

弦理論の数理

細 野 忍 (数学科)

hosono@ms.u-tokyo.ac.jp

1980年代中頃に、現在に言う超弦理論の研究が始まり、理論物理学の話題としては珍しく、その後10年以上に渡って今も多くの人たちが弦理論の研究に携わっています。その研究内容は、膨大でとても私一人では語り尽くせないものですが、大まかに、80年代に成し遂げられた2次元共形場の理論を手掛かりにした研究(第1期)と、それ以降現在に至るカラビ・ヤウ多様体のモジュライ空間を手掛かりにした研究(第2期)に分けられる様に思われます。

第1期では、リーマン面のモジュライ空間や、また当時ほぼ出来上がっていたカット・ムーディ代数とその表現論が用いられ、その結果、数理科学の一分野「共形場の理論」を作り上げたように思われます。そこは、無限次元リー環論とリーマン面のモジュライ空間の幾何学が調和する、美しい世界に思われます。また、可解格子模型など数理物理学のモデルへの応用も見逃せません。

他方で第2期では、第1期での表現論と言う代数的な手法が「等価と信じられている」カラビ・ヤウ多様体に関する代数幾何学的な手法に置き換えられます。そして、カラビ・ヤウ多様体のミラー対称性予想や、それをカラビ・ヤウ多様体上の正則曲線の数え上げ問題への応用など、純粋に代数幾何学の問題に関する予想や問題の提示が、弦理論の研究から得られ物理学者のみならず数学者も巻き込んだ研究が行われています。

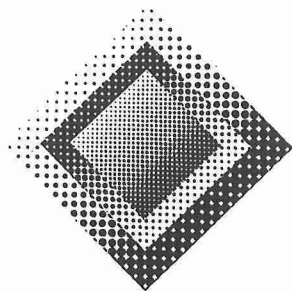
第1期と2期で、全く同じ弦理論を研究しているのですがその描像が表現論と(代数)幾何学と言う具合に全く異なります。この違いは、量子力学でお馴染みの、ハミルトニアンに基づく演算子形式とラグランジアンに基

づく経路積分形式の違いに他なりません。量子力学では、単なる形式の違いでしかないのですが、これが無限自由度の場の理論や弦理論になると同じ理論に全く異なった研究の視点を与え、またそれが数理科学として見ると思いもしなかった予想を導いたりしているのです。現在、物理学者は弦理論双対性 — 全ての弦理論は1つのモジュライ空間で一つに繋がっていて、モジュライ空間上には双対変換という非自明な対称性が存在する — と言う考え方を提唱していますが、そこに新しい数理科学があるのは間違いないように思われています。第2期がほぼ終了し静けさが幾分漂う現在ですが、この静けさは第1期と第2期の統合と完成に向けた第3期の到来につながるものと信じています。

私は、「共形場の理論」の辺りから弦理論に接し、その後カラビ・ヤウ多様体のミラー対称性と正則曲線の数え上げ問題への応用などに興味を持って研究をしていますが、弦理論に関する数理科学の発展に幾らか貢献出来ればと日々努力しています。

参考文献

- B. Greene and S.-T. Yau, Mirror Symmetry I, II, Studies in Adv. Math., (1996), AMS/IP.
- D. Cox and S. Katz, Mirror Symmetry and Algebraic Geometry, Math. Surv. and Monographs, 68(1998), AMS.
- S. Hosono, 「ミラー対称性」、数学 vol. 51, 3(1999) 257-275.



並列・分散プログラム支援ソフトウェア

田 浦 健次郎 (情報科学専攻)

tau@is.s.u-tokyo.ac.jp

おそらく理学系の多くの研究者が、実験のためにコンピュータプログラムを作成することを余儀なくされていることと思います。そのプログラミングをすべきプラットフォームもますます多様化してきています。あまり昔のことは知りませんが、おそらく一昔前は、プログラミングという作業は Fortran で最内側のループの命令数をいかに削るか、という作業のことだったのではないのでしょうか？最近では計算機はやれ日立 SR2201 だ、マルチプロセッサ並列機 (Origin2000 や Ultra Enterprise など) だ、これからは Linux のクラスはどうでしょう、とかいわれていたりします。プログラミングの手段も多様化してきて、C/C++ はもちろんのこと、Java だ、Perl だ、Python だ、とか、さらに並列プログラムのための手段として、ある種の計算機では MPI、別の計算機では Pthread を使って並列プログラムをするんですよ、HPF は、OpenMP はどうでしょうか、とか色々なことがいわれています。

こうした個々の「はやりの」固有名詞にとらわれるのはあまり生産的な時間の使い方とは言えませんが、単なるはやりを越えた大きな潮流はあります。それは、(1)並列・分散プログラミングの必要性の増大、(2)速度一辺倒ではない、プログラミングの生産性や再利用性を重視したプログラム開発、保守サイクルの必要性の増大 (とくにこれは性能が要求される科学技術計算といえども適用される)、です (実は(2)については研究のためにプログラミングをしている人たちは、生産性を度外視して性能向上のための努力を快く(?)引き受けてくれる特異な人種かもしれませんが… (1)については、これは利用者がなんといおうと、そうになっていってしまうので、受け入れてもらうより仕方ありません)。

