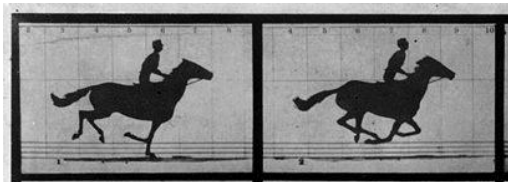




第7回(11/29):一瞬への挑戦—超短パルスレーザー—  
第8回(12/6):高エネルギーへの挑戦—高強度レーザー—

# より速く、より強く 石川 顕一(工学部)

6000分の1秒(1878年)



馬の全ての脚が地面から離れる瞬間があるか？

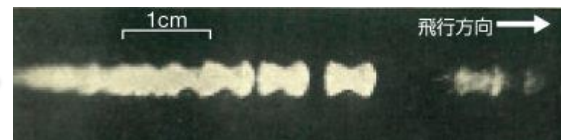
2千万分の1秒



Photo by Viditu, flickr より転載(2012/11/14)  
<http://www.flickr.com/photos/turyddu/2717120307/>  
CC BY 2.0

現代の科学者は瞬間的に光る  
レーザーを高速度カメラとして使っている

1962年



レーザーによる弾丸の  
高速度写真

\* ご提供:独立行政法人 理化学研究所  
『理研ニュース』2010年7月号  
p.8 図1「レーザーによる弾丸の光速度写真」(上)部分。

最短のレーザー → 1京分の1秒  
(光が10万分の3ミリしか進めない!)

これで何を写すの？



第7回(11/29):一瞬への挑戦—超短パルスレーザー—  
 第8回(12/6):高エネルギーへの挑戦—高強度レーザー—

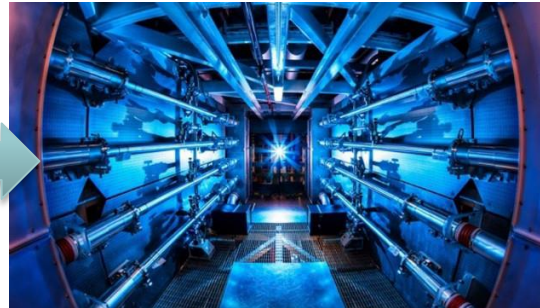
# より速く、より強く 石川 顕一(工学部)

7.5ワット



\*

1000兆ワットのレーザー



\*

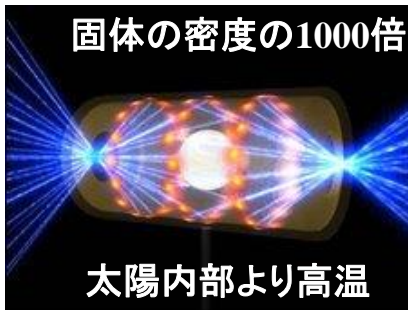
LLNL  
<https://www.llnl.gov/news/newsreleases/2012/Jul/NR-12-07-01.html>

原発100万基分  
 全世界の発電容量の300倍

どうして停電しないの?

NASA/JPL/University of Arizona  
 R.J. Hall  
 Wikimedia Commons より転載  
[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Jupiter\\_interior.png](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Jupiter_interior.png)

固体の密度の1000倍

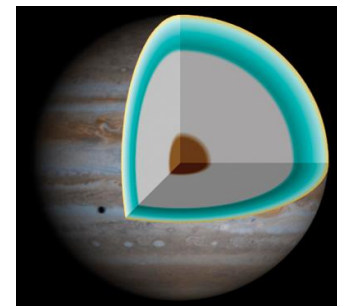


\*

LLNL

[https://lasers.llnl.gov/multimedia/photo\\_gallery/overview/?id=18&category=overview](https://lasers.llnl.gov/multimedia/photo_gallery/overview/?id=18&category=overview)

