

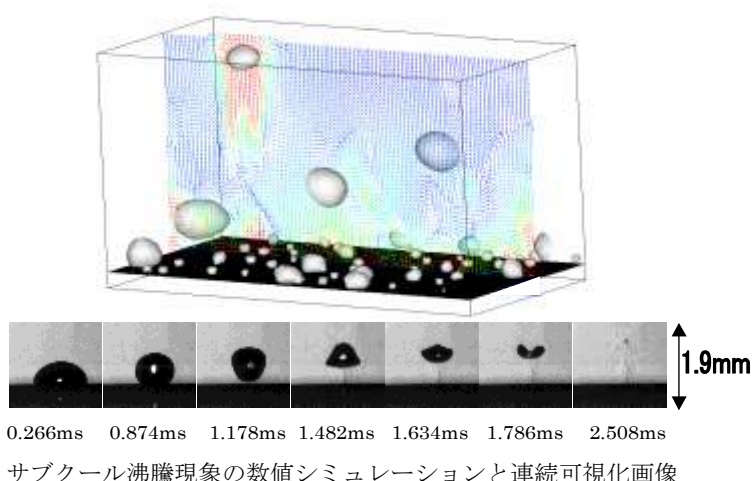
(1-1)量子エネルギー物理工学グループ 核エネルギー変換工学分野

～ 限りあるエネルギーを限りなく安全に、かつ有効に利用するために ～

教授：功刀資彰 教授：杉本純 准教授：横峯健彦 講師：河原全作

■ 混相流工学—理論・実験・シミュレーション

混相流は、極めて複雑な構造と挙動をもつ研究対象です。界面が存在するために、従来の流体物理の延長では、混相流の記述は不完全です。私たちの研究室では、気液二相流を中心に、気液界面の物理と熱物質移動の理論的研究、マイクロメートルスケールから原子炉さらに地球規模のスケールの混相流を対象とした実験的研究、多重スケールで複合した物理現象を伴う混相流シミュレーションのための数値解析手法の開発研究を行っています。



■ 核分裂炉・核融合炉のエネルギー変換と安全性に関わる伝熱流動

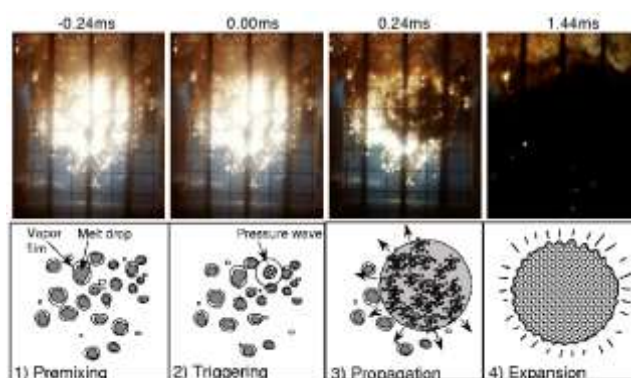
現在利用されている軽水炉の革新的な高度化や次世代の核分裂炉である高速増殖炉、そして磁場閉じ込め核融合炉やレーザー核融合炉など、エネルギーを社会に供給する原子炉には様々なタイプがあります。そこで発生したエネルギーを安全に効率よく利用するために、関連する伝熱流動現象やエネルギー変換方法について基礎から応用研究まで、実験と数値シミュレーション両面から研究を行っています。また、核融合炉工学研究については、国際共同研究(日米科学技術研究協力等)に積極的に参加・推進しています。



米国カリフォルニア大(UCLA)に設置した 2 T 磁場を有する日米共同電磁流体ループ

■ 原子炉システム安全工学-シビアアクシデント時の原子炉挙動

軽水炉の高度利用に向けたシステム安全工学、及び次世代軽水炉、高温ガス炉など固有の安全性を有する革新的原子炉の安全研究を行っています。特に、福島事故でも明らかとなったように、原子炉のリスクはシビアアクシデントがほとんどを占めているので、シビアアクシデント挙動の明確化とアクシデントマネジメント策の有効性に関する研究を行っています。水蒸気爆発など熔融した炉心と冷却材の相互作用を含む事故時の冷却材挙動、放射性物質の挙動等について、基礎的な実験や解析を実施することにより、解析モデルの開発・検証を進めています。



実験で観測された水蒸気爆発

(1-2) 量子エネルギー物理工学グループ 量子制御工学分野

～ 核融合の実現をめざして超高温プラズマにおける物理現象の解明と制御手法の開発 ～

教授：福山淳 准教授：村上定義

■ 将来のエネルギー源を目指す核融合

軽い元素の2つの原子核が融合してより重い元素の原子核が生成される核融合反応は、太陽を支えているエネルギー源であるとともに、地上における将来のエネルギー源として研究が進められています。核融合エネルギーは無尽蔵に近い燃料資源があり、高レベルで長寿命の放射性廃棄物を出さず、温室効果ガスを発生しない特長があります。核融合反応を実現するためには燃料を1億度以上に加熱する必要があり、電子とイオンに電離したプラズマ状態の燃料を効率よく閉じ込めなければいけません。