我々の研究室ではこれらの並列・分散環境におけるプログラミングをいかに支援するかを研究しています。最近の具体的な研究としては、以下のようなものがあります。

[超高速スレッド生成と負荷分散:] 並列プログラミングにおいて数ある面倒な問題のうちの 하나가、並列に実行すべき仕事をどのようにプロセッサに分配するか、です。単純に、 N 個の仕事を P 台のプロセッサに N/P 個ずつ分割してすむ場合は簡単ですが、仕事量にばらつきがあったり、あらかじめ N がわからない (たとえばある仕事をした結果他の仕事が生まれてくる) 場

合などは簡単ではありません。仮にできたとしても、そんなプログラムを保守していくのは大変です。この研究は、プログラマは単に仕事が必要になり次第、その仕事を実行する「スレッド」を生成すれば、あとはシステムが自動的にそれらをプロセッサ間に分配して実行してくれるシステムに関するものです。

[並列・分散自動メモリ管理:] これは実際には並列プログラミング以前から問題になっていることですが、プログラマが行うメモリ管理には間違いが混入しやすく、かつそのデバッグは非常に大変です。最近では Java などの流行により、ごみ集め (Garbage Collection; 使われていないメモリを自動的に検出し、回収・再利用する) などの用語も一般に認知されていますが、この研究は並列・分散環境における効率の良いごみ集めに関するものです。

我々のような種類の研究をしている者にとって、研究内容は論文として成果を発表するだけでなく、研究の産物を実際に一般利用者に利用可能なソフトウェアとしてリリースことも含まれます。上にあげた研究についてもソフトウェアリリースがなされており、<http://www.yl.is.s.u-tokyo.ac.jp/{stthreads,gc}> から入手可能です。それらはいずれも C や C++ のプログラムから、ライブラリとして利用可能で、Solaris、Linux などのポピュラーなマルチプロセッサ計算機で稼動しています。Origin 2000、Ultra Enterprise、あるいは 4 way Pentium 機のようなマルチプロセッサ機でプログラミングをする機会がある方には、強力な道具になると信じています。

今後は、地理的に分散した複数の計算機 (そこでは、参加する個々の計算機自身が並列機かもしれない) を同時に使うような環境が整備され、応用されていくでしょう。例えば、遠隔にあるデータアーカイブのデータを取りだし、それをどこかの計算機センターの並列機で処理し、結果をデスクトップで表示する、といった応用です。これは大域計算 (Global Computing) という名の元で基盤整備が進められている計画です。実用上も研究テーマとしても魅力的で、今後我々の研究も自然とそのようなプラットフォームにおける負荷分散や資源管理へと発展していくでしょう。

レドックス活性金クラスター

西原 寛 (化学専攻)
nisihara@chem.s.u-tokyo.ac.jp

近年、金属超微粒子の合成や物性の研究が、量子材料や新触媒の観点から活発に展開されている。金の場合には、アルカンチオールを表面安定化剤として用いることで、有機溶媒に可溶で乾燥後も再分散可能な、サイズの揃ったナノクラスターが湿式法で簡便に合成される。このアルカンチオール修飾クラスターは他のチオールとも交換可能であり、様々な機能性クラスターの合成へ応用できる。

我々は、多段階レドックス反応をする分子を表面に修飾した金クラスター (図1) を合成し、それらの物性を研究している。金属クラスターは電荷リザーバーの役割をもち、表面電荷が物性を大きく支配する。したがって、“レドックス活性金クラスター”において表面種レドックス状態を変化させて金クラスターの物性を制御することは興味深い。ここでは、レドックス活性金クラスターの電気化学的凝集と、生じた金クラスター薄膜の光学物性について簡単に紹介する。

約100個のオクタンチオールで表面保護した単分散コア粒子径 (直径 $2.2\text{nm} \pm 0.3\text{nm}$) の金クラスターをビフェロセン、テルフェロセン、アントラキノン末端に

もつアルカンチオールと置換反応させることによりそれぞれのレドックス活性種を20個程度まで修飾することができる。ビフェロセンおよびテルフェロセン修飾クラスターを有機電解質溶液中に分散しておき、それぞれ多段階酸化すると、界面凝集現象が起こり金クラスターが電気化学的に積層する。一方、アントラキノン修飾クラスターは2段階還元によって界面凝集を起す。すなわち、正負にかかわらず表面付近の局所的電荷蓄積により、凝集現象が引き起こされる。これらの電気化学的凝集により形成した金クラスター薄膜は均一、フラットでレドックス活性である。そして、酸化還元によってその表面プラズモン吸収エネルギーおよび強度が可逆的に変化する (図2)。この現象は今後、非線形光学特性のような表面プラズモンと関わる物性の電場スイッチングなどにつながると思われる。

