

일반상대성이론과 중력렌즈

DOI: 10.3938/PhiT.24.010

박 명 구

General Relativity and Gravitational Lenses

Myeong-Gu PARK

The bending of light by Sun's gravity was the most dramatic supporting evidence for general relativity. Bending by gravity makes any massive astronomical object act as a gravitational lens. Quasars can be lensed into many images by foreground galaxies and galaxies into luminous arcs by clusters of galaxies. Such gravitational lenses provide valuable information on galaxies and cosmology. Microlensing by stars makes stars brighten through magnification. Galaxies can be weakly lensed and deformed by clusters. Microlensing and weak lensing enable us to estimate the amount of dark matter in galaxies and clusters of galaxies. A three-dimensional map of the mass distribution can even be constructed from weakly-lensed images of galaxies. Gravitational lensing predicted by general relativity has appeared in diverse forms and has become an invaluable astrophysical tool in the understanding of the universe.

지금부터 딱 100년 전인 1915년 발표된 일반상대성이론은 과학의 혁명적 변화를 가져오는 위대한 과학 이론의 전형이라 할 수 있다. 기존 이론이 성립하는 범위에서는 기존 이론과 같 아이지만 기존 이론으로는 설명할 수 없었던 현상을 정확하게 설명했으며 나아가 기존 이론과 비교 검증할 수 있는 예측을 가능하게 하였다. 천문학자들이 밝혀낸 100년 당 43" 크기의 수성의 근일점 이동은 기존 Newton 역학에서는 쉽게 설명할 수 없었지만 일반상대성이론에서는 자연스럽게 설명되었다. 하

저자약력

박명구 교수는 1988년 Princeton 대학교에서 천체물리학 박사를 취득하고 Illinois 대학교 연구원을 거쳐 1990년부터 현재까지 경북대학교 천문대기 과학과에 재직하고 있다. 중력렌즈, 블랙홀 부차, 상대론적 광유체역학 등 상대성이론과 관련된 천체물리학 연구를 하고 있다. (mgp@knu.ac.kr)

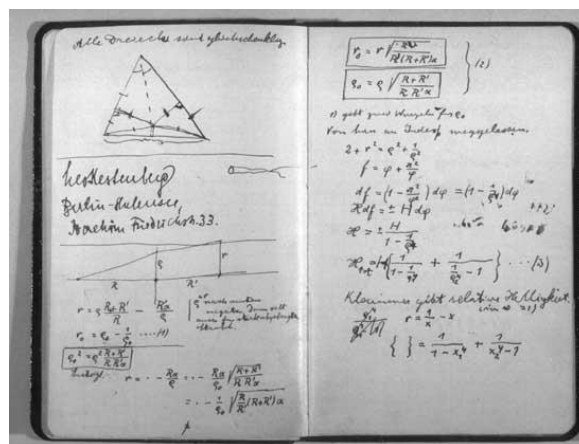


Fig. 1. Einstein's 1912 notebook with gravitational lensing calculation (Einstein Archives).

지만 Newton 역학과 일반상대성이론의 차이를 극적으로 보여 준 것은 바로 빛의 꺾임이었다.

Newton 역학에서는 원칙적으로 빛의 경로가 중력에 의해 어떻게 변하는지를 판단하기 힘들다. 빛이 중력에 의해 끌리는 지 확인되지 않았기 때문이다. 그러나 빛도 일반적인 물질과 같이 행동한다고 가정하면 Newton 역학에서도 빛의 꺾임을 계산할 수 있는데 태양의 가장자리를 지나는 빛의 경우 0.87" 인 것으로 계산된다. 한편 Einstein은 일반상대성이론이 완전한 장방정식 형태로 유도되기 4년 전이었던 1911년 이미 등가성원리에 기초하여 중력에 의해 빛이 꺾일 것으로 제안하였고^[1] 이듬 해 구체적인 계산(그림 1)을 통해 천문학적으로 관측 가능한지에 대해 고민하였으며 1915년 완성된 일반상대성이론으로 다시 계산하여 태양 가장자리를 지나는 빛은 Newton 역학에서 계산된 값의 정확하게 2배인 1.75" 꺾이며 이로 인해 별의 위치도 같은 정도로 이동하게 된다고 주장하였다.

태양에 의해 빛이 꺾이게 되면 태양은 약한 볼록렌즈 역할을

REFERENCES

- [1] F. W. Dyson, A. S. Eddington and C. Davidson, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A **220**, 291 (1920).

하게 되어 지구의 공전에 의해 천구 상을 움직이는 태양이 근처에 있을 때와 없을 때 천구 상의 별들의 겉보기 위치가 달라지게 된다. 태양의 중력이 렌즈 역할을 하게 되는 것이다. 하지만 밝은 태양 주변에서는 별을 볼 수 없기에 일식 때만 이런 관측이 가능해진다. 천문학자 Erwin Freundlich는 기존의 일식 사진으로 별의 위치를 확인하고자 하였으나 충분한 자료가 없어서 실패하였고, 그 이후 몇 번의 일식 때마다 여러 천문학자들이 관측을 시도하였으나 구름이나 관측 정밀도 부족 등 여러 문제들에 의해 실패하였다.^[1] 1905년 특수상대성이론을 발표하여 물리학계에 파란을 일으켰던 Einstein이 또 한 번 새롭게 발표한 일반상대성이론을 빛의 꺾임, 즉 중력렌즈 현상으로 확인하는 것은 당시로서는 물리학 및 천문학계의 초미의 관심사였을 것으로 짐작된다. 일반상대성이론이 발표된 1915년으로부터 정확하게 100년이 지난 올해 2015년이 UN이 정한 세계 빛의 해(The International Year of Light and Light-based Technology)인 것도 일반상대성이론과 빛의 관계를 잘 보여주고 있다고 하겠다.

