

스트링 우주론

김윤배·조인용

스트링 이론(string theory)에 있어 스트링 우주론(string cosmology)은 이 이론을 관측 결과와 비교해 테스트해 볼 수 있는 가장 유력한 가능성이다. 궁극적으로는 가속 팽창하고 있는 현재 우주와 암흑에너지(dark energy) 문제에 대한 해명을 줄 수 있다면 더할 나위가 없겠지만, 현재 스트링 이론의 발전 단계로 볼 때, 현실적으로 규명해야 할 문제는 어떻게 초기 우주에서 자연스럽게 시작되고 종료될 수 있는 인플레이션(inflation, 초팽창)을 포함한 스트링 우주론 모형을 도출해 낼 것인가이다. 현재 스트링 우주론은 근본이론에서 천체물리학적 관측까지 넓은 영역에 걸쳐 많은 수의 연구자들이 연구하는 분야가 되어, 모든 연구주제를 이 짧은 글에서 다룰 수 없고 필자가 흥미있게 공부하였던 세 개의 주제를 다루고자 한다.

브레인 세계 시나리오

지난 십년간 스트링 우주론의 이론적 진전을 보면 가장 영향을 많이 미친 요소는 역시 스트링 이론에 브레인, 특히 D-브레인(D-brane)이 도입된 것이다. D-브레인을 공부하여 지식이 쌓이자 입자물리학 현상론에 도입된 모형이 바로 브레인 세계 시나리오(brane world scenario)이다.

가장 폭넓게 논의된 브레인 모형 중 하나는 1998년 도입된 커다란 여분차원(large extra-dimensions) 모형이다.^[1] 물론 여기서 ‘커다란’이란 당연히 중력에서 온 플랑크 스케일(10^{28} eV) 즉 10^{-35} m에 비해 표준모형의 길이 스케일이 크다는 것으로 이 모형에서는 10^{12} eV 즉 10^{-19} m 정도를 의미한다. 이 모형을 통해 공간의 개념이 마치 응집물질 물리 실험에서 시료와 시료가 놓인 공간을 구분하는 것처럼 바뀐 것이다 (그림 1의 (가)와 (나)를 비교). 즉 우리 3차원 우주는

저자약력

김윤배 교수는 서울대학교 물리학과 Ph.D(1991)로서 미국 콜럼비아 대학교 물리학과(1992), 경희대학교 물리학과(1993), 나고야대학교 물리학과(1994)에서 연구원을 역임하고, 부산대학교 물리학과 브레인물 교수를 거쳐(1995), 1996년부터 성균관대학교 물리학과에 재직 중이다. (yoonbai@skku.edu)

조인용 박사는 미국 Tufts 대학교 물리학과 Ph.D(1999)로서 미국 Emory 대학교 물리학과(1999), 국립 멕시코 대학교 핵 과학 연구소(2001), 프랑스 파리 11대학교 이론물리 연구소(2002), 서울대학교 물리학과(2003) 연구원을 역임하고 현재 성균관대학교 물리학과 연구교수(2005-)로 재직 중이다. (jycho@skku.edu)

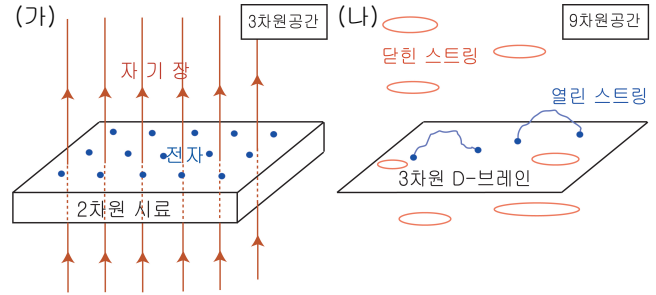


그림 1. (가) 2차원 시료에 자기장을 걸어 행하는 응집물질물리 실험. (나) 스트링 이론에서 9차원 공간에 놓인 3차원 D-브레인.

