

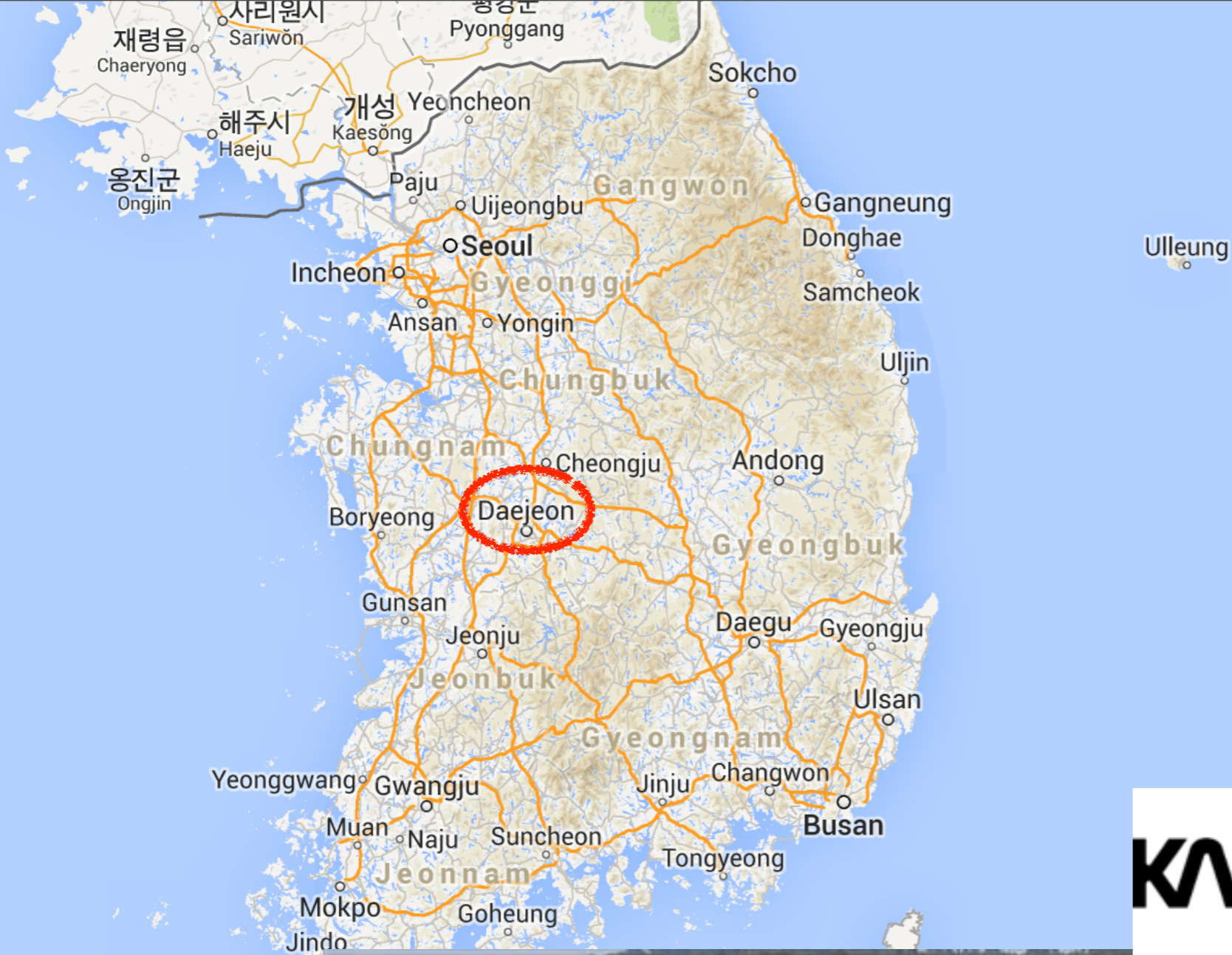
# 우주론과 인플레이션



Open KIAS

Pyeong-Chang Summer Institute 2014

Alpensia Resort, August 24 - 30, 2014



# 우주론

“우주 전체의 기원, 진화, 궁극적인 운명을 이해하기 위하여 거대규모의 커다란 우주를 과학적으로 연구하는 것”

## 빅뱅 우주론

초기의 우주는 고온, 고밀도 상태였으며 팽창하고 있다는 우주의 이론

## 인플레이션

- 균일하고, 평탄한 우주로 만든다.
- 양자 요동의 결과로 작은 밀도 섭동을 만들어 낸다.
- 초기의 작은 섭동은 우주배경복사의 온도 비등방성을 만들고, 중력에 의하여 우주 거대 구조를 만들게 된다.

## 1. 우주는 팽창하고 있다.

- 얼마나 빨리 팽창하는가?
- 팽창하는 속도는 변하는가?
- 왜 팽창하는가?
- 어떻게 팽창하는가?
- 팽창하는 우주의 진화?

## 2. 빅뱅 우주론과 우주초기의 가속 팽창 (인플레이션)

- 왜 인플레이션이 필요한가?
- 어떻게 인플레이션이 일어나는가?
- 인플레이션의 이론적인 모형들?

### 3. 인플레이션과 물질 밀도섭동의 생성

- 우주거대구조의 씨앗이 되는 물질 섭동의 생성?
- 우주배경복사의 온도 비등방성?
- 인플레이션에서 나오는 중력파?

### 4. 인플레이션의 증거

- 우주배경복사: 온도 비등방성, 중력파
- 우주 거대구조

# 참고문헌

“The early Universe”, Kolb and Turner

“Physical foundations of cosmology”, Mukhanov

“Cosmology”, Weinberg

“Particle physics and inflationary cosmology”, Andrei Linde, hep-th/0503203

“TASI lectures on inflation”, Daniel Baumann, arXiv:0907.5424

“What do we learn from the CMB observations?”, Rubakov and Vlasov, 1008.1704

# I. 팽창하는 우주



Open KIAS

Pyeong-Chang Summer Institute 2014

Alpensia Resort, August 24 - 30, 2014

# 우리 우주의 모습

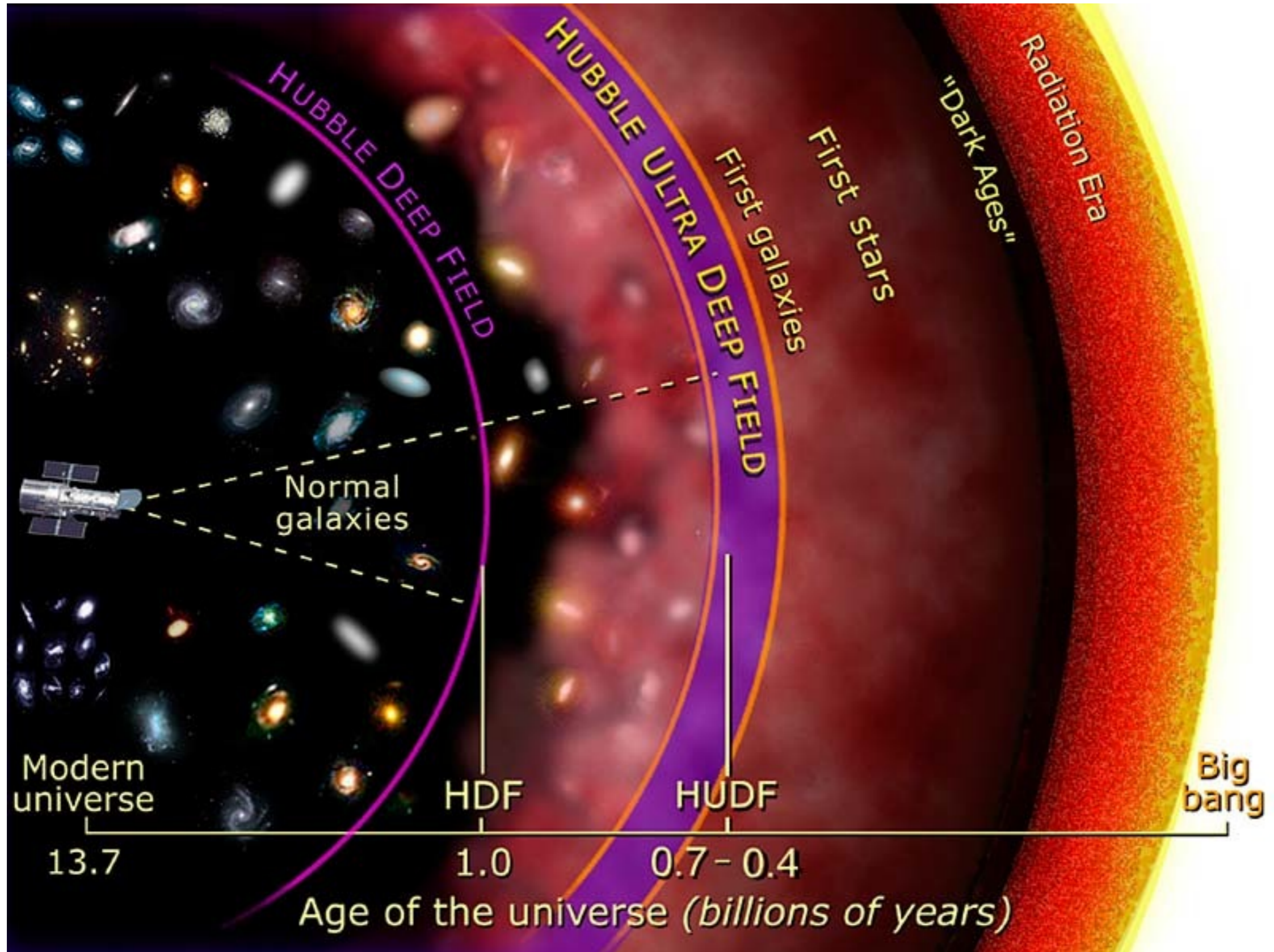


 IMAGINOVA

# 망원경의 발명과 천문학



# 허블우주 망원경



## • 거리의 단위

1 AU (Astronomical Unit)

: Average distance between Sun and Earth

$$= 1.49 \times 10^8 \text{ km} \quad (8 \text{ min } 18 \text{ sec with light})$$

1 Ly (Light year, 광년): 빛의 속도로 1년 걸리는 거리

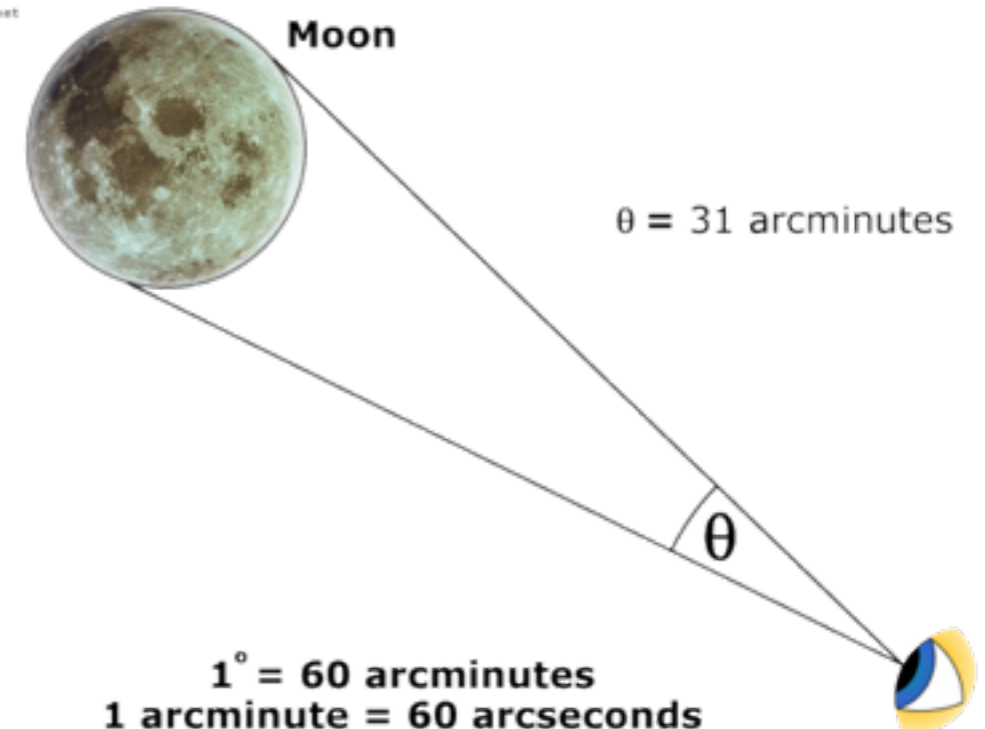
$$\text{빛 속도} \times 1 \text{ 년} = 9.46 \times 10^{12} \text{ km}$$

1 pc (parsec) : 약 3.26 광년

1 Arcmin = 1 degree / 60

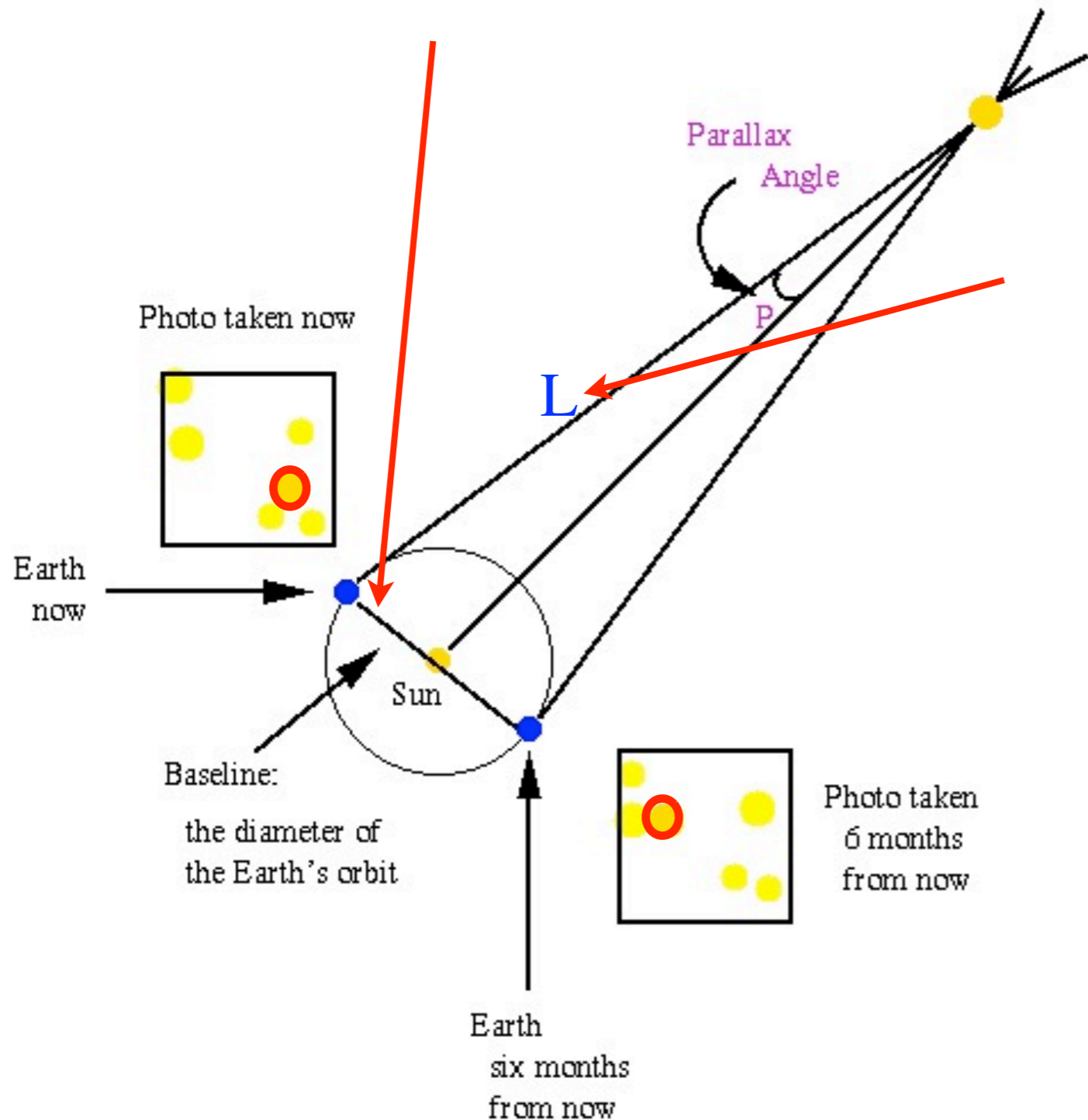
1 Arcsec = 1 Arcmin / 60  
= 1 degree / 3600

Presented by  
LCOGT



- 거리측정 : 연주시차 (거리 < 100 pc)

Sun-Earth = 1AU =  $1.49 \times 10^8$  km



$$L \sin(p) = 1AU$$

For small  $p \ll 1$ ,  $L \simeq \frac{1AU}{p}$

Define parsec,

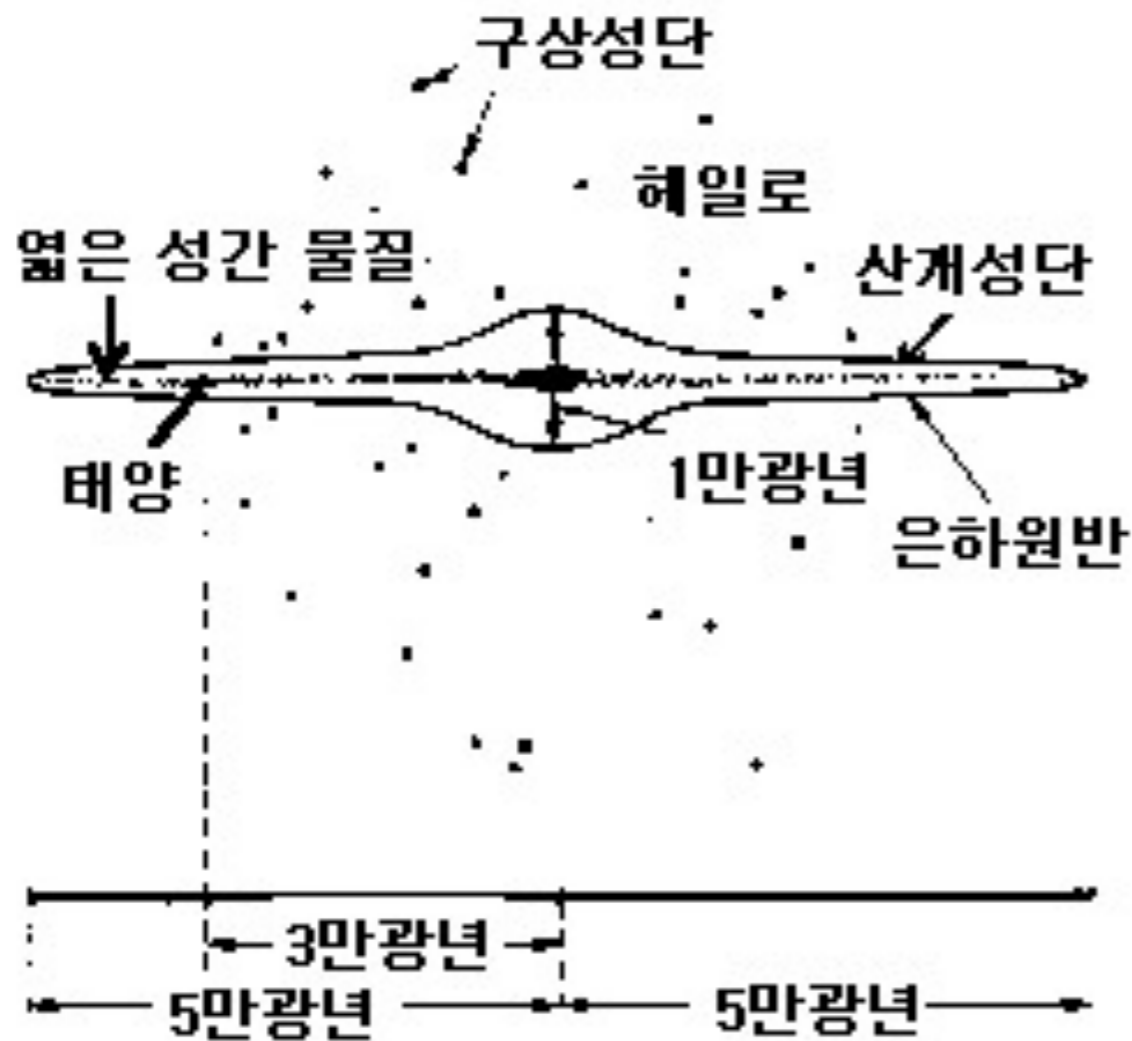
$$1 \text{ parsec}(PC) = \frac{1AU}{1 \text{ arcsec}} \simeq 3.26Lys$$

$$1 \text{ arcsec} = \frac{2\pi}{360 \times 60 \times 60}$$

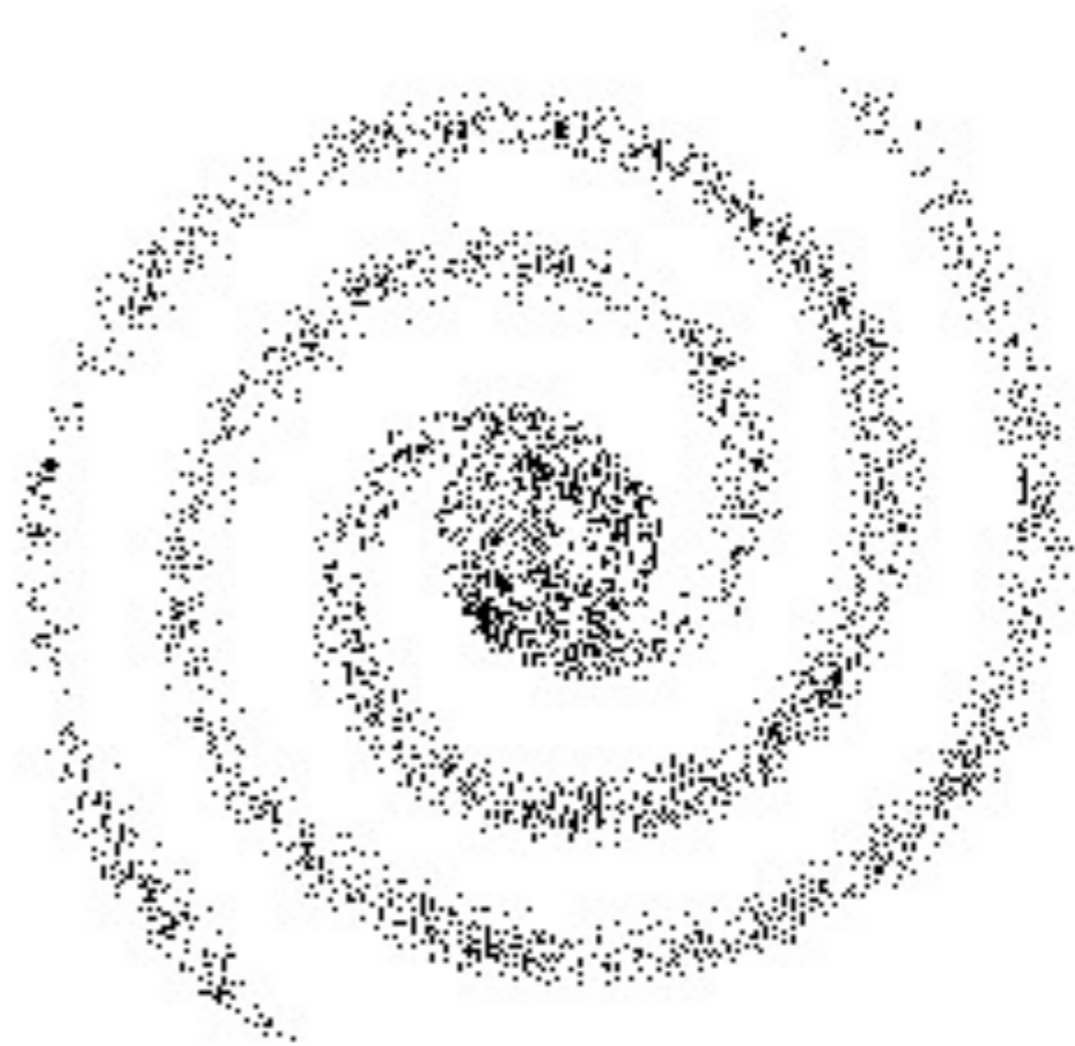


# 우리 은하(Milky Way)

~ 10 kpc



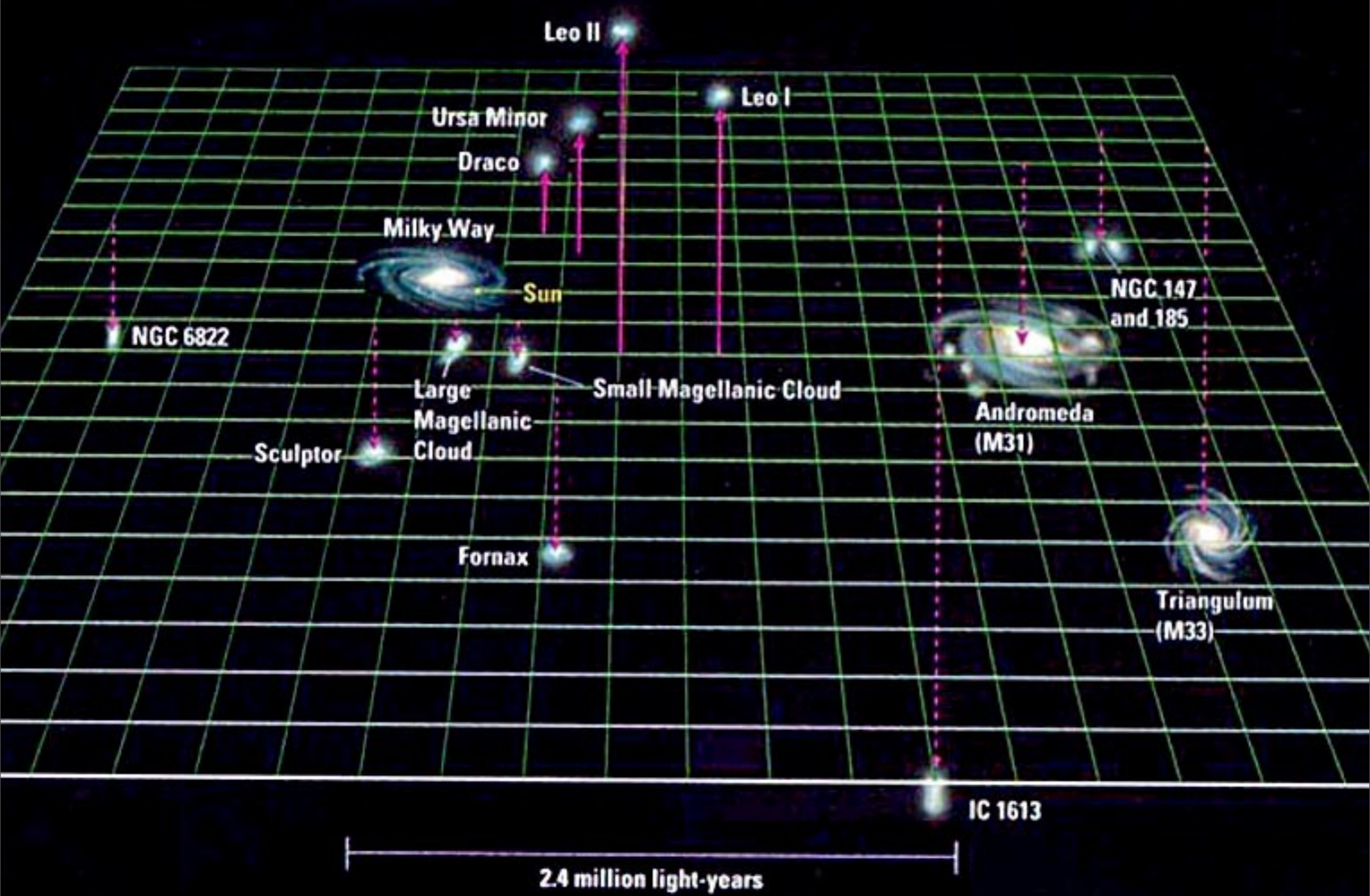
[옆에서 본 모습]



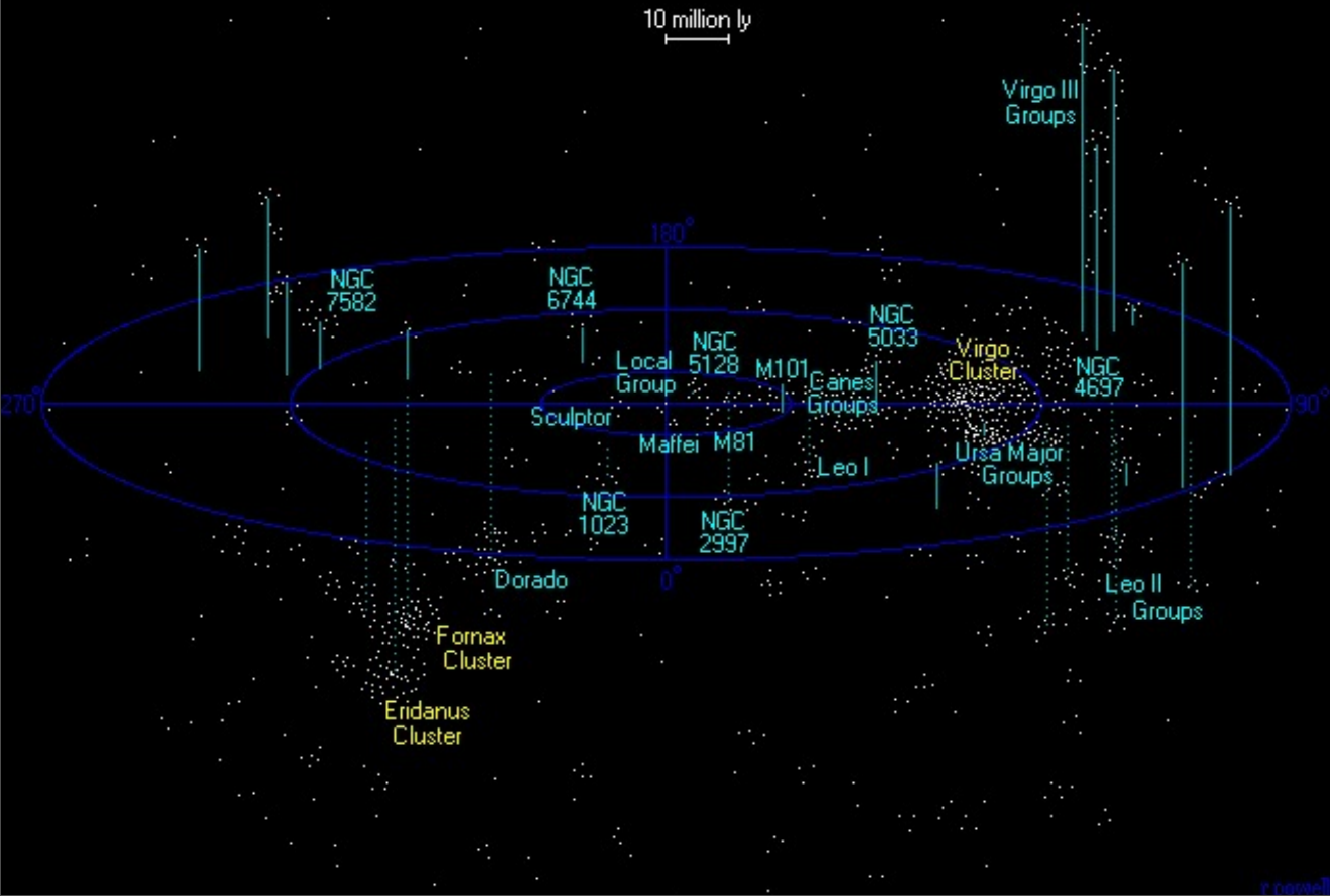
[위에서 본 모습]

