

NIFS NEWS

ISSN 1884-1600



No.247

2019年度 第16回 国立大学法人 総合研究大学院大学・物理科学研究科
核融合科学専攻 岐阜県土岐市下石町322-6 (JR多岐駅前からバスで20分)

Summer Student Program

夏の体験入学

2019 MON 8.26 → FRI 30

世界最先端の研究を一緒に体験してみませんか。

核融合プラズマの閉じ込め・加熱・計測に関わる実験的・理論的研究、スーパーコンピュータによるプラズマ・シミュレーション研究、核融合炉設計・産業応用研究など、幅広い分野から課題を選択し、合宿形式で研究の最前線を体験することができます。

参加者募集

対象者	大学1~4年生、高専4~5年生及び専攻科学生	募集定員	30名	旅費支援制度あり	
応募方法	https://soken.nifs.ac.jp/ をご覧ください。			応募締切	2019年6月28日(金) 正午まで

総合研究大学院大学 核融合科学研究所

〒500-8502 岐阜県土岐市下石町322-6
TEL: 0573-59-0042 FAX: 0573-59-2803 Email: daikan@nifs.ac.jp
<https://soken.nifs.ac.jp/> 総研大 核融合 体験

夏の体験入学開催

2019 APR/MAY

>>> 研究最前線・・・2-5

宇宙の重元素の起源に迫る光の分析を可能に
- 最高精度の原子過程データを計算 -

加藤太治

高速イオンの振る舞いを予測する
- ハイブリッド・シミュレーションと実験の比較研究 -

関 良輔

>>> 会議報告・・・6

MPPCワークショップ

岡村昇一

>>> トピックス・・・7-8

対外協力部の組織の見直しについて
最終講義が行われました

高畑一也

2019年度(令和元年度)総研大夏の体験入学のご案内

大学共同利用機関法人 自然科学研究機構
核融合科学研究所

宇宙の重元素の起源に迫る光の分析を可能に — 最高精度の原子過程データを計算 —

加藤 太治

核融合科学研究所では、核融合炉のプラズマや材料の中に含まれる重元素について、高精度な原子過程データを構築する研究を進めています。ここで、原子過程データとは、原子核の周りの電子が取り得るエネルギーの値（エネルギー準位）、原子が放射・吸収できる電磁波の波長や放射・吸収確率など、それぞれの元素に固有のデータのことです。本稿では、宇宙の重元素起源の解明に向けた、重元素の原子過程データに関する、核融合分野と天文分野、そしてリトアニアの研究者との分野融合的な国際共同研究について紹介します。

およそ1億3000万年前、地球から遠く離れた宇宙で二つの中性子星が合体して生じた重力波が2017年8月17日に初めて検出されたというニュースは、まだ皆さんの記憶にも新しいと思います。この天体からは重力波とともに、キロノバと呼ばれる爆発現象による光が観測されたことはご存知だったでしょうか？宇宙において、プラチナや金など、鉄より重い元素がどこでどのように作られたのかは、まだよく分かっていません。鉄より重い元素は、原子核が中性子を取り込んでベータ崩壊（電子放出）することにより形成されます。このうち、ベータ崩壊するよりも速く中性子を大量に取り込み、中性子過剰な不安定核を経てベータ崩壊する場合を r (rapid) プロセスと呼びます。宇宙に存在するプラチナや金、またレアアースなどの重元素の大部分は、この r プロセスで形成されたと考えられています。このような r プロセス元素