太陽内部より高温  
 レーザー核融合



惑星中心部の状態を  
 地上で実現・研究



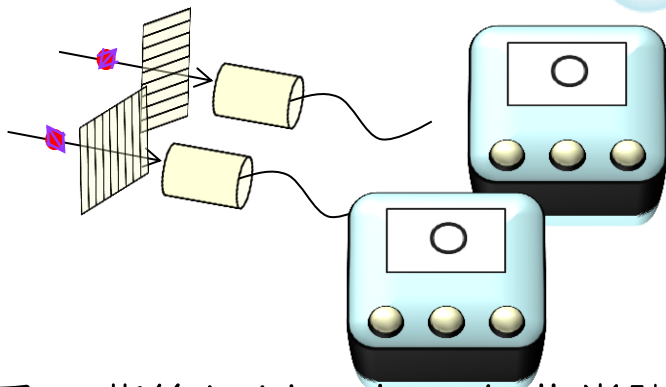
第10回(12/20):光の正体と量子論の不思議

第11回(1/10):微弱光を用いた究極の暗号

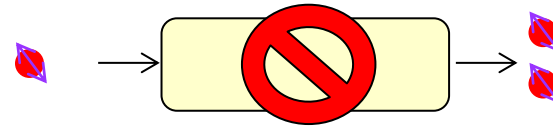
# 微かな光の不思議な世界

小芦 雅斗(工学部)

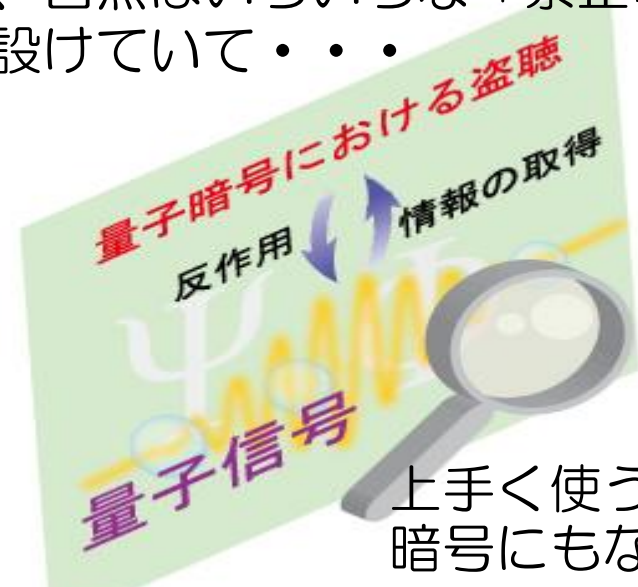
波でもあり粒子でもある  
「光」って何者でしょうか？



その背後には、とても非常識な  
「からくり」が潜んでいます。



その非常識が現実世界に現れないように、自然はいろいろな「禁止事項」を設けていて・・・



上手く使うと究極の  
暗号にもなるのです。

禅問答のような話に聞こえますが、わかりやすく説明しますのでお楽しみに！



第9回(12/13):ゲスト講演

# 一原子から精神まで

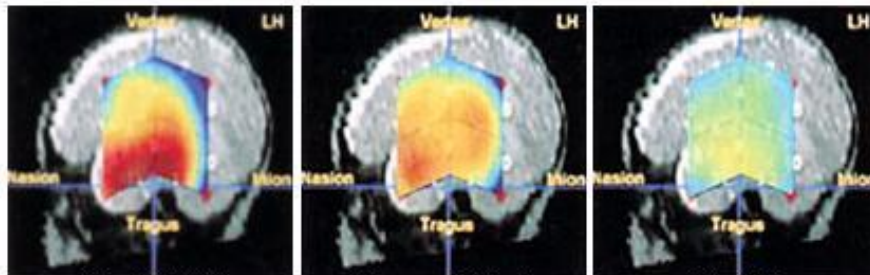
小泉 英明(日立製作所)

## 経歴

- 1971年 東京大学 教養学部基礎科学科 卒業
- 1971年 日製産業株式会社入社
- 1973年 株式会社日立製作所に転入
- 1999年 基礎研究所 所長
- 2001年 中央研究所 主管研究長
- 2003年 研究開発本部 技師長
- 2004年 日立製作所フェロー

- 「偏光ゼーマン原子吸光法」の原理を創出 (1975年)
- 超電導MRI(磁気共鳴描画)装置 (1985年)
- 近赤外光トポグラフィ法 (1995年)

