



# 量子と光

## - 究極のミクロの世界を探る -

代表教員：鳥井寿夫(16-224A)  
ytorii@phys.c.u-tokyo.ac.jp

写真：プリズムによる光の分散 (撮影：伊知地国夫)

# 講義計画

- 10月10日(金) ガイダンス、鳥井(光とは何か?)
- 10月17日(金) 鳥井(レーザー冷却、BEC)
- 10月24日(金) 鳥井(特殊相対論のエッセンス)
- 10月31日(金) 沙川(量子力学における重ね合わせ)
- 11月7日(金) 沙川(EPRパラドクス)
- 11月14日(金) 沙川(ベルの不等式)
- 11月28日(金) 加藤(素粒子と場の量子論)
- 12月5日(金) 加藤(超弦理論の挑戦)
- 12月12日(金) 松田(標準理論の限界をミュオニウム原子で探る)
- 12月19日(金) 松田(宇宙進化の謎を反水素原子で探る)
- 1月9日(金) 鳥井(量子消去実験、霧箱による素粒子の観測)
- 1月23日(金) 久我(もっと光を!)
- 1月27日(火) 久我(1個光を!)

# 平成25年度冬学期 総合科目E 「量子と光－究極のミクロの世界を探る－」

金曜5限 @5号館531教室

代表教員:鳥井 寿夫 ([vtorii@phys.c.u-tokyo.ac.jp](mailto:vtorii@phys.c.u-tokyo.ac.jp))

## <講義概要>

「光の正体は何か？」現代物理学の礎である量子論と相対論は、この問いに端を発して約100年前に誕生した。そして量子論と相対性は、「場」というものを量子的に扱う「場の量子論」によって融合され、この場の量子論が、現在、私たちが自然界を記述する際の言葉となっている。光に限らず全ての粒子は、波(場)と粒子の性質を合わせ持つ。近年、計測技術の発展により個々の光子や原子を操作することが可能となり、これまで思考実験でしかなかった実験(例えばシュレーディンガーの猫状態の生成)が行えるようになってきた。2012年のノーベル賞はまさしくそのような技術の開発に対して贈られた。2012年はまた、ヒッグス粒子とみられる新粒子の発見で世界中が沸いた年でもあった。ヒッグス粒子は、場の量子論を基に築かれた「標準模型」で存在が予言されていた最後の素粒子である。しかしながら、標準模型では説明のつかない謎(暗黒物質、暗黒エネルギー、消えた反物質など)は数多く残されている。我々はまた究極のミクロの理論を知らない。本講義では、駒場で究極のミクロ世界を探求する5人の物理教員(実験家および理論家)が、「量子とは何か？」という基本的な問いかけから「標準理論を越える理論」まで、演示実験も適宜交えながら13回にわたって丁寧に解説する(各教員の詳しい講義概要は、Utask-Webを参照のこと)。人類が到達した驚愕すべき自然観を十分味わって欲しい。

## <成績評価>

5名の教員から2名を選び、レポート問題を提出する。(3名以上選んでもよい。その場合は、評価の高かった2名分のレポートで成績をつける。) 提出先は教務課(アドミニ棟)のレポートボックス。締め切りは以下の通り。

2年生:2月13日(木)

1年生:2月20日(木)

## <講義計画>

回	日付	担当教員	内容	講義資料・レポート問題
1	10/11	鳥井寿夫	ガイダンス、光の正体は何か？	<a href="#">講義資料</a>
2	10/18	鳥井寿夫	宇宙で最も冷たい物質－レーザー冷却が拓く物理	<a href="#">講義資料</a>
3	10/25	久我隆弘	なぜ「1個」が必要なのか、重要なのか －二体相互作用は物理学の基本－	<a href="#">講義資料</a>
4	11/1	久我隆弘	やっぱりアンサンブル(集団)も重要？ －物理定数は本当に普遍なのか、精密測定最前線	<a href="#">講義資料</a> <a href="#">レポート問題</a>
5	11/8	沙川貴大	量子力学における重ね合わせ－その概念と計算法	
6	11/15	沙川貴大	EPRパラドックス－アインシュタインの問題提起	
7	11/29	沙川貴大	ベルの不等式－実験で実在は見えるか？	<a href="#">レポート問題</a>
8	12/6	松田恭幸	標準理論の限界をミュオニウム原子で探る	<a href="#">講義資料</a>
9	12/13	鳥井寿夫	量子を体感するデモ実験(量子消去実験、霧箱による素粒子の観測)	<a href="#">実験資料.pdf</a> <a href="#">レポート問題</a>
10	12/20	松田恭幸	宇宙進化の謎を反水素原子で探る	<a href="#">講義資料</a> <a href="#">レポート問題</a>
11	1/10	大川祐司	素粒子論:自然界は何からできていてどのような法則に従っているのか	<a href="#">講義資料</a>
12	1/24	大川祐司	場の量子論:量子力学と特殊相対性理論の融合	
13	1/27(月)	大川祐司	超弦理論:量子力学と一般相対性理論の融合へのアプローチ	<a href="#">講義資料</a> <a href="#">レポート問題</a>

# 成績評価

- 5名の教員から2名を選んで、レポート(A4で2～3枚程度)を提出3名以上選んでもよい。その場合は、評価の高かった2名分のレポートで成績をつける。。
- レポート問題は、各教員の講義中もしくは講義後にホームページで公開する。
- レポート提出先は教務課(アドミニ棟)のボックス。

