

우주 팽창

**Ricardo Moreno, Susana Deustua,
Rosa M. Ros, Beatriz García**

International Astronomical Union

Colegio Retamar de Madrid, Spain

Space Telescope Science Institute, USA

Technical University of Catalonia, Spain

ITeDA and Technological National University, Argentina



목표

- 우주 팽창을 이해한다.
- 우주에 중심이 없다는 것을 이해한다.
- 허블-르메트르 법칙을 이해한다.
- 암흑물질의 검출을 이해한다.



소개

이 워크샵의 내용은 다음과 같다:

- 우주의 기원: 빅뱅
- 은하: 공간에서 ‘움직’이는게 아니라, 공간 자체가 팽창
- 허블 상수 : $v = H \times d$
- 우주의 중심은 없다.
- 우주 배경 복사 (CMB)
- 중력 렌즈



모델, 예측, 검증: 식탁보로 실험하기



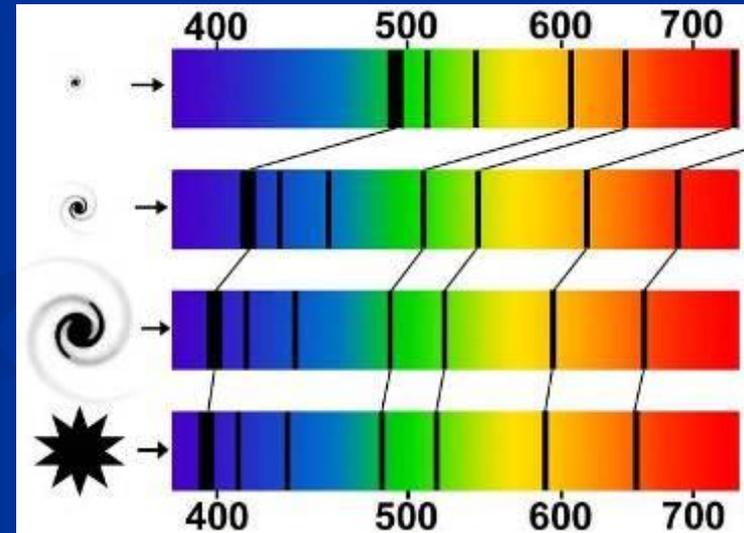
예측: 식탁보를 매우 빠르게 당기면 테이블 위의 아무것도 떨어지지 않을 것이다. 검증할 수 있다면, 예측은 만족된다.

테이블보를 재빨리 잡아당기면, 테이블 위의 물체에 마찰력이 작용할 시간이 충분하지 않아 아무것도 떨어지지 않는다고 설명할 수 있다. 물리학은 무슨일이 일어날지 예측하기 때문에 이 실험은 성공적이다.

우리의 물리학은 나머지 우주에서도 동일하게 적용된다.

붉은색 쪽으로 이동

- 빛의 흡수는 화학 성분에 따라 다르다. 흡수선 스펙트럼은 각기 다른 화학원소의 각기 다른 특징이다.
- 은하로부터 오는 빛을 관측하면, 흡수선이 스펙트럼의 붉은색 끝쪽으로 이동하는 것을 볼 수 있다. 멀리 있는 은하일수록 적색편이가 크다.
- 이것은 은하가 우리로부터 멀어지는 결과로 해석된다.



붉은색 쪽으로 이동

- 주변 은하들의 운동은 상대적으로 작고 불규칙하다: 대마젤란은하는 $+13 \text{ km/s}$, 소마젤란은하는 -30 km/s , 안드로메다은하는 -60 km/s , M32는 $+21 \text{ km/s}$.
- 처녀자리 은하단 (50 천만 광년)의 모든 은하는 $1000 \sim 2000 \text{ km/s}$ 의 속도로 우리로부터 멀어지고 있다.
- 머리털자리 은하단 (3억 광년) 의 속도는 $7000 \sim 8500 \text{ km/s}$.

붉은색 쪽으로 이동

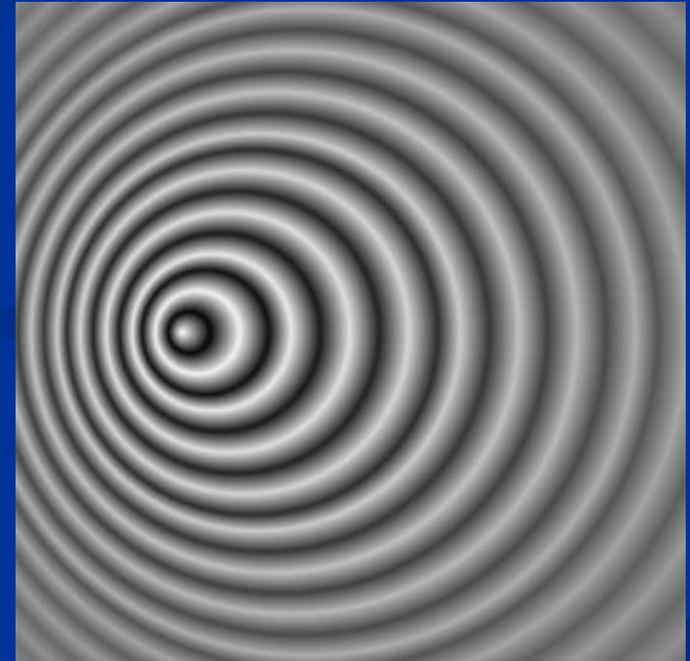
- 반대방향으로, M 74 는 800 km/s 로, M 77은 1130 km/s로 멀어진다.
- 멀리있어 어두운 은하들을 관측할 때, 후퇴속도는 더 빠르다.: 외부은하 NGC 375 6200 km/s, NGC 562는 10500 km/s, NGC 326은 14500 km/s로 멀어진다.
- 어느 방향을 보던, 아주 가까이 있는 은하는 제외하고 모든 은하가 우리에게서 멀어지고 있다.



도플러 효과

테이블보 실험에서 본 것과 같이, 다른 물리 법칙과 원리를 우주를 연구하는데 적용할 수 있다.

- 소리는 구급차, 오토바이, 기차가 다가오면, 높은 음의 소리가 들리고 멀어지면 낮은음의 소리가 들린다.
- 높은 음 → 파장이 짧아짐
- 낮은 음 → 파장이 길어짐



활동 1: 도플러 효과



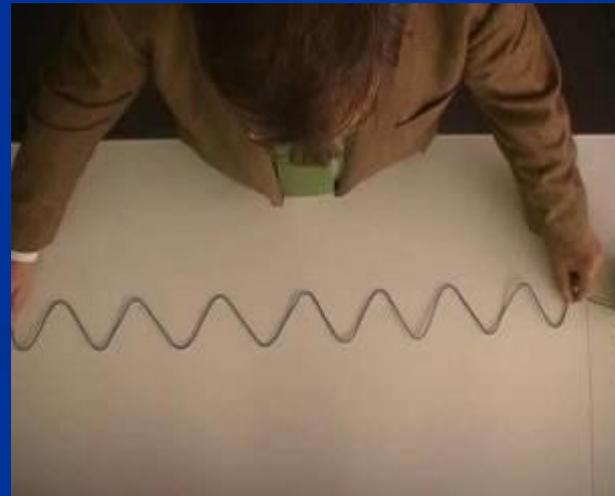
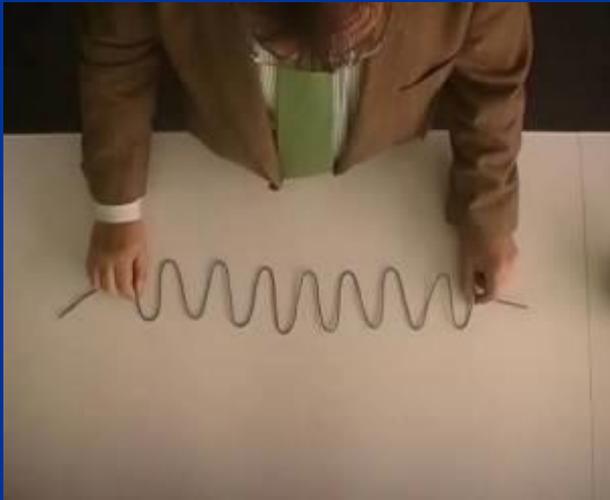
- 알람시계나 진동벨을 수평으로 회전시키면 도플러 효과로 인한 소리를 들을 수 있다.
- 듣는 사람에게 가까이 오면, λ 이 짧아져서 음이 높아진다.
- 멀어지면, λ 가 길어져서 음이 낮아진다.
- 오토바이, 구급차, 기차의 소리에도 발생한다.