の起源の一つとして注目されているのが、中性子星の合体なのです。合体により放出された物質内部では、r プロセスによる不安定核の放射性崩壊のエネルギーで電磁波が生じます。この電磁波の放射が「キロノバ」と呼ばれています。観測されたキロノバの光解析には r プロセス元素の原子過程データが必要ですが、世界基準で広く用いられているものが極めて少ないという問題がありました。そこで、筆者らの研究グループは、r プロセス元素の原子過程データを独自に計算によって構築する研究を開始しました。

r プロセスによって合成される重元素は、原子番号30~92まで広く分布しています。その中で、ランタノイド元素（原子番号57~71）は4f軌道をもつため、密に詰まった無数の励起エネルギー準位が存在し（図1）、光の吸収線の数も膨大なものになります。例えば、ランタノイド元素の一つであるネオジム（原子番号60）には紫外から赤外領域にかけて非常にたくさんの吸収線があり、際立って高い光吸収係数をもつことが筆者らの研究グループの計算によっても示されました（図2）。一方、4d軌道をもつルテニウム（原子番号44）、5p軌道をもつテルル（原子番号52）の光吸収係数はそれより桁違いに低く、紫外から可視領域に集中しています。このように、光の吸収特性は元素の種類によって大きく異なりますので、キロノバの光の明るさや色（波長）は、中性子星合体によって合成された重元素の種類や量を推定する手

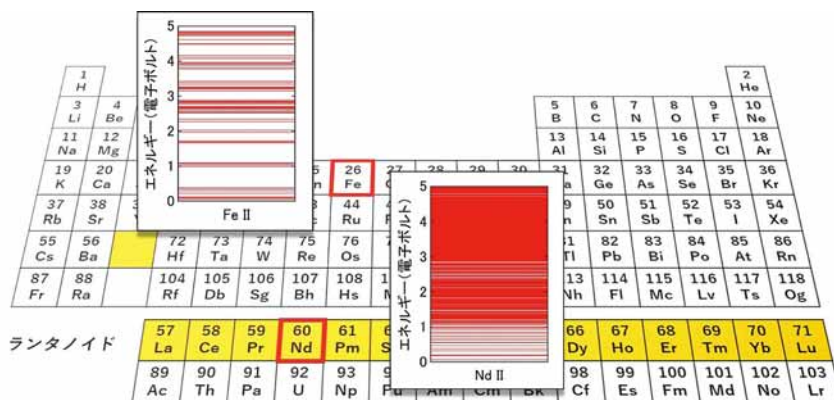


図1. ランタノイド元素の一覧（黄色で表記）とネオジムのエネルギー準位の分布。比較のために、鉄のエネルギー準位の分布も示しています。Fe IIは鉄の1価の正イオン（原子から1個の電子が剥がれた状態）、Nd IIはネオジムの1価の正イオンのこと。縦軸は基底状態の最低エネルギー準位からの励起エネルギー（1電子ボルトは約 1.602×10^{-19} ジュール）。赤色の水平線は、原子の中の電子が取り得るとびとび（離散的）の励起エネルギー準位を表しています。

がかりを与えてくれるはずです。筆者らは、キロノバに特に重要な影響を与えるネオジムの1価～3価の正イオンが吸収する約300万通りの波長の光に関して、原子過程データの計算精度をこれまでより更に高める研究を行いました。この研究のポイントは、効率良く高精度な計算を行うために、量子力学に基づく計算方法を最適化することでした。そして、この計算方法を用いて得られたエネルギー準位の一部をアメリカの国立標準技術研究所（NIST）で公開されている実験データと比較した結果、誤差が10%程度と、世界最高精度であることが確かめられました。

では、以下に今回の計算の詳細について説明します。原子は基底状態と励起状態のエネルギー準位の差に相当する波長の光を吸収します。このような光吸収の原子過程データの高精度な計算には、基底状態と励起状態での原子の中の電子の相互作用をどちらも正確に表す必要があります。量子力学では、電子は同時に何通りもの配置を取り得ますが、基となる電子配置と、そこから仮想的に配置換えをして得られる電子配置との重ね合わせ（数学的には線形結合や線形和と呼ばれる）によって、電子の相互作用（電子相関）の効果を表すという方法があります。筆者らは、光吸収に係わる基底状態と励起状態の電子相関効果をバランスよく計算に取り込むために、基底状態と励起状態の基となる電子配置（参照空間）と、そのそれぞれから得られる仮想的な電子配置（活性空間）とにグループ分けをしました（図3）。このような方

