

양자장이론의 존재론적 토대 I^{*†}

— 힘과 물질의 존재론적 구분과 전일론적 존재론의 가능성 —

김재영[‡]

양자장이론의 존재론적 토대를 검토하기 위해, 힘과 물질의 이원적 존재론을 쟁점으로 제기했다. 이를 논의할 기초적인 개념 틀로서 메타동역학을 제시했다. 입자물리학의 표준모형의 양식인 게이지 양자장이론에서는 힘과 물질이 입자 개념으로 환원될 수 있는 것으로 서술되고 있지만, 입자물리학에서도 힘과 물질의 이원적 존재론은 유지되고 있음을 밝혔다. 양자장이론의 존재론적 토대를 이해할 수 있는 틀로서 전일론적 대상 개념을 고찰했다. 고전마당(파동)과 양자마당의 관계를 비교하면서, 이를 통해 입자물리학에서 양자마당과 입자의 관계를 고찰했다. 이러한 고찰을 통해 개체론적 존재론을 넘어서 전일론적 존재론을 세울 수 있을지 가능성을 논의했다.

【주요어】 게이지 양자장이론, 힘과 물질, 입자-파동 이중성, 개체론적 존재론, 전일론적 존재론

1. 서론

20세기 후반부에 정립된 입자물리학은 그 바탕에 양자장이론을 깔고 있다. 이에 따르면 물질적 자연에 존재하는 힘 혹은 상호작용은 근본적으로 중력, 전자기력, 약한 핵력, 강한 핵력 등의 네 가지이며, 이 중에서 중력을 제외한 나머지 세 가지 상호작용을 서술하는 이론

* 접수 완료 : 2007. 5. 23 / 심사 및 수정 완료 : 2007. 6. 15.

† 저자는 이 논문에 대해 예리하고 적합한 논평을 해 주신 익명의 심사자들에게 깊이 감사드린다. 이 논문은 2004년 한국학술진흥재단의 지원에 의해 연구되었음(KRF-2004-074-AS0025).

‡ 서울대학교 기초교육원 교수

(양자전기역학, 전기약작용의 살람-와인버그 모형, 양자색역학)은 모두 양자장이론이다. 양자장이론은 양자이론과 특수상대성이론을 결합하여 구성한 가장 세련된 동역학 이론 중 하나이다. 양자장이론은 다양한 측면에서 깊이 있게 연구된 물리학이론으로서 실험을 통한 경험적 확인이라는 면에서도 그 어떤 이론보다 정밀한 이론이다.

그러나 양자장이론의 바탕에 깔려 있는 존재론적 토대에 대해서는 이제까지 제한된 연구만이 있는 형편이다. 이 논문은 이러한 간극을 메우는 데에 주된 초점을 맞추고 있다.¹⁾ 양자장이론의 토대로서 가장 중요한 문제가 ‘양자마당’의 존재론적 위상이다.²⁾ 양자장이론은 입자물리학의 기본이론이기 때문에, 양자장이론이 근본적으로 입자의 이론인 것처럼 서술하고 있는 서술을 쉽게 볼 수 있다. 입자물리학의 표준모형은 물질세계의 모든 것이 쿼크와 렙톤이라는 기본물질입자들로 이루어져 있으며, 이 물질입자들 사이의 네 가지 상호작용은 보존(boson)의 교환으로 설명된다고 말한다. 통일장이론이란 이 네 종류의 보존들을 모두 포괄하여 단일하게 서술하는 이론이며, 표준모형을 넘어서 이론들, 즉 초대칭이론이나 초끈이론에서도 기본입자들에 대한 존재론적 관념은 그대로 유지된다. 그러나 입자물리학에서 ‘입자’(particle)란 “푸앵카레 변환군의 기약표현이 되는 연산자 값 마당으로 기술되는 상태”³⁾로 정의되며, 수학적으로도 개념적으로도 양자

-
- 1) 양자장이론의 존재론적 토대와 관련시킬 수 있는 기존의 연구로 다음을 들 수 있다. Auyang(1995), Auyang(1999), Bartels(1999). Brown & Harré (1988), Huggett & Weingard(1994), Kuhlmann et al.(2002), Lange (2002), Monton(2002), Paty(1988), Redhead(1983), Teller(1995), Teller (1996), Wayne(2000). 그러나 Kuhlmann et al.(2002) 이외의 문헌들은 양자장이론의 존재론적 토대를 직접적으로 다루고 있지 않으며, 힘과 물질의 존재론적 고찰이나 전일론의 가능성에 대한 논의는 없는 것으로 평가할 수 있다.
 - 2) 유럽언어에서 field, champs, Feld 등에 해당하는 한국어 용어가 ‘마당’이다. 이것은 장(場)이라는 단모음 어휘보다 더 적합한 것으로 보인다. 그러나 이 논문에서는 관례를 존중하여 ‘양자마당이론’ 대신 ‘양자장이론’이라는 용어를 사용하겠다.
 - 3) 예를 들어, Bogolubov et al.(1990), Huang(1997), Weinberg(1999) 등 참

장이론의 토대에 놓여 있는 존재론적 모형을 고전적인 의미의 ‘알갱이’(corpuscle)와 같은 것으로 보는 것은 옳지 않다. 오히려 입자의 수학적 서술이 ‘연산자 값 마당’이라는 점에서 양자장이론의 존재론적 모형으로서 전일론적(holistic) 모형의 가능성을 진지하게 타진해 볼 필요가 있다.

우리는 다음과 같은 존재론적 질문들에 적절하게 답할 수 있어야 한다. 마당이란 무엇인가? 양자마당은 고전마당과 무엇이 다르며 무엇이 같은가? 양자장이론에서 힘과 물질의 관계는 무엇인가? 양자장이론에서 상호작용을 나타내는 매개입자, 즉 게이지 입자의 존재론적 의미는 무엇인가? 입자물리학에서 말하는 ‘입자’와 양자마당은 어떤 식으로 서로 대응하는가? 양자장이론은 개체론적 존재론과 전일론적 존재론에 대해 어떤 함의를 갖는가?

여기에서는 이와 같은 질문에 답하기 위해 메타-물리학적 접근을 취하려 한다.⁴⁾ 여기에서 제기하고 있는 질문들은 얼핏 보면 물리학에서 다루어지는 논제인 것처럼 보이지만, 이 문제들을 물리학의 관점이 아니라 메타-물리학의 관점에서 보는 것은 여러 면에서 유용하고 필요하다. 메타-물리학의 관점이란 마치 물리학의 이론이 실험결과를 정돈하고 이로부터 새로운 예측을 얻는 것과 유사하게 물리학의 이론에 대한 이론을 전개함으로써 물리학의 이론을 정돈하고 이로부터 새로운 예측을 얻으려는 관점이다. 메타-물리학에서는 물리학적 문제 해결 방식을 도입하지 않는다. 오히려 메타-물리학이 충실하게 지키려 하는 원칙은 과학철학에서 요구하는 바에서 도출된다. 이것은 현재 인정받고 있는 물리학이론의 바탕에 깔려 있는 기초와 토대를 의심하고, 물리학이론 안에서는 유사해 보이거나 유비로 간주

조.

- 4) ‘메타-물리학’은 물리학에 대한 담론을 가리킨다. 대상명제에 대한 주장이 담겨 있는 명제를 메타명제라 지칭하는 것과 마찬가지로, ‘메타-물리학’은 물리학이라는 학문을 대상으로 논의를 전개한다. 특히 여기에서 택하고 있는 메타-물리학적 접근은 ‘메타동역학’이다. ‘메타동역학’의 상세한 의미와 범위에 대해서는 본문 및 김재영(2001) 참조.

할 수 있는 개념들을 존재론적인 관점으로부터 구별하려는 것이다.⁵⁾ 특히 여기에서 택하고 있는 메타-물리학적 접근은 ‘메타동역학’이다.

다음 절에서는 양자장이론에 앞서 동역학 일반에서 제기되는 존재론적 토대의 문제를 살펴볼 것이다. 이것은 고전역학에서부터 명료하게 드러나는 물질과 힘의 이원적 존재론을 검토하고, 이를 이해할 수 있는 틀로서 메타동역학의 관점을 소개한다. 셋째 절에서는 양자장이론과 입자물리학의 개요를 이 논문의 논의에 걸맞도록 축약·재구성하여 정리한다. 이를 바탕으로 넷째 절에서 양자장이론과 입자물리학의 존재론적 토대를 앞에서 제기했던 질문들에 비추어 검토한 뒤 결론을 맺는다.

2. 동역학의 존재론적 토대

양자장이론은 동역학 이론의 한 형태이다. 동역학은 뉴턴의 역학을 통한 과학혁명의 종합 이후 줄곧 물리학의 근본이론으로 자리 잡아 왔다. 양자장이론의 존재론적 토대를 제대로 이해하기 위해서는 동역학 일반의 존재론적 토대에 관한 고찰이 선행될 필요가 있다. 그러나 동역학 일반의 존재론적 토대는 그 자체로 방대하고 심도 있는 연구가 필요한 주제이며, 논의해야 하는 (또는 논의할 수 있는) 주제나 접근방식도 매우 다양하다.⁶⁾

5) 이 때 유용한 방법 중 하나가 물리학이론을 역사적인 맥락에서 재검토하는 것이다. 물리학이론의 특징 중 하나가 올바른 지식의 확립이라는 독특한 ‘표준화’(canonization) 과정을 거친다는 점이다. 이것은 공식적으로는 교과서나 종설논문을 통한 지식의 집대성과 정돈으로 나타나며, 통시적으로는 과거의 잘못된 이론이 시간이 흐름에 따라 올바른 방향으로 교정되어 간다는 관념으로 나타난다. 그러나 메타-물리학의 관점에서는 과거의 낡아 보이는 이론, 특히 어떤 특정의 이론체계가 처음 정립되어 가는 과정에서 겪었던 여러 문제점들을 현재의 맥락에서 되새겨 보는 것이 여러 가지 면에서 유용하다는 입장에 선다. 따라서 이 논문에서는 물리학사의 여러 국면들을 검토하는 데에 중점을 둔다. 그러면서도 역사학적으로 충실한 접근보다는 현재의 문제를 염두에 둔 논리적 재구성의 성격을 더 많이 띠 것이다.