■ 核融合プラズマ中の輸送現象

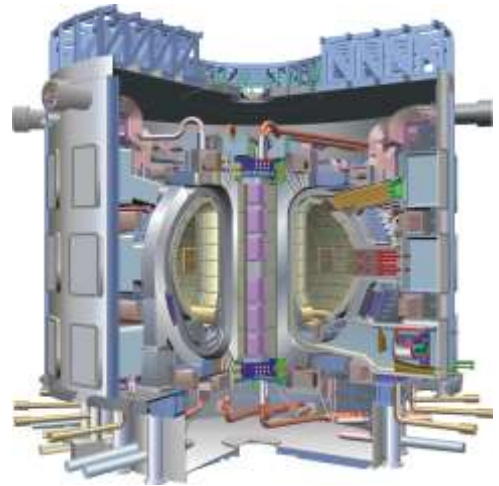
核融合プラズマの閉じ込め性能を支配する乱流輸送。単純な拡散現象では説明できない急峻な圧力勾配をもつ輸送障壁が実験的に観測され、トラスプラズマの閉じ込め性能向上に寄与しています。このような輸送障壁形成を説明する乱流輸送モデルの開発と、定量的な解析を行うための輸送シミュレーションを進めています。

■ 波動によるプラズマの制御

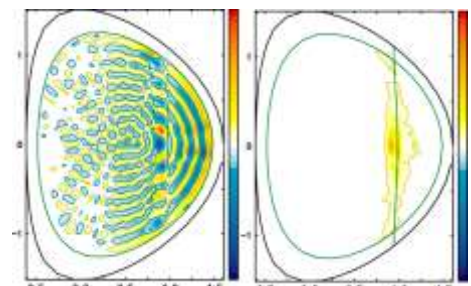
高温プラズマを制御する有力な手段としての波動。数 10 kHz から 数 100GHz までのさまざまな電磁波が、プラズマの生成、加熱、電流駆動、計測等に広く用いられています。その物理機構を解明し、有効なプラズマ制御手法を開発するために、波動の励起、伝播、吸収とそれに伴うプラズマの時間発展の解析を進めています。

■ 核融合プラズマにおける不安定性

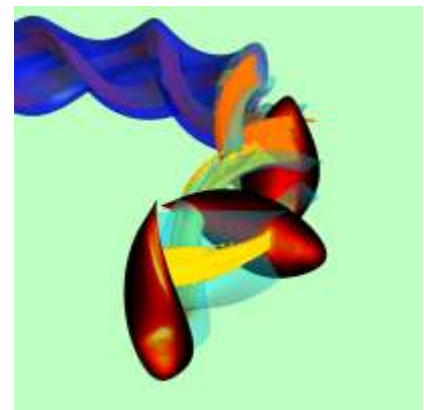
核融合プラズマの閉じ込めをおびやかす不安定性。閉じ込められたプラズマは、揺動の急激な成長によって、輸送の増大やプラズマの崩壊を引き起こす可能性を潜在的にもっています。例えば核融合反応で生成された高速の α 粒子は、Alfven 波を励起して、閉じ込めを劣化させる場合があります。このような不安定性の発生機構を解明し、それを抑制するための研究を進めています。



カダラッシュ（フランス）に建設中の国際熱核融合実験炉(ITER)



トカマク核融合実験装置におけるプラズマ加熱のための電磁波伝播・吸収のシミュレーション



ヘリカル型核融合実験装置におけるプラズマ加熱による高エネルギー粒子の圧力分布

(2-1) 量子エネルギー材料工学グループ **核材料工学分野**

～ 安全なエネルギーの確保と地球環境保護・改善の両立を目指して ～

教授：高木郁二 准教授：佐々木隆之 助教：秋吉優史、小林大志

■ エネルギー・安全、環境、有効利用をキーワードに

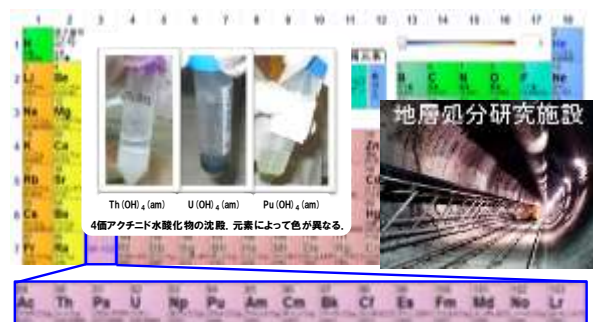
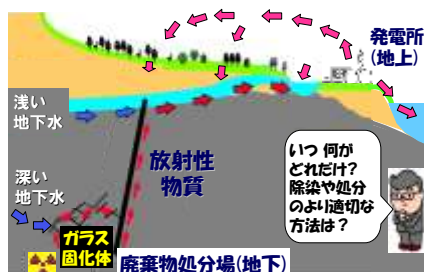
私たちが豊かで安定した生活を送る上で、エネルギーの確保と環境の改善は欠かせません。二酸化炭素の排出が少なく、資源も豊富に存在する核融合や原子力などの核エネルギーは、我が国に適した選択肢の一つです。将来の有望なエネルギー源である水素を、環境に負荷をかけずに製造する方法としても核エネルギーは注目されています。私たちの研究グループでは、核エネルギーを安全に、そして有効に利用するための材料研究や開発を行なっています。核エネルギーの開発・利用においては、廃棄物を厳密に管理し、また、極微量の汚染を除去する技術を開発してきました。これらの技術は、環境の改善や保全に役立ててことができます。



