

Modelo Padrão da Cosmologia

Felipe Tovar Falciano

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas – CBPF



Escola Parque – Abril de 2018

O Que é Cosmologia

- Estudo do universo em larga escala através das ciências naturais
- É possível o ser humano, limitado, entender a totalidade?
- Qual a noção de modelo cosmológico ?

Interações Fundamentais da Natureza

Eletromagnetismo

Gravitação

Força Fraca

Força Forte

longo alcance

curto alcance

$$\frac{F_e}{F_g} \approx 10^{-42}$$

elétrons

- Observação X Experimentação
- Observamos apenas fótons
- Extrapolação das leis Físicas

História da Cosmologia Relativística

- Formulação da Teoria da Relatividade Geral (1915)
- Einstein formula o 1º modelo cosmológico (1917)
- Friedmann propõe um universo dinâmico (1921)
- Hubble mede o afastamento das galáxias próximas (1927)
- Penzias e Wilson medem a radiação cósmica de fundo (1965)
- Satélite COBE mede as propriedades da RCF (1989)
- Telescópio Hubble mede a expansão H_0 (1990)
- Experimentos em SNIa medem a aceleração do Universo (1998)
- Satélite WMAP mede as anisotropias da RCF (2003)
- Satélite Planck confirma o cenário do MPC (2015)

História da Cosmologia Relativística

Quadro Geral

- Homogêneo e isotrópico > 200 Mpc
- Existe a pelo menos 13,7 bilhões de anos
- Em expansão; passado quente e denso
- 3 fases: **radiação** / poeira / energia escura

- Elementos leves:

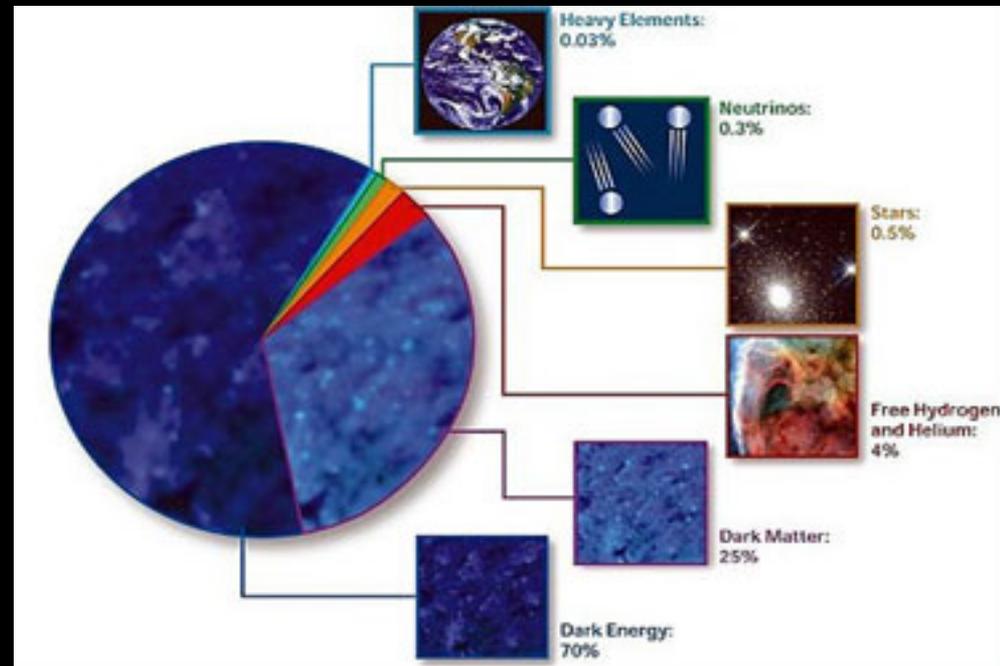
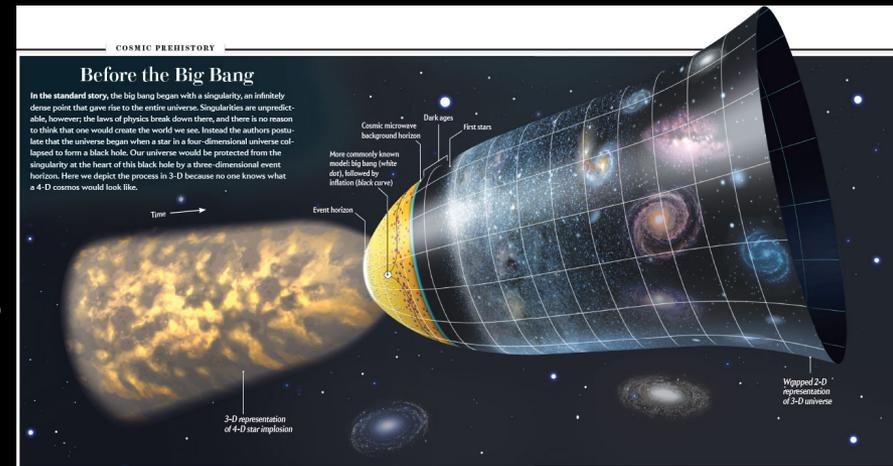
75% hidrogênio e 25% hélio

- Composição:

74% energia escura

22% matéria escura

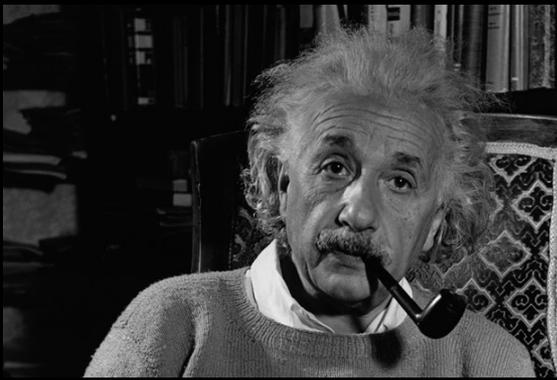
4% matéria bariônica,



História da Cosmologia Relativística

Modelo de Einstein

- Universo é estático
- Universo é homogêneo e isotrópico
- Espaço com geometria de uma esfera
- Espaço finito mas sem borda
- Constante cosmológica -



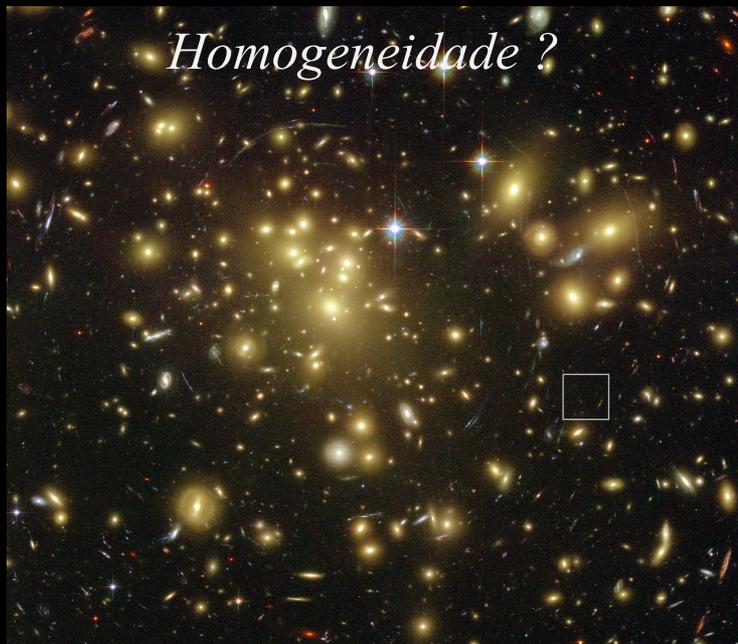
Albert Einstein



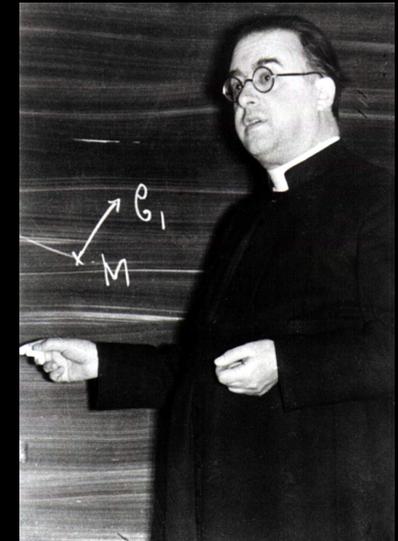
História da Cosmologia Relativística

Modelo de Friedmann – Lemaître

- O Universo é homogêneo e isotrópico
- Tempo global (superfície de simultaneidade)
- Universo está se expandindo

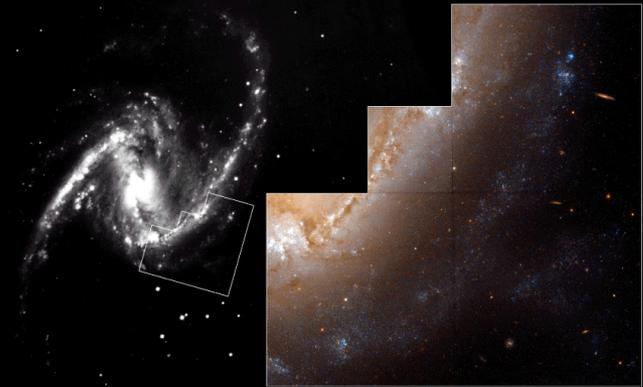


*Alexander
Friedmann*



George Lemaître

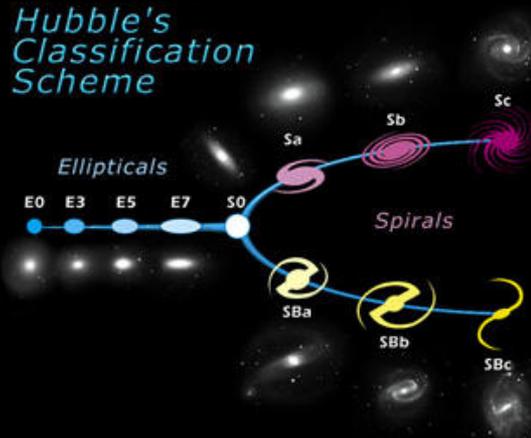
Estructuras Cosmológicas



Galaxy NGC1365

HST · WFPC2

PRC96-21a · ST ScI OPO · May 9, 1996 · W. Freedman (Carnegie Institution of Washington) and NASA

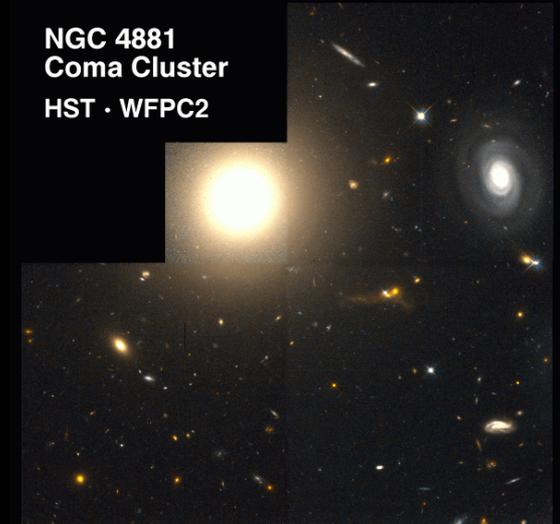


NGC4013_Spiral_Galaxy.

