

2. 2. 2 中くらいの階層・メソスコピック (mesoscopic)

大きな階層と小さな階層の境界に、現在、注目されている「ナノテクノロジー(ナノテック, nanotechnology)」に代表される「メソスコピック領域」がある。

ナノは、SI 単位などで 10^{-9} を表わす接頭辞 (unit prefix) であり、マイクロ 10^{-6} と同じく、小さいという意味のギリシア語に由来する。ナノテックは、ナノメートル (nm) という長さ

特徴を持つ技術を指す。

表 2-2-9 に比較적으로よく使われる SI の接頭語 (SI 接頭辞) の例を示す。この他にも、ペタの上に3つ、ピコの下に3つ、センチとミリの間にデカがある。

日本語は、接頭辞だけを示して肝心の単位の方を省略することが非常に多く、会話の中だけでなく印刷物でもよく見かける。時速 100 キロと言えば 100km/h であり、15 ミリの隙間と言えば 15mm である。

気象のニュース報道ですら、降水量を、時間 100 ミリ (降雨)、一晩 50 センチ (降雪) などと表現し、100 ミリメートルや 50 センチメートルと正確に言うことの方が珍しい。画面の表示にはメートルとあっても読まれていない。

表 2-2-9 比較的によく使われる SI 接頭辞

接頭語	数	記号	実例
ペタ	10^{15}	P	1 国の年間のエネルギー消費量、ペタジュール PJ
テラ	10^{12}	T	ハードディスクの記憶容量、テラバイト TB。1 国の年間の発電量、テラワット TW
ギガ	10^9	G	通信速度：ギガビット毎秒 不揮発メモリの容量 256 ギガバイト、大型の発電所の出力 1 ギガワット=100 万キロワット
メガ	10^6	M	様々な物理量から日常まで多数。メガパスカル (高圧ガス)
キロ	10^3	k	様々な物理量から日常まで多数。キロメートル、キログラム、キロパスカル。ここから下の接頭語は全て小文字になる
ヘクト	10^2	h	例外的に 3 の倍数ではない ヘクタール、ヘクトパスカル
センチ	10^{-2}	c	例外的に 3 の倍数ではない センチメートル、センチポアズ。センチリットルなどは日本では使わない
ミリ	10^{-3}	m	ミリグラム、ミリメートル、ミリアンペアなど実例は多数
マイクロ	10^{-6}	μ	マイクロ波、マイクロマシン、マイクロコンピュータなど「小さい」という意味で用いられる。
ナノ	10^{-9}	n	ナノメートル、ナノ秒。ナノテックなど
ピコ	10^{-12}	p	ピコ秒、ピコリットル
フェムト	10^{-15}	f	フェムトメートル

「1m50cm」の読み方を小学校では「1メートル50センチメートル」と正確に教えている。しかし、ほとんどの大人は、これを「1メートル50センチ」と読み、後ろのメートルを省略して話している。さらに「1メートル50」とセンチまで省略することもあり、この場合の50は、50センチメートルなのか50ミリメートルなのか、はっきりとしない。高圧ガス機器の設計や製作現場では、聞き間違いを防ぐためにセンチメートルを使うことはあまりない。通常、1m50は、1050ミリを意味しており、1m50cmは1500ミリあるいは、メートル500である。業種によっては、暗黙の了解が異なり、「1メートル50」は、1050mmとも1m50cmともいわずれにもとれる。

高圧ガスの業界で15メガといえば15メガパスカル(15MPa)、70メガといえば70メガパスカル(15MPa)である。圧力が、150kPaの場合は150キロと省略せずに、150キロパスカルと読む。「圧力150キロ」というと、昔の圧力の単位「150kgf/cm²G」と勘違いする可能性があるので、キロパスカルはキロで切ることはしない。

キログラムやギガバイトでもグラムやバイトが省略される。SIの場合、接頭語のキロとグラムには特別な関係があり「キログラム」がひとつの基本単位になっているが、それでも日本語ではキロだけで会話が成立してしまう。単位そのものを省略して、接頭辞だけでほとんどの会話が通じる言語はあまり多くはないので、日本語以外の言葉でコミュニケーションを行う場合には、注意が必要である。

「ナノテク」は、ナノメートルに由来するテクノロジーである。接頭語がそのまま研究や技術領域の言葉になる例は珍しいが、これは世界的に広く認められている言葉であって、特に日本語が省略形を多用するからというものではない。

表 2-1-1 に示したように、大きな階層を巨視的な領域＝マクロスコピック(macroscopic)と呼び、小さい階層を、微視的な領域＝ミクロスコピック(microscopic)と呼ぶ。

その境界は、およそ 10^9 m(1nm)近辺にあり、メソスコピック(mesoscopic)と呼ぶ。ミクロスコピックをマイクロと縮めると、マイクロや長さのミクロンと混同しやすいので、ここでは縮めずにミクロスコピックと書くことにする。合わせてマクロスコピックもマクロと縮めないことにする。マクロスコピックとミクロスコピックでは、現象の見え方や考え方など、非常に多くのことが異なるため、この境界は非常に重要である。われわれは、マクロスコピックな階層にいるため、メソスコピックやミクロスコピックの世界の常識や法則を簡単に受け入れることができない。階層の違いは大きい。

階層を大きい方から次第に小さい方をみていくと、メソスコピックのあたりから、

ミクロスコピックの不思議な性質が現れ始める。それまでの常識とは異なる世界が現れてくる。考え方や見方を大きく変えていかななくてはならないのが、このメソスコピックである。したがって、マイクロメータ (10^6m) は、マクロスコピック領域であり、ただ長さが小さいだけであるが、ナノメータ (10^9m) は、メソスコピック領域であり、単に小さいだけではなく、量子の階層が近づいてくるという点で大きな違いがある。

ナノテクノロジーとは、リチャード・フィリップス・ファインマン (1918~1988年、米国) が 1959 年に提唱したメソスコピックの概念から始まる「ナノスケールにおける特異な物理現象」を利用する技術分野である。ファインマンより 100 年前、ファラデーは、金の塊と金のコロイドの光学特性が異なることを発見し、「大きさが異なると性質が異なる」という、現代のナノ科学と同じ概念が既に見出されていた。しかし、それが、メソスコピックの階層の現象としてはっきり認識されるようになったのは、20 世紀のファインマンからである。

ナノテクには、①ナノ素材分野：カーボンナノチューブ (carbon nanotube、CNT) のようなナノ材料、ナノ粒子、ナノ物質、②ナノデバイス分野：半導体素子の自己組織化 (セルフ・アSEMBリー) ③バイオ利用分野 (バイオセンサ、ゲノム創薬、ドラッグデリバリーシステム) など、非常に多くの有望な技術が含まれている。

10^6m の階層を利用する微小デバイスは、マイクロマシンあるいは MEMS (Micro Electro Mechanical System、メムス) として既に実用化が進んでおり、スマートフォンや自動車など身近な物に利用され、広く知られるようになった。ナノテク 10^9m は、原子・分子の階層 10^{10}m に近いテクノロジーである。現在は、さらに小さな 10^9m 階層で機械動作を伴うナノマシン (nanomachine) や微小構造を持つ NEMS (Nano Electro Mechanical Systems、ネムス) も実現へ向けた研究開発が進められている。ナノテクといえば、ナノ材料分野が注目を浴びることが多いが、ナノデバイス分野のナノテクにも大きな発展が期待されている。ファインマンは、メソスコピックを提唱した時、「将来この技術によって百科事典の全てが針の先ほどの大きさに記憶できるだろう」と予言したが、まさにその予言は的中しつつある。

ファインマンは、量子電磁力学への貢献によって朝永振一郎とノーベル物理学賞を受賞 (1965 年) した素粒子物理学者であり、素粒子の反応過程を表わすファインマン・ダイアグラムが有名である。ファインマン・ダイアグラムは、素粒子だけでなく、陽子や中性子などの複合粒子の反応にも用いられ、物理学における反応過程の標準的な記述法になっている。

ファインマンは、物理学の教科書「ファインマン物理学」や、『冗談でしよう、ファインマンさん』シリーズなどを執筆、さらに数々の逸話でも知られる有名人である。ファインマンの専門は、量子電磁力学や数学（量子力学の理論手法である経路積分など）であるが、多彩な才能を持ち、様々な分野で活躍した。



図 2-2-11-リチャード・P・ファインマン
Wikipedia

量子の確率過程を拡散方程式として定式化するファインマン・カツの公式は、シュレーディンガー方程式の解のひとつとして得られているが、金融工学にも応用されている。

ファインマンは、技術・工学の分野でも活躍しており、1980年代にその概念を提唱した量子力学的な重ね合わせを用いる「量子コンピュータ」は、現在も実現に向けた研究が続けられている。米国 NASA のチャレンジャー号爆発事故の調査委員会のメンバーとして安全文化に対する提言も行っており、理論物理学者の枠を越えて活躍した。

数学と物理学の天才ファインマンが、本業以外で示した業績のひとつメソスコピックの概念は、今まさに実用化へと進みつつある。

マイクロには、小さいという意味があり、「巨視的／マクロスコピック」に対して「微視的／ミクロスコピック」という用語が使われるが、長さの単位であるマイクロメートル(μm)が 10^6m であるため、かなりややこしいことになっている。

よく耳にする「マイクロの世界」と言うのは「小さな世界」という意味であるが、文字通り、ミクロン 10^6m を指すこともあれば、本当にミクロスコピックな世界を意味する場合もある。「マイクロの世界」が、ミクロンの長さを持つということであれば、これは、小さなマクロスコピックの階層（小さいけれどマクロの世界）のことであり、原子や素粒子のような量子の世界を表わすのであれば、ミクロスコピックの階層（物理学における本当のマイクロの世界）のことである。

小さいという意味を持つマイクロから「ミクロン」という長さの単位が作られ、結果的にその長さは、物理学としては、「それほど」小さくはなかった。最も大きなミクロスコピックをメソスコピックのすぐ下だとすると、 10^{10}m 、ミクロンは最も大きなミクロスコピックよりも1万倍も大きいのである。

長さの単位「ミクロン (micron, 記号は μ)」は、国際度量衡総会において廃止され(1967年)、現在は、SIには含まれていない。ミクロンが廃止されてから既に半世紀たつが、日本の計量法では、暫定的に使用が許されて1997年に禁止された。ミクロンは、1879年から長期間使われていたこともあって、かなり多くの文献や書物にミクロンという記述が見られる。

計量法は「取引又は証明において非法定計量単位の使用を禁止」しており、基本的には、国際的な基準 SI に統一し、国内の工業規格である JIS とも整合性をとる方向にある。歴史的な経緯もあって計量法には一部に非 SI があり、カロリー（栄養）、mmHg（血圧）、体積のトン（船舶）、ノット（航空）、オングストローム（結晶）などが用途を限定して使用が認められている。長さの単位ミクロンは、暫定的に使用が認められていたが、禁止後は、坪や尺、石高、貫目といった古い単位と同様、公共の場や取引には使用することはできなくなっている。 μ あるいは μm をミクロンと読むことできない。

ミクロンが廃止され、 10^{-6}m の長さには、マイクロメートル（ μm 、micro metre）が正式に使用されるようになったため、 μ と μm の混乱はなくなった。しかし、ミクロスコピック（ミクロな世界）は、メソスコピックよりも小さい階層であり、 μm （ μ メータ）は、メソスコピックより3桁も大きいマクロスコピックの階層（マクロな世界）であるということには変わりはないため、ミクロという言葉の使い方は難しいままである。

一方、長さの単位が、マイクロメートルになったため、測定器のマイクロメータの名称が紛らわしくなった。日本語では、「マイクロ」、「ミクロ」、「メートル」、「メータ」を使って微妙に使い分けており、長さを測る測定器は、「マイクロメータ」、顕微鏡で使う場合は、「ミクロメータ」、長さは、「マイクロメートル」である。しかし、英語では同じ発音であり、米語の場合は、綴りも同じである（micrometer）。

ナノメートルは、マイクロメートルの1000分の1しかない極微の世界である。

20世紀後半から、ナノテク分野の数々の研究成果が、一般にも知られるようになった。フラレンの発見（1985年）、カーボンナノチューブの発見（1991年）、走査型トンネル顕微鏡の発明（1982年）、金属ナノワイヤー、グラフェン（2003年）、量子ドットなどが注目された。日本では、「ナノサイエンスあるいはナノテクノロジーにおける研究業績」に対して授与される「江崎玲於奈賞」が2003年に創設され、ナノテクは、ひとつの科学領域・技術分野として評価され、その成果が大きく期待されるようになった。

ナノで始まる言葉が増えている。ナノスケール、ナノテクノロジー、ナノ工学、ナノサイエンス、ナノマシン、ナノ材料、ナノインプリント（LSI技術）、ナノプロセス、ナノクラスター、ナノピンセット…など、すぐには、どのような技術なのか理解するのが難しいほど多くの言葉が作られている。ナノサイエンスや、ナノ工学などの名称を冠した大学の専攻や研究室なども現れている。

ナノという言葉がハイテクをイメージされる流行語となり、「小さい」という意味だけで、ナノが使われることもある。水中の小さな気泡を利用する技術を「ナ

ノバブル」と呼んだことがあったが、実際は直径 $20\mu\text{m}$ から $1\mu\text{m}$ 以下の微細な気泡を利用ため、現在は、「マイクロバブル」と呼ぶのが一般的である。1nm は原子 10 個分の大きさであるから、さすがにそこまで小さな気泡は考えにくい。水に溶解しにくい気体をマイクロバブル（数百 nm から数十 μm の気泡）やミリバブルとして「溶解」させるガス・アプリケーションが考えられている。

ナノ粒子（nanoparticle）の場合は、 $1\sim 100\text{nm}$ ($1\text{nm}\sim 0.1\mu\text{m}$) ほど、2 桁ほどの幅があり、ナノメートルからマイクロメートルの間の粒子の持つ特異な現象が利用される。たとえば、カーボンナノチューブ（CNT、carbon nanotube）は、直径が $0.4\sim 50\text{nm}$ という非常に微細な構造を持ち、その物性を利用した応用技術の開発が進んでいる。

カーボンナノチューブは、グラファイトの単原子の層（グラフェンシート）で円管を作ったような構造を持つ微細な「チューブ」であり、単層のものをシングル・ウォール・ナノチューブ（SWNT）、多層のものをマルチ・ウォール・ナノチューブ（MWNT）と呼ぶ。SWNT は非常に大きな比表面積を持つ。

CNT は、半導体材料（構造によって電気伝導度が変わる）、燃料電池（高い導電性と大きな表面積をもつ）、顕微鏡の探針、構造材料（軽量、高強度）、複合材料、など実に様々な利用が考えられており、次世代のハイテク材料として期待されている。

様々なナノテクノロジーが、脚光を浴びるようになり、CNT のようなナノテク材料の実用化が期待されるようになってきたが、その歴史は古い。CNT は、1970 年代にソ連で発見され、1980 年代に遠藤守信（1946 年～、信州大学）がその製造法を研究、その後、飯島澄男（1939 年～、NEC 筑波研究所、産業技術総合研究所）が、物質の構造として正式に発見、CNT を再発見した（1991 年）。

