제2의 지구 찾는 외계행성 탐색 연구를 주도하다

- 24시간 별이 지지 않는 외계행성탐색시스템(KMTNet)

(전문) 외계행성은 태양이 아닌 다른 별(모성) 주위를 공전하는 행성을 말합니다. 현재까지 발견한 외계행성은 약 5,900여 개로, 이 우주에는 인류가 아직 발견하지 못한 외계행성이 더 많을 것입니다. 우리나라에서는 미시중력렌즈 방법을 이용한 외계행성 발견을 위해 외계행성 탐색시스템(이하 KMTNet: Korea Microlensing Telescope Network)을 만들어 운영 중인데요. 2015년 본격적으로 가동을 시작한 이래 KMTNet을 통해 미시중력렌즈 방법으로 발견된 외계행성은 232개로, 지난 22년간 전 세계에서 동일 방법으로 발견한 314개 중 약 74%에 해당하는 외계행성을 지난 10년간 발견함으로써, 해당 연구 분야를 주도하고 있습니다. 최근 4월 사이언스지에는 KMTNet 관측자료를 활용해 토성보다 먼 궤도에서 공전하는 장주기 슈퍼지구 외계행성의 발견에 대한 연구가 발표되기도 했습니다.

이번 호에서는 외계행성을 찾는 연구와 시스템에 대해 알아봅니다.



#주요 키워드 # 미시중력렌즈 현상

미시중력렌즈 현상

어떤 별을 관측하고 있을 때, 별과 관측자 사이에 보이지 않는 천체(별 혹은 행성)가 지나가게 되면, 관측자에게 도달하지 않던 빛이 보이지 않는 천체의 중력에 의해 휘어져서 관측하고 있던 별의 밝기가 원래의 밝기보다 밝아지는 현상을 말한다. 중간에 놓인 별이 행성을 가지고 있을 때는 별에 의해 밝아졌다가 다시 어두워지는 매끄러운 밝기 변화와 함께 행성에 의한 추가적인 밝기 변형을 통해 외계행성의 존재를 확인할 수 있다. 중력렌즈 방법은 다른 방법들에 비해 훨씬 적은 비용이 드는 지상관측을 통해서도 지구와 같이 작은 질량을 가진 행성들을 검출할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

▶ 센터장님과 연구팀에 대해서 간략한 소개를 부탁드립니다.



저는 한국천문연구원 우주과학탐사본부 소속의 외계행성탐사센터에서 센터장을 맡고 있는 이충욱입니다. 우리 센터는 다양한 방법을 이용해 태양계 너머에 존재하는 외계행성들, 그중에서도 특히 지구와 유사한 조건을 갖춘 행성들(일명 '제2의 지구')을 찾고 있습니다. 더불어 행성의 분포 및 행성대기, 더 나아가 우주생명체 탐사에 이르는 광범위한 영역에 대해 연구합니다. 센터의 가장 큰 특징은 관측, 이론, 그리고 소규모 시스템 개발에 이르기까지 다양한 분야의 연구자들이 한 팀으로 협력하고 있다는 점입니다. 연구진은 주로 미시중력렌즈(microlensing), 시선속도(Radial Velocity), TTV(Transit Timing Variation) 분석을 활용한 외계행성 탐색, 광시야 CCD 카메라를 이용한 고밀도 시계열 측광 모니터링, 자동 데이터 분석 시스템 개발, 외계행성 대기 연구, 그리고 기원과 진화에 대한 이론적 모델링 등 외계행성 연구 전반에 걸쳐 연구를 수행하고 있습니다. 특히 저희는 한국이 독자적으로 구축한 24시간 연속 관측망인 KMTNet을 중심으로 탐색 연구를 수행하고 있습니다. 남반구 3개 대륙(칠레, 남아프리카공화국, 호주)에 동일한 성능을 가진 광시야 망원경 세 대를 설치하여,

남반구 밤하늘을 중단없이 관측할 수 있는 관측망을 운영하고 있습니다. KMTNet은 외계행성뿐만 아니라 초신성, 소행성, 외부은하 등 다양한 천문현상에 대해서도 세계적인 수준의 데이터를 생산하고 있습니다. 연구팀 내에는 관측 장비 운영, 이미지 처리 및 소프트웨어 개발, 중력렌즈 이론, 통계적 분석 등 다양한 배경을 지닌 연구자들이 함께하며, 공동의 목표를 중심으로 긴밀히 협력하고 있습니다.

