일반상대성이론의 100년과 그 미래

일반상대론의 탄생과 발전

DOI: 10.3938/PhiT.24.008

김 성 원

The Birth of the Theory of General Relativity

Sung-Won KIM

In this article, the historic background for the birth of the theory of general relativity (GR) is described. GR was born as Einstein's gravitation theory in accord with his special relativity. The experimental evidence for GR, as well as future prospects with more general ideas, is briefly introduced. Finally the article leads to the question of the philosophical and the scientific effects of GR on human culture.

도 입

2015년은 참으로 뜻 깊은 해이다. 바로 아인슈타인이 일반 상대론을 발표한지 100년째가 되는 해로서 지난 100년의 업적을 돌아보고 앞으로의 새로운 100년을 조망해보는 해이다. 올해 한 해 동안 전 세계적으로 많은 기념행사와 학술대회를 통하여 학문적으로나 인간 사고의 변혁을 가져온 문명사적으로 의의를 기릴 수 있다.

아인슈타인은 뉴턴의 운동법칙과 전자기이론이 상호 조정이 어려워 이를 일반화 시키고자 새로운 이론을 만들었는데 그 때가 바로 1905년이였다. 그는 “Zur Elektrodynamik bewegter Körper(움직이는 물체의 전기동역학에 대하여)”라는 논문을 발표하였으며 이것이 물리학적으로 큰 족적을 남긴 특수 상대성이론이다. 그러나 이 특수 상대론을 뉴턴의 중력이론과 동시 적용

이 가능하냐는 질문에는 답하기 어려웠다. 왜냐하면 뉴턴의 중력이론은 두 물체 사이에 힘의 작용이 동시라는 개념 위에서 적용되어야 하므로, 특수상대론에서의 국소성, 즉 적어도 빛의 속도 내에서 힘이 작용되어야 하는 원칙에 위배되었기 때문이었다. 그에게는 중력이론에 대한 새로운 개념이 필요함이 절실했으며 이를 위한 각고의 노력이 일반상대론으로 꽃피우게 되었다.

일반상대론의 태동

아인슈타인은 1907년부터 1915년 사이에 중력에 대한 기본이론을 정립하기 위하여 많은 노력을 했다. 이때에는 단순한 사고 실험을 통해서 이해하도록 애썼다. 그 실험은 충분히 중력이론의 기하학이론을 도출하는 것으로 자유낙하 관측자를 포함하는 사고 실험이었다.

1914년에는 아인슈타인은 개인적으로 부인인 밀레바와 별거하였고 한편으로는 베를린 대학 교수자리를 약속 받았다. 밖으로는 제1차 대전이 시작되었고 그는 반전을 나타내는 운동인 “Manifesto to Europeans”에 사인한 93인의 과학자 중 한 명이 되기도 했다. 그로서는 상당히 힘들었던 1년이었던 것이다.

드디어 1915년이 밝아왔다. 그는 꾸준히 중력에 관한 연구를 계속하면서 그 결과를 여러 차례 논문으로 발표했다. 1915년 11월에 아인슈타인 방정식을 완성하여 “프러시안 아카데미 오브 사이언스”에서 4번에 걸쳐 발표하였다. 첫 번째 논문은 “Grundgedanken der allgemeinen Relativitätstheorie und Anwendung dieser Theorie in der Astronomie(일반상대론의 기본 생각과 천문학에의 적용)”이라는 제목으로 게제[Preussische Akademie der Wissenschaften, Sitzungsberichte, 1915(part 1), 315]되었고, 두 번째 논문은 제목이 “Zur allgemeinen Relativitätstheorie(일반상대론에 대하여)”로서 게제[Preussische Akademie der Wissenschaften, Sitzungsberichte, 1915(part 2), 778-786, 799-801]되었다. 4개 논문 중의 2개는 최종적으로 일반상대론의 중력장 방정식을 유도하는 것이었다. 첫 논문에서 아인슈타인은 근본적인 오개념을 수정하였고 끝내려고 했다. 그러나 두 번째 논문에서도 심각한 실수가 있었다.

저자약력

김성원 교수는 서울대학교 자연대 물리학과에서 학사(1978), KAIST에서 천체물리로 석사(1980), 박사(1983) 학위를 취득하였으며 미국 Caltech에서 Post-Doc. 과정을 거쳤다. 1985년부터 현재까지 이화여자대학교 과학교육과 교수로 재직 중이다. 교무처장, 교육대학원장, 대학원장을 역임하였다. 한국물리학회에서는 천체물리분과위원장, 교육과정특위위원장, 교육위원회 위원장, 올림피아드 위원장, 이사 등으로 봉사하였다. 현재 이화여자대학교 사범대학장을 맡고 있다. (sungwon@ewha.ac.kr)

Fig. 1. The first page of the draft “Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie” for the submission in 1916.