上記のような機能分子を表面修飾した金クラスターは、金コアと機能性配位子との複合錯体分子とみなすこともでき、分子化学の面からも興味ある物質群である。今後の研究展開が楽しみである。

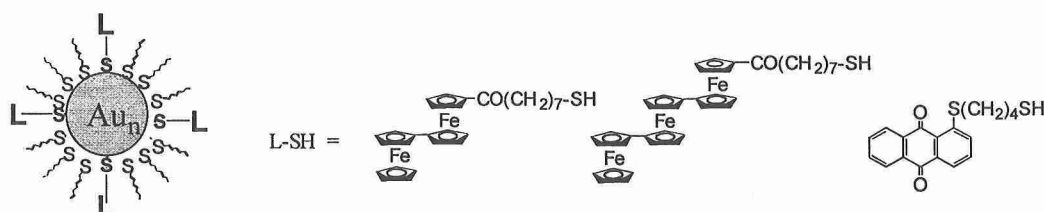


図1. レドックス活性金クラスター

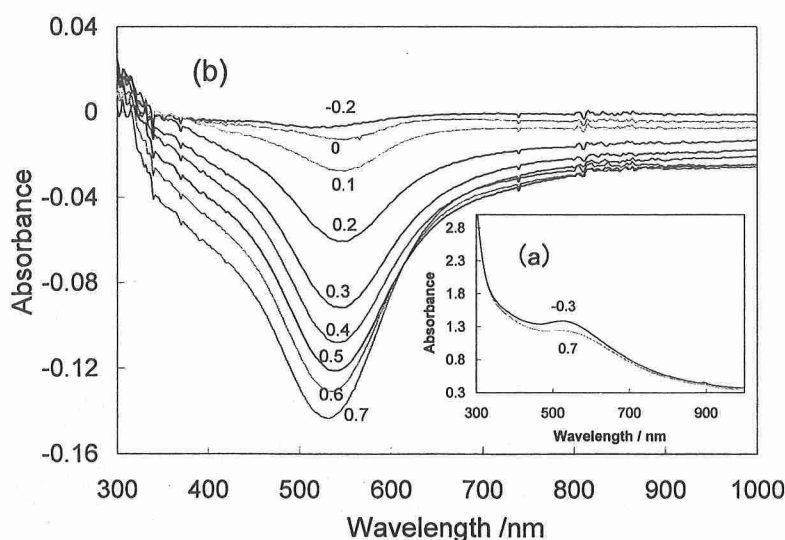


図2. ビフェロセン修飾金クラスター薄膜の吸収スペクトルの電位依存性. (a) -0.3V と 0.7V vs. Ag/Ag^+ におけるスペクトル. (b) -0.3V の場合との差スペクトル. 電位の正側へのシフトとともに、表面プラズモン吸収 (520nm) が減少している。

DNAの再構築

塩谷 光彦 (化学専攻)

shionoya@chem.s.u-tokyo.ac.jp

生体高分子に見られる一次構造→高次構造→分子機能を結ぶ法則性や、生体分子の組織化、物質・エネルギー変換等の生体内現象は、新物質・機能を創出する上で重要な指針を与える。一方、金属錯体は、結合角などの幾何学的性質や、化学的・物理的性質が、有機化合物とは大きく異なる。当研究室では、金属イオンの特性を生かした生体分子の再構築を行い、新しい構造・機能をもつ分子や分子集合体の構築を行っている。本研究は、生命からの発想を原点とする新しい物質構築原理を創出することを目的とし、生命科学、材料科学等のあらゆる分野と密接に関連する。

本稿では、当研究室が現在挑戦している、新規機能性分子の創製を目指したDNAの化学的再構築について、いくつか紹介する。

(1) 金属錯形成で塩基対をつくる DNA

リン酸ジエステル結合で結ばれたヌクレオシドからなる二本のDNA鎖が、核酸塩基間の相補的な水素結合を介して会合し、二重らせん構造を形成することは、WatsonとCrickによる今世紀最大の発見の一つとも言われている。これらDNAの基本骨格を構築している結合力を他の力に置き換えることにより、どのような機能の発現が期待できるだろうか。

まず本研究は、天然の核酸塩基を金属イオンと錯体を形成する核酸塩基に置き換えることからスタートした。ここでは、水素結合ではなく金属錯生成で二重鎖を形成することが期待される。各種金属イオンとの親和性や錯体の電荷を制御する目的で3種のヌクレオシドを合成した。これらは平面四配位構造をとる金属イオンと2:1錯体を形成し、ヌクレオシドレベルで金属イオンによって塩基対形成が誘起されることがわかった。現在、これ

