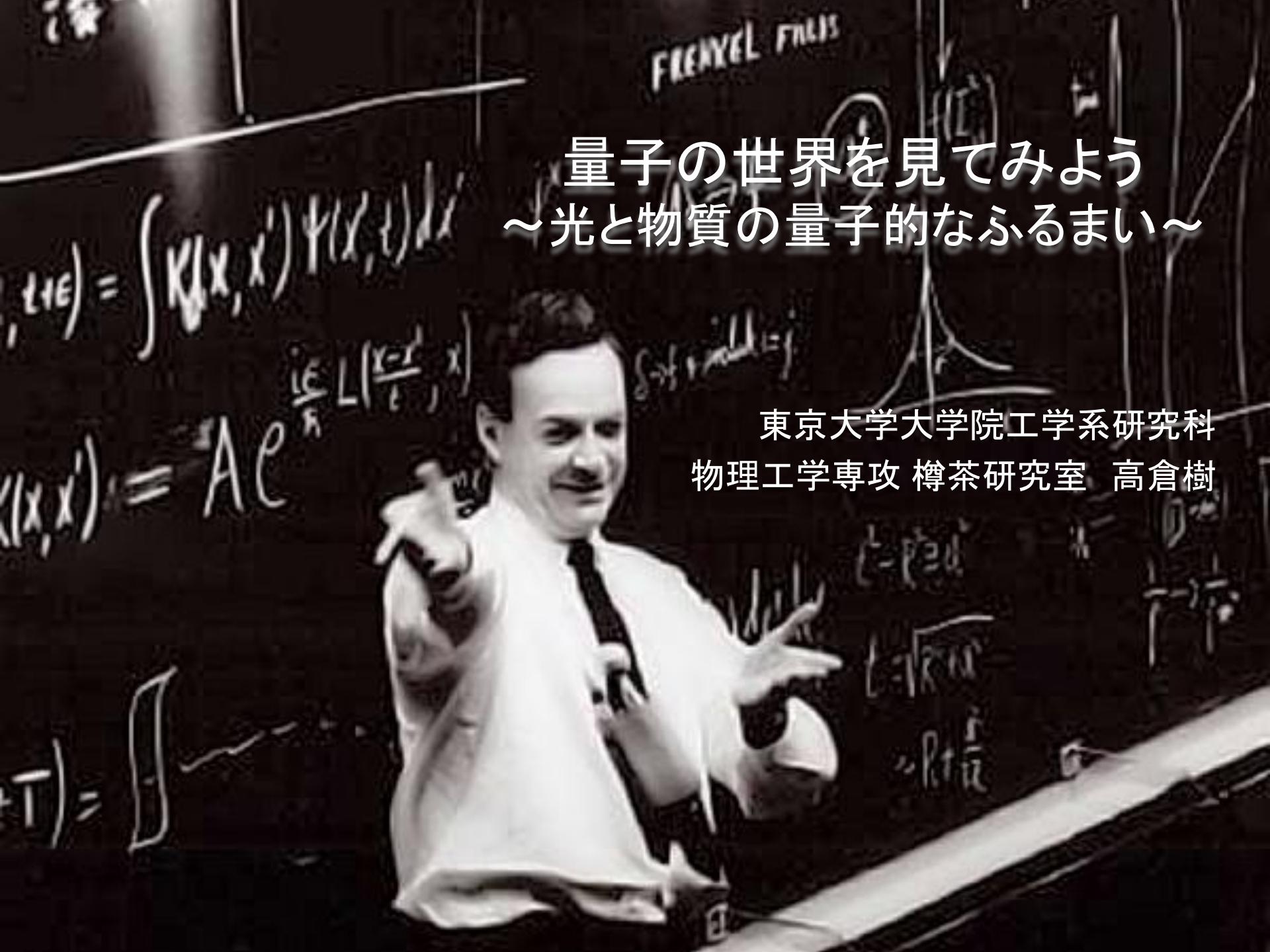
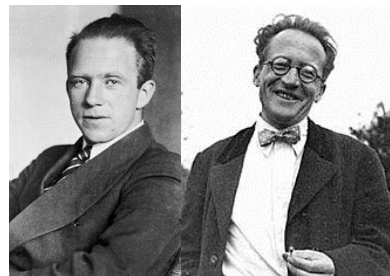


量子の世界を見てみよう ～光と物質の量子的なふるまい～

東京大学大学院工学系研究科
物理工学専攻 樽茶研究室 高倉樹



量子力学ってどんな物理？



Heisenberg Schrödinger

量子力学

(1900~)

小さい

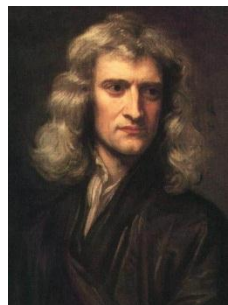
相対論的
量子力学

(1927~)



Dirac

遅い



Newton

古典力学

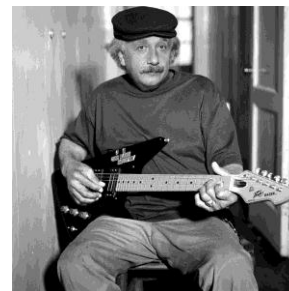
(1600年代~)

相対論

(1905~)

大きい

速い(光速)



Einstein

原子や分子、電子、素粒子などの非常に小さなスケールの現象を扱う学問

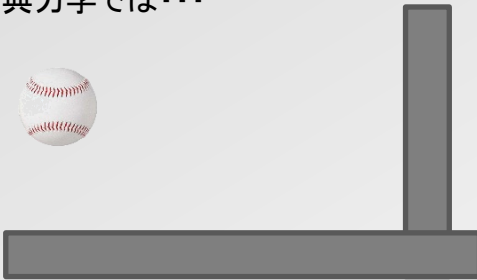
量子の世界で起こる不思議な現象

ミクロな世界ではマクロな世界では考えにくいような現象が起き、
それらは量子力学の考え方で説明される！

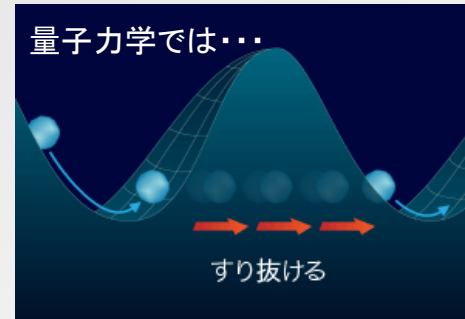
トンネル効果

電子機器の中では電子のトンネル効果が頻繁に起こっている！

古典力学では...



量子力学では...