동역학의 존재론적 토대를 살펴본다고 할 때 서로 상보적인 두 가지 접근이 있다는 점을 상기할 필요가 있다. 하나는 일반적인 존재론(형이상학)의 맥락에서 논의되는 주제들이 세련된 물리하이론으로서의 동역학에서 어떤 특수성을 보이면서 새롭게 조명되는가 하는 접근이다. 이와 같은 접근에서는 동역학이라는 세련된 이론체계 또는 서술체계가 주로 일상적인 언어의 틀에서 논의되는 존재론의 주제들에 새로운 통찰을 줄 수 있다는 믿음이 전제되어 있다. 가령 시간과 공간의 문제는 상대성이론이라는 세련된 동역학을 도입함으로써 이전의 논의보다 더 깊이 있는 고찰을 할 수 있다. 이와 같은 접근에 상보적인 두 번째 접근은 세련된 동역학으로부터 일반적인 존재론에서는 중요한 문제로 부각되지 않던 주제를 찾아내 이를 깊이 있게 살펴보는 것이다. 이와 같은 접근은 추상적인 수준에서 다루기 힘든 주제를 새롭게 제기하고 이를 더 구체적인 수준에서 검토함으로써 더 일반적인 논의에 새로운 통찰을 줄 수 있다. 이 글에서 논의하고 있는 힘과 물질의 존재론적 구분은 후자의 접근에 속하는 논제이다.

(1) 힘과 물질의 이원적 존재론

뉴턴 역학에서 ‘힘’과 ‘물질’은 근원적으로 별개의 존재론적 범주에 속한다. 즉 동역학적 서술의 대상이 되는 ‘물질’은 ‘질량’(mass)으로 표상되는데, 이는 어떤 종류의 ‘힘’을 만들어 내거나 다른 ‘물질’이 만들어 낸 힘의 영향을 받지만, ‘힘’과는 근원적으로 구별된다.⁶⁾

뉴턴에 따르면, ‘물질의 양’(질량, *massa*)은 “밀도와 부피로부터 함께 생겨나는 같음의 척도”이며, ‘운동의 양’은 “속도와 물질의 양으

6) 일반적으로 동역학의 존재론적 토대로서 다룰 수 있는 주제로, 시간과 공간의 문제, 물질과 시간-공간의 관계, 부분과 전체의 관계, 같음과 다름의 문제, 보편자(universal)와 특수자(particular), 동일성(identity; haecceity)의 문제, 지속성(persistence)의 문제: 내속론(內續論, *endurantism*)과 관속론(貫續論, *perdurantism*)의 논쟁 등을 들 수 있다.

7) 물리학에서 물질과 힘에 대한 상세한 개념적 고찰로 Jammer(1961), Jammer(1957) 참조.

로부터 함께 생겨나는 같음의 척도”이다.⁸⁾ 한편 ‘힘’(vis)은 “물체에 가해져서 운동의 상태를 바꾸는 작용”이다.⁹⁾ 단순화시켜 말하면, 어떤 물체에 힘이 작용할 때 그 물체의 운동의 양이 어떻게 바뀌는가를 말해 주는 운동법칙을 통해 물체의 운동을 서술하는 체계가 바로 뉴턴 역학이다.

뉴턴이 제시한 운동의 둘째 법칙은 ‘운동의 양’의 변화가 가해진 힘(vis impressa)에 비례한다는 것이다. 이를 기호로 나타내면 $\Delta(mv) \propto F$ 가 된다. 이 힘이 어디에서 비롯하는 것인가라는 문제가 남아 있지만, 뉴턴 역학의 개념 틀 자체에서는 힘이 물질에 작용한다는 관념이 바탕에 깔려 있다. 힘의 기원은 뉴턴 역학에서 관심을 두는 문제가 아니다. 기원과 작동이라는 측면에서 볼 때 물질과 힘은 별개의 존재론적 범주에 속한다.¹⁰⁾

뉴턴의 둘째 법칙을 오일러를 따라 $ma = F$ 라는 운동의 기본방정식으로 나타낼 때 그에 대한 존재론적 해석에는 몇몇 선택지가 있다. 첫째, 이 방정식은 세 가지의 고유한 존재론적 존재자들 사이의 관계를 나타낸다는 해석이 있다. 즉 질량이 m 인 물체에 힘 F 가 주어지면 이로부터 가속도 a 가 생겨난다는 해석이다. 이것은 힘과 물질의 이원적 존재론을 전제하는 것과 같다. 운동을 하는 대상인 물체는 질량이라는 숫자로 대표된다. 힘이라는 것은 물체가 운동하도록 만드는 원인으로 작용하며, 가속도는 가해진 힘이 물체에 나타나는 결과이다. 둘째, 힘이라는 것을 단순히 질량과 가속도의 곱으로 정의

8) Newton(1687), p. 1.

9) Newton(1687), p. 2.

10) 뉴턴 자신은 보편중력을 일종의 원격작용으로 이해했으며, 힘의 발생원인에 대해서는 정확하게 말할 수 없으며 그럴 필요도 없다고 보았다. 이러한 관념은 라플라스의 ‘천체역학’(Mécanique céleste)이나 라그랑주의 ‘해석역학’(Mécanique analytique)에서도 반복되고 있다. 18세기의 요한 베르누이나 르사주(G.L. Lesage)처럼 힘을 구성입자들 사이의 충돌의 결과로 도출하거나 설명하려는 시도도 있었고, 19세기의 헤르츠나 마흐처럼 힘이라는 개념 자체를 제거하려는 노력도 있었지만, 뉴턴 역학의 적절한 이해는 힘이 별도로 존재하는 존재자라고 보는 것이다. Jammer(1957) 참조.

함으로써 ‘힘’이라는 개념을 제거하는 해석이 있다. 이 해석에서는 운동방정식을 푼다는 것은 여러 종류의 ‘*ma*’들 사이의 관계를 찾아내는 것에 해당한다. 셋째, 운동방정식의 오른쪽에 있는 F 를 어떻게 든 구성입자들의 운동의 결과로 해석하려는 접근이 있다. 다시 말해 힘이라는 개념 자체를 거부하는 것은 아니지만, 어떤 물질에 힘이 작용한다는 것은 곧 다른 물질(구성입자들)이 그 물질에 힘을 주는 것으로 보자는 것이다. 그러면서도 물질에 작용하는 힘이 결국 다른 구성입자들의 운동의 결과로 생겨난다고 본다. 이 접근은 데카르트주의에 연원을 두는데, 일종의 기계론적 관점(*mechanistic view*)으로 볼 수 있다. 이 해석에서도 힘의 개념을 운동으로 환원하려 하지만, 개념적으로 힘을 제거하려 하는 둘째의 경우와는 다르다. 넷째 해석은 미묘한 면이 있는데, 질량이라는 것도 일종의 힘으로 보는 접근이다. 운동은 ‘가해진 힘’(*vis impressa*)과 ‘버티는 힘’(*vis insita*)의 상호작용의 결과라는 것이다. 이 해석에서는 물질이라는 것도 궁극적 존재자가 될 수 없고 단지 다양한 힘들만이 서로 다투고 있다고 본다.¹¹⁾

이 글에서는 뉴턴의 방정식에 대한 이와 같은 여러 해석 중에서 주된 것이 첫째 해석이라고 보고자 한다. 물질과 힘 사이의 관계에 대한 다양한 논의가 이 방정식의 해석과 연관되지만, 뉴턴 자신이 제시하고 있는 해석이나 지금까지도 물리학계에서 가장 널리 받아들여지고 있는 해석이 이것이기 때문이다. 적어도 기초적인 고전역학의 틀 안에서는 대개 물질과 힘이 별개의 존재론적 범주라고 본다.

뉴턴의 방정식에 대한 나머지 해석들은 모두 첫째 해석에 대한 저항으로 나타났으며, 그 자체로 완결된 해석이 아니라는 점에서 일종의 프로그램으로 볼 수 있다. 가령 둘째 해석에서는 역학에서 힘의

11) 뉴턴의 운동방정식에 대한 여러 해석은 역사적으로 오랜 논제였으며, 오일러·마호·헤르츠·톰슨 등 저명한 수학자 및 물리학자들이 이를 다루었다. 현대적인 역학 저술에서도 이러한 해석의 문제가 자주 등장한다. 그러나 이에 대한 상세한 서지학적 및 역사적 논의는 별도의 상당한 작업을 요하며, 또한 이 논문의 주요한 주제가 아니므로, 이 문제는 이후의 연구과제로 남겨두고자 한다.

개념을 제거하고 단순히 질량과 가속도의 곱만으로 된 방정식을 푸는 데 국한하려 한다. 그렇기 때문에 둘째 해석을 옹호하는 이는 왜 질량과 가속도의 곱이 문제가 되는지 그리고 질량과 가속도의 곱 중에서 허용되거나 거부되는 것은 어떤 기준에 의거하는지 등을 명확하게 밝혀주어야 한다. 그러나 이와 같은 시도는 대체로 성공적이지 못했다. 마찬가지로 물질이라는 개념을 제거하고 역학의 서술을 모두 힘의 문제로 환원하려는 넷째 해석에서는 물질이라는 것이 존재한다는 사실에 대해 적절한 설명을 하기 힘들다. 기계론주의적인 셋째 해석은 겉보기에는 물질과 힘의 범주를 모두 인정하는 듯하지만, 사실은 힘의 개념을 물질의 운동으로 환원하려 한다는 점에서 물질 일원론적인 관점이라고 말할 수 있다. 셋째 해석이 성공적이려면 알려진 힘의 형태들을 모두 물질의 운동으로부터 이끌어낼 수 있어야 한다. 만일 힘이라는 개념을 일차적 존재로 여기지 않는다면, 이를 물질의 운동이라는 일차적 개념으로부터 유도할 수 있어야 한다는 뜻이다.

반면에 첫째 해석은 질량으로 대변되는 물질이 존재할 뿐 아니라 이것과 별개로 존재하는 힘이 있다고 보기 때문에, 개념상으로 힘을 물질로 환원하거나 물질을 힘으로 환원하는 부담을 질 필요가 없다. 세계에는 물질이라는 존재자가 있고, 이와 별도로 존재하는 힘이 물질에 가해지면 그로부터 운동, 즉 위치의 변화가 일어난다는 관념은 매우 자연스럽다.