一方、CNT の二次元構造（ 1.4nm の筒）中の電子の特異なふるまい（1 次元性）が朝永ラッティンジャー液体模型によって予言されたのは、半世紀上も前である（1950 年）。江崎玲於奈（1925 年～、東京通信工業、IBM）が、一次元の周期的な構造変化を有する人工単結晶「半導体超格子」の概念を提案したのは、1969 年である。江崎は、固体でのトンネル効果を初めて実証、「半導体内および超伝導体内の各々におけるトンネル効果の実験的発見」によってアイヴァー・ジェーバー（1929 年～、ノルウェー、米 GE）とともにノーベル物理学賞を受賞している（1973 年）。ナノメートルサイズの研究や応用技術の開発は容易ではない。朝永振一郎らの理論が、KEK の放射光研究施設における実験によって、実際に確認されたのは、53 年もたった 2003 年である。

表 2-2-10 にマクロ、メソ、ミクロの関係を再度まとめる。科学では、古典物理学が通用する範囲と現代物理学（量子論）でなければ説明できない範囲の境界が比較

的はっきりしており、 10^9 m を境にマクロスコピック（巨視）とミクロスコピック（微視）が分けられている。これに対して、生物や工学の分野は定義や境界がややあいまいであり、 10^6 m という科学の階層としては、かなり大きなサイズでも「ミクロの世界」と呼ぶことがある。科学的な取り扱いからは、マクロであるマイクロメートルレベルをミクロと呼ぶため少々ややこしい。

表 2-2-10-マクロ、メソ、ミクロの関係

大きさ	科学（物理、化学）		工学、生物学	イメージ
10^{10} m～	↑	↑	マクロの世界	宇宙、望遠鏡
10^6 m	↑	↑	ミクロの世界↓	細菌、ミクロン
10^8 m	マクロスコピック	マクロの世界	↓	ウィルス、電子顕微鏡
10^9 m	メソスコピック	ミクロの世界	ナノメートル↓	ナノテク
10^{10} m	ミクロスコピック		オングストローム	原子、分子
10^{12} m	↓		↓	原子核、同位体
10^{15} m	↓	素粒子の世界	↓	電子、素粒子

2. 2. 3 大きな階層・マクロスコピック (macroscopic)

マクロとは「巨大」を意味し、様々な分野でこの言葉が使われている。

コンピュータの言語 (マクロ言語)、一国規模の経済 (マクロ経済学)、写真撮影法の接写拡大 (マクロレンズ) など、ミクロの対義語として使用されるマクロは、ギリシア語のマクロス (長い) が語源であり、長さを表わす言葉である。

物理学では、ミクロスコピックよりも大きく、さらにメソスコピックよりも大きな階層をマクロスコピックと呼ぶ。微視的ではない大きさがマクロ (巨視的) であるため巨大という意味合いが少し異なる。階層の話を進めるとメソスコピックから始めたのは、これより大きいマクロスコピックと小さいミクロスコピックでは、ものの見え方、考え方が大きく異なるためである。メソよりも大きいものがマクロであり、その境界 10^9m を認識しておくことが重要である。

空気や酸素などのガス分子は人工的に作り出す (合成する) ことはできない。巨大な加速器を用いても人工的に合成できる元素はごくごくわずかである。作ることができないものは、考えても仕方ないともいえるが、酸素や窒素の元素がどのようにして作られたのか、ガス屋としては、その起源や歴史を知っておくことは無駄ではないと思う。ミクロスコピックな分子や原子の起源を理解するためには、はるかに大きなマクロスコピックの階層、宇宙の歴史をたどることになる。

地球を作っている酸素や窒素や炭素や鉄などの元素は、かつての星の残骸である。宇宙空間には、ところどころに、太古に存在した恒星が爆発した後の残骸が「分子雲」 (molecular cloud) として漂っており、そのガス部分が恒星 (太陽)、あるいは巨大ガス惑星 (木星など) となり、チリ (固体) 部分が岩石惑星 (地球など) となり、恒星系 (太陽系) が作られた。

宇宙の平均は、空間とエネルギーである。しかし、ほとんど何も無い空間にも、ところどころにかすかに物質 (星間物質) があり星雲や分子雲となっている。その密度は、 1cm^3 あたり原子数で $10^{-4}\sim 10^6$ 個ほどとかなり幅があるが、 0°C 、 1atm の理想気体の分子数が、 1cm^3 あたり 2.68×10^{19} 個であることと比較すると極めて希薄である。星間物質の中では、恒星系の原料となる分子雲の密度が最も高いが、それでも地球の地表面の空気の密度より 13 桁も希薄である。さらに、地球を作っているほとんどの元素は、その構成比率が、宇宙の平均からは大きくかけ離れており、地球は自然の一部ではあるが、非常に偏った特殊な存在、自然からかけ離れた存在である。

2. 2. 3. 1 宇宙と観測可能な宇宙 10^{27} m

地球は宇宙の一部であるが、地球のことを一般的には宇宙とは呼ばず、地球の外を宇宙と呼ぶ。海に囲まれた国が外国のことを「海外」と呼び、島国である日本や英国が自国を除く近隣をアジア、ヨーロッパと呼ぶのに似ている。

地球外の宇宙の研究や開発が国家規模あるいは先進国を中心とした国際機関で行われている。近年では、宇宙空間を利用する民間ビジネスも興りつつある。

産業ガスの技術は、宇宙開発にも多く利用されている。産業ガスのビジネスの範囲は空気のある地上だけであるが、その技術や提供するガスは、宇宙の研究や開発にはなくてはならないものである。宇宙開発や研究で使用される観測装置では、ノイズを少なくするために液体ヘリウムで冷却する超低温の機器が使用され、打ち上げ用のロケットには、推進材や燃焼材として液体水素や液体酸素が搭載される。宇宙線や様々な天体観測には、超低温機器や液体キセノンなどが使用される。宇宙事業部という部門は、航空機メーカー、電機メーカー、重工メーカーだけでなく、産業ガスのメーカーにもある。

宇宙空間で利用される人工衛星は、ぶっつけ本番で使用される。よほどの理由がなければ宇宙での試運転ということはない。そこで、機能確認のために、宇宙空間の環境を模擬した宇宙環境試験装置（スペース・チェンバ）を用いた地上試験が必要となる。

スペース・チェンバには、宇宙環境、惑星大気などを模擬するための真空排気装置、ガス供給装置、加熱冷却装置、磁場発生装置、各種計測システム、その冷却システム、ソーラーシミュレータ（擬似太陽）などが備えられており、産業ガス分野が培ってきた真空排気技術、断熱技術、低温技術、溶接技術、気密構造などのノウハウなどによって、製作、運用されている。

写真は、大陽日酸（株）製作の大型スペース・チェンバで（同社ではスペース・シミュレーション・チェンバの名前で呼ぶ）、巨大な真空容器に人工衛星などの試験体を格納するための開口部が写っている。本体の大きさは、直径 13m×長さ 16m、到達圧力は 1.33×10^{-5} Pa（13 μ Pa、到達時間 16 時間以内）、低温系



図 2-2-12 JAXA の宇宙環境試験装置（スペース・チェンバ）

写真は、大陽日酸 Web に掲載の同社製「スペース・シミュレーション・チェンバ」

統と排気系が装備される。チェンバの圧力は、「2.2.1.3 ガスの圧力と産業ガス(3) 圧力の範囲」の表の値と比べると分かるように、非常に低圧力(高真空)であり、外気圏を飛行する宇宙ステーションの環境よりも低圧であるが、地上で作られられる環境であるため、さすがに標準的な宇宙空間並みの真空という訳にはいかない。宇宙の真空に比べると地球上には物質が多過ぎるのである。

自然界を対象とする学問には、天文学、地文学、水文学、人文学などがあり、その多くが地球科学あるいは人間に関するものであるが、天文学だけは、地球以外のものも対象としており、非常に大きな階層を取り扱う。大昔より、宇宙は非常に大きいと考えられてきたが、20世紀以降の科学が明らかにしてきた、宇宙の大きさはとてつもなく大きい。

インターネットプロトコルでは、IP アドレスの不足に備えて IPv6 のアドレス空間が考えられており、 10^{38} 個 (2^{128} 個) である。この数字は、このくらい大きな空間があれば、将来も埋まることはないだろうと思われている大きな数字である。しかし、宇宙にあるバリオンの数(およそ原子の数、物質の量)は、 10^{80} 個あり、桁違いに大きい。宇宙はスカスカで、ほとんどが空間ばかりであり、物質はわずかしかな存在しないが、それでも人間が考え付く数値よりはるかに多い。数学的に考えられた十分に大きな仮想空間よりも、実際の宇宙の原子の数のほうがはるかに大きい。とてつもない巨大数を天文学的数字ともいう。

天文学が取り扱う最も大きな階層は「宇宙」であるが、ガス屋が、直接関係しそうな宇宙は、地球のすぐ近くの極めて小さな宇宙空間である。しかし、ここでは、ガスや低温機器の重要な顧客でもある宇宙物理学の分野がどういった研究を行っているのかを知るために、あるいは酸素や空気の起源を知るために、最も大きな宇宙の階層から順番に小さな階層へと話を進めることにする。

最新の科学によると、われわれの宇宙は、「無量宇宙、マルチバース(multiverse)」の中の「ひとつの宇宙、ユニバース(universe)」である。宇宙の生成と消滅を研究する理論物理学では、数多くの宇宙の中のひとつが、われわれの宇宙ということになる。したがって、科学として宇宙を表わす概念は、マルチバースの中のユニバースであり、その成因は諸説が研究されているが、共通しているのは、同じ宇宙では、同じ物理法則が成り立つということであり、この範囲が、ひとつの宇宙(ユニバース)と考えられているということである。物理学者ではないわれわれにとって、現実の宇宙は、ユニバースであり、唯一、最も大きな階層と考えてよさそうである。

ユニバースの他に宇宙を表す言葉には、コスモス(cosmos、英語ではコスモ cosmo)

がある。コスモスは、哲学や宗教における宇宙観、芸術の世界、人体や生物のように複雑な小宇宙を表わす場合など、概念としての宇宙に用いられることが多い。どちらかと言うと、科学から少し距離を置いた「宇宙観」や宗教や哲学から科学までを含んだ「宇宙論 (cosmology)」の用語である。科学の分野では、ほとんどの場合は、空間としての「宇宙 (ユニバース)」が用いられるが、宇宙線 (cosmic ray) や宇宙マイクロ波背景放射 (CMB, cosmic microwave background) などの科学用語に「宇宙 (コスモス)」が用いられることがある。

なお、英語のスペース (space) は、空間であり、本来は宇宙という意味はないが、日本語では、宇宙と訳されることがある。space craft (宇宙船)、space station (宇宙ステーション)、JAXA (Japan Aerospace eXploration Agency、宇宙航空研究開発機構) の aerospace は「航空宇宙」、NASA (National Aeronautics and Space Administration、米航空宇宙局) や ESA (European Space Agency、欧州宇宙機関) など、これらの space は日本語では「宇宙」と訳されている。

日本語では「宇宙」というひとつの言葉も、それは西洋の言葉では、ユニバースであったり、コスモスであったり、あるいはスペースであったり、それぞれ異なった概念を持つ宇宙あるいは宇宙空間である。

Space を空間とする代表的な言葉に「spacetime」がある。これは、アインシュタインの特殊相対性理論の幾何学となっているミンコフスキー空間の論文の中に示されている「Raumzeit」が英語に直訳されたものである。日本語にすると「空時」となるが、何故か順序が変わって「時空」と訳されている。宇宙を研究するために、宇宙船が地球を飛び出していくということは、何もない空間 (space) を飛び回るといことであり、そこには地球上とはまるで異なる空間と時間が広がっている。スペースをうまく日本語にすることは難しそうなので、宇宙と訳しているようである。空間と宇宙は本来は別の概念である。

理論から導かれる現在の宇宙 (ユニバース) の大きさは、 10^{36}m という。3 次元の立方体、球体であれば 10^{108}m^3 である。数字が非常に大きいことは分かるが、比較するものがないため、まるで検討がつかない大きさである。

一方、観測できない領域のことを考えても意味がない、という科学の立場があり、理論上観測可能な領域を「観測可能な宇宙」(The observable universe) と呼び、これを最大の階層とする考えが広く認められている。

「宇宙」というと、この「観測可能な宇宙」を指すことが多く、NASA のホームページや様々な書物には、この「観測可能な宇宙」という文字が頻繁にでてくる。少々まどろっこしい言葉ではあるが、単に宇宙とはいわずに、科学的根拠に基づく観測可能な宇宙という言葉がよく使われている。観測可能というのは、技術的

に観測できるかどうかということではなく、「地球からみて理論的に観測が可能な宇宙」という意味であり、理論的に観測できない領域のことは考えないということでもある。

ビッグバン理論に基づく観測可能な宇宙の大きさは、(現在)、 10^{27} mである。

ビッグバン理論は、1927年に提唱され、その後の実証データや多くの研究者による理論的補強によって、今では標準的となった宇宙の「始まり」を表わす理論である。しかしビッグバン理論には、そのままでは、物理学的に説明ができない、いくつかの問題点があるため、スティーヴン・ウィリアム・ホーキング(1942年～、英国)、ロジャー・ペンローズ(1931年～、英国)によって、量子宇宙論の研究が進められている。

ビッグバン以前の宇宙を説明し、現在の宇宙の謎を明らかにするために、インフレーション理論が提唱されている。最初のインフレーション理論は、アラン・グース(1947年～、米国)と佐藤勝彦(1945年～、日本)が、ほぼ同時に独立に提唱された(1981年)。現在もアンドレイ・リンデ(1948年～、ロシア、米国)や村山斉(1964年～、日本)などの著名な理論物理学者によって研究が進められている。

ホーキングや佐藤勝彦らによる一般の人向けの解説本が多数あり、放送大学や様々な科学番組でも解説されているので、興味があれば、参照願いたい。

インフレーション理論とビッグバン理論は、難解な話であるが、神話やおとぎ話ではなく、科学のシナリオである。科学的宇宙論は、理論や観測に基づく科学であり、宗教や観念論とは違う科学の一分野である。(→「2.2.5 時間の階層(タイム・スケール) 2.2.5.1 宇宙 138億年の歴史」でもう少し詳しく示す)

米国、欧州がこれまでに3機の宇宙論専用探査機を打ち上げ、詳細に観測しており、宇宙の大きさ、年齢、背景放射のわずかなゆらぎ、ほとんど平坦であるが、わずかに存在する非等方性(すなわち宇宙の地図)、組成などが得られている。

3機目の探査機プランク(欧州宇宙機関の探査機で、軌道は人工衛星ではなく人工惑星)の観測によって、地球から「可視宇宙」の端(宇宙光の地平線)までの距離は、共動距離465億光年であり、可視宇宙は、ほぼユークリッド空間に近い球体であるとされた。観測可能な宇宙は、この可視宇宙よりも大きいとされ、少なくとも共動距離約930億光年以上の球体のようなものと考えられている。(1光年 $=9.46 \times 10^{15}$ m)

ビッグバン理論によると、宇宙は、非常に小さなところから膨張して大きくなったため、全ての空間は、同じところから始まっている。したがって、どこから観測しても同じであり、どこかが中心であるとか端であるということがない。宇宙には

中心も端もないので、地球からみた宇宙はどの方向にも同じ大きさを持つ球体のようなものであり、地球は中心でも端でもないが、地球からみた大きさが宇宙の大きさである。

宇宙空間は、膨張を続けているため、その中で距離を測る時には、空間の膨張に無関係の「固有距離」として考えるのではなく、膨張する「共動距離」で考えるのが一般的である。速度は、距離と時間で定義されるが、宇宙を記述する相対論の世界では、光の速度だけが一定で、他のもの、時間と空間は、変化するため、距離の概念もわれわれの階層の常識で考えることはできない。

