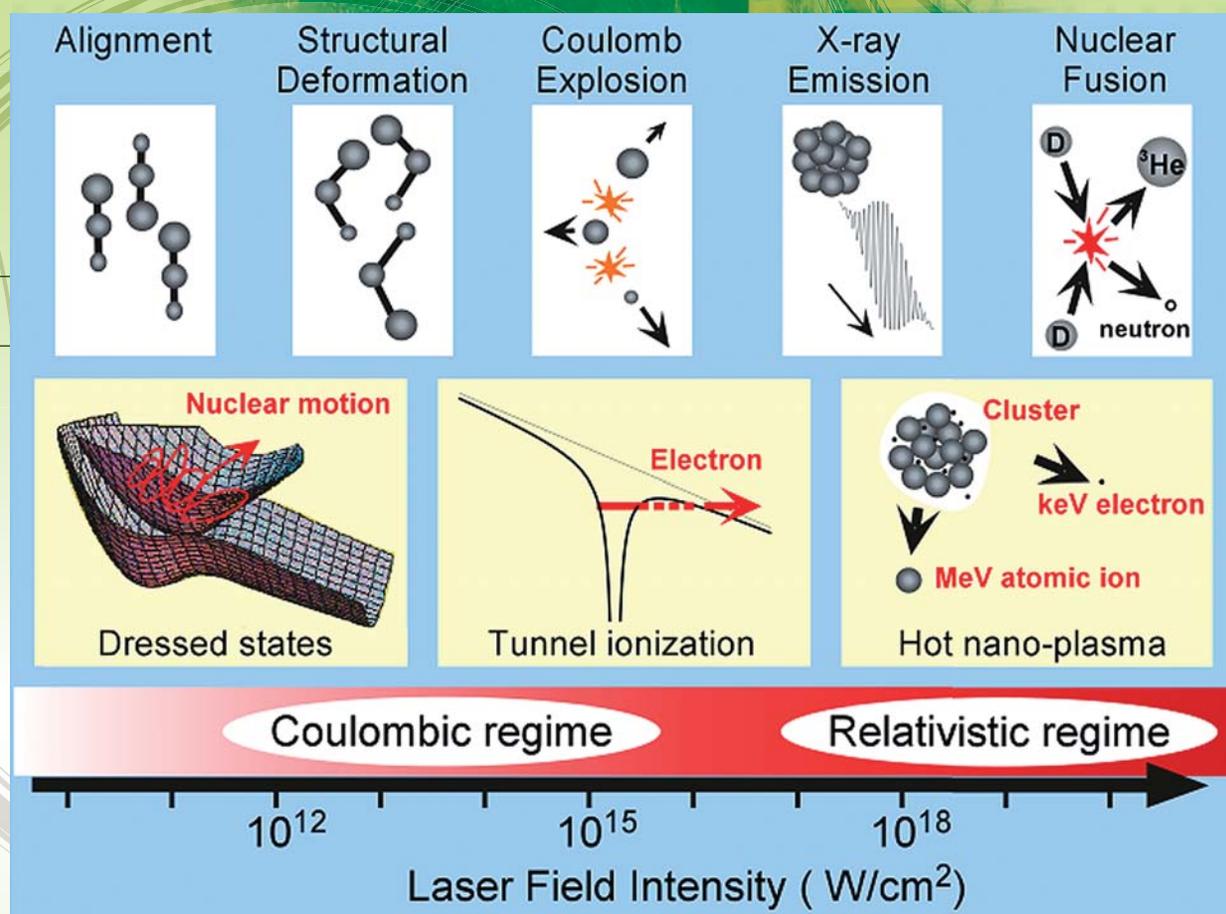




東京大学理学系研究科・理学部ニュース

2007年11月号 39巻4号

<http://www.s.u-tokyo.ac.jp/>



超高速強光子場科学 — 強光子場で起こるさまざまな現象
～附属施設探訪 本郷編 超高速強光子場科学研究センターより～

トピックス

世界トップレベル国際研究拠点「数物連携宇宙研究機構」の発足	相原 博昭(物理学専攻 教授) ……………	3
第23回理学系研究科・理学部技術部技術シンポジウムを開催	樽澤 賢一(附属天文学教育研究センター木曾観測所 技術職員) ……	3
堀正樹博士のヨーロッパ若手研究者賞(EURYI)受賞	早野 龍五(物理学専攻 教授) ……………	4
アモルフォファルス・ギガスまた開花	邑田 仁(附属植物園 教授) ……………	4

研究ニュース

ニッポンウミシダがナショナルバイオリソースプロジェクトに採択	赤坂 甲治(附属臨海実験所 教授) ……………	5
超伝導を引き起こす「重い電子」の不思議な振る舞い	藤森 淳(物理学専攻 教授) ……………	6
すばる望遠鏡、太陽系外惑星の公転軸の向きの測定に成功	成田 憲保(物理学専攻 博士課程3年), 須藤 靖(物理学専攻 教授) ……………	7
熱水中で水を通さなくなる新しい膜材料	中村 栄一(化学専攻 教授) ……………	8
宇宙でも同位体を使って化学反応を追跡	山本 智(物理学専攻 教授), 坂井 南美(物理学専攻 博士課程2年) ……………	9
日本で初めての天然ダイヤモンド発見	鍵 裕之(附属地殻化学実験施設 准教授) ……………	10
冬の雷雲は天然の粒子加速器だった	榎戸 輝揚(物理学専攻 博士課程2年), 牧島 一夫(物理学専攻 教授) ……………	11

連載：理学のキーワード 第10回

「サンゴ礁」	茅根 創(地球惑星科学専攻 准教授) ……………	12
「花の進化」	平野 博之(生物科学専攻 教授) ……………	12
「人名反応」	山野井慶徳(化学専攻 助教) ……………	13
「4次元を超える世界」	向山 信治(附属ビッグバン宇宙国際研究センター 助教) ……………	13
「ペタコンピューティング」	平木 敬(情報理工学系研究科コンピュータ科学専攻 教授) ……………	14
「ベクトル束」	古田 幹雄(数理学研究科 教授) ……………	14

理学系探訪シリーズ：附属施設探訪 本郷編

第4回 超高速強光子場科学研究センター	山内 薫(センター長, 化学専攻 教授) ……………	15
---------------------	----------------------------	----

お知らせ

「理学部サイエンスカフェ2007@駒場」の開催	岡 良隆(生物科学専攻 教授) ……………	18
「高校生のためのサイエンスカフェ本郷」も第3回を開催	小形 正男(物理学専攻 准教授) ……………	18
東京大学大学院理学系研究科・博士学位取得者一覧	……………	18
人事異動報告	……………	19

世界トップレベル国際研究拠点「数物連携宇宙研究機構」の発足

相原 博昭 (物理学専攻 教授)

2007年10月1日(月)、文部科学省による世界トップレベル国際研究拠点プログラムに本学から採択された数物連携宇宙研究機構(Institute for the Physics and Mathematics of the Universe, 略称IPMU)が発足した。このプログラムはわが国に「世界から見える研究拠点」をつくり、優れた研究成果をあげ、学問の飛躍的な進展をはかることを目的としている。柏キャンパスに建設される新研究棟において、われわれは、宇宙は何でできているのか、どうやって始まり、その運命

は何か、どんな法則で動いていて、われわれはどうして存在するのかという宇宙の根源的問題に取り組む。

この機構は、理学系研究科、数理科学研究科、宇宙線研究所の三者が協力して構想したもので、純粋・応用数学から理論・実験物理、天文学におよぶ広範な基礎科学分野を戦略的に融合し、かつ分野間の垣根を取り払い、世界トップレベルの研究者を結集するユニークな研究組織である。現代基礎物理学の最重要課題である暗黒エネルギー、暗黒物質、ニュートリノ、統一理論(超弦理論や量子重力)などの研究をスーパーカミオカンデ、すばる望遠鏡、超高エネルギー加速器LHCという最先端設備を駆使して進めると同時に、そのデータの解析と記述に必要な新しい

数学を創造する。その結果、素粒子に働く力や重力の起源と時空構造との関係、そして宇宙の起源と進化を解明するのが目標である。

米国カリフォルニア大学バークレー校から新進気鋭の素粒子理論研究者、村山斉教授を機構長に迎えるほか、すでに5名のグループリーダーを米国、フランスから招いている。村山機構長のリーダーシップのもとに世界標準に基づく拠点運営を行い、年齢、性別、国籍についても多様性に富む研究環境を構築する。理学系研究科との連携協力をいっそう強め、この拠点が世の中に見える存在になることによって、第二のユカワ、コシバを目指す学生が、理学系に殺到するようになって欲しいと願っている。

第23回理学系研究科・理学部技術部技術シンポジウムを開催

シンポジウム実行委員長 樽澤 賢一
(附属天文学教育研究センター木曾観測所 技術職員)

理学系研究科・理学部技術部では、2007年9月14日(金)13時~17時30分に理学部1号館西棟2階207号室において技術シンポジウムを開催した。参加者は、外部の方を含め合計36名であった。技術発表では、各講演はそれぞれ違う分野であったが活発な討論がなされ、有意義なシンポジウムとなった。

情報交換会では、佐藤教授からご提供いただいた「南極の水」で数十万年前の地球を感じることができ、有意義な情報交換と交流ができた。

本技術シンポジウム開催にあたっては、事務部の方々をはじめ多くの方々のご協力をいただいた。この場をお借りして深くお礼申し上げたい。また、講演をされた方々、特別講演をしていただいた佐藤

薫教授、座長、タイムキーパをされた方々、そして、ご参加いただいたみなさんに深く感謝申し上げたい。今年から「新たな評価制度」の試行もはじまり、

技術職員を取り巻く状況は厳しいものがあるが、今後も、技術職員の技術向上のため開催したいと考えている。なお、演題と講演者は、以下のとおりであった。

技術発表

「電子顕微鏡による数 μ オーダーからの鉱物微粒子の軽希土類組成分析の実際」

市村康治(機器分析・実習系)、吉田英人(機器分析・実習系)¹、村上隆¹
(1:地球惑星科学専攻)

「木曾105cmシュミット望遠鏡2K×4KモザイクCCDカメラの機械系」

樽澤賢一(機器分析・実習系)¹、富田浩行¹、青木勉¹、征矢野隆夫¹、
宮田隆志¹、三戸洋之¹、中田好一¹、小林尚人¹、土居守²、仲田史明³、
宮崎聡³

(1:木曾観測所, 2:天文学教育研究センター, 3:国立天文台)

「植物の収集および育成、保存」

綾部充(植物園・日光分園/生命科学系)

「法人化後の安全衛生」

佐伯喜美子(物理学専攻/共通系)

特別講演

「南極オゾンホール科学」

佐藤薫(1:地球惑星科学専攻 教授)

堀正樹博士のヨーロッパ若手研究者賞 (EURYI) 受賞

早野 龍五 (物理学専攻 教授)

