

文部科学省 科学研究費補助金 新学術領域研究 (2018-2022)

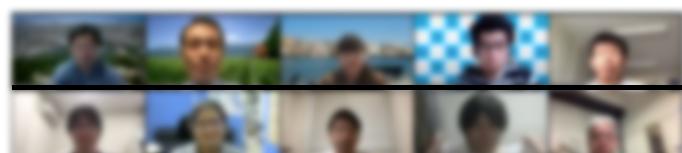
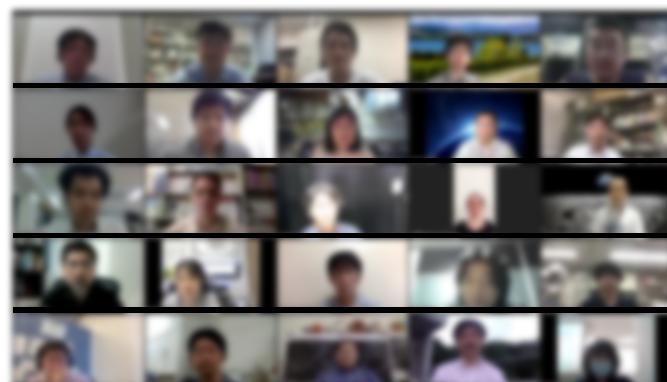
「宇宙観測検出器と量子ビームの出会い。新たな応用への架け橋。」

NEWS LETTER



Vol. 3

2022.11



表紙の写真は

2020年7月27日(月)~28日(火) オンライン開催した本新学術領域「宇宙観測検出器と量子ビームの出会い。新たな応用への架け橋。」ワークショップ 第2回領域全体会議にて撮影した参加者集合写真です。

当日のプログラム

July 27, 2020

高橋忠幸
オープニング

高橋忠幸 東京大学 Kavli ITPU

ミュオン共同利用S1型実験課題「宇宙X線ガンマ線検出技術を用いた
新たな負ミュオン実験の展開。原子物理から高精度3D非破壊元素分析まで。

東俊行 理化学研究所
負ミュオンビームによる原子分子物理の精密検証と宇宙物理観測への展開

山下琢磨 東北大学
精密X線分光のミュオン分子物理学への展開

二宮和彦 大阪大学
負ミュオンビームを用いた新たな非破壊元素分析法

中村智樹 東北大学
小惑星探査機はやぶさ2の回収試料のミューオンによる炭素質物質分析法の確立

永谷幸則 KEK 物構研
新しい超低速負ミュオンマイクロビームの生成方法

三宅康博 KEK 物構研
J-PARC MUSEにおけるミュオン科学研究

永谷幸則 KEK 物構研
トリチウム使用ミュオン触媒核融合による負ミュオンビーム生成

名取寛顕 KEK 物構研
dd muCF

木野康志 東北大学
マッハ衝撃波緩衝領域での飛行中ミュオン触媒核融合の創生

佐藤元泰 中部大学
「標的的特性」— ミュオン核融合は「散逸系の飛程」、磁気核融合は「拡散系のエネルギー閉じ込め物理」の本質

瀧雅人 立教大学
深層学習の科学応用事例

上野秀樹 理化学研究所
高偏極RIビームの生成と核・物質科学研究への応用

今村慧 理化学研究所
RI原子線磁気共鳴法に向けた中性化装置開発

中村哲 東北大学
エネルギー光子ビームで探る原子核内部と中性子星深部

永尾翔 東北大学
ハイパー核電磁生成分光実験用電磁石設計、製作

奥村拓馬 理化学研究所
ガンマ線測定用TES 開発

桂川美穂 東京大学 Kavli ITPU
生体内(*in vivo*)イメージングのためのCdTe半導体イメージヤの開発

水本和美 東京藝術大学
陶磁器研究における考古学と自然科学の協業

高橋忠幸 東京大学 Kavli ITPU
初日エンディング

July 28, 2020

高橋忠幸 東京大学 Kavli ITPU
2日目オープニング

中村信行 電気通信大学
先端の宇宙X線検出器で迫る多価重イオンの量子電磁力学

藤本龍一 金沢大学
中性粒子計測における超伝導転移端検出器の安定動作に向けた基盤構築

久間晋 理化学研究所
精密X線検出器が実現する宇宙化学反応研究の新展開

石川貴嗣 東北大学
仮想光子を使った nn 散乱長の精密測定による荷電対称性の破れの研究

本多良太郎 東北大学
ラムダ陽子散乱実験実現のためのデータストリーミング型MPPC読み出し回路の開発

髭本亘 日本原子力研
強相関電子系における負ミュオン捕獲過程でみる電子多体効果

三原基嗣 大阪大学
電池材料研究のための高偏極放射性リチウム及び酸素同位体ビーム開発

小高裕和 東京大学
多重散乱コンプトンカメラの実現による宇宙MeVガンマ線感度の向上と医療への展開

中村浩二 KEK 素核研
医療機器TOF-PETに用いる半導体検出器の開発

水間広 理化学研究所
高性能SPECTを用いた中枢リンパ系ドレナージの循環動態イメージング法の開発

梅田泉 東京大学 Kavli ITPU
超高分解能/多核種同時測定インビボイメージングを可能にする分子プローブの開発

山崎高幸 KEK 物構研
負ミュオンマイクロビーム生成のためのフラットトップ高周波加速空洞の開発

木村智樹 東北大学
惑星量子ビームとミュオン分析の連携で迫る氷天体物質の合成と蓄積

梅垣いづみ 豊田中央研
ミュオン特性X線元素分析イメージングによる価数・電子状態の可視化

福家英之 宇宙航空研究開発機構
エキゾチック原子法を用いた宇宙観測およびその応用による新機軸

小林義男 電気通信大学
フッ化物イオン電池材料のイオン伝導性の研究

中村哲 東北大学
中間評価報告書について

高橋忠幸 東京大学 Kavli ITPU
エンディング

目次

総括班より	4
2021–2022 年度 公募研究課題紹介	5
介プレスリリース紹介	23

新学術領域「宇宙観測検出器と量子ビームの出会い。新たな応用への架け橋。(量子ビーム応用)」が始まって、早いもので4年が過ぎました。2020年11月に行われた中間評価では、「一見相関のない様々な分野を活性化する方策が必要」という採択時の所見に対して、研究組織相互の人的交流、内部評価者によるピアレビュー やサイト ビジットなど、異分野を包含する領域運営の工夫と努力が評価され、A+(研究領域の設定目的に照らして、期待以上の進展がみとめられる)をいただきました
(https://kaken.nii.ac.jp/ja/file/KAKENHI-AREA-6007/6007_chukan_hyoka_shoken_ja.pdf)。これも、領域研究に参加していただいている皆さんが、他分野の人との「目線をあわせた」研究スタイルを意識し、それぞれの分野でのレベルの高い研究を行っていただいたおかげかと思います。

これまでに、40回の総括班会議を開催し、毎月、領域全体の研究、計画研究相互の設備共有、横断的な検出器開発の方針の確認および調整を行なっています。宇宙観測を目的として開発されてきたテルル化カドミウム半導体検出器や TES マイクロカロリメータの領域横断的な応用の他、X線天文学におけるスペクトル解析手法の非破壊元素分析への応用などがおこなわれ、当初想定していなかったほど深い、計画研究班間や公募研究との連携が行われるようになっています。また、J-PARC での負ミュオンを用いた実験では、一つの実験に複数の研究班からのメンバーがそれぞれの得意なところを持ちよって参加することができます。

コロナではありましたが、2020年7月には第2回、2021年6月には第3回領域全体会議をリモートで開きました。さらに、2021年8月の「高精度硬X線・ガンマ線偏光計を用いた原子物理・原子核物理実験の検討」小研究会や 2021年12月の第1回超低速負ミュオンビーム研究会のように、領域内の融合研究促進のための 小研究会を組織しています。

2021年度からは医学・薬学の分野からの3件を含み、新たに17件の公募研究が開始されました。若手研究者からの積極的な参加を得ることもでき、第一回の公募研究のさらなる発展に加えて、新たな共同研究がいくつか立ち上がっています。本ニュースレターでは、公募研究の詳しい紹介をさせていただきます。

新学術領域研究も4月から最終年度にはいります。これまで多くの科学的成果が出ています。また人材育成の意味においても、領域の若手が新たな拠点を確立するなどの成果がでています。コロナウィルスの影響がまだ続いているが、研究の進め方を工夫し、互いに協力しあって、成果をまとめあげられますよう、領域全体で協力して進めさせていただくことができれば、と思っております。今後ともよろしくお願ひいたします。

公募研究課題一覧

A01: 負ミュオンビームによる原子分子物理の精密検証と宇宙物理観測への展開

研究課題4 研究代表者	超伝導転移端検出器応用によるXAFS研究の飛躍的進展が拓く新しい地球惑星科学 高橋 嘉夫 (東京大学)	6
研究課題5 研究代表者	先端的宇宙 X 線検出器で迫る多価重イオンの量子電磁力学 中村 信行 (電気通信大学)	7
研究課題6 研究代表者	革新レーザー技術で拓くエキゾチック物質の量子操作 桂川 真幸 (電気通信大学)	8
研究課題7 研究代表者	ミュオン原子におけるパリティ非保存効果の観測に向けた動的過程の研究 神田 智太郎 (高エネルギー加速器研究機構)	9

