

우주론

밀도 요동에서 생명이 시작된다

3

글_ 김항배 한양대학교 물리학과 교수 hbkim@hanyang.ac.kr

우주론은 우리 우주의 기원, 현재의 상태 그리고 미래를 연구하는 분야이다. 우주에 대한 개념도 시대의 발전에 따라 변해 왔는데, 불과 2백~3백 년 전까지도 우주란 태양계와 거의 같은 말이었으나, 그 후 우리가 볼 수 있는 거리가 점점 커짐에 따라 우리 은하를 넘어 현재 볼 수 있는 우주까지 확장되었다. 우주에 대한 연구도 처음엔 다분히 형이상학적이거나 종교적이었지만, 근대 과학의 발전과 함께 과학의 영역으로 들어왔으며, 특히 지난 20세기는 우주론이 더 이상 신화가 아닌 하나의 확실한 과학으로서 자리매김하는 시기였다.

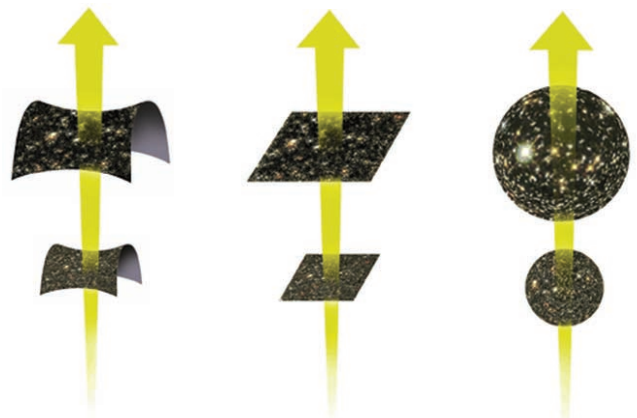
현대 우주론은 일반상대론의 등장과 함께 시작된다. 일반상대론은 우리가 일상에서 늘 경험하는 중력에 대한 이론이다. 일반상대론에서의 중력이란 물체가 가진 에너지가 주위의 시공간을 휘어지게 하고 이 휘어진 시공간에서 움직이는 물체는 마치 편평한 공간에서 중력을 받아 움직이는 것처럼 보인다는 것이다. 간단하게 말해서 일반상대론에서는 우리가 살고 있는 시공간 자체가 그 안에 들어 있는 물질(에너지)에 의해 결정되는데, 그 관계식이 아인슈타인 방정식으로 주어진다. 이로써 일반상대론은 우리가 살고 있는 시공간 전체인 ‘우주’를 ‘과학적’으로 다룰 수 있는 토대를 마련해 주게 된다.

우주론은 ‘신화’ 아닌 ‘과학’

일반상대론을 우주 전체에 적용하기 위해서는 우리 우주의 모양에 대한 적절한 가정이 필요하다. 물론 이 가정은 실험에 의해 확인이 되어야 한다.

표준 우주론에서 이 가정은 우주원리라 불리며 우리 우주의 ‘공간’은 어디나 ‘균일’ (homogeneous)하고 ‘등방적’ (isotropic)이라는 것이다. 이 말은 우리 우주에는 특별한 곳이

란 없고 모든 곳이 동등하다는 것이며, 우리가 살고 있는 지구 역시 우주의 입장에서는 전혀 특별한 곳이 아니란 것을 의미한다. 우주원리를 받아들이면 우주의 공간의 전체적인 모양이 3가지 형태 중 하나로 결정된다. 하지만 시간에 따라서 이 형태가 수축 또는 팽창할 자유도는 남게 되는데 이것을 ‘우주척도인자’라고 부른다(그림1 참조). 시간에 따른 척도인자의 변화는 아인슈타인 방정식에 의해 결정되며 우주에 어떤 종류의 물질이 얼마나 있는가에 따라 달라진다. 공간이 팽창 또는 수축하는 것을 어떻게 관측할 수 있을까? 우주 공간을 돌아다니는 빛은 공간이 팽창하게 되면 파장이 길어지게 되는데 이것을 ‘적색편이’라 부른다. 우주가 과거로부터 계속 팽창해 왔다면 별이나 은하에서 나올 때는 같은 파장의 빛이라도 멀리 떨어져 있는 별에서 온 빛은 가까운 별에서 온 빛보다 더 과거에 나온 빛이고 더 많은 팽창을 겪었으므로 적색편이가 더 크게 일어나게 된다. 1920년대에 에드윈 허블은 별의 거리와 그 별에서 온 빛의 적



