

Everett 解釈成立における情報概念

森田 紘平*

The role of the concept of the information
in the development of Everett interpretation

Kohei MORITA

abstract

The Many Worlds Interpretation (hereafter MWI) is one of the most famous interpretation of quantum mechanics. MWI is based on Hugh Everett III's thesis written in 1957, but his own ideas are not MWI itself. Everett's interpretation is based on a universal wave function, a relative state formulation, states branching (splitting), and a correlation structure. Some of these ideas are similar to those used in MWI. But the role and background of correlation structure is vague in Everett (1957). By analyzing some hand-written papers and his draft of the dissertation, we can find roles and background of the correlation-structure. First his word "correlation" was defined by Shannon's information theory in his draft and some hand-written papers. In his draft, a correlation between a state and another state and between an operator and another one was defined. His trial to connect quantum mechanics with the information theory can be seen in a hand-written paper. Second, in Everett (1957) the correlation is defined only in observation processes. On the contrary, in his earlier works, the correlation plays some roles also in measurement processes, in particular time evolution of states interacting with another state. With this idea of correlations Everett proposed the quantum mechanics without any superfluous hypothesis and his idea of correlation has a realistic character.

§1 はじめに

量子力学の哲学における中心的な話題の一つに解釈問題と呼ばれる問題がある。この問題に対する解答を、本論では量子力学において射影公準を認めるか否か、さらに、射影公準を認めない場合に量子力学の理論が完全である¹か否かという問いによって分類できるとしよう。すると、射影公準を認める立場が標準解釈に対応し、射影公準を

* 京都大学大学院文学研究科 k.morita.hand4@gmail.com

¹ ここでは、簡単のために隠れた変数が存在すればその理論を不完全であると考えたとしよう。

認めず量子力学の理論が不完全であるとする立場が隠れた変数解釈に対応する。最後の可能性である射影公準を認めず量子力学の理論が完全であるとする立場に対応するのが多世界解釈と呼ばれるアイデアである。これによると、この世界は観測の度に分裂するようなものとされ、その提案者として Hugh Everett III (1930–1982)² があげられることもある。しかし、少なくとも専門家の間ではよく知られているように、いわゆる多世界解釈は、Everett ではなく彼のアイデアに影響を受けた Bryce DeWitt によって構築された (DeWitt 1970) ものである。確かに、Everett は分岐という概念を用いているが、「世界が分岐する」といった主張はしていない。ただし、Everett は実際に射影公準を否定しており、彼の主張は隠れた変数を仮定するものではない。

Everett 自身の主張の特徴は相対状態 *relative state*、状態の分岐 *branch*、普遍的波動関数 *universal wave function*、相互関係構造 *correlation structure* が挙げられるが、後述するので、ここでは簡単にその特徴を整理しておくに留める。普遍的波動関数というのは、あらゆる対象系が波動関数によって記述されるという考え方であり、相対状態とは、複合系の状態を相対的に記述することである。さらに、Everett は射影公準を否定することから重ね合わせが維持されるが、重ね合わせという量子力学的な特徴と経験的な側面を対応させる概念として状態の分岐と相互関係構造が導入されている。

2007 年に至るまで Everett に関する歴史的な研究はなされてこなかったといっている。確かに、彼のアイデアを汲んで量子力学の解釈問題に取り組む研究者がいなかったわけではないが³、歴史的な研究とは呼べない。Everett の主張については、Albert (1992) や Bub (1999) といった、量子力学の哲学における伝統的なテキストにおいても扱われているが、やはり、これらのテキストでも Everett 自身の解釈を厳密に検討しているわけではない。しかし、2007 年に Peter Byrne と Jeffrey Barrett によって、これまで未公開だった Everett の草稿が公開され、歴史的な研究が可能になった。公開された史料は、オンラインアーカイブ⁴ で確認でき、さらに、史料のうちの一

² Everett は、1949 年 Catholic 大学に入学すると化学工学の学位を取得した。1953 年の秋には Princeton 大学の大学院に進学した。そこで当初は熱力学や電磁気学を学び、加えて意思決定理論の研究会にも参加していた。1954 年に量子力学の授業を受けた後、専門を量子力学に移し、当時の指導教官は物理学者の John Wheeler であった。1956 年から Wepon Systems Evaluation Group (WESG) で兵役逃れのために働いていたが、継続的に働き続けるためには博士の学位が必要であったこともあり、1957 年には博士論文を提出した。その後、Everett はアカデミックなキャリアからは身を引き、研究会に参加することはあっても物理学の論文を出すことはなかった。

³ Saunders (1995) や Wallace (2002, 2003) に代表される Oxford 学派は Everett 自身のアイデアに則って、解釈問題を扱っている。

⁴ <http://ucispace.lib.uci.edu/handle/10575/1060>

部を整理したものが Barrett and Byrne (2012) として刊行されている。一方で、このような史料が公開されたにもかかわらず、Everett 自身の解釈は十分に検討されていない。例えば、Wallace (2013) はいわゆる Everett 解釈にまつわる現代的な議論を論じているが、Everett 自身の解釈は扱っていない。史料を踏まえたうえで Everett 自身の解釈に言及している研究としては、Barett (2011)、Bever (2011) が挙げられる⁵が、これらは十分に Everett 自身の解釈を分析しているとは言えず、特に本論で扱う相互関係の役割については不問に付したままである。

Everett の解釈を扱う時に参照されるのは Everett (1957) であることが多いが、Everett (1957) には曖昧な記述があり、中でも相互関係という概念については何の説明もなく導入されている。しかし、この概念は史料を分析することで、1955 年から一貫した量子力学と情報理論を関連づけようとする Everett の試みの一部と位置付けることができる。そこで、本論では幾つかの論考を歴史的に分析し、これによって、相互関係がどのように用いられ、導入されてきたかを明らかにする。具体的には、Barrett and Byrne (2012) と上述のオンラインアーカイブに基づき、1955 年から 1957 年までの 5 つの史料を分析する。本論で扱う史料は、Everett が自身のアイディアを成立させる過程を追う上で重要な論考である。Everett (1955a) は彼が量子力学へと関心を移した最初期の論考であり、Everett (1955b) では情報理論と量子力学を明確に関連付けている。さらに、Everett (1955c) には、分岐という Everett 独自の概念の萌芽的なアイディアを見て取ることができる。Everett (1956) は博士論文の草稿⁶であり、これをもとに作成された博士論文をもとに出版されたのが Everett (1957) である⁷。した

⁵ Byrne (2010a) と Byrne (2010b) も同様に史料を踏まえた研究になっているが、どちらも Everett の解釈を扱ったものではない。Byrne (2010a) は Everett の伝記であり、Byrne (2010b) は Wheeler との関係进行调查したものである。これら以外にも 2007 年公開の史料を参照している文献もあるものの、Everett 自身の解釈について分析していないものが多い。例えば、Conroy (2012) は自身の量子力学解釈(相対事実解釈)を提案するために、きっかけとして使っているにすぎない。

⁶ 56 年 1 月に執筆された博士論文草稿のタイトルは“Quantum Mechanics by the Method of Universal Wave Function”である。ここで参照する Everett (1956) は Barrett と Byrne によって、この 56 年の草稿をリライトしたものである。ただしタイトルは Everett (1973) と同じになっている。Everett (1956) と Everett (1973) に内容的に大きな違いはないが、Everett (1973) を出版するに当たり修正が入ったことが分かっているので、ここでは主に 1956 年に書かれたものを編纂した Everett (1956) を扱う。

