

**光の正体を探ろう！
～量子の世界への招待～**

**北海道大学大学院情報科学研究科
光エレクトロニクス研究室**

小川和久, 松岡史晃



第1部：光って何だ？

～光の科学史とかんたん光実験～

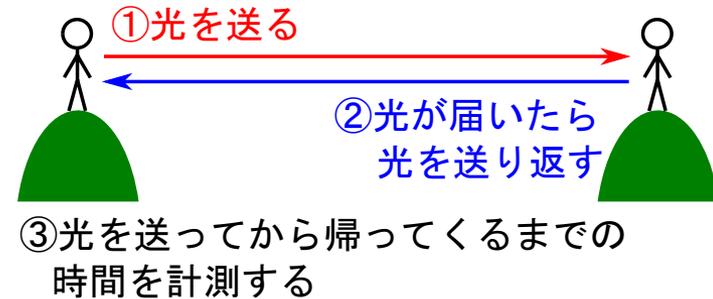
17世紀

- 光の速さ: ~~無限に速い?~~ **有限の速さ?**

- ガリレイの実験(1638)
 - 速すぎて判別できず



https://en.wikipedia.org/wiki/Galileo_Galilei

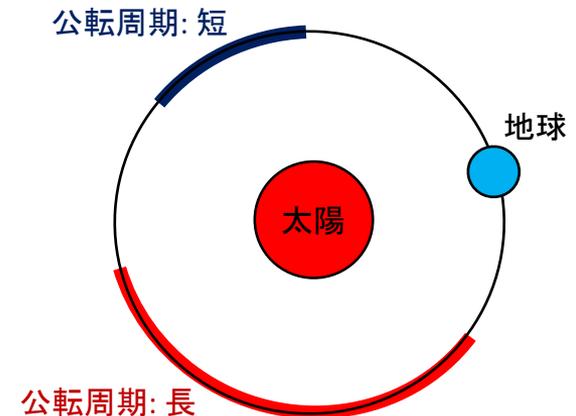
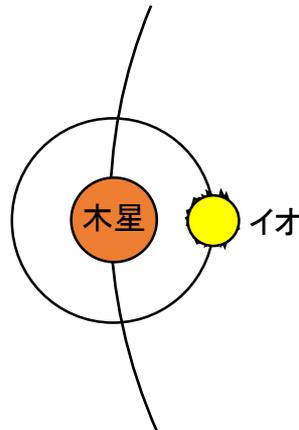


- レーマーの測定(1676)
 - イオの公転周期

←光の速さが有限なら説明がつく!



https://en.wikipedia.org/wiki/Ole_Rømer

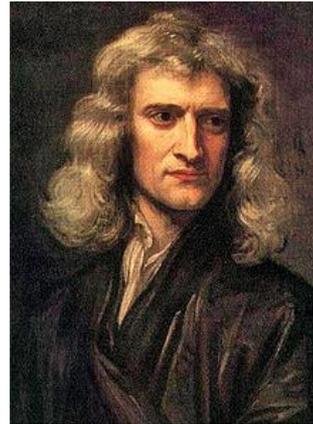


17世紀～18世紀

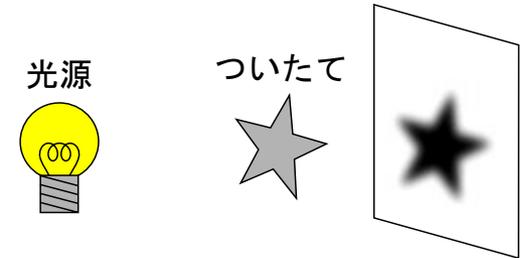
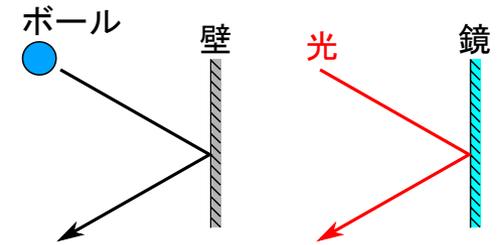
• じゃあ光って一体何なの？

• 粒子説 (ニュートン, 1704)

- 直進、反射
- 媒質なしでも伝わる



https://en.wikipedia.org/wiki/Isaac_Newton



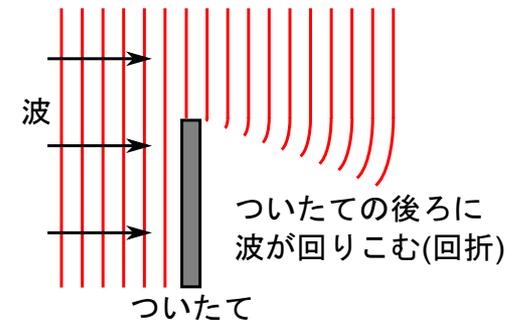
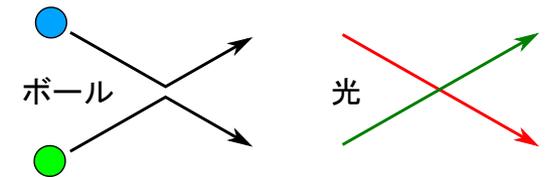
スクリーンに同じ形の影ができる
→ 光が直進した結果

• 波動説 (ホイヘンス, 1690)

