

실험에는 일품이고 이론에는 약하나, 그럼에도 불구하고 이론에 무지하지는 않다. 이와 마찬가지로, 로렌츠는 (더 작은 정도로) 좀 베이컨의 거미와 같다. 두 사람 모두 서로를 높이 평가했다. 로렌츠는 마이컬슨의 작업을 격려했으며, 한편 이와 동시에 그것을 설명해내어 피해갈 에테르 수학을 발전시키려 했다. 만일 퇴행적 프로그램이 존재했다면, 그것은, 내가 가정하기로, 로렌츠의 프로그램이었다. 더 중요한 것으로, 우리는 두 종류의 능력 사이의 상호작용을 보게 된다. 아인슈타인의 상대성 이론에 대한 놀랄 만한 관심은 이론적 작업을 이 영역에서 더 중요하게 만든다. 마이컬슨 역시 새로운 범위의 실험 기법에 관해 정확히 말하기 시작했다. 과학은, 베이컨이 썼던 것처럼, 개미와 거미의 재주를 동시에 갖으면서 더 많이 일을 할 능력이 있는, 즉 실험과 사변 둘 다를 소화하고 해석하는 별과 같아야 한다.

## ... 16 실험하기와 과학적 실재론

실험 물리학은 과학적 실재론에 가장 강력한 근거를 제공한다. 이는 우리가 존재자에 관한 가설을 시험하기 때문에 그런 것이 아니다. 그것은 새로운 현상을 산출해 내기 위해서 그리고 자연에 존재하는 여타의 측면을 탐구하기 위해서 원리적으로 '관찰될' 수 없는 존재자들이 정기적으로 조작되기 때문이다. 그것들은 연장이며, 사고하기의 도구가 아니라 하기(doing)를 위한 도구다. 철학자들이 좋아하는 존재자는 전자다. 나는 어떻게 전자가 실험적 존재자, 혹은 실험자의 존재자가 되었는지를 예증하게 될 것이다. 우리가 어떠한 존재자를 발견하는 초기 단계에서, 그 존재자에 관한 가설들을 시험할 수가 있다. 이것조차도 일상적인 것은 아니다. J. J. 톰슨이 그가 '미립자(corpuscles)'라 부른 것이 열음극(hot cathodes)에서 나오고 있는 것을 1897년에 깨달았을 때, 그가 했던 거의 첫 번째 일은 이 음으로 하전된 입자의 질량을 측정하는 것이었다. 그는 전하  $e$ 에

대한 거친 추정값을 만들어냈으며  $e/m$ 을 측정했다. 그는 거의 올바르게  $m$ 도 얻었다. 밀리컨은 톰슨의 캐번디시 실험실에서 이미 토의된 몇몇 관념을 뒤쫓았으며, 1908년에 이르러 전자의 전하량, 즉 전하량의 개연적 최소 단위를 결정했다. 이 때문에 맨 처음부터 사람들은 전자의 존재를 시험하기보다는 그것들로 상호작용을 일으키는 일이 더 잦았다. 우리가 전자의 몇몇 인과적 힘(causal powers)을 더 많이 이해하면 할수록, 자연의 여타 부분에서 잘 이해된 효과를 성취해내는 장치를 더 많이 세울 수 있다. 우리가 전자를 자연의 여타 부분을 조작하기 위해서 체계적으로 사용할 수 있는 시점에 이르러, 전자는 가설적인 어떤 것, 추론된 어떤 것이기를 그치게 되었다. 그것은 이론적인 것이 되는 것을 끝내고 실험적인 것이 되었던 것이다.

## 실험자와 존재자

실험 물리학자들의 대다수는 몇몇 존재자에 관한, 즉 그들이 사용하는 것에 관한 실재론자다. 나는 그들이 그러지 않을 수 없다고 주장한다. 많은 이는 또한, 의문의 여지없이, 이론에 관한 실재론자이기도 하다, 그것은 그들의 관심사에서 덜 중심적이다.

실험자는 종종 그들이 탐구하는 존재자에 관해서 실재론자이나 그들이 그래야만 하는 것은 아니다. 밀리컨은 그가 전자의 전하를 측정하는 일을 시작했을 때 전자의 실재성에 관해 별다른 거리낌이 없었다. 그러나 그는 그가 찾고자 하는 것을 찾았을 때까지도 그것에 관해 회의적이었을 수 있었을 것이다. 그는 계속하여 회의적인 채로 남아 있었을 수도 있었을 것이다. 아마도 전하의 최소 단위는 존재하겠지만, 정확하게 그 전하의 단위를 갖는 입자나 대상은 존재하지 않을 것이다. 어떤 존재자에 대한 실험이 여러분으로 하여

금 그 존재자가 실재한다고 믿도록 해주지는 못한다. 그밖의 어떤 것에 관해서 실험하기 위한 존재자 조작하기(manipulating)만이 그렇게 해줄 필요가 있다.

더욱이 그것은 여러분이 전자에 대한 회의를 불가능하게 해줄 그밖의 어떤 것에 관해서 실험하기 위해 전자를 사용한다는 것조차도 아니다. 전자의 몇몇 인과적 성질을 이해하면, 여러분은 그밖의 어떤 것에 무슨 일이 발생할지를 알아보기 위해 전자를 여러분이 원하는 방식으로 정렬시키는 것을 가능하게 해줄, 아주 교묘하고, 복잡한 장치를 어떻게 만들어야 할지를 짐작하게 된다. 일단 여러분이 올바른 실험적 착상을 갖게 되면 여러분은 그 장치를 어떻게 만들고자 해야 할지 미리 대략 알게 되는데, 왜냐하면 여러분은 이것이 전자로 하여금 이러저러하게 행동하도록 하는 길임을 알기 때문이다. 전자는 우리의 사고를 조직하거나 관찰된 현상을 구제하기 위한 방식이 더 이상 아니다. 그것들은 이제 자연의 몇몇 다른 영역에서 현상을 창조하는 방식이다. 전자는 연장이다.