시료에 해당되고, 9차원(혹은 10차원) 공간은 시료가 놓인 3차원 공간에 해당된다. 이 경우 우리 우주 공간을 3차원 D3-브레인으로 생각하면, D3-브레인 위에 사는 전자기장과 물질 등을 포함한 열린 스트링 자유도는 시료 안에 갇혀있는 전자와 같고, 중력장 같이 D3-브레인을 포함한 9차원 공간을 확보할 수 있는 닫힌 스트링 자유도는 시료 밖으로도 방사될 수 있는 전자기장에 해당된다.

브레인 세계 시나리오 중 다른 중요한 모형은 랜달-선드럼(Randall-Sundrum) 모형이다.^[2] 이 모형에서 여분차원에 음의 우주상수와 중력 효과를 고려하면 그림 2의 회색 부분으로 표시되어 있듯이 지수함수 형태의 소위 워프인자(warp factor)가 있는 시공간이 형성되지만, 우리가 살고 있는 우주는 파랑색 혹은 빨간색으로 표시된 브레인으로 편평할 수 있다는 것이다. 위 두 가지 모형은 원래 오랫동안 입자 물리학 현상론의 숙제였던 계층문제(hierarchy problem)를, 즉 앞에서 소개하였던 플랑크 스케일과 표준모형의 스케일이 왜 이렇게 많이 다른가 하는 문제를, 해결할 수 있는 새로운 가능성으로 제시되었다. 우주론의 측면에서도 이 모형은 브레인의 크기가 시간에 따라 변하는 동력학인 우주론을 포함할 수 있음이 곧 알려지고, 이에 따라 인플레이션을 포함한 수많은 후속 연구가 행하여져 브레인 우주론(brane cosmology)이란 우주론의 한 연구

참고문헌

- [1] N. Arkani-Hamed, S. Dimopoulos and G. R. Dvali, Phys. Lett. B **429**, 263 (1998).
- [2] L. Randall and R. Sundrum, Phys. Rev. Lett. **83**, 3370 (1999); Phys. Rev. Lett. **83**, 4690 (1999).

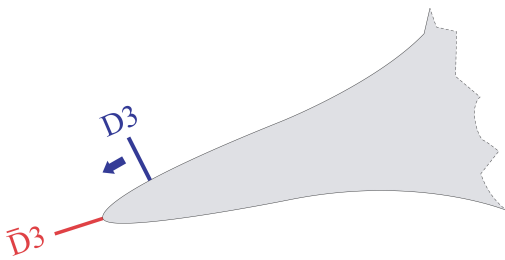


그림 2. 워프 인자가 있는 공간에 놓인 D3-브레인과 반 D3-브레인.

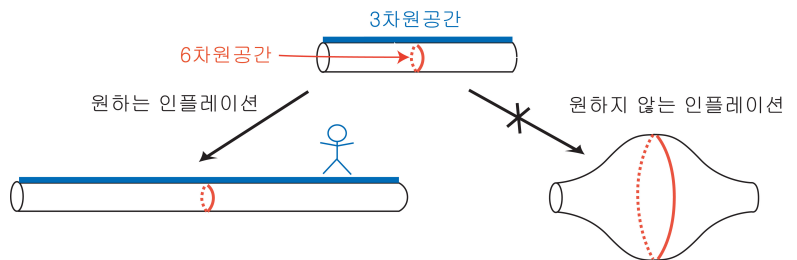


그림 3. 9차원 공간 중 우리가 사는 3차원은 초팽창되고 나머지 6차원은 작게 남아있는 모형이 바람직.

분야를 이루었다. 또한 LHC의 본격적 가동이 곧 시작되는 현 시점에서 보면 이 브레인 세계 시나리오는 블랙홀의 존재에 따른 제트의 관찰 가능성을 예고하고 있어 매우 흥미롭다.

