QUATUO研究会
2016/1/10(日)-11(月)@高知工科大学(発表は11日)

Bell不等式とその周辺

大阪大学大学院基礎工学研究科

井元 信之

1926 Born: $|\psi|^2$ ・・・ 観測値出現確率

1927 Einstein:「神がサイコロを振るとは信じられない」→ Bohr:「それが物理法則」

1935 Einstein-Podolsky-Rosen パラドクス ／ シュレーディンガーが "entanglement"命名

1952 Bohmの理論

1954 Everett/De Witt の多世界解釈

1964 Bell不等式

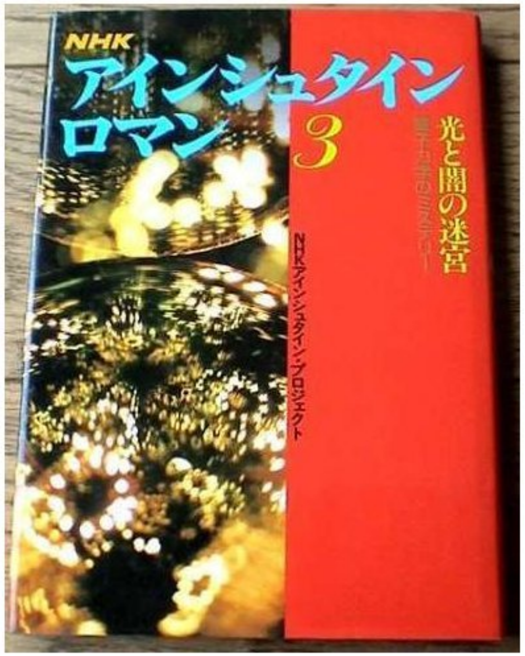
1969 CHSH不等式

Bell不等式検証実験(1972-1982)
1972 Freedman and Clauser (Ca蒸気からのカスケード2光子発生)→ QMを支持
1973 Holt and Pipkin (水銀)→ 古典論(局所実在論)を支持
1976 Fry and Thompson (水銀)→ QMを支持
などなど
1982 Aspect, Grangier, and Roger (Ca＋偏光分離)→ QMを支持
Aspect, Dalibard, and Roger (Ca＋偏光＋Pockels Cell)→ QMを支持
Communication Loopholeを解消

他にも種々。例:Duncan & Kleinpoppen 原子発光(1985-1986)等 → QMを支持

光子以外での実験:スピン(1976)、メソン(2003)→ いずれもQMを支持

Detection Loopholeの解消に向かって



1990年NHKの番組における
インタビュー(by 井元)

パイエルス: コペンハーゲン解釈
の旗手

ドイッチュ: 多世界解釈の旗手

ボーム: ボーム理論

クラインポッペン: Bell不等式実験

1926 Born: $|\psi|^2$ ・・・ 観測値出現確率

1927 Einstein:「神がサイコロを振るとは信じられない」→ Bohr:「それが物理法則」

1935 Einstein-Podolsky-Rosen パラドクス ／ シュレーディンガーが "entanglement"命名

1952 Bohmの理論

1954 Everett/De Witt の多世界解釈

1964 Bell不等式

1969 CHSH不等式

Bell不等式検証実験(1972-1982)
1972 Freedman and Clauser (Ca蒸気からのカスケード2光子発生)→ QMを支持
1973 Holt and Pipkin (水銀)→ 古典論(局所実在論)を支持
1976 Fry and Thompson (水銀)→ QMを支持
などなど
1982 Aspect, Grangier, and Roger (Ca＋偏光分離)→ QMを支持
Aspect, Dalibard, and Roger (Ca＋偏光＋Pockels Cell)→ QMを支持
Communication Loopholeを解消

他にも種々。例:Duncan & Kleinpoppen 原子発光(1985-1986)等 → QMを支持

光子以外での実験:スピン(1976)、メソン(2003)→ いずれもQMを支持

Detection Loopholeの解消に向かって

数理科学2013年3月号:「人物で学ぶ物理10」〜仮説クリエーターとしてのデイヴィッド・ボーム〜（拙著）より

まず単一粒子のシュレーディンガー方程式

$$i\hbar\frac{\partial\psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2\psi + V(r)\psi \tag{1}$$

から出発する。ψ は複素数なので

$$\psi = R\exp\left(\frac{iS}{\hbar}\right) \tag{2}$$

と極形式で書ける。(2) 式を (1) 式に代入して数行の計算ののち実部と虚部を両辺それぞれ等しいと置くと

$$\frac{\partial R}{\partial t} = -\frac{1}{2m}\left(R\nabla^2 S + 2\nabla R\cdot\nabla S\right) \tag{3}$$

および

$$\frac{\partial S}{\partial t} = -\left[\frac{\nabla S\cdot\nabla S}{2m} + V(r) - \frac{\hbar^2}{2m}\frac{\nabla^2 R}{R}\right] \tag{4}$$

を得る。すなわちシュレーディンガー方程式 (1) を ψ の絶対値 R の方程式 (3) と位相 S の方程式 (4) に書き下した。次に、$R=\sqrt{P}$ となる正の (非負の) 数 P を導入すると、(3) と (4) はそれぞれ