이 실험에서, 도플러 효과는 상대적인 음원-수신기의 위치 변화로 소리로 표현되었다. 우주 팽창의 경우에는, 이 효과는 전자기파로 나타난다.

활동 2: 광자 “늘이기”

- 우주가 팽창할 때, 우주에 있는 광자는 “늘어난다”.
- 집 주변에서 사용되는 철사처럼 강체보다는 유연한 케이블을 사용하여 늘어나는 모델을 만들 수 있다.
- 광자의 경로가 길어질수록, 더 많이 늘어난다.



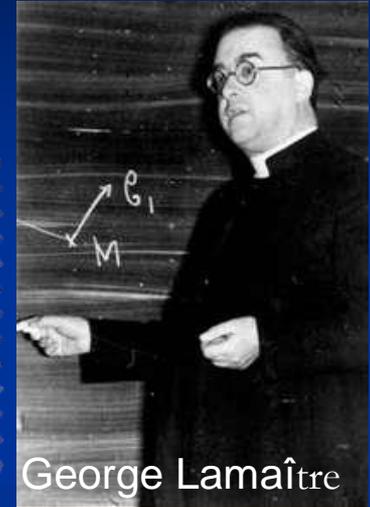
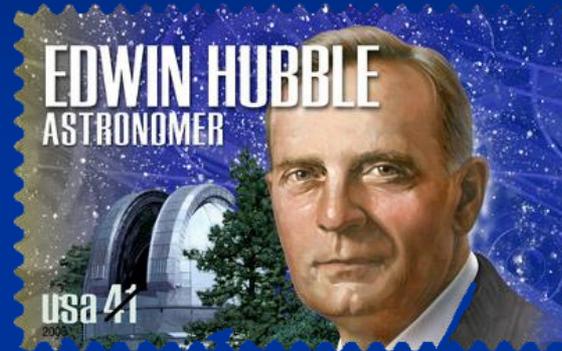
허블-르메트르 법칙

1920년과 1930년 사이에, 조지 르메트르 (George Lemaître)와 에드윈 허블 (Edwin Hubble)은 가장 멀리 있는 은하가 가까이 있는 은하보다 더 빠르게 멀어진다는 것을 알게 된다.

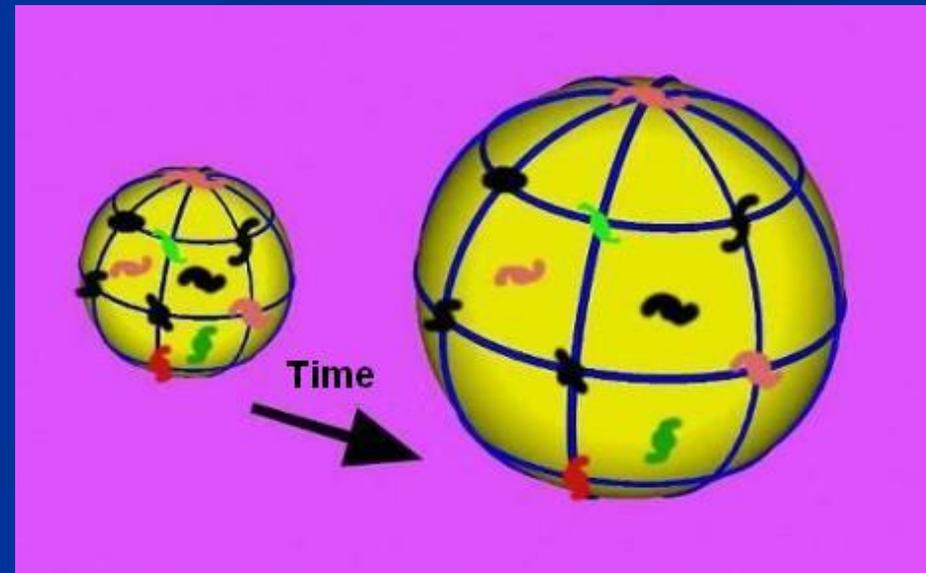
허블 - 르메트르 법칙:

$$v = H \times d$$

은하들은 공간상에 이동하지 않는다. 공간이 확장되며 은하들을 끌고 간다.



George Lemaître



활동 3: 고무줄 우주



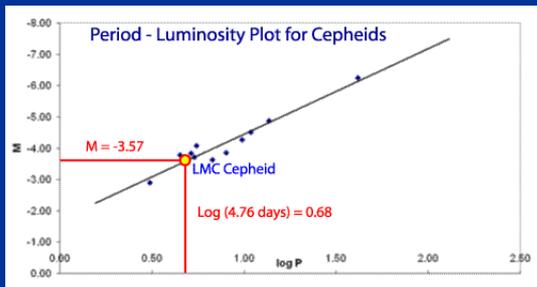
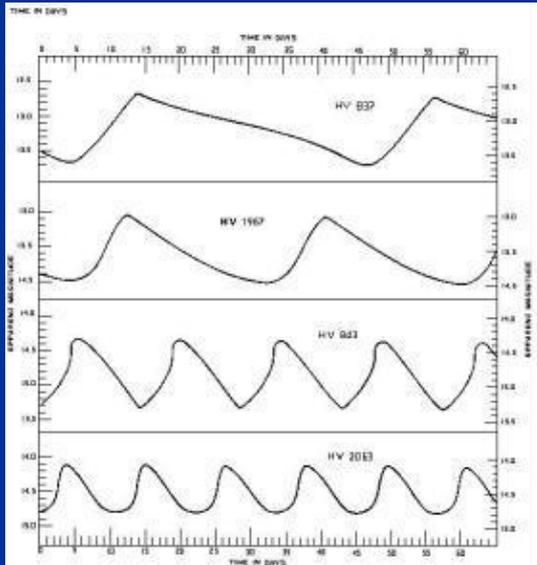
활동 4: 풍선 우주



- 은하 사이의 거리는 팽창하면서 증가한다.
- 풍선 위의 은하는 움직이지 않는다.
- 풍선위의 “은하”중 우리가 아무 은하에나 있더라도, 우리가 보기에 모든 은하가 멀어지는 것처럼 보인다.

우주 팽창

1) 아주 가까운 은하까지의 거리는 세페이드 변광성의 주기-광도 관계로부터 얻을 수 있다. 헨리에타 르빗(Henrietta Leavitt) 이 20세기 초에 하바드에 있을 때 발견



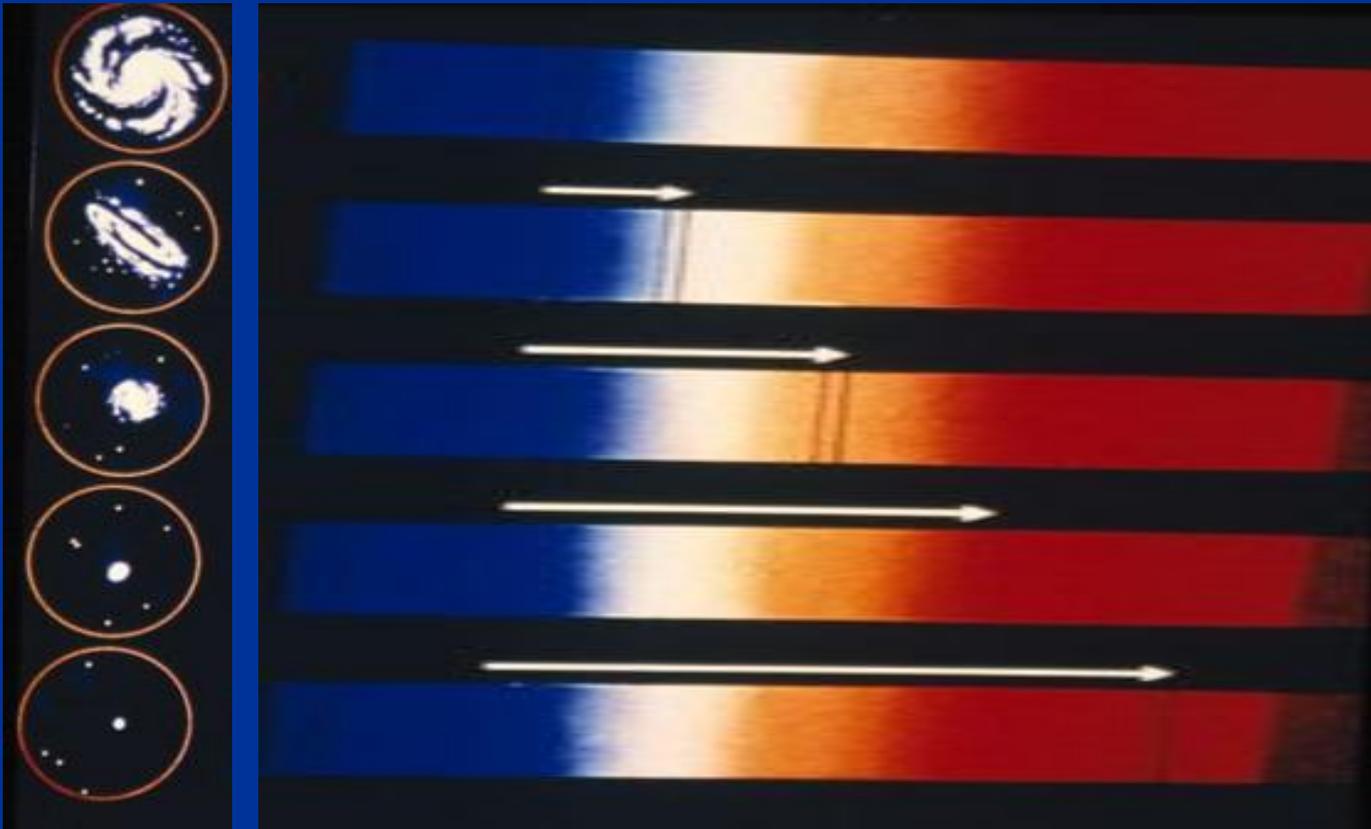
- 광도 곡선에서 변광 주기 P 를 얻을 수 있다
- 주기-광도 관계로부터 절대등급 M 을 알아낸다
- 절대등급 M 과 겉보기 등급 m 을 이용하여 은하까지의 거리를 결정한다.
$$d=10^{(m-M+5)/5} \text{ parsec}$$
- 아주 멀리 있는 은하까지의 거리를 결정하기 위해서는 초신성 I_a 를 이용한다. 이 특별한 초신성은 밝기가 비슷하기 때문이다.



