

<양자중력과 시공간>

이필진

고등과학원 물리학부 교수

양자와 중력은 20세기 초 물리학의 혁명을 견인한 두 단어이다. 19세기말에 들어서면서 빛이 가진 에너지가 연속적이지 않고 최소 단위가 있다는 것을 실험적으로 증거들이 나타나기 시작하였고, 맥스웰이 전기력과 자기력을 통합하면서 빛의 속도가 일정하다는 사실을 발견한 사건은 모두 당시까지의 세계관과 정면으로 위배되는 패러독스들이었다. 이 두 가지 문제들은 각기, 양자역학의 도래와 상대성이론의 발견에 의하여 20년이 채 되지 짧은 기간 동안 한꺼번에 해결되었고, 이로부터 20세기 현대과학은 그 시작을 알리게 된다.

양자 역학은 그 초기에 수학적으로는 불완전한 형태로 시작하였음에도 불구하고, 수 많은 학자들에 의하여 발전을 거듭하였고, 이를 통하여 힘과 물질에 대한 궁극적인 이해를 추구할 수 있게 되었다. 한편으로는 자연계의 모든 원소들과 이들의 구조에 대한 원리적인 이해가 가능해지면서 반도체, 초전도체, 레이저, MRI 등의 수 많은 응용뿐 아니라, 현대 화학과 분자 생물학 등 새로운 연구분야를 가능하게 하였고, 다른 한편에서는 원자와 핵을 넘어 초미시계에서의 궁극적인 단위 물질, 즉 쿼크라거나 혹은 이보다도 작은 초끈과 같은 최소 단위의 물질에 대한 탐구로 이어지고 있다.

이에 비하여, 처음부터 수학적으로 완벽해 보이던 상대성 이론은, 우주의 팽창과 Big Bang 우주론, 우주 배경복사, 블랙홀의 존재 등을 알려주었음에도 불구하고, 이론가들의 눈에는 새로 풀어야 하는 난제 중의 난제로 남아 있다. 왜일까?

모든 물리현상의 근본적인 토대에는 양자이론이 있다는 것이 현대 물리학의 기본적인 가설이다. 이 양자이론은 모든 것이 파동이라고 말한다.<sup>1</sup> 파동의 가장 중요한 성질은, 연결되어 있는 모든 곳으로 퍼져 가는 것이다. 연못에 돌을 던져 큰 물결을 일으키면 연못의 모양이 아무리 구불거려도, 그 구석 구석까지 물결이 도달한다. 도달한 물결의 세기와 소요 시간이 다를 뿐이다. 파동의 다른 중요한 성질은 파동이 있는 위치는 대략적으로 이야기할 수 밖에 없다는데 있다. 물결의 높고 낮은 곳, 빠르고 느린 곳 이야기는 할 수 있지만, 물결이 정확히 어디에 있고 어디를 거쳐서 어디로 간다고 말할 수 없다. 즉 파동은 특정한 궤적을 그리며 움직일 수 없다. 또한 물결과 물결은 쉽게 더할 수 있는데, 이 때문에 물결과 물결의 파동의 진행이 서로 상쇄되거나, 합쳐지면서 마치 궤적처럼 보이는 형상을 만들기도 하지만, 예를 들어 Tsunami가 이런 현상의 대표 격인데, 이는 어디까지나 상황에 따라 생기는 근사적인 결과이지 근원적인 현상은 아니라고 한다.

미시적인 세계에서의 물질들, 즉 전자, 양성자, 중성자, 광자 등등 역시 이러한 형태로 움직여 나

간다는 것이 양자 역학의 기본 원리이다. 그런데, 같은 우주를 설명하고 있는 중력 이론에서는, 그럼에도 불구하고, 항상 입자와 입자, 천체와 입자, 천체와 천체 사이의 거리와 힘, 그리고 이들이 지나는 궤적들에 대한 이야기를 한다. 물론 이는 수 백 년간 성공적으로 쓰여온 관점으로, 이들 역학과 중력 이론이 잘못되었다기 보다는 오히려 거시적인 물체들에서는 왜 입자와 궤적의 개념이 가능해 지는지 대한 우리의 이해가 아직 모자란다고 하는 편이 옳을 것이다. 양자적인 물체들이 많이 모여 거시적인 물체를 만들어진 경우 양자역학이 어떤 현상을 만들어 내는지에 대한 보편적인 이해가 많이 부족한 편이다.