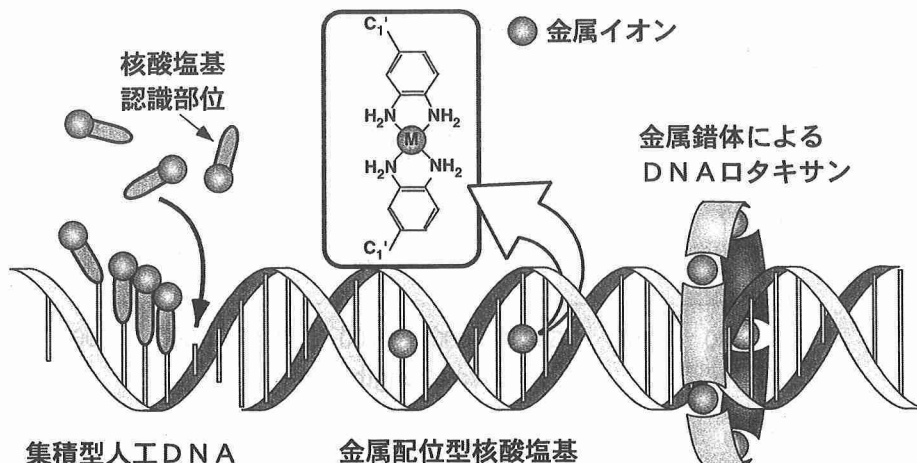
ら人工ヌクレオシドをDNAオリゴマー中に導入し、二重らせん構造の形成を検討している。DNA二重らせん構造中へ金属イオンを組み込む、もしくは並べることによる、金属イオンを活性点としたDNA構造変換の誘起、転写調節などに興味を持っている。また、多数の金属イオンを任意に配列しうる可能性があるため、分子素子等への応用も検討していきたい。

(2) 金属錯体で主鎖を形成する DNA

プログラムされた情報をもとに、分子を可逆的に集積化することができれば、分子素子、分子メモリー、テトラメイドの触媒などの新しい構築原理が創出されると期待される。DNAは、塩基配列をもとに生体中でプログラムを担う分子として働いている。本研究は、DNAの塩基配列を鋳型として可逆的に集積する分子システムを構築することを目的としている。二つの金属配位部位と核酸塩基を有するモノマーが、鋳型となるDNA上に金属錯体を形成しながら集積化することにより、塩基配列に相補的なモノマーの配列化が起こることを明らかにしつつある。

【参考文献】

- (1) K. Tanaka and M. Shionoya, *J. Org. Chem.*, **64**, 5002 (1999).
- (2) K. Tanaka, M. Tasaka, H. Cao, and M. Shionoya, *Eur. J. Pharm. Sci.*, in press.
- (3) A. Hatano, H. Morishita, K. Tanaka, and M. Shionoya, *Nucleic Acids, Symp. Ser.*, **39**, 171 (1998).
- (4) K. Tanaka, H. Cao, M. Tasaka, and M. Shionoya, *Nucleic Acids, Symp. Ser.*, **42**, 111 (1999).



ショウジョウバエ成虫肢形成における領域の区画化

小嶋 徹也 (生物化学専攻)

skojima@hongo.ecc.u-tokyo.ac.jp

発生分化の基本的な機構は、受精卵やそれに由来する組織における、モルフォゲンの濃度勾配による領域の区画化であり、その繰り返しの最終的に個々の細胞運命が決定され、複雑な個体系が形成されると考えられる。しかし、これらの機構の分子レベルでの詳細は、その複雑性から未知の部分が多い。私達の研究室では、ショウジョウバエの成虫肢の形成過程を舞台に、発生過程における領域の区画化の機構及びその役割について研究している。

ショウジョウバエの成虫肢は、遠近軸に沿って複数の節によって構成されており、幼虫期に肢原基と呼ばれる単層の細胞からなる組織から分化する。成虫肢の各節は肢原基上では同心円状の領域として規定される。2 齢幼虫後期まではホメオボックス遺伝子 *Distal-less (Dll)* が原基の中心付近で円状に発現し、核タンパク質をコードする *dachshund (dac)* が *Dll* 領域に一部重なりながらその外側で円環状に発現しており、肢原基を大まかに区別している。現在までの私達の研究により、以下の様な事が分かってきた。3 齢幼虫期に入ると、ホメオボックス遺伝子対 *BarH1/BarH2 (Bar)* が、将来の第 3 – 第 5 附節領域で円環状に発現する。この *Bar* の発現によって第 2 附節までと第 3 – 第 5 附節領域が区別される。ま

