우주 암흑기와 재이온화기 그리고 SKA

(전문) 전파망원경의 발전 역사는 그 자체로 흥미롭습니다. 전파천문학의 기원은 1930년대에 천문학자 젠스키가 우리 은하에서 발생한 전파 신호를 검측하며 시작되지만, 기술적 측면에서는 전파 수신을 위한 안테나 발명(1880년대 토마스 에디슨)이 전파망원경의 기원이며 전쟁기술이 발달하던 2차 세계대전 시기 레이다 발명 및 활용이 기술 발전의 근간이 됩니다. 일례로 전파망원경으로 하늘의 특정 지역을 추적 관측하는 방법은 KF-21 전투기에 장착된 AESA 레이다의 원리와 근본적으로 동일합니다. 휴대폰 안테나는 이동 통신 신호를 수신하기도 하지만, 하늘에서 오는 신호를 수신하기도 하므로 전파망원경이기도 합니다. 그에 덧붙여, 파장이 긴 전파는 회절 한계로 인한 어려움이 남아 있지만, 이를 여러 개의 안테나를 배치하여 구성하는 "간섭계" 시스템으로 극복할 수 있음을 피조와 미켈슨이 발견하여 현재에 이르고 있습니다.

#주요 키워드 # SKA

국제 거대전파망원경(이하 SKA, Square Kilometer Array)

호주와 남아프리카공화국에 건설 중인 국제 거대전파망원경. 기존 전파망원경보다 해상도, 관측속도, 감도 등이 뛰어난 성능이 기대되며, 2030년 완공을 목표하고 있다.

전파망원경은 전파를 검출하기에, 전파가 많이 발생하는 천문현상에 특화되어 있습니다. 전자레인지의 작동 파장대와 비슷한 우주배경복사를 비롯하여, 우리은하 및 외부은하의 물질 분포, 별 탄생 영역, 블랙홀, 펄서 등이 주로 연구되고 있습니다. 최근에는, 우주 초기에 속하는 "우주 암흑기"와 "우주 재이온화기"를 탐색하고자 거대 전파간섭계를 건설 중인데, 대한민국 정부도 큰 관심을 가지고 참여 노력을 기울이는 SKA가 그 대표 격으로서 건설과 유지에 물경 5조 원 내외의 재원이 요구되는 대형 국제 협력 프로젝트이기도 합니다.



__그림 1. 왼쪽:__ 한국 KVN 전파간섭계의 탐라(제주도) 망원경, __가운데:__ 지름 500m로 세계 최대 단일 전파망원경인 중국의 FAST, __오른쪽:__ 호주에 건설 중인 초대형 전파 간섭계인 SKA 망원경

▶ 교수님의 주요 연구 분야와 연구 그룹에 대한 간략한 소개 부탁드립니다.

“우주 암흑기 연구”

우주는 탄생 이후 약 30만년간 우리에게 익숙한 천체(행성, 별, 은하)를 만들지 못합니다. 그래서 우주에서 최초의 별이 만들어지기까지 우주는 매우 어둡다는 의미로 이 시기를 “우주 암흑기” 라고 부릅니다. 저희 연구그룹은 우주 암흑기를 탐색하는 방법을 다각적으로 모색 중입니다. 매우 어두운 시기이지만, 익숙한 원소인 수소와 헬륨이 3 대 1의 질량비로 우주를 가득 메우면서 아주 약한 빛을 방출하던 시기이기도 합니다. 이 빛은 중성수소 분광선인 21cm선(파장이 21cm인 빛)으로서 수소에서 방출되기에, 이를 이용하여 우주 암흑기를 직접 관측하고 분석하는 방법론을 연구하고 있습니다. 우주암흑기를 직접 관측할 수 있으면 우주의 물질 분포 탐색, 우주론 모형 확인 등이 가능해집니다. 아직은 이에 대한 확실한 전파 관측 결과는 전무한 상태이어서, 많은 연구자들이 노력을 기울이고 있는 현대천문학의 프론티어 분야이기도 합니다.

