우주 거대구조 연구를 위한 세계 최대 시뮬레이션 수행

DOI: 10.3938/PhiT.21.018

김주한·박창범·Graziano Rossi·이상민

The Top-two Biggest Simulations ever Performed for the Study of the Large-scale Structures of the Universe

Juhan KIM, Changbom PARK, Graziano ROSSI and Sang Min LEE

A group of Korean scientists has performed two very massive cosmological simulations to study the clustering of galaxies on cosmic time and length scales. These simulations are the biggest ones ever performed. The simulations were done over two months on a supercomputer (Tachyon-II@KISTI), that was the 37th most powerful supercomputer at the time of this writing. For the simulation, 8,240 CPU cores and 8.7 and 15 terabytes of memory space were used to follow the gravitational evolutions of 216 and 374 billion particles in a cubic box with side lengths of $7,200 \text{ h}^{-1} \text{ Mpc}$ and $10,815 \text{ h}^{-1} \text{ Mpc}$, respectively. From the simulation output, we built mock luminous red galaxies (LRGs) in the past light cone space for comparison with future galaxy redshift surveys.

저자약력

김주한 박사는 서울대학교에서 2003년 천문학 박사학위를 받았다. 한국 천문연구원과 고등과학원에서 박사후 연구원을 지냈고, 경희대에서 연구교수로 지냈다. 2010년부터 현재까지 고등과학원에서 거대수치 계산 연구센터에서 연구교수로 있다. 주된 연구분야는 중력을 통한 우주거대 구조 연구와 가스 동역학을 통한 은하 형성 연구이다. (kjhan@kias.re.kr)

박창범 교수는 1990년에 프린스턴대학교에서 천체물리학 박사학위를 받고 칼텍에서 연구원 생활을 하였다. 그리고 1992년부터 2003년까지 서울대 교수를 역임하였고, 현재까지 고등과학원 물리학부 교수로 재직하였다. 주된 연구분야는 우주론과 고천문학이다.

Graziano Rossi 박사는 2008년에 펜실베이니아 대학에서 박사학위를 받고 현재까지 고등과학원의 연구원으로 있다. 우주배경복사와, 우주거대 구조와 은하형성, 그리고 은하의 회전에 대해서 연구를 수행하고 있다.

이상민 박사는 2002년에 서울대 천문학과에서 천문학 박사학위를 하고 현재 KISTI에서 산업체 슈퍼컴퓨팅 팀장으로 재직 중이다. 주된 연구분야는 성간물질의 생성과 진화이다.

서론

한국의 과학자 그룹이 우주론적 시간과 길이 규모에서 은하 분포를 연구하기 위해서 매우 큰 우주론적 시뮬레이션을 수행하였다. 이 두 개의 시뮬레이션은 지금까지 수행된 것 중에서 세계 최대이다. 우리는 이들 시뮬레이션을 위해서 두 달 동안 KISTI의 슈퍼컴퓨터(Tachyon-II)의 8,240개의 시피유 코어와 총 8.7과 15 테라바이트의 메모리를 이용하였다. 우리는 한 변의 길이가 $7,200 \text{ h}^{-1} \text{ Mpc}$ 와 $10,815 \text{ h}^{-1} \text{ Mpc}$ 인 정육면체 상자 안에 2,160억 개와 3,740억 개의 입자의 중력 진화를 살펴보았다. 시뮬레이션 결과를 가지고, 우리는 미래의 은하 적색이동 관측과 비교를 위해서 과거 빛 이동 공간 안에서 가상의 밝은 적색은하들을 만들어 내었다.

