



# 量子情報

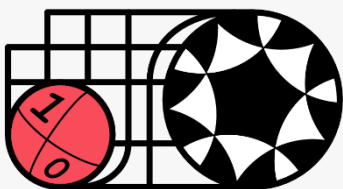
- 量子の奇妙から情報へ、情報から物理へ -

中田芳史

基礎物理学研究所 特定准教授



2023年11月18日 @第二回極限宇宙市民講演会



# まずは自己紹介

Hello, world!!

日本



「数式を用いれば、この世界を正確に理解できる」  
ことに魅せられて、**物理の道**に。

エチオピア

中田芳史 (40)

- 大阪府出身
- 2006 – 2008 : 東京大学 物理学 修士課程
- 2008 – 2010 : 青年海外協力隊 (エチオピア) に参加
- 2010 – 2013 : 東京大学 物理学 博士課程
- ハノーファー大学 (ドイツ)、バルセロナ自治大学 (スペイン)、東京大学でのポスドク・助教
- 2022年8月より、京都大学 基礎物理学研究所 特定准教授 (現職)

- 一度は発展途上国で暮らしてみたかった。
  - ボランティア (人助け) にも興味があった。
- 「心の底からやりたい」ことには、**挑戦**すべき。



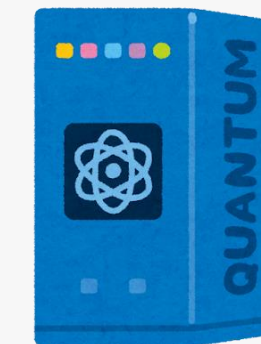


# まずは自己紹介

Hello, world!!

中田芳史 (40)

コンピュータ



インターネット



暗号

量子情報科学 = 量子力学 + 情報科学

wikipedia

量子力学とは、一般相対論とともに現代物理学の根幹を成す理論として、  
“主として分子や原子、電子などの微視的な物理現象を記述する力学”

原子



りんご



人間



太陽



大質量  
ブラックホール



量子力学

ニュートン力学

一般相対性理論

# まずは自己紹介

Hello, world!!

中田芳史 (40)

量子情報科学 = 量子力学 + 情報科学

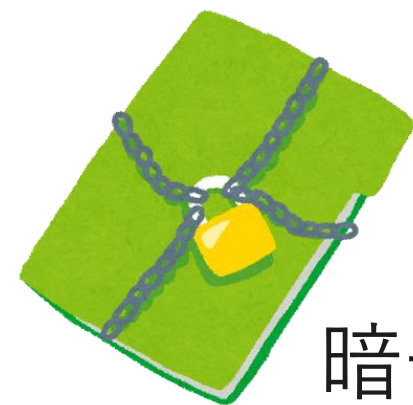
wikipedia

量子力学とは、  
“主として分子や

情報処理に使うと、凄いことができる！”



コンピュータ



暗号

インターネット



などなど

大質量  
ブラックホール

原子



量子力学

“情報” という視点から、物理現象を理解する！

一般相対性理論

1

## 量子力学の不思議 -小さな世界の大きな不思議-

*量子の世界はまだ見ぬ不思議に満ちている！*

2

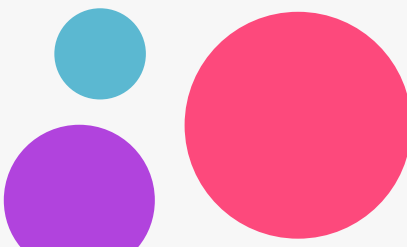
## 量子情報処理 -量子の不思議を“使う”驚きの情報技術-

*量子を舞台とした、情報技術*

3

## 量子情報から物理へ

*量子情報と物理の融合*



# 小さな世界の大きな不思議

量子が明らかにするこの世界の不思議

## 小さな世界を見てみよう。

□ 全ての物質は「分子や原子」で構成されている。

“量子の世界”

原子



100億分の1



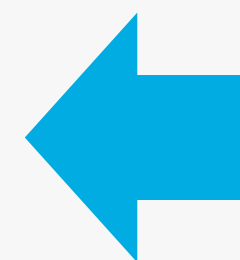
りんご



人間



10億分の1



太陽



量子力学

ニュートン力学

$10^{-10}$  m

≈ 5cm  
= 0.05m

≈ 10cm  
= 0.1m

≈ 1m

$10^9$  m

原子や分子の法則（ルール）に関する理論 = 量子力学

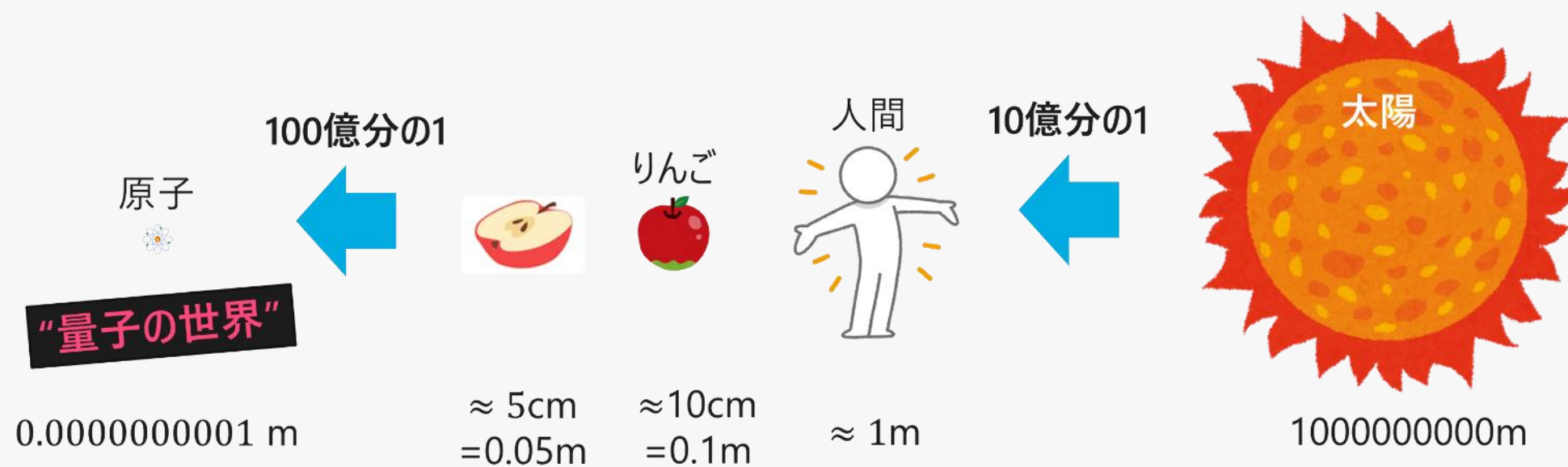


# 小さな世界の大きな不思議

量子が明らかにするこの世界の不思議

## 量子力学の不思議な世界

- 量子の世界では、我々の“普通の考え方”が一切通用しない！
- 今日は、「トンネル効果」と呼ばれる“非常識な量子現象”を通じて、その不思議さの一端を説明。



原子や分子の法則（ルール）に関する理論 = 量子力学

# 小さな世界の大きな不思議

量子が明らかにするこの世界の不思議

## トンネル効果？

□ ボールを1個壁に投げると？



≈ 1m

### 我々の常識

100回投げたら100回とも跳ね返る。



### 前提

ボールが通れるような穴は開いていない。



# 小さな世界の大きな不思議

量子が明らかにするこの世界の不思議

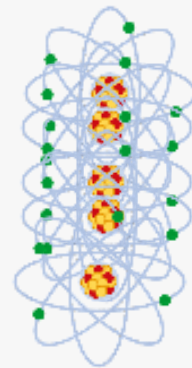
## トンネル効果？

□ 原子を1個壁に投げると？

原子



$10^{-10}$  m



我々の常識

100回投げたら100回とも跳ね返る。



前提

原子が通れるような穴は開いていない。

量子の世界の非常識

100回投げたら、たまに原子が壁をすり抜ける。

# 小さな世界の大きな不思議

量子が明らかにするこの世界の不思議

## トンネル効果？

我々の常識

100回投げたら100回とも跳ね返る。



量子の非常識

100回投げたら、たまに原子が壁をすり抜ける。

### □ トンネル効果の二つの不思議

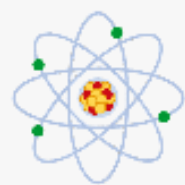
1. 原子がすり抜ける。
  - 原子が通れる穴はないし、壁が壊れた訳でもない。
2. すり抜けるのは毎回ではなく、“たまに”すり抜ける！
  - 全く同じ条件で繰り返し実験しても、“たまに”しかすり抜けない。

量子力学が教えること  
量子現象は、本質的に**確率的**！

原子



$10^{-10}$  m

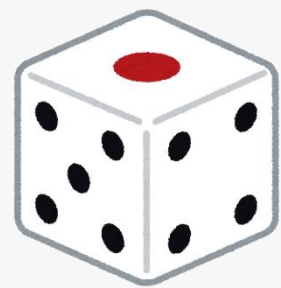


# 小さな世界の大きな不思議

量子が明らかにするこの世界の不思議

## 日常生活での確率

### 日常生活での「確率的な現象」の例



サイコロ



コイン



天気予報

- **原理的には**、これらは予測可能。本質的には確率的ではない。
  - サイコロやコインス・・・投げ方で、出る目は決まる。
  - **天気予報**・・・湿度や気圧等が全て分かれば、原理的には翌日の天気は計算で分かる。
- **現実的には**、知識が不足していたり、計算が手に負えないことから、確率的な現象に見える。



