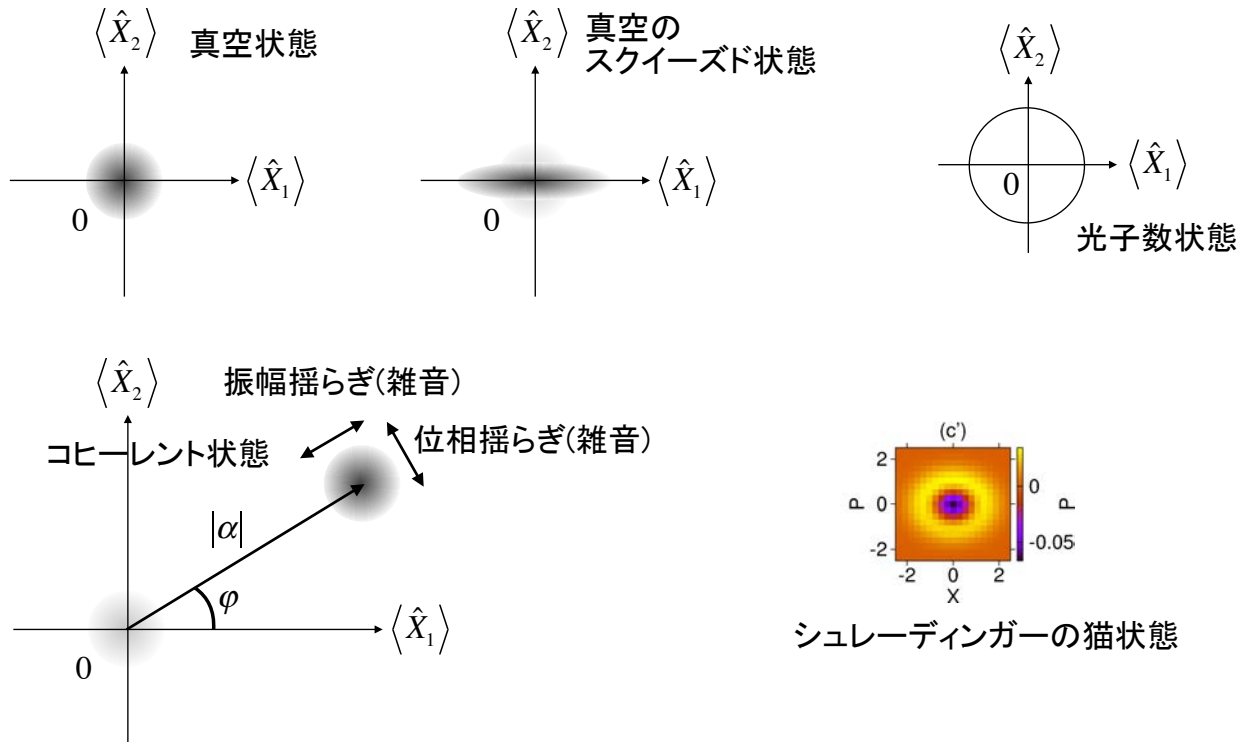




前回のまとめ(1)

光の状態の位相空間での表示



1



前回のまとめ(2)

実験値と不確かさ

測定値は必ずばらつく … 真実

Aタイプの不確かさ (回数を繰り返せば小さくできる)

Bタイプの不確かさ (繰り返しても小さくできない)

実験結果の表記法(相手への伝え方)

ある物理量の値 = **実験値** \pm **不確かさ** **単位**

例 $T = 26.8990 \pm 0.0077 \text{ s}$

不確かさは2桁
…実験値の下の桁を
不確かさに合わせる

$T = 26.899 \pm 0.008 \text{ s}$

…「不確かさ」の概念から
考えると、1桁でも良い

- 「100%正しい結果」というのはありえない(必ず**不確かさ**がある)
- **実験値**の信頼性(**不確かさ**)もきちんと伝える
- **不確かさ**が与えられていない情報(**実験値**)は信用しない

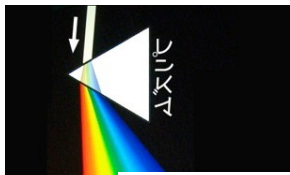
2



波動性を利用 -分光学-

分光学：スペクトルの位置を正確に測定し、エネルギー準位に関する知見を得る

17世紀



プリズム 17世紀～

相対不確かさ = 10^{-3} (1000分の1)

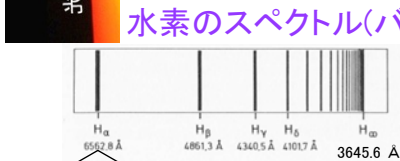
18世紀

白色光は様々な「色」から成る

回折格子分光器 18世紀末～

相対不確かさ = 10^{-6} (100万分の1)

19世紀

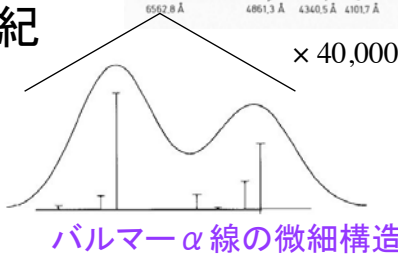


水素のスペクトル(バルマー)系列

Fig. 8.3. Balmer series in the hydrogen emission spectrum. The convergence of the lines to the series limit H_∞ is clearly seen

離散的エネルギー準位

20世紀



バルマーα線の微細構造

ボーアの水素原子模型(1913)

初期量子論

ディラックの相対論的量子論(1928)

電子のスピン、反粒子の存在

ここ以降は「周波数」を使う

周波数(振動数) $\nu = c/\lambda$ 光の速さ/波長

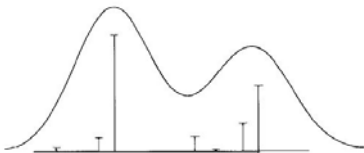
波長

周波数(振動数)



波動性を利用 -分光学-

バルマーα線の微細構造



相対不確かさ = 10^{-7} (1000万分の1)

マイクロ波分光 1945～

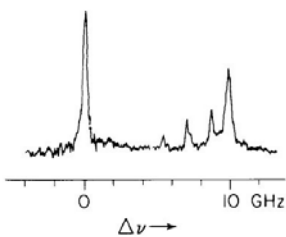
ラムシフトの観測(1947)

量子電気力学による説明(1947)

真空分極

異常磁気モーメント

質量の繰り込み



レーザー分光 1960～

相対不確かさ = 10^{-9} (10億分の1)

超微細構造 (核スピンによる準位の分裂)

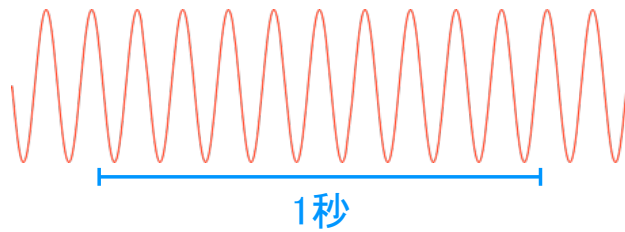
レーザーの登場で超微細構造までも観測できるようになった(相対不確かさ10億分の1)。レーザー冷却、原子気体のボースアインシュタイン凝縮など、大きな進歩はあるものの、分光学的な「新発見」はその後出ていない。

なぜ? もっと分解能を上げなければならない? (相対不確かさを小さくする)



超精確原子時計への道

例えば周波数測定は、



1秒間の振動数(波の数)を測定

…測られるもの

…測るための物差し(尺度)、標準器

ドップラーフリー分光

相対不確かさ = 10^{-9} (10億分の1)