<그림 1> 우주원리에 맞는 공간의 모양: (a) 열린 우주, (b) 편평한 우주, (c) 닫힌 우주. 이 그림들은 2차원 공간의 예이며 실제 우주 공간은 이 그림들을 3차원으로 확장해야 한다.

색편이의 관계를 조사해서 우리 우주가 팽창하고 있다는 사실을 발견하였고 이것은 현대 우주론의 단초가 되었다.

우주공간은 어디나 균일하고 등방적

그렇다면 우리 우주를 어떤 물질들이 채우고 있을까? 이것은 결국 다양한 관측을 통해서 알아볼 수밖에 없다. 우주 구성 물질 중 우리가 현재 직접 볼 수 있는 것은 빛을 내는 은하들과 우주배경복사이다. 은하는 우리와 같은 원자들로 이루어져 있고 그 질량의 대부분을 바리온(양성자와 중성자)이 차지하므로 우주 구성 물질을 분류할 때는 바리온으로 분류된다. 우주배경복사는 하늘의 모든 방향에서 관측되는 마이크로파로 높은 수준의 등방성을 보이며 2.7K의 온도를 가진 거의 완벽한 흑체복사 스펙트럼을 가지고 있다. 우주배경복사는 1960년대에 아노 펜지아스와 로버트 윌슨에 의해 처음 발견되었고, 이후 현재의 표준우주론을 정립하는데 중요한 역할을 하였다. 우주배경복사가 보이는 높은 수준의 등방성은 우주원리를 뒷받침하는 실험적 증거이며, 완벽에 가까운 흑체복사 스펙트럼은 우리 우주가 과거에 열적 평형 상태에 있었다는 증거가 된다. 이것은 우주의 팽창과 맞물려 우리 우주의 과거에 대한 가장 중요한 단서를 준다. 현재 우주가 팽창하고 있다는 것은 과거로 거슬러 올라가면 공간이 수축한다는 것을 의미하고, 열적 평형 상태가 계속 유지되어 왔다면 공간의 수축에 의해 우주의 온도와 밀도는 점점 올라가게 된다. 이렇게 아주 초기에 아주 뜨거운 우주에서 시작해서 팽창에 의해 식어서 현재의 모습이 되었다는 것이 표준우주론의 근간이다.

여기서 한 가지 주목해야 할 사실이 있는데, 우주가 계속 열적 평형 상태를 유지하면서 팽창해 왔다면 아무런 흔적을 남기지 않고 현재의 온도에 도달하게 되고 우리는 우주의 과거를 확인할 수 있는 방법이 없게 된다는 것이다. 그러나 실제로는 팽창에 의해 가끔씩 평형 상태가 유지되지 못하고 비평형 상태로 옮겨 가게 되는데 이 과정에서 생기는 흔적에 의해 우리는 우주의 과거를 확인할 수 있다. 즉 팽창이 '우주 화석'을 만들고 우리는 이것을 통해 우주의 과거를 보는 것이고, 이런 면에서 우주론은 고고학과 같다고 할 수 있다. 우주의 역사에 등장하는 중요한 비평형 과정을 들자면, 중성미자의 분리, 원자핵 합성, 앞에서 언급한 우주배경복사의 분리를 들 수 있으며, 이 이외에