# Local Group Of Galaxies

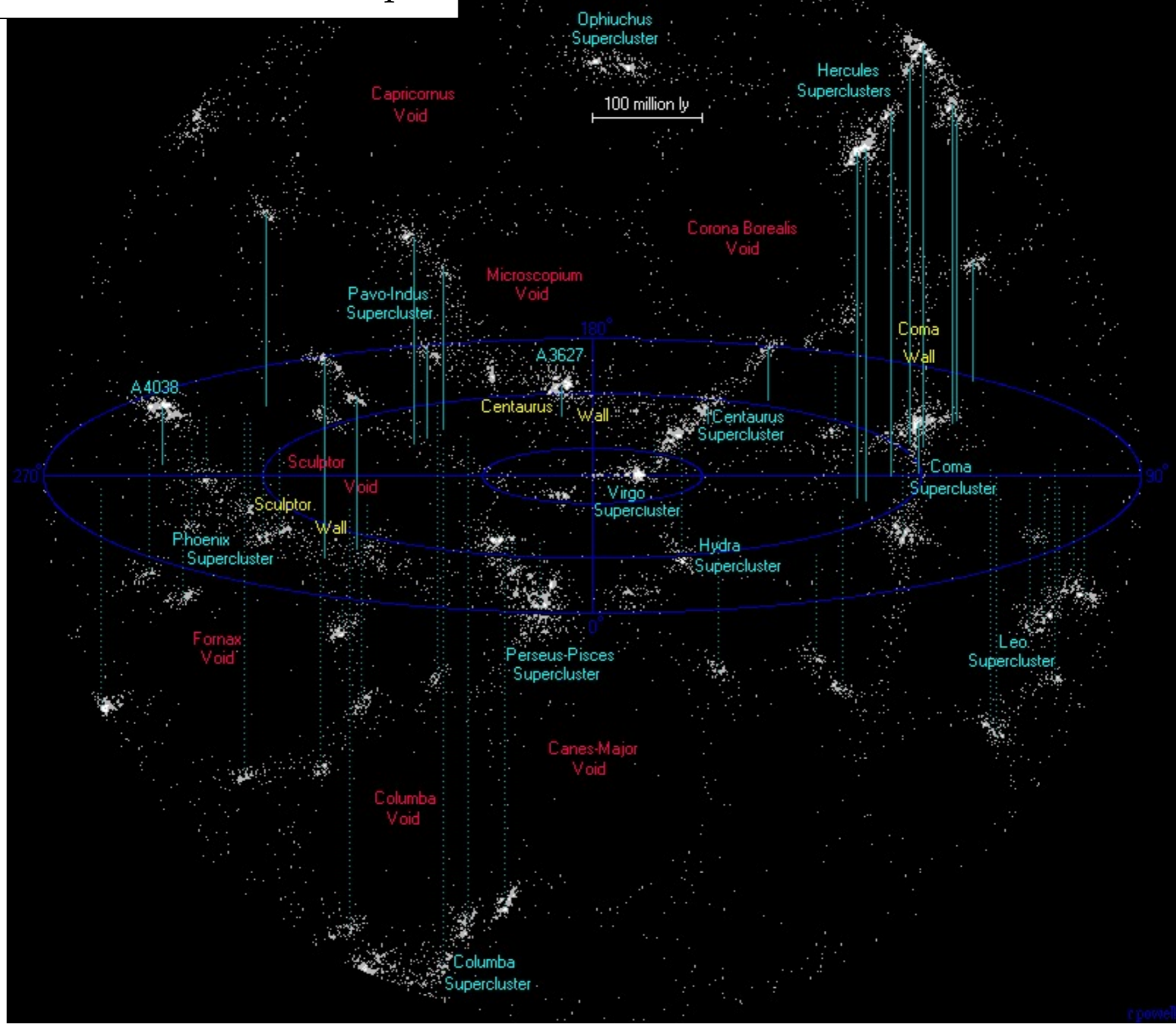
~ Mpc



# Virgo 초은하단 ~ 10 Mpc



지구근처 초은하단 ~ 100 Mpc



r ponell

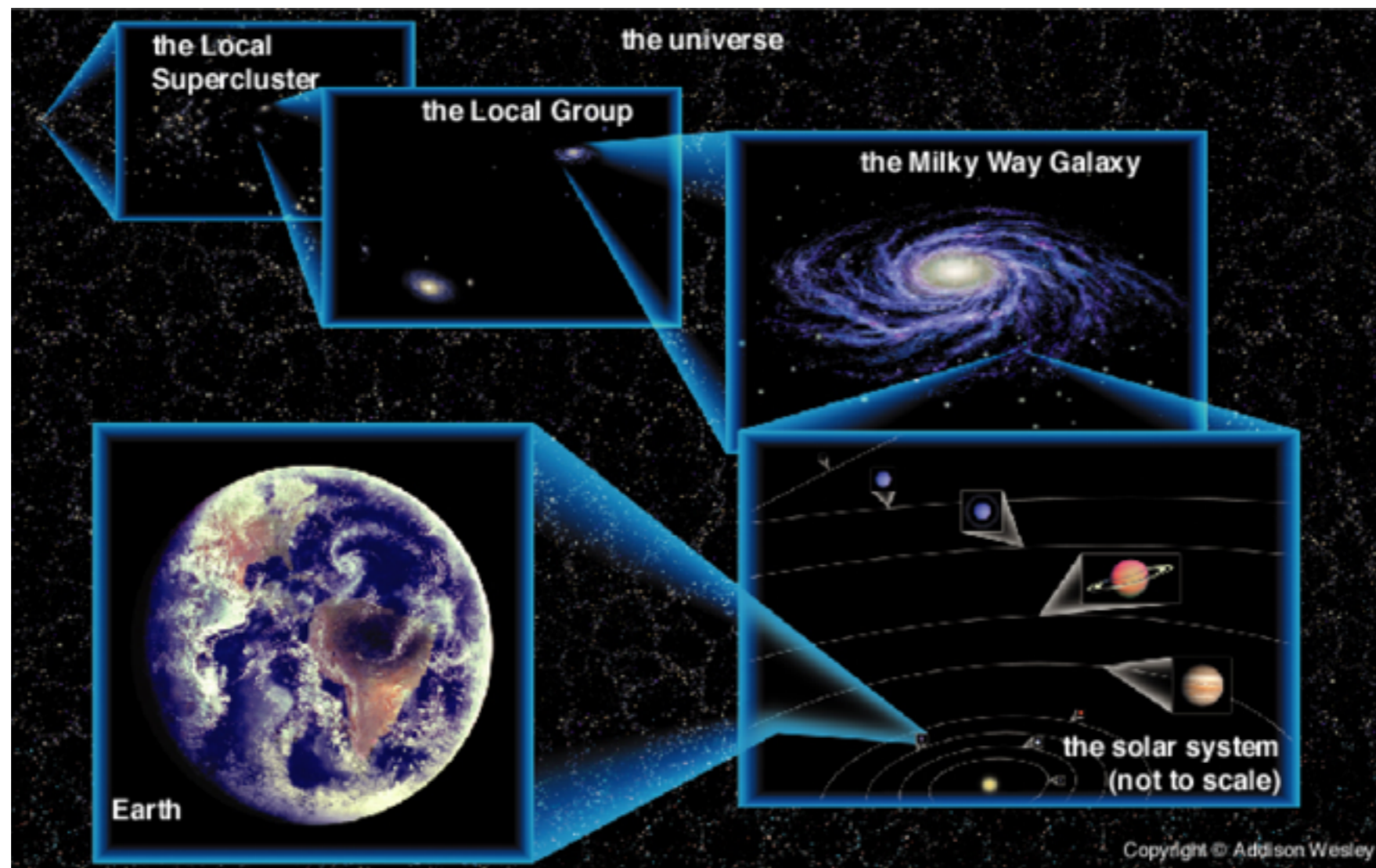
# 우리가 관측 가능한 우주 ~ 3,000 Mpc

별(항성): 스스로 빛을 내는 천체 (행성: 별 주위의 궤도를 따라 도는 물체)

은하: 수백억 개의 별과 성간물질로 이루어진 계

은하단: 수백개, 수천개의 은하들이 중력에 의하여 모여 있는 무리

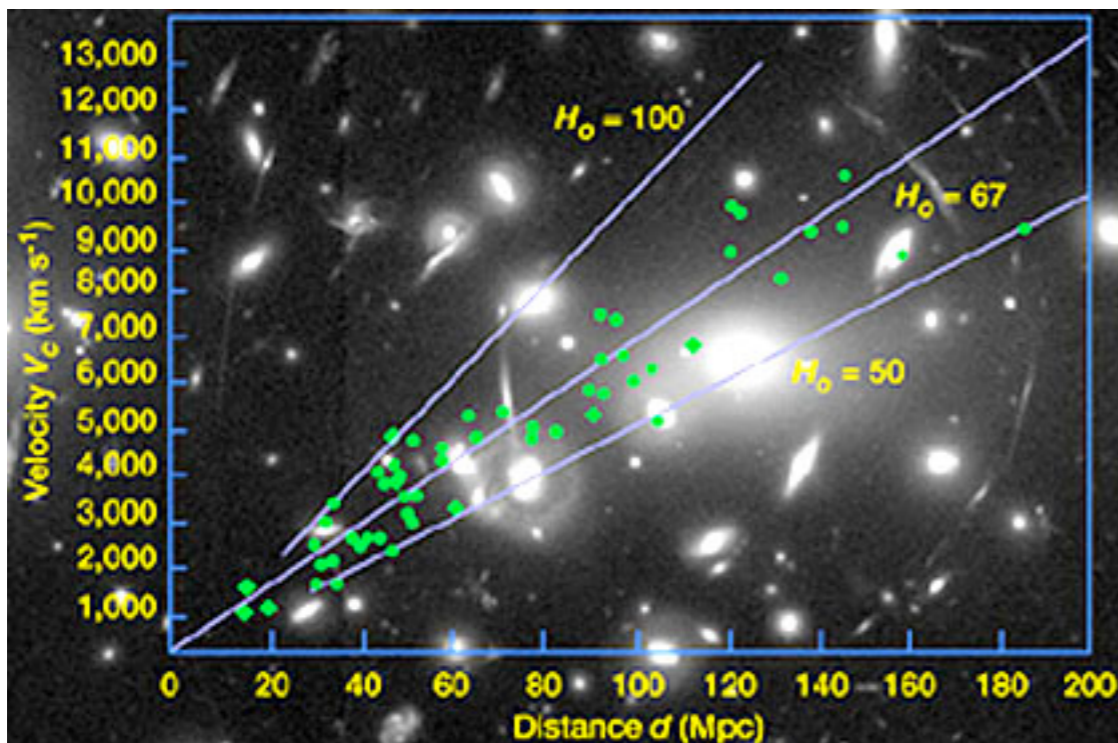
초은하단: 은하단의 거대한 군집



# 팽창하는 우주

# 허블의 법칙

은하들의 적색편이(후퇴속도)와 거리를 비교할 때, 멀리 있는 은하들의 적색편이가 더 크게 관측된다. 거리가 1 Mpc 증가할 때, 그 해당하는 속도가 약 70 km/sec 증가하는 것처럼 보인다. 이 비를 허블상수라고 한다.



## 허블의 법칙 (1929)

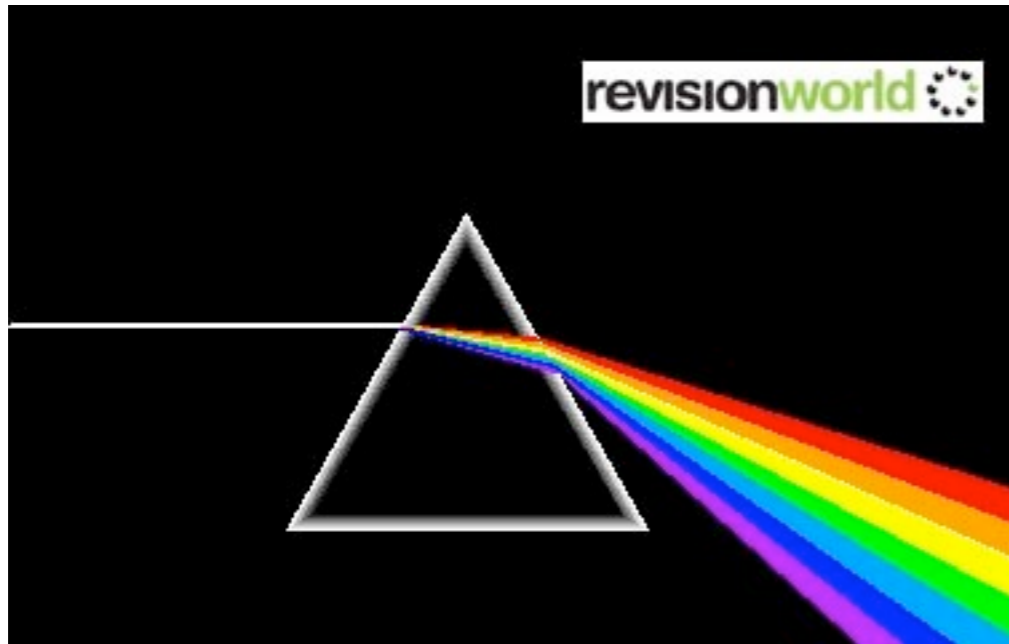
후퇴속도                      거리

$$v(r) = H \times r$$

$$H = 70(\text{km/sec})/\text{Mpc}$$

허블상수(변수)

# • 분광학과 적색편이



프리즘을 통과한 뒤의 태양 빛 스펙트럼

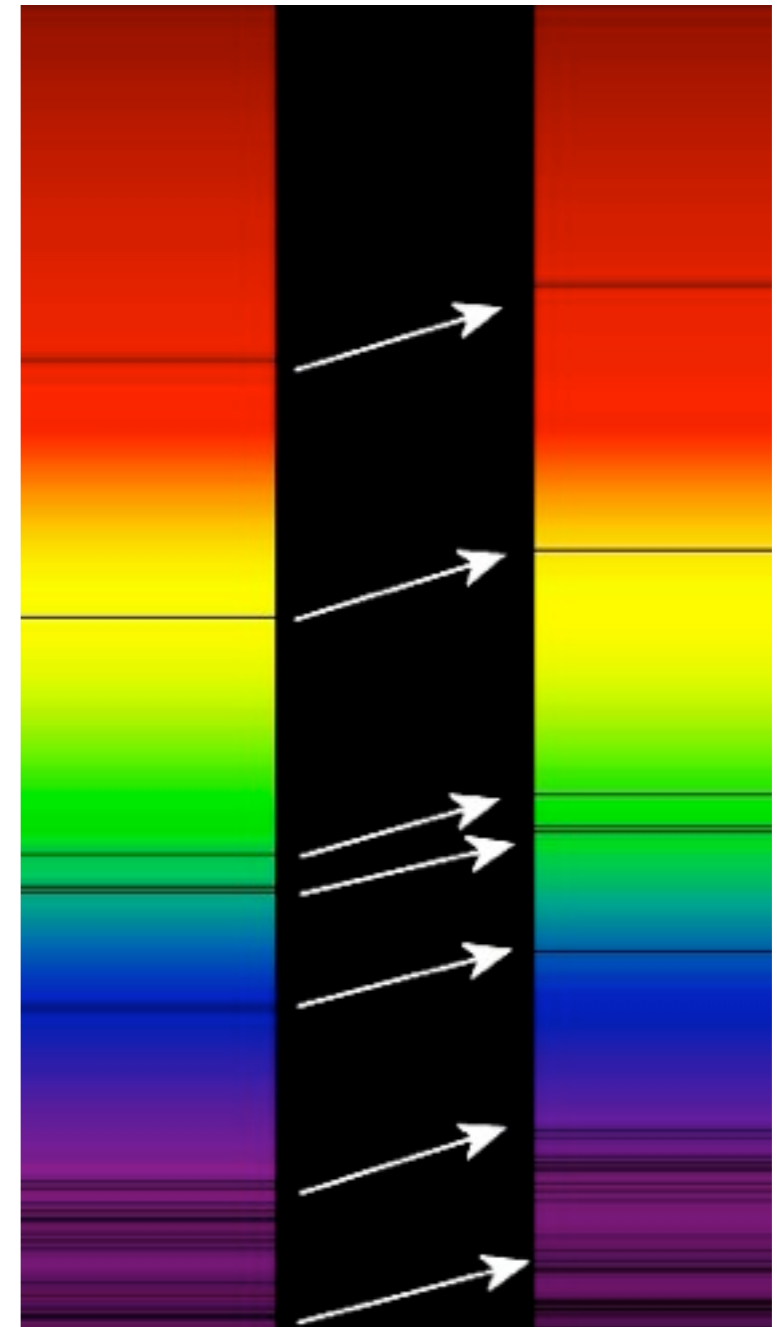
정지한 물체의 스펙트럼

멀리 움직이는 물체의 스펙트럼

$$\frac{\lambda'}{\lambda} = 1 + \frac{v}{c}$$

$\lambda$   
파장

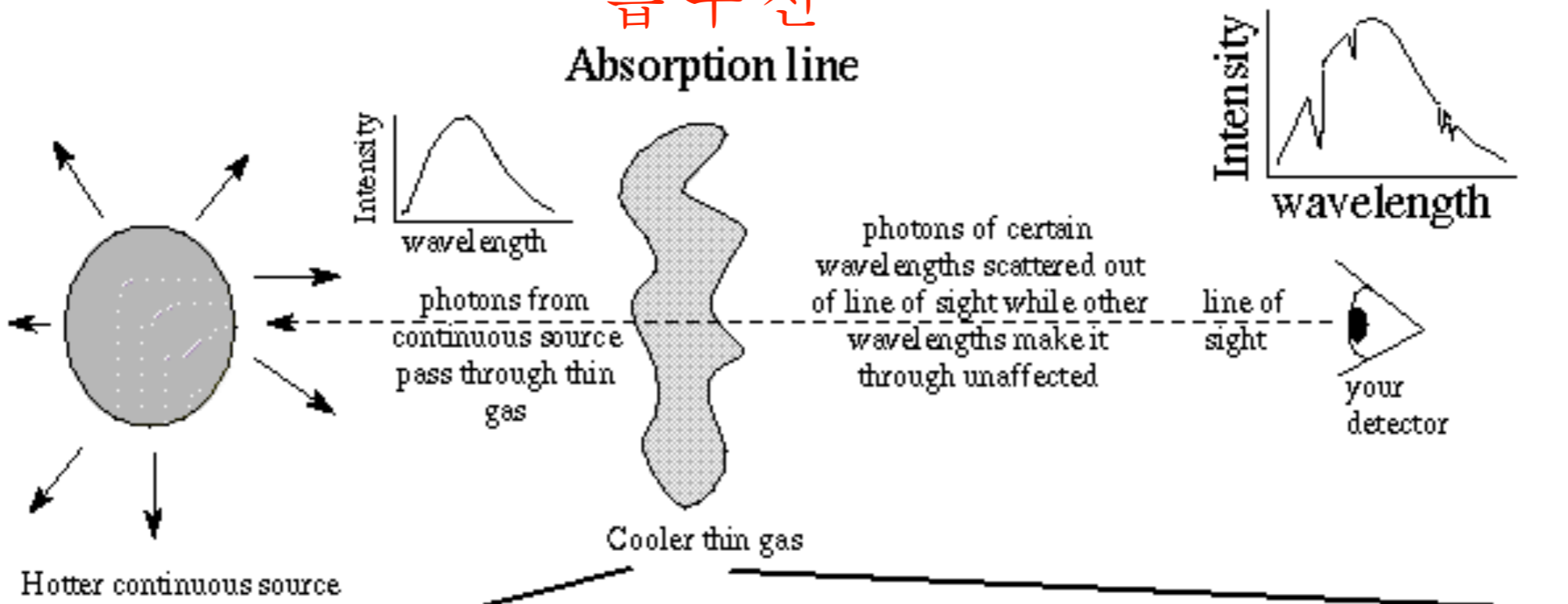
멀리 움직이는 물체에서 오는 빛은 파장이 길어진다 (도플러효과). 흡수선들도 파장이 긴 쪽으로 옮겨간다. 정지한 물체의 흡수선과 비교하여 해당하는 속력을 구할 수 있다.



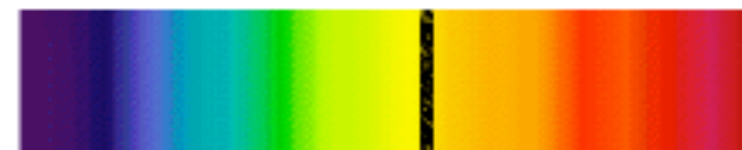
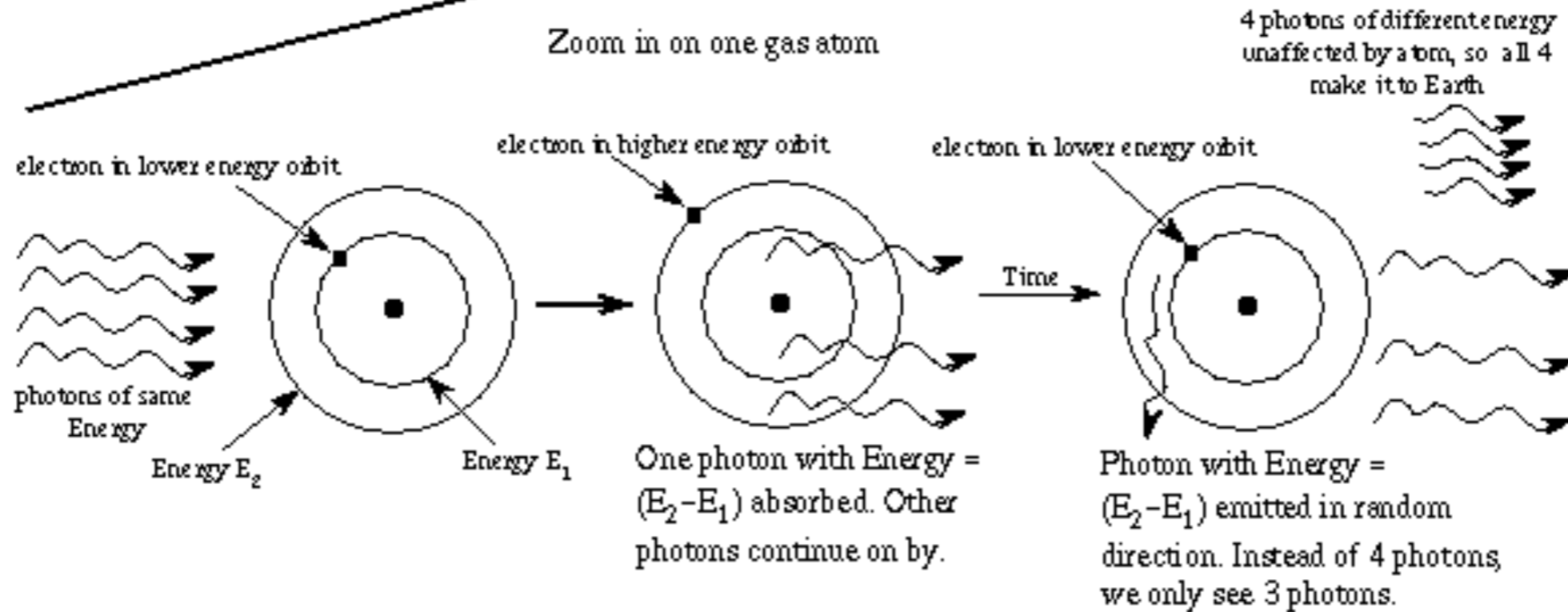
흡수선의 이동

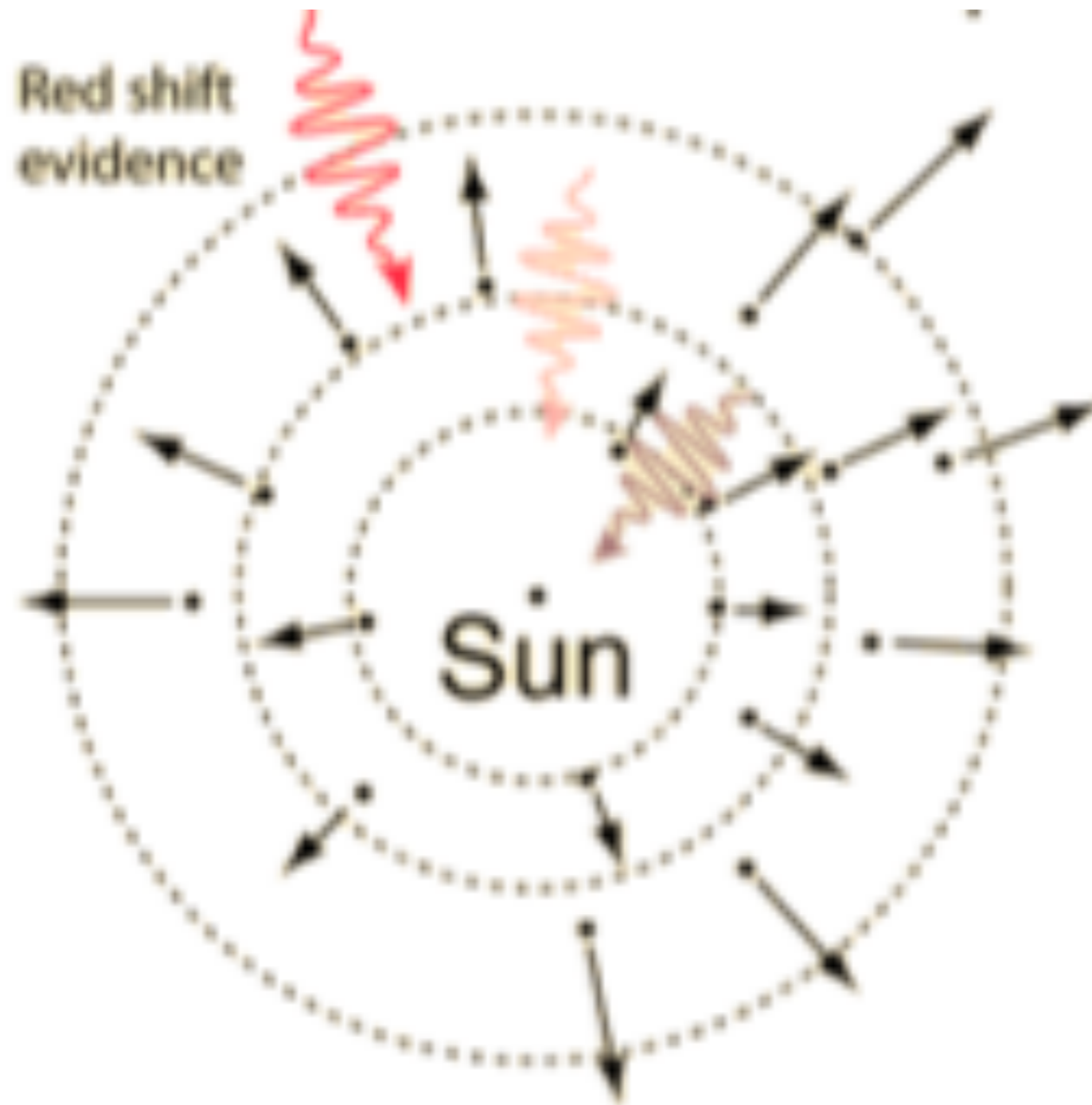
# 흡수선

## Absorption line



Zoom in on one gas atom





Red shift  
evidence

Sun

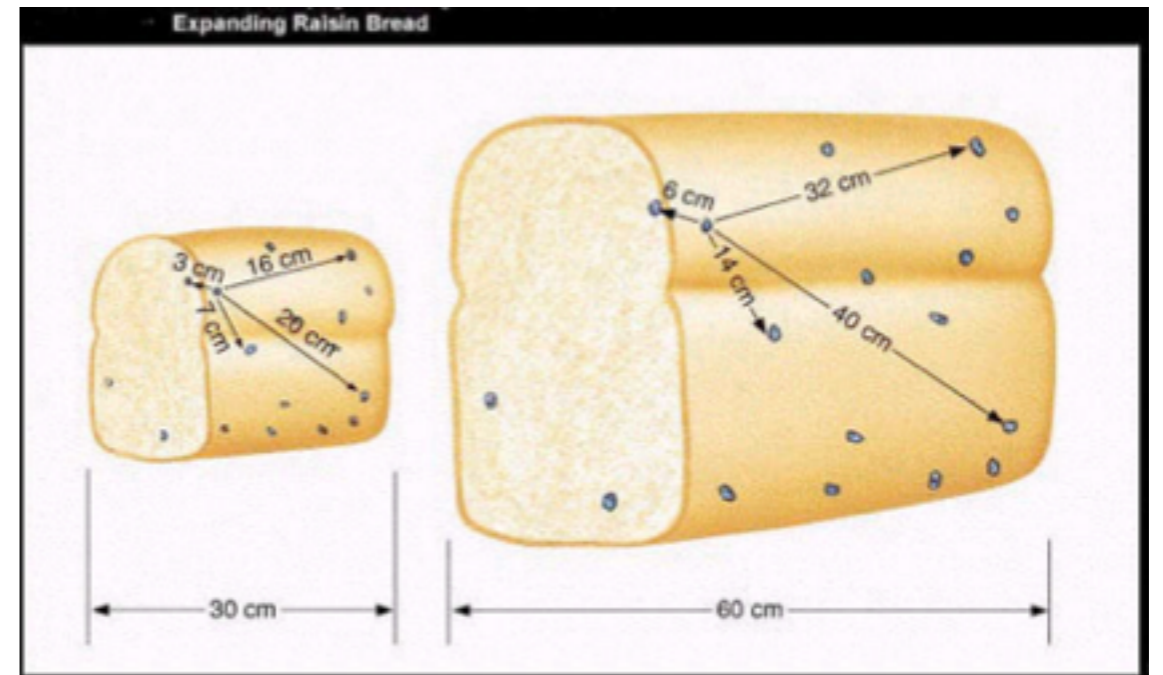
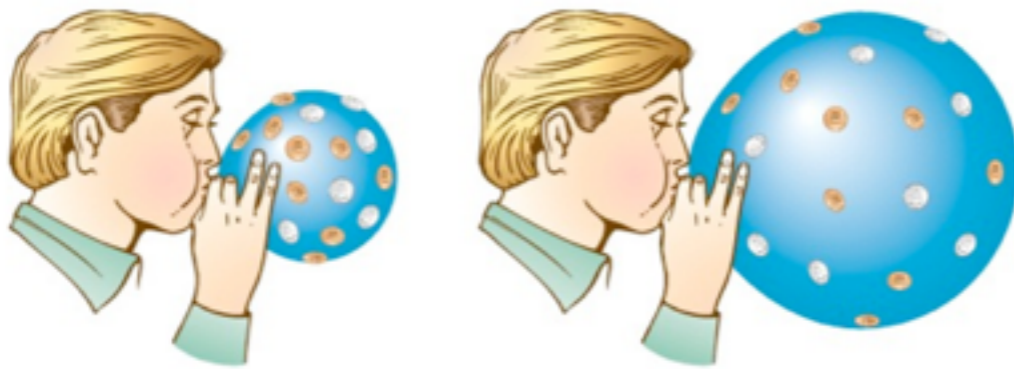
# 우주 원리

