

2026.1.22.(목) 01:00

보도 시점

(국제 엠바고)

배포

2026.1.19.(월) 09:00

(2026.1.22.(목) 조간)

국내 연구진, 태양계 탄생의 비밀 풀었다 ... 제임스 웹 우주망원경으로 관측 성공

- 서울대 이정은 교수 연구팀 연구 성과, 네이처 지(誌) 논문 게재
- 행성이 형성되는 원리(메커니즘)에 대한 새로운 이정표 제공

과학기술정보통신부(부총리 겸 과기정통부 장관 배경훈, 이하 ‘과기정통부’)는 서울대학교 이정은 교수 연구팀이 별이 생성될 때 규산염이 결정화되는 과정을 세계 최초로 관측하여 입증하는 데 성공했다고 밝혔다.

과기정통부 기초연구사업(중견연구, 기초연구실)의 지원으로 수행한 이번 연구 성과는 세계 최고 권위의 학술지 「네이처(Nature)」에 1월 22일(현지시간 1.21.(수) 16시, 그리니치 평균시<GMT>) 게재*되었다.

* 논문명 : Accretion bursts crystallize silicates in a planet-forming disk

지구의 지각을 구성하고 있는 물질 중 약 90%를 차지하는 규산염은 지구형 행성과 혜성을 구성하는 핵심 성분이다.

특히, 규산염의 결정질 형태는 600℃ 이상의 고온 환경에서만 형성되는 것으로 알려져 있는데, 극도로 차가운 태양계 외곽에 있는 혜성에서 결정질 규산염이 발견되면서 고온 환경에서 형성된 물질이 어떻게 태양계 외곽으로 이동했는지에 대한 의문이 제기되어 왔다.

그동안 전 세계 많은 연구자가 난류 혼합이나 대규모 물질 이동 등의 가설을 세워 추측하는 데에만 그쳤을 뿐 규산염의 결정화와 이동이 동시에 일어나는 것이 관측되는 증거는 부족했다.

이정은 교수는 20여 년 동안 별이 태어나는 과정을 연구해 오며, 태아별의 폭발적 질량 유입이 혜성을 구성하는 성분의 화학적 상태를 근본적으로 변화시킬 것으로 예상했지만, 이러한 변화를 정확히 관측할 수 있는 감도와 해상도를 가진 망원경이 그 당시에는 존재하지 않았다.

이후, 미국항공우주국(NASA)의 제임스 웹 우주망원경이 성공적으로 발사되면서 이론적 예측을 실제로 검증할 수 있는 성능을 갖춘 망원경이 확보되었고, 그동안 구상해 온 연구를 실제로 수행할 수 있는 환경이 마련되었다.

국내에서 유일하게 제임스 웹 우주망원경 관측 시간을 확보한 연구팀은 뱀자리 성운*에 위치한 태아별 EC 53에 주목했다. EC 53은 약 18개월 주기로 밝기가 변화하기 때문에 폭발기와 휴지기를 명확히 구분할 수 있는 천체이다.

* 뱀자리 성운 : 뱀자리 방향에 있는 먼지와 수소로 이루어진 우주 구름으로, 별의 생성 장소

EC 53의 휴지기와 폭발기에서 각각 관측을 이어 나갔고, 그 결과 폭발 단계에서만 결정질 광물의 빛 띠(스펙트럼)가 검출되는 것을 확인했다. 이는 규산염 결정화가 태아별에 가까운 뜨거운 원반 안쪽에서 실제로 일어남을 확인하는 결과이다. 또한, 원반 안쪽에서 생성된 결정질 규산염이 원반 풍에 의해 차가운 외곽으로 운반될 수 있다는 것도 밝혀냈다.

이번 연구 결과는 연구팀이 오랜 기간 연구하며 쌓아온 이론적 예측이 관측을 통해 증명되어 결실을 보게 된 것으로, 결정질 규산염의 생성과 이동 원리를 밝혀낸 세계 최초의 결과이다.

