이심률이 큰 외계행성 공전궤도에 미치는 일반상대론적 효과 관측

● 이희원[1], 장석준[1], 허정은[1], 이병철[2]

세종대학교[1], 한국천문연구원[2]

1. 과학 목적 및 요약

지금까지 발견된 많은 외계행성들은 우리 태양계와는 달리 목성 질량을 갖는 행성이 큰 이심률을 갖고 모항성에 매우 가깝게 공전하는 경우가 드물지 않다. 이심률이 크고 모항성에 가까운 궤도로 공전할수록 일반상대론적 효과가 크게 나타나서 이 결과 궤도의 근성점 전진이 두드러진다. 수성의 경우 100년에 43초의 근일점 전진을 보이지만, 외계행성의 경우에는 20년에 1도까지 근성점 전진이 나타날 수 있다. 이와 같은 목성 질량을 초과하는 외계행성의 대체적인 공전 속도는 100km/s에 달하며, 모항성은 이들 행성보다 수백 배의 질량을 갖기 때문에 모항성의 움직임은 1km/s 이하의 값을 갖게 될 것이다. 이 경우에 궤도요소가 1도 달라질 때에 나타나는 속도 성분 변화량은 수십 cm/s로 놓을 수 있다. 이 값은 현재 GMT/G-CLEF가 도달하려는 정밀 시선속도의 한계 값과 유사하다.

우리는 근성점 위치의 변화를 적당한 시간 간격을 두고 모항성의 시선속도에 대한 정밀 시계열 고분산 분광관측을 통하여 이러한 효과를 측정하고자 한다. 궤도요소의 변화를 일으키는 요인은 일반상대론적 효과 외에도 다른 이웃 행성들의 섭동, 모항성의 4극자 모멘트를 생각할 수 있으며, 정밀한 분광관측으로부터 궤도요소의 변화를 알아낼 수 있을 것이다.

2. 연구 필요성, 배경 및 동향

1) 연구의 배경 및 필요성

여러 번의 거듭된 실패 끝에 펄사에서 최초로 외계행성이 발견된 이후(Wolszczan & Frail 1992) 정밀 시선속도 분석법이 이용되어 외계행성의 발견이 일반적인 항성에서도 이루어졌다(Mayor & Queloz 1995). 이후 계속 이어진 외계행성 탐사 연구가 활발해지면서 미세중력렌즈 현상 및 항성횡단을 이용한 정밀 측광관측에서도 많은 외계행성 발견이 뒤를 이었다. 특히, 케플러 미션을 통하여 모항성 앞을 횡단할 때 나타나는 미세한 광도 변화를 포착하여 2014년 현재 900개를 넘는 많은 외계행성들을 찾게 되었다. 많은 외계행성 발견이 이루어지면서, 한 개의 항성이 여러 외계행성을 거느리는 행성계에서 공전궤도의 특성에 대한 연구까지도 현재 진행되고 있으며 생명체가 존재할 가능성이 매우 높은 외계행성의 발견을 목전에 두고 있다.

외계행성계의 연구에서 매우 흥미로운 점은 우리 태양계와 크게 다른 모습을 하고 있다는 점이다. 우리 태양계의 행성들은 이심률이 대부분 매우 작아 거의 원에 가까운 궤도를 그리며 수성만이 예외적으로 0.2를 넘는 이심률을 갖고 있을 뿐이다. 그러나 많은 외계행성계에서는 이심률이 대단히 큰 공전궤도를 갖는 경우가 드물지 않다. 또한, 정밀 시선측정법으로 발견된 많은 행성들은 모항성 가까이에서 돌고 있으며, 이들의 질량은 목성 질량보다 큰 경우가 많다.