연구에는 전파망원경 스펙(specification 혹은 configuration)의 이해도 필요하기에, 개별 전파망원경 스펙을 기반으로 관측데이터의 분석과 관측 예측을 수행하고 있습니다. 서두에 거론된 SKA는 호주와 남아프리카에 각각 다른 과학임무를 수행하고자 건설되고 있으며, 이 중 호주의 SKA가 우주 암흑기 연구에 사용될 예정입니다. 이외에도 호주의 MWA, 인도의 GMRT, 유럽의 LOFAR, 중국의 21CMARRAY, 미국/남아공의 HERA 등이 이미 관측 임무를 수행하고 있습니다. 이들 망원경을 이용하여 얼마나 오랜 기간 동안 하늘을 관측하고, 어떻게 관측 데이터를 분석하면 원하는 우주 암흑기 신호를 찾아낼 수 있는지의 방법론을 개발 중입니다.

“우주 재이온화기 연구”

어둡기만 하던 우주에 최초로 별과 은하가 탄생하면서, 우주 암흑기가 종료되는 동시에 “우주 재이온화기” 가 시작됩니다. 별과 은하는 여러 파장대에서 빛을 내는데, 에너지가 강해 우리 피부에도 영향을 미치는 자외선은 수소의 전자를 벗겨내는 이온화를 야기합니다. 따라서 별의 탄생 시점은 곧 우주의 수소가 이온화되는 시점과 일치하는데, 수소는 우주의 극초기에 먼저 이온화 상태에 있다가 우주 암흑기에는 중성 상태에있던 터라 이를 재이온화라고 명명합니다. 우주 재이온화기에 별과 은하는 균일하게 분포하지 않고, 그에 따라 별과 은하 주위에 수소가 이온화된 영역이 비균일하게 존재하고 그 외에는 중성수소가 분포하는 형태로 우주 재이온화가 진행됩니다(그림 2). 광원의 성질에 의하여 분포의 형태가 달라지므로, 우주재이온화기를 잘 이해하는 것은 그 시기의 별과 은하의 다양한 성질을 판독함과 다를 바 없습니다. 현재 활발한 관측을 수행중인 제임스웹 망원경(JWST)이 몇몇 초기은하들을 직접 관측 중인데, 이에 상응하며 더 방대한 정보를 얻을 수 있는 방법이 우주재이온화기의 중성수소 분포 관측입니다.

저희 연구그룹은 우주 재이온화기에 발생하는 물리현상을 컴퓨터 시뮬레이션이나 해석학적 방법으로 구현하고, 이를 어떻게 관측할 수 있는지에 대한 방법론을 연구 중입니다. 컴퓨터 시뮬레이션에는 다중 CPU 혹은 다중 CPU+GPU 조합의 병렬컴퓨터를 사용하고, 최근에는 "CoDa(Cosmic Dawn project)"라고 명명한 국제연구팀의 참여를 통하여 수십만 개의 CPU 코어를 사용한 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 분석하고 연구논문을 출판 중입니다. 이러한 시뮬레이션과 해석학적 연구를 통하여 아직 관측되지 않은 우주 재이온화기의 현상을 구현하고, 이후 본격적인 관측이 이루어질 때를 대비하고 있습니다.