M51_Spiral_whirlpool_galaxy



NGC 4881
Coma Cluster
HST · WFPC2



PF95-07 · ST ScI OPO · January 1995 · W. Baum (U.WA), NASA

1/27/95 zgl

Estructuras Cosmológicas



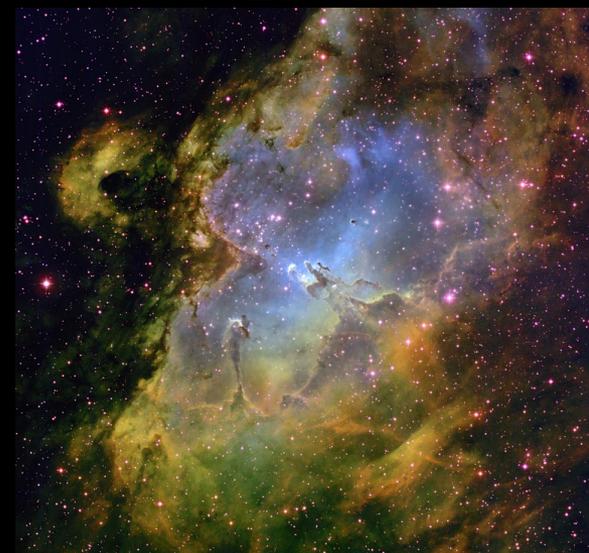
Trifid_HubbleGendler_960



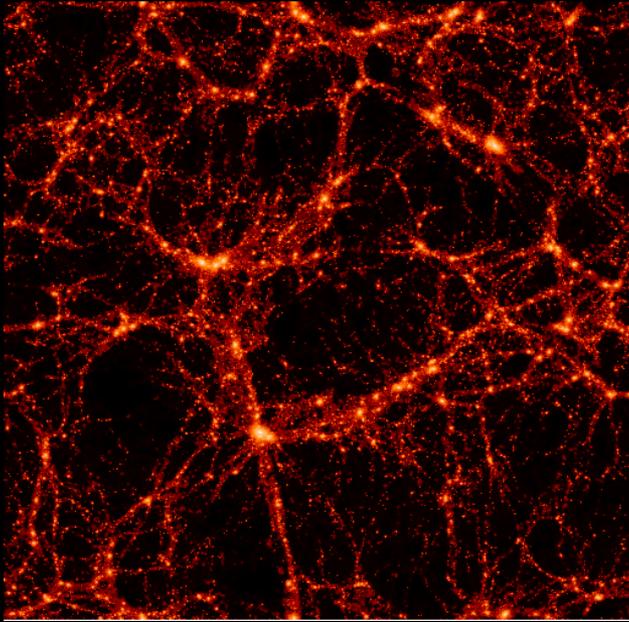
ngc2237_400_Rosette Nebula



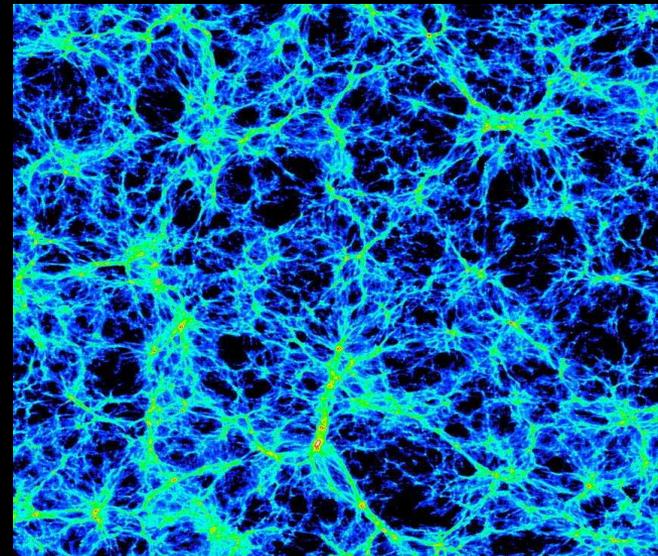
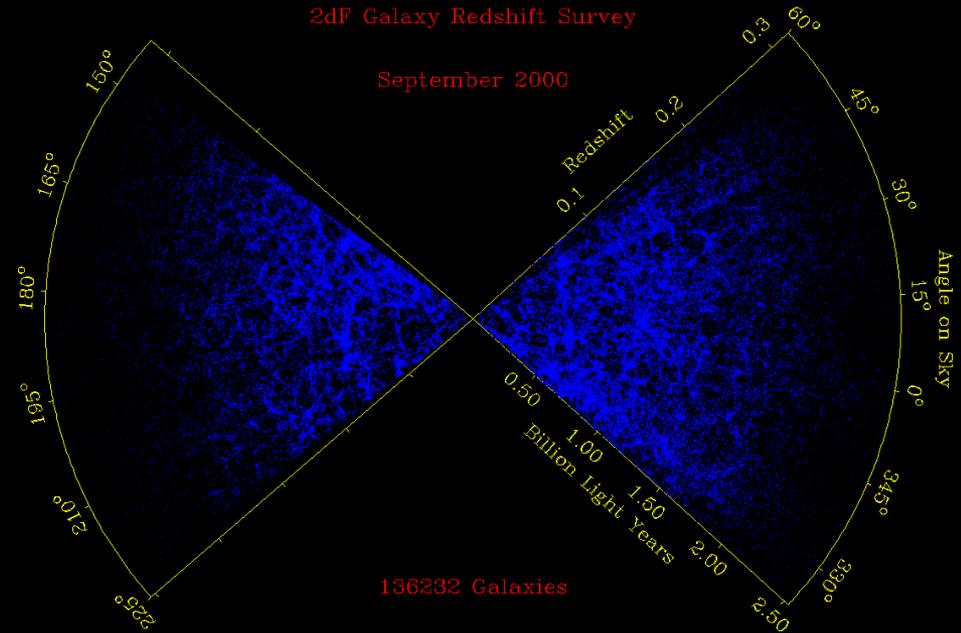
eagle_kp09_960



Estruturas Cosmológicas

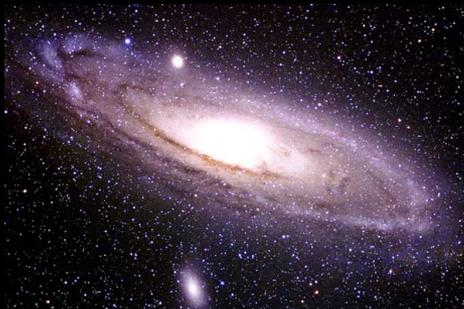


Computer simulation by a group of scientists known as the Virgo Consortium



A 200 Mpc simulation of the dark matter structure in the universe (credit: Suwendra Dutta)

Homogeneidade?

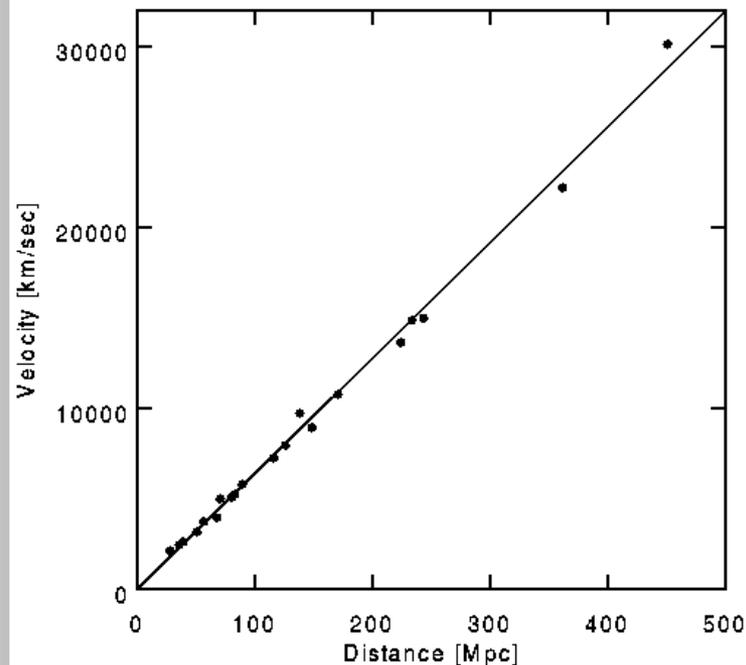


História da Cosmologia Relativística

Modelo de Friedmann – Lemaître

- O Universo é homogêneo e isotrópico
- Tempo global (superfície de simultaneidade)
- Universo está se expandindo

Afastamento das galáxias



In retrospect, Hubble's law is not that difficult to understand once we have adopted the



Edwin Hubble



História da Cosmologia Relativística

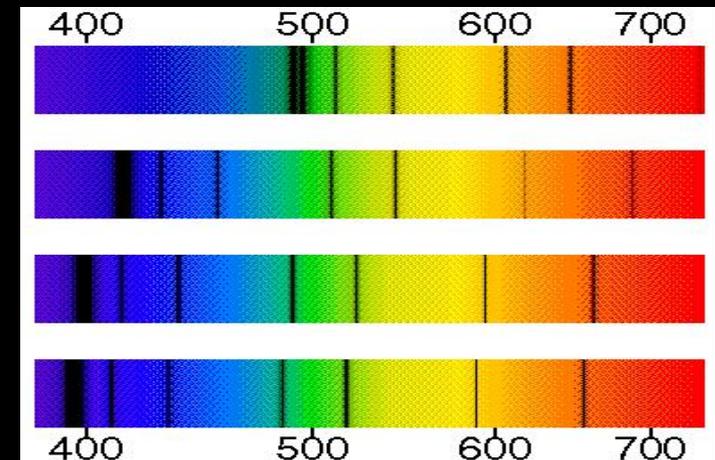
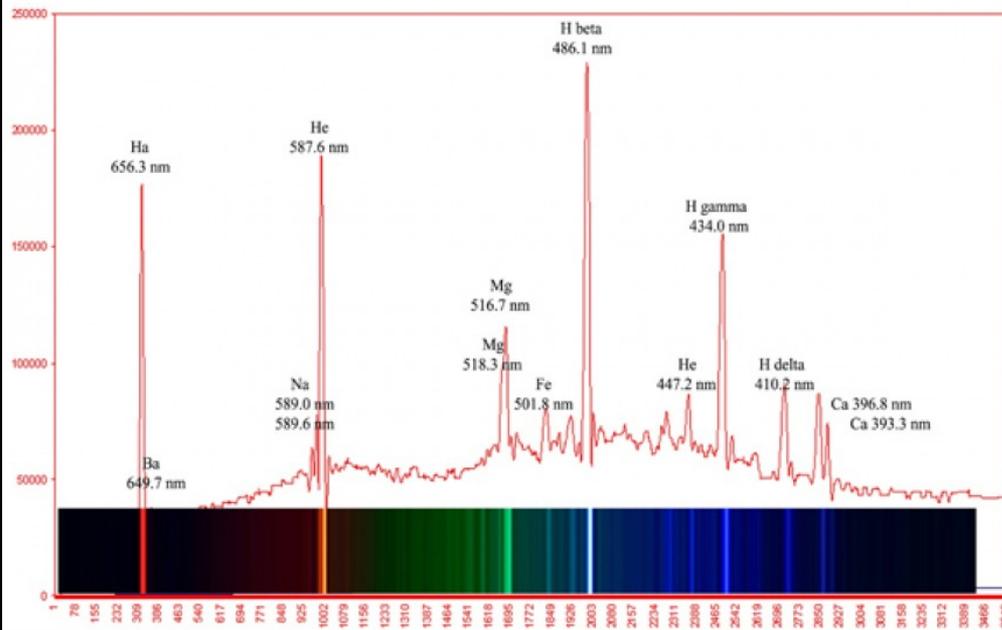
Modelo de Friedmann – Lemaître

- O Universo é homogêneo e isotrópico
- Tempo global (superfície de simultaneidade)
- Universo está se expandindo

Desvio para o vermelho



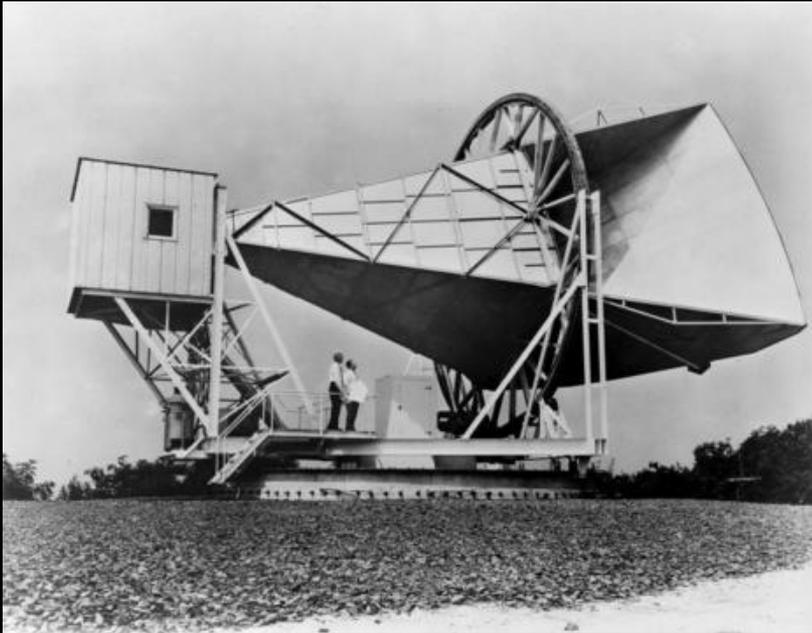
The Solar Chromosphere Spectrum (Flash Spectrum)