이심률이 크고 주기가 짧은 궤도에서는 근성점 전진에 대한 일반상대론적 효과가 두드러지게 나타난다. 근성점 전진을 간단히 살펴보기 위하여 슈바르츠실트 계량(Schwarzschild metric)

$$d\tau^2=(1-2M/r)dt^2-\frac{d/r^2}{1-2M/r}-r^2d\theta^2-r^2\sin^2\theta d\phi^2$$

와 같이 주어지는 중력장을 생각하자. 여기에서 $G=c=1$로 택하여 기하학적 단위로 물리량들을 기술하고 M은 블랙홀 혹은 중심 항성의 질량이다. 이와 같은 중력장에서 궤도 운동하는 천체의 운동을 적도면 $\theta=\pi/2$로 한정하게 될 때에 천체가 만족하게 되는 궤도 방정식은

$$\left(\frac{du}{d\phi}\right)^2=\tilde{l}^{-2}[\tilde{E}^2-(1-2Mu)(1+\tilde{l}^2u^2)]=F(u)$$

와 같이 나타난다. 여기에서 $\tilde{l}=r^2\dot{\phi}$로 보존되는 단위질량당 각운동량, $\tilde{E}=(1-2Mu)\dot{t}$는 보존되는 단위질량당 에너지이며 $u=1/r$이다. 또한 $\dot{\phi}=\left(\frac{d\phi}{d\tau}\right)$이고 $\dot{t}=\left(\frac{dt}{d\tau}\right)$로서 affine parameter인 고유시간에 대한 도함수 값들이다.

근성점의 전진이 나타나는 이유는 u^3항이 있기 때문이다. 이 항이 없으면 고전역학의 케플러 문제와 같고 궤도가 닫히게 되어 근성점 이동은 일어나지 않는다. 행성의 운동을 결정하는 함수

$$F(u)=\frac{\tilde{E}^2-1}{\tilde{l}^2}+\frac{2M}{\tilde{l}^2}-u^2+2M^3$$

가 3차 함수이며, 이 함수는 3개의 근을 갖고, 그 가운데 두 근이 각각 근성점과 원성점에 해당한다. 원성점과 근성점에 해당하는 r좌표를 $r_\alpha=1/u_1$, $r_p=1/u_2$라고 하면, 나머지 한 근 u_3와 함께

$$u_1+u_2+u_3=\frac{1}{2M}$$

을 만족한다. 이때에 u_1과 u_2가 매우 작은 값이므로, $u_3\approx(2M)^{-1}$의 값을 갖고, u_1, u_2에 비하여 매우 큰 값이 된다.

행성이 원성점에서 근성점까지 이동할 때에 회전하는 방위각거리

$$\Delta\phi=\int_{u_1}^{u_2}\frac{du}{F(u)^{1/2}}=\int_{u_1}^{u_2}\frac{du}{[2M(u-u_1)(u_2-u)(u_3-u)]^{1/2}}$$

로 주어진다. 이때에 제곱근호 안에서 $2M(u_3-u)=1-2M(u_1+u_2+u)$와 같이 쓰고 $2M(u_1+u_2+u)$가 1에 비하여 매우 작은 값이므로,

$$[F(u)]^{-1/2} \simeq [(u-u_1)(u_2-u)]^{-1/2}[1+M(u_1+u_2+u)]$$

와 같이 전개할 수 있어서, 적분값을 간단하게 계산할 수 있다. 즉,

$$\Delta\phi \simeq \int_{u_1}^{u_2} du[(u-u_1)(u_2-u)]^{-1/2}\left[1+\frac{3}{2}M(u_1+u_2)+M(u-\frac{u_1+u_2}{2})\right]$$
$$=\pi\left[1+\frac{3}{2}M(u_1+u_2)\right]$$

을 얻는다.

행성이 원성점에서 근성점까지 운동할 때에 180도의 방위각 거리를 가면 궤도가 닫히지만, 180도보다 더 많이 운동한다면 근성점의 전진이 일어난다. 외계행성이 공전 1회할 때마다 나타나는 근성점 전진의 구체적인 표현은

$$\Delta\phi_P = 3\pi M(u_1+u_2) = \frac{3\pi GM}{c^2}\left(\frac{1}{r_1}+\frac{1}{r_2}\right) = \frac{6\pi GM}{ac^2(1-\varepsilon^2)}$$

와 같이 주어진다. 여기에서 $r_1=r_a=a(1+\varepsilon)$과 $r_2=r_p=a(1-\varepsilon)$을 썼고, a와 ε은 각각 장축 반지름과 이심률이다. 아인슈타인이 post-Newtonian 계산을 통하여 처음 얻은 위 식을 태양계에서 가장 안쪽 궤도를 도는 행성인 수성에 적용하면 100년에 43각초의 값을 얻게 된다. 이 값은 이미 19세기 말에 천왕성 섭동 문제에 도전하여 해왕성의 위치를 예언하면서 명성을 드높인 프랑스의 이론 천문학자인 Le Verrier가 고심했던 관측 결과로서 뉴턴 역학과 관측된 공전궤도 사이에서 매우 중요한 수수께끼였다.