# 小さな世界の大きな不思議

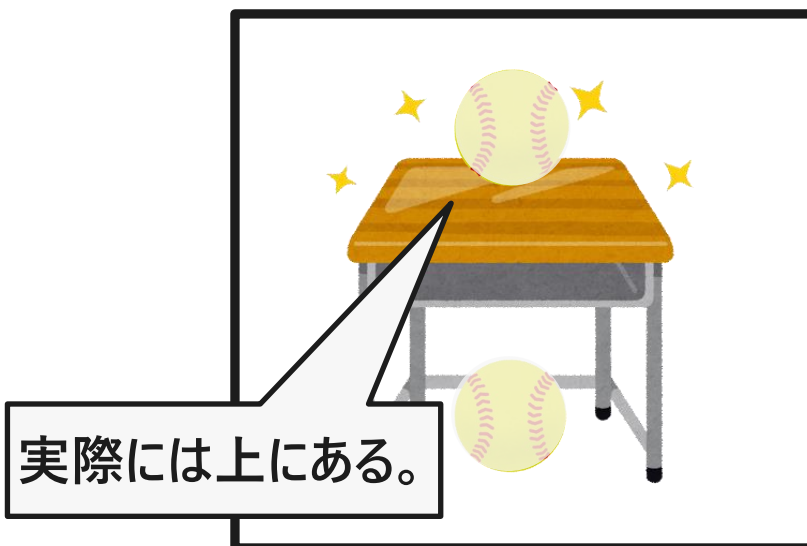
量子が明らかにするこの世界の不思議

## 確率的な量子の世界

### 我々の常識

「ボールが机の上か下に存在する」

- 場所を確認（測定）する前は、確率的に見える。
- 測定とは無関係に、ボールは「机の上か下」に存在。

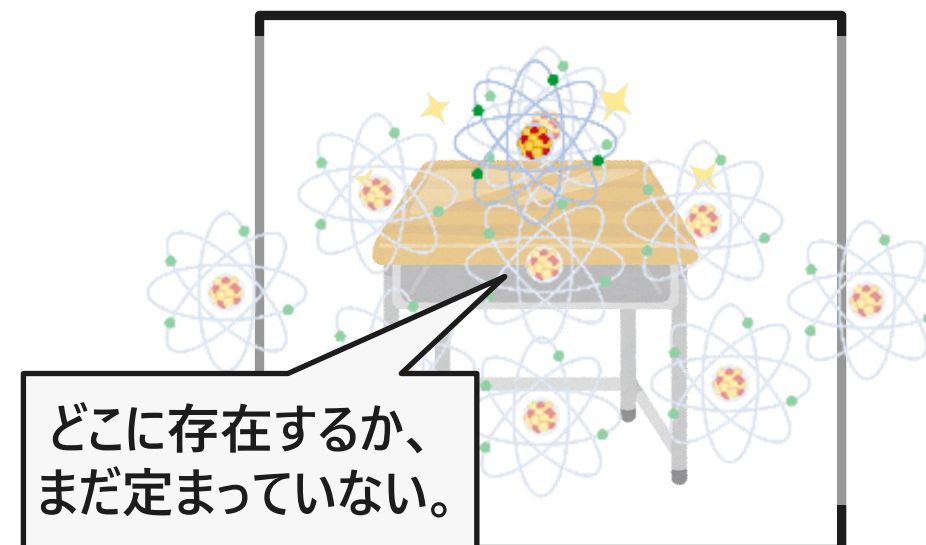


### 量子力学が教えること

「原子がある場所に存在する」

- 測定するまでは「どこにあるか、決まっていない」。
- 測定した瞬間に、確率的に「どこにあるか」が決まる。

原子の位置が、**量子的に重ね合わさっている**



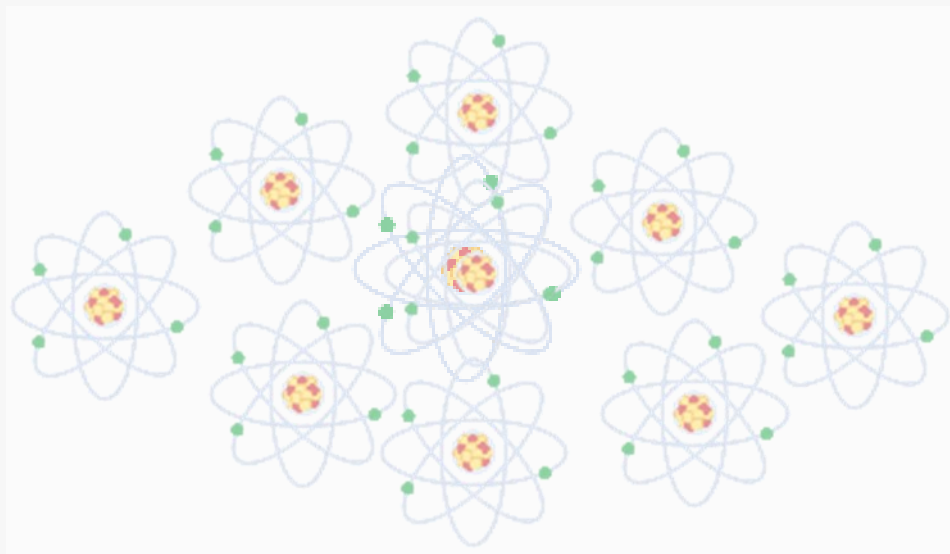
「知らない」のではなく、  
本当に「決まっていない」

# 小さな世界の大きな不思議

量子が明らかにするこの世界の不思議

## トンネル効果？

□ 原子を1個壁に投げると？

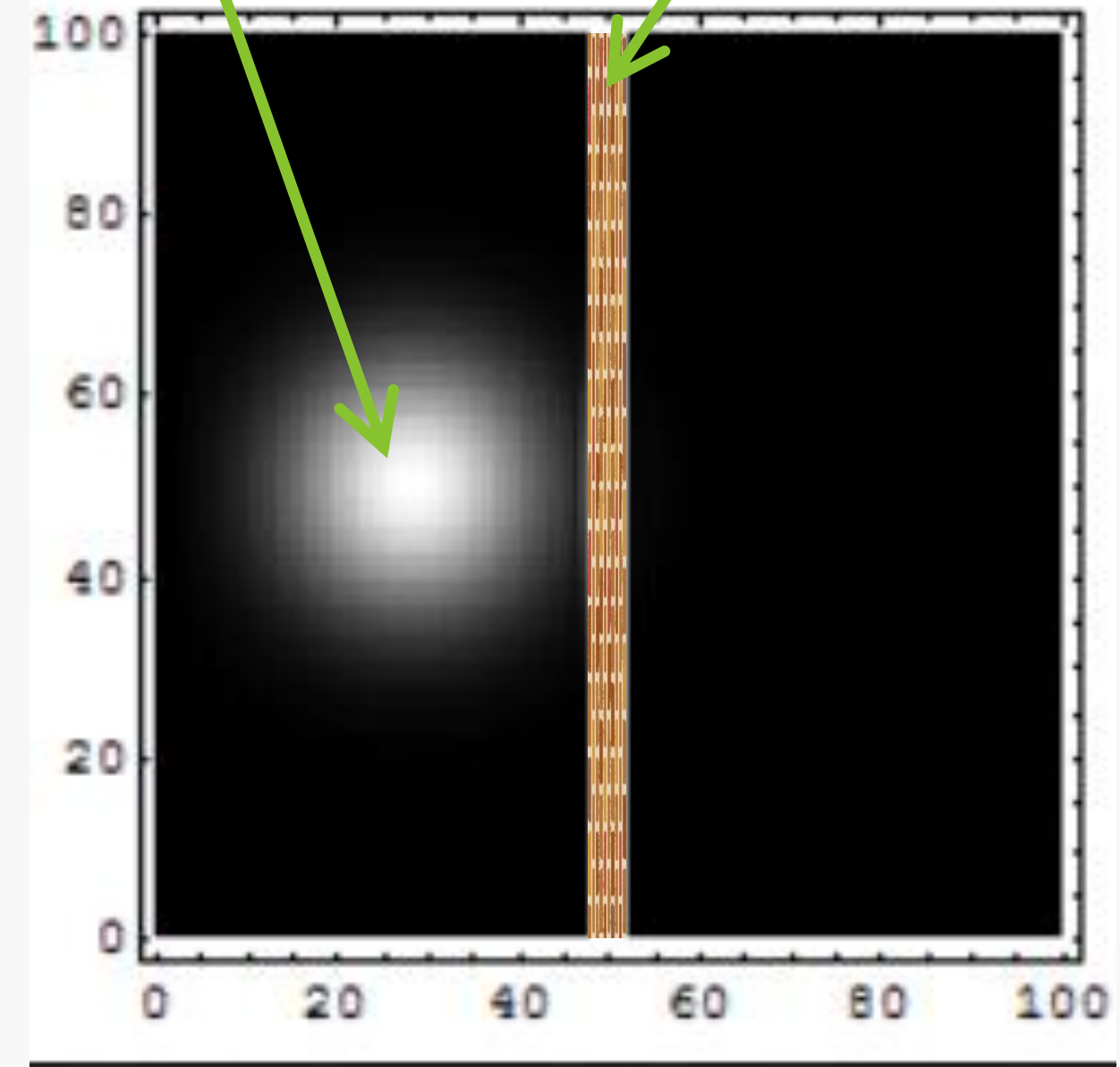


「原子1個」の位置は重ね合わさっているため、どこに存在するかはまだ決まっていない。



白いところは、原子が存在する確率が高い。  
※知らないのではなく、本質的にどこに存在するか決まっていない。

壁



原子1個を壁に投げた時の数値計算。  
[Wikipedia]