외계행성탐사센터에서는 국내외 연구 협력도 활발히 이루어지고 있습니다. 미국 CfA, MIT, NASA 및 독일 막스플랑크연구소 등 주요 천문 연구기관과의 공동 관측 및 데이터 분석을 지속적으로 수행하고 있으며, 앞으로는 베라 루빈 관측소(LSST), NASA의 로만 우주망원경과 같은 차세대 대형 프로젝트들과의 연계를 통해 전 지구적 관측 및 분석 체계를 구성하는 계획도 함께 추진 중입니다. 무엇보다도 '외계행성'이라는 낭만적이면서도 과학적으로 매혹적인 주제를 중심에 두고 지구 밖 생명 가능성과 우주의 다양성에 대한 근본적인 질문에 도전하고 있다는 점에서, 단순한 연구센터를 넘어선 지적 공동체의 성격도 함께 갖추고 있다고 생각합니다. 이렇게 공통의 관심사를 중심으로 모인 연구자들의 전문성과 열정을 하나로 연결하는 공동의 비전이 결국 우리 센터의 가장 큰 자산인 것 같습니다.



외계행성 연구팀 단체사진

▶ 외계행성을 찾아야 하는 이유가 무엇인가요?

외계행성을 찾아야 하는 이유는 단순히 '다른 행성이 존재하는가?'라는 궁금증을 해결하는 차원에 그치지 않습니다. 이는 결국 '우리는 어디에서 왔고, 어디로 가는가'라는 인류 보편의 근본적 질문에 과학적으로 답하기 위한 노력이라고 생각합니다. 우리가 사는 이 지구가 우주 속에서 유일하고 특별한 존재인지, 아니면 유사한 조건을 가진 행성이 아주 흔한 존재인지를 알아내는 과정은 인류의 지식 지평을 확장하고 우리 존재에 대한 이해를 심화시키는 중요한 연구 활동입니다. 이런 의미에서 외계행성 연구는 우주생명체 탐사연구의 출발점이라고도 할 수 있습니다. 지금까지 발견된 수천 개의 외계행성 중에는 뜨거운 가스형 행성, 얼어붙은 암석형 행성 그리고 지구와 유사한 크기와 밀도를 가진 행성들도 다수 포함되어 있습니다. 이 중 일부는 생명체가 존재할 수 있는 '생명체 거주 가능 영역(habitable zone)' 안에 위치해 생명 가능성에 대한 기대를 높이고 있습니다. 이러한 행성들의 물리적 특성, 궤도 정보, 대기 구성 등을 정밀하게 파악하는 일은, '생명은 우주에서 보편적인가, 아니면 지구에만 국한된 특별한 현상인가'라는 인류의 궁극적인 질문에 한 걸음 더 다가가는 길이라고 생각합니다.

더 나아가 외계행성 탐사는 천문학을 중심으로 행성과학, 대기과학, 생물학, 통계학, 인공지능 등 다양한 분야와의 융합을 필요로 하는 첨단 융합 과학의 중심 역할을 하고 있습니다. 이러한 다양한 탐색 기술의 발전은 곧 초정밀 광학 기술, 고속 신호 검출, 대용량 자료 자동 분석 시스템 등 첨단 기술의 고도화로 이어지며, 이는 다시 우리 사회의 기술 발전과 산업적 파급 효과로 피드백될 수 있다는 점에서도 큰 의미를 갖습니다.

▶ 외계행성탐색시스템이란 무엇이며 역할은 무엇인가요?

