

암흑물질과 암흑에너지

2018년 9월 10일

전응진



아인슈타인의 상대성 이론에 따르면 물질과 에너지는 서로 별개의 것이 아닙니다. 임의의 물질의 질량(m)은 그 값에 광속(c)의 제곱을 곱한 값(mc^2)에 해당되는 에너지($E = mc^2$)로 바뀔 수 있고, 또한 그 반대로 에너지도 질량으로 전환될 수 있기 때문입니다. 그런데 우리는 일상적인 경험으로 물질과 에너지는 서로 다른 어떤 것임을 인식하고 있습니다. 물질은 최소단위의 질량을 가진 알갱이가 뭉쳐서 이루어져 있는 것, 즉 모래알갱이가 모여 있는 것 같은 상태이고, 에너지는 질량은 없지만 일을 할 수 있는 능력을 가진, 마치 물처럼 연속적으로 퍼져 있는, 어떤 것을 일컫는 말입니다. 구체적으로 빛에너지, 열에너지, 위치에너지(수력발전의 에너지)등을 떠올리면 될 듯합니다. 상대성이론의 입장에서 보면 이 둘은 서로 다른 성질, 상태를 가진 물질-에너지라고 하겠습니다. 그러면 이 앞에 암흑을 붙인 “암흑물질”과 “암흑에너지”란 무엇일까요?

당대 최고의 물리학자였던 파인만 Richard P. Feynman은 “세상만물은 원자로 이루어져 있다”라는 명제가 현대과학의 요체라고 했습니다. 세상만물을 우리 주변의 모든 사물, 공기, 물, 생명체, 그리고 우주의 별(항성)과 흑성들로 국한한다면 맞는 말입니다. 그러나 우주 공간을 채우고 있는 모든 것을 말한다면, 이는 5%만 맞는 말입니다. 현재 우리는 우주 공간이 5%의 보통의 물질과 25%의 암흑물질, 70%의 암흑에너지로 채워져 있다고 알고 있습니다. 파인만 시대 때에는 알지 못했던 사실입니다. 보통의 물질이란 원자로 이루어져 있는 것들, 즉 전자(렙톤)와 양성자, 중성자(더 작게는 쿼크)로 구성된 것들을 일컫습니다. 우주에는 쿼크와 렙톤으로 구성되지 않은, 따라서 보통의 별들과는 달리 빛을 낼 수 없는 어두운 물질이 존재하는데 이를 암흑물질이라고 부릅니다. 우리는 아직도 암흑물질을 구성하고 있는 “입자”의 정체를 알고 있지 못합니다. 우주 구성의 최대 지분을 차지하고 있는 암흑에너지는 더욱 신비스러운 존재입니다.

다. 암흑에너지라는 조어는 우주론연구를 선도했던 마이클 터너^{Michael S. Turner}가 1998년 즈음에 처음 사용해서 유행 되기 시작한 말입니다. 물질도 아니고 빛에너지 같은 것도 아닌, 모종의 상태에 있는 알 수 없는 에너지라는 뜻에서 암흑물질과 대칭적으로 사용한 것입니다. 이 암흑에너지는 아주 독특한 성질을 가지고 있습니다.

