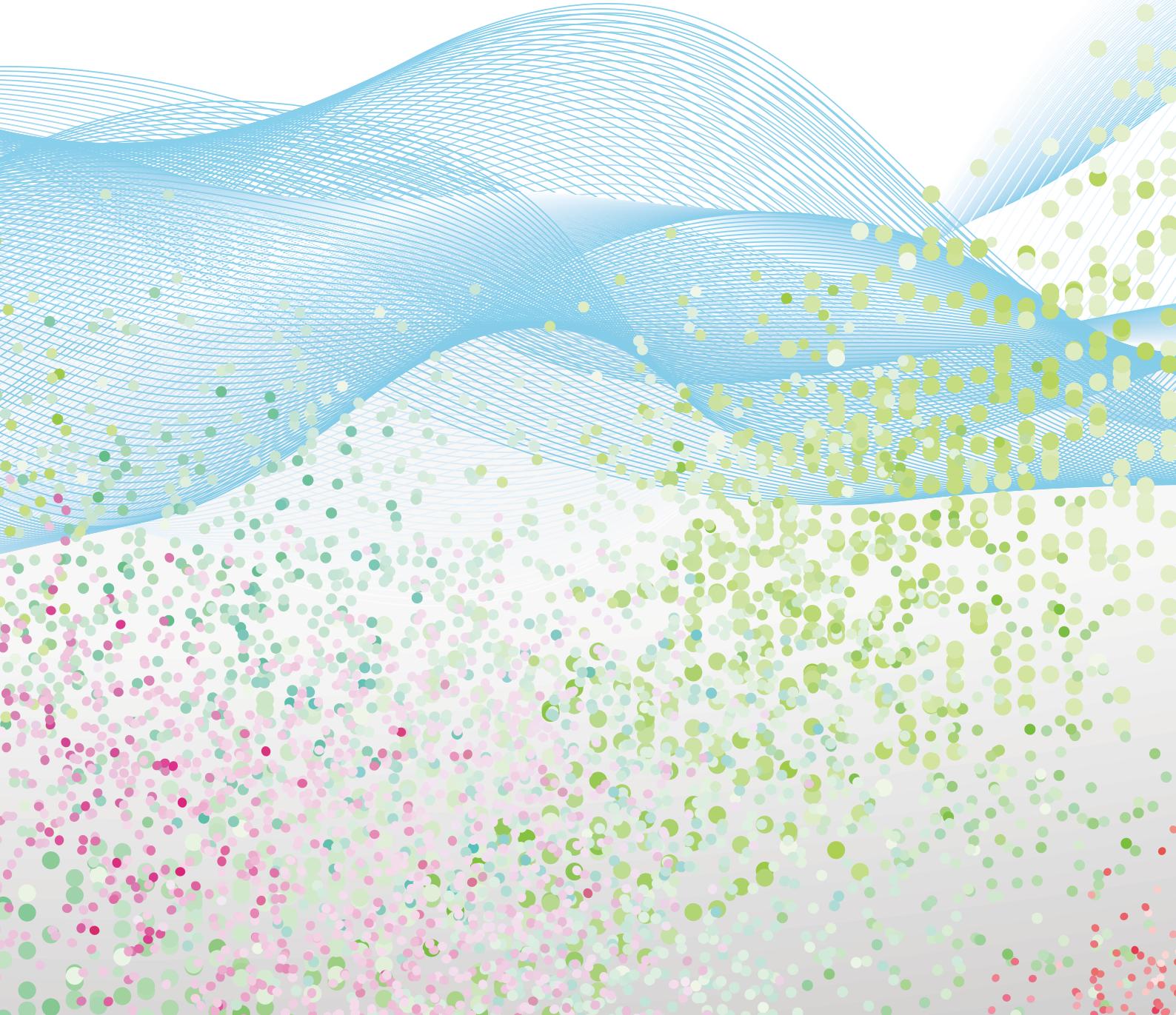


大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構
量子マルチビーム施設計画
Multi Quantum-Beam Facility with Superconducting
Linac for Material-Quantum-Life Sciences (MB-LINQ)
Conceptual Design Report (CDR) ver. 2.0



目次

1. 量子マルチビーム施設計画の概要	1
2. 量子マルチビーム施設計画の目指すサイエンス	3
2-1. 陽電子・光子融合による低次元量子材料の精密計測	3
2-2. サブサイクル強光子場とアト秒 XFEL が拓くペタヘルツ量子物性科学	5
2-3. アト秒 XFEL で観る物質・生命中の電子ダイナミクス	7
2-4. 物質・反物質原子「ポジトロニウム」の超精密分光	9

