

Температурна история

Основни събития

ИСТОРИЯ НА ВСЕЛЕНАТА

Процеси време температура

Велико обединение

10^{-35} s 10^{15} GeV

Инфлация

Генерация на БА

EW симетрия нарушение

10^{-10} s 100 GeV

QCD

10^{-5} s 0.3 GeV

Първичен нуклеосинтез

1 s – 3 m 1 - 0.1 MeV

Формиране на КМФ

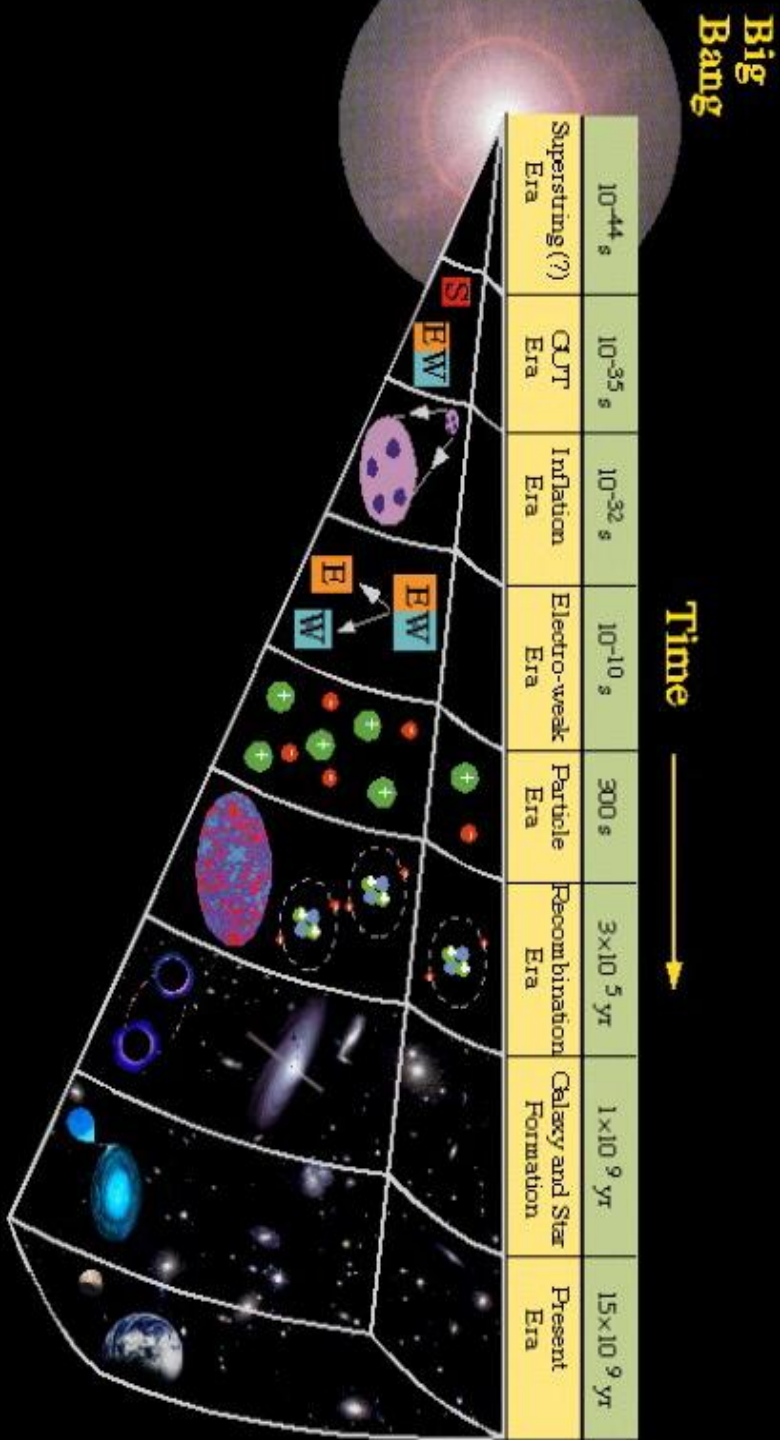
300 000 y 0.3 eV

Формиране на галактиките

$\sim 10^9$ y

Днешна епоха

$13.7 \cdot 10^9$ y 0.0003 eV \sim 3K



Time



РЕЛИКТОВО НЕУТРИНО

Взаимодействия на неутриното с веществото

Реликтов неутринен фон

Космологична роля на неутриното

Равновесие в разширяващата се Вселена – пример РНФ

$T > 1 \text{ MeV}$

$$\nu_\alpha \nu_\beta \leftrightarrow \bar{\nu}_\alpha \bar{\nu}_\beta$$

$$\nu_\alpha \bar{\nu}_\beta \leftrightarrow \bar{\nu}_\alpha \nu_\beta$$

$$\nu_\alpha e^- \leftrightarrow \bar{\nu}_\alpha e^-$$

$$\nu_\alpha \bar{\nu}_\alpha \leftrightarrow e^+ e^-$$

$T \sim 1 \text{ MeV}$

$$T_\nu = T_e = T_\gamma$$

$$\rho_r = \rho_\gamma + \rho_\nu + \rho_x = \left[1 + \frac{7}{8} \left(\frac{4}{11} \right)^{4/3} N_{\text{eff}} \right] \rho_\gamma$$

В ранната Вселена неутриното е сред основните компоненти, силно влияе на темпа на разширение, участва в процесите в пред КН епоха.

Излизане от равновесие

С разширението на Вселената T намалява, взаимодействията отслабват и скоростта им става недостатъчна да поддържат неутриното в равновесие.

$$\Gamma \sim G_F^2 E_\nu^2 N_\nu \leq H \sim \sqrt{g_{\text{eff}}} G T^2 \quad T_{\text{dec}}(\nu_e) \sim 2 \text{ MeV} \quad T_{\text{dec}}(\nu_{\mu,\tau}) \sim 3 \text{ MeV}$$

$$T \sim m_e, \quad e^+ e^- \rightarrow \gamma\gamma \quad T_\nu = (4/11)^{1/3} T_{\text{cmb}} \quad f_\nu(p, T) = \frac{1}{e^{p/T_\nu} + 1}$$

$$N_\nu = 3.046 \text{ не } 3 \text{ поради частично загряване.} \quad N_\nu = 2.984 \pm 0.008 \text{ (LEP)}$$

$T_0 \sim 2.7 \text{ K}$

РЕЛИКТОВ НЕУТРИНЕН ФОН

$T_{\nu 0} \sim 1.9 \text{ K.}$

$$n_\nu = 339.3 \text{ cm}^{-3}$$

$$n_\nu = 112 \text{ cm}^{-3}$$

$$n_{\text{cmb}} = 411 \text{ cm}^{-3}$$

$$\Omega_\nu = \frac{3m_0}{93.14h^2 \text{ eV}^2}$$

Неутриното от РНФ е най-многобройната частица след КМФ фотони.

History of the Universe

Неutrino в равновесие

$$f_{\nu}(p, T) = \frac{1}{e^{p/T} + 1}$$

BIG BANG

Inflation

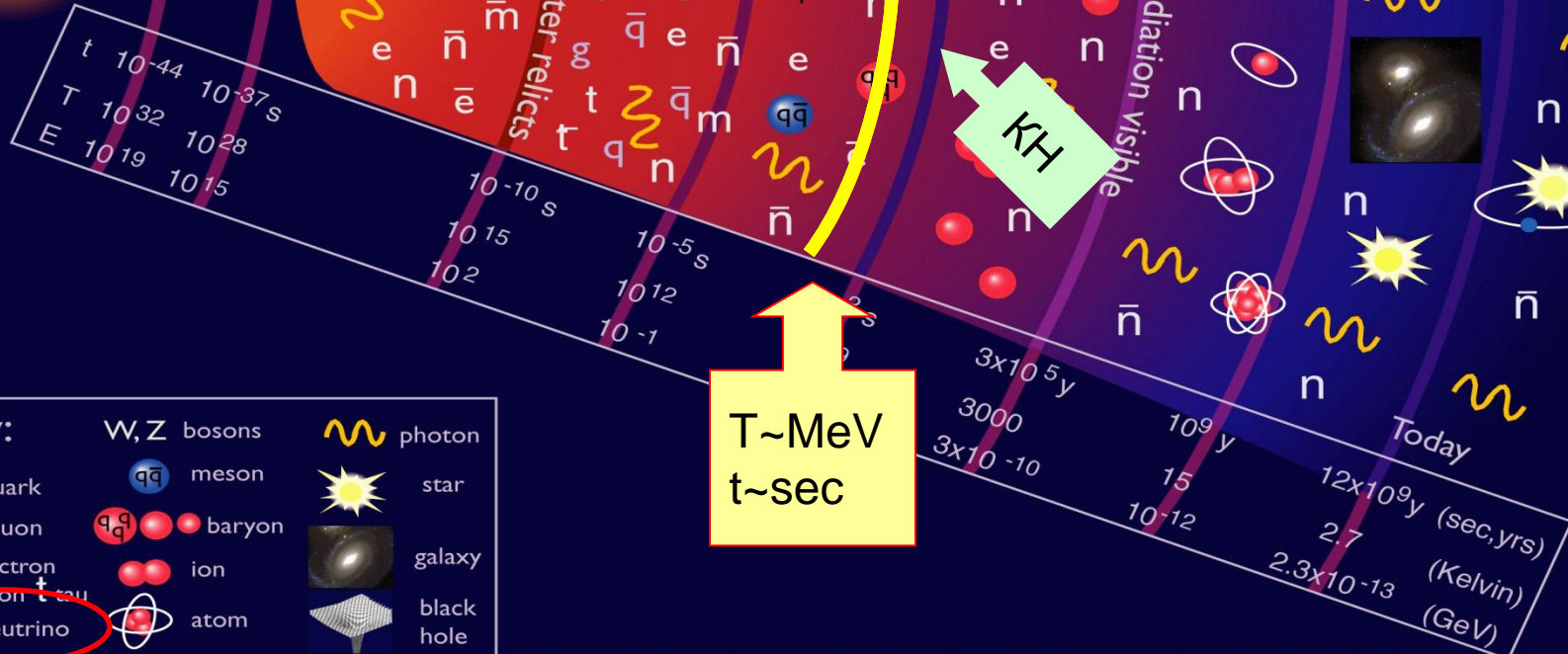
BNL-RHIC
CERN-LEP
SLAC-SLC

possible dark matter relicts

KH

T ~ MeV
t ~ sec

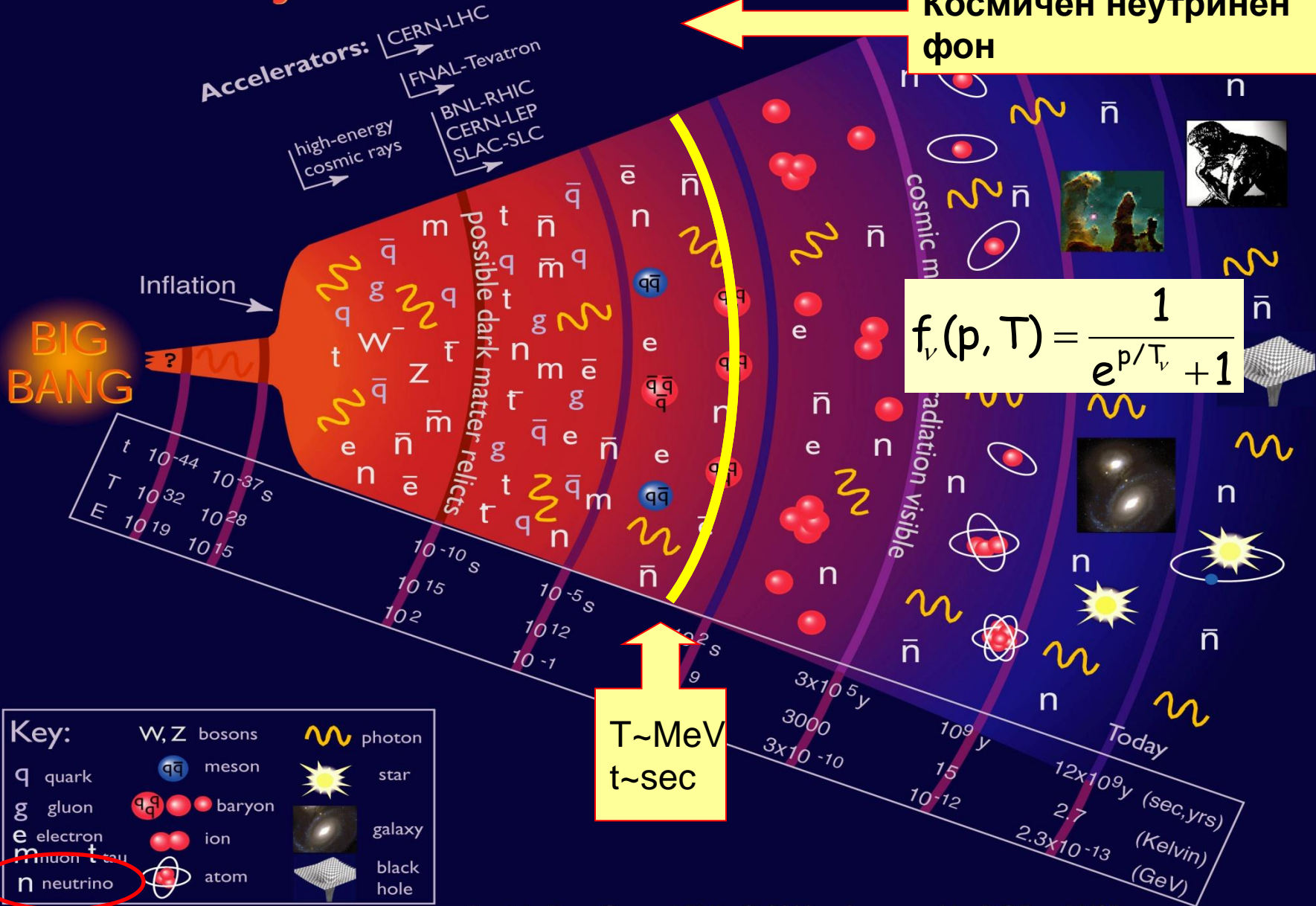
cosmic microwave radiation visible



Key:

W, Z bosons	meson	photon
quark	baryon	star
gluon	ion	galaxy
electron	atom	black hole
muon		
neutrino		

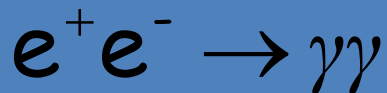
History of the Universe



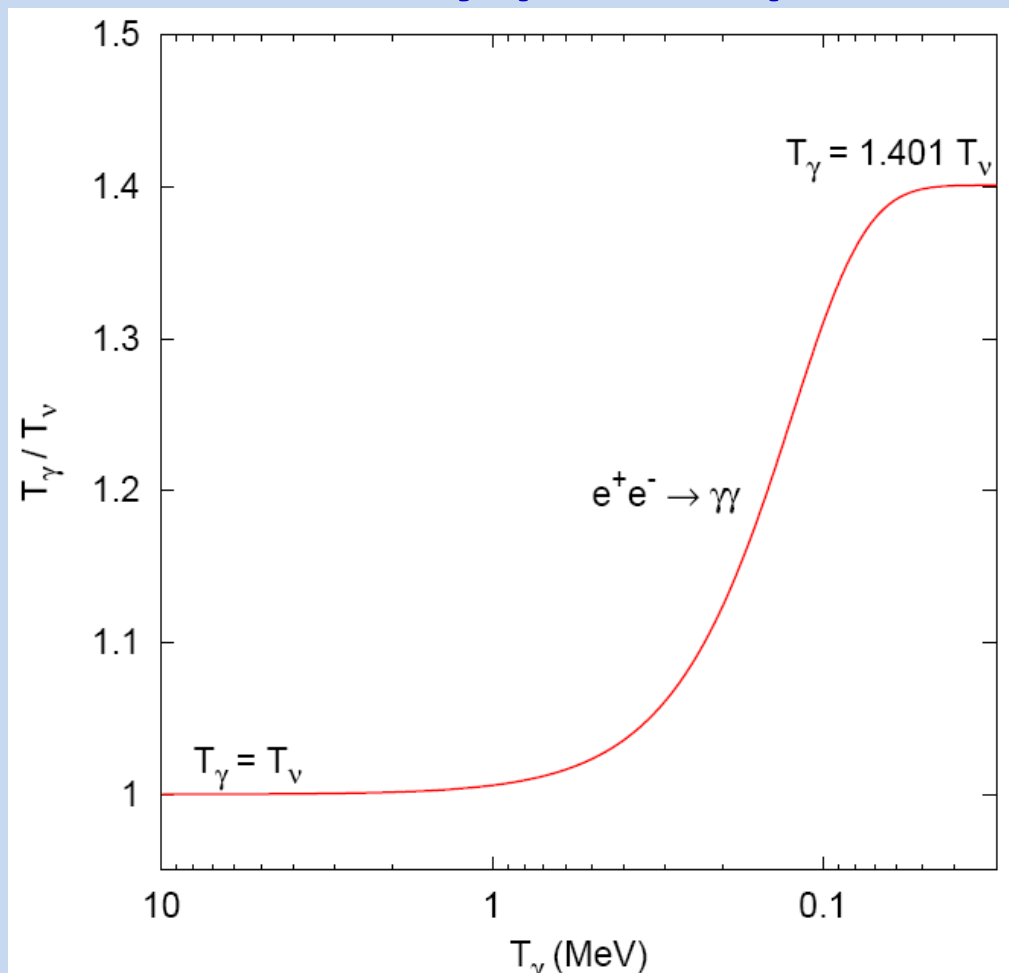
Температура на реликтовия неутринен фон

$$\frac{T_\gamma}{T_\nu} = \left(\frac{11}{4}\right)^{1/3}$$

$$T \sim m_e$$



загрива фотоните
не неутриното



$$n_\nu = 339.3 \text{ cm}^{-3}$$

$$\Delta N_{\text{eff}} \sim 3 \text{ (WMAP)}$$

$$\Delta N_{\text{eff}} \sim 0.2 \text{ (Planck)}$$

$$\Omega_\nu = \frac{3m_0}{93.14h^2 \text{ eV}^2}$$

Уточняване на характеристиките на РНФ

	$T_{fin}^\gamma / T_0^\gamma$	$\delta\rho_{\nu e}(\%)$	$\delta\rho_{\nu\mu}(\%)$	$\delta\rho_{\nu\tau}(\%)$	N_{eff}
Мигновено излизане от ТДР	1.40102	0	0	0	3
СМ	1.3978	0.94	0.43	0.43	3.046
+3ν смесване ($\theta_{13}=0$)	1.3978	0.73	0.52	0.52	3.046

$\Delta N_{eff} \sim 3$ (WMAP)

$\Delta N_{eff} \sim 0.2$ (Planck)

Dolgov, Hansen & Semikoz, NPB 503 (1997) 426
Mangano et al, PLB 534 (2002) 8; NPB 729 (2005) 221

Bowen et al MNRAS 2002

Неутринната енергийна плътност днес (3 еднакви маси)

$$\Omega_\nu = \frac{\rho_\nu}{\rho_c} = \frac{3m_0}{94.12h^2 \text{ eV}^2} \longrightarrow \Omega_\nu = \frac{3m_0}{93.14h^2 \text{ eV}^2}$$

Плътност на частиците

$$n_\nu = 335.7 \text{ cm}^{-3} \longrightarrow n_\nu = 339.3 \text{ cm}^{-3}$$

Реликтовото неутрино днес е най-многобройната частица след КМФ фотони.

Въпреки голямата плътност на частиците от КНФ, детектирането на реликново неутрино е много трудно, поради изключително слабите взаимодействия на неутрино и поради изключително ниската му енергия $\sim T_\nu$.

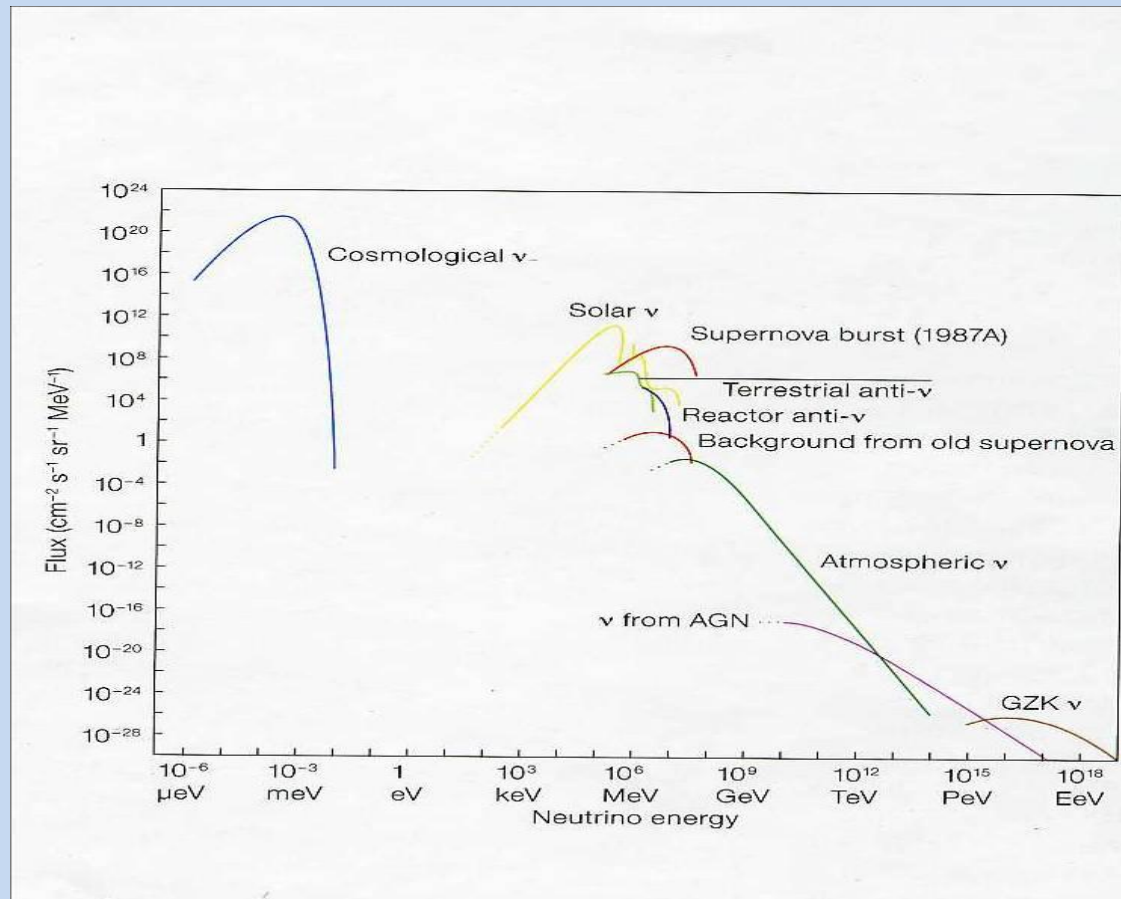


Figure 2: The 'grand unified' neutrino spectrum.

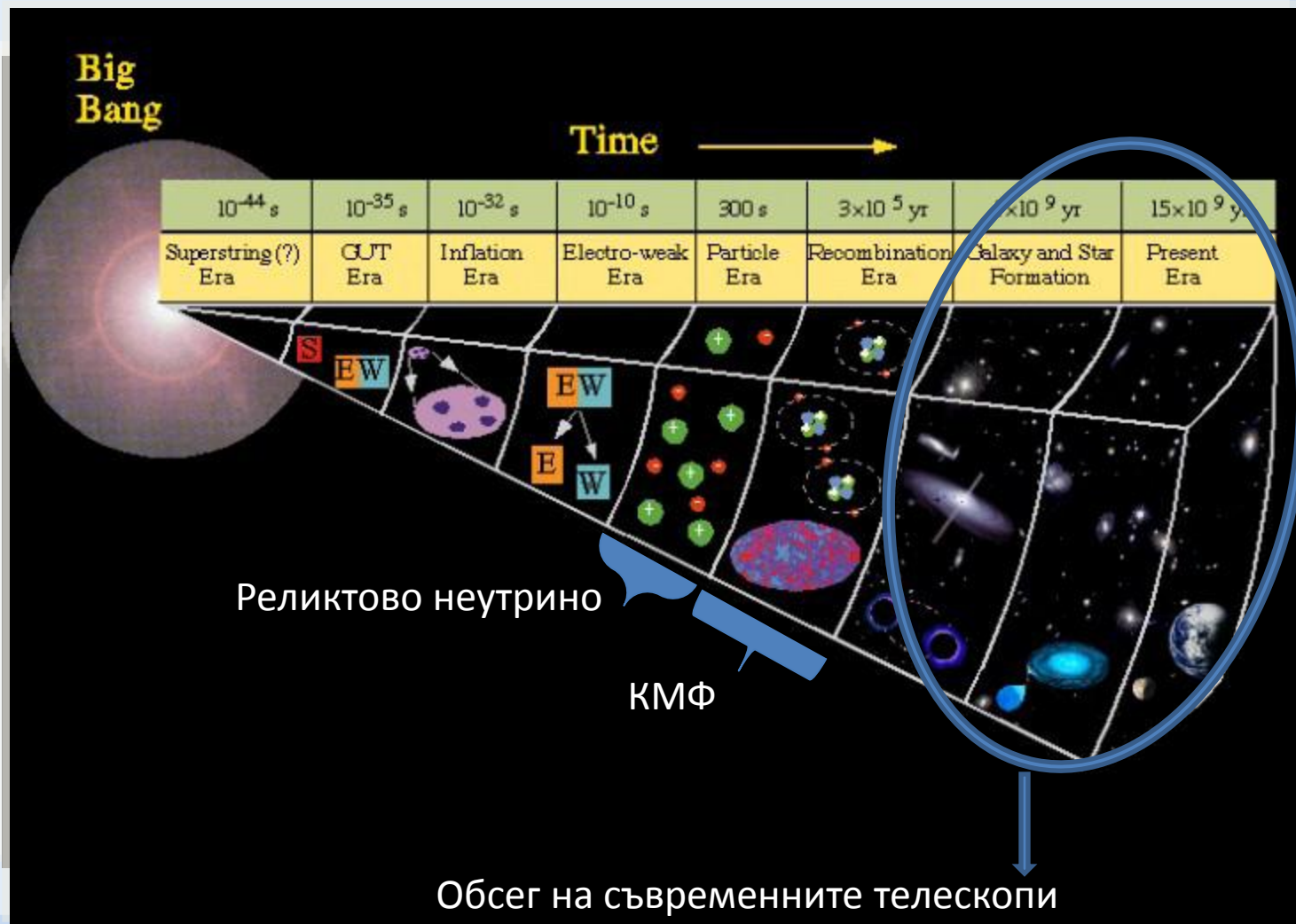
$$\Omega_\nu = \frac{3m_0}{93.14h^2 \text{ eV}^2}$$

$$n_\nu = 339.3 \text{ cm}^{-3}$$

$$0.001 < \Omega_\nu < 0.02$$

Недиректно детектиране вече има благодарение на ефекта на РНФ върху КН, КМФ, LSS. КМФ и структурите са чувствителни към пълната неутринна плътност, докато КН тества разпределението на енергията, смесването, масовите разлики химичния потенциал и др.