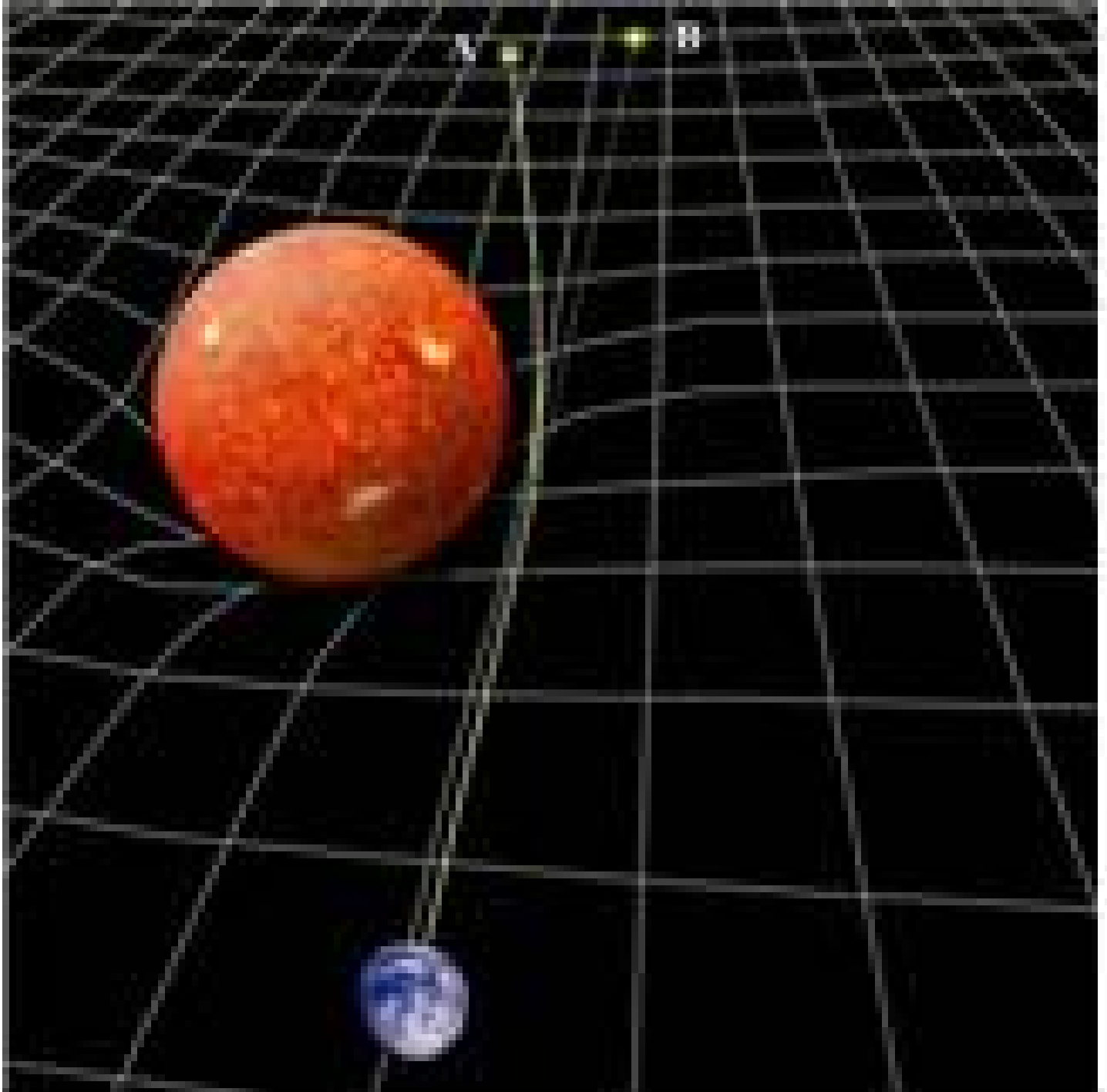


그림1. 일반상대성이론의 중력

아인슈타인은 1915년 두 물체사이에서 작용하는 만유인력 또는 중력은 근본적으로 두 물체가 만들어낸 시공간의 휘어짐 때문에 일어난다고 설파하며 일반상대성이론을 발표합니다. 비유하자면, 고무막 위에 무거운 물체를 올려놓으면 막이 아래로 휘게 되고 그 주변에 작은 공을 놓으면 안으로 굴러 내려가는 현상이 나타나는데, 이것이 바로 중력에 의해 이끌리는 것으로 보인다는 것입니다. 이 경우 놀라운 결론이 도출되는데, <그림1>에서 보여주는 것처럼 무거운 물체 주변을 지나가는 빛도 시공간의 휘어짐에 따라 (즉 중력에 이끌려) 휘어진 경로를 따라간다는 사실입니다. 이 신기한 현상은 불과 몇 년 뒤인 1919년에 관측됩니다. 그해 5월에 일식이 일어났는데 그때 잘 알려진 별의 위치를

관찰했더니 실제 위치인 N이 아니라 H에 있는 것으로 관측된 것입니다. 이 사건은 그 당시 엄청난 뉴스거리였고 상상할 수 있듯이 아인슈타인과 일반상대성이론을 아주 유명하게 만들었습니다. 그런데 어떤 일인지 상식을 뒤바꾸어 놓은 세기의 업적, 일반상대성이론 그리고 특수상대성이론에는 노벨상이 주어지지 않았습니다. 아인슈타인은 광전효과와 발견에 대한 공로로 1921년 노벨상 수상자가 되었습니다.