# 光の正体は何か？

平成25年10月10日

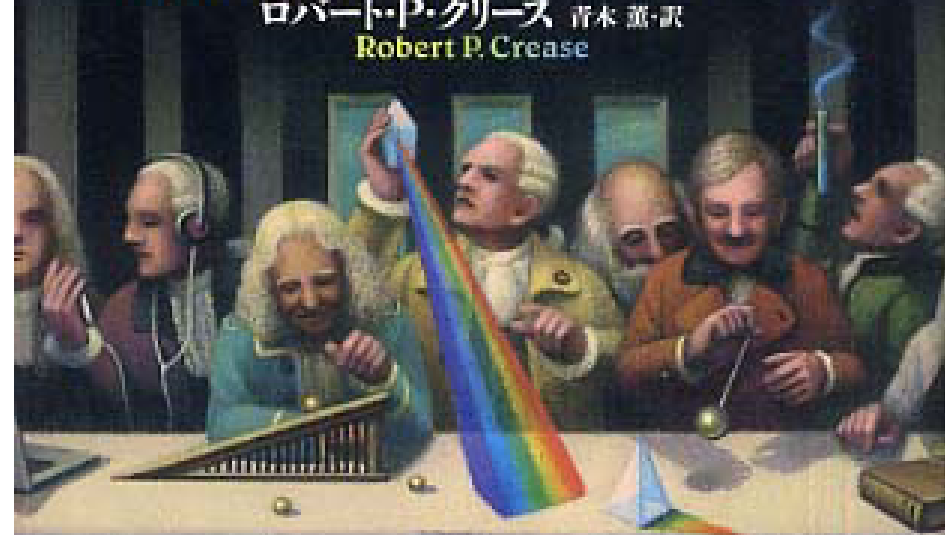
総合科目E 「量子と光」 第一回

鳥井寿夫

# 世界でもっとも美しい 10の科学実験

The Prism and the Pendulum  
The Ten Most Beautiful Experiments in Science

ロバート・P・クリース 青木 薫・訳  
Robert P. Crease



日経BP社

## 目次

### 第1章 世界を測る

エラステネスによる地球の外周の長さの測定

### 第2章 球を落とす

斜塔の伝説

### 第3章 アルファ実験

ガリレオと斜面

### 第4章 決定実験

ニュートンによるプリズムを使った太陽光の分解

### 第5章 地球の重さを量る

キャヴェンディッシュの切り詰めた実験

### 第6章 光という波

ヤングの明快なアナロジー

### 第7章 地球の自転を見る

フーコーの崇高な振り子

### 第8章 電子を見る

ミリカンの油滴実験

### 第9章 わかりはじめることの美しさ

ラザフォードによる原子核の発見

### 第10章 唯一の謎

一個の電子の量子干渉

小学生からわかる

# 光の世界

ニュートン・アインシュタイン・現代

2006年

8月2日(水)



9月10日(日)

## 東京大学駒場博物館



休館日 火曜日  
開館時間 10:00-18:00  
(入館は 17:30 まで)  
入館料 無料

T 153-8902 東京都目黒区駒場 3-8-1  
TEL: 03-6454-6139 FAX: 03-6454-4829  
<http://tdgl.e.u-tokyo.ac.jp/tb/moku/>

開催期間中に行われるイベント情報▶▶▶

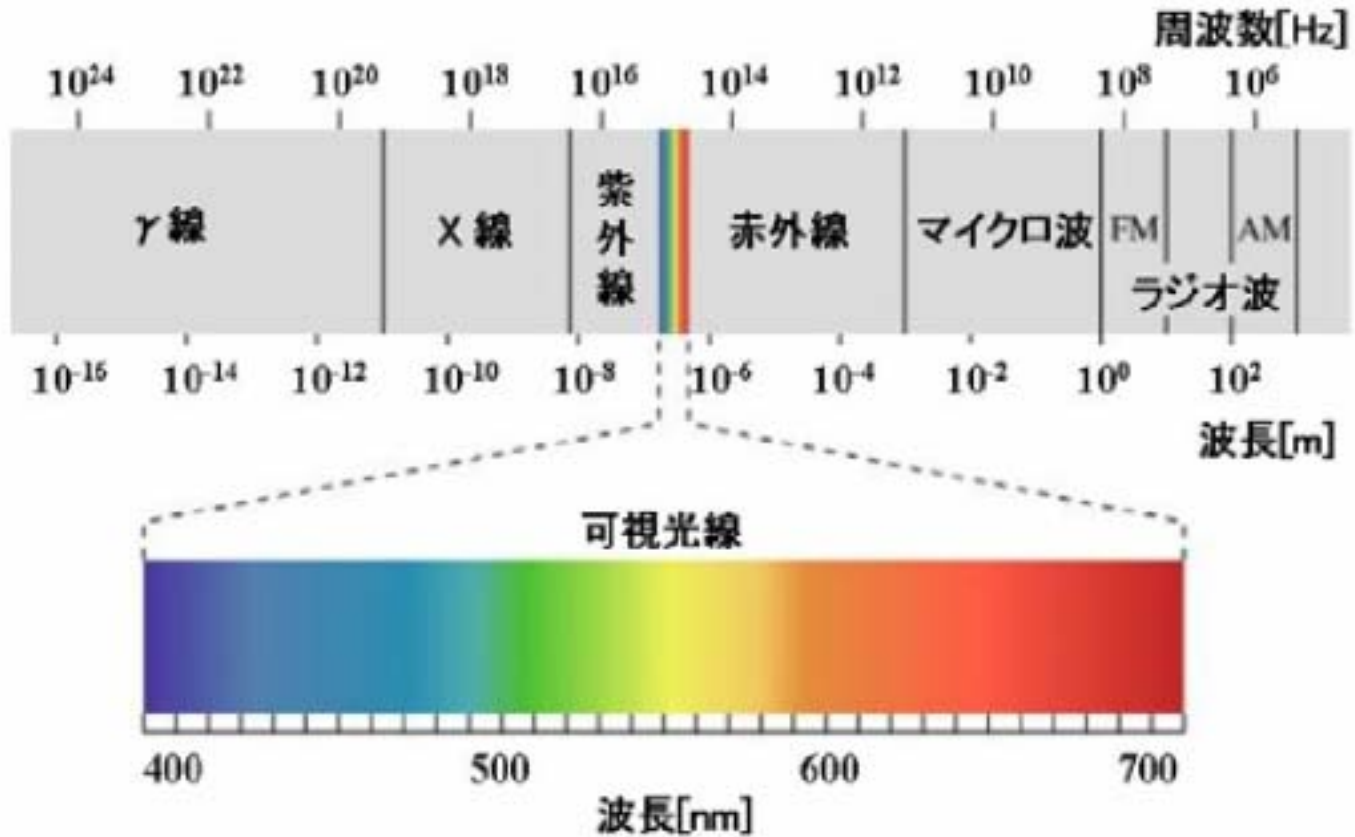


写真：プリズムによる光の分散 (撮影：伊知地剛夫)