粒子性と波動性



粒子としての性質と波としての性質を両立する

状態の重ね合わせ

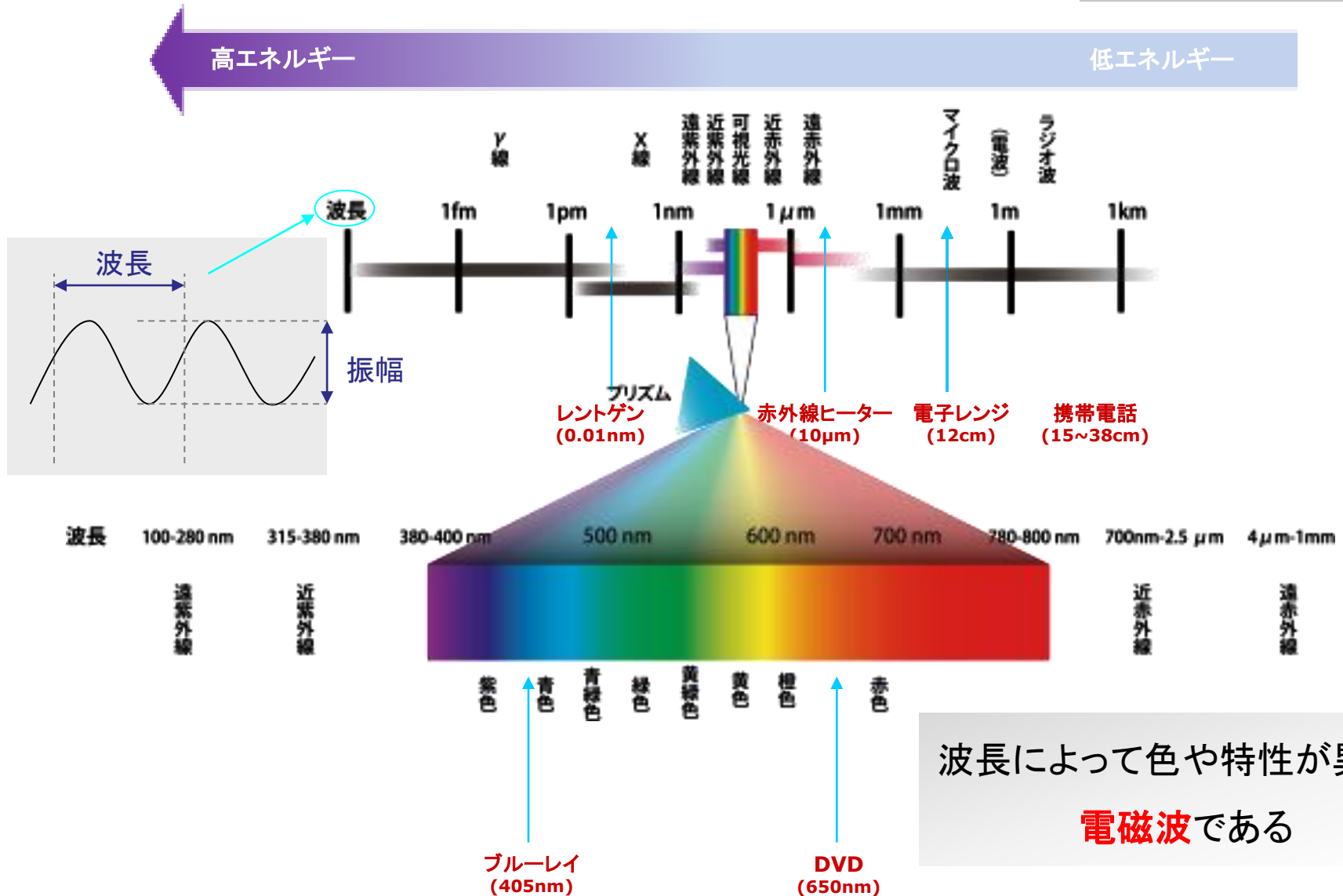


複数の状態を同時に
取りうる
観測によって確率的に
定まる

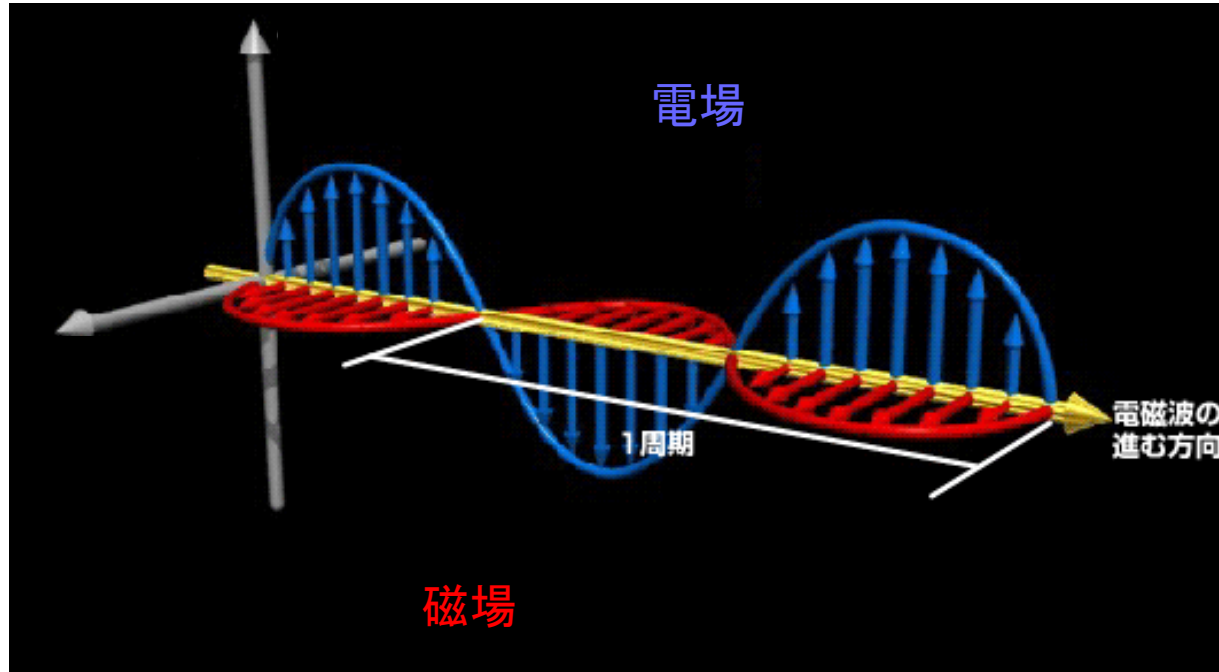


粒子性と波動性

まずは「光」を題材に考えてみよう



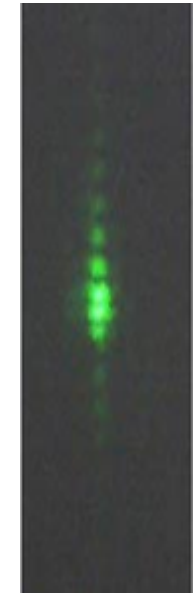
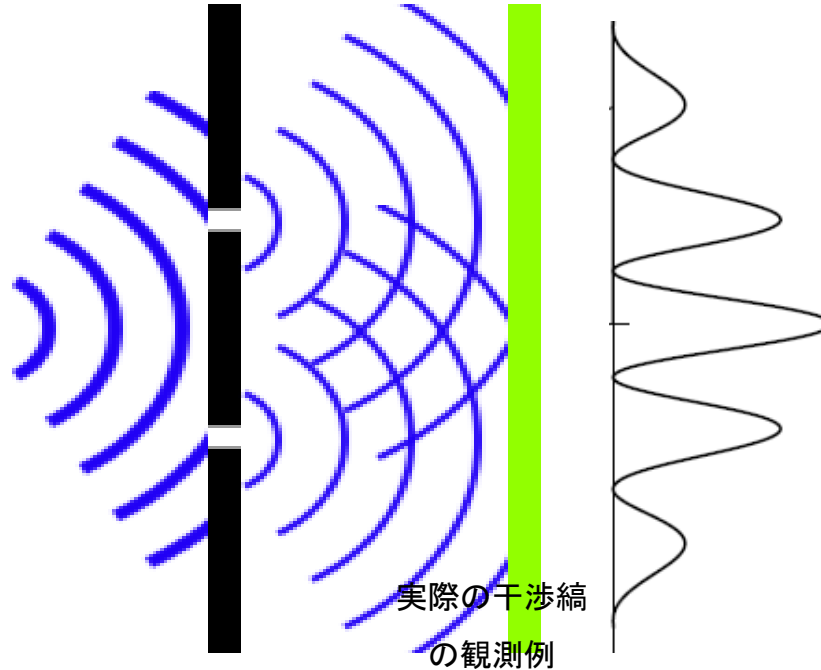
電磁波とは？



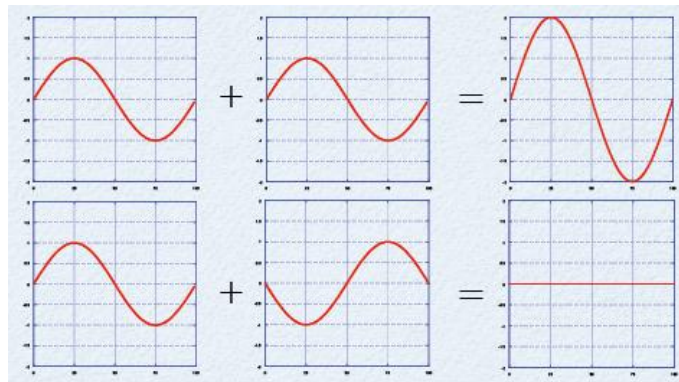
直交する電場と磁場がお互いに発生しあって進行する横波
真空中では30万km/sで進む