História da Cosmologia Relativística

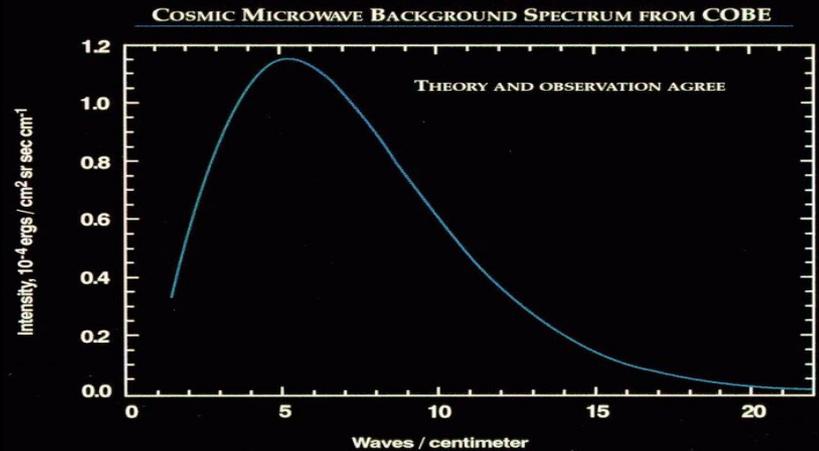
Radiação Cósmica de Fundo (1965)

- O Universo é permeado por radiação eletromagnética
- Temperatura atual de 2.73 °K



Penzias & Wilson (1965)

Espectro de corpo negro

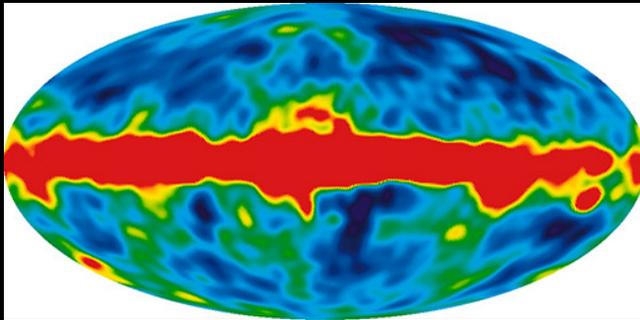


História da Cosmologia Relativística

Radiação Cósmica de Fundo

(*Relikt-1* – 1983 / *COBE* - 1989)

- Pequenas anisotropias na radiação eletromagnética
- Temperatura atual de 2.73 °K



Variação de
temperature de
 ± 100
microkelvin



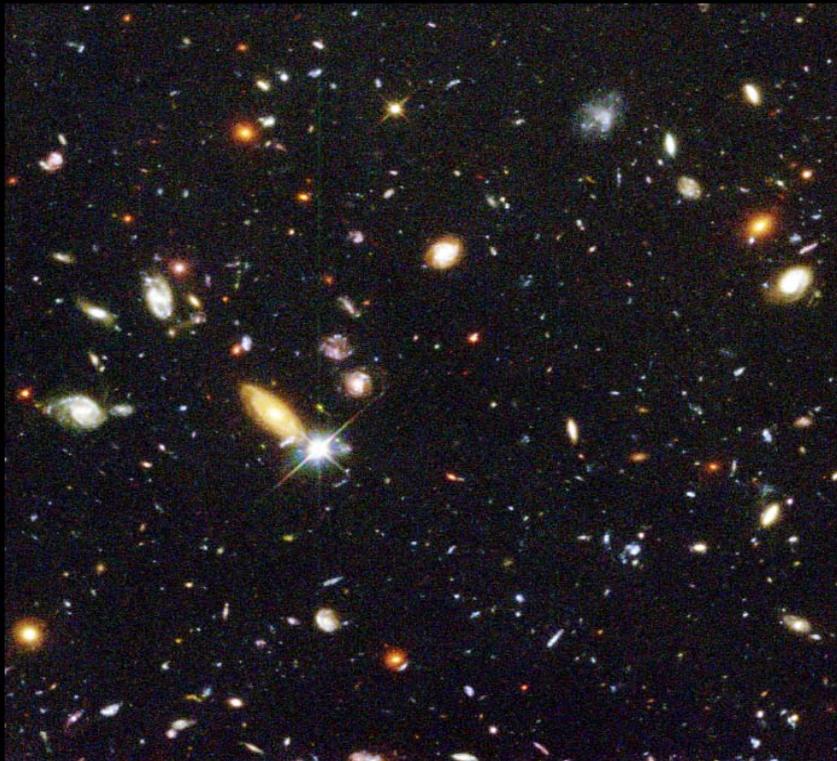
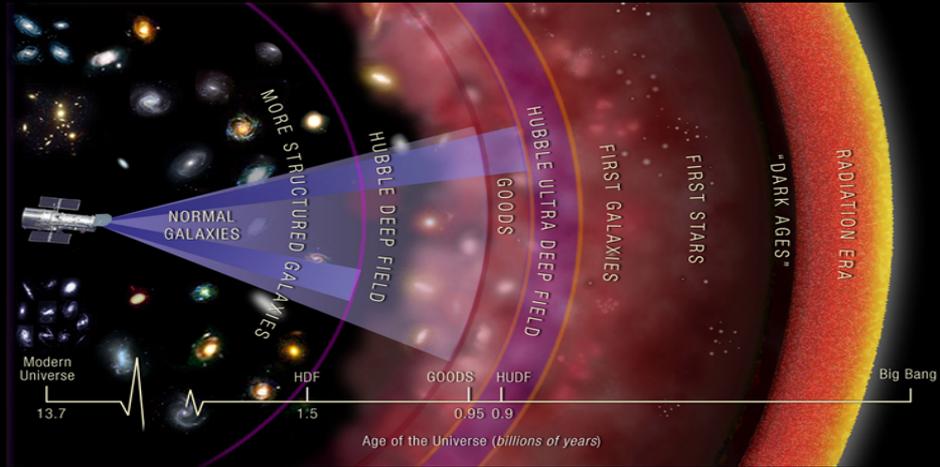
“Dr Mather, Professor Smoot: Cosmology has become a precision science and your ground-breaking research laid the foundation for that. With your carefully calibrated instruments you have shown the cosmic microwave background radiation to follow very precisely a blackbody form. The in-depth analysis of the radiometer data has shown the presence of the long sought small temperature anisotropies, the seed of the structures in the Universe that we observe today.”

(Per Carlson – discurso de entrega *Nobel de física 2006*)

História da Cosmologia Relativística

Satélite Hubble (1990)

- Medidas de H_0
- Reforçou o termo Cosmologia de Precisão



Hubble Deep Field

HST • WFPC2

PRC96-01a • ST ScI OPO • January 15, 1996 • R. Williams (ST ScI), NASA



Hubble Ultra Deep Field
Hubble Space Telescope • Advanced Camera for Surveys

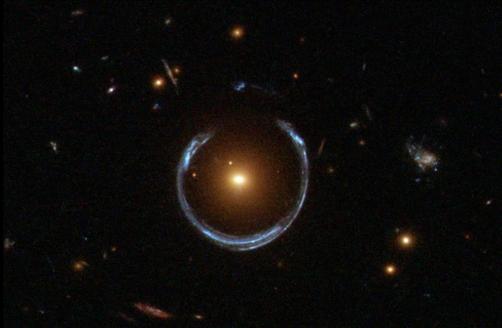
NASA, ESA, S. Beckwith (STScI) and the HUDF Team

STScI-PRC04-07a

História da Cosmologia Relativística

Satélite Hubble (1990)

- Medidas de H_0
- Reforçou o termo Cosmologia de Precisão



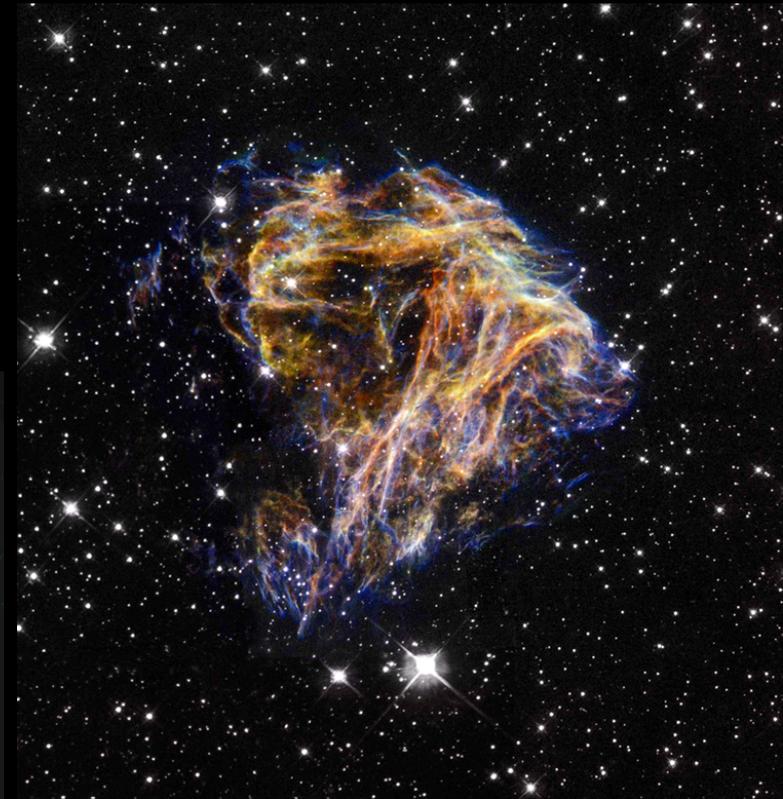
A_Horseshoe
Einstein_Ring



Two Spiral
Galaxies



Calabash Nebula

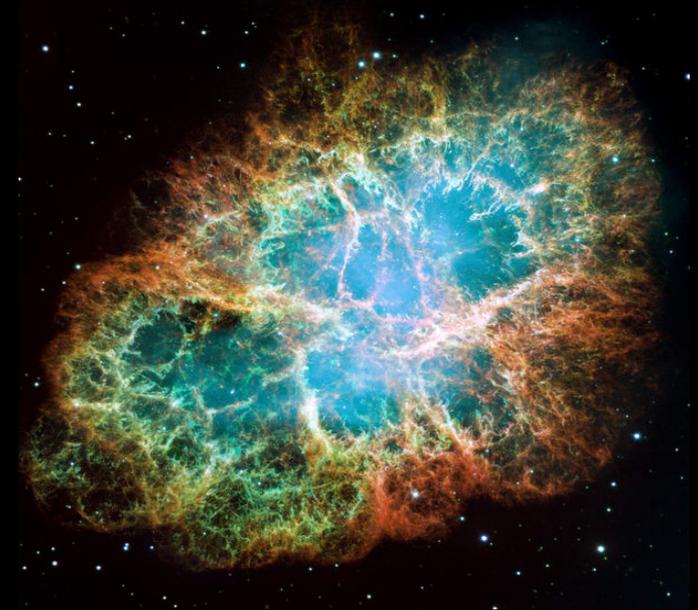
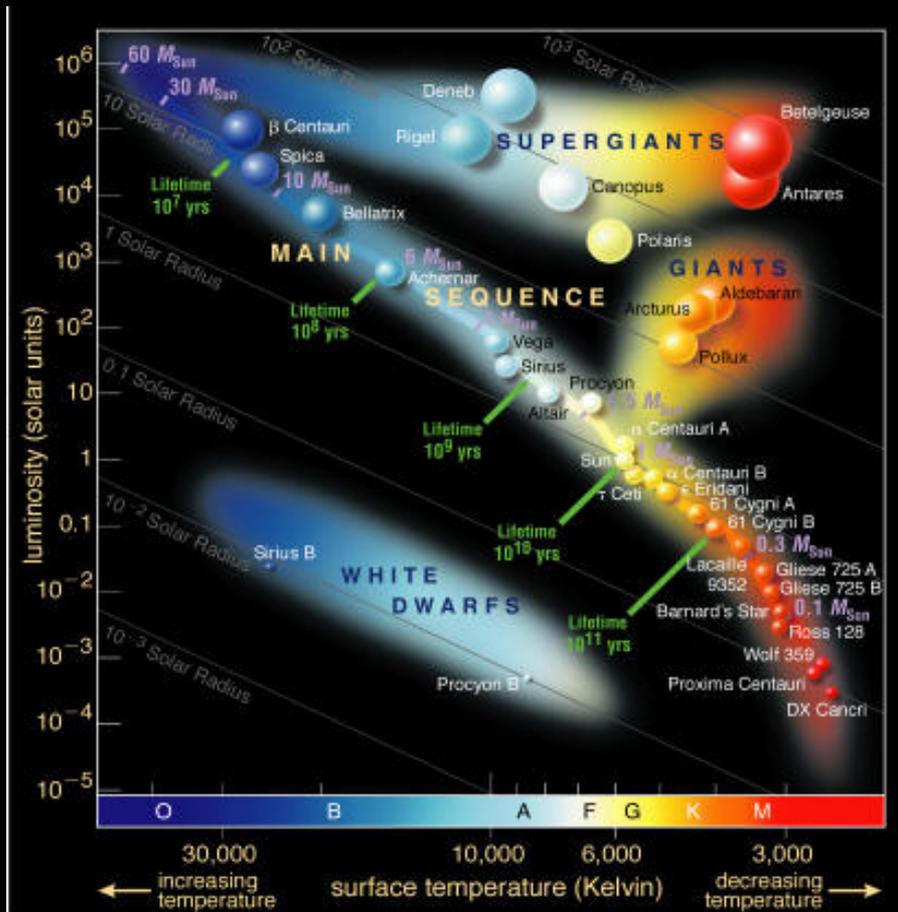


Gas and dust surround a neutron star, after a supernova explosion. Decades before, this star gave off a tremendous gamma ray burst measured by numerous satellites.