뉴턴 역학의 일반화로서 해밀턴/라그랑주 역학에서는 사정이 좀 복잡해진다. 같은 ‘물질’이라도 다른 ‘힘’(또는 퍼텐셜)을 받고 있다면 존재론적으로 별개의 대상이 되기 때문이다. 가령 부피가 정확히 얼마인 완전한 구 모양의 물체가 있고 그 질량이 얼마라고 하자. 이 물체가 용수철 끝에 매달려 탄성력을 받고 있을 때와 지구상에서 중력을 받고 있을 때에는 그를 지칭하는 해밀토니안 함수 또는 라그랑지안 함수의 꼴이 달라진다. 왜냐하면 해밀토니안 함수나 라그랑지안 함수에는 운동에너지 항뿐 아니라 위치에너지 항이 포함되어 있기 때문이다. 따라서 운동에너지 항의 계수, 즉 질량이 같다고 하더라도 위치에너지(퍼텐셜)가 다른 두 물체는 존재론적으로 다른 대상으로

간주해야 한다. 그러므로 해밀턴/라그랑주 역학에서는 동역학적 서술 대상을 지시할 때에는 물질의 속성인 질량뿐 아니라 그 물질의 운동을 좌우하는 퍼텐셜까지 함께 지시해 주어야 적절한 지칭이 된다.

그러나 이 경우에도 위치에너지 또는 퍼텐셜이 물질로부터 비롯되는 것은 아니다. 해밀토니안 함수나 라그랑지안 함수에서 운동에너지 항과 위치에너지 항은 언제나 병립하여 존재한다. 운동에너지 항으로부터 위치에너지 항이 주어지거나 그 반대로 위치에너지 항으로부터 운동에너지 항이 주어지는 것은 아니다.

그런데 ‘상호작용’이라는 개념을 상기한다면, 힘과 물질의 이원적 존재론이 부적절하게 느껴질 수도 있다. 이에 대해 잠시 살펴보자. 역학을 사용하여 운동을 서술하려고 하는 대상이 가령 둘인 경우에는

$$H = T_1 + T_2 + V_{12} = \frac{p_1^2}{2m_1} + \frac{p_2^2}{2m_2} + V(q_1, q_2)$$

와 같이 위치에너지 항을 두 물체 사이의 상호작용으로 서술할 수 있다. 즉 태양과 관련된 보편중력을 받고 있는 행성의 운동에만 관심을 갖는 경우를 보면, 행성이라는 물질과 보편중력이라는 힘의 두 존재론적 범주로 나누는 것이 적합해 보이지만, 태양도 서술의 대상으로 포함시키는 경우에는 상황이 달라지는 것처럼 보인다. 결국 존재하는 것은 행성과 태양이라는 두 물질이며, 그 사이에서 작용하는 힘이라는 것은 존재론적 존재자가 아닌 듯이 보인다. 이러한 직관적 믿음이 뉴턴의 운동 방정식에서 힘의 개념을 제거하려는 해석의 바탕이었을 것이다. 그러나 이 경우에도 대응하는 운동방정식은

$$\dot{p}_1 = -\frac{\partial V}{\partial q_1} \equiv F_1, \quad \dot{p}_2 = -\frac{\partial V}{\partial q_2} \equiv F_2$$

와 같이 되어, 단지 자유도가 늘어난 것일 뿐, 결국 뉴턴 역학에서와 마찬가지로 상황이 된다. 따라서 직관적으로는 상호작용이라는 개념을 통해 힘의 개념을 제거할 수 있을 듯이 보이더라도, 각각의 자유도에 대해서는 여전히 그 자유도(대상)에 대응하는 물질과 거기에 작용하는 힘이라는 이원적 존재론이 유지되어야 함을 알 수 있다.

이제 이러한 측면이 전기 및 자기와 관련된 현상을 서술하는 전자기이론 또는 전기역학에서 어떤 모습으로 나타나는지 검토해 보자. 통칭 전자기이론은 동역학적 이론구조의 측면에서 볼 때 두 동역학의 결합이다. 즉 전하의 질점역학과 전기동역학이 정합적인 방식으로 통합된 이론이다. 전하의 질점역학에서 전기마당이나 자기마당은 힘 또는 퍼텐셜의 맥락에서 나타나지만, 전기동역학에서는 전기마당이나 자기마당 그 자체가 동역학적 서술의 대상이 된다. 먼저 전하의 질점역학이라는 틀에 국한하여 살펴보면, 물질의 속성으로 질량 외에 전하가 덧붙여졌고, 위치에너지 또는 퍼텐셜에서 전자기마당이라는 새로운 요소가 나타나지만, 근본적으로 힘과 물질의 이원적 존재론은 영향을 받지 않는다.

한편 전기역학에서는 동역학적 서술의 대상이 전자기마당이며, 전하를 지니는 물질에 대한 정보로부터 전자기마당의 함수적 형태를 결정할 수 있게 하는 것이 맥스웰 방정식이다. 그렇다면 전자기마당이라는 힘이 전하라는 물질로부터 비롯되는 것이고, 이것은 곧 물질과 힘의 이원적 존재론이 일원적 존재론으로 변형된다는 것을 의미하는 듯이 보인다. 그러나 전기역학의 구조적 측면을 본다면, 전기마당 또는 자기마당은 힘이 아니라 물질의 맥락에서 서술되는 대상이며, 이 마당을 결정짓는 전하 또는 전류는 전자기마당에 작용하는 힘과 같다. 가령 맥스웰 방정식에서 전하 또는 전류는 뉴턴 방정식에서 힘을 나타내는 항이 하는 역할을 한다. 즉 뉴턴 역학에서 운동의 원인으로 힘이 주어지면 그로부터 물질이 수동적으로 운동 상태의 변화를 겪게 되는 것과 마찬가지로, 전기역학에서는 운동(전자기마당의 변화)의 원인으로 전하와 전류가 주어지면 그로부터 전자기마당의 상태가 수동적으로 변화하게 되는 것이다. 이 때 전자기마당은 전하와 전류로부터 영향을 받을 뿐이지 그 반대로 전하와 전류를 좌우하는 것은 아니다.

요컨대, 전자기이론을 전하의 질점역학과 전기역학으로 쪼개서 생각하면, 각각의 경우에 국한해서는 힘과 물질의 이원론은 유지된다. 개념 정립이 어려워지는 것은 이 두 부분적인 역학이 결합했을 때이

다. 전하의 질점역학과 전기역학이 결합된 이론으로서의 전자기이론에서는 힘과 물질의 존재론적 범주 구분이 어떻게 될 것인가? 이 문제가 불거진 것은 전자기이론에서 ‘마당’의 위치가 무엇인지를 둘러싸고 전개된 논쟁에서였다.

전자기이론을 체계화한 패러데이의 ‘힘의 선’ 즉 마당을 더 근본적인 존재자로 보고, 입자나 전하는 이 ‘힘의 선들’의 매듭 내지 마디로 보았다. 패러데이에게는 힘의 선을 떠나 존재하는 입자나 전하는 받아들이기 힘든 존재였다. 이와 달리 로렌츠는 힘의 선을 대변하는 에테르가 전형적인 입자나 전하 등의 물질과 같은 종류의 존재라고 보는 관점을 끝내 받아들일 수 없었기 때문에, “물질 그리고 에테르”라는 다소 기묘해 보이는 이원적 존재론을 옹호하게 된다.¹²⁾

에테르에 관한 물리학 교과서의 표준적인 서술에서는 대개 빛의 속도나 빛이라는 파동의 매질에 초점이 맞추어져 있다. 그런데 전자기이론에서 물질과 힘의 존재론적 양상이 어떻게 나타나는가에 관심을 두기 시작하면, 에테르의 존재 여부는 다름 아니라 힘이라는 존재론적 범주를 물질이라는 존재론적 범주와 대등한 것으로 치환할 수 있는가 하는 질문과 대등함이 드러난다. 애초에 마당의 개념은 ‘힘의 선’에서 출발한 것이며, 전자기마당이라는 것은 다름 아니라 전기력과 자기력이 작용하는 공간적 영역의 다른 이름이었다. 전자기마당을 에테르라는 독특한 물질의 운동의 상태로 보겠다는 것은 전자기력이라는 힘을 에테르라는 물질의 운동의 결과로 이해하겠다는 것과 같다. 따라서 에테르의 개념 자체는 힘과 물질이라는 이원적 존재론을 물질만으로 이루어진 일원적 존재론으로 바꾸려는 형이상학상의 의도에서 비롯된 것이라 말할 수 있다.

(2) 메타동역학

앞의 논의에서 드러나듯이, 힘과 물질의 이원적 존재론이라는 문제에 접근해 나가는 데에는 아직까지 체계적인 방식이 확립되어 있지

12) Nersessian(1984).

않다. 고전역학이나 전자기이론에서 힘과 물질의 존재론적 구분을 어떤 기본 틀에서 다루어야 할지에 대해 누구나 동의하는 틀이 있는 것은 아니다. 뉴턴 역학에서 운동방정식을 어떻게 해석할 것인가 하는 문제는 일반적인 수준과 개별적인 수준 사이에 나타나는 상호적인 문제이다. 고전동역학에서 힘과 물질의 이원적 존재론을 이해할 수 있으려면, 고전동역학과 다른 종류의 담론에 대한 논의와 비교하는 것이 가장 바람직하다. 따라서 이를 비교하여 고찰할 수 있는 포괄적 담론이 마련되어야 한다. 그런데 이와 같은 일반적 수준의 틀을 마련하기 위해서는 다시 개별적인 수준에서의 논의가 바탕이 되어야 한다. 이 글에서는 이미 다른 곳에서 논의한 적이 있는 좁은 의미의 ‘메타동역학’이 우리의 문제를 이해할 수 있는 일반적 수준의 틀이 될 수 있다고 제안하고자 한다.¹³⁾

넓은 의미의 ‘메타동역학’은 동역학 전반에 대하여 가장 일반적인 공통요소를 구조적으로 추려내고, 이를 바탕으로 개별 동역학들의 구조를 고찰하는 물리학기초론(物理學基礎論, Foundational Studies of Physics)의 한 분과학문이다. 메타동역학은 각각의 동역학 이론들을 작업소재로 하여, 동역학 일반에 대한 보편적 이론구조, 개념요소, 암묵적으로 전제되어 있는 숨어 있는 요소 등을 밝히고, 이를 각각의 개별 동역학들에서 나타나는 특수한 면모들을 바탕으로 해명하며, 개별 동역학들 사이의 연관관계를 논구한다. 물리학 이론의 메타적 구조를 정확하게 이해하게 되면, 현존하고 있는 다양한 물리학 이론들을 체계적으로 분류할 수 있으며, 물리학자들의 사고방식에 깔려 있는 전제들을 명료하게 드러낼 수 있기 때문에, 이러한 접근은 물리학의 철학을 연구하는 데에도 매우 유익한 방법이 된다.

