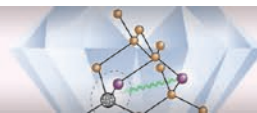


Qubits in the pink

ピンクのキュービット

Pieter Kok and Brendon W. Lovett



一部のダイヤモンドは、結晶構造に窒素 - 空孔欠陥とよばれる不完全性があるため、特徴的なピンク色を呈している。こうした欠陥を適切に操作することができれば、量子コンピューターの「キュービット」として利用するというバラ色の展望が開けてくるかもしれない。

Nature Vol. 444(49) / 2 November 2006

材料科学者である F.C.Franck は「結晶は人間のようなものであり、欠陥があるからこそ興味深い」と述べた。ダイヤモンドの結晶中にできる負に帯電した「窒素 - 空孔欠陥」に関する研究成果を *Physical Review Letters* 誌に発表した Ronald Hanson とその同僚も、おそらく同じ意見であろう¹。この系はみるみるうちに、固体量子コンピューターの量子情報基本単位（キュービット）の有力候補になろうとしている。

ダイヤモンドを構成する炭素原子の格子には、窒素やホウ素など、さまざまな置換不純物原子が入っていることがある。こうした欠陥はダイヤモンドに色をつけるので、しばしば色中心とよばれる。ダイヤモンドにピンク色を帯びさせる窒素 - 空孔 (NV) 欠陥は、結晶格子中の空孔の隣に位置する炭素原子が窒素原子に置き換わることで生じる。2つの欠陥が隣り合って存在する可能性は低そうに見えるかもしれないが、ダイヤモンドが加熱されると、空孔が格子の中を拡散していき、窒素原子の隣に来て止まることが知られている。「ランダムウォーク」がここで止まるのは、隣り合った2つの欠陥の配置が非常に安定になるからである。

NV 中心には、電気的に中性の NV⁰ と負に帯電した NV⁻ の2種類がある。興味深いのは、電子を余計にもっている NV⁻ 中心の方である。この電子は、おそらく別の窒素欠陥から供与されたものである。NV⁻ 欠陥の電子のうち、近隣の炭素原子との間に結合を作っていないものの総数は6であり、基底状態での全スピンは S=1 である。このスピンには、磁気量子数 $m_s = +1, 0, -1$ によって表される3種類の向

きがある。スピンのこれらのいずれかの値をとる傾向があるとき、それは偏極しているという。

NV⁻ 中心の明確な（「コヒーレント」な）スピン状態は、長時間（室温でも 50 μ 秒以上²）にわたって保存されうる。 $m_s=0$ の状態と $m_s=\pm 1$ の状態とのエネルギー差は、約 12 μ eV である。3 ギガヘルツのマイクロ波周波数の光子は、まさにこのエネルギーをもっているため、この光を使って NV⁻ 中心のスピン状態を操作することが可能である。スピン状態の「読み出し」には、もっと高いエネルギー状態への遷移を利用する。すなわち、ダイヤモンドにレーザーを照射して遷移を誘発し、緩和により NV⁻ 中心が低いエネルギーレベルへ戻ってくるときに放出する光から、そのスピン状態を知るのである。この過程は光ルミネッセンスとよばれている³。

コヒーレンス時間が長く、外部から正確に制御できる NV⁻ スピンは、実用的なキュービットに求められる性質の多くを備えているため、量子コンピューティングの分野でさかんに研究されている⁴。しかし、NV⁻ を利用した量子コンピューティングが実現するまでには、多くの障害を乗り越えなければならない。おそらく最も困難なのは、この系を拡張して多キュービット系を構築することである。

Hanson らは、この問題の解決に向かって大きく前進した¹。彼らは NV⁻ 中心と、空孔と結合していない窒素中心 N (NV⁻ に余分な電子を供与した窒素欠陥とは異なるもの) とのカップリングを実証した。この「N 中心」にもスピンがあるが、磁気量子数は異なり、 $m_s = \pm 1/2$ である。磁場をかけると、NV⁻ スピン