B01: 負ミュオンビームを用いた新たな非破壊元素分析法

研究課題3 研究代表者	小惑星探査機はやぶさ2の回収試料の負ミューオンによる炭素濃度測定 中村 智樹 (東北大学)	10
研究課題4 研究代表者	ミュオン特性X線分析によるリチウムイオン電池内部の金属リチウムイメージング 梅垣 いづみ (高エネルギー加速器研究機構)	11

B02: マッハ衝撃波緩衝領域での飛行中ミュオン触媒核融合の創生

研究課題1 研究代表者	荷電粒子の捕集・輸送装置の開発 奥津 賢一 (東北大学)	12
----------------	---------------------------------	----

C01: 宇宙硬エックス線・ガンマ線検出テクノロジーの異分野への展開

研究課題5 研究代表者	硬X線による化合物活性化を利用した新しいがん治療法の開拓 小川 美香子 (北海道大学)	13
研究課題6 研究代表者	CdTe 半導体検出器を用いたアルファ線放出核種 At-211 の生体内イメージング 桂川 美穂 (東京大学)	14
研究課題7 研究代表者	高速半導体イメージヤによる雷からの MeV ガンマ線フラッシュの精密探査 中澤 知洋 (名古屋大学)	15
研究課題8 研究代表者	微小胃がん腹膜播種の検出を可能とする放射線イメージング技術の開発 熊倉 嘉貴 (埼玉医科大学)	16
研究課題9 研究代表者	高時間分解能を実現する半導体検出器の開発と応用 中村 浩二 (高エネルギー加速器研究機構)	17
研究課題10 研究代表者	脳病態における中枢神経系リンパ管の免疫細胞応答イメージング 水間 広 (理化学研究所)	18

D01: 分野横断的研究

研究課題5 研究代表者	多価イオンビームによる2光子稀崩壊の観測 山口 貴之 (埼玉大学)	19
研究課題6 研究代表者	高運動量ハドロンビーム反応測定のための粒子識別検出器の開発 白鳥 昂太郎 (大阪大学)	20
研究課題7 研究代表者	実時間イメージ相関解析法によるパルス状ビーム利用実験の新展開 門野 良典 (高エネルギー加速器研究機構)	21

E01: 理論研究

研究課題1 研究代表者	イオンビームを用いた高エネルギー光渦生成の基礎的研究 田中 実 (大阪大学)	22
----------------	---	----

A01 超伝導転移端検出器応用によるXAFS研究の飛躍的進展が拓く新しい地球惑星



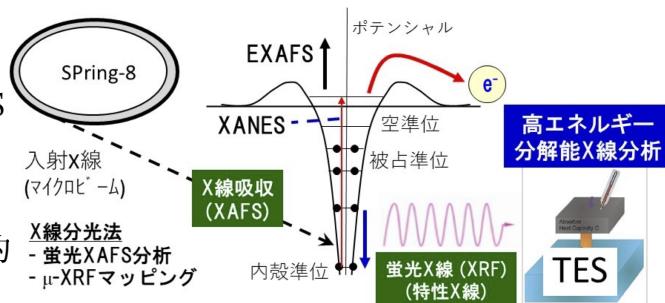
研究代表者 高橋 嘉夫 (東京大学大学院 理学系研究科)

研究協力者 山田 真也 (立教大学 理学部) 岡田 信二 (中部大学 工学部)

橋本 直 (日本原子力研究開発機構)

超伝導転移端検出器(TES)は極低温技術を用いたX線検出器で、世界的に競争が厳しいX線天文学分野で開発が続けられた結果、エネルギー分散型検出器としては極めて高い、10 eV以下というエネルギー分解能を達成しています。本研究では、新学術領域研究「量子ビーム応用」A01班で研究展開されているTESを、量子ビームの1つである大型放射光を用いたX線分光法、中でもX線吸収微細構造(XAFS)法・蛍光X線(XRF)法に応用し、その革新的発展を目指します。このうちXAFSは、X線吸収スペクトルに現れる各元素固有の吸収端付近の微細構造で、元素の価数や対称性を反映する吸収端近傍構造(XANES)と隣接原子との距離や配位数が得られる高エネルギー側の波うち構造(EXAFS)からなるものです。XAFSは、対象元素に対する高い選択性や固-液-気体や非晶質など試料形態を選ばない特徴から、その応用範囲は非常に広いですが、地球惑星科学や環境科学で扱う天然試料の応用には、(i) 微量な元素への応用は他元素の干渉の影響が大きい、(ii) EXAFSは測定が困難な場合が多く、一方でXANESのみでは得られる情報が少ない、などの問題点がありました。これらを克服し、微量元素のXAFSの分野に新たな革新を起こし得るのがXRF検出系の進化であり、本研究領域で開発されている超伝導転移端検出器(TES)はその突破口の1つとなり得ます。

こうした中で我々は、2019年にA01班の山田真也博士(立大)のグループと共同でNIST製240素子TESを放射光施設SPring-8のBL37XUに設置・調整し、XRFを高エネルギー分解能で計測し、蛍光XAFSを測定することに成功しました。これによりTESによる放射光硬X線XRF-XAFS実験が可能であることが確実となりました。この成功を受けて、放射光施設で安定したTES利用XRF・XAFS実験を実現し、様々な応用研究に展開する手法を確立するのが、本研究の目標です。高いエネルギー分解能を持つ検出器を地球惑星・環境試料に応用するメリットは、高感度化・顕微分析・新分光法の3要素に集約されます。本研究では、TESでこれらを実現すると共に、我々のXAFS応用研究に関する経験を活かして、個々の手法の特徴を活かした以下の3つの応用研究を進め、手法的・科学的に新規性の高い成果を得ます。



TESの高エネルギー分解能を活かしたXAFS-XRF分析

A01

先端的宇宙X線検出器で迫る 多価重イオンの量子電磁力学



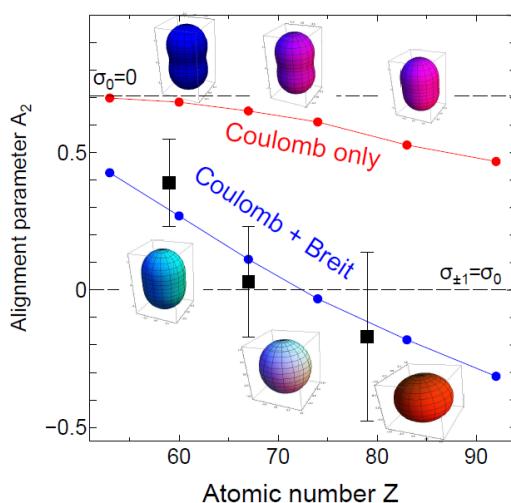
研究代表者 中村信行 (電気通信大学 レーザー新世代センター)

研究協力者	高橋 忠幸 (東京大 Kavli IPMU)	渡辺 伸 (宇宙科学研究所)	内田 悠介 (広島大)
	東 俊行 (理研)	岡田 信二 (中部大)	加藤 太治 (核融合研)
	Xiao-Ming Tong (筑波大)		

多価重イオンのエネルギー準位や相互作用には量子電磁力学効果が顕著に現れます。その代表例はラムシフトであり、原子核と電子との相互作用によるものです。一方、電子と電子との相互作用における量子電磁力学効果はブライト相互作用と呼ばれます。これは通常補正に過ぎない小さな寄与ですが、多価重イオンの共鳴再結合において、本来主要項であるはずのクーロン相互作用を凌駕する支配的な寄与を示す例があることを研究代表者らは最近の研究で示しました。しかし、既存の検出器による既存の方法には限界があり、更なる研究の深化が妨げられています。本研究は、宇宙観測のために開発された先端的 X 線検出器、Si/CdTe コンプトンカメラと超伝導転移端マイクロカロリーメータによりその限界を打破し、電子間相互作用の量子電磁力学を記述するブライト相互作用理論をこれまでにない領域まで迫り試験することが目的です。研究代表者が専門とする原子物理分野と先端的宇宙 X 線検出器の「出会い」により、世界のどの研究機関も追随し得ない独創的な研究が可能となります。さらに本研究は「原子分子物理の精密検証」という目的を A01 計画研究と共有する他、ミュオン原子物理と多価重イオン物理との間に多くの類似性があることから、連携により双方の研究をより一層深化させます。また、研究代表者の所有する多価重イオン生成装置・電子ビームイオントラップのシーズを天文研究のニーズに適用する新たな研究への展開も目指しています。