た、*Bar* 領域の内側（つめ等のある先附節領域）ではホメオボックス遺伝子 *aristaless (al)* が発現する。最初、両者の発現領域には重なりがあるが、その後、両者間の相互抑制と *Bar* の自己活性化により、完全に分離する。また、*Bar* の発現量は初期には第 3 – 第 5 附節領域で一樣で、区別が無いのだが、3 齢幼虫後期までには第 5、第 4、第 3 附節でそれぞれ強い、弱い、ないというパターンに変化し、この発現量の違いによって各附節の運命決定及び各附節間の segmentation が制御されている。この様に肢原基ではおおむねの遠近軸情報に基づいて大まかに区画化が起こり、そこで発現する遺伝子間の相互作用により各区画が更に細分化され、より厳密に区画が決定されると考えられる。また、*al* 領域と *Bar* 領域の完全な分離に伴い、*Bar* 領域のすぐ内側の細胞で細胞接着因子 *Fas II* の発現が誘導され、先附節領域と第 5 附節領域が完全に分離する。このことから、各区画で発現する転写因子による細胞接着因子の発現制御が、実際の区画の分離に重要である事も示唆される。

このような解析を続けていくことにより、発生分化の基本の一つである領域の区画化について、分子レベルでの根本原理の理解を目指している。

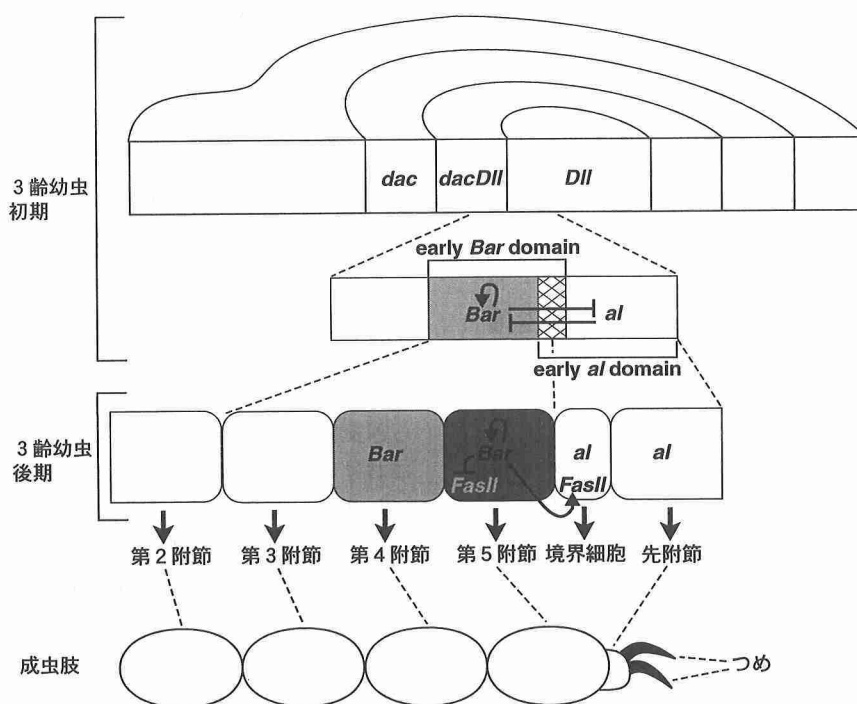


図 ショウジョウバエ成虫肢の先端部分の形成過程

肢原基の横断面を模式的に示した。網掛けの部分は発現の重なりを、塗りつぶし部分の濃さは発現量を示す。この様に、成虫肢の各節に対応する区画は、大まかな領域からだんだんと細かく厳密なものへと形成されてゆく。

電子機構超伝導における異方的ペアリング：多体系でのフェルミ面形状効果

青 木 秀 夫 (物理学専攻)

aoki@phys.s.u-tokyo.ac.jp

超伝導、超流動は、固体物理学の中でも最も興奮をそそるテーマの一つである。というのも、「ゲージ対称性の自発的破れ」という純粋な量子効果と見なせるためである。超伝導は、荒っぽく言えば電子（フェルミオン）が二個でクーパー・ペアをなし、これがボーズ凝縮するというのがBCS理論の教えるところである。普通の超伝導体では、二個の電子がフォノンを交換すると引力が働くためにペアリングが起きる。さて、電子間相互作用は基本的には斥力なのは言うまでもないが、純斥力電子系は超伝導し得るであろうか？斥力ではペアリングなど起きそうにもないように思えるが、意外にも引力は決して超伝導の必要条件ではない。

フェルミ面近傍のペアは相互作用のために別のペアに散乱されるが、引力の場合にはこの「ペア散乱」がフェルミ面上で万遍なく起こり全面的にエネルギー・ギャップ Δ が開く。もしフェルミ面上の場所の関数として符号を変えるようなギャップ関数 $\Delta(k)$ を考えると、斥力であってもギャップが開いた状態が基底状態になる可能性がある。このような状態を異方的超伝導と呼び、ペアの実空間での波動関数は丁度原子のd軌道のような異方的（かつ正負の間を振動する）ものになっている。斥力からの異方的超伝導は随分昔から考えられており、例えばKohn（昨年ノーベル化学賞受賞）等は、普通のクーロン斥力相互作用する電子気体も十分低温なら原理的には異方的超伝導になると示唆したが、通常の場合転移温度は低く現実的ではない。