1915년의 일반상대론에 관한 세 번째 논문은 제목이 “Erklärung der Perihelbewegung des Merkur aus der allgemeinen Relativitätstheorie(일반상대론에서 설명하는 수성의 근일점 운동)”으로 게재[Preussische Akademie der Wissenschaften, Sitzungsberichte, 1915 (part 2), 831-839]되었다. 이 논문은 1859년 이래 천문학자들을 골치 아프게 했던 수성의 비정상적인 세차운동을 아인슈타인이 일반상대론으로 해결해준다고 보여준 아주 중요한 논문이다. 이 논문에는 중요한 계산법인 post-Newtonian 전개법도 소개되어 있다. 아인슈타인은 처음으로 중력에 의해 빛이 휘어짐도 맞게 계산했다. 1915년의 일반상대론에 대한 논문 시리즈 중 마지막 논문은 “Feldgleichungen der Gravitation(중력장 방정식)”의 제목을 가지고 게재[Preussische Akademie der Wissenschaften, Sitzungsberichte, 1915 (part 2), 844-847]되었다. 여기에서 그는 일반상대론을 정의하였고 최종적으로 중력장 방정식을 알아냈음을 밝히고 있다. 이것을 기초로 하여 이 논문에서 추가사항들을 유도하고 있다.

1916년에는 지금까지 발표한 일반상대론에 대한 내용을 총정리하여 “Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie (일반상대론의 기초)”라는 제목으로 게재[Annalen der Physik (ser. 4), 49, 769-822]하였다. 그림 1에는 이 논문을 위하여 아

Fig. 2. Cover and the first page of the journal published in 1916.

인슈타인이 쓴 친필 원고가 있으며 그림 2는 그 논문이 게재된 학술지 표지와 논문의 첫째 페이지가 있다. 그래서 이 논문을 근거로 어떤 사람들은 1916년이 일반상대론이 발표된 해라고 하지만, 앞에서 언급한 것처럼 많은 시행착오 끝에 여러 시리즈의 논문을 발표하여 중력을 개념화하고 이론의 정립과 함께 최종적으로 중력 방정식을 발표하였기에 1915년을 일반상대론이 발표된 해라고 하는 것이 과학사적인 의미에서 더 적절하다고 할 수 있다. 그해에 그는 독일 물리학회 회장에 피선된다.

1916년 이후에도 그는 일반상대론을 확장하거나 좀 더 이론적인 근거를 찾기 위해 중력과 양자론에 대한 연구를 계속 수행하였다. 1917년에는 중력방정식을 이용하여 우주론에 대한 첫 논문을 작성하였다. 그런데 방정식을 풀어 역동하는 우주 모형에 대한 풀이를 얻게 되자 그는 당황하였고 이를 피하는 방법을 찾는데 역점을 다했다. 팽창하는 우주를 붙들기 위해서 무엇인지 반 중력의 효과를 볼 수 있는 소위 중력상수를 슬그머니 넣어서 중력 방정식을 수정하여 정적인 우주가 되도록 하였다. 그러나 허블의 관측 결과를 포함한 여러 증거들과 프리드만, 로버트슨, 워커, 르메이트르 등의 이론적인 연구 결과들이 속속 우주가 팽창하고 있음을 뒷받침하자 그는 자신의 잘못을 시인하고 우주상수 항을 넣은 것을 ‘내 생애 가장 큰 바보 짓’이라 하면서 크게 후회하였다. 그런데 아이러니하게도 우주상수 해프닝이 있는 지 수십 년이 지난 1980년대에 다시금 우주상수 리콜사태가 벌어졌다. 우주 빅뱅 직후 우주가 급격하게 팽창해야 하는 인플레이션 시기가 필요하게 되자 많은 학자들은 이를 위해 다시 우주 상수를 도입하고 이

항을 지수함수적으로 우주의 팽창을 불러오는 아주 중요한 요인으로 발탁하였다. 게다가 바로 그 우주상수를 ‘아인슈타인이 발명한 최고의 실책’이라 칭송하기까지 하였다. 최근에는 우주가 계속 가속 팽창하는 증거가 속출하자 천체물리학자들은 그 원인으로 암흑에너지라는 모호한 표현으로 제시하고 있는데 그 후보 중의 하나로 다시 우주상수를 제시하는 학자들도 있는 상황이니 참으로 세상일은 아무도 모를 일인가 보다.

일반상대론의 검증

뉴턴의 중력이론은 거의 완전한 공 모양의 별 주위로 행성들이 타원 궤도로 움직임을 말해준다. 아인슈타인의 이론은 좀 더 복잡한 곡선을 예측한다. 행성은 겉으로 보기에는 타원을 따라 움직이는 것처럼 행동한다. 그러나 이와 동시에 그 타원은 별 주위를 돌고 있다. 이러한 차이가 수성의 궤도에서 나타난 비정상 세차운동이다. 물론 이 차이는 일반상대론으로 충분히 설명이 되고 있음은 앞에서 언급한 바 있고 이것이 일반상대론의 정당성을 부여하는 이유 중의 하나이다.