1917년 왕립천문학자 Frank W. Dyson은 1919년 5월 29일에 일어날 개기일식이 태양 주변에 밝은 별이 많이 포함되어 있는 드문 경우임을 일반상대성이론의 후원자였던 Arthur S. Eddington 교수에게 알렸고 이들은 일식 관측을 실행에 옮기기로 결심하였다.^[2] 이 개기일식은 아프리카와 남아메리카 가운데를 가로질러 관측 가능했는데 이 일식 탐사팀은 이 중 관측 환경이 좋은 서아프리카 해안의 Principe 섬, 북부 브라질의 Sobral, 아프리카 탕가니카호 세 곳 중 두 곳에서 관측하기로 계획을 세웠다. 재정적인 지원이 문제였는데 전쟁 중이었는데도 불구하고 영국정부에 탐사에 대한 지원을 신청하였고 많은 학자들이 회의적이었지만 지원금과 함께 탐사 소위원회가 꾸려졌다. 이들은 Greenwich 천문대와 Oxford 대학 천문대의 13인치, 16인치 실로스탯(태양 추적 장치), 4인치 대물렌즈들과 경통 등을 관측지로 최종 결정된 Sobral과 Principe 섬으로 배와 증기선, 인력 등을 동원하여 운송하였다.

1919년 3월 8일 Liverpool을 출발한 탐사팀은 도중에 두 팀으로 나누어져 각각 4월 23일에 Principe 섬, 4월 30일에 Sobral에 도착해서 한 달여에 걸쳐 거울 및 부품들을 조립하고 시험 관측을 통해 준비를 마친 후 드디어 5월 29일 일식 때 지나가는 구름 사이로 황소자리 주변을 촬영하였다. 이렇게 촬영된 사진은 태양이 없을 때 촬영된 사진과 비교되어 천구 상에서의 별들의 위치 변화가 측정되었다. 여러 나라의 지원과 협력이 필요했던 이 탐사는 제1차 세계대전이 끝난 지 몇 달 되지 않았던 점을 고려하면 과학에 대한 대단한 의지로 가능했던 것 같다.

Principe 섬까지 직접 가서 사진 촬영을 한 Eddington은 촬영된 별들의 위치도 직접 측정하였다. 사진에 나타난 별들의

위치를 천구 상의 위치로 정확하게 변환하는 것은 사실은 쉽지 않는 일이다. 광학적 특성이 다른 망원경과 사진기로 촬영된 사진은 기본 크기 척도가 다르고 광학적 왜곡 정도가 다르며 천체의 고도에 따라 대기 굴절이 다르며 온도에 따라 사진의 팽창도 달라지므로 복잡한 보정 작업을 거쳐야 정밀한 위치 측정이 이루어진다. 이렇게 힘들게 결정된 별의 위치 변화는 태양의 중심에서의 거리에 반비례했으며 반비례 계수인 태양 가장자리에서의 위치 변화는 Sobral에서 4인치 망원경으로 촬영된 사진의 경우 $1.98'' \pm 0.12''$ 였고 Principe 관측에서는 $1.61'' \pm 0.30''$ 로 측정되었다. 한편 Sobral의 13인치 망원경으로 결정된 값은 $0.93''$ 이었는데 몇 가지 이유를 들어 신뢰하지 않았다. 관측 오차들과 체계적 오차 등에 대해서도 상세하게 언급한 후 탐사팀은 최종적으로 일반상대성이론에 따르면 태양 가장자리에서 위치 변화는 $1.75''$ 이고 멀어질수록 태양 중심까지의 거리에 반비례하여 줄어든다고 계산되므로 Newton의 역학 이론이 아닌 Einstein의 일반상대성이론이 관측 결과와 잘 일치한다고 결론 내렸다.^[1]

당시로서는 일반상대성이론의 몇 가지 중요한 예측 중 수성의 근일점 이동은 확인되었으나 중력에 의한 적색이동은 명확하게 확인되지 않은 상태였다. 따라서 수성과 달리 아주 빠르게 움직이는 빛이 중력에 의해 꺾여서 중력렌즈 현상이 일어나고 그 양이 일반상대성이론과 잘 일치한다는 관측 결과는 학계에서 일반상대성이론이 받아들여지는데 결정적인 기여를 하게 되었다. 중력렌즈 관측을 통해 Newton의 지위를 Einstein이 차지하게 된 것이다.

그 이후 이 같은 일식 때의 광학관측이 반복되었지만 밝은 태양 빛에 의해 정밀한 관측이 실제로는 쉽지 않았고 1970년대가 되어서야 전파로 퀘이사를 관측하여 높은 정밀도로 1919년 일식 관측 결과를 확인하여 주었다.

한편 러시아 물리학자 Orest Chwolson은 1924년 멀리 있는 천체가 중력렌즈되는 경우를 제시했으나 학계에서는 별 관심을 두지 않았다.^[3] 그러다 Einstein이 미국 Princeton의 Institute for Advanced Study로 옮긴 몇 년 후인 1936년 체코슬로바키아 출신의 전기기술자이면서 아마추어 과학자였던 Rudi W. Mandl이 Princeton으로 Einstein을 직접 찾아왔다. 그는 별과 별이 거의 일직선이 되면 중력렌즈에 의해 빛이 모이게 되어 당시에 발견되었던 고리 모양의 성운이 될 수 있으며 먼 은하가 중력렌즈되면 빛이 강해져서 지구 생명의 멸종을 가져올 수 있다는 좁은 황당한 아이디어를 Einstein에게 설

REFERENCES

- [2] M. Stanley, The History of Science Society **94**, 57 (2003).
- [3] O. Chwolson, Astronomische Nachrichten **221**, 329 (1924).

