

2.3 量子力学 (quantum mechanics, QM)

「2.1 気体の液化、分子の発見」では、理想気体の科学と実在気体の液化を復習した。ガス屋の技術は、概ね 17 世紀から 20 世紀初頭までの科学の知識に、実務経験が加われば、十分にやっていけそうである。「2.2 階層」では、ガス分子のような非常に小さな階層から、その元素を生んだ宇宙の階層まで、ガス屋が関わるであろうガスの科学と非常に広いガスのユーザーの科学について「物質の階層構造」を追って説明した。異なる階層を観測するための音、光、電磁波、放射線の利用方法、温度、圧力などの基礎的な量の測定方法を示した。

ここまでの話で、ガスを取り扱う基礎の科学は十分のように思える。ところが、20 世紀後半から 21 世紀にかけて、産業ガスのビジネスは大きく広がり、ガスを安定供給するだけでなく、機器やノウハウを含めたトータル・ガス・ソリューションを提供するようになってきた。ガスビジネスの範囲は、20 世紀前半にはなかったビジネス領域に広がり、電子機器を扱う産業（半導体材料）、超低温（機器・ガス）、安定同位体（供給と応用技術）、燃焼技術や雰囲気ガス（供給と技術提供）など、様々な分野の産業ガス顧客が現われた。

プロのガス屋 (Gas Professionals) としては、顧客にガスを安定供給するだけでなく、それを利用する技術と新分野への知見や理解も求められるようになってきた。たとえば、半導体材料ガスを供給する時に、半導体そのものや製造プロセスについて全く知らなくてもよいということにはならない。超低温の機器を納入する時に超低温の科学を知らなくてもよいということもなく、また、安定同位体製品を製造する時に同位体や周辺技術に対する知見がなくてもよいということにはならない。

2.3 節以降は、「現代物理学」について少し整理したい。ただし、20 世紀に現われた物理学の 3 大理論は、「量子論 (量子力学)」「相対論 (特殊相対性理論と一般相対性理論)」「超ひも理論」であり、大学の理工系を卒業していたとしても全てを学びなおすことは不可能である。そこで、ガス屋の視点からみて必要な部分だけ抜き出すこととし、ガスの科学に関連する量子論と相対論の概要だけを扱うことにするが、どこまでがガス屋に必要な科学なのかは判断が難しいところもあるので、そこは読み手 (Gas Professionals) の皆さんにも考えて頂きたい。量子論 (前期量子論) → 特殊相対性理論 → 場の量子論 → 一般相対性理論 → 宇宙論 (宇宙、太陽、地球) → 空気の歴史の順に話しを進める。

2. 3. 1 現代物理学と量子論

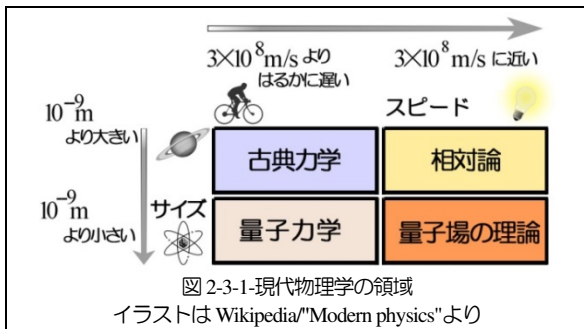
量子力学は、20世紀最大の科学の成果であり、それまでの古典物理学を根底から変えた。

17世紀の欧州では、ニコラウス・コペルニクスやヨハネス・ケプラーらによる科学革命があり、18世紀には、ガスの科学や物質の科学が大きく進展し、18世紀後半には英国発の大きな技術革新、(第一次)産業革命が起こった。19世紀中盤には、米国やドイツ、フランスの工業化が進み、第二次産業革命が起こった。そして19世紀最後の年の最後の月にドイツのマックス・プランクによって生み出された量子力学は、それまでにない大きなパラダイムシフトをもたらし、20世紀は科学の世紀と呼ばれるようになった。量子力学は、人々のものの見方を根底から変えさせ、科学の原理の変更すら迫るものとなった。

「量子力学 (quantum mechanics)」は、「量子物理学 (quantum physics)」あるいは「量子論 (quantum theory)」と呼ばれることもある。量子論は、歴史的には量子力学から始まり、その後、量子力学を含む大きな枠組みとなり、現在量子論は、大きくは、二つの理論、「量子力学」と「量子場理論 (quantum field theory, QFT)」に分けられている。量子論を少し細かく分類すると、量子電磁力学、量子色力学、量子化学、固体物理、低温物理などの研究領域があり、電子工学や応用物理などの応用分野がある。

量子論 (量子力学) と相対性理論 (相対論) 以後の物理学は「現代物理学 (modern physics)」と呼ばれるようになり、それ以前の物理学は「古典物理学 (classical physics)」と呼ばれるようになった。

図 2-3-1 に古典物理学 (古典力学) と現代物理学の領域分けの概念を示す。横軸はスピード (速度)、縦軸は大きさ (サイズ) であり、スピードが遅く、サイズが大きい範囲が 19 世紀までの古典力学と位置づけられる。(スピードが光速 $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ より遅く、サイズが 10^9 m より大きい図の左上の領域)



スピードが速くなると、「相対論」の領域、サイズが小さくなると「量子力学」の世界となり、スピードが速くサイズが小さい領域は「量子場の理論」の世界である。

図の左下の「量子力学」の領域は、「非相対論的量子論」あるいは「古典的量子力学」とも呼ばれ、通常の化学はこの領域に含まれる。図の右下は、電場、磁場、真空などを取り扱う「量子場の理論」、「場の量子論」となり、古典的量子力学は量子場の理論の一部（近似）を構成する。「古典力学」の領域以外の3つの領域が、「現代物理学」（20世紀の科学）の領域である。

どのくらい速くなると相対論（相対論的取り扱いが必要）となるのか、どのくらい小さくなると量子論となるのか（量子効果が現れるのか）、というきちんとした線引きはないが、大まかにいって、遅くて大きいものは「古典力学」による近似が可能であり、古典力学と量子力学の境界は、およそ 10^9 m とされている（→「2.2.2 中くらいの階層（メソスコピック）」）。

現代物理学は、物理学、化学、生物学など様々な自然科学に大きな影響を与え、20世紀以降の文明と産業は、現代物理学の進展を抜きに語ることはできない。特に産業ガスの技術は、現代物理学の成果から生まれ、逆にそこから生まれた技術や商材が、現代物理学の発展に大きく寄与してきた。現代物理学とガス屋の仕事は、切っても切れない密接な関係にある。数々の天才たちが成し遂げた現代物理学の全てを学び理解することは不可能であるが、産業ガスビジネスの継続・発展のためには、その歴史と概要を知り、少しでも理解を深めておくことが重要である。

1900年に始まる量子力学は、1925年頃に、ほぼ確立した。

量子力学に代表される量子論は、その後も、20世紀中盤にかけて、量子化学、量子電磁気学、量子色力学など様々な広がりを見せた。量子論は、自然科学における微視的記述から始まったが、その考え方や手法は、巨視的な記述や情報処理、さらには、自然科学以外の分野にまで利用されるようになっていった。

次の表に、量子論の体系を大まかに列挙する。（分類法、並べ方は様々であり一例である）

表 2-3-1-量子論の大まかな体系

分野の名称	英語表記	主な人物、キーワードなど
①量子物理学	quantum physics	
●場の量子論 QFT	quantum field theory	ディラック、ハイゼンベルク、パウリ
◎量子力学 QM	quantum mechanics	マックス・プランク、ヴェルナー・ハイゼンベルク、ヴォルフガング・パウリ 「場の量子論」の低エネルギー状態近似
◎量子電磁力学 QED	quantum electrodynamics	ディラック、南部陽一郎、ファインマン、朝永振一郎、荷電粒子間の電磁相互作用を量子論的に記述する場の量子論
◎量子色力学 QCD	quantum chromodynamics	南部陽一郎、ゲルマン他 強い相互作用を記述する場の量子論
●量子力学の数学		
◎量子力学の数学的基礎	mathematical formulation of quantum mechanics	ノイマン、量子力学で扱う物理量や状態の概念の基礎となる数学
◎量子群	quantum group	物性物理学、量子的場の理論、弦理論などに応用される代数
●量子統計力学	quantum statistical mechanics	アインシュタイン、ボース他 量子力学的な系を扱う統計力学の手法
●核物理	nuclear physics	ラザフォード
◎ハドロン物理学	hadron physics	ハドロンの性質を QCD を用いて解析
◎核分裂反応	nuclear fission	マイトナー、原子力工学
◎核融合反応	nuclear fusion reaction	コッククロフト、サハロフ
◎放射線医学	radiology	
○核医学	nuclear medicine	診断学、核医学検査
○放射線診断学	diagnostic radiology	X-線、X線CT、MRI、SPECT、PET
○放射線治療学	radiation oncology	サイバーナイフ治療
●素粒子物理学	particle physics	坂田昌一、湯川秀樹、ヒッグス、その他多数、最も基本的な構成要素を研究
◎高エネルギー物理学		CERN、KEK
◎ニュートリノ天文学	neutrino astronomy	小柴昌俊
◎加速器工学	particle accelerator	
◎放射光	synchrotron radiation	シンクロトロン放射、X線分

		光、SPing8
●物性物理学	condensed matter physics	物質の巨視的性質を微視的な観点から研究 凝縮系の物理学
◎量子エレクトロニクス	quantum electronics	電子と光子の振る舞いを研究
◎電子工学	electronics	電子の動きを制御・利用する科学と技術
◎固体物理学	solid state physics	
○表面科学	surface science	ラングミュア
○ソフトマター物理学	soft matter	ジル・ド・ジェンヌ、伝統的な物性物理学と化学、生物学との境界領域
○高分子物理学	polymer physics	ポリマー統計性あるいは高分子の電子系の物性物理。導電性高分子、ポリアセチレン
○高分子化学	polymer chemistry	分子量が1万を超える無機・有機化合物
◎低温物理	cryogenics	カピッツァ、オネス
◎良導体、半導体、絶縁体		
○半導体	semiconductor	固体のバンド理論
◎結晶、アモルファス		
◎スピントロニクス	spintronics	固体中の電子の電荷とスピンの両方を利用
◎量子光学	quantum optics	光と物質の相互作用を研究
●量子重力理論	quantum gravity theory	ホーキング、ペンローズ
●超弦理論	superstring theory	南部陽一郎、グロス
②物理化学	physical chemistry	物理学的手法を用いて研究する化学 量子力学、熱力学、統計力学などを用いる
●量子化学	quantum chemistry	原子と電子の振舞いを量子力学で取り扱う フリッツ・ロンドン、ポーリング
●計算化学	computational chemistry	レナード=ジョーンズ
●放射化学	radiochemistry	マリ・キュリー、ピエール・キュリー
③分子生物学	molecular biology	
●生物物理学	biophysics	生命を物理学と物理化学で理解
◎量子生物学	quantum biology	量子力学の言葉で生命現象を記述

●分子遺伝学	molecular genetics	塩基配列から生物の進化を議論、あるいは遺伝現象の仕組みを分子のレベルで理解
●量子脳力学	quantum mind	脳のマクロスケールでの振舞いまたは意識、量子意識、ペンローズ他
④量子工学	quantum engineering	
●量子情報科学	quantum information science	
◎量子コンピュータ	quantum computer	ファインマン
◎量子暗号	quantum cryptography	
◎量子テレポーテーション	quantum teleportation	量子もつれを用いた情報伝達方法
⑤社会科学		
●経済物理学	econophysics	量子物理学と経済学
◎量子ファイナンス	quantum finance	
●量子データフュージョン	quantum data fusion	ブランド、経営戦略
⑥その他、学際、工学		
●離散信号	discrete signal	デジタル制御、離散フーリエ変換
◎情報処理		データのデジタル化
◎音響信号処理		音声分析、音声認識、デジタル化
◎データマイニング	data mining、DM	KDD (knowledge-discovery in databases)
◎ビッグデータ	big data	
●人工知能、AI	artificial intelligence	
●色の量子化	colour quantization	

2. 3. 2 量子論のおおまかな歴史

19世紀末の古典力学や統計力学から本格的に量子力学の構築が始まる1920年代中頃までの量子力学を、「前期量子論 (old quantum theory)」と呼ぶ。

前期量子論に大きな影響を与えたのは、それ以前の古典的な物理学であり、ジェームズ・マクスウェル (古典電磁気学を確立)、マイケル・ファラデー (電気化学)、ハインリヒ・ヘルツ (電磁波)、カール・ガウス (電磁気) などの19世紀の科学である。

これらの古典物理学は、19世紀末には、ほぼ完成の域に達しており、物理学にはもう新たな課題がないと思われていた。しかし、科学の進歩に伴って、電磁気学や物質の研究領域を中心に、大きな未解決問題が現れるようになり、それが現代物理学を生むきっかけとなった。

前期量子論は、大きく3つに分けられる。

第1期：「エネルギーと光は、とびとびの量を持つ」

量子力学は、量子の生みの親プランクの「エネルギー量子仮説」から始まり、相対性理論の生みの親アインシュタインの「光量子仮説」が続いた。

第2期：「電子もとびとびの量を持つ」

ニールス・ボーアが電子を量子化し、原子模型を完成させた。

第3期：「ミクロスコピックな階層の物質は、波である」

ド・ブロイは、電子を波としてとらえた (物質波)。波を記述するためにシュレーディンガーが波動力学を、ハイゼンベルクが行列力学を構築した。

プランクのエネルギー量子仮説の5年後に出されたアインシュタインの光量子仮説は、長い間、波だと思われていた光が、粒子としても振る舞うことを説明し、その後の量子力学の発展に大きな影響を与えた。光は波であるという事実と、光は粒子であるというもうひとつの事実は、光が光量子という量子であるという真実によって説明され、17世紀から続く、光の波動説、光の粒子説という科学の難問に結論を与えた。

アインシュタインは、初期の量子力学に多大な貢献をしたが、後にボーアらとの間に基本的な見解の違いが生じ、大きな論争となった。アインシュタインは、相対性理論をライフワークとし、基本的には量子論の概念を嫌っていたが、ノーベ

ル物理学賞の受賞理由は、量子論における貢献（光電効果など）である。

第2期では、ボーアが電子を量子化することによって、原子模型を完成させた。

第3期では、シュレーディンガー方程式によって、分子を構成する軌道電子が記述されるようになり、量子力学は、物理学だけでなく化学の分野においても必須の科学となった。

量子力学は、プランク、ハイゼンベルク、シュレーディンガー、アインシュタイン、ラザフォード、ボーア、パウリといった数々の天才たちの手によって発展し、シュレーディンガーの波動方程式（1927年）でほぼ完成された（前期量子論）。

20世紀初頭は、ドミトリ・メンデレーエフが元素の周期表（1865年）を発表して、既に50年近くが経過していたが、まだ、周期表は空欄だらけであり、アルゴンやヘリウムのような希ガスがやっと発見され始めた時代である。空気の液化や鉱物の調査によって新たな元素が発見され、次第に周期表が埋まり、元素を構成する原子やその原子の構造について様々な研究が行われるようになっていったが、この時代の発見や新理論は、古典物理学と現代物理学の狭間に現れたため、にわかには信じるのが難しく、多くの議論が巻き起こった。

しかし、それまでの古典的な考えでは、説明ができなかった多くの事象が、量子力学によって次々と解決されていったため、人々は次第に量子力学を信じるようになっていった。

17世紀、ボイルらが切り拓いた新たな学問、化学によって、それまで錬金術やスコラ哲学では説明が困難であった事象が明らかにされていった。20世紀初頭、現代物理学、量子力学という新しい科学によって古典物理学では説明できなかったことが明らかにされていった。

この時代、量子力学や相対論では、極めて重要な原理がいくつか見出された。科学や物理の「原理」は、証明することができない最上位に位置づけられる「出発点」であり、新たな原理は百年に1度も現われないほどのものである。しかし、20世紀初頭は、不確定性原理、排他原理、光速不変の原理など、自然の本質を示す新たな原理がいくつも見出され、科学の大前提が書き換えられた。エネルギー保存則、質量とエネルギーの等価、熱力学の第二法則など、今では当たり前と思われている重要な法則もこの時代に確立された。

前期量子力学が定式化され、ほぼ同じ時期に確立されていったアインシュタインの相対性理論が現代物理学の基礎理論となった。しかし、前期量子論の完成形であり、電子を波として記述することに成功したシュレーディンガー方程式は、非相対論的量子力学である。時代は、電磁場などの「場」の正しい記述を必要とし、

量子力学にも、電磁相互作用（特殊相対性理論）が組み込まれることが要請された。しかし、量子論は非常に小さな階層を記述し、相対論は主に地球規模や宇宙規模の大きな階層を記述するものであり、量子論と相対論は、基本的には相性がよくない（図 2-3-1）。ポール・ディラックは、ディラック方程式を提案（1928 年）、量子力学に特殊相対性理論を組み込んだ相対論的量子力学である「場の量子論」を生み出した。波動方程式を過渡期として、それ以降、本格的な量子力学が構築され、後期量子論の時代となった。新たな量子論によって、それまでの量子力学は、場の量子論の一部として理解されるようになった。それまで、量子力学の研究を進めてきたのは、主に、光や波、原子や化学の研究者であったが、これ以降、より小さな階層や高エネルギーの現象を取り扱う素粒子物理学や理論物理学の研究者らが研究の中心となっていった。

1950 年代になって、ファインマンや朝永振一郎らによって「量子電磁力学 QED」が作られ、1960 年代には、南部陽一郎やゲルマンらによって「量子色力学 QCD」が作られ、現在の量子論と素粒子研究の基礎ができあがった。

素粒子物理学というと最新の科学のように思われがちであるが、はじめは 50 ～60 年も前であり、理論的研究が 20 世紀中盤から続けられている。はじめは、一部の天才的な学者だけが理解できていた理論も、最新の観測技術・実験技術によって実証されるようになり、やがて、世界の人々は、「最新の理論」として理解できるようになってきている。素粒子物理学のノーベル物理学賞の受賞は、南部陽一郎 2008 年、小林誠、益川敏英 2008 年、ピーター・ヒッグス 2013 年、梶田隆章 2015 年と比較的新しい。しかし、南部陽一郎が、「自発的対称性の破れ」を研究したのは 1960 年代、小林・益川が「CP 対称性の破れ」を理論的に説明し、第三世代のクォークを予言する小林・益川理論が発表したのは 1973 年である。自発的対称性の破れは、宇宙が存在する理由、物質や生命の起源にせまる理論であるが、歴史的な大発見や革新的な理論が実証され、評価されるには非常に長い時間がかかる。

2. 3. 3 前期量子論

2. 3. 3. 1 量子 (独 Quant、英 quantum) とは

量子 (Quant、量、クォント) とは、1900年にマックス・プランク (1858~1947年、ドイツ) が発見・提唱した「物理量の最小単位」であり、古典物理学では考えられなかった不連続な量、とびとびの値を持つ「単位」である。英語では quantum (微小な量、カンタム) という。元は、ラテン語であり、複数形は quanta (カンタ、クアンタ) であり、この関係は、データム (単数、datum) / データ (複数、data) と似ている。

「データム/データ」の場合、ほとんど日本語訳 (資料・情報) は用いられず、情報の性格上、複数形の「データ」が用いられることが多い。一方、「カンタム/カンタ」の場合は、最小単位を表わすため、主に単数形が用いられ、日本語訳 (量子) も広く普及している。

クォントの、日本語訳は、「量子 (りょうし)」あるいは「素量 (そりょう)」である。素量は、電気素量以外では使われていないため、ほとんど量子が用いられる。量子は、中国語でも同じ文字が用いられるが、この漢字から得られる印象からは量子の実体は見えてこない。

量子という物質やグループが存在するのではなく、量子の性質が顕著に現れる「状態」や「もの」を量子と呼んでいるので、量子の性質を理解しなければこの言葉は使えない。

量子は、「エネルギー量子」、「光量子」、「量子数」、「量子効率」、「量子効果」など他の用語と組み合わせて用いられることが多く、あちらこちらに「量子」「量子化」という言葉が溢れるようになった。

正体不明であるにもかかわらず巷に溢れてかえっている言葉に「エネルギー」がある。エネルギーには、実体・形がなく、取り出してみることができないため、定義や本質の理解は非常に難しい。エネルギーという言葉は、スタミナや活力の源のようなものとして理解されて広く流通している。エネルギーの本質を理解することは難しいが、エネルギーはその形が変化する時の「性質」によって何となく理解されている。

量子は量子の性質をもつ「もの (物質、波、状態、空間)」である。ものには、光や原子や素粒子 (物質粒子) のように物質としての実体がある場合や、物質波や素粒子 (相互作用粒子) のように物質としての実体がない場合がある。

全ての「もの」の根源は素粒子であり、素粒子は量子であるから、これらが持つ量子の性質は、上位の階層に受け継がれているはずである。しかし、大きな階層（ 10^9 m よりも大きい階層）では、量子の性質（量子効果）がほとんど見られず、巨視的量子効果（マクロサイズでの量子効果）が顕著に現われるには条件がある。一般的に量子特有の現象・量子効果が観測されるのは、小さな階層、たとえば分子や原子よりも小さな粒子、あるいは量子効果以外の他の効果が小さいとき、たとえば、分子の熱運動が極端に小さな超低温領域、分子の数が極端に少ない超高真空の状態の時などである。量子効果は、極端な環境、基本的には微視的な領域のものであるから、日常的には観測されないが、それが巨視的な領域にも影響を及ぼしているため、量子の利用が行われ、「表 2-3-1-量子論の大まかな体系」に示すような様々な研究領域・工学的応用領域がある。

量子の階層は、人間の階層から大きく離れている。そのため、量子の性質は人間の常識を超えており、その奇異な性質は理解しがたい。量子論が示している「非常識」に、初めて触れる時、教科書には嘘が書かれていると考えてもおかしくない。量子論を含む現代物理学は、それ以前の古典物理学を完全に否定しているのではなく、古典物理学は現代物理学の一部分であって、部分的には正しいが、本質的には正しくはないということを示しているが、これを受け入れることは容易ではない。直感的に、中学校で習った理科や高校で習った物理が正しい科学であり、量子論や相対論のような現代物理学は魔法の世界に見える。

17世紀までのスコラ哲学や錬金術は、見えない何かを考える時、思索を巡らすという方法が中心であった。これに対して、ボイルは気体や真空の研究から、実験結果に基づいた科学の理論を構築して化学を作った。顕微鏡や望遠鏡を用いて異なる階層を観測し、科学の方法によって自然を理解しようという流れが出来上がった。

