

『양자역학의 역사와 철학: 보어, 아인슈타인, 실재론』

김유신 지음, 이학사, 2012.

이 정 민[†]

이 책은 양자역학의 역사와 철학을 다룬 저자의 첫 단독 연구서이다.¹⁾ 번역서나 여러 저자명의 논문집이 일반적인 국내 과학철학 분야의 출판 풍토에서 이렇듯 진중한 연구서가 출간되었다는 사실은 그 자체만으로도 환영할 일이다. 더구나 학술적-대중적 관심에 비해 정작 국내 연구자의 목소리를 듣기는 쉽지 않은 양자역학을 그 주제로 삼고 있는 점에서 출간의 의미는 더욱 크다. 연구방법에서도 역사와 철학을 결합한다는 점에서 유례없고, 보어의 철학에 대한 ‘전체론적 실재론’이라는 해석도 참신하다. 그 외로도 이 책의 장점은 여럿 나열될 수 있지만 일단 멈추고 본격적인 서평을 위해 책의 구성과 내용을 먼저 살펴보자.

책은 세 부분으로 구성되어 있다. 1부는 양자역학의 역사를 다루는 일종의 통사이다. 저자는 19세기 말 고전역학의 시기에서 시작해 어떻게 그것이 차츰 붕괴하면서 그 자리에 양자역학이 형성되어 갔고 결국 보어의 완숙한 상보성 해석에 이르렀는지를 논의한다. 2부에서는 양자역학의 해석을 둘러싼 보어와 아인슈타인의 논쟁을 살핀다. 여기서는 여러 단계에 걸친 논쟁의 역사가 자세히 서술되어 있을 뿐만 아니라 이후에 나온 벨 정리의 유도를 통한 철학적 해석과 평가가 이루어지고 있다. 3부에서는 역사 대신

[†] 서울시립대 교양교육부.

1) 앞으로 이 책을 인용할 때에는 괄호 안에 쪽수만을 표기한다.

에 철학적 해석에 초점이 맞추어져 있다. 특히 보어의 상보성을 어떻게 해석할 것인가를 놓고 별이는 실재론자와 반실재론자의 논쟁을 집중적으로 다룬다. 결론으로 저자는 보어가 ‘전체론적 실재론자’로 해석될 수 있다고 하며 그 의미를 밝히고 있다. 끝에는 책 전체를 정리하는 객관성에 대한 논의가 덧붙여져 있다. 그러면 각 부분의 내용을 좀 더 자세히 살펴보자.

1부는 저자가 ‘양자역학의 통사’로 읽히기를 의도한 것이다. 특기할 것은 순수하게 과학적인 업적이나 이론의 발전만을 다루는 것이 아니라 철학적 해석의 역사가 군데군데 첨가되어 있다는 것이다. 또한 경험적 사실이나 실험을 사료중심으로 나열하기보다 핵심 개념이나 원리의 역사를 밝히는 데 주안점을 두었다. 그리고 수학적 내용을 줄임으로써 전문가들뿐만 아니라 대중적인 독자도 읽을 수 있는 역사를 개괄하려 했다. 저자도 인정하듯이 관련 분야의 국내 저술이 거의 전무한 상태에서, 보어와 아인슈타인의 논쟁을 포함하는 이 책의 전반부는 양자역학의 역사를 소개하는 별도의 책으로 읽힐 수 있을 정도이다.