외계행성탐색시스템 KMTNet은 우리은하 중심부를 관측하여 미시중력렌즈 방법으로 지구형 외계행성을 탐색하기 위해, 한국천문연구원이 세계 최초로 남반구에 구축한 24시간 연속 관측 지상 관측망입니다. KMTNet은 칠레, 남아프리카공화국, 호주에 동일한 성능의 1.6미터 광시야 망원경을 설치하여, 지구 자전으로 한 지역에서 관측이 끝나는 시점에 다른 지역에서 관측이 이어지도록 구성된 시스템입니다. 즉, 어느 한 곳에서 밤이 끝나고 해가 뜨면, 동시에 다른 지역에서는 밤이 시작되기 때문에, 세 대의 망원경이 순차적으로 밤하늘을 이어받아 하루 24시간 연속적인 천문 관측이 가능하도록 설계되었습니다. KMTNet이 활용하는 미시중력렌즈 방법은 아인슈타인의 일반 상대성이론에 기반하며, 빛의 경로가 질량에 의해 휘는 현상을 이용합니다. 특정 별(렌즈)이 우리

와 멀리 있는 배경 별(소스) 사이를 지나갈 때, 렌즈 별의 중력이 배경 별의 빛을 증폭시켜 일시적으로 밝아지는 현상이 나타납니다. 이때 렌즈 별 주변에 행성이 존재하면, 광도 곡선에 미세한 광변형이 짧은 시간 동안 추가로 발생하게 되며, 이 신호의 특성을 분석함으로써 지구질량 또는 목성질량 등 행성의 질량을 결정할 수 있습니다. 이러한 중력렌즈 현상은 언제, 어디서 발생할지 예측할 수 없기 때문에, 별이 밀집된 우리은하 중심부를 집중적으로 관측하게 됩니다. 그리고 바로 이 은하 중심부를 가장 오랫동안 안정적으로 관측할 수 있는 위치가 남반구이기 때문에, KMTNet의 세 관측소는 모두 남반구에 위치하게 되었습니다.



KMTNet-CTIO (2015.1) | KMTNet-SAAO (2015.2) | KMTNet-SSO (2015.6)

한편, 외계행성 탐색 외에도 KMTNet은 우리은하 중심부를 관측할 수 없는 시기에는 초신성, 소행성, 외부은하 등 다양한 천체에 대한 시계열 관측(Time-Domain Astronomy, TDA)에 활용하고, 중력파 천체의 전자기파 후속 관측과 같은 다중신호 천문학(Multi Messenger Astronomy, MMA)에도 기여하고 있습니다. 최근에는 기존 시스템을 고도화하여 AI 기반 자율 관측 시스템으로 전환하는 작업을 진행 중입니다. 과거에는 사람이 기상 조건이나 관측 상황에 따라 수동으로 대상 천체를 설정하고 관측을 수행해야 했지만, 앞으로는 AI가 날씨나 시상 등의 관측환경을 실시간으로 판단하여 관측 여부를 결정하며, 주요 천문현상이 발생하면 중요도에 따라 하던 관측을 멈추고 중요한 관측을 먼저 할 수 있도록 자체 판단하여 빨리 추적 관측할 수 있도록 시스템을 진화시키고 있습니다. 이러한 기술 발전은 향후 베라 루빈 관측소(LSST), NASA의 로만 우주망원경 등과 연계해, 글로벌 천문 관측 네트워크를 구축하는 데 있어 중요한 기반이 될 것으로 기대합니다.



