

量子と宇宙

細谷暁夫

東京工業大学 理工学研究科 基礎物理学専攻

物理学の中で宇宙論は、元素の存在比や銀河の起源などを問題にして、存在論的な分野と見なされる。一方、量子力学の方は20世紀の初頭に建設された当時は認識論的な問題がボーア、シュレーディンガー、ハイゼンベルグ等により論じられたにも関わらず、力学系を特徴づけるハミルトニアンを同定するという実験、理論的研究が主流となり、むしろ存在論的な研究に重心が移った。代表格が湯川中間子論をはじめとする素粒子物理学である。一方、20世紀の後半になるとレーザーと半導体技術など量子力学を応用したテクノロジーが飛躍的に進歩し、量子力学の認識論的な問題を実証的に研究する事が可能になった。同時にそれはIT技術を生み出し情報化社会を実現し、人々は情報というすぐれて認識論的な対象になれ親しむようになり、物理学の中に情報の概念を積極的に取り込む社会的下地が出来た。量子情報科学の誕生である。

一方、宇宙論の方も観測による精密化が進み、極めて初期の宇宙の量子揺らぎまでが「観測的宇宙論」の射程に入って来た。直接的にはそれが宇宙背景放射の非一様性をもたらし、遠くは銀河の起源となる。その量子揺らぎの時期と時空自体が量子的に揺らく量子重力の時期は定量的には「指呼の間」にある。そこで、我々が観測しているものと初期の宇宙で起きているものとの関係は非自明になる。その観点から量子力学を根本から捉え直そうとする機運が100年を経て最近復活して来た。

実は、量子力学の学部の講義の始めの方に学ぶ事を批判的に吟味して行く事の中にその重要なヒントがある。まず、量子力学の基本的な前提を4項目掲げる。これは、今のところ他のことから証明できることではなく、仮定せざるを得ないものである。

(1) 重ね合わせの原理

状態 $|0\rangle$ と状態 $|1\rangle$ が物理的に実現可能な状態ならば、その重ね合わせ

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle \quad (\alpha, \beta \text{ は } |\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1 \text{ のような複素数}) \quad (1)$$

も物理的に可能な状態である。

(2) シュレーディンガー方程式

状態の時間発展は物質の場合にはシュレーディンガー方程式：

$$i\hbar \frac{\partial |\psi(t)\rangle}{\partial t} = H|\psi(t)\rangle \quad (2)$$

に従う。ここに、 H は物理系を与えれば決まるハミルトニアンと呼ばれる物理量である。また、電磁波の場合にはマクスウェル方程式がこれに代わる。これらの方程式は時間空間の中では、波動の伝播を記述する。

(3) 波束の収縮と確率解釈

重ね合わせ状態：

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle \quad (3)$$

にある時に、状態を測定すると状態は $|0\rangle$ か $|1\rangle$ のどちらかに変化し、その確率はそれぞれ係数の $|\alpha|^2$ 、 $|\beta|^2$ に比例する。 $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$ と全体の大きさを 1 に規格化しておけば、それぞれ確率になる。

(4) 多粒子状態

2 粒子の量子状態 $|\psi(1, 2)\rangle$ は 1 粒子状態 2 つ、 $|\psi_1\rangle, |\psi_1'\rangle \in \mathcal{H}_1$ と $|\psi_2\rangle, |\psi_2'\rangle \in \mathcal{H}_2$ のテンソル積（積の線形結合）になる。例えば、

$$|\psi(1, 2)\rangle = \sqrt{0.9}|\psi_1\rangle \otimes |\psi_2\rangle + \sqrt{0.1}|\psi_1'\rangle \otimes |\psi_2'\rangle \in \mathcal{H}_1 \otimes \mathcal{H}_2 \quad (4)$$

量子情報科学の重要な概念であるエンタングルメントは量子状態のテンソル積構造に起因する。

はじめの 2 つの項目は物質（光）の波動性に関わるもので、3 つ目の「波束の収縮と確率解釈」が粒子性を記述する。ヤングの実験の例では、入射光を弱くして光子が一個だけが出るようにするとスクリーンの写真乾板の一点が感光するのが粒子性である。また、はじめの 2 つの波動性の項目は言わば想定上のものであり、3 つ目が現実世界との関係をあたえる 2 元論的構成になっている。量子力学における波動と粒子の 2 重性とはこの事を言うのである。

講演ではこれらの「公理」を批判的に吟味して、量子宇宙論の問題点を明らかにしたいと思う。重ね合わせの原理については、朝永振一郎著の「光子の裁判」[1]に沿って考察し、簡単な演技実験も行う。波束の収縮については、物理量の値が測定後にはじめて決まることの不自然さを述べて、宇宙論において深刻な問題が生じる事を指摘する。確率解釈については、古来からある確率の意味についての議論に立ち戻り、私自身に最近の研究にも触れる。概観するには佐藤文隆氏の本が読み易い [2]。¹

参考文献

- [1] 朝永振一郎, 「量子力学的世界像」(みすず書房)
- [2] 佐藤文隆, 「アインシュタインの反乱と量子コンピュータ」(京都大学学術出版会)

¹ いわゆる「多世界解釈」は状態ベクトルを実体としてこの 2 元論を解消する。