日本学術振興会特別研究員 (PD) で、物理学専攻早野研究室所属の堀正樹博士は、ヨーロッパ科学財団より第四回ヨーロッパ若手研究者賞 (European Young Investigator Awards : EURYI) を受賞し、去る9月27日にヘルシンキで授賞式が行われた。これは日本人初の受賞である。

EURYI は人文科学を含むすべての研究分野の、ポストドク経験2年以上10年以下の若手研究者から “best and brightest” を選抜し、ヨーロッパ内の研究機関において独立の研究グループを

率いるチャンスを与える制度で、受賞者には賞金約2億円 (本人の5年分の給与を含む) が授与される。選考は欧州各国での予備審査で約500名に絞った上、書類審査と面接で20名を選ぶという厳しいものだったが、堀博士は「反物質原子の精密レーザー・マイクロ波分光—反物質制御の新技術」という意欲的な研究テーマで見事に栄冠を勝ち取った。

堀博士はこれまでも CERN 研究所 (スイス) にて反陽子原子の精密レーザー分光による物質と反物質の質量比較などの顕著な成果を上げており (理学部ニュース 38 巻 2 号 P.7)、今後は 2005 年のノーベル物理学賞を受賞した、マックス・プランク研究所 (ドイツ) の T. ヘンシュ (Ted Hänsch) 教授のグルー

プ内に独立研究室を組織し、大学院生やポストドクを指導しつつ、CERN 研究所における反物質研究を推進することになっている。



ノーベル賞受賞者 T. フント (Tim Hunt) 博士 (左) より EURYI を授与される堀正樹博士 (右) (写真提供 ESF)

アモルフォファルス・ギガス また開花

附属植物園長 邑田 仁
(附属植物園 教授)

附属植物園ではおもに系統分類学的研究のためサトイモ科の植物を世界各地から収集し、温室で栽培している。コンニャクの仲間もそのひとつで、地下に大きなイモ (地下茎) があり、毎年1枚、傘のように広がった葉を出して栄養を貯め、イモが十分大きくなるとこんどは1個の花序だけを地上に出して開花する。開花・結実すると栄養を消費し、イモが小さくなってしまふので、ふたたび数年間は葉だけを出して栄養を貯めるというサイクルをもっている。コンニャクの仲間は種類によって大きささまざま、小さいものは花序の高さ 20 cm 以下、大きいものには高さ 4 m ほどになるアモルフォファルス・ギガス、花序の幅が 1.5 m になるショクダイオオコンニャクがある。

今回、開花したギガスは 1993 年に

原産地のスマトラ島で採集された種子から育てたもので、2003年に附属植物園で開花し、「世界で一番背の高い花」が「世界の植物園で第2番目」に開花したことで話題をよんだ。そのとき咲いた株が復活して再び開花したので、2007年9月8日 (土)・9日 (日) の2日間限定で特別公開を行うこととし、「4年ぶり2度目の開花 アモルフォファルス・ギガス —世界一背が高いコンニャク—」というタイトルで記者発表を行った。その結果、いくつかの新聞とテレビで画像とともに紹介され、2日間で3000人をこえる見学者があった。花序はサーモグラフィによる温度測定などを行った後、切り取って標本とした。

今回は温室から出して屋外に展示し、入園者に自由に見てもらおうよう展示場の設営もしていたが、直前に台風が来たため背が低いうちに温室外に出すことができず (1日に10 cm 以上伸びて開花時には 3 m 20 cm になってしまった)、結局、温室での公開となったのは残念であった。次にはショクダイオオコン

ニャクの開花も期待されるので、いまのうちから展示公開の企画を進めたいと考えている。



研究温室内で開花したギガスの花序。長い柄の先に筒状に巻いた仏炎苞があり、その内側に多数の花と大きな棒状の花序附属体がある。附属体表面にしみ出す液体が腐った魚のような悪臭を放ち、受粉のための昆虫を集めるのに役立っている。右側は別株のギガスの葉

ニッポンウミシダがナショナルバイオリソースプロジェクトに採択

附属臨海実験所長 赤坂 甲治（附属臨海実験所 教授）

理学系研究科附属臨海実験所（通称三崎臨海実験所）のニッポンウミシダがナショナルバイオリソースプロジェクト（NBRP）に採択された。NBRPとは、「わが国のライフサイエンス研究の基盤となるバイオリソースについて、国の戦略目標に基づき、継続的に収集・保存・提供を行うとともに、バイオリソースの所在情報などを提供する情報センター機能を強化する」国家プロジェクトである。

ニッポンウミシダとはウミユリ類の一種であり、名前からは植物を想像するが植物ではなく動物であり、ウニなどの棘皮動物に属す。NBRPに採択される生物は「研究対象としてきわめて有用であり、ニーズが高い」ことが必須条件である。しかし、ニッポンウミシダは研究者人口も少なく研究成果もほとんどない。ではなぜ、ニッポンウミシダが国家プロジェクトに採択されたのだろうか？

人類までも生み出した進化を理解し、その起源を探るためには、人類に至る進化系統の中でもっとも古い動物、すなわち棘皮動物を研究する必要がある。従来は、棘皮動物の代表として入手しやすいウニ・ヒトデ・ナマコなどが研究されてきた。しかし、これらの動物の起源は比較的新しく、進化の過程で脳（中枢神経）など、多くの動物に共通した組織・器官を捨てている。したがって、これらの動物は本当の意味では棘皮動物の代表とはいえなかった。

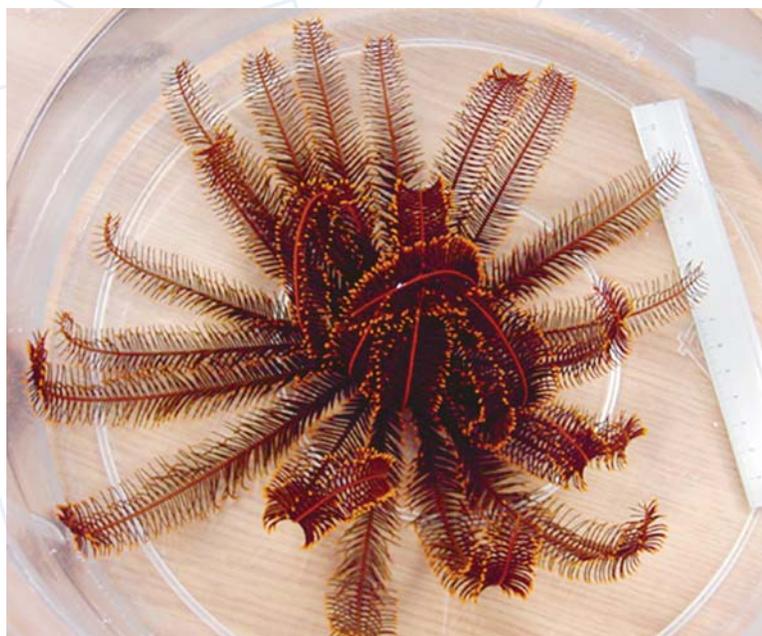
棘皮動物の中でもっとも起源が古いのはウミユリ類であり、中枢神経系を有するなど、棘皮動物の本来の体制を継承する。また、再生能力がきわめて高く、発達した神経系が再生にかかわることから、

ヒトの組織の再生機構の研究にもつながると期待されてきた。しかし、ウミユリ類の多くは深海に生息し、採集が困難なため、実験動物とすることができなかった。

三崎臨海実験所周辺の海底地形は、急峻で深海が迫っている。そのため、深海の生物が沿岸に生息し、ウミユリ類も比較的浅い海域で採集することができる。昭和時代の動物学・発生生物学のカリスマ的存在であった団勝磨*先生以来、三崎臨海実験所ではニッポンウミシダの生態研究を継続してきた。最近、大学院生らの篤い情熱が実り、ついに飼育・発生・継代に成功した。ウミユリ類を閉鎖系で飼育・継代できる海洋生物研究施設は世界でも三崎臨海実験所だけであり、バイオリソースとしての重要性和高い独自性が評価されてNBRPの採択となった。

今後、三崎臨海実験所を舞台として、また、世界に向けてニッポンウミシダの胚、幼生、成体およびゲノムを供給することにより、進化と再生の研究が飛躍的に進歩すると期待される。理学系研究科の皆さん、ニッポンウミシダを使ってみませんか？

*団勝磨：東京大学理学部動物学教室出身。昭和時代に活躍した発生生物学者。第二次大戦前、渡米。米国人生物学者ジーンと結婚、帰国。三崎臨海実験所を舞台に研究。戦前、戦中、戦後の激動の時期をジーンと過ごした生活は文化的にも注目されている。戦時中、三崎臨海実験所旧本館は海軍の特殊潜航艇基地として使用された。敗戦を迎え、米軍により実験所が破壊されようとした時、玄関に「Last one to go」の張り紙をして立ち去ったストーリーはあまりにも有名。東京大学出版会磯野直秀著「三崎臨海実験所を去来した人々」参照。



■ ニッポンウミシダ

超伝導を引き起こす「重い電子」の不思議な振る舞い

— 遍歴から局在への転移過程が明らかに —

藤森 淳 (物理学専攻 教授)

物質中の電子は、金属中の電子のように物質中を自由に動き回る(量子力学的な“波”の性質が顕著な)「遍歴状態」と、絶縁体中の電子のように原子に束縛されて動けない(古典的な“粒子”の性質が顕著な)「局在状態」の二種類に分類される。しかし、一部の希土類化合物やアクチノイド化合物に見られる「重い電子」^{注)}はその両方の性質を兼ね備えており、室温付近の高温で局在状態の性質を、液体窒素・液体ヘリウム温度付近の低温では遍歴状態の性質を示すことが知られていた。さらに低温では、多くの重い電子が磁気秩序を示し、極低温で超伝導を示すものがあることも見だされている。重い電子がどのようにして局在状態—遍歴状態—超伝導状態と極端に性質の異なった状態を移り変わることができるのか、重い電子の発見以来30年間、その転移過程について多くの理論的研究や電気的・磁気的応答の研究がなされてきた。しかし、転移過程における電子の状態変化を直接明らかにした研究は行われていなかった。

われわれは大型放射光施設 SPring-8 からの放射光を用いて、極低温で超伝導を示す重い電子系化合物 UPd₂Al₃ (ウラン・パラジウム・アルミニウムからなる化合物)の角度分解光電子分光法で測定を行い、重い電子の“バンド構造”を直接測定することによって遍歴状態と局在状態の違いの本質を明確に観測することに成功した。これは世界トップクラスのX線強度とエネルギー分解能をもつ測定装置を開発したことで初めて実現したものである。

図1に高温・低温における「重い電子」のバンド構造を概念的に示す。低温では電子は遍歴する“波”であるため、その

エネルギー(∞周波数)が電子の波数 $2\pi/\lambda$ (λ :波長)の関数として変化する。いっぽう、高温では電子が局在した“粒子”となり波数が意味を失うために、そのエネルギーは定数になる。この様子が、実際に UPd₂Al₃ の角度分解光電子分光で観測されたのが図2である。フェルミ準位付近のわずかな部分ではあるが、「遍歴状態」と「局在状態」との明瞭な差が表れている。

