■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　Todai OCW　学術俯瞰講義
Copyright 2012, 小芦 雅斗

The University of Tokyo / Todai OCW　The Global Focus on Knowledge Lecture Series
Copyright 2012, Masato Koashi

UT-PSC
Photon Science Center of the University of Tokyo

微(かす)かな光の不思議な世界

- 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

工学系研究科　　光量子科学研究センター
物理工学専攻

小芦　雅斗

光は波か粒子か？～ミニッツレポートから～

- 光の粒子性と波動性がどのように同時に成り立つのか
- 振る舞いの境界がどこにあるのか
- 光が光子でもあり波でもあるということが心の方で納得できない。
- まだ粒子であって波動であるのに納得できない
- 粒子説と波動説の話をきくと、光は身近なようだがとらえどころのない存在なのだと思えた

  - 二重スリットの実験で、光子はどちらか一方ではなく両方のスリットを通っているのではないか
  - ホイヘンスの原理は波面を構成するものの相互影響で新たな波面が構成されるという考えだが、では光子一つをガラスなどに向けて出した場合、どのように進むのか

- 「常識で考えて」という反証はいけないのか。
- いっそのこと現在量子性として考えられていることを波動性をもって説明し尽くしたい
- 不確定性原理は観測の可否にかかわらず実際に状態として静止しているということがありえないということなのか、それとも観測できないだけでそういう状態は存在できるのか、それとも観測できることが状態の存在を規定するのか
- 光子に質量はないというが、質量のないものを一つの存在するものとして規定してよいのか。

  - 光が波だとか粒子だとかいう話に比べ、今回は原子という実体を扱っていたのでとっつきやすかった

講義内容

- 光の粒子性と波動性がどのように同時に成り立つのか
- 振る舞いの境界がどこにあるのか
- 光が光子でもあり波でもあるということが心の方で納得できない。
- まだ粒子であって波動である
- 粒子説と波動説の話をきくと

波動と粒子の二重性の話

えた

- 二重スリットの実験で、光子はどちらか一方ではなく両方のスリットを通っているのでは

偏光の性質を学ぶ

- ホイヘン 互影響で新たな波面が構成されるという考えたか、では光子一つをカメラなどに向けて出した場合、どのように進むのか

息抜き＋休憩

- 「常識で考えて」という反証はいけないのか。
- いっそのこと現在量子性として考えられている

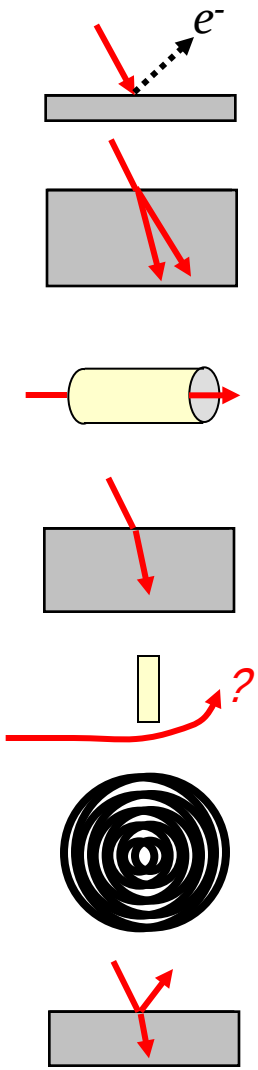
双子の光子対の話

- 不確定性原理は観測の可否にかかわらず実 りえないということなのか、それとも観測できないだ とも観測できることが状態の存在を規定するのか
- 光子に質量はないというが、質量のないものを一つの存在するものとして規定してよいのか。

- 光が波だとか粒子だとかいう話に いたのでとっつきやすかった

役に立ちそうな話（次回）

光の性質



光電効果

複屈折

直進

屈折

回折

干渉

部分反射

アインシュタインの光量子仮説へ

粒子説

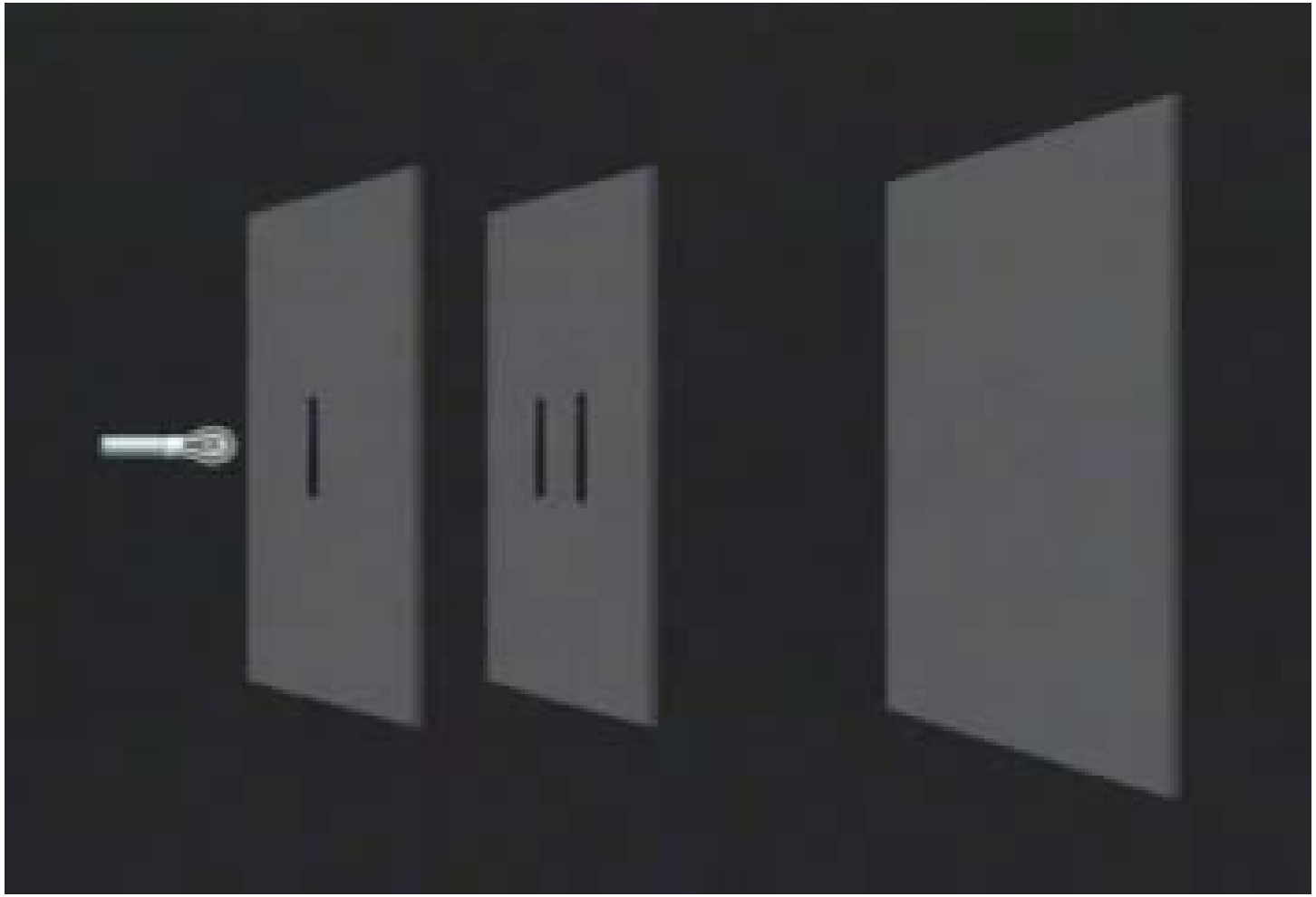
波動説

~~（縦波）~~

（横波）

第２回（井上先生）の講義より

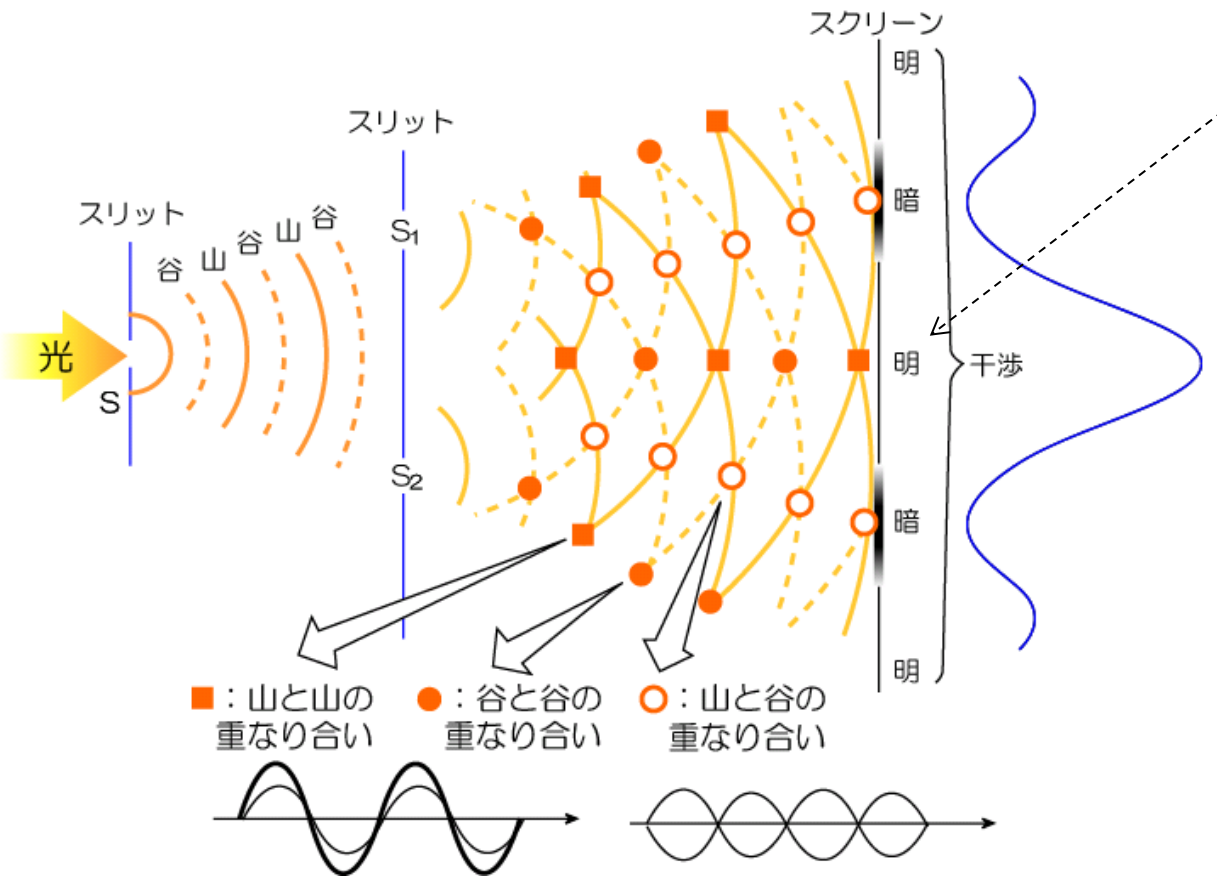
ヤングの干渉計



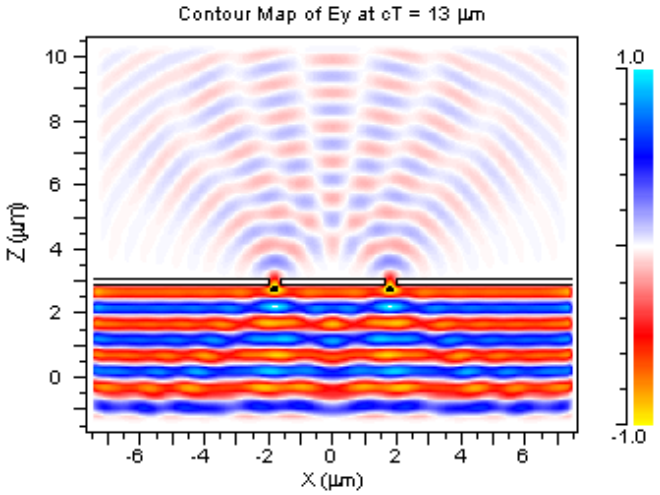
* ERATO五神協同励起プロジェクト（H9-H14）
「光で揃う量子たち」
提供：科学技術振興機構（JST）

第１回（五神先生）の講義より

ヤングの干渉計

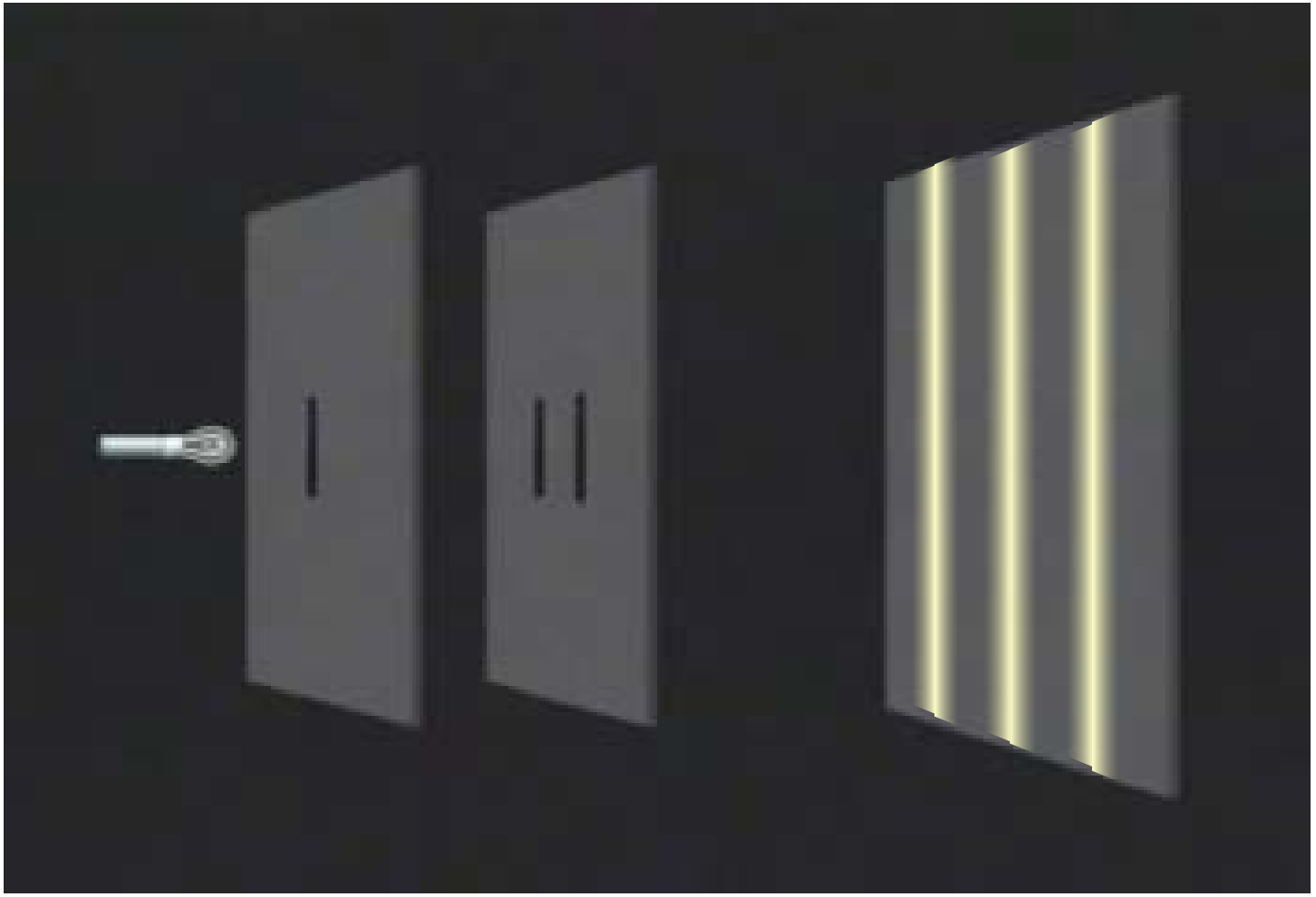


ちょうど真ん中では、
２つのスリットからの
山と山、谷と谷が重なるので、
明るくなる。



第１回（五神先生）の講義より

ヤングの干渉計



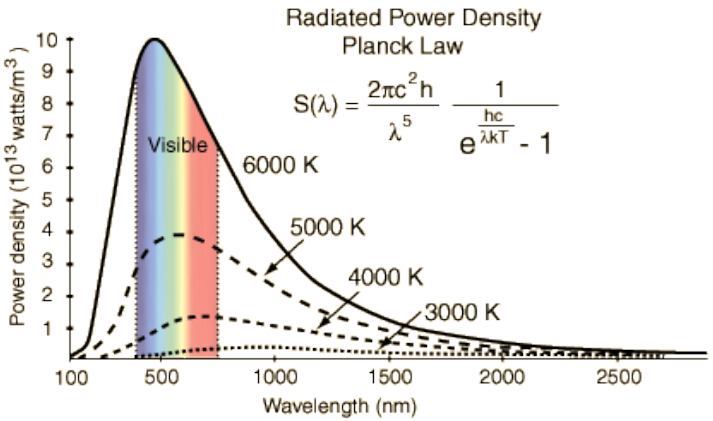
＊ ERATO五神協同励起プロジェクト（H9-H14）
「光で揃う量子たち」
提供：科学技術振興機構（JST）

光子(photon)

•光のエネルギーを細かく分割していくと、それ以上分割できないエネルギーの塊、「光子」が現れる。

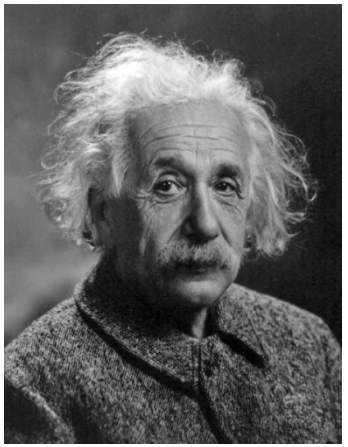
• 振動数 ν の光子のエネルギーは $h\nu$ で、
$h = 6.6 \times 10^{-34}\mathrm{Js}$
はプランク定数。目に見える光では $4 \times 10^{-19}\mathrm{J}$ 付近。

プランクの輻射則（1900）

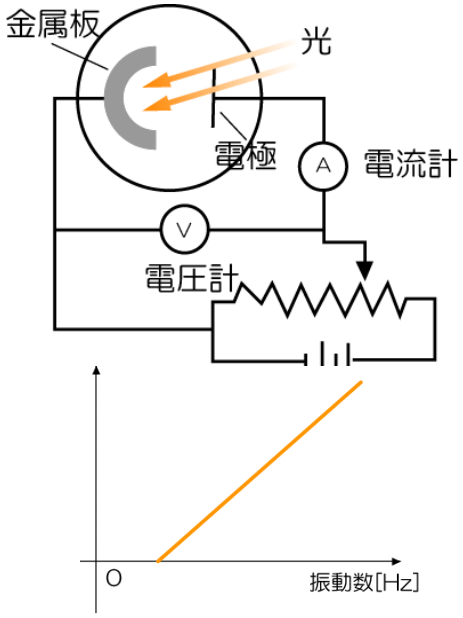


黒体輻射のスペクトル

アインシュタインの光量子仮説　（1905）



光電効果
ミリカン（1916）



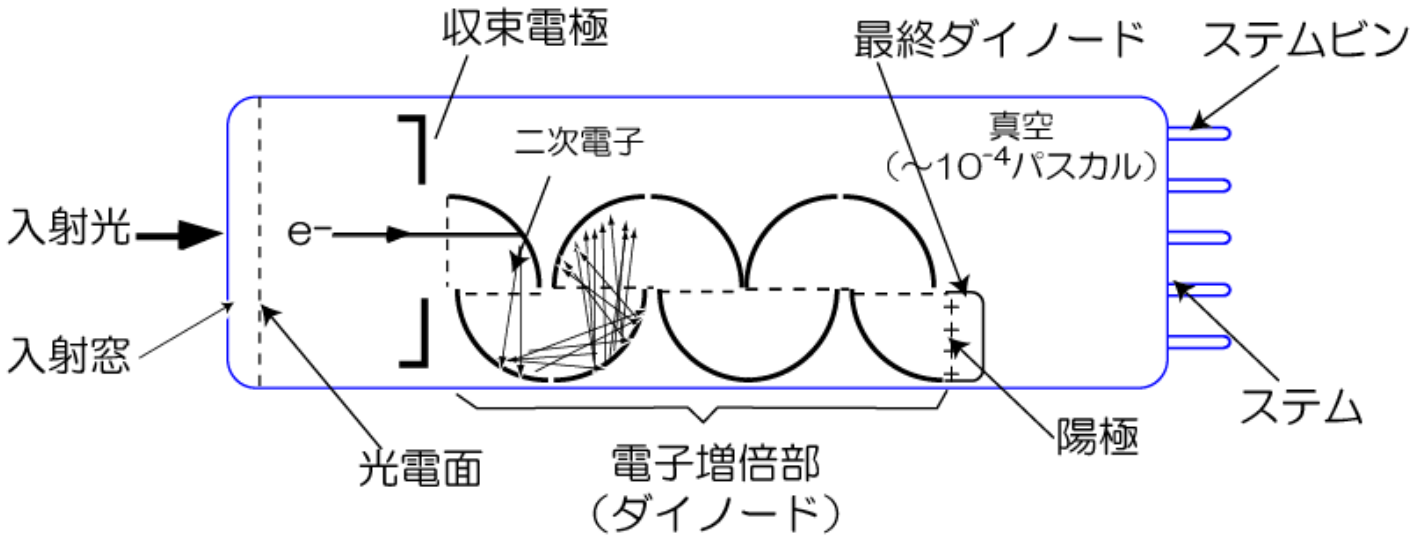
* from HyperPhysics by Rod Nave, Georgia State University
http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/bbrc.html

光子(photon)

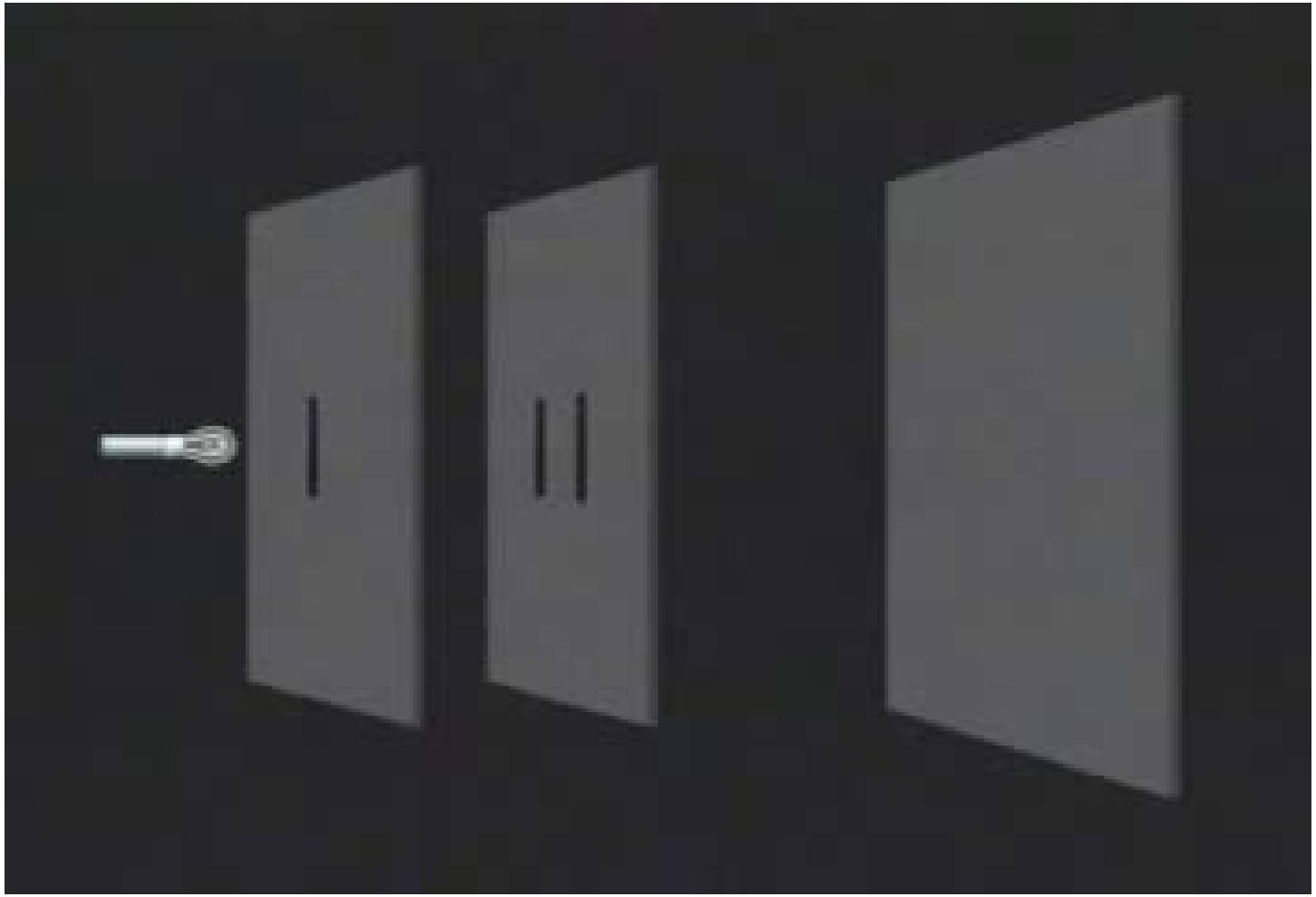
•光のエネルギーを細かく分割していくと、それ以上分割できないエネルギーの塊、「光子」が現れる。

• 振動数 ν の光子のエネルギーは $h\nu$ で、
$h = 6.6 \times 10^{-34}\mathrm{Js}$
はプランク定数。目に見える光では $4 \times 10^{-19}\mathrm{J}$ 付近。

•光子の到着を電気信号として取り出す様々な検出器があり、光子検出器と呼ばれる。



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）浜松フォトニクス
「光で揃う量子たち」
提供：科学技術振興機構（JST）