基本的には、ありのままの自然を観察することから自然の本質を見出し、そこから新たな法則を導くことによって、理解・進歩してきたのが科学の歴史である。しかし、20世紀の量子論は、見たままの自然は、実際の自然とは大きく異なっており、自然の本質や真実を全く表わしていないということを明らかにした。魔法の世界から科学の世界となり、また魔法の世界に戻ったのではなく、科学は魔法のような新たな段階へと進んだ。それまでの観測方法から得られる情報だけでは、自然を正しく理解することはできず、直感や体感から得られた常識は全くあてにならず、人々が、「ありのままの世界」だと勘違いしていた自然は、本物の自然のごく一部にしか過ぎないことを示した。

科学の天才達は、理解が難しい事柄を説明する時に、一般人が、少しでも理解し

易いようにと、様々な言葉で話しかけてくる。佐藤勝彦博士（1945年～、東京大学名誉教授）は、次の言葉を引用している。

「あり得べからずことを除去していけば、後に残ったことがいかに信じがたいものであっても、それが事実に相違ない（シャーロック・ホームズ）」。

コナン・ドイルの小説に現れる一節である。

佐藤勝彦先生は、量子論や相対論を専門とし、最先端の科学である「インフレーション宇宙論」の提唱者のひとりであるが、NHKの科学番組における解説、一般の人向けの量子論・相対論の教養書・解説書の執筆、重力量子論の先駆者 S ホーキング博士の解説書の日本語訳など、現代物理学を、一般の人や若い学生が分かりやすい言葉で説明する活動がよく知られている。量子論や相対論の世界は、それまでの多くの常識を覆した摩訶不思議な世界である。どれだけ不思議で理解できないように思われても、間違っていることをどんどん排除していった後に残った疑いのない「事実」は確かに存在するのだという。量子論や相対論では、信じがたいことであっても事実として受け止めるという、ことが重要であるという。

自分で見聞したことをそのまま信じ、見えないものや触れられないものは信じることができないう人にとって、量子論の世界の説明は、とても受け入れられそうにない。しかし、人の話をそのまま鵜呑みにして自分では考えない、思考停止に陥るといことでは嘘に騙されかねない。量子論は、中世の魔法、錬金術ではなく似非科学でもなく、既に120年近い歴史を持つ20世紀の科学である。これを自分なりに理解していかなければ、電子技術や様々な最先端の技術だけでなく、より基本的な化学反応さえも正しく理解することができない。量子論がなければ現代の科学や文明を読み解くことができないということである。

19世紀末の先人たちは、熱力学のサイクルを利用して気体を液化するという手法を作り出したが、その仕組みや液化が起こる理由までは説明できていない。アルゴンやヘリウムのような希ガスの液化を説明するためには、20世紀の科学、量子論が必要である。分子や原子、量子の世界は小さな階層にあり、簡単に観測することはできないが、確かに分子は存在し、われわれはそれを商品にしており、分子の世界は量子の世界である。

産業ガスのビジネスで、ガスの液化や空気分離に直接関わる技術領域（化学工学の分離技術の分野）では、量子力学が直接、数式として現れることはない。しかし、低温のガスや高圧ガスを取り扱うためには、分子、原子の知識、ガスの物性の知見が必要であり、利用式貴学や量子化学が重要となる。ガスの分析や測定、

ガスを利用したアプリケーションや電子機材のビジネスシーンでも量子論の知識が必要である。

ガス屋にとって、量子論は、数学や熱力学と同じくらい重要な基礎科学となっている。

しかし、量子論を理解するための基礎科学は簡単ではない。大学でも理学系（物理、化学）と電子・電気系、量子工学系、材料系などでは詳しく学ぶが、その他の工学系では、詳しく学ぶ機会が少ない。ここでは、ガス屋の物理として、量子論の入門、勉強のための予備知識として、その内容を整理しておきたい。

2. 3. 3. 2 量子の性質、量子はとびとびの値をとる

量子は、量子という粒子やものがあるのではなく、量子の発見とは、量子の性質を持つものがあるということであり、量子という概念の発見である。きっかけは、製鉄である。

製鉄では、良質の鉄を得るために、溶けた鉄の温度を正しく知る必要があり、19世紀末の科学者や技術者の重要な仕事のひとつに、炉の温度を正しく測るということがあった。高温の鉄の温度は、直接温度計を用いて測ることができないため、炉から輻射（放射）される光の観測が行われた。プランクもそのような科学者・技術者の一人であったが、炉から漏れ出る光を詳細に調べている時に、そのエネルギーが連続しておらず、とびとびの値をとることに気づき、ここを出発点に「エネルギー量子」の概念が作り出された。

プランクより少し前、ヨーゼフ・シュテファン（1835～1893年、スロベニア）が、熱輻射によって黒体（black body）から放出される光（電磁波）のエネルギーと温度の関係を実験的に明らかにした（1879年）。その弟子ルートヴィヒ・ボルツマン（1844～1906年、オーストリア）がこの結果を理論化し（1884年）、熱輻射により黒体（外部からの放射を完全に吸収、放射する仮定の物体、完全放射体、black body）から放出されるエネルギー（黒体放射）は、黒体の熱力学温度の4乗に比例するという「シュテファン=ボルツマンの法則」が示された。

$$K = \sigma T^4$$

ここで、 K は放射エネルギー（放射束密度、 $[\text{W}/\text{m}^2]$ ）、 T は熱力学温度 $[\text{K}]$ 、 σ はシュテファン=ボルツマン定数 $[\text{W}/(\text{m}^2\text{K}^4)]$ である。

この法則は、電磁気学、熱力学、統計力学など様々な科学分野にとって重要な基礎的な法則であり、量子力学のきっかけを作った法則である。

低温機器を取り扱うときに必要な断熱技術の中に、真空によって熱伝導を抑えるという方法（真空断熱）があるが、空気を抜くことによって伝導伝熱や対流伝熱が低く抑えられたときに効いてくるのが、輻射伝熱である。輻射のエネルギーが熱力学温度の4乗に比例するという知見は重要である。



図 2-3-2 ヨーゼフ・シュテファン (1835~1893年)、Wikipedia



図 2-3-3 ルートヴィヒ・ボルツマン (1844~1906年)、Wikipedia

シュテファン=ボルツマン定数は、実験から求めることもできるが、後に提出されたプランクの法則から理論的に他の物理定数（普遍定数、ボルツマン定数とプランク定数と光速）から導くことができ、 $\sigma = 2\pi^5 k^4 / (15c^2 h^3) = 5.67054 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{K}^4)$ と求められた。

シュテファン=ボルツマン定数 σ を知れば、観測される輻射エネルギーを用いて、遠くにある物の温度、たとえば太陽の表面温度などを比較的容易に推測することができる。太陽の直径から太陽の表面積を求め、地球までの距離と地球の直径から、地球の単位面積に対して太陽から放射されるエネルギーが計算

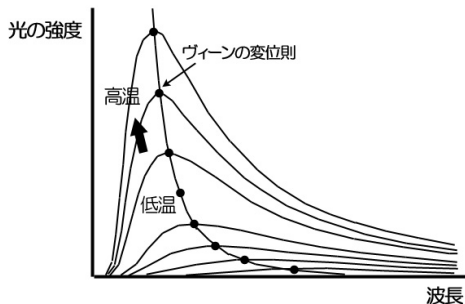


図 2-3-4 ウィーンの変位則

できるので、地球上に降り注ぐ太陽光のエネルギー（熱量）を測定して、シュテファン=ボルツマンの法則を用いると、太陽の表面温度が約 5800K と計算できる。太陽の近くまで行っても直接温度を測定する温度計はないが、太陽まで行かなくても地球上で輻射のエネルギーを測ることによって、太陽の温度を求めることができる（ただし測定には、地球大気の影響などが含まれる）。

続いて、ヴィルヘルム・ヴィーン (1864~1928年、ドイツ) によって、横軸を光の周波数、縦軸を強度としたスペクトルのグラフのピークが、温度の上昇とともに周波数の高い方（波長の短い方）にずれるという「ウィーンの変位則」が見出された (1893年)。

温度が変わるとその物体の色が変わって見えるのは、ウィーンの変位則によって

光のスペクトルのピークがずれるためであり、この性質を利用して放射温度計が発明されている。

ウィーンは、ウィーンの放射法則（放射強度と周波数の関係、黒体から放射される電磁波のスペクトルを表わす式）を得た（ $K = av^3 e^{-bv/T}$ 、 ν は周波数、 a 、 b は定数）（1896年）。これは、ウィーンの変位則に従いながら、その積分がシュテファン=ボルツマンの法則を満たすと分布として求められた。

補足 2-15：放射温度計

物体から放射される赤外線あるいは可視光線の強度を測定して、物体の温度を測定する非接触型の温度計が開発されている。

①パイロメーター (pyrometer)

可視光線を発している高温の物体を測定する温度計。ウィーンの変位則から温度を測定するにはかなりの高温（1000K）が必要であり、製錬、窯業、ガラス炉などで利用される。光高温度計などとも呼ぶ。

②赤外放射温度計 (infrared thermometer)

赤外光を発している物体の温度を測定する温度計。一般的な測定精度は $\pm 2^\circ\text{C}$ 程度。測定対象物表面の状態によって測定値が左右されるため補正が必要である。放射率は完全な黒体で1、セラミックで0.9、鉄で0.5~0.9、アルミニウムで0.02~0.1と物質とその状態によって大きく異なる。物体が熱放射で放出する光のエネルギー（放射輝度）を同じ温度の黒体が放出する光（黒体放射）のエネルギーで割った値を放射率 ε という。キルヒホッフの法則（1860年）によると、放射率と吸収率 α は等しく、 $\varepsilon = \alpha$ 。光の透過率を無視すると反射率 ρ との間に $\rho + \alpha = 1$ の関係があり、 $\varepsilon = 1 - \rho$ 。放射率は表面の反射率で変わる。

この功績で、ウィーンはノーベル物理学賞を受賞した（1911年）が、この式から得られる結果は、光の波長が短い時（周波数が高い時）には、実験結果によく一致したが、波長が長い（周波数が低い）時の実験結果には合わなかった。

当時は、周波数が低い部分の測定実験はまだ難しかったということもあったが、研究者の多くは、ウィーンの放射法則は部分的に合わないことを惜しいと考えるのではなく、ウィーンの研究そのものが、物理学的にあいまいな点が多く、本質的な部分が抜け落ちていると指摘、周波数が高いところで一致しているのではなく、そのように式の係数を合わせ込んだだけのものと考えられた。ウィーンは、空洞の放射が分子の運動に起因しており、光のスペクトル分布は分子の速度分布であると考えたが、これは論理の飛躍であり、現在の物理学では完全に誤っている。

ウィーンの放射法則に不満を持った学者のひとりレイリー卿（ジョン・ウィリアム・ストラット、1842～1919年、イングランド）は、ウィーンの理論の弱点を批判し、これに代わる理論として、電磁波の理論と統計力学からレイリーの放射法則を提案した（1900年）。

この時、提出されたレイリーの論文には、数値の誤りがあり、これをジェームズ・ジーンズ（1877～1946年、イングランド）が修正したため、レイリーの法則は、「レイリー・ジーンズの放則」と呼ばれている（ $K=(8\pi kT/c^3)v^2$ ）（1905年）。

レイリーは、非常に多くの物理学の業績が知られ、産業ガスの分野ではアルゴンの発見、工学の分野では次元解析の提唱など、われわれが日常的に使っている多くの知見がレイリーによるものである。黒体から放射される電磁波のエネルギー密度の理論式であるレイリー・ジーンズの放射法則も、物理学的に洗練されていた。

しかし、レイリー・ジーンズの放射法則は、周波数が低いときの実験結果をよく表わすことができたが、周波数が高い時の実験結果は全く合わなかった。これは、レイリー・ジーンズの法則が、光が波であり、波のモードに対してエネルギーが等配分されるという古典物理学の仮定に基づいているためであり、輻射の全エネルギーを積分して求めると無限大になるという問題が残されていた。

シュテファン=ボルツマンの法則は、熱力学温度と光のエネルギーの関係を示し、ウィーンの変位法則は温度と光のスペクトルピークのずれを明らかにし、ここまでは、古典物理学で光（電磁波）の振舞いを説明できていた。しかし、ウィーン放射法則もレイリー・ジーンズの法則もスペクトル解析の結果（放射強度と周波数の関係）を説明することができなかった。

プランクは、光のエネルギーが、ある最小単位の整数倍の値しか取ることが出来ないと仮定して「放射に関するプランクの法則（Planck's law）」を見出した（1900年）。これによって、ウィーン放射法則（1896年）やレイリー・ジーンズの法則（1905年）が実験結果を正しく表わさないという問題が解決された。

その後の量子論が明らかにしたことによれば、「ウィーン放射法則」と「レイリー・ジーンズの法則」の黒体輻射に対する物理学のアプローチは、部分的に合っていて部分的に間違っていたというのではなく、いずれも、根本的な部分で古典的な物理学が破綻し、限界に達していたということを示した。

それぞれの放射法則から求められる周波数と輝度の関係は、図 2-3-4 のようになり（温度は任意）、プランクの法則だけが実測値を正しく説明することができた（実測値は図示していないがプランクの法則と一致）。

結果的には、ウィーンが1896年に発表し1911年にノーベル物理学賞を受賞した

「熱放射の諸法則に関する発見」は根本部分が間違った古典物理学であり、プランクが1900年に提唱し、1918年にノーベル物理学賞を受賞した「放射に関するプランクの法則」が正しい現代物理学であった。

しかし、ヴィーンが放射法則を見出した時は、低周波数領域の実験は難しく、しばらくの間はこの理論が有力と思われ、最先端の発見と判断されて受賞したノーベル賞が取り消されることはなかった。

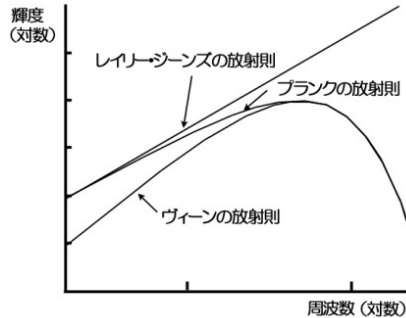


図 2-3-5 ヴィーン、レイリー・ジーンズ、プランクの放射則 (Wikipedia より)

黒体から放射される電磁波の分光放射輝度 B (放射面の単位面積、立体角、周波数あたり) は、周波数 (振動数) ν と熱力学温度 T の関数として次のプランクの式で表わされる。

$$B_{\nu}(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

ここで、 h はプランク定数、 k はボルツマン定数、 c は光速である。

プランクの放射則からは、高周波数領域におけるヴィーンの放射則と低周波数領域におけるレイリー・ジーンズの放射則を近似的に導くことができ、周波数領域を積分することによってシュテファン=ボルツマンの法則が得られ、シュテファン=ボルツマン係数を理論的に求めることができ、極大値からはヴィーンの変位則が得られる。

プランクの法則には、ヴィーンの放射法則やレイリー・ジーンズの法則と同様に光の速度、熱力学温度、ボルツマン定数、周波数が含まれ、アプローチは似ているようにも見えるが、新たに「プランク定数」という量子論を特徴付ける物理定数が加えられた点が最も大きな違いである。

プランクがこの法則で示した重要な点は、光が持つエネルギーは、振動数に比例するエネルギー素量 ($\epsilon = h\nu$) の整数倍の値のみを取り得るという「エネルギーの量子化 (quantization)」の概念である。その後、光は光子 (光の粒子) という量子であることがわかり、波であった光は、光子という粒子として数えることができるようになり、光のエネルギーは、エネルギー素量に光子の「数」 n をかけて、 $E = nh\nu$ と表わされた。

最小単位、「量子」の概念の「発明」は、その後の物理学を大きく変えたが、プランクの論文が提出されたのは、19世紀の最後の月、1900年12月のことである。プランクの法則によって、それまでの黒体輻射に関する法則の問題が解決されたが、時期的には、プランクの法則（1900年）が発表された後からレイリー・ジーンズの法則（1905年）が発表されており、プランクの法則が、はじめからすぐに認められたというものではなかった。

プランクが論文を発表した時、プランクは42歳、既に数々の業績を上げて学界の超大物であったレイリーは58歳である。レイリーは、プランクの結果を認めず、その後も量子論、相対論を嫌悪し批判を続けたという。物理学における多大な業績が知られ、アルゴンの発見で既にノーベル物理学賞（1904年）を受けていたレイリーであるが、「古典物理学」からは抜け出すことはできなかった。（レイリーの業績については「3.1 アルゴンの発見」）

同じ時代、ジュール・トムソン効果などで知られるケルビン卿（ウィリアム・トムソン）も、自身の輻射の理論から、地球の年齢は1億年以下と主張、アーネスト・ラザフォードから放射性物質や放射性年代測定から7億年前のものという石を見せられても、これを信じようとしなかった。ケルピンは、原子（原子核）が崩壊することやその熱によって地球が何億年も冷えて固まらずにいるということを、どうしても受け入れることができなかった。ケルビンやレイリーは、数々の業績を挙げた偉大な物理学者であり、熱力学からガスの科学まで、ガス屋にとっても極めて重要な人物である。しかし彼らほどの天才であっても、20世紀の新しい科学は受け入れ難く、信じることはできないほどのものであった。

プランクは、量子論によって20世紀の科学を切り拓いたが、その功績が認められてノーベル物理学賞を受賞したのは、18年も後、プランクが60歳になった時である（1918年）。1901年に始まったノーベル物理学賞も、まだ新しい科学には追いついてこなかった。

それまで、物理量は、連続した値をとるものと信じられており、いくらでも分割できると思われていた。しかし、プランクが示したように、エネルギーは連続していなかった。量子の世界は、非常に小さな「極微の世界（ミクروسコピックな世界）」であり、「何らかの性質を失わない最小の単位」、「とびとびの値」というものが存在した。

数学の数は、どこまでも分割でき、連続という概念があるが、量子論は、自然はそのようにはできておらず、連続ではない物理量の最小単位があることを示して

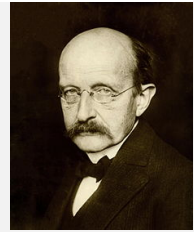


図 2-3-6 「量子論の父」
マックス・プランク
(1858~1947年)
Wikipedia

いる。ただし、プランク定数は、SI単位で表すと、 $6.626070040(81) \times 10^{-34} \text{ Js}$ という非常に小さな値であるため、これに周波数 ν （単位はヘルツ、 s^{-1} ）をかけたエネルギー素量（エネルギー量子）も非常に小さな値である。古い考え方のままでは、連続とみなせるほど小さい。

しかし、連続であるということ、値は小さくとも、それがとびとびであるということの意味の違いは大きく、容易には理解されなかった。20世紀からは、エネルギーだけでなく多くの物理量が最小単位の整数倍で表わされ「量子化される」ようになっていくが、このとびとびの値という概念は、エネルギー量子を見出したプランク自身でさえも、しばらくは、受け入れることができなかったといわれる。

補足 2-16：古典物理学の終わりの時代

ケルビン卿（ウィリアム・トムソン、1824～1907年）は、ジュール＝トムソン効果や熱力学温度や色温度に用いられる単位ケルビンに名前が残る、偉大な物理学者・数学者である。ガス屋にとって、ケルビンもトムソンもその名前を知らないでは済ませられないほどのビッグネームである。しかし、プランクの量子やラザフォードの原子核崩壊を認めなかっただけでなく、現代物理学や技術には激しく抵抗を示し、その他にもいくつかの逸話が残っている。

「電波には未来はない」、「X線は人々をだますものと立証されるだろう」など、さらに「空気よりも重い空飛ぶ機械を作ることは不可能である」（1896年）とも発言している。多くの学者も同じことを考えていたようであるが、物理学の大御所、前年までは、王立協会の会長であったトムソンほどの人物ともなると、その影響力は非常に大きかったと思われる。しかし、7年後の1903年にライト兄弟が有人動力飛行に成功、電波もX線も偽物ではなく、20世紀にはいずれも重要な技術として発展した。

プランクから始まる量子論が、さらに発展するためには、新たな概念、新たな理論、新たな数学的手法、実証実験が必要となった。しかし、その後、わずか四半世紀の間に、量子論には数多くの天才が現れ、プランクが提唱した量子の概念は、輻射の問題だけでなく、その後に現われた物理学の諸問題に対して、非常に有効な解決策を示していった。

分子、原子の世界には「量子化学」、原子や原子核の世界には「量子電磁気学」、素粒子の世界には、「量子色力学」といった新たな物理学の体系が構築された。しかし、19世紀までの古典物理学は完全に否定されたのではなく、その理論や観測

事実は、新たな解釈によって再構築され、それまで見えていたものは量子論によって「巨視的な観測」と理解されるようになった。古典物理学は現代物理学に組み込まれ、部分法則や近似解とし継承されていった。

表 2-3-2 放射の研究・古典物理学から現代物理学へ

提唱年	提唱者	法則・説	主張	結果など
1884年	ルートヴィヒ・ボルツマン	シュテファン=ボルツマンの法則	黒体放射は熱力学温度の4乗に比例する	放射に関する研究のきっかけとなる
1893年	ヴィルヘルム・ヴィーン	ヴィーンの変位則	温度の上昇とともにスペクトルピークが周波数の高い方にずれる	光高温計の仕組み
1896年	ヴィルヘルム・ヴィーン	ヴィーン放射法則	光のスペクトル分布は分子の速度分布である	1911年ノーベル物理学賞、結果的に誤り
1900年	マックス・プランク	プランクの放射法則 エネルギー量子仮説	光が放射するエネルギーは、とびとびの値しかとらない	1918年ノーベル物理学賞 量子論のはじまり
	ジョン・ウィリアム・ストラット	レイリーの放射法則	電磁波の理論と統計力学から	古典物理学の限界
1905年	アルベルト・アインシュタイン	光量子仮説	光は波である「光波」 光は粒子である「光子」 光は量子である「光量子」	1921年ノーベル物理学賞。17世紀からの光の波動説・粒子説論争に決着
	ジェームズ・シーンス	レイリー・シーンスの放則	レイリーの放射放則を修正	古典物理学の限界

量子論によって、実際の世界は、連続するものがないと示されたが、ミクロスコピックよりもずっと大きな階層、マクロスコピックの階層には、連続の量（アナログ）と離散的な量（デジタル、とびとびの値、「計数」という計量の考え方が存在する。