본문의 내용에 관해서는 비록 많은 부분이 저자의 독립적인 해석이라기 보다 이차 문헌에 의존하고 있기는 하지만, 기본적으로 정확하고 믿을 만 하며 다른 곳에서 얻기 힘든 많은 정보를 담고 있다. 예를 들어 1924년의 보어-크라메르스-슬레이터(BKS) 이론에 대한 논의가 있다(89-95, 192-4, 252-4). BKS 이론은 바로 다음 해 실험적으로 반박된 단명한 이론이기는 했지만, 행렬역학²⁾ 직전에 출현한 옛 양자 시기 최후의 이론이라는 점에서 양자역학의 역사를 이해하려면 꼭 검토해야만 하는 이론이다. 저자는 이 이론을 내놓은 슬레이터와 보어의 서로 다른 의도를 논의할 뿐만 아니라 아인슈타인의 반응까지를 다루고 있다. BKS 이론 외로도 광양자가설에 대한 논의도 주목할 만하다. ‘실재론’이라는 책 후반의 철학적 관심을 반영하듯 저자는 1부 곳곳에서 보어가 왜 한동안 광양자의 실재에 반대했으며 2

2) 책 전체에서 저자는 일관되게 “매트릭스역학”이라는 표현을 쓰는데 굳이 그렇게 쓴 다른 이유가 있었는지 궁금하다(이 점을 상기시켜 준 익명의 심사자에게 감사한다). 물론 하이젠베르크가 처음부터 의식적으로 “행렬”을 도입한 것은 아니다. 저자의 지적대로(114) 새 역학에서의 물리량이 수학적으로 행렬에 해당된다는 것을 처음 지적한 이는 보른이다. 그렇다고 해도 “행렬” 대신 “매트릭스”가 여기서 도움이 되는 것 같지는 않다.

부에서는 그것이 어떻게 아인슈타인과의 논쟁으로 이어지는지를 서술한다.

물론 전문 역사가의 저술이 아닌 만큼 1부에서 군데군데 역사적인 정확성이나 해석의 공평함에 의심이 가는 논의가 발견되는 것도 사실이다. 예를 들어 저자는 처음에 마이컬슨-몰리 실험이 아인슈타인의 특수상대성이론의 발견에 기여했다고 이야기한다(33). 그런데 뒤에서는 이론 발견 당시 아인슈타인이 실험 결과에 대해 잘 몰랐다고 하며, 그 증거로 아인슈타인의 편지를 포함하는 홀턴의 연구를 인용하고 있다(144-6). 사실 이 부분은 파동역학을 논의하는 전후 맥락상 불필요한 내용이 끼어들어갔다는 인상을 준다. 아예 논의를 생략해도 무리가 없으며, 아니면 아인슈타인이 실험 결과를 의식하고 있었다는 반론(예를 들어 Pais 1982, 115-9)도 같이 검토했다면 더 균형 잡힌 이야기를 전달할 수 있었을 것이다. 물론 이 부분은 상대성이론에 관한 이야기이며 양자역학에 관한 본래의 줄거리와는 관계가 없다.

하지만 양자역학에 관해서도 사소하게나마 지적할 수 있는 내용이 발견된다. 예를 들어 1926년의 보어와 슈뢰딩거의 논쟁을 서술하는 부분에서 보어가 “1925년 이래” 플랑크 공식의 의미가 알려졌다고 슈뢰딩거에게 대꾸하는 구절이 있다(132). 원문은 “25년 간”(seit 25 Jahren)이므로 플랑크가 작용 양자를 발견한 “1900년 이래”가 옳은 표현이다. 『부분과 전체』의 오역이 그대로 반복되었다. 그리고 133쪽에서 슈뢰딩거가 결국 양자 도약을 수용했다고 하는데 1920년대 후반의 잠정적인 후퇴를 제외하면 슈뢰딩거는 평생 양자 도약을 거부했다. 행렬역학과 파동역학이 단지 수학적으로만 등가임을 보인 것이지 보어나 하이젠베르크의 해석을 받아들이지는 않았다는 뜻이다. 그리고 172-3쪽의 행렬역학과 파동역학 사이의 이론 미결정성에 관한 논의가 있는데 그 철학적 중요성에 비해 논의 자체가 미결되었다는 인상을 주지만 이후에 다시 논의되지는 않는다.