重い電子系化合物は、上に述べた「重い電子」の奇妙な振る舞いと共通の原因により、従来の金属で観測されている超伝導とは異なる“エキゾチックな”超伝導を示す場合があり、今回測定した UPd₂Al₃ もその一例である。今回の成果

によって、エキゾチック超伝導に対する理解が進み、超伝導機構の解明も大きく進展するものと期待される。

本研究は、日本原子力研究開発機構の藤森伸一副主任研究員・芳賀芳範研究主幹、京都産業大学の山上浩志教授、大阪大学の大貫惇睦教授らとの共同で、*Nature Physics*, **3**, 618, 2007 に掲載されている。

(2007年7月27日プレスリリース)

^{注)} 重い電子: 金属中の伝導電子が電子間相互作用の“衣”を着ることで、その質量が、自由電子の質量の数百倍~千倍に重くなったように見える現象。電子比熱など、電子の質量に比例した物理量が巨大化することを通じて検出される。

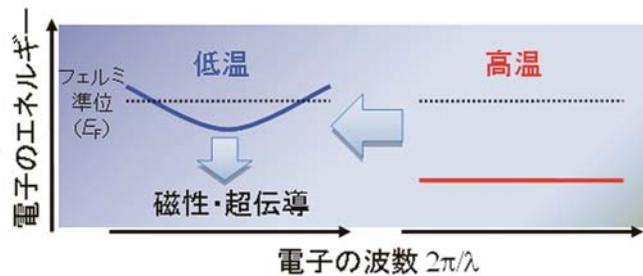


図1: 「重い電子」のバンド構造の概念図
(左: 低温における遍歴状態, 右: 高温における局在状態)

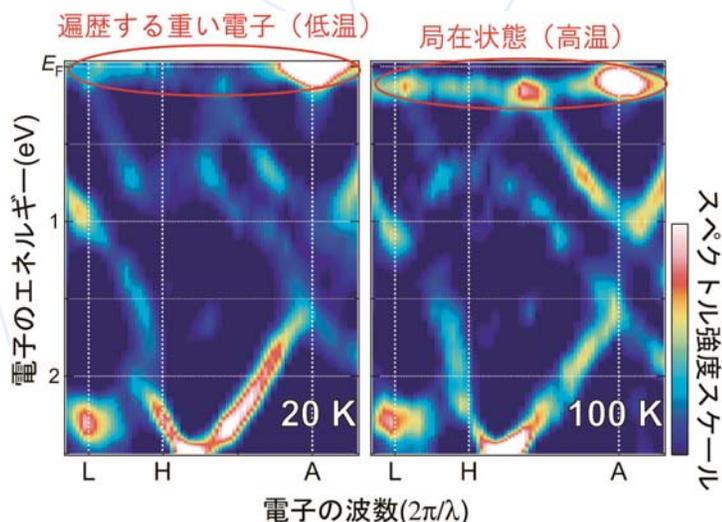


図2: 角度分解光電子分光測定で得られた UPd₂Al₃ のバンド構造の温度依存性。赤線で囲った部分が、図1に描かれた特徴を示している。

すばる望遠鏡，太陽系外惑星の公転軸の向きの測定に成功

成田 憲保（物理学専攻 博士課程3年），須藤 靖（物理学専攻 教授）

これまでに，太陽以外の恒星にある惑星は250個以上発見されている。しかしこの太陽系外惑星の中には，太陽系でいうと木星のような巨大惑星であるにもかかわらず，公転周期がたった数日しかないものや，細長く伸びた楕円軌道をしているものが多く存在している。このように太陽系の惑星とは似ても似つかない惑星たちは，どのようにして生まれたのだろうか？

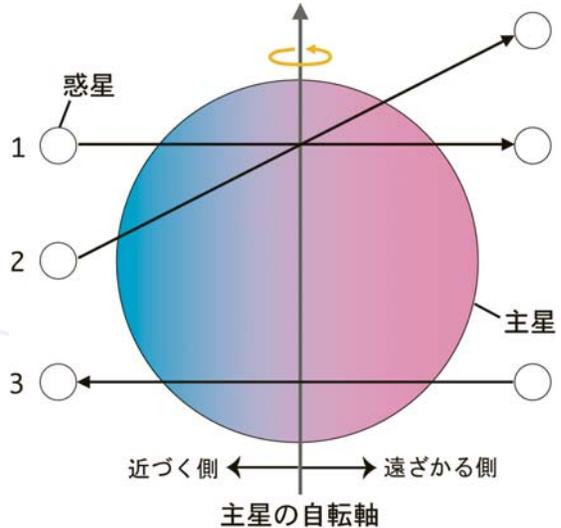
現在の標準的な惑星形成理論では，惑星は原始星のまわりを取り囲む原始惑星系円盤の中で，小さなチリが集積・合体して徐々に成長していくことで形成されると考えられている。この過程において，惑星は周囲を取り囲む原始惑星系円盤との相互作用によって，中心星に徐々に近づいていく。公転周期の短い惑星の存在は，この理論で大まかに説明することができる。いっぽう，この理論ではすべての惑星の軌道離心率はほぼ0になることが予想されている。そのため，この理論だけでは離心率をもった多くの惑星の存在を説明できない。そこで最近，成長した巨大惑星同士の重力散乱などが，惑星の離心率を大きくすると考える理論が注目されている。これらの新しい理論は，先の標準理論と組み合わせることで，太陽系外惑星の軌道の性質をきちんと説明することができる可能性がある。しかし，これらの理論を強く支持する観測的な証拠はまだ得られていない。

では，観測的証拠として何を発見すればよいのだろうか？ここでわれわれは，主星の自転軸と惑星の公転軸のなす角度に着目した。標準理論では，惑星は原始星の自転とそろって回転する円盤の中で生まれるため，2つの軸のなす角度が

0度から大きくずれることはない。いっぽう，複数の巨大惑星による重力散乱を考慮した理論は，かなりの割合の惑星が大きなずれをもつことを（ときには主星の自転と惑星の公転の向きが逆になることも）予言している。したがって，観測から2つの軸のなす角度を測ることができれば，惑星の生い立ちを探る新しい道をひらくことができる。

そこで，われわれはトランジット惑星系とよばれる惑星の公転軌道が主星の前面を通過するような惑星系に注目した。このような惑星系では，惑星が主星の前面を通過している間，惑星が主星のごく一部を隠すが，その場所が徐々にずれるため，主星の時点で近づく側と遠ざかる側の見える割合がわずかに変化し，結果として，見かけ上，主星が近づいたり遠ざかったりして見える。この現象はロシター（Rossiter）効果とよばれており，この効果を検出することで2つの軸のなす角度を測ることができるようになる（図）。

今回われわれがハワイにあるすばる望遠鏡とMAGNUM望遠鏡（東京大学）の2台を用いて同時観測を行い，ロシター効果の検出に成功したのは，TrES-1という主星の見かけの等級が約12等の惑星系である。これは世界で3例目の検出例だが，この惑星系は以前に検出がなされていた2つの惑星系に比べて約2%の明るさしかなく，現時点でもっとも暗いターゲットでの成功例



主星の前を横切る，惑星の公転軌道の3つの例。主星の青い部分は自転によって観測者に近づいてくる側を表し，逆に赤い部分は遠ざかる側を表している。それぞれの軌道によって，ロシター効果は異なって観測される。そのため，ロシター効果を測定することで，主星の自転軸と惑星の公転軸のなす角度を調べることができる。

である。今回の結果は，2つの軸のなす角度が 30 ± 21 度で，有意なずれは検出できず，どちらかといえば標準理論を支持する。ここでとくに重要なのはロシター効果の観測対象をより暗い主星をもつ惑星系にまで拡張したことである。実際，われわれは2007年7～9月にかけて，同じように暗い5つの惑星系でロシター効果の観測を行い，現在，解析を行っている。後もこうした観測を通し，さらに多くの惑星系で，精度を高めた観測を行っていくことで，太陽系外惑星の生い立ちに迫っていきたいと考えている。

本研究は多くの共同研究者の方々のご協力をいただき達成することができた。ここに深く感謝したい。本研究は，N. Narita et al., *Publ. Astron. Soc. Japan*, **59**, 763-770, 2007 に掲載された。

(2007年8月24日プレスリリース)

熱水中で水を通さなくなる新しい膜材料

中村 栄一 (化学専攻 教授)

細胞などに見られる生体膜は脂質とよばれる飽和炭化水素の構成する分子二重膜からなっている。そのもっとも重要な役割は、水分子を自由に透過し、外界から必要な物質を取り込む一方で、生命活動に必要な物質が外に漏れ出さないようにすること、つまり「物質のふるい分け」である。今回、われわれの研究グループは、分子二重膜をフラーレンからつくと、温度を上げるほど水分子の透過性が減少し、最大で通常の細胞膜の一万倍も水を通しにくい膜ができることを明らかにした。世界でもっとも薄い分子二重膜であるフラーレンの分子膜が、世界でもっとも水を通しにくいという予想外の性質をもつ一方、膜透過の分子選択性も脂質二重膜とはまったく異なることを予想させる発見である。

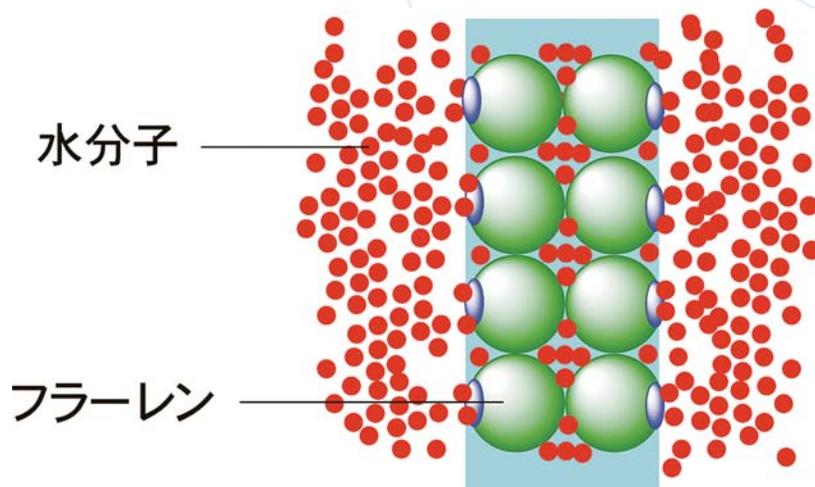
われわれは、フラーレン誘導体の陰イオンを水に溶かすと、黄色い均質な溶液が生じ、この中に分子二重膜からできたベシクル (小胞) ができることを2001年に報告した。このフラーレンベシクルと

