

NTT持株会社ニュースリリース

(ニュースリリース)

2012年1月26日

日本電信電話株式会社
独立行政法人科学技術振興機構自然界の基本粒子とは異なる「準粒子」の存在が期待される電子状態を世界で初めて解明
～エラー発生率が非常に低い新しい量子計算の手法に期待～

日本電信電話株式会社(東京都千代田区、代表取締役社長:三浦 惺、以下 NTT)と独立行政法人科学技術振興機構(埼玉県川口市、理事長:中村 道治、以下 JST)は、自然界の基本粒子※1(フェルミ粒子、ボーズ粒子)とは異なる非アーベリアン準粒子※2の存在が期待される電子状態を世界で初めて解明しました。

本成果は、5/2分数量子ホール状態※3(以下 5/2状態)という非常に純度の高い半導体結晶中においてのみ実現される特殊な電子状態を、NTTとJSTが独自に開発した高感度核磁気共鳴(NMR)法※4により測定することで得られました。

今後、準粒子の実証実験を行い、エラー発生率が非常に低い新しい手法の量子計算(トポロジカル量子計算※5)の応用を検討します。

なお、本成果は米国時間2012年1月26日(日本時間1月27日未明)に米国科学雑誌「Science」のオンライン速報版(Science Express)で公開されます。

1. 研究の背景

量子コンピュータは従来のコンピュータをはるかにしのぐ計算能力を有すると期待されていますが、計算の規模が大きくなると外部擾乱や論理ゲートの精度不足によるエラー発生や、そのためのエラー補正が重要な課題となります。そのような問題を根本的に解決する方策として、エラー発生率が非常に低くなると期待されるトポロジカル量子計算(図1)という新しいアイデアが提案され、興味を集めています。それが現実のものとなるためには、自然界の基本粒子とは異なる特異な性質をもった粒子(非アーベリアン準粒子)(図2)が必要です。

5/2状態(図3)という非常に純度の高い半導体結晶中で見られる特殊な電子状態において、非アーベリアン準粒子が存在すると期待されていますが、この状態は従来の理論では説明できないため、そのメカニズムを明らかにすることが課題となっていました。

2. 研究の成果

今回、NTTとJSTの共同研究チームは、独自に開発した高感度抵抗検出NMR法(図4)を用いることで、非常に壊れやすい5/2状態において、電子のスピン状態※6を正確かつ直接的に測定することに成功し、すべてのスピンの向きが揃っていることを明らかにしました。(図5)

5/2状態を説明するために提案されている理論の中で、非アーベリアン準粒子の存在を否定する理論では、上向きと下向きのスピンの同数になるとされていたため、その理論は排除され、実験と一致するのは非アーベリアン準粒子の存在を肯定する理論に絞られました。そのため、5/2状態において非アーベリアン準粒子が存在する可能性が非常に高くなりました。

本成果は、フェルミ粒子でもボーズ粒子でもない非アーベリアン準粒子が現実存在する可能性を大きく高め、さらにそれを用いた新しい量子計算手法の研究に期待を持たせるものです。

3. 技術のポイント

5/2状態を壊さずにそのスピン状態を測定するためには、高純度の半導体結晶と、高感度の測定技術が必要です。今回の成果は、NTTが有する高純度半導体の結晶成長技術と抵抗検出核磁気共鳴(NMR)技術に、さらに改良を加えることで可能となりました。

(1) 高移動度2次元電子試料(図6)

測定に用いた試料は、砒化ガリウム(GaAs)のヘテロ構造で、NTTの高純度結晶成長技術により、 $10^7 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 以上の電子移動度を得ています。さらにバックゲートを用いて電子を誘起することで、チャネル下側のドーピングをなくし、不純物ポテンシャルを低減するとともに、広い電子密度範囲にわたって安定したゲート動作を実現しました。これにより、抵抗検出NMR法の高感度化が可能となりました。

(2) 高感度抵抗検出NMR法

GaAsの結晶を構成するGaやAs原子の核スピンと電子スピンの間には弱い相互作用があります。そのため、ある電子状態において上向きスピンと下向きスピンの数に差があると、それが核スピンに対して有効磁場として働き、核スピンの共鳴周波数をわずかに変化させます。NMRではこのシフト(ナイトシフト)を測定することにより、電子スピンの情報を得ることができます。抵抗検出NMRは、核スピンの共鳴を2次元電子の抵抗の変化として検出することにより、基板や他の層に含まれる同種原子の影響を取りのぞき、測定対象である2次元電子と接触している核スピンからの信号のみを選択的に、かつ高感度で検出する方法です。これまでは、核スピンの共鳴によって抵抗が変化する特定の電子状態に適用が限られていました。本研究では、ゲート電圧と高周波磁場を別々に加え、核スピンに対してもっとも敏感な電子状態を信号読み出しに用いることで、5/2状態の高感度測定が可能となりました。

4. 今後の展開

今回の実験では、準粒子の性質を決める電子のスピン状態に着目しました。今後は準粒子の性質に着目し、準粒子の閉じ込めや干渉などの実証実験を通じてトポロジカル量子計算の応用を検討します。

参考

本研究は、NTT(代表研究者:村木康二 NTT物性科学基礎研究所 主幹研究員)とJST(戦略的創造研究推進事業総括実施型研究(ERATO)「平山核スピンエレクトロニクスプロジェクト」(研究総括:平山祥郎 東北大学教授)物理研究・結晶成長グループ(グループリーダー:村木康二))の共同研究として行われました。

