

第 156 回 CIS パートナー会議事録(一般様用)

開催日時 2025 年 6 月 29 日(日) 13 時～15 時 30 分

講 師 久米 健次 様

テーマ (1) Bell-CHSH 不等式

—古典派と量子派の論争に決着をつける。

科学史に残る定理

数式はほとんどナシに導ける。

しかし、本当に決着はついたのか？

(30 分～1 時間程度)

(2) ペロブスカイト太陽電池の現状



会議風景

(1) Bell-CHSH 不等式

—古典派と量子派の論争に決着をつける。

科学史に残る定理

数式はほとんどナシに導ける。

しかし、本当に決着はついたのか？

Bell-CHSH不等式

$$-2 \leq C \leq 2$$

- 科学史の中で最も深淵な発見ともいわれる。・・・Bellが導出(1964年)
- 2022年のノーベル物理学賞・・・ベル不等式の破れの実験検証
(アスペ、クラウザー、ツァイリッガーの3氏、ベルはすでに他界)
- 導出は簡単で物理法則も難しい数学も一切不要
- 一方で、ほとんどの物理研究者は「量子論は正しい」と思っていたので、その意味では驚きはなかった。ただし、哲学(神学)論争と思われていたものが、実証可能になったことは驚きであった。量子情報理論には間接的に影響

初めから脱線
最近のノーベル賞

	物理学賞	化学賞
2024年	ニューラルネットワーク (ホップフィールド、ヒントン)	AIによるたんぱく質の構造予測 (バイカー、ハサビス、ジャンパー)
2023年	アト秒光パルス生成	量子ドット
2022年	Bell不等式の破れの実験検証	クリックケミストリー

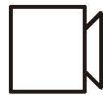
情報系の受賞に傾く。

この流れだと、いずれ、P. ショアー氏が受賞すると予想

「量子コンピューターの因数分解アルゴリズムと量子誤り訂正」

プレゼン資料集

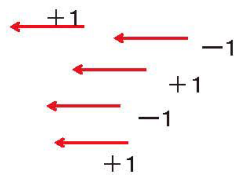
量子派の見方



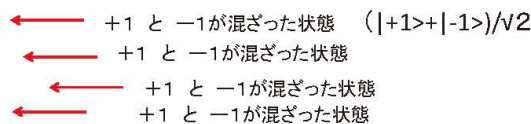
+1 と -1が混ざった状態
(状態の重ね合わせ)
「+1/-1」が**決まっていない**。

測定器で測定すると
測定値は +1 だったり -1 であったり
確率的に決まる。

古典派: 飛んでくる粒子のスピンの成分は+1か-1のいずれかに決まっている。我々はそれを知らないだけ。測定でどちらであるかがわかる。



量子派: +1と-1 の状態が混ざった状態というのがある。
測定で+1か-1のいずれかに確率的になる。



古典派

何故そんな不自然なことを考えないといけないのか。
我々が無知なだけであって実は+1か-1に決まっているのではないか。

量子派

いやいや、そうではない。
波動性による「重ね合わせ」や、それに伴う干渉現象があって、
現象を矛盾なく説明するには、このように記述せざるを得ない。

古典派

量子論は間違っていないが未完成なのではないか。

なまくら派

自然観の問題なのか？ 白黒をつけられる問題なのか？
大多数は「まあ、量子論で正しく予測ができるのだから
これ以上詮索しないでよいのではないか」であった。

・1925年 量子論の一応の完成

- ・1935年 Einstein (Schroedinger)は量子論に懐疑的
Bohr vs Einsteinの論争勃発
→ 雲の上の神学論争？

- ・1964年 この論争は実験で決着できる
→ Bellの不等式

Einsteinが正しければ $-2 \leq C \leq 2$
Bohrが正しければ C は2を超える場合がある

- ・1980年 アスぺの実験 $C \sim 2.8$ の場合があった。
量子論の予言通り

Einstein

ある物理量は、どの瞬間にも、ひとつずつ決まった値を持っている。それこそが、物質の「实在」だ。

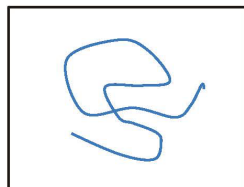
ある物理量を測定して「+1」になったら、測定直前に系は「+1」の状態だったのだ。