⁷ 博士論文と Everett (1957) はほぼ同内容ながら、顕わに異なる点として、Everett (1957) には付け足された注がある。これは、DeWitt とのやり取りが反映されたものである。博士論文執筆後に、DeWitt ら多くの物理学者に彼の論文は送られており、その中で DeWitt ともやり取りをしており、そこでの議論が踏まえられている。この点に関しては、Barrett and Byrne (2012) や Conroy (2012) でも指摘されている。

表1 本論で扱う史料

出版年	タイトル
1955a	Subject versus objective probability
1955b	Quantitative measure of correlation
1955c	Probability in wave mechanics
1956	Quantum mechanics by the method of the universal wave function (LT)
1957	'Relative state' formulation of quantum mechanics (ST)

がって、1956年の論文の内容を見ていくことが、1957年に書かれた論文の主張を明らかにするために非常に重要である。本論では、特に情報理論と相互関係概念に注目し、これらの史料を分析しよう。本論で扱う史料は表1の通りである。

まず、本論では§2でEverett (1957) (Short Thesis と呼ばれ、STと略される。以下ST) を分析し、STにおいて相互関係があいまいなままであることを指摘しよう。さらに§3では、STの元となった1956年の博士論文草稿Everett (1956) (Long Thesis と呼ばれLTと略される。以下LT) を分析する。特に、STとの関係を踏まえ、情報理論が量子力学と結び付けられている点に注目して相互関係の役割を指摘する。§4では1955年の三つの論考を分析しよう。§5ではこれらの史料の分析を踏まえた際に、相互関係について明らかになったことを考察し、§6を結論とする。

§2 相対状態に基づく Everett の解釈 (1957年: ST)

この節では、STを分析する。この論文では、「相対状態」と「状態の分岐」という彼の解釈の中心となったアイデアが見て取れる。相対状態は定義されており、状態の分岐は実在との対応関係が鮮明ではないという問題はあるものの、一応説明がなされている。一方で、これらの概念とは異なり相互関係には十分な説明がなされていない。本節では、相対状態や分岐という概念を説明することで、標準的なEverettの解釈を明らかにした上で、相互関係が定義されていない点⁸を指摘しよう。

まず、Everettは量子力学には以下のような二つの時間発展

プロセス1 不連続な変化は、固有状態 $\phi_1, \phi_2 \dots$ に対応する物理量の観測によって生じる。この観測において、状態 ψ が状態 ϕ_j に確率 $|\langle \psi, \phi_j \rangle|^2$ で変化する。

⁸ 3節以降で確認するが、この概念についてはSTだけでは完結していない。

プロセス 2 孤立系の状態は、波動方程式 $\partial\psi/\partial t = A\psi$ に従い（ただし、 A は線形作用素である。）連続的、決定論的に変化する。

があると指摘する (Everett 1957, p. 454)。プロセス 1 は、いわゆる波動関数の崩壊などと呼ばれる過程であり、一般に射影公準によって表現される。このように、系を不連続的に変化させるような観測者を外部観測者 external observer と呼ぶ。Everett は、観測者と対象系を含む系を例としてあげる。この全体系はどちらのプロセスに従って変化するのだろうか。プロセス 2 に従い決定論的に変化すると考えると、射影公準による不連続な変化が生じていないと主張しなければならない。一方で、プロセス 1 に従い不連続に変化すると答えば、観測者を含むような系が「他の全ての系では認められている記述と同じ種類の量子力学的な記述には従わない」(Everett 1957, p. 454) ことになってしまうと論じる。Everett は、二つの選択肢のうち前者、つまり、プロセス 1 のような過程を持たないように⁹量子力学の時間発展を説明しようと試みた。このように Everett はプロセス 2 しか含まない（つまり射影公準を含まない）自身が与えた量子力学のモデルを、純粋波動力学 pure wave mechanics と呼んだ。

Everett は相対状態という概念を導入する。相対状態は複合系の部分系が、他の系によって定められるとする考え方である。つまり、「ある部分系の状態は独立した実体を持たず、残りの部分系によってのみ定められる。言い換えると、部分系を担う状態は独立ではなく、相互関係している」(Everett 1957, p. 455) とする考え方である。ここで、相互関係という概念が用いられているが、この意味は説明されていない。

複合系 S について、その部分系を S_1, S_2 とし、それぞれをヒルベルト空間 H_1, H_2 と対応させる。このとき、 S のヒルベルト空間は二つのヒルベルト空間のテンソル積 $H_1 \otimes H_2$ によって表現される。ここで、集合 $\{\xi_i^{S_1}\}$ と $\{\eta_j^{S_2}\}$ を S_1, S_2 のそれぞれに対する状態の完全直交集合とすると、複合系 S は次のように重ね合わせとして表現できる。

$$\psi^S = \sum_{i,j} a_{ij} \xi_i^{S_1} \eta_j^{S_2}$$

a_{ij} は重ね合わせ係数である。ここで、ある部分系に対して状態を選択すれば、それに対して相対的な状態を得ることができる。例えば、系 S_1 の状態として ξ_k を選択すれ

⁹ このような立場について、Everett は Jammer への手紙で「他の全ての時間において系は完全に自然な連続的法則に従って作用する一方で、何か非常に極端なことが起きるような『魔術的な』過程があるべきであるというのは非現実的」(Jammer 1974, p. 508) と述べている。

ば、対応する S_2 の状態は、

$$\psi(S_2; \text{rel}\xi_k, S_1) = N_k \sum_j a_k \eta_j^{S_2} \quad (1)$$

と表現され (N_k は規格化定数)、これが相対状態の定義である。相対状態によって S_2 の状態が、 ξ_k にのみ依存する形で表現できている。したがって、相対状態を用いて重ね合わせを表現すると、

$$\psi^S = \sum_i \frac{1}{N_i} \xi_i^{S_1} \psi(S_2)$$

となる。このように相対状態によって複合系を記述して、Everett は次のように述べている。

一般に、複合系の一つの部分系に対して特異な状態のようなものは存在しない。部分系は系の残りの状態から独立している状態を持たない、そのため、部分系の状態は一般に他の状態と相互関係している。ある部分系に対する状態を任意に選ぶことができ、残りの系に対する相対状態を得ることができる。それゆえ、われわれは、複合系の形式から示唆されるような本質的な状態の相対性に直面する。部分系の絶対的な状態を問うことは無意味である——与えられた残りの部分系の状態に対して相対的な状態だけを問うことができる。(Everett 1957, p. 456)

複合系の状態について、その構成要素が相対的に決まることが示されており、相互関係という概念が、何の説明もなしに用いられている。

続いて、分岐概念を確認し、その中でも相対状態が導入されていることを確認しよう。例えば、対象系と測定機器とが相互作用する過程を考えると、両者は全体として複合系を成している。したがって、相対状態によって記述できることから、測定機器の状態は対象系に相対的に定まる。このことを、「二つの系の状態間に相互関係だけが存在する」(Everett 1957, p. 457) と論じる。さて、Everett のモデルでは射影公準を認めないのでこの複合系の重ね合わせは維持される。したがって、状態が明確ではないと論じている。しかし、一方で、我々が実験をすれば値は一つに定まるはずである。そこで、導入されるのが状態の分岐、より正確には観測者の記憶系列の状態の分岐である。具体的に見ていこう。

Everett は観測者を感覚機関 *sensory apparatus* と過去の感覚データを保存することができる記録装置 *recording device* を持った関数機械と捉える (Everett 1957, p. 457)。

つまり、人間である必要がなく、実験の測定（観測）データを記録し、そのデータを踏まえて次の行動を起こすことができるような機械であれば、観測者として扱うことができる。このような観測者の状態関数は

$$\psi_{[A,B,\dots,C]}^O$$

と表現されている。この $[A, B, \dots, C]$ を観測者 O の記憶系列と呼び、この A, B, \dots, C それぞれが何らかの出来事に対応している。