좁은 의미의 ‘메타동역학’은 기존에 존재하는 모든 동역학들로부터 동역학이라 불리는 이론체계가 반드시 가져야 할 필요·충분한 요소

13) ‘메타과학’이나 ‘메타-물리학’의 경우처럼 ‘메타동역학’이란 말 자체는 “동역학에 대한 메타적 논의”라는 의미를 담고 있지만, 여기에서 ‘메타동역학’이라고 부른 것은 김재영(2000) 및 김재영(2001) 등에서 다루어진 좁은 의미의 ‘메타동역학’을 가리킨다. 이에 대한 개략적인 요약은 본문 참조.

를 추출하여, 동역학 체계를 다음과 같이 정의하고 있다.¹⁴⁾

(동역학체계의 정의)

임의의 동역학 체계 D는 다음과 같은 요소로 이루어진다.

$D := \langle (T, R/G), CHAR, F/G, EOM, RULE \rangle$

- ① 동역학적 서술을 위한 메타시간과 서술배위공간 (T, R/G) : 동역학적으로 ‘처음’과 ‘나중’을 가려낼 ‘메타시간’의 정의와 동역학적 서술대상이 존재하는 공간, 즉 ‘서술배위공간’의 설정과 그 서술배위공간이 갖고 있는 불변성으로서의 기하학적 (변환군적) 요소의 설정,
- ② 동역학적 특성과 상태공간 (CHAR, F/G) : 대상의 주어진 요소인 ‘동역학적 특성’을 규정하는 방식 및 대상의 술어적인 요소로서의 ‘상태’들의 묶음으로서의 ‘상태공간’을 규정하는 방식의 선택,
- ③ 상태변화의 법칙 (EOM) : 상태의 ‘메타시간’적 변화를 지배하는 운동방정식의 설정(또는 운동방정식의 확장된 개념으로서 상태공간 내에서의 변환규칙의 설정) 및 ‘처음 상태’와 ‘상태’의 변화규칙으로부터 ‘나중 상태’를 예측하는 방식의 선택,
- ④ 상태와 사건의 연관규칙 또는 상태의 해석규칙 (RULE) : 표현된 ‘상태’를 ‘현상’ 또는 ‘사건’과 연관짓는 규칙, 또는 주어진 ‘상태’의 표현을 해석하여 이로부터 서술주체가 ‘정보’를 얻기 위한 일반적 규칙.

이 정의에서 동역학은 특정 시점에 특정한 상태에 있던 서술대상이 이후의 어느 특정 시점에 어떤 상태로 바뀌게 될지를 밝히는 이론체계를 가리키며, 이 틀은 고전질점역학을 비롯하여 가장 세련된 동역학으로 볼 수 있는 양자장이론이나 일반상대성이론에도 모두 적절하게 적용된다.¹⁵⁾

14) 이러한 기본요소들은 고전동역학은 물론이거니와 전기동역학, 양자동역학, 상대론적 질점역학, 양자장이론, 일반상대성이론 전체에 적용되는 보편적인 요소로 여겨진다. 이에 대하여 더 상세한 것은 김재영(2001) 참조.

15) 여기에서 사용되는 특수한 용어들, 즉 ‘메타시간’, ‘서술배위공간’, ‘동역학적 특성’, ‘상태공간’, ‘상태의 변화법칙’, ‘해석규칙’ 등은 물리학의 용어가

이 동역학의 모형은 곧 동역학적 서술이 다름 아니라 “언제 어디에서 무엇이 어떠하다가 어떠하게 된다.”와 같이 이루어짐에 주목한다. 수학적 형식이론에서 매우 세련되고 복잡한 모습을 갖춘다 하더라도, 모든 동역학의 기초적인 서술은 “언제 어디에서 무엇이 어떠하다.”와 본질적으로 동등하다. 이 대응은 각각

언제	↔	메타시간	T
어디에서	↔	서술배위공간	R/G
무엇이	↔	동역학적 특성	CHAR
어떠하다	↔	상태공간	F/G

와 같이 생각할 수 있다. 메타시간과 서술배위공간은 보통의 시간과 공간의 범주를 상대론적 동역학을 포괄할 수 있도록 세련화한 개념이며, 이 논문에서는 일반적인 시간과 공간으로 대치해도 무방하다. 동역학적 특성은 그 동역학이 서술하고 있는 대상을 규정하는 방식을 말하며, 이는 시간이 흐르더라도 변하지 않는 요소이다. 상태공간은 동역학이 서술하고 있는 대상의 가변적인 요소들을 모두 모아 놓은 것이다.

가령 고전역학이라는 동역학체계를 이와 같은 정의에서 고찰하면 다음과 같은 요소들을 얻을 수 있다. 동역학적 서술을 위해서는 변화의 기준이 되는 시간이 먼저 전제되어야 하며, 그러한 시간의 변화 속에서 공간적 위치의 변화가 동역학적 서술의 일차적인 목표가 된다. 다음으로 고전역학의 서술이 적용되는 대상(‘무엇이’)은 다름 아니라 라그랑지안 함수나 해밀토니안 함수를 제시하는 것과 같다. 가령 해밀토니안 함수 $H(q, p)$ 가 주어질 때, 그 상태의 서술은 특정 시간의 위치와 운동량의 값 $(q(t), p(t))$ 로 주어진다. 이와 같은 상태의 서술을 모두 모아 놓은 상태공간은 위상공간이 된다. 운동방정식

아니다. 이것은 동역학의 구조를 밝히는 과정에서 물리학적 개념들로부터 추상한 메타-물리학적 개념들이며, 따라서 직관적인 물리학적 개념들과는 차이가 있음에 유의할 필요가 있다.

은 주어진 해밀토니안 함수(즉 동역학적 특성)로부터 상태의 변화를 알아낼 수 있는 장치가 된다. 다시 말해

$$\dot{q} = \frac{\partial H}{\partial p}, \quad \dot{p} = -\frac{\partial H}{\partial q}$$

이라는 해밀턴 방정식을 풀어내는 일은 곧 “ H 로 규정되는 대상이 지금 (q_1, p_1) 의 상태에 있을 때 나중에 어떤 상태가 될 것인가?”라는 질문에 답하는 것이다.

여기에서 동역학이론에서 등장하는 물리량이라는 개념을 되짚어보는 것이 유용하다. 물리학에서는 물리량 또는 물리적 성질의 값을 계산하고 이를 경험적인 데이터와 비교하는 것이 중요한 것으로 여긴다. 그런데 동역학이론이라는 맥락에서 본다면, 물리적 성질들이 모두 같은 성격을 지니는 것이 아니다. 고전역학의 경우, 직관적으로 보면 고전역학의 서술대상은 질점, 강체, 탄성체, 유체 등과 같이 특정의 모양을 갖춘 물체이다. 이 물체가 무엇인지를 모호함 없이 규정할 수 있어야만 고전역학이라는 동역학이론이 무엇의 운동을 서술하려고 하는지 알 수 있다. 그런 점에서 질점의 질량이라든가 강체의 반지름이나 탄성체의 탄성계수 등과 같은 물리적 성질들은 대상의 고유한 특성을 나타내는 양이며, 시간이 흐르더라도 변화하지 않는다. 이에 반해 위치, 운동량, 각운동량, 속도 등의 물리적 성질들은 대상이 특정시간에 가지고 있다가 점차 변해가는 양이다. 물론 유체의 경우에 밀도가 시간에 따라 변화할 수 있는데, 이 경우에 단위부피당 질량이라는 것은 불변하는 고유한 특성이 아니라 시간에 따라 변화하는 상태를 서술해 준다. 이와 같이 서술대상의 주어적인 요소가 ‘동역학적 특성’이고, 서술대상의 술어적인 요소가 ‘상태’이다.

(3) 메타동역학에서 본 힘과 물질의 범주 구분

메타동역학의 접근은 앞에서 살펴본 힘과 물질의 범주 구분에 대해서도 새로운 문제의식을 던져 준다. 고전역학이나 전자기이론에서 동역학의 서술대상을 규정하는 ‘동역학적 특성’은 라그랑지안 함수

내지 해밀토니안 함수로 표현된다. 전형적인 경우로서 해밀토니안 함수가

$$H = T + V = \frac{p^2}{2m} + V(q)$$

와 같이 주어지는 경우를 생각해 보자. 질량이 같더라도 어떤 퍼텐셜 안에 있는가에 따라 운동의 방식은 달라진다. 이 때 질량이나 모양과 같이 원초적 지칭(haecceity, thisness)을 나타내는 동역학적 특성을 잠정적으로 원초적인 동역학적 특성이라 부르면, 퍼텐셜과 같은 후자의 동역학적 특성은 상황적인 동역학적 특성 또는 외형적인 동역학적 특성이라 부를 수 있다. 용어가 복잡해지는 경우에는 이를 간단히 각각 원초적 특성, 상황적 특성, 외형적 특성이라 하자. 가령 고전역학에서 강체의 동역학적 특성은 질량과 모양과 크기가 될 것으로 보인다. 그러나 똑같은 질량과 크기와 모양의 강체라 해도 그것이 용수철 끝에 매달려서 힘을 받아 움직이는 경우와 중력장 안에서 힘을 받아 움직이는 경우는 다르다. 따라서 설령 원초적인 동역학적 특성이 같은 경우라 해도 상황적인 동역학적 특성이 다르다면, 그 때의 서술대상은 별개인 것으로 보아야 한다. 적어도 상황적인 동역학적 특성이 상태의 서술이 아니라는 점은 분명하다. 상황적인 동역학적 특성도 원초적인 동역학적 특성과 마찬가지로 동역학적 서술에 대해 불변적이다. 술어가 아니라 주어의 역할을 하기 때문이다. 특수한 경우에 동역학적 대상의 원초적 특성은 질량이나 전하와 같은 물질의 속성으로 나타나며 상황적 특성은 힘 또는 퍼텐셜의 모습으로 나타난다.

