

平成29年2月20日

## 新しい単原子シート「ボロフェン」の中に 質量ゼロ粒子を発見

### 1. 発表者：

松田 巖（東京大学物性研究所 准教授）

杉野 修（東京大学物性研究所 准教授）

組頭 広志（高エネルギー加速器研究機構（KEK）物質構造科学研究所 教授）

### 2. 発表のポイント：

- ◆次世代エレクトロニクス動作原理に不可欠な質量ゼロの伝導粒子が、新しい2次元物質であるホウ素の単原子シート「ボロフェン」で発見されました。
- ◆従来「質量ゼロ」の伝導粒子の生成には蜂の巣状の原子配列が必要とされてきましたが、その配列を持たない場合でも生成することが理論と実験から実証されました。
- ◆本研究は原子シートに基づく新量子デバイス開発に革新的な設計理念を与えます。

### 3. 発表概要：

東京大学物性研究所の松田巖准教授と杉野修准教授らの研究グループは、中国科学院の Sheng Meng 教授・Kehui Wu 教授のグループ、高エネルギー加速器研究機構（KEK）の組頭広志教授の研究グループと共同で、ホウ素の単原子シート「ボロフェン」の中に、「質量ゼロ」粒子を発見しました。これまで、質量ゼロの粒子は炭素の単原子シート「グラフェン」に存在することが知られており、固体物理の中心テーマとして研究されてきました。また最近では、この粒子は電気伝導を担うため、エレクトロニクスの新たな動作原理に従うものとしても注目されています。これまでの研究から、単原子シートにおける質量ゼロ粒子の生成には蜂の巣状の原子配列が必要と考えられていました。しかしながら発見されたばかりの単原子シート「ボロフェン」では、蜂の巣状の配置を持たないのにも関わらず、同様の質量ゼロ粒子が生成することがわかりました。この粒子はまた、シートを支える基板の影響により性質の異なるペアを形成して存在していることも発見しました。

本研究成果は、新材料「ボロフェン」が示す新奇な性質の発見のみならず、次世代材料として注目されている単原子シートに対して新しい物質設計理念を提供します。今後、本研究成果を元に、質量ゼロ粒子による多種多様な原子シート物性の発見と工業利用への促進が期待されます。

本研究成果はアメリカ物理学会の速報誌「Physical Review Letters」に掲載予定です（2月20日（月）オンライン版掲載予定。前後する可能性あり）。

### 4. 発表内容：

#### 背景

昨今微細化が進められているナノデバイスの究極の素子として、厚さが原子1層分である単原子シートに注目が集まっています。炭素の場合は「グラフェン」として知られ、エレクトロニクスなどへの応用研究が世界中で盛んに行われています。最近では、ケイ素から構成される「シリセン」や、ゲルマニウムの「ゲルマネン」などの単原子シートの報告が続き、ごく最近（2015年）にはホウ素から構成された「ボロフェン」が発見されました。新しい物質には、既

成概念を越える物性の可能性が秘められており、この新しい原子シートに対しても新規物性の発見に期待が高まっていました。

## 研究成果

本研究グループは、このホウ素の単原子シート「ボロフェン」を銀単結晶基板の上に合成することに成功し、その電子状態を KEK フォトンファクトリーを利用した光電子分光法（注）によって直接観測しました。その結果、「ボロフェン」でもグラフェンと同様の「質量ゼロ」の伝導粒子が存在することが分かりました。グラフェンでは、構成原子の蜂の巣構造（図 1 (a)）によってこの質量ゼロ粒子が形成されていましたが、「ボロフェン」では雪の結晶が 1 次元に並んだような異なる原子構造を有しています（図 1 (b)）。それにも関わらず質量ゼロ粒子が観測されたことについて量子力学の理論計算を行ったところ、「ボロフェン」原子構造の中で電子が特定のホウ素原子に集中することで、「隠れた蜂の巣構造」を形成していることが分かりました（図 1 (c)）。この特異な電子状態はシートを支える基板の影響によって、さらに質量ゼロ粒子のペアを形成することも分かりました（図 2）。

## 今後の展開

単原子シートにおける「質量ゼロ」の粒子は電気伝導を担うため、エレクトロニクスの新たな動作原理に従うものとしても現在特に注目されています。これまでの研究ではこの粒子を実現するために、グラフェンのように 2 次元シートの構成原子に蜂の巣配置を基本としてきました。しかしながら今回、新原子シート「ボロフェン」の新たな 2 次元原子配置でも同様の質量ゼロ粒子を形成することができ、さらに基板によってその電子物性も容易に制御できることがわかりました。本研究は新材料「ボロフェン」の新奇な性質を示すだけでなく、次世代材料として注目されている他の元素による原子シートに対しても、蜂の巣構造に限らない新たな物質設計指針を提供します。今後、本研究成果を元に、さらに多種多機能な原子シートの開発が促進され、我々の社会を支えるエレクトロニクスの発展がより加速すると期待されます。