脂質二重膜からなるベシクルの性質の差にはたいへん興味をもたれるところである。細胞膜とフラーレン膜の水透過性の違いを、核磁気共鳴装置を使った熱力学測定により詳細に調べたところ、この違いが膜を構成する分子と水分子の相互作用の違いによることがわかった。すなわち、脂質二重膜の内部では、高い運動自由度をもった炭化水素の鎖が膜に対して垂直に並んでおり、水分子はこの柔軟な炭化水素鎖の隙間をぬうようにして通り抜けていく。いっぽうで、フラーレン二重膜の内部は剛直なフラーレンが密に詰まった、いわば結晶のような状態をとっている。このため、膜を透過するために膜外部から侵入した水分子は結晶性の膜の隙間に挟まって自由度が減少し (エントロピー減少)、膜を通り抜けることが困難になっていると考えられる (図)。すなわち、フラーレン二重膜の中に取り込まれた水が糊のように働き、熱を加えたときに膜を硬くすると考えられる。これまでの細胞などの分子二重膜で

知られていた常識からは考えられない特性である。

脂質二重膜では、酸素や窒素のような非極性小分子や、水やエタノールのような中性小分子は透過することが可能だが、より大きなアミノ酸や糖といった分子や、イオン性分子は通り抜けることができない。これは透過する分子と脂質二重膜内部の炭化水素鎖との相互作用の違いによって生じる選択性である。今回の発見は、フラーレンの膜がこれまで知られている膜とはまったく異なる物質選択性をもつということに要約できる。近年、エネルギーや環境問題に関連して膜による分離精製法が脚光を浴びている。今回見つかった新しい性質を活用してフラーレンを含む薄膜を設計すれば、これまでにない物質分離の選択性をもつ新しいタイプの膜としての利用ができることと期待される。たとえば、メタンハイドレートからのメタンガスを分離するためのガス分離膜、また近年バイオ燃料として注目されているエタノールを精製する過程で必要とされる水とエタノールの分離のための膜の開発など、環境問題やエネルギー科学における鍵物質の分離という観点から、将来の工業的応用が期待される新材料である。

本研究は、文部科学省 (科学研究費補助金および科学技術振興機構 ERATO プロジェクト) の支援によって行われ、H. Isobe *et al.*, *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America*, **104**, 14895-14898, 2007 に掲載された。



フラーレン二重膜が水透過するさいの模式図。フラーレン二重膜内では水分子が結晶性の膜の隙間にとらわれるため、水を著しく通しにくい

(2007年8月31日プレスリリース)

宇宙でも同位体を使って化学反応を追跡

山本 智 (物理学専攻 教授), 坂井 南美 (物理学専攻 博士課程 2年)

星と星との間にはガスと塵からなる希薄な雲(星間分子雲)が存在している。星間分子雲は温度が 10 K、水素分子密度が 10^4 cm^{-3} と、低温低密度の極限的環境にある。そこでの化学反応の理解は、星形成に伴う物質進化の理解において重要なばかりか、分子科学の観点からも注目されている。星間分子雲に存在するさまざまな分子の中で、もっとも特徴的なものは炭素鎖分子(HC_nN , C_nH , C_nH_2 , C_nS など)である。本研究でとりあげる CCS もその仲間、星間分子雲の化学進化を反映する分子として、星形成の研究でよく用いられている。炭素鎖分子は一般に化学反応性が高く、地上には自然に存在しない。そのため、炭素鎖分子の生成過程の理解は、星間化学の重要課題となっている。CCS についてもアセチレンを経由する反応、CCH を経由する反応、CH と CS の反応などが提案されてきたが、それらの当否および相対的重要性はわかっていなかった。本研究では CCS の ^{13}C 同位体種の観測を行って、CCS の生成過程を明らかにすることに成功した。

星間分子雲には炭素同位体 (^{13}C) が 1/60 ほどの割合で含まれている(地上では 1/89)。私たちは国立天文台の 45 m 電波望遠鏡と米国国立電波天文台の 100 m 電波望遠鏡を用いて、 ^{13}CCS と C^{13}CS の回転スペクトル線を高感度観測した。その結果、両者の強度が大きく異なることを発見した(図)。存在量比 $[\text{C}^{13}\text{CS}] / [\text{CCS}]$ は、星間空間の同位体比 (1/60)

とほぼ同じであったが、 $[\text{C}^{13}\text{CCS}] / [\text{CCS}]$ は 1/230 であり、 $[\text{C}^{13}\text{CS}] / [\text{CCS}]$ の 1/4 にすぎないことがわかった。

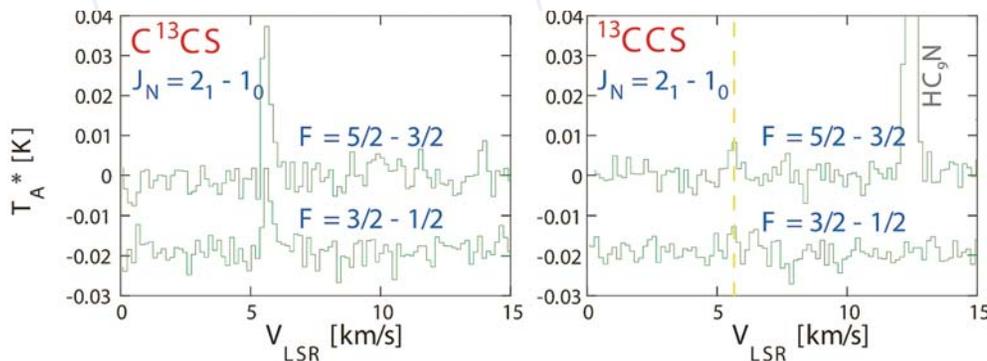
この結果から 2 つの重要な結論が得られる。第 1 は、 C^{13}CS と ^{13}CCS の存在量が違うことから、2 つの炭素原子は生成時に非等価であったということである。したがって、これまで最有力とされてきたアセチレン経由ルートは、2 つの炭素原子が等価なのでただちに除外される。また、CCH の ^{13}C 同位体比と比べることによって、CCH を経由する反応も除外された。その結果、CCS の生成には CS と CH の反応がもっとも寄与していることがはじめて明らかになった。

第 2 の重要な結論は、 $[\text{C}^{13}\text{CCS}] / [\text{CCS}]$ 比が通常の同位体比よりも小さいことである。CCS の主要生成ルートが CS と CH の反応であることを考えると、この事実は $[\text{C}^{13}\text{CH}] / [\text{CH}]$ が小さいことに対応する。一般に、重い同位体は分子に濃縮される傾向にあるので、この結果は異常といえる。その原因としては、星間紫外線による光解離によって ^{13}CH が

選択的に解離されている可能性が考えられる。CH は CCS 以外にもさまざまな星間分子(たとえば CCCS)の生成において重要な役割を果たしている。したがって、CH の同位体比の異常は他の分子にも転移していると考えられ、その追跡を通して星間分子の生成過程を詳しく調べることができよう。

以上述べたように、 ^{13}C 同位体種の観測によって、星間分子雲での化学反応を追跡できることがわかった。通常、 ^{13}C 同位体種のスペクトル線はひじょうに弱いため、短時間の観測ではその検出自体すら難しい。しかし、今回のように高感度の望遠鏡で長時間の観測を行えば、弱いスペクトル線でも精度良く観測でき、分子の生成過程をつぶさに調べることができる。今後、観測装置の一層の高感度化により、この手法は宇宙の化学の理解に広く用いられるようになるであろう。なお、この成果は N. Sakai *et al.*, *The Astrophysical Journal*, **663**, 1174-1179, 2007 に掲載された。

(2007年9月4日プレスリリース)



米国国立電波天文台 100 m 望遠鏡によって TMC-1 で観測された C^{13}CS と ^{13}CCS のスペクトル。横軸は周波数を天体の運動のドップラーシフトで表している。2 本のスペクトルは ^{13}C 核の超微細構造

日本で初めての天然ダイヤモンド発見

鍵 裕之 (附属地殻化学実験施設 准教授)

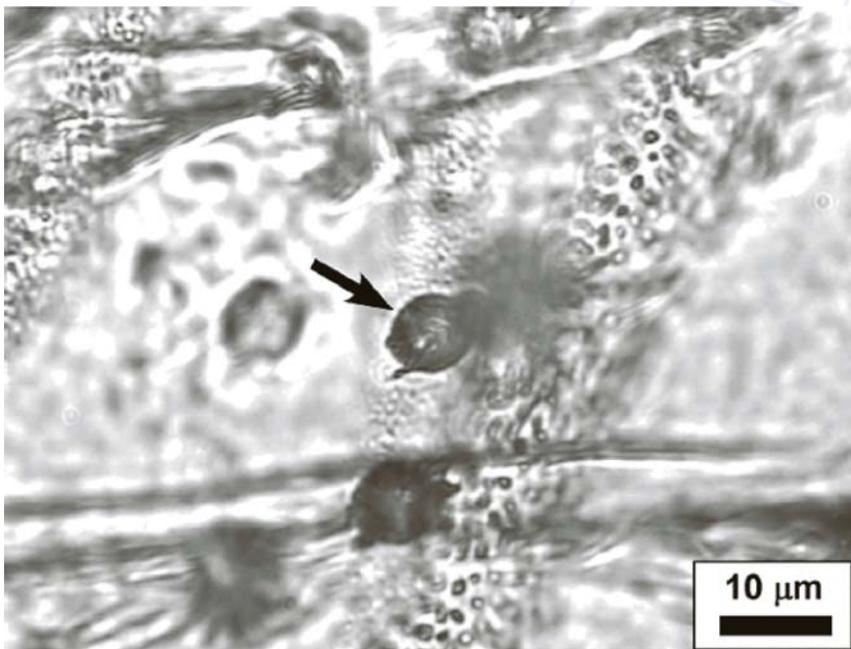
名古屋大学環境学研究科の水上知行博士、サイモン・ウォリス准教授 (Simon Wallis)、榎並正樹教授と著者からなる共同研究グループは、愛媛県の露頭岩石に含まれるマントル捕獲岩から、日本で初めて天然に産するダイヤモンドを発見した。

今回発見された結晶は1 mmの約1000分の1程度のたいへん小さなものであるが、これまでの地質学的な定説を覆す画期的なもので、ダイヤモンドの成因解明など今後のさらなる研究の必要性を示した。

2年前まで本研究科に博士研究員として所属していた水上知行博士 (現在、日本学術振興会特別研究員、名古屋大学大学院環境学研究科) は、愛媛県での露頭岩石に含まれるマントル捕獲岩の深さ起源を推定する目的で、二酸化炭素

流体包有物¹⁾の残留圧力を顕微ラマン分光法²⁾で測定していた。彼はその測定データから見慣れぬ信号を見だし、それがダイヤモンドによるものと気づいたが、その時の発見が彼から報告されることはなかった。もしもその発見が本当であれば、わが国の地質学研究の歴史を大きく書き変えることになるため、彼は慎重に実験データをあためることとなった。その後、水上氏は名古屋大学に移り、導入されたばかりの最新鋭の顕微ラマン分光装置で同じ試料を分析したところ、やはりダイヤモンドの結晶の振動に相当する振動数に信号が現れた。薄片試料を3次元的にスキャンしながら詳細にスペクトルを測定したところ、ダイヤモンドと思われる粒子の大きさは1ミクロン程度で、二酸化炭素包有物の内部に取り込まれていることがわかった (図)。