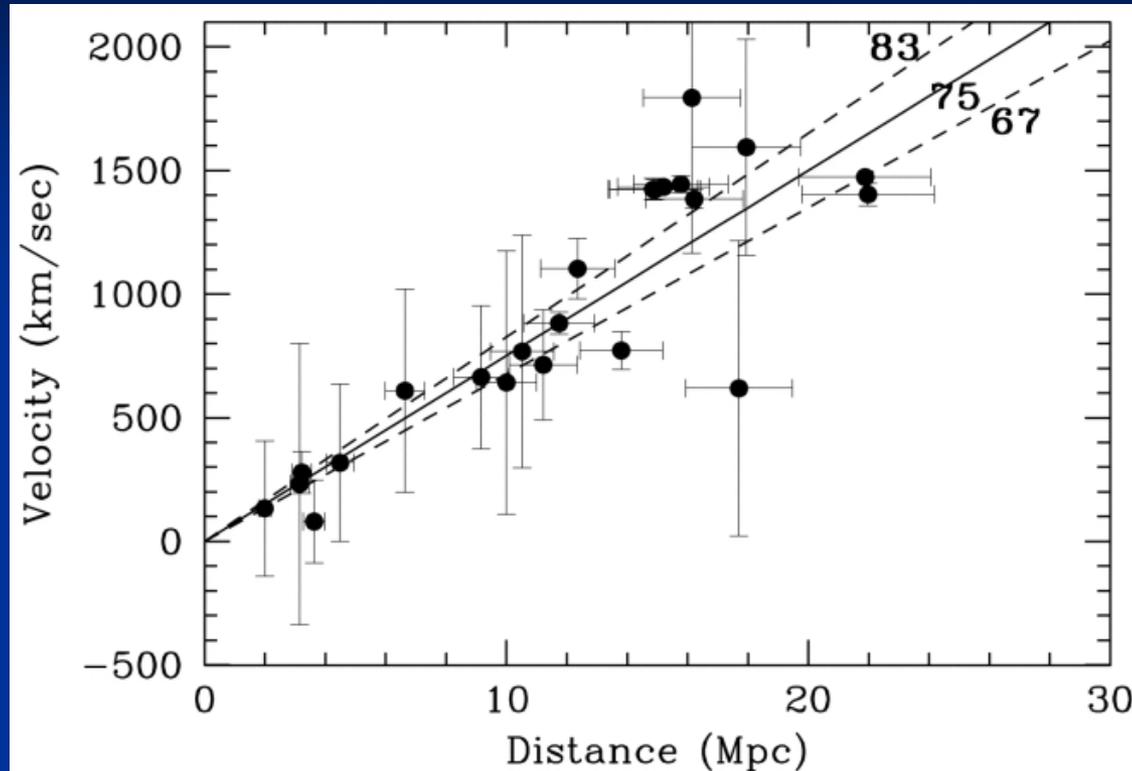
우주 팽창

2) 후퇴속도는 흡수 스펙트럼의 파장 변이로부터 측정한다. 사용하는 식은:

$$v = (\Delta \lambda / \lambda) \times c$$



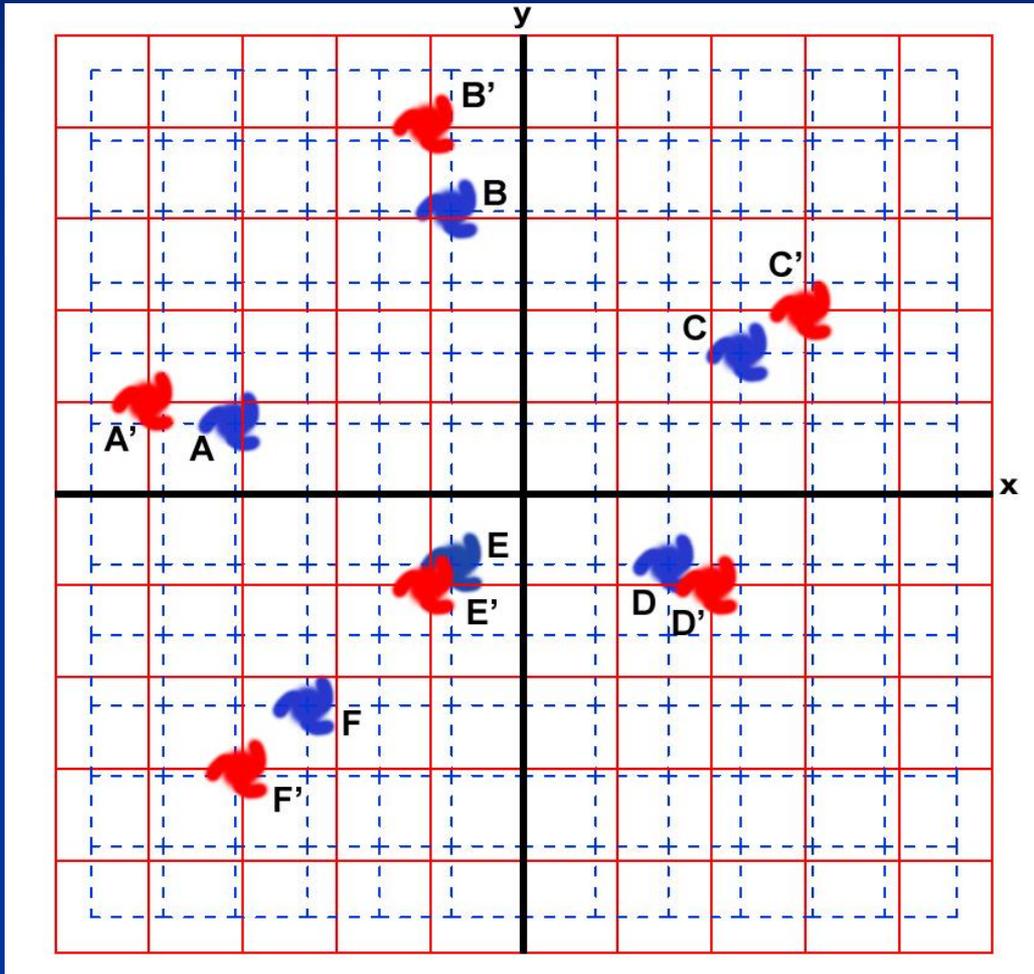
우주 팽창



(from Freedman et al, 2001, ApJ, vol 553, p47)

3. 그래프의 기울기가 허블 상수다. : $v = H_0 \times d$,
여기서 H_0 는 우주 팽창률 이다. : $H_0 = 72 \text{ km/s.Mpc}$

