

2025年6月6日

「学術フロンティア講義」
2022年 量子情報科学

素粒子物理国際研究センター
寺師弘二

Nobel Prize in Physics 2022

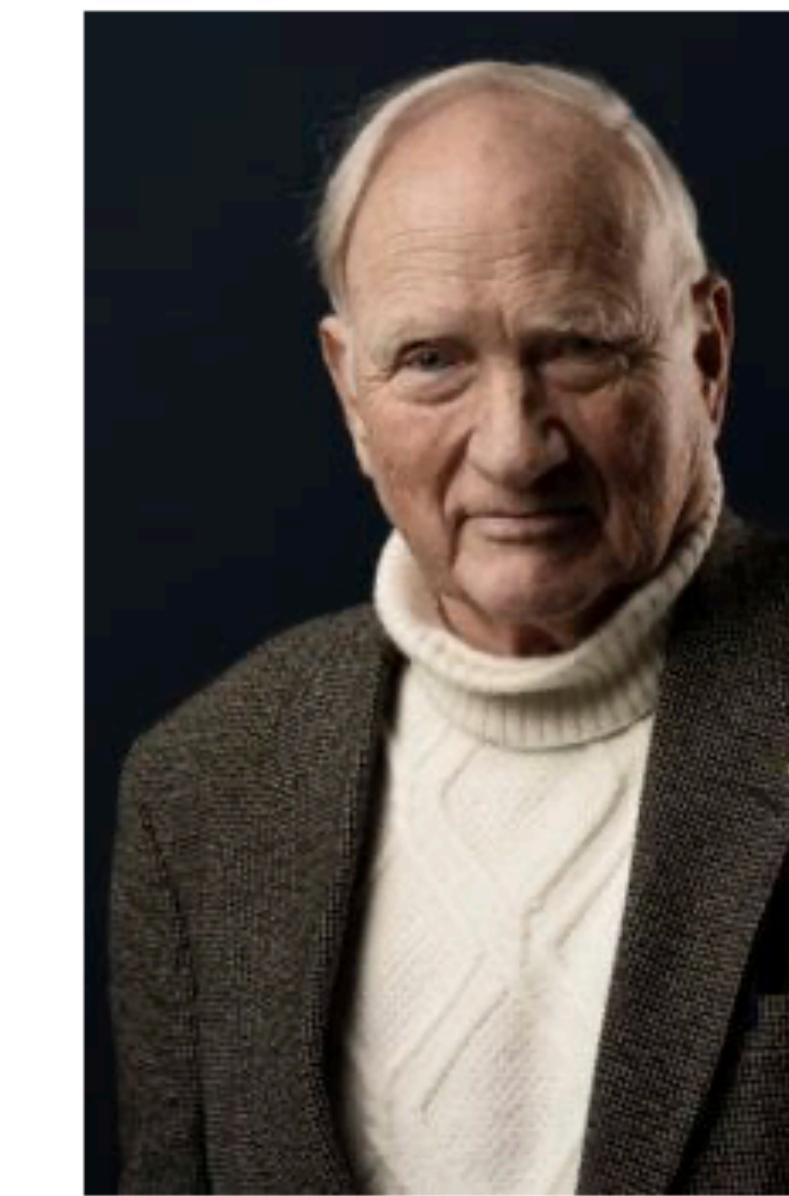


© Nobel Prize Outreach. Photo:

Stefan Bladh

Alain Aspect

Prize share: 1/3



© Nobel Prize Outreach. Photo:

Stefan Bladh

John F. Clauser

Prize share: 1/3



© Nobel Prize Outreach. Photo:

Stefan Bladh

Anton Zeilinger

Prize share: 1/3

The Nobel Prize in Physics 2022 was awarded jointly to Alain Aspect, John F. Clauser and Anton Zeilinger "for experiments with entangled photons establishing the violation of Bell inequalities and pioneering quantum information science"

量子とは何か？

「量子」 = ある量の最小単位

例) 光のエネルギーの最小単位 = 光子

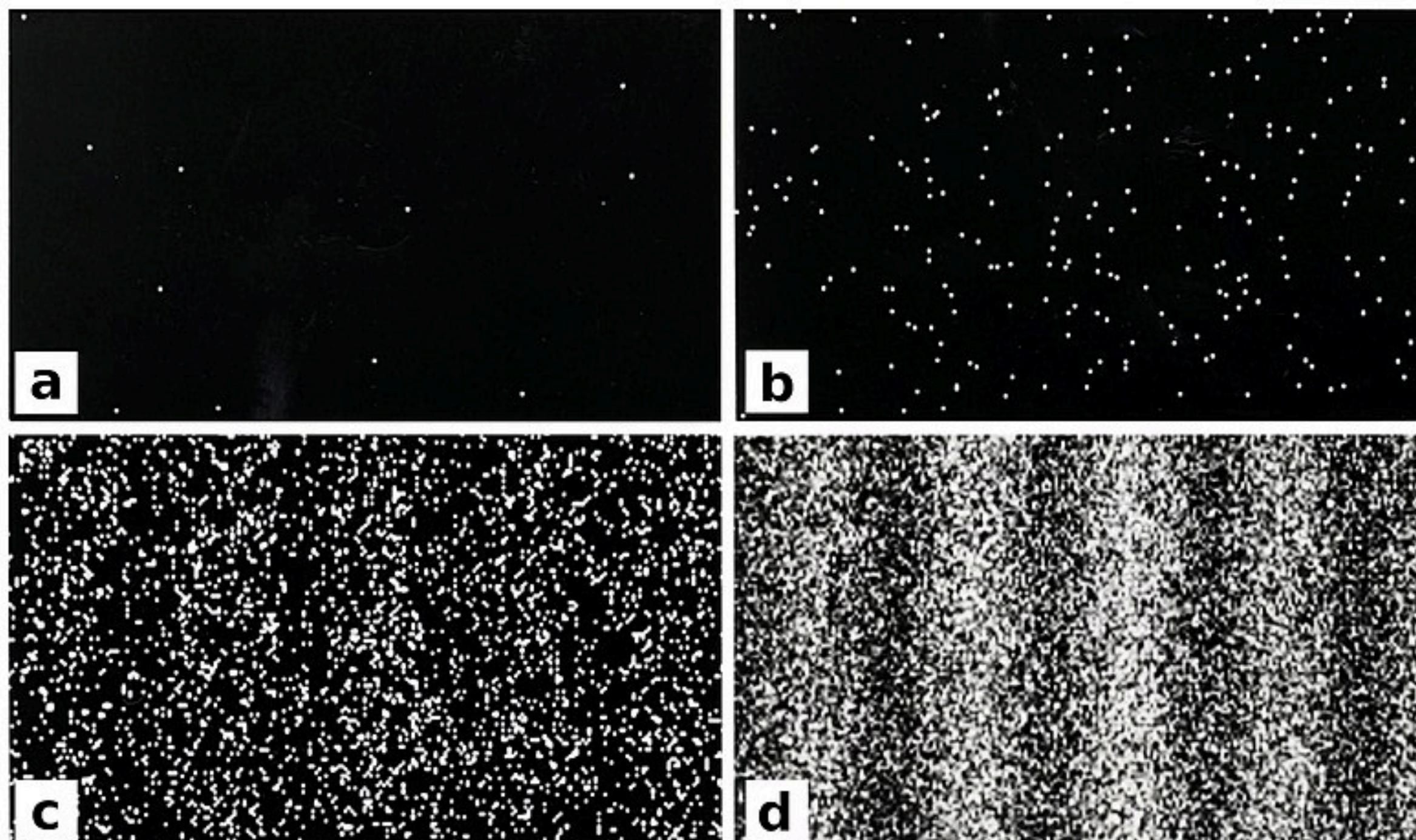
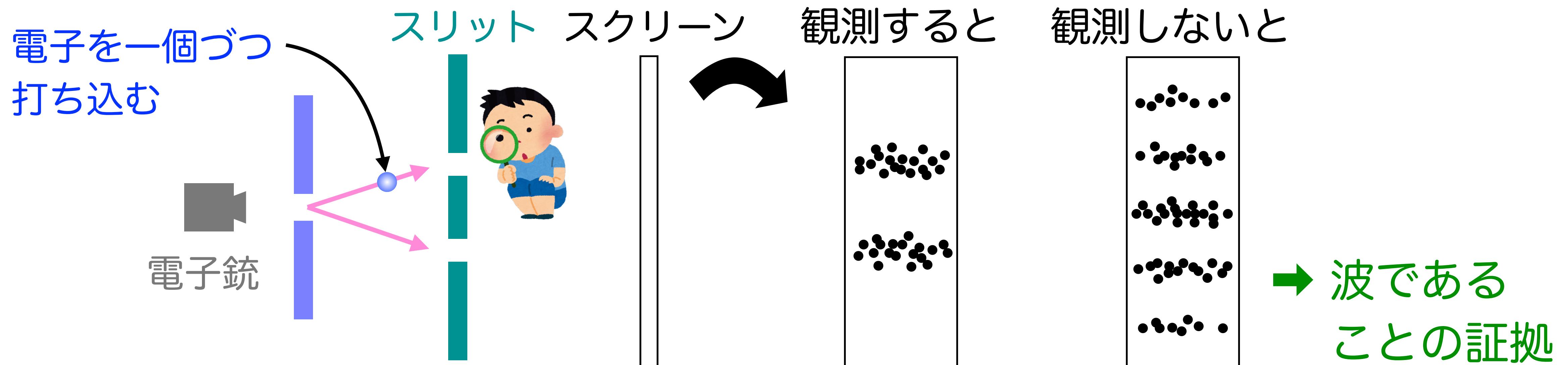
光 = 電磁場の変化として空間を伝わっていく電磁波

→ 波と粒子の両方の性質がある

光の最小単位 (= 光子) の数が少ないと粒子の性質が見えやすくなるが、波の性質も合わせ持っている

→ その特徴がよく分かるのが「2重スリット実験」

2重スリット実験



個々の電子は粒々だが、測定前は波の性質も持つ

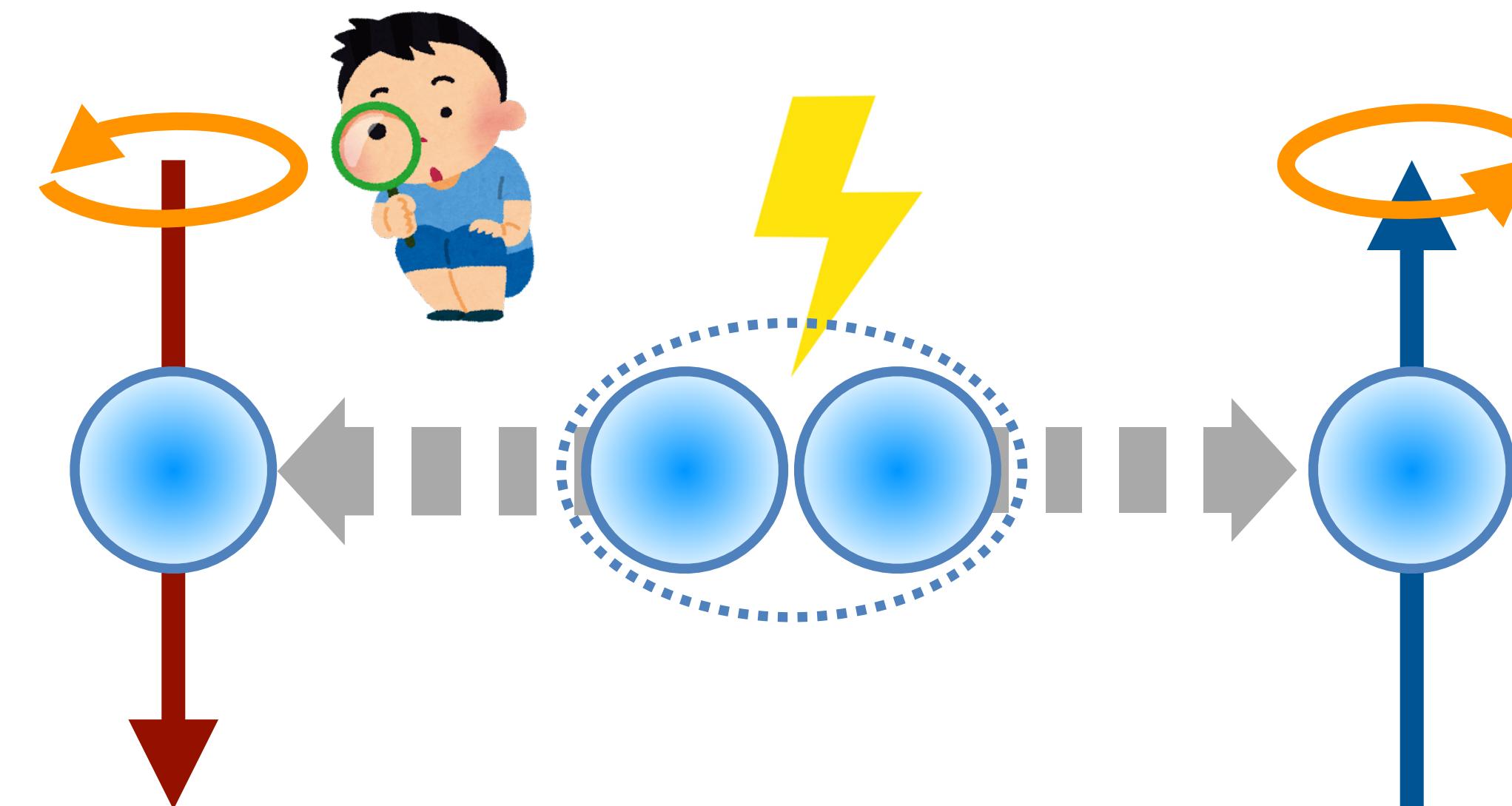
- ▶ 重ね合わせを作ることが可能
- ▶ 波の干渉によって、干渉縞ができる
- ▶ 測定すると、粒子として観測される

量子もつれ

通常の（マクロな）物質にはない、量子特有の性質

➡ 「エンタングルメント」と呼ばれる

光による電子の対生成を考えてみると



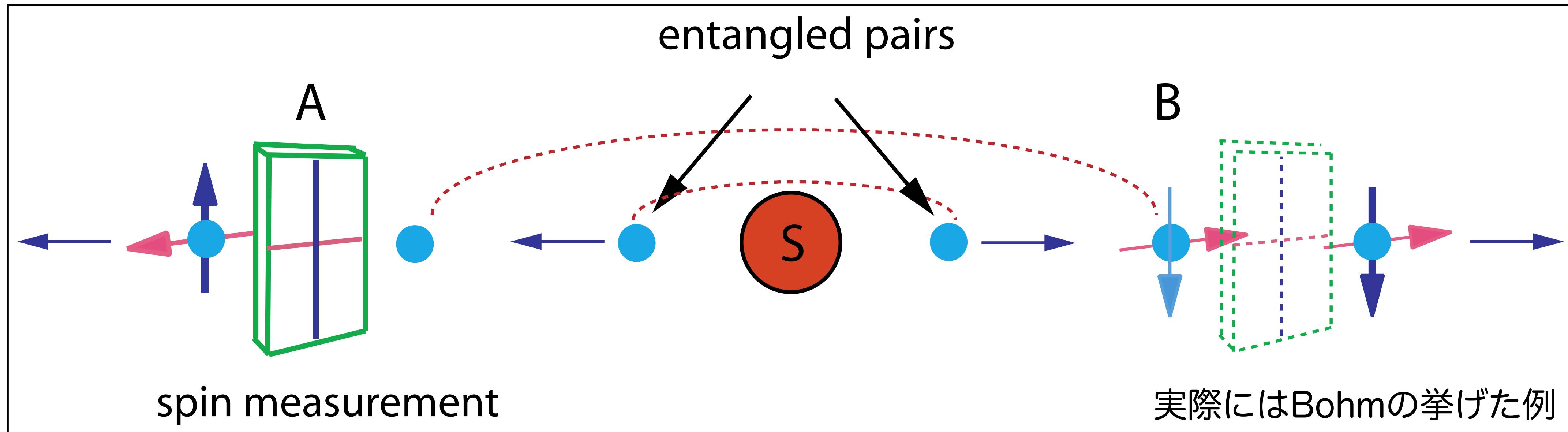
二つの電子はエンタングルした状態にある

一方の電子のスピン（“自転”による角運動量）を測定すると、
他方の電子のスピンが決まる

EPR相関

Einstein, Podolsky, Rosenの思考実験 (1935年)

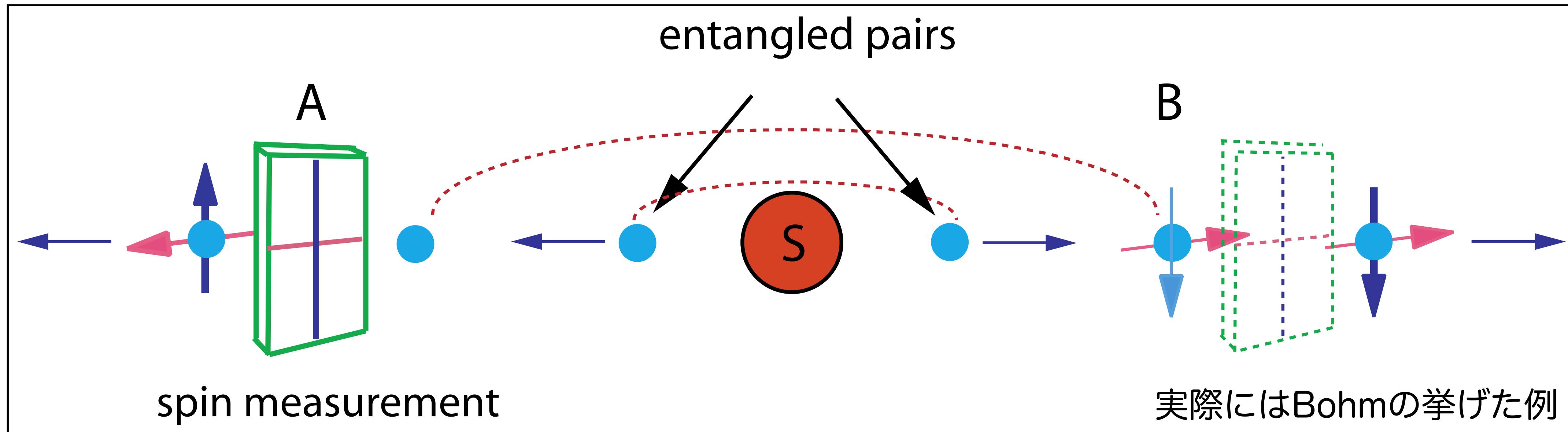
エンタングルした粒子対のそれぞれの粒子が反対方向に飛んでいく



EPR相関

Einstein, Podolsky, Rosenの思考実験 (1935年)

エンタングルした粒子対のそれぞれの粒子が反対方向に飛んでいく



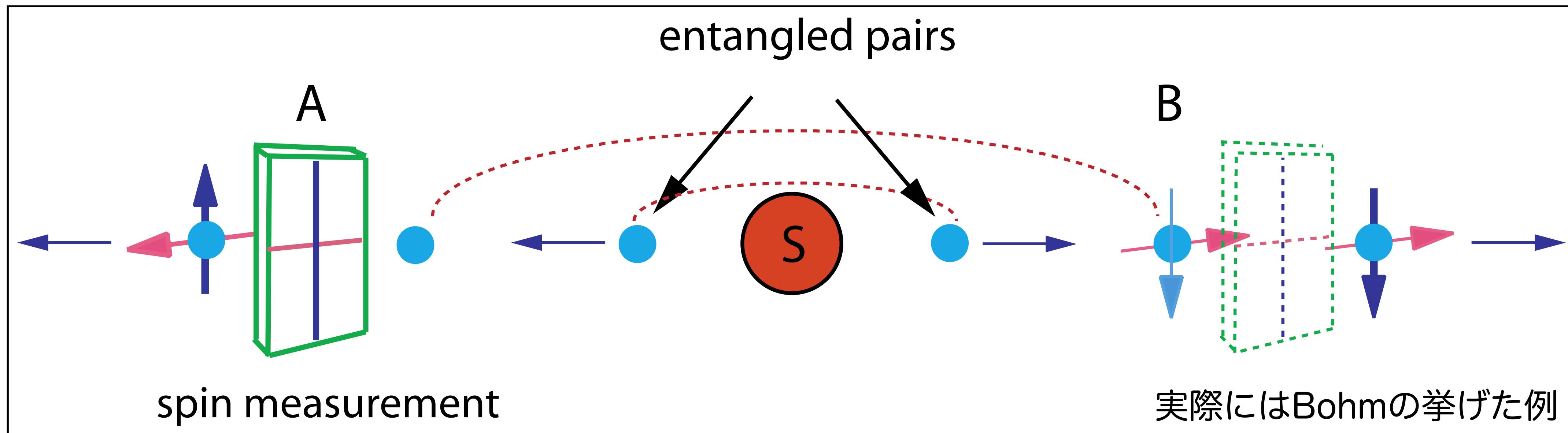
Aが z 方向 (青線) でスピンを測定し、例えばスピン↑という結果を得る

→ Bが z 方向で測定すると、結果は100%の確率でスピン↓

EPR相関

Einstein, Podolsky, Rosenの思考実験 (1935年)

エンタングルした粒子対のそれぞれの粒子が反対方向に飛んでいく



Aが z 方向（青線）でスピンを測定し、例えばスピン↑という結果を得る

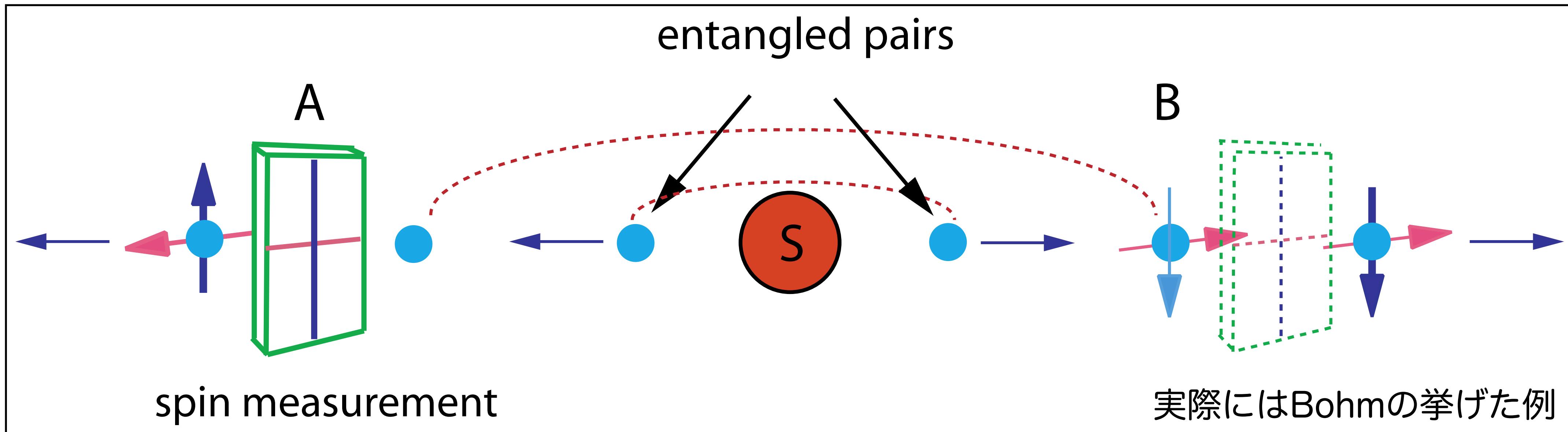
→ Bが z 方向で測定すると、結果は100%の確率でスピン↓

エンタングルした粒子対の状態 $|\psi_-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (| \uparrow \downarrow \rangle - | \downarrow \uparrow \rangle)$