존재자에 관한 실재론과 이론에 관한 실재론 사이에는 중요한 실험적 대조가 존재한다. 우리가 이론에 관한 실재론은 과학이 참된 이론을 목표로 한다는 믿음이라고 말한다고 가정하라. 그것을 부정하는 실험자는 많지 않을 것이다. 철학자들만이 그것을 의심한다. 참을 목표로 한다는 것은, 하지만 불확실한 미래에 관한 어떤 것이다. 전자의 빔을 조준시키는 일은 현재의 전자를 사용하고 있는 것이다. 이온을 만들고자 어떤 한 전자를 떼어내기 위해 한 특수한 원자에 섬세하게 준비된 레이저를 조준시키는 일은 현재의 전자에 조준하는 것이다. 이와 대조적으로 어떤 이가 믿어야 하는 이론의 현재적 집합은 존재하지 않는다. 만일 이론에 관한 실재론이 과학의 목표에 관한 학설이라면, 그것은 일정한 종류의 가치들을 신포하는 학설이다. 만일 존재자에 관한 실재론이 다음 주에 전자를 조

준시키는 또는 그 다음 주에 여타의 전자를 조준시키는 문제라면, 그것은 가치들 사이에서 훨씬 더 중립적인 학설이다. 실험자가 존재자에 관한 과학적 실재론자가 되는 방식은 그들이 이론에 관한 실재론자가 될 수 있을 방식과 전적으로 다르다.

이는 우리가 이상적 이론에서 현재적 이론으로 전환할 때 나타난다. 다양한 속성이 전자에 속하는 것으로 확신 있게 생각할 수 있으나, 확실한 속성의 대부분은 실험자가 오히려 그것에 대해서 회의적 입장을 취할 수 있는 수많은 서로 다른 이론 또는 모형 속에서 표현된다. 한 조에 속해 있는 사람들이 동일한 큰 실험의 서로 다른 부분에서 작업을 하는데, 이들조차도 전자에 관한 서로 다르고 상호 모순되는 설명을 주장할 수가 있다. 그것은 그 실험의 서로 다른 부분이 전자의 서로 다른 사용을 이루어낼 것이기 때문이다. 전자의 한 측면에서 계산을 위해 좋은 모형이 여타의 측면에서는 만족스럽지 못할 것이다. 가끔 어떤 조는 그러한 실험적 문제를 풀 수 있는 어떤 이를 단순히 구하기 위해서 꽤나 서로 다른 이론적 관점을 갖고 있는 구성원을 선별해야 한다. 여러분은 이질적인 훈련을 받은 그리고 그의 이야기가 여러분의 이야기와는 거의 공약 불가능한 어떤 이를 선택할 수도 있을 텐데, 이는 바로 여러분이 원하는 효과를 산출시킬 수 있는 사람을 얻기 위한 것이다.

그러나 이론의 공통적 핵심, 즉 그 그룹에 속한 모든 이의 교차점이며, 모든 실험자가 실재론적으로 위임하는 전자 이론이 존재하는 것은 아닐까? 나는 공통의 핵심이 아니라 상식적 지식(common lore)에 대해 말할 것이다. 전자와 관련해 수많은 이론, 모형, 근사, 구도, 정식화, 방법 등등이 존재하나, 이들의 교차점이 전적으로 어떤 이론이라고 가정할 이유는 없다. ‘한 조의 이런 구성원 또는 저런 구성원이 믿도록 훈련받아 온 모든 이론의 교차점 안에 포함되어 있는 가장 강력하고 중요한 이론’과 같은 것이 존재한다고 생각할 어

떠한 이유가 있는 것도 아니다. 수많은 공유된 믿음이 존재한다 할지라도, 이들이 이론이라 불릴만한 어떤 것을 형성한다고 가정할 이유는 없다. 당연히 조는 동일한 연구기관에서 비슷한 사고를 가진 사람들로 이루어지는 경향이 있고, 따라서 그들의 연구의 기초가 되는 몇몇의 실제로 공유되는 이론적 기초가 보통 존재한다. 이것은 사회학적 사실이지, 과학적 실재론을 위한 토대가 아니다.

이론과 관련한 여러 과학적 실재론은 현재에 관한 학설이 아니라 우리가 성취할 수도 있는 혹은 아마도 우리가 목표로 하는 이상에 관한 학설이다. 그러므로 어떠한 현재적 이론도 없다고 말하는 것이 낙관적 목표에 반하는 것으로 간주되지 않는다. 요점은 이론에 관한 과학적 실재론은 미래에 과학이 진리로 향해 가리라는 믿음, 희망, 자비와 같은 퍼스적 원리들을 채택해야 한다는 것이다.<sup>1</sup> 존재자에 관한 실재론은 그런 덕목을 필요로 하지 않는다. 그것은 현재 우리가 무엇을 할 수 있느냐에서 생겨난다. 이를 이해하기 위해서, 우리는 전자를 일으켜 세워 움직이게 하는 장치를 세운다는 것이 무엇인지를 약간 자세히 들여다보아야 한다.

## 만들기

실험자가 존재자에 관한 실재론자라고 할지라도, 그 결과로 그들이 옳게 되는 것은 아니다. 아마도 그것은 심리학의 문제일 것이다. 아마 위대한 실험자가 되게 하는 바로 그 숙련은 정신의 일정한 성질

1. “나는 세 가지 의견을, 즉 공동체에 대한 무한정의 관심, 이런 관심이 지고한 것이 될 가능성에 대한 깨달음, 논리학의 필수 불가결한 요소로서 지식 활동의 무제한적 계속을 내놓는다. …… 이 세 가지 의견은 자비, 믿음, 희망이라는 유명한 트리오와 거의 똑같은 것으로 본다. ……” C. Hartshorne and P. Weiss(eds.), *The Collected Papers of C. S. Peirce*, Vol. 2, Section 665.