- 主催 東京大学 大学総合文化研究所・数理学部 自然科学博物館
- 共催 東京大学 数理学部 物理学会  
東京大学 大学総合文化研究所・数理学部 共催 技術系
- 協力 東京大学 数理学部 数理学部附属機関  
NPO 法人 ガリレオ工房  
駒場友の会  
株式会社ベネッセコーポレーション  
オリンパスメディカルシステムズ株式会社
- 協賛 中村理科工業株式会社  
ケニス株式会社  
有限会社沢野興産  
東京大学工学部電気系 3 学科

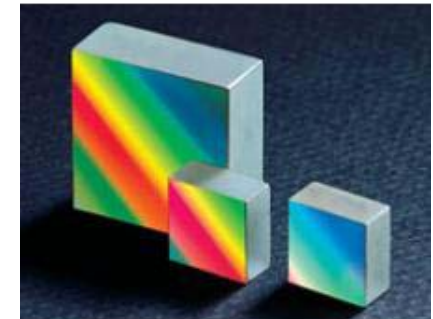


# 光は電磁波の一種





# 分光器 (スペクトルに分解する装置)



# 光の3原色

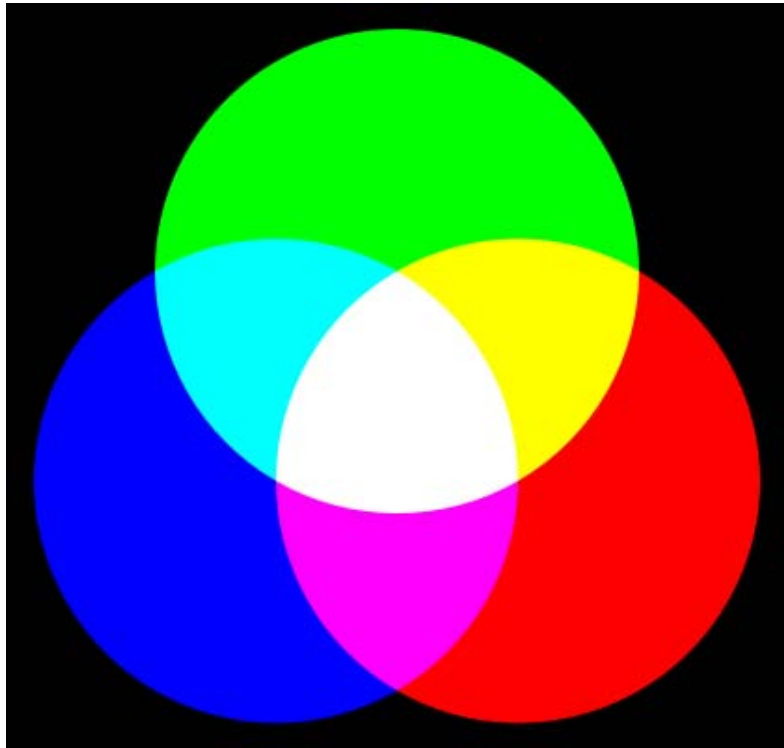
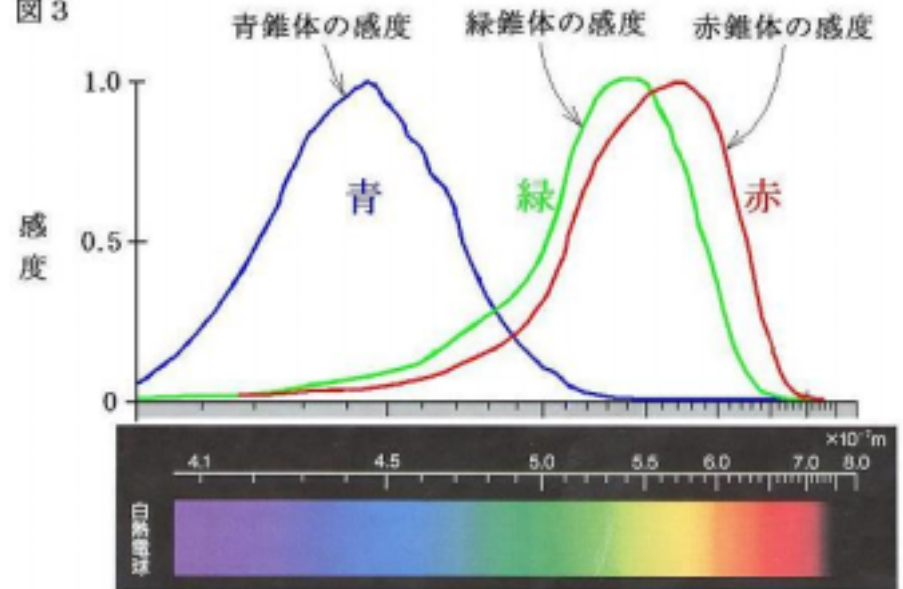
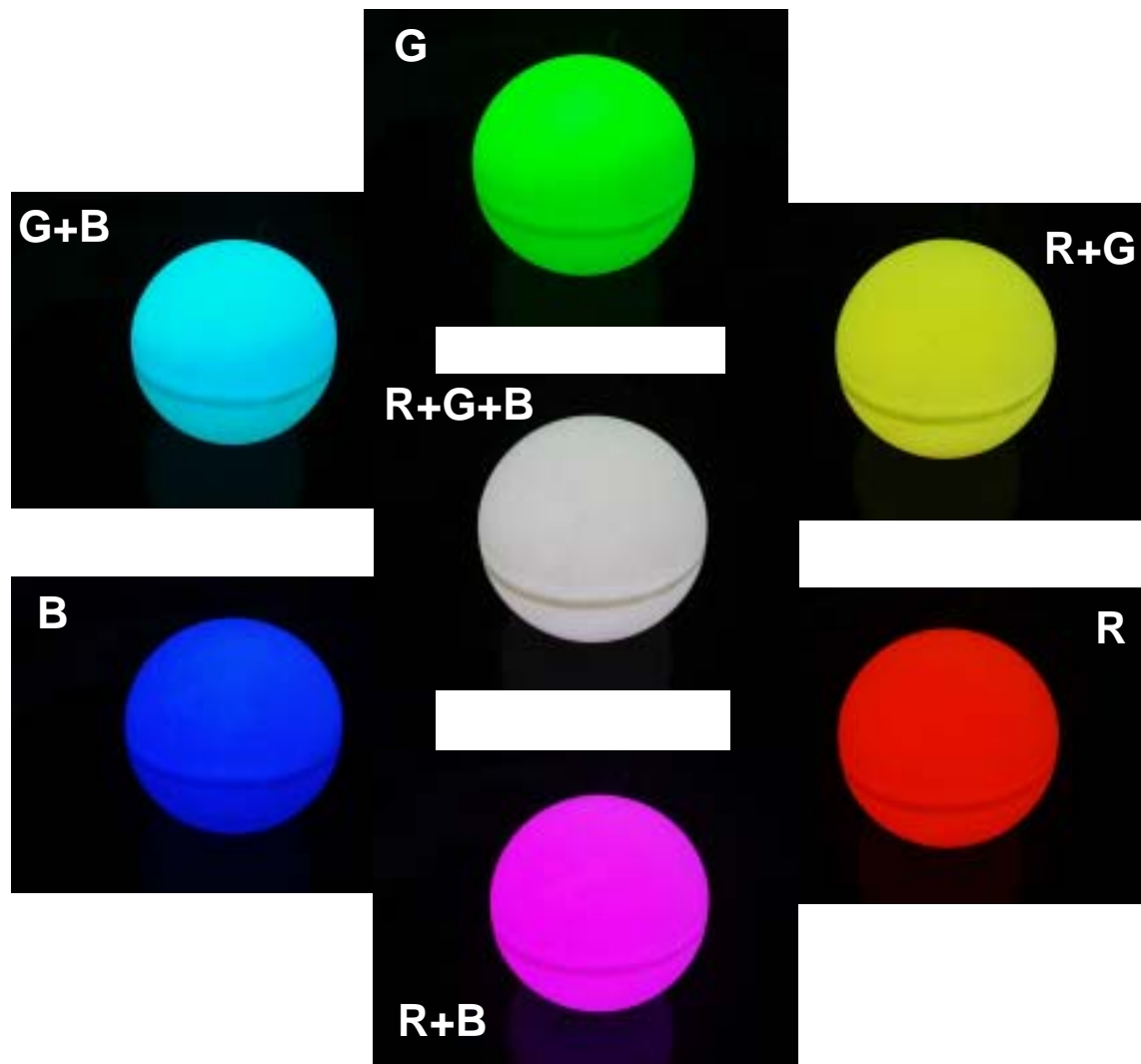
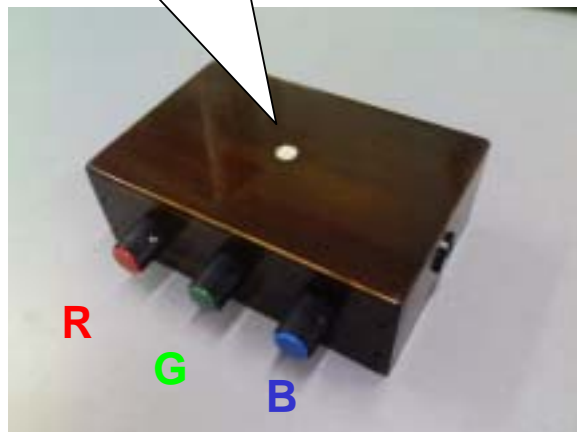