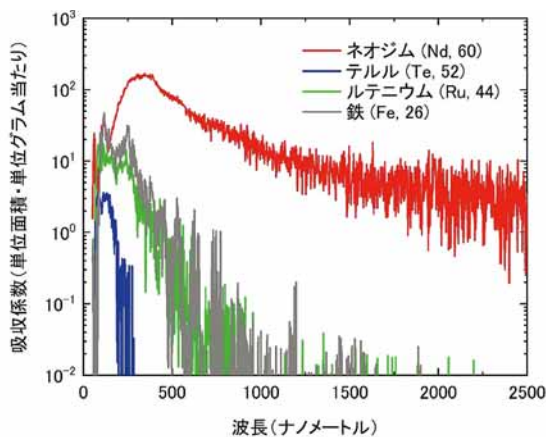


図2. rプロセス元素と鉄の光吸収係数。物質中の光の透りにくさを表す量。中性子星合体からの放出物質の典型的な物理状態（密度1立方センチメートル当たり10兆分の1グラム、絶対温度5000ケルビン）を仮定して計算したもの。ナノメートルは100万分の1ミリメートル。目に見える波長領域はおよそ400～800ナノメートル。

法は多参照配置間相互作用法と呼ばれます。活性空間の電子配置は無限に考えられ、それを多く取り入れるほど計算は高精度になりますが時間がかかります。そこで、活性空間から取り入れる電子配置を、電子相関効果が特に大きなものに限りしました。それは、参照空間の電子配置の最外殻軌道から1個ないし2個の電子を配置換えしたものです。このようにして、参照空間と活性空間に含まれる電子配置の組み合わせを幾つか試して計算を行い、現実的な時間内で最も精度の高い結果が得られる組み合わせを見つけました。そして、この計算方法を用いて、ネオジムの原子過程データを最高精度で構築することができたのです。

現在、同じ方法で残るすべてのランタノイド元素についても計算を進めています。今後、高精度の原子過程データを用いることによって、宇宙の重元素起源の解明に向けた研究が更に加速されると期待しています。

本稿で紹介した内容は、ピリニウス大学（リトアニア）理論物理・天文学研究所のGediminas Gaigalas教授、Pavel Rynkun博士、Lima Radžiūtė博士、東北大学天文学教室の田中雅臣准教授との共同研究によるものです。

（核融合システム研究系 准教授）

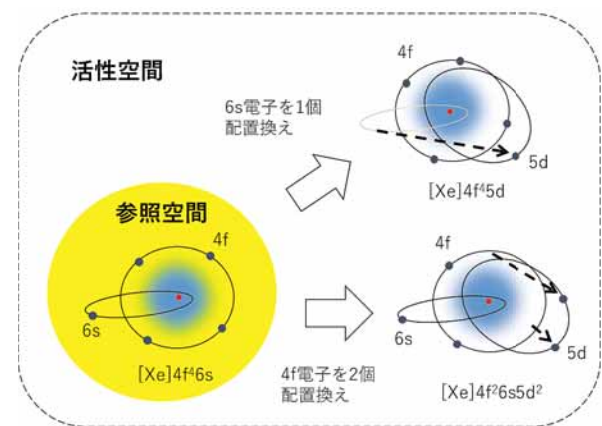


図3. 参照空間と活性空間の電子配置のイメージ図。この図の参照空間の電子配置は、ネオジムの1価の正イオンの基底状態（4f軌道に4個の電子、6s軌道に1個の電子が配置）を表しています。活性空間の電子配置の例は、基底状態の電子配置の軌道から1個または2個の電子を空いた5d軌道に配置換えして得られるものです。[Xe]は内殻の電子配置を表しており、ネオジムに最も近い原子番号の希ガスであるキセノンの基底状態の電子配置（ $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^6 4d^{10} 5s^2 5p^6$ ）と同じです。参照空間の電子配置に活性空間の電子配置を重ね合わせることによって、参照空間の電子配置での電子相関効果を表すことができます。

