【논 문】 과학철학 8-1(2005) pp. 1~30

양자이론에 대한 반프라쎈의 양상해석 비판[*†]

이 중 원[‡]

양자이론에 대한 수학적 형식화가 매우 명료한 반면, 양자이론의 의미와 관련한 해석들은 매우 다양하며 논쟁적이다. 해석과 관련된 쟁점 가운데 대표적인 것이 측정문제인데, 반프라쎈은 코펜하겐 해석과 이를 보완하는 두 가지의 해석, 즉 혼합 상태에 관한 '무지해석' 및 폰노이만의 '투사가설'에 주목하고 이들의 비일관성과 기이함을 지적한다. 측정문제를 보다 일관되고 기이하지 않은 방식으로 설명하기 위해, 그는 무지해석과 투사가설을 재해석하여 코펜하겐 해석의 기본적인 틀에 적용한 새로운 해석체계, 즉 코펜하겐 해석의 변종으로서의 양상해석을 새롭게 제안한다. 양상해석은 양자이론의 이중적인 서술양식을 명료히 하고, 양상 논리 및 그 의미론 체계를 동원하여 현상계의 비결정론적 변화와 대상계의 결정론적 변화 사이의 조화를 꾀하고 있다. 본 논문에서는 양상해석의 인식론적 토대와 함께, 이 해석의 중심 주장들 곧 기본 전제들 및 결과들 그리고 함의들을 상세히 분석한 다음, 양상해석이 측정문제를 과연 일관되게 그리고 효과적으로 해결하고 있는지를 비판적으로 검토할 것이다. 반프라쎈의 양상해석은 긍정적인 성과에도 불구하고, 상태 개념의 불필요한 확대 적용, 측정 과정과 관련 가능세계로부터 실제세계로의 전이 메커니즘에 대한 설명의 부재, 경험적인 관측가능량의 특성과 관련된 기이한 결과 등, 새로운 문제들을 배태하고 있음이 지적될 것이다.

【주요어】 양상해석, 반프라쎈, 양자이론, 값 상태, 동역학적 상태, 코펜하겐 해석, 무지해석, 투사가설

---

* 접수완료: 2004. 12. 9. / 심사 및 수정완료: 2005. 6. 18.
† 이 논문은 2003년도 서울시립대학교 학술연구조성비에 의하여 연구되었음. (과제번호 20030929-1-1-013)
이 글에 유익한 논평을 해 주신 두 분의 심사위원께 감사드린다.
‡ 서울시립대학교 철학과 교수

1. 들어가는 말

양자이론에 대한 힐버트(Hilbert) 공간에서의 수학적 형식화는 양자이론의 의미 체계와 독립하여 존재하는 양자이론의 형식 구조를 명료하게 보여준다. 그러나 양자이론의 언어들 예를 들어 상태함수, 관측가능량, 확률, 측정 등의 의미와 관련해서는 여전히 다양한 해석들이 존재한다. 이론의 해석이란 일반적으로 이론 자체에 새로운 경험적 내용을 추가하지 않고 이론의 현상에 대한 설명력과 예측력에 어떠한 영향을 주지 않으면서, 이론에 비춰진 세계상을 이해하는데 필요한 포괄적인 (의미론적) 과정으로 이해할 수 있다. 양자이론에서 이러한 해석과 관련된 대표적인 논쟁 사례가 양자이론 형성 초창기부터 제기되어 왔던 측정문제다. 이를 해결하기 위해 다양한 해석들이 제안되었지만 일관성이나 적합성 측면에서 매우 논쟁적이다.

반프라쎈(Bas van Fraassen)은 측정문제와 관련하여 정통적인 코펜하겐(Copenhagen) 해석과 이를 보완하는 두 가지의 해석, 즉 혼합 상태에 관한 '무지해석'(Ignorance Interpretation)과 폰노이만(von Neumann)의 '투사가설'(Projection Postulate)에 주목하고 이들의 비일관성과 기이함을 지적한다. 그리고 이 문제를 일관되게 설명할 수 있도록 무지해석과 투사가설을 재해석하여 코펜하겐 해석의 기본적인 틀에 적용한 새로운 해석체계, 즉 코펜하겐 해석의 변종으로서의 양상해석(Modal Interpretation)을 새롭게 제안한다. 이 양상해석은 기존의 해석들이 양자이론의 이중적인 서술양식, 즉 한편으로는 비결정론적으로 변화하는 (양자)현상계를 서술하고 다른 한편으로는 결정론적으로 변화하는 대상계를 서술하는 양면적 특성을 제대로 간파하지 못함으로써 일관된 해석체계를 갖는데 실패한 것으로 평가하고, 이 양면성을 어떻게 조화시킬 수 있을까라는 문제의식에서 출발하고 있다.

서술양식의 이중성을 명확히 하고 이를 다시 일관된 체계 하에 결합시키기 위한 전략으로 양상해석은, 우선 대상의 상태에 대한 서술을 '값 상태'(value state) 서술과 '동역학적 상태'(dynamic state) 서술로 구분한

다. 여기서 현상을 서술하는 값 상태는 대상에 대한 측정결과들의 관찰보고들로 규정되지만, 대상의 동역학적 상태는 복합원리, 슈뢰딩거(A. Schrödinger) 방정식, 환원 등 양자이론의 수학적 기초 원리들로부터 이론적으로 규정된다. 그리고 보른(M. Born)의 규칙은 이들 두 상태들을 의미론적으로 연결시키고, 그 확률은 두 상태들 사이의 양상적 관계를 표현하는 것으로 받아들여진다. 이러한 양상해석 안에서 매우 기이하고 의심스러운 것으로 평가되었던 투사가설이나 무지해석은 일관성을 지닌 것으로 해석될 수 있으며, 이들이 함축하는 주장들도 마치 옳은 것인 양 나타난다고 반프라쎈은 주장한다. 이것이 맞다면 양상해석은 측정문제를 일관되게 설명할 수 있게 된다. 이 외에도 반프라쎈은 동역학적 상태에 관한 명제 집합을 양상 논리 체계로 구성하고 이를 힐버트 공간모델과 결합시킴으로써, 과학이론을 모델들의 집합으로 보는 이론에 대한 의미론적 관점을 지지하고 과학이론에 관한 그의 반(反)실재론적 입장을 더욱 확고히 하고 있다.[1] 이 모든 주장들은 양자이론에 대한 반프라쎈의 양상해석의 주요한 함의들로서, 그의 반실재론과 구성적 경험론(constructive empiricism)을 받쳐 주는 주된 토대가 되고 있다.

이 글에서는 양자이론에서의 측정문제 해결과 관련하여 반프라쎈의 양상해석이 등장하는 인식론적 배경을 살펴보고 이 해석의 주요한 주장들 곧 기본 전제들 및 결과들 그리고 함의들을 상세히 분석한 다음, 양상해석이 측정문제를 과연 일관되게 그리고 효과적으로 해결하고 있는지를 비판적으로 검토할 것이다. 결론부터 말하자면 반프라쎈의 양상해석은 양상 논리체계를 사용하여 측정문제에 대해 논리적으로 매우 일관되고 정합적인 해석을 추구하고는 있으나, 상태 개념의 불필요한(superfluous) 확대 적용과 양자이론의 구조에 대한 복잡한 규정, 측정 과정에서 가능세계로부터 실제세계로의 전이 메커니즘에 대한 설명의 부재, 경험적인 관측가능량의 특성과 관련된 기이한 결과들 등, 다른 해석들에서는 문제가

1) 이 외에도 반프라쎈은 이러한 이론적 모델이 고전논리나 고전적 확률이론과도 양립 가능함을 보임으로써, 양자논리나 양자역학적 확률이론이 고전적인 표준논리나 확률이론을 대체해야 한다는 양자 논리적 관점을 반박한다. van Fraassen (1975), pp. 577-607.

되지 않는 새로운 문제들을 배태하고 있음이 지적될 것이다. 이러한 비판은 양자이론 나아가 과학이론 일반과 관련한 반프라쎈의 반실재론적인 구성적 경험론에 대한 비판의 단초가 되리라 기대한다.

2. 코펜하겐 해석의 난제 — 측정문제

2.1. 양자이론의 수학적 형식화와 의미론

<상태 및 관측가능량 표상> 대상계의 관측가능량 A가 가질 수 있는 모든 가능한 값들(A의 스펙트럼 혹은 고유치들)의 집합 $S=\{a_i\}$이 측정결과들로부터 주어지면, 고유치 문제(eigenvalue problem)를 통해 이에 대응하는 고유 상태들의 집합 $\{|a_i\rangle\}$이 결정된다. 그리고 임의의 시각에서 대상계의 상태(혹은 상태함수)는 이러한 고유상태들의 선형결합($\Psi=\Sigma c_i|a_i\rangle$) 곧 중첩(superposition)으로 표상된다.[2] 이를 힐버트 공간의 형식체계 안에서 다시 기술하면, 고유상태는 힐버트 공간 내에서 1차원 벡터(혹은 이들 벡터들의 집합이 만드는 부분 공간)에 대응되고 그것은 다시 투사연산자(projection operator)인 I^A_E[3]에 의해 표상되므로, 결국 대상계의 일반 상태는 직교분해정리(orthogonal decomposition theorem)에 의해 밀도 연산자 $W=\Sigma\{p_i\ I^A_E : a_i \in E\}$(여기서 $\Sigma p_i = 1$)로 표상된다. 한편 모든 관측가능량 A는 허미션 연산자 $\hat{A}$에 의해 표상되는데, 직교분해정리에 의해 $\hat{A} = \Sigma\{a_i\ I^A_E : a_i \in E\}$가 된다.[4]

---

2) 상태의 의미에 대해서는 다양한 해석이 가능하다. 양자역학적 상태가 한 대상에 부여되는가 아니면 대상의 앙상블에 부여되는가, 한 대상에 부여되는 경우에도 상태가 대상의 물리적 특성을 정확하게 반영하는 것인지 아니면 단순히 측정결과들에 대한 확률적 정보만을 제공해 주는 것인지가 논쟁이다.