第１回（五神先生）の講義より

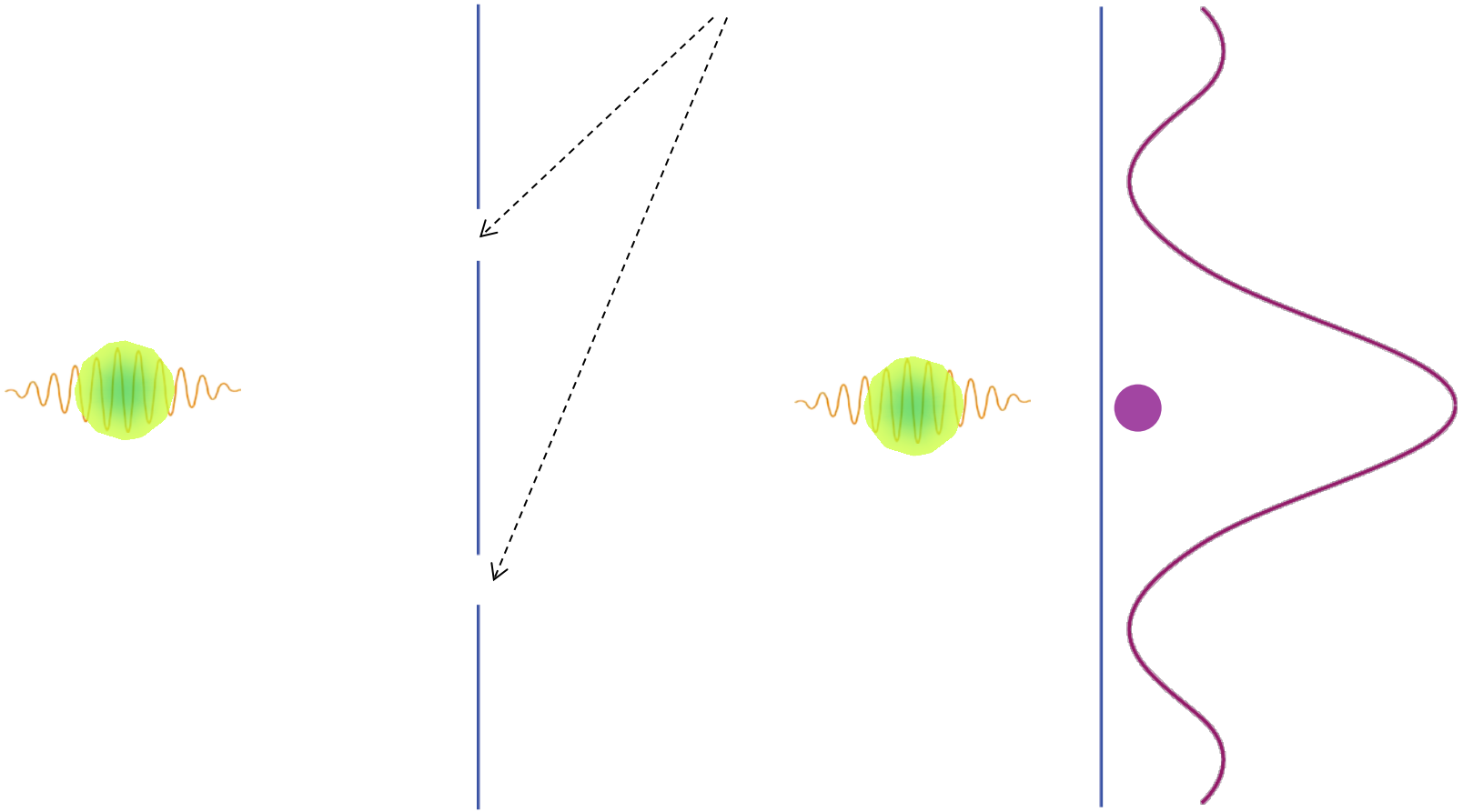
光 子 の 干 渉

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

第１回（五神先生）の講義より

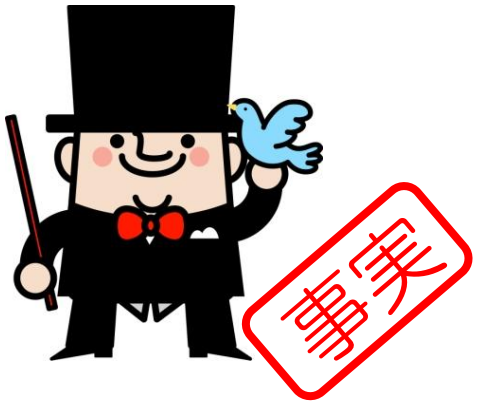
光子の干渉の説明？

どちらか一方を塞いだら、
縞模様はできない。



「二重スリットの実験で、光子はどちらか一方ではなく両方のスリットを通っているのではないか？」～ミニッツレポートより

科学における不思議



うわあ！凄い！不思議～

この世には不思議なことなど何もないのだよ。

あれは帽子と袖の裏にね、…

× 良く理解していないので不思議に思える

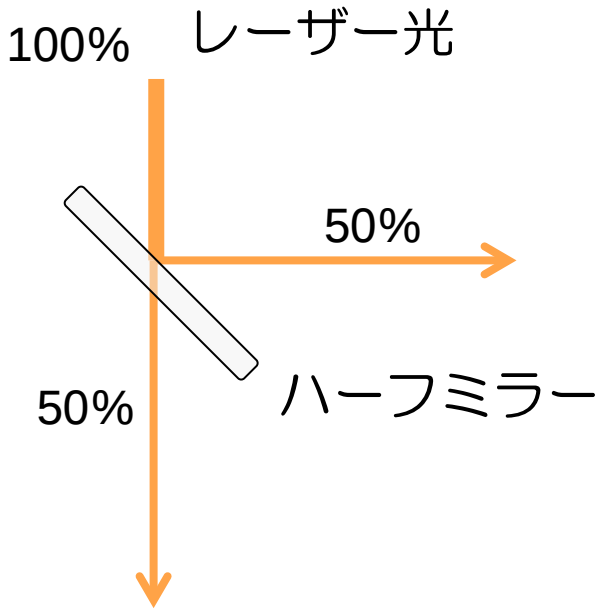
○ 良く理解した上でそれでも不思議に思える

「観測される客観的な事実」と、
理解のために提示される「解釈」
を混同しないように。

*人物イラスト出典:「イラストAC」
http://www.ac-illust.com/

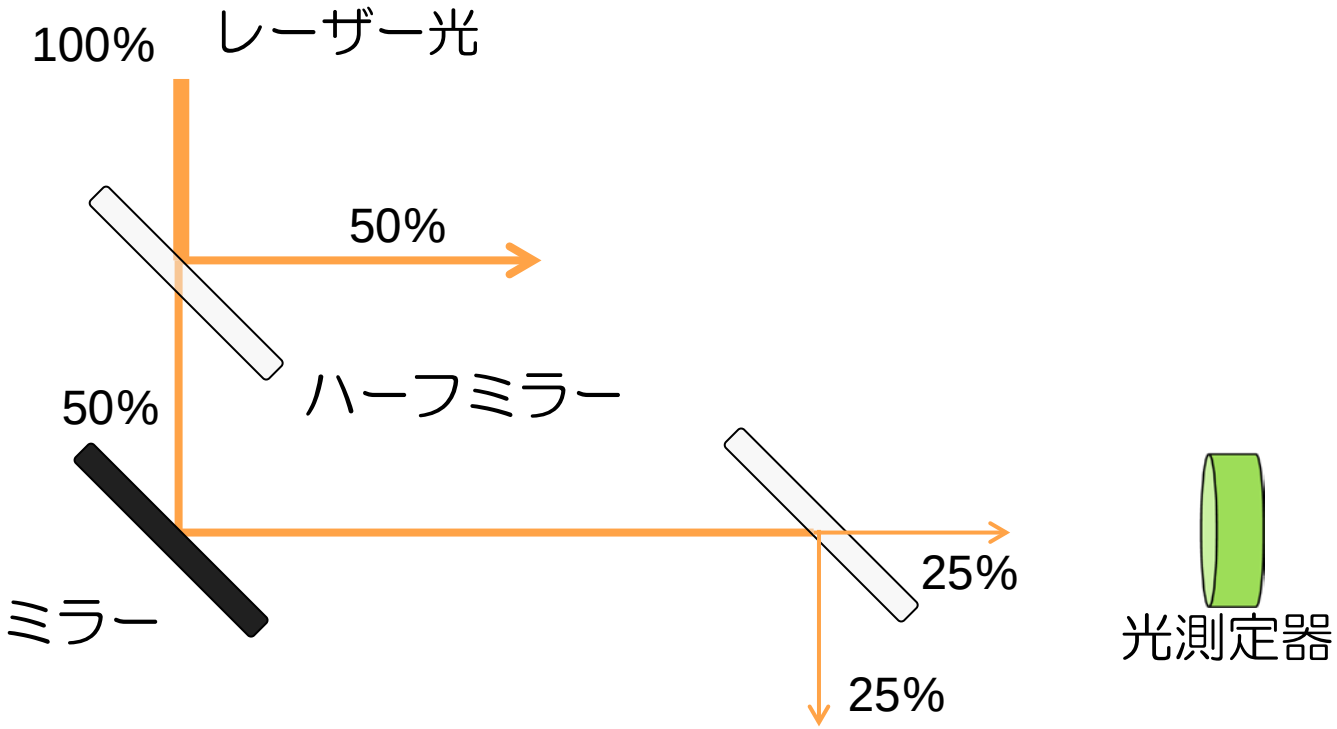
マッハツェンダー干渉計

できるだけシンプルな例で考察しよう。



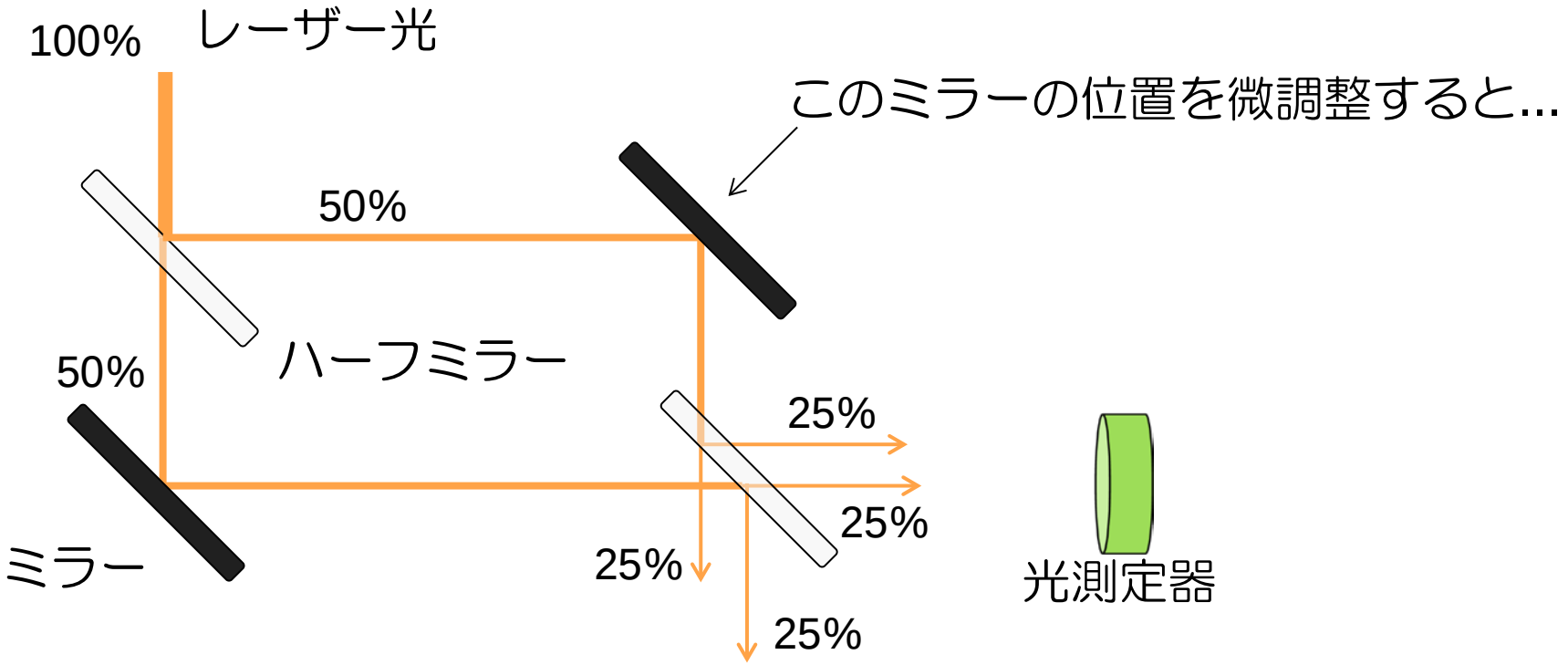
マッハツェンダー干渉計

できるだけシンプルな例で考察しよう。



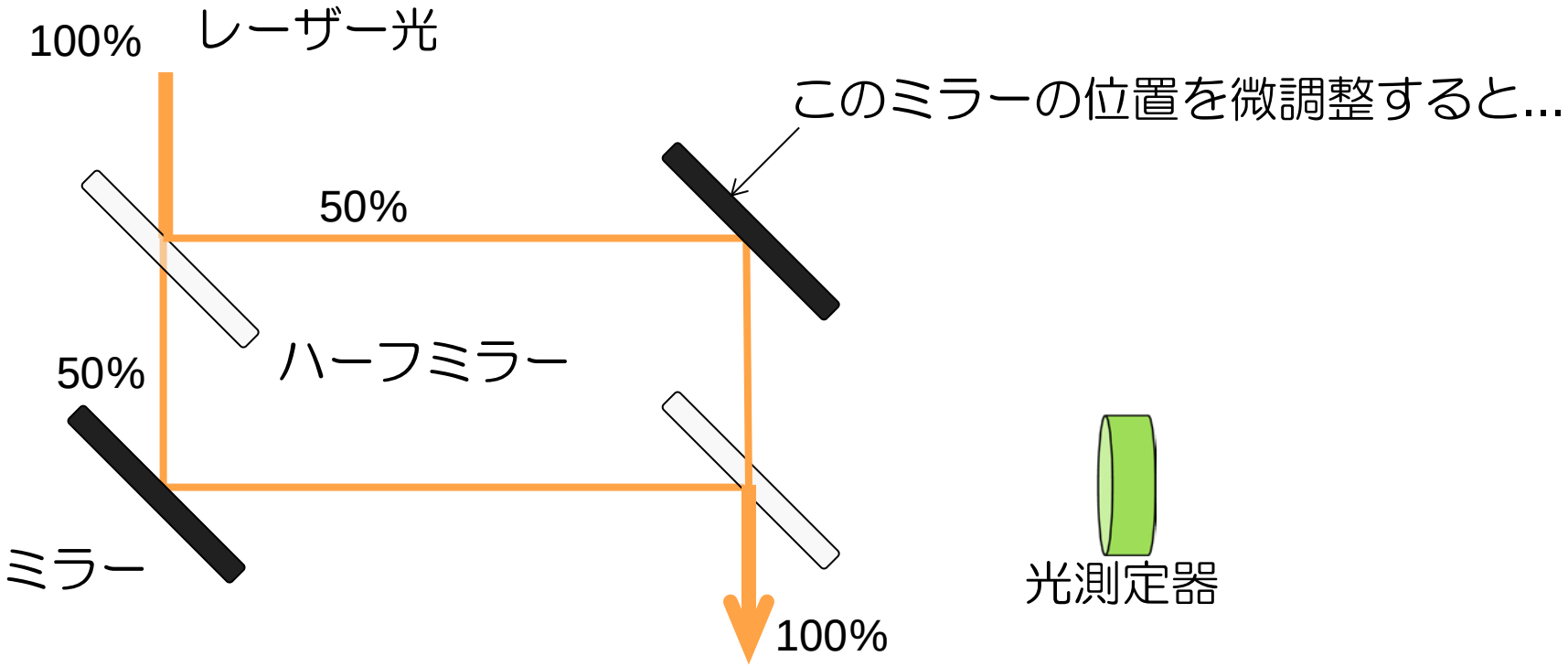
マッハツェンダー干渉計

できるだけシンプルな例で考察しよう。



マッハツェンダー干渉計

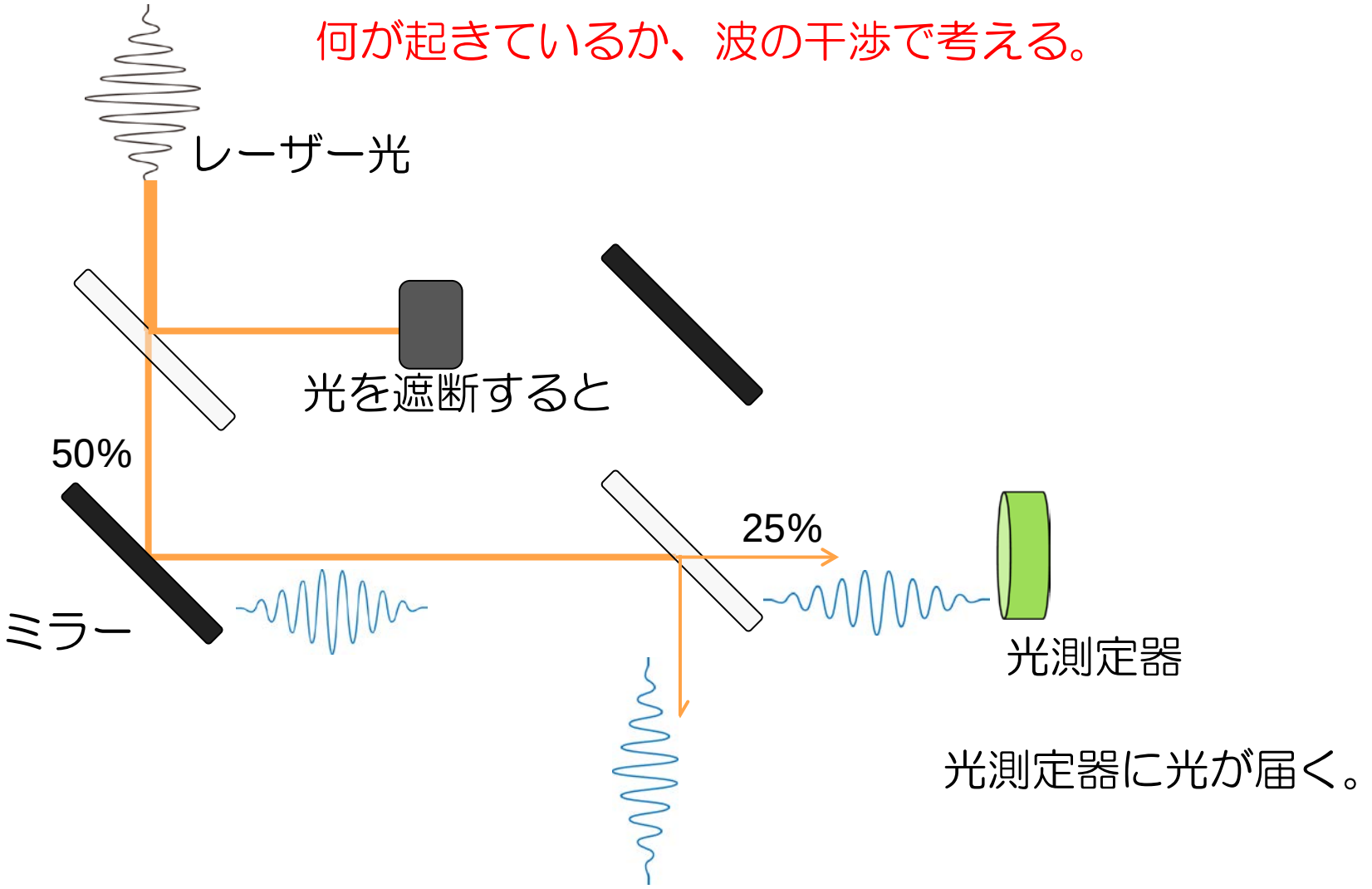
できるだけシンプルな例で考察しよう。



光測定器に光が届かなくなる。

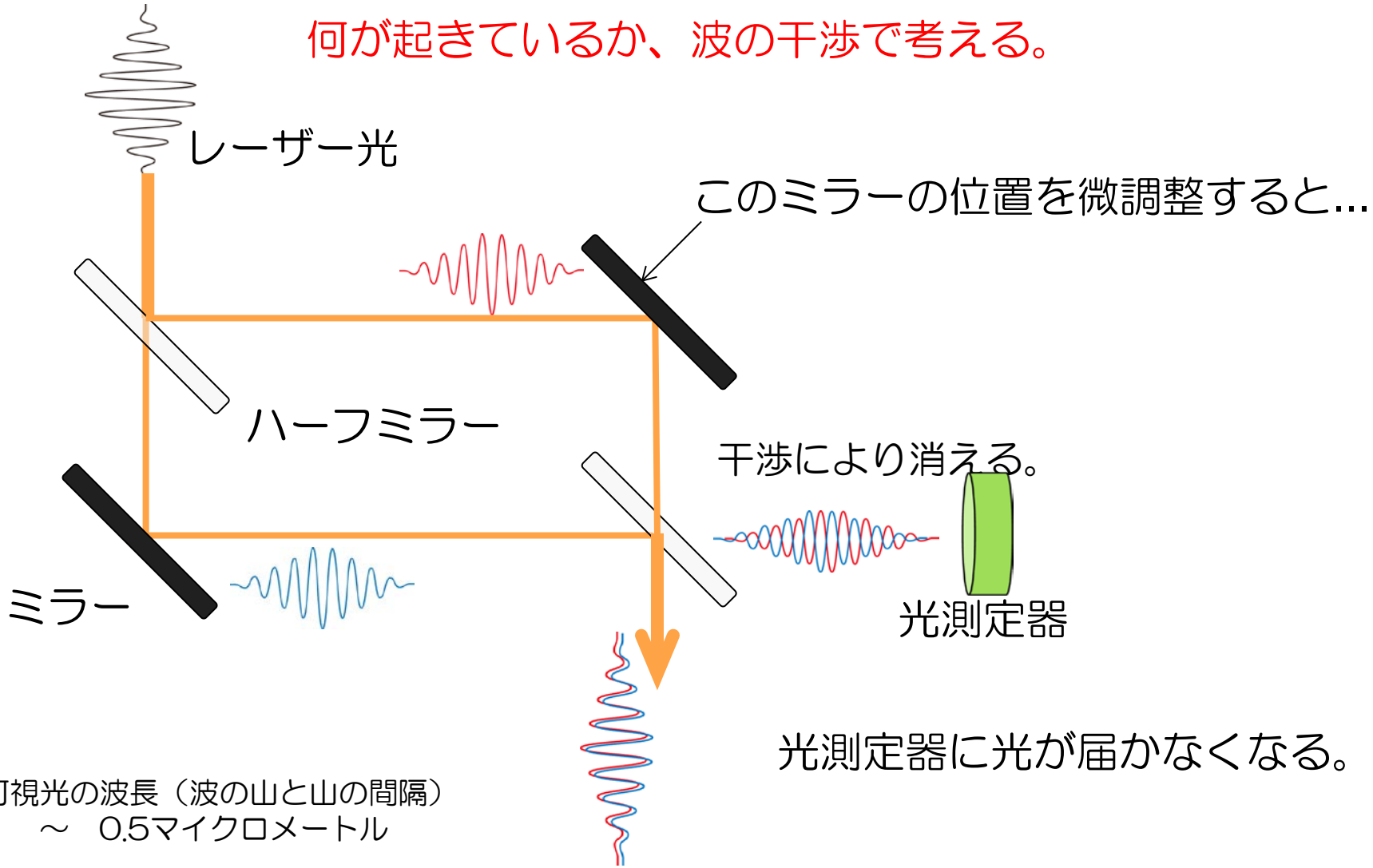
マッハツェンダー干渉計

何が起きているか、波の干渉で考える。



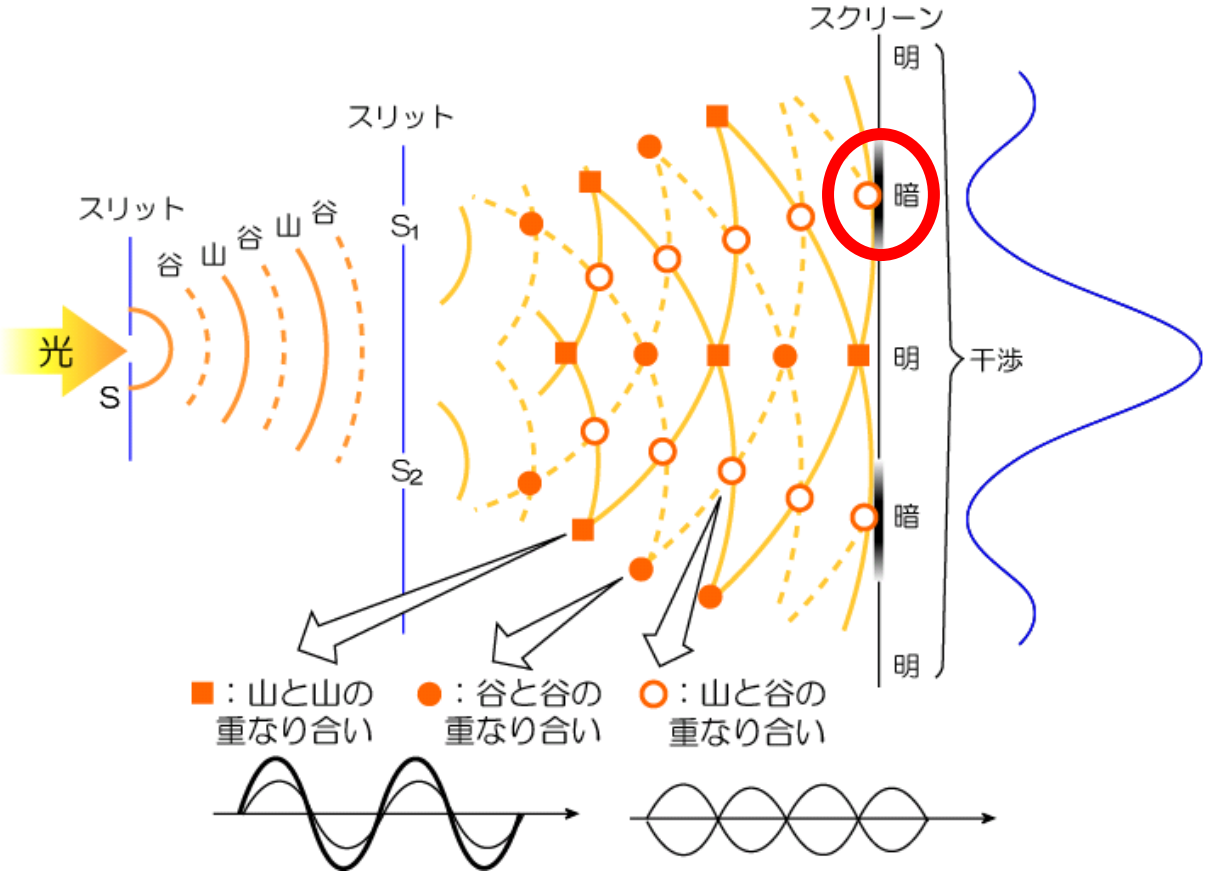
マッハツェンダー干渉計

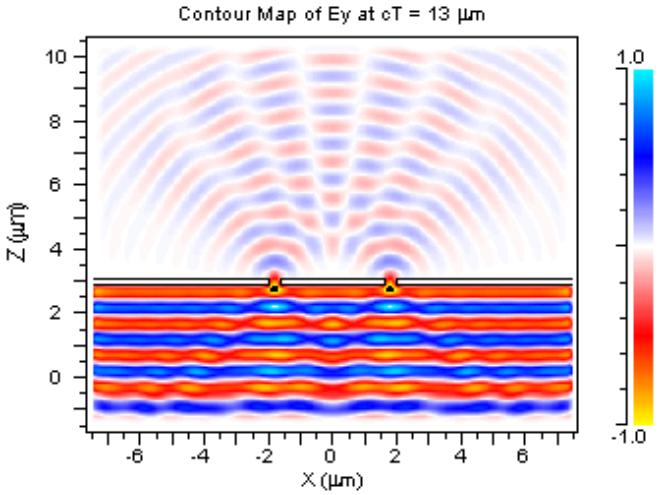
何が起きているか、波の干渉で考える。



可視光の波長（波の山と山の間隔）
～　0.5マイクロメートル

ヤングの干渉計





第１回（五神先生）の講義より

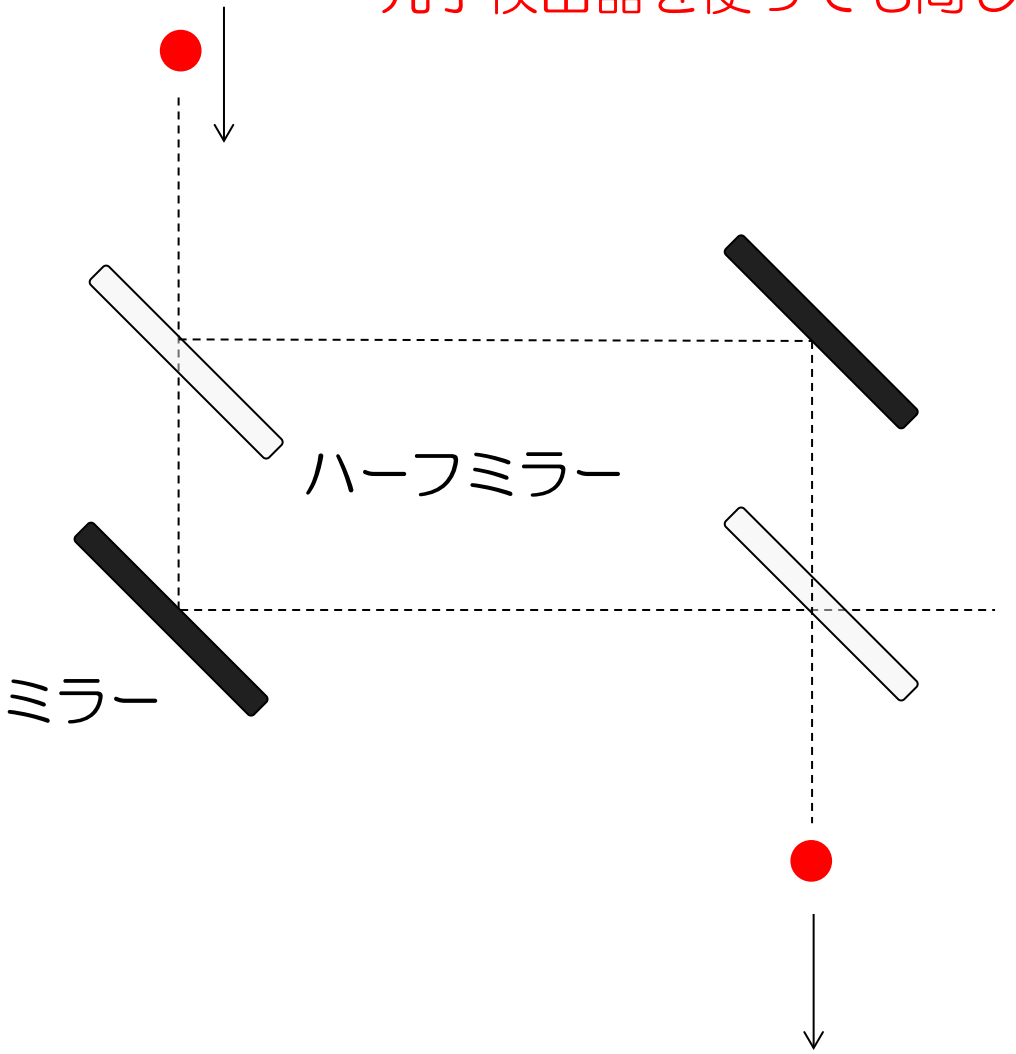
光 子 の 干 渉

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

第１回（五神先生）の講義より

干渉計と光子検出

光子検出器を使っても同じ現象が見える。

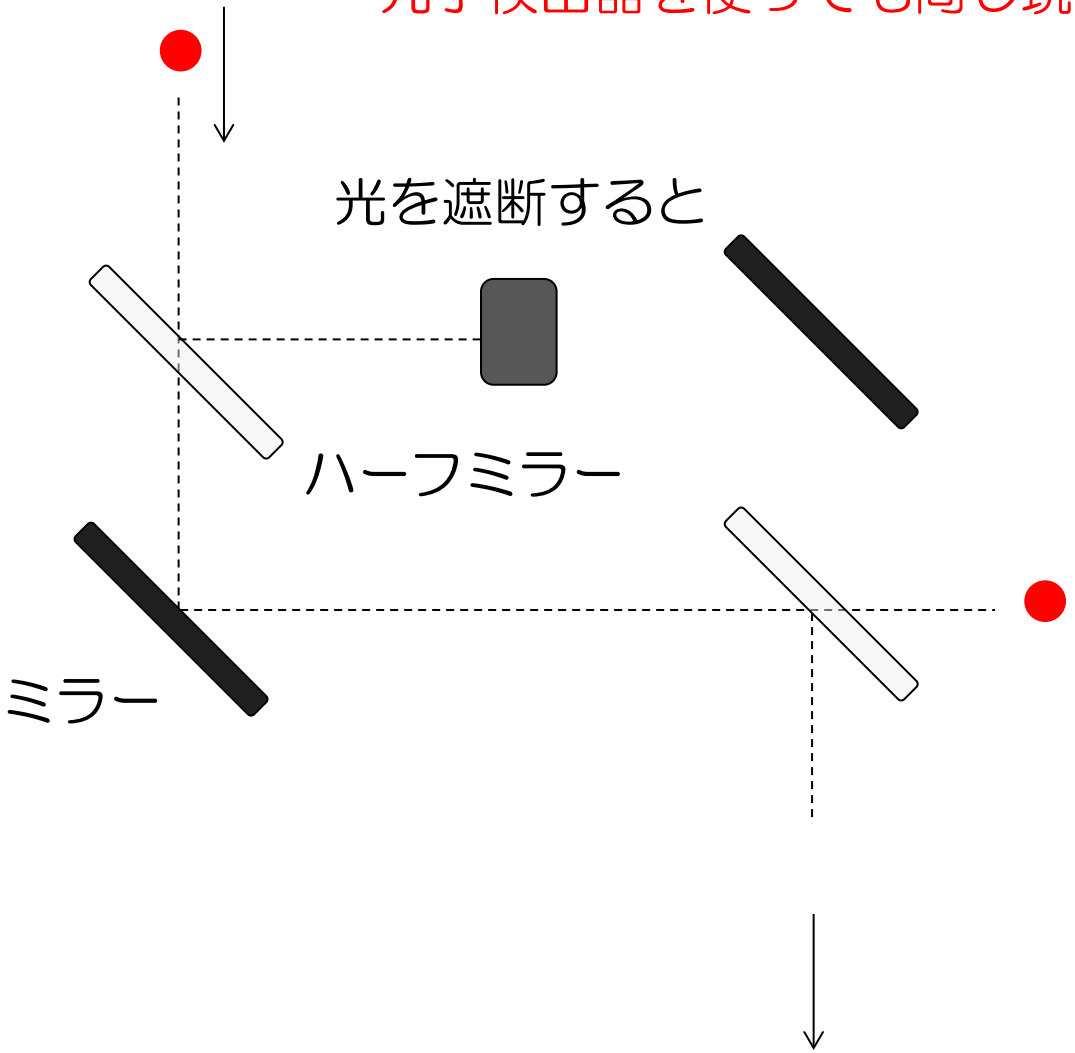


この光子検出器は全く
光子を検出しない。

光子検出器

干渉計と光子検出

光子検出器を使っても同じ現象が見える。



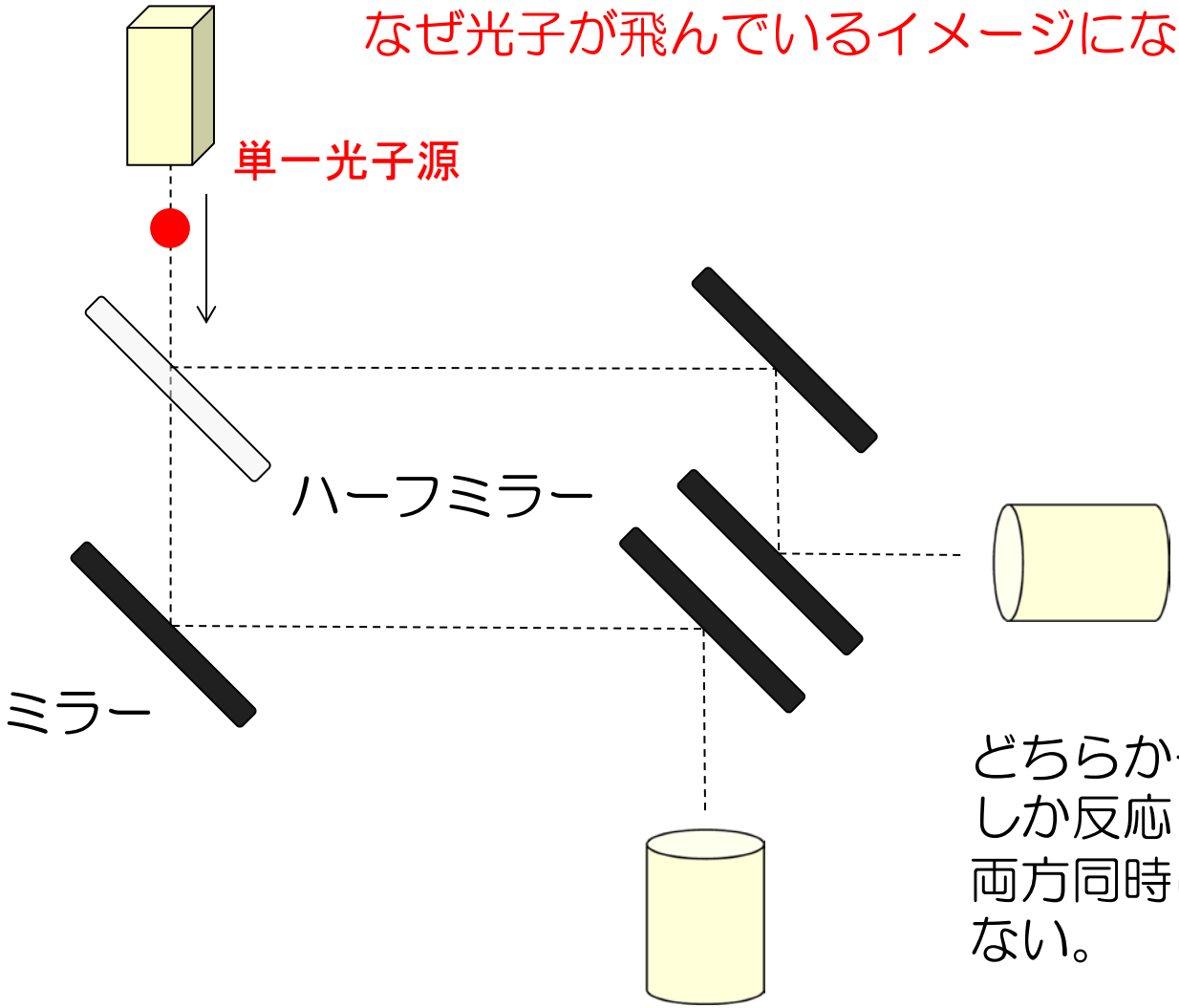
ときどき検出する。

光子検出器

「光子検出器」と名付けているだけで、実は波動を感じて確率的に電気信号を出しているだけでは？

粒子特有の性質

なぜ光子が飛んでいるイメージになるのか？



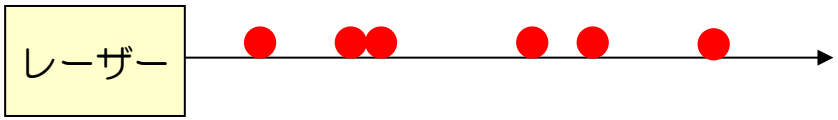
どちらか一方の検出器だけしか反応しない。
両方同時に反応することはない。

光子一個を用意するには？

1個のイオンからの発光を観測

実験配置

レーザー光を微弱にすればよい?



レーザーから出てくる光子のタイミングはランダム（ポアソン分布）で、それ以上制御できないので駄目。

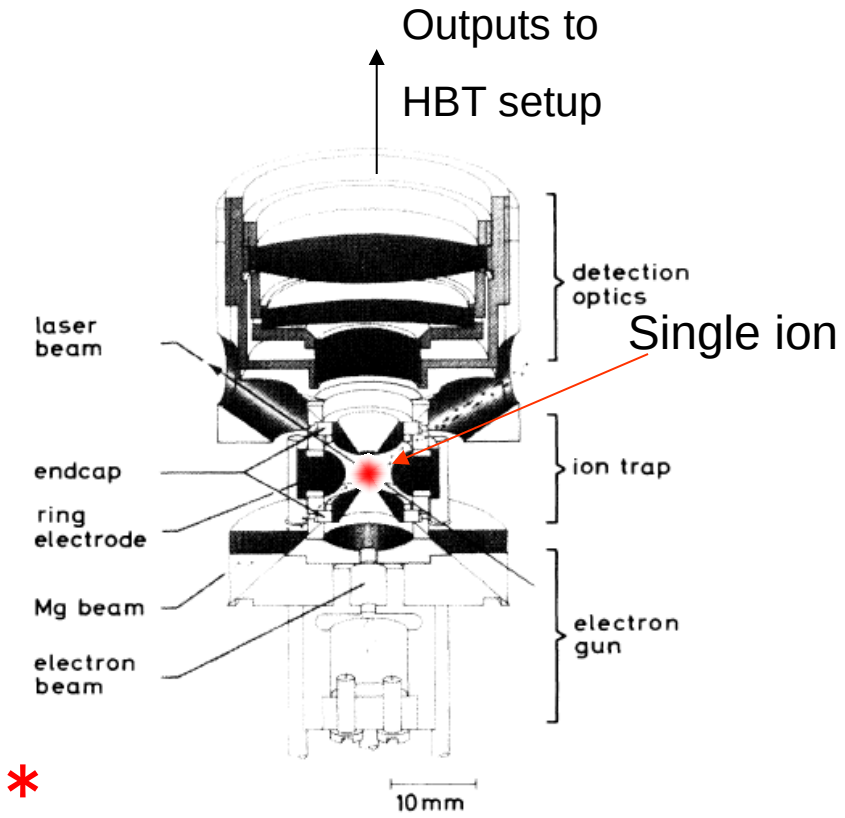


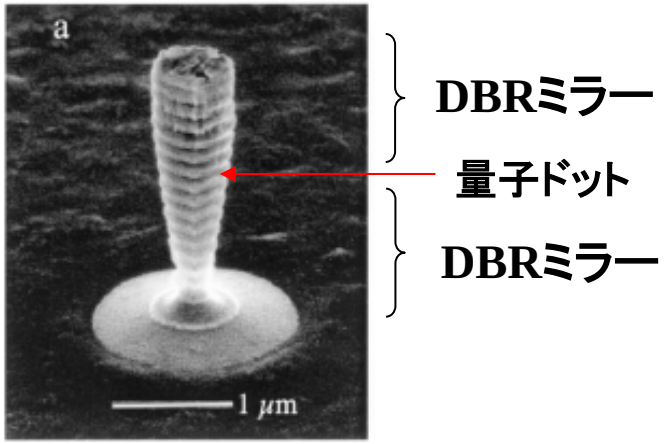
FIG. 1. Radio-frequency trap. The fluorescence light of the stored ion is observed through a bore in the upper pole cap.

Reprinted figure with permission from Frank Diedrich and Herbert Walther, Physical Review Letters, 58, 203-206, 1987. Copyright 1987 by the American Physical Society.
http://prl.aps.org/abstract/PRL/v58/i3/p203_1

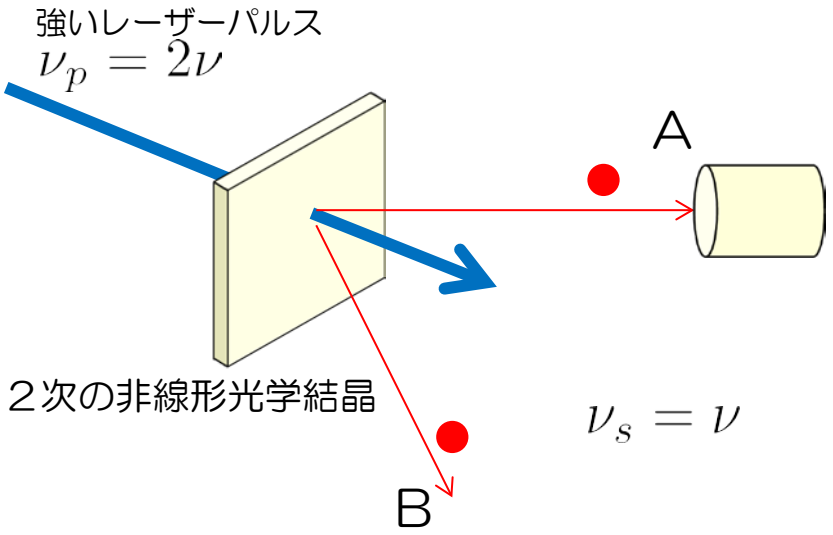
Readers may view, browse, and/or download material for temporary copying purposes only, provided these uses are for noncommercial personal purposes. Except as provided by law, this material may not be further reproduced, distributed, transmitted, modified, adapted, performed, displayed, published, or sold in whole or part, without prior written permission from the American Physical Society.