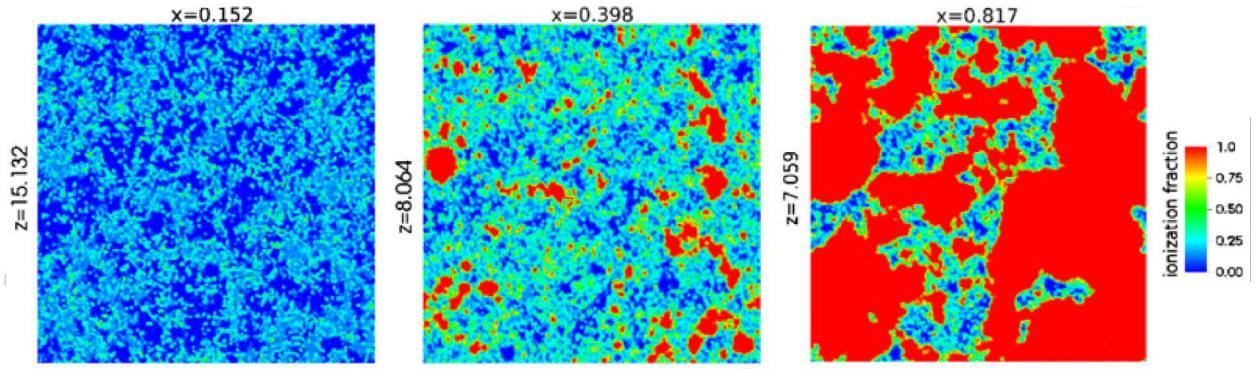


그림 2. 컴퓨터 시뮬레이션으로 구현한 우주 재이온화의 진행도. 색은 푸른색(이온화도 0%)에서 붉은색(이온화도 100%)까지 중성수소의 이온화도(x)를 나타낸다. 적색편이량(z)이 클수록 더 먼 과거를 나타내며, 시간이 지남에 따라 이온화된 수소의 "거품"이 점차 자라나고 합쳐지며 우주 전역을 뒤덮게 되어 중성수소가 점차 사라지는 과정을 볼 수 있다(Ahn et al. 2012). 대형 전파간섭계를 통하여 이러한 우주 재이온화 과정을 중성수소 분포의 직접 관측으로 그려낼 수 있을 것으로 기대하고 있다.

저는 SKA 전파망원경 프로젝트의 과학임무에 직접 참여 중입니다. 현재 한국 SKA 과학그룹과 국제 SKA CD/EoR(우주암흑기/우주재이온화기) 과학 그룹에 동시에 참여하고 있습니다. 후자의 활동 일환으로 2014년 전 세계 과학자들이 모여 출간한 SKA 과학백서에서 우주 재이온화기 관련 챕터의 작성을 담당하였고, 2025년 출간 예정인 새 SKA 과학백서에서는 SKA를 이용한 광시야 관측으로 우주 암흑기와 재이온화기 탐색하기 주제의 챕터 작성을 준비 중입니다. 이러한 노력이 후속 연구 세대에 이어져 우주 재이온화기 연구에서 한국이 주도적 역할을 수행하는데 밑거름이 되었으면 합니다.

“연구그룹 소개”

저희 연구 그룹은 박사후 연구원 1명, 대학원생 1명으로 소규모입니다. 박사후 연구원인 오민지 박사는 은하 서베이를 통한 우주론 연구를 수행 중이고, 이 경험을 살려 우주 암흑기/재이온화기 연구에 다양한 방법론을 도입하고 있습니다. 대학원생인 이다희 학생은 우주마이크로파배경복사(CMB) 및 JWST 관측으로 추정된 광도함수를 이용하여 우주 재이온화기 시기의 은하 형성에 이론적 제한을 가하는 연구를 진행 중입니다. 근시일 내에 박사후 연구원 1명과 대학원생 1명이 추가로 연구그룹에 합류할 예정입니다. 저희 그룹은 국내 및 국외의 연구자들과 활발한 공동 연구를 진행하고 있습니다.

▶ 현재 국내 천문학계에서 교수님과 유사한 연구를 하는 연구자와 최근 연구동향을 소개해 주십시오.

우주 암흑기 연구는 우주론의 한 분야인 거대구조 연구와 직접적으로 연관됩니다. 저 역시 거대구조 연구도 수행 중이지만 이를 주된 연구 주제로 삼는 연구자로는 고등과학원 박창범 교수님, 정동희 교수님, 서울대학교 황호성 교수님, 연세대학교 지명국 교수님, 한국천문연구원 송영선 박사님, 홍성욱 박사님, David Parkinson 박사님, Arman Shafieloo 박사님, 세종대학교 Graziano Rossi 교수님, 이외에도 언급하지 못한 여러분들이 계십니다. 우주 재이온화 연구와 우주 초기의 은하 형성 연구를 아우르는 영역에서는 우주항공청 박재홍 박사님, 연세대학교 김태선 교수님, 서울대학교 김지훈 교수님, 경희대학교 전명원 교수님, KAIST 김준한 교수님, 한국천문연구원 신지혜 박사님 등이 활약하고 있습니다.