量子論によって現実の世界（エネルギーと物質の世界）には、連続というもの存在しないということが分かったが、一般の生活や工学の分野では、様々な現象を実質的に連続とみなすということが続けられており、現実の現象を、数学のようにアナログ（analog）とデジタル（digital）に区分して取り扱うことが行われている。人が絵画や音楽のような芸術を楽しむ時には、画像や音を画素や音の最小単位にまで分解して鑑賞することはない。しかし、写真やディスプレイの滑らかで連続的にみえる画像も、大きく拡大すると印刷の粒子や発光素子の大きさ、最

小単位が見えてくる。音もそれを構成する波に分解し、それぞれの波をさらに細かく見ていくと、最小単位のようなものが見えてくる。映像も音もけっして連続していることはなく、全てとびとびの存在が集合したものである。デジタルカメラの撮像素子も銀塩カメラの感光剤も液晶ディスプレイの画素もとびとびに存在し、これが、連続して見えるのは、受け手の分解能が最小単位よりも大きく、最小単位を認識できないためであって、厳密にはアナログというものは存在しない。そのためかどうかは知らないが、デジタルカメラのデジタルとは、画像情報のデジタルデータ化に由来し、対義語にアナログカメラという言葉はない。

映像や音の世界の情報は、マクロスコピックな階層の波の情報であるから、これらの世界の「デジタル化」を、ミクロスコピックの階層の特徴である「量子の概念」と同列に扱うことはできない（厳密には音はマクロの波、光はミクロの波）。しかし、これら通常は連続的に見えるものであっても、観測の方法を変え、処理方法を変えると、とびとびの量が見えるようになり、現象の理解が深まり、高度な処理が可能になるなど、様々なメリットがある。

通常は連続に見えるアナログ量を離散化し、「デジタル化 (digitize デジタイズ)」するという手法が、物理学の量子化の概念に通じるところがあるため、このような処理を「量子化 (quantization)」、「とびとびの計数化」と呼ぶ。物理学のミクロスコピックの階層以外の処理にも「量子化」という言葉が使われるようになっている。情報のデジタル処理は「情報の量子化」とも呼ばれ、日本語では「電子化」と呼ぶこともある。

画像や音響だけでなく、様々なアナログ情報のデジタル変換、取扱いが一般的に行われるようになっている（表 2-3-1）。測定技術、圧縮技術、高密度保存技術やコンピュータによる処理技術などのデータ取り扱い技術の急速な向上に伴って、「デジタル化」「量子化」が進んでいる。たとえば、放送や通信の「デジタル化」によって従来のアナログ処理よりも性能・品質が格段に向上している。そのため、デジタル＝ハイテク、アナログ＝ローテクと思われがちである。しかし、デジタルはアナログと信号の処理方法や取り扱い技術が異なることによって、そのメリットが活かしやすいということはあるが、本質的な物理量は変わっておらず、全ての分野でデジタル技術の方が従来のアナログ技術よりも進化していると決め付けることもできない。（たとえば、そろばんは、典型的なデジタル計算機であるが、特にハイテクという訳ではない。）

「とびとび」の値が顕著に現れるのが量子の特徴である。

前期量子論の第一段階で、プランクは、光のエネルギー量子説を唱えたが、アインシュタインは、プランクが行った「エネルギーの量子化」は、電磁放射そのもの

の性質であると提案、電磁波である光は波であると同時に粒子と呼ぶことができることを示唆、光は量子であるという「光量子仮説」を唱えた（1905年）。

多くの物理学者は、電磁放射自体が粒子であるということをはにわかには信じる事ができず、プランクが行ったエネルギー量子化以外の量子化は、しばらくは、物質だけにとどまっていた。しかし、その後の20年間に行われた様々な実験によって光も粒子であることが確かめられ、「光量子」「光子」と呼ばれるようになった。

現在、光を主に波として取り扱う時は「光波」、粒子として取り扱う時は「光子」、両方の性質を考える時は「光量子」と呼ぶのが一般的である。光には、波であるという事実と、粒子であるというもうひとつの事実があり、光は光量子であるというひとつの真実が明らかにされていった。

2. 3. 3. 3 量子の性質、量子は波動性と粒子性を持つ

エネルギーがとびとびの値を持ち、波と思われていた「光」は、とびとびの値と粒子性を持つことが分かった。

ニールス・ボーア（1885～1962年、デンマーク）は、原子の中にある電子もとびとびの値を持つと考えて電子の性質を説明、粒子だと思われていた「電子」には「物質波」という波の性質があることが明らかにされた。エネルギーと光が量子化され、電子も量子になった。

ボーアは、英国のキャヴェンディッシュ研究所のJJトムソンの下でラザフォードの原子模型を研究し、ボーアの原子模型を完成させた（1913年）。ボーアは、原子の中に原子核と電子があるという原子の構造を明らかにし、原子核という言葉をはじめ使った。（前期量子論の第2段階）。

ボーアは、量子力学、原子物理学に数々の貢献をし、ノーベル物理学賞を受賞（1922年）、コペンハーゲンに理論物理学研究所（ニールス・ボーア研究所）を開き、外国から著名な物理学者、ヴェルナー・ハイゼンベルク、エルヴィン・シュレーディンガーらを招いて研究を行い、コペンハーゲン学派を形成した。

ルイ・ド・ブロイ（1892～1987年、フランス）は、電子以外にも存在する「物質波の仮説」を主張、自らの博士論文の中で発表した（1924年）。量子力学における重要な式、「アインシュタイン＝ド・ブロイの関係」が得られた。

アインシュタインの関係： $E = h\nu$ （エネルギー＝プランク定数×振動数）

ド・ブロイの関係： $p = h/\lambda$ （運動量＝プランク定数／波長）



図 2-3-7-ニールス・ボーア（1885～1962年）
(Wikipedia)

ド・ブローイ兄弟は、兄のモーリス・ド・ブローイは実験物理学者（X線回折、分光学）、弟のルイ・ド・ブローイは理論物理学者である。ルイが提出した物質波に関する博士論文は、学位審査員には理解されなかったが、部外者として意見を求められたアインシュタインは、これを高く評価し、ルイ・ド・ブローイは博士号を取得することができた。当初は孤立したド・ブローイの理論もやがて電子回折の実験などによって実証が進み、ド・ブローイにノーベル物理学賞が授与された（1929年）。

アインシュタインの関係は、光が光量子として持つエネルギーを波の振動数で示し、ド・ブローイの関係は、物質の持つ運動量が波の波長で表わされることを示している。これは、光だけでなく全ての物質が波動性を持つという仮説から導かれている。光の場合、アインシュタインの式から光量子の運動量は、 $p = E/c, \lambda = c/f$ と示されたが、ド・ブローイの式では、電子に限らず光子を含む広く量子を一般化したものとなっており、粒子を特徴づけるもの（運動量 p とエネルギー E ）と波動性の特徴づけるもの（周波数 f と波長 λ ）を結び付け、粒子性と波動性という量子の持つふたつの性質を簡潔に定式化した。

佐藤勝彦先生の説明によると、「物質波である電子は、誰も見ていないときは波であり、観測されるときは必ず粒子になるため、誰も波である電子を観測することがない」。これも、量子力学によって明らかにされていた量子の本質である。

プランクが、エネルギーの量子化を行った時に導入した「プランク定数」 h (Plancksches Wirkungsquantum、プランクの作用量子)は、「アインシュタイン＝ド・ブローイの関係」のいずれの式にも現れる極めて重要な物理学の基礎定数となった。プランク定数は、SI単位では、作用の次元を持ち、 $6.626070040(81) \times 10^{-34}$ Js の値が示されている。プランク定数は、エネルギーの量子化に関するものであるため、桁外れに小さな値となっている。なお、記号 h は、プランクが「放射に関するプランクの法則」の論文で示した Hilfsgröße (auxiliary quantity、補助的な量)の頭文字に由来する。プランク定数を 2π で割った量もよく使われ「換算プランク定数」あるいは「ディラック定数」の名前がある。記号はストローク符号を用いて「 \hbar 」と書かれ次式で定義され、 $\hbar \equiv h/2\pi = 1.05 \times 10^{-35}$ Js、アインシュタイン＝ド・ブローイの関係は次のように書き換えられる。



図 2-3-8 ルイ・ド・ブローイ (1892~1987年)
(Wikipedia)

アインシュタインの関係： $E = h\nu = \hbar 2\pi\nu = \hbar\omega$
 (エネルギー＝換算プランク定数×角周波数)

ド・ブロイの関係： $p = h/\lambda = \hbar(2\pi/\lambda) = \hbar k$
 (運動量＝換算プランク定数×角波数)

補足 2-17：作用 (action)

物理学における「作用」は、動力学的な性質を示し、(エネルギー×時間)の次元を持つ。プランク定数は作用の次元を持つ最も基本的な物理定数のひとつ。作用は非常に重要な概念であり、物体の運動は、物理学における最上位の原理である「最小作用の原理」に基づいて、作用積分の量を最小にするような軌道に沿っている。なお、物理学ではこの他に、「作用・反作用」「相互作用」「近接作用」など、物体や物質に及ぼされる「力」の意味にも作用という用語が用いられる。

2. 3. 3. 4 シュレーディンガー方程式 (Schrödinger equation)

粒子であった電子が波であることが分かった。古典物理学には、波を取り扱う理論があったが、量子としての波を記述するための新たな力学が必要となった。ド・ブロイの物質波を発展させて、エルヴィン・シュレーディンガー(1887～1961年、オーストリア)が、量子力学の基本方程式(シュレーディンガー方程式)を提出した(1926年)。

シュレーディンガー方程式には、時間依存の有無などの条件によっていくつかの種類に分類されるが、基本の式のひとつは、次のような形で示される。

$$i \frac{\hbar}{2\pi} \frac{\partial \psi}{\partial t} = H\psi$$

ここで、 ψ は、系の量子状態を表す状態ベクトルであり、系の力学エネルギーを表わす演算子ハミルトニアン H を用いて、様々な形式のシュレーディンガー方程式が導かれる。

シュレーディンガー方程式の解は「波動関数」または「状態関数」と呼ばれる。

粒子でありながら波でもある電子は、シュレーディンガー方程式で記述され、水素原子の持つ離散的なエネルギー準位がうまく説明された。シュレーディンガー方程式は、物質を波動関数で表わし、物理量を演算子(数学における作用素)で表わすという、量子力学の一般的な手法となり、量子系の状態を表す基礎方程式となった。

本来、波動力学(wave mechanics)とは、通常、波を取り扱う力学であったが、その後は、シュレーディンガー方程式を用いた量子力学のことを指すようになった。古典力学ではエネルギーを表す「関数」であったハミルトニアンは、量子力学では、位置と運動量の関数である「演算子」あるいは「行列式」として表現される。したがって、前述のシュレーディンガー方程式は、非常に簡単な形式で記述されているが、実際の解法は少し複雑であり、シュレーディンガー方程式の具体的な解法だけで何冊かの書籍になるほど内容が豊富である。

20世紀の化学は、原子・分子の軌道電子を取り扱うシュレーディンガー方程式が必須となった。シュレーディンガー方程式からは、いくつもの重要な帰結(結果や発見)が導かれており、ボーアの原子模型の時は、仮定であった電子の角運動量が量子化され、粒子が持つ波動性が導かれている。また、量子の確率性の問題を提起し、量子のトンネ



図 2-3-9-エルヴィン・シュレーディンガー(1887～1961年)(Wikipedia)

ル効果を説明している。ただし、シュレーディンガー方程式は、「非相対論的」（アインシュタインの特殊相対性理論の考えを含まない理論）であるため、高速で運動する粒子や「場」を記述することができず、相対論を含まない「古典的量子論」とされる。

補足 2-18：ハミルトニアン

ここで、ハミルトニアンは、高校までの物理には現われてこないのに、エネルギーをハミルトニアンで表現する解析力学について少しだけ説明を加えることにする。

解析力学（analytical mechanics）とは、ニュートン力学を数学の解析学の手法を用いて新たに記述するもので、ラグランジュ力学とハミルトン力学によってニュートン力学が再構築された。ニュートンの記述は、直感的ではあるが、数学的・解析的ではなく、エネルギーの記述が難しい。そもそもエネルギーの概念は19世紀に作られたものであって、ニュートンの時代、17世紀にはまだエネルギーがないが、力学の記述に、エネルギーの概念を外すことはできない。解析力学は、ニュートン力学を数学の問題に置き換えて再定式化したため、数学的に洗練され、力学やエネルギーの問題を数学の問題として記述することが可能になった。ただし、現実の現象を数学の問題にしたため、直感的ではなくなった。

もともとエネルギーの概念は、物理量として表現しにくいものであるが、解析力学はこれを数学的に取り扱うことを可能にした。「ラグランジアン」はラグランジュ力学においてエネルギーを表現する「関数」であり、シュレーディンガー方程式の中でエネルギーを表現するために用いられる「ハミルトニアン」は、このラグランジアンをルジャンドル変換したものである。

ニュートン力学と解析力学

古典力学	創始者	特長	欠点	エネルギーの表現
ニュートン力学	17世紀：アイザック・ニュートン	直感的	座標変換などが使いにくい	エネルギーの概念がない
ラグランジュ力学	19世紀：ジョゼフ＝ルイ・ラグランジュ	解析的 数学的	直感的でない	ラグランジアン $L(q, \dot{q}, t) = T - V$
ハミルトン力学	19世紀：ウィリアム・ローワン・ハミルトン			ハミルトニアン $H(q, p, t) = T + V$

エネルギーは19世紀初頭、トマス・ヤング（1773～1829年、スコットランド）が著書「自然哲学講義」の中で、活力に変わる概念として「エネルギー」という言葉を用いたのがはじめて（1807年）であるが、すぐに、ラグランジュやハミルトンが力学系にエネルギーの概念を導入してニュートン力学を再構築した。「活力」は力と運動の関係を示そうとしていたが、新たな概念である「エネルギー」は力と仕事の関係を表わした。その後、ガスパール＝ギユスターヴ・コリオリ（1792～1843年、フランス）によってそれまでの活力が、 $1/2 mv^2$ と定式化された（1829年）。これがウィリアム・トムソン（ケルビン卿）（1824～1907年）によって「運動エネルギー」（kinetic energy）と名付けられたのは、ニュートンのプリンキピアから160年も後のことである（1850年）。

トムソンとの共同研究によってジュール・トムソン効果を発見したジェームズ・プレスコット・ジュール（1818～1889年）は、熱が物質（元素）ではなく、エネルギーの一形態であることを実証し、19世紀に生まれたエネルギーの概念は、解析力学に組み入れられてニュートン力学を再評価させたが、さらに熱力学の発展にもつながっていった。

ニュートン力学のために考え出された解析力学はこの形式（ラグランジュ形式とハミルトン形式）が古典力学だけでなく、量子力学や相対論のような現代物理学についても適用可能である。ハミルトニアンは、解析力学ではエネルギーを表現する関数であるが、シュレーディンガー方程式では、エネルギーを表現する演算子となっている。

補足 2-19：ルジャンドル変換

ルジャンドル変換は、元々は解析力学のために作られたものであり、「関数の変数を入れ替える」変換である。エネルギーを表わす「ラグランジアン」の変数を入れ替えて、全エネルギーの関数「ハミルトニアン」で記述するのに用いられている。より身近なところでは、われわれがよく知る熱力学関数の変換にも用いられている。

熱力学では、内部エネルギーを「完全な熱力学関数（熱力学ポテンシャル）」として取り扱う時、「内部エネルギー」をルジャンドル変換して独立変数を入れ替えるという手法によって「エンタルピー」という関数を導き、エネルギーという非常に取り扱いが難しい概念をエンタルピーという熱力学関数に変換、利用している。

図は、ルジャンドル変換でつながる熱力学関数を表わす二モニックダイアグラム（暗記図）、サーモダイナミック・スクエア（Thermodynamic square）である。

U ：内部エネルギー、 H ：エンタルピー

F ：ヘルムホルツエネルギー、 G ：ギブスエネルギー

ここで、変数は S ：エントロピー、 V ：容積、 P ：圧力、

T ：熱力学温度である。

この図を使って、たとえば次のような平衡状態の関係式を得る。

	$-S$	U	V
H			F
	$-p$	G	T

$$dU = -pdV + Tds$$

内部エネルギー $U(S, V, N)$ 、エンタルピー $H(S, p, N)$ 、ヘルムホルツエネルギー $F(T, V, N)$ 、ギブスエネルギー $G(T, p, N)$ 、の間の変数変換（ルジャンドル変換）は、次のように行われる。（ N ：物質の量） $U = H - pV$ 、 $F = U - TS = G - pV$
 $G = U + pV - TS$

「完全な熱力学関数」は熱力学的性質の情報を全て持つ関数であり、4つの熱力学関数はその変数の組み合わせによって完全な熱力学関（熱力学ポテンシャル）となる。エントロピー、熱力学温度、物質質量、その他の示量性状態量、示強性状態量などが変数の組み合わせとなり、これらの関係を用いて熱容量、圧縮率などを求めることができる。

エンタルピー H は別名、熱関数、あるいはオネスの自由エネルギーともよばれ、内部エネルギー U 、ギブスの自由エネルギー G 、ヘルムホルツの自由エネルギー F と合わせた四つの熱力学の自由エネルギーが、ルジャンドル変換によって相互に変換される。形式的には、内部エネルギーに TS と pV を足したり引いたりした形でエネルギーを（解析的に）表現している。

2. 3. 3. 5 ハイゼンベルクの不確定性原理 (Heisenbergsche Unschärferelation, 英: uncertainty principle)

ヴェルナー・ハイゼンベルク (1901~1976 年、ドイツ) によって、不確定性原理が発見された (1927 年)。「Unschärfe」は、「ぶれ」「ピンボケ」、あるいは英語の「ファジー、fuzziness」を意味しており、Relation は関係であるから、原文は「ハイゼンベルクのあいまいな関係」となる。英語や日本語では「不確定性」(uncertainty) の「原理」(principle) と訳されている。

不確定性原理が極めて重要である理由は、これが科学における基礎「原理」であり、「全ての現象は確率的に示され、決定論的に示されるものではない」ことを示したことにある。

不確定性原理で説明される現象は、自然の本質であり、全ての階層に存在するが、マクロスコピックな階層では、その効果が非常に小さい (確率が小さい) ため、観測・目撃されることがない。しかし、ミクロスコピックな階層では、量子の持つ不確定性の性質が顕著に現れやすく、量子には、「量子力学的ゆらぎ」がある。

ハイゼンベルクが発見した不確定性原理は、そのような自然の本質を表現しており、証明が可能な法則や定理とは全く異なる新たな「原理」であり、新たな科学の出発点となった。

(1) 科学の原理

原理と言うのは滅多なことでは変わることがなく、新たな原理の発見も極めて稀なことである。自然科学における原理とは極めて重要な概念であるにも関わらず、この原理という言葉が安易に用いられることがある。非常に重要な発見である不確定性原理を考える前に「原理」という用語について考察しておきたい。

①原理の定義

数学では、自明なものが公理 (axiom) であり、公理に基づいて演繹されるものが定理 (theorem) である。数学の定理や公式 (formula、数式で表わされる定理) は、ほとんどの場合、証明ができていないが、証明ができない (必要としない) 公理あるいは原理と呼ばれるものは、非常に少ない。

数学の公理に相当するものが、科学では原理 (principle) と呼ばれ、社会科学の場合は、基本法則や根本法則を指し「民主主義の原理」「多数決の原理」などと使う。自然科学における原理は、自然の本質やその解釈、あるいは概念を指すが、



図 2-3-10-ヴェルナー・ハイゼンベルク (1901~1976 年) (Wikipedia)

数学の公理のように、自明となっていないことが多く、誰が見ても同じように解釈されるというものでもない。

哲学や自然科学における「原理」という言葉の定義として、「他のものを規定するが、それ自身は他に依存しないもの（根源的なもの、根本的なもの）」を原理と呼ぶ。すなわち、科学の原理は成立のための理由を必要とせず、法則や定理のように証明することはできない。逆にいえば、証明できるものは原理とは呼べないことになり、原理ではなく法則と呼ばれる。

科学における法則（自然法則、law of nature）とは、ある関係が必然性や普遍性を持つことであり、理論や実験によって科学的手法によって証明することが可能であるか、あるいは間違っていないことが経験的に確実にになっているものである。

たとえば、ボイルの法則やドルトンの法則などは、理想気体という仮想の物質を仮定した時に、証明ができる法則である。熱力学の法則は、厳密な証明はできていないが、経験的には正しいこと、間違っていないことが証明できる法則、経験則である。一般的に、法則は証明が可能である。

これに対して、その大前提になっている原理は証明することができない。原理に矛盾がないか、あるいは、どこかで破れていないかといった議論は可能であるが、原理に基づくどのような法則を証明しても、それは元の原理が前提となっているため、原理を証明したことにはならない。たとえば、特殊相対性理論は、相対性原理と光速度一定の原理に基づくが、この理論が矛盾していない、あるいは観測結果と一致しているからといって、この理論の元になっている原理が正しいということは証明されない。原理がこの範囲で破れていないことが確認できるだけである。

そもそも、原理を証明するという文言自体が言語として論理矛盾しており、光速度一定の原理は証明を試みることができないのである。

「最小作用の原理」は、物理学における最大の指導原理といわれる自然の本質である。これは、古典力学であっても量子力学であっても同じであり、非常に複雑にみえる法則であっても、たいいていものは、この原理ににたどりついて説明することができるかとされている。物理学における「最小作用の原理」や幾何光学における「フェルマーの原理」（光は最短時間で進む）などは、数学における変分原理の一部であって、これらの原理そのものは証明されることのない自然の本質である。この他にも、いかなる座標系においても物理法則は不変であるとする「相対性原理」や宇宙では同じ法則が成り立ち、どこにも特別な場所や中心がないという「宇宙原理」なども自然のもつ本質や基本的な概念を示しており、証明をしたり、その理由を説明したりはできない。

原理は、理に適っており、間違っていないことが大前提であるが、哲学や科学の

歴史の中では、それまで当たり前だと思われていた原理が、実際は正しくはなかったということが起きている。

「天動説」、「地動説（太陽中心説）」「絶対時間」、「絶対空間」は、様々な観測結果や理論の間でつじつまが合わなくなった。原理が「破れ（breaking）」ということとは、重大事件であるから、原理に反するような事象が発見された場合には、すぐに原理を見直すのではなく、実験や観測や計算のやり直し、理論の補強やほころびの修復などが試みられる。しかし、天動説や絶対時間、絶対空間は、ついに修復が不可能となり、放棄せざるを得なくなり、新たな原理が取って代わった。