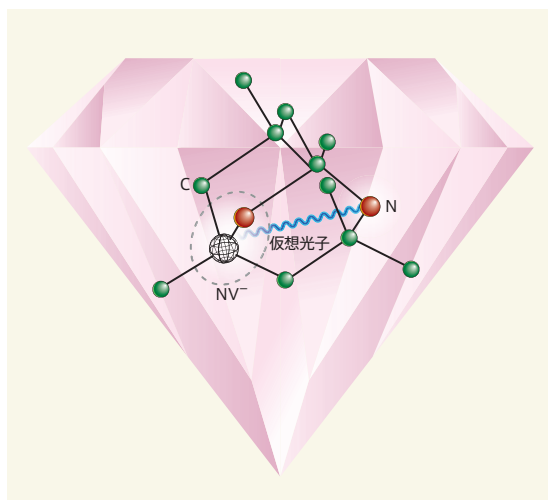


図1：欠陥どうしのカップリング。Hansonらは実験で、ダイヤモンドを構成する炭素原子の格子にできる窒素 (N) 欠陥と、その近傍にある窒素-空孔 (NV⁻) 欠陥とのカップリングについて調べた¹。磁場を利用して欠陥のスピン状態のエネルギーを調整すると、欠陥どうしを共鳴させることができる。このとき、いわゆる「仮想光子」を介して、エネルギーと偏極の交換が起こる。このような相互作用は、NV⁻欠陥の光学的制御を利用して窒素欠陥のスピンを制御することを可能にするものであり、これらを組み合わせてできる系は、量子コンピューティングのための2キュービット構造として有望視されている。

と N スピンのエネルギーレベルの構造はいずれも変化する (ゼーマン効果)。ある強さの磁場をかけると、2つの欠陥のスピンレベルの間のエネルギーギャップが同じになる。NV⁻と N との間に相互作用がある場合、この「共鳴」が、いわゆる「仮想光子」を介したエネルギーと偏極の交換を可能にする (図1)。その結果、NV⁻は光を放出するのに適した量子状態ではなくなるため、光ルミネッセンスシグナルが小さくなる。Hansonらが観察したのは、この効果だった¹。

著者らは次に、マイクロ波場を NV⁻欠陥と共鳴させる実験を行った。ここでも、NV⁻スピンとマイクロ波場との間で偏極の交換が起きた。NV⁻がダイヤモンド格子中で孤立している場合、光ルミネッセンスシグナルは1回だけ低下するはずである。けれどもHansonらは、シグナル中に2回の低下を観察した²。これもまた、N中心との相互作用のためである。Nスピンの向きをとりうることで、NV⁻中心での有効磁場に違いが生じ、それに応じて共鳴がシフトする。重要なのは、このシフトがN中心のスピン状態の読み出しを可能にすることである。それには単に、NV⁻中心の光ルミネッセンスを観察するだけでよい。この実験は、必要に応じてN中心に特異的な状態をとらせることができることも示している。

N中心は、NV⁻欠陥を含む試料にはごく一般的にみられるため、上述の相互作用は、NV⁻キュービットのコヒーレンスが失われる主な原因になっている。N中心を制御する方法は、このデコヒーレンスを許容範囲内まで小さくする手段として有望視されている。

N-NV⁻系は電子-スピン2キュービット系に相当するため、今回の実験は、NV⁻系に基づく大規模な量子コンピューターの製作に向けて重要な一歩を踏み出したものといえる。著者らは、N欠陥の鎖を介して複数のNV⁻中心を連結することができると提案する。この提案は、大胆すぎるかもしれない。多キュービットレジスタを実現するには、ある種の「測定に基づく」量子コンピューティングを利用する方法、すなわち、キュービット間に量子相関を作ってから量子アルゴリズムを実行する方法のほうがよいかもしれない⁵。ここでN-NV⁻系は、光学的操作により「ブローカー」キュービットの間に必要な量子相関を作り出し、これを「クライアント」キュービット (デコヒーレンス時間は長い、光学的遷移を起こさないもの) に移すプロトコルとして理想的である⁶。この方法がうまくいけば、量子コンピューティングには真にバラ色の未来が待っているといえるだろう。 ■

Pieter Kok and Brendon W. Lovett, オックスフォード大学 (英)

- Hanson, R., Mendoza, F.M., Epstein, R.J. & Awschalom, D.D. *Phys. Rev. Lett.* **97**, 087601 (2006).
- Kennedy, T.A., Colton, J.S., Butler, J.E., Linares, R.C. & Doering, P.J. *Appl. Phys. Lett.* **83**, 4190 (2003).
- Jelezko, F., Gaebel, T., Popa, I., Gruber, A. & Wrachtrup, J. *Phys. Rev. Lett.* **92**, 076401 (2004).
- Santori, C. *et al.* preprint available at www.arxiv.org/quant-ph/0607147 (2006).
- Raussendorf, R. & Briegel, H.J. *Phys. Rev. Lett.* **86**, 5188 (2001).
- Benjamin, S.C., Browne, D.E., Fitzsimons, J. & Morton, J.J.L. *New J. Phys.* **8**, 141 (2006).