시뮬레이션 역사

우주론적 거대구조 연구를 위한 시뮬레이션의 역사는 40년 전으로 거슬러 올라간다. 그 당시에 최초로 300개의 점 질량을 갖는 입자를 사용하여 은하단의 생성과 진화를 살펴보았다 (그림 1). 그 이후로 컴퓨터 발전에 따라서 입자의 개수를 늘려서 질량과 길이 분해능이 점점 커지는 방향으로 시뮬레이션을 수행하였다. 처음에는 입자-격자(Particle-Mesh; PM) 방법을 사용하여 주기적인 경계조건 하에서 중력 계산을 수행하였지만, 1990년대 들어서 PM 방법으로 정확히 구현할 수 없는 작은 규모의 중력을 새로운 방법을 이용하여 보정하였다. 대표적으로 PP+PM(Particle-Particle and Particle-Mesh)을 사용했지만, 매우 느린 계산 속도로 인하여 많은 제약이 따랐다. 그래서 90년대 중후반부터 PP 방법 대신에 Tree 방법을 사용하여 비교적 빠른 시간에 작은 규모의 중력을 대체로 정확하게 계산하게 되었다. 그림 1에서 우주론적 시뮬레이션의 크기 변화를 연대별로 표시하였다. 여기에서 실선은 평균 크기 변화를 나타내고 있다. 한국 연구진이 PM 방법을 이용한 시뮬레이션은 육각형으로, PMTree 방법을 사용한 시뮬레이션을 별 모양으로 표시하였다. 별 모양으로 표시한 시뮬

1) $1 \text{ pc} = 3.26 \text{ 광년}$. 참고로 알려진 우리 우주의 반경은 $10,500 \text{ h}^{-1} \text{ Mpc}$ 이다.

Fig. 1. Size evolution of the cosmological simulations.

레이션은 국내 연구진이 지난 2000년에 개발한 코드를 이용한 것으로, 세계적으로 빠른 속도와 메모리 효율성을 갖고 있는 것으로 잘 알려져 있다. 2000년대 초반부터 후반까지 우리나라 연구진이 다른 나라 연구진과 동등한 경쟁을 벌이다가 2011년도에 세계 최대의 시뮬레이션을 수행했다는 것을 볼 수 있다.

앞으로 10년 동안 미국을 비롯한 전 세계의 우주 거대구조 연구자들은 우주 생성 초기에 바리온 물질이 우주 구조물의 생성과 진화에 미치는 효과를 측정하려고 많은 은하 적색이동 관측을 수행할 예정이다. SDSS-III²⁾에서는 Baryonic Oscillation Sky Survey (BOSS)를 통해서 LRG 은하들의 공간 분포를 관측하여 이를 여러 우주모형에 비추어 가장 잘 들어맞는 모형 인자의 값들을 추정할 것이다. 즉 우주 물질의 크기, 우주 곡률, 우주 암흑에너지의 양을 1% 수준 아래로 측정하는 것이 주된 목표로 되어있다. 뿐만 아니라 유럽에서는 인공위성을 통한 외부은하 관측 프로그램인 EUCLID를 수행할 예정이다. 주된 목적으로는 우주공간에서 2억 개 은하 위치를 측정하는 것이다. 따라서 이러한 세계적인 은하 관측 프로젝트의 진행과 맞물려, 우리나라 연구진들은 이러한 관측 결과를 미리 예측하고 관측 대상과 관측 기법에 대한 선행연구를 진행하고 있다. 이를 위해서 우리는 우주 거대구조 시뮬레이션을 선택하였고, 통계적인 정확도를 높이기 위해서 거대한 우주론적 시뮬레이션이 필요하게 되었다.

지금까지 알려진 바로는 우주 구조물은 계층적 진화를 보이고 있다. 이는 작은 규모의 구조물이 먼저 생기고 중력에 의해서 이러한 구조물의 병합으로 큰 구조물이 생긴다는 뜻이다. 또한 전 우주 공간에 걸쳐 모든 길이 규모에서 물질 요동의 크기가 인플레이션 이론과 암흑물질(Cold Dark Matter;

CDM) 이론에 의해서 결정되는데, 관측적으로 상당히 큰 규모까지 물질 요동이 존재하고 있다는 것이 알려져 있다. 따라서 어떤 규모의 우주 구조물을 보기 위해서는 그보다 충분히 작은 구조물까지 볼 수 있어야 하고, 되도록이면 큰 우주 공간에서의 물질의 진화를 동시에 살펴볼 수 있어야 한다. 따라서 우주론적 시뮬레이션에서는 질량, 공간 분해능을 높이기 위해서 충분히 많은 수의 입자를 사용해야 한다. 이를 위해서는 매우 많은 메모리 공간이 필요하고 시뮬레이션 코드의 병렬화가 필요하다.

