일반상대성이론의 100년과 그 미래

21세기 물리학의 최종이론을 향하여 - 양자중력

DOI: 10.3938/PhiT.24.013

남 순 건

Quantum Gravity – Quest for the Final Theory
in the Physics of the 21st Century

Soonkeon NAM

Although quantum mechanics and the theory of general relativity have been very successful in describing the microscopic world of atoms and subatomic particles and the macroscopic universe, respectively, the two theories clash in that they are mutually incompatible. This contradiction points to a whole new physical theory that has yet to be discovered. This new theory, which is sought after, is called quantum gravity, and in this short article, we review a brief history of the theory of quantum gravity and of what has been studied so far. We also discuss the utility of quantum gravity in solving the greatest mystery of all, the origin of the Universe and the beginning of the Big Bang.

들어가며

일반인이 가장 잘 느끼는 힘은 중력이다. 고층 건물의 창문을 열고 밖으로 나가서 잘못하면 아래로 떨어질 것이라는 것을 누구나 잘 안다. 또한, 인도 위를 걷다가 갑자기 공중으로 뜨지 않고 항상 지구 표면 근처에 붙어 있을 것이라 알고 있다. 우리뿐만 아니라 지구상의 모든 생물들의 본능 속에 중력의 이런 성질, 즉, 당기는 성질에 대한 적응이 들어있다. 그러

저자약력

남순건 교수는 서울대학교 자연과학대학 물리학과를 졸업(이학사, 1982)하고, Yale 대학교 물리학과를 졸업(Ph.D, 1987)한 후 Virginia Tech., MIT, 서울대에서 박사후연구원을 거쳐 1992년부터 지금까지 경희대학교 이과대학 물리학과 교수로 재직 중이다. 경희대학교 일반대학원장을 역임하였고, 현재 경희대학교 미래정책원장(2014-현재)을 맡고 있으며, 한국물리학회 입자물리분과위원장(2011-2014)으로 활동하였으며, 한국물리학회 실무이사장(부회장) (2015-현재)으로 봉사하고 있다. (nam@khu.ac.kr)

나 물리를 가지고 조금이라도 고민을 해 본 물리학자들에게 물어보면, 중력이 가장 이해하기 어려운 힘이라고 답을 할 것이다. 그럼 왜 중력이 어렵다고 하는지 알아보고, 특히 중력에 대한 최신 연구의 최전선인 양자중력에 대해 어떤지 간략히 살펴보자.

모든 물체가 서로 당기고 그 당기는 힘의 세기는 일정한 법칙을 따른다는 개념은 뉴턴(Newton) 이전에도 영국의 물리학자 후크(Hooke) 등에 의해 알려져 있었기는 했으나, 중력에 대한 본격적 물리이론은 1686년 출판된 뉴턴의 만유인력법칙이라 할 수 있다. 즉 뉴턴 이전에도 중력에 의한 힘은 두 물체의 거리의 제곱에 반비례한다는 것까지 알려져 있었다. 그러나 뉴턴은 이런 힘을 받는 모든 물체가 어떤 곡선을 그리며 운동하는가를 정확히 계산해 내었다. 이런 것이 가능했던 것은 이론 물리학자들이 늘상 수학에 크나큰 기여를 해왔듯이 뉴턴은 미적분이라는 수학을 만들었기 때문이다. 수백 년 동안 물리학계를 풍미한 뉴턴의 중력이론이 그 한계를 드러내는 시점은 약 100년 전쯤부터 빛의 속도가 어떤 관찰자가 채더라도 일정하다는 실험 결과가 나오면서부터였다. 우리의 상식과는 달리 빛은 다른 속도로 달리면서 그 속도를 재어도 전혀 아무런 속도의 변화가 없다는 것을 발견한 것이다. 심지어는 거의 빛의 속도로 쫓아가더라도, 빛의 속도로 멀어진다는 우리의 상식을 완전히 뛰어넘는 실험 결과가 나왔다.

이러한 실험 결과를 물리 법칙에 제대로 적용한 사람이 바로 아인슈타인(Einstein)이다. 그는 시간과 공간에 대한 개념을 완전히 새로이 해야만 이해된다고 주장한 것이다. 1905년 발표된 특수 상대성이론에서는 거리의 측정도 관찰자에 따라 달라지고, 그리고 달리는 물체의 시간은 천천히 흐른다는 상식 밖의 예측을 했다. 그리고 이런 예측이 실제로 실험적으로 완전히 검증되었다는 것이다. 특수상대론을 중력이 있는 경우까지 확장하는데, 아인슈타인은 꼬박 10년을 고군분투하여, 1915년 일반상대성이론을 완성할 수 있었다. 2015년에 탄생 100주년이 된 일반상대성이론에서는 시간과 공간은 물체 또는 에너지에 의해 휘다고 말한다. 그리고 그 휘어짐에 의해 이런 시공간 속에 운동하는 다른 물체의 궤적이 만들어진다는 것이다. 이후

에, 유명한 몇 가지 실험을 통해 일반상대론은 검증되었다. 예를 들어 1959년 하버드대학에서 파운드(Pound) 교수가 수행한 실험에서는 중력에 의해 시간이 천천히 흐르는 효과를 잴 수 있었다. 다른 실험에서는 휘어진 시공간에서 물체의 운동만이 영향을 받는 것이 아니고, 빛도 영향을 받아, 빛의 궤적이 휘게 된다는 것도 검증되었다. 즉, 중력에 의해 휘인 시공간에서의 빛은 마치 굴절된 것처럼 휘게 되는 것이 잘 입증된 것이다.