このような観測者による観測はどのように記述されるだろうか。例えば、観測者 O が状態 $S_1, S_2 \dots S_n$ からなる複合系を観測するとしよう。このとき、対象系と観測者の全体系は $\psi^{S_1+S_2+\dots+S_n} = \psi^{S_1}\psi^{S_2}\dots\psi^{S_n}\psi_{[\dots]}^O$ と表現される。ここで、状態 S_1 を観測したとしよう。このとき、 ψ^{S_1} が固有状態になく、例えば、 $\psi^{S_1} = \sum_i a_i \phi^{S_1}$ と表現できるとすると、観測後の状態は、

$$\psi^{S_1+S_2+\dots+S_n+O} = \sum_i a_i \phi_i \psi^{S_2} \dots \psi^{S_n} \psi_{[\dots, a_i]}^O$$

となるとされ、状態そのものではなく観測者の記憶系列の要素が変化している。

ここで、 i に対する和をとっていることから、重ね合わせになっているのは対象系と観測者の記憶系列の要素である。しかし、これだけでは我々が重ね合わせを経験しないことを説明できていない。上述の通り、重ね合わせになっているのは観測者の記憶系列の要素であるが、我々は自分の記憶が重ね合わせにあることを経験しない。そこで、Everett が導入するのが分岐という概念である。このような状況について、Everett は「連続する測定に従って観測者の軌跡 trajectory が継続的に分岐する」(Everett 1957, pp. 460-461) と述べている。

また、観測者の状態を上例と同様に記述できたとし、 n 個の対象系と観測者が複合系を成しているとする。このとき、 r 番目まで観測が終わっているとする。さらに、観測者の持つ記憶系列を $\sum_{ij\dots k} [\dots, \alpha_i^1, \alpha_j^2 \dots, \alpha_k^r]$ であったとしよう。つまり、この観測者にとっては、 r 番目までの対象系が固有状態にある。例えば、既に固有状態になっている l 番目の対象系を再決定するとしよう。すると、観測者の記憶系列は

$$\sum_{ij\dots k} [\dots, \alpha_i^1 \dots \alpha_j^l \dots \alpha_k^r \alpha_j^l]$$

となる。このことは、「記憶の状態が相互関係している」(Everett 1957, p. 459) と論じられている。

量子力学では、観測結果についてボルンの規則¹⁰が用いられる。一方で、Everett のモデルでは重ね合わせが崩壊しないために、結果についても決定論でなければいけない。しかし、自身のモデルにおいても観測過程において、Everett は確率が与えられることを測度論をもとに証明している。結論としては、重ね合わせの要素にあたる観測者にとっては、自分自身が何を観測するのかについては、主観的確率で与えられるといえる。

相対状態が特徴的であるのはいうまでもないが、ここで指摘した分岐概念は、いわゆる多世界解釈で知られるように世界の分岐として用いられていない。分岐するのは、観測者の記憶系列の要素とそれに対応する対象系である。もちろん、これが具体的にどのような描像を与えているのかは明確ではないが、世界が分岐するといった主張にはなっていない。また、分岐という概念を導入してまで主張された点として観測過程を特別扱いたくないという点が挙げられる。もちろん、観測者には記憶系列が付随するのでその点で特徴的ではあるが、観測者と対象系の相互作用は単純に複合系を作るだけであり、特別な時間発展を起こさない。Everett 自身は、この自分自身のモデルを

全ての観測過程の系列を通じて、観測者を表現する唯一の物理系が存在するが、(相互作用する系から導かれるような)観測者の特異でユニークな状態は存在しない。重ね合わせによる記述が存在し、重ね合わせのそれぞれの要素には明確な観測者の状態と対応する系の状態が含まれている。それゆえ、続く観測(または相互作用)によって、観測者の状態は多数の異なる状態へと「分裂する」。それぞれの枝が測定の結果と対象系の状態に対応する固有状態を表現する。与えられた観測の系列の後には、全ての分岐が重ね合わせの中で同時に存在する (Everett 1957, p. 459)

としている。

Everett (1957) では、相対状態は定義されており、分岐についても十分ではないかもしれないが説明がなされている。一方で、相互関係という概念は ST において定義されていないだけでなく、何の説明もなされていない。また、ST においては相互関係が観測過程において用いられている点も特徴的である。

¹⁰ ブラケット形式で書くと、ある演算子 A について状態 $|\psi\rangle$ を観測したとき、物理量 a が得られる確率は、

$$\text{Prob}(a) = \langle \psi | \hat{A} | \psi \rangle$$

である。

§3 博士論文草稿 (1956 年: LT)

ST の草稿となった原稿は 56 年 1 月の時点で完成していた。LT は Bohr や Feynman らによる批判を受けて、およそ 4 分の 3 が削除され博士論文として提出される¹¹。この論文での特徴は情報理論に多くのページが割かれていることであり、特に、Shannon の情報理論を用いて、情報量や相互関係量の定義を与えた後に、これらの定義を量子力学の対象である状態や演算子にも応用している。

加えて、ST の内容は一部を除けば LT に基づいている。LT では情報理論に基づいて情報量や相互関係量を定義していることを踏まえると、LT の内容を吟味することで ST において不明確であった相互関係に対する関心を遡ることができ、その内容についても理解できるだろう。まずは、LT の概略をみつつ、情報や相互関係に対して与えられた定義をみる。さらに続いて、ST との連続性に注意しつつ、LT において意味が不明瞭であるところに明確な形で説明を加えよう。

3.1 LT 概略

LT においても ST と同様に、二つの異なる時間発展を導入し、思考実験を提示することで、問題を提起している。時間発展の記述は、ST とほぼ同様に

プロセス 1 不連続な変化が、固有状態が ϕ_1, ϕ_2, \dots であるような物理量の観測によって生じ、状態 ψ が状態 ϕ_j に確率 $|\langle \psi, \phi_j \rangle|^2$ で変化する。

プロセス 2 (孤立した) 系の状態の連続的な、決定論的な時間に従う変化は、波動方程式 $\frac{\partial \psi}{\partial t} = U\psi$ に従う。ただし、 U は線形作用素である。

と与えられている (Everett 1956, p. 64)。さらに、ST と同様の思考実験を提示して、この形式では問題が生じると論じる。この問題を解決する方針として 5 つの選択肢を挙げ、その中でも以下のような選択肢を Everett は選択する。

プロセス 1 を完全に放棄し、量子的な記述の普遍的な妥当性を認める。純粋波動力学の一般的な妥当性は、統計的な主張なしに、観測者や測定機器を含む、あらゆる物理的な過程に認められる。観測過程は完全に複合系の状態関数によっ

¹¹ Everett が博士論文を提出するまでの経緯や指導教官である Wheeler との関係などの歴史的な事実は伝記的著作である Byrne (2010a) や両者の関係をまとめた Byrne (2010b) で確認できる。また、Wheeler 自身の自叙伝 Wheeler and Ford ([1998] 2010) でも確認できる。

て記述されることができ、複合系は観測者と対象系を含み、波動方程式（プロセス2）に従う。（Everett 1956, p. 77）

射影公準に基づくプロセスを否定していることから、観測過程を特別扱いしないという特徴が見て取れる。さらに、あらゆる対象に波動関数を割り当てるという考え方を Everett は普遍的波動関数 universal wave function と呼んでいる。また、LT の目的について

普遍的波動関数という概念が、解釈のために必要な相互関係の仕組みと共に、論理的に自己矛盾のない複数の観測者が活動している宇宙の記述を形成するというを示す。（Everett 1956, p. 77）