3) 투사 연산자란 고유치가 0 또는 1인 'yes-no' 관측가능량으로서, 다음의 성질을 만족한다. $I^A_E\ x_i = x_i$ if $a_i \in E$; $I^A_E\ x_i = 0$ if $a_i \notin E$. 여기서 E는 A의 고유치들의 집합을 가리킨다.

4) 관측가능량들이 모두 허미션 연산자에 의해 표상되어야 하는 것은 아니다.

<시간에 따른 상태 변화(State Evolution)> 양자역학적 상태함수 $\Psi(t)$는 (순수상태이든 혼합상태이든) 양자이론의 동역학 방정식인 결정론적인 슈뢰딩거 운동방정식을 만족한다. 즉 상태함수 그 자체는 결정론적으로 변화한다. 이를 힐버트 공간에서 재 기술하면, 고립된 대상계에서 양자역학적 상태의 시간에 따른 변화는 $W(t)=U_t\ W(0)\ U_t^{-1}$로 주어진다. 여기서 U_t는 유니터리(unitary) 연산자로 물리적으로 대상계의 에너지를 보존한다. U_t하에서 순수상태는 순수상태로 혼합 상태는 혼합 상태로 변화하며, 상호간에 단절적인 교차 변화는 가능하지 않다.

<복합 원리(Composition rule)> 상호 독립적인 두 대상계 X, Y가 각각 힐버트 공간 H_1, H_2 내의 상태 ϕ, η에 있다면, 이들을 어떤 상관관계(correlation)하에 하나로 묶은 복합계 X+Y는 H_1와 H_2의 텐서곱(tensor product) 공간인 $H_1 \otimes H_2$에서 상태 $\phi \otimes \eta$에 존재한다.5) 예를 들어 대상계 X, Y가 각각 $\phi=\Sigma c_i|a_i\rangle$, $\eta=\Sigma d_i|b_i\rangle$에 있다면, 이들을 완전한 상관관계하의 복합계로 묶었을 때 복합계의 전체 상태는 힐버트 공간 $H_1 \otimes H_2$에서 $\Psi = \phi \otimes \eta = \Sigma e_i|a_i\rangle \otimes |b_i\rangle$로 표상된다. 여기서 텐서곱 공간은 일반적으로 부분계 공간들의 산술적 합을 능가하며, 복합계 전체의 상태가 부분계들의 그것들에 의해 일의적으로 결정되지 않는 양자이론의 전체론적 특성을 반영한다.

<특수 환원(Special Reduction)> 환원은 복합계의 전체 상태로부

그러나 일반적으로 허미션 연사자에 의해 표상 가능한 것으로 받아들인다.

5) ⓧ는 H_1, H_2의 H_{12}로의 사상(mapping)으로서, 다음의 수학적 성질들을 만족한다.

ㄱ) 벡터들의 집합 $\{x \otimes y: x \in H_1, y \in H_2\}$는 공간 H_{12}로서 H_1, H_2를 확장(span)한 것이다. 예를 들어 H_1을 x축의 1차원 공간, H_2를 y축의 1차원 공간이라 한다면, H_{12}는 x-y평면을 가리킨다.

ㄴ) ⓧ는 bilinear : $x\otimes(y+z)=(x\otimes y)+(x\otimes z)$; $(x+y)\otimes z=(x\otimes z)+(y\otimes z)$; $b(x\otimes y)=(bx\otimes y)=(x\otimes by)$

ㄷ) ⓧ는 스칼라 곱(*)을 다음과 같이 만족한다

: $(x\otimes y)*(x'\otimes y')=(x*x')\ (y*y')$

터 부분계가 가지는 각각의 상태를 규정한다. 만약 복합계 X+Y가 완전한 상관관계[6] 하에 있는 두 부분계로 구성되어 순수상태 $\Psi = \Sigma e_i | a_i > \otimes | b_i >$에, 혹은 이에 대응되는 힐버트 공간상의 밀도연산자 W에 있다면, 대상계 X는 상태 $\rho_1 = \#W[X] = \Sigma | e_i |^2 I_{a(i)}$ 즉 X에 관해 환원된 W에, 그리고 대상계 Y는 $\rho_2 = \#W[Y] = \Sigma | e_i |^2 I_{b(i)}$즉 Y에 관해 환원된 W에 있다.[7] 이는 양자이론의 경험적 기반인 다음과 같은 요구, 즉 대상계 X의 관측가능량인 $\hat{A}$가 X계에서 갖는 기대값이, 복합계 X+Y 에서의 대응 관측가능량인 $\hat{A} \otimes I_2$가 복합계에서 갖는 기대값과 동일해야 한다는 경험적 사실, 다시 말해 $Tr(\hat{A}\ \#W[X]) = Tr((\hat{A} \otimes I_2)W)$이 반영된 결과이다.[8] 만약 복합계가 순수상태인 경우 환원된 부분계들의 상태는 혼합상태가 되는데, 이는 전체계의 상태가 부분계들의 그것들에 의해 일의적으로 결정되지 않는 전체론적 특성을 가짐을 의미한다.[9]

---

6) 특수 환원은 복합계가 이와 같이 '완전하게 상호 연관된'(perfectly correlated) 상태에 있는 경우에 해당된다. 이를 일반화하면 일반 환원이 가능해 진다. 반프라쎈 (1991), p. 202.

7) 글리슨 정리(Gleason′s theorem)는 이러한 환원된 상태들 혹은 환원된 밀도연산자들이 유일하게 존재하여 대상계 X, Y에 각각 부여될 수 있음을 보여준다. Gleason (1957), pp. 885-93. 이의 의미에 관한 더 자세한 내용은 van Fraassen (1991), pp. 165-77 참조.

8) 이는 물론 모든 허미션 연산자가 관측가능량을 표상한다는 가정 하에서만 성립한다. 만약 이 가정이 거부된다면, 환원된 상태에 대응하는 밀도연산자들 #W의 유일성은 상실된다.

9) 한편 환원은 그것의 물리적 함의와 관련해서 논쟁적이다. 우선 전체계의 상태가 순수상태이건 혼합 상태이건 이들 각각을 (수학적으로) 환원할 경우 부분계 각각의 상태는 전체계의 상태 유형에 상관없이 동일한 혼합 상태가 되지만, 물리적으로 전체계가 순수상태에 있는가 아니면 혼합 상태에 있는가는 분명 서로 다른 의미를 가진다. 또한 환원에 의해 주어진 부분계의 상태 역시 전체계의 상태와 마찬가지로 동역학적 방정식에 따라 변화해야 하는데, X를 대상계로 Y를 X의 관측가능량을 측정하는 측정 장치계로 하는 측정과정에 적용했을 때, 대상계의 상태가 측정이라는 물리적 상호작용의 영향 하에서 과연 동역학적 방정식에 따라 연속적으로 변화할 수 있는지 의심스럽다. 아래의 그림은 이러한 상황을 묘사한 것이다.

<보른의 의미규칙> 양자이론의 수학적 형식화와 별도로, 양자이론을 구성하는 또 하나의 중요한 가설은 수학적 체계에 경험적 의미를 부여하는, 다시 말해 추상화된 이론과 경험적 증거들을 연결시키는 의미(혹은 해석)규칙이다. 대상계 X가 관측가능량 A의 고유상태들의 중첩으로 표상된 순수상태 $\phi = \Sigma c_i | a_i \rangle$에 있을 때, 관측가능량 A에 대한 측정결과가 a_k일 확률은 일반적으로 $\Sigma\{ | c_j |^2 : a_j = a_k \}$이다. 이를 힐버트 형식체계의 언어로 기술하면, 대상계 X가 상태 W에 있을 때 A의 측정결과가 집합 E(Borel set)내의 값을 가질 확률은 $P^A{}_W(E) = Tr(W\ I^A{}_E)$이 된다. 이는 코펜하겐 해석의 핵심 가설로서, 양자이론의 동역학적 상태와 측정결과들을 통계적으로 연결시킨다.[10]

2.2. 측정문제와 다양한 해석 가설들

전술한 수학적 형식체계와 보른의 의미규칙을 복합계의 형태로 기술되는 측정상황에 적용해 보면, 양자이론의 해석에서 코펜하겐 해석의 난제

전체계의 초기상태 ---- evolution -----> 전체계의 최종상태

환 ↓ 원 환 ↓ 원

대상계의 초기상태 -------- ? --------> 대상계의 최종상태

10) 보른의 확률이 무엇을 의미하는지에 대해서는 다양한 해석이 가능하다. 그것은 상태개념에 대한 상이한 이해와 관련된다. 상태를 대상계에 부여하는 경우 상태를 대상계의 물리적 속성이 그대로 반영된 것으로 해석하는 관점은 $\phi \rightarrow | a_k \rangle$로의 상태전이 확률로 보는 반면, 상태가 단지 관측가능량들의 값에 대한 확률적 정보만을 제공한다고 보는 관점에서는 측정결과들에 대한 추정확률로 볼 것이다. 반프라쎈은 이와 관련하여 두 가지의 비결정론을 주장한다. 하나는 측정결과들에 관한 비결정론이고, 다른 하나는 상태변화에서의 비결정론이다(van Fraassen (1991), p. 245). 한편 상태가 단일 대상계에 부여되는 것이 아니라 동일계들의 앙상블(ensemble)에 부여되는 것으로 보는 경우, a_k를 기대값으로 갖는 앙상블 내에서의 대상계들의 통계적 분포의 확률로 간주될 것이다. 이들은 각기 측정문제에 직면하여 정합적이고 일관된 설명을 위해 보른의 규칙을 보완하는 새로운 해석규칙들을 제안하고 있다.