光子一個を用意するには？

量子ドットからの発光



光パラメトリック過程



$h\nu_p$ の光子１個のエネルギーは、
$h\nu_s$ の光子２個のエネルギーに
等しい。

Aで検出があった時だけ
Bの光を使うことにすれば…
（伝令つき単一光子源）

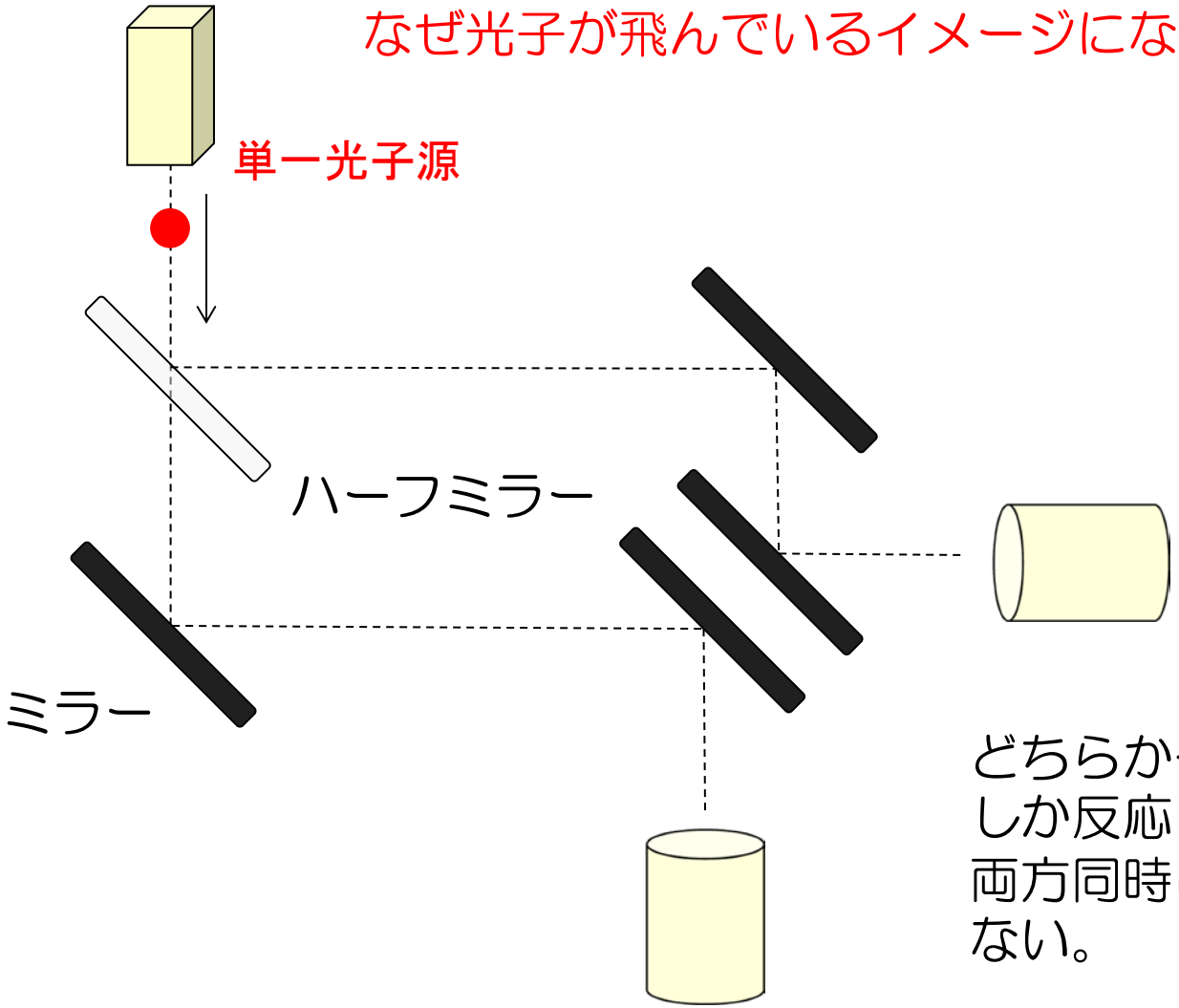
*

Reprinted figure with permission from G. S. Solomon, M. Pelton, and Y. Yamamoto, Physical Review Letters, 86, 3903-3906, 2001. Copyright 2001 by the American Physical Society.
http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.86.3903

Readers may view, browse, and/or download material for temporary copying purposes only, provided these uses are for noncommercial personal purposes. Except as provided by law, this material may not be further reproduced, distributed, transmitted, modified, adapted, performed, displayed, published, or sold in whole or part, without prior written permission from the American Physical Society.

粒子特有の性質

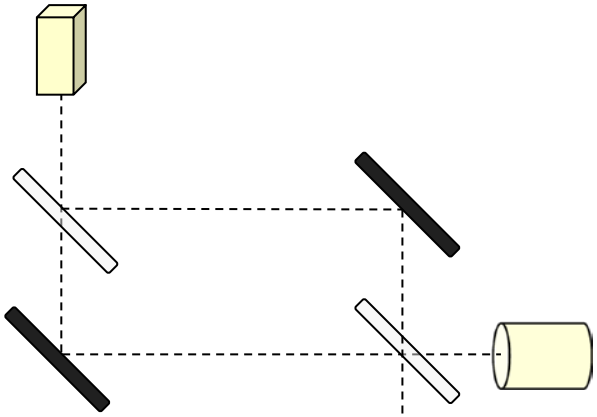
なぜ光子が飛んでいるイメージになるのか？



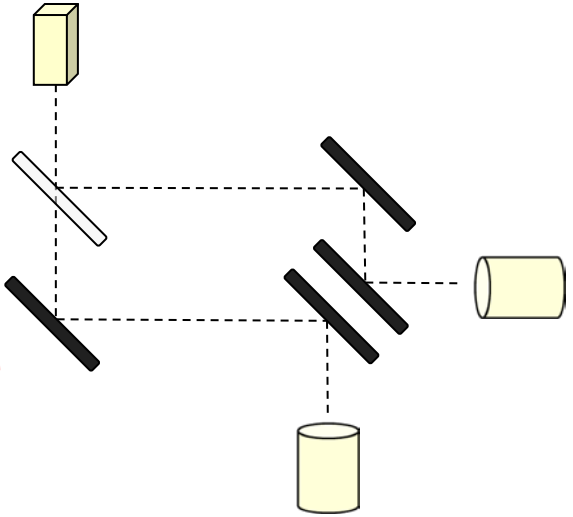
どちらか一方の検出器だけしか反応しない。
両方同時に反応することはない。

観測される現象のまとめ

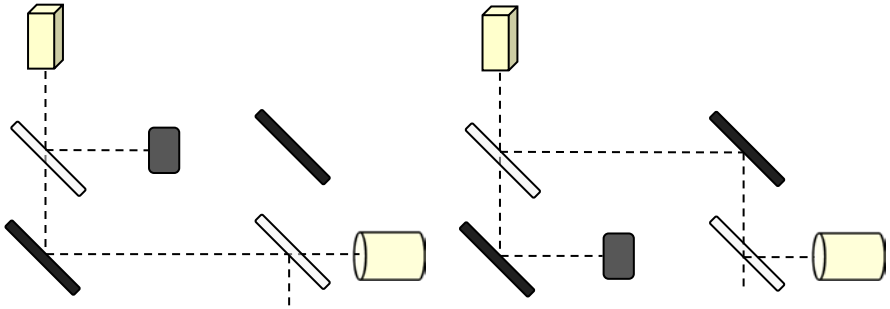
予断を排除して客観的事実だけを整理しよう。



全く検出しない。



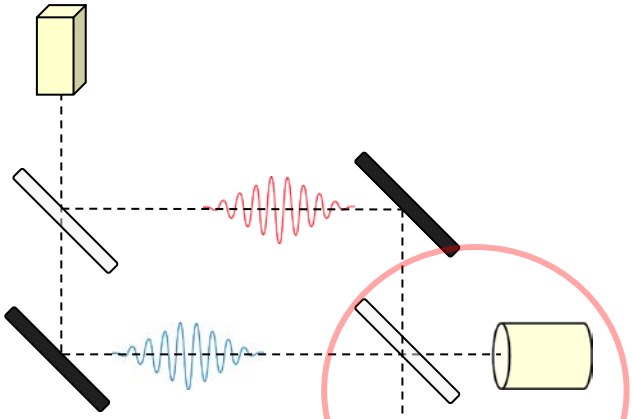
両方同時に検出することはない。



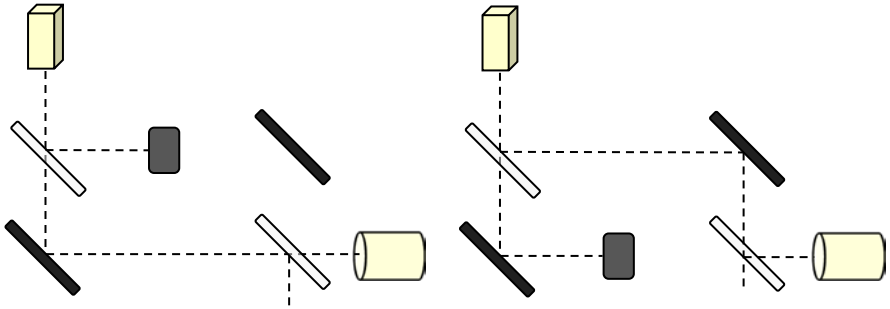
ときどき検出が起こる。

事実

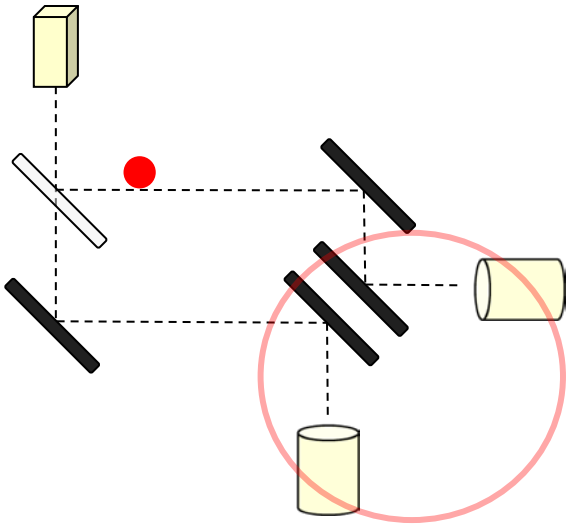
波動？粒子？



全く検出しない。



たまに検出が起こる。



両方同時に検出することはない。

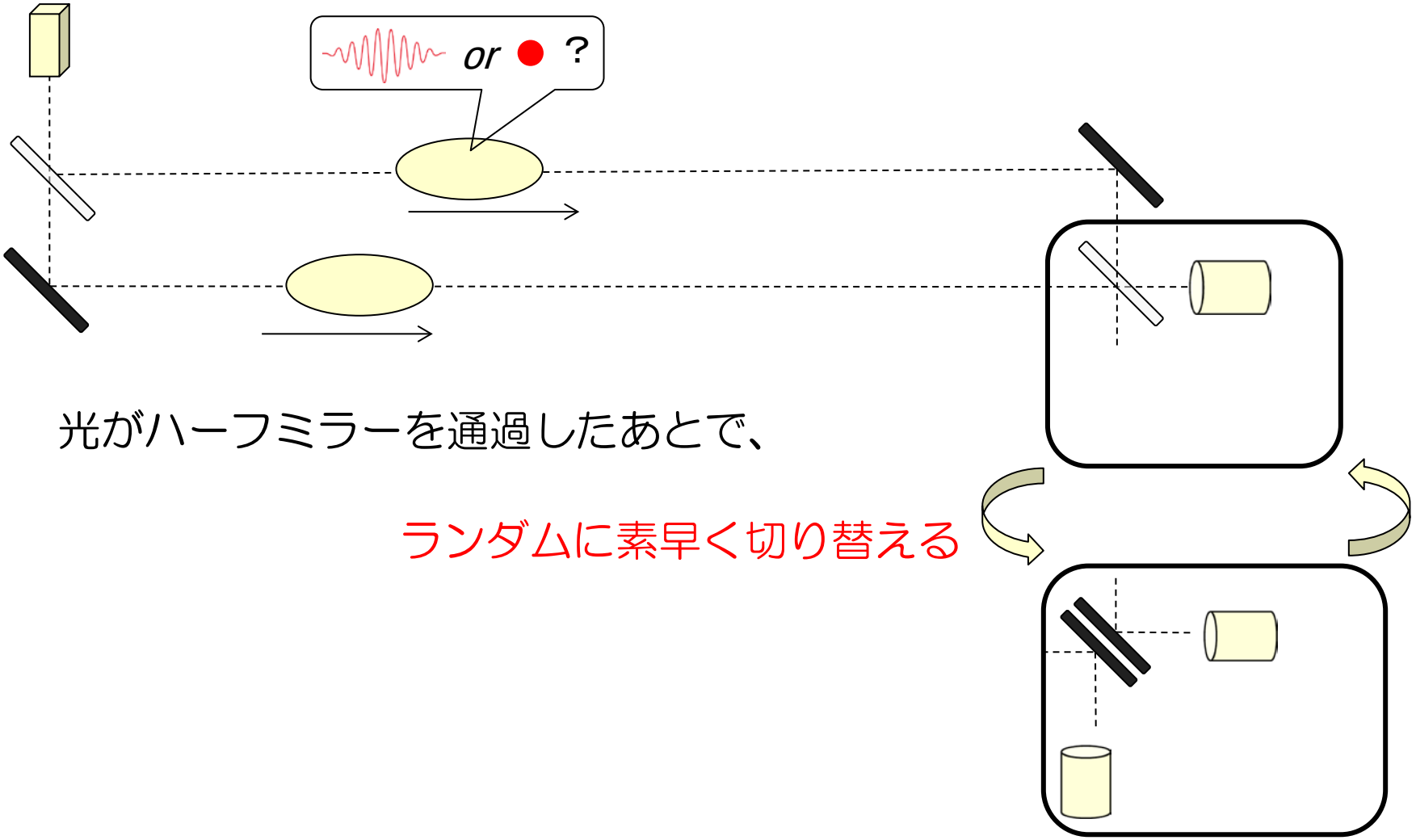
何を測定するかによって、波動か粒子かの振る舞いが変わるのかしら？

人物イラスト出典：「イラストAC」*
http://www.ac-illust.com/

遅延選択実験

自然の裏をかいてやろう。

ホイーラー(1978)



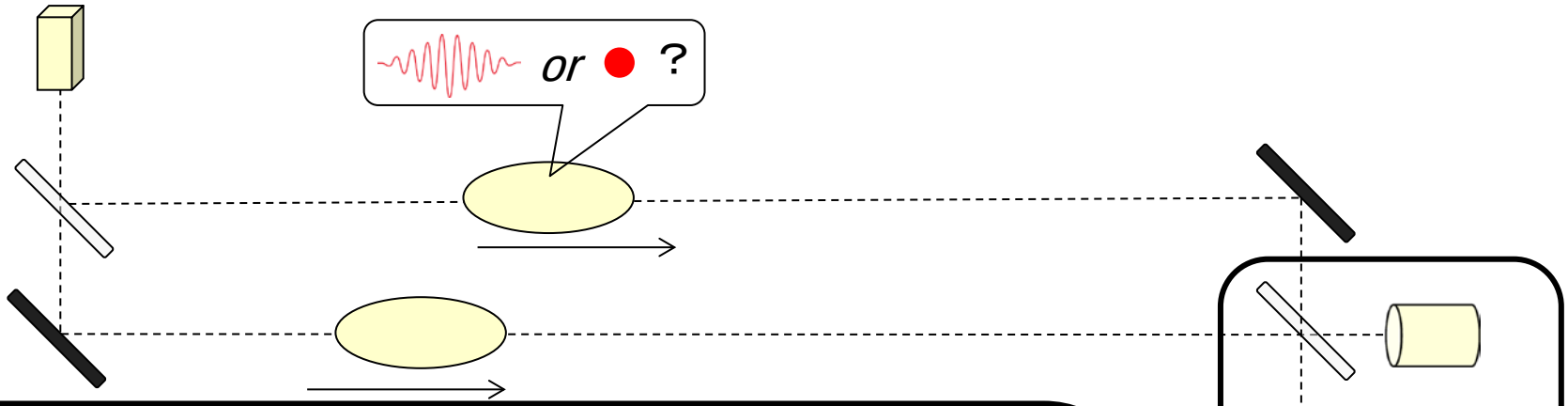
光がハーフミラーを通過したあとで、

ランダムに素早く切り替える

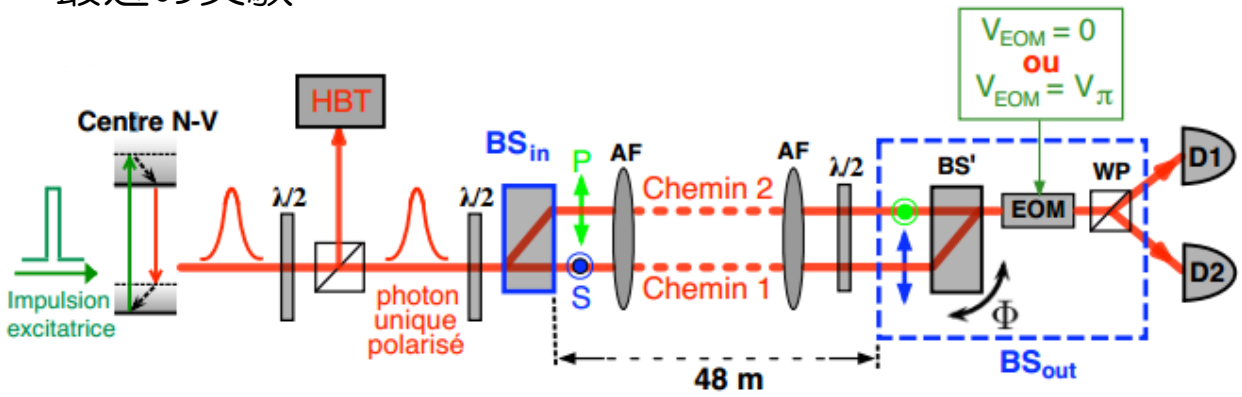
遅延選択実験

自然の裏をかいてやろう。

ホイーラー(1978)

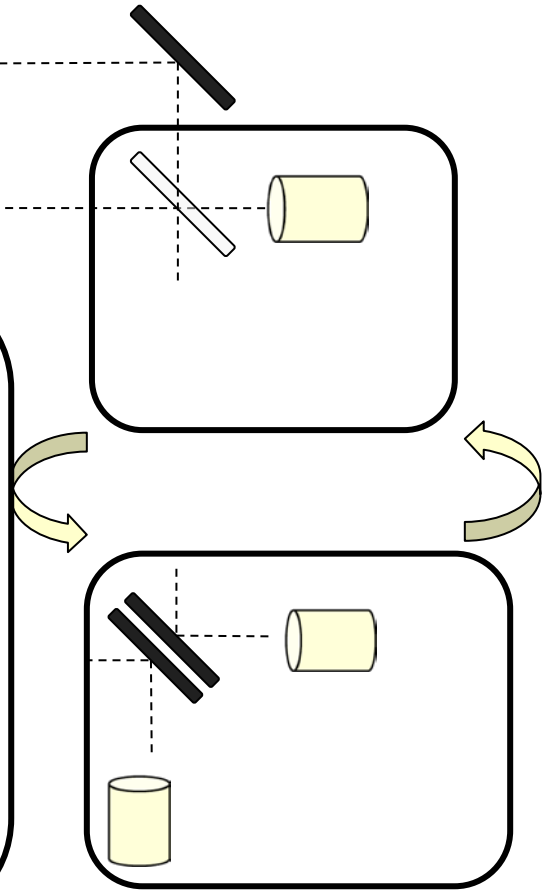


最近の実験

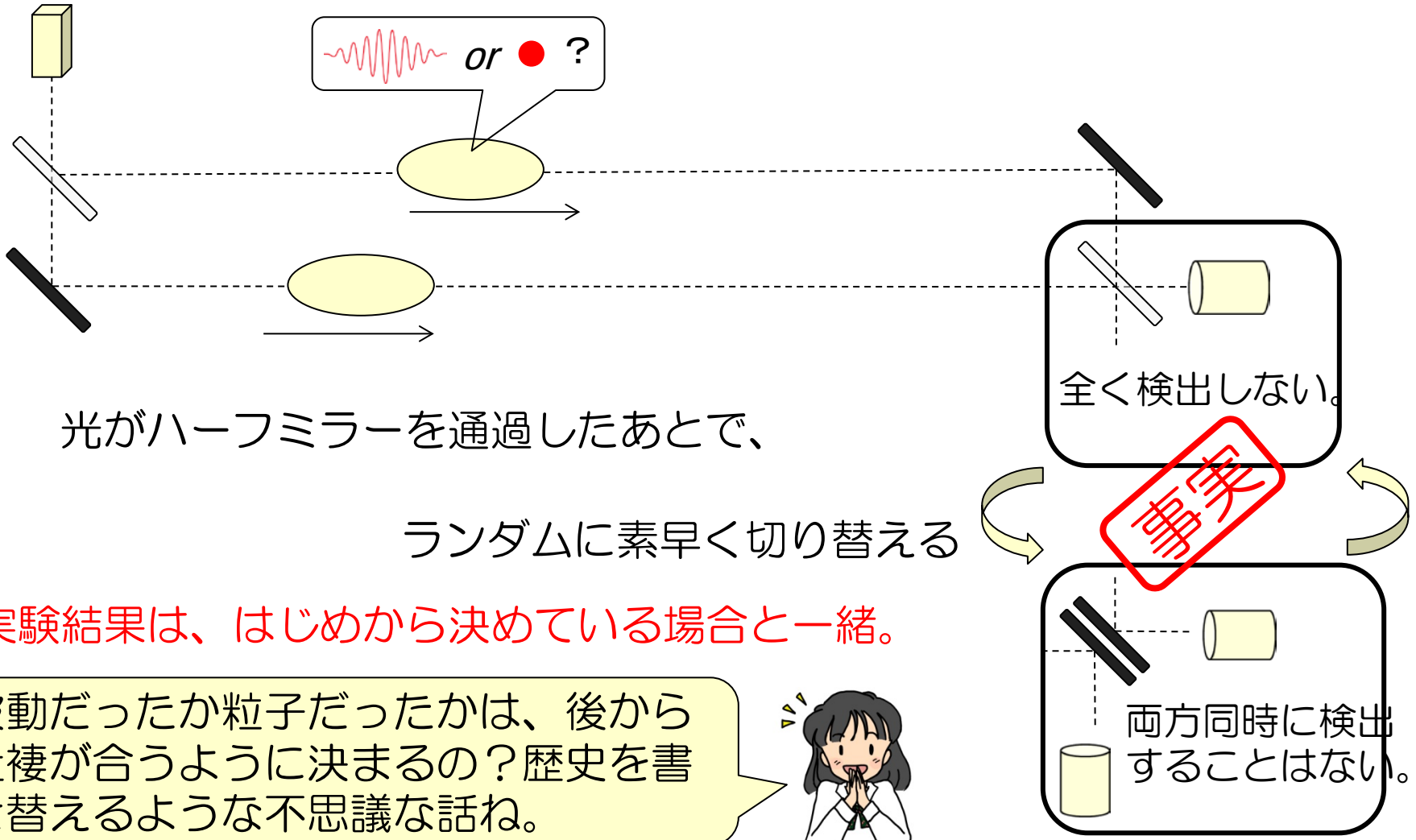


* Image) Courtesy of Dr Vincent Jacques

参考）V. Jacques, et al., Science **315**, 966 (2007)



遅延選択実験



光がハーフミラーを通過したあとで、

ランダムに素早く切り替える

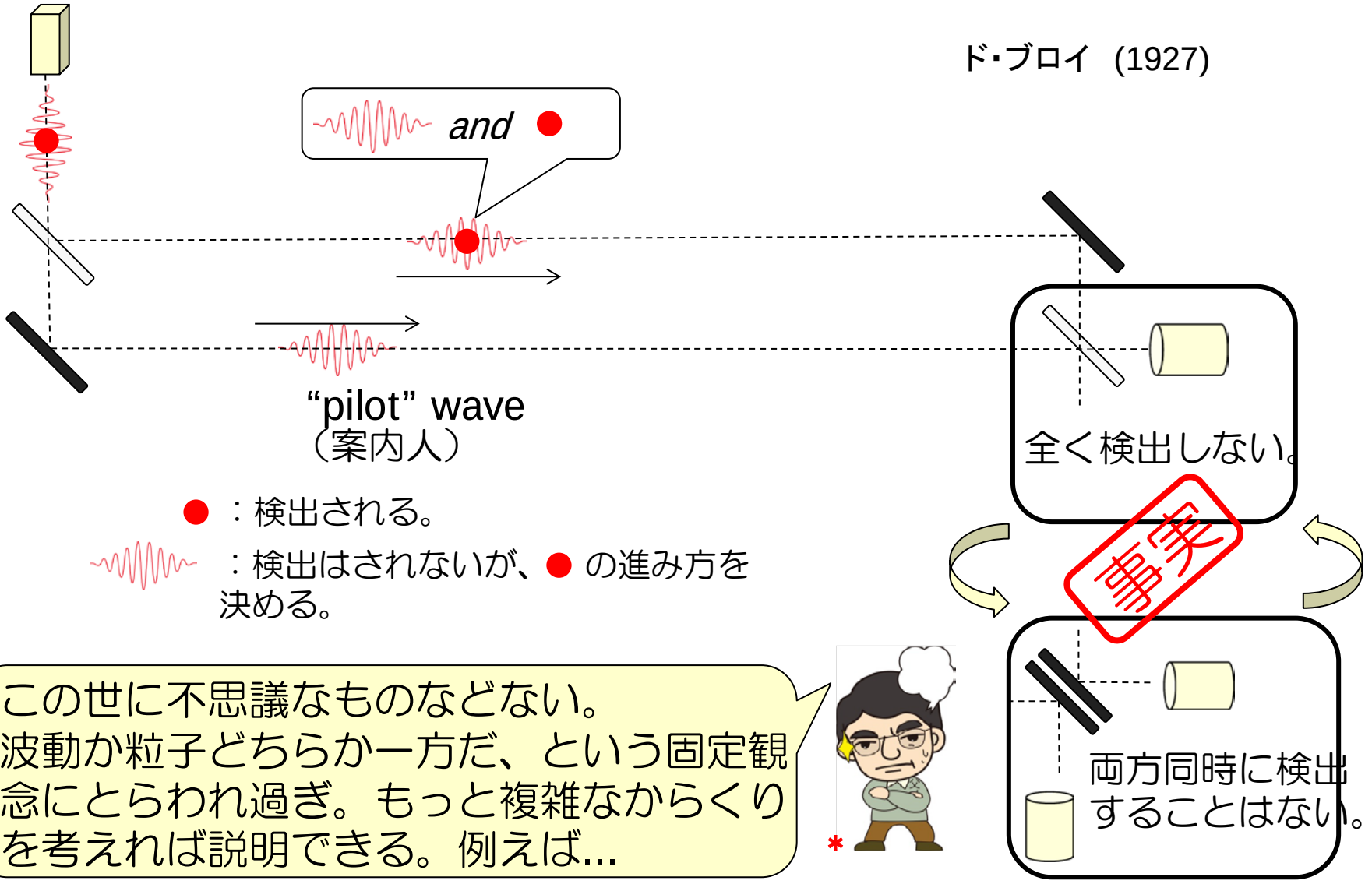
実験結果は、はじめから決めている場合と一緒。

波動だったか粒子だったかは、後から辻褄が合うように決まるの？歴史を書き替えるような不思議な話ね。

＊人物イラスト出典：「イラストAC　http://www.ac-illust.com/

別の説明

ド・ブロイ　(1927)



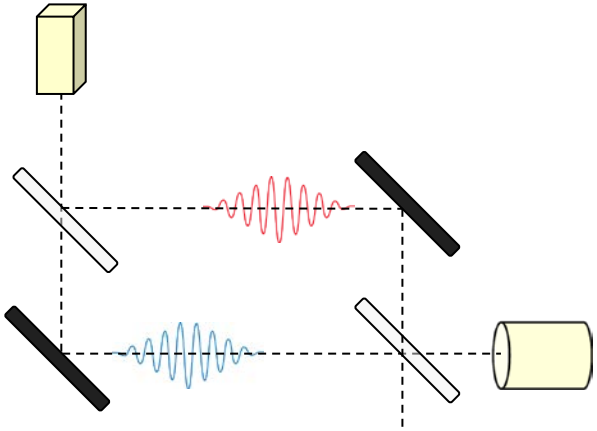
● ：検出される。

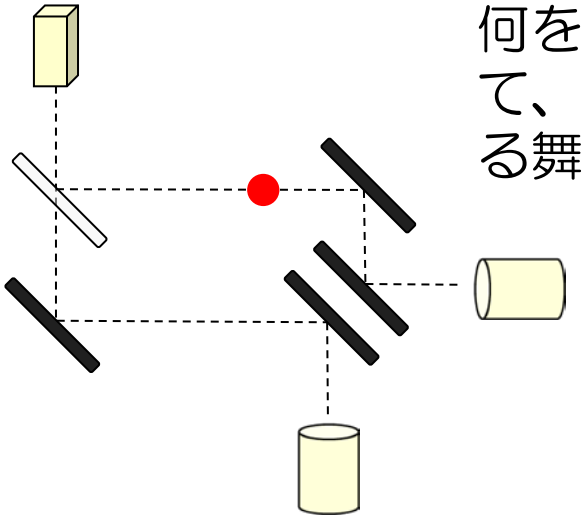
：検出はされないが、● の進み方を決める。

この世に不思議なものなどない。
波動か粒子どちらか一方だ、という固定観念にとらわれ過ぎ。もっと複雑なからくりを考えれば説明できる。例えば...

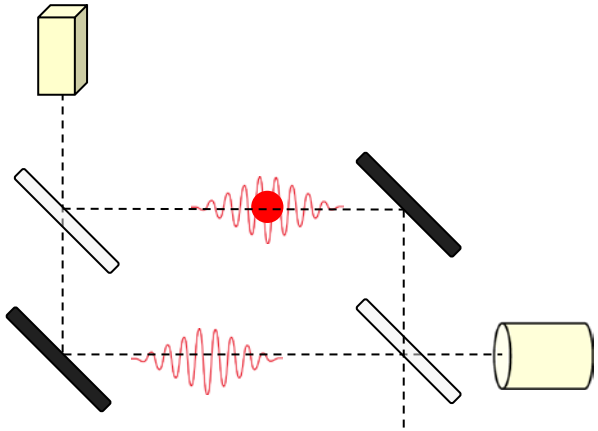
人物イラスト出典：「イラストAC」http://www.ac-illust.com/

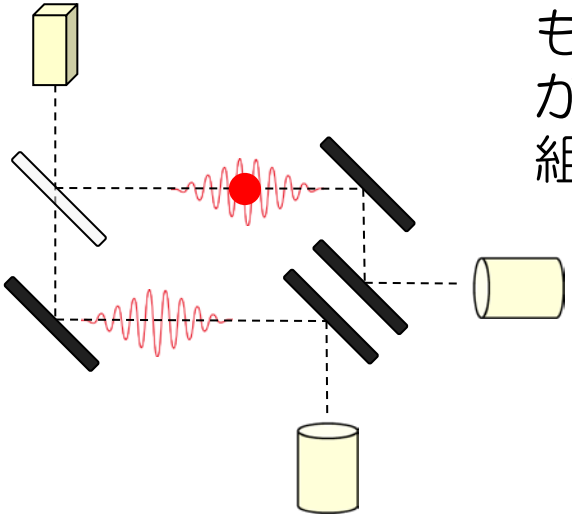
どちらの説明がお好み？





何を測定するかによって、波動か粒子かの振る舞いがかわる。





もっと複雑なからくりだが、何を測定しようが仕組み自体はかわらない。

* 人物イラスト出典：「イラストAC」
http://www.ac-illust.com/

講義内容

- 光の粒子性と波動性がどのように同時に成り立つのか
- 振る舞いの境界がどこにあるのか
- 光が光子でもあり波でもあるということが心の方で納得できない。
- まだ粒子であって波動である
- 粒子説と波動説の話をきくと

波動と粒子の二重性の話

えた

- 二重スリットの実験で、光子はどちらか一方ではなく両方のスリットを通っているのでは

偏光の性質を学ぶ

- ホイヘン 互影響で新たな波面が構成されるという考えたか、では光子一つをカメラなどに向けて出した場合、どのように進むのか

息抜き＋休憩

- 「常識で考えて」という反証はいけないのか。
- いっそのこと現在量子性として考えられている

双子の光子対の話

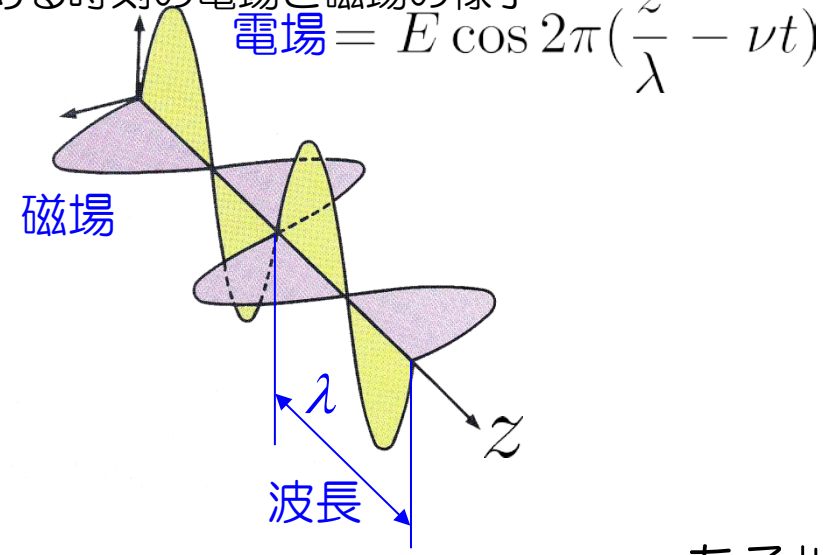
- 不確定性原理は観測の可否にかかわらず実 りえないということなのか、それとも観測できないだ とも観測できることが状態の存在を規定するのか
- 光子に質量はないというが、質量のないものを一つの存在するものとして規定してよいのか。