명했으나 Einstein은 이를 친절하게 받아들여 20여 년 전 자신의 계산을 기억하지 못한 채 다시 이러한 중력렌즈 경우를 계산하였다.^[4] Mandl은 이 내용을 출간하여 줄 것을 끈질기게 요청하여 Einstein은 그 내용을 1936년 Science에 짧은 논문으로 출간하였다.^[5] 이 논문에서 Einstein은 별과 별이 일직선으로 정렬되면 앞에 있는 별의 중력에 의해 뒤에 있는 광원 별이 고리 모양으로 보이게 되고, 두 별이 일직선에서 약간 벗어나 있으면 광원 별이 두 개의 상으로 분리되어 보이게 되면서 더 밝아지게 된다고 밝히고 있다. 그러나 Einstein 고리로 불리게 되는 이 고리나 두 상 사이의 각거리는 너무 작아서 관측이 불가능하다고 판단하였다.^[6]

그러나 이 시기는 안드로메다 성운 같은 일부 성운들은 우리 은하와 같은 은하로서 아주 큰 질량을 지녔고 멀리 있음이 비로소 확인되던 때였다. California 공과대학의 괴짜 천체 물리학자 Fritz Zwicky는 이듬해인 1937년 이러한 은하들 사이에 중력렌즈 현상이 일어날 경우 상들 사이 각거리도 관측 가능한 정도가 될 것이므로 중력렌즈된 상의 발견은 일반상대성이론에 대한 또 하나의 검증이 될 수 있으며 멀어서 관측 불가능한 은하들이 밝게 확대되어 관측 가능해질 수 있으며 렌즈 작용을 하는 은하의 질량을 측정할 수 있게 해서 자신이 그 전에 밝힌 개별 은하들의 질량 합과 은하단 전체 질량과의 차이, 즉 오늘날의 암흑물질을 밝히는데 활용될 수 있다는 놀라운 예측을 하였다.^[7] 이 예측들은 수십 년 후 거의 모두 그대로 활용되었다. Zwicky는 바로 뒤 이은 논문에서는 은하들 사이에 중력렌즈될 확률을 계산하여 반드시 발견할 수 있다고 확언하였다.^[8] 한편 Princeton 대학의 Henry Norris Russell은 시리우스의 동반성인 백색왜성 주위에 행성이 있을 경우 행성에서 보이는 시리우스의 식현상이 어떻게 보일 것인지에 대한 흥미로운 상상을 설명하기도 했다.^[9] 여하튼 Einstein의 1936년 논문으로 인해 중력렌즈는 학계의 관심을 받게 되었고 정상적인 천체물리학의 연구 주제로 자리 잡았다.

중력렌즈의 특성상 광원과 렌즈작용을 하는 천체(그냥 렌즈라 함)가 거의 일직선상에 있을 때 관측 가능해지므로 은하의 경우에도 중력렌즈될 확률은 크지 않다. 그러나 광원이 멀어질수록 렌즈가 시선방향에 위치할 가능성이 높아지기 때문에 아주 먼 광원일수록 중력렌즈될 확률이 커지게 된다.^[10] 그러나 멀리 있는 은하들은 작고 어두워서 Zwicky의 기대처럼 쉽게 중력렌즈된 은하가 발견되지는 않았다.

2차 대전 중 레이더의 발달에 힘입어 1950년대 많은 외부 은하 전파원들이 많이 발견되었다. 그 중 일부는 아주 멀리 있으면서 작은 영역에서 많은 에너지를 방출하는 퀘이사임이 1962년 확인되었다. 퀘이사(quasar: 별과 비슷하게 보이는 전파원)는 먼 거리에 비해 밝기 때문에 중력렌즈 되어 관측될 가

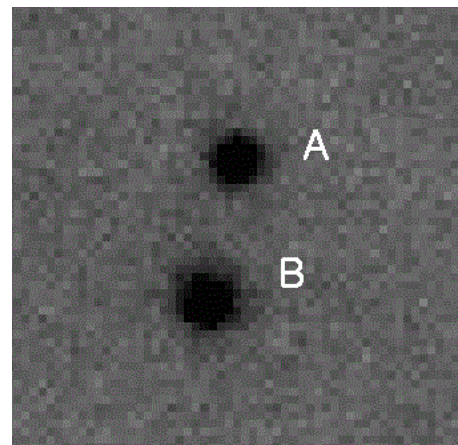


Fig. 2. Images of first gravitationally lensed quasar Q0957+561.

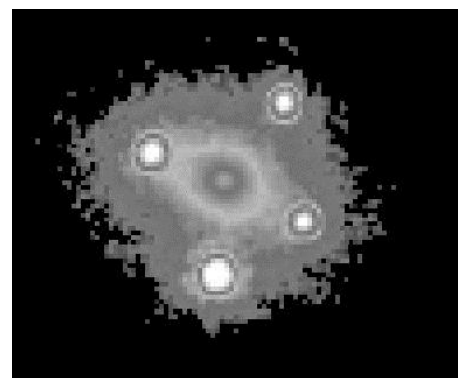


Fig. 3. Quasar 2237+0305 with four lensed images (CASTLES).

