



理化学研究所  
RIKEN

**創発物性科学研究センター**  
**Center for Emergent Matter Science**

平成25年6月19日

副センター長 川崎 雅司

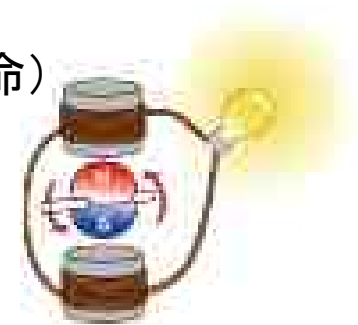
# 第3のエネルギー革命

I : 燃焼エネルギーを蒸気(力学)エネルギーに転換して利用 (産業革命)

電磁誘導による力学-電気エネルギー変換(古典電磁気学)

電磁誘導  $\text{rot } E = -\partial B / \partial t$

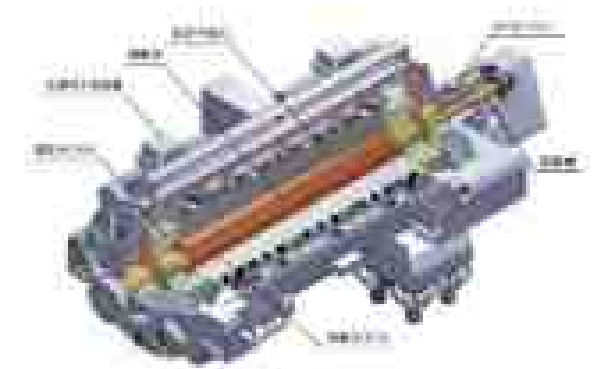
(時間変化する電場と磁場は独立でない。)



II : 核エネルギーの利用 (原子力発電、原子核物理学)

$$E=mc^2$$

蒸気による力学エネルギーから電気エネルギー  
への電磁誘導変換は不変



出典:九州電力

[http://www.kyuden.co.jp/effort\\_thirmal\\_new\\_i\\_karita.html](http://www.kyuden.co.jp/effort_thirmal_new_i_karita.html)

III : 固体電子を用いた光熱発電・省エネルギー情報技術

物質の中の創発電磁気学

# 創発物性科学研究 目標

本研究は、現代の世界的課題—環境調和型持続型社会の実現—を目指し、新しい物性科学を創成することでこの問題の解決に基盤的に貢献する。

- (1) 多体系の創発現象の理念と原理を提案する強相関量子系の物性物理学
- (2) 分子設計に基づく機能性ナノ構造体の超分子機能化学
- (3) 量子科学の成果を応用へとつなげる量子情報エレクトロニクス