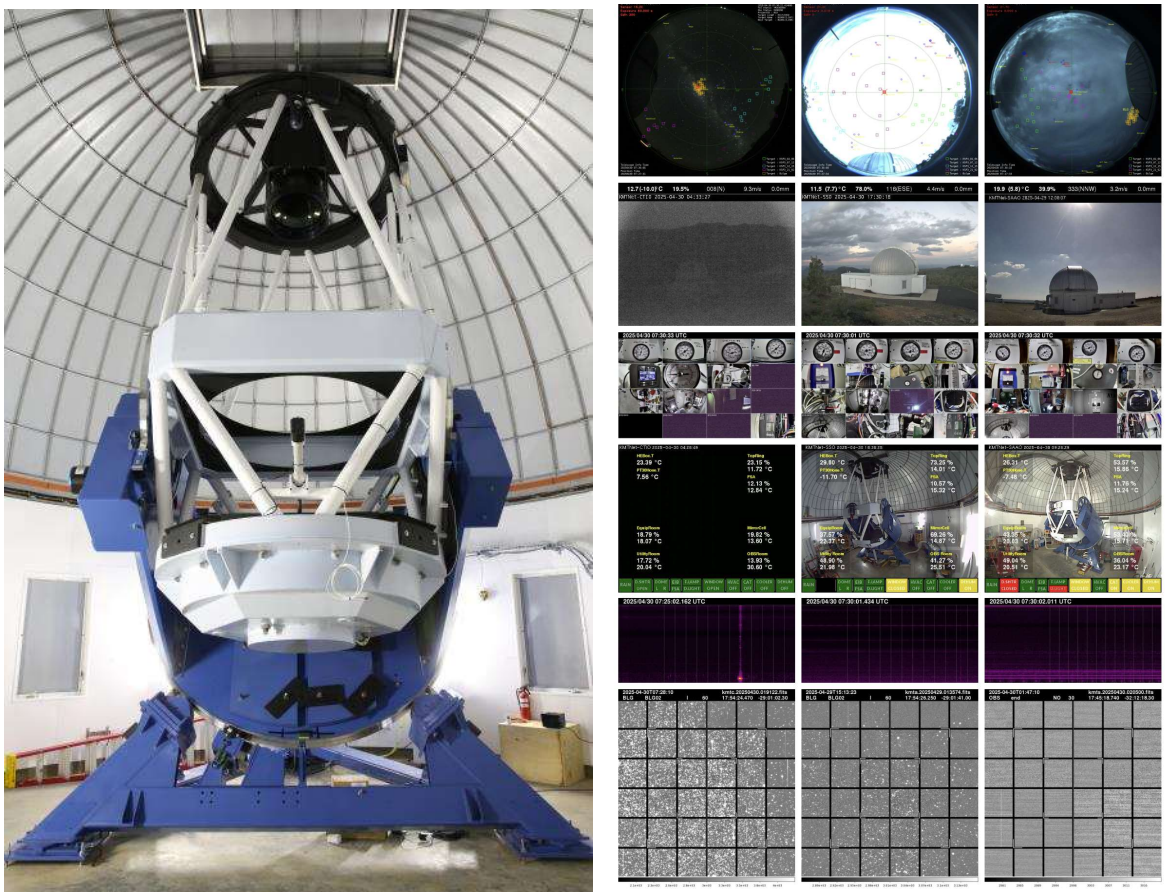
칠레 KMTNet 관측소와 은하수

▶ KMTNet 개발 배경에 대한 설명 바랍니다.

KMTNet은 처음부터 미시중력렌즈 현상을 이용한 외계행성 탐색을 주된 과학 목표로 설계한 외계행성 탐색전용 관측 시스템입니다. 중력렌즈 현상은 두 천체가 관측자와 정확히 일렬로 정렬되어야 발생하는데, 이 같은 현상이 발생할 확률을 높이기 위해서는 별들이 밀집해있는 우리은하 중심부를 지속적으로 관측하는 것이 가장 효과적입니다. 우리은하 중심부는 북반구보다 남반구에서 훨씬 오랜 시간 동안 안정적으로 관측할 수 있기 때문에, KMTNet은 칠레, 남아프리카공화국, 호주에 동일한 성능을 갖춘 관측 시스템으로 구축되었습니다. 시스템을 설계하는 과정에서는 정밀한 시뮬레이션과 실제 관측소에서 수집된 데이터를 활용했습니다. 각 관측소의 장기 날씨 통계, 시상(seeing) 자료를 기반으로, 미시중력렌즈 현상을 검출할 수 있는 최적의 관측전략을 도출했고, 그 결과 망원경 구경은 1.6미터, 시야는 2도 × 2도로 결정했습니다. 또한, 주초점 방식의 광시야 광학계를 채택하고, 적도의식 마운트를 사용하여 전체 관측시야에 대해 안정적인 측광 정밀도를 확보할 수 있도록 설계했습니다. 광학계는 모두 구면(spherical)을 사용하여, 복잡한 비구면보다 가공과 정렬이 간단하고 안정성이 높은 구조로 구성했습니다. 또한, 3개의 고분해능 액추에이터를 이용해 초점과 틸트를 능동적으로 조정함으로써, 관측 중 발생할 수 있는 미세한 광학 변화도 효과적으로 보정할 수 있게 했습니다.

