



短報

波動関数の形が見える！

固体物理学研究室から開かれる 超伝導研究の新展開

電気抵抗ゼロの夢の物質「超伝導体」。扱いやすい高温で実現すれば、多くの業界に革命的な影響を及ぼすと期待されている。一方で、それぞれの超伝導体の性質や、なぜ超伝導状態が存在し得るのか、というような基本的な問題もまだ完全には理解されておらず、謎が多く残っている。京都大学・固体物理学研究室は超伝導の起源と物性を調べるために、なんと物質の波動関数を「可視化」する装置を開発した。波動関数が決定できれば物質の物理量は全てわかってしまうが、この装置はいったい超伝導研究にどのようなインパクトを与えるのだろうか。装置を開発したCOEポスドク研究員の出口さんにお話を伺った。

写真1 固体物理学研究室が開発した新しい比熱装置と開発を主に担当したCOEポスドク研究員(4月採用)の出口和彦さん。

第3号の内容

1. 短報

波動関数の形が見える！
固体物理学研究室から
開かれる超伝導研究の新展開

2. 研究室紹介

化学物理・生命物理
研究室

■発行■
京都大学 21COE 物理学の
多様性と普遍性の探求拠
点編集委員会
〒606-8502 京都市左京
区北白川追分町 京都大
学大学院理学研究科 物
理学教室内
TEL: 075-753-3758
FAX: 075-753-3886
e-mail:
21COE@scphys.kyoto-
u.ac.jp

「超伝導状態で特徴的なのは、低温だとあらゆる電子の波動関数が重なり合いコヒーレントになって、結果的に物質の状態が1つの波動関数で書けてしまうことなんです。」常伝導状態の場合、系の状態を記述する波動関数は電子の数だけある。物質の状態を調べるためにそれら膨大な数の波動関数1つ1つを決定することは不可能だ。一方で、超伝導状態ならそれが可能になるというわけだ。超伝導状態と常伝導状態の間にはエネルギーギャップ(=超伝導ギャップ)が存在し、このギャップのために超伝導体は転移温度以下で安定に超伝導状態を保つことができる。この超伝導ギャップが波動関数の振幅に相当するので、ギャップの大きさの方向依存性から波動関数の形を知ることができる。出口さん達が開発した装置は様々な空間方向から超伝導ギャップを決定することができるため、非等方的な波動関数を3次元上に可視化することができる。従来型の超伝導ではそのような研究はされてこなかった。やる意味がなかったのだという。

超伝導現象とは、フェルミ粒子である電子2つが「クーパー対」と呼ばれるペアを作ってボーズ粒子のように振る舞い、ある温度以下でボーズ凝縮状態になったものと考えられる。この理論が提唱された1957年以降、クーパー対の波動関数は図1左に描かれているような、電子の合成スピンと軌道角運動量が共にゼロの最も単純な形が考えられていた。この場合、波動関数は等方的なので方向依存性を調べても仕方がない。なぜ超伝導状態が存在しうるのか、という問題を考えるとき、クーパー対を形成するために電子間に働く引力の正体を知ることが重要となる。従来型の超伝導では引力の起源は電子-格子相互作用を介した電子同士のフォノンの交換であると考えられている。

しかし、この状況は1980年代の高温超伝導の発見によって激変する。従来型の理論では説明できないような高い温度での超伝導体の登場に、各種産業界は常温超伝導物質の実現と応用へ期