능성이 높은 천체였다. 1979년 Dennis Walsh 등은 이미 발견된 전파원 중에서 퀘이사를 확인하는 관측을 하고 있었다. 각 크기가 작은 전파원에 대해 광학(가시광) 사진과 스펙트럼을 촬영하여 방출선을 찾고 이들 스펙트럼 선이 어떤 원소에 의한 것인지를 동정하면 그 전파원의 적색이동이 결정된다. 그런데 Palomar산 망원경으로 촬영된 사진에서 서로 6" 정도 떨어진 퀘이사로 의심되는 두 천체를 발견하였고 이어 Kitt Peak 천문대 망원경으로 분광관측을 한 결과 스펙트럼 상의 방출선들의 적색이동 값이 두 천체 모두 1.405로 동일했고 연

REFERENCES

- [4] T. Sauer, Einstein Online **04**, 1005 (2010).
- [5] J. Renn and T. Sauer, in *Revisiting the Foundations of Relativistic Physics*, by A. Ashtekar, et al. (Springer, 2003).
- [6] A. Einstein, Science **84**, 506 (1936).
- [7] F. Zwicky, Physical Review **51**, 290 (1937).
- [8] F. Zwicky, Physical Review **51**, 679 (1937).
- [9] H. N. Russell, Scientific American **156**(2), 76 (1937).
- [10] M.-G. Park, *Gravitational Lens* (Kyungpook National University Press, 2010).

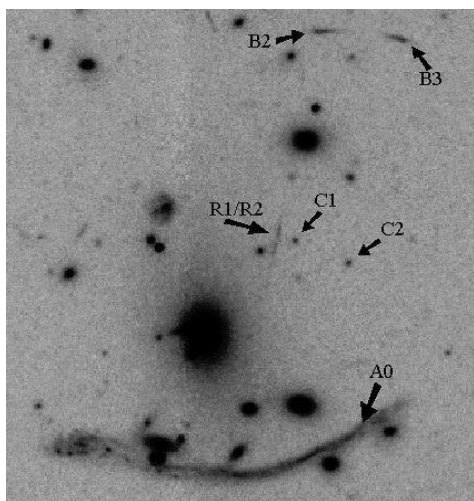


Fig. 4. Luminous arcs in Abell 370 cluster (IAP, France).

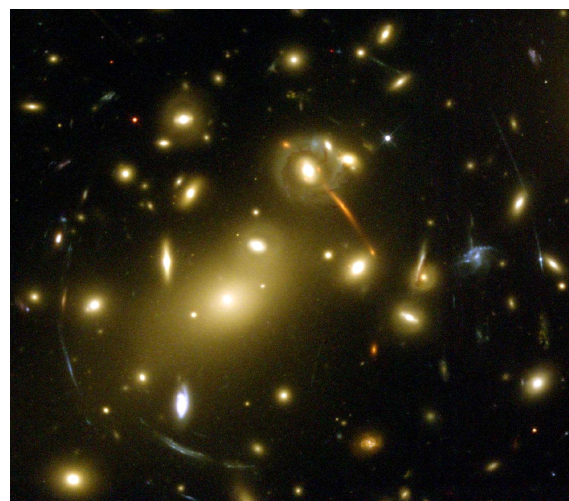


Fig. 5. Abell 2218 with many lensed arcs (NASA).

속 스펙트럼의 모습도 완벽하게 같음을 발견하였다.^[11] 퀘이사는 우주에서 드물게 존재하므로 우연에 의해 이렇게 완벽하게 같은 스펙트럼을 가지는 두 퀘이사가 이 정도로 가까이 존재할 가능성은 거의 없으므로 이 퀘이사 Q0957+561(앞의 숫자는 적경, 뒷 숫자는 적위 값이다)은 퀘이사가 전방의 은하에 의해 두 개의 동일한 (신기루같은) 상으로 중력렌즈된 최초의 경우로 받아들여졌다. 그림 2는 1997년 보현산 1.8 m 망원경으로 저자가 촬영한 두 퀘이사 A, B의 모습인데 아래쪽 B의 상이 아주 약간 더 퍼져 있음을 알 수 있는데 이는 상 B 바로 위에 렌즈 작용을 하는 어두운 은하가 있기 때문이다.

Q0957+561의 발견을 기점으로 10여 년간 매년 1개 정도의 이와 유사한 다상(multiple-image) 퀘이사들이 발견되다가 이후 급격하게 늘어 현재는 대략 100개 정도의 다상 중력렌즈계가 발견된 상태이다.¹⁾ 그림 3은 Einstein 십자가라 불리는 상이 4개(A, B, C, D)인 중력렌즈 퀘이사 2237+0305를 Hubble 우주망원경으로 촬영한 사진이다. 중심의 밝은 부분이 렌즈 작용을 하는 은하의 중심부이다. 이렇게 여러 개의 상이 만들어지는 것은 광원으로부터 렌즈 작용을 하는 은하나 은하단을 거쳐 관측자에게 도달할 수 있는 경로가 여러 개이기 때문인데 그 원리는 광학에서 두 지점 사이 빛의 경로는 빛의 진행 시간이 가장 짧은 경로라는 Fermat의 원리와 같다. 다만 광학에서는 빛이 지나가는 매질의 굴절율에 의해 빛의 속도가 달라지지만 중력렌즈의 경우에는 중력 즉 시공간의 휨에 따라 빛의 유효속도(멀리 있는 관측자가 측정한 속도)가 달라지게 된다. 따라서 중력렌즈된 상의 위치와 밝기 등은 광원과 관측자 사이의 시공간의 휨에 의해 결정되는데 퀘이사 중력렌즈의 경우에는 우주 전체의 기하학적 구조와 렌즈 작용을 하는 은

하에 의한 지역적인 시공간의 모습 둘 다에 영향을 받게 된다. 예를 들어 은하가 없다고 하더라도 우주 전체가 휘어 있으면 빛의 경로도 휘어 중력렌즈 현상이 나타날 수 있다. 따라서 다상 퀘이사 중력렌즈계를 개별적으로 분석하면 특정한 은하의 질량분포나 암흑물질의 존재를 알 수 있고 통계적으로 분석하면 우주 전체의 특성, 예를 들어 우주 전체 물질의 양과 암흑에너지의 양 등을 결정할 수 있다.^[12-14] 저자를 포함하여 다수의 국내 학자들도 이러한 연구를 활발하게 수행하고 있다.