이 결과에서 보듯이 공전궤도 반지름이 작고 이심률이 클수록 근성점 전진 현상이 두드러진다. 태양과 비슷한 모항성 주위를 0.06AU의 공전궤도를 가지며 이심률 $\varepsilon=0.3$인 가상의 hot Jupiter의 경우 10년 동안 전진하는 근성점 방위각 이동량은 0.16도로 주어진다. 여전히 측정하기에는 쉽지 않은 값이지만, 구경이 매우 크고, 분광분해능이 뛰어난 거대망원경의 fast spectroscopy를 지속적으로 추진하여 외계행성의 공전궤도의 정밀 분석을 시도할 가치가 있다.

2) GMT의 필요성

모항성에 매우 가깝게 놓여 있는 hot Jupiter조차도 상대론적 관점에서는 무척 느리게 운동하기 때문에 일반 상대론적 효과를 검출하기 위해서는 높은 분광분

해능과 동시에 높은 품질의 신호대잡음비를 갖는 자료의 확보가 필수적이다. 이와 같은 조건을 동시에 만족하는 기기는 GMT의 G-CLEF가 유일하다.

정밀 시선속도의 측정에는 분광기 자체의 분광분해능과 함께 지상 실험실에서 제공되는 정밀 파장 캘리브레이션 레퍼런스가 필요하다. 현재 많이 쓰이는 방법으로는 요오드 분자가 가진 세밀한 흡수선을 사용하여 파장 분해 정밀도를 높이고 있으며 향후 laser comb과 같은 기술이 결합되면 정밀 시선속도 측정의 개선이 기대된다.

3) 국내외 연구 동향

한국천문연구원의 분광 연구팀으로 구성된 국내 연구진은 보현산 천문대의 고분산 에셸 분광기인 BOES(Bohyunsan Optical Echelle Spectrograph)를 사용하여 정밀 시선속도 측정을 통한 외계행성 탐색 연구를 활발히 진행해오고 있다. 천문연구원 외계행성 연구팀은 만기형 거성을 대상으로 시선속도 모니터링을 수행하고 있으며, 2014년 10월까지 이미 10여 개의 외계행성을 발견하였고 외계행성 후보 천체에 대한 추가 관측을 계속 시도하고 있다(e.g. Han et al. 2010; Lee et al. 2014). Iodine cell을 사용한 시선속도 측정은 초속 10미터의 정밀도에 다다르고 있어서 고분해능 분광관측 연구에서는 국제 공동연구를 대등하게 수행할 수 있는 수준에 와 있다. 그러나 현재 학문 후속 세대가 배출되고 있는 대학에서 고분산 분광관측 연구가 활발한 연구실이 드물기 때문에, 국내 대학원에서 분광관측 연구에 대한 학부생 및 대학원생들의 관심을 불러일으킬 필요가 있다. 한편 해외에서 외계행성 연구와 관련하여 크게 부각되는 문제는 생명체 거주 가능성이 높은 외계행성의 발견이다. 인류 존재의 우주적 보편성과 관련된 가장 근본적인 문제에 대한 답이 제공될 가능성이 멀지 않은 듯하다.

또한 미세중력렌즈 현상을 활용한 외계행성 탐사 연구에도 뛰어난 연구진이 한국천문연구원과 충북대학교 창의연구단에 구성되어 있다(e.g. Henderson et al. 2014). 이들 국내 연구진은 칠레-호주-남아프리카공화국에 3개의 1.6m 망원경을 설치하고 있다. 이들 망원경은 남반구 하늘을 24시간 주시하면서 외계행성에 의하여 짧은 시간 동안에만 관측할 수 있는 caustic event를 포착하여 지구와 비슷한 질량의 행성까지 탐사하는 데에 목표를 설정하고 있다.