図3



<http://fnorio.com/0074trichromatism1/trichromatism1.html>

# RGB LEDを用いた光の3原色の実験





The Nobel Prize in Physics 2014

Isamu Akasaki, Hiroshi Amano, Shuji Nakamura

Share this:     1.3K 

# The Nobel Prize in Physics 2014



Photo: Yasuo  
Nakamura/Meijo  
University

**Isamu Akasaki**

Prize share: 1/3



Ill. N. Elmehed. © Nobel  
Media 2014

**Hiroshi Amano**

Prize share: 1/3



Ill. N. Elmehed. © Nobel  
Media 2014

**Shuji Nakamura**

Prize share: 1/3

The Nobel Prize in Physics 2014 was awarded jointly to Isamu Akasaki, Hiroshi Amano and Shuji Nakamura *"for the invention of efficient blue light-emitting diodes which has enabled bright and energy-saving white light sources"*.

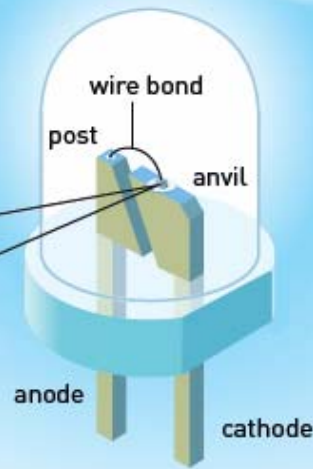
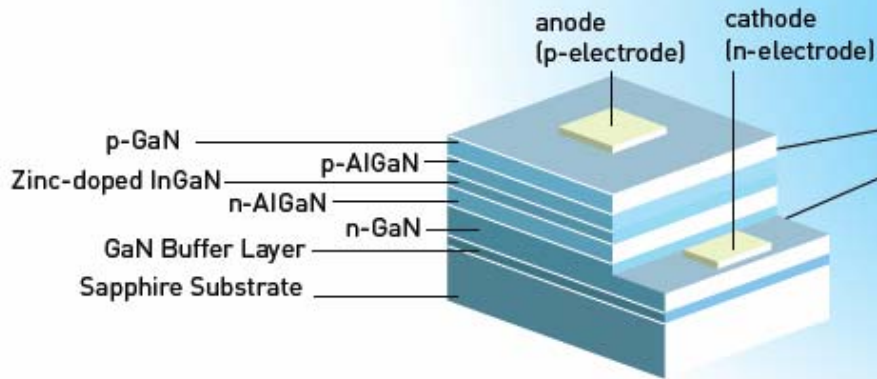
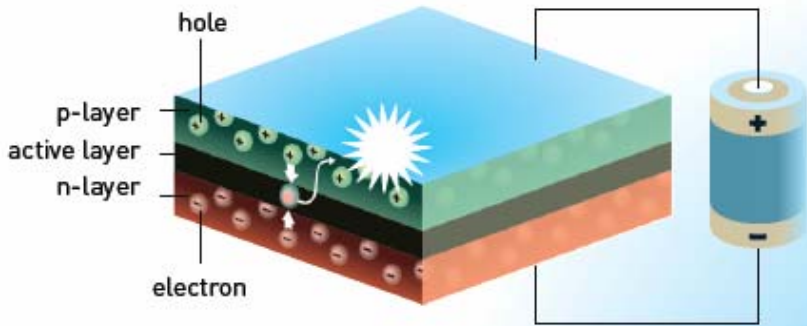