- 光が波だとか粒子だとかいう話に いたのでとっつきやすかった

役に立ちそうな話（次回）

光とは？　～　電磁波

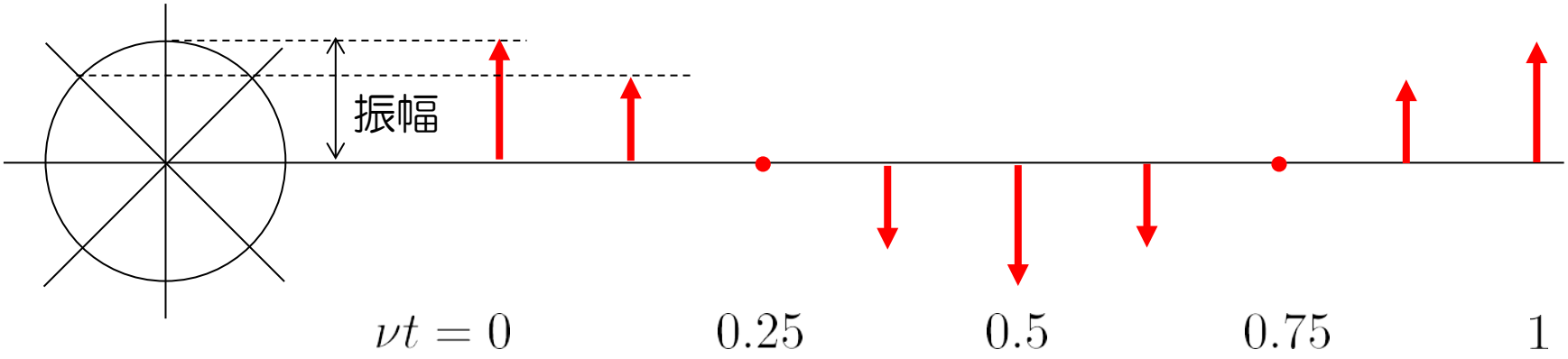
ある時刻の電場と磁場の様子



- 電場は、その場所に電荷を置くと受ける「力」を表している。
- 光の強さ、パワー、エネルギーなどは、振幅の２乗に比例

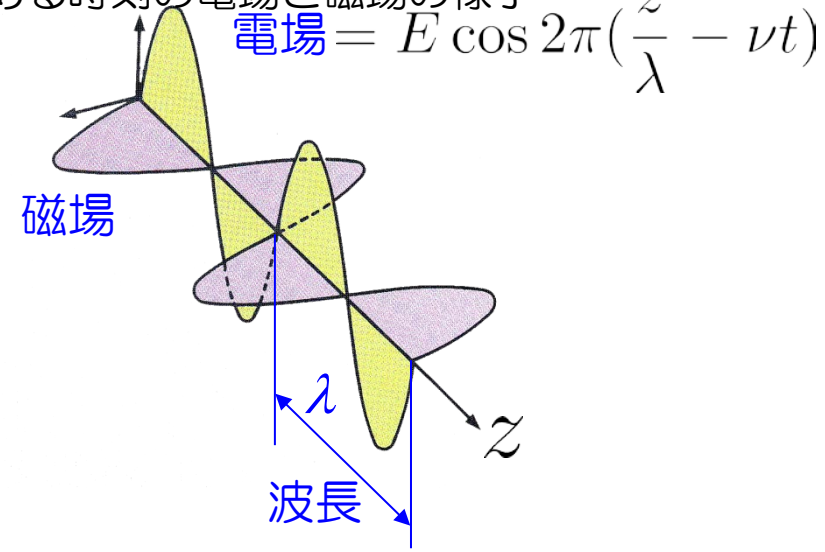
ある地点 $(z = 0)$ での電場の時間変化

$E\cos(2\pi\nu t)$



光の偏光

ある時刻の電場と磁場の様子



- 電場は、その場所に電荷を置くと受ける「力」を表している。
- 電場の向き（力の向き）は、光の進行方向に垂直

この絵では、電場は上下方向に振動

光の進行方向から見た
振動方向の絵

当然、いろいろな向きの振動が可能

水平偏光　垂直偏光　斜め偏光

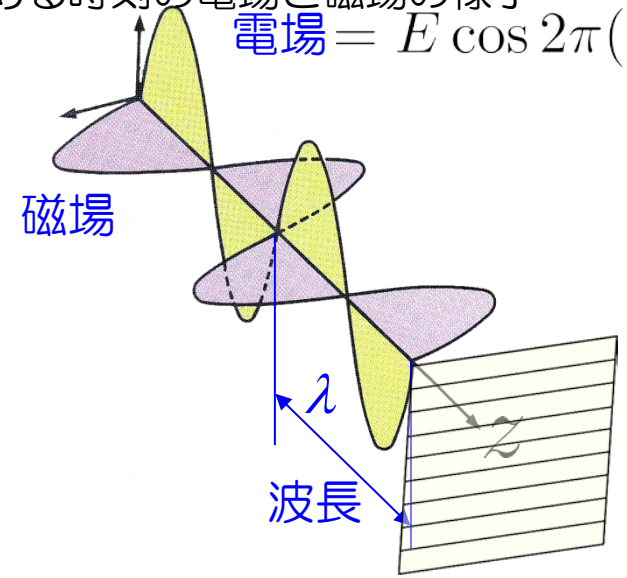
同じ向きに進む光でも、振動の様子に種類がある。「偏光」と呼ぶ。

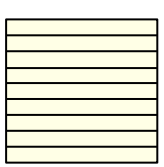
これらの例はみな、直線偏光。他にも偏光はある（円偏光など）。

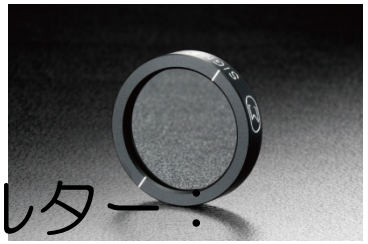
光の偏光を扱う道具

ある時刻の電場と磁場の様子

電場 $= E\cos 2\pi(\frac{z}{\lambda} - \nu t)$

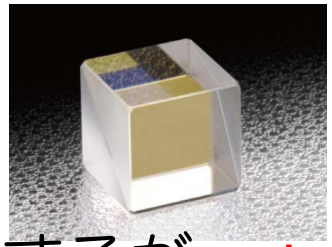




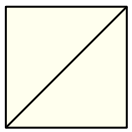


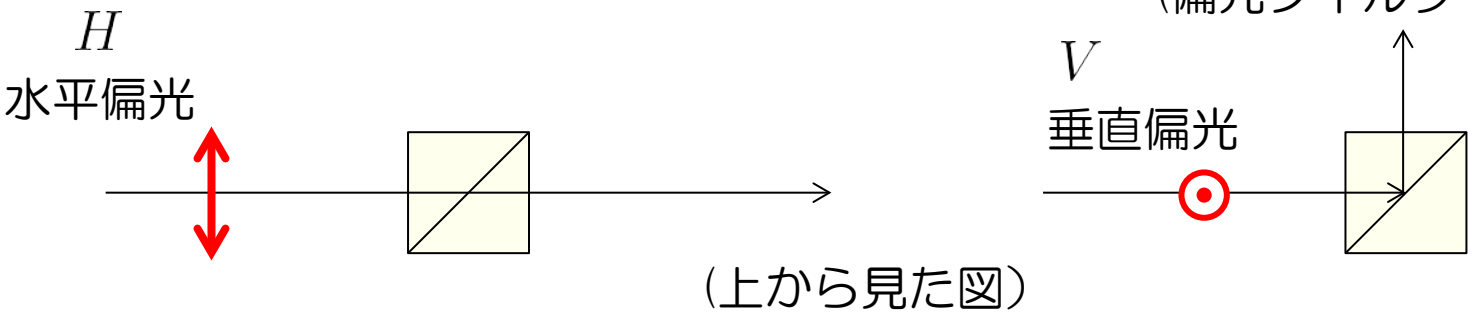
偏光板、偏光子、偏光フィルター：
水平偏光の光は100%透過するが、
垂直偏光の光は完全に遮断
（好きな回転角で使う）

画像提供（上下）：
シグマ光機株式会社



偏光ビームスプリッタ：
水平偏光の光はそのまま通過するが、
垂直偏光の光は９０度曲がる。
（偏光フィルターとしても使える）

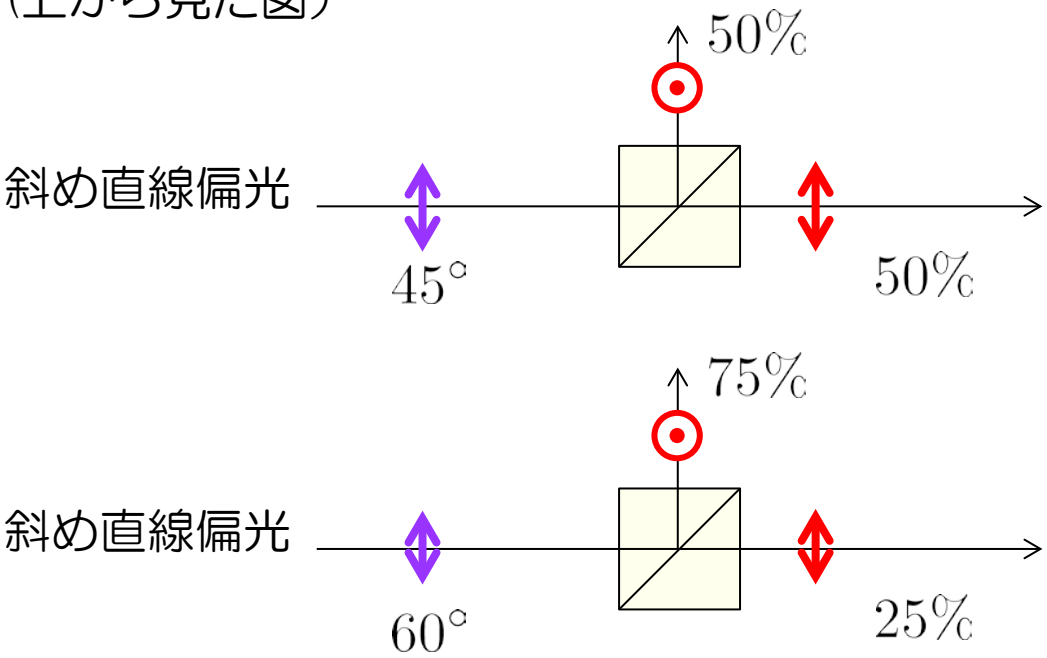




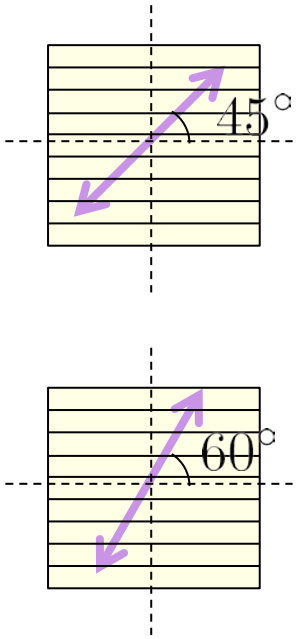
（上から見た図）

偏光フィルターの動作

（上から見た図）



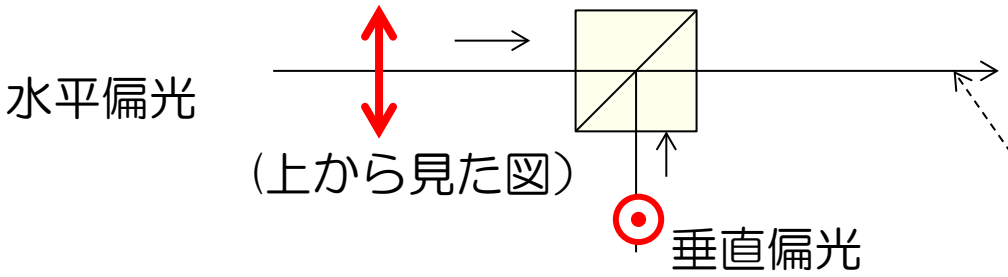
（光の進行方向から見た図）



入力の偏光の角度と、偏光フィルターを通り抜けるエネルギーの割合の関係は？

•光の強さ、パワー、エネルギーなどは、
振幅の２乗に比例

偏光の重ね合わせ

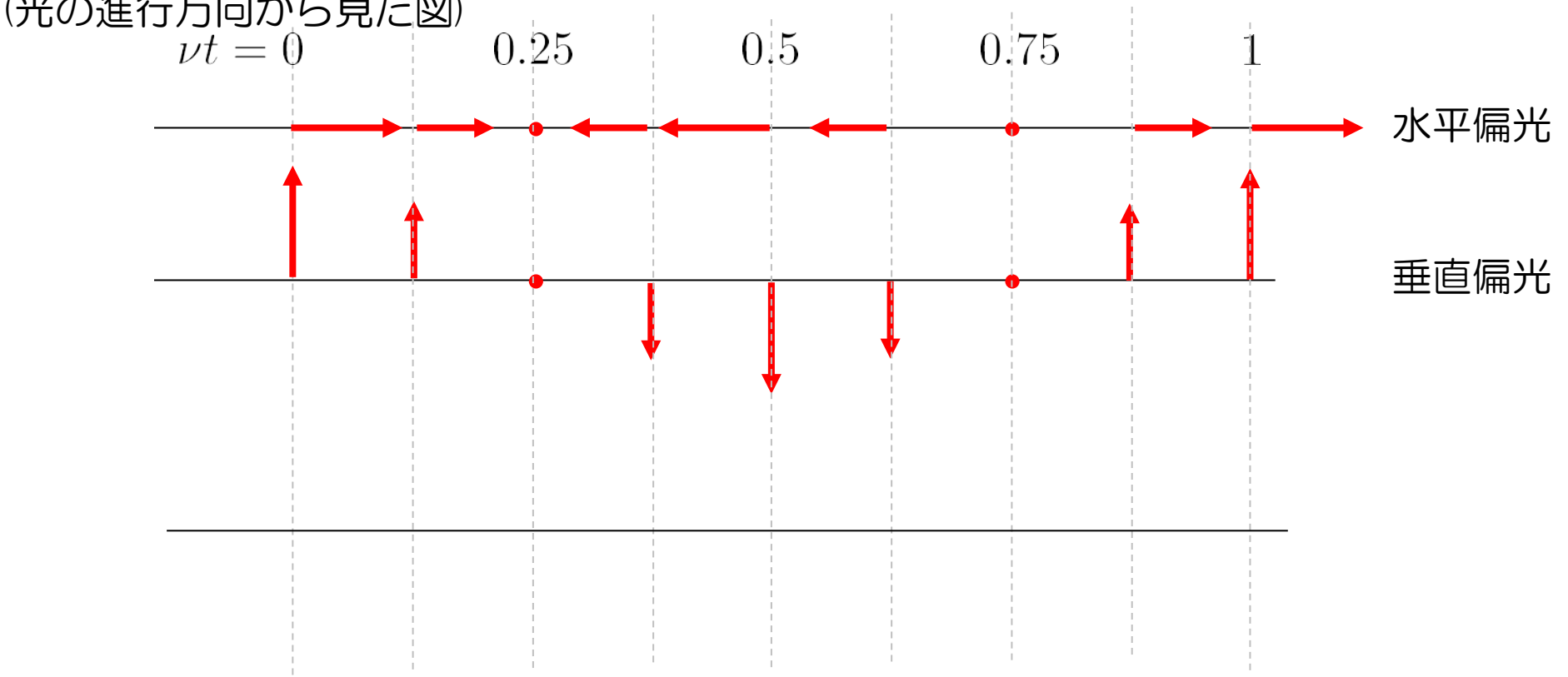


水平偏光　$E_H \cos(2\pi\nu t)$

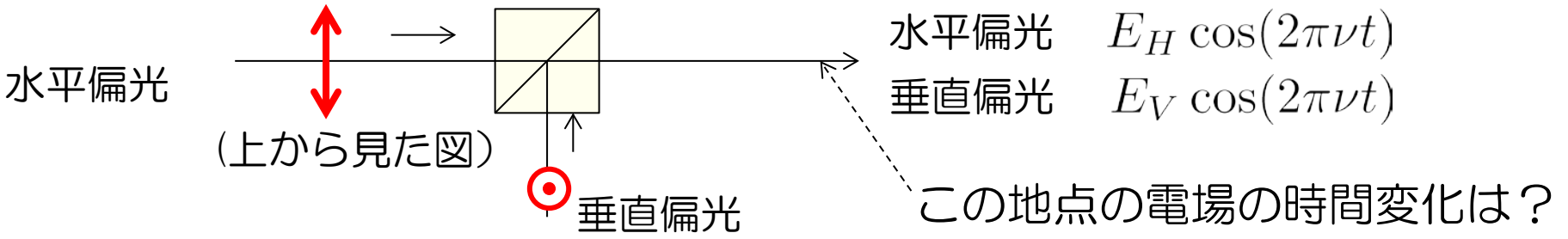
垂直偏光　$E_V \cos(2\pi\nu t)$

この地点の電場の時間変化は？

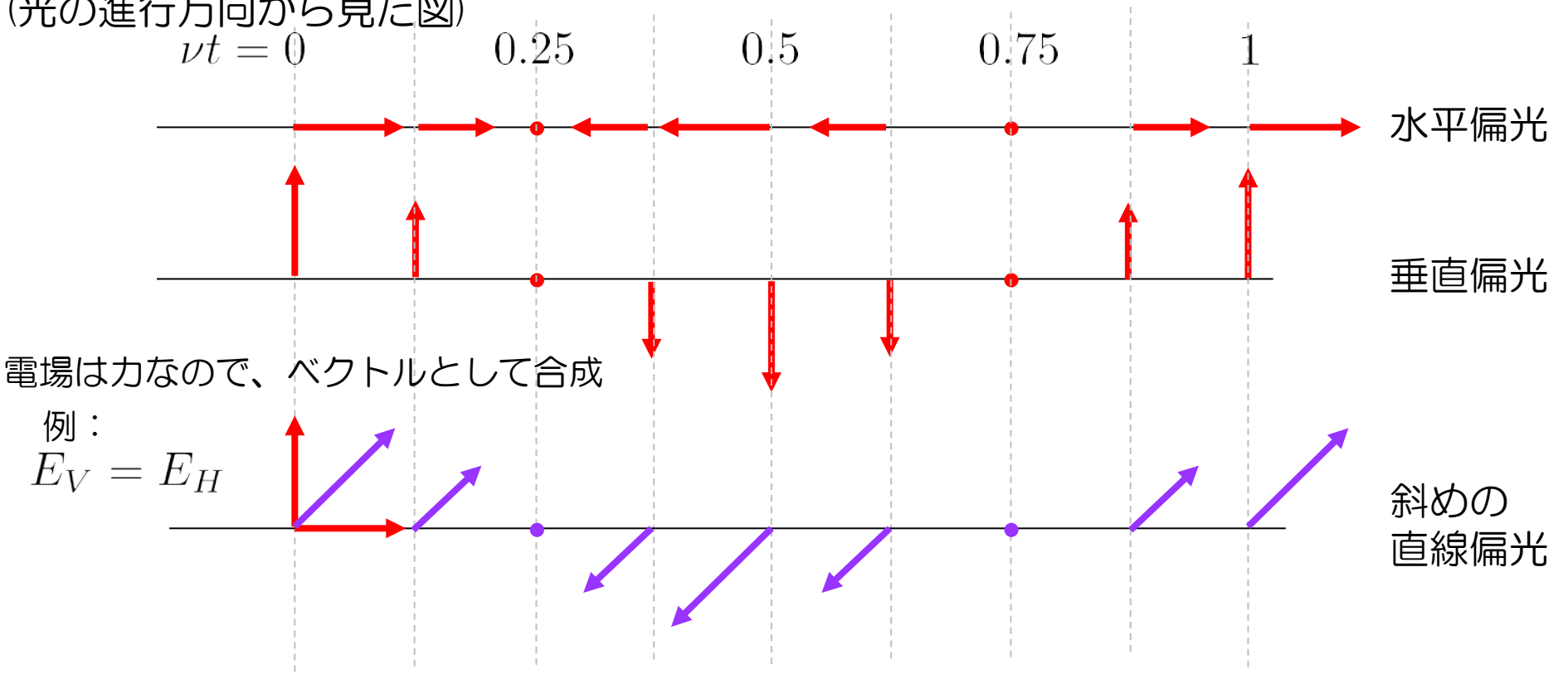
(光の進行方向から見た図)



偏光の重ね合わせ



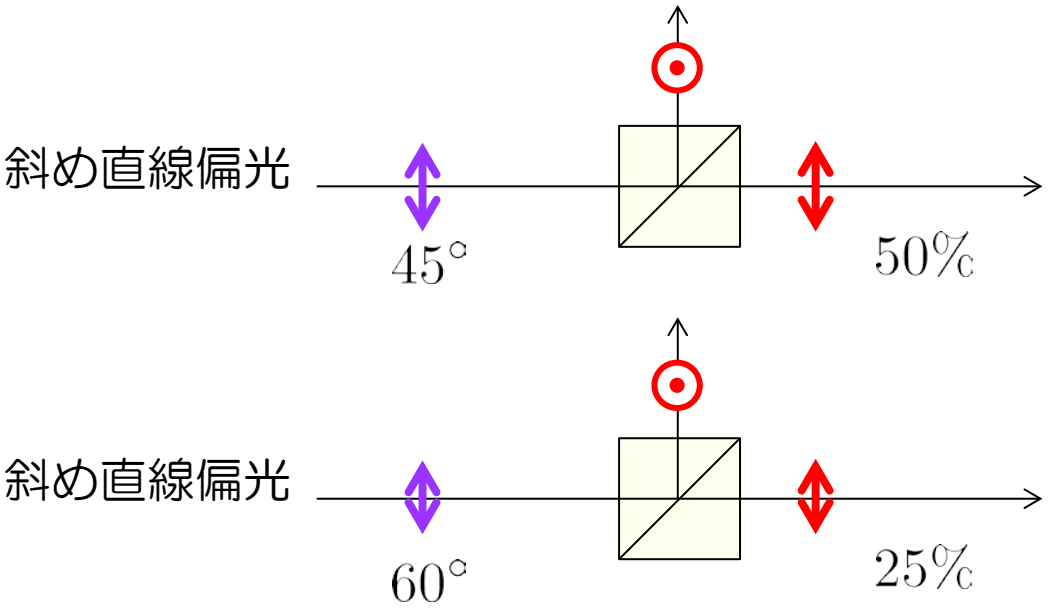
(光の進行方向から見た図)

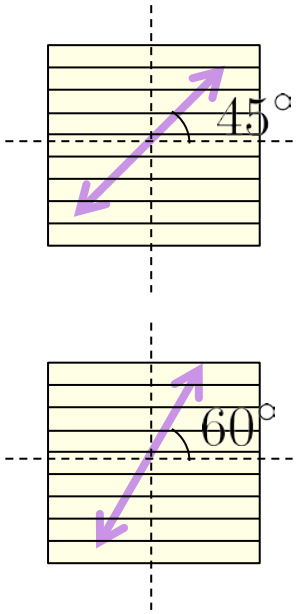


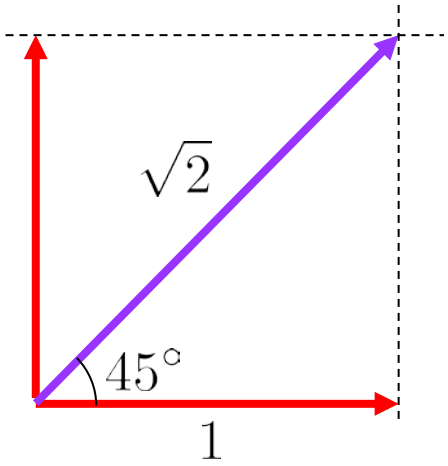
偏光フィルターの動作

(上から見た図)

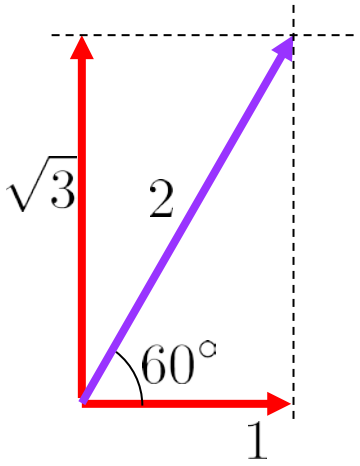
(光の進行方向から見た図)







入力：出力
$= (\sqrt{2})^2 : 1^2$
$= 2 : 1$



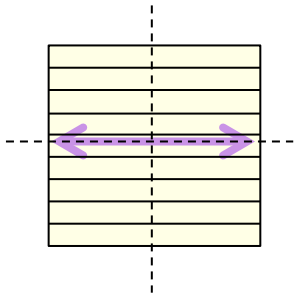
入力：出力
$= 2^2 : 1^2$
$= 4 : 1$

光の強さ、パワー、エネルギーなどは、振幅の２乗に比例

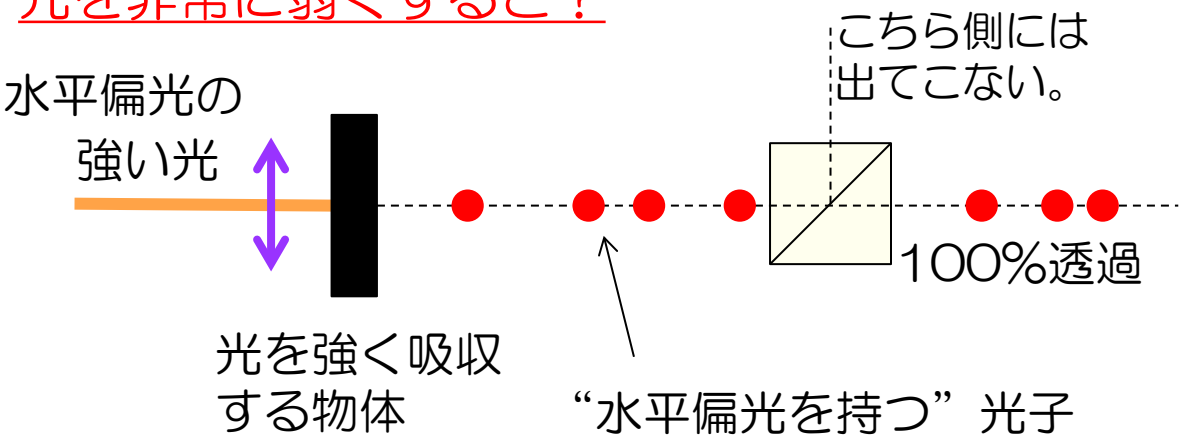
光子と偏光

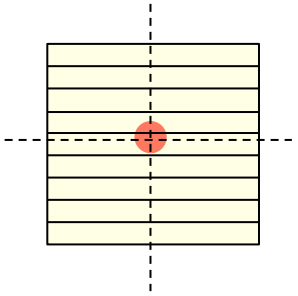
（上から見た図）

（光の進行方向から見た図）



光を非常に弱くすると？

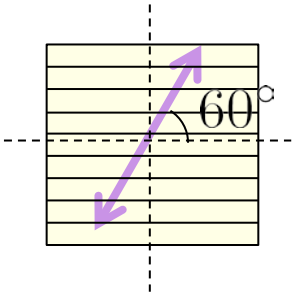


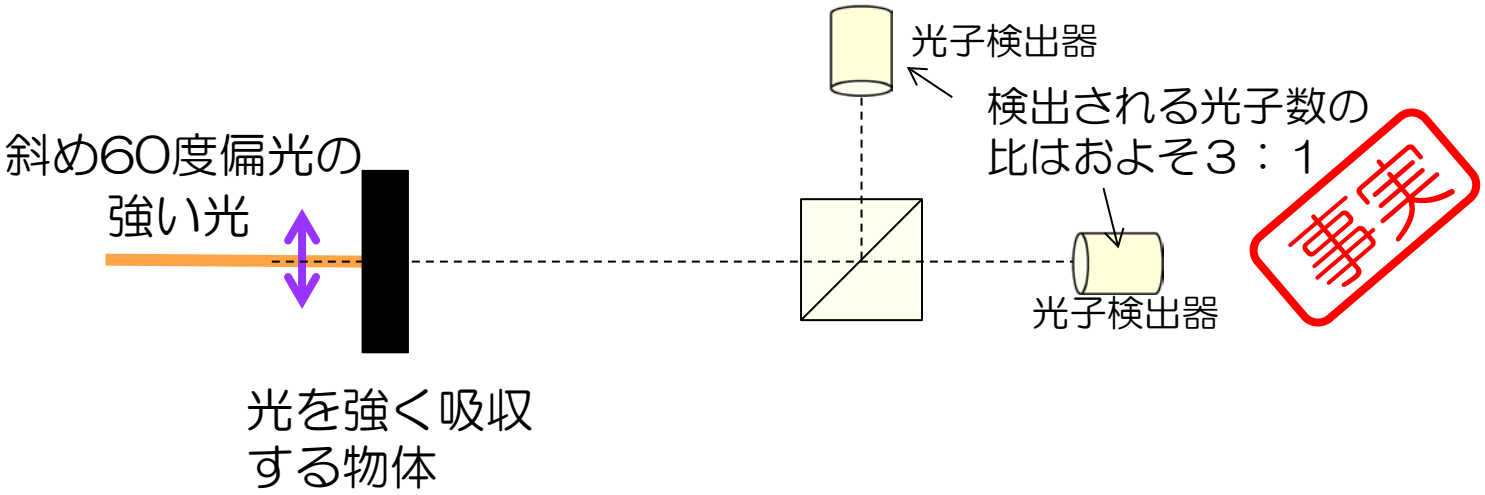


光子と偏光

（上から見た図）

（光の進行方向から見た図）





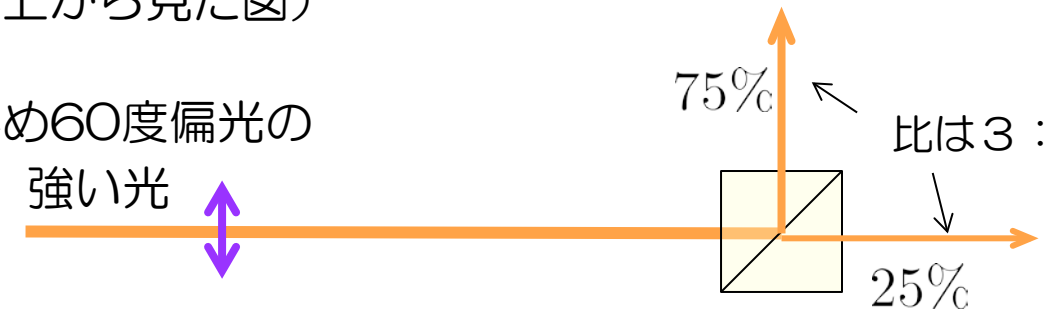
実事

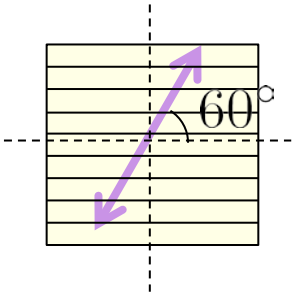
光子と偏光

（上から見た図）

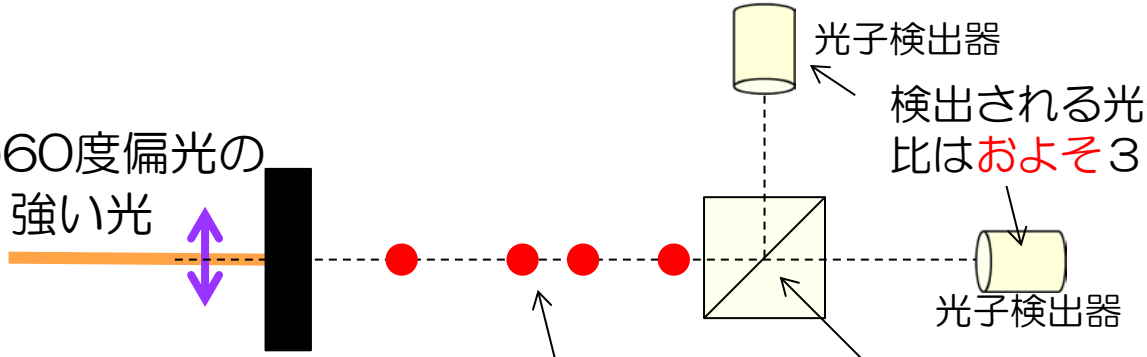
（光の進行方向から見た図）

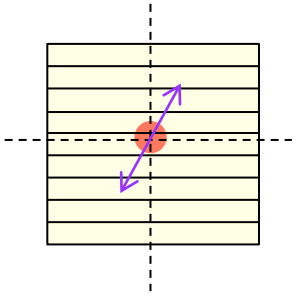
斜め60度偏光の
強い光





斜め60度偏光の
強い光



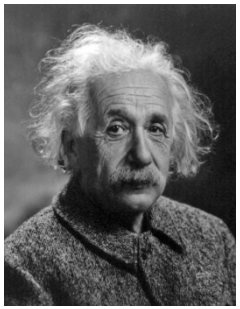


光を強く吸収
する物体

斜め60度偏光を
持つ光子

各光子は、確率２５％
でまっすぐ進む。

（実験結果はこの考え方と整合する。）

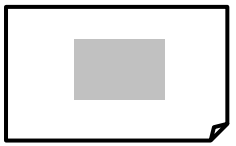


神はサイコロを振らない。

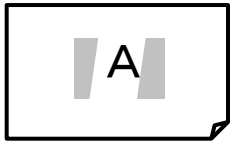
ちょっとひと息

これから、いろいろなゲームを考えます。どのゲームも、一回の挑戦に千円かかりますが、当たりを引けば３千３百円もらえます。そのゲームに何度も挑戦するのが得かどうか考えてください。

Q1： 銀色の部分をこするとA、B、Cのいずれかの文字が現われるカードを一枚貰います。こすってAが出れば当たりです。あなたならこのゲームをしますか？



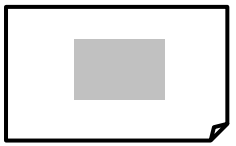
解答例：３種類数字があるので、Aが出る確率は1/3。よって賞金の期待値は3300/3=1100円となる。これは1000円より大きく、ゲーム一回ごとに平均100円儲かることになるので、ゲームをするべきである。



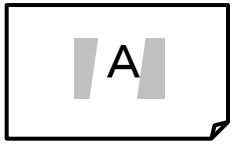
ちょっとひと息

これから、いろいろなゲームを考えます。どのゲームも、一回の挑戦に千円かかりますが、当たりを引けば３千３百円もらえます。そのゲームに何度も挑戦するのが得かどうか考えてください。

Q1： 銀色の部分をこするとA、B、Cのいずれかの文字が現われるカードを一枚貰います。こすってAが出れば当たりです。あなたならこのゲームをしますか？



解答例：３種類数字があるので、Aが出る確率は1/3。よって賞金の期待値は3300/3=1100円となる。これは1000円より大きく、ゲーム一回ごとに平均100円儲かることになるので、ゲームをするべきである。

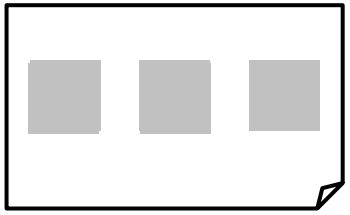


この解答を見て「なるほどそうだ」と思った人は、ギャンブルには向きません。カードの文字がどれも等しい確率で現われる保証はどこにもないのです。最悪の場合、Aが出る確率はゼロで、期待値は0円となるので、ゲームをすべきではありません。

ちょっとひと息

これから、いろいろなゲームを考えます。どのゲームも、一回の挑戦に千円かかりますが、当たりを引けば３千３百円もらえます。そのゲームに何度も挑戦するのが得かどうか考えてください。

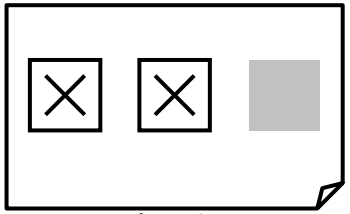
Q2： 削る場所が３箇所あるスクラッチカードを貰います。３箇所のうち、２箇所を削って、 同じマークが出ればあたりです。マークは２種類だけです。あなたならこのゲームをしますか？



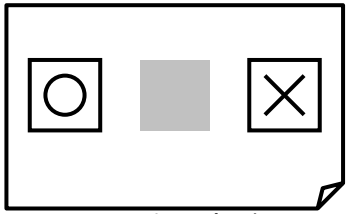
ちょっとひと息

これから、いろいろなゲームを考えます。どのゲームも、一回の挑戦に千円かかりますが、当たりを引けば３千３百円もらえます。そのゲームに何度も挑戦するのが得かどうか考えてください。