電気通信大学の多価重イオン生成装置：
電子ビームイオントラップ



多価重イオンの共鳴再結合における放射X線の非等方性パラメータ。放射の角度分布や偏光に量子電磁力学効果が強く現れる。

A01

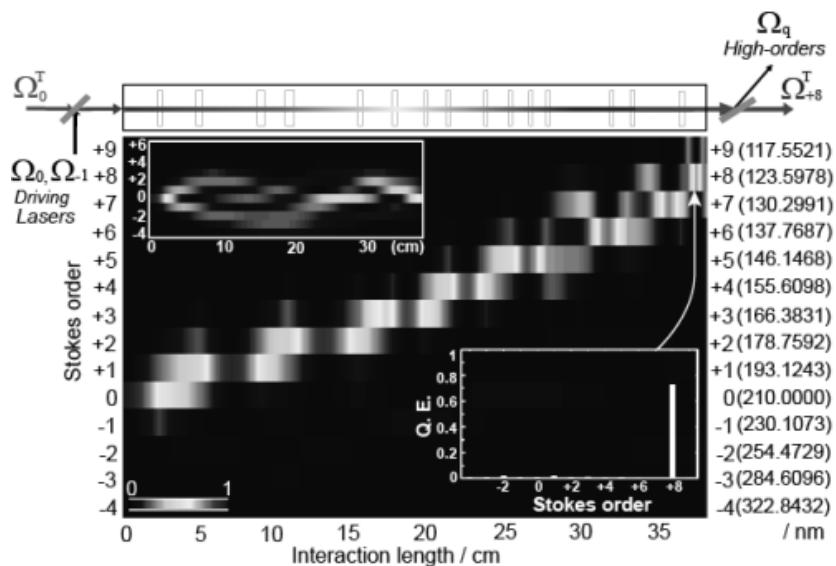
革新レーザー技術で拓く エキゾチック物質の量子操作

研究代表者 桂川 真幸 (電気通信大学 大学院情報理工学研究科)



研究代表者は、非線形光学過程の進行過程において、そこに関与する電磁場の相対位相関係を、望まれる相互作用長において、望まれる値に操作することで、その非線形光学過程を様々な形態に誘導できることを明らかにしました。中赤外から真空紫外の超広帯域をカバーする量子効率1の波長変換はその典型例です。図1は高次の誘導ラマン散乱光発生過程に上述の位相操作を組込むことで、入射レーザー光が波長120–200 nmの特定のアンチストークスモードにはほぼ100%の効率で波長変換されることを示した数値計算の結果です。原理実証実験もおこなわれ、ここで示された物理が現実にも機能することが確かめられました。

レーザーの発明から60年を経て高度で多様なレーザー技術が実現されている現代においても、中赤外域や真空紫外域には実用に耐えうる單一周波数・波長可変レーザーは存在しません。この波長域に透明な固体材料がほとんど無いことがその根源的な理由になっています。この公募研究では、気相の媒質を用いた非線形光学過程に上述の物理を組込むことで、エキゾチック原子の一つであるミューオニウムのレーザー冷却(2p-1s遷移(Lyman α): 122.09 nm)を可能とする性能をもつ真空紫外・單一周波数・波長可変レーザーの実現を目指します。また、実現された真空紫外・單一周波数・波長可変レーザーを用いて、実際にミューオニウムをレーザー冷却するための定量的なシナリオを実験的に構築することを試みます。



位相操作を組込むことによる特定次数のアンチストークス光(120-200 nm)へのエネルギー集中

A01

ミュオン原子におけるパリティ非保存効果の観測に向けた動的過程の研究

研究代表者 神田 聰太郎 (高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所)

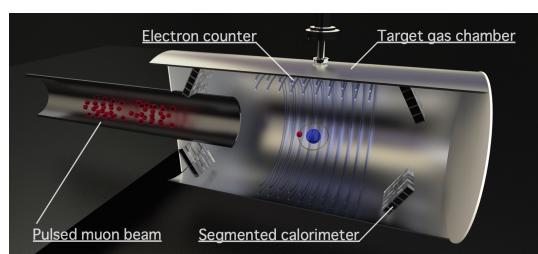
研究協力者 山下 琢磨 (東北大)



負ミュオンが原子核の Coulomb ポテンシャルに束縛されることでミュオン原子と呼ばれる束縛状態が形成されます。ミュオン原子の性質を調べることで、束縛系量子電磁力学の検証や標準模型を超えた新たな物理現象の探索が可能になります。中でも、ミュオン原子におけるパリティ非保存効果はミュオン原子が分光学的研究の対象となつた初期の頃から提唱されてきたものの、実験による観測は様々な困難から実現していませんでした。この問題に現代の技術で再び取り組むために、我々は大強度パルスミュオンビームと細分化された高速応答のカロリメーターを用いた新たな実験を計画、立案しました。

低圧の気体中で生成されたミュオン原子の一部は 2S 準安定状態に留まり 2P 状態とパリティを破る形で混合し、パリティを破る 2S から 1S への一光子遷移の振幅を観測可能な水準まで増幅します。このパリティを破る遷移に伴って放出される光子のミュオン спинを基準とした角度異方性を調べることで、原子核の弱荷および電弱相互作用の混合角である Weinberg 角を決定することができます。様々なエネルギー スケールで Weinberg 角を測定することは標準模型の精密検証として大きな意義を持ちます。

2S 準安定状態を得るために必要なミュオン原子の動的過程については、様々な実験結果および理論計算が知られているものの、この分野には多くの未解決問題が残されています。我々は、低圧の気体標的を用いてミュオン炭素原子の電子状態を明らかにすることを目指しています。パルス負ミュオンビームを容器に封入した、ミュオン原子が周辺から孤立しているとみなせる低圧(0.1 気圧)の気体標的に入射し、ミュオン原子を生成します。J-PARC MLF MUSE で実現した大強度かつ低運動量の負ミュオンビームを用いれば十分な効率でミュオン原子を生成可能です。容器内部には LYSO:Ce 無機シンチレーター結晶と小型の半導体光検出器 SiPM で構成したカロリメーターを設置し、ミュオン原子が放出する X 線とミュオン崩壊による電子を同時に検出します。気体標的中のミュオン静止位置分布はファイバーホドスコープで測定します。カスケード脱励起に伴って放出される各 X 線の強度と基底状態における残留スピン偏極および残存電子の情報を組み合わせ、ミュオン原子形成時の主量子数や電子数の分布を Bayes の方法で推定し、新たな予言能力を持つカスケードのモデルを構築します。



実験の概念図

B01

小惑星探査機はやぶさ2の回収試料の 負ミューオンによる炭素濃度測定



研究代表者 中村 智樹（東北大学 理学研究科）

研究協力者 二宮 和彦（大阪大学 理学研究科）

大澤 崇人（原子力研究所）

高橋 忠幸（東京大学 IPMU）

和田 大雅（東北大学 理学研究科）

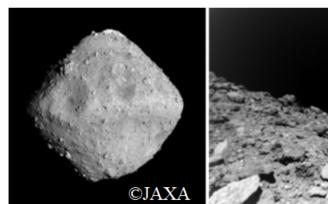
小惑星探査機はやぶさ2はC型小惑星 162173 Ryugu(図1:以下、リュウグウ)に2019年2月に着陸しサンプルを回収し、2020年12月に地球に帰還しました。リモートセンシングによるリュウグウ表面の分光観測の結果、リュウグウは非常に暗く、含水鉱物の吸収を示し、また、表面物質は少し多様性を示すことが分かりました。波長550 nmの光の反射率が約2%と非常に低く、これまでに観測されたC型小惑星の中でも最も暗い一つです。この反射率は同じC型小惑星由来である炭素質隕石の反射率と比べても低く、反射率を下げる原因物質である有機炭素化合物がリュウグウに高濃度に含まれていることを示唆します。

2019–20年度の公募研究において、当該新学術研究で推進している負ミューオン非破壊軽元素分析(とくに炭素)をリュウグウ回収サンプルに適用するため、J-PARC実験施設において複数回の実験を行い、必要な精度で定量分析できる分析手法や実験条件を確立できました。今回は、実際のリュウグウサンプルに対し、確立した上記手法を用いて、負ミューオンによる軽元素分析を行います。

本研究代表者の中村は、リュウグウから回収されたサンプルを真っ先に分析する初期分析グループに属し、回収サンプルのうち粗粒(粒径1–5 mm程度)粒子を分析するチームのリーダーです。初期分析は2021年6月から開始され、本研究の負ミューオン分析は6月後半–7月中旬にかけて行われる。2021年4月に最終リハーサル分析を、リュウグウ試料と近いと予想される炭素質隕石に対して行い、約5日間負ミューオンを照射し続ければ、高い精度で炭素を定量することができますことを確認しました。

中村はこれまで30年間、C型小惑星から飛來した炭素質隕石の物質科学的研究に従事し、これらの隕石に精通しています。また、過去のサンプレリターンミッションに中核的立場で参画し、彗星回収サンプル、および、はやぶさ初号機が回収した小惑星サンプルを計画的に分析し、太陽系始原天体の物質解明と初期太陽系進化の研究に生かしてきました。はやぶさ2号機の回収サンプルを総合的に解析することにより、C型小惑星リュウグウの形成進化のプロセスを解明したい。その中で

本研究で判明する炭素濃度は、C型小惑星リュウグウを特徴づける基本的な元素量であり、リュウグウに含まれる有機物含有量の指標になる重要な化学データです。この分析は非破壊分析であるので、貴重なリュウグウ試料を100 mg程度使用し、測定することができます。測定後のサンプルは多様な物質分析を行い、リュウグウサンプルの岩石鉱物学的特徴を明らかにする予定です。

小惑星リュウグウ(左: 直径900 m程度)
と表面の岩石(右: 図の横幅が1 m程度)