Illustration: © Johan Jamestad/The Royal Swedish Academy of Sciences

[http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/2014/diode.pdf](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2014/diode.pdf)

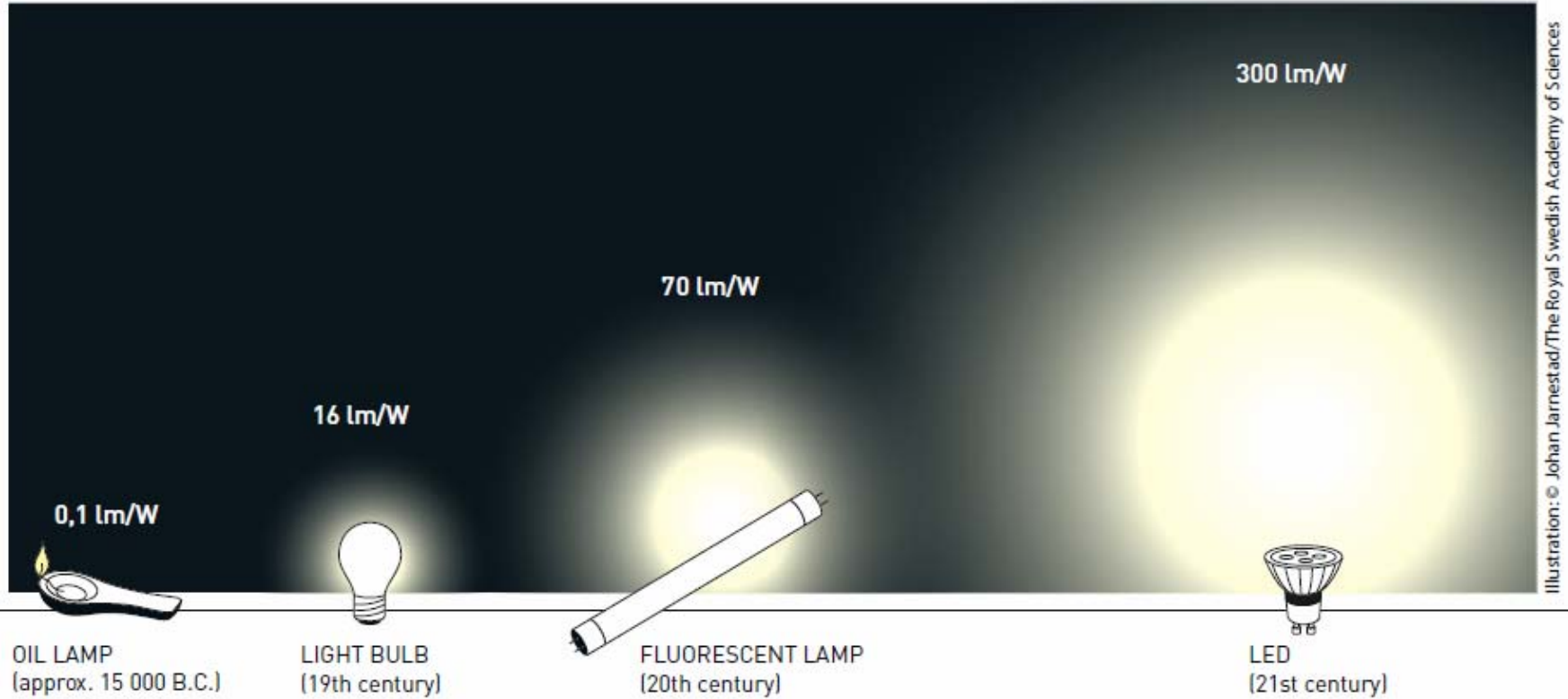
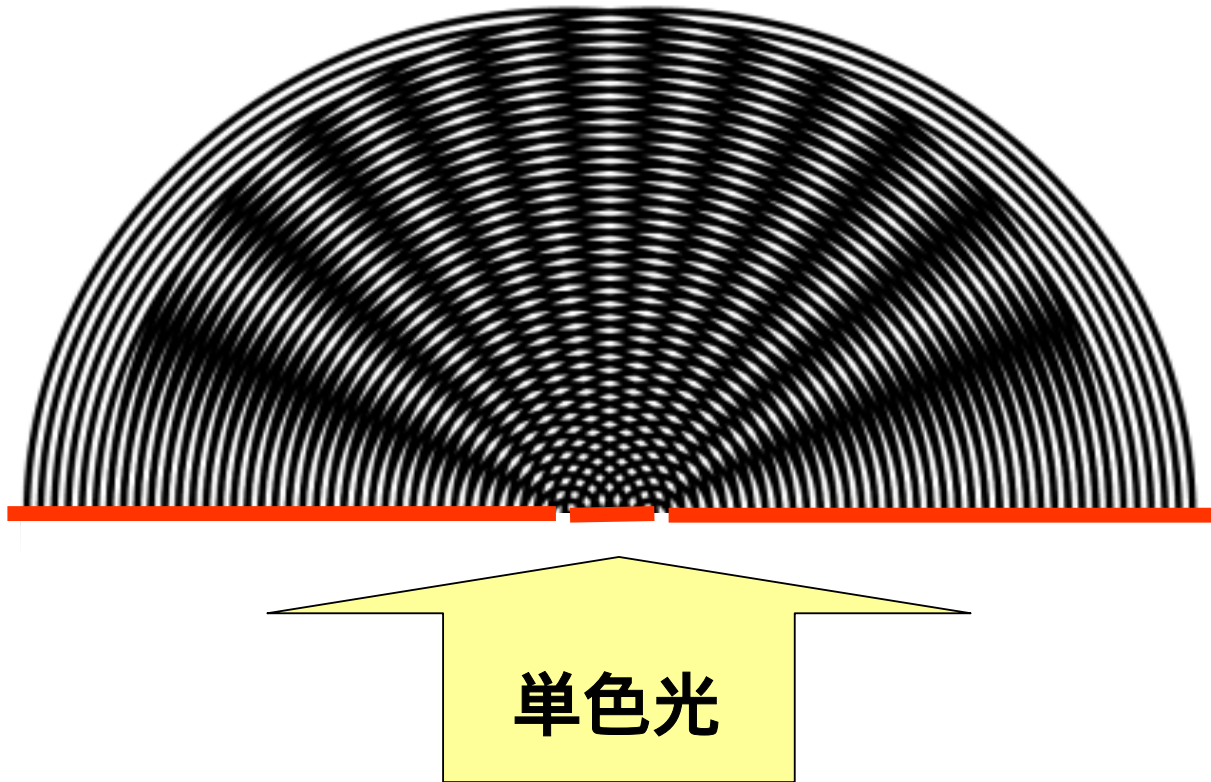