연구를 이끈 이정은 교수는 “이번 연구 성과는 장기간에 걸쳐 축적된 경험이 과학적 발견으로 이어진 사례라고 생각한다”라며, “앞으로 후속 관측을 이어 나가 규산염 결정화와 물질 이동 과정의 보편성과 진화 단계에 따른 의존성을 검증할 계획이다” 라고 밝혔다.

담당 부서	과학기술정보통신부 기초연구진흥과	책임자	과장	조종영 (044-202-4530)
		담당자	주무관	허정현 (044-202-4537)
관계 기관	서울대학교 물리천문학부	교신저자	교수	이정은 (02-880-6623)

주요내용 설명

<작성 : 서울대학교 이정은 교수>

논문명	Accretion bursts crystallize silicates in a planet-forming disk
저널명	Nature
키워드	protostar (태아별), accretion (강착, 물질유입), protoplanetary disk (원시행성계원반), disk wind (원반풍), crystalline silicate (결정질 규산염)
DOI	10.1038/s41586-025-09939-3
저자	이정은 교수(제1저자, 교신저자/서울대학교), 김철환 학생(공동저자/서울대학교), 김재영 박사(공동저자/한국천문연구원), 이석호 박사(공동저자/한국천문연구원), 김영준 학생(공동저자/서울대학교), 이선재 학생(공동저자/서울대학교), 백기선 박사(공동저자/서울대학교), 그레고리 헤르츠제그(Gregory Herczeg) 교수(베이징 대학교), 덕 잔스톤(Doug Johnstone) 박사(NRC 허츠버그), 클라우스 폰토피단(Klaus Pontoppidan) 박사(JPL), 유리 아이카와(Yuri Aikawa) 교수(동경대학교), 로건 프렌시스(Logan Francis) 박사(레이덴 대학), 진미화 박사(나사 고다드 센터), 장헤린 박사(라드바우트 대학교)

1. 연구의 필요성

- 규산염은 지구형 행성과 혜성을 구성하는 핵심 광물로, 행성 형성 과정의 물리적·화학적 조건을 이해하는 데 중요한 단서를 제공한다. 특히 결정질 규산염은 규칙적인 결정 구조를 가지며, 일반적으로 섭씨 600도 이상의 고온 환경에서만 형성될 수 있는 것으로 알려져 있다.
- 문제는 이러한 결정질 규산염이 극도로 차가운 태양계 외곽에서 형성된 혜성에서도 흔히 발견된다는 점이다. 이는 태양계 형성 초기 물질이 어떤 고온 과정을 거쳐 외곽 영역까지 이동했는지에 대한 오랜 미해결 문제로 남아 있었다. 기존에는 난류 혼합이나 대규모 물질 수송, 국지적 가열 현상 등이 제안되었으나, 실제 별이 형성되는 현장에서 규산염이 언제, 어디서 결정화되고 이동하는지를 직접적으로 보여주는 관측 증거는 부족했다.

- 특히 별 형성의 매우 초기 단계인 태아별 단계에서는 두꺼운 가스와 먼지 외피로 인해 관측이 어려워, 규산염의 광물학적 진화가 언제 시작되는지는 명확히 밝혀지지 않았다. 한편, 최근 연구들은 별의 형성이 연속적인 과정이 아니라, 폭발적 질량 유입(accretion burst)이 반복되는 방식으로 진행됨을 보여주고 있으며, 이러한 폭발 현상이 원반을 고온으로 가열해 규산염 결정화를 유도할 가능성이 제기되어 왔다.
- 본 연구는 이러한 배경에서, 폭발적 질량 유입이 실제로 규산염 결정화를 일으키는지, 그리고 형성된 결정질 규산염이 혜성 형성 영역까지 이동할 수 있는지를 관측으로 검증하고자 수행되었다.