1. 量子マルチビーム施設計画の概要

量子マルチビーム施設計画（MB-LINQ 計画）は、超伝導線形加速器による自由電子レーザー、放射光、陽電子、さらには高次高調波レーザーなど、最先端の量子ビームを有機的に活用して、極限的な量子現象を理解することで、物質・生命の機能の根源の解明を目指します。本計画は、物質・生命の複雑で動的な“ありのまま”の状態を計測するため、AI も活用して、相補的な情報の得られる量子ビームの順次利用から同時利用への転換を先導し、計測手法や研究分野の融合による新領域の開拓を推進します。さらに、量子ビームの利用研究に留まらず、加速器や検出器に関連する技術開発や次世代半導体リソグラフィ研究を通じた社会貢献も計画しています。

MB-LINQ 計画は、2020 年に始まった放射光学術基盤ネットワークの取り組みを発展させ、KEK の加速器技術を基盤として、人材育成と技術開発を担う量子ビーム学術施設の機能を結集（MB-LINQ 内で協働）するものです。

量子マルチビーム施設計画（MB-LINQ 計画）は、放射光マルチビーム施設計画（PF-HLS 計画）の発展形です。PF-HLS 計画では、研究の深化と融合、そして創成を掲げました。MB-LINQ 計画では、計測手法や研究分野の融合を手段として再定義し、利用可能な量子ビームの種類を拡大して、目的である研究の創成（フロンティアの探究）を推進します。なお、研究の深化を整理再編後の既存施設が担うことで、新規施設と既存施設の相乗効果も見込まれます。

世界的に見ると相補的な情報を得られる量子ビーム施設群を隣接して建設する例は少なくありません。しかし、同一施設内の同時利用を掲げる MB-LINQ 計画は世界的にもユニークです。本計画は、量子ビームの可能性を飛躍的に拡げ、サイエンスの Diversity Frontier を実現することに貢献します。現時点で検討している量子ビームは、VSXFEL、VSX 放射光、陽電子、高次高調波レーザー（中性子やミュオンは将来の検討）で、いずれも世界最高クラスの高性能を有します。VSXFEL は、国内随一の KEK の超伝導加速技術を応用、常伝導加速器による HXFEL の SACLAC と相補・相乗的な拠点として、FEL 利用（研究者）を倍増させるとともに、超伝導ならではの高い平均輝度と短パルス性を活用したサイエンスを推進します。VSX 放射光は、50 年を超える実績をもつ ISSP-SOR、UVSOR、HiSOR と Photon Factory が総力を結集する小型の高輝度蓄積リングであり、中型の NanoTerasu、大型の SPring-8-II と相補・相乗的な拠点として、放射光の操作性と安定性を活用したサイエンスを推進するとともに、小型ならではの消費電力の低さと機動力の高さも活用して、人材育成と技術開発を推進します。陽電子は、世界を牽引する Slow Positron Facility を更に高強度化し、表面敏感性や精密測定性を活用したサイエンスを推進します。MB-LINQ では、加速器による自由電子レーザー、放射光、陽電子を組み合わせたサイエンスに加え、これらの量子ビームと 2012 年から ISSP-SOR と協働してきた LASOR の高次高調波レーザーの発振・利用技術を組み合わせたサイエンスを展開します。

本計画の検討を通じて、物質・生命の複雑で動的な“ありのまま”の状態の計測に向けた手法や分野の融合、そして研究の創成（フロンティアの探究）はすでに始まっています。

参画施設：

KEK 物質構造科学研究所 (Photon Factory, Slow Positron Facility)

NINS 分子科学研究所 (UVSOR)

東京大学物性研究所 (ISSP-SOR, LASOR)

広島大学放射光科学研究所 (HiSOR)

KEK 加速器研究施設・共通基盤研究施設

MB-LINQ

Multi Quantum-Beam Facility with Superconducting Linac for Material-Quantum-Life Sciences

MB-LINQ は、マルチビーム・リンクと読み、複数の量子ビームを接続するリンク (LINK) と研究者が集い研究を滑走させるリンク (RINK) をイメージ、最後の Q は量子 (Quantum) を意味します。

2. 量子マルチビーム施設計画の目指すサイエンス

2-1. 陽電子・光子融合による低次元量子材料の精密計測

物質の表面や、極限まで薄い低次元量子材料において、超伝導やスピン偏極伝導など多彩で高機能な量子状態が報告され、次世代を担う消費電力の極めて低い高速電子・スピンデバイス材料の探索研究が行われている。これをさらに効率よく促進するためには、それらの物理現象が実際にどの「微小領域」で発現し、どのような原子配列に起因するのかを、解明する手段が必要である。表面はしばしば細かい結晶領域（結晶ドメイン）に分かれしており、時間的にも変化することもあるため、機能が宿る領域を見つけて狙い撃ちし、電子状態と原子配列を同時に突き止める計測が求められる。本提案が狙うサイエンスの核心は、表面微小領域に局在する量子状態の起源を、電子状態（エネルギー-band）と表面構造の相関として定量的に解明することである。