EPR相関

Einstein, Podolsky, Rosenの思考実験 (1935年)

エンタングルした粒子対のそれぞれの粒子が反対方向に飛んでいく



Aが z 方向 (青線) でスピンを測定し、例えばスピン↑という結果を得る

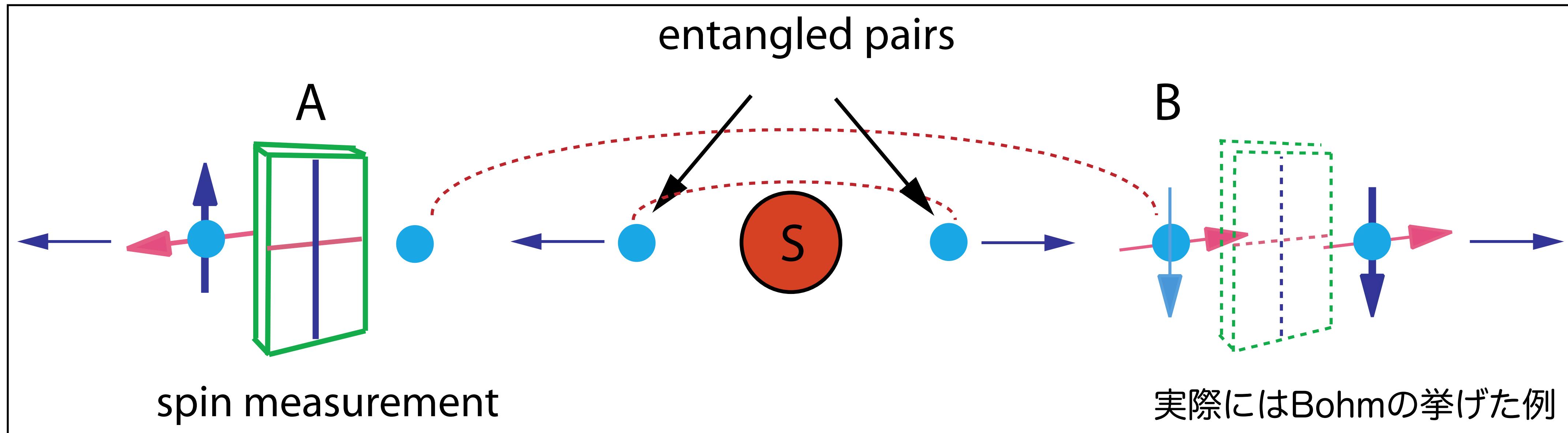
→ Bが z 方向で測定すると、結果は100%の確率でスpin↓

Bが測定しなくても、Bの z 方向の測定結果を予言できる → 物理的な実在

EPR相関

Einstein, Podolsky, Rosenの思考実験 (1935年)

エンタングルした粒子対のそれぞれの粒子が反対方向に飛んでいく

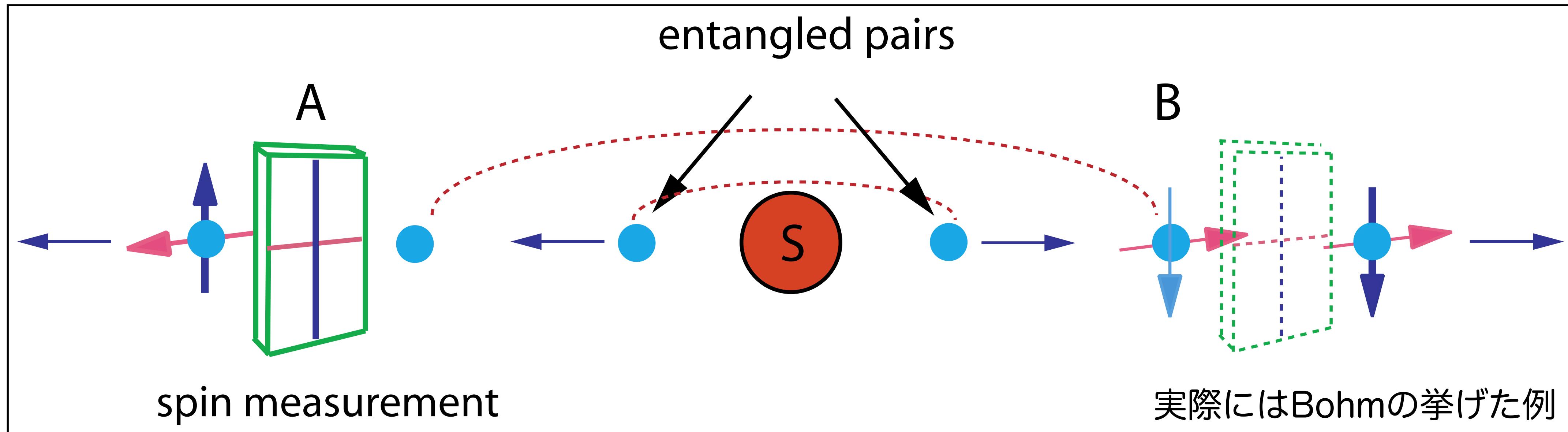


量子力学によれば、この状態は $|\psi_-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (| \rightarrow \leftarrow \rangle - | \leftarrow \rightarrow \rangle)$ とも書ける

EPR相関

Einstein, Podolsky, Rosenの思考実験 (1935年)

エンタングルした粒子対のそれぞれの粒子が反対方向に飛んでいく



量子力学によれば、この状態は $|\psi_-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (| \rightarrow \leftarrow \rangle - | \leftarrow \rightarrow \rangle)$ とも書ける

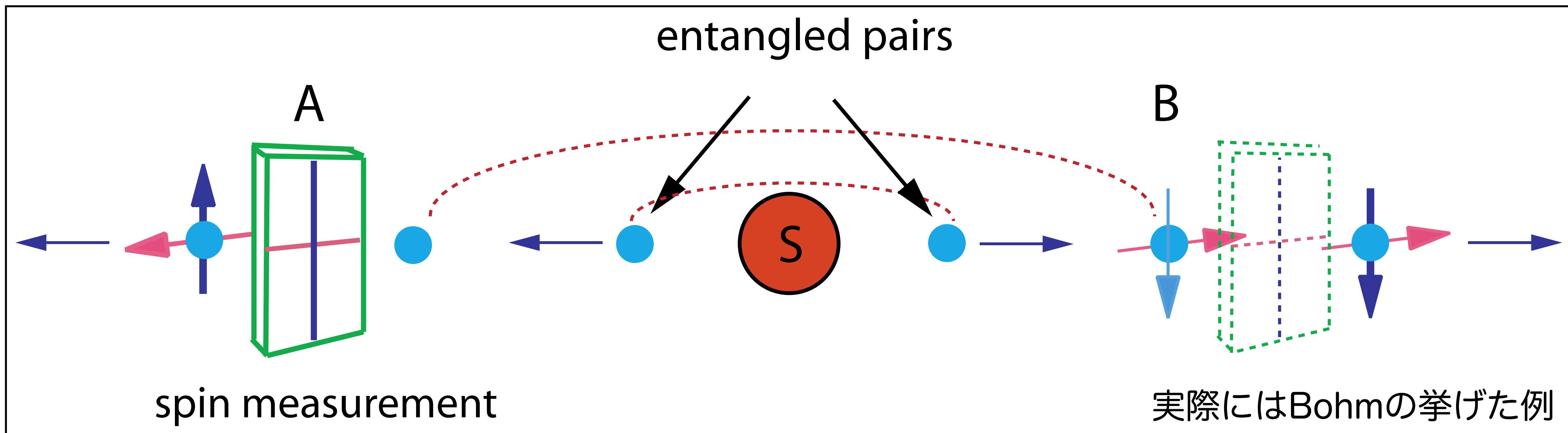
Aが x 方向（赤線）でスピンを測定し、例えばスピン \leftarrow という結果を得る

→ Bが x 方向で測定すると、結果は100%の確率でスピン \rightarrow

EPR相関

Einstein, Podolsky, Rosenの思考実験 (1935年)

エンタングルした粒子対のそれぞれの粒子が反対方向に飛んでいく



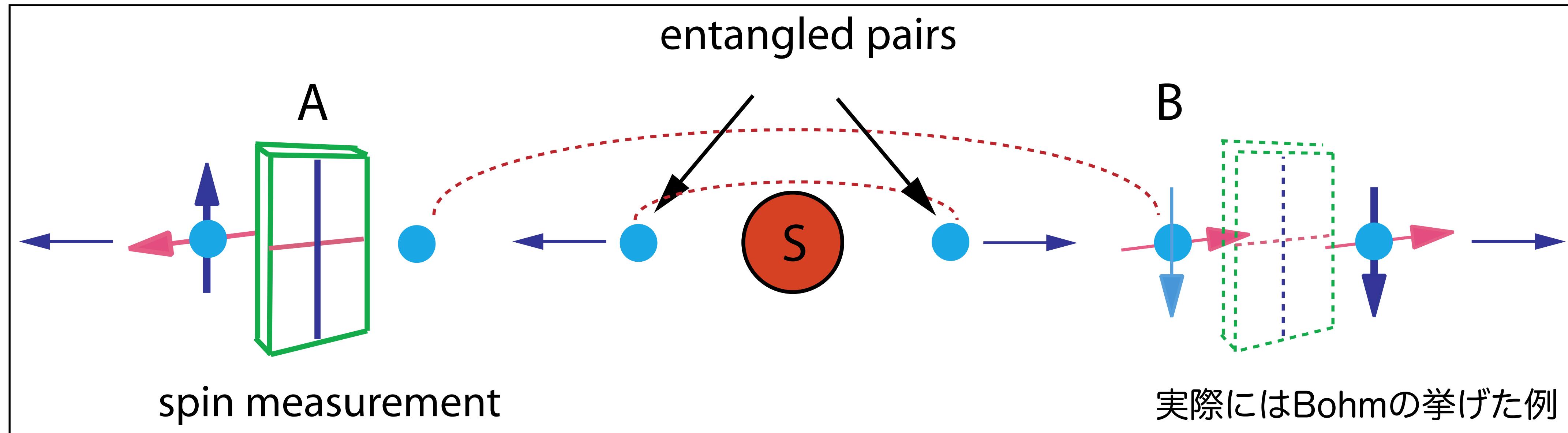
量子力学によれば、この状態は $|\psi_-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (| \rightarrow \leftarrow \rangle - | \leftarrow \rightarrow \rangle)$ とも書ける

Bの x 方向の測定結果もやはり予言できる → x 方向のスピンも物理的な実在

EPRパラドックス

Einstein, Podolsky, Rosenの思考実験 (1935年)

エンタングルした粒子対のそれぞれの粒子が反対方向に飛んでいく



一方で、量子力学ではスピン↑とスピン←の状態は同時に存在できない

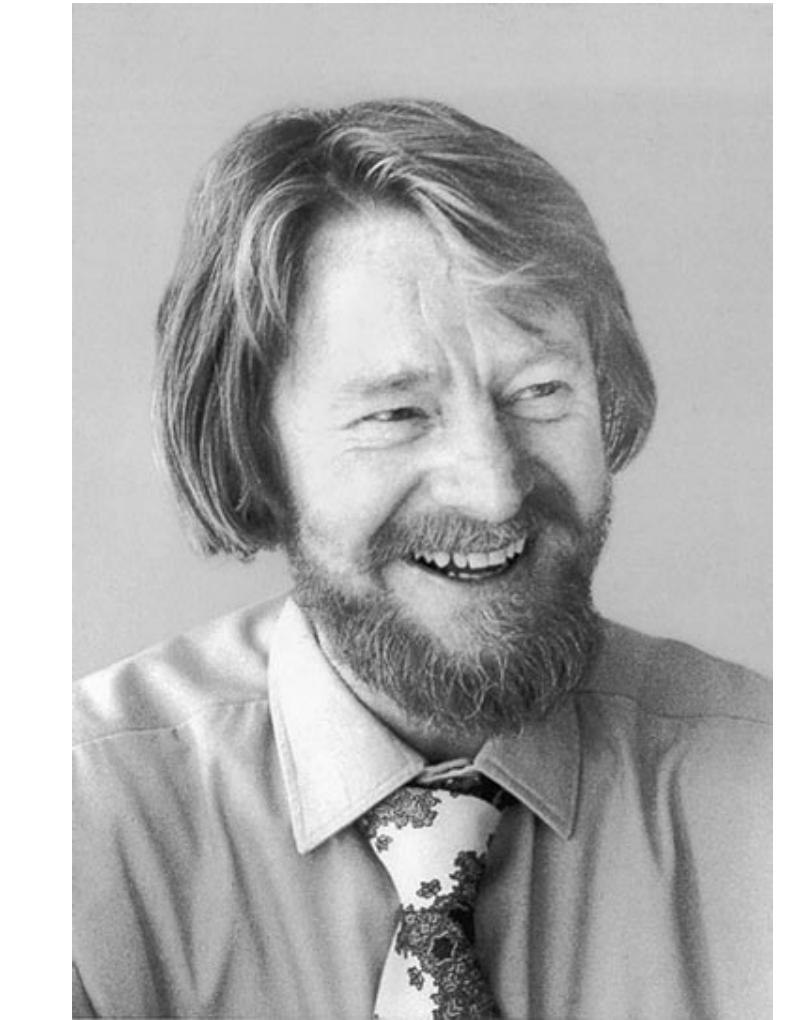
$$[\sigma_z, \sigma_x] = i\hbar\sigma_y$$

スピン↑と←が両方とも物理的な実在であるとは言えない → パラドックス!!

Aの測定がBに影響を及ぼさないという「局所性」を仮定している

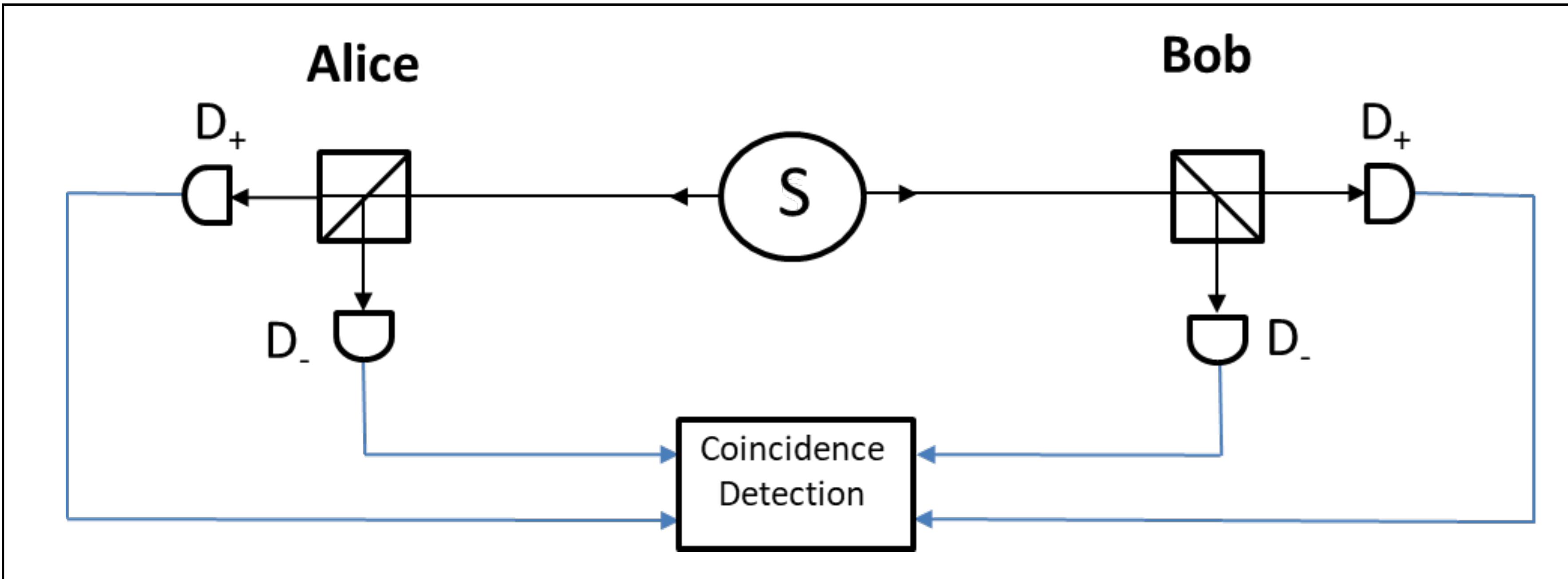
Bellの不等式

John Bellによる量子力学の局所実在性の検証（1964年）



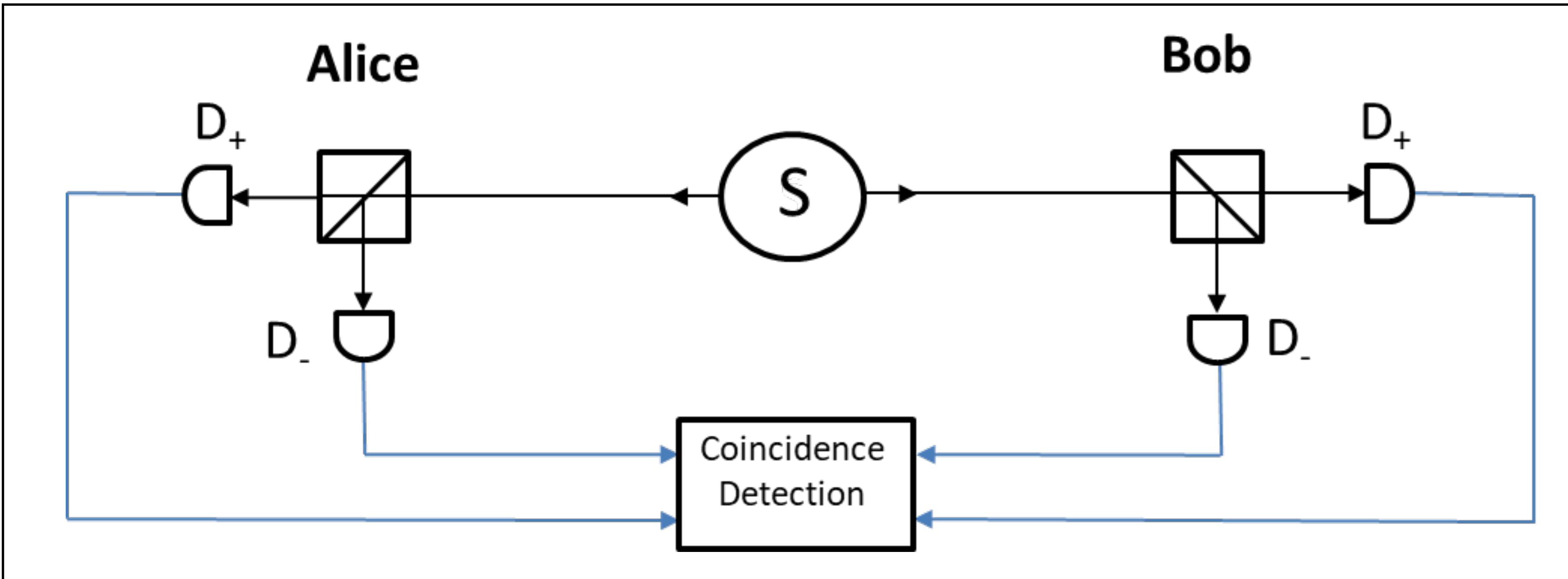
- ▶ Bellの不等式として提唱されたが、実験での検証が難しかった
- ▶ 1969年のClauser, Horne, Shimony, Holtによる提案（CHSH不等式）をBellの不等式と呼ぶことも多い

Bellの不等式



Aliceがスピンを二つの方向（例えば a_1 と a_2 ）で測定する Bobも同様（ b_1 と b_2 ）
測定結果を $A_1 = \pm 1$ 、 $A_2 = \pm 1$ などとする

Bellの不等式



Aliceがスピンを二つの方向（例えば a_1 と a_2 ）で測定する Bobも同様（ b_1 と b_2 ）
測定結果を $A_1 = \pm 1$ 、 $A_2 = \pm 1$ などとする

測定が局所的で、かつスピンに物理的な実在性を仮定すると

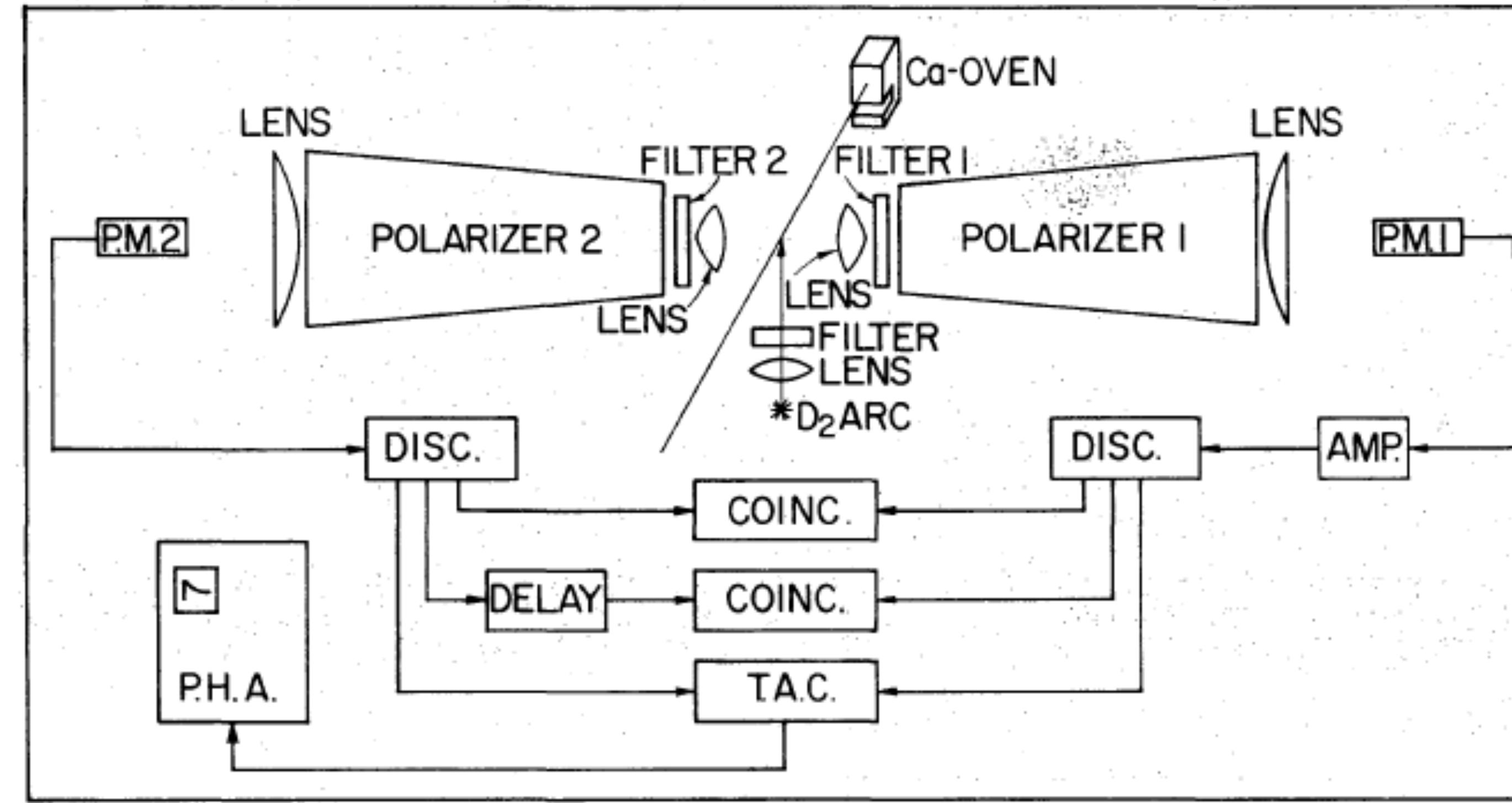
$$A_1B_1 + A_1B_2 + A_2B_1 - A_2B_2 = A_1(B_1 + B_2) + A_2(B_1 - B_2) = \pm 2$$