물론 이는 극히 사소한 문제점에 불과하다. 하지만 서평이라는 논의의 목적상 좀 더 학술적인 문제제기를 해볼 수는 있겠다. 먼저 여러 이차문헌의 논의가 다소 두서없이 병렬되어 있다는 점이 눈에 띈다. 저자는 쿤, 야머, 메라와 레헨베르크, 벨리와 같은 양자역학의 전문 역사가의 저술뿐만 아니라 머독이나 폴스와 같은 보어 연구서 및 파이스의 보어 전기를 광범

위하게 인용한다. 일차문헌에 관해서는 저자가 독립적으로 검토한 부분도 있지만 상당수가 이러한 이차문헌에서 재인용한 부분들이다. 그래서 어디까지가 일차문헌의 인용이고, 어디까지가 여기에 대한 이차문헌의 해석인지, 그리고 여기에 더한 저자 자신의 해석은 무엇인지가 때때로 분명하게 구분되지 않는다. 그 결과 인용이 과다하거나 이차문헌의 논의를 그대로 반복하는 경우도 눈에 띈다. 물론 가장 이상적으로는 일차문헌에 대한 저자 고유의 해석을 먼저 밝히고, 그것이 기존 이차문헌에서의 해석과 어떻게 다른지를 논했으면 좋았을 것이다. 하지만 이는 너무 많은 것을 바라는 것일지 모르겠다. 요컨대 1부의 내용은 과학사학자들의 평가를 받을 만한 독립적인 역사로 쓰였다기보다 후반부의 철학적인 해석을 염두에 둔 기초 다지기의 성격이 짙다.

이러한 저자의 ‘철학적’ 의도는 군데군데 보어의 ‘실재론적’ 성향을 강조하는 것에서 잘 드러난다. 특히 보어의 상보성 개념을 논의하는 4장에서 저자는 보어가 “실재론적 성향” 때문에 빛의 입자설을 받아들이지 않았을 가능성을 제기한다(195). 입자-파동의 이중성이 밝혀진 후에도 보어는 여기에 “실재론적 중요성”이 있다고 생각해 더 깊은 철학적 해결을 모색한다. 그 결과 상보성의 철학에 이르러서야 그 이중성을 받아들이게 되었다는 것이다(196-203). 이러한 이야기는 적어도 철학적으로는 꽤 설득력이 있게 들린다. 하지만 보어가 정말로 어떤 ‘실재론적’ 의도에서 광양자가설이나 파동-입자 이중성을 꺼려했는지에 대한 역사적이고 문헌적인 근거가 제시되고 있지는 않다. 보어의 실재론적 “성향”이나 “경향”과 같은 표현을 의도적으로 쓴 것도 아마 보어가 직접적으로 실재론을 옹호한 것이 아니라 그렇게 해석될 만한 여지가 있다는 이야기일 것이다.

이렇듯 역사 서술에 대한 여러 의문점에도 불구하고 1부의 내용은 중요한 메시지를 전달한다. 그것은 **양자역학의 철학적 논의에 그 역사가 빠질 수 없다**는 것이다. 보어의 상보성에 대한 4장이 이를 잘 보여준다. 저자는 상보성 개념이 역사적으로 어떻게 형성되어 갔으며 그 구조와 의미를 어떻게 이해할 것인가를 자세히 논한다. 특히 논란이 되는 두 가지 상보성, 곧 인과적 기술과 시공간 기술의 상보성과 입자와 파동의 상보성 개념이 1927년 이전의 생각에서 어떻게 발전되어 나왔는지를 밝히고 있다. 그리고 두