ヤングの2重スリット実験

レーザーなどの
コヒーレントな光
→
波の波長・位相が
揃っている！



Young

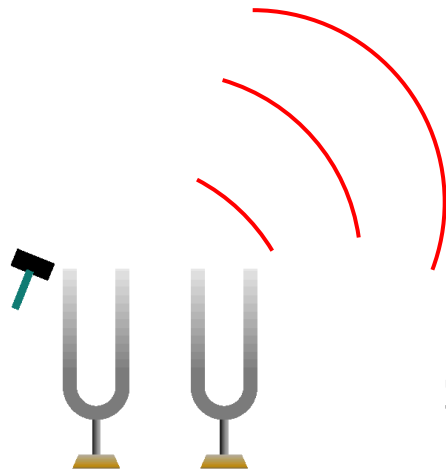


波が同位相で重なるところは明るく
逆位相で重なるところは暗くなる

干渉は波特有の現象である

波の強弱

音波の場合

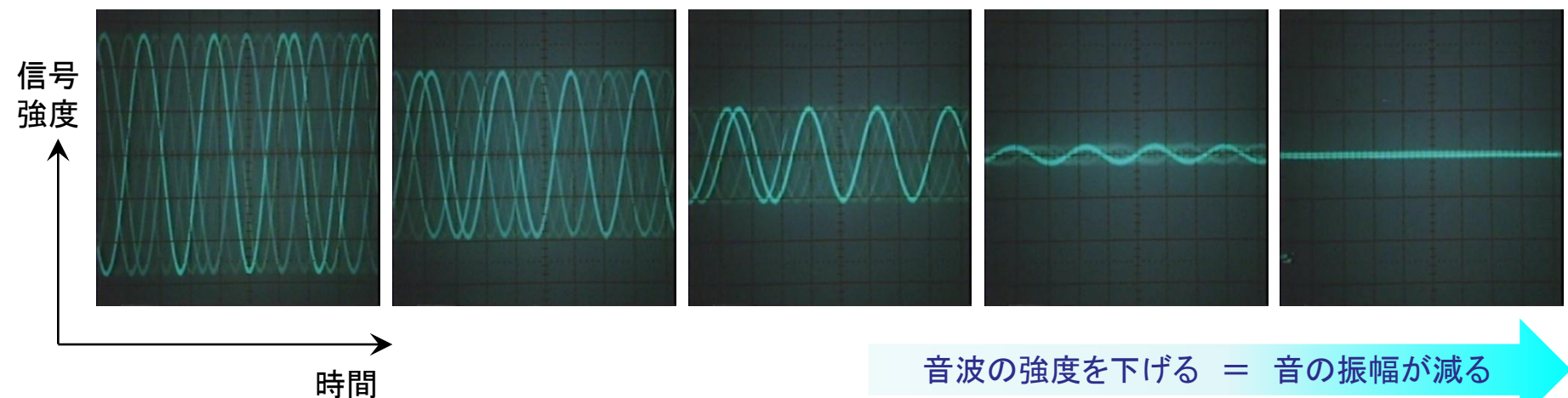


空气中を伝搬する音波



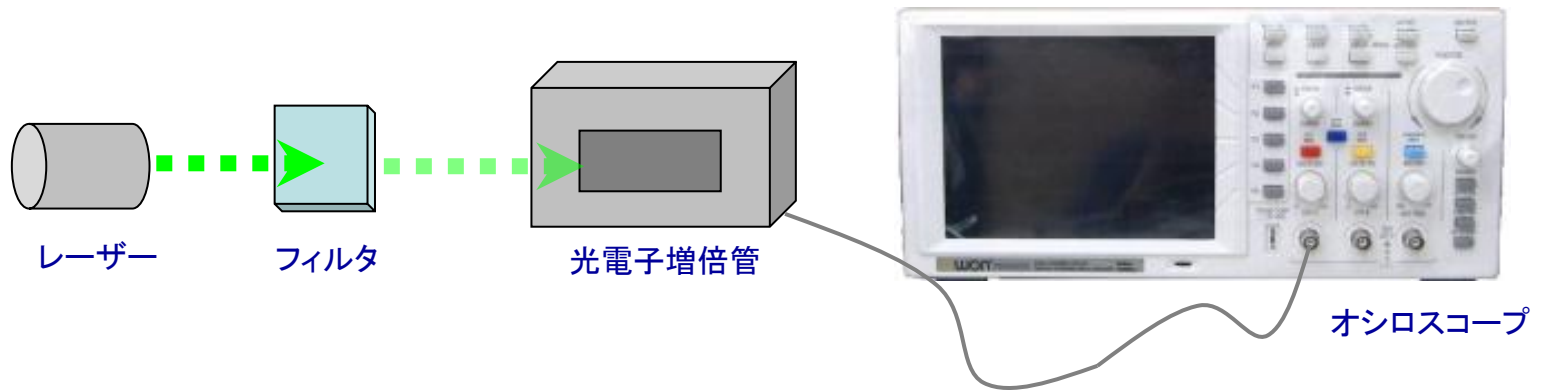
オシロスコープで音波を観測

オシロスコープ: 電位差を時間軸について計測する

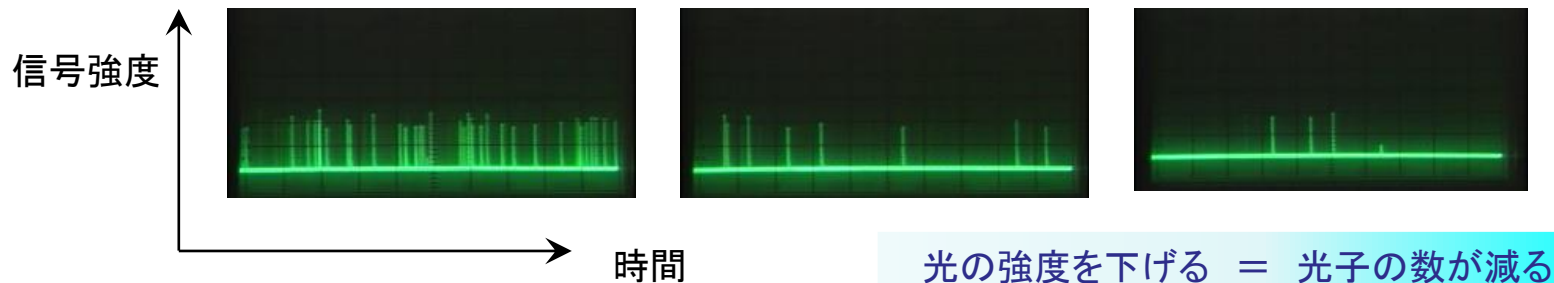


レーザー光の強度を下げてみると・・・

光波の場合



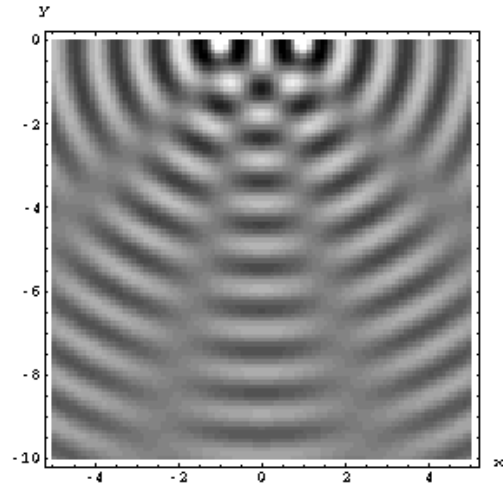
光の強度を下げる : 粒子性を示す(光子)



信号強度が変わらない・・・ということは光子一個あたりのエネルギーは一定

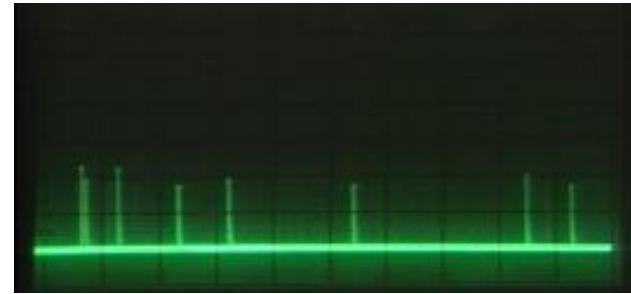
問題：微弱な光で2重スリット実験をするとどうなる？

日常程度の強い光：**波動性**

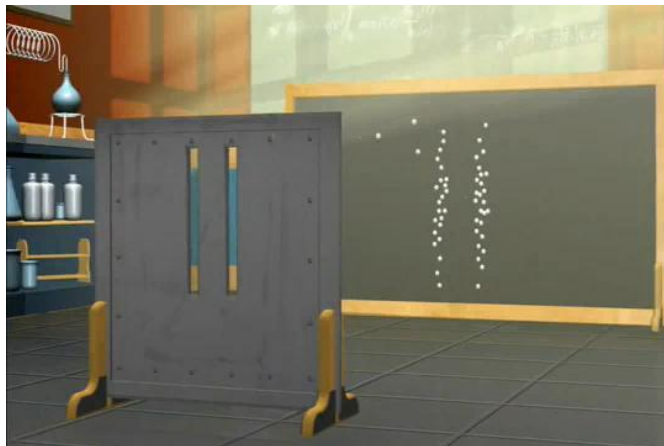


連続的

極めて弱い光：**粒子性(光子)**

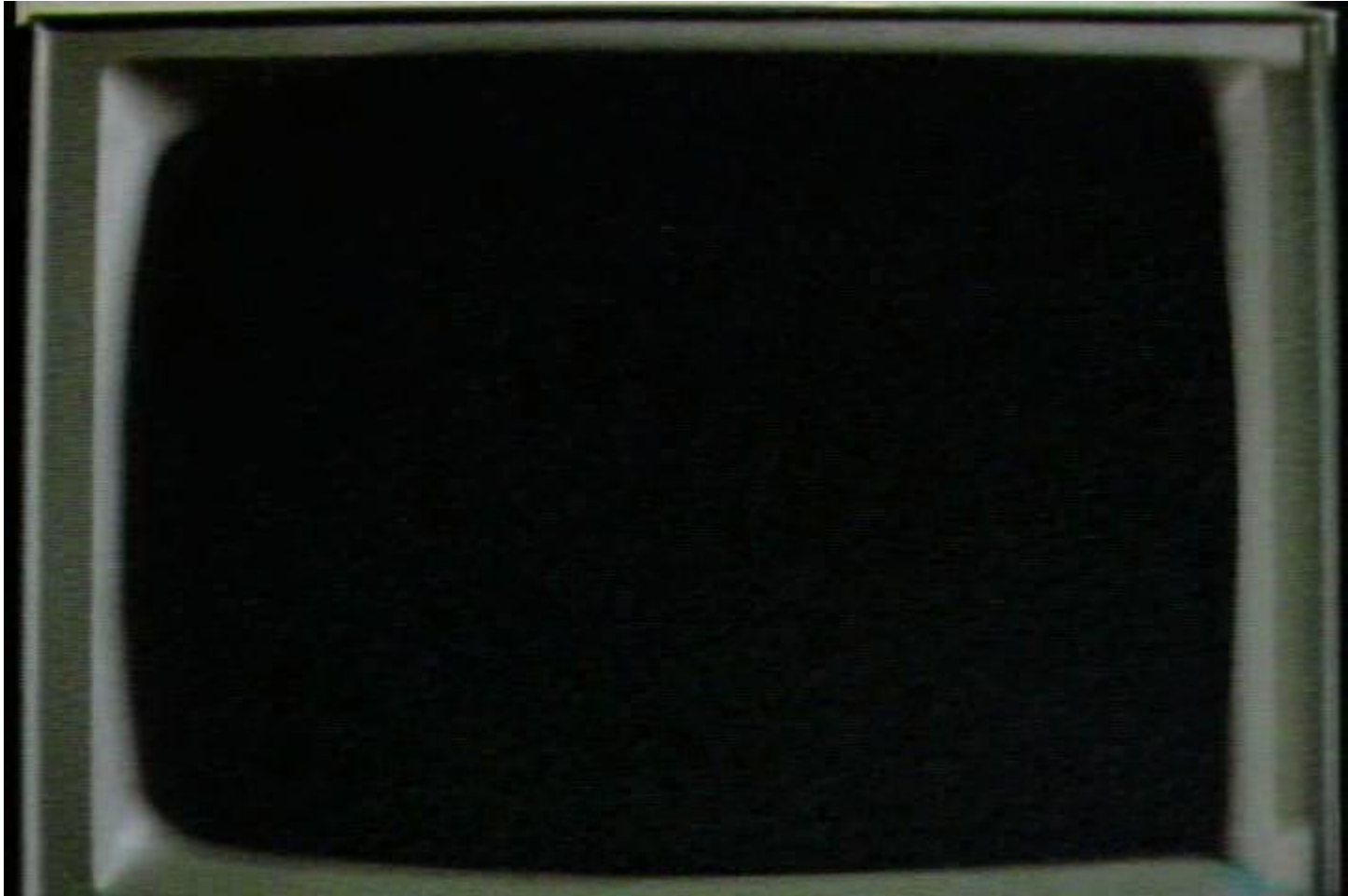


離散的

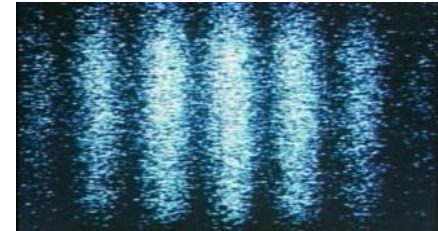
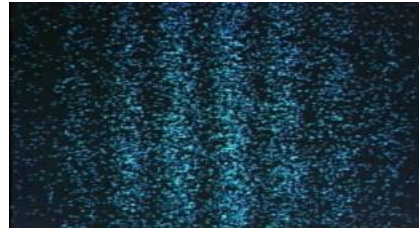