한편 은하들의 집단인 은하단에 의해서도 중력렌즈 현상이 일어날 수 있지만 은하의 경우보다 확률이 낮다. 그러나 퀘이사보다 훨씬 수가 많은 은하가 광원일 경우에는 은하단에 의해 중력렌즈되는 모습을 발견할 수 있다. 퀘이사의 경우에는 각 크기가 너무 작아서 여러 개의 상으로 나누어지는 것만 확인되지만 은하의 경우 분해 가능한 각 크기를 가지므로 상이 여러 개로 나누어지거나 일그러져 나타나게 된다.

천문학자 George O. Abell은 많은 수의 은하들로 이루어진 부자 은하단(rich cluster of galaxies)의 목록을 만들었는데 이 중 일부 은하단에서는 푸른 색의 긴 호(arc)가 흐리게나마 촬영되었지만 (아마도 설명하기 어려워서) 학계에서 전혀 언급되지 않았다. 그러다 검출기의 발전으로 1985년에 이르러 뚜렷한 사진을 얻게 되었고 그 이듬해 밝은 호(luminous arc)란

REFERENCES

- [11] D. Walsh, R. F. Carswell and R. J. Weymann, *Nature* **279**, 381 (1979).
- [12] J. R. Gott III, Myeong-Gu Park and Hyung Mok Lee, *Astrophysical Journal* **338**, 1 (1989).
- [13] M. Im, R. E. Griffiths and K. U. Ratnatunga, *Astrophysical Journal* **475**, 457 (1997).
- [14] K.-H. Chae, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **346**, 746 (2003).

1) CASTLES Database <https://www.cfa.harvard.edu/castles/>.

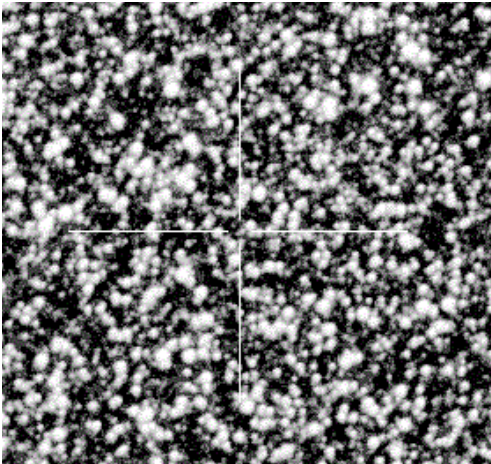


Fig. 6. Image of stars and a microlensed star in Galactic Bulge (MACHO collaboration).

이름으로 공개되었다(그림 4).^[15] 처음에는 이 호의 정체에 대해 많은 혼란이 있었다. 충격파, 빛 메아리, 먼지 등이 제시되었지만 Princeton 대학의 Bohdan Paczyński가 어린 아들에게 이 새로운 현상을 설명하던 중 호의 푸른 색과 낮은 표면밝기는 멀리 있는 은하가 은하단에 의해 일그러진 형태로 중력렌즈된 것이라는 생각에 이르게 되었다.^[16] 이후 하늘 배경보다 고작 수 % 밝은 이 호의 적색이동을 가까스로 분광관측하여 확인한 결과 은하단보다 훨씬 더 멀리 있는 천체임이 확인되면서 밝은 호도 중력렌즈의 한 형태인 것으로 논란은 일단락되었다. 그림 5는 Hubble 우주망원경으로 촬영한 은하단 Abell 2218의 모습이다. 여기 저기 밝게 보이는 수백 개 이상의 은하들로 이루어진 은하단이 더 멀리 있는 푸른 색의 은하들을 중력렌즈하여 길쭉하게 늘어진 모습으로 보이게 만들었음을 극적으로 보여주고 있고, 이 모습에 일반상대성이론에 기초한 중력렌즈 이론을 적용하면 이 같은 렌즈 효과를 보여주는 은하단의 질량 분포가 어떠해야 하는지를 결정할 수 있다. 은하단 은하단을 천문학적 방법으로 관측할 경우 별이나 기체 등 빛을 방출하는 물질의 분포에 대해서만 알 수 있는 반면 중력렌즈는 빛의 방출 유무에 상관없이 모든 종류의 질량-에너지에 의한 시공간의 휨을 보여주기에 관측이 어려운 암흑물질²⁾에 대한 직접적인 정보를 얻을 수 있다.

한편 천체물리학자들은 Einstein이 1936년 언급한 별끼리의 중력렌즈 현상에 대해서도 연구하였다. 은하에 의한 중력렌즈 경우와는 달리 별에 의한 중력렌즈의 경우 상이 미시적으로 여러 개로 나누어 생기는 것을 구분하여 관측할 수는 없지만 두 상이 합쳐져서 하나의 덩어리로 보이는 전체 상의 밝기 변화는 관측 가능해진다. 투명한 중력렌즈의 경우 Liouville의 정

2) 역학적으로 존재하는 것으로 추정되지만 천문 관측으로 확인하기 어려운 물질.