가지 상보성 개념의 관계에 대한 논쟁도 소개하고 있다. 보어의 생각, 특히 양자역학 상보성 개념을 이해하고 싶은 독자에게 이 책의 여러 부분 가운데서도 가장 먼저 추천하고 싶은 장이다. 또한 저자는 코펜하겐 해석에 대한 논의를 통해 그것이 어떤 하나의 통일된 입장은 아니었다고 하며 다만 가족 유사성에 의해 묶일 수 있다고 본다(216). 그리고 하이젠베르크와 보어의 해석 사이의 긴장과 차이를 밝힌다. 이는 코펜하겐 해석이 실체 없는 신화일 뿐이라는 최근의 논의를 반영하면서도 여전히 그것이 유용한 용어로 쓰일 수 있는 근거를 제시하는 것이다. ‘코펜하겐 해석’이라는 표현을 정작 보어의 생각과는 관련 없이 이리저리 편의에 따라 무비판적으로 쓰는 학계의 관습에 도전하는 논의로 높이 평가할 만하다.

양자역학의 철학에서 역사의 중요성은 보어와 아인슈타인과의 논쟁에 대한 2부에서도 잘 드러난다. 저자는 크게 세 단계에 걸쳐 둘 사이의 논쟁이 어떻게 전개되어 갔는지를 자세히 서술한다. 먼저 양자론의 출현부터 두 차례의 솔베이학회에 이른 논쟁이 학회 노트와 보어의 1949년 회고 논문을 중심으로 그려진다. 그리고 1935년의 아인슈타인-포돌스키-로젠(EPR) 논문과 보어의 응답을 자세히 분석하고 거기에 대한 평가를 내리고 있다. 마지막으로 1960년대 이후 벨 정리의 유도과 그것의 실험적 확인이 이 역사적 논쟁에 어떤 함축을 지니는지에 대한 논의가 이어진다.

2부의 두 장은 앞의 상보성에 대한 장과 함께 역사와 철학을 결합하는 저자의 스타일을 잘 보여주는 장들로 이 책에서 가장 가치 있는 부분이다. 양자역학을 둘러싼 보어와 아인슈타인의 대립은 대중적으로도 널리 알려졌지만 정작 국내의 학술적인 논의는 부족한 것이 사실이다. 이 100여 쪽에 걸친 논의는 그러한 학술적 갈증을 단번에 해소하고 있다. 다만 아쉬움으로 남는 것은 몇몇 중요한 문헌들에 대한 언급이 빠져있다는 사실이다. 1927년의 5차 솔베이학회에 대해서는 전체 학회의 논문들과 토론을 영영한 책이 있다(Bacciagaluppi and Valentini 2009). 또한 아인슈타인과 보어의 논쟁에 관해서는 판을 거듭한 휘태커의 연구서가 있다(Whitaker 2006). 이들 문헌이 활용되었다면 논의가 더 풍부해지지 않았을까하는 생각이 든다. 아주 최근에도 보어의 상보성에 대한 연구서(Katsumori 2011, Plotnitsky 2012)는 계속 출간되고 있으므로 이들을 반영한 저자의

후속 연구를 기대해 봄직하다. 그리고 사소한 지적이지만 339쪽에 아인슈타인이 “소박한 실재론자”가 아니었다고 한 것은 “소박한 귀납주의자”를 잘못 쓴 것이 아닌가한다. 물론 아인슈타인은 존재론적 전통에서 물리적 실재를 옹호했는데 이에 대한 논의는 자연스럽게 3부의 실재론에 대한 논쟁으로 넘어간다.

2부의 후반부에서 저자는 EPR과 보어의 논쟁을 소개하며 분리성이나 전체론과 같은 중요한 개념을 언급했다. 이제 3부에서는 본격적으로 보어와 실재론을 주제로 기존의 보어 해석을 비판하며 저자 자신의 실재론적 해석을 제시한다. 여기서 핵심 질문은 과연 보어가 실재론자라고 할 수 있는지, 그렇다면 어떤 의미의 실재론자인지에 관한 것이다. 실재론에 관한 논쟁은 보어 해석에서뿐만 아니라 현대 과학철학의 중심 주제이기도 하므로 3부의 논의는 양자역학을 넘어서는 중요성과 의의를 갖는다. 하지만 동시에 3부는 책 전체에서도 가장 논쟁적인 주장들을 담고 있다고 생각된다. 이를 크게 둘로 나누어 검토해 보자.