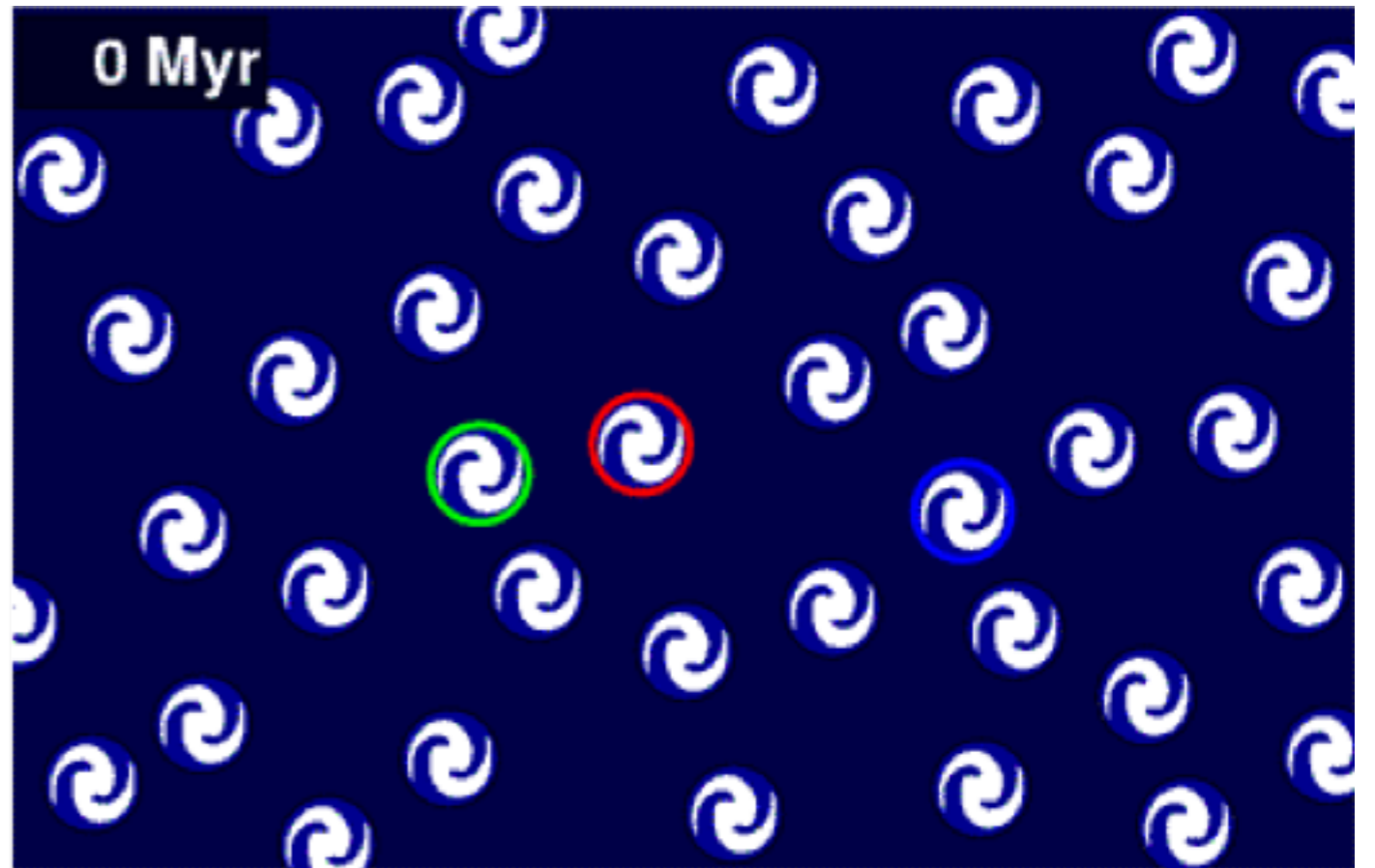
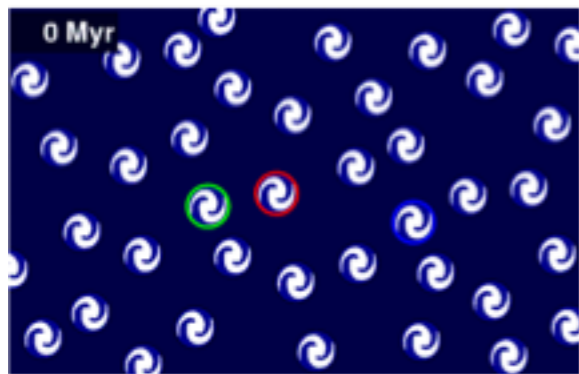
우주공간은 어디서 보나 같다. 즉 특별한 방향도 없고 밀도도 균등하다.

지구는 우주의 특별한 위치에 있지 않다.

우주의 임의의 위치에서 관측하여도 허블의 법칙이 적용될 것이다.

→ 팽창하는 우주



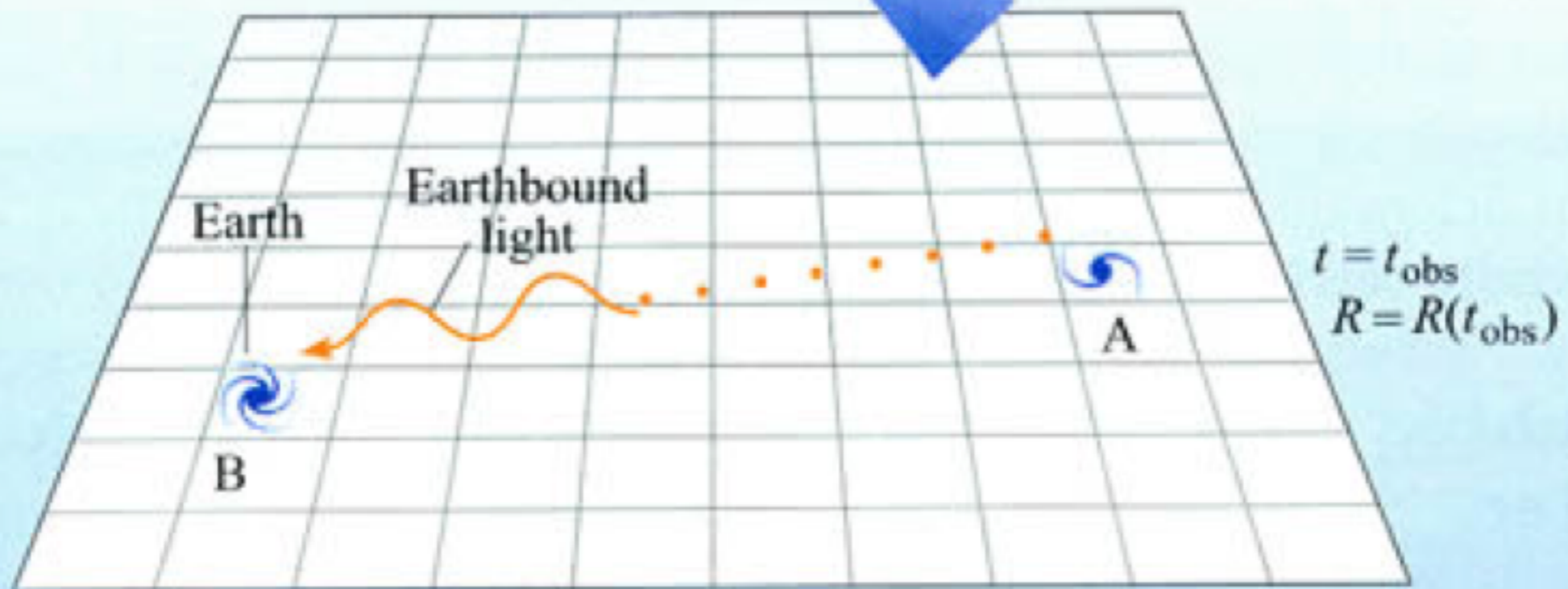
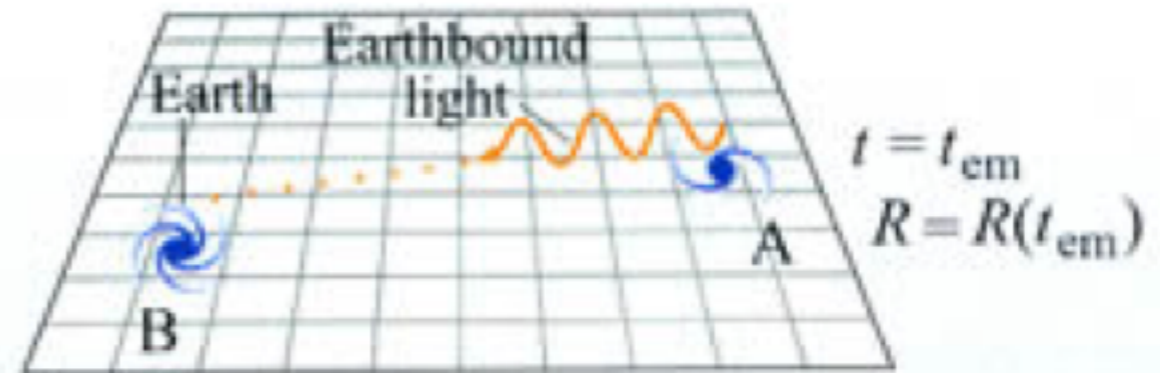


# 우주의 팽창이란?

실제로는 은하들이 주어진 속도로 멀어지는 것이 아니다.

은하는 주어진 좌표 상의 그 위치에 정지해 있더라도, 멀리 있는 은하와 관측자 사이의 공간이 팽창함으로 인하여, 빛의 파장이 길어지고, 그 결과로 도플러 효과가 생긴다.

# 우주의 팽창과 적색편이



## 우주의 팽창과 적색편이

: 우주 팽창에 의하여 빛의 파장이 길어짐. 그 비를 적색편이  $z$  로 나타냄

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_0} = \frac{R(t_1)}{R(t_0)} \equiv 1 + z$$

적색편이는 빛이 출발할 때와 현재 공간 크기의 상대적인 비와 같다.

빛의 분광기술은 적색편이를 아주 정확하게 측정할 수 있고, 그러면 원인이 된 빛이 나온 때와 거리를 알 수 있다.

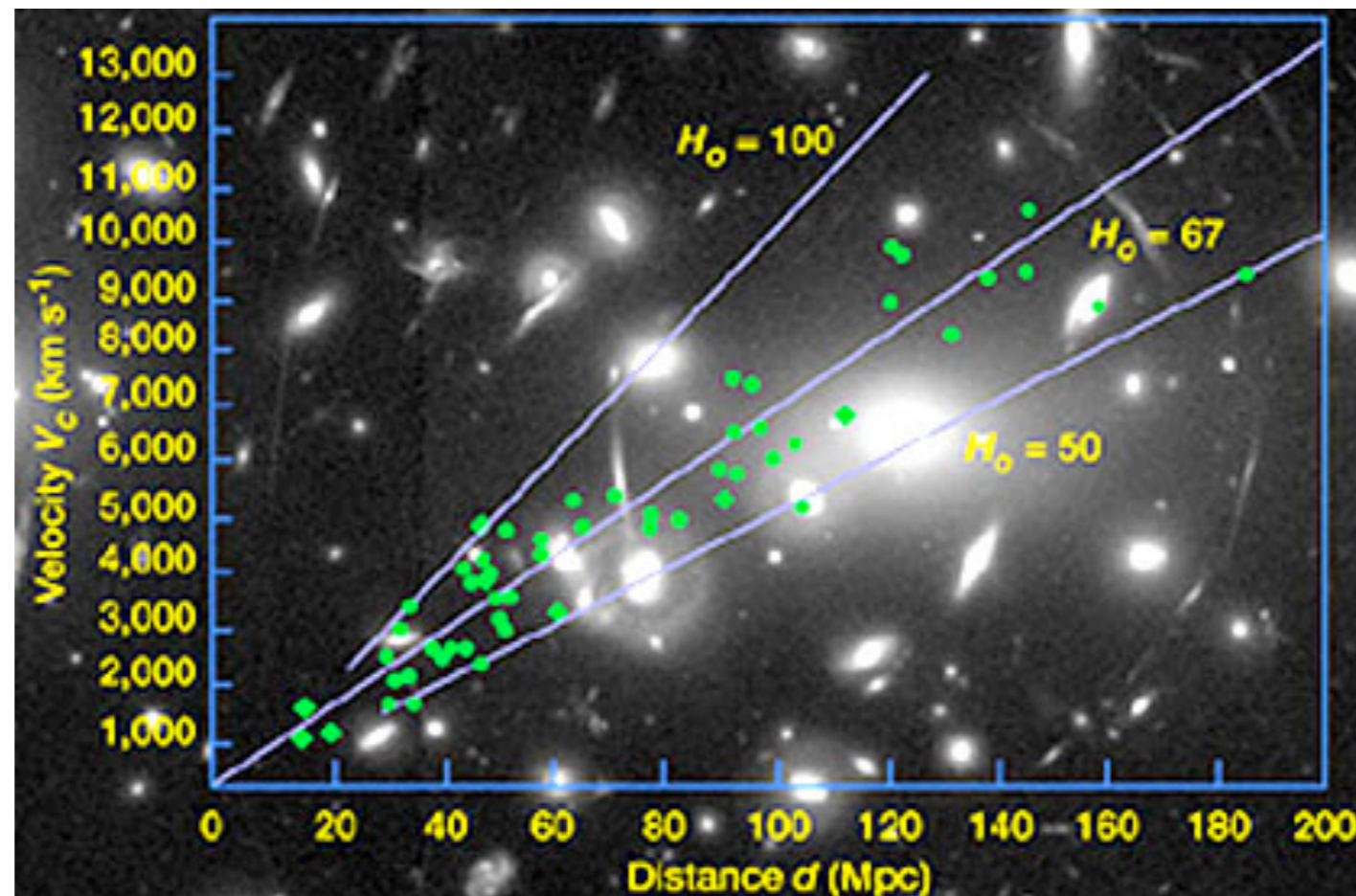
현재 가까운 곳에서 나온 빛은 적색편이가 거의 없으므로  $z=0$ . 적색편이가 크다는 것은 그 빛이 거 먼 곳에서 훨씬 더 이전에 만들어져 나왔다는 것을 의미한다.

실제 관측하는 적색편이는 우주의 팽창과 은하의 실제 속도 두 가지의 효과가 합쳐진 것이다.

은하의 평균적인 속도는 수 100 m/sec.

$$H = 70(\text{ km/sec}) / \text{Mpc}$$

그러므로 우주의 팽창에 의한 효과를 보려면, 관측하는 은하가 Mpc 보다는 훨씬 멀리 있어야한다.



# 상대성이론과 우주론

과학적인 근대 우주론은 아인슈타인의 1917년 논문에서 비롯된다고 할 수 있다. “일반상대론의 우주론적 고찰”

(Cosmological considerations of the general theory of relativity)

**우주원리:** 우주 공간은 어디서 보나 같다, 즉 특별한 방향도 없고 밀도도 균등하다. (큰 거리 영역에서)

일반상대론 + 우주원리



프리드만 방정식

공간의 기하학적구조와 물질사이의 관계

- 일반상대론과 아인슈타인 방정식


Einstein eq.

중력 = 공간의 휘어짐

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

물질의 분포

Friedmann eq.


$$H^2 + \frac{k}{a^2} = \frac{8\pi G}{3} \rho$$



우주의 팽창과 구조



물질의 양

- 우주의 미래 : 공간 속 물질 양에 의하여 결정된다.

우주 상수가 없을 때

편평한 우주  
flat ( $k=0$ )



계속 팽창

flat Universe

물질이 많을 때

닫힌 우주  
closed ( $k=+1$ )

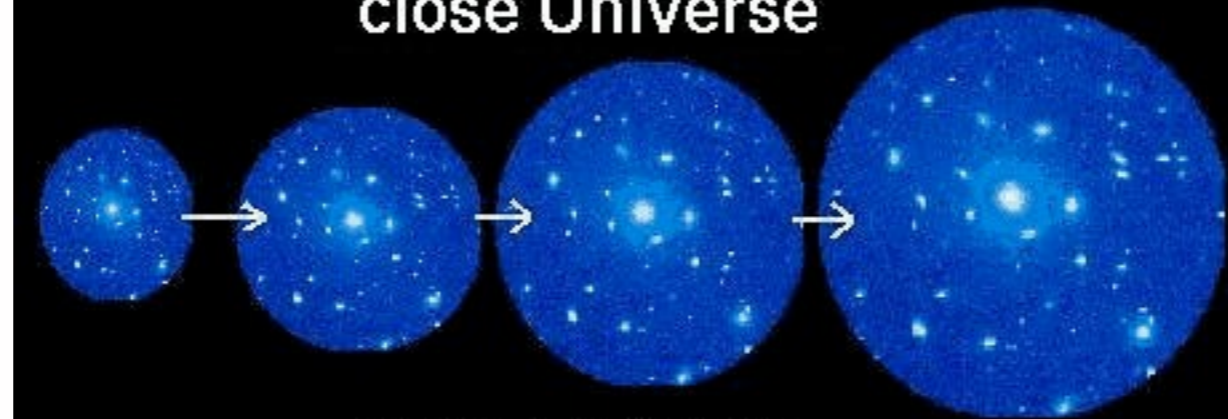


팽창하다 수축

close Universe

물질이 적을 때

열린 우주  
open ( $k=-1$ )



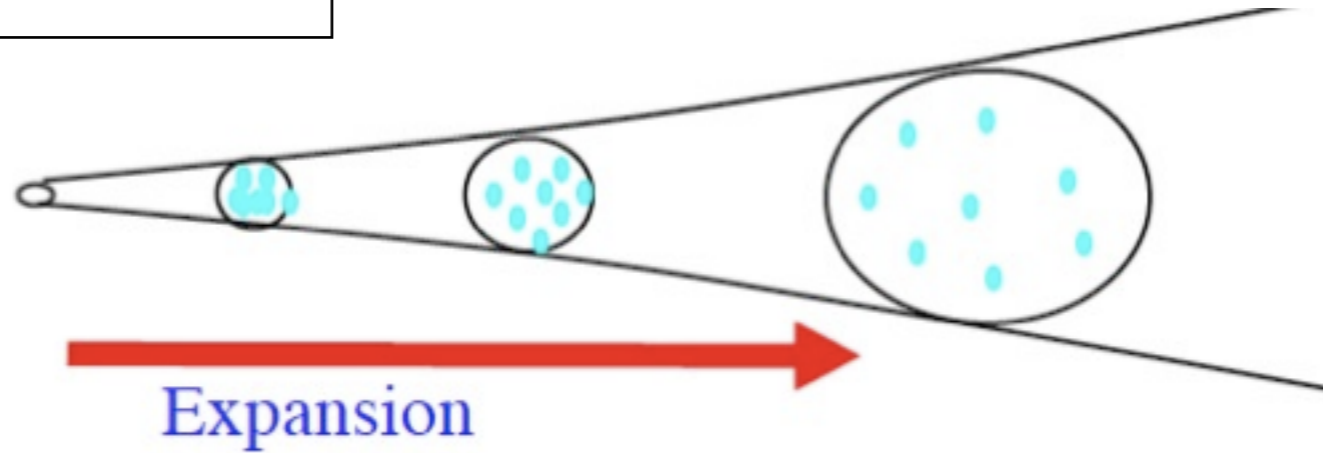
영원히 팽창

open Universe

일반적인 물질은 그 중력에 의하여 팽창속도가 시간에 따라 감소한다.

# 초기의 우주

# 팽창하는 우주에서



상대적인 부피의 증가에 따라, 자유입자들의

1. 단위부피당 개수가 감소 :  $n(t) \propto \frac{1}{R^3(t)}$

2. 운동량 감소 :  $P(t) \propto \frac{1}{R(t)}$

에너지 밀도의 감소



상대론적 물질 ( $E \gg m$ )

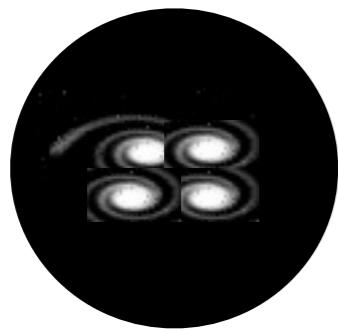
$$\rho_r \sim E(t) n(t) \propto R(t)^{-4}$$

비상대론적 물질 ( $E \ll m$ )

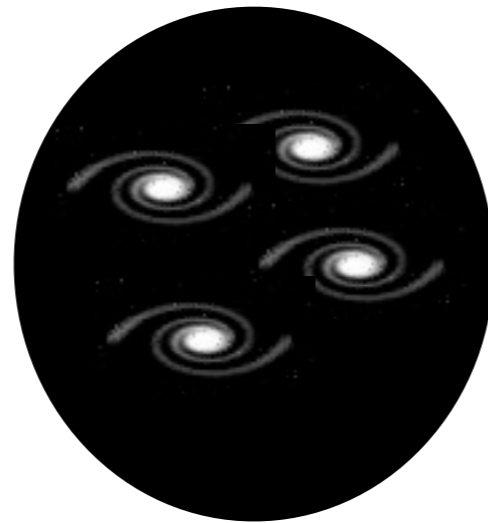
$$\rho_m \sim M n(t) \propto R(t)^{-3}$$

## • 우주의 과거

현재 우주가 팽창하고 있다면, 과거에는 아주 작은 공간에 많은 물질이 모여 있었을 것이다. 좁은 공간에 많은 은하들이 밀집하여 있고, 밀도와 온도가 아주 높았을 것이다.



오래 전 과거



과거



현재

높은 온도



낮은 온도

초기 우주로 갈수록 운동량이 점점 커지므로 어떤 순간에서는 물질의 운동에너지가 질량보다 훨씬 큰 순간들이 존재하게 된다.

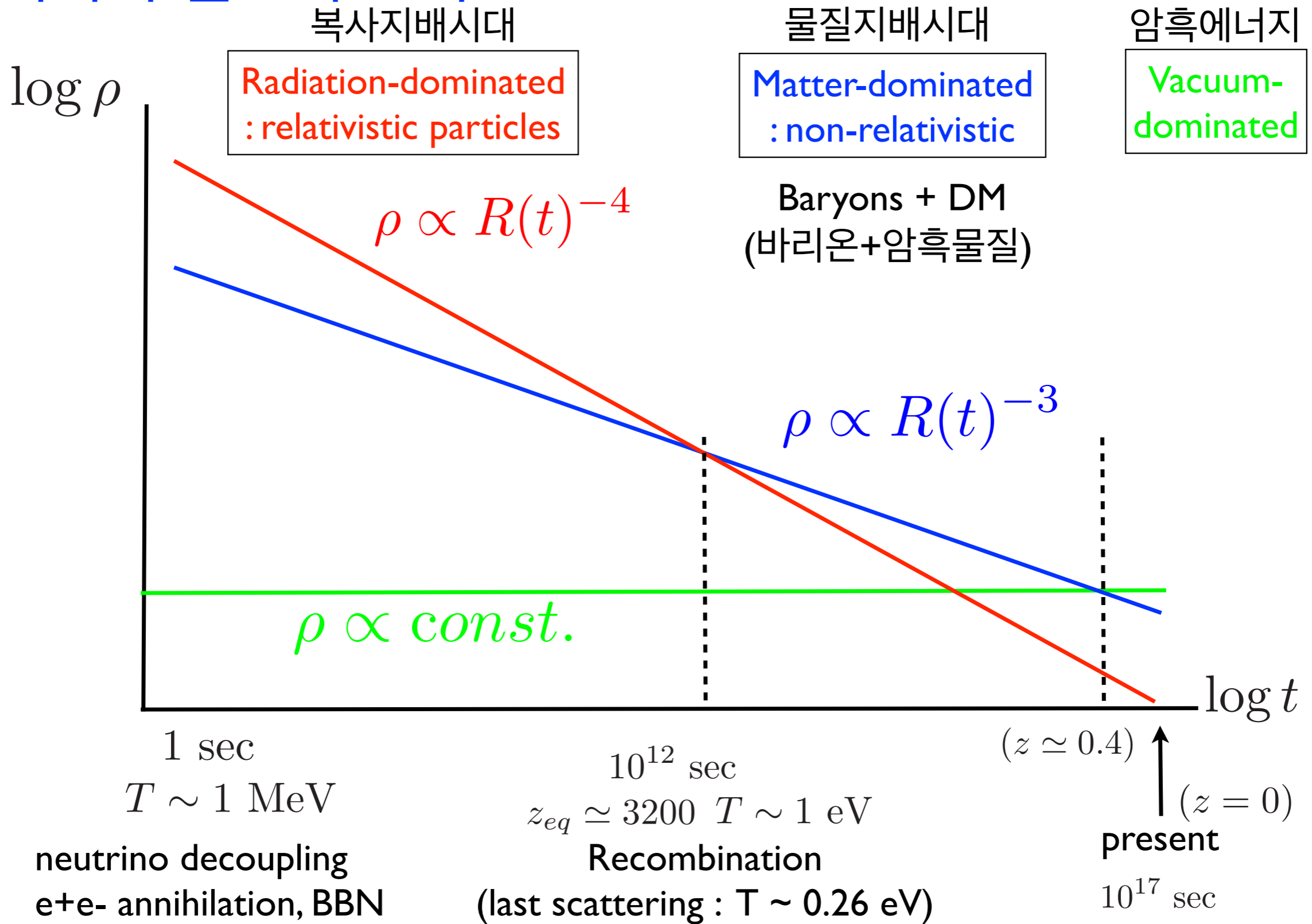
에너지 << 질량 : 비상대론적

에너지 >> 질량 : 상대론적

우주의 에너지가 **비상대론적인 물질**들에 의해서 가득찬 시기  
: 물질지배시대

우주의 에너지가 **상대론적인 물질**들에 의해서 가득찬 시기  
: 복사지배시대

# 에너지 밀도의 변화

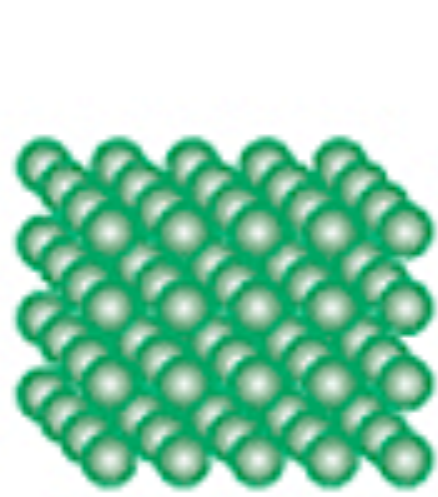


초기의 우주는  
매우 밀도가 크고 온도가 높은 상태!

은하와 별들은 어떤 상태였을까?  
세상의 모든 물질들은 어떻게 되었을까?

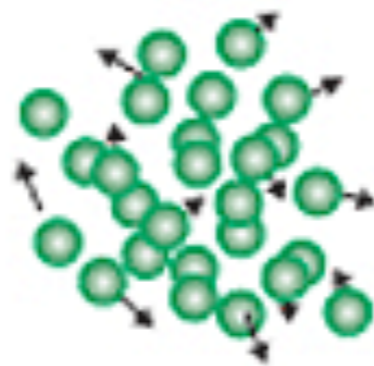
● 물질의 상태와 입자물리

- 원자, 분자
- 원자핵
- 전자



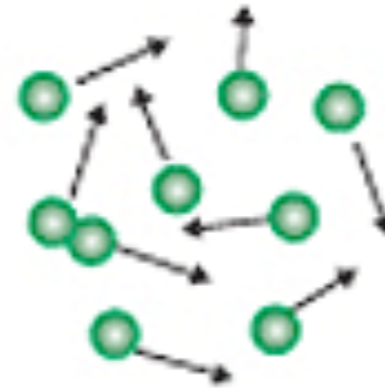
고체

에너지



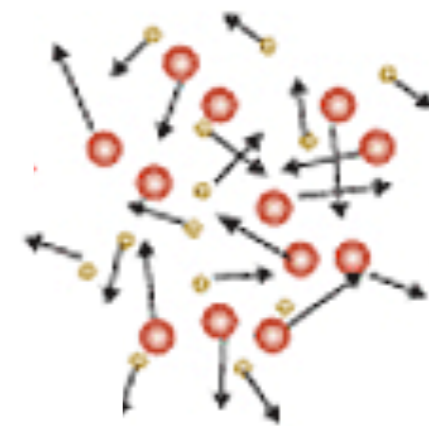
액체

에너지



기체

에너지



플라즈마

에너지



양성자, 중성자,  
전자의 플라즈마

쿼크, 글루온,  
전자의 플라즈마

에너지



# 입자물리와 우주론

입자물리 : 자연의 기본입자와 그 상호작용을 연구하는 물리의 한 분야

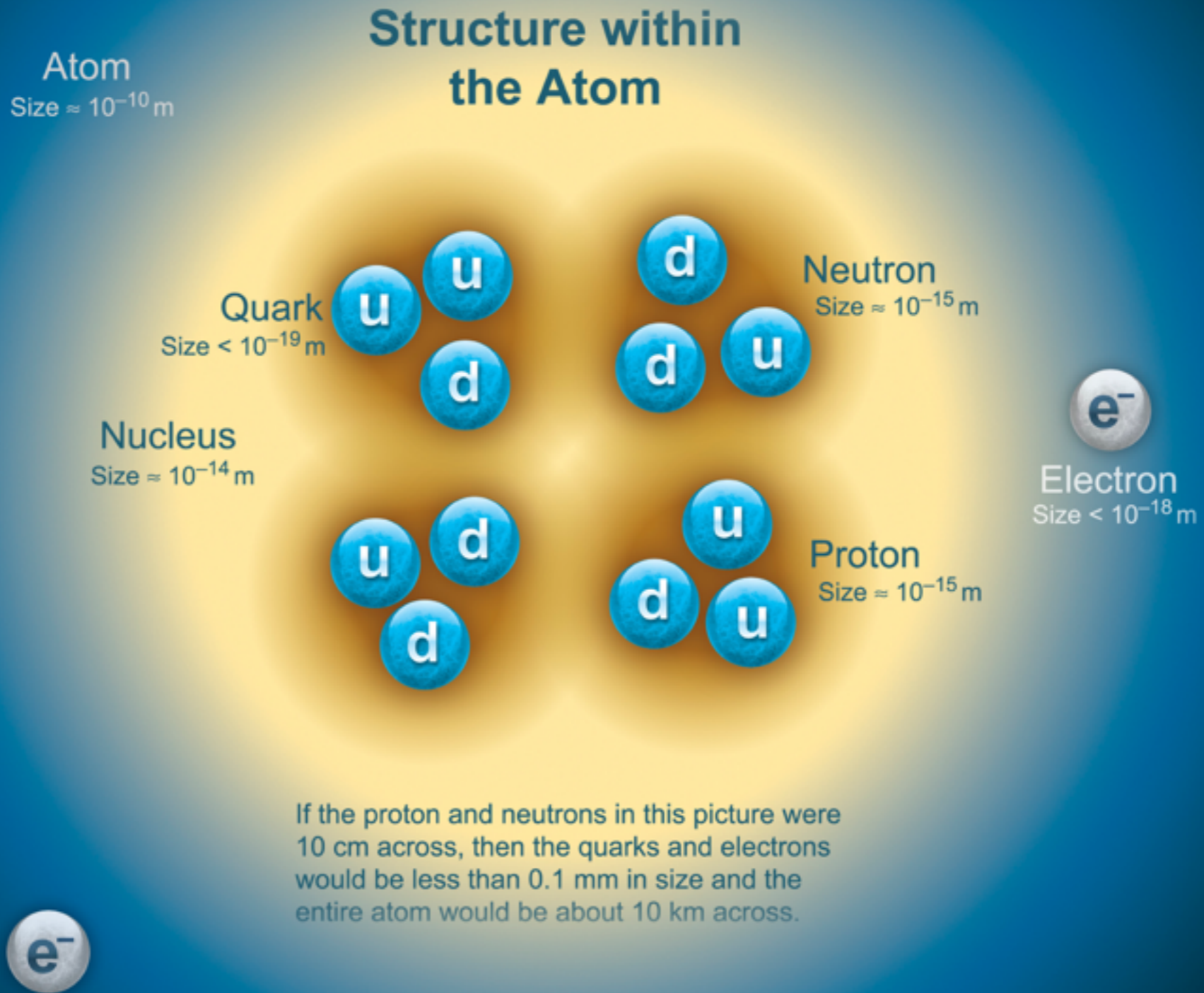
기본입자 : 다른 입자를 구성하는 가장 기본적인 입자.  
더 이상 작게 쪼갤 수 없는 궁극의 단위.