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \nabla\cdot\left(P\frac{\nabla S}{m}\right) = 0 \tag{5}$$

および

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{(\nabla S)^2}{2m} + V(r) - \frac{\hbar^2}{4m}\left[\left(-\frac{1}{2}\frac{(\nabla P)^2}{P^2} + \frac{\nabla^2 P}{P}\right)\right] = 0 \tag{6}$$

と書ける。ここまで初等ベクトル解析のよい練習問題である。

ここで $\hbar\to 0$ とした極限、すなわち古典論の場合を考えてみよう。すると (6) 式は、ポテンシャル $V(r)$ 中を泳ぐ粒子について、S*1) が古典的なハミルトン-ヤコビの方程式の解であることを示している。運動方程式に従う粒子の軌跡のアンサンブルを考えるならば、次のことがよく知られている。すなわち $S=$const. であるような曲面を空間内に一つとり、全ての軌跡がこの面に垂直であるとき、これらの軌跡は他の全ての $S=$const. であるような曲面群に垂直である*2)。

このとき $\nabla S(r)/m$ は速度ベクトル $\mathbf{v}(\mathbf{r})$ に等しい。これを使うと、もう一つ残っていた (5) 式は

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \nabla\cdot(Pv) = 0 \tag{7}$$

となる。この式は $P(r)$ をこの集団に対する粒子の存在確率と解釈するとつじつまが合う。そうすると $P\mathbf{v}$ はこの集団における平均的な流れとなり、(7) 式は確率の保存を意味する。ちなみにこれは流体力学における圧縮性流体の質量保存の式

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + \nabla\cdot(\rho v) = 0$$

に対応する。ρ は質量密度である。

それでは、上のような解釈が、量子力学に戻って $\hbar\neq 0$ とした場合にどれだけ通用するか、考えてみよう。(6) 式において、それぞれの粒子が "古典" ポテンシャル $V(r)$ だけでなく、余分のポテンシャル

$$U(r) = -\frac{\hbar^2}{4m}\left[\left(-\frac{1}{2}\frac{(\nabla P)^2}{P^2} + \frac{\nabla^2 P}{P}\right)\right] = -\frac{\hbar^2}{m}\frac{\nabla^2 R}{R} \tag{8}$$

の下で運動しているとしよう。つまり粒子は $V(r)+U(r)$ というポテンシャルの中を動いていると考えるのである。そうすれば (6) 式は依然としてハミルトン-ヤコビの方程式であり、$\nabla S(r)/m$ も依然として粒子速度であり、(5) 式は依然として確率保存の式である。これはシュレーディンガー方程式を書き変えただけのものであり、しかしその解釈は、ポテンシャル $V(r)$ 中を動く量子力学的粒子は $V(r)+U(r)$ 中を動く古典粒子と見なせることを見通しよく示している。この余分に付け加わるポテンシャル $U(r)$ を「量子ポテンシャル」とボームは名付けた。もちろんこのポテンシャルは、外部条件として与えられた $V(r)$ と異なり、何か粒子自身の存在確率の分布 P の平方根に依存している。粒子としての存在確率 P と波としての位相 S が互いに絡み合って発展しているので、ド・ブロイの「パイロット波」を観念でなくきちんと定式化したとも言える。

この理論を使えば、初期時刻における粒子の存在確率分布と位相の空間分布さえ与えれば、以後はまるでリウヴィル方程式のごとく発展を追える。つまり初期時刻における粒子の存在確率分布と位相の空間分布が「隠れた変数」とも言える。通常の量子力学の解釈では $|\psi|^2$ は測定して初めてそこに見いだされることがわかる確率なので「発見確率」というのが妥当であるが、ボームの解釈では「存在確率」と言うことになる。使っている数式自体はシュレーディンガー方程式そのものであることがわかるであろう。引き続くボームの論文ではエンタングルした粒子系を扱っている。そこでの考察により、ボームの理論は非局所性を帯びていることが示される。ボームの理論がベル不等式を破ることはこのことからも当然である。通常の量子力学と—その解釈以外—何ら変わりはない理論なのだ。（以下略）

つまり、

もともと「局所性 or 実在性 or その両方」が間違っているわけだが、Bohm 理論は実在性を保持して全ての誤りを局所性に押しつける理論である。

この意味で、ブラックボックスの中では実在としての変数 R や S が非局所的に動き回るモデルである。

もちろんブラックボックスの外にいる我々は、その応答を利用して超光速通信をすることはできない。

「非局所性」の意味:
- Bohmの量子ポテンシャルの非局所性とは、「ブラックボックスの中で超光速で伝わる」ことを意味。
- 「影響が空間を連続的に伝わる」意の局所性は、ブラックボックスの外からaccessibleなものの性質。