História da Cosmologia Relativística

Medidas de SNIa (1998)

- O que é uma Supernova



Crab nebulae

História da Cosmologia Relativística

Medidas de SNIa (1998)

- Aceleração do Universo



Super Novae 1987A



SN1987A Remanescente



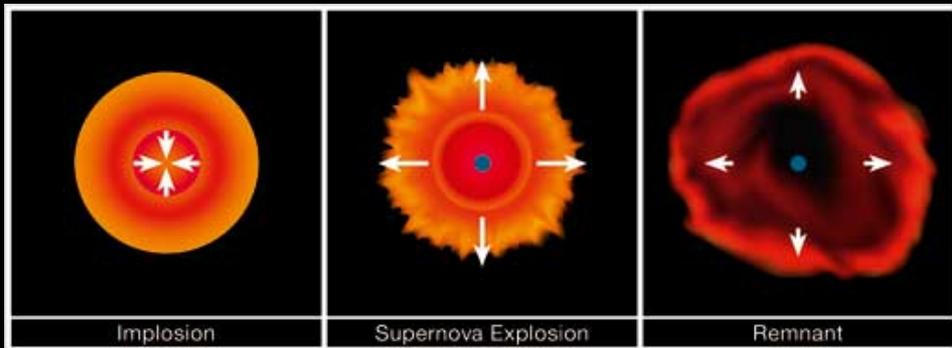
- *Tipo I- não tem linhas de hidrogênio*
 - Tipo Ic - não tem silício nem hélio*
 - Tipo Ib - não tem silício; tem hélio não ionizado*
 - Tipo Ia - tem silício ionizado*
- *Tipo II - tem linhas de hidrogênio*

História da Cosmologia Relativística

Medidas de SNIa (1998)

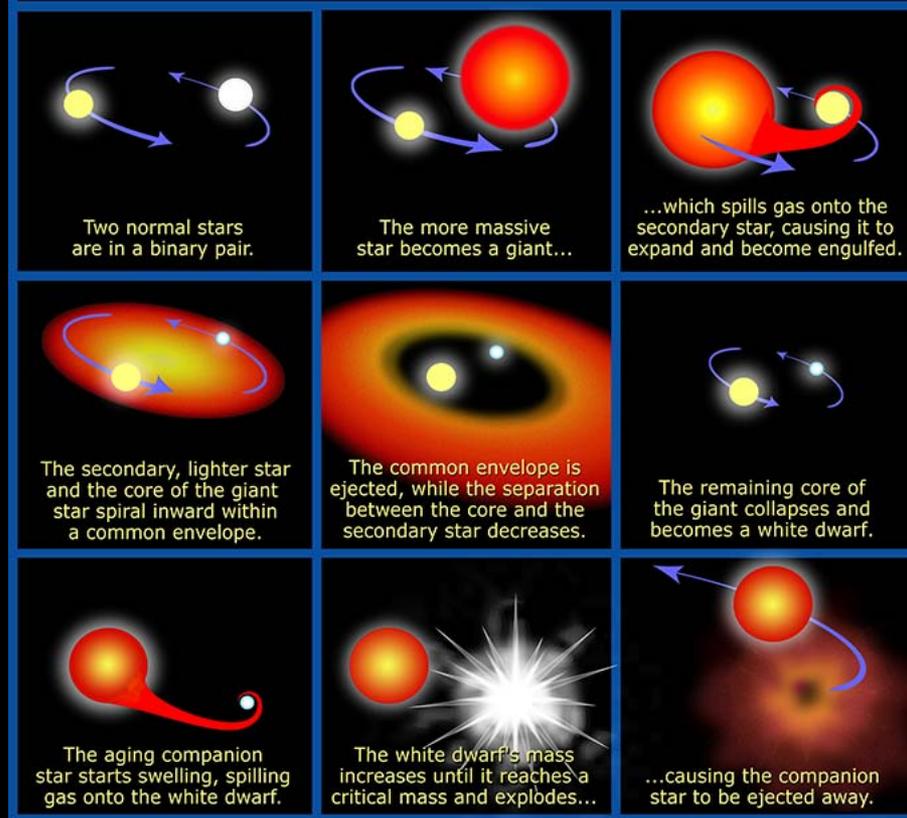
Progenitores das Supernovas

Supernova Tipo II



Supernova Tipo I

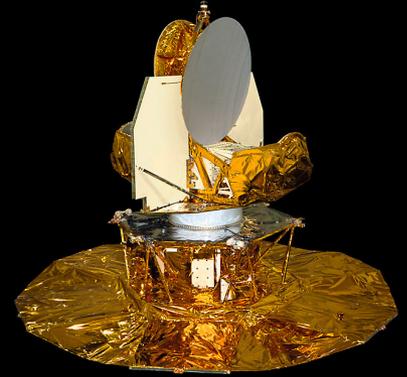
The progenitor of a Type Ia supernova



História da Cosmologia Relativística

Satélite WMAP (2003)

- Medidas de H_0
- Colocou o precisão no termo Cosmologia de Precisão



Página oficial do WMAP:

“The WMAP science team has [...] put the ‘precision’ in ‘precision cosmology’ by reducing the allowed volume of cosmological parameters by a factor *in excess of 68.000.*”

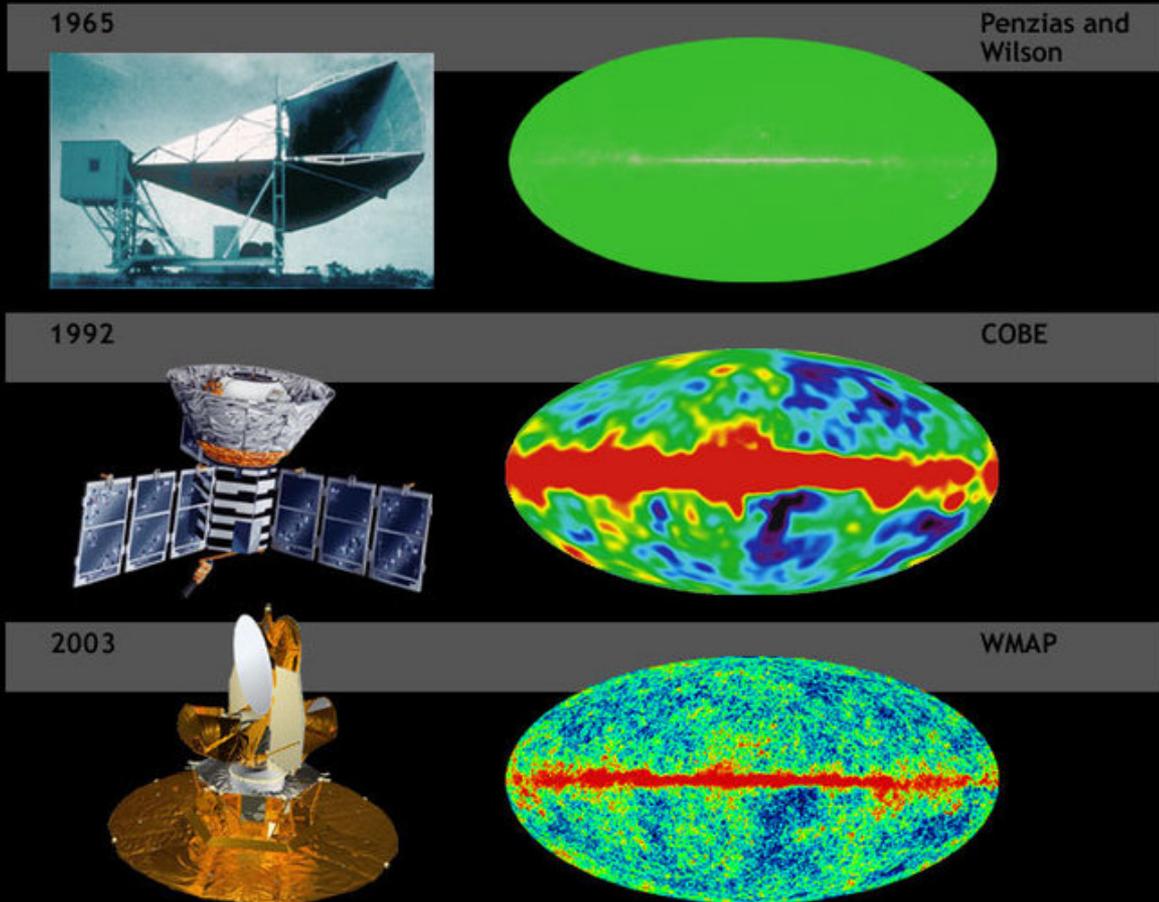
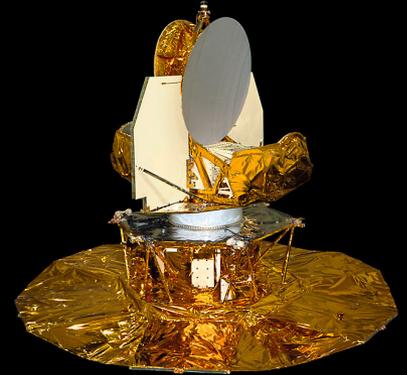
9-Year WMAP Observations: Cosmological Parameter Results

“Measurements of temperature and polarization anisotropy in the cosmic microwave background (CMB) have played a major role in establishing and sharpening the standard “ Λ CDM” model of cosmology: a six-parameter model based on a flat universe, dominated by a cosmological constant, Λ , and cold dark matter (CDM), with initial Gaussian, adiabatic fluctuations seeded by inflation.” (WMAP COLLABORATION, 2013)

História da Cosmologia Relativística

Satélite WMAP (2003)

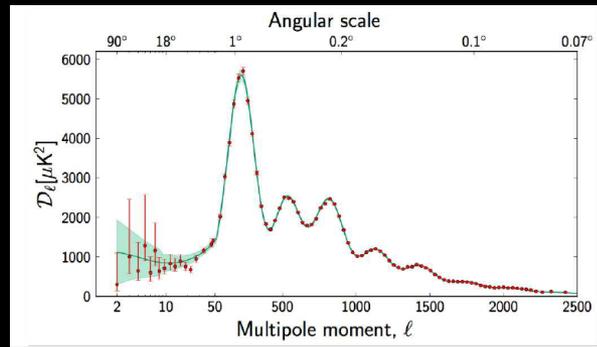
- Medidas de H_0
- Colocou o precisão no termo Cosmologia de Precisão



