

Escola de Astrofísica, Cosmologia e Gravitação – Inverno Astrofísico 2018

Introdução à Cosmologia

Wiliam Santiago Hipólito Ricaldi

Departamento de Ciências Naturais
Programa Internacional de Pós-graduação em Astrofísica,
Cosmologia e Gravitação (PPGCosmo)
Universidade Federal do Espírito Santo

Fazenda do Centro, Castelo ES, Julho 2018

O que estuda a Cosmologia?

Estudo da evolução e estrutura em grande escala do Universo como um todo

Evolução:

- O Universo teve um início?
- Terá um fim?
- O Universo foi sempre assim? Ou ele muda com o tempo?
Se for assim, como muda?
- Podemos dividir a evolução temporal em etapas? Se for assim, em qual etapa da evolução estamos?

Estrutura:

- De que está composto o Universo?
- É possível descobrir a forma do Universo?
- Qual é a geometria do Universo? Como se medem distâncias nele?
- Como apareceram as primeiras estruturas que observamos?

$$\begin{array}{c} \text{COSMOLOGIA} = \\ \text{PRINCÍPIO COSMOLÓGICO} \\ \text{(Hipótese)} \\ \\ + \\ \\ \text{RELATIVIDADE GERAL} \\ \text{(Teoria da Gravidade)} \end{array}$$

- Grande escala?

Estrutura em Grande Escala

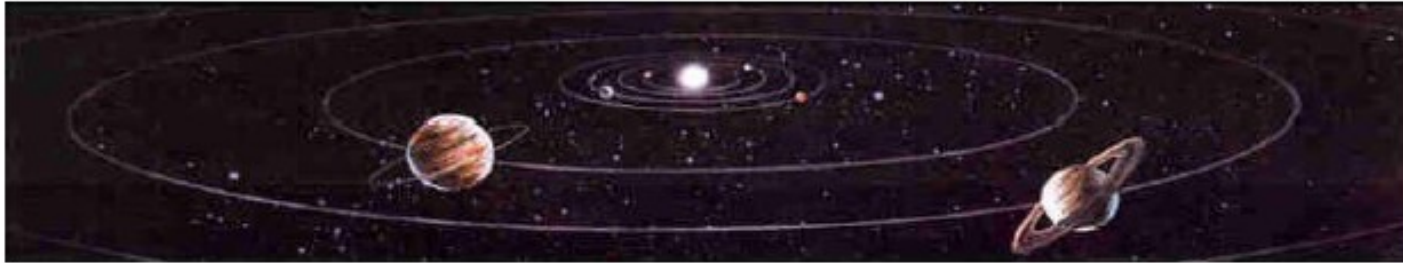
A gravidade aglomera matéria formando estruturas

UNIDADES DE DISTÂNCIA

Distância ou tamanho	Símbolo	Valor	Valor Relativo
Raio da Terra	R_T	6371 Km	
Raio do Sol	R_S	696000 Km	100 R_T
Distância Terra - Sol	AU	149.6×10^9 Km	20000 R_T
1 parsec	pc	3.0856×10^{13} Km	206265 AU
Estrela + próxima	R_*	1.275 pc	$7 \times 10^7 R_S$
Distância Sol - centro da galáxia	R_G	10 kpc	8000 R_*
Raio do grupo local (Andromeda)	R_A	670 kpc	70 R_G
Cluster + próximo (Virgo)	R_V	$11 h^{-1}$ Mpc	30 R_A
Raio do Universo observável	R_U	$3000 h^{-1}$ Mpc	300 R_V

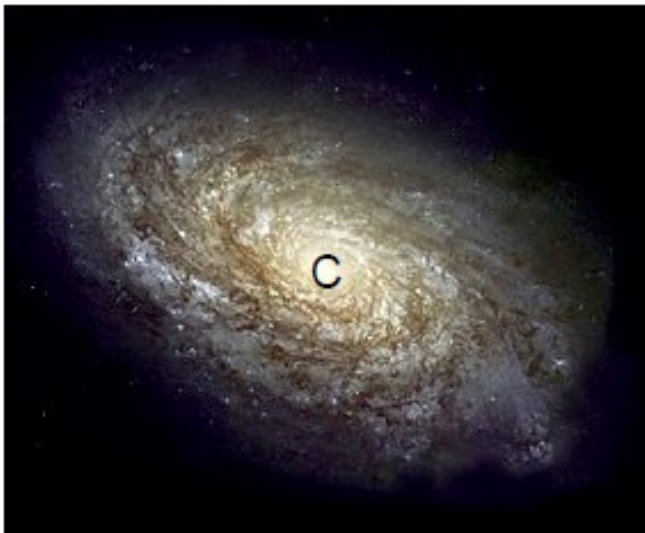
ESTRUTURAS

SISTEMA SOLAR



~ 100 UA ~ 0,5 pc

GALAXIAS

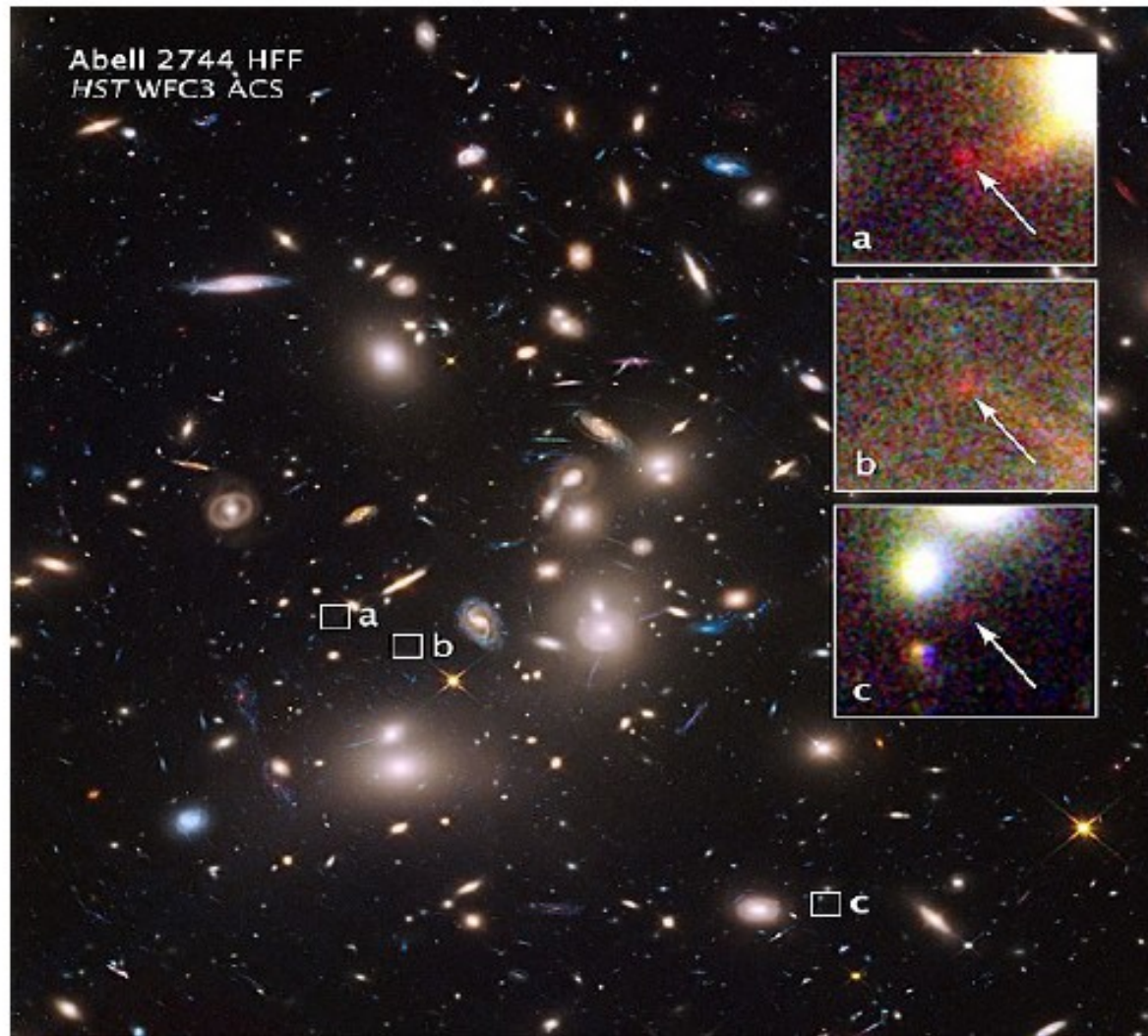


Via Láctea: 100 – 400 bilhões de estrelas

Diâmetro: ~ 100000 anos-luz ~ 330 kpc

Diâmetro típico: 1 a 1000 kpc

AGLOMERADOS DE GALÁXIAS

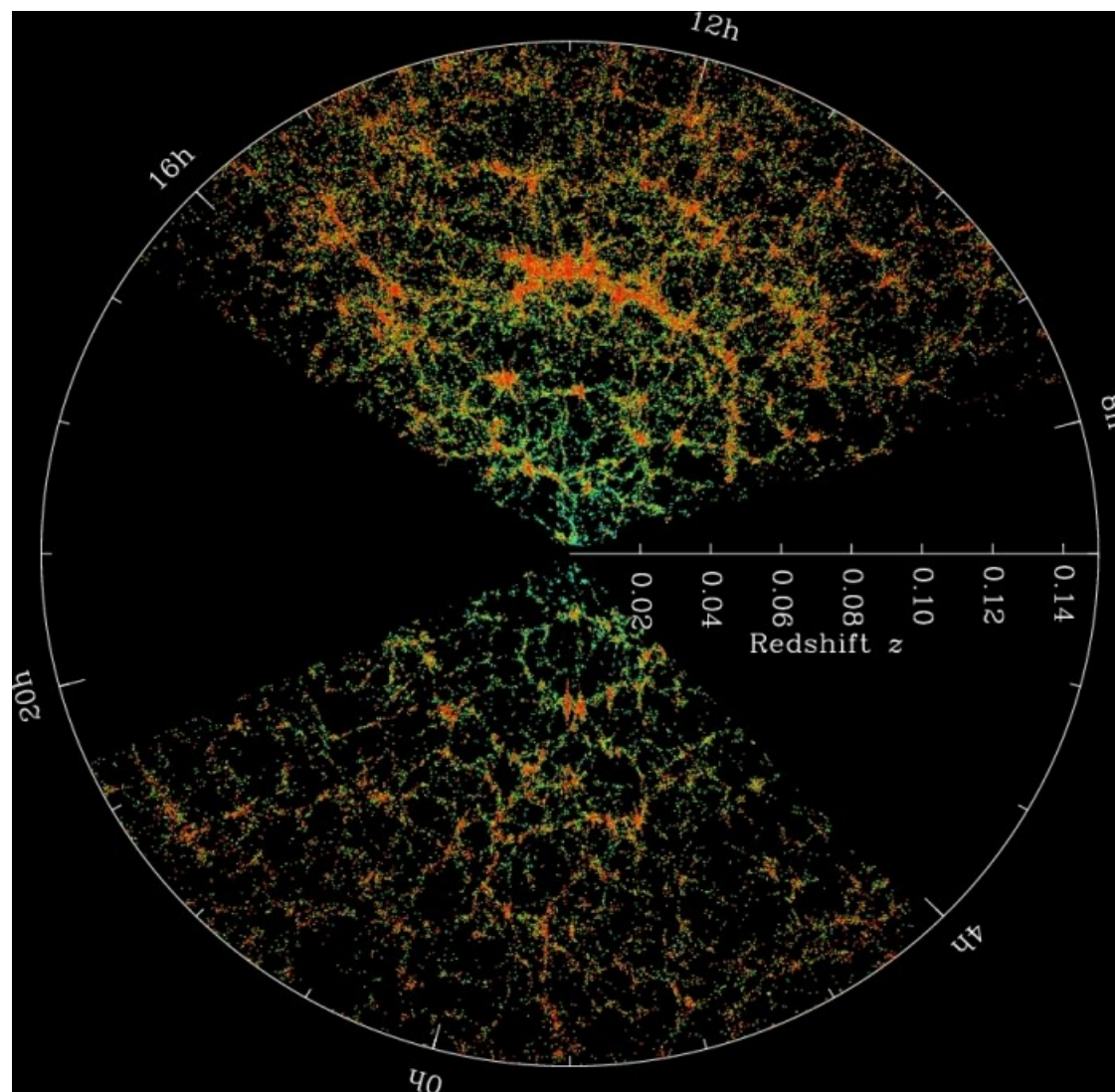


De decenas a milhares de galáxias
~ 2 a 10 Mpc

SUPERAGLOMERADOS E VOIDS : ESTRUTURA EM GRANDE ESCALA

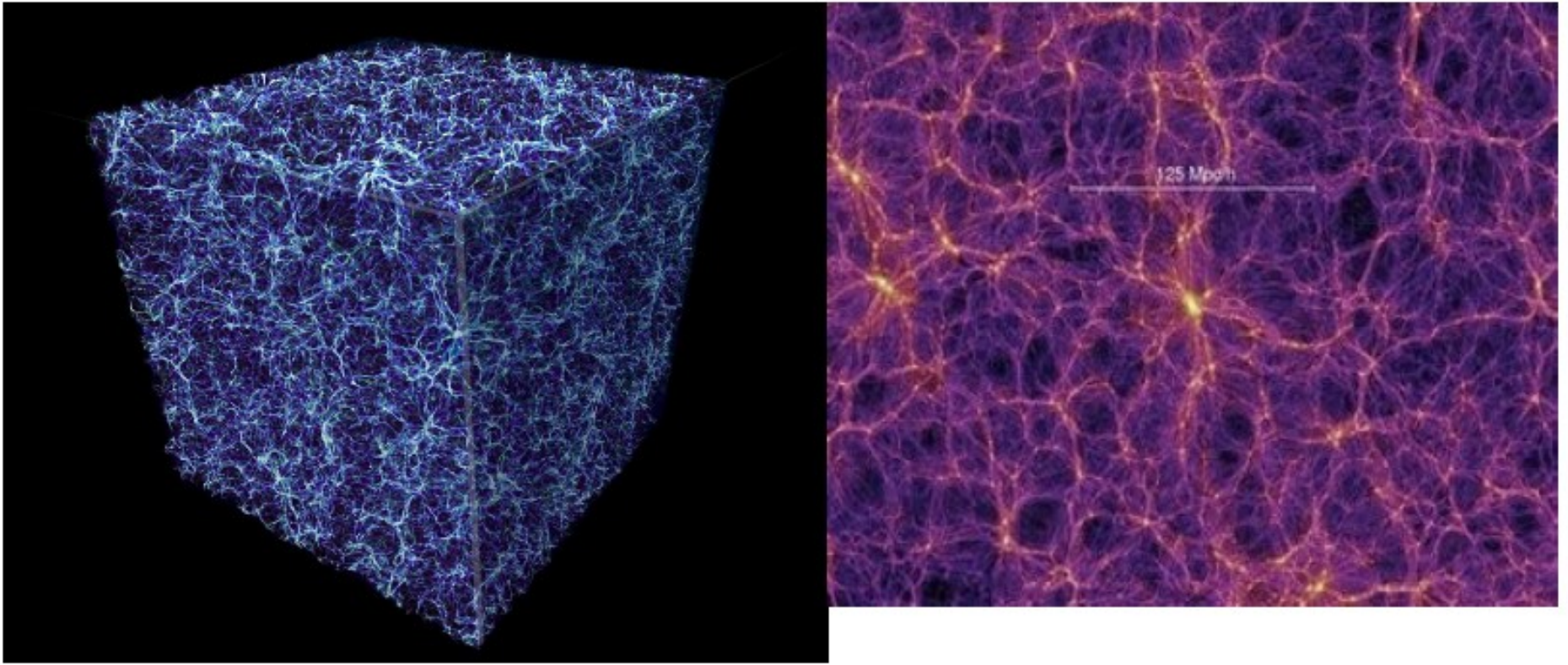
~ 10 bilhões de
superaglomerados

~ 10 Mpc – 1 Gpc



Plot de coordenadas do céu vs. distância para galáxias no Sloan Digital Sky Survey (SDSS)

ESTRUTURA EM GRANDE ESCALA: SUPERAGLOMERADOS, VOIDS, PAREDES, FILAMENTOS.



- Escalas relevantes para Cosmologia: $\sim$ kpc

UNIDADES

1 angstrom (Å) = 10^{-10} m

1 nanometro (nm) = 10^{-9} m

1 micron (μ m) = 10^{-6} m

física atômica
espectroscopia
poeira interestelar

1 centímetro (cm) = 0.01 m

1 metro (m) = 100 cm

1 quilômetro (km) = 1000 m = 10^5 cm

uso freqüente
em astronomia

Raio da Terra ($R_{\oplus}$) = 6378 km

Raio solar ($R_{\odot}$) = 6.96×10^8 m

1 unidade astronômica (UA) = 1.496×10^8 km

1 ano-luz (al) = 9.46×10^{12} km

= 63.200 UA

1 parsec (pc) = 3.09×10^{13} km

= 3.26 anos-luz

astronomia planetária
sistema solar

astronomia galáctica
estrelas, aglomerados de estrelas

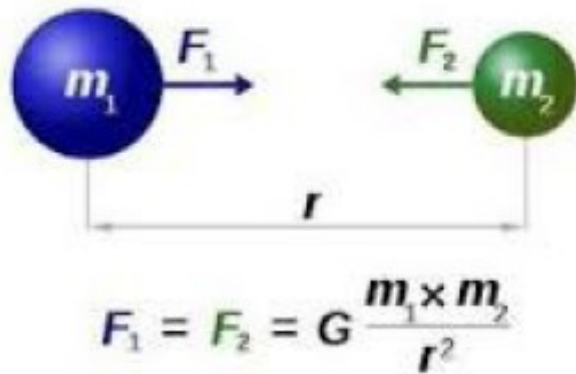
1 quiloparsec (Kpc) = 1000 pc

1 megaparsec (Mpc) = 1000 kpc

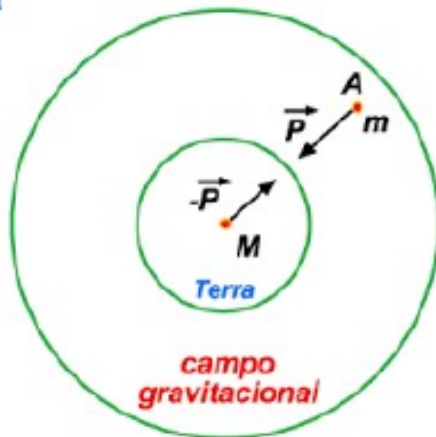
galáxias, aglomerados de galáxias
cosmologia

TEORIA DA GRAVIDADE: RELATIVIDADE GERAL

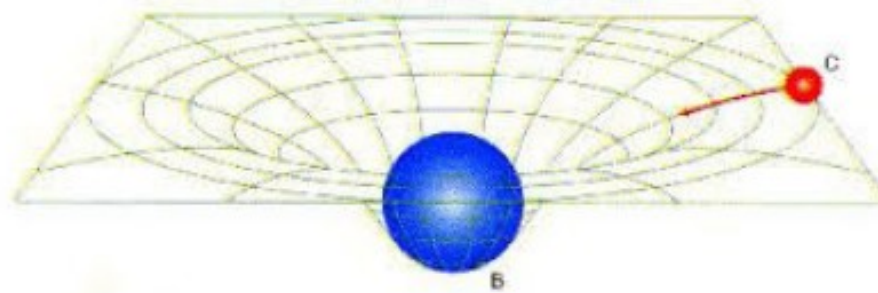
Newton (Interacción-Fuerza)



Campo gravitacional relacionado a la fuerza



Einstein (geometria)



Campo gravitacional relacionado a la curvatura del espacio-tiempo.

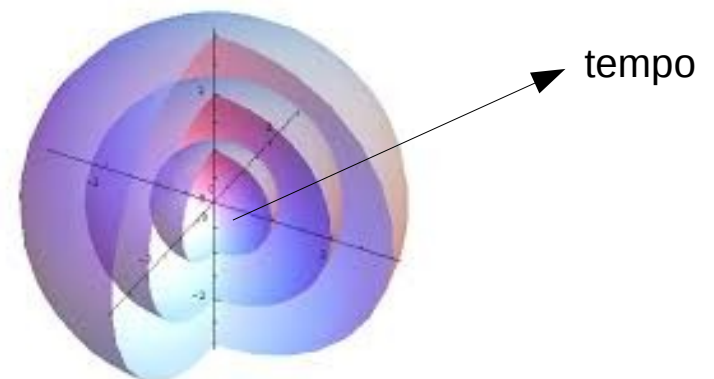
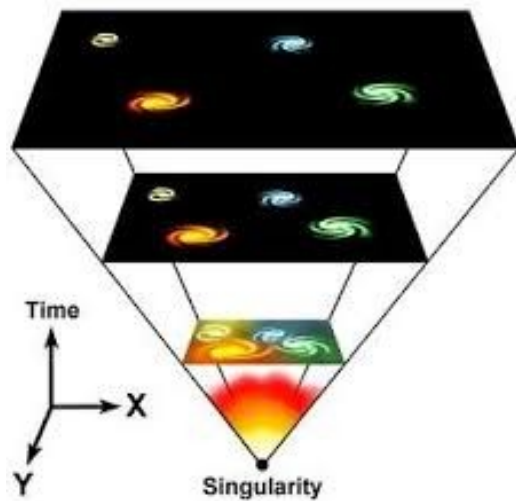
$$G_{\alpha\beta} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\alpha\beta}$$

ESPAÇO-TEMPO?

Todo ponto precisa de 4 coordenadas para ser descrito: 3 espaciais e 1 temporal



- O conjunto de todos os pontos (t,x,y,z) do Universo formam o seu espaço-tempo



COMO CARACTERIZAR O ESPAÇO-TEMPO?

- O espaço-tempo é caracterizado pela sua métrica

Métrica

Está relacionada com la distancia entre dos puntos:

En un espacio tridimensional:

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2$$



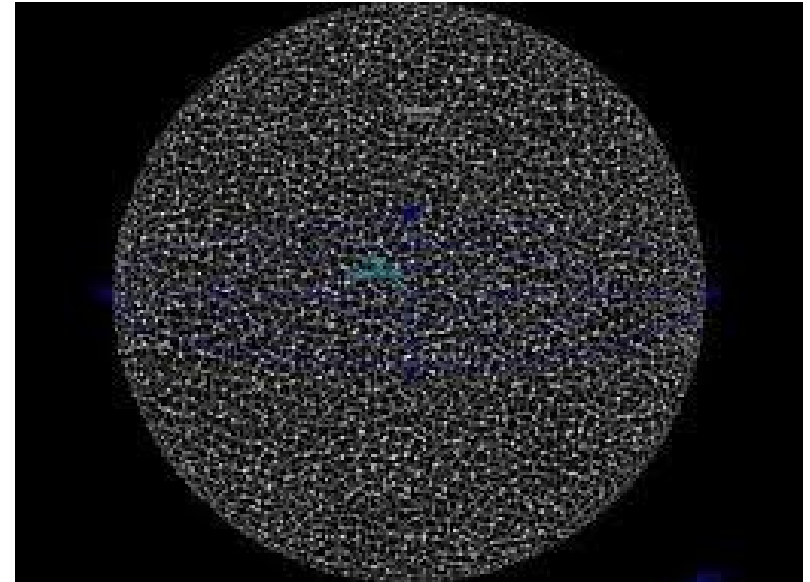
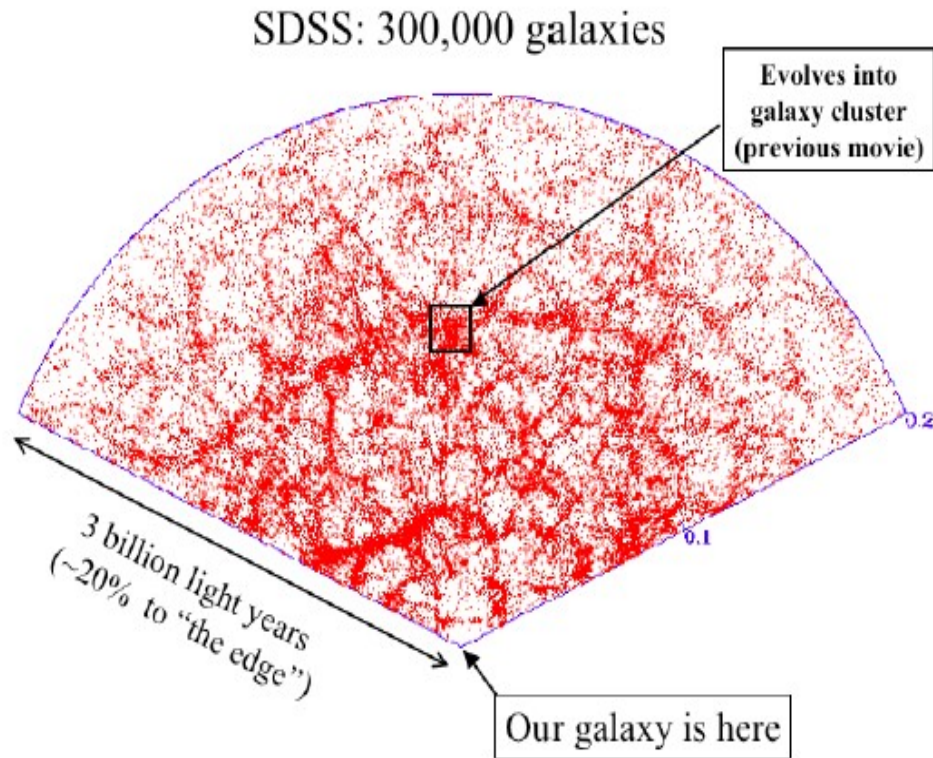
Em uma esfera:

$$dl^2 = a^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2)$$

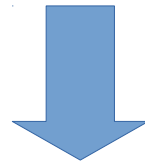
$$g = (g_{\mu\nu}) = \begin{pmatrix} a^2 & 0 \\ 0 & a^2 \sin^2 \theta \end{pmatrix}$$



UMA MÉTRICA PARA O UNIVERSO: PRINCÍPIO COSMOLÓGICO



Princípio Cosmológico: A Matéria é homogênea e isotropicamente distribuída no Universo

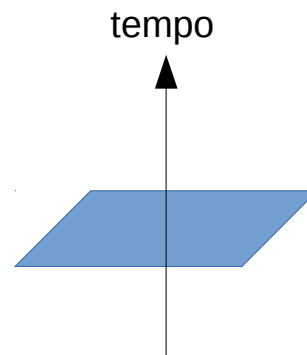
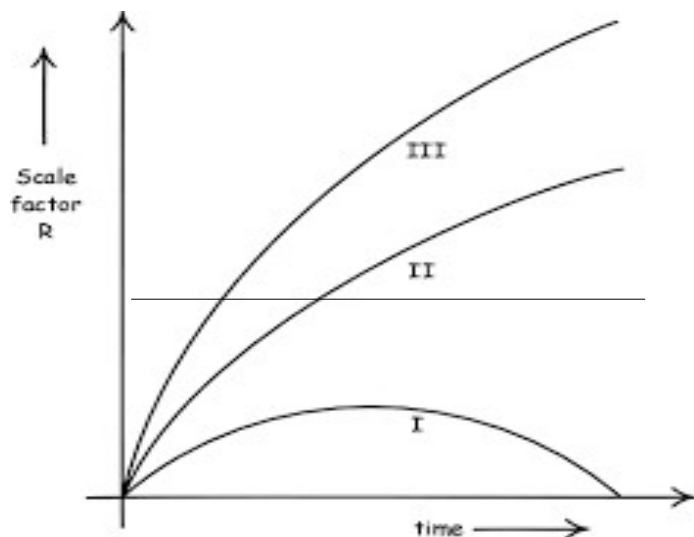


INVARIANCIA POR ROTAÇÕES E TRANSLAÇÕES

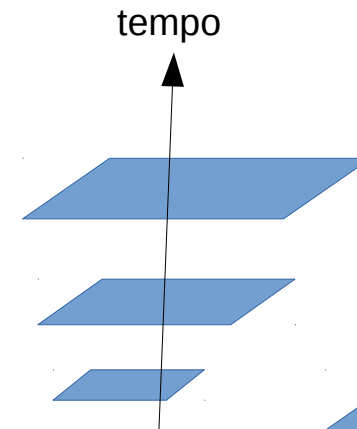
ESPAÇO-TEMPO FRIEDMANN LEMAITRÊ ROBERTSON

$$ds^2 = -dt^2 + a^2(t) \left(\frac{dr^2}{1-kr^2} + r^2 d\Omega^2 \right) \longrightarrow \text{Métrica Robertson-Walker}$$

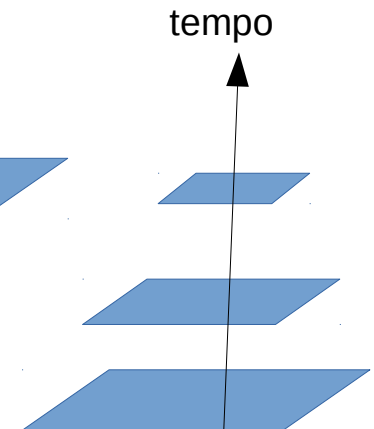
$$g_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a^2(t) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a^2(t) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a^2(t) \end{pmatrix}.$$



Estático



Expansão

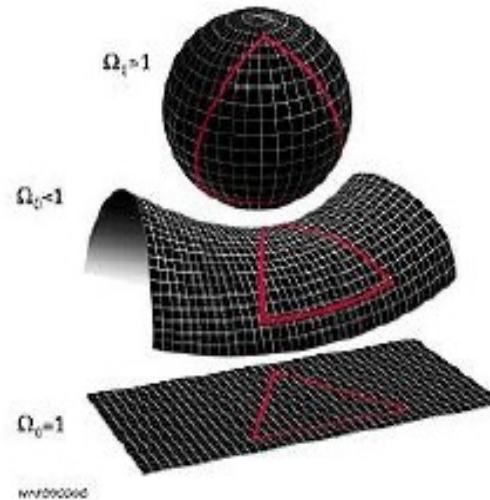


Contração

MÉTRICA FLRW

$$ds^2 = dt^2 - a^2(t) \left[\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2(d\theta^2 + \sin\theta d\varphi^2) \right]$$

Factor de escala



$K=1$ (esferico)

$K=0$ (euclidiano)

$K=-1$ (hiperbólico)

- É muito importante conhecer a evolução temporal do fator de escala.