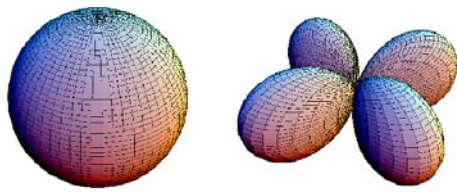


図1 (左) 等方的な波動関数。従来型のs波超伝導。(右) 非等方的な波動関数の一例、d波超伝導。固体物理学研究室提供。

待を膨らませた。高温超伝導体では非等方的な波動関数、つまり従来型と異なる引力起源をもっていることが示唆されている。図1右に描かれているのは、合成スピンはゼロ（スピン・シングレット）だが軌道角運動量をもった場合の波動関数の模式図である。少数ではあるが、合成スピンの1（スピン・トリプレット）の超伝導体も発見されており、その新しい物性に注目が集まっている。そのような新しいタイプの超伝導における電子間引力の起源としては電子のスピン揺らぎを媒介とした相互作用などが提案されている。最近では磁性・幾何学的フラストレーションとの関係が示唆されるような新超伝導体も発見され、超伝導の起源・メカニズムについてまだ統一的理解には至っていない。もし様々な個性をもつ超伝導体の波動関数を「見る」ことができるならば、そこから引力ポテンシャルが決まるので、超伝導の起源に実験から迫ることができる。超伝導の起源を理解することができれば、それを応用してより高い温度の超伝導体を産み出すことができるかもしれない。

ではどのようにして、波動関数を「見る」ことができるのだろうか。出口さん達が開発した装置では「磁場」を使う。クーパー対は磁場によって破壊され、常伝導電子になる。常伝導電子は物質の比熱に寄与する。ある特定の方向に波動関数が伸びていれば、その方向に超伝導ギャップは大きく開いている。超伝導ギャップの開いている方向と磁場の方向は破壊されるクーパー対の量を通して密接に関係しており、常伝導電子の量の磁場方向に対する依存性を調べることで超伝導ギャップの異方性を観測できる。出口さん達が開発した装置は比熱測定装置である。比熱を測定することによって、破壊されるクーパー対の量、つまり常伝導電子の量を調べることができ、最

終的に超伝導ギャップ、即ち波動関数の振幅の方向依存性がわかる。

「キーワードは方向依存性なんです」と出口さんは語る。非等方的な形状の波動関数を可視化するには様々な角度から磁場をかける必要がある。「この装置の特徴は低温で磁場をかける方向を精密に制御できることなんです。」新しい比熱測定装置は50mKの低温で小さな単結晶試料の比熱を測定できる。結果の一例としてルテニウム酸化物(Sr_2RuO_4)について見てみよう。図2左は実験から得られた比熱の方向依存性を示しており、磁場の方向が変わると比熱が変化していることがわかる。この実験データから超伝導ギャップ、即ち波動関数を3次元上に可視化したものが図2右である。予想されていたように非等方的な形状が再現されている。「最近になって初めて、超伝導状態におけるクーパー対の波動関数も物質によって様々であることが実験で観測されるようになってきました。4方向に突出した形状や、ほとんど等方的でもある部分だけギャップが小さいものとか、幾何学的にはおもしろいものがたくさんあるんです。それらの結果からどういう引力起源が超伝導を発生させているのかという問題の解決の糸口が、最近ようやく見えはじめてきました。今が一番おもしろい時かもしれません。」

低温で磁場を精密に制御して超伝導体の波動関数を可視化する装置は世界的にも類を見ない。何故、京都大学・固体物理学研究室では開発に成功したのだろうか。出口さん自身はこう分析している。「固体物理学研究室では、以前から低

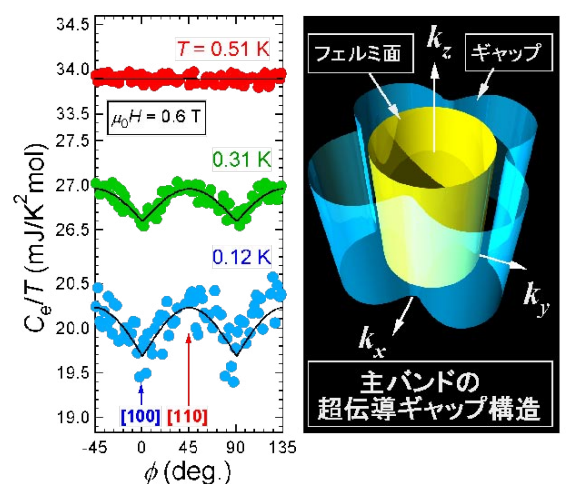


図2 超伝導体ルテニウム酸化物の実験結果。(左) 磁場の向き(横軸)に対する比熱の変化(縦軸)。(右) 左の実験データを基に可視化された超伝導ギャップ構造。固体物理学研究室提供。