- 交差してもぶつからない
- まわりこみ(回折)がある



https://en.wikipedia.org/wiki/Christiaan_Huygens

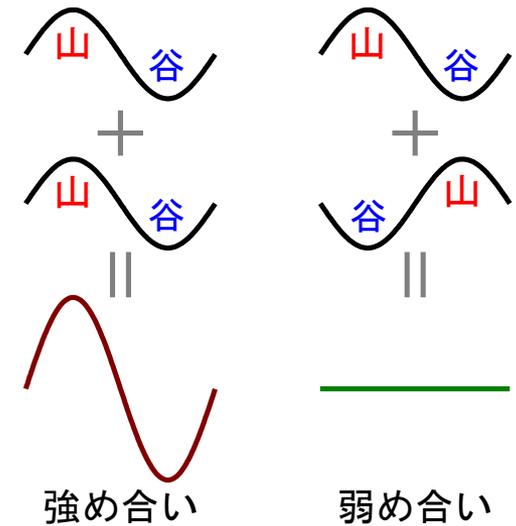


• どちらも決定的な証拠がない…

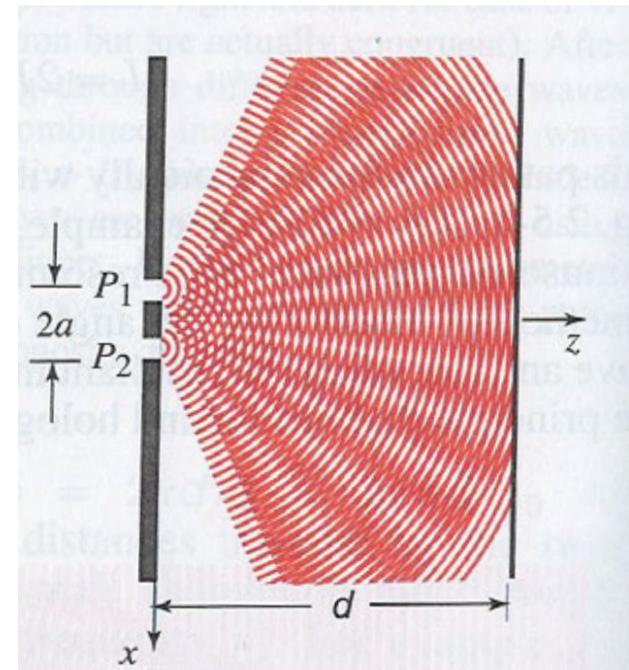
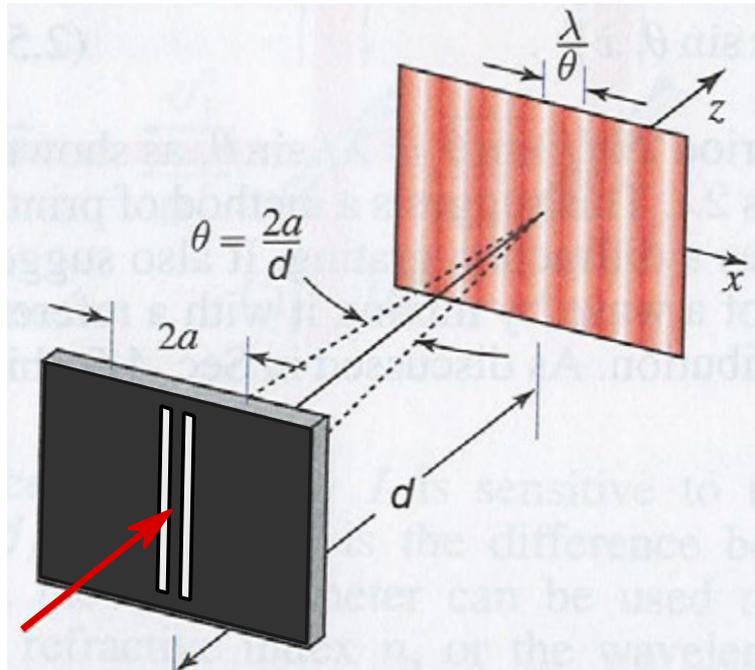
19世紀初頭

• ヤングの二重スリット実験 (1805)

- 波は干渉(強め合い/弱め合い)を起こす
 - 粒子にはそのような性質はない
- 光は干渉を起こすことがわかった
→ **光は波である!**



[https://en.wikipedia.org/wiki/Thomas_Young_\(scientist\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Thomas_Young_(scientist))



19世紀後半

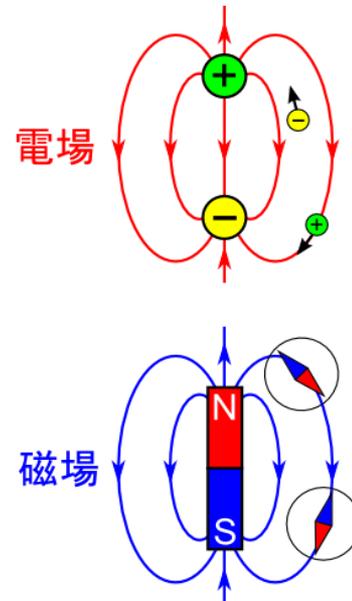
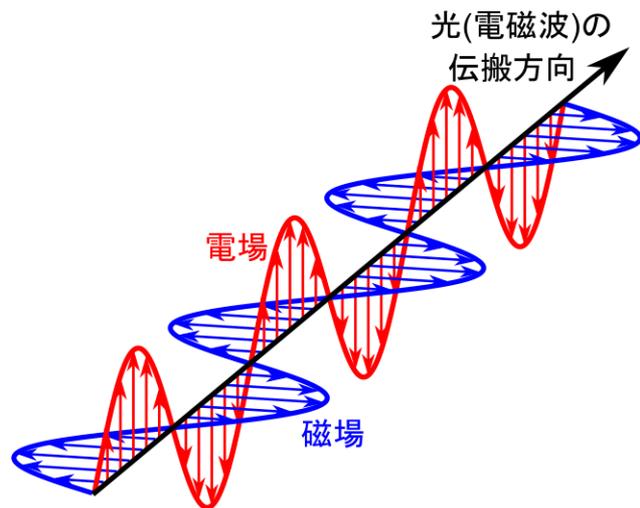
- マクスウェル, ヘルツによる電磁波の発見(1864,1888)
(理論) (実験)



https://en.wikipedia.org/wiki/James_Clerk_Maxwell

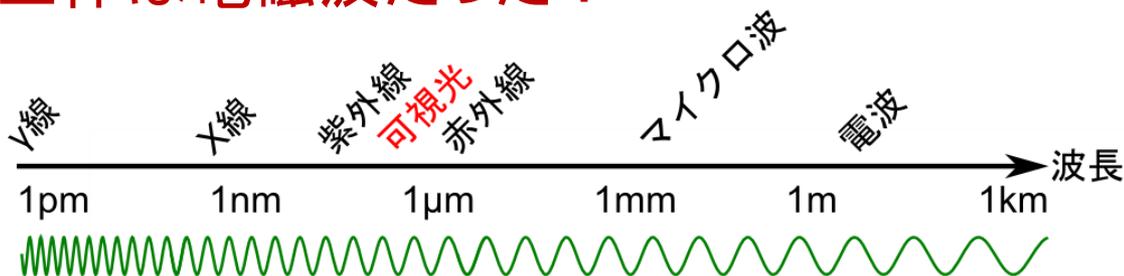


https://en.wikipedia.org/wiki/Heinrich_Hertz



- 媒質がなくても伝わる
- 電磁波の伝わる速度は光速度と等しい

→光の正体は電磁波だった！

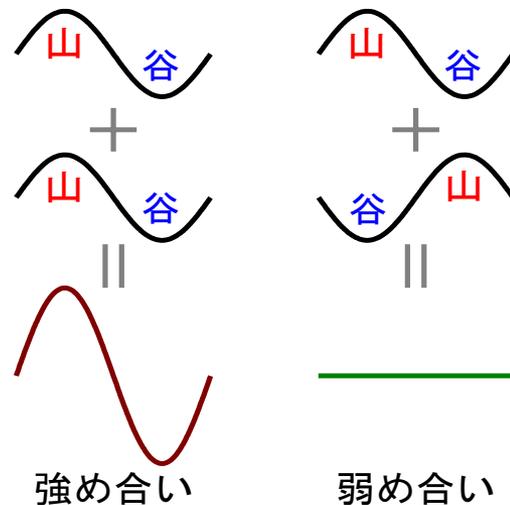
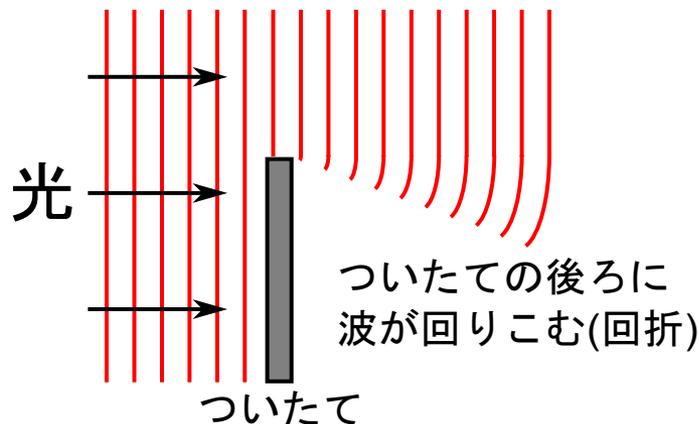