로 알려진 측정문제가 발생한다. 이를 일관되게 해결(혹은 설명)하기 위하여 수학적 형식체계에 해석 가설을 부가하는 다양한 시도들이 있어 왔는데, 무지해석과 폰노이만의 투사가설이 그 대표적 예들이다.[11] 먼저 폰노이만-측정의 경우 힐버트 형식체계 하에서 측정이 어떻게 서술되며, 여기서 측정문제란 무엇이고 이의 일관된 설명을 위해 제안된 무지해석과 투사가설의 해석 원리들이 이 문제를 어떻게 해결하고 있는지, 그리고 그 문제점은 무엇인지를 살펴보자.

대상계 X의 관측가능량을 A, 측정 장치 Y의 지시-관측가능량을 B라 하고, 초기에 측정 장치는 기저상태 $\eta_0 = |b_0\rangle$에, 대상계는 고유상태인 $\phi = \Sigma c_i |a_i\rangle$에 있었다고 하면, 측정에 의해 전체계의 초기상태 $\Psi_0 = \phi \otimes \eta_0 = (\Sigma c_i |a_i\rangle) \otimes |b_0\rangle$는 최종상태 $\Psi = U\Psi_0 = \Sigma c_i |a_i\rangle \otimes |b_i\rangle$가 된다.

---

11) 이들은 측정상황을 정통해석처럼 측정 장치와 대상계로 구성된 고립된 복합계로 규정하고, 측정을 복합계의 상태변화(동역학적 방정식을 만족하는 unitary evolution)의 관점에서 고찰하는 공통의 특성을 지닌다. 여기에는 크게 두 가지 측정개념이 사용되는데 하나는 폰노이만 측정개념이고, 다른 하나는 이를 좀 더 일반화한 폰노이만-뤼더스(Lüders) 측정개념이다. 전자는 (ㄱ) 측정 장치 Y가 순수 기저상태 b_0에 있고, (ㄴ) 측정과정은 동역학적 방정식을 따르는 unitary evolution 과정이며 (ㄷ) 대상계 X의 초기상태가 순수 고유상태라면, 이는 측정에 의해 영향을 받지 않고 최종상태까지 초기의 고유상태를 그대로 유지하는 특성을 지닌다. 반면, 후자는 (ㄱ), (ㄴ)의 성질은 동일하나, (ㄷ)에서 전자가 대상계의 최종상태를 대상계 X로 전체계의 최종상태를 환원한 것으로 보는 것과 달리, 대상계 X의 초기(환원)상태를 관측가능량의 고유상태 공간 위에서 조건화(conditionalization)한 것으로 본다. 자세한 논의는 van Fraassen (1991), pp. 218-224 참조.

이들과는 달리 주렉(Zurek)과 하틀(Hartle) 등은 측정상황이 대상계, 측정 장치뿐 아니라 주위 환경의 세 가지 요소로 이루어짐을 강조한다. 즉 대상계와 측정 장치가 이제는 고립계가 아니라 주위 환경과의 상호작용 하에서 변화하는 비고립된 계이며, 측정이란 세 가지 계로 구성된 복합계 내에서의 변화(evolution)로 본다. 다시 말해 무지해석이나 폰노이만의 투사가설과 같은 해석 가설들의 도움 없이 측정문제를 순전히 물리적으로 해결하려 한다(이에 관한 자세한 논의는 Hartle (1992)와 Hartle (1993)을 참조). 여기서는 논의를 전자에 국한하도록 하겠다. 그것은 이 글의 핵심 주제인 반프라쎈의 양상해석이 이들의 비일관성을 비판하면서 일관되고 적합한 정통해석의 복원을 추구하고 있기 때문이다.

여기서 대상계 X와 측정 장치 Y의 최종상태는 환원에 의해 각각 #W[X] $=\Sigma|c_i|^2 I_{a(i)}$, #W[Y]$=\Sigma|c_i|^2 I_{b(i)}$로 주어진다. 그러나 환원에 의해 주어진 측정 장치의 최종상태는 우리의 실험적 보고, 즉 측정 장치의 지시-관측가능량이 보여주는 값이 명확히(확률 1로) b_k(곧 대상계의 측정결과가 a_k)라는 실험결과와는 다른 정보를 제공한다. 즉 측정 장치가 지시-관측가능량의 특정한 측정값 b_k을 가리키는 특정한 순수상태 $|b_k>$에 있는 것이 아니라, 측정결과들의 통계적 분포를 함축하는 혼합 상태에 있음을 가리킨다. 이러한 수학적인 이론적 예측과 측정에 대한 실험보고와의 불일치가 바로 측정문제의 근원인 바, 이를 해결하기 위한 다양한 해석 원리들이 제기되어 왔다.

<무지해석> 이는 대상계가 혼합 상태에 있다면, 대상계는 혼합 상태를 구성하는 적절한 고유상태들 중 하나에 실제로 존재함을 주장한다. 다시 말해 혼합 상태에서의 확률적 분포는 상태들의 실제적 분포라기보다는 무지의 확률이라는 것이다. 그 결과 대상계는 어느 한 상태에 있음에도 불구하고 우리가 그것을 정확히 모르기 때문에 혼합 상태에 있는 것처럼 기술된다는 것이다.

무지해석은 크게 두 가지 결정적인 반박을 받아왔다. 첫째는 특정의 혼합 상태를 구성하는 순수상태들의 집합이 사실은 비편광된(unpolarized) 스핀 1/2인 입자의 예에서도 볼 수 있듯이 유일하지 않기 때문에, 어떤 순수상태에 대상계가 실제로 존재하는지 알 수 없다는 반론이다.[12] 둘째는 복합계가 순수상태에 있고 이의 환원에 의해 부분계들의 혼합 상태가 나오는 경우 모순이 발생한다는 비판이다. 예를 들어 순수상태 W에 있는

12) A가 스핀(spin) 값이 1/2인 스핀 물리량 S인 경우, 가령 z 방향의 '스핀-업'(spin-up)을 나타내는 고유 상태 $|\uparrow>_z$는 $c_1|\uparrow>_x + c_2|\downarrow>_x$로 표상 가능하고 동시에 $c_1|\uparrow>_y + c_2|\downarrow>_y$로도 표상 가능하므로, 결과적으로 이것으로 구성된 복합계의 상태를 다시 환원하여 얻은 대상계 X의 최종상태 #W[X]$=\Sigma|c_i|^2 I_{a(i)}$에서 고유상태 $|a_i>$는, x 방향의 '스핀-업' 혹은 '스핀-다운'을 나타내는 고유상태일 수도 있고 y 방향의 '스핀-업' 혹은 '스핀-다운'을 나타내는 고유상태일 수도 있다. 이에 관한 자세한 논의는 Hughes (1989), pp. 1-8 참조.

복합계에 대해 부분계들이 각각 혼합 상태 $\#W[X] = c_1 I_{a(1)} + c_2 I_{a(2)}$와 $\#W[Y] = d_1 I_{b(1)} + d_2 I_{b(2)}$에 있는 경우를 생각하자(여기서 확률 c_i값들은 서로 다르며 합은 1, d_i값들도 서로 다르며 합은 1이다). 이 경우 무지해석을 적용하면 복합계가 $c_i d_j$의 확률을 지닌 4개의 상태 $|a_i\rangle \otimes |b_j\rangle$들의 혼합 상태가 되어야 하는데, 이는 원래의 순수 상태와 모순되는 결과를 초래한다.

<폰노이만의 투사가설> 측정문제 해결을 위해 폰노이만은 우선 다음을 가정한다. '측정 장치 Y에 속하는 관측가능량 B가 b_k의 값을 갖는다'는 것은 '측정 장치 Y가 B의 대응 고유상태인 $|b_k\rangle$에 있다'는 것과 동일하다. 그렇게 되면 보른의 규칙에 따라 '측정 장치 Y가 B의 고유상태 $|b_k\rangle$에 있을 때, B가 b_k의 값을 가질 확률은 1이다'가 성립하게 된다. 이는 양자역학적 상태가 전면적으로 관측가능량의 측정결과들에 대한 참 거짓을 결정함을 의미할 뿐만 아니라, 'B가 b_k의 값을 갖는다'는 것과 'B의 측정결과가 b_k일 확률이 1이다'라는 것이 동일함을 함축한다. 이러한 가정 하에서 폰노이만은 다음의 투사가설을 도입한다. 즉 측정과정이 전술한 최종상태 Ψ에서 종료되는 것이 아니라 $\Psi = \Sigma c_i |a_i\rangle \otimes |b_i\rangle \rightarrow \Psi' = |a_k\rangle \otimes |b_k\rangle$로의 '비인과적(acausal) 상태전환'(슈뢰딩거의 표현을 빌자면, 파속붕괴)이 추가로 존재하며, $|c_k|^2$은 바로 이 상태전환의 확률이라는 가설이다. 그 결과 측정의 최종단계에서 B가 b_k의 값을 가질 확률로서의 보른확률은 측정 장치 Y가 B의 고유상태인 $|b_k\rangle$에 있을 확률이 되며, 이는 다시 비결정론적인 상태전환의 확률로 인식된다.[13]

마게누(H. Margenau)는 투사가설에서의 비인과적 상태전환이 슈뢰딩거 방정식을 따르지 않는 기이하고 비물리적인 과정이거나 아니면 원격작용이 허용되는 의심스러운 물리적 과정이라는 이유로, 그리고 폰노이만

---

13) 투사가설에 대한 지지 논증은 크게 세 가지로 나누어 볼 수 있다. 첫째는 폰노이만 자신의 방어논증이고, 둘째는 휴스(Hughes)의 양자조건화 확률에 입각한 지지논증이며, 셋째는 슈뢰딩거에 그 뿌리를 두고 있는 거시와 미시의 구분과 같은 초선택 규칙(superselection rule)에 입각하여 투사를 거시계의 속성으로 정당화하려는 주장이다. 이에 대한 자세한 내용과 비판은 van Fraassen (1991), pp. 250-69와, Hughes (1989), pp. 271-8 참조.