1. 먼저 저자는 책 곳곳에서 **실재론은 경험적 가설**이라고 하며 이를 선험적 또는 규약적 정의와 대비시키고 있다(특히 375쪽 이하). 이 말의 의미는 다음과 같다. 곧 과학 이론이 발전함에 따라 실재론의 의미는 변화할 수 있고 또 변화해야만 한다는 것이다. 그러면서도 그것은 경험과학의 개별적 가설과 달리 몇몇 실험에 의해 부정될 수 있는 성격의 가설은 아니다. 대신 실재론은 경험을 아우르는 가설로 경험에 대한 폭넓은 해석을 가능하게 한다.

1은 보이즈나 퍼트남이 실재론을 생각하는 방식과 비슷한 것 같지만 그 의미는 좀 다르다. 보이즈나 퍼트남이 실재론이 경험적 논제라고 할 때에는 그것이 ‘경험과학이 놀라운 예측적 성공을 거두어 왔다’는 과학사의 ‘경험적 사실’을 잘 설명한다는 의미이다(예를 들어 Putnam 1984, 141). 반면 경험과학의 변천에 따라 실재론의 의미가 변화한다는 것은 저자만의 독특한 생각인 것 같다. 실재론을 단순한 철학적 논제가 아닌, 경험과학과의 관련 아래 이해하려는 저자의 의도에는 충분히 공감이 간다. 하지만 그렇다

고 실재론 자체가 경험적 가설이라 할 수 있는가? 사실 경험과학에서도 매우 일반적인 이론적 가설은 몇 가지 실험에 의해 반박되지는 않는다. 예를 들어 뉴턴의 운동 법칙과 같은 것이 있다. 이것은 고전역학의 거의 모든 경험적 현상을 아우르는 가설이지만 경험적으로 반박되었다고 보기에는 무리가 많다. 그래서 뉴턴의 운동 법칙을 선험 원리(칸트) 또는 규약(푸앙카레)으로 보는 견해가 설득력을 지니는 것이다. 하지만 이들과 달리 저자는 실재론이 여전히 경험적 가설이라는 견해를 유지한다. 그렇다면 그것은 어떤 의미의 ‘경험적’ 가설인가? 저자는 그것이 ‘경험적’인 이유가 그 시대의 암묵적인 형이상학적 가정(예를 들어 고전적인 “분리적 독립”)을 반영하기 때문이라고 한다(381). 곧 과학적 경험이 달라지면 형이상학적 가정이나 존재론도 달라지기 때문에 결국 이를 반영하는 실재론적 주장도 ‘경험적’일 수밖에 없다는 것이다. 만일 ‘경험적’을 이런 의미로 쓴다면 형이상학적 가정이나 존재론도 모두 ‘경험적’인 것인지, ‘경험적’의 의미를 너무 확대해 쓴 것은 아닌지 하는 의문이 남는다.

2. 만일 실재론이 경험적 논제라는 1을 받아들이면 자연스럽게 다음과 같은 질문을 할 수 있다. 고전역학에서 양자역학으로 넘어오면서 실재론의 의미는 어떻게 달라져야만 하는가? 저자는 양자역학이 분리적(기계론적) 독립이 아닌 비분리적(전체론적) 독립, 더 나아가 개별자 존재론이 아닌 전체론적 존재론을 지향한다고 한다. 이 말의 의미를 알아보기 위해 다음 일련의 논제를 생각해 보자. 저자는 보어가 2-3을 부정하고 나머지는 모두 받아들인다고 한다.