この核心課題を解くための戦略は、まず実空間で機能が発現していると思われる領域に狙いを定め、次にその場所で電子状態を観測して新機能を確認し、最後に同じ場所の最表面の原子配列を精密に決定する、というマルチプローブ融合にある。具体的には、光電子顕微鏡(PEEM)等で実空間の位置を探索し、角度分解光電子分光(ARPES)によりエネルギー-bandの情報を得て、低速陽電子回折(LEPD)により最表面および表面直下数原子層までの原子配列を精密に決定する。新機能が発現している領域の探索から、原子配列の精密決定までを一気呵成に行うことで、不均一積層、ナノワイヤ、フレーク、ツイストドメインなど、新量子材料として期待が高まっている多様な表面・低次元材料について、新機能を発現する物性の起源を確定的に解明する。

この戦略を実現するために最も重要なのは、表面微小領域観測に十分な強度と輝度を備えた低速陽電子ビームによるLEPDである。LEPDは、極表面構造に高い感度を持ち、かつ物質中の電子との交換相互作用が無いことから、高精度な表面構造解析を可能にする。光子プローブと同一の微小ドメインを、十分な統計精度を確保しつつ測定するには、従来水準を超える陽電子ビーム性能が不可欠となる。

本提案では、超伝導ライナックのハイパワー・高繰り返し電子ビームを基盤に、従来と比較して桁違いに高強度な低速陽電子ビームを実現し、放射光、XFEL、レーザーとの同一領域測定を前提としたビームラインと計測系を構築することを目指す。通常、FEL発振後の電子ビームはビームダンプに輸送されるが、本計画ではこの電子ビームを捨てずに大強度陽電子生成に活用する。その上で、光電子分光と低速陽電子回折を統合した新たな装置を開発し、同一の表面ナノ領域に対する表面電子状態と原子配列の精密決定を実現する。

陽電子・光子融合による低次元量子材料の精密計測

**目的****Objective**

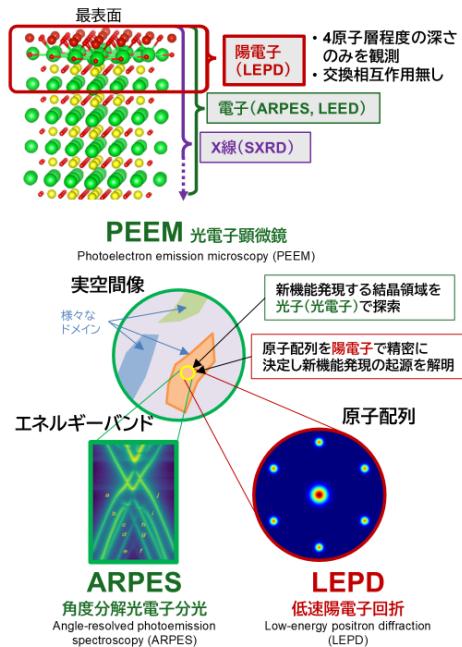
- 極最表面の高精度構造解析を可能にする陽電子と光電子分光による電子状態観察の融合により、物質の最表面・微小領域に顕れる特異な低次元量子状態を解明する。

計画**Plan**

- 超伝導ライナックの高繰り返し電子ビームを用いた世界最高強度の低速陽電子ビームの実現
- SX-FELと低速陽電子を用いた光電子分光/陽電子回折マルチビーム装置の開発
- 同一の表面ナノドメインに対する電子状態・3D原子配列計測の実現

成果**Outcomes**

- 低次元量子材料の超精密計測技術の実用化
- 最表面における構造・電子状態相関の理解
- 特異な低次元量子特性を生かした超高速・超低消費電力な電子・スピンドバイス材料の設計指針の創出

世界最高性能の大強度低速陽電子ビーム

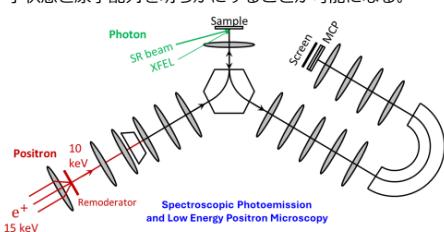
陽電子・光子融合による低次元量子材料の精密計測

**背景****Background**

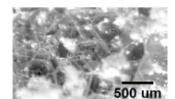
表面や二次元物質に観察される低次元の電子挙動は、超伝導、スピン偏極伝導、スピン軌道トルク、トポロジカル状態、異常ホール効果など、多彩で特異な物理現象を発現する。これらの低次元特有の量子状態は、発熱の原因となる散乱や電荷移動を減らした新しい超高速・超低消費電力デバイスへの応用などを目指して世界中で研究が進められている。