2. 연구내용

- 연구진은 뱀자리 성운에 위치한 태아별 EC 53을 연구 대상으로 삼았다. EC 53은 약 18개월 주기로 반복적으로 밝아지는 태아별로, 폭발기와 휴지기를 명확히 구분할 수 있는 드문 천체다. 이러한 주기성 덕분에 동일한 천체를 서로 다른 물리적 상태에서 직접 비교 관측할 수 있었다.
- 연구진은 제임스 웹 우주망원경(JWST)에 탑재된 중적외선 분광기(MIRI)를 이용해 EC 53을 휴지기와 폭발기에서 각각 관측했다. 두 시기의 스펙트럼을 비교한 결과, 폭발 단계에서만 약 $10\mu\text{m}$ 대역에서 새로운 규산염 방출 성분이 뚜렷하게 나타났다.
- 이 방출 성분을 이론적 광물 모델과 비교 분석한 결과, 결정질 감람석(Forsterite)과 결정질 휘석(Enstatite)의 특징적인 스펙트럼 구조가 검출되었다. 반면, 상대적으로 낮은 온도를 추적하는 $18\mu\text{m}$ 대역에서는 결정질 성분이 나타나지 않아, 해당 결정질 규산염이 기존에 존재하던 물질이 아니라 폭발 단계 동안 고온의 원반 내부에서 새롭게 형성되었음을 확인했다.

- 또한 JWST 관측에서는 빠른 원자 제트와 느린 분자 방출류가 중첩된 구조가 함께 관측되었으며, 이는 자기유체역학적 원반풍(MHD disk wind) 모델과 잘 일치한다. 연구진은 이 원반풍이 고온의 안쪽 원반 표면에서 형성된 결정질 규산염을 들어 올려 차가운 원반 외곽으로 운반할 수 있는 물리적 경로를 제공한다고 해석했다.

※ 결정질 규산염 (Crystalline Silicates)

규칙적인 결정 구조를 가진 규산염 광물로, 섭씨 600도 이상에 이르는 높은 온도에서만 형성될 수 있다. 지구를 구성하는 주요 광물 성분이며, 혜성 및 원시 행성계에서 발견되는 결정질 규산염은 태양계 형성 초기의 고온 환경과 물질 이동 과정을 추적할 수 있는 중요한 단서로 여겨진다.

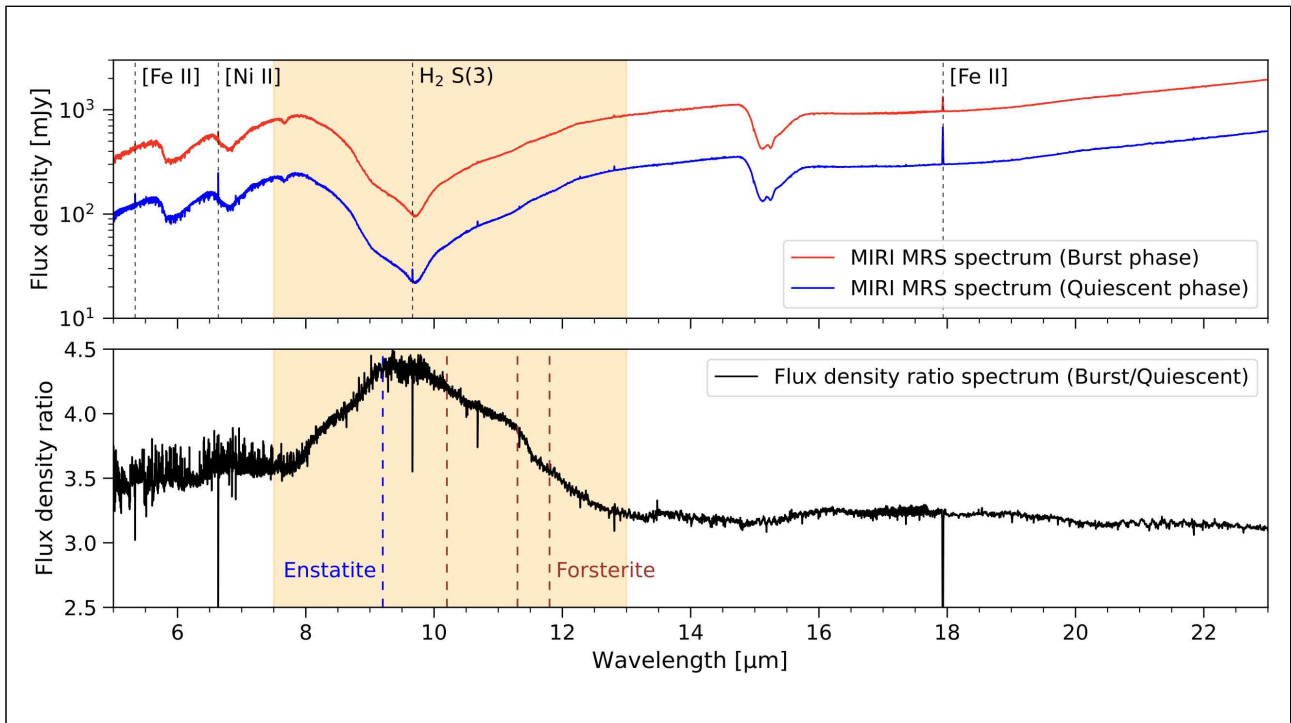
※ 원반풍 (Disk Wind)