温で磁場の方向を制御する技術開発に取り組んできました。装置開発の技術的な面ではそういう研究の蓄積があって、やっと最近になって実現した、ということです。それともう1つは、この研究室で発見したスピン・トリプレット超伝導体 Sr₂RuO₄ の波動関数を決めたいという動機がありました。おもしろい研究をするための系と手法の両方がここにはあったんですね。」その Sr₂RuO₄ の超伝導を通して、スピン揺らぎも含む包括的なクーロン斥力効果の重要性が明確になり、この分野のパラダイム・シフトの牽引力ともなりつつある。2004年10月には Sr₂RuO₄ に関する国際シンポジウムが京都大学 21COE CDUP 主催で開かれる。この新しい比熱装置を使った実験結果も報告される予定だ。

装置自体は低温で磁場の方向を精密に制御できることが本質的な特徴なので、対象はなにも超伝導体の研究のみに限られたものではない。インタビューの最後を出口さんはこう締めくくった。「今は様々な超伝導体の研究に手を広げている段階ですが、この装置を使って将来は超伝導以外の物理現象、物質の基底状態で起こる量子凝縮現象の可視化という方向に研究を進め、研究対象を物性物理全般に拡大していきます。物理現象を『見

る』ための目も比熱という『ウィンドウ』からだけではなく、他の物理量の『ウィンドウ』からも見ることにより、研究の応用範囲を拡げていくつもりです。」低温での精密磁場制御という新たな武器を得て、固体物理学研究室から物性物理学の新展開が幕を開けようとしている。

(基礎物理学研究所 植村 誠)

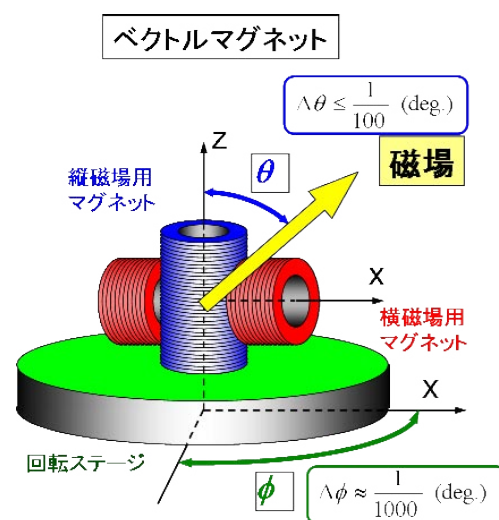


図3 開発された比熱測定装置の磁場制御部分の模式図。3次元のあらゆる方向に精密に磁場の向きを制御できる。固体物理学研究室提供。

研究室紹介

化学物理・生命物理研究室

物理学第一教室 吉川 研一

研究室スタッフ

教授 吉川研一、 助教授 瀬戸秀紀、 助手 北畑 裕之

はじめに

私たちの研究室では、生命現象や種々の自然現象についての一般的原理を探ることを目的として研究を進めています。当研究室は「化学物理・生命物理研究室」と呼ばれ、物理学教室にあつては耳慣れない用語が並ぶ研究室です。名前だけ聞いて「生物物理学」と勘違いされる方もおられるかと思いますが、生物物理学がたんぱく質や核酸の“個性”に注目して分子の立体構造をあつかう“構造生物学”の様相が強いのに対し、当研究室では非平衡開放条件下で時間発展するシステムに注目し、生物・非生物の枠を越えて研究を展開しています。遺伝子発現の自己制御・自己発展する分子システム・メゾスコピック系での自励発振・ソフトマターのダイナミクス・非同期型並列演算