자신의 투사가설 방어논증의 하나인 ‘일관성(consistency) 논변’[14]이 경험적인 어떠한 의미도 더 이상 부여하지 못하는 불필요한(redundant) 증명이라는 이유로 투사가설을 거부한다.[15] 한마디로 양자이론의 예측력의 관점에서 이의 거부는 정당화될 수 있다고 본다.[16] 한편 반프라쎈은 폰노이만 자신의 두 번째 방어논증, 즉 측정이 반복가능하기 위해서는 투사가설이 요구된다는 논증이, 투사 없이도 측정에 관한 양자이론 자체 내에서 해결 가능한 문제임을 주장함으로써 이를 반박하고 있다.[17] 또한 양상개념을 도입하여 ‘B가 b_k의 값을 갖는다’는 것과 ‘B의 측정결과가 b_k일 확률이 1이다’, 다시 말해 ‘측정 장치 Y가 B의 대응 고유상태인 $|b_k\rangle$에 있다’라는 것이 동일하지 않으며, 따라서 대상계의 비인과적 상태 변환을 기본내용으로 하는 투사가설이 측정문제 해결에 효과적이지 못함을 주장하고 있다.

결국 측정문제와 관련하여 정통해석의 대안으로 제안된 무지해석과 투사가설은, 일관성과 적합성을 갖는 만족스러운 해석(혹은 설명)을 제공하지 못한다고 볼 수 있다. 즉 투사가설을 받아들이면 ‘관측가능량 B가 b_k의 값을 갖는다’(혹은 ‘관측가능량 A가 a_k의 값을 가진다’)는 측정보고와 이론적 예측 간에 일치를 얻을 수 있지만 비인과적 상태전환이라는 인과의 변칙사례(casual anomaly)가 발생하고, 반대로 이를 거부하면 측정의 최종단계에서 대상계나 측정 장치가 항상 혼합 상태에 있다는 것 이상으로 ‘측정 장치가 A의 측정값 a_k를 보여 준다’는 실험보고에 대한 어떠한 해석도 불가능하게 되는 딜레마에 빠지게 된다. 물론 이러한 결론은 반프라쎈의 경우처럼 환원이 측정문제와 뒤엉켜 있지 않으며, 그 자체로 정당

14) 측정과정에서 대상의 상태는, 이후 즉각적으로 반복된 측정이 첫 번째 측정결과와 확실하게 동일한 측정결과를 산출하는 방식으로 변화한다는 논변으로, 이 논변이 맞다면 투사가설이 당연하게 요구된다. von Neumann (1955), p. 442.

15) Margenau (1936), pp. 240-2.

16) 반프라쎈은 투사가설의 도입이 양자이론의 예측력과는 무관하게, 오히려 측정과정에서 어떤 일이 일어나는가에 관한 설명, 즉 해석과 연관되는 만큼 마게누의 반박이 설득력이 약함을 지적한다.

17) van Fraassen (1991), pp. 252-6.

화가 가능한 양자이론의 기초 원리로 받아들이는 경우에 한해서 주어진다. 설령 한 대상계가 아닌 대상계의 앙상블에 상태를 부여함으로써 무지해석을 받아들이는 것이 가능하게 된다하더라도, 어째서 각각의 대상계에 상태가 부과될 수 없는지에 대한 설명이 부재하며 이는 또한 각 대상계에 대한 실험적 측정의 보고들이 존재하는 현실적 상황과도 잘 맞지 않는 듯하다.

이상의 논의를 요약하면 측정문제와 관련하여 확률을 대상계의 실제 상태에 대한 무지확률 혹은 통계적 앙상블의 빈도수로 보는 무지해석은 만족스럽지 못하다. 반면 'A의 측정결과가 a_k일 확률이 1이다'(즉 '$P(A=a_k \mid A$ is measured$)=1$')라는 문장과 'A가 a_k의 값을 가진다'라는 문장의 동일성에 기초하고 있는, 따라서 보른확률을 상태전환의 확률로 해석하는 폰노이만의 투사가설은 (비록 일관성은 지니나) 경험적 적합성을 상실한다.[18] 따라서 이들 두 문장을 분리시켜 측정문제를 설명할 수만 있다면, 달리 말해 상태전이에 관한 투사가설 자체는 거부되나 측정결과들의 관점에서 투사가설에서와 같은 동일한 결론이 도출될 수 있다면, 일관성과 적합성을 모두 지닌 새로운 해석의 가능성이 기대될 수 있을 것이다. 반프라쎈은 바로 이 점에 주목하여 이들의 분리에 근거한 새로운 해석, 즉 양상해석을 주장한다.

3. 반프라쎈의 양상해석

반프라쎈은 양자이론이 한편으로 결정론적으로 변화하는 대상계의 상태를 서술하면서, 다른 한편으로 비결정론적인 (양자)현상계를 설명하는 양면성을 지니고 있다고 본다. 그리고 측정문제를 해결하기 위해 제안되었던 기존의 여러 가지 의심스러운 해석들이나 심지어 양자논리에 의한 고전논리의 대체와 같은 주장들은, 이러한 양면성의 본질을 제대로 인식

---

18) 이는 폰노이만이 양자논리학의 구성과 관련하여 투사연산자를 명제로 언급한 경우에서도 잘 나타난다. van Fraassen (1991), pp. 338-42.

하지 못한 결과들로 평가한다. 반프라센은 대상에 대한 측정결과(곧 지시-관측가능량의 값)를 내용으로 하는 소위 사건(혹은 현상)에 대한 서술과, 이러한 사건들이 발생할 확률 정보를 제공하는 대상계의 이론적 상태에 대한 서술을 구분한다. 후자가 양자 이론과 직접 연루되어 진행되는 결정론적 과정에 대한 서술이라면, 전자는 그러한 상태들의 제약 하에 비결정론적으로 변화하는 그러나 양자 이론과는 직접 연루되어 있지 않은 현상들을 서술한다. 그런 다음 이들을 다시 논리적으로 일관되게 결합하고 경험적으로도 적합하게 (즉 기이하지 않게) 해석할 수 있는 대안적인 해석을 제안한다. 좀 더 상세히 분석해 보자.

고전적인 물리이론은 대상계의 상태란 모든 관측가능량들의 값을 알면 결정되고 관측가능량의 값은 그것에 대한 측정값으로부터 주어지며, 역으로 대상계의 상태를 알면 측정값을 그로부터 직접적으로 추론할 수 있다고 가정한다. 즉 대상계의 상태와 관측가능량의 값, 나아가 측정값이 상호 일대일 대응관계에 있음을 가정한다.[19] 따라서 대상계의 상태변화는 관측가능량의 값들(혹은 측정값들)의 변화에 의해 일의적으로 결정되게 된다. 그러나 양자이론의 경우 상황은 전혀 다르다. 즉 대상계의 상태들이 관측가능량들의 값에 의해 결정되지 않고 관측가능량들의 값 또한 그것들에 대한 측정값과 반드시 일치한다고 볼 수 없기에, 결과적으로 대상계의 상태 변화와 현상의 변화가 상응관계를 갖는다고 말할 수 없다.[20] 따라서 반프라센은 양자이론에 서로 다른 역할을 담당하는 다음의 두 가지의 상태개념이 존재하고, 이들이 함께 대상계의 전체 상태를 구성한다고 가정하고 있다.[21]

값 상태(value state): 관측가능량이 어떤 값을 갖는다고 진술함으로써 완전하게 규정되는 상태

---

19) van Fraassen (1991), pp. 112-3.

20) X계의 상태가 순수상태인 경우에는, 다시 말해 yes-no의 관측가능량에 대응되는 투사연산자가 대상계의 상태를 표상하는 경우에는, 상태와 관측가능량의 값 간에 일대일 대응관계가 성립할 수 있다. 폰노이만의 전략은 이를 모든 상태에까지 확대시킨 것에 다름 아니다.

21) van Fraassen (1991), p. 275.

동역학적 상태(dynamic state): 대상계가 외부의 영향을 받거나 고립되었을 때 동역학의 운동법칙에 따라 어떻게 변화하는가를 진술함으로써 완전하게 규정되는 상태

여기서 값 상태는 관측가능량의 값(혹은 측정값)과 일대일로 대응되는 고전적 의미의 상태개념으로서 양자이론과 관련해서는 표면모델에 속한다고 볼 수 있다.[22] 반면 동역학적 상태는 어떤 상호작용(interaction) 하에서 대상계의 상태변화가 결정론적인 슈뢰딩거 방정식을 따라 어떻게 진행되는지를 서술하는 상태개념으로서 관측가능량의 값과는 직접적인 관련이 없으며, 양자이론의 이론적 모델에 속하고 힐버트 공간모델에서는 벡터 혹은 부분공간에 대응된다. 동역학적 상태가 관측가능량들의 값들의 변화(혹은 값 상태의 변화)에 어떤 통계적(혹은 확률적) 제약을 가하면서 결정론적으로 변화하는 상태라면, 값 상태는 이들의 제약 하에서 비결정론적으로 변화하는 상태다. 결국 동역학적 상태개념은 (보른의 규칙에 따라) 측정결과들의 확률을 예측하는 역할을 한다. 다시 말해 동역학적인 상태는 관측보고와 관련하여 어떤 사건이 일어날 수 있는지 없는지, 그리고 그것의 발생이 얼마나 개연적인지에 관한 정보(가능성을 포함한 양상적 정보)를 제공할 뿐, 실제로 무엇이 발생했는지를 정확하게 말해 주지

22) 반프라쎈은 과학이론을 한 부류의 모델들로 인식한다. 그리고 과학이론의 수용은 모델들 중 특정모델이 실제세계를 얼마나 있는 그대로 드러내 주었는가의 실재론적 기준이 아니라, 그것들이 보여주는 정보제공능력(informativeness) 혹은 경험적인 예측능력에 달려있다고 주장한다. 현상을 이론이 얼마나 구제하는가가 중요한 관건이 된다. 소위 과학이론에 관한 의미론적 관점을 강조한다. 반프라쎈은 모델들을 다시 두 부류로 구분하고, 이론을 이들의 중층적 구조로 파악한다. 하나는 관찰가능한 현상을 서술하는 '현상모델'(data model) 혹은 '표면모델'(surface model)이고, 다른 하나는 경험 현상들의 이론적 상이라 할 수 있는 '경험적 하위구조'(empirical substructure)를 부분으로 포함하는 '이론적 모델'(theoretical model)이다. 여기서 표면모델이 이론적 모델 내의 경험적 하위구조와 구조 동형적(isomorphic)일 때, 달리 표현하면 현상모델이 이론적 모델 내에 파묻혀서(embedded) 이론모델이 현상에 관한 더 많은 정보를 제공할 수 있게 될 때, 반프라쎈은 이론이 현상을 구제한다(save)고, 또는 이론이 현상에 잘 맞는다(fit)고 말한다(van Fraassen (1991), pp. 112-3).

