

テンソルネットワークの基礎と応用

統計物理・量子情報・機械学習

西野友年著, B5判, 216頁, 本体2300円, サイエンス社



私の父は建築と車の構造解析が専門だったから「テンソルって要素が多次元あってそうそうわからないんだぞ」というようなことを聞いて育った。そのためか大学の一般相対論でテンソルに遭遇した際、面倒なものがきたと思ったものだ。それがさらに組み合わせさせた「テンソルネットワーク」は、極度に抽象的で掴みどころがない概念である。使ってみないとわからない、使っても本当のところはわかっているのか、構造やルールは一見シンプルそのものなのにその表現できる空間は広い、それでいて本当に目的物を正しく表現できるのかどうか、肝心なところがはっきりしない。そんな魅力的ながらも苦しみの多いこのオブジェクトを実に多角的な切り口から、しかも一から最先端まで一気に紹介してくれるのが本書である。典型的なレクチャーだと最も単純な行列積状態 (MPS) とは... から始まって特異値分解やらエンタングルメントやらとなるところを、西野さんはあみだくじからはじめて統計力学ではおなじみの転送行列という概念に一気に入っていく。この独自の筋書きが、テンソルネットの性質やネットワーク間の関係性を知るうえで本質的な役割を果たすことに改めて感慨を覚えるのが第9章である。この段に至ってセグエンツのようにちりばめられていた欠片がまとまって一連のテンソルがイジング模型の転送行列から Kramers-Wannier 近似, Baxter の変分形式, Fannes らの MPS, そして White の DMRG からモダンなテンソルネットワーク計算の世界へと、偶然が積もり積もって至る歴史的な筋道が明かされる。

「西野さん」を知ったのは大学院時代に当時はまだユーザが少なく画期的な数値計算法だった DMRG をやってみようと思った頃だった。西野さんは DMRG をいち早く日本に紹介した立役者であり、角転送行列繰込み群というテンソルネットワークの基礎的な仕事を行ったゴッドファーザーのようなお人である。その後も、学会の予稿のグラフに書かれた「宿敵 量子モンテカルロ」の一言だったり、西野さんへの興味は尽きないところだったが、やっと実物にお会いしたのは2008年、基研の研究会で“双曲面上で時間発展をした

とき波動関数を不変に保つようなハミルトニアンはどう空間的に曲がっているべきか?” という設定を曼荼羅を見せながらとうとうと語っておられたときである。今では MERA で表現されると指摘された、反ドジッター宇宙の曲がった時空に触発されたのかもしれないとも思えるのだが、当時は一体全体どうしてハミルトニアンが曲がらなくちゃいけないのか (注: 我々物性物理研究者の多くはハミルトニアンが一様で不変の世界に住んでいる), 西野さんの頭中に広がる世界はどうなっているのだろう, そんな衝撃を受けた。そして今に至るまで彼との悟ったようでいて野心的な含蓄ある会話を楽しんでいる。本書の第1章から第9章に至る流れを読んでも、この一見飛躍に満ちて突き抜けたような彼の発想が、過去の幾つもの考察や物理の広い事象に跨る理解を基に積み上げられて出てきたのであろうということがなんとなくしにわかってくる。

テンソルネットワークを理解するにはテンソル図形が射影や縮約で変幻自在に形を変えていく様を即座に読み取らなくてはいけない。それには手を動かしての慣れも必須である。本書はこれらの操作をうまく行えばテンソルの情報が失われない仕組みが自然とわかる構成になっていると同時に MPS を「動く窓」にしたらずっと時間発展でできてしまうなどといった事細かなテクニックや豆知識が仕込まれている。第10章からはさらなる研究の展開が一望できる。なぜテンソルネットワークが今に至って統計力学や物性論のみならず素粒子・宇宙、量子情報や機械学習にいたる理論に幅広く必要とされているかが理解できるだろう。注意しておくが最後のほうは専門家が喜ぶマニアックな内容全開である。これでこそ西野さんだ。この本が一冊あれば、計算が面倒で不確実なこともたくさんあって実際やってみると理論通りにはいかないけれども多くの物理の含蓄が学べるテンソルネットをやってみよう、という若い人が出てきてくれる、と期待したい。あとは本の表紙さえ赤く染まっていたら言うことがないのだが...

堀田 知佐 (東京大学大学院総合文化研究科)