相対不確かさ10億分の1で波の数を数えるためには、

「1秒」という時間間隔(標準器)は、10億分の1よりももっと良い精度で作っておかなければならない

そして1960年頃の1秒の正確さ(相対不確かさ)は10~100億分の1程度

測定対象と同程度

基準(1秒の標準器)を決める測定は、
もっとも相対不確かさの小さい測定で
なければならない

…究極の測定

5



超精確原子時計への道

1秒の定義の変遷 (参考資料 参照)

古代より	地球の自転周期	平均太陽日の 1/86 400 倍 7~8桁(1千万~1億分の1)程度の安定性 (マイクロ波分光の精度と同程度)
1960	地球の公転周期	暦表示の1900年1月0日12時に対する太陽年の 1/31 556 925.974 7 倍である 10桁(100億分の1)程度の安定性
1967	セシウム原子の 遷移周波数	セシウム133の原子の基底状態の二つの超微細 構造準位間の遷移に対応する放射の周期の 9 192 631 770 倍の継続時間である 12桁の安定性(1967年当時)

量子標準の採択

時間標準 セシウム原子時計の採択(1967)

1秒を決めるための測定 … 原子線分光、ラムゼイ共鳴

相対不確かさ = 10^{-12} (1兆分の1)

ドップラーフリー分光の相対不確かさを凌駕しているのでひと安心。

6

超精確原子時計への道

(ちょっと寄り道)

「測る」を究めろ!」 98~100ページ参照

時間の測定器(時計)の仕組み

古代：日時計 (地球の自転周期に同期)
まさに(当時の)定義通り

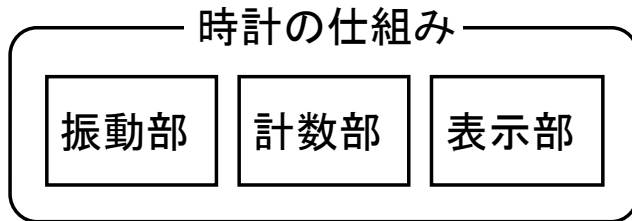
1秒を測るのは困難

中世～：機械式時計

現代～：電気式時計



http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Precision_sundial_in_Bütgenbach-Belgium.jpg
(精度は約30秒)



時計の性能、精度はほぼ振動部で決まる

特に等時性

周波数の不確かさが同じならば、周波数の高い方が精度は良くなる
(相対不確かさは小さくなる)

超精確原子時計への道

「測る」を究めろ!」 98~100ページ参照



[http://en.wikipedia.org/wiki/File:GB-3-Gew-Pendeluhr_\(Luekk\).jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:GB-3-Gew-Pendeluhr_(Luekk).jpg)

振動部の素子	周波数
振り子	~ 1 Hz
テンプ	~ 10 Hz
音叉	~ 10 ³ Hz
クォーツ	~ 10 ⁴⁻⁵ Hz
(LCR共振回路)	~ 10 ⁷ Hz
マイクロ波 (超微細構造間遷移)	~ 10 ¹⁰ Hz
光領域の遷移	~ 10 ¹⁵ Hz



http://en.wikipedia.org/wiki/File:000_0rysd251_edited.jpg



http://en.wikipedia.org/wiki/File:G-shock_G100.jpg



http://en.wikipedia.org/wiki/File:Rb_oscillator.jpg



http://en.wikipedia.org/wiki/File:JILA%27s_strontium_optical_atomic_clock.jpg

ルビジウム原子時計
セシウム原子時計

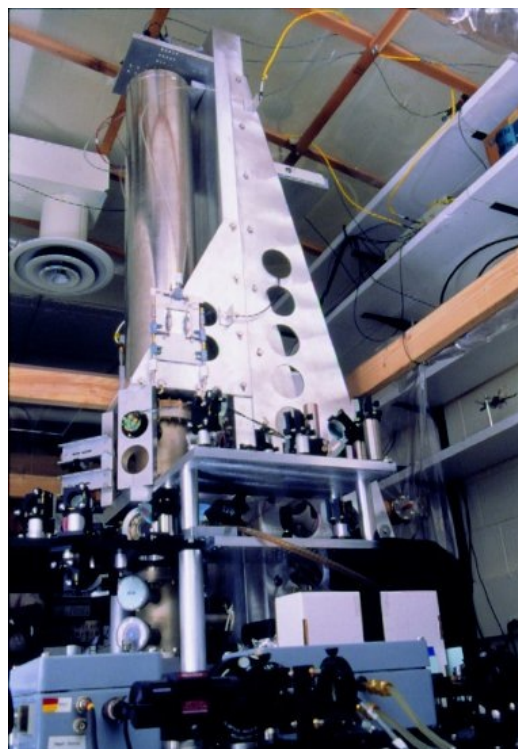
イオン時計、光格子時計

超精確原子時計への道

セシウム原子時計(原子泉型)



<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:FOCS-1.jpg>



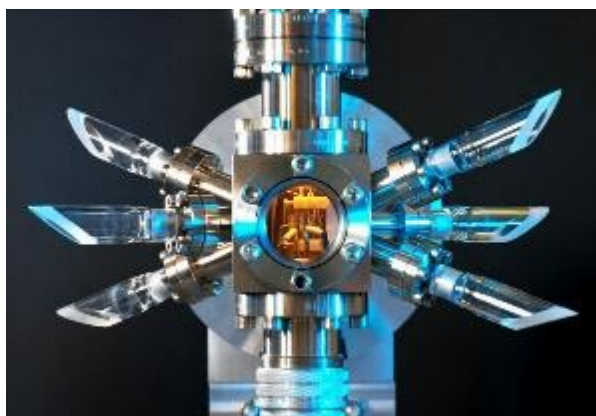
<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Nist-f1.jpg>

9

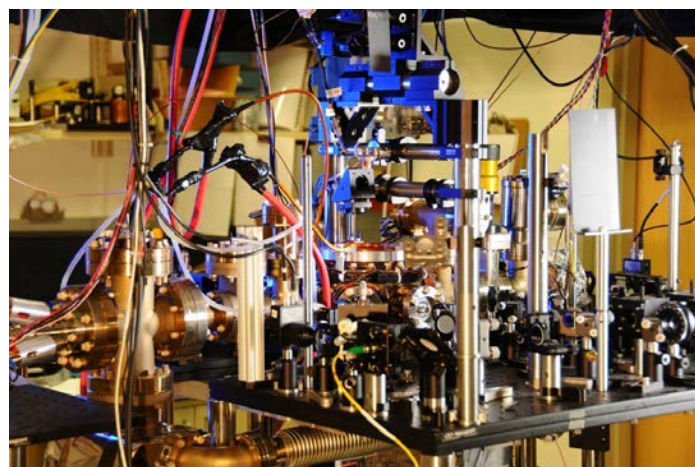
超精確原子時計への道

イオン時計

光格子時計



<http://www.npl.co.uk/science-technology/time-frequency/research/optical-frequency-standards/trapped-ion-optical-frequency-standards>



<http://patapsco.nist.gov/imagegallery/retrieve.cfm?imageid=1250&dpi=300&fileformat=jpg>

10



超精確原子時計への道

(話を戻して…) 精度は上がったが、なかなか新しい発見は出てこない。
やはりもっと精度を高める必要がある。と、人類の更なる挑戦は続く…

長さ標準の再定義(1983)

1メートル = 光が真空中で299,792,458分の1秒の間に進む距離

レーザー冷却の成功(1985)

極低温気体原子の安定生成

原子気体ボース・アインシュタイン凝縮の成功(1995)

高密度・極低温気体原子の生成

周波数コム(2000)

周波数軸上の便利な「物差し」

光格子時計(2003)

相対不確かさ = 10^{-15} (1000兆分の1)

高密度・極低温気体原子による
可視光領域における精密周波数測定

光領域の原子時計の相互比較(2008)

イオン時計(Hg⁺, Al⁺) 2008

相対不確かさ = 10^{-17} (10京分の1)