どんな実験結果が得られるのか
考えてみよう！！

実験結果



実験結果まとめ



時間経過

1. 光子1個からスクリーン上に輝点が1個生じる
2. 輝点は一定の範囲に確率的に分布している
3. 輝点をたくさん観測すると波の干渉パターンによく似た確率分布を示す



光子はスリットを通るときには波のように振る舞い、
観測されるときには粒子のように振る舞うと考えられる

ここまでのまとめ

光は電磁波であり、十分強度が強い場合には波として特徴づけられる

光の強度を下げていくと粒子としての性質が見える(光子)

単一光子でも2重スリットで干渉する : 波動性

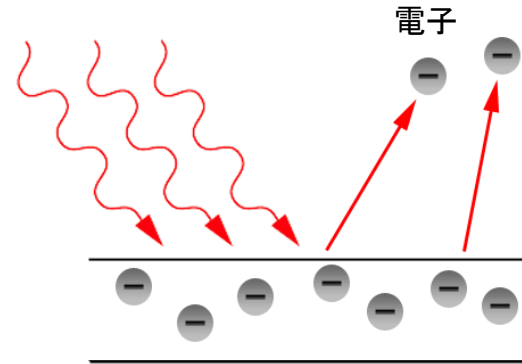
干渉した単一光子は輝点として観測される : 粒子性

光子は振動数に比例(波長に反比例)したエネルギーを持つ量子である

$$E = h\nu = h\frac{c}{\lambda}$$

c : 光の速さ λ: 波長 ν: 振動数

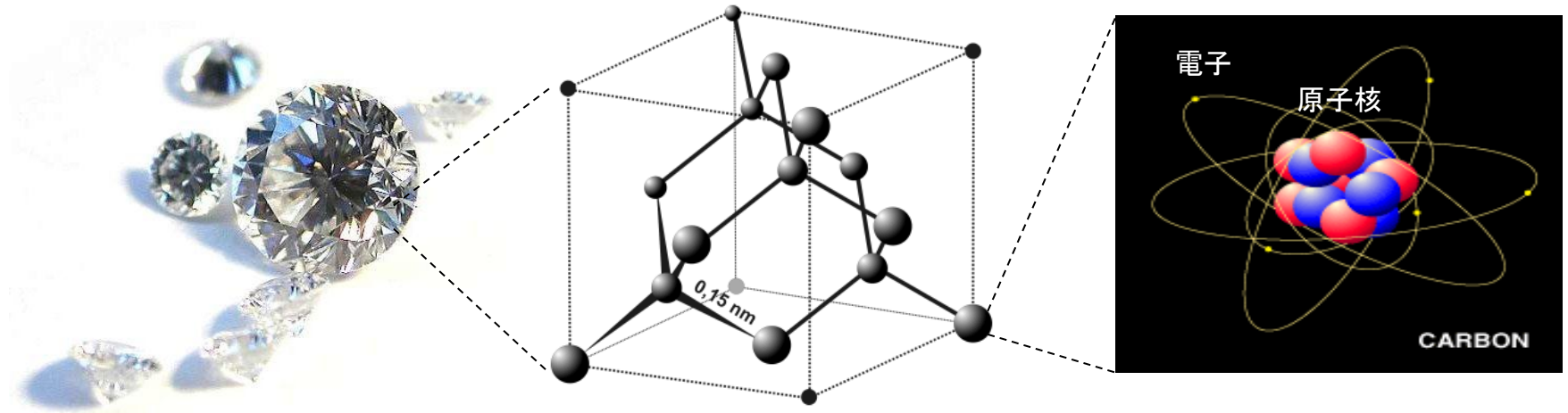
h : プランク定数 ($6.626 \times 10^{-34} \text{Js}$)



光電効果は光子によって初めて説明された！

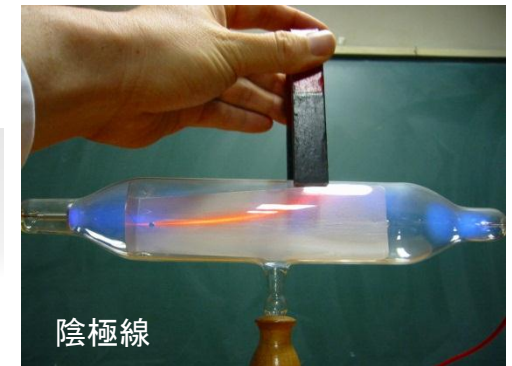
続いて「電子」について考えてみよう

たとえばダイヤモンド...



電子とは？

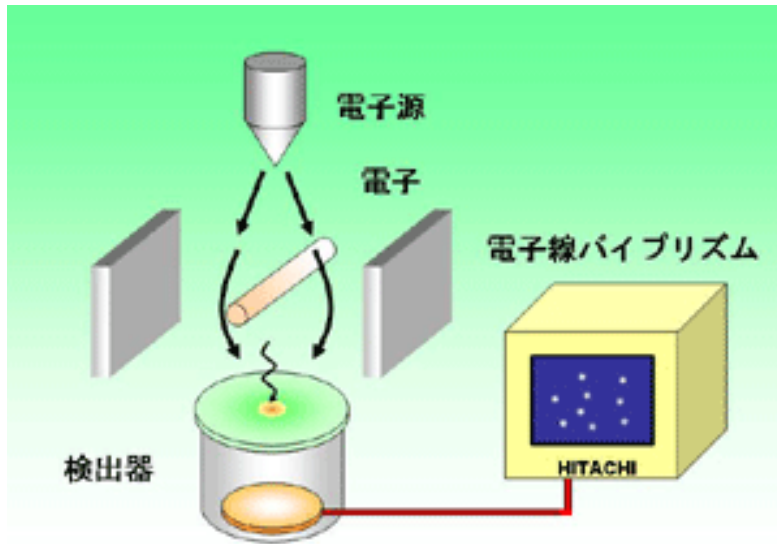
電荷 ($-1.6 \times 10^{-19}\text{C}$) と質量 ($9.1 \times 10^{-31}\text{kg}$) をもつ素粒子である



「素粒子」というからには粒子だと思うけど・・・2重スリットに通したらどうなる？

電子線の2重スリット実験

1989年、日立製作所の外村彰らによって行われた実験



電子源から電子を1つ1つ飛ばし、「電子線バイプリズム」で
2つの経路に分割して反対側で検出してみた！

実験結果



単一電子も単一光子と全く同じように**干渉効果**を示す！

光と電子の示す波動性・粒子性

	身近な例	数え方	どのように存在する？	複数の入り口があった場合
粒子	ボール	1個、2個・・・	空間の1点に局在	いずれか1つを通る
波	水の波、音波、電磁波	強度はあるが数えられない	空間に広がっている	全てを同時に通り、合流して重なり合う

古典的なイメージでは・・・
電子は粒子
光は波
だけど波でもある！
粒子

ミクロな世界では
どちらも波として飛んできて
粒子として観測される



波と粒子をつなぐ式：光の粒子性

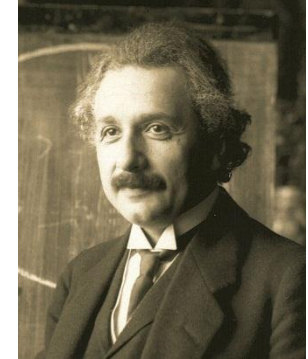
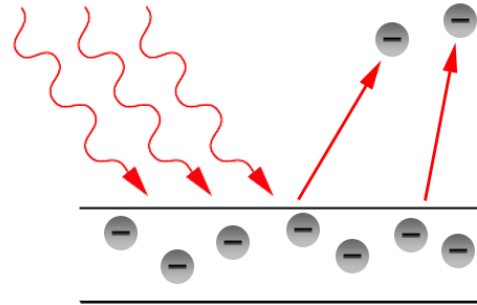
アインシュタインの光量子仮説(再掲)

光子は振動数に比例(波長に反比例)したエネルギーを持つ量子である

$$E = h\nu = h\frac{c}{\lambda}$$

c : 光の速さ λ : 波長 ν : 振動数

h : プランク定数 ($6.626 \times 10^{-34} \text{Js}$)