아인슈타인은 1917년 일반상대성이론을 우주에 적용하여 우주가 시간에 따라 어떻게 변화되어왔는지를 풀어냈는데, 이 우주방정식을 통해 현재 우리는 우주의 나이 등 여러 가지 우주의 역사에 대한 많은 정보를 알아내고 있습니다. 우주가 물질로만 가득 차 있다면 서로의 중력에 의해 끌어당겨져 팽창하던 우주도 종국에는 아주 작은 점으로 줄어들게 될 겁니다. 다른 한편 우주에 빛에너지(또는 질량이 없는 입자들)만 있다면, 물질로 차 있는 우주에 비해 2배나 더 휘게 되어 팽창 속도가 줄어드는 비율이 2배가 됩니다. 즉 더 빨리 수축하게 되는 것이지요.

암흑에너지라는 놈은 아주 신기한 성질을 가지고 있습니다. 우주가 암흑에너지로만 차 있으면 우주의 팽창하는 속도는 줄어드는 것이 아니라 오히려 늘어납니다. 즉 가속팽창을 하게 된다는 말이지요. 우주가 가속팽창을 하면 아주 멀리서 오는 별빛의 파장이 더욱 길어져 (더 빨리 멀어지는 앰블런스 가 내는 소리의 파장이 더 길어져 늘어지게 들리는 것처럼) 빨간색 쪽으로 더욱 많이 편향되어 보입니다. 바로 이 현상을 1998년에 초신성에서 오는 빛을 관측하던 두 실험그룹에서 확인하게 되었고, 우주의 진화에 대한 우리의 지식에 혁명적인 변화를 가져오게 되었습니다. 당연히 2011년에는 이 업적에 노벨상 물리학상이 주어졌습니다.

암흑에너지의 대표적인 사례가 아인슈타인이 1917년 논문에서 처음 제시한 “우주상수”라는 것입니다. 보통의 물질과 에너지에 의해 우주가 점점 수축하게 되는 것을 방지하기 위해, 적당한 양의 우주상수를 도입해서 시간에 따라 변하지 않는 우주(정상우주)를 만들어내었던 것입니다. 아인슈타인을 비롯한 그 당시의 사람들은 우주의 상태가 시간에 따라 변화한다는 사실을 받아들이지 못했을 것입니다. 오늘 보는 별들 사이의 거리가 수년 전에 보았던 거리와 같았고, 더욱이 선조들이 기록해 놓았던 그대로였을 테니 이렇게 생각했다는 것이 이상하지는 않습니다. 마치 태양이 지구 주위를 도는 것이라고 오랫동안 믿어왔던 것처럼 말입니다. 그러나 그 당시에도 상식을 거부했던 소수의 사람들이 있었습니다. 1922년 프리드만^{Jerome I. Friedman}은 팽창하는 우주의 가능성을 처음 제시하였고, 1927년에는 가톨릭 사제이면서 과학자였던 르메트르^{Georges Lemaître}가 프리드만 논문의 존재를 알지 못한 채 독립적으로 우주가 팽창하고 있을 수 있다고 주장하였습니다. 현재는 공식적인 과학용어로 쓰이고 있는 “대폭발”이란 말은 사실 이런 주장이 터무니없다고 비꼬기 위해 탄생한 용어입니다. 우주가 팽창하고 있다면 과거로 갈수록 우주가 작아져야 하는 데 그럼 태초에 한 점에 지나지 않았던 우주가 크게 폭발해서 현재의 우주가 되었겠느냐는 비판이었습니다.