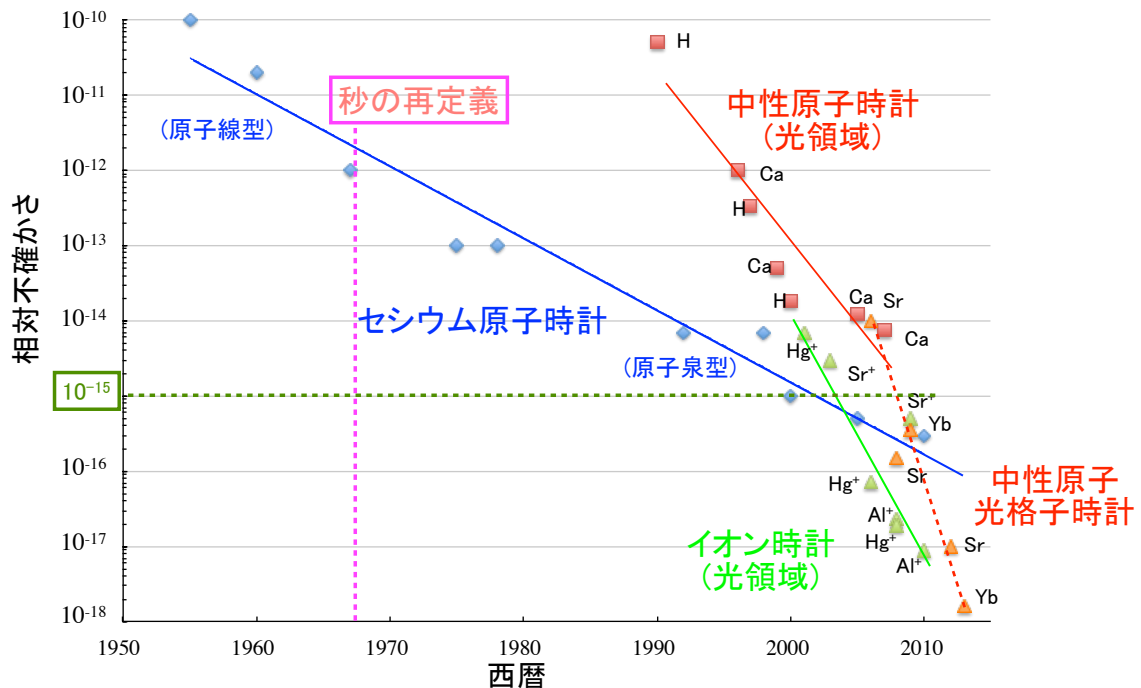
光格子時計(Yb) 2013

相対不確かさ = 10^{-18} (100京分の1)



超精確原子時計への道

原子時計の相対不確かさの変遷



秒の定義であるセシウム原子時計もその精度を上げているが、
新たに開発された光領域の時計の精度に追い上げられ、
2000年以降は不利な戦いとなっている



超精確原子時計への道

相対不確かさ 10^{-18} の世界

不確かさの内訳の評価 (error/uncertainty budget)

周波数に影響を及ぼす様々な要因について、シフトの大きさやそれによる不確かさの大きさを事細かに見積もる

Table 1. $^{27}\text{Al}^+ \ ^1\text{S}_0 \leftrightarrow \ ^3\text{P}_0$ and $^{199}\text{Hg}^+ \ ^2\text{S}_{1/2} \rightarrow \ ^2\text{D}_{5/2}$ clock shifts ($\Delta\nu$), and uncertainties (σ) in units of 10^{-18} of fractional frequency. AOM, Acousto-optic modulator.

Shift	$\Delta\nu_{\text{Al}}$	σ_{Al}	$\Delta\nu_{\text{Hg}}$	σ_{Hg}	Limitation
Micromotion	-20	20	-4	4	Static electric fields
Secular motion	-16	8	-3	3	Doppler cooling
Blackbody radiation	-12	5	0	0	DC polarizability
313-nm Stark	-7	2	-	-	Polarizability, intensity
DC quadratic Zeeman	-453	0.5	-1130	5	B-field calibration
AC quadratic Zeeman	0	1	0	10	Trap RF B-fields
Electric quadrupole	0	0.5	0	10	B-field orientation
First-order Doppler	0	1	0	7	Statistical imbalance
Background gas collisions	0	0.5	0	4	Collision model
AOM phase chirp	0	0.1	0	6	RF power
Gravitational red-shift	-5	1	-	-	Clock height
Total	-513	23	-1137	19	

光格子時計(Hg^+ , Al^+)、Science 319, 1808 (2008)

Al^+ で 2.3×10^{-17} 、 Hg^+ で 1.9×10^{-17}

13



超精確原子時計への道

再び時計の「正しさ」に対する疑問

現在の時間標準(1秒の定義)

セシウム原子時計(マイクロ波遷移を利用)

相対不確かさ = 10^{-15} (1000兆分の1)

新しい原子時計(可視光領域の遷移を利用)

相対不確かさ = 10^{-18} (100京分の1)

つまり現在の1秒の定義の方が不正確

👉 近い将来(おそらく2019年)、1秒の定義が変更されるはず

(参考資料 参照)

技術開発による
測定精度の向上
(相対不確かさの減少)

14

粒子性の利用 一個光を!

粒子性の利用 一個光を!

なぜ「一個」が必要なのか 重要なのか
—量子ビットとしての単一原子と単一光子—

量子情報処理の分類

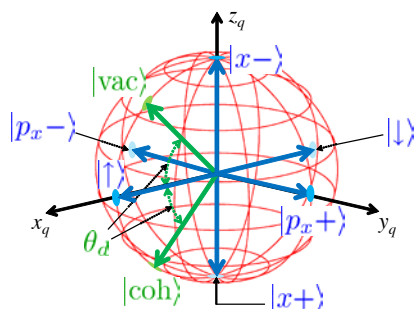
量子計測
量子標準

伝統的分野
単一光子、スピン計測
時間・周波数標準

比較的新しい分野
量子暗号、量子メモリー
量子ビット、量子演算

量子通信

量子コンピューター/量子シミュレーター



古典計算機：「0」あるいは「1」の値(状態) 「ビット」
量子計算機：「0」と「1」の重ね合わせ状態 「量子ビット」
1(量子)ビットで表現できる範囲が広い

古典計算機では「現実的に」計算不可能とされていた問題も計算可能となり、量子計算機では「現実的な」時間内で解くことができるようになる。

粒子性の利用 一個光を!