그런데 일반상대성이론은 원자 이하의 크기의 미시의 세계에서는 점점 효용가치를 잃게 된다. 일단, 원자나, 분자의 미시의 세계에서는 중력이 다른 힘에 비해 거의 무시할 만큼 미약하다. 미시세계의 언어인 20세기 초 나온 양자역학은 물체의 운동에 자연에 내재하는 불확정성이 있다는 이론이다. 미시의 세계에서 중력이 무시되지 않으려면 소위 말하는 플랑크 에너지(Planck Energy)를 그 에너지로 가지고 있는 입자가 있다면, 양자중력을 무시할 수 없게 된다. 이러한 경우에는 일반상대성이론과 양자역학을 동시에 고려해야만 한다. 그런데, 양자역학을 중력이 있는 경우에 적용할 때는 아주 큰 개념적 어려움에 봉착하게 된다. 즉, 시간과 공간에, 불확실성이 없는 것이 일반상대론이기 때문에, 불확실성이 지배하는 양자역학적으로 된 세상에서는 완전히 새로운 시공간의 개념이 필요하게 된다. 이러한 문제점은 이미 1927년 클라인(O. Klein)이 지적하였다. 당연히 이런 완전히 새로운 개념 속에서의 새로운 중력이론인 양자중력이론에 대해 당대의 최고의 학자들이 고민하기 시작하였다. 하이젠베르크, 디랙(Dirac), 파울리(Pauli), 파인만(Feynman) 등이 모두 한 번 이상씩 이 문제를 가지고 고민하였던 것이다.

1974년에는 호킹(Hawking)이 양자역학적 물리를 블랙홀에서 적용해 보았더니 매우 놀라운 사실을 발견하게 되었다. 블랙홀에서 충분히 멀리 떨어져 있는 경우에는 양자역학을 무리없이 사용할 수 있기 때문에 그 결과를 믿을 수 있다. 호킹의 계산 결과에 의하면, 모든 것을 빨아들이는 블랙홀이 더 이상 빨아들이기만 하는 것이 아니고, 물체를 내 놓기도 한다는 것을 알게 된 것이다. 블랙홀을 둘러싸고 있는 사건지평선이라는 선을 넘은 물체는 되돌아 나올 수 없다는 것이 이전의 생각이었는데, 사건지평선이 일정 온도를 가진 물체처럼 여러 가지 물체를 방출할 수 있다는 것이다. 블랙홀은 일종의 물리적 자유도를 가지고 있는 물체가 된 것이다. 호킹의 일은 양자역학과 중력을 섞는 과정에서 흥미로운 사실이 나타나는 것을 잘 보여주는 예이다. 중력이 가지는 또 다른 중요한 성질은 많은 정보가 한 차원 낮은 차원에 모여 있다는 것이다. 이를 홀로그래프 원리라 하는데, 이러한 것이 가장 극명하게 나타나는 곳이 블랙홀이다. (이에 대해서는 필자가 쓴 다음의 글을 참고하기 바란다. 김원태, 남순건, 현승준, '블랙홀과 초끈이론', 물

리학과 첨단기술 제17권 9호, 2008년).^[1] 블랙홀에 물체가 빨려 들어갈 경우 멀리 있는 외부 관찰자에게는 그 물체가 블랙홀의 사건지평선에 머물면서 시간이 무한히 천천히 흐르는 것을 관찰하게 된다. 이렇다는 것은 블랙홀로 빨려간 물체의 모든 정보가 사건 지평선에 누적된다는 것이다. 또한 학자들 간에는 중력이 아인슈타인 이론대로 기하학적으로 완전히 기술되는지 아니면 정보 이론적으로 비트(bit)로 완전히 설명가능한가 하는 논란이 있다. 필자는 중력은 기하보다는 정보가 더 근본적이라는 결론에 도달해 2012년 중력의 최대 학회인 마르셀 그로스만 학회에서 초청받아 발표한 바 있다.

양자중력의 문제는 우주의 탄생의 비밀을 밝히는 가장 중요한 언어가 되기 때문에 매우 중요하다. 시간과 공간이 어떻게 탄생하였고, 우주의 장래가 어떻게 될 것인가에 대한 결정적 증거를 주기 때문이다. 이와 관련하여, 중력을 통해서는 그 존재가 알려져 있지만, 다른 방법으로는 아직 그 정체가 무엇인지 모르고 있는 두 가지, 암흑물질과 암흑에너지가 과연 무엇인지 알아내는 것이 앞으로의 물리학에서 가장 중요한 문제가 될 것이다. 우주를 구성하는 전체의 4%만 알고 있는 현재의 물리학으로는 도저히 우주의 탄생의 비밀을 밝힐 수는 없기 때문이다. 근본적인 물리 원리를 발견하려는 물리학자들의 각축장이 되는 곳이 바로 중력 연구라 할 수 있다.

양자중력이론은 왜 필요한가?