B01

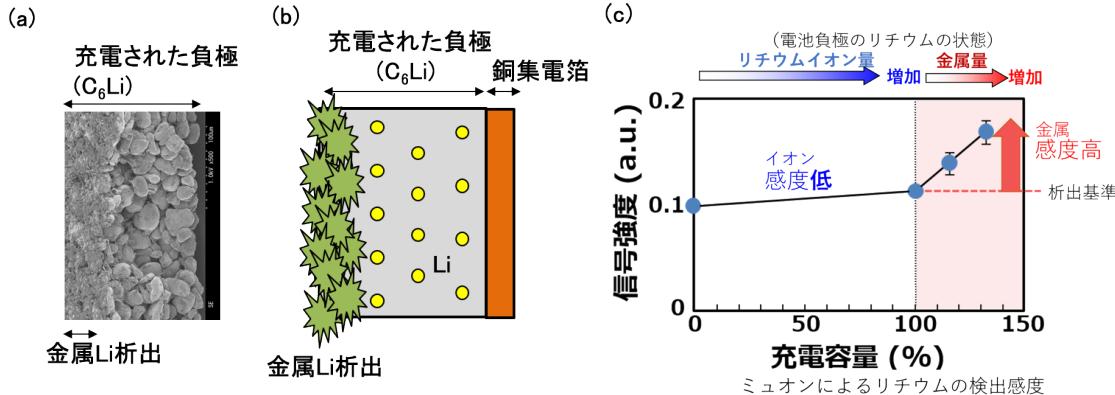
ミュオン特性X線分析によるリチウムイオン電池内部の金属リチウムイメージング

研究代表者 梅垣 いづみ (高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所)



本公募研究では、ミュオン特性X線のイメージングにより、リチウムイオン電池の内部の金属リチウム析出検出の実現を目指すものです。これまでの私たちの研究で、ミュオン特性X線元素分析により、ミュオンの捕獲率の違いを利用して、リチウムイオン電池内の金属リチウムが検出できることを示しました。横約3cm×縦約4cmの面積の電極の平均情報として、検量線を作成して、金属リチウムを定量することができます。新学術領域B01班の取り組む元素分析のイメージングの技術により、リチウムのイメージングを実現し、リチウムイオン電池の熱不安定性と金属リチウム析出の関係を明らかにします。

近年、リチウムイオン電池の市場拡大に伴い、中古電池のリユースや、資源の再利用の重要性が高まっています。しかしながら、一般に中古電池は容量低下だけでなく、金属リチウムが析出していることが考えられ、安全に中古電池を回収することが大きな課題となっています。金属リチウムは、リチウムイオン電池の負極で、不適切な使用条件下で、リチウムが還元されて金属として析出するので、電極間の短絡や発熱により、リチウムイオン電池の熱安定性を低下させる原因となります。金属リチウム析出の発生・成長と、電池の熱反応の促進にどのような関係があるかは、これまで以上に安全に中古電池を取り扱うために重要と考えます。金属リチウム析出を溶解・消失させる技術の取り組みに合わせた、検出方法の必要性が高まっています。負ミュオンを用いたミュオン特性X線元素分析は他に類を見ない、強力な非破壊分析手法となり得る高いポテンシャルを有しています。新学術領域研究のB01班との連携により、本課題を推進し、新しい分野を切り開きたいと思います。



負極に析出した金属リチウム析出の(a)断面SEM画像と(b)模式図。(c) ミュオンによるリチウムの検出感度。



B02

荷電粒子の捕集・輸送装置の開発

研究代表者 奥津 賢一（東北大学 理学研究科）

研究協力者 木野 康志（東北大学 理学研究科）

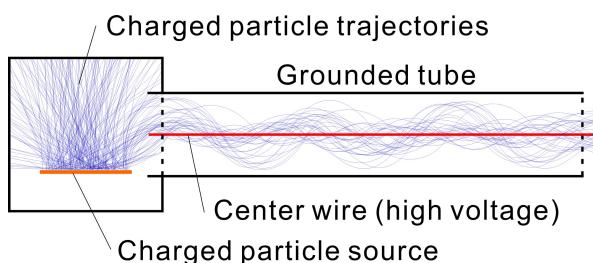
永谷 幸則（高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所）

名取 寛顕（高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所）

本公募研究では荷電粒子の捕集・輸送装置の開発を通じて、ミュオン触媒核融合由来のミュオンの観測を目標とします。素粒子の一つである負ミュオンは負の電荷を持っている一方で電子の約 207 倍重い粒子ですので重い電子のように振舞い、原子や分子の電子に入れ替わることでミュオン原子やミュオン分子を生成することが知られています。特にミュオン分子におけるミュオンの分子軌道径はその質量に反比例することから分子軌道は電子のそれと比べ約 207 分の 1 の大きさになります。このため分子を構成する原子核同士を近づけ、トンネル効果により原子核が接触する確率が大きくなり核反応がおこりやすくなります。

水素同位体間の核反応がミュオンを介して促進される反応はミュオン触媒核融合として知られており、熱核融合とは異なり低温で反応が起こることから盛んに研究が行われていました。しかし、反応に未解明の部分が多く、ミュオン数の不足に加えて、エネルギーとして取り出す方法に目途が立たなかったことなどからその後下火になりました。このミュオン触媒核融合では核反応後に原子核は直ちに高エネルギーで離散してしまうため、ミュオン分子を構成していたミュオンがミュオン分子軌道の運動エネルギーを保って放出されると考えられています。このため核反応後のミュオンを直接観測することでミュオン分子の分子軌道の観測が期待できます。

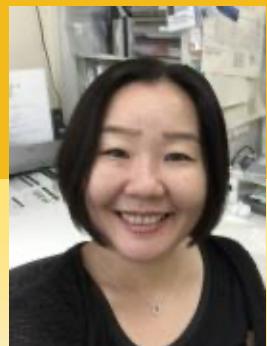
一方でこの核反応がミュオン「触媒」核融合と呼ばれるのは核反応後に放出されるミュオン（再生ミュオン）が次の水素同位体核の核反応をミュオンの寿命 ($2.2 \mu\text{s}$) を迎えるまで複数回手助けするからです。このように再生ミュオンは非常に反応において重要な役割を担っている一方で生成量が少なく、これまで直接観測は難しいものでした。そこで本研究では少量放出される荷電粒子を遠方まで輸送する装置を開発し、これを用いた再生ミュオン検出により核反応の理解、応用への架け橋になることが期待されます。



輸送装置における荷電粒子の軌跡シミュレーションの様子

C01

硬X線による化合物活性化を利用した 新しいがん治療法の開拓



研究代表者 小川 美香子 (北海道大学 大学院薬学研究院)

研究協力者 稲波 修 (北海道大学 大学院獣医学研究院)

横谷 明徳 (国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構)

光免疫療法 (photoimmuno therapy; PIT) は、2020年9月に世界に先駆けて日本で承認された新しいがんの光治療法で、がん細胞に結合する抗体に光反応性薬剤であるIR700を結合したものを薬剤として用います。薬剤を生体に投与後、腫瘍部位に近赤外光 (690 nm) を照射することでがん細胞を死滅させます。我々は、この治療法の根幹にあるのは、近赤外光による化合物 IR700 の化学構造変化(水溶性軸配位子の切断)であることを見出しました。また、軸配位子切断メカニズムとして、近赤外光により励起状態となったIR700が電子供与体から電子を受け取りアニオンラジカルとなり、この活性種から化学結合の切断反応が起こることを解明しました。

しかし、可視-近赤外領域の光は、生体物質の電子励起エネルギーにも相当するため、生体物質によって吸収されます。そこで、本研究では、生体透過性が高い硬X線により活性化する手法の開発を目指します。

特にラジカル生成初期過程および二次放射線の内殻励起に着目し開発を行います。生体分子に比べ、水和電子、ヒドロキシラジカルなどの水から発生するラジカルとより反応しやすい分子を開発し、ラジカルからの結合開裂反応を利用すれば、生体に害が無いレベルでのラジカル発生で化合物の構造変化を起こせるのではないか、あるいは、水よりもラジカルを発生しやすい分子を用いれば、直接的なラジカル化により、水のラジカル化が起こらないレベルで化合物の活性化が行えるのではないかと考えています。また、内殻励起とそれに引き続くオージェ遷移を利用した化学結合選択的な化合物の活性化が可能ではないかと考えています。内殻励起は、原子核と主にK殻電子のエネルギー差に基づく励起であり軟X線で起こりますが、軟X線は生体を透過しません。そこで、硬X線が生体を透過する際に散乱吸収され、それにより生じる二次放射線(蛍光X線や二次電子)を利用して内殻励起を利用することを予定しています。

領域の特性を生かし、放射線化学の初期過程や量子物理の観点を取り入れ、それに基づいた理論的分子設計をすることに主眼を置き、研究を進めます。

C01

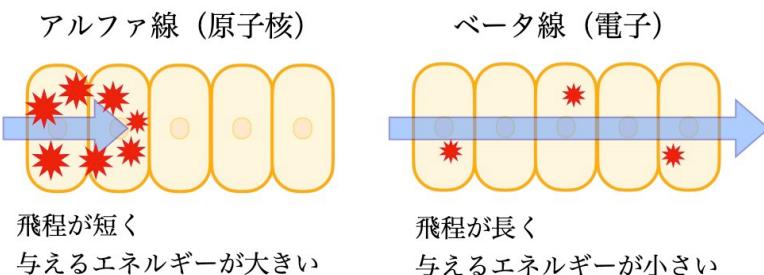
CdTe半導体検出器を用いたAt-211の
生体内(*in vivo*)イメージング