量子計算に必要なもの

- 量子ビット(演算部) いわゆる原子の二準位系を考えればよい
- 量子メモリー これも二準位系で可能
- 量子伝送 ここに光が必要

量子計算機の話も面白いが、ここでは「一個光を!」の範囲に留め、単一光子を利用した話題に限ることにする。

単一光子を利用した話題

量子暗号通信

概要~いろいろな単一光子源

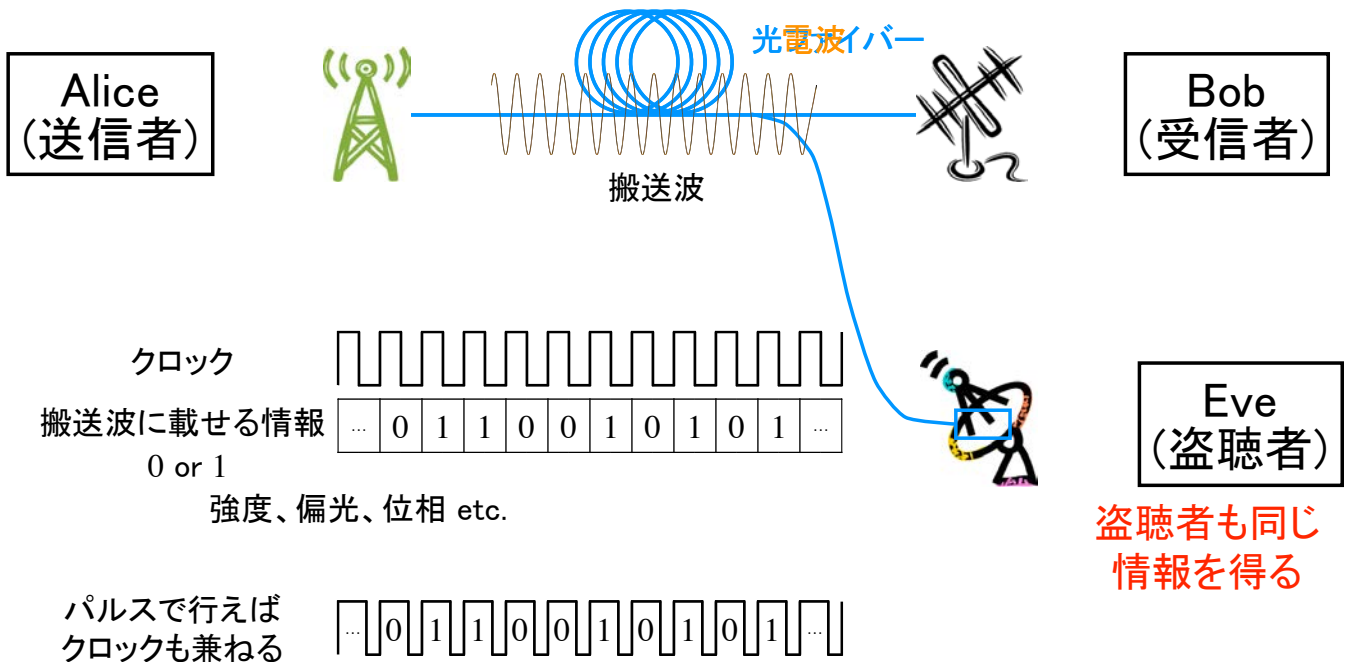
一個の原子と一個の光子、そして相互作用

実は物理学の基本法則(Schrödinger方程式)はこの枠組みで書かれている

少数個(1個)の原子、光子が絡む面白い話題・実験

量子暗号通信

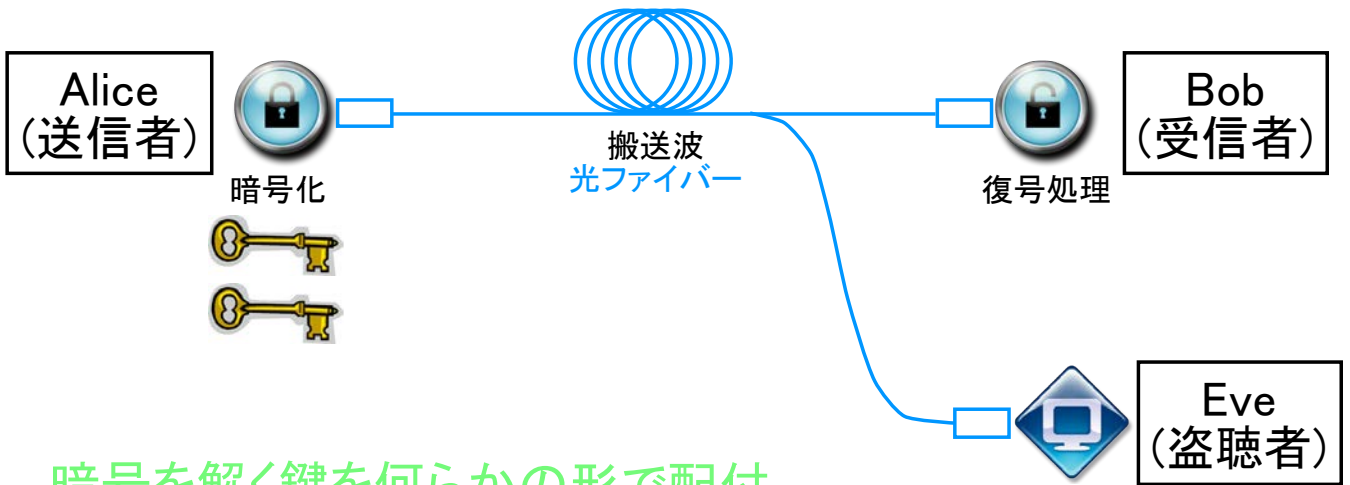
通常の通信スキーム



盗聴されても情報が漏れないようにするには暗号化が必要

量子暗号通信

暗号通信



暗号を解く鍵を何らかの形で配付

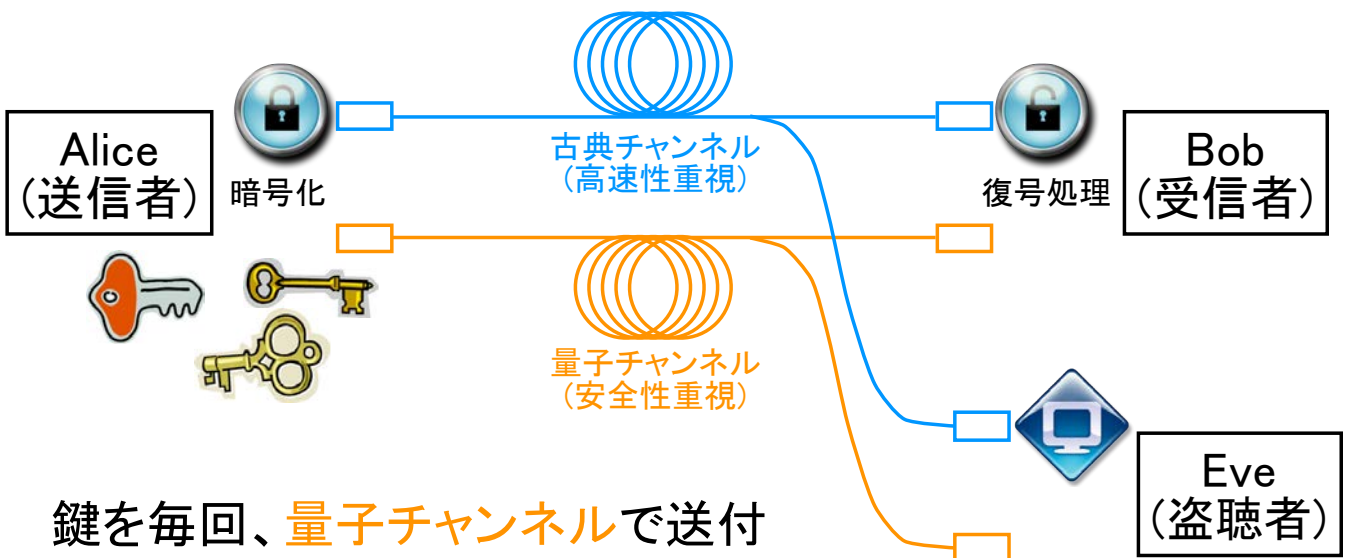
同じ鍵を使い続けるのは危険
(破られる可能性が高くなる)