新しい原理が現われると古い原理に基づいていた法則は、新しい原理のもとで新たな解釈が行われ、再構築が行われることになる。原理の変更は、比較的簡単に進む場合もあれば、天動説に代わる地動説の時のように、宗教裁判という大きな事件が起こることもある。移行には長期間要する場合もある。

20世紀以降は、宗教裁判のようなものはないが、不確定性原理は、その重大性から原理の解釈をめぐる大きな論争が起こった。

②最初は原理と呼ばれた法則

一方、一部の法則の中には、発見された時の経緯や慣習によって「原理」と呼ばれたものが少なからずあった。容易に法則だと分かるものが、勘違いによって原理と呼ばれたことや、当初、原理だと思われていたものが、そうではなかったと気付くということもある。科学の歴史の中には少なくない。

たとえば、アイザック・ニュートンが著したプリンキピアは「自然哲学の数学的諸原理」という名称であるが、中に記されていることの多くが、運動や力学に関する法則であって、本来の原理という意味ではない。

ミクロスコピックな状態とマクロスコピックのエントロピーを関係付ける「ボルツマンの関係」は、かつて「ボルツマンの原理」と呼ばれたことがあるが、現在では「ボルツマンの公式」と呼ばれるのが普通である。アインシュタインは、「原理」という言葉を比較的好んで使った時期があり、ボルツマンがエントロピーを定義したこの公式を高く評価し、自らの論文の中で、ボルツマンの原理と呼んだことがある。

「アルキメデスの原理」（古代ギリシア）は浮力に関する法則、「パスカルの原理」（17世紀）は流体静力学における法則、「ルシャトリエの原理」（19世紀）は化学平衡における法則であるが、これらが発見された時は原理と呼ばれていたため、現在でも原理と呼ばれることがある。これらの法則は、科学の進歩によって、証明され説明されるようになったが、発見時の科学水準では理由が分からず根本原理と考えられていたようである。

③原理の拡大利用

ガス屋にとって、实在気体の状態方程式は非常に重要なものであるが、ファンデルワールス定数は物質ごとに与えられるため、新規の物質の場合は、物性の調査に手間がかかることがある。そこで、物理量をそれぞれの気体の物理量の臨界値との比（対臨界温度、対臨界圧力などの換算量、英語では reduced な値）を用いて表わすと圧縮係数が気体によらず一般化できるという「対応状態原理、principle of corresponding state」が利用されることがある。

これは、実測値に基づかない推算方法であるため、それなりの信頼性ということになるが、臨界定数だけを知ればよいので、比較的容易に物性推算が可能になる。工学系の公式には、無次元量によって式を一般化するという手法がよく用いられ、この対臨界比を用いた手法も対応状態の公式と呼ぶことができ、非常に便利である。しかし、なぜか「対応状態原理」という名称で呼ばれている。なぜ原理と呼ぶのかその理由はよく分からない。かなり大げさな感じがする。

数学には公理や原理と呼べるものはほとんどなく、大半が公式や定理で組み立てられ、自然科学の分野でも、歴史的な理由によって法則が原理と呼ばれたことを除くと、実際に原理といえるものはごくわずかしかかない。ところが、数学と自然科学以外の分野、実学の分野では、この「原理」という言葉が、様々なところで使われることがある。

機械の仕組みやメカニズムのことを「作動原理」「動作原理」と呼ぶことがある。たとえば、「てこの仕組み」を「てこの原理」ということもある。法則に反した方法を「理論的に不可能」という意味で「原理的に不可能」と言ったりもする。

測定や分析のために用いる仕組みや、そこで利用されている法則などをまとめて「測定原理」「分析計の原理」などと呼ぶこともある。「測定原理」は、英語でも measurement principle と言うことがあるので、これは、日本語だけのことではなさそうである。これらの例は、原理という言葉本来の定義からすると、かなりの拡大用法であり、まだうまく説明ができないため原理と呼んでいるのというのではなく、容易に説明ができる仕組みを原理と呼んでおり、広義の解釈というよりも、誤用や乱用に近いものまでである。

「空気分離の原理」の説明を求められたことがあるが、空気分離装置のプロセスは、空気系の気液平衡、機械装置の仕掛け、工学的な法則を用いて十分に説明が可能である。質問者の期待は、「機械の作動原理」のような機構、仕掛けの説明をより基本的なところから知りたいということだと思われるが、空気分離には、原理などという大げさなものはどこにもない。

おそらく、工学の分野で、原理と呼ばれているものの大半が、法則、仕組み、仕

掛けなどと読み替える方が言語として正しいようである。つい、「蒸留分離の原理」などと使ってしまいそうであるが、「蒸留分離の仕組み」で十分である。

工学の分野にも、原理と呼んだ方がよいものがあり、化学プロセスを考える時の前提条件には「局所平衡の原理」がある。これは、蒸留塔や熱交換器における気液の界面（局所）においては、熱力学的平衡が成立していると考えられる「概念」であり、この原理に基づいて系の気液平衡、伝熱、物質移動、推進力などが議論される。たとえば、液体窒素の貯槽では、中の窒素が沸騰状態にあっても、全体として平衡になることは現実的にはあり得ないので、測定される圧力から温度を推算することなどは不可能である。このような場合は、平衡状態にあるのは気液が接触している界面だけであり、逆に気液が接触している局所においては必ず平衡関係にあると考える。その局所の温度、圧力、組成を知ることはできないが、局所平衡を考えることによって、その周囲の温度分布、濃度分布、伝熱、物質移動などを考察することが最も理に適っている。

この場合の、局所平衡は前提であって、実験結果や他の法則を用いて証明されるものではない。局所において平衡が成り立っているかどうかを確認する方法はなく、それよりも界面での平衡を仮定し、その周辺で起こっている現象を理解することの方が役に立つ。この原理を認めないことには、話が先に進まず、実際に平衡が成り立っているかどうかといった議論は意味がないのである。

技術の世界には、本物の原理（要するに証明のしようがない自然の本質）と本物ではない原理（要するに証明のできる法則や説明ができる仕組みのようなもの）が混在しているように思えるが、物理学の世界に登場した不確定性原理は、自然科学における根本原理として議論された。

（2）不確定性原理

量子論は、20世紀を変えた大理論であるが、量子力学の研究の中で発見されたハイゼンベルクの「不確定性原理」は、物理学だけでなく科学とその他の世界観を根底から揺さぶるほどの重大な発見となった（1927年）。

ハイゼンベルクの不確定性原理とは、「ある相補の変数として知られる一対の物理量を同時に知ることができる精度には根本的限界がある」というものである。

一対の物理量の組合せというのは、たとえば、「位置と運動量（Space-Momentum Uncertainty Relation、SMUR）」、あるいは、「時間とエネルギー（Time-Energy Uncertainty Relation）（TEUR）」であり、「位置と運動量、SMUR」に関しては、ヘルマン・ワイル（1885年～1955年、ドイツ）やアール・ハッセ・ケナード（1885年～1968年、米国）によって、次のように定式化された。

一対の物理量が「位置」と「運動量」であれば、次のように示される。

$$\Delta x \Delta p \geq \hbar/2 \quad (\text{ハイゼンベルク・ワイルの式、1928年})$$

あるいは

$$\sigma_x \sigma_p \geq \hbar/2 \quad (\text{ケナードの式、1927年})$$

位置のゆらぎ Δx と運動量のゆらぎ Δp の積、あるいは、位置の標準偏差 σ_x と運動量の標準偏差 σ_p の積は、ディラック定数 \hbar の1/2よりも大きいという不等式である。ワイルもケナードも数学者であり、ハイゼンベルクが提唱した不確定性原理から、これらの不等式を導出した。

発見当初、不確定性原理は観測行為によるものであると説明されたが、これは後に誤った解釈であるとされるようになった。

観測行為とは、「物理量の不確定性は、光などを用いた観測によって影響を受けるために生じる」というものであり、量子の運動量を測定しようとして光をあてると、その結果、位置が決まらなくなり、精密に測ろうとして光子の波長を短く（エネルギーを大きく）すれば、さらにそれに応じて位置が分からなくなっていくという説明である。はじめに、このような説明が行われ、不等式の表現からも、不確定の理由が観測行為によるものであるような印象が与えられてしまった。

しかし、その後の研究によって、不確定性 (uncertainty) には理由がなく、量子が持つ不確定性の「原理」(本質)と観測者問題は別のものと解釈されるようになった。もし、観測者問題として不確定性が説明できるのであれば、これは、不確定性原理ではなく、不確定性の法則とされるべきであるが、ハイゼンベルクが発見した不確定性は、物理の法則ではなく、より上位の概念、すなわち、自然の本質を表わす原理であるとしてその解釈の研究が進められた。

ひとつの物理量を正確に測定しようとする、その行為が影響してもう一方の物理量が正しく得られなくなるという考えには、運動量や位置には「真の値」が存在するという前提条件がある。現実の問題として、測定に光を使うと測定値は真の値から少し広がってしまうが、ここには、「真の値はどこかに必ず存在する」という考えがある。測定における「標準偏差」という言葉の中にも、測ることができるかできないかに関わらず真の値は、どこかに必ずあるはずだという前提がみえる。したがって、真の値が存在するということは、不確定という自然の本質とは相容れないものになる。したがって、前述の標準偏差を用いたケナードの式は、厳密には不確定原理を定式化しておらず、補正が必要であるとした研究が行われている。前述の2つの式のうち、「ゆらぎ」で表現されるワイルの式の方が正確に

不確定性原理を定式化していると考えられている。

観測による正確さの限界というのは、当初は分かりやすい説明のように思えた。発見者であるハイゼンベルクや原子核のアルファ崩壊（トンネル効果）を不確定性原理で説明したジョージ・ガモフでさえ、不確定性と観測者効果を混同していた。ハイゼンベルクやガモフのような大学者ですら、不確定性を説明できると考え、重大な原理と気付かなかったほどである。一般の不確定性原理に関する解釈は大きく混乱した。

原理は証明ができない（証明できるものは原理とは呼ばない）ため、その議論には「解釈（interpretations）」という言葉が用いられる。現在、不確定性原理における観測者効果という解釈は根本的に間違った解釈とされている。

最も広く認められている「不確定性原理の解釈」は、量子力学的不確定性とは、量子状態（波である量子系）が本質的に持っている量子の性質であって、観測とは無関係の基本原則であり、「測定限界の法則」あるいは「不可知の法則」のようなものではない、というものである。

証明ができるはずの「法則」と、自然の本質であって証明を必要としない「原理」の違いは非常に大きい。要するに、証明を試みた時点で、原理は原則ではなく法則ということになるので、その後の対応が全く異なることになる。不確定性原理の解釈をめぐるのは、物理学を二分する大激論が起こった。

ニールス・ボーアらが提唱した解釈は、不確定なのは「元々決まっていないからだ」というものである。ボーアは、コペンハーゲンにボーア研究所を設立、ハイゼンベルクやシュレーディンガーなどの若き天才を招聘し、コペンハーゲン学派を形成していたが、ここで「コペンハーゲン解釈」と呼ばれる量子力学的不確定性の解釈が構築されていった。

コペンハーゲン解釈では、「量子力学の状態は、いくつかの異なる「状態の重ね合わせ」で表現され、これは、どちらの状態であるとも言及できないと解釈する」というものであり、量子が持つ確率的な性質は根源的なものであるという主張をしている。ボーアらによって、量子力学とは「非決定論的」科学であるという非常に重要な提言が行われた。

これは非常に大胆な解釈であり、多くの学者が反対したが、最も強力に不確定性原理に反対し人物は、アインシュタインである。アインシュタインには「完全な物理学理論は決定論的であるべき」との強い信念があり、不確定に見える現象は、「決まってはいるが人間にはわからないだけである」という「隠れた変数理論」を唱えた。非決定論的であるとする不確定性原理の解釈に猛反対し、自らもその構築に尽力した量子力学は不完全であると反対した。

アインシュタインが、物理学に不確定という曖昧さを持ち込むことを納得しなかったという逸話のひとつとして、アインシュタインが、友人であるマックス・ボルン(1882~1970年、ドイツ、英国)へ宛てた手紙の中に記した「Der Alte würfelt nicht,」という有名な言葉がある(1926年)。直訳として「神はサイコロ遊びをしない」とされているが「神はサイコロを振らない」という訳もある。アインシュタインは、物理学者であり、Got(神)という単語も用いていないため、Der Alteを「神」と訳すことには諸説あるが、アインシュタインには、自然界を支配する何かがあり、これがサイコロのような不確定の原理に基づくということには納得しなかった、という意味のようである。なお、ボルンは、終戦後ドイツに戻り、量子力学における波動関数の確率解釈への貢献によってノーベル物理学賞を受賞している(1954年)。

数々の古い常識を過去のものとして、光量子仮説によって量子力学に大きな貢献をしたアインシュタインであるが、奇跡の年(1905年)から20年たってハイゼンベルクが提唱した不確定性原理を認めることはできなかった。この時、アインシュタイン47歳、コペンハーゲン学派は、ボーア41歳、シュレーディンガー39歳、不確定性原理の発見者ハイゼンベルクは25歳である。

アインシュタインは、次々と不確定性原理の矛盾を突く思考実験を考え出し、ボーアらに突きつけ、ボーアらはその思考実験の不備を指摘するという論戦が続いた。特にブリュッセルで開催されるソルベー会議(ガラス原料の炭酸ナトリウムの製造法を考案したソルベーと熱力学の第三法則を発見したネルンストが提唱する国際的な物理学会議)における論争が有名で、第5回ソルベー会議(1927年)で不確定性原理をめぐる激しい議論が繰り広げられた。会議は少人数ではあるが、アインシュタイン、パウリ、ハイゼンベルク、プランク、M キュリー、ラングミュア、ディラック、ドロイ、シュレーディンガー、ボーアなど世界最高の天才達が集まって行われた(議長はローレンツ)。

アインシュタインは、不確定制限リン反対し、量子力学を追い詰め、これが不完全であるとする決定的証拠として「箱の中の時計の思考実験」を提唱した(1930年、第6回ソルベー会議)。世界の著名な物理学者が集まる最高峰の会議の冒頭、アインシュタインは、不確定性原理に反論、「時間」と「エネルギー」という組み合わせには、不確定性はなく、特殊相対性理論を用いて正確に測ることができることを示した。一般によく用いられる不確定性「位置と運動量の不確定性関係」(SMUR)に対して、アインシュタインが提起した不確定性は「時間とエネルギーの不確定性関係」(TEUR)である。箱の中の時計は、「アインシュタインの光子箱」とも呼ばれる思考実験であり、これによって不確定性原理と量子力学は根底から

覆され、否定されるという瀬戸際に立たされた。

ボーアは反論に窮したが、アインシュタインが提唱した一般相対性理論を用いて、この思考実験では時間が正しく測れないことにたどり着き、論破することに成功した。アインシュタインの特殊相対性理論によって消滅の危機にあった不確定性原理は、アインシュタインの一般相対性理論によって救われた。

アインシュタインは、その後、公然とはボーアらへの反論を行わなくなったが、心底から不確定性原理を認めた訳ではなく、3人の物理学者による共著「アインシュタイン＝ポドルスキー＝ローゼンのパラドックス、EPR論文」を提出(1935年)、量子論の不完全性を突く試みを続けた。TEURの議論や別の解釈は、その後も続き、ボーアが1930年に用いた一般相対性理論を用いた反論は間違っており、別の方法でアインシュタインへの反論が可能であるとする研究者もいる。

アインシュタインが示した「隠れた変数理論」とは、確率的にみえる現象には、情報が足りないだけであって、実際の物理学は厳密な因果律を持つというものである。

アインシュタインが固執したのは、未来は現在の状態によって既に決まっているとする「決定論」の概念であり、これは、19世紀にピエール＝シモン・ラプラス(1749～1827年、フランス)が提唱した「ラプラスの悪魔」(Laplace's demon、1812年)に基づく概念である。これは、もし、ある瞬間における全ての物質の状態を知り、それらのデータを解析できるだけの能力がある者が存在すれば、未来を完全に見通すことができるという考えであり、そのような存在をラプラスの悪魔と呼ぶ。人間には不可能でも、ラプラスの悪魔であれば、因果的に決定された未来を完全に見通すことができるというのが、決定論的科学の考え方である。アインシュタインは、量子力学による世界の記述は不完全であり、確率的に見える振る舞いの裏には、確固たる存在や性質が実在するはずだと主張した。

「はじめから決まっていない」と考えるボーアと「全てが決まっており、人間が知らないだけである」とするアインシュタインの解釈は、どこまでも相容れないものであったが、その後、多くの現象が不確定性原理によって説明され、隠れた変数理論とは両立しない実験結果が知られるようになったため、ハイゼンベルクの不確定性原理は広く支持されるようになった。現在では、不確定性原理が根本的に誤っていると考えられる研究者はほとんどいなくなっている。現在の科学・技術のは、量子力学と不確定性原理の上に構築されており、アインシュタインが考えた隠れた変数理論が量子力学を越えるというような現象は見出されていない。

「アインシュタイン・ロマン」(NHK エンタープライズ、1991年放送)には、次のようなやりとりがある。

アインシュタイン：「幽霊のようなテレパシー。確率だけの予測。それを物理学と呼びたくはありません。自然は、もっと単純な美しさを持っているはずです。」

ボーア：「その理論が正しくないなら『単純な美しさ』など何の意味も持たないのです。私たちは、古典物理学に慣れすぎました。ミクロの世界は、私たちの常識を越えたつながりを持っているのです。」

物理学の難題を次々に解決し、それまでの常識と思われたことの多くを覆してきた天才アインシュタインであるが、ボーアによると、その決定論的な考え方は既に古い世界観であり、古典物理学に縛られているという。17世紀から19世紀までの科学や古典物理学を1905年に根底から変えてしまったアインシュタインに対して、ボーアはわずか20年後にその考えは古いと指摘しているのである。

ハイゼンベルクの不確定性原理は、未来は既に決まっているのではないということを示し、「決定論」の概念を否定したが、量子的世界で、未来が決まっていない（全ては確率として予測される）ということは、これに支配されるより大きく複雑な階層、おそらく生物や人間の階層も、やはり未来はまだ決まっていないのだろうということになる。不確定性原理の解釈は、ミクロスコピックな量子的世界だけでなく、自然科学全般や人々の世界観にも大きな影響を与えた。

なお、現在、ハイゼンベルクの不確定性原理の「主張」に対して否定的な異論が唱えられることはないが、その不等式は不完全であるとの指摘はある。小澤正直（1950年～）は、ハイゼンベルクの不等式は不完全であると主張、誤差と本質的ゆらぎを区別して式の不足を補う「小澤の不等式」を提唱、実証研究が行われている（2012年、名古屋大学とウィーン工科大学の共同研究チーム）。この研究は、ハイゼンベルクの式の限界を超えた測定の可能性を示唆しており、重力波の検出装置の限界を議論するために1980年代から進められてきたものである。現在、建設中の東大宇宙線研究所の重力波望遠鏡「KAGRA」では、量子レベルでの雑音や測定精度の議論が重要となるため、量子力学的不確定と測定精度の理論的な検証、重力波検出における小澤理論が検討されるだろうといわれている。

（3）量子の確率的性質

不確定性原理によって、量子力学は結果をひとつに予想することはなく、その代わりに結果の確率分布を予想するということが明らかにされた。量子は、特徴的な「確率的な性質」を持っているが、これは、統計力学が対象とするような数多くの粒子が示す振る舞いや分布のようなものを意味しているのではない。確率という言葉からは、非常に多くの母集団を想像するが、量子力学における確率的性質とは、たった一個の量子が持っている性質である。

光が2つのスリットを通過すると、出口で干渉して干渉縞が現れる。トマス・ヤングが行った有名な光の干渉実験（「ヤングの実験」、1805年）である。ヤングは光の波動説を唱えたが、この実験によって、干渉という波に特徴的な性質を光が持つことを証明した。高校の物理では、光の波動性を説明するのに用いられている。

しかし、20世紀の科学では、光は量子であり、光子は、不確定性原理に基づいて二つのスリットをある確率で通過、出口で干渉縞を作る。

これは、数多くの光子が統計的、確率的に分かれて、例えば100個の光子が50個ずつ別々に二つのスリットを通過して出口で干渉して縞を作ったという意味ではない。

粒子と波の性質を併せ持つ光子が1個であっても、確率的に両方のスリットを通過していると考えるのが正しい量子の確率的性質の解釈である。

リチャード・ファインマンは、光子の二重スリットの思考実験によって、たったひとつの量子であっても確率的性質をもつことを説明した。しかし、ひとつの量子が確率的に二つのスリットを通過するということは、マクロスコピックの常識からは想像しにくい。そこで、思考実験ではなく、実際に粒子の数を数え、量子の確率的振舞いを確かめるための実験が行われた。波である「光波」は数を数えないが、粒子である「光子」はその個数を数えることができるのである。

最初の二重スリット実験は、光（光子）ではなく電子（物質波）を用いて行われた。複数の電子による実験（1961年）に続いて、1個の電子でも干渉縞が確認された（1974年、イタリア・ミラノ大学）。

近年、実験装置が高度化し、追試も行われている。土屋裕（浜松ホトニクス（株））らは、光子1個ずつを計測できるフォトカウンターを製作し、二重スリット実験を行い、1個の光子による干渉縞の追試に成功した（1982年）。外村彰（（株）日立製作所）らは、この光子検出器を電子用に変え、電子顕微鏡の中で電子を単発に発射、電子の二重スリット実験に成功した（1989年）。

光の波動説を説明するためのヤングの実験からちょうど100年後、アインシュタインの光子説によって、光は、量子であり、波であり粒子でもあることが示され、その25年後には、ハイゼンベルクの不確定性原理によって、量子は確率的存在であることが示された。その後、実際に行われた二重スリット実験によって、1

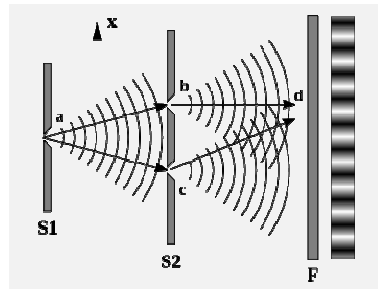


図 2-3-11-ヤングの実験（1805年）
（Wikipedia）

個の量子が確率的に2つのスリットを通り抜け、干渉縞が作られることが示された。量子1個を粒子と考えるのは容易であるが、1個の粒子が波動性を持ち、干渉を起こすことというのは、マクロスコピックの階層の常識からは想像が難しい。奇妙であるが、これが、われわれが普段気付いていない自然の本質ということである。

不確定性原理によって、量子の階層における量子力学的ゆらぎが説明されるようになったが、この「量子ゆらぎ (quantum fluctuation)」は、量子論から宇宙論まで、実に様々な場面に登場する。