Illustration: © Johan Järnestad/The Royal Swedish Academy of Sciences

[http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/2014/efficiency.pdf](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2014/efficiency.pdf)



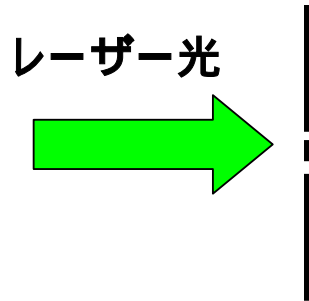
# 光の波動性ーヤングの干渉ー



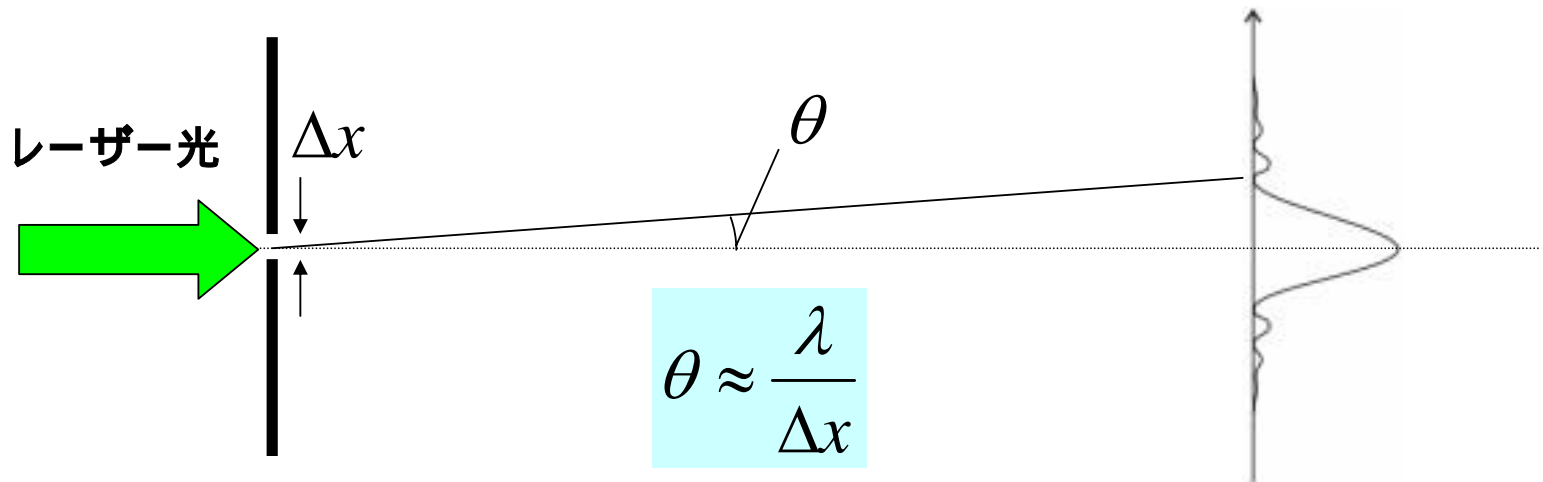


# ここで実験

- 二重スリットを使ったヤングの干渉実験



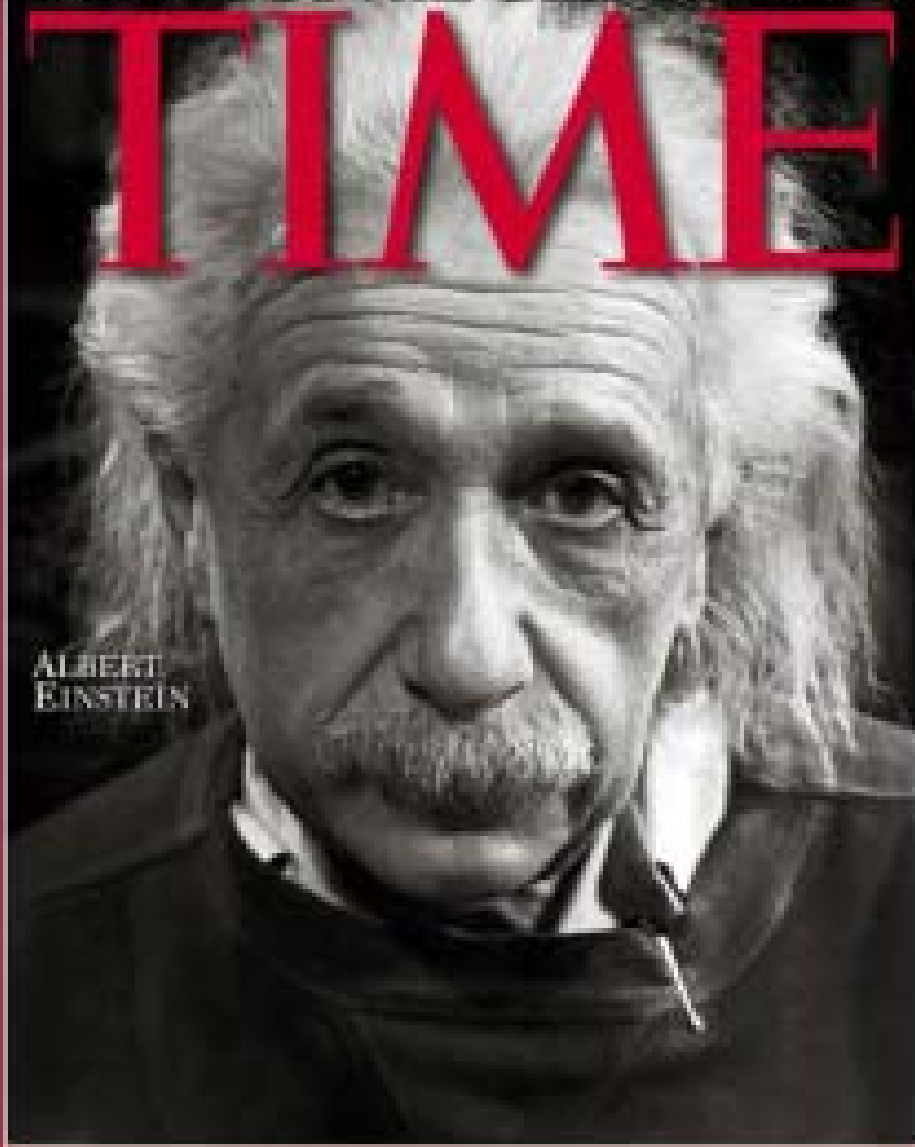
- ノギスを使った回折パターンを観測



PERSON OF THE CENTURY

TIME

ALBERT  
EINSTEIN



# アインシュタインとえば

- 特殊相対性理論 (1905)
  - ローレンツ収縮
  - 時間の遅れ
  - 質量とエネルギーの等価性
- 一般相対性理論 (1915)

$$E = mc^2$$

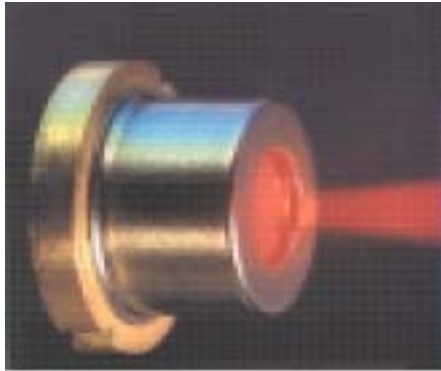
相対論

- 光量子仮説 (1905)
- 自然放出、誘導放出 (レーザーの原理) の導入 (1917)
- ボース・アインシュタイン凝縮 (1924)