원시행성계원반의 안쪽 영역에서 가열되거나 자기장 작용에 의해 발생하여, 원반 표면을 따라 바깥쪽으로 흘러나가는 가스 흐름을 의미한다. 원반풍은 원반 내부에서 형성된 물질을 외곽 영역으로 운반하는 역할을 하며, 별 형성 과정에서 질량과 각운동량을 조절하고 원반의 진화 및 행성 형성 환경에 중요한 영향을 미친다.

3. 연구성과/기대효과

- 본 연구는 별 형성의 매우 초기 단계에서 발생하는 폭발적 질량 유입이 규산염을 실제로 결정화시키고, 형성된 결정질 규산염이 원반 외곽으로 이동할 수 있음을 관측으로 최초 입증했다는 점에서 중요한 의의를 갖는다.
- 이는 혜성 속 결정질 규산염의 기원과 이동 과정을 하나의 일관된 물리적 시나리오로 설명하며, 태양계 형성 초기 물질 순환에 대한 이해를 크게 확장한다. 또한 별 형성 과정에서의 폭발적 진화가 단순한 밝기 변화가 아니라, 원반의 광물학적 성질과 행성 형성 환경을 근본적으로 변화시킬 수 있음을 보여준다.
- 본 연구 결과는 태양계뿐 아니라 다른 항성 주위의 행성계 형성 과정에도 보편적으로 적용될 수 있으며, 향후 제임스 웹 우주망원경을 활용한 시계열 관측 연구의 중요한 기준점이 될 것으로 기대된다.