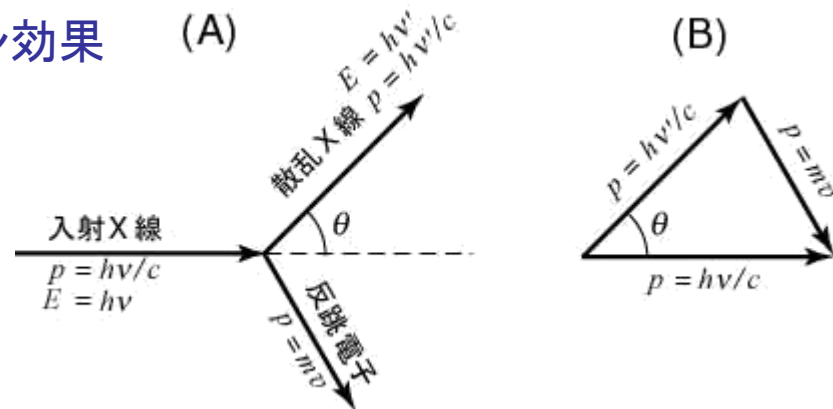


Einstein, 1921年 ノーベル物理学賞！

光量子仮説を裏付ける実験・・・コンプトン効果

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

p : 光子の運動量



波長 λ をもつ光の波動の伝播は運動量 $p = h/\lambda$ をもつ粒子の運動と見なせる

波と粒子をつなぐ式：物質の波動性

ド・ブロイの仮説：光が粒子性をもつならば逆に全ての物質は波動性をもつのでは？

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

物質波(ド・ブロイ波)

運動量 p をもつ粒子の運動は

波長 $\lambda = h/p$ をもつ波動の伝播と見なせる



de Broglie

1929年 ノーベル物理学賞！



速さ 20m/s で運動するサッカーボール(450g)の

$$\text{ド・ブロイ波長} = 7.4 \times 10^{-35} \text{ m}$$

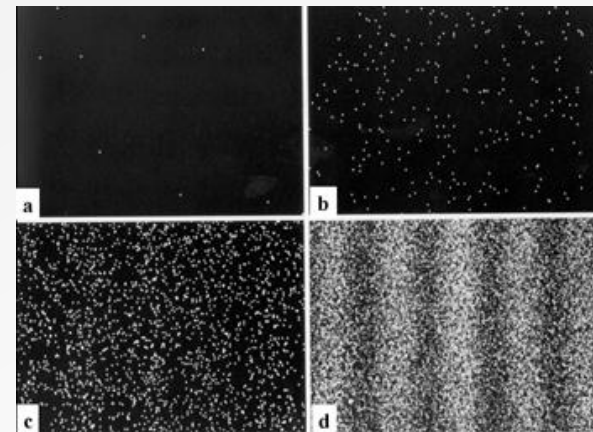
あまりにも波長が短く日常生活では波動性を見出すことはできない $\Rightarrow$ 限りなく粒子的に振る舞う

まとめ: 量子の波動性と粒子性

ミクロな世界ではマクロな世界では考えにくいような現象が起き、
それらは量子力学の考え方で説明される！

波動性と粒子性

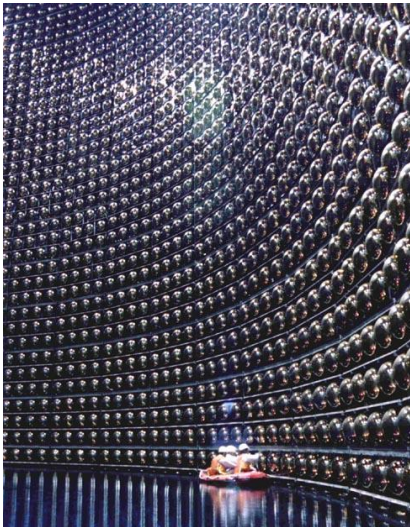
微弱な光(光子)や電子は粒子としての性質と波としての性質を両立する
量子は観測されるまでは波として振る舞い、観測によって粒子のように位置が定まる
分子などの物体でも波動性を示す(ド・ブロイ波)
日常的な物体ではド・ブロイ波長が短すぎるため波動性を見ることはできない



量子力学はどのように利用されている？

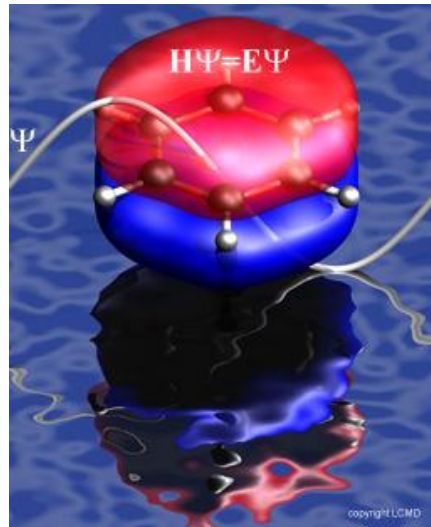
量子力学は現代の様々な学問や産業の基礎です！

素粒子物理



宇宙の謎の解明

化学



化学結合のよりよい理解

半導体ナノテク・電子部品



高性能・新しい原理で動作するデバイス

我々は半導体デバイス中で量子状態を操作・制御することを目指しています

樽茶研究室の研究テーマ

固体中の電子系における単一量子レベルの量子現象

固体中の電子

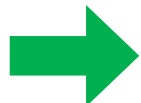


電荷(e^-)
伝導特性など
スピン
磁性など

1																	18							
1	H 1 水素 Hydrogen 1.008																	He 2 ヘリウム Helium 4.003						
2	Li 3 リチウム Lithium 6.941	Be 4 ベリリウム Beryllium 9.012																	B 5 硼素 Boron 10.81	C 6 炭素 Carbon 12.01	N 7 窒素 Nitrogen 14.01	O 8 酸素 Oxygen 16.00	F 9 フッ素 Fluorine 19.00	Ne 10 ネオン Neon 20.18
3	Na 11 ナトリウム Sodium 22.99	Mg 12 マグネシウム Magnesium 24.31																	Al 13 アルミニウム Aluminum 26.98	Si 14 シリコン Silicon 28.09	P 15 リン Phosphorus 30.97	S 16 硫黄 Sulfur 32.07	Cl 17 塩素 Chlorine 35.45	Ar 18 アルゴン Argon 39.95
4																								
4	K 19 カリウム Potassium 39.10	Ca 20 カルシウム Calcium 40.08	Sc 21 スカルン Scandium 44.96	Ti 22 チタン Titanium 47.87	V 23 バナジウム Vanadium 50.94	Cr 24 クロム Chromium 52.00	Mn 25 マンガン Manganese 54.94	Fe 26 鉄 Iron 55.85	Co 27 コバルト Cobalt 58.93	Ni 28 ニッケル Nickel 58.69	Cu 29 銅 Copper 63.55	Zn 30 ギャリウム Zinc 65.41	Ga 31 ゲルマニウム Germanium 69.72	Ge 32 アセニウム Arsenic 74.92	As 33 セレン Selenium 78.96	Se 34 ブロム Bromine 79.90	Br 35 臭素 Iodine 126.9	Kr 36 クリプトン Krypton 83.80						
5	Rb 37 ルビウム Rubidium 85.47	Sr 38 ストロンチウム Strontium 87.62	Y 39 イットリウム Yttrium 88.91	Zr 40 ゼルコニウム Zirconium 91.22	Nb 41 ニオブ Niobium 92.91	Mo 42 モリブデン Molybdenum 95.94	Tc 43 テクネチウム Technetium [98]	Ru 44 ルルチウム Ruthenium 101.1	Rh 45 ロジウム Rhodium 102.9	Pd 46 パラジウム Palladium 106.4	Ag 47 銀 Silver 107.9	Cd 48 カドミウム Cadmium 112.4	In 49 インジウム Indium 114.8	Sn 50 スズ Tin 118.7	Sb 51 アンチモン Antimony 121.8	Te 52 テルル Tellurium 127.6	I 53 ヨウ素 Iodine 126.9	Xe 54 キセノン Xenon 131.3						
6	Cs 55 セシウム Cesium 132.9	Ba 56 バリウム Barium 137.3	57 ランタノイド	Hf 58 ハフニウム Hafnium 178.5	Ta 59 タンタル Tantalum 180.9	W 60 タングステン Tungsten 183.8	Re 71 レニウム Rhenium 186.2	Os 72 オスミウム Osmium 190.2	Ir 73 イリジウム Iridium 192.2	Pt 74 プラチナ Platinum 195.1	Au 75 ゴールド Gold 197.0	Hg 76 水銀 Mercury 200.6	Tl 77 タリウム Thallium 204.4	Pb 78 鉛 Lead 207.2	Bi 79 ビスマス Bismuth 209.0	Po 80 ポロニウム Polonium [210]	At 81 アスタチン Astatine [210]	Rn 82 ラドン Radon [222]						
7	Fr 87 フランシウム Francium [223]	Ra 88 ランタノイド Radium [226]	89-103 ランタノイド	Rf 104 ランタノイド Rutherfordium [261]	Db 105 デューニウム Dubnium [262]	Sg 106 ショーグバーク Seaborgium [266]	Bh 107 ボーヘリウム Bohrium [272]	Hs 108 ハシウム Hassium [277]	Mt 109 メイテニウム Meitnerium [278]	Ds 110 ダモクリウム Darmstadtium [281]	Rg 111 レンツウム Roentgenium [282]	Cn 112 コペルニウム Copernicium [285]	Uut 113 ニホニウム Nihonium [286]											