PROPRIEDADES DO ESPAÇO-TEMPO

Tensor de Einstein

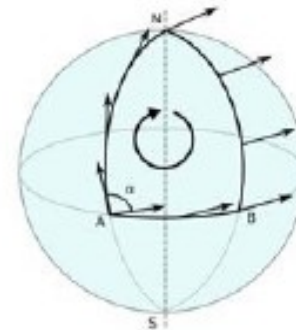
$$G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R$$

Tensor de Curvatura de Riemann : toda informação sobre a curvatura de uma **variedade** está contida no tensor de Riemann (tensor de quarta ordem)

Tensor de Ricci ← $R^a_{bcd} = \partial_c \Gamma^a_{bd} - \partial_d \Gamma^a_{bc} + \Gamma^e_{bd} \Gamma^a_{ec} - \Gamma^e_{bc} \Gamma^a_{ed}$

Conexões da métrica $\Gamma^a_{bc} = \frac{1}{2} g^{ad} (\partial_b g_{dc} + \partial_c g_{db} - \partial_d g_{bc})$
(Símbolo de Christoffel)

Tensor de Riemann e o transporte paralelo: a diferença entre os vetores de “partida” e de “chegada” é proporcional ao tensor de Riemann



Eq. Einstein
Para o Universo:

$$G_{\alpha\beta} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\alpha\beta}$$

Geometria ←

→ Materia

$$T^\mu_\nu = (p + \epsilon) U^\mu U_\nu - p \delta^\mu_\nu$$

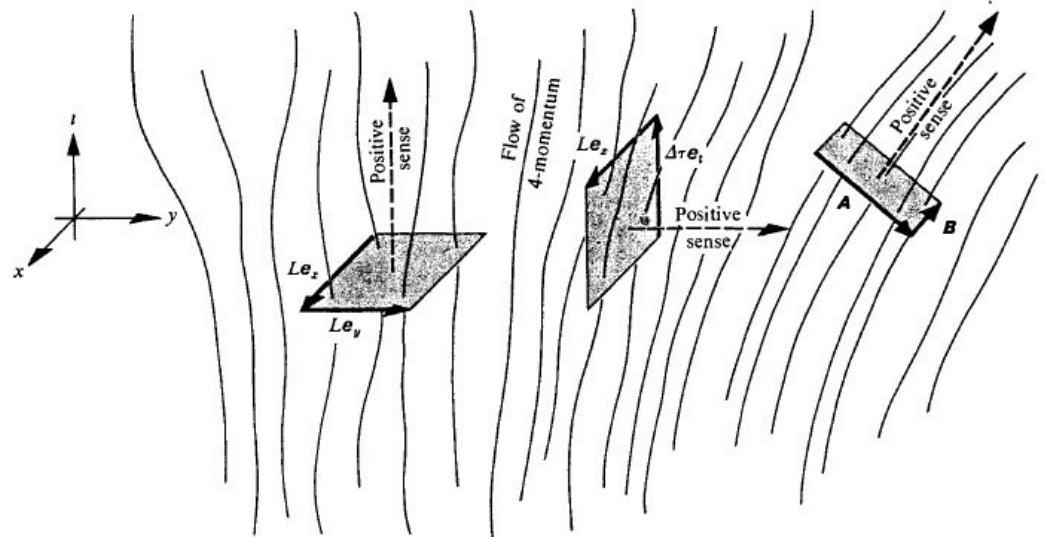
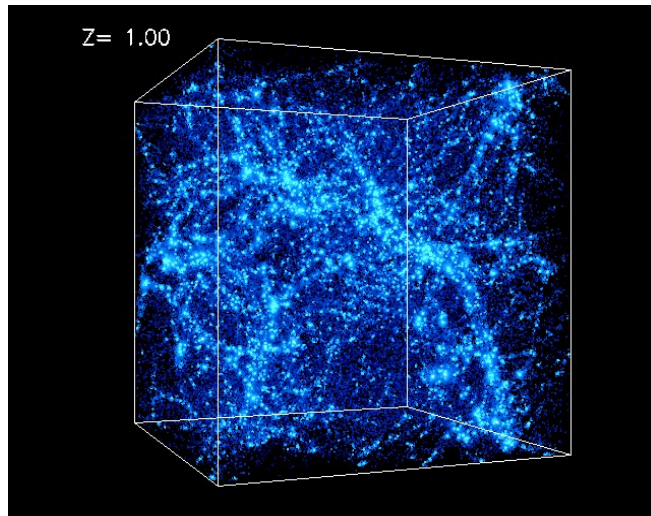
← presión

← Densidad de energia

(Tensor Energia-Momento)

TENSOR ENERGIA MOMENTO

- O Universo como um sistema de N partículas



- O tratamento é de um fluido, usando quantidades termodinâmicas

$$T^\mu_\nu = (p + \epsilon)U^\mu U_\nu - p\delta^\mu_\nu \quad (\text{Tensor Energia-Momento})$$

$\swarrow$ presion $\searrow$ Densidad de energia

$$T^\mu_\nu = \begin{pmatrix} \rho & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -p & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -p & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -p \end{pmatrix}, \quad (30)$$

EQUAÇÕES DE FRIEDMANN

$$\begin{aligned}\frac{\dot{a}^2}{a^2} + \frac{k c^2}{a^2} &= \frac{8\pi G \rho}{3} \\ \frac{2\ddot{a}}{a} + \frac{\dot{a}^2}{a^2} + \frac{k c^2}{a^2} &= -\frac{8\pi G p}{c^2} \\ \frac{\ddot{a}}{a} &= -\frac{4\pi G}{3} \left(\rho + \frac{3p}{c^2} \right) -\end{aligned}$$

Eqs. De Einstein

$$\dot{\rho} + 3\frac{\dot{a}}{a}(\rho + p) = 0$$

→ Conservação da energia

- Resolvendo o sistema podemos conhecer várias características do Universo.
- Simplificações podem ser realizadas → Diferentes modelos cosmológicos.

PRIMEIROS MODELOS COSMOLÓGICOS RELATIVISTAS

- Universo estático de Einstein:

Universo estático $\dot{a} = \ddot{a} = 0$

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



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



Geometria esférica.

$$a = \sqrt{\frac{3}{8\pi G \rho}}$$



Não é constante.

- Introduzindo a constante cosmológica

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

$$k = 1$$



$$a = \frac{1}{\sqrt{\Lambda}}$$

Universo de de Sitter

Universo vazio $\rho = 0$ e com constante cosmológica

$$\frac{\dot{a}^2}{a^2} + \frac{\Lambda}{3} = 0 \quad \Rightarrow \quad a(t) = e^{\pm \sqrt{\frac{\Lambda}{3}} t}$$

- Anti de Sitter
+ de Sitter

- Expansão acelerada do Universo. Grosso modo Inflação e expansão acelerada atual do universo.

- Para outros modelos cosmológicos precisamos conhecer as componentes do Universo e suas características com mais cuidado.

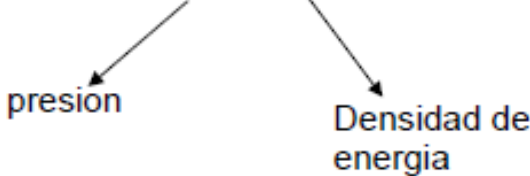
Equação de Estado:

$$w = \frac{p}{\rho}$$

RESUMO:

$$ds^2 = -dt^2 + a^2(t) \left(\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 d\Omega^2 \right) \longrightarrow \begin{array}{l} \text{Métrica} \\ \text{Robertson-Walker} \end{array}$$

$$T^\mu{}_\nu = (p + \epsilon) U^\mu U_\nu - p \delta^\mu_\nu \quad (\text{Tensor Energia-Momento})$$



presion Densidad de energia


$$\frac{\dot{a}^2}{a^2} + \frac{kc^2}{a^2} = \frac{8\pi G\rho}{3} \qquad \frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3} \left(\rho + \frac{3p}{c^2} \right) \quad (\text{Eqs. De Friedmann})$$

$$\dot{\rho} + 3\frac{\dot{a}}{a}(\rho + p) = 0$$

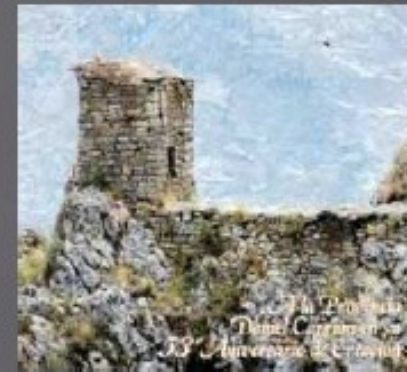
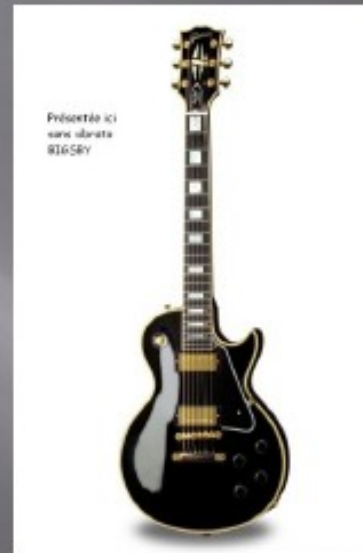
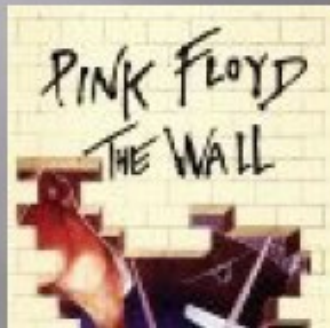
(Conservação energia-momento)

$$w = \frac{p}{\rho}$$

(Eq. de estado)

Componentes do Universo

Do que está composto o Universo?



Componentes en la Tierra

TABLA PERIÓDICA DE LOS ELEMENTOS
McGraw-Hill/INTERAMERICANA DE ESPAÑA, S.A.U.