全体の平均を取ると
$$S = |E(a_1, b_1) + E(a_1, b_2) + E(a_2, b_1) - E(a_2, b_2)| \leq 2$$

→ CHSH不等式

Clauserの実験

Clauser, FreedmanによるCHSH不等式の検証（1972年）



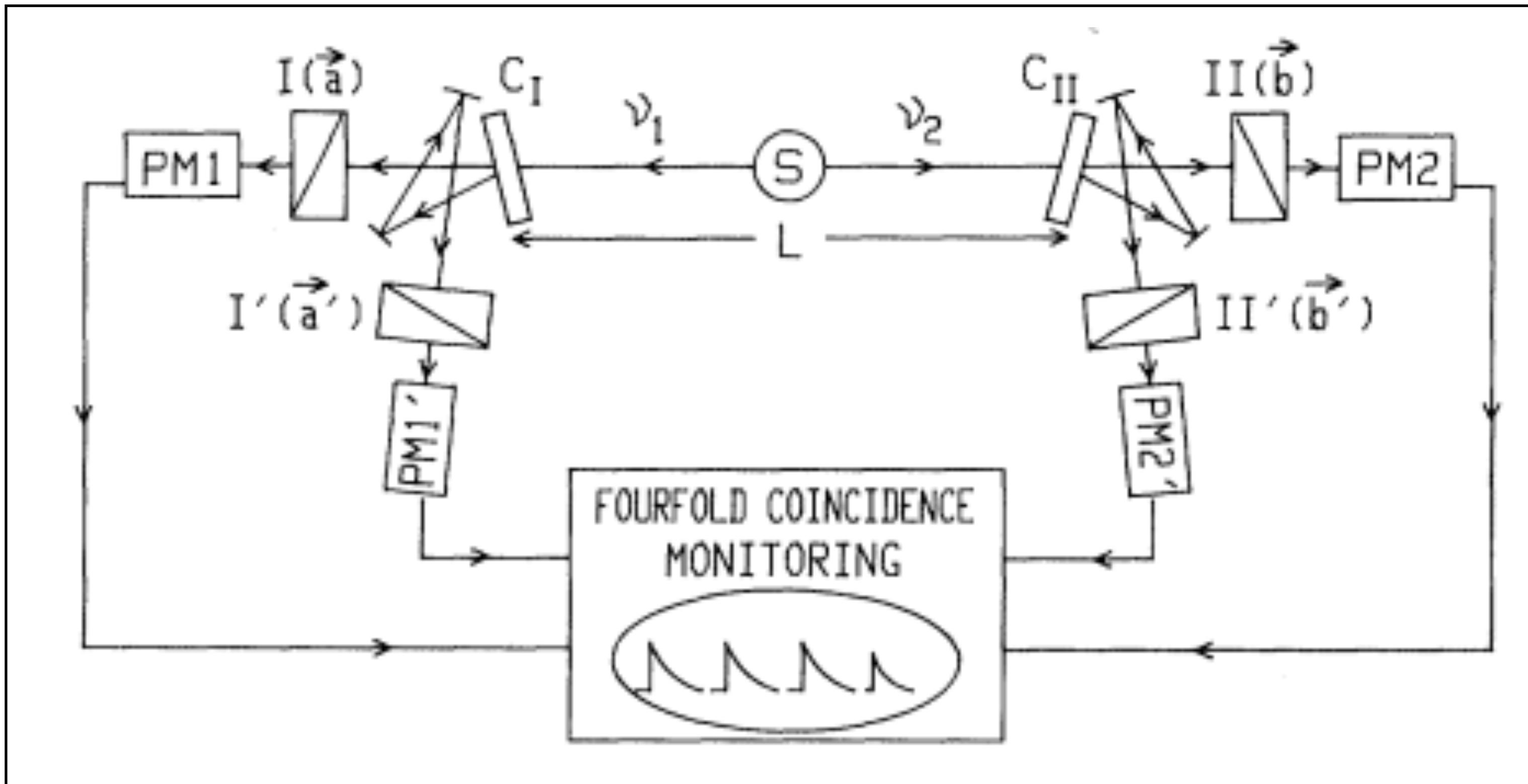
CHSH不等式の破れ ($S > 2$) を確認した

しかし、実験結果に二つの「抜け穴」の可能性が指摘された

- ▶ 局所性の抜け穴 (\rightarrow AとBの距離が近いことによる相関の可能性)
- ▶ 検出効率性の抜け穴 (\rightarrow データの偏りによる不等式成立の可能性)

Aspectの実験

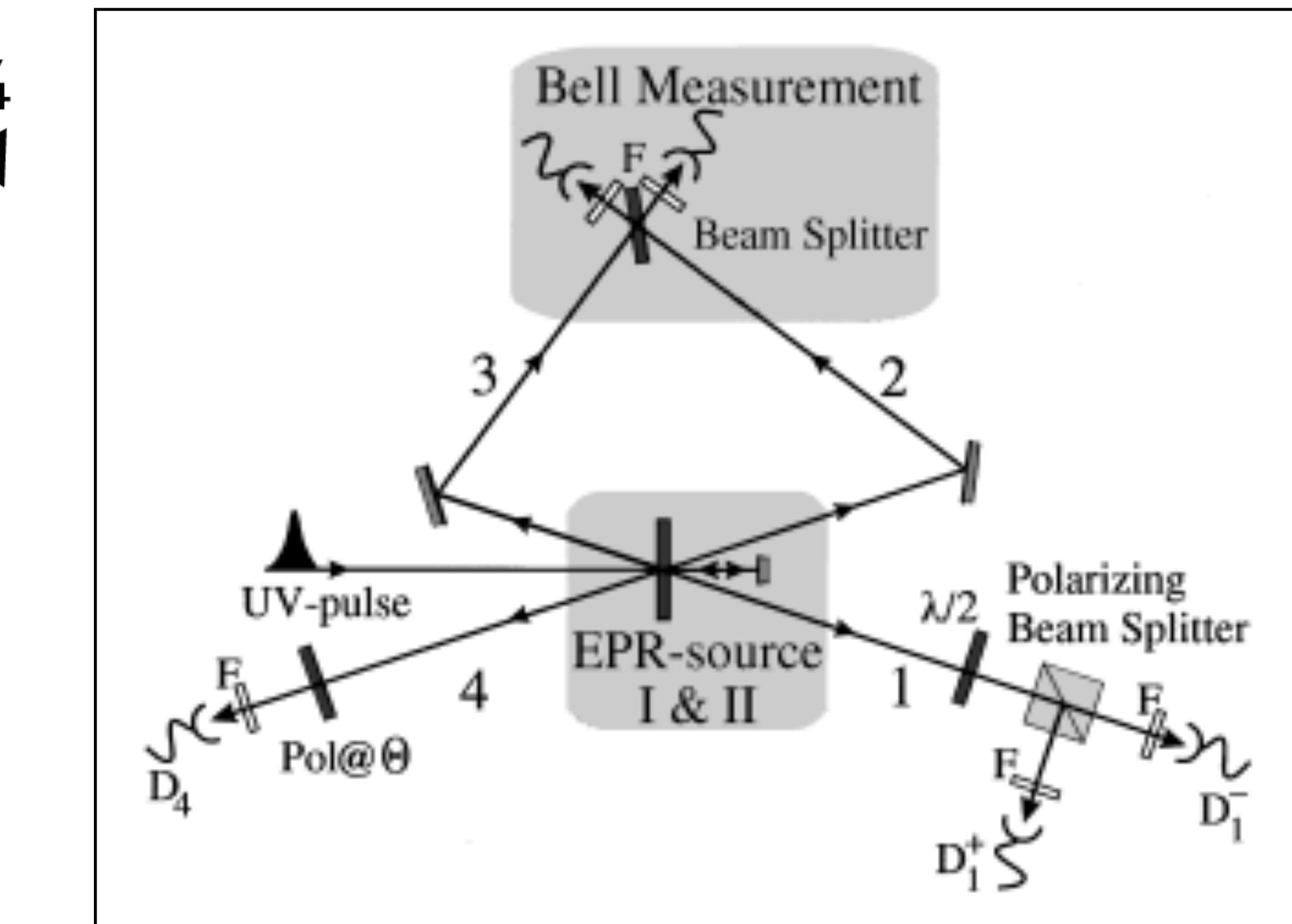
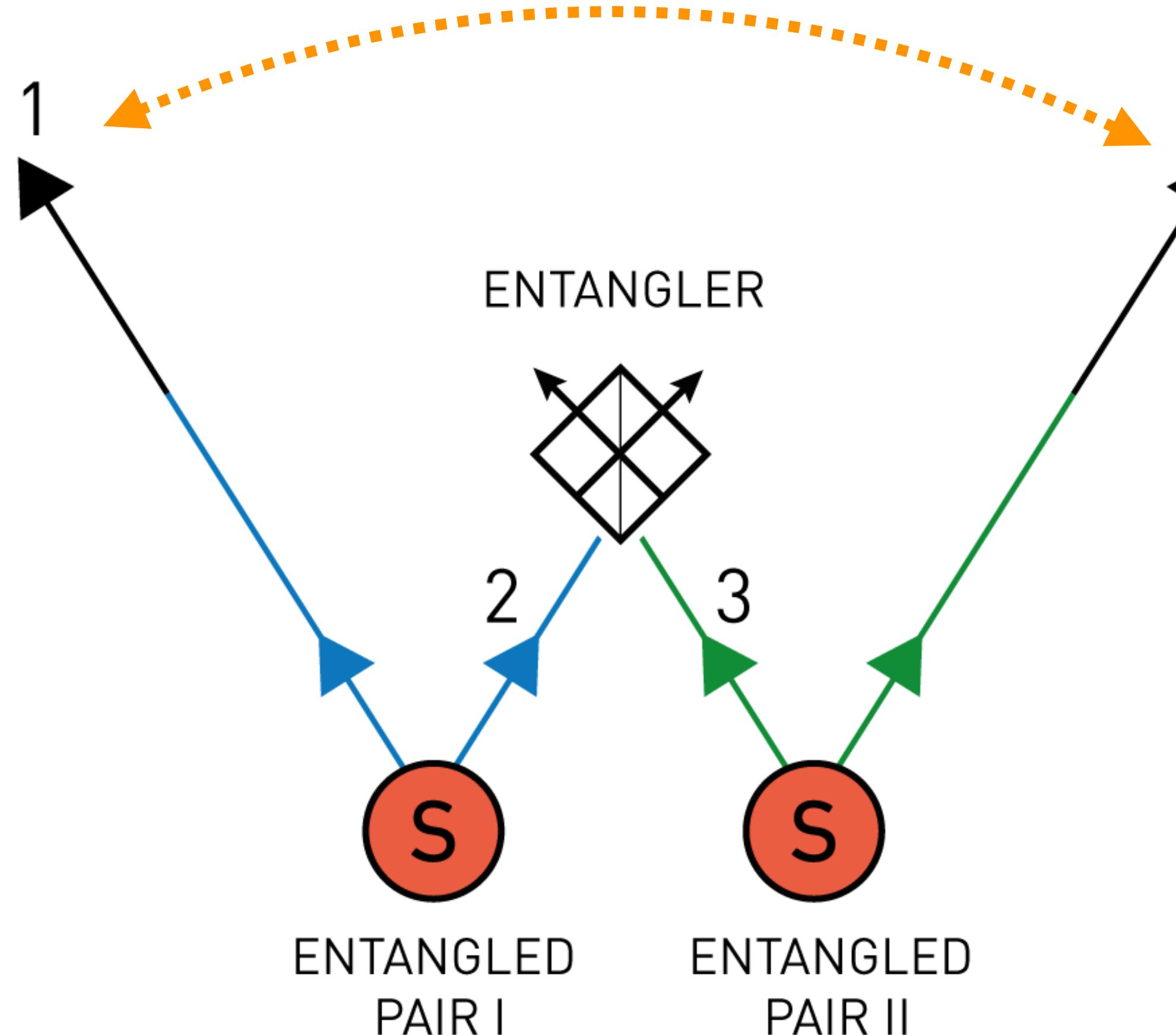
AspectらによるCHSH不等式の検証（1982年）



光子が到達する前に二つの方向（AliceはI, I'、BobはII, II'）にランダムに切り替えることで、局所性の抜け穴を塞いだ

Zeilingerの実験

Zeilingerらによるエンタングルメントの実験 (1998年)



エンタングルメントスワッピング

CHSH不等式の破れを「量子コンピュータ」で見てみる

CHSH不等式の破れの検証

CHSH不等式 =

2粒子系の測定に対して、一つの粒子の測定が他方に影響を及ぼさず
(局所性)、測定値を決める物理的な実在が存在すれば (実在性)

成り立つ不等式

「隠れた変数」理論とも呼ばれる

CHSH不等式の破れ

量子コンピュータでCHSH不等式が成り立たなければ

→ 量子力学に従って動いている (可能性がある)

量子を使って、どのように計算するのか？

計算の基本ユニット = 「ビット」

論理演算、シフト演算などで計算を行う

量子を使って、どのように計算するのか？

計算の基本ユニット = 「ビット」

論理演算、シフト演算などで計算を行う

古典ビット → 0と1 例えば 0100101110100110...

通常の計算機はこの方式

パソコン、スパコン、スマホなど = 古典コンピュータと総称

量子を使って、どのように計算するのか？

計算の基本ユニット = 「ビット」

論理演算、シフト演算などで計算を行う

古典ビット → 0と1 例えば 0100101110100110...

通常の計算機はこの方式

パソコン、スパコン、スマホなど = 古典コンピュータと総称

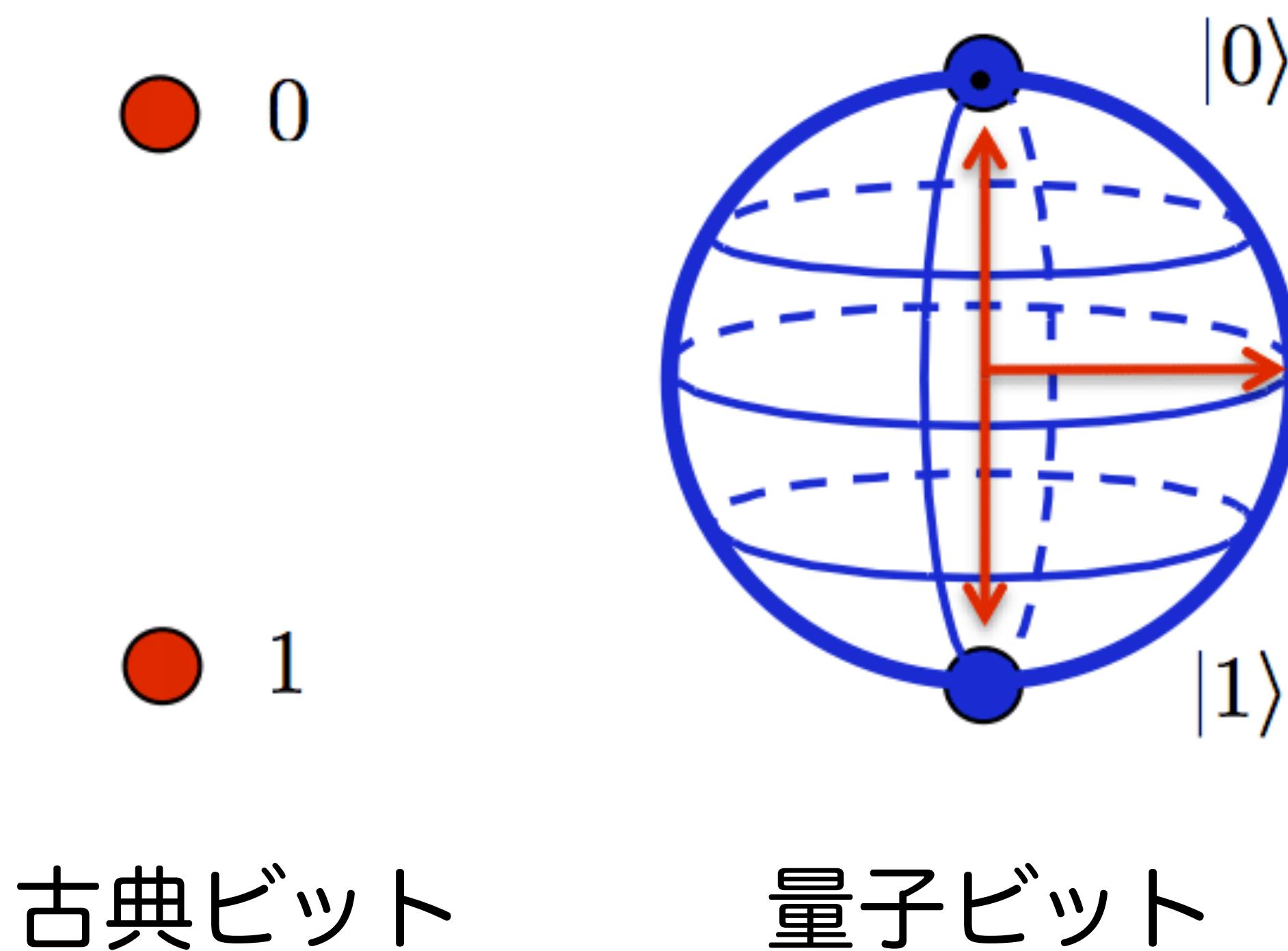
量子ビット → 0と1を表現でき、0でも1でもない状態も表現できる

量子コンピュータはこの方式

計算の基本ユニット

古典ビット → 0と1

量子ビット → 0と1を表現でき、0でも1でもない状態も表現できる

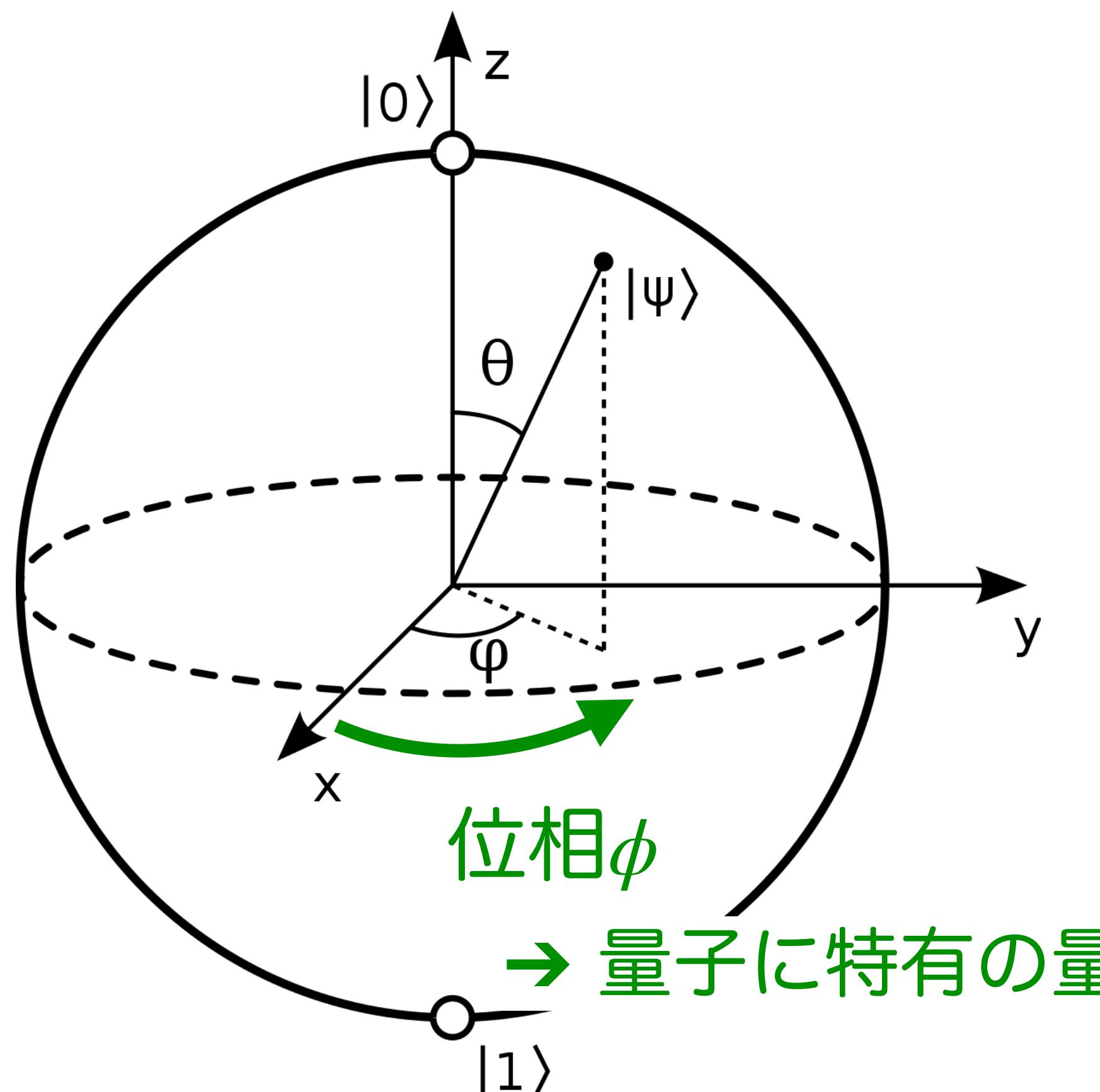


「0でも1でもない状態」の例

- ▶ 0と1が等しく重ね合わさっている状態
- ▶ 測定すると、0が50%、1が50%の確率で出てくる

量子ビット

0と1を表現でき、0でも1でもない状態も表現できる



1量子ビットの状態 $|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle = \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix}$

- α, β は複素数で、確率振幅と呼ばれる
- 状態 $|\psi\rangle$ を測定すると、確率 $|\alpha|^2$ で0、 $|\beta|^2$ で1を得る