- 光の粒子説は消えてしまったのか… 後半へつづく

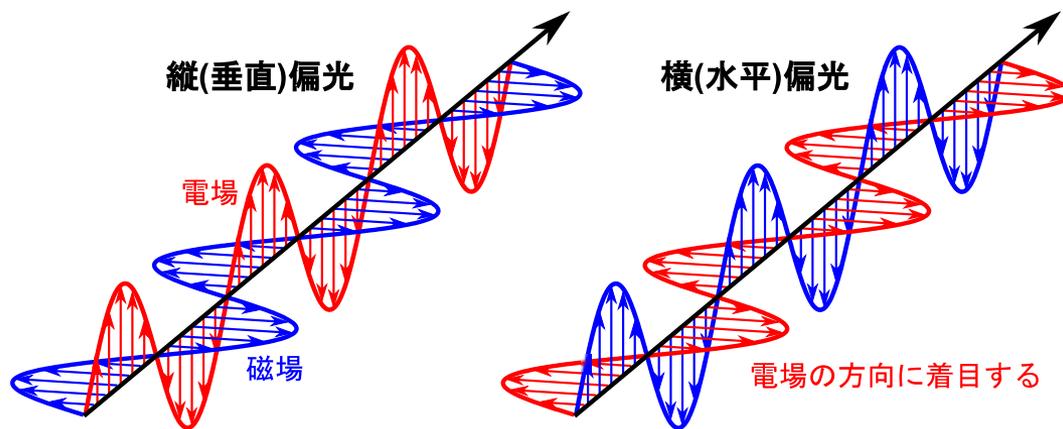
実験：光の波動性を確かめてみよう！

• 波の性質のおさらい

- 回折(直進方向以外の広がり) • 干渉(強め合い/弱め合い)

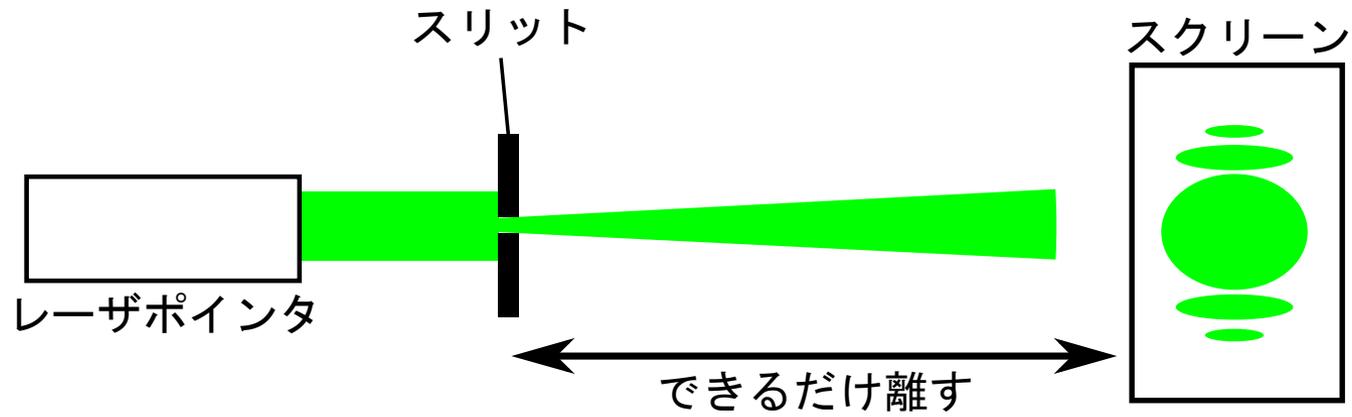


• 偏光 (2種類の波の振動の方向)



実験1: 回折

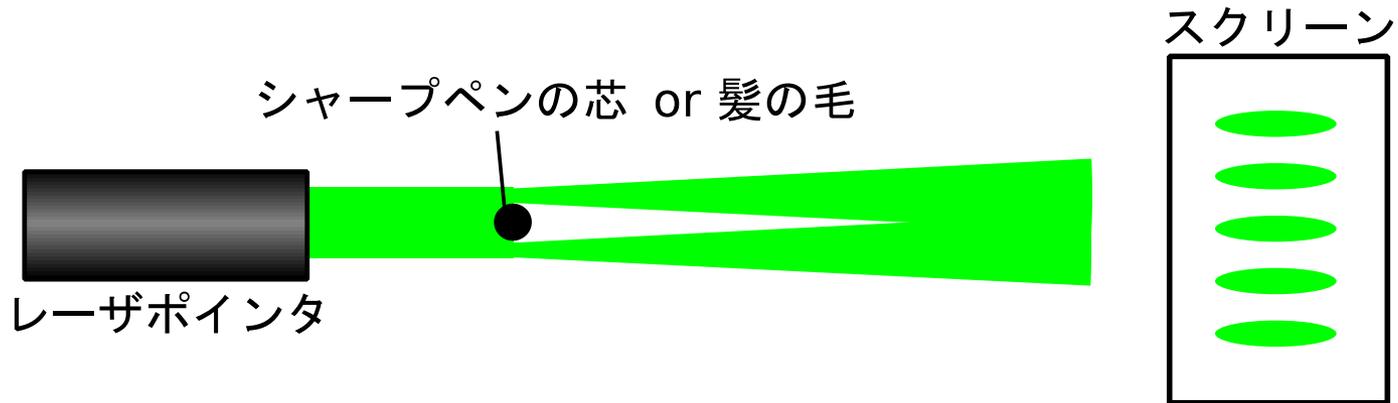
- レーザ光をスリットに通した時, 光の回り込みが見えるか？



- レーザー光を直接目に入れないこと！
- 反射光、散乱光に十分注意すること！
- スクリーンに映った光を凝視しないこと！

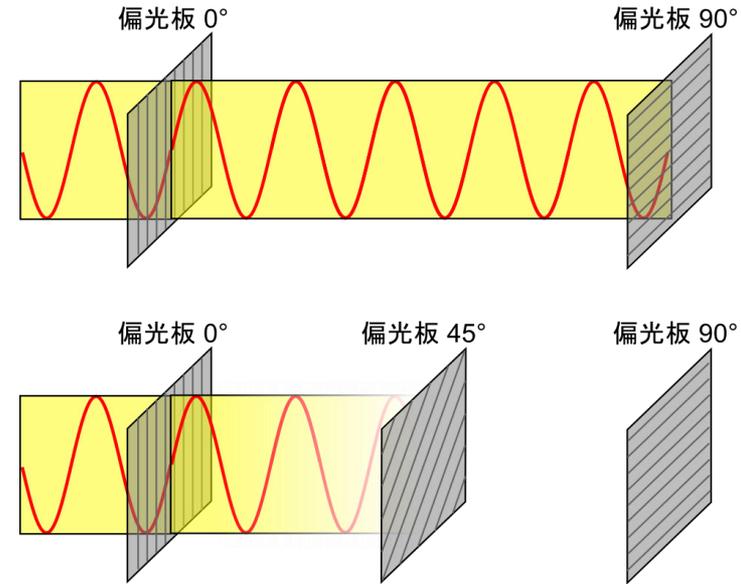
実験2: 干渉

- レーザ光を二重スリットに通した時, 干渉縞が見えるか?
- スリット間隔を細くすると干渉縞はどう変化するか?