그림 설명

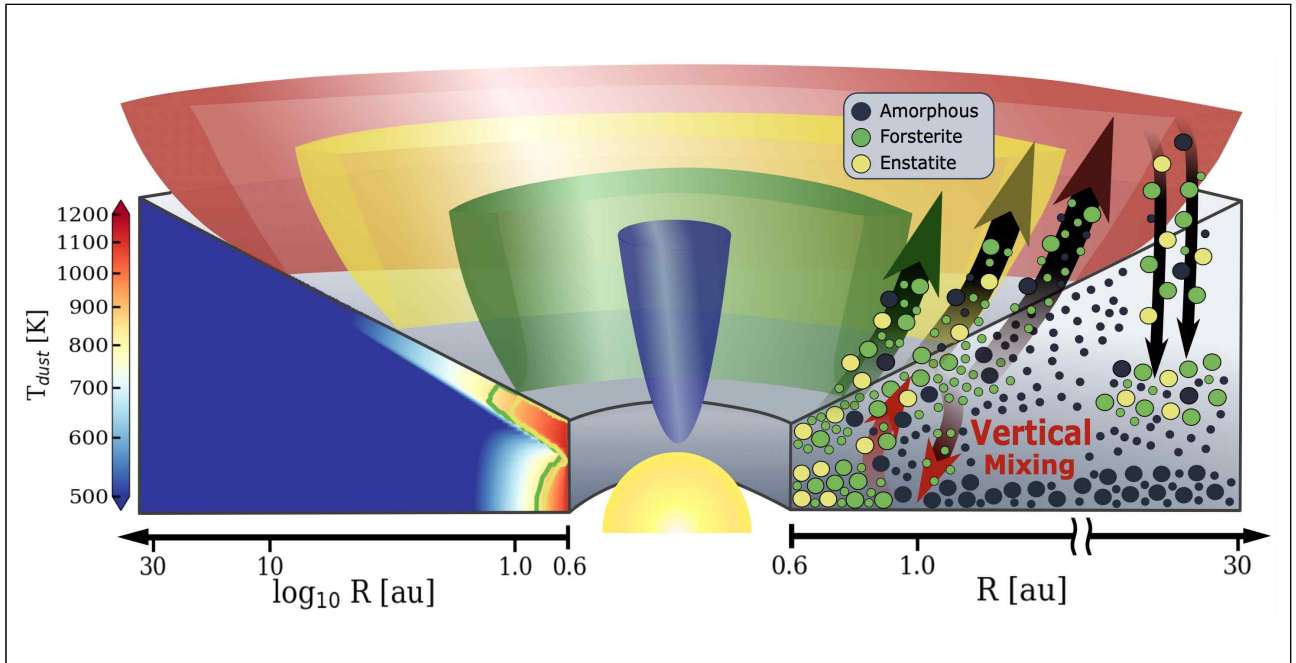


(그림1) 제임스 웹 우주망원경으로 관측한 태아별 EC 53의 중적외선 분광 스펙트럼 (J.-E. Lee et al. 2026, Nature)

(위) 제임스 웹 우주망원경(JWST)의 중적외 분광기(MIRI)를 이용해 관측한 태아별 EC 53의 스펙트럼으로, 폭발기(빨간색)와 휴지기(파란색)를 비교해 보여준다. 폭발 단계 동안 EC 53의 밝기는 평온 단계에 비해 3배 이상 증가했으며, 스펙트럼에서는 다양한 얼음 성분과 수증기에 의한 흡수 특성이 함께 나타난다. 특히 $10\ \mu\text{m}$ 부근의 규산염 흡수 특성이 가장 두드러지게 관측된다.

(아래) 폭발기와 휴지기 사이의 밝기 비율을 나타낸 그래프로, $10\ \mu\text{m}$ 부근에서 큰 증가가 확인된다. 이는 폭발 단계 동안 원시행성계원반 내부에서 규산염 방출 성분이 새롭게 나타났음을 의미한다. 수직 점선은 결정질 규산염과 관련된 스펙트럼 특징이 나타나는 파장 위치를 표시한다.

그림설명 및 그림제공 : 서울대학교 물리천문학부 이정은 교수



(그림2) 자기유체역학적 원반풍에 의한 규산염 결정화 및 재분배 모식도 (J.-E. Lee et al. 2026, Nature)