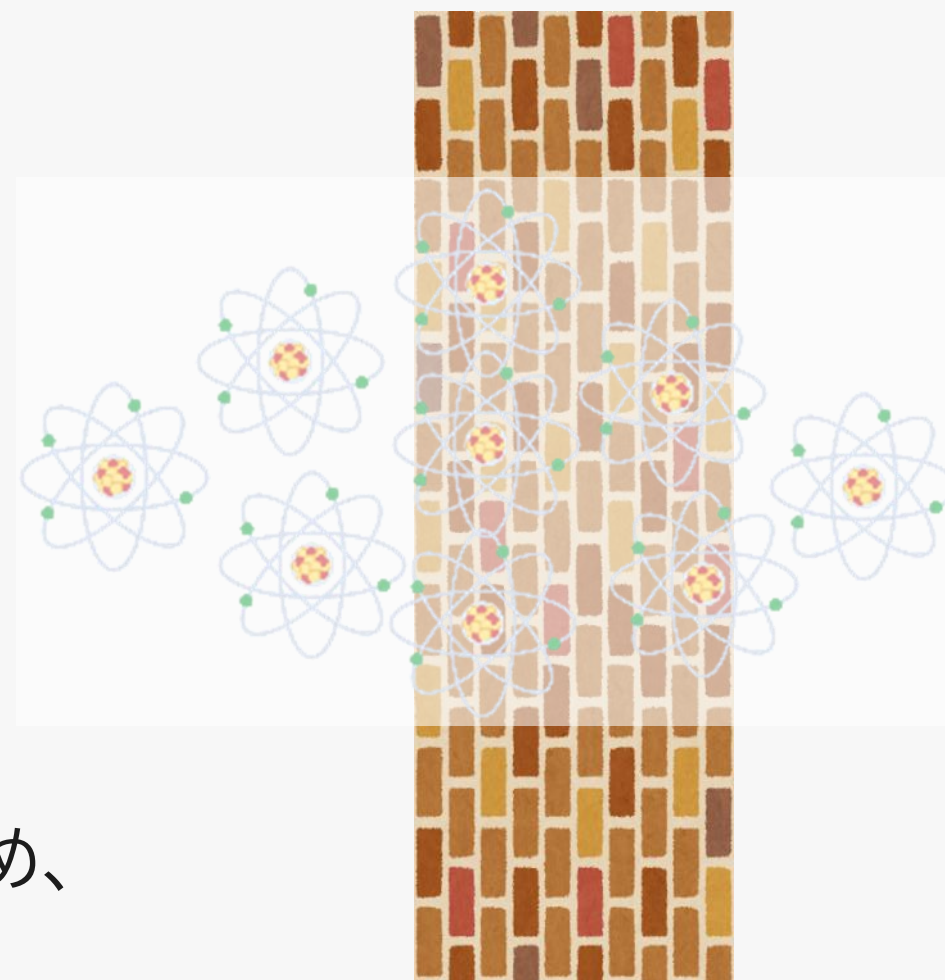
# 小さな世界の大きな不思議

量子が明らかにするこの世界の不思議

## トンネル効果？

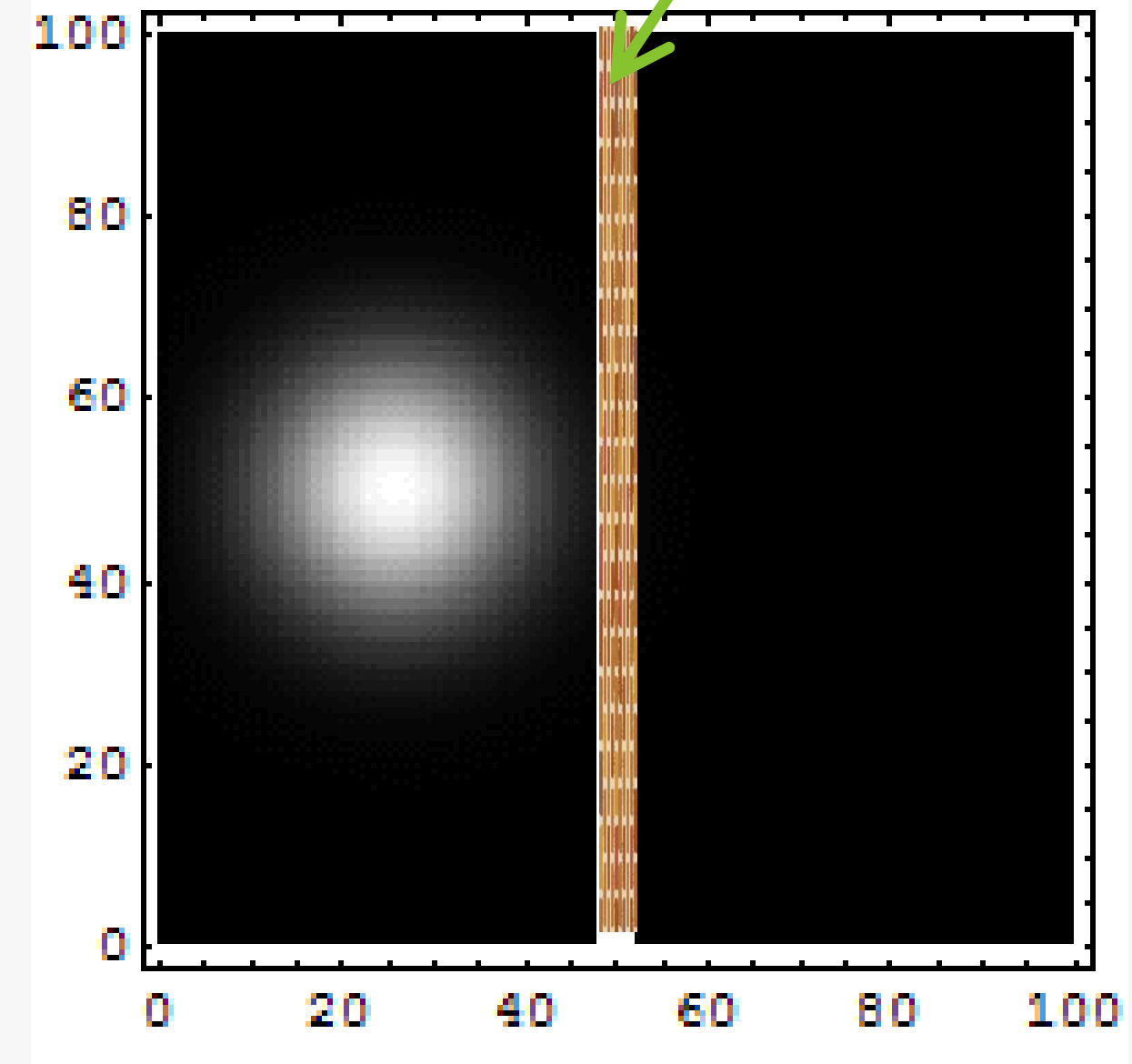
□ 原子を1個壁に投げると？

「原子1個」の位置は重ね合わさっているため、どこに存在するかはまだ決まっていない。



白いところは、  
原子が存在する確率が高い。  
※知らないのではなく、本質的にどこに  
存在するか決まっていない。

壁



原子1個を壁に投げた時の数値計算。  
[Wikipedia]