앞의 논의에서는 힘과 물질의 범주 구분을 논의하기 위해 운동방정식을 주요 기준으로 삼았기 때문에, 힘과 물질의 이원적 존재론은 자연스러운 것으로 보였다. 만일 보는 관점을 운동방정식이 아니라 동역학적 특성에 둔다면, 이것은 결국 동역학의 서술대상을 규정하거나 정의하는 것에 해당한다. 동역학이 서술하고 있는 대상을 모호함 없이 규정하기 위해서는 원초적인 동역학적 특성뿐 아니라 상황적인 동역학적 특성까지 밝혀주어야 한다. 그런 의미에서 서술대상이라는 표현

안에는 물질에 대한 부분과 힘에 대한 부분이 모두 녹아들어 있다.

이제 힘과 물질의 존재론적 이원론이라는 논제는 동역학이 서술하고 있는 대상을 규정할 때 제시해야 하는 원초적인 동역학적 특성과 상황적인 동역학적 특성이 존재론적으로 별개인가 아닌가의 문제가 된다. 앞 절의 논의에서는 존재자라는 개념을 명확하게 정의하지 않은 채 직관적인 용법에 맞추어 사용했다. 이제 대상을 명료하게 규정하기 위해 동역학적 특성을 제시하는 것이 관건이라고 하면, 존재자라는 개념을 굳이 동원하지 않더라도 동역학적 특성의 개념만으로 논의를 진행할 수 있다.

(4) 개체론적 대상개념과 전일론적 대상개념

이제 개체론적(individualistic) 대상과 전일론적(holistic) 대상의 개념 구분을 생각해 보자. 힘과 물질을 별개의 존재론적 범주로 보는 시각은 모두 대상을 개체론적으로 이해하는 데에서 출발한다. 특히 입자라는 관념은 개체(個體, individual)라는 일상적 관념으로부터 많은 것을 빌리고 있다. 고대 그리스의 원자론이나 에피쿠로스의 자연 철학뿐 아니라 19세기의 기체분자론에 이르기까지 입자 또는 원자라는 관념은 개체론적 대상 개념의 원천이 되어 왔다. 세계가 입자 또는 궁극적 요소로 구성되어 있으며, 이 요소들 사이의 관계(상호작용)를 파악함으로써 전체를 모두 이해할 수 있으리라는 환원주의적 방법(reductionist method)이 현대과학, 특히 현대물리학에서 주된 방법이 된 것도 이런 맥락과 맞닿아 있다.

개체론적 대상이라는 개념을 더 분명하게 드러내기 위해서는 동역학에서 즐겨 사용되는 ‘계’(系, system)라는 개념을 검토하는 것이 유용하다. 동역학에서 계는 그 내부와 외부를 구별하여 동역학적 서술의 범위를 정해 주기 위한 개념이다. 이 때 계의 외부와 내부는 어떤 관계에 있어도 좋다. 외떨어진 계가 아니라면 어떤 식으로든 계의 내부는 계의 외부와 특수한 관계를 맺고 있다. 계의 개념에서 내부와 외부를 구분할 수 있는 경계는 어디에 놓여도 좋다. 즉 어느 동역학

적 서술에서는 똑같은 상황에 대해 분명히 계의 외부인 것도 다른 서술에서는 계의 내부가 되는 일이 얼마든지 가능하다. 그러나 이 경우에도 계의 내부와 외부의 구분을 모호함 없이 정의할 수 있어야만 계라는 개념이 비로소 제 역할을 할 수 있다.

동역학이론에서 계를 규정하는 가장 표준적인 방식은 해밀토니안 함수를 적는 것이다. 이것은 곧 동역학적 특성을 제시하는 것인데, 앞에서 논의한 바와 같이 원초적인 동역학적 특성과 상황적인 동역학적 특성이 구분된다. 그런데 만일 상황적인 동역학적 특성과 무관하게 원초적인 동역학적 특성을 각각의 요소에 대해 규정할 수 있다면, 동역학적 서술 대상이 되는 계는 부분계로 나누어 고찰할 수 있게 된다. 또한 상황적인 동역학적 특성을 일정한 수학적 방법을 써서 부분계의 합으로 나타낼 수 있다면, 이 경우에도 동역학적 서술 대상은 부분계로 나눌 수 있다. 이것은 부분계가 반드시 입자로 표상되는 경우에만 해당하는 것이 아니다. 동역학적 특성이 파동이나 다른 대상으로 표상하더라도 (a) 상황적인 동역학적 특성과 무관하게 원초적인 동역학적 특성을 각 요소에 대해 규정할 수 있거나 (b) 상황적인 동역학적 특성을 각 요소에 대해 분리하여 규정할 수 있기만 하면, 동역학적 서술은 부분계에 대한 서술들로 완결된다. 그러므로 우리는 개체론적 대상개념을 다음과 같이 정의할 수 있다.

(개체론적 대상의 정의)

개체론적 대상은 대상의 동역학적 특성이 다음의 조건을 충족시키는 경우를 말한다.

- (i) 대상의 동역학적 특성은 요소들의 합으로 주어지며,
- (ii) 요소들에 대하여
 - (a) 상황적 특성과 무관하게 원초적 특성을 각 요소에 대해 규정할 수 있거나
 - (b) 상황적 특성을 각 요소에 대해 제각기 분리하여 규정할 수 있다.

전일론적 대상은 개체론적 대상이 아닌 것으로 정의한다. 이는 곧

대상에 대한 규정이 각 요소들을 따로따로 규정하여 모으는 것으로는 가능하지 않은 경우를 가리킨다. 위의 개체론적 대상에 대한 정의와 대비하면, 전일론적 대상은 다음과 같이 정의된다.

(전일론적 대상의 정의)

전일론적 대상은 대상의 동역학적 특성이 다음의 두 조건 중 하나를 충족시키는 경우를 말한다.

- (i) 대상의 동역학적 특성이 요소들의 동역학적 특성들에 대한 합으로 주어지지 않거나,
- (ii) 요소들에 대하여
 - (a) 상황적 특성과 무관하게 원초적 특성을 각 요소에 대해 규정할 수 없으며,
 - (b) 상황적 특성을 각 요소에 대해 분리하여 규정할 수 없다.

이지훈(2005)은 전일론과 관련된 개념으로서 창발성, 유기체성, 복잡성을 들고 있다.¹⁶⁾ 창발성은 진화이론과 심리학에서 제기된 창발론(emergentism)과 연결된다. 유기체론(organicism)에서 말하는 유기체성의 핵심은 전체가 부분의 속성들을 결정한다는 믿음이다. 이지훈은 과학과 관련된 존재론적 전체론의 대상을 “<자신의 부분들에게 인과적 원인으로서는 영향을 미칠 수 있는 단위>로서의 양상을 띠는 전체”로 규정한다.¹⁷⁾ 그러면서 “전체가 가진 인과적 원인으로서는 능력

16) 이지훈(2005)에서는 complexity를 ‘복합성’(複合性)으로 보았으나, 그 실질적인 내용은 ‘복잡성’(複雜性)으로 보아야 한다. 복합성이란 두 가지 이상의 요소들이 함께 연합하여 전체의 특성이 나타난다는 의미인 반면, 복잡성은 요소들의 연결이 복잡해서(complex) 부분들에 대한 정보만으로는 전체의 양상을 파악할 수 없음을 함축하기 때문이다. 물리학, 생물학, 통계학, 경제학 등에서도 이에 대한 용어를 ‘복잡성’으로 정하고 있다. 전일론에 대한 고려를 염두에 두더라도 복합성보다는 복잡성이 더 적합한 용어라고 할 수 있다.

17) ‘존재론적 전체론’의 대상이 곧 전일론적 대상인 것은 아니다. 일반적으로 존재론적 전체론은 전일론적 대상에 대한 형이상학적 논의이지만, 전일론적 대상이 반드시 존재론적 전체론을 전제해야 하는 것은 아니다. 그러나 이 글의 논지에서는 존재론적 전체론의 대상을 전일론적 대상과 동일시해도

이 결코 부분들이 가진 인과적 원인으로서의 능력들을 통해서는 예측할 수 없어야 한다고 요구한다.

앞의 (전일론적 대상의 정의)는 이지훈(2005)의 존재론적 전체론의 대상과 일맥상통한다. 먼저 원초적 특성을 상황적 특성과 무관하게 규정할 수 없다는 것은 곧 대상 요소의 지칭에서 언제나 다른 대상 요소들과의 관계를 고려해야 한다는 것을 의미한다. 이것은 곧 부분의 인과적 원인으로부터 전체의 인과적 원인을 규정할 수 없다는 뜻이다. 그러나 이 경우에도 전체로부터 부분으로 향하는 인과적 영향이 배제될 수 있다. 따라서 둘째 요건으로서 상황적 특성을 각 요소에 대해 분리하여 규정할 수 없다는 것은 전체가 부분들에 인과적 영향을 줄 수 있음을 함축한다.

한편 앞의 (전일론적 대상의 정의)는 속성 전일론(property holism)과 관계 전일론(relational holism)의 구분과 비교할 수 있다.¹⁸⁾ 속성 전일론은 전체의 내재적 속성을 부분들의 속성들과 부분들 사이의 관계만으로 온전히 규정할 수 없는 것을 말한다. 관계 전일론은 관계항들의 비관계적 속성들 위에 수반하지 않는 관계가 존재한다는 것이다. 즉 부분들 사이의 관계 중에 부분들의 속성들 위에 수반하지 않는 것이 있음을 가리킨다.¹⁹⁾ 일반적으로 속성 전일론은 관계 전일론을 함축하는 반면, 그 역은 성립하지 않는다. 만일 전체의 속성 중에 부분들의 속성들과 그 관계들만으로 온전히 규정할 수 없는 것이 존재한다면, 부분들 사이의 관계 중에도 부분들의 속성들만으로 규정할 수 없는 것이 존재하게 된다. 그러나 전체의 속성을 부분들의 속성들과 그 관계들만으로 온전히 규정할 수 있다면, 부분들의 속성들로부터 규정될 수 없는 부분들 사이의 관계가 존재할 수 없다. 다시 말해서 관계 전일론이 성립하지 않는 경우에는 속성 전일론이 성립

무방하다.