量子派

そうではない。系は「+1」と「-1」の混った(重ね合わせた)状態があり得る。測定を行うと、「+1」または「-1」の値が確率的に得られる。測定結果は測定直前の値そのものではない。さらにどの瞬間にも、決まった物理量を持つというのも誤りだ。

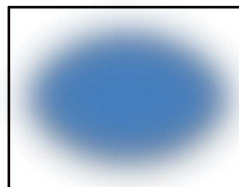
古典的描像

どこかにいることは決まっているが、我々はそれを知らないだけ。測定すると、どこにいるのかがわかる。



量子的描像

どこにいるか決まっていない。どこにいるのかは、測定の時点で確率的に決まる。



このいずれが正しいかを決める実験はあり得るか？？

Einstein:

「パイス君、君は

『月は、われわれが見ているときにだけ、そこにある』
ということを信じられるかね。」

Schroedinger:

量子論によれば、箱の中の猫は

| 死んでいる状態 > + | 生きている状態 >

箱のふたを開けた、その瞬間に「生・死」が決まるなんてこと
があり得るのか。(シュレディンガーの猫)

このような疑問と論争は形而上学的な問題なのか。

「決まっているが知らない」のか

「決まっておらず見た瞬間に決まる」のか

かは区別できるか??

これを区別するために、測定を行うわけにもいかない……

これを可能にしたのがベルの不等式

数学も物理も関係ない! 考え方だけの問題。

局所实在論 $-2 \leq C \leq 2$

Bell-CHSH

量子論 $-2\sqrt{2} \leq C \leq 2\sqrt{2}$

Tsirelson bound

Bell-CHSH不等式を導く

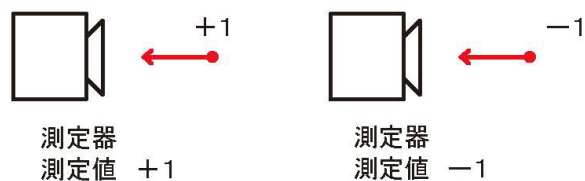
準備

電子をスピンの向きの測定機に入射

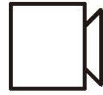
電子のスピンのz軸成分を測る

測定結果は+1(上向き) か -1(下向き)

古典派の見方



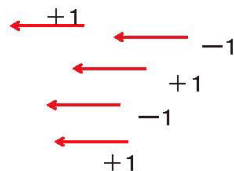
量子派の見方



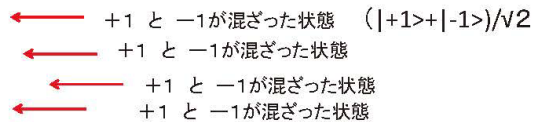
+1 と -1 が混ざった状態
(状態の重ね合わせ)
「+1/-1」が**決まっていない**。

測定器で測定すると
測定値は +1 だったり -1 であったり
確率的に決まる。

古典派: 飛んでくる粒子のスピンの成分は +1 か -1 のいずれかに決まっている。我々はそれを知らないだけ。測定でどちらであるかがわかる。



量子派: +1 と -1 の状態が混ざった状態というのがある。
測定で +1 か -1 のいずれかに確率的になる。



古典派

何故そんな不自然なことを考えないといけないのか。
我々が無知なだけであって実は +1 か -1 に決まっているのではないか。

量子派

いやいや、そうではない。
波動性による「重ね合わせ」や、それに伴う干渉現象があって、
現象を矛盾なく説明するには、このように記述せざるを得ない。

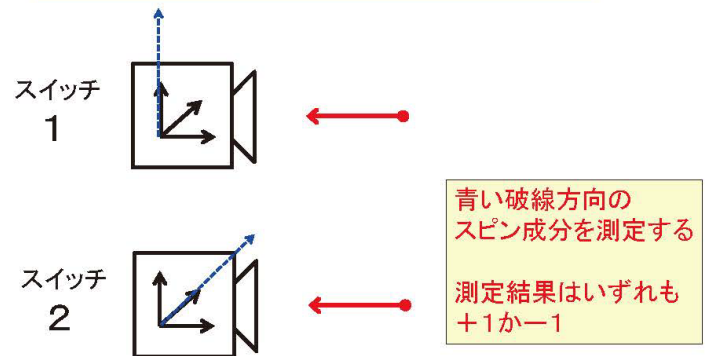
古典派

量子論は間違っていないが未完成なのではないか。

なまくら派

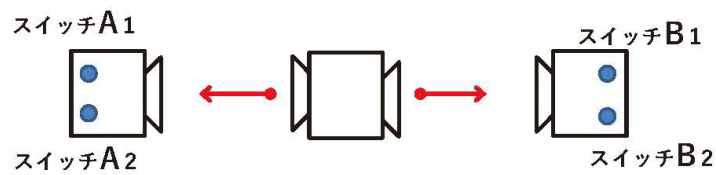
自然観の問題なのか？ 白黒をつけられる問題なのか？
大多数は「まあ、量子論で正しく予測ができるのだから
これ以上詮索しないでよいのではないか」であった。

