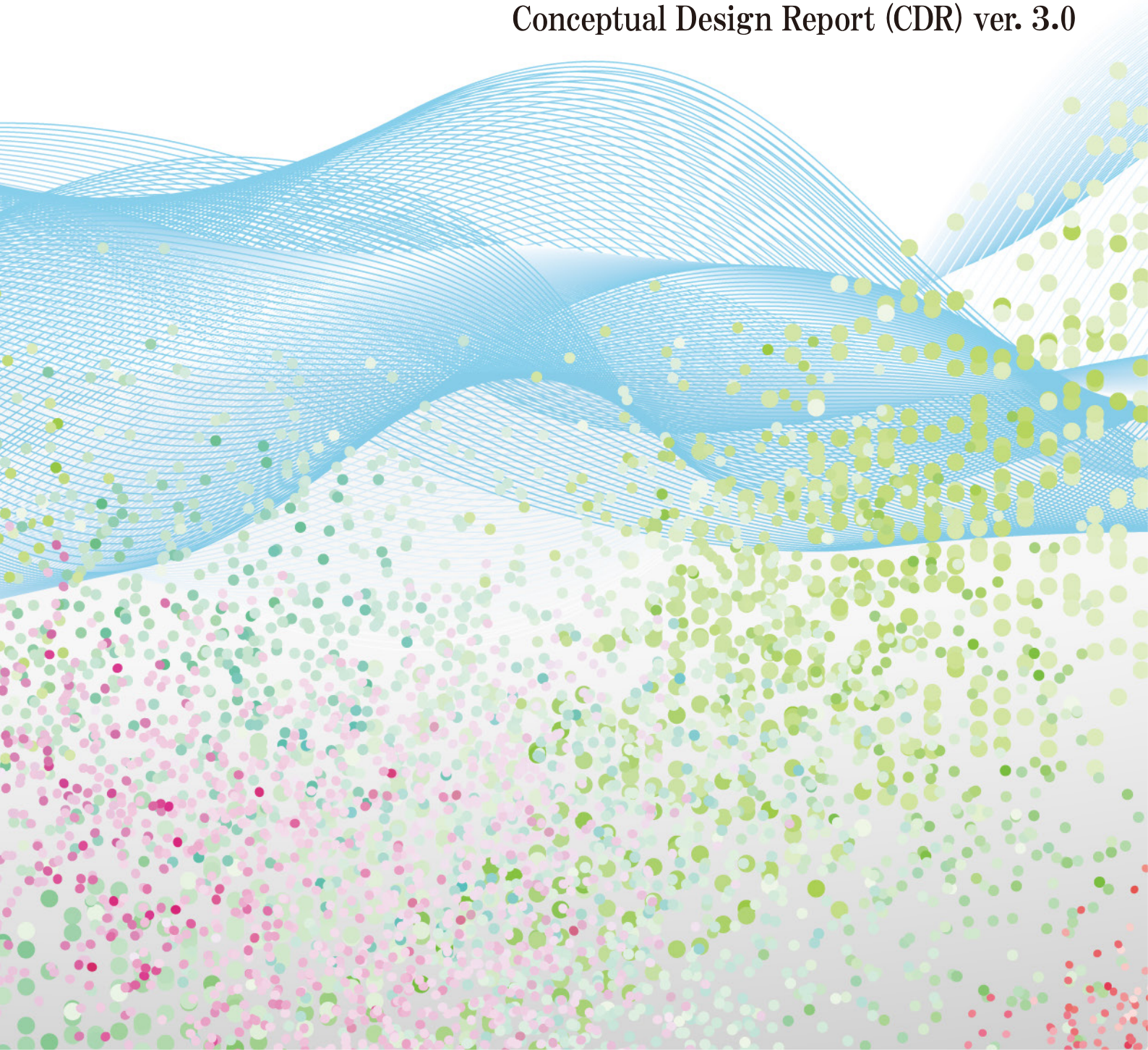


量子マルチビーム共創拠点計画

Multi Quantum-Beam Linked Facility for
Material-Quantum-Life Sciences (MB-LINQ)

Conceptual Design Report (CDR) ver. 3.0



目次

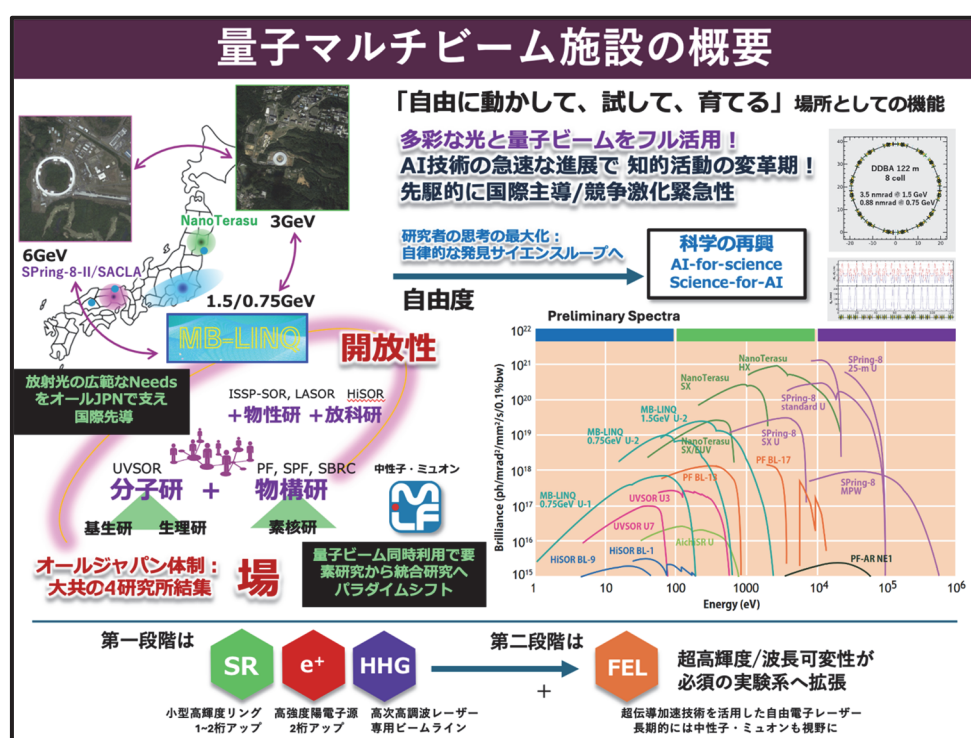
1. 概要	1
2. サイエンス	7
2-1. 科学目標	8
2-1-1. 最表面構造物性（空間的極限階層）	8
2-1-2. 超高速電子物性（時間的極限階層）	8
2-1-3. 機能物性制御（時空間的多階層横断）	8
2-2. サイエンス課題	9
2-2-1. 陽電子・光子融合による低次元量子材料の精密計測	9
2-2-2. サブサイクル強光子場とアト秒 XFEL が拓くペタヘルツ量子物性科学	11
2-2-3. アト秒 XFEL で観る物質・生命中の電子ダイナミクス	13
2-2-4. 物質・反物質原子「ポジトロニウム」の超精密分光	15
3. ファシリティ	17
3-1. VUV 蓄積リング	17
3-2. AI・データ活用	19