입자물리의 표준모형 : 기본입자와 그들 사이의 상호작용을 다루는 이론.

기본입자: 쿼크, 렙톤

상호작용 : 강한상호작용, 약한상호작용, 전자기상호작용  
(중력은 포함되지 않음)

# 원자의 구조



# BOSONS

## Unified Electroweak spin = 1

Name	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge
$\gamma$ photon	0	0
$W^-$	80.39	-1
$W^+$ W bosons	80.39	+1
$Z^0$ Z boson	91.188	0

## Strong (color) spin = 1

Name	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge
$g$ gluon	0	0

# 표준모형의 기본입자

**Higgs**

# FERMIONS

matter constituents  
spin = 1/2, 3/2, 5/2, ...

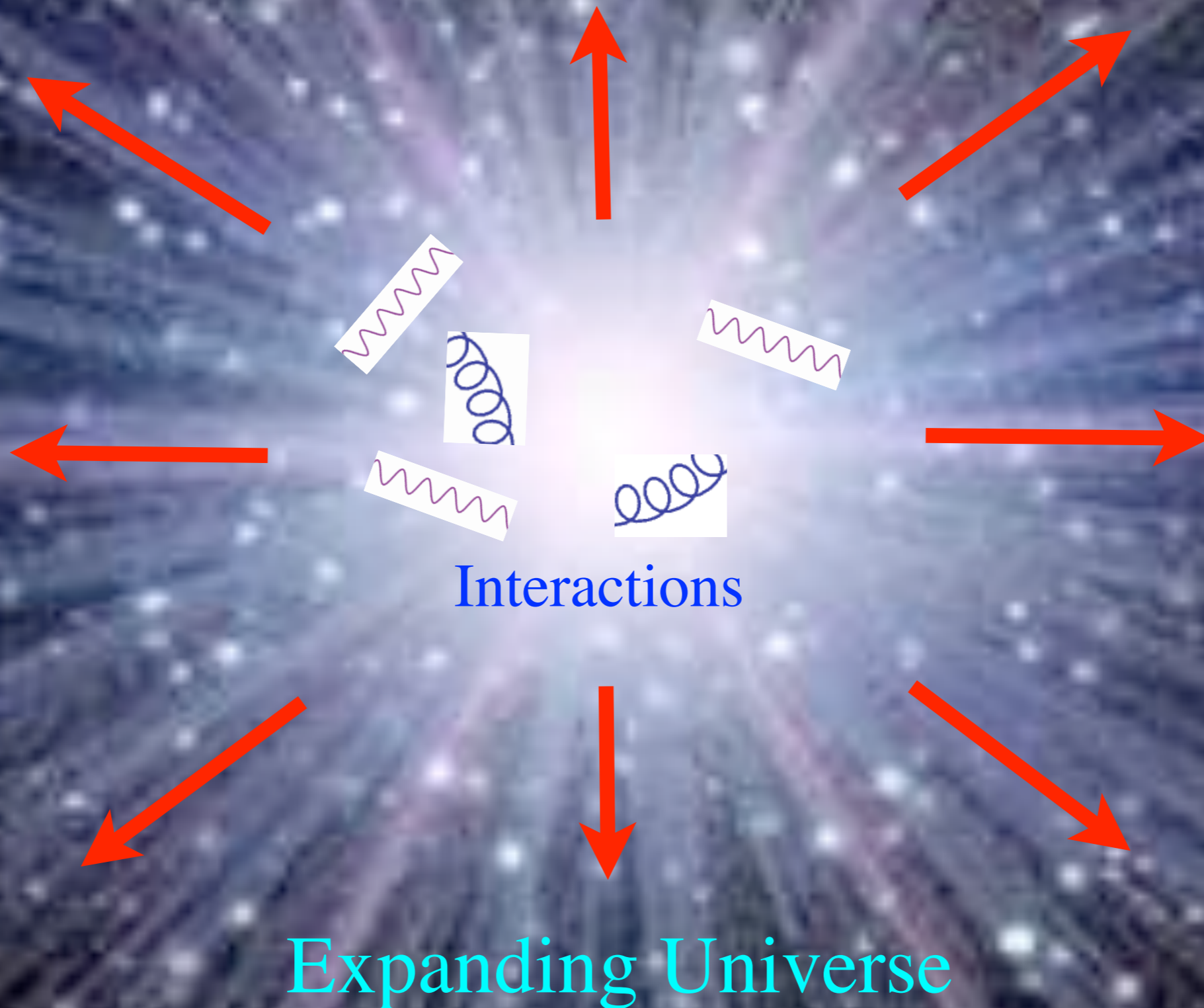
## Leptons spin = 1/2

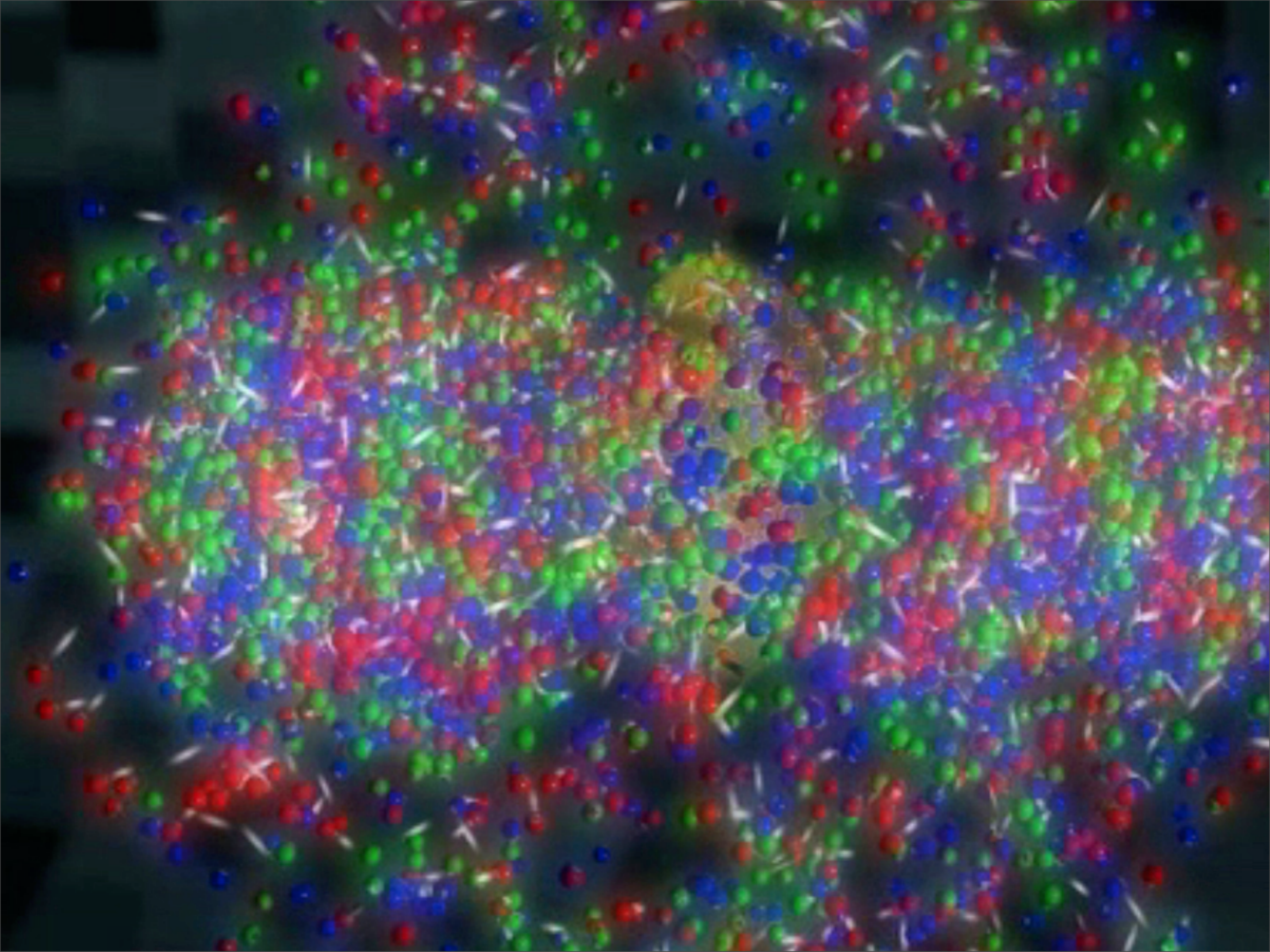
Flavor	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge
$\nu_L$ lightest neutrino*	$(0-0.13)\times 10^{-9}$	0
$e$ electron	0.000511	-1
$\nu_M$ middle neutrino*	$(0.009-0.13)\times 10^{-9}$	0
$\mu$ muon	0.106	-1
$\nu_H$ heaviest neutrino*	$(0.04-0.14)\times 10^{-9}$	0
$\tau$ tau	1.777	-1

## Quarks spin = 1/2

Flavor	Approx. Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge
$u$ up	0.002	2/3
$d$ down	0.005	-1/3
$c$ charm	1.3	2/3
$s$ strange	0.1	-1/3
$t$ top	173	2/3
$b$ bottom	4.2	-1/3

초기우주는 팽창하는 공간에 서로 상호작용하는  
뜨거운 기본입자들로 이루어진 플라즈마 상태





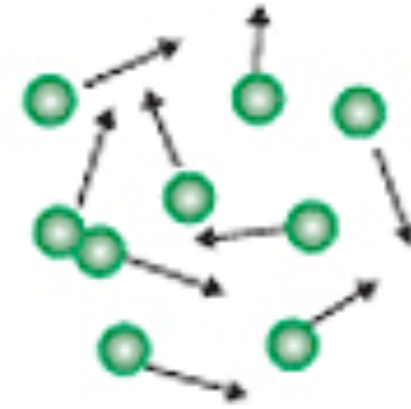
• 우주속 물질 상태의 진화

- atom, molecule
- nucleus
- electron

매우 차가운 거대 구조 형성



은하, 은하단



Gas

Recombination,  
photon decoupling  
: CMB

매우 뜨거운

쿼크, 글루온,  
전자의 플라즈마

열적평형 상태

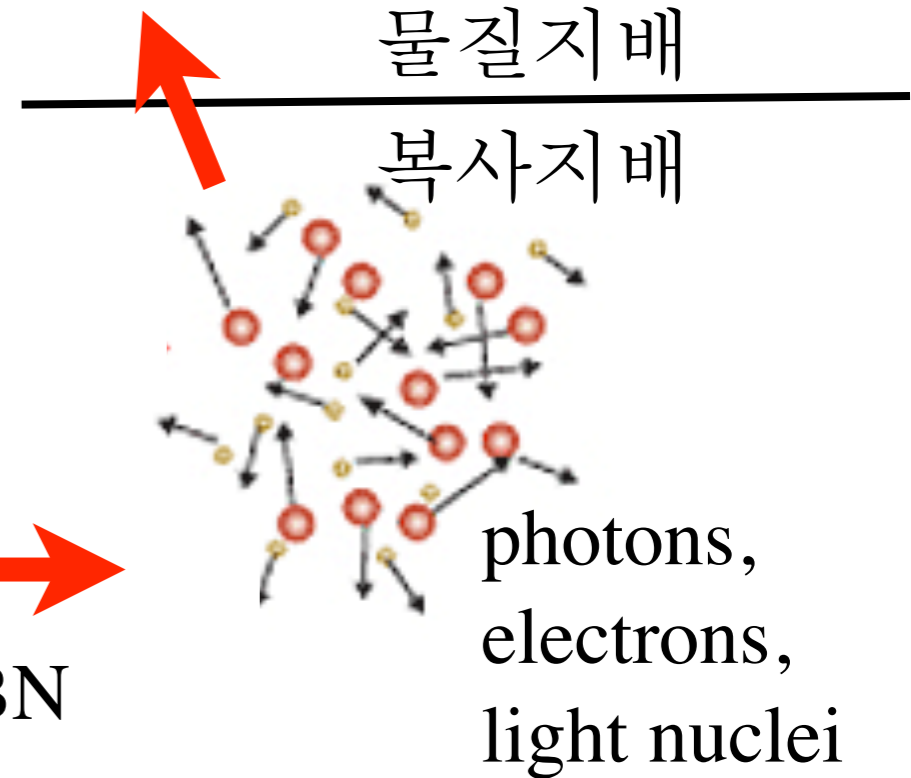
Quark-hadron transition



양성자, 중성자,  
전자의 플라즈마



BBN



photons,  
electrons,  
light nuclei

# PERIODIC TABLE OF THE ELEMENTS

<http://www.ktf-split.hr/periodni/>

PERIOD	GROUP I A	GROUP II A	GROUP III A	GROUP IV A	GROUP V A	GROUP VI A	GROUP VII A	GROUP VIII A										
1	1 1.0079 <b>H</b> HYDROGEN	2 4.0026 <b>He</b> HELIUM																
2	3 6.941 <b>Li</b> LITHIUM	4 9.0122 <b>Be</b> BERYLLIUM	5 10.811 <b>B</b> BORON															
3	11 22.990 <b>Na</b> SODIUM	12 24.305 <b>Mg</b> MAGNESIUM																
4	19 39.098 <b>K</b> POTASSIUM	20 40.078 <b>Ca</b> CALCIUM	21 44.956 <b>Sc</b> SCANDIUM	22 47.867 <b>Ti</b> TITANIUM	23 50.942 <b>V</b> VANADIUM	24 51.996 <b>Cr</b> CHROMIUM	25 54.938 <b>Mn</b> MANGANESE	26 55.845 <b>Fe</b> IRON	27 58.933 <b>Co</b> COBALT	28 58.693 <b>Ni</b> NICKEL	29 63.546 <b>Cu</b> COPPER	30 65.39 <b>Zn</b> ZINC	31 69.723 <b>Ga</b> GALLIUM	32 72.64 <b>Ge</b> GERMANIUM	33 74.922 <b>As</b> ARSENIC	34 78.96 <b>Se</b> SELENIUM	35 79.904 <b>Br</b> BROMINE	36 83.80 <b>Kr</b> KRYPTON
5	37 85.468 <b>Rb</b> RUBIDIUM	38 87.62 <b>Sr</b> STRONTIUM	39 88.906 <b>Y</b> YTTRIUM	40 91.224 <b>Zr</b> ZIRCONIUM	41 92.906 <b>Nb</b> NIOBIUM	42 95.94 <b>Mo</b> MOLYBDENUM	43 (98) <b>Tc</b> TECHNETIUM	44 101.07 <b>Ru</b> RUTHENIUM	45 102.91 <b>Rh</b> RHODIUM	46 106.42 <b>Pd</b> PALLADIUM	47 107.87 <b>Ag</b> SILVER	48 112.41 <b>Cd</b> CADMIUM	49 114.82 <b>In</b> INDIUM	50 118.71 <b>Sn</b> TIN	51 121.76 <b>Sb</b> ANTIMONY	52 127.60 <b>Te</b> TELLURIUM	53 126.90 <b>I</b> IODINE	54 131.29 <b>Xe</b> XENON
6	55 132.91 <b>Cs</b> CAESIUM	56 137.33 <b>Ba</b> BARIUM	57-71 <b>La-Lu</b> Lanthanide	72 178.49 <b>Hf</b> HAFNIUM	73 180.95 <b>Ta</b> TANTALUM	74 183.84 <b>W</b> TUNGSTEN	75 186.21 <b>Re</b> RHENIUM	76 190.23 <b>Os</b> OSMIUM	77 192.22 <b>Ir</b> IRIDIUM	78 195.08 <b>Pt</b> PLATINUM	79 196.97 <b>Au</b> GOLD	80 200.59 <b>Hg</b> MERCURY	81 204.38 <b>Tl</b> THALLIUM	82 207.2 <b>Pb</b> LEAD	83 208.98 <b>Bi</b> BISMUTH	84 (209) <b>Po</b> POLONIUM	85 (210) <b>At</b> ASTATINE	86 (222) <b>Rn</b> RADON
7	87 (223) <b>Fr</b> FRANCIUM	88 (226) <b>Ra</b> RADIUM	89-103 <b>Ac-Lr</b> Actinide	104 (261) <b>Rf</b> RUTHERFORDIUM	105 (262) <b>Db</b> DUBNIUM	106 (266) <b>Sg</b> SEABORGIUM	107 (264) <b>Bh</b> BOHRIUM	108 (277) <b>Hs</b> HASSIUM	109 (268) <b>Mt</b> MEITNERIUM	110 (281) <b>Uun</b> UNUNNIUM	111 (272) <b>Uuu</b> UNUNUNIUM	112 (285) <b>Uub</b> UNUNBIUM		114 (289) <b>Uuq</b> UNUNQUADIUM				

Legend for element classification:

- Metal
- Semimetal
- Nonmetal

Standard State (25 °C; 101 kPa):

- 1 Alkali metal
- 2 Alkaline earth metal
- Transition metals
- Lanthanide
- Actinide
- 16 Chalcogens element
- 17 Halogens element
- 18 Noble gas
- Ne - gas
- Ga - liquid
- Fe - solid
- Tc - synthetic

(1) Pure Appl. Chem., 73, No. 4, 667-683 (2001)  
Relative atomic mass is shown with five significant figures. For elements with no stable nuclides, the value enclosed in brackets indicates the mass number of the longest-lived isotope of the element.  
However three such elements (Th, Pa, and U) do have a characteristic terrestrial isotopic composition, and for these an atomic weight is tabulated.

LANTHANIDE

57 138.91 <b>La</b> LANTHANUM	58 140.12 <b>Ce</b> CERIUM	59 140.91 <b>Pr</b> PRASEODYMIUM	60 144.24 <b>Nd</b> NEODYMIUM	61 (145) <b>Pm</b> PROMETHIUM	62 150.36 <b>Sm</b> SAMARIUM	63 151.96 <b>Eu</b> EUROPIUM	64 157.25 <b>Gd</b> GADOLINIUM	65 158.93 <b>Tb</b> TERBIUM	66 162.50 <b>Dy</b> DYSPROSIUM	67 164.93 <b>Ho</b> HOLMIUM	68 167.26 <b>Er</b> ERBIUM	69 168.93 <b>Tm</b> THULIUM	70 173.04 <b>Yb</b> YTTERBIUM	71 174.97 <b>Lu</b> LUTETIUM
-------------------------------------	----------------------------------	--	-------------------------------------	-------------------------------------	------------------------------------	------------------------------------	--------------------------------------	-----------------------------------	--------------------------------------	-----------------------------------	----------------------------------	-----------------------------------	-------------------------------------	------------------------------------

ACTINIDE

89 (227) <b>Ac</b> ACTINIUM	90 232.04 <b>Th</b> THORIUM	91 231.04 <b>Pa</b> PROTACTINIUM	92 238.03 <b>U</b> URANIUM	93 (237) <b>Np</b> NEPTUNIUM	94 (244) <b>Pu</b> PLUTONIUM	95 (243) <b>Am</b> AMERICIUM	96 (247) <b>Cm</b> CURIUM	97 (247) <b>Bk</b> BERKELIUM	98 (251) <b>Cf</b> CALIFORNIUM	99 (252) <b>Es</b> EINSTEINIUM	100 (257) <b>Fm</b> FERMIUM	101 (258) <b>Md</b> MENDELEVIUM	102 (259) <b>No</b> NOBELIUM	103 (262) <b>Lr</b> LAWRENCIUM
-----------------------------------	-----------------------------------	--	----------------------------------	------------------------------------	------------------------------------	------------------------------------	---------------------------------	------------------------------------	--------------------------------------	--------------------------------------	-----------------------------------	---------------------------------------	------------------------------------	--------------------------------------

Editor: Aditya Vardhan (adivar@netlinx.com)

Copyright © 1998-2003 EniG. (eni@ktf-split.hr)

● 빅뱅 핵합성 : 가벼운 원자핵의 생성

헬륨, 중수소와 같은  
가벼운 원자핵의 생성은?

빅뱅 핵합성

1940년대

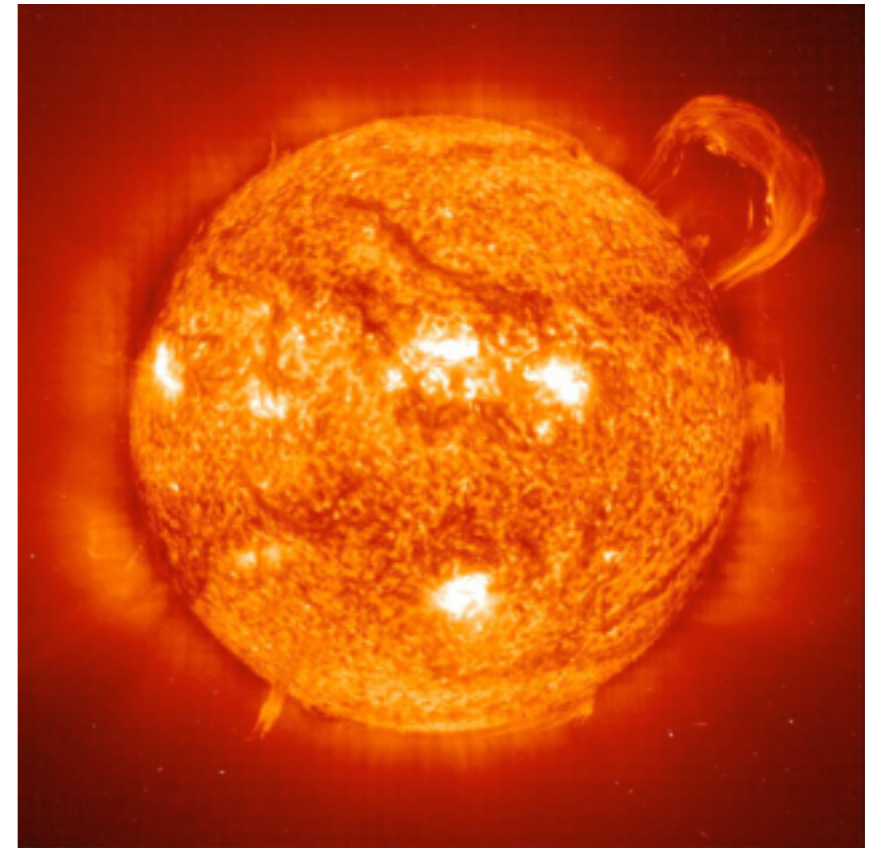
가모브(G. Gamow) 와 알퍼(R. Alpher)  
: 별보다도 훨씬 뜨거운 초기우주에서  
가능하다



우주에 있는 원자의 양:  
임계질량의 4%

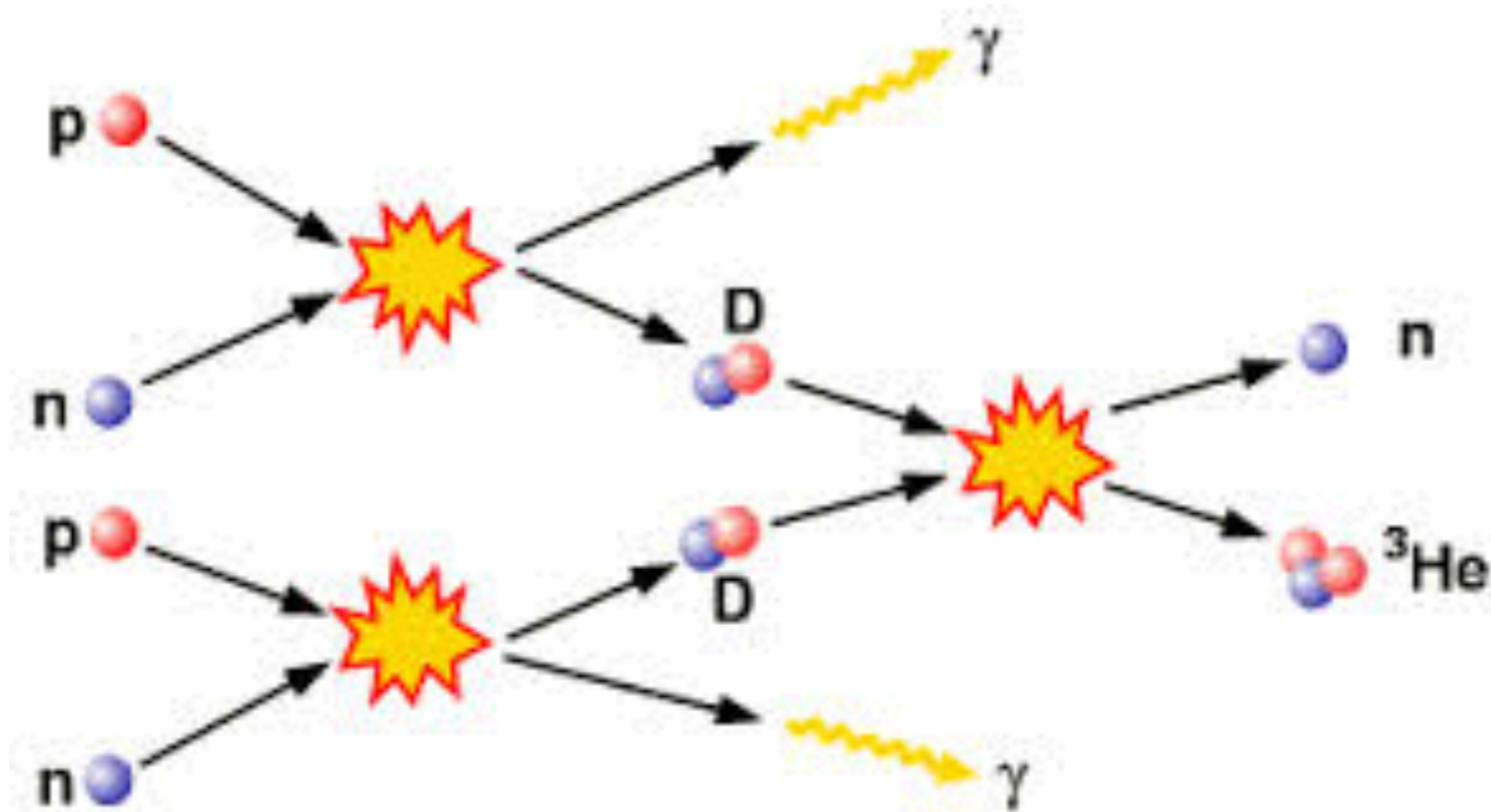
열린우주?

별이 생성된 이후.....



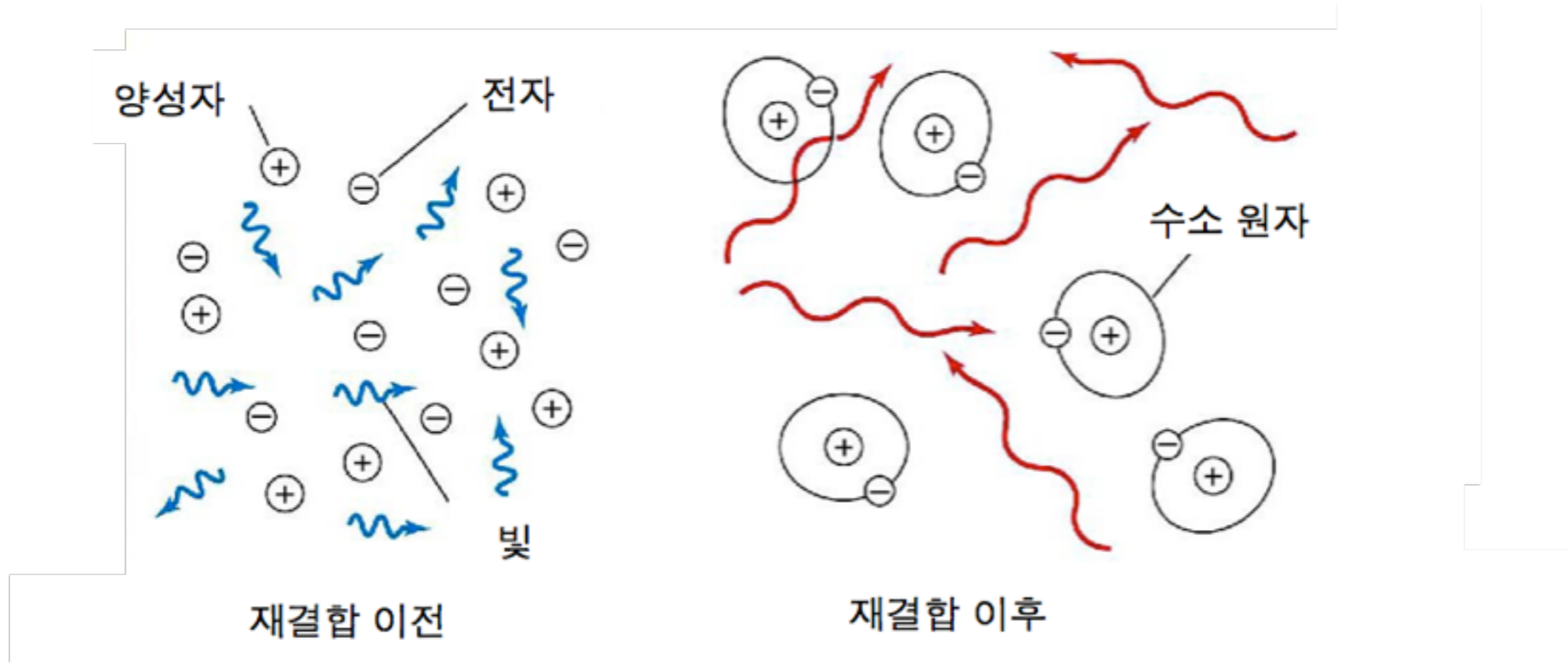
별의 핵융합:  
탄소, 철과 같은 무거운  
원자핵들의 생성

우주나이 1초 - 100 초 : 가벼운 원자핵들의 형성  
(중수소, 삼중수소, 헬륨, 리튬)





- 원자핵과 전자의 재결합 그리고 광자의 분리 (우주 나이 38 만년)  
(Recombination and photon decoupling)



수소 원자핵과 전자의 결합 에너지 13.6 eV : 우주온도 약 3000 도  
 자유로워진 광자는 아무런 충돌없이 진행하여 현재의 우리 주변을 채우고 있다.