플럭스가 있는 스트링 우주론

이론적 측면에서 전술한 브레인 세계 시나리오의 브레인은 그 발상이 스트링 이론내 브레인의 존재에 영향받고 있었다. 따라서 과연 이 브레인이 스트링 이론에 있는 브레인인지, 만약 그렇다면 수많은 종류의 브레인 중 어떤 것에 해당될 수 있는지가 중요한 질문의 하나였다. 즉, 스트링 이론으로 아이디어를 얻어 쓴 현상론 및 우주론 모형인 브레인 세계 모형을 스트링 이론으로부터 유도 가능한 것인가 하는 것이 관건이었다.

초대칭성을 포함한 스트링 이론은 10차원 시공간에서 정의되는 이론이며 I형, IIA형과 IIB형, 헤테로틱한 두 가지 형의 도합 다섯 가지가 알려져 있다. 만약 우리 관측하는 우주공간이 브레인으로 이루어져 있다고 가정하면 흥미로운 대상은 3차원 D3-브레인을 포함하고 있는 IIB형 스트링 이론이 될 것이다. 그리고 우리가 살며 늘 보고있는 3차원은 빛의 속도로 약 150억 년 정도 걸리는 매우 큰 대상이지만, 반면 6차원 공간을 아직 가속기 실험을 통해 관찰하지 못한 것으로 보아 10^{-19} m 이하의 매우 작은 존재임에 틀림없다. 따라서 자연스럽게 매우 작은 크기의 6차원 공간을 사용하게 되는데, 이중 최근 스트링 이론과 스트링 우주론과 관련하여 많은 연구가 진행된 예가 복소 다양체의 하나인 3차원(실수 기준으로는 6차원) 칼라비-야우 공간이다. 이를 만화로 2차원으로 간단히 그리면 그림 3의 상단에 있는 짧은 호스같이 생긴 공간으로 상상할 수 있다.

스트링 이론으로부터 인플레이션을 포함한 스트링 우주론을 구성할 때 모듈라이 문제(moduli problem)라는 오래된 숙제도 있어 왔다. 즉 스트링 이론에는 많은 모듈라이가 존재하고 이를 어떻게 고정(fix) 혹은 안정화(stabilize)할 것인가가 오랫동안 남아있던 문제이다. 모듈라이의 존재는 질량없는 가벼운 입자의 존재를 의미하는 등 여러 가지 반갑지 않은 현상을 초래하는데, 우주론의 관점에서 보면 이는 그림 3의 하단 우측 그림처럼

처럼 작다고 여기는 6차원 공간을 초팽창시켜 우리가 사는 우주의 모습과는 다른 우주를 만들 수 있기 때문이다. 따라서 그림 3의 하단 좌측 그림처럼 관측 결과와 일치하는 스트링 우주론을 만들려면 이 모듈라이를 고정 혹은 안정시켜야 한다.

IIB형 스트링 이론의 낮은 에너지에서 닫힌 스트링의 유효장론을 고려하면 128개 자유도를 가진 보존장과 같은 수의 페르미온 장을 가진 초대칭 중력이론(supergravity)이 된다. 이런 복잡한 이론의 보존장을 고려해 얽혀있는 방정식을 풀어보면, 각종 플럭스(fluxes)가 6차원 칼라비-야우 공간에 커져서 일부 뾰족한 특이점(singularity)이 변형(deform)되고 딜라톤(dilaton)이나 액시온(axion)같은 모듈라이가 상수로 고정된 해를 얻을 수 있다. 이때 중력 부분을 살펴보면 이 공간이 워프 인자를 포함하고 있음을 알 수 있는데, 이 공간을 클레바노프-스트라슬러(Klebanov-Strassler) 배경이라고 부른다.^[3] 이런 모듈라이의 안정화는 스트링 이론상 양자 효과를 고려하면 일부 공간의 부피 모듈라이까지도 포함해 고정이 가능해진다.^[4,5] 또한 부산물로 작은 값의 양의 우주상수를 갖는 준안정적 진공이 오랫동안 살아남을 수 있어 우리 우주가 드지터(de Sitter) 공간으로 있을 가능성도 열어놓은 모형 구축이 가능하다.^[5] 물론 여기서 '오랫동안'이란 우주의 나이 정도인 약 150억 년 이상을 의미한다.