1. 概要

コンセプト

量子マルチビーム共創拠点（MB-LINQ）計画は、VUV 高輝度放射光源、高強度陽電子源、高次高調波レーザーを単一施設に整備し、最終的には連続波自由電子レーザーをも統合した複合施設において、量子ビームの順次利用から同時利用へと研究基盤を発展させる構想である。同一試料・同一環境に対して、複数の量子ビームから得られる相補的情報を相関解析することで、物質・生命の複雑で動的な“ありのまま”の状態を多階層的に理解することを目指す。

本計画では、空間的極限階層、時間的極限階層、時空間的多階層横断の理解を三大科学目標として掲げる。最表面構造物性、超高速電子物性、機能物性制御の各課題について、同一研究対象の順次測定、複数手法の同時測定、相関解析による機能理解の高度化を段階的に実証する。また、放射光、陽電子、レーザーの専門家がアンダーワンルーフで協働することで、計測手法と研究分野の融合を促す。施設と人材の両面から融合を進めることで、従来の個別手法による要素研究を、階層横断的な統合研究へと転換する。



実施体制

MB-LINQ は、大学共同利用機関と共同利用・共同研究拠点が共同提案する施設である。中核となる参画・連携施設は、NINS 分子科学研究所 (UVSOR)、KEK 物質構造科学研究所 (Photon Factory, Slow Positron Facility)、広島大学放射光科学研究所 (HiSOR)、東京大学物性研究所 (ISSP-SOR, LASOR)、KEK 加速器研究施設・共通基盤研究施設・WPI 量子場計測システム国際拠点 (ACCL, ARL, QUP) である。加速器、ビームライン、レーザー、陽電子、検出器、データ解析の各専門性を結び、量子マルチビーム研究を支える体制を形成する。

放射光、陽電子、レーザーに加え、中性子・中間子を含む量子ビーム関連学会、量子ビーム生成を担う加速器学会、分子科学・物性科学の研究コミュニティ、SPRING-8 や NanoTerasu、MLF を含む利用者団体、国際的な放射光コミュニティからも本計画への支持が寄せられている。2026 年 3 月には、文部科学省の量子ビーム施設利用推進委員会および放射光学会の拡大放射光施設代表者会議で説明と意見交換の機会を得ており、コミュニティの意見を計画に反映するプロセスを継続する。

準備状況

本計画の出発点は、日本学術会議マスタープラン 2020 に採択された放射光学術基盤ネットワークである。PF、UVSOR、HiSOR を中心に始まった連携に、2024 年には ISSP-SOR が加わり、各施設の高度化構想を、VUV 高輝度放射光源を中核とする MB-LINQ 計画へ一本化した。PF-HLS 計画で検討された放射光マルチビームの概念を、陽電子およびレーザーとの融合へ拡張し、相対的に低コストで早期実現可能な計画へ再構成した。連続波自由電子レーザーや加速器・検出器等の R&D ファシリティは、発展計画と位置づける。

放射光学術基盤ネットワークの実績

開発研究多機能ビームライン 順次利用から同時利用へ

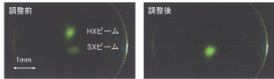


BL-11A-11B
フォトンファクトリー
開発研究多機能ビームライン

放射光学術基盤ネットワーク (2020~) の共同事業



開発研究多機能ビームラインを
4 研究所連携で整備して利用を開始
→ 軟X線と硬X線の 2 ビーム同時実験
→ 量子マルチビームの同時利用に
向けた準備と実績
→ 国際拠点として先導



調整前
調整後

The two beam ducts are introduced into the experimental hutch. The other one is for soft X-rays.
This beamline was constructed through the cooperation of four academic facilities, PF, UVSOR, HiSOR, and ISSP-SOR.

2025.10.28 ファーストビーム
2025.11.26 2ビーム同時照射

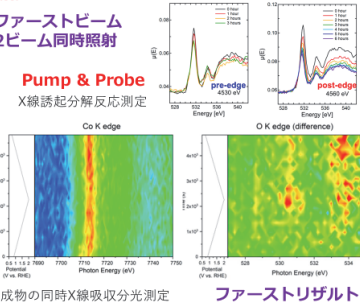
レーザー、放射光、陽電子ビームの融合による物質・生命科学の新展開 (2026.1.5 @物性研究所)

これからの時代のサイエンス創発に必須な技術開発の例
Proof of Concept 研究のさらなる強化が必須



Probe & Probe
触媒と生成物の同時X線吸収分光測定

ファーストリザルト



Pump & Probe
X線談起分解反応測定

Co K edge
O K edge (difference)

提案機関には、約 50 年にわたり大学院生を含む研究者を支えてきた共同利用・共同研究の実績がある。学術論文、学位論文、重要技術、施設リーダーを多数輩出し、真空封止アンジュレーターや定位置出射二結晶分光器など、世界の放射光施設に普及した技術も生み出してきた。低速陽電子回折、スピン角度時間分解光電子分光、軟 X 線アト秒時間分解過渡吸収分光、VUV 放射光ベクトルビームなど、本計画で活用される先端技術の蓄積もある。

放射光学術基盤ネットワークの共同事業として、PF BL-11A,-11B に開発研究多機能ビームラインを建設し、2025 年に完成した。同ビームラインでは、軟 X 線と硬 X 線の同時利用の実証試験を進め、水の電気分解反応における触媒の化学状態と生成物・反応中間体の同時観察など、MB-LINQ のミッションに直結するファーストリザルトが得られている。ビームラインの建設・運用検討会は 30 回以上開催され、技術開発と人材育成のための新しい利用制度も導入された。

計画の検討は、放射光マルチビームおよび量子マルチビーム研究会を開催するなどして、関連分野の研究者・技術者・学生との継続的な意見交換を通して進めている。検討内容は、Web ページや CDR を随時更新して公開している。物構研では、LASOR のレーザー専門家のクロスアポイントメントや、2026 年度からの量子ビーム研究開拓部門の設置など、計画遂行に必要な体制強化も進めている。

共同利用・共同研究の運営方針

運営面では、提案機関が蓄積してきた透明性の高い課題審査と利用制度の検討体制を継承する。UVSOR および PF では、外部委員を主体とする審査委員会や運営会議を通じて、公平性と柔軟性を両立した共同利用を実施してきた。MB-LINQ においても、UVSOR、PF、HiSOR、ISSP-SOR が連携し、萌芽的研究と開発人材育成に適した共通の課題制度を構築する。