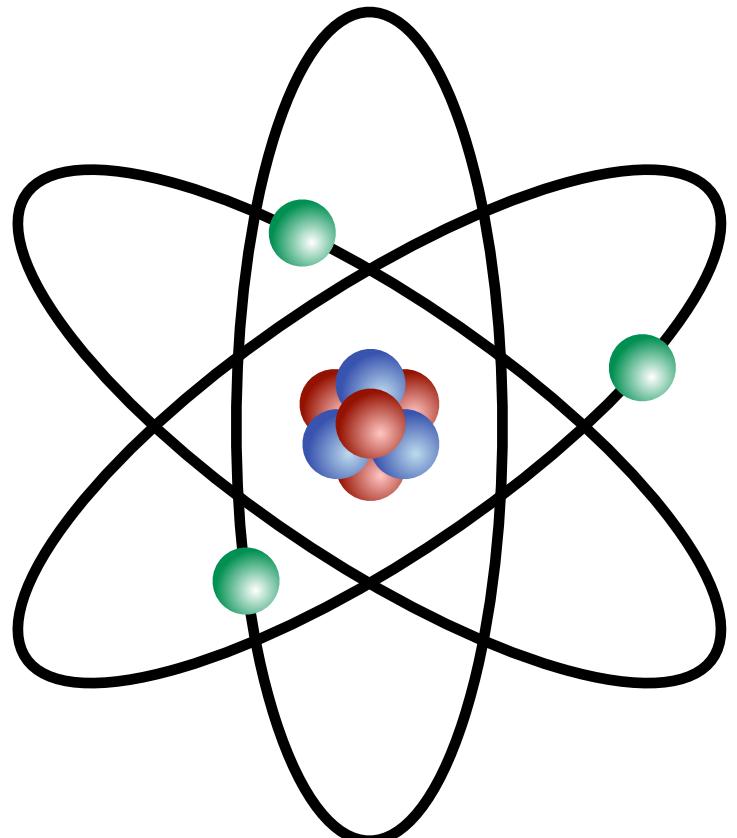
$$|\psi\rangle = e^{i\gamma}(\cos(\theta/2)|0\rangle + e^{i\phi}\sin(\theta/2)|1\rangle)$$

$|\cdot\rangle$ = ケットベクトルと呼ぶ

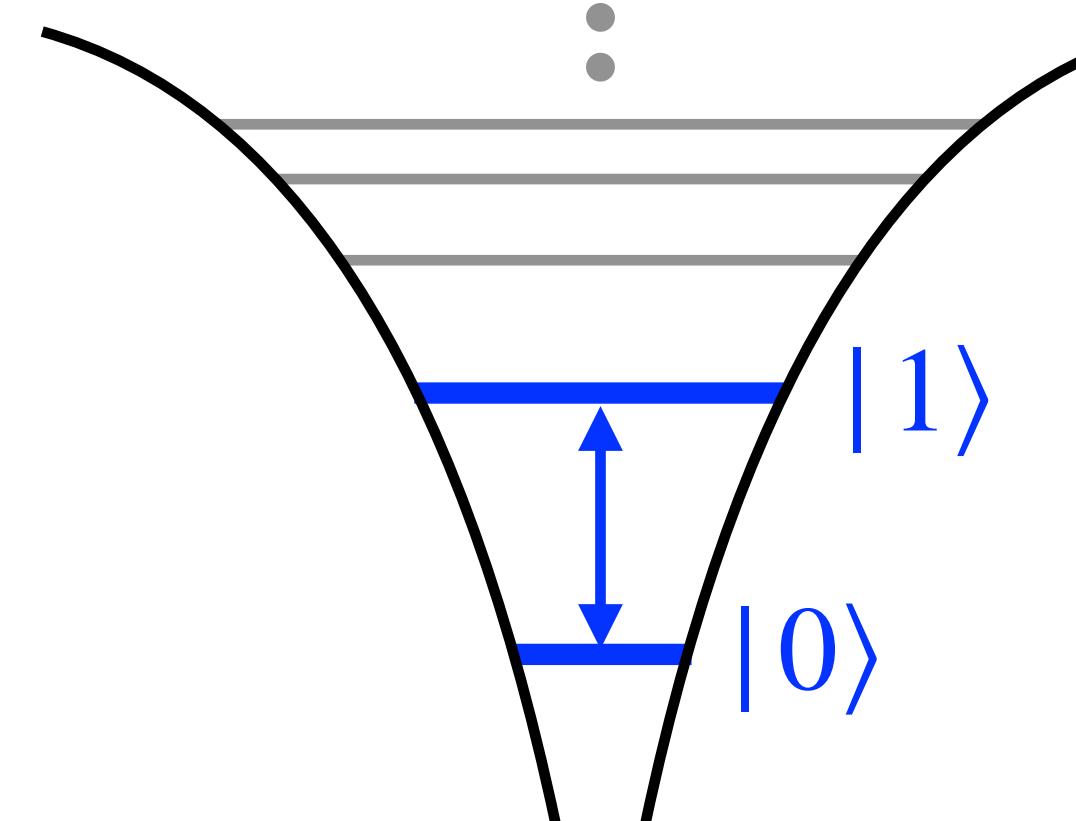
量子ビットの例 ①

中性原子

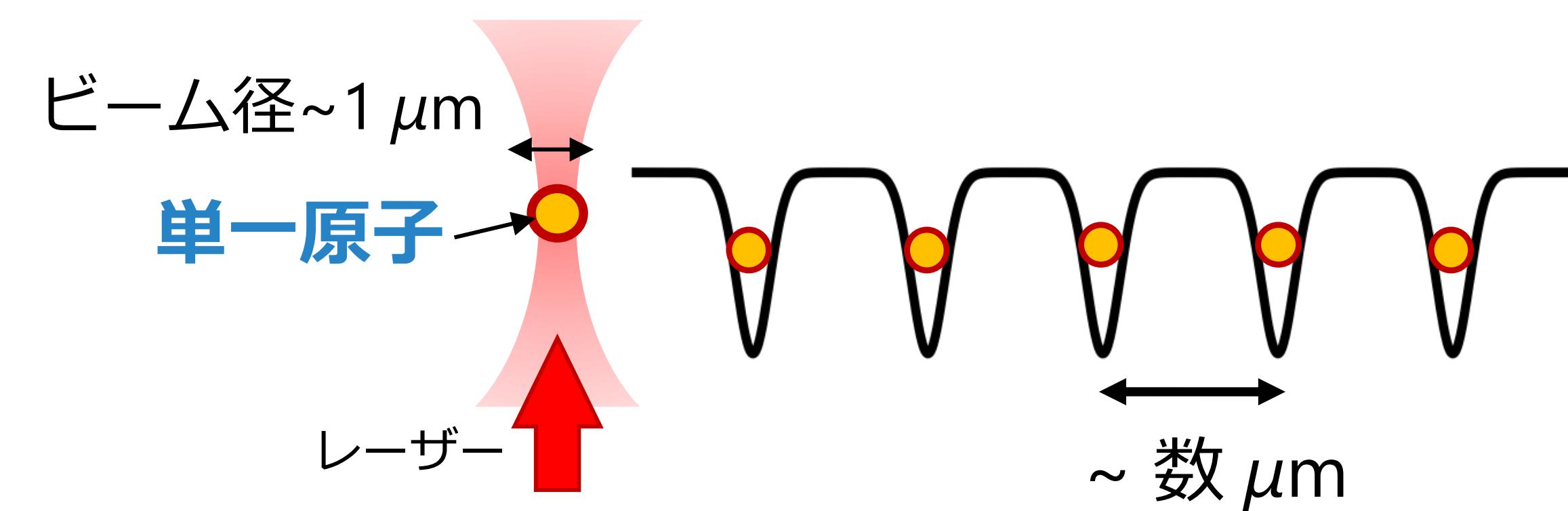
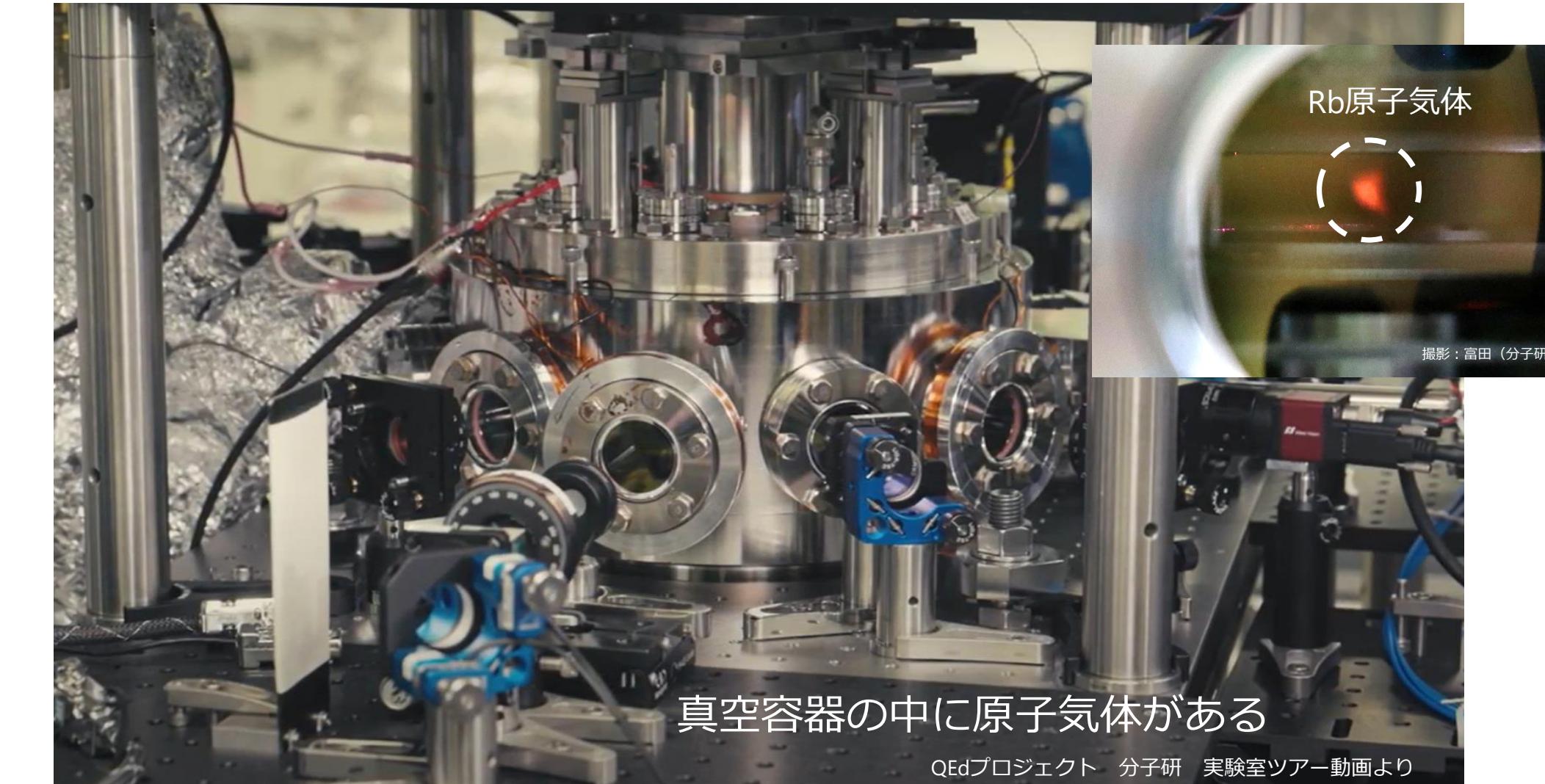
大きさ $\sim 10^{-10} \text{ m}$



● 陽子
● 中性子 } 原子核
● 電子



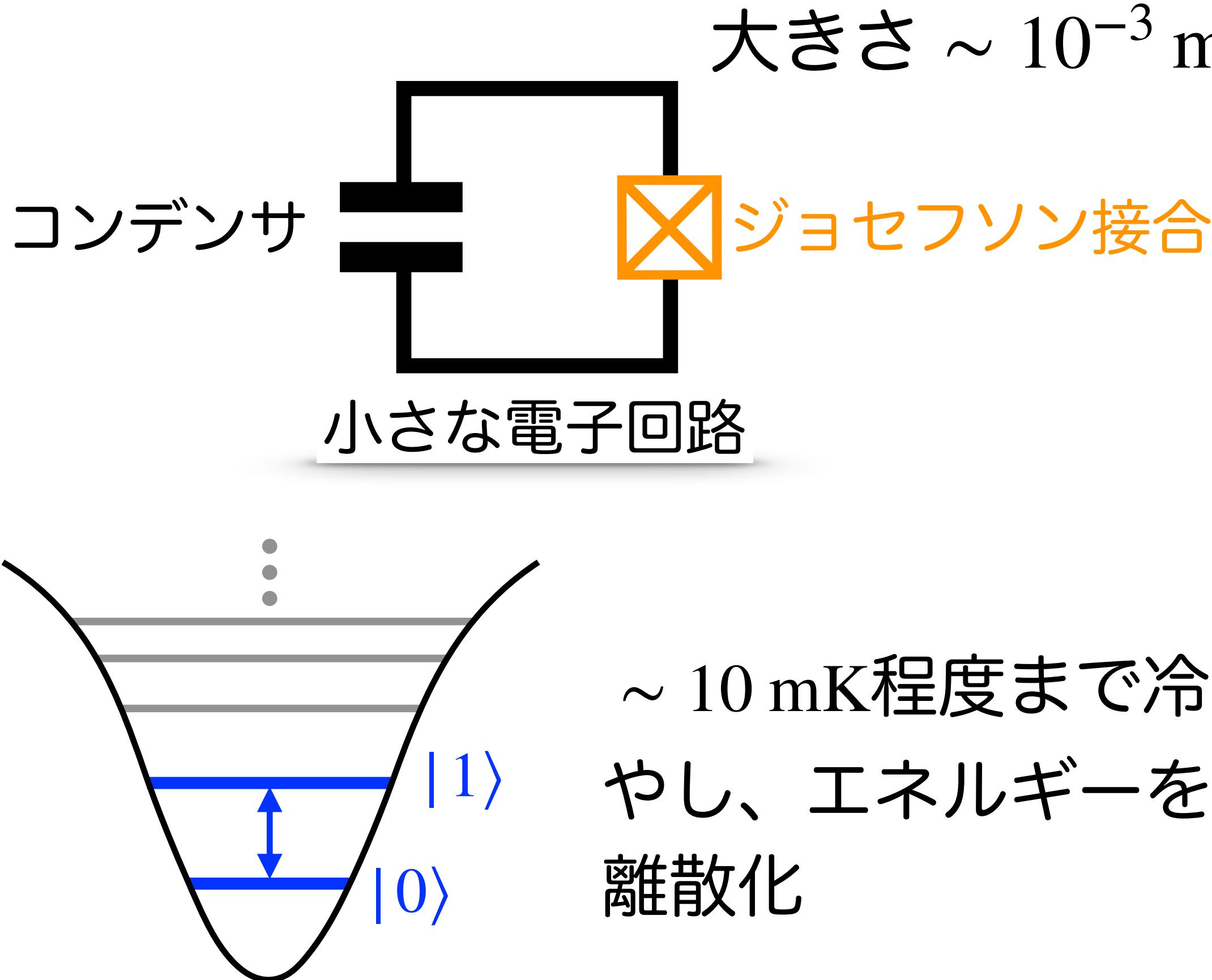
絶対零度付近 ($\sim \mu\text{K}$ から $\sim n\text{K}$) までレーザーで冷却し、孤立した量子系として計算に使う



→ 原子は全て同じ (均質な量子ビット)

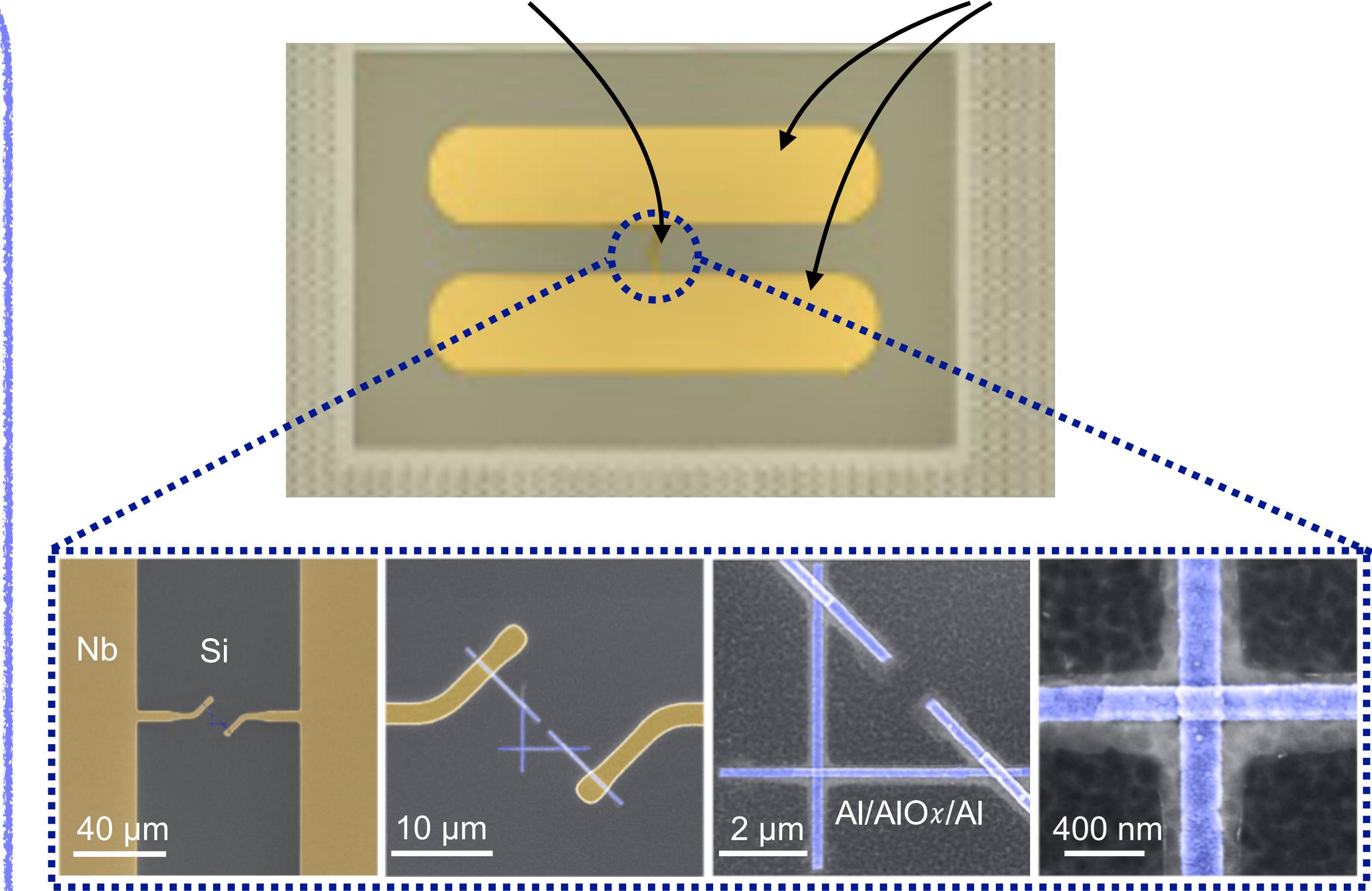
量子ビットの例 ②

超伝導量子ビット



ジョセフソン接合

コンデンサ



非常に微弱な電磁波（マイクロ波）を
使って、光子のエネルギーのやり取り
で状態の操作を行う

ビットによる表現

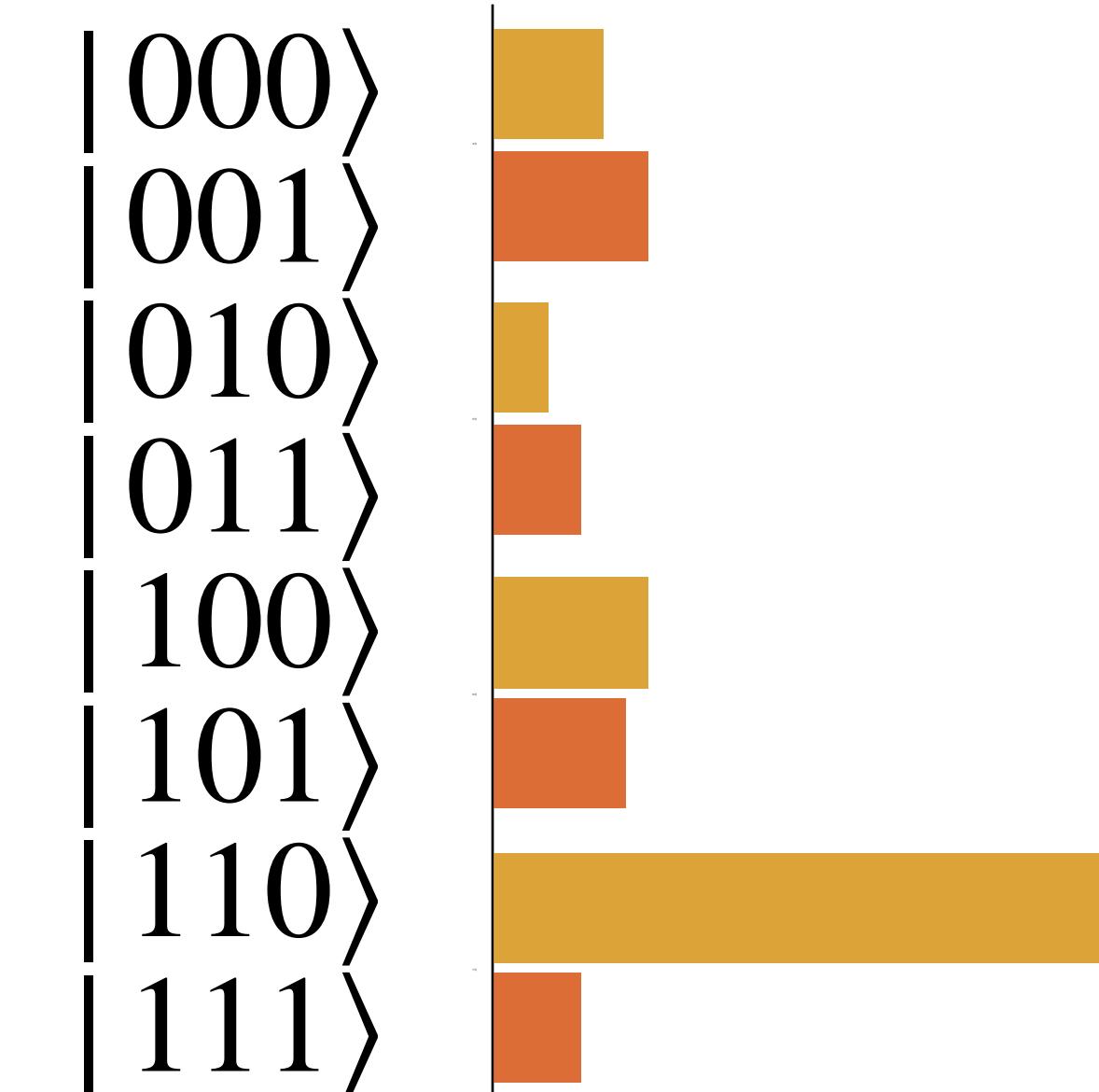
例えば、3ビットある場合

古典コンピュータ

$$110 = 6$$

一個の数を表すだけ

量子コンピュータ



8個の数を表すことが可能*

8個の数が全て取り出せるわけではない

ビットによる表現

重ね合わせを使うことで、扱うことができる状態が量子ビットの数に対して指数関数的に増える

10量子ビット → 1000個の状態

50量子ビット → 1000兆個の状態

300量子ビット → 宇宙にある全ての原子の数に相当する状態

ibm_marrakesh		
QPU status	● Online	
Processor type	Heron r2	
Qubits	2Q error (best/layered)	CLOPS
156	1.17e-3/3.74e-3	195K