一方、酸化物高温超伝導体や有機超伝導体では、局在した軌道（d軌道や分子軌道）が並んでおり、この間を電子がホップする、という随分違う状況になっており、相互作用も同じ軌道に2電子が鉢合わせしたときに感じる短距離斥力が主なもので、これを表したハバード（Hubbard）モデルは、格子上で考え得る最も簡単な電子相関モデルとなる。

この系では斥力から超伝導は実際起き得て、特徴としてペアリングの波動関数が異方的になるであろう、ということが最近明らかになりつつある。例えば斥力が十分小さいとした摂動論では、スピン揺らぎを媒介とした相互作用に起因するd対称性をもつペアの異方的超伝導が導かれていた。我々の研究室では、最近、（摂動論で仮定するような無限小ではなく、有限の大きさの）斥力からの超伝導を量子モンテカルロ法で初めて検出した。斥力相互作用するフェルミオン系が超流動する、という可能性は概念的にも面白いが、これの候補が酸化物や有機超伝導体といった一癖ある物質という訳である。さらに、様々なフェルミ面をもつ模型に対して、フェルミ面の形状と

超伝導のペアの対称性の相関を系統的に探索した。

量子モンテカルロ法による超伝導検出の鍵となったのは、斥力からの超伝導は実は、元々の電子エネルギー（バンド幅 ~ 10000 K）に比べると、2桁も小さい「低温超伝導」（転移温 $T_c \sim 100$ K、これでもフォノン機構による超伝導転移温度よりは大きい）ということである。このため、検出には、典型的に100サイトをもち正方形格子上の80電子という（多体系としては）大規模計算というだけでなく小さいエネルギー・スケールに注意を払う必要がある

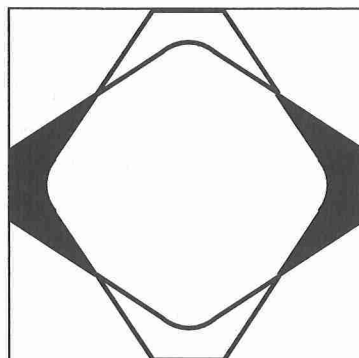
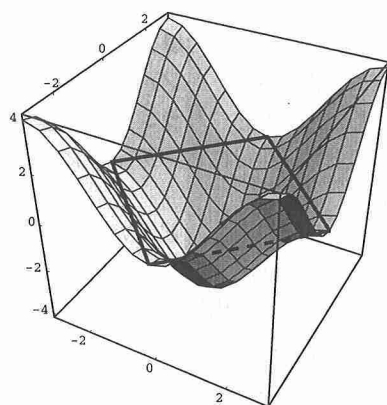
ひとたび検出されると、現実的な様々な物質に対応するモデルでの超伝導が次の興味となる。酸化物超伝導には正孔ドープ型と電子ドープ型があるが、各々のモデルで、ハバード模型における超伝導を量子モンテカルロ法によって調べた。次ページの図で、上のパネルはバンド分散上の等高線として示したフェルミ面、下のパネルはギャップ関数 $\Delta(k)$ をフェルミ面上で正・負（白・黒）も含めて示した概念図。(a)は正方形格子の場合、(b)が正孔ドープ酸化物。異方的ペアリングの対称性は正孔側と電子側で異なる結果を得たが、これはフェルミ面の形状が電子正孔対称性をもっていないことに対応して交換する揺らぎの主成分が異なると解釈される。有機超伝導体も強相関系と見なせ、フェルミ面のトポロジーが異なる $K-(BEDT-TTF)_2X$ (擬2次元系、図(c))、 $(TMTSF)_2X$ (擬1次元系、図(d))、という有機超伝導体に対しても、電子モンテカルロ法によって超伝導相関を求めた。これらを総合すると、「フェルミ面の形に対応して特徴的な波数を持つスピンの揺らぎが発生し、そのスピン揺らぎから期待される異方的な超伝導の相関関数が増大する」という統一的な描像が浮かび上がる。

また、このような機構において T_c を高くするには一般にどうしたら良いであろうか。これを解明するために種々の2次元、3次元格子に対してd波だけでなく強磁性的揺らぎを用いたp波ペアリングの場合を含めて、揺らぎ交換近似という解析的な方法を用いてハバード模型における超伝導を広く調べると、反強磁性的揺らぎを用いた2次元の場合が「ベスト」であることが示される。銅酸化物は層状かつ反強磁性的なので、良い線を行っていることになるが、さらなる物質探索・設計が望まれよう。

