암흑우주연구실

DOI: 10.3938/PhiT.28.006

박 성 찬

Lab for Dark Universe

Seong Chan PARK

The majority of the energy budget of the universe is composed of dark components. We examine the observational and theoretical status of dark matter and dark energy and introduce the direction of the research being pursued at the Lab for Dark Universe (LDU).

우주의 대부분을 이루고 있는 에너지는 암흑성분으로 이루어져 있다. 암흑물질과 암흑에너지의 실험적, 이론적 상황을 점검하고, 암흑우주연구실(LDU)에서 연구하고자 하는 방향을 소개한다.

2018년 여름 ICHEP 학회가 한창 진행 중일 때 한국연구재단으로부터 암흑우주연구실(Lab for Dark Universe, LDU) 과제가 기초연구실(Basic Research Lab, BRL)로 선정되었다는 담당자의 소식을 들었다. 제가 아는 어떤 분은 ‘암흑우주연구실’이라고 하니, 마블 코믹스에서 나오는 나쁜 박사들이 암흑의 힘을 제어하기 위해 만든 연구실이나는 흥미로운(?) 질문을 주기도 하였는데, 실은 연세대학교 권영준, 김충선 교수 그리고 중앙대 이현민, 충남대 박종철 교수와 함께 만든 진지한 물리 연구실이다. 본문에서는 암흑우주란 무엇이고, 어떤 연구를 하려는 것인지 소개하려 한다.

연구자들에 따라서 느끼는 체감 온도는 다르겠지만, 지난 수년간 입자물리학과 우주론 연구는 새로운 전기를 맞이하게 되었다. 우선 ‘표준모형(the Standard Model)’이라고 불리는 소립자와 그 기본 상호작용에 관한 이론이 예측한 힉스 입자가 2012년 CERN(Conseil Européenne pour la Recherche Nucléaire)의 LHC(Large Hadron Collider) 가속기 실험을 통

해 결국 발견되었다. 발견된 힉스 입자의 물리적 성질은 놀랍도록 표준 모형의 예측과 일치하여 표준모형은 가장 정확한 이론으로 정립되었다. 그리고 4년 뒤 2016년에는 블랙홀이 충돌하는 과정에서 만들어진 중력파가 aLIGO(advanced Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory) 관측 실험을 통해 발견되었다. 중력파 발견은 소위 후기 뉴턴 근사(post-Newtonian approximation)로는 이해할 수 없는 현상으로, 진정한 의미로 일반상대론이 옳다는 것을 밝힌 대 사건으로 볼 수 있다. 오래전 코넬대학교에서 연구할 당시 Teukolsky 교수님께서 “내가 오랫동안 일반상대성 이론을 연구해오고 있지만 완전히 믿는 것은 아닙니다. 중력파가 발견되면 그 때는 정말로 믿을 거예요”라고 하셨던 말씀이 기억이 난다. 20세기 물리학의 양대산맥인 양자역학과 상대성이론의 정수가 최근 인정받게 된 것으로 인류 지성사에서 그 의미가 크다.

입자물리학 표준모형과 일반상대성 이론의 성공에도 불구하고, 20세기 말엽부터 우주론적 관측이 정밀해짐에 따라 물리학에 대한 근본적인 변혁이 필요하다는 것이 명료해졌다. 우선 소위 1a형 초신성(SN type-1a)의 우주론적 후퇴속도, 혹은 허블 계수(Hubble Parameter)의 측정이 필요하다. 1a형 초신성은 백색왜성을 포함한 쌍성계에서 물질을 흡수한 백색왜성이 일정한 질량(대략 1.44 태양질량)에 도달했을 때 폭발하여 발생하며, 그 절대 밝기를 알기에 매우 먼 거리에 놓여있을 때도 거리를 측정할 수 있는 기준이 된다. 거리를 알고, 또 도플러 효과에 의한 후퇴속도 결정을 할 수 있으면, 거리에 따른 후퇴속도를 결정할 수 있는데, 이 결과는 일반상대성 이론이 등방, 균질한 우주에 대해 예측한 프리드만 척도(Friedmann Metric)와 비교할 수 있다. 이 비교를 통해 느린 물질, 빛처럼 빠른 물질 그리고 진공에너지와 같이 일정한 밀도를 가진 성분의 비율을 알 수 있게 해준다. 그 결과는 매우 놀라운 것이었다. 바로 우주 전체 에너지의 95%가 ‘암흑성분’임을 알게 된 것이다. 이