그러나, 이렇게 슬쩍 넘어가기 어려운 문제들이 몇 남는데, 그 중 지난 수 십 년 간 이론가들을 가장 괴롭힌 것은, 상대론적 중력이론, 즉 일반상대론에서 나타나는 블랙홀이라는 천체의 경우이다. 블랙홀은 별이 무한히 응축되어 만들어지는 천체이다. 그 중심으로부터 어떤 특정한 거리에 존재하는 호라이즌(horizon)이라고 하는 구면이 있고, 이 구면 내부에 들어간 어떠한 것도 그 외부로 나오지 못한다고 하여 블랙홀이라고 부른다. 우주에서 가장 빠른 빛조차도 나올 수 없으므로 검은색일 수 밖에 없다는 것이다. 호라이즌의 크기는 블랙홀이 빨아들인 전체 질량에 정비례하는데, 태양의 질량을 응축하여 블랙홀로 만들어 버리면 호라이즌의 크기는 약 3km쯤 되고, 지구의 경우 마찬가지로 하면 약 1cm정도가 된다. 실제로 관측된 블랙홀은 주로 은하들의 중심에 있는 것들이 대부분으로 이들이 가진 호라이즌의 크기는 백만km에서 십억km까지라고 한다.

그런데, 이런 블랙홀 주변에 실험실을 차리고 양자역학적인 미시세계를 들여다보면 어떤 일들이 생길까? 예를 들어 빛의 양자역학적 개념인 광자들은, 그 위치를 정확히 이야기 할 수 없으므로 호라이즌 안에 있는지 밖에 있는지가 모호해지는 상황이 있을 수 있는데, 그렇다면 이 빛은 밖으로 나갈까 아니면 빨려 들어갈까? 호라이즌이 구별하는 내부와 외부의 이분법이, 궤적과 위치의 개념이 모호해지는 양자원리와 상충되지 않을까? 더욱 이상한 사실은, 호라이즌 부근이 완전히 진공인 경우에도, 100% 양자적인 이유로 에너지가 조금씩 밖으로 나온다는 점인데, 다만 양자정보를 다 잃어버린 열에너지로만 나온다고 한다. 상대론적으로는 에너지를 잃을 수 없는 듯 보이던 블랙홀이 실제로 에너지를 잃어버리지만, 그래도 양자 정보는 내보내지 못한다는 말이다. 이러한 사실을 계산을 통해 처음으로 보인 사람이 유명한 Stephen Hawking이다.

Hawking이 여기서부터 제시한 문제는 다음과 같다. 완벽히 진공인 우주를 가정하고, 그 안 어딘가에 있는 단 하나의 별을 가정하자.<sup>ii</sup> 일반상대성 이론의 따르면 이 별의 질량이 충분히 크면 이는 곧바로 블랙홀로 응축되고 호라이즌이 생긴다. 흡수할 물체가 더 이상 주변에 없으므로, 일반상대론적으로는 더 할 이야기가 없다. 그러나 Hawking의 양자적 계산에 따르면 미미하나마 열복사 에너지가 나오고, 따라서 에너지와 질량은 결국 같은 것이라는 상대론의 대 명제에 따라 잃어버린 에너지만큼 그 질량이 조금씩 줄어든다. 충분히 오래 기다리면 이렇게 빠져 나온 총 에너지가 블랙홀의 원래 질량에 해당하는 만큼 되고, 이는 곧 블랙홀이 소멸함을 의미한다. 남는 것은 결국 양자역학적으로 빠져 나와 온 우주에 퍼져버린 열 에너지뿐인데, 이들은 양자 정보를 가지고 나오지 못하므로 블랙홀이 되기 직전 별의 처음 양자상태가 어떤 것이었는지에 대한 정보는 모두 사라지게 된다.

즉 별 → 블랙홀 → 열에너지라는 세 단계의 진화과정은, 양자 역학과 상대론을 사용하여 유추 되었음에도 불구하고 에너지와 함께 양자정보가 보존되어야 한다는 양자원리를 자체를 위배한다는 것인데, 그렇다면, 그 수학적인 토대가 만족스럽지 않았던 양자 역학을 다시 생각해 보아야 하지 않을까 하는 것이 Hawking의 관점이었다. 한세기 동안의 수 많은 실험과 응용에 의하여 검증된 양자원리를 포기하기에는 무언가 모자라 보이지만, 딱히 잘못된 부분을 찾기 힘든 것도 사실이다. 향후, Hawking의 주장은 많은 학자들과의 논쟁을 일으켰고, 현재 필자를 포함한 대부분의 학자들은 블랙홀의 개념에 무언가, 아직 알려지지 않은, 양자적인 수정이 가해져야 한다는 쪽으로 의견이 기울고 있다.