# 小さな世界の大きな不思議

量子が明らかにするこの世界の不思議

## トンネル効果？

白いところは、  
原子が存在する確率が高い。  
※知らないのではなく、本質的にどこに  
存在するか決まっていない。

壁

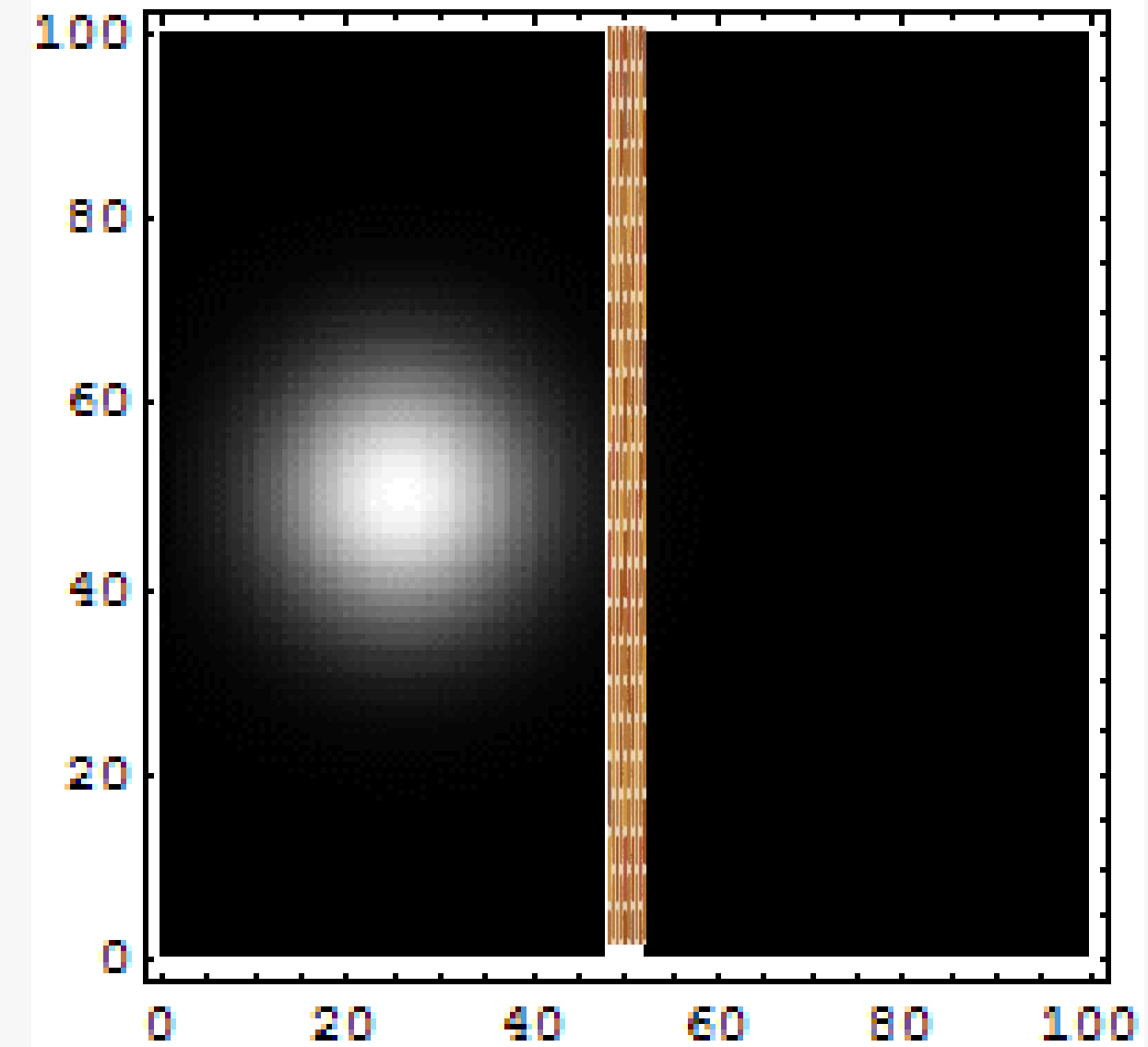
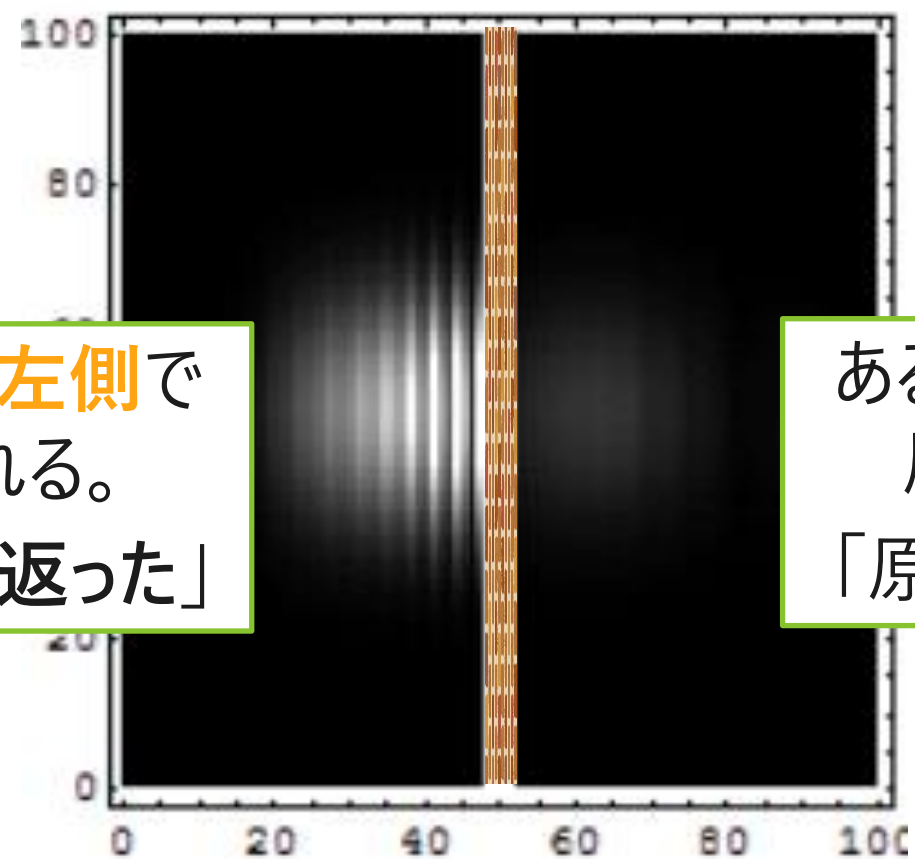
1つの原子が、「壁の右側に存在する状況」と  
「壁の左側に存在する状況」の重ね合わせにある。  
(どちらに存在するかはまだ決まっていない)

測定

測定

ある確率で、壁の左側で  
原子が測定される。  
「原子が壁で跳ね返った」

ある確率で、壁の右側で  
原子が測定される。  
「原子が壁をすり抜けた」



原子 1 個を壁に投げた時の数値計算。  
[Wikipedia]

# 小さな世界の大きな不思議

量子が明らかにするこの世界の不思議

## トンネル効果！

### □ 原子を壁に投げる

#### 1. 原子がすり抜ける

→ 「**原子の存在確率**」は波のように振る舞う。

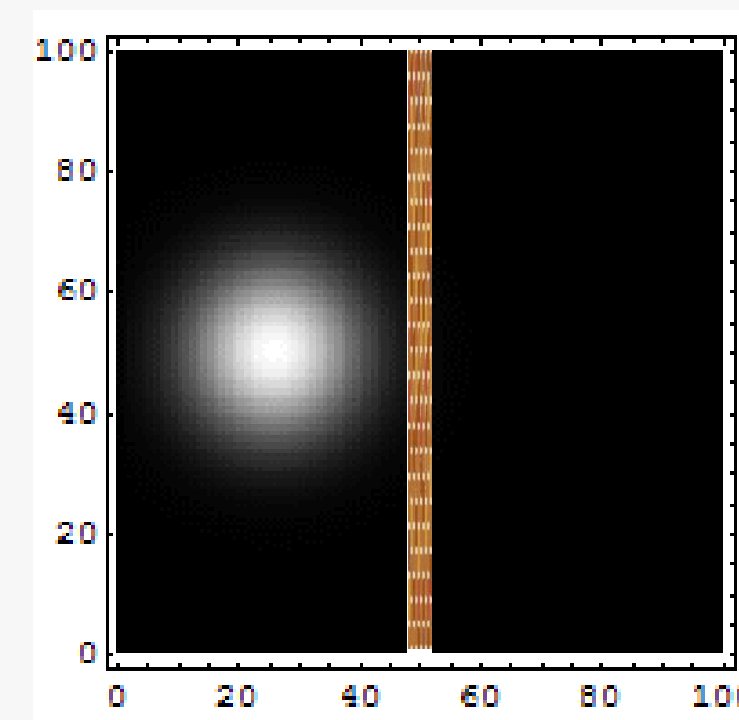
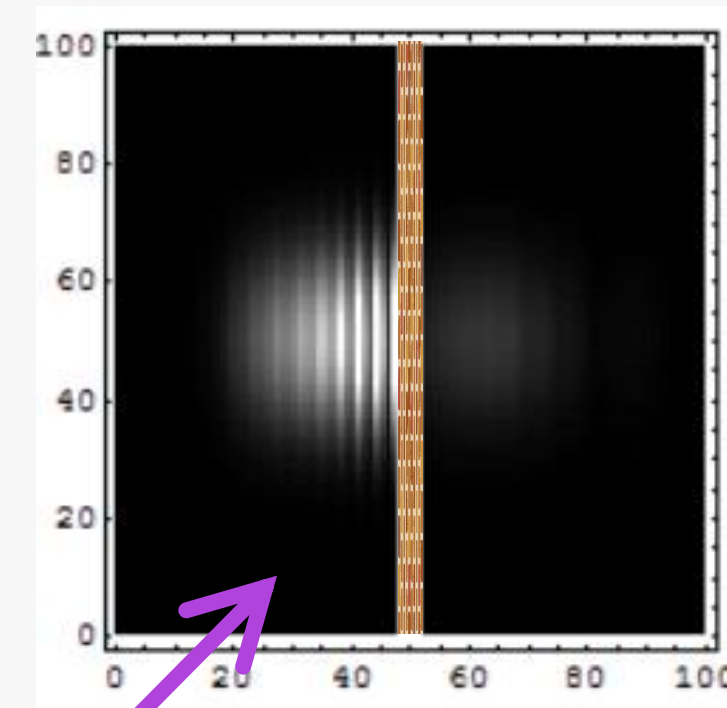
→ 一つの原子が、「**壁の左側にある状況**」と「**右側にある状況**」の**量子重ね合わせ**ができる。

#### 2. すり抜けるのは毎回ではなく、“たまに”！

→ **測定**することで、**確率的に位置**が決まる。



原子 1 個が壁に当たる時の数値計算。  
[Wikipedia]