地球に届いている最も遠い光は、宇宙の年齢である138億年の時間をかけて地球に届いており、その距離は、光路距離（光行距離）では、138億光年である。しかし、その光源は「現在」、地球から「共動距離465億光年」のところであり、これが、大きさ930億光年の球体のような「観測可能な宇宙」ということになる。時間も絶対的ではないため、「現在」の「距離」と考えることは正しくないと思うが、「今」われわれが観測可能な宇宙は、光が465億年かけて進む距離まで存在するということである。人間の階層の常識で考えると、宇宙の年齢は138億年であるため、465億光年も先の光は地球に届いていないと考えてしまうが、光速度だけが一定で、空間が膨張を続けている宇宙では、138億年前に生まれた極微の宇宙が発した光は、膨張によって「現在」は、465億光年先にあると考え、これが宇宙の大きさということになる。

アインシュタインは、特殊相対性理論によって、物質や波は、空間中を光速度を越えて移動することはできないとしたが、時空そのものにはこの制約がない。空間が膨張する速さが、われわれの考える「光速度」より大きいようにみえても、インフレーション理論、ビッグバン理論と特殊相対性理論は矛盾することがない。したがって、地球からみた空間の膨張速度が光速度に達した場所よりも先にある天体の後退速度は、光速を超える。したがって、その天体からの光は地球には届かなくなり、その先は、理論的に観測不可能ということになる。このような、最も遠い光は「宇宙光の地平面」と呼ばれ、そこまでが、観測可能な宇宙である。物理学では「光速を超える情報の伝播は存在しない」という原理を因果律と呼び、因果律が断絶している空間は、同じ宇宙ではないと考える。

このまま空間の膨張が続けば、いつかは全ての星が観測できなくなり、宇宙の始まりの証拠である背景放射すら消えてしまい、過去の記録は全て失われる。エントロピーは増大し、宇宙の温度はゼロケルビンに近づき、宇宙は熱力学的終焉を迎える。一方で、そのようなシナリオの宇宙論に対して、膨張している宇宙は、どこかで逆に収縮に向かい、重力によって集まり、始まりと同じようにまた一点に収縮す

るというシナリオもある。宇宙の始まりがビッグバンであるのに対して宇宙の終焉がビッグクランチになるという理論である。

宇宙の終焉が膨張で終わるのか、それともどこかで収縮に転じて1点に戻るのかを求める研究（観測や理論）が行われている。

空間は質量（重力）によって歪むが、重力には引力しか見つかっていない。斥力が見当たらないのである。しかし、にも関わらず、宇宙は膨張を続けており、膨張に必要な斥力が存在するはずであり、そのダークエネルギー（とダークマター）の量が、宇宙の運命を決めているのだという。ただし、宇宙の終焉は、太陽や地球や銀河系の寿命よりもずっと先のことであり、誰も確認できない（少なくとも地球人には）ので、科学が取り扱うものではないという主張もある。

これまでの観測によって分かっていることは、観測可能な宇宙は、あらゆる方向に 46.5×10^9 光年の大きさを持つ体積 9×10^{30} 立方光年 ($3 \times 10^{80} \text{m}^3$) の球体であり、そこには 8×10^{10} 個（800 億個）から 1.7×10^{11} 個（1700 億個）の銀河があり、その中には、 $3 \sim 7 \times 10^{22}$ 個の恒星（太陽）があり、ここに含まれる物質は、バリオン（陽子と中性子）の数として 10^{80} 個と推定されている。とてつもなく大きな宇宙も 10 の冪乗で表わすと、驚くほど普通の数字になってしまう。便利な数学のおかげであり、最新の科学の成果である。

また、光の速度に比べると、現在の宇宙の時空は非常に大きくなっている。宇宙の大きさに比べると、光の速度は非常にゆっくりとしているため、過去の事象は、長い時間をかけて様々な形で地球に届いている。したがって、「遠く」を観測することは、「古い」過去を「今」観測できるということである。

2. 2. 3. 2 銀河、 10^{21}m ～

観測可能な宇宙 10^{27}m から階層が6桁小さく 10^{21}m の階層になると、よくある「ひとつの銀河」の大きさになる。わずか半世紀ほど前まで、宇宙の大きさは銀河の大きさほどだと思われており、宇宙には銀河がひとつしかないと考えられていたが、現代の科学が明らかにしている事実は、われわれの銀河は、宇宙にある数千億個の銀河のひとつであるということである。

銀河の階層でも、まだ、非常に大きいのが、観測可能な宇宙が理論的・数学的にイメージすることが非常に難しいことに比べると、映像としてとらえられる天の川銀河の姿によって、少しだけ現実味が増す。

宇宙は、ほとんどが何も無い空間が広がっており、ところどころに銀河が存在する。夜空を見上げたとき、満天が全て銀河や星で埋め尽くされることはない。もし星の数が無限にあるのなら夜空は暗くならず、まぶしいほどの光があるはずであるが、有限の宇宙にある星の数は有限であり、地球から見える「今」の夜空は暗い。遠くの光が地球に届くまでに広がり弱くなるということもあるが、星の数に比べると、今の宇宙はとてつもなく大きく、ほとんど何も無いため、夜空は暗い。

ひとつの銀河の大きさは 10^{21}m 程度、観測可能宇宙からは6桁も小さい。宇宙が 1m の球だとすると、銀河は $1\mu\text{m}$ の粒である。長さが6桁異なるということは、そのくらいの違うということである。

宇宙には、ポイドと呼ばれる全く星が存在しない空間が広がり、ところどころに星（銀河など）がある。星がある場所と星が全くない場所が、不均一に存在しており、これを「宇宙の大規模構造」と呼ぶ。天文学者らによって宇宙の大規模構造が探索され、宇宙の地図の作成作業が進められている。ほとんど、何も無い空間からなる宇宙に、ほんのわずか、ところどころに銀河が存在し、その数は約800～1700億個あると言われている。

直径 1m の球体の容積は 0.785m^3 、ここに大気圧の理想気体があれば、物質の量は44.64モル。ここにある気体の分子の数は 2.69×10^{25} 個となる。直径 1m の宇宙の中に800億個の銀河があり、銀河ひとつが気体の分子であると考えたと、この宇宙の密度は大気圧に対して $800 \text{億} \div 2.69 \times 10^{25}$ 、すなわち 3×10^{-15} 倍。理想気体の圧力に換算すると、わずか 0.3nPa である。800億という膨大な数の銀河があってもなおこの希薄さである。宇宙は大きな空間である。

1点から始まった宇宙は、はじめは、量子の階層にあったため、量子力学的ゆらぎを持っていた。

自然の本質は、不確定性原理によって、ゆらぎのない決定論的な法則を許さないため、宇宙は非常に均質に膨張したにも関わらず、わずかな非等方性を持つことになり、均質ではない大規模な宇宙の構造ができあがった。もし、宇宙が完全に対称で均質であったならば、宇宙は空間（エネルギーを含む）だけであり、物質が作られ、物質が集まり、星が作られることもなかったが、わずかなゆらぎがあったために、物質が生成され、物質が集まり、星が生まれた。量子宇宙の小さなゆらぎは拡大され、その結果、星や銀河が作られた。

グラショウが描いた宇宙の階層構造「ウロボロスの蛇」(図 2-2-1) は、最も小さな素粒子の世界（始まりの宇宙）と最も大きな宇宙の構造（現在の宇宙の階層）が、同じ宇宙の過去と現在の姿としてつながっていることを表わしている。

不均一に存在する銀河は、そのほとんどは、単独ではなく、複数の銀河として存在しているようである。複数の銀河とこれに付随する伴銀河と呼ばれる小さな銀河が 50 個ほど集まって「銀河群」を構成している。銀河群は、さらに大きな銀河団や超銀河団を構成し、これらの銀河団によって宇宙の大規模構造が構成されている。1m の球である宇宙の中にある $1\mu\text{m}$ の球である銀河の間には 6 桁離れた階層構造がある。

われわれの銀河は、「局部銀河群」(the Local Group) と呼ばれる銀河群の中にある「銀河系」(the Galaxy) あるいは「天の川銀河 (Milky Way Galaxy)」である。

少し前までは、宇宙には銀河がひとつしかないと考えられ、われわれの銀河が唯一無二の銀河であった。その後の観測から、銀河系は、数多くの銀河のひとつにしか過ぎないことが分かり、近くには別の銀河があって、これらと銀河群を形成していることが分かったため、これらは局部銀河群と呼ばれるようになった。

地球や月、太陽や銀河などは、初めは唯一のものと考えられていたため、特に固有名詞が与えられていない。われわれは、地上に閉じ込められていて、長い間、客観的に自分を知ることができず、太陽や月や銀河は、唯一のものと思われた時間が長い。ひとつしかないため特に名前がつけられていない。ほんの少し前までは宇宙には銀河系しかなかったため銀河系にも固有の名称がない。他の銀河と区別する必要がある時には、われわれの銀河、天の川銀河などと呼ぶ。

長い観測と研究の結果、多くの惑星があり、そこには月以外にも多くの衛星があり、もっと遠くには太陽以外にも多くの恒星があり、さらに銀河の外には数多くの銀河が存在することが分かったが、これらがはっきりとしたのは 20 世紀の中盤以降である。われわれの銀河を含む銀河群にも固有の名称がなく局所銀河群という味気ない名前で呼ばれている。

現在、地球から遠いところを「系外」と呼ぶようになっており、たとえば、太陽

以外の恒星系の惑星を「系外惑星 (exoplanet)」、銀河系 (the Galaxy) 以外の銀河を「系外銀河 (galaxies)」と呼ぶ。

局部銀河群には、主要な 3 つの銀河があり、最大の銀河は、アンドロメダ銀河 (Andromeda Galaxy, M31)、次いで 2 番目に大きい銀河が、われわれの銀河系 (天の川銀河) である。天の川銀河には、2000 億~4000 億個の恒星 (星) があり、そのうちのひとつが、われわれの星、太陽である。

18 世紀末に、ウィリアム・ハーシェル (1738~1822 年、ハノーファー選帝侯国) によって銀河の大きさと構造が調べられた (1788 年)。16 世紀に、コペルニクスによって古代の地動説が復活し、科学は、既に天動説から地動説の時代が変わっていたが、ハーシェルは太陽 (太陽系) も宇宙空間を運動していることに気付き、銀河の大きさ、形、太陽系の運動の方向などを調べた。

ハーシェルは、太陽系内の天体の観測でさえ難しい時代に、はるかかなたの銀河を調べ、太陽は銀河の中のひとつの恒星に過ぎないことを突き止めた。地動説は、太陽中心説であって、動かない太陽の周りを地球などの惑星が運動するという原理であるが、これも正しくないことが分かったのである。

ハーシェルは、音楽家 (演奏家、指揮者) である。本名は、フリードリヒ・ヴィルヘルム・ヘルシェルであるが、37 歳の時に、楽団が同盟国であるイングランドへの赴任を命じられ、そこで活躍したため、サー・フレデリック・ウィリアム・ハーシェルという英語名の方がよく知られている。その後、数学、天文学を学び、自作の望遠鏡によって天体の観測を始め、月面の山の測定などを行い、44 歳の時には、新惑星・天王星を発見した。

ハーシセルの数多くの業績のうち、天動説でもなく、また太陽中心説 (地動説) でもなく、太陽も運動していることを発見したことは非常に大きな発見であったが、ハーシセルは、星から赤外線が放射されていることを発見した (1800 年) ことも非常に大きな業績である。

ハーシセルは、可視光以外の光が知られていなかった時代に、プリズムで分光した見えない光が熱を伝えることを発見した。翌年には、ハーシセルの赤外線発見をヒントにヨハン・ヴィルヘルム・リッター (1776~ 1810 年、ドイツ) が紫外線を発見した (1801 年)。

可視光線以外の見えない光、赤外線や紫外線の存在は、今では誰でも知っている身近なものであり、ガスの分析やガス利用にとっても重要な知見である。赤外線

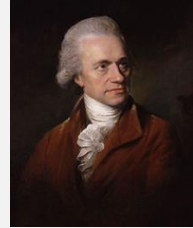


図 2-2-13-フレデリック・ウィリアム・ハーシェル (1738~1822 年)
Wikipedia

と紫外線は、200年前の星の光の観測によって発見された。

ハーシェルは、全ての星の明るさは等しいという仮説を立てて、地上で見える明るさは星までの距離によって異なると考え、銀河の地図を作成した。星の本来の明るさが等しいという仮説は間違っていたが、ハーシセルの地図から、銀河は円盤状に存在する星の集団からなっていることが見出され、その時、ハーシセルが求めた銀河の大きさは、最新の科学で求められる大きさのおよそ20分の1である。200年前であることを考えると、驚くほど高い精度で銀河の大きさが求められている。ハーシセルが製作した天体望遠鏡は400基以上、かつてロバート・フックが製作した長大望遠鏡は、筒が20m以上あったが、ハーシセルの望遠鏡も長さ12m（40ft 望遠鏡）、口径126cmと非常に大きなものである。

ハーシセルは、asteroid（恒星のようなもの）という言葉を発明し、惑星の衛星や小惑星のような小さな星があることを示した（1802年）。現在では、小惑星のことをアステロイドと呼ぶ。また、ハーシセルは、二重に見える星の中に、実際の連星（binary star）があることを発見した。連星とはひとつの恒星系に実際に二つ以上の恒星があるもの、二重星とは地球から見て方角が同じの時に二つの星が重なって見えるもの、ハーシセルは見出した連星の運動から星の質量が正確に求められるようになった。その後の観測から、宇宙の恒星系のうち、少なくとも1/4が、2連星あるいは3連星（ternary star）以上であることが分かっている。

しかし、ハーシセルの時代は、まだ近代的な天文学以前の時代である。18世紀のアイザック・ニュートンには、数多くのオカルト（超自然）的研究・著作が知られる（錬金術、賢者の石、予言の書、など）が、19世紀初頭のハーシセルにも同じようなオカルト的研究が多い。全ての惑星には高等文明が存在し、太陽にも大地があり生物がいる、などといった、今となっては荒唐無稽な研究もある。しかし、彼が残した数々の科学的発見の多くは、正確であり、現代の科学につながっている。

シャルル・メシエ（1730～1817年、フランス）は、星雲、星団、銀河に番号を振り「メシエ天体カタログ」を作成した。その後の詳細な研究によって、これらの星の集まりは、銀河、星雲、星団、残骸に分類されるようになった。メシエは、メシエ番号M103までを作成（1784年）、M104以降は、後の研究者が追加してM110までの番号がある（1966年）。なお、Mはエムとは呼ばず、メシエ（カタログ）と読む決まりなので、M78天体を「エム78星雲」と読むのは間違いである。アンドロメダ銀河はM31、プレアデス星団（日本名すばる）はM45などといった番号が与えられている。銀河系には、メシエ番号がない。

19世紀になって分光技術が進み、ヨゼフ・フォン・フラウンホーファー（1787～1826年、ドイツ）が、太陽光線を解析しスペクトルの中から多数のフラウンホーファー暗線を発見した（1814年）。フラウンホーファーは、太陽大気に含まれる元素が特定の波長の光を吸収して暗線を作ることを見出し、系統的な観測によって500以上の暗線の波長を調べた。

これによって、遠くの星の光から様々な情報を得る天体物理学の基礎が出来上がった。

また、地球上では発見されていなかった物質が、分光分析で見つかることがあり、1868年には、太陽光線から新元素「ヘリウム」が発見された。ガス屋の重要な素材のひとつヘリウムは、宇宙では2番目に多い元素であるが、地球上では見つからず、太陽の光の中から発見された。天文学は、地上のこととは関係がないように思われることもあるが、暦の発明、赤外線の見つけ、紫外線の発見、ヘリウムの発見など、地上の生活に密接に関わる科学である。