일반상대성이론은 이제 천체물리학에서는 매일 사용되는 언어가 되어있다. 심지어 내비게이션 장치에 응용되는 아주 중요한 실용적인 것이 되어있다. 그런데 이런 일반상대성이론은 치명적인 한계가 있다. 미시세계의 물리학인 양자역학과 서로 모순인 것이다. 모순인 이론이 있을 경우 이론은 분명 새로운 이론체계가 있다는 것을 뜻한다. 우리의 보통 경험이 일어나는 세상은 우리 신체의 크기와 많은 상관이 있다. 물체의 크기가 수 미터, 물체의 무게가 수 킬로그램, 물체의 속도가 시속 수 킬로미터인 것들은 우리의 감각기관이 쉽게 해석하는 물리량이다. 그런데 물리학과에 오면 이런 물리량이 우리의 감각기관이 쉽게 알아내기 힘든 정도로 크게 달라지는 경우를 배우게 된다. 2학년 때쯤에 배우는 현대물리학에서는 속도가 매우 빠른, 빛의 속도(약 초속 30만 킬로미터)에 가깝게 운동하는 물체에 대해서 배운다. 바로 특수상대성이론이다. 이때 시간이 상대적으로 천천히 흐를 수도 있고 길이가 짧아질 수 있고 빠른 속

REFERENCES

- [1] Wontae Kim, Soonkeon Nam, Seungjoon Hyun, "Black Holes and Superstring Theory," (in Korean), Phys. High Technol. 17, 9 (2009).

도로 운동하는 질량이 있는 물체는 그 질량이 운동속도가 커짐에 따라 커지고, 한계속도인 빛의 속도에 근접할 때는 질량이 무한히 커질 수 있다는 것을 배우고 실제 계산을 해보고 나면 물리학이 너무 재미있어진다. 더 재미있는 것은 이러한 것들이 다 실험적으로 검증이 된다는 것이다. 그 다음 3학년 때 본격적으로 배우는 양자역학이란 과목에서 매우 작은 물체들(길이가 1천만분의 1 미터인 나노미터보다 작음)에 관계되는 나노의 세계에 대해 알게 된다. 특히 물체가 입자와 파동의 성질을 동시에 가지고, 물체의 위치에 불확정성이 있다는 것을 배우면서 실체가 과연 무엇인지 큰 충격에 빠지게 된다. 입자의 파동함수라는 것이 있어, 물체의 존재가 파동함수의 절대치의 제곱에 비례해서 존재할 확률이 있다는 것은 사실 쉽게 소화해내기 어려운 개념이 된다. 양자역학 후반부에 배우게 되는 파인만의 해석인 경로적분(path integral)적인 것을 배우면 더 큰 혼란에 빠지게 된다. 전자의 운동이라는 것이 가능한 모든 경로를 다 다니는 것들을 다 중첩한 것이라는 매우 묘한 이야기를 듣는다. 그런데 가장 충격적인 것은 이러한 '묘한' 물리학의 세계가 바로 우리가 살고 있는 세계에서 원자가 안정적인 상태를 유지하는 근본적인 이유고, 나노물리학의 세계는 전자공학 등을 통해 우리가 제어하면서 살고 있다는 것을 배우면 엄청난 힘을 느끼게도 된다. 모든 물리학과에서는 제공하고 있지는 않지만, 주로 4학년 때 몇몇 물리학과에서 제공되는 우주론 등에서 접하게 되는 일반상대성이론은 천체물리학과 우주의 영역에서는 중력이 다른 아닌 시공간의 굽어짐과 동일한 것이라는 것을 배우면서, 이론물리학의 진수를 맛보게 된다. 블랙홀이 왜 그런 이름이 붙었고, 빅뱅우주론을 통한 빅-히스토리의 앞부분을 배우게 되는 것이다. 물론 이때 이 과목에서 제대로 일반상대성 계산을 일부 소개한다는 전제하에서이다. 다행히 필자가 경희대학교 학생들에게는 지난 십 수 년간 거의 매년 일반상대성이론을 여러 과목에서 소개할 수 있었고 이에 매력을 느껴 대학원에 이론물리학을 전공하려 진학한 학생이 다수 있었다. 특수상대론, 양자역학, 일반상대론이 20세기 물리학 혁명의 근간을 이루었고, 현대문명을 다 열었으며, 우주에서의 우리의 위치를 자리매김한 것들이라 할 수 있다. 대학원에서 입자물리학을 전공하게 되면 가장 먼저 배우게 되는 것은 다음과 같은 물리학적 상황이다. 양자역학적인 행동을 하는 매우 작은 입자(예를 들어 전자)가 매우 빠른 속도로 (예를 들어 입자가속기에서) 운동할 경우는 어떤 행동을 하는가 하는 것이다. 즉, [특수상대성 이론+양자역학]은 어떠한가를 배우게 된다. 이를 상대론적 양자역학이라 하고 특히 전자가 만족하는 방정식인 디랙 방정식을 배운다. 그런데, 이 방정식에서는 매우 놀라운 새로운 '예측'이 있게 된다. 전자만 존재하는 것이 아니고 반드시 전자의 '반물질'에 해당하는 양전자(즉, 양의 전