# 小さな世界の大きな不思議

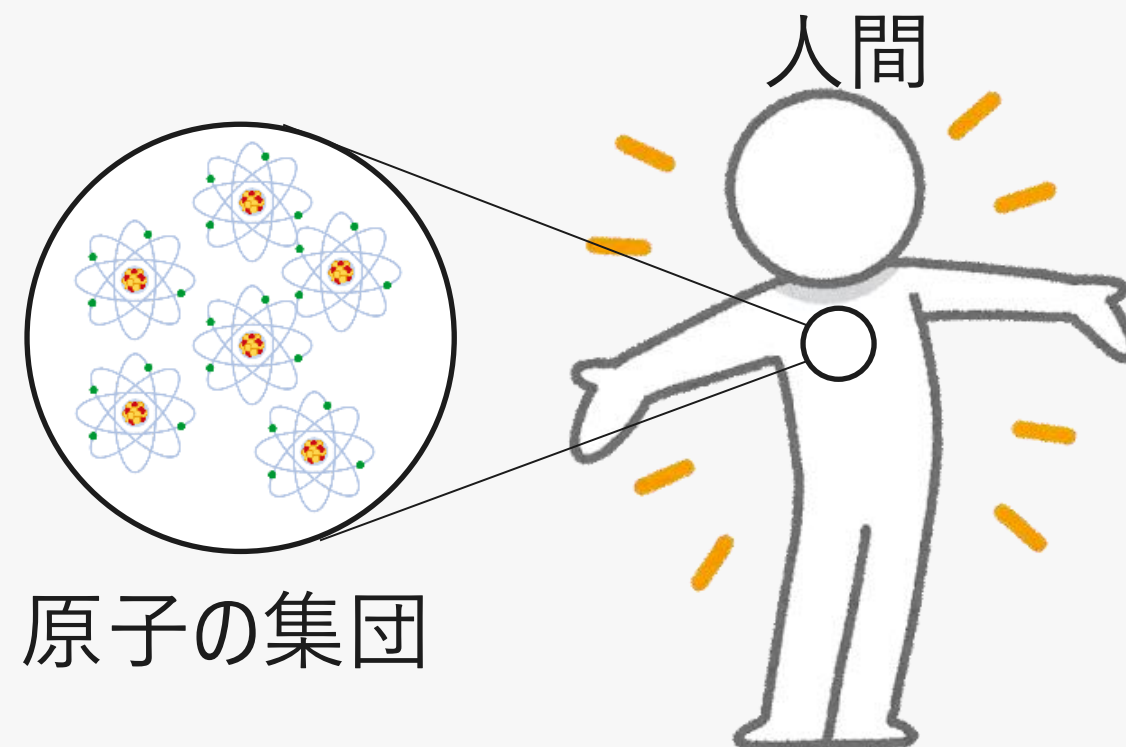
量子が明らかにするこの世界の不思議

## トンネル効果は、直観では理解しがたい

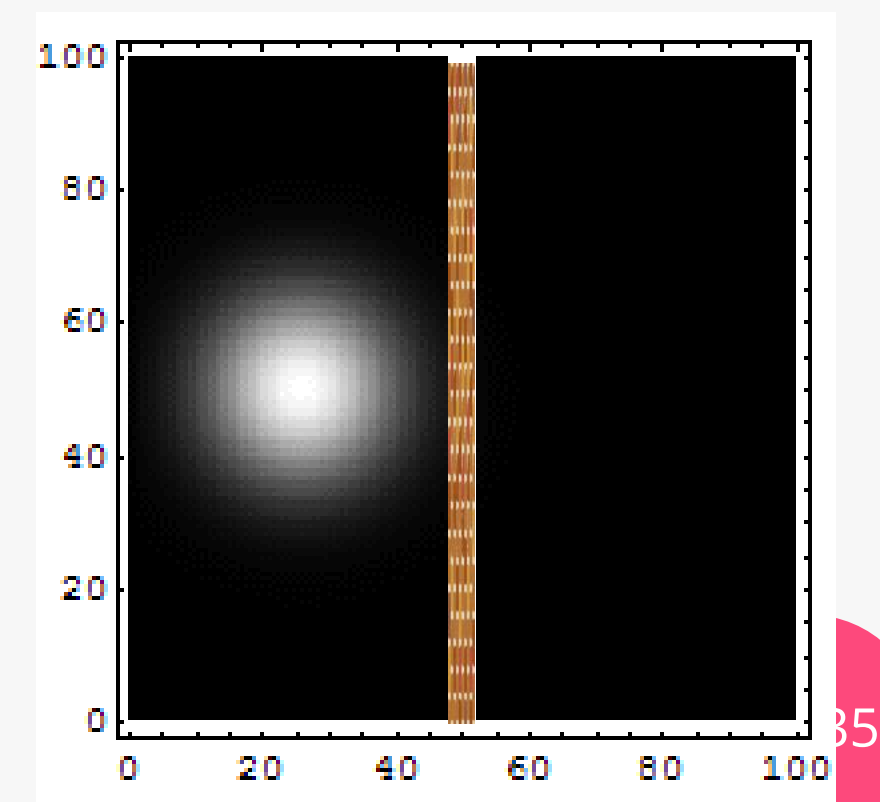
□ 量子重ね合わせって、どういうこと？

- 私たちの体も、「原子」から構成される。
- 「原子の位置は測定するまで定まらない」ならば、「私たちの位置」も決まらない？

量子力学は、  
間違ったor不完全な理論なのでは？



原子が存在する位置の確率





# 小さな世界の大きな不思議

量子が明らかにするこの世界の不思議

## トンネル効果は、直観では理解しがたい

□ 量子重ね合わせって、どういうこと？

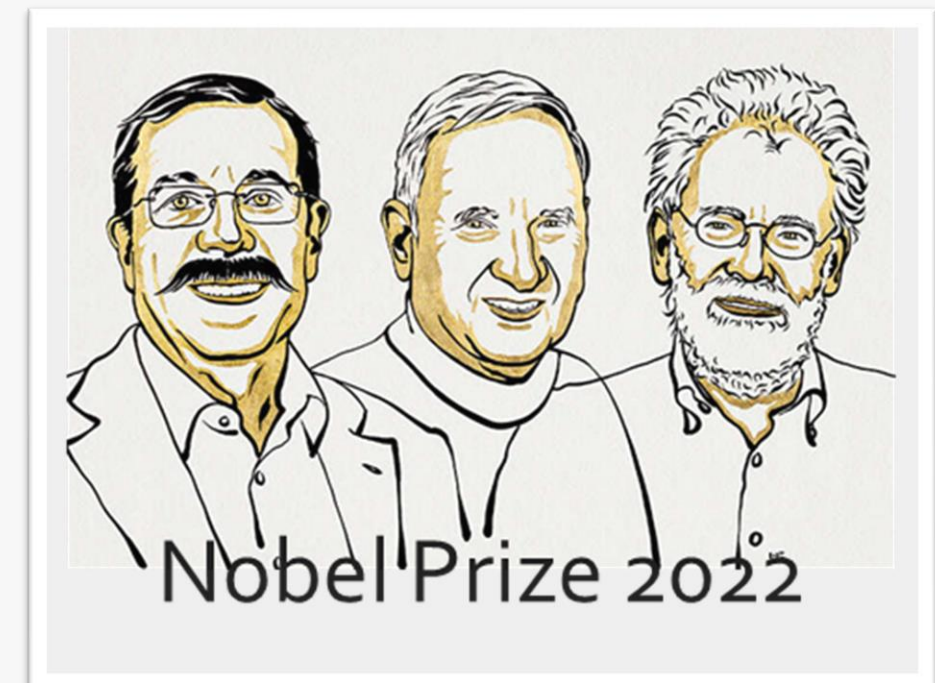
- 私たちの体も、「原子」から構成される。
- 「原子の位置は測定するまで定まらない」ならば、「私たちの位置」も決まらない？



- 量子力学が完成して以来100年近くが経つが、これまでの全ての実験結果は、**量子力学**によって矛盾なく説明できる。
- 「原子の位置は**測定**するまで、決まっていない = 『知らない』ではない」ことも、（局所性を仮定すれば）**実験で実際に確認**された。

→ この世界は、実は我々の直観とは異なる法則に支配されている。

~~量子力学は、間違ったor不完全な理論なのでは？~~



1

## 量子力学の不思議 -小さな世界の大きな不思議-

量子の世界はまだ見ぬ不思議に満ちている！

2

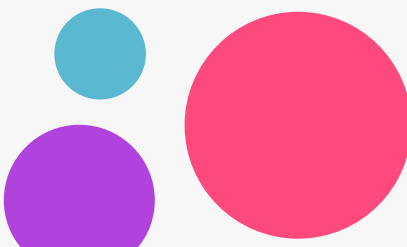
## 量子情報処理 -量子の不思議を“使う”驚きの情報技術-

量子を舞台とした、情報技術

3

## 量子情報から物理へ

量子情報と物理の融合



# 不思議を使った驚きの“技術”

量子を舞台とした、情報技術

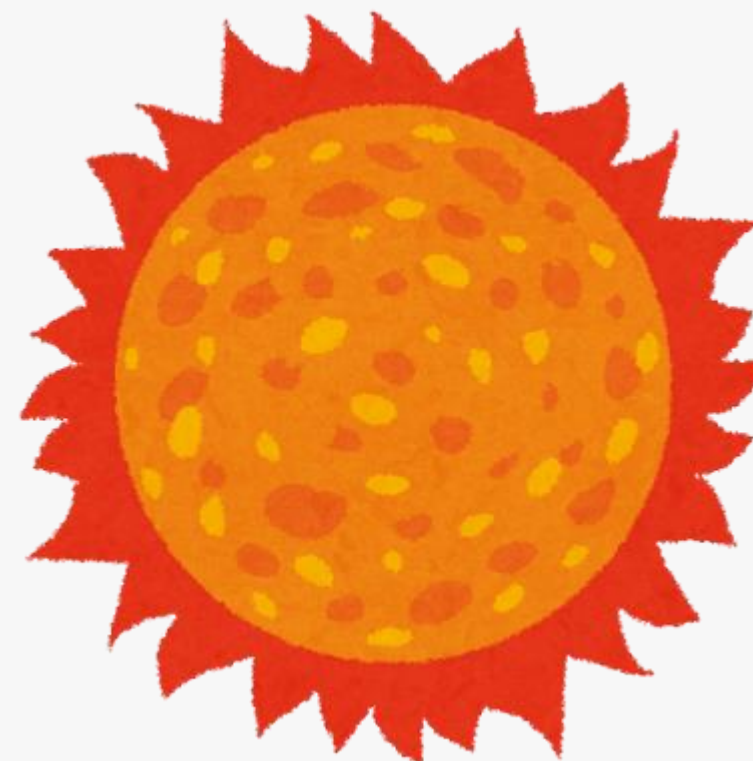
## 日常にある、トンネル効果

- **トンネル効果** = 「投げた原子が、確率的に壁をすり抜ける」現象
  - 生物の細胞内でも、トンネル効果は起こっているようだ。
  - 太陽が安定して存在する理由の一つ。
  - 実は皆さんの目前にある「**トンネル効果を使ったモノ**」