関係研究室との合同合宿（5月）

(場の演算)の基本的原理の研究など、生命現象の裏に潜む物理法則の解明を目指し、実空間のモデル実験を進める一方、理論および計算機実験も重視しています。人数は総勢30名をこえ物理学教室内屈指の大所帯ですが(写真参照)、様々なバックグラウンドの人たちがひしめき合い、国内外を問わず他分野の研究室との交流もさかんな開放的で明るい研究室です。研究テーマ也多岐にわたり、一人々々が独自のテーマをもっているため、ここではその一部しか紹介することができません。当研究室に興味を持たれた方はWebサイトを訪問いただければより詳しく知ることが出来ます。研究室訪問も歓迎いたしますのでお気軽にお越しください。

(<http://www.chem.scphys.kyoto-u.ac.jp>)

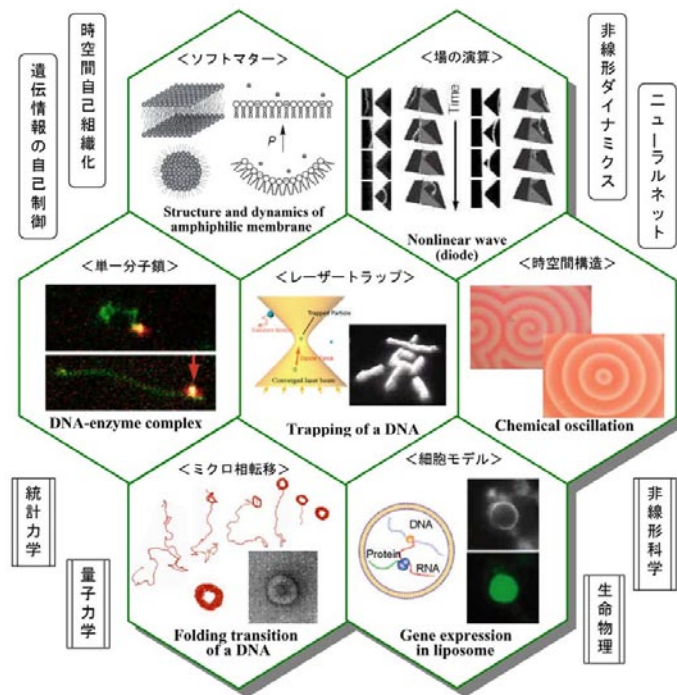


図1 私達の研究分野とその関係領域の大観図

時空間構造の自己組織化

熱力学の第二法則によると、「孤立系ではエントロピーは増大する」と言われています。しかし、自然界、特に生命現象が関係するところには美しい時空間構造が現れています。このような構造がどのようにして生成されているのかを考えると、私たちが住んでいる世界は、「非平衡開放系(散逸系)」であることに注目しなければなりません。

非平衡開放系においては、自発的に時間発展する空間構造が生み出されることがあります。これを「自己組織化」と呼びます。時空間の自己組織化は、生体内だけではなく、簡単な実験系でもエネルギーの散逸があるときに起こり得ます。たとえば、Benard 対流や化学振動反応を用いた系などが有名です。写真は、Belousov-Zhabotinsky 反応における自己組織化の様子です。BZ 反応においては空間的なパターンが自発的に生成、発展している様子が見取れます。

われわれの研究室では、BZ 反応や塩水振動子、樟脳、流体现象、油水系を用いて生体内で行っている並列情報処理や化学エネルギーを運動に変換する分子機械のメカニズム、微小な空間内での化学波の挙動の変化、非線形振動子のカップリング、自己同調現象などについて実験等を行い、より普遍的な理論の構築を目指しています。

