



문의 : 담당자 연락처(02-880-6588)
 연구단장/연구책임자 물리천문학부 Uwe R. Fischer 교수(02-880-2653) /교신저자
 연구단/연구진 최석영 연구원(010-2738-8004) / 제1저자

기체 방울 속의 우주

- 팽창하는 극저온 양자 기체를 통해 우주 생성의 원리를 밝힌다 -

□ 내용 1

- 인플레이션 이론은 이전까지 풀리지 않았던 우주론의 많은 문제들을 해결하였다. 특히 인플레이션 이론은 우주 초기의 양자 요동이 급가속 팽창을 통해 동결되어 현재의 우주에 나타나는 거대 구조(은하와 은하단)를 형성했음을 설명해준다.
- 그러나 인플레이션 이론은 그 성취의 대가로 ‘초 플랑크 영역의 문제’ 라는 다른 문제를 만들어 내었는데, 인플레이션에 의한 팽창이 너무 큰 나머지 현재의 거대구조가 우주 초기에는 현대 물리학이 설명할 수 있는 가장 작은 영역인 플랑크 영역보다 작은 곳에서 시작되었어야만 하기 때문이다.

□ 내용 2

- 극단적인 초기상태를 가지는 우주를 구현하는 일은 불가능하나, 조작이 용이한 응집 물질 혹은 극저온 양자 기체를 팽창시키는 실험을 통해서 초기 우주를 비유적으로 탐구할 수 있다.
- 본 연구는 쌍극자 모멘트를 가지는 원자 혹은 분자들로 이루어진 극저온 양자 기체를 절대 0도에 가깝게 냉각시켜 얻어지는 보스-아인슈타인 응축체를 활용하여 초기 우주에 관한 이론의 하나인 인플레이션 이론의 결과를 실험적으로 확인할 수 있는 방법을 제시하였다.

- [붙임] 1. 연구결과 2. 용어설명 3. 그림설명
 4. 연구진 이력사항

연구결과

Probing the scale invariance of the inflationary power spectrum in expanding quasi-two-dimensional dipolar condensates

Seok-Yeong Chä and Uwe R. Fischer

(Phys. Rev. Lett. **118**, 130404 - Published 30 March 2017)

우주 생성(빅뱅) 직후의 초기 우주에 대한 연구는 물리학의 한 분야로서, 당연하게도 실험과는 거리가 먼 이론적인 분야이다. 초기 우주에 대한 연구에 있어서 재현 가능한 실험이란 존재하지 않으며, 우리에게 137억 년 전부터 지금까지 진행되고 있는 단 한 번의 실험이 있을 뿐이고, 우리는 이 실험에 뒤늦게 참여하여 과거의 기록을 살펴보는 관찰자에 지나지 않는다. 비록 극단적인 초기상태를 가지는 우주를 구현하는 진정한 의미의 실험 우주론은 불가능하지만, 응집 물질(condensed matter)이나 극저온 양자 기체(ultracold quantum gas)를 팽창시키는 실험을 통하여 우리는 초기 우주를 비유적(analogy)으로 탐구할 수 있는데, 이것이 본 연구의 기본 아이디어이다.

우베 피셔(Uwe R. Fischer)교수와 그의 지도학생 최석영군은 쌍극자 모멘트를 가지는 원자 혹은 분자들로 이루어진 극저온 양자 기체가 절대 0도까지 냉각 되었을 때 얻어지는 보스-아인슈타인 응축체(Bose-Einstein condensate)를 활용하여 초기 우주에 관한 가장 중요한 업적중 하나인 인플레이션 이론의 결과를 실험적으로 확인할 수 있는 방법을 제시하였다. 인플레이션 이론은 우주 생성 직후 10의 -32 제곱 초라는 매우 짧은 시간 동안 우주가 자연 상수 $e = 2.71828 \dots$ 의 60제곱배 이상 급가속 팽창하였다는 이론으로, 이러한 팽창의 결과로 우주가 평탄하며 규모 불변적(scale invariant)인 물질분포를 가지게 되었음을 함의하는 이론이다. 피셔교수와 최군은 우리 우주에 관한 인플레이션 이론의 단순한 확인에서 나아가 극저온 양자 기체의 상호작용의 세기 등을 조절하여 '초 플랑크(trans-Planckian)'영역의 물리학이 규모 불변적 물질분포에 관측 가능한 영향을 줄 수 있음을 증명하고 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 이를 확인하였다.