の3分野間の有機的連携で、次のエネルギー機能の課題を解決する。

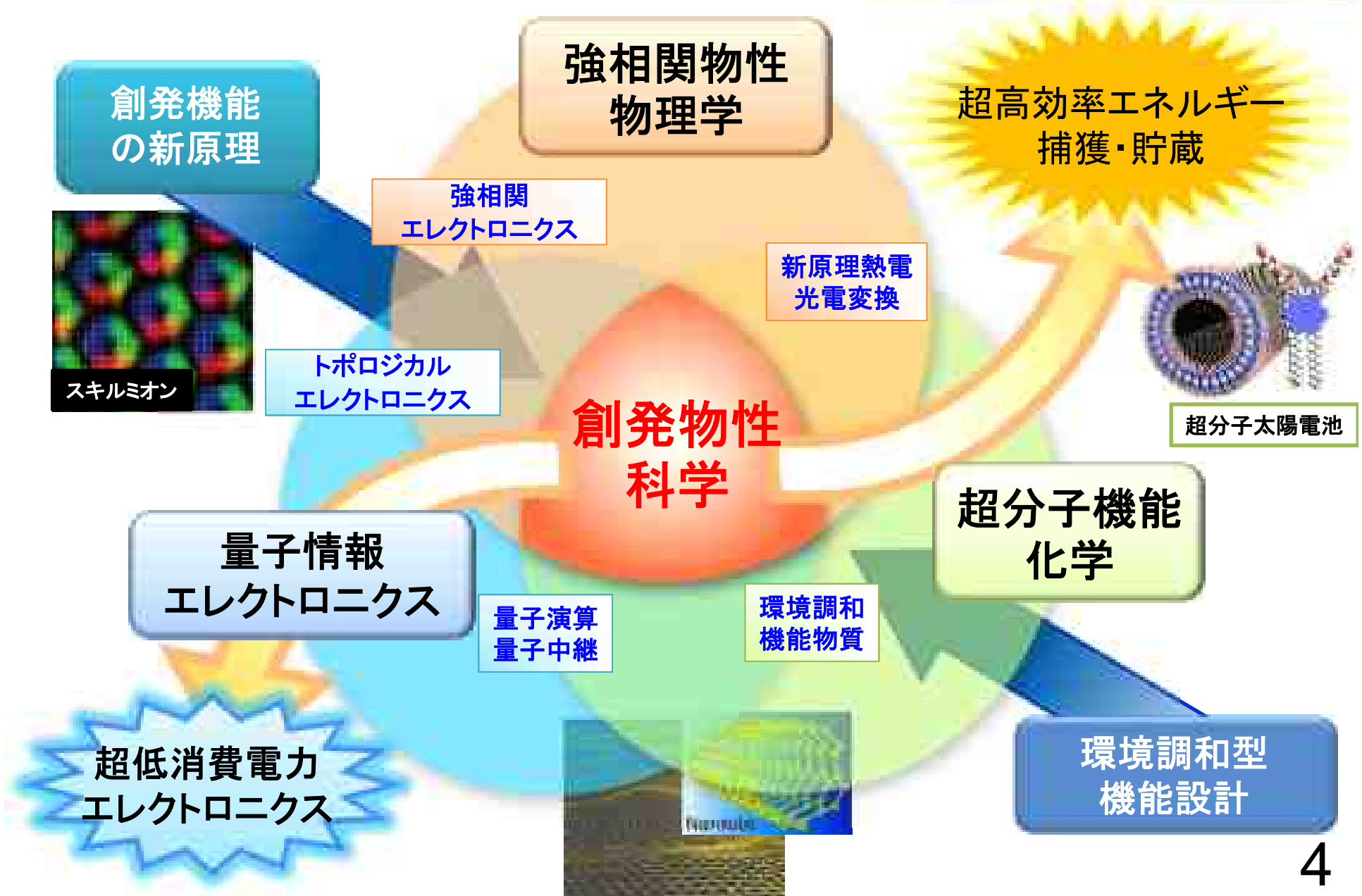
## 環境調和型超高エネルギー収集・変換

創発現象を活用することで太陽光発電などのエネルギー収集機構、電池・熱電素子などのエネルギー変換機構が直面している限界を突破する。また、環境・資源に負荷を与えずに機能を生み出すことが可能なナノ化学反応場を創成する。

## 超低エネルギー消費エレクトロニクス

電子の量子力学的集団運動を用いることで、わずかの刺激にエネルギーの損失なく巨大な応答を示す系を実現することが出来る。具体例としては、(i)外場誘起相変化現象によるデバイスへの応用、(ii)超低エネルギー消費スピントロニクス、(iii)高機能界面・分子系の開発、など。これらを量子情報処理技術へ展開する。

# 持続可能社会に向けて



# 強相関物理部門 —エネルギー機能の交差相関応答—

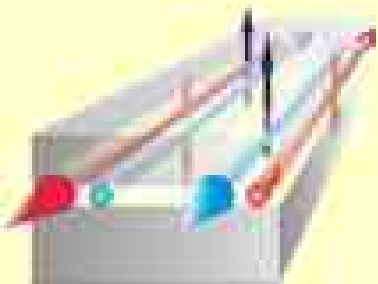
部門長:永長 直人

## 研究目標

膨大な数の電子が強く相互作用している状態：強相関電子系の電子の運動を利用・制御することにより、**超低消費エレクトロニクス、超低損失エネルギー輸送、超高効率の電気・磁気・光・熱の相互エネルギー変換機能**の学理を構築する。

## 研究テーマ

### エネルギーロスのないエレクトロニクスの開発



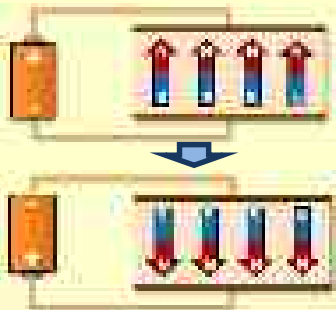
固体中において電子が波として振る舞う性質を利用して、熱の発生を伴わない電流の流れを作り出す。