ビームラインは総計 20 本程度とし、放射光 15 本、陽電子 2 本、レーザー 2 本、可搬式レーザー 2 台を組み合わせる想定である。同時利用を考慮した実効ビームライン数は 16 本程度となるが、VUV 放射光源の低消費電力性を活かして十分な運転時間を確保し、AI 等を援用した測定的高速化・自動化により、年間 4000 時間の利用運転と 1200 名規模のユーザー受入を目指す。国内大学の教育研究を重点的に支援しつつ、海外ユーザーや国立研究所ユーザーへの課金、協定による分担金、有償の緊急運転なども検討し、持続可能な運営基盤を整える。

新施設への移行に伴い、現行の UVSOR、PF-AR、SPF は順次運転を停止する計画である。新施設へ移行できない PF-AR の大型硬 X 線放射光源としての機能は、PF ビームラインの再編により可能な限り継承し、利用研究の断絶を避ける。

人材育成

人材育成は、MB-LINQ の最重要ミッションの一つである。装置面では、若手ユーザーが自由に試行錯誤できる研究環境と、スタッフが過度な支援負担に追われず研究開発に取り組める環境を両立するため、フェイルセーフ機構とビームライン担当 AI の導入を進める。これにより、ユーザーの自由度を高めながら、長期停止につながる人的ミスを防ぎ、セレンディピティを生む実験環境を実現する。

利用制度面では、一般課題の複数年化、教育枠、若手旅費支援、博士後期課程学生への課題責任者資格付与などを組み合わせ、学部生から若手研究者までが量子ビーム研究に継続的に関与できる制度を整える。人事面では、大学との人事交流、技術職員を含む専門的キャリア形成、若手スタッフの責任ある立場への登用、海外施設への計画的派遣など、施設運営人材の育成と国際連携を一体的に進める。

実現性

提案機関が連携して進めてきた開発研究多機能ビームラインの建設・利用、R&D プロジェクト、人員配置の強化は順調に進んでおり、MB-LINQ 計画を実現する素地は整っている。中核設備として高輝度 VUV 光源を整備し、高強度陽電子源、高次高調波レーザー、ビームライン群を段階的に立ち上げる。

本計画は、既存施設の再編による省エネルギー化と人員確保の点でも妥当性が高い。新 VUV 放射光源施設と PF、HiSOR を合わせた年間消費電力は、年間 4800 時間の加速器運転（4000 時間の利用運転）を想定して約 24 GWh と見積もられ、現行施設合計の約 45 GWh からほぼ半減する。これは 2025 年度単価で年間約 5.3 億円の削減に相当する。2024 年度の施設利用収入は 1 億円超であった。MB-LINQ への移行に伴う収入増、大学以外の共同利用への課金制度、有償緊急運転等を組み合わせることで、持続的な運営を目指す。

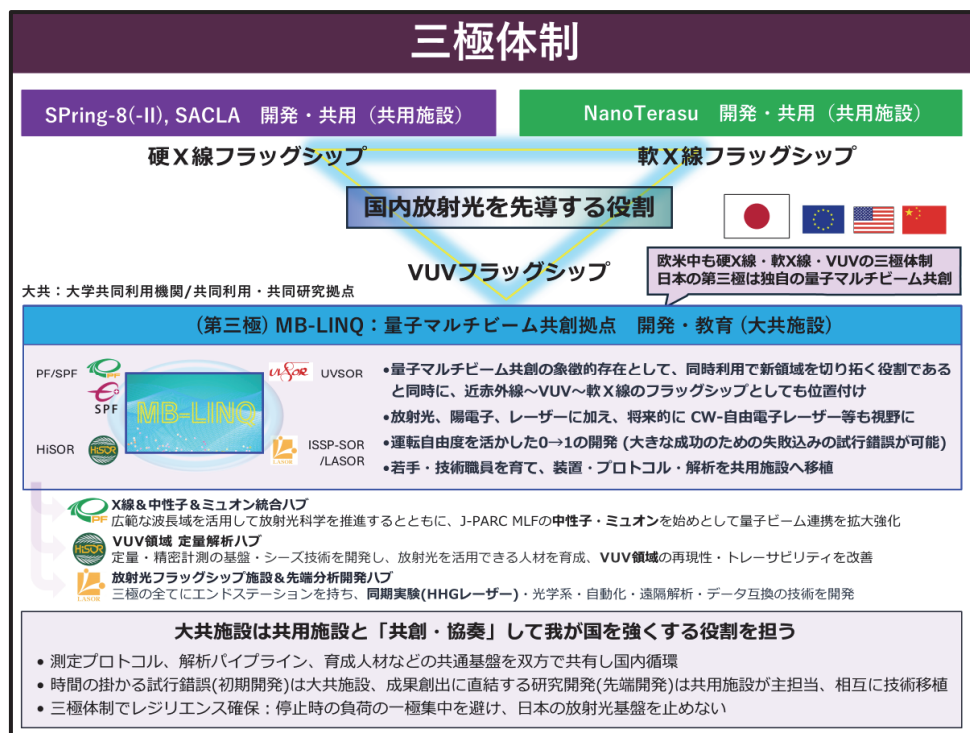
建設サイトは、国内大学の教員数の約 40%が集中する関東圏を想定している。遠隔制御や自動測定が進展しても、装置開発や技術的挑戦性の高い利用研究、若手育成にはオンサイト実験が不可欠である。拡張性を考慮し、将来的には連続波自由電子レーザーや加速器・検出器等の R&D ファシリティを含む研究基盤へ発展させる。施設・設備については、ライフサイクルを考慮した保守計画、現有設備の再利用、老朽化対策を兼ねた高度化積立により、長期的な安定運用を図る。

国内外の状況、戦略性、緊急性

量子ビーム科学は、物質・生命に関連する広範な研究分野を支える基盤であり、世界各国で国家戦略として施設整備が進んでいる。米国、欧州、中国では、硬 X 線、軟 X 線、VUV 領域をカバーする高輝度施設の三極体制が整いつつある。一方、日本は SPring-8 (硬 X 線) と NanoTerasu (軟 X 線) を有するものの、VUV 領域を担う高輝度フラッグシップ施設を欠いている。MB-LINQ の 1.5/0.75 GeV 切替式蓄積リングは、この空白を埋め、日本の高輝度放射光三極体制の一極を担う。

MB-LINQ は、共用施設が担う発展的研究・利用人材育成を補完し、大学共同利用機関と共同利用・共同研究拠点が得意とする萌芽的研究・開発人材育成を担う。放射光、陽電子、レーザーを組み合わせた同時利用環境は海外にも前例がなく、日本独自の強みとなる。すでに国内の放射光マルチビーム研究は先行しているが、英国やドイツでも関連する取り組みが始まっており、早急に体制を構築しなければ優位性を失う恐れがある。

PF と UVSOR は 40 年を超える実績を持つ一方、建物的制約により抜本的な高輝度化が難しい。蓄積された知見を次世代施設へ継承し、若手が光源、ビームライン、エンドステーションの建設・開発に関わる機会を確保するためにも、現時点での新施設整備は緊急性が高い。アジア・オセアニアを中心とする国際連携を発展させ、日本の量子ビーム科学の国際プレゼンスを維持・強化する上でも重要である。