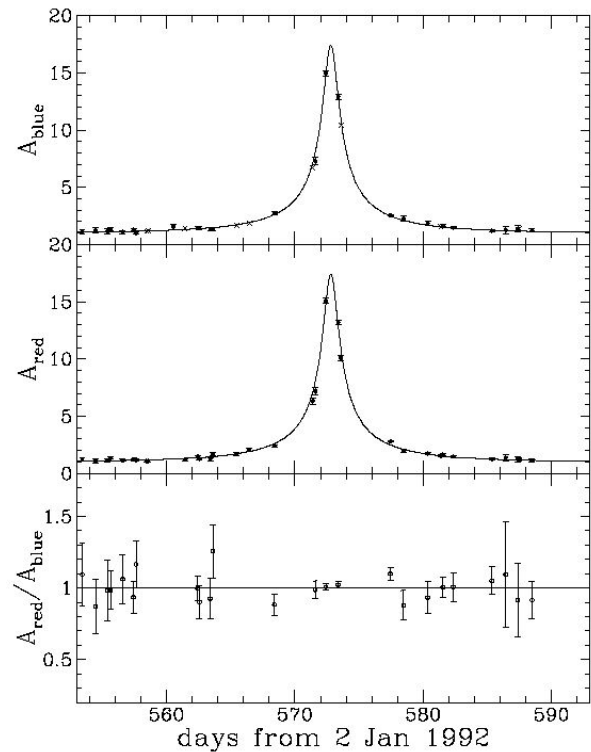


Fig. 7. Brightness change of lensed star in Fig. 6. Top panel for blue band, mid panel for red band, and bottom panel for blue-red ratio. (MACHO collaboration)

리가 적용되어 각 면적당 표면밝기는 보존되므로 상의 총 밝기는 상의 총 각 면적에 비례하기 때문이다. 이런 중력렌즈 현상을 미시중력렌즈(microlensing)라고 부른다.

그렇지만 우리 은하 내 별들의 밀도를 생각하면 이를 관측할 수 있는 가능성이 너무 낮아 천문학자들은 실제 관측하려는 시도를 하지는 않았다. 그러나 1987년 Bohdan Paczyński는 우리 은하 전체를 감싸는 헤일로(halo)를 구성하는 암흑물질이 아주 어두운 별이나 행성 같이 작고 밀도가 높은 MACHO (Massive Astrophysical Compact Halo Object)로 이루어졌다면 대마젤란 은하 같이 좁은 지역에 있는 많은 별들의 밝기 변화를 관측하여 미시중력렌즈를 발견한다면 헤일로에 있는 MACHO 전체의 질량을 결정할 수 있다는 획기적인 제안을 하였다. 당시에는 한 번 관측으로 많은 별의 밝기를 정밀하게 측광할 수 없었는데 대마젤란 은하의 한 별이 미시중력렌즈되어 있을 확률이 10^{-6} 정도이므로 수백만 개의 별의 밝기를 1년 정도 지속적으로 측광하는 것은 쉽지 않은 일이었다. Paczyński가 이 아이디어를 티타임에 꺼내 놓았을 때 대학원생이었던

REFERENCES

- [15] R. Lynds and V. Petrosian, *Bulletins of American Astronomical Society* **18**, 1014 (1986).
- [16] B. Paczyński, *Nature* **325**, 572 (1987).

저자도 당연히 희망사항이라 생각했었다. 하지만 1980년대 중반 감도가 높은 CCD(전하결합소자)를 활용한 천체사진기가 본격적으로 보급되고 디지털 영상을 빠르게 처리할 수 있는 값싸고 성능 좋은 워크스테이션이 등장하면서 한꺼번에 많은 별의 밝기를 자동으로 측정하는 것이 가능해졌다. 마침내 1993년 프랑스의 EROS, 미국-호주의 MACHO, 폴란드의 OGLE 세 연구팀이 독립적으로 미시중력렌즈 현상을 검출하는데 성공했다. 대마젤란 은하, 소마젤란 은하, 우리 은하 중심 팽대부(bulge)의 많은 별을 측광하여 그 중 몇 개 별의 밝기가 일반 상대성이론에 기초한 미시중력렌즈 이론에서 예측된 정확한 형태(그림 7의 곡선)대로 밝았다가 어두워짐을 확인하였다. 그림 6은 우리 은하 팽대부의 한 부분을 촬영한 사진이며 사진 중심의 십자로 표시된 보일 듯 말 듯한 별 한 개가 미시중력렌즈에 의해 그림 7에서처럼 밝기가 증가했다가 감소하였다. 그림 7 맨 위 그래프의 작은 점과 막대들은 푸른 색 필터에서 촬영된 대상 별의 밝기와 오차를 표시한 것이고 중간 그래프는 붉은 색 필터에서의 밝기와 오차를 보여준다. 두 경우 모두 일반상대성이론의 예측(연속 곡선)과 잘 일치한다. 맨 아래 그래프는 별의 색을 나타내는데 별이 밝아지는 중에도 색의 변화가 없음을 보여준다. 별의 크기 변화에 의한 변광성은 대부분 밝기 변화와 색의 변화가 동반되며 동반별이 가려져 밝기가 변하는 식쌍성은 밝기 변화가 완전히 다른 모양을 보이므로 미시중력렌즈에 의한 밝기 변화는 다른 변광성들의 그것과는 구별된다.

이렇게 발견된 미시중력렌즈의 총 개수는 우리 은하 halo를 구성하는 MACHO의 총 질량에 비례하는데 1992년 7월부터 1999년 12월까지 5.7년에 걸쳐 대마젤란 은하를 관측한 MACHO 실험은 MACHO는 halo 전체 질량의 최소 8%에서 최대 50%(95% 신뢰 구간)에 이른다고 발표하였다. 이는 halo의 암흑물질이 MACHO로만 이루어질 수 없고 소립자(elementary particle)로도 이루어져야 함을 의미했다. 즉 우리 은하의 암흑물질을 설명하기 위해서는 입자물리학적 연구와 천문학적 연구가 다 필요한 셈이었다. 그런데 이후 EROS2 등의 후속 관측은 미시중력렌즈 확률이 MACHO 실험 결과보다 더 낮은 것으로 나타나 우리 은하 halo의 얼마 정도가 MACHO로 이루어졌는지는 아직 해결되지 못한 상태이다.