이렇게 모듈라이를 모두 고정하고 나면 원하지 않는 여분차원의 초팽창은 막을 수 있지만 우리가 사는 3차원의 인플레이션을 포함한 우주론을 얻기가 힘들어진다. 따라서 3차원에서만 초팽창을 일으키는 새로운 형태의 모듈라이의 도입이 필요하다. 이때 가장 유력한 방법의 하나가 3차원 D3-브레인 쌍을 이용하는 것이다.^[6] 이 경우 그림 2처럼 워프 인자가 있

참고문헌

- [3] I. R. Klebanov and M. J. Strassler, JHEP **0008**, 052 (2000).
- [4] S. B. Giddings, S. Kachru and J. Polchinski, Phys. Rev. D **66**, 106006 (2002).
- [5] S. Kachru, R. Kallosh, A. Linde and S. P. Trivedi, Phys. Rev. D **68**, 046005 (2003).
- [6] S. Kachru, R. Kallosh, A. Linde, J. M. Maldacena, L. McAllister and S. P. Trivedi, JCAP **0310**, 013 (2003).

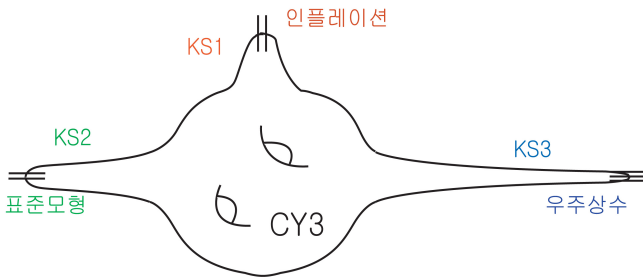


그림 4. 칼라비-야우 다양체의 끝에 놓인 워프된 공간들.

는 배경에 이 쌍을 놓으면, 반D3-브레인은 배경으로부터 받는 힘이 더해져 워프된 목(throat)의 끝에 가라앉아 있고 (그림 2의 빨간색), D3-브레인은 배경으로부터 받는 힘이 상쇄되어 놓은 위치 근처에 떠 있게 된다 (그림 2의 파란색). 이렇게 D-브레인과 반D-브레인이 적당한 거리를 두고 떨어져 있으면 만유인력과 반대 전하에 의한 당기는 힘에 의해 다가온다 (그림 2의 화살표). 이 동안 느리게-구르는 인플레이션 (slow-roll inflation)이 일어나고 이후 둘이 충돌하여 붕괴되면서 인플레이션은 끝나고 중력장이나 코스믹 D-끈 등을 생성하게 되는데, 이 결과를 우주배경복사 데이터와 비교하면 이 스트링 이론으로부터 유도된 우주론 모형에 심한 제한을 가하게 된다. 종합적으로 보면 이 복잡한 모형을 통해 그림 4 처럼 6차원 칼라비-야우 공간의 한 쪽 끝에서는 인플레이션을 일으키고, 다른 쪽 끝에서는 표준모형도 만들고, 또 다른 끝에서는 우주상수 문제도 해결하기를 기대하고 있다. 이론적인 면에서 이 플럭스를 포함한 스트링 우주론 모형은 현재 너무 큰 초중력 수정(supergravity correction)으로 인해 생기는 난관을 극복할 새로운 아이디어를 기다리고 있다.