18) 속성 전일론과 관계 전일론에 대한 고찰로 예를 들어 Healey(2004) 참조. 관계 전일론에 대한 더 상세한 논의는 Teller(1989) 참조.

19) 여기에서 환원된다(reduce)고 하지 않고 수반한다(supervene)고 표현한 것은 환원론적 논의를 불식시키기 위함이다.

할 수 없지만, 관계 전일론이 성립하면서도 속성 전일론이 성립하지 않는 경우가 가능하다.

동역학적 특성을 통해 대상을 규정할 때, 요소의 원초적 특성을 제시하는 것은 곧 요소의 속성을 제시하는 것과 동등하며, 요소들에 대한 상황적 특성은 요소들 사이의 관계를 정하는 것에 대응한다. 따라서 (전일론적 대상의 정의)에서 (ii)의 (a)는 전체의 속성을 부분들의 관계와 무관하게 규정할 수 없음을 요구한다는 점에서 속성 전일론과 상통한다. 비슷하게 (ii)의 (b)는 부분들의 관계를 부분들에 대하여 분리하여 규정할 수 없음을 요구한다는 점에서 관계 전일론과 상통하는 것처럼 보인다. 만일 그렇다면 (전일론적 대상의 정의)에서 (ii)의 (b)는 잉여적인 요건이 되어 버린다. 속성 전일론은 관계 전일론을 함축하기 때문이다. 그러나 관계 전일론이 관심을 갖는 것은 부분들 사이의 관계이지 이를 통한 전체의 규정이 아니다. (ii)의 (b)는 동역학적 대상을 규정하기 위해 확정되어야 하는 전체의 상황적 특성을 부분과 분리하여 규정할 수 없다는 것이다. 따라서 이는 전일론적 대상에 대한 정의로서 잉여적인 것이 아니라 독립적인 요건이다.

3. 양자마당과 게이지 보존의 존재론적 지위

(1) 중간자와 게이지이론: 상호작용의 물질적 표상

현대 입자물리학은 상호작용을 게이지 보존(gauge boson)의 교환으로 기술하는 게이지 이론이다. 이것은 두 물질 사이의 상호작용에서 나타나는 물리적 속성의 변화를 가상적인 입자의 교환으로 보자는 것이다. 가령 전자기력 또는 전자기 상호작용은 두 전하 사이에 가상적 빛알(광자)이 교환된 결과로 나타나며, 약한 핵력(약한 상호작용)이나 강한 핵력(강한 상호작용)도 W^\pm , Z^0 나 8가지의 글루온이 교환된 결과로 나타난다는 것이 입자물리학의 서술이다.

가상적 입자의 교환이라는 개념의 존재론적 측면에 초점을 둔다면,

이것을 단지 상호작용에 대한 수학적 기술방식의 하나로 보아야 하는지, 아니면 게이지 보존도 실질적으로 물질적 입자와 동등한 존재론적 지위를 지니는 것으로 보아야 하는지 등의 문제가 자명한 것은 아니다.²⁰⁾

게이지이론에서는 힘 또는 상호작용을 양자마당으로 표상한다. 그런데 여기에서는 물질도 양자마당으로 표상한다. 그러므로 게이지이론은 힘과 물질이 일원론적으로 통합된 이론인 것으로 보인다. 이 절은 이와 같은 힘과 물질의 범주 통합의 문제를 다루고자 한다.

게이지이론에서는 힘 또는 상호작용을 게이지 보존의 교환으로 설명한다. 그 까닭은 힘 또는 상호작용의 결과에서 가장 중요한 핵심이 운동량의 변화이기 때문이다. 운동량의 변화는 물질이 가지고 있던 운동의 양이 달라진 것으로 볼 수도 있지만, 더 자연스러운 관념으로 중간에 매개하는 입자가 있어서 이 매개입자가 운동량을 한 입자로부터 다른 입자로 전해 주었다고 볼 수도 있다. 게이지이론은 이와 같은 매개 게이지 보존에 대한 성공적인 이론이다.

그런데 현대 입자물리학의 표준모형에서는 매개 게이지 보존을 주고받는 물질들도 양자마당으로 서술하고 있다. 전자와 복사의 상호작용을 다루던 초기 입자물리학에서는 복사만을 파동으로 다루고 전자는 일종의 점입자로 기술했다. 따라서 양전자는 일종의 정공(hole)과 같은 것으로 간주되었다. 그러나 양자전기역학이 본격적으로 발전하면서, 이와 같은 절충적인 입장은 점차 사라지고, 물질들도 양자마당으로 서술하는 이론이 새로운 지배적 패러다임이 되었다.

이 두 종류의 양자마당은 스핀 또는 통계에 따라 분류된다. 양자장 이론에서 입자들은 페르미-디랙 통계를 따르거나, 또는 보제-아인슈타인 통계를 따르는가에 따라 페르미온(fermion)과 보존(boson)으로 양분된다. 상대론적 양자장이론의 전체 아래에서는 스핀과 통계 사이에 일대일 대응이 있음을 일반적인 양자장이론의 틀 안에서 증명할 수 있으며, 이것이 스핀 통계 정리이다. 스핀 통계 정리는 스핀이 홀수

20) Weingard(1988) 참조.

의 절반인 경우에는 반드시 페르미-디랙 통계를 따르며, 스핀이 정수이면 반드시 보제-아인슈타인 통계를 따른다는 주장을 담고 있다.²¹⁾ 이것은 동일한 입자들(identical particles)의 무리와 구별가능성(discernability)의 문제에서 매우 중요한 논제가 되며, 나아가 ‘이것임’(haecceity, thisness)의 문제로 이어진다. 그러나 여기에서는 이에 대해 더 상세히 검토하지 않는다. 다만 여기에서 주목하는 것은 쿼크와 렙톤과 같은 물질은 모두 페르미온인 반면, 상호작용 또는 힘을 매개하는 입자는 모두 보존이라는 사실이다. 이에 대해서는 각운동량의 보존법칙이라든가, 편극성의 고려라든가 여러 가지 개연성 있는 물리적 설명이 제시되어 있다.

그런데 물질은 페르미-디랙 통계를 따르고 힘을 매개하는 입자는 보제-아인슈타인 통계를 따른다는 사실은 양자장이론이 힘과 물질의 존재론적 이원론에 바탕을 두고 있는지, 그렇지 않으면 양자마당의 존재론적 일원론에 바탕을 두고 있는지의 문제와 연결된다.

물질과 힘의 통일은 입자와 파동의 통일과 유사한 모습을 보인다. 원래 이 논문에서 주로 초점을 맞추려 했던 것은 양자장이론이라는 물리학의 한 세련된 이론이 전제하고 있는 존재론적 기초였다. 흔히 양자장이론은 기본입자의 상호작용을 다루는 이론이라고 하는데, 마당은 다름 아니라 파동이 아닌가, 그렇다면 어떻게 파동의 이론이 어떻게 입자의 이론이 될 수 있는가, 하는 점이 나의 주된 문제의식이었다. 그런데 마당의 성격을 검토해 보면, 적어도 고전적인 마당은 곧 힘과 같다는 것을 알 수 있다. 결국 입자와 파동이 통일되는 듯이 보이는 것의 본색은 물질과 힘의 통일을 위한 모색의 한 측면이며 그 모색의 결과는 불완전하다는 것이 내 주장이다.

양자마당과 고전적인 마당은 몇 가지 점에서 차이를 보이는데, 무엇보다도 양자마당은 ‘힘의 선’과 직접적인 연관을 맺지 않는다. 특히 물질에 대응하는 양자마당(쿼크나 렙톤)에서는 고전적인 마당이 힘과 연결되어 있던 흔적을 찾아보는 것이 힘들다. 상호작용에 대응

21) Streater & Wightman(1964) 등 참조.

하는 양자마당(게이지 보존)은 자연스럽게 힘과 연결되며, 힘의 개념이 매개입자 교환으로 나타난다. 그러나 후자의 경우에도 ‘연산자 값을 갖는 마당’은 실험실에서 측정할 수 있는 힘과는 전혀 다르다.

(2) 입자-파동 이중성 다시 보기

양자마당의 존재론적 지위를 이해하기 위해서는 양자역학에서 깊이가 있게 논의되어 온 입자-파동 이중성 문제를 진지하게 다시 검토할 필요가 있다.

지배적인 양자역학의 해석인 코펜하겐 해석에서는 상보성 원리에 입각하여 양자역학의 서술대상(가령 수소원자에 매여 있는 전자)이 입자로서의 속성과 파동으로서의 속성을 모두 갖는다고 말한다. 이것은 슈뢰딩거의 양자역학이 드브로이의 물질파 개념에서 출발한 것과 연관되며, 20세기 초에 빛의 본성을 파동이자 입자[빛알]인 것으로 보았던 견해에 바탕을 두고 있다.

그러나 폰노이만-디랙의 양자역학에서는 전통적인 의미의 ‘파동’이 전혀 나타나지 않는다. 비상대론적 양자역학에서 다루어지는 해밀토니안 함수는 원론적으로 모두 질점에 대한 것이다. 양자역학에서 파동이라는 관념이 등장하는 까닭은 단지 확률밀도함수가 충족시키는 편미분방정식이 수학적으로 파동방정식과 유사하다는 점에 있다. 전자의 상태를 나타내는 소위 ‘파동함수’ $\psi(x, y, z, t)$ 는 공간적인 위치와 시간에 의존하는 함수이며, 시간과 공간의 각 점에서의 변위로 표현되는 일반적인 의미의 파동 $\phi(x, y, z, t)$ 와 별반 차이가 없어 보인다.

일반적으로 파동은 모든 위치에서 변위가 주어지고 이것이 시간에 따라 달라진다는 것으로 서술된다. 가령 깊지 않은 긴 운하에서 일정한 모양을 가지고 움직이는 파동을 서술하는 코르테벡-드프리스 방정식의 풀이는 $\phi(x, t)$ 와 같이 위치와 시간의 함수로 주어진다.²²⁾ 이

22) Korteweg & de Vries(1895). 여기에서 코르테벡-드프리스 방정식을 예로 드는 까닭은 이것이 흔히 직관적으로 머리에 떠올리는 전형적인 파동을 서

방정식이 파동을 기술하게 되는 가장 중요한 까닭은 시간의 도함수와 공간의 도함수로 이루어진 편미분방정식이기 때문이다. 물론 시간과 공간의 도함수로 이루어진 편미분방정식이 모두 파동을 나타내는 것은 아니다. 코르트벡-드프리스 방정식의 풀이가 파동을 나타낸다는 것은 $\phi(x, t)$ 가 $x \pm ct$ 의 함수이기 때문이다.