저자약력

박성찬 교수는 서울대에서 2002년 박사 학위를 취득한 후 고등과학원, 코넬대 박사후 연구원, 동경대 IPMU 특임 연구원 등을 거쳐 현재 연세대학교 물리학과 교수로 재직 중이며, 암흑우주연구실 PI이다. 2010년 일본소립자회에서 수여하는 ‘젊은 이론소립자물리학자 상’을 수상하였다. (sc.park@yonsei.ac.kr)

REFERENCES

- [1] S. Perlmutter, Supernova Cosmology Project, *et al.*, *Astrophysical Journal* **517**, 565 (1999). arXiv:astro-ph/9812133. doi:10.1086/307221.
- [2] Adam G. Riess, Supernova Search Team, *et al.*, *Astronomical Journal* **116**, 1009 (1998). arXiv:astro-ph/9805201. doi:10.1086/300499.

Fig. 1. The Pie Chart of the Universe.

업적을 인정받아 S. Permuter, B. P. Schmidt, A. Riess는 2011년 노벨상을 수상한 바 있다.^[1,2]

초신성 후퇴속도 측정 실험의 결과는 또 다른 우주론 실험 특히 COBE, WMAP, Planck 등 위성에 기반한 정밀한 우주배경복사 측정 실험의 관측 데이터와도 일치한다. 우주배경복사는 고온, 고압 상태의 ‘빅뱅’ 우주가 팽창에 따라 식어가면서, 결국 충분한 운동에너지를 갖지 못한 핵과 전자가 원자를 만들게 되어 마치 ‘맑게 갠 하늘’이 되면서 남은 빛이다. 우주배경복사가 만들어질 때 우주는 불과 38만 살에 불과했고 그 때 어떤 에너지 성분이 들어있는지를 우주배경복사의 정밀 분석을 통해 알아낼 수 있다. 이외에도 다양한 우주론적 관측이 모두 동일하게 95%의 우주에너지가 암흑성분임을 말해주어 현재는 그림 1과 같은 ‘우주론적 파이 차트’가 널리 받아들여지게 되었다.

우주 전체 에너지의 95%는 소위 ‘암흑성분’으로 이루어졌음이 밝혀졌다. 이 암흑성분은 입자물리학의 표준 모형으로는 이해할 수 없는 ‘암흑물질’과 음의 압력을 일으키는 ‘암흑에너지’ 성분으로 되어 있다. 이는 현재의 표준모형이 우주 전체 에너지의 불과 5%만을 설명할 수 있다는 것을 뜻한다. 물론 이 5%를 이해할 수 있다는 것도 대단한 일이며, 별, 은하, 인간, 나무, 바닷물, 스마트폰 등 모든 물질문명을 이룰 수 있는 근본적인 힘이 되었음은 두 말할 나위 없는 사실이다.

20세기 물리학이 5%의 입자와 상호작용에 대한 물리학이었다면, 21세기 물리학의 최대 문제는 바로 이 95%의 암흑우주 성분을 밝히는 일이라고 볼 수 있겠다. 암흑우주연구실의 주된 연구 주제가 바로 이 암흑우주성분을 밝히는 것이다.

우선 암흑에너지 문제이다. 우주 전체 에너지의 67%에 해당하는 암흑에너지는 그 성질이 매우 흥미롭다. 첫째 이 에너

Fig. 2. The equation of the state and the matter content of the universe.(출처 arXiv:1811.02374)

지 성분은 마치 진공에너지가 그러하듯 팽창함에 따라서 밀도가 낮아지지 않는다. 이는 일반적인 물질 성분과 완전히 구별되는 성질로 일반적인 물질은 부피가 커지면 밀도는 부피에 반비례해서 혹은 거리의 세제곱에 반비례해서 작아진다. 빛의 경우엔 파장도 함께 길어질 경우 거리의 네제곱에 반비례해서 작아진다. 이 특별한 성질을 열역학 제1법칙에 비추어 보면, $p = -\rho$, 즉, 밀도와 부피는 크기가 같고 부호는 반대가 됨을 알 수 있다. 즉, 상태방정식 $p = \omega\rho$ 에서 $\omega = -1$ 이라는 것이다. 이 결과는 우주론적 관측과 매우 합치한다. 그림 2는 최근 Dark Energy Survey(DES)에서 얻은 결과이다.(출처 arXiv:1811.02374) 주목할 점은 관측과 합치하는 부분에서 $\omega = -1$ 그리고 물질 성분은 대략 32퍼센트로 표준모형 물질과 암흑물질 성분의 합에 해당한다는 부분이다.^[3]

