

ということが言え<sup>8</sup>，(ii) はマクロ系については幻想に過ぎないことが解った．つまり，もしも我々が量子論だけしか知らないとしたら，少数自由度の系が，現実には存在しないような単純化された理論モデルの多自由度系についてしか予言能力をもたないのだ．言い換えれば，たとえミクロ系についての基本法則を知ったところでそれで自然を理解できるほど甘くはないということである．

#### 補足：スケールの重要性

ミクロ系とかマクロ系については，初学者は，この節の冒頭に書いた程度の理解で読み進んで良い．以下は，もっときちんと理解したい人のための説明である．ある物理現象において生じるエネルギー変化などの特徴的な大きさの程度をスケール (scale) と言う．例えば原子内の電子状態が関わる現象は，長さで  $10^{-10}\text{m}$  程度，エネルギーで  $10^{-19}\text{J}$  程度のスケールを持つ．現代の物理学では，あらゆる理論は適当なスケールの範囲内でのみ有効な理論，即ち有効理論 (effective theory) だと考えられている．従って，まず自分が扱いたい現象のスケールを決め，それに応じた適切な理論で記述することになる．そのスケールにおいて，近似的に物質の基本構成要素と見なせるものがミクロ系である．従って，自分が扱うスケールを変えれば，同じ系がミクロな系になったりマクロな系になったりすることもある．また，スケールを決めるということは，必然的に有効桁数を有限桁で打ち切ることにもなっている．例えば， $10^{-10}\text{m}$  程度のスケールの現象を見るつもりなのに 50 桁まで計算してしまったり， $10^{-60}\text{m}$  程度の現象まで見るようになってしまい，自分が決めたスケールの外に出てしまうからだ．自然現象は見るスケールを変えるとまったく違うように見える．それぞれのスケールで自然がどのように見えるかを明らかにするのが物理学であると言っても過言ではない．

## 1.2 熱力学の意義

熱力学が作られた動機や歴史的経緯は膨大な物語になるし，真の歴史はよく分からない部分もある．そこで，そういうことに興味がある人は，巻末の参考文献 [0] などを参照して欲しい．それらを読むと，「なんだ，熱力学というのは，人間が無知だった時代の経験則か」と思ってしまう人もいるだろう．確かに，熱力学の成立の経緯はそれに近いかも知れないが，現代的な物理学の視点から熱力学の体系を見直してみると，まことに驚くべき理論体系であることに気付く<sup>9</sup>（その一端は 16 章で触れる）．そこで，熱力学の意義の主要な点を述べておく．

まず第一に，本質だけを抽出することに見事に成功した理論体系だということである．前節の (ii) が幻想であるからには，マクロ系を扱うためには，何か別のアプローチを考える必要がある．一番望ましいのは，その複雑な運動の中から本質だけを抽出した，マクロ系専用の理論体系を構築する事である．その理論は， $10^{24}$  程度の莫大な自由度をもつマクロ系を，ごく少数の変数だけで記述してしまうものであってほしい．もちろん，変数が少ないのだから，その系の全てを記述するのは不可能だが，本質的な部分だけは記述できてしまうような理論，ということである．果たして，そんな都合の良い理論ができるのだろうか？幸い，2.2 節，3.2 節で説明する「平衡状態」と呼ばれる状態達と，その間の遷移 (transition)（ピストンを押すなどの操作をしたときにどんな平衡状態からどんな平衡状態へと移り変わるか）に関しては，そのような理論が構築できたのである．それが熱力学である．つまり，マクロ系の理論を構築する模範的成功例が熱力学なのである．

第二に，マクロ系がどこまで自由に操作できるかという操作限界（ほぼ不可逆性 (irreversibility) と等価）を簡単な数式で見事に記述した理論体系だということである．この限界は，決して，人間という生物種の能力の限界に由来するものではなく，自然界の基本法則そのものに由来するものである．後に説明する「熱力学第二法則」が，この限界を記述する核心である．

第三に，たとえ前節の (i) もまた幻想だったとしても，熱力学はびくともしない（よく自然を記述する）．実際，量子論が登場してミクロな物理学は大変革を受けたが，そのときでも熱力学は全く変更を受けなかった．それほどまでに堅牢な理論がマクロレベルでは存在しているということは，それ自体驚きであり，深い意味と意義を持っている．