分光法（spectroscopy）は、天体観測に用いられて発達したが、分析化学や鉱物などの分析技術としても重要な技術となり、様々な元素の発見にも大きな役割を果たした。

吸収分光法、発光分光法、赤外分光法、紫外・可視・近赤外分光法、核磁気共鳴分光法など様々な分光法が開発された。

なお、ヨゼフ・フォン・フラウンホーファーに因んで設立されたドイツのフラウンホーファー研究機構は、67ヶ所の研究所を持つ欧州最大規模の民間研究所である。同じドイツのマックス・プランク学術振興協会（20ヶ所のマックス・プランク研究所を保有）が基礎研究を中心としているのに対してフラウンホーファー研究機構は実用的な応用研究を目的としている。



図 2-2-14-ヨゼフ・フォン・フラウンホーファー（1787～1826年）
Wikipedia

ヒトが見ることができる可視光線の波長は非常に狭い範囲にある。したがって、可視光を用いる天体望遠鏡（光学望遠鏡）による観測では、得られる情報が限られるが、様々な波長の光を観測する分光技術が発明されたことによって多くの情報が得られるようになり、天文学は急速に進歩した。

さらに、20世紀になって、天体の電波観測が行われるようになり、ヤン・オールト（1900～1992年、オランダ）によって、銀河のより正確な構造が調べられ、銀河系回転説が実証された（1951年）。オールトは、水素原子が出す波長21cmの電

波（周波数 1.42GHz、21 cm hydrogen line）を観測することに成功、宇宙の構造を調べる電波天文学が発達することになった。天の川銀河は、2000~4000 億個の星（恒星）からなり、直径は約 10 万光年、厚さは約 100 万光年、われわれの太陽の公転周期は、2 億 2500 万年、銀河の質量は、太陽の 10^{11} 倍、銀河の形態（ハッブル分類）は棒渦巻銀河であることなどが明らかとなった。

観測可能な宇宙の階層（ 10^{27} m）は、あまりにも大きく、想像することも容易ではないが、銀河の階層（ 10^{21} m~ 10^{20} m）であれば、具体的な映像があるため、何とかイメージできそうである。ただし、遠くにある系外銀河の映像は観測によるものであるが、われわれは、天の川銀河を外から観測することが出来ないため、銀河系を外から俯瞰するような全体像は、内側から観測された情報から作られた想像図である。

銀河の階層も、まだ大き過ぎるが、銀河系の直径を 10 万光年と言い換え、SF に出てくる大マゼラン雲までの距離、16 万 3 千光年（少し前までは 14 万 8 千光年）という数字からは、それなりにイメージをふくらませることが可能かも知れない。なお、大マゼラン雲は、現在は、天の川銀河の近くにある伴銀河（天の川銀河の 20 分の 1 ほどの大きさの矮小銀河）であることが分かっているため、正しくは、星雲ではなく大マゼラン銀河である。（南天にあり日本からは見えない）

伴銀河ではない、最も近い系外銀河、アンドロメダ銀河は、エドウィン・ハッブル（1889~1953 年、米国）によって発見された（1929 年）。アンドロメダ座（星座）は、銀河系内の星雲ではなく、天の川銀河とは別の銀河であることが分かった。

ハッブルが発見するまで、宇宙には銀河系だけが存在すると思われており、系外銀河（天の川銀河以外の銀河）の存在は知られていなかった。そのため、1930 年よりも古い書物や物語では、アンドロメダ星雲と書かれているが、星雲ではなく、銀河系よりも大きな銀河である。地球からは 250 万光年の距離にある局所銀河群最大の銀河である。

ハッブルが発見した、銀河系（天の川銀河）以外にも数多くの銀河が存在するという事実は、極めて大きな発見であったが、ハッブルの最大の発見は、宇宙が膨張していること、ハッブルの法則を見出したことである（1929 年）。

$$v = H_0 D$$

天体が遠ざかる後退速度 v は、天体までの距離 D に比例する。 H_0 は、ハッブル定数と呼ばれ、最新の観測から、67.15(km/s)/Mpc と求められている。

距離 D の単位 Pc はパーセク、地球の年周視差 1 秒に相当する距離を表しており、

約 3.1×10^{16} m (3.3 光年) である。Mpc はメガパーセク。ハッブル定数の数値は、約 330 万光年離れている星が遠ざかる速度を km/s の単位で表している。

ハッブルの法則は、20 世紀最大の発見のひとつといわれることもあり、それまでの人々の宇宙観や宇宙論などの科学を根底から変えるきっかけとなった。遠くの星ほど、高速で遠ざかっているというハッブルの観測結果から、宇宙の膨張が確認され、ビッグバン仮説の実証へつながった。



図 2-2-15-エドウィン・パウエル・ハッブル (1889~1953 年)
Wikipedia



図 2-2-16-ハッブル宇宙望遠鏡 (1990 年~) Wikipedia

アインシュタインは、一般相対性理論によって宇宙の重力方程式を作り上げたが、アインシュタイン自身は、宇宙には始まりも終わりもないという「定常宇宙論」を信じていたため、最初は、ハッブルが発見した宇宙の膨張を信じるのができなかった。ハッブルの法則が発表された時、アインシュタイン 50 歳、ハッブル 40 歳である。なお、ハッブルはシカゴ大学では数学を専攻していたが、オックスフォード大学で法学を学び、帰国後は、法律の仕事や数々のスポーツで活躍していたが、30 歳の時にウィルソン山天文台の職員となり、その後は天体観測を続け、世紀の大発見をした。

定常宇宙論では、宇宙は「初めから」存在し、過去から未来まで、何も変わらない。時間や空間でさえ絶対ではないということを示し、20 世紀の科学に大革命を起こしたアインシュタインでさえ、宇宙の始まりや終わりを信じるのができず、ハッブルの観測結果を信じるのができなかった。しかし、その後の観測や研究から、宇宙の膨張の事実が明らかになり、アインシュタインは、自らの一般相対性理論の修正のために悩むことになる。

宇宙が膨張しているということは、元をたどると最初の宇宙は非常に小さかったということであり、どこかに始まりがあったということになる。宇宙には、はじまりも終わりもないと考える定常宇宙論は否定された。ハッブルの発見は、人々の世界観を変え、宗教観に影響を与えるほどの世紀の大発見となった。しかし、ハッブルは、ノーベル賞受賞が確実とされた時に、没してしまった。世界を変えるほどの大発見や大発明に与えられるノーベル賞であるが、ハッブルが受賞することはなかった。

ハッブルの名前を冠した米国の宇宙望遠鏡がスペースシャトルによって軌道上に打ち上げられた(1990年)。大気の影響を受けない宇宙天文台によって数々の観測、新発見が行われ、エドウィン・ハッブルと同じようにハッブル宇宙望遠鏡(Hubble Space Telescope)の名前も一般に広く知られるようになった。

アンドロメダ銀河は、局部銀河群最大の銀河であり、地球との距離は、現在 254 ± 6 万光年 (24.4×10^{21} m) である。宇宙が膨張しているため、ほとんど全ての銀河が赤方偏移(ドップラー効果によって波長が長くなり光のスペクトルが赤い方にずれる)して、われわれから遠ざかっているが、アンドロメダ銀河と銀河系(天の川銀河)は、逆に接近中である。

二つの銀河は、宇宙の膨張以上に力学的に近づいているため、青方偏移(波長が短くなってスペクトルが青の方へずれる)している。40億年後には、銀河系とアンドロメダ銀河は衝突する。衝突といっても、宇宙のほとんどは空間なので、銀河同士の衝突は、大規模な天体同士の衝突を意味しておらず、二つの銀河は力学的に合体する。その時、地球の位置からは、銀河系(天の川銀河)とアンドロメダ銀河を合わせた満天の星が見えるはずであるが、太陽の寿命は残り50億年であり、その前に地球は消滅、人類の子孫が銀河系とアンドロメダ銀河の合体を地球上から観測することはない。

2. 2. 3. 3 太陽系、 $10^{12}\text{m}\sim 10^{13}\text{m}$

銀河から9桁、階層が小さくなると太陽系の大きさになる。銀河系が直径1mの円盤であったなら、太陽系は1ナノメートルの小さな円盤である。

銀河と太陽系間の9桁の階層にあるものは、やはり空間である。宇宙は何もない空間であるが、銀河の中であっても、恒星のないところは、やはり同じように何もない空間が広がっている。宇宙の大きさから15桁も小さくなって、やっと太陽系の階層が現れる。宇宙が直径1mであれば、銀河系は $1\mu\text{m}$ 、太陽系はたったひとつの原子核よりも小さい。

太陽系内の最も外側の8番目の惑星、海王星と太陽との距離は約45億km ($4.5\times 10^{12}\text{m}$) 地球と太陽の距離は、1億5千万km ($1.5\times 10^{11}\text{m}$) である。

このあたりからは、光年や霧乗表示でなくキロメートル表示も可能になってくるが、太陽系やその近くの宇宙の大きさを測る尺度として「天文単位 (au:astronomical unit、エイユー)」がよく用いられる。これは、地球が太陽の周りをまわる楕円軌道から得られる距離から定義されている。海王星の軌道は30au、太陽系の外縁のカイパーベルトまでが50au、ここまでを太陽系と呼ぶとすれば、太陽系の大きさは、地球軌道の約50倍ということである。

50auのさらにその外側には、ヤン・オールトが1950年に提唱した太陽系を球殻状に取り巻く「オールトの雲」と呼ばれる天体群があり、ここまでを太陽系だと考えると、その大きさは、1万~10万au (1.58光年) となり、海王星やカイパーベルトまでを太陽系と考えた場合とはその形や大きさがまるで異なっている。

オールトの雲には、約1兆個の天体があり、彗星の発生源だと考えられているが、具体的な天体が確認されていないため、現在はまだ仮説とされている。どこまでが太陽系かという境界は、とても曖昧である。われわれが通常イメージする太陽系は、同じ方向に運動している惑星群であるが、本当の太陽系は円盤状のものではなく、もっと巨大な球形をしているようである。

現在、天文単位は、地球の軌道の長半径を基準として $1\text{au}=1.4959\cdots\times 10^{11}\text{m}$ (有効数字11桁) と定義されているが、実際の値は常に変化している。常に変動する量は、基本単位としてはふさわしくないが、auは重要な単位であるとして、この定義値はSIと併用することが認められることになった(2014年)。SIで、このように変化する実験値を単位として採用することは非常に珍しい。auは、ISOやJISでも使用されており、基本的な長さの尺度となっている。

なお、オングストローム単位系も長さの単位としてauを用いるが、こちらは非SI単位であり、表記も $1\text{\AA}=0.1\text{nm}=10^{-10}\text{m}$ とされることが多いため、天文単位のau

と混同されることはない。

1au は、光の速度で約 8 分（8 光分）の距離であるから、地球上で見えている太陽は、太陽光球の約 8 分前の光である。太陽の光の元は、太陽中心で起こった核融合反応に伴うものであるが、太陽内部の物質の密度が大きく、光速度が遅い（光子が進むのを妨げる）ため、表面に届くまでに 3 万年ほどかかる。したがって、今、地球上で観測されている太陽光は、太陽の中心で 3 万年前に起こった核融合反応の光が表面に到達して 1au の距離を 8 分間かけてたどり着いたものである。

ヒトが目で見、耳で聞く情報は、全て過去のもので時間をかけて届いているものであるが、すぐ目の前の事象では、そのかかった時間を意識することが全くない。

しかし、少し距離が離れるとそれを感じることもある。上空を通過する飛行機を見上げると、音のする方向と見える方向がかなりずれており、光の進む速さと音の進む速さの違いが現われる。雷光と雷鳴も距離が離れていると、かなりずれて届く。速さの代名詞のようにいわれる音速も光と比べるとあまりにも遅い。しかし、光の速度も有限であり宇宙ではかなり遅いため、地球から 1au の距離にある太陽は 8 分前の姿である。

観測可能な宇宙 (10^{27} m) や銀河 (10^{21} m) の詳細な研究が進んでいるが、銀河よりも桁違いに小さい太陽系 (10^{12} m) には謎が非常に多い。隣の銀河やその先の宇宙のことが調べられているのに近場の太陽系がよく分からないとは不思議であるが、恒星以外の天体は、自らは光らないため、情報（光や電磁波）が少なく、太陽系内の天体は地球からの距離が近いにも関わらず観測が難しい。しかし、現在、系外の天体に接近する方法はないが、太陽系内の天体は、それなりの技術と時間と金をかければ、探査機が接近できる距離にあるため、より詳細に調べることが可能である。

探査機が接近、近距離からの大気分析、地震波による内部の観測、鉱物やガスなどの分析、地球への持ち込み（サンプルリターン）などが試みられている。太陽系の他の惑星や小惑星、月や他の衛星などを調査することは、地球をより詳しく理解するために重要なことと考えられており、各国の探査機による太陽系内天体の直接観測プロジェクトが続けられている。

太陽系内の惑星や衛星の探査だけでなく、日常的な太陽の観測も続けられている。

日本では、情報通信研究機構（NICT）の宇宙天気情報センターが、太陽活動（黒点、太陽風、太陽フレア、地球の地磁気の状態など）を「宇宙天気予報」として発信している。これは、太陽の活動が、地球上の日常生活にも影響を与えるためであり、黒点情報、周期情報、ケア情報（無線通信、衛星運用、電力・磁気探査、GPS、航空機関係）などのサービスが行われている。

具体的に起こった太陽活動の影響としては、太陽フレアによるデリンジャー現象（短波通信障害）、電波バーストによるGPS受信機の障害、磁気嵐による人工衛星の運用停止、送電線の異常電流、極域航空路の低緯度への変更推奨などがある。

太陽活動は、地球の気候、温暖化や寒冷化にも非常に大きな影響を与えており、詳細な観測が続けられている

表 2-2-11-太陽系内の主な探査機

打上年	探査機	国	業績
1959	ルナ1号	ソ連	月近傍を通過
1959	ルナ3号	ソ連	月の裏側を撮影
	パイオニア4号	米国	月近傍を通過
1962	マリナー2号	米国	金星フライバイ
1964	マリナー4号	米国	火星フライバイ
1966	ルナ9号	ソ連	月面軟着陸
	ベネラ3号	ソ連	金星衝突
1967	マリナー5号	米国	金星探査
	ベネラ4号	ソ連	金星大気
1969	アポロ11、12号	米国	月面軟着陸
1970	ベネラ7号	ソ連	金星着陸
1971	マリナー8、9号	米国	火星探査
	マルス2号	米国	火星衝突
	アポロ14、15号	米国	月面軟着陸
1972	パイオニア10号	米国	木星探査
	アポロ16、17号	米国	月面軟着陸
1973	パイオニア11号	米国	土星探査
	マリナー10号	米国	金星、水星探査
1975	バイキング1、2号	米国	火星軟着陸、一般相対性理論の検証
1976	ルナ24号	ソ連	月面からの標本
1977	ボイジャー1号	米国	木星、土星と衛星
1977	ボイジャー2号	米国	天王星、海王星
1983	ベネラ15号	ソ連	金星探査
1989	ガリレオ	米国	木星探査
1997	カッシーニ	ESA 米国	土星探査
2003	マーズ・エクスプレス	ESA	火星探査
	はやぶさ	日本	小惑星イトカワ標本
	スマート1	ESA	月探査
2006	ニュー・ホライズンズ	米国	冥王星と太陽系外縁天体探査
2007	かぐや	日本	月探査
	嫦娥1号	中国	月探査
2008	チャンドラヤーン1号	インド	月探査
2010	あかつき	日本	金星探査
2011	ジュノー	米国	木星探査