測定器で2つの異なる測定 of どちらかを行う
(スイッチの切り替え)



Bell-CHSH不等式の状況設定

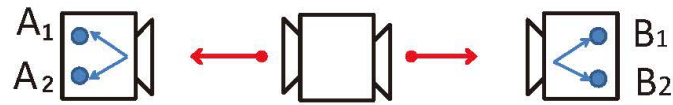
2個の電子を左右に打ち出し、離れた2地点A,Bで
スイッチのどちらかを勝手に選び測定を行う。



スイッチをどう設定するかは任意なので、測定結果
は下の表のようになる。

	1	2	3	4	5	6	7	8	9		N
A ₁	+1			-1	-1	+1		-1		...	+1
A ₂		-1	+1				-1		+1	...	
B ₁				-1			+1			...	
B ₂	-1	+1	-1		+1	+1		-1	-1	...	+1

第 1 番目の測定は、スイッチA₁,B₂であったが、粒子には
A₂とB₁の値も書き込まれているハズ。(常識的には)



左右に射出された粒子には、下記のような数値が書き込まれていて、それが測定値になるはず（常識）。



$[A_1=1, A_2=1]$
 $[A_1=1, A_2=-1]$
 $[A_1=-1, A_2=1]$
 $[A_1=-1, A_2=-1]$



$[B_1=1, B_2=1]$
 $[B_1=1, B_2=-1]$
 $[B_1=-1, B_2=1]$
 $[B_1=-1, B_2=-1]$

測定値のすべての場合の表を作ってみる。

λ はそれらを区別する番号。

$A_1B_1+A_2B_1-A_1B_2+A_2B_2$ という量を考える

→どんな場合でもその値は ± 2

λ	A_1	A_2	B_1	B_2	$A_1B_1+A_2B_1-A_1B_2+A_2B_2$
1	1	1	1	1	$=1+1-1+1=2$
2	1	1	1	-1	$=1+1-(-1)-1=2$
3	1	1	-1	1	-2
4	1	1	-1	-1	-2
5	1	-1	1	1	-2
6	1	-1	1	-1	2
7	1	-1	-1	1	-2
8	1	-1	-1	-1	2
9	-1	1	1	1	2
10	-1	1	1	-1	-2
11	-1	1	-1	1	2
12	-1	1	-1	-1	-2
13	-1	-1	1	1	-2
14	-1	-1	1	-1	-2
15	-1	-1	-1	1	2
16	-1	-1	-1	-1	2

測定器のスイッチを切り替えながら実験を行う

	1	2	3	4	5	6	7	8	9		N
A_1	+1			-1	-1	+1		-1		...	+1
A_2		-1	+1				-1		+1	...	
B_1				-1			+1			...	
B_2	-1	+1	-1		+1	+1		-1	-1	...	+1

A_1B_1 (青色)の平均値を求める → $\langle A_1B_1 \rangle$

A_2B_1 (水色)の平均値を求める → $\langle A_2B_1 \rangle$

A_1B_2 (赤色)の平均値を求める → $\langle A_1B_2 \rangle$

A_2B_2 (緑色)の平均値を求める → $\langle A_2B_2 \rangle$

$$C = \langle A_1B_1 \rangle + \langle A_2B_1 \rangle - \langle A_1B_2 \rangle + \langle A_2B_2 \rangle$$

$$C = \langle A_1 B_1 \rangle + \langle A_2 B_1 \rangle - \langle A_1 B_2 \rangle + \langle A_2 B_2 \rangle$$

$$\langle A_i B_j \rangle = \sum_{\lambda} A_i(\lambda) B_j(\lambda) \rho(\lambda)$$