과 더불어 나아가고 정신은 정신이 사고하는 것을 그것이 무엇이든 간에 객관화한다. 하지만 이것이 그렇게 되지는 않을 것이다. 실험자는 중성 보손(neutral bosons)을 기꺼이 가설적 존재자라고 여기지만, 전자는 실재한다고 여긴다. 그 차이는 무엇일까?

탁월한 정확성으로 원하는 효과를 산출시키기 위해 전자의 인과적 속성에 의존하는 도구를 만드는 엄청나게 많은 방식이 있다. 나는 이것을 예증하게 될 것이다. 그 논의 — 이것은 실재론을 위한 실험적 논변이라 불릴 수 있을 것이다 — 는 우리의 성공에서 전자의 실재성을 추론한다는 것이 아니다. 우리가 가설을 시험하고 이어 가설이 시험을 통과했기 때문에 그것을 믿을 때처럼, 우리가 도구를 만들고 이어 전자의 실재성을 추론하는 것이 아니다. 그것은 시간 순서상 잘못이다. 이제 우리는 우리가 탐구하고자 하는 몇몇의 다른 현상을 탐구하기 위하여, 전자에 관한 적당한 수의 일상적 진리(home truths)에 의존해 장치를 설계한다.

이것은 마치 우리가 우리의 장치가 어떻게 행동할지를 예측하기 때문에 우리가 전자를 믿게 되는 것처럼 들릴 수도 있을 것이다. 이는 너무도 잘못 이해하는 것이다. 말하자면, 우리는 극화된(polarized) 전자를 어떻게 준비할지에 대한 여러 가지 일반적 관념을 갖고 있다. 우리는 작동되지 않는 원형을 세우느라 많은 시간을 소모한다. 우리는 수많은 버그(bugs)를 제거한다. 종종 우리는 포기해야 하고 다른 접근을 해야 한다. 디버깅(debugging)은 무엇이 잘못되고 있는지를 이론적으로 설명하거나 예측하는 일이 아니다. 그것은 부분적으로 장치내의 ‘잡음(noise)’을 제거하는 일이다. 그것이 또한 엄밀한 의미를 갖고 있음에도 불구하고, ‘잡음’은 종종 어떤 이론으로 이해가 안 되는 모든 사건을 의미한다. 도구는 우리가 사용하길 원하는 존재자의 속성을, 물리적으로, 분리해낼 수 있어야 하고, 우리의 방식에 낄 수가 있는 모든 다른 효과를 감쇠시켜야 한다. 우리가

자연의 더 가설적인 여타의 부분에 개입하기 위해 전자의 잘 이해된 인과적 성질을 이용하는 새로운 종류의 장치들을 정규적으로 세우기 시작 — 그리고 이러한 세우기가 종종 충분한 성공을 거둔다 — 할 때 우리는 전자의 실재성을 완전히 확신하게 된다.”

예가 없이 이것을 파악하기란 불가능하다. 친숙한 역사적 사례는 그릇된 이론 경도적(theory-oriented) 철학 또는 역사의 외피로 보통 덮여 있다. 따라서 나는 새로운 어떤 것을 취하게 될 것이다. 그것은 두문자어(頭文字語)로 PEGGY II 라고 불리는 극화 전자총(polarizing electron gun)이다. 1978년에 그것은 심지어 《뉴욕타임스(The New York Times)》의 주목을 받았던 근본적인 실험에 사용되었다. 다음 절에서 나는 PEGGY II 만들기의 요점을 기술한다. 따라서 나는 몇몇의 새로운 물리학에 관해 이야기해야 한다. 여러분은 이를 빼고 이어지는 공학 부분만을 읽을 수 있다. 그렇지만 그 주요 실험 결과의 중요성, 즉 (1) 중수소(deuterium)로부터 나오는 극화된 전자들이 흩뿌려질 때 패리티(parity)가 위반된다는 것, 그리고 (2) 좀더 일반적으로 말하여, 약한 중성흐름 상호작용(weak neutral-current interactions)에서 패리티가 위반된다는 점이 지니는, 이해가 좀 쉬운 중요성을 아는 일은 틀림없이 흥미로울 것이다.<sup>2</sup>

## 패리티와 약한 중성 흐름

자연에는 네 가지 근본적인 힘이 존재하며, 이들이 필연적으로 구분되는 것은 아니다. 중력과 전자기력은 잘 알려져 있다. 그리고 나면

2. 아래에 제시된 대중적인 설명은 몇몇 실험자와의 너그러운 대화에, 또한 내부 보고서 ‘Parity violation in polarized electron scattering’, by Bill Kirk, SLAC Beam Line, no. 8(October, 1978)에 의존하고 있다.



강력(strong forces)과 약력(weak forces)이 존재하며, 이는 『광학』 안에 들어 있는 뉴턴 프로그램의 실현인데, 이것은 모든 자연이 서로 다른 다양한 거리에서 인력과 척력으로 작용하는 (즉 상이한 소멸률을 갖는) 입자들과 다양한 힘의 상호작용으로 이해되리라고 가르쳤다.

강력은 전자기력보다 100배 이상이나 강하지만 강력은 대단히 가까운 거리에서만, 기껏 해봐야 양성자의 직경에 해당하는 거리에서 작용한다. 강력은 양성자, 중성자, 더 최근의 입자를 포함하는 ‘강입자(hadrons)’에 작용하며, 전자 또는 경입자(leptons)로 불리는 입자의 집합에 속하는 것에는 작용하지 않는다.

약력은 전자기력의 1/10000배 정도의 세기일 뿐이며, 강력보다 1/100배 더 짧은 거리에서 작용한다. 그러나 이 힘은 강입자는 물론이고 전자를 포함해 경입자에도 작용한다. 약력의 가장 친숙한 예는 방사성이다.