Grupo IA 1

Periodo 1

1 H Hidrógeno

2 He Helio

3 Li Litio

4 Be Berilio

5 B Boro

6 C Carbono

7 N Nitrógeno

8 O Oxígeno

9 F Fluor

10 Ne Neón

11 Na Sodio

12 Mg Magnesio

13 Al Aluminio

14 Si Silicio

15 P Fósforo

16 S Azufre

17 Cl Cloro

18 Ar Argón

19 K Potasio

20 Ca Calcio

21 Sc Escandio

22 Ti Titanio

23 V Vanadio

24 Cr Cromo

25 Mn Manganeso

26 Fe Hierro

27 Co Cobalto

28 Ni Níquel

29 Cu Cobre

30 Zn Zinc

31 Ga Galio

32 Ge Germanio

33 As Arsénico

34 Se Selenio

35 Br Bromo

36 Kr Kriptón

37 Rb Rubidio

38 Sr Estroncio

39 Y Ytrio

40 Zr Zircón

41 Nb Niobio

42 Mo Molibdeno

43 Tc Tecnecio

44 Ru Rutenio

45 Rh Rodio

46 Pd Paladio

47 Ag Plata

48 Cd Cadmio

49 In Indio

50 Sn Estaño

51 Sb Antimonio

52 Te Teluro

53 I Yodo

54 Xe Xenón

55 Cs Cesio

56 Ba Bario

57 La Lantano

58 Ce Cerio

59 Pr Praseodimio

60 Nd Neodimio

61 Pm Prometio

62 Sm Samario

63 Eu Europio

64 Gd Gadolinio

65 Tb Terbio

66 Dy Disprosio

67 Ho Holmio

68 Er Eritrio

69 Tm Tulio

70 Yb Ytterbio

71 Lu Lutecio

72 Hf Hafnio

73 Ta Tantalio

74 W Tungsteno

75 Re Renio

76 Os Osmio

77 Ir Iridio

78 Pt Platino

79 Au Oro

80 Hg Mercurio

81 Tl Talio

82 Pb Plomo

83 Bi Bismuto

84 Po Polonio

85 At Astenio

86 Rn Radón

87 Fr Francio

88 Ra Radio

89 Ac Actinio

90 Th Torio

91 Pa Protactinio

92 U Uranio

93 Np Neptunio

94 Pu Plutonio

95 Am Americio

96 Cm Curcio

97 Bk Berkelio

98 Cf Californio

99 Es Eiseinsteinio

100 Fm Fermio

101 Md Mendelevio

102 No Nobelio

103 Lr Lawrencio

104 Rf Rutherfordio

105 Db Dubnio

106 Sg Seaborgio

107 Bh Bohrio

108 Hs Hassio

109 Mt Meitnerio

110 Uun Ununio

111 Uuu Ununio

112 Uub Ununio

113 Uuq Ununio

114 Uuh Ununio

115 Uuo Ununio

116 Uuh Ununio

117 Uuo Ununio

118 Uuo Ununio

119 Uuo Ununio

120 Uuo Ununio

121 Uuo Ununio

122 Uuo Ununio

123 Uuo Ununio

124 Uuo Ununio

125 Uuo Ununio

126 Uuo Ununio

127 Uuo Ununio

128 Uuo Ununio

129 Uuo Ununio

130 Uuo Ununio

131 Uuo Ununio

132 Uuo Ununio

133 Uuo Ununio

134 Uuo Ununio

135 Uuo Ununio

136 Uuo Ununio

137 Uuo Ununio

138 Uuo Ununio

139 Uuo Ununio

140 Uuo Ununio

141 Uuo Ununio

142 Uuo Ununio

143 Uuo Ununio

144 Uuo Ununio

145 Uuo Ununio

146 Uuo Ununio

147 Uuo Ununio

148 Uuo Ununio

149 Uuo Ununio

150 Uuo Ununio

151 Uuo Ununio

152 Uuo Ununio

153 Uuo Ununio

154 Uuo Ununio

155 Uuo Ununio

156 Uuo Ununio

157 Uuo Ununio

158 Uuo Ununio

159 Uuo Ununio

160 Uuo Ununio

161 Uuo Ununio

162 Uuo Ununio

163 Uuo Ununio

164 Uuo Ununio

165 Uuo Ununio

166 Uuo Ununio

167 Uuo Ununio

168 Uuo Ununio

169 Uuo Ununio

170 Uuo Ununio

171 Uuo Ununio

172 Uuo Ununio

173 Uuo Ununio

174 Uuo Ununio

175 Uuo Ununio

176 Uuo Ununio

177 Uuo Ununio

178 Uuo Ununio

179 Uuo Ununio

180 Uuo Ununio

181 Uuo Ununio

182 Uuo Ununio

183 Uuo Ununio

184 Uuo Ununio

185 Uuo Ununio

186 Uuo Ununio

187 Uuo Ununio

188 Uuo Ununio

189 Uuo Ununio

190 Uuo Ununio

191 Uuo Ununio

192 Uuo Ununio

193 Uuo Ununio

194 Uuo Ununio

195 Uuo Ununio

196 Uuo Ununio

197 Uuo Ununio

198 Uuo Ununio

199 Uuo Ununio

200 Uuo Ununio

201 Uuo Ununio

202 Uuo Ununio

203 Uuo Ununio

204 Uuo Ununio

205 Uuo Ununio

206 Uuo Ununio

207 Uuo Ununio

208 Uuo Ununio

209 Uuo Ununio

210 Uuo Ununio

211 Uuo Ununio

212 Uuo Ununio

213 Uuo Ununio

214 Uuo Ununio

215 Uuo Ununio

216 Uuo Ununio

217 Uuo Ununio

218 Uuo Ununio

219 Uuo Ununio

220 Uuo Ununio

221 Uuo Ununio

222 Uuo Ununio

223 Uuo Ununio

224 Uuo Ununio

225 Uuo Ununio

226 Uuo Ununio

227 Uuo Ununio

228 Uuo Ununio

229 Uuo Ununio

230 Uuo Ununio

231 Uuo Ununio

232 Uuo Ununio

233 Uuo Ununio

234 Uuo Ununio

235 Uuo Ununio

236 Uuo Ununio

237 Uuo Ununio

238 Uuo Ununio

239 Uuo Ununio

240 Uuo Ununio

241 Uuo Ununio

242 Uuo Ununio

243 Uuo Ununio

244 Uuo Ununio

245 Uuo Ununio

246 Uuo Ununio

247 Uuo Ununio

248 Uuo Ununio

249 Uuo Ununio

250 Uuo Ununio

251 Uuo Ununio

252 Uuo Ununio

253 Uuo Ununio

254 Uuo Ununio

255 Uuo Ununio

256 Uuo Ununio

257 Uuo Ununio

258 Uuo Ununio

259 Uuo Ununio

260 Uuo Ununio

261 Uuo Ununio

262 Uuo Ununio

263 Uuo Ununio

264 Uuo Ununio

265 Uuo Ununio

266 Uuo Ununio

267 Uuo Ununio

268 Uuo Ununio

269 Uuo Ununio

270 Uuo Ununio

271 Uuo Ununio

272 Uuo Ununio

273 Uuo Ununio

274 Uuo Ununio

275 Uuo Ununio

276 Uuo Ununio

277 Uuo Ununio

278 Uuo Ununio

279 Uuo Ununio

280 Uuo Ununio

281 Uuo Ununio

282 Uuo Ununio

283 Uuo Ununio

284 Uuo Ununio

285 Uuo Ununio

286 Uuo Ununio

287 Uuo Ununio

288 Uuo Ununio

289 Uuo Ununio

290 Uuo Ununio

291 Uuo Ununio

292 Uuo Ununio

293 Uuo Ununio

294 Uuo Ununio

295 Uuo Ununio

296 Uuo Ununio

297 Uuo Ununio

298 Uuo Ununio

299 Uuo Ununio

300 Uuo Ununio

301 Uuo Ununio

302 Uuo Ununio

303 Uuo Ununio

304 Uuo Ununio

305 Uuo Ununio

306 Uuo Ununio

307 Uuo Ununio

308 Uuo Ununio

309 Uuo Ununio

310 Uuo Ununio

311 Uuo Ununio

312 Uuo Ununio

313 Uuo Ununio

314 Uuo Ununio

315 Uuo Ununio

316 Uuo Ununio

317 Uuo Ununio

318 Uuo Ununio

319 Uuo Ununio

320 Uuo Ununio

321 Uuo Ununio

322 Uuo Ununio

323 Uuo Ununio

324 Uuo Ununio

325 Uuo Ununio

326 Uuo Ununio

327 Uuo Ununio

328 Uuo Ununio

329 Uuo Ununio

330 Uuo Ununio

331 Uuo Ununio

332 Uuo Ununio

333 Uuo Ununio

334 Uuo Ununio

335 Uuo Ununio

336 Uuo Ununio

337 Uuo Ununio

338 Uuo Ununio

339 Uuo Ununio

340 Uuo Ununio

341 Uuo Ununio

342 Uuo Ununio

343 Uuo Ununio

344 Uuo Ununio

345 Uuo Ununio

346 Uuo Ununio

347 Uuo Ununio

348 Uuo Ununio

349 Uuo Ununio

350 Uuo Ununio

351 Uuo Ununio

352 Uuo Ununio

353 Uuo Ununio

354 Uuo Ununio

355 Uuo Ununio

356 Uuo Ununio

357 Uuo Ununio

358 Uuo Ununio

359 Uuo Ununio

360 Uuo Ununio

361 Uuo Ununio

362 Uuo Ununio

363 Uuo Ununio

364 Uuo Ununio

365 Uuo Ununio

366 Uuo Ununio

367 Uuo Ununio

368 Uuo Ununio

369 Uuo Ununio

370 Uuo Ununio

371 Uuo Ununio

372 Uuo Ununio

373 Uuo Ununio

374 Uuo Ununio

375 Uuo Ununio

376 Uuo Ununio

377 Uuo Ununio

378 Uuo Ununio

379 Uuo Ununio

380 Uuo Ununio

381 Uuo Ununio

382 Uuo Ununio

383 Uuo Ununio

384 Uuo Ununio

385 Uuo Ununio

386 Uuo Ununio

387 Uuo Ununio

388 Uuo Ununio

389 Uuo Ununio

390 Uuo Ununio

391 Uuo Ununio

392 Uuo Ununio

393 Uuo Ununio

394 Uuo Ununio

395 Uuo Ununio

396 Uuo Ununio

397 Uuo Ununio

398 Uuo Ununio

399 Uuo Ununio

400 Uuo Ununio

401 Uuo Ununio

402 Uuo Ununio

403 Uuo Ununio

404 Uuo Ununio

405 Uuo Ununio

406 Uuo Ununio

407 Uuo Ununio

408 Uuo Ununio

409 Uuo Ununio

410 Uuo Ununio

411 Uuo Ununio

412 Uuo Ununio

413 Uuo Ununio

414 Uuo Ununio

415 Uuo Ununio

416 Uuo Ununio

417 Uuo Ununio

418 Uuo Ununio

419 Uuo Ununio

420 Uuo Ununio

421 Uuo Ununio

422 Uuo Ununio

423 Uuo Ununio

424 Uuo Ununio

425 Uuo Ununio

426 Uuo Ununio

427 Uuo Ununio

428 Uuo Ununio

429 Uuo Ununio

430 Uuo Ununio

431 Uuo Ununio

432 Uuo Ununio

433 Uuo Ununio

434 Uuo Ununio

435 Uuo Ununio

436 Uuo Ununio

437 Uuo Ununio

438 Uuo Ununio

439 Uuo Ununio

440 Uuo Ununio

441 Uuo Ununio

442 Uuo Ununio

443 Uuo Ununio

444 Uuo Ununio

445 Uuo Ununio

446 Uuo Ununio

447 Uuo Ununio

448 Uuo Ununio

449 Uuo Ununio

450 Uuo Ununio

451 Uuo Ununio

452 Uuo Ununio

453 Uuo Ununio

454 Uuo Ununio

455 Uuo Ununio

456 Uuo Ununio

457 Uuo Ununio

458 Uuo Ununio

459 Uuo Ununio

460 Uuo Ununio

461 Uuo Ununio

462 Uuo Ununio

463 Uuo Ununio

464 Uuo Ununio

465 Uuo Ununio

466 Uuo Ununio

467 Uuo Ununio

468 Uuo Ununio

469 Uuo Ununio

470 Uuo Ununio

471 Uuo Ununio

472 Uuo Ununio

473 Uuo Ununio

474 Uuo Ununio

475 Uuo Ununio

476 Uuo Ununio

477 Uuo Ununio

478 Uuo Ununio

479 Uuo Ununio

480 Uuo Ununio

481 Uuo Ununio

482 Uuo Ununio

483 Uuo Ununio

484 Uuo Ununio

485 Uuo Ununio

486 Uuo Ununio

487 Uuo Ununio

488 Uuo Ununio

489 Uuo Ununio

490 Uuo Ununio

491 Uuo Ununio

492 Uuo Ununio

493 Uuo Ununio

494 Uuo Ununio

495 Uuo Ununio

496 Uuo Ununio

497 Uuo Ununio

498 Uuo Ununio

499 Uuo Ununio

500 Uuo Ununio

501 Uuo Ununio

502 Uuo Ununio

503 Uuo Ununio

504 Uuo Ununio

505 Uuo Ununio

506 Uuo Ununio

507 Uuo Ununio

508 Uuo Ununio

509 Uuo Ununio

510 Uuo Ununio

511 Uuo Ununio

512 Uuo Ununio

513 Uuo Ununio

514 Uuo Ununio

515 Uuo Ununio

516 Uuo Ununio

517 Uuo Ununio

518 Uuo Ununio

519 Uuo Ununio

520 Uuo Ununio

521 Uuo Ununio

522 Uuo Ununio

523 Uuo Ununio

524 Uuo Ununio

525 Uuo Ununio

526 Uuo Ununio

527 Uuo Ununio

528 Uuo Ununio

529 Uuo Ununio

530 Uuo Ununio

531 Uuo Ununio

532 Uuo Ununio

533 Uuo Ununio

534 Uuo Ununio

535 Uuo Ununio

536 Uuo Ununio

537 Uuo Ununio

538 Uuo Ununio

539 Uuo Ununio

540 Uuo Ununio

541 Uuo Ununio

542 Uuo Ununio

543 Uuo Ununio

544 Uuo Ununio

545 Uuo Ununio

546 Uuo Ununio

547 Uuo Ununio

548 Uuo Ununio

549 Uuo Ununio

550 Uuo Ununio

551 Uuo Ununio

552 Uuo Ununio

553 Uuo Ununio

554 Uuo Ununio

555 Uuo Ununio

556 Uuo Ununio

557 Uuo Ununio

558 Uuo Ununio

559 Uuo Ununio

560 Uuo Ununio

561 Uuo Ununio

562 Uuo Ununio

563 Uuo Ununio

564 Uuo Ununio

565 Uuo Ununio

566 Uuo Ununio

567 Uuo Ununio

568 Uuo Ununio

569 Uuo Ununio

570 Uuo Ununio

571 Uuo Ununio

572 Uuo Ununio

573 Uuo Ununio

574 Uuo Ununio

575 Uuo Ununio

576 Uuo Ununio

577 Uuo Ununio

578 Uuo Ununio

579 Uuo Ununio

580 Uuo Ununio

581 Uuo Ununio

582 Uuo Ununio

583 Uuo Ununio

584 Uuo Ununio

585 Uuo Ununio

586 Uuo Ununio

587 Uuo Ununio

588 Uuo Ununio

589 Uuo Ununio

590 Uuo Ununio

591 Uuo Ununio

592 Uuo Ununio

593 Uuo Ununio

594 Uuo Ununio

595 Uuo Ununio

596 Uuo Ununio

597 Uuo Ununio

598 Uuo Ununio

599 Uuo Ununio

600 Uuo Ununio

601 Uuo Ununio

602 Uuo Ununio

603 Uuo Ununio

604 Uuo Ununio

605 Uuo Ununio

606 Uuo Ununio

607 Uuo Ununio

608 Uuo Ununio

609 Uuo Ununio

610 Uuo Ununio

611 Uuo Ununio

612 Uuo Ununio

613 Uuo Ununio

614 Uuo Ununio

615 Uuo Ununio

616 Uuo Ununio

617 Uuo Ununio

618 Uuo Ununio

619 Uuo Ununio

620 Uuo Ununio

621 Uuo Ununio

622 Uuo Ununio

623 Uuo Ununio

624 Uuo Ununio

625 Uuo Ununio

626 Uuo Ununio

627 Uuo Ununio

628 Uuo Ununio

629 Uuo Ununio

630 Uuo Ununio

631 Uuo Ununio

632 Uuo Ununio

633 Uuo Ununio

634 Uuo Ununio

635 Uuo Ununio

636 Uuo Ununio

637 Uuo Ununio

638 Uuo Ununio

639 Uuo Ununio

640 Uuo Ununio

641 Uuo Ununio

642 Uuo Ununio

643 Uuo Ununio

644 Uuo Ununio

645 Uuo Ununio

646 Uuo Ununio

647 Uuo Ununio

648 Uuo Ununio

649 Uuo Ununio

650 Uuo Ununio

651 Uuo Ununio

652 Uuo Ununio

653 Uuo Ununio

654 Uuo Ununio

655 Uuo Ununio

656 Uuo Ununio

657 Uuo Ununio

658 Uuo Ununio

659 Uuo Ununio

660 Uuo Ununio

661 Uuo Ununio

662 Uuo Ununio

663 Uuo Ununio

664 Uuo Ununio

665 Uuo Ununio

666 Uuo Ununio

667 Uuo Ununio

668 Uuo Ununio

669 Uuo Ununio

670 Uuo Ununio

671 Uuo Ununio

672 Uuo Ununio

673 Uuo Ununio

674 Uuo Ununio

675 Uuo Ununio

676 Uuo Ununio

677 Uuo Ununio

678 Uuo Ununio

679 Uuo Ununio

680 Uuo Ununio

681 Uuo Ununio

682 Uuo Ununio

683 Uuo Ununio

684 Uuo Ununio

685 Uuo Ununio

686 Uuo Ununio

687 Uuo Ununio

688 Uuo Ununio

689 Uuo Ununio

690 Uuo Ununio

691 Uuo Ununio

692 Uuo Ununio

693 Uuo Ununio

694 Uuo Ununio

695 Uuo Ununio

696 Uuo Ununio

697 Uuo Ununio

698 Uuo Ununio

699 Uuo Ununio

700 Uuo Ununio

701 Uuo Ununio

702 Uuo Ununio

703 Uuo Ununio

704 Uuo Ununio

705 Uuo Ununio

706 Uuo Ununio

707 Uuo Ununio

708 Uuo Ununio

709 Uuo Ununio

710 Uuo Ununio

711 Uuo Ununio

712 Uuo Ununio

713 Uuo Ununio

714 Uuo Ununio

715 Uuo Ununio

716 Uuo Ununio

717 Uuo Ununio

718 Uuo Ununio

719 Uuo Ununio

720 Uuo Ununio

721 Uuo Ununio

722 Uuo Ununio

723 Uuo Ununio

724 Uuo Ununio

725 Uuo Ununio

726 Uuo Ununio

727 Uuo Ununio

728 Uuo Ununio

729 Uuo Ununio

730 Uuo Ununio

731 Uuo Ununio

732 Uuo Ununio

733 Uuo Ununio

734 Uuo Ununio

735 Uuo Ununio

736 Uuo Ununio

737 Uuo Ununio

738 Uuo Ununio

739 Uuo Ununio

740 Uuo Ununio

741 Uuo Ununio

742 Uuo Ununio

743 Uuo Ununio

744 Uuo Ununio

745 Uuo Ununio

746 Uuo Ununio

747 Uuo Ununio

748 Uuo Ununio

749 Uuo Ununio

750 Uuo Ununio

751 Uuo Ununio

752 Uuo Ununio

753 Uuo Ununio

754 Uuo Ununio

755 Uuo Ununio

756 Uuo Ununio

757 Uuo Ununio

758 Uuo Ununio

759 Uuo Ununio

760 Uuo Ununio

761 Uuo Ununio

762 Uuo Ununio

763 Uuo Ununio

764 Uuo Ununio

765 Uuo Ununio

766 Uuo Ununio

767 Uuo Ununio

768 Uuo Ununio

769 Uuo Ununio

770 Uuo Ununio

771 Uuo Ununio

772 Uuo Ununio

773 Uuo Ununio

774 Uuo Ununio

775 Uuo Ununio

776 Uuo Ununio

777 Uuo Ununio

778 Uuo Ununio

779 Uuo Ununio

780 Uuo Ununio

781 Uuo Ununio

782 Uuo Ununio

783 Uuo Ununio

784 Uuo Ununio

785 Uuo Ununio

786 Uuo Ununio

787 Uuo Ununio

788 Uuo Ununio

789 Uuo Ununio

790 Uuo Ununio

791 Uuo Ununio

792 Uuo Ununio

793 Uuo Ununio

794 Uuo Ununio

795 Uuo Ununio

796 Uuo Ununio

797 Uuo Ununio

798 Uuo Ununio

799 Uuo Ununio

800 Uuo Ununio

801 Uuo Ununio

802 Uuo Ununio

803 Uuo Ununio

804 Uuo Ununio

805 Uuo Ununio

806 Uuo Ununio

807 Uuo Ununio

808 Uuo Ununio

809 Uuo Ununio

810 Uuo Ununio

811 Uuo Ununio

812 Uuo Ununio

813 Uuo Ununio

814 Uuo Ununio

815 Uuo Ununio

816 Uuo Ununio

817 Uuo Ununio

818 Uuo Ununio

819 Uuo Ununio

820 Uuo Ununio

821 Uuo Ununio

822 Uuo Ununio

823 Uuo Ununio

824 Uuo Ununio

825 Uuo Ununio

826 Uuo Ununio

827 Uuo Ununio

828 Uuo Ununio

829 Uuo Ununio

830 Uuo Ununio

831 Uuo Ununio

832 Uuo Ununio

833 Uuo Ununio

834 Uuo Ununio

835 Uuo Ununio

836 Uuo Ununio

837 Uuo Ununio

838 Uuo Ununio

839 Uuo Ununio

840 Uuo Ununio

841 Uuo Ununio

842 Uuo Ununio

843 Uuo Ununio

844 Uuo Ununio

845 Uuo Ununio

846 Uuo Ununio

847 Uuo Ununio

848 Uuo Ununio

849 Uuo Ununio

850 Uuo Ununio

851 Uuo Ununio

852 Uuo Ununio

853 Uuo Ununio

854 Uuo Ununio

855 Uuo Ununio

856 Uuo Ununio

857 Uuo Ununio

858 Uuo Ununio

859 Uuo Ununio

860 Uuo Ununio

861 Uuo Ununio

862 Uuo Ununio

863 Uuo Ununio

864 Uuo Ununio

865 Uuo Ununio

866 Uuo Ununio

867 Uuo Ununio

868 Uuo Ununio

869 Uuo Ununio

870 Uuo Ununio

871 Uuo Ununio

872 Uuo Ununio

873 Uuo Ununio

874 Uuo Ununio

875 Uuo Ununio

876 Uuo Ununio

877 Uuo Ununio

878 Uuo Ununio

879 Uuo Ununio

880 Uuo Ununio

881 Uuo Ununio

882 Uuo Ununio

883 Uuo Ununio

884 Uuo Ununio

885 Uuo Ununio

886 Uuo Ununio

887 Uuo Ununio

888 Uuo Ununio

889 Uuo Ununio

890 Uuo Ununio

891 Uuo Ununio

892 Uuo Ununio

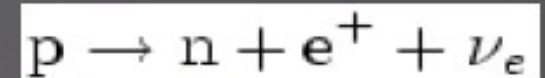
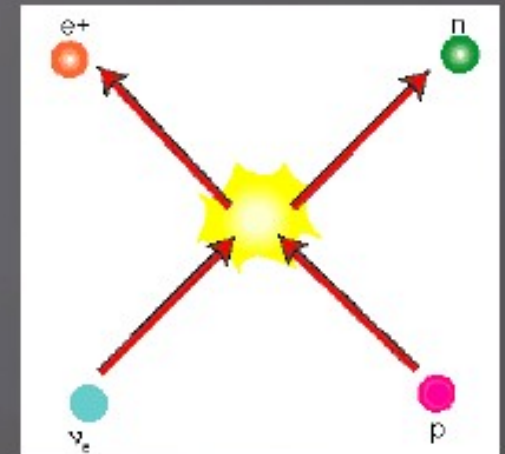
893 Uuo Ununio

894 Uuo Unun

En forma natural (bajas energías) todo esto compuesto de:

electrones + protones + neutrones + fotones

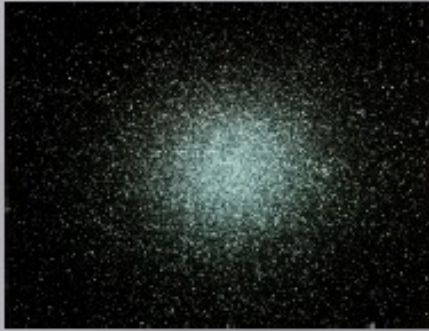
En forma artificial (altas energías):



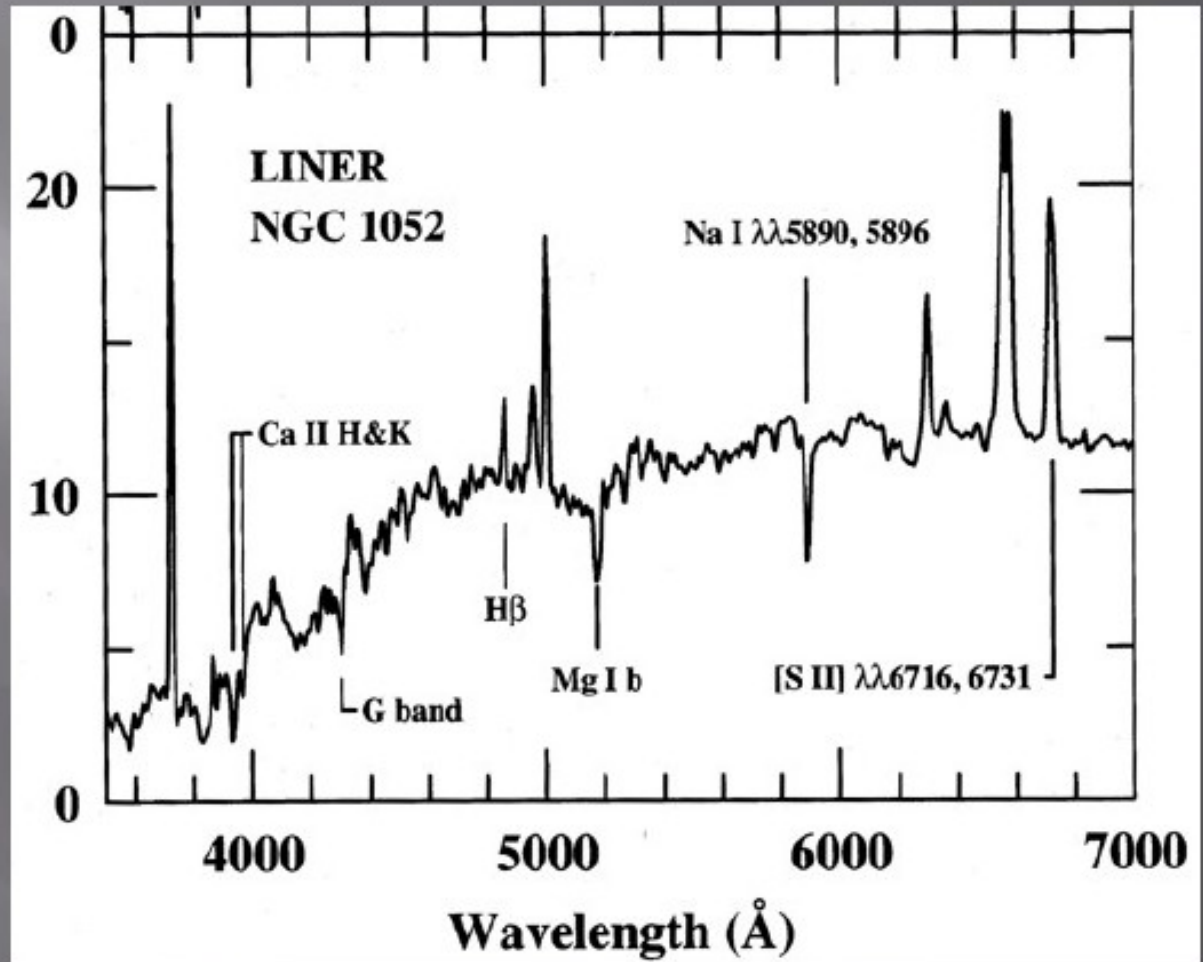
Neutrinos + otras partículas elementales (positrones, muones, etc)

En la Tierra: electrones + protones + neutrones + otras PE (Materia barionica)

Componentes del Universo

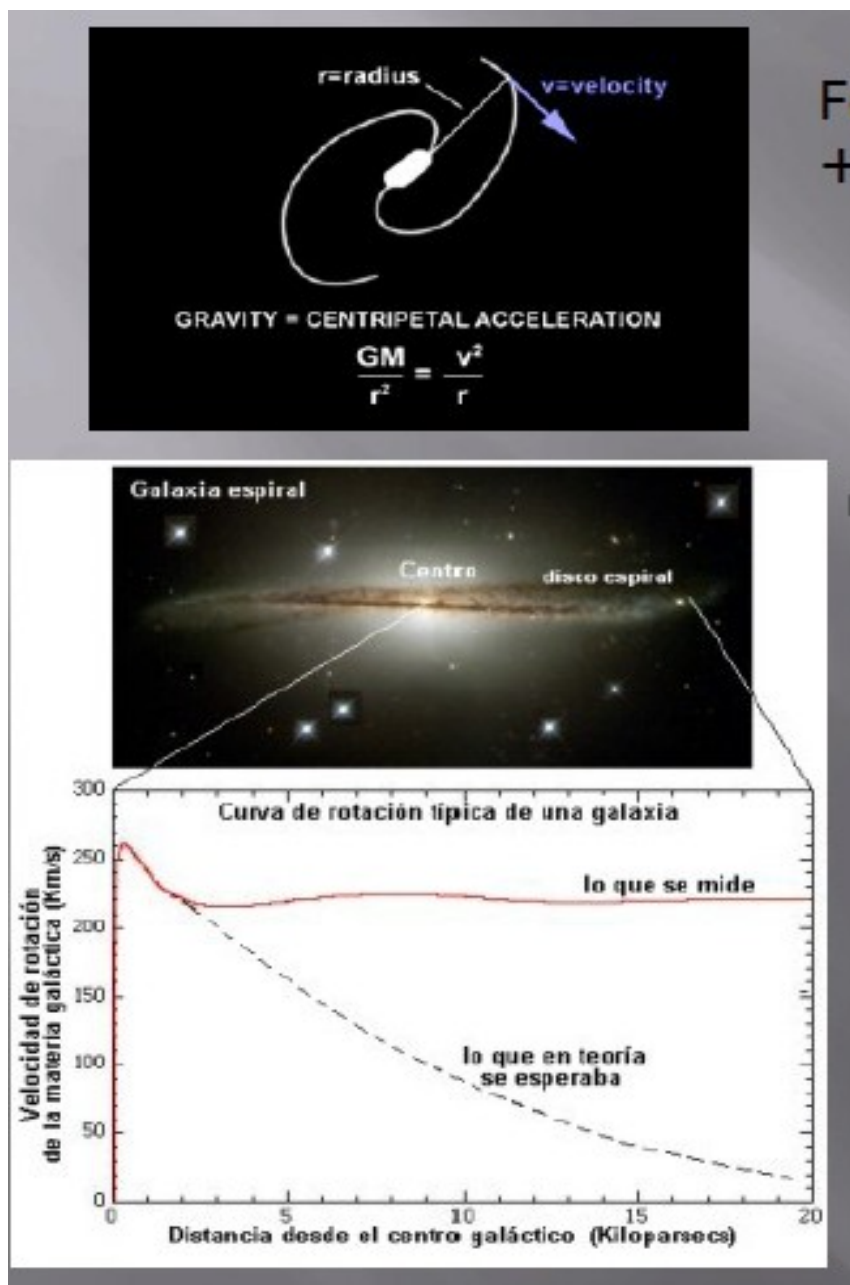


Espectroscopia y líneas de absorción



En el Universo: Materia barionica + radiación (fotons+neutrinos)

CURVAS DE ROTAÇÃO DE GALÁXIAS ESPIRAIS: MATÉRIA ESCURA



- A velocidade deve cair com a distância ao centro.

- Mediante efeitos das interações de fótons com bárions, pode se medir a massa bariônica.

- A força de gravidade decai mais lentamente do que o esperado.

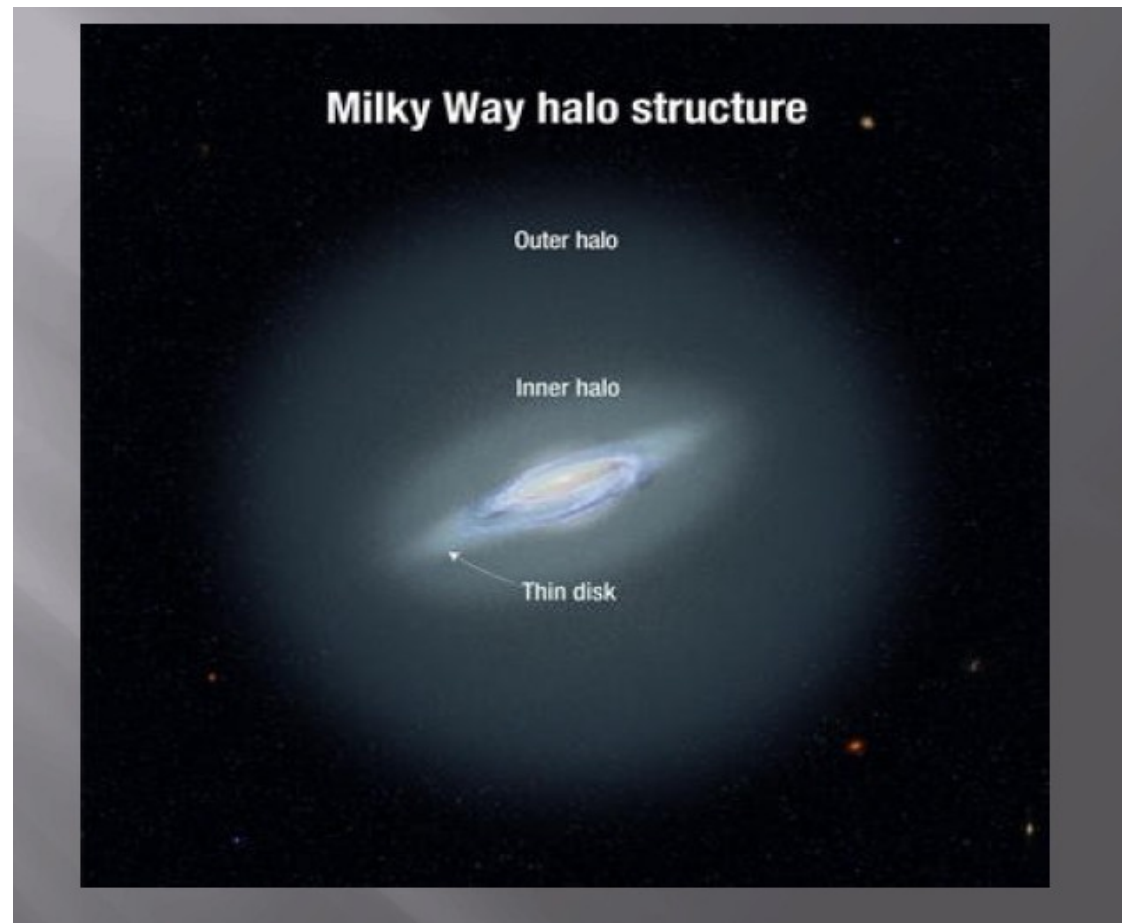
- Deveria ter mais matéria do que esperado
Diferente a matéria bariônica.

- Matéria que não interage com fótons e nem bárions.



MATÉRIA ESCURA

HALOS DE MATÉRIA ESCURA



- O Universo estaria composto de matéria bariônica, radiação (fótons e neutrinos) e matéria escura.

$w \sim 0$ (bárions), $w = 1/3$ (radiação), $w \sim 0$ (matéria escura fria)
 $w = -1$ (constante cosmológica)

UNIVERSO DOMINADO PELA RADIAÇÃO, MATÉRIA E CONSTANTE COSMOLÓGICA

Friedman equations

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 + \frac{k}{a^2} = \frac{8\pi G}{3} \rho$$

$$\ddot{a} = -\frac{4\pi G}{3}(\rho + 3p)$$

$$H \equiv \frac{\dot{a}}{a} \quad \text{expansion rate}$$

$$k \begin{cases} > 0 & \text{closed} \\ = 0 & \text{flat} \\ < 0 & \text{open} \end{cases}$$

Ecuación de estado

$$\dot{\rho} + 3\frac{\dot{a}}{a}(\rho + p) = 0$$

$$\rho \propto a^{-3(1+w)}$$

$$w = p/\rho$$

Various kinds of the cosmic fluids with different w

• radiation	$p_R = \rho_R/3$	$w = 1/3$	$\rho \propto a^{-4}$	$a \propto t^{1/2}$
• matter	$p_M = 0$	$w = 0$	$\rho \propto a^{-3}$	$a \propto t^{2/3}$
• vacuum	$p_\Lambda = -\rho_\Lambda$	$w = -1$	$\rho \propto a^0$	$a \propto e^{H_0 t}$

(Constante Cosmológica)

O Universo estaria composto de matéria (bariônica e matéria escura fria) e radiação (fótons e neutrinos).

MODELO DO BIG BANG

1. El universo se expande:

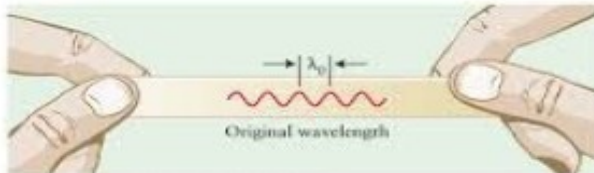
$$a \propto t^{1/2} \quad (\text{radiación})$$

$$a \propto t^{2/3} \quad (\text{materia})$$

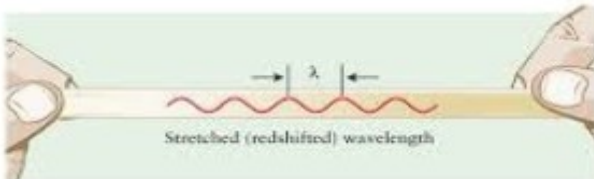
$$a \propto e^{H_0 t} \quad (\text{constante cosmológica})$$

2. En el pasado, todos los puntos del Universo estaban juntos (Big Bang)

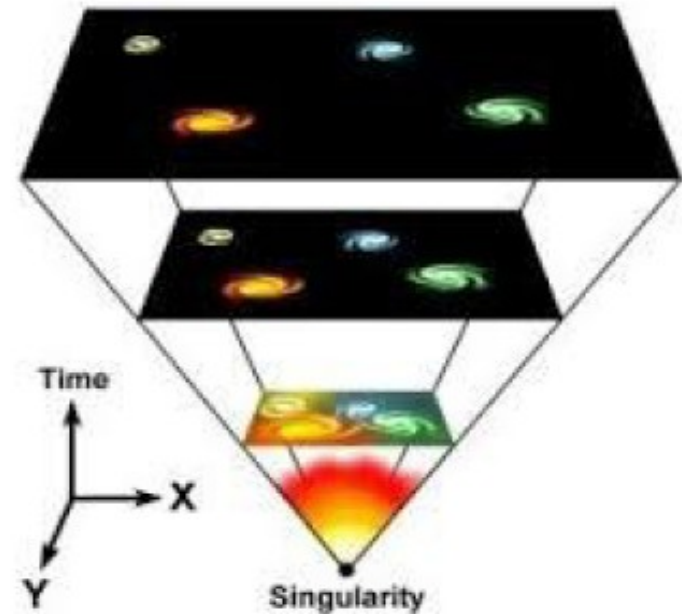
3. Corrimiento al rojo por causa de la expansión del universo



(a) A wave drawn on a rubber band ...