### 高効率熱電変換物質の開発



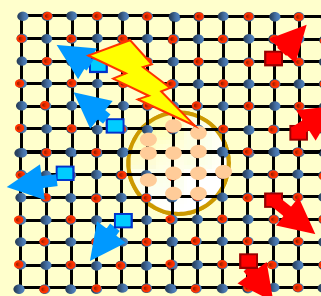
強相関電子の動きを制御して、熱—電気を高効率に相互変換できる物質を開発する。

### 電気—磁気—光—熱交差制御の実現



マルチフェロイクス（磁石の特性と正負の電子分極を併せ持つ物質）を利用した省エネルギー型の回路を実現する。

### 強相関太陽電池の開発



電子の集団運動としての金属—絶縁体転移を利用した太陽光エネルギーの捕獲の原理を追求する。

# 超分子化学部門 —エネルギー機能のデザイナー—

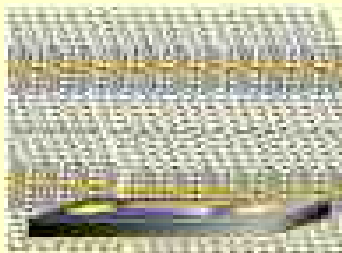
部門長:相田 卓三

## 研究目標

有機分子・高分子を1つずつ精密に合成し、それらを規則正しく配列・集積させることで、個々の分子ではなし得なかった新機能を発現するための学理を構築する。分子レベルでの現象を目に見える機能に直結させることにより新しい機能を持つ構造体をデザインし、エネルギー問題の解決に繋がる材料を創出する。

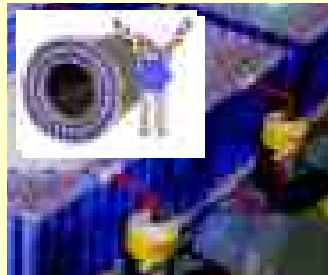
## 研究テーマ

### 自己組織化有機半導体の開発



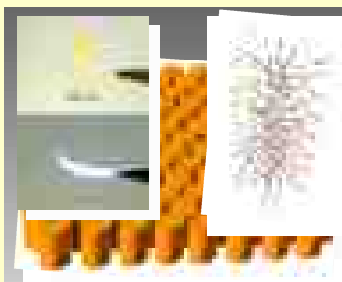
精密に設計された分子の自己組織化を利用して、最適の分子構造・電子状態・集合構造を実現する有機半導体を開発する。

### 超分子太陽光発電の実現



太陽電池のキャリア（電子と正孔）を効率よく輸送する有機分子・高分子の集積構造を創出・精密に制御することにより、高効率の電荷輸送を実現する。

### 光応答性高分子材料の開発



光に応答して構造変化する部品を組み込んだポリマーを規則正しく配置し、光エネルギーを運動エネルギーに変換する機能材料を開発する。

### アクアプラスチックの開発



ほとんどが水で構成され、プラスチックやゴムのような特性を示すアクアマテリアルを発展させ、環境に負荷を与えない機能材料を創出する。

# 量子情報エレクトロニクス部門

## —安全で省エネルギーな情報処理の実現—

部門長: 樽茶 清悟

### 研究目標

固体中の量子状態を光学的、電氣的、磁氣的に制御する技術を基盤として、**量子コンピュータや量子ナノデバイスの概念と技術を創出し、安全で超低エネルギー消費の情報処理技術を実現する。**

### 研究テーマ

#### 誤り耐性を含めた量子コンピュータの研究開発



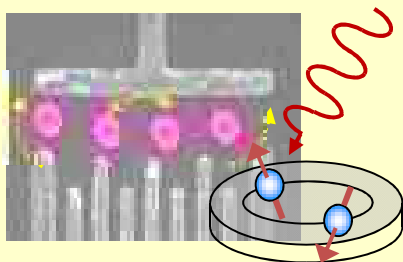
大規模計算への拡張を視野に、量子計算の基本単位となる論理回路を構成し、小規模量子計算を実現する。

#### コヒーレント・コンピュータの実現



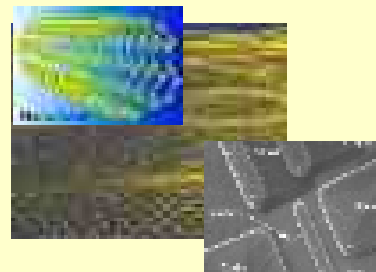
光子を量子ビットのように扱い計算を行うためのレーザーネットワークを構築し、量子コンピュータでも難しいとされるNP完全問題を解く。