ナノドメインの物性計測**Example**

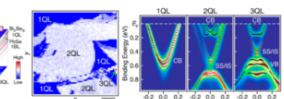
特異な低次元の量子状態は表面微小領域に局在するが、時空間的に不均一であることが多い。光子と陽電子を同時に用いることで、機能が発現している微細領域を探し出し、その電子状態と原子配列を明らかにすることが可能になる。

**課題****Challenge**

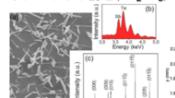
- 世界に類を見ない大強度・高輝度低速陽電子ビーム生成
- 分光型光電子・低速陽電子回折装置(SPELEPD)の開発
- 微小かつ時間変化する表面結晶について、同一ナノドメインを光子・陽電子マルチプローブで計測できるビームラインの構築

● 剥離面の2次元物質 (h-BN)

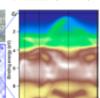
H. Tanaka et al., PRL 132, 136402 (2024)

● 不均一積層表面 (Pb₅Bi₂₄Te₄₁)

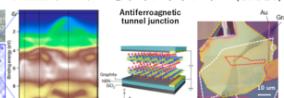
K. Nakayama et al., Nano Lett. 19, 3737 (2020)

● ナノワイヤ構造 (Sb₂Te₃)

Y.C. Arzaga et al., Sci. Rep. 6, 29493 (2016)

● フレーク状結晶 (r-BS)

K. Sugawara et al., Nano Lett. 23, 1673 (2023)

● ツイストドメイン (CrSBr)

Y. Chen et al., Nature 632, 1045 (2024)

2-2. サブサイクル強光子場とアト秒 XFEL が拓くペタヘルツ量子物性科学

近年、光の 1 周期よりも短い時間幅を持つサブサイクル強光子場を用いることで、電子を光子場の時間変化そのものに直接応答させ、光子場と強く結合した非平衡電子状態(フロッケ/光ドレッド状態)の創出や、それを利用したペタヘルツ領域における電子ダイナミクス制御を可能とする新しい量子物性制御の概念が注目されている[1,2]。サブ 10 フェムト秒スケールのサブサイクル強光子場では、電子は原子変位や格子振動といった遅い自由度を介さず、瞬時光電磁場によって直接駆動されるため、従来の熱的励起や構造緩和に基づく物性制御とは本質的に異なる、非熱的・非摂動的な量子物性制御が可能となる。一方で、こうした電磁場駆動が電子散乱以前の極初期非平衡領域においてどのように立ち上がり、その後の物性応答や秩序形成へとどのように繋がるかについては、フェムト秒スケールの時間分解能では計測困難であり、実像は未解明のままである。

本研究は、アト秒時間分解 X 線計測と、ペタヘルツ電子応答を駆動するサブサイクル強光子場を融合し、強光子場下における非平衡電子状態の生成および時間発展を、電子散乱以前の非熱的・非摂動ダイナミクスとして観測・操作することを目的とする。アト秒 X 線による極限時間分解観測により、ペタヘルツ強光子場によって直接駆動される電子応答を実時間で可視化し、従来は光照射下の時間平均として捉えられてきた強光子場駆動電子状態を、時間発展を伴う実体的な物理像として明らかにする。これにより、電子の散乱・原子変位・熱化を待たずに量子状態を制御する新たな機能の基盤原理を確立し、超高速情報処理や光波電子制御、極短時間領域で動作するデバイス概念へとつながる量子技術基盤の構築を目指す。

本研究を達成するための主要な課題は、電子散乱が始まる前の極短時間領域において、十分な時間分解能と元素・スピン・電荷・軌道選択性をもって光子場駆動電子応答を捉えることである。そのためには、アト秒パルス幅を有する軟 X 線光源と、位相安定なサブサイクル強光子場源の開発・高度化を含め、両者を高精度に時間同期・空間整合させたポンププローブ計測基盤の構築が不可欠である。さらに、強光子場の振幅・位相・時間波形と電子応答との関係を定量的に整理し、ペタヘルツ量子物性制御を物性科学として普遍化することが求められる。

本研究により、電子散乱以前に支配される極初期非平衡領域が実験的に開拓され、ペタヘルツ強光子場によって駆動される電子応答が、元素・スピン・電荷・軌道選択性に直接可視化されることが期待される。これにより、強相関物質、量子スピン系、二次元材料、トポロジカル物質など、幅広い物性・材料科学分野において、非熱的・非摂動駆動に基づく新たな量子物性制御原理の確立と展開が可能となる。さらに、本研究基盤は、ペタヘルツ領域で電子を「見て・操る」世界的に先導的な極限光科学プラットフォームを形成し、国際競争力の向上や、新たな FEL ユーザーコミュニティの創出にも貢献することが期待される。

[1] D. N. Basov, R. D. Averitt and D. Hsieh, *Nat. Mater.* **16**, 1077 (2017).