物理学の基礎的な理論を，上記の観点からごく大ざっぱに整理したものを表 1.1 に掲げる．第 2 列にある（平衡系の）統計力学 (statistical mechanics) は，ミクロ系の理論から出発して，マクロ系で重要になる要素だけを抽出してゆく，という作業をなんらかの形で定式化することにより，ミクロとマクロを繋ごうという理論である．具体的には，次のような内容である：

- (a) マクロ系の理論である熱力学に現れる「状態方程式」(後で説明する)の形や，パラメーターの値を，ミクロ系

<sup>8</sup> これらは，いわゆる「エルゴード性」「混合性」「カオス」などと深く関係していて，統計力学が現実の系で成立していることの理由だと考えられている．

<sup>9</sup> このことを強調した物理学者は，アインシュタインや朝永振一郎など枚挙にいとまがない．最近では，大野克嗣らが啓蒙している．

の理論から、運動方程式を解くことなしに計算する手法を与える。

ただし、いくら運動方程式を解く必要はないとは言っても、任意の系に対してこの計算を遂行するのは大変難しい。

- (b) マクロ系の理論（熱力学や流体力学）とミクロ系の理論が、どのように繋がっているのか、どうして・どうやって整合しているのかを、明らかにしようとする。

ただし、まだこれには十分には成功していない<sup>10</sup>。それでも、非常に教訓的なことが示唆されている：運動方程式を全て解くのが原理的に不可能だという、著しい困難（に見えたこと）が、実は逆に、マクロ系をほんの少数の変数だけで記述することを可能にしているらしい。

- (c) 非平衡系の熱力学など、まだ完成していないマクロ系の理論を、ミクロ系の法則の知識を助けにして、なんとか導き出そうとする。

ただし、まだこれにも成功していない。

これらのただし書きの部分を読むと、なにやら頼りなく思うかもしれない。しかし、ひとたび (a) の手法を正しいと認めてしまえば、統計力学はきわめて強力で有用である。そもそも、統計力学なくしては、量子論も（1.1 節で述べたように）マクロ系に対しては予言能力を持たないという貧弱な理論になってしまうのである。その強力な統計力学もまた、熱力学がないと、予言能力の乏しい貧弱な理論になってしまう。たとえば、平衡状態間の遷移については（今のところ）熱力学に頼るしかないのだから、熱力学がなければ、10.4 節で導くような熱機関の最大効率すら予言できない。

このように、熱力学は、物理学の根幹を成す理論のひとつなのである。その一方で、熱力学も、統計力学や量子論がないと、まだ実験が行われたことのない物質の性質を予言することは不可能だし、実験されている物質について熱力学の議論を展開する際にも方針が立てづらい。つまり、図 1.1 に示すように、熱力学・統計力学・量子論（と時空の構造に関する相対論）は、お互いに依存しあい関係しあっている理論体系であり、いずれを欠いても現代の物理は立ち行かないのである。これについては、最後の 16 章でもう一度触れるであろう。

ミクロ系の理論	ミクロとマクロを繋ぐ理論	マクロ系の平衡状態とその間の遷移の理論	マクロ系の非平衡状態の理論
力学，真空中の電磁気学 量子力学，場の量子論 ⋮	平衡系の統計力学 非平衡系の統計力学 (未)	平衡系の熱力学	流体力学 物質中の電磁気学 非平衡系の熱力学 (未)

表 1.1: 物理の基礎的な理論の大ざっぱな分類。(未) と記したものは、まだ限られた場合についてしか定式化ができていない。

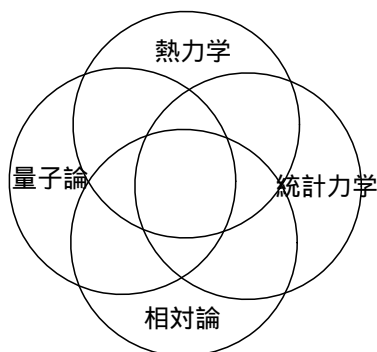


図 1.1: 熱力学・統計力学・量子論・相対論は、お互いに依存しあい関係しあって、現代の物理学の根幹を成している。

<sup>10</sup> 「成功した」と自称する論文はくりかえし現れるが、いつも、広く認められるものにはならず終わる。