그런데 대반전이 일어나기까지는 얼마 걸리지 않았습니다. 1929년에는 그 유명한 허블^{Edwin Hubble}의 관측으로 우주가 실제로 팽창하고 있다는 사실이 밝혀지게 되었습니다. 이로써 프리드만과 르메트르는 대폭발우주론의 창시자로 인정받고, 아인슈타인은 우주상수를 도입한 것이 자신의 최대의 실수라고 고백하게 됩니다. 아인슈타인이 정상우주를 위해 생각해냈던 이 우주상수를 현재 우주의 가속 팽창을 설명하는데도 쓸 수 있는데, 암흑에너지의 정체가 정말 우주상수인지 아니면 다른 어떤 것인지는 아직 밝혀지지 않고 있습니다. 더 멀리서 오는 (따라서 더 희미한) 많은 초신성의 빛을 관측하여 암흑에너지의 정체를 구체적으로 밝혀내려는 노력이 꾸준히 시도되고 있어, 아마도 몇 년 뒤에는 아인슈타인의 대실수가 또 다른 비상한 업적으로 평가되는 반전이 일어날지 모릅니다.

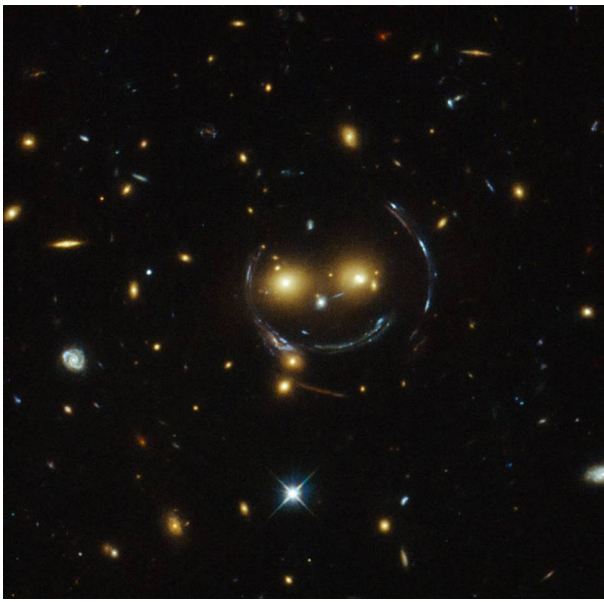


그림2. 중력렌즈효과

NASA, ESA

그럼 우주 전체 에너지양의 25%를 차지하고 있는 암흑물질이란 무엇일까요? 암흑물질에 대한 가설은 1922년 네덜란드의 천문학자 칼테인에 의해 처음 제시되었다고 합니다. 그 뒤 1933년 스위스의 천문학자 츠비키^{Fritz Zwicky}는 코마 은하단 안에 있는 은하들의 회전속도를 측정하여 얼마만한 중력에 이끌려야 그런 속도를 얻을 수 있는지 분석했습니다. 은하단 (수백 개에서 수천 개의 은하로 구성된) 은하단 안에는 항성, 가스 등 빛을 내어 우리가 볼 수 있는 천체들과 흑성, 블랙홀 등 빛을 내지 않는 천체들로 차 있습니다. 은하단의 끝자락에 있는 은하는 그 안에 있는 모든 천체들의 질량에 이끌리는 중력에 의해 궤도 운동을 할 텐데, 은하단의 중심으로부터의 거리와 회전속력을 측정하면 뉴턴의 만유인력 방정식으로부터 간단히 은하단 안의 총 질량을 얻어낼 수 있습니다. 이로부터 츠비키는 관측된 천체의 질량보다 400배나 많은 질량이 있어야 한다는 결론을 도출했습니다. 빛을 내지 않지만 필요한 중력 작용을 일으킬 수 있는 물질, 즉 암흑물질의 존재를 처음 과학적으로 논증한 것입니다. 물론 이 숫자는 현재 알려진 것보다 수십 배나 크지만, 이후 계속된 여러 천체들의 회전속도 관측에서도 유사한 결론들이 도출되어 암흑물질의 필요성은 더욱 확고해져 왔습니다.