[2] S. Koshihara *et al.*, *Phys. Rep.* **942**, 1 (2022).

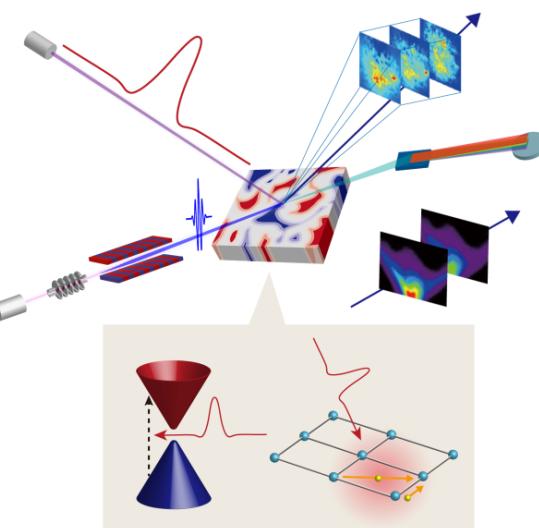
サブサイクル強光子場とアト秒XFELが拓く ペタヘルツ量子物性科学

XFEL レーザー

目的

Objective

- ペタヘルツ電子応答を駆動するサブサイクル強光子場とアト秒時間分解X線計測を融合し、強光子場下で現れる非平衡電子状態の生成および時間発展を、電子散乱以前の非熱的・非摂動ダイナミクスとして操作・観測する。

**計画**

Plan

- 超伝導ライナックの高繰り返し電子ビームを用いた広いエネルギー範囲での高輝度XFELアト秒パルス生成・制御
- 位相安定なサブサイクル強光子場光源の開発・高度化
- サブサイクル強光子場とアト秒XFEL計測を融合した世界唯一の計測基盤の構築

成果

Outcomes

- 電子散乱以前に支配される“極初期非平衡領域”的開拓
- ペタヘルツ量子物性制御を支える物理原理の確立
- ペタヘルツ量子機能・デバイス概念への展開と先導的極限科学プラットフォームの創成

サブサイクル強光子場とアト秒XFELが拓く ペタヘルツ量子物性科学

XFEL レーザー

背景

Background

数フェムト秒の近赤外極短光パルスは、光の1周期より短い時間に強い瞬時光子場（光電磁場）を生じる。このようなサブサイクル強光子場の下で、電子は散乱や格子応答が起こる前に光子場そのものに直接追随し、ペタヘルツ領域で駆動される。この光子場駆動は従来の熱的励起とは本質的に異なり、アト秒時間スケールで電子ダイナミクスを直接操作することを可能にする。さらに、強光子場によって形成される、光をまとった電子状態（フロッカ/光ドレッド状態）を介した、非熱的な電子状態制御への展開が期待されている。

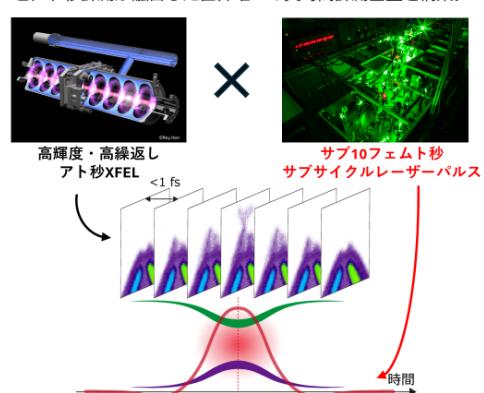
光子場駆動電子応答の可視化 Example

電子がサブサイクル強光子場に直接追随することで生じるペタヘルツ電子応答を、アト秒時間分解X線計測によって直接可視化する。さらに、フロッカ/光ドレッド状態を、元素・スピン・電荷・軌道選択的に量子自由度分解して捉える。これにより、従来は光学応答から間接的に議論してきた電場駆動電子ダイナミクスを、実時間・実空間的に明らかにし、光子場駆動量子物性制御の物理基盤を解明する。

課題

Challenge

- 数フェムト秒の時間幅のサブサイクル強光子場により非摂動的に駆動された電子をアト秒オーダーで観測する基盤技術の確立。
- 高輝度アト秒軟X線・サブサイクルレーザー光源・アト秒同期技術を融合し、量子物質のサブサイクル光子場駆動とアト秒計測が融合した世界唯一の実時間計測基盤を構築。