1926 Born: $|\psi|^2$ ・・・ 観測値出現確率

1927 Einstein:「神がサイコロを振るとは信じられない」→ Bohr:「それが物理法則」

1935 Einstein-Podolsky-Rosen パラドクス ／ シュレーディンガーが “entanglement”命名

1952 Bohmの理論

1954 Everett/De Witt の多世界解釈

1964 Bell不等式

1969 CHSH不等式

Bell不等式検証実験（1972-1982）
- 1972 Freedman and Clauser（Ca蒸気からのカスケード2光子発生）→ QMを支持
- 1973 Holt and Pipkin（水銀）→ 古典論（局所実在論）を支持
- 1976 Fry and Thompson（水銀）→ QMを支持
- などなど
- 1982 Aspect, Grangier, and Roger（Ca＋偏光分離）→ QMを支持
  Aspect, Dalibard, and Roger（Ca＋偏光＋Pockels Cell）→ QMを支持
  Communication Loopholeを解消
- 他にも種々。例:Duncan & Kleinpoppen 原子発光（1985-1986）等 → QMを支持

光子以外での実験:スピン（1976）、メソン（2003）→ いずれもQMを支持

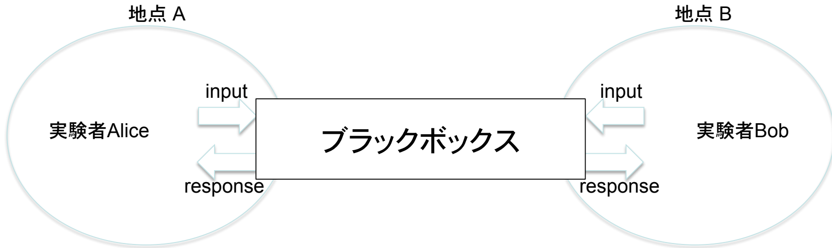
Detection Loopholeの解消に向かって

自然法則を探る: 自然界に働きかけ応答を見る

（局所的）

知りたい法則は局所的とは限らない → 次ページ

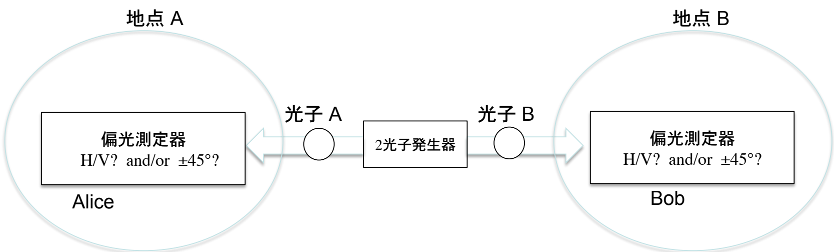
自然法則を探る: 自然界に働きかけ応答を見る



ブラックボックスから出る光子AとBをそれぞれAliceとBobが偏光測定し、連絡を取りあって偏光の相関を見ることによってこの2光子発生器がどんな素性か探る。

(この場合のinputは、検出装置を組立てて待ち構えること

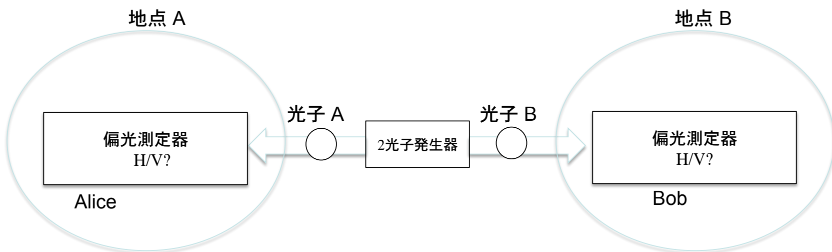
変数の定義:



$$X_{\rm A} = 1 \quad \text{for H}$$
$$X_{\rm A} = -1 \quad \text{for V}$$
$$Y_{\rm A} = 1 \quad \text{for} + 45\text{degree}$$
$$Y_{\rm A} = -1 \quad \text{for} - 45\text{degree}$$

$$X_{\rm B} = 1 \quad \text{for H}$$
$$X_{\rm B} = -1 \quad \text{for V}$$
$$Y_{\rm B} = 1 \quad \text{for} + 45\text{degree}$$
$$Y_{\rm B} = -1 \quad \text{for} - 45\text{degree}$$