미시중력렌즈 실험은 당초 기대했던 암흑물질의 정체를 밝히지 못한 아쉬운 결과를 남겼지만 관측의 부산물은 풍성했다. MACHO 실험의 경우 무려 1,200만 개의 별 밝기를 측정하였으므로 수없이 많은 변광성들을 찾았으며 별들의 특성에 대해서도 자세하게 알 수 있게 되었다. 더 흥미로운 부산물은 외계

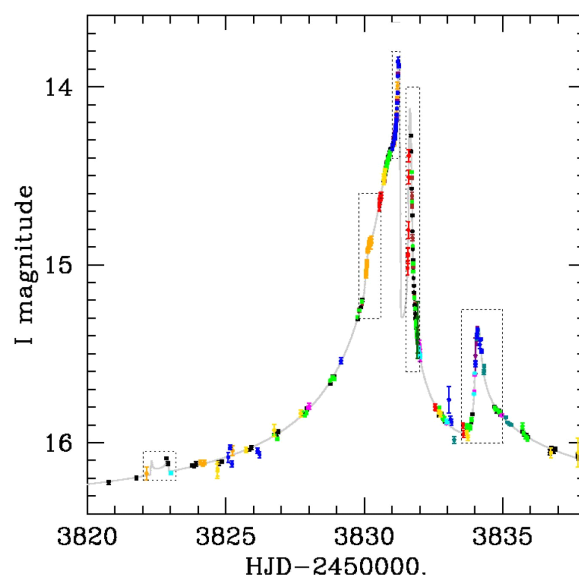


Fig. 8. Brightness change of a star lensed by a star plus two planets (Korea Astronomy and Space Science Institute).

행성(exoplanet)의 발견이었다.

제대로 잘 깎인 볼록렌즈를 천천히 이동하면서 불빛을 보면 불빛이 서서히 규칙적으로 확대되면서 밝아졌다가 같은 식으로 어두워지게 될 것이다. 하지만 이 렌즈에 조그마한 흠이 있고 관측자의 눈과 이 흠과 불빛이 정렬되게 렌즈를 움직이게 되면 불빛은 규칙적으로 밝아지다가 갑자기 급격한 밝기 변화를 일으켰다가 다시 원래의 규칙적인 변화로 돌아갈 것이다. 행성들을 가진 별에 의해 미시중력렌즈될 경우에도 비슷한 변화가 일어나게 된다. 그림 8은 국내 학자들이 참여한 국제 공동 연구에 의해 태양계의 목성-토성과 비슷한 두 행성과 한 개의 별로 이루어진 행성계에 의해 미시중력렌즈된 경우를 관측한 결과를 보여준다. 별의 밝기(I band 등급)는 급격하게 불규칙하게 변화했고 이 변화를 재현해낼 수 있는 행성계 모형을 수치적으로 찾은 결과 우리 태양계의 목성-토성과 비슷한 행성을 지닌 것으로 밝혀졌다.^[17]

2015년 2월 현재 약 1,189개의 행성계가 발견되었지만³⁾ 대부분은 행성의 공전의 반작용에 의해 모성이 미세하게 움직이는 것을 검출하거나 행성이 별 앞을 지나가면서(transit) 별의 밝기가 살짝 줄어드는 것을 검출하여 발견되었다. 그러나 이 두 방법으로는 무겁고 큰 행성이 모성에 가까이 있는 경우는 비교적 쉽게 발견할 수 있지만 지구 같이 작은 행성이 모성에서 멀찍이 있는 경우는 발견하기 힘들다. 반면 미시중력렌즈 관측은 작은 행성이 먼 거리에 떨어져 있는 경우도 발견할 수 있으며

REFERENCES

- [17] B. S. Gaudi *et al.*, Science **319**, 927 (2008).

3) <http://exoplanet.eu/>

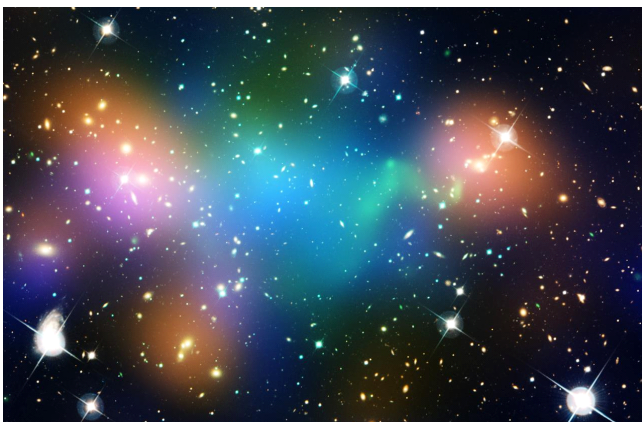


Fig. 9. Bright galaxies are superposed with hot gas (green) observed by X-ray telescope, starlight (yellow), and mass reconstructed by weak lensing (blue). (Jee *et al.*, 2012, NASA/STScI)

로 모성에서 적당한 거리에 지구 질량 정도의 행성이 위치하여 외계생명체가 존재할 여건을 갖춘 Goldilocks 행성계를 찾는 데 적합하다. 최근 한국천문연구원과 충북대학교 천체물리연구소가 주축이 된 KMTNet(Korea Microlensing Telescope Network) 연구팀도 남반구의 칠레, 호주, 남아공에 1.6 m짜리 망원경 3개를 세워 우리 은하 중심부를 24시간 관측하기 시작했으므로 수 년 내 흥미로운 결과가 나올 것으로 기대된다.