Q2： 削る場所が３箇所あるスクラッチカードを貰います。３箇所のうち、２箇所を削って、 同じマークが出ればあたりです。マークは２種類だけです。あなたならこのゲームをしますか？

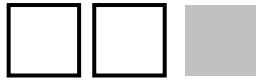


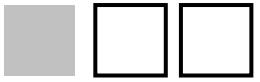
あたり



はずれ

ヒント：削り方のパターンは３通りありますが、等確率で選択する作戦でいきましょう。

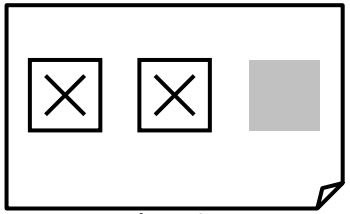




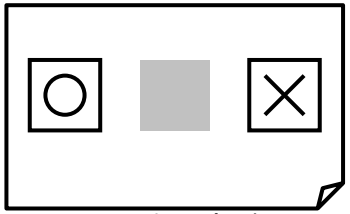
ちょっとひと息

これから、いろいろなゲームを考えます。どのゲームも、一回の挑戦に千円かかりますが、当たりを引けば３千３百円もらえます。そのゲームに何度も挑戦するのが得かどうか考えてください。

Q2： 削る場所が３箇所あるスクラッチカードを貰います。３箇所のうち、２箇所を削って、 同じマークが出ればあたりです。マークは２種類だけです。あなたならこのゲームをしますか？

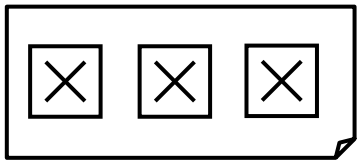


あたり

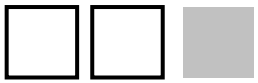


はずれ

ヒント：削り方のパターンは３通りありますが、等確率で選択する作戦でいきましょう。

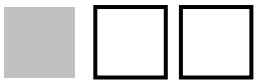


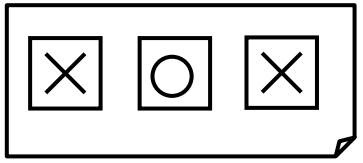
あたり



あたり

あたり





はずれ

あたり

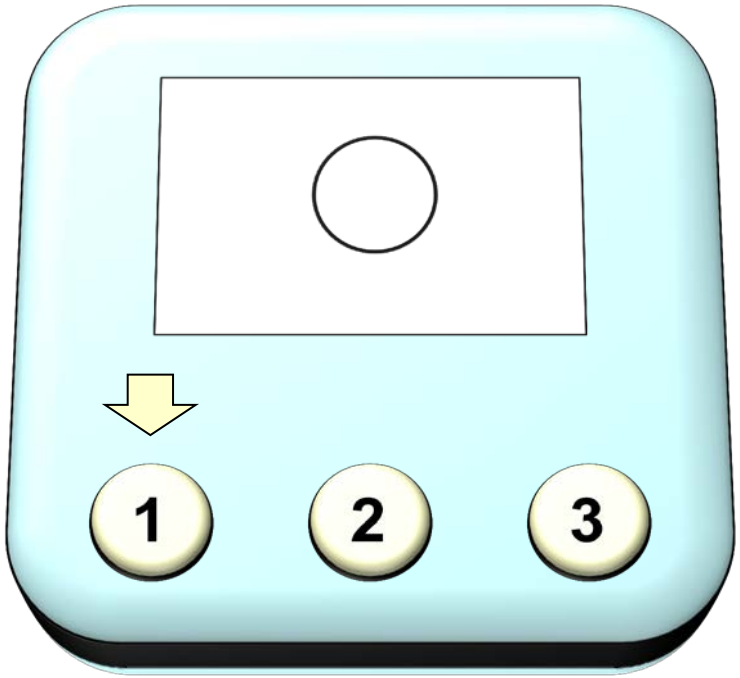
はずれ

最低でも、3回に1回は当たりになるはず。

平均100円儲かる。

ちょっとひと息

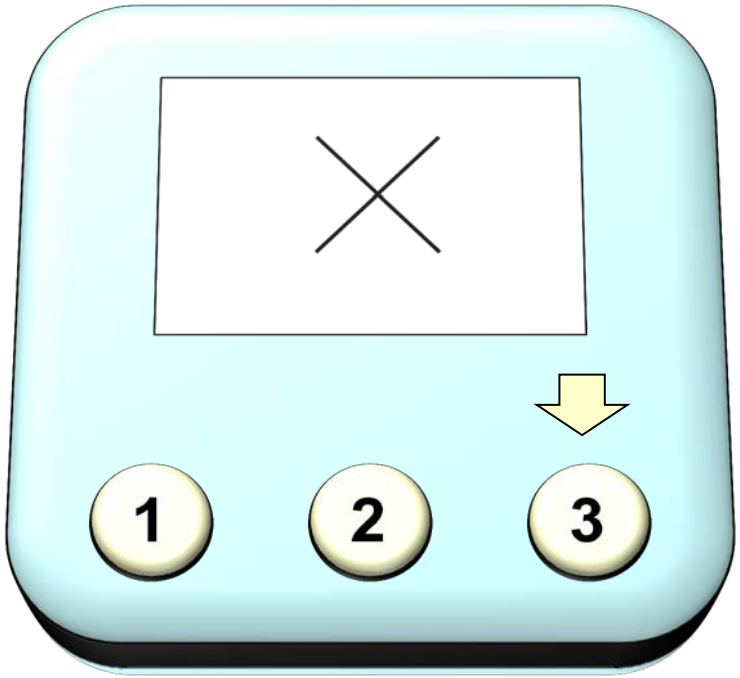
これから、いろいろなゲームを考えます。どのゲームも、一回の挑戦に千円かかりますが、当たりを引けば３千３百円もらえます。そのゲームに何度も挑戦するのが得かどうか考えてください。



Q3：ルールは同じですが、今度は機械のボタンを押すと窓にマークが出る仕組みです。箱の中のからくりはわかりません。あなたならこのゲームをしますか？

ちょっとひと息

これから、いろいろなゲームを考えます。どのゲームも、一回の挑戦に千円かかりますが、当たりを引けば３千３百円もらえます。そのゲームに何度も挑戦するのが得かどうか考えてください。

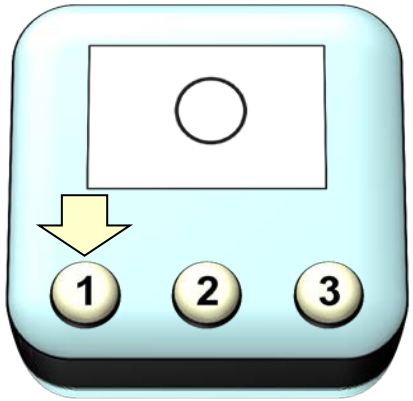


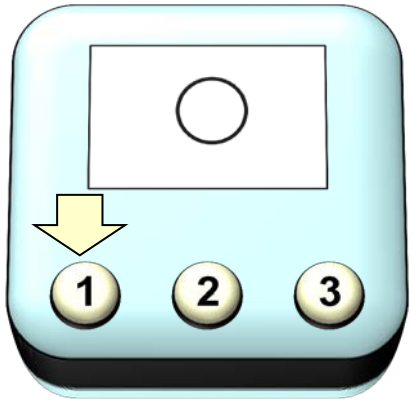
Q3：ルールは同じですが、今度は機械のボタンを押すと窓にマークが出る仕組みです。箱の中のからくりはわかりません。あなたならこのゲームをしますか？

ちょっとひと息

Q4： 今度は機械が２台、それぞれ別々の部屋に置かれていて、一部屋にあなた、もう一部屋には信頼できる友人が入ります。あなたと友人は、それぞれの機械のボタンをひとつだけ押します。同じ番号のボタンが押されたら、〇か×か必ず同じマークが出ます（何度確認しても構いません。もちろん、その都度、一致するマークは変わります）。２人が違う番号のボタンを押して、マークが一致したら当たりです。あなたならこのゲームをしますか？

　ただし、ゲームを開始して以降は、２つの機械の間でいかなる通信も行われないことは保証されているとします。

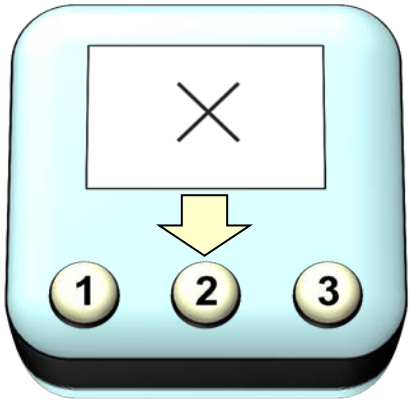


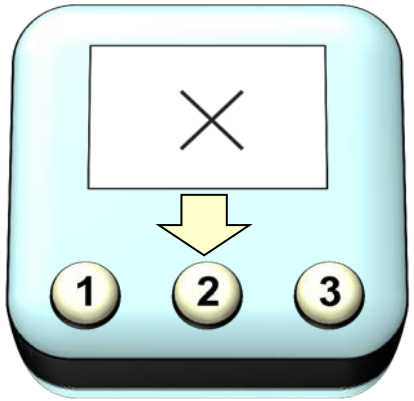


ちょっとひと息

Q4： 今度は機械が２台、それぞれ別々の部屋に置かれていて、一部屋にあなた、もう一部屋には信頼できる友人が入ります。あなたと友人は、それぞれの機械のボタンをひとつ選んで同時に押します。同じ番号のボタンが押されたら、〇か×か必ず同じマークが出ます（何度確認しても構いません。もちろん、その都度、一致するマークは変わります）。２人が違う番号のボタンを押して、マークが一致したら当たりです。あなたならこのゲームをしますか？

　ただし、ゲームを開始して以降は、２つの機械の間でいかなる通信も行われないことは保証されているとします。

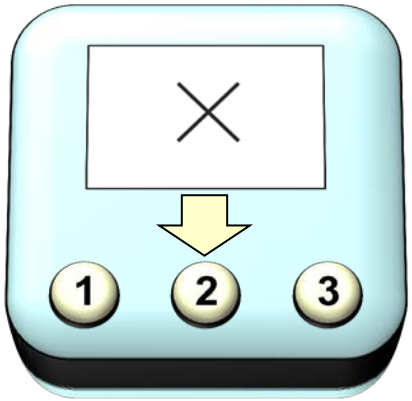




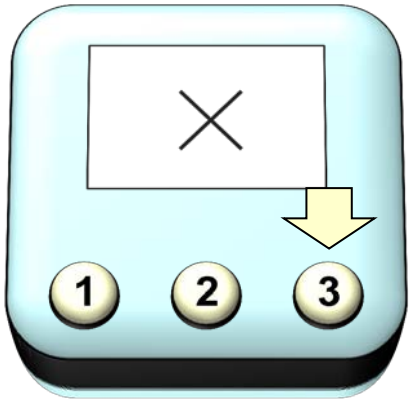
ちょっとひと息

Q4： 今度は機械が２台、それぞれ別々の部屋に置かれていて、一部屋にあなた、もう一部屋には信頼できる友人が入ります。あなたと友人は、それぞれの機械のボタンをひとつ選んで同時に押します。同じ番号のボタンが押されたら、〇か×か必ず同じマークが出ます（何度確認しても構いません。もちろん、その都度、一致するマークは変わります）。２人が違う番号のボタンを押して、マークが一致したら当たりです。あなたならこのゲームをしますか？

　ただし、ゲームを開始して以降は、２つの機械の間でいかなる通信も行われないことは保証されているとします。



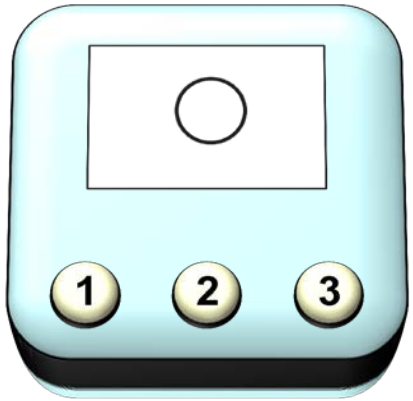
あたり！！



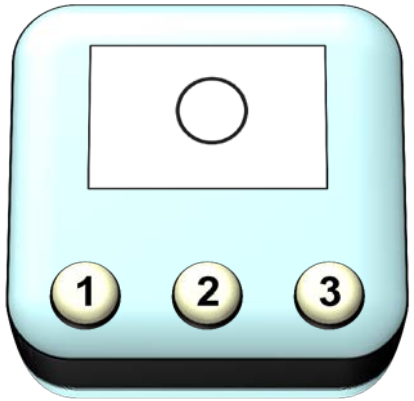
ちょっとひと息

Q4： 今度は機械が２台、それぞれ別々の部屋に置かれていて、一部屋にあなた、もう一部屋には信頼できる友人が入ります。あなたと友人は、それぞれの機械のボタンをひとつ選んで同時に押します。同じ番号のボタンが押されたら、〇か×か必ず同じマークが出ます（何度確認しても構いません。もちろん、その都度、一致するマークは変わります）。２人が違う番号のボタンを押して、マークが一致したら当たりです。あなたならこのゲームをしますか？

ただし、ゲームを開始して以降は、２つの機械の間でいかなる通信も行われないことは保証されているとします。



「そんなことをどうやって保証するんだ？」という疑い深い人は、次のような問題だと思ってください。相対論によって、どんな信号も光速度を超えて伝わらないことは信じているでしょう。そこで、二つの部屋は二つの別の星にあり、その二つの星は光の速度でも１０秒以上かかるくらい離れているとします。あなたと友人は時計を合わせて、ほぼ同時にボタンを押すようにします。これなら、通信によってどのボタンが押されたか知らせることはできません。

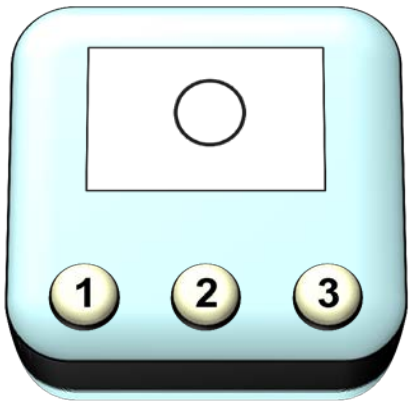


ちょっとひと息

「同じ番号のボタンが同時に押されたら、必ず同じマークが出る」というルールを守るためには、どちらの箱も同じパターンでマークが出るようにあらかじめプログラムしておくしかない。

	①	②	③
1回目	○	○	×
2回目	×	×	○
3回目	○	×	×
4回目	○	○	○
5回目	○	×	○
・			

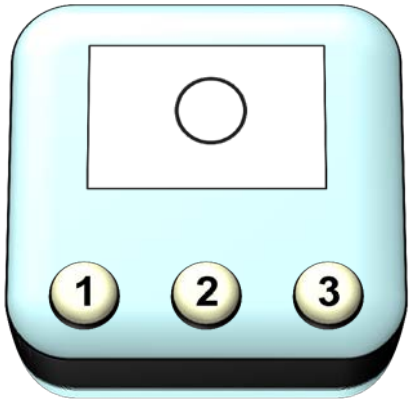
	①	②	③
1回目	○	○	×
2回目	×	×	○
3回目	○	×	×
4回目	○	○	○
5回目	○	×	○
・			



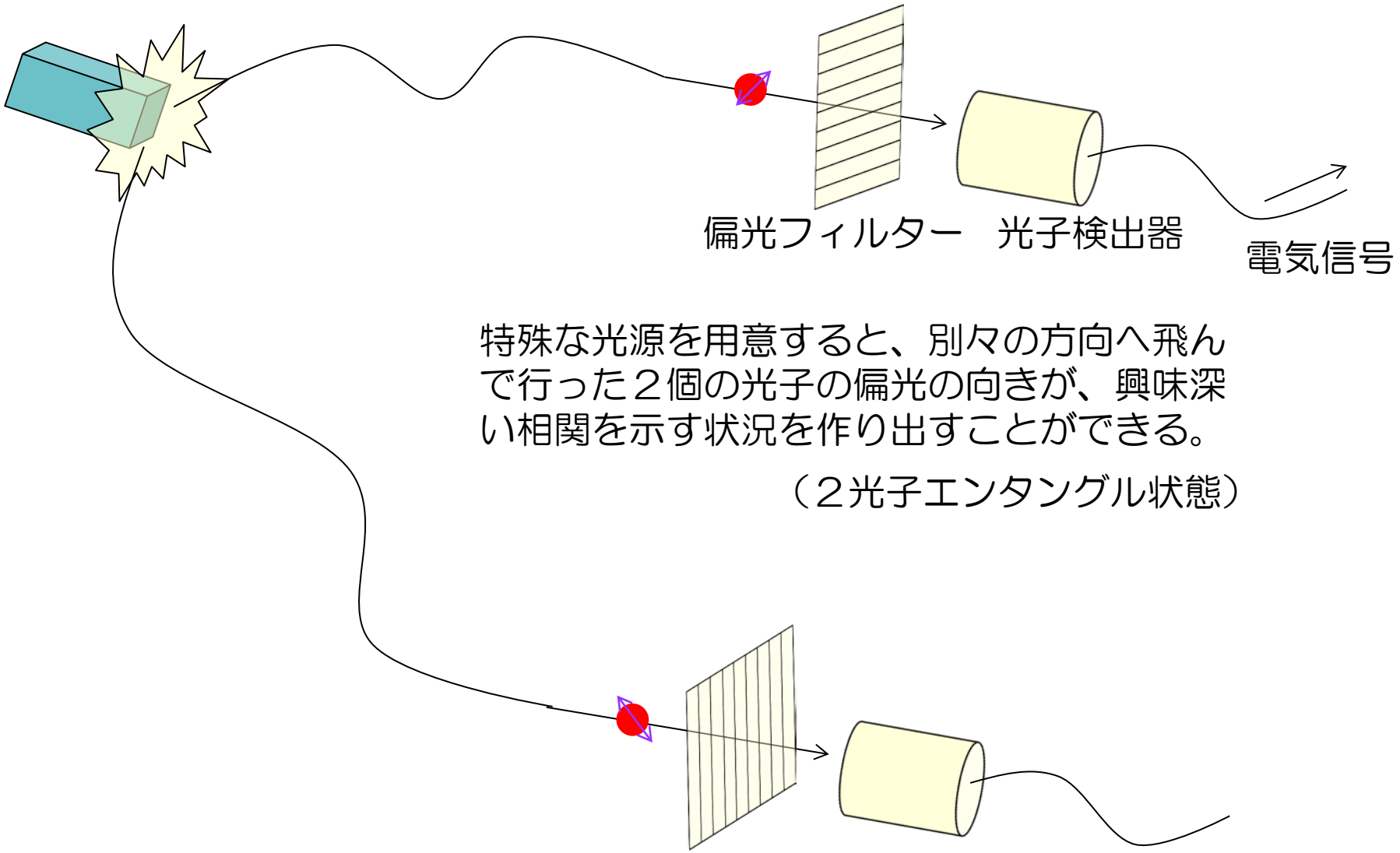
スクラッチカードと同じことになるので、

最低でも、３回に１回は当たりになるはず。

平均して、
３０００円払うと３３００円戻ってくるので、どんどんゲームをやるべき。



双子の光子対

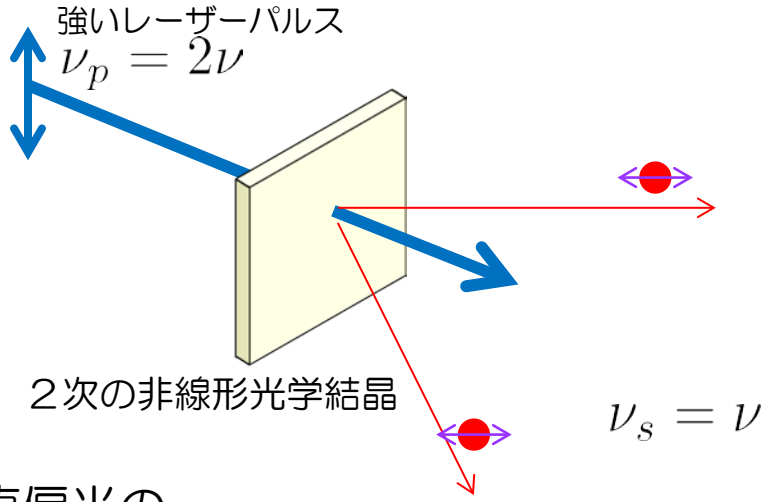


特殊な光源を用意すると、別々の方向へ飛んで行った２個の光子の偏光の向きが、興味深い相関を示す状況を作り出すことができる。

（２光子エンタングル状態）

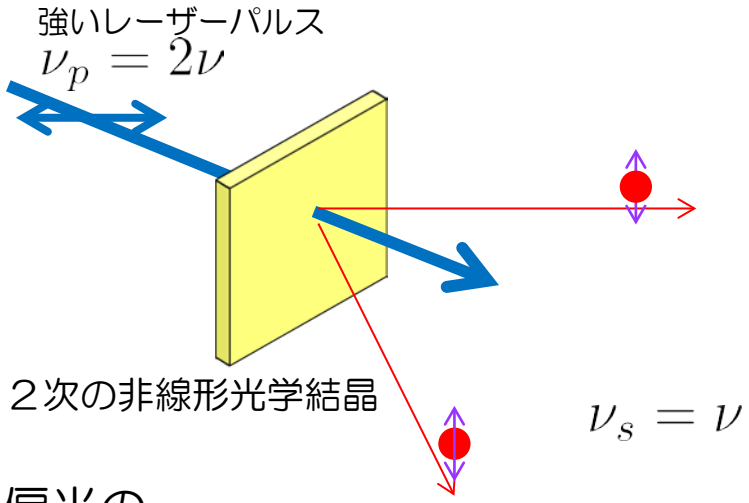
２光子エンタングル状態の作り方

光パラメトリック過程



垂直偏光の
$h\nu_p$ の光子１個が、

水平偏光の
$h\nu_s$ の光子２個に変換される

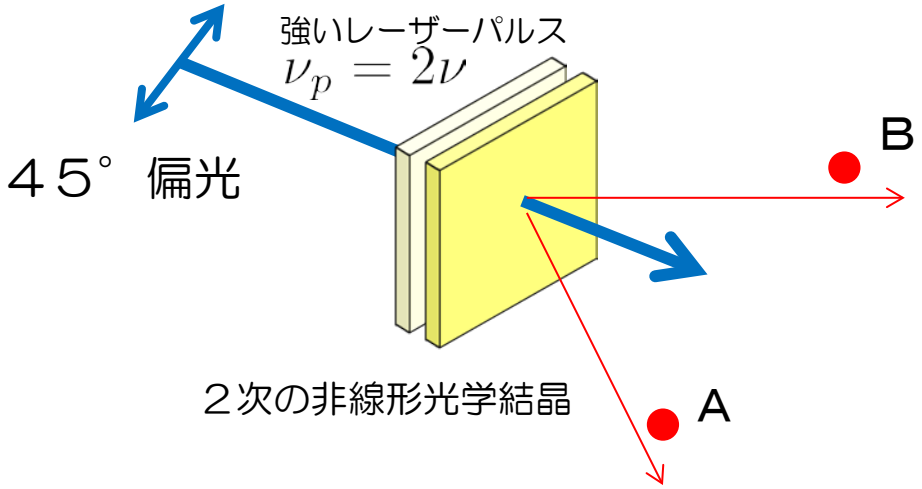


水平偏光の
$h\nu_p$ の光子１個が、

垂直偏光の
$h\nu_s$ の光子２個に変換される

２光子エンタングル状態の作り方

光パラメトリック過程



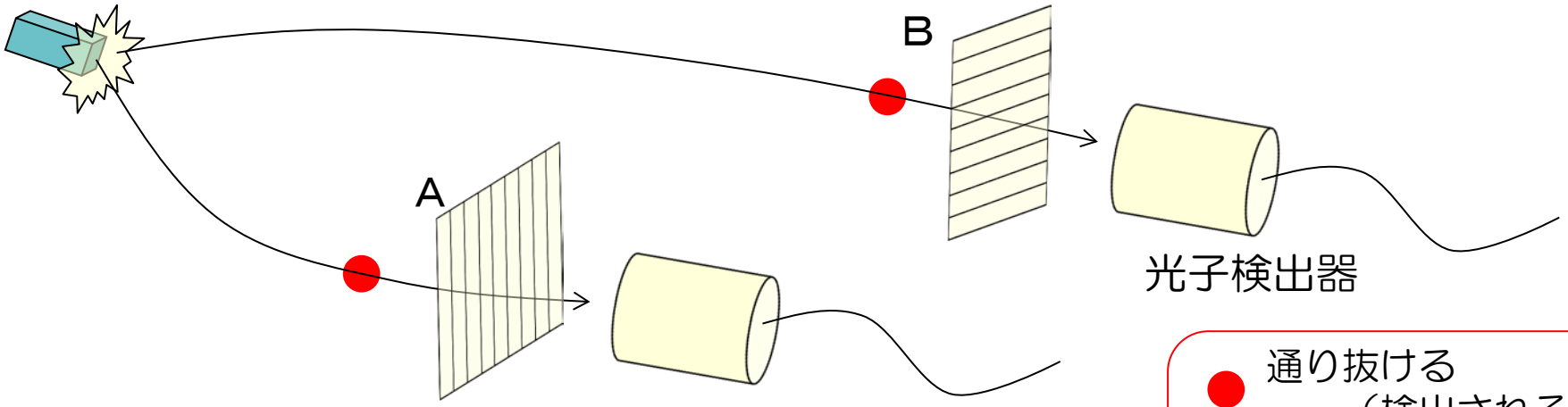
２枚がさねの板を用いて、

斜め４５°偏光の $h\nu_p$ の光子１個を、$h\nu_s$ の光子２個に変換する。

（２光子エンタングル状態）

２種類の生成過程が重なると....

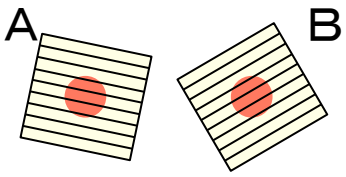
双子の光子の性質を調べる



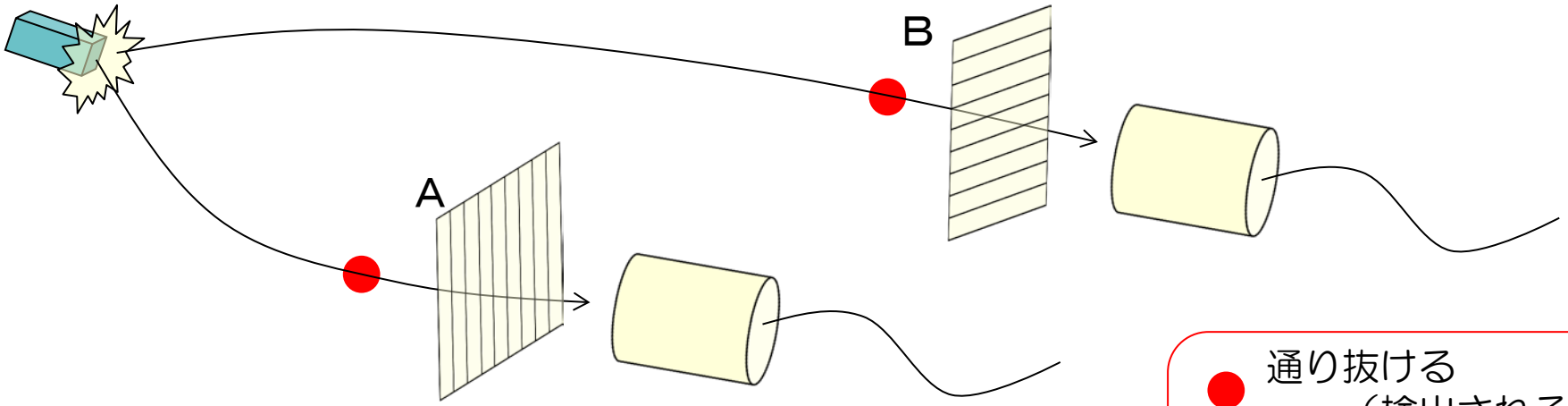
通り抜ける
（検出される）

通り抜けない
（検出されない）

いろいろな角度に偏光板を置いたときに、各光子が偏光フィルターを通り抜けるかどうかを調べる。
（２個の光子で４通りのパターン）



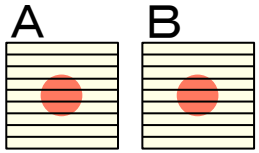
同じ角度にフィルターを置く



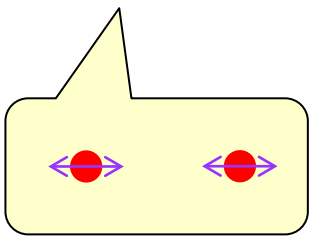
通り抜ける
（検出される）

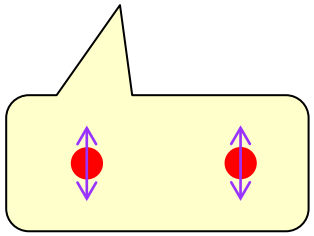
通り抜けない
（検出されない）

いろいろな角度に偏光板を置いたときに、各光子が偏光フィルターを通り抜けるかどうかを調べる。
（２個の光子で４通りのパターン）



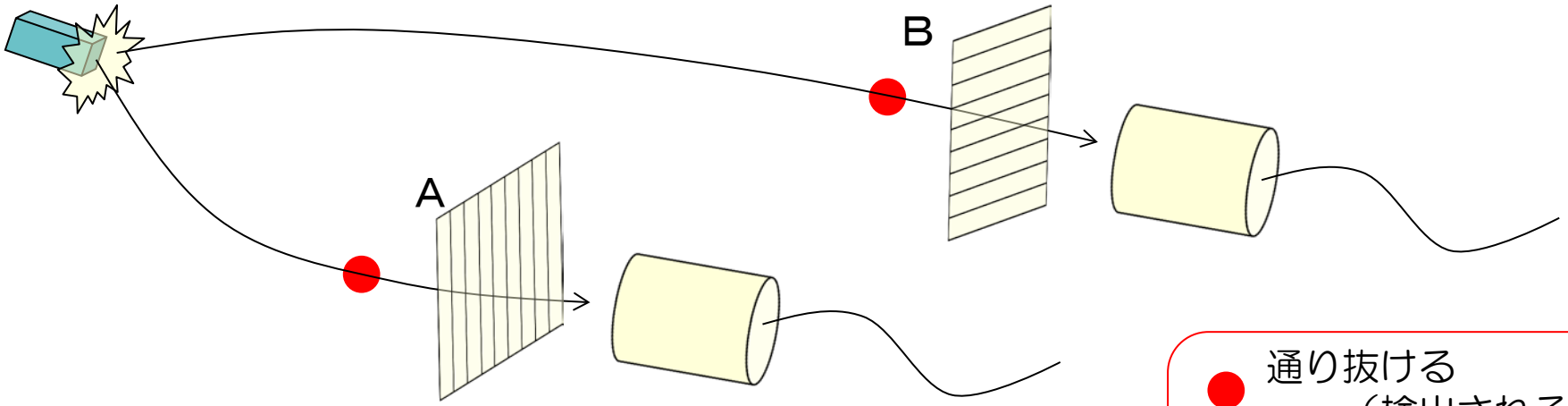
50%　0%　0%　50%





作り方から考えて、
この結果は妥当。

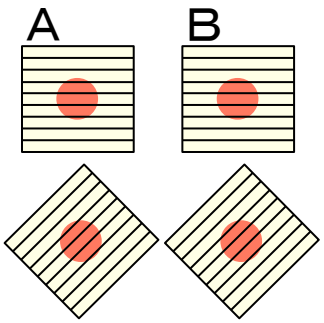
同じ角度にフィルターを置く



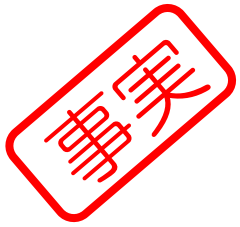
通り抜ける
（検出される）

通り抜けない
（検出されない）

いろいろな角度に偏光板を置いたときに、各光子が偏光フィルターを通り抜けるかどうかを調べる。

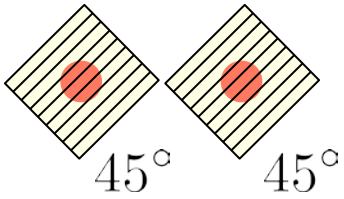


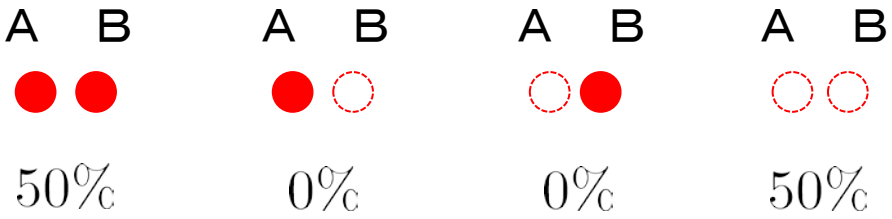
A	B	A	B	A	B	A	B
●	●	●	○	○	●	○	○
50%		0%		0%		50%	
50%		0%		0%		50%	