또 다른 증거로 일반상대론에 의하면 빛은 중력장을 지날 때 직선을 따라 움직이지 않는다. 대신 무거운 물체가 있을 때 휘어진다. 특별히 빛이 태양 부근을 지날 때 하늘에서 별의 위치에서 1.75각초 정도 휘어진다. 이는 뉴턴의 이론으로는 절대로 설명할 수 없는 현상이고 일반상대론으로만 설명이 가능했다. 이는 영국 천체물리학자인 에딩턴에 의해 1919년 서 아프리카에서 측정에 성공하였다. 별의 위치가 중간에 태양이 있을 때와 없을 때 달라짐을 보일 수 있어야 하는데 바로 일식이 있던 시점에 측정에 성공하였다. 당시 전쟁 중에 서로 적대적인 국가에 속하고 있었지만 에딩턴은 아인슈타인이 맞았음을 공식적으로 뒷받침해준 셈이 되었다. 에딩턴의 결과는 아주 정밀하지는 않았다. 혹자는 그 기술이 실제로는 그 차이를 측정하기 미흡했지만 아인슈타인을 도와주기 위하여 일반상대론이 맞았다고 발표하지 않았는지 의문을 갖기도 한다. 이후 이와 관련된 많은 관측 결과들이 모두 아인슈타인을 뒷받침하기에 조금도 손색이 없었다.

그리고 중력에 의해서도 빛의 적색편이가 생기는데 이는 1959년 Pound and Rebka에 의해 처음 측정되었다. 이후 천문학적인 측정이 이루어지면서 정밀한 값으로 일반상대론을 뒷받침하고 있으며 이 결과는 현재 GPS 위성에서 지상과 시각을 조정하는데 적용하고 있다.

일반상대론의 미래 연구

아인슈타인의 일반상대론이 나온 지 100년이나 지났다. 그 이론 자체는 큰 문제가 없기에 지금도 여러 물리적 현상을 설

명하기 위하여 계속 적용되고 있다. 한편으로는 조금 더 복잡하거나 일반적인 경우를 위하여 많은 변화와 시도가 있었고 지금도 현재 진행 중이다. 곡률 외에 토손까지 고려하는 Einstein-Cartan 이론, 중력상수가 상수가 아닌 경우까지 확대한 Brans-Dicke 이론 등은 일반적인 이론이다. 최근 Horava 이론도 거기에 한몫하고 있다.

통일장이론도 일반상대론을 확장시키는 시도 중 하나이다. 통일장이론으로서 일반상대론과 양자론을 결합한 양자중력이론, 즉 일반상대론의 양자 버전을 이루기 위하여 끈이론이나 루프 양자중력이론 등 여러 후보가 있지만 현재까지 일관적이고 완전한 이론은 아직 나타나고 있지는 않다. 낙관론자는 2050년까지는 통일장이론이 나오게 되지 않을까 조심스럽게 추측해보지만 정말 가능할지 아무도 모를 일이다.

또 일반상대론과 관련하여 미래를 조망하게 되는 다른 측면에서는 우주와 천체에 관련된 것들이다. 특히 우주의 초기와 관련된 빅뱅 부근의 시공간, 특이점, 블랙홀의 내부, 암흑물질과 암흑에너지 등의 문제들은 일반상대론만으로는 풀 수 없기에 계속 좋은 관측 결과도 있어야 하며 일반상대론으로 해석이 안된다면 이를 해결하기 위한 이론적인 양자 점프가 필요하다. 일반상대론을 뛰어넘는 무엇이 있든지 아니면 다른 이론과 결합한 융합적인 이론이 도래해야 할지 모른다. 또 한편에서는 일반상대론 학자들은 중력파를 검출할 수 있기를 학수고대하고 있다. 중력파 검출은 일반상대론의 정당성을 뒷받침하는 또 하나의 인류의 큰 업적이 될 것이다. 현재까지 전 세계에서 많은 학자들의 노력으로 그 측정 가능성이 점차 높아지고 있지만 과연 언제 중력파 검출 성공에 대한 시그널이 우리에게 전달될지 모를 일이다.

맺으며

다음은 곰곰이 생각하는 과제를 남기며 이 글을 맺겠다.

1. 아인슈타인은 그저 하늘에서 뚝 떨어진 것을 주위 답아 중력방정식을 만들어 낸 것이 아니고 끊임없이 부단하고 치열한 노력으로 업적을 이룬 것이다.
2. 아인슈타인이 감히 시공간이 굽어짐을 제시하고 시공간의 동적인 역학을 고려하였다는 것은 기존의 생각을 뛰어넘는 일반상대론에 대한 통찰력을 가지고 있었다.
3. 이러한 통찰력은 바로 그가 던진 말에서 나온다.

“Imagination is more important than knowledge. For knowledge is limited to all we now know and understand, while imagination embraces the entire world, and all there ever will be to know and understand.”