現在利用可能なIBM量子コンピュータの中で、最も量子ビット数の多いマシンの一つ

エンタングルした状態

2つの量子ビット1, 2がエンタングルした状態 $|\psi_{12}\rangle$ は、それぞれの量子ビットの状態の積で書くことができない

$$|\psi_{12}\rangle \neq |\psi_1\rangle |\psi_2\rangle \equiv |\psi_1\psi_2\rangle$$

例えば $|\psi_{12}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|00\rangle + |11\rangle)$ のような状態 (Bell状態と呼ばれる)

エンタングルした状態

2つの量子ビット1, 2がエンタングルした状態 $|\psi_{12}\rangle$ は、それぞれの量子ビットの状態の積で書くことができない

$$|\psi_{12}\rangle \neq |\psi_1\rangle |\psi_2\rangle \equiv |\psi_1\psi_2\rangle$$

例えば $|\psi_{12}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|00\rangle + |11\rangle)$ のような状態 (Bell状態と呼ばれる)

$$|\phi_{12}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|01\rangle + |11\rangle) \text{のような状態は積の形で書ける}$$

$$|\phi_{12}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle + |1\rangle) |1\rangle \equiv |\phi_1\rangle |\phi_2\rangle \quad |\phi_1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle + |1\rangle) \quad |\phi_2\rangle = |1\rangle$$

この場合は、それぞれの量子ビットの測定結果の積が全体の答え

CHSH不等式の破れ

2つの量子ビット A と B からなる状態を考えてみる

- ▶ それぞれの量子ビットは、独立に測定器の設定を変えて測定することができる
 - ▶ 測定で得られる観測量は+1か-1とする
- ➡ 量子ビット A を設定1と2、量子ビット B を設定3と4で測定するとする

CHSH不等式の破れ

2つの量子ビット A と B からなる状態を考えてみる

- ▶ それぞれの量子ビットは、独立に測定器の設定を変えて測定することができる
 - ▶ 測定で得られる観測量は+1か-1とする
- ➡ 量子ビット A を設定1と2、量子ビット B を設定3と4で測定するとする

$S = \langle B_3 A_1 \rangle - \langle B_4 A_1 \rangle + \langle B_3 A_2 \rangle + \langle B_4 A_2 \rangle$ という量を測定する

$\langle A_1 \rangle \equiv$ 量子ビット A の設定1での測定結果

A と B がエンタングルしていないとすると

$$\begin{aligned} |S| &= |\langle B_3 \rangle \langle A_1 \rangle - \langle B_4 \rangle \langle A_1 \rangle + \langle B_3 \rangle \langle A_2 \rangle + \langle B_4 \rangle \langle A_2 \rangle| \\ &= |(\langle B_3 \rangle - \langle B_4 \rangle) \langle A_1 \rangle + (\langle B_3 \rangle + \langle B_4 \rangle) \langle A_2 \rangle| \\ &\leq |\langle B_3 \rangle - \langle B_4 \rangle| + |\langle B_3 \rangle + \langle B_4 \rangle| \\ &\leq 2 \end{aligned}$$

➡ CHSH不等式

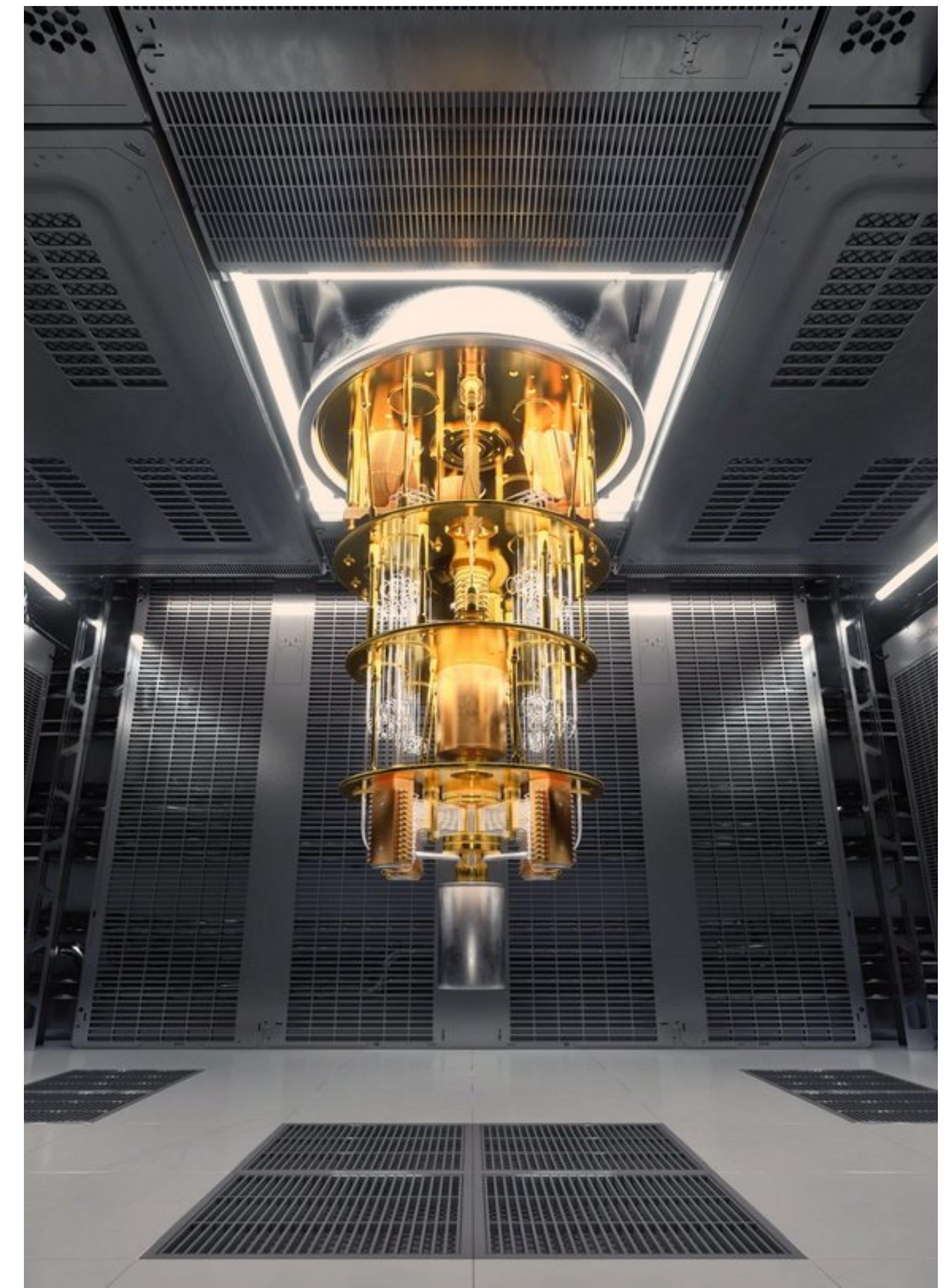
量子コンピュータでは
 $|S| \leq 2$ が成り立たないか？

量子コンピュータを使ってみる

IBM量子コンピュータ

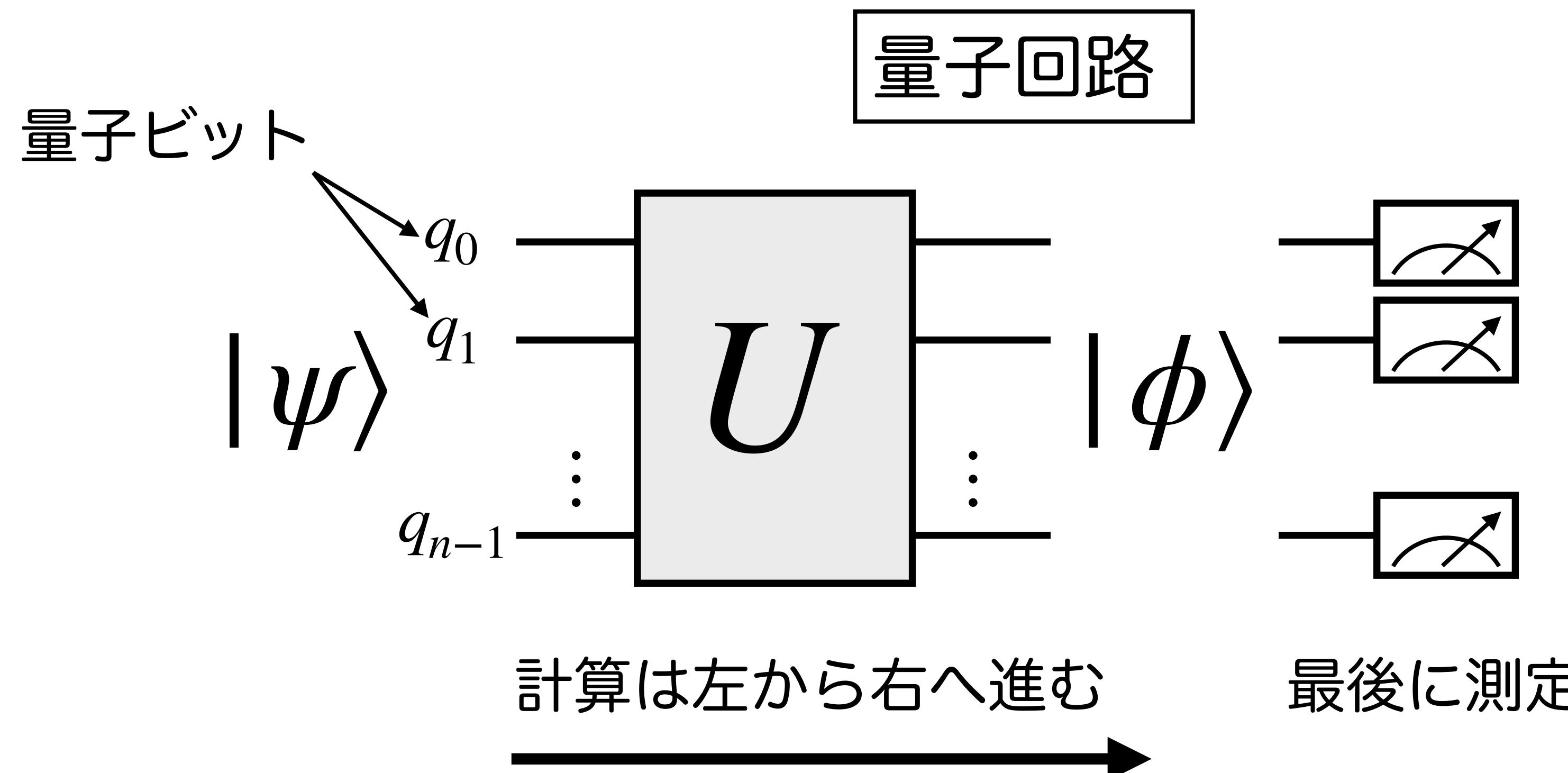


クラウドで利用可能



量子コンピュータを使ってみる

- ・量子ビットの状態 $|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ (状態ベクトルと呼ぶ)
- ・量子計算は、複素数のユニタリー行列を状態ベクトルに掛けて行う
 - ・ n 量子ビットの計算 → 2^n 行 × 2^n 列の行列 U の掛け算
 - ・掛け算した後の状態 : $|\phi\rangle = U|\psi\rangle$



量子コンピュータを使ってみる

IBM Quantum Platform Dashboard Systems Jobs

誰でも使うことができます

IBM Quantum

Use our suite of applications to support your quantum research and development needs.

Learning

Take a course, browse tutorials, and start experimenting with Composer.

<https://quantum.ibm.com/>

アカウント作って、使ってみてください

Having trouble signing in?
Try signing in with an IBMid. If you are still having issues, contact the [IBMid help desk](#).

量子コンピュータを使ってみる

IBM Quantum Platform Dashboard Systems Jobs

IBM

Use our suite of a research and dev

Learning Take a course, br Composer.

Explore the latest course

Fundamentals of quantum algorithms

Try signing in with an IBMid. If you are still having issues, contact the IBMid help desk.

Quantum computers to solve problems more efficiently, including problems with real-world relevance such as searching and factoring.

Lessons Your progress 4 0%

UTOLにある資料（[環境設定](#)）にアカウント作成、実行環境、プログラムの動かし方等の説明を書いています

興味のある方はどうぞ！

量子コンピュータを使ってみる

IBM Quantum Platform Dashboard Systems Jobs

IBM

Use our suite of a research and dev

Learning

Take a course, br Composer.

Having trouble signing in? Try signing in with an IBMid. If you are still having issues, contact the [IBMid help desk](#).

Explore the latest course

Fundamentals of quantum algorithms

Use quantum computers to solve problems more efficiently, including problems with real-world relevance such as searching and factoring.

Lessons Your progress

4 0%

プログラムはJupyter Notebookを使います。この[リンク](#)からNotebookファイル入手できます（[環境設定](#)にも説明を書いています）。

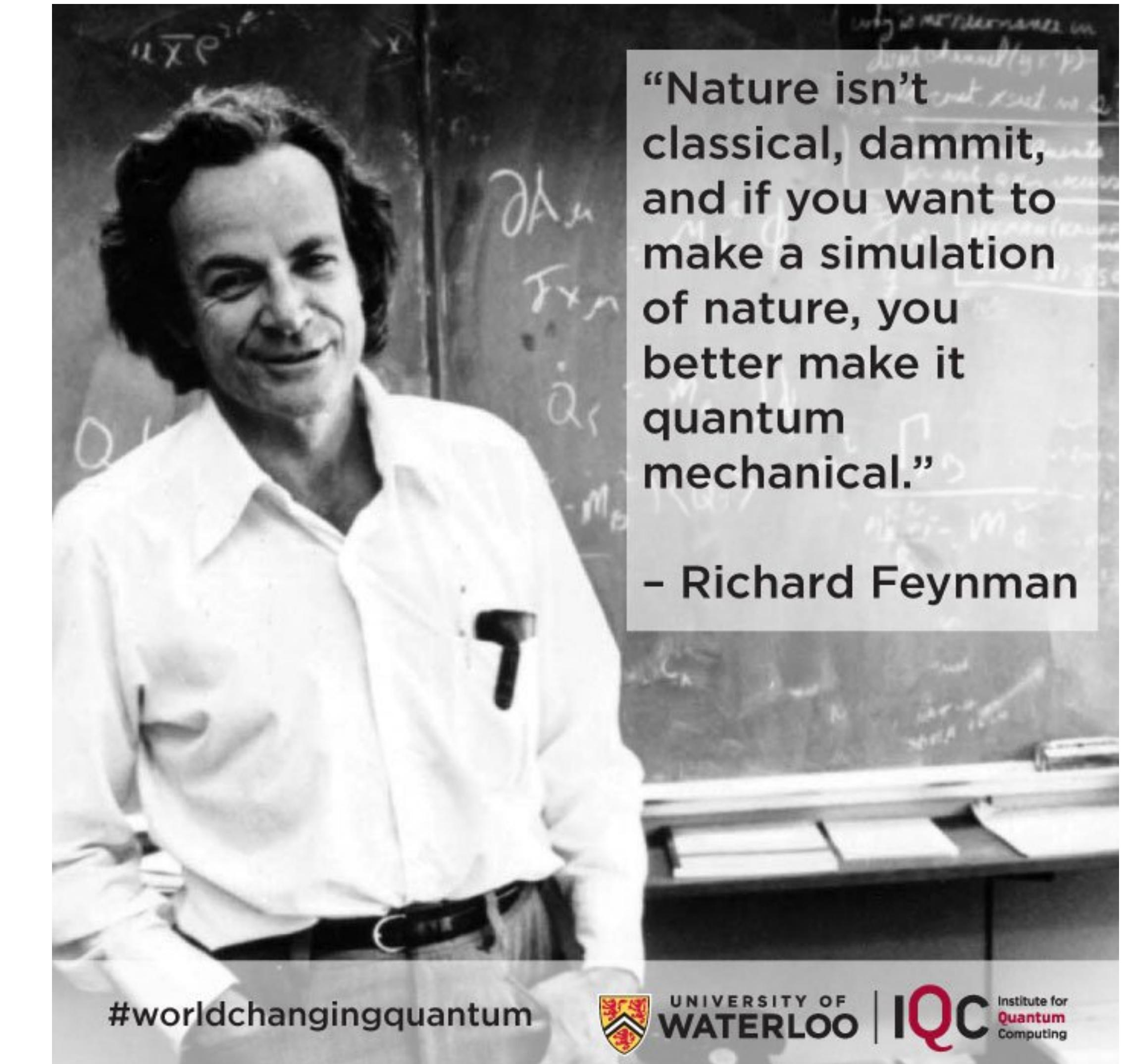
量子シミュレーション

量子コンピュータによる場の理論のシミュレーションは、
大きな可能性を持っている

リチャード・ファインマン

“自然現象のシミュレーションを
したいなら、量子力学的に計算
する方が良いよね”