폭발 단계 동안 원시행성계원반에서 일어나는 규산염 결정화와 이동 과정을 도식적으로 나타낸 그림이다. 원반의 **왼쪽**은 폭발 단계에서의 원반 내부 **이차원 온도 분포**를 보여주며, 규산염 종류별 결정화가 일어나는 영역을 함께 표시했다. 연두색은 결정질 휘석(Enstatite), 초록색은 결정질 감람석(Forsterite)의 결정화 영역을 의미한다. 원반의 **오른쪽**은 이렇게 형성된 결정질 규산염이 혼합되고 이동하는 과정을 나타낸다. 회색은 비결정질 규산염 먼지를 나타낸다. 초록색과 연두색 구형 입자는 각각 결정질 감람석과 결정질 휘석을 의미하며, 이들 결정질 규산염은 **자기유체역학적 원반풍(MHD disk wind)**에 의해 원반 표면에서 들어 올려져 혜성이 형성될 수 있는 원반 외곽 영역까지 운반될 수 있다. 이러한 원반풍은 중심에서 방출되는 빠른 제트와 원반의 넓은 영역에 걸쳐 분포하는 느린 방출류가 중첩된 구조를 형성하며, 그림에서는 이를 수직 방향의 층 구조로 표현했다. 또한 원반 내부에서는 효율적인 수직 혼합이 일어나, 약 1 천문단위 (1 au; 태양계에서 지구 위치) 부근에서 수년 이내의 시간 규모로 원반 중간면 (midplane) 내 결정질 규산염의 비율이 증가할 수 있음을 보여준다. 한편, 원반 **왼쪽 그림**은 **로그 스케일**, **오른쪽 그림**은 **선형 스케일**을 사용해 각 영역의 물리적 특성을 효과적으로 표현했다.

그림설명 및 그림제공: 서울대학교 물리천문학부 이정은 교수

연구 이야기

<작성 : 서울대학교 이정은 교수>

□ 연구를 시작한 계기나 배경은?

별이 태어나는 과정을 연구해 오면서, 태아별이 **간헐적 강착(episodic accretion)**을 통해 성장한다는 점에 오랫동안 관심을 가져왔다. 태아별에서 폭발적인 강착이 발생하면 별의 밝기가 급격히 증가할 뿐만 아니라, 이 과정에서 방출되는 막대한 에너지가 원시행성계원반을 가열하게 된다. 이러한 가열은 장차 행성과 소행성, 혜성의 구성 성분이 되는 원반 물질의 **화학적·광물학적 상태를 근본적으로 변화시킬 것으로** 예상했다.

이러한 변화가 실제로 언제, 어떤 방식으로 일어나는지를 관측으로 확인하고자 했지만, 제임스 웹 우주망원경 이전에는 이 연구를 가능하게 할 만큼 충분한 감도와 분광·공간 해상도를 갖춘 망원경이 존재하지 않았다. 그로 인해 이 질문은 오랫동안 이론적 예측에 머물 수밖에 없었다.

약 20여 년에 걸친 기다림 끝에 제임스 웹 우주망원경이 성공적으로 발사되어 본격적인 관측을 시작하면서, 그동안 구상해 온 연구를 실제로 수행할 수 있는 환경이 마련되었다. 운 좋게도 관측 시간을 확보할 수 있었고(본인은 한국에서 유일하게 연구책임자로서 제임스 웹 우주망원경 관측시간을 확보하고 있다), 이를 통해 태아별의 폭발적 강착 과정이 원반 물질에 미치는 영향을 직접 탐구하는 연구를 본격적으로 진행할 수 있었다.

□ 연구하면서 어려웠던 점이나 장애요소는 무엇인지? 어떻게 극복(해결)하였는지?

본 연구는 제임스 웹 우주망원경(JWST)으로 수행된 **최초의 시계열 관측 프로젝트**라는 점에서 시작부터 도전적인 과제를 안고 있었다. 연구 목표를 달성하기 위해서는 태아별의 휴지기와 폭발기를 정확히 포착해야 했고, 이를 위해 **정해진 두 시점에 반드시 관측을 수행해야 하는 제약**이 있었다.

