

文部科学記者会, 科学記者会他,  
名古屋教育医療記者会と同時発表

名古屋市立大学芸術工学部事務室

Tel:052-721-1225 Fax:052-721-3110

## シリコン材料における量子もつれ状態を発見！ 量子コンピューターを超える超量子コンピューターの実現へ 名古屋市立大学 論文発表

世界初！

米国物理学会 (American Physical Society) 『Physical Review B』 令和3年6月1日に掲載

### 研究成果の概要

名古屋市立大学大学院芸術工学研究科産業イノベーションデザイン領域の松本貴裕教授, 中央大学杉本秀彦名誉教授, 日本原子力研究開発機構大原高志研究主幹, 高エネルギー加速器研究機構池田進名誉教授らの共同研究グループは, シリコン表面に終端した水素が量子もつれ状態にあることを世界に先駆けて発見しました。

量子もつれは, 自然界で最も基本的で興味深い現象の1つです。最近の研究では, この量子もつれ現象を利用することによって盗聴不可能な量子通信や, 現代のスーパーコンピューターをはるかに凌駕する超高速情報処理が可能であることが実証されつつあります。今回, 名古屋市立大学の研究グループは, シリコン表面上に結合した2つの水素が, 安定した量子もつれ状態になることを発見しました。スーパーコンピューターの集積回路はシリコン材料で出来ているため, この発見により, 現代のスーパーコンピューター技術と量子コンピューター技術を統合する新たな道が開かれる可能性があります。(現段階では全く異なる別技術として研究開発が行われています。)

本研究は, 米国物理学会 (American Physical Society)の『Physical Review B』に令和3年6月1日に公開されました。

### 【背景】

量子力学の最も興味深い現象の一つに, 「量子もつれ」があります。これは, 例えば2個の粒子(ここでは粒子Aと粒子Bを仮定)が密接に結びついていて, 粒子Aと粒子Bが宇宙的スケールで離れていても, 粒子Aに対する測定が瞬時に粒子Bの測定に影響を与えるという現象です。この量子もつれ現象は, 量子コンピューター構築の基礎ともなっています。そのため, 近年, 物理学者たちはこの「量子もつれ」を生成して制御する技術を模索しています。しかし, これらの技術には, 量子情報の基本単位である「量子ビット<sup>1</sup>」を大量に作製することの困難さや, 1K以下の極低温(室温は300K)を維持する必要があること, 超高純度の材料を使用する必要があることなど, 多くの工学的な障壁がありました。

## 【研究の成果】

名古屋市立大学の松本貴裕教授，中央大学の杉本秀彦名誉教授，日本原子力研究開発機構の大原高志主幹研究員，高エネルギー加速器研究機構の池田進名誉教授らは，シリコンナノ結晶の表面に結合した2個の水素が，安定した「量子もつれ」状態になることを発見しました。

図1に示す「中性子非弾性散乱法<sup>2</sup>」と呼ばれる手法を用いて，シリコン表面に結合した水素の振動状態を観測し，2個の水素が「量子もつれ」状態にある事実を明らかにしました。この「量子もつれ」状態の特長としては，従来の水素分子の「量子もつれ」状態と比較すると，10倍以上の大きな振動エネルギーを有するため（水素分子：10 meV，シリコン表面水素：100 meV），**室温でも安定な「量子もつれ」状態を形成**することができる点が挙げられます。また，シリコン半導体表面処理技術を利用することによって，従来（ $10^2$  bit）よりも遥かに多い（ $10^6$  bit）量子ビットの形成が可能となり，**現在のスーパーコンピューターを用いては解くことができない，『大きな桁数の因数分解<sup>3</sup>』や『巡回セールスマン問題<sup>4</sup>』などの問題を一瞬で解くことが出来る超高速量子コンピューターを構築**できます。

## 【研究の意義と今後の展開や社会的意義など】

松本教授は，今回の研究意義について次のように述べています。“水素の「量子もつれ」状態は，これまでも水素分子で観測されており，基礎科学の分野で重要な役割を果たしています。しかし，この水素の「量子もつれ」状態は，今まで気相（気体）や液相（液体）でしか見つかっていませんでした。今回，私たちはシリコンの固体表面に結合した水素が「量子もつれ」状態になっていることを発見しました。シリコン材料における「量子もつれ」状態は，**今まで相容れなかった現代のスーパーコンピューター技術と量子コンピューター技術を統合する新たな情報処理技術の創出**につながります。”