구체적으로, 쌍극자 모멘트를 가지는 극저온 양자 기체의 에너지-운동량관계(dispersion relation)를 보면, 저에너지 영역에서는 선형적인 관계가 나타나고 고에너지 영역에서는 소위 로톤 극소점(roton minimum)이라 불리는 비선형적 에너지 스펙트럼이 나타나는데, 선형적인 저에너지 영역이 현재의 물리학 이론이 다룰 수 있는 플랑크영역에 해당한다면, 비선형적 고에너지 영역은 현재의 물리학 이론이 설명하지 못하는 초 플랑크영역에 해당한다. 피셔교수와 최군은 로톤 극소점의 세기와 위치 등에 따라 인플레이션 이후 물질분포가 달라짐을 확인할 수 있는, 조작이 용이하며 잘 정의된 실험 방법을 제시한 것이다.

규모 불변적 물질분포는 주어진 굽은 시공간(curved spacetime)에서의 양자장(quantum fields)들이 보여주는 운동학적(kinematical) 현상의 결과이다. 따라서 본 연구에서처럼 극저온 양자 기체로 굽은 시공간을 '흉내 내어' 그 결과를 살펴보는 것은 실제 우주론 연구와 천문 관측 데이터의 해석에도 커다란 반향을 일으킬 것으로 기대된다.

용 어 설 명

1. 인플레이션 이론(inflation theory)

- 빅뱅 이론이 가지고 있는 문제점들 - 평탄성 문제, 지평선 문제, 그리고 자기 단극자의 문제 - 를 해결하기 위해 1979년 미국의 앨런 구스가 주장한 이론으로, 우주가 처음에는 천천히 커지다가 인플레이션이 일어나 급격하게 팽창한 후 다시 느리게 팽창했다는 이론이다.

2. 양자 요동(quantum fluctuation)

- 베르너 하이젠베르크의 불확정성 원리로부터 일어나는, 우주의 한 지점에서 에너지의 양의 일시적인 변화이다. 이는 아무 것도 없는 진공에서도 매우 짧은 시간 동안 가상적인 입자와 반입자의 쌍의 창조를 허락한다.

3. 플랑크 영역(플랑크 길이, Planck length)

- 플랑크 길이(약 $1.616 \times 10^{-35} \text{m}$)는 시공간이 더 이상 연속적인 형태를 갖지 못하고 양자적 효과를 나타내는 길이 단위로, 이것보다 더 짧은 거리에서 나타나는 양자 중력의 효과는 아직까지 밝혀지지 않았다.

4. 쌍극자 모멘트(dipole moment)

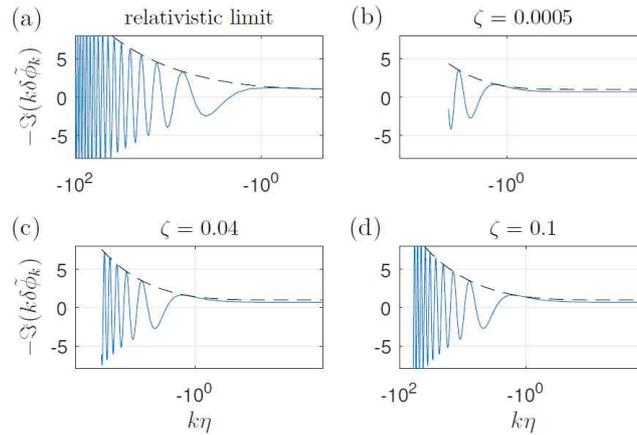
- 전기적 혹은 자기적으로 서로 반대인 두 극이 아주 가까운 거리를 두고 함께 운동할 때 이를 쌍극자라고 부르며, 두 극의 세기와 거리를 곱한 것을 쌍극자 모멘트라고 부른다. 전하로 이루어지는 전기 쌍극자 모멘트와, 자성을 띠는 자기쌍극자 모멘트가 있다.

5. 보스-아인슈타인 응축체(Bose-Einstein Condensate)

- 양자역학적인 성질에 따라 '보손(Boson)'으로 분류되는 입자들이 절대 0도에 가까운 온도로 냉각되었을 때 나타나는 물질의 새로운 상(phase)으로, 1920년대에 인도 물리학자 사티엔드라 나트 보스와 아인슈타인이 그 존재를 예견하였다. 1995년 항공물리 공동연구소(JILA)의 코넬과 와이먼, 매사추세츠 공과대학교의 볼프강 케테를레가 독립적으로 보스-아인슈타인 응축체의 형성에 성공하여 이 성과로 2001년 노벨 물리학상을 수상하였다.