História da Cosmologia Relativística

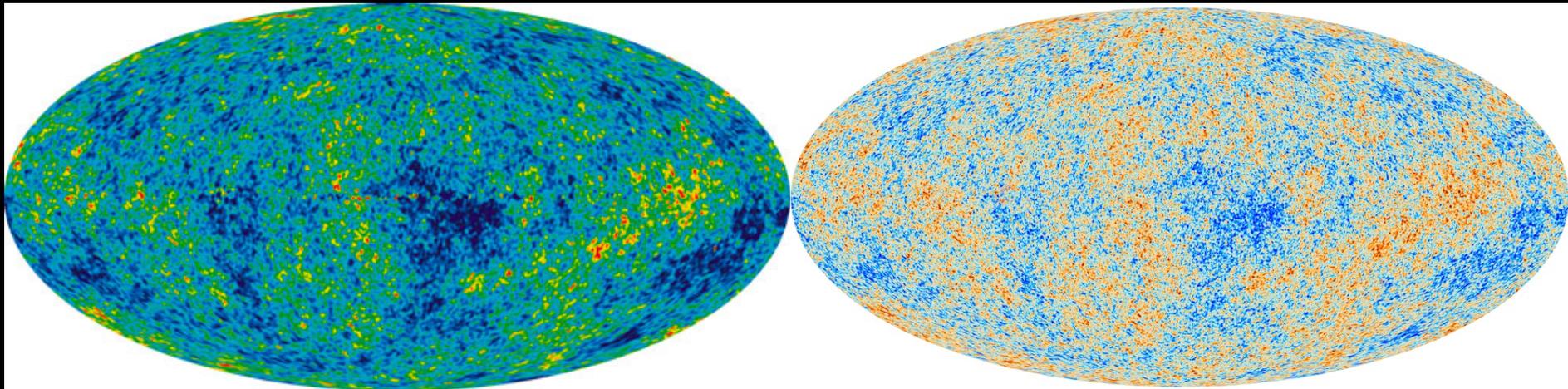
Satélite Planck (2015)

- comprovação do Modelo Padrão da Cosmologia
- anisotropias na CMB



WMAP

Planck



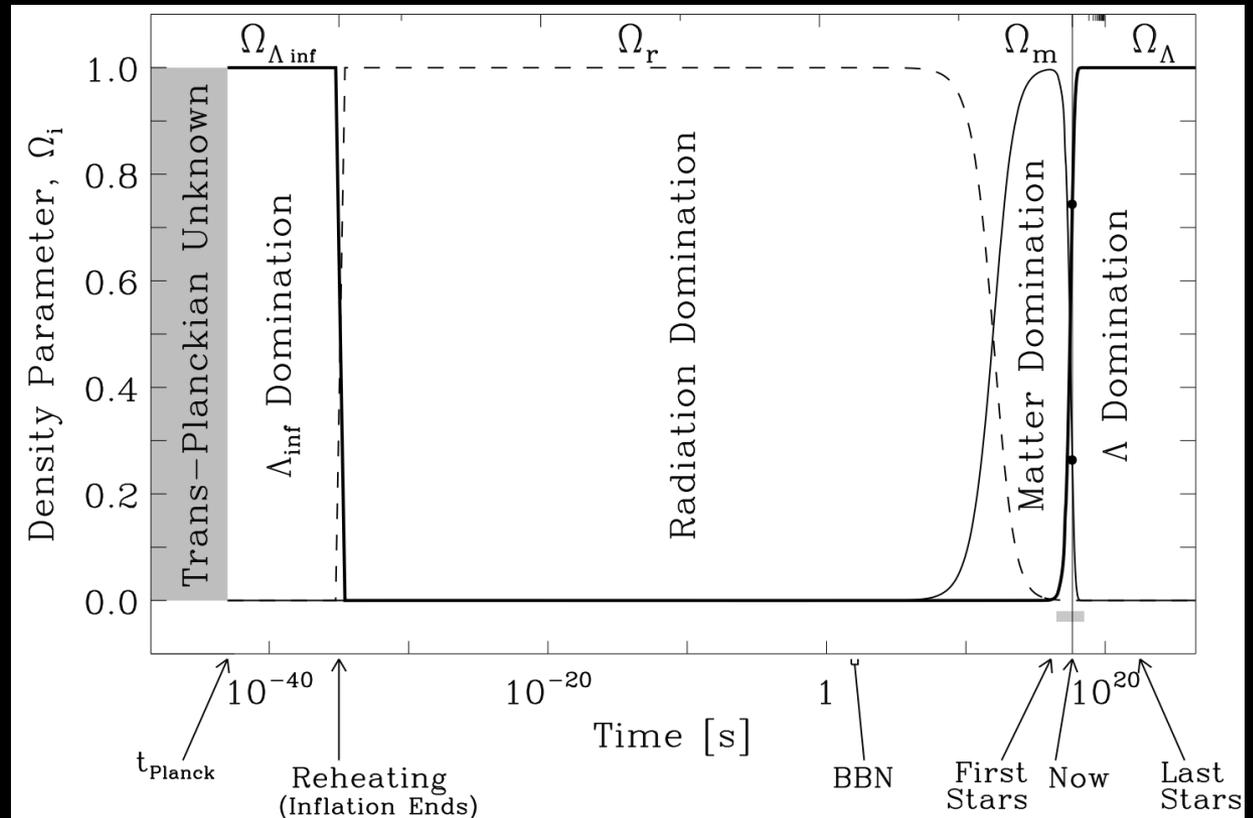
História da Cosmologia Relativística

Energia Escura

Evidências:

✓ Evolução cósmica recente

- Problema da coincidência cósmica
- Idade do Universo
- Valor de H_0



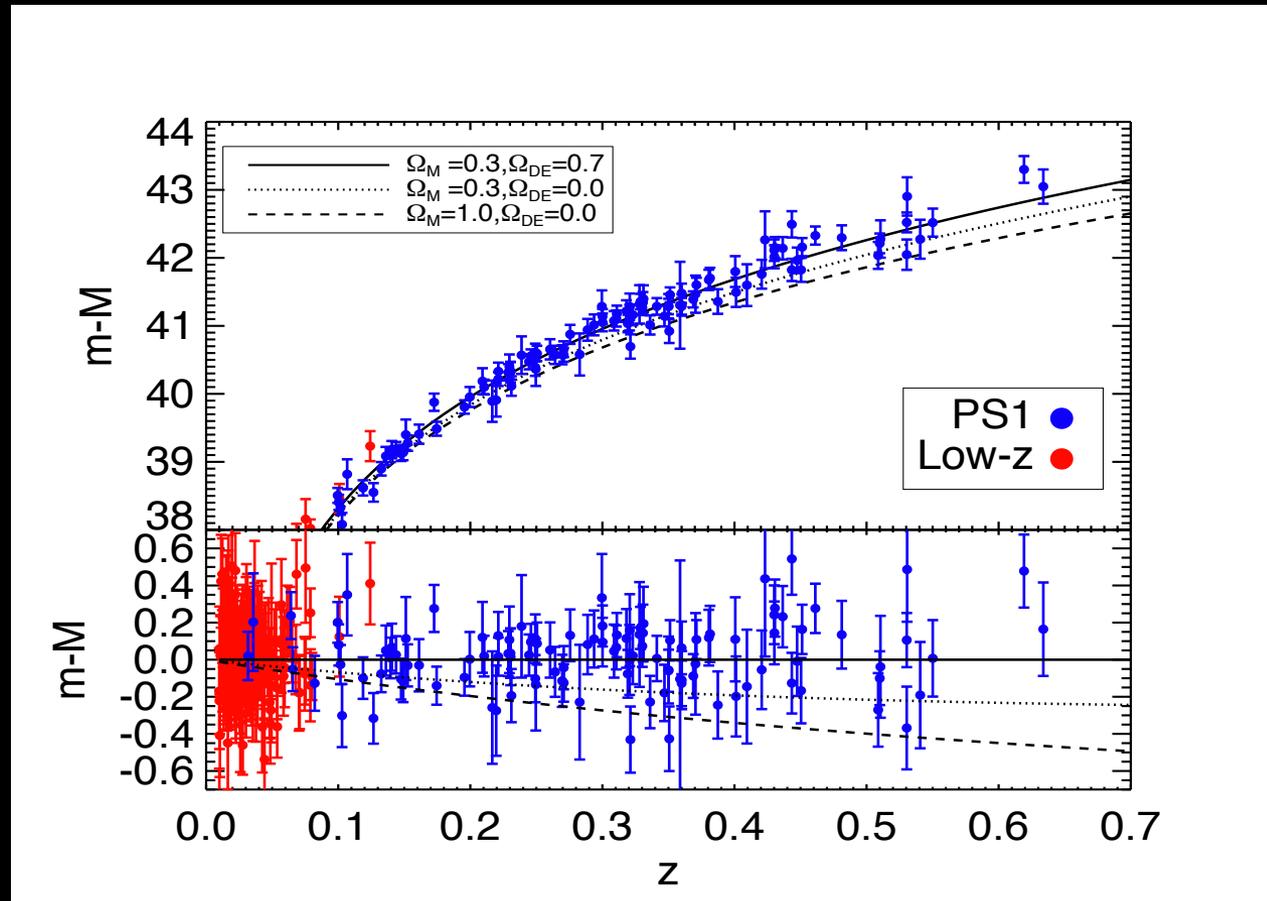
História da Cosmologia Relativística

Energia Escura

Evidências:

- ✓ Evolução cósmica recente
- ✓ Distância luminosidade

- Distância luminosidade
Dados de SNIa



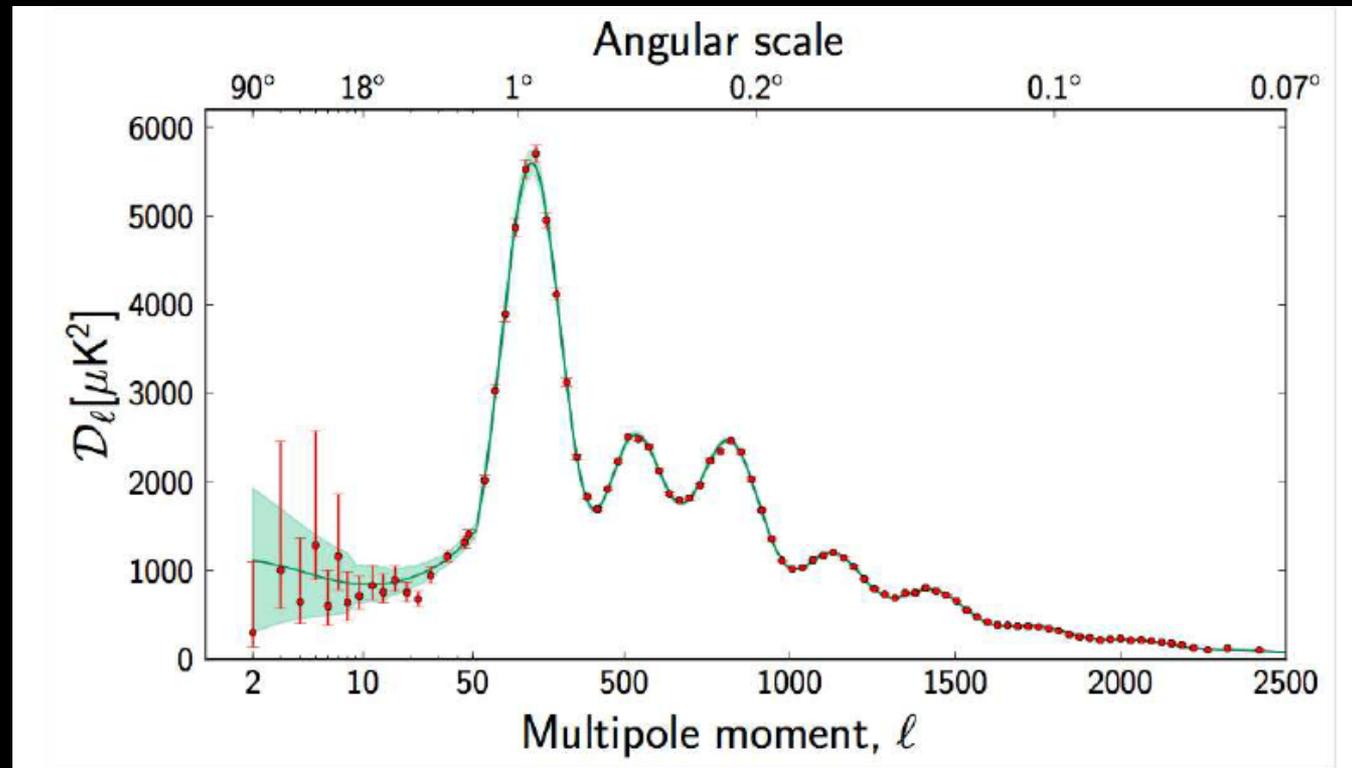
História da Cosmologia Relativística

Energia Escura

Evidências:

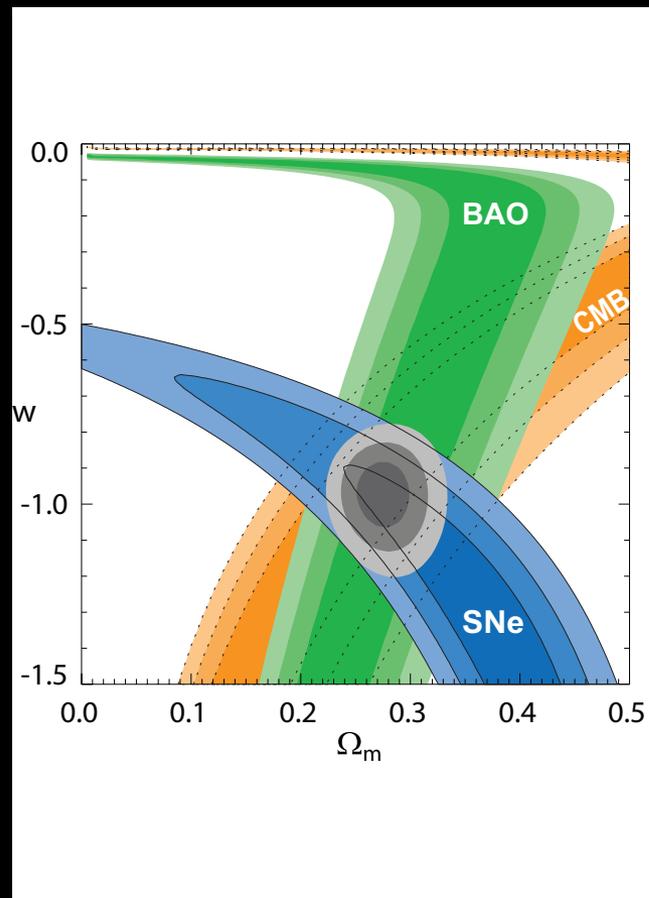
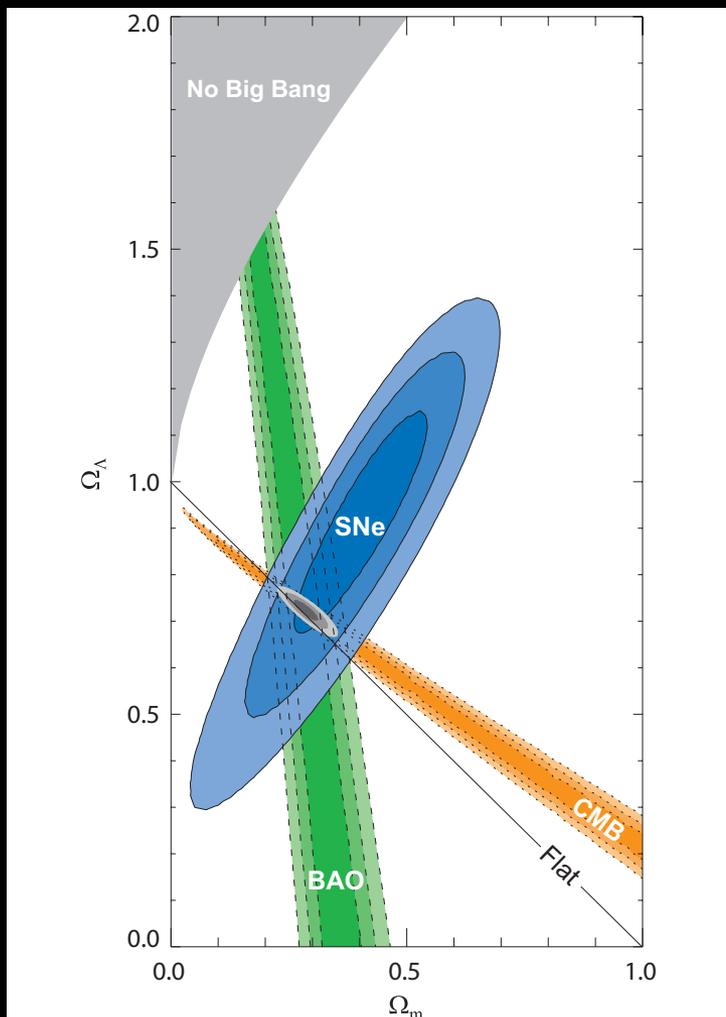
- ✓ Evolução cósmica recente
- ✓ Distância luminosidade
- ✓ Picos da CMB

- posição 1° pico:
fixa Ω_T
- altura 1° e 2° picos:
degenerescência
 Ω_b e Ω_m



História da Cosmologia Relativística

Importância dados complementares



Arxiv:0804.4142
Kowalski et. al

História da Cosmologia Relativística

Matéria Escura

Evidências:

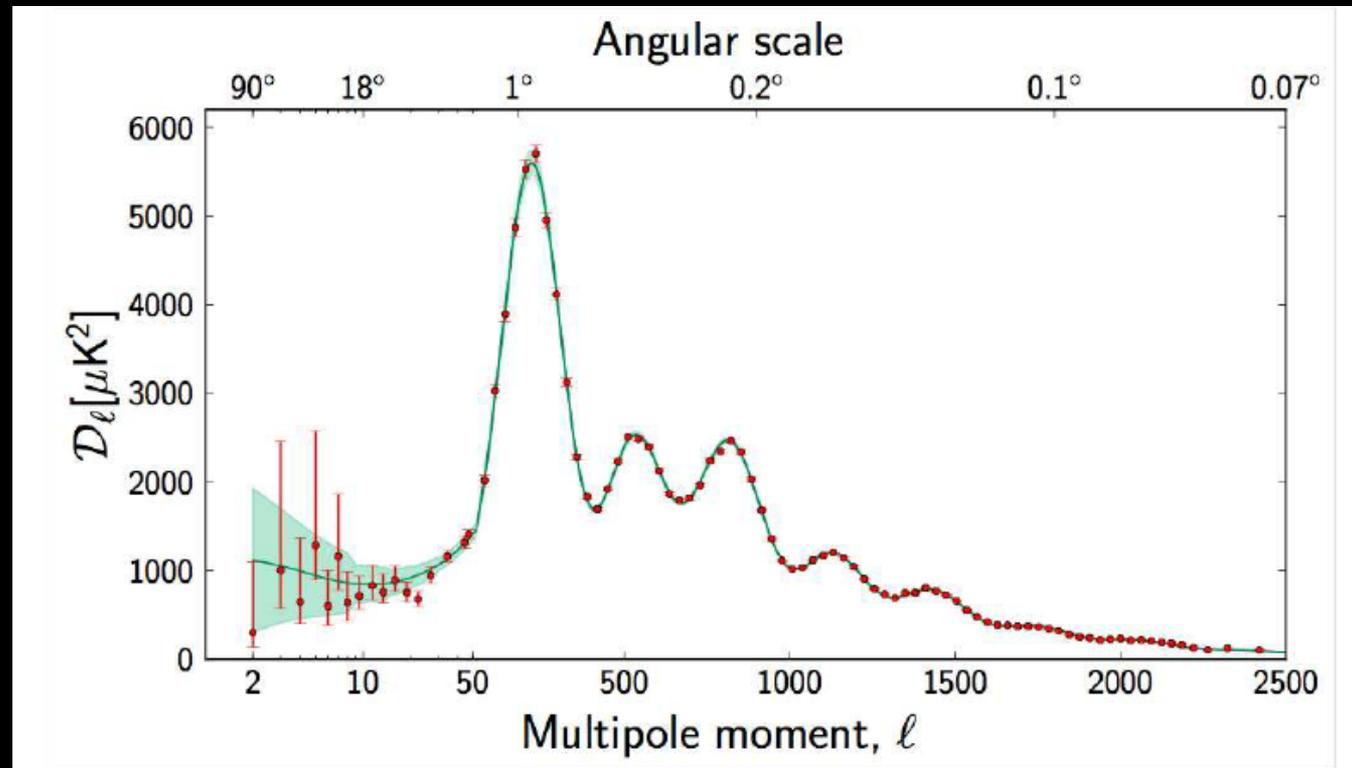
História da Cosmologia Relativística

Matéria Escura

Evidências:

✓ Picos da CMB

- posição 1° pico:
fixa Ω_T
- altura 1° e 2° picos:
degenerescência
 Ω_b e Ω_m



História da Cosmologia Relativística

Matéria Escura

Evidências:

- ✓ Picos da CMB
- ✓ Curvas de rotação



região com matéria ($M \propto r^3$)

$$-\frac{GMm}{r^2} = m\frac{v^2}{r} \Rightarrow v^2 \propto \frac{M}{r} \propto r^2$$

região sem matéria ($M = C^{te}$)

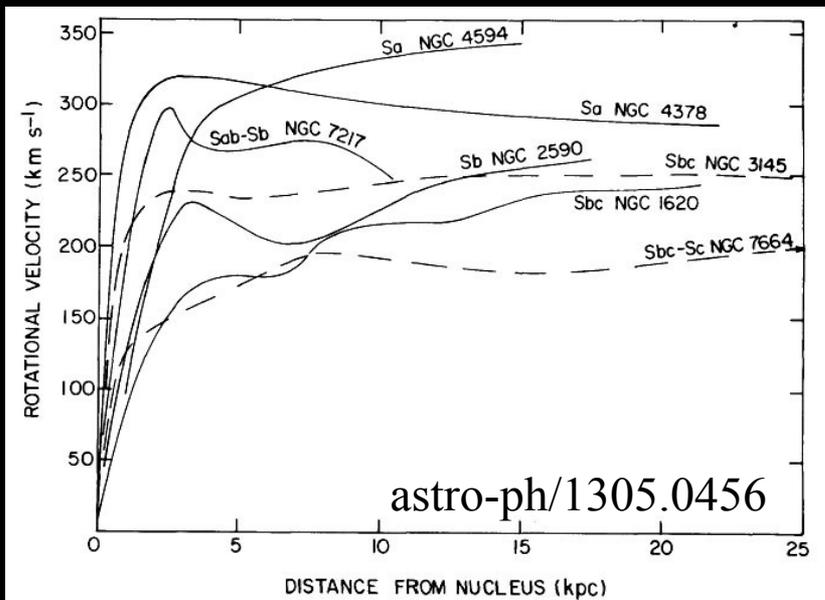
$$v^2 \propto \frac{M}{r} \Rightarrow v \propto \frac{1}{\sqrt{r}}$$

História da Cosmologia Relativística

Matéria Escura

Evidências:

- ✓ Picos da CMB
- ✓ Curvas de rotação



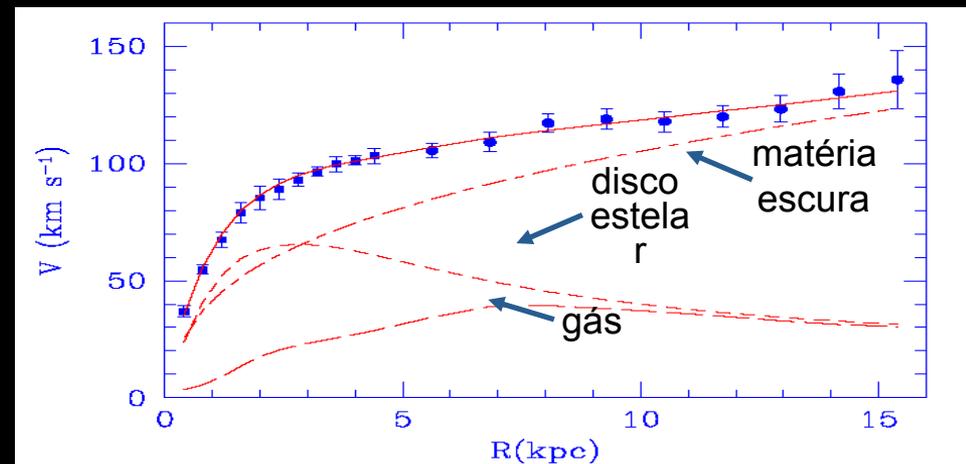
7 tipos de galáxias na
classificação do Hubble

região com matéria ($M \propto r^3$)

$$-\frac{GMm}{r^2} = m \frac{v^2}{r} \Rightarrow v^2 \propto \frac{M}{r} \propto r^2$$

região sem matéria ($M = C^{te}$)