高速イオンの振る舞いを予測する —ハイブリッド・シミュレーションと実験の比較研究—

關 良 輔

核融合発電を実現するためには、核融合反応が持続するよう、プラズマを1億度以上の高温に加熱し、高温状態のまま保持することが必要です。将来の核融合炉では、核融合反応によって生成され、プラズマの粒子よりも高いエネルギーを持った高速のヘリウムイオンがプラズマにエネルギーを与えることで加熱します。一方、高温・高密度のプラズマの閉じ込め研究を行う核融合科学研究所の大型ヘリカル装置（LHD）では、高い電圧で加速した水素のビームを入射することにより生成した高速のイオンによってプラズマを加熱しています。超高温プラズマの生成・維持を実現するためには、プラズマ加熱において重要な役割を担う高速イオンの振る舞いを理解し、高精度で予測することが必要です。今回は、その予測を行う計算機シミュレーションとLHD実験との比較研究を紹介します。

高速イオンは、ドーナツ型の磁場の中を周回しながらプラズマを加熱します（図1）。この高速イ

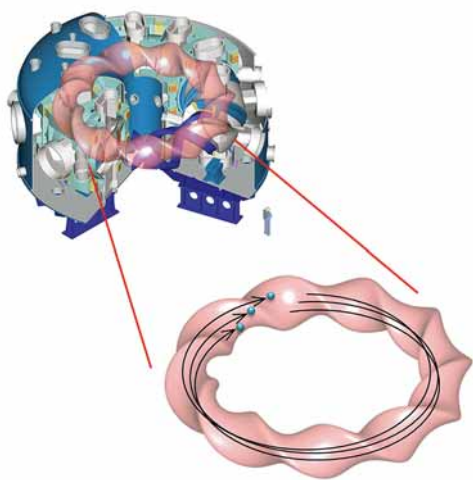


図1. 高速イオンは、LHDのねじれたドーナツの形をした磁場の中を周回しながらプラズマを加熱しています。高速イオンの周回の周期とプラズマの振動の周期が一致すると、振動の振幅が大きくなります。

オンの振る舞いに影響を与えるのが、プラズマの振動です。多数の分子の集まりである空気が音を伝える際に振動するように、電気を帯びた多数の粒子の集まりであるプラズマも様々な形で振動します。プラズマが元々持っている振動の周期と高速イオンの周回する周期が一致すると、振動が大きくなることがあります。そして、大きくなった振動の影響を受けた高速イオンは、プラズマ周辺部へ運ばれたり、プラズマの外へ飛び出しプラズマ真空容器に衝突したりしてしまいます。結果、加熱源である高速イオンがプラズマ中心部から減ってしまい、プラズマの加熱効率が低下してしまいます。本研究では、プラズマの振動と高速イオンの相互作用も含めて高速イオンの振る舞いを理解・予測することで、超高温プラズマの生成・維持の実現を目指しています。

研究所では、このようなプラズマの振動と高速イオンの相互作用を予測できる計算機シミュレーションを開発してきました。このシミュレーショ

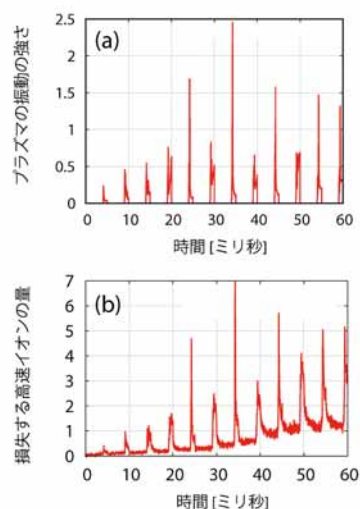


図2. プラズマ振動の強さ (a) と損失した高速イオンの量 (b) の時間変化。間欠的に発生する大きなプラズマ振動に合わせて、高速イオンの損失量が増えています。