Неутрино носи информация от 1 секунда на Вселената



НЕУТРИНОТО ОСЦИЛИРА

$$\nu_m = U_{mf} \nu_f, \quad (f = e, \mu, \tau) \quad P(\theta, \delta m^2, E, t)$$

Свидетелства за неутринни осцилации: намерени от неутринни експерименти: слънчева неутринна аномалия, атмосферна неутринна аномалия, LSND, KAMLAND, K2K....

Неутринните аномалии и резултатите от наземните неутринни експерименти са разрешени чрез неутринни осцилации

Щом неутрино осцилира, то:

- ✓ ненулева маса и масови разлики на неутрино
- ✓ смесване
 - масовите състояния се различават от флевърните
- ✓ L асиметрия на Вселената може да не е малка
- ✓ РНФ може да не е равновесен

$$n_\nu^{cnb} \neq n_\nu^{eq} = \exp(-E/T) / (1 + \exp(-E/T)) \quad N_e < N_{eq}$$

Слънчев неутринен проблем: $\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu$

$$\delta m_{12}^2 \sim 7.6 \cdot 10^{-5} \text{ eV}^2 \quad \sin^2\theta \sim 0.3$$

Атмосферна неутринна аномалия: $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$

$$\delta m_{23}^2 \sim 2.4 \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2 \quad \text{максимално смесване}$$

$\delta m^2 \neq 0 \implies$ поне 2 типа неутрино $m_\nu \neq 0$

$$\Omega_\nu = \frac{3m_0}{93.14h^2 \text{ eV}^2} \quad 0.001 < \Omega_\nu$$

Лекото флевърно неутрино не съставлява ТВ и не играе важна роля в образуването на структурите.

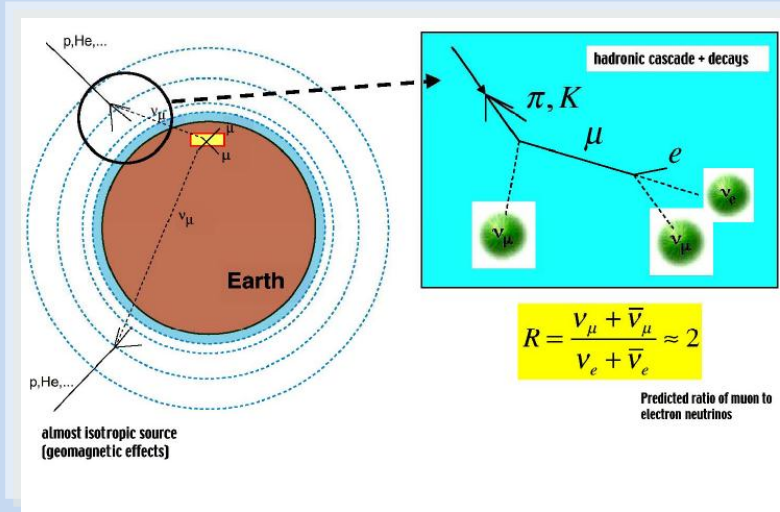
$$0.001 < \Omega_\nu < 0.02$$

Евентуално стерилно неутрино кандидат за ТВ на Вселената.

Слънчев неутринен проблем Homestake+Gallium+Kam+SK+SNO

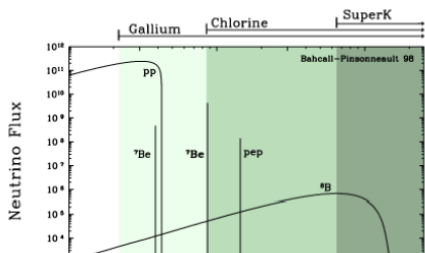
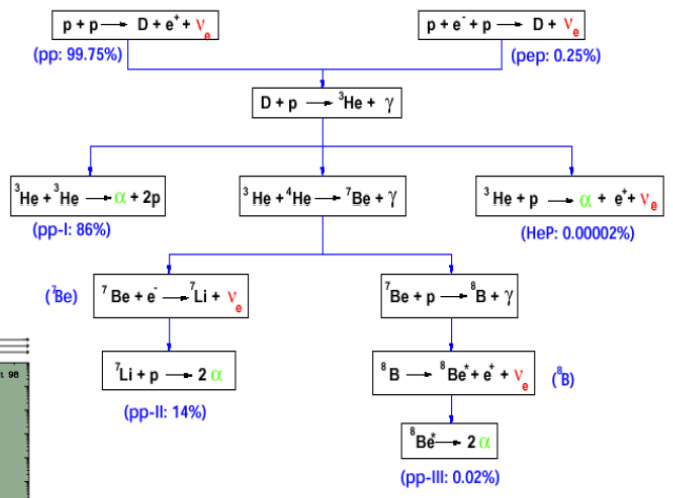
1968 Homestake **Ray Davis**
 SK 1996: Неутриното наистина е от Слънцето
 SNO 2002: SMA решение и стерилния канал са изключени
 Слънцето свети в резултат на нуклеосинтез в ядрото!
 Наблюдавани са мюонно и тау неутрино, измерен пълния неутринен поток от Слънцето
 KAMLAND: дисторсия типична за осцилациите
 SNO-II, Kamland: LMA решение на слънчевата аномалия
 Слънчевата аномалия потвърдена от наземни експерименти

Атмосферна неутринна аномалия



ν_e solar neutrinos

Sun = Fusion reactor
 Only ν_e produced
 Different reactions
 Spectrum in energy



Counting experiments vs

Атмосферните неутринни ($\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$) осцилации са установени (IMB+Kam+SK+Macro+Sudan)

$$\Omega_\nu = \frac{3m_0}{93.14h^2 \text{ eV}^2}$$

$$0.001 < \Omega_\nu$$

Космологична роля на неутриното

- Влияе върху плътността на Вселената и съответно върху скоростта на разширение
- Влияе върху КН - КН ограничения върху характеристиките на неутриното
- Влияе върху КМФ – КМФ ограничения
- Влияе върху формирането на структурите - КС ограничения
- Ефекти на неутринните осцилации. Еволюцията на космично неутрино и космологичните ограничения върху космичния неутринен фон при наличие на неутринни осцилации.
- Космологични ограничения върху осцилационните параметри
- Роля на началното ниво на запълване на инертното неутрино
- Космологични модели с неутринни осцилации и лептонна асиметрия
- Бариогенезис чрез лептогенезис

Неутрино във Вселената:



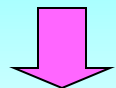
Влияе върху плътността
скоростта на разширение
на Вселената

Ограничения върху
броя на поколенията

вещество/лъчение изместване

Ограничения върху неутринните
маси и плътности

кандидат за ТВ



Влияе върху КН
кинетика на КН

Дисторсия на спектъра
Ограничения върху ЛА

Ограничения върху
осцилационните
параметри

Върху популацията на
инертно неутрино

бариогенезис чрез
лептогенезис



Влияе върху КМФ и КСВ

усеща пълната плътност
на неутрино



Ограничения върху масите
Ограничения върху лептонната А

нечувствителен към различните
неутринни типове и към
спектралната дисторсия

Ефект на неутриното върху плътността

$$n_{\nu}^{eq} = \exp(-E/T) / (1 + \exp(-E/T))$$

$T < m_e$

$$\rho_r = \rho_{\gamma} + \rho_{\nu} = \frac{\pi^2}{15} T_{\gamma}^4 + 3 \times \frac{7}{8} \times \frac{\pi^2}{15} T_{\nu}^4 = \left[1 + \frac{7}{8} \left(\frac{4}{11} \right)^{4/3} \right] 3 \rho_{\gamma}$$

Effective number of relativistic neutrino species

$$\rho_r = \rho_{\gamma} + \rho_{\nu} + \rho_x = \left[1 + \frac{7}{8} \left(\frac{4}{11} \right)^{4/3} N_{\text{eff}} \right] \rho_{\gamma}$$

Неутриното съществено влияе върху скоростта на разширение на Вселената

$$H^2 \equiv \left(\frac{\dot{R}}{R} \right)^2 = \frac{8\pi G_N \rho}{3} - \frac{k}{R^2} + \frac{\Lambda}{3},$$

$$\frac{\ddot{R}}{R} = \frac{\Lambda}{3} - \frac{4\pi G_N}{3} (\rho + 3p),$$

Неутринните осцилации указват на най-малко 2 различни ненулеви неутринни маси.

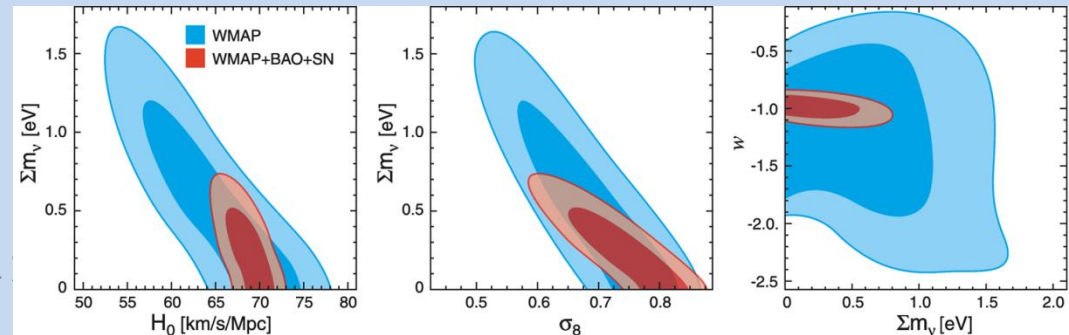
Днес приносът на 3 еднакви неутринни маси е:

$$\Omega_\nu = \frac{3m_0}{93.14h^2 \text{ eV}^2} \quad n_\nu = 339.3 \text{ cm}^{-3}$$

Ако масите са в eV диапазона, то те съставляват няколко % от ТВ, могат да повлияят на формирането на структурите (подтискайки образуването на малки структури).

Релативистките неутрино пречат на образуването на структурите във Вселената, забавяйки появата на първите звезди, което е в противоречие с новите данни от WMAP.

Ограничения върху масата



Леките неутрино не бива да играят роля в еволюцията на структурите на Вселената – забавят формирането на галактиките.

Днешната Вселена

е изпълнена с
реликтови неутрино
сравними по численост с
реликтовите фотони
с $T \sim 1.9 \text{ K}$.

КМФ и КМС са чувствителни към пълната плътност, те поставят най-строгите ограничения върху сумата от неутринните маси $< 0.6 \text{ eV}$.
Тези ограничения са значително по-строги от съществуващите лабораторни ограничения върху масите.

Първичен Нуклеосинтез

Реликтово обилие на леките елементи
Химичен състав на барионната компонента

Наблюдателни основи на СКМ

- Разширение на Вселената

Наблюдаваното разбягване на галактиките свидетелствува за разширение на Вселената. SN наблюдения свидетелствуват за разширение с ускорение.

- Обилие на леките елементи

$$H_0, \Omega_B, \Omega_V$$

Свидетелство за ранен горещ и плътен стадий на Вселената.

- Космичен микровълнов фон

Остатъчното лъчение от горещия стадий на Вселената.

- Структури във Вселената

$$H_0, q_0, \Omega_i (\Omega_0, \Omega_\Lambda, \Omega_M, \Omega_B, \Omega_\gamma, \Omega_V, \dots), t_0, T_0, P(k), C_l$$

Обилие на леките елементи

D се измерва в далечни, нискометалични квазарни абсорбционни системи

$$D/H|_p = (2.78 \pm 0.29) \times 10^{-5}$$

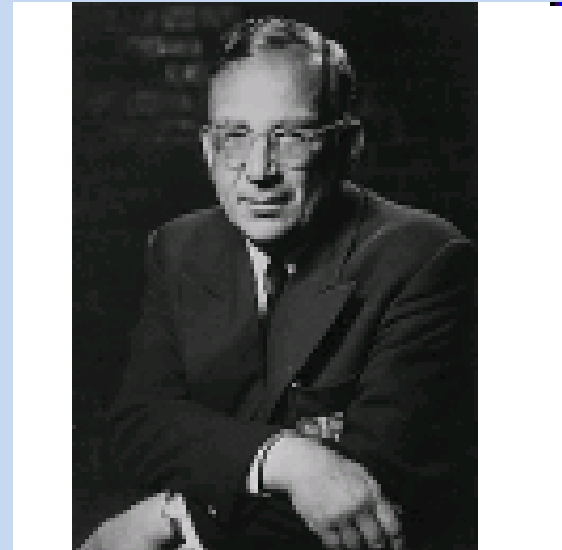
He - в H II области на галактики джуджета с ниска Z

$$Y_p = 0.249 \pm 0.009$$

Li - в Pop II (бедни на метали $Z < 1/10\,000 Z_{\odot}$) звезди от сфероидалната компонента на Галактиката

$$Li/H|_p = (1.7 \pm 0.02_{-0}^{+1.1}) \times 10^{-10}.$$

Наблюдателните данни относно обилието на леките елементи са в отлично съгласие (простиращо се на 9 порядъка!) с теоретичните предсказания на СКМ за космологичен нуклеосинтез в гореща ранна Вселена.



Георгий А. Гамов

1904 – 1968

Г. Гамов през 1946–1948 разработва теорията за образуване на химичните елементи посредством неутронен захват в модел на гореща Вселена.

В рамките на този модел предсказва реликтовия фон и неговата температура.

Fuse наблюдава реликтов He и структурата на ранната Вселена



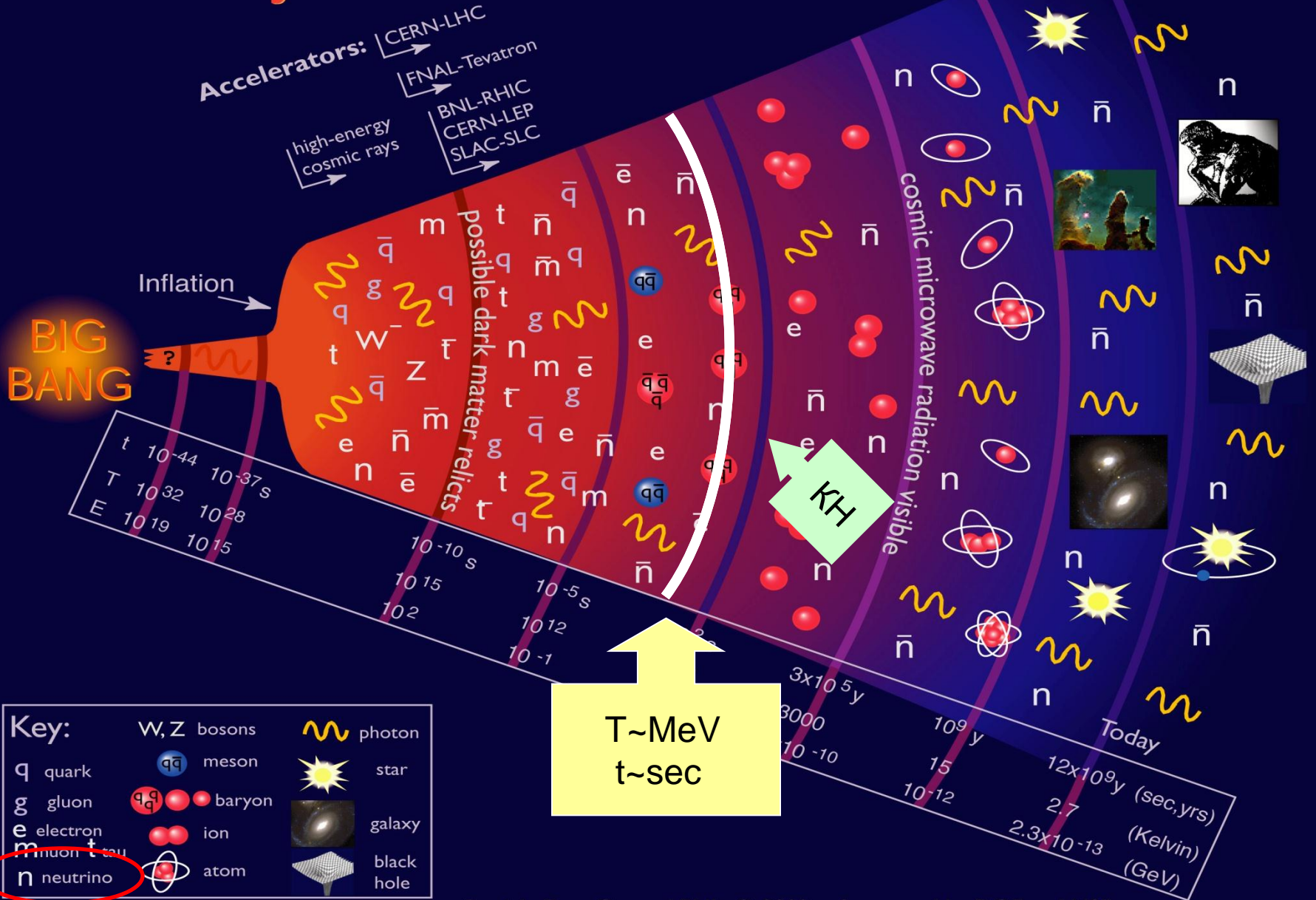
С еволюцията на Вселената флуктуациите на плътността на междугалактичния газ (H и He) нарастват и образуват сгъстъци и филаменти под действие на гравитацията. От най-плътните образувания се образуват галактики и квазари, чието излъчване йонизира оставащия междугалактичен газ.

Този He, разпределен в пространството проследява **архитектурата на ранната Вселената**, която е резултат от малките гравитационни нестабилности. Наблюденията потвърждават теоретичните модели за образуване на мрежовидната структура на Вселената между галактиките.

2001: Наблюденията на Космическия сателит провеждащ спетроскопични изследвания в далечната ултравиолетова област (NASA's Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer, FUSE) разкриват **структурата на йонизирания He**, която трасира областите с най-малка плътност на междугалактичната среда.

Първи директни наблюдения на първично синтезирания He в КН.

History of the Universe

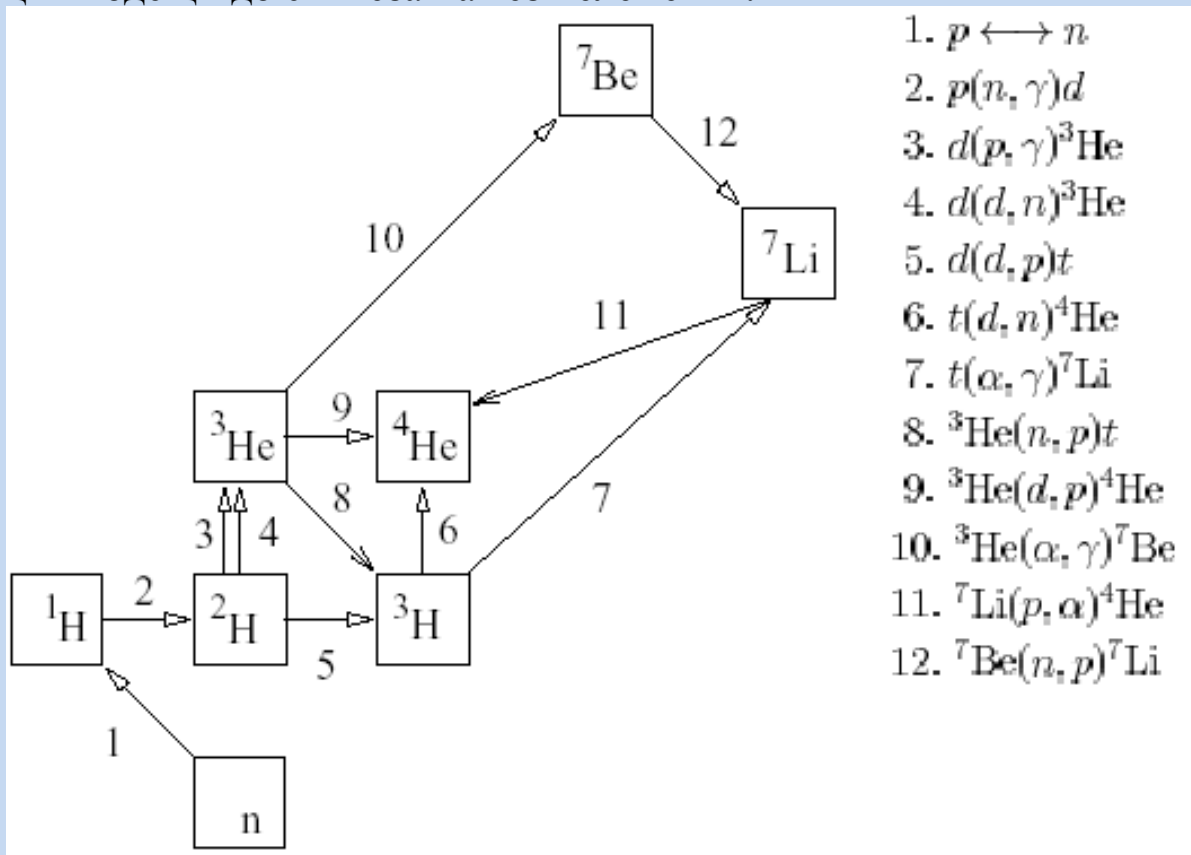


Космологичен нуклеосинтез на D, He-3, He-4, Li-7

Според стандартния космологичен модел на ранния горещ стадий на еволюцията на Вселената при температура $T \sim 10^{10} \text{K} = 1 \text{ MeV}$ от свободните p и n са синтезирани 4 елемента:

24% ${}^4\text{He}$, 10^{-5} D и ${}^3\text{He}$, 10^{-10} ${}^7\text{Li}$.

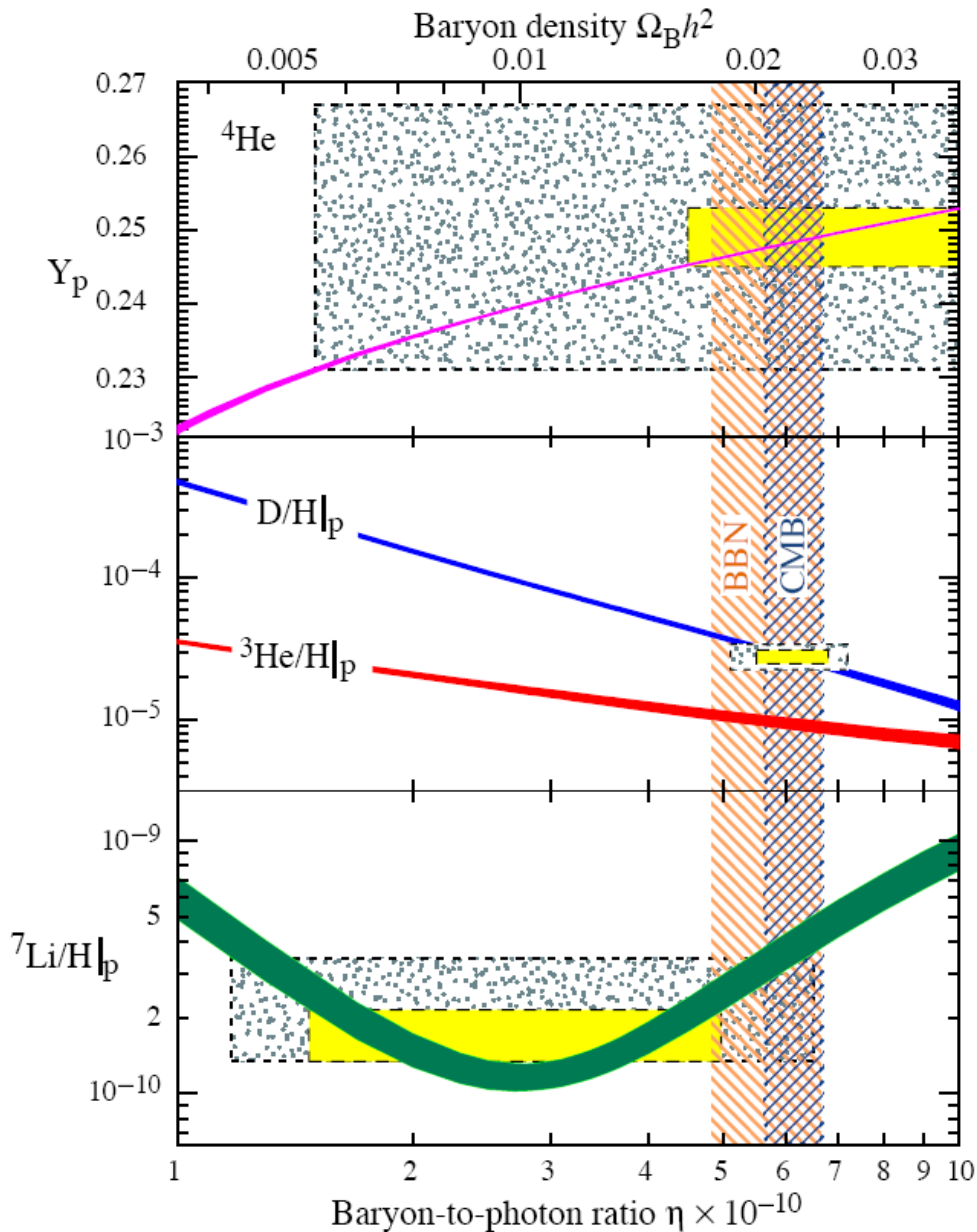
Основни реакции водещи до синтеза на тези елементи:



Космологично произведените обилия на тези елементи зависят само от един параметър – барион-фотонното отношение η , който днес вече е определен от измерванията на анизотропията на космологичния микровълнов фон .

Предсказанията на КН са в отлично съгласие с наблюдателните данни при $\Omega_B \sim 0.05$.

КН – теория и наблюдения



Космологично произведените обилия на леките елементи зависят от барион-фотонното отношение η , което днес е определено от данни на анизотропията на КМФ.

Не-4 силно зависи от скоростта на разширение и лептонната асиметрия. Много слаба зависимост от η .

Деутерият - чувствителен бариометър.

$$0.017 \leq \Omega_B h^2 \leq 0.024 \text{ (95\% CL)}$$

Зависимост на D , ${}^3\text{He}$, ${}^4\text{He}$, ${}^7\text{Li}$ от η .

Наблюдателните данни обозначени на графиката в жълто, означават 2σ статистическа грешка, а по-големите карета показват 2σ статистическа плюс систематична грешка. Вертикалните ленти указват значенията на барионната плътност, измерена посредством КМФ и КН.