기를 띠고 있는 전자와 질량은 같은 입자)가 존재해야 한다는 것이다. 그리고 이론적으로 예측되는 이런 입자가 실제로 실험적으로 존재한다는 것이다. 대 충격이 아닐 수 없다. 어떻게 순수한 이론적 계산이 새로운 존재를 예측하고, 또한 그런 존재가 실험적으로 검증될 수 있다는 말인가? 이러한 것을 실제로 순수한 호기심(즉, 특수상대성이론과 양자역학을 동시에 만족하면 어떻게하는 질문)으로 시작하여, 이를 이론적으로 정립하고(즉, 디랙 방정식을 유도해내고) 이러한 이론의 예측을 계산해보고(반물질의 존재) 이러한 존재의 검증이 있는 실험에 대해서 배우게 되면 입자물리학의 매력에 빠져서 헤어날 수 없게 된다. 물질과 반물질이 있게 되면, 이 두 가지가 만날 때는 서로 소멸해서 없어지고 빛(즉, 광자)으로 바뀌고, 또 빛이 전자와 양전자라는 물질이 될 수 있는 가능성이 열리는 것이다. 이러한 가능성, 즉 전자가 있다가 소멸했다 또 만들어지는 등을 설명할 수 있는 이론이 필요하게 되고 이렇게 입자의 개수가 바뀔 수 있는 이론이 양자장론이라 부른 것으로서 양자역학이 완성되고 수년에 걸쳐 양자장론이 완성되었고, 특히 전자와 광자들의 상호작용을 설명하는 양자전기역학이라는 이론은 인간이 가지고 있는 가장 정밀도가 높은 예측을 하고 실험적으로 그 정밀도가 검증된 이론으로 자리매김을 하였다. 양자장론은 그 후에도 꾸준히 발전하여 이제는 다른 상호작용, 즉, 쿼크들의 강한 상호작용, 뉴트리노(중성미자)의 약한 상호작용 등을 설명하는 이론으로 정립되었고, 현존하는 입자가속기에서 충돌실험에서 보게 되는 거의 모든 현상을 거의 완벽하게 설명하는 힉스입자까지 들어있는 입자물리표준모형이라는 것으로 총 정리가 된다.

앞부분에서 3가지(특수상대론, 양자역학, 일반상대론)를 이야기했었고 이 세 가지 중 두 가지를 조합하는 경우의 수의 하나씩을 따져보기 시작했다. 이런 조합은 3가지가 있으니, 나머지 2가지의 경우도 계속 살펴보자. [일반상대성이론+특수상대성이론]은 특별히 큰 노력을 하지 않더라도 저절로 해결되는 문제다. 일반상대성이론 속에 특수상대성이론이 완벽하게 포함되어 있기 때문이다. 그럼 이제 마지막의 경우 수인 [일반상대성이론+양자역학]을 생각해보자. 이러한 경우를 양자중력이라 부른다. 앞에서의 다른 두 가지의 경우처럼 과연 쉽게 해결할 수 있을까? 이 경우는 매우 작은 크기에 매우 큰 질량을 가진 물체의 물리학적 것이다. 언뜻 생각하면 그런 경우가 없을 것 같다. 그러나 사실 그렇지 않다. 우선 빛의 속도에 근접한 속도로 운동할 경우 질량이 매우 커질 수 있다. 예를 들어 LHC의 에너지인 수 TeV로 전자를 가속해서 운동시키면 그 질량이 수천만 배로 커지게 되는 것이다. 즉 에너지가 높은 영역으로 가면 작은 입자도 질량이 커진다. 그럼 이런 높은 에너지의 영역은 어떤 상황에서 나올 수 있는가? 빅뱅으로 시작한 우주

초기에 가까워질수록 더 높은 에너지의 영역이 된다. 특히 우주 초기에는 아주 짧은 시간에 우주가 급팽창하는 시기가 있어 이 광대한 우주의 공간이 만들어졌다고 현대 우주론에서는 이야기하고 있는데, 이 당시 우주에 있는 입자들의 평균에너지는 현재 인간이 만들어낸 가장 높은 에너지인 LHC에서의 에너지의 대략 1천조 배 정도 높은 에너지일 때이고, 이보다도 또 1만 배 더 높은 에너지를 가지고 있을 당시는 소위 말하는 플랑크 에너지의 영역으로 진정한 양자중력이 지배하는 우주라는 것이다. 즉, 빅뱅을 통한 우주의 기원을 제대로 밝히려려면 반드시 양자중력에 대한 이해를 해야 한다는 것이다.

또 다른 양자중력의 영역은 블랙홀이다. 중력은 다른 힘과는 다르게 당기는 힘만 있다. 그렇기 때문에 어느 수준 이상의 중력이 되면 다른 어떤 것도 버틸 수 없을 만큼 세어져서 블랙홀이 만들어지는 것이다. 이를 보다 전문적으로는 일반상대성이론에서는 특이점이 불가피하다고 수학적으로 증명할 수 있다. 이런 증명을 처음 한 사람이 펜로즈(Penrose)이고, 이를 우주 전체에 적용해서 빅뱅이 불가피함을 증명한 사람이 호킹이다. 즉, 고전적 일반상대성이론에서는 시공간의 특이점, 즉 무한대로 중력이 커지는 것이 반드시 만들어진다는 것이다. 이러한 특이점에서는 시공간이 매우 작아지기 때문에 반드시 최종적으로 양자중력이 필요하게 되는 것이다.

양자중력의 참을 수 없는 매력 포인트

올해 탄생 100주년인 위대한 일반상대성이론이 사실은 불완전한 이론이라는 것을 이제 독자들은 알게 되었을 것이다. 필자도 이러한 불완전성을 일부 해결하기 위해 지난 30년 동안 양자중력의 문제에 사로잡혔었던 것이다. 필자뿐만이 아닌 여러 이론물리학자들은 어떻게 보면 이런 참을 수 없는 논리의 모순을 해결하기 위해 끝없이 노력하는 사람들일 것이다. 과학이란 내가 할 수 있는 것을 반복적으로 하는 것이 아닌, 정말로 도전정신이 가득하여 누구도 가지 않은 길을 가는 과정이라 할 수 있는 것이다. 주말 등산객으로 지하철을 타고 인근 산을 갈 수도 있으나, 진정한 도전은 아직 아무도 오르지 못한 직벽을 올라가는 것이라 생각했던 것이다. 이런 두 가지 등산이 어떻게 같다고 할 수 있을까?