- 2-1. 양자역학적 비분리성: 관찰 장치와 관찰 대상은 분리불가능하다.
- 2-2. 전체성: 관찰자와 관찰 대상은 분리불가능하다.
- 2-3. 분리적(고전적) 독립성: 관찰자와 관찰 대상의 상호작용은 분리가 가능하다.
- 2-4. 독립성: 관찰 결과는 개별 관찰자의 특징에 의존하지 않는다.

2-1은 양자역학에서 근본적으로 새로운 상황으로 보어가 반복해서 강조

하는 논점이다. 관찰 장치와 관찰 대상이 작용 양자로 연결되어 있어 관찰 대상의 속성은 관찰 장치와의 연관 아래서만 말할 수 있다는 함축이 있다. 하지만 그렇다고 해서 2-2가 따라 나오지는 않는다. 그런데 저자는 곳곳에서 2-1과 2-2를 혼용해서 쓰며 이 둘을 명시적으로 구분하지 않는다. 곧 저자는 암암리에 관찰자와 관찰 장치가 같은 영역에 속한 것처럼 가정한다(예를 들어 439쪽 중간의 인용문 부분).

그런데 다른 한편으로 저자는 때때로 보어가 관찰 주체와 관찰 내용 사이의 구분을 했다는 구절들을 인용하기도 한다(379, 387, 442). 만일 관찰 주체가 관찰자이고 관찰 내용이 관찰 대상에 관한 것이라면 이러한 구절은 관찰자와 관찰 대상의 구분을 함축하며, 따라서 2-2와 모순되지 않는가? 저자는 모순되지 않는다고 생각한다. 그 이유는 2-2를 받아들여도 그것이 2-3을 부정하지 2-4를 부정하지는 않는다고 보기 때문이다. 곧 관찰자와 관찰 대상이 분리가능하다고 해서 관찰 결과가 개별 관찰자의 특징에 의존할 필요는 없다(393). 보어가 주관과 객관을 분리한 것은 객관성을 유지하기 위해서이지 전체성을 부정하기 위해서가 아니다. 그렇다면 이것이 왜 전체론적 ‘실재론’인가? 저자는 관찰자 역시 관찰 대상이나 관찰 장치처럼 실재의 한 부분이라고 한다(381). 전체성에 따라 관찰자와 관찰 대상의 상호작용은 분리가능해도 그 상호작용의 성격은 세계에 의해 결정된다는 의미에서 실재론이라는 것이다(441).

이러한 저자의 ‘전체론적 실재론’은 나름대로 참신하고 비교적 일관된 실재론적 입장인 것 같다. 하지만 그것이 얼마나 보어의 의도를 반영하는지에 대한 의문은 남는다. 저자도 시인하듯이 만일 보어가 ‘분리된 관찰자’를 명시적으로 인정했다면 이는 분명히 2-2와 모순되는 것이 아닌가? 보어도 관찰자와 관찰 내용의 구분, 주체와 객체의 구분은 고전역학에 한정된 이야기가 아니라 “모든 과학적 지식에 필수적인” 요구라고 하지 않았는가?(379쪽 인용문 참고) 물론 양자역학에서는 주체와 객체의 경계선이 고정되지는 않는다. 하지만 자연의 객관적인 서술을 위해서 적어도 개념적이고 논리적으로 그러한 구분을 해야 한다는 것은 보어의 일관된 입장이었다(Bohr 1996, 361-2, 390, 393). 곧 보어는 2-1을 받아들이면서도 관찰자와 관찰 대상을 명확히 구분함으로써 객관성을 확보하려 했다는 해석이 가능

하다.