KMTNet은 단순히 성능 좋은 망원경 하나를 만든 것이 아닙니다. 세 대의 동일한 망원경을 지구의 경도를 삼등분한 위치에 배치하여, 24시간 끊김 없는 연속 관측이 가능한 전 지구적 관측망을 세계 최초로 구현했다는 점에서 매우 큰 과학적 의미를 갖습니다. 과학 목표를 실현하기 위해서는, 예를 들어 I-밴드 기준 60초 노출 시 17.5등급 천체에서 약 1% 수준의 측광 정밀도를 확보해야 했습니다. 이 요구 조건을 바탕으로, 광학계, 카메라, 망원경 구조물, 제어 시스템 등 모든 구성 요소를 고려하여 설계했습니다. 전

체 관측망의 개념 수립 이후, 2009년부터 2014년까지 설계 및 제작을 완료하고, 이후 현장 설치와 시험 관측을 거쳐 2015년 10월부터 본격적인 과학 관측을 시작했습니다.



외계행성 탐색시스템과 실시간 관측 모니터링 화면

▶ 외계행성을 발견하는 방법에 대한 설명 바랍니다. (KMTNet 방법도 설명)

외계행성을 발견하는 방법에는 여러 가지가 있지만, 주요 방법 세 가지에 대해 말씀드립니다. 가장 널리 알려진 외계행성 발견법은 트랜짓(transit)과 시선속도(radial velocity) 방법입니다. 트랜짓 방법은 행성이 별 앞을 지나갈 때 별빛을 아주 미세하게 가리는 현상을 포착하여 행성의 존재를 확인합니다. 시선속도 방법은 행성의 중력이 중심별에 작용해 별이 미세하게 움직일 때 발생하는 시선속도 변화를 측정함으로써 행성을 찾아냅니다. KMTNet은 이들과는 다른, 미시중력렌즈(microlensing) 방법을 사용합니다. 이 방법은 앞에서 자세히 설명했는데, 가장 큰 장점은 별이나 행성의 밝기, 거리, 스펙트럼 유형에 크게 제한이 없어 지구형 외계행성은 물론 중심별로부터 멀리 떨어진 장주기 행성과 중심별이 없는 나홀로행성(free-floating planets)까지도 발견할 수 있다는 것입니다. 이는 특히 외계행성의 분포 통계 및 형성 이론 연구에 매우 중요한 데이터를 제공합니다. 한편, 중력렌즈 현상은 본질적으로 일회성