활동 5: 허블-르메트르 상수 계산

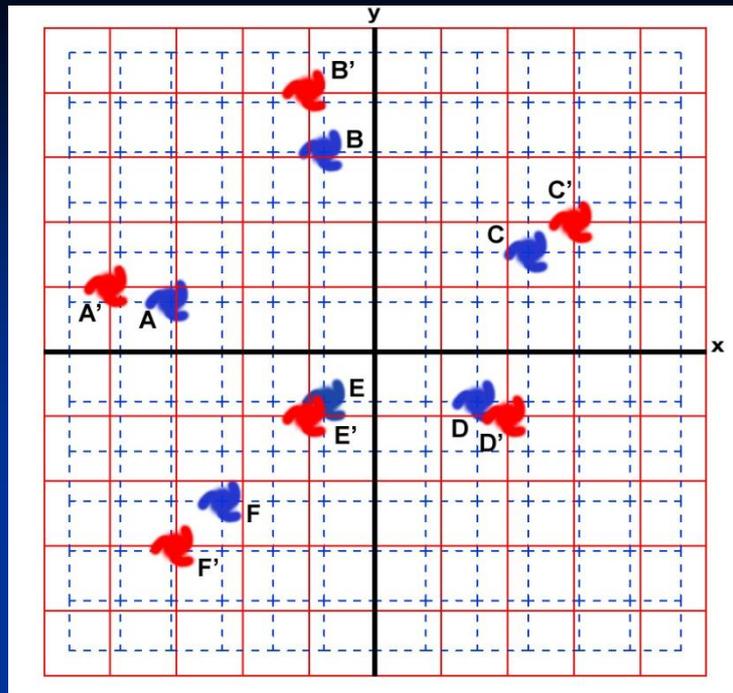


파란색 = 팽창하기 전 우주

빨간색 = 팽창후 우주

활동 5: 허블-르메트르 상수 계산

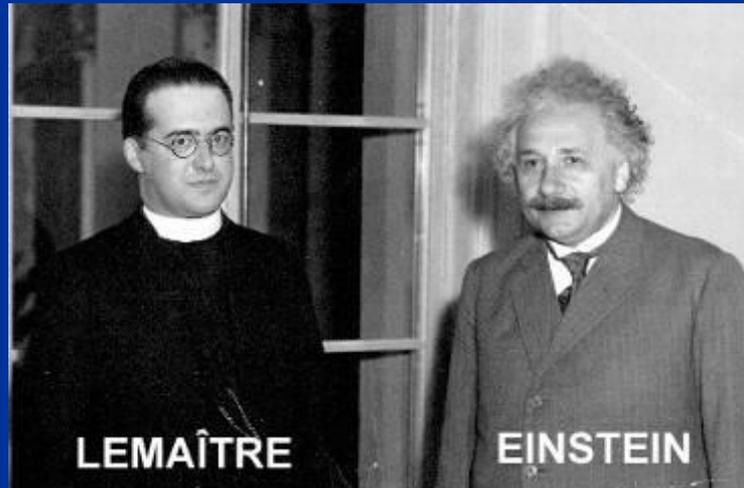
<i>Galaxy</i>	<i>Coordinates x,y</i>	<i>d=distance to origin</i>	Δd	$v = \frac{\Delta d}{\Delta t}$	$H = \frac{v}{d}$
<i>A</i>					
<i>A'</i>					
<i>B</i>					
<i>B'</i>					
<i>C</i>					
<i>C'</i>					
<i>D</i>					
<i>D'</i>					
<i>E</i>					
<i>E'</i>					
<i>F</i>					
<i>F'</i>					



Galaxy	Coordinates x,y	d =distance to origin	Δd	$v = \frac{\Delta d}{\Delta t}$	$H = \frac{v}{d}$
A	(-4, 1)				
A'	(-4, 1)				
B	(-1, 4)				
B'	(-1, 4)				
C	(3, 2)				
C'	(3, 2)				
D	(2, -1)				
D'	(2, -1)				
E	(-1, -1)				
E'	(-1, -1)				
F	(-3, -3)				
F'	(-3, -3)				

빅뱅

- 과거로 돌아간다면, 모든것이 통합되어 있던 때가 있다: 팽창하는 우주
- 조지 르메트르 (Georges Lemaître)는 상대성이론을 해결하면서 “우주 달걀”로 시작하는 팽창하는 우주에 대한 아이디어를 얻었다.



빅뱅

- 빅뱅의 이름: 큰 폭발.
- 종교에 반하는 생각을 가진 프레드 호일(Fred Hoyle)은 창조주의 생각과 너무 비슷하게 보인다고 생각했다.
- S & T 는 이름을 바꾸고자 제안을 받았고, 12 000 여개의 이름이 제안되었지만, 이보다 더 좋은 것이 없었다.



빅뱅

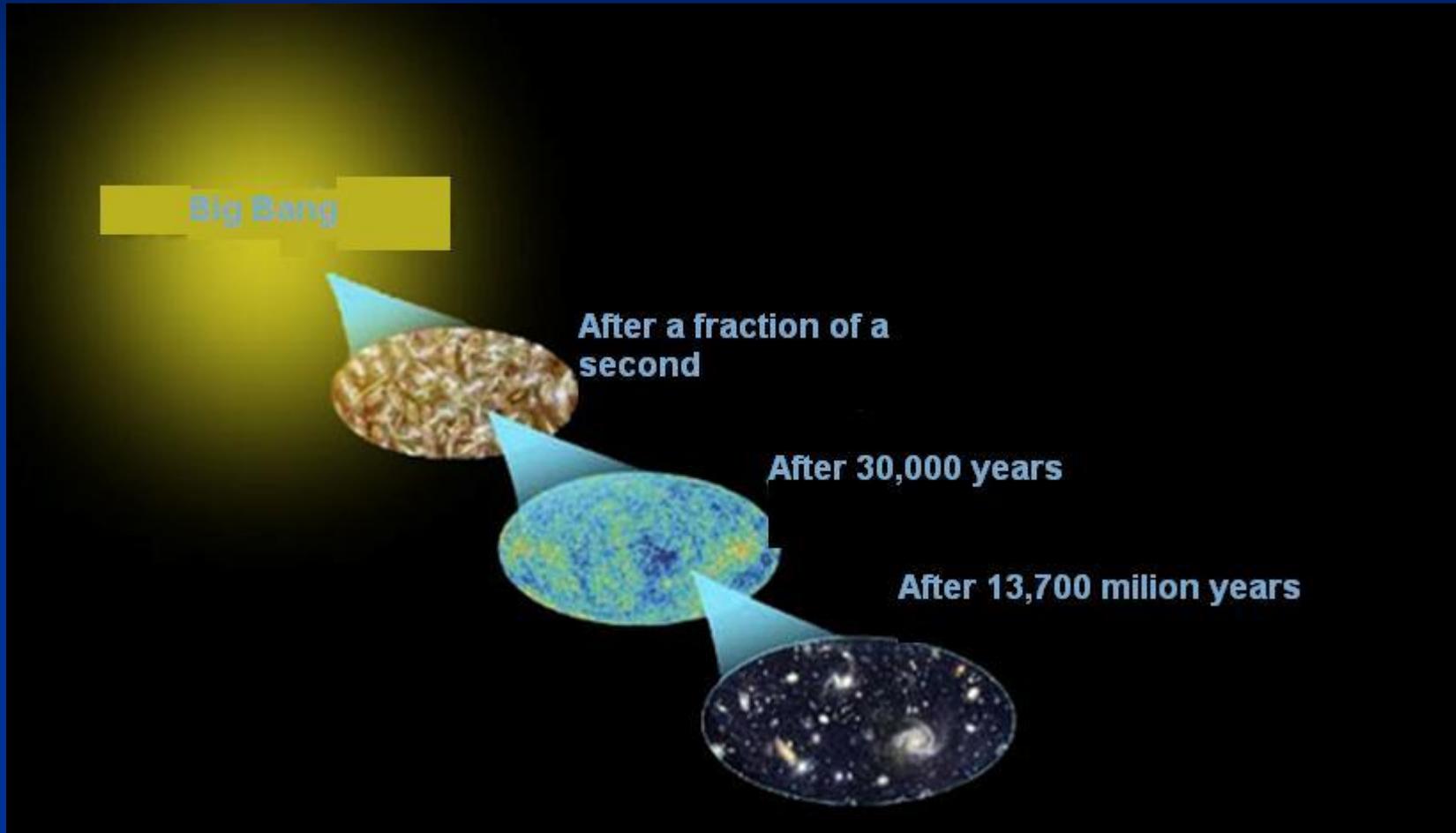
- 빅뱅 이전은? 아무것도 모른다.
- 빅뱅의 원인은? 왜 빅뱅이 일어났는가? 왜 모든 곳에서 동일한 물리 법칙을 따르는가?
- 물리학은 왜 존재하는지에 대한 것이 아니라 어떻게 존재하는가에 대한 것이다.
- 물리학은 빅뱅 이후의 물질을 연구하는 것이고, 그 이전이나, 왜 존재하는지 존재하는 목적이 무엇인지를 연구하는 것은 아니다. 이 영역은 철학이나 종교의 영역이 아닐까.