이같은 사변을 유발한 이론은 양자 전기역학이다. 이는 믿을 수 없을 정도로 성공적이어서, 100만 분의 1 이상의 정밀도로 많은 예측을 산출해내는데, 이는 실험 물리학의 기적이다. 이는 지구 반경의 거리로부터 양성자의 반경의 1/100거리에 이르는 여러 거리에서 적용된다. 이 이론은 모든 힘들이 몇몇 종류의 입자에 의해 ‘운반된다고’ 가정한다. 광자는 전자기력에서 그 일을 한다. 우리는 중력에 대해서는 중력자(graviton)를 가정한다.

약력과 관계된 상호작용의 경우에는, 하전된 흐름이 존재한다. 우리는 보오손이라는 입자가 이러한 약력을 운반한다고 가정한다. 하전된 흐름에 대해서는, 보오손이 양전하 또는 음전하를 띌 수 있다. 1970년대에 전하를 전혀 운반하지 않거나 어떠한 전하의 교환도 없는 약한 ‘중성의’ 흐름이 틀림없이 있으리라는 가능성이 제기되었다. 양자 전기역학의 정당성이 입증된 부분과의 순전한 유비에 의해서, 중성 보오손이 약한 상호작용의 운반체로 가정되었다.

고에너지 물리학에서 최근의 가장 유명한 발견은 패리티의 보존의 파국이다. 많은 물리학자 및 칸트를 포함하는 많은 철학자의 기대와는 반대로, 자연은 우선성(右旋性, right-handedness)과 좌선성(左旋性, left-handedness) 간의 절대적인 구별을 이룬다. 명백히 이것은 약한 상호작용에서만 나타난다.

자연의 우선성 또는 좌선성으로 우리가 의미하는 바는 규약의 요소를 갖고 있다. 나는 전자가 스핀을 갖고 있다고 이야기했다. 여러분의 오른손으로 손가락이 스핀의 방향을 가리키도록 회전하는 입자를 감싼다고 상상해보라. 그러면 여러분의 엄지는 스핀 벡터의 방향을 가리킨다고 이야기된다. 만일 그런 입자들이 빔 속을 이동하고 있다면, 스핀 벡터와 빔 사이의 관계에 대해서 생각해보라. 만일 모든 입자들이 그들의 스핀 벡터를 빔과 똑같은 방향으로 가진다면, 그들은 우선성 선형적(linear) 극화를 가지게 되며, 반면, 만일 그 스핀 벡터가 빔 방향과 정반대라면, 입자들은 좌선성 선형적 극화를 갖게 된다.

최초의 패리티 위배의 발견은, 한 종류의 입자 붕괴의 산물인 이른바 뮤온 중성미자(muon neutrino)가 우선성 극화에서 결코 존재할 수 없고 오직 좌선성 극화에서만 존재한다는 것을 보여줬다.

패리티 위배가 약한 하전된 상호작용에서 발견되어 왔다. 약한 중성의 상호작용에 대해서는 어떨까? 네 가지 종류의 힘에 대한 유명한 와인버그-살람 모형이 1967년에 스티븐 와인버그(Stephen Weinberg) 그리고 1968년에 A. 살람(Salam)에 의해 독립적으로 제안되었다. 이 이론은 약한 중성의 상호작용에서 패리티의 미세한 위배를 함축했다. 그 모형이 순전한 사변일지라도, 그것의 성공은 놀라웠고, 심지어 경외감을 자극하는 것이었다. 그러므로 약한 중성의 상호작용에서 예측된 패리티의 파국을 엄밀하게 시험해보는 일은 가치가 있어 보였다. 그것은 아주 미세한 거리에서 작용하는 그

러한 약력에 대해서 더 많은 것을 가르쳐주게 될 것이다.

예측은 이렇다. 즉 일정한 과녁들을 때릴 극화된 전자가 방출될 때, 우선성 극화 전자보다 약간 더 많은 좌선성 극화 전자가 흩뿌려진다는 것이다. 약간 더 많이! 두 가지 종류의 전자의 흩뿌려짐의 상대적 빈도 차는 10000개에 하나 정도인데, 이는 0.50005와 0.49995사이의 확률 차에 비길 만하다. 1970년대 초반에 스탠퍼드선형가속기센터에서 쓰이던 장치는 초당 120번의 펄스를 내며, 각 펄스마다 하나의 전자 사건을 제공한다. 그렇다면 이 기계를 쓸 경우 앞서 본 아주 작은 빈도 차를 감지하는 데 27년이 걸린다. 어떤 이가, 상이한 실험이 상이한 펄스를 사용하게 함으로써, 똑같은 빔을 수많은 실험에 동시에 사용하는 점을 고려하고, 어떤 장비도 27년은 그만두고 한 달도 안정적인 채로 있을 수 없음을 고려하면, 이런 실험은 불가능하다. 여러분은 각 펄스에서 나오는 엄청나게 더 많은 전자를 필요로 한다. 우리는 한때 가능했던 것 이상으로 펄스당 1000개에서 10000개 사이의 전자를 필요로 한다. 최초의 기도는 지금은 PEGGY I 으로 불리는 도구를 사용했다. 이는 본질적으로 J. J. 톰슨의 열음극의 고급 버전이었다. 약간의 리튬(lithium)이 가열되고 전자가 데워져 튀어나왔다. PEGGY II는 아주 다른 원리들을 사용한다.

## PEGGY II

그 기본적 착상은 C. Y. 프레스컷(Prescott)이라는 이가 한 광학 잡지에서 갈륨비소(gallium arsenide)라고 불리는 결정성 물질에 관한 기사를 ('우연히!') 주목했을 때 시작되었다. GaAs는 진기한 성질을 갖고 있다. 적절한 진동수를 갖는 원형으로(circularly) 극화된 빛을 받으면, 선형으로 극화된 전자를 아주 많이 낸다. 이러한 현상이 왜 일어나

는가에 대해서, 그리고 방출되는 전자가 왜 극화되고 극화된 전자 가운데 3/4이 한 방향으로 극화되고 1/4이 다른 방향으로 극화되는가에 대해서 대략적인 양자적 이해가 존재한다.