2-3. アト秒 XFEL で観る物質・生命中の電子ダイナミクス

「構造が機能を決める (Structure determines function.)」という言葉が示すように、物質の機能はその物質がとる構造で決まっており、ワトソンとクリックが X 線回折像に基づいて DNA の二重らせん構造を提案した時代から、結晶の原子配列や生体分子の構造を X 線を用いて調べる分野が発展してきた。静的状態にある物質の構造解析が長らく行われてきたが、シンクロトロン放射光や X 線自由電子レーザーの大強度 X 線パルスが利用できるようになってから、物質が機能している瞬間の動的過程をナノ秒からフェムト秒の時間分解能で構造解析できるようになった。一方、電子分布も機能を決定する重要な要素であり、電子分布とエネルギー準位の関係を電子状態解析から明らかにする分野も発展してきた。特に外場に対する物質の応答（光解離、光合成、光電子放出など）や化学反応における化学結合の組換えといった現象では、原子に先んじて軽い電子が動くため、電子の動的過程を捉えることが現象の正しい理解に不可欠である。このような電子の動的過程はアト秒オーダー (10^{-18} 秒) で進行するため、アト秒時間分解能を持つ測定技術が必須であり、世界中でアト秒実験に関する研究開発が急速に進められている。

以下では、アト秒 XFEL パルス光で検証できる研究例を二つ紹介する。

分子内の特定の結合の開裂や、二つ以上の分子間が結合して起こる新しい分子の形成は、二つの原子間の距離が時間とともに連続的に変化することで進行する。例えばシアン化金(I)二量体 ($[\text{Au}(\text{CN})_2^-]_2$) にもう一つのシアン化金(I)イオンが会合して Au-Au 結合を形成して 3 量体になるには数百 fs の時間がかかるが[1]、このプロセスに先行して、Au 原子の価電子雲の分極が起こるはずである。開裂にはホモリシス（均等開裂）とヘテロリシス（不均等開裂）があり、開裂過程に伴う価電子分布の時間変化がそれぞれで異なると予想される。アト秒時間分解測定により原子の動きに先行する電子の動きを明らかできれば、化学結合の本質をより深く理解できる。また、時間発展シュレディンガー方程式の解として得られる電子分布の時間変化の検証も可能になり、理論分野の進展も期待できる。

光合成は光エネルギーを化学エネルギーに変換するプロセスであり、全生物の存在基盤となる最も重要な光・物質相互作用である。様々な種類の光合成のうち最も研究が進んでいるのが葉緑素による酸素発生型光合成であり、クロロフィルの近傍にあるマンガンクラスター (Mn_2CaO_5) が酸素発生反応の活性中心であることが分かっている。水分解で酸素を発生する際のクラスター構造変化がフェムト秒分解能の X 線回折実験により明らかにされているが[2]、クラスターがどのようなプロセスで 4 つの光子を吸収して、クラスター内の電子分布がどのように変化して水分子を還元しているのかといった、光吸収を起点とした反応の初動についての知見は得られていない。アト秒パルス幅の可視光と軟 X 線をそれぞれポンプ光とプローブ光としたポンププローブ実験により Mn 原子や O 原子の内殻電子状態の時間変化を追跡することで、光合成の反応機構の真の解明により近づけるだろう。

[1] K. H. Kim *et al.*, *Nature* **518**, 385 (2015).

[2] M. Suga *et al.*, *Nature* **517**, 99 (2015).

アトセカンド物質生命科学

アト秒XFELで観る物質・生命中の電子のダイナミクス

XFEL レーザー

目的

Objective

- 物質・生命中の電子の運動を、アト秒パルスX線自由電子レーザー(XFEL)の元素・サイト選択性を用いて超高速スケールで可視化し、物質・生命の機能の根源を解明する。

計画

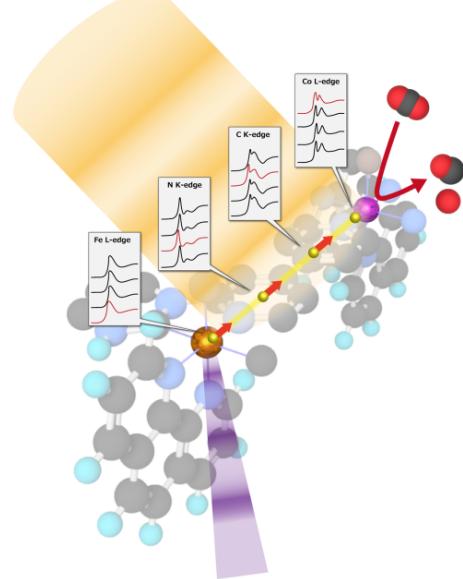
Plan

- 超伝導ライナックの高繰り返し電子ビームを用いた広いエネルギー範囲での高輝度FELアト秒パルス生成
- アト秒FELの光パルス制御と精密測定を可能にするアト秒計測基盤の構築
- 第一原理計算手法・AI援用解析手法の開発とアト秒ダイナミクス解析手法の確立