核燃料サイクルのイメージ

■ 放射性廃棄物の処理と処分

福島第一原発の事故によって拡散した多量の放射性物質を除染して回収し、安全に処分することは急務の課題です。そのために、放射性物質の土壌への吸着や移行などの物理化学的な性質を解明する実験的な研究を行っています。また、放射能レベルの高い廃棄物を地下深くに閉じ込めるため、自然界に存在しない超ウラン元素を調べる研究も行っています。

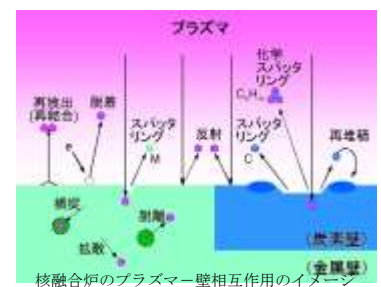


種々の放射性物質を取り巻く環境

重い元素（超ウラン元素）の化学

■ 核エネルギーの安全利用、有効利用のための材料研究・開発

核融合炉や原子炉の材料は放射線や高温などの過酷な環境にさらされるため、劣化して安全性が低下してしまうことがあります。私たちは材料を健全に使用するための研究を行っています。例えば核融合炉プラズマに材料が接触したとき、損耗したり燃料が無駄に吸収されたりするので、その過程を調べて損耗や吸収を防止する技術を開発しています。また、放射線の照射によって材料はダメージを受けますが、ダメージの影響や回復する方法を実験によって調べてより過酷な環境下で用いることのできる材料の研究を行っています。さらに、照射を利用して新しい材料を開発することや、水素吸蔵技術に役立てることも考えています。



(2-2) 量子エネルギー材料工学グループ 量子リサイクル工学分野

～ 重元素と同位体の化学を探り、先進的原子力システムのリサイクル化学を研究する ～

教授：森山裕丈、山名元 准教授：藤井俊行 助教：上原彰寛

■ 高温融体（溶融塩及び液体金属）中でのアクチニドの化学的特性研究

アクチニドと呼ばれる「5f電子軌道」を有する重い元素は、原子力利用に伴って発生する使用済核燃料の中に多量に含まれるため、将来的なより良い原子力システムを構築してゆくにあたっては、これらの元素の分離・回収など高度な化学処理（リサイクル化学）が必要となる。水溶液を使わない乾式分離法の研究開発として、これらの元素が高温の溶融塩（溶融状態のアルカリ塩化物等）や液体金属中において示す化学的特性や特徴的挙動を、電気化学分析、分光分析を駆使して調べている。

■ 核燃料や放射性廃棄物の化学処理法に関わる研究

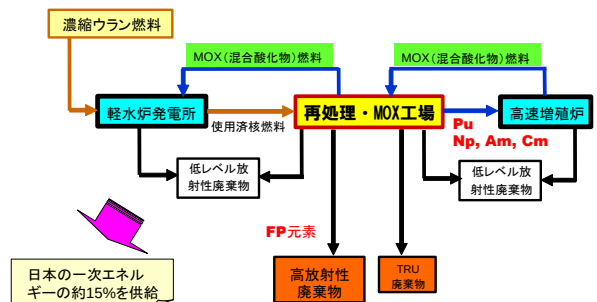
現在の再処理工場において使われている湿式分離法では、マイナーアクチニド元素や一部の核分裂生成物元素などの、長期的な観点で問題となる元素を回収・分離できない。このため、新規性の高い抽出剤を用いた溶媒抽出法や、水和物溶融体と呼ばれる水分を少量含んだ溶融塩を用いた手法による分離特性を、電気化学分析や分光分析法を用いて研究している。また、中性子照射によるマイナーアクチニド元素の核種変換（消滅処理）のための中性子吸収反応の核データ測定を、放射化学的な手法を用いて進めている。

■ 化学分配平衡に現れる特異な同位体効果等に関わる研究

化学交換反応によって元素の同位体比がわずかながら変動することは古くから知られており、原子力分野でもこのことを応用した同位体分離法が研究・開発されている。当研究室では、同位体比の変動を精密に分析することが可能な、マルチコレクター表面電離型質量分析装置を有しており、この装置を用いて同位体化学研究を行っている。化学交換法の同位体分離係数は、理論上、相対的な同位体質量の差に律されているとされてきた。しかしながら、近年、同位体効果に原子核の情報（核の質量、核の大きさや形、核スピン）が現れることが分かってきた。私たちはそのような核特性が与える同位体効果の発現メカニズムを研究している。