$\rho(\lambda)$: λ になる頻度。

i, j のとり方とは無関係

$$C = \langle A_1 B_1 \rangle + \langle A_2 B_1 \rangle - \langle A_1 B_2 \rangle + \langle A_2 B_2 \rangle$$

$$= [+2 \text{ と } -2 \text{ の加重平均}]$$

$$\rightarrow |C| \leq 2 \quad (\text{Bell-CHSH不等式})$$

- ・ 2 電子が射出される場合に、各回ごとに λ が決まっている。
 - ・ λ の値が決まると、電子のスピンの状態はその時点で確定。
 $A_1, A_2, B_1, B_2 = \pm 1$ いずれかが (知らないが) 決まっていて、電子にその値が書き込まれている。
 - ・ その確定値を測定器が測っている。
 - ・ λ の値は何かの規則で変化してもよいし、ランダムでもよい。
- これが常識的な考え方

このことから、

$$-2 \leq C \leq 2$$

(Bell-CHSH不等式)

これが成り立たないということはあるか??

量子論ではベルの不等式が破れる。

計算してみると。

下記のスピン波動関数を用いて
(エンタングル状態)

$$|\Phi\rangle = (|z+\rangle_1 |z-\rangle_2 - |z-\rangle_1 |z+\rangle_2) / \sqrt{2}$$

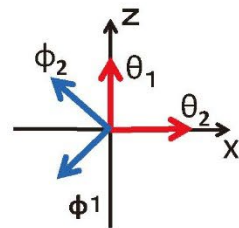
$$\langle \hat{A}_i \hat{B}_j \rangle = \langle \Phi | \hat{A}_i \hat{B}_j | \Phi \rangle \quad i, j = 1, 2$$

を計算する

$$|\Phi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} [|z+\rangle_1 |z-\rangle_2 - |z-\rangle_1 |z+\rangle_2]$$

$$\hat{A}_i = \sin \theta_i \sigma_x^{(1)} + \cos \theta_i \sigma_z^{(1)} \quad i = 1, 2$$

$$\hat{B}_j = \sin \phi_j \sigma_x^{(2)} + \cos \phi_j \sigma_z^{(2)} \quad j = 1, 2$$



$$\sigma_x = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \quad \sigma_y = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix} \quad \sigma_z = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$

$$|\Phi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} [|z+\rangle_1 |z-\rangle_2 - |z-\rangle_1 |z+\rangle_2]$$

$\hat{A}_i \hat{B}_j$ の測定を繰り返したときの期待値は

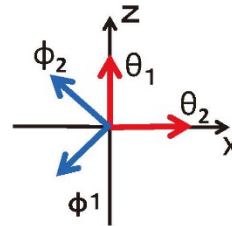
$$\langle \hat{A}_i \hat{B}_j \rangle = \langle \Phi | \hat{A}_i \hat{B}_j | \Phi \rangle$$

$$|z+\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad |z-\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$\hat{A}_i = \begin{pmatrix} \cos \theta_i & \sin \theta_i \\ \sin \theta_i & -\cos \theta_i \end{pmatrix} \quad \hat{B}_j = \begin{pmatrix} \cos \phi_j & \sin \phi_j \\ \sin \phi_j & -\cos \phi_j \end{pmatrix}$$

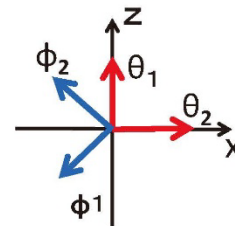
計算結果は

$$\begin{aligned} C &= \langle A_1 B_1 \rangle + \langle A_2 B_1 \rangle - \langle A_1 B_2 \rangle + \langle A_2 B_2 \rangle \\ &= -\cos(\theta_1 - \phi_1) - \cos(\theta_2 - \phi_1) \\ &\quad + \cos(\theta_1 - \phi_2) - \cos(\theta_2 - \phi_2) \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} C &= \langle A_1 B_1 \rangle + \langle A_2 B_1 \rangle - \langle A_1 B_2 \rangle + \langle A_2 B_2 \rangle \\ &= -\cos(\theta_1 - \phi_1) - \cos(\theta_2 - \phi_1) \\ &\quad + \cos(\theta_1 - \phi_2) - \cos(\theta_2 - \phi_2) \end{aligned}$$

$$\theta_1 = 0, \quad \theta_2 = \frac{\pi}{2} \quad \phi_1 = \frac{5}{4}\pi \quad \phi_2 = \frac{7}{4}\pi$$



$$C = 2\sqrt{2} \quad \text{2を超える}$$

- ・実験ではベル不等式は（やはり）破れていた。
（アスペ：1980頃）
- ・エンタングルメントは量子世界では「ありふれた存在」
→多粒子を遠隔に置くと、奇妙さが際立つ
- ・ベル不等式の破れ
⇒ 自然観への衝撃は大きかった。（予想されたこととはいえ）
- ・ベル不等式の破れから量子論に加えるものは何もなかった。
しかし、エンタングルメント状態の応用など、新たなアイデアへの刺激となった。
量子テレポーテーション、量子コンピューティング、...