암흑물질의 존재에 대한 또 다른 그리고 더욱 결정적인 증거가 있는데, 이를 얻는 데에도 일반상대성이론의 힘이 컸습니다. 아주 먼 곳에 있는 광원에서 뿜어낸 빛이 지구로 오는 도중에 거대한 질량을 가진 천체를 지나게 되면, 중력에 의해 빛이 휘는 효과 때문에, 사방으로 퍼져 오던 빛이 안쪽으로 모이면서 광원이 한 점으로 보이는 게 아니라 <그림2>에서 보이듯이 고리처럼 보이기도 하고, 또는 여러 점으로 나타나기도 합니다. 천체 관측 기술이 발전하면서 1980년대부터는 중력렌즈 현상을 많이 관측할 수 있게 되었는데, 이를 이용해서 렌즈효과를 주는 천체의 질량도 알아낼 수 있게 되었습니다. 과학계에 뜨거운 화젯거리가 된 사건이 2004년에 일어났는데, 서로의 중력에 의해 이끌리던 두 은하단이 충돌하는 과정이 관찰된 것입니다.

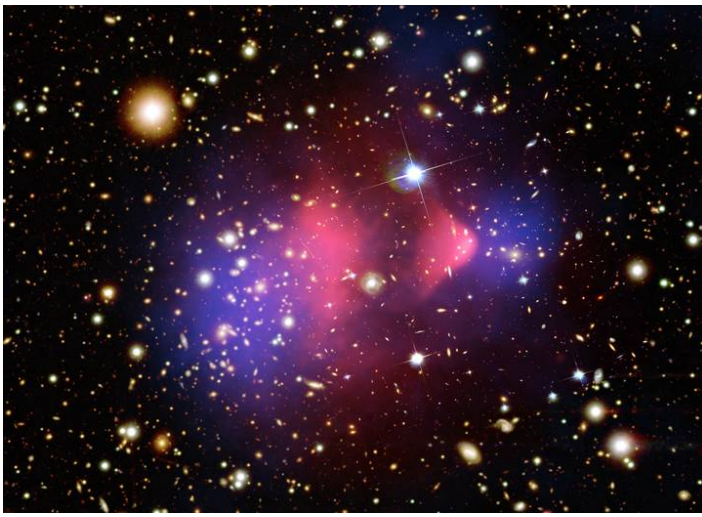


그림3. 중력렌즈효과로 알아낸 충돌

X-ray: NASA/CXC/CfA/M.Markevitch et al.; Optical: NASA/STScI;
Magellan/U.Arizona/D.Clowe et al.; Lensing Map: NASA/STScI; ESO WFI;
Magellan/U.Arizona/D.Clowe et al.

<그림3>은 부딪히면서 스쳐 지나가는 두 은하단 안의 물질 분포를 보여줍니다. 안쪽에 붉은색으로 표시된 부분은 빛을 내는 항성, 가스 등의 분포를 나타내는데, 이는 보이는 물질들을 구성하는 원자들이 방출하는 엑스선을 관측해서 얻어낸 것입니다. 바깥쪽의 파란색 부분은 빛을 내지 않는 물질의 분포를 중력렌즈 효과를 이용해서 알아낸 것을 보여줍니다. 충돌하기 전 각 은하에는 이 두 가지 종류의 물질이 마구 섞여서 분포했을 텐데, 충돌 후에는 이렇게 서로 분리되어 분포하게 되는 것입니다. 이는 파란색 부분에 있는 물질이 원자가 아닌 (원자와 상호작용을 거의 하지 않는) 새로운 입자로 구성되어 있다는 증거입니다. 원자로 구성된 보통의 물질은 서로의 전자기력에 의해 서로 더 끈끈하게 잡아당겨지고, 보이지 않는 새로운 입자로 구성된 물질은 서로 쉽게 통과해 버리기 때문입니다.