成果

Outcomes

- 分子内電荷移動・化学結合形成・光電子放出過程などの電子ダイナミクスの直接観察
- 電子ダイナミクス・原子核ダイナミクスの相互作用の理解
- 電子運動の制御による触媒・電池・生体材料等の新材料開発・高性能化指針の創出



アトセカンド物質生命科学

アト秒XFELで観る物質・生命中の電子のダイナミクス

XFEL レーザー

背景

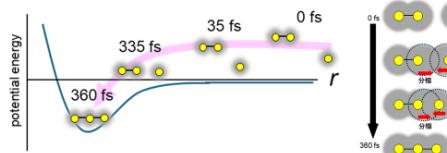
Background

外場に対する物質の応答や化学反応における化学結合の組換えでは、原子に先んじて軽い電子が動く。この電子の動きが物質の物理的・化学的性質を決めているため、物質の性質を正しく理解するためには電子の動的過程を捉えることが不可欠であり、アト秒オーダー（ 10^{-18} 秒）の時間分解能を持つ測定技術が必須である。現在、世界中でアト秒実験に関する研究開発が急速に進められている。

化学結合の形成を見る

Example

アト秒計測では、原子に先んじて分布を変える価電子の動的過程を追跡できる。これまでのフェムト秒計測で得られてきた原子核の動きと、アト秒計測で得られる価電子の動きを統合して解析することで、化学結合の形成（および開裂）の時間発展を詳しく記述することが可能になる。



課題

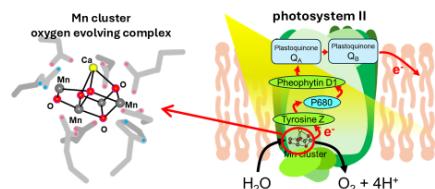
Challenge

- ウォーターウィンドウ（C K吸収端からO K吸収端）を超える光エネルギーでのアト秒パルス生成・時間制御
- アト秒時間分解能の測定手法開発（過渡吸収分光・光電子分光、X線発光分光・電気伝導測定等）
- 電子ダイナミクスを再現する第一原理計算手法の開発

光合成の電子の初動を見る

Example

光合成では、光エネルギーを利用して4段階で4電子を引き抜いて水分子が分解する反応が、光化学系IIの酸素発生複合体のMnクラスターにおいて進行する。アト秒X線の元素・サイト選択性を用いて、光照射によりMnクラスター内で起こる電子励起とそれに続く電子分布の時間発展を実験的に捉えることで、光合成の反応機構の解明を目指す。



2-4. 物質・反物質原子「ポジトロニウム」の超精密分光

ポジトロニウム (Ps) は、最も単純な電子と陽電子（ともにレプトン）だけから成る原子（純レプトン系原子）である。そのため、核構造に起因する不確かさに制限されずに、素粒子標準理論において重要な束縛系量子電磁力学（束縛系 QED）を、遷移周波数の超精密測定で直接検証できる。束縛系 QED はこれまで水素原子を用いて検証されてきたが、現在は実験および理論の精度が向上して、陽子の有限サイズや構造に由来する補正と実験系ごとの不一致（いわゆる陽子電荷半径問題）を含めて扱わなければ、厳密な検証や基礎定数の精密決定が難しい局面に達している。Ps 精密分光は、核構造に依らない独立な基準として、遷移周波数を通じてリュードベリ定数を精密に決定できる。さらに、反物質を含む原子の精密分光を極限まで高めることは、宇宙における物質・反物質非対称性の起源に迫るための手がかりにもなり得る。

Ps をこの目的に使うためにはレーザー冷却が不可欠であるが、Ps は寿命が約 142 ns と短いため、その時間内に冷却と測定を完了しなければならない。さらに質量が水素の 1/900 と軽いため、同じ温度でも速度分布の幅が水素より 30 倍広く、冷却（速度分布の幅の縮小）に必要なレーザーには特殊な特性が要求される。2024 年に世界初の Ps の 1 次元レーザー冷却が実現されたが、これは KEK の高強度低速陽電子ビームによる十分な密度の Ps の生成と、周波数を高速に掃引する光パルス列という Ps 冷却に特化した新レーザー技術の開発によるものである。超精密分光に不可欠なレーザー冷却と、十分な統計精度を支える高密度・高頻度 Ps 生成の両立の実現が視野に入り、状況が大きく変わった。