우주 거대구조는 어떻게 우주가 진화하는지를 알려주는 중요한 척도로 사용됩니다. 수십 년의 노력으로 우주 표준모형이 정립되었는데, 최근의 은하 서베이 데이터들은 기존의 표준모형이 어쩌면 조금 틀릴 수 있다는 가능성을 암시하고 있습니다. 따라서, 이를 확정 짓기 위하여 더 많은 은하를 관측(은하 서베이)하고, CMB 이외의 빛(예: 21cm선, 일산화탄소선, 수소 라이먼알파선)을 배경복사로 사용하는 노력이 진행 중입니다. 우주 암흑기와 우주 재이온화의 연구는 21cm선과 일산화탄소선이 주 관측 대상으로서 가까운 미래에 본격적인 관측 결과가 도출될 예정입니다. 이들 연구주제는 컴퓨터 시뮬레이션, 해석학적 계산, 다양한 파장대의 망원경 사용 및 데이터 분석 노력이 복합적으로 이루어져야 가능해지는 작업으로서, 현재의 연구추세는 이전보다 더 많은 과학자와 기술자가 큰 팀을 이루어 공동 협력을 하는 방식으로 발전하고 있습니다.

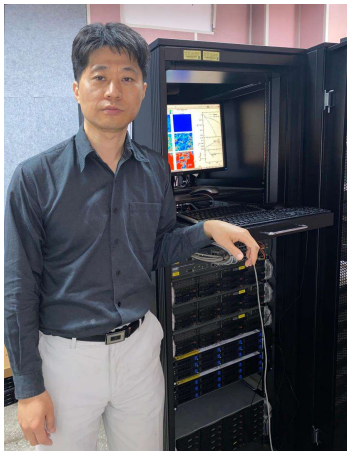



그림 3. 조선대학교 천체물리학 연구실. 좌에서 우 순서로 안경진 교수, 이다희 학생(박사과정 대학원생), 오민지 박사(박사 후 연구원). 교수 옆 기기는 리눅스 병렬 컴퓨터로 컴퓨터 시뮬레이션 등에 활용 중이다.

▶ SKA를 많이 언급하셨는데, 이에 대하여 조금 더 자세히 설명해 주세요.

"가장 거대한 전파간섭계"

일단 SKA는 규모가 거대합니다. SKA는 저주파수 대역을 관측하는 SKA-LOW와 중간 주파수 대역을 관측하는 SKA-MID가 각각 호주와 남아프리카의 사막 지역에 건설되고 있습니다. 2027년 완공을 목표로 하는 SKA 1단계에 있어, SKA-LOW는 약 2.2m 높이의 알루미늄 안테나가 13만여개, SKA-MID는 지름 15m의 안테나가 200여개 설치되고, 최대 150km 거리 안에서 미리 계획된 위치에 배치되게 됩니다. 그리고 이러한 간섭계 내의 안테나들은 대략 (안테나 개수)^2 만큼의 전기 신호로 전환되고 이를 컴퓨터 하드디스크에 저장해야 합니다. 이에 소요되는 물적 자원(망원경 재료, 전기 시설, 컴퓨팅 시설 등)과 이를 운용/관리할 인적 자원의 규모가 기존의 전파간섭계 모두를 압도합니다. 게다가 최종 단계인 SKA 2단계 건설/운용에는 1단계보다 10배가량의 자원이 더 소요될 예정으로, 이에 대한 구체적 계획은 현재 논의 중입니다.

"최고 감도의 전파간섭계"

어느 파장 영역의 망원경이건 높아진 감도는 이전보다 더욱 어두운 천체나 천문현상 관측을 가능케 합니다. SKA의 개념은 약 30여년 전 우주 재이온화기를 관측할 방법을 찾던 과학자들이 필요한 최소 감도를 제시하면서 시작되었습니다. 빛을 모으는 영역의 총면적이 km^2(square kilometer)은 되어야 관측이 충분히 정밀해진다는 계산에서 비롯하여 SKA로 명명된 기기를 구상하였었고, 실제 최종 단계에서는 이를 실현하는 것이 목표입니다. 지금은 SKA의 과학 목표가 크게는 5가지로 확장되었고 세부 목표도 많아져 거의 전 영역의 천문학 연구를 가능케 할 것으로 여겨집니다.