요즘 우리나라 과학연구 환경은 상당히 우스운 상태가 되어 있다. 단지 등산 몇 번 했는가로 구분하는 것이다. 지하철 타고 갔다 온 등산이 오히려 직벽에 매달려 아직 정상에 도달하지 못한 등산보다 훨씬 더 높게 평가된다는 것이다. 아직 정상에 어는 누구도 가보지 못한 등정이기 때문에, 여러 개의 등반로가 개척되어 있다. 어떤 것은 조금 더 많은 사람들이 시도하고 있으며, 다른 개척로보다 더 정상에 가까이 간 듯하다.

그러나 정상에 더 가까이 있다고 하더라도 정상에 최종적으로 도달하기 전에 어떤 난관에 부딪힐지는 어느 누구도 모르는 것이다. 그리고 정상 근처는 매우 짙은 안개에 싸여있어 어떤 방법이 최종 승자일지 모른다. 그리고 아직까지 개척되지 않은 전혀 다른 길이 될지도 모른다.

가장 오래된 양자중력이론은 기하학적인 접근을 하는 것이다. 즉, 전자기적인 상호작용의 양자장론이 활발하게 만들어지고 있던 1930년대부터 중력장론을 양자화하려는 노력이 있었다. 1926년 양자역학이 알려진 이후 1930년경부터 보른(Born), 디랙(Dirac) 등이 전자기장을 양자화하기 시작했다. 역사적으로 중력장을 양자화하려는 최초의 시도는 1930년 벨기에 물리학자인 로젠펠트(Leon Rosenfeld)에 의해서이다.^[2] 당시 27세인 로젠펠트는 파울리의 양자장론 방법을 중력장이 약한 경우에 적용하였다. 이론적으로 완성도가 떨어지기는 했지만, 최초의 시도로서 의미를 갖는다. 그는 렘톤이란 단어를 만들어낸 사람이기도 하다.

피에르츠(Fierz)와 파울리(Pauli)는 중력장이론이 스핀이 2인 장이 필요함을 그 후 알아냈고, 1934년 Blokhintsev와 Gal'perin은 중력자(graviton)란 단어를 최초로 사용했다. 1938년 하이젠베르크는 중력장의 결합상수가 전자기력의 결합상수와는 달리 물리적 차원을 가지고 있기 때문에 양자론에서 문제를 일으킬 수 있음을 지적하였다. 양자중력에 많은 기여를 한 사람은 드윗(B. DeWitt)이다. 그가 1949년 쓴 박사학위 논문의 주제가 슈윙거(Schwinger)의 양자장론적 방법을 중력장에 적용한 것이다. 또 다른 양자장론의 방법이 있는데 파인만의 경로적분 방법이다. 중력장에 이러한 방법을 처음 적용한 사람은 미스너(Misner)로서 1957년 도입하였다. 1961년에는 매우 중요한 논문이 하나 등장한다. Arnowitt, Deser, Misner이 소위 말하는 ADM 방법을 도입한 것이다. 물리에서 에너지를 조금 더 고급스럽게 해밀토니안이라 부르는데, 일반상대성이론에서의 해밀토니안을 잘 도입한 형식이론이다. 양자전기역학으로 노벨상을 받은 파인만은 1962-63년 칼텍에서 양자중력이론에 대해 강의를 하였다. 그의 관심이 이 문제에 있음을 보여주는 것이다. 이 당시의 양자중력이론 강의록으로는 1963년의 드윗의 Les Houches 강의록이 유명하다. 또한 1975년 벨트만(Veltman)의 Les Houches 강의록도 그의 관심사를 보여준다고 할 수 있다. 자신의 제자인 토프트(t Hooft)와 같이 노벨상을 받았던 벨트만도 사실은 양자중력에 매료되어 있었던 것이다.

1970년대는 양자장론의 황금기다. 양-밀즈(Yang-Mills) 게이

REFERENCES

- [2] Léon Rosenfeld, Über die Gravitationswirkungen des Lichtes, Zeitschrift für Physik **65**, 589 (1930).

지이론이 재규격화 가능성이 증명되었고, 이를 활용한 약한 상호작용의 이론에서 힉스(Higgs)의 아이디어가 들어갔고, 지난 40년에 걸쳐서 일련의 입자의 발견으로 양자장론은 그 위치를 확고히 할 수 있었다. (재규격화라 함은 무한대의 값이 나오는 양자장론에서 유한한 측정 가능값을 잘 뽑아낼 수 있는 방법이라 보면 된다. 무한대의 값이 나온 것을 잘 처리하면 되는데, 이러한 처리가 유한번만 있으면 재규격화가 가능해질 수도 있다.) 이러한 게이지이론도 사실은 양자중력 문제로 가기 전에 다뤄볼 수 있는 비교적 쉬운 문제로서 여겨졌고, 1970년대 초 이전에는 이런 이론적 효용성 때문에 연구되는 경우가 많았고, 실제 실험과 직접 연관되어져 연구되지는 않았다는 것이 현재 순수 이론 연구에 시사하는 바가 크다.