특히 이 중 한 번의 관측은 JWST의 진행 방향과 겹쳐 **미소운석 충돌 위험이 상대적으로 높은 방향**에서 이루어질 수밖에 없는 상황이었다. JWST는 초기 운영 과정에서 미소운석 충돌로 인한 일부 거울 손상이 확인된 이후, 이러한 위험이 큰 방향을 **‘Micrometeoroid Avoidance Zone(MAZ)’**으로 지정하고, 관측 계획 단계에서 해당 영역을 가능한 한 피하도록 권장하고 있다. 이는 망원경의 장기적인 성능 유지를 위한 중요한 운영 원칙이다. 그럼에도 불구하고 본 연구에서는 **폭발 시점을 정확히 맞춘 관측이 연구의 성패를 좌우하는 핵심 요소**였고, 연구의 과학적 중요성이 인정되어 해당 시점의 관측이 허용되었다. 위험을 감수하고 수행한 관측이었기에, 연구진은 관측 자료에서 반드시 의미 있는 결과를 얻고자 하는 부담과 기대를 동시에 안고 있었다.

그러나 첫 번째로 추출한 스펙트럼을 비교했을 때, 휴지기와 폭발기 사이에 뚜렷한 차이가 보이지 않아 큰 실망을 느꼈다. 그럼에도 불구하고 확보한 자료 자체의 가치는 매우 높았기 때문에, 세 대학원생과 박사 연구원들에게 JWST 관측 자료를 바탕으로 가능한 연구 주제를 나누어 주고 분석을 이어가도록 했다.

학생들과 박사 연구원들이 복잡한 분광 분석을 진행하는 동안, 연구책임자는 두 시기의 스펙트럼을 다양한 방식으로 다시 살펴보던 중, **폭발기와 휴지기 스펙트럼의 밝기비를 계산해** 보게 되었다. 그 과정에서 10마이크로미터 부근에서 매우 큰 밝기비가 나타나며, 그 스펙트럼의 형태가 **약 20년 전 스피처 적외선 우주망원경으로 관측되었던 혜성의 규산염 방출 구조와 유사하다**는 점을 깨달았다.

이 깨달음은 두 번째 관측이 이루어진지 약 5개월이 지난 시점, 미국 캘리포니아 공과대학교에서 열린 **SPHEREx 국제회의**에 참석 중이던 주간에 이루어졌다. 2000년대 초반부터 스피처, 허셜, 아카리 적외선 우주망원경을 활용해 축적해 온 연구 경험이, 제임스 웹 우주망원경의 고해상도 스펙트럼을 해석하는 데 중요한 안목으로 작용한 순간이었다.

이러한 경험은 장기간에 걸쳐 축적된 관측 경험과 새로운 관측 자원의 결합이 어떻게 과학적 발견으로 이어질 수 있는지를 잘 보여주는 사례라고 생각한다.

□ 이번 성과, 무엇이 다른가?

이번 연구의 가장 큰 차별성은 **하나의 태아별에 대해 휴지기와 폭발기라는 두 상태를 정확히 특정해 관측을 수행했다는 점**이다. 이는 우연히 관측된 서로 다른 천체나 시점을 비교하는 기존 연구들과 달리, 동일한 대상에서 하나의 사건이 일어나기 전과 후를 직접 추적할 수 있었음을 의미한다.

일반적으로 천문학자는 우주에서 발생하는 현상을 수동적으로 관측할 수밖에 없으며, 실험실 과학처럼 조건을 통제된 실험을 수행하기는 어렵다. 그러나 본 연구에서는 **폭발적 강착이라는 자연 현상을 ‘자연 실험실’로 활용**해, 하나의 물리적 사건이 원시행성계원반에 미치는 영향을 시간에 따라 비교할 수 있었다는 점에서 기존 관측과 본질적으로 다르다. 이와 같은 관측이 가능했던 것은, 기존 망원경으로는 도달할 수 없었던 **높은 감도와 공간·분광 분해능**을 제임스 웹 우주망원경이 제공했기 때문이다. JWST의 중적외선 분광 관측 능력은 태아별의 두꺼운 외피에 가려졌던 원반 내부의 미세한 광물학적 변화를 직접 검출할 수 있게 했으며, 이를 통해 폭발적 강착이 규산염의 결정화와 재분배를 유도한다는 사실을 관측으로 입증할 수 있었다.