$$v^2 \propto \frac{M}{r} \Rightarrow v \propto \frac{1}{\sqrt{r}}$$



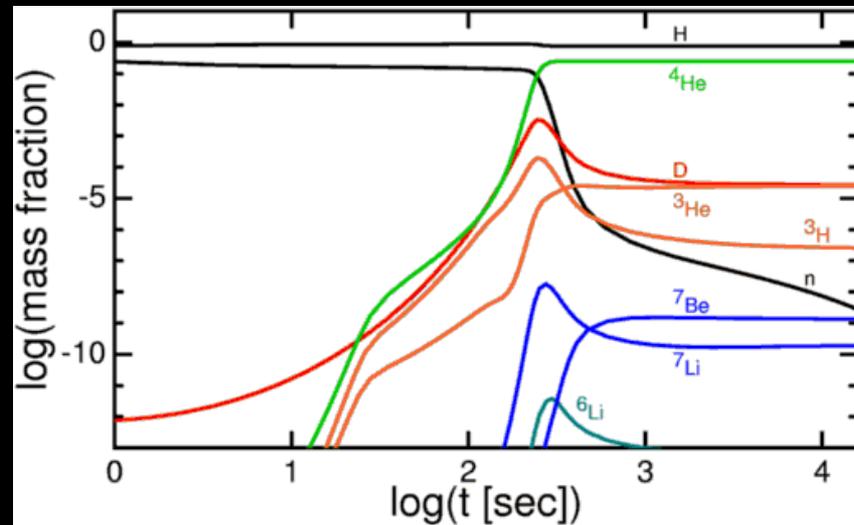
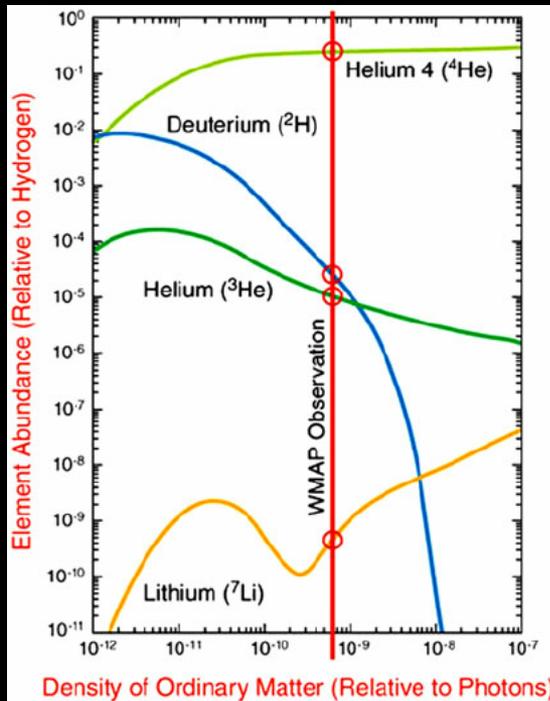
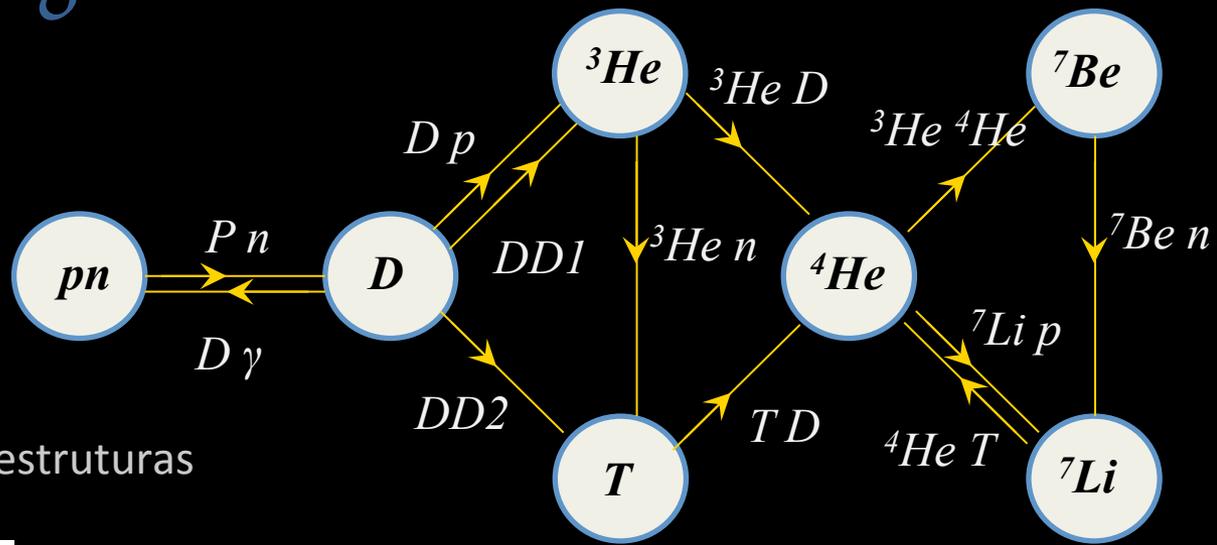
astro-ph/9909252

História da Cosmologia Relativística

Matéria Escura

Evidências:

- ✓ Picos da CMB
- ✓ Curvas de rotação
- ✓ Nucleossínteses + Formação estruturas

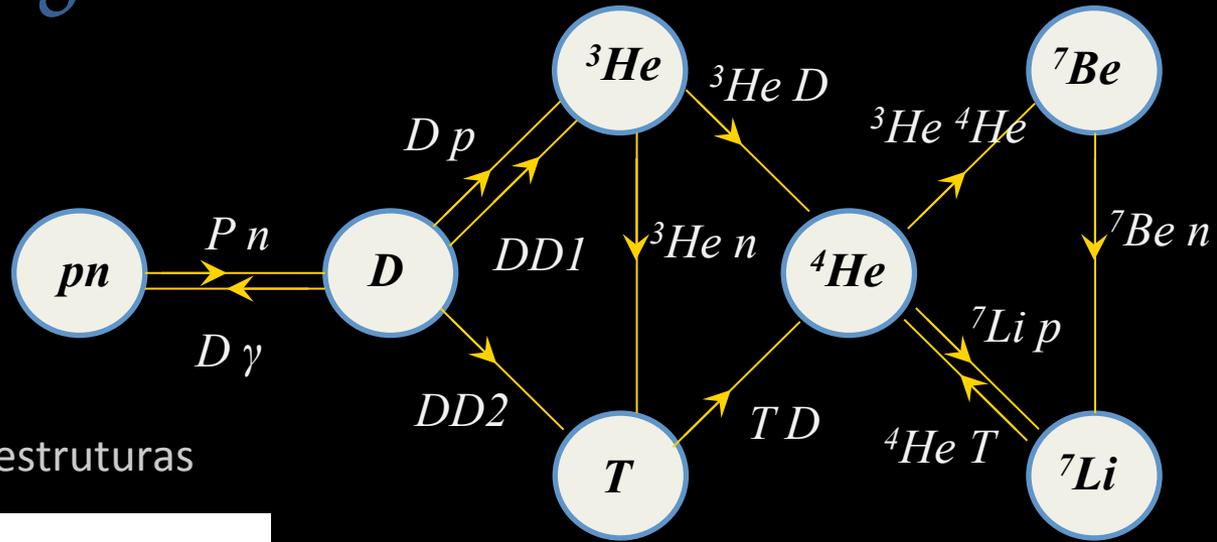


História da Cosmologia Relativística

Matéria Escura

Evidências:

- ✓ Picos da CMB
- ✓ Curvas de rotação
- ✓ Nucleossínteses + Formação estruturas



Periodic Table of the Elements

1 H Hydrogen 1.008																	2 He Helium 4.003
3 Li Lithium 6.941	4 Be Beryllium 9.012											5 B Boron 10.811	6 C Carbon 12.011	7 N Nitrogen 14.007	8 O Oxygen 15.999	9 F Fluorine 18.998	10 Ne Neon 20.180
11 Na Sodium 22.990	12 Mg Magnesium 24.305											13 Al Aluminum 26.982	14 Si Silicon 28.086	15 P Phosphorus 30.974	16 S Sulfur 32.066	17 Cl Chlorine 35.453	18 Ar Argon 39.948
19 K Potassium 39.098	20 Ca Calcium 40.078	21 Sc Scandium 44.956	22 Ti Titanium 47.867	23 V Vanadium 50.942	24 Cr Chromium 51.996	25 Mn Manganese 54.938	26 Fe Iron 55.845	27 Co Cobalt 58.933	28 Ni Nickel 58.693	29 Cu Copper 63.546	30 Zn Zinc 65.38	31 Ga Gallium 69.723	32 Ge Germanium 72.631	33 As Arsenic 74.922	34 Se Selenium 78.971	35 Br Bromine 79.904	36 Kr Krypton 83.798
37 Rb Rubidium 84.468	38 Sr Strontium 87.62	39 Y Yttrium 88.906	40 Zr Zirconium 91.224	41 Nb Niobium 92.906	42 Mo Molybdenum 95.94	43 Tc Technetium 98.907	44 Ru Ruthenium 101.07	45 Rh Rhodium 102.905	46 Pd Palladium 106.42	47 Ag Silver 107.868	48 Cd Cadmium 112.414	49 In Indium 114.818	50 Sn Tin 118.711	51 Sb Antimony 121.760	52 Te Tellurium 127.6	53 I Iodine 126.904	54 Xe Xenon 131.294
55 Cs Cesium 132.905	56 Ba Barium 137.328	57-71 Lanthanides	72 Hf Hafnium 178.49	73 Ta Tantalum 180.948	74 W Tungsten 183.84	75 Re Rhenium 186.207	76 Os Osmium 190.23	77 Ir Iridium 192.222	78 Pt Platinum 195.085	79 Au Gold 196.967	80 Hg Mercury 200.592	81 Tl Thallium 204.383	82 Pb Lead 207.2	83 Bi Bismuth 208.980	84 Po Polonium 209	85 At Astatine 210	86 Rn Radon 222
87 Fr Francium 223	88 Ra Radium 226	89-103 Actinides	104 Rf Rutherfordium [261]	105 Db Dubnium [262]	106 Sg Seaborgium [266]	107 Bh Bohrium [264]	108 Hs Hassium [265]	109 Mt Meitnerium [268]	110 Ds Darmstadtium [285]	111 Rg Roentgenium [272]	112 Cn Copernicium [285]	113 Uut Ununtrium [288]	114 Fl Flerovium [289]	115 Uup Ununpentium [288]	116 Lv Livermorium [293]	117 Uus Ununseptium [294]	118 Uuo Ununoctium [294]
57 La Lanthanum 138.905	58 Ce Cerium 140.116	59 Pr Praseodymium 140.908	60 Nd Neodymium 144.242	61 Pm Promethium 144.913	62 Sm Samarium 150.36	63 Eu Europium 151.964	64 Gd Gadolinium 157.25	65 Tb Terbium 158.925	66 Dy Dysprosium 162.500	67 Ho Holmium 164.930	68 Er Erbium 167.259	69 Tm Thulium 168.934	70 Yb Ytterbium 173.055	71 Lu Lutetium 174.967			
89 Ac Actinium 227.028	90 Th Thorium 232.038	91 Pa Protactinium 231.036	92 U Uranium 238.029	93 Np Neptunium 237.048	94 Pu Plutonium 244.064	95 Am Americium 243.061	96 Cm Curium 247.070	97 Bk Berkelium 247.070	98 Cf Californium 251.080	99 Es Einsteinium [254]	100 Fm Fermium [257]	101 Md Mendelevium [258]	102 No Nobelium [259]	103 Lr Lawrencium [262]			

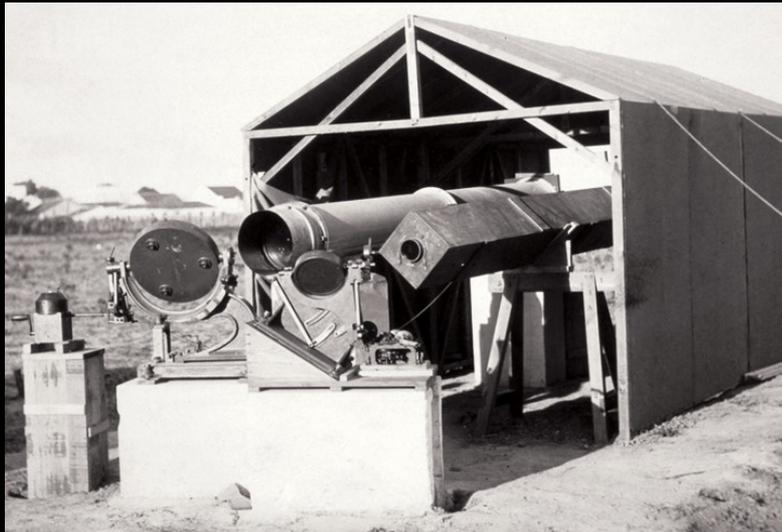
Alkali Metal Alkaline Earth Transition Metal Basic Metal Semimetal Nonmetal Halogen Noble Gas Lanthanide Actinide