않는다. 결국 측정 장치를 포함하는 양자 복합계가 측정 이후에 동역학적으로 보면 상태 $\Psi = \Sigma c_i | a_i \rangle \otimes | b_i \rangle$에 있지만 실제로는 상태 $| a_k \rangle \otimes | b_k \rangle$에 있다는 측정문제와 관련하여, 반프라쎈은 이 두 상태 개념을 모두 포용함으로써 측정문제 해결에서 비일관성과 비적합성을 피하려 한다고 말할 수 있겠다.

이러한 개념구분에 기초하여 반프라쎈은 다시 다음과 같은 두 종류의 명제를 구분한다.[23)]

> 값-부여 명제(value-attributing proposition) : 관측가능량 A가 실제로 (혹은 우연적으로) 실수 집합 E내의 한 값을 가진다는 명제로 <A, E>로 표기된다.
> 상태-부여 명제(state-attributing proposition) : 관측가능량 A에 대한 측정 결과가 반드시 (혹은 필연적으로) E 내의 한 값이 되도록 하는 그러한 상태가 존재한다는 명제로 [A, E]로 표기된다.

이 명제들의 구분은 양자이론에 관한 반프라쎈의 양상해석의 몇 가지 주요한 특성들을 함축하고 있다. 먼저 이들 간에 [A, E] = □<A, E>의 관계가 성립한다.[24)] 즉 관측가능량 A가 E의 한 값을 갖는 것이 필연적 (혹은 확률 1)이라는 주장은, 관측가능량 A에 대한 측정결과가 필연적으로 E내의 한 값이 되도록 하는 그러한 상태가 존재함을 의미한다. 이는 양자계에 대한 동역학적 상태 부여가, 측정결과와 일의적으로 대응되는 값 상태 부여와 달리 보른의 확률에 지배됨을 뜻한다. 또한 이 관계로부터 현상모델과 이론적 모델의 하위구조 사이의 구조적 동형성도 이끌어 낼 수 있다.

둘째로 명제 [A, E]는 명제 <A, E>를 함축한다. 즉 A가 E내의 한 값을 필연적으로 (혹은 확률 1로) 갖도록 하는 상태가 존재한다면, A는 실제로 E내의 그 값을 가진다. 그러나 A가 E내의 한 값을 필연적으로 갖도록 하는 상태가 존재하지 않는다 할지라도, A가 실제로 E내의 그 값

---

23) *Ibid.*, p. 275.
24) 여기서 □는 '필연적으로'를 의미하는 양상기호이다.

을 가지는 것은 가능하다.[25] 이는 두 명제가 동일하지 않다는 것, 다시 말해 A의 측정값과 A가 속해있는 대상계의 동역학적 상태 간에 일대일 대응관계가 성립하지 않는다는 것에 다름 아니다.

셋째는 이들 명제들의 진리 값은 값 상태와 동역학적 상태에 의해 결정된다는 진리조건이다. 대상계 X가 시각 t에서 동역학적 상태 W에 있다고 가정할 때, 대상계 X에 속한 모든 관측가능량 A에 대해 다음의 진리조건이 만족된다.[26]

(T1) 상태 W가 명제 [A, E]를 참으로 만드는 오직 그러한 경우에 한해서, 명제 [A, E]는 참이다.
(T2) 상태 W에 대해 '상대적으로 가능한'(possible relative)[27] 순수 상태 x가 존재하며, x가 명제 [A, E]를 참으로 만드는 오직 그러한 경우에 한해 명제 <A, E>는 참이다.

이는 먼저 코펜하겐 해석에 암묵적으로 들어 있는 '가능성에서 실제로의 전화'[28]를 함축한다. 왜냐하면 무엇이 실제적인가를 서술하는 (현상모델 내의 값 상태에 대응되는) 이론적 모델내의 동역학적 상태인 x가, 무엇이 가능한가를 서술하는 동역학적 상태 W로부터 연역되지는 않지만 W에 상대적으로 가능한 상태이며, (T2)의 방식으로 이에 제한되어 있기 때문이다(이러한 의미에서 반프라쎈은 자신의 해석을 코펜하겐 해석의 변종이라 칭한다). 또한 이 진리조건은 다음과 같은 결과들도 함축한다. 하나는 개개의 관측가능량이 항상 명확한(sharp) 값들 중의 하나를 가진다

25) 이와는 달리 대상계가 순수상태에 있는 경우 두 명제는 구분되지 않으며 그 정보의 내용은 동일하다.
26) van Fraassen (1991), p. 281.
27) 모든 관측가능량 A와 실수(혹은 일반적으로 보렐)집합 E에 대해 $P^{A}_{W}(E)=1$일 때마다 $P^{A}_{x}(E)=1$이 성립하면, x는 W에 '상대적으로 가능하다'고 부른다. 보통 W의 상(image)공간을 생성(span)하는 순수상태들이 이러한 성질을 만족한다.
28) 이러한 해석은 다음에 기초한다. 일반적으로 코펜하겐 해석은 측정이 이루어지기 전에 대상계의 관측가능량이 특정한 값을 이미 가지고 있다고 가정하지 않는다. 오히려 이를 의심하고 부정한다. 그러다가 측정이 이루어지는 순간 대상계와 측정장치가 결합하여 특정한 측정결과를 산출한다고 해석한다.

는 고전원리에 대한 거부이다. [A, E] = [I^{A}_{E}, 1]이므로 (T2)에 의해 <A, E> = <I^{A}_{E}, 1>이 성립하는데, 그럴 경우 <A,E>는 고전적인 의미의 선언(∪{<A, r> : r ∈ E})이 될 수 없게 된다. 왜냐하면 만약 E 안에 <A, E>를 참으로 만드는 가장 작은 보렐 집합 E_0(⊆E)가 존재한다면, 그럴 경우 이는 <A, E_0>를 항상 참으로 만들 것이므로 결과적으로 확률 Tr(WI^{A}_{E0}) = 1이 되고, 따라서 E_0보다 더 큰 집합 E에 대해서도 확률 Tr(WI^{A}_{E}) = 1이 되기 때문이다. 이는 A가 불명확한(unsharp) 값을 가질 수 있음을 의미한다. 다른 하나는 혼합 상태에 대한 무지해석이 비록 실제로 옳지 않지만 마치 옳은 것인 양 해석될 수 있다는 것이다. 왜냐하면 만약 대상계 X가 혼합 상태 W에 있다면 X에 속하는 관측가능량의 값들(혹은 값 상태들)이 실제로 무엇인지 모른다 할지라도, 그것들은 (T2)에 의해 분명 대상계가 W의 상공간(image space)안에서 상대적으로 가능한 순수상태 x에 있었다면 가졌을 바로 그 값들이기 때문이다. 한마디로 관측가능량의 값(혹은 값 상태)에 관한 무지해석은 옳다는 것이다.

넷째로 이러한 조건을 바탕으로 반프라쎈은 힐버트 공간의 부분공간에 대응되는 명제들 [A, E]가 양상논리를 따른다고 주장한다.[29] 먼저 양자이론에서 비결정성의 원리(indeterminacy principle)의 존재가 명제들 간의 배분법칙을 허용하지 않고 있어서 전통적인 표준논리로는 그 논리적 구조가 밝혀지기 어렵다. 뿐만 아니라 명제 [A, E] 자체가 양상개념을 포함하고 있다. 반프라쎈의 양상논리에서 명제들은 포함(inclusion), 배척(exclusion), 동일성(identity)의 외연적 관계와 함께 내포적 관계로 내용들 간의 의미관계를 따른다. 특히 힐버트 공간모델에서는 의미 자체보다는 의미관계(예를 들면 (T2))가 전술한 외연적 관계들에 의해 잘 표상될 수 있는 까닭에, 반프라쎈은 양자이론을 다루는 양상논리에서는 전통적인 의미 자체의 문제 특히 실재론과 관련한 지시의 문제 등이 쟁점이 되지 않음을 특히 강조한다.[30] 결국 지시의 문제에 대한 언급 없이도 양자이론

29) 반프라쎈의 양상논리체계는 S5 체계이다. 이에 대한 자세한 논의는 van Fraassen (1991), pp. 299-322 참조. 그리고 양상논리에 대한 자세한 내용은 Hughes & Cresswell (1968) 참조.

30) van Fraassen (1974), pp. 169-209. 가령 격자(lattice) 구조에서 명제들

명제들의 의미론이 기술된다면, 반프라쎈의 경우처럼 반실재론이라는 실용주의적 전략이 선택될 가능성이 매우 높아 보인다.