1981年



素粒子の標準模型

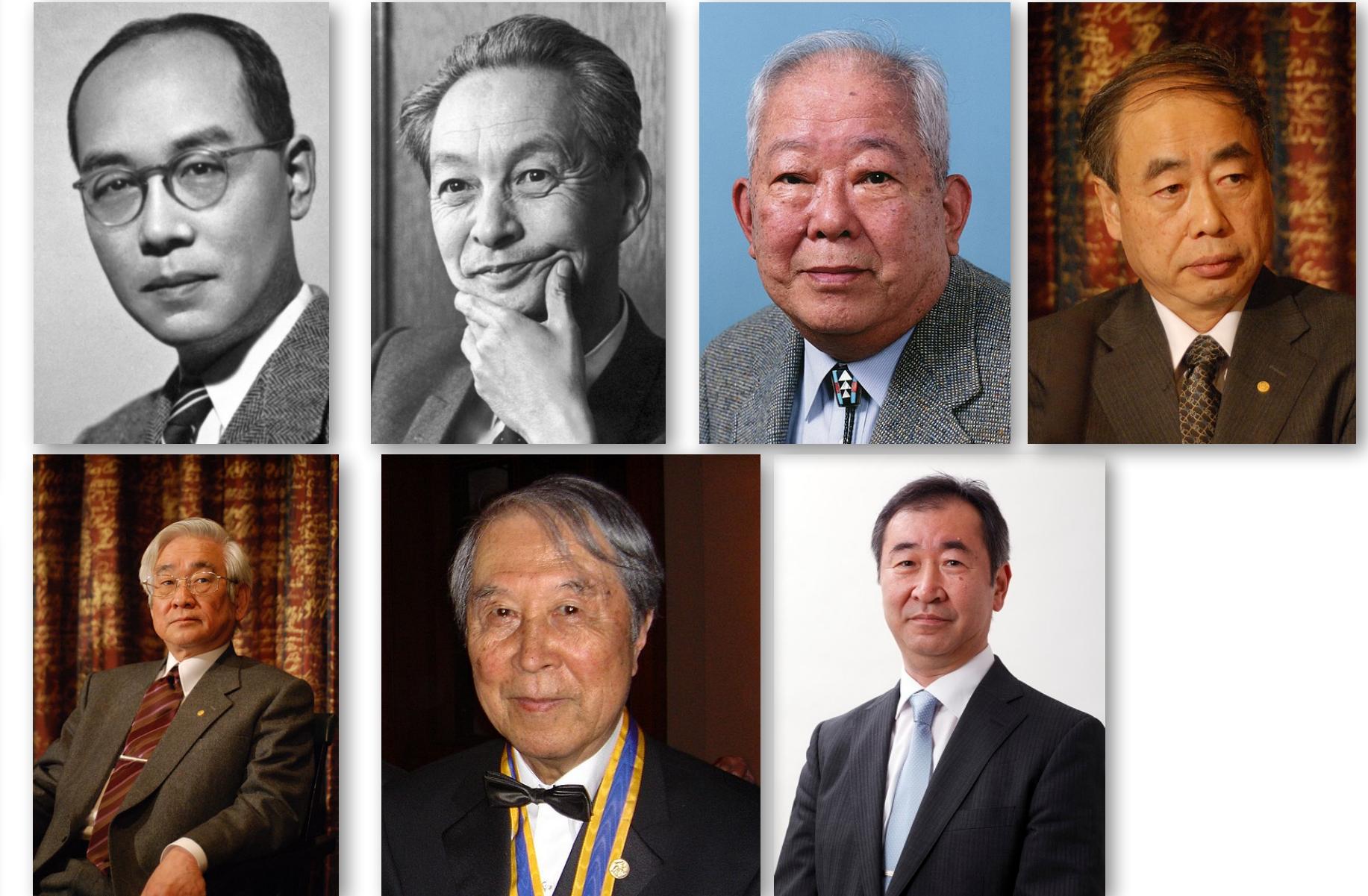
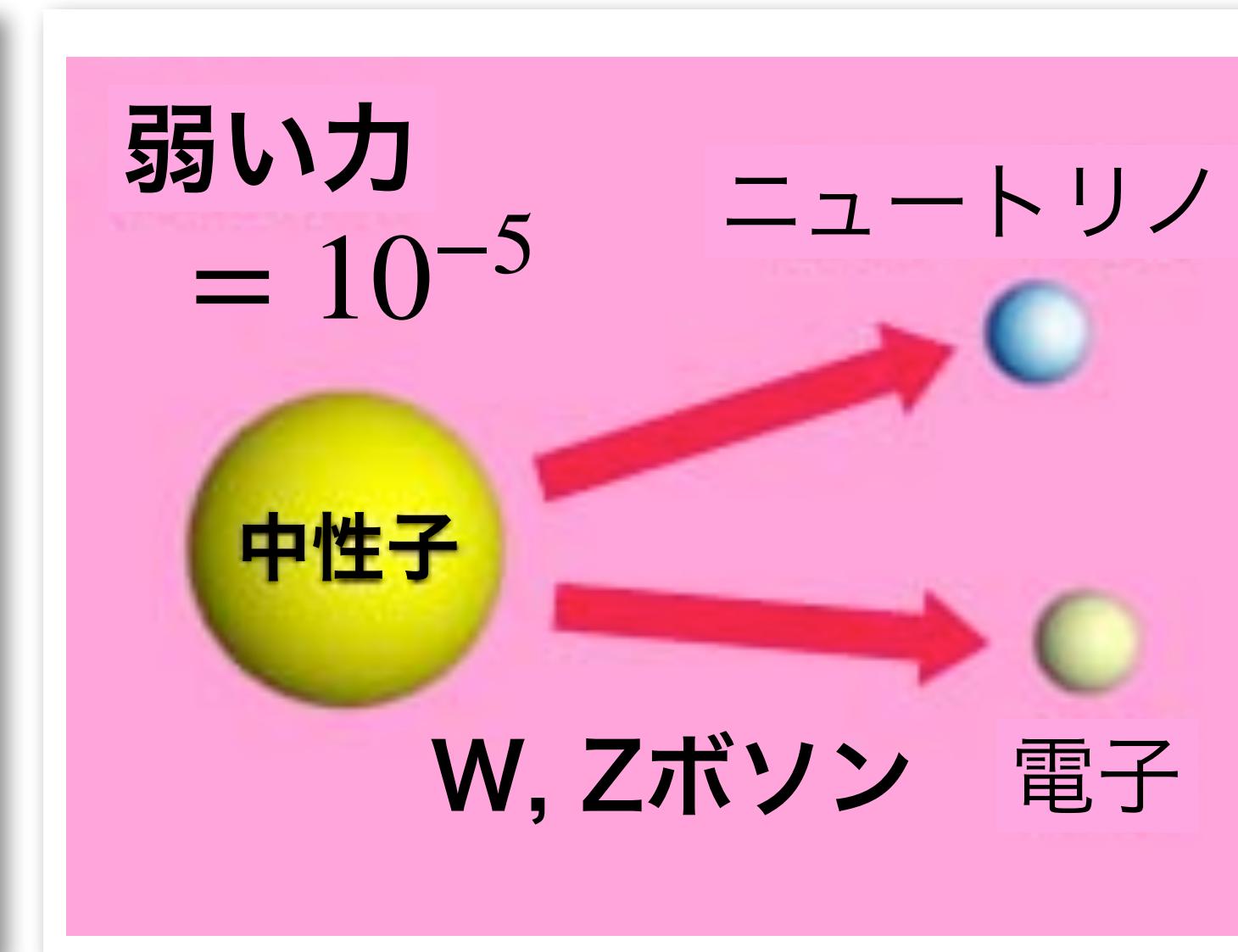
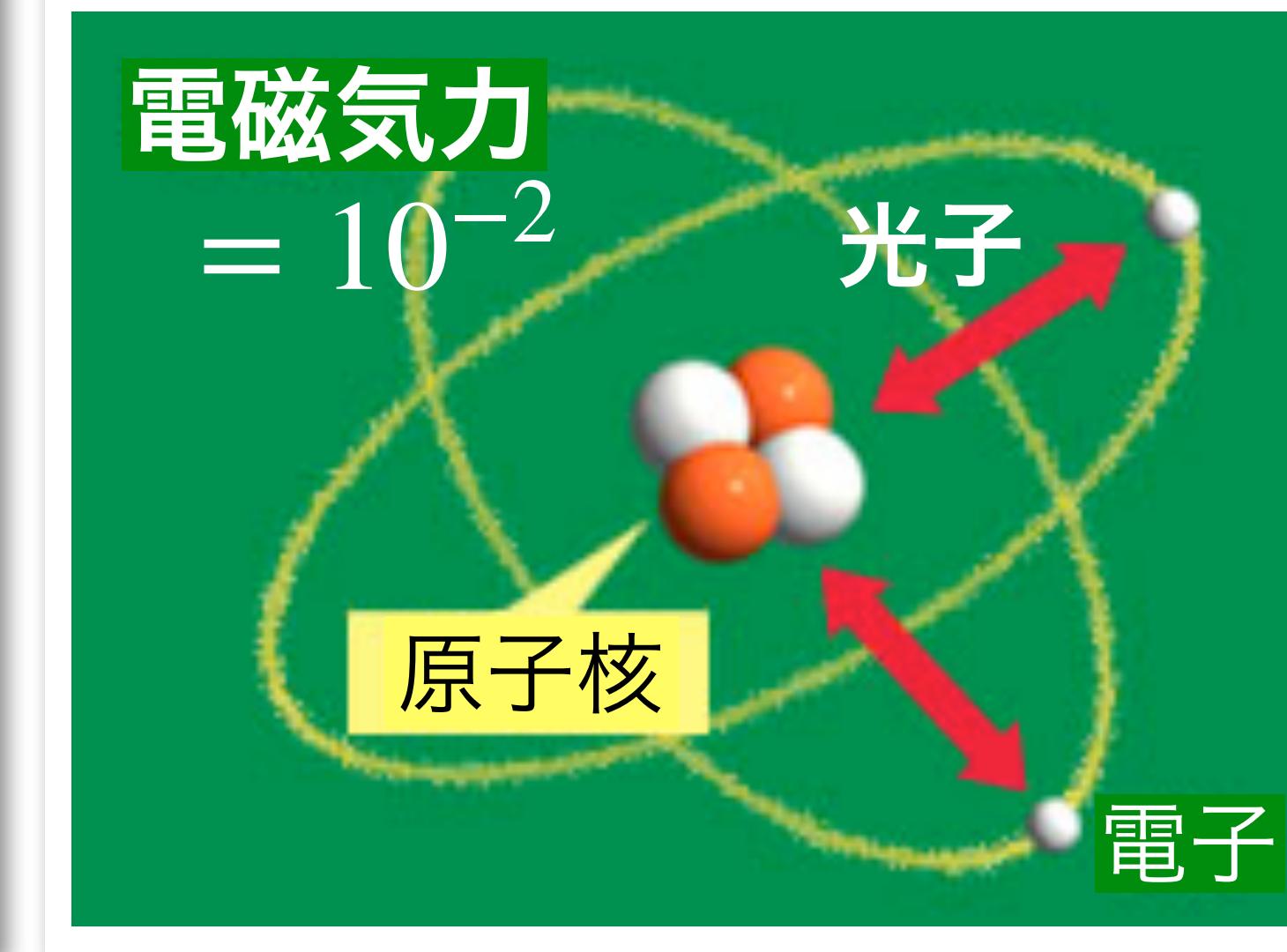
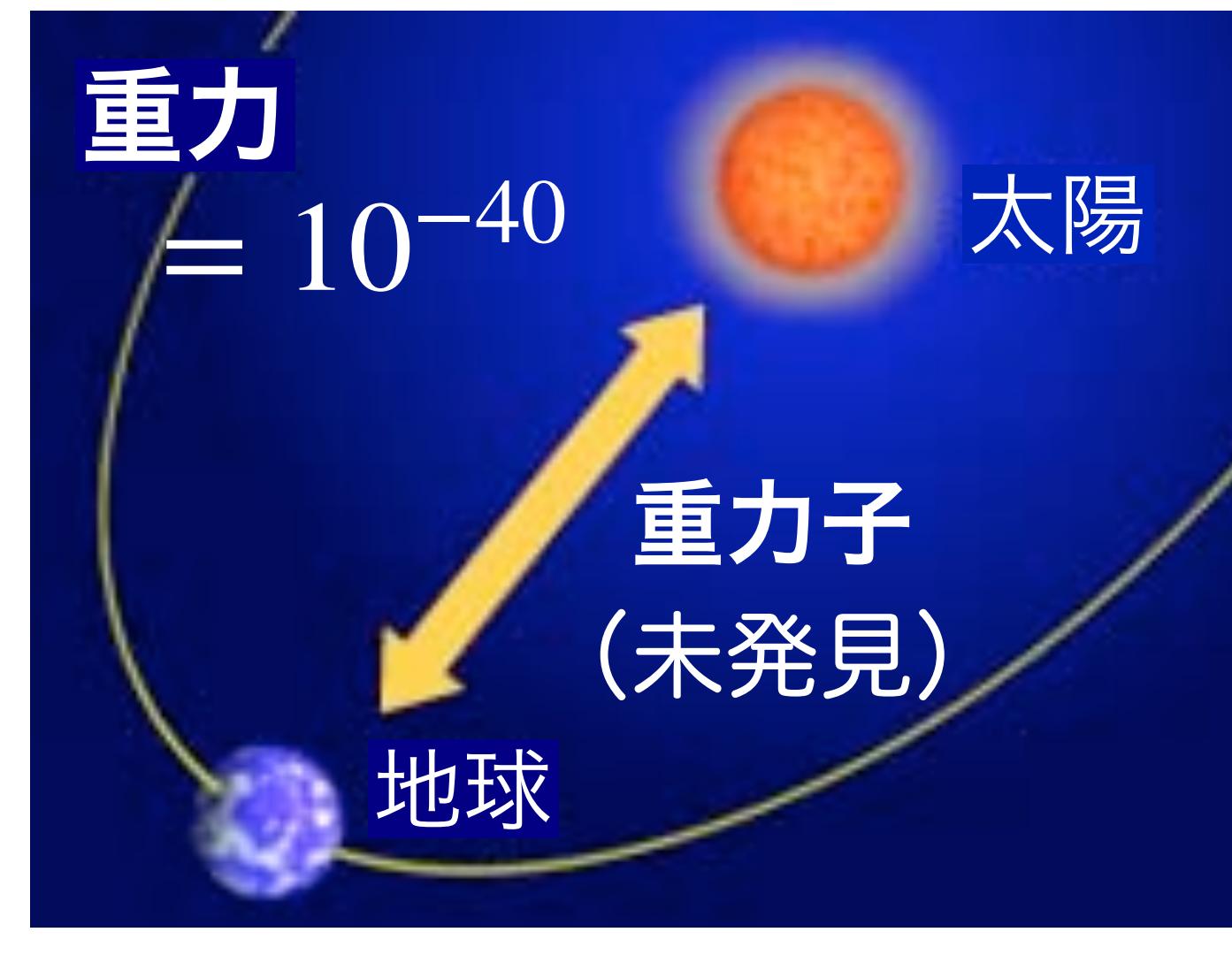
物質を構成する3世代の粒子 (フェルミオン)

	I	II	III
質量	$\simeq 1.9 \text{ MeV}/c^2$	$\simeq 1.32 \text{ GeV}/c^2$	$\simeq 172.7 \text{ GeV}/c^2$
電荷	$2/3$	$2/3$	$2/3$
スピン	$1/2$	$1/2$	$1/2$
クオーケン	u アップ	c チャーム	t トップ
	d ダウン	s ストレンジ	b ボトム
レプトン	e 電子	μ ミューオン	τ タウ
	ν_e 電子 ニュートリノ	ν_μ ミュー ニュートリノ	ν_τ タウ ニュートリノ

力(相互作用)を媒介する粒子 (ボソン)

g グルーオン	$\simeq 125 \text{ GeV}/c^2$
γ 光子	スカラーボソン
Z Zボソン	ゲージボソン
W Wボソン	

4つの力



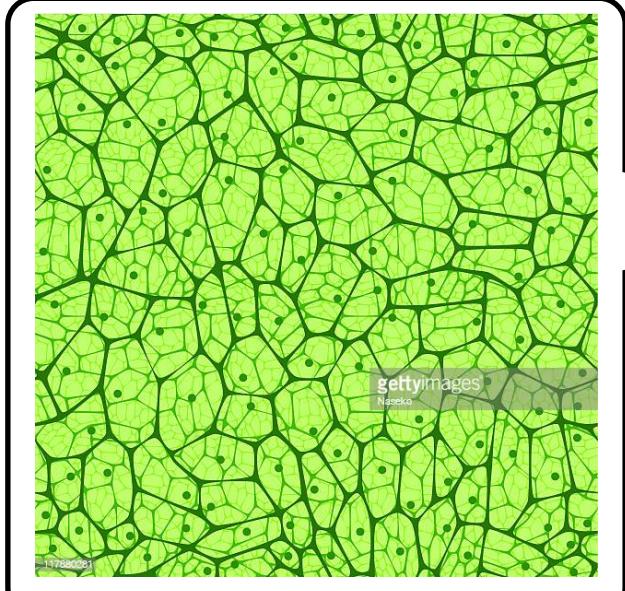
日本人研究者が確固とした
地位を築いた

素粒子の世界を「見る」には

光を当て、その反射光を見る

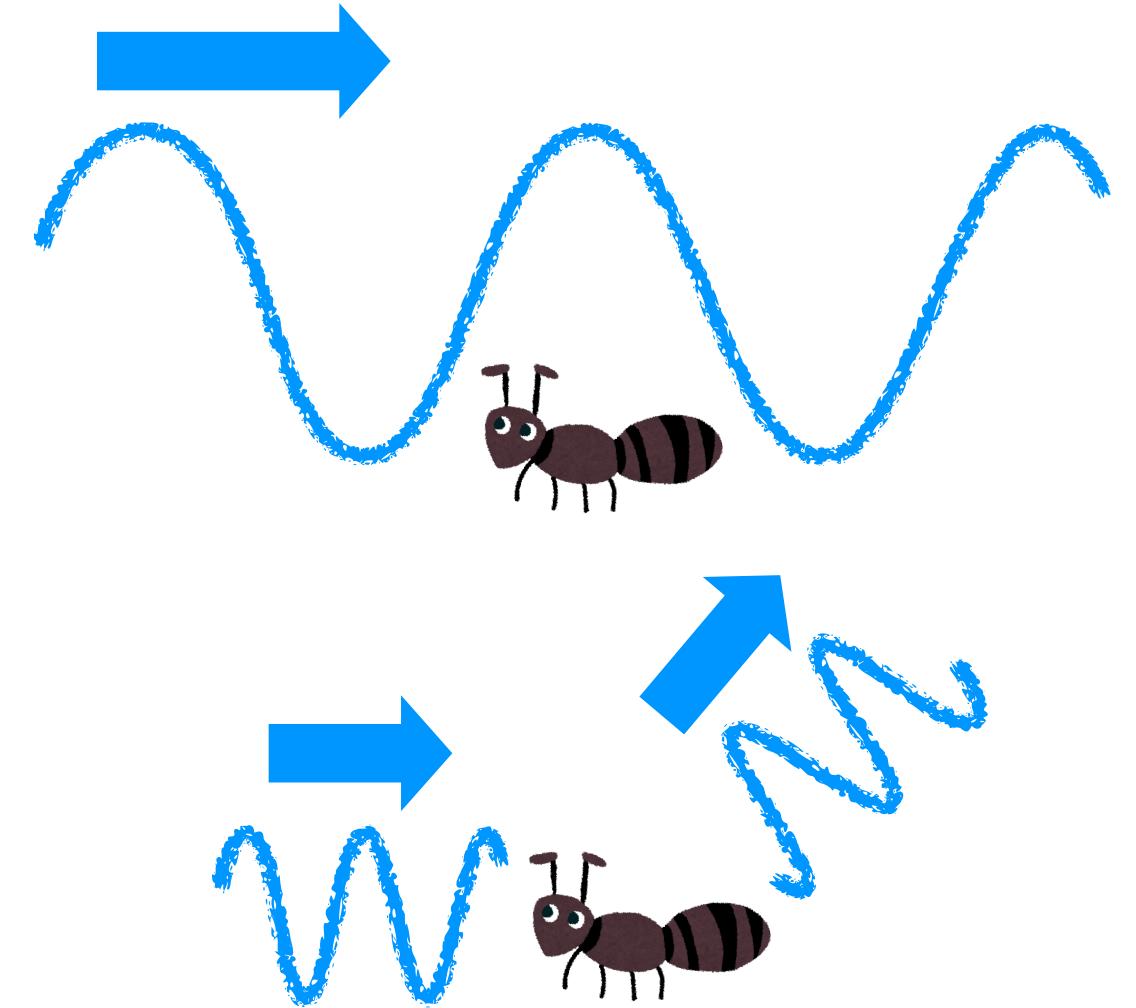
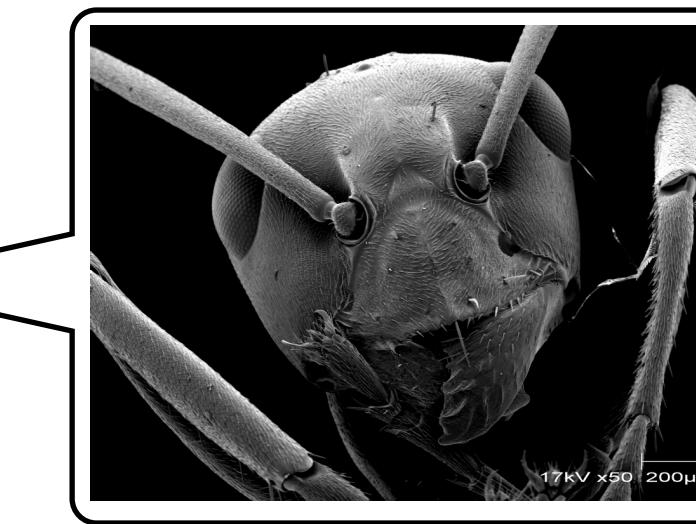
光学顕微鏡

可視光の波長 $\sim 10^{-7}$ m



電子顕微鏡

電子の波長 $\sim 10^{-10}$ m



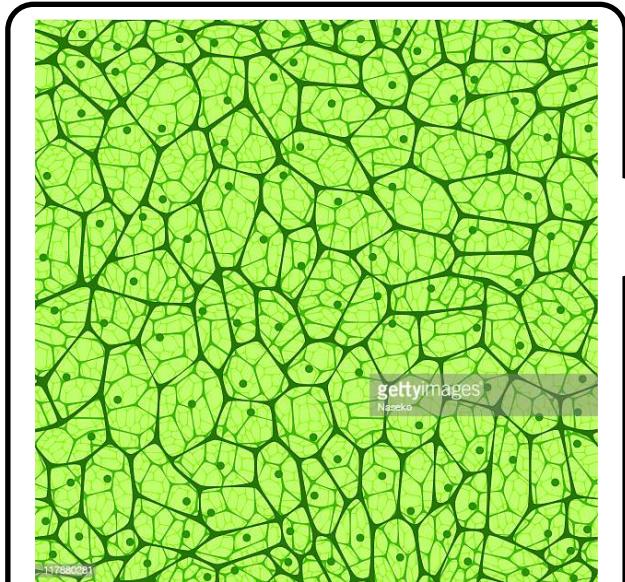
見たいものより、短い
波長の光が必要

素粒子の世界を「見る」には

光を当て、その反射光を見る

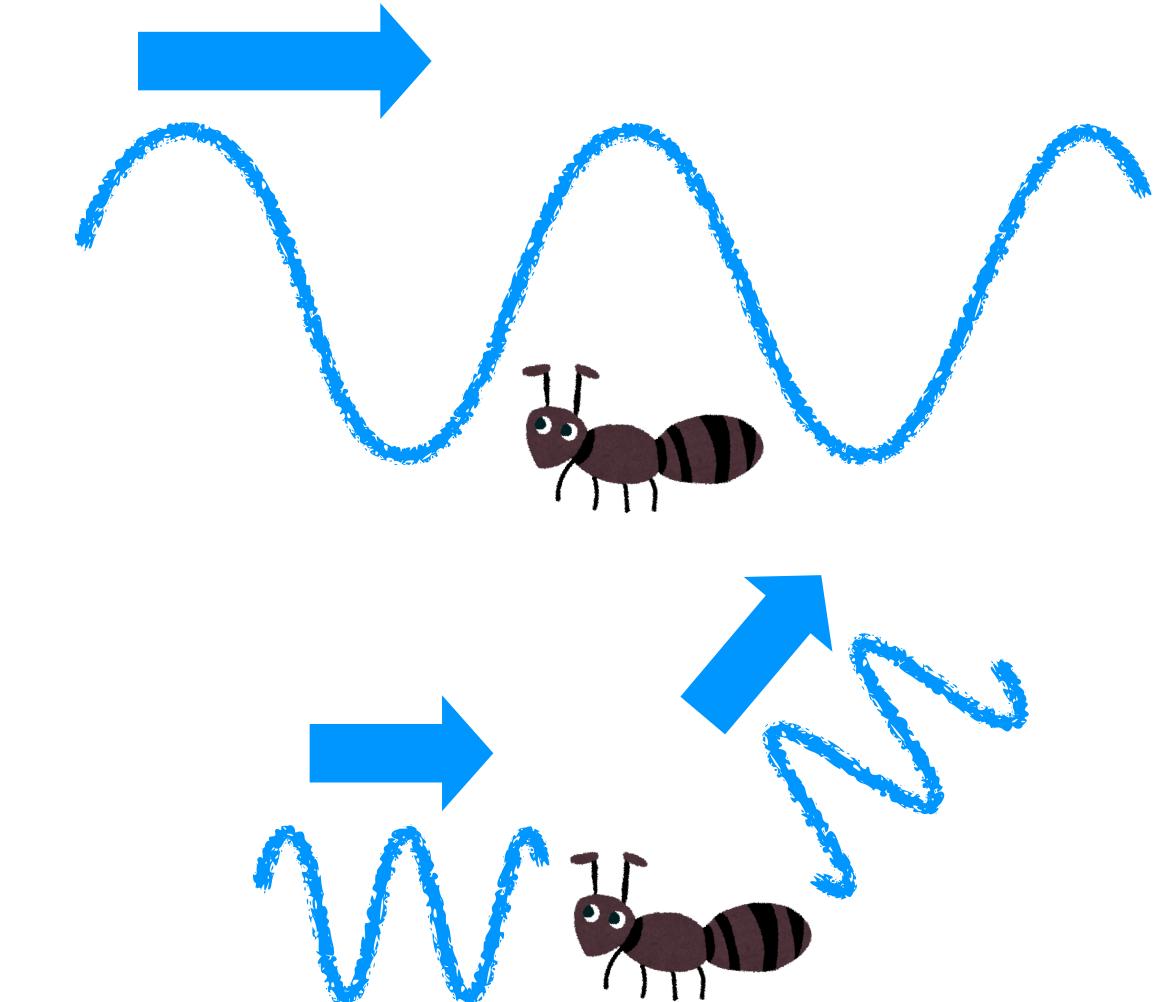
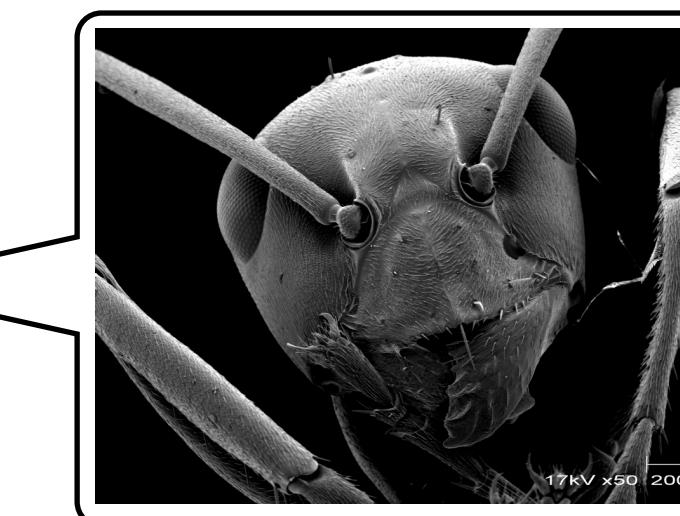
光学顕微鏡