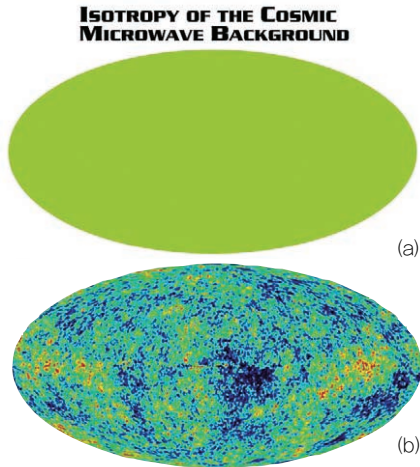
도 어떤 것들이 더 있는 지는 앞으로 밝혀야 할 과제이다.

과거로 가면서 우주가 계속 수축했다면 온도와 밀도가 무한대가 되는 특이점에 도달하게 되는데 이 특이점을 빅뱅(Big Bang)이라 부르며 우리 우주의 시작점이라 할 수 있다. 우리 우주가 실제로 빅뱅에서 시작했는지는 현재의 알려진 관측들만으로는 확인할 수 없고, 다만 뜨거운 우주로부터 원자핵 합성 과정에서 만들어지는 듀테륨(D), 헬륨(He), 리튬(Li)같은 가벼운 원소들의 예측된 양과 관측된 양이 잘 일치한다는 사실로부터 우리 우주가 적어도 핵자들이 결합해서 원자핵이 만들어지기 시작하는 온도인 1백억 도 이상의 온도까지 올라갔었다는 것은 확실해 보인다. 이 시점은 우리 우주가 빅뱅에서 시작했다면 빅뱅 후 약 1초 후 정도 시점이고, 표준우주론은 적어도 이 시점부터 현재까지 우주의 진화 과정을 잘 설명하고 있다.

물질 밀도 · 온도 무한대된 특이점때 빅뱅

지금까지는 일반상대론과 우주원리를 바탕으로 우리 우주의 전체적인 모양인 '균일 등방적인 우주'를 다뤘다. 그러나 이것은 우리 우주의 모습의 중요한 다른 한 면인 우주 안의 구조물들을 무시한 것이다. 우리 우주의 물질 분포를 보면 우주배경복사가 오는 거리 정도의 큰 규모에서는 균일하게 분포하고 있으며 그 증거가 우주배경복사의 등방성이다. 그러나 그보다 작은 규모에서 보면 우주의 물질은 전혀 균일하게 분포하고 있지 않으며 은하, 은하단, 초은하단 등에 물질이 많이 모여 있는 구조를 가지고 있다. 이 우주 구조가 어떻게 형성되었는가를 이해하는 것 또한 우주론의 중요한 과제이다. 우주가 태초부터 완벽하게 균일 등방적이었다면 현재의 우주 또한 완벽하게 균일 등방적일 것이다. 그러나 만약 초기우주에 약간의 밀도 요동이 존재했다면, 다행히도 중력은 밀도가 높은 곳은 주변의 물질을 끌어들이며 밀도가 더 높아지게 하는, 즉 밀도 요동을 키우는 성질이 있어서, 현재 우리가 보는 우주의 구조를 만들어 낼 수 있으며, 이것이 현대 우주론에서 우주 구조의 형성을 이해하는 기본 틀이다.

이렇듯 초기 우주에 밀도 요동이 존재했다는 것은 우리 우주에서 별과 은하의 생성, 그리고 그것을 바탕으로 한 생명체의 탄생을 설명하는 출발점인 것이다. 그렇다면 은하의 분포 구조 이외에 초기 우주에서의 밀도 요동의 존재와 그 형태를 확인할



〈그림 2〉 WMAP가 관측한 우주배경복사의 비등방성. 이 그림은 하늘 전체의 각 방향에서의 우주배경복사의 온도를 색으로 보여주는 것이다. (a) 우주배경복사는 하늘의 어느 방향을 보나 거의 같은 온도이다. (b) 온도 측정의 정밀도를 10만 분의 1 이상으로 높였을 때 방향에 따른 온도 요동이 보인다.