시뮬레이션 수행

현재 GOTPM(Grid-based Oct-sibling Tree Particle Mesh)은 2000년에 기존의 PM 코드와 Tree 코드를 통합하고 여러 컴퓨터에서 동시에 돌릴 수 있도록 MPI를 기반으로 병렬화되어 있다. 다른 분야의 시뮬레이션들과 마찬가지로 우주 거대구조 시뮬레이션인 경우, 시뮬레이션에서 사용하는 입자의 수가 많을수록 더 좋은 분해능을 갖고 있다. 분해능이 좋을수록 보다 작은 질량의 우주 구조물을 볼 수 있거나, 또는 보다 큰 공간 규모에서 우주 구조물의 탄생과 진화를 볼 수 있는 장점이 있다.

2011년 후반에 한국의 연구진(김주환³⁾, 박창범³⁾, 이상민⁴⁾, Graziano Rossi³⁾)과 미국 프린스턴 대학 교수인 J. Richard Gott III 등이 KISTI 슈퍼컴퓨터인 Tachyon-II에서 8,000개가 넘는 CPU 코어와 GOTPM을 사용하여 두 달 동안 두 가지 시뮬레이션을 수행하였다. 첫 번째 시뮬레이션(Horizon Run2; HR2)은 2,160억 개의 입자를 사용하였고, 정육면체 상자의 크기는 $7,200 \text{ h}^{-1} \text{ Mpc}$ 정도이고 이는 허블 반경인 $3,000 \text{ h}^{-1} \text{ Mpc}$ 보다 두 배 이상 큰 값이다. 그리고 두 번째 시뮬레이션(Horizon Run3; HR3)은 3,740억 개의 입자를 사용하였고, 시뮬레이션 상자의 한 변의 길이는 $10,815 \text{ h}^{-1} \text{ Mpc}$ 정도로 현재 알려진 우주 반경인 $10,500 \text{ h}^{-1} \text{ Mpc}$ 보다 크게 설정하였다.

그림 2에서 현재 우주의 크기와 여러 시뮬레이션 상자의 크기를 비교하였다. 배경 그림은 HR3에서 구현한 현재 밀도 슬라이스를 나타낸다. 가상 관측자는 그림의 왼쪽 아래 구석에 놓고, 프랑스 연구자들이 수행한 시뮬레이션의 상자 크기는 F^5 로 표시하였다. 그리고 M은 영국, 미국, 독일, 일본 연구자들이 수행한 Millennium Simulation을 뜻한다. 이 시뮬

2) <http://www.sdss3.org/>.

3) 고등과학원.

4) KISTI.

5) 현재 세계 4위.

Fig. 2. Size differences between simulations. Here, M and F represent the Millennium and French simulations, respectively.

레이션은 큰 규모의 우주 공간 분포에 대한 연구보다는 작은 규모 ($500 \text{ h}^{-1} \text{ Mpc}$) 이하의 공간에서 은하와 왜소은하들의 생성과 진화를 보고자 하는 것이다. 그렇지만 앞으로 실제 관측에서는 $1,500 \text{ h}^{-1} \text{ Mpc}$ 정도 깊이에서 바리온 영향을 살펴볼 예정이다. 그리고 여기에서 Horizon은 particle horizon을 뜻한다. 따라서 관측의 통계적인 효과를 고려하기 위해서 이 규모보다 훨씬 큰 시뮬레이션을 수행할 필요가 있다.

이처럼 큰 시뮬레이션 공간에서 우리는 HR2에서 8개의 가상관측자와 HR3에서 27개의 가상관측자를 서로 겹치지 않게 위치시켜 실제 적색이동 관측과 동일하게 유한한 빛 속도를 이용하여 가상관측을 수행하였다. 즉 가상관측자로부터 멀수록 먼 과거의 일이므로 시뮬레이션을 진행하면서 각각의 시뮬레이션 시간스텝에서 관측되는 해당 공간 안의 입자를 저장하고 이를 하나로 모아서 가상관측을 수행하는 것처럼 분석하였다. 즉 가상관측을 통해서 관측 깊이에 따라서 우주밀도의 변화를 반영하였다. 그림 3은 가상관측자가 보는 우주 밀도분포를 나타낸다. 가상관측자는 부채꼴의 꼭지점에 위치해있고, lookback time 공간에서 136억 년 거리까지 물질 분포를 보여주고 있다. 고밀도일수록 밝은 색으로 표현하였고, 우주 초기로 갈수록 붉은 색으로 칠하였다. 이 그림을 보면 관측자로부터 멀수록 (또는 멀리 볼수록) 입자의 밀도가 낮아지는 것을 알 수 있다. 우주 초기에는 밀도 분포가 거의 균일 등방하지만, 중력적인 진화로 인해서 작은 규모에서 밀도가 높아지고 현재에 도달하면 큰 밀도 요동이 있는 것을

Fig. 3. Density distribution in the past light cone space.