2014	はやぶさ2	日本	目標は小惑星リュウグウ
------	-------	----	-------------

2. 2. 3. 4 地球、月、 10^8m

天文単位 au より2桁、階層が小さくなると太陽の直径 $1.39 \times 10^9\text{m}$ (139万 km) となり、さらにひと桁小さくなると地球から月までの距離 $3.8 \times 10^8\text{m}$ (38万 km) となり、もうひと桁階層が小さくなると、 10^7m 、地球の直径 $1.28 \times 10^7\text{m}$ 、(1万2,800km) となる。

図2-2-3-6に $10^6\text{m} \sim 10^8\text{m}$ の階層を示す。図は、地球と月の距離を水平ではなく、赤道上空にある月を見上げたように描いている。地球、月および大気圏の大きさは、ほぼ同じ縮尺である。

地球の直径は、約 12,800km (10^7m)、月の直径は約 3,500km (10^6m)、現在の平均の距離は 38万 km ($3.8 \times 10^8\text{m}$) である。

月、地球、地球と月の距離が $10^6\text{m} \sim 10^8\text{m}$ の階層であり、1枚の図に何とか収まるが、太陽の直径 139万 km は、この図には入らないほど大きい。

月は、地球の赤道の真上であり、遠地点 (40.5万 km) と近地点 (36.3万 km) は 10% も異なるため、地球から見える月の大きさは最大 15% ほど異なる (近地点そのもの

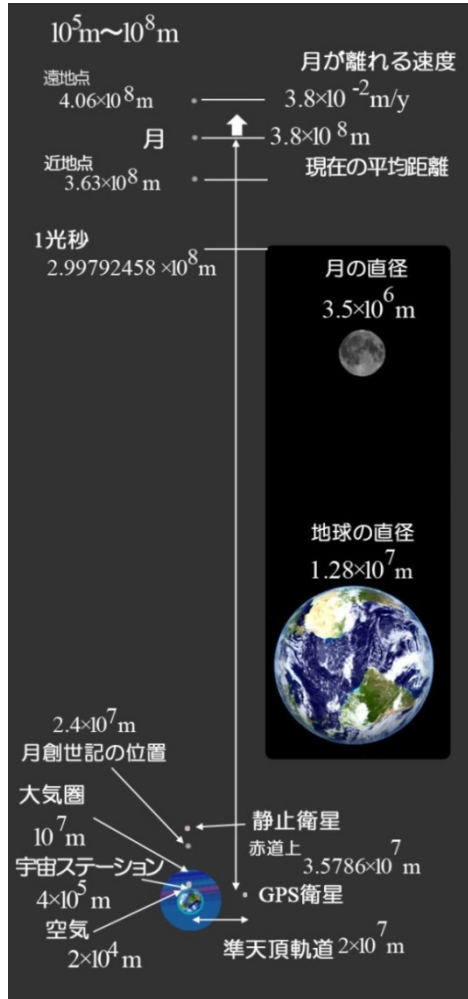


図2-2-17- $10^6 \sim 10^8\text{m}$ の階層
地球から赤道上を見上げた距離

は、35.64～37.0 万 km の間で変化する)。月の最接近が、満月・新月の位置に重なる時は、大きな月「スーパームーン」が観測される。月は潮汐力で、地球に常に同じ面を向けているが、近点にある時は、月の自転速度は公転速度よりも遅いため、地球からはわずかに月の東側の裏側が見える。

月までの平均距離 38 万 km という数字は比較的良好によく知られており、光の速度で 1.3 秒ほどの距離である。創世記の月は、すぐ近く 2.4 万 km にあり、静止衛星の軌道 3.6 万 km よりも低い。月はらせん状に徐々に遠ざかっているが、月が地球から離れる速度は、現在、年間 3.8cm (1.2×10^{-9} m/s、毎秒 1.2nm) と測定されており、これは衛星の後退速度としては異常に大きい。人類の文明の歴史の中では、この 38 万 km という数字が書き換えられることはなさそうである。

月は、肉眼でも大きく見えるほど地球に近い天体であるが、人類の科学技術で到達するには非常に遠い。1968 年に米国の有人宇宙船アポロ 8 号が初めて月に到達した時、地球から月までの月遷移軌道を経て月周回軌道に移行するまでに要した時間は、発射から 69 時間余りもかかっている。アポロ宇宙船は、月までの遷移中は、2.1km/s という速度で飛行していたが、それでも 3 日間もかかっている。 10^7 m ～ 10^8 m の階層、38 万 km というのは、そのくらいの距離であり、秒速 2.1km という速度は、地上では非常に速いが、宇宙空間を移動するにはあまり遅いのである。

アポロ計画では、8 号の 5 か月後にアポロ 10 号が月に再度到達、その 4 か月後には、11 号が初めて月面に着陸し (1969 年)、その後、17 号 (1972 年) まで様々な調査・研究が行われた。月は、すぐ近くにあるように思えるが、非常に遠く、プロジェクトにかかった時間も費用も莫大である。技術開発のために多くの試験飛行や失敗もあり、17 号までのうち、月面に着陸したのは 6 回である。

アポロ計画では、地球や月に関する重要な知見が得られたが、このミッションで得られた科学的・工学的資産も非常に大きい。集積回路やコンピュータ、燃料電池、システム工学など、現在では当たり前のように使われている技術の多くが、アポロ計画という巨大プロジェクトを通じて開拓・推進された。様々な知見の中にはガスの利用技術もある。アポロ 1 号の事故によって高濃度酸素雰囲気の高濃度酸素の危険性が明らかとなった。それまでの有人宇宙船の呼吸用空気は、ほぼ 100% 濃度の酸素雰囲気であったが、そのためにアポロ 1 号は火災事故によって失われた。その後、多くの改良が行われ、様々な理由によって地上と同じ 21% 酸素の大気圧の空気を採用することはできなかったが、40% 酸素濃度の空気が使用されることになり、船内の設備や宇宙服などの材質の見直しも行われた。現在の国際宇宙ステーションでは、長期滞在も必要となるため、地上と同じ気圧、21% 酸素と窒素からなる空気 (ただしア

ルゴンは含まれない) が使用されるようになった。

アポロの打ち上げ時に使用される専用のサターンV型ロケットの2段目と3段目の推進用には、大量の液体酸素と液体水素が使用された。1段目のロケットはケロシン燃料であり、まだ空気のあるところで使用されるが、短時間に大量の燃料を燃焼させるために酸化剤として大量の液体酸素が使用された。また、アポロ宇宙船(機械船)には、液体水素と液体酸素のタンクが備えられ、酸素は呼吸用に、水素と酸素は燃料電池(FC)に用いられ、宇宙船に電力と水を供給した。液体酸素と液体水素のタンクを持った宇宙船が月まで到達した時、酸素がはじめて液化されてからまだ50年しかたっていなかった。

月までの有人飛行は非常にリスクの高いミッションである。地球を少しでも離れると、それまで守られていた大気や地球磁場による防御がなくなり、宇宙船と乗員は、太陽からの大量の荷電粒子や放射線に直接晒される。小さな微粒子であっても大きな相対速度で衝突すると機体には簡単に穴が開き、大事故の危険が伴う。ゲイ・リュサックたちは、高空の空気を調べるために気球による大冒険を行ったが、20世紀には、さらに38万kmもの上空へ、科学の冒険が行われた。

なお、アポロ計画に先んじてソ連のルナ計画が進められており、1958年から1976年の間に、無人の月面探査機ルナが打ち上げられた。総数43機が打ち上げられ、打ち上げに成功した24機にルナ1号から24号までの番号がつけられた。そのうち6機が月面に軟着陸、3機のサンプルカプセルが地球に帰還している。

2. 2. 3. 5 人の生存圏、 $10^4\text{m}\sim$

地球の大気圏 (atmosphere) は、地球と宇宙の境界線である。外気圏 (exosphere) と呼ばれる最高層の大気は、地表面からの高度 $800\text{km}\sim 1\text{万 km}$ (10^7m) の範囲にあり、地球の大気圏は、地球の直径と同じくらい大きさがあり、想像以上に大きい。

大気は、鉛直方向に多層の構造をしており、宇宙との境界という意味での大気圏は、外気圏までであるが、異なった分類法もあり、ロケット打ち上げ時の「大気圏脱出」や、カプセルなどが地球に帰還する時の「大気圏再突入」などで使われる「大気圏」は、高層の熱圏や外気圏を大気を含めず、成層圏から中間圏の上あたりを指している。

テレビ放送や通信に利用される静止衛星は、赤道上にあり、高度 $35,786\text{km}$ ($3.6 \times 10^7\text{m}$) であり、かなり地球から離れており、地球の大気圏の外にあるため、大気の影響を全く受けていない。地球の自転速度と人工衛星の公転速度が一致し、地上から常に同じ位置に人工衛星が見える「静止軌道」は、赤道上のこの高度の真円しかないので、多くの静止衛星 (放送衛星、通信衛星、気象衛星など) が集まる宇宙の過密領域である。欧州、米国、アジア上空が特に過密であり、国際連合の専門機関である国際電気通信連合が、混雑する静止衛星の調整 (軌道ポジションと周波数の調整) を行っている。

現在では、非常に身近な存在となった GPS 衛星であるが、その高度は、 $20,200\text{km}$ ($2 \times 10^7\text{m}$) である。この人工衛星も大気圏外 (地球の外) にあるため、大気抵抗で軌道が変わることはない。階層が 2 桁小さく、地表面からの高度が、 $4 \times 10^5\text{m}$ (450km) になると国際宇宙ステーション (ISS、 $278\text{ km}\sim 460\text{ km}$) の飛行高度になる。ISS は、地球と宇宙の観測、宇宙環境を利用した研究のために運用されており、宇宙機としてはかなり低い軌道を周回、大気圏内の熱圏を飛行している。 3.6万 km や 2万 km といった高い位置にある静止衛星や GPS 衛星からみると、宇宙ステーションは地球に貼りついたように近いところにある。

大気圏の内側が「地球」、外側が「宇宙」であるが、その境界は明確ではないため、国際航空連盟では、高度 10^5m (100km) の仮想線をカーマンラインと呼び、宇宙と地球の境界としている。

カーマンラインは、最高層の大気圏よりも 2 桁も小さいが、宇宙速度 (脱出速度) に関する線であり、カルマン渦で有名なセオドア・フォン・カルマン (1881~1963 年、ハンガリー) にちなんで命名されている。ISS の軌道はカーマンラインより上にあるため、宇宙ステーションと呼ばれ、周囲の気圧は非常に低く、低重力の環

境となっている。真空や無重力ではないが、空気や重力の影響が少ない環境での観測や実験が可能である。

大気が一番下の層は、地表面から高度 10^4m (約 1 万 m) までの対流圏である。対流圏の大気を「空気」と呼ぶ。地下資源を評価する時に用いられる「クラーク数」では、「地圏 (ちげん)」を海面下 10 マイル ($1.6 \times 10^4\text{m}$) と設定しており、対流圏と地圏は、ほぼ同じ厚さである。最も深い海は、水深 10,911m ($1.1 \times 10^4\text{m}$ 、マリアナ海溝)、最も高い山は、標高 8,848 m (10^4m 、エベレスト山頂) である。

10^4m の範囲に、空・海・陸 (山、地下資源) が収まり、この階層は、星としての地球 (直径 10^7m) より 3 桁も小さいが、人類にとっての「地球」(空気、水、大地) の全てがこの厚さの中にある。

対流圏から水圏にかけて、生命の生存圏となる。超高層大気や大深度の地下における有機物の合成や生命の存在も研究されているが、現在のところ対流圏、水圏、地表面が主な生存圏である。さらにもう一桁小さい、 10^3m からは人間の生存可能な領域が現れる。

より具体的には、高山病が発症する可能性が高くなるとされる標高 $2 \times 10^3\text{m}$ より下、海面高度までの空間が、実質的なヒトの生存圏であり、海中には住める環境がない。高度が高くなると気圧が下がり、空気が薄くなるが、そのような場所にも人が暮らす環境がある。たとえば、ボリビアのラパスは、標高 4000m にある人口 90 万人の大都会であり、世界にはこのような高地都市がいくつかある。しかし、このような場所はどちらかといえば例外的であり、世界人口の圧倒的多数は、低地に住んでいるため、標準の大気圧は、海面近くの値が採用されている。

生存圏という用語は、一般的には地政学的に自給自足が可能な領土や政治支配圏を指すが、自然科学の場合は、生物の「生存圏科学」の領域に用いられる。生存基盤研究を行っている京都大学の「生存圏研究所」では、「人間生活圏、森林圏、大気圏、宇宙圏など人間の生存に必要な領域と空間」を生存圏と定義している。

$10^2\text{m} \sim 10^4\text{m}$ の階層になると天然物の他に、人間が作る構造物や人工物、ビル、船舶、橋梁などが現れる。

長大橋、丹陽一昆山特大橋 (中国) は、長さ 10^5m (164.8km)、ドバイの高層ビル、ブルジュ・ハリファは、高さ 10^3m 、(828m)、かつて就航していたノルウェーの巨大石油タンカー、ノック・ネヴィスは、全長 $5 \times 10^2\text{m}$ (458m)。人間が作るものの階層の上限は、およそ、このあたりにある。

多くの工業製品が、 $10^1\text{m} \sim 10^2\text{m}$ の階層にある。MEMS やマイクロマシンなどはもっと小さいが、日常、手に触れたり見たりすることのできる製品の大きさは、マ

イクロ SD カードで $15\text{mm} \times 11\text{mm}$ 、列車の車両長は約 20m 。したがって、よく見る工業製品は、およそ $10^2\text{m} \sim 10^1\text{m}$ の階層にあるが、われわれのガス製品は 10^{10}m である。

植物は、 $10^1\text{m} \sim 10\text{m}$ 、大きな植物では 10^2m もある。動物は、 $10^1\text{m} \sim 10^0\text{m}$ 、大きくても 10^1m 程度までである。

人間の大きさは、 10^0m の階層、生まれたての赤ん坊から大人までおよそ、 $0.5 \sim 2 \times 10^0\text{m}$ の間にある。

肉眼で観察できる多くの動植物が $10^2 \sim 10^1\text{m}$ の階層にある。

大きな階層は、宇宙の大きさから、ナノスケールより少し大きいところまでのマクロスコピック領域に広がっている。非常に広い範囲にあるが、数字にすると、簡単に書けてしまい、 $10^{27}\text{m} \sim 10^8\text{m}$ となる。

メソスコピックよりも大きいマクロスコピックの階層の現象は、ほぼ同じ法則で記述することができる。これは非常に重要なことであるが、特に大きいということ意識させるのは「重力」が働くところからである。

重力は、ニュートンの時代の解釈では全ての質量の間に働く万有引力である。

しかし、これは、人間の階層では、重力は無視できるほど小さい。重力は、他の力（強い相互作用、弱い相互作用、電磁力）にくらべて 30 桁から 40 桁近くも小さいため、人間同士や人間とモノとの間に働く引力は極めて小さいため無視される。普通の物理の法則や化学の式には、重力の項は現れない。

物を持ち上げたり、坂を上ったりする時に非常に大きな重力を感じるので重力は非常に大きいと感じることもある。しかし、これは地球という大きな質量があって初めて感じることができる力である。