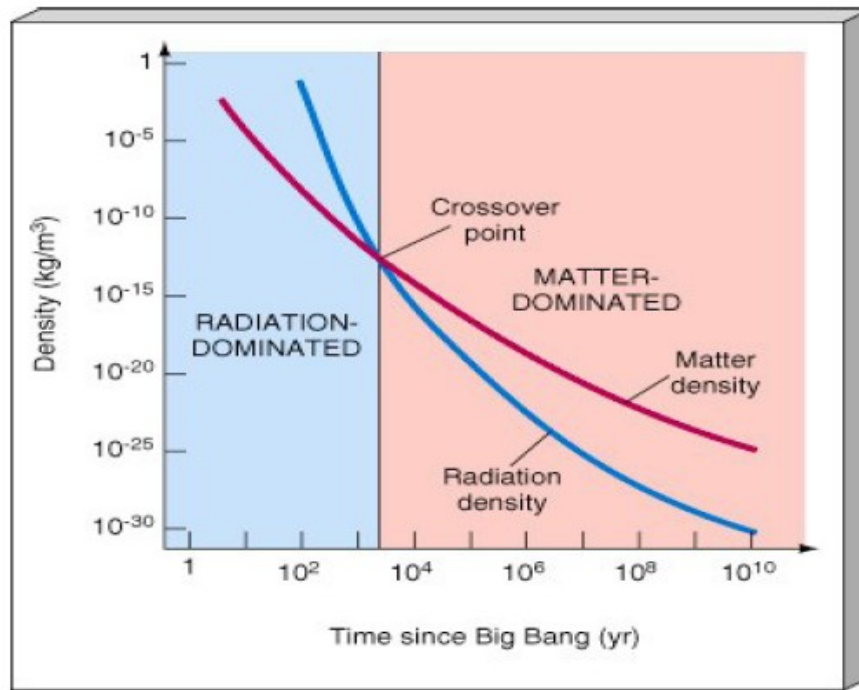
(b) ... increases in wavelength as the rubber band is stretched.



$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \sqrt{\frac{1 + v/c}{1 - v/c}} - 1$$

redshift

$$a = \frac{1}{1 + z}$$



4. O Universo teve duas eras durante sua evolução: A primeira dominada Pela radiação e a segunda, pela matéria.

5. Lei de Hubble (Primeira confirmação do modelo do modelo de univ, em expansão)

6. A existência da Radiação Cósmica de Fundo (Segunda confirmação de univ, em Expansão).

7. Nucleossíntese Primordial (Terceira confirmação de univ, em Expansão).

Lei de Hubble

$$a(t) = a(t_0) + (t - t_0) \frac{da}{dt} \Big|_{t=t_0} + \dots$$

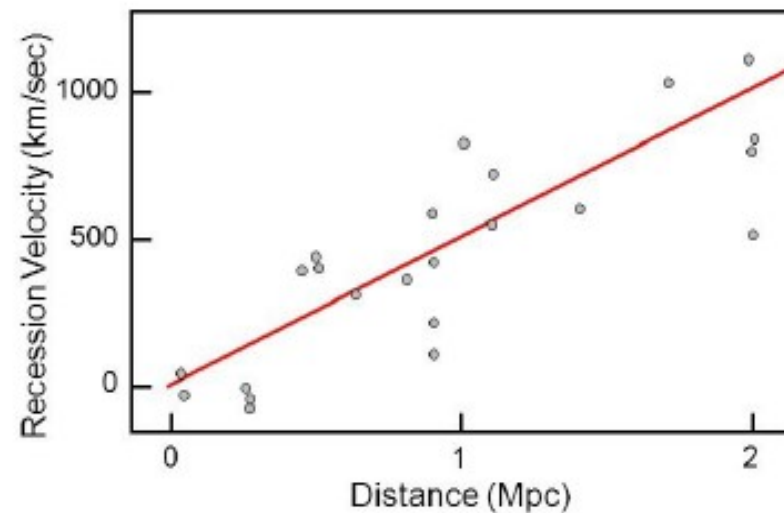
$$a(t) = a(t_0) [1 + (t - t_0) H_0] \quad H_0 = \frac{\dot{a}(t_0)}{a(t_0)} \longrightarrow \text{Constante de Hubble}$$

$$z \approx H_0 d \longrightarrow \text{Distancia del objeto}$$

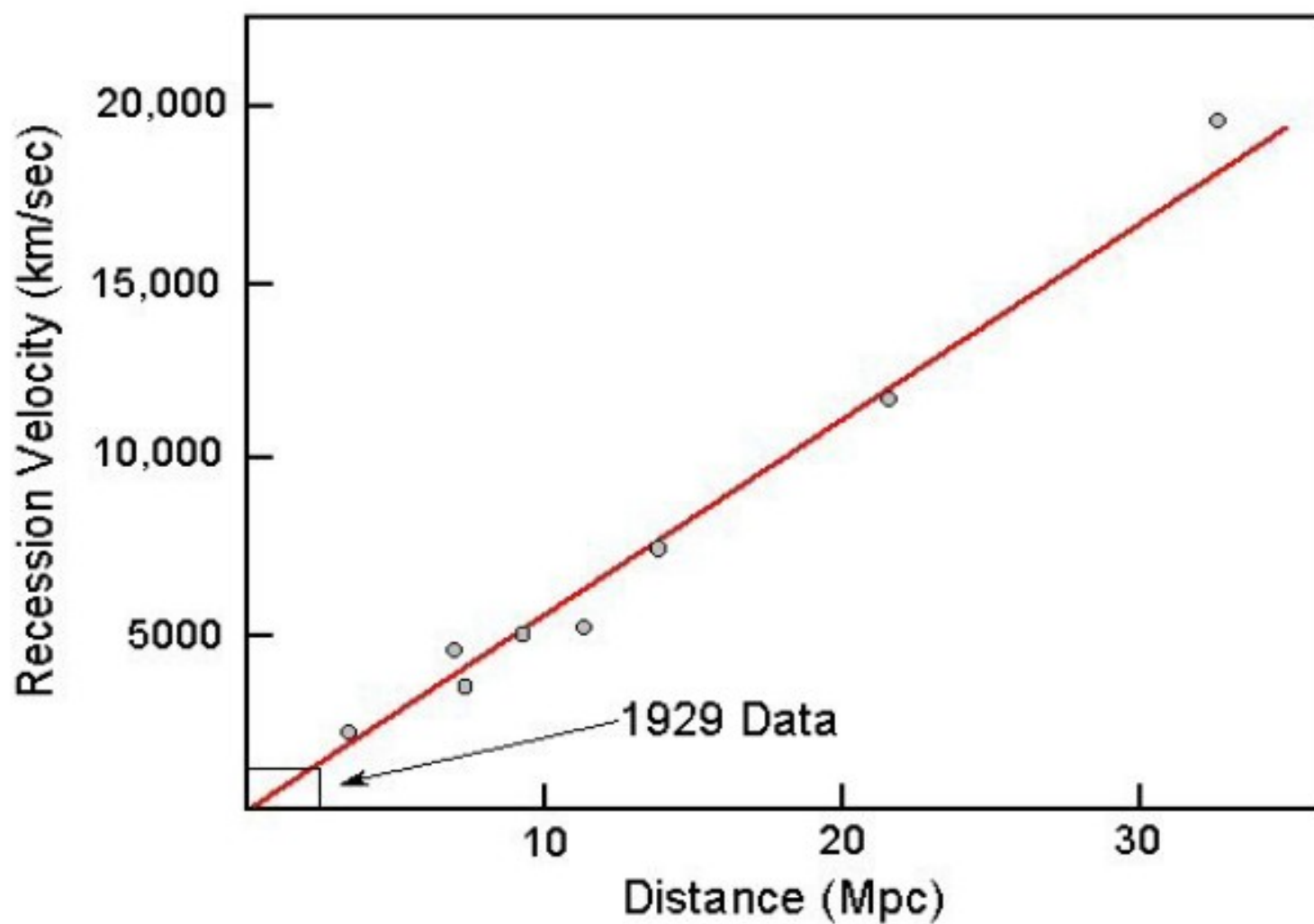
Hubble's Data (1929)

$$z \approx \frac{v}{c}$$

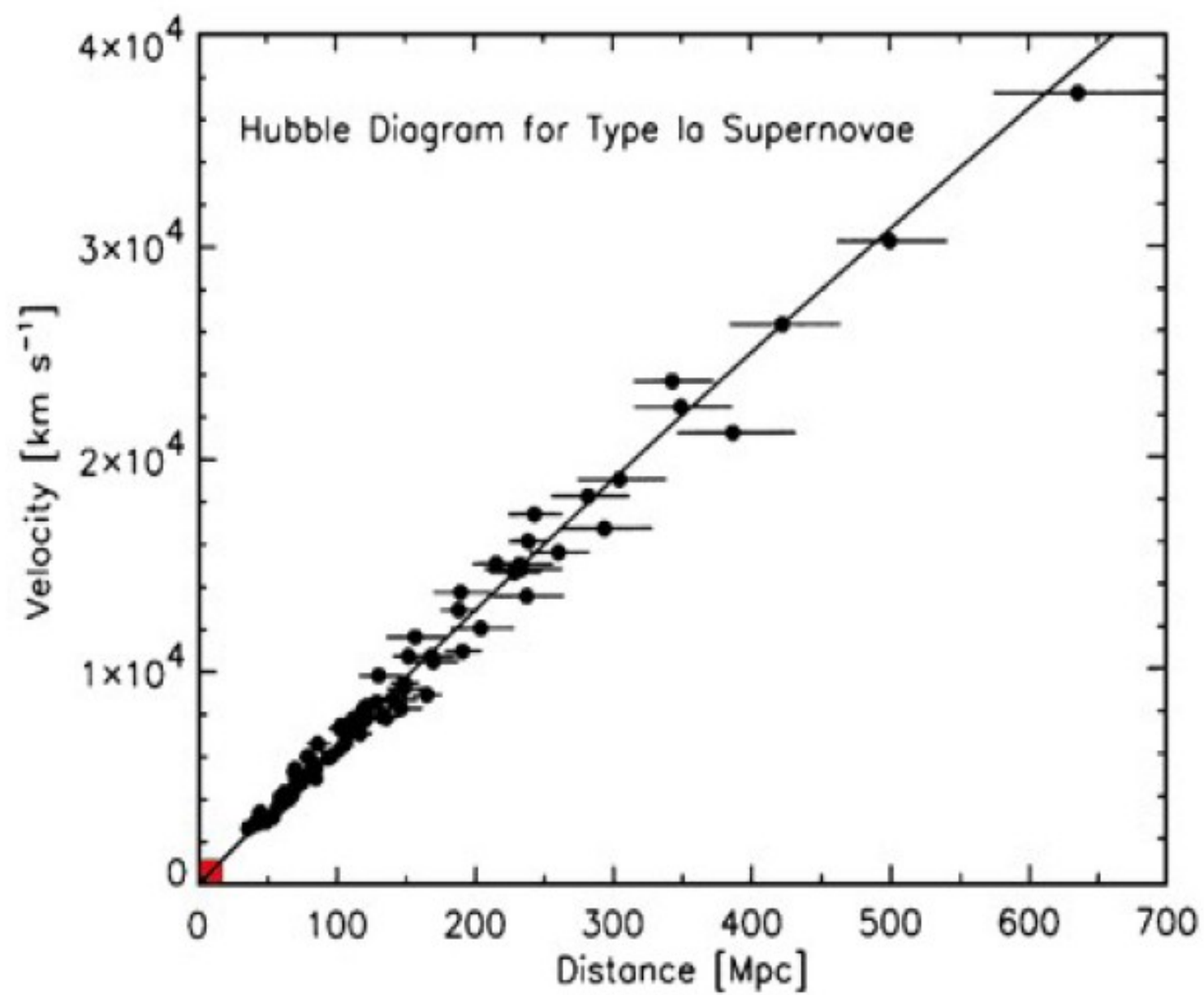
$$H_0 = 500 \text{ Km/s/Mpc}$$



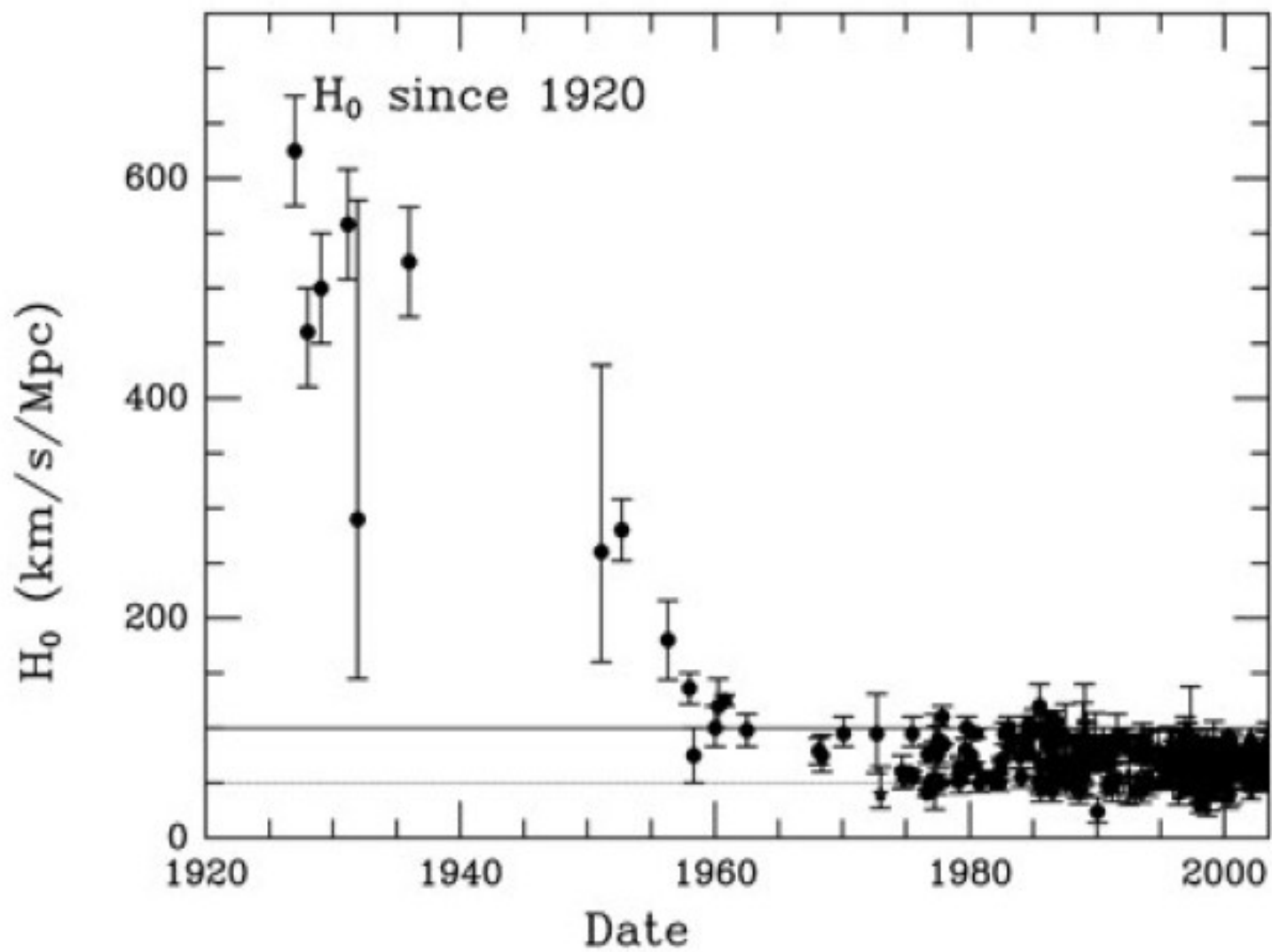
Hubble & Humason (1931)



2002-2004



Evolução das medidas da constante de Hubble



MEDIDAS ATUAIS

A 2.4% Determination of the Local Value of the Hubble Constant¹

Adam G. Riess^{2,3}, Lucas M. Macri⁴, Samantha L. Hoffmann⁴, Dan Scolnic^{2,5}, Stefano Casertano³, Alexei V. Filippenko⁶, Brad E. Tucker^{6,7}, Mark J. Reid⁸, David O. Jones², Jeffrey M. Silverman⁹, Ryan Chornock¹⁰, Peter Challis⁸, Wenlong Yuan⁴, Peter J. Brown⁴, and Ryan J. Foley^{11,12}

ABSTRACT

We use the Wide Field Camera 3 (WFC3) on the *Hubble Space Telescope* (*HST*) to reduce the uncertainty in the local value of the Hubble constant from 3.3% to 2.4%. The bulk of this improvement comes from new, near-infrared observations of Cepheid variables in 11 host galaxies of recent type Ia supernovae (SNe Ia), more than doubling the sample of reliable SNe Ia having a Cepheid-calibrated distance to a total of 19; these in turn leverage the magnitude-redshift relation based on ~ 300 SNe Ia at $z < 0.15$. All 19 hosts as well as the megamaser system NGC 4258 have been observed with WFC3 in the optical and near-infrared, thus nullifying cross-instrument zeropoint errors in the relative distance estimates from Cepheids. Other noteworthy improvements include a 33% reduction in the systematic uncertainty in the maser distance to NGC 4258, a larger sample of Cepheids in the Large Magellanic Cloud (LMC), a more robust distance to the LMC based on late-type detached eclipsing binaries (DEBs), *HST* observations of Cepheids in M31, and new *HST*-based trigonometric parallaxes for Milky Way (MW) Cepheids.

Medidas locais $z < 1$:

$$H_0 = 73.24 \pm 1.74 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$$

¹Based on observations with the NASA/ESA *Hubble Space Telescope*, obtained at the Space Telescope Science Institute, which is operated by AURA, Inc., under NASA contract NAS 5-26555.

²Department of Physics and Astronomy, Johns Hopkins University, Baltimore, MD, USA

³Space Telescope Science Institute, Baltimore, MD, USA; ariess@stsci.edu

⁴George P. and Cynthia Woods Mitchell Institute for Fundamental Physics and Astronomy, Department of Physics & Astronomy, Texas A&M University, College Station, TX, USA

⁵Kavli Institute for Cosmological Physics, University of Chicago, Chicago, IL, USA

Planck 2015 results. XIII. Cosmological parameters

Planck Collaboration: P. A. R. Ade¹²⁹, N. Aghanim⁷¹, M. Amendola¹²⁷, M. Ashdown¹²⁷, J. Aumont⁷¹, C. Baccigalupi¹²⁵, A. J. Banday^{127,12}, R. B. Barreiro¹⁸, J. G. Bartlett¹³⁰, N. Bartolo^{18,79}, E. Battaner^{120,121}, R. Battye⁸¹, K. Benabed^{12,104}, A. Benoit⁴⁸, A. Benoit-Lévy^{20,72,116}, J.-P. Bernard^{127,12}, M. Bersanini^{41,58}, P. Bielewicz^{127,120}, J. J. Bock^{10,14}, A. Bonaldi⁸¹, I. Bonavera⁷⁸, J. R. Bond¹¹, J. Borrill^{127,100}, E. R. Bouchet^{127,12}, F. Boulanger⁷¹, M. Bucher¹, C. Burigana^{127,38,59}, R. C. Butler¹², E. Calabrese¹¹², J.-F. Cardoso^{10,132}, A. Catalano^{10,132}, A. Challinor^{13,15}, A. Chambhali^{127,121}, R.-R. Chary¹⁴, H. C. Chiang¹⁰³, J. Chluba¹⁰³, P. R. Christensen^{10,44}, S. Church¹¹¹, D. L. Clements¹², S. Colombi^{127,116}, L. P. L. Colombo^{2,30}, C. Combet¹⁰, A. Condon¹⁰, B. P. Crill^{10,14}, A. Curio^{107,10}, F. Cuttaia¹², I. Danese¹⁰³, R. D. Davies¹², R. J. Davis¹⁴, P. de Bernardis¹⁰, A. de Rosa¹², G. de Zotti^{13,120}, J. Delabrouille¹, F.-X. Désert¹, E. Di Valentino^{12,128}, C. Dickinson¹², J. M. Diego¹⁰, K. Dolag^{110,14}, H. Dole^{127,10}, S. Donnell¹⁰, O. Doré^{10,14}, M. Doust¹¹, A. Ducou^{127,12}, J. Dunkley¹¹², X. Dupac¹², G. Efstathiou^{13,103}, F. Elsner^{107,116}, T. A. Enblin¹⁰⁴, H. K. Eriksen⁷⁸, M. Farhang^{11,102}, J. Fergusson¹⁵, E. Finelli^{127,58}, O. Fort^{107,112}, M. Frailis¹⁰, A. A. Fraisse¹², E. Franceschi¹²⁷, A. Freese¹⁰, S. Galeotta¹⁰, S. Galli¹², K. Ganga¹, C. Gauthier¹⁰³, M. Gerbino^{114,100,10}, T. Ghosh¹²⁷, M. Giani^{107,12}, Y. Giraud-Héraud¹, E. Giusarma¹⁰, E. Gjerløw⁷⁸, J. González-Nuevo¹²⁷, K. M. Górski^{10,120}, S. Gratton¹⁰⁷, A. Gregorio^{127,103}, A. Gruppato¹⁰, J. E. Gudmundsson^{14,100,10}, J. Hamann^{115,113}, F. K. Hansen¹⁴, D. Hanson^{10,101}, D. L. Harrison^{10,103}, G. Heide¹⁴, S. Henrot-Versillé¹⁰, C. Hernández-Monteagudo^{10,14}, D. Herranz¹⁰, S. R. Hildebrandt^{10,14}, E. Hivon^{127,116}, M. Hobson¹⁰, W. A. Holmes¹⁰, A. Hornstrup¹⁰, W. Hovest¹⁰⁴, Z. Huang¹¹, K. M. Huffenberger¹¹, G. Hühner¹¹, A. H. Jaffe¹²⁷, T. R. Jaffe^{127,12}, W. C. Jones¹⁰, M. Juvela¹²⁷, E. Kauppi¹²⁷, R. Keisig¹²⁷, T. S. Kisner¹²⁷, R. Kneissl^{10,14}, J. Knoche¹⁰, L. Knox¹⁰, M. Kunz^{10,113}, H. Kurki-Suonio^{10,102}, G. Lagache¹²⁷, A. Lähteenmäki¹²⁷, J.-M. Lamarca¹⁰, A. Lavezzi^{10,10}, M. Lattanzi^{10,10}, C. R. Lawrence¹⁰, J. P. Leahy¹¹, R. Leonardi¹⁰, J. Lesgourgues^{127,113}, E. Levrier¹⁰, A. Lewis¹⁰, M. Liguori^{10,10}, P. B. Ligt¹⁰, M. Linden-Vørnle¹⁰, M. López-Cáncer¹⁰⁷, P. M. Lubin¹⁰, J. E. Macías-Pérez¹⁰, G. Maggio¹⁰, D. Maino^{11,10}, N. Mandic¹⁰⁷, A. Mangilli^{10,10}, A. Marchini¹⁰, M. Marín¹⁰, P. G. Martin¹¹, M. Martinelli¹²⁷, E. Martínez-González¹⁰, S. Masi¹⁰, S. Matsumura^{10,10}, P. McGee¹⁰, P. R. Meinhold¹⁰, A. Melchiorri^{10,10}, J.-S. Melin¹⁰, L. Mendes¹⁰, A. Mennella^{10,10}, M. Migliaccio^{10,10}, M. Milica¹⁰, S. Mitra^{10,10}, M.-A. Miville-Deschênes^{11,11}, A. Moneti¹²⁷, L. Montier¹²⁷, G. Morgante¹²⁷, D. Mortlock¹²⁷, A. Moss¹⁰, D. Munezi¹⁰, J. A. Murphy¹⁰, P. Naselsky^{10,10}, E. Nat¹⁰, P. Natoli^{10,10}, C. R. Netterfield¹⁰, H. U. Nørgaard-Nielsen¹⁰, E. Novotny¹⁰, D. Novikov¹⁰, I. Novikov^{10,10}, C. A. Oxborrow¹⁰, E. Paci¹⁰, L. Pagano^{10,10}, E. Pajot¹⁰, R. Paladini¹⁰, D. Paoletti^{10,10}, B. Partridge¹⁰, E. Patenaude¹⁰, G. Patanchon¹⁰, T. J. Pearson^{10,10}, O. Perdereau¹⁰, E. Perotto¹⁰, E. Perrotta¹⁰, V. Petronio¹⁰, E. Placenty¹⁰, M. Piat¹⁰, E. Pierpaoli¹⁰, D. Pietroniro¹⁰, S. Platczynski¹⁰, E. Polenta^{10,10}, G. Polenta¹⁰, G. W. Pratt¹⁰, G. Prénau^{10,10}, S. Prunet^{10,10}, J.-L. Puget¹⁰, J. P. Rachen^{10,10}, W. T. Reich¹⁰, R. Reibelio^{10,10}, M. Reinecke¹⁰, M. Remazeilles^{10,10}, C. Renard¹⁰, A. Renzi^{10,10}, I. Riekenell^{10,10}, G. Rocha^{10,10}, C. Rossetti¹⁰, M. Rossetti^{10,10}, G. Roudier^{10,10}, B. Roulet d'Orléans¹⁰, M. Rowan-Robinson¹⁰, J. A. Rubino-Martin^{10,10}, B. Rushmore¹⁰, N. Said¹⁰, V. Salvatielli^{10,10}, L. Salvatielli¹⁰, M. Sandoz¹⁰, D. Santos¹⁰, M. Savelainen^{10,10}, G. Savini¹⁰, D. Scott¹⁰, M. D. Seiffert^{10,10}, P. Serra¹⁰, E. P. S. Shellard¹⁰, L. D. Spencer¹⁰, M. Spinelli¹⁰, V. Stolyarov^{10,10}, R. Stompor¹⁰, R. Sudwala¹⁰, R. Sunyaev^{10,10}, D. Sutton^{10,10}, A.-S. Suur-Uuski^{10,10}, J.-F. Sygret¹⁰, J. A. Tanzer¹⁰, L. Tienari^{10,10}, I. Toffolatti^{10,10}, M. Tomasi^{10,10}, M. Tristram¹⁰, T. Trombetti^{10,10}, M. Tucci¹⁰, J. Tuckey¹⁰, M. Turner¹⁰, G. Umari¹⁰, L. Valenziano¹⁰, J. Valiviita^{10,10}, E. Van Tent¹⁰, P. Vielzeu¹⁰, E. Villa¹⁰, L. A. Wade¹⁰, R. D. Wandell^{10,10}, I. K. Wehus^{10,10}, M. White¹⁰, S. D. M. White¹⁰, A. Wilkinson¹⁰, D. Yvon¹⁰, A. Zacchei¹⁰, and A. Zonca¹⁰

(Affiliations can be found after the references)