光子をプローブとして様々な情報を得る。



(a) 普通会話

(b) テープ逆回し

(c) 無音

\*

小泉ら(2004)「脳と心を観る—無侵襲高次脳機能イメージング」『電子情報通信学会誌』第87巻第3号、207-214、p.212、図8(a)

新生児:生後5日以内

母国語:イタリア語

In collaboration with J.Mehler's group, International School for Advanced Studies in Italy, Proc. Natl. Acad. Sci. USA. (2003)



第12回(1/17):ゲスト講演

# 光のデザイン 石井 幹子(照明デザイナー)

## 経 歴

昭和37年 東京藝術大学美術学部卒業

昭和40年-41年 渡欧、フィンランド ヘルシンキ、ドイツ デュッセルドルフにて照明デザインに従事

昭和43年 帰国後、石井幹子デザイン事務所設立。以来、建築・都市等の照明デザインに従事

平成12年 紫綬褒章

## 主な著書・作品・受賞歴

作品(照明デザイン)ー

国内 東京タワー、東京港レインボーブリッジ、明石海峡大橋、姫路城、白川郷合掌集落

函館市、長崎市等の都市景観照明、愛・地球博会場照明

オペラ「蝶々夫人」(日伊共同制作)、横浜三溪園「あかり夢幻能」、

東京国立博物館「光彩時空」 他

海外 ジェッタ迎賓館(サウジアラビア)、ノースウェスタン生命保険ビル(アメリカ合衆国)、

メルボルンセントラル(オーストラリア)、パンパシフィックホテル(シンガポール)、

コンベンション・エキジビジョンセンター(香港) 他



写真:(株)石井幹子デザイン事務所



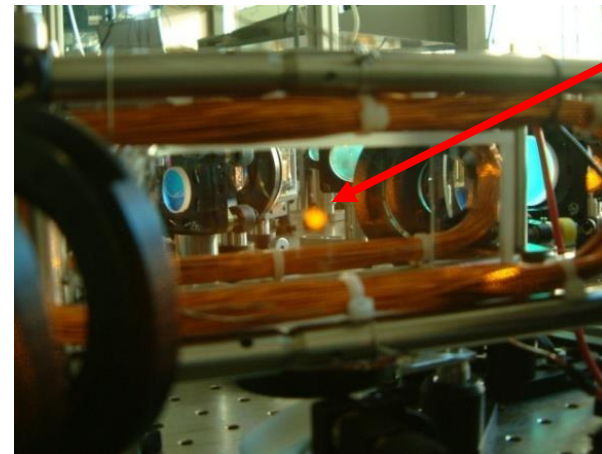
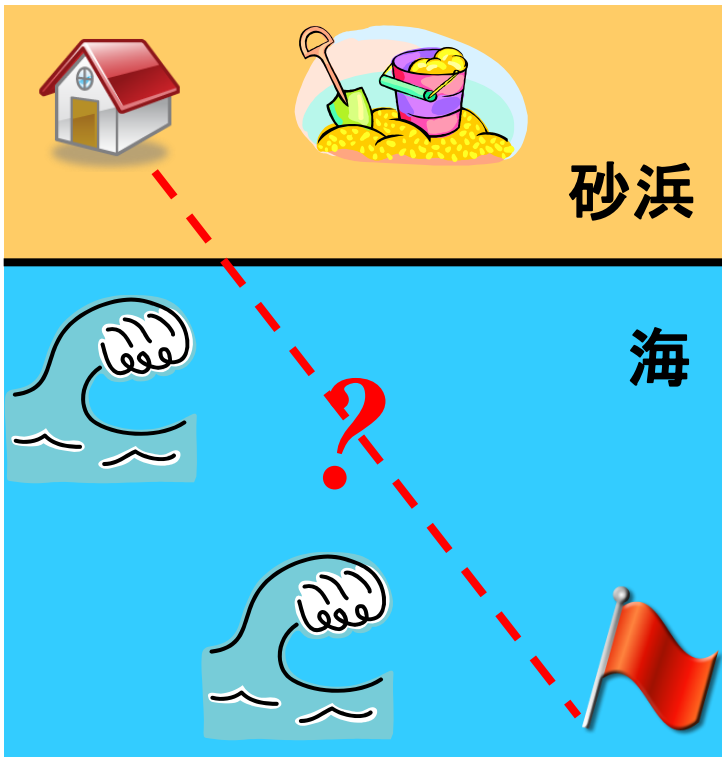
第2回(10/18):光学と力学、第3回(10/25):絶対零度への挑戦