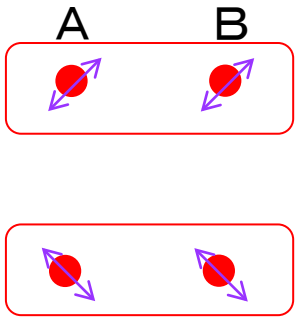


２枚のフィルターの角度が同じなら、どの向きに置いても、２光子は同じ振る舞いをする。

同じ角度にフィルターを置く

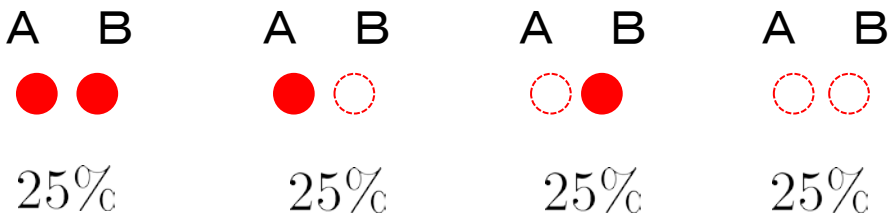






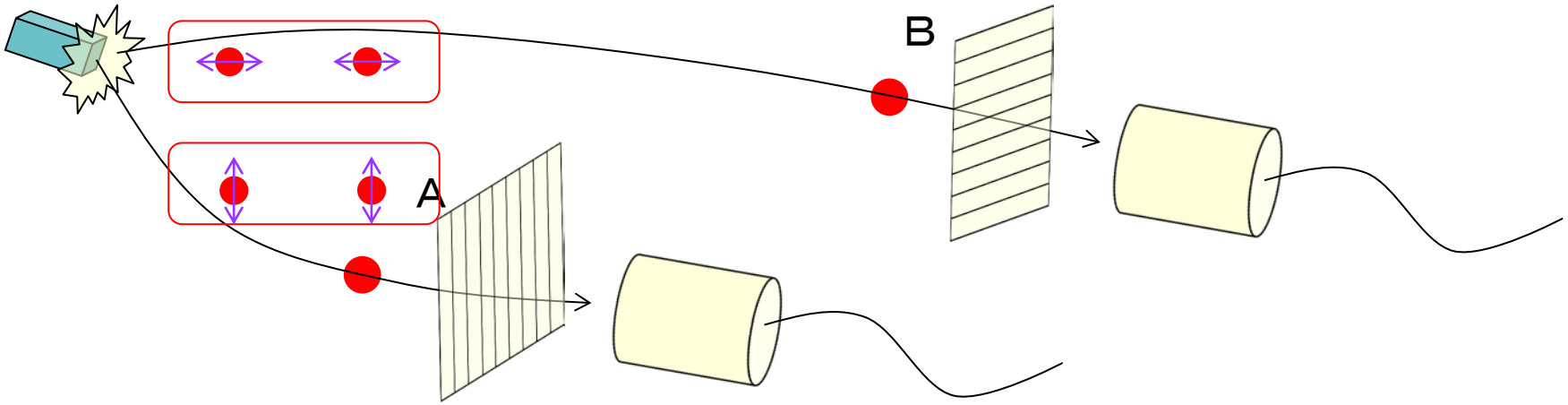
ちなみに、こんな組み合わせの光子が斜め４５度のフィルターに届いてしまうと、

光子Aが通るか通らないかは50%:50%で、
光子Bが通ったかどうかとは無関係なので、

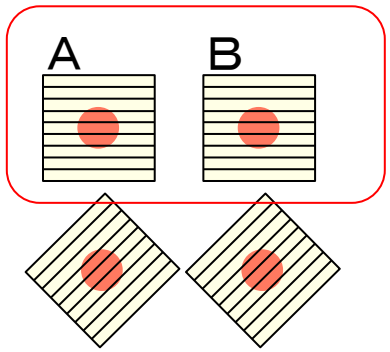


という割合になってしまいます。

同じ角度にフィルターを置く



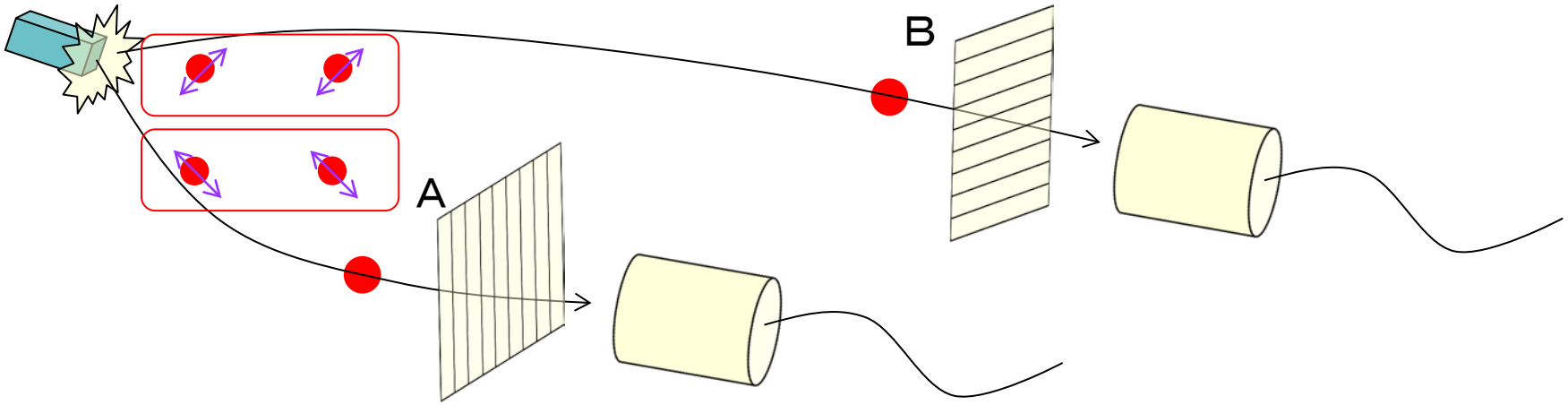
いろいろな角度に偏光板を置いたときに、各光子が偏光フィルターを通り抜けるかどうかを調べる。



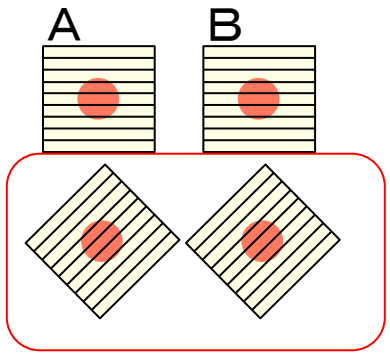
A	B	A	B	A	B	A	B
●	●	●	○	○	●	○	○
50%		0%		0%		50%	
50%		0%		0%		50%	

２枚のフィルターの角度が同じなら、どの向きに置いても、２光子は同じ振る舞いをする。

同じ角度にフィルターを置く



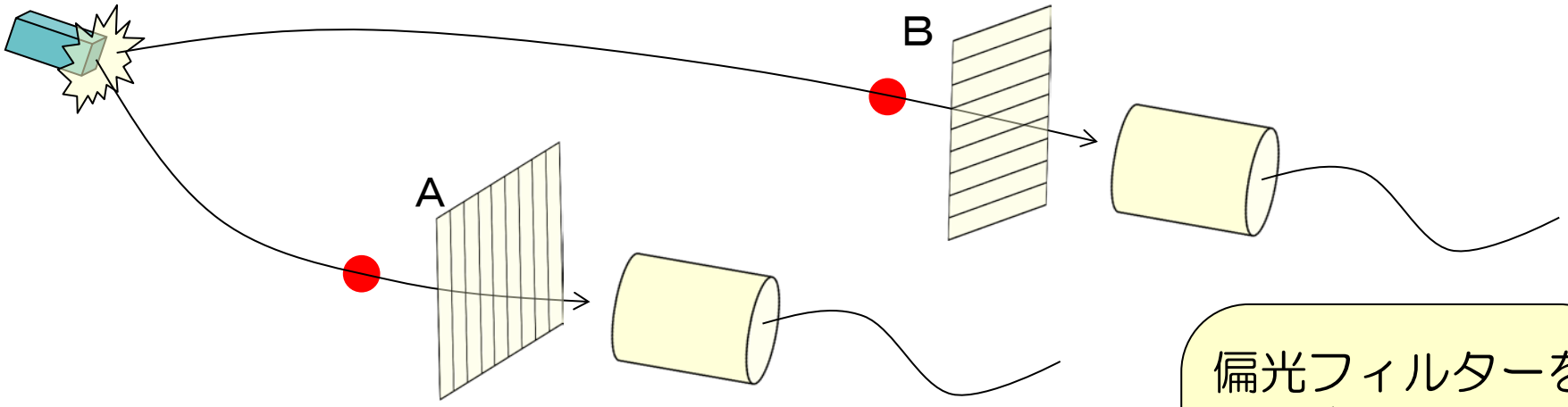
いろいろな角度に偏光板を置いたときに、各光子が偏光フィルターを通り抜けるかどうかを調べる。



A	B	A	B	A	B	A	B
●	●	●	○	○	●	○	○
50%		0%		0%		50%	
50%		0%		0%		50%	

２枚のフィルターの角度が同じなら、どの向きに置いても、２光子は同じ振る舞いをする。

同じ角度にフィルターを置く



いろいろな角度に偏光板を置いたときに、各光子が偏光フィルターを通り抜けるかどうかを調べる。

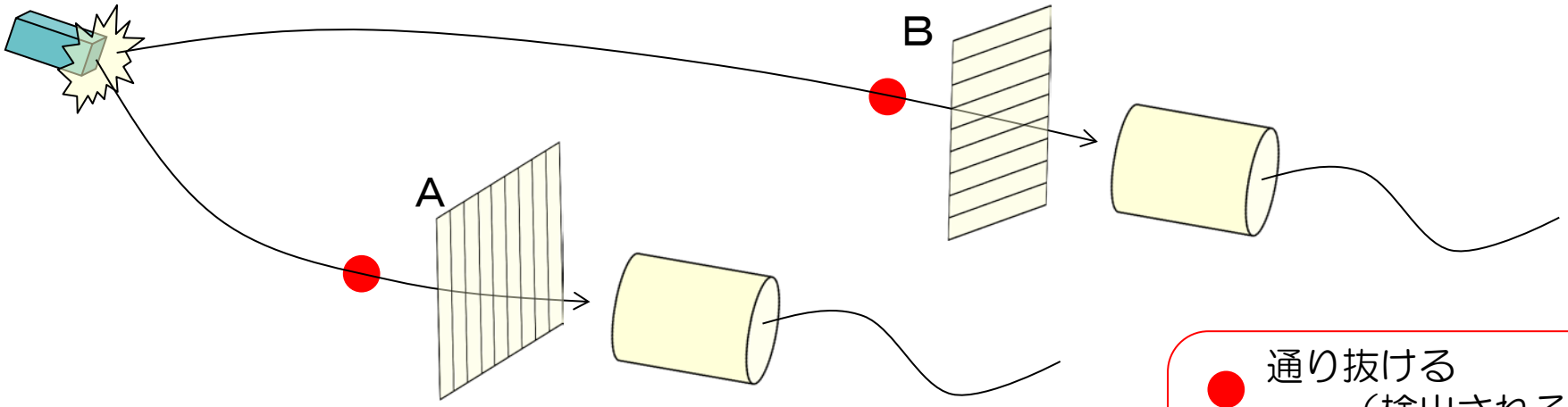
固定観念を捨てなさい。あらかじめ、「どの向きの偏光フィルターがあっても通り抜けよう」、とか打ち合わせをしていると考えれば説明できる。
この世に不思議なものなどない。

偏光フィルターを置く向きをかえると、双子の光子の偏光方向も揃って変わるみたいに見えるわね。

２枚のフィルターの角度が同じなら、どの向きに置いても、２光子は同じ振る舞いをする。

* 人物イラスト出典:「イラストAC」
http://www.ac-illust.com/

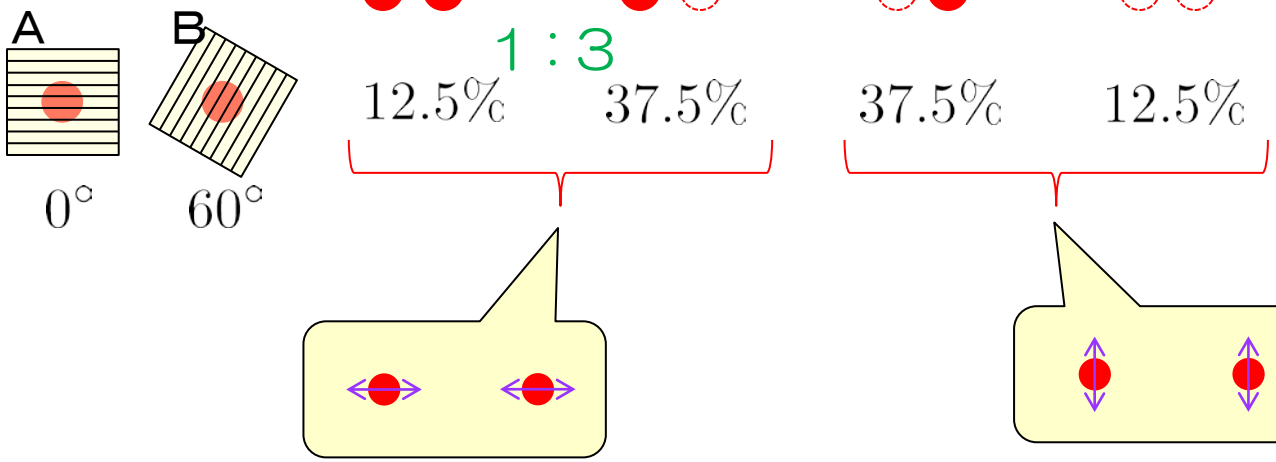
異なる角度にフィルターを置く



通り抜ける
（検出される）

通り抜けない
（検出されない）

いろいろな角度に偏光板を置いたときに、各光子が偏光フィルターを通り抜けるかどうかを調べる。

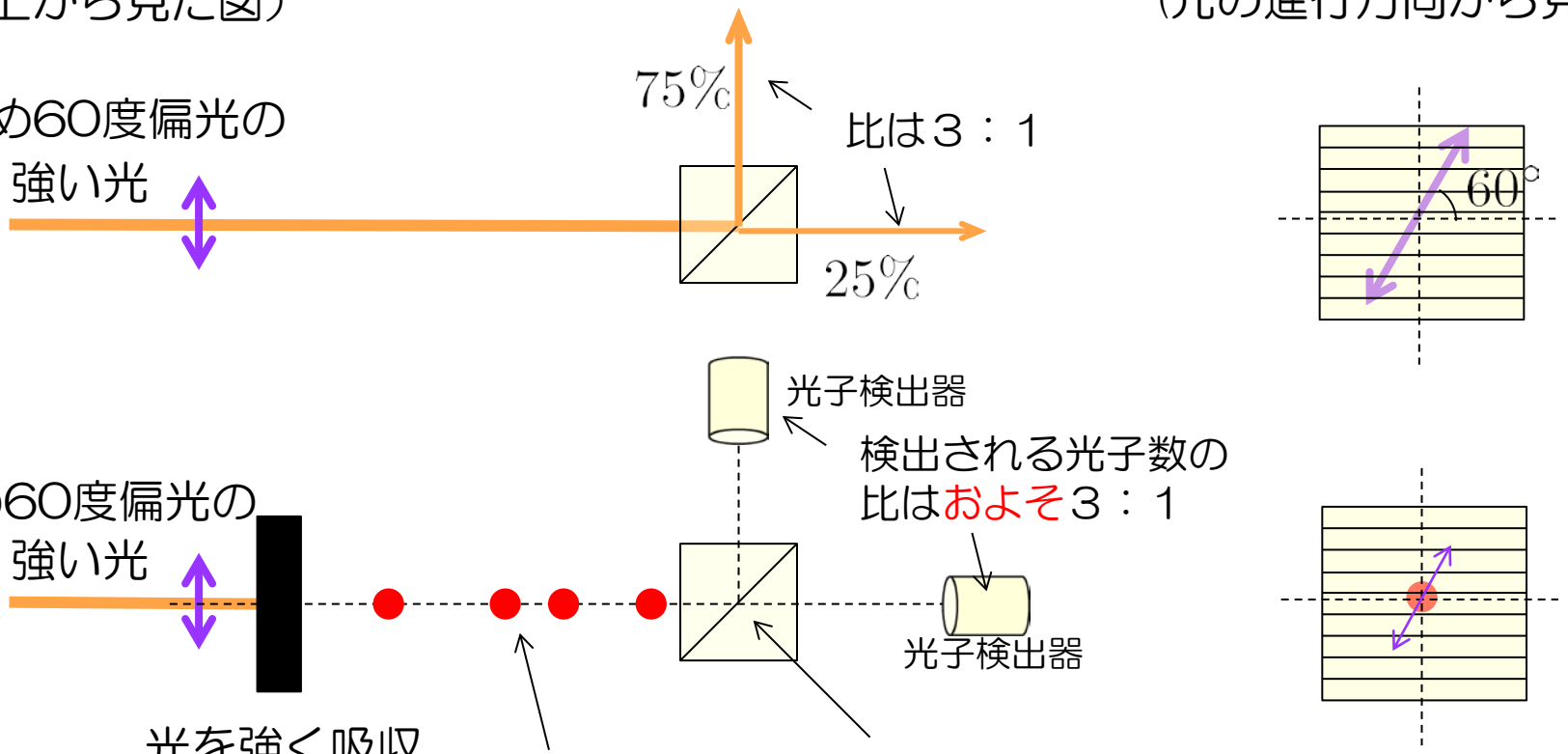


この組み合わせで説明できる。

光子と偏光

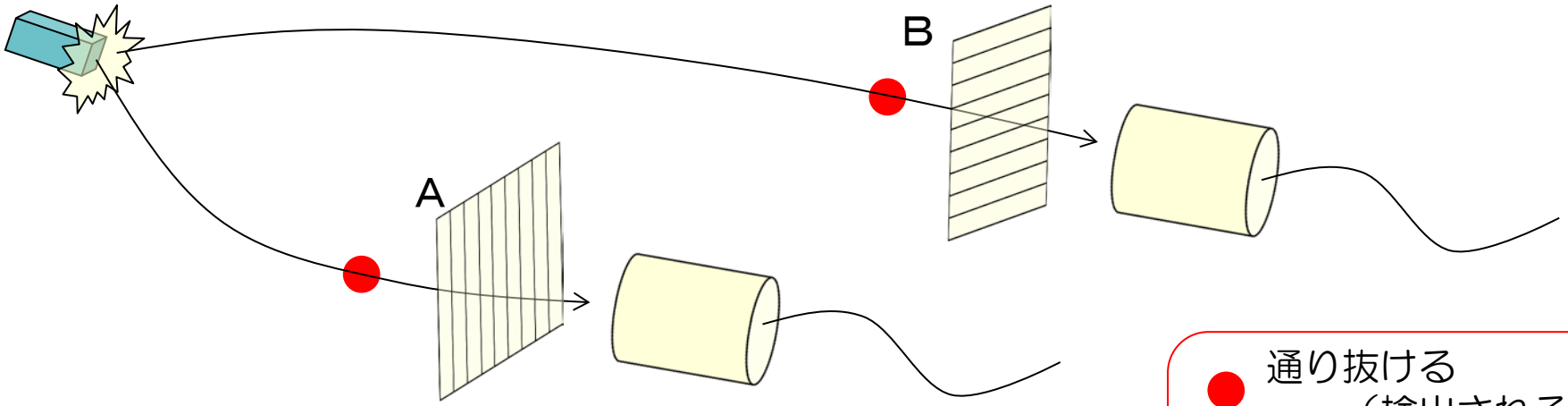
（上から見た図）

（光の進行方向から見た図）



（実験結果はこの考え方と整合する。）

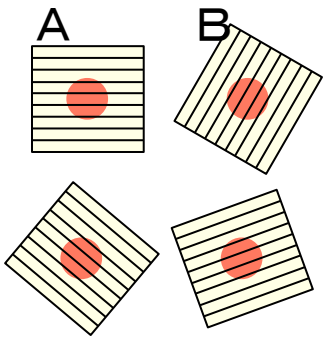
異なる角度にフィルターを置く



● 通り抜ける（検出される）

○ 通り抜けない（検出されない）

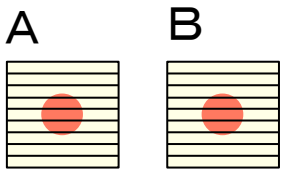
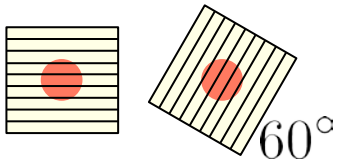
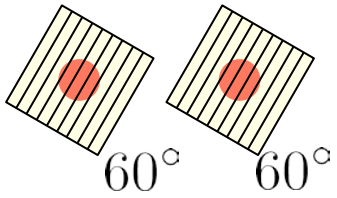
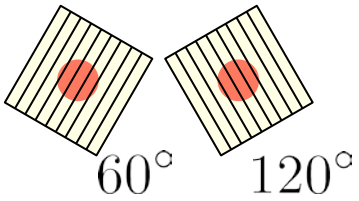
いろいろな角度に偏光板を置いたときに、各光子が偏光フィルターを通り抜けるかどうかを調べる。



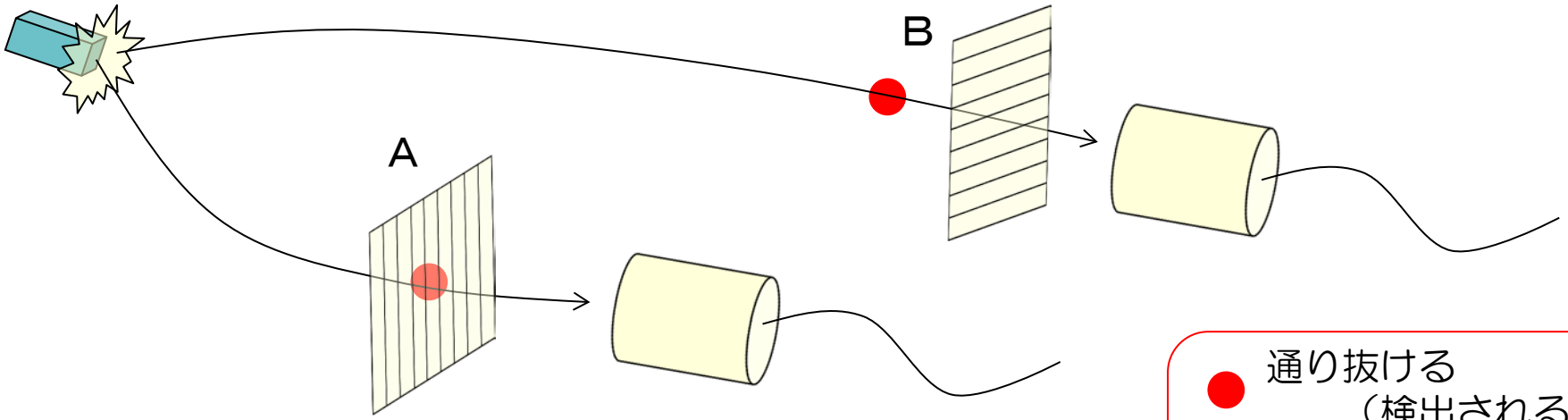
A	B	A	B	A	B	A	B
●	●	●	○	○	●	○	○
12.5%		37.5%		37.5%		12.5%	
12.5%		37.5%		37.5%		12.5%	

２枚のフィルターの角度のずれが６０度なら、どの向きに置いても、割合は一緒。

何が起きている？

	A B	A B	A B	A B
	50%	0%	0%	50%
	12.5%	37.5%	37.5%	12.5%
	50%	0%	0%	50%
	12.5%	37.5%	37.5%	12.5%

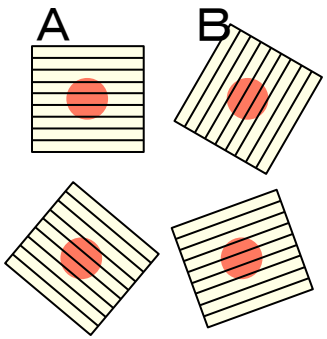
異なる角度にフィルターを置く



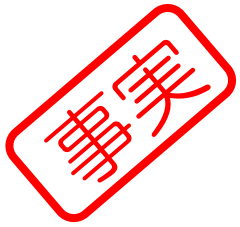
● 通り抜ける（検出される）

○ 通り抜けない（検出されない）

いろいろな角度に偏光板を置いたときに、各光子が偏光フィルターを通り抜けるかどうかを調べる。

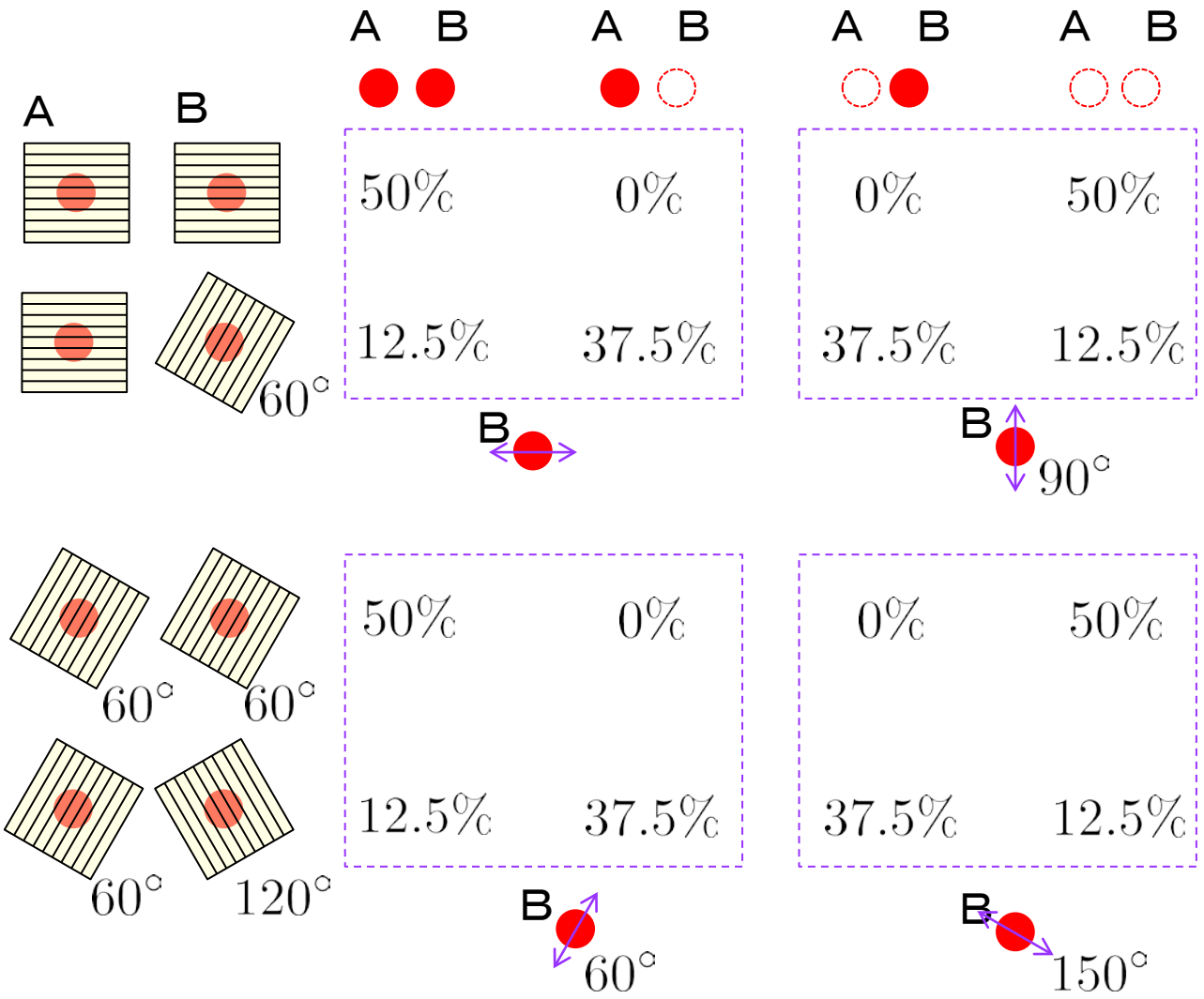


A	B	A	B	A	B	A	B
●	●	●	○	○	●	○	○
12.5%		37.5%		37.5%		12.5%	
12.5%		37.5%		37.5%		12.5%	



２枚のフィルターの角度のずれが６０度なら、どの向きに置いても、割合は一緒。

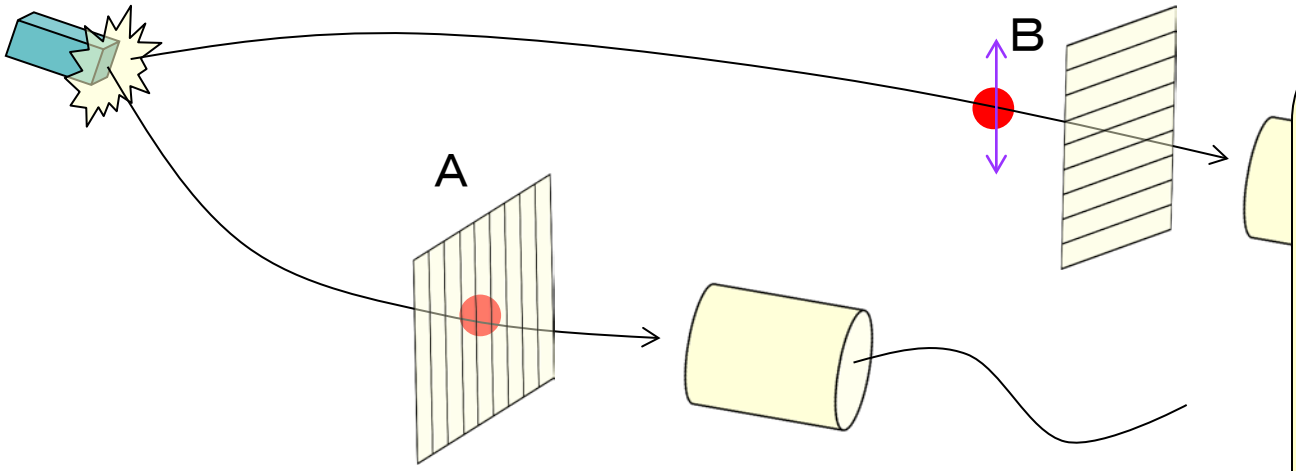
何が起きている？



Aの光子が偏光フィルターAを通り抜けた瞬間、Bの光子の偏光がフィルターAと同じ向きになる、
と考えると辻褄は合うわね。
でも、光子Bはどうやって遠くのフィルターAの向きを感じるのかしら？不思議ね。

人物イラスト出典：「イラストAC」
http://www.ac-illust.com/

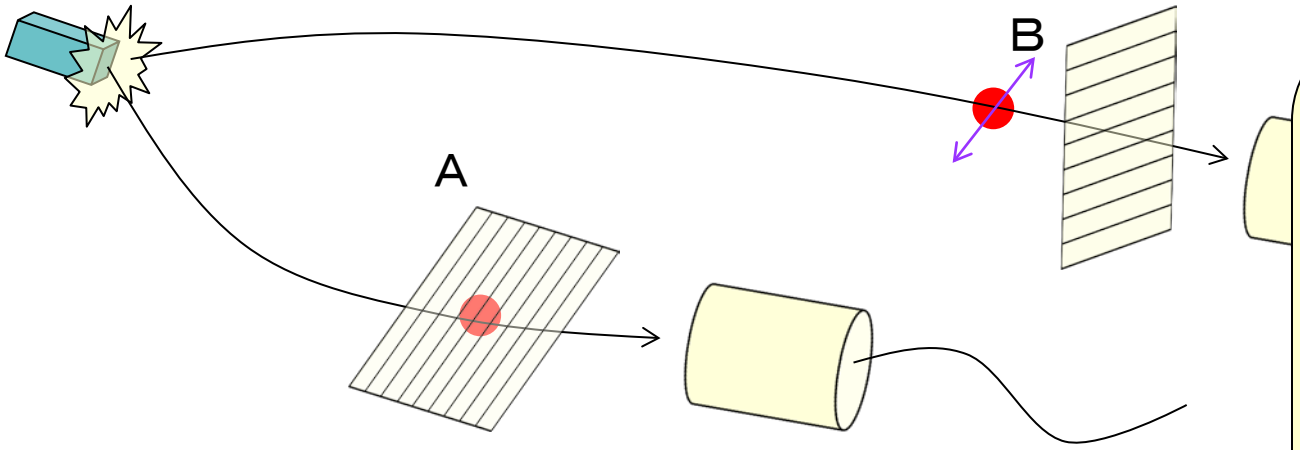
異なる角度にフィルターを置く



Aの光子が偏光フィルターAを通り抜けた瞬間、Bの光子の偏光がフィルターAと同じ向きになる、
と考えると辻褄は合うわね。
でも、光子Bはどうやって遠くのフィルターAの向きを感じるのかしら？不思議ね。

人物イラスト出典：「イラストAC」
http://www.ac-illust.com/

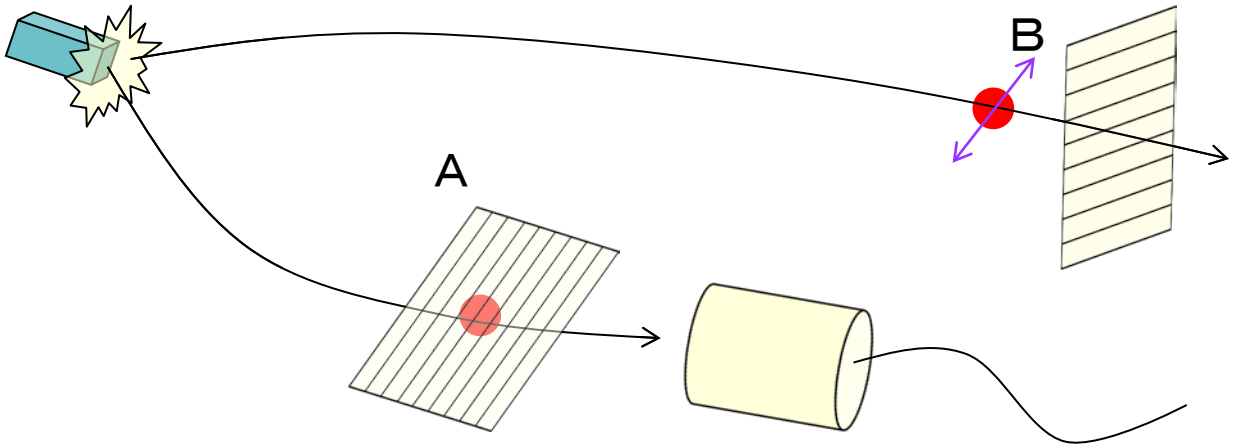
異なる角度にフィルターを置く



Aの光子が偏光フィルターAを通り抜けた瞬間、Bの光子の偏光がフィルターAと同じ向きになる、
と考えると辻褄は合うわね。
でも、光子Bはどうやって遠くのフィルターAの向きを感じるのかしら？不思議ね。

人物イラスト出典：「イラストAC」
http://www.ac-illust.com/

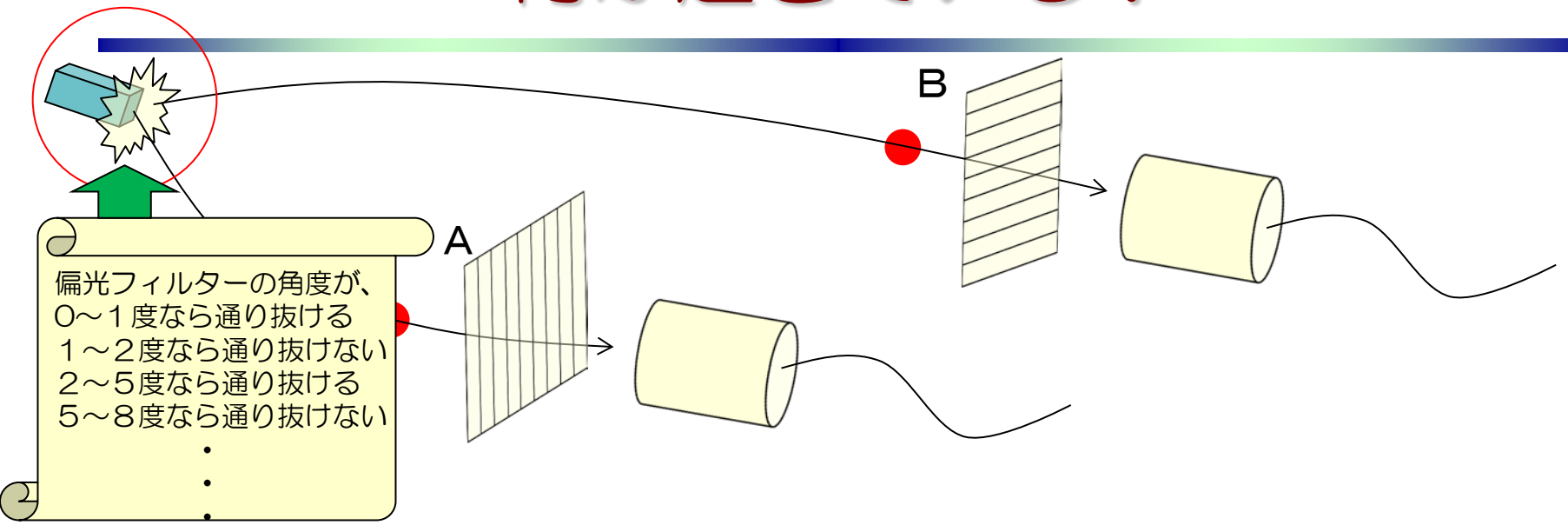
異なる角度にフィルターを置く



Aの光子が偏光フィルターAを通り抜けた瞬間、Bの光子の偏光がフィルターAと同じ向きになる、
と考えると辻褄は合うわね。
でも、光子Bはどうやって遠くのフィルターAの向きを感じるのかしら？不思議ね。

