

1.14 量子力学と観測・測定

ここでは、以下に示した「測定1」～「測定6」によって、ミクロな系で物理量を測定することについて考える（図1.6を参照せよ）。

測定1 まずはじめに、系が任意の波動関数 $\varphi(\mathbf{r})$ で表される状態にあるとしよう。この状態でエネルギーを測定すると、エネルギー固有値 E_1, E_2, \dots のどれかが測定される。エネルギー固有状態を $\psi_i(\mathbf{r})$ とすると、 $\{\psi_i(\mathbf{r})\}$ は完全系をなすから $\varphi(\mathbf{r})$ を $\{\psi_i(\mathbf{r})\}$ で展開できる。

$$\varphi(\mathbf{r}) = \sum_i c_i \psi_i(\mathbf{r}) \quad (1.78)$$

この状態 $\varphi(\mathbf{r})$ でエネルギーを測定し、測定値が E_n であるとすれば、それは、測定のとて系が n 番目のエネルギー固有状態 $\psi_n(\mathbf{r})$ にあることを意味する。すなわち、系は測定という操作により状態 $\varphi(\mathbf{r})$ から状態 $\psi_n(\mathbf{r})$ へ「とび移った」ことになる。^{アイラック}Dirac はこれを次のように表現した [16]。

- 測定をすると、いつも系は測定された力学変数の1つの固有状態にとび移る。

測定2 いま、系が $\psi_n(\mathbf{r})$ の状態にあるのだから、その直後に（または、他の測定をはさまないかぎり）もう一度エネルギーの測定を繰り返せば、同じエネルギー E_n が得られ、系は同じ状態 $\psi_n(\mathbf{r})$ のままである。

次に、状態 $\psi_n(\mathbf{r})$ にある系で、エネルギーではない物理量を測定することを考えよう。これは2通りに分けて考えなければならない。それは、測定する物理量の演算子がハミルトニアンと可換である場合 \hat{F} と、可換でない場合 \hat{G} についてである。

測定3 まずは、ハミルトニアン \hat{H} と可換な演算子 \hat{F} で表される物理量 F を測定する場合を考えよう。この場合、 \hat{H} と \hat{F} は固有関数が共通であるから、固有方程式、

$$\hat{F}\psi_n(\mathbf{r}) = f_n\psi_n(\mathbf{r}) \quad (1.79)$$

の固有値 f_n が測定され、状態は $\psi_n(\mathbf{r})$ のままである。

測定4 状態が $\psi_n(\mathbf{r})$ のままであるから、これの直後に再度エネルギーを測定すると、 E_n が測定値として得られる。

測定5 次に、ハミルトニアン \hat{H} と可換でない演算子 \hat{G} で表される物理量 G を測定することを考えよう。 G を測定すれば、 \hat{G} の固有値のいずれかを測定値として得る。ただし、 \hat{G} はハミルトニアンと可換でないから、状態が $\psi_n(\mathbf{r})$ のままであるとは期待できない。 \hat{G} の固有方程式を、

$$\hat{G}\phi_i(\mathbf{r}) = g_i\phi_i(\mathbf{r}) \quad \text{ただし、} i = 1, 2, \dots \quad (1.80)$$

と書けば、この固有関数系 $\{\phi_i(\mathbf{r})\}$ も完全系をなすから、測定対象であるいまの状態 $\psi_n(\mathbf{r})$ を $\{\phi_i(\mathbf{r})\}$ で展開できる。

$$\psi_n(\mathbf{r}) = \sum_i c_i \phi_i(\mathbf{r}) \quad (1.81)$$

この状態で G を測定すれば、固有値 g_m が $|c_m|^2$ の確率で測定され、状態は $\phi_m(\mathbf{r})$ にとび移る。

測定6 ここで、もう一度エネルギーを測定すれば、状態 $\phi_m(\mathbf{r})$ を $\{\psi_i(\mathbf{r})\}$ で展開したときの係数の自乗 $|c_m|^2$ の確率で E_m が測定され、状態は $\psi_m(\mathbf{r})$ にとび移る。このときの測定値 E_m は、はじめに測定した E_n とは異なるのが普通である。これは、「物理量 G の測定」が系の状態に関する以前の情報を完全に破壊したと考えられる。