^4He – най-добрят скоростомер

He-4 е най-обилно произведения елемент (25%), най-точно измерен (3-5 %) и пресметнат (0.1% неточност) и има проста еволюция след КН.

$$Y_p = 0,2421 \pm 0,0021 \quad \text{Izotov, Thuan 2000}$$

$$Y_p = 0,2429 \pm 0,009 \quad \text{Izotov, Thuan 2004}$$

$$Y_p = 0,2472 \pm 0,0012 \quad \text{Izotov, Thuan 2007} \quad (93 \text{ spectra of } 86 \text{ low-metallicity HII regions})$$

$$Y_p = 0,245 \pm 0,013 \quad \text{Olive, Skillman 2004}$$

дисперсия на измерванията

$$Y_p = 0,2491 \pm 0,0091 \quad \text{Olive, Skillman 2004}$$

$$Y_p = 0.249 \pm 0.009.$$

$$Y_p = 0,2384 \pm 0,0025 \quad \text{Peimbert et al 2002}$$

$$Y_p = 0,2474 \pm 0,0028 \quad \text{Peimbert, Luridiana. Peimbert 2007, new atomic data}$$

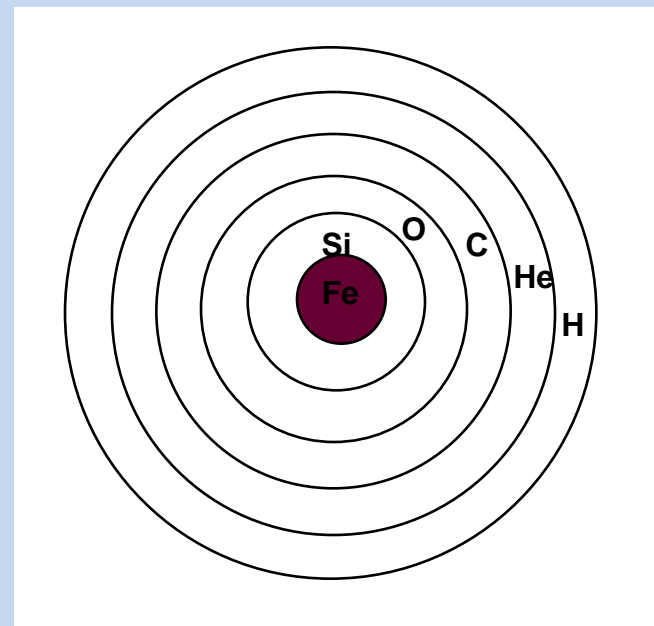
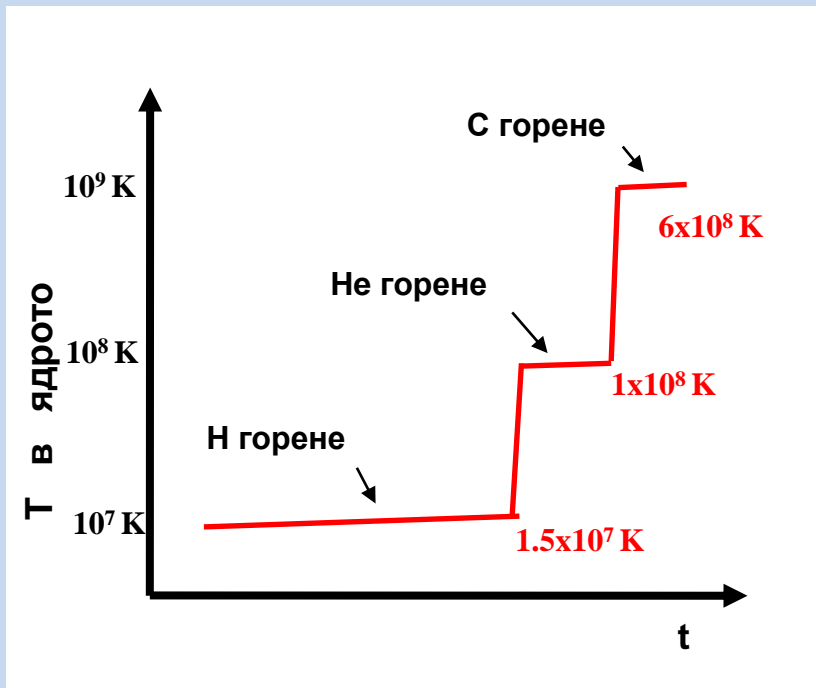
Sasselov, 95

Доминираща е систематичната грешка. Свързана е с неточности при определяне на нивото на йонизация, на поглъщането .. *Sasselov, 95 Luridiana, 2002*

$$Y_T = (H(\rho(g)), \Gamma) = 0,2482 \pm 0,0007 \quad Y_p = 0,249 \pm 0,009$$

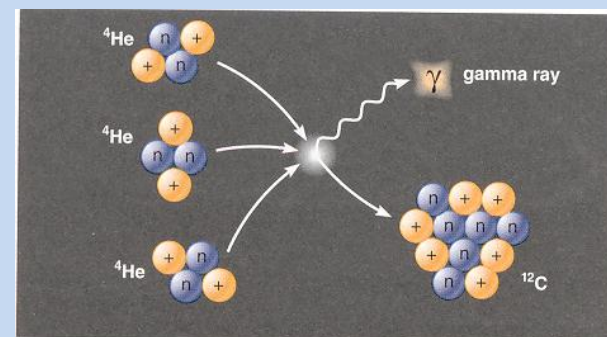
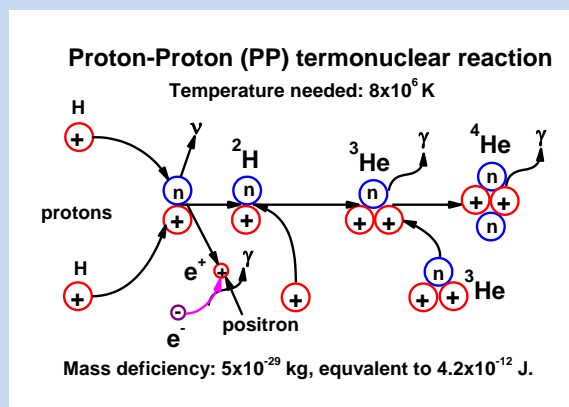
Звезден нуклеосинтез на тежки елементи

По-тежките от Li елементи са синтезирани в звездите. В масивните звезди H гори в He, C, O, Si и Fe. По-тежките от Fe елементи – при SN избухвания и в обвивките на свръх-гиганти.



Отличия:

- pp – реакции при синтез на He
- 3α процеси при синтез на C т.е. голяма плътност в отличие от условията в бързо изстиващата Вселена



Космологични ограничения от КН

КН бариомер, спидомер, лептомер

КН ограничения върху неутриното

КН ограничения върху нова физика

Космологични ограничения от КН

В момента КН предоставя най-прецизния и ранен тест за физичните условия в ранната Вселена и се използва за получаване на космологични ограничения върху нови физични модели.

❖ С изключителна точност и посредством независими методи е определен барионната плътност.

$$4.7 \leq \eta_{10} \leq 6.5 \text{ (95\% CL)}$$

$$\Omega_b h^2 = 3.65 \times 10^7 \eta, \quad \Omega_b = \frac{\rho_b}{\rho_c}, \quad \rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G_N}$$

$$0.017 \leq \Omega_B h^2 \leq 0.024 \text{ (95\% CL)}$$

КН + D измервания към квазари с голямо червено отместване z и ниска металичност Z

$$\Omega_b h^2 = 0.021 \pm 0.001$$

$$\eta = (5.7 \pm 0.3) \times 10^{-10}$$

CMB:

$$\Omega_b h^2 = 0.0224 \pm 0.0009$$

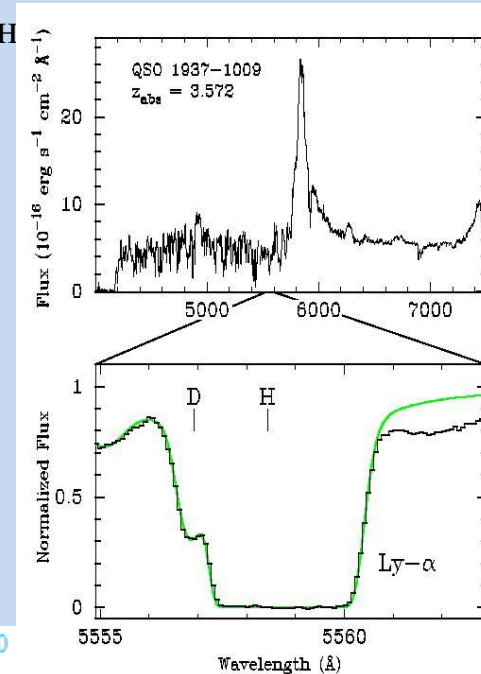
DASI, BOOMERANG, MAXIMA, WMAP

$$\Omega_b h^2 = 0.0223 \pm 0.0007$$

$$\eta = (6.11 \pm 0.19) \times 10^{-10}$$

$$\Omega_b h^2 = 0.0226 \pm 0.0005$$

Барионите не са достатъчни за достигане на критична плътност и плоска Вселена. Повечето от тях са тъмни - Барионната плътност е ~ 0.05 от пълната плътност, т.е. по-голяма от тази на светещото вещество (0.005), но значително по-малка от плътността на гравитиращото (0.3).



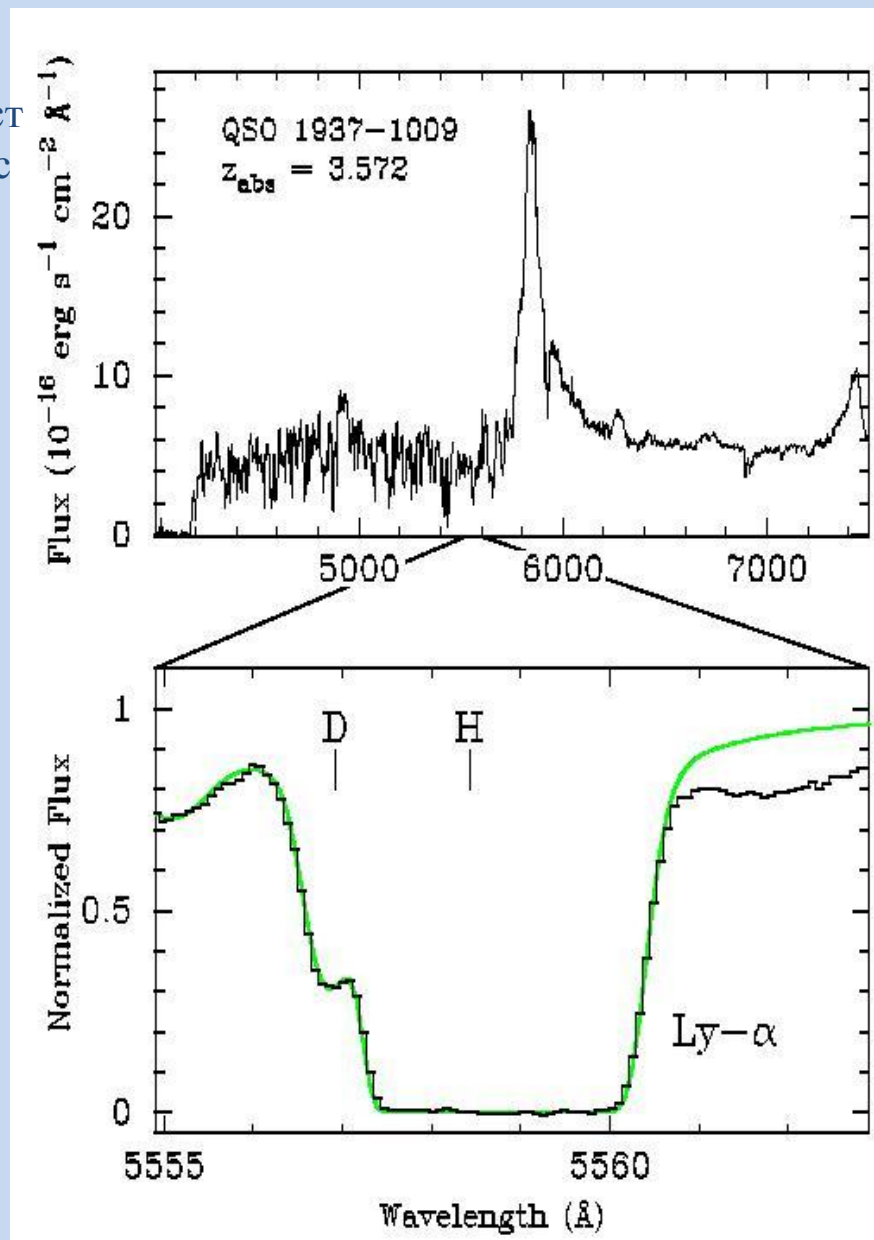
Обилието на леките елементи и особено на D позволяват определянето на барионната плътност с изключително голяма точност, сравнима само с точността от измерванията на КМФ.

- КН + измерения на D

$$D/H = (2.87 \pm 0.2) \cdot 10^{-5}$$

$$\Omega_b h^2 = 0.021^{+0.001}_{-0.001}$$

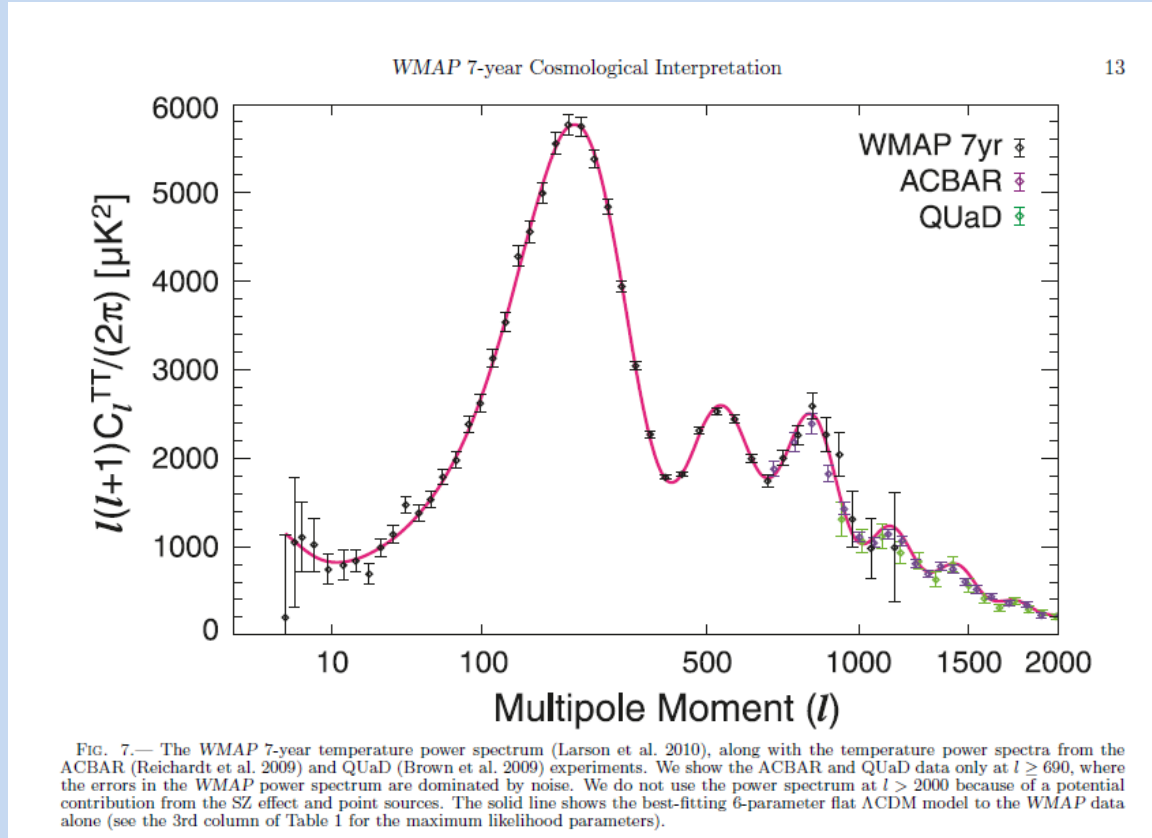
Барионната плътност е ~ 0.05 от пълната плътност, т.е. по-голяма от тази на светещото вещество (0.005), но значително по-малка от плътността на гравитиращото (0.3).



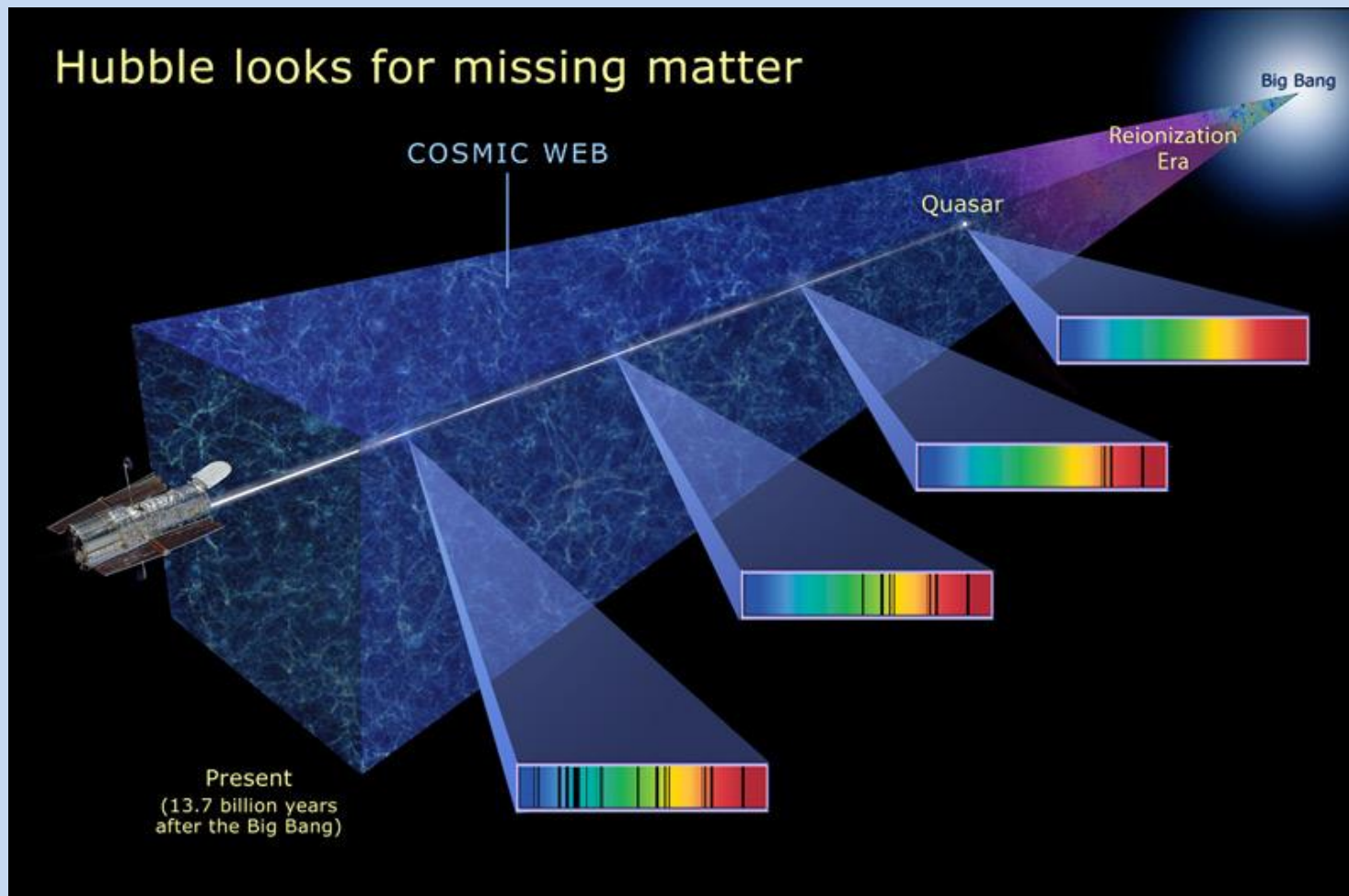
$$\beta = (n_b - n_{\bar{b}}) / n_\gamma \sim \eta = n_b / n_\gamma \sim 6 \cdot 10^{-10}$$

Барионната плътност е измерена най-точно по данни от D и КМФ.

DASI, BOOMERANG, MAXIMA, WMAP



Половината от тъмните бариони са в междугалактичното пространство.



В спектрите получени от светлината от далечни квазари са намерени абсорбционни спектрални линии на барионното вещество, което поглъща на определена честоти. По този начин получаваме картина на структурата на междугалактичното пространство.

Наблюдения на космичния телескоп Hubble Space Telescope с далечния ултравиолетов спектроскоп (Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer) в посока на далечни 28 квазари представляващи най-детайлните наблюдения на междугалактичната среда до 4 млрд ly .

Къде е антивеществото?

СКМ предсказва равни количества бариони и антибариони на ранния стадий, а на сегашния етап на еволюция на Вселената:

$$\beta \sim 10^{-18}$$

Барионите са в момента на 8 порядъка повече от очакваното от симетрична по отношение ранна Вселена. Но локално ~ 10 - 20 Мрс Вселена е асиметрична, съдържа само значителни количества антивещество.

Защо барион-фотонното отношение е толкова голямо?

Как да се обясни наличието само на вещество в локалната Вселена?

Глобално свойство ли е асиметрията на вещество-антивещество?

Ако е асиметрична, как е произведена барионната асиметрия на Вселената?

Модели за производството на БАВ: основани на ВО, на суперсиметрията, бариогенезис през лептогенезис и др.

Ако е симетрична, как са разделени областите от вещество от тези с антивещество?

Мисии за търсене на антивещество: PAMELA, BESS, AMS, AMS 2, PEBBS(2010), ..

Мисии за търсене на антивещество: PAMELA, BESS, AMS, AMS 2 (2009), PEBs(2010), ..

- Космични лъчи: Няма съществени количества антивещество в радиус 1 Мрс.

BESS 98

$$\bar{H}e/He < 1.7 \cdot 10^{-6}$$

AMS 01

$$\bar{H}e/He < 1.1 \cdot 10^{-6}$$

$$\begin{aligned} \bar{p}/p &\sim 10^{-5} \text{ at } E < 2 \text{ GeV} \\ \bar{p}/p &\sim 10^{-4} \text{ at } E > 2 \text{ GeV} \end{aligned}$$

PAMELA антипротони в съгласие с вторичен характер, излишък на позитрони – ТВ?

HESS излишък на позитрони

- Гама лъчение: До разстояния $\sim 10\text{-}20$ Мрс, няма значими количества антивещество.

При разстояния $> 10\text{-}20$ Мрс, наличието на антивещество не е изключено

Малки количества обекти от антивещество не са изключени и в рамките на нашата галактика (звезди, сферични купове).

Steigman 79, Stecker 85, Dolgov 99, DK 2000, DK, Valchanov, Panayotova 2000

Теорията и наблюденията не изключват категорично наличието на астрономично значими количества антивещество.

Модели за производството на БАВ?

Разделение на вещество от анти?

КН ограничения

He-4 е най-обилно произведения елемент (25%), най-точно измерен (3-5 %) и пресметнат (0.1% неточност) и има проста еволюция след КН.

- Брой на поколенията (типове релативистки неутрино)

$$\rho_r = \rho_\gamma + \rho_\nu + \rho_x = \left[1 + \frac{7}{8} \left(\frac{4}{11} \right)^{4/3} N_{\text{eff}} \right] \rho_\gamma$$

$$\delta Y_{\text{KH}} \sim 0.013 \delta N_{\text{eff}}$$

ΔN_{eff} е указател също за релативистка компонента, като стерилно неутрино, неутринни осцилации, лептонна

$$\Delta N_{\text{eff}} < 1.5 \text{ (0.6)}$$

асиметрия, разпади на частици, нестандартна топлинна история и др.

$$\text{CMB: } 1 < N_{\text{eff}} < 8$$

WMAP, ACBAR, CBI, BOOMERANG

- Лептонна асиметрия $\mu/T < 0.07$

$$\Delta N_{\text{eff}} = 15/7 \left\{ \left[(\mu/T)/\pi \right]^4 + 2 \left[(\mu/T)/\pi \right]^2 \right\}$$

$$\Delta N_{\text{eff}} \sim 3 \text{ (WMAP)}$$

$$\Delta N_{\text{eff}} \sim 0.2 \text{ (Planck)}$$

КН съображения + LMA : ограничение върху химическия потенциал на всеки тип неутрино

- Ограничение върху температурата на излизане от равновесие на стерилното

неутрино $T_R > 130 \text{ MeV}$, върху нестандартни взаимодействия

$$\frac{\Gamma_R}{H} = \left(\frac{T_R}{T_L} \right)^3 \left(\frac{G_T}{G_F} \right)^2 \sim 1; \quad G_T \leq 10^{-2} G_F$$

- Неутринните осцилационни параметри

КН с $\nu \leftrightarrow \nu_s$ води до изменение на неутринния спектър и плътност, които влияят на кинетиката на нуклоните, редуцират скоростта на слабите процеси, препроизводство на He-4.

- Магнитен момент на неутриното

$$\mu_\nu < 310^{-10} \mu_B$$

Лептонна асиметрия

В отличие от барионната асиметрия, която е измерена с различни независими методи (данни от леки елементи, КМФ, др.) лептонната асиметрия не е измерена и може да е на порядъци по-голяма от барионната.

Голяма лептонна асиметрия може да се крие например в неутринния сектор.

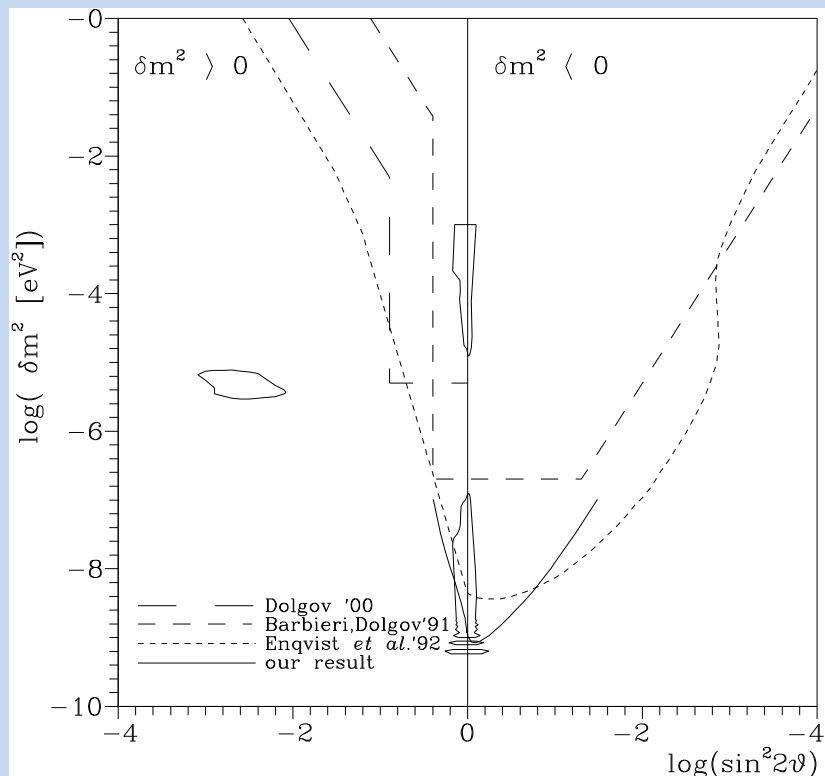
По настоящем КН предоставя най-строгите ограничения върху величината и:

$$L < 0.1$$

- Съществуват механизми за произвеждане на голяма LA, като например генерацията и в MSW резонансни неутринни осцилации в ранната Вселена
 $\delta m^2 > 10^{-5} \text{eV}^2$ (Foot & Volkas *PRD* 96), $\delta m^2 < 10^{-7} \text{eV}^2$ (DK & Chizhov, *PLB* 96).

Космологични ограничения от КН върху $\nu \leftrightarrow \nu_s$ осцилациите

През последното десетилетие бяха получени неоспорими експериментални и наблюдателни доказателства за съществуването на неутринни осцилации.