たとえば、小さな永久磁石で鉄のクリップを引き寄せることは容易であるが、これを重力で引き寄せようとする「地球くらいの質量」が必要である。磁石の持つ万有引力（重力）では、とてもクリップを引き寄せることはできない。30 桁以上も異なるというのは非常に大きな違いである。磁石と鉄片の間に働く相互作用を記述する時、磁力は記述されるが、重力が記述されることはない。

10^6m より上の階層、天文学の領域からは重力が無視できなくなるため、引力の記述が必要となる。地球 (10^7m) は、大きな質量を持ち、地球、月、太陽などの天体の間に働く重力は無視することができないほど大きくなる。地球上の空気や水や生物は、それ自体の質量は小さいが、相手が地球という大きな質量を持つ天体であるためその重力を無視することができない。われわれは、地球の引力圏（重力圏）から逃れることができないため、地球上で起こる現象を記述する時には、必ず地球

との間の相互作用、地球の重力加速度が考慮される。

地球は完全な球形ではなく、自転をしているため緯度と標高によって重力加速度は異なるが、平均的な値として $g=9.80665 \text{ m/s}^2$ という「標準重力」が与えられている（1901年、国際度量衡総会）。この値は、平均値であって様々な場面で簡易的な計算に使用されている。

しかし、実際の重力加速度は、この値ではないので、たとえば、重力を利用した重量計では、使用する地域によって補正をしなければならない。家庭用の体重計であれば日本国内でも2~3通りの地域設定（初期設定）があり、タンクローリーなどの重量を測定するトラックスケールであれば、設置する地域に応じてより詳細な重力加速度の入力が行われている。

一方、天秤ばかりを利用する重量計では、比較する分銅との釣り合いから重量を測定するため、使用する場所による補正の必要がない。そのため、非常に精度の高い混合ガス、たとえば、標準ガスの分析のさらに標準となるような高精度のガス（標準ガスの標準ガス）を製造する場合は、容器とガスの重量を測定する専用の精密天秤が用いられる（非常に特殊な機器なので数は非常に少ない）。なお、電子天秤と呼ばれているものの中には、実際は分銅を用いずにロードセルや電磁式の重量計であることが多い。この場合は、天秤という名称が使われていても、重力加速度の影響を受けるため、標準分銅を用いた校正が必要である。

地表面の気圧も深海の水圧も全て地球の重力によるものであり、高さ方向でかかる圧力が異なる。深いほど大きな力がかかるため、圧力が高い。

深冷空気分離装置の設計範囲では、設置する場所の詳細な重力加速度の測定や補正までは考慮されない。しかし、鉛直方向の力（地球の重心へ向かう力）は重要であり、液ヘッド（液柱）やガスヘッドが考慮される。配管中の液体の鉛直方向の高さの違いは、圧力に影響するため、装置の中の圧力分布が詳細に計算される。

液ヘッドを利用したものに低温液化ガスの液面計がある。液体窒素や液体酸素の貯槽の液体の量を測る「液面計」は、気液の界面の位置、液面の高さを測定しているのではなく、液体のヘッドを測定し液体の組成や密度から液面の位置を計算し表示している。頂部の蒸気相の圧力と容器底面の圧力では、液体にかかる重力の分だけ底部で測定される圧力が高いため、この差が液ヘッドとして求められる。液面計の正体は差圧計である。貯槽の中の液体窒素や液体酸素の温度と圧力は大きくは変わらず、密度の変化も少ないため、差圧計の目盛（液ヘッド）をそのまま液面の高さとして読み取ることが行われている。厳密には、温度による液体の密度の変化、地域による重力加速度の違いがあるが、一般的な貯槽では、その都度の補正は行わずに、液面計が示す目盛をそのまま利用している。

ガスにかかる重力というのは、実感としてつかみにくいが、地球の大気や空気は、地球の引力によってとらえられ、宇宙空間に散逸せずに留まっていられる。小さな密閉空間に閉じ込められた流体の圧力はどこでも等しいが、さすがに地球の大きさになると、地表面では圧力が高く、高度が上がるにつれて気圧が低下する。

一般的な化学装置では、ガスの密度が小さい、あるいは気液の密度差・密度比が大きい場合は、ガスの重さが考慮されないこともある。しかし、深冷空気分離装置の中にある低温のガスの密度は、 $5\sim 30\text{kg/m}^3$ と比較的大きく、気液の密度比は、 $30\sim 200$ 倍程度しかない。したがって、高低差のある配管や機器の配置によっては、ガスの重さ（ガスヘッド）を考慮した設計が行われる。

2. 2. 4 小さな階層・ミクロスコピック

2. 2. 4. 1 小さな階層

人間の階層 10^0m から髪の毛、細胞の階層 10^6m まではマクロスコピックな階層である。

小生物や微生物の世界は、虫眼鏡や顕微鏡などの道具がないと観察できない小さな領域であるが、古典的な物理学が、ほとんど補正されることなく適用できる領域であり、マクロスコピック・巨視的階層である。

われわれの日常の常識は、マクロスコピック領域の常識であるが、階層が小さくなってくると、メソスコピック（ナノスケール）あたりから次第に通用しなくなってくる。そこから、さらに小さな分子・原子の階層になると、ミクロスコピックな「量子」の世界となり、マクロスコピックの常識が（全く）通じない不思議な世界が現れる。

分子や原子を理解し、物質や材料を取り扱うためには、20世紀の物理学が必要である。ミクロスコピックの階層を取り扱うための科学、量子論がなければ、ガスの分子を理解することもできない。たとえば、19世紀までの理想気体の概念では、気体は液化しない。19世紀末には、実在気体が液化されるようになり、分子の大きさや分子間力によって説明されるようになった。しかし、アルゴンやヘリウムのような希ガスの液化は、ファン・デル・ワールズが考えたような分子間力では、まだ説明することができない。量子力学から生まれた量子化学による説明が必要である。

原子よりもさらに4桁小さい階層が、原子核である。原子は非常に小さいが、その質量のほとんどは原子核が占め、その原子核は原子よりもはるかに小さい。原子の大半の質量を占める原子核は、原子のうちほんのわずかな部分を占めるだけであり、原子の中は、スカスカであるということが、20世紀になって初めて理解されるようになった。宇宙は、ほとんどが何も無い空間であるが、物質の世界も、ほとんど何も無い空間ばかりである。

科学は、分子、原子、原子核とどんどん小さなものにたどり着いたが、原子核はそれでも基本粒子（素粒子）ではなかった。20世紀初頭には、原子核の中にある陽子や中性子が発見され、素粒子だと思われたことがあったが、これらも素粒子ではなく、さらに小さな素粒子がその下の階層に存在することが分かった。

20世紀中盤の教科書や啓蒙書には、いたるところに、「陽子や中性子のような素粒子」という言葉が見られたが、素粒子はこんなには大きくはなかった。

素粒子の階層は、非常に小さく、素粒子は、それ以上の内部構造を持たない。したがって「粒子」とは呼んでいるが、粒子という言葉からイメージされる3次元的な球形の粒ということではない。

さらに人間が考えることができる最も小さな階層は、プランク単位系における長さの単位、プランク長 ($1.616 \times 10^{-35} \text{m}$) とされている。プランク長は、通常の物理学が取り扱う最小の階層であり、観測可能な宇宙 10^{27}m からプランク長さまで、現代の科学が対象とする階層は、10進数で62桁の範囲(2進数で206桁)にある。このうち、およそ50桁の範囲は、まだ純粋科学の領域であるといわれているので、一般の科学技術、文明、社会、産業の階層は、およそ、 10^2m から 10^{10}m までの、12桁ほどの範囲に収まる。階層が一桁異なるだけでも、現象が大きく変化することも多いため、この実質的な階層の範囲が狭いということではなく、マクロスコピックからメソスコピック(ナノ)、ミクロスコピックまで広がる12桁である。

ただし、化学や工学にとって最も重要な素粒子である「電子」だけは、この階層の中には収まらず、飛び抜けて小さい。ローレンツの古典的電子論では、電子を帯電した球とみなして取扱う。この場合の電子の大きさは「古典電子半径」として厳密に求められており、CODATAは物理定数の1つとして $2.818 \cdots \times 10^{-15} \text{m}$ と公表している。

電子は、その他の実験からは 10^{-18}m よりも小さいという結果も得られているが、一般的な取り扱い上、大きさを持たなくても不都合ではないということも多く、空間的な広がりがない「点電荷」として取り扱われることもある。電子は素粒子であり、素粒子は、それ以上の内部構造を持たないため、内部と外部の境界を決める明確な定義を持たないとも考えることもできる。原子の大きさが 10^{-10}m 、原子核の大きさが 10^{-14}m のあたりにあることを考えると、素粒子である電子は非常に小さい。化学の領域は、細胞から分子まで、およそ4桁~5桁の階層にあるが、化学にとって最も重要な役割を果たす、電子の階層だけは飛びぬけて小さい。

図2-2-18のイラストに、分子より下の階層を示す。原子、分子、化合物の階層は、およそ 10^{-10}m (0.1nm) である。メソスコピックより一桁小さいミクロスコピックな領域となる。

反応の過程において、原子核だけの粒子、たとえば、水素イオン(陽子)やヘリウム原子核(α 線)あるいは、高温ガス中で反応するプラズマを考える場合は、さらに小さな階層である $10^{-14} \text{m} \sim 10^{-15} \text{m}$ (10fm~1fm、フェムトメートル) も考えられる。

全ての元素には、同じ元素の中に、異なる核種の原子(安定同位体と放射性同位体と核異性体)が多数あるため、元素の種類(118種類)に対して元素を構成する

原子 (atom) の種類 (核種) はかなり多く、2000~3000 種類ほどある。産業ガスのビジネスでは、商材として、軽元素の安定同位体 (ヘリウム、水素、炭素、酸素など) を取り扱う。分子は、 10^{-10} m の階層にあるが、同位体で構成される分子の違いは、原子核の中の核子 (中性子数) の違いであるため、議論の対象となる階層はかなり小さい (10^{-14} m)。

図 2-2-18 のイラストの階層を小さい方 (左側) から眺めてみる。

素粒子である電子やクォークは非常に小さく、おそらく 10^{-18} m よりも小さい。素粒子は、物質の最小単位であり、それ以上の内部構造を持たず、ここまで小さいと空間的大きさという概念よりも、粒子の持つ質量 (エネルギー) を議論することが多くなり、高エネルギーを利用した研究の領域である。

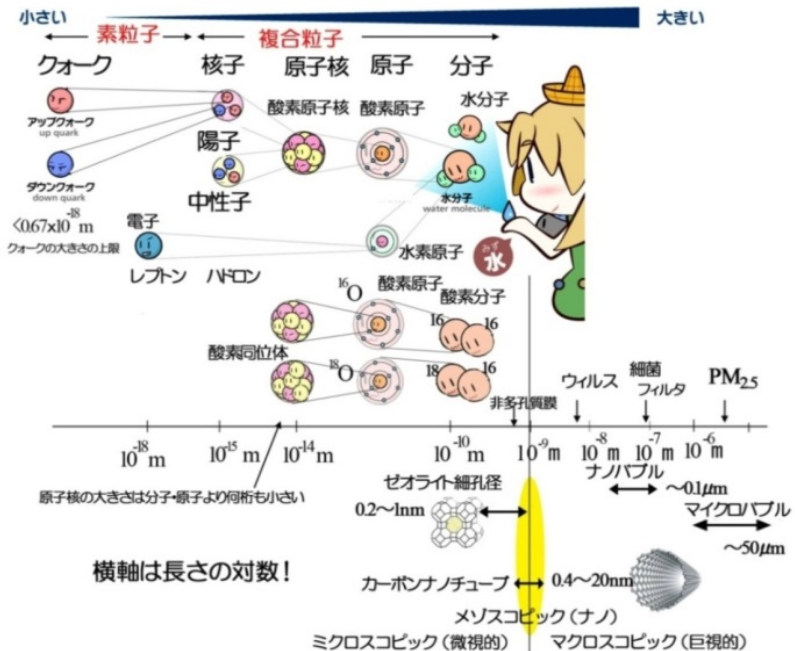


図 2-2-18-分子より下の階層 (原図は Higgstan の HP を利用)

素粒子が集まって「複合粒子」 (composite particle) が作られる。

クォークと核力からなる「核子 (陽子、中性子)」、核子と核力からなる「原子核」、クォークと反クォークからなる「中間子」、原子核と電子からなる「原子」などは、

それ自身が単体の粒子のように振る舞うと考えることもできるので、複合粒子と呼ばれる。

複合粒子と素粒子は、階層が全く異なっていることがイラストから分かる。原子の組合せである分子の階層は原子の階層と同じであるが、種類は非常に多く、低分子、高分子、同位体を含む化合物、異性体、など、天然物と人工物の種類の数は非常に多い。

図2-2-18の右の方には、ウィルス、カーボンナノチューブ、分離膜、合成ゼオライトの大きさも示した。合成ゼオライトの細孔径は、オングストロームサイズで、分子サイズほど小さいが、生物や他の人工物は、ミクロスコピックな世界から見ると、とてつもなく大きいことが分かる。メソスコピックの領域を代表するカーボンナノチューブ(CNT)も、人工物としては、非常に微細な構造を持ち、その径は、0.4nmから20nmと非常に小さいが、それでもミクロスコピックからみると巨大である。

図2-2-19に主要なガス分子の大きさのイメージを示す。ガス分子の大きさは、 10^{-10} m付近にある。実際の原子は球形ではなく、分子も図のような配置になっている訳ではないが、原子のファンデルワールス半径を指標にして、分子の大きさのイメージを表わした。

ファンデルワールス半径は、この距離よりも内側には、他の原子が近づけない最小の距離であり、原子の大きさを代表する長さのひとつである。その内側には他のものが入ることができないので、その境界までの距離を粒子(原子)の大きさと考えることもできる。

水素、窒素、酸素などの二原子分子は、共有する最外殻の電子の軌道がおよそ分子の大きさになる。

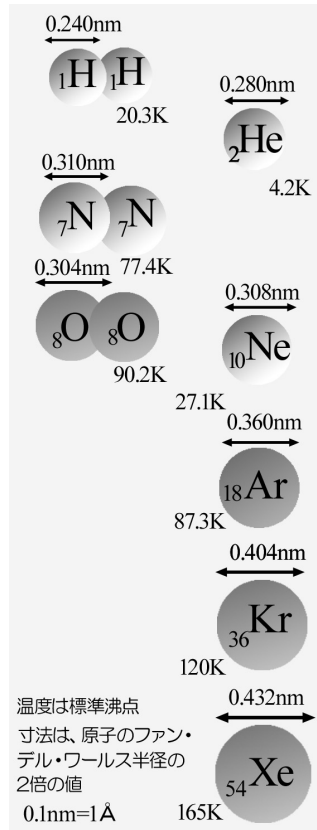


図2-2-19-ガス分子の大きさのイメージ

図の右側には、単原子分子である希ガスの大きさを示している。元素の周期表の隣同士の窒素と酸素では、原子番号の大きい酸素の方がわずかに小さいが、希ガス同士では、周期表の周期がひとつずつ増えるので、原子番号が大きい原子の方が、電子軌道が増え、少しずつ大きくなっている。

ヘリウムガスは、漏洩しやすいことがよく知られているが、この図でみると、ヘリウム原子（単原子分子）がネオンやアルゴンの原子に比べて極端に小さいという訳ではない。ヘリウム原子は、単原子分子であり、小さいというだけでなく、他の原子との相互作用が非常に小さいため、すり抜けやすく、漏れやすい。他の物質に比べて極端に液化温度が低いのはヘリウム同士の分子間力が極めて小さいためである。