実験3: 偏光

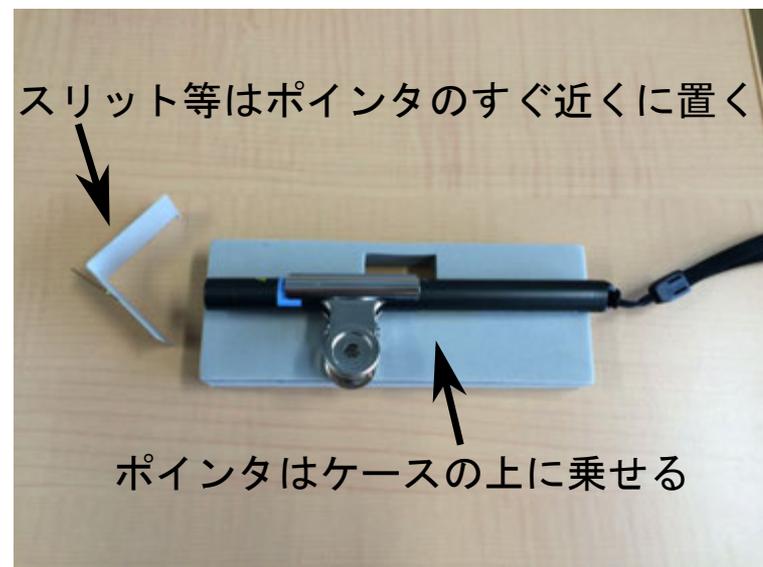
- 縦偏光の光は横方向の偏光板を通過できないことを確認せよ
- 間に斜め45度方向の偏光板を入れるとどうなるか?
- 身の回りのものを偏光板を通して見てみよう
 - スライド画面
 - 液晶モニタ
 - 床の反射光
- 人間は縦偏光・横偏光を見分けることができるか?



実験上の注意

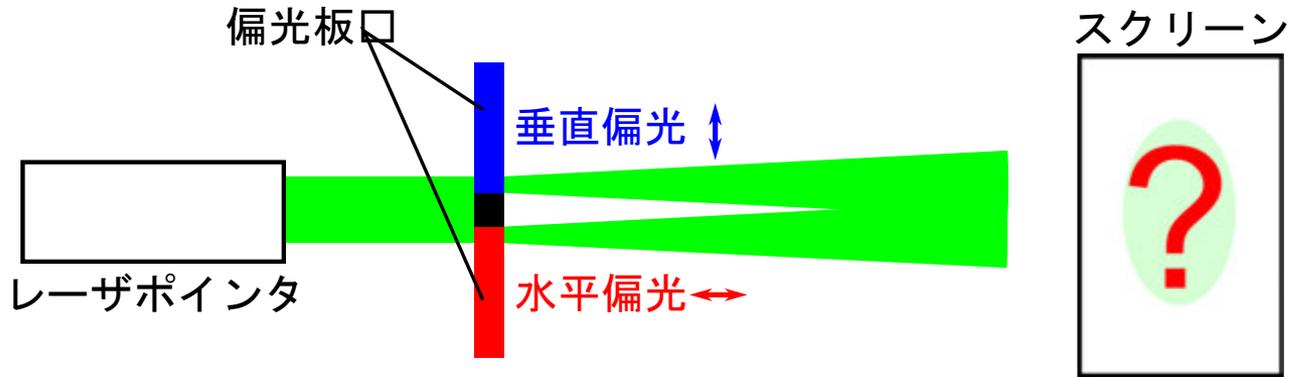


**クリップを付け外しするときは
必ずポインタの先を指で塞ぐ**

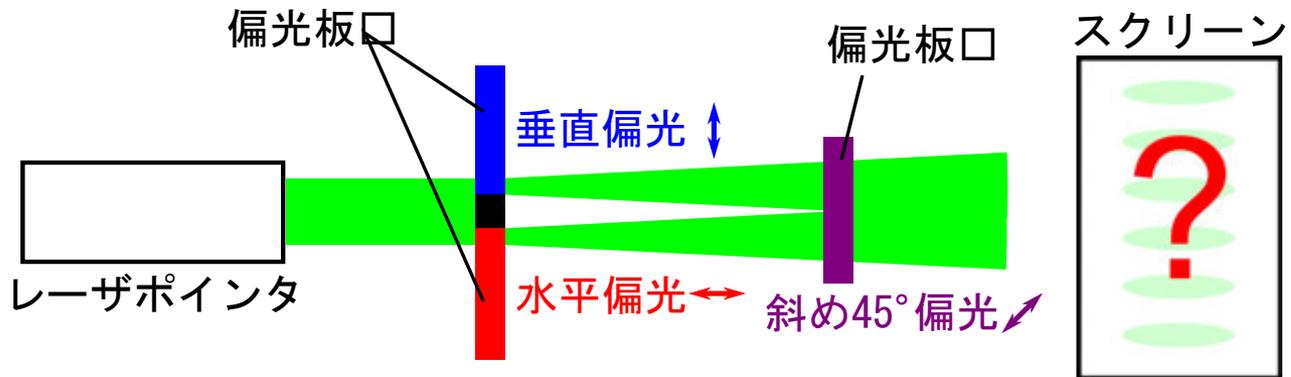


発展実験1: 量子消しゴム

- 縦偏光と横偏光は干渉するか？

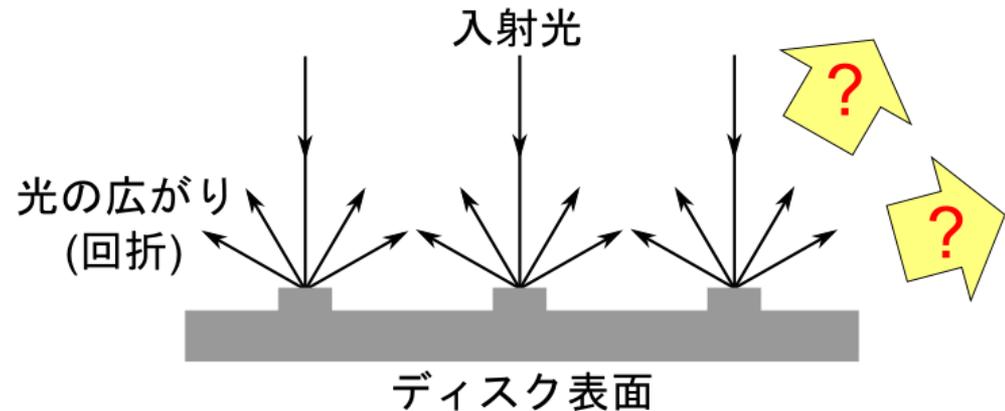
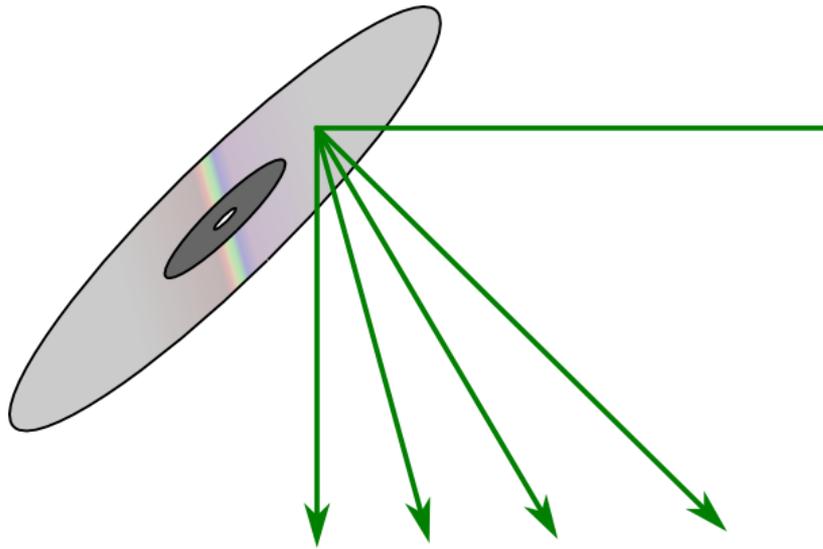