でも、高性能計算機があれば
古典暗号は破ることが可能



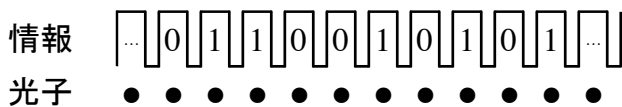
量子暗号通信

量子暗号



鍵を毎回、量子チャンネルで送付

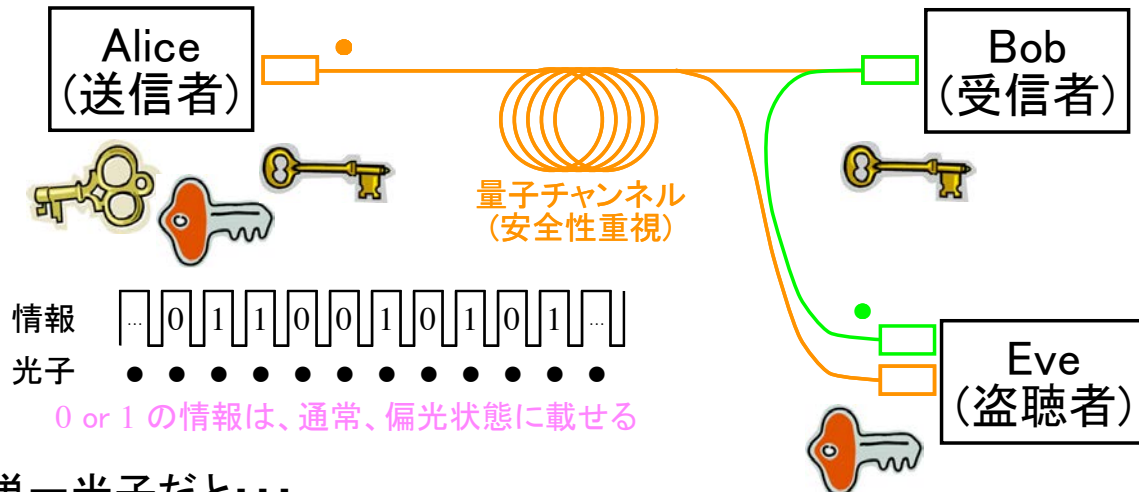
パルス内の光子数は1個(単一光子)



0 or 1 の情報は、通常、偏光状態に載せる



量子暗号通信



単一光子だと...

Eveが盗聴するとBobには光子が届かないことがある
何らかの情報を得ると、必ず光子の状態が乱される

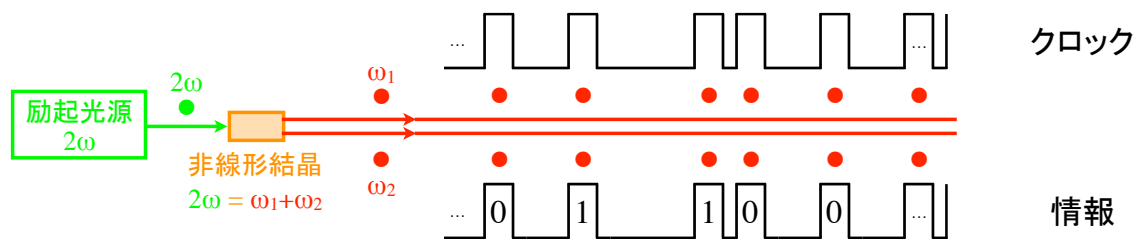
- Alice、Bob、Eveの三者が同一の鍵を持つことはない
- AliceとBobが時々「答えあわせ」すれば、盗聴を発見できる

単一光子源は安全な暗号(量子暗号)を実現するためには必須



これまでの単一光子源

パラメトリック蛍光



利点

室温動作
比較的簡単な実験系

難点

励起光源にそれなりの出力が必要
クロックの周期が不規則
光子対の空間分布が大きい

解決法

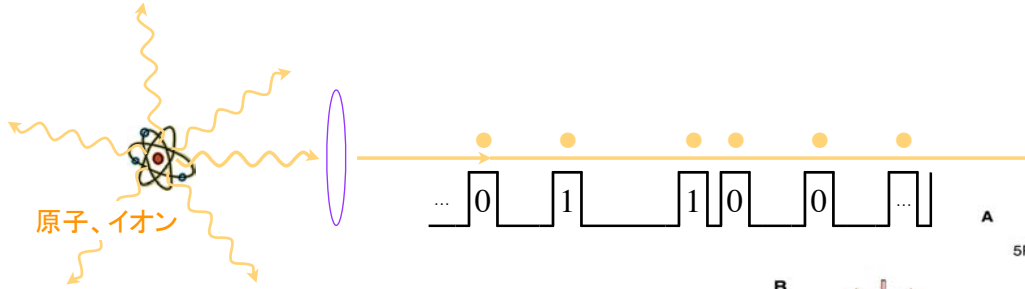
高効率非線形結晶(導波路型)
(本質的な問題ではない) **でも実用上は問題**
導波路とファイバーの利用



これまでの単一光子源

単一原子、イオン

発光体が1個なので、一度に出る光子も1個



原子、イオン

利点

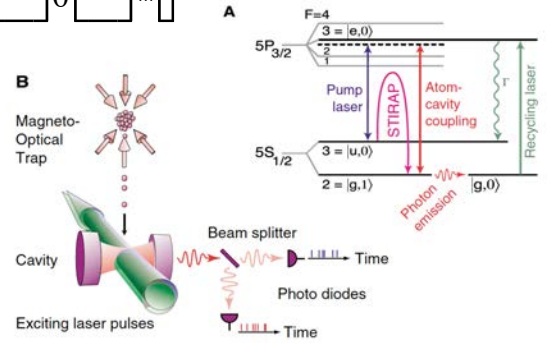
確実な単一光子源

難点

原子などの捕獲
集光効率
クロックができない
大規模な装置(真空槽など)

解決法

レーザー冷却・捕獲、イオントラップ
共振器量子電磁学的効果(cQED)
cQEDとパルス励起 (STIRAP)
Atomチップなどによる小型化



Phys. Rev. Lett., 89, 067901 (2002)



これまでの単一光子源

エピタキシャル半導体量子ドット

New J. Phys., 6, 089 (2004).

(山本さんのグループ)

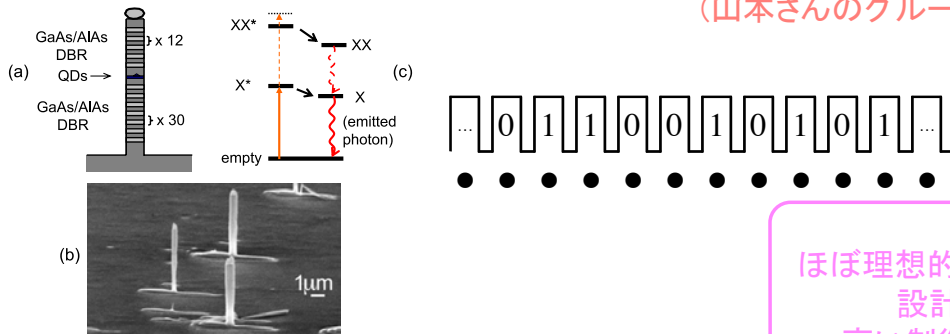


Figure 1. (a) Schematic diagram of single-photon device, (b) scanning-electron microscope image of actual pillar structures; and (c) optical excitation scheme.

利点

ほぼ理想的な単一光子列が実現可能
設計の自由度が大きい
高い制御性、ハイテクの見せ所

難点

高度な作成技術
極低温(He温度、 -270°C)
大規模な装置

解決法

すべてが技術の進展・集積に
かかっている
(頑張るしかない)

いずれの方法も、高い技術、高価・大型装置が必要
また、環境負荷も大きい

「一人1台」の単一光子源という意味では、実現性に乏しい

これまでの単一光子源

ベースは単一原子による方法と同じ

単一原子の代わりにコロイド量子ドット(半導体微粒子)を用いる

CdSe/ZnS コア/シェル量子ドット

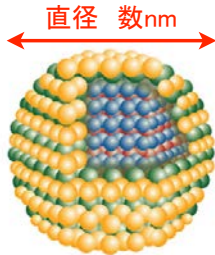


Figure 5. CdSe/ZnS core-shell quantum dots have an inner spherical CdSe semiconductor crystal surrounded by a shell of ZnS semiconductor. Core diameters typically range from 2 to 10 nm, and shell thickness may vary from 0.5 to 4 nm. Courtesy of Evident Technologies Inc.