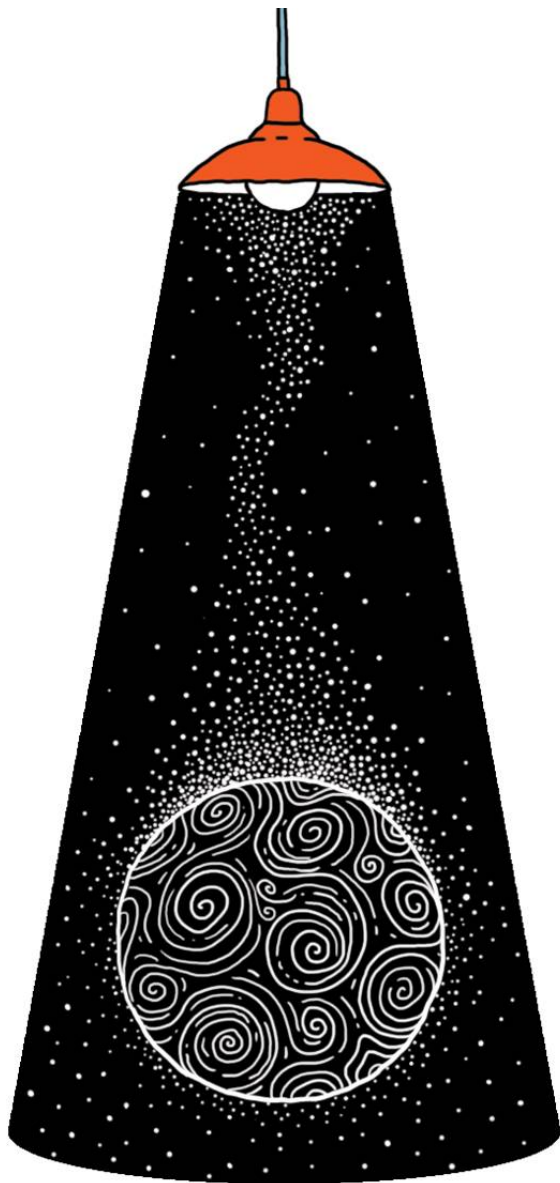
결론적으로 은하단 안에는 상당한 양의 암흑물질이 존재한다는 사실이 재확인되었고, 암흑 물질은 원자가 아닌 모종의 새로운 입자로 구성되어 있다는 사실도 밝혀진 셈입니다. 사실 암흑물질은 원자로 구성되어있으나 빛을 내지 않아서 아직 발견되지 않은 모종의 무거운 천체들로 이루어져 있는 게 아닌가 하는 의문은 계속 제기할 수 있겠습니다. 그러나 그런 것이 있다고 해도, 위에서 살펴본 천체의 회전속도나 중력렌즈 효과를 설명할 만큼의 충분한 양일 수 없다는 것이 대폭발우주론의 예측결과이기도 합니다.

표준모형의 방정식을 완성한 와인버그^{Steven Weinberg}의 저서 중에 <최초의 3분>이란 책이 있습니다. 대폭발로 태초가 열린 후 3분 동안 일어난 우주의 진화과정을 과학적으로 기술한 명저입니다. 대폭발 직전의 우주는 모든 물질-에너지가 아주 작은 점에 모여 있어 상상할 수 없이 뜨거운 플라즈마 상태로 그 온도가 $10^{32}K$ ($0K=-273^{\circ}C$)에 이를 것으로 추정됩니다. 이 작은 점이 폭발하여 급격한 팽창의 시기를 거친 이후, 계속 서서히 팽창하면서 차가워져서 여러 가지 진화과정을 거쳐 138억년이 지난 현재의 모습을 갖추게 되었다는 것이 대폭발우주론의 개관입니다.

우주의 긴 역사 동안 아주 많은 사건들이 벌어졌는데, 초기 우주의 연대기는 아인슈타인의 우주 방정식과 열역학, 입자/핵물리의 기본 원리로부터 재구성할 수 있습니다. 이 가운데에 현재 관찰로 확인된 사건 중 하나가 우주의 나이가 1초에서 3분 정도 되었을 때 일어났습니다. 대폭발 후 1초 즈음의 우주는 온도가 100억K 정도로 낮아졌고, 광자(빛)와 전자, 양성자, 중성자들로 가득 차 있는 상태였습니다. 이제 우주가 더 식으면 양성자와 중성자들의 에너지가 충분히 줄어들게 되고, 따라서 핵융합작용으로 서로 뭉쳐서 더 무거운 핵을 만들 수 있게 됩니다. 우주 나이 3분쯤이면 현재