- 縦・横偏光を後で斜め偏光にすると？



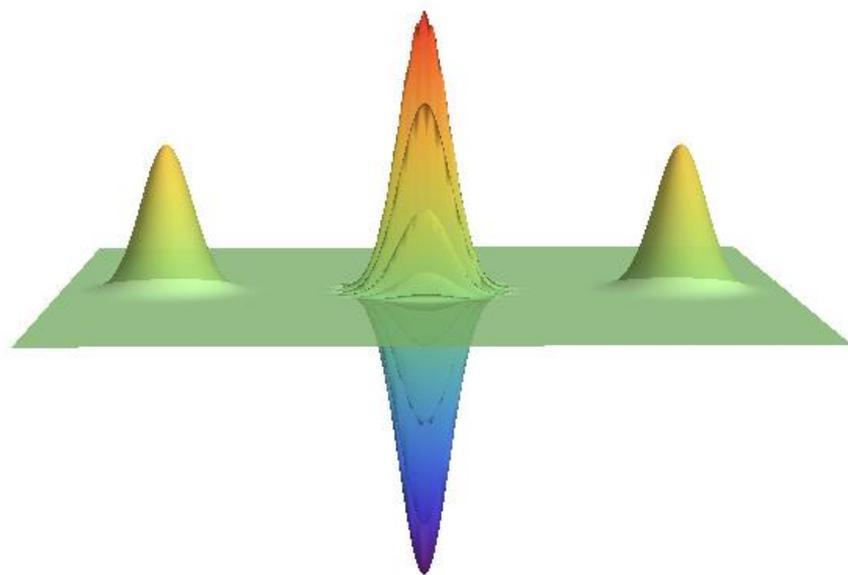
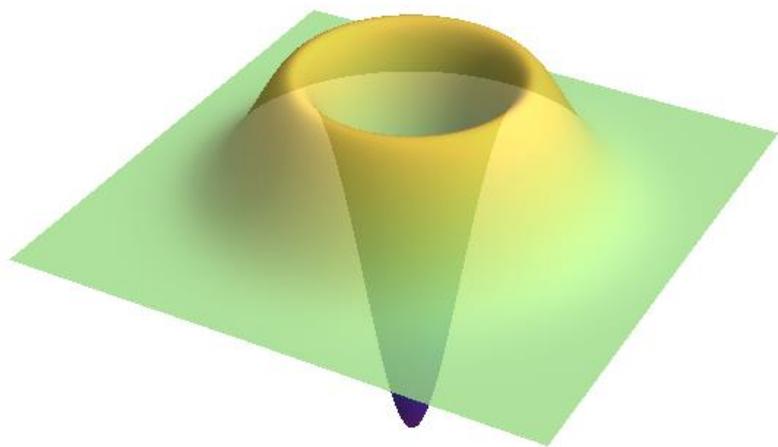
発展実験2: ディスク表面からの回折光の観測

- ディスクに緑色のレーザーを当てると反射光以外の光(回折光)が見えるか？
- CD, DVD, Blu-rayで回折光の数に違いがあるか？



- レーザー光は床に向けて反射させること！
- 回折光の行き先に十分注意すること！

第2部：結局光って何だ？ ～光の二重性と量子コンピュータ～

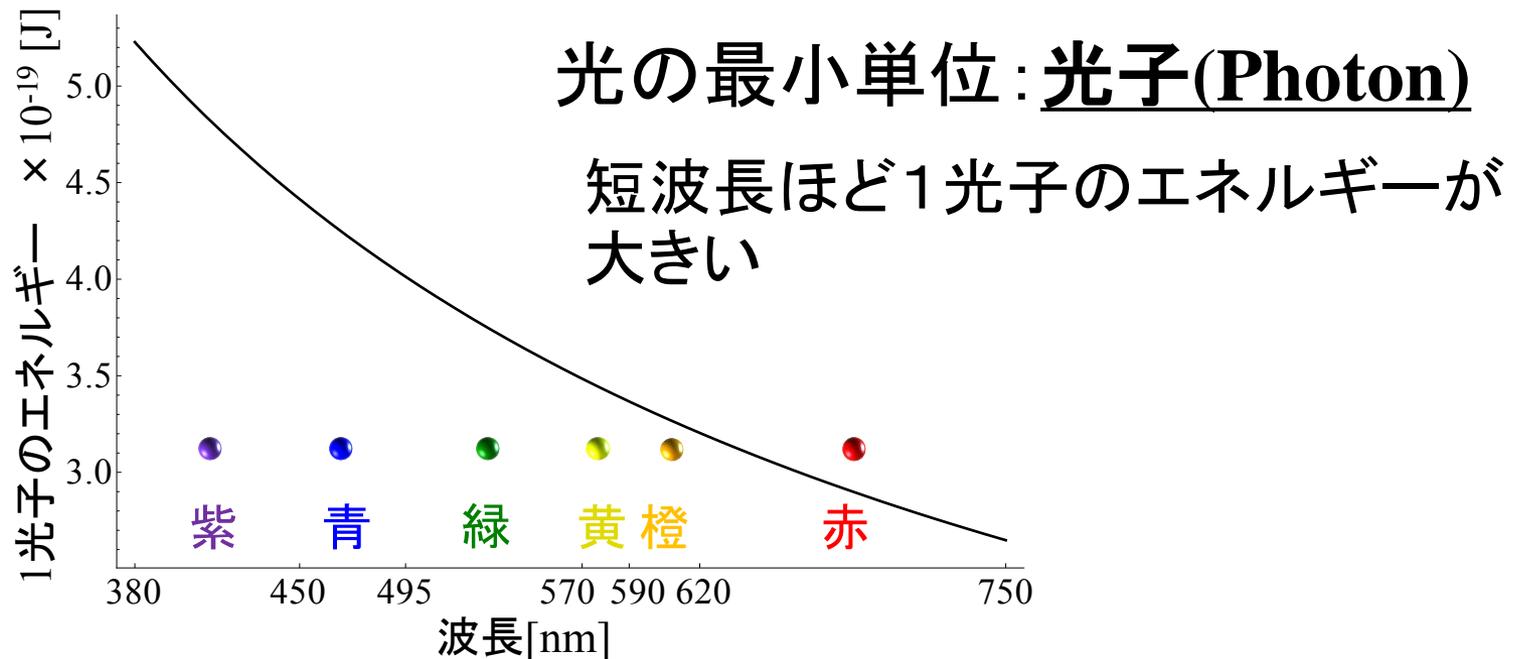


光の二重性

どんどん光を弱めていくと...

