

連載 理学のキーワード 第12回



「量子井戸と量子ドット」

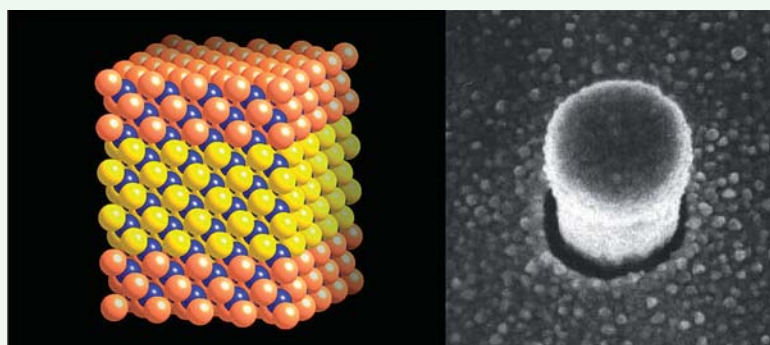
青木 秀夫 (物理学専攻 教授)

量子力学を学ぶと、必ず出てくるのが「井戸型ポテンシャル問題」、つまり電子などの粒子が、そのド・ブロイ (de Broglie) 波長程度の空間スケールをもつ領域に閉じ込められたときの波動関数の問題である。これを、半導体系で実現したものが量子井戸、量子ドットである。量子井戸 (図左) は、分子線エピタキシー (原子・分子を真空中で蒸着させて原子一層の精度で製膜する) などの方法で、バンド・ギャップの異なる半導体を、母体の半導体に層状に埋め込んだ構造 (これを周期的につくると、江崎玲於奈により創案された半導体超格子となる)。層に垂直方向では井戸型ポテンシャルとなり、この自由度についてエネルギーは量子化するいっぽう、層の面内方向は自由運動なので、一種の2次元電子系となる。量子ドットでは、

異なる半導体の界面に存在する2次元電子系に対して、周りを削って柱状にする (図右)、あるいはリソグラフィーでつくった電極により電子を狭い領域に閉じ込めるので0次元電子系となり、準位は完全に離散化する。井戸の厚さやドットの直径をナノメートル程度にすると、量子効果が顕著になり、特異な電子の輸送 (単一電子トンネリングなど)、

電子相関効果 (分数量子ホール効果、電子分子など) や光物性 (2次元励起子を用いた量子井戸レーザーなど) が生じるので、基礎物理だけでなく半導体デバイスにも広く用いられている。

本理学系研究科では、物理学専攻の樽茶清悟教授、岡本徹准教授など (実験)、青木など (理論) が量子井戸や量子ドットに関連した研究を行っている。



■ 左：量子井戸。 右：量子ドット (物理学専攻 樽茶清悟教授提供)。



「固相合成法」

田代 省平 (化学専攻 助教)

DNA やタンパク質 (ペプチド) といった生命の根幹に関わる生体高分子の化学合成を可能にした技術が「固相合成法」である。

化学反応、とりわけ有機合成反応では、溶媒に試薬を溶かして反応させるという「液相合成」がもっとも標準的である。いっぽう「固相合成」は、反応させたい分子を固体樹脂上に結合させ、その樹脂上で試薬と化学反応させる合成手法である。先に述べた液相合成では、反応溶液から目的分子だけを分離する必要があり、時として多大な労力を要する。いっぽう、固相合成は、樹脂に結合した目的分子以外の不要物、たとえば残存試薬などを洗浄操作のみで簡便に除けるといふ大きなメリットがある。そのため固

相合成では、煩雑な分離操作なしに連続的に化学反応を行うことが可能となり、手間と時間が大幅に省略される。

固相合成の有用性は、まずペプチドの化学合成で威力を発揮した。たとえば、液相法によって R (アルギニン) - I (イソロイシン) - G (グリシン) - A (アラニン) - K (リシン) … のようなペプチドを合成する場合、アミノ酸の縮合と脱保護を繰り返し行うためひょとんに手間がかかる。ところが1963年、メリーフィールド (R. B. Merrifield) によって4残基ペプチドの固相合成が報告されて以来、現在では自動ペプチド固相合成装置を活用することで、数十残基のペプチドが数日もしくは一日でほぼ自動合成されるまでに至った。またDNAも、

現在では固相合成およびその自動化が一般的になっている。

固相合成法の魅力は、生体分子をそのまま化学合成できることだけではない。固相合成によって、人工分子をDNAやペプチドに組み込むことにより、生体分子を超えた新しい機能性分子を創製することができる。たとえば化学専攻の塩谷光彦教授 (生物無機化学研究室) のグループでは、金属イオンを捕捉する機能性部位が織り込まれた人工DNA鎖を、固相法によって自動合成することに成功している。得られた人工DNAと金属イオンを水中で混ぜ合わせると、金属イオンがDNA内部に一次元状に配列し、原子1個分の太さの世界最細の金属ナノワイヤーをつくることができる。