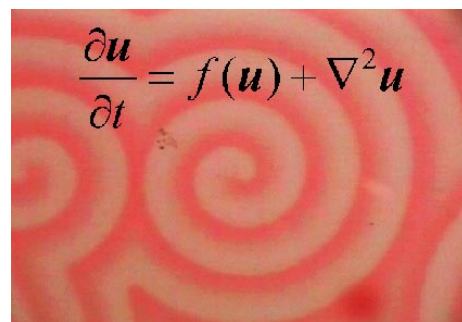


図2 BZ 反応による螺旋パターンの形成

$$\frac{\partial u}{\partial t} = f(u) + \nabla^2 u$$

ソフトマターの構造とダイナミクス

高分子やコロイド等の「ソフトマター」は、分子レベルからマクロスケールに至る様々な空間スケールの階層構造を持っています。従ってソフトマターの多様な物性を理解するためには、これらの階層構造、特にマイクロとマクロの中間のスケール（メゾスケール）の形成要因を明らかにすることが重要です。その一例として細胞膜の構成物質であるリン脂質が作るラメラ構造に着目して、温度や圧力を変化させたときの相転移やエタノールや塩の濃度変化による膜間距離の変化の様子を調べました。図はその結果の一つで、温度と圧力の変化によるリン脂質 DPPC 水溶液の構造変化の様子で、無塩系であるにも関わらず膜距離が増大する新しい相（図の網かけ部分）が存在することを確認しました。

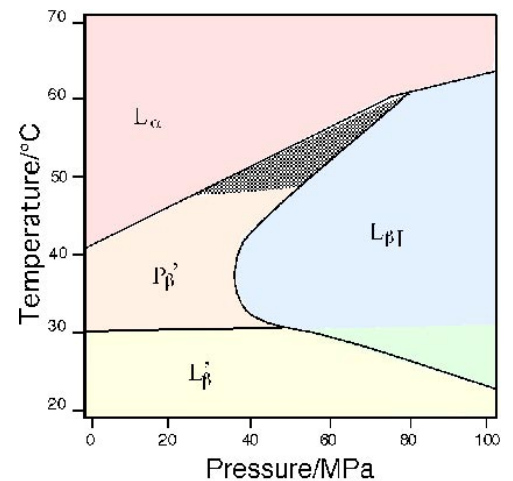


図 3 リン脂質の膜構造の温度・圧力相図

細胞モデル

全ての生物は細胞により構成され、細胞はマイクロメートルスケールの典型的なサイズをもち細胞膜によってその内外を区分されています。細胞膜の主成分であるリン脂質は水溶液中で自己集合し脂質二分子膜小胞（リポソームと呼ばれる）を形成します。これは細胞膜とほぼ同じ構造・組成を持つことから細胞のモデルとみなすことができます。

通常、生化学実験は試験管内、すなわちセンチメートルスケールの容器内で行われています。しかしマイクロメートルスケールの細胞空間はセンチメートルスケールの試験管空間に比べ拡散時間が早く、また表面積/体積の比が大きく表面効果が顕著になります。また細胞内では生体高分子の分子数が少ないため揺らぎの効果が大きくなるなどの影響も考えられます。このような影響を考慮に入れ生命活動をより深く理解するためには、実際の細胞とほぼ同じ空間スケール・構造を持つ細胞サイズリポソームをマイクロラボ（微視的実験室）として利用した研究が有用であると考えられます。

私たちの研究室では生理的塩濃度の水溶液中で細胞サイズのリポソームを形成する方法を独自に開発しました。さらにその内部に DNA などの生化学物質を封入し、実際に転写反応が起こるのをリアルタイムで観察する事に成功しました。（図 4）また集光レーザーを用いてリポソームを効率よく運搬する方法の新規開発にも成功しています。細胞サイズリポソームを用いて細胞モデル系の構築が可能となってきた現在、私達は細胞空間を支配する物理法則を明らかにするための理論的アプローチも重視しています。