社会的還元と将来展開

MB-LINQ が目指す物質・生命の機能の根源の解明は、半導体材料、エネルギー材料、触媒、医薬分子、生体分子、医療、文化財保存、検出器開発など、幅広い分野に波及する。例えば、AI の急速な発展に伴うデータセンターの増加を背景に、省電力電子デバイスの開発は喫緊の課題であり、低次元量子材料の研究には放射光、陽電子、レーザーの統合利用が有効である。タンパク質の動的構造決定や超高線量率照射治療のメカニズム解明、文化財・考古資料の劣化過程の理解にも貢献が期待される。

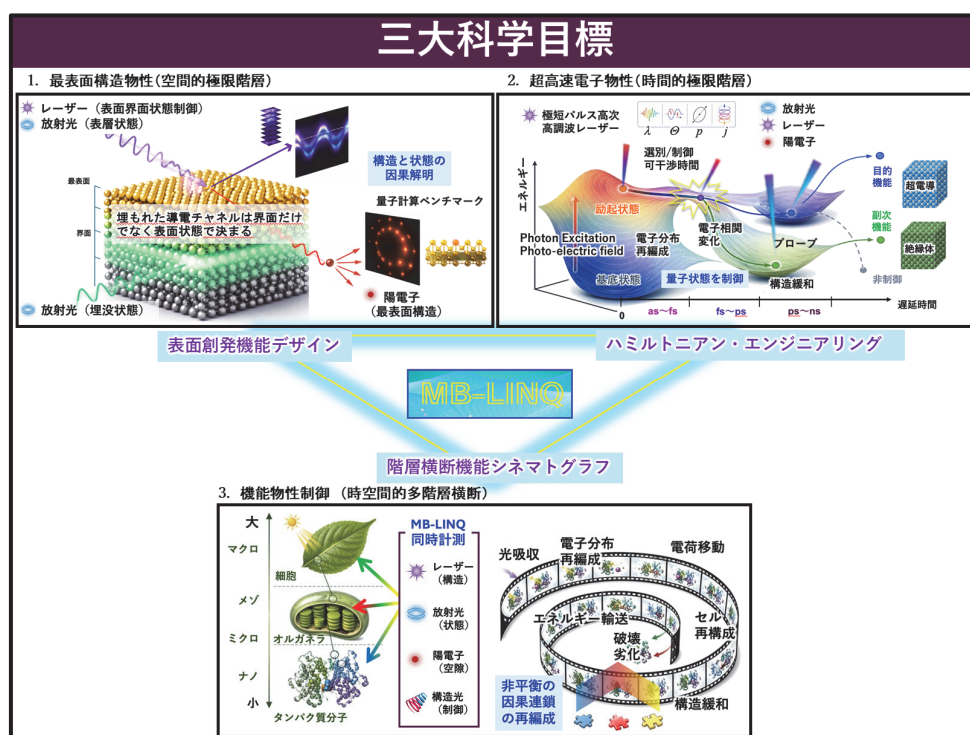
複数量子ビーム利用により生み出される多階層横断測定データは、AI for Science を推進する重要な資源となる。実験者による成果創出に加え、加速器運転、ビームライン計測、試料環境、解析結果を統合的に学習することで、量子ビーム施設そのものの進化にもつながる。一般公開、施設見学、寄附などを通じて得られてきた社会的支持を基盤に、研究成果と人材育成の両面から社会へ還元する。

名称

MB-LINQ: 元々は、Multi quantum-Beam facility with superconducting LINac for material-Quantum-life sciences の略、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) を意味する、として命名した。現在は、超伝導加速器による連続波 (CW) 自由電子レーザーを除く部分を先行整備する計画としているので、Multi quantum-Beam LINKed facility for material-Quantum-life sciences の略としている。なお、本事業の日本語名称を量子マルチビーム共創拠点、英語名称を Multi quantum-beam linked co-creation center とした。

2. サイエンス

物質・生命の機能は、原子配列、電子状態、欠陥・空隙、水和環境、巨視的応答が、時間・空間の複数階層で結びつくことで発現する。従来の量子ビーム研究は、それぞれの手法が得意とする階層を高精度に切り出して理解を深めてきたが、機能が生まれ、変化し、失われる過程そのものを捉えるには、同一試料・同一環境における相補的情報を、時間軸と空間軸の上で関連づける必要がある。MB-LINQ 計画は、まず VUV 高輝度放射光源、高強度陽電子源、高次高調波レーザーを単一施設として整備した後、連続波自由電子レーザーを統合した複合施設とする構想であり、順次測定から同時測定、さらに相関解析へ進むことで、対象を破壊・分離して理解するのではなく、「ありのまま」の状態が多階層的に理解する研究基盤を構築する。本章では、本計画の三大科学目標、すなわち空間的極限階層、時間的極限階層、時空間的多階層横断の理解が目指すところを述べる。また、連続波自由電子レーザーの整備後に実現される課題も含め、本計画で最終的に目指す具体的なサイエンスを示す。サイエンス課題は、今後順次追加する。



2-1. 科学目標

2-1-1. 最表面構造物性（空間的極限階層）

物質表面やグラフェンに代表される極限まで薄い低次元量子材料では、スピン偏極伝導や超伝導などの特異な量子状態から、触媒活性や表面反応選択性に至るまで、多様な機能が発現する。これらの機能は、最表面および表面直下の原子配列が生み出す電子状態に起因する。また、その表面構造と電子状態は、内部構造とも密接に関係している。しかし、新奇機能の発見やその発現原理の解明を目指す研究で扱う表面は、しばしば様々な微小ドメインから構成され、不均一かつ不安定である。本課題では、機能が宿る微小領域を特定し、放射光により最表面から内部に至る電子状態を調べ、同時に陽電子回折により最表面および表面直下の原子配列を精密に決定する。陽電子回折は、最表面および表面直下数原子層の原子配列の精密決定が可能な唯一無二の新しいプローブである。これにより、新奇低次元量子材料の開発に必要な不可欠な、原子配列と電子状態に関する「表面創発機能デザイン」を実現する。

2-1-2. 超高速電子物性（時間的極限階層）

光励起された物質中では、アト秒からフェムト秒の時間スケールで電子分布の再編成、電子相関の変化、コヒーレンスの生成と消失が進行し、その後の電子状態変化、構造緩和、さらにはピコ秒からナノ秒で現れる巨視的な物性や機能を方向づける。本課題では、高次高調波レーザーの極短パルス性と高コヒーレンスを利用して、波長、位相、偏光、角運動量などの自由度を制御した光場（高調波レーザーおよび強レーザー場）によって、電子系の相互作用や非平衡分布を選択的に変調し、その後の緩和経路や相転移の分岐を操作する。その上で、放射光などの量子ビームを組み合わせ、電子状態および構造の変化を広い時間階層にわたって追跡することで、初期のコヒーレント電子ダイナミクスの光制御が最終的な機能発現にどのような影響を与えるかを明らかにする。すなわち、アト秒から数フェムト秒の初期電子過程を操作することで、ピコ秒以降に現れる巨視的現象を制御する「ハミルトニアン・エンジニアリング」を実現する。