Photonics Spectra, May 2007

<http://www.photonics.com/Article.aspx?AID=29421>

大きさを制御することで
様々な波長の発光が可能

ナノサイズだと2光子同時
放出が抑制される

量子閉じ込め効果により、
通常のバンドギャップ(1.73 eV)より
光学遷移エネルギーが高くなる

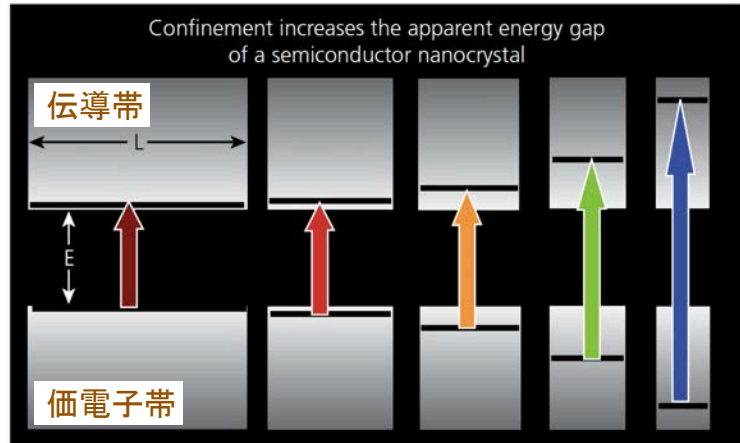
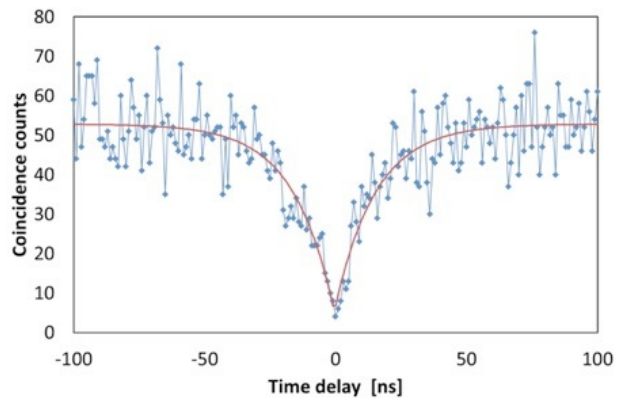
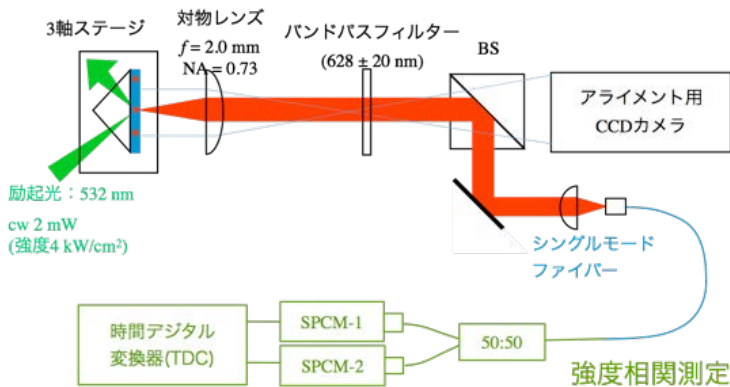


Figure 2. Schematic of the effect of the decreased size of the box on the increased energy gap of a semiconductor quantum dot, and the resultant luminescent color change from bulk materials (left) to small nanocrystals (right).

http://www.sigmaaldrich.com/etc/medialib/docs/Aldrich/Brochure/al_material_matters_v2n1.Par.0001.File.tmp/al_material_matters_v2n1.pdf

これまでの単一光子源

コロイド量子ドットによる単一光子源



アンチバンチング

利点

室温動作
簡単な実験系
安価

難点

集光効率が低い
量子ドットの酸化(発光効率の低下)

解決法

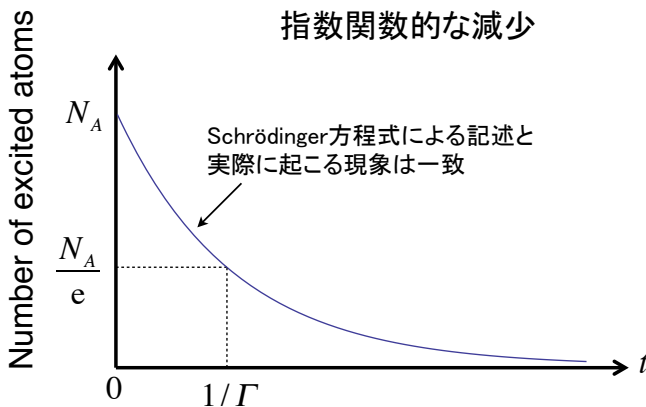
ドットをファイバー端面に固定
光共振器効果
ポリマーで保護

一個の原子と一個の光 相互作用

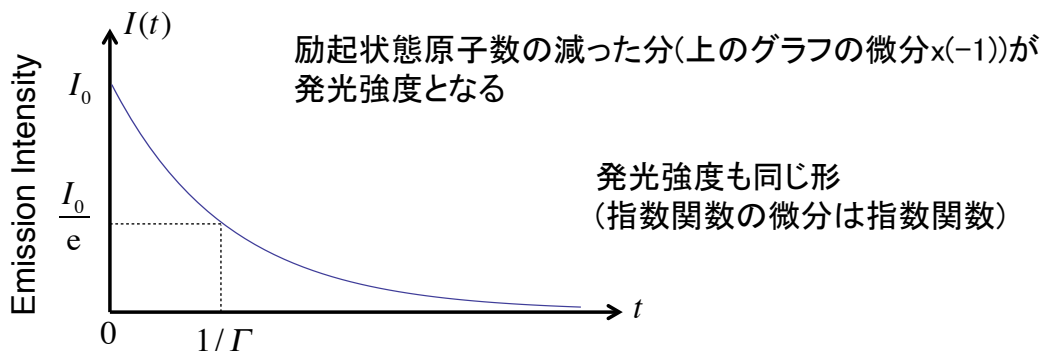
蛍光寿命の測定実験

励起状態の原子をたくさん用意して自由に発光させる
初期励起状態原子数 = 多数個(たとえばアボガドロ数個)

励起状態原子数の時間変化



似ている(同じ)例 原子核崩壊
指数関数的な減少



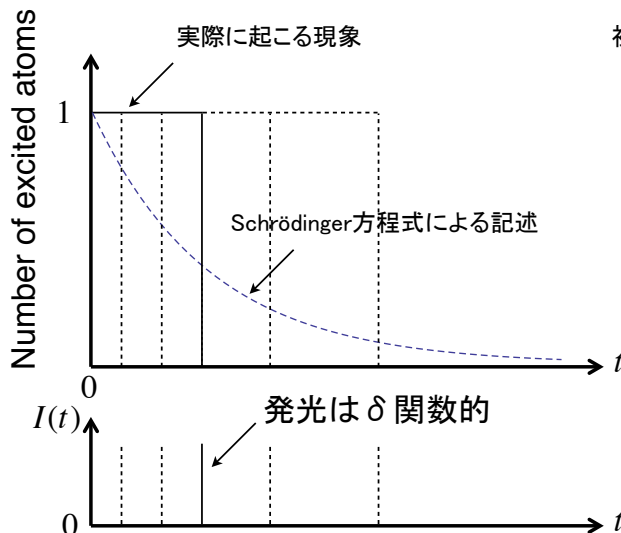
一個の原子と一個の光 相互作用

Bohrの仮説
(1913)