양자장론적 방법으로 접근하는 양자중력이론은 기존의 좋은 양자장론에서 볼 수 있는 재규격화 가능성이 없다. 이는 무엇을 의미하는가 하면, 무한대의 값이 무한히 많이 나오는 이론이 되기 때문에 무한히 많은 처리를 해야 한다는 것이고, 실험적으로 의미 있는 유한한 물리량을 계산해낼 수 있는 이론이 될 수 없다는 것이다. 이러한 무한대의 값을 잘 처리하는 방법으로는 새로운 물리자유도를 도입하는 방법이 있다. 가장 유명한 것은 초대칭성을 도입해서 초대칭 짝입자가 만들어내는 반대부호의 무한대 값을 통해 무한대 값을 상쇄하는 방법이 있다. 일반상대성이론의 초대칭적 확장인 초중력이론이 이러한 성질을 가질지 모른다는 희망이 80년대 초반까지 있었으나, 이러한 꿈은 실제로 계산해보니 이루어질 수 없다는 것이 증명됨으로 무참히 깨졌다. 이와는 완전히 다른 새로운 방법이 필요하게 되었다.

가장 기본적인, 그러나 가장 어려운 질문들

시간이 무엇인가? 공간이란 무엇인가? 실제(존재)란 무엇인가? 이러한 가장 단순한 질문이면서 가장 심오하고 어려운 질문에 대한 대답을 과연 물리학에서 할 수 있을까? 이런 근본적인 문제에 대한 해결이 오는 것은 과학과 철학에서 가장 큰 변혁을 가져올 것이라는 것에는 의심의 여지가 없다. 이런 문제가 어려운 것은 다른 모든 것의 배경으로 당연시되는 것이다. 그럼 시간이 과연 무엇인가를 알기 위해서는 시간의 시작과 끝이 과연 어떠한 것인가를 생각해 보면 일부 해결될 수도 있을 것이다. 그런데 이런 시간의 시작과 끝에 대해서 이야기하기 시작하면, 우주의 시작과 끝에 대해서 생각하게 되고, 결국은 존재가 무엇인가 하는 근원적인 질문에 자연스럽게 도달하게 되는 것이다. 이런 어려운 질문에 대해서 이미 오랜 동안 당대의 최고 석학들이 문제를 고민해왔다. 그러나 쉽게 해결되지 않고 있는데, 이러한 시도에 어떤 한계가 있었는지 정확히

알고 있어야 문제를 정확히 해결할 수 있을 것이다. 이러한 문제에 대한 집단적 지성이 여러 형태의 학파를 만들어 냈다. 그 중에 가장 큰 추종자를 가지고 있는 것이 끈이론 학파다. 그 외에도 고리-중력이론이라든지 다른 방법들이 연구되고 있으나, 끈이론 학파에 비해서는 훨씬 더 적은 연구자들이 연구하고 있는 것이 현실이다. 고리-중력이론이란 시공간 배경에 무관한 비섭동적인 양자중력을 적어보려는 노력이라 보면 된다.

이외에도 양자론 자체 또는 상대론 자체를 근본적으로 다시 생각하고 이러한 근본적인 변화에 따라 새로운 양자중력이 나올 수 있다고 생각하는 사람들도 있기는 하나, 더욱 더 적은 사람들이 연구하고 있으며, 진보도 훨씬 더디다고 할 수 있다. 필자는 이러한 세 번째 방법에 대해서는 매우 부정적인 생각을 가지고 있다. (물론 세계 최고의 지성 중 몇 명, 예를 들어 펜로즈 등이 이런 방법을 고민하고 있는 것은 사실임에도 불구하고) 그 이유는 양자론 자체의 매우 신비로운 면이 있는 것에 몰입하여 그 근원을 생각하는 것이 과연 중력이 가지고 있는 묘한 면, 즉, 끝없이 그 힘이 세어질 수 있다는 것 때문에 생기는 문제를 해결할 수는 없다고 생각하기 때문이다. 즉, 시간과 공간이라는 배경 자체를 만들어 내는 것은 중력을 넣지 않은 양자론 내에서는 찾을 수 없다고 생각한다.

다시 양자중력이론의 양자장론적 접근방법부터 되돌아 살펴보자. 앞서 이야기했듯이 본격적인 시도는 양자장론이 여러 기본 작용에 성공적으로 적용되기 시작한 1950, 60년대부터 있었다. 어쩌면 중력적 상호작용의 양자화도 하는 것도 당연한 일일 것이다. 전자기적인 상호작용은 스핀이 1인 장(field)이 있다. 스핀이 1인 것은 두 방향으로 빛이 편광되는 것과 밀접한 관계가 있다. 우리가 편광판을 가지고 90도 돌릴 때마다 선형으로 편광된 빛은 완전히 투과되었다 전혀 되지 않았다 하는 것을 반복하는 것을 알고 있는데, 이와 밀접한 관계가 있다. 전자기장을 양자화하면 불연속적인 빛의 알갱이들인 광자(photon)가 된다. 전자도 양자장으로 만들 수 있다. 전자의 양자역학을 특수 상대성이론과 부합되게 만든 것을 디랙방정식이라고 하는데, 디랙 장을 양자화할 수 있다는 것이다. 전자와 광자는 상호작용을 할 수 있다. 전자기장을 양자화한 이론을 양자전기역학(quantum electrodynamics)이라고 부른다. 양자전자기학은 전자와 광자의 장이 상호작용하는 경우 이를 같이 양자화한 것이다. 이러한 양자장론의 성과는 대단하다. 입자물리학의 거의 대부분을 설명하는 표준모형으로서 거의 대부분의 입자물리현상을 설명하고 있으며, 다체계를 잘 설명하는 물리학의 표준 언어로서 자리매김을 하였다. 이러한 양자장론도 중력을 만나는 순간 완전히 백기를 든다. 이런 한계를 극복하기 위해 등장한 이론이 끈이론이다. 끈이론에서는 앞서 이야기한 재규격화를 위한 무한대의 처리를 할 필요가 없어진다. 끈이론