### 5. 発表雑誌：

雑誌名：Physical Review Letters（2月20日（月）にオンライン版掲載予定）

論文タイトル：Dirac fermions in borophene

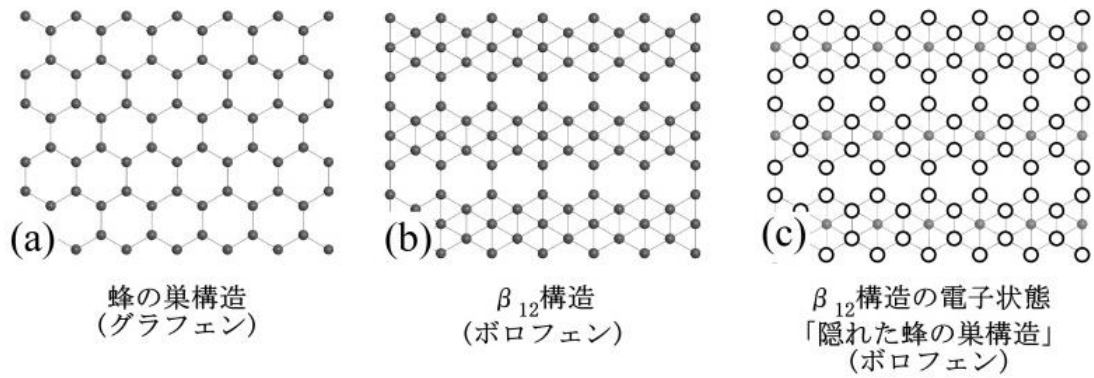
著者：Baojie Feng, Osamu Sugino, Ro-Ya Liu, Jin Zhang, Ryu Yukawa, Mitsuaki Kawamura, Takushi Iimori, Howon Kim, Yukio Hasegawa, Hui Li, Lan Chen, Kehui Wu, Hiroshi Kumigashira, Fumio Komori, Tai-Chang Chiang, Sheng Meng, and Iwao Matsuda

### 6. 用語解説：

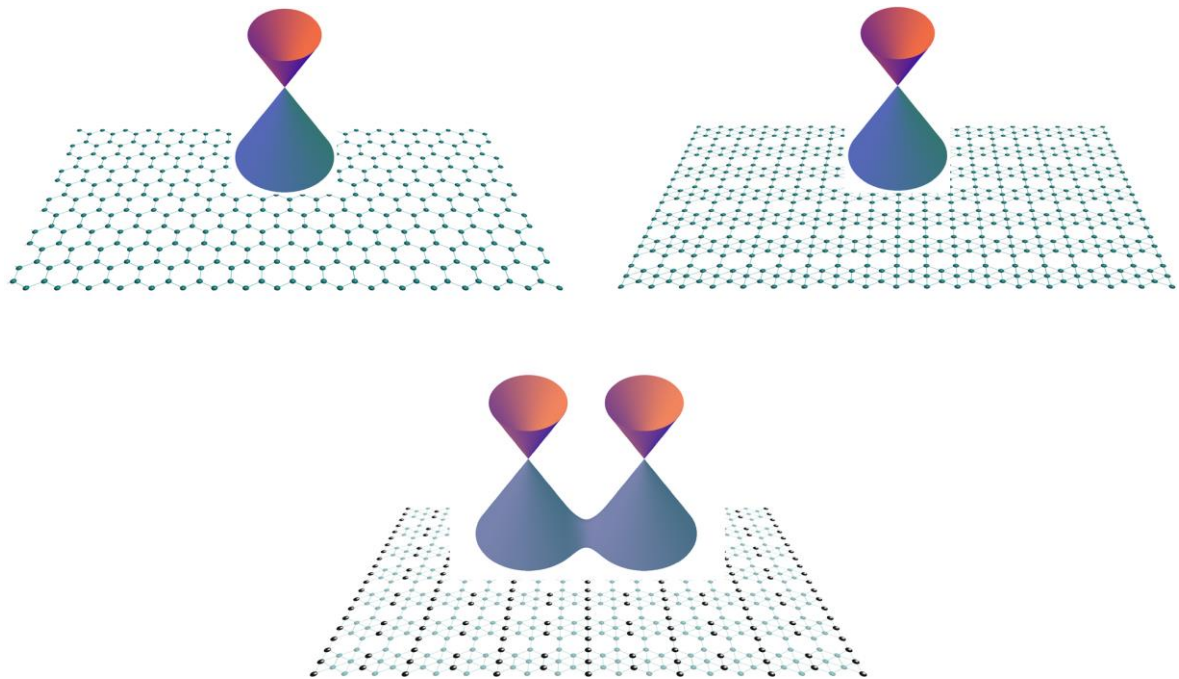
（注）光電子分光法

金属や半導体などの固体に紫外光以上のエネルギーを持つ光を照射すると、電子が放出されます。この電子を光電子と呼び、光電子のエネルギーや速度を分析することで固体中の電子の情報を抽出する実験法を光電子分光法といいます。

7. 添付資料：



(図1) 各原子構造。●は原子を表し、白丸は電子が集中した原子に対応。(a)グラフェン、(b)ボロフェン、(c)ボロフェン $\beta_{12}$ 構造の電子状態。



(図2) 「質量ゼロ」粒子を表す運動量とエネルギーの比例関係 (ディラック・コーン) および各原子構造。丸は原子を表し、特に基板との相互作用で影響を受けた原子は大きめの黒丸で示してあります。蜂の巣構造以外にも質量ゼロ粒子が原子シート内に形成され、基板との相互作用でさらにそのペアを形成することができます。