PEGGY II는 이러한 사실과 더불어 GaAs가 그것의 결정 구조가 갖는 특징으로 인해 많은 전자를 방출한다는 사실을 이용한다. 이어 몇몇 공학이 온다. 그것은 표면으로부터 전자를 자유롭게 하는 작업이다. 우리는 적절한 물질을 표면에 바르면 도움이 된다는 것을 안다. 이 경우 세슘(cesium)과 산소로 이루어진 얇은 막을 결정에 댄다. 거기에 더해 결정 주위의 공기 압력을 낮춰 주면 줄수록, 주어지는 일의 양에 대해 더 많은 전자가 탈출한다. 그리하여 기온이 액체 질소의 온도인 훌륭한 진공 속에서 전자는 폭발적으로 쏟아져 나온다.

우리는 적절한 광원을 필요로 한다. 이때 적색광의 레이저(7100 옹스트롬)가 결정에 조준된다. 이 빛은 먼저 보통 편광기, 즉 아주 고품의 방해석(calcite) 프리즘 또는 아이슬란드 스파(Iceland spar) 편광기를 통과하게 된다. 이는 선형으로 극화된 빛을 낸다. 우리는 결정을 때리기 위해서 원형으로 극화된 빛을 원한다. 극화된 레이저 빔은 이제 퍼클의 전지(Pockel's cell)라는 교묘한 장치를 거쳐 간다. 이 장치는 선형으로 극화된 광자를 원형으로 극화된 광자로 전기적으로 바꿔준다. 전기적인 방식이므로, 그것은 마치 매우 빠른 스위치처럼 행동한다. 원형 극화의 방향은 전지의 전류 방향에 의존한다. 따라서 극화의 방향을 임의로 변화시킬 수가 있다. 우리가 좌선성 극화와 우선성 극화의 아주 미세한 비대칭을 탐지하고자 한다면, 이는 중요하다. 임의화작업(randomizing)은 장치 내의 어떤 체계적인 '경향적 요소(drift)'를 막아내는 데에 도움을 준다. 임의화는 방사성 붕괴 장치에 의해 이루어지며, 컴퓨터가 각 펄스에 대한 극화의 방향을 기록한다.

원형으로 극화된 펄스가 GaAs 결정을 때리고, 선형으로 극화된 전자의 펄스를 만들어낸다. 이러한 펄스로 이루어진 빔은 실험의 다음 부분에 쓸 수 있도록 자석에 의해 교묘하게 조작되어 가속기로 가게 된다. 이 빔은 이어서 극화된 비율을 점검하는 장치를 통과한다. 실험의 나머지 부분에도 이와 비교될만한 정교한 장치들과 탐지기가 요구되지만, 우리는 PEGGY II에서 멈추기로 한다.

## 버그

짧은 기술(記述)은 모든 것을 너무 쉬운 소리로 들리도록 만드는데, 그러므로 한동안 멈춰 디버깅에 대해 살펴보기로 한다. 많은 버그는 결코 이해될 수 없다. 그것은 시행착오를 통해서만 제거된다. 세 가지의 서로 다른 종류를 설명하기로 한다. (1) 결국 오류의 분석에 요인으로 들어가야 할 본질적인 기술적 한계, (2) 여러분에게 압력을 가하지 전까지는 결코 생각해볼 수 없는 더 간단한 기계적 결함, (3) 잘못될 수도 있는 바에 대한 육감.

1. 레이저 빔은 과학 소설이 가르치는 것처럼 일정하지 않으며, 어떤 시간 범위를 지나면서 빔 속에는 돌이킬 수 없는 양의 '지터(jitter)'가 항상 존재하게 된다.

2. 더 평범한 수준에서 볼 때 GaAs 결정에서 나오는 전자는 뒤쪽으로 흩뿌려지고 그 결정을 때리는 데 사용된 레이저 빔의 통로와 동일한 통로를 역으로 따라간다. 그들의 대부분은 이어 자기적으로 편향된다. 그러나 몇몇이 레이저 장치에서 반사되고 그 체계 안으로 되돌아온다. 따라서 여러분은 주변에 있는 이들 새로운 전자를 제거해야 한다. 이는 조야한 기계적 수단으로, 즉 그들 전자를 결정에서 약간 초점이 빗나나게 하고 그럼으로써 빗나가도록 하게 함으로써 이루어진다.

3. 훌륭한 실험자는 어리석은 일을 막을 줄 안다. 극화된 펄스가 먼저 입자를 칠 때 실험이 행해지는 어떤 표면 위에 그 먼저 입자가 납작하게 쓰러진다고, 그리고 이어 반대 방향으로 극화된 펄스에 의해 타격되어 그 먼지가 물구나무 서 있게 된다고 가정해 보라? 우리가 미세한 비대칭을 탐지하고 있다고 할 때, 그것은 체계적인 효과를 가질 수 있을 것인가? 그 조의 한 사람이 한 밤중에 이에 대해 생각했고, 다음 날 아침에 와서 먼지 제거 스프레이를 미친 듯이 사용했다. 그런 경우에만, 그들은 깨끗한 상태를 한 달 동안 유지시켰던 것이다.

## 결과

체계적 오류(systematical error)와 통계적 오류(statistical error)를 넘어 인정될 수 있는 몇몇 결과를 얻기 위해서는 약  $10^{11}$  번의 사건이 필요하다. 체계적 오류라는 개념이 흥미로운 개념적 문제를 제시함에도 불구하고, 그것은 철학자에게 알려져 있지 않은 것으로 보인다. 좌선성 극화와 우선성 극화의 탐지에는 체계적인 불확실성이 존재했고, 몇몇 지터가 존재했으며, 두 가지 종류의 빔의 특성에 관한 여타의 문제가 있었다. 이 오류들이 분석되었고 통계적 오류에 선형적으로 부가되었다. 통계적 추론을 연구하는 이에게 이것은 그것이 무엇이던 간에 아무런 이론적 근거를 갖지 않는 진정으로 본능에 의한 분석이다. 그것은 그렇고, PEGGY II 덕택에 사건의 수는 충분히 커서 전체 물리학자 사회에 확신을 줄 수 있었다. 좌선성 극화 전자가 중수소로부터 우선성 극화 전자보다 약간 더 많이 흩뿌려졌다. 이것은 약한 중성흐름 상호작용에서 패리티의 위배를 보여준 최초의 확신을 주는 예였다.