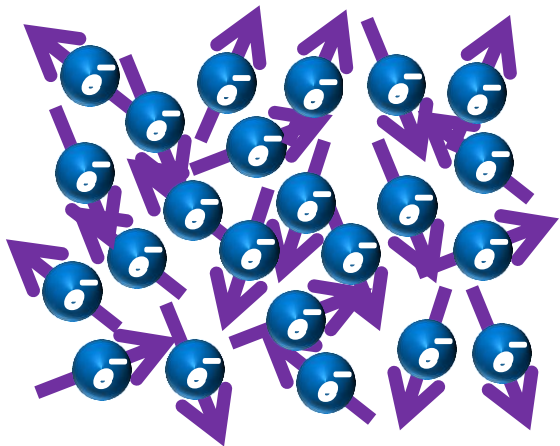
…物性を司る

量子効果? …統計的な平均化で見えにくい

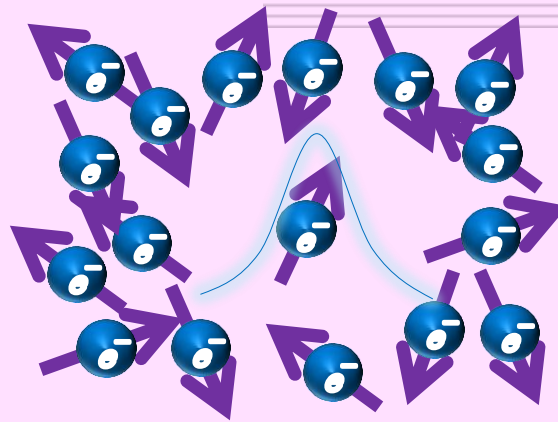


電子をひとつずつ取り出せばよい(“単一量子”)

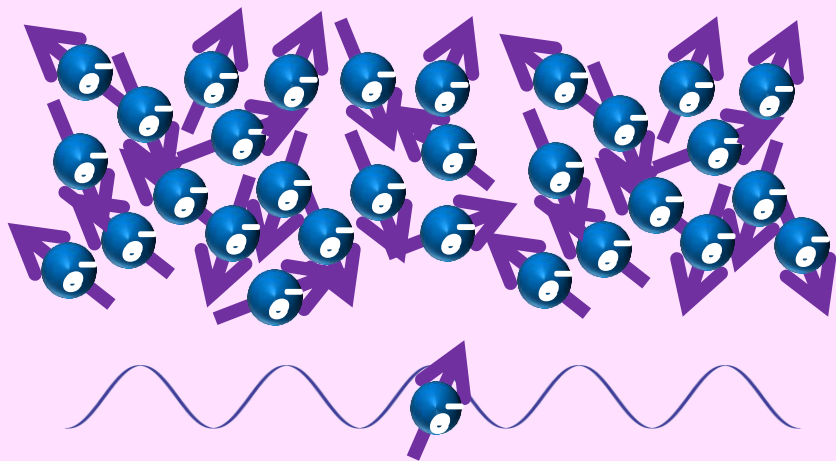
“単一量子”状態の実現



普通の状態



量子ドット

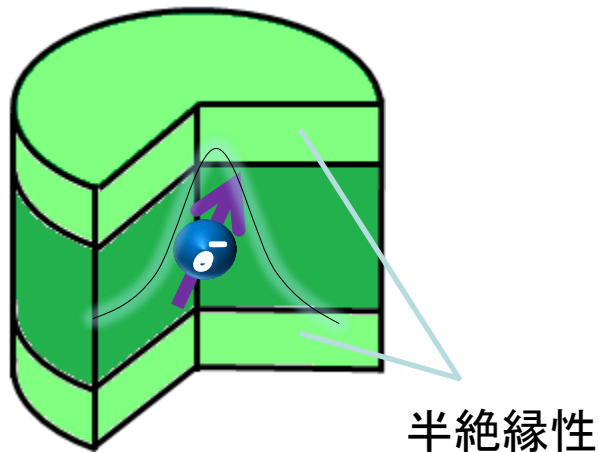


量子細線

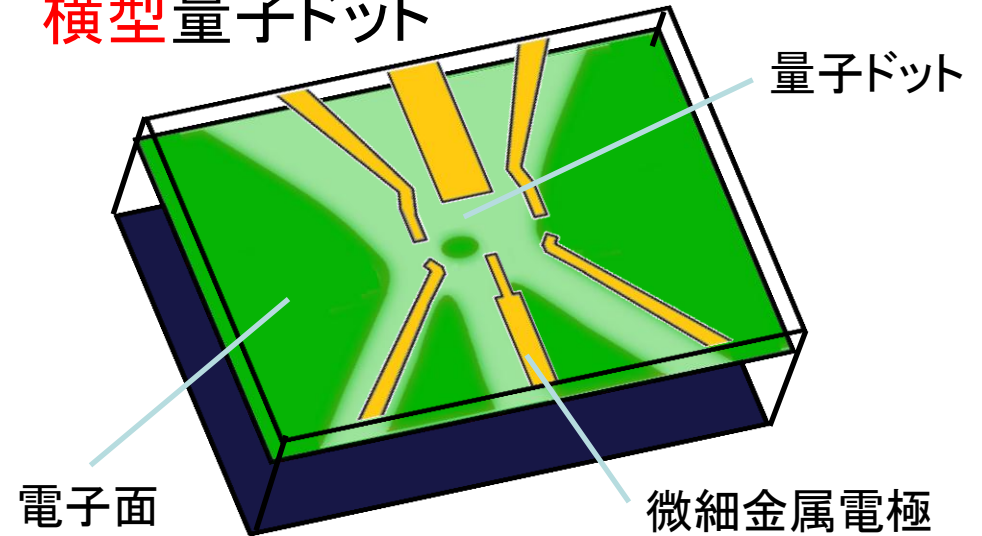
どうやったら
このような状態が
実現できるか？

いろいろな量子ドット

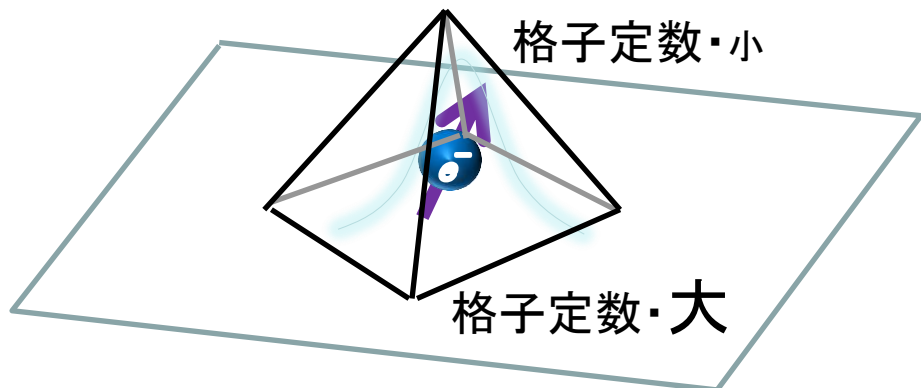
縦型量子ドット



横型量子ドット



自己形成量子ドット



ド・ブROI波長程度の領域に
電子を閉じ込める



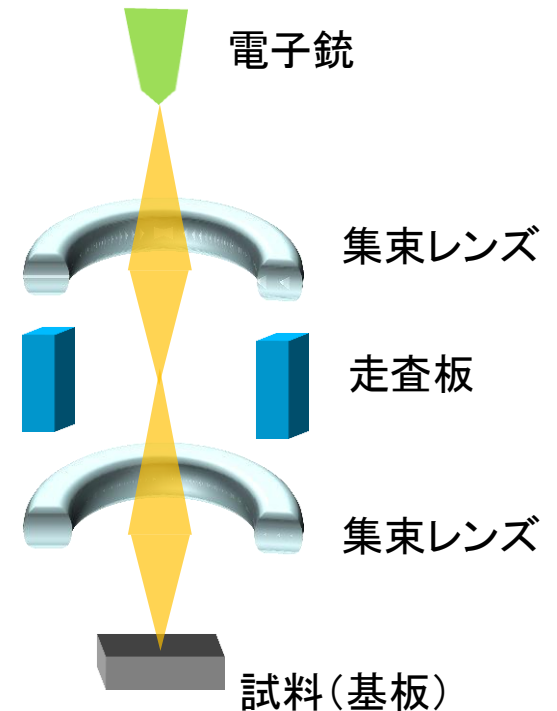
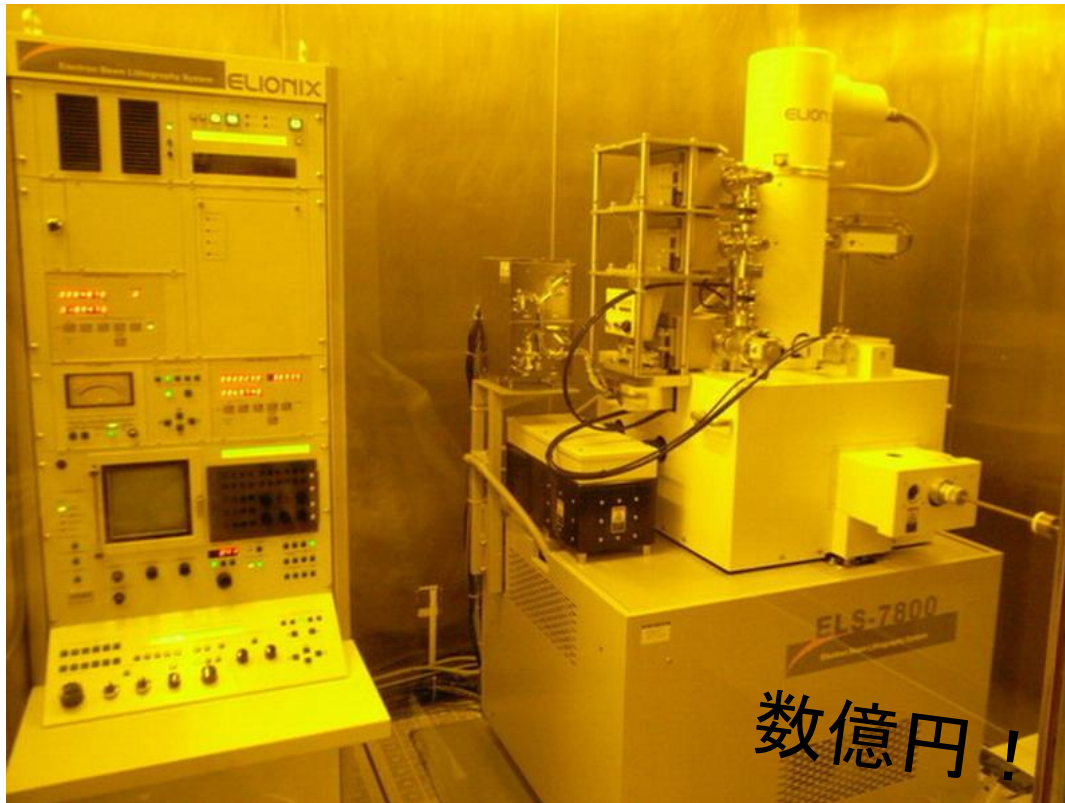
半導体微細加工技術
ナノテクノロジー
(ナノメートル: 10^{-9}m)