今回発見された「量子もつれ」状態を利用すると，テラヘルツ光<sup>5</sup>波長領域で，多重にもつれたフォトン（光の粒）を発生できることを理論的に示しました。このフォトン（光の粒）を利用すれば，**秘匿性に優れた超高速量子暗号光通信が可能**となります。また，多数の「量子もつれ」状態を組み合わせることによって，図2に示すように，今まではSF上の話であった**“物質（水素）の瞬間移動”も実現出来るようになります（量子テレポーテーション）**。このように，今回の発見は，情報の保存，処理，物質転送に関する我々の常識を覆すものであり，**医薬品の開発やデータセキュリティなど，さまざまな分野でパラダイムシフトをもたらす可能性**があります。

私たちは，量子コンピューターの技術革新を目の当たりにしているのかもしれない。

## 【用語解説】

- 1 量子ビット：ビット（古典）とは binary digit の略で，現代のコンピューターが行っているのは，たくさん並べられた1又は0の数値列（例えば，10000111000111010100）を様々に操作していくことにほかならない。一方，量子ビットは，0又は1の決まった値を取らずに，例えば，ビットが0である確率が20%，ビットが1である確率が80%，とビットの数値に確率的要素が入り込む。これを量子ビットという。
- 2 中性子非弾性散乱法：図1に示すように，中性子(n)をn-Siに照射すると，ビリヤードをイメージするように，中性子のエネルギー（ここでは速度）がn-Si表面の水素原子(H)に与えられ，中性子(n)のエネルギーが小さく（速度が遅く）なる。逆に，この原理を利用すると，遅くなった中性子(n)の速度を測定することによって，n-Si表面の水素原子(H)がどのように振動し

ているかが、正確に評価できる。このように、中性子の速度変化を測定することによって原子の運動や結晶の振動を分析する手法を中性子非弾性散乱法という。

- 3 大きな桁数の因数分解：大きな桁数の因数分解は、現代のインターネットの情報秘匿性・安全性を保つための原理となっている。例えば2つの素数、 $3559 \times 2833$ の掛け算は直ぐに答えが10082647、と導き出せるが、10082647の因数分解を行うためには、しらみつぶしに計算していかなければならないため、非常に計算時間が必要となる。この大きな素数の積をインターネットでやり取りして情報秘匿性・安全性を保っている。
- 4 巡回セールスマン問題：全ての都市をちょうど一度ずつ巡り、出発地に戻る巡回路のうちで総移動距離が最小のものを求める（セールスマンが所定の複数の都市を1回だけ巡回する場合の最短経路を求める）組合せ最適化問題であり、都市が多数ある場合、非常に計算時間が必要となる。現代のスーパーコンピューターを用いても有限時間内に計算を終えることは不可能とされている。
- 5 テラヘルツ光：光と電波の中間の性質を有する電磁波である。テラヘルツ光の波長は、約300 $\mu\text{m}$ 前後である。将来的にはこのテラヘルツ光を利用して、現在の5Gより1000倍高速なスマートフォンやIoT等の超高速光通信が期待されている。