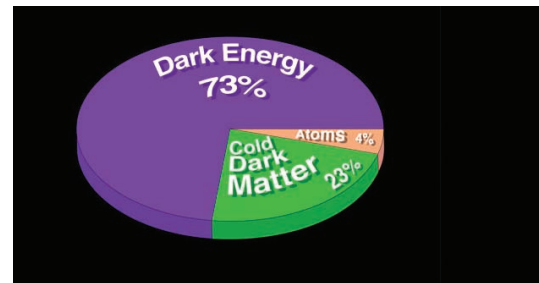
수 있는 다른 방법이 있을까? 초기 우주의 밀도 요동은 중력장에 요동을 만들며, 중력장의 요동은 우주배경복사의 온도 요동으로 흔적을 남기게 된다. 따라서 우주배경복사의 온도 요동을 관측함으로써 우주배경복사가 분리되는 시점에서의 밀도 요동을 알 수 있다. 지난 세기의 마지막 10년에 COBE를 비롯한 여러 그룹에서 우주배경복사 온도의 10만 분의 1 수준인 이 온도 요동을 측정하는데 성공하였으며, 이는 우주론이 정밀과학으로 옮겨가는 발판을 마련했다(그림 2 참조). 우주배경복사의 온도 요동에는 초기 우주의 밀도 요동뿐만이 아니라 우주의 구성 물질 등에 대한 다양한 정보를 포함하고 있어 현재 관측우주론의 가장 중요한 부분을 차지하고 있다.

우주구성물질, 암흑에너지 73% · 암흑물질 27%

다시 우리 우주의 구성 물질에 대한 얘기로 돌아가 보자. 앞에서 은하를 구성하고 있는 바리온과 우주 배경 복사의 존재에 대해서 말했는데 이들의 양은 어느 정도일까? 우주배경복사의 에너지 밀도는 온도에 의해 결정되므로 쉽게 알 수 있으며, 현재의 우주배경복사의 에너지 밀도는 우주의 평균 에너지 밀도의 10만 분의 1 수준이다. 바리온의 양은 우주 핵합성 결과와 우주배경복사의 비등방성에 영향을 미치므로 이들의 관측으로부터 유추할 수 있으며, 평균 밀도의 4% 정도를 차지하고 있다.

우주 구성 물질에 대한 또 다른 정보는 우주 팽창의 속도는 우주에 담겨 있는 물질의 종류와 양에 따라 달라진다는 사실로부터 얻을 수 있다. 물질의 종류는 물질의 밀도가 우주가 팽창할 때 어떻게 변하는가에 따라서 현상론적으로 분류할 수 있는데, 물질의 밀도를 ρ , 우주 척도 인자를 a 라 할 때, $\rho \propto a^{-4}$ 이면 복사, $\rho \propto a^{-3}$ 이면 (먼지)물질, ρ =상수이면 진공에너지(또는 우주상수)라 부른다 (일반적으로 물질의 압력 p 와 밀도 ρ 사이의 상태 방정식이 $p = \omega\rho$ (ω = 상수) 이면 $\rho \propto a^{-3(1+\omega)}$ 의 관계가 성립한다).

1990년대말에 두 그룹의 과학자들은 먼 거리에 있는 초신성들을 관측하여 현재 우주는 팽창의 속도가 점점 빨라지는 가속 팽창을 하고 있다는 결과를 얻었다. 우주가 복사와 물질로만 차 있다면 중력에 의해 우주의 팽창은 감속되어야 한다. 우주가 가속 팽창한다는 것은 우주가 복사와 물질 이외에도, 이들과는 다른 특이한 성질을 가진 물질, 예를 들면 진공 에너지 같은 것으로 채워져 있다는 것을 의미한다. 과학자들은 이 정체가 알려지지 않은 새로운 물질을 암흑 에너지(dark energy)라 부르고 있다. 〈그림 3〉은 초신성을 이용한 우주 팽창 관측과 최근의 WMAP 그룹이 얻은 우주배경복사의 비등방성 관측을 조합해서 유추할 수 있는 현