将来の原子力発電を支える高度な化学分離法の研究

「アクチニド元素（Pu, Np, Am, Cm）の効率的な回収と分離を研究する事により、放射性廃棄物を最少化した核燃料サイクルを実現する」



図一 1 核燃料サイクルを高度化する分離化学の基礎研究を進めている



図一 2 溶融塩中でのアクチニド元素の化学特性を調べるグローブボックス



図一 3 表面電離型質量分析装置

(3-1) 量子システム工学グループ 量子ビーム科学分野

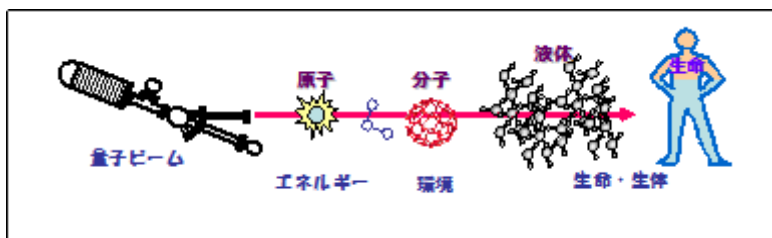
～ 量子ビーム科学を学び先進科学・技術にいかす ～

教授：伊藤秋男 准教授：土田秀次、松尾二郎

講師：瀬木利夫 助教：今井誠、間嶋 拓也

■ 加速器からの量子ビームによる「原子衝突反応～生命の誕生～粒子線がん治療」を探る

荷電粒子ビーム（イオンや電子）あるいはレーザーなどは総称して量子ビームと言います。これらを物質（固体・液体・気体・プラズマ）にあてると物質を構成する原子や分子に大きなエネルギーが与えられます。その結果、様々な量子現象が起こり電子の状態は全く別のものになってしまう。さらには量子ビームによる特異な衝突反応場によって通常では考えることも作ることもできない構造をもつ新奇な粒子・物質が形成されたりします。このように、量子ビームは個々の原子や電子に直接作用して物質のナノスケールレベルでの状態を変えるため、これにより我々が知覚しているマクロスケールの性質に変化をもたらしたり、我々の想像を超えた新しい性質・形質を発現させたりすることが出来ます。当研究室では、精密に制御した量子ビームをあらゆる物質に衝突させ、その原子レベルでの反応解明から、生命の誕生、粒子線がん治療などへの応用までを考えたテーマで実験・研究を行っています。また、加速器からの高速イオンをマイクロメートル程度に小さく絞り、物質の極小領域にあてる技術（マイクロイオンビーム照射技術）を使った基礎、応用研究も行っています。この技術を用いると、極小領域の各種分析（例えば、元素分析）が可能になります。その他、極小領域のビーム照射、つまり、ビームの大きさが1つの細胞の大きさに匹敵することを利用して、イオンビームの細胞照射技術に使うことができます。



イオンビーム加速器

■ 量子ビームによる革新的ナノプロセス・評価技術の開拓

革新的な量子ビームを用い、ナノテクノロジーや生命科学分野で使われる新しいプロセス技術、評価、シミュレーション技術の研究開発を行っています。例えば、多数の原子集団であるクラスターのイオン、1000万電子ボルトという非常に大きなエネルギーを持った重粒子、パルスの幅が 10^{-12} 秒以下の極短パルスのレーザーなどの様々な量子ビームを使った研究を行っています。量子ビームの持つ特異な性質を利用することで、これまではできなかった新しいナノプロセスや評価を実現することができます。例えば、次世代の微細デバイスに用いられるナノレベルの加工技術、生体材料の分子イメージング、さらには物質中の電子応答や格子振動などの超高速で起こる物理現象の観測もできます。



様々な量子ビームを用いた研究・評価装置

(3-2) 量子システム工学グループ 放射線医学物理学分野

～医療用放射線場の形成および線量評価の高度化のために～

准教授：櫻井良憲 准教授：古林徹

■ 医療用放射線場の形成と QA/QC

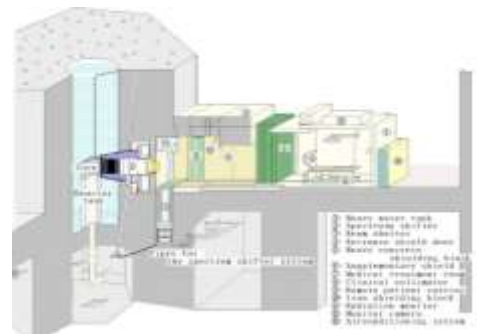
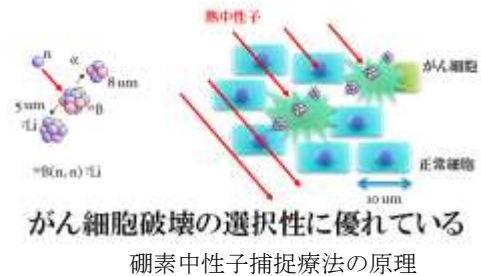
日本のがんの罹患率は年々増加しており、術後の生活の質 (Quality Of Life) の向上という観点から放射線治療の重要性が高まっています。治療に利用される放射線には、エックス線、高エネルギーイオン線や中性子線等があります。本分野では、硼素中性子捕捉療法(BNCT)に重点を置いて、医療に関する物理工学および医学物理研究を行っています。医療のための放射線場の形成、放射線場の品質保証/品質管理(QA/QC)に関する研究、等を行っています。