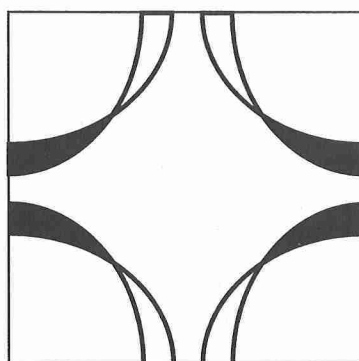
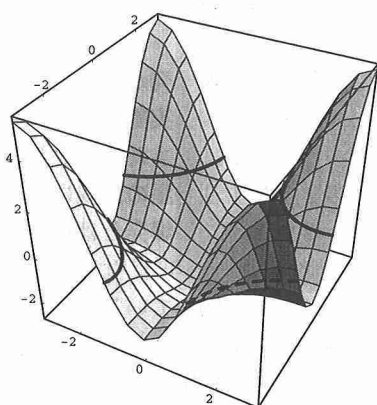
ちなみに、冒頭でゲージ対称性の破れに言及したが、分数量子ホール効果（今年のノーベル物理学賞）も、複合粒子という理論においては、（別の）ゲージ対称性が破れた一種のボーズ凝縮状態と見なせ、多体相互作用する電子系の状態は思いがけない可能性を埋藏していることが示唆される。

参考文献

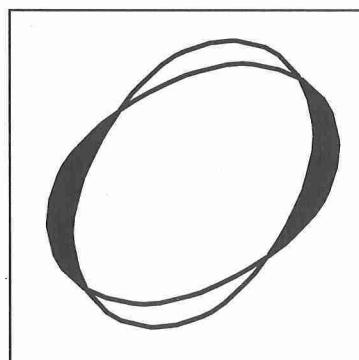
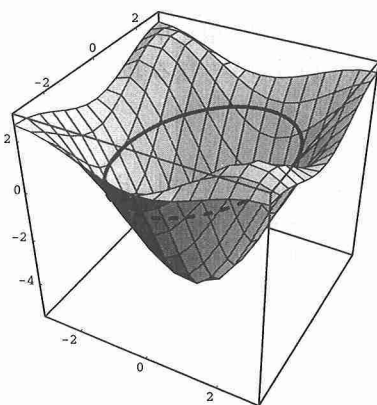
「多体電子論」(草部浩一、青木秀夫：Ⅰ強磁性、黒木和彦、青木秀人：Ⅱ超伝導、中島龍也、青木秀夫：Ⅲ分数量子ホール効果)(東京大学出版会，1998-99)。



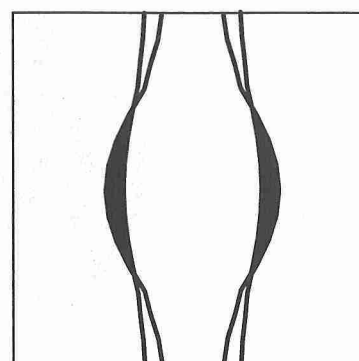
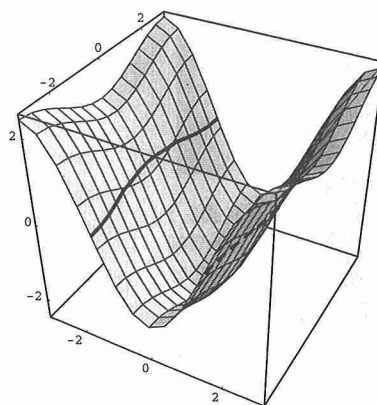
(a)



(b)



(c)



(d)

宇宙の大爆発：極超新星とガンマ線バースト

野 本 憲 一 (天文学専攻・初期宇宙研究センター)
nomoto@astron.s.u-tokyo.ac.jp

天文学の研究でエキサイトする時というのは、何といっても、天空でそれまで知られていなかったような現象が突然起こり、新たな観測情報が連日のようにどっと流れ込んで来る時である。私にとっては、1987年に隣の小銀河大マゼラン雲に新種の超新星（スーパーノバ：大質量の星の一生の最後におきる大爆発）が出現した時が、その最たるものであった。最近では1998年、ガンマ線バーストという突発的な現象の直後にそのバーストの位置で超新星爆発が起きたことが報じられた時に、同じ様なことがおきた。

そもそもガンマ線バーストとは、30年ほど前に、原水爆実験からのガンマ線を探査する目的の人工衛星が偶然発見したもので、強いガンマ線が突然数秒から数十秒爆発的に放射される現象である。このガンマ線バーストは、宇宙のどの方向からも一様に観測されたが、このバーストを起こす天体の正体はおろか、どの距離にあるのかも永らく謎であった。ここ数年ようやく、数十億光年から百億光年のかなたで起こる、超新星より桁違いに大きい規模の大爆発らしいことが判ってきたところであった。

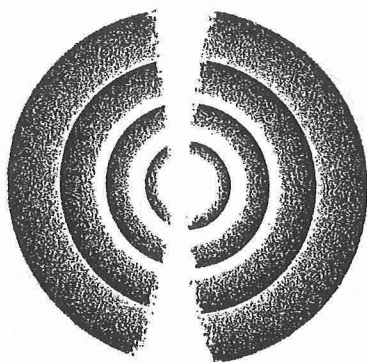
そのバーストがたまたま約1億光年という比較的近い所で起こり、それが超新星と直接関係しているらしいというのである（写真）。この超新星は、南半球からしか観測できない位置にあったが、運良く南米チリにあるヨーロッパ南天文台で観測しているグループとコンタクトすることができた。早速、星の爆発のシミュレーションを行ない、観測された明るさや、スペクトルと比較してみると、驚くなくれ通常の超新星の約30倍もの莫大なエネ