에서는 양자장론에 비해 이미 무한대로 많은 물리적 자유도를 도입하게 된다. 그 이유는 끈이 진동할 수 있는 자유도는 점 하나에 비해서 무한히 많기 때문이다. 끈이론은 이러저러한 이유로 양자장론에서의 재규격화 같은 문제를 겪지 않아도 된다. 끈이론은 이미 필자가 다른 글들^[3,4](예를 들어 남순건, “스트링 코스모스”, 지호 2007; 남순건, ‘상대성이론과 양자역학을 묶는 끈-초끈으로 양자중력 만들기’, 과학동아 2013년 7월호)을 참고 바란다.

끈이론은 완전히 다른 방식으로 접근한다. 양자장론에서는 점입자들로 물질이 구성되어 있고, 이러한 입자들이 광자와 같은 힘의 매개하는 입자를 주고받음으로써 서로 상호작용하는 것으로 설명해 왔으나, 끈이론에서는 점이 아닌 선과 같은 끈들로 모든 것이 이루어져 있고, 이러한 끈이 붙었다 떨어졌다 하는 것이 상호작용이라는 것이다. 그리고 양자장론에서는 여러 다른 기본입자들을 도입해야 했으나 끈이론에서는 여러 다른 입자들이 사실은 끈이 어떻게 진동하는가에 따라 달리 나타나는 것으로 보는 것이다. 따라서 끈이론은 자연스레 모든 입자들과 상호작용을 통일하게 되는 것이다. 특히 재미있는 것은 스핀이 2인 장이 자연스레 끈이론에서 등장하고, 이 스핀 2인 장이 바로 중력이 되기 때문에 끈이론은 일반상대성이론을 포함하고 있는 것이다. 물론 전자기력도 포함하고 있기 때문에 아인슈타인이 평생 추구했던 통일장이론이 바로 끈이론인 것이다.

끈이론은 4차원의 시공간에서는 수학적으로 모순이기 때문에 10차원의 시공간을 필요로 하게 되고, 이러한 여분의 차원(즉, 4차원 시공간보다 많은 나머지 6개의 차원)의 존재와 이로 인해 일어날 수 있는 여러 새로운 물리현상의 이론적인 규명이 끈이론 연구에 많은 부분을 차지하게 된다. 끈이론과 우주의 여분의 차원에 대해서는 다음의 글을 참고하기 바란다.^[5](남순건, ‘우주는 몇 차원일까?’ 과학동아 2013년 7월호).

끈이론은 매우 재미나는 현상을 가지고 있다. 이는 양면성이라고 불리는 것이다. 이중에서 T-양면성이라 불리는 것이 있는데 이는 다음과 같은 상황을 생각해 보면 나타나는 현상이다. 끈을 시공간에 담아서 점점 시공간을 매우 작게 만든다고 생각해 보자. 그러면 끈이론이 가지고 있는 재미나는 수학적 성질은 이러한 상황이 매우 큰 시공간에 들어있는 끈이론과 동일하다는 것이다. 즉, 시공간에서는 최소의 길이가 있어서, 그 이상으로는 더 작게 만든다는 것이 의미가 없다는 것이다. 이러한 T-양면성은 닫혀진 끈의 경우이고, 만약에 양쪽이 터져 있는 끈, 즉 열려져 있는 끈을 점점 더 작은 공간에 집어넣으면 이제는 끈이 아닌 D-brane이라 불리는 막이 등장하게 된다. 즉, 끈이론에서는 1차원적인 끈만 중요한 것이 아니고, 그 이상의 차원의 물체들도 자연스레 같이 등장한다. 이는 마치 하