코스믹 스트링 우주론

코스믹 스트링(cosmic string)은 초기우주에서 대칭 깨짐 (symmetry breaking) 현상이 동반되는 상전이 과정에서 킵블 기구(Kibble mechanism)에 의해 생성되는 위상 결함체 (topological defect)의 한 종류이다.^[7] 우주에서의 코스믹 스트링에 의한 물리적인 현상들은 스트링의 선밀도 μ 에 의해 결정되며, 이는 대칭 깨짐 스케일 η 와 $\mu = 2\pi\eta^2$ 의 관계에 있다. 대통일이론(GUT)의 대칭 깨짐 스케일은 $\eta \sim 10^{16}$ GeV이며, 이때 생성되는 스트링의 경우 $G\mu \sim 10^{-6}$ 이다. 코스믹 스트링과 관련된 중요한 우주론적 현상들은 다음과 같다.

첫째, 스트링에 의해 생성된 시공간의 곡률은 스트링의 중심부에 몰려있고 스트링 바깥쪽은 편평한 공간이 된다. 이로 인한 스트링 주변의 시공간 구조는 고깔모양이다.^[8] 고깔 모양의 시공간은 그 중심으로 한 바퀴 회전각이 2π 가 아닌

$8\pi G\mu$ 만큼이 부족한 구조를 갖는다. 이러한 시공간 구조는 중력렌즈 현상을 유발하고, 움직이는 스트링 뒤쪽에 매질이 모이게 하여 은하의 거대구조에서 보이는 필라멘트 구조나면 구조를 형성할 수 있게 한다.^[9]

둘째, 스트링은 우주에서 생성된 후 수개의 긴 스트링과 수백 개 이상의 스트링 고리들로 이루어진 네트워크를 형성한다. 우주가 팽창하며 진화할 때, 스트링 네트워크의 에너지 밀도는 에너지 발산 메커니즘이 없다고 가정하면, 우주의 다른 물질(빛이나 입자 등)의 에너지 밀도를 능가하게 된다. 하지만 이들은 시간이 지남에 따라 우주의 다른 물질의 에너지 밀도와 같은 진화로 정착하게 된다. 이를 스케일링이라 한다. 스트링 네트워크가 스케일링 체제로 정착하는 데에는 스트링들이 충돌할 때 일어나는 재연결(reconnection)이 주요한 역할을 한다. 서로 다른 두 스트링이 교차할 때, 이들은 그냥 지나치지 않고, 항상 한 스트링은 다른 스트링과 연결되어 분리된다. 이로써 스트링 고리의 생성이 가능해지고 이 고리들은 진동을 하여 중력파의 형태로 에너지를 잃게 된다. 이러한 메커니즘에 의해 스트링 네트워크는 우주의 다른 물질들의 밀도와 같은 방식으로 진화하게 된다.

셋째, 스트링 고리의 진동이나 스트링 고리 생성 시 만들어지는 뾰족한 부분(cusp)은 강한 중력파를 발생한다.^[10] 스트링이 주는 중력과 스펙트럼은 앞으로 작동될 중력과 검출기 LIGO II나 LISA의 감도영역이어서 멀지 않아 그 관측이 가능하리라 본다. 현재 8년 동안의 펄서 관측을 통한 중력과 관측 결과로는 스트링의 선밀도를 $G\mu \leq 4 \times 10^{-5}$ 로 제한을 준다.^[11]

넷째, 코스믹 스트링은 은하 생성 등의 우주 구조 형성에 필요한 초기 밀도섭동의 씨앗이 될 수 있다.^[12] 스트링 주변으로 물질이 모여 주변보다 밀도가 높아지고 이 주변에 은하와 같은 우주의 구조들이 형성된다. 은하규모의 구조를 주기 위한 필요한 밀도섭동은 $\delta\rho/\rho \sim 10^{-5}$ 정도이며 이를 스트링이 주기 위해서는 $G\mu \sim 10^{-6}$ 정도가 요구된다. 한편 이 정도의 스트링은 우주 배경복사에 $\delta T/T \sim 10^{-5}$ 정도의 온도섭동에 흔적을 남긴다.^[13] 스트링이 주는 우주배경복사의 스펙트럼은 하나의 극대점만을