END

(2) ペロブスカイト太陽電池の現状

ペロブスカイト太陽電池 補足

ペロブスカイト結晶が有機溶剤に溶ける
→ その液体を「塗る」「印刷する」

ガラス基板型
フィルム基板型 → シリコン型に比べて1/10の重量

発電層の重量比 ヨウ素60%
 鉛 30%
その他有機部分 10% 以下

「ヨウ素」の生産量は日本は世界で2位(シェア3割)

政府の目標
発電能力 20GW(原発20基相当)(2040年)

積水化学の目標
屋外耐久性 現在10年相当
発電効率 現在15% (2030年に18%)

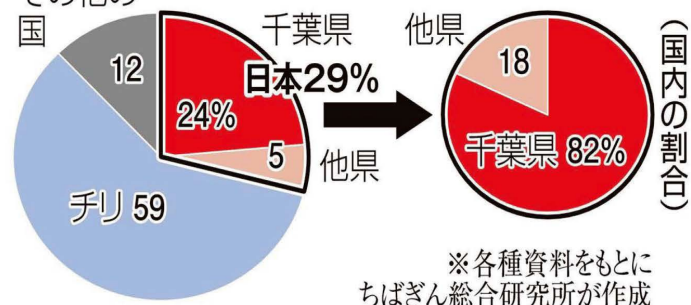
1MWのシリコン太陽電池を作るのに
原料シリコン~2トン
100万円~600万トン

1MWのペロブスカイト太陽電池
16kgのヨウ素 約15万円

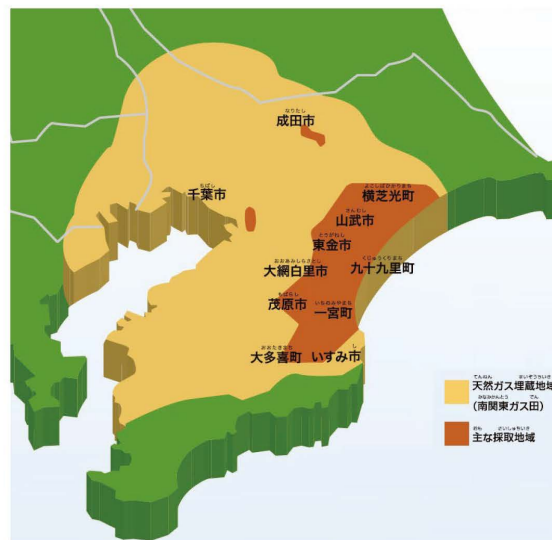
ヨウ素

世界のヨウ素生産国(平成29年)

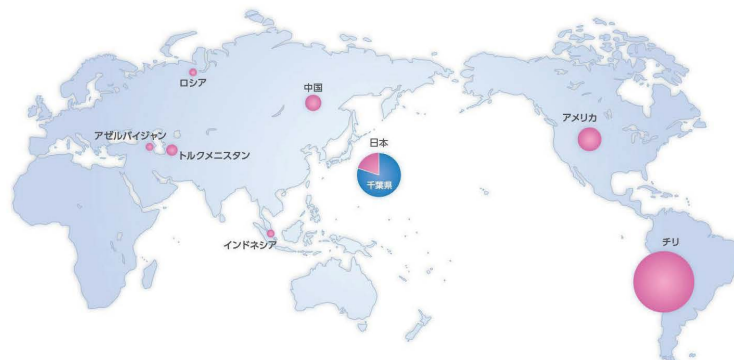
その他の
国



※各種資料をもとに
ちばぎん総合研究所が作成



主要なヨウ素生産国



(3) 今後の日程

第 157 回 7 月 27 日 (日) 13 時 ～ 寺川 雅嗣 様

HP <http://www.cis-laboratories.co.jp/index.html>

以上

2025-7-1 文責 山本洋一