그렇다면 그러한 구분은 어떻게 확보되는가? 여기서 보어의 유명한 교설, 곧 관찰 장치는 고전적으로 서술되어야 한다는 주장이 나오게 된다. 곧 관찰 장치와 관찰 대상이 분리가능하지 않더라도 관찰 장치를 고전적으로 서술하게 되면 관찰자는 분리될 수 있고, 관찰 내용에 대한 애매하지 않은 의사소통이 가능해진다. 물론 상황이 그렇게 단순하지만은 않다. 어떤 관찰 장치를 선택할 것인지에 관해서는 여전히 관찰자의 자유가 있기 때문이다. 곧 그렇게 고전적으로 서술되는 대상에도 부분적으로 관찰자의 선택이 개입하고 이에 따라 관찰 내용도 바뀌게 된다. 이런 맥락에서 보어가 즐겨 인용한 “우리는 존재의 위대한 드라마에서 관객[관찰자]인 동시에 배우[대상]”(414)라는 언급이 중요한 의미를 지니게 된다. 곧 우리는 우리의 선택에 따른 대상을 우리와는 분리된 것처럼 바라보고 있는 것이다. 물론 이것은 또 하나의 가능한 해석일 뿐 저자의 해석에 대한 반박은 아니다. 저자 나름의 일관된 입장에서 파이에나 머독, 벨러와 파인, 심지어는 실재론적 해석의 폴스까지 비판적으로 논의하는 부분은 학술적 가치가 크다고 본다. 다만 관찰 기구를 고전적으로 서술할 필요성에 관한 보어의 주장은 잘 알려졌고 보어 학자들도 많은 어려움을 겪는 부분인 만큼(Howard 1994) 책 전체에 걸쳐 이에 대한 언급이나 해명이 없다는 것이 다소 아쉬움으로 남는다.

이상이 지적이 책 전체에 대한 비판적 언급으로 읽히지 않기를 바란다. 이 서평 곳곳에서 나는 이 책의 학술적 기여를 구체적으로 지적했다. 앞으로 국내의 모든 보어 연구, 더 나아가 양자역학의 역사와 철학 연구는 이 책을 반드시 참고해야 하며, 당분간 이 정도의 포괄적인 연구서를 접하기는 힘들지도 모르겠다. 물론 일반 독자에게 양자역학의 역사와 철학을 고루고루 소개하겠다는 원래의 목적은 충분히 달성되고도 남는다. 양자역학의 역사와 철학을 이해하고 싶은 일반 독자, 실재론 논쟁의 모범적 적용 사례를 알고 싶은 철학자 모두에게 이 책을 자신 있게 추천한다.

참고문헌

연도 인용 없이 쪽수만을 표기한 것은 (김유신 2012)을 가리킨다.

- 김유신 (2012), 『양자역학의 역사와 철학: 보어, 아인슈타인, 실재론』, 이학사, 2012.
- Bacciagaluppi, G. and Valentini, A. (2009), *Quantum Theory at the Crossroads: Reconsidering the 1927 Solvay Conference*, Cambridge: Cambridge University Press.
- Bohr, N. (1996), *Niels Bohr Collected Works, vol. 7: Foundations of Quantum Physics II (1933 - 1958)*, ed. by J. Kalckar, Amsterdam: North-Holland Publishing Co.
- Howard, D. (1994), "What Makes a Classical Concept Classical? Toward a Reconstruction of Niels Bohr's Philosophy of Physics," in J. Faye and H. Folse eds., *Niels Bohr and Contemporary Philosophy*, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, pp. 201-229.
- Katsumori, M. (2011), *Niels Bohr's Complementarity: Its Structure, History, and Intersections with Hermeneutics and Deconstruction*, Dordrecht: Springer Netherlands.
- Pais, A. (1982), *Subtle is the Lord: The Science and the Life of Albert Einstein*, Oxford: Oxford University Press.
- Plotnitsky, A. (2012). *Niels Bohr and Complementarity: An Introduction*, New York: Springer.
- Putnam, H. (1984), "What is Realism?" in J. Leplin ed., *Scientific Realism*, Berkeley, CA: University of California Press, pp. 140-153.
- Whitaker, A. (2006), *Einstein, Bohr and the Quantum Dilemma: From Quantum Theory to Quantum Information*, 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press.