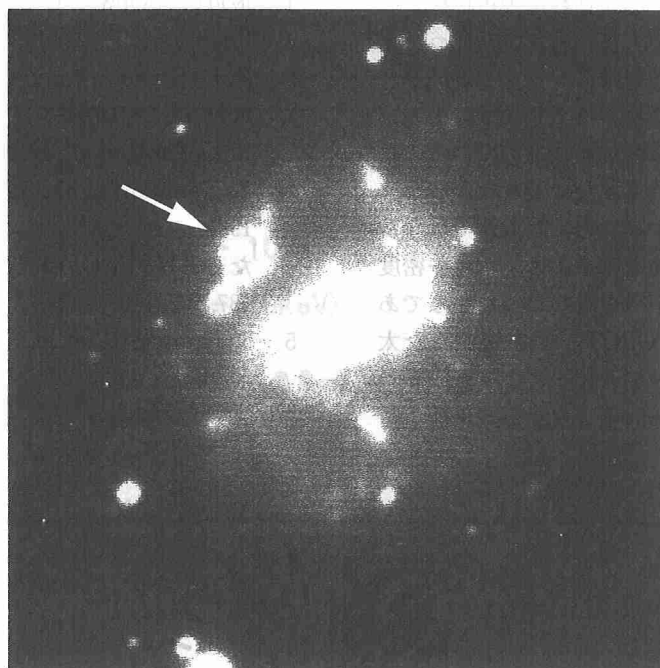
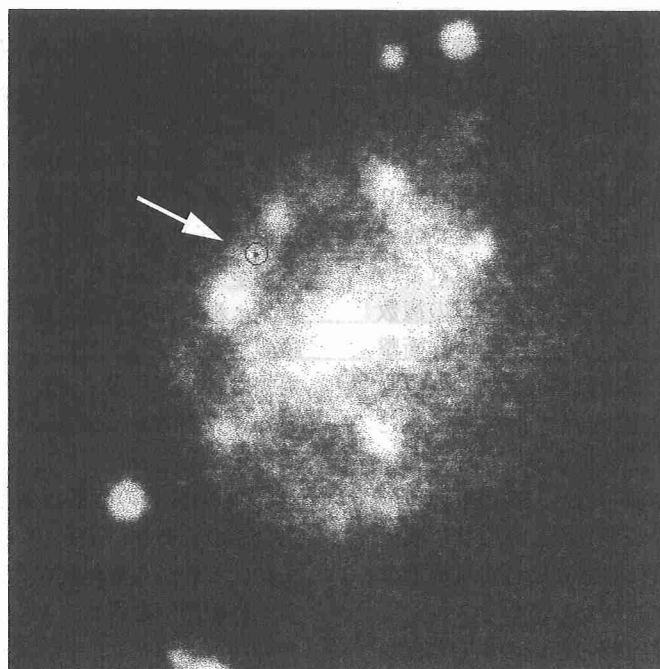
ルギー（ 3×10^{52} erg/s）で爆発していることが判った。そこで極超新星（ハイパーノバ）と呼ぶことにして、直ちに観測サイドの論文をオランダから理論サイドの論文を東大から、殆ど同時にネーチャーに送った（参考文献1、2）。

このような新種の天体はどういうわけか、1つ見つかりと次々と見つかり出す。これまでの所、このハイパーノバの候補が5－6個出現した。Paolo Mazzali 博士（1999年度4月から発足したビッグバン宇宙国際研究センターの初代客員教授）らと、それらの候補天体のスペクトルの分析を進めているところである。

超新星数十個分もの大爆発がどのように起こるのか、またこのハイパーノバが、実際にガンマ線バーストを引き起こしたのかどうかは、まだはっきりしていない。普通の超新星のように中性子星の形成に伴って放射されるニュートリノが引き起こす爆発とは違うメカニズム、おそらくブラックホールや 10^{16} ガウスといった超強磁場が関係したメカニズムが働いているのであろう。このような天体は、地上では実現できないような極端な状況を実現する、格好の宇宙実験室となる。ハイパーノバは、超高エネルギーガンマ線や宇宙線の起源にも深く関係しているだろうし、百数十億光年かなたの遠い（初期）宇宙で何が起きているのかを探る上で非常に役立つ観測対象である。

1. Iwamoto, K., Mazzali, P., Nomoto, K., et al. *Nature*, **395**, 672-674(1998)
2. 岩本弘一、野本 憲一 科学、68, 854 (1998)





1.3億光年の距離にある銀河に1998年に出現したハイパーノバ（極超新星）。上図の矢印で示されたサークルの中でガンマ線バーストが発生し、その直後、その位置に下図の写真のように超新星が出現した。