「地球ダイナモ」

櫻庭 中 (地球惑星科学専攻 助教)

地磁気はおおむねどこでも北向きで、地球全体で見ると双極子磁場に近い。磁場は時や天候を問わず計れるため、古来、探検家や船乗りたちは方位を知るのにこれを利用してきた。鳥や海生動物、細菌にも磁場を感じて進路を決定しているものがある。

なぜ地球は磁場をもちうるのか。これは長らく未解決の問題であった。地球半径の半分よりも深い部分は金属鉄からなる。地磁気は、この金属コアに流れる電流を反映しているのは疑いないのだが、その電流がいつに維持されるのか、起電力がどこからくるのか、という地球ダイナモ問題が具体的に明らかになったのは、計算機シミュレーションが発展したここ10数年ばかりのことである。

コアの大部分は溶融しており、地球の

冷却にともない、毎時1mほどの速さで対流している。生じる対流渦は、地球の自転の影響のため、南北方向に細長く伸びた回転円筒がいくつも並んだような形態を示す。地上の低気圧が上昇流、高気圧が下降流をそれぞれ伴うのと同様、これら渦のまわりの速度場は、北半球では右ねじの、南半球では左ねじの進む向きで、流線はらせん状になる。磁力線はこうした渦に巻きつくように成長する。磁場中で導体が回転すると、導体表面に電流が流れて磁場が誘導されるのと、原理は同じである。最終的に、流れの赤道面対称性を反映して、地球全体を貫く双極子磁場が生まれる。

昨夏、首都圏は記録的猛暑に見舞われ、東京電力管内の消費電力は6000万kWを超えた。コアの発電能力は、トータル

ではその数倍の規模である。工学では電磁流体(MHD)発電という技術が研究されているが、地球ダイナモはまさにそれに近い。

コアは乱流状態にあり、流れも磁場も、ともに広大な時空間スペクトルをもつ。これが地球ダイナモの研究を困難にしている。現在の目標は、乱流コアという極限下でのダイナモ作用を明らかにし、さまざまな地磁気の変動現象を理論的に説明することである。双極子の向きが突然反転するという地磁気の逆転現象は、そのうちもっとも魅力的な研究テーマである。地球ダイナモの研究は、筆者のほか、本学ではおもに地磁気観測を通じて地震研究所の歌田久司教授らが、乱流理論を通じて生産技術研究所の半場藤弘准教授らが行っている。



「ガンマ線バースト」

野本 憲一 (天文学専攻 教授)

ガンマ線バーストとは、宇宙の未知の天体から、突如、数十ミリ秒から数百秒という短時間、ガンマ線が爆発的に放射される現象である。宇宙の何処で、どのような天体が放射するのか、発見後30年以上も謎であった。最近ようやく、宇宙のきわめて遠方で、莫大なエネルギーを放射する巨大な爆発現象であることがつきとめられてきた。このバーストにより、宇宙のもっとも遠方の天体を観測的に研究できる可能性があり、その正体の解明がさらに進められつつある。

ガンマ線バーストは、1960年代にアメリカの軍事衛星によって発見されたが、その正確な位置、距離がわかるようになったのは、1997年、天文観測衛星によって、バーストの残光現象として放

射されたX線が観測されるようになってからである。対応する光学天体の観測から、銀河系外の遠方の宇宙で発生し、莫大なエネルギーを放射している現象であることが明らかとなった。(赤方偏移 $z=6.295$ という最遠方のガンマ線バーストの光学的同定は「すばる」望遠鏡によってなされた)ガンマ線バーストは、継続時間が1秒以上のロングバーストと、1秒以下のショートバーストとに大別される。比較的近距离に出現したロングバースト3例には、それに付随して、通常の超新星の10倍以上のエネルギーをもつ、極超新星が発見された。ロングバーストと極超新星は、ブラックホールから光速にきわめて近い速度でジェットが噴出することで引き起される、巨大な爆発であ

ると推測されている。X線フラッシュという類似の現象も観測されており、こちらは、超強磁場をもつ中性子星の形成を伴う超新星に付随した現象である可能性がある。ショートバーストの方は、連星系をつくっている2つの中性子星が重力波を放射しつつ合体する時に起こる現象ではないかというアイデアが提案されているが、その正体はまだはっきりしていない。本研究科では梅田秀之准教授と筆者の研究室、また佐藤勝彦教授、茂山俊和准教授の研究室において、それぞれ、ガンマ線バーストに付随した極超新星、ガンマ線バーストの中心エンジンの理論的研究が行われている。牧島教授の研究室では、X線天文衛星による、残光X線やX線フラッシュの観測研究が行われている。



「有限単純群モンスター」

松尾 厚 (数理科学研究科 准教授)