June 20, 2016

ABSTRACT

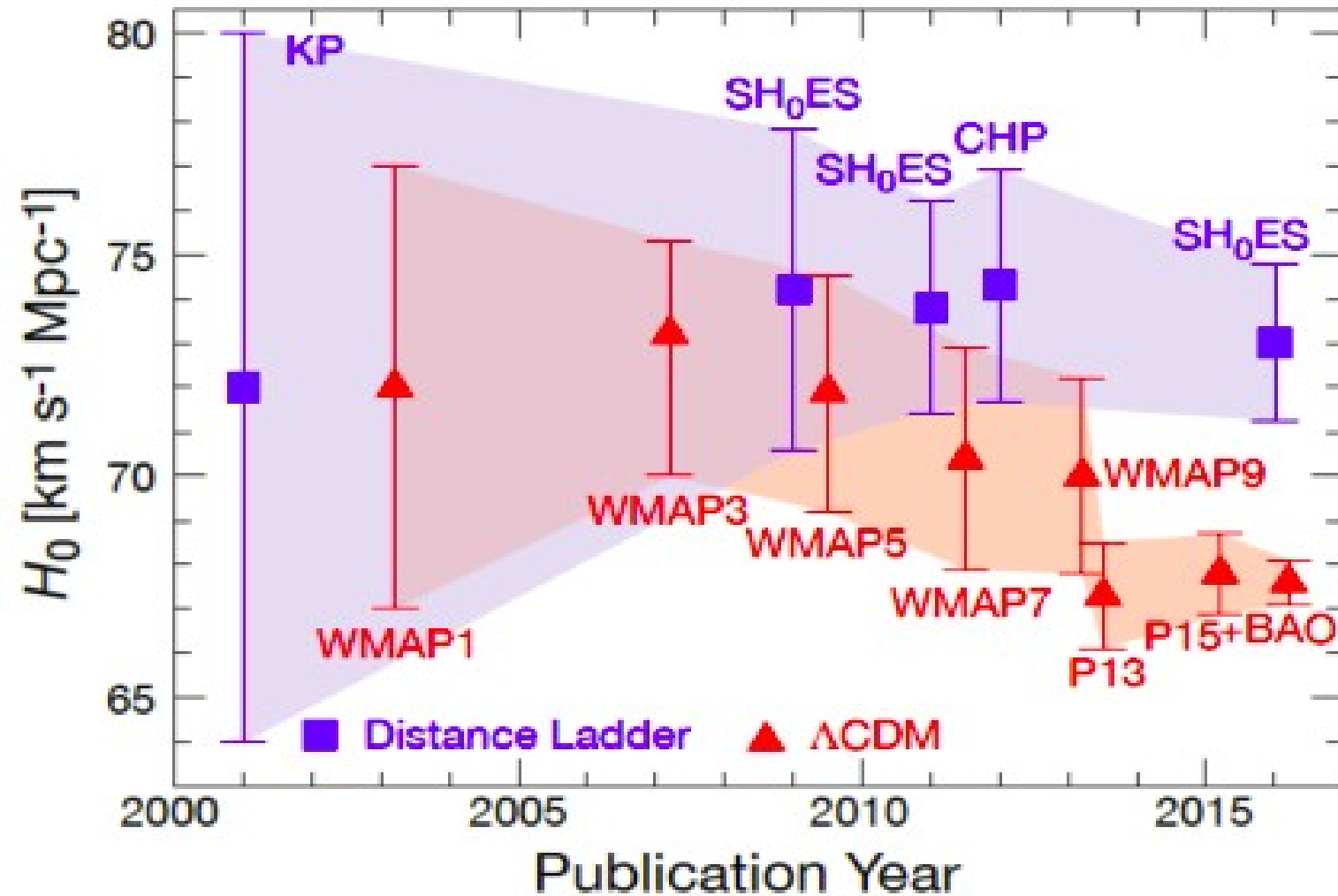
This paper presents cosmological results based on full-mission *Planck* observations of temperature and polarization anisotropies of the cosmic microwave background (CMB) radiation. Our results are in very good agreement with the 2013 analysis of the *Planck* nominal-mission temperature data, but with increased precision. The temperature and polarization power spectra are consistent with the standard spatially-flat Λ CDM cosmology with a power-law spectrum of adiabatic scalar perturbations (denoted “base Λ CDM” in this paper). From the *Planck* temperature data combined with *Planck* lensing, for this cosmology we find a Hubble constant, $H_0 = (67.3 \pm 0.9) \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, a matter density parameter $\Omega_m = 0.308 \pm 0.012$, and a tilted scalar spectral index with $n_s = 0.968 \pm 0.006$, consistent with the 2013 analysis. Note that in this abstract we quote 68 % confidence limits on measured parameters and 95 % upper limits on other parameters. We present the first results of polarization measurements with the Low Frequency Instrument at large angular scales. Combined with the *Planck* temperature and lensing data, these measurements give a reionization optical depth of $\tau = 0.066 \pm 0.016$, corresponding to a reionization redshift of $z_{\text{re}} = 8.8^{+1.1}_{-1.2}$. These results are consistent with those from WMAP polarization measurements cleaned for dust emission using 353-GHz polarization maps from the High Frequency Instrument. We find no evidence for any departure from base Λ CDM in the neutrino sector of the theory; for example, combining *Planck* observations with other astrophysical data we find $N_{\text{eff}} = 3.15 \pm 0.23$ for the effective number of relativistic degrees of freedom, consistent with the value $N_{\text{eff}} = 3.046$ of the Standard Model of particle physics. The sum of neutrino masses is constrained to $\Sigma m_\nu < 0.23 \text{ eV}$. The spatial curvature of our Universe is found to be very close to zero, with $|Q_k| < 0.005$. Adding a tensor component as a single-parameter extension to base Λ CDM we find an upper limit on the tensor-to-scalar ratio of $r_{0.002} < 0.11$, consistent with the *Planck* 2013 results and consistent with the B -mode polarization constraints from a joint analysis of BICEP2, KeckArray, and *Planck* (BKP) data. Adding the BKP B -mode data to our analysis leads to a tighter constraint of $r_{0.002} < 0.09$ and disfavors inflationary models with a $V(\phi) \propto \phi^2$ potential. The addition of *Planck* polarization data leads to strong constraints on deviations from a purely adiabatic spectrum of fluctuations. We find no evidence for any contribution from isocurvature perturbations or from cosmic defects. Combining *Planck* data with other astrophysical data, including Type Ia supernovae, the equation of state of dark energy is constrained to $w = -1.006 \pm 0.045$, consistent with the expected value for a cosmological constant. The standard big bang nucleosynthesis predictions for the helium and deuterium abundances for the best-fit *Planck* base Λ CDM cosmology are in excellent agreement with observations. We also analyse constraints on annihilating dark matter and on possible deviations from the standard recombination history. In neither case do we find no evidence for new physics. The *Planck* results for base Λ CDM are in good agreement with baryon acoustic oscillation data and with the JLA sample of Type Ia supernovae. However, as in the 2013 analysis, the amplitude of the fluctuation spectrum is found to be higher than inferred from some analyses of rich cluster counts and weak gravitational lensing. We show that these tensions cannot easily be resolved with simple modifications of the base Λ CDM cosmology. Apart from these tensions, the base Λ CDM cosmology provides an excellent description of the *Planck* CMB observations and many other astrophysical data sets.

Key words. Cosmology: observations – Cosmology: theory – cosmic microwave background – cosmological parameters

Medidas no locais

$$H_0 = 67.3 \pm 1.2 \text{ K m/s/Mpc}$$

EVOLUÇÃO DOS ERROS DAS MEDIDAS DA CONSTANTE DE HUBBLE



A gravitational-wave standard siren measurement of the Hubble constant

The LIGO Scientific Collaboration and The Virgo Collaboration*, The IM2H Collaboration*, The Dark Energy Camera GW-EM Collaboration and the DES Collaboration*, The DLT40 Collaboration*, The Las Cumbres Observatory Collaboration*, The VINROUGE Collaboration* & The MASTER Collaboration*

The detection of GW170817 (ref. 1) heralds the age of gravitational-wave multi-messenger astronomy, with the observations of gravitational-wave and electromagnetic emission from the same transient source. On 17 August 2017 the network of Advanced Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory (LIGO)² and Virgo³ detectors observed GW170817, a strong signal from the merger of a binary neutron-star system. Less than two seconds after the merger, a γ -ray burst event, GRB 170817A, was detected consistent with the LIGO–Virgo sky localization region^{4–6}. The sky region was subsequently observed by optical astronomy facilities⁷, resulting in the identification of an optical transient signal within about 10 arcseconds of the galaxy NGC 4993 (refs 8–13). GW170817 can be used as a standard siren^{14–18}, combining the distance inferred purely from the gravitational-wave signal with the recession velocity arising from the electromagnetic data to determine the Hubble constant. This quantity, representing the local expansion rate of the Universe, sets the overall scale of the Universe and is of fundamental importance to cosmology. Our measurements do not require any form of cosmic ‘distance ladder’¹⁹; the gravitational-wave analysis directly estimates the luminosity distance out to cosmological scales. Here we report $H_0 = 70.0^{+12.0}_{-8.0}$ kilometres per second per megaparsec, which is consistent with existing measurements^{20,21}, while being completely independent of them.

The Hubble constant H_0 measures the mean expansion rate of the Universe. At nearby distances ($d \lesssim 50$ Mpc) it is well approximated by the expression

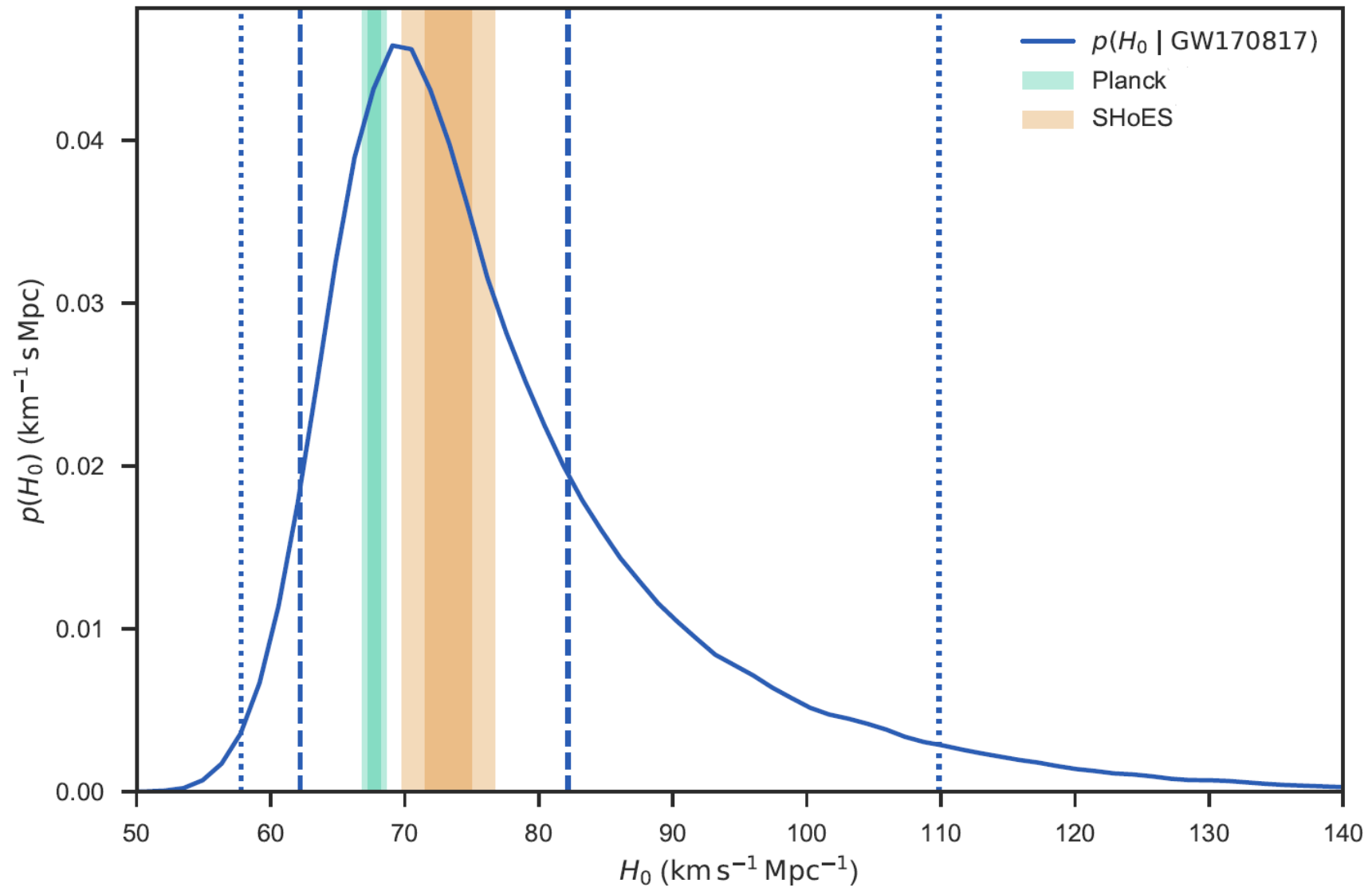
$$v_{11} = H_0 d \quad (1)$$

obtained even without the detection of any transient optical counterparts²². Alternatively, if an electromagnetic counterpart has been identified but the host galaxy is unknown, the same statistical method can be applied but using only those galaxies in a narrow beam around the location of the optical counterpart. However, such statistical analyses are sensitive to a number of complicating effects, including the incompleteness of current galaxy catalogs or the need for dedicated follow-up surveys, as well as a range of selection effects²³. In what follows we exploit the identification of NGC 4993 as the host galaxy of GW170817 to perform a standard siren measurement of the Hubble constant^{15–18}.

Analysis of the gravitational-wave data associated with GW170817 produces estimates for the parameters of the source, under the assumption that general relativity is the correct model of gravity¹. We are most interested in the joint posterior distribution on the luminosity distance and binary orbital inclination angle. For the analysis in this paper we fix the location of the gravitational-wave source on the sky to the identified location of the counterpart⁸. See Methods for details.

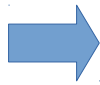
An analysis of the gravitational-wave data alone finds that GW170817 occurred at a distance $d = 43.8^{+2.9}_{-6.9}$ Mpc (all values are quoted as the maximum posterior value with the minimal width 68.3% credible interval). We note that the distance quoted here differs from that in other studies¹, since here we assume that the optical counterpart represents the true sky location of the gravitational-wave source instead of marginalizing over a range of potential sky locations. The approximately 15% uncertainty is due to a combination of statistical measurement error from the noise in the detectors, instrumental calibration uncertainties¹, and a geometrical factor dependent upon the correlation of distance with inclination angle. The gravitational-wave

EVOLUÇÃO DOS ERROS DAS MEDIDAS DA CONSTANTE DE HUBBLE



MODELO DO UNIVERSO EM EXPANSÃO

- Universo homogêneo e isotrópico em grandes escalas, composto de matéria bariônica, matéria escura e radiação.



Universo em expansão.

• radiation	$p_R = \rho_R/3$	$w = 1/3$	$\rho \propto a^{-4}$	$a \propto t^{1/2}$
• matter	$p_M = 0$	$w = 0$	$\rho \propto a^{-3}$	$a \propto t^{2/3}$
• vacuum	$p_\Lambda = -\rho_\Lambda$	$w = -1$	$\rho \propto a^0$	$a \propto e^{H_0 t}$

- A expansão do Universo gera um efeito Doppler, que origina um deslocamento para o vermelho (redshift)

- Considerando todas as componentes: Cada componente conserva energia Independentemente.

Conservação da energia total:

$$\dot{\rho} + 3\frac{\dot{a}}{a}(\rho + p) = 0$$

$$\rho = \rho_{dm} + \rho_b + \rho_r$$



$$\rho_{dm} = \rho_{dm0} a^{-3}$$

$$\rho_b = \rho_{b0} a^{-3}$$

$$\rho_r = \rho_{r0} a^{-4}$$

$$\rho(a) = \rho_{r0} a^{-4} + (\rho_{dm0} + \rho_{b0}) a^{-3}$$

MODELO DO UNIVERSO EM EXPANSÃO

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 + \frac{k}{a^2} = \frac{8\pi G}{3}\rho \quad \xrightarrow{k=0} \quad \sqrt{\frac{8\pi G}{3}}(t_0 - t) = \int_a^{a_0} \frac{dx}{x\sqrt{\rho_{r0}x^{-4} + (\rho_{dm0} + \rho_{b0})x^{-3}}}$$

- Deslocamento ao vermelho por causa da expansão do Universo

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \quad a = \frac{1}{1+z}$$

- Lei de Hubble

$$z = H_o d$$

$$v = H_o d$$

O redshift pode medir tanto distâncias como tempo

- Não é necessário conhecer a forma explícita do fator de escala mas sim do fator de Hubble

$$H(t) = \frac{\dot{a}}{a}$$

Reescrevendo as eqs. de Friedmann

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 + \frac{k}{a^2} = \frac{8\pi G}{3}\rho \qquad H = \frac{\dot{a}}{a} \quad \text{Fator de Hubble}$$

- Se define a densidade crítica como sendo a densidade necessária para que o Universo seja plano $k=0$ hoje.

$$\rho_c = \frac{3H_0^2}{8\pi G} \qquad \overline{\rho_{c0} = 1.878 \times 10^{-29} h^2 \text{ g cm}^{-3}}$$

- Se define como parâmetros de densidade

$$\Omega_{m0} = \frac{\rho_{m0}}{\rho_c} \qquad \Omega_{k0} = \frac{\rho_{k0}}{\rho_c}$$

$$\Omega_{r0} = \frac{\rho_{r0}}{\rho_c} \qquad \rho_K \equiv -\frac{3Kc^2}{8\pi G a^2}$$

- Das eqs. de Friedmann

$$H^2(a) = H_0^2(\Omega_{r0}a^{-4} + \Omega_{m0}a^{-3} + \Omega_{k0}a^{-2})$$

$$H^2(z) = H_0^2[\Omega_{r0}(1+z)^4 + \Omega_{m0}(1+z)^3 + \Omega_{k0}(1+z)^2]$$



Fator de Hubble para o
Modelo Cold Dark Matter
(CDM)

UNIVERSO NO PASSADO

- No passado o Universo era dominada pela radiação.

$$\rho_r \propto a^{-4} \longrightarrow \text{Fótons altamente energéticos}$$

- Universo primordial = Plasma primordial (neutros, prótons, elétrons, fótons) em altas energias.
- O mais relevante: Scattering Compton (Thomson)

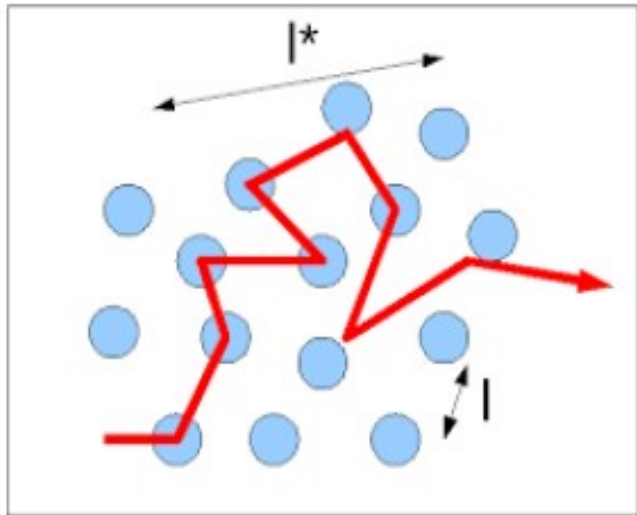
$$| e^-(q') + \gamma(p') \longrightarrow e^-(q) + \gamma(p)$$

Cross Section for Scattering Thomson

$$\sigma_t = \frac{8\pi}{3} \left(\frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 mc^2} \right)^2$$

RADIAÇÃO CÓSMICA DE FUNDO E ESPALHAMENTO THOMSON

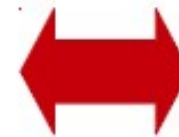
- Processos de Compton Scattering .



$$e^{-}(q') + \gamma(p') \longrightarrow e^{-}(q) + \gamma(p)$$

- El camino libre medio es pequeño, los fotones rapidamente llega al equilibrio térmico

- Equilibrio térmico

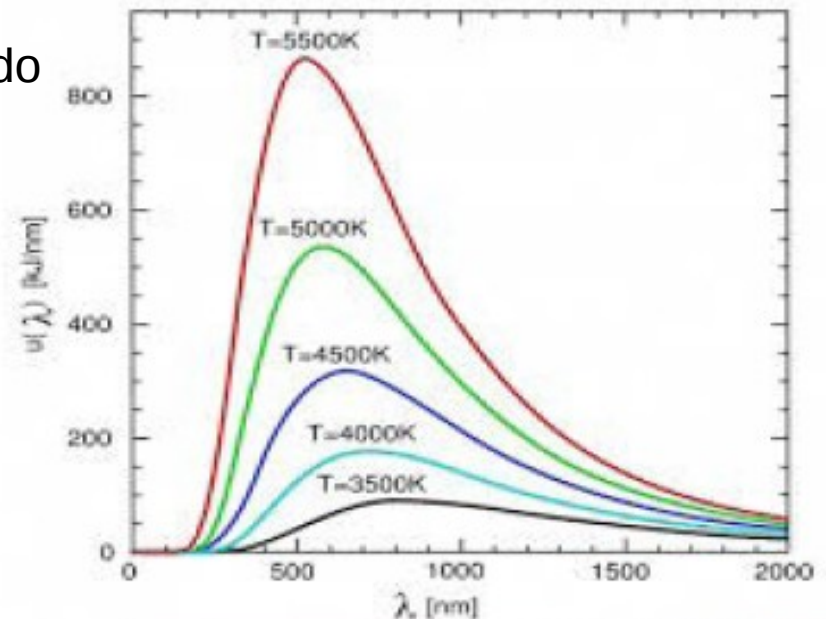


Radiación de cuerpo negro

Fotons primordiais → Radiação Cósmica de Fundo

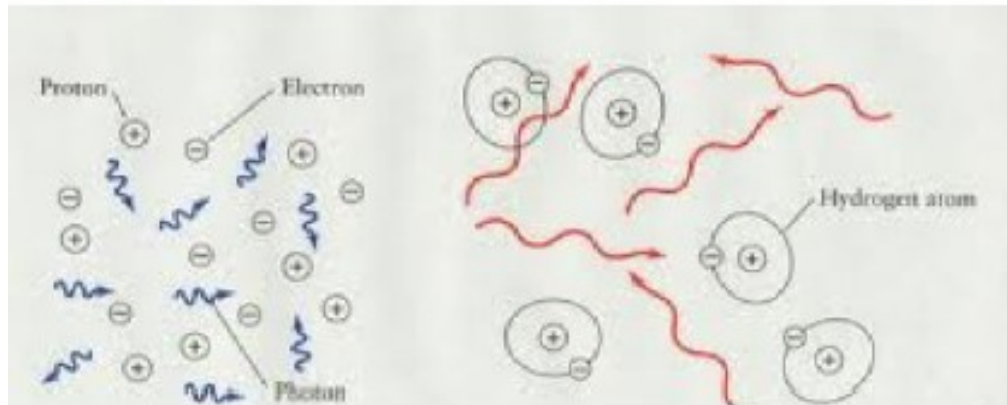
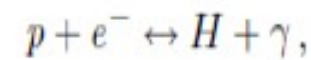
- RCF debe tener un espectro de cuerpo Negro com una temperatura T.

- Com a expansão do Universo o caminho livre médio aumenta.



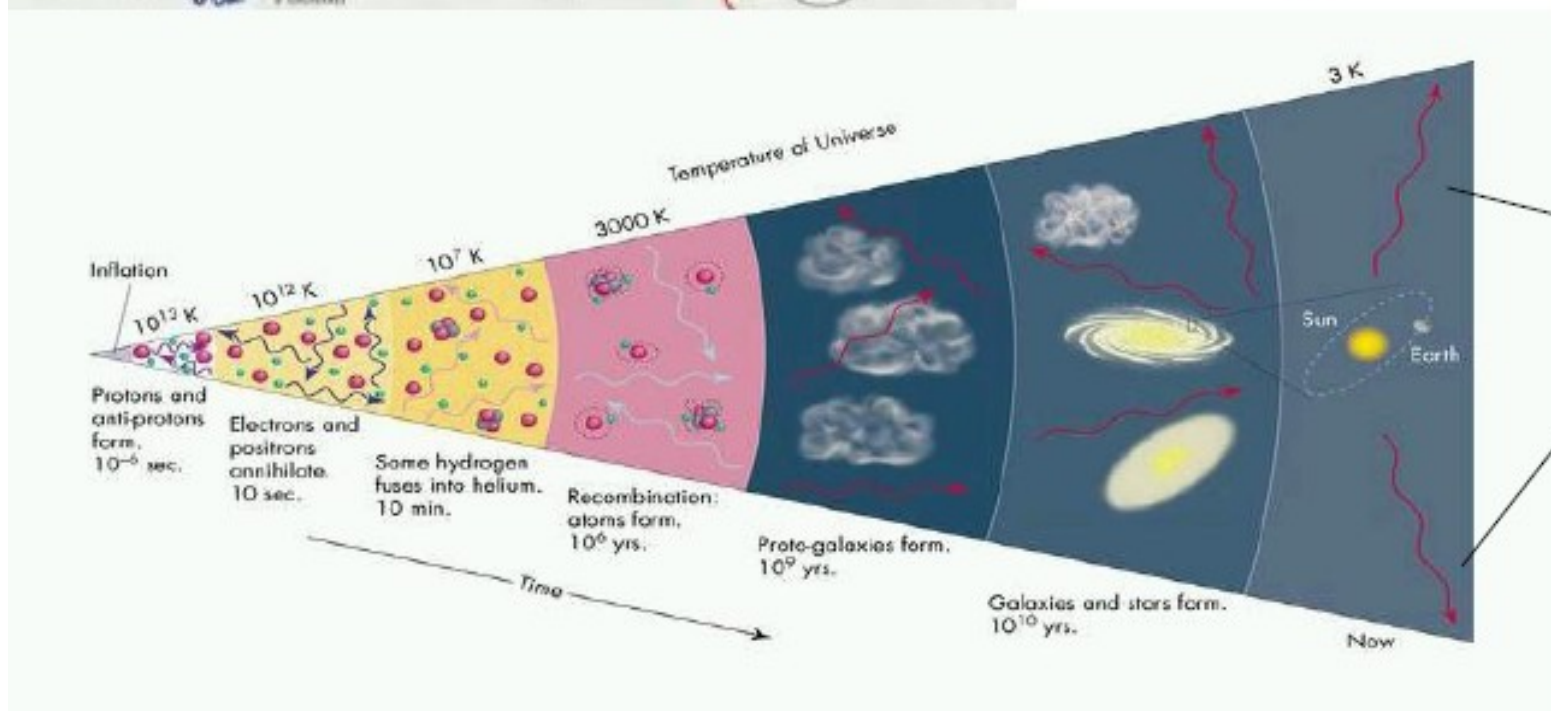
DESACOPLAMIENTO DOS FÓTONS

- Era do desacoplamiento: La recombinación empieza. Formación del Hidrogeno neutro.