**우주 배경 복사**

: 우주 팽창에 의하여 온도가 줄어들어 지금은 2.7 도 정도가 됨  
 (1948 년, 알퍼와 허먼이 예측하였다.)

- 우주에서 오는 잡음 : 우주 배경 복사  
(Cosmic Microwave Background Radiation : CMBR)

하늘 전체에서, 모든 방향에서  
동일한 잡음을 발견 (1965)



Horn Antenna — Holmdel, New Jersey.  
Dr. Robert Wilson (left) and Dr. Arno Penzias (right) in front of the Horn Antenna, 1975.  
(Photo Credit: Bell Labs)

- 우주에서 오는 잡음 : 우주 배경 복사  
(Cosmic Microwave Background Radiation : CMBR)



하늘 전체에서, 모든 방향에서  
동일한 잡음을 발견 (1965)

잡음의 원인은?

: 전자 회로의 문제점, 전기선의 불  
순물, 안테나의 노후화, 비둘기  
똥....

Horn Antenna — Holmdel, New Jersey.  
Dr. Robert Wilson (left) and Dr. Arno Penzias (right) in front of the Horn Antenna, 1975.  
(Photo Credit: Bell Labs)

- 우주에서 오는 잡음 : 우주 배경 복사  
(Cosmic Microwave Background Radiation : CMBR)

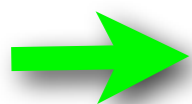


하늘 전체에서, 모든 방향에서  
동일한 잡음을 발견 (1965)

잡음의 원인은?

: 전자 회로의 문제점, 전기선의 불  
순물, 안테나의 노후화, 비둘기  
똥....

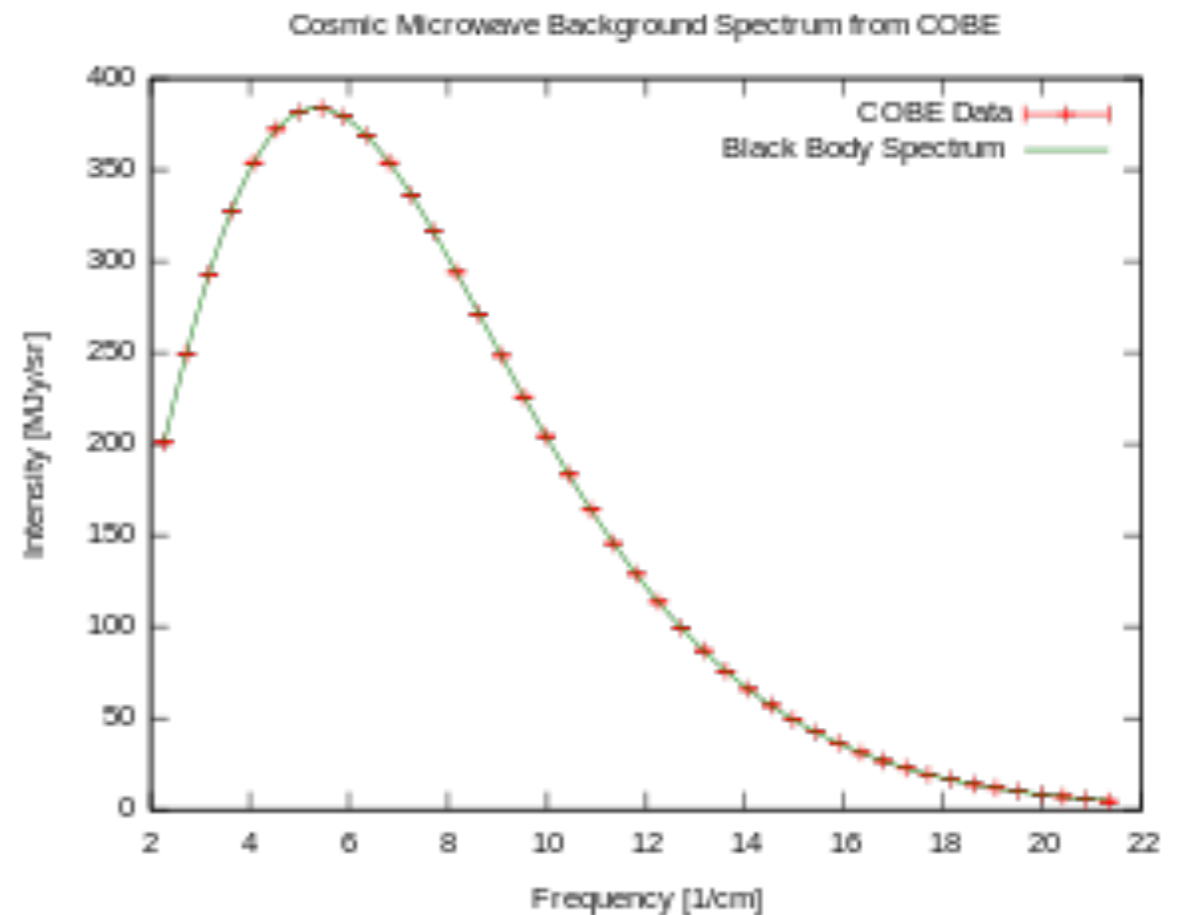
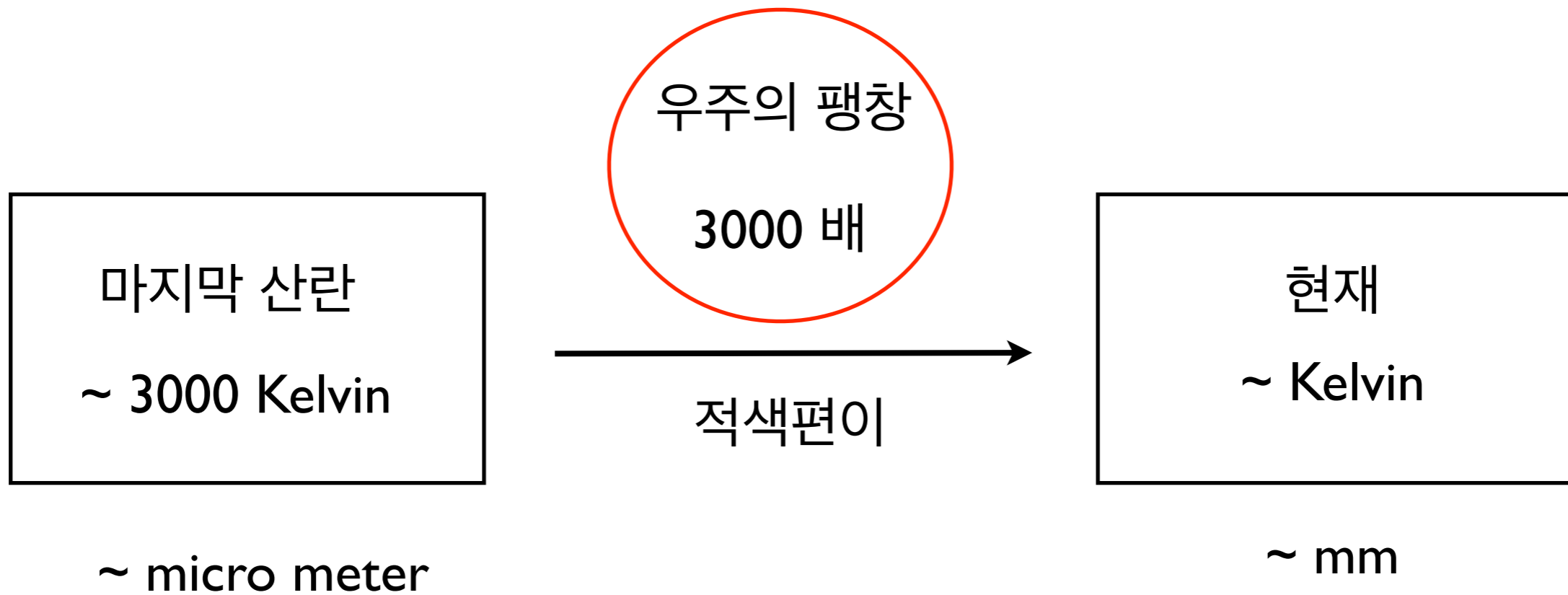
Horn Antenna — Holmdel, New Jersey.  
Dr. Robert Wilson (left) and Dr. Arno Penzias (right) in front of the Horn Antenna, 1975.  
(Photo Credit: Bell Labs)



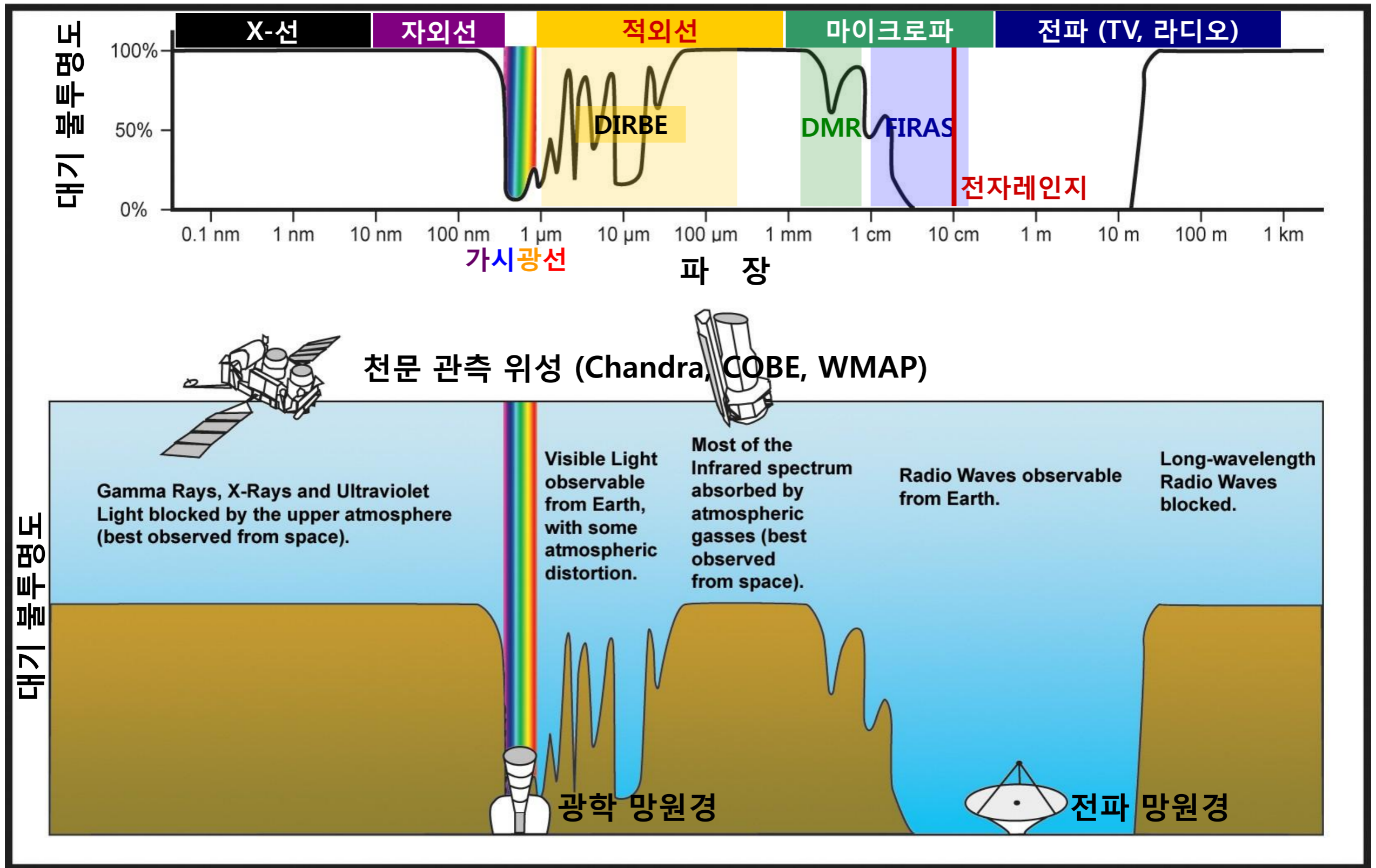
뜨거운 초기 우주에서 떨어져 나온 빛

: 우주의 팽창으로 적색편이 되어 에너지가 낮아짐

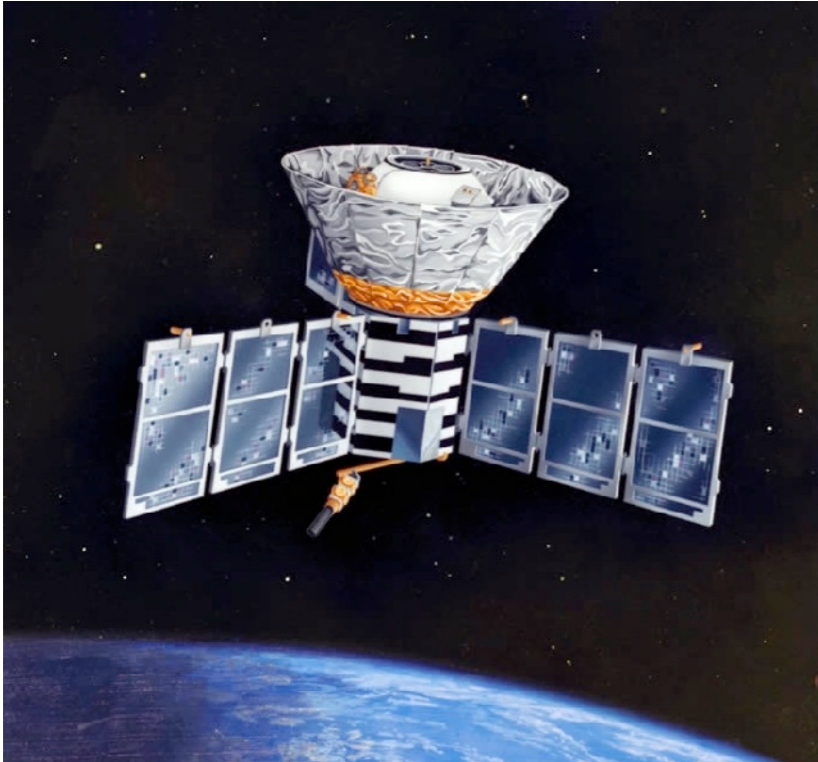
# 빛의 마지막 산란과 적색편이 : 우주배경복사



Penzias and Wilson: wavelength of 7.35 centimeters



- 코비 위성 (Cosmic Background Explorer, COBE)



1989년 11월 18일 발사

1. 관측된 우주배경복사는 거의 완벽한 플랑크 분포를 따른다. 그 온도는

$$T = 2.725 \pm 0.001 \text{ K} \quad \text{FIRAS}$$

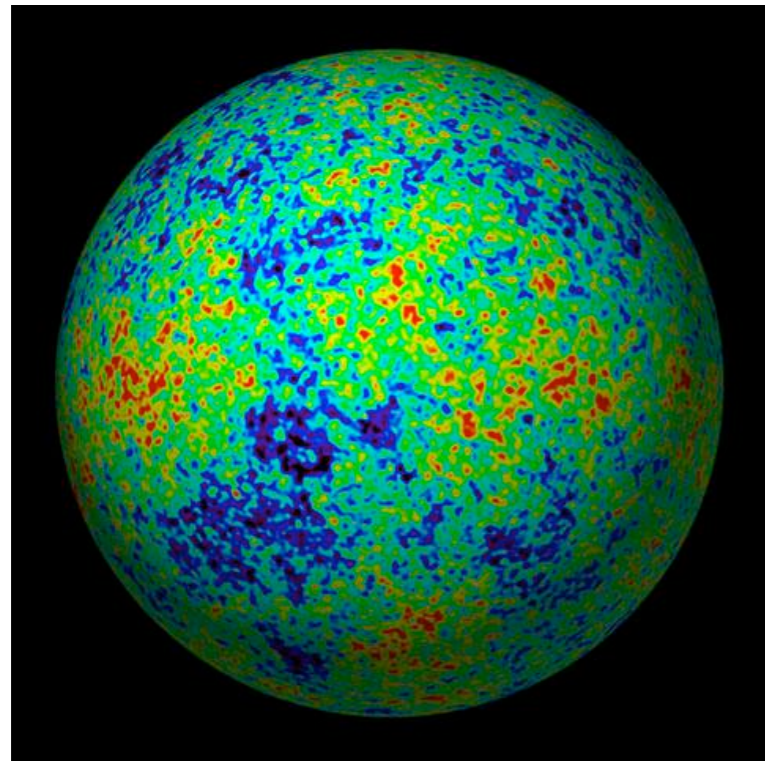
2. 방향에 관계없이 일정한 온도를 나타낸다. 이것은 빅뱅모형의 균일성, 등방성 가정이 옳다는 것을 보이는 것이다.

3. 하지만  $\sim 10^{-5} \text{ K}$  에서 온도의 비균질성을 발견

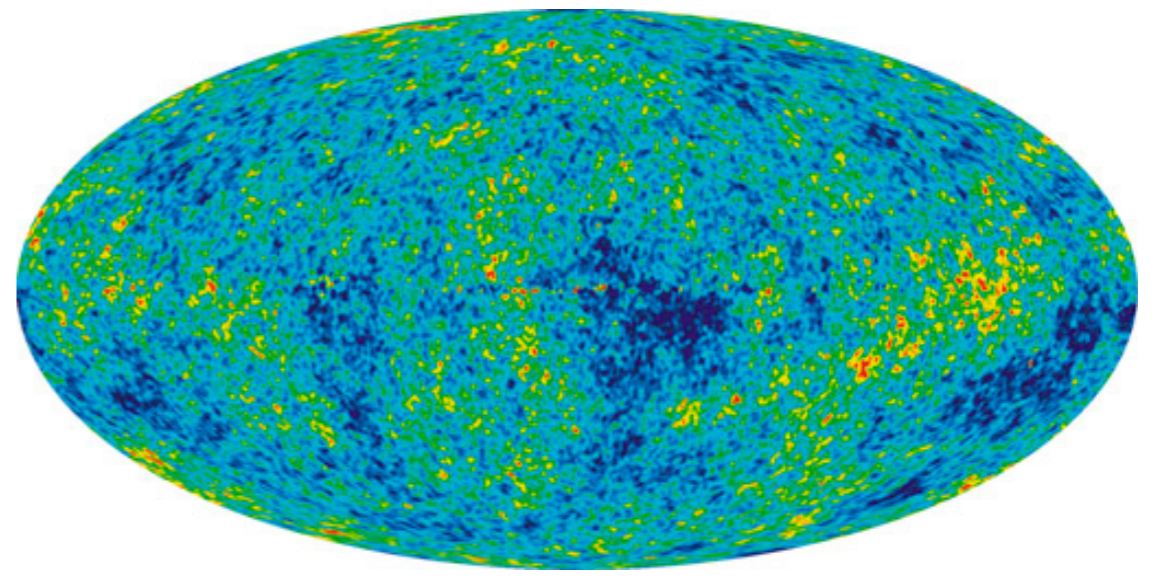
DMR

2006 년 노벨상 수상

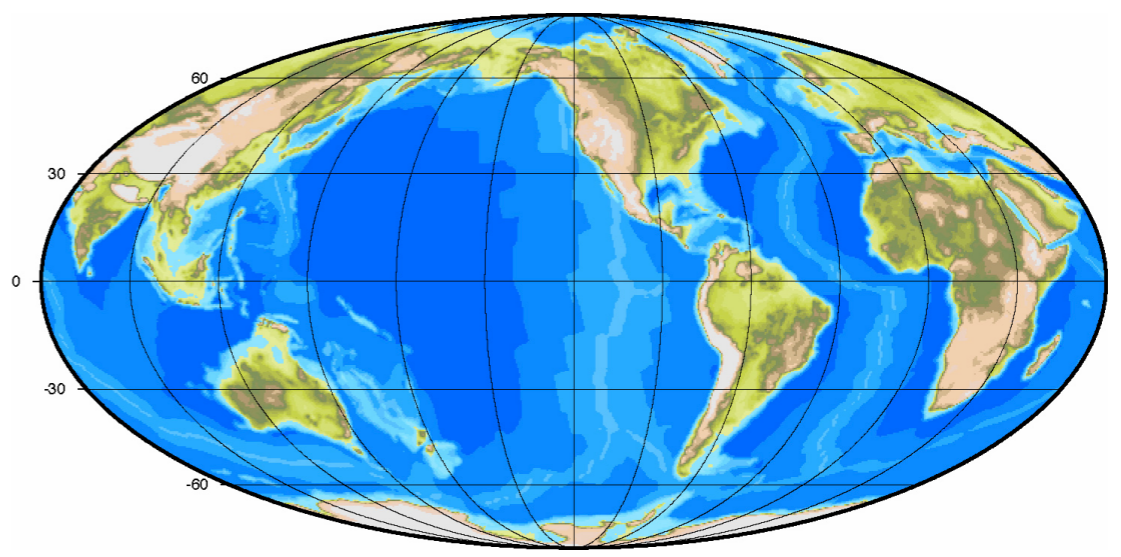
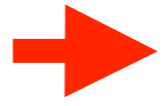
# Cosmic Microwave Background Radiation



CMB temperature  
Earth

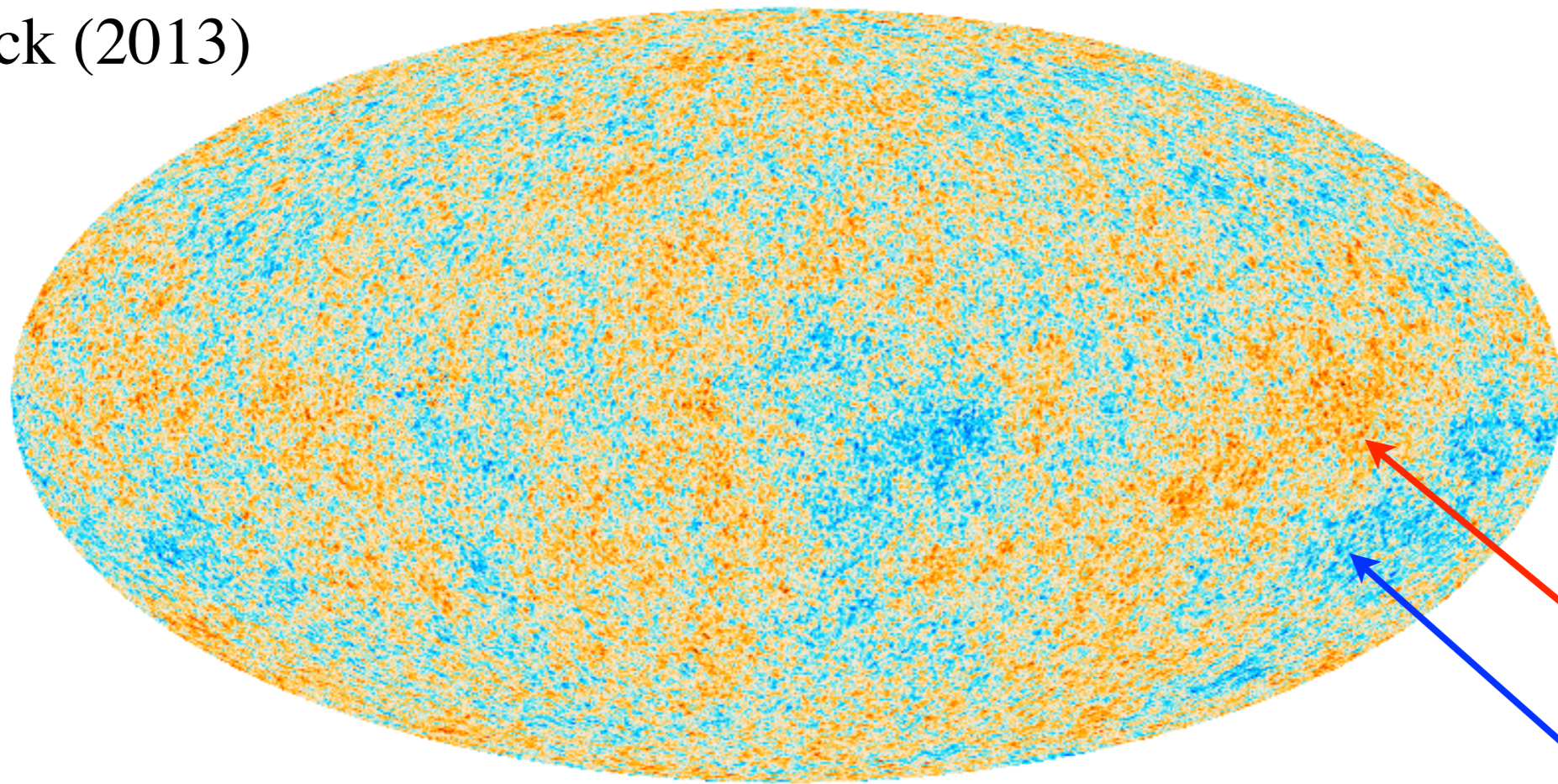


Mollweide projection



- CMB 온도 비등방성

Planck (2013)



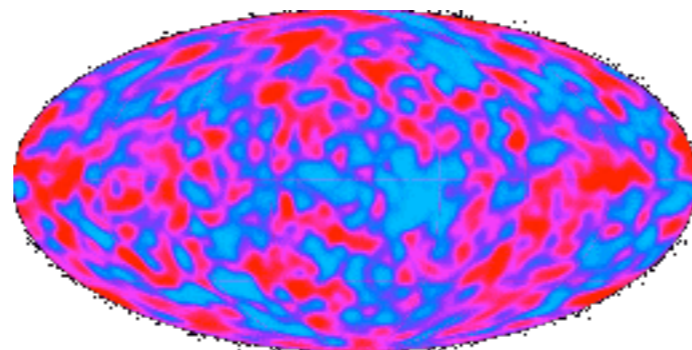
-500 500  $\mu K_{\text{CMB}}$

$T_0 = 2.725K$   
 $T_0 + \mathcal{O}(10^{-5})K$   
 $T_0 - \mathcal{O}(10^{-5})K$

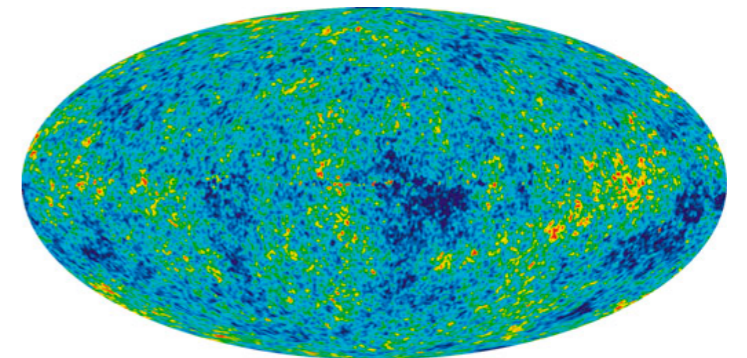
Penzias, Wilson (1965)



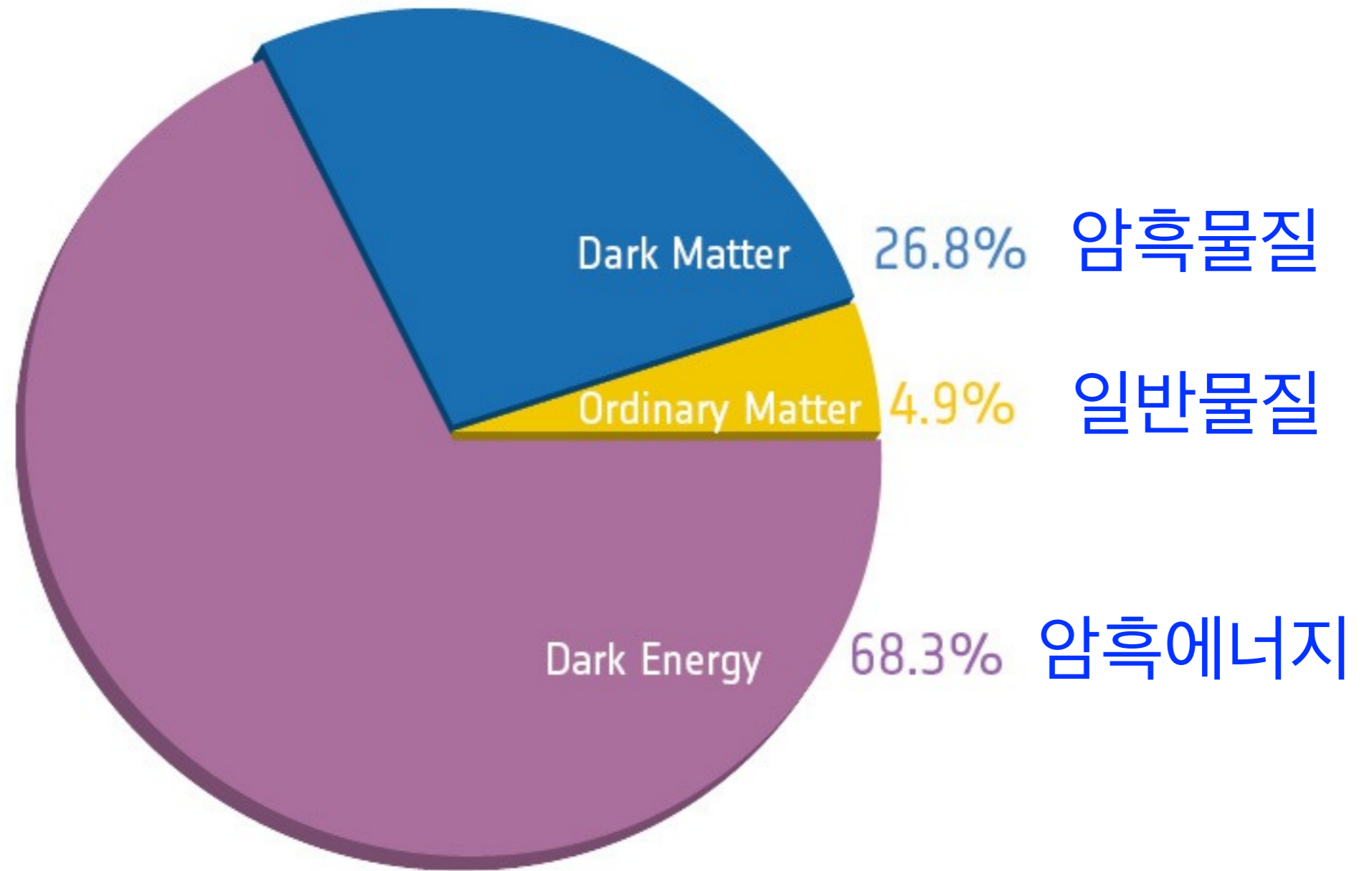
COBE (1992)



WMAP (2007)



# 현재 우주의 에너지 분포

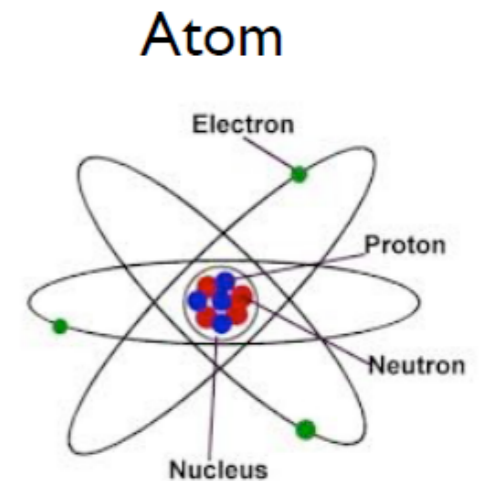


- 우주내의 물질을 관측하기

- 방출, 흡수하는 빛을 사용하여

원자, 분자들은 빛을 흡수하고 방출할 수 있다.  
망원경을 통하여 직접적으로 검출.