〈그림 3〉 우주의 구성 물질간의 비율

재 우주의 구성 물질들의 비율 보여주고 있다. 가장 많은 부분을 차지하고 있는 것은 암흑에너지로 73%, 나머지 27%는 물질이다, 복사와 중성미자도 존재하지만 현재의 이들의 양은 무시할 만한 양이다. 그러나 과거로 갈수록 복사의 에너지 밀도는 다른 구성물질보다 빠르게 증가하여 과거에는 복사가 우주를 가득 채운 뜨거운 우주가 된다. 27%를 차지하는 물질 중 바리온은 4%이고 나머지 23%는 바리온이 아닌 물질이다. 이들은 빛을 내지 않아서 암흑 물질(dark matter)이라 부르고 있으며, 우주 구조의 형성을 위해서는 없어서는 안 되는 구성 성분이다. 어쨌든 이 결과는 인류에게는 아주 예상 밖의 결과로 우리 우주에는 우리의 몸을 이루고 있는 원자들과 같은 바리온의 양은

4% 정도 밖에 되지 않고 나머지는 모두 우리가 아직 실체가 무엇인지, 언제 어떻게 생겨났는지 모르는 암흑 물질과 암흑 에너지로 가득 차 있다는 것이다.

‘우주나이 1초’ 이전 밀도요동 원인 밝혀


그렇다면 우주의 역사에서 1초 이전에는 어떤 일이 일어났으며 우주의 기원은 무엇일까? 현재 우주의 구조성 성분인 암흑 물질과 암흑 에너지, 그리고 우주 구조물의 발단인 초기 우주의 밀도 요동은 우리 우주의 역사에서 언제 어떻게 생겨났을까? 우주 나이 1초 이전에 일어났을 것으로 보이는 사건 중 가장 중요한 것은 급팽창(inflation) 과정이다. 급팽창은 초기 우주의 어떤 시기에 가속 팽창이 일어나서 짧은 시간 안에 우주가 엄청나게 커지는 것을 말하며, 1980년대에 알란 구스에 의해 우리 우주가 왜 큰 규모까지 균일하고, 거의 편평한 가 등등 빅뱅 우주론이 가지는 여러 가지 의문점들을 설명하기 위해 도입되었다. 현재 급팽창 과정의 존재는 우주 배경 복사의 비등방성 관측으로부터 두 가지 면에서 실험적 기반을 다지고 있다. 관측 결과 우리 우주의 공간은 거의 편평한 것으로 보이는데, 이는 급팽창이 항상 공간을 거의 편평하게 만들어 버린다는 사실과 맞고 있다. 그리고 급팽창이 도입된 후 곧 이 과정이 양자 요동을 밀도 요동으로 바꾸어주어 우주 구조물 형성을 위해 반드시 필요한 초기 우주의 밀도 요동을 만들 수 있다는 것이 밝혀졌는데, 최근의 WMAP 등의 관측을 통해 알아낸 밀도 요동의 스펙트럼이 급팽창의 예측과 잘 일치하고 있다는 것이다. 따라서 초기 우주에 급팽창이 있었다는 것은 거의 사실로 받아들여지고 있으며 아직 확실하지 않은 것은 급팽창이 언제, 어떻게 일어났는가 하는 것이다.