たとえば、絶対零度においても原子は不確定性原理のために静止せずに振動するという「零点振動」(zero-point motion)という現象が知られている。

絶対零度「近傍」にまで、冷却されたヘリウムは、この零点振動によって、大気圧下では、固化しない。零点振動は非常に小さいが、ヘリウムの場合は、原子間力も非常に小さいため、零点振動が顕著に現われ、液体ヘリウムは固化することができない。ハイケ・オネス(1853~1926年、オランダ)は、カール・フォン・リンデ(1842~1934年、ドイツ)が開発した冷凍機を用いて、世界で初めてヘリウムを液化したが(1908年)、固化には成功しなかった。その後任者であるウィレム・ヘンドリック・ケーソン(1876~1956年、オランダ)は、ヘリウムに高圧力を加えることによって、はじめてヘリウムの固化に成功した(1926年)。

固体では、絶対零度近傍でも零点エネルギー(zero-point energy)によって格子振動が起こるが、この零点エネルギーという現象を提唱したのは、他でもない、アインシュタインである(1913年)。アインシュタインは、不確定性原理に異論を唱え続けたが、一方では、光量子説、ボース・アインシュタイン統計、零点振動と量子力学の発展に多大な貢献をしている。

トンネル効果(quantum tunnelling)も不確定性原理と量子力学によって説明される現象である。トンネル効果とは、量子系の粒子が、古典的には乗り越えることができない高いポテンシャル(エネルギー障壁)を乗り越えてすり抜けてしまうという有名な現象である。

これは、量子が持つ時間とエネルギーの不確定性の関係によって壁をすり抜ける現象として説明されている。原子核がアルファ崩壊する時、陽子2個と中性子2個からなるアルファ粒子が原子核の中から飛び出してくるが、この粒子が原子核内の強い核力を破って外に飛び出すエネルギーはどこにもみあたらないが、トンネル効果によってこの現象が起こる。量子が、いきなり壁の向こう側に現れるという現象は、量子が持つ粒子性と波動性という二重性と、ハイゼンベルクの不確定性原理によって説明されている。

佐藤勝彦先生は、トンネル効果について、「量子は、エネルギーを未来から借りてきて障壁を乗り越え、それを後から返すことができる不思議な存在である」とも説明している。

マクロスコピックな世界では、ボールが壁をすり抜けたり、時間を自由に行き来したりすることは観測することができない。確率はゼロではないが、あまりにもその確率が低すぎて観測することができない。しかし、ミクロスコピックな量子の世界では、とても不思議なことが頻繁に起こっている。

トンネル効果（量子トンネル効果）の具体的な例は比較的身近なところにある。集積回路の電力損失、発熱の原因のひとつに量子トンネリング（数ナノメートルの障壁から問題となる）による電気の漏洩があり、集積化の障害になっている。

超伝導とトンネル効果を用いたジョセフソン接合は、精密測定や太陽光発電素子の接合に用いられている。トンネルダイオード（エサキダイオード）、トンネル電界効果トランジスタ、走査型トンネル顕微鏡（STM）などの利用例がある。

江崎玲於奈（1925年～、日本）は固体中のトンネル効果、アイヴァー・ジェーバー（1929年～、ノルウェー、米国）は半導体と超伝導体の中でのトンネル効果を発見し、二人はノーベル物理学賞を共同受賞している（1973年）、同じ年のノーベル物理学賞には、ブライアン・ジョセフソン（1940年～、英国）もジョセフソン効果（超伝導体同士のトンネル効果）によって受賞している。

舛岡富士雄（東芝）が発明したフラッシュメモリーも電子のトンネル効果を利用している。

（4）前期量子力学の確立

シュレーディンガーは、量子を波動力学で示したが、ハイゼンベルクは量子を行列力学で表現した。このふたつの量子力学は、その後、数学的に等価であることが証明された。

シュレーディンガー描像（イメージ）は、時刻とともに状態が変化するものであり、状態を波動関数で表わし、主に「電子の記述（化学）」に用いられる。ハイゼンベルク描像は、時刻とともに演算子が変化するもので、状態を行列で表わし、主に「場の量子論」で用いられるようになった。プランクから始まった量子力学はほぼ確立した（1932年）。

一方、1905年にアインシュタインが提唱した特殊相対性理論は量子論と並び20世紀最大の科学の成果であり、世界を科学の世紀へと変えた。速度が光速に近い時に重要となる特殊相対性理論と非常に小さな階層にある量子を取り扱う量子論とは、対象とする領域が異なり、統合が難しいと思われ、相対性理論と量子論は

相性が良くないと言われるたが、量子の階層の記述にも相対論が必要となった。

光（電磁波）は量子の波であるが、媒体の無い真空中を伝播し、「場」を記述する科学（場の量子化）が必要となる。電磁波は電場と磁場の相互作用を含むが、物理作用は、相対性理論によって光の速度を超えることができないため、真空中（空間）には、有限の時間、エネルギーを保持する「場」が必要である。

電磁波は、真空中を光速で伝わる波であるため、相対論的な取り扱いが必要である。前期量子力学において完成された、波動を記述するシュレーディンガー方程式は、方程式そのものが非相対論的であるため、電磁波の記述ができないことが問題となった。20世紀初頭、実用化が始まっていた電磁波やマイクロ波の取り扱いには相対論を取り入れた量子力学が必要となった。

量子論の話しは前期量子論までで一旦完結ということにして、次節は20年、時間を戻して、アインシュタインの特殊相対性理論を復習し、再度、量子論に戻り、アルゴンや窒素の液化を説明する量子化学は後半にする。

2. 4 特殊相対性理論 (Relativitätstheorie)

量子力学は、多くの天才、秀才たちによって構築されたが、相対性理論は、アルベルト・アインシュタインによって作り上げられた。アインシュタインの前に相対性理論につながるいくつかの研究があったが、基本的には、たったひとりの若き天才の論文から始まる。

相対性理論にも専門書、入門書、解説本が多数あり、一般教養書も非常に多い。

特殊相対性理論は 1905 年、一般相対性理論は 1915 年に発表された。2015 年は、一般相対性理論から 100 周年、まだ残されている課題を解決するための研究が盛んに行われている。次表に、奇跡の年と呼ばれる 1905 年からのアインシュタインの主な業績を示す。



図 2-4-1-アルベルト・アインシュタイン (1879~1955 年) Wikipedia)

表 2-4-1 アインシュタインの主な業績

発表年	論文・理論	成果
1905 年 3 月	光量子仮説	光の粒子性を説明。ノーベル物理学賞
1905 年 5 月	分子の大きさを決める手法	学位論文
	ブラウン運動	分子の存在を証明
1905 年 6 月	特殊相対性理論	加速度のない慣性系に対する電磁気学および力学の新理論
1905 年 9 月	$E = mc^2$	特殊相対性理論の一部。エネルギーと質量の等価
1911~16 年	一般相対性理論	重力理論。加速度のある系での相対論
1917 年	アインシュタイン方程式	重力方程式
1925 年	ボース=アインシュタイン凝縮	多数のボース粒子が 1 つの量子状態を占める物質の状態

2. 4. 1 ガリレイの相対性理論

はじめに、古典的なガリレイの相対性理論（ガリレイ変換）についておさらいをしておきたい。

19世紀以前の古典力学の基本は、サー・アイザック・ニュートン（1643～1727年、イングランド）が著した「プリンキピア」（1687年）に示されたニュートン力学に遡る。ニュートン力学は、300年以上も前に完成されており、ニュートンが用いた時間と空間の概念は次のようなものである。

- 絶対時間：時間は一様に流れ、これを「持続」と呼ぶ
- 絶対空間：空間は常に均質であり、ゆらがないものである

この原理に基づいてニュートン力学では、次の3つのニュートンの法則が見出されている。

- ニュートンの第一法則：慣性の法則

外力が作用していない時、物体は静止または等速運動をする。経験則であり、オリジナルはガリレオ・ガリレイやルネ・デカルトが提唱したもの。

- ニュートンの第二法則：運動の法則あるいは力の定義。

物体の加速度は力に比例するという法則。物体の運動状態と時間変化を表わす。

- ニュートンの第三法則：作用反作用の法則

物体が他の物体に力をおよぼす時、同じ大きさの反対向きの力を他方の物体から受ける。経験則である。

絶対時間と絶対空間は概念であり、原理である。原理を証明することはできないが、もし不都合が生じたら放棄することになる。しかし、19世紀末までは、数々の事実が、ニュートンの法則が正しいことを証明して来たため、時間と空間は絶対的であり、物理学で取り扱う対象ではないという基本が守られてきた。

しかし、たとえば、われわれは、地球の上において、地球は回転運動をし、地球は、さらに太陽のまわりを公転運動し、太陽は銀河系の中で運動し、銀河系も宇宙の大規模構造の中で回転運動をしている。現代の科学ではここまで分かっているが、古典力学の時代でも、地球が回っていることは分かっていたので、そもそも、慣性の法則は、局所的にしか成立していないことは明白である。

ニュートン力学では、「結果として慣性の法則が成立している系」を慣性系(inertial frame of reference)として定義し、ニュートンの第一法則は、逆に「慣性系が必ず存在する」ということが大前提になっていることを表現している。

したがって、慣性系は無限に存在し、それぞれの慣性系は「平等同格」である、

とするのが、ニュートン力学である。

ニュートンの第二法則は、ただ単にニュートンの法則と呼ばれることもあり、非常に簡単な次の式で表わされる。

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = f$$

m は質点の質量、 x は質点の座標、 t は時間、 f は力であり、これを「座標 x 系の運動方程式」または「ニュートンの運動方程式」と呼ぶ。(ただしこの微分の表記法は、ニュートンが先取権を争って激しく攻撃したライブニッツの記法)

この式は、物体の運動の時間変化と力の関係を示しているが、距離(空間)も時間も絶対的なものであるという前提があり、速度が定義され、力が定式化されている。なお、ニュートンは第二法則をプリンキピアに示した(1687年)が、これを上式のような方程式として明示したのはレオンハルト・オイラーである(1749年)。高校物理の教科書では、座標の二階微分を加速度(a)として説明することもある。

ニュートン力学では、慣性系は無数に存在し、異なる系でもこの運動方程式を記述することができ、その時の変換をガリレイ変換(Galilean transformation)と呼ぶ。ガリレイ変換は、ニュートンの運動方程式を不変に保つので、ガリレイ変換の前後でニュートン力学の法則は不変となる。ニュートン力学における慣性系をガリレイ系とも呼ぶ。

なお、ガリレオ・ガリレイ(1564年~1642年、イタリア)のような偉人は、姓ではなく名前の方で呼ばれることも多く、日本では名前の「ガリレオ」がよく知られているが、この変換は、ガリレオ変換ではなく「ガリレイ変換」である。

ファミリーネーム以外の名前がよく知られている人物には、

ガリレオ・ガリレイ以外にも、ミケランジェロ・ブオナローティ、フェーリクス・メンデルスゾーン・バルトルディ、ダンテ・アリギエーリ、ラファエロ・サンティ、アイルトン・セナ・ダ・シルバ、など、大衆にも人気のあった偉人・有名人に多くみられる。ガリレオ・ガリレイの場合は、父ヴィンチェンツォ・ガリレイ

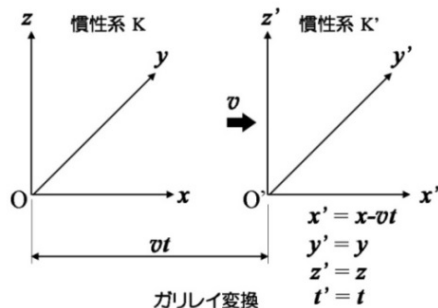


図 2-4-2-ガリレイ変換

と弟ミケランジェロ・ガリレイも有名人であること、イタリアでは偉大な人物を親しみを込めてファースト・ネームで呼ぶ習慣があることから「ガリレオ」の方がよく通じるが、この変換はガリレイ変換である。

図に示すような x 方向に速度 v で動いている慣性系を、 K 系 (x, y, z) から K' 系 (x', y', z') へガリレイ変換すると、座標 x' に対して、 $x' = x - vt$ とすればよいことが分かる。

物理学では、いずれの座標系でも「同じ物理法則が成り立つ」という概念が重要であり、「物理学の法則は同格であるどのような座標系で記述しても同じでなければならない」という考えを「相対性原理」と呼び、上式のようなガリレイ変換によって法則が不変である関係を「ガリレイの相対性理論」あるいは「ガリレイの相対性原理」と呼ぶ。

多くの物理法則が、ガリレイ変換に対する不変性を持っているとされている。具体的には、ガリレイの相対性原理は、図 2-3-1 の左半分では、ほとんど成立するため、深冷空気分離装置などの一般的な化学工学が取り扱う系では、ガリレイ変換が可能である。蒸留塔の棚段が 100 段以上あっても、その各段で起こっている物理現象は全て同格の慣性系で起こっているとみなすことができる。

身近な様々な力学の問題を解く時に、地球や太陽が動いていることを考慮せず、無視することが多い。深冷空気分離装置を設計する時にも、地球の回転運動や太陽系の運動を考慮することはないが、これは、地球の運動とは無関係の慣性系がいくらかでも存在するということが暗黙のうちに了解されているためである。深冷空気分離装置の中で起こる現象は、ガリレイ変換が可能であるため、それぞれ局所的な「系」の中で、同じ法則に基づいて同じ現象が起こっている。蒸留塔や熱交換器の中で起こる力学的な記述は、どこでも同じである。蒸留塔の塔頂部で起こっている現象と塔底部で起こっている現象は、基本的に同じものであり、物理法則は全く同じものが適用されるということである。「全く同格の系が無数に存在する」と考えてよいので、同じ物理モデルが使用できる。

ただし、われわれは、深冷空気分離装置の中で起こっている現象を、流体側からではなく、装置の外側から観測しているということを念頭において、観測結果の取り扱いに注意しなければならない。観測系を正しく理解しておかなければ、現象の理解を誤り、事象の記述を誤り、設計を間違える可能性がある。

蒸留塔や熱交換器の中では、熱と物質の同時移動現象 (simultaneous heat and mass transfer) が起っている。気液平衡を利用した蒸留操作が行われる蒸留塔では、混合物中の濃度差によって「拡散移動」が起こる。これは、「フィックの法則」(Fick's law)

あるいは「フィックの拡散の法則」(Fick's laws of diffusion)と呼ばれる物理法則であり、これは、どのような慣性系に対しても成立する。

アドルフ・オイゲン・フィック(1829~1901年、ドイツ)は、医師、生理学者であり、膜を透過する気体の研究からフィックの法則を見出した(1855年)。フィックは、既にジョゼフ・フーリエが見出していた熱伝導に関するフーリエの法則(Fourier's law, 1807年)を参考にして、熱伝導と同じような形式で、拡散現象を濃度勾配とを関連付けた。

フーリエの法則は次式、

$$q = -\kappa \cdot \text{grad}(T)$$

で、示される。ここで $\kappa[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$ は媒質の熱伝導率、 $q[\text{W}/\text{m}^2]$ は熱流束、 $y[\text{m}]$ は距離である。grad はスカラー場の勾配を表し、1次元では、

$$q = -\kappa \frac{dT}{dy}$$

と書ける。

拡散現象の研究から同様の記述が得られ、フィックの法則は次式で示される。

$$J = -cD \cdot \text{grad}(x)$$

ここで $D[\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$ は流体の輸送物性(transport property)のひとつである拡散係数(diffusion coefficient)、 $x_A[-]$ は混合物中の成分Aのモル分率(mole fraction)、 $c[\text{mol}/(\text{m}^3)]$ は流体のモル密度(molar density)、 $J[\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$ は拡散流束(diffusion flux)である。

1次元では、

$$J = -cD \frac{dx_A}{dy}$$

と書ける。

拡散流束は、濃度勾配(concentration gradient)あるいは濃度差に比例することが示され、濃度勾配あるいは濃度差は、濃度推進力(concentration driving force)と呼ばれる。熱伝導の方程式と拡散方程式は非常によく似ている。

物質移動の場合、ほとんどの場合、媒質は流体であり、一般的には、流体そのものが移動する(たとえば配管中をポンプや圧力差による強制対流で流れる)ため、拡散流束は流体の質点座標系(流体の重心系)に対して記述されることが特徴である。

しかし、通常、観測者(実験者、装置の運転者)は、移動する質点系ではなく、

(装置の)外から物質移動を観測しているの、見たまま(測定したもの)をそのまま記述してもフィックの法則を正しく表現することはできない。移動現象を外から観測し、その結果を、フィックの法則が成り立つ慣性系に変換して記述する必要がある。

補足 2-20：勾配

スカラーの関数、たとえば温度 $T(T_1, T_2, T_3)$ の勾配ベクトル場を数式で表わす時にはナブラ記号 ∇ を用いて ∇T と書かれる。数学的には(ベクトル解析)、空間の各点において、空間ベクトル v と温度 T とのドット積(デカルト座標では内積)が、温度 T の空間ベクトル v に沿う方向微分と一致するベクトル場を「勾配」と定義する。

温度や濃度を取り扱うときには、3次元のデカルト座標を考えることが多いので、温度分布(空間の各点の温度)の (x, y, z) に関する方向微分が「温度の勾配」ということになる。数学のナブラ記号の代わりに勾配を意味する grad 記号を用いるという記述方法も広く行われており、フーリエの法則やフィックの法則も grad で示されることが多い。

空間の2点の温度が異なり、その間を直線で結ぶことが可能な場合、勾配の代わりに「温度差」を用いることができる。

気体や液体を「連続体」として取り扱う「流体力学」では、流体の運動の記述に2つの異なる方式がある。古典的なオイラー系(質点系)とラグランジュ系である。オイラー系は観測系の中心を「場」としているのに対して、ラグランジュ系では「流体粒子的」立場をとっているため、現象の記述法に違いが生じる。

より具体的には、オイラー系の記述では、物理量の微分を d/dt という見慣れた普通の微分演算子で表わすが、ラグランジュ系の記述では、 D/Dt という「実質微分(または物質微分 material derivative)」で表わす。実質微分は、ガリレイ変換に対して不変である。(実質微分には様々な名称が存在するので注意が必要である。たとえば、convective derivative、substantial derivative、Lagrangian derivative、total derivative など)

蒸留塔の中で起こる移動現象は、拡散の寄与が大きく、ラグランジュ系で記述する必要がある。蒸留塔内の気液の界面では混合物の気液平衡によって、各成分の濃度が大きく変化し、主流と界面との間に拡散移動が起こるが、同時に顕熱輸送や潜熱交換に伴う対流(気液界面に対して垂直成分の物質の流れ)が生じるため、物質移動と拡散移動を厳密に分けて考える必要がある。混合物の流体は、その重心の移

動に伴って拡散現象を観測した時に、はじめてフィックの法則が普通の形式で示されるので、観測者は「物質移動流束と拡散移動流束を混同しないように注意」して測定結果を取り扱わなければならない、ということである。

深冷空気分離装置のような低温の装置では、外から観測した実験結果（現象）を変換せずにそのまま評価すると、物質移動を過大評価してしまい、実験装置から得られるデータそのまま設計された商業装置は性能不足に陥りやすい。低温の蒸留実験では、装置の温度に対して周囲の環境の温度が非常に高いため、外から装置の中へ向かって非常に大きな侵入熱（侵入熱負荷、heat-in-leak）がある。実験装置の設計は、高い断熱性能が得られるように配慮されるが、それでも侵入熱をゼロにすることはできず、実験装置は商業装置に比べると、サイズが小さいため、その影響を大きく受けやすい。蒸留塔は、常に外から加熱されているため、内部の液体はその熱で蒸発し、蒸留塔内では上昇ガスが増加し、蒸留塔内の気液の流量が増加し、物質移動、物質収支の測定結果に影響している。したがって、侵入熱が大きい時の実験データは、侵入熱が小さい時よりも、物質移動流束が大きくなっている。蒸留塔の塔頂部では蒸気を液化して還流液を戻すための凝縮器があり、この侵入熱の分の余分な仕事をして外部からの侵入熱は補償されている（そうでなければ蒸留塔の圧力が上昇を続けることになる）。実験装置における凝縮器の負荷は精密に測定されている訳ではなく、装置が安定するように冷媒が供給されているため、そのままのデータを評価すると、蒸留塔における分離性能・物質移動は過大に評価されることになる。

室温よりも高い温度で行われる蒸留実験では、外部への熱の漏洩（heat loss）によって壁面で蒸気の凝縮が起こるため、系の温度保持のための余分な加熱が必要となるが、低い温度で行われる空気分離の蒸留実験の場合は、熱が外から中に侵入し、液体が蒸発して上昇ガスが増えるため、余分な冷却を必要とし、塔頂部や塔底部で測定される物質移動の量はその分だけ大きくなっている。

蒸留装置における普遍的な現象（法則）は、みかけの物質移動流束ではなく濃度勾配に対する拡散流束であるから、測定された物質移動流束から拡散流束を分離して評価しなければ、実験を正しく記述していないことになる。ところが、研究論文の中には、物質移動と拡散移動を混同して評価しているものが多く、特に、熱伝達におけるヌセルト数と物質移動におけるシャーウッド数の間に相似則があるように勘違いしている論文をよくみかける。伝熱におけるヌセルト数に対応するのは物質移動の示すシャーウッド数ではなく拡散流束に対する無次元数でなければならないはずであるが、実験装置そのものが、物質移動流束だけを見出し、拡散流束を正しく見積もるようには設計されていないことが多い。

蒸留塔における「熱と物質の同時移動現象」において、物質移動流束から拡散流束を分離して評価する方法や理論については、浅野康一（東京工業大学名誉教授）らの論文や浅野先生の教科書に詳しい。浅野康一著「物質移動の基礎と応用」－Fickの法則から多成分蒸留まで－、丸善(株)、2004年などが参考になる。

われわれが、日常取り扱う技術の多くは、簡単なガリレイ変換が使用でき、蒸留塔における移動現象もラグランジュ系の視点で正しく記述することができる。しかしこのような簡単な変換であっても、うっかりすると実験結果をオイラー系の立場で（観測したまま）評価してしまうことがある。実験者は十分な注意が必要である。次節に示すアインシュタインの特殊相対性理論は、多くの物理法則がガリレイ変換できないこと、慣性系の記述は観測者によって異なることを示しているが、蒸留塔のようにガリレイ変換が可能な系であっても、物理現象の本質と観測者の立場を間違えると誤った実験や設計を行ってしまうということである。