→ 보이는 물질

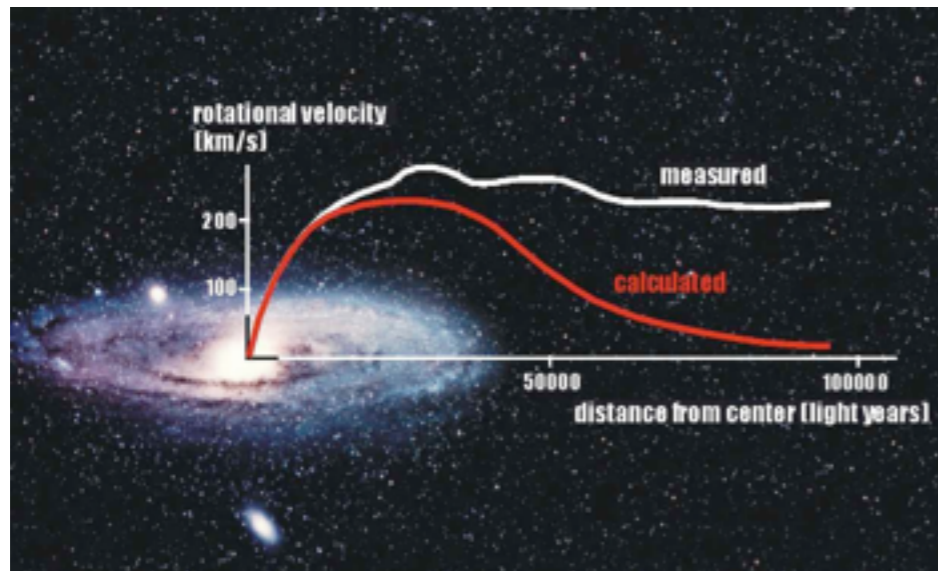


- 중력을 사용하여

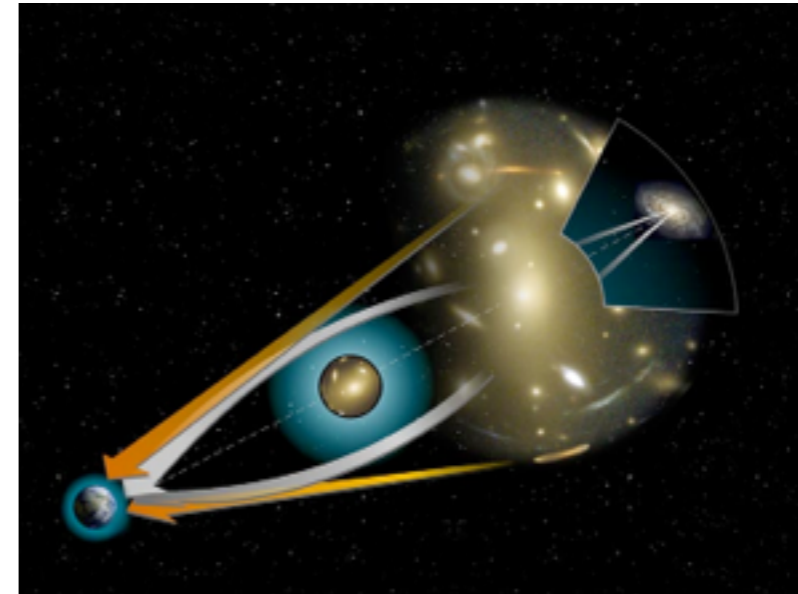
모든 형태의 물질과 에너지는 중력을 일으키고 영향을 받는다.  
천체들의 운동이나 중력렌즈를 통하여 중력을 일으키는 물질  
들을 검출.

→ 중력 물질 = 보이는 + 보이지 않는 물질

# 보이는 물질과 중력 물질 사이의 차이



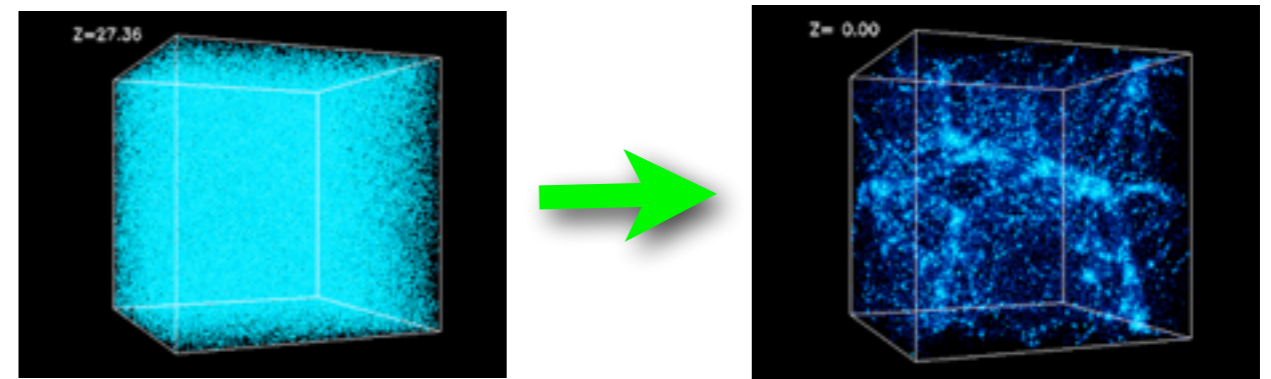
은하회전속도



중력 렌즈

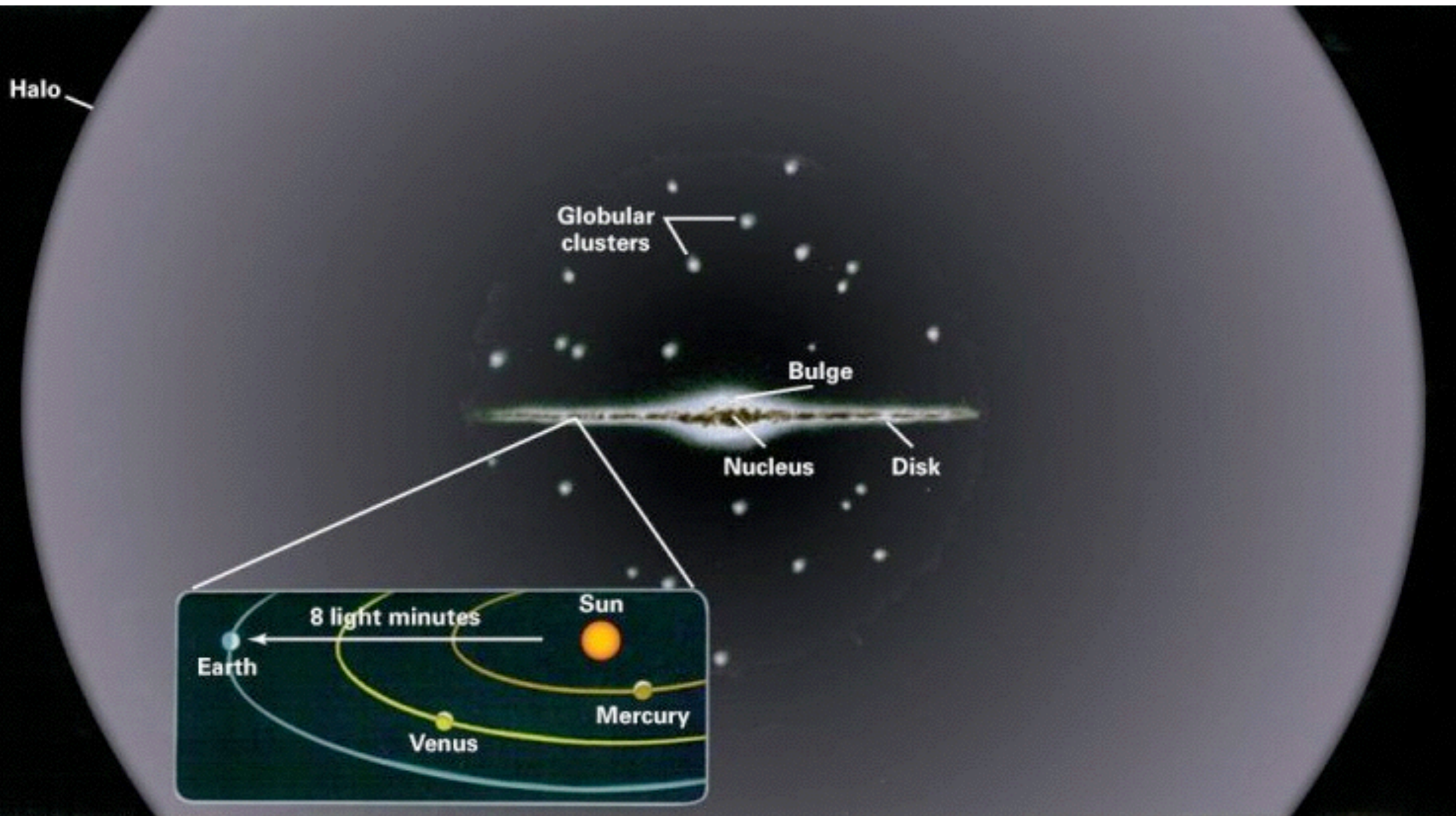


총알 은하단



거대구조형성

# ● 우리 주변의 암흑물질



© 2007 Thomson Higher Education

## 태양 주변의 암흑물질

$$\rho_{\text{DM}}(\text{Sun}) \sim 0.3 \pm 0.2 \text{ GeV}/\text{cm}^3$$

$$\sim 5 \times 10^{-25} \text{ gram}/\text{cm}^3$$

## 바다표면에서 공기 밀도

$$\rho_{\text{air}} \sim 10^{-3} \text{ gram}/\text{cm}^3$$

## Dark Matter as a particle must (be)

1. **exist** around galaxies, clusters

➔ **stable** or lifetime longer than the age of universe

2. **neutral**: NO electromagnetic interaction

➔ **Only upper bounds on the interaction**

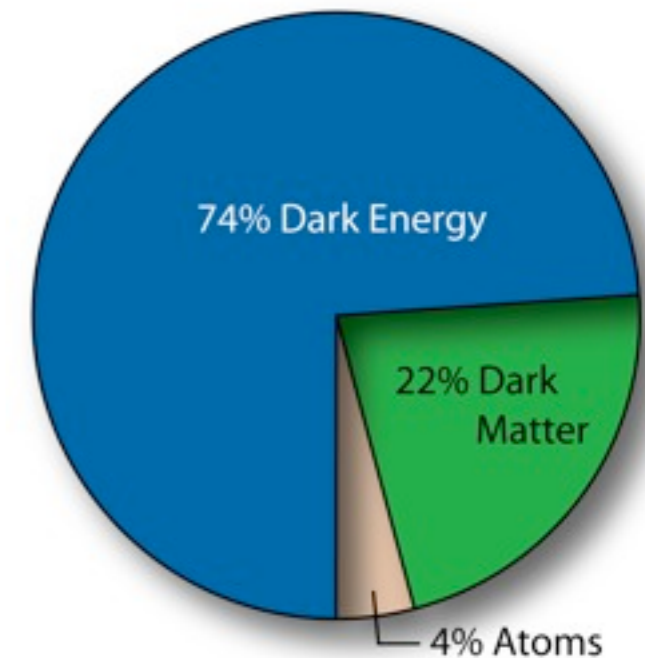
$$\sigma/m \lesssim 10^{-24} \text{ cm}^2/\text{GeV} \quad \text{from bullet cluster}$$

**No lower bound down to gravity!**

In fact all the evidences are gravitational.

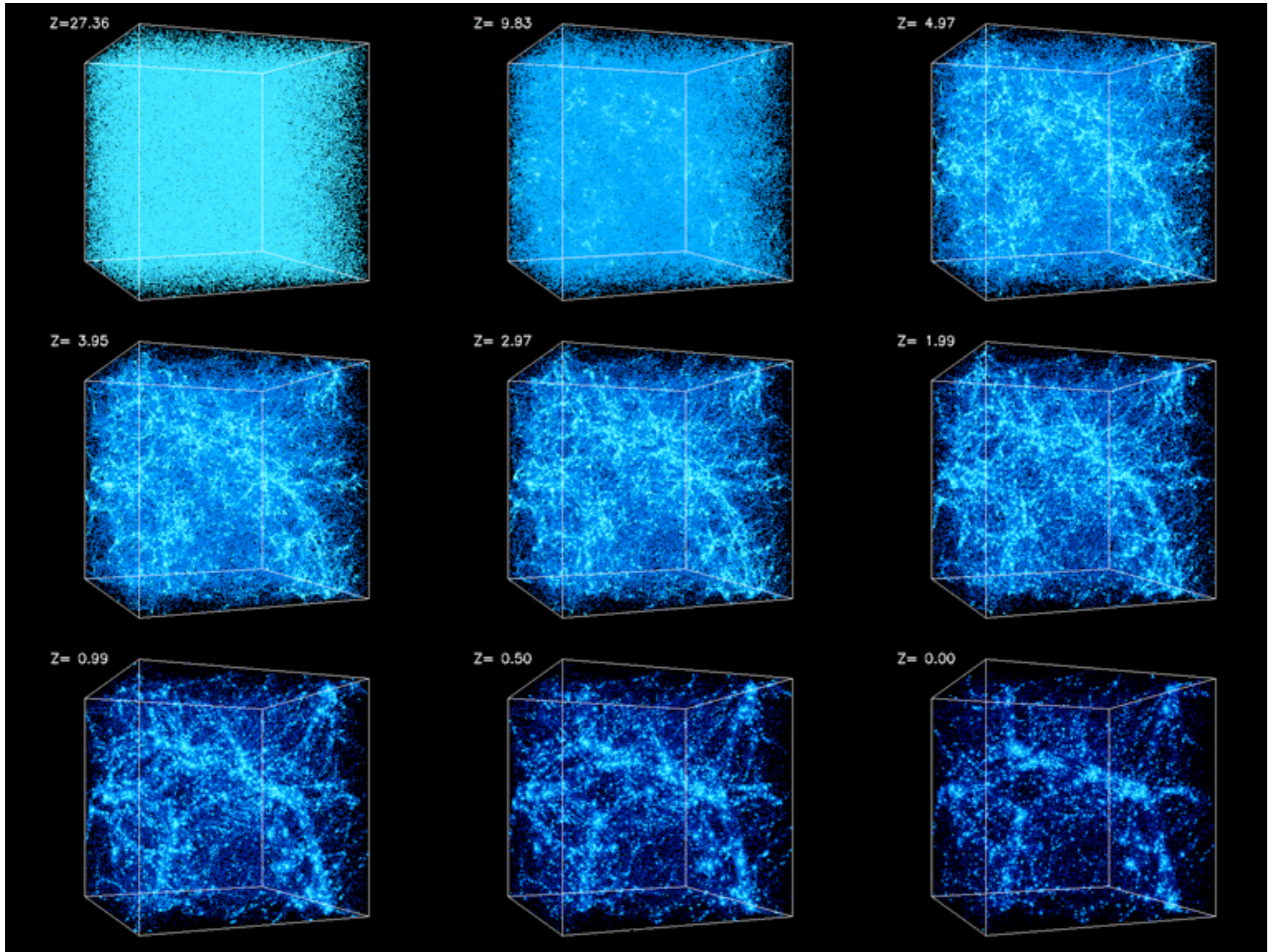
3. **22%** of the present energy density of the universe

4. **cold (or warm)**: non-relativistic to seed the structure formation

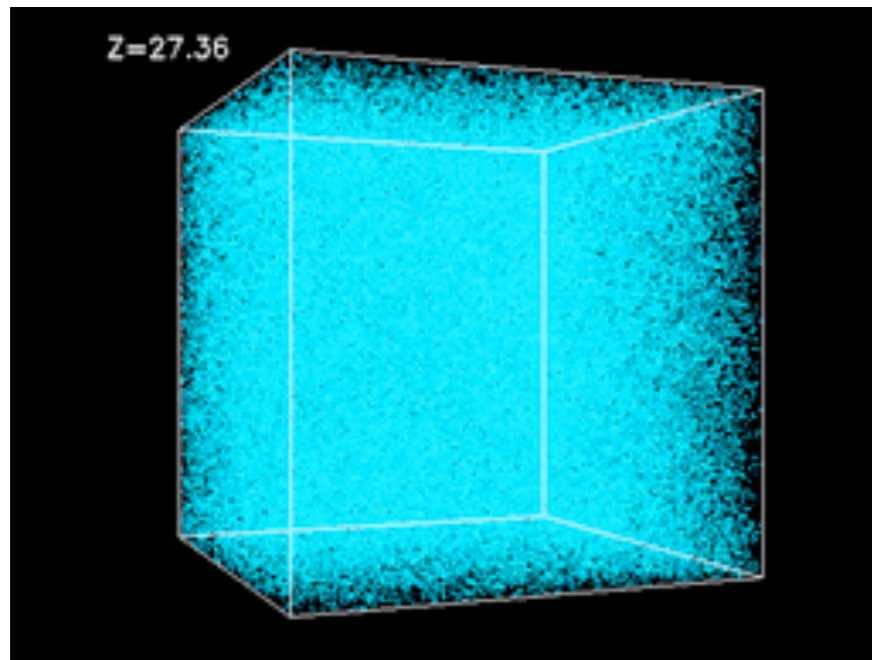


# ● 물질의 진화 : 우주거대구조의 형성

43Mpc box



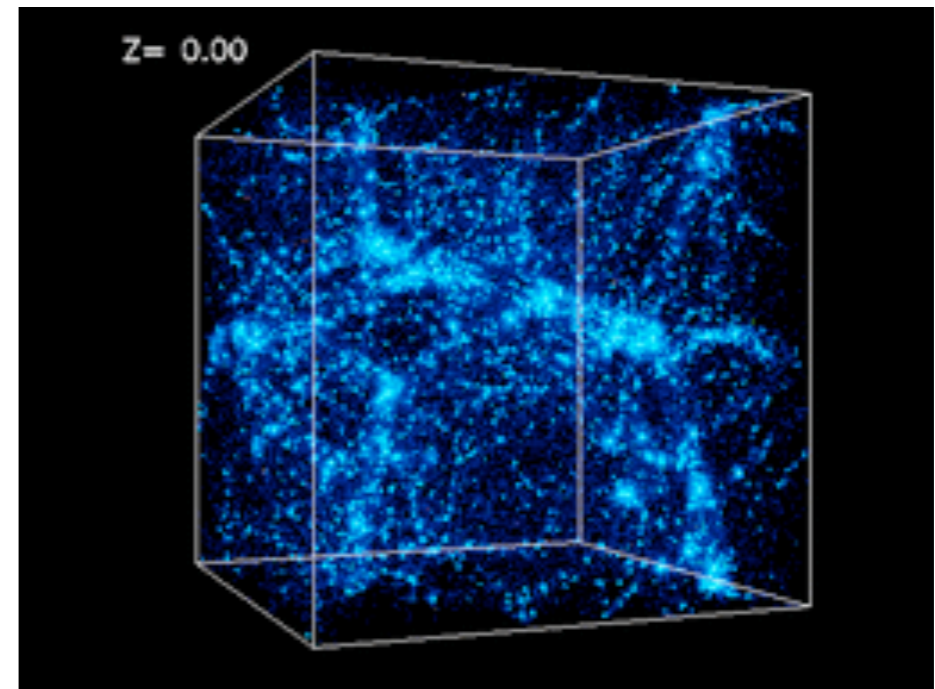
- 거대구조형성과 암흑물질



초기 우주  
거의 균질, 등방

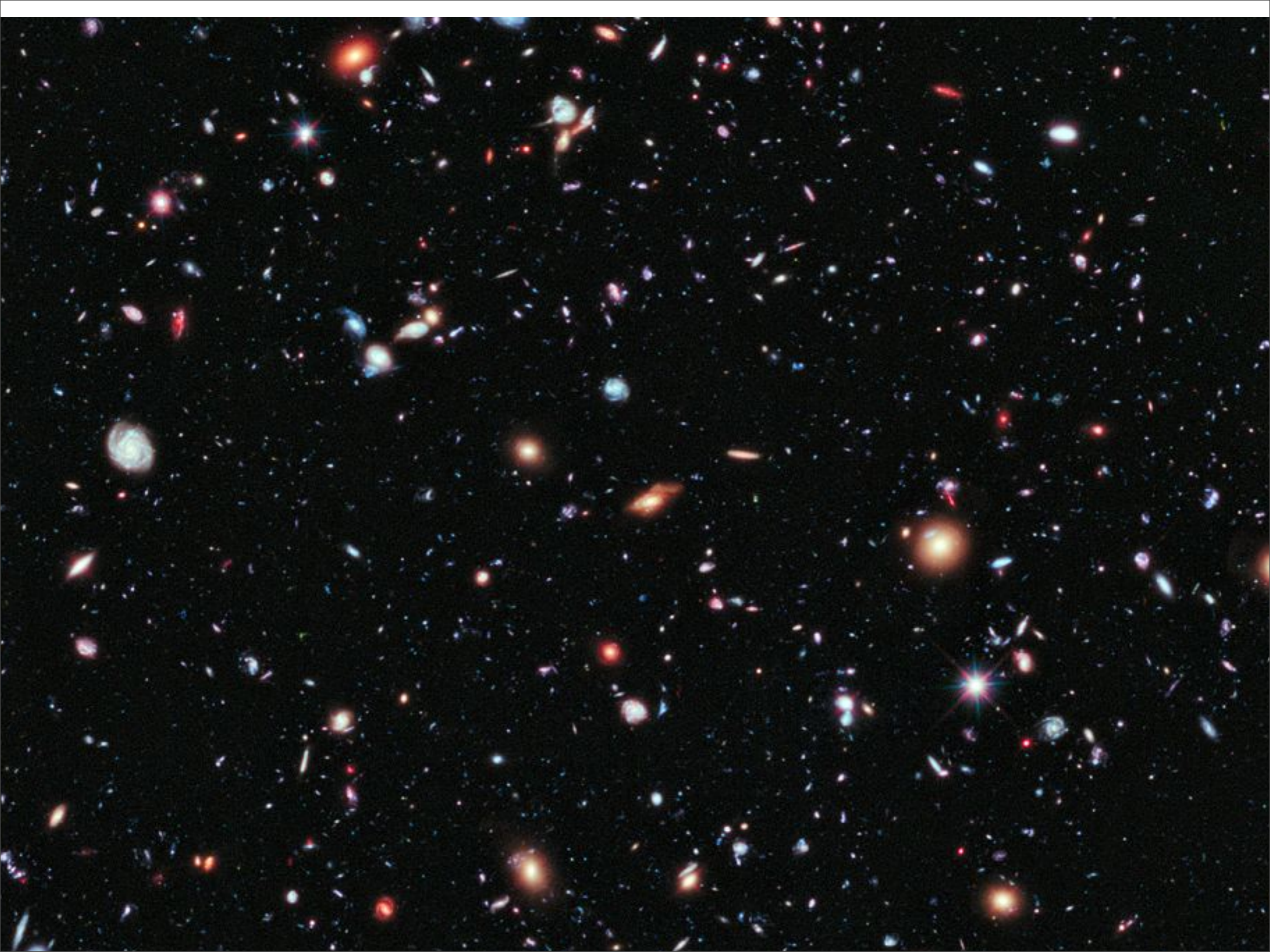
$$\frac{\delta\rho}{\rho} \sim 10^{-5}$$

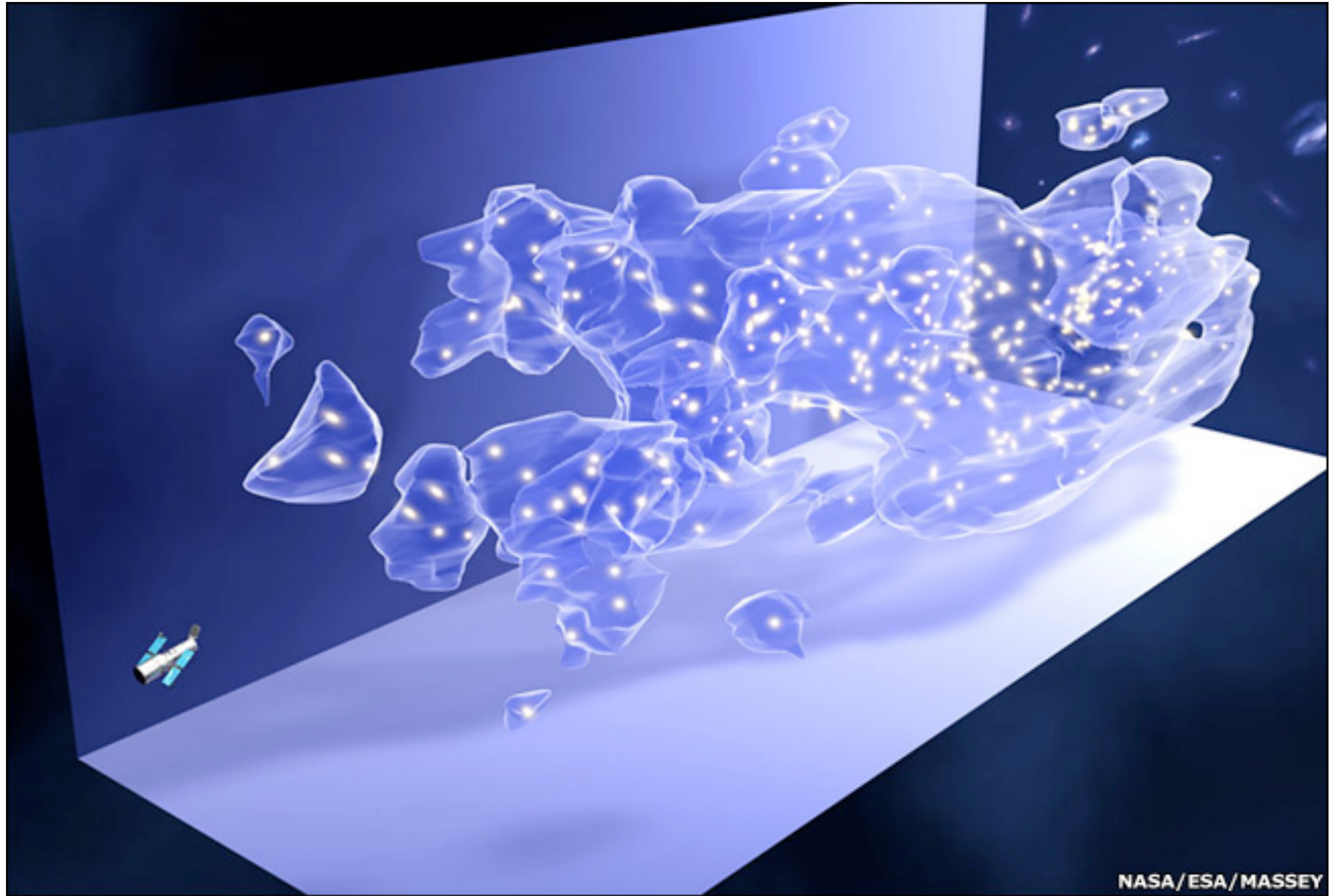
중력에 의하여



현재 우주  
아주 비균일, 비등방적

$$\frac{\delta\rho}{\rho} \gtrsim 1$$





Hubble's map: Dark matter may be invisible but it accounts for most of the Universe's mass. Its gravitational attraction acts as a template, pulling normal matter - the stars in their galaxy groupings into the large-scale structures we can see through telescopes.

WIMP

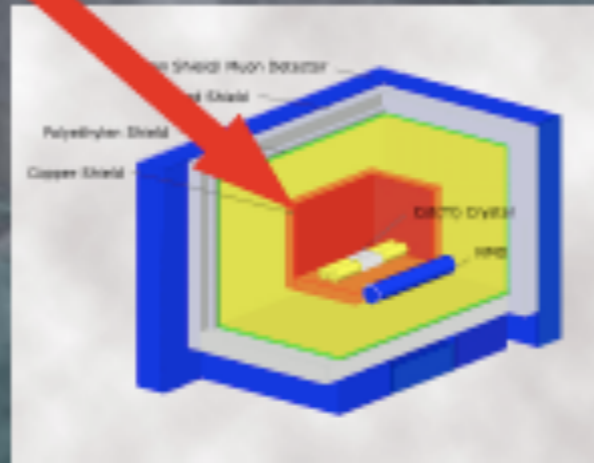
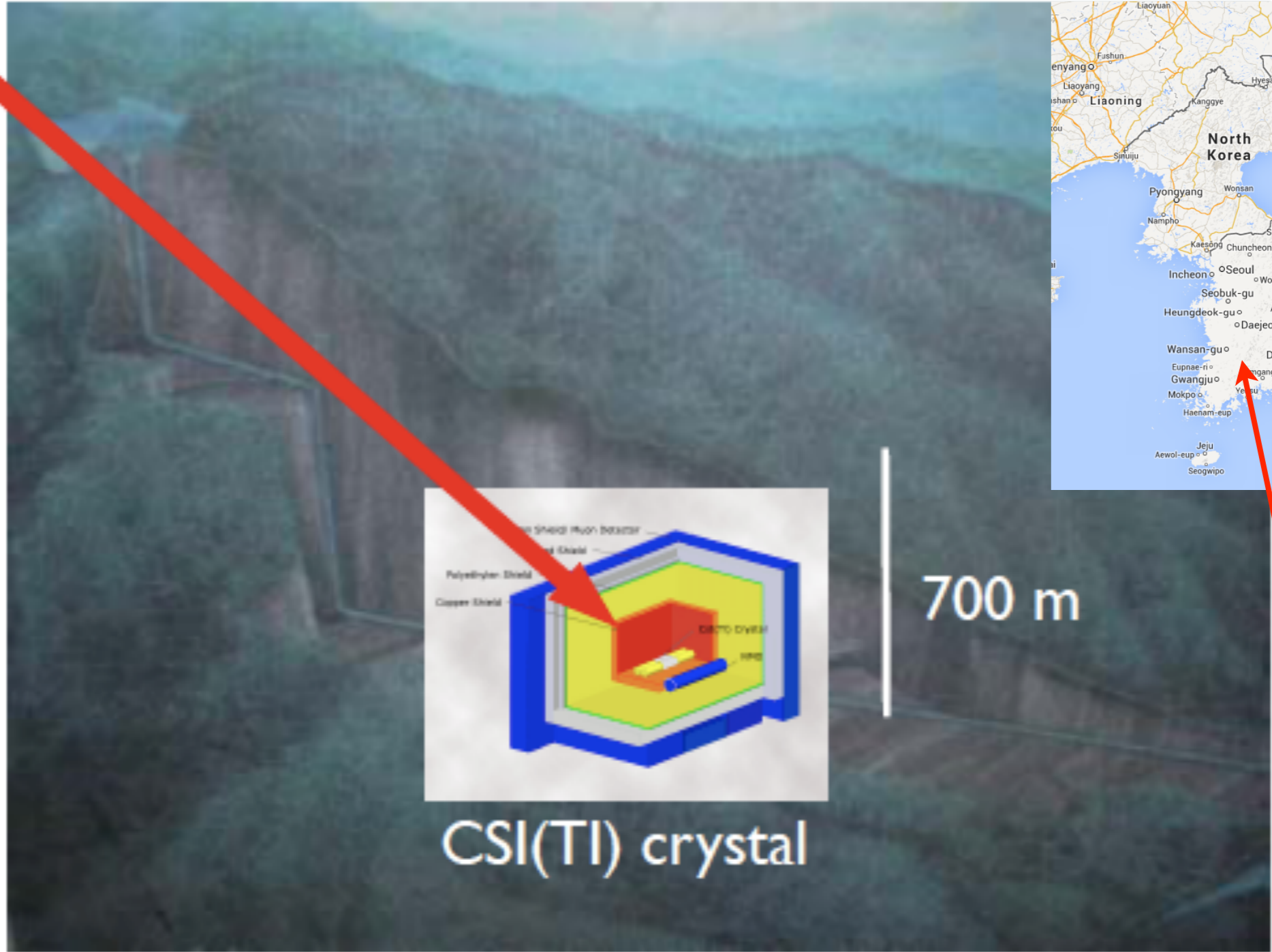


$$n = \frac{\rho}{m} \sim 0.3 \text{ cm}^{-3} \left( \frac{1 \text{ GeV}}{m} \right)$$

$$E_{\text{kin}} \simeq (1 - 10) \text{ keV}$$

• Direct Detection

Mt. JeomBong



CSI(TI) crystal

700 m

Jirisan

KIMS (Korea Invisible Mass Search) : YangYang Lab.