참고문헌

- [7] T. W. B. Kibble, J. Phys. A **9**, 1387 (1976).
- [8] A. Vilenkin, Phys. Rev. D **23**, 852 (1981).
- [9] J. Silk and A. Vilenkin, Phys. Rev. Lett. **53**, 1700 (1984).
- [10] T. Vachaspati and A. Vilenkin, Phys. Rev. D **31**, 3052 (1985).
- [11] V. M. Kaspi, J. H. Taylor and M. F. Ryba, Astrophys. J. **428**, 713 (1994).
- [12] Y. B. Zeldovich, Mon. Not. Roy. Astron. Soc. **192**, 663 (1980); A. Vilenkin, Phys. Rev. Lett. **46**, 1169 (1981) [Erratum-ibid. **46**, 1496 (1981)].
- [13] F. R. Bouchet, D. P. Bennett and A. Stebbins, Nature **335**, 410 (1988).

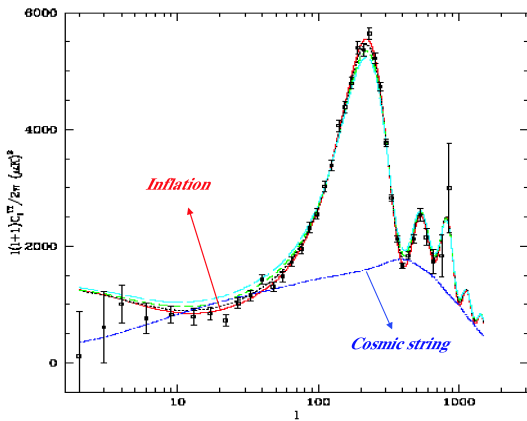


그림 5. 우주배경복사 데이터 및 코스믹 스트링과 인플레이션의 스펙트럼 예측치.

주며 비 가우스 분포를 이룬다. 이는 인플레이션이 예측하는 많은 극대 극소점을 주는 가우스분포와는 명백한 차이가 있다.

WMAP 등을 통한 최근의 우주배경복사 관측 결과로부터 얻어지는 스펙트럼은 그림 5에서 보는 바와 같다.^[14] 이는 인플레이션이 예측한 온도섭동의 결과와 매우 흡사하다. 하지만 현재의 데이터는 코스믹 스트링의 온도섭동의 기여가 약 10% 정도 첨가될 때 가장 잘 맞는 것으로 여겨진다. 이는 $G\mu \sim 0.7 \times 10^{-6}$ 의 스트링 스케일에 해당한다. 이는 대통일이론의 대칭 깨짐에서 생성되는 코스믹 스트링 스케일보다는 약간 작은 수치이다. 우주배경복사 데이터를 통한 코스믹 스트링 존재 여부는 중력과 텐서 모드의 온도 섭동의 영향, 스펙트럼 지표(spectral index), 고주파 영역(그림 5의 우측 영역) 등에 대한 좀 더 정확한 관측의 결과가 나온 후에 결정이 가능하리라 본다.

최근 초끈이론(superstring theory)에 기초한 브레인 인플레이션(brane inflation)으로부터 플랑크 스케일보다 훨씬 작은 스케일에서 코스믹 스트링의 생성이 가능하다는 주장이 제기되고 있다.^[5] p 차원의 D-브레인(D-brane)과 반D-브레인이 접근할 때 우리 우주에 인플레이션이 일어나고, 이들이 충돌한 후 인플레이션이 끝나며 타키온장의 대칭 깨짐 현상으로부터 킵블기구(Kibble mechanism)에 의해 코스믹 스트링이 생성된다. 이를 코스믹 수퍼스트링이라 부른다. 막들의 충돌 후 $p-2$ 차원의 브레인들이 생성되고 이 중 $p-3$ 차원이 초끈이론에서 예측하는 작은 공간차원에 감기고 나머지 한 차원만 우리 우주에 발현될 때, 이 $p-2$ 차원의 브레인들은 우리 우주에서 스트링으로 보이게 된다. 이렇게 생성된 스트링은 기존의 코스믹 스트링과 조금 다른 현상론적 속성을 갖는다.

