블랙홀과 중력 그리고 SKA
- 우주 탐구의 새로운 지평을 열어나가다

(전문) 21세기 노벨 물리학상 수상자 명단에는 우주를 연구하는 천문학과 천체물리학 분야 연구자가 부쩍 많아졌습니다. 최근에는 블랙홀 연구자들의 이름이 자주 등장하고 있습니다. 대표적으로 2020년에는 로저 펜로즈가 블랙홀 형성이 일반 상대성 이론의 확실한 예측이라는 점을 발견한 공로로 노벨상을 받았고, 라인하르트 겐첼, 안드레아 게즈는 우리은하 중심의 초대질량 '응집 천체'를 발견해 노벨상을 공동 수상했습니다. 그리고 라이너 바이스, 킵 손, 배리 배리시는 한 쌍의 별 질량 블랙홀이 병합해 하나로 합쳐지며 발생한 중력파를 발견한 공로로 2017년 노벨상을 받았습니다. 이는 블랙홀이 신기하고 흥미로운 천체인 것뿐만 아니라 중력과 일반 상대성 이론을 연구할 최적의 대상이며, 인류의 과학기술이 블랙홀을 정밀 관측할 수준에 도달했기 때문입니다. 이번 호에서는 블랙홀 관련 연구들과 이를 관측하기 위한 국제 거대전파망원경에 대해 알아봅니다.

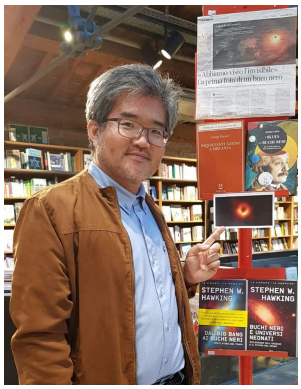
#주요 키워드 # SKA

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.

▶ 박사님과 연구팀에 대해서 간략한 소개를 부탁드립니다.

저는 초대질량블랙홀과 그 주변에서 일어나는 현상을 자세히 관측하는 연구를 수행하고 있습니다. 관측을 위해서 수백 킬로미터 또는 더 멀리 떨어진 망원경을 연결하여 큰 가상의 망원경을 구현하고, 망원경 사이의 최대 거리만큼 우수한 분해능(해상도)을 가질 수 있는 초장거리 전파간섭계(VLBI, Very Long Baseline Interferometry)라는 기술을 활용하고 있습니다. 그리고 이를 활용해 초대질량블랙홀과 그 주변을 자세히 들여다보고 다양한 물리량을 측정하는 연구를 수행하고 있습니다.





한국에서 열린 SKA 워크숍 단체사진

▶ 블랙홀을 어떻게 관측하나요?

블랙홀은 빛도 탈출할 수 없는 어두운 천체이지만, 사건지평선* 바깥에서는 에너지와 입자를 방출할 수 있습니다. 여기에는 크게 두 가지 방출 방식이 있습니다 하나는 스티븐 호킹이 제안한 것으로 유명한 **호킹 복사**라는 방법입니다. 블랙홀 사건지평선 바로 바깥에서 가상입자 쌍이 생기고 사라지기를 반복하다 보면, 그중에 한 짝은 블랙홀로 떨어지고, 다른 짝은 우주로 방출되는 경우가 발생하는데 이를 호킹 복사라고 합니다. 이 복사는 특히 작고 가벼운 블랙홀이 사라지는 마지막 순간에 강력한 폭발을 보일 것으로 예상됩니다. 이런 폭발은 아직 관측되지는 않았지만, SKA가 이를 관측할 수 있을 것으로 기대하고 있습니다. 1970년대에 호킹 복사가 제안되었을 때, 이를 관측하려고 시도하던 중 나온 아이디어가 **WIFI 발명**으로 이어진 것은, 기초과학 연구로부터 파생된 대표적 기술 사례로 꼽힙니다.