3. 연구의 내용 및 방법

1) 연구 대상

Jordan & Bakos(2008)은 100년 동안 근성점 전진이 1도 이상 나타나게 될 외계행성계를 조사하여 표 1과 같이 제시하였다. 현재까지 알려진 외계행성 가운데 XO-3b가 10년에 0.4도의 근성점 전진이 예상되고 있다. 이들 천체들은 대부분 공전주기가 3일에서 6일 사이에 놓여 있으며, 이심률도 0.2 안팎의 큰 값을 갖고 있다. 외계행성 탐사가 계속 이어지면서 후보 천체들 역시 더 늘어날 것이 기대된다.

표 1. 10년 동안 근성점 전진이 0.1도 이상 나타날 것이 기대되는 외계행성들.
모항성에 가깝게 위치한 무거운 행성들인 hot Jupiter들이며, 이심률이 대단히 크다는 사실을 확인할 수 있다.

천체	a(AU)	e	M	공전주기(일)	시선속도(m/s)	근성점 전진 (deg/decade)
HD49674 b	0.058	0.29	1.060	4.944	13.7	0.1576
HD88133b	0.047	0.133	1.200	3.416	36.1	0.2958
GJ 436 b	0.028	0.159	0.410	2.644	18.7	0.2234
HD118203 b	0.070	0.309	1.230	6.133	217.0	0.1231
HAT-P-2 b	0.069	0.507	1.350	5.633	884.0	0.1836
HD185269 b	0.077	0.296	1.280	6.838	90.7	0.1046
XO-3 b	0.048	0.260	1.410	3.192	1471.0	0.3886

2) 사용 GMT 기기 및 관측 전략

앞에서 서술하였듯이, 사용할 수 있는 최적의 관측기기는 G-CLEF로서 정밀 시선속도 측정을 10년 이상의 시간을 두고 스케줄링 관측이 필요하다. 일부 외계행성의 경우 15년 동안 0.5도의 근성점 전진을 기대할 수 있고, 이심률이 0.2 정도로 크기 때문에 충분한 데이터 포인트가 있을 경우에, 시선속도 곡선에서 근성점 전진 효과가 보일 것으로 기대된다. 5일의 공전주기를 갖는 외계행성의 경우 0.5도 공전에 걸리는 시간은 10분이다. 따라서 10분 미만의 짧은 노출로 되도록 많은 횟수의 분광자료를 획득하여 한 사이클의 시선속도 곡선을 획득하고, 이러

한 관측을 매년 2-3차례 꾸준히 수행하면서 다년간의 변화를 포착하는 것이 필요할 것으로 판단된다. 일반상대론적 효과는 특히 식현상을 일으키는 외계행성계에 대하여 다양한 정보를 추출할 수 있을 것으로 기대한다. 이심률이 큰 궤도를 돌면서 모성을 횡단하면, 횡단 시간이 근성점 이동과 맞물려 달라질 것을 기대할 수 있다.

4. 연구 결과의 기대 성과

일반상대론은 천문 관측에서 주로 측정과 시험될 수 있는 가장 중요한 현대물리학이며, 외계행성계에 대한 정밀 시계열 분광관측으로부터 이를 시험하는 것 자체가 큰 의미를 갖는다. 19세기에 이루어진 천체 역학의 발전은 뉴턴 역학을 이론의 한계까지 밀어붙이면서 미지의 행성 발견이 이루어졌고, 태양계 천체의 궤도 전반에 대한 깊은 이해를 제공하였다. 정밀 시계열 분광관측은 외계행성계가 일반상대성 이론을 시험하는 것 이외에도 우리 태양계와 구별되는 궤도 역학적 특징을 풍부하게 드러낼 것으로 기대된다. Hot Jupiter들의 궤도요소에는 일반상대론적 효과 이외에도 모항성의 4중극자 모멘트, 외곽에 존재하는 다른 행성의 섭동과 같은 다양한 요소들이 개입할 것이다. 정밀 시계열 분광자료에서 추출될 수 있는 이러한 정보들은 행성계 형성 과정의 다양성과 보편성에 대한 지식을 크게 확장할 것이다.

5. 인용문헌

Han, I. et al., 2010, A&A, 509, 24
Henderson, C. B. et al., 2014, ApJ, 794, 29
Jordan A. & Bakos, G. A., 2008, ApJ, 685, 543
Lee, B. -C. et al., 2014, JKAS, 47, 69
Mayor, M. & Queloz, D., 1995, Nature, 378, 355
Wolszczan, A. & Frail, 1992, Nature, 355, 145