PEGGY II 만들기는 상당히 비이론적이었다. 누구도 GaAs의 극화 속성을 미리 연구해 내지 못했다. 그것은 이와 무관했던 실험적 탐구와의 우연한 조우에 의해서 발견되었다. 결정에 관한 기초적인 양자 이론이 극화 효과의 기본 원리를 설명할 수 있음에도 불구하고, 그것이 사용된 실제 결정의 성질을 설명해 내지는 못했다. 원리적으로는 50%이상 극화되어야 함에도 불구하고, 전자를 37%이상으로 극화시키는 실제 결정을 누구도 얻지 못했다.

마찬가지로 우리는 GaAs 결정을 덮는 세슘과 산소로 이루어진 막이 왜 '음전자 친화성을 산출하게' 될 것인지에 대한, 즉 왜 전자가 탈출하는 것을 돕는가에 대한 일반적인 그림을 지니고 있음에도 불구하고, 우리는 무슨 이유로 이것이 효율을 37%까지 증가시키는가에 대한 정량적인 이해를 갖고 있지 않다.

서로 다른 것의 집합이 서로 잘 들어맞으리라는 어떤 보장이 있었던 것도 아니다. 훨씬 더 최근의 예에 대한 설명을 제시하자면, 아래에 짚막하게 기술된, 미래의 실험적 작업은 우리로 하여금 PEGGY II가 제공할 수 있었던 것보다 펄스 당 훨씬 더 많은 전자를 원하도록 할 것이다. 패리티 실험이 《뉴욕타임스》에 보도되었을 때, 벨연구소(Bell Laboratory)의 한 그룹은 그 신문을 읽고 어떤 일이 진행되고 있었는지를 알게 되었다. 그들은 PEGGY II와는 전적으로 무관한 어떤 결정격자를 만들어 오고 있었다. 이 결정격자는 GaAs 및 그와 관련되는 알루미늄 화합물을 사용한다. 이 격자의 구조는 사람들로 하여금 실제로 방출되는 전자가 모두 극화될 것이라고 기대하게 한다. 그렇다면 우리는 PEGGY II의 효율을 두 배가 되게 할 수도 있을 것이다. 그러나 현재 그 좋은 착상은 문제를 갖고 있다. 새로운 격자에도 일을 줄이는 페인트를 입혀야 한다. 세슘-

산소 화합물이 고온에서 쓰인다. 따라서 고온에서 알루미늄은 이웃하는 GaAs 층으로 녹아 스며드는 경향을 띠고, 꽤나 인공적인 격자가 약간 울퉁불퉁해짐으로써, 극화된 전자를 방출하는 그것의 섬세한 속성을 제한하게 만든다. 그러므로 이것은 아마도 결코 작동하지 않을 것이다. 프레스콧은 이와 동시에 더 많은 전자를 얻기 위해서 성능을 높인 새로운 열이온을 이용하는 음극선을 부활시키고 있다. '이론'은 PEGGY II가 열이온을 이용한 PEGGY I을 물리칠 것이라고 말해줄 수 없을 것이다. 이론은 열이온을 이용하는 어떤 PEGGY III가 PEGGY II를 물리치게 될 것이라고도 말해줄 수 없을 것이다.

벨연구소 사람들이 새로운 표본 격자를 만들기 위해 많은 약한 중성흐름 이론을 알 필요는 없었음에도 주목하라. 그들은 다만 《뉴욕타임스》를 읽었을 뿐이다.

## 교훈

과거 한때 전자가 존재하는지의 여부를 의혹하는 것은 의미가 있었다. 톰슨이 그의 미립자의 질량을 측정하고, 밀리컨이 그 미립자의 전하를 측정한 이후에조차도, 의혹은 의미를 지닐 수 있었을 것이다. 우리는 밀리컨이 톰슨이 측정했던 것과 동일한 존재자를 측정하고 있었음을 확신할 필요가 있었다. 더 많은 이론적 정교화가 필요했다. 이 관념은 여타의 많은 현상에 적용될 필요가 있었다. 고체 상태 물리학, 원자, 초전도성. 이 모두가 그들의 역할을 해야 했다.

과거 한때 전자가 존재한다고 생각하기 위한 최선의 이유는 설명에서의 성공이었을 수도 있다. 우리는 12장에서 로렌츠가 그의 전자 이론으로 어떻게 패러데이 효과(Faraday effect)를 설명했는가를 보았다. 나는 설명하는 능력이 진리에 대한 보장을 별로 제공하지 못한



다고 말했다. 심지어 J. J. 톰슨 시절부터 설명보다 비중 있는 것은 측정이었다. 설명이 도움은 되었다. 몇몇 사람들은 전자의 존재에 관한 가정이 아주 다양한 현상을 설명할 수 있었기 때문에 전자를 믿어야 했을 수도 있다. 운 좋게도 더 이상 우리는 설명적 성공(explanatory success)으로부터(즉 우리의 마음이 좋게 느끼도록 하는 것으로부터) 추론하는 척하지 않아도 된다. 프레스컷 등등은 전자로 현상을 설명하지 않는다. 그들은 전자를 어떻게 사용하는지를 안다. 정상적인 지성을 가진 사람이라면 전자가 ‘실제로’ 우리가 충분히 작은 손으로 그것을 손가락으로 감쌀 수 있고 움켜쥔 손가락 방향으로 돌며, 엄지손가락을 위로 뻗을 때 그 방향이 스핀 벡터의 방향과 일치하게 되는 것을 알 수 있을 바로 그런 아주 작은 구라고 생각하지 않을 것이다. 이런 것 대신에 재능 있는 실험자가 여타의 어떤 것을, 예를 들어 중성 흐름이나 중성 보오손을 탐구하기 위해서 기술할 수 있고 이용할 수 있는 일군의 인과적 속성이 존재한다. 우리는 전자의 거동에 대해서 엄청나게 많이 알고 있다. 무엇이 전자와 상관이 없는지를 아는 것도 마찬가지로 중요하다. 그래서 우리는 자기 코일 안에서 극화된 전자 빔을 굽게 하는 일이 어떤 중요한 방식으로 극화에 영향을 미치지 않음을 안다. 우리는 육감을 갖고 있으며, 독립적으로 시험하기에 아주 사소한 것임에도 불구하고, 그것은 무시하기에는 너무나 강력하다. 예를 들어 먼지는 극화의 방향의 변화에 따라 춤출 수 있다. 그러한 육감은 전자와 같은 종류에 관해 열심히 연구해서 얻은 감각에 기초한다. (전자가 구름이나 또는 파동 혹은 입자냐의 여부는 이러한 육감에 전혀 문제가 안 된다.)

