

特集／物理諸分野における場の量子論

巻頭言

量子場：過去，現在，未来

米谷 民明

1. 量子場の起源と発展

物理学の基本概念としての量子場，すなわち，量子力学における「場」の概念は，量子力学の誕生（1925年）に伴う必然的な帰結として生まれた。量子化された場として定式化された電磁場の理論は，ディラックの1927年の論文「輻射の放出と吸収の理論」に始まる。電磁場を波数ベクトルと偏極で指定される無数の調和振動子の系として取り扱い，荷電粒子との相互作用によって引き起こされる光子の生成（放出）と消滅（吸収）を表す演算子として電磁場を定式化したのである。ハイゼンベルクとパウリは，さらに一般化し，古典的正準形式に従う任意の場を量子化する手続きを確立した（1929年）。これにより，量子の世界の最も際立った特徴である『波と粒子の2重性』についての現在の標準的な解釈の基礎ができ上がり，あらゆる粒子は，その粒子の時空点 x^μ における生成および消滅という局所的作用を表す量子場 $\phi(x^\mu)$ と対応するという描像が確立した。現在，普通に『場の量子論』と言うとこの理論を指し，その入門的部分は学部専門課程や大学院初年級の標準科目の一つになっている。それだけでなく，以下に述べる進展の成果に基づき，量子場の理論は量子力学を用いて多自由度系を扱う普遍的な方法論的枠組み，あるいは道具として，物理学の幅広い分野における標準言語に成長している。

さて，波と粒子の2重性の観点から重要なこと

は，『場』という時空の各点で独立な自由度を持ち，時空全体に広がったものとして定義される概念（通常の「波」に対応）と，『粒子』という時空の一点ごとにのみ意味がある概念との両立が成し遂げられていることである。この考え方は，量子力学による状態概念の変革によって初めて可能になった。古典的な状態は，物理量の値を定めることによって指定される。量子力学では，物理量は量子力学的な状態に対して何らかの作用を引き起こす演算操作で表される。この意味で，量子場は量子力学的状態から粒子を消滅させ生成させる作用を引き起こす^{*1)}。実験は結局，この種の作用が組み合わせられて起こる状態の応答・変化を測定することに他ならない。状態はヒルベルト空間と呼ばれる状態の成す抽象的（無限次元）空間に属する一種のベクトルとして表され，測定は一般にこのベクトルに対する線形演算子（あるいは作用素）に対応する。線形性により一般に状態が重ね合わさるといふ，古典状態ではあり得ない現象が常につきまとうが，状態は観測量を確率的に定めると解釈することにより矛盾のない体系が可能になる。たとえば，状態が直交する2個の状態ベクトルの線形

*1) 歴史的コメントの一つ：アインシュタインの光量子仮説（1905年）に対しては，当時，プランクも含め大方の物理学者が厳しく反対した。その中でアインシュタインはザルツブルクにおける学会講演（1909年）で「理論物理学の次の段階では，光の理論を粒子放出と波動の融合されたようなものとして理解できるようになるだろうというのが私の見解です」と述べている。量子場はまさにこの「融合」を成し遂げたものに違いない。しかし，皮肉にも彼は量子力学の状態概念を受け入れず，量子場の概念には終生共感を示さなかった。