Fig. 4. Two-point correlations in simulated matter fields.

볼 수 있다.

그림 4에서 시뮬레이션에서 구한 입자 밀도분포의 2차 상관함수를 볼 수 있다. 여러 적색이동에서 선형진화모형에서 계산한 값(파선)과 실제 시뮬레이션에서 구한 값(여러 색의 실선)이 보여주고 있는데, $107 \text{ h}^{-1} \text{ Mpc}$ 근처에서 2차 상관함수 값이 솟아있는 것을 알 수 있다. 이것이 바로 바리온 물질의 효과 때문에 나타나는 BAO(Baryonic Acoustic Oscillation)의 정점(peak)이다. 그림에서 쉽게 알 수 있듯이 시뮬레이션을 통해서 구현한 중력의 비선형적 진화가 이 정점의 크기를 변화시키는 것이 보인다. 이러한 정점의 위치와 높이는 우주 모형에 따라서 변하는 것이기 때문에, 관측을 통해서 얻어낸 값들과 시뮬레이션을 통해서 얻어낸 값들을 비교하면 우리 우주모형의 인자 값들을 정확히 얻어낼 수 있을 것으로 기대하고 있다.

Fig. 5. An example of simulated dark matter halos. To identify halos from the simulated particles, we applied the total energy and tidal radius of each structure.

암흑물질 헤일로

헤일로는 암흑물질로 이루어진 안정화된 우주 구조물이다. 여기에 우리가 관측하는 은하가 있다고 믿어지는데, 시뮬레이션을 통해서 얻은 입자들의 분포로부터 암흑물질 헤일로를 찾고 여기에 헤일로-은하 관계를 이용해서 가상은하를 분포시키는 것이 주된 시뮬레이션 분석 기법이다. 그림 5는 일반적인 우주론적 시뮬레이션을 통해서 얻어낸 입자 밀도 분포 중에서 고밀도 부분을 나타내는 예제이다. 중앙의 밝은 오렌지색으로 나타낸 부분이 헤일로 중심이고, 주변에 작은 규모의 동반 헤일로들이 있는 것을 알 수 있다. 이것은 관측을 통해서 이미 알고 있는 중앙의 밝고 무거운 은하와 주변의 가볍고 작은 동반 은하들이 있는 것과 유사한 패턴을 보여주고 있다.

이렇게 구한 헤일로 데이터로부터 우리는 가상 우주 공간에서 가상 은하들의 분포를 구하였다. 가상 은하들의 분포로부터 은하의 2차 상관함수와, 은하밀도의 저너스 통계 분석,

Fig. 6. Mock-galaxy distribution. An observer is located at the center of the circle and mock galaxies are shown by dots.

그리고 중력의 비선형 진화가 미치는 은하 분포의 왜곡 등을 연구할 예정이다. 그림 6에서 우리는 가상은하들의 분포를 나타내었다. 가상 관측자는 원의 중심에 있고, 그 주위로 관측되는 은하들의 위치를 점으로 표시하였다. 이 은하들의 개수 분포는 BOSS에서 예측되는 개수 분포에 맞추어서 나타내었다.

결론

우리는 세계 최대의 우주론적 시뮬레이션을 수행하였다. 이의 목적은 차세대 우주관측 프로그램에서 목표로 하고 있는 은하들의 공간 분포를 예측하고, 이와를 비교를 통하여 우리 우주모형의 정밀화를 꾀하기 위해서이다. 아직 본격적인 분석 결과는 나오지 않았지만, 전 세계 우주론 연구자들을 위해서 해당 홈페이지를 이용하여 현재 시뮬레이션의 데이터를 서비스 중이다 (<http://astro.kias.re.kr/Horizon-Run23/>).