#### 量子中継/ネットワークの研究開発



スピン間、光-スピン間の量子結合を制御する要素技術を開発する。

#### 低次元材料・量子デバイスの開発



カーボンナノチューブなど、量子制御・計測に適した材料やデバイスを開発し、量子効果を最大限に利用する。

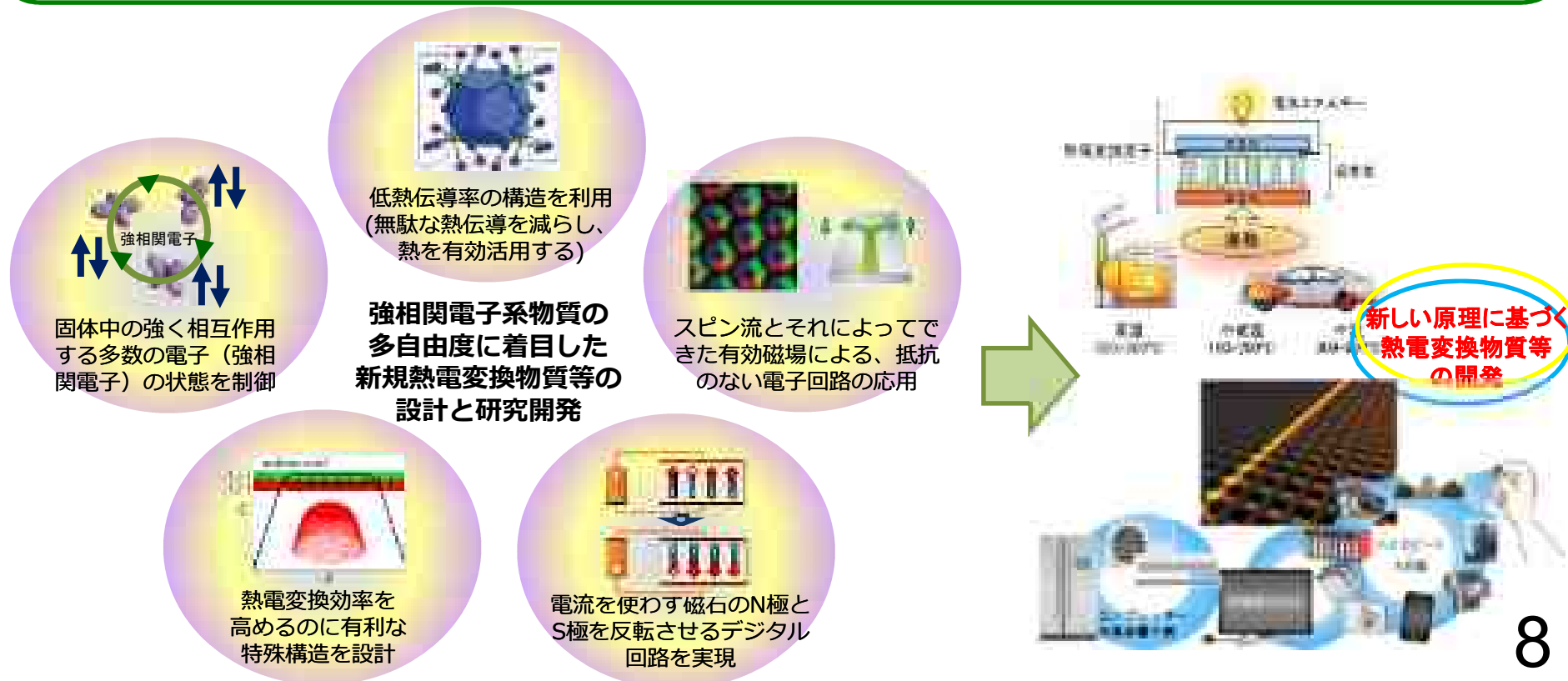


# 分野融合プロジェクト

## — 高効率エネルギー変換の実現に向けた熱電変換材料等の開発 —

### 研究目標

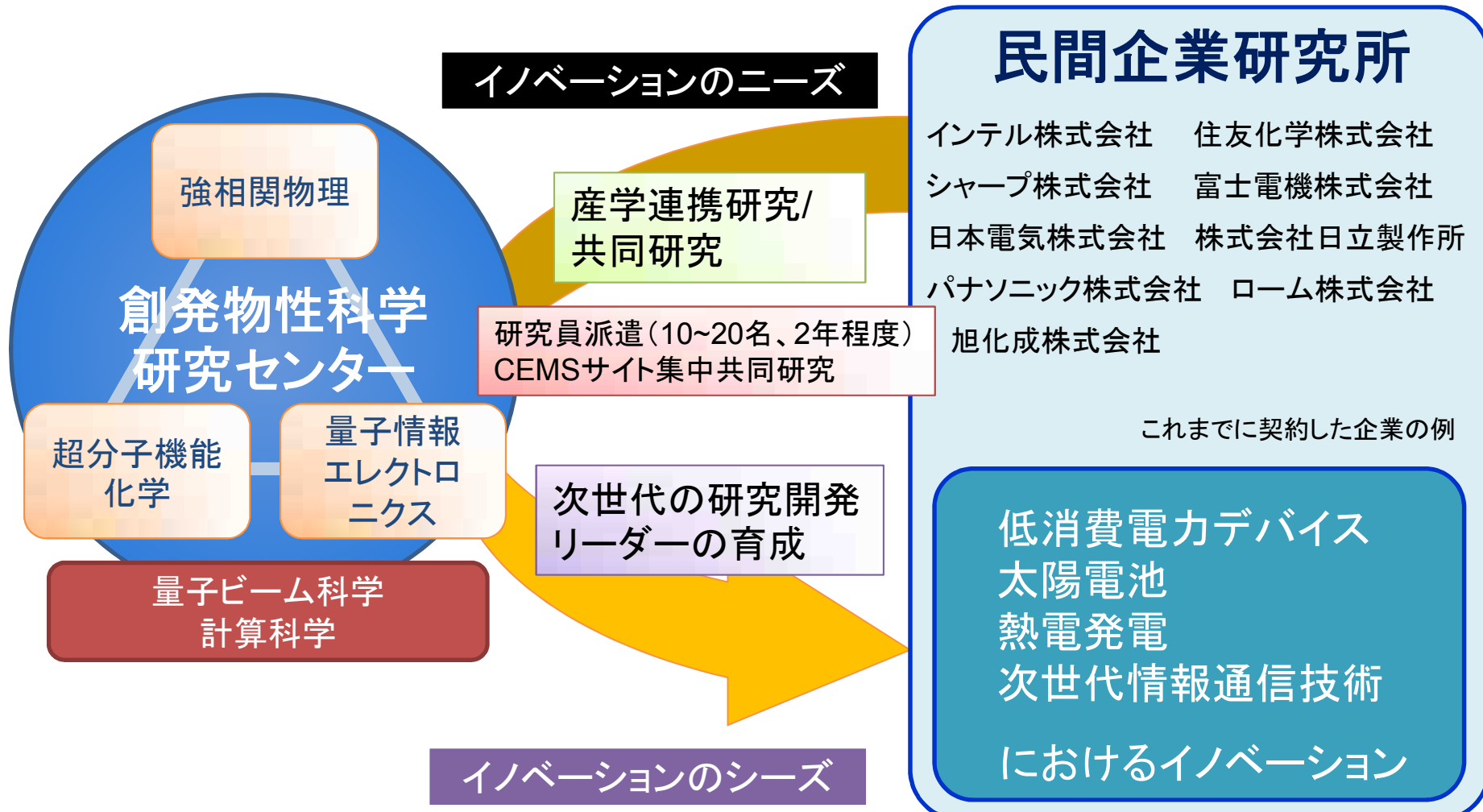
- 既存の熱電物質では十分な熱電特性が出ないため、それらの物質の電子状態を調べて熱電特性を向上するのに有効な条件を抽出し、電子状態を操作することで、**熱電特性の高い仮想的な物質を設計**するとともに、**新たな熱電変換物質を合成・評価**し、情報をフィードバックすることにより、**高効率熱電変換材料を開発**する。
- **金属—絶縁体、磁性体—非磁性体の変化を電界により制御し、電流は流れないが情報は伝達可能なエレクトロニクスを開拓**する。