우주가 1초 이전에도 열적 평형 상태를 계속 유지해 오고 있었다면 우주의 온도는 1백억 도 이상으로 올라갔을 것이고, 위에 나온 질문에 답을 하기 위해서는 이렇게 높은 온도에서의 열적 평형 상태에 대해서 알아야 한다. 온도가 올라간다는 것은 우주를 채우고 있는 물질의 개개 입자가 가지는 에너지가 커진다는 것을 의미한다. 양자역학에 의하면 입자의 에너지가 커질수록 우리는 더 작은 거리에서 일어나는 현상을 보게 되고, 따라서 작은 거리에서 작용하는 상호작용이 중요하게 된다. 핵 합성이 일어나는 시작점인 1백억 도 정도에 해당하는 길이는 원

자핵 크기 정도이고 그보다 더 높은 온도에서는 더 작은 길이에 서의 상호작용, 즉 입자물리의 표준모형이 담고 있는 또는 그 이상의 이론에 대한 지식이 필요하게 된다. 우리 우주가 과거로부터 계속 팽창해 왔다는 사실은 이렇듯 우리가 볼 수 있는 가장 큰 세계인 우주를 이해하는데 우리가 볼 수 있는 가장 작은 세계인 소립자에 대한 이해를 필요로 하게 만들고, 반대로 우주를 관측함으로써 소립자들에 대한 정보를 얻을 수 있게 만들어 준다.

급팽창·암흑물질 해명이 21세기의 과제

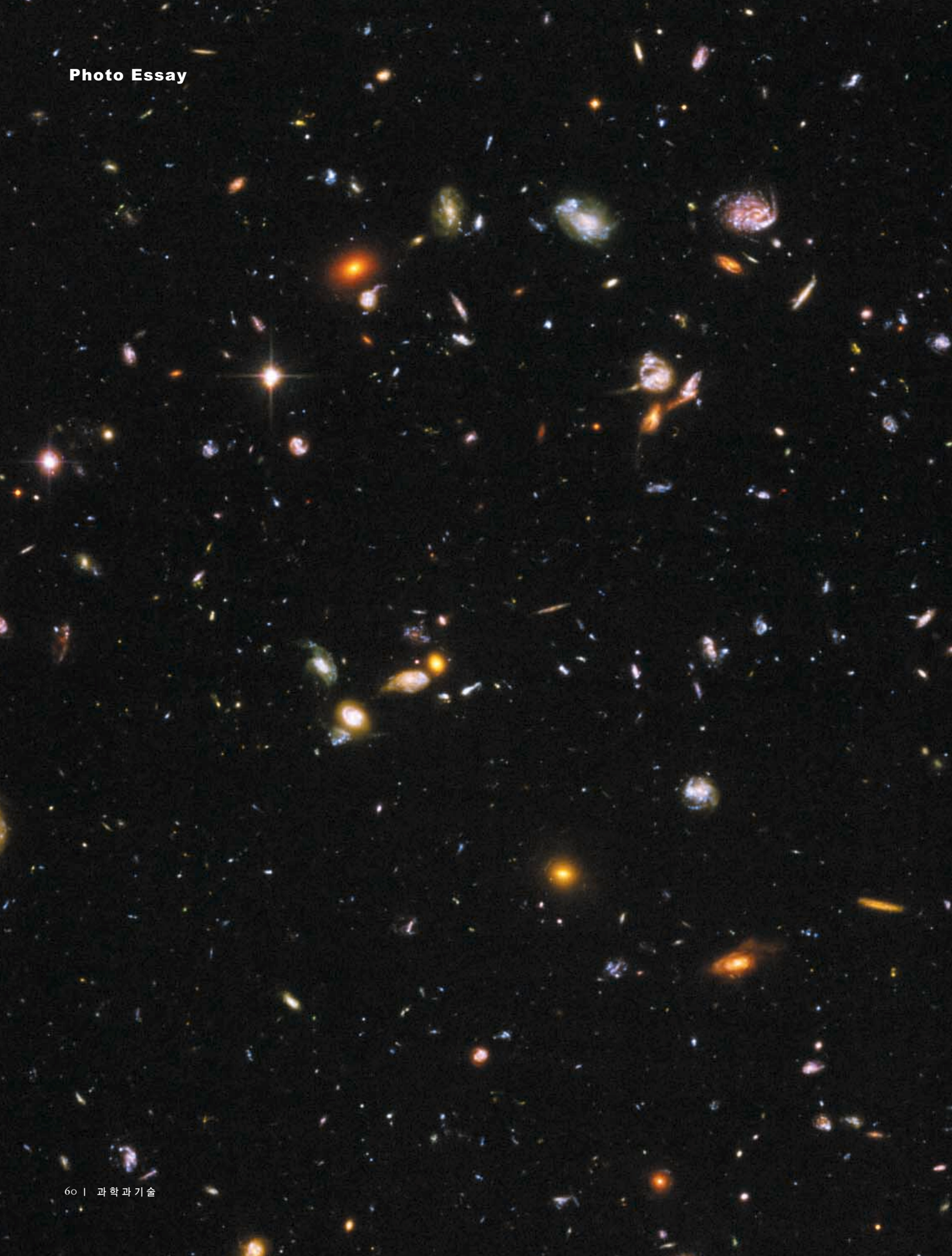
현재의 입자물리의 표준 모형은 우주의 구성 성분 중 우주배경복사와 중성미자의 존재만을 제대로 설명하고 있을 뿐이다. 바리온들은 표준 모형에 들어 있는 입자들이긴 하지만 표준모형은 바리온과 반바리온이 높은 수준의 대칭성을 가지고 있어서 표준 모형으로부터 예측되는 현재의 바리온의 양은 너무나 작아서, 현재 관측된 바리온의 양과 바리온과 반바리온의 비대칭성을 설명하기 위해서는 표준 모형을 확장한 새로운 이론이 도입되어야 한다. 암흑 물질과 암흑 에너지 또한 표준 모형으로는 설명이 안 되고 있다. 암흑 물질의 경우, 가장 가벼운 초대칭 입자가 암흑 물질의 실체일 가능성을 보여서 입자물리에 초대칭성을 도입하는데 힘을 실어주고 있고, 이 외에도 액시온 등 표준 모형을 확장한 모형들에 나오는 다양한 입자들도 논의되고 있다.