これ以上分割できない**最小の単位**がある！

光は波動性の他に**粒子性も併せ持っている**



光子や原子などの最小単位の粒子の振舞い
量子力学

光電効果

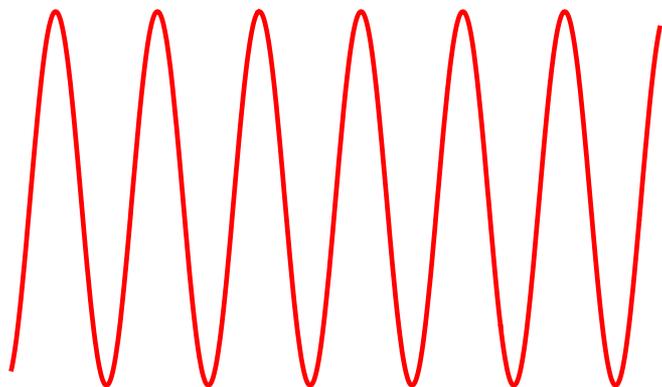
● 1888年 ハルヴァックス

亜鉛板に紫外線を照射すると電子が表面から飛び出す現象を発見

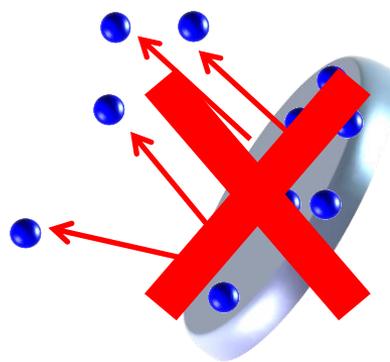
https://en.wikipedia.org/wiki/Wilhelm_Hallwachs



波動性を用いた「当時の」考え

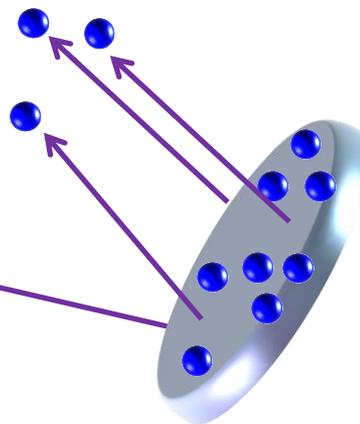
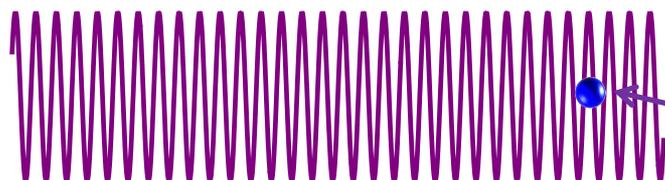


実際の性質



電子のエネルギー
入射光の強度に依存

しなかった！



光を強くしても飛び出ない

➡ 短波長なら出てくる！

より強い強度：量が増える

より短波長：

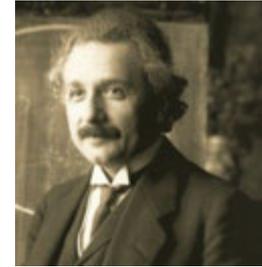
エネルギーが増える

光量子仮説

● 1905年 アインシュタイン

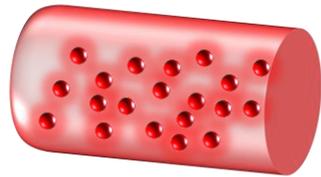
光量子仮説 → 1921年: ノーベル賞

光には最小単位のエネルギーがある: **光子**

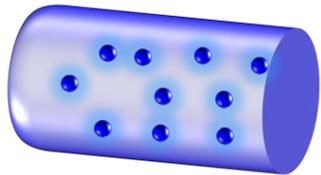


https://en.wikipedia.org/wiki/Albert_Einstein

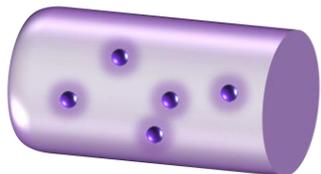
例えば電子を飛ばすのに「8」の光子エネルギーが必要と考える 注:あくまでイメージ



1光子あたり5の
エネルギー



1光子あたり10の
エネルギー

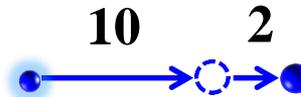


1光子あたり20の
エネルギー

光子 電子



弾けない



弾くことができる

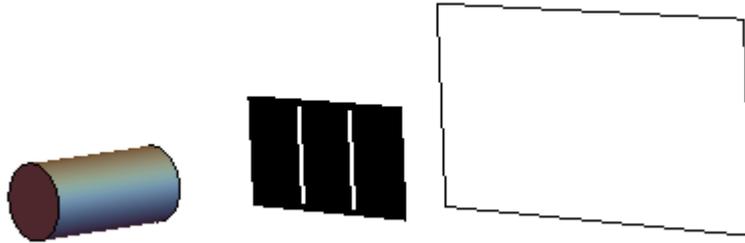


強く弾くことができる!

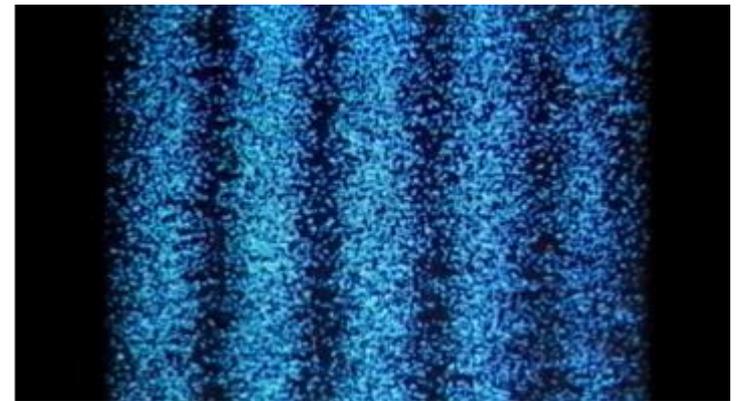
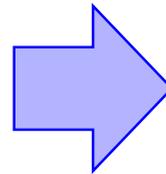
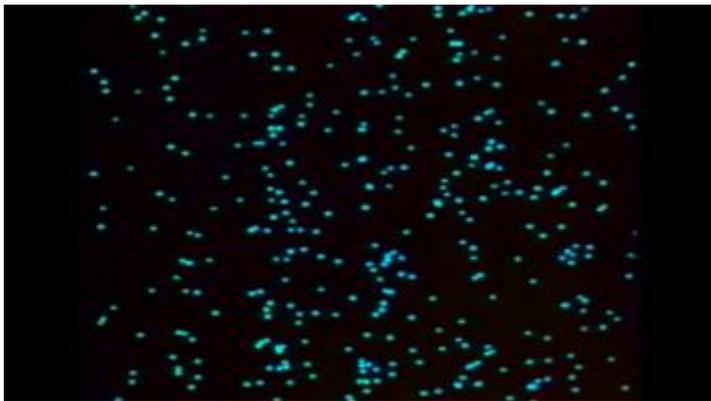
※実際には金属によって必要な波長は異なり, 主に紫外線領域で光電効果が確認される

光子と二重スリット

光子を1個1個二重スリットに通すとどうなる？



<http://demonstrations.wolfram.com/WaveParticleDualityInTheDoubleSlitExperiment/>