可視光の波長 $\sim 10^{-7}$ m



電子顕微鏡

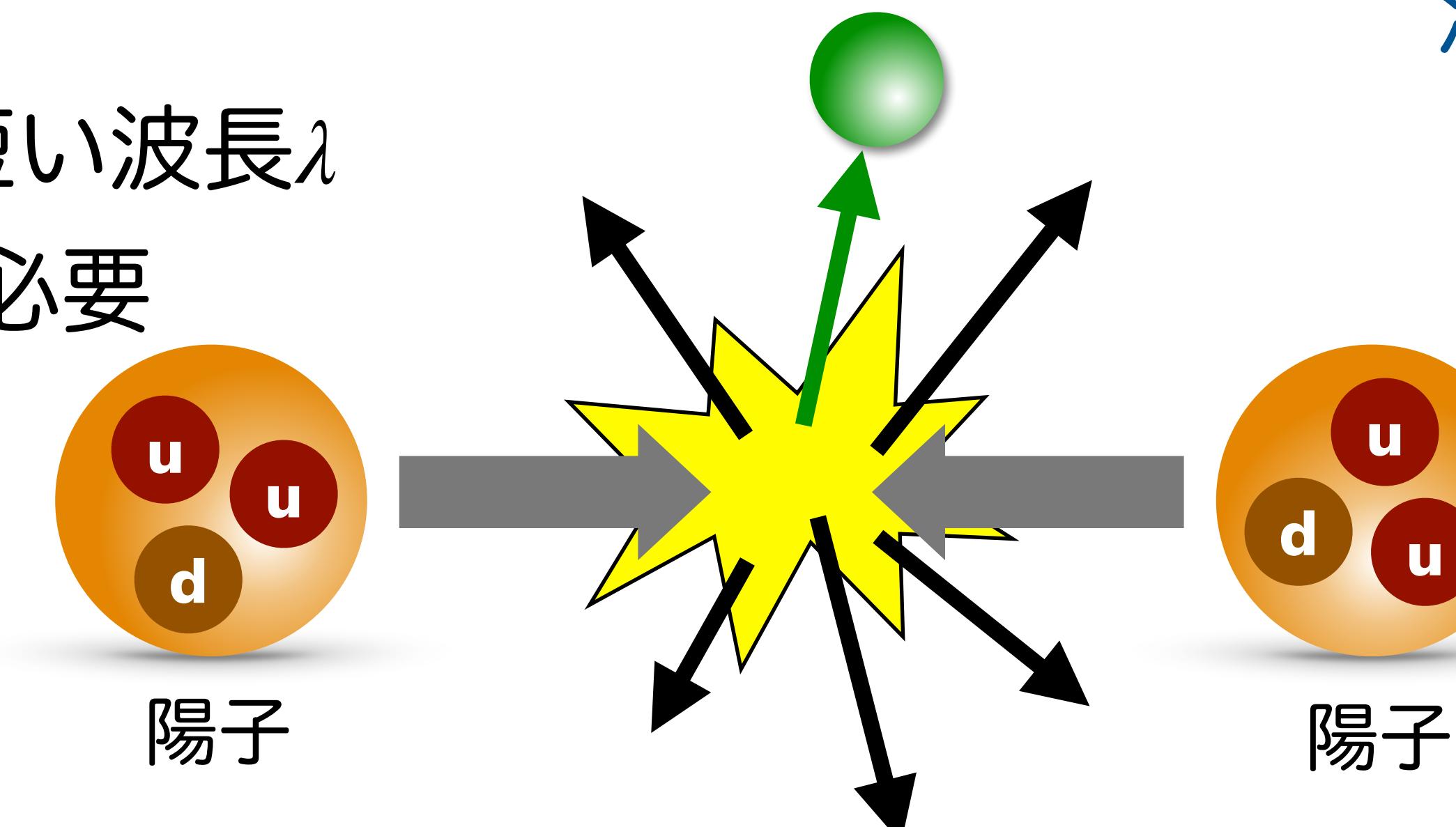
電子の波長 $\sim 10^{-10}$ m



見たいものより、短い
波長の光が必要

より細部を見るには、短い波長 λ
(高い振動数 ν) の光が必要

$$E = h\nu = h\frac{c}{\lambda}$$

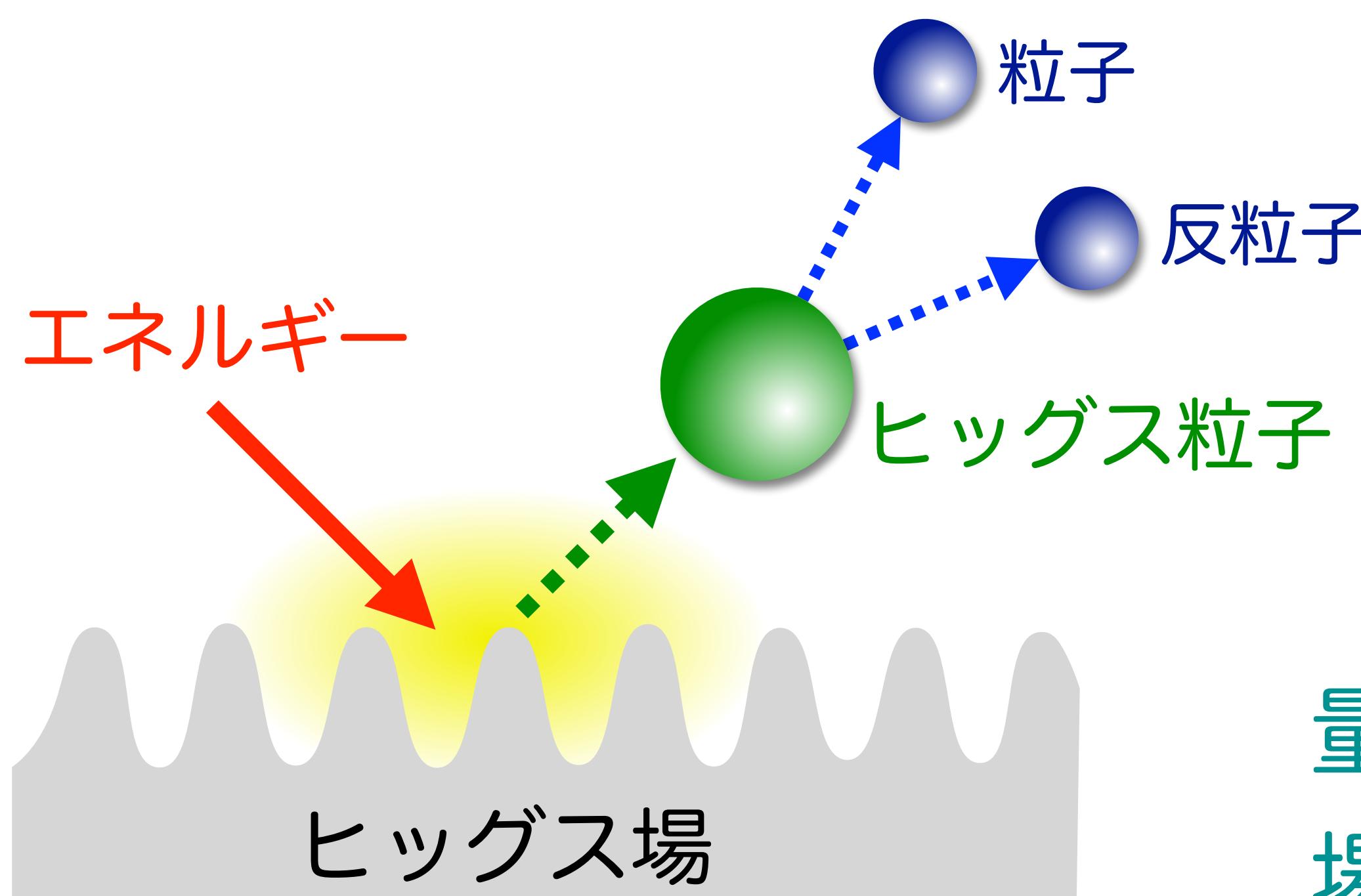


加速器で高いエネル
ギーまで加速し、衝
突させる

加速器でヒッグス粒子を作る

ヒッグス粒子 = 「ヒッグス場」の変化

高いエネルギーの粒子衝突によって
ヒッグス場にエネルギーを与え、
ヒッグス粒子を叩き出す



例えると、
水に石を投げ入れる
→ 飛び散る水飛沫
= ヒッグス粒子



量子コンピュータを使って、このような
場の変化の計算ができるだろうか？

場の変化を計算する

時間と共に状態が変わっていく様子（時間発展）を計算する

時間発展はシュレーディンガーエルミニアム方程式で記述される

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} |\psi(t)\rangle = H |\psi(t)\rangle$$

H = ハミルトニアン

$$\rightarrow |\psi(t)\rangle = \exp\left(-\frac{i}{\hbar}Ht\right) |\psi(0)\rangle$$

$$\hbar = \frac{h}{2\pi}$$

$\exp\left(-\frac{i}{\hbar}Ht\right)$ はユニタリー行列になるため、 $\exp\left(-\frac{i}{\hbar}Ht\right)$ を量子回路で

表現できる可能性がある

量子コンピュータで場の時間発展を計算できる！

時間発展のシミュレーション

一つの例：

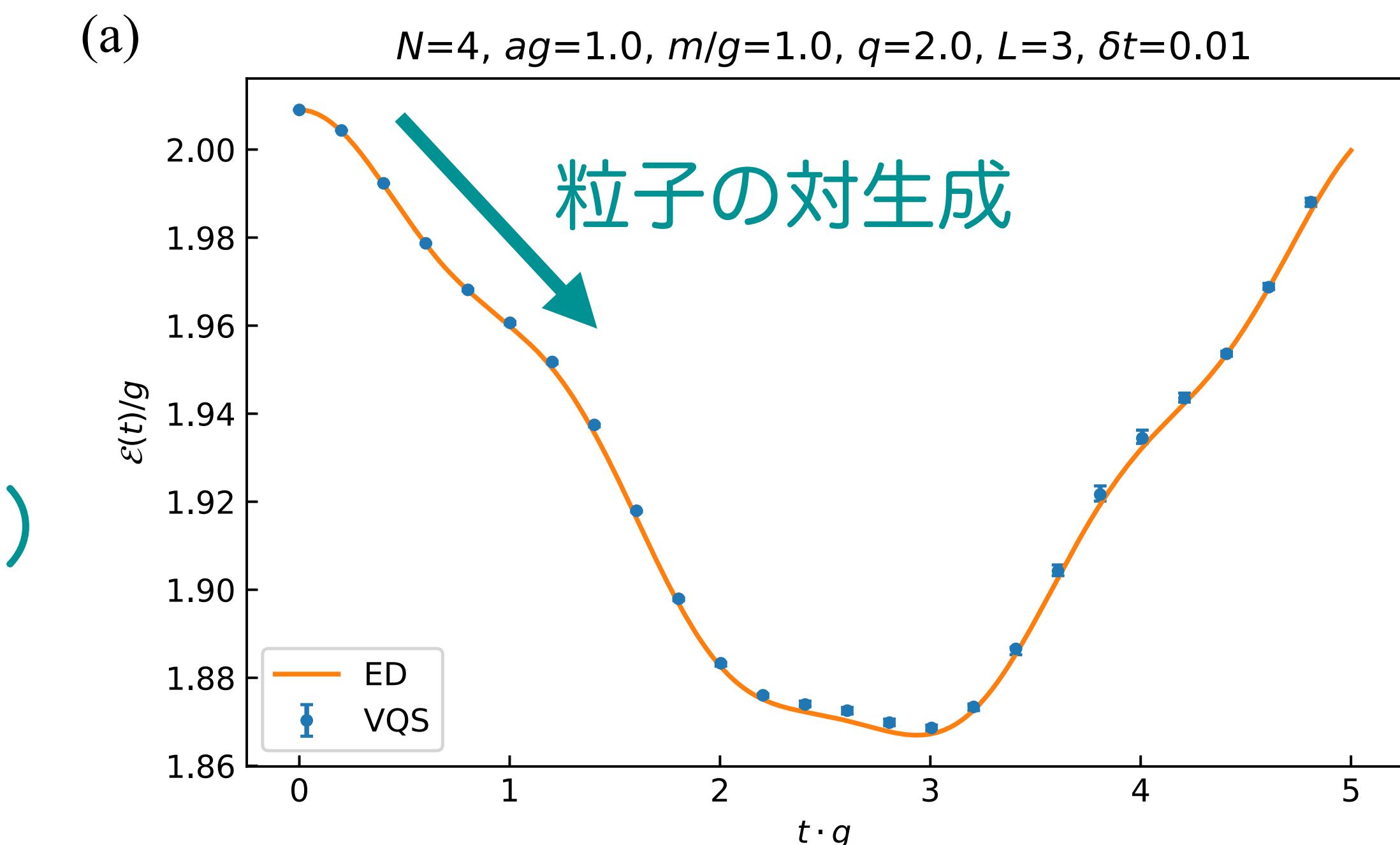
空間1次元での量子電磁力学に従うフェルミオンの時間発展シミュレーション

ハミルトニアン

$$H = J \sum_{j=0}^{N-2} \left(\sum_{k=0}^j \frac{Z_k + (-1)^k}{2} + \frac{\theta}{2\pi} \right)^2 + \frac{\omega}{2} \sum_{j=0}^{N-2} (X_j X_{j+1} + Y_j Y_{j+1}) + \frac{m}{2} \sum_{j=0}^{N-1} (-1)^j Z_j$$