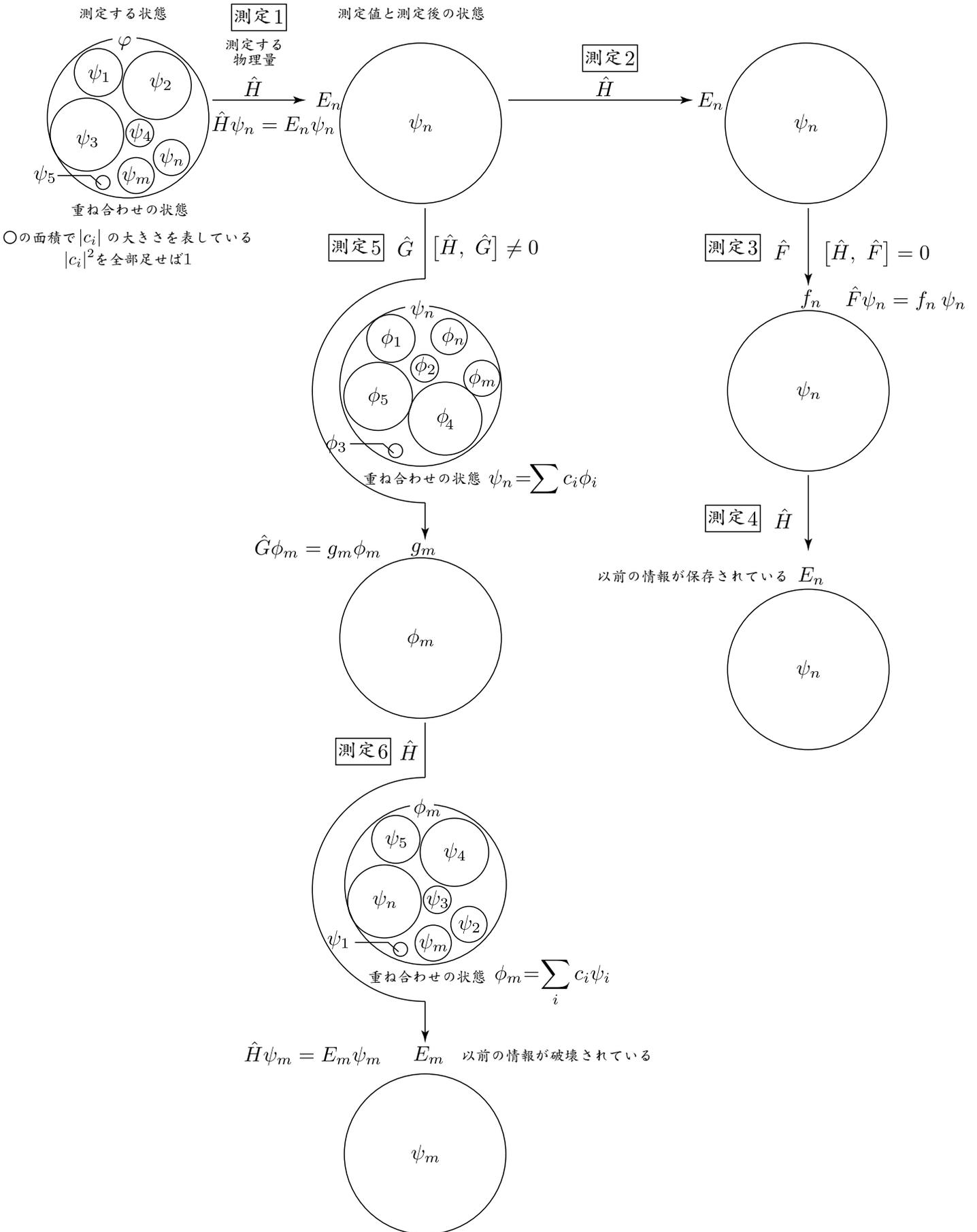


図 1.6 量子力学と観測・測定：エネルギーとそれ以外の2つの物理量 F と G を考え、 $[\hat{H}, \hat{F}] = 0$ 、 $[\hat{H}, \hat{G}] \neq 0$ とする (\hat{H} はハミルトニアン)。エネルギーと F のように、演算子が可換な物理量を測定しつつある限り、系はその状態を変えない。しかし、エネルギーと G のように、演算子が可換でない物理量を測定すると系はその状態を変えてしまう。ここでは、「測定5」により状態 ψ_n が状態 ϕ_m に変わっている。詳細は 1.14 節を参照せよ。