2-1-3. 機能物性制御（時空間的多階層横断）

非平衡系・複雑系の機能発現を理解するには、異なる階層にまたがる現象を時間軸に沿って統合的に捉える新たな計測が必要である。本課題では、光合成、酵素反応、イオン輸送、薬効・薬剤耐性、機能性材料などを対象に、リガンド結合や光刺激を起点とする電荷移動、水和・空隙再編成、構造変化、機能発現、耐性化・失活への分岐を、同一試料・同一環境で描き出す。レーザー、放射光、陽電子を統合した計測により、階層間相互作用とその時間発展を追跡し、機能発現と破綻を決める律速過程を特定する。さらに、構造光、時間分解計測、フーリエ変換イメージングなど最先端技術を組み合わせ、階層間の因果連鎖を再構成する。これにより、創薬や生命機能設計、材料創製の新原理を確立し、非平衡系の因果を実験的に解読する「階層横断機能シネマトグラフ」を実現する。

2-2. サイエンス課題

2-2-1. 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（エネルギーバンド）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) によりエネルギーバンドの情報を得て、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

世界最高性能の大強度低速陽電子ビーム

XFEL 放射光 陽電子 レーザー

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

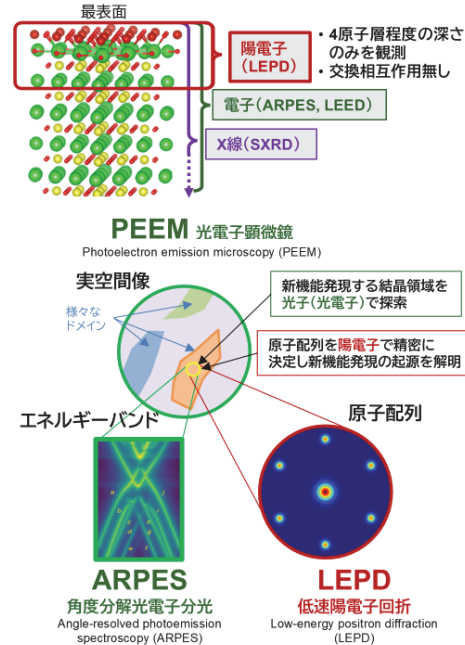
Plan

- 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



陽電子・光子融合による低次元量子材料の精密計測

世界最高性能の大強度低速陽電子ビーム

XFEL 放射光 陽電子 レーザー

背景

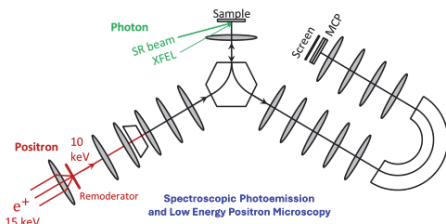
Background

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狙っ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

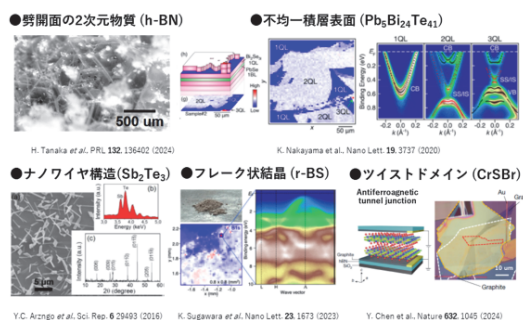
特異な低次元の量子状態は表面微小領域に局在するが、時間的に不均一であることが多い。光子と陽電子を同時に用いることで、機能が発現している微細領域を探し出し、その電子状態と原子配列を明らかにすることが可能になる。



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



2-2-2. 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سد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・軌道選択的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「視て・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

ペタヘルツで操る、アト秒で視る

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

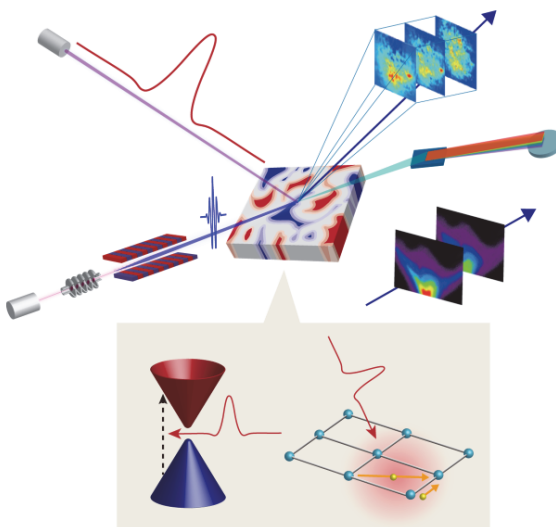
Plan

- 超伝導リ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・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FEL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”の開拓
- 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光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

ペタヘルツで操る、アト秒で視る

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従し、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（フロック/光ドレド状態）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。

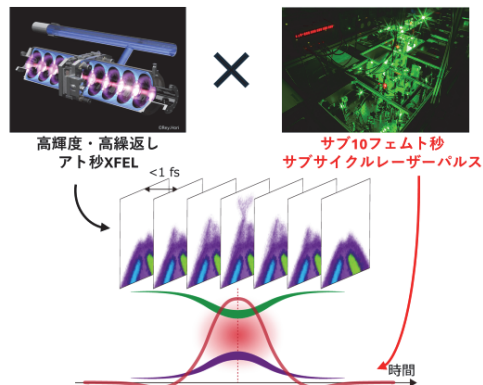
光子場駆動電子応答の可視化 Example

電子がサブサイクル強光子場に直接追従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、フロック/光ドレド状態を、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され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。



2-2-3. 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) ($[\text{Au}(\text{CN})_2]^+$) 二量体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にできれば、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נק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).

アト秒XFELで観る物質・生命中の電子のダイナミクス

超高速で動く電子を可視化する

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

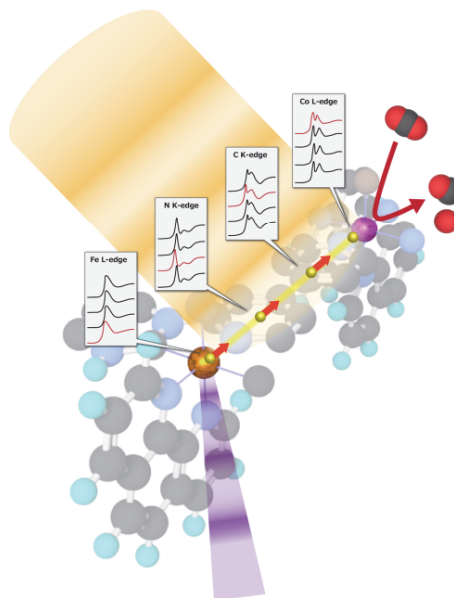
Plan

- 超伝導リ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



アト秒XFELで観る物質・生命中の電子のダイナミクス

超高速で動く電子を可視化する

XFEL レーザー

背景

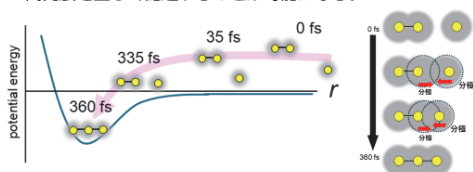
Background

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）の時間発展を正しく記述することが可能になる。



課題

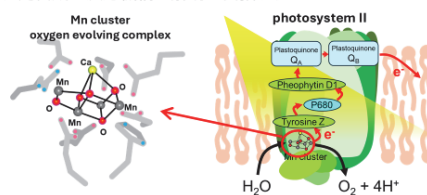
Challenge

- 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。



2-2-4. 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、このブレイク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。