В КН с $\nu \leftrightarrow \nu_s$ спектърът и плътността на неутрино се отличава от това в СКМ, което влияе на кинетиката на нуклоните в КН епоха, намалява скоростта на слабите процеси и води до ${}^4\text{He}$ препроизводство.

Обилието на ${}^4\text{He}$ е известно с точност 3%. Това позволява да бъдат поставени КН ограничения върху $\nu \leftrightarrow \nu_s$:

$$\delta m^2 > 10^{-6} \text{ eV}^2$$

$$\delta m_{es}^2 \sin^4 2\theta_{es} \leq 3.16 \times 10^{-5} \text{ eV}^2 (\Delta N_\nu)^2$$

$$\delta m_{\mu s}^2 \sin^4 2\theta_{\mu s} \leq 1.74 \times 10^{-5} \text{ eV}^2 (\Delta N_\nu)^2$$

$$\delta m^2 \sin^4 2\theta \leq 10^{-7}$$

$$\delta m^2 (\sin^2 2\theta)^4 \leq 1.5 \times 10^{-9} \text{ eV}^2 \quad \delta m^2 > 0$$

$$\delta m^2 < 8.2 \times 10^{-10} \text{ eV}^2 \quad \text{large } \theta, \delta m^2 < 0$$

- ✓ КН ограничения са с 4 порядки по-строги от съществуващите експериментални
- ✓ КН ограничения изключват 2 от възможните решения – LMA и LOW (1990, 1999) години преди експерименталните указания на неутринните експерименти.

КН заключения

Космологичният нуклеосинтез е един от най-точно изучените процеси в ранната Вселена.

Леките елементи деутерий, хелий-3, хелий-4 и литий-7 са синтезирани в ранната Вселена.

Първично произведения D е най-точния бариометър. Барионната компонента съставлява $<5\%$, т.е. подкритична плътност! Преобладаващата част от барионите са тъмни.

He-4 силно зависи от скоростта на разширение в периода преди КН на леките елементи и от найната лептонната асиметрия. Той е най-добрия спидомер и лептомер.

КН се използва за тест на физиката отвъд СМ

Космичен Микровълнов Фон

Исторически бележки

Формиране на космичен микровълнов фон

Детектиране на КМФ

Основни характеристики на КМФ

Детектиране на анизотропията на КМФ

COBE, WMAP, Planck

Космологични параметри

Наблюдателни основи на СКМ

- Разширение на Вселената

Наблюдаваното разбягване на галактиките свидетелствува за разширение на Вселената. SN наблюдения свидетелствуват за разширение с ускорение.

- Обилие на леките елементи

$$H_0, \Omega_B, \Omega_\nu$$

Най-ранни наблюдателни данни за Вселената.

Свидетелство за ранен горещ и плътен стадий на Вселената.

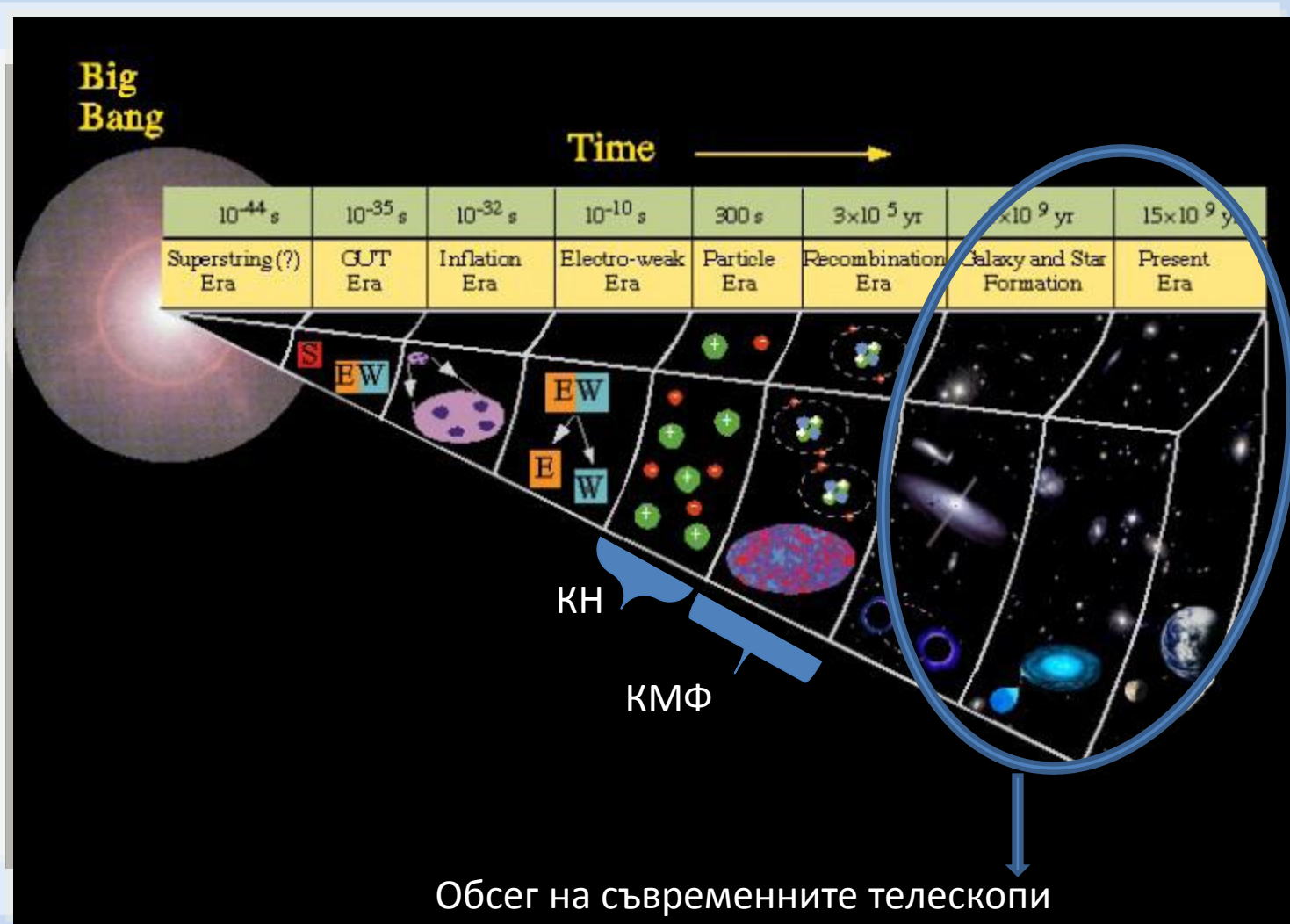
- Космичен микровълнов фон

Остатъчното лъчение от горещия стадий на Вселената.

$$H_0, q_0, \Omega_i (\Omega_0, \Omega_\Lambda, \Omega_M, \Omega_B, \Omega_\gamma, \Omega_\nu, \dots), t_0, T_0, P(k), C_l$$

- Структури във Вселената

КМФ носи информация от първите 300 000 – 400 000 години на Вселената.

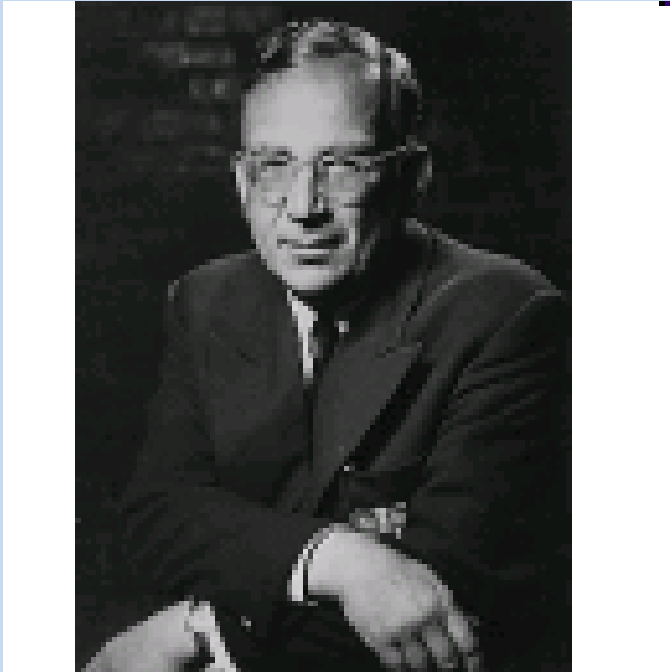


Исторически бележки

Теорията на Големия взрив предсказва горещ и плътен стадий на Вселената, на който в резултат от бързи взаимодействия на лъчението с веществото се установява ТДР. В резултат на разширението на Вселената тя се охлажда. Днес тя е изпълнена с лъчение “космичен микровълнов фон”, което е реликт от ранния горещ стадий.

- Още през 1940 някои измервания указват радиационно поле, необходимо за обяснение на преходите между енергетичните нива на междузвездни молекули (McKellar 1941)
- G. Gamov (1946) предсказва КМФ и пресмята неговата T . По-точно определяне на T се прави по-късно от неговите сътрудници Ralph Alpher и Robert Herman през 1948-50.
- През 1964 Дорошкевич и Новиков предлагат област за детектиране на КМФ на базата на неговите характеристики.
- R. Dicke, P. Peebles, P. Roll, D. Wilkinson, (1964) Princeton University: подготвят експеримент за детектиране на КМФ.
- 1964 A. Penzias & R. Wilson детектират КМФ. *Нобеловата награда за 1978*
- След 1964 измервания с използване на инструменти върху балони, спътници и наземни инструменти.
- РЕЛИКТ (1983-84), СОВЕ (1989-93) – измерен Планковски спектър, детектиране на анизотропията. *2006 Нобелова награда* (G. Smoot, J. Mather)

Първо предсказание на КМФ



Георгий А. Гамов

1904 – 1968

Г. Гамов през 1946–1948 разработва теорията за образуване на химичните елементи посредством неутронен захват в модел на гореща Вселена.

В рамките на този модел **предсказва реликтовия фон и неговата температура.**

Просветване на Вселената

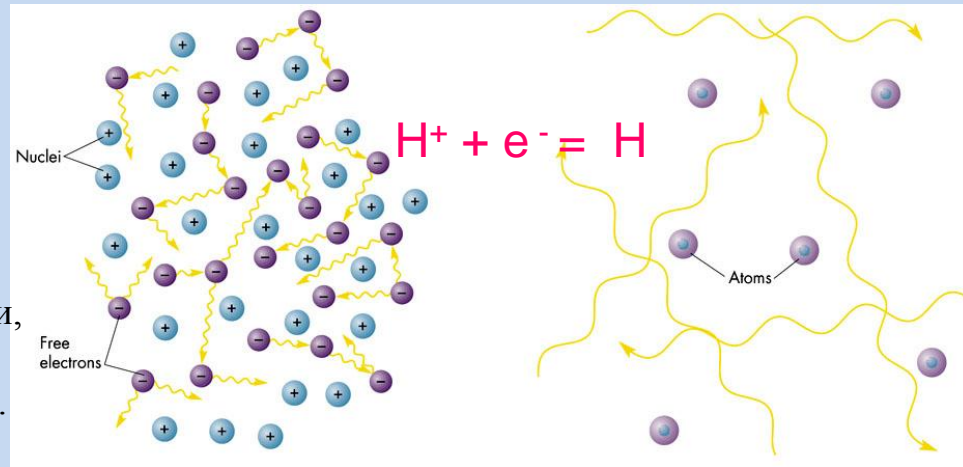
Космическият микровълнов фон е предсказан от Георги Гамов и сътрудниците му Ралф Алфер и Роберт Херман през 1948.

$T > 3000 \text{ K}$: ТД равновесие

Лъчението взаимодейства с електроните.

Томпсъново разсейване и електромагнитните взаимодействия осигуряват контакт на фотоните и барионите. [Спектър на АЧТ.](#)

Звукови вълни: Лъчистото налягане противодейства на опитите на гравитацията да свие газа в потенциалните ями, довеждащи до акустични осцилации, които водят до пространствени вариации на КМФ температура с времето.



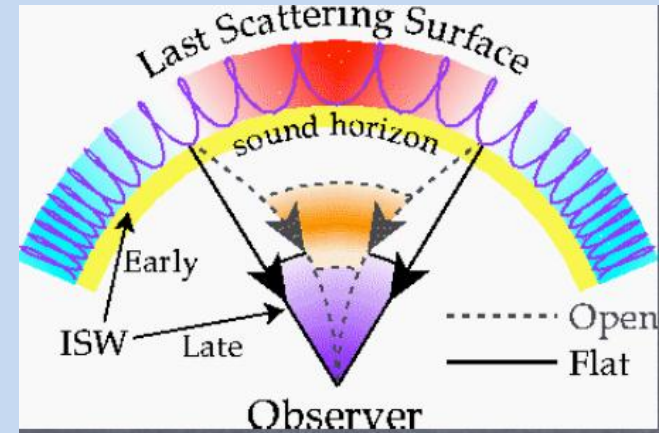
Вселената разширявайки се изстива $T \sim 1/R(t)$

$T = 3000 \text{ K}$: [епоха рекомбинация](#) 380,000 у, $z = 1100$ [Лъчението не взаимодейства.](#)

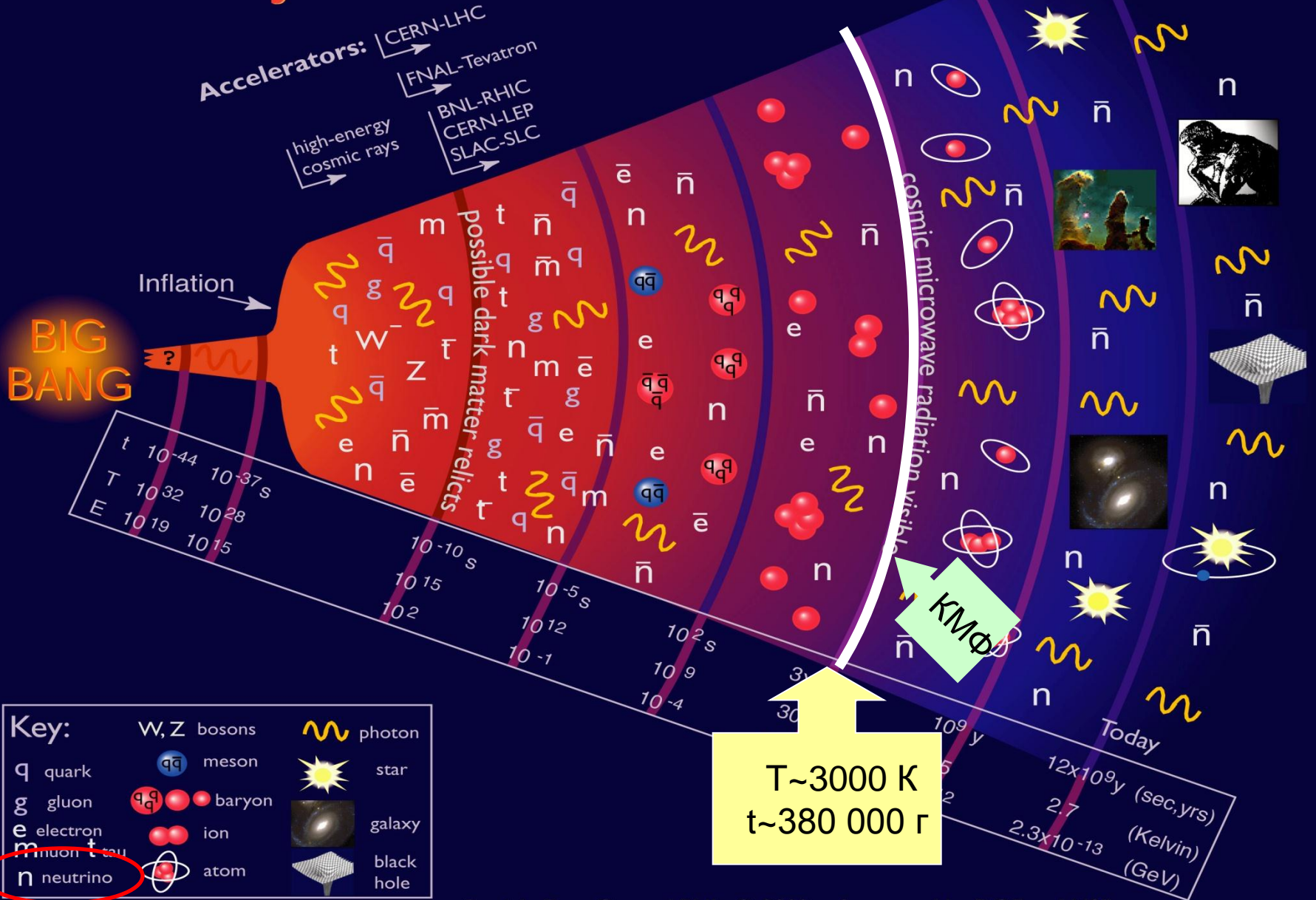
Вселената – прозрачна за лъчението - просветване на Вселената. Образуване на Космичен микровълнов фон.

Сега $T \sim 3 \text{ K}$ - детектируем с радиотелескопи.

Фотон-барионната система спира да осцилира при рекомбинацията. Осцилациите са замразени при рекомбинацията. Модите хванати в максимум на осцилациите им представляват максимумите. [Пространствените вариации на T](#) да се наблюдават като вариации по ъгли с увеличаване на ъгловия размер.



History of the Universe



Космичен Микровълнов Фон

1964 A. Penzias & R. Wilson

Детектират шум в радио-антената,
независещ от направлението.

1978 Нобелова награда по физика

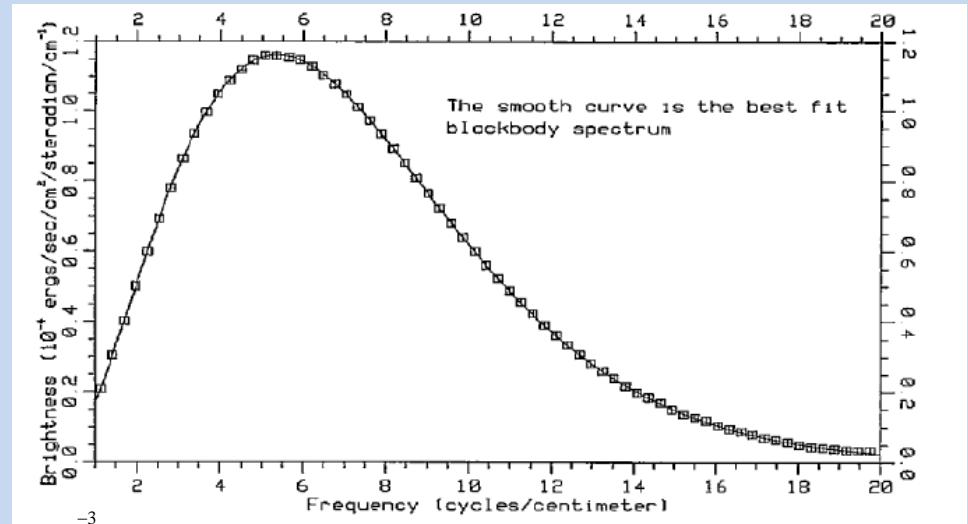
2.7 К чернотелен спектър

висока изотропност (<1%)

3 mK дипол, движението на Земята към
Hydra Centaurus свръхкупове $v=600$ km/s.

КМФ позволява да надникнем в младата
380 000 години и гореща 3000 К Вселена.

$\delta T/T < 10^{-5}$



*Максимум на 1 mm където поглъщането в
атмосферата е голямо > космични мисии*

РЕЛИКТ (1983-84) 1992: $\delta T/T \approx 5 \cdot 10^{-6}$

COBE (1989-93) $T = 2.728$ K

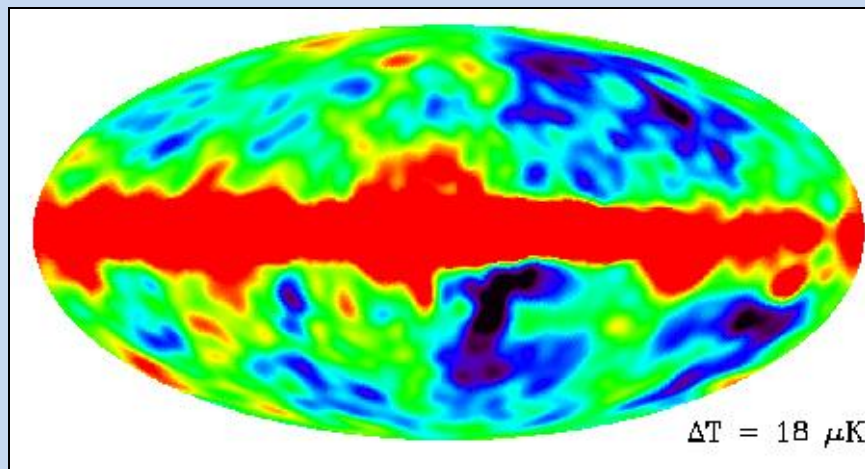
АЧТ установен $T = 2.725 \pm 0.001$ K 411 cm^{-3}

флуктуации на T $13 \pm 4 \mu\text{K}$

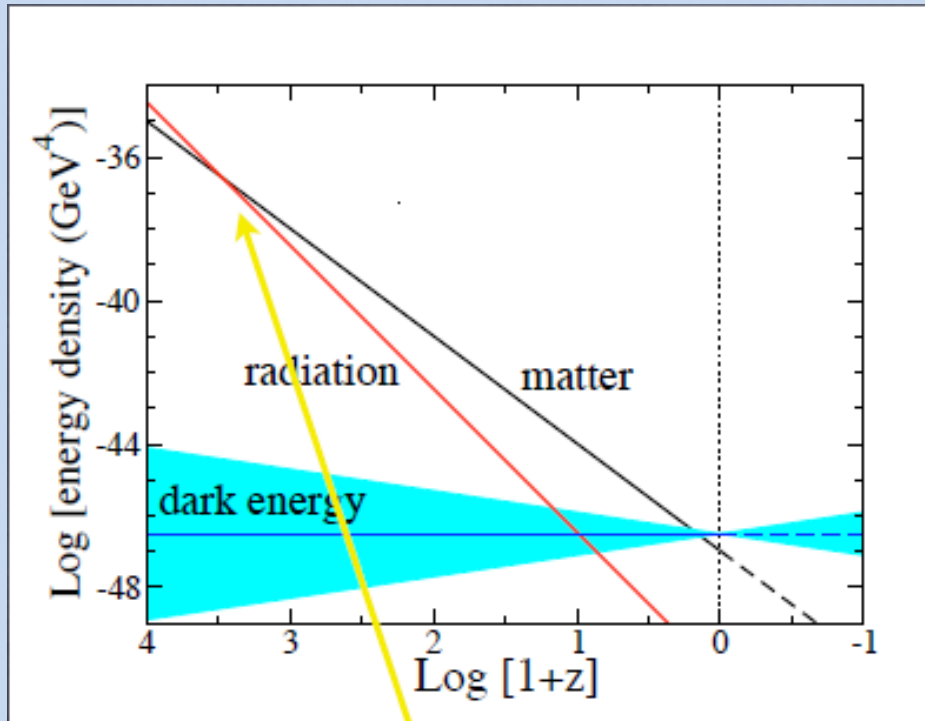
2006 Нобелова награда (G. Smoot, J. Mather)

*”for their discovery of the blackbody form and anisotropy of
the Cosmic microwave background radiation”*

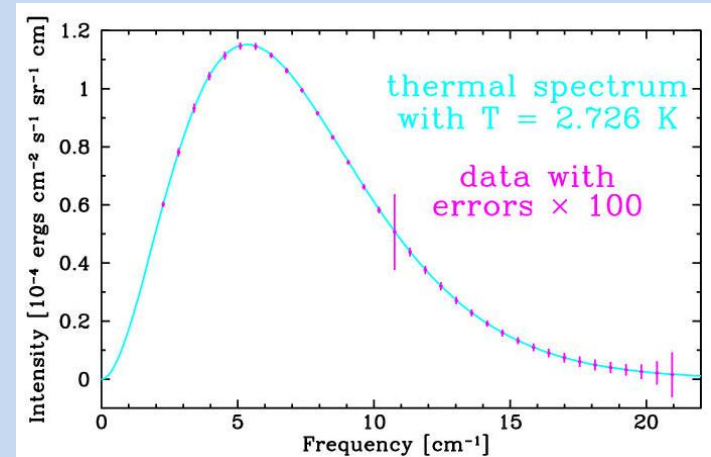
Прецизни измервания на x-ките на Вселената:
плътности, възраст, геометрия, реионизация, ...



КМФ указва на ранен горещ стадий на Вселената:



$$\rho_M \sim \rho_R$$



$$\rho_M \sim R^{-3}$$

$$\rho_R \sim R^{-4}$$

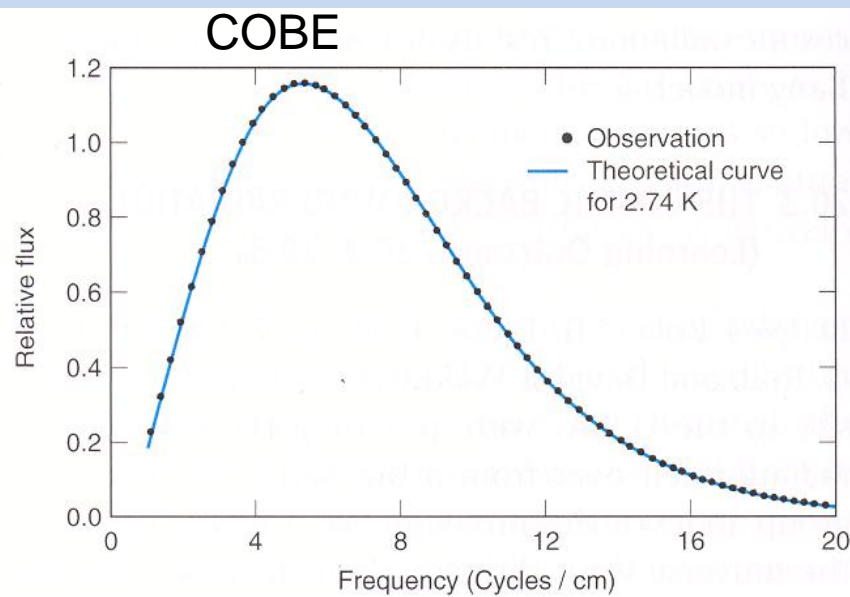
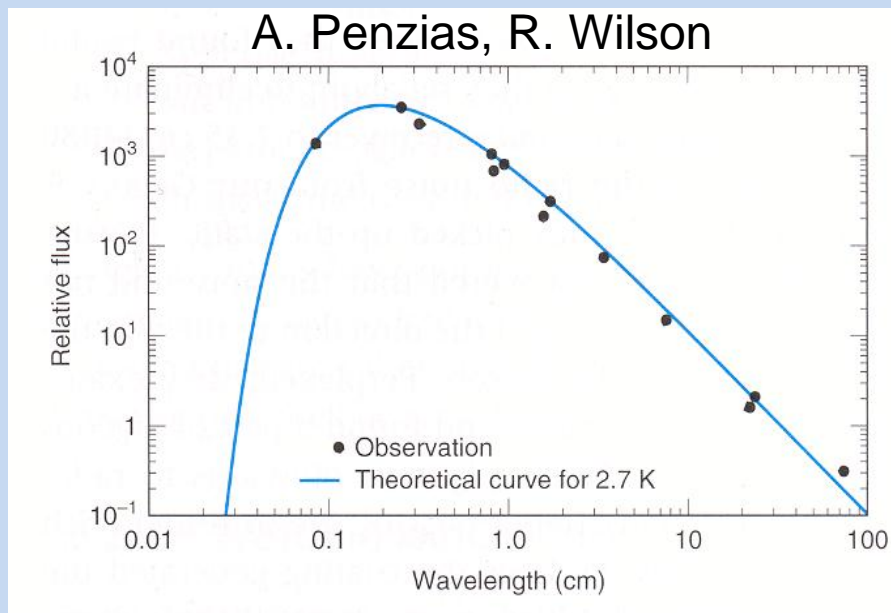
Характеристики: Планковски спектър

Експеримента FIRAS измерва КМФ спектър в 34 еквиливантни точки по чернотелната крива. Грешките са толкова малки, че не могат да се видят на кривата на фигурата вдясно.