□ 꼭 이루고 싶은 목표나 후속 연구계획은?

간헐적 강착 과정은 규산염과 같은 고체 물질뿐만 아니라, 원시행성계원반에 존재하는 얼음 분자에도 중요한 영향을 미칠 것으로 예상된다. 폭발적인 강착이 일어나 원반의 먼지가 가열되면, 먼지 표면에 응결되어 있던 얼음 분자들에서도 물리적·화학적 변화가 발생하게 된다. 이러한 과정은 얼음의 증발과 재응결, 분자 구조의 변화, 그리고 새로운 분자의 형성을 동반할 수 있다.

원시행성계원반에서 물(H_2O)을 비롯해 이산화탄소(CO_2), 메탄올(CH_3OH)과 같은 다양한 유기 분자들은 주로 얼음 상태로 형성되고 저장된다. 따라서 얼음의 성분과 분포, 그리고 그 진화 과정을 이해하는 것은 장차 형성될 행성 대기과 행성의 화학 조성을 결정하는 핵심 요소다. 이는 생명의 기원과 직결되는 물질이 어떻게 초기 행성계에 공급되는지를 이해하는 데에도 중요한 단서를 제공한다.

향후 연구에서는 한국천문연구원과 미국 항공우주국(NASA)이 공동 개발하여 현재 관측을 수행 중인 SPHEREx 우주망원경을 적극 활용할 계획이다. SPHEREx는 우리은하 전역에 걸친 얼음 분자의 분포 지도를 구축할 수 있을 뿐만 아니라, 폭발적 강착을 겪고 있는 태아별들을 효율적으로 식별할 수 있는 능력을 갖추고 있다.

연구진은 SPHEREx를 통해 다양한 진화 단계에 있는 폭발하는 태아별 후보를 선별한 뒤, 이를 제임스 웹 우주망원경(JWST)으로 정밀 관측함으로써, 원시행성계원반에서 먼지 입자의 광물학적 변화뿐만 아니라 얼음의 성분과 공간 분포가 어떻게 진화하는지를 종합적으로 규명하고자 한다. 이를 통해 별과 행성이 형성되는 과정에서 물과 유기물이 어떤 경로를 거쳐 행성계로 전달되는지를 보다 입체적으로 이해하는 것이 궁극적인 목표다.

연구자 소개

<이정은, 제1저자, 교신저자>



1. 인적사항

- 소 속 : 서울대학교 물리천문학부
- 전 화 : 02-880-6623

2. 학력

- 2005 미국 텍사스대학교 박사 (천문학)
- 2005~2007 미국 캘리포니아대학교 박사후 연구원 (허블 펠로우)

3. 경력사항

- 2022 ~ 현재 서울대학교 물리천문학부 교수
- 2025 ~ 현재 한국연구재단 기초연구본부 전문위원
- 2024 ~ 2025 한국천문학회 부회장
- 2021 ~ 2022 과학난제 중력파우주연구단 전문위원
- 2011 ~ 2022 경희대학교 우주과학과 교수
- 2007 ~ 2011 세종대학교 천문우주학과 교수
- 2021 학술상 (한국천문학회)
- 2017 ~ 2018 경희 펠로우쉽
- 2015 교육부장관 표창
- 2013 LG 연암 해외연구교수
- 2009 젊은 천문학자상 (한국천문학회)
- 2005 ~ 2007 나사 허블 펠로우쉽

4. 전문분야 정보

- 천문학 (별탄생, 성간물질, 성간화학)

5. 연구지원 정보

- 2024 ~ 현재 과학기술정보통신부 집단연구지원 사업(글로벌 기초연구실)
- 2021 ~ 현재 과학기술정보통신부 개인기초연구 사업(중견연구)

연구팀 사진