ンは、プラズマの振動を解く磁気流体力学方程式の計算と、個々の高速イオンの動きを解く運動方程式の計算を連結して行うことで、プラズマの振動と高速イオンの相互作用を再現します。流体(プラズマ)と粒子(イオン)という異なる2種類の計算を連結するので、ハイブリッド・シミュレーションと呼ばれています。なお、このハイブリッド・シミュレーションは、これまでに、LHDや米国等の装置で観測された、高速イオンによってプラズマの振動が大きくなる現象を再現しています。

今回、ハイブリッド・シミュレーションの信頼性をより一層高めるため、LHDの水素実験で観測された、プラズマの振動の影響を受けて一部の高速イオンがプラズマの外へ損失するという結果を再現できるか検証しました。LHDでは、損失高速イオンプローブと呼ばれる計測器が設置されています。この計測器は、磁力線に巻き付いて運動するイオンの特性を用いることで、損失した高速イオンのエネルギーとピッチ角(旋回の高さと磁力線方向の速さの比)を同時に測ることができます。計算においては、プラズマの温度や密度、高速イオンの速度や密度等について可能な限りLHD実験と同じ条件を設定しました。

図2は、ハイブリッド・シミュレーションで得た、プラズマ振動の強さと損失した高速イオン量の時間変化です。大きなプラズマの振動が間欠的に発生している様子と、そのプラズマの振動に合わせ

て、高速イオンの損失量が増えている様子が示されています。この振動の強さと高速イオンの損失量の関係を詳しく解析したところ、高速イオンの損失量が振動の大きさの2乗に比例するという、実験と同じ結果が得られました。また、図2 (b)においては、大きなプラズマ振動が発生していない時間においても、高速イオンの損失量が徐々に増加していることがわかります。これは、振動によってプラズマの周辺部へ運ばれた高速イオンが少しずつ損失していることによるものです。さらに、プラズマから損失した高速イオンのエネルギーとピッチ角について、ハイブリッド・シミュレーションとLHD実験との比較を行いました(図3)。赤で示した高速イオンの損失量が多い領域のエネルギーとピッチ角について、シミュレーション結果とLHD実験が概ね一致していることがわかります。これにより、損失した高速イオンのエネルギーやピッチ角についても、LHDでの実験結果をほぼ再現することに成功し、ハイブリッド・シミュレーションの信頼性を、より一層高めることができました。

今後は、ハイブリッド・シミュレーションとLHD実験との比較研究を更に推進することで、将来の核融合炉における高速イオンの振る舞いの予測精度を、更に向上させていきます。

(プラズマ加熱物理研究系 助教)