（まず簡単のため）H/V のみ観測する場合

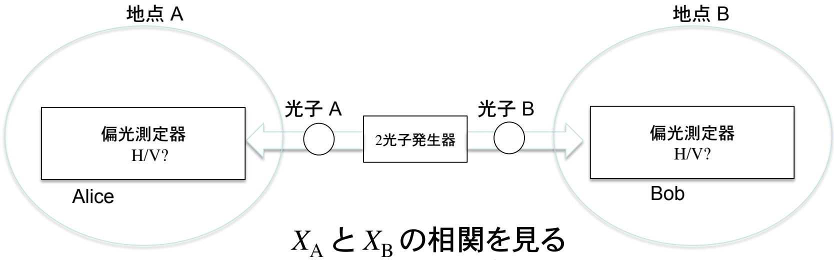


$$X_{\rm A} = 1 \quad \text{for H}$$
$$X_{\rm A} = -1 \quad \text{for V}$$

$$X_{\rm B} = 1 \quad \text{for H}$$
$$X_{\rm B} = -1 \quad \text{for V}$$

（まず簡単のため）H/V のみ観測する場合

(a) HとVを独立にランダムに発生するブラックボックス



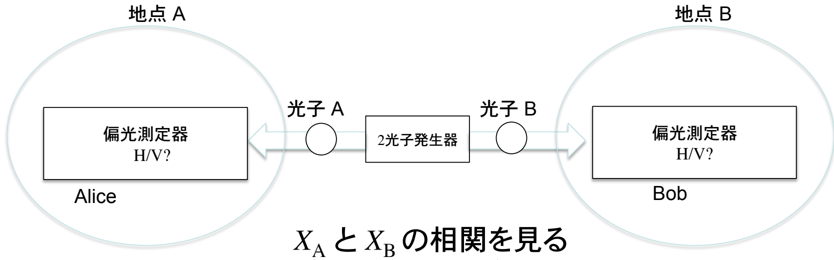
$X_{\rm A}$ と $X_{\rm B}$ の相関を見る

$X_{\rm A} =$	$X_{\rm A}X_{\rm B} =$	$X_{\rm B} =$
1	1	1
1	-1	-1
-1	1	-1
1	-1	-1
-1	1	1
-1	1	1
.	.	.
.	.	.

$\langle X_{\rm A}X_{\rm B}\rangle = 0$　→「このBBは、HVについては独立にランダムな二光子を発生している」とAliceとBobは結論。

（まず簡単のため）H/V のみ観測する場合

(b) HV偏光に負の「古典的相関」がある光子AとBを出すBB

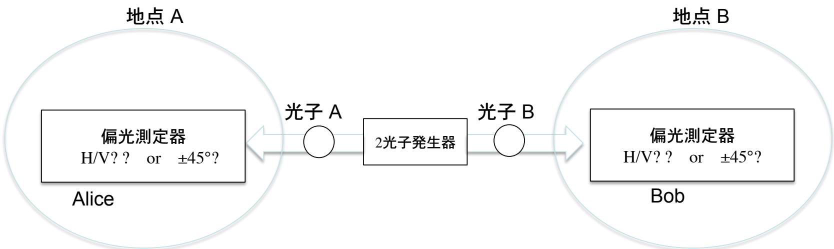


$X_{\rm A}$ と $X_{\rm B}$ の相関を見る

$X_{\rm A} =$	$X_{\rm A}X_{\rm B} =$	$X_{\rm B} =$
1	-1	-1
1	-1	-1
-1	-1	1
1	-1	-1
-1	-1	1
-1	-1	1
.	.	.
.	.	.

$\langle X_{\rm A}X_{\rm B}\rangle = -1$　→「このBBは、HVについては100%負の相関がある二光子を発生している」とAliceとBobは結論。

H/V と +45度/-45度の両方を観測する場合



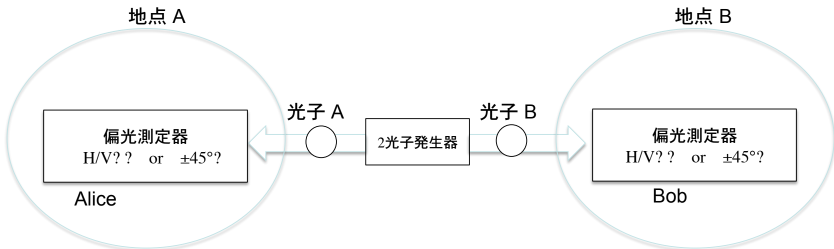
$X_{\rm A}$　$Y_{\rm A}$　$X_{\rm B}$　$Y_{\rm B}$

$\langle X_{\rm A}Y_{\rm A}\rangle,\ \langle X_{\rm A}X_{\rm B}\rangle,\ \langle X_{\rm A}Y_{\rm B}\rangle,\ \langle Y_{\rm A}X_{\rm B}\rangle,\ \langle Y_{\rm A}Y_{\rm B}\rangle,\ \langle X_{\rm B}Y_{\rm B}\rangle$

4変数の間の「2変数相関」は${}_4C_2(=6)$種類ある。

ここで新たなゲームのルール:
同一地点で X と Y の両方を測ることはしない（できない）。

H/V と +45度/-45度を観測する場合



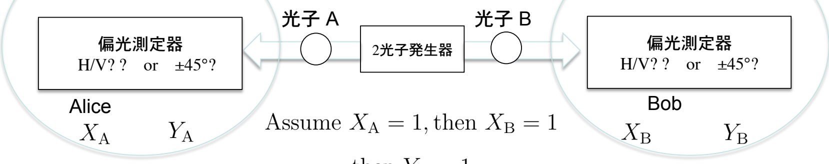
$X_{\rm A}$　$Y_{\rm A}$　$X_{\rm B}$　$Y_{\rm B}$

$\langle X_{\rm A}X_{\rm B}\rangle,\ \langle X_{\rm A}Y_{\rm B}\rangle,\ \langle Y_{\rm A}X_{\rm B}\rangle,\ \langle Y_{\rm A}Y_{\rm B}\rangle$

以後、この4つの相関に限定する。そのとき
AliceとBobは2光子発生器の素性について何が言えるか?