마지막으로 보른의 규칙은 다음과 같이 재 기술된다. 측정의 최종단계에서 복합계가 동역학적 상태 $\Psi = U\Psi_0 = \Sigma c_i | a_i > \otimes | b_i >$에 있다면, 대상계 X와 측정 장치 Y는 환원에 의해 각각 $\#W[X]=\Sigma | c_i |^2 I_{a(i)}$, $\#W[Y]=\Sigma | c_i |^2 I_{b(i)}$의 동역학적 상태에 있게 된다(동역학적 상태부여). 그리고 지시-관측가능량 B는 가능한 값들로 b_i의 값들을 가질 수 있다. 이때 B의 측정결과가 b_k일 확률, 즉 B의 (값)상태가 $| b_k >$일 확률은 $| c_k |^2$으로 주어진다(값 상태 부여). 결국 반프라쎈은 보른 규칙을 측정결과로부터 B에 값을 부여하는 진술과 A-측정 최종단계에서 B에 동역학적 상태를 부여하는 진술 간의 확률적 관계로 재 기술하고 있다.[31]

반프라쎈의 이와 같은 시도들이 과연 측정문제 해결(또는 해소)에 얼마나 유효한가를 논하기 앞서, 반프라쎈 식의 상태 구분에 대해 다음과 같은 의문점들을 먼저 제기해 볼 수 있다. 먼저 동역학적 상태가 슈뢰딩거 방정식에 따라 시간에 따른 변화를 겪듯이 값 상태 또한 이에 대응하는 시간에 따른 어떤 변화를 겪어야 할 텐데, 그것이 무엇인가 하는 점이다. 상태라는 개념 자체가 어떤 운동방정식에 의거하여 시간에 따라 변화한다는 의미를 내포한다고 본다면, 이 변화를 지배하는 운동방정식은 무엇이며 이 운동방정식이 폰노이만이 투사가설에서 주장한 비인과적 상태변환과는 본질적으로 어떻게 다른가가 해명되어야 한다. 만약 어떤 운동방정식에 따라 변화하는 것이 아니라면, 다시 말해 측정결과들을 단지 값 상태라는 개념으로 대체한 것에 불과하다면, 혹은 초기에 대상계의 가능한 고유상태들을 측정결과들로부터 지정한(prepare) 것에 불과하다면, 이들을 상태 개념으로 포섭하여 상태들의 복잡한 중층구조를 형성하는 것이 (경험론 자들에게서 자주 강조되는) 이론의 경제성이나 단순성의 측면에서 군이 필요한가라는 의문이 제기된다.

간의 의미 관계 혹은 명제의 진리 조건은 격자를 구성하는 공간들의 포함 또는 배척 관계에 의해 결정됨을 볼 수 있다. 양자이론의 격자 구조에 관한 자세한 분석은 Hughes (1989), pp. 194-207을 참조.

31) van Fraassen (1991), p. 280.

두 번째 의문은 값 상태가 측정순간에만 정의되어 대상계에 부여되는 것인지, 아니면 측정과 무관하게 대상계가 항상 두 상태를 동시에 가지고 있는 것인지의 문제다. 이는 값 상태에 대한 존재론적 고찰과 관련된다. 만약 후자라면 값 상태는 마치 별도의 존재론적 특성을 지니고 동역학적 상태와 구분되어 존재하면서, 그것과 함께 대상계의 전체 상태를 완벽하게 규정하는 별도의 존재자인 양 간주되어야 할 것이다. 그러나 실제로는 동역학적 상태를 구성하는 고유상태들 각각이 사실은 특정한 고유치에 대응하는 값 상태로 볼 수 있기에, 값 상태를 동역학적 상태와 구태여 구분하여 별도의 방식으로 개념화할 필요가 없다. 만약 전자라면 앞서 지적한 바와 같이 측정값으로 충분히 이해 가능한데, 굳이 값을 지닌 상태라는 개념의 형태로 주장할 필요가 있는지 마찬가지의 의문이 제기된다.

4. 측정문제에 대한 양상해석의 대응

양상해석이 측정문제를 어떻게 해결하는지를 구체적으로 분석해 보자. 이를 위해 반프라쎈은 다음의 상황설정과 정당화가 가능한 몇 가지 가설들을 도입한다.

(a) <상황설정> X, Y로 구성된 복합계 X+Y가 측정(지시-관측가능량 B를 통한 A의 측정, 소위 폰노이만 측정)의 최종단계에서 순수한 동역학적 상태 Ψ에 있다면, 각 계들의 값 상태와 동역학적 상태는 다음과 같이 기술된다.[32]

X+Y, X, Y의 동역학적 상태: 복합계가 $\Psi = \Sigma c_i | a_i > \otimes | b_i >$에 있다면, 대상계 X와 측정장치 Y는 환원에 의해 각각 $\#W[X]=\Sigma | c_i |^2 I_{a(i)}$, $\#W[Y]=\Sigma | c_i |^2 I_{b(i)}$

X+Y, X, Y의 값 상태: 각각 Ψ, x, y(여기서 x, y는 각각 #W[X]와

32) van Fraassen (1991), p. 285.

#W[Y]에 상대적으로 가능한 상태들이다.)

이때 우리는 x, y가 무엇인지를 정확히 규정할 수 없는데, 그것은 #W에 상대적으로 가능한 상태란, #W를 구성하는 순수 고유상태들의 집합의 하나로만 주어지기 때문이다. 값 상태는 관측가능량의 값들과 일대일 대응관계에 있으므로, 결국 두 상태의 구분 및 이들 간에 성립하는 '상대적으로 가능함'의 관계로부터 관측가능량의 값들(혹은 값 상태)에 대한 무지해석이 정당화된다고 볼 수 있다.

(b) <양상해석 안에서 재 기술된 보른 규칙> 측정의 최종단계에서 복합계가 동역학적 상태 $\Psi = \Sigma c_i | a_i \rangle \otimes | b_i \rangle$에, X와 측정 장치 Y가 환원에 의해 각각 #W[X]=$\Sigma | c_i |^2 I_{a(i)}$, #W[Y]=$\Sigma | c_i |^2 I_{b(i)}$에 있다면, 어떤 k에 대해 지시-관측가능량 B가 b_k의 값을 가질 확률 혹은 B의 상태가 $| b_k \rangle$일 확률은 $| c_k |^2$으로 주어진다.

(c) <완전한 상관관계(perfect correlation)> 이 가정 하에서라면 측정의 최종단계에서 B의 상태가 $| b_k \rangle$이고, A의 상태가 $| a_k \rangle$일 확률이 바로 $| c_k |^2$이 된다. 이는 지시-관측가능량의 값이 b_k라는 사실이 그 시점에서 관측가능량 A가 a_k의 값을 가짐을 확실하게(확률=1) 함축함을 의미한다.

(d) <정리> 상황 (a)에서 (b)가 만족된다면, 명제 <B, b_k>가 참인 경우, 명제 <A, a_k>가 참일 확률은 1이 된다(이는 (c)로 부터 증명 가능).

결론적으로 양상해석 안에서 (a), (b), (c)가 모두 가정된다면, 다음과 같은 결론이 도출된다. 즉 비록 투사가설이 실제로는 옳지 않으나, 마치 옳은 것처럼 나타난다는 것이다. 왜냐하면 A측정의 최종단계에서 A가 실제로 측정결과로 어떤 특정의 값을 갖는 것은 참 인데, 이는 측정의 최종단계에서 가능한 값들로부터 실제적인 값으로의 전이가 발생했기 때문이라는 것이다.[33] 결국 폰노이만이 제안한 상태들의 비인과적 전이로서의

투사가설이 아니라, 관측가능량의 값들의 전이로서의 투사가설을 받아들이고 이로써 측정문제가 일관되게 그리고 적합하게 설명된다고 반프라쎈은 주장하고 있다.

그러나 반프라쎈의 이러한 결론은 가능세계 이론에 근거하고 있다. 즉 각각의 가능한 측정값들에 대응되는 가능세계들이, 측정의 최종단계에서 하나의 가능세계 곧 실제세계로 전이한 것으로 판단하는 것이다. 그러나 가능세계 이론은 가능세계의 실재성과 의미에 관한 문제, 그리고 실제세계로의 전이 메커니즘 문제와 관련해서 매우 논쟁적이며, 이는 반프라쎈의 양상해석이 과연 다른 해석들에 비해 경험적 의미차원에서 불필요한 잉여내용들이 적은 경제적인 이론인가라는 의문을 갖게 한다.

5. 양상해석의 문제점과 그 비판

5.1. 가능세계의 문제

반프라쎈의 양상해석이 측정문제를 일관되고 적합하게 설명하기 위해서는 가능세계 이론에 의존하지 않을 수 없다. 반프라쎈 자신이 명료하게 밝히고 있지 않은 가능세계 이론에의 의존과 그로 인한 문제점을 우선 분석하고 이를 비판해 보자. 양상해석은 대상계에 두 종류의 양자상태를 부여할 것을 요구한다. 앞서 언급하였듯이 대상계의 값 상태는 대상계의 관측가능량의 실제적인 값들에 의해 규정되는 바, 만약 대상계 X의 관측가능량 A의 값이 실제로 a_k라면, 대상계 X는 실제로 상태 $|a_k>$에 존재한다고 볼 수 있다.

(대상계 X에서 관측가능량 A의 값이 a_k이다) = $<A, a_k>$
↔ (대상계 X는 상태 $|a_k>$에 있다)

반면 동역학적 상태는 반프라쎈에 따르면 슈뢰딩거 운동방정식과 환원

---

33) van Fraassen (1991), p. 288.

원리를 포함하는 양자이론의 수학적 형식체계로 부터 규정되므로, 측정결과와 동역학적 상태의 관계는 보른의 규칙의 지배를 받는다. 즉 값 상태의 경우와 달리 동역학적 상태는 관측가능량들의 값들 특히 측정결과들에 대한 확률적 정보를 제공한다. 그러나 대상계 X의 동역학적 고유상태인 $|a_k>$는 값 상태와 일치하며, 관측가능량 A의 측정결과가 a_k일 확률이 1임을 예측하므로, 이들 간에 다음의 대응관계가 성립하게 된다.