# 自然の理解を進めた光技術

井上 慎(工学部)

## 絶対零度への挑戦

最も速く行くには？

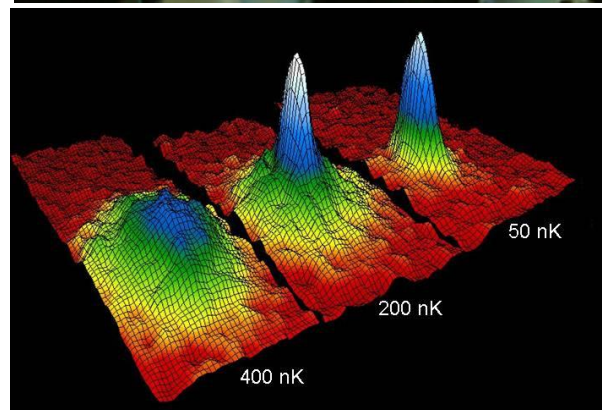


原子集団

レーザー冷却

\*

井上慎先生ご提供



ボース・  
アインシュタイン  
凝縮



NIST/JILA/CU-Boulder

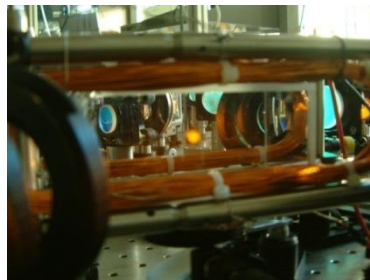
[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bose\\_Einstein\\_condensate.png](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bose_Einstein_condensate.png)

# 講義内容



## ● 自然の理解を進めた光技術

井上 慎 (工学部)



\* 井上慎先生ご提供



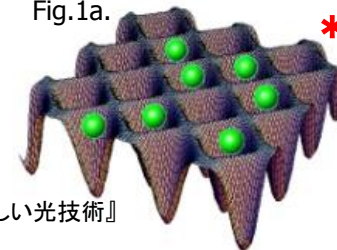
## ● 光を導き、活用する

保立 和夫 (工学部)



\*

Takamoto et al. (2005) "An optical lattice clock," *Nature* 435(7040): 321-324, p.321, Fig. 1a.



\*



## ● 時を極める

香取 秀俊 (工学部)



光産業技術振興協会編『やさしい光技術』  
オプトロニクス社、1998年  
p.24図1「光ファイバケーブル」

\*



## ● より速く、より強く

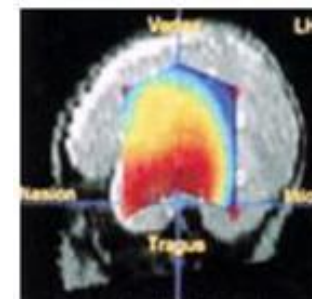
石川 顕一 (工学部)



## ● 自然や人間を光で観る—原子から精神まで

小泉 英明 (日立製作所)

LLNL  
<https://www.llnl.gov/news/newsreleases/2012/Jul/NR-12-07-01.html>



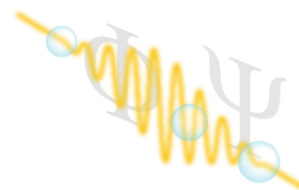
\*

小泉ら(2004)「脳と心を観る—無侵襲高次脳機能イメージング」『電子情報通信学会誌』第87巻第3号、207-214、p.212、図8(a)



## ● 微かな光の不思議な世界

小芦 雅斗 (工学部)



## ● 光のデザイン

石井 幹子 (照明デザイナー)



\*

(株)石井幹子デザイン事務所



## ● 光技術のこれから

五神 真 (理学部)