■ 硼素中性子捕捉療法の発展

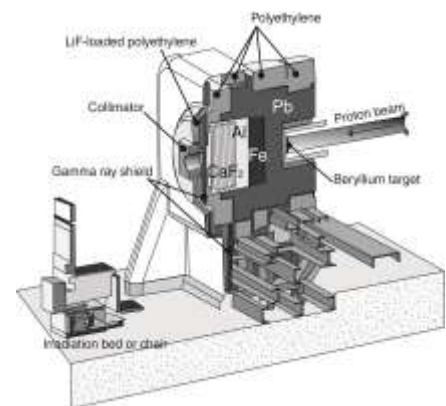
BNCT は他の放射線治療と異なり、がん細胞を選択的に治療できるという特徴を持っています。京都大学原子炉実験所では、研究炉(KUR)に付属している「重水中性子照射設備(HWNIF)」を用いて、世界に先駆けて BNCT を推進し、本療法の有効性を実証してきました。本実験所での症例数は世界一であり、従来行われてきた脳腫瘍、悪性皮膚黒色腫に加えて、難治性頭頸部腫瘍、肝臓癌、中皮腫を含む肺癌等へと適応拡大を進めています。BNCT のさらなる発展のために、病院併設を目指した加速器ベースの中性子照射装置の研究開発も進めています。2008 年 12 月には「サイクロトロンベース熱外中性子源(C-BENS)」が完成し、2012 年 10 月より治験が始まりました。

■ 放射線治療における線量評価の高度化

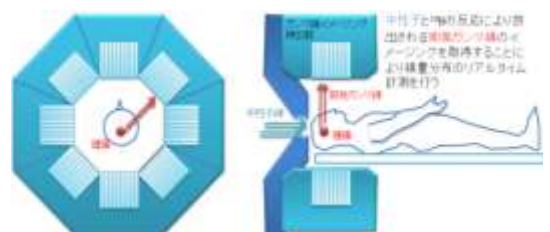
放射線治療では人体に付与される線量をいかにして正確に評価するかが鍵となります。そのためには高精度線量計画システムとリアルタイム線量評価システムが必要です。前者を用いて治療時の線量の基準を計算し、後者を用いて治療中の線量をモニタします。両システムのコンビネーションにより実際の線量が決定されます。本分野では、BNCT を始め放射線治療における線量評価の高度化を進めています。また、治療に利用される様々な放射線、粒子線の生物学的な効果に関する基礎研究も行っています。



KUR 重水中性子照射設備



サイクロトロンベース中性子照射装置



リアルタイム線量評価システム

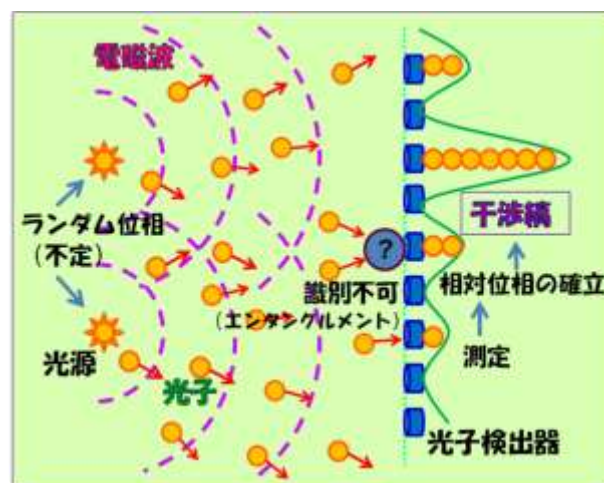
(4-1) 量子物質工学グループ 量子物理学分野

～ 不思議な量子の世界を探求し、量子現象を操作して利用する ～

教授：山本克治 准教授：宮寺隆之 助教：小暮兼三

■ 量子のほんとうの姿の発現と量子測定

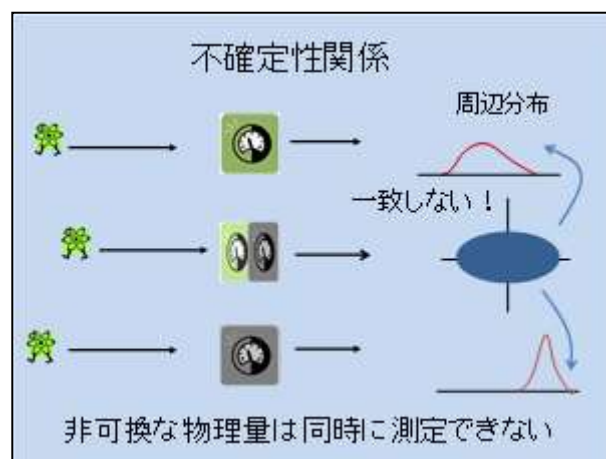
量子の世界は、「粒子」と「波動」の二重性、「重ね合わせ状態」、同種粒子(2光子など)の「識別不可性」、「エンタングルメント」(もつれ:量子固有の相関)など、その「実在」は不思議で、測定を通して我々に姿を現わしてくれます。独立光源からの光子の測定における量子干渉など、量子測定に対する確率論に基づいてこのような量子現象を理解する研究をしています。また、光や原子などの量子状態の操作、測定、制御を考え、その方法を、量子計算、量子的エネルギー発生や輸送(例えば、光電効果、光合成系)などへ応用することをめざしています。