빅뱅

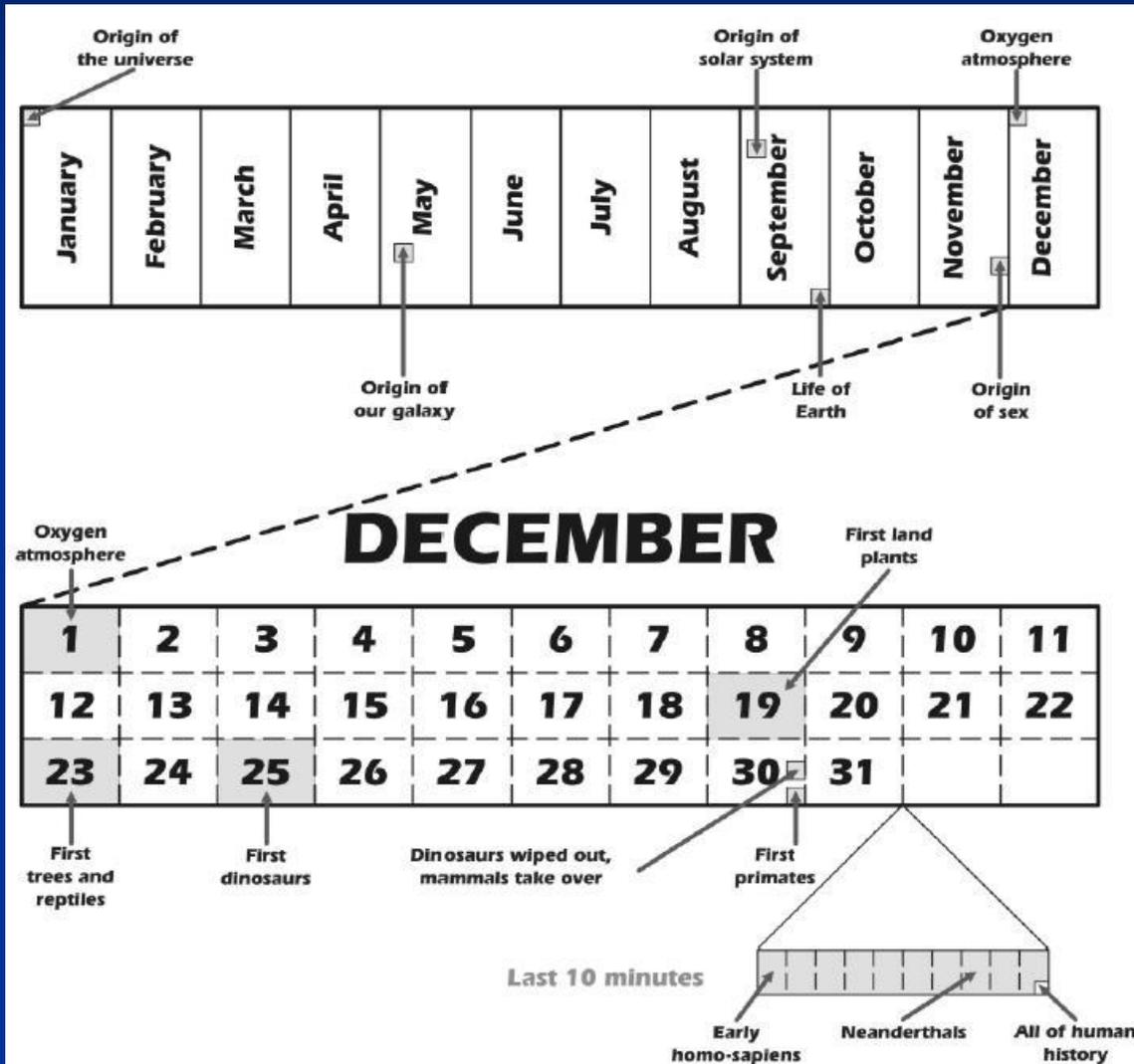
- 양자 진공의 요동?
- 비어 있음은 아무것도 아닌게 아니라 비어 있음이 존재하는 것이다.
- 다중 우주? 정의상 설명할 수 없다.