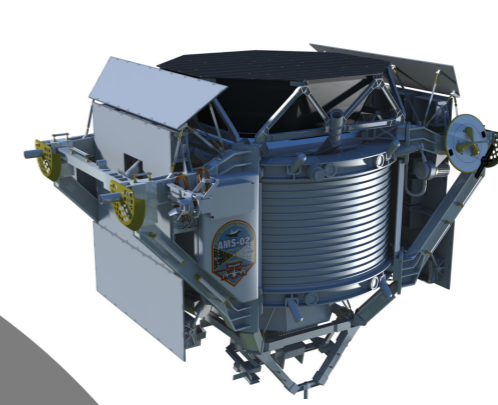
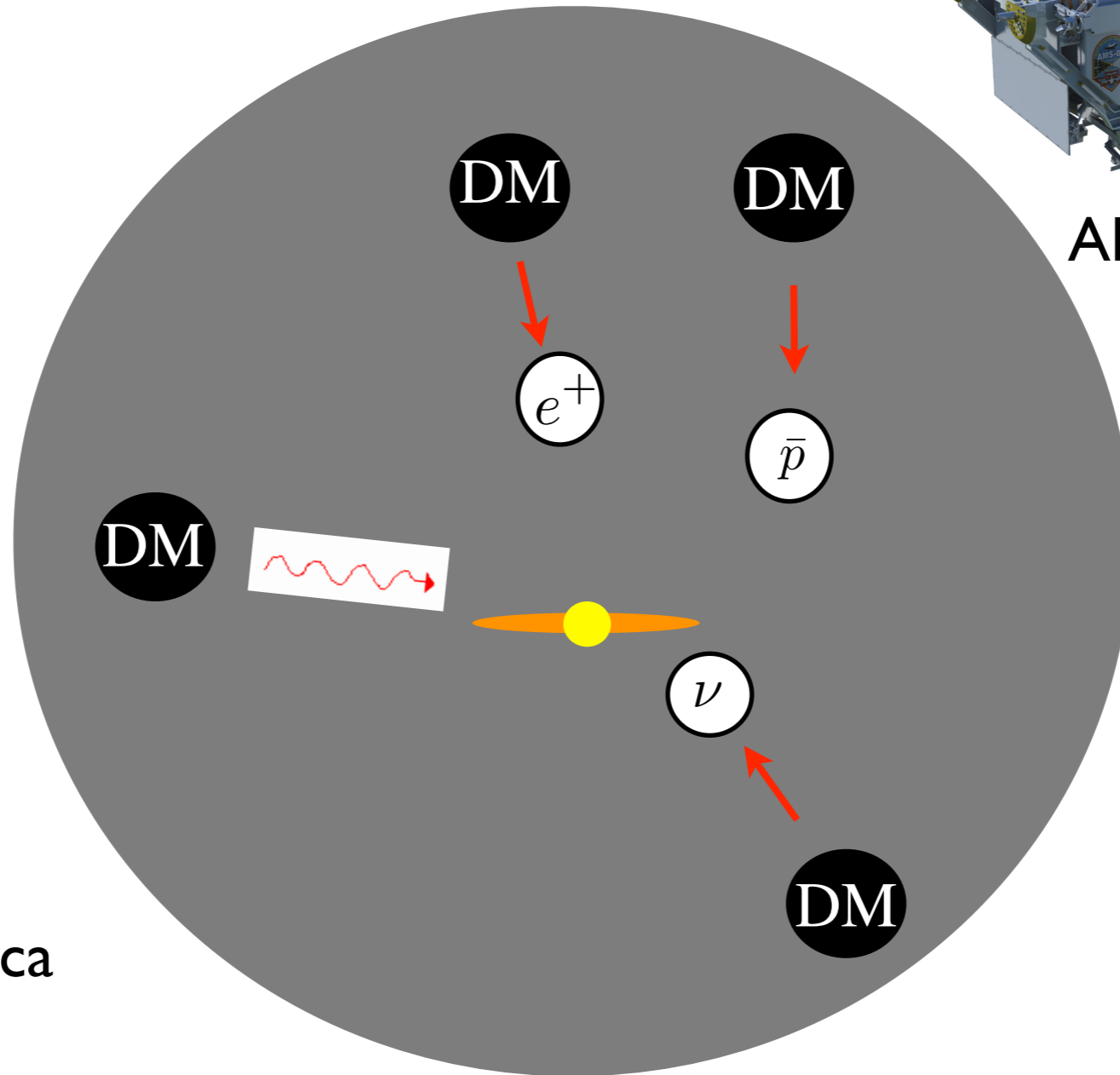
# • Indirect Detection



Fermi-LAT, 2008



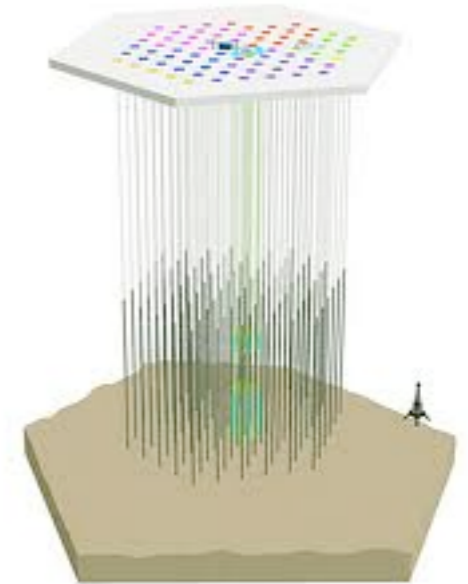
HESS in Namibia of Africa



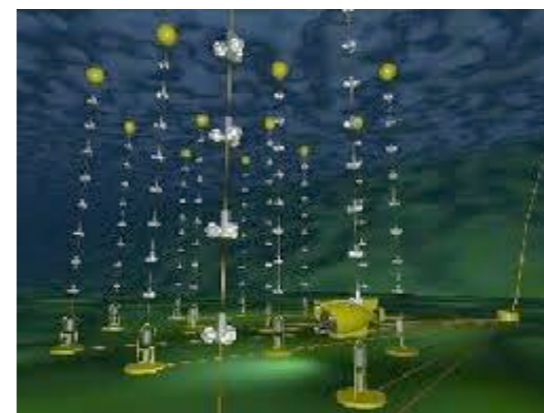
AMS-02



PAMELA, 2006

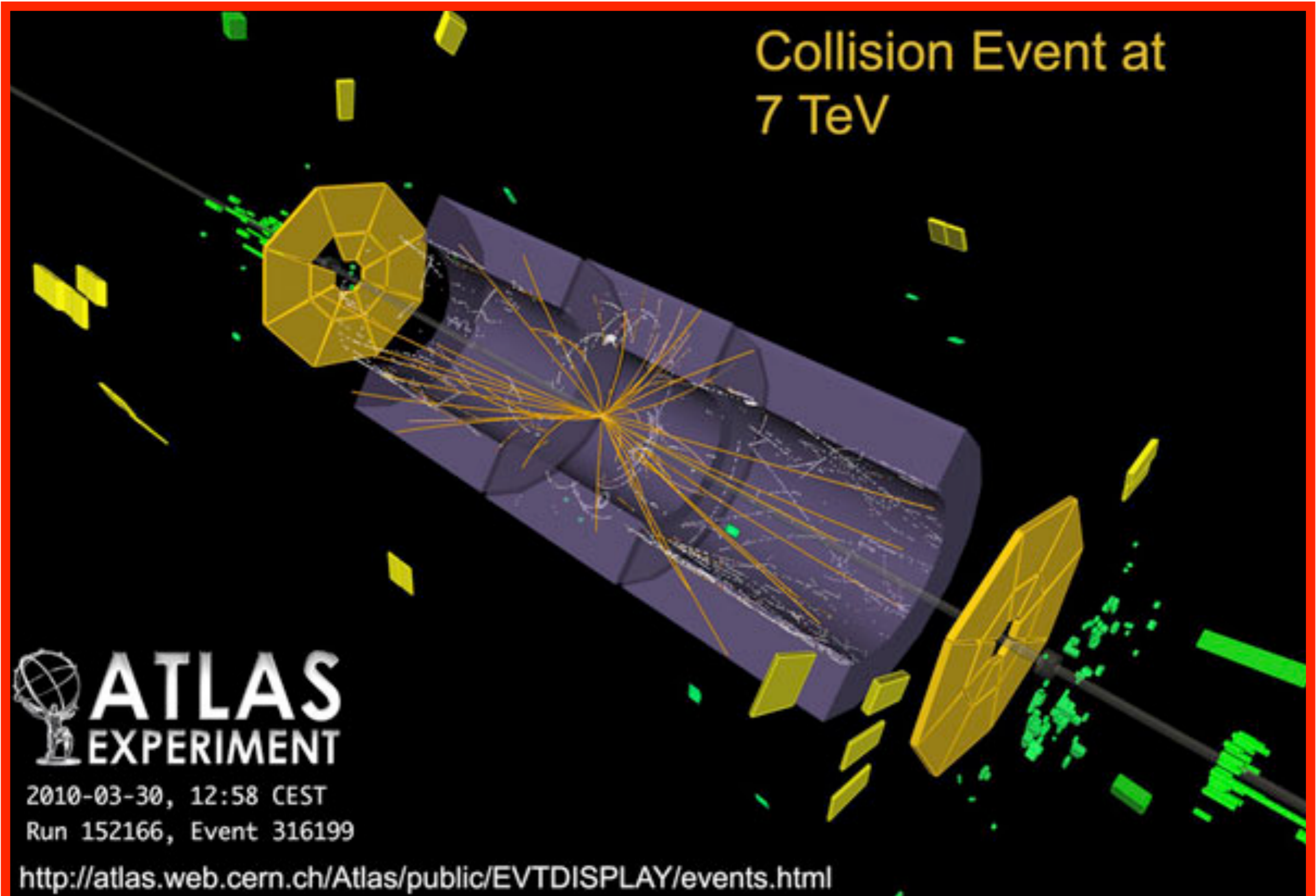


IceCube



Antares

# Collision Event at 7 TeV



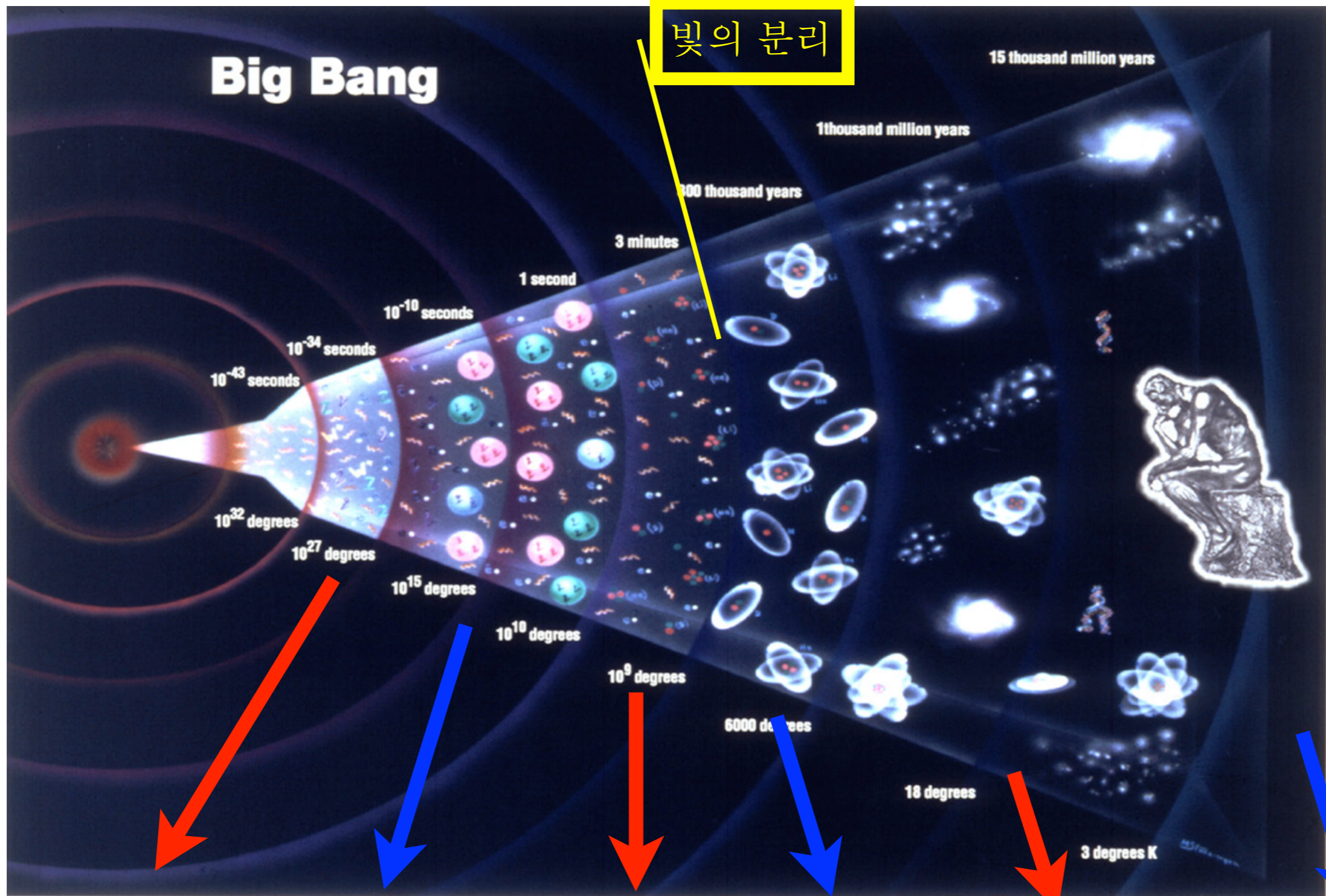
 **ATLAS**  
EXPERIMENT

2010-03-30, 12:58 CEST  
Run 152166, Event 316199

<http://atlas.web.cern.ch/Atlas/public/EVTDISPLAY/events.html>

• 우주 진화의 재구성 (빅뱅 모형)

: 우주배경복사



쿼크, 글루온,  
전자, 빛 등

양성자, 중성자,  
전자, 빛 플라즈마

원자핵의  
합성  
 $T \sim 10^{10} \text{ K}$

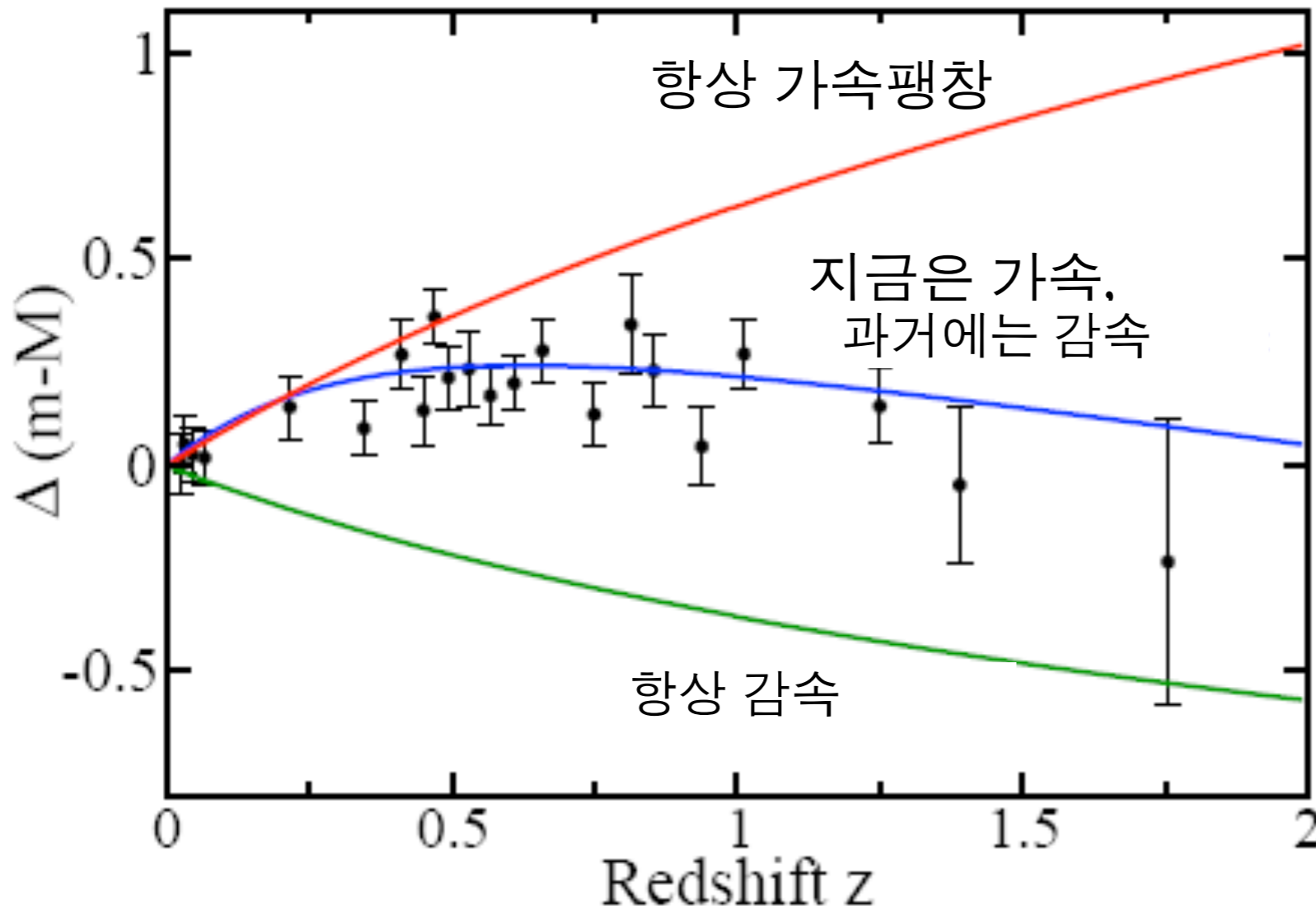
원자형성  
 $T \sim 4000 \text{ K}$

거대구조의 형성

현재  
 $T_{\gamma,0} \sim 2.725 \text{ K}$

• 가속 팽창하는 우주: 초신성 Ia

1998년, Perlmutter 그룹과 Riess 그룹은 멀리있는 초신성이 예상하던 것보다 희미하다는 것을 발견



우주가 더 빨리 팽창하고있다. 진공에너지(우주상수)를 도입하였을 때 아주 잘 설명할 수 있다.

우주상수의 부활

$$\frac{d^2 a}{dt^2} = -\frac{4\pi G\rho}{3}a + \frac{\Lambda}{3}a$$

deceleration

acceleration

[A. Riess et al, ap.J 607, 665 (2004)]

- Precision cosmology

Type Ia Supernovae

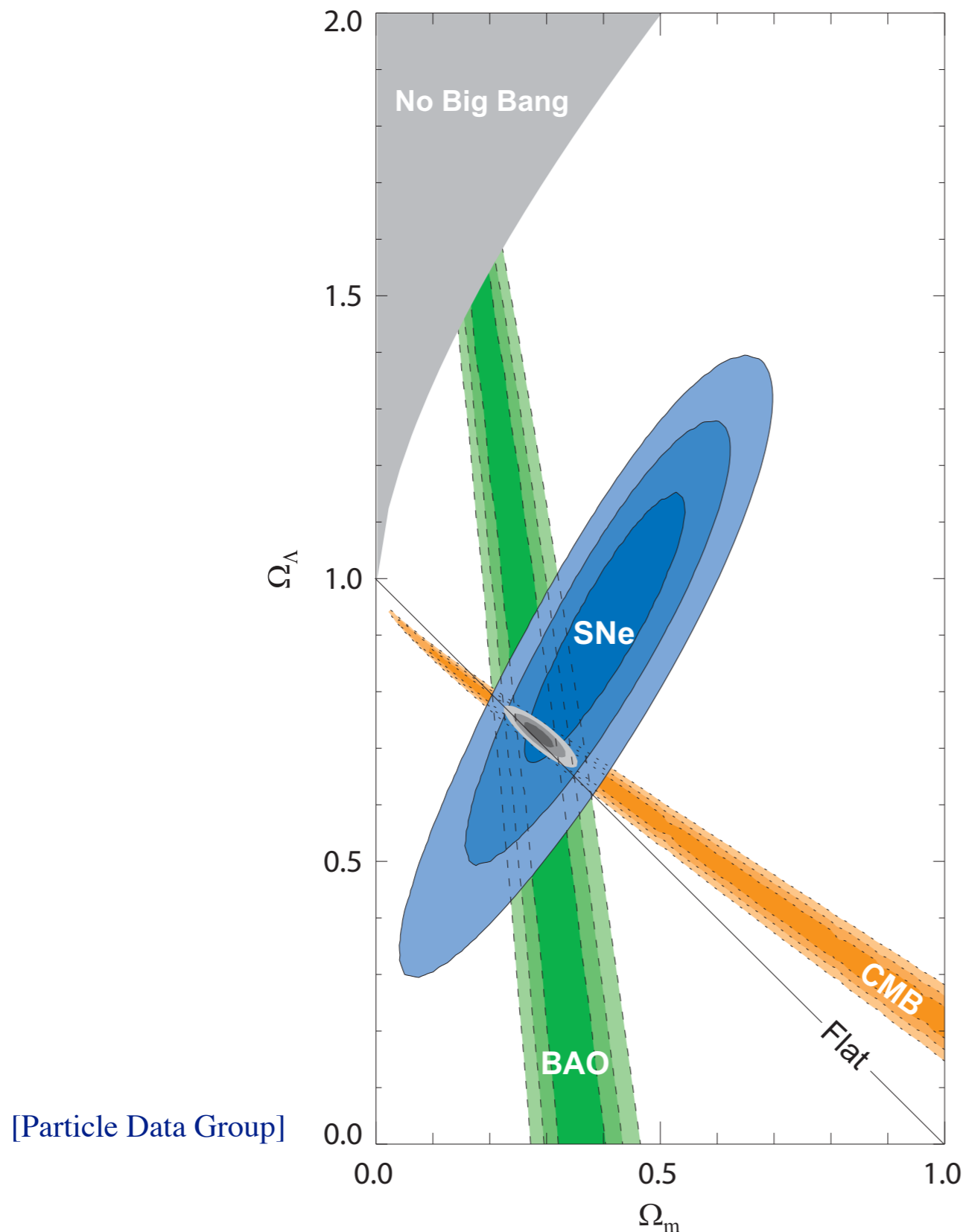
Galaxy clustering

Cosmic Microwave Background

$$\Omega_m + \Omega_\Lambda = 1.005 \pm 0.006$$

Flat Universe

with Dark Matter and Dark Energy



**Figure 21.1:** Confidence level contours of 68.3%, 95.4% and 99.7% in the  $\Omega_\Lambda$ - $\Omega_m$  plane from the Cosmic Microwave Background, Baryonic Acoustic Oscillations and the Union SNe Ia set, as well as their combination (assuming  $w = -1$ ). [Courtesy of Kowalski *et al.* [22]]

- Precision cosmology

Type Ia Supernovae

Galaxy clustering

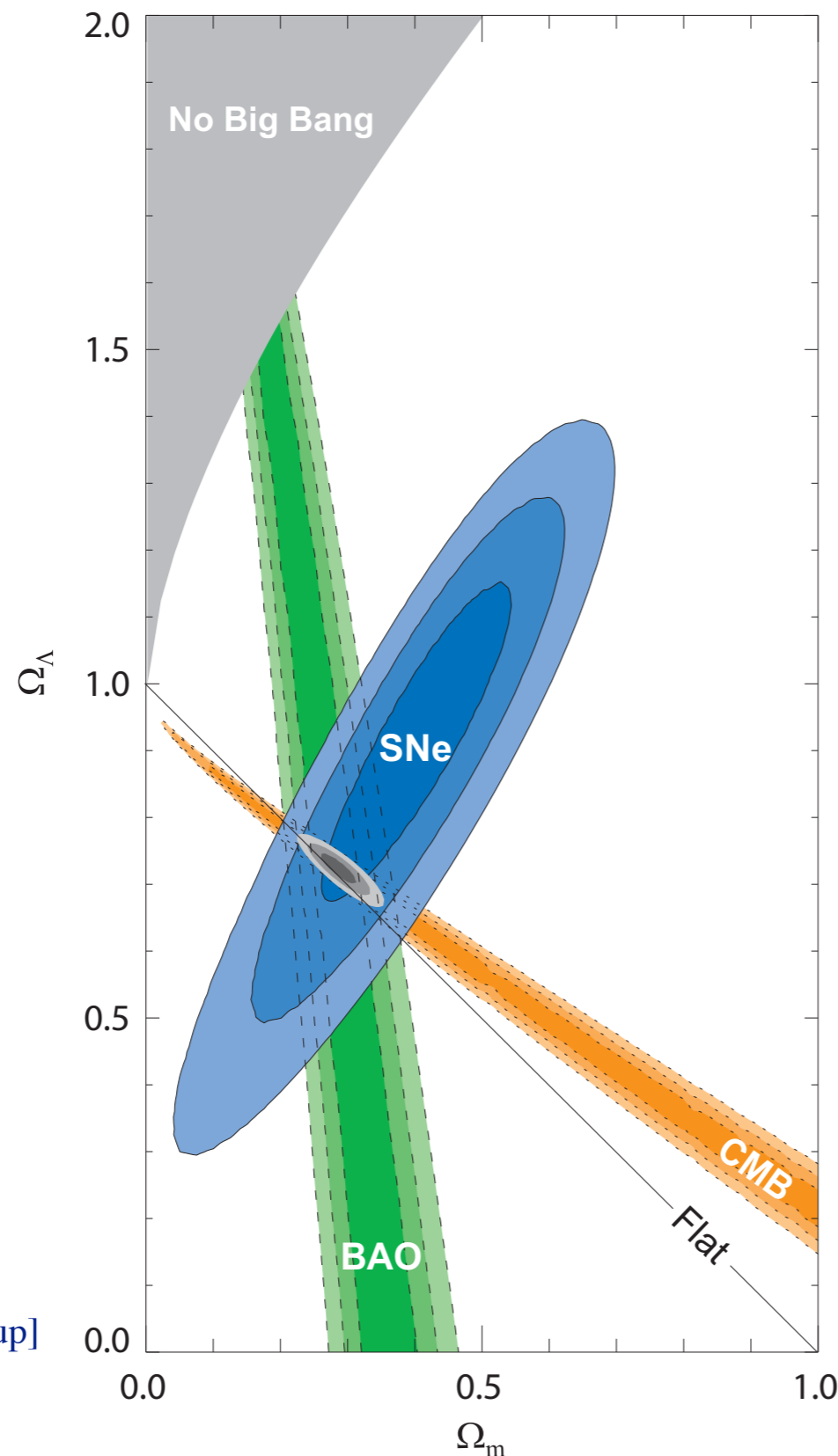
Cosmic Microwave Background

$$\Omega_m + \Omega_\Lambda = 1.005 \pm 0.006$$



**Flat Universe**

with Dark Matter and Dark Energy



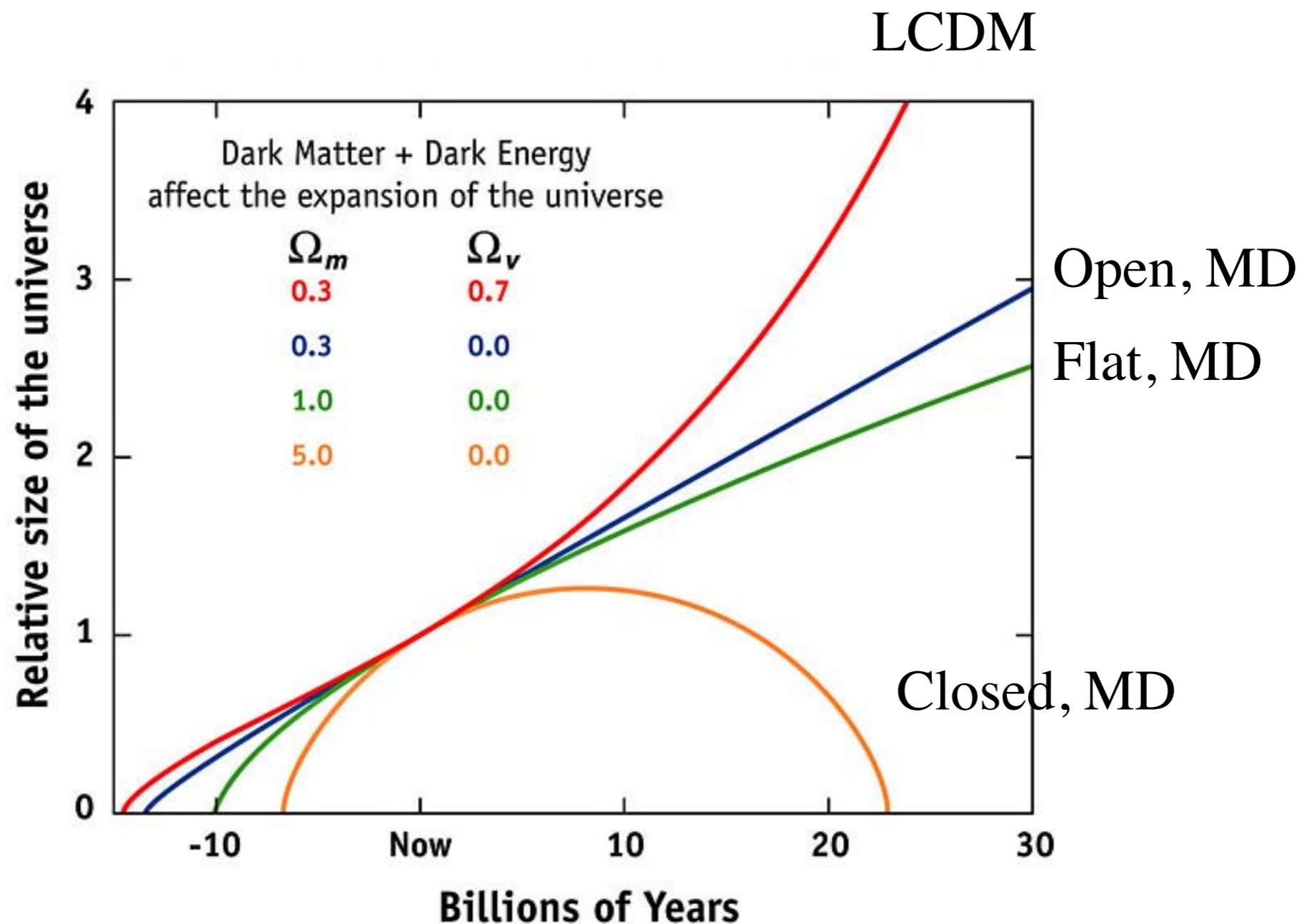
[Particle Data Group]

**Figure 21.1:** Confidence level contours of 68.3%, 95.4% and 99.7% in the  $\Omega_\Lambda$ - $\Omega_m$  plane from the Cosmic Microwave Background, Baryonic Acoustic Oscillations and the Union SNe Ia set, as well as their combination (assuming  $w = -1$ ). [Courtesy of Kowalski *et al.* [22]]

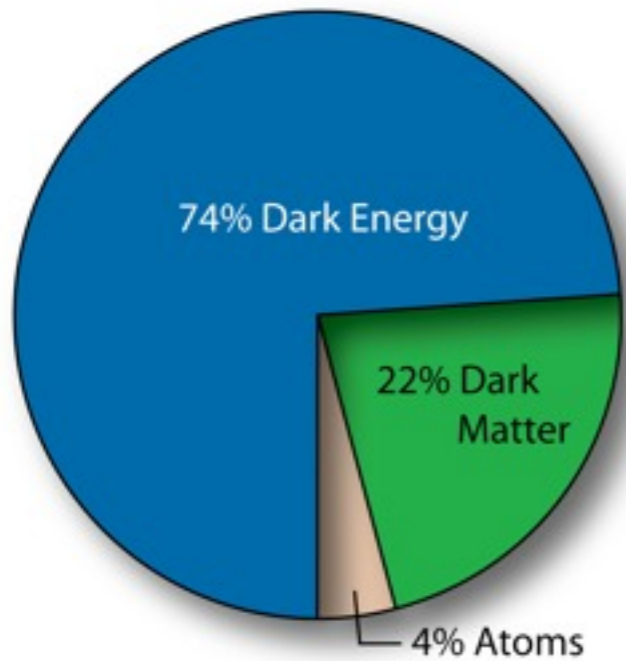
- Precise determination of the density parameters and Hubble parameter in the **LCDM cosmology** gives

$$t(z) = \int_0^{a(t)} \frac{da'}{\dot{a}'} = H_0^{-1} \int_0^{1/(1+z)} \frac{dx}{[1 - \Omega_0 + \Omega_m x^{-1} + \Omega_r x^{-2} + \Omega_\Lambda x^2]^{1/2}}$$

$$t_0 = 13.76 \pm 0.11 \text{ Gyr [WMAP 7 year]}$$



우주를 구성하는 물질?