암흑에너지가 과연 진공에너지인지 그래서 공간분포가 완전히 균질하게 이루어져 있는지는 관측을 통해 밝혀내야 할 중요한 과제이다. 그리고 이론적으로 과연 진공에너지라고 한다면, 그 값을 어떻게 결정할 수 있을지가 또 다른 난제로 남아 있다. 실제로 아래 식과 같이 단순한 양자장이론에 의한 진공 에너지 값의 추정치는 실험으로 얻은 값과 매우 큰 차이를 보인다.

REFERENCES

- [3] T. M. C. Abbott *et al.*, [DES Collaboration], “First Cosmology Results using Type Ia Supernovae from the Dark Energy Survey: Constraints on Cosmological Parameters”, arXiv:1811.02374 [astro-ph.CO].

Fig. 3. The Dark Matter theory space.

Fig. 4. The energy scale of dark matter.

$$\frac{\rho_{\text{theory}}}{\rho_{\text{experiment}}} \sim \left(\frac{M_{\text{Planck}}}{0.001\text{eV}} \right)^4 \sim 10^{120}$$

혹자는 이 문제는 너무 어려워서 지금 물리학 수준을 훨씬 뛰어넘는다고 한다. 결국 중력의 양자이론이 나와야만 제대로 이 문제에 도전할 수 있다는 것이다. 아마도 이 말은 사실일 수 있다. 다만, 암흑에너지의 공간 분포에 대한 정밀한 측정

등을 통해 우선 이 에너지가 정말로 진공 에너지인지 아니면 또 다른 제5원소 (quintessence)에 의한 에너지인지 밝히는 관측적 노력이 계속되어야 할 것이다.

암흑우주연구실의 보다 현실적인 주제는 암흑물질이다. 일반 물질과 같이 밀도가 부피의 증가에 따라 작아지는 ‘물질’인 것은 알고 있으나, 빛을 내지 않고 매우 안정한 상태로 우주의 은하 등 구조가 생기기 이전부터 자리잡고 있었던 암흑물질의 정체를 밝히려는 것이 기본 목적이다.

암흑물질의 이러한 요구사항을 만족시키는 이론은 비교적 쉽게 얻을 수 있는 것으로 알려져 있다. 이론가의 수보다 더 많은 암흑물질 이론이 있다고 말하는 분도 계시다. 필자의 생각에 이 말은 과장이지만, 그래도 너무 큰 과장은 아니다. 실제로 매우 많은 암흑물질 이론이 이미 제시된 것은 사실이니까. 그림 3은 그 중 대표적인 일부를 모아놓은 것이다. 필자도 일부를 보았다.

암흑우주연구실에서는 특히 암흑물질 자체 상호작용이 무시할 수 없이 작은 경우, 그리고 암흑물질 섹터가 단순한 입자 1,2개가 아니라 보다 복잡한 구조를 갖고 있어 상호작용을 통해 무거운 암흑물질과 가벼운 암흑물질이 서로 다른 방식으로 표준모형 입자들과 상호작용하는 상황에 관심이 크다. 그리고 기존의 각광받던 WIMP(weakly interacting massive particle) 패러다임에 머무르지 않고, 이론적으로 가능한 매우 무거운 암흑물질과 매우 가벼운 암흑물질의 이론을 세우고, 실험적으로 검증할 다양한 방법을 제시하려고 한다. 실제로 대부분의 실험적 노력이 매우 제한적인 질량 영역에 집중해서 이루어져 왔다.(그림 4 참조)

물론 WIMP 패러다임은 매우 아름다운 암흑물질의 이론적 가능성을 제시하지만, 우주는 인간이 상상했던 것보다 훨씬 아름답고 더 흥미로울 수 있다는 것을 잊지 않으려고 한다.