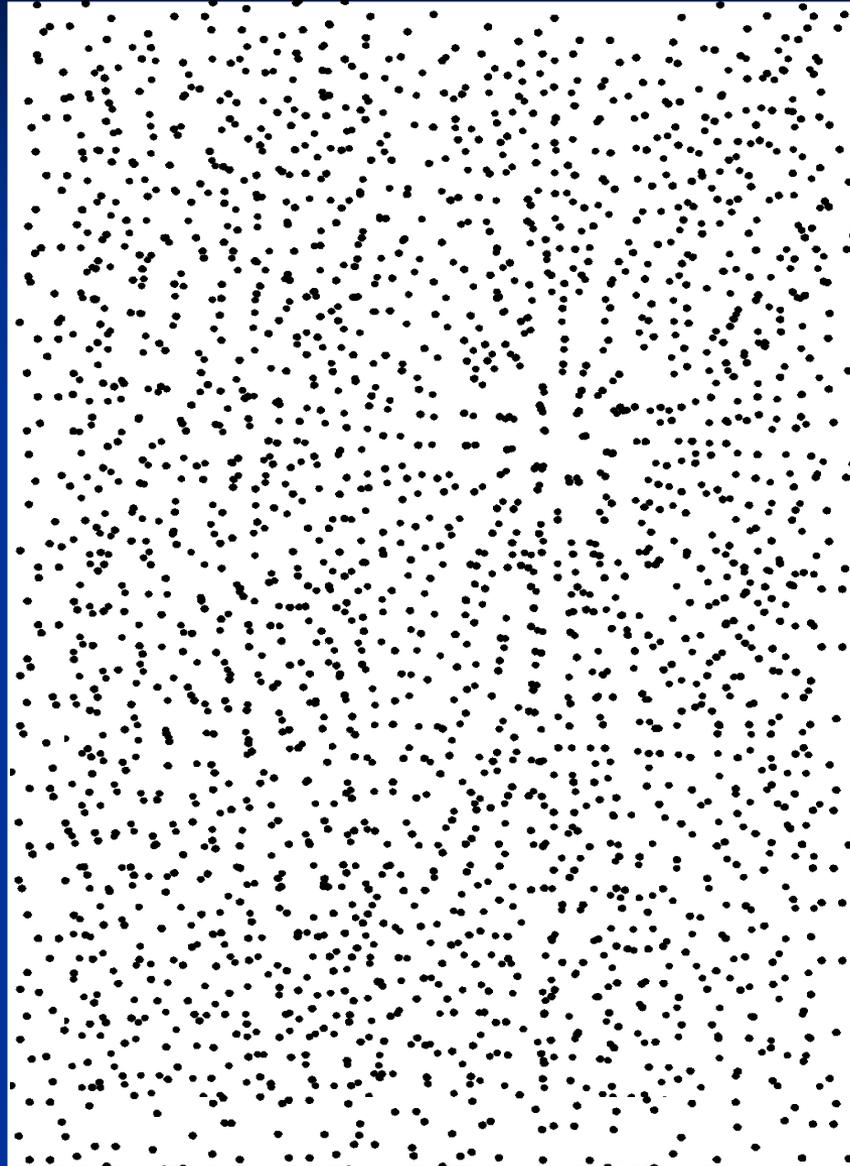
우주의 진화



1년으로 본 우주의 발전



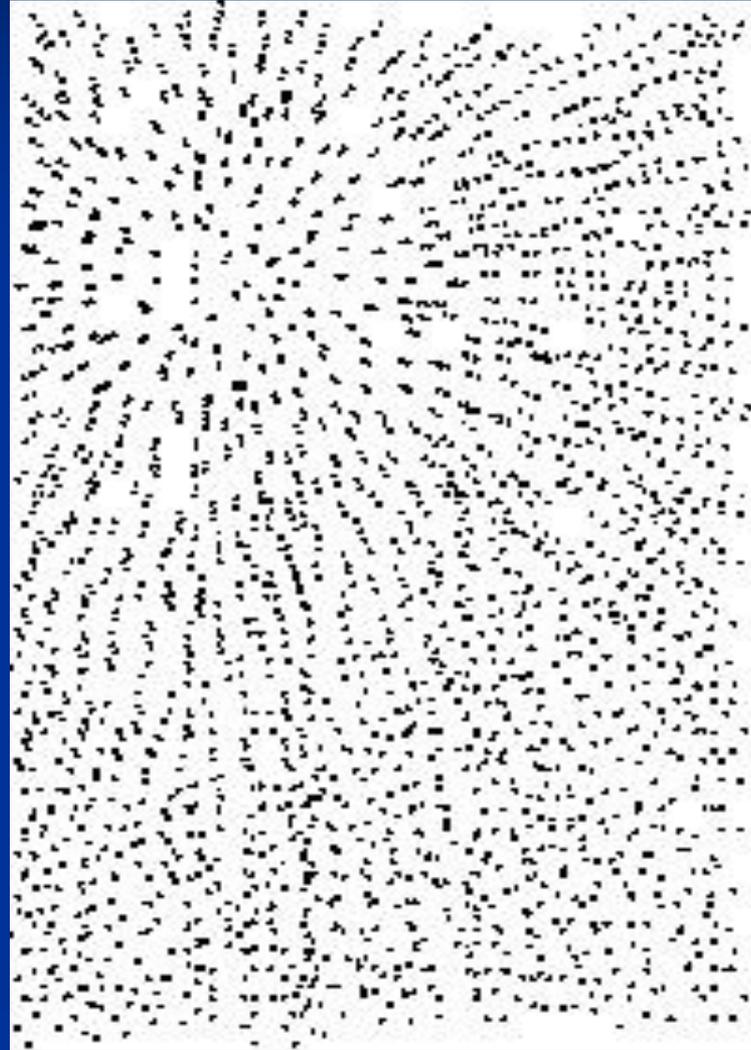
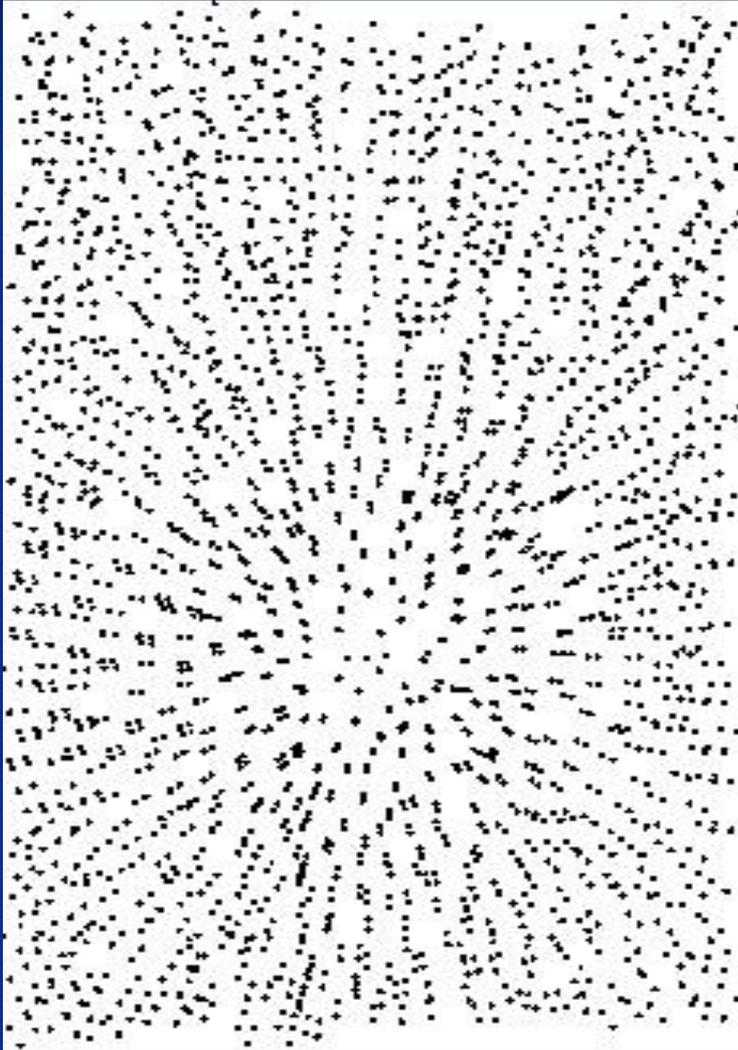
활동 6: 팽창의 중심은 없다



100%

105%

활동 6: 팽창의 중심은 없다



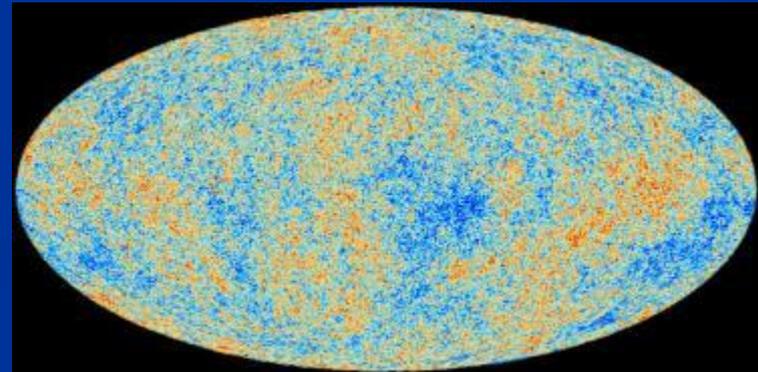
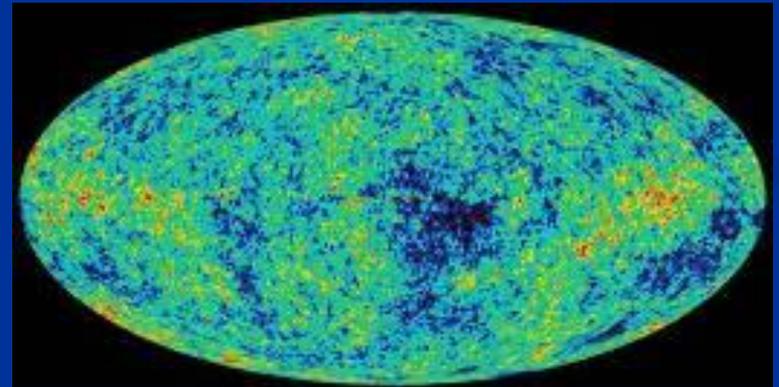
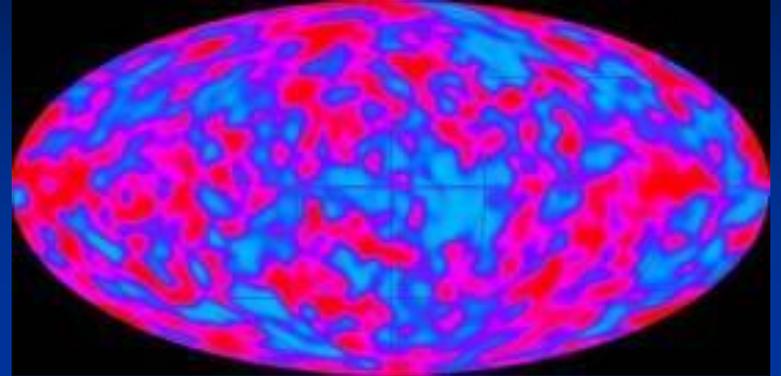
우주 배경 복사 (CMB)

- 빅뱅 이후 380 000 년이 지나 복사가 자유로워졌다.
- 공간이 팽창하면서 시간이 지날수록, CMB 광자의 파장이 늘어난다.
- 그렇게 늘어나 지금은 전파 파장을 가진다.



우주 배경 복사 (CMB)

- COBE, WMAP, PLANCK 미션은 우주배경복사 지도를 매번 더 자세하게 만든다. 아주 작은 요동도 측정한다.: 은하가 형성되기 시작는 물질 덩어리의 흔적



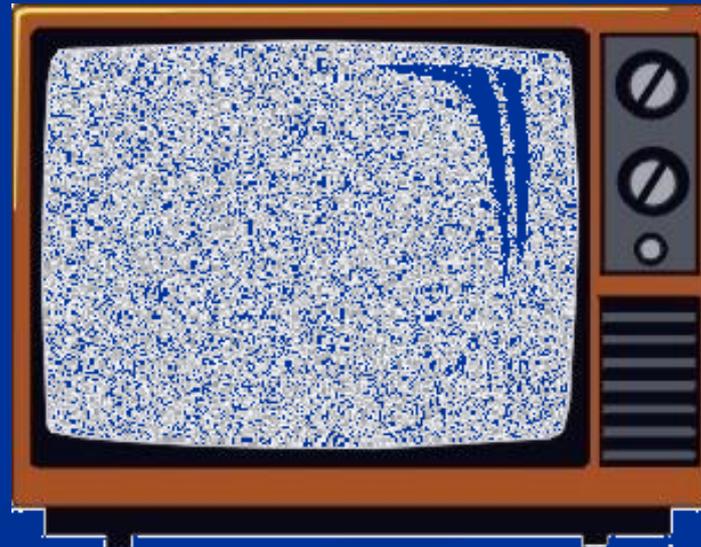
활동 7: 우주배경복사

- 빅뱅 이후 300 000 년이 지나서, 광자는 물질에서 분리되어 자유롭게 우주를 여행한다.
- 공간이 팽창되면서, 광자의 파장은 늘어나 현재 $\lambda = 2 \text{ mm}$, 이것은 온도로 나타내면 $T = 2.7 \text{ K} = -270 \text{ }^\circ\text{C}$.