Desacoplamiento:

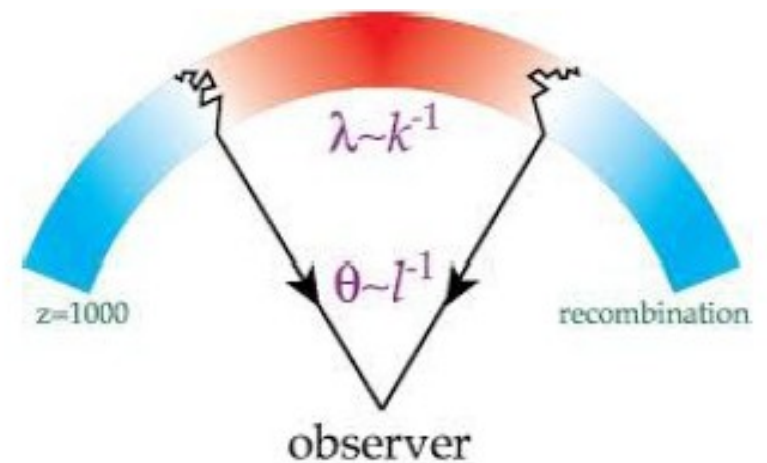
"tiempo de la última dispersión" para fotons.
Last Scattering Surface (LSS)



RCF

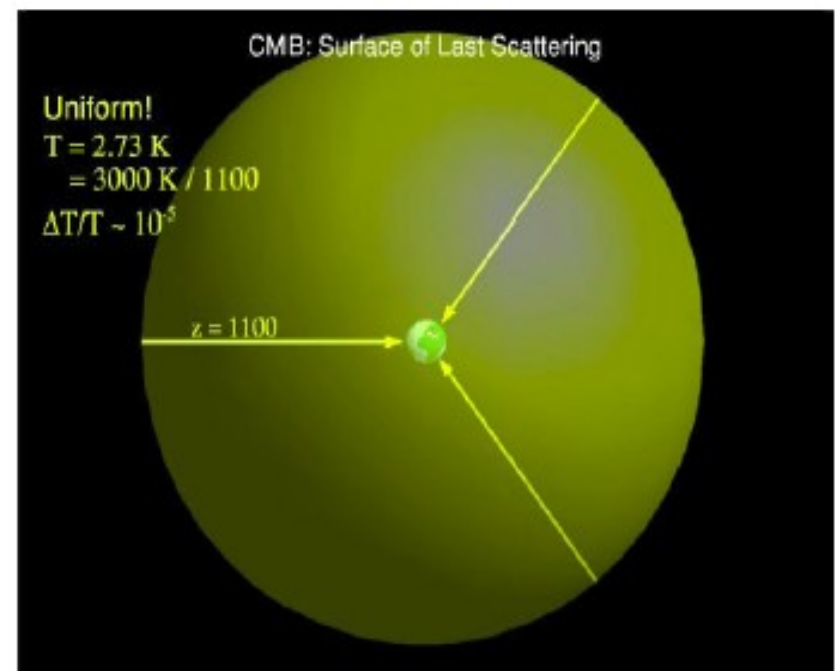
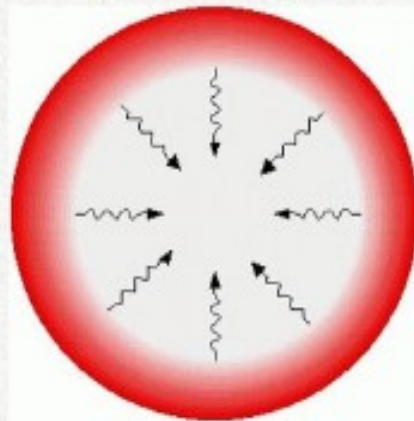
SUPERFÍCIE DE ÚLTIMO ESPALHAMENTO

Superfície de Última | Dispersion
(SUD)



We see photons today from last scattering surface
when the universe was just 400,000 years old

The temperature of
the cosmic microwave
background (CMB) is
very nearly the same
in all directions.



EVOLUÇÃO DA RADIAÇÃO CÓSMICA DE FUNDO

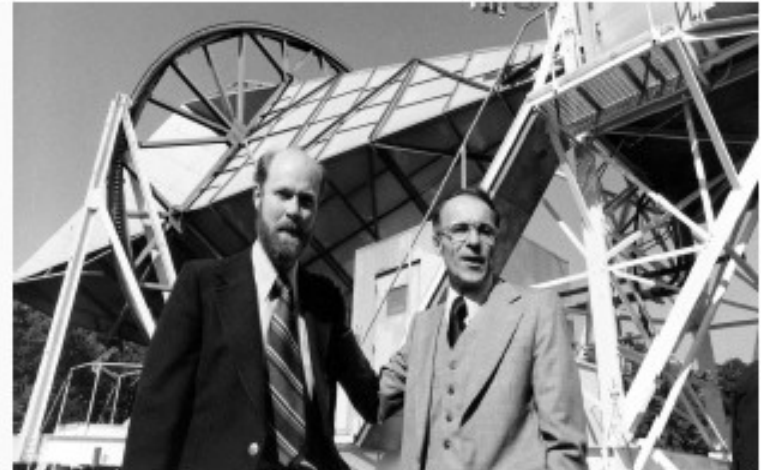
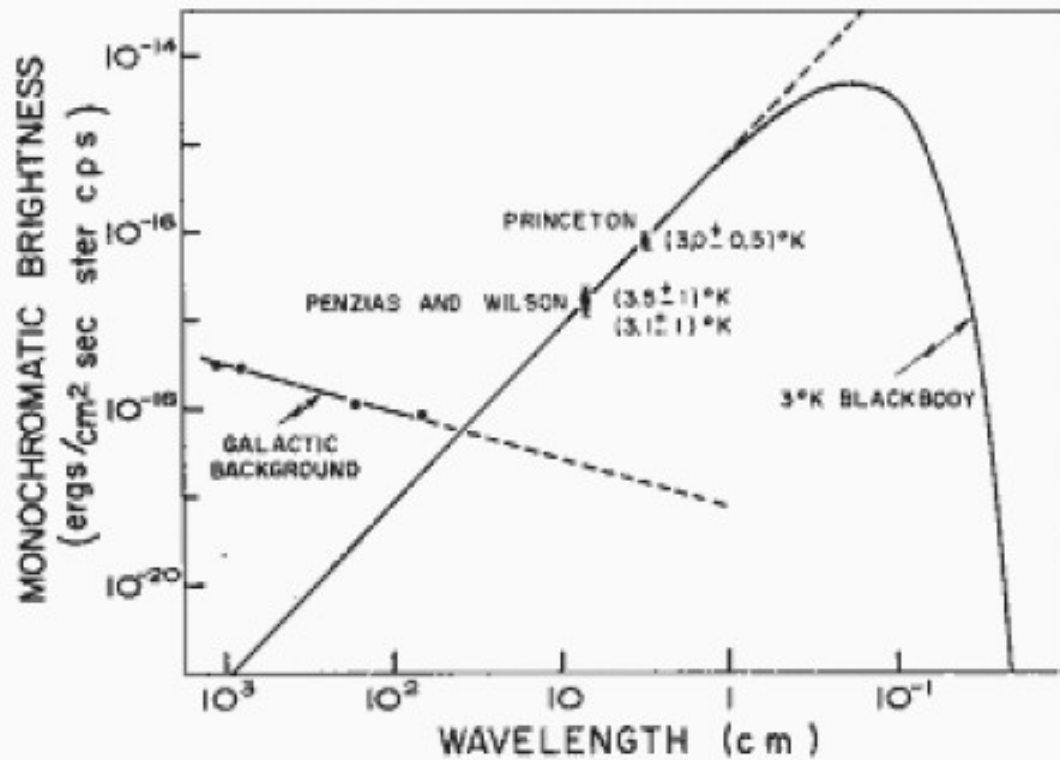
- Los fotones de la CMB tienen una función de distribución tipo Bose- Einstein

$$f = \frac{1}{e^{(E-\mu)/T} - 1} \longrightarrow f(p) = \frac{1}{e^{p/T} - 1}$$

- Para todo el tiempo $\frac{1}{e^{p/T} - 1} = \frac{1}{e^{p_0/T_0} - 1}$  $T \propto \frac{1}{a}.$

- Se o Universo estiver se expandindo, a temperatura da RCF deve estar diminuindo
- Na época do desacoplamento: $T \sim 3000$ K, $a \sim 0,001$, $z \sim 1100$
- Atualmente: $T \sim 3$ K. Isotrópica.

DETECÇÃO DA RCF

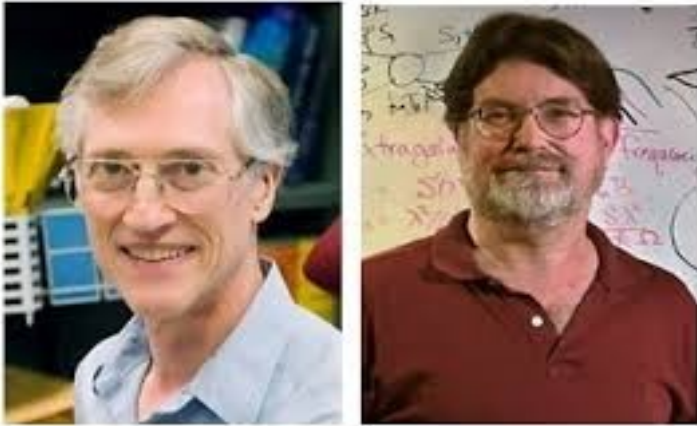


Penzias y Wilson 1964,
(Nobel 1978)

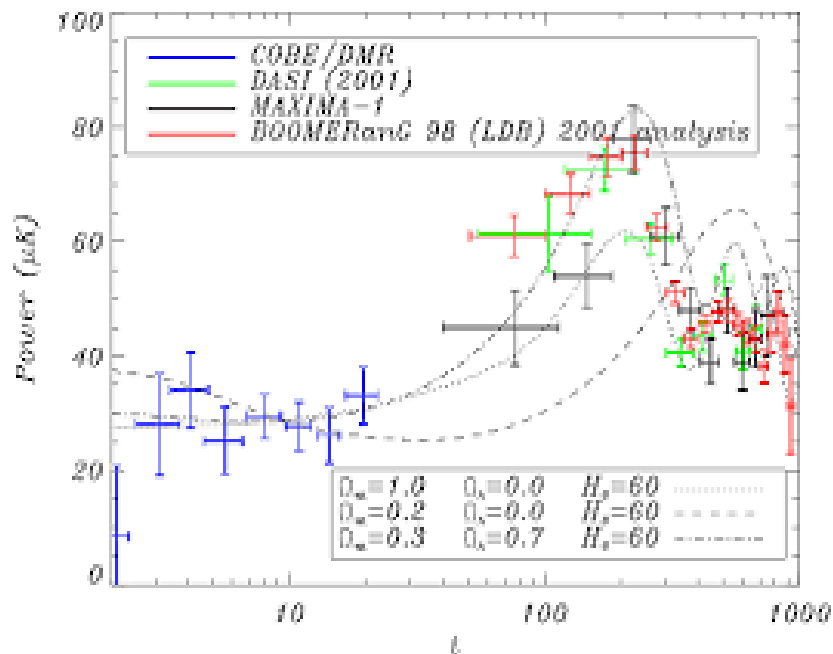
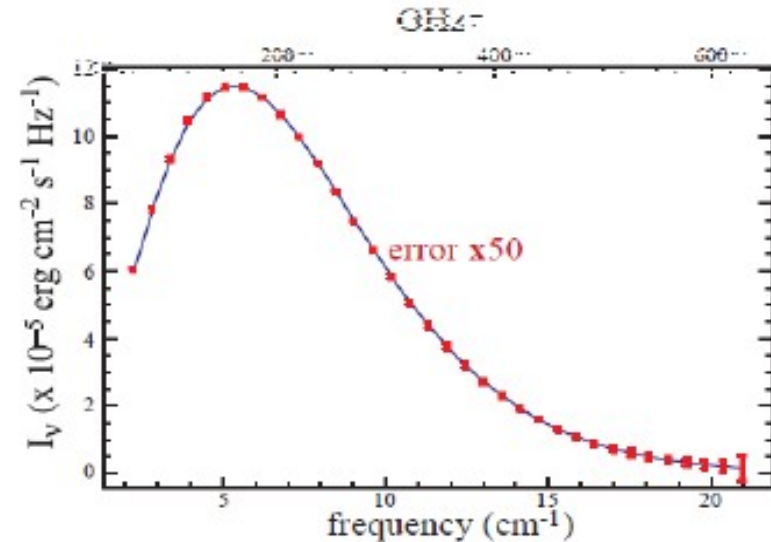
COSMIC BACKGROUND EXPLORER
COBE (1974 – 1989, NASA)



DETECÇÃO DO COBE (1992)



John Mather e George Smoot,
(COBE – NOBEL 2006)



Existência de flutuações de
Temperatura na RCF, ao
Redor de 2.73 K e da ordem
De micro Kelvins.

Nucleossíntese dos Elementos Primordiais (BBN)

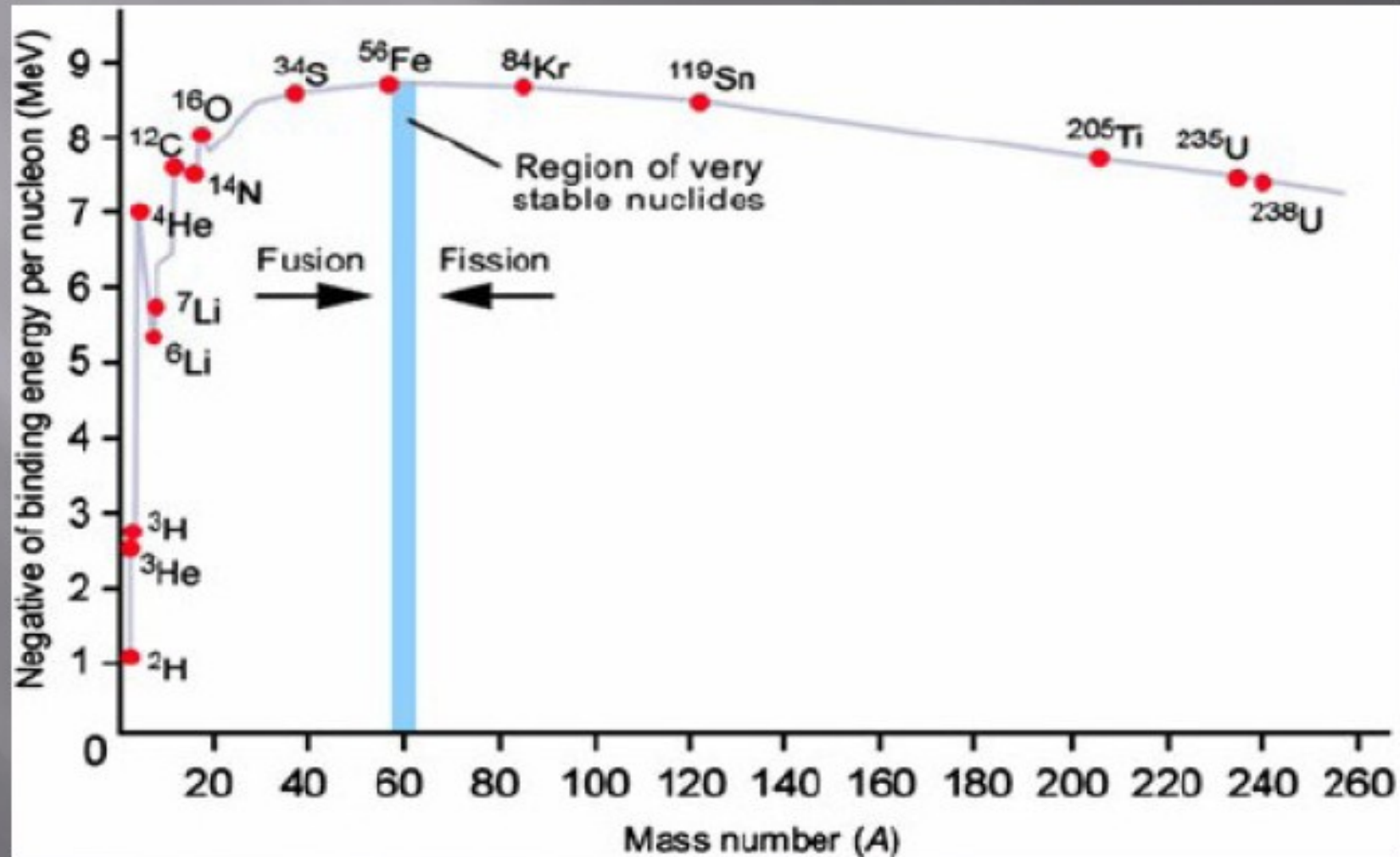
Energia de Ligación
(Binding energy)

$$B_D = Zm_p + (A - Z)m_n - m$$

Masa del nucleo

Masa del proton

Masa del neutron



NUCLEOSSÍNTESE PRIMORDIAL E EQ. DE BOLTZMANN

$$\text{Operador de Liouville} \leftarrow \frac{df}{dt} = C[f] \rightarrow \text{Termino de colisiones}$$

- f é a função de distribuição.

- Dada a interação :



$$\frac{df_1}{d\lambda} = C[f]$$

Eq. de Saha



$$\frac{n_3 n_4}{n_3^{(0)} n_4^{(0)}} = \frac{n_1 n_2}{n_1^{(0)} n_2^{(0)}}$$

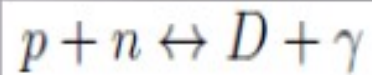
$$n = g_s \int \frac{d^3 \mathbf{p}}{(2\pi \hbar)^3} f \approx g_s e^{\mu/(k_B T)} \int \frac{d^3 \mathbf{p}}{(2\pi \hbar)^3} e^{-E/(k_B T)}$$

(Número de partículas por volume)

(densidade de partículas em equilíbrio)

$$n^{(0)} = g_s \int \frac{d^3 \mathbf{p}}{(2\pi \hbar)^3} e^{-E/(k_B T)}$$

Produção de Deutério



$$\frac{n_D n_\gamma}{n_D^{(0)} n_\gamma^{(0)}} = \frac{n_p n_n}{n_p^{(0)} n_n^{(0)}}$$

$$n_i^{(0)} \equiv g_i \int \frac{d^3 p}{(2\pi)^3} e^{-E_i/T} = \begin{cases} g_i \left(\frac{m_i T}{2\pi} \right)^{3/2} e^{-m_i/T} & m_i \gg T \\ g_i \frac{T^3}{\pi^2} & m_i \ll T \end{cases}$$



$$\frac{n_D}{n_p n_n} = \frac{3}{4} \left(\frac{2\pi \hbar^2 m_D}{m_p m_n k_B T} \right)^{3/2} e^{B_D/(k_B T)}$$

$$\left. \frac{m_D}{m_p m_n} \approx \frac{2}{m_p} \right\}$$



$$n_p \sim n_n \sim n_b \Big|$$



$$\frac{n_D}{n_b} = \frac{3}{4} n_b \left(\frac{4\pi \hbar^2}{m_p k_B T} \right)^{3/2} e^{B_D/(k_B T)}$$

Produção de Deutério (Deuterium Bottleneck)

$$n_b = \eta_b n_\gamma = \eta_b n_\gamma^{(0)} = 2\eta_b \frac{(k_B T)^3}{\pi^2 \hbar^3 c^3}$$

- Número de núcleos de Deutério por bárion no Universo Primordial:

$$\frac{n_D}{n_b} = \frac{12}{\sqrt{\pi}} \eta_b \left(\frac{k_B T}{m_p c^2} \right)^{3/2} e^{B_D/(k_B T)}$$

$$\eta_b \equiv \frac{n_b}{n_\gamma} = 5.5 \times 10^{-10} \left(\frac{\Omega_b h^2}{0.020} \right)$$

- Para o Deutério: $B_D = 2.22 \text{ MeV}$  $\frac{n_D}{n_b} \ll 1$

- Só haverá produção de Deutério se: $\frac{n_D}{n_b} \sim 1$

- A nucleossíntese começa em:

$$k_B T_{\text{BBN}} \approx 0.07 \text{ MeV}$$

Abundância de nêutrons

- Das eqs. De Boltzmann:

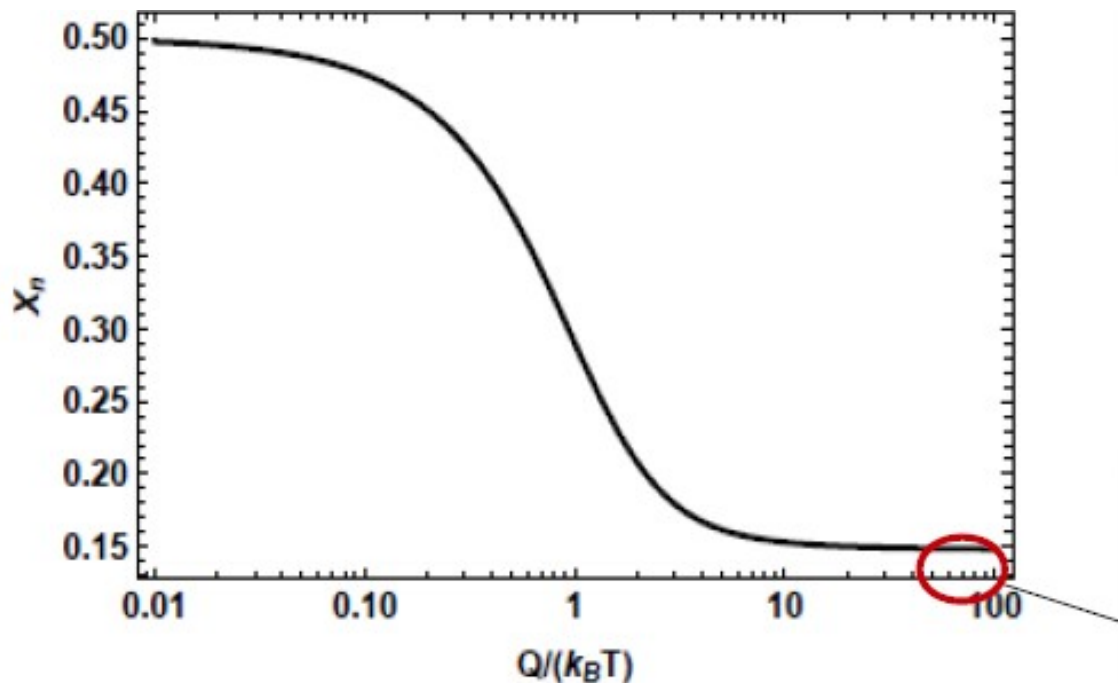
$$\frac{dX_n}{dx} = \frac{x\lambda_{np}}{H(x=1)} \left[e^{-x} - X_n(1 + e^{-x}) \right]$$

$$X_n \equiv \frac{n_n}{n_n + n_p}, \quad n_l^{(0)} \langle \sigma v \rangle \equiv \lambda_{np}.$$

$$x \equiv \frac{Q}{k_B T}$$

Fração de nêutrons em relação a bárions

$$Q = m_n - m_p \sim 1,239, Mev$$

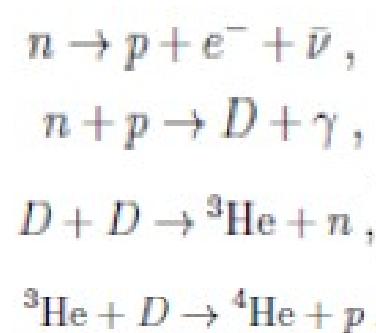


$$X_n(T_{BBN}) \approx 0.15$$

- Quando a BBN começou,
O 15 % dos bárions eram nêutrons

Abundância do Hélio Primordial

- Sendo mais realistas devemos considerar:



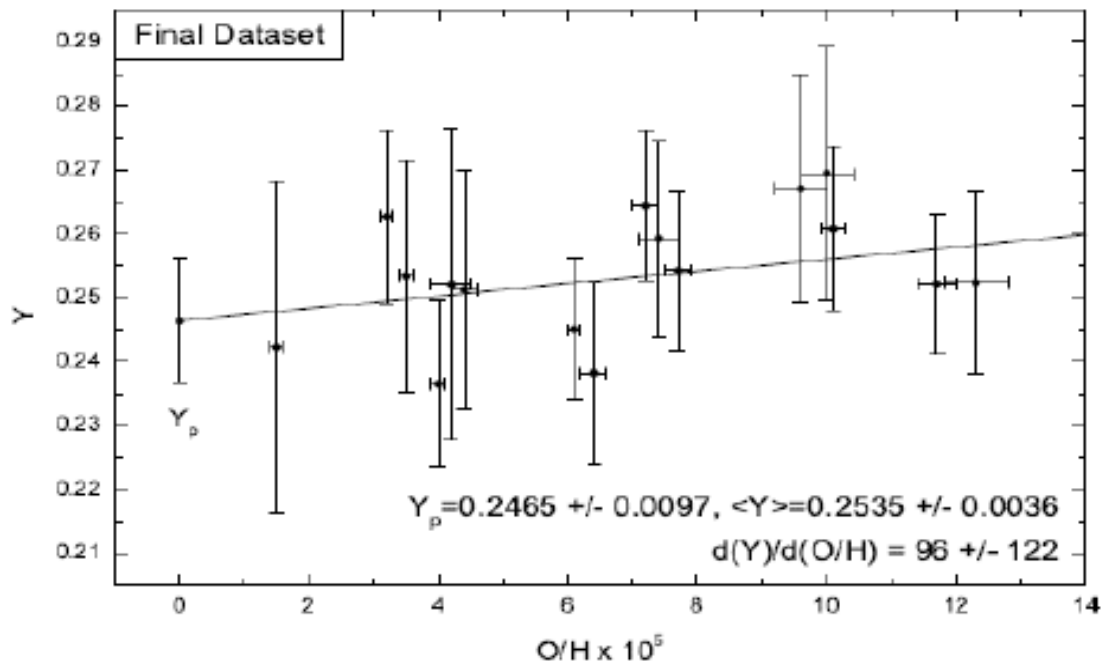
$$X_n(T_{BBN}) \approx 0.11 \quad |$$

- Também pode ser calcular a fração de Hélio primordial em relação ao número de bárions