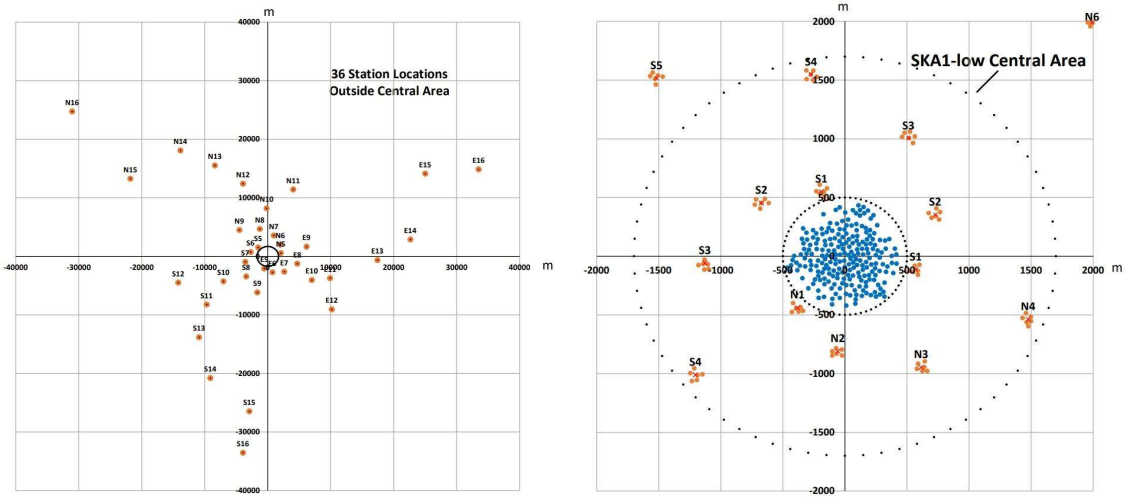


*그림 4. 2027년 완공 목표로 호주에 건설 중인 1단계 SKA-LOW의 어레이 구성(array configuration). **왼쪽**: 80 km 규모에서의 어레이 구성. 각 점에는 256개의 안테나가 엮인 스테이션이 6개씩 모여 배치된다. 중심부 원은 우측 그림에 확대되어 나타난다. **오른쪽**: 4 km 규모에서의 중심부 어레이 구성. 각 점은 스테이션 1개에 해당한다. 정중앙 지역에는 256개의 스테이션이 밀집되어 분포된다. 최종단계인 2단계에서는 스테이션의 개수가 10배 이상으로 증가될 예정이다.*

▶ 현대 천문학은 과거의 천문학과 어떤 차이가 있나요?

모든 과학기술 분야의 발전이 그렇듯이, 천문학 역시 기술 발전의 도움을 크게 받는 학문입니다. CCD의 발명은 기존 필름을 사용한 이미지 저장법에 비하여 천문 관측 효율을 크게 향상했으며, 레이더 기술의 발전과 컴퓨팅 자원의 발전은 전파 천문학 발전으로 이어졌습니다. 망원경 제작 기술의 발전속도는 비약적이며, 몇몇 위성 망원경은 지구에서 1.5백만 광년 떨어진 라그랑쥐 점까지 날아간 후 관측을 수행하므로 발사체 기술도 매우 중요합니다. 따라서 현대 천문학 연구에서 뒤처지지 않으려면, 어디서, 누가, 어떤 망원경을 제작 중인지 늘 예의 주시하여야 합니다. 관측결과의 분석에는 AI를 많이 활용하여 기존의 통계적 분석 방법의 제한을 넘어서기도 하니, 천문학에서도 AI의 사용 능력이 중요해졌습니다. 또한 기술개발을 하는 공학자 없이는 천문학이 불가능한 시대가 되었습니다.

전파천문학에 있어서는 기술의 발전이 오히려 부작용을 불러오기도 합니다. 인류의 상호 소통에 이용되는 이동통신 신호는 전파망원경에 검출되어 늘 골칫거리입니다. 게다가 스페이스X가 만들어 지구궤도를 돌고 있는 스타링크 위성들은 전파망원경이 피할 수 없는 신호를 줄지어 하늘을 날며 방출하고 있어, 전파천문학자들의 걱정을 키우고 있습니다. 따라서 스페이스X와 천문학계가 대화와 타협으로 이에 대한 대책을 마련 중입니다. 기술의 진보가 인류의 문화와 삶의 터전을 망치지 않고, 되려 지식과 환경의 균형 잡힌 발전을 이끌어내길 기대하며 부족한 글을 마칩니다.