Case 1: 右のような結果になった場合、「局所実在論」と矛盾はないか?

$$\langle X_{\rm A} X_{\rm B}\rangle = 1$$
$$\langle X_{\rm A} Y_{\rm B}\rangle = 1$$
$$\langle Y_{\rm A} X_{\rm B}\rangle = 1$$
$$\langle Y_{\rm A} Y_{\rm B}\rangle = 1$$



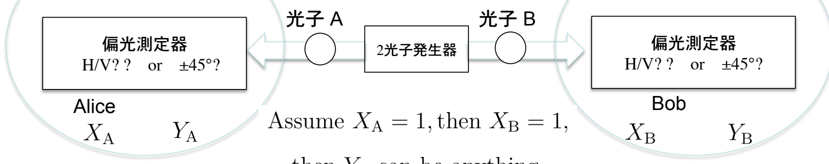
$$\text{Assume } X_{\rm A} = 1, \text{then } X_{\rm B} = 1$$
$$\text{then } Y_{\rm A} = 1$$
$$\text{then } Y_{\rm B} = 1$$
$$\text{then } X_{\rm A} = 1$$

特に矛盾はない。

→ AliceとBobは、「このBBから出る二光子の偏光の関係は局所実在論でも説明できる」と結論。

Case 2: 右のような結果になった場合、「局所実在論」と矛盾はないか?

$$\langle X_{\rm A} X_{\rm B}\rangle = 1$$
$$\langle X_{\rm A} Y_{\rm B}\rangle = 0$$
$$\langle Y_{\rm A} X_{\rm B}\rangle = 0$$
$$\langle Y_{\rm A} Y_{\rm B}\rangle = 1$$



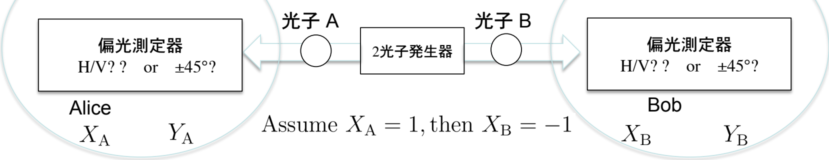
$$\text{Assume } X_{\rm A} = 1, \text{then } X_{\rm B} = 1,$$
$$\text{then } Y_{\rm A} \text{ can be anything,}$$
$$\text{then } Y_{\rm B} \text{ should be equal to } Y_{\rm A},$$
$$\text{then } X_{\rm A} \text{ can be anything.}$$

特に矛盾はない。

→ AliceとBobは、「このBBから出る二光子の偏光の関係もやはり局所実在論で説明できる」と結論。

Case 3: 右のような結果になった場合、「局所実在論」と矛盾はないか?

$$\langle X_{\rm A} X_{\rm B}\rangle = -1$$
$$\langle X_{\rm A} Y_{\rm B}\rangle = 1$$
$$\langle Y_{\rm A} X_{\rm B}\rangle = 1$$
$$\langle Y_{\rm A} Y_{\rm B}\rangle = 1$$



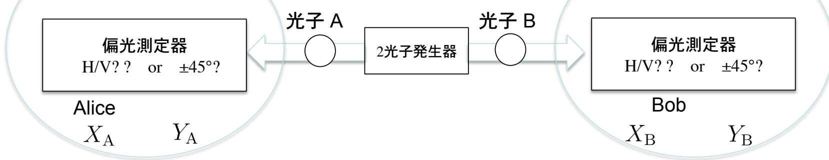
$$\text{Assume } X_{\rm A} = 1, \text{then } X_{\rm B} = -1$$
$$\text{then } Y_{\rm A} = -1$$
$$\text{then } Y_{\rm B} = -1$$
$$\text{then } X_{\rm A} = -1$$

矛盾！

→ AliceとBobは、「このBBから出る二光子の偏光の関係は局所実在論では説明できない」と結論。

Case 4: 右のような結果になった場合、「局所実在論」と矛盾はないか?

$$\langle X_{\rm A} X_{\rm B}\rangle = -0.5$$
$$\langle X_{\rm A} Y_{\rm B}\rangle = 0.3$$
$$\langle Y_{\rm A} X_{\rm B}\rangle = 0.8$$
$$\langle Y_{\rm A} Y_{\rm B}\rangle = 0.7$$



すぐにはわからない。
（Case 1～3は相関値が±1とか 0 などで、論理で追いやすかった）

→ Case 4 のような場合にも一発で「局所実在論と矛盾するか?」を判定できる「判別式」が欲しい！

→ まずは試行錯誤的に判別式の候補を探ってみよう。

候補1: $D \equiv \left| \langle X_A X_B \rangle + \langle X_A Y_B \rangle + \langle Y_A X_B \rangle + \langle Y_A Y_B \rangle \right|$

→ D = 4 for Case 1,
2 for Case 2,　　→ うまく判別できていない
2 for Case 3.