□(대상계 X에서 관측가능량 A의 값이 a_k이다)
↔ □(A의 값을 a_k로 갖는 상태 $|a_k>$가 존재하며, 대상계 X는 상태 $|a_k>$에 있다) = [A, a_k]

이러한 두 가지의 상태진술들은 가능세계를 통해 다음과 같이 연결된다. 일반적으로 대상계 X가 필연적으로 어떤 상태에 있다는 진술은 상대적으로 가능한 모든 가능세계 각각에서 대상계 X가 모두 그 상태에 있음을 의미한다. 즉 필연적 참은 모든 가능세계에서의 참을 의미한다. 이를 전술한 양자상태에 적용하면, 관측가능량의 모든 가능한 값들 $\{a_i\}$에 모든 가능세계의 집합 $\{\beta_i\}$가 각각 대응되며, 실제세계는 이러한 가능세계 중에 하나가 된다. 따라서 대상계 X가 필연적으로 동역학적 상태 ϕ = #W[X] $=\Sigma|c_i|^2 I_{a(i)} = \Sigma|c_i|^2|a_i><a_i|$ 에 있다는 것은, 대상계 X가 상대적으로 가능한 모든 가능세계 β_i 각각에서 실제로 (값)상태 $|a_i>$에 있고 A의 측정결과 역시 a_i를 가짐을 의미한다. 다시 말해 다음의 진리조건 관계가 성립한다. 이는 전술한 진리조건 (T2)의 결과이기도 하다.

(T3) □(대상계 X가 상태 $\phi=\Sigma|c_i|^2 I_{a(i)}$에 있다)는 참이다
↔ (대상계 X가 상태 $|a_i>$에 있다)는 모두 각각의 가능세계 β_i에서 참이다

이제 위와 같이 가능세계이론을 통해 재구성된 반프라쎈의 주장을 측정문제에 적용하여, 가능세계이론이 측정문제 해결에서 어떠한 역할을 하는지, 그리고 그 문제점은 무엇인지를 살펴보자. 반프라쎈의 논증을 재구성하면 다음과 같다.

ㄱ. □(복합계 X+Y는 상태 $\Psi = \Sigma c_i|a_i>\otimes|b_i>$에 있다)는 참이다.

ㄴ. (환원에 의해)

ㄴ-1 □(대상계 X는 상태 #W[X]=$\Sigma \mid c_i \mid^2 I_{a(i)}$에 있다)는 참이다.

ㄴ-2 □(측정장치계 Y는 상태 #W[Y]=$\Sigma \mid c_i \mid^2 I_{b(i)}$에 있다)는 참이다.

ㄷ. ((T3)에 의해) 상대적으로 가능한 모든 가능세계 β_i 각각에서

ㄷ-1 (대상계 X는 상태 $\mid a_i >$에 있다)는 참이다.

ㄷ-2 (측정장치계 Y는 상태 $\mid b_i >$에 있다)는 참이다.

ㄹ. 고로 특정한 가능세계 β_k에서

ㄹ-1 (대상계 X는 상태 $\mid a_k >$에 있다)는 참이다.

ㄹ-2 (측정 장치계 Y는 상태 $\mid b_k >$에 있다)는 참이다.

∴ 특정한 가능세계 곧 실제세계 β_k에서(복합계 X+Y는 상태 $\mid a_k > \otimes \mid b_k >$에 있다)는 참이다. 즉 관측가능량 A는 값 a_k를, 측정 장치 B는 측정결과 b_k를 실제로 가진다.

여기서 알 수 있듯이, ‘ㄷ’에서 ‘ㄹ’로의 논증이 가능세계로부터 실제세계로의 전이를 수반한다. 이 전이는 반프라쎈에게 있어서 측정문제 해결뿐 만 아니라 무지해석과 투사가설에 대한 재해석, 그리고 코펜하겐 해석에 함축되어 있는 가능성에서 실제성으로의 전이를 설명하는 중요한 요소이다. 그러나 그것이 어떻게 가능한지를 반프라쎈은 더 이상 설명하지 않는다. 그것은 반프라쎈에게 있어서 가능세계가 어떤 실체를 지닌 형이상학적 실재가 아니라, 단순한 편의적 장치 다시 말해 실재하는 물리계의 앙상블 집합이라기보다는 주어진 대상계의 다양한 존재방식들의 집합에 불과하기 때문에, 반프라쎈 자신이 이에 대한 설명을 어떠한 경험적 의미도 추가하지 않는 불필요한 것으로 거부하기 때문인 듯하다. 그렇다면 반프라쎈의 양상해석 역시 그렇게 피하고자 했던 비일관적인 해석의 문제를 완벽하게 해결하고 있다고 볼 수 없다. 여전히 비일관성 문제로부터 벗어날 수 없는 듯이 보인다. 이는 다음의 상황에서 더욱더 분명하게 나타난다. 측정 이후의 복합계에 대해 위의 논증 ‘ㄹ’에서처럼 오직 값 상태 진술들(< >-진술들)만이 부여된다면, 양자이론이 측정이후 대상계의 운동에 대해 동역학적 상태 진술을 통한 예측을 과연 할 수 있는가라는 근본적인 의문이 제기된다. 일반적으로 양자이론은 측정이후의 대상계의 상태를 □-진술(혹은 [ ]-진술)의 형태로, 즉 □(대상계 X는 상태 $\mid a_i >$에

있다)와 □(측정 장치계 Y는 상태 $|b_i\rangle$에 있다)로 기술한다고 볼 때, 결국 반프라쎈에게 < >-진술로부터 [ ]-진술로의 비일관적인 전환이 불가피한 것처럼 보인다. 만약 그렇다면 다른 해석들과 심대한 차별성이 존재하지 않는 것처럼 보인다.

또 다른 중요한 문제는 반프라쎈의 [A,E] 진술체계가 양상논리를 따르며, 그것의 의미가 가능세계 의미론에 의거하여 주어지기 때문에 가능세계 의미론 일반의 문제를 양상해석 역시 피할 수 없다는 점이다. 양상논리는 프레게(G. Frege)의 고전논리에 나타나는 '실질적 함축'(material implication)에 대한 불만[34]의 산물로서, 기존의 고전논리 체계에 양상 오퍼레이터 'L 혹은 □(필연적으로)'과 'M(가능한) 혹은 ◇(우연적으로)'을 추가하여 실질함축의 필연성으로서 '엄밀 함축'(strict implication)을 정의하는 고전논리의 확장체계이다. 따라서 기존의 의미론 외에 필연성이나 가능성 개념의 유의미성을 주는 그 이상의 것이 필요하다. 가능세계에 의한 접근방법은 널리 받아들여지고 있는 방법으로서, 양상문장 LP가 참임은 문장 P가 모든 가능세계에서 참임을, 그리고 MP가 참임은 P가 어떤 가능세계에서 참임을 함축한다. 그럼으로써 필연성과 우연성의 고전적인 구분자체를 거부해 온 콰인(W. V. Quine)의 양상논리에 대한 비판[35]을 피하고자 한다. 그러나 가능세계가 무엇인가라는 존재론적 본질의 문제가 여전히 남아 있다.[36] 반프라쎈은 이를 인식가능한 물리적 실재나 실제로 존재하는 형이상학적 추상적 실재로 보지 않고, 단지 양자계에 가능한 값들에 대응되는 서로 다른 구성 배열의 양태들(configurations)로 보는 개념적 접근을 시도한다. 이는 반프라쎈의 구성적 경험론의 사고와 맥을 같이한다. 그러나 이를 인정하더라도 '통세계적 동일성'(transworld identity)이라는 또 다른 문제가 발생한다. 그것은 모든 가능세계에서 관측가능량 A의 동일성 혹은 관측가능량 A를 지닌 개체의 동일성을 어떻

---

34) 루이스(Lewis)는 $p \rightarrow q$의 명제에서 p가 거짓이고 q가 참일 때도 p는 q를 실질적으로 함축한다는 것이 우리의 직관과 잘 맞지 않는다고 비판하였다. Lewis (1918) 참조.

35) Quine (1951) 참조.

36) 이에 관한 자세한 논의는 수잔하크 (1984), pp. 248-253 참조.

게 확보할 것인가의 문제이다. 개체의 본질적 속성의 존재를 가정하거나, 아니면 이름에 초점을 맞춰 고유명이 모든 가능세계에서 동일한 개체를 지시한다고 가정하거나, 아니면 이 세계의 개체를 다른 가능세계에서 찾아내는 것 자체가 불가능하므로 문제자체가 성립하지 않는다고 주장하는 방법 등이 있을 수 있다. 그 어떤 주장이든 궁극적으로는 실재의 문제와 연관되어 있음을 알 수 있다. 그렇다면 양상해석 역시 실재론의 문제를 미해결의 과제로 남겨 놓았을 뿐, 이를 과학이론으로부터 완전히 배제했다고 볼 수 없을 것이다.

5.2. 양상해석의 기이한 결과들

양상해석은 반프라쎈 자신도 인정하고 있듯이[37] 다음과 같은 두 가지의 기이한 결과들을 배태한다. 첫째는 이미 살펴보았듯이 관측가능량이 불명확한 값(unsharp value)을 가질 수 있다. 양자 복합계 X+Y로 구성된 측정의 최종단계에서 대상계의 상태는 전술한 바와 같이 값 상태나 동역학적 상태 모두 $\Sigma c_i |a_i\rangle \otimes |b_i\rangle$에 있다. 특히 값 상태는 측정이 완결된 이후 실제로 명확한 값(sharp value)을 갖는 상태 $|a_k\rangle \otimes |b_k\rangle$로 전이하기 전까지, 측정의 최종단계에서 $\Psi = \Sigma c_i |a_i\rangle \otimes |b_i\rangle$에 남아있게 되는데, 이는 관측가능량이 불명확한 값(unsharp value)을 가짐을 함축한다. 이러한 기이한 특성은 경험적인 현상모델 차원에서 다시 말해 측정결과로부터 부여되는 값 상태에 의해 주장된다는 면에서 양상 해석의 치명적인 약점이 될 수 있다. 즉 가능성에서 현실성에로의 전이문제와 함께 양상해석의 난제라고 평가할 수 있다.