나의 교향곡을 완성하기 위해서는 바이올린같은 현악기뿐만 아니라 드럼과 같은 타악기, 목관악기, 금관악기들이 다 필요한 것에 비유할 수 있다. 이렇듯 양자중력에 대한 많은 발전은 끈이론에서 왔다. 자연의 궁극적인 구성은 끈과 같은 것이고 끈의 진동에서 모든 기본입자들이 나오고, 끈이 붙었다 떨어졌다 하는 과정에서 기본입자들 간의 힘이 나온다는 것이다. 여기서 매우 놀라운 것은 끈이론에서는 에너지가 낮은 경우에는 아인슈타인의 일반상대론이 저절로 나온다는 것이다. 끈이론의 시공간은 매우 퍼지(fuzzy)해지게 된다. 그리고 우리가 익숙해 있는 3차원 공간과 한 방향의 시간 외에도 몇 개의 여분의 차원이 더 존재한다고 ‘예측’한다. 끈이론에서의 중력은 에너지가 높아지면, 일반상대론과는 전혀 다른 이론이 되어버린다. 이러한 과정에서 이전에 아인슈타인의 중력이론이 가지고 있었던 양자역학과의 모순점이 해결되는 것이다. 물론 아직까지는 끈이론을 실험적으로 검증하지 못하였다. 그리고 가까운 장래에도 그리 쉽게 검증할 수는 없을 것이다. 그러나 끈이론은 이론적인 ‘검증’을 거쳤다고 할 수 있다. 특히 블랙홀이 가지는 자유도와 베켄슈타인이 말했던 엔트로피에 대해 결정적인 단초를 제공하였다. 끈이론의 복잡한 계산을 통해 구체적으로 이런 자유도를 정확히 계산할 수 있었다. 하버드 대학교의 스트로민저(Strominger)와 바파(Vafa)의 1996년의 업적이었다. 최근 영화 ‘인터스텔라’에서 마지막에 아버지가 보내준 힌트로 인류를 구원해낼 수 있는 계산을 해내는데 칠판에 적혀있던 수식이 끈이론 교과서에 나오는 수식이었다. 최근 들어서 끈이론 연구는 새로운 국면에 들어갔는데, 최근에는 끈이론에서의 방법론이 전혀 다른 영역에서의 물리문제를 쉽게 푸는 도구로 쓰는 추세가 있다. 이러한 강력한 방법을 응집물질계의 비섭동 현상에 응용해보려는 시도도 많이 있다.

양자중력의 현상으로 가장 유명한 것은 앞서 간단히 설명했던 호킹복사다. 블랙홀은 일반상대성이론에 의하면 모든 것을 빨아들이기만 한다. 즉, 블랙홀은 점점 커지기만 한다. 심지어는 빛마저도 빠져 나올 수 없어, 그 이름값을 하는 것이다. 그런데, 양자중력이론이 아직 없지만, 기존의 양자이론인 양자장론을 비교적 약한 중력이 있는 곳에서 적용할 수 있다. 약간 굽어진 시공간에서의 양자장론은 어느 정도 믿을 만하기 때문이다. 이에 의하면 블랙홀은 마치 흑체복사를 하는 물체로서 유한한 온도를 가지고, 그 온도와 맞는 복사를 하고, 이 복사

REFERENCES

- [3] Soonkeon Nam, String Cosmos, (in Korean) (Jiho, 2007).
- [4] *idem*, “Strings that bind together theory of relativity and quantum mechanics,” (in Korean), Science Donga, July (2013).
- [5] *idem*, “What is the dimension of the universe?” (in Korean), *ibid*.

에 의해 점점 질량이 주는 증발현상이 있다는 것이다. 블랙홀은 그 온도가 블랙홀 질량에 반비례한다. 그렇다면, 증발을 하면서 점점 질량이 감소하게 되면 그 온도가 점점 높아지고, 끝에 가서는 질량이 거의 없어질 때는 온도는 거의 무한대가 된다. 여기에 양자중력이론이 필요하게 된다. 블랙홀의 마지막이 어떤 것인가 하는 것이다. 이러한 호킹의 블랙홀 증발에 관한 연구를 촉발시킨 그 이전의 연구가 있었으니, 이는 베켄슈타인의 블랙홀 엔트로피에 관한 연구였다. 1970년대 초에 베켄슈타인(Bekenstein)은 블랙홀이 열역학적인 양인 엔트로피를 가지고 있다고 해석해야지만, 블랙홀이 존재하는 우주에서의 열역학 제2법칙이 깨지지 않고 성립함을 보였다. 이러한 블랙홀이 엔트로피를 가지기 위해서는 유한한 온도가 있어야 하고, 이러한 온도를 제공해 주는 것이 바로 호킹복사인 것이다. 필자는 지난 7-8년간 다양한 블랙홀에서의 열역학의 문제에 몰입해 왔고, 이는 바로 양자중력을 다양한 방법으로 시험해 볼 수 있는 문제이기 때문이었다. 양자중력의 또 다른 검증은 어쩌면 천체물리학에서 올 수 있다. 빛의 속도는 일정하다는 것은 너무나도 잘 알려져 있다. 그런데, 어쩌면, 양자중력적 효과

를 잘 생각하면, 빛의 속도로 일정하지 않고, 빛의 에너지에 따라 달라질 수 있을지도 모른다. 이러한 가능성에 대해 이미 필자와 이태리의 학자와 공동 연구한 결과가 있었는데, 이러한 가능성에 대해 아직도 강한 감마선을 방출하는 천체에서 오는 감마선의 에너지에 따른 도착 시간의 미미한 차이로부터 양자중력의 효과를 검증하려는 노력이 현재도 진행 중이다.

또 다른 중요한 문제는 우주의 근원에 대한 문제이다. 특히 빅뱅의 근원, 우주의 시작점에 대한 문제는 양자중력이론의 고유 영역이다. 어쩌면, 우주배경복사의 데이터에 잘 숨어져 있는지도 모른다. 그런데, 아직도 해결해야 하는 것이 너무 많이 남아있는 이 문제에 대해서는 지면의 제한이 있는 이번 글에서는 다루지 않겠다. 다만, 우주론의 역사에 대한 필자의 짧은 다른 글^[6](남순건, ‘우주 속의 인간, 인간 속의 우주’, 지식의 지평 17호, 2014년)에서 좀 더 접하기를 바란다.

REFERENCES

- [6] *idem*, "Human in the Universe and the Universe in Human" (in Korean), *Orbis Sapientiae* **17**, 122-135 (2014).