研究代表者 桂川 美穂（東京大学 カブリ数物連携宇宙研究機構）

研究協力者 藤井 博史（国立がん研究センター 先端医療開発センター）
柳下 淳（東京大学 カブリ数物連携宇宙研究機構）
武田 伸一郎（東京大学 カブリ数物連携宇宙研究機構）
高橋 忠幸（東京大学 カブリ数物連携宇宙研究機構）

核医学分子イメージングにおいて腫瘍の転移や薬剤動態を研究する際に、いかに弱い信号を検出できるか、という検出器の感度は非常に重要な問題です。近年、注目を集めているアルファ線放出核種 At-211 においても同様です。At-211 は、飛程の短いアルファ線を放出するだけでなく、79 keV の硬 X 線を放射します。そのため、At-211 は新しいがんの治療方法（アルファ線治療、図 1）として有用なだけでなく、硬 X 線による診断や治療後の体内動態の画像化が行えるため実用化への期待が非常に高い核種です。しかし、I-125 や In-111 など他の放射性核種と比べて At-211 は生体内に投与できる量が限られているため、検出器の感度の向上が求められています。さらに、高い感度を維持したままで、どれだけ高い画像分解能を実現できるのかというのも大きな課題です。

本研究では、C01 班で開発が進められているテルル化カドミウム両面ストリップ型検出器(CdTe-DSD)を用いて可搬型の高感度な小動物撮像装置を開発し、生体内における At-211 の定量的な可視化に取り組みます。特に、CdTe-DSD を並べることで撮像面積を拡大し、小動物の全身を 1 回で撮像できるような大面積の装置の開発に取り組みます。光学系には、最新の金属 3D プリンタの技術を用いたタンゲステン製の平行孔コリメータを使用します。コリメータの検出効率や位置分解能、視野を考慮し、コリメータの形状や隔壁厚、傾斜角の最適化を行います。また、開発した装置を用いて、小動物の生体における At-211 のダイナミック撮像を行い、臓器や腫瘍への集積を定量的に明らかにします。本研究が実現すれば、At-211 以外への放射製薬への応用だけでなく、生体内の放射性プローブの集積の有無を 5–10 分程度の短時間で確認できるようになるため、薬剤開発でのスクリーニング用装置としての役割も期待できます。



新しいアルファ線治療とこれまでのベータ線治療の違い。

C01

高速半導体イメージヤによる雷からの MeV ガンマ線フラッシュの精密探査



研究代表者 中澤 知洋 (名古屋大学 素粒子宇宙起源研究所)

研究協力者 高橋 忠幸 (東京大学 カブリ数物連携宇宙研究機構)

地球大気中では電離損失が大きく、電子が電場加速されることはないとしてきました。その常識を覆したのが、雷活動から放射される MeV ガンマ線です。1980 年代末に発見され、2000 年ごろから本格的な研究が始まった高エネルギー現象で、今のところ自然界で唯一、電子が大規模に磁場に起因しない静電場加速を受けている直接証拠です (e.g., Dwyer 2012)。

雷ガンマ線は、雷雲そのものから数分間放射される「雷ガンマ線グロー」と、雷放電に同期する突発的 ($\sim 100 \mu\text{s}$) な放射「雷ガンマ線フラッシュ」に分かれます。冬の北陸地方は雷活動が活発で、雲高度が低いためにガンマ線が大気吸収されず、地上観測に適しており、世界からも注目されています。我々は GROWTH コラボレーションとしてこの観測を進め、世界先端の成果を上げてきました。中でも雷ガンマ線フラッシュは、地上において $\sim 100 \mu\text{s}$ の短時間に $\sim 1.4 \mu\text{Gy}$ という大線量を持つことを確認しました。この現象は $>10 \text{ MeV}$ のガンマ線を多く含むため、大気中で光核反応が起き、高速中性子と陽子過剰核が大量に生成されます。またその線量は決して小さいものではありません。この強力な突発ガンマ線を生む電子の加速場所はどこか、生み出される最大線量はどれほどか、これが本研究の核心をなす学術的問い合わせとなります。雷ガンマ線フラッシュの地上観測では 1 cm^2 あたり 1 万個もの光子がたった $\sim 100 \mu\text{s}$ 間に到来する極限の高輝度観測となりますが、これを捉えるために我々が着目したのが、最近実用化された TimePix3 ASIC を用いた半導体イメージヤーです。これは 1.56 ns の時間分解能、 $53 \mu\text{m}$ の位置分解能力を持ち、検出器サイズ $14 \times 14 \text{ mm}^2$ をもちます。その厚さは $0.5\text{--}2 \text{ mm}$ と薄いが、位置分解能よりは厚く、反応した電子のトラックを追跡できます。反応断面積が小さいことは本観測では問題なりません。 10 MeV ガンマ線が生む電子・陽電子対は検出器外へ飛び出してしまうが、その軌跡を捉えることでガンマ線の入射方向を知ることができます。

本研究では、2年間の研究により 10 MeV ガンマ線への観測性能を検証し、その指向性検知能力を実証すること、そして実際に金沢市にある名大チームの観測小屋に設置して観測を試みることを研究目標とします。観測に成功すれば、これにより雷放電の電波観測の位置評定と、 10 MeV ガンマ線の入射方向を比較して、電子加速の場所の特定を目指します。



左から:

- ・雷雲中での電子加速とその観測体制の現状。
- ・金沢の名大チーム観測小屋の様子
- ・TimePix3 シリコン検出器で大強度の 10 MeV ガンマ線の入射方向を電子・陽電子対生成のトラッキングで検出する考え方



C01

微小胃がん腹膜播種の検出を可能とする 放射線イメージング技術の開発

研究代表者 熊倉 嘉貴（埼玉医科大学医学部 総合医療センター）

研究協力者 野村 幸世（東京大学大学院医学系研究科 消化器外科学）

和田 洋一郎（東京大学アイソトープ総合センター） 秋光 信佳（東京大学アイソトープ総合センター）

杉山 晓（東京大学アイソトープ総合センター）

羽場 宏光（理化学研究所仁科加速器科学研究中心）

元来、核医学はブドウ糖やアミノ酸のような小分子を用いて、人体臓器の生理的、および生化学的な異常を可視化するための非侵襲的定量イメージング技術です。この臨床技術は、特定の人体臓器に集積するように設計された放射性標識医薬品を使用します。放射能の分布は、陽電子放射断層撮影法（PET）の断層画像として得ることができます。近年の空間分解能の向上のおかげで、小動物を用いた前臨床 PET イメージングが、新薬の候補物質開発のための強力なツールとなっています。こうした候補物質には、腫瘍に特異的なモノクローナル抗体が含まれます。現在、小動物 PET イメージングは、免疫不全ヌードマウスに移植された腫瘍へのモノクローナル抗体結合を評価するために必要不可欠です。モノクローナル抗体に α 線（あるいは β 線）放出核種を組み込むことによって、極めて腫瘍細胞に特異的な細胞障害を達成することができます。この際に、PET イメージングは改変モノクローナル抗体の生体内分布の最適化に有用です。この分子イメージング技術と一対となって新しく出現した治療技術（セラノステイックス）は、癌患者の治療のために大きな注目を集めています。高い線エネルギー付与を有する α 線粒子の砲撃は、モノクローナル抗体によって腫瘍細胞の表面抗原に届けられます。この結果、DNA 二重らせんの切断を生じ、最終的にアポトーシスや壊死を誘導します。我々は、胃癌腹膜播種のための新しいセラノステイックス戦略の開発を目指します。治療用の α 線放出核種として、 ^{211}At （半減期：7.2 時間）は、有望なハロゲン核種で、サイクロトロンでの生産が可能です。しかし、現在の小動物イメージング技術は ^{211}At が放出する低エネルギー X 線（77–92 keV）や乏しい高エネルギー γ 線（570 and 898 keV, <1%）の生体内分布を可視化するには適していません。すなわち、 ^{211}At によるセラノステイックスをワンストップ・ショッップで実現するためには、 ^{211}At の高分解能イメージングが課題として残っています。我々は、胃癌腹膜播種の小動物モデルを用いて、

^{211}At 核医学治療の効果、および従来の小動物 PET 画像と比較検討しつつ、新しい ^{211}At イメージング技術が学際的な共同研究によって探索されることを希望しています。



東京大学アイソトープ総合センターの小動物用 PET スキャナー（島津製作所製）

C01

高時間分解能を実現する 半導体検出器の開発と応用



研究代表者 中村 浩二 (高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所)

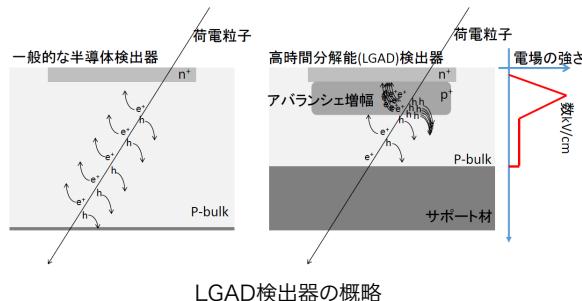
研究協力者 原 和彦 (筑波大)