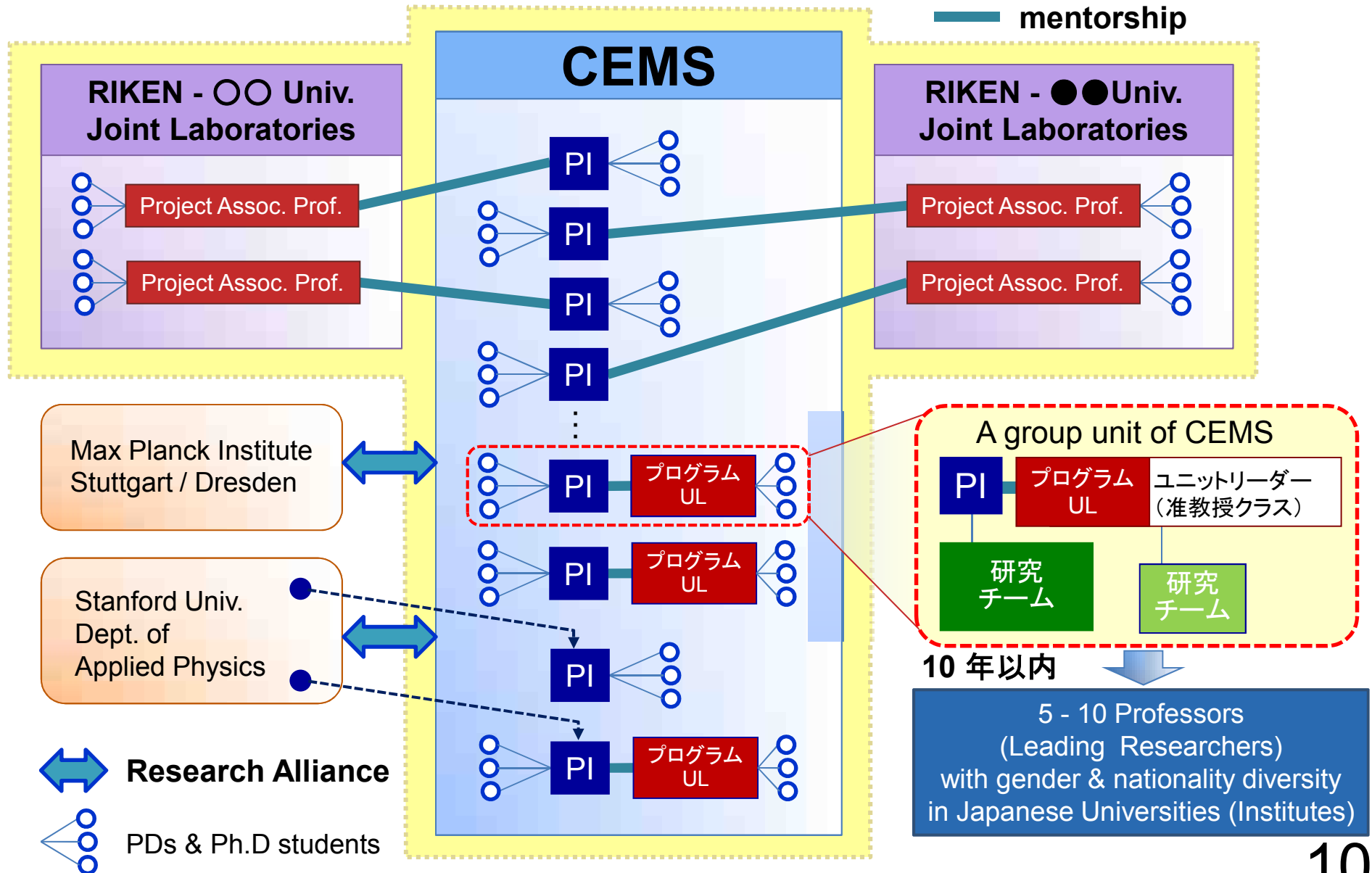


# 民間企業とのイノベーションにむけた取り組み

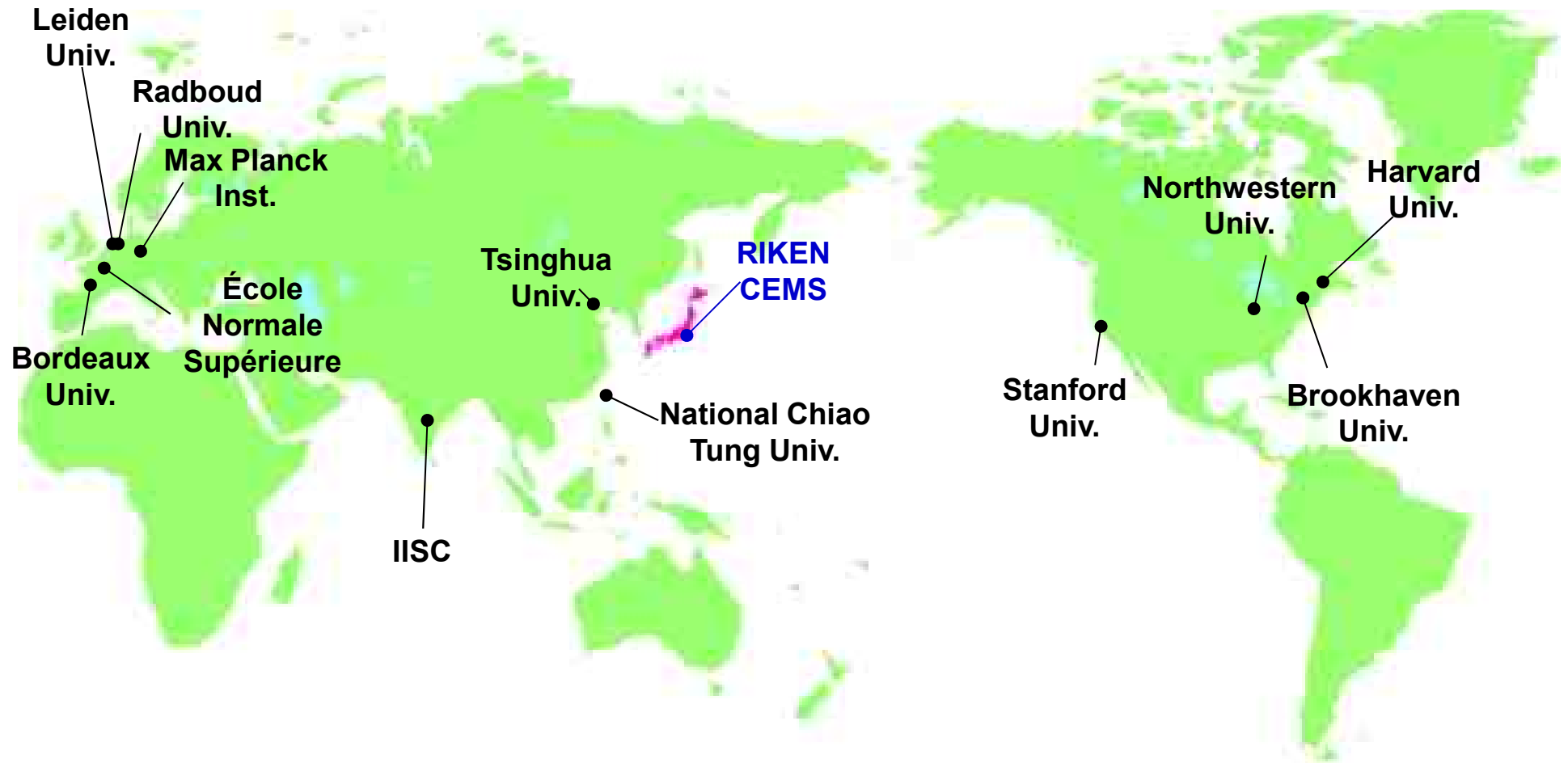
## 分野や研究機関の垣根をこえた連携を促進する 課題解決型共同研究の枠組みの構築