一般にダイヤモンドは火山岩に伴って産出する。アフリカ南部やシベリア、北米などの代表的な産地はキンパーライトマグマに伴うものであり、10億年を超えるような古い大陸地塊に噴出する。大陸衝突によって形成されるような、超高压変成岩中にもダイヤモンドの産出の報告もある。今回のダイヤモンドは、火山岩に伴う形で見つかった。日本のような活動的で地質学的に若いプレート収束域では、比較的起源の浅い火山岩が卓越し、ダイヤモンドの産出には適していないと考えられてきたが、さまざまな方面から見直していく必要がある。この発見の重要性は、日本のようなプレート収束境界において100 km規模の地下から何らかの原因により、地表まで物質がもたらされる地質現象があるということを示したことにある。そのメカニズムの探求は今後の大きな学術的課題である。



日本で初めて発見されたダイヤモンドを含む鉱物薄片の写真。矢印が二酸化炭素包有物で、この中からダイヤモンドが検出された (名古屋大学水上知行博士提供)。

¹⁾ 流体包有物：

鉱物は成長場にあった二酸化炭素などの流体を取り込みながら成長することがしばしばあり、完全に鉱物の結晶の中に捕獲された流体を「流体包有物」とよぶ。今回のダイヤモンドは、輝石の中に取り込まれた主として二酸化炭素からなる流体包有物の壁に付着して存在している。

²⁾ 顕微ラマン分光法：

顕微ラマン分光法はレーザー光を分析対象に照射し、分子の振動とのエネルギーのやりとりによって変化した光の波長変化を読み取る手法である。レーザーの高い指向性を利用して、ミクロンスケールの領域から物質固有の情報を取り出すことができ、埋没した微小試料の同定や圧力などを決定するのに有用である。

冬の雷雲は天然の粒子加速器だった

榎戸 輝揚 (物理学専攻 博士課程1年), 牧島 一夫 (物理学専攻 教授)

ベンジャミン・フランクリン (Benjamin Franklin) が凧を用いて検証したように、雷は電気現象である。正負電荷の分離により、雲の内部や雲と地表のあいだに高い電圧が発生し、大気の絶縁破壊にいたる。雷雲内部での電場強度は、100 kV/mにもおよぶと考えられる。

1990年代の半ば、宇宙ガンマ線衛星により、時おり短時間のガンマ線のパルスが地球から来ており、それらは雷雲から数十 km の上空へ駆け昇る、スプライトとよばれる発光現象に付随する可能性が浮上した。日本海沿岸でも、冬の季節風が吹き「雪起こし」とよばれる雷が鳴ると、原子力発電所の放射線モニタが反応することが報告された。雷の強い電場では、荷電粒子が加速されているらしい。

そこで私たち、物理学専攻と理化学研究所・宇宙放射線研究室の混成チームは、宇宙での電場加速の手本にすべく、雷からの放射線を探索する二組の放射線検出器を製作した。東大の装置は、X線衛星「すざく」に載せた硬X線検出器にない、NaIシンチレータの側面と底面を別の結晶で覆い、上空からの信号を除き反同時計数で落とせるようにした。理研の装置は、土屋晴文協力研究員、加藤博専任技師らが製作し、等方的な感度をもつ球形のNaIシンチレータとCsIシンチレータを並べた。私たちは東京電力柏崎刈羽原子力発電所の協力をえて、2006年12月下旬、同発電所の構内に二組の検出器を設置して、データ取得を開始した。

2006～2007年の冬は記録的な暖冬だったが、2007年1月7日の未明から昼にかけては、二つ玉低気圧が合体して爆弾低気圧となり、強い冬型気圧配置と

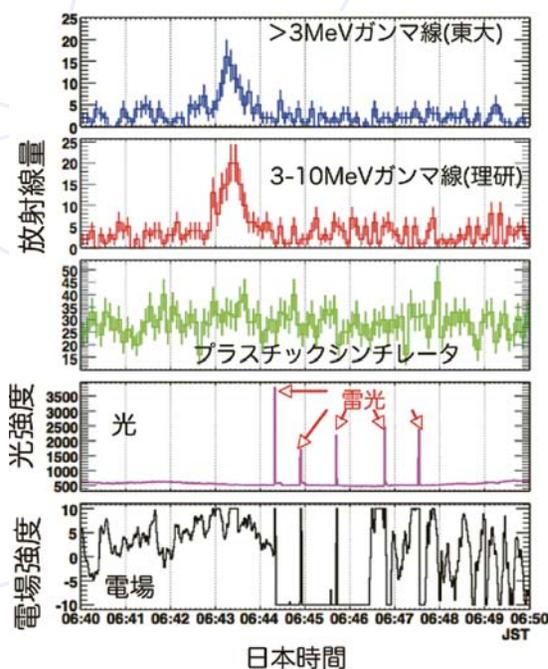
なった。図はこのとき私たちの装置が記録した放射線カウント数で、6時43分ごろ、東大と理研の合計4台の結晶シンチレータのどれにもほぼ同じ強度で、40秒間ほど明らかな放射線の増加が見られる。東大の信号は反同時計数をかけても残るので、この放射線は上空から来たことがわかる。併設したプラスチックシンチレータは反応していないので、この放射線は荷電粒子ではなく、ガンマ線である。さらに理研の装置により、このガンマ線の津波にはエネルギー10 MeVに達する高エネルギー光子まで含まれることも明らかになった。

興味深いのは、このとき雷放電は起きておらず、むしろガンマ線放射が終わって20秒ほど後に、東大の装置に組み込まれた光センサーが、続けて5発の雷光を捕えていることである。したがってガンマ線は、雷雲そのものの強い電場により、電子が準定常的に10 MeV以上にまで加速された結果と推論できる。電子は大気中では大気分子との頻繁なクーロン散乱のため簡単には加速できないが、散乱断面積は電子のエネルギーとともに減るので、いったん宇宙線の入射などでエネルギーの高い電子ができると、それらは「逃走電子」として加速される。電子は大気中を走るさいに、制動放射で前方に絞られたガンマ線を放射し、そのビームが私

たちの装置を照らしたのであろう。こうして雷雲が天然の加速器として働いていることが明らかになり、宇宙のさまざまな加速源への手掛かりが広がった。

柏崎刈羽原子力発電所は、7月16日の中越沖地震で甚大な被害を被った。私たちの装置は幸い、取り付け足が歪んだ程度ですんだが、被災された方々および発電所の皆様に、心よりお見舞いを申し上げます。本研究は、H. Tsuchiya, T. Enoto *et al.*, *Phys.Rev. Lett.*, **99**, 165002, 2007に掲載され、外国の科学雑誌などから問い合わせが相次いでいる。

(2007年10月5日プレスリリース)



2007年1月7日未明の10分間に記録された、ガンマ線の津波を含むデータ。上から、東大の検出器、理研の検出器、プラスチックシンチレータ、可視光センサー、電場センサーの出力を示す

連載 理学のキーワード 第10回



「サンゴ礁」

茅根 創 (地球惑星科学専攻 准教授)

サンゴ礁を作るサンゴは、宝石珊瑚とは異なるグループの動物で、石灰質骨格をつくり、体内に藻類を共生させるという特徴をもつ。石灰質骨格は積み重なって、サンゴ礁という地形を作る。共生藻の光合成産物は、サンゴを経由してサンゴ礁の生物たちにもたらされ、生物たちはサンゴ礁の複雑な地形を住処としている。その結果、サンゴ礁は海でもっとも生物種の多様性が高い生態系をつくっている。

現在、世界のサンゴ礁の3分の1は破壊され、3分の1は破壊の危機にある。破壊の原因は、おもに海岸開発などローカルな環境ストレスであるとされていた。しかし1998年に世界中のサンゴ礁で白化が起こり、地球温暖化もサンゴ礁の破壊の原因であることが明らかになった。

白化とは、ストレスを受けたサンゴが共生藻を体外に放出し、サンゴの体を通して石灰質骨格の白い色が透けてみえてしまう現象である。白化したサンゴは、やがて死んでしまう。1998年の白化は、高水温によって光合成回路が損傷した共生藻を、サンゴが体外に放出したことによって起こった。これまでに例のない規模の白化が起こった原因は、地球温暖化によって水温が底上げされたためである。

サンゴ礁はこのほかにも、海面上昇による水没、二酸化炭素濃度上昇・海洋酸性化による石灰化抑制など、地球温暖化のシナリオのそれぞれと関わっている。私たちの研究室では、石垣島やパラオ諸島などのフィールドをベースに、サンゴ礁と地球環境変動に関する研究を進めている。

水中で見るサンゴ礁は、本当に美しい。しかし、それが翌年にはすっかり死滅してしまっていることもある。石垣島では今年も大規模な白化が起こった。研究が、美しいサンゴ礁を将来の世代に残すことにもつながることを願っている。



白化したユビエダハマサンゴ(2007年8月、石垣島白保)



「花の進化」

平野 博之 (生物科学専攻 教授)

花は私たちの生活に潤いをもたらせてくれるものであるが、植物にとっては子孫を残すための生殖器官である。「花」というと花びらを連想する方も多いと思うが、一般的な植物では、ガク片、花弁(花びら)、雄しべ、雌しべからなる構造を指す。雄しべや雌しべの中で減数分裂が起き、配偶子が形成される。動物の精子と卵に対応するのは、花粉に形成される精核と胚珠内の胚のうに形成される卵細胞である。シダやコケ植物なども、次代に遺伝情報を伝えるために配偶子を形成する。しかし、花という生殖

器官を発達させたのは、裸子植物と被子植物に限られている。これらの植物では、配偶子同士が効率よく安全に出会い、確実に受精を行うために、花という特別な構造を進化させた。裸子植物では花弁がない地味な花であったが、被子植物の花は、花粉を媒介する昆虫とともに、まさに華々しく多様に進化してきている。

ところで、花は進化の過程で、新たに突然現れた器官ではない。実は、花の各器官は葉が変形したものである。専門外の方が意外に思うかもしれないこの考え方を最初に提唱したのは、「意外にも」、詩人であり文学者でもあるゲーテである。自然科学にも造詣の深かったゲーテは、1790年「植物変態論」という書を著し、この考えを展開している。その後、植物学として花の形態進化の研究が進んできたが、その根底にはゲーテの思想が流れている。

1990年代に入り、植物の分野でも、遺伝子の働きから形づくりを解明する分

子発生遺伝学が発展してきた。その中で、花の発生を説明するモデル(ABCモデル)が遺伝学的に提案され、引き続く分子生物学的研究により確証されてきた。このモデルは、A,B,Cの3つのクラスに分類される遺伝子の組み合わせにより、ガク片、花弁、雄しべ、雌しべ(正確には心皮)が決定されるというものであり、簡潔で美しいモデルとして、植物発生学の中でも際だっている。さて、このABCの3つの遺伝子を同時に機能喪失させると、すべての花器官がほぼ葉のような器官に変化した。これら3種の遺伝子がなければ、花は葉へと先祖返りしてしまうのである。ゲーテからほぼ200年後、彼の提唱した考え方が、現代生物科学の言葉によって証明されたことになる。