候補2: $D \equiv \left| \langle X_A X_B \rangle - \langle X_A Y_B \rangle - \langle Y_A X_B \rangle + \langle Y_A Y_B \rangle \right|$

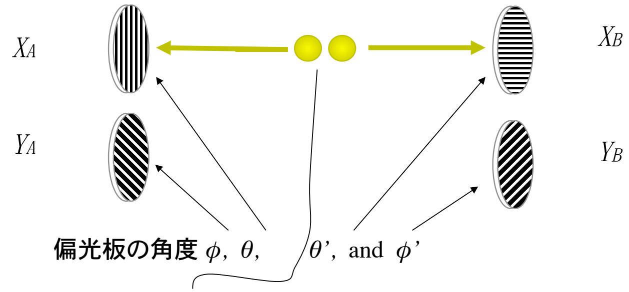
→ D = 0 for Case 1,
2 for Case 2,　　→ うまく判別できていない
2 for Case 3.

候補3: $D \equiv \left| -\langle X_A X_B \rangle + \langle X_A Y_B \rangle + \langle Y_A X_B \rangle + \langle Y_A Y_B \rangle \right|$

→ D = 2 for Case 1,
0 for Case 2,　　→ これはいいかもしれない
4 for Case 3.

候補3がよい判別式であることをきちんと導けないか?

ベル不等式（CHSHタイプ）の導出



二光子の偏光は、発生された時点で決まっている(実在論)とする。
→ 我々にはわからない **隠れた変数 λ** に支配されていると仮定。

→ $X_A = X_A(\theta,\lambda)$　$Y_A = Y_A(\phi,\lambda)$　$X_B = X_B(\theta',\lambda)$　$Y_B = Y_B(\phi',\lambda)$
隠れた変数の値が λ である確率を $p(\lambda)$ とする。

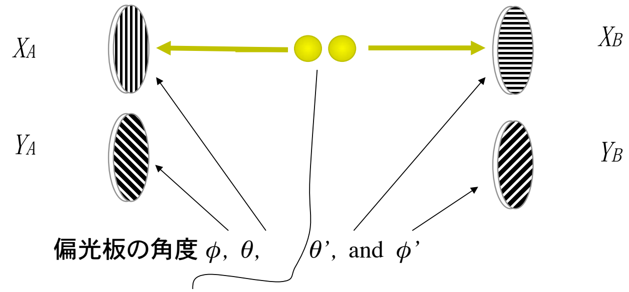
まず、中学レベルの数学として、不等式 $-1 \leqq X_A, Y_A, X_B, Y_B \leqq 1$ を満たす変数について、不等式 $-2 \leqq (Y_A - X_A) X_B + (Y_A + X_A) Y_B \leqq 2$ が成立。
左辺、中辺、右辺に $p(\lambda)$ を乗じて λ で積分することにより、ただちに
$-2 \leqq -\langle X_A X_B \rangle + \langle X_A Y_B \rangle + \langle X_B Y_A \rangle + \langle Y_A Y_B \rangle \leqq 2$ を得る。（証明終わり）

試しに Case 1 – 4 を判別してみよう。

$D \equiv \left| -\langle X_A X_B \rangle + \langle X_A Y_B \rangle + \langle Y_A X_B \rangle + \langle Y_A Y_B \rangle \right|$

Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
$\langle X_A X_B \rangle = 1$	$\langle X_A X_B \rangle = 1$	$\langle X_A X_B \rangle = -1$	$\langle X_A X_B \rangle = -0.5$
$\langle X_A Y_B \rangle = 1$	$\langle X_A Y_B \rangle = 0$	$\langle X_A Y_B \rangle = 1$	$\langle X_A Y_B \rangle = 0.3$
$\langle Y_A X_B \rangle = 1$	$\langle Y_A X_B \rangle = 0$	$\langle Y_A X_B \rangle = 1$	$\langle Y_A X_B \rangle = 0.8$
$\langle Y_A Y_B \rangle = 1$	$\langle Y_A Y_B \rangle = 1$	$\langle Y_A Y_B \rangle = 1$	$\langle Y_A Y_B \rangle = 0.7$
$D = 2$	$D = 0$	$D = 4$	$D = 2.3$
↓	↓	↓	↓
局所実在論でもあり得る二光子光源	局所実在論でもあり得る	局所実在論はあり得ない	局所実在論はあり得ない

局所実在論を仮定せず、量子力学の場合はどうなるか？



この二光子はベル状態 $|\psi^-\rangle = |HV\rangle - |VH\rangle$ としよう。
さらに簡単のため $\phi - \theta = \theta - \theta' = \theta' - \phi' \equiv \Theta$ とする。

このとき $-\langle X_A X_B \rangle + \langle X_A Y_B \rangle + \langle X_B Y_A \rangle + \langle Y_A Y_B \rangle$ の計算は簡単。
$|\psi^-\rangle$ を仮定したとき、答は $3\cos 2\Theta - \sin 6\Theta$ となる。

→ これは $\Theta = \pi/8$ のとき最大となり、その値は $2\sqrt{2}$ 。
→ $-2\sqrt{2} \leqq -\langle X_A X_B \rangle + \langle X_A Y_B \rangle + \langle X_B Y_A \rangle + \langle Y_A Y_B \rangle \leqq 2\sqrt{2}$