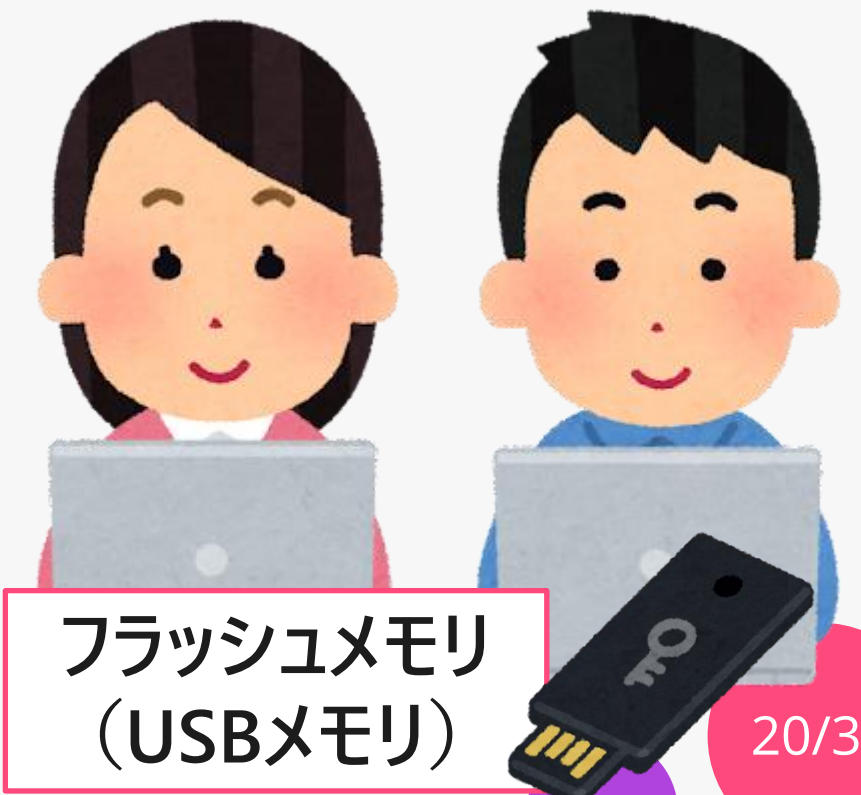
DNA



太陽

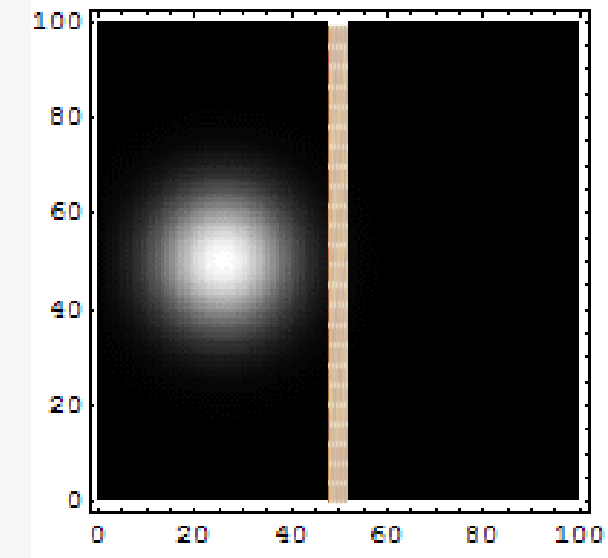


パソコン



フラッシュメモリ  
(USBメモリ)

原子 1 個が壁に当たる時の数値計算。  
[Wikipedia]





# 不思議を使った驚きの“技術”

量子を舞台とした、情報技術

## 量子の非常識を、つ・か・う

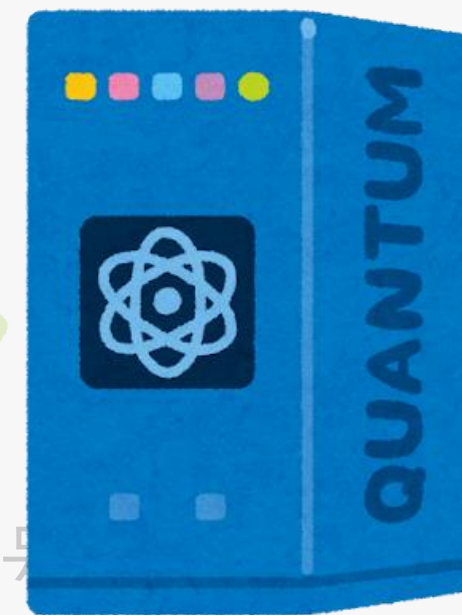
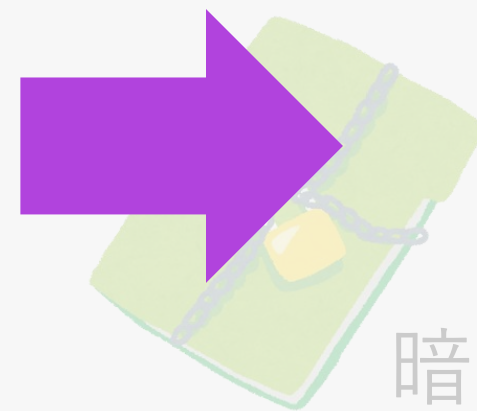
- 実は、量子の不思議な現象は情報科学（コンピュータやインターネット）ととても相性がよい！

### 量子情報科学

不思議な量子現象を用いると、これまでの情報処理を遥かに凌駕できる！



コンピュータ



量子コンピュータ など



インターネット

# 不思議を使った驚きの“技術”

量子を舞台とした、情報技術

## 量子コンピュータの凄さ

□ コンピュータを用いた計算

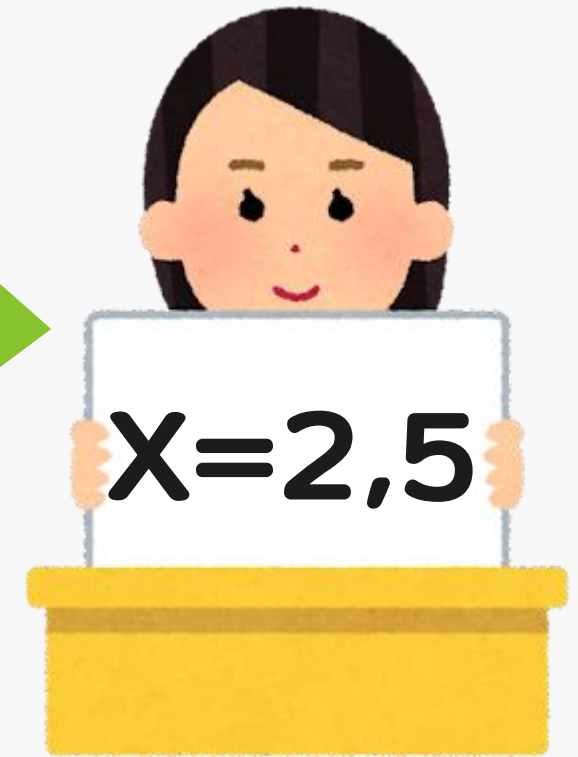


問題

$$x^2 - 7x + 10 = 0$$



パソコン



答え

# 不思議を使った驚きの“技術”

量子を舞台とした、情報技術

## 量子コンピュータの凄さ

□ コンピュータを用いた計算

$x = 0?$   
 $x = 4?$   
 $x = 5?$   
...

$x = 1?$   
 $x = 2?$   
 $x = 3?$

問題

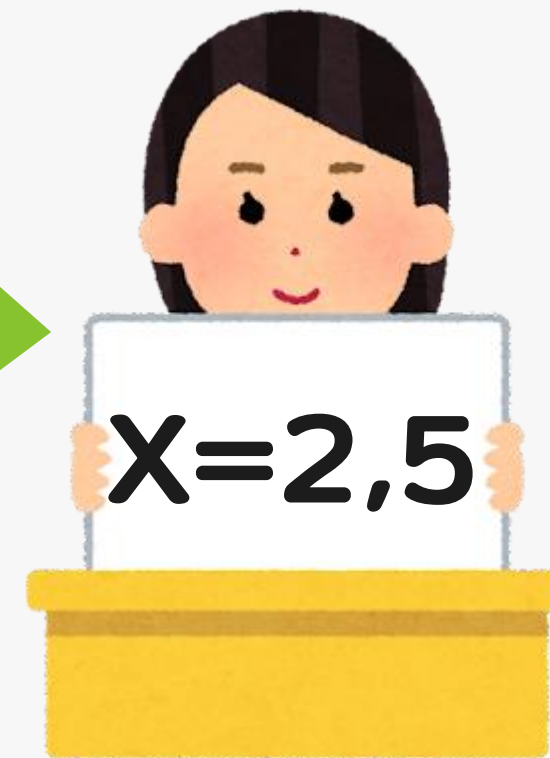
$$x^2 - 7x + 10 = 0$$



パソコン

左辺 = 0だよ!  
左辺 = -2だよー  
左辺 = -2だよー

左辺 = 0だよ!  
左辺 = 4だよー  
左辺 = 10だよー



答え

- 多くの問題は、コンピュータで何度も何度も計算を繰り返せば、解ける。
- ただし、難しい問題を解くには、**計算回数**が膨大になって、時間がかかる...