활동 7: 우주배경복사

아날로그 TV로 CMB를 감지할 수 있다. 빈 채널에서 나타나는 점들 열개중 1개는 우주 배경 복사다. 비슷한 효과를 방송이 꺼진 VHF 라디오에서 들을 수 있다.



암흑 물질: 지구 중력의 인력을 보상하는 스핀 테이블

블랙홀은 보이지 않지만, 블랙홀의 중력으로 주위를 공전하는 항성계로 블랙홀의 존재를 알 수 있다.



암흑물질도 보이지 않지만, 은하 나선팔의 운동을 관측하고 연구하면서 알 수 있다.

암흑물질을 관측하는 또 다른 방법: 중력 렌즈



중력 렌즈는 광학렌즈처럼 작용하는데, 질량이 주변 공간을 왜곡시키고, 멀리서 오는 천체의 빛을 휘게 한다.

중력 렌즈

- 빛은 최단경로로 따른다.
- 표면이 곡선이면, 경로도 휘게 된다.

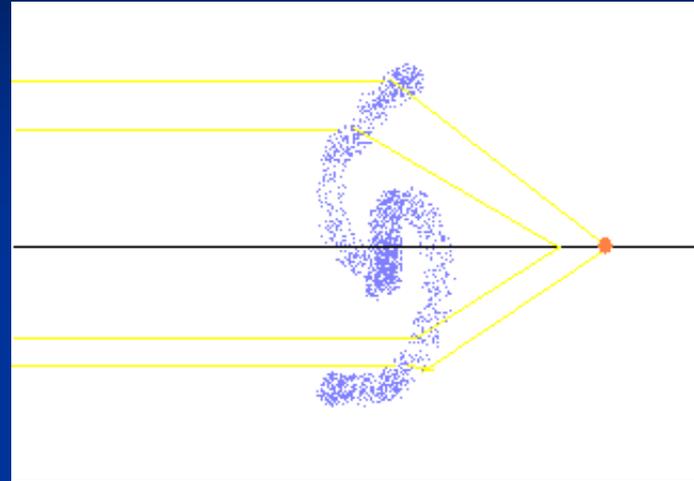
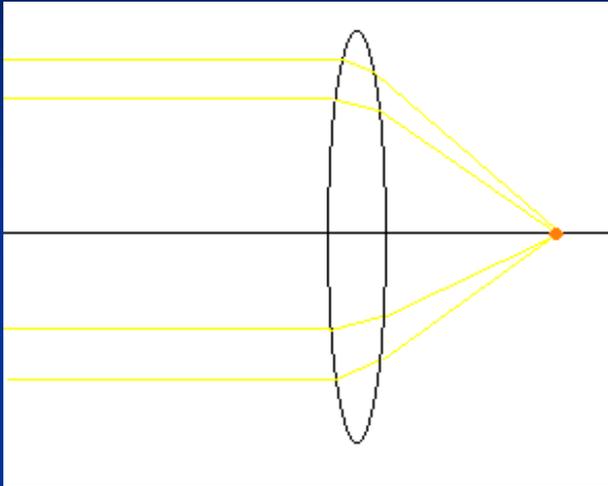


물체 근처를 지날때 빛이 왜 휘나?

- 질량이 있다면, 공간은 휘게 되고, 두 지점 사이의 가장 짧은 경로는 휘게 된다.
- 지구본으로 비슷한 상황을 볼 수 있다.

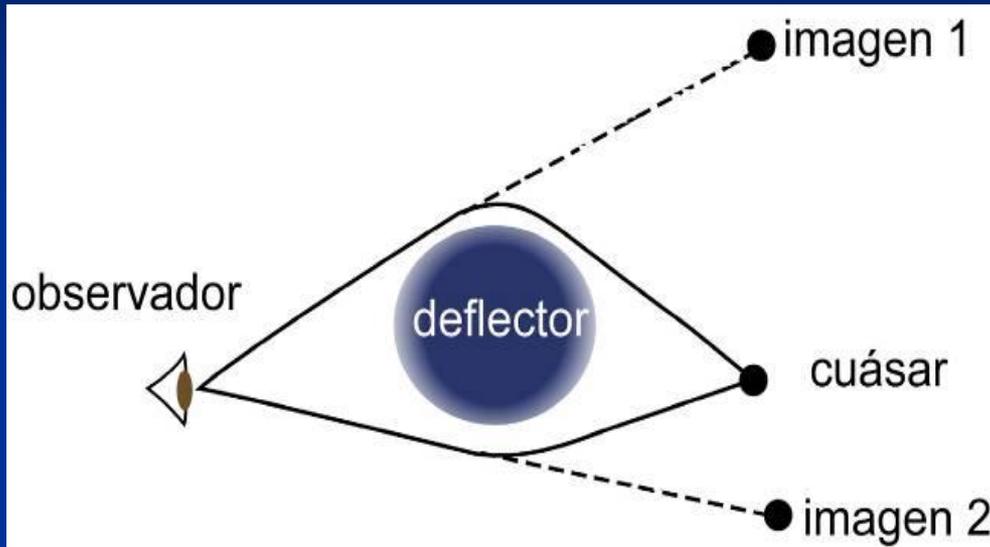


중력렌즈는 어떻게 일어나는가??



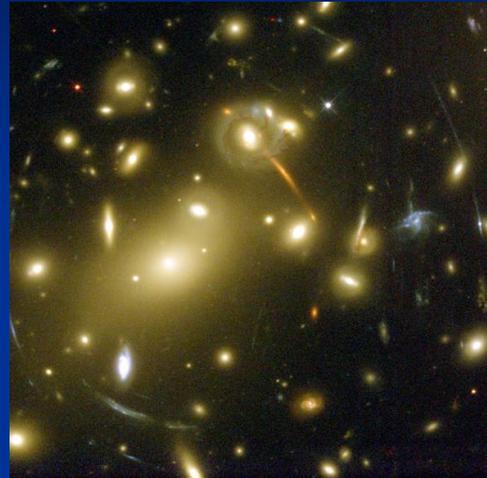
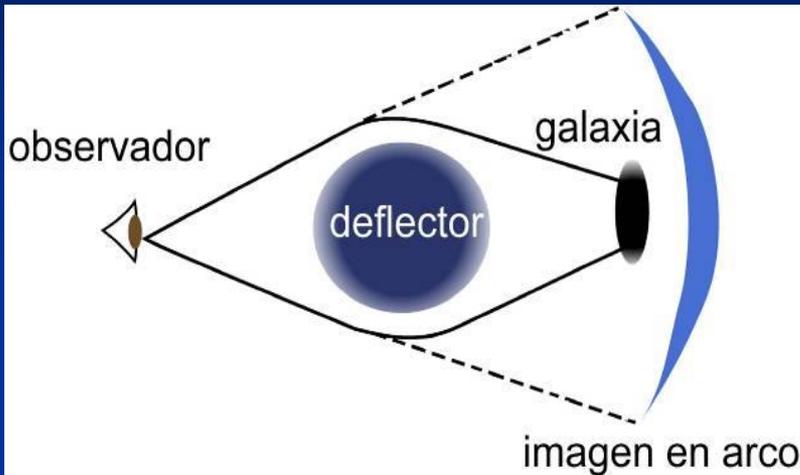
- 볼록 렌즈는 평행광을 한 점에 모이게 한다:
초점
- 중력 렌즈 (예, 은하나 은하단)는 빛을 점이 아니라 빛다발로 모은다; 왜곡된 영상으로 알 수 있다.