モンスターは、およそ 8.08×10^{53} 個、正確には $2^{46} \cdot 3^{20} \cdot 5^9 \cdot 7^6 \cdot 11^2 \cdot 13^3 \cdot 17 \cdot 19 \cdot 23 \cdot 29 \cdot 31 \cdot 41 \cdot 47 \cdot 59 \cdot 71 = 808017424794512875886459904961710757005754368000000000$ 個の元からなる巨大な群 (ぐん) である。ちなみにアボガドロ定数はおよそ 6.02×10^{23} である。モンスターは豊かな構造をもつ興味深い研究対象である。

群は図形や空間の対称性を記述する数学的構造である。位数すなわち元の個数が有限であるものを有限群という。

たとえば、正三角形には 120 度回転すると元の位置に重なるという対称性がある。何もしない操作や裏返しも含め、位数 6 の群が得られる。この群は位数 2 の群を回転のなす位数 3 の群で拡大し

たものと解釈できる。一般に、有限群は有限単純群の拡大の繰り返しでできている。

有限単純群にはいくつかの無限系列と 26 個の例外があり、例外中で最大のものがモンスターである。1970 年代前半に有限単純群の分類の試みの中でモンスターが発見された後、1970 年代後半になってムーンシャインとよばれる不思議な現象が見出された。モジュラー関数の級数展開とモンスターの表現の指標に関係があるというのである。これを追及する中で、理論物理学 (弦理論) との関係も示唆されつつ、1980 年代前半にムーンシャイン加群とよばれる無限次元の代数系が構成された。これを用いてムーンシャインは解明され、関連する一連の研究はボーチャーズ (R. E. Borcherds) の

フィールズ賞受賞につながる重要な研究となった。

筆者はこのようなつながりを研究する者の一人である。モンスターについては他にも興味深い観察や謎があり、それがムーンシャイン加群によって明快に説明されるのが望ましい。最近では、ムーンシャインの枠組みがある種の幾何学と関係することも見出され、モンスターに関わる数学の世界はさらに広がりを見せている。この方面では、数理科学研究科の吉川謙一准教授が複素幾何学の立場からの研究を精力的に推進している。

筆者が見ることのできた部分から想像する限り、モンスターは美しい。モンスターの全貌を見る日が来ることを願ってやまない。



「細胞周期」

佐藤 政充 (生物化学専攻 助教)

細胞の分裂は生命現象の根源である。真核生物において細胞が分裂してからまた次に分裂するまでを 1 周期として、細胞周期という概念でとらえている。一般に細胞周期は、染色体 DNA の状態から、おもに 4 つの時期に分けられる。染色体 DNA の合成を行う S 期 (Synthesis) と、複製した染色体を 2 個の細胞に分配する M 期 (Mitosis)、さらにこれらの間にあるギャップ期 (G1 および G2 期) である。すなわち、細胞周期は G1-S-G2-M とまわって G1 期に戻る。この 1 周期が、ヒトでは約 24 時間、酵母では 2~3 時間である。

60 年代半ば以降、米国のリーランド・ハートウェル (Leland H. Hartwell) 博士は出芽酵母、英国のポール・ナース (Paul M. Nurse) 博士は分裂酵母を用いて、細胞周期に異常を示す cdc 変異体を多数単離した。ナース博士は M 期を開始さ

せる因子として、タンパク質リン酸化酵素 Cdc2 を発見し、細胞周期がヒトから酵母に至るまで基本的に共通の機構で制御されていることを示した。今でこそ酵母を用いた細胞周期研究は幅広く認知されているが、細胞周期の分子機構がまったく明らかにされていなかった時代に、両博士が酵母を選び、変異体単離という遺伝学的手法から細胞周期研究の道を切り開いた業績の偉大さは計り知れない。英国のティモシー・ハント (R. Timothy Hunt) 博士は、ウニ卵で周期的に発現するタンパク質「サイクリン」を発見し、これが Cdc2 を活性化することがわかった。上記 3 博士は、これらの分子の発見が評価され、2001 年にノーベル医学生理学賞を受賞している。

ある特定の回数だけ分裂した後に停止する、すなわち細胞分化の観点からも細胞周期は重要である。増殖を停止す

る細胞は、G1 期から静止期 (G0) に入る。高等生物において増殖を停止できない細胞は癌細胞として振る舞う。したがって、細胞周期の進行と停止は、細胞および個体の運命を決定するために厳密に制御されなければならない。酵母においては G1 期から配偶子 (孢子) を形成するための減数分裂へと分化する。減数分裂過程は、DNA 合成のあと、2 回連続で染色体分配が起きる特殊な細胞周期を有する。その特殊性はどのような分子機構によってつくられるのか、謎が多く残されている。減数分裂の細胞周期については生物化学専攻のわれわれ山本正幸教授の研究室で研究が進められている。さらに理学系研究科・生物科学専攻では、酵母を用いて大矢禎一教授、菊池淑子准教授、植物を用いて馳澤盛一郎教授、クラミドモナスを用いて広野雅文准教授など、多くのグループが研究している。