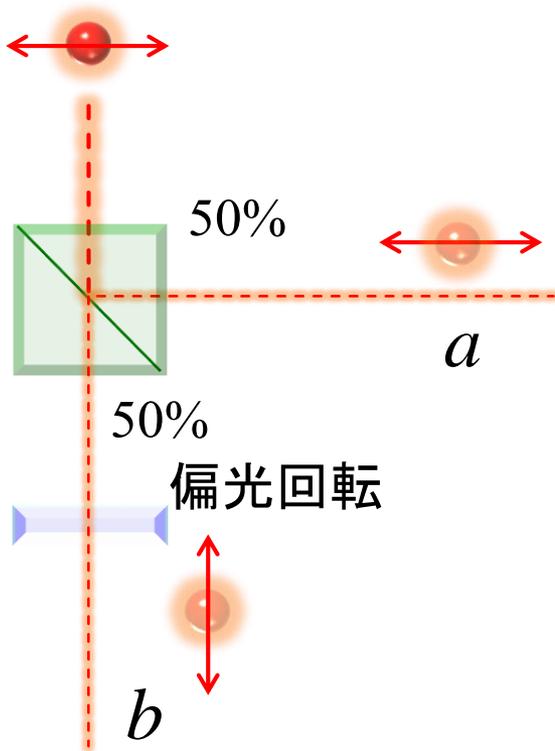


<http://photonterrace.net/ja/photon/duality/> (動画有り)

繰り返し測定することで少しずつ干渉縞が！

量子ビット

光を分ける素子に光子を入れると・・・？



- 横偏光の光

反射した場合(経路 a):そのまま

透過した場合(経路 b):縦偏光に回転

- 経路 a と b に光子が「重ね合わせ」として存在

光を測定するまでは決まっていない!

測定すると確率 $1/2$ でどちらかに現れる

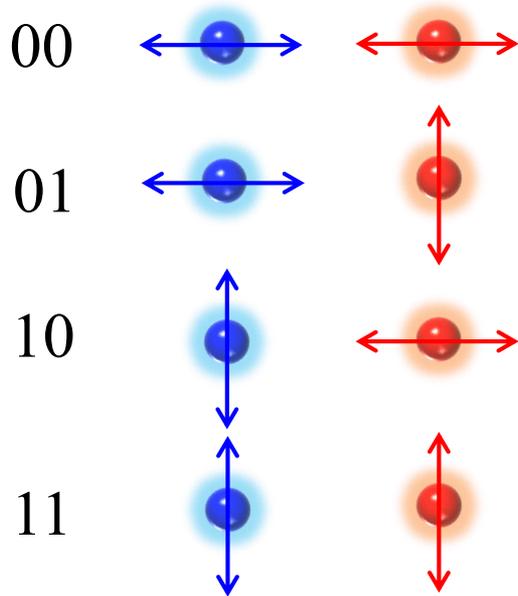
- 横偏光なら0, 縦偏光なら1とする

0と1の「重ね合わせ」:量子ビット

量子ビットを使ったコンピュータ:量子コンピュータ

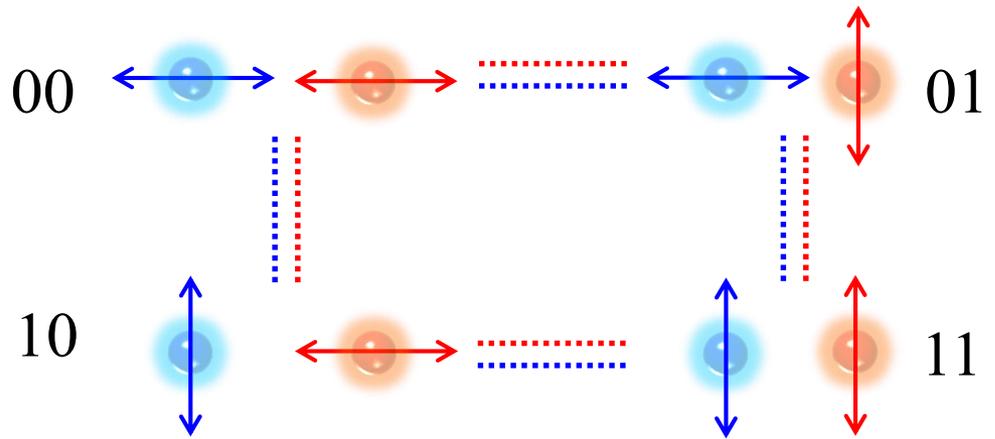
量子コンピュータがなぜ速いのか(概略)

ビットが2個ある場合



2^2 状態の内のどれか1つ

量子ビットが2個ある場合



2^2 状態の重ね合わせ: **同時に表現可能**

量子ビットが n 個ある場合: **2^n 個の情報**が同時に扱える

300量子ビット: 観測可能な宇宙の全ての原子の数を表現可能

特定の問題の高速処理が可能に

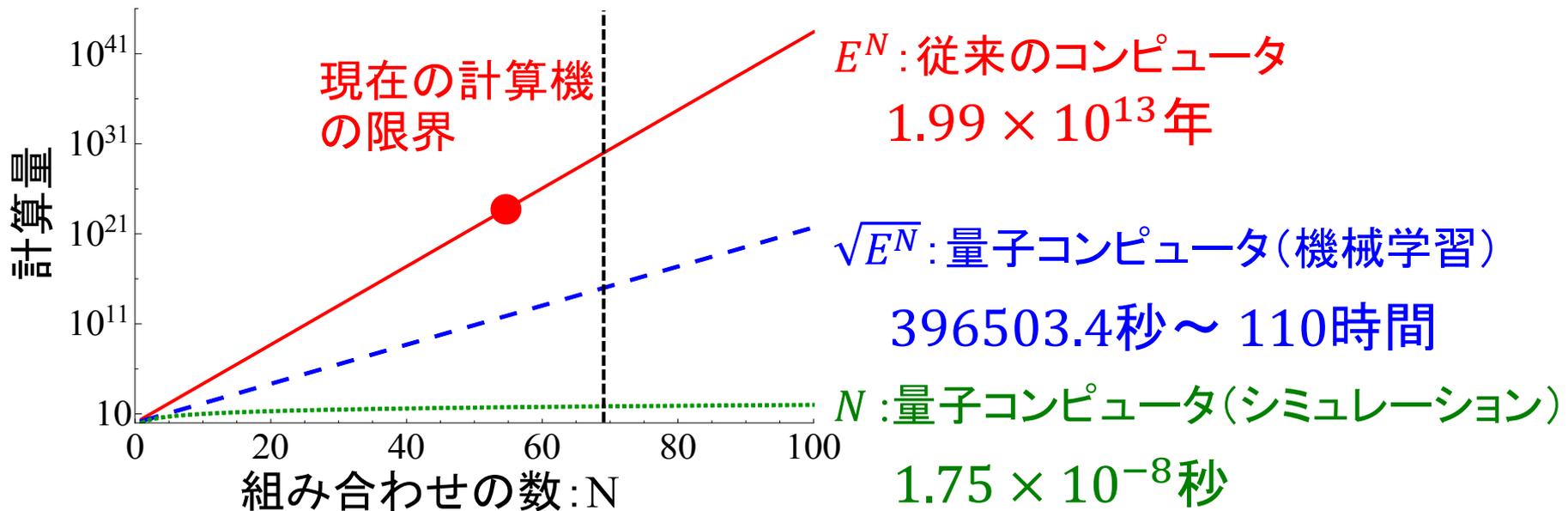
量子コンピュータが得意なこと

組み合わせが増えると計算量が爆発的に増える問題

シミュレーション: 創薬, 蛋白質解析, iPS細胞...