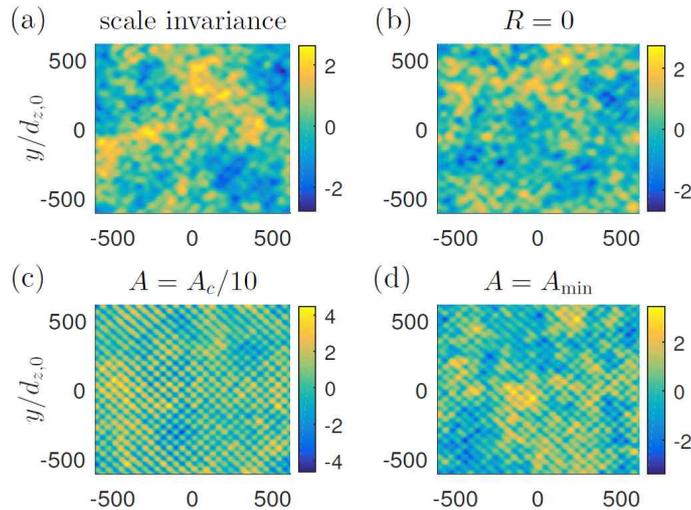
그림 설명

우주 팽창에 따른 양자 요동의 동결 과정



인플레이션 이전에는 양자 요동들이 자유롭게 진동하며 생성과 소멸을 반복 하였지만, 인플레이션에 의한 급가속 팽창이 일어나 양자 요동들의 물리적인 길이가 허블 지평선을 넘어서게 되면 이들은 더 이상 진동하지 않고 동결되게 된다. 이렇게 생성된 비균질성이 중력에 의한 뭉쳐짐을 통해 거대 구조, 즉 은하와 은하단으로 발전하게 된다.

팽창 이후 동결된 양자 요동의 분포



인플레이션 이론에 따르면 우주는 인플레이션 이후에 규모 불변적인 물질 분포를 가지게 된다. 규모 불변성이란 통계학적인 자기 유사성, 혹은 통계학적 프랙탈 구조라고도 불리며, 전체와 부분이 닮은 물질 분포를 말한다. 위의 그림은 ‘가우스 임의 장’이라는 기법으로 양자장을 시각화한 것으로, 첫 번째 그림은 규모 불변적인 물질 분포를, 두 번째부터 네 번째 그림은 초 플랑크 영역의 에너지-운동량 관계를 변화시킴에 따라 달라진 물질 분포를 시각화 한 것이다.

연구자 이력사항

1. 인적사항

- 이 름 : 최석영
- 소 속 : Theory of Cold Atoms 연구그룹
서울대학교 물리천문학부 대학원
- 전 화 : 010-2738-8004
- E-mail : seokyeong.choe@gmail.com



2. 학력

- 2006 - 2011 서울대학교 물리학부 졸업 (수학 복수)
- 2012 - 2014 서울대학교 물리천문학부 대학원 석박통합과정 수료
- 2015 - 서울대학교 물리천문학부 대학원 연구생

3. 경력사항

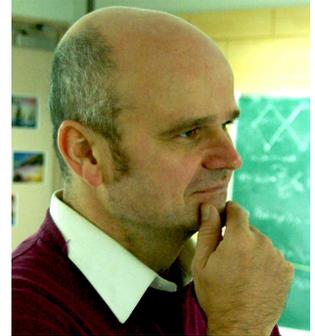
- 2014 - 2014 University of Tübingen, NRF-DAAD 한-독대학원생
하계연수사업

4. 기타 정보

- 출판 이력 : 벡터와 텐서 이야기, 최석영 저, 셀파출판사 (2011)

1. 인적사항

- 이 름 : Uwe R. Fischer (우베 피셔)
- 소 속 : Theory of Cold Atoms 연구그룹 단장
서울대학교 물리천문학부 교수
- 전 화 : 02-880-2653
- E-mail : uwerfi@gmail.com



2. 학력

- 1985 - 1992 Diploma study at the University of Stuttgart
- 1992 - 1994 Ph. D. at the University of Tübingen

3. 경력사항

- 2001 - 2002 University of Illinois at Urbana-Champaign, Postdoc
- 2002 - 2003 University of Innsbruck, Postdoc
- 2004 - 2009 University of Tübingen, Assistant Professor
- 2009 - Seoul National University, Associate Professor

4. 기타 정보

- 1999 Ph. D. Scholarship of the State of Baden-Württemberg (Germany)
- 2000 Research Scholarship of German Research Foundation (DFG)
- 2002 International Research Scholarship of German Research Foundation (DFG)