먼저, 두 스트링이 교차할 때 이들은 기존의 코스믹 스트링처럼 재연결이 일어날 뿐 아니라, 그냥 지나치기도 한다.^[16] 따라서 재연결 확률이 항상 1이 되는 것은 아니다. 이로써 스트링 고리가 생성될 확률이 떨어지고, 스트링 네트워크는 그 에너지지를 효과적으로 발산하지 못하여 우주에서의 스트링 밀도

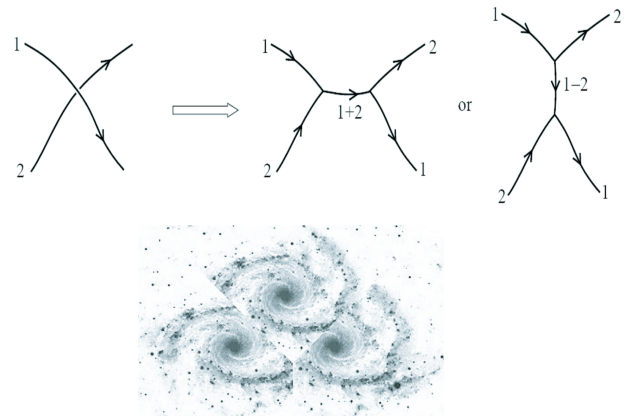


그림 6. DF-스트링의 재연결에 의한 Y-접합 생성과 그에 의해 예측되는 중력렌즈 이미지.

가 증가한다. 하지만 밀도가 증가하면 교차횟수 또한 증가하여 다시 스트링 고리를 많이 생성하게 된다. 이런 과정의 반복을 통해 네트워크는 스케일링 체제에 안착한다. 하지만 어느 한 순간을 보면 기존의 스트링 네트워크에서 보다는 더 많은 스트링 고리들이 발견될 것이다. 따라서 이런 스트링 고리에 존재하는 뾰족한 부분의 수 또한 증가하여 이로부터 발생하는 중력과의 강도가 재연결 확률이 작아질수록 커지게 된다.^[17]

또 다른 차이점은 DF-스트링들의 교차에서 볼 수 있다. 서로 다른 D전하와 F전하를 갖는 두 스트링이 교차할 때 교차점에서의 전하 보존에 의해 두 스트링은 완전히 분리되지 않고, 그림 6에서 보듯 교차점을 연결하는 새로운 스트링이 생성된다. 이를 Y-접합(Y-junction)이라 일컫는다.^[18] 이러한 구조는 중력렌즈 현상에서 2개의 이미지 뿐 아니라 3개 이상의 이미지를 생성할 수 있다.

이상에서 보듯 코스믹 스트링은 최근의 코스믹 수퍼스트링과 맞물려 그 중요성이 부각되고 있다. 앞으로 더 정확한 천문학적 관측 결과들을 토대로, 수퍼스트링과 현대 우주론의 가장 중요한 쟁점인 인플레이션 이론과 코스믹 스트링들의 존재 여부를 결정할 수 있으리라 예상된다.

이 글은 그림없이 의미를 가질 수 없으며, 그런 뜻에서 그림을 그려준 제자 고경춘, 송진향에게 제자 김윤배는 깊은 감사사를 드린다.

참고문헌

[14] A. Gangui, L. Pogosian and S. Winitzki, *New Astron. Rev.* **46**, 681 (2002).
 [15] S. Sarangi and S. H. H. Tye, *Phys. Lett. B* **536**, 185 (2002).
 [16] J. Polchinski, arXiv:hep-th/0412244; I. Cho, T. Kim, Y. Kim and K. Ryu, to appear in *Phys. Lett. B*.
 [17] T. Damour and A. Vilenkin, *Phys. Rev. D* **64**, 064008 (2001); *Phys. Rev. D* **71**, 063510 (2005).
 [18] M. G. Jackson, N. T. Jones and J. Polchinski, *JHEP* **0510**, 013 (2005).