우주에 있는 모든 원자들의 시조인 원시 원자핵(수소, 헬륨, 리튬 등)들이 모두 합성됩니다. 이 과정을 대폭발핵합성이라고 부릅니다. 이후 온도가 더 낮아지면 원시 원자핵들이 중력에 의해 뭉쳐서 은하단, 은하, 별들이 형성되고 이 안에서 더 무거운 원자핵들이 만들어집니다. 태양은 수소와 헬륨이 총질량의 99%를 차지하고 있는데 이들은 거의 모두 대폭발 후 3분간 만들어진 것으로 알려져 있습니다. 태양의 내부 온도는 1500만도 정도 되는데, 여기서도 수소 원자핵들이 융합하는 반응이 일어나 우리가 태양이 방출하는 에너지의 거의 모두가 이 과정에서 만들어집니다.

현재 우주에서 관측되는 보통 물질의 대부분은 항성, 가스등 빛을 내는 천체의 형태로 존재하는데, 이는 대폭발핵합성으로 만들어진 원자(핵)의 양과 거의 같다는 것이 밝혀졌습니다. 따라서 우주에 있는 모든 원자의 질량보다 5배나 더 많은 것으로 밝혀진 암흑물질은 원자가 아닌 아직 정체가 밝혀지지 않은 새로운 입자일 수밖에 없을 겁니다.



김명호

현재의 우주가 원자, 암흑물질, 암흑에너지로 구성되어 있다는 여러 가지 증거들에 대해 살펴보았는데, 이로부터 각 구성분이 얼마나 있어야 하는 지를 알아내기는 어렵습니다. 이를 알기 위해서는, 직관적으로 이해하기 어려운 부분이지만, 우주배경복사의 관측에 대해 살펴보아야 합니다.

우주배경복사의 존재는 대폭발우주론의 자연스런 귀결입니다. 대폭발 후 38만년 즈음에는 우주의 온도가 3000K 정도로 내려갔는데, 이 보다 높은 온도에서는 분리되어 있던 전자와 원자핵이 전기력에 의해 서로 결합하게 됩니다. 즉, 이후의 우주에는 전기적으로 중성인 원자와 광자들로 가득 차있게 됩니다. 따라서 분리되어 있던 전자, 원자핵과 상호작용하여 열적 평형상태(플라즈마)에 있던 광자는, 더 이상의 상호작용을 멈추고 우주 공간을 자유롭게 떠돌게 됩니다. 우주의 나이 38만 년에 플라즈마를 빠져나온 빛이 138억 년 까지 여행하여 지구에 도착하는 동안 계속된 우주의 팽창으로 파장이 아주 길어져, 3000K 정도로 출발했던 빛의 에너지는 현재 2.7K(약 -270°C)으로 줄어들게 됩니다. 이것이 1964년 펜지아스^{Arno A. Penzias}와 윌슨^{Robert. W. Wilson}에 의해 처음 관측된 우주배경복사입니다.