現在我々が浜松ホトニクス社と開発しているLGAD検出器は世界最高レベルの時間分解能(約30ピコ秒)を達成していて素粒子実験のみならず他分野での応用が期待されています。我々はこの検出器の電極を細分化すること、高い放射線耐性を持つことを目標に研究を行ってきました。図のように一般的な半導体検出器と異なり、LGAD検出器は電極の下にアバランシェ増幅層を作ることで高電場を生成しアバランシェ増幅を起こし増幅機能を持たせる検出器です。アバランシェ増幅した電子・正孔対は高電場の恩恵で高速で移動するため電極に誘起される信号は一般的な検出器と比較して格段に速く、高い時間分解能を達成します。

LGAD検出器をさらに改良して、検出位置分解能を劇的に改善する静電容量型のLGAD検出器(AC-LGAD)のプロトタイプを製造しました。従来のように電極と増幅層が独立に配置されている構造では電極間に不感領域ができてしまいます。これを防ぐため、一様な増幅層を配置し、酸化膜を介したアルミ電極から信号をAC的に読み出すことで不感領域をなくします。電極間での信号のクロストークを最小限にするためn⁺のドープ量を少なくし、抵抗値を上げました。昨年度製造したプロトタイプセンサーを評価した結果、80 μm間隔のストリップ型検出器で隣接する電極へのクロストークが50%以下となり、信号の大きさもノイズと分離可能な検出器を製造することに成功しました。

高エネルギー加速器を用いた素粒子実験の粒子衝突点に設置する検出器では、生成粒子が高いエネルギーを持ち最小電離作用で検出器内を通り抜けるため、検出器内で生成された電子正孔対を検出することが可能ですが、可視光や赤外光の場合は、表面に配置されているアルミ電極でほぼすべて止まってしまい検出器内部にエネルギーを落とすことがなく、検出することができません。この問題を解決するため、アルミ電極を半透明な電極(ポリシリコン製)に置き換えた検出器を開発中です。

昨年度、すでにポリシリコン製電極を持つLGAD検出器を製造していて、ベータ線の応答を初めて観測しました。今後、可視光や赤外光に対する応答の確認、時間分解能や位置分解能の測定を行います。



LGAD検出器の概略

C01

脳病態時における中枢神経系リンパ管の免疫細胞応答イメージング



研究代表者 水間 広（理化学研究所 生命機能科学研究センター）

研究協力者 金山 洋介（理化学研究所 生命機能科学研究センター）

武田 伸一郎（東京大学 カブリ数物連携宇宙研究機構）

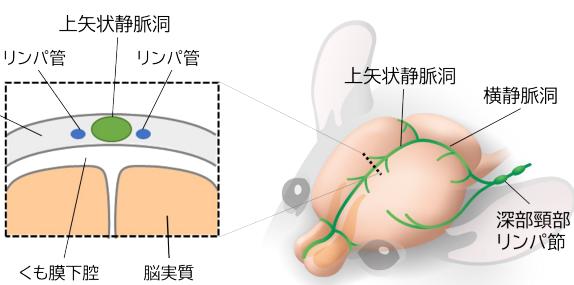
高橋 忠幸（東京大学 カブリ数物連携宇宙研究機構）

藤井 博史（国立がん研究センター 先端医療開発センター）

サンペトラ オルテア（慶應義塾大学 医学部先端医科学研究所）

中枢神経組織である脳・脊髄には「免疫特権」と呼ばれる末梢組織から独立した免疫体系を持つことが知られています。中枢神経系ではグリア細胞が免疫機能の役割を持つが、グリア細胞のみでは中枢神経系における全てのリンパ系機能を果たすことは不十分であると考えられていました。また、リンパ管のもう一つの重要な役割である老廃物の排泄においても中枢神経系では不明な点が多いことから、リンパ管の存在は予見されていました。中枢神経系リンパ管の存在は、18世紀末、イタリア人医師である Mascagni は自らの緻密な解剖所見から脳髄膜に存在することを主張しましたが、当時の医学的技術では証明するまでには至りませんでした。遅れて1953年に Lecco はヒトの脳硬膜の検体からリンパ管を採取したことを報告しましたが、決定的な証拠を見出しきれいが出来ませんでした。2015年、最先端の蛍光顕微鏡および遺伝子改変技術を用いた研究が、2つの異なる研究グループ(Aspelund らと Louveau ら)から相次いで報告がなされ、マウス脳脊髄膜に末梢組織と同じような構造と機能を持つリンパ管が分布している事を発見しました。この発見以降、リンパ管はマウス以外にヒトを含む多くの動物種で保存されている器官であることも明らかとなり、正常機能のみならず認知症や脳腫瘍などの病態との関連性も報告され、重要な役割を持つことが示唆されました。

私たちは第1回公募研究にて採択された「高性能 SPECT を用いた中枢リンパ系ドレナージの循環動態イメージング法の開発」において、この中枢神経系リンパ管の循環動態を可視化することを目的に、宇宙観測技術をベースに開発された高性能 SPECT 装置を利用した研究に着手しました。その結果、マウス髄腔内への放射性核種標識プローブの投与法および撮影法を確立し、世界で初めてマウスの高精細な画像を取得することに成功しました。本研究課題では開発された髄膜リンパ管イメージング手法を用いて、より医学研究へと応用展開するため、認知症および脳腫瘍の疾患をターゲットとし、病態の進行に伴い変化する免疫系細胞の動態を SPECTイメージングにより可視化することを目的とします。本研究により、認知症や脳腫瘍における中枢神経リンパ系の機能的役割を明らかにし、新たな診断技術の創出および治療戦略モデルの構築を目指します。



マウス中枢神経系リンパ管走行の模式図

D01 多価イオンビームによる2光子稀崩壊の観測



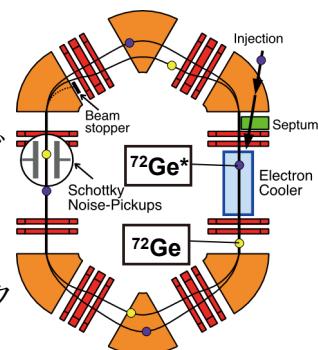
研究代表者 山口 貴之(埼玉大学 理工学研究科)

研究協力者 W. Korten (CEA Saclay)

Yu. A. Litvinov (GSI)

本研究は、蓄積リングに貯蔵された多価イオンビームの特徴を生かし、中性原子状態では実質不可能な、原子核の2光子稀崩壊の観測を行います。原子核は、基底状態、励起状態ともにスピンが 0^+ の場合、 γ 崩壊せず、内部転換電子崩壊が起こります。しかし完全イオン化して電子がなく、内部対生成を起こすほど励起エネルギーが高くない場合、量子力学の2次効果として、光子を2個同時に放出する稀崩壊が起こります。この現象はこれまで3核種しか報告例がなく、いずれも分岐比が極めて小さく、バックグラウンドも多いものです。多価イオンを蓄積リングに貯蔵する実験環境では、競合する過程がなく、クリアに現象を観測できます。本研究では、 ^{72}Ge の励起状態に着目します。

実験はドイツGSI研究所のシンクロトロンで加速した ^{78}Kr ビームを標的に照射し、核反応で ^{72}Ge (基底状態スピン 0^+)の2次ビームを生成します。ビームエネルギーが核子あたり約380 MeVなので、 ^{72}Ge は完全イオン化しています。また、 ^{72}Ge ビームには寿命の長い励起状態 $^{72}\text{Ge}^*$ (スピン 0^+ 、励起エネルギー691 keV)が数%含まれると予想されます。核反応で生成されるバックグラウンド粒子は破碎片分離装置で除去されますが、この励起状態は分離されず ^{72}Ge ビームに含まれます。このビームをGSIの蓄積リングESRに入射し、貯蔵します(図参照)。ESRのビーム光学条件は周回周期が周回粒子の質量電荷比に比例するよう、等時性に調整されています。そのため、周回周期の観測によって粒子識別ができます。ESRの質量分解能は $2\text{--}3 \times 10^5$ と高いので、基底状態と励起状態が混ざった ^{72}Ge ビームを飛行中に識別することができます。2光子稀崩壊の観測は、ESRの直線部に設置された空洞共振器であるショットキー検出器を用います。粒子が周期的にこの空洞を通過すると蓄えられる電磁場を磁気コイルで検出し、高速フーリエ変換すれば、周回粒子の質量電荷比に比例する周波数信号(ショットキースペクトラム)が得られ、その時間変化を測定することで、飛行中の励起状態 $^{72}\text{Ge}^*$ の2光子崩壊を観測することができます。蓄積リングは、バックグラウンドの多い電子分光と補助的に、 0^+ 励起状態の構造を探索する新しいツールになるでしょう。低エネルギー 0^+ 準位を精度よく決定することで、エキゾチック核に現れる変形共存のメカニズム解明に貢献できます。さらに2光子崩壊は量子論の精密検証になります。また、多価イオンによる励起状態の寿命変化は宇宙元素合成過程にもインパクトがあります。



Experimental Storage Ring (ESR) at GSI



D01 高運動量ハドロンビーム反応測定のための 粒子識別検出器の開発

研究代表者 白鳥 昂太郎 (大阪大学 核物理研究センター)