일반상대론은 기하학에 기반을 두고 있는데, 말하자면 은하가 있으면 이에 맞추어 시간과 공간이 특정한 모양을 가지게 되고, 그 중 별 하나가 그 시공간(시간+공간)의 모양에 따라 움직이는 것이, 은하의 중력에 의한 별의 궤적이라는 것이다. 비유해서 말하자면, 은하의 존재가 산과 골짜기를 만들고, 그 안에서 움직이는 별은 가장 낮은 골짜기를 따라 내려간다는 식의 개념이다. 한, 위에서 언급하였듯이 양자 원리의 기본은 파동 현상에 있다. 파동의 중요한 성질은 서로 다른 파동을 더할 수 있다는 것인데, 이를 상대론적으로 번역하자면 다른 두 가지 이상의 시공간과 시공간을 "더할 수" 있는 이론 체계가 필요하다는 이야기가 되는데, 이렇게 시공간을 양자적으로 이해하는데에는 무언가 새로운 방법론과 관점이 필요한 듯 하다.

중력이 자연계의 다른 힘들과는 무언가 크게 다르다는 의견들은 지난 한세기 동안 종종 표출되어 왔다. 중력의 양자화를 시도하다 실패한 20세기의 수많은 이론가들로부터, 최근의 중력이론을 선택한다고 할 수 있는 초끈 학자들까지 중력은 무언가 근본적으로 다른 힘이라고 공감하고 있는 듯 하다. 특히 최근 블랙홀 연구가 시발점이 되어 소위 홀로그래피라는 개념이 대두되었는데, 여기서 예를 들어 어떤 4차원의 일반상대성이론들과 어떤 3차원의 양자이론들이 실은 동일한 것이라는, 믿기 어려운 결과들을 보여주고 있다. 중력이론의 양자화가 어려운 이유가, 그리고 블랙홀 주변에서의 양자역학이 이상하게 보이는 이유가, 기술적인 문제가 아닌 원론적인 몰이해 때문이 아닐까 하는 생각을 할 수 밖에 없는 대목이다.

흔히 초끈 이론이라는 새로운 패러다임이 중력의 양자화에 성공하였다는 말들을 한다. 이는 아마도 사실일 것이다. 그러나, 여기에 만족한다면, 마치 열역학과 유체물리학을 배웠다고 오늘 오후 5시에 서울시청 상공의 기상을 알 수 있다고 기대하는 것과 비슷하다. 이제 겨우 양자원리와 중력을 한 건물 안에 집어넣는 데는 성공하였으나, 우리가 그 건물의 무한히 복잡한 평면도를 제대로 본 적은 한번도 없는 것이다. 블랙홀의 진정한 양자적 모습이 무엇인지, 양자중력의 실체가 어떤 것인지, 아직은 알지 못한다. 가장 오래된, 그리고 가장 먼저 이해된 근대물리학의 대상이, 현대의 물리학자들에게 가장 어려운 문제로 남아 있다는 사실을 뉴턴은 어떻게 생각할지 궁금하다.

---

<sup>i</sup> 흔히 양자역학을 소개할 때 파동과 입자의 양면성이라는 말에서 시작하는 것이 일반적이지만, 필자가 생각에는 이는 정확한 표현이 아니다. 물결과 같은 거시 세계에서와는 달리 파동의 크기(높이)가 미시적으로 "양자화"되어 있는, 특이한 파동이지만, 기본적으로는 양자현상의 이해는 파동의 이해로부터 시작하여야 한다.

<sup>ii</sup> 이렇게 존재하지 않는 상황을 가설적 생각해 보는 것을 생각실험(Gedanken Experiment)이라 하는데, 20세기 초 아인슈

---

타인이 효과적으로 사용했다고 알려져 있다. 이런 생각실험을 하는 것은 물리 법칙이 특정한 우리 우주의 존재에 얽매이지 않는 보편적인 것이라고 믿기 때문에 가능하다.