と述べている。

また、確率については次のような態度をとる。ここでの解釈は、ST 同様に射影公準を認めない。そこで、Everett は、量子力学における確率が「主観的な見た目」（Everett 1956, p. 77）に過ぎず、「理論が客観的には連続的で因果的であるが、主観的には不連続で確率的」（Everett 1956, p. 77）であるという解釈を示す。

ST と共通する点についていえば、相対状態や分岐の扱いが挙げられる。状態 ψ^S によって表現される複合系 $S = S_1 + S_2$ を考えて、 S_2 を状態 η で表現できるとすると、 S_1 の対応する相対状態を、

$$\psi_{\text{rel}}^{\eta} = N \sum_i (\phi_i, \eta, \psi^S) \phi_i$$

と定義している。ただし、 S_1 に対応するヒルベルト空間 \mathcal{H}_1 に対して、 ϕ_i はエルミート演算子 A の固有関数である。また、 (ϕ_i, η, ψ^S) は内積である。このように定義される相対状態は、式 (1) と比較すれば明らかのように、ST において与えられている表記とは異なる。

LT では、Shannon and Weaver (1949) を参考文献に挙げて情報量を定義している¹²。確率変数 X とし、これの分布を $P(x_i)$ とする。このとき、 X の情報量 I_X を、

$$I_X = \sum_i P(x_i) \ln P(x_i) = \text{Exp}[\ln P(x_i)]$$

¹² 論文の中で展開された議論はここでは追わず、実際にある形式をもって定義されていることのみを指摘するに留めておく。

とし、 $\text{Exp}[\mathcal{F}]$ は数値関数 \mathcal{F} の期待値である。同様に、二つの変数 X, Y の相互関係 $\{X, Y\}$ は

$$\begin{aligned}\{X, Y\} &= \text{Exp}[I_X^{Y_i} - I_X] \\ &= \text{Exp}[I_X^{Y_i}] - I_X\end{aligned}$$

と定義される。ここで、 Y の値が y_i であるとわかっていたとき、 X に関する情報は、条件付き分布 $P^{y_i}(x_i)$ の情報に変化し、これを $I_X^{y_i}$ と表現する。このような情報量と相互関係について、「相互関係と情報は分布に対して定義される」(Everett 1956, p. 84) としていて、加えて、「相互関係は相対的というよりは絶対的な性質であり、確率変数間の相互関係は変数に対して選ばれた測定サイズとは完全に独立している」(Everett 1956, p. 89) と述べている。

このように与えられた情報の定義を Everett は量子力学の状態や演算子にまで応用していく。しかし、その具体的な内容に入る前に、Everett の表記を確認しよう。まずは、複合系 $S = S_1 + S_2$ について、系 S_1, S_2 の状態をそれぞれヒルベルト空間 $\mathcal{H}_1, \mathcal{H}_2$ の点に対応させると、 S はテンソル積の形で記述できる。ここで、 $\{\xi_i\}$ と $\{\eta_j\}$ をそれぞれ $\mathcal{H}_1, \mathcal{H}_2$ の正規直交基底であるとする。すると、複合系 S の状態 ψ^S は

$$\psi^S = \sum_{ij} a_{ij} \xi_i \eta_j$$

と記述できる (ただし、 $\sum_{ij} a_{ij}^* a_{ij} = 1$)。このとき、 $P_{ij} = a_{ij}^* a_{ij}$ とすれば、これは S_1 が ξ_i 、 S_2 が η_j であるような確率を表している。確率分布を

$$P_{ij} = P(\phi_i \text{ and } \theta_j) = |\phi_i \theta_j, \psi^S|^2$$

と与えると、これは複合系 ψ^S において、状態が ϕ_i, θ_j であるような確率を表している。

状態 ψ に対する演算子 A の期待値は

$$\langle A \rangle \psi = (\psi, A\psi)$$

である。 ϕ に対する射影演算子 $[\phi]$ は、

$$[\phi]\psi = (\phi, \psi)\phi$$

と定義されている。さらに、完全直交集合 $\{\phi_i\}$ と状態 ψ に対して、二乗振幅分布 P_i を定義して、 $\{\phi_i\}$ にわたる ψ の分布と呼び、

$$P_i = |(\phi_i, \psi)|^2 = \langle [\phi_i] \psi$$

と与えられる¹³。

LT の III 章 § 2 では、状態関数に対するエルミート演算子の情報を与えていく。まずは、状態 ψ の基底 $\{\phi_i\}$ の情報 $I_{\{\phi_i\}}(\psi)$ が次のように与えられる。

$$I_{\{\phi_i\}}(\psi) = \sum_i P_i \ln P_i = \sum_i |(\phi_i, \psi)|^2$$

Everett は状態の記述が相対的なので、演算子を用いて情報を定義するという方針を取っている。状態 ψ に対する演算子 A の情報 $I_A(\psi)$ を、固有値に関する二乗振幅と定義する。つまり、 A の情報は A に関する測定結果の分布に基づく情報である。縮退がある場合とない場合で、区別する必要がある。縮退がない場合、 A の固有値に関する分布の情報は A の固有基底 $\{\phi_i\}$ の情報であるとされていて、

$$I_A(\psi) = I_{\{\phi_i\}}(\psi) = \sum_i P_i \ln P_i = \sum_i \langle [\phi_i] \psi \ln \langle [\phi_i] \psi \rangle$$

という形で与えられる。縮退がある場合には、 ϕ_{ij} (ただし、 $j = 1, \dots, m_i$) を A' の固有状態の完全正規直交集合とし、 i 番目の固有値の積を m_i として、情報 $I_{A'}(\psi)$ は次のように定義されている。

$$I_{A'}(\psi) = \sum_i \left(\sum_j \langle [\phi_{ij}] \psi \rangle \right) \ln \frac{\sum_j \langle [\phi_{ij}] \psi \rangle}{m_i}$$

これで、演算子に関する情報が定義された。さらに、ここから二つの演算子 A, B の相互関係 $\{A, B\}\psi^S$ が、

$$\{A, B\}\psi^S = \sum_{ij} P_{ij} \ln \frac{P_{ij}}{P_i P_j} = \sum_{ij} \langle A_i B_j \rangle \psi^S \ln \frac{\langle A_i B_j \rangle \psi^S}{\langle A_i I \rangle \psi^S \langle I B_j \rangle \psi^S}$$

として与えられる。この値は、演算子の情報の定義における m_i とは独立であることから、相互関係は縮退度とは独立である。ここで、ST では概念としてしか導入されていなかった相互関係が、Shannon 流の情報理論を踏まえて形式的に導入されている点は注目に値する。したがって、Everett が相互関係や情報を導入していることを考えると、これらの概念について Everett 自身の解釈での役割を明らかにする必要があるといえるだろう。Everett 自身の解釈全体における相互関係の役割については 5 節で扱うこととして、次節では LT における相互関係の役割を LT で用いられている例を引きつつ整理しよう。

¹³ P_i 状態 ψ に対して、固有状態 ϕ_i に対する測定を行ったときの結果に関する確率分布である。

3.2 相互関係の役割

このように LT では情報理論と量子力学を結びつけようと試みている。特に、相互関係については、観測過程において重要な役割を果たすことは、ST における分析で確認した。実際、Everett は「純粋波動力学において経験との一致を実現するためには、状態関数によって記述される複合系を構成する部分系間の相互関係を利用すべきである」(Everett, 1956, p. 78) としている。さらに、続けて、「複数の観測者がいる場合や、他の観測者と異なる対象系と同様に相互作用する時の一貫性を維持する場合には、相互関係は重要な役割を果たす」(Everett 1956, p. 78) と述べている。この点で ST と一致している。しかし、観測だけでなく、測定過程と Everett が呼ぶ状態間の相互作用においても相互関係が重要であると述べている点は ST では論じられていない。以下で具体的に指摘しよう。