ヘリウムは、非常に漏れやすいという性質を利用して、溶接の欠陥や配管の接合部、継手などの小さな漏れの検出に利用されている（ヘリウム・リーク・ディテクターによる気密試験）。ヘリウムが漏れなければ、その他のガスは全く漏れないと考えてよい。ただし、漏れ易いとはいっても、肉厚のある高圧ガスの容器に閉じ込めておくことができないというほど漏れるということではないので、ヘリウムの取り扱いには通常の容器や配管類が使用できる。

「合成ゼオライト」という材料が実用化されており、吸着材として使用した場合、吸着されるガス分子に対して選択性（ガス種による吸着量や吸着速度などの違い）があるため、この性質を「分子ふるい効果」と呼ぶことがある。

分子ふるいを意味する「モレキュラーシーブス」という商品名も比較的良好に知られている。長さの単位オングストローム（Å, au）がゼオライトの細孔径（吸着材の結晶構造の中の微細な孔の大きさ）を表すのによく用いられたため、この数字とモレキュラーシーブスの名称を組み合わせると合成ゼオライトを呼称することがある。

たとえば、細孔径の分布が5 Å付近にピークのあるA型ゼオライトを「モレキュラーシーブス5A」などと呼んだ。他にも細孔径や結晶構造によって3A、4A、13Xなどの名称が知られている。

なお、吸着材（adsorbent）は、ガス分子などを吸着する物質であるが、固形の錠剤のような形状をしたものが多く、同じ発音で「吸着剤」という表記もよく用いられる。医薬品や試剤には、液剤、錠剤、粉末、カプセルなど様々な剤形があり、その工程を製剤と呼ぶが、活性炭や合成ゼオライトのような吸着材料にも製剤と似たような整形のための造粒という工程がある（通常の吸着剤は液剤やカプセルではなく固体である）。なお吸着という用語は、化学スペクトルの権威であるハインリヒ・カイザーが、20世紀初頭に作った新語「Adsorption」の日本語訳であり、

「吸収 (absorption)」とは、別の現象として定着した。蒸留と吸着は、ガスの分離や精製プロセスに広く利用される分離の仕組み (単位操作) であるが、蒸留が錬金術の時代からある古い技術であるのに対して、吸着は 20 世紀以降に実用化された非常に新しい技術である。

$1\text{\AA}=0.1\text{nm}$ であるから、現在の単位系にすると、合成ゼオライトの細孔径は $0.5\sim 1\text{nm}$ 付近に多く分布しており、この大きさは、単原子分子や二原子分子の大きさに近い。

窒素分子と酸素分子は、分子の質量数では、それぞれ 28 対 32 とかなり大きな開きがあるが、図に示すように原子の大きさは、それほど大きくは変わらず、原子番号が大きい酸素 (0.304nm) の方が、原子番号の小さい窒素 (0.310nm) よりも少しだけ小さい。窒素も酸素も二原子分子であり、分子の大きさもそれほど大きくは異なっていない。

しかし、平均的な合成ゼオライトであれば、空気中の窒素ガスの方が空気中の酸素ガスよりも (同じ温度、分圧の時に) 多く吸着されるので、この特性を利用してガスを分離することができる。分子の大きさは、それほど大きくは異なっていないが、ガス種によって吸着特性が異なり、選択性があるため、これを「分子ふるい (molecular sieve)」効果と呼んでいる。しかし、これは粉末や粒を大きさで篩分けるメッシュのような実際の機械的「篩 (ふるい)」とは異なる。「ふるい」とはいても、本物のふるいのように大きさだけで分けているということではない。

合成ゼオライトは、その構造に固有の細孔を持っており、吸着特性は、様々な因子によって決まっている。たとえば、①細孔構造の次元、員環数、形状②細孔径の分布 (全てが同じ細孔ではなく分布がある) と細孔の比表面積③シリコンと金属イオンの比の違いによる親水性・疎水性の違い④ガス分子と吸着材の極性⑤ガス分子の大きさと形状⑥温度⑦圧力⑧拡散係数⑨他のガス分子の影響、などが考えられ、細孔径を示す数字だけで分子ふるいが行われる訳でない。分離操作は、このような要因から決まる特性、ガス種による平衡吸着量の違いあるいは吸着速度の違いを利用して行われる。一般的には、吸着材が再生再使用されるため、吸着工程と脱着工程の両方の特性を考慮した分離装置が設計される。脱着とは吸着とは逆の反応で、吸着材に吸着したガス分子が放出される現象である。

吸着や脱着に伴う反応熱は、蒸発潜熱と同じくらい大きいので、吸着材を用いたガスの分離装置は、熱移動と物質移動の両方を考慮して設計される。

図 2-2-20 に、同位体からなる 2 種類の酸素分子のイメージを示す。階層を説明するイラスト図には、酸素の安定同位体を示しているが、酸素原子の同位体の区別

がつくのは原子核の階層、 10^{-14}m である。分子の階層は 10^{-10}m であり、 $^{16}\text{O}_2$ と $^{16}\text{O}^{18}\text{O}$

はいずれも同じ酸素元素の原子からなる分子であり、ほとんど同じ分子である。

図は、原子核をかなり大きく描いているが、原子と原子核の階層は4桁異なるので、本当はもっと小さく描かなければならない。同位体の組み合わせによって作られる分子は、その重心や重さが異なるため、分子の大きさ（電子の軌道）にもわずかな違いがあると考えられるが、分離に利用できるほど有意な差はない。

同位体分子の違いは、質量数の違いであり、異なる同位体から作られた酸素は、分子の階層（化学的性質、大きさ）では、ほとんど見分けがつかない。したがって、同位体の分離や分析は、分子の階層に現われる質量の違いやそれに起因する移動現象の違いを利用して行われる。同位体の分子の間には、ほんのわずかではあるが、気液平衡の違いや拡散速度の違い、反応平衡の違い（同位体効果と呼ぶ）などがある。

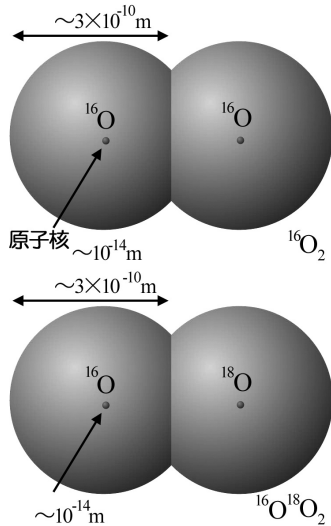


図 2-2-20-同位体からなる酸素分子のイメージ

2. 2. 4. 2 小さな階層を電子で観測する

異なる階層を観察するには、特別な道具が必要である。ヒトの肉眼の分解能では、細菌や微生物は観察できないので、研究のための拡大装置、光学顕微鏡 (optical microscope) がある。顕微鏡は、科学革命・ルネサンス (14 世紀) の頃にはまだなかったが、16 世紀末に製作され、ガリレオ・ガリレイやニュートンの「17 世紀科学革命」の時代には、生物学の研究に用いられるようになっていた。遠くのを観察する望遠鏡 (telescope) と小さなものを観察する顕微鏡 (microscope) は、ほぼ同じ頃 (16 世紀末) から使われるようになった。

階層が $10^0 \sim 10^6 \text{m}$ の間は、可視光 (肉眼、虫眼鏡、光学顕微鏡) で観測ができる。

光学顕微鏡 (optical microscope) には、生物顕微鏡、金属顕微鏡、蛍光顕微鏡 (対象物の燐光・蛍光を観察する)、レーザー走査顕微鏡 (光源にレーザーを使用) などが用途に応じて用いられている。

可視光線の波長 (360 nm \sim 830 nm) から、光学顕微鏡の分解能 (optical resolution) は、100nm (10^{-7}m) 程度となるため、カビ (200 μm)、酵母 (10 μm)、細菌 (1 μm) までは、観察可能であるが、ウィルス (20 \sim 100nm) は、可視光線の波長よりも短く、小さすぎて観察することができない。

20 世紀になって、さらに小さいものを見るために、可視光線ではなく電子線をあてて観察する電子顕微鏡 (electron microscope) が発明された。

電子顕微鏡の理論的な分解能は、0.1nm (10^{-10}m) であり、よく知られるものに「透過型電子顕微鏡」(TEM, Transmission Electron Microscope, 1931 年)、「走査型電子顕微鏡」(SEM, Scanning Electron Microscope, 1937 年)がある。

正式名称が比較的長いため、省略形、TEM (テム) や SEM (セム) が用いられ、綴りが短い割には広く通じる用語である。TEM と SEM は、もとは工学分野で利用されたが、20 世紀中頃からは広く生物学にも利用されるようになった。

19 世紀末に、細菌濾過器を通過しても感染性を失わない病気 (植物のタバコモザイク病) が見つかり、顕微鏡では観察できないほど小さなものが存在すると思われた。20 世紀になって、ウェンデル・スタンリー (1904 \sim 1971 年、米国) が、病原体を TEM で観察するためにウィルスの結晶化に成功 (1935 年)、電子顕微鏡によってウィルス粒子の大きさや形態の観察が可能となった。光学顕微鏡では観察できなかった未知の病原体が電子顕微鏡によって特定され、ウィルス学が急速に進歩することになった。スタンリーはノーベル化学賞を受賞した (1946 年)。

TEM は、観察対象に電子線をあて、それを透過してきた電子を拡大する。対象の構造や成分の違いで電子線の透過が異なり、これが顕微鏡像となる。

TEM の電子加速電圧を非常に高くした「超高圧電子顕微鏡」では、立体物の観察も可能となるが、非常に巨大な装置になるため日本国内には 20 台程しかない。

SEM は対象物全体に電子線を当てるのではなく、細い電子線をスキャンして対象物からの二次電子線などを観察するので表面付近の観察に適している。その後、探針（プローブ）を用いて物質の表面を観察する「走査型プローブ顕微鏡」（Scanning Probe Microscope、SPM）が開発された。

IBM のハインリッヒ・ローラー（1933～2013 年、スイス）とゲルト・ビーニツヒ（1947 年～、ドイツ）によって最初の SPM である「走査型トンネル顕微鏡」（STM、Scanning Tunneling Microscope）が発明された（1981 年）。（1986 年にノーベル物理学賞を受賞）。

続いて、「原子間力顕微鏡」（AFM、Atomic Force Microscope）、SQUID（超伝導量子干渉計、スクウィード）を利用した「走査型 SQUID 顕微鏡」など 10 種類ほどの SPM が開発された。

電子顕微鏡では、試料を乾燥させる必要があり、真空中で用いることもあるため、生物の観察に不向きな場合が多く、生きた細胞の観察はできなかった。そこで、X 線の光源に放射光を利用、光学素子技術を用いた X 線顕微鏡が開発された。

軟 X 線は水の吸収が少なく、高エネルギー加速器研究機構（KEK）の軟 X 線顕微鏡では、水を含んだ状態の試料の $1 \times 10^{-7} \text{m}$ 以下の構造を観察できるという。

硬 X 線顕微鏡では、非常に強度の強い光源が必要となるため、高輝度光科学研究センター（JASRI）のスプリングエイト（SPring-8、大型放射光施設、兵庫県佐用町）施設や KEK の放射光科学研究施設（Photon Factory、フォトンファクトリー、つくば市）などのシンクロトロン放射光が利用される。

このような放射光施設は非常に大がかりな装置となるため数が少ない。国内にはスプリングエイト、フォトンファクトリーの他には、自然科学研究機構・分子科学研究所（岡崎市）、兵庫県立大学（NewSUBARU）、広島大学（HiSOR）、佐賀県立九州シンクロトロン光研究センター（SAGA-LS）などがある。

表 2-2-3-2-主な顕微鏡の種類

光学顕微鏡	Optical microscope	OM
光学顕微鏡	金属顕微鏡、生物顕微鏡、実体顕微鏡、倒立顕微鏡 位相差顕微鏡、微分干渉顕微鏡、偏光顕微鏡など	
共焦点レーザー顕微鏡	Confocal laser scanning microscopy	CLSM
全反射照明蛍光顕微鏡	Total Internal Reflection Fluorescence	TIRF
レーザーラマン顕微鏡	Lasers Raman Microscope	
蛍光顕微鏡	Fluorescence microscope, Epifluorescent microscope,	MFM
電子顕微鏡	Electron microscope	
透過型電子顕微鏡	Transmission Electron Microscope;	TEM
走査型透過電子顕微鏡	Scanning Transmission Electron Microscope、	STEM
走査型電子顕微鏡	Scanning Electron Microscope、	SEM
走査型プローブ顕微鏡	Scanning Probe Microscope	SPM
走査型磁気力顕微鏡	Magnetic Force Microscopy	MFM
走査型 SQUID 顕微鏡 (超伝導量子干渉計)	(superconducting quantum interference device, SQUID)	SQUID

2. 2. 4. 3 小さな階層を放射線で観測する

遠くのは拡大すると観察しやすくなるが、小さなものも拡大しないと見分けられない。そのための仕掛けが必要である。遠くのものと同くのものも拡大する機器が発明されてきた。

16世紀末、顕微鏡(microscope)が発明されたのとほぼ同じ頃に望遠鏡(telescope)、天体望遠鏡(可視光望遠鏡)が発明された。ケプラーの法則が発見されるきっかけとなったティコ・ブラーエの天体観測は、肉眼によるものであったが、ガリレオ・ガリレイは、発明されたばかりの望遠鏡を用いて天体観測を行い、太陽の黒点、木星の衛星、天の川が星の集まりであること、など多くの天文学的発見をした。現在は、可視光以外にも、電磁波のほとんどの波長に対応する望遠鏡が開発されており、電波望遠鏡、赤外線望遠鏡、X線望遠鏡などが利用されている。

表 2-2-4-2 に電磁波の種類を示す。

X線は、波長 $100\ \mu\text{m} \sim 10\text{nm}$ の電磁波である。その高い透過性によって壁の向こうにあるものまで観察できることがよく知られるが、小さなものを見る、遠くのものを見るのにも用いられる。

ヴィルヘルム・レントゲン(1845~1923年、ドイツ)は、X線を発見し(1895年)、第一回のノーベル物理学賞を受賞した(1901年)。

カール・フォン・リンデ(1842~1934年、ドイツ)は、ルドルフ・クラウジウスの子で学び、空気分離装置を発明したが、レントゲンもクラウジウスに刺激されて物理学に興味を持ち、クラウジウスの後任のアウグスト・クントに師事して気体、熱力学、物性に関する研究を行った。

レントゲンは、高圧下でのガスの物性の研究を行う過程で、放電管の実験を行い、これがX線の発見へとつながった。X線は最初に発見された放射線であるが、レントゲンは、電磁波や放射線の専門家ではなく、クラウジウスやリンデと同じ熱力

表 2-2-4-2-電磁波の種類

電磁波の種類	波長 (m)	特徴
ラジオ波	$10^4 \sim 0.1$	ラジオやテレビの送受信電波
マイクロ波	$0.1 \sim 10^{-3}$	電離層で反射されない
赤外線	$10^{-3} \sim 8 \times 10^{-7}$	物質に吸収されると熱を生じる
可視光線	$8 \times 10^{-7} \sim 4 \times 10^{-7}$	人間の目が光として感じる
紫外線	$10^{-7} \sim 10^{-8}$	ほとんどの物質に吸収され、光反応が起こる
X線	$10^{-8} \sim 10^{-12}$	透過力が強い
γ 線	10^{-11} 以下	透過力が極めて強い