위치 변화와 여러 개로 보임



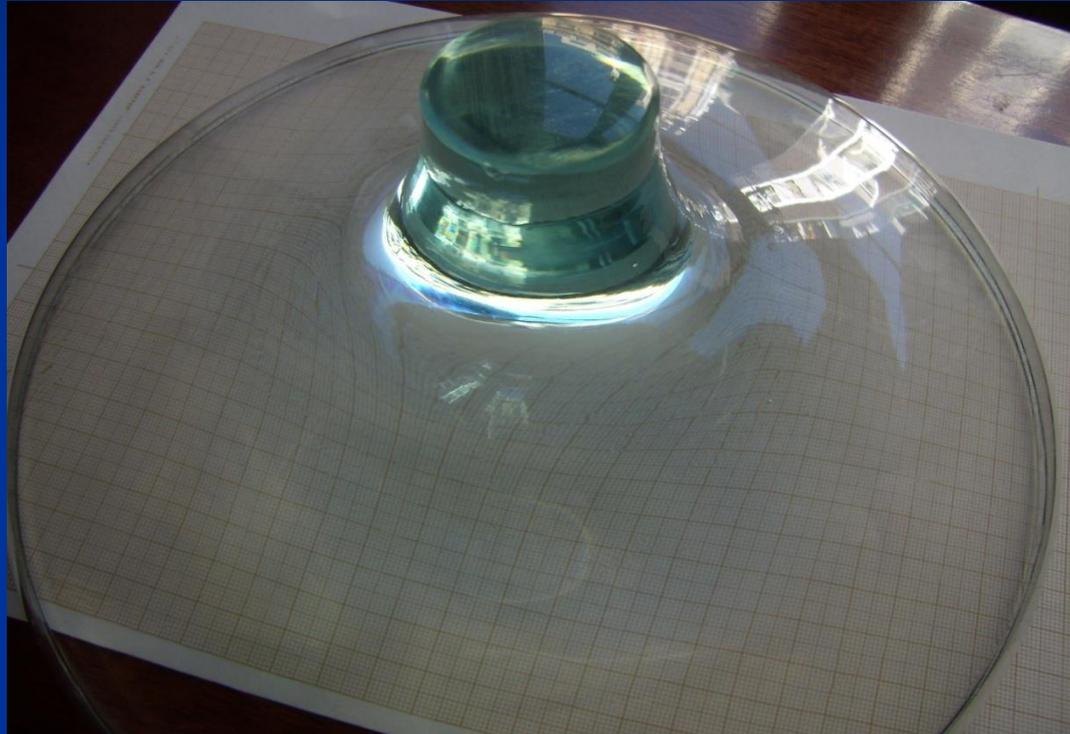
- 굴절은 별, 은하나 퀘이사가 다른 곳에 있는 것처럼 보이게 한다 (겉보기 위치).
- 중력렌즈는 완벽하지 않아, 가장 큰 렌즈는 여러 개의 이미지를 만들어 낸다.

굴절 (Deflection)



- 굴절되는 천체가 점이 아니라 면적을 가지고 있는 천체라면, 밝은 원호로 나타난다.
- 렌즈로 작용하는 시스템이 완벽히 대칭이면, 빛은 수렴하고 결과는 동그란 원으로 보인다 - 아인슈타인 링
- 굴절되는 천체가 별이나 퀘이사라면, 영상은 점으로 나타난다.

활동 8: 와인잔 베이스 왜곡 모형



모눈종이 위에 와인잔을 놓으면 베이스를
통해 변형을 관찰 할 수 있다.

활동 8: “와인잔 바닥”을 통해 보기



와인잔 베이스를 잘라낸다



+



=



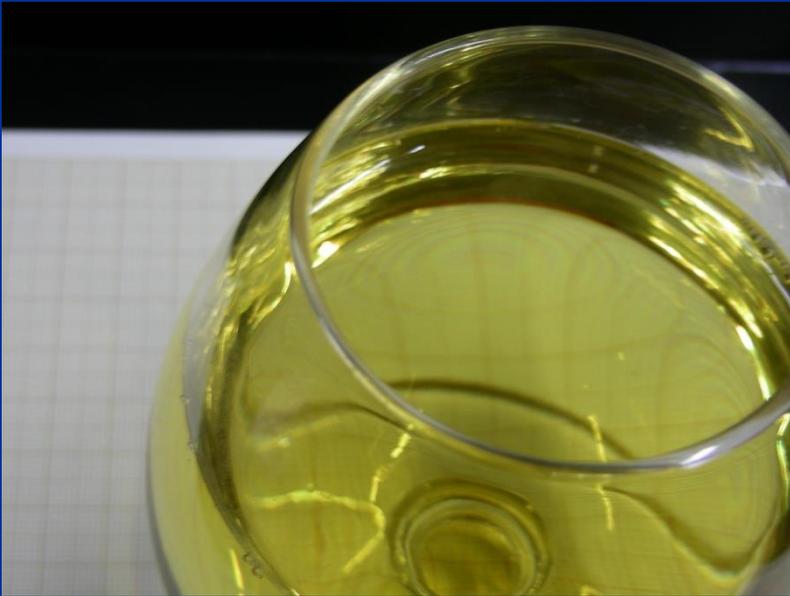
원호 모양

아인슈타인 크로스

아인슈타인 링



활동 9: 와인잔 하나로 공간 변형 시뮬레이션



화이트 와인 한잔을 모눈종이에 올려 놓으면,
이런 변형을 볼 수 있다.

활동 9: 손전등을 고정하고 와인잔을 보면서 천천히 이동



이 간단한 모델은 물질을 통과하는 상이 “물질”에 의해 변형되는 것을 보여준다.

(와인은 투명한 음료로 대체될 수 있다.)



활동 9: 손전등을 고정하고 와인잔을 보면서 천천히 이동



원호 모양



확실한 형태가 없는 모양



아인슈타인 크로스



아인슈타인 링

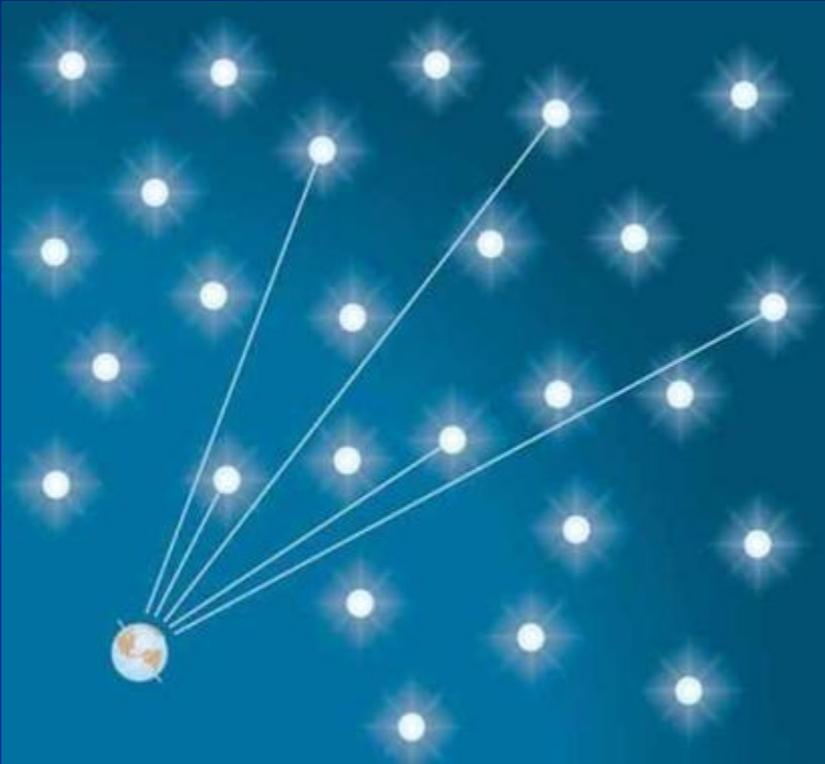
워크샵 외 주제: 밤하늘은 왜 어둡나?

1923년에 올버스(1923)의 제안, 만약:

- 우주가 무한하다면
- 우주 전체에 별이 균일하게 분포한다면
- 우주에 있는 모든 별이 비슷한 광도를 가지고 있다면,



워크샵 외주제: 밤하늘은 왜 어둡나?



... 무한한 우주는 무한한 수의 천체를 가지고 있을 것이고, 그렇다면 밤에도 밝아야 한다.

왜 밤하늘은 어두운가?

흠 :

- 어디를 보던간에 별이 있을 것이고 이들이 빛나므로 하늘은 밝을 것이다.
- 하늘을 ‘양파층’이라고 상상하면 각 양파껍질에 있는 별의 개수는 거리 r^2 비례하고, 빛의 세기는 r^2 에 반비례 한다. 각 껍질은 같은 양의 빛을 낸다. 껍질이 무한이 있다면, 하늘은 밤에도 밝다.

왜 밤하늘은 어두운가?

이 추론에 있는 실수는:

- 우주가 팽창하기 때문에 멀리 있는 별일 수록 붉게 보인다. 멀리 있어 어둡다.
- 무엇보다도, 우주의 나이가 무한하지 않기 때문에 별들로 이루어진 층이 무한하지 않다.

에드가 엘런 포 (Edgar Allan Poe) 1848년에 출판한 “Eureka” 에세이에서 이 현상을 정확하게 설명한 사람이다.

밤하늘은 어두울 수 있다!



Thank you very much
for your attention!