# 不思議を使った驚きの“技術”

量子を舞台とした、情報技術

## 量子コンピュータの凄さ

□ 量子コンピュータを用いた同時計算？

$x = 0$ と1と2と3と4と...を、  
量子的に重ね合わせた入力

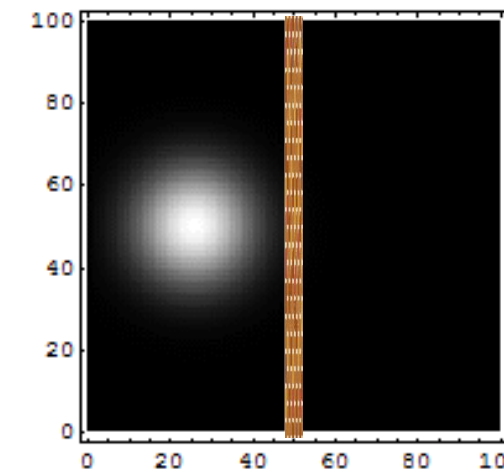
問題

$$x^2 - 7x + 10 = 0$$



量子コンピュータ

量子コンピュータのGOOD  
重ね合わせた全ての入力に対する計算を、  
一回で同時に実行できる！



位置が重ね合わせにある原子 1 個を壁に投げると、  
「壁の左にある」と「壁の右にある」の重ね合わせが得られる。

左辺 = 0だよ！

~~左辺 = -2だよー~~

~~左辺 = -2だよー~~

左辺 = 0だよ！

左辺 = 4だよー

左辺 = 10だよー

ナイーブに考えると、普通のコンピュータで、  
 $x = 1, 2, 3, \dots$ と順番に試すのに比べて、  
圧倒的に高速化できそう...



# 不思議を使った驚きの“技術”

量子を舞台とした、情報技術

## 量子コンピュータの凄さ

□ 量子コンピュータを用いた同時計算？

$x = 0$ と $1$ と $2$ と $3$ と $4$ と $\dots$ を、  
量子的に重ね合わせた入力

問題

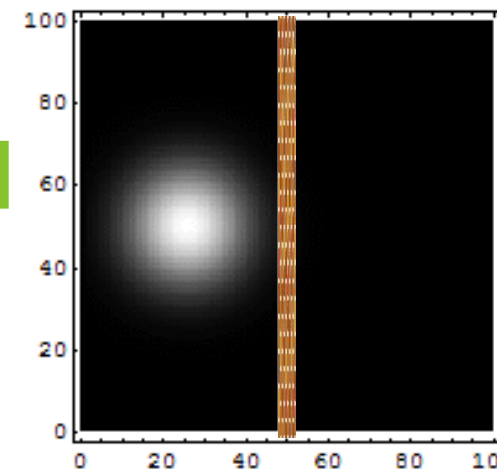
$$x^2 - 7x + 10 = 0$$



量子コンピュータ

量子コンピュータのGOOD  
重ね合わせた全ての入力に対する計算を、  
一回で同時に実行できる！

測定で原子の場所が  
確率的に決まる。



位置が重ね合わせにある原子 1 個を壁に投げると、  
「壁の左にある」と「壁の右にある」の重ね合わせが得られる。

$x = 0$ と $1$ と $2$ と $3$ と $4$ と $\dots$ に対する  
 $x^2 - 7x + 10$ の値が  
“重ね合わさった”出力

測定

「ある入力値 $x$ に対する左辺の値」が  
確率的に一つだけ得られる。

(例えば)  $x=1$ なら、左辺 = 4

(例えば)  $x=3$ なら、左辺 = -2

# 不思議を使った驚きの“技術”

量子を舞台とした、情報技術



研究者の腕の見せ所

量子の「強み」を保ちつつ、  
「弱み」を消せないか？

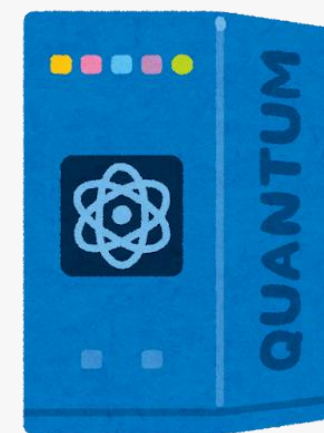
## 量子コンピュータの凄さ

□ 量子コンピュータを用いた同時計算？

- **強み**：入力を重ね合わせることで、無数の計算を一回で同時に実行可能！  
→ 計算を「並列化」できるので、一回の計算で考えられる入力を全て試せる。
- **弱み**：計算結果は、最後の測定によって確率的に一つだけ得られる。  
→ ナイーブに量子コンピュータを使うと、「普通のコンピュータに、ランダムな入力を入れた」のと同じ。



入力の“重ね合わせ”



量子コンピュータ



計算結果は“確率的”に一つだけ

# 不思議を使った驚きの“技術”

量子を舞台とした、情報技術



## 研究者の腕の見せ所

量子の「**強み**」を保ちつつ、「**弱み**」を消せないか？

## 量子コンピュータの凄さ

### □ 量子コンピュータを用いた同時計算？

- **強み**：入力を**重ね合わせる**ことで、無数の計算を**一回で同時に実行可能**！  
→ 計算を「**並列化**」できるので、一回の計算で考えられる入力を全て試せる。
- **弱み**：計算結果は、最後の**測定**によって**確率的**に一つだけ得られる。  
→ ナイーブに量子コンピュータを使うと、「**普通のコンピュータに、ランダムな入力を入れた**」のと同じ。

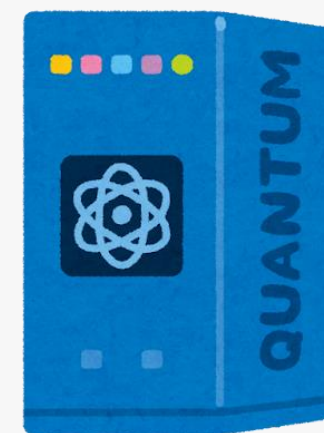
### □ 特定の問題に対しては、「量子の**強み**」を保ちつつ、「悪い**弱み**」を消せることがある。

- **スーパーコンピュータで1億年かかる問題を、量子コンピュータがあれば8時間で解ける。**

ただし、一般の問題に対して計算がどれくらい早くなるかは分かっていない

**GOOD!**

入力の“**重ね合わせ**”



量子コンピュータ



**GOOD!**

ほぼ必ず、欲しい答えが得られる！

# 不思議を使った驚きの“技術”

量子を舞台とした、情報技術

## 量子の非常識を、つ・か・う

- 実は、量子の不思議な現象は情報科学（コンピュータやインターネット）ととても相性がよい！

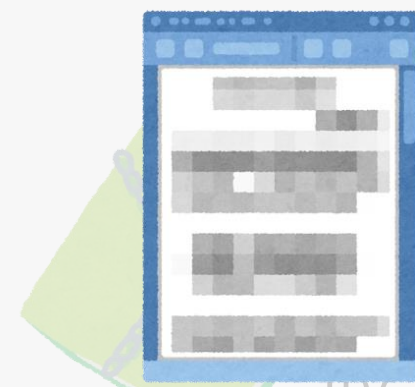
### 量子情報科学

不思議な量子現象を用いると、これまでの情報処理を遥かに凌駕できる！

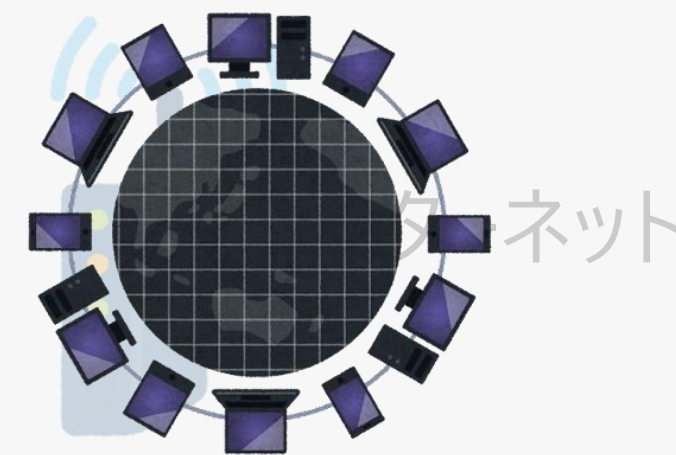
量子の法則は、情報処理にとって「都合がよい点」も「悪い点」もあって、全く単純ではなく、面白い。