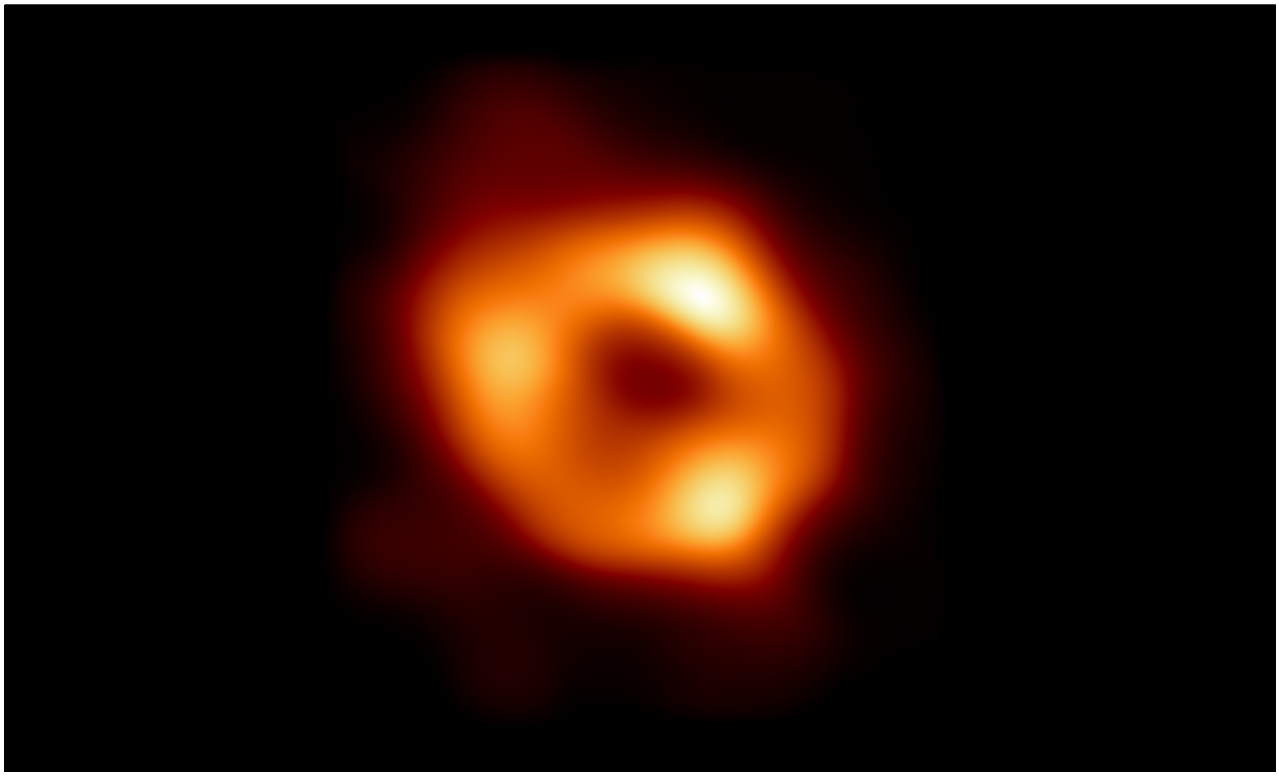


그림 1. 인류가 관측한 은하수 중심부에 있는 블랙홀 이미지 (출처: EHT Collaboration)

블랙홀이 에너지와 물질을 방출하는 또 하나의 방식은 블랙홀로 끌려 들어가던 물질들이 일으키는 마찰에서 에너지를 얻는 것입니다. 예를 들면, 지구로 떨어지는 운석이나 인공위성 잔해는 지구 대기와 마찰을 일으켜 엄청난 빛, 열, 소음 등을 만들며 많은 에너지를 소모한 후에 지구 표면에 충돌합니다. 블랙홀 주변에서도 비슷한 일이 일어나는데 규모는 엄청나게 큽니다. **블랙홀이라는 강한 중력을 가진 천체의 주변에는 물질에 모여있어 블랙홀로 끌려가던 물질은 이들과 큰 마찰을 빚게 됩니다.** 이 마찰로 온도가 높아져 그 일대는 이온화**되어 플라스마*** 상태가 되고 강력한 빛을 방출합니다. 이 플라스마가 블랙홀에 바짝 붙어 **부착원반을 형성**하고 블랙홀 주변을 도는데, 블랙홀 주변에 강한 전류가 흐르는 모양이 되어 **전기장과 자기장**이 만들어집니다. 이런 현상은 모든 종류의 블랙홀에서 발생할 수 있지만, 특히 태양 질량의 백만 배 이상의 질량을 가진 초대질량블랙홀에서 잘 관측됩니다. **블랙홀 주변에서 만들어진 자기장은 마치 제트 엔진의 노즐과 같은 역할을 해서 방출되는 이온화된 물질과 전자의 속도를 빛의 속도에 가까울 정도로 빠르게 가속합니다.**

* 사건지평선: 블랙홀의 안과 밖을 나누는 넓은 경계지선

** 이온화: 원자나 분자가 전자를 잃거나 얻어 전기를 띄는 상태로 변하는 현상

*** 플라스마: 고온이 되면서 기체는 플러스와 마이너스 전기를 갖는 입자로 분리가 되는 상태

▶ 초대질량블랙홀을 관측하는 이유를 설명해 주세요.