Everett は測定について、「測定は単に物理系間の相互作用——ある物理量と別の部分系の物理量の相互関係の性質を持った相互作用——の特殊な場合である」(Everett 1956, p. 111) としている。この主張の特徴的な点としては、測定の過程を他の相互作用と区別しないという点にある。相互関係が測定において何らかの役割を果たしていることが分かる。Everett が具体例を挙げているのでそれを確認しよう。 q を粒子の位置座標、 r を測定機器の位置座標とする。それぞれは、初期状態では独立しており（つまり、相互関係しておらず）、全体の波動関数を $\psi_0^{S+A} = \phi(q)\eta(r)$ と記述できるとしよう。ここでは、 $\phi(q)$ は粒子の波動関数であり、 $\eta(r)$ は測定機器の波動関数である。また、測定においてはハミルトニアンが相互作用を記述すると考え、このハミルトニアンを

$$H_I = -i\hbar q \frac{\partial}{\partial t}$$

とする。このとき、状態 $\psi_i^{S+A}(q, r)$ が次のように与えられ、

$$\psi_i^{S+A}(q, r) = \phi(q)\eta(r - qt)$$

これが、シュレーディンガー方程式

$$i\hbar \frac{\partial \psi_i^{S+A}}{\partial t} = H_I \eta(r - qt)$$

の解になっている。加えて、この場合、相互関係について次の様な性質を満たすとされる。対象となる粒子の位置に対応する演算子を Q 、測定機器の位置に対応する演算

子を R とすると、両者の相互関係は、

$$\{Q, R\}_t \geq I_R(0) - I_Q(0) + \ln t$$

とされる (Everett 1956, pp. 112–114).

Everett は、測定機器が明確な系の値を指示することはない (つまり、重ね合わせにある) にも関わらず、それぞれの項は対象系と一致するように明確な状態であると主張する。そこで、対象系と測定機器の状態について、

$$\psi_i^{S+A} = \int \phi(q') \delta(q - q') \eta(r - q') dq'$$

と表現する。これは、対象となる系が明確に $q = q'$ であるときである。これとは逆に、測定機器が明確な状態にあるとき、

$$\psi_i^{S+A} = \int \frac{1}{N_{r'}} \xi^{r'}(q) \delta(r - r') dr'$$

$$\text{ただし } \xi^{r'}(q) = N_{r'} \phi(q) \eta(r' - qt)$$

$$\text{かつ } (1/N_{r'})^2 = \int \phi^*(q) \phi(q) \eta^*(r' - qt) \eta(r - qt) dq$$

とされる (Everett 1956, p. 115)。 $\xi^{r'}(q)$ は、明確な値 $r = r'$ を取る機器の状態 $\delta(r - r')$ に対する相対的な系の状態の関数である。これが示唆することとして、Everett は「 q と r の相互関係の度合いが十分高いとき、これらの相対的な系の状態 $\xi^{r'}(q)$ はほぼ $q = r'/t$ に対する固有状態である」(Everett 1956, p. 115) としている。これは相対的な系の状態が測定の近似的な固有状態になることである。この性質はあらゆる測定において成立するとされている¹⁴。

続いて、観測過程について考えよう。観測者を、記憶系列を持つ波動関数として記述する点において ST と同様である。しかし、取り扱われている例が LT の方が多く、ST で取り上げられている例では、観測者が一人の状態しか扱われていない。一方 LT では、観測者が複数いるような場合も取り扱われている。相互関係に注目しつつ ST では扱われていない具体的な例を見ていこう。

観測者が一人である場合については 2 節で分析した。複数の観測者が同一の系、同

¹⁴ ここでの、 δ の意味が不明確であるので、ここで補う。Everett は δ が機器の状態を表すと主張している。しかし、測定機器の針の状態を規定しているということ是可以する。たとえば、上式において $r = r'$ であることが要請されている。このとき、 r' 以外の全ての可能性は除外してよい。このことを δ によって表現している。

一の物理量を観測する場合を考えよう。この時、複合系は

$$\psi^{S+O_1+O_2} = \psi^S \psi_{[\dots]}^{O_1} \psi_{[\dots]}^{O_2}$$

となる。まず、 O_1 を観測したとき、状態は、

$$\psi' = \sum_i (\phi_i^S, \psi^S) \phi_i^S \psi_{i[\dots, \alpha_i]}^{O_1} \psi_{[\dots]}^{O_2}$$

と変化する。このとき、状態 ψ^S は状態 ϕ_i に変化しており、対応する固有状態は α_i で表現されている。続いて、 O_2 がこの状態を観測すると、

$$\psi'' = \sum_i (\phi_i^S, \psi^S) \phi_i^S \psi_{i[\dots, \alpha_i]}^{O_1} \psi_{i[\dots, \alpha_i]}^{O_2}$$

である。さらに、この結果について O_1 から O_2 が観測の結果を聞いたとき、全体系は、

$$\psi''' = \sum_i (\phi_i^S, \psi) \phi_i^S \psi_{i[\dots, \alpha_i]}^{O_1} \psi_{i[\dots, \alpha_i, \alpha_i^1]}^{O_2}$$

になる。このとき、 O_2 が O_1 から得た情報は、系を観測して得られた情報と全く同じとされる。このことは、相互関係の推移律¹⁵をもとに与えられ、これを踏まえて、「複数の観測者が他の観測者と相談することが認められているような状況において一貫性を維持するために、波動関数において相互関係は重要な役割を果たす」(Everett 1956, p. 131) と述べられている。

このように LT では、ST とは異なる観測の状況で相互関係が役割を果たしている。さらに、ST では指摘されていなかったが、観測とは異なる測定という相互作用においても相互関係が用いられている点は特徴的である。さらに、前節で指摘したとおり、LT では相互関係と情報理論の関係が明らかである。しかし、LT 以前の論考においても同様に情報理論に対する Everett の関心が見て取れる。以下でそれを確認しよう。

§4 萌芽的な三つの論考 (1955 年)

ST や LT より以前の論考は、これまで公開されておらず考察の対象となることはなかった。しかし、2007 年に史料が公開され、その一部が Barrett and Byrne (2012) で編集された。ここでは、Barrett and Byrne (2012) にも掲載された 1955 年に書かれた三つの論考 Everett (1955a, 1955b, 1955c) をみていく。情報概念や情報理論の役割も小さくない。それぞれの特徴を順に整理していこう。

¹⁵ 推移率はここで初めて導入される概念であり、「 S_1 と S_2 が相互関係し、 S_2 と S_3 が相互関係しているならば、 S_1 と S_3 [原文では S_2] が相互関係する」(Everett 1956, p. 131 □ 内は筆者) と述べられている。

4.1 情報に基づく確率概念

ここでは、Everett (1955a) を扱おう。この論考で注目すべきは、情報に基づく確率概念、Everett の一貫した量子力学への疑問、LT や ST の元となるような萌芽的なアイデアである。なかでも、情報に注目して確率概念を整理している点を中心にこの論考の内容を整理しよう。