物質・反物質原子「ポジトロニウム」の超精密分光

宇宙の物質・反物質非対称性の起源に迫る

陽電子 レーザー

目的

Objective

- 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

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
- 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の向上
- 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

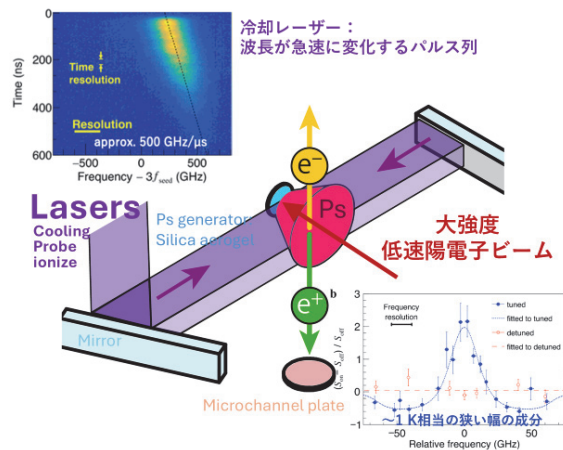
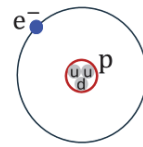
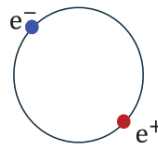
成果

Outcomes

- 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

ポジトロニウム (Ps)

水素 (H)



物質・反物質原子「ポジトロニウム」の超精密分光

宇宙の物質・反物質非対称性の起源に迫る

陽電子 レーザー

背景

Background

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

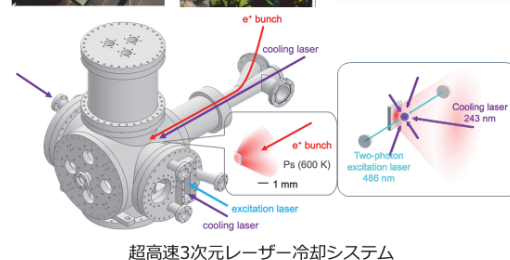
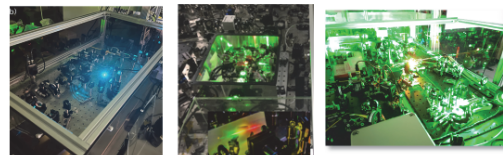
Example

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・高周波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。

課題

Challenge

- 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・高周波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



3. ファシリティ

3-1. VUV 蓄積リング

VUV 蓄積リングは、MB-LINQ の中核となる高輝度放射光源であり、VUV 光を中心とし、赤外線から軟 X 線領域までをカバーする。加速器検討では、既存・計画中の低エネルギーリング光源を参照し、1.5 GeV/0.75 GeV の切替運転を前提とする案を検討している。0.75 GeV で光子エネルギー100 eV 以下で回折限界に近い光源性能を得ることを目指し、エミッタンス 1 nmrad 未満を目標として暫定案を設計した。

図にラティスとオプティクスの暫定案を示す。周長を約 122 m とし、エミッタンスは 1.5 GeV で約 3.5 nmrad、0.75 GeV で約 0.88 nmrad が見込まれる。直線部は 4.2 m と 1.6 m をそれぞれ 8 本程度確保する構成で、入射部、主 RF 空洞、高調波空洞などの加速器コンポーネントを配置した上で、4.2 m 直線部 6 本、1.6 m 直線部 7 本程度を挿入光源用に利用できる見通しである。この構成により、赤外・UV-EUV 領域では長周期の可変偏光アンジュレータ、VUV 領域では APPLE-II 型などの可変偏光アンジュレータ、軟 X 線領域では短周期の真空封止アンジュレータを組み合わせる。

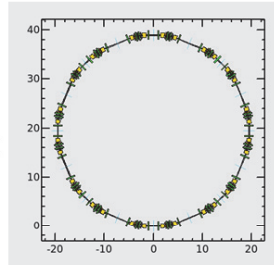
1.5 GeV 運転は、VUV から軟 X 線までの広い光子エネルギー範囲をカバーする標準運転モードとして位置づける。一方、0.75 GeV 運転は、低エネルギー領域での高いコヒーレントフラクシオン、低次元・表面系に適した高輝度 VUV 光、ならびに高次光の影響低減を狙う運転モードである。両モードを切り替えることで、汎用性と VUV 領域での先鋭性を両立し、PF、UVSOR、HiSOR 等で蓄積された低エネルギー放射光源の知見を、次世代の高輝度光源へ発展させる。

今後は、500 mA トップアップ運転の実現可能性、Intrabeam scattering およびタウシェック寿命、ビーム安定領域、高調波空洞の必要性、RF 周波数および RF 電圧、抵抗壁不安定性、挿入光源放射損失を含めた RF 負荷、非線形最適化、ID ギャップ変更時の局所的な運動量アクセプタンスなどの評価・検討を進める。現在、ビーム安定領域の計算や RF 周波数がイオントラップに与える影響などに加え、より周長の大きなリングの可能性についても検討を進めている。性能、コスト、開発リスク、既存技術の再利用性を総合的に比較し、MB-LINQ の科学目標に最も適した仕様を決定する。

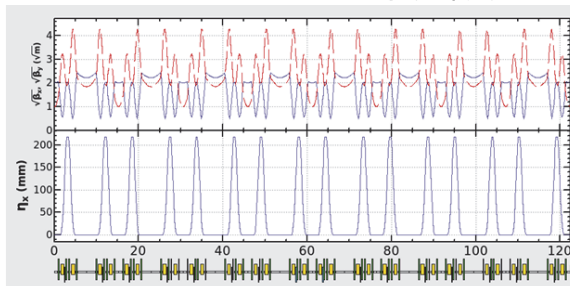
VUV蓄積リング暫定案 ラティス・オプティクス・パラメータ

PF・UVSORによる検討

周長 **122 m**
 セル数 **8**
 エミッタンス
 1.5GeV: **3.5 nmrad**
 0.75GeV: **0.88 nmrad**
 直線部
4.2 m×8 本
1.6 m×8 本