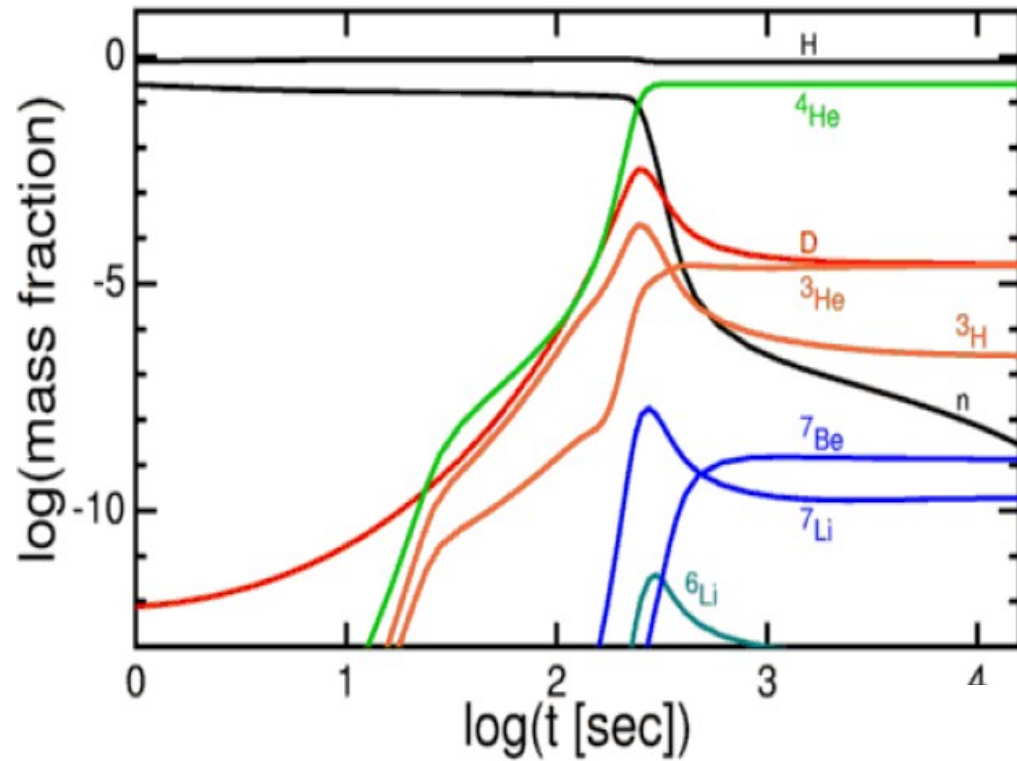
$$| Y_p(4He) = 0.25 |$$



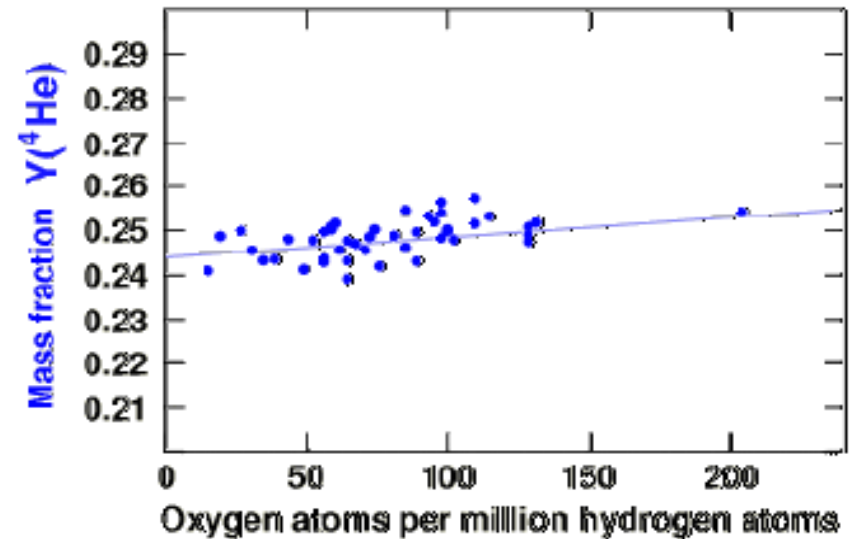
- Fração de 4He em relação
Ao total de átomos formados



Abundância de Outros Elementos Primordiais

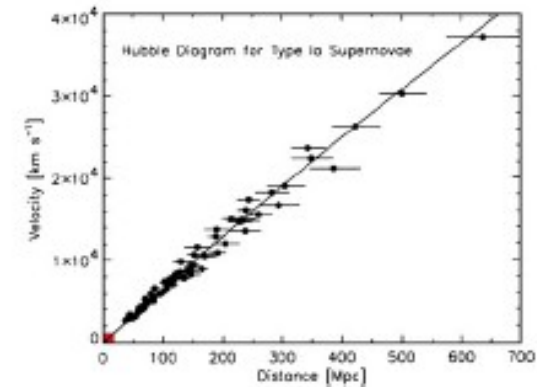


Confirmação experimental:

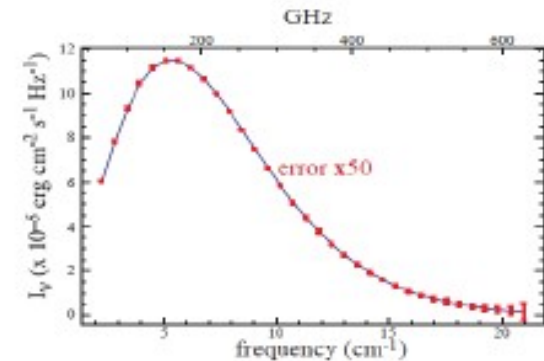


Bases observacionais do Universo em Expansão (CDM)

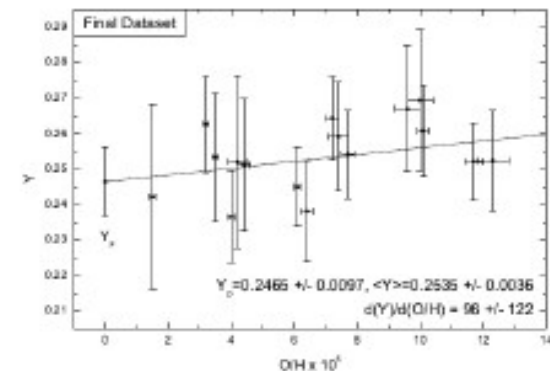
1. Expansão do Universo : Lei de Hubble
(medida de H_0)



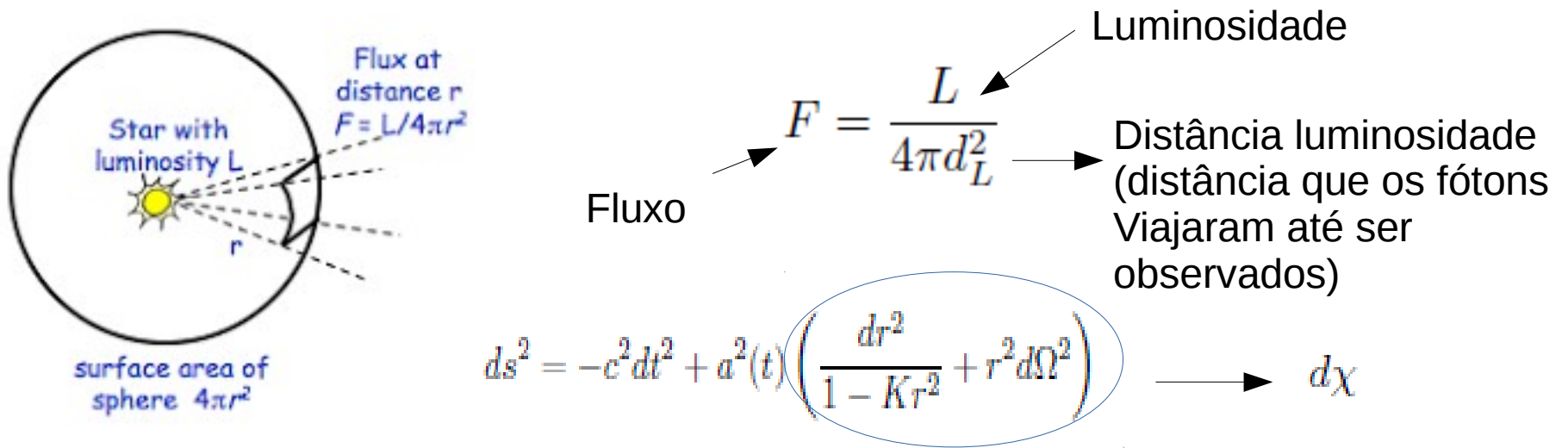
2. Plasma primordial em equilíbrio térmico
(medida da quantidade de radiação no universo)



3. Mecanismo de produção de elementos leves
(medida da quantidade de bárions)



Distância Luminosidade



- Distância que o fóton viajou

$$ds^2 = 0,$$



$$cdt = a(t)d\chi$$

$$\chi = \int_{t_{\text{em}}}^{t_0} \frac{cdt'}{a(t')} = \int_a^1 \frac{cda'}{H(a')a'^2}$$



$$F = \frac{dE_0}{dt_0 A_0} = \frac{a^2 dE}{a_0^2 dt 4\pi a_0^2 \chi^2} = \frac{dE}{dt 4\pi a_0^2 \chi^2 (1+z)^2}$$

- Distância luminosidade:

$$d_L \equiv a_0(1+z)\chi$$



Depende do modelo cosmológico

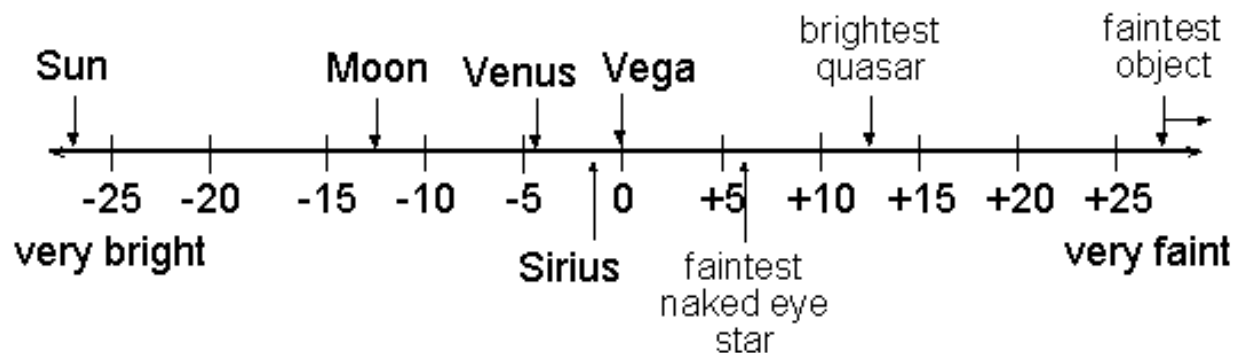
Modulo Distância

- As quantidades de interesse são os fluxos

Magnitude aparente $\rightarrow m \equiv -\frac{5}{2} \log_{10} \left(\frac{F}{F_0} \right)$

Fluxo observado $\rightarrow F$

Fluxo de referência para $m=0$ $\rightarrow F_0$



Apparent brightnesses of some objects in the magnitude system.

Magnitude Absoluta: Magnitude aparente hipotética que um objeto teria se estivesse a uma distância de 10 pc.

$$F \propto 1/d_L^2 \quad \Rightarrow \quad M \equiv -\frac{5}{2} \log_{10} \left[\frac{F}{F_0} \left(\frac{d_L}{10 \text{ pc}} \right)^2 \right] = m - 5 \log_{10} \left(\frac{d_L}{10 \text{ pc}} \right)$$

Módulo distância:

$$\mu \equiv m - M = 5 \log_{10} \left(\frac{d_L}{10 \text{ pc}} \right) = 5 \log_{10} \left(\frac{d_L}{1 \text{ Mpc}} \right) + 25$$

1998 E O MODELO Lambda CDM

- Modulo distância de um emissor de fótons

$$\mu \equiv m - M = 5 \log_{10} \left(\frac{d_L}{10 \text{ pc}} \right) = 5 \log_{10} \left(\frac{d_L}{1 \text{ Mpc}} \right) + 25 ,$$

$$d_L = (1 + z) S_k$$

$$S_k = \frac{c}{H_0 \sqrt{\Omega_k}} \sinh \left(\sqrt{\Omega_k} \frac{H_0}{c} \int_0^z \frac{cdz'}{H(z')} \right) \quad k > 0$$

$$S_k = \int_0^z \frac{cdz'}{H(z')} \quad k = 0$$

$$S_k = \frac{c}{H_0 \sqrt{|\Omega_k|}} \sin \left(\sqrt{|\Omega_k|} \frac{H_0}{c} \int_0^z \frac{cdz'}{H(z')} \right) \quad k < 0$$

$$H^2 = H_0^2 (\Omega_{m0} a^{-3} + \Omega_{r0} a^{-4} + \Omega_{k0} a^{-2})$$

+

MODELO CDM EO PARÂMETRO DE DESACELERAÇÃO

- Universo homogêneo e isotrópico cheio de matéria Bariônica, radiação e matéria escura.

$$H^2 = H_0^2 (\Omega_{m0} a^{-3} + \Omega_{r0} a^{-4} + \Omega_{k0} a^{-2})$$

Como o fator de escala depende do tempo $a(t) = a(t_0) + \left. \frac{da}{dt} \right|_{t_0} (t - t_0) + \frac{1}{2} \left. \frac{d^2 a}{dt^2} \right|_{t_0} (t - t_0)^2 + \dots$

$$a(t) = a(t_0) \left[1 + H_0(t - t_0) - \frac{1}{2} q_0 H_0^2 (t - t_0)^2 + \dots \right]$$

Parâmetro de desaceleração

$$q(t) = - \frac{\ddot{a}a}{\dot{a}^2}$$

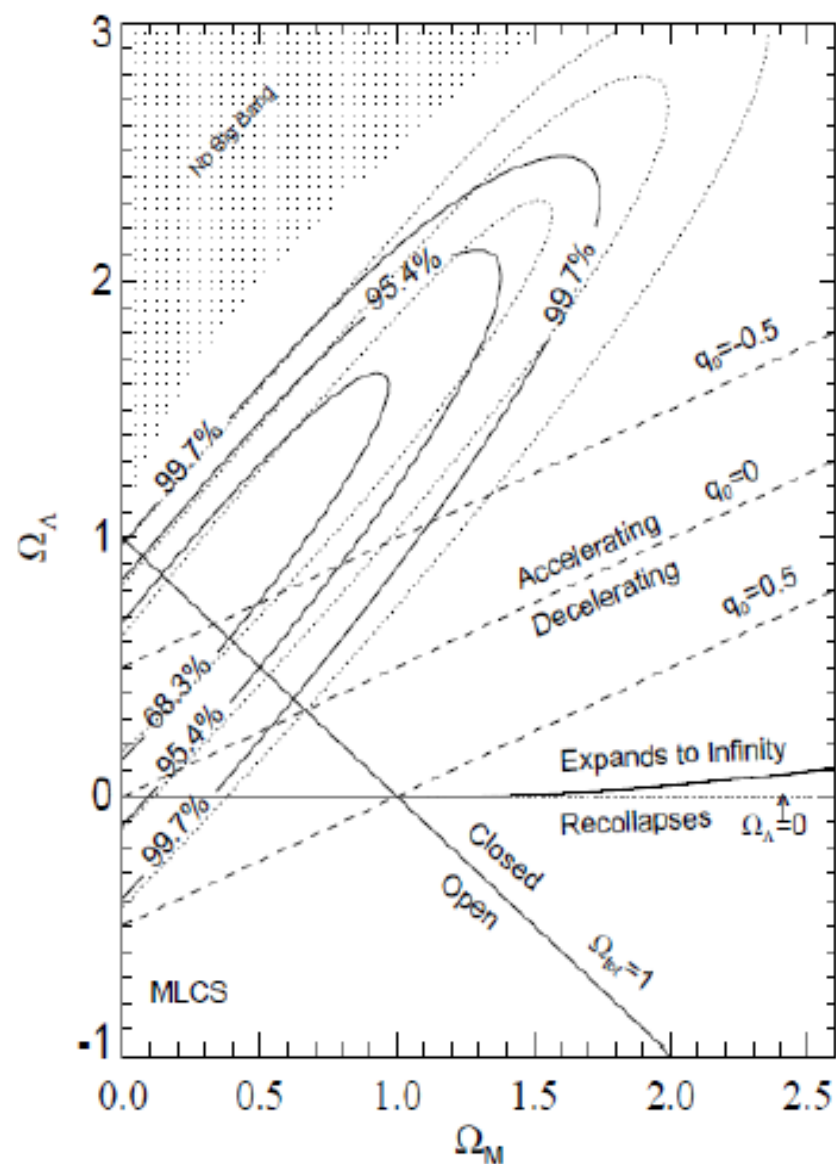
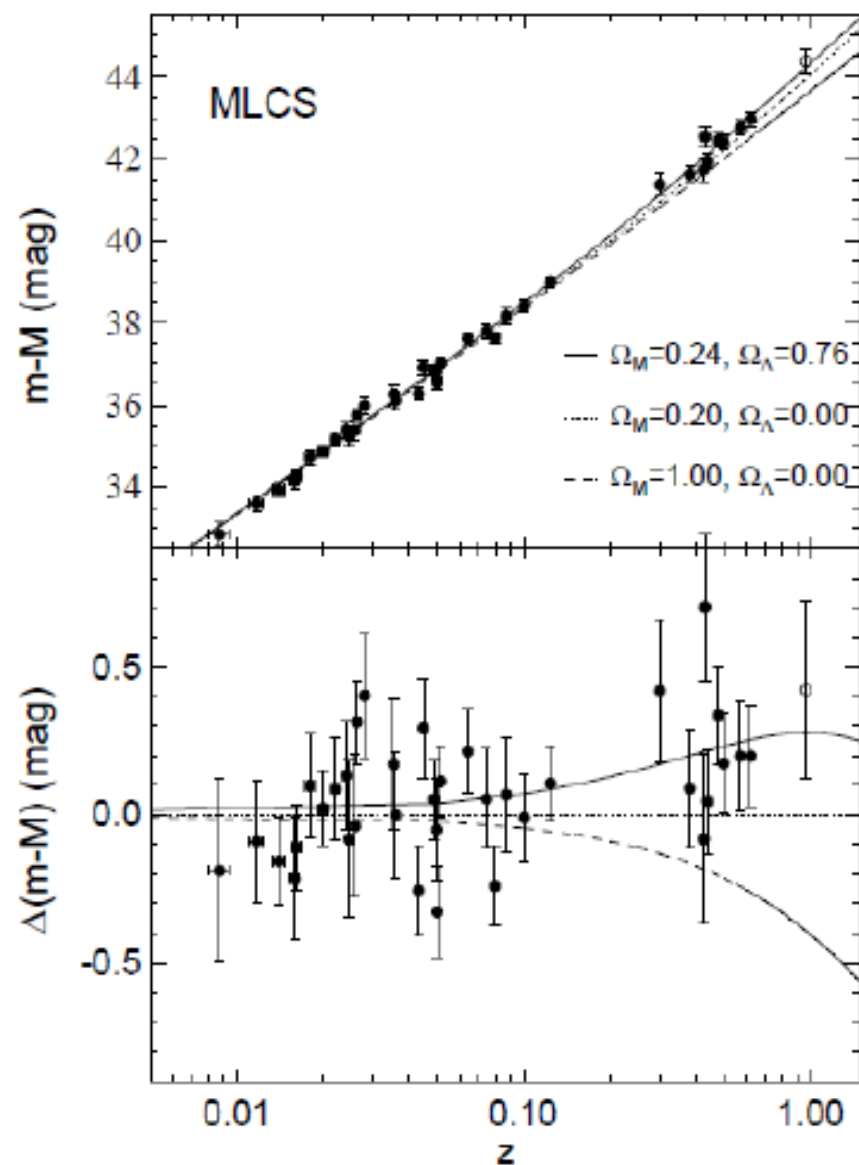
$$\frac{\ddot{a}}{a} = - \frac{4\pi G}{3} \left(\rho + \frac{3p}{c^2} \right)$$

- O Universo deveria estar desacelerando e $q_0 \sim 1/2$ (CDM)

$$d_L = \frac{c}{H_0} \left[z + \frac{1}{2} (1 - q_0) z^2 + \dots \right] \longrightarrow$$

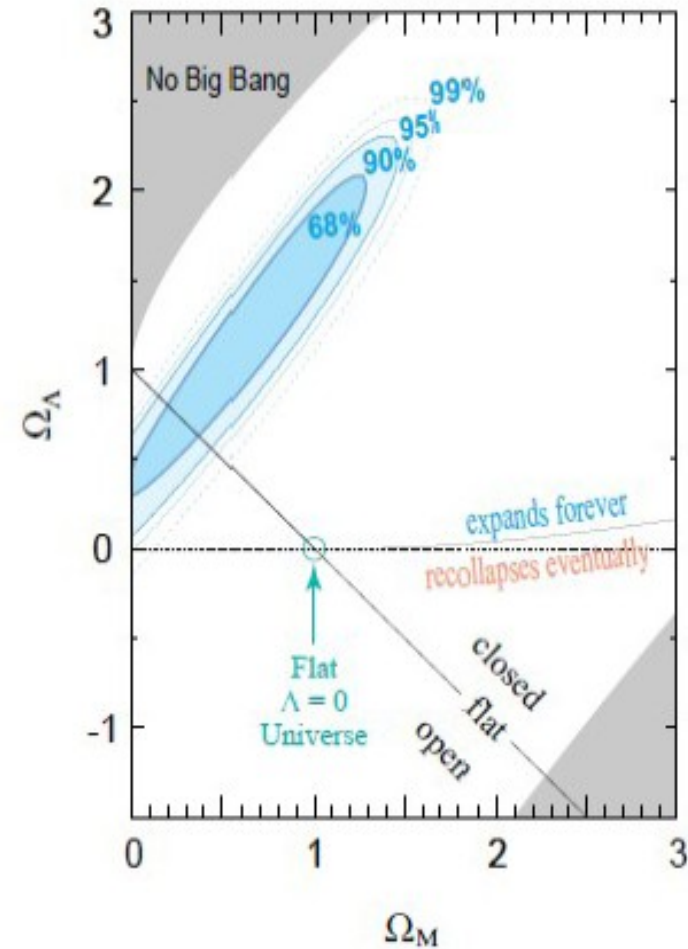
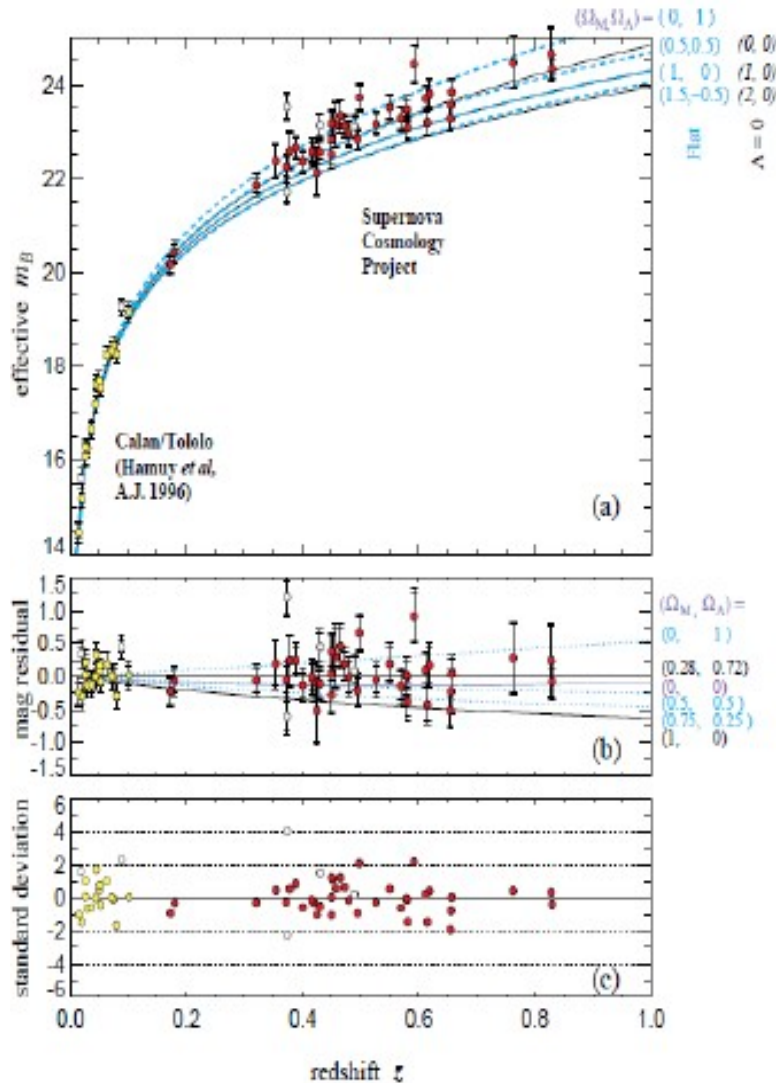
Podemos usar medidas de modulo distância
Para achar q_0 .

