



私たちの生き別れの生みの母：暗黒物質

村山 斉（カリフォルニア大学バークレイ校（Univ. California, Berkeley）教授
カブリ数物連携宇宙研究機構（Kavli IPMU） 機構長・特任教授兼任，物理学専攻兼務）

私たちはどこから来たのか。こんな素朴な問いは、実は宇宙の始まりに深くつながっている。柏キャンパスにあるカブリ数物連携宇宙研究機構（Kavli IPMU）では、観測・実験・理論というさまざまな手段と場所でこの謎を解き明かそうとしている。

私たちは 100 億年以上昔の星のかげらである。実は宇宙が始まった 3 分後には、水素とヘリウム以外の元素はなかった。いっぽう私たちの体は炭素、酸素、ナトリウム、カルシウム、リン、鉄などの元素がないと生きていられない。こうした元素は星の中で作られたのだ。太陽を含め、光る星の中では小さな元素をくっつけ大きな元素をつくる、核融合という反応でエネルギーを生み出している。しかし星の中心でできた元素も、取り出すことができなければ役に立たない。

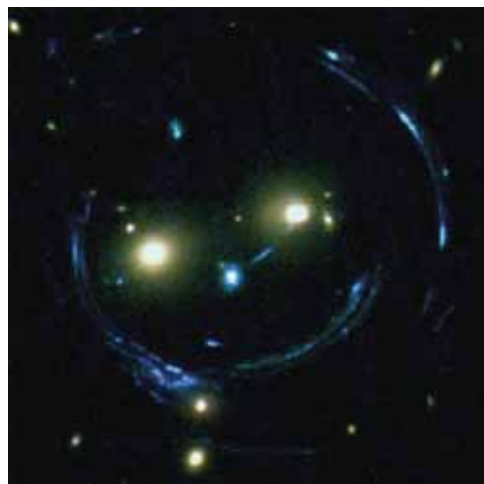
星はいずれ燃料を使い尽くし、死を迎える。太陽の場合は、約 45 億年後に中心がしゅうっと縮み、外側がプワッと膨らんで地球を呑み込んでしまう。しかしもっと重い星の場合は、中心が潰れる反動で外側が大爆発を起こし、近ければ昼間でも見えるとてつもなく明るい星、「超新星」になる。たとえば藤原定家の『明月記』に記録がある。宇宙の最初に水素とヘリウム

だけでできた「一番星」は太陽の 40 倍から 100 倍も重く、爆発して元素を宇宙空間にばらまいた。それをかき集めて第二世代の星が生まれ、それも爆発して死を迎える。太陽は第三世代の星だと考えられており、その「くず」でできた地球には私たちに必要な元素がふんだんにあったのだ。

こうした「一番星」がどういう星だったのか、理学部と併任の吉田直紀教授がコンピュータを駆使して調べ、その観測的証拠をハワイにあるすばる望遠鏡やチリのアルマ電波望遠鏡で宇宙線研究所と併任の大内正己准教授が探索している。

次に疑問になるのは、どうやって最初の星ができたのか。学校では「万物は原子でできている」と習うが、これは大ウソであることが 2003 年はっきりした。もし宇宙の物質がすべて原子でできているとすると、ビッグバン後の熱い宇宙では光の圧力に邪魔されて、原子が集まって星をつくるのは無理だった。熱い光の圧力に逆らって原子を集めるには、光と反応しない「暗黒物質」の重力が必要だった。しかも暗黒物質は原子の 5 倍以上もあり、宇宙では原子はマイノリティーなのだ。

つまり暗黒物質は私たちの「生き別れの生みの母」であり、私たちの存在の鍵なのに、誰も「会った」ことがない。しかしその重力の効果が何十億光年先の銀河から来る光を曲げるいたずらをする。高田昌広教授や A. レオトー（Alexie Leauthaud）、S. モレ（Surhud More）助教らはこのいたずらっ子がどこにどれだけいるのかを割り出している。筆者も含め、すばる望遠鏡を使って今後何億という銀河を観測し、



47 億年先の銀河が暗黒物質のいたずらで、不思議の国のアリスの「チェシャ猫」の様に見えている。こうしたいたずらのおかげで、暗黒物質の「隠れ家」が見つかる。（写真提供：Claude Cornen）

今後 5 年間で見えないはずの暗黒物質の世界最大の地図を作ろうとしている。

光を出さない暗黒物質は恐らく小さな粒粒「素粒子」で、私たちの体を毎秒何千万個も突き抜けているが、私たちは気がつかないのだ。だとすると、周りの雑音に邪魔されない地下奥深くの静かな環境に高感度の装置を置けば、一年に数回は暗黒物質が「こつん」とぶつかる音が聞こえるかもしれない。岐阜県神岡鉱山の地下 1000m の XMASS 実験で Kavli IPMU の鈴木洋一郎教授、カイ・マルテンス（Kai Martens）准教授らが雑音と戦いながら、この瞬間を待っている。