2. 4. 2 エーテル仮説

科学技術の進歩に伴って、ニュートン力学には根本的な問題が生じてきた。19世紀から20世紀にかけて多くの現象が、ニュートン力学やガリレイの相対性理論では説明できず、新しい理論を必要とした。

ジェームズ・クラーク・マクスウェル(1831～1879年、スコットランド)によって電磁場の基礎方程式が作り上げられたのは、アインシュタインの特殊相対性理論の46年前である(1861年)。電場と磁場が、波となって伝わる「電磁波の存在」が、マクスウェルによって予言され、電磁現象は、方程式を解くことによって完全に記述できるようになった。

マクスウェルは、産業ガスの分野からみると、気体の分子運動論、熱力学、統計力学において大きな結果を残した偉大な科学者であるが、古典的な電磁気学を確立したことがよく知られる。マクスウェルは、電気化学、気体の液化と電磁気学の分野で数々の結果を残したファラデーとも通じる物理と化学の天才であり、ファラデーより40歳も年下であるが、両者は電磁気学の研究分野において交流があった。マクスウェルが導いた電磁波の方程式は、ベクトル解析では4つの式からなる。



図2-4-3-ジェームズ・クラーク・マクスウェル (1831～1879年) (Wikipedia)

- ①磁場の構造を表わす「ガウスの磁束保存の式」、
- ②変化する磁場と電場を表わす「ファラデー-マクスウェルの式」、
- ③電荷密度と電場を表わす「マクスウェル-ガウスの式」、
- ④電流・電場と磁場の関係を表わす「アンペール-マクスウェルの式」

基礎方程式から、次の電磁波の方程式(波動方程式)が得られる。

$$\left(\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \Delta\right) \mathbf{E} = 0$$

ここで、 \mathbf{E} は電場ベクトル、 Δ はラプラシアン(ラプラス演算子、 $\Delta = \nabla^2$)、 $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ は真空の誘電率、 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ は真空の透磁率であり、 $c = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$ は電磁波の伝播速度であり、 $\frac{1}{c^2} = \epsilon_0 \mu_0$ の関係がある。

マクスウェルが示した電磁波の式(1864年)は「現象論」のひとつである。現象論とは、科学の法則は分からなくても、数式で実際の現象を記述することができるということである。電磁気学の理論から導かれる電磁波の速度が、アルマン・

フィゾー（1819～1896年、フランス）が行った回転歯車を用いた光速の測定実験（1849年）の結果、 $3.13 \times 10^8 \text{ m/s}$ と非常に近かったため、マクスウェルは自分が求めた速度は光の速度に違いないと考え、「光は電磁波の一種である」ということを提唱した。光速はその後、レオン・フーコー（1819～1868年、フランス）が鏡を用いた装置で測定（1862年）し、 $2.98 \times 10^8 \text{ m/s}$ という、より正確な値が得られている。（現在の値は、 $299,792.458 \text{ km/s}$ ）

しかし、この式によって、それまでになかった重大な問題が提起された。

物理学の基本方程式の中に「光の速度」が現れることになったが、速度は距離と時間で定義されるため、光の速度がどの慣性系で記述されるのかが重要な課題となったのである。

マクスウェル方程式は、ガリレイ変換に対する不変性を持たず、もし、慣性系によらず電磁気学の法則が成り立つならば、ガリレイの相対性理論を修正することになり、ガリレイの相対性理論の方が正しいならば、マクスウェル方程式と電磁気学を修正する必要が生じた。マクスウェル方程式は、様々な電気や磁気の問題をまとめて説明し、電磁波を予言し、量子力学にも大きな影響を与えたが、ガリレイ変換ができないという問題は、光の速度という重大な問題を提起し、アインシュタインの特殊相対性理論が生み出されるきっかけとなった。

この当時は、光の波動説と粒子説は決着がついていなかったが、様々な観測結果や実験結果、理論から「光の波動説」が優勢となっており、波である光の速度と光を伝える媒体をめぐる、様々な議論が行われていた。波動説を決定付けるための実験、歴史に残る「マイケルソン・モーリーの実験」（Michelson-Morley experiment、1887年～）が行われた。

アルバート・マイケルソン（1852～1931年、プロイセン王国、1881年まで米国海軍士官、その後大学の物理学教授）と物理学者のエドワード・モーリー（1838～1923年、米国）は、光速に対する地球の速さの比を検出し、光や電磁波を伝える媒体＝エーテル（ether）の存在を確認するための実験を計画、光や電磁波は波であるから、太陽からの光が地球に光が届くには、波を伝える媒体が必要であり、宇宙空間はエーテルという仮想の物質で満たされていると考えられていたため、これを実証しようとしたのである。

ガリレイの相対性原理に従うと、全ての物理学の理論はガリレイ変換について不変でなければならないが、電磁波を記述するマクスウェルの方程式では、ニュートン力学のように無数の慣性系が存在するという前提は成り立たない。エーテルに対する絶対座標系が存在し、マクスウェルの方程式は、この座標系においての

み成立しななければならないと考えられたのである。

マクスウェルの電磁場の基礎方程式より170年前、クリスティアーン・ホイヘンス(1629~1695年、オランダ)は、光を縦波とする波動説の中でエーテル仮説を提唱した(1690年)。

これに対して、アイザック・ニュートンは、エーテル説を否定、光は球形以外の形をした粒子であるとした(光の粒子説)。トマス・ヤングは、光を横波とする波動説を提唱した。

光の波動説と粒子説は、時代とともに幾度も形勢が逆転、19世紀末は、多くの実験結果・観測から、光の波動説が優勢となり、光の粒子説はほとんど廃れていた。しかし、光がどのようにして伝播するのか、多くの学説、仮説が提唱された。ホイヘンスが予言した、光を伝える媒体エーテルは発見されておらず、マイケルソンらは、特殊な干渉計を発明して、エーテルを発見するための大がかりな実験を始めた。

マイケルソン・モーリー実験の仮説は、①エーテルは太陽系に対して静止している、②エーテル中の光速は一定である、③地球上の光速は太陽系に対するガリレイ変換で決まる、というものであった。

当時は、太陽系よりも大きな宇宙についてはとりあえず考える必要がなかったため、エーテルは太陽系の中だけで静止し、光はその中を伝わるのが確かめられればよかった。静止している媒体エーテルが存在し、その「ひとつの慣性系」の中で地球が動いていると考えれば、方向によって光の速度が変わるはずであり、それを測定する装置が考案された。

地球の自転速度は、秒速460mほどであり、地球が太陽の周りを回る公転速度は秒速30kmである。地球の公転によって生じる光の速度の差、すなわち「エーテルの風速」を干渉計によって観測しようというものである。マイケルソンとモーリー以外にも多くの研究者がこの実験に参加、実験結果に対する議論には、世界の多くの著名な学者が参加した。

光の速度は17世紀には、天体観測から秒速21万kmと求められ、その後、アルマン・フィゾー(1819~1896年、フランス)の実験(1849年)によって秒速31.5万kmという値が知られていた。「光速不変の法則」が実験的に見出されており、地球の公転速度であれば、エーテルの風速は、技術的に測定可能な範囲にありエーテルの検出は可能と思われた。

かつてコペルニクスやケプラーによって地動説が提唱された時、地球が太陽の周りを公転しているのであれば必ず見出されるはずの恒星の年周視差が全く観測されず、かなり後になって観測技術が発達してから確認されたということがある。エーテルも提唱されてから200年近くは観測されなかったが、それは、年周視差の時

と同様、測定技術が十分ではなかったということであり、観測されないということが、エーテルが存在しないという証拠にはなっていないと考えられていた。光速度や地球の公転速度が正確に見積られ、高精度の光干渉計が発明された19世紀末の技術であれば、ついにエーテルの存在がとらえられると思われたのである。

1881年からマイケルソンによってはじめられた実験は、モーリー、ミラー、ケネディ、イリングワースなど多くの研究者によって1930年まで50年にもわたって継続され、10回以上論文が提出された。しかし、エーテル発見の報告はついになされなかった。マイケルソンらの実験は、エーテルを発見するという当初の目的からすると大失敗であるが、これだけの実験を行っても観測されないエーテルは、ほぼ存在しないことが証明され、「失敗が評価された」最も歴史に残る大実験と言われ、物理学における大発見とされた。マイケルソンは、光干渉計による光速度の測定によって米国人初のノーベル物理学賞（1907年）を受賞した。

ホイヘンスが提唱した宇宙を満たすエーテルの存在は、マイケルソン＝モーリーの実験によって、その存在が否定され、仮想のものではなく、架空のものとなったが、「エーテル(ether)」という言葉には普遍的に広がっているという意味があり、他の分野のエーテルは今も残っている。神学におけるエーテルは宇宙を構成する「元素」のひとつとされている。

化学物質のエーテルは「エーテル結合(-R-O-R')を持つ化学物質」である。ただ単にエーテルというとその中でもジエチルエーテル($C_4H_{10}O$)を指すことが多く、有機溶媒、麻酔薬、ディーゼル燃料の燃焼助剤としての用途が知られている。ジエチルエーテルよりも簡単な構造を持つジメチルエーテル(C_2H_6O)は、DMEとも呼ばれ、スプレー噴射剤、LPG代替燃料、自動車用・産業用燃料として実用化されている。ただし、高揮発性の石油留分を「石油エーテル（日本の消防法では第四類危険物）」と呼ぶが、石油エーテルの主成分はペンタンであって、石油エーテルにはエーテル類が含まれていない。名称と中身が異なっているので注意が必要である。

イーサネットというネットワークの規格は、ゼロックス社の登録商標（1972年）であるが、その通信技術はIEEEによって規格化されており、物理規格のイーサネットと通信規格のTCP/IPプロトコルの二つの言葉はネットワーク時代の標準語となっている。遍く広がるネットワーク情報を意味しているが、エーテル・ネットではなく、英語読みのイーサネットが普及している。

2. 4. 3 アインシュタインの特殊相対性理論 (Spezielle Relativitätstheorie、SRT、1905 年、英: special relativity)

アインシュタイン (ドイツ) は、1905 年に「光量子仮説」を発表、光は粒子として「真空中」を伝わると考えた。光量子仮説は、「波である光が粒子の性質も持つ」というものであり、光量子 (light quantum) には、その後の研究によって「光子、こうし、photon」という名称が与えられた。

なお、アインシュタインは、エーテルの存在を否定したのではなく、光の伝播にエーテルを必要としなかったため、マイケルソンらがエーテルの観測を続け、世界の多くの学者が、世紀の大実験の実験結果の議論を行っていた時にも、その議論に参加することがなかった。

アインシュタインは、続いて3ヵ月後、特殊相対性理論 (当初はこの名称はない) を発表した。この時、アインシュタインは、スイス特許庁に勤務する特許審査官であったが、学位取得のために大学に提出した特殊相対性理論は拒絶された。代わりに提出した論文は、後に「ブラウン運動の起源を説明する揺動散逸定理」となり、分子の存在の証明という重要な論文となった。この「ブラウン運動の理論」と「光量子仮説」と「特殊相対性理論」の3つの重要な論文が発表された1905年は、後に奇跡の年と呼ばれるようになった。(表2-4-1参照)

アインシュタインの特殊相対性理論は、マクスウェルの電磁波の理論における慣性系の問題を解決するものであり、二つの原理に基づく新たな理論である。

ひとつは、物理学の法則は全ての慣性系で同じ形式で表わされる「相対性原理」が成り立つということ、二つ目は、ある慣性系から見た時、光源が静止しているか運動しているかにかかわらず、光速は一定であるという「光速一定の原理」である。

アインシュタインは、光を伝える媒体・エーテルの存在を前提とせず、光を粒子と波の二面性を持つ「光量子」としたが、さらにニュートンが与えた絶対空間、絶対時間の概念を放棄し、どこからみても光速は一定であるというそれまでの常識を覆す提案を行った。

アインシュタインは、絶対時間や絶対空間ではなく、時間と空間を一体と考える「時空」の概念を導入、観測結果から得られる「光速度一定の法則」ではなく、あらゆる観測者からみて光速度が一定であり時空の方が変化すると考える「光速度一定の原理」に基づいて特殊相対性理論を導いた。

真空中の光速度が一定に見えるのは、そのような法則があるのではなく、まず先に光速度が一定であるという原理があり、それを観測している時空 (時間と空間)

の方が変化しており、それまでに取り扱ってきた古典物理学の範囲では、たまたま時空の変化が小さく、光速度も空間も時間も一定に見えていたということになる。

アインシュタインは、彼の大学の数学の教官であったヘルマン・ミンコフスキー（1864～1909年、リトアニア）が考えた4次元空間・ミンコフスキー時空を特殊相対性理論の幾何学に用いたが、これは、物理学にとって極めて重要な転換点となった。

ニュートン力学では、空間が伸び縮みしたり、時間の進む速さが変わったりすることはない。時間と空間は、絶対的であるから、科学が取り扱う対象としてはならなかったのである。しかし、アインシュタインは絶対時間と絶対空間の原理を放棄し、時空を科学の対象とした。これは物理学における大革命であった。

速度とは、ある時間に進んだ距離であるから、時間と空間が不変であれば、速度の定義は容易であるが、そのためには、慣性系は無限に存在し、「光速一定の原理」と「ガリレイ変換」は矛盾する。光の速度を定義することが難しくなる。

ガリレイ変換に代わる新たな変換が必要となり、アインシュタインは、すでに電磁波方程式のために編み出されていた「ローレンツ変換」を用いた。

前述のガリレイ変換と同様、 x 方向に速度 v で動いている慣性系を、 K 系 (x, y, z) から K' 系 (x', y', z') へのローレンツ変換は次のようになる。

$$t' = \gamma \left(t - \frac{c}{\beta} x \right) = \gamma \left(t - \frac{vx}{c^2} \right)$$

$$x' = \gamma(x - c\beta t) = \gamma(x - vt)$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$\text{ここで、 } \beta = v/c \quad \gamma \equiv 1/\sqrt{1-\beta^2}$$

絶対時間を前提とするガリレイ変換に対して、時間と空間が等価であるローレンツ変換は、少し複雑な形式となり、光の速度が一定であり、速度を定義する時間と空間の方が一定ではない。ガリレイ変換では観測者によって光速は一定ではないが、ローレンツ変換では、光速一定の原理と矛盾しない変換が可能である。

また、ローレンツ変換は、速度 v が光速度に対して十分に小さく、ゼロとみなせる時、 $\beta = 0$ 、 $\gamma = 1$ となり、ガリレイ変換と同じ結果になるため、光速不変の法則と矛盾しない変換形式であるだけでなく、速度が十分に小さい場合は、それまでの古典力学を含むことができる。

アインシュタインの論文の名称は、「電気力学」という題名であったが、慣性系の変換が、このローレンツ変換に限定され、また、重力を含まないという条件であったため、「特殊相対性理論」と呼ばれるようになった。

ヘンドリック・ローレンツ（1853～1928年、オランダ）は、マクスウェルの方程式が座標変換に対して不変であるという条件からローレンツ変換を導いたが、その後、光や電場、磁場だけでなく様々な事象がこのローレンツ変換によって理解されるようになり、時間も空間も質量も、様々な「もの」や「こと」がローレンツ変換できることが分かった。ローレンツは、ローレンツ変換がマクスウェル方程式を不変な形で変換することを、1900年に発見していたが、ゼーマン効果の研究でノーベル物理学賞を受賞（1902年）しており、アインシュタインの特殊相対性理論が発表された時には、すでに学界の大物である。

無名のアインシュタイン（当時26歳）とローレンツでは、学界や学会における評価に大きな差があり、ローレンツ変換を用いたアインシュタインの理論は、当初は「ローレンツ-アインシュタイン理論」と呼ばれた。しかし、ローレンツは、エーテルの存在を信じており、ローレンツ変換が、時空の本質そのものであるということには気付いておらず、そのことを理解していたのは、アインシュタインだけであった。非常に速度が大きい物体では時間と空間が縮むが、ローレンツが考えたこのローレンツ収縮の解釈は、アインシュタインの相対論の解釈とは全く異なるものであり、エーテルの存在を前提としていた。

アインシュタインが提唱した理論は、これを高く評価したマックス・プランクによって見出され、その後、ローレンツ-アインシュタイン理論ではなく、「アインシュタインの特殊相対性理論」と呼ばれるようになった。アインシュタインは、4年後にスイス特許庁を退職、翌年には、プランクに推薦されて、カイザー・ヴィルヘルム研究所（ベルリン）の所長となり、はじめて研究者としてスタートすることになる。

特殊相対性理論の発表から数ヶ月後に追加で発表された次の式は、特殊相対性理論の中でも最も有名な「エネルギーと質量が等価である」という関係を表わす式である。

$$E = m_0 c^2 / \sqrt{1 - v^2/c^2} = mc^2$$

この式は、4元運動量保存則から導かれ、 E は「エネルギー」、 m_0 は速度 v で動く粒子の静止質量である。分母のローレンツ変換は、質量についても同じ形式が用いられるため、静止系でも運動系でも成り立ち、 $E = mc^2$ 、"E equals m c squared"という世界的に有名な関係式が得られる。

この式に具体的な数値を代入すると、わずかな質量が莫大なエネルギーに轉換されることが分かり、また莫大なエネルギーがあれば、わずかではあるが質量（物質）が生み出されることが示唆されている。エネルギーと質量（物質）は等価であるから、「無から有は生まれない」という常識は、過去のものとなった。

特殊相対性理論を定式化する「Raumzeit、ラウムツァイト」という概念は、時間と空間を同等に取り扱うという物理学用語であるが、今ではすっかり普通の言葉として定着し、英語では、「spacetime、スペースタイム」と直訳された。

日本語の「世界」は、サンスクリットの漢語訳が語源であり、「世」が時間、「界」が空間の概念であるため、「世界」と「Raumzeit」は同じ意味を持つ。したがって、特に新しい言葉を必要としていなかったが、「世界」は「world」の意味で用いられることが多く、ミンコフスキー空間を物理学用語として、はっきりとさせるために「時空」という新しい日本語が作られた。

ただし、ドイツ語や英語の語順と同じであれば「空時」となるところが、日本語訳は、「世界」と同じ語順、原語とは逆の語順「時空」となっている。

ヘルマン・ミンコフスキー（1864～1909年、ロシア）は、結晶学や金属学に應用される「格子」の概念を導入したことで知られる線型位相空間論の数学者であり、スイス連邦工科大学ではアインシュタインに数学を教えている。ミンコフスキーが特殊相対性理論に数学的基礎を与えた業績は大きく、時空を表すための方法として光円錐を考案している。



図 2-4-4 ヘルマン・ミンコフスキー（1864～1909年）Wikipedia

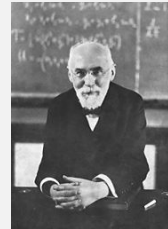


図 2-4-5 ヘンドリック・ローレンツ（1853～1928年）Wikipedia

ミンコフスキーが時空の概念（「Raum und Zeit」）を公式に発表したのは、アインシュタインの特殊相対性理論より少し後の1908年であり、その時に「空間自身とか時間自身といった概念は消え去り、空間と時間を組み合わせたもののみが独立した実在であり続ける」と述べている。以降、われわれの世界は、ミンコフスキー時空と呼ばれるようになった。

概念として空間と時間が等価といっても、通常の物理学の式では、空間と時間は異なる次元を持つ物理量であるため、ミンコフスキー時空の座標を表わす時には、

$$P(x, y, z, ict)$$

と、時間の項は、光速 c [m/s] と虚数を掛けることによって表わされ、4つの次元は、全て長さの次元を持つ。

ミンコフスキー空間における2つの点の間の距離は、3次元空間のピタゴラスの定理と同じよう表わすことができ、原点 O と上記の P 点との距離は、

$$L = x^2 + y^2 + z^2 - (ct)^2$$

と示され、空間と時間は等価であっても、数学的には、時間だけが異なった形で記述される。

3次元のデカルト座標であれば、原点から距離ゼロの解は原点だけであるが、この式から分かるように、ミンコフスキー時空における距離ゼロの解は、点ではなく式の値がゼロになる球表面全体ということになる。

ミンコフスキー時空の不思議な性質の解説は、様々な解説書に詳しい。なお、数学的な整合性のために、宇宙にはより高次の次元が必要とされており、超弦理論を統合するとされる「M理論」では、空間が10次元、時間が1次元と考えられており、超弦理論やM理論では、5次元以上の余剰次元はコンパクトにたたまれているため、その性質を知るための高エネルギー実験が行われている。ただし、これらは未完成の理論であり、現在の一般的な科学が議論可能な時空は、このミンコフスキーの4次元時空までである。

特殊相対性理論を一文で表すと、「重力が無視できる条件で、ミンコフスキー空間が歪むことがなく、ローレンツ変換によって記述が出来るという、等速の慣性系を取り扱う理論」となる。より短く言えば、「重力を含まず加速度を含まない特殊な条件での相対論」となり、これに対して一般相対性理論は重力を含む相対論ということになる。

アインシュタインの特殊相対性理論は、電磁場理論と力学を統合したという業績が大きいが、その中で、次のような重要な帰結を与えている。

- ①電場 (electric field) と磁場 (magnetic field) は独立した物理現象ではなく、磁場は電場を別の観測系で相対論的にみたものである。
- ②運動量保存則とエネルギー保存則は、別のものではなく四元運動量保存則としてまとめられ、「エネルギー運動量テンソル」が保存される
- ③質量とエネルギーは等価である。

特殊相対性理論を実証する研究がいくつも行われているが、その中でも、有名なのは、オットー・ハーン (1879~1968年、ドイツ) による、原子核分裂において質量欠損がエネルギーに変換されるという実験 (1938年) である。核分裂の時のほんのわずかな質量欠損が莫大なエネルギーとなって放出されることが実験によ

って確かめられた。

特殊相対性理論による時間のローレンツ変換の実証に関しては、地上に降り注ぐミュオンを観測がよく知られている。

地球の高層大気、地上から 100km ほどのところでは、宇宙線（一次宇宙線、陽子線が 90%、 α 線が 8%）が、大気中の窒素原子に衝突していくつかの反応過程が生じている。一次宇宙線と大気のはじめの反応では、中間子が生成されるが、大半は崩壊してミュオン（ミュオン粒子）となり、ミュオンの二次宇宙線がシャワーのように地球に降り注いでいる。

カール・アンダーソン（1905～1991 年、米国）が宇宙線の中から「プラスの電子」、陽電子を発見（1936 年）、続いて「重い電子」を発見（1937 年）した。仁科芳雄（1890～1951 年、理化学研究所）らは、これを計測し「ミュオン中間子」と呼んだ（1938 年）。当時は、湯川が提唱していた中間子の一種だと思われ、ミュオン中間子と呼ばれたが、その後、この粒子は、中間子の性質（すなわちハドロンの性質）を持たない粒子であることが分かり、電子と同じレプトンに分類されて、「重い電子」は「ミュオン」と呼ばれるようになった（1947 年）。