人物イラスト出典：「イラストAC」
http://www.ac-illust.com/

何が起きている？



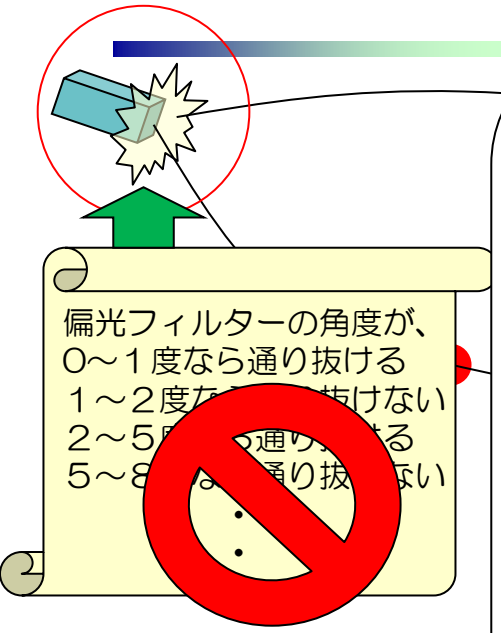
そんなテレパシーのような話があるわけがない。
あらかじめ、綿密に取り決めておく仕組みがあるはず。
具体的には…いや、今は思いつかんが、とにかく
この世に不思議なものなどないのだ！！

たぶんないと思う。
ないんじゃないかな。
まちょっと覚悟は…

*

人物イラスト出典：「イラストAC」
http://www.ac-illust.com/

何が起きている？



そんな仕組みは
存在しない！！

By Queen's University Belfast
（Wikipediaより転載）
http://en.wikipedia.org/wiki/File:John_Stewart_Bell_(physicist).jpg
CC BY-SA 3.0

ベル（１９６４）

そんなテレパシー
あらかじめ、綿密に取り決めておく仕組みがあるはず。
具体的には…いや、今は思いつかんが、とにかく
この世に不思議なものなどないのだ！！

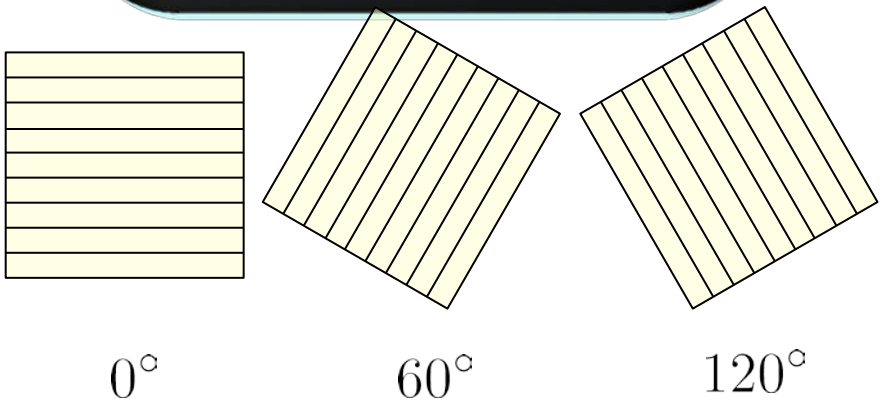
たぶんないと思う。
ないんじゃないかな。
まちょっと覚悟は…

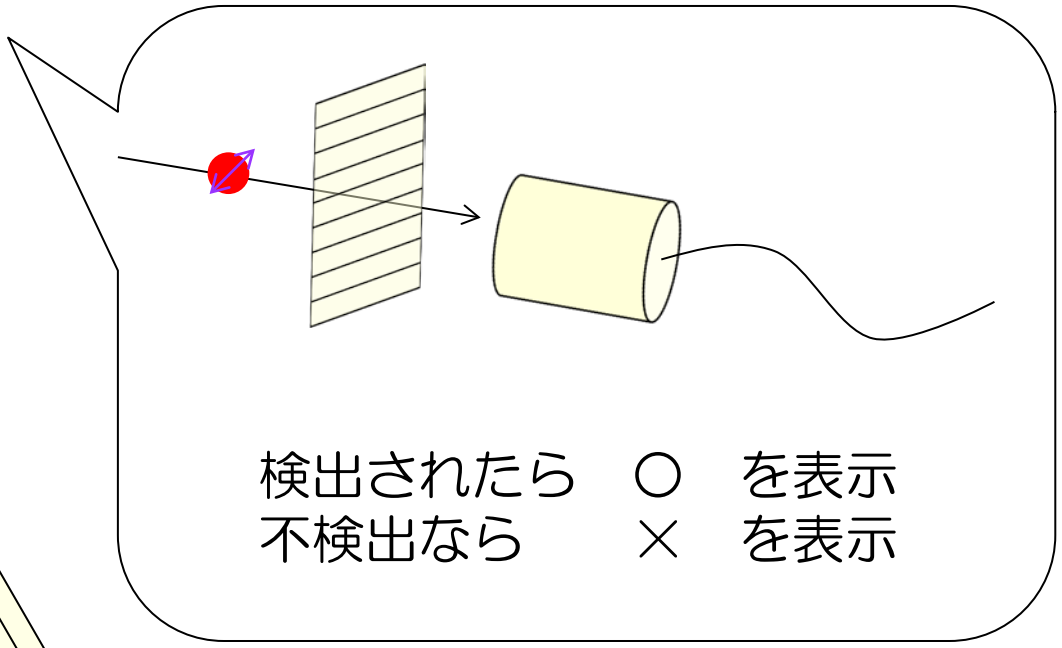
*

人物イラスト出典：「イラストAC」
http://www.ac-illust.com/

エンタングル状態を用いたからくり

ベル　(1964)

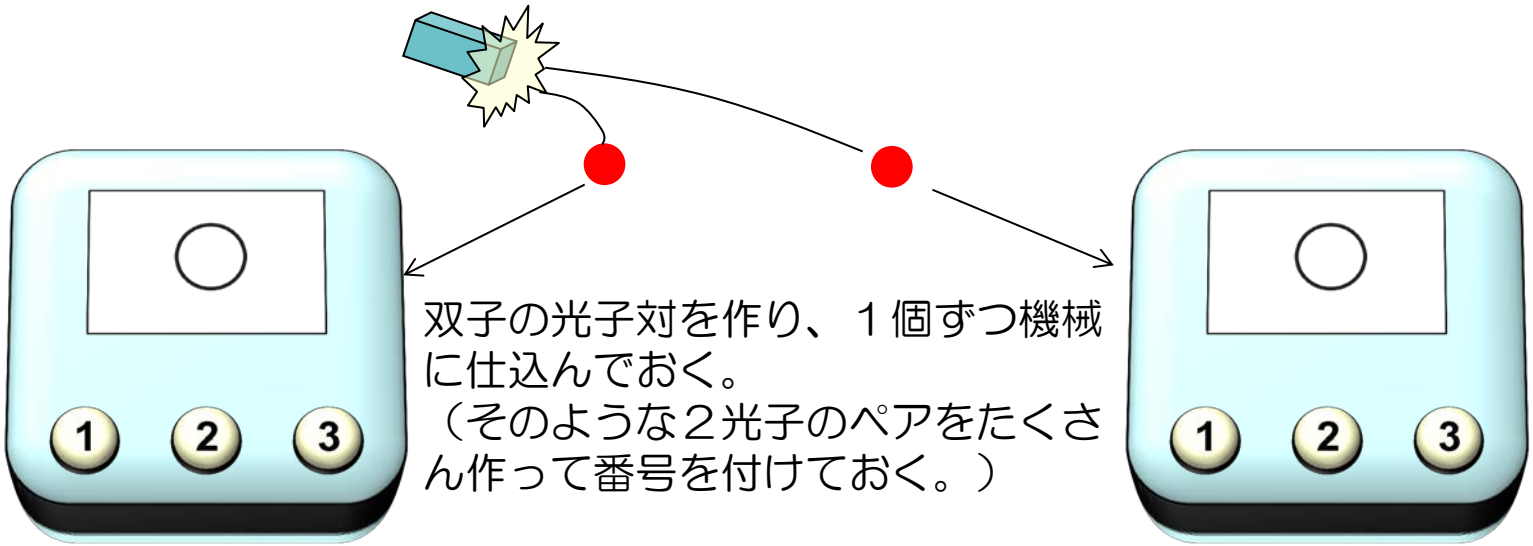




検出されたら　○　を表示
不検出なら　　×　を表示

押されたボタンに応じて、偏光フィルターの角度が変わる。

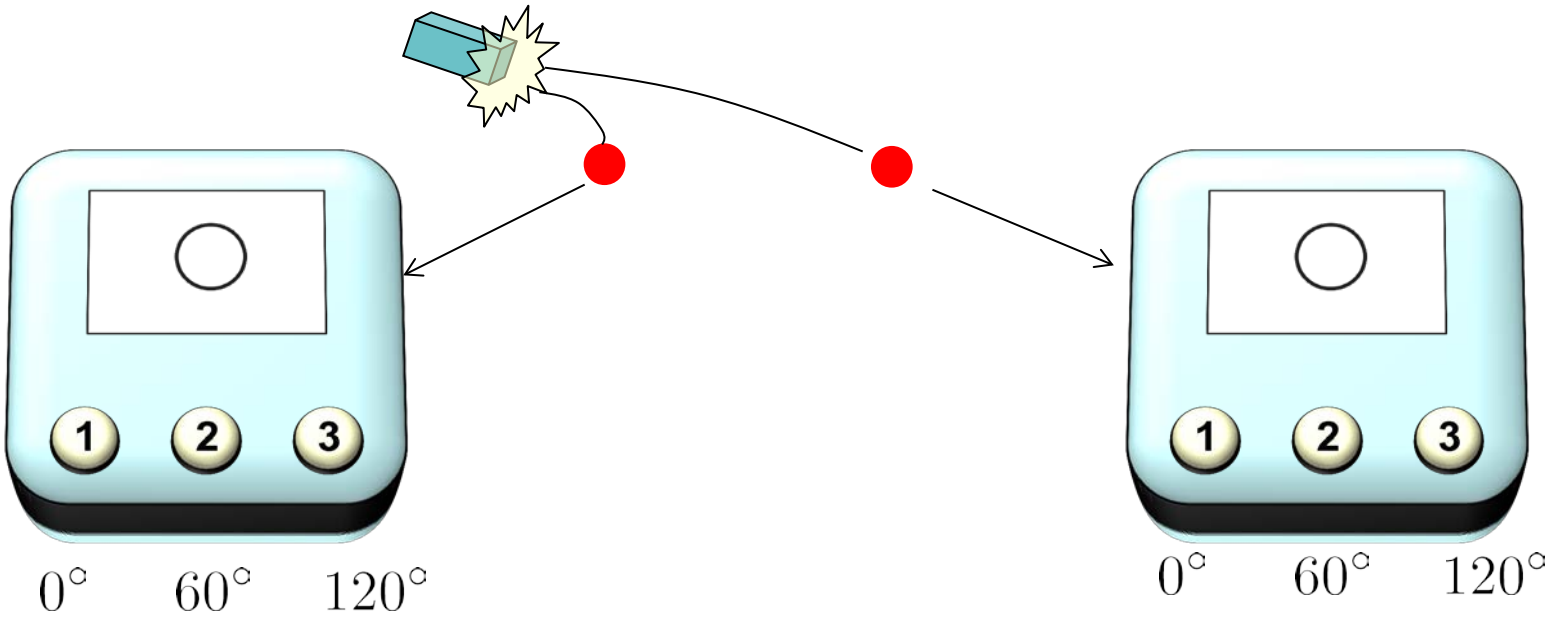
エンタングル状態を用いたからくり



双子の光子対を作り、１個ずつ機械に仕込んでおく。
（そのような２光子のペアをたくさん作って番号を付けておく。）

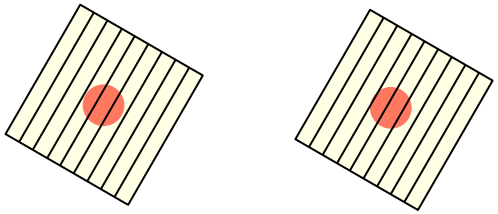
「３回目にボタンが押された場合、３番目のペアの光子を測定して○×を表示」
などと設定しておく。

エンタングル状態を用いたからくり



同じ番号が押されたら・・・

偏光フィルターは同じ角度になる。

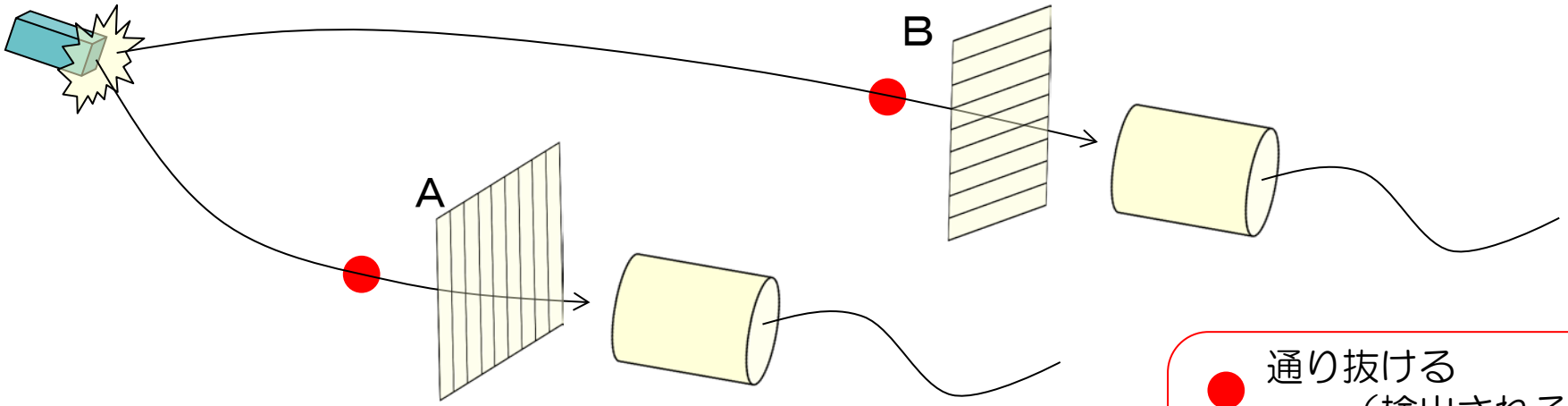


「どちらも検出」か、「どちらも不検出」のいづれかになる。

○○　50%　　××　50%

二つの機械が表示するマークは必ず一致。

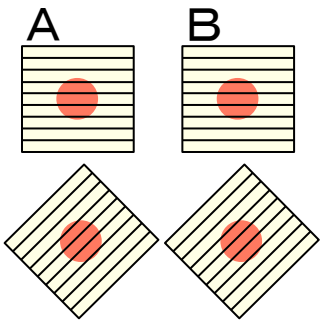
同じ角度にフィルターを置く



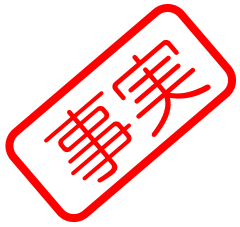
通り抜ける
（検出される）

通り抜けない
（検出されない）

いろいろな角度に偏光板を置いたときに、各光子が偏光フィルターを通り抜けるかどうかを調べる。

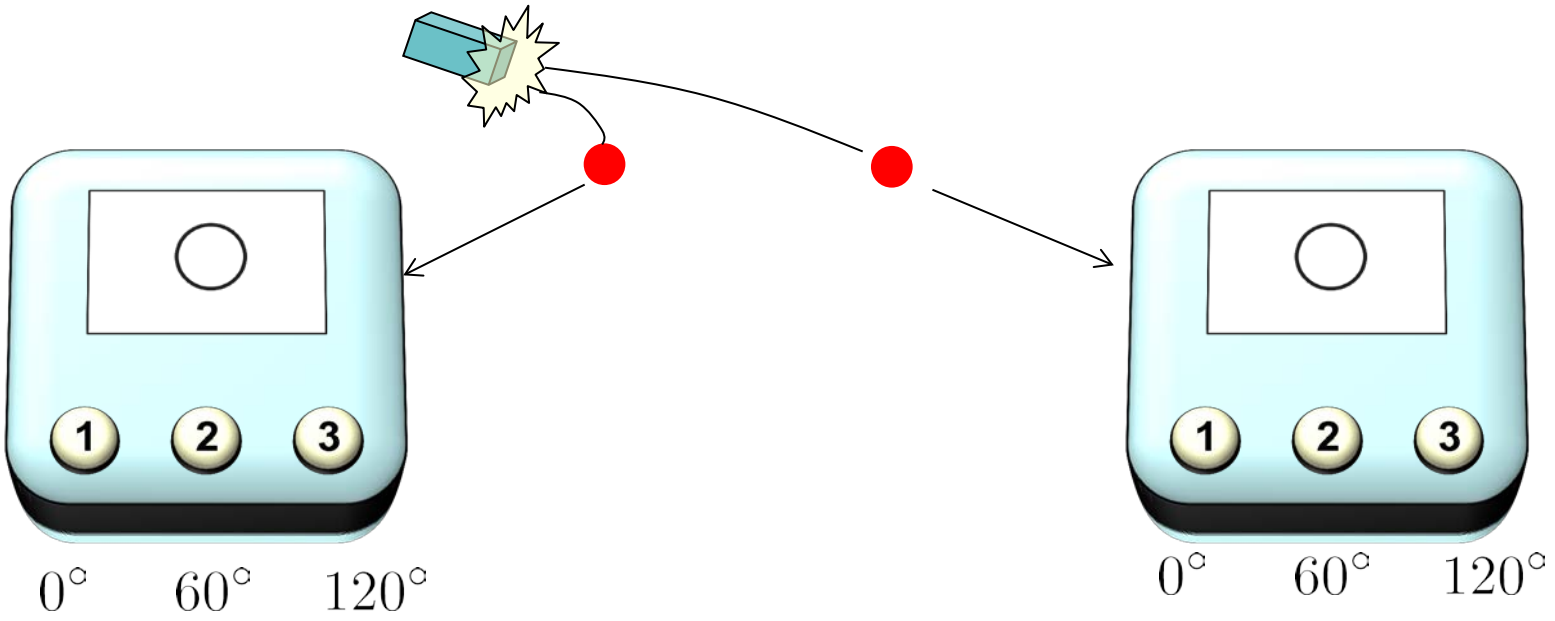


A	B	A	B	A	B	A	B
●	●	●	○	○	●	○	○
50%		0%		0%		50%	
50%		0%		0%		50%	



２枚のフィルターの角度が同じなら、どの向きに置いても、２光子は同じ振る舞いをする。

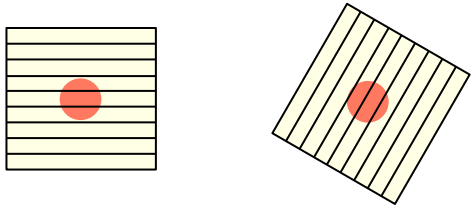
エンタングル状態を用いたからくり



違う番号が押されたら・・・

偏光フィルターの角度の差は、

$\pm 60^\circ, \pm 120^\circ$



● ● 12.5%

● ○

○ ●

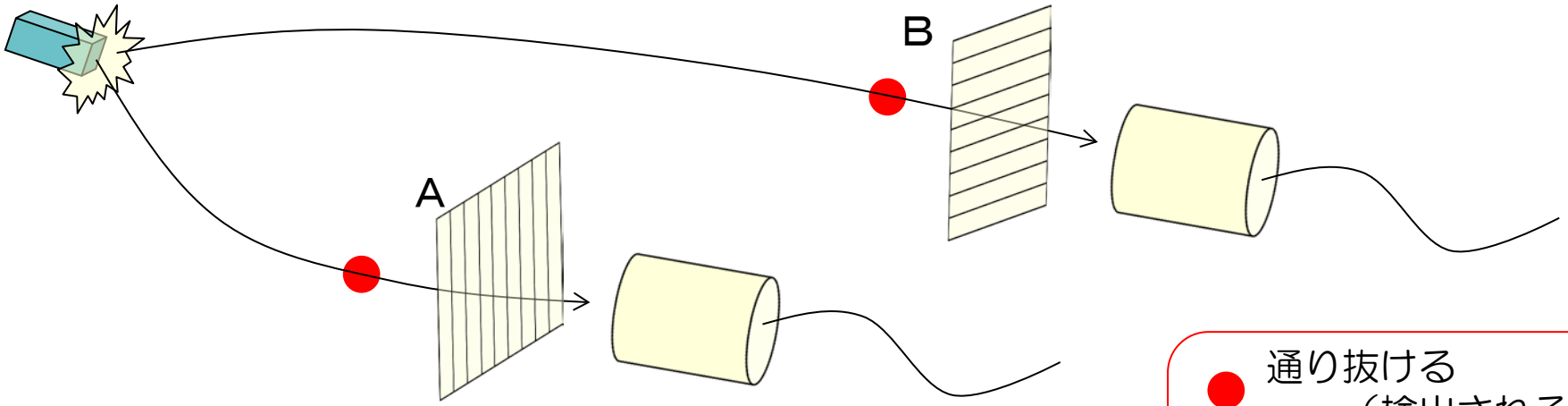
○ ○ 12.5%

「どちらも検出」か、 「どちらも不検出」の確率は合計で 25%

○○ 12.5% ×× 12.5%

「当たり」になる確率 $\frac{1}{4}$ で、 $\frac{1}{3}$ より小さい！

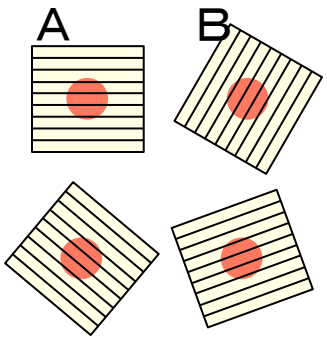
異なる角度にフィルターを置く



● 通り抜ける（検出される）

○ 通り抜けない（検出されない）

いろいろな角度に偏光板を置いたときに、各光子が偏光フィルターを通り抜けるかどうかを調べる。



A	B	A	B	A	B	A	B
●	●	●	○	○	●	○	○
12.5%		37.5%		37.5%		12.5%	
12.5%		37.5%		37.5%		12.5%	

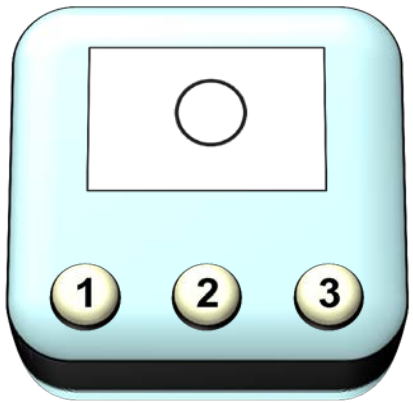
２枚のフィルターの角度のずれが６０度なら、どの向きに置いても、割合は一緒。

「常識」的な考え方

「同じ番号のボタンが同時に押されたら、必ず同じマークが出る」というルールを守るためには、どちらの箱も同じパターンでマークが出るようにあらかじめプログラムしておくしかない。

	①	②	③
1回目	○	○	×
2回目	×	×	○
3回目	○	×	×
4回目	○	○	○
5回目	○	×	○
・			

	①	②	③
1回目	○	○	×
2回目	×	×	○
3回目	○	×	×
4回目	○	○	○
5回目	○	×	○
・			

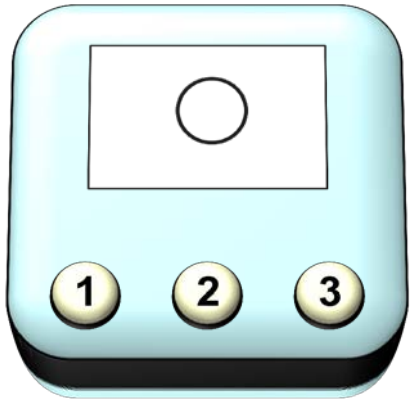


スクラッチカードと同じことになるので、

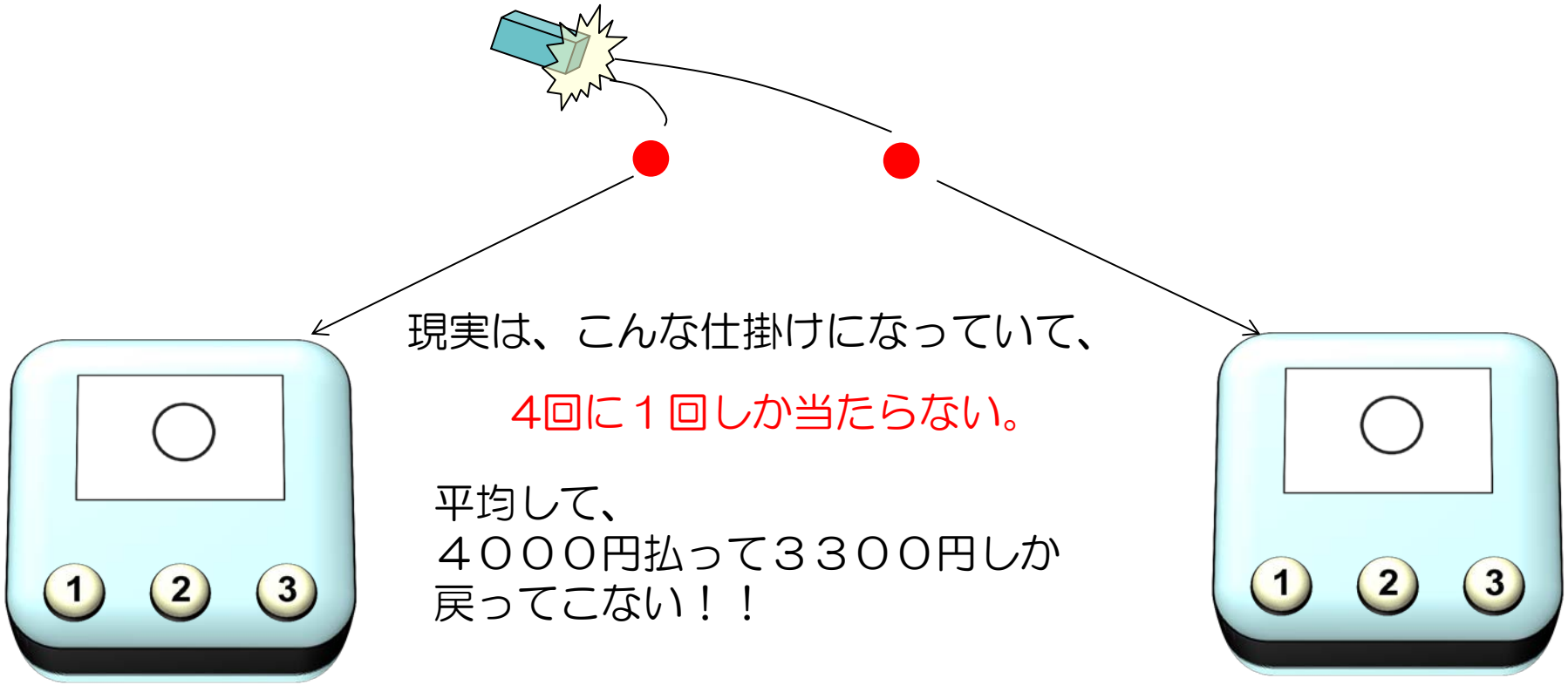
最低でも、３回に１回は当たりになるはず。

平均して、
３０００円払うと３３００円戻ってくるので、どんどんゲームをやるべき。

と思っていたら....



量子力学の「非常識な」世界

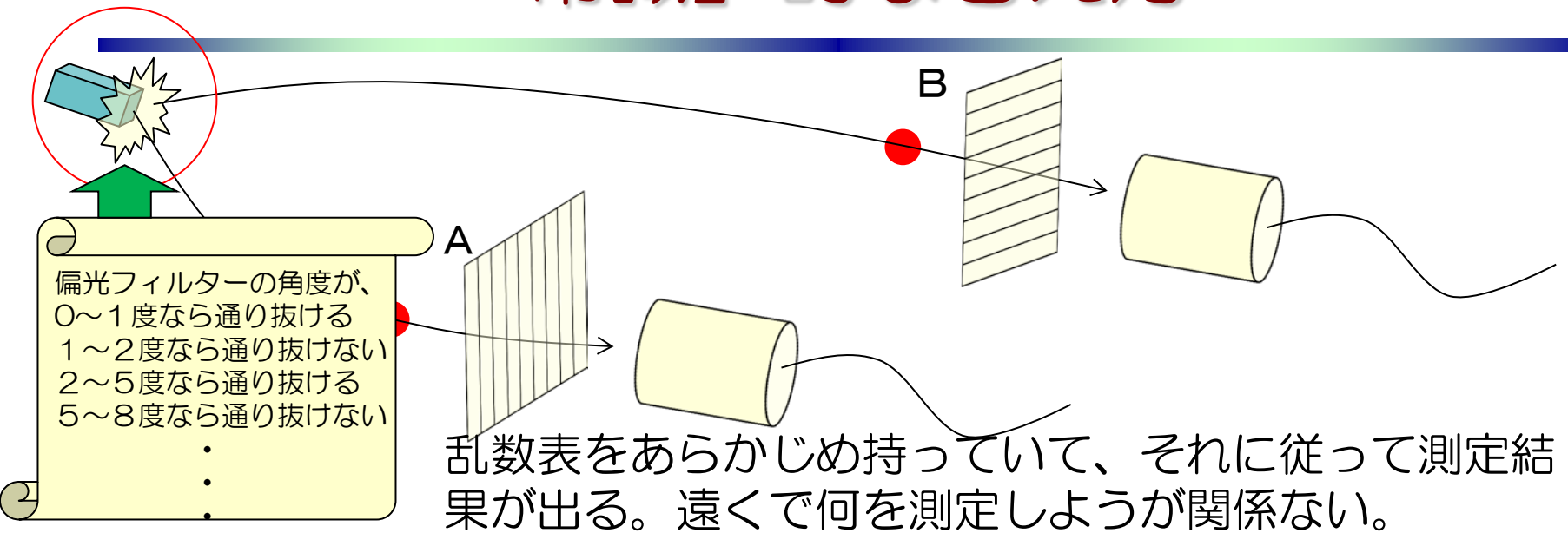


現実は、こんな仕掛けになっていて、

4回に１回しか当たらない。

平均して、
４０００円払って３３００円しか
戻ってこない！！

「常識」的な考え方



乱数表をあらかじめ持っていて、それに従って測定結果が出る。遠くで何を測定しようが関係ない。
（局所実在論、局所隠れた変数理論）
自然は、この考え方では説明できない。

そんなテレパシーのような話があるわけがない。
あらかじめ、綿密に取り決めておく仕組みがあるはず。
具体的には…いや、今は思いつかんが、とにかく
この世に不思議なものなどないのだ！！

*

人物イラスト出典：「イラストAC」
http://www.ac-illust.com/

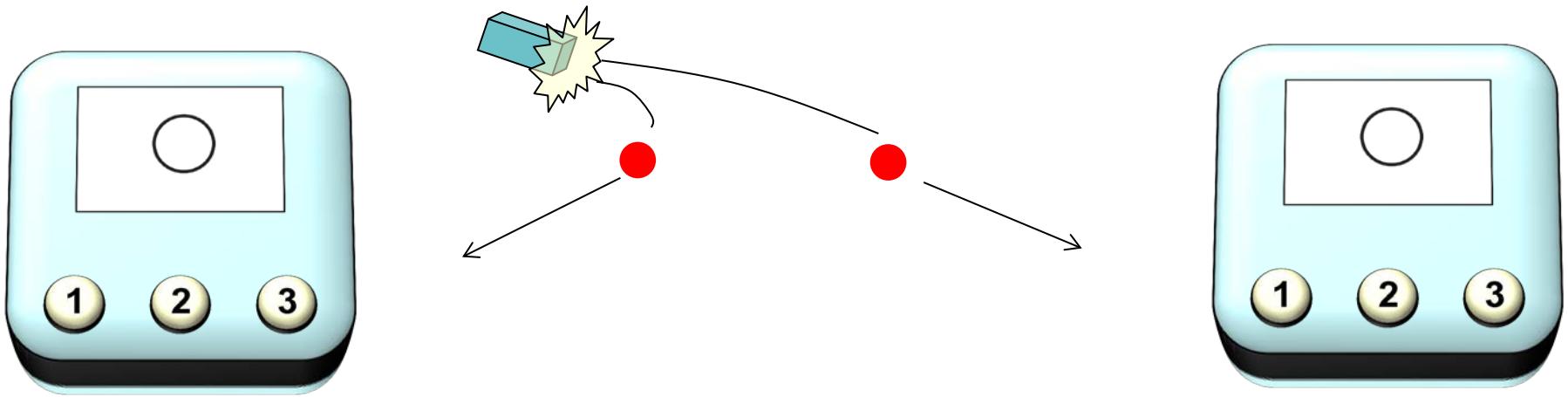
ベルの不等式

（当たりのでる確率）$\geq \frac{1}{3}$　（ただし、同じボタンを押したらマークは100%一致）

のように、局所実在論の考え方から導かれる不等式をベルの不等式という。

量子力学は、この不等式が破られることを予言する。

実験でベルの不等式が破れていることを検証する場合、実験には誤差がつきものなので、上記の「ただし」書きの部分を正確に満足するのが難しい。そこで、



⟹ 4回に1回しか当たらない。

ベルの不等式

実験でベルの不等式が破れていることを検証する場合、実験には誤差がつきものなので、上記の「ただし書き」の部分を正確に満足するのが難しい。そこで、下記の状況を考えると、「ただし書き」は不要で、局所実在論の考え方から