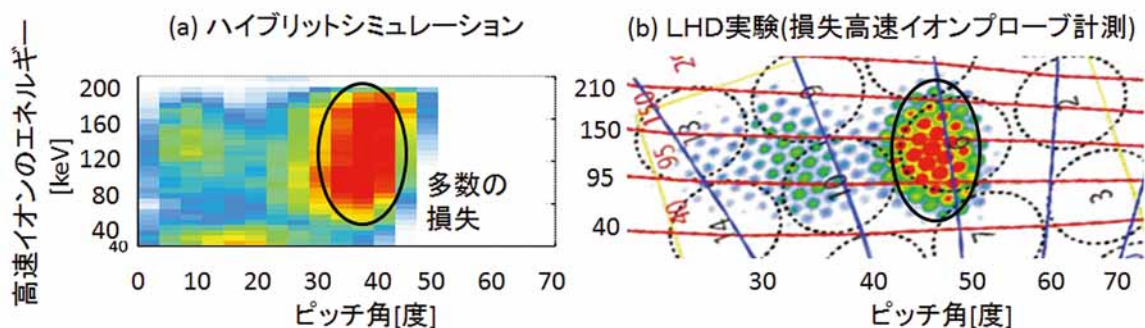


図3. プラズマから損失した高速水素イオンについてのハイブリッド・シミュレーションとLHD実験との比較。縦軸は、高速水素イオンのエネルギーで、100 keVはおよそ秒速4000キロメートルの速さに相当します。横軸は、旋回の高さと磁場方向の速さの比を表すピッチ角を、図の色は、損失した高速イオンの量(青⇒黄⇒赤と大きくなる)を表しています。損失が多いことを示す赤の部分に注目すると、シミュレーションと実験で概ね一致していることがわかります。

MPPC ワークショップ

岡 村 昇 一

2019年2月18日から21日までの4日間、東京大学本郷キャンパスの小柴ホールにおいて、MPPCワークショップが開催されました。MPPCの名称は、Max-Planck Princeton Center for Plasma Physicsという国際センターに由来しています。このセンターは、核融合科学と天体物理学の国際的な分野融合的研究を発展させることを目的として、2012年に、ドイツ・マックスプランク協会と米国・プリンストン大学との間に設立されたものです。一方、自然科学研究機構においても、2015年より、核融合科学研究所と国立天文台を中心とした同様の目的に向けた動きが大きく進展しており、現在それは、日米独の三極による国際共同研究としてまとまりつつあります。今回の日本におけるMPPCワークショップの開催は、多くの日本の研究者がこの国際的動きに参入する契機の一つとなりました。

このワークショップの主な目的は、核融合科学と天体物理学において共通の基礎的学問分野となっているプラズマ物理学に関して、分野融合的な観点から研究発表と議論を行うことです。今回は、磁気再結合現象、プラズマ乱流現象及び高エネルギー粒子に関するプラズマ物理現象の「融合プラズマ物理学」が中心的な話題となり、プラズマ物理が大

きな役割を果たす天体现象及びヘリカル系磁場配位の最適化等も紹介されました。

ワークショップの性格から、ドイツと米国からの参加者が海外からの参加者の多数を占めていますが、日本開催ということで豪州及び中国等からの参加もありました。日本からの参加者は、全参加者104人の約半数でした。ワークショップは、研究成果の発表よりも議論に重きが置かれ、23件の招待講演と55件の口頭発表が用意されました。主に、午前中は大会場で招待講演が行われ、午後は4カ所の分科会に分かれて発表が行われました。会場では、今後の日独間及び日米間の国際共同研究に発展すると期待される、活発な議論が展開されました。

核融合科学研究所からは4件の招待講演を含めて全部で11件の発表がありました。研究所の特任研究員のフルヴィア・プッチさんは、自然科学研究機構の戦略的国際研究交流加速事業に従事してきた2年間のまとめとして、このワークショップの二つの分科会のプログラミングを任されました。これらの分科会では、部屋に入りきれないほど多数の参加者が集まっていました。

(研究力強化戦略室 特任教授)



会議出席者の集合写真

対外協力部の組織の見直しについて

高畑 一也

本年4月から核融合科学研究所(研究所)の広報・アウトリーチ活動を担う「対外協力部」の組織を変更しましたのでご紹介します。

今回の対外協力部の組織の見直しでは、核融合研究をより効果的に広報し、広範囲なアウトリーチ活動を推進するために、既設の地域連携室を残し、残りの組織(室)を整理統合し、コンテンツ制作室、イベント企画室、広報見学室及びアウトリーチ活動推進室の4室を新設しました。地域連携室においては、従来どおり、重水素実験及び研究所の活動について、地域の方々の理解を得るための活動を行います。コンテンツ制作室においては、研究所紹介・研究内容紹介を目的とした記事を作成し、ウェブサイト、印刷物を使って効果的な広報を行います。イベント企画室では、オープンキャンパス、市民学術講演会をはじめ、研究所が主催するイベントを企画・運営します(写真1、2はこれまでのイベントの様子)。広報見学室においては、施設見学の案内、各種取材の窓口を行います。アウトリーチ活動推進室においては、地域から全国へのイベント出展、出張講義等を通じて研究所・核融合研究のアピールに繋がるアウトリーチ活動を行います(写真3、4はこれまでの活動の様子)。以上の5室が有機的に連携し、核融合研究が全国レベルで支持されるよう積極的な活動を行っていききたいと思います。