둘째는 관측가능량과 측정값들이 전체론적 속성을 가진다. 복합계가 상태 W에 있을 때, 대상계 X의 상태는 환원에 의해 #W[X]로 주어지며 관측가능량 A에 대해 조건 Tr(A #W[X]) = Tr((A$\otimes I_2$) W)를 만족한다. 이는 X계의 관측가능량 A에 대한 측정이 이루어졌을 때 그 결과들에 대한 확률과, X+Y계에서 관측가능량 A$\otimes I_2$에 대한 측정이 이루어졌을 때 그 결과들에 대한 확률이 일치함을 의미하며, 측정결과들의 확률에

---

37) van Fraassen (1991), pp. 290-299.

관한한 측정 대상계의 경계 설정이 임의적임을 의미한다. 이는 경험적 결과들과 잘 일치한다. 그러나 반프라쎈의 양상해석은 여기서 한 걸음 더 나아간다. 즉 위의 확률은 동일할지라도, 두 관측가능량 A와 $A \otimes I_2$는 각기 서로 다른 측정 대상계에 조건화되어 있기 때문에 동일하지 않다는 것이다.[38] 이것이 동일하지 않다는 것은 결국 관측가능량 A로부터 관측가능량 $A \otimes I_2$로의 추론이 가능하지 않음을 뜻하며, 바로 관측가능량들이 전체론적 특성을 지녔음을 의미한다.

일반적으로 X, Y계 각각에 속하는 두 관측가능량 A, B에 대해, $(A \otimes B)(|a\rangle \otimes |b\rangle) = ab(|a\rangle \otimes |b\rangle)$이 성립한다. 그러나 ab의 값과 (a, b)값은 일대일 대응관계가 아니기 때문에, A와 B 각각의 측정결과들의 집합(a,b)는 복합계 X+Y에서의 관측가능량($A \otimes B$)의 측정결과 ab에 대해 부분적 정보만을 제공한다. 바로 측정값들이 전체론적 특성을 가지며, 관측가능량 A와 $A \otimes I_2$가 서로 동등하지 않음을 함축한다. 이러한 기이한 특성에 대해 반프라쎈은 실제적인 실험상황에서는 이러한 문제가 발생하지 않는다고 주장한다.[39] 즉 실용주의적 전략을 선택한다. 그러나 이러한 반프라쎈의 주장은 자기 모순적이다. 양상해석에서 관측가능량은 경험적으로 측정 가능한 어떤 물리량을 단순히 추상화한 개념, 즉 표면모델 혹은 이론 모델내의 경험적 하위구조에 속하는 개념이다. 이는 양자계의 상태를 이원화하여 값 상태는 표면모델에, 그리고 동역학적 상태는 순수 이론모델 내에 위치시킨 것과는 다르다. 한마디로 관측가능량에 관한한 경험적 의미는 실제세계로부터 부여된다고 볼 수 있다. 그런데 이러한 경험론적 구도로는 관측가능량, 더 나아가 관측가능량의 값들이 전체론적 성격을 지닌다는 것을 이론내적으로 설명하지 못한다. 따라서 이를 이론내적으로 설명하려 한다면, 양자 상태의 전체론적 성격을 설명하기 위한 상태의 이원화 전략과 유사한 관측가능량의 이원화 전략이 요구되는데, 이는 반프라쎈의 경험론 관점에서 볼 때 받아들이기 곤란하다. 결국 반프라쎈은 실제적인 측정상황이라는 이론 외적 요소에 의존하고 있는데, 이는 그의 양상해석이 역시 실제적인 측정상황을 충분하게 모델화하고 있

38) van Fraassen (1991), p. 293.
39) *Ibid.*, p. 293.

지 못하다는 반증이기도 하다.

6. 맺는말

양상해석은 한편으로 양자이론이 물리현상에 대해 경험적으로 확인가능한 성공적인 설명력과 예측력을 가진다는 사실과, 다른 한편으로 이론자체로는 전체론적 특성, 비국소성, 그리고 측정문제 등 비고전적이고 경험적으로 받아들이기 곤란한 특성들을 함축하고 있다는 사실을 어떻게 일관성을 가지면서 조화시킬 것인가에 강조점이 주어져 있다. 이를 위해 반프라쎈은 양자상태의 이원화 전략과 이를 뒷받침해 주는 이론에 관한 의미론적 관점을 택하고 있다. 그러나 이러한 반프라쎈의 전략은 측정문제 해결에서 보듯이 양상 논리체계를 사용하여 논리적으로 매우 일관되고 정합적인 해석을 추구하고는 있으나, 상태 개념의 불필요한 (superfluous) 확대 적용과 양자이론의 구조에 대한 복잡한 규정, 측정과정에서 가능세계로부터 실제세계로의 전이 메커니즘에 대한 설명의 부재, 경험적인 관측가능량의 특성과 관련된 기이한 결과들 등, 다른 해석들에서는 문제가 되지 않을 새로운 문제들을 양산하는 결과를 초래하고 있다. 그러한 면에서 측정문제를 효과적으로 해결하고 있다고 보기 어렵고, 나아가 경험론의 덕목 가운데 하나인 경제성의 원리로부터도 많이 벗어나 있다고 평가할 수 있다.

한편 반프라쎈의 이러한 시도들은 궁극적으로 반실재론을 지향하고 있다. 즉 양자이론의 이론적 존재자인 동역학적 상태들에 대해 어떠한 실재론적 의미도 부여하지 않고 양상논리로 이들의 체계를 구조화하며 형식적인 의미론 차원에서 이들에게 의미를 부여하고 있다. 이 모든 도구적 장치들은 양자이론이 경험 현상을 잘 설명하도록 동원된 것일 뿐, 반프라쎈에게서 결코 그 이상의 의미를 지니지 않는다. 그러나 앞서 지적된 많은 문제점들 ―가령 한 예로 가능세계로부터 실제세계로의 전이 메커니즘에 대한 설명의 요구―에서 보듯이, 이론과 실재세계와의 관계에 대한 어떠한 조명 없이는 쉽게 해결될 수 없는 것처럼 보인다. 양자이론의 형

식 체계를 무엇으로 선택할 것인가와 관련해서도 물리적인 의미가 반영될 수 있다고 주장한 맥키넌(E. Mackinnon)의 지적은 그러한 면에서 매우 의미가 있다고 하겠다.[40] 이렇게 볼 때 양자이론에 대한 양상해석이 반프라쎈의 반실재론 입장을 충분히 잘 옹호해 주고 있다고 말하기 어렵다. 달리 말해 이러한 문제들을 어떻게 실재론적인 관점에서 해결할 것인가의 문제는 여전히 유효하다고 할 수 있다.

40) Mackinnon (1979), pp. 501-32.

참고문헌

수잔하크, 김효명 옮김 (1984), 『논리철학』, 종로서적.

Gleason, A. M. (1957), "Measures on the Closed Subspaces of a Hilbert Space", *Journal of Mathematics and Mechanics 6.*

Hartle, J. B. (1992), *Spacetime Quantum Mechanics and the Quantum Mechanics of Spacetime*, in Proceedings of the 1992 Les Houches Summer School Gravitation and Quantizations, ed. by Julia, B., North Holland, Amsterdam.

__________ (1993), *The Quantum Mechanics of Closed Systems*, in the Festschrift for Misner, C. W., (ed.) by Hu, B. L., Ryan, M. P., and Vishveshwara, C. V., Cambridge Univ. Press.

Hughes, G. E. & Cresswell, M. J. (1968), *An Introduction to Modal Logic*, Methuen and Co ltd.

Hughes, R. I. G. (1989), *The Structure and Interpretation of Quantum Mechanics*, Harvard Univ. Press.

Lewis, C. I. (1918), *A Survey of Symbolic Logic*, California U.P.

Mackinnon, E. (1979), "Scientific Realism: The New Debates", *Philosophy of Science 46.*

Margenau, H. (1936), 'Quantum-Mechanical Description,' *Physical Review 49.*

Quine, W. V. O. (1951), "Two dogmas of empiricism", *Philosophical Review 60.*

Sneed, J. D. (1971), *The Logical Structure of Mathematical Physics*, D. Reidel Publishing Comp.

van Fraassen, B. C. (1991), *Quantum Mechanics — An Empiricist View*, Clarendon Press, Oxford.

__________ (1974), "The Formal Representation of

Physical Quantities", in *Boston studies in the Philosophy of Science 12.*

____________________ (1975), "The Labyrinth of Quantum Logic", In *The Logico-Algebraic Approach to Quantum Mechanics, vol 1: Historical Evolution,* by Hooker Dordrecht, C. A., Holland.

von Neumann, J. (1955), *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*, (trans.) Beyer, R. T., Princeton, N. J.

ARTICLE ABSTRACTS

Critical Comments on van Fraassen's Modal Interpretation of Quantum Mechanics

Joongwon Lee

While the mathematical formalism of quantum mechanics is obvious, the interpretation of it relating to its semantics is various and controversial. A typical problem with respect to the interpretation is a measurement problem. To solve this problem, Bas van Fraassen proposed so-called the modal interpretation, which complemented orthodox Copenhagen Interpretation with the modally-reconstructed ignorance interpretation and also projection postulate which was first suggested by von Neumann. First of all, he tried to remove any inconsistency and oddness appeared in both original ignorance interpretation and the postulate by reconstructing them in terms of modality, and then tried to apply them to the explication of a measurement problem. According to his modal interpretation, a deterministic evolution of quantum states and an indeterministic change of measured results could be coexistent, and thus a measurement problem does not appear any more. In this article I will analyse critically its epistemological backgrounds and its core arguments for solving the measurement problem. To say a conclusion, his modal interpretation is not successful in explicating the measurement problem, because of an insufficient explanation of the transition mechanism of the possible world into the real world, and of the superfluous expansion of a state-concept, and of other strange implications.

[Key Words] modal interpretation, Bas van Fraassen, Quantum mechanics, value-state, dynamic-state, Copenhagen interpretation, ignorance interpretation, projection postulate