천문현상이기 때문에, 한 번 발생하면 다시 반복되지 않으며, 현상이 지속되는 짧은 시간 안에 모든 관측 데이터를 확보해야만 합니다. 그래서 이러한 현상을 실시간으로 포착하고 전 데이터를 관측할 수 있는 체계적인 관측 시스템이 반드시 필요합니다. 바로 이 점에서 KMTNet의 장점이 극대화됩니다. KMTNet은 지구 경도를 삼등분한 칠레, 남아프리카공화국, 호주에 동일한 망원경을 배치해 24시간 밤하늘을 연속적으로 관측할 수 있도록 구성되어 있어, 중력렌즈 현상이 발생하면 언제든 발견할 수 있습니다. 또한 미시중력렌즈 방법은 단순히 행성의 존재만을 확인하는 것이 아니라, 밝기 곡선의 패턴 분석을 통해 행성과 모항성의 질량비, 궤도 반지름, 거리 등 다양한 물리적 특성까지 추정할 수 있습니다. 최근에는 이러한 방식으로 지구형 외계행성뿐 아니라, 다중행성계, 행성 주위의 위성 발견까지 매우 다양한 질량의 외계행성 발견을 시도하고 있습니다. 결과적으로 미시중력렌즈 방법은 기존의 방식으로는 발견하기 어려웠던 외계행성 영역을 탐색할 수 있는 매우 강력하고 보완적인 도구이며, KMTNet은 이 방법으로는 전 세계적으로 가장 이상적인 관측 시스템이라고 생각합니다. 실제로 KMTNet은 매년 수천 건의 중력렌즈 현상을 발견하고, 이 중 수십 건이 외계행성의 발견으로 이어지고 있습니다.



호주 KMTNet 관측소와 은하수

▶ 앞으로의 외계행성 연구는? KMTNet의 미래는?

앞으로의 외계행성 연구는 이제 단순히 '행성이 존재하는가'를 밝히는 단계를 넘어서, '어떤 행성이 있는가', '그 행성은 어떻게 형성되었고 어떤 환경을 갖추고 있는가', 그리고 '그 안에 생명이 존재할 수 있는가'라는 근본적인 질문들로 확장되고 있습니다. 즉, 외계행성의 통계적 분포, 행성대기 구성 요소, 공전궤도 등을 정밀하게 분석하고, 이를 바탕으로 행성계의 형성과 진화 메커니즘을 규명하는 방향으로 진화하고 있다고 볼 수 있습니다. 이러한 흐름 속에서 KMTNet의 역할은 앞으로도 중요한 위치를 차지할 것이라 생각합니다. KMTNet의 미시중력렌즈 방법을

통해 지구형, 가스형, 그리고 나홀로 행성(free-floating planets) 등 다양한 외계행성들을 탐색하고 있으며, 시간이 지남에 따라 충분한 샘플이 축적되면, 이를 기반으로 외계행성의 형성과 진화에 관한 보다 본질적인 연구가 가능해질 것입니다. 특히 앞으로는 중력렌즈 방법뿐만 아니라, 시선속도(Radial Velocity), 트랜짓 타이밍 변이(TTV) 등 다양한 방법과의 융합 연구가 본격화될 예정입니다. 서로 다른 방법에서 얻어진 정보를 통합 분석함으로써, 질량, 반지름, 밀도, 대기 조성 등 외계행성의 다차원적인 물리량을 보다 정밀하게 파악할 수 있게 되면, 단일 방법만으로는 얻기 어려웠던 복합적이고도 풍부한 과학적 연구를 가능하게 해줄 것으로 기대합니다.

KMTNet 시스템 자체도 기술적으로 꾸준히 고도화되고 있습니다. AI 기반 자율 관측 시스템과 실시간 외계행성 탐지 파이프라인이 개발되고 있으며, 이를 통해 기존보다 훨씬 빠르고 정밀한 관측과 데이터 처리가 가능하리라 기대합니다. 더불어 차세대 CCD 카메라 성능 개선, 광학계 정비, 데이터 처리 인프라 확대 등의 작업도 함께 진행되고 있어, 시스템 전반의 안정성과 성능이 점차 향상되고 있습니다. 무엇보다 중요한 것은 KMTNet이 독립적인 시스템을 넘어 차세대 대형 관측 시설과 유기적으로 연결되는 글로벌 관측망의 일부로 역할을 시작했다고 점입니다. 예를 들어 LSST(베라 루빈 관측소), NASA의 Roman 우주망원경 과의 연계 관측에 대한 공동연구가 협의되었고, 원활한 수행을 위해 기존 시스템의 고도화를 통해 지상-우주 국제관측망을 구축하는 것이 저희의 중장기 목표입니다. 장기적으로는 외계행성 탐색을 넘어, 생명체 탐사, 다중 행성계의 형성 이론 검증, 그리고 행성과 항성 간 상호작용에 대한 물리적 해석까지 포함하는, 복합적인 연구 체계로 확장해 나갈 계획입니다. KMTNet은 한국이 독자적으로 구축해 성공적으로 운영해 온 과학 인프라입니다. 앞으로도 그 성과를 더욱 확장시켜, 보다 넓은 과학적 질문에 답을 찾고, 국제 공동연구와 기술 혁신의 중심에서 외계행성 탐사의 미래를 열어가고자 합니다.