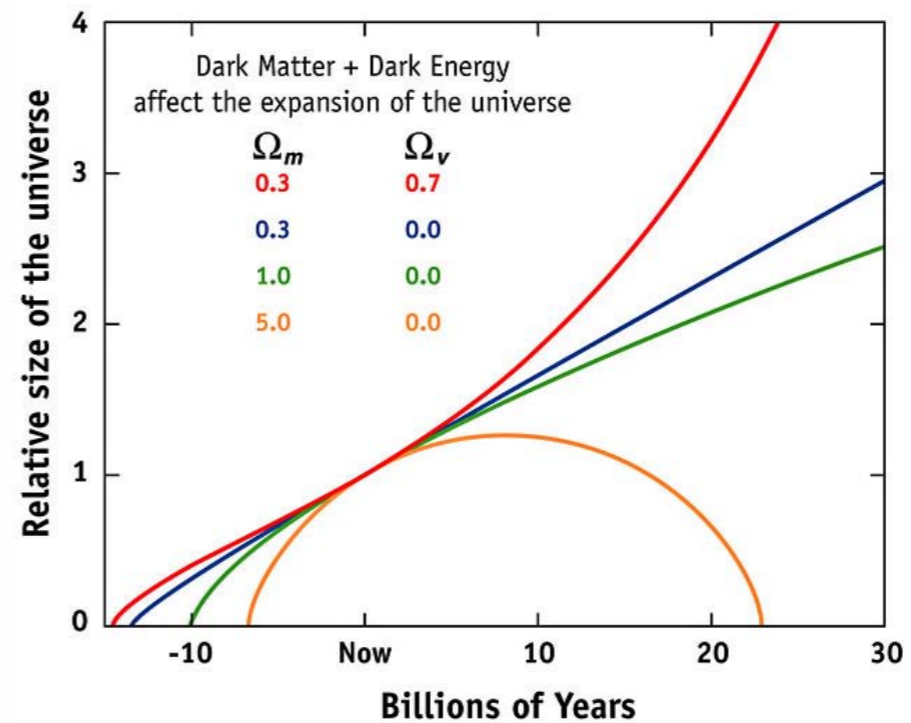
우리주변 우주의 모양?  
거의 평탄한 우주

우주론의 모형?  
simplest LCDM?

우주의 나이는?

138억년

미래의 궁극적인 운명?  
영원히 (가속)팽창



우주거대구조의 형성?  
작은 밀도 섭동의 중력 불안정

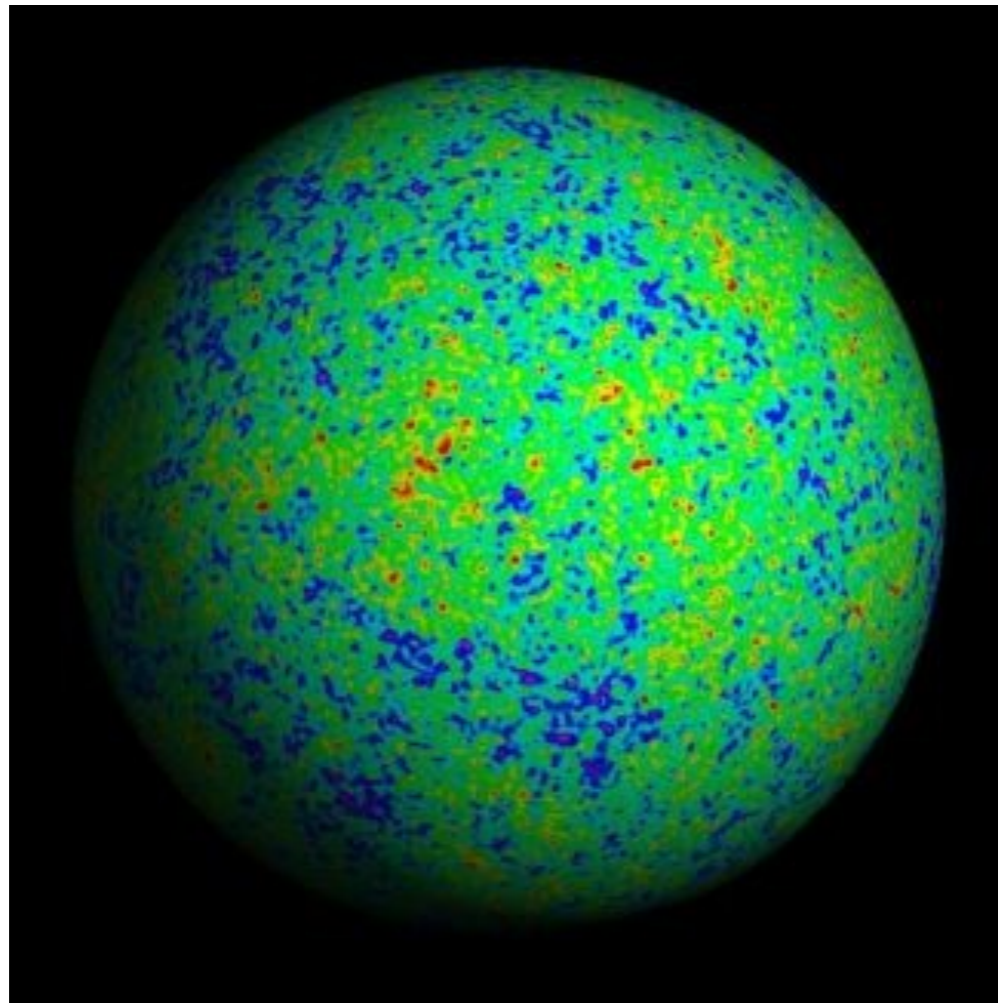
# 표준 모형의 문제점

- 균일성, 등방성 문제
- 평탄성 문제
- 물질-반물질의 차이 설명(Baryogenesis)
- 초기 섭동의 생성
- 암흑물질의 정체 규명
- 암흑에너지와 우주 가속팽창
- 우주거대구조의 형성

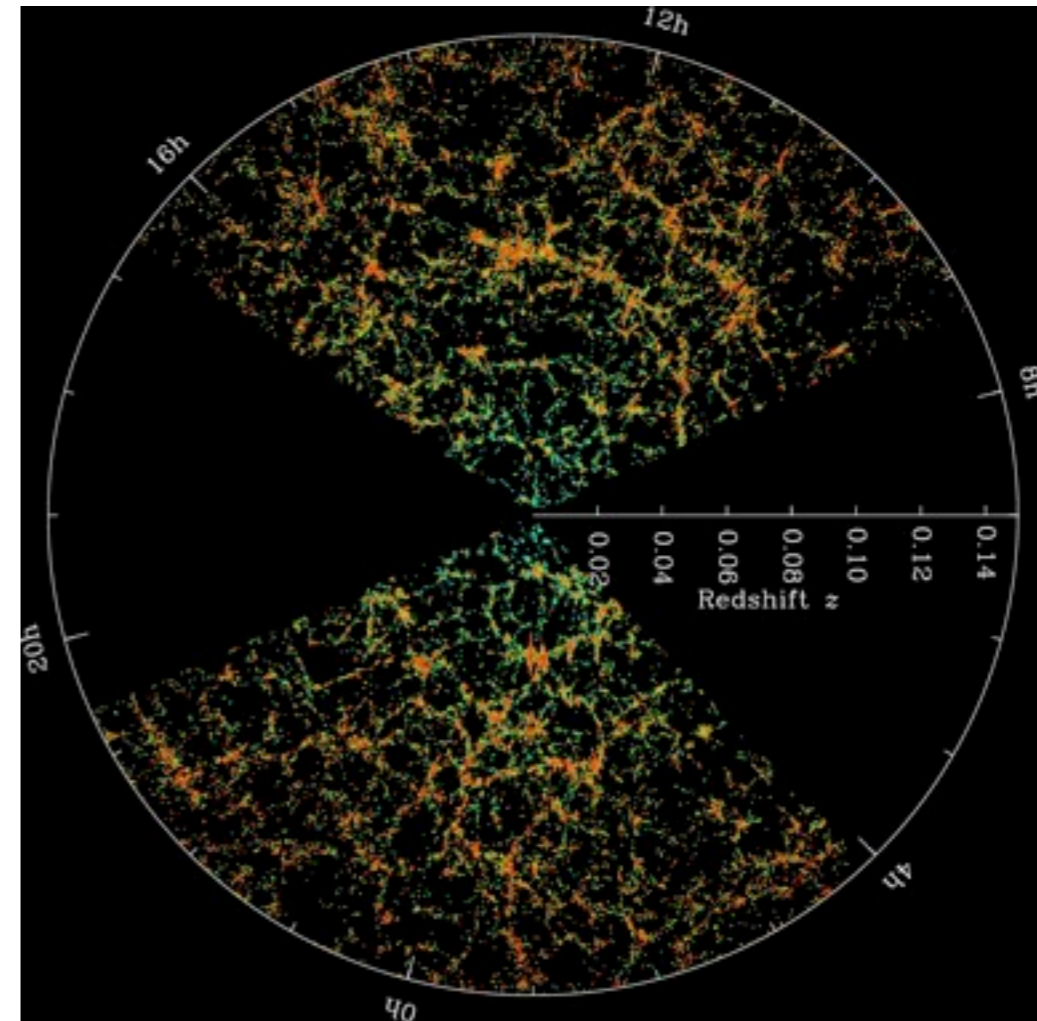
“우주초기에 밀도들이 균일하지 않고 아주 작은 정도의 차이(밀도요동)이 존재하여야 한다.”

인플레이션

우주배경 복사의 온도 분포



은하들의 분포



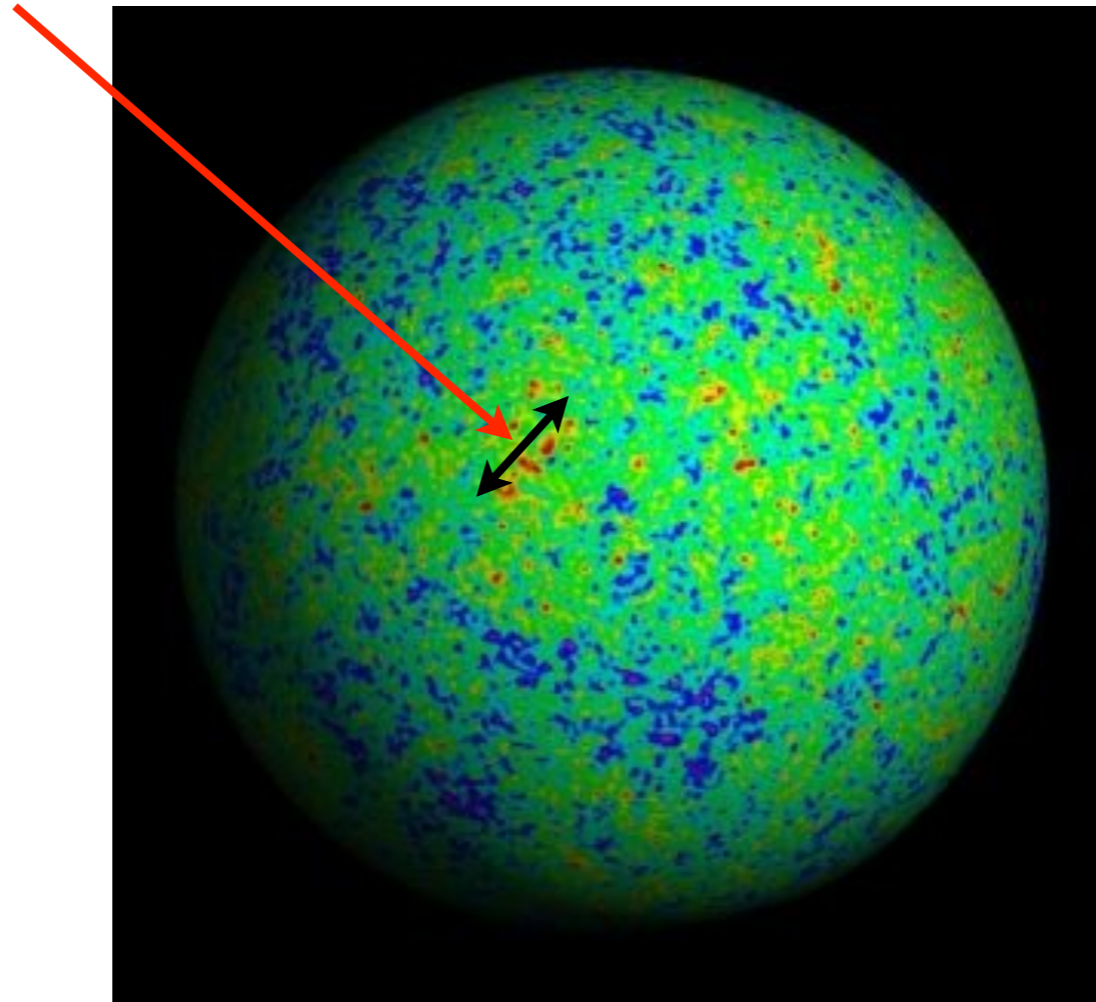
$l \gtrsim 10^2 \text{ Mpc}$  에서 우주는 거의 균일하고 등방적이다.

$$\frac{\delta\rho(t, \mathbf{x})}{\rho_0(t)} \sim \frac{\delta T(t, \mathbf{x})}{T_0(t)} \sim 10^{-5}$$

왜 이렇게 비슷한가?

## 지평선 문제 (the horizon problem)

horizon size at the time of last scattering

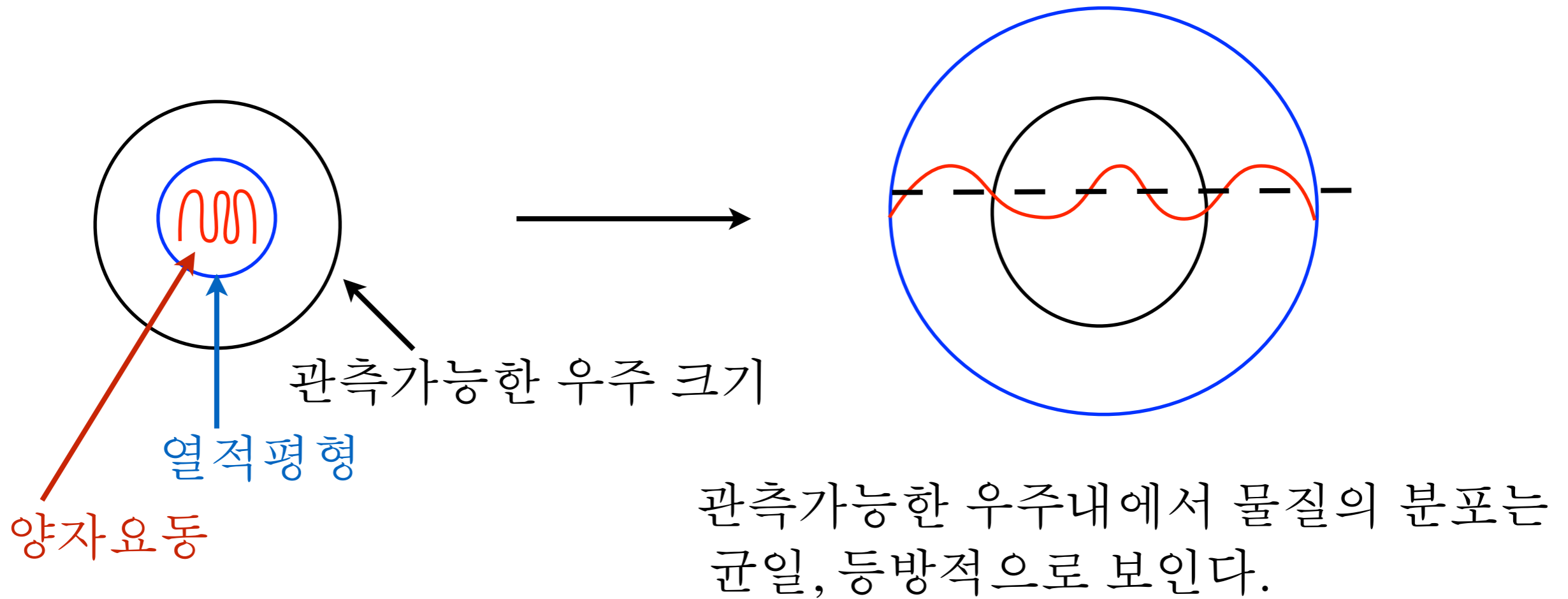


표준모형의 복사지배 또는 물질지배의 시대에서는 우주가 왜 그 정도로 균일하고 등방한지를 설명할 수 없다.

# 왜 인플레이션이 필요한가?

Flatness problem, horizon problem, Monopole problem, ...

우주의 급격한 팽창과 재가열에 의하여 위의 모든 것을 설명



하지만 양자요동에 해당하는 비균일한 분포가 존재한다.

아인슈타인 방정식  $G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$

시공간의 구조와 물질밀도를 연결시키는 방정식

인플레이션기간동안 인플라톤 입자의 양자요동은 시공간의 요동을 일으킨다. (스칼라, 텐서 요동)

Metric perturbation

$$ds^2 = (1 + 2\phi)dt^2 - a^2[(1 - 2\psi)\delta_{ij} - h_{ij}]dx^i dx^j$$

스칼라 요동

밀도 섭동

$$\delta\rho(t, \mathbf{x})$$

텐서 요동

traceless, transverse  $h^i_i = 0, h^i_{j,i} = 0,$

중력파 생성

- 온도섭동의 기원 : 스칼라요동

인플레이션

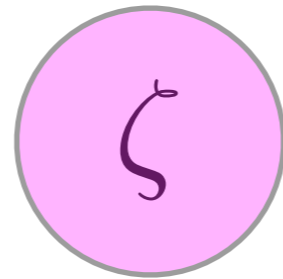
$$\delta\phi$$

인플라톤의 양자요동

$$\zeta = -\psi - H \frac{\delta\rho}{\dot{\rho}}$$

$$\delta\rho \simeq \frac{dV}{d\phi} \delta\phi$$

초기 우주



curvature perturbation  
: conserved if

$$p = p(\rho)$$

[Lyth, Malik, Sasaki, 2005]

우주배경복사

$$\frac{\Delta T}{T} \sim 10^{-5}$$

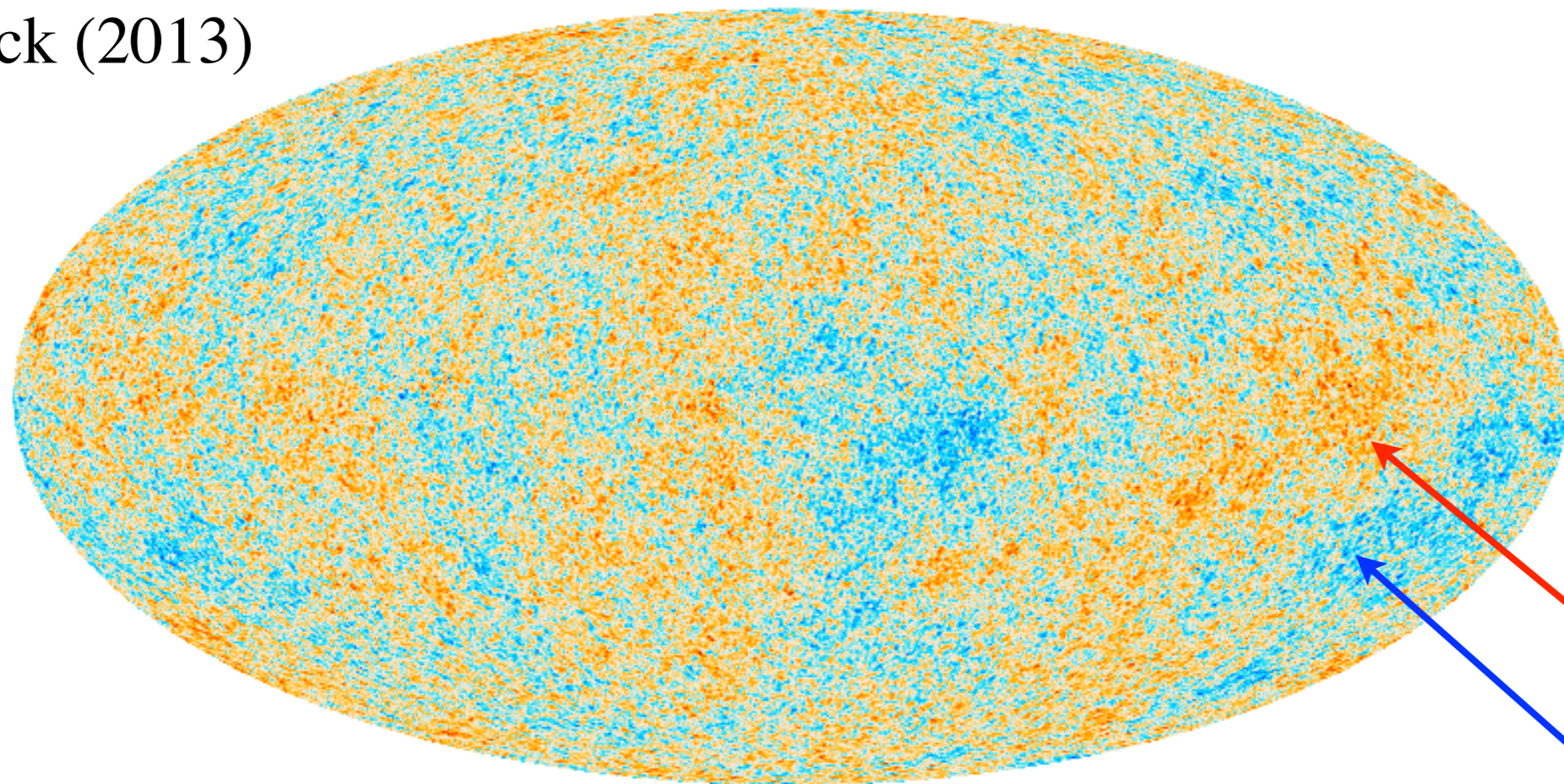
CMB의 비등방성

$$\frac{\Delta T}{T} = -\frac{1}{5}\zeta \quad (\text{SW limit})$$

$$\mathcal{P}_\zeta \simeq \left(\frac{\delta T}{T}\right)^2 \sim 2 \times 10^{-9}$$

- CMB 온도 비등방성

Planck (2013)



-500  $\mu K_{CMB}$  500  $\mu K_{CMB}$

$T_0 = 2.725K$

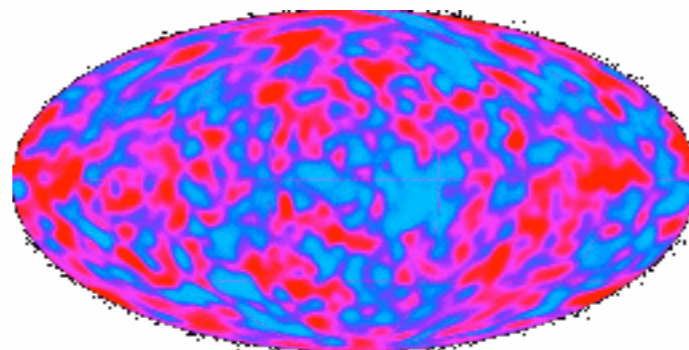
$T_0 + \mathcal{O}(10^{-5})K$

$T_0 - \mathcal{O}(10^{-5})K$

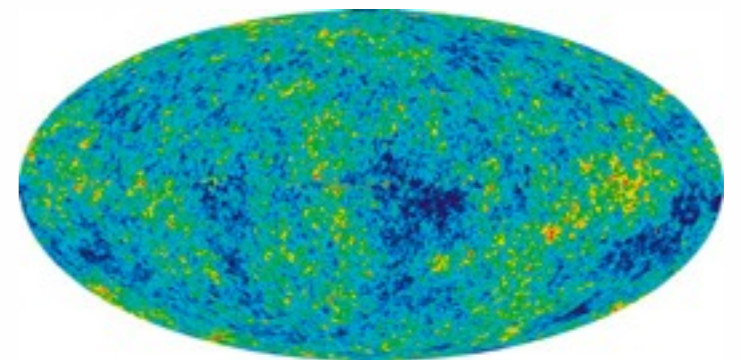
Penzias, Wilson (1965)



COBE (1992)



WMAP (2007)



- 온도섭동의 기원 : **텐서요동**

인플레이션

$$h_{ij} \sim H$$

텐서요동

traceless, transverse

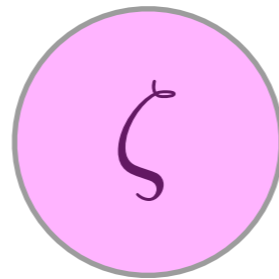
$$h_i^i = 0, \quad h_{j,i}^i = 0,$$

초기 우주



우주배경복사

$$\mathcal{P}_T = 8 \left( \frac{H_*}{2\pi} \right)^2$$



curvature perturbation  
: conserved

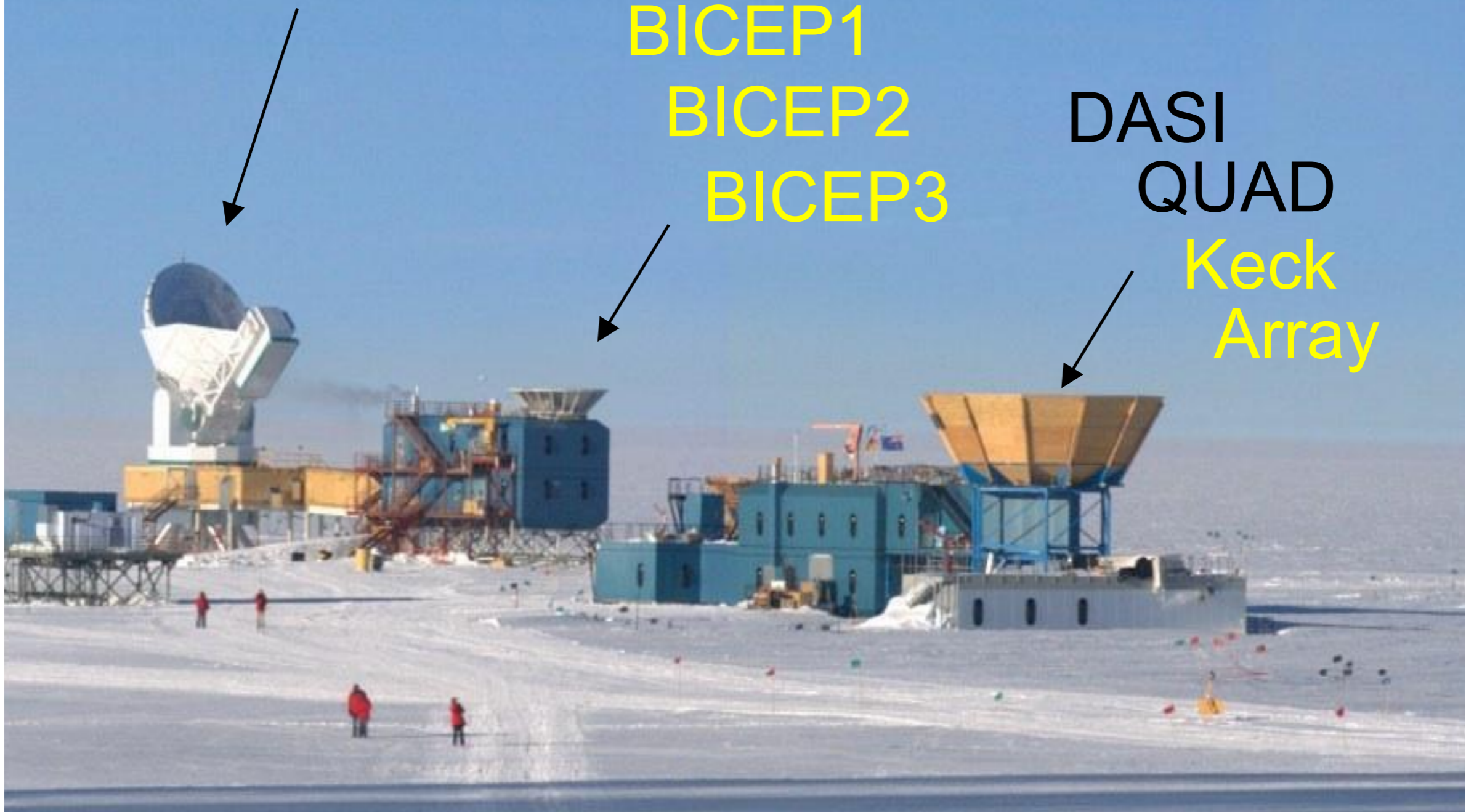
Tensor-to-scalar ratio

$$r \equiv \frac{\mathcal{P}_T}{\mathcal{P}_\zeta}$$

# 10m South Pole Telescope

BICEP1  
BICEP2  
BICEP3

DASI  
QUAD  
Keck  
Array



# BICEP2 : 텐서요동의 발견 ???