本計画の目的は、このブレーカスルーを起点として、低温 Ps を用いた超精密分光を体系的に推し進め、束縛系 QED 理論との厳密な比較を実現することにある。Ps の遷移周波数を従来より桁違いに精密に測定し、理論と実験が合致するなら、精度向上を通じてレプトン系による基礎定数の整合性検証へと展開する。もし有意な差が現れるなら、標準理論を超える相互作用の兆候として、暗黒物質の正体や反物質が現在の宇宙にほとんど残っていない機構など、根本問題に対する新理論への制約条件を与える。

そのための第一の柱として、現在より桁違いに強度を高めた大強度低速陽電子ビームを小面積へ高効率に集束し、Ps を狭い領域に大量生成して統計精度を引き上げる。第二の柱は、誘導放出過程も活用した超高速 3 次元レーザー冷却の実現である。これにより過去の実験と比べて統計精度を数桁向上させる。第三の柱として、フェムト秒パルスレーザー等を用いた超高速分光を整備し、短寿命（約 125 ps）のスピン一重項 Ps の精密寿命計測の道を開く。また、冷却した Ps をリュードベリ状態へ励起して長寿命化することで、原子干渉計を活用した質量や重力加速度の計測にも道を開く。これらの高密度 Ps 生成とレーザー技術を融合させることで、素粒子物理と宇宙論の両面に波及する新しい制約と手がかりを提供する低温 Ps 分光の世界的拠点を確立する。

レプトン原子極限精密分光

物質・反物質原子「ポジトロニウム」の超精密分光

陽電子 レーザー

目的

- 核子を含まない最も単純な純レプトン系のポジトロニウム (Ps) の超精密分光を実現し、陽子構造の不定性なしに素粒子標準理論を検証する。

計画

- 超伝導ライナックの高繰り返し電子ビームを用いた世界最高強度の低速陽電子ビームの実現
- 世界最高強度低速陽電子ビームを用いた桁違いのPs生成と飛躍的な統計的向上
- 新レーザー光源開発によるPsの超高速3次元レーザー冷却の実現

成果

- 遷移周波数の超精密測定と理論計算の厳密比較による束縛系QEDの精密な検証
- 測定精度の向上を通じた純レプトン系による物理基本定数の高精度決定への展開
- 暗黒物質や宇宙の物質・反物質非対称性に関わる新物理に対する手がかりと制約の提供

宇宙の物質・反物質非対称性の起源に迫る

ポジトロニウム (Ps)

水素 (H)

Time (ns)

Time 1 resolution

Resolution approx. 500 GHz/μs

Frequency -3/f_max (GHz)

冷却レーザー：
波長が急速に変化するパルス列

Lasers

Cooling

Probe

ionize

Mirror

Ps generator Silica aerogel

Frequency resolution

$\Delta\omega_{\text{eff}}/\Delta\omega_{\text{eff}} \approx 1/100$

Relative frequency (GHz)

~1 K相当の狭い幅の成分

tuned

fitted to tuned

detuned

fitted to detuned

Relative frequency (GHz)

レプトン原子極限精密分光

物質・反物質原子「ポジトロニウム」の超精密分光

陽電子 レーザー

背景

2つのレプトンの束縛状態からなる最も単純な純レプトン原子であるPsは、構造を持たない素粒子(レプトン)のみで構成されるため、核構造の不確かさなしに量子電磁力学(QED)を精密に検証できる。しかし、Psは寿命が142nsと短く質量が水素の1/900と軽く、精密分光に必須のレーザー冷却は実現困難と考えられてきた。2024年に新しく開発されたレーザー光源とKEK低速陽電子ビームを用いた世界初のPsの1次元レーザー冷却が実現し、超精密分光への道が拓けた。

低温Psの超精密分光

急減速させたPsの1S-2Sをはじめとする遷移周波数を従来より桁違いに精密に計測し、束縛系QED計算との厳密比較を行う。また、冷却したPsをRydberg状態へ励起して長寿命化すれば、原子干渉計を活用した質量や重力加速度などの計測が可能となり、物質・反物質の基本性質に関する新たな制限と手がかりを与える。周波数・強度・時間特性をPsに特化した種々のレーザー技術と、高密度・高頻度Ps生成技術を融合させることで、世界最先端の低温Ps分光拠点を確立する。

宇宙の物質・反物質非対称性の起源に迫る

課題

- 大強度低速陽電子ビームとその小面積への集束、高効率かつ低速なPs発生材料開発による高密度・高頻度Ps生成
- 新レーザー光源による誘導放出過程も活用した超高速3次元レーザー冷却
- フェムト秒パルスレーザーを活用した超高速分光

e- bunch

cooling laser

e+ bunch

Ps (600 K)

cooling laser 243 nm

excitation laser 488 nm

cooling laser 532 nm

Two-photon excitation laser 488 nm

Cooling laser 243 nm

超高速3次元レーザー冷却システム



Institute of Materials Structure Science (2026年1月発行)
<https://www2.kek.jp/imss/mb-linq/>