まず、「主観的確率は特定の観測者による完全な情報に基づかない推定値を指し... (中略) ... 客観的確率は系の内在する性質、つまり、『真に』ランダムな過程とも呼べるもの」(Everett 1955a, p. 57) として、主観的確率と客観的確率を定義する¹⁶。例えば、ジョーカーを除いた 52 枚からなるトランプを考える。このとき、スペードエースを引く確率は標準的には $1/52$ となるだろう。Everett はこの確率は主観的な確率であるという、なぜなら、このカードの山から一枚トランプを引く人は、カードの順番を知らないために、確率を割り当てるしかないと考えるからであり、つまり、カードの山の順番という情報が不完全なために生じる確率だからである。例えば、カードを引く人が上から 13 枚がすべてスペードであることを知っていたとしよう。このとき、スペードのエースを引く確率は、 $1/13$ である。一方で、客観的確率は完全にランダムな過程に対してのみ適用される。換言すると、対象系の事前の情報が完全であってもなお確率しか与えられないようなものを客観的な確率と呼ぶ。したがって、トランプの例では、トランプを引く直前まで状態が決定しないような場合のみある一枚のカードを引く確率は客観的な確率である。

Everett のこのようなアイデアは、実は後の LT や ST と矛盾するようなものではない。実際、分岐のそれぞれに所属するような観測者が確率を得てしまう理由付けとしては、このアイデアは有効である。つまり、観測者は自分自身が分岐してしまうため、状態の情報を全て知ることができない。そのため、彼らは観測値について確率を得ることしかできない。一方で、その観測者と対象系をさらに外側からみている我々にとっては、時間発展は決定論的である。

Everett は量子力学の解釈問題を量子力学の確率解釈問題であると考えた。すなわち、量子力学において与えられる確率は主観的確率なのか、客観的確率なのかという問いに答えを与えることで解釈問題を解決しようとした。そこで、Everett は量子力学

¹⁶ ここでの主観的確率、客観的確率という語は、Everett 独自の用い方であり、現在の科学哲学などで用いられる意味ではない。

における異なる二つの時間発展を次のように整理する。

1. あらゆる物理系 s は状態関数 ψ を持ち、状態関数は系に対して行われうるあらゆる測定の結果に関する客観的確率を与える。
2. 孤立系の状態関数 ψ_s は、孤立系である限り時間とともに因果的に変化する。(Everett 1955a, p. 58)

この二つの時間発展を認めたくえて、Everett はさらに観測者と対象系がなす全体系についての思考実験から二つの時間発展では問題が生じることを示す。そのうえで、Everett は量子力学において生じる確率は客観的でないという立場をとり、その立場を、

量子力学において生じる確率は客観的ではない。つまり、確率は隠れたパラメーターの無知に対応している。このような解釈では矛盾は簡単に解消する。なぜなら、外側の状態関数は内側の状態関数よりも相互作用に関して位相要素のような情報をより多く持っているからである。したがって因果的な記述が導かれる。(Everett 1955a, p. 60)

と論じている。

この論考で特徴的な点は、確率によって量子力学の時間発展を捉え、かつ確率の解釈を変更するというものであり、確率の意味を変更するが射影公準を否定しているわけではない。確率を扱うにあたって情報概念を重視している点も注目に値する。ST と LT の論考において、特に LT において情報理論と情報概念が一定の役割を果たしていることを踏まえると、この情報と量子力学を結び付けようとする営みが 1955 年の時点でも見いだせる。

4.2 情報理論の量子力学への応用

ここでは、Everett (1955b) を検討する。この論考においては、情報量と相互関係量が与えられ、さらに、この定義を踏まえて量子力学の波動関数に相互関係量を応用している。

まず情報量が、確率変数 X の確率分布が持つ情報量 I_X は、確率密度を $P(x)$ として、

$$I_X = \int P(x) \log P(x) dx$$

と定義される。この論考には、Shannon に対する言及はないが、その影響は明らかである。実際、Shannon and Weaver (1949) では、密度分布関数 $p(x)$ の連続分布のエン

トロピーが

$$H = - \int p(x) \log p(x) dx$$

と定義されている。両式の右辺を比較すれば、符号が逆になっているだけであり、これを踏まえれば Shannon の影響は明らかである。

続いて、二つの変数 X と Y について結合分布 $P(x, y)$ が与えられているとしよう。変数 Y について、何の情報も持っていない場合には、 X の確率分布は $P(x) = \int P(x, y) dy$ となり、 $I_X = \int P(x) \log P(x) dx$ となる。一方、 Y の値が例えば y であるとわかっている場合には、 X の確率分布は条件付き確率分布になり、

$$P_y(x) = P(x, y) / P(y)$$

であり、変数 X の情報は、

$$I_X^y = \int P_y(x) \log P_y(x) dx$$

と与えられる。

この I_X^y は Y が特定の値の場合を論じているに過ぎない。そこで、これを一般化して、 X の情報について期待される変化を考え、この量を変数 X と Y の相互関係と呼び、

$$C(X, Y) = \int P(y) [I_X^y - I_X] dy$$

と定義する。さらに、 X と Y の相互関係は対称であるとして、

$$C(X, Y) = I_{XY} - I_X - I_Y$$

と定義され、二つ以上の変数の分布に応用できるものである。

さらにこれを波動関数に応用し、具体的には、波動関数 $\psi(x, y)$ として表されるオブザーバブル X と Y の相互関係を、

$$C(X, Y) = \iint \psi^* \psi \log \frac{\psi^* \psi}{\int \psi^* \psi dx \int \psi^* \psi dy} dx dy$$

として与えている。しかし、この論考では、この応用した結果について分析はおろかコメントもない。

しかし、一般に相互関係については、次のように述べられている。

二つの変数 X と Y が相互関係しているという言明がなされたとき、その基本的な意味とは片方の値を伝えられたとき、もう一方の変数について何かを学ぶということである。(Everett 1955b, p. 61)

片方の変数の値という情報に、もう一方の変数の情報が含まれていると言い換えられるだろう。

このように、Everett (1955b) においては情報量に基づく相互関係量を量子力学に適用している点が特徴的であり、ここでの情報量は Everett (1955a) とは異なり Shannon の情報理論が念頭におかれていることは明らかである。ただし、本文中に Shannon に対する言及もみられず、応用してはいるものの、これの含意などについては論じられていない。LT においても情報理論を量子力学に適用する意図などは明確ではないが、Everett (1955b) は相互関係量を量子力学の波動関数に適用した形式を記述するだけで論考が終わってしまっている。したがって、ここから Everett の量子力学に関する何らかの態度を指摘することはできない。

4.3 より明確なアイディア

最後に、Everett (1955c) をみる。ここまでの二つの論考からは確率への態度や、情報概念・相互関係と量子力学の関係性が指摘できる。Everett (1955c) では、より LT や ST に近い主張がなされている。

ここでも、ST や LT と同様に異なる二つの時間発展を挙げ、これが両立しないとされる。Everett (1955c) においては、

1. 固有状態 $\{\phi_i\}$ の物理量に関する観測をしたとき、不連続な変化が生じ、状態 ψ が状態 ϕ_j に確率 $|\langle \psi, \phi_j \rangle|^2$ で変化する。
2. 系はエネルギー作用素によって、連続的、因果的に時間発展する。

という形で提示されている (Everett 1955c, p. 64)。もちろん、一つ目のプロセスを否定する形で議論が展開される。

ここでは観測過程をどのように説明するかという問題になる。状態が不連続な変化を起こさないということは、状態が重ね合わせであっても、測定値が一意に決まることを説明しなければならない。そこで Everett が導入するのが断面 cross section というアイディアである。Everett は、

全体の波動関数のなかで変数 x が明確な値 x_i を持つような断面に注目すると、測定機器は対応する明確な値 y_i を持つとわかる。一方で x_j が明確であるような断面を考えることを選べば、機器の y の値が y_j であると直ちにわかる。(Everett 1955c, p. 66)