초대질량블랙홀을 주 연구 대상으로 삼는 이유는 크게 두 가지입니다. 하나는 위에서 설명한 방출 현상이 강력해서 작은 블랙홀보다 관측하기 쉽다는 점이고, 또 하나는 초대질량블랙홀은 크기가 엄청나게 크기 때문에 우리가 아주 먼 거리에서 관측해도 사건지평선 주변을 볼 수 있는 기회를 제공하기 때문입니다. 블랙홀은 질량이 증가하면서 부피가 엄청나게 확장됩니다. 즉 블랙홀의 크기는 질량에 비례하기 때문에, 질량이 백만 배 차이 나면 크기도 백만 배 차이가 납니다. **우리 주변에 있을지도 모를 가볍고 어두운 블랙홀보다 멀리 있더라도 밝고 질량이 큰 블랙홀이 관측에 유리합니다.**

▶ 전파는 전자기파 중 파장이 아주 긴 전자기파인 것으로 알고 있습니다. 블랙홀 관측에서 가시광선이 아닌, 전파 관측을 하는 이유가 있나요?

앞서 설명한 블랙홀의 에너지 방출 과정에서 이온화된 물질이 자기장으로 된 제트 노즐을 통과하며 빛의 속도에 가깝게 가속한다고 했는데 이러한 과정을 거쳐 **싱크로트론 복사라는 전자기파가 방출**됩니다. 이는 특히 전파 대역에서 강력하며, **1930년대에 무선통신 실험을 하던 중에 이런 강력한 전파를 내는 천체가 발견되어 전파천문학이라는 분야가 시작됐**습니다. 전파를 내는 천체를 자세히 관측하려고 전파망원경을 개발하던 중 전파간섭계라는 새로운 기술이 등장합니다. 전파는 파장이 길어서 전파의 파형을 시간에 따라 기록할 수 있습니다. 이 특성을 이용하면 멀리 떨어져 있는 망원경에서 각자 전파를 관측한 신호를 기록한 후에 컴퓨터로 합성해서 **마치 두 망원경 사이의 거리만큼 큰 구경의 망원경 역할**을 할 수 있습니다. 이런 망원경을 빛의 간섭현상을 이용한다고 해서 전파간섭계 망원경이라고 부릅니다. 전파보다 파장이 짧은 적외선부터는 양자역학적인 한계 때문에 전자기파의 신호를 기록해서 합성하는 방식의 관측은 불가능합니다. 기술적으로 수십 미터 이상의 크기를 가진 광학망원경은 구현하기 어려운데, 전파간섭계 망원경은 지구 크기인 13,000킬로미터는 물론 인공위성 전파망원경을 활용해서 350,000킬로미터의 초장거리 전파간섭계 구현에 성공하기도 했습니다. 이것은 지구에서 달까지의 거리에 필적하는 거리입니다. 초장거리 전파간섭계의 성과 중 최근 널리 알려진 것으로는 **우리 한국 연구진이 참여하고 있는 사건지평선망원경 프로젝트의 블랙홀 영상 촬영**이 있습니다.

- 사상 최초로 M87의 중심부 블랙홀 관측 영상

https://www.youtube.com/watch?v=sIEwkepgeA0

▶ 블랙홀을 관측하고 연구하기 위해서 SKA의 활용에 어떤 중요성이 있나요?

블랙홀은 중력 연구를 위한 최고의 실험실입니다. 우선 블랙홀이 존재한다는 자체가 일반 상대성이론을 지지하는 강력한 증거입니다. 그리고 뉴턴역학과 아인슈타인의 일반 상대성이론이 설명하는 중력의 차이를 극명히 보여줍니다. **시공간의 왜곡 현상들**이 블랙홀의 사건지평선 주변에서 일어나기 때문이죠. **두 개의 블랙홀이 하나로 합쳐질 때 발생하는 중력파**는 중력을 이해하는 중요한 자료가 됩니다. 기존의 중력파는 별 질량 블랙홀 또는 중성자와 별 사이의 병합 또는 그들 사이의 병합한 결과들입니다. 이런 '작은 규모'의 중력파는 지상의 레이저 간섭계를 이용해서 검출할 수는 있지만 크기가 작아 아무리 큰 망원경으로도 자세히 살펴볼 수 없습니다. 초장거리 전파간섭계로도 그 영상을 얻을 수 없습니다. 그런데 초대질량블랙홀 병합 과정에서 중력파가 발생한다면 이야기가 다릅니다. **SKA는 중성자별이라는 우주에서 가장 정밀한 시계가 보내오는 펄스 신호를 감시하고 있다가 초대질량블랙홀의 병합이 발생하면 그 신호의 변화를 감지하여 바로 그 위치를 확인할 수 있습니다.** 그리고 초장거리 전파간섭계는 이런 병합 과정을 높은 분해능(해상도)으로 관측할 수 있습니다. 이러한 정밀 관측을 통해서 일반 상대성이론의 검증은 물론 대안 중력이론과 블랙홀에 대한 이론의 검증도 가능해질 것입니다.