# 次世代研究リーダーの育成



# International Collaborations



# 創発物性科学研究センター 組織

## 創発物性科学研究センター

センター長: 十倉 好紀

副センター長:

永長 直人、相田 卓三、川崎 雅司

### アドバイザーカウンシル

#### 強相関物理部門

部門長: 永長 直人

強相関物性研究グループ  
十倉 好紀 (GD)

強相関理論研究グループ  
永長 直人 (GD)

強相関界面研究グループ  
川崎 雅司 (GD)

強相関物質研究チーム  
田口 康二郎 (TL)

強相関量子伝導研究チーム  
Harold Y. Hwang (TL)

強相関量子構造研究チーム  
有馬 孝尚 (TL): RSC兼

強相関量子科学研究支援チーム  
平林 泉 (TL)

創発物性計測研究チーム  
花栗 哲郎 (TL)

量子物性理論研究チーム  
古崎 昭 (TL,CS)

計算量子物性研究チーム  
柚木 清司 (TL,ACS): AICS兼

#### 超分子 機能化学部門

部門長: 相田 卓三

創発ソフトマター機能研究グループ  
相田 卓三 (GD)

創発分子機能研究グループ  
瀧宮 和男 (GD)

創発生体関連ソフトマター研究チーム  
石田 康博 (TL)

創発デバイス研究チーム  
岩佐 義宏 (TL)

ソフトマター構造創発研究チーム  
相田 卓三 (GD: 兼)

創発機能高分子研究チーム  
但馬 敬介 (TL)

創発生体工学材料研究チーム  
伊藤 嘉浩 (TL,CS)

物質評価支援ユニット  
橋爪 大輔 (UL)

#### 量子情報エレクトロニクス部門

部門長: 樽茶 清悟

量子機能システム研究グループ  
樽茶 清悟 (GD)

量子光学研究グループ  
山本 喜久 (GD)

量子凝縮物性研究グループ  
Franco Nori (GD)

巨視的量子コヒーレンス研究チーム  
蔡 兆申 (TL)

創発現象観測技術研究チーム  
進藤 大輔 (TL)

量子ナノ磁性研究チーム  
大谷 義近 (TL)

量子システム理論研究チーム  
Daniel Loss (TL)

スピン物性理論研究チーム  
多々良 源 (TL)

創発物性科学研究支援チーム  
秋元 彦太 (TL)

量子効果デバイス研究チーム  
石橋 幸治 (TL,CS)

量子凝縮相研究チーム  
河野 公俊 (TL,CS)

#### 統合物性科学研究プログラム

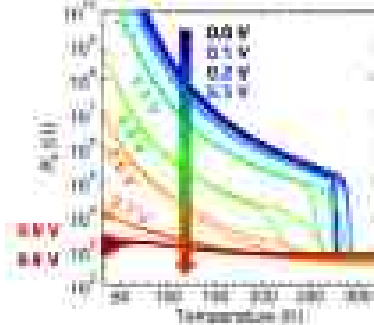
PD: 十倉 好紀

UL(若手PI)  
6名選考中

# 最近の主な成果

## 1V以下の電圧で絶縁体と金属をスイッチ

(2012年7月, 川崎, 岩佐, 十倉ら, Nature)