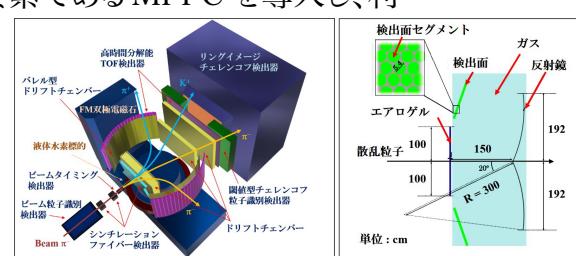
研究協力者 野海 博之 (大阪大学 核物理研究センター) 山我 拓巳 (理化学研究所)

成木 恵 (京都大学 理学系研究科)

本多 良太郎 (高エネルギー加速器研究機構)

J-PARC ハドロン実験施設では、量子ビームとして二次粒子ハドロンビームを使用できます。2020 年に既存ビームラインよりも高運動量のビームを供給できる J-PARC 高運動量ビームラインが完成し、30 GeV の一次陽子ビームの取り出しに成功しました。加えて、高運動量ビームラインは、ビーム取り出し部分に二次粒子生成標的を置くことにより、 $20 \text{ GeV}/c$ までの高運動量二次粒子ハドロンビームを供給できるように予め設計されています。この運動量領域のハドロンビームは世界的にユニークで、J-PARC の大強度ビームのおかげでチャームクォークや複数のストレンジクォークを含むハドロンを効率良く生成することができ、特徴あるハドロン・原子核物理の研究を展開できます。既存のハドロン実験施設のビームラインは $2 \text{ GeV}/c$ が最高運動量で、 $2\text{--}20 \text{ GeV}/c$ のハドロンビームによって、これまで生成できなかったチャームクォークや複数のストレンジクォークを持ったハドロンを用いたハドロン・原子核物理の研究を新たに開拓できます。特に中心的に進めているチャームバリオン分光実験では、重いチャームクォークを導入することで、強い相互作用によってハドロンに閉じ込められたクォークの運動や相関を詳細に調べることができ、ハドロンの新しい有効自由度と考えられているダイクォーク相関を明らかにできると期待されます。

我々はチャームバリオン分光実験のために、大立体角スペクトロメータの開発を進めてきましたが、これを利用した様々なハドロン・ハイパー核の実験も提案されています。チャームバリオン分光実験のみならず、高運動量ハドロンビーム反応を利用した多彩な実験研究を推進する汎用スペクトロメータとして建設しています。この汎用性の高いスペクトロメータの重要な粒子識別検出器がリングイメージチェレンコフ検出器 (RICH) であり、 $2\text{--}17 \text{ GeV}/c$ の広い運動量領域で粒子識別が可能です。散乱粒子の広い運動量領域を測定するため、チェレンコフ輻射体としてエアロゲルとガスを使用したハイブリッド型の RICH として設計しています。光センサーには磁気スペクトロメータの漏れ磁場を考慮し、Micro Pixel Photon Counter (MPPC) を使用します。MPPC の小さい受光面積を補う集光装置を開発し、RICH として新しい検出器構成要素である MPPC を導入し、利⽤を実現します。本研究では、高運動量ハドロンビーム反応から生成される高運動量粒子識別を行うための RICH 実証機を開発し、チャームバリオン分光実験や多彩なハドロン・原子核の実験研究を推進する汎用スペクトロメータを建設するための検出器技術を確立します。



汎用スペクトロメータ(左図)と
リングイメージチェレンコフ検出器の全体図(右図)



D01

実時間イメージ相関解析法による パルス状ビーム利用実験の新展開

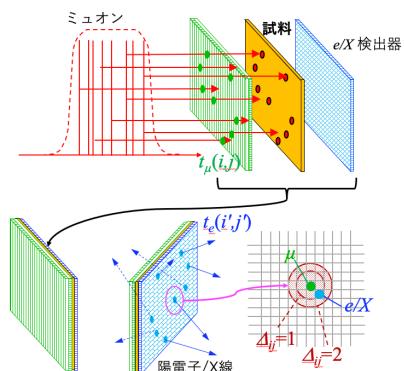
研究代表者 門野 良典 (高エネルギー加速器研究機構)

研究協力者 神田 智太郎 (高エネルギー加速器研究機構)

高橋 忠幸 (東京大学 カブリ数物連携宇宙研究機構)

本研究では μ SR 実験を主要なモデルケースとして、C01 班と連携しながら以下の様な実験を計画しています。即ち、表面(低速)ミュオンビーム照射実験で典型的な厚み 1 mm 程度の平板状試料を用意し、これを 2 つの二次元検出器で密着して挟み込みます。試料前面の二次元検出器はホドスコープ(低速ミュオンビームを透過し、なおかつその通過した位置と時刻を測定できる検出器)とし、これでビーム照射時にパルスに含まれる全てのミュオンひとつについて透過時刻とその位置の情報を記録します(実時間ミュオン画像)。試料背面に置かれた二次元検出器では、崩壊電子／陽電子の時刻と位置の情報、X 線については位置とエネルギーの情報を記録します(実時間後続事象像)。最後に、ミュオン画像と後続事象画像の位置相関を解析し、ミュオン-後続事象の対応があると判定される対について、それらの事象の時間差をヒストグラム化、あるいはエネルギーに対応した情報を記録します。本研究ではこれを「実時間イメージ相関解析(Real-time Image Correlation Analysis、RICA)」法と呼びます。RICA 法を適応することで、 μ SR では微小なミュオンカウンター・陽電子カウンターの対による 1 事象ごとのミュオン崩壊検出を行うことになります。従って、本質的に直流ミュオンビームによる場合と等価な μ SR 測定をパルス状ビームに対して実現することができます。ミュオンが透過する二次元ホドスコープとしては、プラスチックファイバー(断面 $0.1 \text{ mm} \phi$)、読み出しにアバランシェ・フォトダイオード、(128×128 ピクセル相当)、陽電子画像用にはシリコンピクセル検出器(読み出し集積回路に ToA モード動作 TimePix3 実装、 $55 \mu\text{m}$ ピッチ、 256×256)を応用します。ホドスコープ、シリコンピクセル検出器いずれも 1.5 ns 程度の時間分解能を期待できることから、最高で 300 MHz 程度の回転信号の観測を実現します。

研究計画初年では、J-PARCでのミュオンビーム強度を前提に、 μ SR 実験について純鉄(室温ゼロ磁場で 48.7 MHz の回転信号)、石英(室温 10 mT で 144 MHz の回転信号)を用いて RICA 法の原理実証の研究を行います。計画 2 年目では、先行する RICA- μ SR 研究で明らかになる問題点について対策を施し、実用化に向けての最適化を行います。さらに、TimePix3 の動作モードを変更し、シリコンに付与されるエネルギーに比例した信号を読み出せるようにします。これと低速負ミュオンビームと組み合わせることで、負ミュオン入射事象に対応した特性 X 線のエネルギー測定を行い、RICA 法による空間分解能を備えた軽元素についての非破壊分析の可能性を検証します。



実時間イメージ相関解析法の原理

E01

イオンビームを用いた 高エネルギー光渦生成の基礎的研究

研究代表者 田中 実（大阪大学 理学研究科）



全角運動量は軌道角運動量 (orbital angular momentum, OAM) とスピン角運動量 (spin angular momentum, SAM) の和で表わされます。電磁場が角運動量を持つことは1909年にポインティングによって指摘され、1936年にBethによって実験的に確認されました。電磁場の量子である光子はスピン1を持つ素粒子であることが判っていますが、Bethの実験はこのスピンを測定したものでした。また、OAMを持つ非自明な電磁場として多重極場がよく知られています。これに加えて、現在では OAM を持つ光ビームも可視光領域で実現していて、その応用研究が盛んに行われています。このような光は、図1のように波面が螺旋状になっているので光渦 (optical vortex) や twisted photon などと呼ばれています。

一方、X線領域やガンマ線領域の高エネルギーの光源の開発も活発に行われています。自由電子レーザーによるX線の生成や後方コンプトン散乱によるガンマ線の生成が挙げられますが、部分的に電子を剥ぎ取った超高速イオンによる(可視領域)レーザー光の共鳴吸収による励起とその脱励起による高エネルギー光子の生成も提案されています(図2参照)。この後方共鳴レイリー散乱によるエネルギー変換の特徴は、その大きな散乱断面積にあります。

本研究計画では、加速されたイオンのビームを用いた高エネルギー光渦生成について、理論的な研究を行います。これまでに提案されている光渦レーザーの後方コンプトン散乱によるエネルギー変換と比較して、イオンビームを用いる方法の利点を明らかにしその原理を構築することが、主な目的となります。

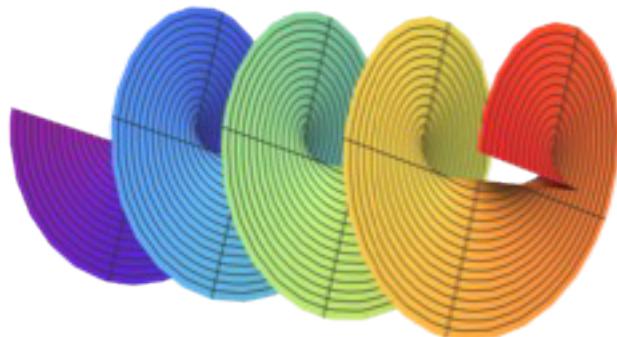


図1:光渦の波面

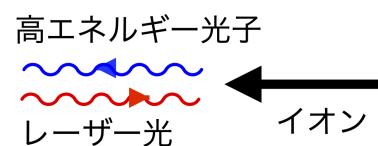


図2:後方散乱によるエネルギー変換

本領域研究に関するプレスリリース・新聞等掲載（2020年度以降）

2022年9月23-26日(プレスリリース)