としている。これは、次のように考えれば整合的である。たとえば、状態と機器の複合系を

$$\psi_{S+A} = \sum_i a_i \phi_i^S \phi_i^A$$

とする（ただし、 ϕ_i^S は固有値 x_i の系の固有状態であり、 ϕ_i^A を固有値 y_i の機器の固有状態とする）。変数 x の値が x_i であるような系の状態を表す項に注目すると、その項では機器の状態は y_i の固有状態になっている。例えば、横に x_1, x_2, \dots 縦に y_1, y_2, \dots を並べて表を組む。すると、 x_i であり y_i であるようなマス目が存在し、これを断面ととらえる。

さらに、曖昧な状態という概念が導入される。曖昧な状態とは、測定機器が固有状態にない系と観測後に相互関係しているときの機器の状態である。これは、系の重ね合わせが維持されているため、マクロな状態も重ね合わせにあり、一意に状態を指定できないということである。このような古典的な対象の状態が曖昧な状態として記述されるとき経験と一致するように整合的な説明をどのように構築するかという問題がある。この点について、次のように議論されている。

人間の観測者が測定機器を設定して固有状態ではない系に対して測定を行うとすると、結果はメーターの針の位置に現れる。測定機器と系が相互関係すると、針の状態は曖昧な smearing out 状態になる。さらに、観測者もまた測定機器と同じように時間発展する。つまり、観測者が測定機器にあるメーターの針を見たとき、観測者と測定機器は相互作用し、観測者も曖昧な状態になる。この時、観測者は機器とも、系とも同時に相互関係しているとされている。

Everett は、さらに、対象系-測定機器-観測者の全体を記述する波動関数の断面について考えている。このとき、例えば、対象系がある測定値 x_i であるような場合は測定機器の状態は断面の考え方から、対応する状態 y_i にある。さらに、観測者はこの測定機器と対応する状態になる。ここで、観測者が相互作用している測定機器の状態と対応する状態 z_i になる¹⁷のであって、相互関係しているにもかかわらず対象系に対応する状態とは表現されていない。このように、ある観測者が、重ね合わせの状態を観測せず、一つの観測値を得ることを説明している。しかし、未だに重ね合わせは維持さ

¹⁷ ここでは、観測者の状態を測定機器の状態とは異なる状態として記述している。しかし、原文では「観測者は測定機器と対応する状態 y_i になる」とされており、観測者の状態と測定機器の状態を区別していない。しかし、測定機器の針の位置を示す固有状態が y_i であったので、これを観測者の状態に適用してしまうのは正確ではない。そこで、本論では両者は異なる状態として区別している。

れており、さらにこの断面のアイデアでは、ある観測者は一つの値を得ることができるが、重ね合わせの項の数だけそれに対応する観測者や測定装置が必要である。

この点を説明するために導入されたのが分裂と人生樹という考え方である。特に、射影公準を認めないために重ね合わせが崩壊しない。そこで、測定が行われるたび、観測者が分裂すると論じる。そのため、繰り返し測定をした観測者は複数に分裂する。そこで、導入されるのが人生樹である。この人生樹のそれぞれの枝に注目すれば、観測者は明確な物理量を得ている。観測者が分岐しているだけで、重ね合わせは崩壊していないとされている。

Everett はこれらの議論をまとめて、次のように整理している (Everett 1955c, pp. 69-70)。量子力学は客観的には因果的・連続的であり、主観的には確率論的・不連続的である。さらに、このように量子力学を捉えれば、マクロな対象についても量子力学で扱うことができる。そこから、Everett は量子力学はマクロな世界の創発を記述でき、かつ、新しい仮説 (射影公準) を導入することもできないという意味で、量子力学は完全であると論じている。さらに、物理的な実在とは波動関数で記述されるものであり、マクロな世界の現れ方は波動関数における相互関係によって説明できる。

このように、Everett (1955c) では、LT においても見られないような概念が導入されているものの、状態の分岐に言及している点では連続性は見いだせる。さらに、観測機器と対象系での相互関係があることが指摘されている点も注目に値する。

§5 考察

ここまで、ST、LT および 1955 年の三つの論稿について、相互関係を軸に分析してきた。ここでは、これまでの分析を踏まえ情報理論の役割や、相互関係概念の性質について分析しよう。

まずはここまで確認した史料について、情報や相互関係にまつわる記述を中心に整理しよう。2 節で指摘したように、ST では状態間の相互関係という概念が用いられているが、その定義は与えられていない。この相互関係は、状態間の相互関係であり、観測過程や測定過程という制限はない。また形式的には、情報理論への言及もない。この ST の背景にある LT については 3 節で確認した。LT では情報理論を用いて情報や相互関係を定義し、これらを量子力学に適用している点で、形式的には ST とは異なる。概念的には、測定と観測という過程において相互関係が重要な役割を果たしていることは指摘した。1955 年の三つの論稿については、Everett (1955a) では量子力学

における確率解釈を情報概念を元に整理している。Everett (1955b) では、LT と同様に情報理論を量子力学に適用している。Everett (1955c) では、相互関係概念が用いられていて、特に対象と測定機器、測定機器と観測者の間に成立しているとされている。

つづいて、形式的な側面に注目してみよう。Everett (1955b) では、情報理論に波動関数を応用する形式が見られる。しかし、波動関数を応用した形式が記されているだけで、動機や解釈などは論じられていない。1956年のLTでは波動関数の応用のみならず演算子の相互関係というものが与えられている。また、Shannonの情報理論に関する文献が参考文献に挙がっていることから、量子力学と情報理論を結びつけようとしたのは明確である。LTやEverett (1955b)と異なり、1957年のSTでは形式的には情報理論との関連は見いだせない。一方で、Everett (1955b)では波動関数を情報理論の形式に代入しただけだが、LTにおいては可観測量に対応する演算子を情報理論に適用している。

しかし、わざわざ演算子の相互関係を定義している意味はなんだろうか。LTにおいて相互関係は絶対的性質であるとされているが、状態については相対状態概念が与えられていて、状態の記述は相対的であった。そこで、形式的な相互関係については演算子をもとに絶対的な相互関係の性質を与えようとしたと考えられる。しかし、Everettは形式的には演算子の相互関係を導入しながら、概念的には状態間の相互関係を中心に議論を展開している。このことから、演算子を元に相互関係を定義しているのは便宜上であると考えられる。

これらの内容を踏まえてEverettの解釈における相互関係の役割について論じるが、ここでは特にLTを中心に考える。実際STがLTを元に作られていて、さらに55年の論稿は時間的に先行することを考えるとLTが最もEverett自身の考え方を反映していると言えるだろう。

では、相互関係がEverett自身の解釈においてどのような役割を担っているかを考えよう。状態間の測定の例では、相互作用と相互関係の両方を用いて記述されている。独立でない系は相互関係するという記述がある (Everett 1956, p. 103) ことから、相互作用する状態間には相互関係があるといえるだろう。一方で、記憶系列の要素の状態間については、相互作用があるとは論じられていない。したがって、記憶系列における変化は相互関係による効果であるといっていいたいだろう。

相互作用がハミルトニアンで記述される一方で、相互関係は情報理論に従って与えられる。相互作用は測定過程において用いられているが、相互関係は測定過程と観測過程で用いられている。したがって、観測過程における変化は相互関係によるもので

ある。例えば、 $[\alpha_1^1, \alpha_2^2, \dots, \alpha^n]$ とあるような記憶系列を考える。この時、1 番最初の測定結果 α^1 を確認したとき $\alpha^n \rightarrow \alpha_i^n$ と変化することは確認し、この時、 α^1 と α^n は相互関係していると述べられていることは前述した。さらに、対象系が固有値 i に対応する固有状態 ϕ_i であるとき、観測者 $\psi_{[\alpha^1, \alpha^2, \dots]}^O$ がこの対象の観測を行ったとき、観測者の記憶系列の要素の α^1 が α_i^1 へと変化する。これは相互関係によるものであると説明されている。このように、相互関係は記憶系列の要素に変化をもたらしていることは明らかである。