独立光源からの光子の測定における量子干渉

■ 量子論の普遍的性質を探る

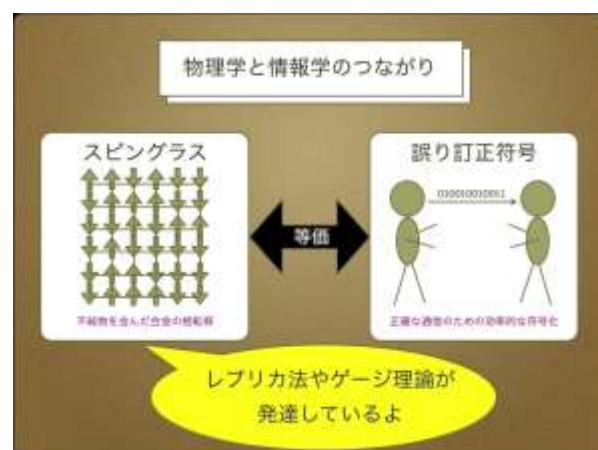
量子論では、位置と運動量のような二つの物理量は同時に正確に測定することはできません。これは不確定性関係と呼ばれ、その厳密な定式化や定量化について現在も活発に研究が行われています。また、この基本的操作に関する限界は、量子状態がコピー不可能であることを導き、量子暗号の基礎にもなっています。このように量子論の基本原則が、どのような普遍的性質を導くのかについて、数理的な手法を用いて研究を行っています。また、物理学を記述する広い枠組みの中で量子論の特徴付けを探ることで、その基礎付けを考えています。



物理量の非可換性がもたらす不確定性関係

■ スピングラスと情報理論

ある種の不純物を含む合金の磁性体には、スピングラス相と呼ばれる相が存在します。この相転移を調べるため物理学では、レプリカ法やゲージ理論が開発されてきました。近年、情報通信における効率的な誤り訂正符号化の問題とスピングラスモデルの基底状態を求める問題が等価であることが示され、物理学の手法が情報学に応用され始めています。この問題について、理論的な立場から研究しています。