ラティス

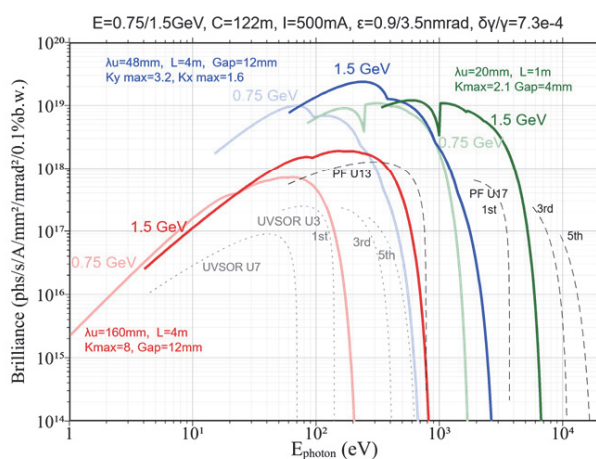


オプティクス

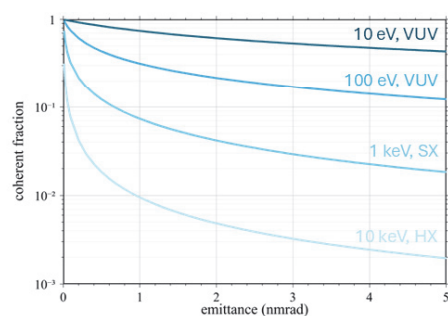
パラメータ	Value
エネルギー [GeV]	1.5
周長 [m]	122.4
ラティス	DDBA
セル数	8
RF電圧 [MV]	0.5
RFバケット高さ [%]	2.273
一周当たりの放射損失 [MeV/turn]	0.1172
モーメントコンパクション因子	1.3278×10^{-3}
ベータatronチューン, ν_x/ν_y	14.420/5.246
減衰時間, $x/y/z$ [ms]	7.59/10.45/6.43
自然エミッタンス[nmrad]	3.503
エネルギー拡がり	7.296×10^{-4}
自然バンチ長	16.84 ps (5.05 mm)

VUV蓄積リング暫定案 スペクトル・コヒーレントフラクション

PF・UVSORによる検討



スペクトル



コヒーレントフラクション

3-2. AI・データ活用

近年、加速器運転や量子ビーム計測においては、大量データ取得と機械学習を活用したデータ解析技術が急速に発展している。特に自由電子レーザー（FEL）施設では瞬間的な計測により膨大なデータが生成されるため、データ転送・保存・解析のワークフローが整備されてきた。蓄積リング型の放射光施設でもデータ量の増大が顕著であり、データポータルやリモート計算環境を整備し、ユーザーが生データを持ち帰るのではなく計算資源をデータ側に持ち込む“bring compute to data”の考え方が広まりつつある。しかし、量子ビーム実験の実施は依然として人の経験や暗黙知に大きく依存している。加速器運転では多数の運転パラメータや環境条件が絡み合い、運転状態の良否にはオペレーターの熟練度が影響する。ビームラインの調整でも、最適条件の探索は担当者の経験に依存する部分が多い。ユーザー自身も、試料の状態や明らかにしたい物理量に応じて測定条件を設定する必要があり、その判断には経験やサポートスタッフの助言が重要な役割を果たしている。

量子ビーム施設では、加速器研究者・オペレーター、ビームライン担当者／サポートスタッフ、そして多様なユーザーが関与して実験が実現されている。しかし専門分野や経験、立場の違いにより知識の断絶が生じている。例えばユーザーが測定データの異常に気づいた場合、その原因が試料によるものか、計測器や加速器など上流のどこかの要因によるものかを切り分ける必要があるが、その判断には施設側と双方向の知識共有が不可欠である。この状況は実験の効率や再現性を制限する要因となっている。量子ビーム施設は本質的に上下流の要素が強く結合したシステムである。加速器で生成されたビームはビームラインで分光・整形されたのちに試料へ照射され、検出器によって信号が取得される。従来は上流から順に最適と考えられる状態を作り、ビームを供給する調整が行われてきた。しかし、これは必ずしもある試料や測定対象にとって最適な条件を保証するものではなく、運用上の制約によるものである。本来の最適な計測条件は、加速器の運転状態と試料・検出器の状態という上下流の境界条件のもとで決定されるべきものである。

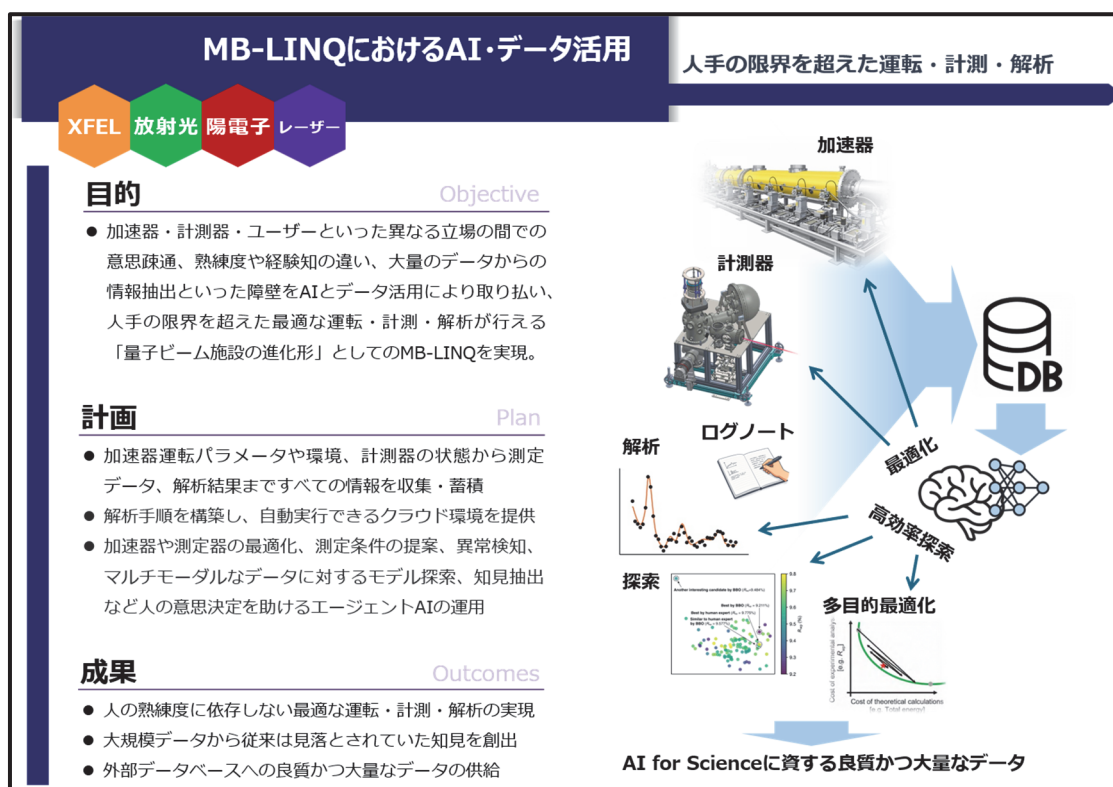
この状況を最適化問題として捉えると、量子ビーム実験は、加速器・ビームライン・検出器など実験に関与する要素から得られる観測変数と、測定条件や装置設定など人が調整可能な操作変数の関係のもとで最適な実験条件を探索する問題として定式化できる。ここでいう最適化とは、限られた測定時間などの制約のもとで操作変数を探索し、得られる物理量や構造モデルの不確かさを最小化するパラメータセットを見出す過程である。このような問題では各パラメータが解析結果に与える影響を明示的に記述することが難しく、ブラックボックス最適化が重要な手法となる。