量子コンピュータ



量子暗号



量子インターネット



1

## 量子力学の不思議 -小さな世界の大きな不思議-

量子の世界はまだ見ぬ不思議に満ちている！

2

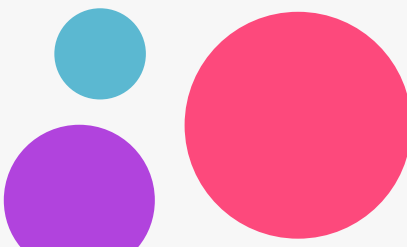
## 量子情報処理 -量子の不思議を“使う”驚きの情報技術-

量子を舞台とした、情報技術

3

## 量子情報から物理へ

量子情報と物理の融合

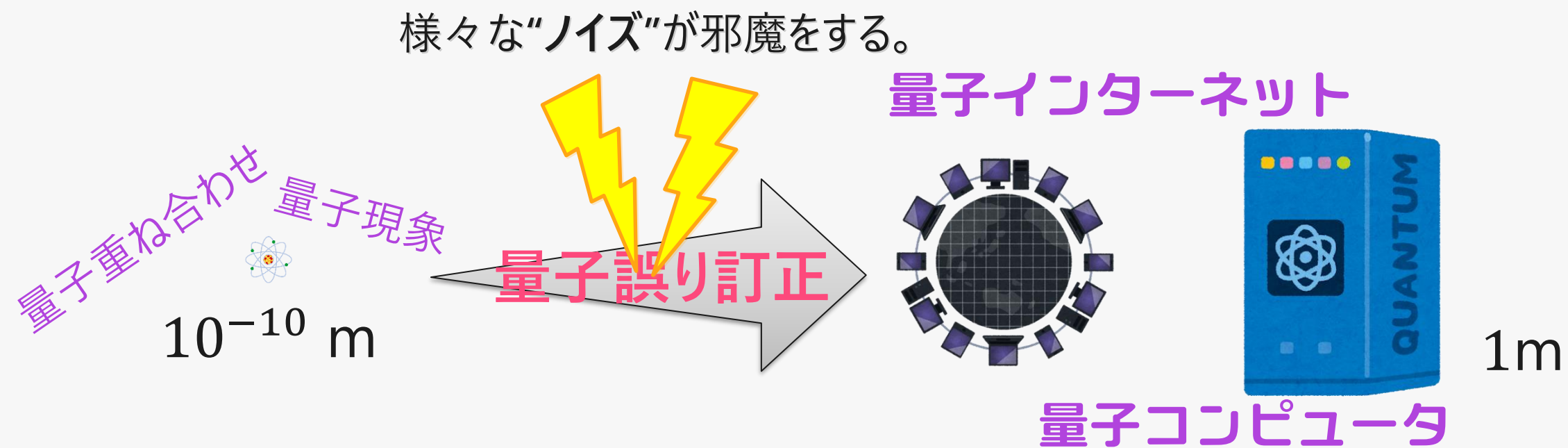


# 量子情報から物理へ

量子力学に基づく、情報科学

## 量子情報処理を実現する難しさ

- 量子現象を、我々の日常スケールで実現するのは容易ではない。
  - 量子現象はノイズに極めて弱い。
  - ノイズの影響をキャンセルする手法 = 量子誤り訂正

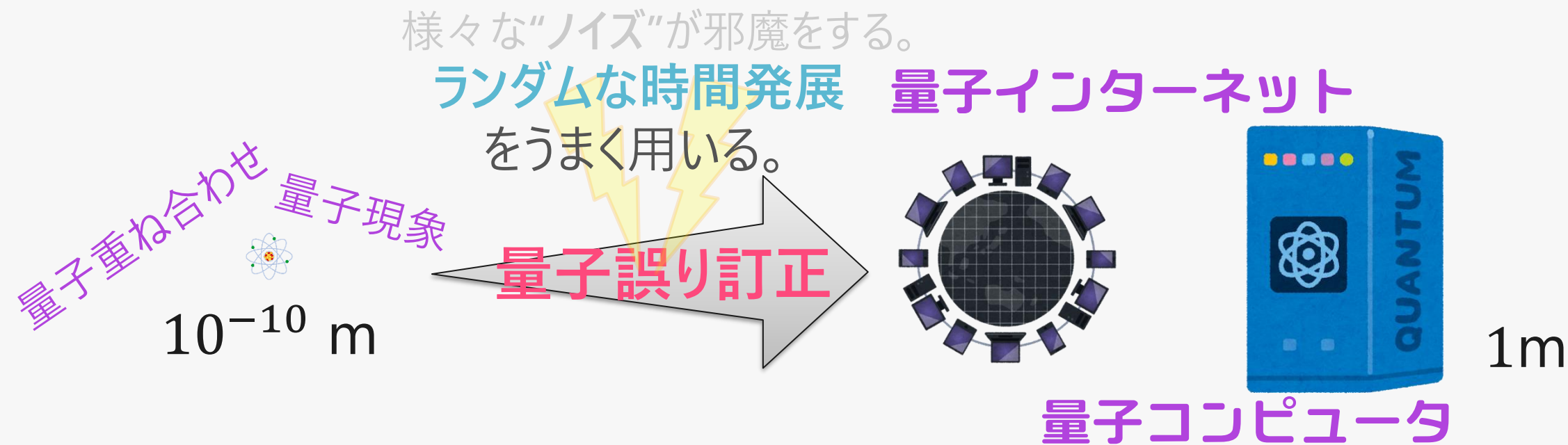


# 量子情報から物理へ

量子力学に基づく、情報科学

## 量子情報処理を実現する難しさ

- 量子現象を、我々の日常スケールで実現するのは容易ではない。
  - 量子現象はノイズに極めて弱い。
  - ノイズの影響をキャンセルする手法 = 量子誤り訂正
  - その一つの方法が、量子系でのランダムな時間発展を用いる方法。



# 量子情報から物理へ

量子情報から、物理へ

## 量子ランダム符号化が、ブラックホールの理解に役立つ！？

- 量子系でのランダムな時間発展を用いれば、量子誤り訂正を実現できる
  - 量子情報処理を実現するための技術として、提案された話だったが...



量子情報処理

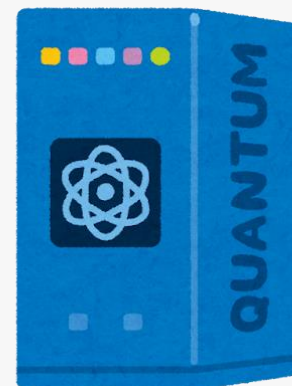
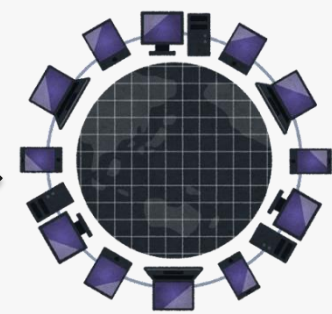
へー、ランダムな時間発展と量子誤り訂正が関係あるんだ。  
実は、ブラックホールとか量子カオスの時間発展は、ランダムなんだけど、  
じゃあ、それらも量子誤り訂正になっているってこと？

素粒子物理の  
研究者たち



ランダムな時間発展  
をうまく用いる。

量子誤り訂正



量子カオス

物理現象と量子誤り訂正？

ランダムな時間発展



ブラックホール

量子重ね合わせ  
量子現象  
 $10^{-10}$  m



# 量子情報から物理へ

量子情報から、物理へ

## 量子ランダム符号化が、ブラックホールの理解に役立つ！？

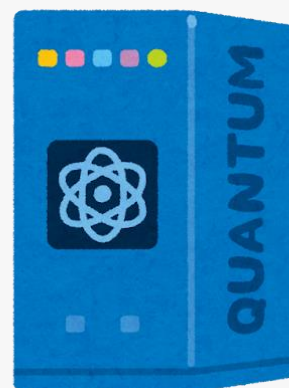
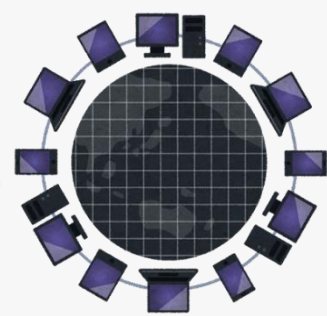
- 量子系でのランダムな時間発展を用いれば、量子誤り訂正を実現できる
  - 量子情報処理を実現するための技術として、提案された話だったが・・・
- このようなきっかけから、近年、量子情報の理論を用いて物理現象を解析する研究が盛んに。
  - 情報という全く新しい観点から、新しい物理を理解・開拓できるかもしれない。
  - この宇宙の在り方や起源も、量子情報をキーワードに理解できるかも？

### → 極限宇宙プロジェクトの目標

量子情報処理

ランダムな時間発展  
をうまく用いる。

量子誤り訂正



物理現象と量子誤り訂正？

ランダムな時間発展

量子カオス

ブラックホール

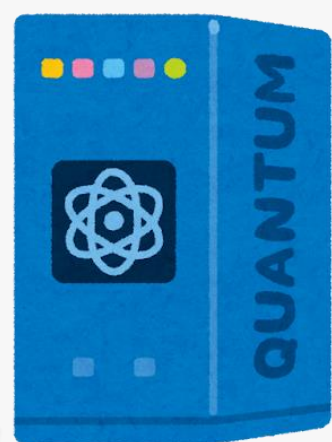
量子重ね合わせ  
量子現象  
 $10^{-10}$  m

# 量子情報から物理へ

量子情報から、物理へ

「突拍子もない発想」と「偶然の気付き」  
が切り拓く宇宙の真理

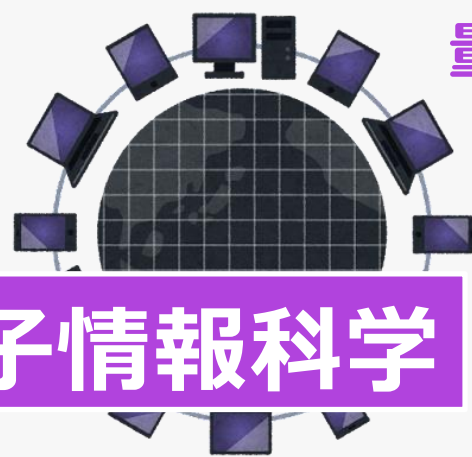
## 量子情報科学が切り拓く、情報と物理の融合



量子コンピュータ



量子暗号



量子インターネット

量子情報科学

量子情報が明らかにする  
物理の新潮流

情報処理に  
応用しよう！

原子



不思議な現象が  
たくさん。

りんご



人間



太陽



大質量  
ブラックホール



量子力学

ニュートン力学

一般相対性理論

$10^{-10}$  m

$10^{-1}$  m

1m

$10^9$  m

$\approx 10^{12}$  m



# Thank you



for your attention

Special Thanks to