機械学習(人間的学習): 医療診断・画像認識・検索...

N=70の時(4GHzで動作するパソコン)



量子コンピュータの研究機関

どんな組織や企業が研究しているの？ (大学を除く)

海外

- 米国 : Google, Microsoft, Intel, IBM
- カナダ : D-WAVE



<https://plus.google.com/+QuantumAILab>



<https://www.youtube.com/watch?v=-LhPE6FpJYk>

日本

- 独立行政法人 : 理研・情報通信研究機構・国立情報学研究所
- 企業 : NTT・NEC・富士通・東芝・日立・三菱

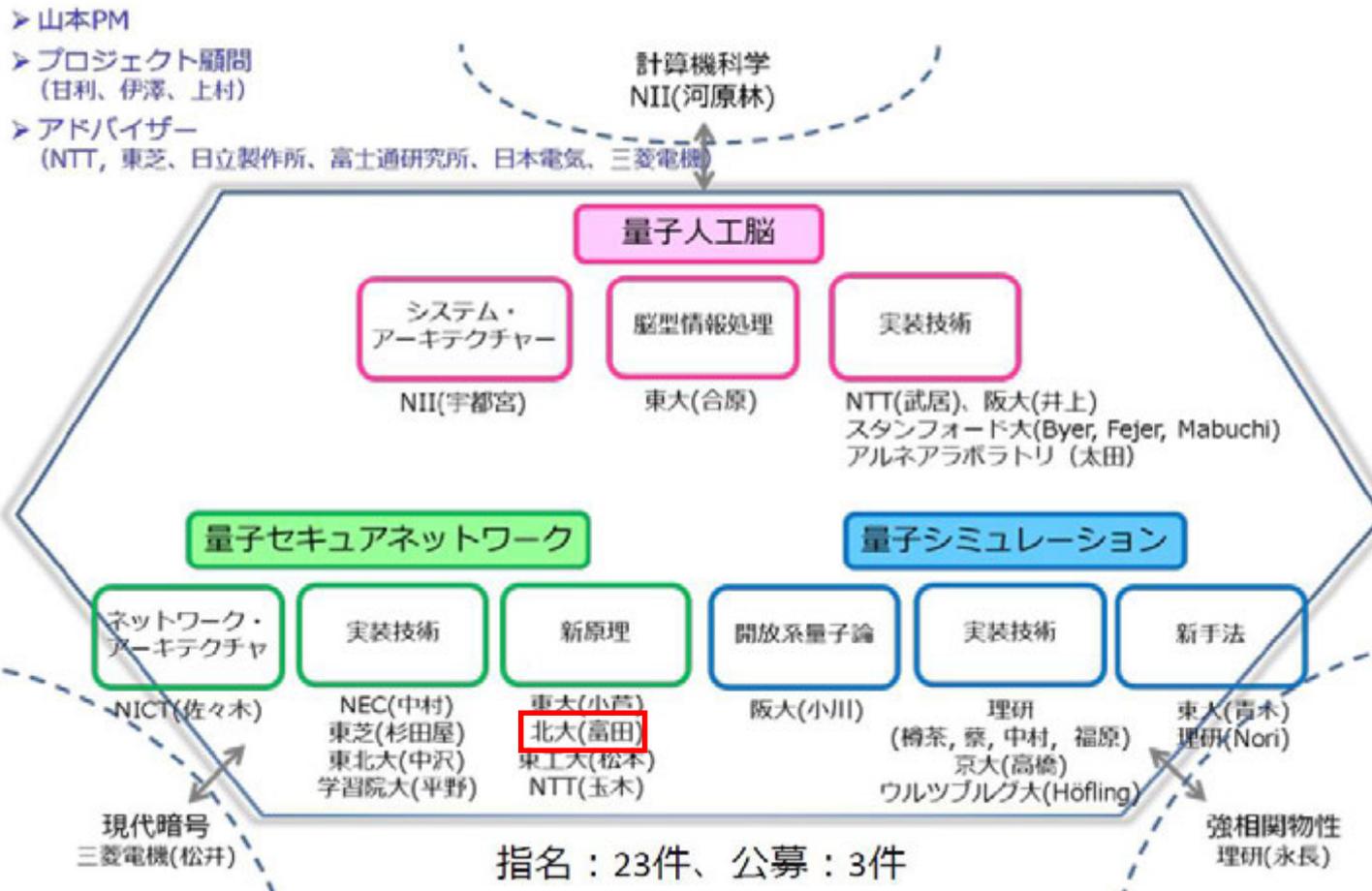
内閣府プロジェクト: ImPACT

ImPACT Project

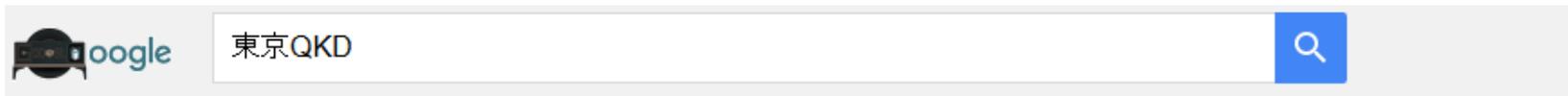
革新的研究開発推進プログラムImPACT

量子人工脳を量子ネットワークでつなぐ高度知識社会基盤の実現

http://www.jst.go.jp/impact/hp_yamamoto/index.html



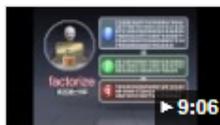
量子暗号：量子鍵配送の紹介動画



すべて 画像 ニュース **動画** 地図 もっと見る ▾ 検索ツール

約 2,570 件 (0.59 秒)

量子暗号と東京QKDネットワークの紹介 - YouTube



https://www.youtube.com/watch?v=FSP-H2_V5Tg

2013/07/28 - アップロード元: NICTchannel

量子暗号は量子鍵配送による暗号鍵共有と、それを用いたワンタイムパッド暗号化から構成され無条件に安全な通信を可能にします。量子 ...

量子暗号ネットワーク(東京QKD)運用開始～小金井からの ...



<https://www.youtube.com/watch?v=Lk7B76D1uDM>

2010/10/14 - アップロード元: internetwatchUP

2010/10/14(木) 運用開始直後の動画伝送のもよう。小金井一大手町間で、小金井からのテレビ会議映像。伝送速度は 100kbps ...

量子暗号ネットワーク(東京QKD)運用開始～盗聴検知、経路 ...



www.youtube.com/watch?v=hmsTiDvRaJE

2010/10/14 - アップロード元: internetwatchUP

量子暗号ネットワークでは、ビットエラーの増加により盗聴の検知が可能。盗聴を検知すると自動的に経路を変更。経路変更による映像の乱れな ...

※QKD: Quantum Key Distribution (量子鍵配送)

まとめ

光の正体

光は波(電磁波)と粒子(光子)両方の性質(二重性)を持つ

光の量子性

光の量子性をうまく利用するとこれまでにない技術が実現できる

量子情報科学

量子コンピュータ

大規模化

量子暗号

高速・長距離化

量子情報を応用できる関連分野: 基礎物理(重力波検出など), 生体計測...

今(これからも?)最もホットな分野の1つ

物性, エレクトロニクス, 光学, 量子力学, 情報理論, 数学などあらゆる分野で活躍できる可能性がある

自分の得意分野が活かせる!