АЧТ установен

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

411 cm^{-3}



2.7 K чернотелен спектър
висока изотропност (<1%)

Максимум на интензитета на лъчението е на дължина на вълната около 1 mm, където поглъщането на атмосферата е силно.

- След 1964 независими измервания се правят от Wilkinson и други с използване на инструменти върху балони, спътници и наземни инструменти.
 - Измерена е диполната анизотропия $\Delta T \approx 3$ mK дипол от движението на Земята към Hydra Centaurus свръхкупове $v=600$ km/s.

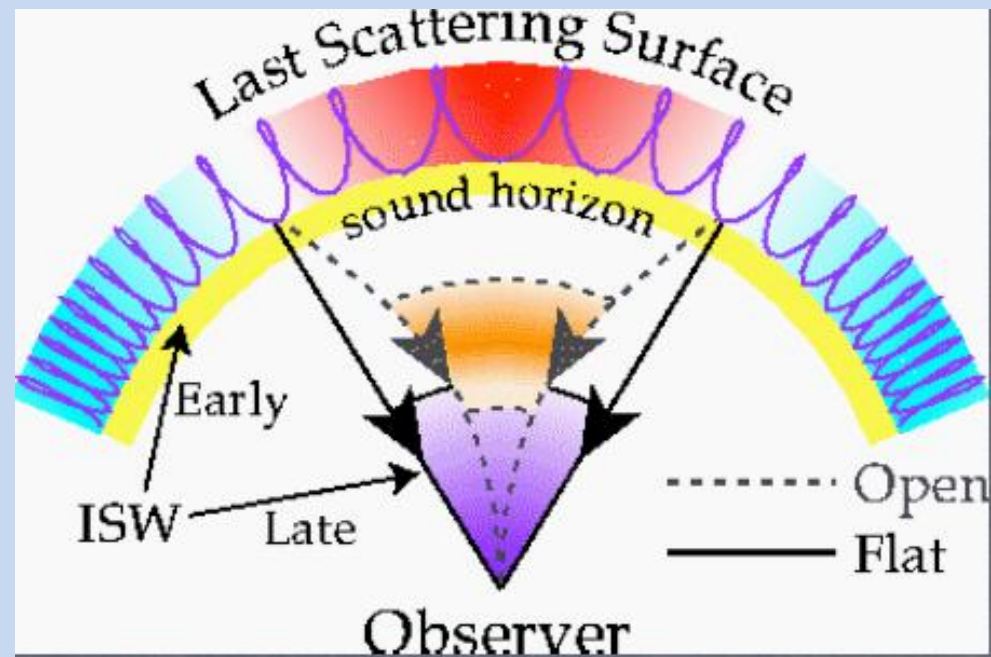
Because the Earth moves relative to the CMB, a dipole temperature anisotropy of the level of $\Delta T/T = 10^{-3}$ is expected. This was observed in the 1970s (Conklin 1969, Henry 1971, Corey and Wilkinson 1976 and Smoot, Gorenstein and Muller 1977). During the 1970-ties the anisotropies were expected to be of the order of 10^{-2} - 10^{-4} , but were not observed experimentally. When dark matter was taken into account in the 1980-ties, the predicted level of the fluctuations was lowered to about 10^{-5} , thereby posing a great experimental challenge.

Малко измервания са направени при високи честоти. При дължини на вълната по-малки от 1 mm – измервания от космоса.

Звукови вълни: Лъчистото налягане противодейства на опитите на гравитацията да свие газа в потенциалните ями, довеждащи до акустични осцилации, които водят до пространствени вариации на КМФ температура с времето.

Фотон-барионната система спира да осцилира при рекомбинацията. Осцилациите са замразени при рекомбинацията.

Модите хванати в максимум на осцилациите им представляват максимумите. **Пространствените вариации на T** да се наблюдават като вариации по ъгли с увеличаване на ъгловия размер.



COBE (1989-93)

- 1992, Cosmic Background Explorer (**COBE**) спътник детектира космологичните флуктуации в температурата на КМФ с по-малка грешка.

Info from Nobel prize committee <http://www.kva.se>

The Nobel Prize in Physics for 2006 is awarded to John Mather and George Smoot. They have made measurements looking back into the infancy of the Universe and attempted to gain some understanding of the origin of galaxies and stars.

- WMAP (2001-) – прецизна космология
- Planck (2009 -) –

Резултати от COBE

Температурни флуктуации от порядъка 10^{-5} детектирани и установен спектър на АЧТ с $T = 2.725 \text{ K}$.

- КМФ спектър в диапазона (0.1 – 10 mm) съвпада с този на АЧТ с отклонения по-малки от 1 % .
- $T = 2.725 \pm 0.002 \text{ K}$ с точност по-добра от 0.03% .

WMAP: $T = 2.725 \pm 0.001 \text{ K}$

плътност на частиците $411 / \text{cm}^3$

плътност на енергията $4.64 \cdot 10^{-34} \text{ g/cm}^3$

КМФ представлява най-точното АЧТ детектирано в природата.

- Изотропия, като се изключи движението на Земята към куповете Hydra и Centaurus с $v=600$ km/s, водещи до

диполна температурна анизотропия $dT/T = 10^{-3}$

(Conklin 1969, Henry 1971, Corey and Wilkinson 1976 and Smoot, Gorenstein and Muller 1977)

- Анизотропия

Очаквана малка анизотропия за да бъдат обяснени структурите от галактики и купове от галактики наблюдавани днес.

Гравитацията води до нарастване на малките нееднородности в плътността, налични на ранния стадий, и до формиране на галактиките.

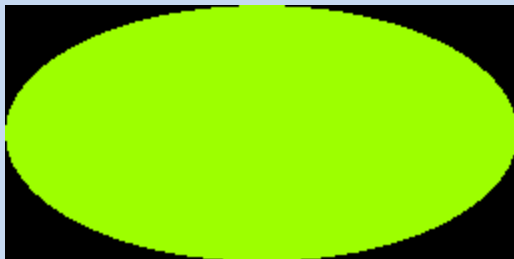
През 1970те очаквана анизотропия $10^{-2} - 10^{-4}$.

1980те: когато се отчете ТВ очакваната амплитута на флуктуациите е 10^{-5} .

$$\frac{\delta T}{T} \sim \frac{\delta \rho}{\rho}$$

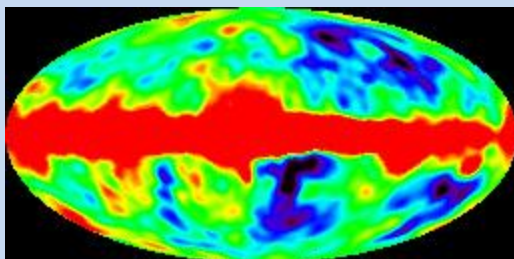
$$\rho = \bar{\rho} + \delta \rho$$

Анизотропия на КМФ



1990 – първо детектиране от РЕЛИКТ
1992 - COBE 90, 53, 31.5 GHz (3.3, 5.7, 9.5 mm),
близо до максимума на интензитета на КМФ и където
галактичният фон е слаб.

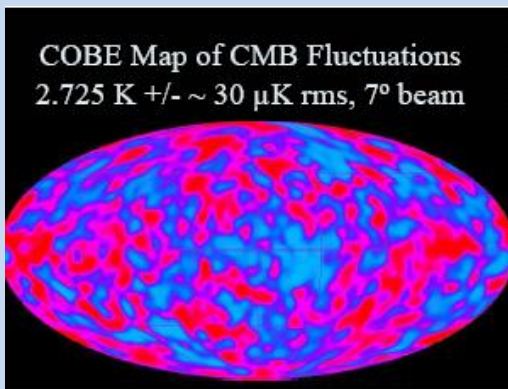
Картите показват небето снимано в микровълнови
честоти след изваждане на диполната
анизотропия.



Източници на флуктуациите:

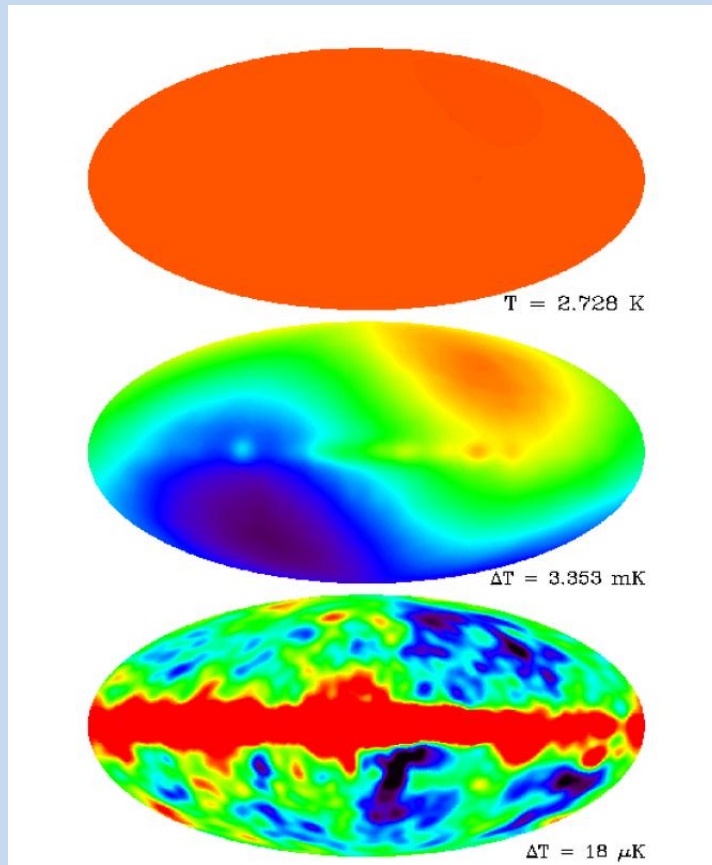
Емисията от Галактиката доминира в
екваториалната област на картата.

Далеч от екваториалната зона флуктуациите в
КМФ са резултат от същинските флуктуации в К
на фона на рекомбинационната епоха.



Шумът от инструментите е малък в сравнение със
сигнала.

Изотропията и анизотропията на КМФ



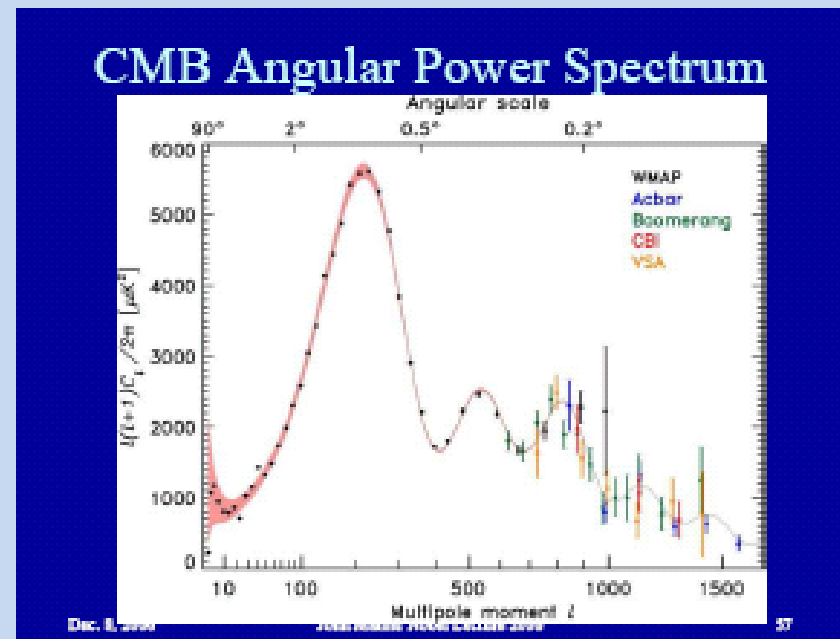
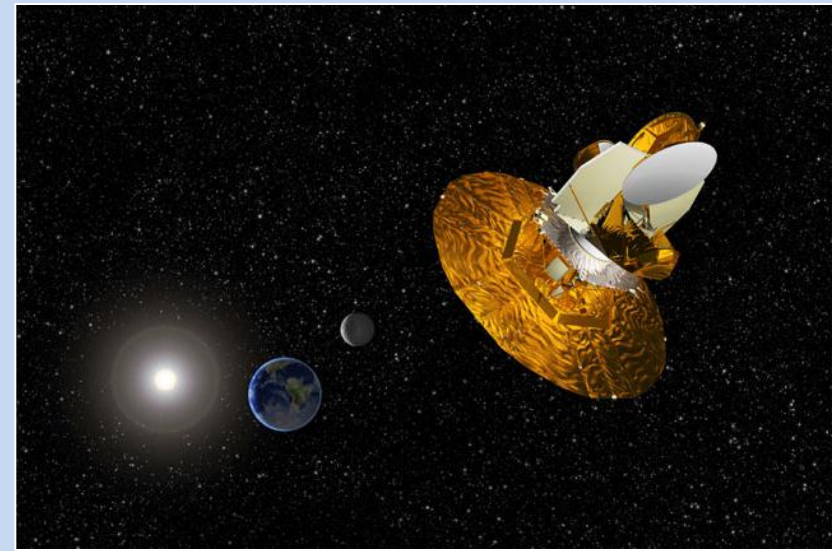
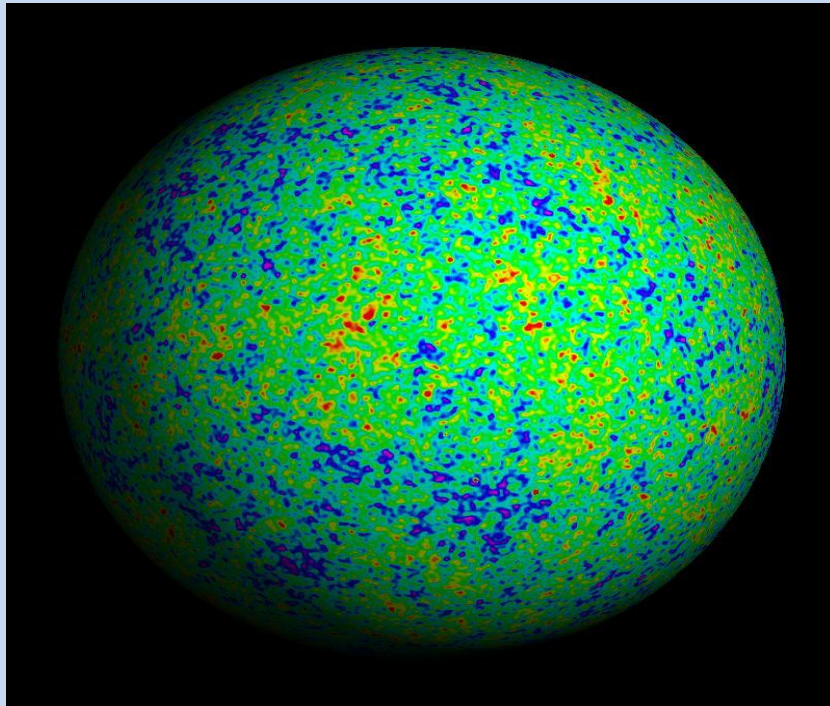
DMR резултати (Smoot et al. 1992, <http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/cobe/>) в галактични координати
Данни от 53 GHz диапазон (6 mm) показващи изотропията на КМФ (горе), диполната (в средата) и квадруполната и по-високи анизотропии при изваден дипол (долу). Относителната чувствителност от горе на долу е 1, 100 и 100,000. Хоризонталната червена полоса в долния панел показва фона от Млечния път.

WMAP (2001)

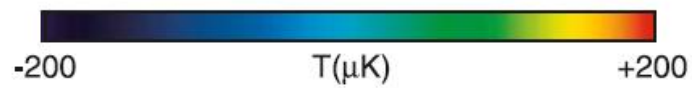
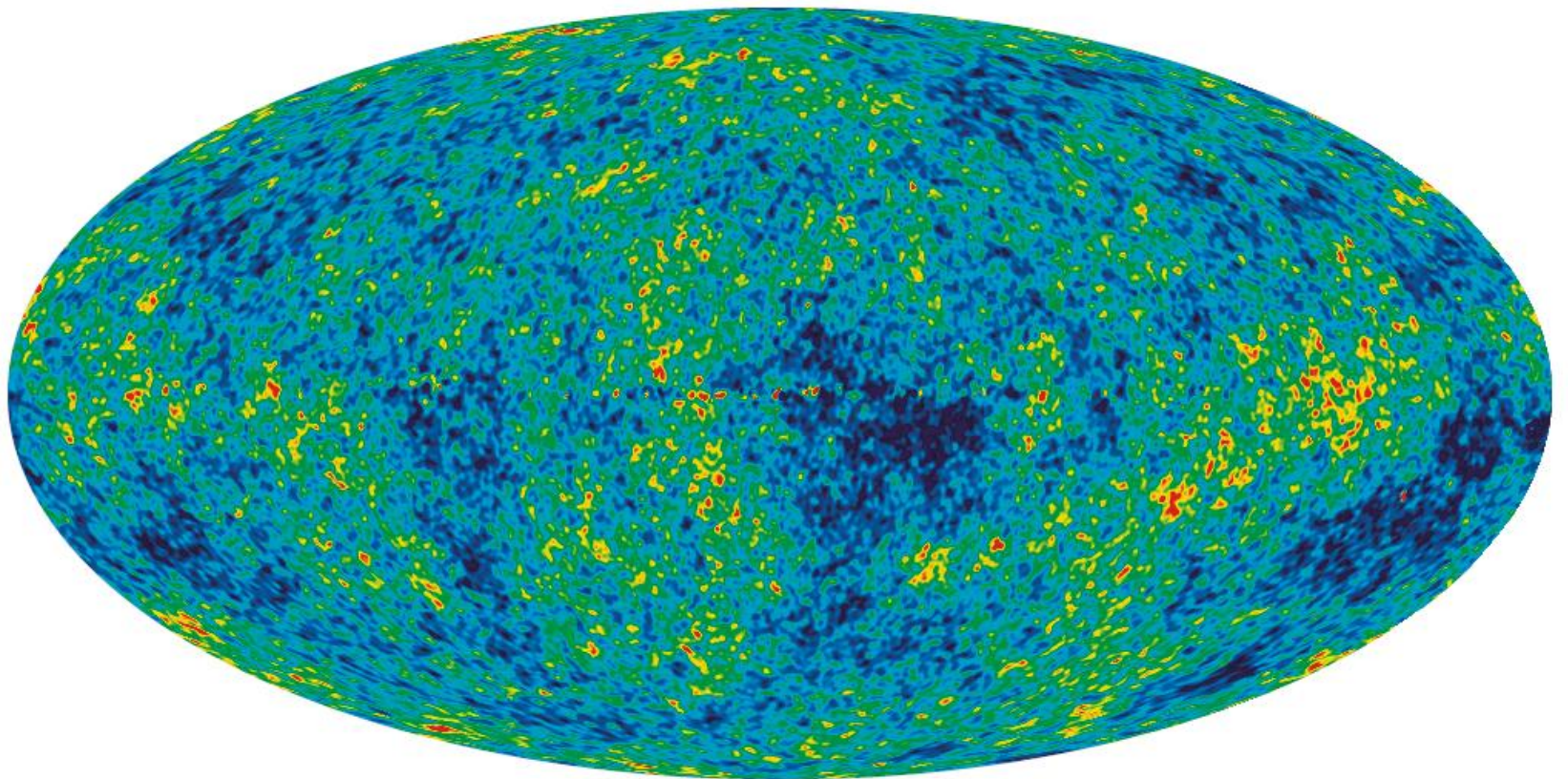
Резултатите на COBE са потвърдени от наземни експерименти на балони и от WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) експеримента с 1° резолюция.

Това изображение, представляващо проекция на цялото небе, е получено от космическата мисия WMAP и показва с по-добра резолюция малките температурни вариации на КМФ.

Карта на разпределението на КМФ.



RMS temperature variation $\sim 100\mu\text{K}$

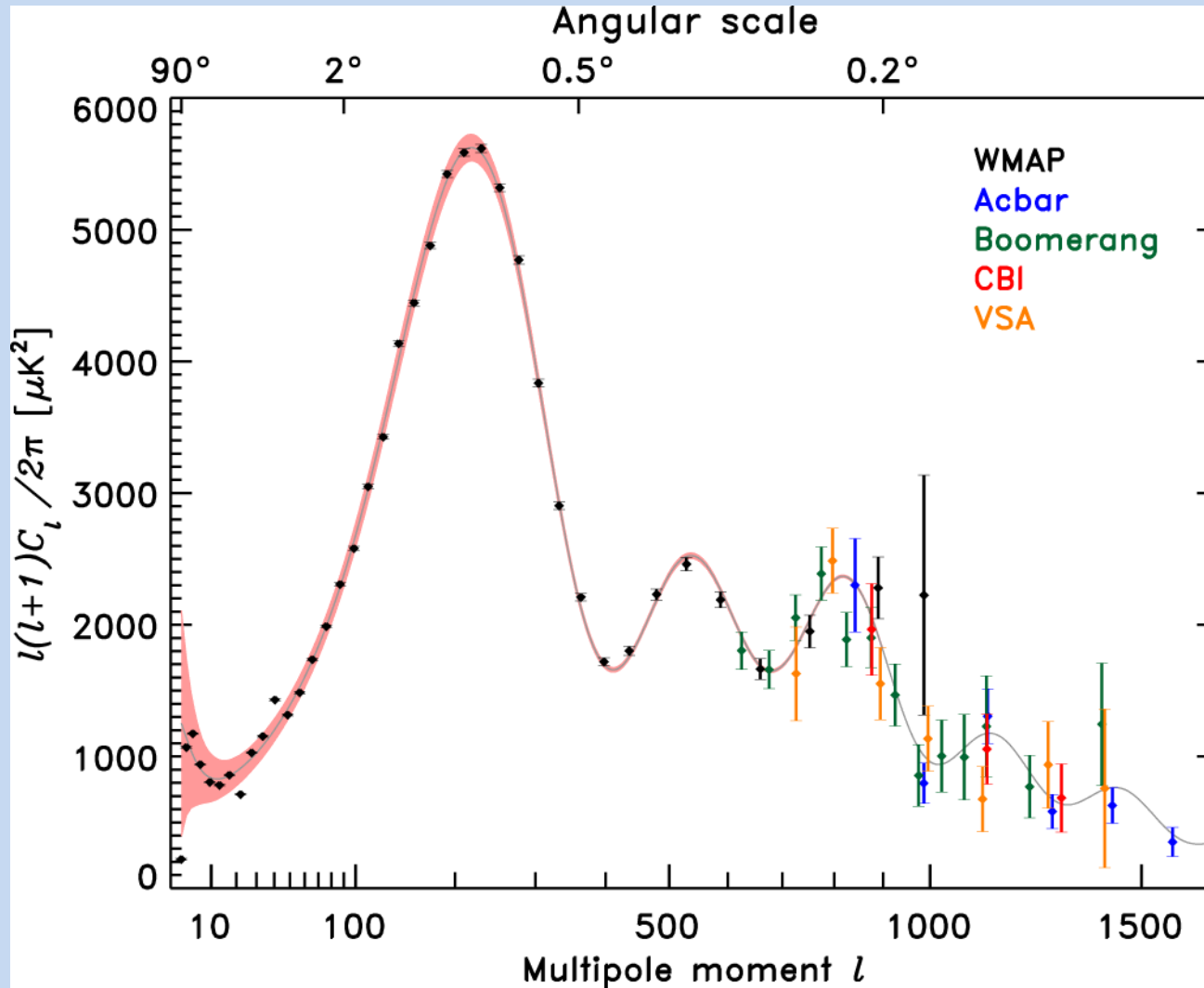


WMAP 5-year

КМФ резултати

- Потвърждава Big Bang модела, който предсказва детектирания КМФ
- Детектира първичните нееднородности довели до образуване на едромасщабната структура на Вселената
- Определяне на пълната плътност (резултати в подкрепа на инфлационната хипотеза)
- Определяне на количеството тъмно вещество във Вселената (връзка с физика на частиците, и специално с Големия адронен колайдер в ЦЕРН който скоро очакваме да детектира нови частици, като susy частиците, например, които могат да са представителите на ТВ)
- Определяне на барионното вещество в съответствие с величината определена на базата на BBN – триумф на теорията на първичния нуклеосинтез, както и на теорията на горещата ранна Вселена!
- Възраст на Вселената : 13.7 Blny
- Предоставя уникална, детайлна и прецизна информация за Вселената, превръщайки космологията в точна наука.