ミュオンは、電子と同じ荷電レプトンのひとつであるため、質量が大きいことを除くと電子に非常によく似ており、比較的、計測しやすい「素粒子」である。しかし、その寿命は短く、 2.2μ 秒しかないため、高層大気中に発生したミュオンの速度が光の速度に近いとしても、発生から消滅までの間にわずか 600m しか進むことができない。したがって、もし時空が変化しないと単純に計算すると発生したミュオンのほとんどは地上には届かず観測はされないことになる。しかし、実際は地上に達したミュオンが観測されており、これが特殊相対性理論の実証のひとつとなった。

発生したミュオンの速度は、非常に大きく、光の速度に近いため、慣性系の変換には、ガリレイ変換を使うことができず、ローレンツ変換が必要である。この時、ミュオンの時間の進みは、地球上よりも遅くなり、その寿命の間に約 6000m 進むことができるため、多くが地上に到達することができ、観測される。この現象は、ミュオンと同じ速度で移動する観測者の立場から記述することもでき、その場合は、時間の進みは同じであるが、空間（地球）がローレンツ収縮によって縮むため、やはり、ミュオンは地上に到達することができる。光速一定の原理から、観測者によって時空が収縮するという現象が実際に見出された。

ここで、「粒子の寿命」というのは、崩壊していない粒子の数がはじめの $1/e=0.3679$ になるまでの時間（平均寿命）として定義されている。これは、崩壊定数の逆数に等しい。したがってミュオンの寿命というのは、1 個のミュオンが 2.2μ 秒

で必ず崩壊するという意味ではなく、粒子が消滅する確率を表している。ミューオンのような素粒子の自発的変換過程の場合は、放射性物質の崩壊で用いられる半減期ではなく、粒子の寿命確率で示されることが多い。放射性崩壊は放射性物質の個数が減少するという現象に着目しているのに対して、素粒子の場合は、変換されるまでの時間の確率に着目するためこのような違いが生じている。しかし、計算上、粒子の寿命に $\ln 2 = 0.693$ を掛けると半減期になるので、半減期と寿命の値はあまり大きくは異なっていない。(→「2.7.5.4 半減期・寿命・比放射能」)

特殊相対性理論における簡単な速度の足し算の例を示す。

速度 u で動く物体 A から速度 v で物体 B を打ち出せば、物体 B のこの慣性系における速度は、ガリレイ変換であれば $u + v$ になる。これに対して、ローレンツ変換では、物体 B の速度は $(u + v)/(1 + uv/c^2)$ となる。したがって、もし、 $u = v = c$ としても B の速度は光の速度にしかならない。

この式からは、光の速度を越える速度は得られないので、どのような慣性系でも光の速度を越えることがないということになる。観測者から見て光速で移動する宇宙船が光を放てば、宇宙船から見る光は光速で進むが、その光はどの観測者から見ても光速を越えることがない。「同じ現象でも観測者の立場が変わると、説明が変わる」というのがアインシュタインの相対論である。

宇宙船の速度とそこから打ち出される粒子の速度が、いずれも光速の 0.5 倍の時は、ローレンツ変換では光速の 0.8 倍となるので、ローレンツ変換の足し算は、 $1+1 \rightarrow 1$ 、 $0.5+0.5 \rightarrow 0.8$ 、といった感じになる。それぞれの速度が光速の $1/1000$ の時、速度の合計は $2/1000$ よりも 100 万分の 2 遅くなる。 $1/1000 + 1/1000 = 2/1000 - 2/1\,000\,000$ 。

光速度一定というのは、光の速度は、どんな足し算をしても 1 にしかならないということであり、 $1+1$ を 2 だと思っている間は理解ができない。 $1+1$ は 1 になると頭を切り替える必要がある。

光速度は、現在の SI では、 $299\,792\,458$ m/s と 9 桁の有効数字で与えられており、一般的には、「秒速 30 万 km」と書かれることが多い。

2. 4. 4 熱力学的時間の矢

相対性理論とミンコフスキー空間の時空の概念によって、時間と空間を区別せずに対等に扱われるようになった。実際に相対論的粒子は、空間だけでなく時間についても対称であることがわかった。たとえば、二つの粒子が衝突する時の反応は、可逆反応であり、過去と未来の区別がつかない。反応を映像に撮影したとして、それを逆回しにして再生しても、方向の区別がつかないため、過去と未来をきめることができない。

しかし、われわれが知っているマクロスコピックな世界では、時間は一方向にしか流れておらず、反応は不可逆過程である。特に、ガスを分離することによって成り立っている産業ガスの分野では「熱力学の第二法則」が絶対的な原理のように存在している。よく混ざっている空気は、エントロピーが大きい状態であり、これを分離してエントロピーが小さい状態を作ることによって商売が成り立っており、勝手に空気が分離したり、容器の中の混合ガスが分離したりしない。熱力学の第二法則＝エントロピー増大の法則がある。熱いお湯と冷たい水を混ぜてぬるま湯を作ることではできるが、ぬるま湯が自然にお湯と冷水に分かれることはない。

空間の研究と同じように時間の研究が行われている。空間は自由に移動できるのに対して、時間は一方向にしか流れているようにしか観測できないことを「時間の矢」(arrow of time)と呼ぶ。素粒子や量子の世界では、ほとんどの法則が時空対称であり、基本的に過去と未来の区別がない。しかしその他の法則の場合には、時間の矢が存在する。アインシュタインの相対性理論を研究し、それを実証したことで知られるアーサー・エディントン(1882~1944年、英国)が最初に「時間の矢」という言葉を使った。時間の矢には次の5つがある。

- ①「熱力学時間の矢」：エントロピーが増大する方向、すなわち「情報量が減少する方向」にしか事象が進まないという法則である。
- ②「波の時間の矢」：たとえば水面に石を投げた時に波が中心から外側に向かって広がることはあるが、その逆のことは起こらないというもので、熱力学時間の矢から説明される。
- ③「進化の時間の矢」：一見、エントロピーが減少しているように見えるが、それは太陽や地球のような巨大な「低エントロピー資源」によるものであり、より大きな系で観測するとエントロピーは増大し、熱力学時間の矢の方向と変わらない。
- ④「意識の時間の矢」：人間のような生物が、過去からの情報を順序をつけて記憶することによって生じる時間の流れ。生まれたばかりの時は、過去の記憶がないため、意識の中には時間の流れが存在しないが、情報が増えることによ

て時間の矢が生じる。物理学的説明は難しいが、コンピュータにも同様に時間の矢が存在する。

- ⑤「宇宙論的時間の矢」：無から宇宙が始まり、時空が生まれ、終焉するという流れのながで考察される時間の方向である。

対称性を重要と考える物理学において、時空対称性のうち、多くの場合に時間だけが非対称に見える現象は、解明すべき課題のひとつであり、様々な研究が行われている。熱力学時間の矢については、ある程度の説明がなされている。

図 2-4-6 の上には、容器の中に酸素分子がひとつ、窒素分子がひとつだけあった状態を示している。分子は運動しており、酸素と窒素の位置は時々入れ替わっているが、それを映像に残して反転して再生しても全く見分けがつかない。右の容器と左の容器は、どちらが過去でどちらが現在、あるいは未来なのかを見分けることができない。これは、何も変化が起こっていないのと同じことを意味しており、ここでは、時間は流れていない。

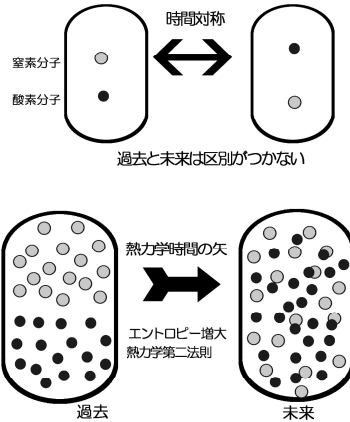


図 2-4-6-熱力学時間の矢

次に容器にもっと数の多い酸素分子と窒素分子を置いて、非常にエントロピーが小さい状態（情報量が多い状態）から時間が始まるとすると図の左下の容器のような状態が考えられる。

時間がたつと、酸素分子と窒素分子は分子運動によって互いに場所を入れ替え、次第に混ざり合っていく。分子が動くにつれて、窒素と酸素が左右に分かれている状態の確率よりも、適当に混ざっている状態の確率の方が大きいいため、最終的には、均一に混ざってしまい、エントロピーが大きい状態（情報量が少ない状態）、図の右下のようになる。どちらが過去でどちらが未来のことであるかは明らかであり、時間は「熱力学時間の矢」の方向に流れていることが判別できる。

同じ二種類の分子であっても2個しかない時は、時間の流れを見分けることができないが、分子の数が増えてくると「時間の矢」が現れてくる。時間の矢は、粒子の数が増えることによって初めて現れる現象と理解されている。実際の容器の中の分子の数は、これよりも 10^{20} 個よりも多く、混ざる前と混ざった後は、必ず認識することができる。われわれの世界はとてつもなく多くの粒子が集まってできており、過去と未来は見分けがつかない。

熱力学第二法則は、エネルギーの移動の方向とエネルギーの質に関する法則であるが、エントロピーの概念を取り入れて様々な表現がなされている。そのうちのひとつが「断熱系において不可逆変化が生じた場合、その系のエントロピーは増大する」というものであり、この表現が「熱力学時間の矢」を説明している。しかし「微視的可逆性」と「巨視的不可逆性」の関係は、厳密には証明されておらず、熱力学第二法則は未完成なままである。

熱力学第二法則が破れない限り、混合ガスは、ひとりでに（自発的には）分離されない。自然の成り行きではエントロピーが減少する方向には時間は流れない。したがって、空気を分離して酸素や窒素を製造するためには、「低エントロピー資源」すなわち「分離エネルギー」を投入しなければならないということになる。ガス屋の仕事というのは、仕掛けとエネルギーを利用して混合ガスを分離して販売するものである。ガスの分子の階層で見れば、分離技術はタイムマシンの技術ということになる。時間は巻き戻せないが、混合する前の状態を作るのが分離技術である。

2.5 量子論の確立

前期量子論が確立したのと同時期に特殊相対性理論が提唱され、量子論には相対論的考えを取り入れた次の段階が必要とされた。ガス屋にとって量子論は分子や原子を取り扱うという点で密接に関係していることが分かるが、特殊相対性理論はあまり関係ないと思うかも知れない。しかし、相対論を取り入れた量子論は「場の量子論」であり、20世紀後半から特に重要な技術となる電子工学、真空（空間）の科学、原子核や同位体の科学など、様々な最先端の科学・技術に欠かせないものである。ガス屋にとっても避けては通れない分野である。

2.5.1 ディラック方程式と反粒子

2.5.1.1 場の量子論、反粒子と真空の科学

ポール・ディラック（1902年～1984年、イングランド）は、シュレーディンガー方程式を拡張して特殊相対論を組み入れ、ディラック方程式を基礎方程式とする相対論的量子力学を導いた（1928年）。ハイゼンベルクとディラックは、プランクが量子論を提唱した1900年には、まだ生まれておらず、量子論は、20世紀生まれの新世代の研究者達が活躍する時代となった。

ディラックは、この数年前にヴォルフガング・パウリ（1900年～1958年、オーストリア、スイス）が提唱していた「パウリの排他原理（Pauli exclusion principle, 1925年）」に従う粒子「フェルミオン」の研究を行っていた（フェルミオンについては「2.5.2 量子の統計性」を参照）。

物理学と数学の天才ディラックは、電子の相対論的な量子力学を記述するディラック方程式を提出した。ディラック自身は、あまり量子力学が好きではなく、相対性理論を含む理論物理に注力していたが、量子力学が相対性理論を満足していないことが問題だと考え、量子論が相対論に従うように研究を進めた。

ディラック方程式は、フェルミオン（物質粒子）を記述する「場の量子化」（ディラック場）の数学的記述である。それまで、パウリの排他原理に従わないように見えていた軌道電子に対して「スピン」という自由度が提案されていたが、ディラックが提唱した方程式には、自然に量子が持つスピンという概念が導入された。



図 2-5-1-ポール・ディラック（1902～1984年）Wikipedia

ディラック方程式は、ディラック定数（換算プランク定数）を1、光速度を1とした自然単位系で表わすと次のような簡単な式で表わされる。

$$i\gamma^\mu \partial_\mu \psi(x) - m\psi(x) = 0$$

ψ は、ディラック場と呼ばれる4成分スピノルである（スピノルは、複素ベクトル空間の元）。方程式は簡潔に示されているが、ここに現われる記号の意味を知るには、アインシュタインの特殊相対性理論の記述、ミンコフスキー時空のテンソル、ディラック行列などの数学の理解が必要になる。ここでは、記号やディラック方程式そのものの意味は考えず、この方程式の帰結として得られる重要な発見に注目することにする。

非相対論的シュレーディンガー方程式に相対論を持ち込む方法として、当初、クライン-ゴルドン方程式が提案された（1926年）が、この方程式には、負のエネルギー解が現われ、負の確率密度が現われ、排他原理を解消することができない、という3つの問題があった。

これらの問題を数学的に解決するために、ディラックが提案したディラック方程式（Dirac equation、1928年）では、負の確率密度がなくなり、排他原理に反して同じ軌道上に二つの電子が存在しているようにみえていたものがスピンという量子数が自然な形で現われることによって解決した。二つの問題は解決したが、この場（ディラック場、Dirac field）を記述する方程式には、自然界には存在しないはずのエネルギーの状態、すなわち負のエネルギー（負のエネルギー固有値）の問題が残った。

ディラックは、この負のエネルギーを記述するために「真空とは、負のエネルギーの電子が完全に満たされた状態である」とする「ディラックの海」の概念（空孔理論）を提唱した。

ディラックは、この空孔の正体は、1918年にアーネスト・ラザフォード（1871～1937年、ニュージーランド、イングランド）によって発見された「陽子」（電子と反対のプラスの電荷を持つ粒子、proton）であると考えたが、ヘルマン・ワイル（1885～1955年、ドイツ）とロベルト・オッペンハイマー（1904～1967年、米国）は、この空孔は陽子ではなく、未発見の「プラスの電荷を持つ電子」であるという説を提唱した。

カール・デイヴィッド・アンダーソン（1905～1991年、米国）が、宇宙線の中からプラスの電荷を持つ電子を発見し、これに、ポジトロンという名前を付けた（1932年）。ディラックが予言した空孔は、陽子ではなく、陽電子という形で発見された。新粒子が予言されてから、発見されるまでに非常に長い年月を要するこ

ともあるが、陽電子はディラック方程式が提唱されてから4年後、非常に短期間のうちに発見されている。アンダーソンは、プラスの電荷を持つ電子・陽電子と非常に重い電子・ミューオンという2つの新電子を発見した。

電子（粒子としての電子）がエレクトロン（electron）と呼ばれていたため、電荷が反対の電子（正の電荷を持つ粒子）に対して、ポジトロン（positron）という名前が付けられ、日本語では「陽電子」と訳されたが、この際、エレクトロンの名前も変更しようという提案もあった。

マイナスの電子をネガトロン（陰電子）、プラスの電子をポジトロン（陽電子）として、名前に対称性を持たせようという提案もなされた。しかし、当時は、既にエレクトロンという名称が一般にも広まりつつあったため、ネガトロンへの変更計画は進まず、マイナスの電子はエレクトロンのままとなった。

日本語では、エレクトロニクス（electronic engineering）を「電子工学」と訳す。エレクトロニクスとは、電子の動きを制御して利用する科学・技術である。電子工学は、電気工学（electrical engineering）の一部であるが、どちらかと言うと強電に電気工学、弱電に電子工学という用語を使い、独立して用いられるようになった。

電子と言う用語は、20世紀初頭に真空管が発明された頃から使われており、陽電子が発見された時には、すでに電子という言葉が広く定着していたようである。ただし、二種類の β 崩壊（ベータ崩壊）を明確に表わす時には、 β^- 崩壊を「陰電子」崩壊、 β^+ を「陽電子」崩壊と呼ぶ。なお、電子はnegatronに変更されなかったが、negative electronには「陰電子」という日本語訳がある。

電子工学が普及したため、本来は素粒子の名称である「電子」という言葉が様々なところで使われている。電子メール（E-mail）、電子書籍（e-book）、電子辞書（electronic dictionary）などは、電子という素粒子のイメージとは結びつかないが、電子工学を利用した製品であるためこういう名称になっている。電子〇〇という言葉が非常に多く、たとえば、「電子レンジ（microwave oven）」は、マイクロ波加熱器であって電子や電子機器とは全く関係ないが、いつの間にかこういう名前になっている。

ディラックは、シュレーディンガーと同じ年にノーベル物理学賞を共同受賞した（1933年）が、非相対論的量子力学・波動力学であるシュレーディンガー方程式と相対論的粒子を取り扱う場の量子論・ディラック方程式では、内容も業績も大きく異なると思われるが、受賞理由は、「原子論の新しく有効な形式の発見」ということになっている。

陽電子は、初めて発見された反粒子であるが、その後、電子以外の素粒子にも「対

称)な粒子があることが分かり、さらに素粒子以外の複合粒子、陽子、中性子、中間子などにも反粒子があることが分かった。量子の世界には、素粒子から複合粒子まで、様々な対称性があることが知られるようになった。

素粒子と複合粒子は、フェルミオンあるいはボソンという2つの統計性のいずれかを持っている(量子統計力学における「スピン統計定理」)。フェルミオンのグループは、物質を構成する「物質粒子」であり、ボソンのグループは、力を伝える「相互作用粒子」である。

一般に反粒子という名称で呼ばれているのは、フェルミオンに属する粒子のパートナー粒子(対称なもう一方の粒子)である。電子はフェルミオンであり、陽電子は電子に対称な粒子(反粒子)である。

ボソンにも反粒子という概念はあるが、ボソンのパートナー粒子は通常は元の粒子と同じものであり、区別できないため、たとえば、ボソンである光子の反粒子は、光子と同一のもので理解されるため、光子の反粒子は光子そのものである。したがって、反光子という呼び方はない。基本的には、全ての粒子に対称な反粒子があるが、用語としては、フェルミオンにだけ反粒子が存在する。なお、粒子と反粒子はどちらが正でどちらが反対という訳でもないが、現在の宇宙のほとんど全てを構成している物質の方を「粒子」あるいは「物質」と呼び、ほとんど存在していないもう一方の対称な方を「反粒子」あるいは「反物質」と呼ぶ。

電子やミューオンのような電荷を持つ素粒子や陽子のような荷電粒子の場合には、電荷が対称(チャージ対称、C対称)な反粒子が存在する。名称は、陽電子、反ミューオン、反陽子である。

ニュートリノは、電荷を持たない素粒子であるが、スピンの向きが異なる反ニュートリノがある。ただし、中性の素粒子の場合、粒子と反粒子が等しい可能性もあり、その存在(マヨラナ粒子と呼ぶ)を確認するための二重ベータ崩壊の実験が行われている。

中性子は、電荷を持たない複合粒子であるが、中性子の内部構造であるクォークには、反クォークがあるため、反クォークからなる中性子は反中性子と呼ばれる。クォークは数種類のフレーバー量子数(量子が持つ特性値で自由度のようなもの)を持ち、この量子数の反数を持つ反クォークがある。

これらの反粒子(antiparticle)の名称は、基本的に反クォーク、反中性子、反電子ニュートリノのように粒子の名前に「反、anti-」をつけて呼ばれるが、「電子-陽電子」の組み合わせは例外である。

「反物質(antimatter)」という言葉もよく聞かすが、反物質とは、反陽子や反中性子からなる原子核と陽電子からなる「反原子」のことであり、今の宇宙にはほとんど存在していない。反粒子は、様々な反応の過程で頻繁に現れるが、反物質は、

一部の研究機関で人工的にごくわずかに作られたことがあるものの、生成には莫大なエネルギーを必要とし、作られたとしてもその数は非常に少なく、長時間閉じ込めておくことも難しい。「反物質」とは基本的には自然界には（宇宙創世記の一瞬を除いて）存在しないものである。

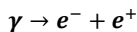
ディラックによって、「空間」とは①粒子と反粒子の対生成（ついせいせい、pair production）を起こすエネルギーと②粒子と反粒子が対消滅（ついしょうめつ、annihilation、アナイアレイション）を起こす「仮想粒子」が存在する相対論的量子論（量子場）であるとの概念が与えられた。ここで、実在粒子のうち観測されるものを実粒子、観測されないものを仮想粒子と呼ぶので、仮想粒子は実在しているのではなく、実在するが観測されない粒子のことを指す。

特殊相対性理論では、エネルギーと質量は等価であり「物質のない空間＝真空」であってもエネルギーが存在する。粒子と反粒子はエネルギーから生まれ、粒子と反粒子が出会うと対消滅してエネルギーに転換される。この反応が繰り返し起こるのが「空間」の概念である。

特殊相対性理論と反粒子（陽電子）の発見によって「無から有は生じない」という概念は、科学的に間違った古い常識であることが確かめられた。

エネルギーを光（電磁波）、質量を物質と言い換えると、光と物質は等価であり、光と物質の間には、いくつかの相互作用が知られている。よく知られている光と物質の相互作用には、光電効果、トムソン散乱（弾性散乱）、コンプトン散乱（非弾性散乱）、対生成があり、エネルギーレベルはこの順に大きくなる。対生成は、最も大きなエネルギーレベルの光－物質反応であり、わずか 1g の質量を生み出すために必要なエネルギーは、 $9 \times 10^{13} \text{J}$ (2500 万 kWh) にものぼる。逆に見るとわずかな質量がエネルギーに転換されるとその量は莫大であるということである。

対生成は、エネルギーが物質に転換する反応であり、次のように光子（ γ 線）から電子（ e^- ）と陽電子（ e^+ ）が生成する。



真空中の 1 点に、 $2mc^2$ （ m は電子あるいは陽電子の質量）以上のエネルギーを集中させると、そこに粒子と反粒子が生成する。

図 2-3-12 は、電子・陽電子の対生成を記述するファインマン・ダイアグラム、横軸は空間、縦軸は時間である。波線は、波（相互作用粒子）を表し、ここでは γ 線（光、電磁波）であり、頂点は、相互作用の点、実線は、素粒子を表わしており、ここでは、電子 e^- と陽電子 e^+ である。