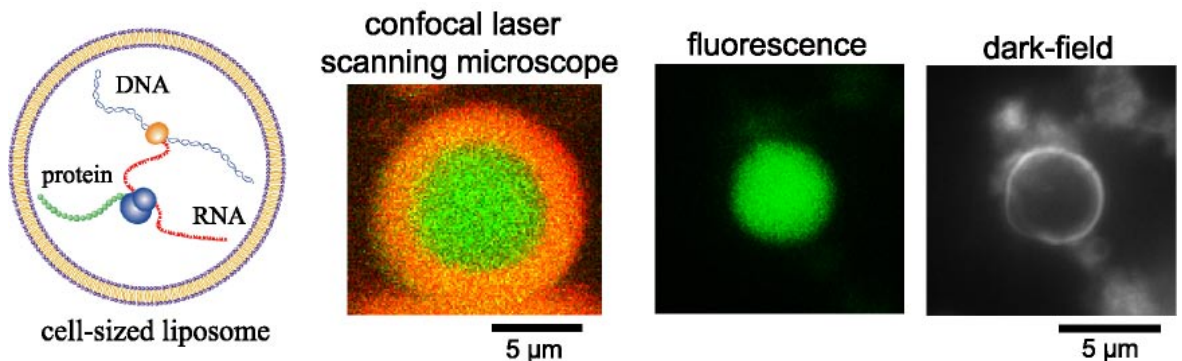


図 4 リポソームによる細胞モデルの模式図（左）と各顕微鏡による実映像（右）。写真中で蛍光を発しているのはリポソーム内で生成されたたんぱく質で、転写から発現にいたるまでの一連の反応が人為的に作られたリポソーム内環境（人工細胞）にておこっていることが分かる。

DNA の高次構造変化と遺伝子活性

生物の遺伝情報は紐状の2重螺旋DNAに刻まれています。ヒトにおいては約2mにもなるというそのDNA鎖は、マイクロメートルスケールの細胞の中（真核細胞では約10 μ mの核内）に高度に折り畳まれた状態で存在します。このように非常に狭い空間内に閉じ込められているDNA分子が、どのような仕組みで自らの遺伝情報を制御しているかという問題は現在でも未解決な問題です。

近年、蛍光顕微鏡を用いることで液中でのDNA鎖を単分子レベルで動的に観測することが可能になりました。これにより私達は、DNAの折り畳み構造転移は熱揺らぎによって揺らぐ紐状のコイル状態からコンパクトに折り畳まれた凝縮状態へと不連続に折り畳まれる一次相転移であることを明らかにしました。またその構造転移は、溶液条件によって多様な様相を見せることも明らかになっています。(図5) DNAは負に帯電した高分子ですが、このような構造の多様性は荷電のもつ性質が大きく関与しているものと考えられます。(図6) 私たちは現在、DNAの折り畳み構造転移を蛍光顕微鏡、原子間力顕微鏡などによって観測を行うと同時に、その理論面についても先導的な研究を進めています。