남아공 KMTNet 관측소와 은하수

▶ 이 분야를 꿈꾸는 젊은 연구자들에게 전하고 싶은 말씀이 있다면요?

지구에서 가장 가까운 별은 태양입니다. 태양이 우리에게 제공하는 따듯한 햇빛은 생명 유지의 필수적 요소이며, 우리가 존재할 수 있는 가장 근본적인 에너지원이기도 합니다. 지구에서 두 번째로 가까운 별은 약 4.25광년 떨어진 곳에 위치한 프록시마 센타우리 입니다. 이 별은 태양 질량의 약 0.12배이지만, 지구 질량에 가까운 외계행성을 가지고 있는 것으로 알려져 있습니다. 4.25광년이라는 거리는, 빛의 속도로도 무려 4.25년이 걸리는 거리이기 때문에, 현재의 기술로는 도저히 도달할 수 없다고 여겨질 수 있습니다. 그러나 과학기술은 놀라운 속도로 발전하고 있으며, 지금은 불가능해 보이는 그 거리도 머지않아 도전 가능한 영역이 될 것이라 믿습니다. 외계행성 탐사는 더 이상 먼 미래의 이야기가 아닙니다.

우리는 외계행성을 연구함으로써 행성이 어떻게 형성되고 진화하며, 결국 어떤 과정을 거쳐 소멸하는지에 대해 과학적으로 접근할 수 있습니다. 이 연구는 단순한 발견을 넘어 인류 지식의 외연을 확장시키는 가치 있는 일입니다. 나아가 각기 다른 환경을 가진 외계행성에서 다양한 형태의 생명 가능성을 탐색하는 연구도 매우 흥미진진할 것으로 기대됩니다. 그래서 저는 우주의 신비를 밝히고자 하는 도전적인 분들께 이 분야를 권하고 싶습니다. 외계행성 탐사는 단순히 데이터를 처리하고 논문을 쓰는 일이 아닙니다. 그것은 우주를 향해 질문을 던지고 그 질문에 대한 해답을 과학적으로 찾아가는 과정이며, 그 자체만으로도 철학적이면서도 깊이 있는 여정이라 생각합니다. 이 길을 꿈꾸는 젊은 연구자들에게 꼭 드리고 싶은 말씀은, 무엇보다 '좋은 질문'을 던질 줄 아는 호기심을 지켜달라는 것입니다. 좋은 질문은 연구의 출발점이고, 그 질문에 답하려는 끈질긴 노력이 결국 중요한 과학적 발견으로 이어집니다. 또 하나 강조하고 싶은 점은 이 분야는 융합과 협력이 필수적인 영역이라는 사실입니다. 지금의 외계행성 탐사 연구는 천문학, 물리학뿐만 아니라 기기공학, 데이터 과학, 인공지능, 통계학, 생물학, 심지어 철학까지 다양한 분야와 연결되어 있습니다. 그만큼 다양한 배경과 시야를 가진 사람들이 함께 문제를 해결할 수 있는 열린 연구환경이기도 합니다. 우주를 향한 호기심과 과학적 열정이 있는 분들이라면, 도전을 망설이지 않으셨으면 좋겠습니다.

※ 참고 관련 사이트: KMTnet 홈페이지 http://kmtnet.kasi.re.kr/kmtnet/

※ 관련 문의 : 이충욱 한국천문연구원 우주과학탐사본부 외계행성탐사센터장
leecu@kasi.re.kr