本研究科では、生物科学専攻の邑田研究室(植物園)や筆者の研究室などで、形態や遺伝子機能など多様な観点から、花の進化の研究が行われている。



私たちが研究対象としているイネの花。りんび(矢尻)は、花弁が変形した器官。



「人名反応」

山野井 慶徳（化学専攻 助教）

ここ数年「ネーミングライツ」がビジネスとして流行しており、ヤフードーム、スカイマークスタジアム、C.C.Lemon ホールなど既存の球場や施設が次々に企業名などを冠した名称に名を変えている。科学の世界でも新しい元素・生物・天体などに対して発見者が命名する権利を得る習慣があり、この場合は人名にちなんで命名することが多い。

ここで説明する人名反応とは、「グリニャール反応」「ウィテヒ反応」などのように発見者の名前がつけられた有機合成反応を指し、広義には「アルドール反応」などのように反応物あるいは生成物を示唆する化合物群の名称を使って呼び表される古くから知られている反応も

含める。名前がつけられているほどの反応であるから合成反応として重要なものが多く、合成に携わる者はしっかりと学習しておくことが必要とされている。

現在では、化学系の大学院生が使用する教科書に 100～200 程度の反応が代表的なものとして紹介されている。有機化合物の数は 2000 万以上あると言われており、これらの合成法もまた無数に存在する。したがって新しい合成反応は最先端の国際誌に数多く報告されているが、これらが新しく人名反応として取り上げられるかどうかのポイントとして、①反応の信頼性の高さ、②応用性の広さ、③多くの合成化学者に利用されるなどが挙げられる。このような反応はそれまでになかった革新的な概念を

創出しており、合成法ばかりでなく反応メカニズムや遷移状態の構造という観点から多くの研究者に注目される。そして最初に報告した人に対する敬意を表し、次第に人名反応として定着していく。その中には「鈴木-宮浦反応」「光延反応」など多くの日本人の名前が見受けられ、この分野における日本人の貢献度の高さが窺われる。

理学系研究科化学専攻の無機化学研究室では、特殊な遷移金属触媒を設計・開発し、さまざまな分子変換反応の開発研究を行っている。そのなかには従来の手法ではほとんど生成しないとされてきた化合物が高収率で合成できるなど有用な反応も見い出されており、新しい機能材料や医薬品合成への利用を試みている。



「4次元を超える世界」

向山 信治（附属ビッグバン宇宙国際研究センター 助教）

私たちの宇宙は、縦・横・高さを表す 3次元空間に時間を合わせた、4次元世界であるとされる。しかし、これは不可侵な原理ではない。単に、私たちの感覚やさまざまな観測・実験のおよぶ範囲では、4次元と仮定してもまったく矛盾がないといっているに過ぎない。アインシュタインの相対性理論は時間と空間の概念を4次元時空として融合するが、“どうして私たちは4次元世界に住んでいるのか？”という疑問には答えてくれない。相対性理論は、4次元でも5次元でも、あるいはそれ以上の次元でも、理論としてはまったく問題なく機能するからだ。しかし、だからといって4次元を超える世界、すなわち空間と時間の次元が合わせて5以上の世界に私たちが住むことは可能なのだろうか？

そもそも、5番目や6番目、あるいはさらなる次元があったとしたら、それはどこにあるのか？驚くかもしれないが、答えは“どこにでも存在する”である。これを、簡単な例を使って説明しよう。

電線の表面は2次元である。つまり、長さの方向と、断面の周の方向がある。十分近くから見ればそれがわかるのだが、遠くから眺めたらどうだろう。周の方向は認識できなくなり、長さの方向だけが残って1次元の線として見えるはずだ。これと同じことが、私たちの世界にも起こっているかもしれない。つまり、5番目以降の次元があっても、小さく巻き上げられていけば低エネルギーでは感知できないのである。この場合、電線の断面の周の方向が表面上のどこにでも存在するように、5番目以降の次元も、私たちの世界のどこにでも存在することになる。どこにでもあるのに小さくて見えない余分な次元、これは80年以上も前にカルツァ (T.Kaluza) とクライン (O.Klein) によって考案され、そして現在では超弦理論 (理学部ニュース 2007年7月号 P.13「理学のキーワード」記事参照) に継承されている。

7月下旬のリサ・ランドール博士 (Lisa Randall) による講演 (理学部ニュース

2007年9月号 P.3「トピックス」記事参照) で知った読者も少なくないと思われるが、最近では、上述の考えのほかにブレンワールドとよばれる考えが活発に研究されている。まるで窓ガラスについた水滴やホワイトボードについたマグネットのように、私たちがブレンとよばれる膜のようなものにはりついて離れられないとする考えである。ブレンの外が4次元を超える世界であっても、ブレンが空間的に3つの方向にしか広がっていないのなら、ブレン上にはりついた私たちには4次元世界しか分からない。もしもこの考えが本当なら、近い将来、巨大加速器実験によって4次元を超える世界が検証される可能性があるといわれており、理論と実験の両方の進展が気になる分野である。

4次元を超える高次元理論の研究や、それにもとづく宇宙論の研究は、物理学専攻の宇宙理論研究室・素粒子論研究室、ビッグバン宇宙国際研究センターなどで活発に行われている。

「ペタコンピューティング」

平木 敬 (情報理工学系研究科コンピュータ科学専攻 教授)

コンピュータは、その最初期の段階から理学研究と深く関係して開発が行われてきた。1960年代に開発された最初のスーパーコンピュータは、1 Mflopsの演算速度をもち、以後今日まで、指数関数的な性能向上を実現してきた(図1)。現在、最速のスーパーコンピュータは長年の夢である1ペタフロップス(1秒間に1000兆回の計算)に達しつつあり、数年後に10ペタフロップス(1秒間に1京回の計算)を実現するプロジェクトが、日本や米国で実施中である。したがって、計算速度は過去45年で10億倍に高速化している。

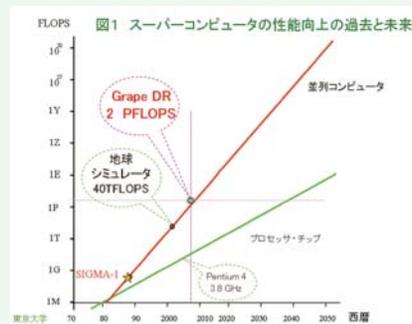
それでは、ペタフロップスを実現することの理学研究への意義は何であろうか? 計算が高速になることで、従来から用いられてきたさまざまなシミュレーションの対象規模が拡大し、精度は向上する。問題の種類にもよるが、計算速度が1000倍速くなることにより、5倍から10倍の規模の問題がシミュレーション可能となる。しかしながら、ペタフロップスレベルの性能の実現は、理学研究により多くのインパクトをもたらす。ゲノム情報に代表

される生物情報の処理、科学文献情報の抽出など離散的問題、離散系と連続系が複合している問題は、問題サイズの拡大に対して、さらに高次の計算力を要求し、ペタフロップスレベル(実際にはペタ命令/秒)の性能で初めて現実的な問題に取り組むことができると言って過言ではない。

また、ペタフロップスを1システムで実現する技術は、さまざまな副次的効果があり、多くの貧乏な理学研究者にも大きな福音となる。すなわち、実現可能な規模、消費電力、コストでペタフロップスレベルのシステムができることは、個人や研究室で持てる情報システムが著しく拡大することを意味する。2011年には10ペタフロップスのスーパーコンピュータが200億円、10 MWでできる予定であるが、換算すると、1 Tflopsが200万円、1000 Wである。問題の性質が計算量的に高次であるならば、このようなシステムで、かなりの研究目的を達成することが可能である。

私たちは、国立天文台の牧野淳一郎氏(プロジェクト発足時は理学系研究科天文学

専攻所属)、情報理工学系研究科の稲葉真理氏らとともに、極超高速・低消費電力・低コストのスーパーコンピュータ、GRAPE-DRシステムを構築中である。GRAPE-DRは、512個の要素プロセッサを1個のチップに集積した512ギガフロップス(1秒間に5120億回演算)のチップを開発し、全体で1ペタフロップスを超えるシステムの構築を目指している。GRAPE-DRチップを汎用のサーバとともに用いることにより、1 Tflopsあたり100万円、1000 Wのシステムが実現すると予測している。これらのシステムを使って、新しい科学をつくりだすことが、今後の課題である。



スーパーコンピュータの性能向上の過去と未来

「ベクトル束」

古田 幹雄 (数理科学研究科 教授)

線形代数とは、非線形な諸現象をまず一次近似したとき、その近似の振る舞いを解析するツールである。しかし、私たちが本当に知りたいのは、非線形の諸現象である。その非摂動的な、トポロジカルな、大域的な性質を調べる数学的ツールとして「ベクトル束」がある。

ベクトル束とは、線形性と非線形性の狭間に位置する幾何学的対象である。大域的な振れを担えるほどの非線形性を持ち、しかも線形性に由来して、具体的な計算から把握可能な扱いやすさをもつ。定義はやさしい。ベクトル束の例として「接束」と「法束」は基本的である。曲面上に描かれた曲線を考えよう。曲線の各点には「接線」と「法線」とが付随しており、各々一次元のベクトル空間である。

曲線上の点を動かすと、それらは連続的に動く。しかしその動き方は、もはや線形ではない。接線を束ねて、全体をひとつのものと見るとき、これを「接束」とよぶ。同様に法線を束ねたものが「法束」である。一般に、ベクトル空間を束ねた全体が、ベクトル束に他ならない。クラインの壺の中に曲線を描く。ある描き方をすると、曲線の法束は「メビウスの帯」の形状になる。メビウスの帯の振れは、クラインの壺の中に描かれた曲線の振れを反映している。曲線の振れ方を直接とらえるのは難しいが、まず、法束という線形代数を使える対象の振れ方を考えるのである。

ベクトル束に対して積分と似た操作が定義され「指数」とよばれる。積分が関数から数を得る操作であるのに対して、

ここで使われるのはベクトル束からベクトル空間を得る操作である。そのベクトル空間は「ベクトル束に付随した線形偏微分方程式の解空間」を用いて定義される。たとえば素粒子物理において、右手系と左手系の非対称性が知られているが、これはある種のベクトル束の指数の非自明性と関連する。筆者は、無限次元の空間の上で、ベクトル束の指数を考察すると、普通の積分だけでは届かない深い情報が得られる例を見出した。とくに、思いがけないことに、ある種の4次元空間が、数学的に存在しえないことがわかった。その空間上でディラック方程式を考察すると、解の次元が大きすぎて、別の知見と矛盾するのである。最近では、この方法の射程がいかほどであるかを探っている。

附属施設探訪 本郷編

第4回

東京大学大学院理学系研究科附属

超高速強光子場科学研究センター

センター長 山内 薫 (化学専攻 教授)