また、柳田勉教授・松本重貴准教授・筆者らの理論家は黒板で議論しながら、暗黒物質の理論を編み出し、その実験・観測にかかる性質を予言している。その正体が解れば、暗黒物質が生まれたと考えられる、ビッグバン直後わずか 10^{-10} 秒の宇宙の姿が見えて来る。そして初めて生き別れの生みの母に感謝できるのだ。

私たちはどこから来たのか。Kavli IPMU の研究はこんな人類何千年来の疑問に迫っている。



東大柏キャンパスにある Kavli IPMU 研究棟で毎日三時に行われるティータイム。世界 20 ヶ国から来た研究者と東大の大学院生、約 120 名が集まり、コーヒーやクッキーを片手に物理・天文・数学の議論をする。（写真提供：Kavli IPMU）



高分解能核磁気共鳴装置の進歩と研究の現場

山野井 慶徳（化学専攻 准教授）

試料を一樣な磁場中に置き、ある周波数の電磁波を照射すると、特定の原子核との間で共鳴現象が起こる。これを核磁気共鳴（Nuclear Magnetic Resonance（以下 NMR と略す））と呼び、磁気モーメントを有する核種を測定することができる。分子を構成する原子では同じ核種でも化学結合の違いによって、それぞれの原子核の感じる磁場が ppm（100 万分の 1）単位で異なる。この微小な磁場の差から分子構造に関する情報を得ることができる。測定対象となる代表的な核種は ^1H （プロトン）や ^{13}C （炭素 13）であり、有機化合物、金属錯体、そしてナノ粒子の構造解析に広く用いられる。NMR 装置の性能はテスラ（T）という磁場の強さを表す単位のかわりに、プロトン核の共鳴周波数であるメガヘルツ（MHz）で表記する。たとえば、磁場強度 2.75 T の装置

は 100 MHz の装置とよぶ。

NMR では、試料に印加される磁場強度が高いほど装置の分解能と感度が向上する。そのため今では、NMR 装置は 400 MHz（磁場強度：9.4 T）以上のプロトン核共鳴周波数をもつ高分解能超伝導磁石型装置で測定するのが一般的である。NMR では測定中の磁場強度の変動を最低限に抑える必要がある。このため、電気抵抗ゼロで電流が減衰せず、磁場が変動しない超伝導磁石が利用される。超伝導磁石では、超伝導線材の接続箇所で発生する抵抗を抑えるため、通常の電磁石より高度な技術が活用されている。現在、もっとも分解能の高い装置は 920 MHz（磁場強度：21.6 T）であり、これまで困難とされてきたタンパク質や生体高分子の構造解析において、強い威力を発揮しつつある。

写真は化学専攻の共通 NMR 装置として 2014 年 5 月に導入した超伝導磁石型 NMR 装置である。図の Ultra Shield は、500 MHz（磁場強度：11.7 T）の強力磁石でありながら外部への磁場漏れが殆どないことを意味する。この装置を使用すれば 2～3 mg 程度の微量試料で十分な測定結果を得ることができる。装置に試料をセットすると自動で磁場補正と分解能調整をし、数分以内に測定が終了する。筆者が大学院生だった 20 年前では、60 MHz や 100 MHz の NMR 装置が学科共通装置であった。また、上級者用として使用していた 270 MHz の NMR 装置は磁場漏れが著しく、不用意に装置に近づいて磁気カード情報が消失してしまったこともあった。使用に際し熟練した技術も必要で、満足のいく測定結果を得るのに 30 分程度かかることもあった。今では、検出感度、操作性、安全性が格段に向上し、またその性能を活かすような新しい測定手法も開発され、NMR の利用範囲は広がった。

化学専攻無機化学研究室では、周期表の金属元素と非金属元素の境目に当たるケイ素を含む化合物群の合成と光物性を研究ターゲットの 1 つとしている。ケイ素は ^{29}Si の核スピンを有しているため、 ^{29}Si NMR を分解能良く測定することにより、研究室で見出した新規合成反応のメカニズムや光機能ケイ素材料の構造を解明することができた。紙面の都合上、NMR の長所のすべてを説明できないが、化学研究の現場では高分解能 NMR 装置が強力な武器であることが伝えることができれば幸いである。



■ 超伝導磁石型 500 MHz NMR 装置