이제 이것을 양자역학의 기본방정식인 슈뢰딩거 방정식과 비교해 보자. 이 방정식도 시간과 공간의 도함수로 이루어진 편미분방정식이며, 그 풀이 $\Psi(x, t)$ 도 위치와 시간의 함수이다. 또한 $\Psi(x, t)$ 가 $x \pm ct$ 의 함수가 되는 것이 가능하다. 따라서 슈뢰딩거 방정식도 일종의 파동방정식이며, 함수 $\Psi(x, t)$ 는 파동을 나타내고, 나아가 그 함수가 대변하는 전자 따위의 대상들이 다름 아니라 파동이라는 주장이 가능하다.

그러나 파동이라는 것을 다시 곰곰이 생각해 보면 이와 같은 주장을 옹호하는 것이 쉽지 않다는 사실을 알 수 있다. 파동을 나타내는 함수 $\phi(x, t)$ 는 시간과 공간의 각 점에서의 변위, 즉 파동을 구성하는 매질의 각 요소(입자)가 그 공간점의 평형 위치에서 얼마나 벗어나 있는가를 나타낸다. 이 변위는 가령 물결 위에 작은 코르크마개를 띄우는 식으로 측정할 수 있다. 반면, 슈뢰딩거 방정식의 풀이 $\Psi(x, t)$ 는 변위를 나타내는 것도 아니고 측정할 수 있는 것도 아니다. 양자역학에서 ‘파동함수’란 단지 상태에 관한 모든 정보를 담고 있는 수학적 대상일 뿐이다. 보른의 해석규칙에 따르면 이 함수를 절대값으로 제공하면 물리량에 대한 확률밀도함수가 된다. 이것은 디랙-폰노이만의 표준적인 정칙화인 힐버트 공간 정칙화에서 더 분명하게 드러난다. 힐버트 공간의 벡터 또는 밀도연산자로 상정되는 상태벡터가 마침 르베그 공간(제곱적분가능한 복소함수들의 집합)을 구성할 때, 이것이 파동을 나타내는 함수와 유사한 모습이 되는 것이다.²³⁾

술하고 있기 때문이다. 운하에서 나타나는 파동 모양이 일정한 시간 동안 그 형태를 유지하는 현상을 설명하기 위해 19세기말에 제안된 코르테벡-드프리스 방정식은 현대물리학에서도 솔로알(soliton)과 관련하여 중요한 역할을 하고 있다.

요컨대, 양자역학에서는 일상적인 의미의 파동이 등장하지 않는다.²⁴⁾ 따라서 양자역학의 파동함수에 대한 존재론적 고찰만으로는 양자장이론의 마당에 대한 존재론적 고찰에 직접적인 도움을 얻기 힘들다. 한편, 흥미롭게도 입자물리학의 기본언어인 양자장이론에서는 전통적인 의미의 입자가 전혀 등장하지 않는다. 다음 소절에서는 이 점에 대해 살펴보고자 한다.

(3) 양자마당과 입자의 대응

아직까지는 입자라는 관념을 직접 언급하지 않고도 양자마당의 개념만으로 논의를 전개할 수 있었다. 그러나 현대입자물리학의 기본이론이 양자장이론이고, 각각의 양자마당에 기본입자가 대응된다고 보는 것이 물리학의 관점이라면, 양자마당과 입자가 어떻게 대응되는지를 검토하는 것이 존재론적 탐구에서 중요한 과제가 될 것이다. 그런데 역설적이게도 상대론적 양자이론에서는 국소화 가능한 입자가 존재할 수 없다.²⁵⁾ 일반적으로 상대론적 양자이론에서는 국소화된 입자의 상태가 존재하고 계의 에너지에 최소값이 존재한다면, 광속을 넘어서는 신호전달이 있음을 보일 수 있다. 여기에서 ‘국소화할 수 있

23) 가령, 하이젠베르크가 1929년 시카고 대학에서 강연했던 내용을 묶어 출판한 Heisenberg(1930)은 시종일관 ‘시공간 속의 파동’과 ‘배위공간의 슈뢰딩거 파동’이 전혀 다른 것임을 여러 가지 측면에서 강조하고 있다.

24) 입자-파동 이중성의 문제를 메타-물리학적 관점에서 바라보면, 양자역학에서는 파동이라는 존재론적 실체가 실질적으로 등장하지 않는다는 점을 강조할 수 있다. 그러나 양자역학의 해석 전반에 걸쳐 철학적인 방법에 따라 양자역학의 존재론적 함의를 다루는 관점과 맥락에서는 이러한 주장이 반드시 옹호되는 것은 아니다. 즉 더 근본적인 형이상학적 의미에서는 비상대론적인 양자역학이 기술하는 대상이 파동일 수 없다고 주장하기 어렵다. 이 논문에서는 단지 물리학이론을 검토함으로써 거기에서 요구되는 존재론적 문제를 다룰 뿐이므로, 현상이 지니는 근원적인 존재론적 특징은 이러한 서술과 분명히 구별되어 서술해야 한다. 이 점을 지적해 준 익명의 심사자에게 감사드린다.

25) Haag(1992), Malament(1996), Hegerfeldt(1998), Halvorson & Clifton(2002), Steater & Wightman(1964), Bogolubov et al.(1990).

는’(localizable)이라는 표현은 입자의 위치를 정할 수 있는가 하는 질문과 연관된 개념이다.

그렇다면 입자물리학의 표준모형에서는 왜 양자장이론을 기본 틀로 삼고 있으면서도 입자를 얘기하고 있을까? 가령 입자데이터그룹(Particle Data Group, 2004)은 600여 쪽에 걸쳐 200여 가지 입자의 여러 성질을 나열해 놓고 있다. 상대론적 양자장이론에서는 국소화된 입자가 존재할 수 없는데, 어떻게 입자의 성질을 말할 수 있을까? 이 역설적으로 보이는 질문에 대한 대답의 실마리는 양자장이론에서 ‘입자’가 “푸앵카레 변환군의 기약표현이 되는 연산자 값 마당으로 기술되는 상태”로 정의된다는 점에 있다.²⁶⁾ 다시 말하면 비상대론적 양자질점역학에서 상태를 나타내는 에너지 준위를 상대론적 양자장이론에서는 입자라고 부르고 있는 것이다.

앞에서 우리는 양자역학에서 나타난다고 흔히 말하는 입자-파동 이중성이 부적절함을 지적하면서 양자역학에서는 파동이 나타나지 않음을 지적했다. 이와 관련하여 양자장이론에서는 입자가 나타나지 않는다고 말할 수 있다. 이를 도식화하면 다음과 같은 표가 된다.

	동역학적 특성	상태
양자질점역학	입자	파동함수
양자장이론	마당(=파동)	입자

동역학적 특성 즉 주어의 요소를 보자면, 양자질점역학이 대상으로 삼는 것은 입자이며, 양자장이론이 대상으로 삼는 것은 마당이다. 술어의 요소로서 상태의 서술을 보면, 양자질점역학에서는 힐버트 공간의 벡터가 경우에 따라 파동함수와 같은 모습으로 나타나기도 하며, 양자장이론에서는 포크 공간의 벡터를 입자로 표현하기도 한다. 그러나 상태의 서술만을 고려할 때, 양자질점역학에서 힐버트 공간의 벡

26) Huang(1997).

터를 반드시 파동함수로 나타낼 필요가 없듯이, 양자장이론에서도 포크 공간의 벡터를 반드시 입자로 나타낼 필요는 없다. 그런 의미에서 양자질점역학에는 파동이 없으며, 양자장이론에서는 입자가 없다고 말할 수 있다.

물리학 이론에서는 이와 같은 상태의 서술 도구를 그냥 입자라고 부르더라도 특별한 문제가 발생하지 않는다. 그러나 메타-물리학의 관점에서는 여기서 말하는 ‘입자’(particle)가 당구공과 같은 모양의 ‘알갱이’(corpuscle)로 표상할 수 없다는 사실이 중요하다.

(4) 개체론적 존재론과 전일론적 존재론

이제까지 우리가 살펴본 것처럼, 현대 입자물리학에서는 국소화가 능한 입자를 다루고 있지 않으며, 힘 또는 상호작용을 입자의 교환이라는 개념으로 대처하려는 시도도 성공적이지 않으며, 입자와 파동의 이중성이라는 관념은 동역학적 특성과 상태의 서술을 혼동한 데서 비롯한 주장이다.

그렇다면 입자물리학에서는 왜 물질은 물론이거니와 힘 또는 상호작용까지도 모두 입자로 만들고 싶어 하는 것일까? 이것은 개체론적 존재론을 옹호하려 하기 때문에 생겨난 부적절한 결과이다.

그러나 양자장이론에서 양자마당은 마치 온 우주에 퍼져 있는 바탕과도 같다. 가령 파울리의 배타율, 즉 페르미-디랙 통계를 생각해 보면 양자마당은 개체론적 세계를 별로 용인하지 않는 것처럼 보인다. 적어도 이론의 서술에만 국한시킨다면, 여기 지구상 어디에 있는 전자 하나는 안드로메다은하 어딘가에 있는 전자와도 언제나 교환대칭성을 나타내야 한다. 즉 여기의 전자와 안드로메다은하에 있는 전자는 별개의 것이 아니다.²⁷⁾

27) 물론 양자장이론의 여러 함의들을 존재론적으로 해석하지 않고 인식론적인 함의만 인정할 수도 있다. 즉 이 모두가 이론상의 서술이 실제 세계를 모두 감싸 안지 못하기 때문에 발생하는 의미론적 문제라고 보는 것이다. 이와 같은 관점은 추후의 연구에서 상세히 논구할 것이다.