그림 2. SKA 중간주파수(SKA-Mid) 첫 번째 망원경 설치 장면 (출처: SKAO)

▶ SKA 프로젝트를 통해 기대하는 바는?

뉴턴역학에서 일반상대성이론으로 중력에 대한 이해가 발전했기 때문에 위성 통신, GPS 등 위성 항법과 같은 기술이 가능해졌습니다. 블랙홀과 중력에 대한 다음으로 중요 발견은 SKA를 통해 이루어질 것이라고 기대하고 있습니다. 그리고 초대질량블랙홀의 상대론적 제트 현상은 그 자체로 매우 흥미로운 천문학과 천체물리학 연구주제입니다만, 이에 더하여 **최근에는 지구에서 만들 수 없는 강력한 입자가속기**라는 블랙홀 제트의 새로운 가능성이 조명받고 있습니다. 최근 초대질량블랙홀 제트에서 발생한 고에너지 뉴트리노가 검출되었는데, 기본입자 표준모델에 어떤 영향을 끼칠지 그 귀추가 주목됩니다. SKA가 가진 높은 감도와 빠른 탐색 능력을 활용해 이런 제트를 초기에 발견하고 추적 관측한다면 이 분야에도 크게 이바지할 것으로 기대합니다.



그림 3. SKA 낮은 주파수(SKA-Low)의 두 지역(Station) 설치 장면 (출처: SKAO)

▶ SKA 건설로 우주 연구에 새로운 지평이 열릴 것 같습니다. 여기에 한국은 어떤 역할을 하게 될 것으로 예상하나요?

한국은 한국우주전파관측망(KVN)이라는 혁신적인 전파간섭계를 개발하여 전파 고주파수 대역(1cm 이하 파장)의 초장거리 전파간섭계 연구 및 개발에서 선도적인 역할을 하고 있습니다. 국제적인 연구 및 개발을 선도하고 있을 뿐만 아니라, 이를 활용할 우수한

전문 인력 배출도 꾸준히 이루어져 국내외 대학과 연구소에서 블랙홀 연구와 전파간섭계 개발에 활약하고 있습니다.

최근 추진 중인 차세대 사건지평선망원경과 밀리미터파 인공위성 전파망원경 계획들에서는, **한국우주전파관측망이 성공적으로 입증한 동시 다주파수 수신 시스템을 도입할 계획**입니다. 특히 저주파수 대역에서 밝던 블랙홀도 고주파수 대역에서는 급격히 어두워지기 때문에, 낮은 주파수의 관측 정보로 높은 주파수 관측 정보를 복원하는 한국우주전파관측망 기술은 미래 고주파수 전파간섭계 블랙홀 관측에 필수 기술입니다.

초장거리 전파간섭계 분야에서 한국이 갖춘 역량은 SKA에서도 큰 역할을 할 것으로 기대합니다. SKA는 기존의 어떤 망원경도 따라올 수 없는 높은 감도와 매우 빠른 탐색 속도를 자랑하지만, 분해능(해상도) 면에서는 초장거리 전파간섭계에 미치지 못합니다. **한국 연구진은 SKA에 초장거리 전파간섭계의 분해능을 부여하는 새로운 방식의 SKA-VLBI(SKA-초장거리 전파간섭계)를 계획**하고 있습니다. SKA가 중력파 또는 전파 돌발(격변) 현상을 발견하는 동시에, SKA-VLBI를 통해 초고분해능 영상을 얻고 한국우주전파관측망을 중심으로 한 글로벌 초장거리 전파간섭계로 다파장 관측을 수행한다면, 초대질량블랙홀의 병합과 그 전후를 정밀하게 연구하는 시대가 열릴 것으로 기대합니다.

※ 참고 관련 사이트: SKAO(SKA 프로젝트를 주관하는 국제기구) 홈페이지 https://www.skao.int

※ 관련 문의 : 손봉원 한국천문연구원 책임연구원 bwsohn@kasi.re.kr