このように物理的な作用をもたらしていることを踏まえれば、情報や相互関係という概念は実在的な性質を持つと考えられる。ここで、相互関係を情報のやり取りであると考えよう。すると、1 番目の α_i^1 という情報を得ることで n 番目の α^n が変化するということは、 α^1 の情報を α^n が受け取ることで、記憶系列の要素が変化しているということを意味している。さらに、測定と呼ばれる過程でも対象系と測定機器の間にも情報のやり取りがある。実際に、測定過程では相互関係の度合いが高くなると、対象系に対応した状態に測定機器が変化すると述べられている。これは、測定機器が対象系の情報を得ていくにしたがって状態が対象系と対応した形に変化していくことを示しているといえるだろう。

量子力学において不可欠な確率に対する説明は情報概念を背景に持っていると考えるとよい。LT では、客観的には決定論的で主観的には確率論的なモデルを提示していると主張されている。これを Everett (1955a) で提示されたような確率解釈が背景にあると考えよう。すると、まず客観的には決定論的というのは、全体系を外部から考えている人にとってその全体系の情報を全て知っているので、全体系の変化を単なるユニタリな時間発展と捉えることができる。もちろん射影公準を Everett は認めないので例外はない。一方で、観測者自身が対象系を観測するとき、対象系の情報を完全には引き出せない（観測する前に対象系の情報を完全には知らない）ので、その時間発展を正確に追うことができず、主観的には確率的に見える。さらに、この確率的な時間発展がいわゆる射影公準によって与えられる確率的な予測と一致すると考えれば、波束の崩壊を認めずに量子力学の解釈を与えることができる。

このように分岐の過程では相互関係が重要な役割を果たしており、さらに量子力学において与えられる確率は情報概念を背景にもつ主観・客観概念によって考えられる。特に、Everett 自身のモデルを理解するうえで、相互関係に重要な役割があり、さらにそれが何らかの実在論的な性質を持っている点を踏まえる必要があることは明らかであろう。相互関係の重要性にもかかわらず形式的な側面に注目すると、情報理論の言

及は完全になくなってしまっている。

§6 おわりに

Everett 自身のモデルについて再度整理しよう。まず、射影公準を認めず、二つの時間発展のうち決定論的な時間発展だけが量子力学における時間発展であるとされる。そのため重ね合わせが維持され、複合系の状態は相対状態によって相対的に与えられる。Everett は測定による変化をハミルトニアンによって記述される相互作用と情報概念に関わる相互関係によって記述し、観測による変化を相互関係のみによって記述している。また、重ね合わせにある対象系を観測したときは、観測者の記憶系列の要素が対象系の重ね合わせの要素に対応して分岐する。対応した要素間の関係や整合性は、相互関係という情報のやりとりによって確認することができる。ここで情報のやり取りは実在的な変化を引き起こすものであり、情報は実在的な性質を持っている。

情報理論が Everett の議論の背景にあることは LT において明確であったが、このような立場は 1955 年の段階からみてとることができる。しかし、ST の段階で情報理論に対する言及は削除されている。一方で、概念的には Everett 自身のモデルにおいて、特に経験との一致という観点からは相互関係が不可欠な要素である。

本論は Everett 自身の解釈の全体像を与えているものではない。しかし、このような相互関係の役割を含む形での Everett 自身の量子力学解釈がどれほどの一貫性を保てるか、EPR 問題との関係はどのようになるか、現代の量子情報を巡る種々の(哲学的・物理学的)議論と類似点はあるだろうかと言った問題が、ここでの相互関係の特徴を論じた本論を踏まえることによって初めて可能になるのである。

参考文献

- Albert, David. 1992. *Quantum mechanics and experience*. Harvard: Harvard University Press.
- Batterman, Robert. ed. 2013. *Oxford handbook of philosophy of physics*. Oxford: Oxford University Press.
- Barrett, Jeffrey. A. 2011. On the faithful interpretation of pure wave mechanics. *British Journal of Philosophy of Science* 62: 693–709.
- Barrett, Jeffrey. A. and Peter Byrne. 2012. *The Everett interpretation of quantum mechanics: Collected works 1955–1980 with commentary*. New Jersey: Princeton

- University Press.
- Bever, Brett. M. 2011. Everett's "many-worlds" proposal. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 42: 3-12.
- Bub, Jeffrey. 1999. *Interpreting the quantum worlds*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Byrne, Peter. 2010a. *The many worlds of Hugh Everett III*. New York: Oxford University Press.
- . 2010b. Everett and Wheeler, untold story. In *Many Worlds?*, eds. S. Saunders et al, pp. 521-541. Oxford: Oxford University Press.
- Conroy, Christina. 2012. The relative facts interpretation and Everett's *note added in proof*. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 43: 112-120.
- DeWitt, Bryce. 1970. Quantum mechanics and reality. *Physics Today* 23: 30-35.
- DeWitt, Bryce and Neill Graham eds. 1973. *The many worlds interpretation of quantum mechanics*. New Jersey: Princeton University Press.
- Everett III, Hugh. 1955a. Subject versus objective probability. In *The Everett interpretation of quantum mechanics: Collected works 1955-1980 with commentary*, eds. J. Barrett and P. Byrne, pp. 57-60. New Jersey: Princeton University Press.
- . 1955b. Quantitative measure of correlation. In *The Everett interpretation of quantum mechanics: Collected works 1955-1980 with commentary*, eds. J. Barrett and P. Byrne, pp. 61-63. New Jersey: Princeton University Press.
- . 1955c. Probability in wave mechanics. In *The Everett interpretation of quantum mechanics: Collected works 1955-1980 with commentary*, eds. J. Barrett and P. Byrne, pp. 64-70. New Jersey: Princeton University Press.
- . 1956. Quantum mechanics by the method of the universal wave function. In *The Everett interpretation of quantum mechanics: Collected works 1955-1980 with commentary*, eds. J. Barrett and P. Byrne, pp. 72-172. New Jersey: Princeton University Press.
- . 1957. 'Relative state' formulation of quantum mechanics. *Reviews of Modern Physics* 29: 454-462.
- . 1973. The theory of the universal wave function. In *The many worlds interpretation of quantum mechanics*, eds. B. DeWitt and N. Graham, pp. 3-140. New Jersey: Princeton University Press.

- Jammer, Max. 1974. *The philosophy of quantum mechanics: The interpretation of quantume mechanics in historical perspective*. New York: John Wiley & Sons Inc.
- Saunders, Simon. 1993. Decoherence, relative states and evolutionary adaptation. *Foundations of Physics* 23: 1553–1585.
- . 1995. Time, decoherence and quantum mechanics. *Synthese* 102: 235–266.
- Saunders, Simon., Jonathan Barrett, Adrian Kent and David Wallace. 2010. *Many Worlds?*. Oxford: Oxford University Press.
- Shannon, Claude E. and Warren Weaver. 1949. *The mathematical theory of communication*. Illinois: The University of Illinois Press.
- Wallace, David. 2002. Worlds in the Everett interpretation. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 33: 637–661.
- . 2003. Everett and structure. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 34: 87–105.
- . 2013. The Everett interpretation. In *The Oxford Handbook of Philosophy of Physics*, ed. R. Batterman, pp. 460–487. Oxford : Oxford University Press.
- Wheeler, John. A. and Ford Keneth. [1998] 2010. *Geons, black holes, and quantum foam: A life in physics*. New York: W. W. Norton & Co Inc. Kindle edition.