学と気体の研究者である。

X線は、未知の電磁波であったが、強い透過力から得られる「X線写真」が一般の人々にも非常に分かりやすかったため、レントゲンの成果は、すぐさま世界中に広まった。

X線は、エネルギーによって分類され、紫外線に近い低エネルギーの「超軟X線」、 「軟X線」からエネルギーが高く透過性が強い「硬X線」まであり、非破壊検査や健康診断などに用いられている。医療用の、X線撮影 (X-ray Photograph) が広く普及し、現在では、コンピュータを用いたX線-CT装置などが開発されている。日本語では放射線を用いた透過撮影全般をX線撮影と呼ぶことが多く、あるいはヴィルヘルム・レントゲンに因んで「レントゲン写真」などともいわれる。英語では、放射線撮影をラジオグラフィ (radiography) と呼び、X線撮影はその一部である。工業用の非破壊検査にもX線が用いられている。X線源には、X線管・高電圧発生器・制御器からなるX線発生装置がある。陰極フィラメントを加熱して熱電子を放出、陰極陽極間に高電圧を与えて、電子を加速、陽極のターゲットに衝突させてX線を発生させる。

X線を人工的に作る方法としては、X線管球によるX線発生 (制動放射+特性X線) とシンクロトロンによるX線発生 (シンクロトロン放射光: 制動放射) などがある。

シンクロトロン放射光を用いる方法では、電子を加速させるための大型の加速器が必要となり、非常に大がかりな装置となる。日本ではSpring-8、KEKのPhoton Factoryなどが知られる。

一方、非常に簡単な作業でX線が発生することがあり、粘着テープを真空中ではがす時の発光現象、トリボルミネッセンスと呼ばれる摩擦による発光にX線が含まれているというUCLAの実験結果が2008年に発表された。掲載したのがNature誌であったため、粘着テープから放射線が出ると話題になったが、真空中でなければ十分なX線が発生せず、通常的环境下でテープを使用してもX線被曝の可能性はないことが分かり、騒動にはならなかった。欧米の研究者は実験室でテープを使うことが多いのだろうか、これ以前にも粘着テープ剥離法によるグラフェン作製 (2004年) が大きな話題となり、2010年のノーベル物理学賞につながっている。

X線の発見後、天然の放射性物質から出る他の放射線が発見された。初めて放射



図 2-2-21-ヴィルヘルム・コンラート・レントゲン(1845~1923年)
Wikipedia

線が見つかった時の未知の記号「X」線と同じように、異なる3種類の放射線には、 α 、 β 、 γ と記号がつけられた。その後、アルファ線はヘリウム4の原子核、ベータ線は電子、ガンマ線は電磁波であることがわかったが、名前や記号はその時のまま残っている。

アーネスト・ラザフォード(1871~1937年、ニュージーランド)は、原子の中の構造を調べるために α 線を用いた。その散乱実験から、原子核は、原子の中心部にほんのわずかな空間を占めるだけで、原子の中はほとんどが空っぽであるという、現在よく知られている原子の基本的な構造が明らかになった(1909年)。現在は、さらに小さな構造を調べるために衝突型加速器など様々な道具が用いられている。

最も有名なのは、スイスとフランスの国境をまたいで建設・運営されている欧州原子核研究機構(CERN、セルン)の施設で、ここには、大型ハドロン衝突型加速器(LHC)など6種類の粒子加速器があり、ニュース映像などでしばしば紹介されている。

LHCは全周27kmもある巨大な加速器で陽子ビームどうしを衝突させて高エネルギーを発生させて素粒子の反応を研究する装置である。2年間の大規模な改造工事を終えて2015年より実験が再開されている。

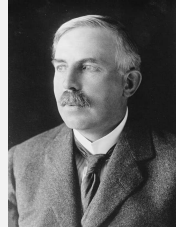


図 2-2-22-ネルソン卿アーネスト・ラザフォード(1871~1937年)
Wikipedia

2. 2. 4. 4 小さな階層を観測するその他の方法

X線撮影法は、内部の検査や結晶構造の解析に用いられるが、X線が放射線であり、レントゲンの時代には明らかではなかった放射線被曝による障害が知られるようになり、検査目的の医療放射線では被曝による侵襲性が問題となった。また、X線撮影法も万能ではなく、造影剤が必要となることもある。

生物の内部や分子の構造を調べるのに核磁気共鳴（NMR、Nuclear Magnetic Resonance）が用いられるようになった。

イジドル・ラービ（1898～1988年、米国）がNMR法を開発（1938年）、1944年にノーベル物理学賞（「共鳴法による原子核の磁気モーメントの測定法の発見」）を受賞した。

NMRは、回転磁場におかれた原子核の歳差運動の共鳴現象を利用するものである。ヒトの体の検査をおこなうために、水分子の中の水素原子核の核磁気共鳴を観察してコンピュータを用いて映像化する核磁気共鳴画像法（magnetic resonance imaging、MRI）が実用化された。MRIは、ポール・ラウターバー（1929～2007年、米）とピーター・マンズフィールド（1933年～、英国）が1971年に発明、28年後の2003年にノーベル生理学・医学賞を受賞している。

核磁気共鳴は、原子核のゼロ以外の核スピン（量子数）と磁気双極子モーメントを利用するため、「原子番号と質量数がともに偶数ではない」原子核だけが測定対象となる。実際の測定は、励起された原子核が基底状態に戻る「緩和」を観測する。

素粒子は、性質（自由度）として「スピン内部角運動量」を持つが、素粒子からなる複合粒子である核子（陽子、中性子）もスピンを持ち、核子からなる原子核もスピンを持つ。

原子核のスピンは、核子の持つスピンを合成して求めなければならないが、簡単に言えば、原子番号が奇数の原子核は、陽子数が奇数なので、陽子どうしのスピンの対が余り、スピン量子数はゼロ以外の値をとる。スピン量子数がゼロでない原子核は、核磁気共鳴が利用できる。原子核の質量数が奇数の場合は、陽子あるいは中性子のいずれかが奇数であるため、原子番号の偶奇に関係なく、スピンの対がゼロではないので核磁気共鳴が利用できる。

一方、質量数も原子番号も偶数の場合は、陽子と中性子がそれぞれ偶数であるため、ペアが打ち消しあってスピンの対がゼロとなり、核磁気共鳴がない。

したがって原子番号が1の水素は、水素 ^1H と重水素 ^2H （D）ともに核磁気共鳴現象が利用可能である。原子番号が偶数6の炭素は、質量数も偶数の12の ^{12}C に

は核磁気共鳴がなく、質量数が奇数の ^{13}C に核磁気共鳴がある。原子番号が偶数 8 の酸素は、質量数が偶数である酸素 ^{16}O 、 ^{18}O 、には核磁気共鳴がなく、奇数である ^{17}O には核磁気共鳴がある。水素、炭素、酸素は生物の分子を作る代表的な元素であるが、 ^{12}C 、 ^{16}O 、 ^{18}O 、は核磁気共鳴を利用した測定には使用できない核種ということになる。

水素は、天然存在比が大きく相対感度が大きいので、様々な測定に利用されるが、酸素は核磁気共鳴のある ^{17}O の天然存在比が 380ppm と非常に小さいため、MRI を利用するには濃縮（同位体分離）しなければならない。天然存在比が少ないということは、同位体分離プロセスにとって大きな難題であり、 ^{17}O を利用した MRI の技術は実用化には至っていない。

炭素の場合も核磁気共鳴があるのは ^{13}C だけとなるが、こちらは天然存在比が 1.07% と比較的大きいため、濃縮は (^{17}O よりは) 容易である。

NMR は、今では様々な測定に用いられるようになり ^1H 、 ^{13}C 、 ^{15}N 、 ^{19}F 、 ^{29}Si 、 ^{31}P といった核種が利用されている。なお、核磁気共鳴(NMR)現象を利用した CT (computer tomography、コンピュータ断層撮影) であるから、NMR-CT (核磁気共鳴 CT 検査) が正式名称であったが、医療現場に「核」という文字に抵抗があったため、MRI (magnetic resonance imaging) と呼ばれるようになったという。

小さなものの観察、壁の向こうのものの観測に、電磁波 (光、X 線)、電子線や核磁気共鳴などが用いられているが、遠くのもの観測には、さらにこれらとは異なるものが使われている。東大宇宙線研究所・神岡実験場には、ニュートリノ望遠鏡 (宇宙ニュートリノ検出器) があり、小柴昌俊 (東京大学特別栄誉教授、1926 年～) らは、本来は陽子崩壊実験装置であったカミオカンデをニュートリノ検出器に改造し、宇宙ニュートリノの観測に成功している。ニュートリノは、ヴォルフガング・パウリ (1900～1958 年、オーストリア) が予言 (1930 年) し、エンリコ・フェルミ (1901～1954 年、イタリア) が仮説をたて、ニュートリノと命名した素粒子 (1932 年) であるが、観測は非常に難しく、長く発見されなかった。

フレデリック・ライネス (1918～1998 年、米国) とクライド・カワン (1919～1974 年、米国) が原子炉周辺に検出器を置き、初めてニュートリノを観測、その存在を証明したのは 1954 年であるが、ライネスにノーベル物理学賞が授与されたのは 1995 年、41 年も後のことである。

小柴昌俊は、カミオカンデを用いて自然界 (マゼラン星雲の超新星爆発) からニュートリノを検出 (1987 年)、15 年後にノーベル物理学賞、ニュートリノ天文学という新しい分野を開拓した。梶田隆章 (1959 年～) がスーパーカミオカンデを用いて大気ニュートリノを観測、ニュートリノ振動を確認してニュートリノの質

量を見出したのが1998年であるが、ノーベル物理学賞を受賞したのは17年後の2015年である。ニュートリノの観測やその検証は非常に困難な研究であり、この研究を推進し梶田らを指導した戸塚洋二は既に他界しており受賞はできなかった。

現在は、より大規模化したスーパーカミオカンデが登場し、カミオカンデは、反ニュートリノ研究に特化した検出器「カムランド」（東北大学ニュートリノ科学研究センター）に生まれ変わっている。ハイパーカミオカンデ計画も進められている。

神岡実験場では、液体キセノン・シンチレータを用いたXMASS（エックスマス）実験によってダークマターの探索が試みられている。約1トンの超高純度液体キセノンが検出用に用いられ、液体キセノンの超高純度精製やキセノン容器の製作に、産業ガスメーカーの技術が活用されている。

最近では、地球の内部構造を調べるためにミュオ・トモグラフィーが研究されている。これは地球大気高層部で発生するミュオン（素粒子である荷電レプトンのひとつ）を利用して地球の内部を観察するもので、最近では、火山のCTスキャンとも言われるようになってきている。東京電力福島第一原子力発電所の内部の透視に用いることも検討されている。

ヒトが自らの五感で観察できるのは、ほぼ同じ階層から周辺の事象に限られるため、科学技術の発展には、このような異なる階層を観察する道具の発明が欠かせない。特にガスを取り扱う実験では、ほとんど何も見えず、可視化も非常に困難であるから測定器頼りである。実験装置でも商業装置でも運転中の大半の時間は、温度計、圧力計、分析計、流量計などが示す数字を眺めているのであって、ガスを見ている訳ではない。

産業ガスでは、品質管理のために「ガスの分析」が行われ、ガスの濃度（主に不純物の濃度）が測定されているが、分子、原子、イオンの階層の現象を直接観測することはできないため、様々な仕組みを用いて同定や定量ができる測定器（分析計）が開発されている。

測定技術や実験技術が進歩して、より下の階層が観察・観測できるようになると目の前の現象や物性の理解が深まり、疑問が解消する。しかし、その先に新たな謎が現れ、課題が増えることが多い。

補足 2-15 : スピン

原子核やハドロン（陽子、中性子など）の性質を表わす時に用いられる「スピン」は量子力学的な量子の自由度である。

量子数の中には「電荷」のように比較的なじみのあるものと、「色荷」「フレーバー」のように専門外の人間にとって、イメージすることが困難なものがある。「スピン」は、語感からは、分かり易そうに感じられるが、実際は理解しにくい。

スピンという言葉からは、自転のようなものをイメージしてしまうが、量子は不確定であり、自転する軸のようなものを持たず、また量子を取り扱う時には、大きさのない質点あるいは波と考えることもあり、粒子がぐるぐると同転運動するようなスピンを定義することはできない。

色荷が、実際には色ではないのと同様にスピンも回転運動ではないということであり、スピンは、内部自由度あるいは内部角運動量として定義される。

角運動量（スピン）は、ド・ブロイの関係式から、 $p = \hbar k$ と示されたので、実際の値は、ディラック定数の定数倍となり、たとえば電子のスピンは、 $\pm 1/2 \hbar$ である。SI 単位で表わせば、 $5.27 \times 10^{-35} \text{Js}$ ということになるが、このような場合、物理学ではプランク単位系を用いることが多く、電子のスピンは、ディラック定数を含まず、 $\pm 1/2$ と示されるのが一般的である。

また、電子は粒子ではなく量子化された場（電子場）として記述されるため、スピンの属性は、粒子ではなく「場」が持っている。

量子は、「ゼロと整数と半整数のいずれか」の値のスピンを持つが、スピンを回転運動だとイメージしてしまうと、粒子が持つスピンの符号や半整数の意味の理解が難しくなる。スティーブン・ホーキングは、天才的な物理学者であり、一般の人向けの啓蒙書を多く執筆することで知られるが、ベストセラーとなった「ホーキング宇宙を語る」の中で、スピンを次のように平易に説明している。

「宇宙の全てのものは、粒子という言葉を用いて記述できる。これらはスピンという性質を持つが、ひとつのとらえ方は軸を中心に自転しているコマのような粒子を想像することである。しかし、これは誤解を招きかねない。・・・ 粒子のスピンが本当に示してくれるのは、異なる方向から見たときに粒子がどのように見えるかということである」・・・「スピンゼロの粒子は点に似ており、どの方向から見ても同じである。スピン1の粒子は矢印のようなもので（挿絵はトランプのエース）、見る方向によって異なり、1回転した時にだけ同じに見える。スピン2は両端に矢を持つ矢印のようなもので（挿絵はトランプのクイーン）半回

転すると同じに見える。さらに大きなスピンの持つ粒子は、半回転以下で同じに見える。一方、1回転360度回転させても同じに見えない不思議な粒子が存在する。2回転して同じに見える粒子は $1/2$ のスピンの持つ。」「スピンというのは、マクロな世界でイメージされる回転運動ではなく、ミクロな世界の量子が持つ対称性の性質である。われわれの世界は、スピン $1/2$ を持つ物質粒子とスピン0、1、2を持つ相互作用粒子（力を伝える粒子）からできている。…電子その他のスピン $1/2$ の粒子が正しく理解されるようになったのは1928年にディラックが、ひとつの理論をとнаえてからである。…この理論から電子にはパートナー粒子が存在することが予言され、1932年に陽電子が発見された」

素粒子の場合、力を伝えるゲージ粒子のスピンは1（未発見のゲージ粒子、重力子はスピン2）、対称性を破り物質に質量を与えるヒッグス粒子のスピンは0、物質を構成するフェルミオンのスピンは半整数である。電子は物質粒子（フェルミオン）でありスピン $1/2$ を持つ。核子（陽子と中性子）は素粒子ではなく複合粒子であるが、スピン $1/2$ を持つ。核子からなる原子核は、核子の角運動量の合計で原子核全体のスピン（核スピン）が決まる。たとえば、酸素原子の場合、 ^{15}O は $-1/2$ 、 ^{16}O はゼロ、 ^{17}O は $5/2$ 、 ^{18}O はゼロのスピンの持つ。酸素の核磁気共鳴を利用するには、 ^{15}O あるいは ^{17}O ということなる。