さて Case 3 を思い出そう。$\langle X_{\rm A} X_{\rm B}\rangle = -1$

$$\langle X_{\rm A} Y_{\rm B}\rangle = 1$$
$$\langle Y_{\rm A} X_{\rm B}\rangle = 1$$
$$\langle Y_{\rm A} Y_{\rm B}\rangle = 1$$

これは $D = 4$ となる。→ このようなデータは局所実在論に反するだけでなく、量子力学をも超越している。

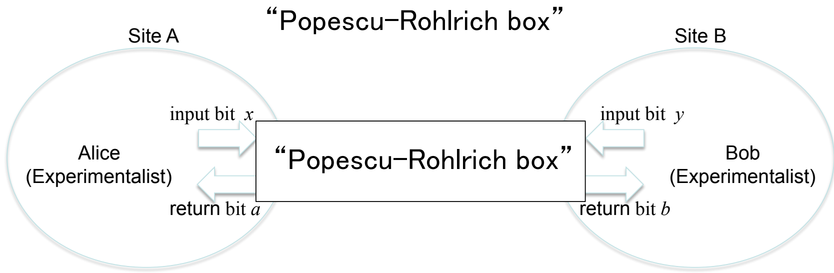
$2\sqrt{2} < D \leqq 4$ という世界はどんな世界なのか?

量子力学の世界よりもっと面白い世界だろうか? たとえば

そのような世界で情報処理は「量子情報処理より強力」か?

あるいは相対論を破る通信が可能となってしまうか?

（もしそうなら、相対論と共存するために、そのような世界を神様は許さず、しかし相対論と両立する最大限の不思議な世界である量子力学まで許したとも言える・・・?)



This blackbox returns bits a and b so that $P(a, b|x, y) = \begin{cases} 1/2 & (a \oplus b = xy) \\ 0 & (\text{otherwise}). \end{cases}$

More concretely, inputs → outputs

$$x = 0,\ y = 0 \quad\to\quad a = 0,\ b = 0 \quad\text{or}\quad a = 1,\ b = 1$$
$$x = 0,\ y = 1 \quad\to\quad a = 0,\ b = 0 \quad\text{or}\quad a = 1,\ b = 1$$
$$x = 1,\ y = 0 \quad\to\quad a = 0,\ b = 0 \quad\text{or}\quad a = 1,\ b = 1$$
$$x = 1,\ y = 1 \quad\to\quad a = 0,\ b = 1 \quad\text{or}\quad a = 1,\ b = 0$$

It is obvious that if the box wants to respond to Alice (or to Bob) instantaneously, then superluminal communication is needed inside the box.

Nevertheless, Alice and Bob cannot utilize the response of this box to do superluminal communication because Alice (Bob) cannot know the input bit of Bob (Alice) by knowing the PR box’s response to Alice (Bob).

$$x = 0,\ y = 0 \quad\to\quad a = 0,\ b = 0 \quad\text{or}\quad a = 1,\ b = 1$$
$$x = 0,\ y = 1 \quad\to\quad a = 0,\ b = 0 \quad\text{or}\quad a = 1,\ b = 1$$
$$x = 1,\ y = 0 \quad\to\quad a = 0,\ b = 0 \quad\text{or}\quad a = 1,\ b = 1$$
$$x = 1,\ y = 1 \quad\to\quad a = 0,\ b = 1 \quad\text{or}\quad a = 1,\ b = 0$$

Also, it can be shown that $D = 4$ for PR box.

→ “$D = 4$,まで行ってしまう世界では超光速通信ができてしまう” はウソ。

同様に、我々が超光速通信ができないからといって、ブラックボックスの中で超光速通信がなされていない、とは限らない。

(現に Bohm’s の「非局所隠れた変数」は超光速で伝わるが、我々はそれを使って超光速通信に利用することはできない。)

1926 Born: $|\psi|^2$ ・・・ 観測値出現確率

1927 Einstein:「神がサイコロを振るとは信じられない」→ Bohr:「それが物理法則」

1935 Einstein-Podolsky-Rosen パラドクス ／ シュレーディンガーが “entanglement”命名

1952 Bohmの理論

1954 Everett/De Witt の多世界解釈

1964 Bell不等式

1969 CHSH不等式

Bell不等式検証実験(1972-1982)

1972 Freedman and Clauser (Ca蒸気からのカスケード2光子発生)→ QMを支持

1973 Holt and Pipkin (水銀)→ 古典論(局所実在論)を支持

1976 Fry and Thompson (水銀)→ QMを支持

などなど

1982 Aspect, Grangier, and Roger (Ca＋偏光分離)→ QMを支持

Aspect, Dalibard, and Roger (Ca＋偏光＋Pockels Cell)→ QMを支持

Communication Loopholeを解消

他にも種々。例:Duncan & Kleinpoppen 原子発光(1985-1986)等 → QMを支持

光子以外での実験:スピン(1976)、メソン(2003)→ いずれもQMを支持

Detection Loopholeの解消に向かって

1926 Born: $|\psi|^2$ ･･･ 観測値出現確率

1927 Einstein:「神がサイコロを振るとは信じられない」→ Bohr:「それが物理法則」

1935 Einstein-Podolsky-Rosen パラドクス ／ シュレーディンガーが "entanglement"命名

1952 Bohmの理論

1954 Everett/De Witt の多世界解釈

1964 Bell不等式

1969 CHSH不等式

Bell不等式検証実験(1972-1982)