## 언제 가설적 존재자는 실제하는 것이 되는가

전자와 중성 보오손 사이에서 이루어지는 완전한 대조에 주목하라.

어떤 시도가 있을 수 있겠지만, 아직은 아무도 중성 보오손을 조작하지 못한다고 나는 듣고 있다. 심지어 약한 중성 흐름조차도 가설의 연무 속에서 막 벗어나고 있을 뿐이다. 1980년에 이르러 충분한 범위의 확신을 주는 실험이 중성 흐름을 탐구의 대상이 되도록 했다. 언제 중성 보오손이 가설적 지위에서 벗어나 전자와 같은 상식적 실재가 될 수 있을까? 언제 우리는 중성 보오손을 여타의 어떤 것을 탐구하기 위해서 사용하는가.

나는 PEGGY II 보다 나은 전자총을 만들려는 욕구에 대해서 언급했다. 왜? 우리는 이제 약한 중성 상호작용에서 패리티가 위배되는 것을 ‘알기’ 때문이다. 패리티 실험과 관계된 것 훨씬 이상으로 기괴한 통계적 분석으로 아마도 우리는 바로 그 약한 상호작용을 분리해낼 수 있을 것이다. 즉, 우리는 이를 테면 전자기적 상호작용을 포함해 많은 상호작용을 갖고 있다. 우리는 이들을 다양한 방식으로 감지할 수 있지만, 우리는 또한 패리티를 보존시키지 않는 일군의 정확한 바로 그 약한 상호작용을 통계적으로 선별해낼 수 있다. 이는 아마도 물질과 반물질(anti-matter)에 대한 훨씬 더 깊이 있는 탐구로 가는 길을 우리에게 제공할 것이다. 통계학을 쓰기 위해서 우리는 PEGGY II 가 발생시키리라 희망할 수 있는 것보다 훨씬 더 많은 펄스 당 전자를 필요로 한다. 그러한 프로젝트가 성공한다면, 우리는 약한 중성 흐름을 그밖의 어떤 것을 조사하기 위한 조작 가능한 연장으로 사용하기 시작하게 될 것이다. 그러한 흐름에 관한 실재론을 향하는 다음 단계가 이루어질 것이다.

## 변하는 시대

실재론과 반실재론 논쟁의 연원은 그리스 선사로까지 족히 거슬러 올라 갈 수 있는 과학철학의 일부임에도 불구하고, 우리의 현재 버

전은 대부분 19세기말의 원자론에 관한 논쟁에서 내려온 것이다. 원자에 대한 반실재론은 부분적으로 물리학의 문제였다. 에너지론자는 에너지가 모든 것의 바닥에 있으며, 이것은 물질의 아주 작은 조각이 아니라고 생각했다. 그것은 또한 콩트, 마흐, 피어슨, 심지어 J. S. 밀과 같은 이의 실증주의와 연결되었다. 밀의 젊은 동료 알렉산더 베인(Alexander Bain)은 그 논점을 그의 교과서 『논리학, 연역과 귀납(Logic, Deductive and Inductive)』에서 특징적인 방식으로 진술한다. 1870년에 다음과 같은 쓴 일은 그에게 적절한 것이었다.

몇몇 가설은 물체의 미세 구조와 작동에 관한 가정들로 이루어진다. 그 사례의 본성상, 이 가정들은 직접적 수단에 의해서 결코 증명될 수 없다. 이들의 장점은 현상을 표현해내는 그들의 적합성이다. 그들은 표상적 허구다.

베인은 계속해 다음과 같이 이야기한다. ‘물질 입자의 궁극적 구조에 관한 모든 언명은 가설적인 것이며 내내 가설적인 것이어야 한다. ....’ 그가 말하기로, 열에 관한 운동학적 이론은 ‘중요한 지적 기능을 충족시킨다.’ 그러나 우리는 그것을 세계에 대한 참된 기술이라고 주장할 수는 없다. 그것은 표상적 허구다.

백 년 전에 베인은 확실히 옳았다. 물질의 미세 구조에 관한 가정은 그 당시에 증명될 수 없었던 것이다. 유일한 증명은 간접적일 수밖에, 즉 가설이 몇몇 설명을 제공하는 것처럼 보였고 훌륭한 예측을 하는 데 도움이 되었다는 것일 수밖에 없었다. 그러한 추론이 도구주의 혹은 관념론의 몇몇 다른 브랜드로 기운 철학자에게 확신을 제공할 필요는 결코 없다.

실제로 상황은 17세기 인식론과 상당히 유사하다. 그 때에 지식은 올바른 표상이라고 생각되었다. 그러나 당시에 표상이 세계에

대응하느냐를 확신하기 위해서 누구도 표상의 밖으로 결코 나갈 수가 없었다. 표상에 관한 모든 시험은 그저 또 다른 표상이었을 뿐이다. ‘관념으로서 관념만한 어떤 것도 없다’라고 버클리 주교가 말했던 것처럼 말이다.