中村智樹氏（東北大学，B01）、二宮和彦氏（大阪大学，B01）、高橋忠幸氏（東京大学，C02）、三宅康博氏（KEK, C02）ら A01, B01, C01, C02 班が参画する研究が、(1)「小惑星リュウグウの石の平均的元素組成を決定—素粒子ミュオンを用いた非破壊の元素分析に成功—」として大阪大学から、「素粒子ミュオンにより非破壊で小惑星リュウグウの石の元素分析に成功—太陽系を代表する新たな標準試料となる可能性—」として(2) 東京大学 Kavli IPMU、大阪大学、京都大学、ICU、宇宙航空研究開発機構（JAXA）、東北大学 および (3) 高エネルギー加速器研究機構（KEK）、J-PARC センター、JAEA からそれぞれ（共同）プレスリリースされました。

2022年9月23日(プレスリリース)

中村智樹氏（東北大学，B01）ら A01、B01、C01、C02 班が参画する研究が「小惑星探査機『はやぶさ2』初期分析 石の物質分析チーム—研究成果の科学誌『Science』論文掲載について」として JAXA、東北大学、KEK、J-PARC、JASRI、北海道大学、京都大学、九州大学、広島大学、東京大学から共同プレスリリースされました。

2022年5月11日(新聞等掲載)

CHIU, I-Huan 氏（大阪大学，B01）ら B01、C01、C02 班を中心とした研究グループによる実験研究が「素粒子ミュオンを用いた非破壊三次元元素分析に成功—量子ビーム技術と宇宙観測検出器の出会いによる新技術開発—」として大阪大学、東京大学 Kavli IPMU、高エネルギー加速器研究機構（KEK）、J-PARC から共同プレス

2022年4月5日(プレスリリース)

柳下淳氏（東京大学 / 国立がん研究センター）ら による C01 班の実験研究が「宇宙観測技術で分子イメージングの新技術を開発！—医学生物学研究での応用へ—」として東京大学 Kavli IPMU、国立がん研究センター、理化学研究所から共同プレスリリースされました。

2022年3月8日(プレスリリース)

後神利志氏（京都大学，A02）ら A02 班を中心とする実験研究が「電荷をもたない奇妙な原子核の高精度探索—ラムダ - 中性子 - 中性子の三体系—」として東北大学、京都大学から共同プレスリリースされました。

2021年10月21日(新聞等掲載)

中村智樹氏（東北大，B01）および C01, C02 班らによる研究が、「はやぶさ2 初期分析チームの思い（上）=周到な準備で迎えた小惑星の石」として、2021 年 10 月 21 日 毎日新聞 朝刊に掲載されました。

2021年9月19日/2021年10月22日(新聞等掲載)

岡田信二氏(中部大学,A01&B02)らの研究が「素粒子使い『一瞬』を探る」として、朝日新聞デジタル(紙面9月19日朝刊及び電子版10月22日)に掲載されました。

2021年8月4日(新聞等掲載)

奥村拓馬氏(理研,A01)ら、A01班、B02班、C01班、およびC02班などから構成され、奥村拓馬氏を中心とする研究グループが実施した実験研究の成果が、「ミュオン原子形成過程解明—理研『量子少数多体系』開拓」として2021年8月4日の日刊工業新聞朝刊に掲載されました。「理研、ミュオン原子の形成過程解明『量子少数多体系』開拓」として同日の日刊工業新聞電子版にも掲載されました。

2021年7月26日(プレスリリース)

奥村拓馬氏(理研,A01)ら、A01班、B02班、C01班、およびC02班を中心とする実験研究が「最先端超伝導検出器で探るミュオン原子形成過程の全貌—負ミュオン・電子・原子核の織り成すフェムト秒ダイナミクス—」として理研等から共同プレスリリースされました。

2021年7月25日(新聞等掲載)

中村智樹氏(東北大,B01)およびC01、C02班による研究が、産経新聞電子版「クローズアップ科学」に、「はやぶさ2試料分析 最先端ミューオンなど駆使」として掲載されました。

2021年3月19日-6月9日(新聞等掲載)

B01、C02、及びD01班が参画した高橋京子氏(大阪大学総合学術博物館)らによる、ミュオンを使った緒方洪庵の薬瓶の非破壊分析に関する研究の記事が、下記の通り新聞各紙・ネットニュースに掲載されました。

- 「開かぬなら『透視』しよう薬瓶—緒方洪庵が愛用『ミュー粒子』で中身判明」、朝日新聞夕刊&朝日新聞デジタル、2021年3月19日
- 「緒方洪庵が残した『開かずの薬瓶』、ミュー粒子で中身を特定 阪大など」、サイエンスポータル、2021年4月6日
- 「江戸期の薬瓶 壊さず中身特定」、東京新聞朝刊、2021年4月18日
- 「緒方洪庵の『開かずの瓶』、素粒子で分析…白い粉末ついに成分判明」、読売新聞オンライン、2021年4月30日
- 「緒方洪庵の薬瓶、素粒子で透視 大阪大、中身特定に成功」、共同通信ニュース、2021年5月11日
- 「緒方洪庵の薬瓶、中身は『塩化水銀』素粒子で透視 阪大チーム」、毎日新聞ニュース、2021年5月12日
- 「洪庵が残した薬 素粒子使い透視／大阪大 中身特定に成功」、沖縄タイムス朝刊、2021年5月13日
- 「洪庵の薬瓶 素粒子で透視／大阪大、中身は塩化水銀と特定」、産経新聞朝刊、2021年5月22日
- 「洪庵の薬瓶、素粒子で“透視” 阪大、中身特定に成功」、京都新聞夕刊、2021年5月24日
- 「大阪特派員=洪庵先生の薬箱に学ぶ」、産経新聞朝刊、2021年5月25日
- 「洪庵の薬瓶 壊さず中身判明 大阪大などチーム ミュー粒子使い『塩化水銀』特定」、読売新聞夕刊、2021年5月27日
- 「緒方洪庵の薬瓶 素粒子で透視」、日経産業新聞朝刊、2021年6月2日
- 「緒方洪庵“開かずの薬瓶” 中身特定 阪大などの研究グループ」、NHK関西NEWS WEB、2021年6月9日

2021年3月17日(プレスリリース)

B01班、C02班、及びD01班が参画した高橋京子氏（大阪大学総合学術博物館）による実験研究が「緒方洪庵が遺した“開かずの薬瓶”非破壊で解明ミュオンビームによる医療文化財の分析に成功」として大阪大学からプレスリリースされました。

2020年12月15日&2021年1月30日(新聞等掲載)

C02班が参画した研究が「造山古墳科学の力で透視」として2020年12月15日の読売新聞オンラインに、「巨大古墳素粒子で透視」として2021年1月30日の山梨日日新聞に掲載されました。

2020年11月30日(プレスリリース)

山本誠一之氏（名古屋大学）らによる実験研究(B01, C02班が参画)が「発光イメージングを用いてミュオンビームの分布計測に成功：ビームの精度管理や素粒子研究への応用に期待」として、名古屋大学、大阪大学、高エネルギー加速器研究機構(KEK)、J-PARCセンターから共同プレスリリースされました。

2020年11月16日(新聞等掲載)

C02班を中心として高エネルギー加速器研究機構で主催された研究会が、「量子ビームで歴史を探る高エネ機構が文理融合シンポジウム」として、2020年11月16日の文教速報に掲載されました。

2020年6月16日(プレスリリース)

梅垣いづみ氏（豊田中央研究所）を中心に、D01、B01、C02班を主要メンバとする実験研究が「リチウムイオン電池電極に析出した金属リチウムをミュオンで検知—ミュオン特性X線による非破壊元素分析の応用—」として、高エネルギー加速器研究機構(KEK)、豊田中央研究所、J-PARCセンター、大阪大学、国際基督教大学、総合科学研究院から共同プレスリリースされました。

2020年5月21日(新聞等掲載)

B03班の研究に関する記事「中性子過剰ジルコニウム同位体の励起状態での変形」が5月21日のフジサンケイビジネスアイに掲載されました。オンライン版にも掲載されています。

他にも多数のプレスリリースがあります。詳しくは本領域ウェブページ
https://member.ipmu.jp/SpaceTech_to_QuantumBeam/をご覧ください。

編集後記

本新学術領域「宇宙観測検出器と量子ビームの出会い。新たな応用への架け橋」のニュースレター第三号ができあがりました。ご多用の中、ご寄稿いただいた皆様へ厚く御礼を申し上げます。

本新学術領域のウェブページには詳しい活動報告を記載しておりますので、是非ご覧下さい。

本ニュースレターに関して掲載希望、ご意見などございましたら、高峰 icot@riken.jpまでお寄せ下さい。

領域代表：高橋 忠幸 東京大学 国際高等研究所 カブリ数物宇宙研究機構 (Kavli IPMU)

編集：上野 秀樹 理化学研究所 開拓研究本部／仁科加速器科学研究センター

高峰 愛子 理化学研究所 開拓研究本部／仁科加速器科学研究センター

領域ウェブページ：https://member.ipmu.jp/SpaceTech_to_QuantumBeam/