지난 10여 년 동안의 우주론의 발전은 정말로 놀란 만한 것으로 가속 팽창의 발견과 우주 배경 복사의 비등방성 관측은 우리에게 급팽창, 암흑 물질, 암흑 에너지 등의 문제를 던져주고 있으며, 더 이상 입자물리의 표준 모형이 우주론의 기반 이론이 되지 못한다는 것은 자명해졌다. 가장 큰 대상인 우주를 다루는 우주론이 가장 작은 대상인 소립자를 다루는 입자 물리에 새로운 것을 요구하고 있다. 아마도 급팽창, 암흑 물질과 암흑 에너지가 무엇인지 이해하는 문제는 새로운 패러다임의 창출을 위해 20세기가 21세기에 선물로 남겨준 문제일지도 모르겠다. 



글쓴이는 서울대학교에서 물리학과 이학박사를 받은 후 영국 랑카스터대학교, 스위스 로잔대학교 연구원을 지냈다.

Photo Essay



이것이 '우주창세기' 때의 은하이다

허블망원경이 지난달 초 촬영한 137억년 전 우주대폭발(빅뱅) 직후에 탄생하였고, 지구에서 130억 광년이나 멀리 떨어져 있는 '우주창세기' 때의 은하이다. 미국 항공우주국(NASA)은 "이 은하는 지금까지 우주에서 발견된 은하 중, 가장 멀고 깊은 우주에서 발견된 초기 은하"라고 밝혔다. 이 은하모습은 130억 광년이라는 먼 거리를 날아와 허블망원경에 촬영된 것이고 다양한 크기와 모양, 색깔을 가진 1만여 개의 별과 또다른 은하로 구성되어 있다. 사진은 '허블 울트라 딥 필드(Hubble Ultra Deep Field)'라 불리는 전체영상의 상단부분이고 다음 쪽은 하단부분이다.(사진제공 NASA)

Photo Essay