- 仮説I 定常状態における系の動的な釣り合いは古典論を使って表現できるが、異なる定常状態間を移り変わる現象(遷移)は古典論では説明できない。
- 仮説II 異なる定常状態間を遷移する際、均質な電磁波を放出し、電磁波の周波数と放出されるエネルギーはプランクの関係式で結ばれる。
- 仮説III 定常状態がエネルギー的に連続に分布していると見なされるような領域では、放出される電磁波の周波数は古典論と一致する。

一個だけに着目すると、励起状態にしばらくいて、発光し基底状態に戻る
つまり状態は「突然」変化する(遷移する) いつ光るかは誰もわからない

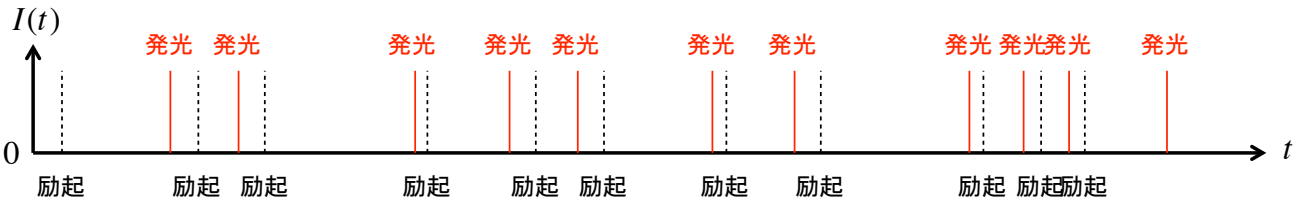
励起状態原子数の時間変化



微分して(-1)をかけると...
「量子性」

一個の原子と一個の光 相互作用

1個の原子を連続して励起し続けたときの発光

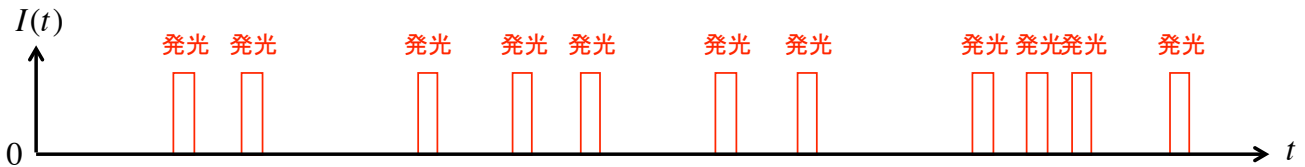


発光から励起までの時間間隔はほぼ一定
 (基底状態から励起状態に遷移するまでの時間)
 励起の強さで決まり、強ければほとんど瞬間的に励起される

励起から発光までの時間間隔はばらつく(指数関数的な分布)
 (励起状態から基底状態に遷移するまでの時間)
 励起状態の寿命(2準位間の遷移強度)で決まる

実際に検出器から出力される信号

検出器には有限の応答時間があるので δ 関数的な出力にはならない



光子統計 … このような「光子列」の統計分布を調べる (一例)

一個の原子と一個の光 相互作用

1個の原子は一度に1個の光子しか放出できない

つまり、原子を1個だけ捕獲して励起すれば、1個ずつしか光子は出てこない

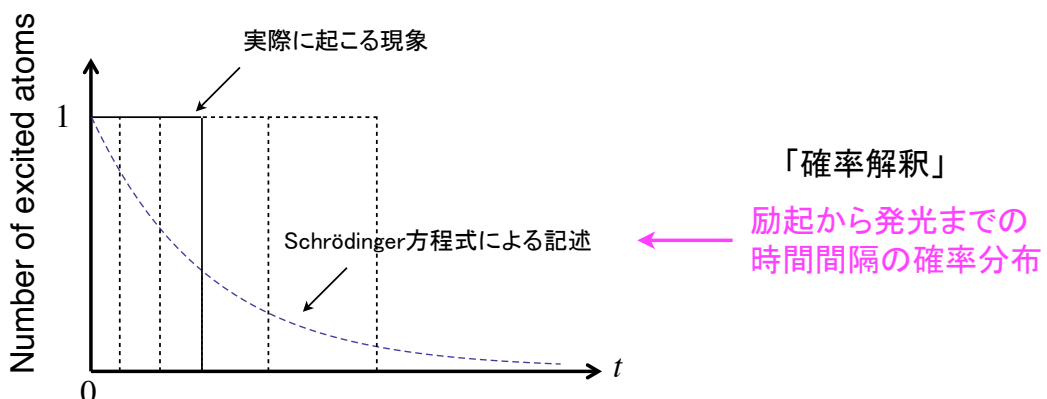
単一光子源

確かに、量子論のSchrödinger方程式は、
 1個の原子と1個の光子の相互作用を記述する方程式

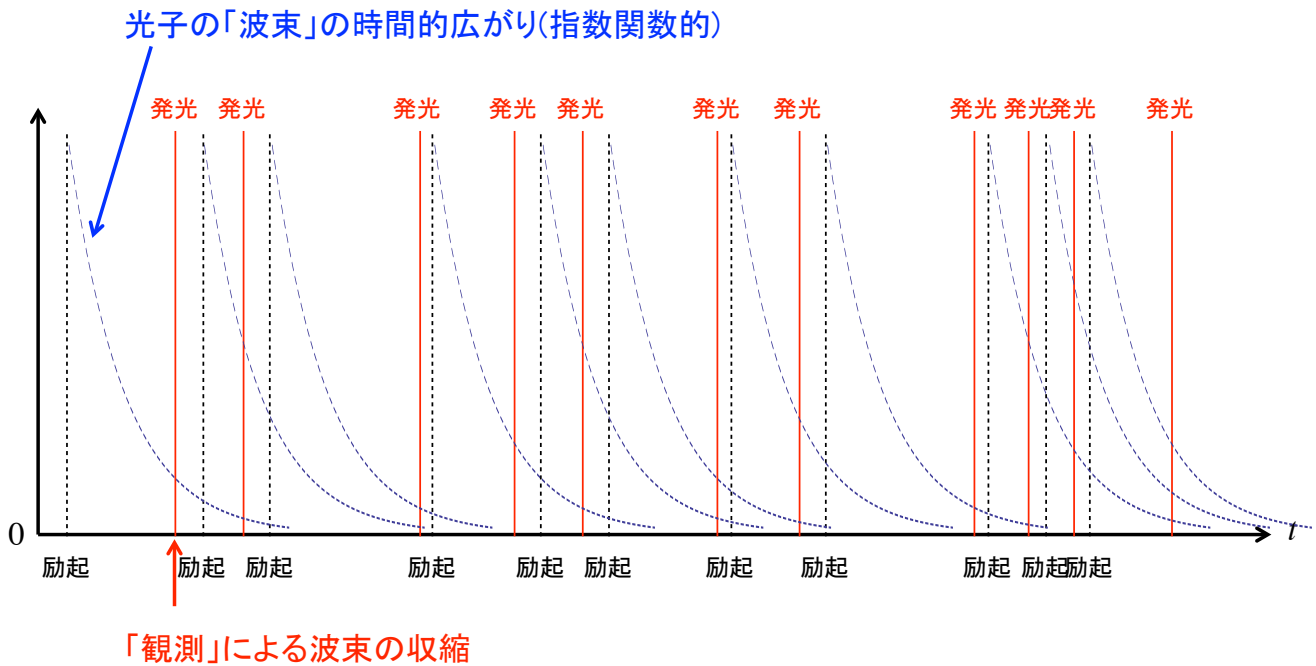
しかし、これまでの観測、実験は、集団平均を測定してきた

逆にいうと、集団平均を測定してきた実験をうまく説明できるのが、
 Schrödinger方程式ということ

1個の原子を対象とする時は、いわゆる「確率解釈」を使う



一個の原子からの発光(連続励起)