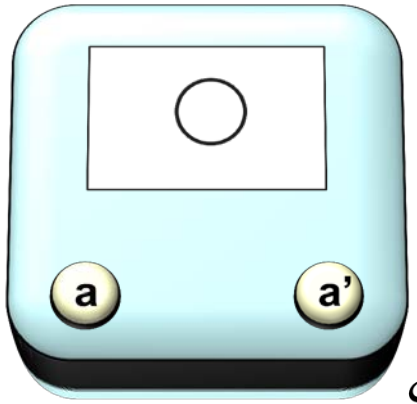
$$|S| \leq 2$$

が示せる。発案者４人のイニシャルから、CHSH不等式と呼ぶこともある。

量子力学は、この不等式を破り、

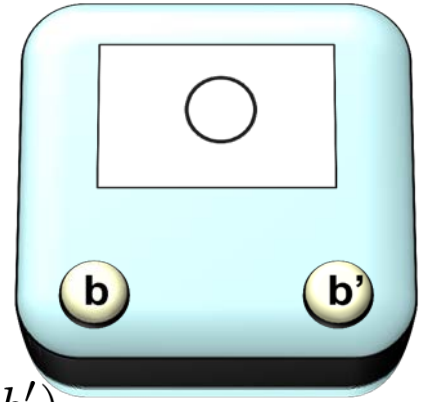
$$S = 2\sqrt{2} = 2.828...$$

とできることを予言する。これなら多少誤差があっても破れが検証できる。
実際、この破れを観測する多数の実験が行われている。



同じマークなら１点、
違うマークなら（－１）点とする。

aとbのボタンが押された場合の平均点（期待値）を $E(a,b)$ と書く。



$$S \equiv E(a,b) - E(a,b') + E(a',b) + E(a',b')$$

CHSH不等式の導出

なるべく S の値を大きくしたいと考えよう。

- bのボタンが押された時のマークと、b’のボタンが押された時のマークが異なるように設定すると

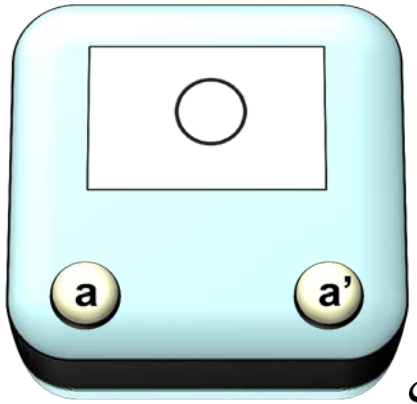
$$E(a',b)+E(a',b')=0$$ となってしまう。

この場合はどうしても $S \leq 2$

- bのボタンが押された時のマークと、b’のボタンが押された時のマークが同じであるように設定すると

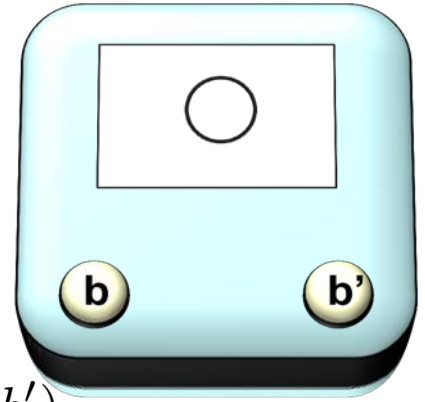
$$E(a,b)-E(a,b')=0$$ となってしまう。

この場合もどうしても $S \leq 2$



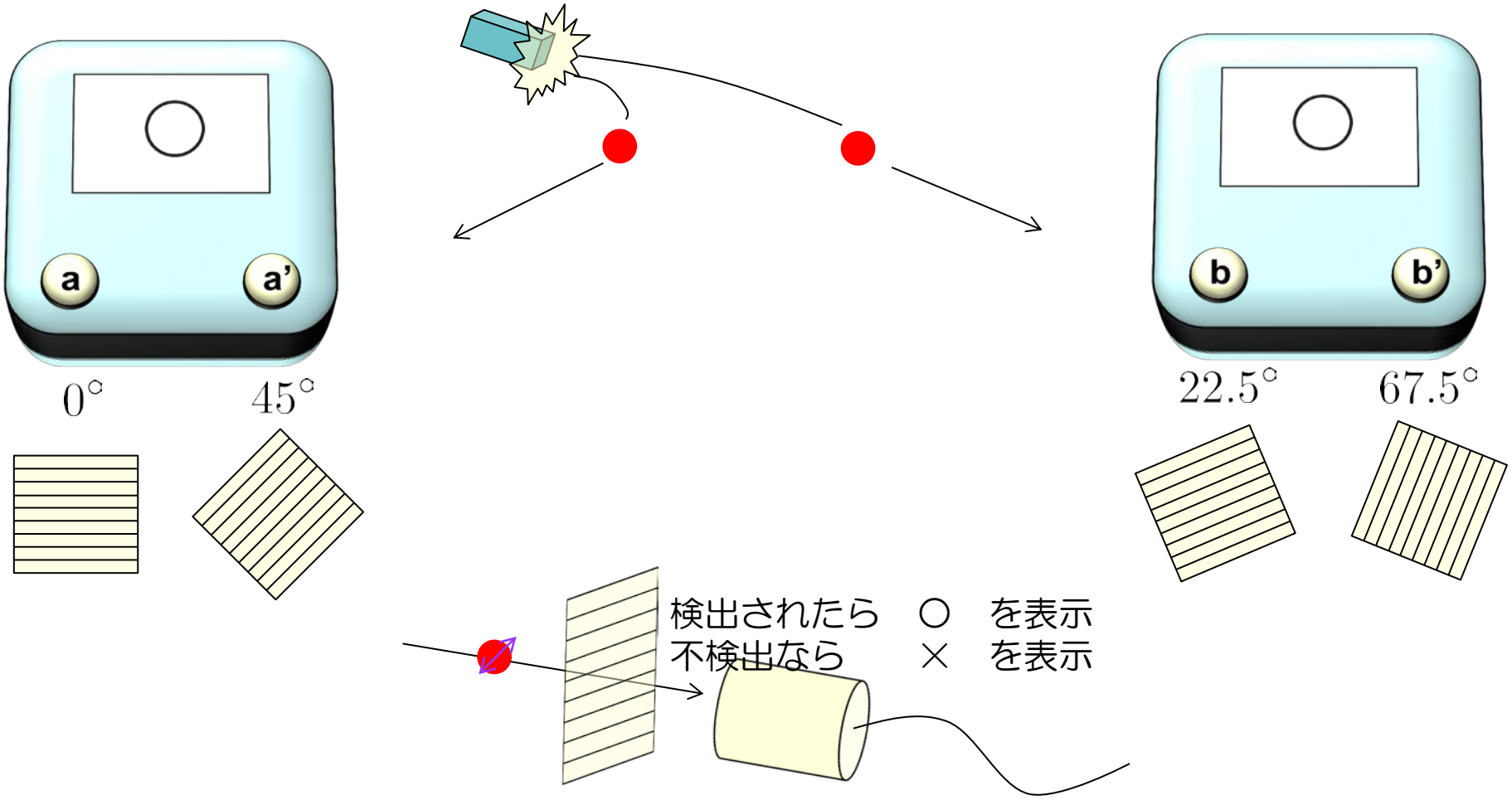
同じマークなら１点、
違うマークなら（－１）点とする。

aとbのボタンが押された場合の平均点（期待値）を $E(a,b)$ と書く。



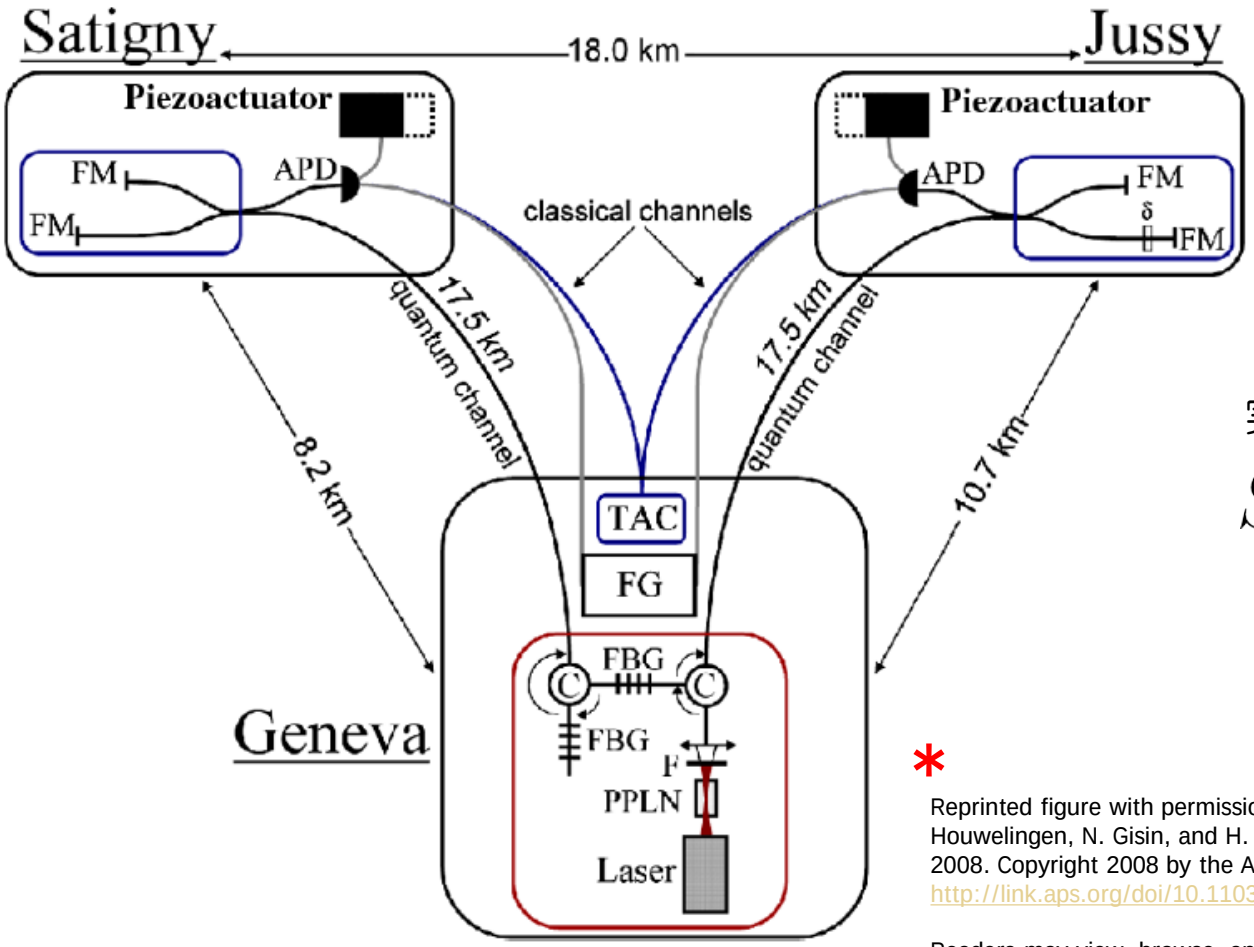
$$S \equiv E(a,b)-E(a,b')+E(a',b)+E(a',b')$$

CHSH不等式の破れ



計算すると $S = 2\sqrt{2}$ となる。

CHSH不等式の破れの実験例



18km: 光速で　60 μ秒

測定は　７μ秒で完了

実験結果

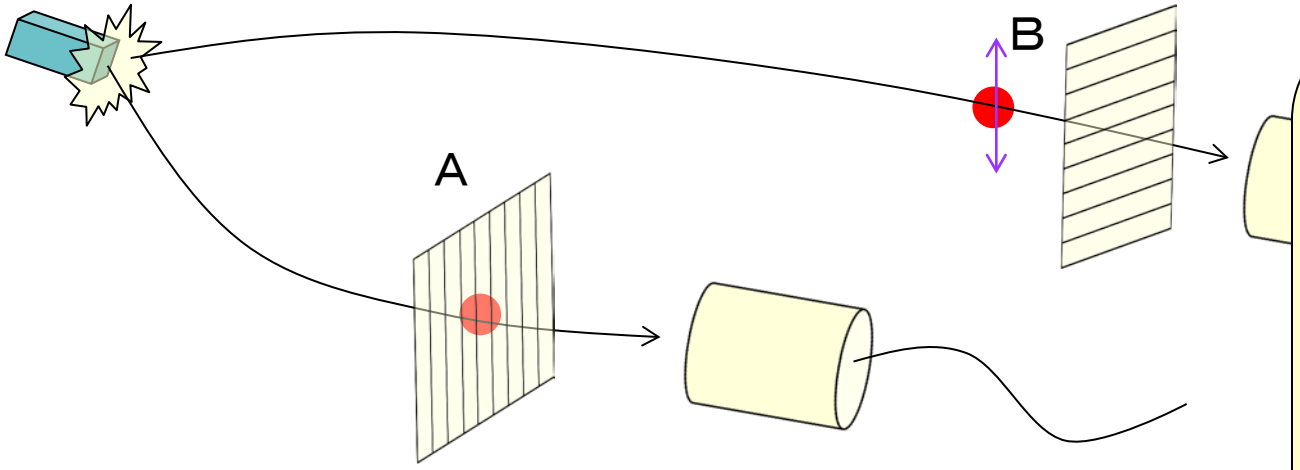
$$S = 2.56 \pm 0.04$$

*

Reprinted figure with permission from D. Salart, A. Baas, J. A. W. van Houwelingen, N. Gisin, and H. Zbinden, Physical Review Letters, 100, 220404, 2008. Copyright 2008 by the American Physical Society.
http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.100.220404

Readers may view, browse, and/or download material for temporary copying purposes only, provided these uses are for noncommercial personal purposes. Except as provided by law, this material may not be further reproduced, distributed, transmitted, modified, adapted, performed, displayed, published, or sold in whole or part, without prior written permission from the American Physical Society.

量子力学の標準的な考え方



テレパシーのようで気持ちは悪いかもしれないが、

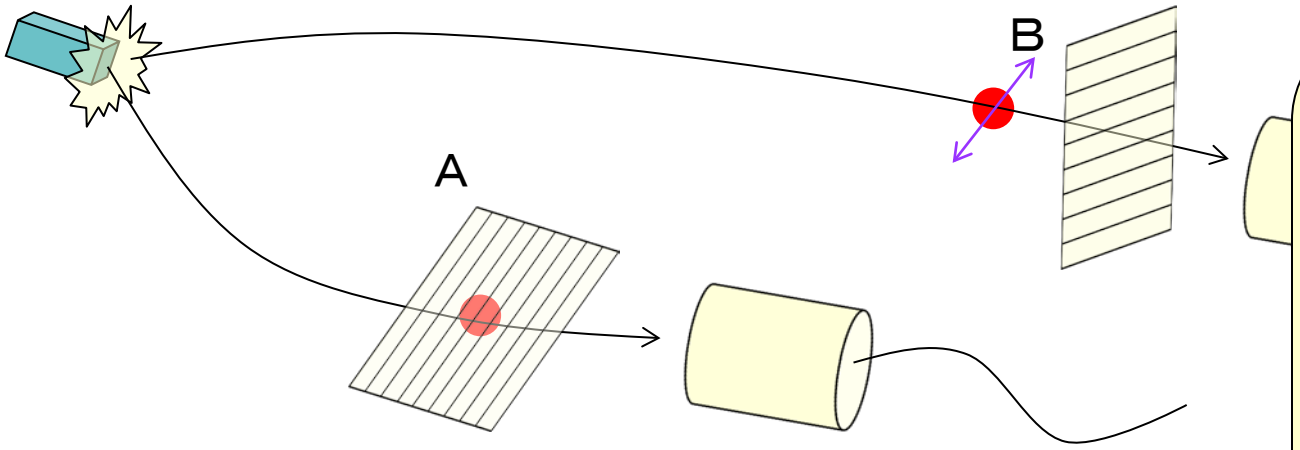
- この考えで計算するとちゃんと実験と合う。
- 気持ち悪くならない説明は存在しない

ということで、量子力学では通常このように考えている。

Aの光子が偏光フィルターAを通り抜けた瞬間、Bの光子の偏光がフィルターAと同じ向きになる、
と考えると辻褄は合うわね。
でも、光子Bはどうやって遠くのフィルターAの向きを感じるのかしら？不思議ね。

人物イラスト出典:「イラストAC」
http://www.ac-illust.com/

量子力学の標準的な考え方



Aの光子が偏光フィルターAを通り抜けた瞬間、Bの光子の偏光がフィルターAと同じ向きになる、
と考えると辻褄は合うわね。
でも、光子Bはどうやって遠くのフィルターAの向きを感じるのかしら？不思議ね。

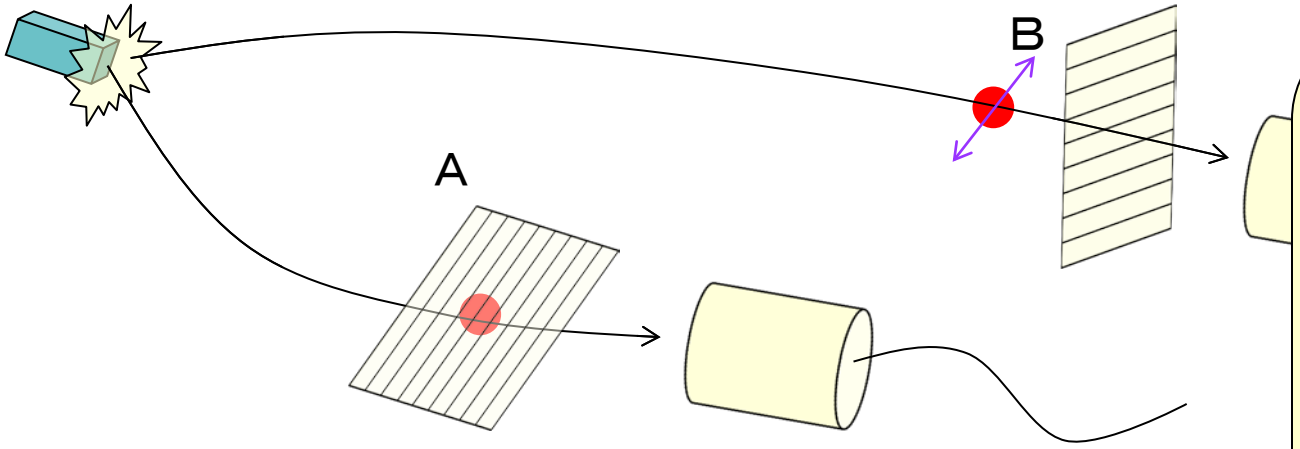
テレパシーのようで気持ちは悪いかもしれないが、

- この考えで計算するとちゃんと実験と合う。
- 気持ち悪くならない説明は存在しない

ということで、量子力学では通常このように考えている。

人物イラスト出典:「イラストAC」
http://www.ac-illust.com/

量子力学の標準的な考え方



Aの光子が偏光フィルターAを通り抜けた瞬間、Bの光子の偏光がフィルターAと同じ向きになる、
と考えると辻褄は合うわね。
でも、光子Bはどうやって遠くのフィルターAの向きを感じるのかしら？不思議ね。

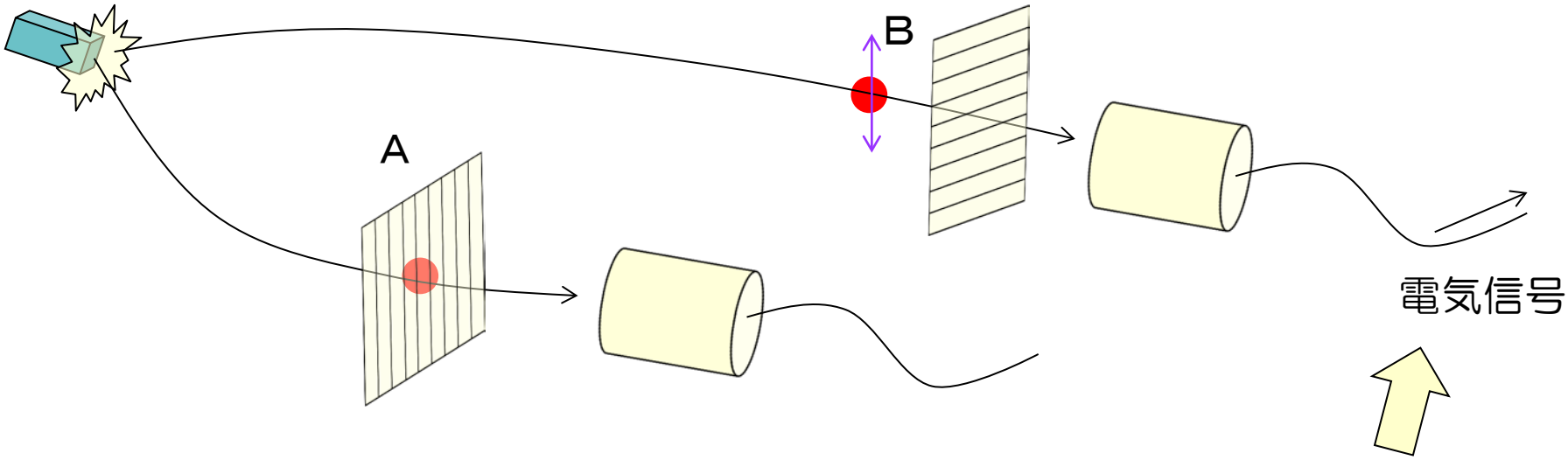
テレパシーのようで気持ちは悪いかもしれないが、

- この考えで計算するとちゃんと実験と合う。
- 気持ち悪くならない説明は存在しない

ということで、量子力学では通常このように考えている。

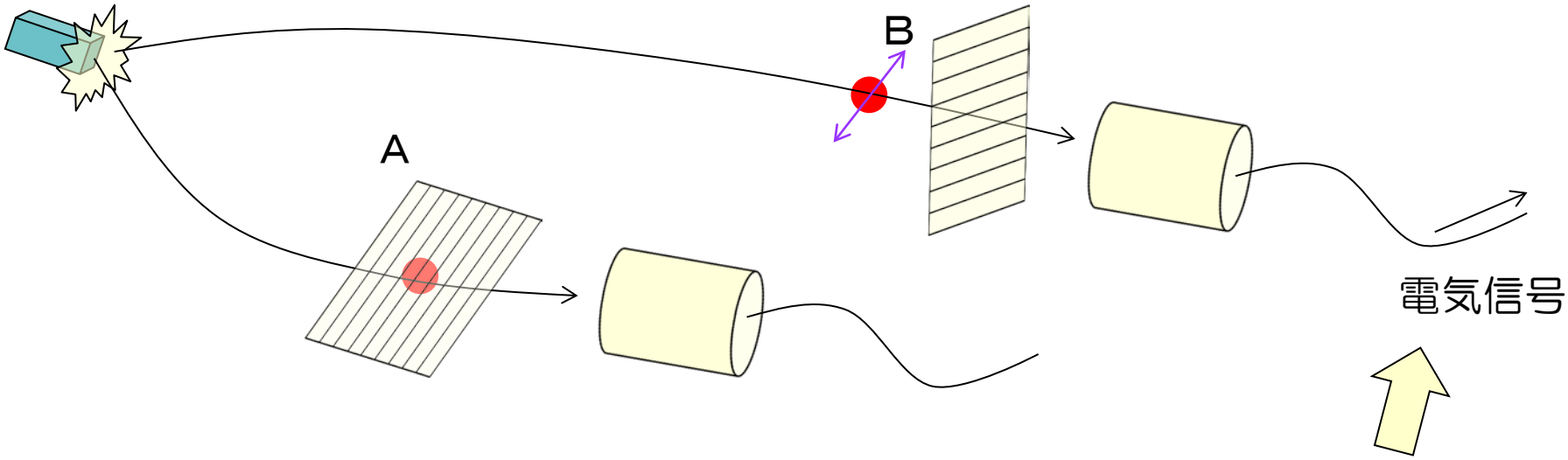
人物イラスト出典:「イラストAC」
http://www.ac-illust.com/

超光速の通信？



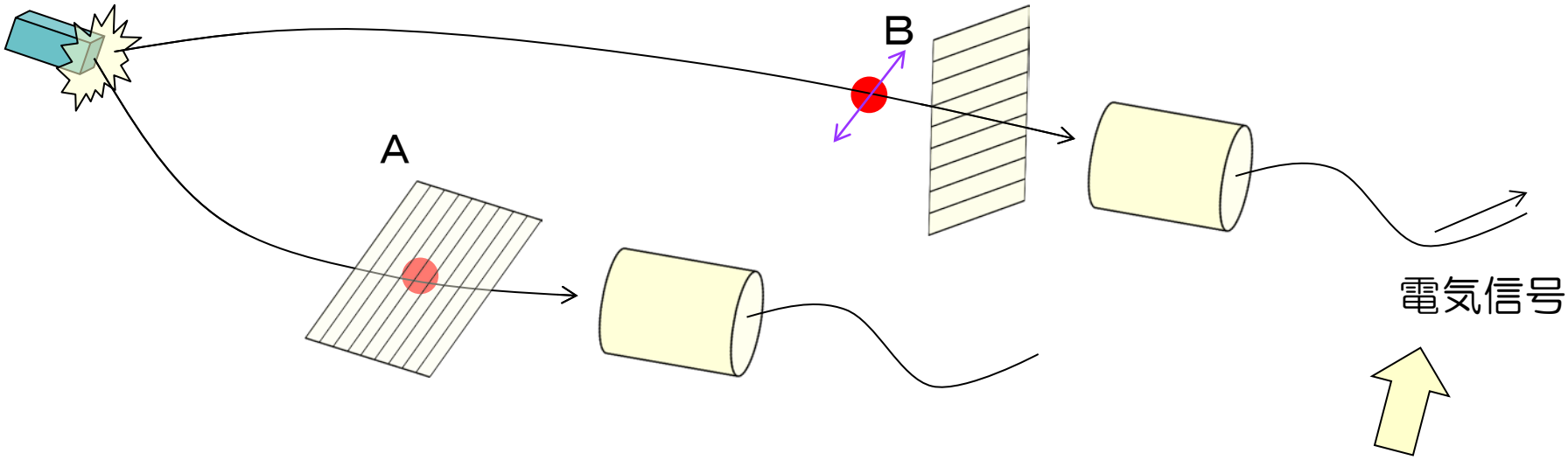
この電気信号（測定結果）は、Aのフィルターの向きの影響をうけない。

超光速の通信？



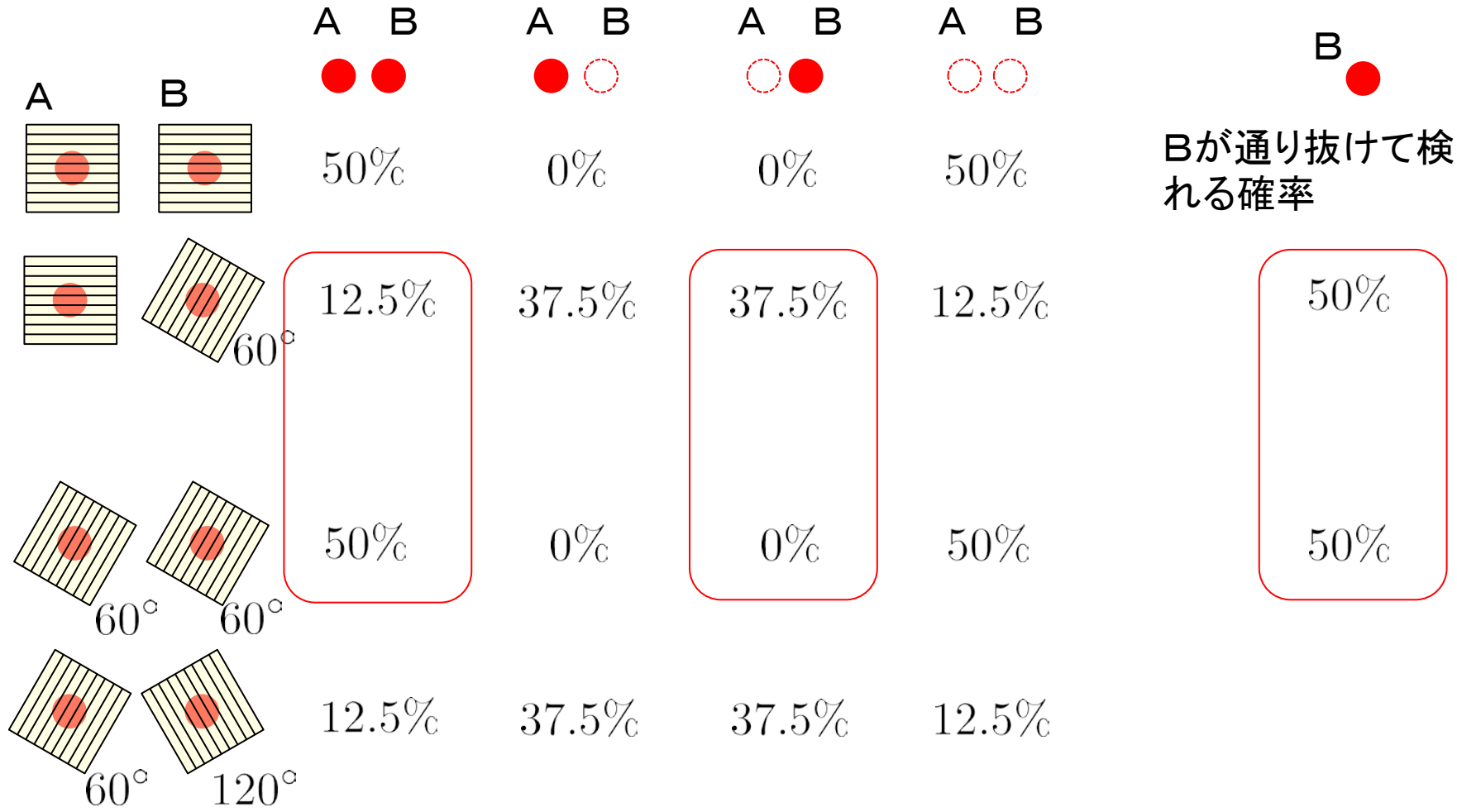
この電気信号（測定結果）は、Aのフィルターの向きの影響をうけない。

超光速の通信？



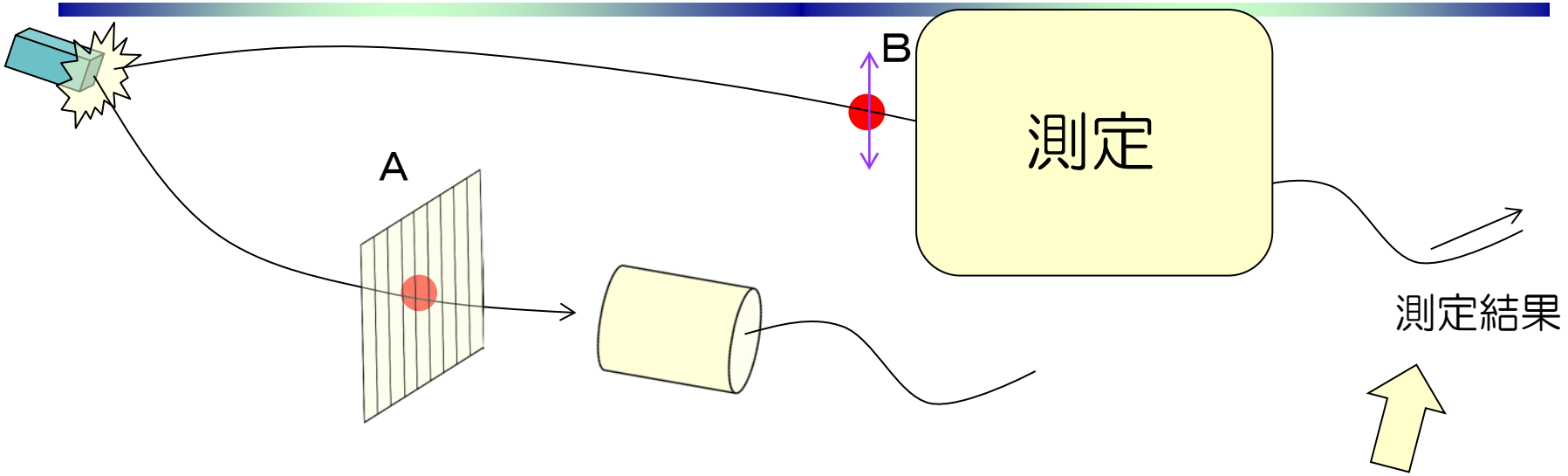
この電気信号（測定結果）は、Aのフィルターの向きの影響をうけない。

Bだけの結果を見ると？



Bが通り抜けて検出される確率

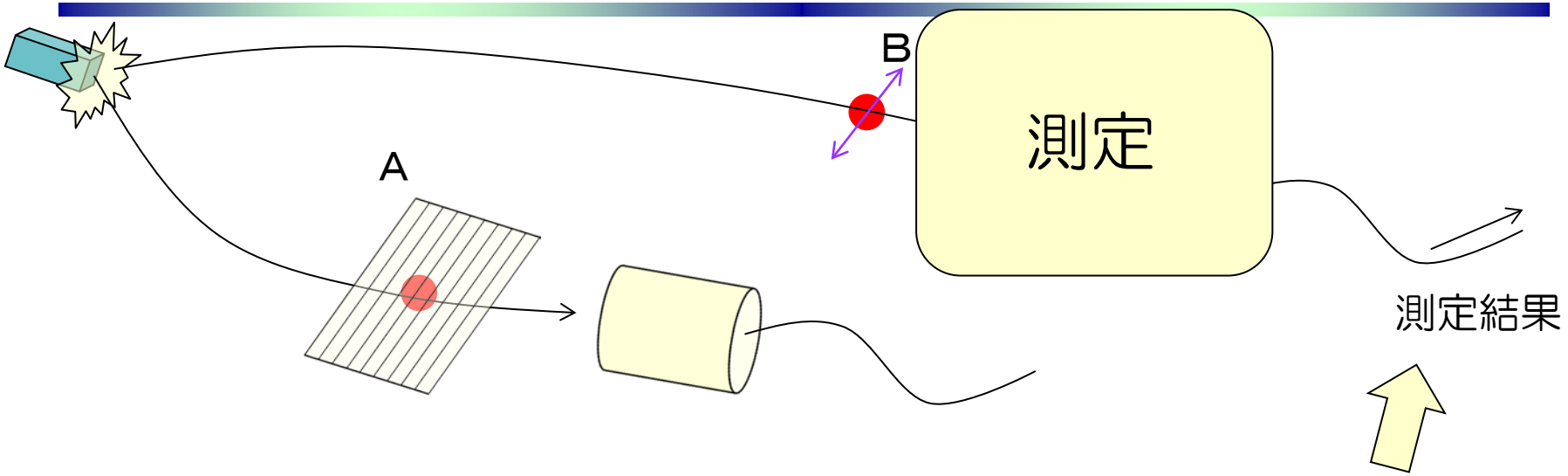
量子力学における測定



どんな測定であっても、この測定結果は、Aのフィルターの向きの影響をうけないはず。

（でないと本当に超光速の通信ができてしまう）

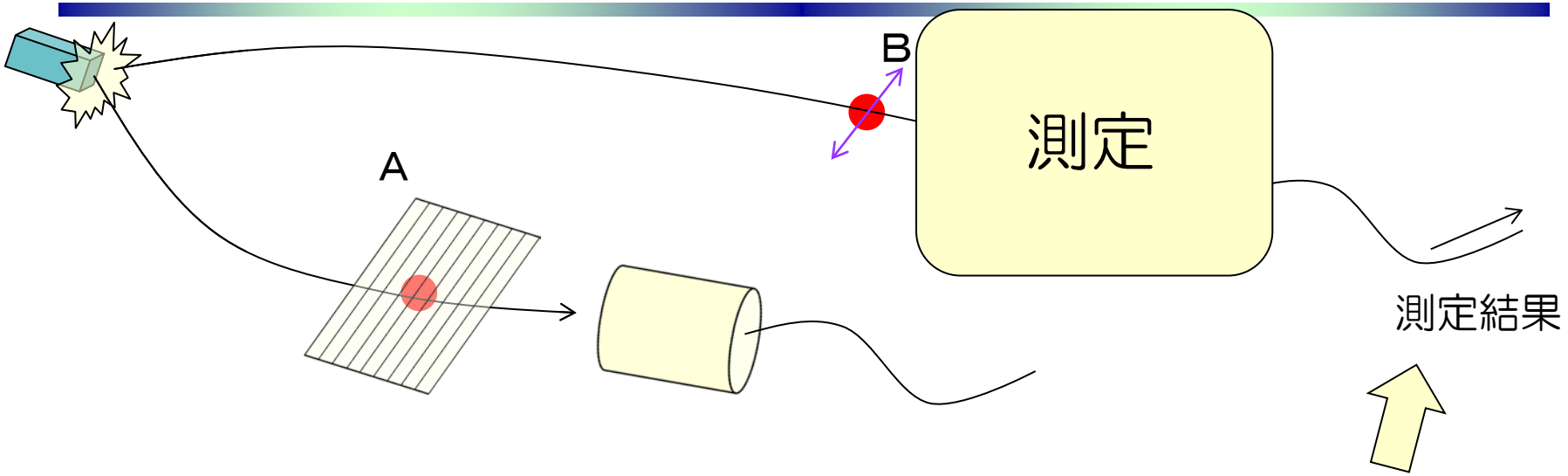
量子力学における測定



どんな測定であっても、この測定結果は、Aのフィルターの向きの影響をうけないはず。

（でないと本当に超光速の通信ができてしまう）

量子力学における測定



測定できることが限られている。

なんでもかんでも好きな精度で
測定できるわけではない。

⇓

通信セキュリティへの応用
（次回）

⇔

どんな測定であっても、この測定結果は、Aのフィルターの向きの影響をうけないはず。

（でないと本当に超光速の通信ができてしまう）