КМФ ъглов спектър

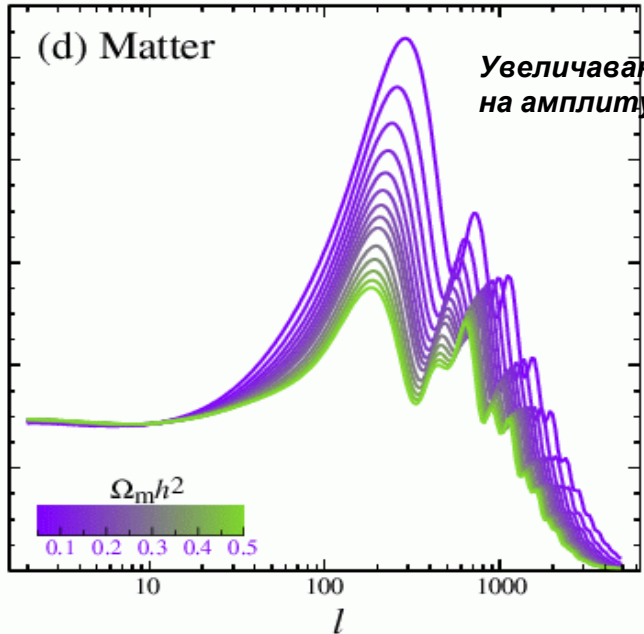
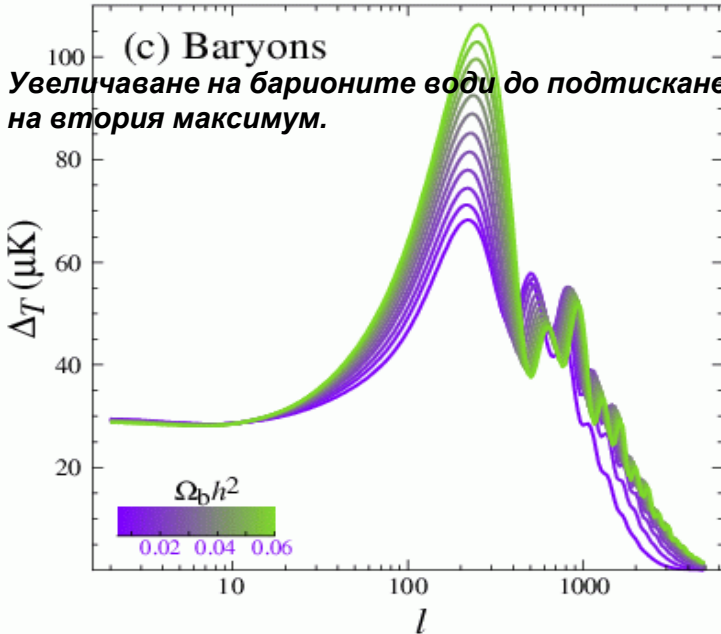
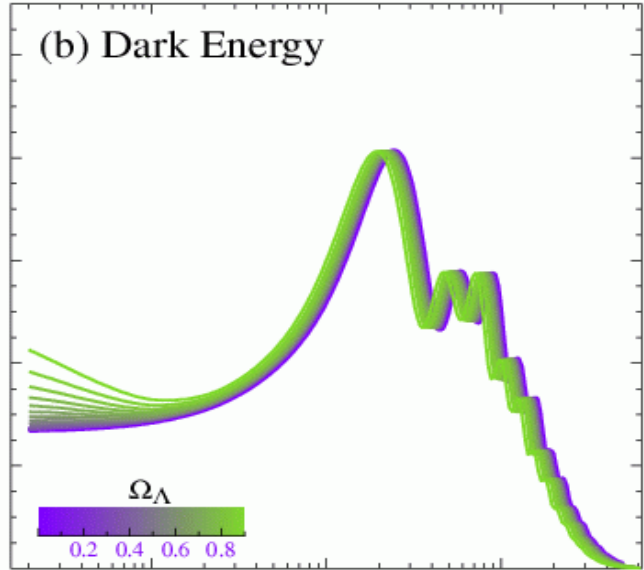
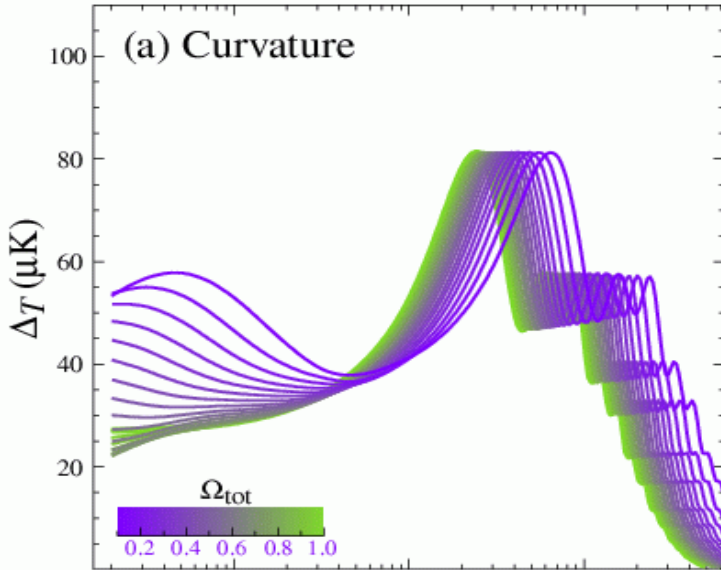


WMAP+ 3yr TT power spectrum (Hinshaw et al. 2006)

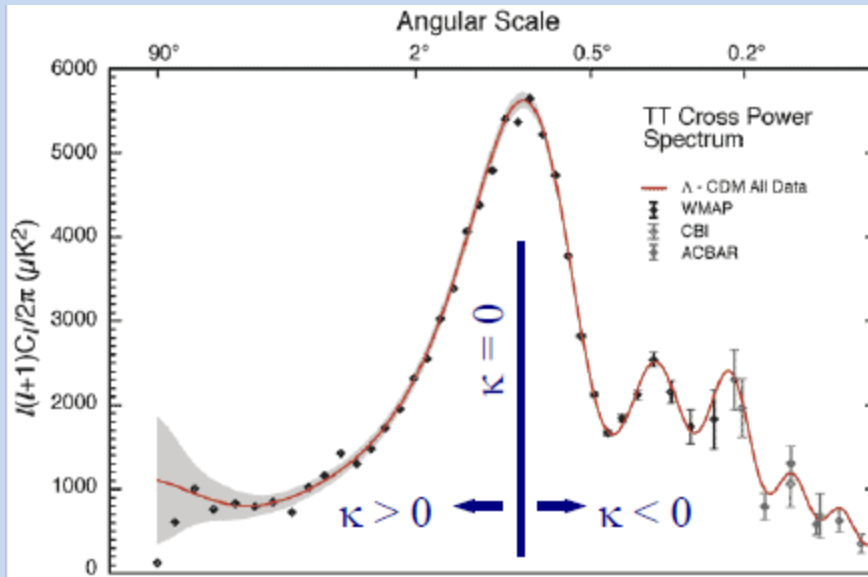
$$\frac{\Delta T}{T} = \sum_{lm} a_{lm} Y_{lm}(\theta, \phi)$$
$$C_l = \langle |a_{lm}|^2 \rangle$$

Ъгловия спектър на КМФ е чувствителен към почти всички космологични параметри: пълна плътност, тъмно вещество, тъмна енергия, барионна плътност, Хъбълова константа и др. Мястото и височината на акустичните пикове определя величините на космологичните параметри.

Намаляването на кривината води до преместване на максимумите към по-малки ъгли, запазвайки формата им.



Можем да определим пълната енергия от измервания на пространствената кривина: $\Omega = 1 + \kappa / H^2 R^2$



КМФ има максимум на флуктуациите на определено разстояние от нас $\sim 380\,000$ г. Измервайки съответния му ъглов размер можем да определим геометрията на пространството. Позицията на максимума е мерило за кривината.

От наблюдения: $\theta_{\text{peak}} = 1^\circ$
 следователно: $\Omega = 1.0$

Понеже $\Omega_M \sim 0.3$ то

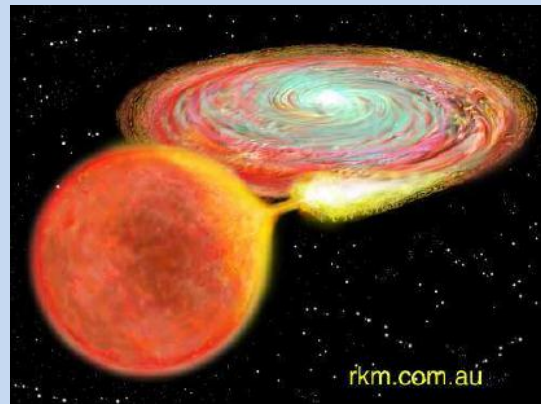
съществува Тъмна Енергия

$$\Omega_{DE} \sim 0.7$$

студена, еднородно разпределена !!

- **Наличие на тъмна енергия** ТЕ необходима за съгласие между наблюдателните данни . Необходимото количество ТЕ съвпада с ТЕ необходима за обяснение на резултатите от SN звезди

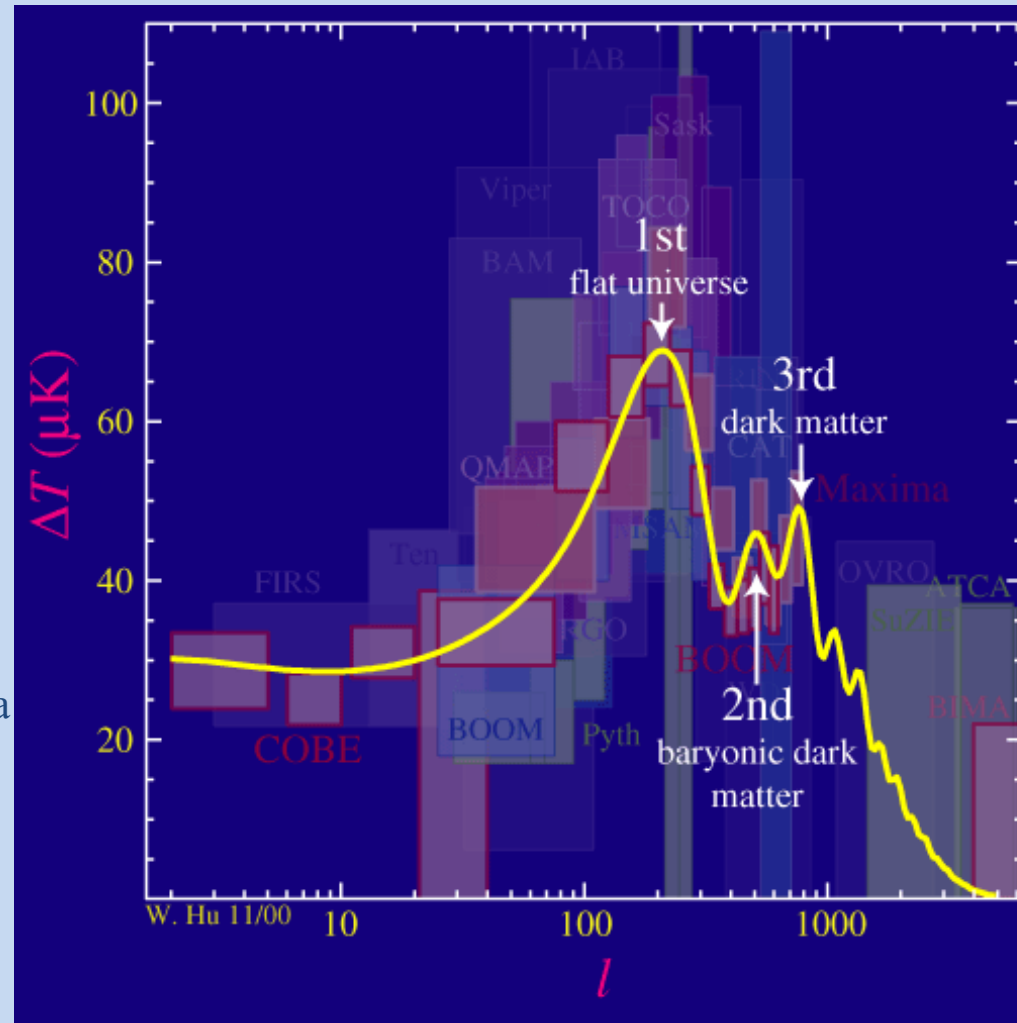
Наблюденията на SNIa в далечни г-ки указват на ускорено разширение - наличие на Λ

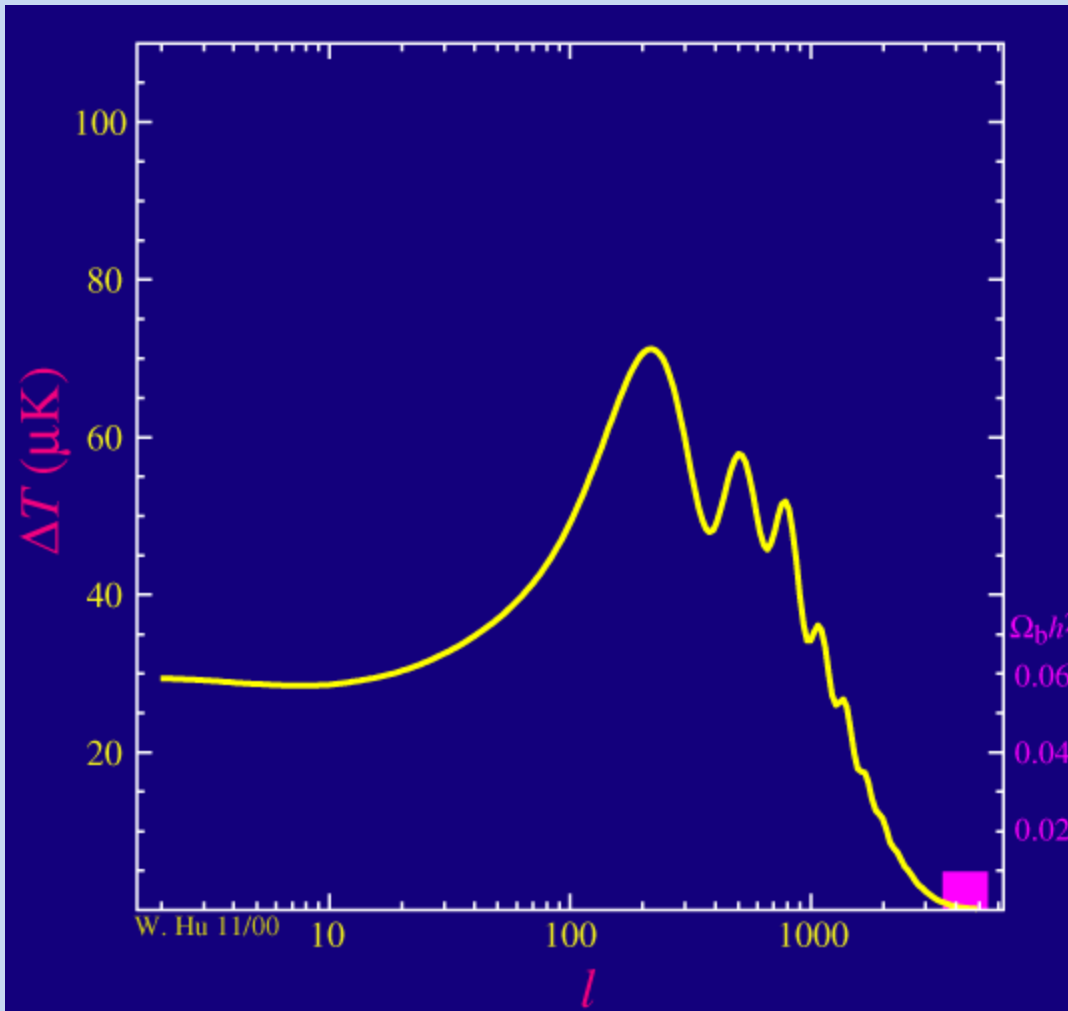


Барионна плътност от КМФ

Ъгловия спектър на КМФ е чувствителен към почти всички космологични параметри: пълна плътност, тъмно вещество, тъмна енергия, **барионна плътност**, Хъбълова константа и др. Мястото и височината на акустичните максимуми определя величините на космологичните параметри.

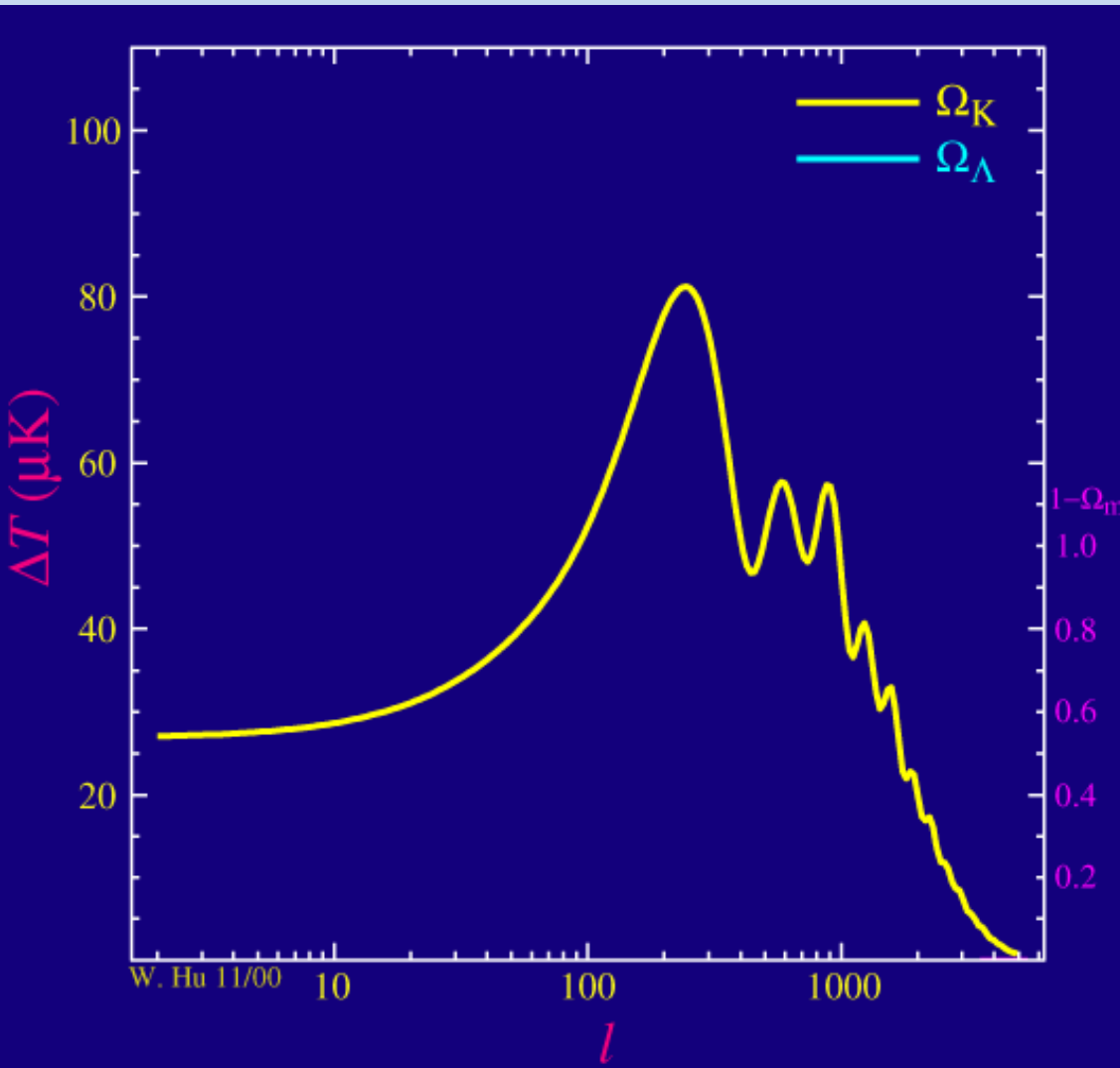
Формата на максимумите зависи от физичната плътност на веществото и барионите.





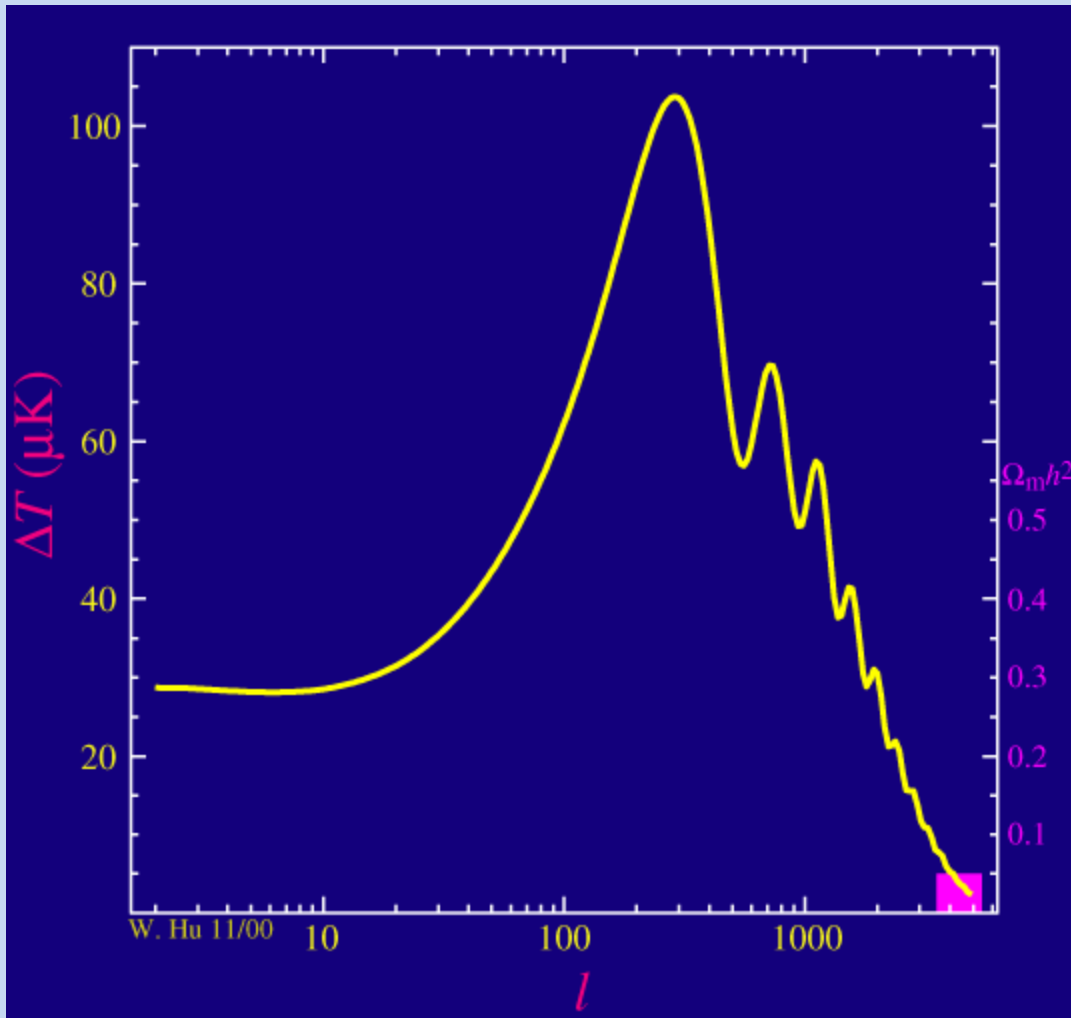
Изменение на барионната
плътност изменя
съотношението между четни
и нечетни максимуми

Геометрия на Вселената



Изменението на
разстоянието до $z = 1100$
изменя спектъра

- Мястото и височината на акустичните пикове
 - Определя величините на космологичните параметри
- Параметри
 - Кривина (отворена, плоска, затворена)
 - Ω_K (космол. константа)
 - бариони
 - тъмно вещество



Изменение на ТВ изменя
максимумите

...

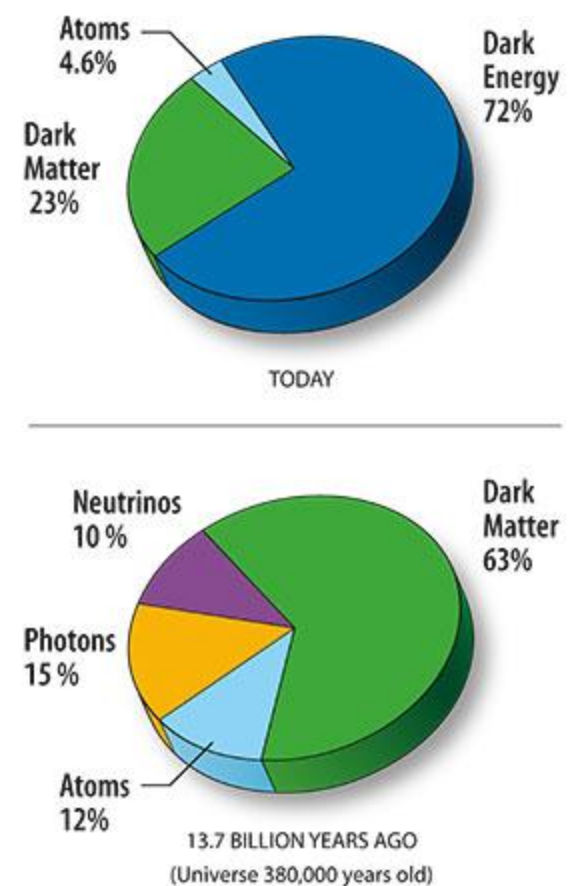
WMAP

96% от плътността на енергията на Вселената е във форма недетектирана в лабораторни условия....!?

КМФ – бариометър на Вселената 4.6%
светещи бариони (0.1%)
ТВ 23.3% (1.3%)
ТЕ 72.1% (1.5%)

WMAP данните дават указания за свойствата на небарионното вещество: самодействие, маса, взаимодействие с обичайното вещество. Неутрино не играе важна роля в образуването на структурите (иначе би забавило появата на първите звезди и галактики), но наличието на реликтовия неутринен фон е установено.

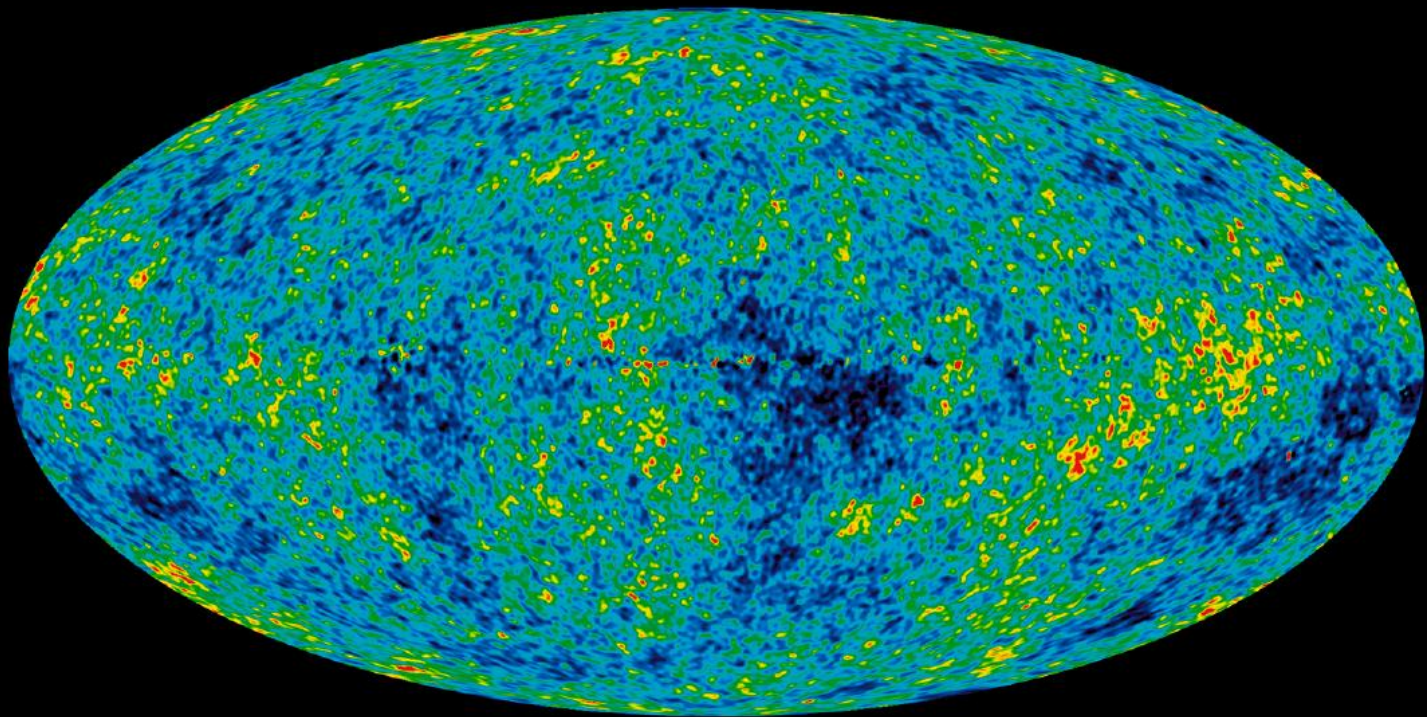
- Пълна карта на небето в микровълни с резолюция 0.2 градуса
- Поляризация на микровълновото лъчение на цялото небе.
- По-ранна реионизация от очакваната - информация за първите галактики



- Кривина на пространството – плоско Евклидово с точност 1%
- Средната плътност е равна на критичната $9.9 \times 10^{-30} \text{ g/cm}^3$ (5.9 p в m^3) (2% точност)
- Възраст на Вселената 13.73 милиарда години, 1% точност (0.12 млрд. г.)