はじめに - 強光子場科学とは

近年の、超短パルスレーザー技術の発展は、光の電場を極端に高くすることを可能にしたため、光科学に新たな展開を促しました。光の電場強度が原子内や分子内のクーロン電場の強度と匹敵する程に大きくなると、光によって原子・分子内の電子がゆすられることとなります。このとき、もともとの原子・分子とは性質の異なる「物質と光が混ざった状態」が生成します。この新しい状態を研究すること、そして、この状態を利用してさまざまな現象を起こさせそれを利用することが、強光子場科学という学際的な研究分野です。物質と光が混ざった状態は、弱い光では決して実現することができなかったものです。強光子場科学は、この光の役割に関するパラダイムシフトとともに生まれたものなのです。

超高速強光子場科学研究センターは、この学際的な研究分野である「強光子場科学」のフロンティアを国際的な連携のもとに開拓するとともに、国際的な研究交流ネットワークの拠点として研究者交流を促進し、国際的に活躍することのできる若手人材の育成を目指して、2005年2月に理学部の附属施設として設立されました。

強光子場で何が起こるか？

強光子場科学の分野における研究対象についての概観を本号の表紙に示してあります。その図において、 1 PW/cm^2 ($1 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$) の強度を中心として、

その上下の3桁程度の間はクーロン領域とよばれています。この領域では、レーザー電場の大きさが、分子内のクーロン電場の大きさと、同程度となるため、分子がさまざまな特異なダイナミクスを示すことが明らかとなっています。たとえば、比較的レーザー電場の低い領域 ($1 \text{ TW/cm}^2 = 1 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$) において、分子はレーザー電場の方向に向きを揃える配向や配列という現象を起こします。そして、レーザー電場が大きくなり 1 PW/cm^2 に近づくと分子の構造が大きく変形するようになります。さらに、光電場によるトンネルイオン化現象が進み、分子は多価イオンとなり、クーロン爆発とよばれる現象によってフラグメントイオンに分解します。このような現象は、光が存在している間に「光が存在しないときは全く異なった性質をもつ状態」が形成されるために起こります。

最近発見された顕著な現象として、炭化水素系の分子における超高速水素マイグレーションを挙げることができます。たとえば、図1は、メタノールについて、その様子を模式的に示したものです。実験結果から、強いレーザー場が存在する

60フェムト秒よりも短い時間内に、水素原子が分子内を駆け巡ることが明らかとなりました。平均の速度に直すと、水素(またはプロトン)の移動速度は、光の存在下で、光速の0.1%に達する程速いのです。

もうひとつの研究の例をご紹介しますと思います。フェムト秒化学という言葉をお聞きになった方は多いと思いますが、このフェムト秒というのは、 10^{-15} 秒のことです。たとえば、分子の振動運動の周期が100フェムト秒程度です。これまでは、 $10 \sim 1000$ フェムト秒のレーザーパルスを用いたポンプ-プローブ法で、時間領域で起こる動的な現象が追跡されてきました。しかし、超高速水素マイグレーションのプロセスや、原子・分子内の電子の分布の変化などを実時間で追跡しようと思うと、パルス幅をアト秒領域にまで短くする必要があります。アト秒とは、 10^{-18} 秒のことです。

実は、アト秒領域のパルスをつくるには、強光子場が必要になります。レーザー電場がきわめて大きいと、原子の中の電子は、トンネルイオン化によって原子領域から離れて行きます。そして、レーザー電場

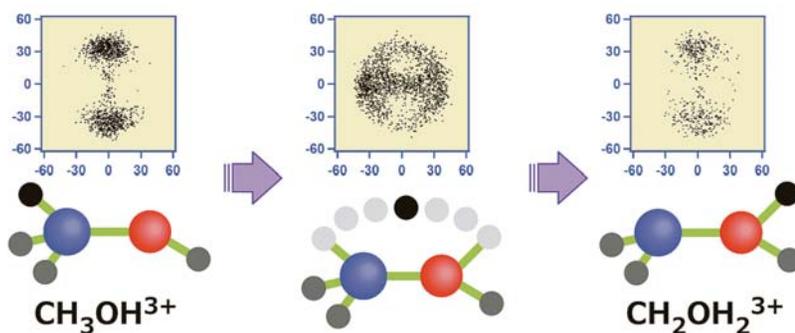


図1: メタノール分子内で進行する超高速水素マイグレーション過程。コインシデンス運動量画像計測から、60 fs以下のきわめて短い時間に水素が分子内を駆け巡ることが明らかとなった

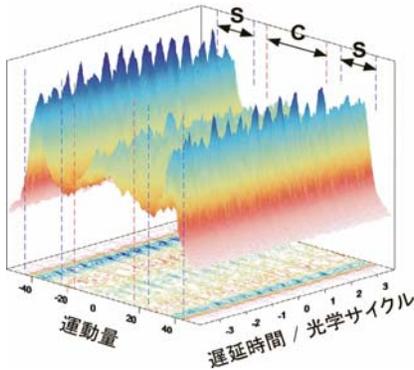


図2：窒素分子のイオン化を用いたアト秒パルス列の自己相関関数の観測 (理化学研究所緑川研究室との共同研究)

の向きが逆向きになると、離れていった電子が、逆に、原子イオンに向かって加速されて原子イオンによって散乱されます。これを電子の再散乱と呼びます。この再散乱のさいに、アト秒領域のパルスのバーストが生まれるのです。図2は、そのようにして発生した320アト秒のパルスの列を、 N_2 分子のイオン化を利用して観測したものです。

強光子場科学分野の研究交流

わが国においては、科学研究費補助金特定領域研究「強レーザー光子場における分子制御」(2002年10月～2006年3月)による支援を受けて、強光子場科学に関する研究が、物理学、化学、レーザー工学の分野の研究者の学際的な協力と連携によって、活発に、かつ組織的に行われてきました。そして、2004年度に発足した、日本学術振興会の「先端研究拠点事業」(多国間の研究交流事業)のプログラムのひとつとして、「超高速強光子場科学」が採択されると、日本における強光子場科学分野の学際ネットワークが、国際的なネットワークとして広がることになりました。

このプロジェクトでは、東京大学大学院理学系研究科を日本国内の拠点として、先進諸外国の協力のもとに、「強光子場科学」およびその関連分野における学術交流ならびに学際連携体制を構築するこ



図3：ハワイ島で開催されたISUILS4(ポスターと集合写真)

とを目指しています。そして、日本をはじめとして、カナダ、フランス、ドイツ、イタリア、英国、米国の先進7カ国の、総勢60を越える研究グループが学術交流を展開してきました。本センターは、この先端研究拠点事業「超高速強光子場科学」と連携するとともに、若手研究者の国際交流を奨励し、先端的な光科学研究分野の次世代を担う国際性豊かな研究者を育成することを目標としています。

本センターでは、この先端拠点事業と連携する形で、国際シンポジウム International Symposium on Ultrafast Intense Laser Science (ISUILS) <http://www.isuils.jp> を支援して来ました。この ISUILS 国際会議は、毎年、おもに海外にて開催されており、本センターが設立されてからは、ハワイ島 (ISUILS4) (図3)、麗江 (ISUILS5, 裏表紙) (図4)、ピサ

(ISUILS6, 裏表紙)で開催され、活発な国際研究交流の場と成りました。また、国際的な環境のもとでの若手研究者の育成を目指して、日本国内で短期のシンポジウムや、スクールを開催しています。

さらに、本事業と連携する形で、「超高速強光子場科学」に関する英文総説誌の刊行が開始されたことも特筆すべき成果です。これは、Progress in Ultrafast Intense Laser Science のシリーズとして、ドイツの Springer 社より出版が始められたもので、第1巻が2006年9月に、そして、第2巻が2007年3月に刊行されました(図5)。本先端拠点事業の支援を受けて開催された国際会議や国際研究交流に基づく成果が、具体的な形となって世界に発信されることになったのです。第3巻については本年12月に刊行予定であり、現在、第4巻の編集が進められています。



図4：麗江(中国)にて開催されたISUILS5の講演会場

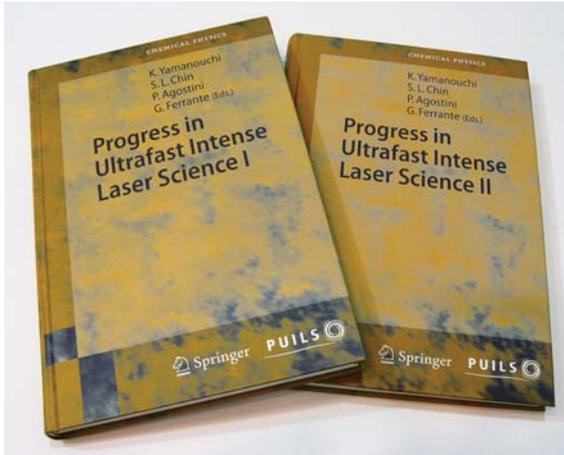


図5：Springer社からの刊行が始まったProgress in Ultrafast Intense Laser Science

CORAL への発展

このような本センターを中心とする学際的な研究分野の活動は、物理学、化学、工学にまたがる研究者の研究交流を格段に促進することになりました。その結果、次世代の光科学研究を支え、国際的に活躍できる若手研究者の育成を目指して、文部科学省特別教育研究経費(教育改革)事業として、先端レーザー科学教育研究コンソーシアム(Consortium on Education and Research on Advanced Laser Science; CORAL)が、2007年4月に発足いたしました。

これは、光科学分野の大学における人材教育を目的とした、東京大学を中核機関とする大学院教育プログラムです。本「超高速強光子場科学研究センター」は、このコンソーシアムの中心となり、本学大学院工学系研究科附属「量子相エレクトロニクス研究センター」、「総合研究機構レーザーアライアンス」と連携し、コンソーシアムの事業を推進することになりました。

このコンソーシアムでは、若手人材が、現在の先端光科学の最前線において必要な知識と技術を系統的に学ぶことができる教育プログラムの構築が最重要課題であり、従来分散して行われてきた学部および大学院教育のカリキュラムをフロンティア研究と密接に連携させつつ、系統

的に再構築をすることを目標としています。

この事業の特徴は、東京大学における理工連携教育事業であるということのほかに、光科学教育に実績のある電気通信大学と、慶應義塾大学理工学研究科が参加する「大学間連携事業」であるという点にあります。

2008年4月からは、東京大学と電気通信大学、

慶應義塾大学との間で、単位互換制度のもと、教員・大学院生が本プログラムを通じて交流することになっています。

そして、もうひとつの特徴は、「産学官連携教育事業」であるという点です。応用力・開発力のある人材を育成するために光科学分野で世界をリードする先端企業各社(2007年6月現在で11社)に参加いただき、企業にて最先端で活躍する研究者に、大学院講義、大学院学生の実験・実習の指導をお願いしています。本年10月にはじまったCORALパイロットプログラムでは、キヤノン株式会社、浜松ホトニクス株式会社、三菱電機

株式会社、アイシン精機株式会社、株式会社ニコン、シグマ光機株式会社、株式会社ブイ・テクノロジー、株式会社リコー、横河電機株式会社、富士フイルム株式会社の研究者・技術者が参加しています。すでに、10月よりパイロットプログラムとして、講義、実験実習の講義が進められています。実験室での実験実習の様子を図6に紹介します。