1972 Freedman and Clauser (Ca蒸気からのカスケード2光子発生)→ QMを支持

1973 Holt and Pipkin (水銀)→ 古典論(局所実在論)を支持

1976 Fry and Thompson (水銀)→ QMを支持

などなど

1982 Aspect, Grangier, and Roger (Ca＋偏光分離)→ QMを支持

Aspect, Dalibard, and Roger (Ca＋偏光＋Pockels Cell)→ QMを支持

Communication Loopholeを解消

他にも種々。例:Duncan & Kleinpoppen 原子発光(1985-1986)等 → QMを支持

光子以外での実験:スピン(1976)、メソン(2003)→ いずれもQMを支持

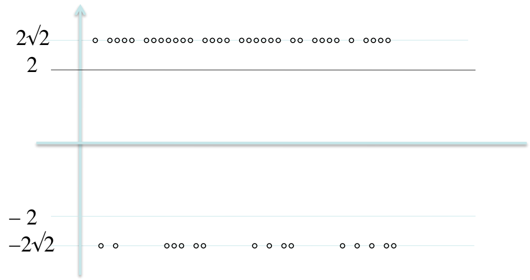
Detection Loopholeの解消に向かって

Detection Loophole ― fair sampling assumption

「Detectorの量子効率ηが<1のとき、1−ηの光子達はfairにランダムサンプリングされている保証はない。未知の物理によって、Bell不等式を破るものだけfavorableに選ばれているかもしれないではないか」

QM : $-2\sqrt{2} \leqq -\langle X_A X_B\rangle + \langle X_A Y_B\rangle + \langle X_B Y_A\rangle + \langle Y_A Y_B\rangle \leqq 2\sqrt{2}$

LHV : $-2 \leqq -\langle X_A X_B\rangle + \langle X_A Y_B\rangle + \langle X_B Y_A\rangle + \langle Y_A Y_B\rangle \leqq 2$



以下3枚 Delftの実験 Nature 526(2015)682 の図を説明したが、著作権抵触を避けるためウェブ公開版では省略します。

1926 Born: $|\psi|^2$ ･･･ 観測値出現確率

1927 Einstein:「神がサイコロを振るとは信じられない」→ Bohr:「それが物理法則」

1935 Einstein-Podolsky-Rosen パラドクス ／ シュレーディンガーが "entanglement"命名

1952 Bohmの理論

1954 Everett/De Witt の多世界解釈

1964 Bell不等式

1969 CHSH不等式

Bell不等式検証実験(1972-1982)

1972 Freedman and Clauser (Ca蒸気からのカスケード2光子発生)→ QMを支持

1973 Holt and Pipkin (水銀)→ 古典論(局所実在論)を支持

1976 Fry and Thompson (水銀)→ QMを支持

などなど

1982 Aspect, Grangier, and Roger (Ca＋偏光分離)→ QMを支持

Aspect, Dalibard, and Roger (Ca＋偏光＋Pockels Cell)→ QMを支持

Communication Loopholeを解消

他にも種々。例:Duncan & Kleinpoppen 原子発光(1985-1986)等 → QMを支持

光子以外での実験:スピン(1976)、メソン(2003)→ いずれもQMを支持

Detection Loopholeの解消に向かって

まとめ

(注:このサイズの文字は講演で喋ったことを補足したもの)

系を量子的、測定器は古典的という区別をなくした点が改良点

- QMの正統解釈の欠点を減らす／なくす努力
  - Bohmの理論(1952)･･･すべてを古典論に → 局所性を失う ブラックボックス中で相対論を破るのが嫌だが、観測されるものはOK
  - Everett解釈(1957)･･･すべてを量子論に → 自分はなぜこの世界にいるか? が未解決で、この点が確率解釈とあまり変わらない
- 古典論(局所実在論)で満たされなければならない不等式が提案された。(Bell不等式)

LHV : $-2 \leqq -\langle X_A X_B\rangle + \langle X_A Y_B\rangle + \langle X_B Y_A\rangle + \langle Y_A Y_B\rangle \leqq 2$

(QM : $-2\sqrt{2} \leqq -\langle X_A X_B\rangle + \langle X_A Y_B\rangle + \langle X_B Y_A\rangle + \langle Y_A Y_B\rangle \leqq 2\sqrt{2}$)

方向その1

方向その2

- $2\sqrt{2}$を超える世界を考えてみよう。
  (最大4まで行く : 例 PR-box)
  動機 : 神様はなぜ量子力学を選択した?
  - 情報因果律?
  - 何らかの意味で最も面白い世界?
- Bell不等式の検証実験は数多くなされて来た。その中で、
  - Aspect(1982)の実験はcommunication loop-hole freeの範囲で信頼できる
  - NVセンターを使ったNature 2015 Oct.はdetection LHもfreeにしたと主張･･･