電子線描画装置

100kVで加速した電子のド・ブROI波長： $\frac{h}{mp} \sim 4 \times 10^{-12} \text{ m} = 0.04 \text{ \AA}$

波長が短い → 細かいものが見える & 描ける！

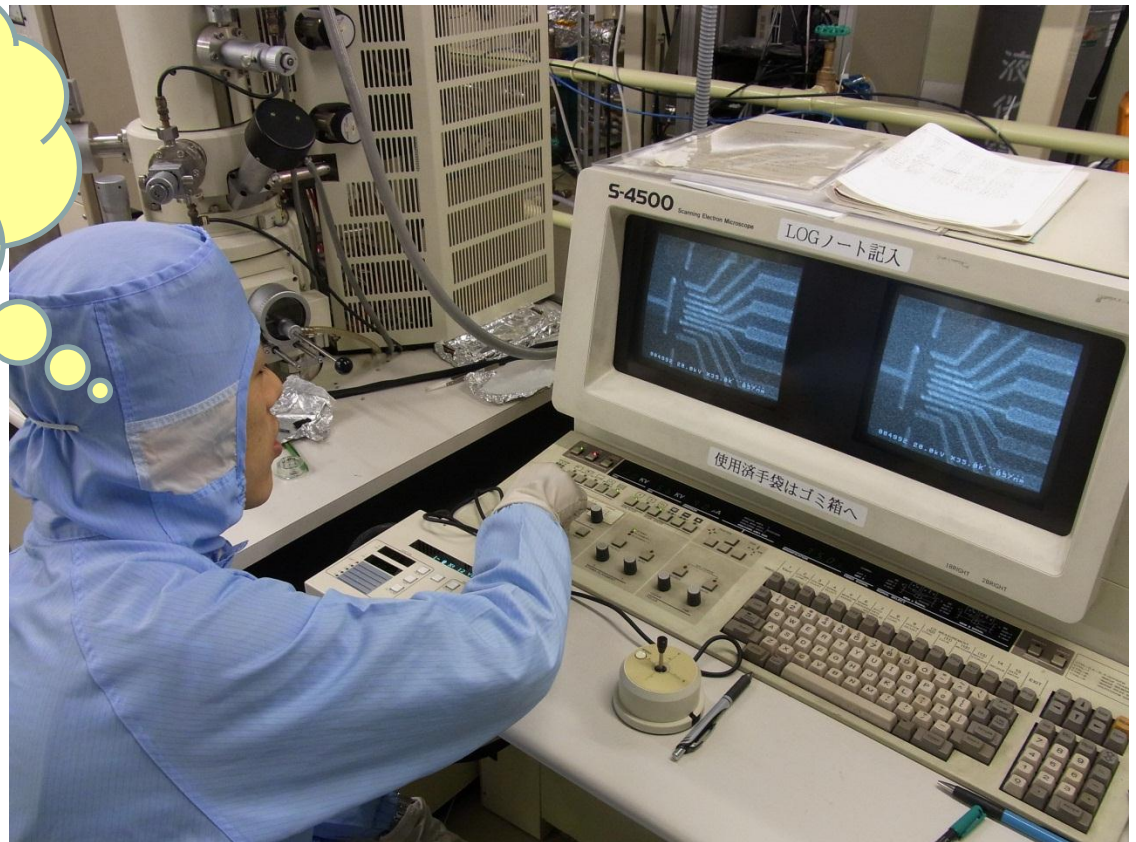
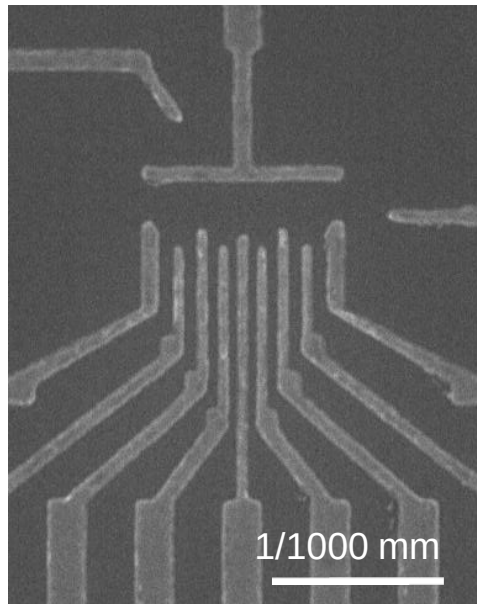
cf. EUV線源：135 Å



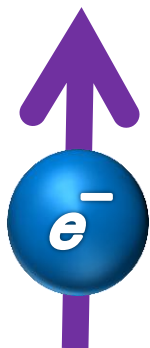
電子線顕微鏡写真

加速された電子＝波長が短い → 細かいものが見える & 描ける！

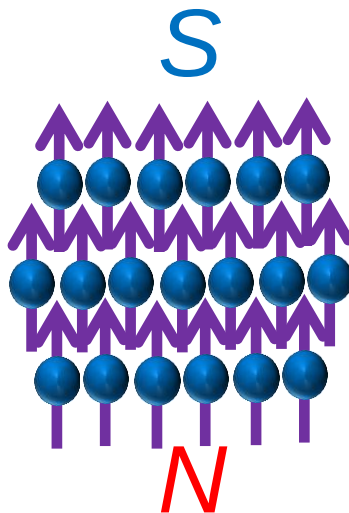
きちんと
描けてるかな？



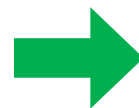
電子のスピン



スピンとは...
電子に付随する
角運動量。
相対論的量子力学
から導かれる。

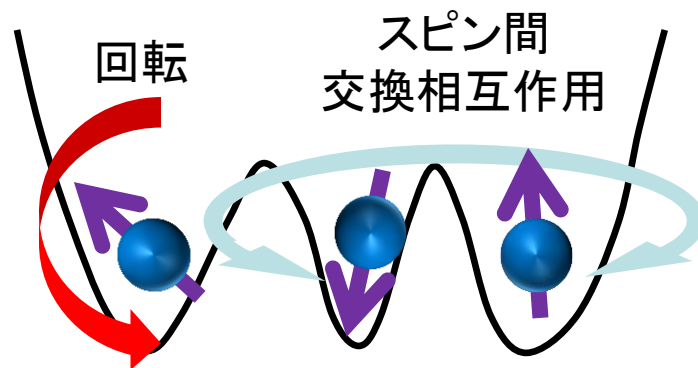
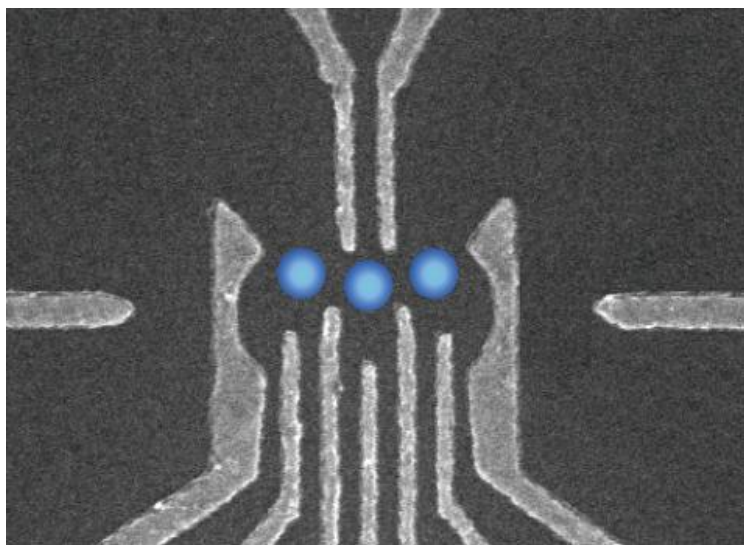


向きが
そろくと...