これから

CORAL事業では、国際的な視野をもち、近い将来、大学・企業などの研究において世界をリードすることのできる若手人材の育成を目指しています。そのため、国際スクール、国際学会などを通じて、国内外の大学院学生や若手研究者の交流を促進する予定です。

本センターでは、このCORAL事業と先端研究拠点事業「超高速強光子場科学」を連携させ、国際的な人材育成に資するように努力しています。来年(2008年)1月には、このCORAL事業と、先端研究拠点事業が共催する形で、Winter Schoolが開催されます。



図6：CORAL先端光科学実験実習の一コマ(先端企業の研究者・技術者が実験実習を指導)

「理学部サイエンスカフェ 2007 @駒場」の開催

教務委員長 岡 良隆 (生物科学専攻 教授)

理学部では従来、高校生を対象としたサイエンスカフェ本郷を実施しておりますが(この下の記事を参照)、さらに新しい試みとして、駒場の教養学部1・2年生を対象としたサイエンスカフェを、

以下の予定で実施いたします。これは、理学部で行っている研究の魅力に触れてもらうとともに、専門学部や大学院への進学にさいして教養学部生が疑問に思っていることを、理学部の学部生

・大学院生・教員に対して、リラックスした雰囲気の少人数のテーブルで、お茶を飲みながら気楽に質問してもらうのをおもな目的として初めて開催するものです。

日時: 12月14日(金) 午後4:00~8:00

午後6:00~6:30「理学の魅力語る」講演(岩澤康裕教授・前理学部長)

場所: 駒場コミュニケーション・プラザ南館2階 Dining 銀杏

「高校生のためのサイエンスカフェ本郷」も Science Cafe Hongo 第3回を開催

サイエンスカフェ実行委員長 小形 正男 (物理学専攻 准教授)

来る2007年12月22日(土)午後1時から、理学部1号館小柴ホールにおいて理学の魅力伝える「高校生のためのサイエンスカフェ本郷」の第3回を開催いたします。これは、去る6月17日(日)に開催した第2回に引き続くもので、そのときは女子高校生を対象としましたが、今回は男女を問いません。この催しは、高校生に集まっていたいただき、理学系研究科において活躍する大学院生と、気軽な雰囲気の中で最先端の科学

のことを語り合い、またそれと合わせて、理学系のキャリアパスや大学生活、研究生活についても語り合っていたらこうという趣旨のものです。高校生の皆さんに科学の現場をより身近に感じていただければと考えています。

今回は「砂がつくる豊かな世界ー粒の「大きさ」からわかる身近な科学ー」と題して、物理学専攻の博士課程3年の辰巳創一さんに講演してもらいます。高校で習う物理学とは少し違った観点から、

身の回りの世界での科学の面白さが伝わることと思います。また途中で、いくつかの研究室見学も予定しています。多くの方に来ていただけるよう、ぜひ、周囲の高校生に声をかけていただければと思います。

なおこのサイエンスカフェ本郷は事前申し込み制です。定員は50名で、参加費は無料です。詳しくはホームページ(<http://www.s.u-tokyo.ac.jp/cafe3/>)をご覧ください。

東京大学大学院理学系研究科・博士学位取得者一覧

(2007年9月)

(※)は原著が英文(和訳した題名を掲載)

種別	専攻	申請者名	論文題目
2007年9月21日付学位授与者 (3名)			
課程博士	地惑	西野 真木	地球磁気圏近尾部の冷たいプラズマシートの性質(※)
課程博士	生化	西 賢二	新規エンドサイトーシス経路によるヘルペスシンプレックスウイルス VP22-PTD の細胞内取り込み
課程博士	生科	西澤 大輔	薬物感受性個人差に対するオピオイド関連遺伝子多型の寄与(※)
2007年9月28日付学位授与者 (7名)			
課程博士	物理	茂地 圭一	可解頂点模型と組み合わせ論的数えあげ(※)
課程博士	物理	鈴木 仁研	遠赤外線光伝導型検出器における放射線影響の研究と「あかり」による近傍銀河観測への応用(※)
課程博士	天文	富永 望	重力崩壊型超新星の輻射輸送, 流体力学, 元素合成(※)
課程博士	地惑	飯田 晃子	斑晶ガラス包有物研究による富士火山のマグマ供給系(※)
課程博士	地惑	向井真木子	人為起源気候変動要因が東アジア域の放射場と雲場に及ぼす影響に関する研究
課程博士	地惑	室谷 智子	地震波形と水準測量データから見た1946年南海地震の震源過程(※)
課程博士	地惑	Iskhaq Iskandar	インド洋熱帯域南東部における季節内変動(※)

人事異動報告

所属	職名	氏名	異動年月日	異動事項	備考
物理	教授	常行 真司	2007.8.16	昇任	准教授から
化学	助教	高屋 智久	2007.8.16	採用	
物理	助教	Damian Markham	2007.8.31	辞職	
化学	助教	寶角 敏也	2007.8.31	辞職	
地惑	教授	平原 聖文	2007.9.1	採用	立教大学理学部准教授から
生化	教授	飯野 雄一	2007.9.1	採用	遺伝子実験施設准教授から
生化	特任助教 (COE 特任教員)	芹澤 尚	2007.9.1	採用	学術研究支援員から
化学	教授	小澤 岳昌	2007.10.1	採用	自然科学研究機構分子科学研究所准教授から
化学	助教	菅野 憲	2007.10.1	採用	
生化	特任助教 (COE 特任教員)	富岡 征大	2007.10.1	採用	学術研究支援員から
生化	特任助教 (COE 特任教員)	藤井 佳史	2007.10.1	採用	特任助教 (特定プロジェクト特任教員) から

あ と が き

理学部ニュースもフルカラー化して3年目になり、初年度の「本郷以外にある理学系キャンパス探訪」、2年目の「専攻探訪」、そして今年度の「本郷にある附属施設探訪」を経て、ほぼ理学系の全体をひと巡りします。2008年度からは、また新たなシリーズものを開始する予定ですので、良い案がありましたら、ぜひ編集委員会までお寄せください。

「理学のキーワード」も、本号で第11回を迎えました。あと1年ほど蓄積した上で、これらのキーワードは株式会社化学同人から単行本として出版される予定です。ご期待ください。理学部の広報体制は、横山広美先生、竹村三和子さん、山本摩利子さんの3人の活躍で、一段とレベルアップして

来ました。ニュースの編集もそれに負けず、努力したいと思えます。

お蔭さまで外部の読者の方々の中には、この「理学部ニュース」を詳しく読んで下さっている方も少なくないようですが、つねに気になるのは、「理学系の教職員や学生院生の皆さんは、どこまで読んでくれているだろうか」という点です。どうも、あまり読んでいただけていないのでは…。この「あとかき」まで読んでくださった方、ありがとうございます。ぜひお近くの皆さんに、理学部ニュースをちゃんと読むよう勧めてください。近いうちに、理学系内で購読モニターを募集しようかなどと考える日々です。

牧島 一夫 (物理学専攻 教授)

第39巻4号

発行日：2007年11月20日

発行：東京大学大学院理学系研究科・理学部

〒113-0033 東京都文京区本郷7-3-1

編集：理学系研究科広報委員会所属 広報誌編集委員会 (e-mail: kouhou@adm.s.u-tokyo.ac.jp)

牧島 一夫 (物理学専攻) maxima@phys.s.u-tokyo.ac.jp

横山 央明 (地球惑星科学専攻) yokoyama.t@eps.s.u-tokyo.ac.jp

上田 貴志 (生物科学専攻) tueda@biol.s.u-tokyo.ac.jp

米澤 徹 (化学専攻) tetsu@chem.s.u-tokyo.ac.jp

渡辺 正昭 (庶務係) mwatanabe@adm.s.u-tokyo.ac.jp

加藤 千恵 (庶務係) c-kato@adm.s.u-tokyo.ac.jp

広報室：

横山 広美 yokoyama@adm.s.u-tokyo.ac.jp

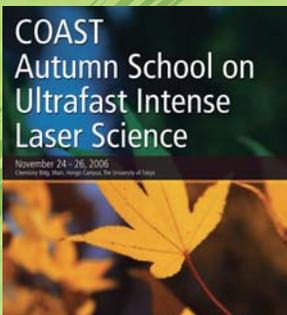
HP担当：

柴田 有 (ネットワーク) yuu@adm.s.u-tokyo.ac.jp

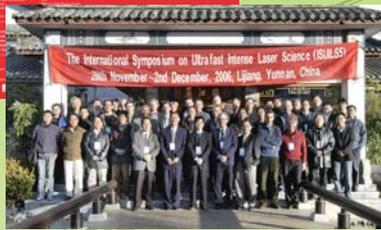
HP & ページデザイン：

大島 智 (ネットワーク) satoshi@adm.s.u-tokyo.ac.jp

印刷・・・三鈴印刷株式会社



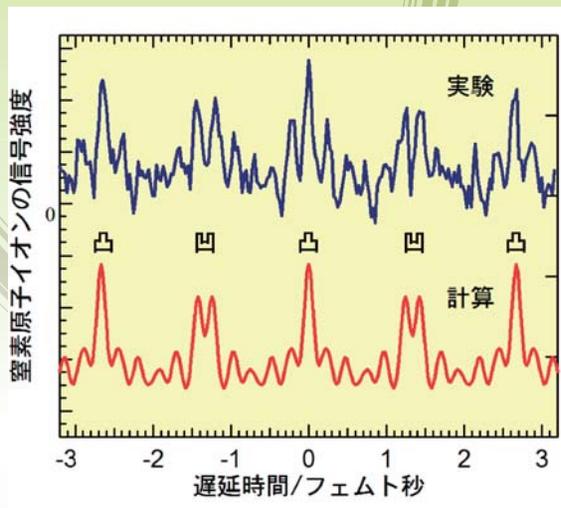
先端研究拠点事業・秋の学校
(本郷, 東大)



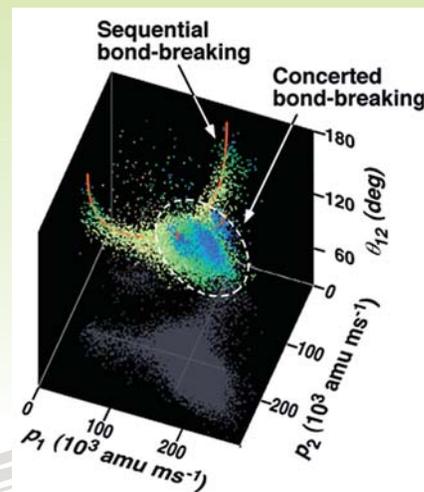
国際シンポジウム ISUILS5
(麗江, 中国)



国際シンポジウム ISUILS6
(ピザ, イタリア)



アト秒パルス列の計測
(パルス幅 320 as のパルス列)



強光子場中におけるCS₂の3体クーロン爆発過程
CS₂³⁺ → S⁺ + C⁺ + S⁺ の3次元運動量分布図

～附属施設探訪 本郷編 超高速強光子場科学研究センターより～