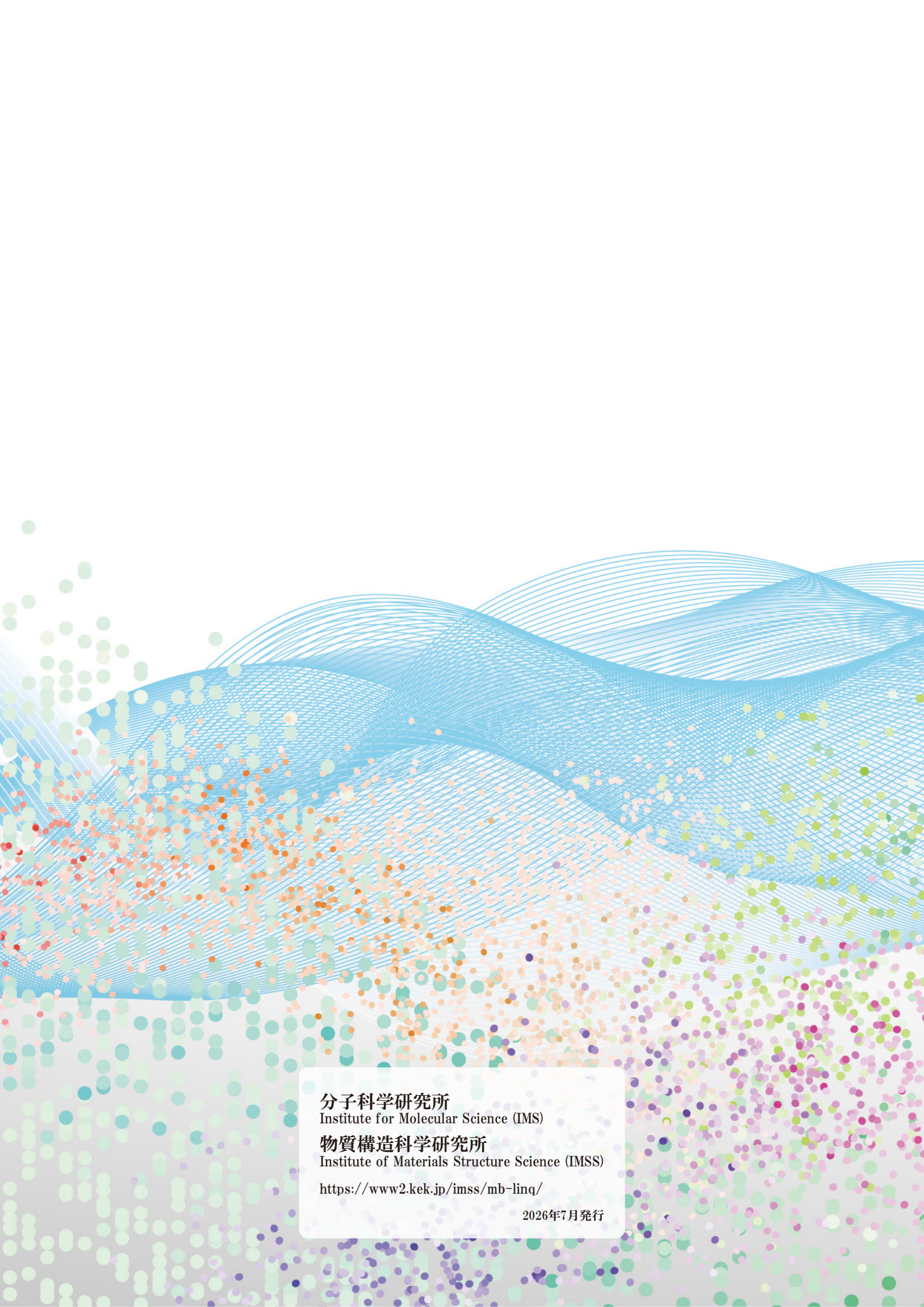
この観点から見ると、量子ビーム実験は「加速器運転」「ビームライン計測」「データ解析」という三つの過程を個別に最適化する問題ではなく、運転・計測・解析を一体として最適化する問題として再定義できる。そのためには、各段階で得られるデータや条件を分断された情報として扱うのではなく、統合的に蓄積・解析する基盤が必要となる。この基盤として、従来のようにユーザーがデータを取得する仕組みにとどまらず、探索的なデータ解析と確立された解析フローによる自動処理の双方を実行できるクラウド型解析環境を整備することが重要である。この環境では、さまざまな実験条件のもとで生成されるデー

タの分布や、解析パラメータ変更時の結果の挙動が体系的に記録される。すなわち、「そのビームラインからどのようなデータが生成され得るか」という知識そのものがデータとして蓄積される。

このようなデータ基盤により、異常検知や実験の良否判定の基準を構築することが可能となる。また解析結果における人や手順によるばらつきを可視化することができ、他の計測手法や第一原理計算とのマルチモーダル比較の指針となる。さらに蓄積された知識を活用することで、ユーザーの熟練度に依存せず最適な測定条件を提案することが可能となり、AI for Science に資する高品質なデータ創出を支える基盤となる。蓄積された知見は大規模言語モデルと組み合わせることで、ユーザーとの対話を通じて試料作成や測定条件設定を支援するエージェント AI として活用できる。加速器運転情報、ビームライン状態、測定データ、解析結果を統合的に扱うことで、実験に関与する研究者・スタッフ・ユーザーが経験や立場の違いを超えて議論するための共通基盤を提供する。

加速器から計測器、試料に至るまで、量子ビーム実験のすべての要素をそれぞれの熟練者レベルで理解する研究者はおそらく存在しない。従来の量子ビーム施設は、上流から下流へと流れる運用フローのもとでユーザーに実験データ創出環境を提供してきた。しかし、実験条件・装置状態・解析結果を体系的に蓄積し、それらの関係を学習・活用できる現在、量子ビーム施設はデータを基盤として実験環境を継続的に改善していく新しい段階へと進化することが期待される。MB-LINQ では、このようなデータ蓄積・活用の枠組みを施設基盤として採用し、量子ビーム施設を単なる「データ創出環境」ではなく、運転・計測・解析を統合して知識を自己学習し続ける「量子ビーム施設の進化形」として実現する。





分子科学研究所
Institute for Molecular Science (IMS)

物質構造科学研究所
Institute of Materials Structure Science (IMSS)

<https://www2.kek.jp/imss/mb-linq/>

2026年7月発行