強磁性
(磁石)

ドット中の電子もスピンを持っている。

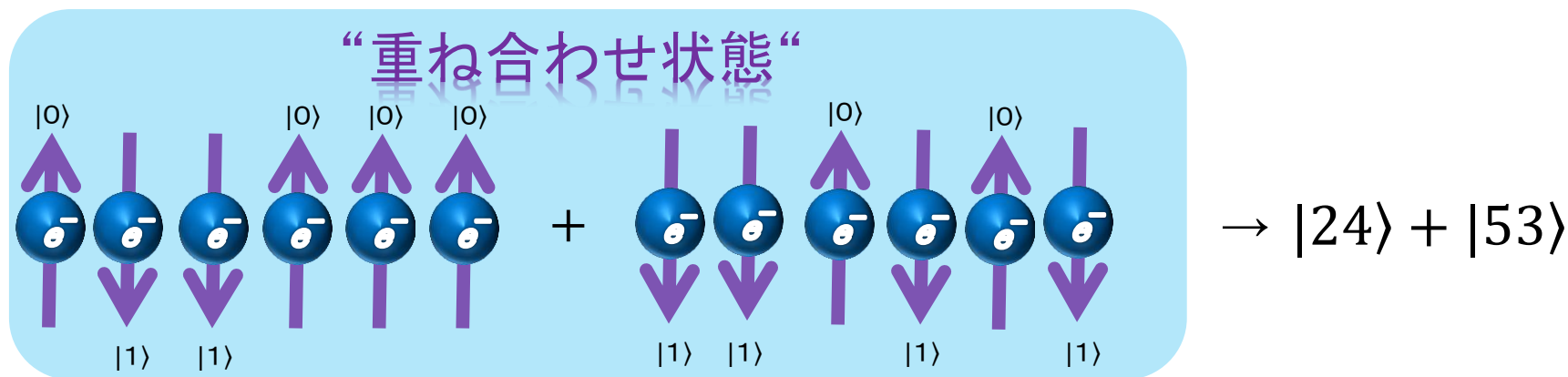
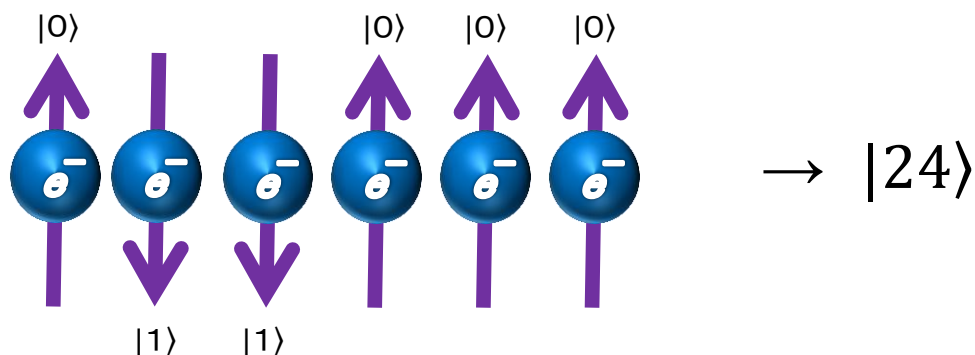


典型的な量子現象

量子ビット vs 古典ビット

スピンは量子ビットとして使うことができる！
ビットとは...
コンピュータが扱う情報の最小単位。0と1。

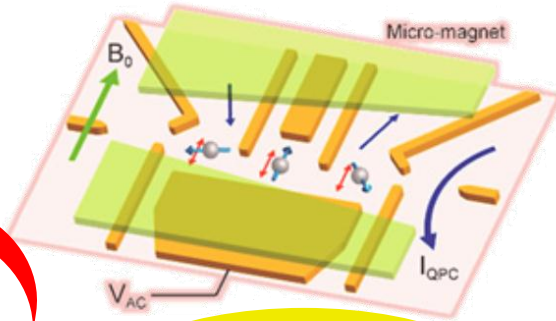
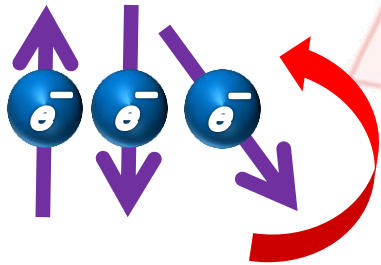
2012 → 11111011100
(10進法) (2進法)



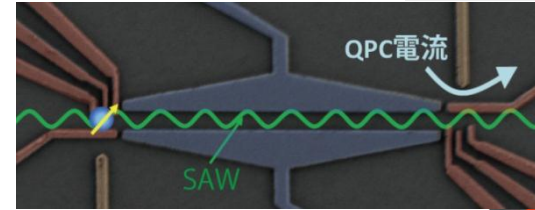
量子状態を利用した計算 → 量子計算・量子情報

樽茶研の現在の研究テーマ

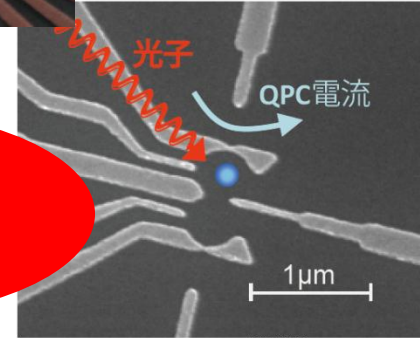
スピンの操作



スピンによる
量子演算



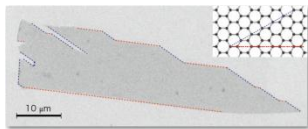
量子状態の
輸送・転写



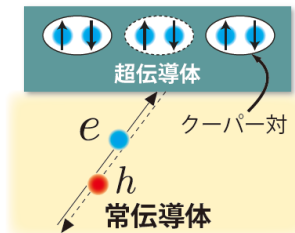
量子状態
操作

量子状態の
分離

多体効果の
探索



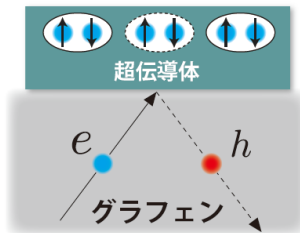
通常物質



シュレディンガー方程式 (非相対論的)

$$\mathcal{H}\Psi(\mathbf{r}) = -\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2\Psi(\mathbf{r})$$

グラフェン

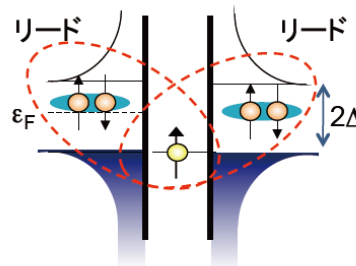


ディラック方程式 (相対論的)

$$\mathcal{H}\Psi(\mathbf{r}) = i\hbar v_F \boldsymbol{\sigma} \cdot \nabla \Psi(\mathbf{r})$$

超伝導

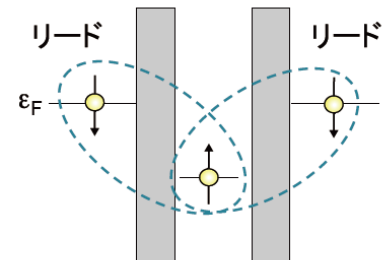
量子ドット



共存・競合

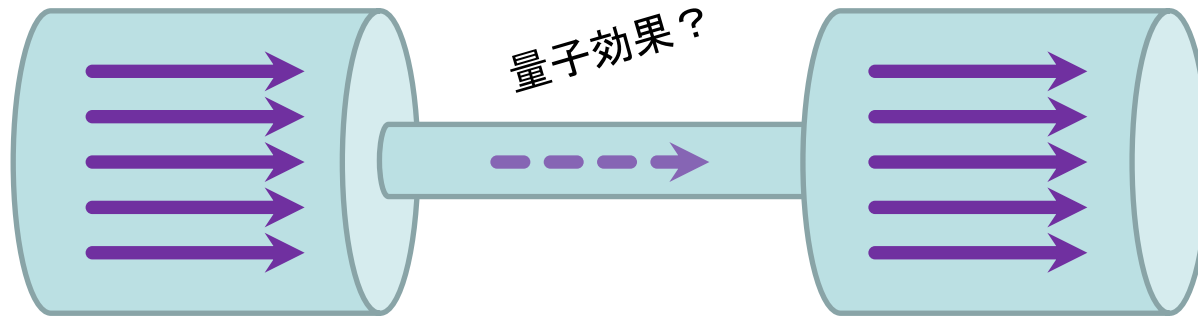
近藤効果

量子ドット



皆さんが取り組む実験

電気で測定するナノサイエンス～量子力学を体験しよう～



微小な導体を電流はどのように流れるのか？

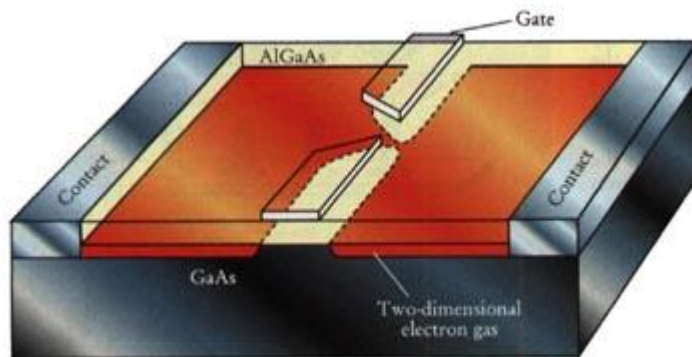
量子力学特有の現象を観測してみましょう

2種類の試料

1. 半導体量子ポイントコンタクト
2. 金属細線

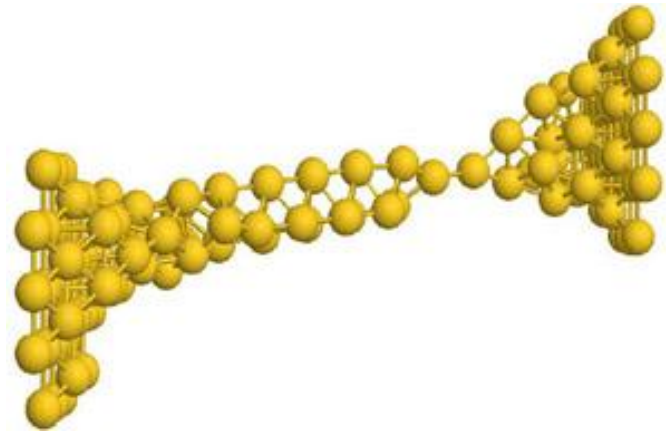
皆さんが取り組む実験

半導体量子ポイントコンタクト



2次元電子系をもった半導体基板上に作製した微小試料を用いて、数十nmの幅の領域を通過する電流を低温で測定します。

金属細線



金や銅などの金属試料を接触・引き離すことによって原子単位の接合を皆さんの手で作ってもらい、そこを流れる電流を観測します。

量子化された電気伝導を観測してみましよう！