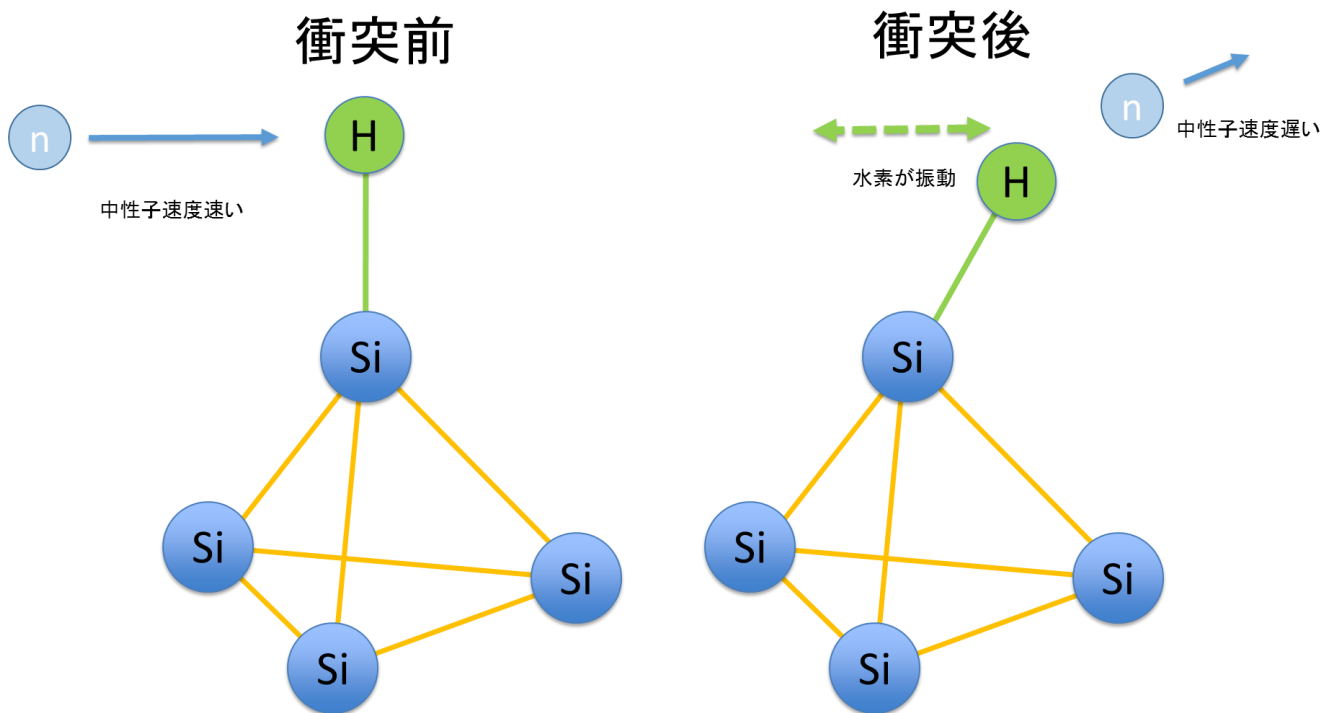


図1. 中性子非弾性散乱法原理図

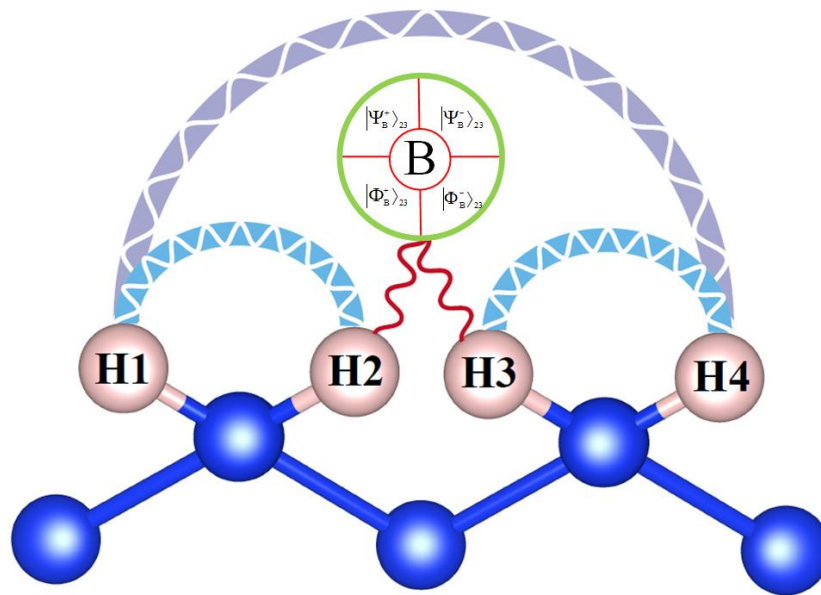


図2. 水素の「量子もつれ」状態と、「量子もつれ」状態を2個重ね合わせることによって生み出される水素の瞬間移動. この図では, H1 から H4 に水素が瞬間移動している.

**【研究助成】**

本研究は日本学術振興会科学研究費 基盤研究 B (松本貴裕 : 20H04455) の助成を受けたものです。

**【論文タイトル】**

“Quantum proton entanglement on a nanocrystalline silicon surface”  
 (ナノ結晶シリコン表面における水素の量子もつれ効果)

**【著者】**

松本貴裕\*, 杉本秀彦\*, 大原高志, 徳光昭夫, 富田誠, 池田進, \*Corresponding authors

松本貴裕 (名古屋市立大学大学院芸術工学研究科, 責任著者, 教授)

杉本秀彦 (中央大学理学部物理学科, 責任著者, 名誉教授)

大原高志 (日本原子力研究開発機構 J-PARC センター, 研究主幹)

徳光昭夫 (名古屋市立大学大学院理学研究科, 准教授)

富田誠 (静岡大学理学部物理学科, 教授)

池田進 (高エネルギー加速器研究機構, 名誉教授)

**【掲載学術誌】**

学術誌名 Physical Review B (フィジカルレビュービー)

DOI 番号 : <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.103.245401>

**【研究に関する問い合わせ】**

名古屋市立大学大学院芸術工学研究科  
教授 松本 貴裕 (まつもと たかひろ)

E-mail : [matsumoto@sda.nagoya-cu.ac.jp](mailto:matsumoto@sda.nagoya-cu.ac.jp)

**【報道に関する問い合わせ】**

名古屋市立大学 芸術工学部事務室  
名古屋市千種区北千種 2-1-10

TEL : 052-721-1225 FAX : 052-721-3110

E-mail : [jimu\\_share@sda.nagoya-cu.ac.jp](mailto:jimu_share@sda.nagoya-cu.ac.jp)