励起から発光までの時間間隔は指数関数的な分布をする
励起状態の寿命(2準位間の遷移強度)で決まる

少数個の原子、光子が絡む面白い話題・実験

量子暗号、量子情報処理

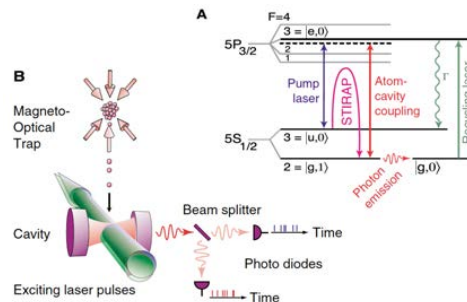
単一光子による情報通信(量子暗号)

量子情報処理(量子計算)までしようとするれば、エンタングルメントが必要

共振器量子電磁気学的効果(cavity QED)

自然放出の抑制、増強

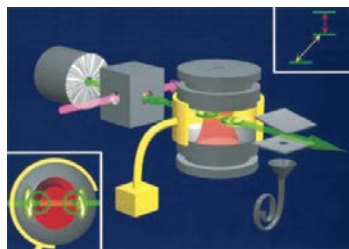
単一光子発生



絡み合い(エンタングル)状態

2光子のエンタングル

原子と光子のエンタングル



Haroche : Science, 288, 2024 (2000) より

量子ゼノ効果

観測し続けることで系の時間発展を抑制する

ゼノンの逆理(飛んでいる矢は止まっている)の
量子論バージョンだが、逆理ではなく真理

etc.

量子ゼノ効果

Physical Review A41, 2295 (1990).

PHYSICAL REVIEW A

VOLUME 41, NUMBER 5

1 MARCH 1990

Quantum Zeno effect

Wayne M. Itano, D. J. Heinzen, J. J. Bollinger, and D. J. Wineland

Time and Frequency Division, National Institute of Standards and Technology, Boulder, Colorado 80303
(Received 12 October 1989)

The quantum Zeno effect is the inhibition of transitions between quantum states by frequent measurements of the state. The inhibition arises because the measurement causes a collapse (reduction) of the wave function. If the time between measurements is short enough, the wave function usually collapses back to the initial state. We have observed this effect in an rf transition between two ${}^9\text{Be}^+$ ground-state hyperfine levels. The ions were confined in a Penning trap and laser cooled. Short pulses of light, applied at the same time as the rf field, made the measurements. If an ion was in one state, it scattered a few photons; if it was in the other, it scattered no photons. In the latter case the wave-function collapse was due to a null measurement. Good agreement was found with calculations.

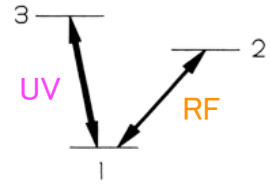
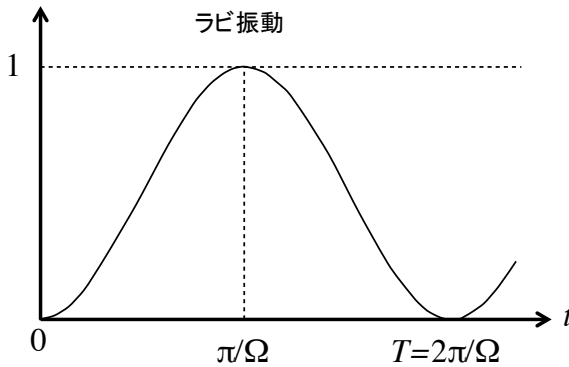


FIG. 1. Energy-level diagram for Cook's proposed demonstration of the quantum Zeno effect.

2295 Work of the U. S. Government Not subject to U. S. copyright

状態2にいる確率



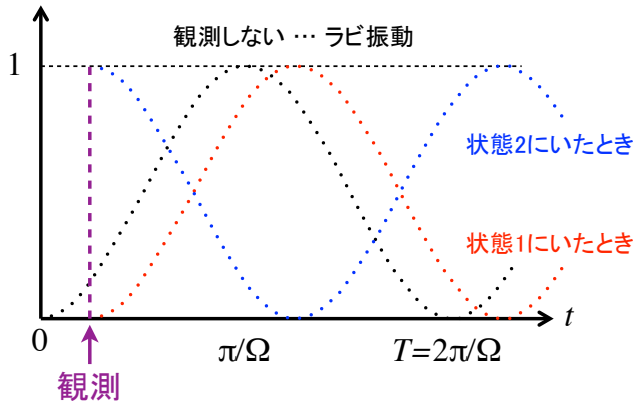
UVを照射した時、1に居れば蛍光が観測される
2に居ると観測されない
(つまり1と2のどちらに居るのが分かる)

UVを照射せずにRFを照射し続けると
1と2の間をラビ振動する(左図)

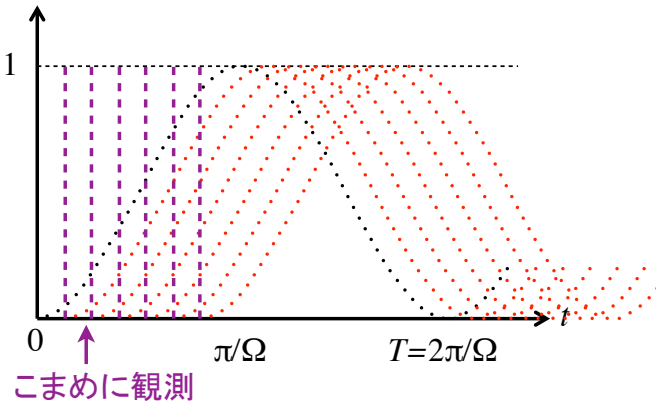
RFを照射している時にUVを照射するとどうなるか

量子ゼノ効果

状態2にいる確率 1個の原子



状態2にいる確率



状態1に「戻される」確率が高い
観測回数を増やせばそれだけ状態2への
時間発展が邪魔される

量子ゼノ効果

TABLE I. Predicted and observed values of the $1 \rightarrow 2$ and $2 \rightarrow 1$ transition probabilities for different values of the number of measurement pulses n . The uncertainties of the observed transition probabilities are about 0.02. The second column shows the transition probabilities that result from a simplified calculation, in which the measurement pulses are assumed to have zero duration and in which optical pumping is neglected.

n	$\frac{1}{2}[1 - \cos^n(\pi/n)]$	$1 \rightarrow 2$ transition		$2 \rightarrow 1$ transition	
		Predicted	Observed	Predicted	Observed
1	1.0000	0.995	0.995	0.999	0.998
2	0.5000	0.497	0.500	0.501	0.496
4	0.3750	0.351	0.335	0.365	0.363
8	0.2346	0.201	0.194	0.217	0.209
16	0.1334	0.095	0.103	0.118	0.106
32	0.0716	0.034	0.013	0.073	0.061
64	0.0371	0.006	-0.006	0.080	0.075

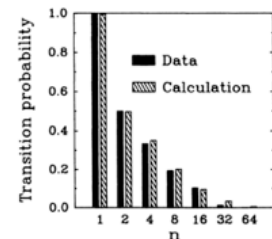


FIG. 3. Graph of the experimental and calculated $1 \rightarrow 2$ transition probabilities as a function of the number of measurement pulses n . The decrease of the transition probabilities with increasing n demonstrates the quantum Zeno effect.

まとめ

光のもついろいろな側面、波動性、粒子性を概観した

- 光と原子などとの相互作用の基本は、2体間相互作用
(一個の原子と一個の光)
- 通常の測定は集団平均を測定する
(多数個の原子と多数個の光)

レポート課題

1. 講義で出てきた以下の用語(話題)から二つ選び、それぞれ500字程度で説明せよ。
スクイーズド状態、原子時計、相対不確かさ、量子ゼノ効果
2. 講義に対する感想(興味を惹かれた話題などでも可)、あるいは意見を1000字以内で記述せよ。