強相関酸化物VO<sub>2</sub>に電気二重層ゲート法によりキャリアを注入し、1V以下の電圧で絶縁体から金属にスイッチした。

- 電子間の強い相互作用のために、多数電子の集団が絶縁体になっているVO<sub>2</sub>の薄膜に、電気二重層ゲート法によりキャリアを注入したところ、1V以下の低い電圧で、電子が集団で動きだし、金属に転移することを発見。
- このトランジスタ機能は、従来のMOSTランジスタにおける原理と根本的にことになっている。
- **モット転移(強相関効果による絶縁体 - 金属転移)を利用した、新しい原理のトランジスタ機能を実証**

## トポロジカル絶縁体の表面状態で強磁性を実現

(2012年8月, 岩佐, 十倉ら, Nature Physics)

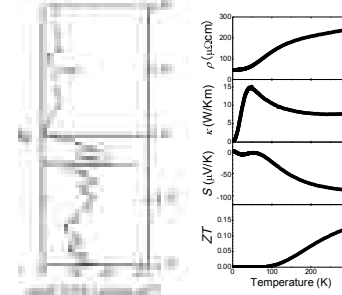


(左)量子ホール効果の概念図。試料の端に沿って、エネルギー損失のない電流が流れることが知られているが、超低温・強磁界下でないとは実現しない。(右)今回発見した強磁性のトポロジカル絶縁体の表面状態。磁界なしで、エネルギー損失のない電流が試料の端に沿って流れる。

- トポロジカル絶縁体(内部は絶縁体なのに表面は必ず導体になる新概念の物質)の表面状態を強磁性にすることに成功。
- 強磁性の磁壁(磁化が上向き領域と下向きの領域の境界)に沿って、エネルギー損失のない電流が流れていることを示す現象を発見。
- **磁界をかけることなくエネルギー損失のない電流を流す物質を発見し、低消費電力デバイスに道筋。**

## 高効率熱電変換材料の設計指針を確立

(2012年3月, 十倉ら, Applied Physics Letters)



(左)計算によるCoGeの状態密度。フェルミ準位をはさんで、非対称になっている。(右)CoGe系の電気抵抗率、熱伝導率、熱電能、性能指数ZT。理論と一致して、高い熱電能が実現している。

- 一切の仮定を与えずに計算機によってCoGeの電子状態を計算し、フェルミ準位において顕著な非対称性を有する状態密度を得た。
- 高圧合成法を用いてCoGeの合成に成功し、理論設計の予言と一致して、室温で80μV/K以上の高い熱電能を有し、ZTは0.1を超えることを示した。
- **状態密度の非対称性が大きな熱電能に寄与し、高効率熱電変換材料の設計指針を確立**

## 量子ドットスピンと単一光子の間に量子もつれ状態を生成

(2012年11月, 山本ら, Nature)



量子中継の概念図。2つの量子ドットから自然放出により、 $\omega_1$ と $\omega_2$ という2つの異なった周波数を持つ光子が同時に放出される。この2つの光子を中間点で衝突させ、 $\omega_1$ と $\omega_2$ の光子を一つずつ検出すると、スピン量子もつれが生成される。

- InAs量子ドット中の量子スピンと放出された単一光子の間に92%という高フィデリティの量子もつれ状態を生成することに成功。固体素子で、このように高フィデリティが達成されたのは初めて。
- 放出された波長0.9ミクロンの単一光子を通信波長帯の1.5ミクロンの単一光子に抵雑音・高効率で変換。
- **長距離量子暗号通信、分散型量子情報処理を可能にする量子中継システム開発に道筋。**

# 今後の展望

## 量子情報エレクトロニクスによる次世代通信ネットワーク技術の研究開発

### 現状と課題

情報通信技術の普及や情報不法閲覧技術の発達により、個人または国家レベルの情報セキュリティの強化が必須である。

### 具体的取り組み

原理的に盗聴されたことがわかる安全性が保障されている量子暗号通信の実現

- 量子情報通信距離・速度を伸ばす技術開発
  - 光子や量子ビットが持つ情報を保持したまま電子に伝達する原理を確認
  - 2光子のもつれ対の片方を分離し、その情報を正確に測定する技術を開発
  - 量子状態を保存したまま中継する機構を開発
- ⇒長距離化、高速化、ネットワーク化及び将来的な実用化のための技術開発を推進



## 新しい原理による革新的超低消費電力デバイスの開発

### 現状と課題

情報技術の発展に伴う電気エネルギー消費の急増や東日本大震災以降のエネルギー制約に対して、消費段階における大幅なエネルギー使用量の削減が求められている。

### 具体的取り組み

強相関電子系物質を利用した新しいエレクトロニクス材料の開発

- エレクトロニクスの電力消費を決定づける要素（論理回路やメモリを構成するスイッチ機能）について、
- トポロジカルエレクトロニクスを用いた革新的な新原理を開拓
  - エネルギー消費を低減するための学理を構築
- ⇒プロトタイプデバイスとして実証