High- z Supernova Search Team (A. Riess) – astro-ph/9805201



SUPERNOVAS TIPO I E A ACELERAÇÃO DO UNIVERSO:

The Supernova Cosmology Project (S. Perlmutter) – astro-ph/9812133



JLA (Joint Light-curve Analysis) – 1401.4064

z_b	μ_b	z_b	μ_b	z_b	μ_b
0.010	32.9538	0.051	36.6511	0.257	40.5649
0.012	33.8790	0.060	37.1580	0.302	40.9052
0.014	33.8421	0.070	37.4301	0.355	41.4214
0.016	34.1185	0.082	37.9566	0.418	41.7909
0.019	34.5934	0.097	38.2532	0.491	42.2314
0.023	34.9390	0.114	38.6128	0.578	42.6170
0.026	35.2520	0.134	39.0678	0.679	43.0527
0.031	35.7485	0.158	39.3414	0.799	43.5041
0.037	36.0697	0.186	39.7921	0.940	43.9725
0.043	36.4345	0.218	40.1565	1.105	44.5140
				1.300	44.8218

Table 11.1: Binned type Ia supernovae data. From [Betoule et al., 2014].

$$h = 0.69^{+0.015}_{-0.015}, \quad q_0 = -0.18^{+0.12}_{-0.13}.$$

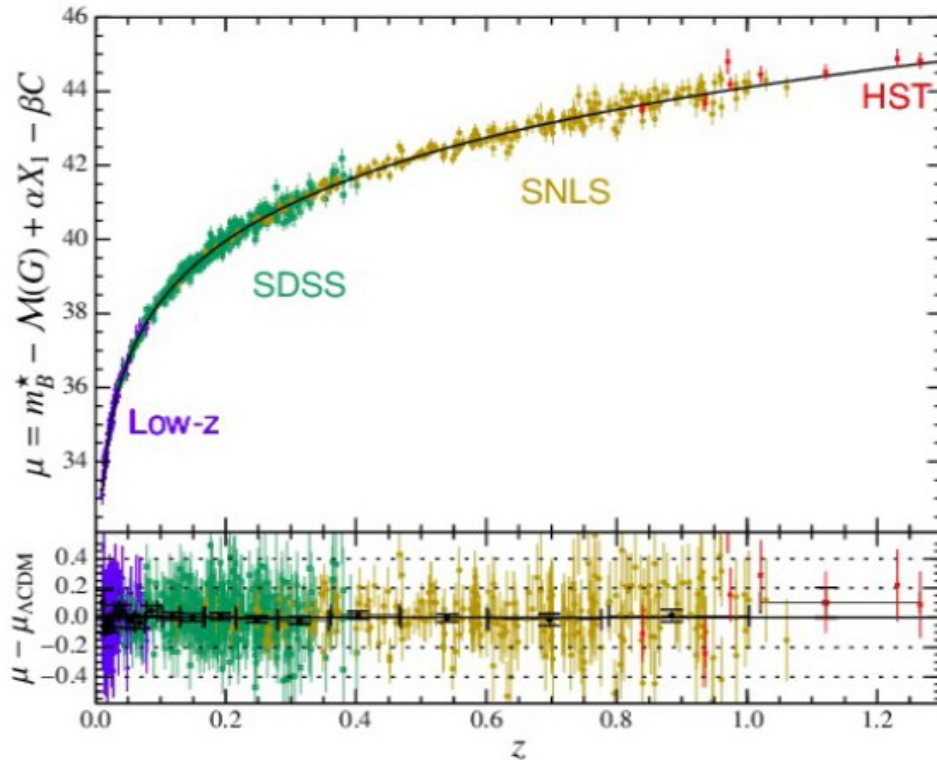
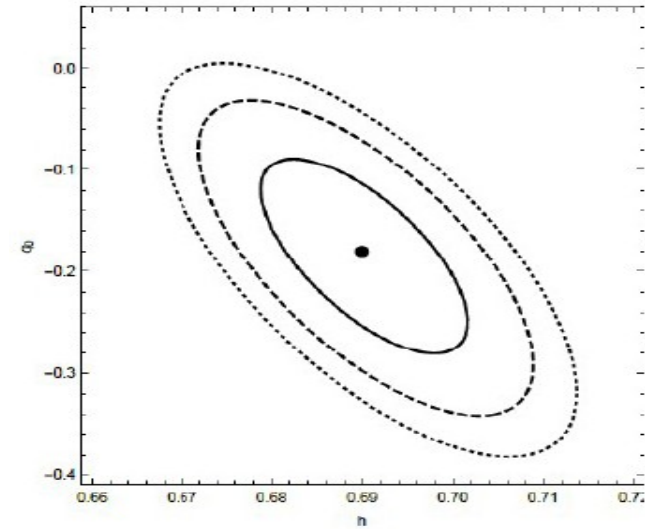


Photo: Roy Kaltschmidt. Courtesy: Lawrence Berkeley National Laboratory

Saul Perlmutter



Photo: Belinda Pratten, Australian National University

Brian P. Schmidt



Photo: Homewood Photography

Adam G. Riess

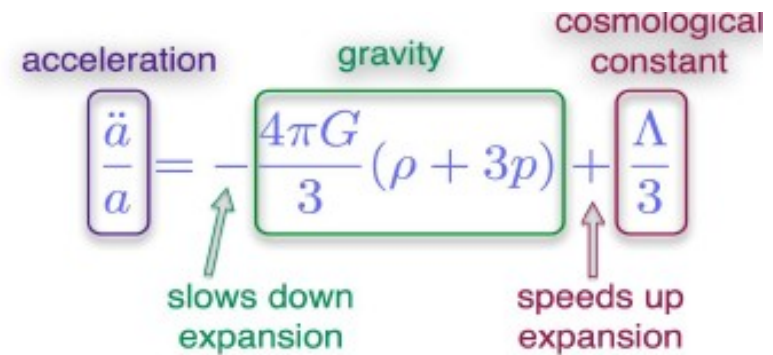
The Nobel Prize in Physics 2011 was divided, one half awarded to Saul Perlmutter, the other half jointly to Brian P. Schmidt and Adam G. Riess "for the discovery of the accelerating expansion of the Universe through observations of distant supernovae".

PARÂMETRO DE DESACELERAÇÃO:

- O Universo deveria estar desacelerando mas não!:

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3} \left(\rho + \frac{3p}{c^2} \right)$$

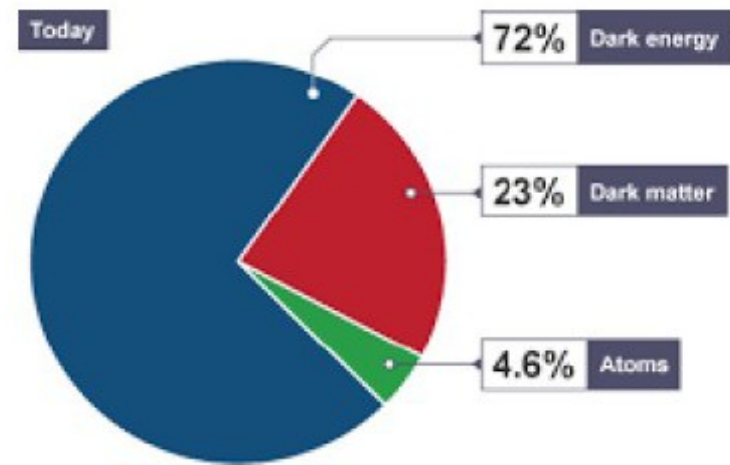
$$q(t) = -\frac{\ddot{a}a}{\dot{a}^2}$$



- Com constante cosmológica $q < 0$ (Lambda CDM)

Componentes do Universo:
Barions, Matéria escura, radiação
E energia escura

$$H^2 = H_0^2 (\Omega_{m0} a^{-3} + \Omega_{r0} a^{-4} + \Omega_{k0} a^{-2} + \Omega_{\Lambda 0})$$



E AS ESTRUTURAS?: PERTURBAÇÕES COSMOLÓGICAS

- Tempo conforme

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + a^2(t) \left(\frac{dr^2}{1 - Kr^2} + r^2 d\Omega^2 \right) \quad \xrightarrow{ad\eta = dt} \quad ds^2 = a(\eta)^2 \left(-c^2 d\eta^2 + \frac{dr^2}{1 - Kr^2} + r^2 d\Omega^2 \right)$$

Tempo conforme

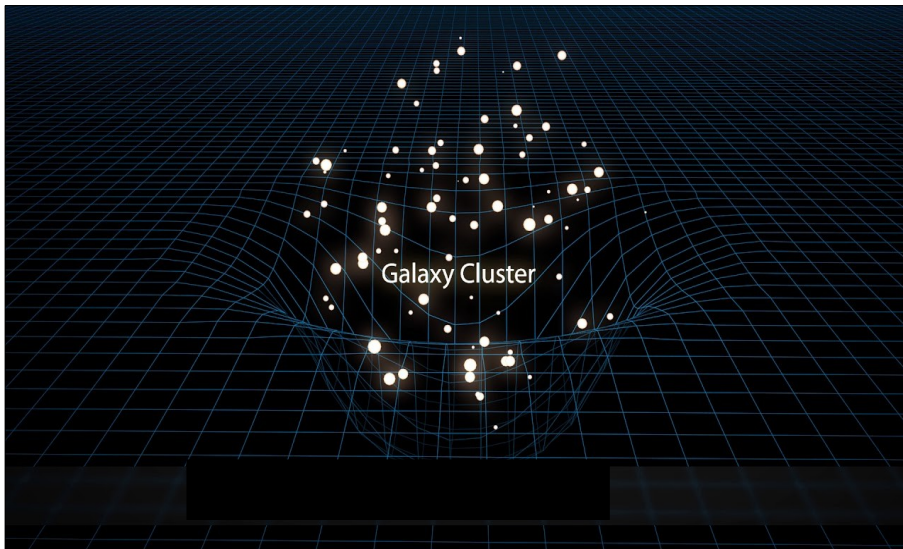
- No Lambda CDM as perturbações cosmológicas são sementes para as estruturas

$$K=0 \quad g_{\mu\nu} = a^2(\eta) \left\{ \begin{array}{cc} -[1 + 2\psi(\eta, \mathbf{x})] & w_i(\eta, \mathbf{x}) \\ w_i(\eta, \mathbf{x}) & \delta_{ij}[1 + 2\phi(\eta, \mathbf{x})] + \chi_{ij}(\eta, \mathbf{x}) \end{array} \right\}$$

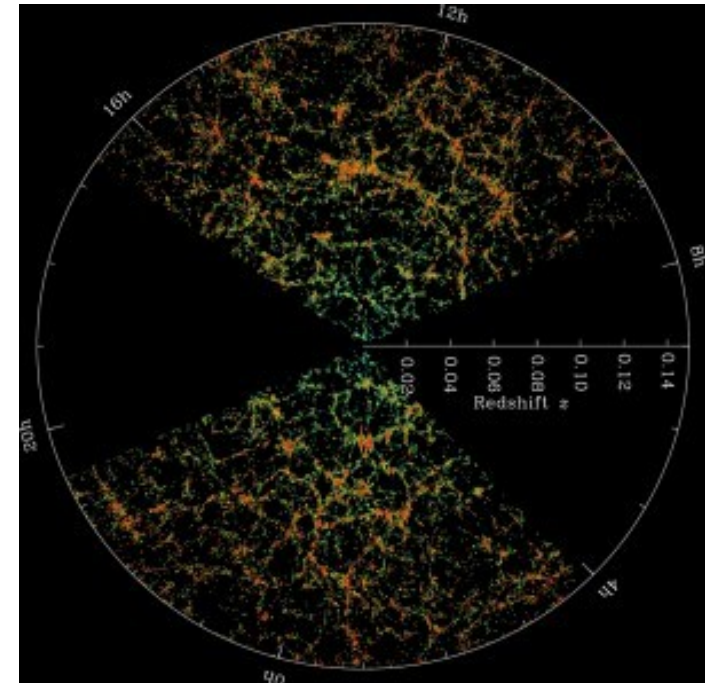
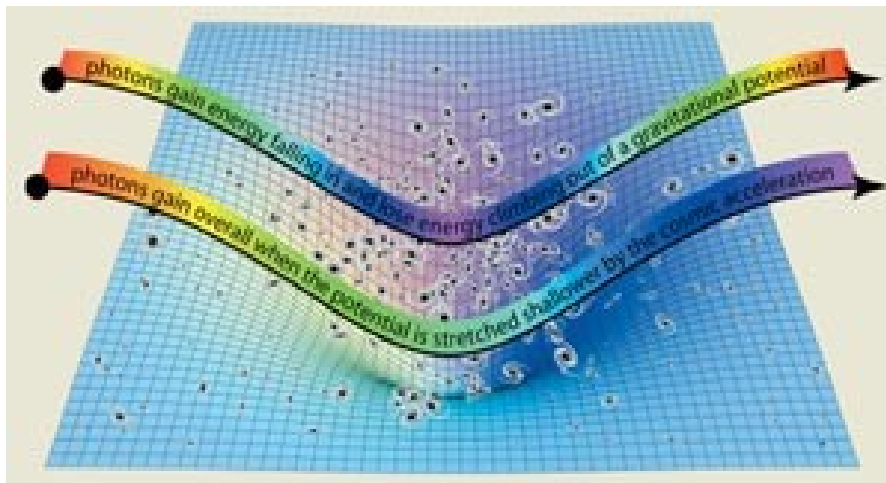
- Perturbações vetoriais: Decaem rapidamente
- Perturbações Tensoriais: Ondas gravitacionais primordiais
- Perturbações Escalares: Sementes para a formação de estruturas

$$ds^2 = -(1 + 2\Psi)dt^2 + a^2(t)(1 + 2\Phi)(dx^2 + dy^2 + dz^2)$$

Estruturas no Universo e Flutuações de Temperatura na RCF

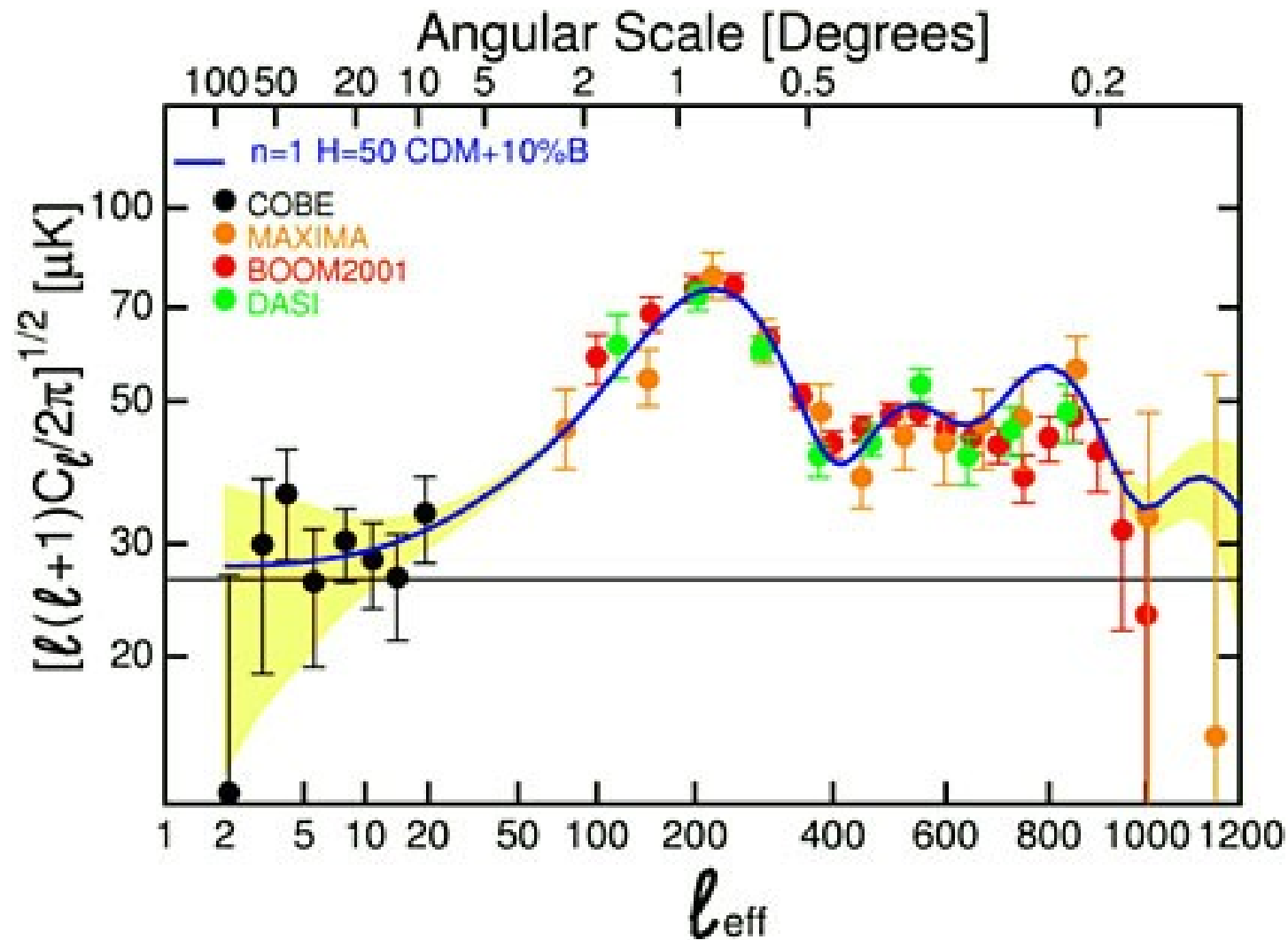


Fótons atravessam regiões com maior e Menos gravidade

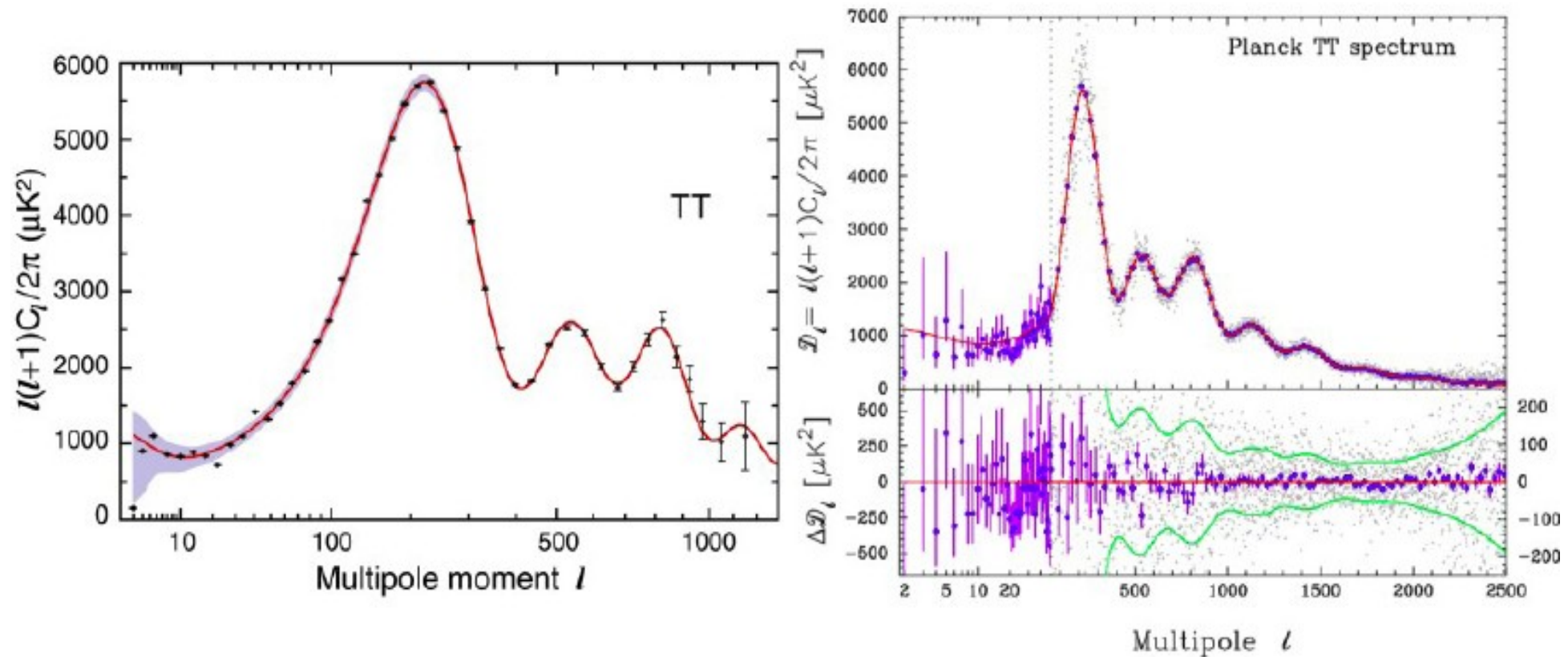


Deveriam existir flutuações de Temperatura na RCF. Pequenas (anisotropias da RCF)

ANISOTROPIAS DA RCF – MEDIDAS DO COBE (1992)



CONSEQUÊNCIAS DAS PERTURBAÇÕES NA RCF: ANISOTROPIAS DA RCF



- COBE angular resolution ~ 7 degrees, WMAP ~ 0.3 degrees and Planck ~ 10 arcmin

Best-Fits dos Parâmetros do LCDM

Parameter	Best fit	68 % limits	Best fit	68 % limits
$\Omega_b h^2$	0.022242	0.02217 ± 0.00033	0.022161	0.02214 ± 0.00024
$\Omega_c h^2$	0.11805	0.1186 ± 0.0031	0.11889	0.1187 ± 0.0017
$100\theta_{MC}$	1.04150	1.04141 ± 0.00067	1.04148	1.04147 ± 0.00056
τ	0.0949	0.089 ± 0.032	0.0952	0.092 ± 0.013
n_s	0.9675	0.9635 ± 0.0094	0.9611	0.9608 ± 0.0054
$\ln(10^{10} A_s)$	3.098	3.085 ± 0.057	3.0973	3.091 ± 0.025
Ω_Λ	0.6964	0.693 ± 0.019	0.6914	0.692 ± 0.010
σ_8	0.8285	0.823 ± 0.018	0.8288	0.826 ± 0.012
z_{re}	11.45	$10.8^{+3.1}_{-2.5}$	11.52	11.3 ± 1.1
H_0	68.14	67.9 ± 1.5	67.77	67.80 ± 0.77
Age/Gyr	13.784	13.796 ± 0.058	13.7965	13.798 ± 0.037
$100\theta_*$	1.04164	1.04156 ± 0.00066	1.04163	1.04162 ± 0.00056
r_{drag}	147.74	147.70 ± 0.63	147.611	147.68 ± 0.45
$r_{drag}/D_V(0.57)$	0.07207	0.0719 ± 0.0011		

Problemas da Teoria do Big Bang : O Problema do Horizonte

- Aproximadamente, a distância que um fóton emitido viaja é dada por:

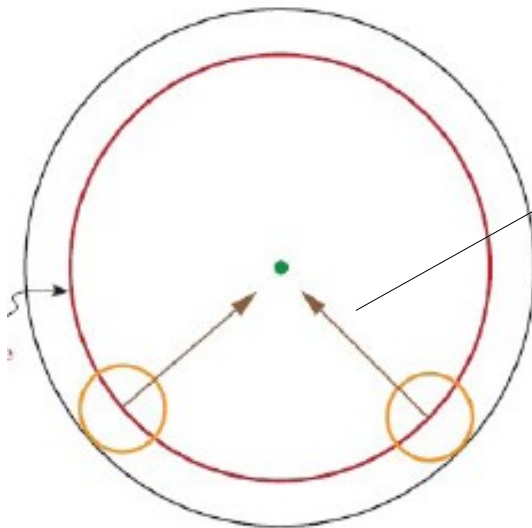
$$d_H = \frac{c}{aH} \longrightarrow \text{Raio de Hubble}$$

- Regiões do Universo separadas uma distância maior que $2d_H$, são causalmente desconexas.
- Na superfície de último espalhamento

$$H(t_{SUD}) = H_0 \sqrt{\Omega_{m0}} a_{SUD}^{-3/2} \quad \longrightarrow \quad \frac{c}{H(t_{SUD})} \approx 0.25 Mpc$$

$$d_{SUD} = \frac{\chi_{SUD}}{1 + z_{SUD}} \approx 13,8 Mpc$$

$$\theta_{SUD} \approx 1^\circ$$



- Como chegaram a ser isotrópicas regiões que na SUE não estavam em contato causal?

Paradigma Inflacionario

Disminuyendo el radio co-movil de Hubble

$$d_H = \frac{1}{aH(t)}$$

$$\frac{d(aH)^{-1}}{dt} < 0$$

Sea la ecuacion de estado:

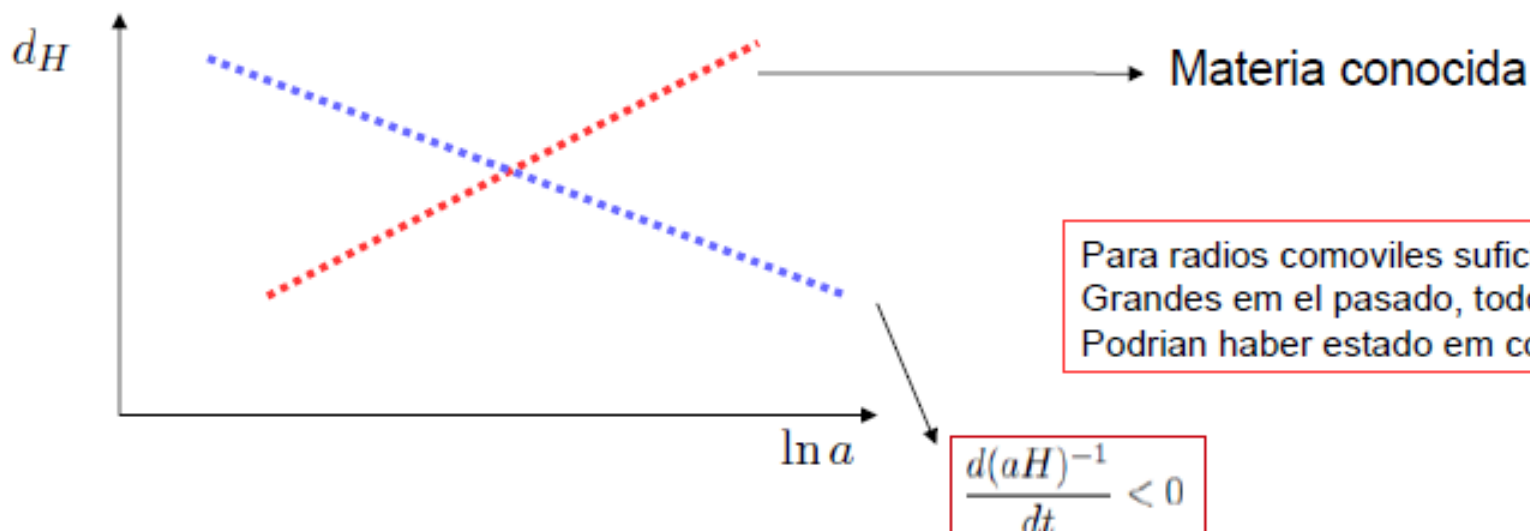
$$w = \frac{p}{\rho}$$



$$\dot{\rho} + 3H(\rho + p) = 0 \quad , \rho \propto a^{-3(1+w)}$$

Para materia conocida el radio co-movil siempre aumenta

$$d_H \propto a^{\frac{1}{2}(1+3w)}$$



Para radios comoviles suficientemente Grandes em el pasado, todos las regiones Podrian haber estado em contato causal

PARADIGMA INFLACIONÁRIO

- Vários dos problemas da Teoria do Big Bang se resolvem se

$$\frac{d(aH)^{-1}}{dt} < 0 \quad \Rightarrow \quad \ddot{a} > 0 \quad \text{Expansão acelerada}$$

- Podemos reescrever: $\frac{d}{dt}(aH)^{-1} = -\frac{1}{a}(1 - \varepsilon) \quad \varepsilon \equiv -\frac{\dot{H}}{H^2} .$

$$\boxed{\varepsilon = -\frac{\dot{H}}{H^2} < 1}$$

- Caso ideal:

$$\varepsilon \approx 0 \quad H \approx cte \quad a \propto e^{Ht}$$

Expansão quase- de Sitter

- Deveria existir uma época de expansão acelerada e exponencial antes da era dominada pela radiação: Era Inflacionária.

MODELO LCDM (Lambda COLD DARK MATTER)

- Universo homogêneo e isotrópico quase plano ($k \sim 0$), cheio de matéria bariônica ($\sim 4.6\%$), radiação e matéria (23%) e energia escuras (72%).

$$H^2 = H_0^2(\Omega_{m0}a^{-3} + \Omega_{r0}a^{-4} + \Omega_{k0}a^{-2} + \Omega_{\Lambda0})$$

- Antes da era dominada pela radiação houve uma época inflacionária.
- Flutuações quânticas na época inflacionária originaram as perturbações cosmológicas .
- As perturbações cosmológicas são as sementes para a formação de estruturas.