量子論

# 光(電磁波)にも粒子性がある

光の波長を  $\lambda$ 、周波数を  $\nu$  とすると、光は



エネルギーが  $E = h\nu$

(アインシュタイン1905)

運動量が  $p = \frac{h}{\lambda}$

(アインシュタイン1916)

を持つ粒子のように振舞う(光の粒子性)

この光の粒を「光子」と呼ぶ

# 量子力学の形成

- 1900 作用量子 (プランク)
- 1905 光量子仮説、特殊相対性理論 (アインシュタイン)

$$E = h\nu$$

$$E = mc^2$$

- 1913 ボーア原子模型 (ボーア)

- 1923 物質波の概念 (ド・ブロイ)

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

- 1924 ボース統計、ボース・アインシュタイン凝縮

- 1925 行列力学 (ハイゼンベルグ)

- 1926 波動力学 (シュレーディンガー方程式)

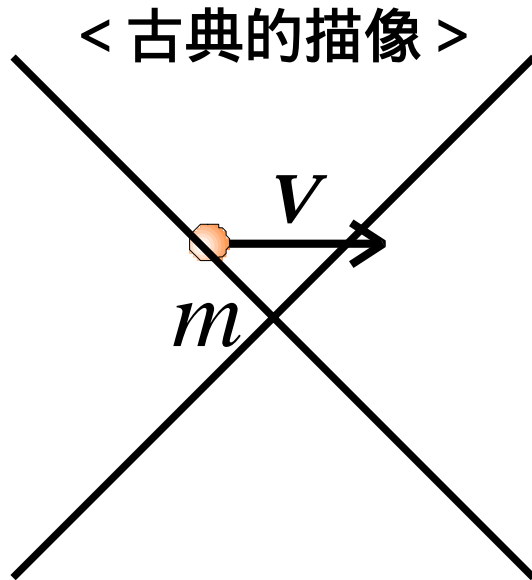
$$\hat{H}\Psi(\mathbf{r}, t) = i\hbar \frac{\partial \Psi(\mathbf{r}, t)}{\partial t}$$

- 1927 フェルミ統計 (フェルミ)

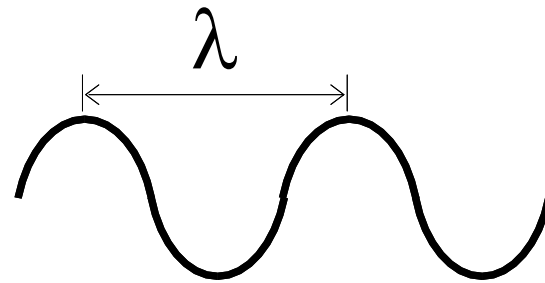
- 1928 相対論的量子力学 (ディラック方程式)