なお、対外協力部のメンバーは、のべ55名です。その構成は、研究教育職員が36名、技術職員が6名、事務職員が8名、その他の専任職員が5名となっています。今後ともよろしくお願ひ申し上げます。

(対外協力部長/装置工学・応用物理研究系 教授)



写真1 オープンキャンパス



写真2 市民学術講演会



写真3 地域の公民館で行っている工作教室



写真4 野辺山宇宙電波観測所特別公開におけるブース展示

最終講義が行われました

平成31年3月31日をもって退職された先生方の最終講義が、平成31年3月19日に核融合科学研究所で行われました。会場には、研究者や大学院生らが多数集まり、熱心に聞き入っていました。最終講義の題目は、以下のとおりです（職名及び所属は当時のもの）。



森田 繁 高密度プラズマ物理研究系教授
「人生いろいろ」



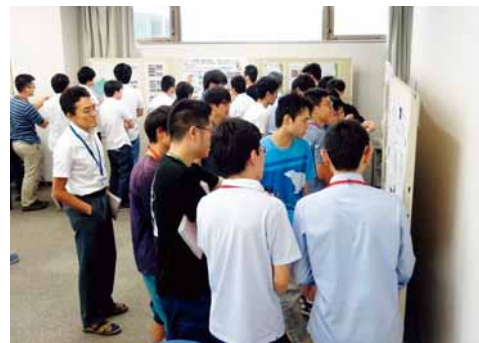
西村 新 核融合システム研究系教授
「定年退職 自由人として生きる」

2019年度（令和元年度）総研大夏の体験入学のご案内

国立大学法人 総合研究大学院大学（総研大）物理科学研究科核融合科学専攻では、大学院への進学を検討されている方々にプラズマ理工学及び核融合工学に関連した最先端の研究を体験していただくことを目的として、令和元年8月26日から30日にかけて夏の体験入学を開催します。核融合プラズマの閉じ込め・加熱・計測に関わる実験及び理論的研究、プラズマ・シミュレーション研究、核融合炉設計・応用研究のための工学的研究等、10課題を超える幅広い分野から興味のある課題を選択し、教員や総研大在学生の指導に沿って、少人数グループによる5日間の宿泊形式で、核融合研究の最前線を体験していただきます。



竹入専攻長による特別講義の様子



ポスター発表の様子

夏の体験入学の詳細は、核融合科学専攻ホームページをご覧ください

URL : <https://soken.nifs.ac.jp>



大学共同利用機関法人 自然科学研究機構

核融合科学研究所 発行

NIFS NEWS
No.247

2019年4,5月号

〒509-5292 岐阜県土岐市下石町322-6
TEL : 0572-58-2222(代) FAX : 0572-58-2601
URL : <http://www.nifs.ac.jp/>
E-mail : nifs-news@nifs.ac.jp

※過去のニュースはホームページにてご覧いただけます。

複写される
方へ

本紙に掲載された著作物を複写したい方は(社)日本複写権センターと包括複写特許契約を締結されている企業の方でない限り、著作権者から複写権等の行使の委託を受けている次の団体から許諾を受けてください。

一般社団法人学術著作権協会 〒107-0052 東京都港区赤坂9-6-41 乃木坂ビル3F
TEL:03-3475-5618 FAX:03-3475-5619 E-mail:info@jaacc.jp 著作物の転載・翻訳のような、複写以外の許諾は、直接本研究へご連絡ください。