História da Cosmologia Relativística

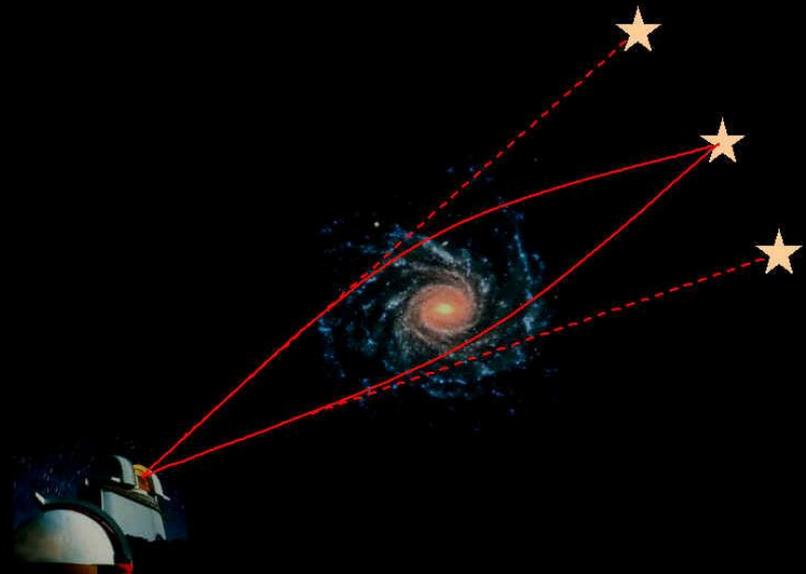
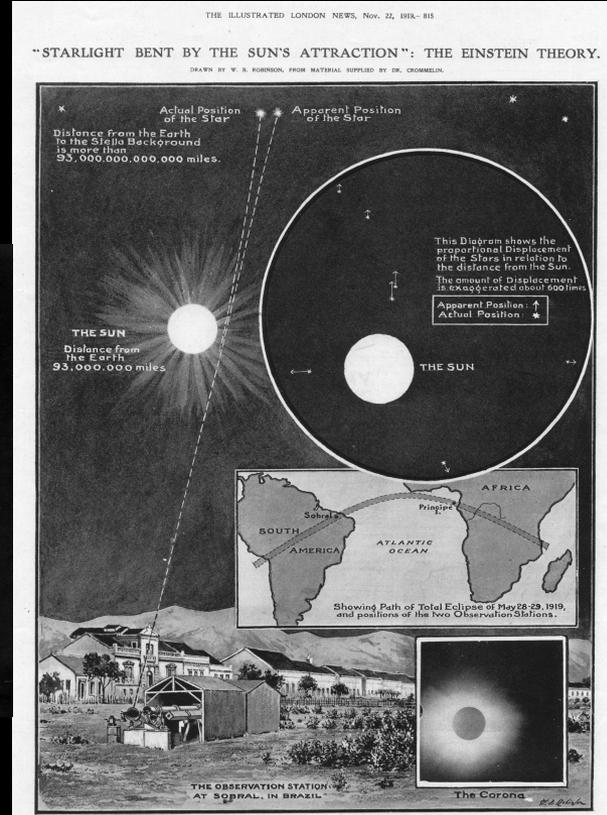
Matéria Escura

Evidências:

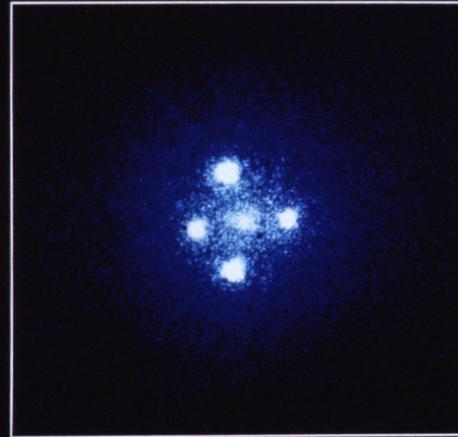
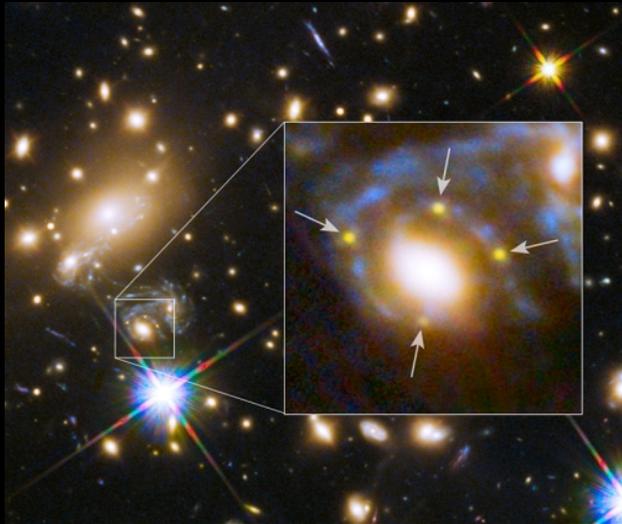
- ✓ Picos da CMB
- ✓ Curvas de rotação
- ✓ Nucleossínteses + Formação estruturas
- ✓ Lentes gravitacionais



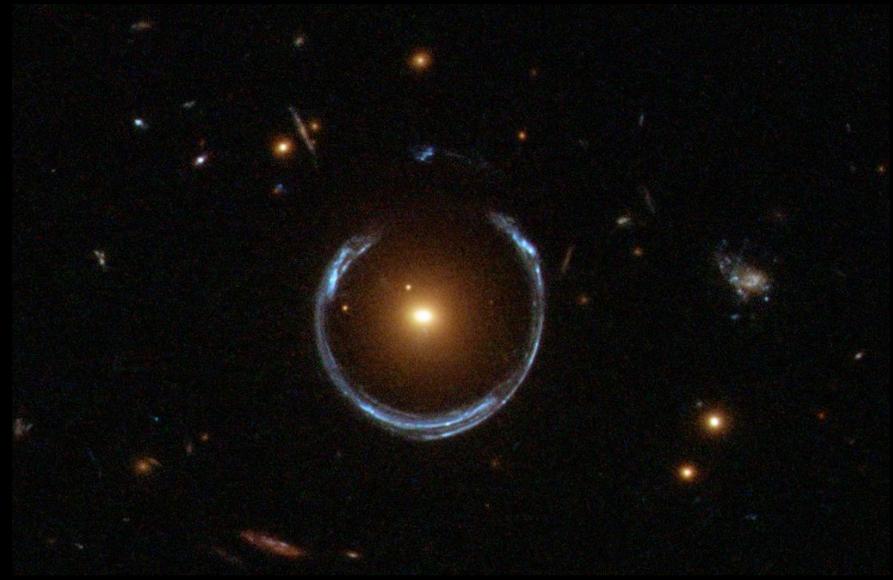
Telescópio refrator astrográfico
Eclipse Sobral 1919



História da Cosmologia Relativística



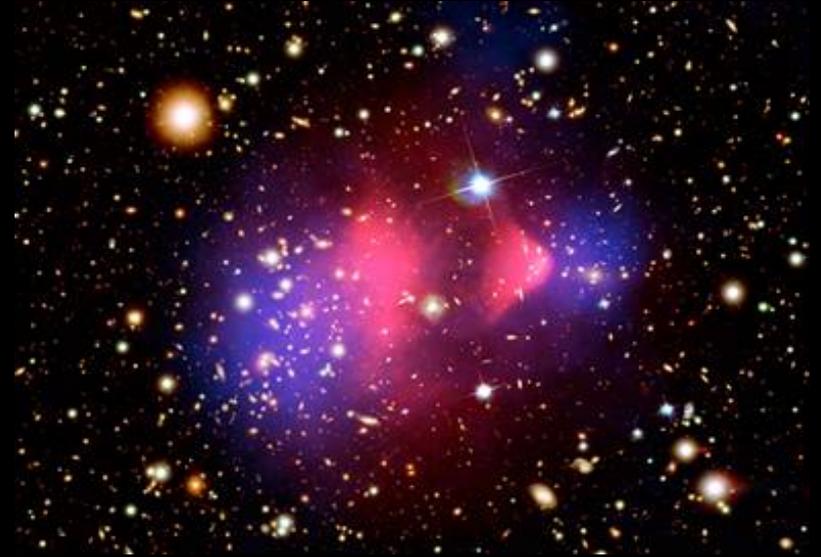
Gravitational Lens G2237+0305



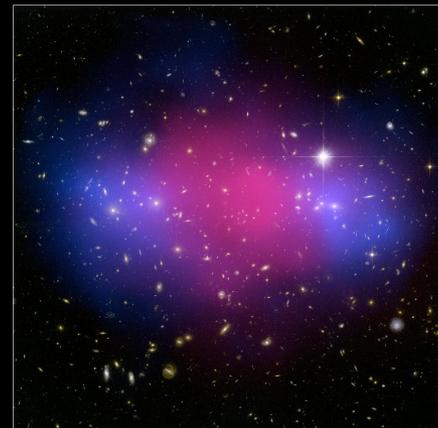
História da Cosmologia Relativística



NGC1052-DF2
Galáxia sem matéria escura



Aglomerado da bala



Dark Matter in Galaxy Cluster MACS J00254.4-1222
Hubble Space Telescope ACS/WFC • Chandra X-Ray Observatory

História da Cosmologia Relativística

Quadro Geral

- Homogêneo e isotrópico > 200 Mpc
- Existe a pelo menos 13,7 bilhões de anos
- Em expansão; passado quente e denso
- 3 fases: **radiação** / poeira / energia escura

- Elementos leves:

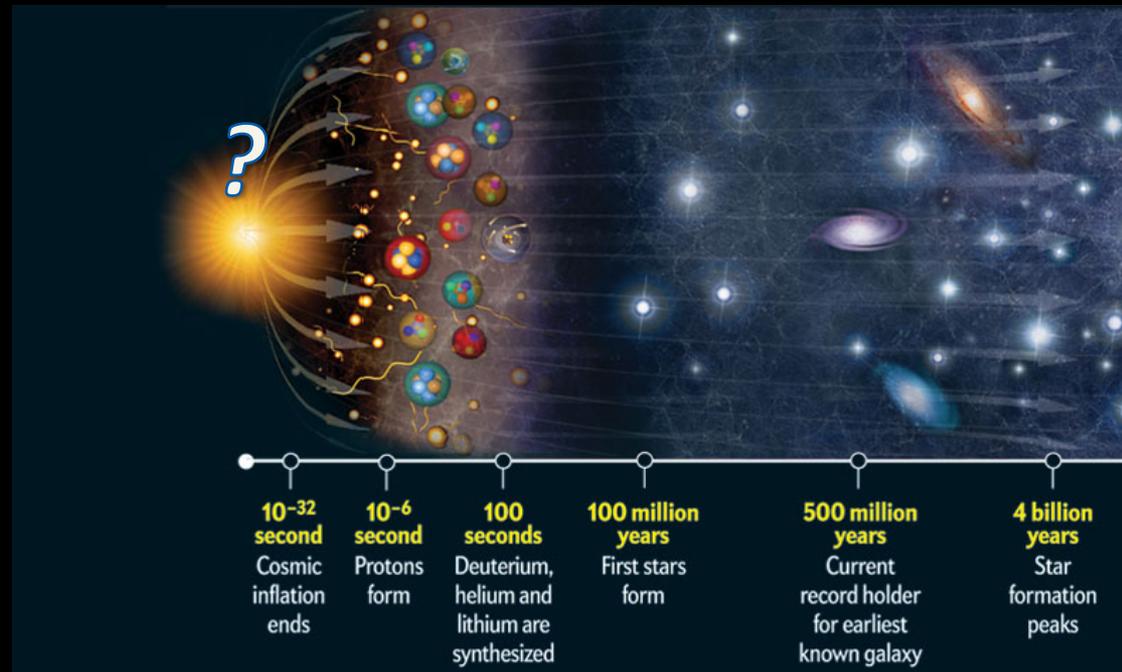
75% hidrogênio e 25% hélio

- Composição:

74% energia escura

22% matéria escura

4% matéria bariônica,



Modelo Padrão da Cosmologia

Felipe Tovar Falciano

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas – CBPF