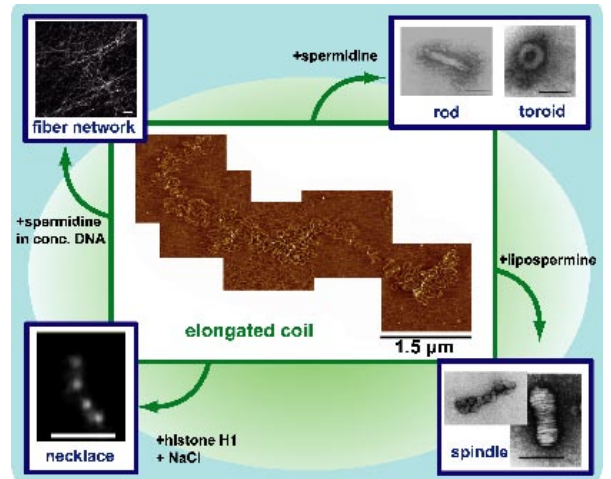


図5 DNAの構造転移とその溶液条件の関係図

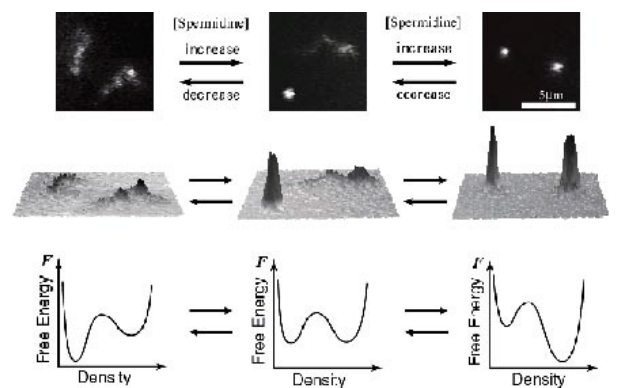


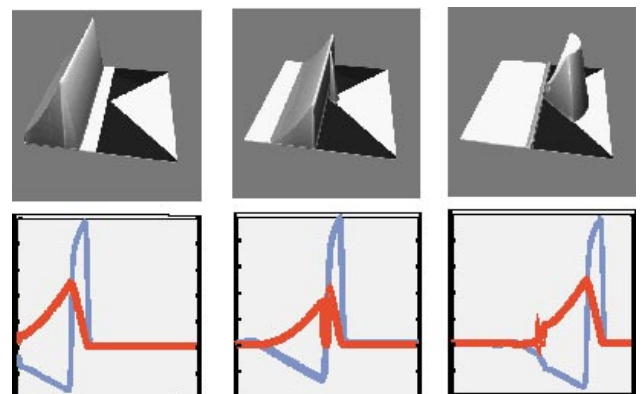
図6 DNA鎖の自由エネルギーと凝縮状態転移の様子

興奮場における並列情報処理

生物の神経系は興奮場としてとらえることができ、その興奮波の伝播の様相はFitzHugh-Nagumo方程式という偏微分方程式で記述できることが知られています。私たちは興奮場の形状を工夫することにより、興奮波の一方方向伝播(図参照)のような様々な機能を持つ回路を作成できることを示し、このような“場”による情報処理、並列演算、“場の演算”という概念を提唱しています。そして生物における情報処理も“場の演算”の原理を活用しているとの仮説を提唱しています。

具体的には、FitzHugh-Nagumo方程式と化学波伝播を記述する方程式が同じ数理構造を有していることから、コンピュータ・シミュレーションを活用した理論的研究と、Belousov-Zhabotinsky反応を用いた実験的研究の両面から研究を進めています。

図7 興奮波の一方方向伝播のシミュレーション



記者紹介

植村 誠 (うえむら まこと) 基礎物理学研究所 PD
今年の3月までは宇宙物理学教室所属。
専攻: 恒星物理学

編集後記

私は飛行機に乗ると必ず機内誌を読みます。色々言う人が居るようですが私は結構好きです。大学以外で何か別の仕事をしろと言われたら、機内誌の編集はやってみたい一つです。飛行機に乗る人は色々なので内容も色々ですよ。随想だったり、ビジネス向けの記事だったり色々。日本のは「どこどこへ行って、何々を食べて、これこれを見た!」というの旅行記が多いですね。日本各地のどんぶり物の比較、というは面白かった。海外のある機内誌では日本の新幹線(500系)のデザインの記事を見たこともあります。さすがテクノロジーの国、と思いました。でも共通するのは「読んで楽しいこと、わくわくすること」。世の中暗い話ばかりですが、そういうのは全くなし。現実逃避は良くないですが、楽しく明るい記事は人を前向きにします。私は機内誌の編集はちょっと無理でしたが、NEWS LETTERの編集には携わることができました。研究は競争の側面は強いですが、基本は明るく楽しくあるべき。「どこどこ研究室に行って、こんな面白い研究を見た!」「これまで良く分からなかったけど、この研究ってこういうことだったのか!」好奇心とわくわくする心をかき立てる誌面にしたいと思っております。

(編集委員 鶴 剛)

21COE 物理学の多様性と普遍性の探求拠点 CDUP NEWS LETTER 編集委員会

柴田一成	shibata@kwasan.kyoto-u.ac.jp
鶴 剛	tsuru@cr.scphys.kyoto-u.ac.jp
国友浩	kunitomo@yukawa.kyoto-u.ac.jp
田中耕一郎 (編集長)	kochan@scphys.kyoto-u.ac.jp

■発行■
京都大学 21COE 物理学の
多様性と普遍性の探求拠点
編集委員会
〒606-8502 京都市左京区
北白川追分町 京都大
学大学院理学研究科 物
理学教室内
TEL: 075-753-3758
FAX: 075-753-3886
e-mail:
21COE@scphys.kyoto-u.ac.jp

CDUP News Letter
No. 3

第3号
平成16年4月20日発行