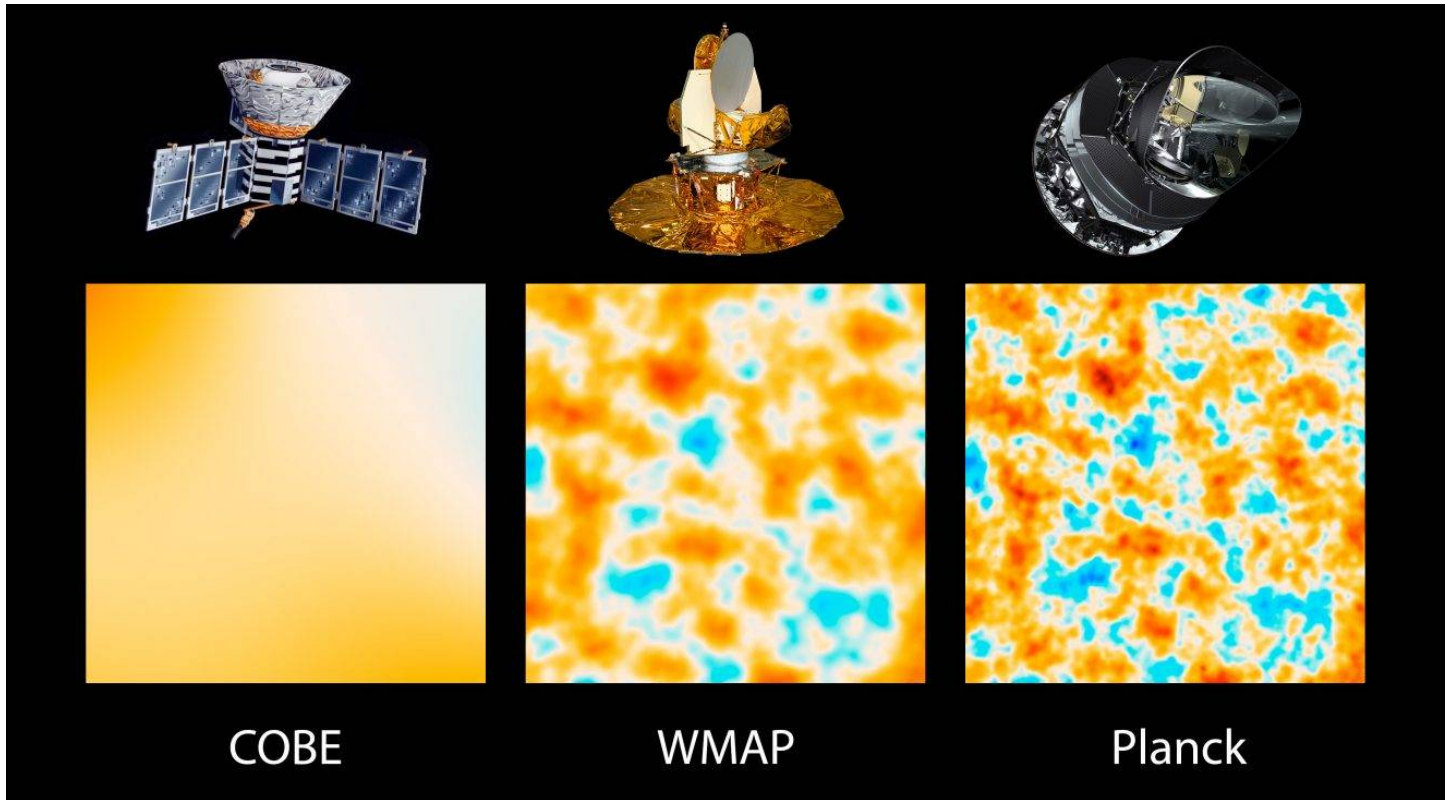


그림4. 인공위성 망원경으로 정밀 관측된 우주배경복사의 이미지

NASA/JPL-Caltech/ESA

이로써 대폭발우주론은 정설로 받아들여지게 됩니다. 우주배경복사의 온도를 10만분의 1의 정밀도까지 측정할 수 있게 된 2000년대부터는 우주론의 전성시대가 열렸습니다. <그림4>처럼 인공위성 관측 장치인 코비^{Cobe}, 더블유맵^{WMAP}, 플랑크^{Planck}등이 만들어지면서, 우주배경복사의 미세한 온도차이를 점점 더 정밀하게 측정할 수 있었습니다. 이로부터 우리는 우주의 구성 성분인 원자, 암흑물질, 암흑에너지가 얼마나 분포하는지를 알아낼 수 있습니다. 더블유맵이 처음으로 그 구성비를 밝혀내는데 성공했고, 현재 가동 중인 플랑크의 최신 데이터에 의하면 원자, 암흑물질, 암흑에너지는 대략 5%, 25%, 70%의 비율로 결정됩니다.

우리는 현재 아주 당혹스런 상황에 처해 있습니다. 실험과 이론의 발전으로 우주의 역사에 대해 놀라울 정도로 많이 알게 되었지만, 또 우리에게 새로운 수수께끼를 남겨 주었습니다. 우주의 95%는 무엇으로 구성되어 있는지 전혀 알고 있지 못하다는 사실입니다. 우리는 언제쯤 이에 대한 답을 알아낼 수 있을까요?

이 글은 고등과학원 초학제연구총서 6권 <체계와 예술>(이학사, 2017)에 수록된 글입니다.