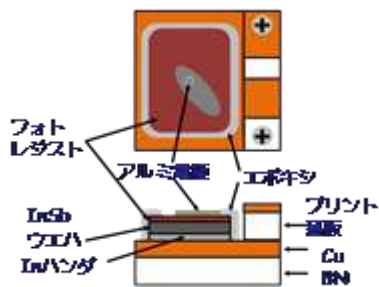
理論物理学の手法が情報学に応用されようとしています

(4-2) 量子物質工学グループ 中性子工学分野

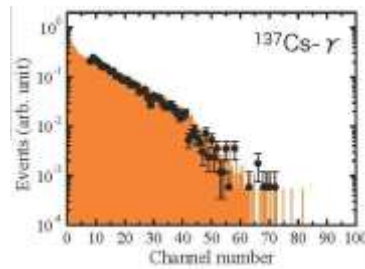
～中性子・X線をとおりて新しい世界を拓く～

教授：神野郁夫 准教授：田崎誠司 助教：安部豊

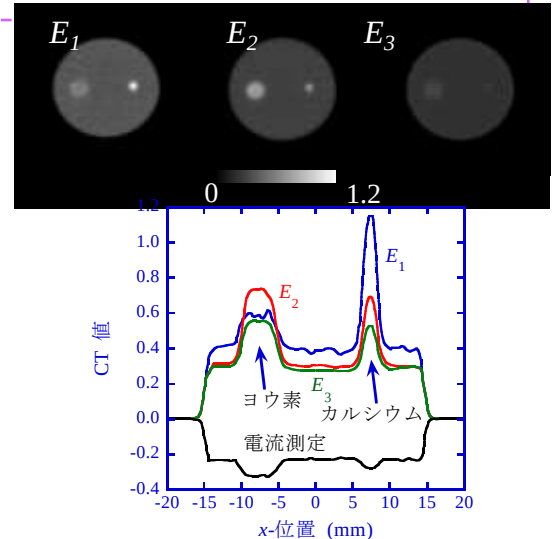
■ 放射線検出器の開発と産業・医療応用



化合物半導体 InSb を用いた放射線検出器開発を行っている世界で唯一の研究室。



InSb 検出器で測定したガンマ線の応答を理論的に解明。InSb 結晶の性能向上がポイント。

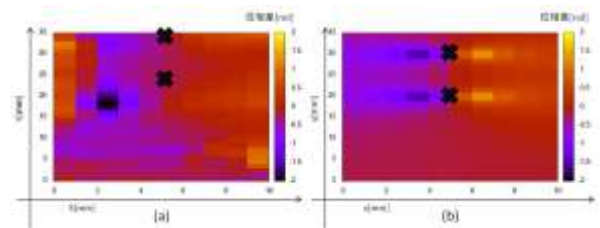


transXend 検出器で、エネルギー分解 X 線コンピュータ断層撮影が可能に。

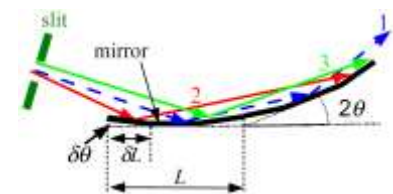
■ 中性子源と中性子光学の新展開

中性子は、約 80 年前に発見されてから、物質にあて物質のミクロな構造を解明する物質構造解析などに大いに利用され、さらに近年、大強度な中性子ビームを利用する施設が日米欧で建設・利用されています。

本研究室では、低エネルギー中性子の反射や屈折といった光学的性質および中性子固有のスピンの性質を応用し、特定の中性子だけを選別したり、中性子を効率的に輸送することができるようなデバイスや中性子スピンコントラストイメージングなど応用技術の開発を行っています。



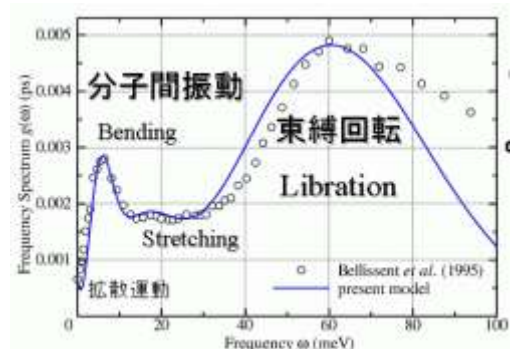
スピンコントラストイメージングによる磁場の測定結果。右が測定値、左がシミュレーション。



新しい中性子ベンダーの開発

■ 低エネルギー中性子の高輝度生成と減速材の中性子散乱断面積解析

新しい中性子散乱研究を拓くには、核反応で発生した高エネルギー中性子を効率的に減速させ、大強度の低エネルギー中性子ビームを得る必要があります。そのための減速材として、液体水素や水などの中性子散乱断面積を解析したり、中性子ビーム強度やパルス形状を最適にする冷中性子源の形状を中性子輸送シミュレーションで調べています。



水の散乱断面積解析における動力学モデル

(4-3) 量子物質工学グループ 中性子源工学分野

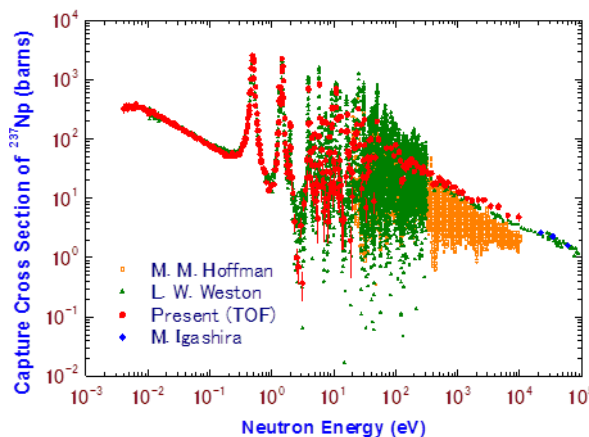
～ ミクロからマクロまで、基礎から応用まで、加速器から原子炉まで ～

教授：森義治、中島健 准教授：石禎浩、高橋俊晴、山本俊弘

助教：上杉智教、栗山靖敏、川辺秀憲、堀順一、佐野忠史

■ 中性子の核反応断面積の測定・評価

原子炉等における中性子の振る舞いを評価するために必要な物質と中性子の相互作用に関するデータ(核反応断面積)の測定を原子炉実験所の電子線型加速器や原子力機構のJ-PARCなどの実験装置を用いて行っています。この研究では、反応する中性子のエネルギーを精度良く決めるために、その速度を測定してエネルギーに換算する飛行時間分析法と呼ぶ方法を用います。マイナーアクチニドや長寿命半減期を持つ核分裂生成物など、革新型原子炉の開発や放射性廃棄物等の処理処分技術の開発に必要な核種の反応断面積の測定を行なうとともに、精度向上のための手法開発を行っています。



反応断面積の測定例。マイナーアクチニド核種といわれる Np-237 について、その中性子捕獲断面積の新しい測定結果を示している(Present(TOF))。

■ FFAG 加速器を中心とした加速器開発およびその応用に関する基礎研究

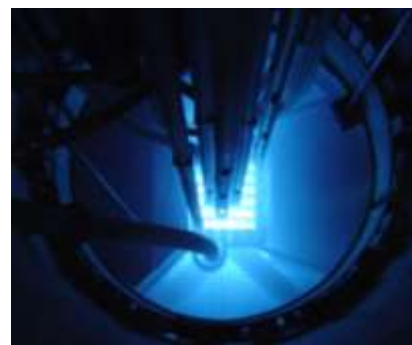
加速器駆動未臨界原子炉(ADSR)、強力中性子源等に用いられる FFAG 加速器の開発とその応用について研究を行っています。なかでも FFAG 加速器における非線形ビーム力学、イオン化ビーム冷却法などの加速器物理学に関する研究開発を進めています。ADSR とは、加速器からの高エネルギー陽子を使ってパルス状の中性子を発生させ、それを未臨界状態の原子炉に入射して、大量のエネルギーや中性子を利用できるようにするものです。現在、私達は、FFAG 加速器と臨界集合体 KUCA を結合した世界初の ADSR の実現のために、FFAG の開発を進めています。