앞에서 개체론적 대상과 전일론적 대상을 구분하기 위한 기준으로 상황적 특성과 무관하게 원초적 특성을 각 요소에 대해 규정할 수 있는지 여부와 상황적 특성을 각 요소에 대해 분리하여 규정할 수 있는지 여부를 논의했다. 이제 양자장이론을 여기에 비추어 살펴보자. 양자장이론에서 자유마당을 다루는 경우가 아니라면 상황적 특성과 무관하게 원초적 특성을 규정하는 것은 원천적으로 불가능하다. ‘되튠맞춤’(renormalization)의 필요성도 이와 같이 상황적 특성의 긴요함과 연결된다. 나아가 상황적 특성을 각 요소에 대해 분리하여 규정할 수 있는가 하는 점을 물으면, 양자장이론은 애초부터 그러한 분리된 규정을 허용하지 않는 이론이라고 대답할 수 있다. 따라서 양자장이론은 개별적인 요소로 분리되지 않는 전일론적 대상을 그 기본 요소로 삼고 있다고 말해도 틀리지 않는다.

오컨대, 양자장이론은 물질과 힘을 입자로 통일하여 서술함으로써 개체론적 존재론의 요구를 충족시키려 했으나, 이러한 시도는 성공적이지 않으며, 오히려 양자장이론의 형식이론적인 토대로부터 전일론적 존재론의 가능성이 잘 드러난다. 힘과 물질을 존재론적으로 구분하려는 노력은 결국 대상의 상황적 특성과 원초적 특성의 규정에서 성공적이지 않으며, 이것은 곧 전일론적 존재론이 개연적일 수 있음을 보여주는 좋은 예가 된다.

그러나 그렇다고 해서 이 논문에서 양자장이론의 존재론이 전일론적이라는 것을 강하게 주장하는 것은 아니다. 단지 양자장이론의 존재론적 토대를 검토함으로써 전일론적 존재론의 가능성을 타진해 보려는 것이다. 양자장이론의 존재론은 개체론적인가, 아니면 전일론적인가 하는 질문은 앞으로 더 깊이 논구해야 할 주제일 것이다.

4. 결론

이제까지 우리는 입자물리학과 양자장이론의 존재론적 측면을 살펴해보았다. 먼저, 힘과 물질이라는 두 가지 존재론적 범주에 대해 논

의한 뒤, 고전역학이나 전자기이론에서 이것이 이원론으로 되어 있음을 보았다. 양자역학에서 거론되는 입자-파동 이중성을 요약했다. 이제 가지 존재론적 쟁점을 논의할 기초적인 개념 틀로서 메타동역학을 제시했다. 이러한 준비를 바탕으로 본격적으로 입자물리학과 양자장이론의 존재론적 측면을 검토했다. 입자물리학의 표준모형이 게이지 양자장이론으로 되어 있음에 주목하면서, 게이지 이론이 힘과 물질이라는 이원적 존재론을 넘어서는지 살펴보았다. 통일장 이론 또는 그보다 약한 형태인 대통일 이론에서는 힘과 물질이 모두 개념상 입자로 환원될 수 있는 것인 양 서술되고 있지만, 입자물리학에서도 힘과 물질의 이원적 존재론은 유지되고 있음을 밝혔다. 고전마당(파동)과 양자마당의 관계를 살펴봄으로써 입자물리학에서 양자마당과 파동을 대응시키기 힘들다는 점을 보이고, 이로부터 입자물리학이 게체론적 존재론을 옹호하지 않음을 밝혔다. 끝으로 이러한 고찰을 통해 개체론적 존재론을 넘어선 전일론적 존재론을 세울 수 있는 가능성을 논의했다.

이 연구는 양자장이론과 입자물리학에 연관된 모든 존재론적 논점들을 다루고 있지 않다. 무엇보다도 구별할 수 없는 입자들에 대한 두 가지 통계를 어떻게 이해할 수 있을지 더 본격적인 연구가 있어야 한다. 또한 공변성 또는 불변성의 개념을 어떻게 이해할 것인가의 문제, 측정의 문제, 되틀맞춤의 문제, 게이지 대칭성에 대한 해석, 진공 및 진공에너지에 대한 문제 등이 모두 양자장이론의 존재론적 탐구에 해당한다. 이와 같은 맥락에서 볼 때, 이 논문에서 다루려 한 양자장이론의 존재론적 토대라는 주제는 여기에서 단지 문제를 제기하는 단계의 시론으로 다루어졌을 뿐이며, 향후에 이와 관련된 논의가 활발하게 진행되어야 한다고 말할 수 있다. 이러한 성격의 연구는 개별과학의 성과에 대한 깊이 있는 이해와 그에 대한 메타적 고찰을 바탕으로 하기 때문에 많은 면에서 쉽지 않은 작업이다. 그러나 철학과 개별과학의 만남은 그만큼 의미 있는 작업이기도 하다.

참고문헌

- 김재영 (2000), 「동역학의 이론구조 III: 일반 메타동역학」, 『새물리』 제40호, pp.262-287.
- 김재영 (2001), 「메타동역학의 열개와 성격: 양자론과 상대론의 동역학적 이론구조」, 서울대학교 이학박사학위논문, 서울대학교 대학원 물리학과.
- 이지훈 (2005), 「개체와 전체의 관계에 대한 존재론적 고찰」, 『과학철학』 8권 2호, pp. 57-81.
- 장희익 (1990), 『과학과 메타과학: 자연과학의 구조의 의미』, 지식산업사.
- Auyang, S.Y. (1995), *How is the quantum field theory possible?*, Oxford University Press.
- _____. (1999), “Mathematics and reality: Two notions of spacetime in the analytic and constructive views of gauge fields” *Philosophy of Science* 67: 482-494.
- Bartels, A. (1999), “Objects or events?: Towards an ontology for quantum field theory” *Philosophy of Science* 66: 170-184.
- Bogolubov, N.N., Logunov, A.A., Oksak, A.I., Todorov, I.T. (1990), *General principles of quantum field theory*, Kluwer.
- Brown, H.R. & R. Harré (1988), *Philosophical foundations of quantum field theory*, Clarendon.
- Cao, T.Y. (1997), *Conceptual developments of 20th century field theories*, Cambridge University Press.
- Cao, T.Y. ed. (1999), *Conceptual foundations of quantum field theory*, Cambridge University Press.
- Castellani, E. ed. (1998), *Interpreting bodies: Classical and quantum objects in modern physics*, Princeton University Press.
- Haag, R. (1992), *Local quantum physics: fields, particles, algebras*, Springer.
- Halvorson, H. & R. Clifton (2002), “No place for particles in

- relativistic quantum theories?" *Philosophy of Science*, 69(1): 1-28.
- Hegerfeldt, G.C. (1998), "Causality, particle localization and positivity of the energy," in A. Böhm, et al. (eds.), *Irreversibility and Causality*, pp. 238-245,
- Heisenberg, W. (1930), *The physical principles of the quantum theory*, Dover.
- Healey, R. (2004), "Holism and nonseparability in physics," *Stanford Encyclopedia of Philosophy*.
- Huang, K. (1997), *Quark, leptons and gauge fields*, World Scientific.
- Huggett, N. & R. Weingard (1994), "Interpretation of quantum field theory," *Philosophy of Science* 61: 302-314.
- Jammer, M. (1957), *Concepts of force*, Dover.
- _____ (1961), *Concepts of mass in classical and modern physics*, Dover.
- Korteweg, D.J. & G. de Vries (1895), "On the change of form of long waves advancing in a rectangular canal and a new type of long standing waves," *Philosophical Magazine*, 39: 422-443.
- Kuhlmann, M., H. Lyre, A. Wayne, eds., (2002), *Ontological aspects of quantum field theory*, World Scientific.
- Lange, M. (2002), *An introduction to the philosophy of physics: locality, fields, energy, and mass*, Blackwell.
- Malament, D. (1996), "In defense of dogma: Why there cannot be a relativistic quantum mechanics of (localizable) particles", in R. Clifton (ed.), *Perspectives on quantum reality*, Kluwer.
- Monton, B. (2002), "Wave function ontology" *Synthese* 130: pp. 265-277.
- Nersessian, N.J. (1984), *Faraday to Einstein: Constructing meaning in scientific theories*, Martinus Mijhoff.
- Newton, I. (1687), *Philosophiae naturalis principia mathematica*; Sir

- Isaac Newton's *Mathematical Principles of Natural Philosophy* and His *System of the World*, Translated into English by Andrew Motte in 1729. Revised by F. Cajori, University of California Press (1960).
- Particle Data Group (2004), "Review of particle physics" *The European Physical Journal C* 15: 1-974.
- Paty, M. (1988), *La Matière dérobée: L'appropriation critique de l'objet de la physique contemporaine*.
- Redhead, M.L.G. (1983), "Quantum field theory for philosophers" *PSA* 1982 2: 57-99.
- _____. (1995), "More ado about nothing" *Foundations of Physics*, 25: 123-137.
- Streater, R.F. & A.S. Wightman (1964), *PCT, spin and statistics, and all that*, Princeton University Press.
- Teller, P. (1989), "Relativity, relational holism, and the Bell inequalities" in J. Cushing and E. McMullin (eds.), *Philosophical consequences of quantum theory: Reflections on Bell's theorem*, University of Notre Dame Press.
- _____. (1995), *An interpretive introduction to quantum field theory*, Princeton University Press.
- _____. (1996), "Wave and particle concepts in quantum field theory" in R. Clifton (ed.), *Perspectives on quantum reality*, Kluwer.
- Weinberg, S. (1999), *The quantum theory of fields*, Cambridge University Press.
- Weingard, R. (1988), "Virtual particles and the interpretation of quantum field theory" in Brown & Harré (1988) pp. 43-58.

Ontological Foundation of Quantum Field Theory I:

Ontological Division of Force and Matter and the Possibility of Holistic World-View

Zae-Young Ghim

For discussion of the ontological foundation of quantum field theory as the basic theory of contemporary particle physics, the issue of the dualistic ontology of force and matter is considered. I suggest the meta-dynamics as the conceptual scheme for discussion of the issues. Though the gauge field theories seem to emphasize the unification of force and matter through the concept of particle, the dualistic ontology still pervades. I discussed the definition of the individualistic and the holistic object and elaborated the concept of holism. From the comparison of the classical field (wave) versus quantum field, I discuss the relation between the quantum field and the particle in particle physics. Finally I discuss the possibility of construction of the holistic ontology beyond the individualistic ontology.

[Key Words] quantum field theory, particle physics, force and matter, wave-particle duality, individualistic versus holistic ontology.