# 波と粒子の二重性

粒子の状態は、波(波動関数)で記述され、  
粒子として観測される



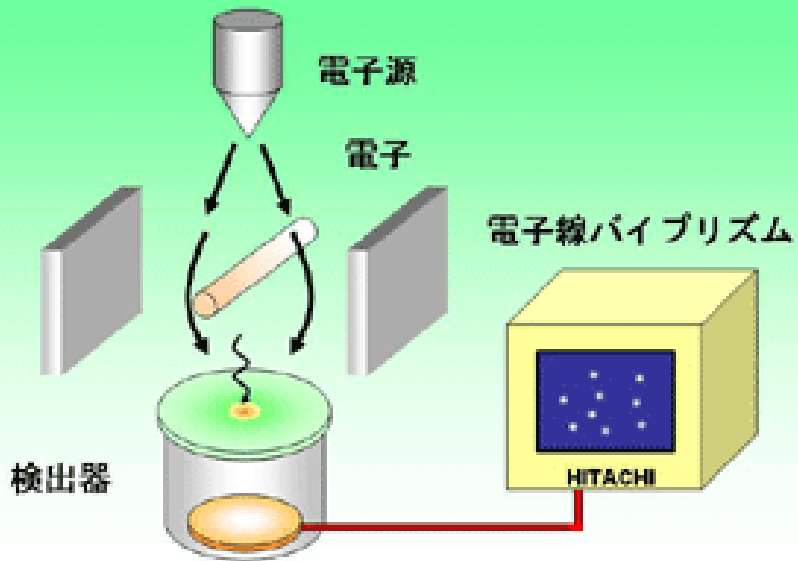
< 量子力学的描像 >



ド・ブロイ波長:  $\lambda = \frac{h}{p}$  運動量  
( $p = mv$ )

( $h = 6.6 \times 10^{-34}$  Js: プランク定数)

# 電子線のヤングの干渉実験

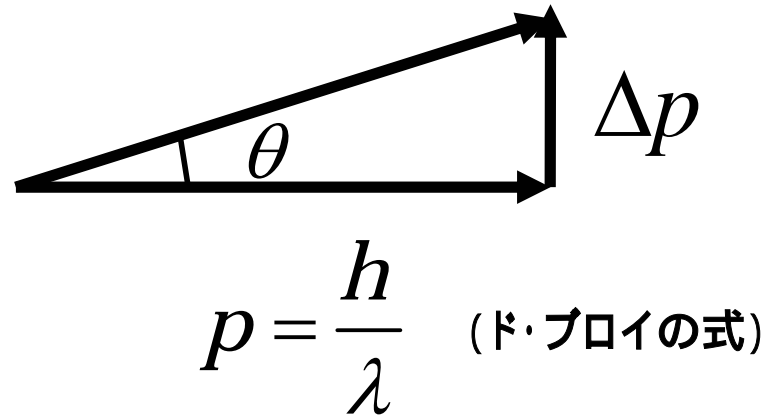
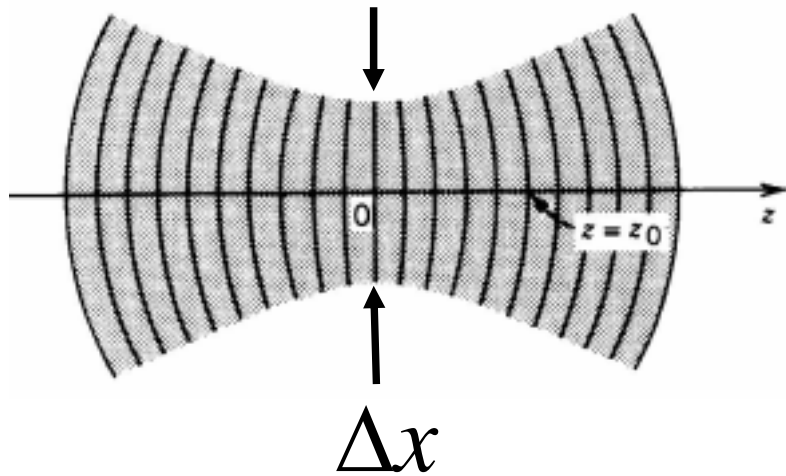


(c) 1989 Hitachi, Ltd. All rights reserved.

<http://www.hitachi.co.jp/rd/research/em/doubleslit.html>



# ドブロイの式と不確定性原理



$$\theta = \frac{\lambda}{\Delta x} = \frac{\Delta p}{p} \rightarrow \Delta x \Delta p \approx h$$

# ハイゼンベルグの不確定性原理

位置と運動量が同時に確定した状態は存在せず、それぞれの不確かさ  $x$ 、 $p$  は以下の不等式に従う

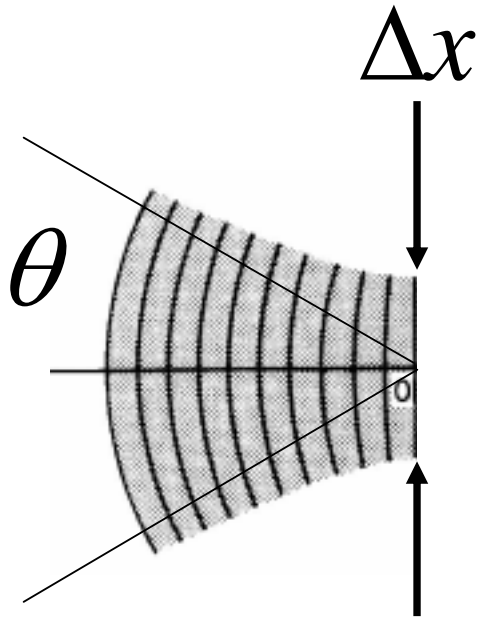
$$\Delta x \Delta p \geq \frac{h}{4\pi}$$

( $h = 6.6 \times 10^{-34}$  Js: プランク定数)



1925年(24歳) 行列力学  
1927年(26歳) 不確定性原理の提唱  
1932年(31歳) ノーベル物理学賞

# レーザー光はどこまで絞れるのか？



$$\theta \approx \frac{\lambda}{\Delta x} \rightarrow \Delta x \approx \frac{\lambda}{\theta}$$

$$0 < \theta < \frac{\pi}{2} \text{ より } \Delta x \approx \lambda$$

ビームは波長以下には絞れない！

# 光の波長とスポットサイズの関係