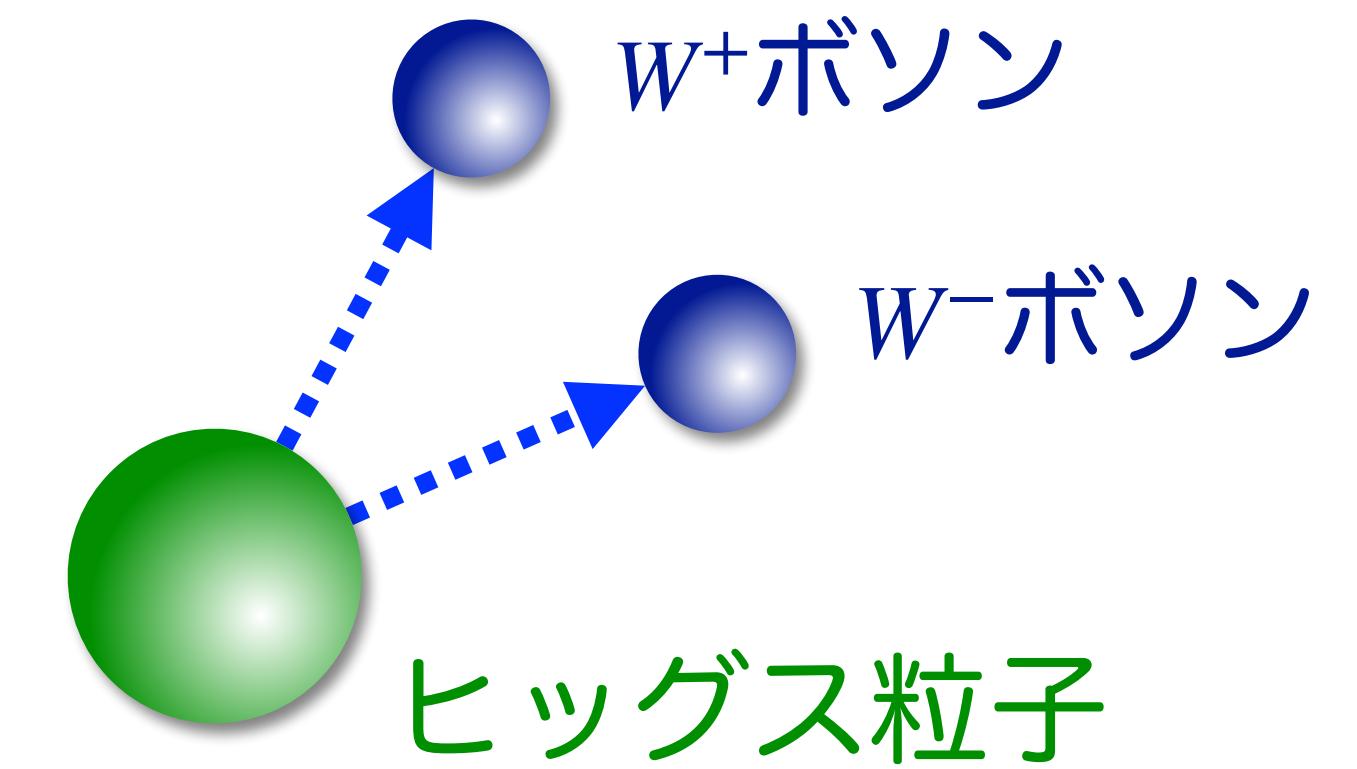
時刻 $t = 0$ で強い外部電場を与え、その後の状態をシミュレーションした

→ 電場による電子陽電子生成 ($\gamma \rightarrow e^+e^-$)
と矛盾のない現象を観測



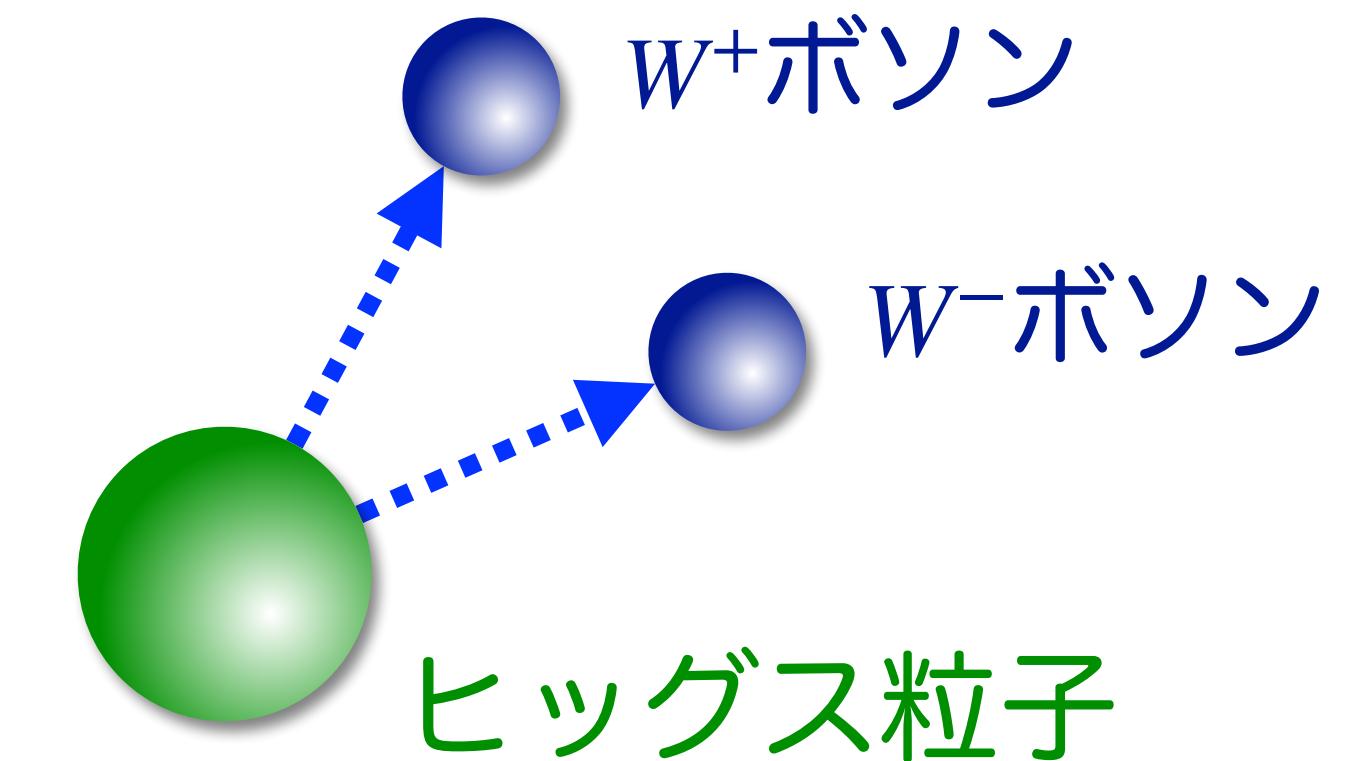
素粒子の崩壊/放出過程のシミュレーション

粒子が崩壊/放出していく過程も、場の理論で説明される

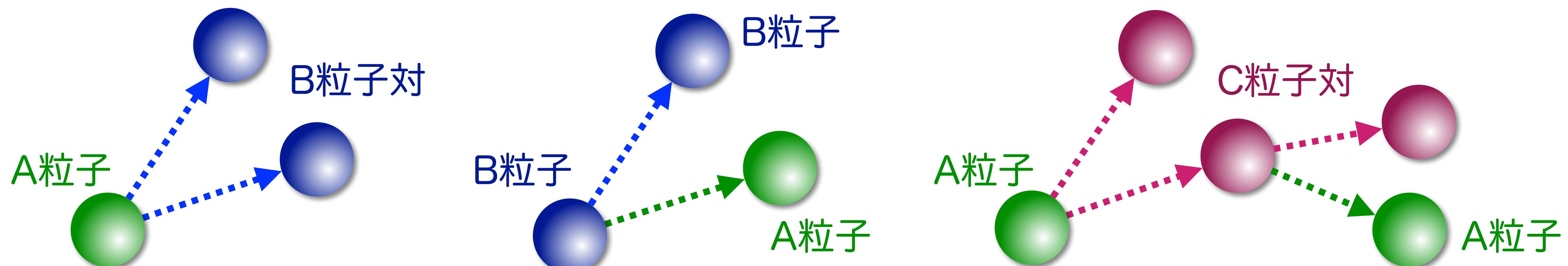


素粒子の崩壊/放出過程のシミュレーション

粒子が崩壊/放出していく過程も、場の理論で説明される

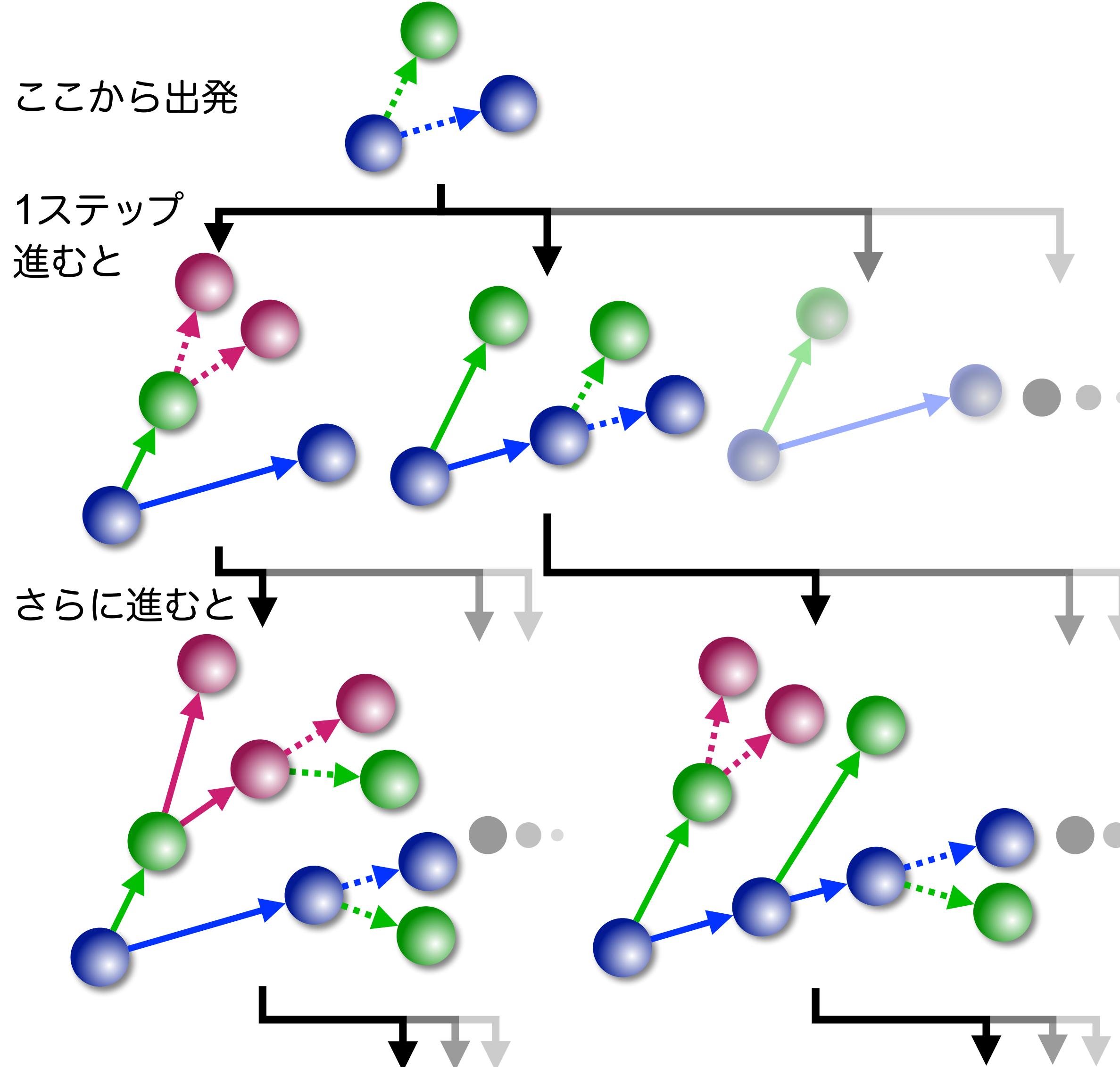


ある粒子が崩壊/放出していく過程のシミュレーション



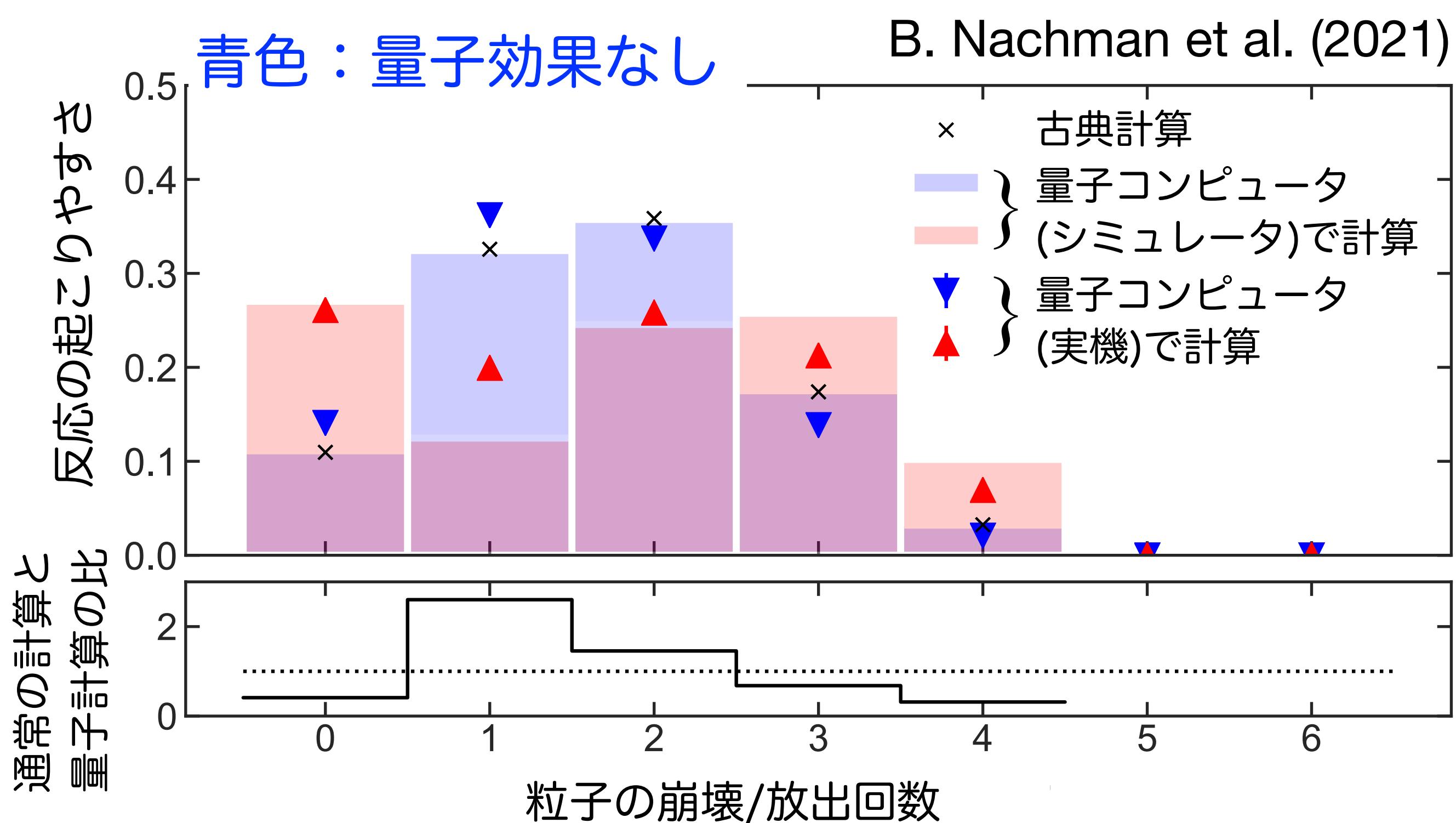
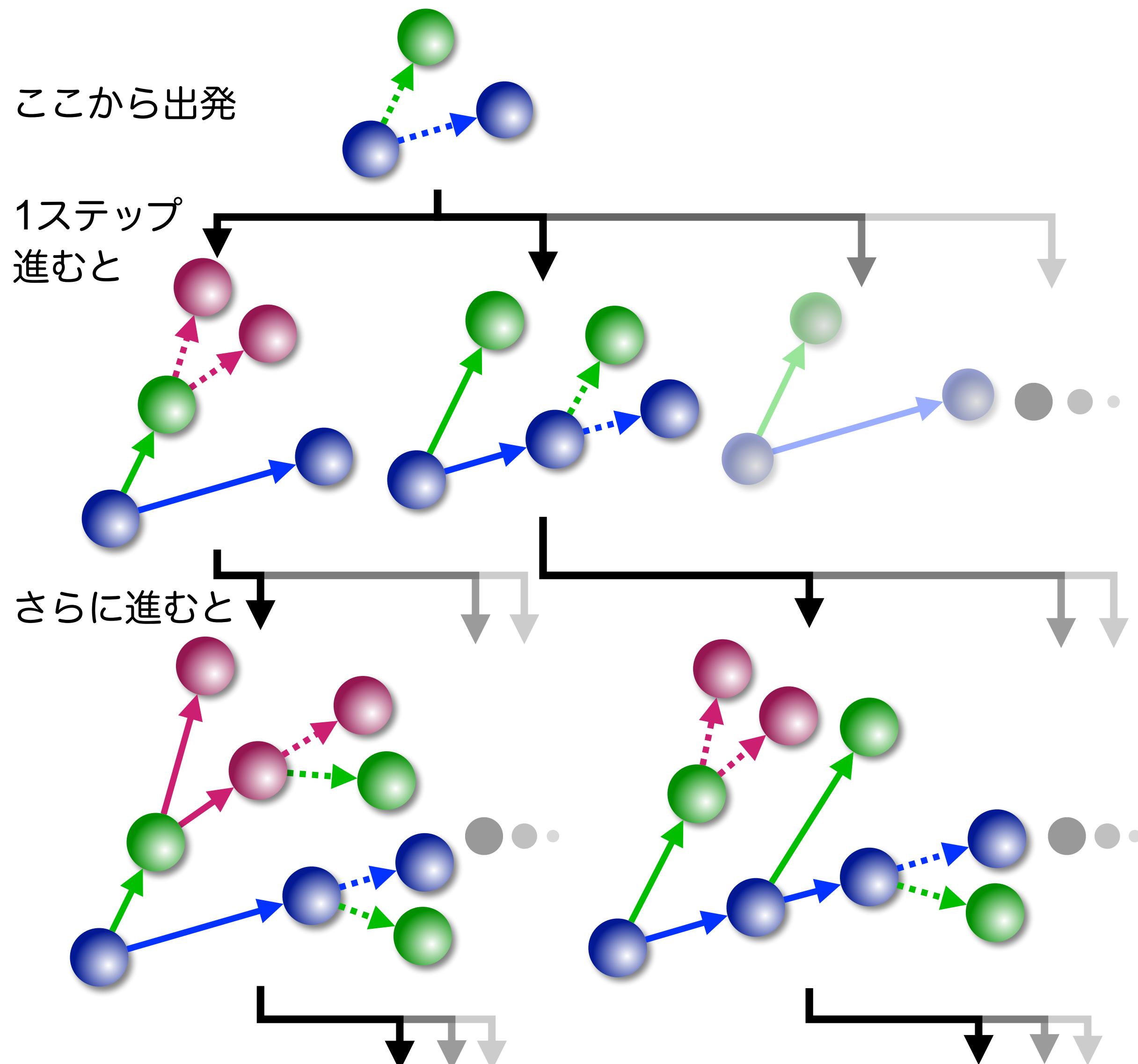
粒子ができれば1、できなければ0として、全ての粒子の崩壊/放出パターンの重ね合わせ状態を作る

素粒子の崩壊/放出過程のシミュレーション



無数に増えていく状態を重ね合わせ、
最後に崩壊/放出した回数を測定

素粒子の崩壊/放出過程のシミュレーション

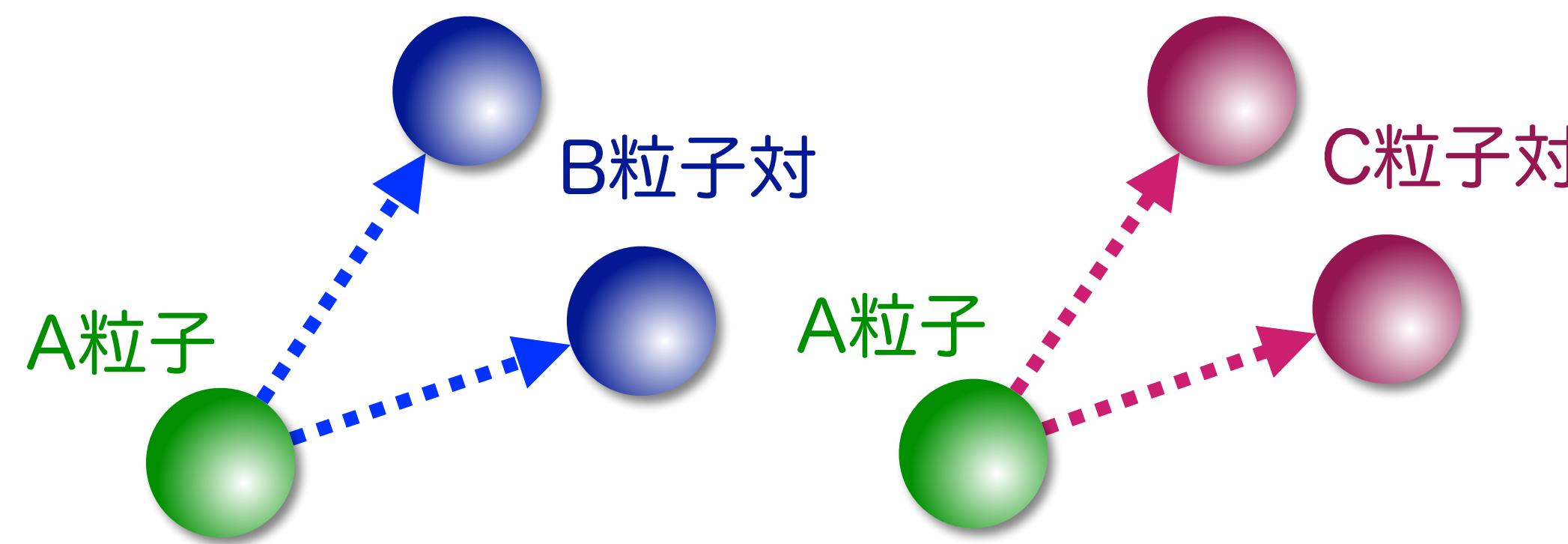


■ と ▼ と × が良く一致している
 → 量子的な効果（後述）がない場合は、古典コンピュータの結果と一致する

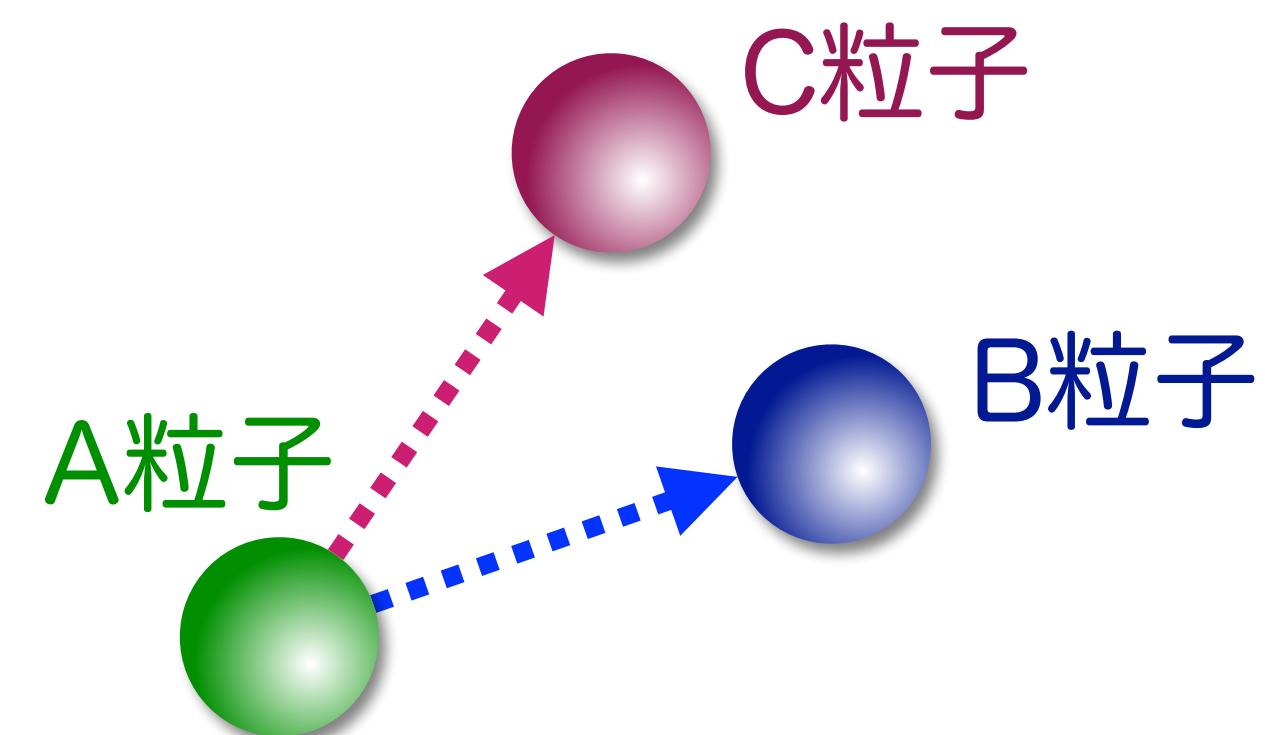
51

素粒子の崩壊/放出過程のシミュレーション

このパターンに加えて

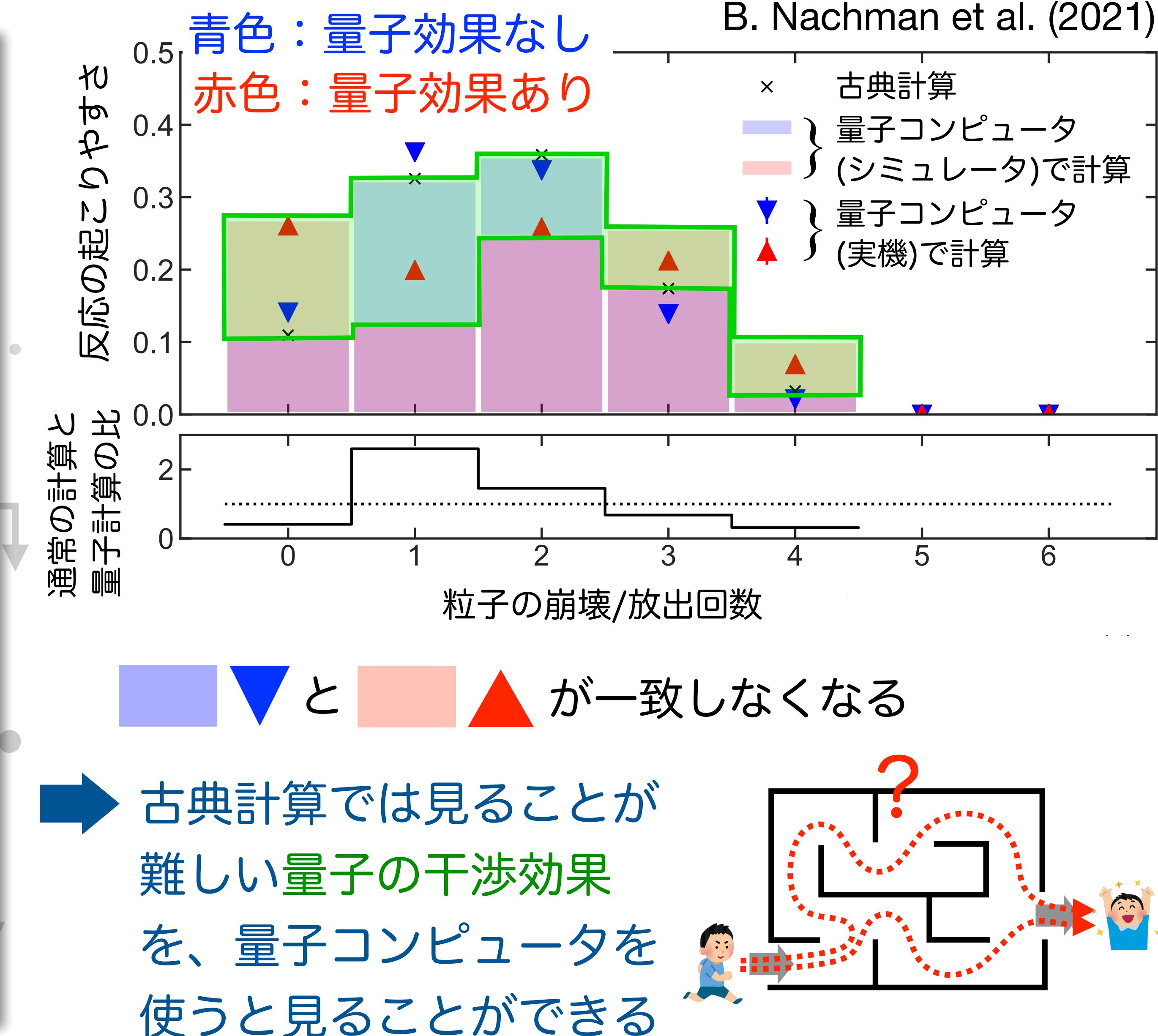
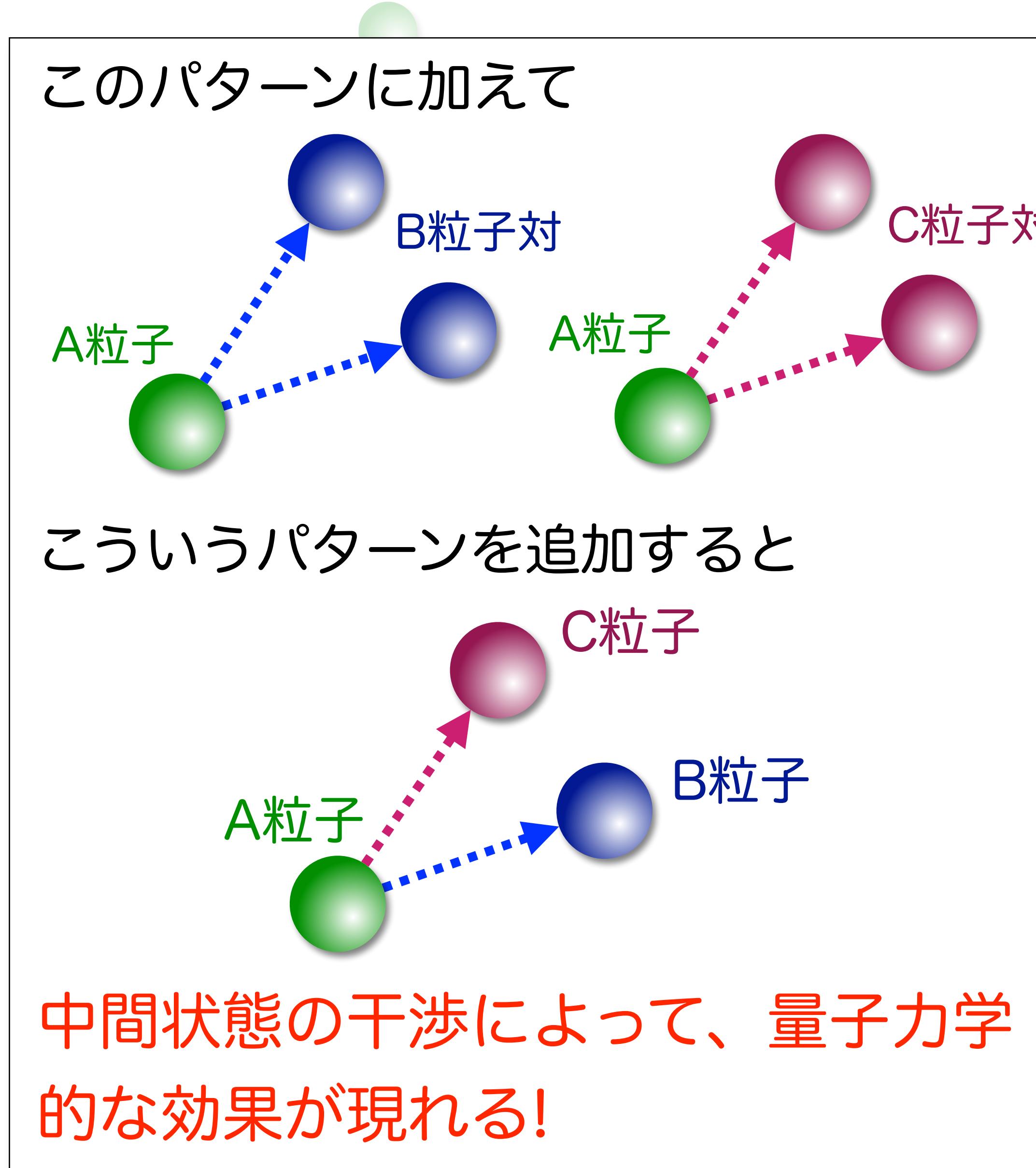


こういうパターンを追加すると



中間状態の干渉によって、量子力学的な効果が現れる!

素粒子の崩壊/放出過程のシミュレーション



まとめ

量子力学の（不思議な）世界を使って計算する量子コンピュータが現実のものになりつつあります

一方で、今の量子コンピュータはまだ不完全で、複雑な計算をすることは難しい

素粒子物理や宇宙物理への応用など、さまざまな可能性がある

皆さんが学部を卒業する頃には、古典コンピュータを上回る計算が可能になっている（かも？！）