電子と陽電子の方向は、矢印で表わされ、同じ点(時空)に γ 線から二つの粒子が現れる。この対生成反応が起こるためには、 γ 線には、電子と陽電子の1個あたりの静止質量の合計 $511\text{keV} \times 2 = 1.2\text{MeV}$ 以上のエネルギーが必要となる(エネルギーと質量の等価)。

このようなエネルギーと質量の等価を取り扱う反応の収支(エネルギー保存と質量保存を合わせたもの)では、素粒子や複合粒子の質量を表わす単位には、 kg ではなく、エネルギーの単位 eV に統一される。「無(空間のエネルギー)」から「有(物質)」が生まれ、「有(物質)」が消滅するため、物質収支とエネルギー収支は単独では成立せず、合計したものが保存されている。

ただし、ここで示されるエネルギー収支は1個あたりのものであって、化学反応のようなモルあたりではないので注意が必要である。 1.2MeV を120万電子ボルトと呼ぶと非常に大きく感じるが、よく知られるエネルギーの単位で表わすと、非常に小さな値である($1.9 \times 10^{-13}\text{J}$ 、 $5.28 \times 10^{-20}\text{kWh}$)。モルのように具体的な粒子の個数を与えた時にはじめて大きな値となる。

ファインマン・ダイアグラム上に示される粒子は、相対論的粒子であり、この図の例では、陽電子は時間軸に対して逆行するように表記されている。マクロスコピックの階層では、熱力学の第二法則により、時間は逆には進まないことが知られているが(→「2.4.5 熱力学時間の矢」)、ミクロスコピックな階層では相対論的粒子は時間を逆行することもある。対生成の逆の反応が対消滅であり、電子と陽電子が衝突すると、 511keV のエネルギーを持つ2つの γ 線(波長 2.43pm)に変換される。

産業ガスを取り扱う時、ガスの物理には熱力学と実在気体の科学、ガスの化学には電子を記述するシュレーディンガー方程式、分子間力や気体の液化を記述するには、量子化学までの知識があれば十分とされていた。しかし、近年は、電子機材(半導体)やメディカル分野(生物、核医学)などの商材も増えてきているために、ここに示した、場の科学や反粒子に関する知識も必要になってきている。

たとえば、酸素18同位体(^{18}O)を原料として放射性薬剤を作り、医療診断を行う「FDG-PET 診断法」は、この「電子-陽電子対消滅」によって発生する γ 線を検出して断層画像を得る診断法である。酸素18同位体は、欧米では原子力関連企業あるいは試薬品メーカーが供給しているが、日本では、産業ガスメーカーが酸素の蒸留分離によって濃縮、医薬原料として製造・供給している。

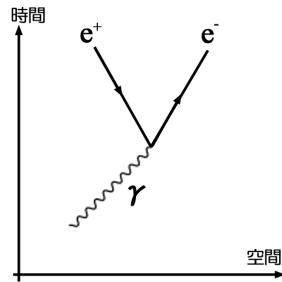


図 2-5-2-電子・陽電子の対生成を表わすファインマン・ダイアグラム

放射性の薬剤に含まれる¹⁸F（フッ素18）が崩壊し、そこから陽電子が放出される。陽電子は反粒子であるから、周囲にある電子とすぐに反応、対消滅して γ 線が生成される。 γ 線のエネルギーは、通常のX線診断より大きく、透過力が強い。そのため、吸収や散乱をされずに体外へ放射、観測される。基本的には、角度180度の方向に同時に二つの光子（ γ 線）が放出されるので、これを測定することによって詳細な画像が得られる。非常に高精度で鮮明な画像が得られ、がん診断やアルツハイマー症の診断に利用されて、近年は、PET診断という言葉が一般にも知られるようになってきている。PET（Positron Emission Tomography）のPは陽電子のPであり、反粒子はSFや素粒子物理学だけの言葉ではなく、既に実用化されている。（→FDG-PET診断法の説明は「3.5.2 ベータ崩壊（ β^+ 崩壊）とPET診断」参照）

ディラックは、物質のない空間（真空）にエネルギーが存在するというを示したが、アインシュタインの特殊相対性理論以降、絶対空間という概念は放棄され「空間」は伸び縮みするものであり、時空は科学の対象となっている。

何もみえない空間（真空）には、粒子（物質）と反粒子（反物質）が生成し、その逆に、粒子と反粒子が消滅してエネルギーに変換されるという反応が常に起こっているということである。したがって、古典的には、物質が含まれていないように見える空間を「真空」と呼んでいたが、実際の空間には、仮想粒子の対消滅と対生成が起こっており、量子論における空間は、エネルギーを持つ「場」（ゼロではない真空期待値を持つ空間）と理解されるようになった。

17世紀に、オットー・フォン・ゲーリケは、マクデブルクの半球を使って、空気を抜いた「真空」を作って見せた（1650年）が、ディラックの海によって、真空の概念は大きく変わり、本当の真空は「物理系の最低エネルギー状態」と定義されるようになった。

その後、場の量子論が確立し、ディラックの海の問題そのものは必要とされなくなったが、真空の概念は変わった。もし、空間に物質が存在しなくても、その空間がエネルギーを持てば、それは真の真空とはいえなくなったのである。

表 2-5-1-主な粒子の発見

年	発見	発見者
1897年	電子	ジョゼフ・ジョン・トムソン、1906年ノーベル物理学賞
1899年	α 粒子	アーネスト・ラザフォード、1908年ノーベル化学賞
1900年	エネルギー量子	マックス・プランク、1918年ノーベル物理学賞
1905年	光量子の予言	アインシュタイン、1921年ノーベル物理学賞
1909年	分子の实在	ジャン・ペラン、1926年ノーベル物理学賞
1911年	原子核	アーネスト・ラザフォード、1908年ノーベル化学賞
1919年	陽子	
1920年	中性子を予言	
1926年	光子と命名	ギルバート・ルイス
1928年	反電子を予言 ディラック方程式	ポール・ディラック、1933年ノーベル物理学賞
1932年	中性子	ジェームズ・チャドウィック、1935年ノーベル物理学賞
	陽電子	カール・デイヴィッド・アンダーソン、1936年ノーベル物理学賞
1955年	反陽子	オーウェン・チェンバレン、エミリオ・セグレ、1959年ノーベル物理学賞

2. 5. 1. 2 真空工学（低圧力の技術）

産業ガス関連の機器で取り扱う「真空」とは、気体の分子が出来る限り少ない状態の容器の中の「真空の状態」を意味している。

気体分子が少ない状態を作り出し、これを利用する技術を真空技術という。

20世紀以降、科学の対象となった空間を取り扱う「真空の科学」と物質（気体分子）が少ない状態「真空の技術」は、同じ「真空」という言葉を使っているが、概念が異なっている。

「究極」とは、絶対零度のように、絶対に達成できない到達点を意味するが、真の真空も到達することのできない究極の「無」を意味しており、17世紀に考えられて、真空嫌悪説を打ち破った真空と20世紀の真空は意味が異なるのである。

気体分子が少ない状態は、「古典的真空」と呼ばれるが、容器の中の空気を排気し、低い圧力の状態を作り出すことはできるが、現実問題として分子が全くない状態を作ることは技術的に不可能であって、実際には古典的真空も作ることはできない。工学的な「真空状態」とは、物質もエネルギーも存在しない「真の真空」からかけ離れているだけでなく、ガス分子が存在しない「古典的な真空」でもない。「気体の圧力が非常に低く、真空に近い状態」のことを「真空」と呼んでいる。

容器の中の空気を排気し、低圧の状態を作り出し、これを維持し、圧力を測定（真空度を測定）し、この状態を利用する工学分野が「真空工学」である。

真空ポンプの技術、真空を維持する技術、測定技術などを「真空技術」と呼ぶ。真空状態を作り出すために、通常は、「真空容器」が用いられる。真空容器は、周囲が大気圧の空気であれば、この圧力で圧壊しないような構造と材料が必要であり、外部から空気が漏れこまないような気密構造も必要である。したがって、ほとんどの場合、真空容器は金属製であり、工業的な真空は、金属の壁で囲まれている。われわれは、大気の底、空気の底で生活しているため、大気圧の空気がある状態が当たり前状態であり、空気がない状態は、工夫して作り出さなければならない。

たとえば、空気の影響をなくした研究を行う場合には、装置の中を真空ポンプで排気し、できるだけ含まれる分子の数を少なくし、低圧の状態を作り、その環境下で実験や分析などが行われる。JISでは、工業的に利用される容器の中の圧力が周囲よりも低い「負圧」状態を総じて「真空」と呼ぶ。圧力が非常に低い場合、圧力と言わずに「真空度」という用語も用いられる。非常に不純物が少ない物質の組成を濃度と呼ばずに純度と呼ぶのにも似ている。

真空度の領域によって熱伝導、電気伝導、放電、摩擦、音の伝播、成膜など様々な現象あるいは応用技術が異なるため、真空はいくつかの領域に区分されている。

表 2-3-2 に一般的な真空の区分を示す。圧力には、昔の圧力の単位 Torr (トール) も併記している。1atm=760Torr、1Torr は、水銀柱 1mm の圧力である。

大気圧より低い圧力を「低真空」(low vacuum)、100Pa (1hPa) 以下を「中真空」(medium vacuum)、圧力が非常に低い状態を「高真空」(high vacuum) と呼ぶ。

圧力の場合、圧力が高い方を「高圧」と呼ぶが、真空の場合は、圧力が低い方を「高真空」と呼んでおり、さらに超高真空、極超高真空などの区分がある。

地球の外の圧力は、ほとんど分子が存在しないため圧力は定義できない。場所にもよるが、水素原子が、およそ 1cm³ に 1 個から 1km³ に 1 個

あると考えると、工業的な真空の区分と比べて極端に分子の数が少ない。したがって「宇宙空間並みの真空」というのは、地上や地球の周りに作り出すことができない状態である。非常によくできた超高真空の装置であっても、さすがに宇宙空間並みと呼べるものはほとんどない。

一方、宇宙空間と呼ばれている環境には、国際宇宙ステーション (ISS) のような飛行高度 400km ほどの (地球に非常に近い) 「宇宙」空間もある。

ISS は、航空機のような空気抵抗はないが、地球の大気圏内を飛行しているため大気抵抗があり、何もせずに放置すれば、その高度は毎月 2.5km ずつ低下する。ISS の周りにはそのくらいの大気 (熱圏の気体) があるが、圧力としては 10⁻⁴~10⁻¹⁰Pa であるため、表 2-3-2 の真空の区分としては、高真空から超高真空 (ultra high vacuum) あるいは、極超高真空 (extremely high vacuum) となる。

人工的に作られた地上での最高の到達真空度 (最高の真空状態) は、10⁻¹¹Pa (7.5 × 10⁻¹³Torr) 程度であり、ISS 周辺の大気圧までは地上でも再現できているが、宇宙空間並みの真空とはやはり桁が違う。

0°C、101.3kPa (1atm) の理想気体の分子の数は、2.7 × 10²⁵ 個/m³ ある。同じ温

表 2-5-2-真空の区分

区分	圧力範囲 Pa 下段は Torr	分子の数 個/m ³
宇宙空間	場所によるが、圧力は定義できない	10 ⁻⁹ ~10 ⁶ 個
超高真空	10 ⁻⁵ ~10 ⁻¹⁰ 0.75 × 10 ⁻⁸ ~7.5 × 10 ⁻¹³	10 ¹⁵ ~10 ¹⁰
高真空	0.1~10 ⁻⁵ 0.75 × 10 ⁻⁴ ~7.5 × 10 ⁻⁸	10 ¹⁹ ~10 ¹⁵
中真空	100~0.1 0.75~7.5 × 10 ⁻⁴	10 ²² ~10 ¹⁹
低真空	100kPa~100Pa 225~0.75	10 ²⁵ ~10 ²²
大気圧	101.3kPa	2.7 × 10 ²⁵

度で、 10^{-11} Pa の高真空状態に含まれる気体分子の数は、およそ 2.7×10^9 個/ m^3 と計算できる。 1cm^3 あたりでは、標準大気圧の 2.7×10^{19} 個、最高到達真空で 2650 個である。非常に分子の数を少なくできていることに違いないが、到達真空度の世界記録であっても、「分子がひとつもない状態」からは程遠い。

自然は真空を嫌い、これを作ることはできないという古代ギリシアから伝わる真空嫌悪仮説は、ゲーリックによって打ち破られたが、その時に作られた真空は非常に低い圧力の状態であって、本当に何も無い「真空」とは程遠い。

工学的な絶対真空、すなわちエネルギーを考えずに物質だけを考えて場合の古典的な真空であっても、超高真空容器の中には、非常に多くの分子が存在しているため、厳密な意味での真空を作り出すことは不可能であり、宇宙空間並みの真空もありえない。

工業的な真空とは、「非常に圧力の低い容器の中の状態」を利用する技術ということであり、表に示された真空度の区分が行われ、真空度によって、利用できる技術や研究対象の分野が異なる。

通常、真空容器には、外部からの漏れや金属容器から放出される分子（通常は、気体分子であるため「脱ガス」という）による圧力上昇があるため、高真空を達成しこれを維持するための技術やノウハウが必要とされる。

真空度が低下すると、真空容器内での高真空下の実験ができなくなり、真空断熱を利用している場合は断熱性能が極端に低下してしまう。したがって、外部からの漏れ（リーク）や脱ガスをできるだけ抑さえ、長時間にわたって高真空を維持することが重要である。真空に必要な技術は、適切な真空ポンプの選定、脱ガスの抑制、リークの抑制である。

真空状態（低圧力状態）を作り出す重要な機器は、真空ポンプである。「ポンプ」とは、自然の流れに逆らうような方向に流体や熱を輸送する機械である。たとえば、静止している液体は、高いところから低いところへ（重力で）流れようとするが、揚水ポンプは、低いところにある水に高い圧力を与えて高いところに汲み上げる。熱は、温度が高いところから低いところに流れるが、ヒートポンプは温度の低いところから高いところへ熱を汲み上げる。

気体は圧力の高い方から低い方へと流れようとするが、真空ポンプは、圧力の低い容器の中に残っている気体を大気圧まで圧縮して空気中へ排気する圧縮機であり、気体分子を汲み上げるポンプである。

真空容器の中の気体の圧力は非常に低いため、これをかき集めて大気圧 (101kPa) 以上に圧縮する仕事は非常に効率がよくない。真空度に応じて様々な形式のポンプが使用され、希薄な気体を一度に大気圧まで圧縮するのではなく、圧力に応じて適切なポンプが直列に組み合わせられることもある。

ロータリーポンプ（回転翼型真空ポンプ）、ダイヤフラムポンプ、ルーツ式メカニカルブースターポンプ、ターボ分子ポンプ、油拡散ポンプ、クライオポンプ、ゲッターポンプ（サブリメーションポンプ）、スパッタイオンポンプなどがある。

真空ポンプで汲み出すのは、希薄な気体分子であるから、気体の流れの性質が重要である。

通常の圧力（大気圧以上）の気体の流れは「粘性流」であるが、圧力が低下して気体が希薄になると、分子間の距離が離れるため、その距離と真空容器の壁までの距離との関係が重要になってくる。平均自由行程と真空装置の大きさ（長さ）の関係から、次のクヌーゼン数（Knudsen number）が定義され、流れが区分される。

$$Kn = \frac{\lambda}{L} = \frac{k_B T}{\sqrt{2} \pi \sigma^2 P L}$$

ここで、 λ は平均自由行程、 L は代表長さ、 k_B はボルツマン定数、 T は温度、 σ は分子の直径、 P は圧力である。

クヌーゼン数は、気体が連続体であるかどうかを示す指標であり、クヌーゼン数がい小さい時は連続体、大きい時は不連続となり、およそ 0.2 以下で「連続体」、1 以下では「すべり流れ領域」、1 より大きい時は「自由分子領域」、とみなすことができる。真空工学の一般的な区分として、 $Kn > 0.3$ 分子流、 $0.3 > Kn > 0.01$ 中間流、 $0.01 > Kn$ 粘性流という分類もあるが、流体力学における無次元数、レイノルズ数などと同様、パラメータとして系の代表長さを含むため、値そのものは目安である。

圧力が低下し、クヌーゼン数が大きくなるということは、分子の間のつながりがなくなるということであり、平均自由行程が大きくなり、気体分子と気体分子の衝突よりも、気体分子と壁との衝突が支配的となることを意味している。

真空装置を排気する時は、最初は空気が入っていて、大気圧の状態から排気され、次第に高真空まで圧力が低下するため、真空ポンプは、粘性流から分子流までの流れを取り扱い、最終的には大気圧まで圧縮することになる。一般的にはそれぞれの領域に適した複数のポンプをつないで構成され、その時の圧力に応じて使い分けが行われる。通常は、超高真空用のポンプは、最初は起動せず、他のポンプによって、適した真空度に達してから起動される。

低真空用には、油回転ポンプやドライポンプ、高真空用には、油拡散ポンプやターボ分子ポンプなどが組み合わされる。

なお、最初に平均自由行程の概念を提唱したのは、ルドルフ・クラウジウス（1822～1888年、ドイツ）である。クラウジウスは、気体分子が衝突の前後で運動方向が変化する場合の衝突の特徴的長さを平均自由行程 λ （mean free path）とし、これ

に対応する特徴的時間を平均自由時間 τ で表した (1858 年)。平均自由行程は、気体分子が衝突、散乱するまでの平均距離を表すため、容器の壁の分子への衝突の数を表し、マクロスコピックには、圧力として現れる。分子の運動は、温度、圧力、粘性に依存し平均自由行程もこれらに依存するので、平均自由行程は、気体の種類 (粘性) によって異なる。空気の場合、圧力との関係で平均自由行程をみると、大気圧では、68nm (窒素などの分子の大きさの 100 倍ほど)、低真空では 0.1~100 μm 、中真空では 0.1~100mm、高真空では 10cm~1km、超高真空では 1~10⁵km、極超高真空 (<10⁻¹²Pa) では 10⁵km 以上と長大である。気体分子は、平均自由行程を進む間に平均して 1 回、他の気体分子と衝突するが、高真空で、平均自由行程が km のオーダーになれば、通常の真空容器はこんなに大きくはないため、気体分子のほとんどは他の気体分子に衝突することなく、真空容器の壁と衝突することになる。

初期の気体分子運動論では、分子の直径 d 、平均自由行程 λ 、容器の大きさ L とした時、暗黙のうちに $d \ll \lambda \ll L$ が仮定され、単位体積あたりの気体分子数を n とすると、 $1/L \ll \sqrt{2}n^2d \ll 1/d$ と書け、クヌーセン数はゼロとみなせる。高真空状態で分子の数が少なくなると、この関係が成り立たなくなり、通常の気体分子運動論や流体力学の取り扱いができなくなるため、その条件を判定するためにクヌーセン数が定義された。

クヌーセン数を考案したマルティン・クヌーセン (1871~1949 年、デンマーク) は、海水の塩分を定義し、海水の物性、海洋力学、生物の酸素消費量などの研究を行った「近代海洋科学の祖」である。一方で、物理学の研究も行い、希薄気体の流れの研究から独自の真空計を考案し、平均自由行程の概念からクヌーセン数を提案した。

「低真空」は、真空乾燥、食品包装など、中真空は、スパッタリング、CVD、放電管、真空断熱など、「高真空」は、蒸着、電子顕微鏡など、超高真空は加速器、表面分析、分子ビーム・エピタキシなどに利用される。

真空装置の圧力計は、真空計とも呼ばれる。高圧を測定する圧力計と真空計では測定の仕組みが異なるものが多く、測定範囲に応じた様々な種類の真

表 2-5-3 真空計 (圧力計)

種類	圧力範囲	測定の仕組み
ペニング式	1~10 ⁻⁵ Pa	冷陰極管
逆マグネトロン式	10 ⁻⁴ ~10 ⁻¹² Pa	冷陰極管
ヘアード・アルパード真空計 (BA ゲージ)	10 ⁻² ~10 ⁻⁸ Pa	電離真空計 (熱陰極管)
ピラニ式	0.1~2000Pa	気体の熱伝導率 (白金の抵抗)
マクラウド式	~0.001Pa	水銀液柱

空計が開発されている。一部を表 2-3-2 に示す。

宇宙空間であってもエネルギーが存在し、ところどころには物質も存在するため、本当に真空と言える場所はどこにも存在しないが、地球から少し離れると地球の表面に比べて極めて圧力（大気圧）が低い状態となり、工学的には超高真空に近い状態になる。

宇宙機、人工衛星や人工惑星などは、低重力、極低圧力の状態で使用されることになるが、コスト的に宇宙での試運転は行われず、いきなり本番の運用が行われる。NASA アポロ計画では、有人月面探査という前例のない目標があったため、宇宙での試運転が何度も行われ、アポロ 10 号までは月の上空までは到達したものの、本番は 11 号からという慎重な開発が行われたが、通常の宇宙開発は試運転なしのいきなり本番である。試しに打ち上げた人工衛星がうまく作動したら次が本番というのではなく、高価な人工衛星が次々と本番に投入される。

そこで、このような環境で機器類が正常に機能することを確認するために、予め地上で宇宙と同じような環境を作り出してテストを行うという試験方法がある。スペースチェンバーという環境試験設備（地上で疑似的な宇宙空間を再現する実験設備。）が建設されている。さすがに大規模な低重力の試験を地上で行うことはできないが、極低圧の環境を地上で再現している。（低重力の試験は、これとは別に自由落下方式で短時間だけ行える設備がある）

スペースチェンバーは、人工衛星や部品などを格納するため、比較的大きな空間を高真空に維持し、宇宙空間を模擬した温度や輻射の環境を作らなければならないため、その設計・製作には、特殊な技術が必要である。真空層の形成、真空の維持、真空排気システム、断熱、輻射の抑制、冷却、真空度の測定、脱ガスを抑える材料、塗装など、産業ガスメーカーが持つ特別な技術・ノウハウが詰め込まれた製品である。なお、スペース・チェンバーの製造メーカーである、大陽日酸（株）の商品名は「スペースシミュレーションチェンバー」となっている。

また、デュワー瓶や金属製の断熱魔法瓶、液体窒素の貯槽の断熱などに用いられる真空技術は、気体の熱伝導や熱伝達を低くする目的で使用されている。現在、飲料用の魔法瓶のほとんどが金属性の真空断熱層を持つ構造のものになっているが、産業ガスメーカーの持つ真空断熱層の形成技術、真空度の維持技術、金属の加工技術が利用されている。

深冷空気分離装置本体は、常圧断熱方式（窒素ガスシール）が多いが、液体窒素や液体酸素の貯蔵や輸送には、真空断熱技術が用いられている。