이론, 시험하기, 설명, 예측적 성공(predictive success), 이론의 수렴 등등의 수준에서 과학적 실재론을 옹호하려 논변하는 것은 표상들의 세계에 갇히는 것이다. 과학적 반실재론이 경주에 영구히 참여하고 있는 것은 놀라운 일이 아니다. 그것은 ‘지식 관망자 이론(spectator theory of knowledge)’의 변종인 것이다.

철학자와 반대로 과학자는 1910년에 이르러 일반적으로 원자에 관한 실재론자가 되었다. 변화하는 풍토에도 불구하고, 몇몇 도구주의 또는 허구주의(fictionalism)와 같은 반실재론적 변종은 1910년과 1930년에 강력한 철학적 대안으로 남아 있었다. 이것이 철학사가 우리에게 가르치는 것이다. 교훈은 다음과 같다. 이론에 대해 생각하지 말고, 실천에 대해 생각하라. 베인이 한 세기 전에 썼을 때, 원자에 관한 반실재론은 매우 분별력이 있었다. 그 시절에 현미경으로 보이는 것 이하의 어떠한 존재자에 관한 반실재론은 건전한 학설이었다. 지금은 사정이 다르다. 전자나 이와 비슷한 것에 대한 ‘직접적’ 증명은 잘 이해된 그들의 낮은 수준의 인과적 성질을 이용해 조작해내는 우리들의 능력이다. 물론 나는 실재성이 인간의 조작 가능성(manipulability)에 의해 이루어진다고 주장하는 것은 아니다. 전자의 전하를 결정한 밀리컨의 능력은 전자라는 관념에 매우 중요한 어떤 역할을 했다. 내가 생각하기로 로렌츠의 전자 이론 이상의 역할을 했다. 어떤 존재자의 전하를 결정하는 일은 그밖의 어떤 것을 설명하기 위해 그것을 가정하는 것 훨씬 이상으로 사람들로 하여금 그것을 믿게 만든다. 밀리컨은 전자에서 전하를 얻는다. 이는 지금도 우수한 것이다. 울런벡(Uhlenbeck)과 호우트스밋(Goudsmit)이 1925

년에 전자에 각운동량을 지정하여, 많은 문제를 눈부시게 풀어낸다. 전자는 그 이후로 내내 스핀을 갖고 있다. 결정타는 우리가 전자에 스핀을 주고, 그들을 극화시킬 수 있으며 따라서 그들을 약간 다른 비율로 산란하게 할 수 있을 때다.

자연에는 인간이 결코 알 수 없을 수많은 존재자와 과정이 확실히 존재한다. 아마도 우리가 원리적으로 결코 알 수 없는 많은 것이 존재할 것이다. 실재는 우리보다 더 크다. 가정되거나 추론된 존재자의 실재성에 관한 최선의 종류의 증거는 우리가 존재자를 직접 측정하기 시작할 수 있거나 그렇지 않으면 그것의 인과적 성질을 이해하기 시작할 수 있다는 점이다. 역으로 우리가 이런 종류의 이해를 갖는다는 최선의 증거는 우리가 무로부터 시작해 이런 혹은 저런 인과적 유대를 이용해서, 아주 믿을 만하게 작동할 기계를 세우기 시작할 수 있다는 것이다. 따라서 이론화작업이 아니라 공학이 존재자에 관한 과학적 실재론에 대한 최선의 증명이다. 과학적 반실재론에 대한 나의 공격은 마르크스(Marx)가 그가 살던 시대의 관념론을 맹공격한 것에 유비된다. 양자 모두가 이야기하는 핵심은 세계를 이해하는 것이 아니라 그것을 변화시킨다는 것이다. 아마도 이론 안에서 오직 이론을 통해서만 그것에 대해 알 수 있을 몇몇 존재자(블랙홀)가 있을 것이다. 그렇다면 우리의 증거는 로렌츠가 제공했던 것과 같다. 아마도 측정만 할 수 있고 결코 사용할 수는 없을 존재자가 있을 것이다. 실재론을 옹호하는 실험적 논의는 실험자가 연구하는 대상만이 존재한다고 말하지 않는다.

나는 이제 말하자면 블랙홀에 관한 피할 수 없는 회의를 고백해야 한다. 나는 현상에 대해 똑같이 일관성을 갖는 우주에 관한 다른 표상이 있을 수 있다고 생각하며, 그 다른 표상 안에서는 블랙홀이 배제된다. 나는 라이프니츠로부터 신비한 힘(occult powers)에 대한 확실한 반감을 이어받는다. 어떻게 그가 뉴턴의 중력을 신비한 것

이라고 반대하면서 맹렬히 비난했는지를 상기해보라. 그가 옳았음을 보여주는 데 두 세기가 걸렸다. 뉴턴의 에테르 역시 뛰어나게 신비적인 것이었다. 그것은 우리에게 많은 것을 가르쳐줬다. 맥스웰은 에테르 안에서 그의 전자기파를 연구했고 헤르츠는 전자파의 존재를 증명함으로써 그 에테르를 입증했다. 마이컬슨은 에테르와 상호작용하는 방법을 생각해냈다. 그는 그의 실험이 스톡스의 에테르 끌기(drag) 이론을 입증했다고 생각했지만, 결국 그것은 에테르로 하여금 희망을 버리게 만든 여러 가지 가운데 하나가 되었다. 나 같은 회의주의자는 약한 귀납을 갖고 있다. 오랫동안 지속되어 온 이론적 존재자는, 조작되지 않는 것으로 낙착되고, 대개 위대한 실수였던 것으로 판명난다.<sup>3</sup>

3\_ 앞에서 약간 중성 보오손이 순수하게 가설적인 존재자의 예로 이용되었다. 1983년 1월에 CERN은 540 GeV에서의 양성자-반양성자(antiproton) 붕괴에서 최초의 그러한 입자 W를 관찰했다고 발표했다.