WMAP 7

CMB temperature variations (1 / 10 000)



WMAP 7-year data (NASA/WMAP Science team)

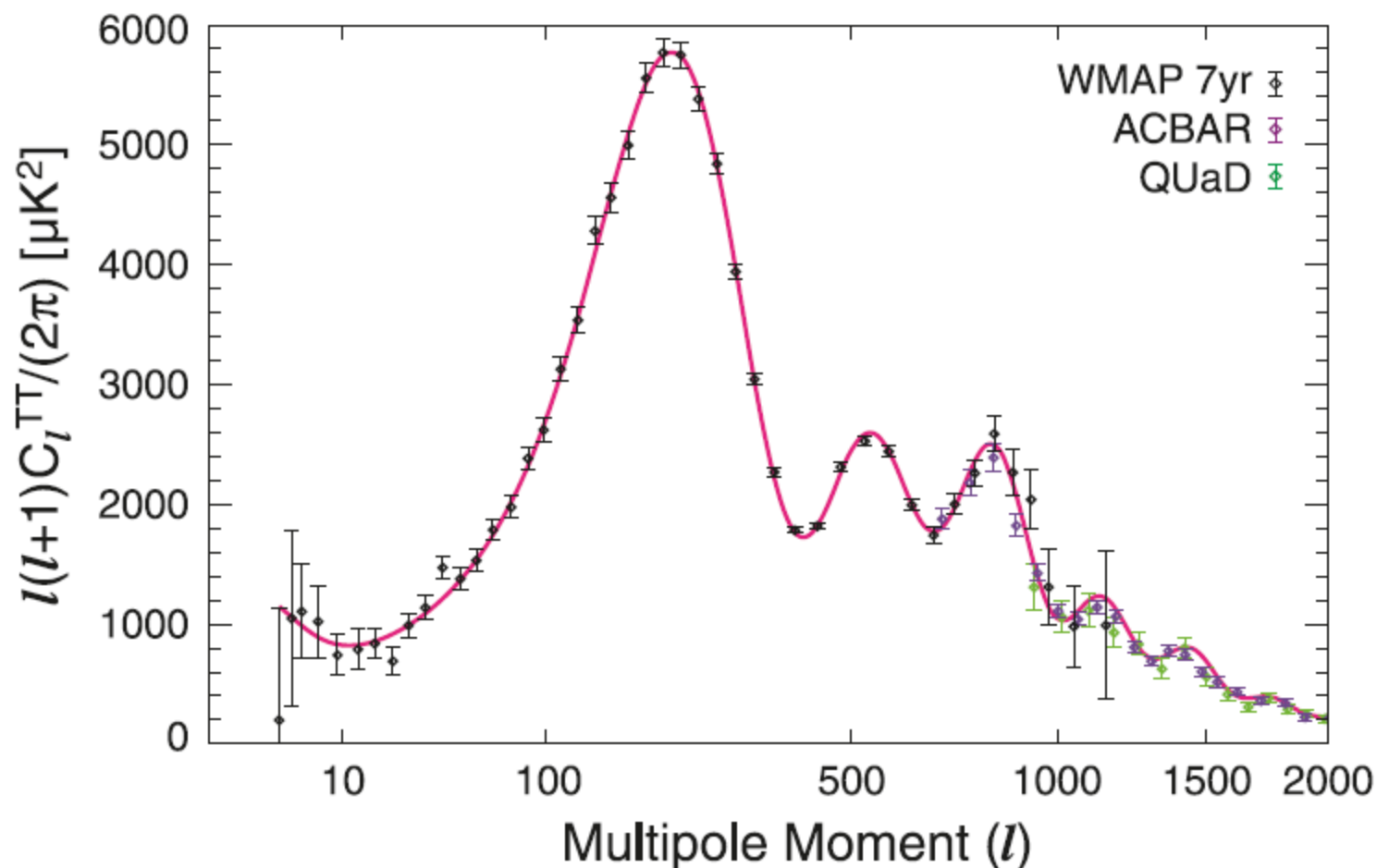
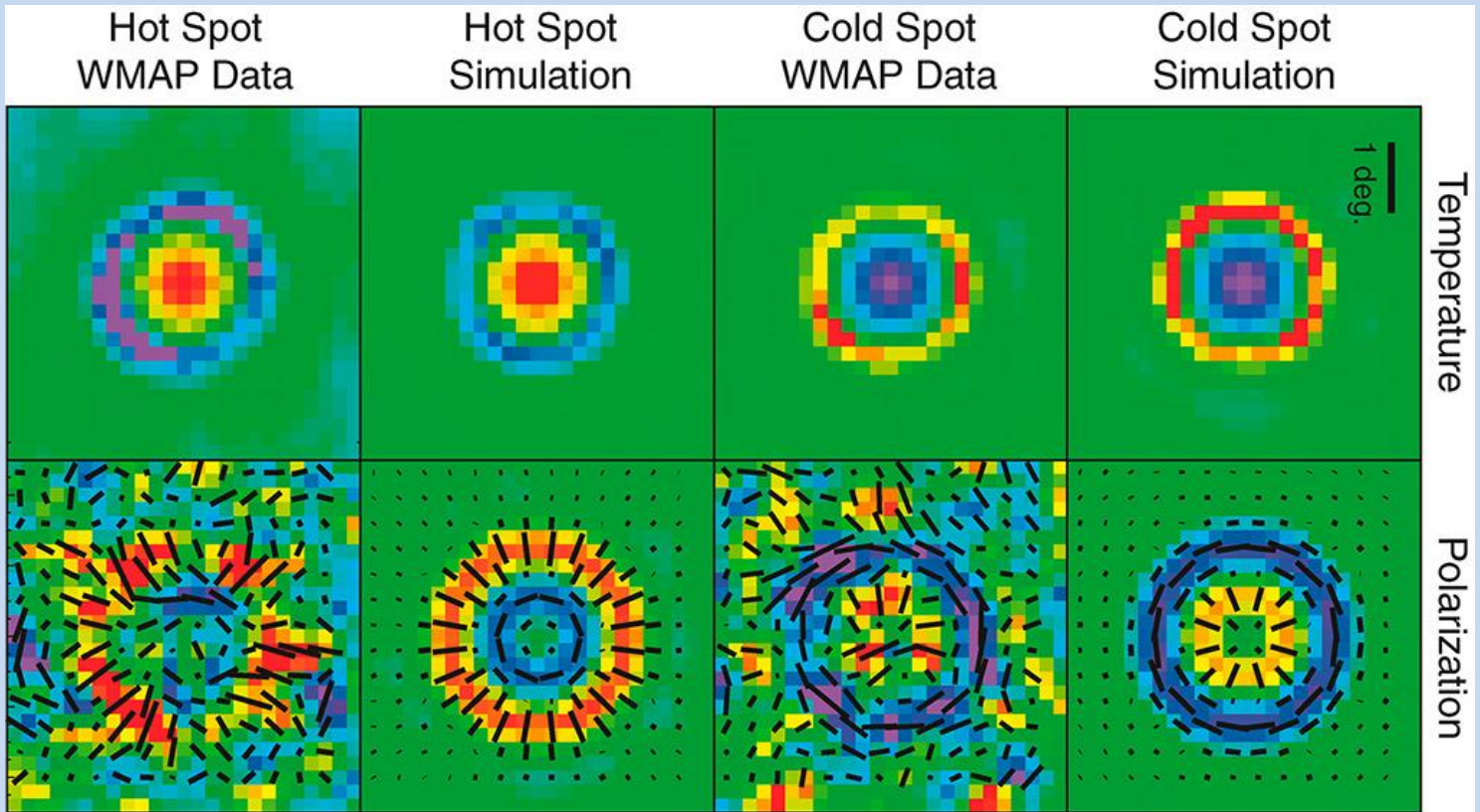


FIG. 7.— The WMAP 7-year temperature power spectrum (Larson et al. 2010), along with the temperature power spectra from the ACBAR (Reichardt et al. 2009) and QUaD (Brown et al. 2009) experiments. We show the ACBAR and QUaD data only at $l \geq 690$, where the errors in the WMAP power spectrum are dominated by noise. We do not use the power spectrum at $l > 2000$ because of a potential contribution from the SZ effect and point sources. The solid line shows the best-fitting 6-parameter flat Λ CDM model to the WMAP data alone (see the 3rd column of Table 1 for the maximum likelihood parameters).

WMAP 7

January 26, 2010

- Детектиран първичен He , пред-звезден произход (+ACBAR +QUaD експерименти)
- Потвърждение на инфлационни предсказания – флуктуациите на големи мащаби са по- интензивни от тези на малки
- Независими (КМФ+ H baryon acoustic oscillations) указания за природата на TE – най-добро съответствие с Λ ; плоска геометрия с точност 1%. (без данни от свръхнови)
- $\omega = -1.1 \pm 0.14$; при -1 геометрията е плоска с точност $-0.77\% +0.31\%$
- WMAP + H + LSS ограничения върху броя на типовете неутрино :
 $N_\nu < 4.34 \pm 0.87$. (стандартния модел : 3.04)
- Детектирани са T флуктуации (намаляване на T по направление на купа) на КМФ от горещ газ в галактиките, в резултат на взаимодействие на КМФ с газа.
- Наблюдаваната поляризация около студени или топли зони следва предсказаното теоретично поведение от СКМ.



WMAP7

- $A_s = 4.94 \pm 0.05 \times 10^{-5}$
- $n_s = 0.963 \pm 0.012$
- $\omega_b = 0.0226 \pm 0.0005$
- $\omega_c = 0.112 \pm 0.004$
- $\Omega_\Lambda = 0.728 \pm 0.015$
- $\tau = 0.087 \pm 0.014$

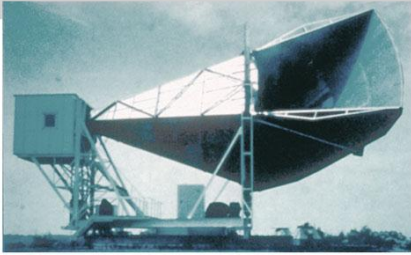
$$\omega_b \equiv \Omega_b h^2 = \rho_b / 1.88 \times 10^{-26} \text{ kg} / \text{m}^3$$

$$\omega_c \equiv \Omega_c h^2 = \rho_c / 1.88 \times 10^{-26} \text{ kg} / \text{m}^3$$

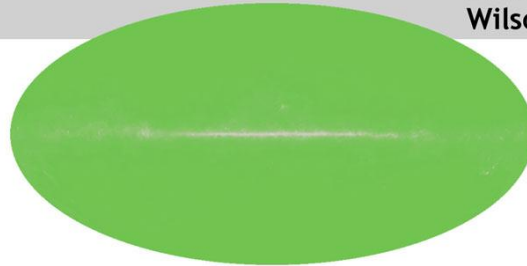
$$H_0 \equiv 100h \text{ km/s/Mpc}$$

Изучаване на космичния микровълнов фон

1965



Penzias and
Wilson



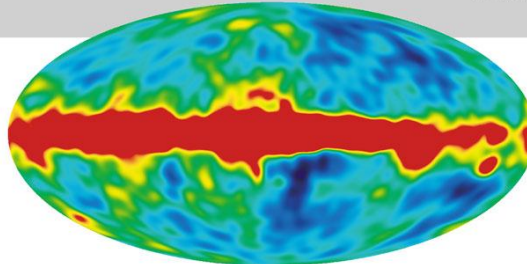
**Най-старото лъчение
във Вселената**

Откритие на остатъчното
лъчение от **Големия Взрив**
→ **2.7 K**

1992

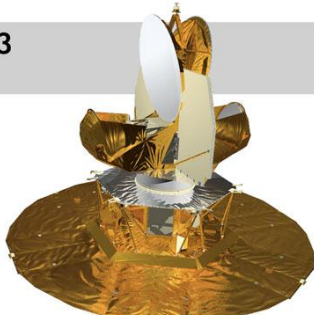


COBE

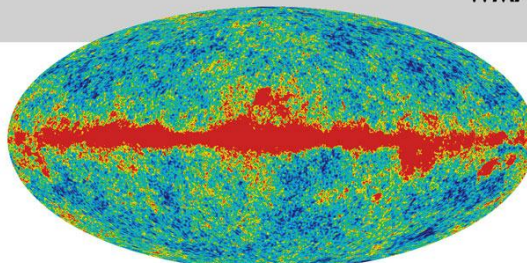


Чернотелно излъчване,
Откритие на анизотропия
→ **ъглов размер ~ 7°**
→ $\Delta T/T = 10^{-5}$

2003

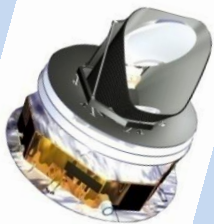


WMAP

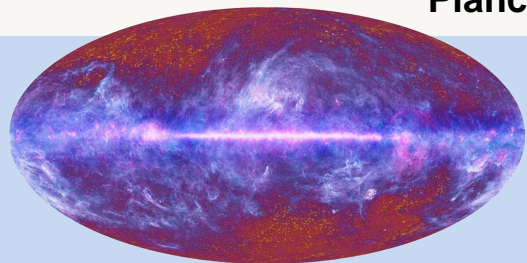


(Wilkinson Microwave
Anisotropy Probe):
→ **резолюция ~ 15'**

2009



Planck



→ **резолюция ~ 5'**,
 $\Delta T/T \sim 2 \times 10^{-6}$, 30~867 Hz

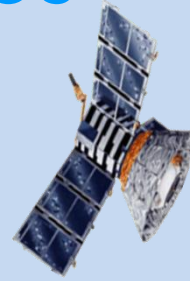
Европейска мисия за изследване на КМФ



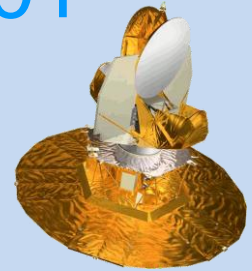
- Planck is a project of the European Space Agency - ESA - with instruments provided by two scientific Consortia funded by ESA member states (in particular the lead countries: France and Italy) with contributions from NASA (USA), and telescope reflectors provided in a collaboration between ESA and a scientific Consortium led and funded by Denmark.
 - More information at <http://www.esa.int/Planck>
-
- Planck is a European Space Agency (ESA) mission to study the cosmic microwave background (CMB)
 - Planck was launched together with the Herschel infrared telescope on May 14th, 2009.

COBE - 1989
4-y

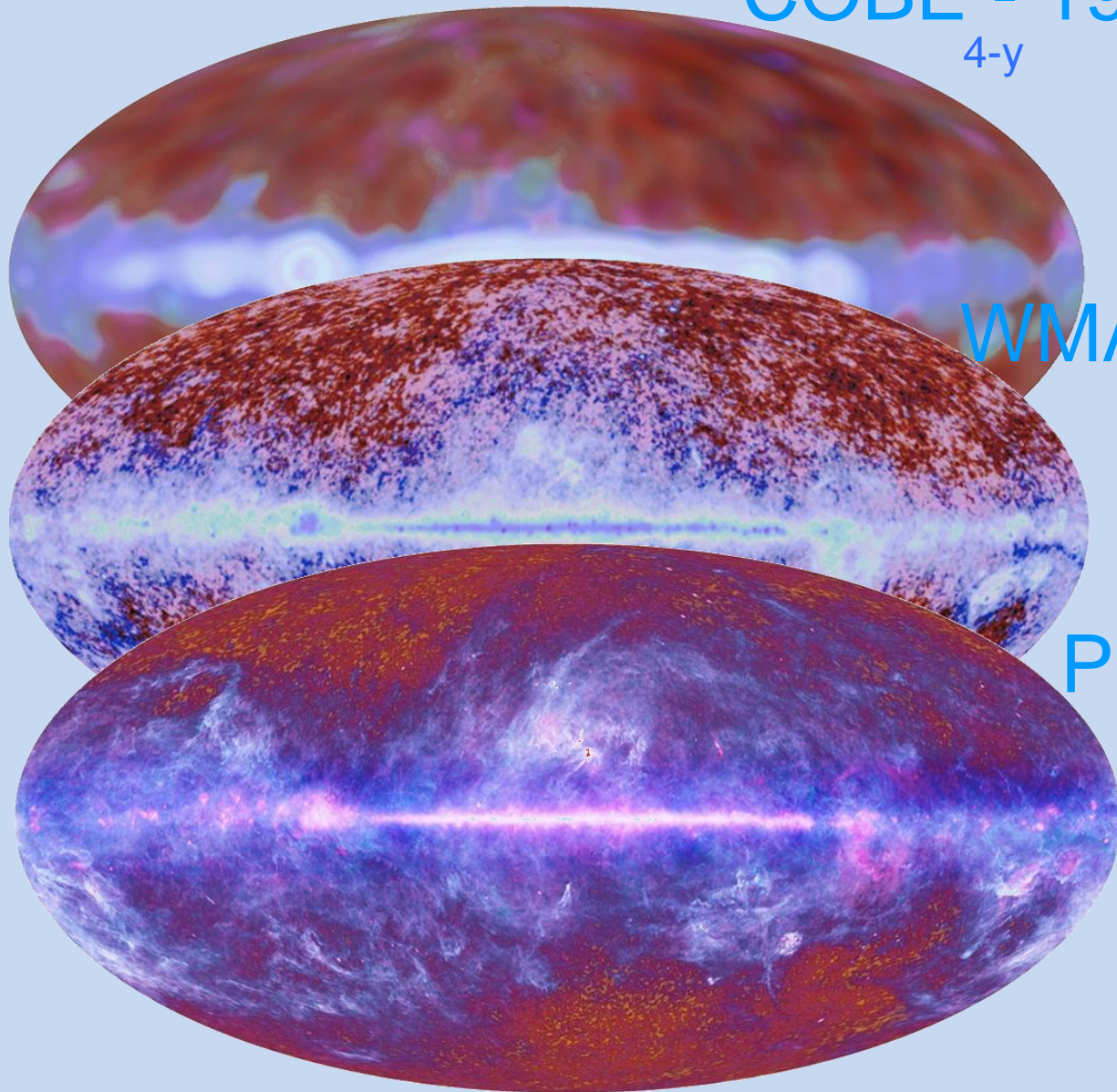
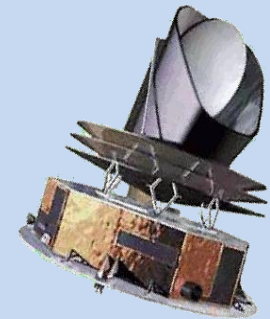
Защо
Planck?



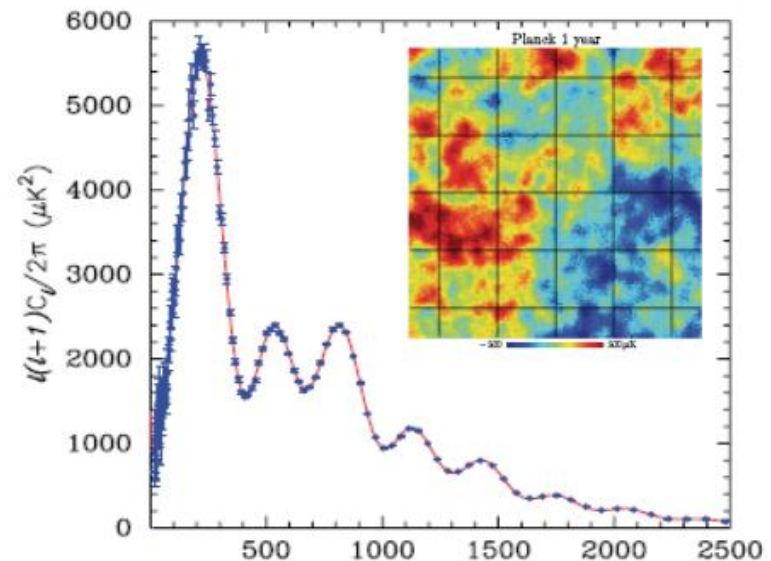
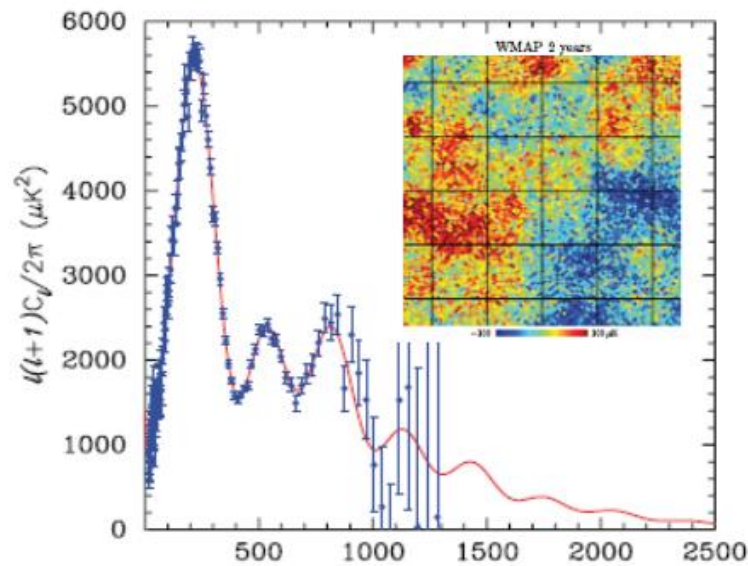
WMAP - 2001
7-y



PLANCK - 2009
1-y



- Planck превъзхожда WMAP по разделителна способност, 5'
- чувствителност – измерване на поляризацията на КМФ
- широк диапазон от честоти
- Позволява три пъти по-добра точност при определяне на характеристиките на Вселената
- with an uncertainty on the temperature limited by “natural causes” (foreground fluctuations, cosmic variance) rather than intrinsic or systematic detector noises



- Planck работи на 9 честоти

Low Frequency Instrument (LFI): 30, 44, 70 GHz

High Frequency Instrument (HFI): 100, 143, 217, 353, 545, 857 GHz

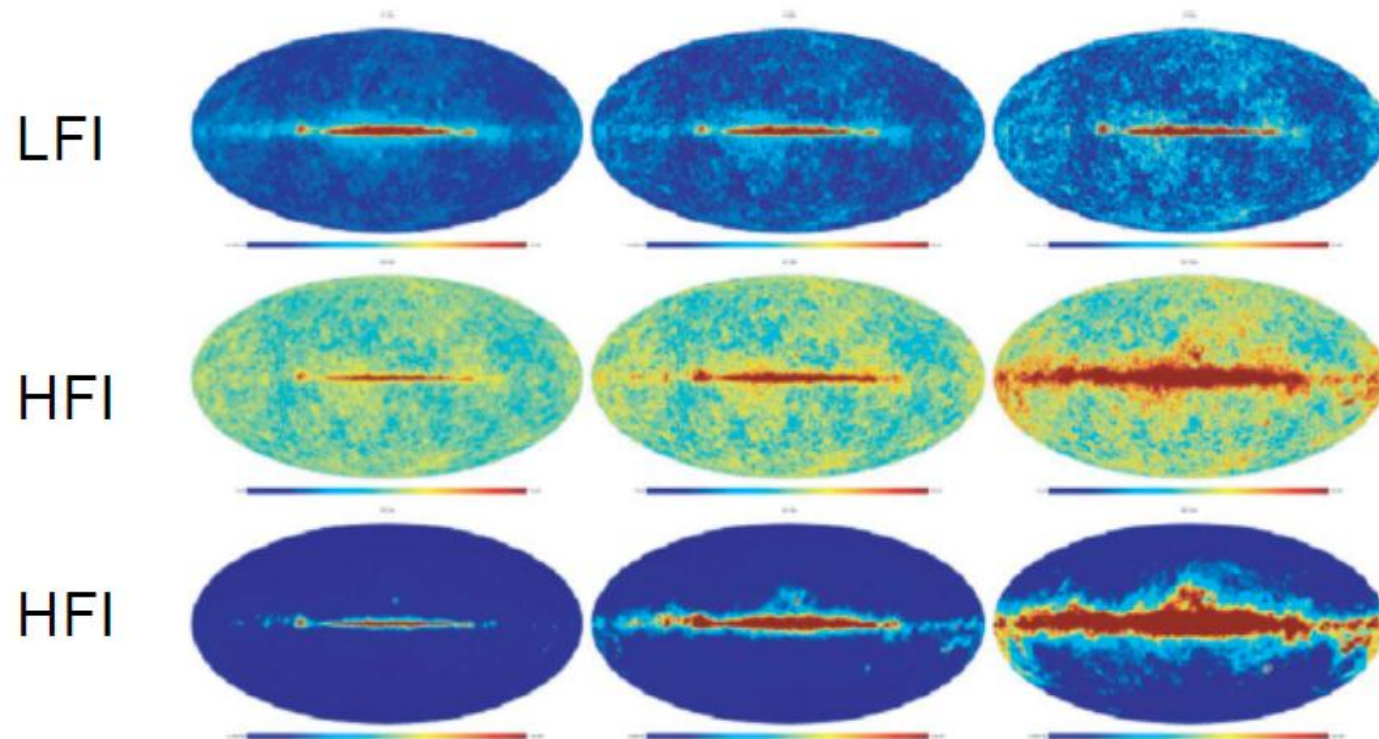
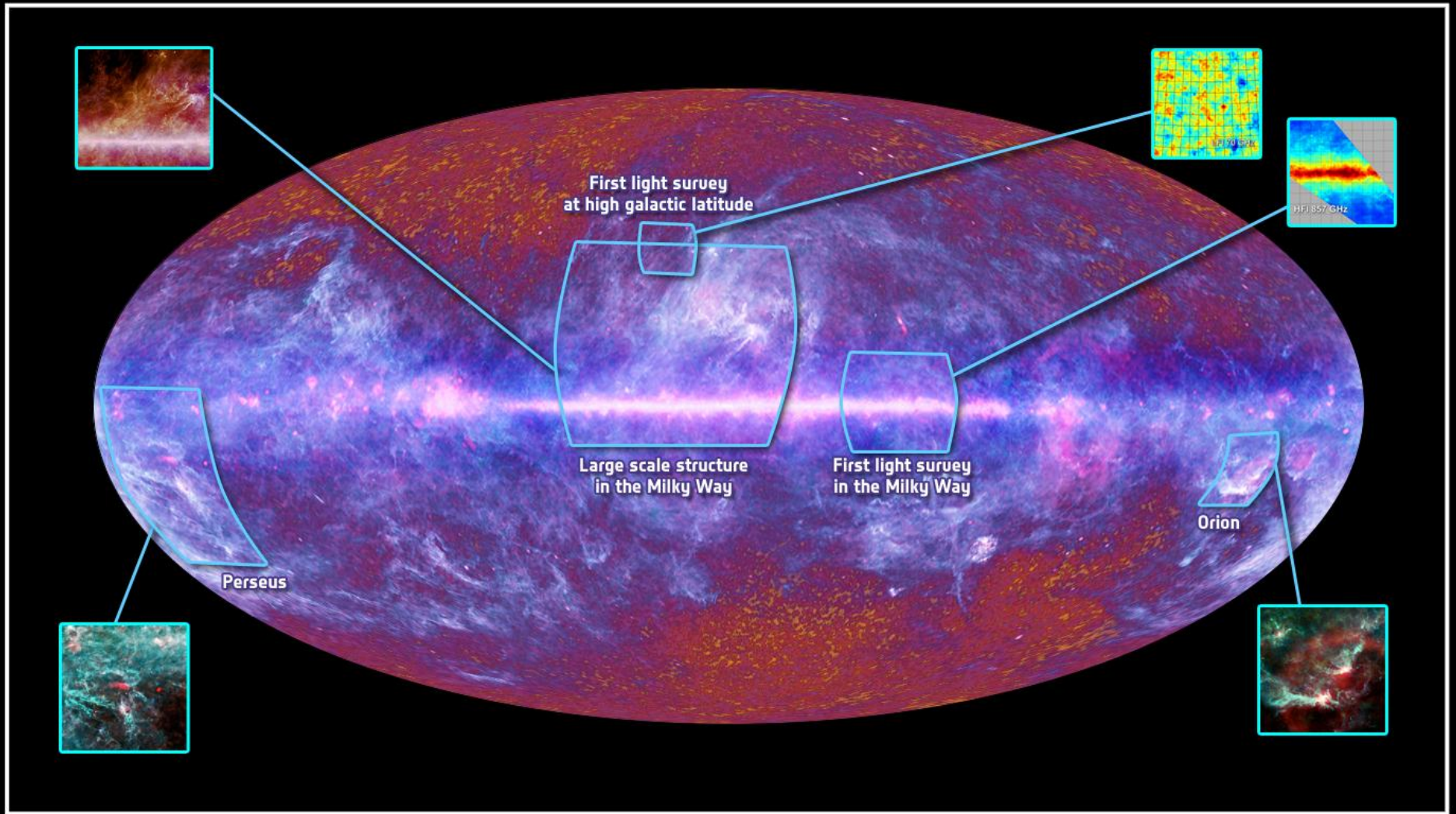


FIG 5.1.— False colour images of the simulated sky in the nine frequency channels of *Planck*, after subtraction of the monopole and dipole CMB components. From top left to bottom right: 30, 44, 70, 100, 143, 217, 353, 545, and 857 GHz channels.