京大 FFAG 陽子加速器複合系：3 台のリングを用いて陽子ビームを 150MeV まで加速し、隣接する臨界集合体にビームを導入する。

■ 原子力施設の安全性研究

原子力施設・設備を安全に運転・管理するための研究として、原子炉の核特性に関する研究、核燃料の臨界安全性に関する研究を進めています。原子炉の核特性研究は、核特性解析手法の高度化・精度向上を目的として、2010 年に低濃縮ウラン燃料での運転を開始した研究用原子炉 KUR の臨界性、反応度特性、燃焼特性等の測定・評価を行っている他、臨界ベンチマークデータの整備や軽水炉燃料の高度化研究等に取り組んでいます。また、核燃料の臨界安全性の研究では、モンテカルロコードによる未臨界体系のシミュレーション技術の開発や臨界事故解析手法の開発を行っています。



運転中の KUR 炉心。チェレンコフ光と呼ばれる原子核反応特有の青い光を見ることができます。

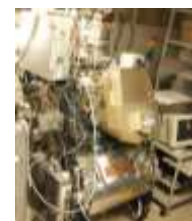
(4-4) 量子物質工学グループ 中性子応用光学分野

～光学デバイスを駆使した中性子の高度利用 基礎物理からナノ・バイオ・産業応用まで～

教授：川端祐司 准教授：日野正裕 助教：伊藤大介

■ 高性能中性子光学デバイスの開発

低速中性子ビームは軽元素や磁性体に敏感な解析手段であり、特に生体物質の研究に於いてはX線では見ることのできない水素の情報を直接引き出す手段として注目されています。しかし中性子は発生に費用がかかり実験場所が限られていることと、X線に比べて強度が格段に弱いために、一般的な解析手段としての応用範囲が強く制限されています。このような貴重な中性子ビームの利用効率を上げて最大限の科学的成果を生み出すために、本研究室では中性子光学素子の開発研究を行っており、特に平面の中性子反射光学素子の開発に関して世界有数の開発拠点でもあります。



高性能中性子多層膜
ミラー製造装置



多層膜ミラー
評価システム

■ 高性能中性子共鳴スピネコ分光装置の開発

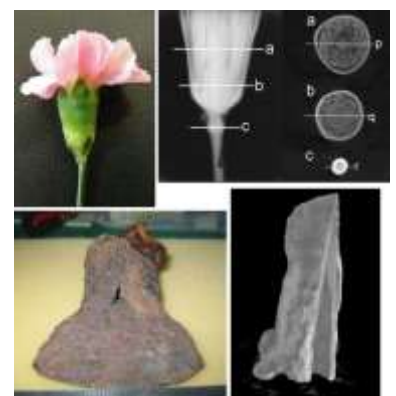
中性子スピネコ法はソフトマターや生体分子のゆっくりとしたダイナミクスを調べることができるユニークな手法で、他の方法では見ることのできない時間・空間領域をカバーします。中性子スピネコ法に基づいた共鳴スピネコ装置は、従来法と比べて装置を小型化できたり磁性体の測定が可能になるなどの特徴を持っています。本研究室では高性能の中性子制御デバイスを駆使して共鳴スピネコ装置を開発しています。現在建設中である大強度陽子加速器施設 J-PARC のパルス中性子源への共鳴スピネコ分光装置の設置をめざして開発を進めています。



開発が進む中性子共鳴
スピネコ装置

■ 基礎物理からラジオグラフィ・CT を用いた農学・工業応用まで

中性子は質量や磁気モーメント・スピンを持つ粒子であり、これらの相互作用を検出する試験粒子となります。本研究室では、重力相互作用による波動関数の位相変化や磁気双極子モーメントの電荷による量子力学的位相の精密測定などをめざして、非常に高精度の光学系である中性子干渉計の開発を進めています。一方中性子が透過力が強く水素や磁性体に対して敏感であることを利用した、中性子ラジオグラフィ・CT の研究と応用も進められています。X 線ではコントラストのつかない物質内の水の振る舞いや、X 線では透視できない金属の内部などを3次元的に見ることが可能です。燃料電池の効率向上や植物を長持ちさせる方法の開発、考古遺物の成り立ちを調べるなど、工学・農学から考古学まで幅広い応用研究を展開しています。



中性子ラジオグラフィ・CT で見る植物とその断面 (上)、鉄製の斧とその3次元像 (下)



基礎物理をめざす冷中性子干渉計と測定された干渉縞