지금까지 설명한 퀘이사 중력렌즈, 밝은 호, 미시중력렌즈는 모두 광원이 여러 개로 나누어져 보이거나 모양이 심하게 변형되어 관측되는 경우여서 이를 강한 중력렌즈(strong gravitational lensing)라 부른다. 이에 비해 개별적으로는 중력렌즈가 일어났는지 아닌지 알기 어려운 경우도 발견되었다. 배경에 있는 은하들이 전방의 은하 또는 은하단에 의해 약하게 중력렌즈될 경우 원래 은하의 모습이 약간씩 변형되어 보이게 된다. 이는 아무리 좋은 광학 렌즈로 촬영을 하더라도 모양이 미세하게 일그러지고, 아무렇게나 제작된 렌즈를 사용한다면 더더욱 뚜렷하게 수차(aberration)가 생기는 것과 같다. 실제 관측되는 은하들의 변형은 그 정도가 아주 약해서 통계적으로만 구별해낼 수 있어서 이를 약한 중력렌즈(weak gravitational lensing)라 부른다. 상의 일그러짐이 렌즈의 모양에 달려있듯이 은하들의 미세한 변형의 강도와 방향은 그 위치에서의 조석력에 달려 있으므로 이로부터 렌즈 작용을 하는 질량의 분포를 재구성해낼 수 있다.

그림 5 Abell 2218 은하단에서도 약한 중력렌즈 현상이 일어나고 있으나 맨 눈으로는 보이지 않고 강하게 중력렌즈된 변형만 보이지만 실제로는 약한 중력렌즈 변형도 포함되어 있다. 다른 중력렌즈의 경우와 마찬가지로 은하들의 변형에서 재구성된 질량은 암흑물질까지 모두 포함하고 있는 총 질량이다. 그림 9는 Abell 520 Hubble 우주망원경의 WFPC2(Wide Field Planetary Camera 2)로 촬영한 은하단의 모습인데 은하단보다 더 멀리

있어서 배경에 작고 흐리게 보이는 은하들의 변형을 모두 조사하여 은하단의 질량 분포를 재구성한 합성 사진이다. 사진의 밝은 천체들은 대부분 은하들이며 십자선이 겹쳐진 밝은 천체는 우리 은하 내에 있는 별들이다. 노란색으로 표시된 덩어리들은 은하 내 별빛들을 평균한 분포이며 초록색은 X-선 망원경으로 관측된 고온의 기체를 보여주고 있다. 그런데 푸른색으로 표시된 덩어리들은 약한 중력렌즈로 재구성된 전체 질량을 보여주는데 은하에 의한 빛이나 고온의 기체와도 다른 분포를 보여주고 있다. 이는 은하들이 충돌하면서 부딪힌 기체들은 충격파에 의해 고온으로 빛나고 별들은 작아서 서로 충돌하지 않아서 분리되지만 전체 질량의 대부분을 차지하는 암흑물질 중 일부는 은하들의 분포와는 다르게 가운데에 몰려 분포하고 있음을 보여준다.^[18] 이는 빛을 내는 물질들과 암흑물질의 분포가 완전히 다를 수도 있음을 보여주는 극적인 예이다.

이러한 약한 중력렌즈 연구는 우주의 거대구조에까지 확장될 수 있다. 큰 망원경으로 아주 어두운 배경 은하들이 나타나게 촬영할 경우 이 은하들의 변형을 이용하여 은하단 또는 그 보다 더 큰 규모의 질량 분포를 결정할 수 있다. 특히 각각 다른 거리에 위치한 많은 수의 은하들을 이용하면 특정 거리의 질량 분포, 즉 3차원 질량 분포를 작성할 수 있게 된다. 2차원 단층 촬영으로부터 3차원 인체 지도를 재현하는 것과 같아서 이를 약한 중력렌즈 단층촬영(weak lensing tomography)이라 부른다. 2021년 직경 8.4 m의 광시야 망원경에 32억 개의 화소를 가진 사진기를 부착하여 하늘 전체를 매주 2회씩 촬영하게 되는 LSST(Large Synoptic Survey Telescope) 프로젝트가 본격적으로 시작되면 약한 중력렌즈 기법으로 우주의 암흑물질의 3차원 분포와 암흑에너지의 특성을 아주 정밀하게 결정할 수 있을 것으로 기대된다.

마지막으로 천문학자들은 언제나 아주 멀리 있어 어두운 천체를 발견하고자 한다. 더 멀리 있을수록 더 과거의 우주 모습을 보기 때문이다. 어두운 천체를 관측하기 위해서는 돈이 많이 드는 큰 망원경을 만들어야 하지만 Zwicky의 1937년 제안처럼 그 대신 우주에 이미 존재하는 중력렌즈를 이용할 수도 있다. 현재 천문학의 가장 큰 의문 중의 하나인 은하들이 최초로 만들어지는 암흑 시기(dark age)를 관측하는데 은하단들은 아주 유용한 중력렌즈 망원경으로 사용될 것이다.

100년 전 발표된 일반상대성이론에서 예측된 중력렌즈는 다양하고 신비로운 모습으로 우주에 나타나서 일반상대성이론의 중요한 증거들이 되며 동시에 우주를 이해할 수 있는 여러 힌트들을 제공했으며 앞으로도 당분간 그렇게 할 것으로 보인다.

REFERENCES

- [18] M. J. Jee, *et al.*, *Astrophysical Journal* **747**, 96 (2012).