用語解説

※1 基本粒子

自然界の物質を構成する最小単位の粒子。電子などのフェルミ粒子と光子などのボーズ粒子に分類される。フェルミ粒子とボーズ粒子のちがいは、2つの同種粒子を入れ替えたときに、その量子力学的状態を記述する波動関数の符号が変化するかどうかによる。陽子、中性子、原子など、複数個の基本粒子から構成された粒子もフェルミ粒子かボーズ粒子に分類される。

※2 非アーベリアン準粒子

金属中の電子や結晶を構成する原子など、多くの粒子が関与することで全体としてあたかも一つの粒子のように振舞うことがあり、これを準粒子という。例として、半導体中の正孔や格子振動の量子であるフォノンなどがあるが、3次元空間ではこれら準粒子もフェルミ粒子かボーズ粒子に分類される。いっぽう2次元空間では、2つの準粒子を入れ替えたとき、波動関数に1でも-1でもない複素数がかかることがあり、これをエニオンと呼ぶが、波動関数には位相の任意性があるため、準粒子を入れ替える前後で状態は変わらない。これに対し、2つを交換すると、元の状態とはちがう別の状態になってしまうという特異な性質を持った準粒子も理論的に予想されており、これを非アーベリアン準粒子(または非アーベリアンエニオン)という。

※3 5/2分数量子ホール状態

2次元空間に閉じ込められた電子に垂直に強い磁場を加えると、電子のエネルギーは「ランダウ準位」と呼ばれる離散的な準位に分裂する。(図7)電子が占めているランダウ準位の数を「占有率」といい、ギリシア文字の ν であらわす。分数量子ホール効果は、低温で特定の占有率において縦抵抗(R_{xx})がゼロとなりホール抵抗(R_{xy})が普遍的な値 h/e^2 (h :プランク定数、 e :素電荷)の ν^{-1} 倍で一定となる現象で、その状態を分数量子ホール状態という。ラフリンは分数量子ホール効果の解明によって1998年のノーベル物理学賞を受賞しているが、占有率5/2で生じる5/2状態はこの理論では説明できない。占有率を5/2からわずかにずらすと局所的に電子の足りない領域ができ、それが電荷をもった

粒子のように振舞うため、準粒子という。(図8)5/2状態を説明するために提案された理論のうちいくつかは、5/2状態の準粒子は非アーベリアン準粒子であると予想している。

※4 核磁気共鳴(NMR)法

磁場中で原子核が固有の周波数で電磁波を共鳴吸収する現象。原子核の化学結合や周囲の電子の状態によって共鳴周波数がわずかに変化するため、分析や物性測定に使われる。

※5 トポロジカル量子計算

複数の非アーベリアン準粒子が存在するときに準粒子の交換によって系の状態が変化することを論理ゲートとして用いた量子計算。空間に配置された準粒子を順番に入れ替えることで計算が実行される。計算結果は準粒子を交換する順序だけで決まり、経路の長さなどの詳細には依存しないため、エラー発生率を低く抑えることができるとされる。

※6 電子のスピン状態

量子力学的粒子の角運動量には軌道角運動量以外に粒子の内部自由度による寄与があり、この自由度をスピンという。電子などのフェルミ粒子の場合、スピンの向きが同じ粒子は同じ軌道に2つ以上入ることができない。そのため多電子系では電子のスピン状態と軌道状態には密接な関係があり、スピン状態を測定することで電子状態に関する重要な情報が得られる。

別紙・参考資料

- ▶ [図1 トポロジカル量子計算のイメージ](#)
- ▶ [図2 粒子の分類とその例](#)
- ▶ [図3 5/2状態](#)
- ▶ [図4 高感度抵抗検出NMR法](#)
- ▶ [図5 実験結果](#)
- ▶ [図6 高移動度2次元電子試料](#)
- ▶ [図7 ランダウ準位と5/2状態](#)
- ▶ [図8 5/2状態における準粒子のイメージ](#)

■ 本件に関するお問い合わせ先

■ 日本電信電話株式会社

先端技術総合研究所 広報担当
a-info@lab.ntt.co.jp
TEL046-240-5157

○ JSTの事業に関すること

■ 独立行政法人 科学技術振興機構

イノベーション推進本部 研究プロジェクト推進部
金子博之
hkaneko@jst.go.jp
TEL03-3512-3528

ニュースリリースに記載している情報は、発表日時点のものです。現時点では、発表日時点での情報と異なる場合がありますので、あらかじめご了承くださいとともに、ご注意をお願いいたします。

NTT持株会社ニュースリリース インデックスへ

[▶ 最新ニュースリリース](#)

[▶ バックナンバー](#)

[▶ English is Here](#)

NTT持株会社 ニュースリリース内検索

1997 ▼ 年 04 ▼

月 ~

2021 ▼ 年 11 ▼ 月

検索

NTTグループの情報は
こちらからもご覧いただけます。



[▲ このページの先頭へ](#)

[▶ 更新履歴](#) [▶ サイトマップ](#) [▶ お問い合わせ](#) [▶ 著作権](#) [▶ プライバシーポリシー](#) [▶ 情報セキュリティポリシー](#) [▶ ウェブアクセシビリティポリシー](#) [▶ 個人情報保護について](#)

Copyright © 2021 日本電信電話株式会社