Небето в микровълни наблюдавано от Планк



Това изображение на цялото небе в микровълни е получено чрез композиране на данните от Planck покриващи електромагнитния спектър от 30 GHz до 857 GHz. Структурата на CMBR, с нейните финни температурни флуктуации отразяващи първичните флуктуации на плътността, от които днешните структури са възникнали, се вижда ясно в областите отдалечени от галактичната плоскост на картата.

Централната ивица е плоскостта на Галактиката. Голяма част от изображението е доминирано от дифузни емисии на прах и газ. Изображението е получено от данни получени от Planck по време на първият пълен небесен обзор, който бе завършен в резултат на 12 месеца наблюдения.

В дясно на основното изображение, под галактичната равнина, е показан голям облак от газ в нашата Галактика. Дъгата от светлина, който го заобикаля е Barnard's Loop – разширяващ се bubble на избухнала звезда. Planck изучава и други галактики. Спиралната галактика Andromeda, 2.2 милиони ly от Земята, изглежда като обломък от микровълни, излъчени от най-студения газ в нея.

Други, по-отдалечени галактики със свръхмасивни черни дупки се виждат като точки на изображението.

Получено от изображения които са направени между август 2009 и юни 2010, това изображение е изображение с ниска резолюция (в сравнение с получените изображения на базата на пълните данни).

Credits: ESA, C. Carreau

Цели:

Най-важните научни цели на Planck включват:

Картиране на КМФ анизотропия с повишена чувствителност и ъглова разделителна способност

Тестиране на инфлационните модели на ранната Вселена

Определяне на амплитудата на структурите в КМФ

Определяне на Хъбъловата константа

Провеждане на измервания на Сюняев-Зелдович ефекта

- Мисията Planck

Planck се очаква да даде отговори на някои от най-важните въпроси на съвременната наука:

Как се е появила Вселената?

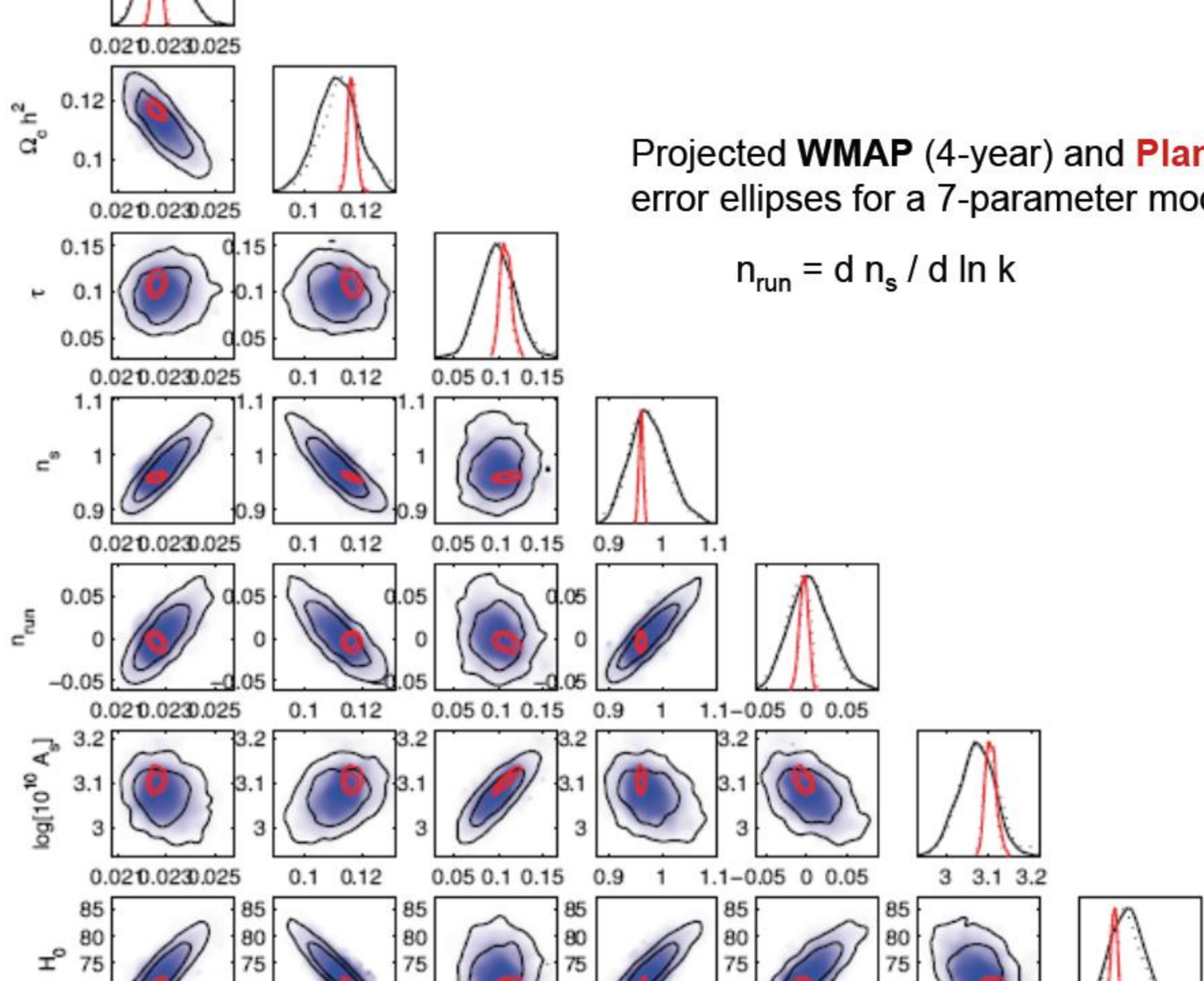
Как е еволюирала до днешното си състояние, което ние наблюдаваме?

Как ще се развива в бъдеще?

Planck ще анализира, с възможно най-висока точност, която някога е достигана, реликтовото излъчване, КМФ .

Projected **WMAP** (4-year) and **Planck** error ellipses for a 7-parameter model

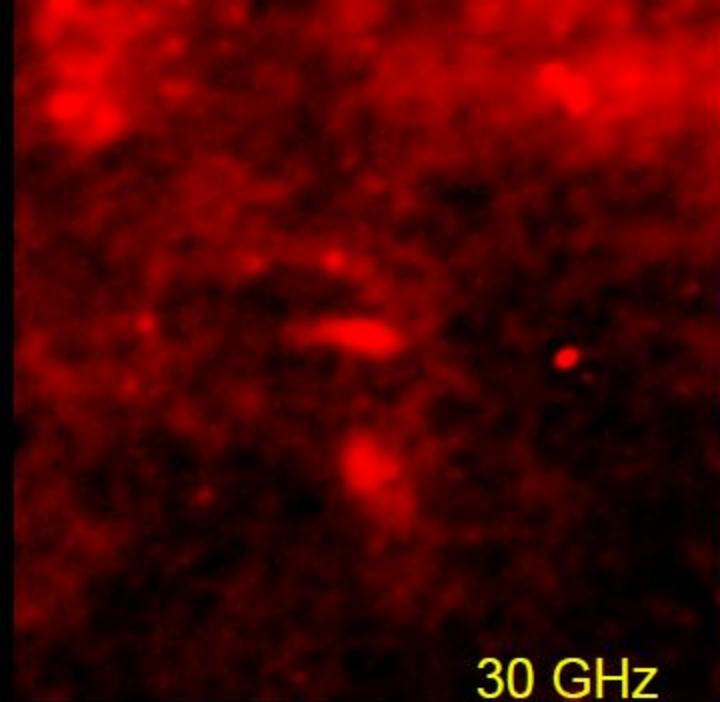
$$n_{\text{run}} = d n_s / d \ln k$$



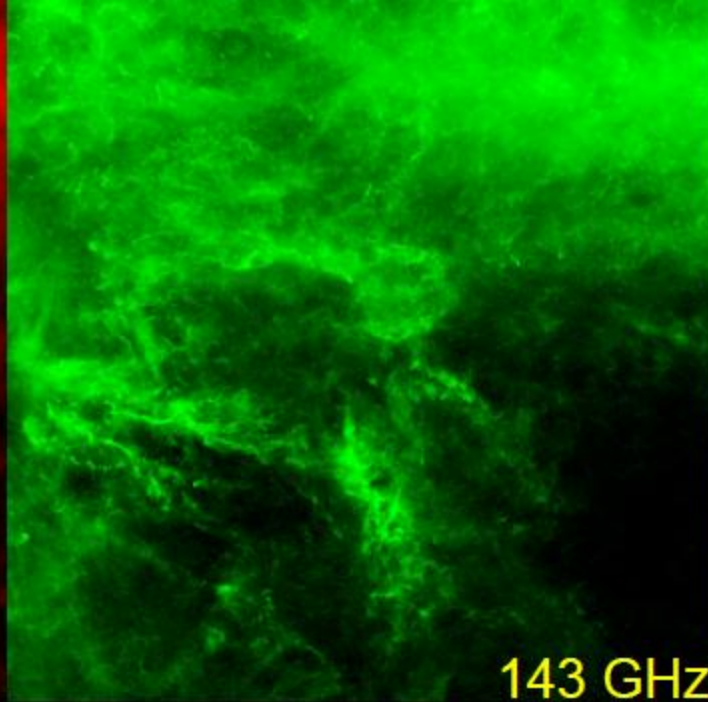
Състояние в момента

Втора година на работа след изстрелването :

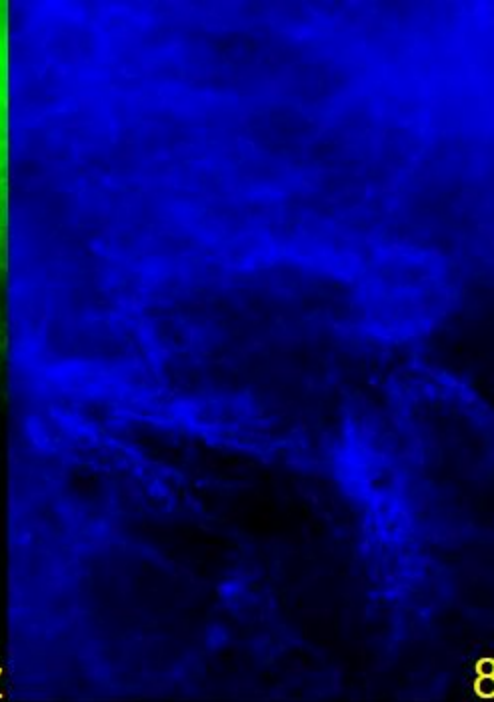
- Сателита и инструментите работят нормално и непрекъснато от старта на обзора (от средата на август 2009)
- 100% покритие на небето
 - **Направени са 4 пълни обзора на цялото небе.**



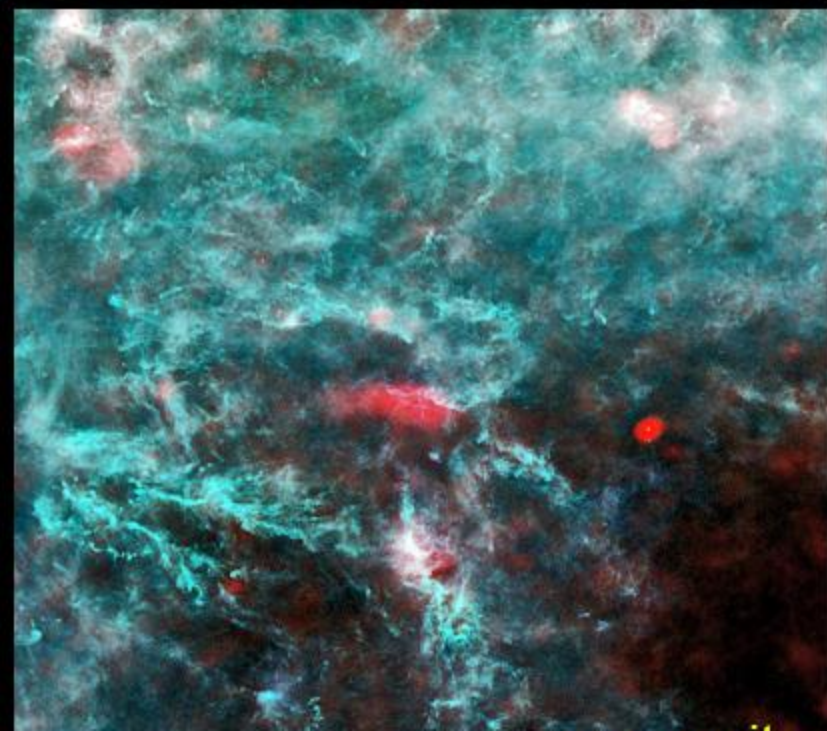
30 GHz



143 GHz



890 GHz



a region
star form
the Pers
constella

Космологична роля на Планк I

- Планк ще изтръгне всичката възможна информация от КМФ температурни анизотропии
- Ще измери възможно най-точно КМФ поляризация
- Ще определи 6 параметри на Λ CDM с висока точност
- 4 от тези параметри са известни с 10% точност а оптичната плътност с 20%
- Обаче точността на n_s е недостатъчна

$$1 - n_s = 0.037 \pm 0.014$$

Космологична роля на Планк II

- Освен измерването на основните параметри Планк ще определи или получи ограничения върху допълнителните космологични параметри
- Ще изследва механизма на генерация на първичните флуктуации – евентуално ще получи информация за нова физика (инфлация)
 - Спектрален индекс, който се изменя
 - Адиабатичност на първичните флуктуации
 - Негаусово разпределение
 - Първични гравитационни вълни
 - Тензорни пертурбации
- Ще тества реионизационната история в повече детайли
- Ще провери аномалиите на големи мащаби получени от WMAP

Компоненти на Вселената

Скрита маса, Тъмна енергия

КМФ, реликтово неутрино, бариони

Съставляващи компоненти на Вселената

Лъчение (релативистки частици) ~ 0.002%

$$\Omega_r = 2.47 \times 10^{-5} h^{-2}$$

Днес тази компонента включва фотоните и неутрино и има пренебрежим принос в пълната плътност на енергията. Доминирала е на РД стадий.

$$\Omega_\nu h^2 \leq 0.0076 \quad 95\% \text{ CL}$$

Барионно вещество ~4,6% $\Omega_b h^2 = 0.022 \pm 0.001$

Тъмно вещество ~22% $\Omega_{\text{nbm}} h^2 = 0.106 \pm 0.008$

Недетектирано директно, само индиректни указания.

Съставлява доминиращата част от веществото днес.

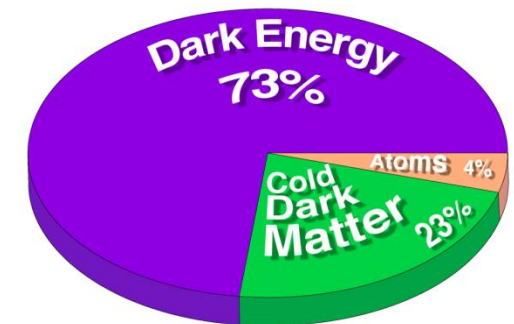
Тъмна енергия ~73%

Основна част от пълната плътност на енергията.

Неочаквана и непредсказвана преди нейното детектиране.

Предизвикателство за космологията, физика на частиците, ..

Може да бъде обяснена с космологична константа или енергия на вакуума.



■ **4% - H+He**, 0.0025% тежки елементи, 0.8% звезди, 0.005% КМФ

■ **23% - тъмна материя**, над 73% **тъмна енергия**, **<0.02% неутрино**,

$$\Omega_m + \Omega_\nu = 1.011 \pm 0.012$$

$$0.001 < \Omega_\nu < 0.02$$

ТВ

Съществуват независими наблюдателни свидетелства от различни епохи:
КН, КМФ, структури днес, SNIa, H_0

наблюдения на различни мащаби
различни методи

Указания от комбинираните данни от КМФ, БАО, свръхнови, H_0 , възраст на Вселената,

Теоретични указания – ръст на флуктуациите, еволюция на структурите

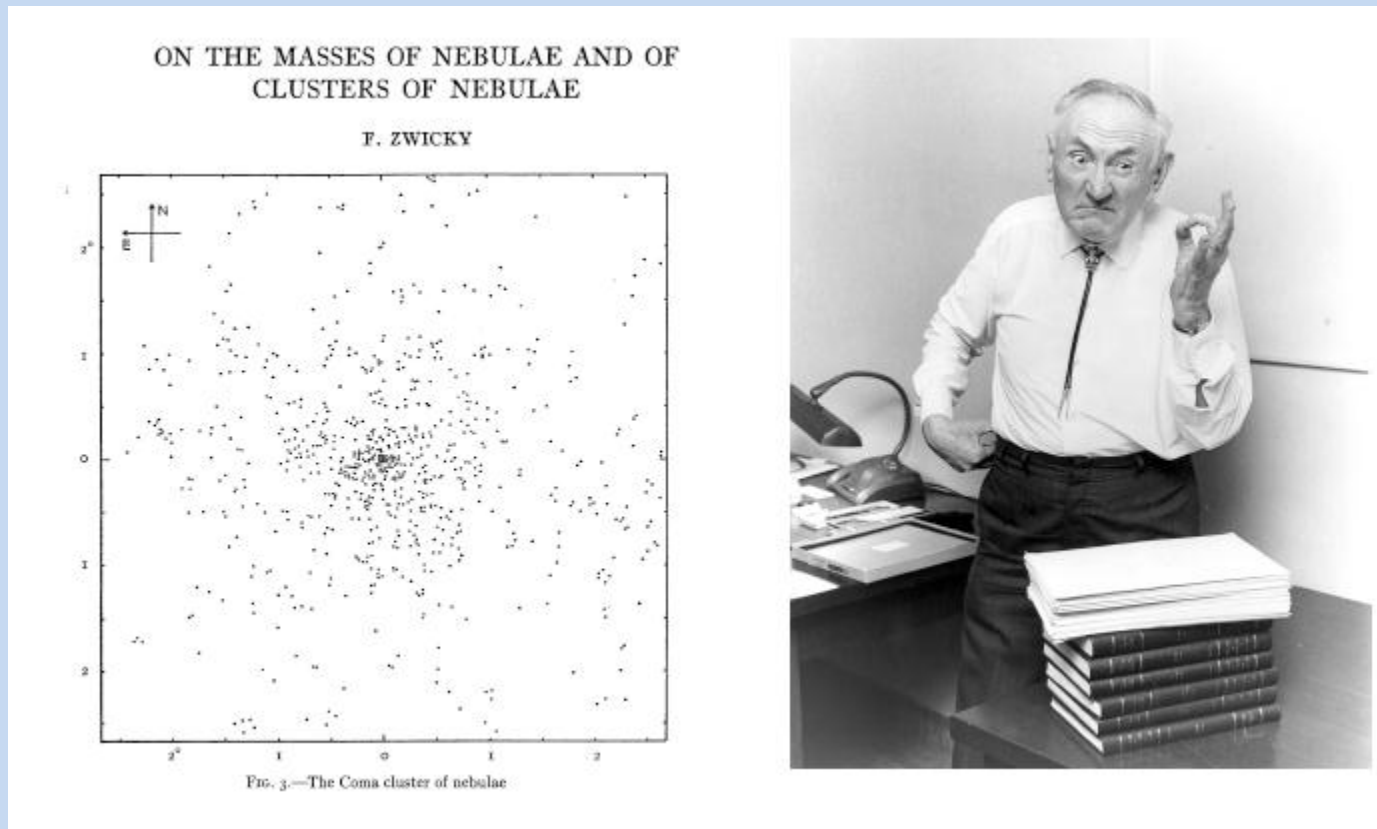
Указания относно вида на ТВ от наблюдения:

структури – барионното вещество недостатъчно, СТВ

космичен нуклеосинтез - тъмните бариони са недостатъчно

КМФ - тъмните бариони са малко

Наблюдателни свидетелства и теоретични указания



“Проблема за скритата маса”
1933, Fritz Zwicky

F. Zwicky открива указания за ТМ в купове от галактики, изучавайки скоростите на галактиките.

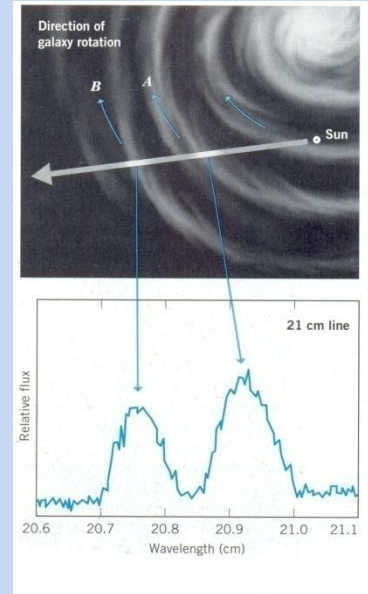
ТЪМНО ВЕЩЕСТВО $\Omega_M \sim 0.3$

Кинематика на различни обекти

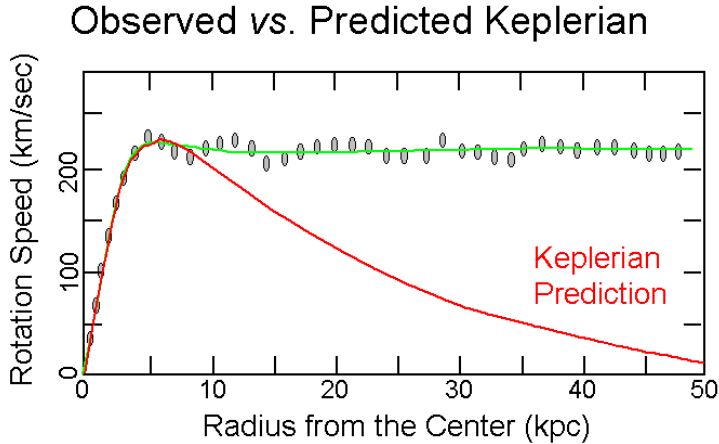
Галактики: Ротационни криви на спирални галактики

Определените маси на галактиките са ~ 10 пъти по-големи от оценките свързани със звезди, газ и прах в галактиките.

$$\Omega_{DM} \approx 0.1,$$



Наблюдения на газ и звезди в галактиките позволяват да се определи разпределението на веществото



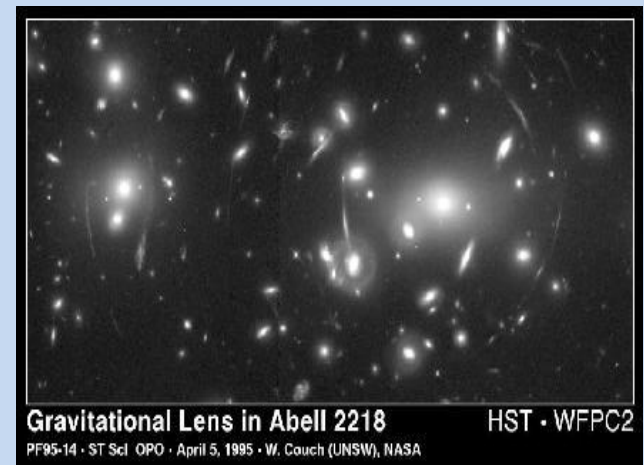
Галактични купове

F. Zwicky 1933 – необходимост от тъмно вещество в галактични купове.

Метод на гравитационните лещи

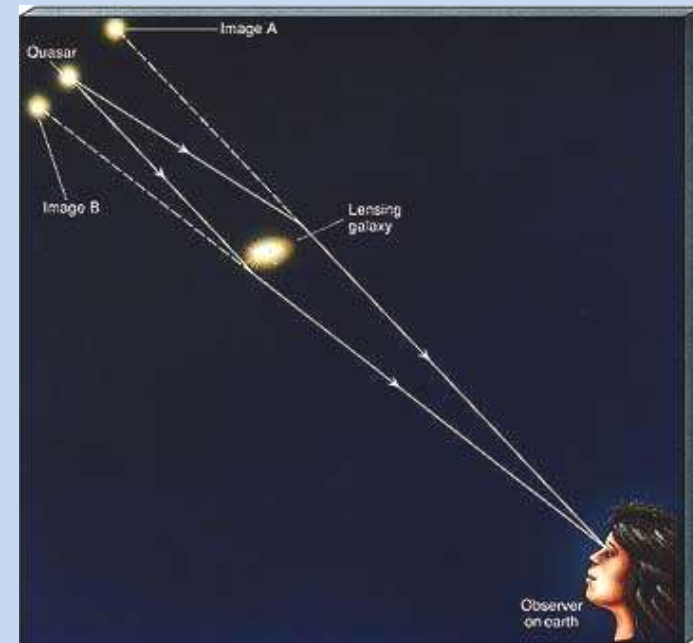
Измервайки изкривяването на фонните галактики от лежащ на лъча на зрение куп може да се определи масата му, използвайки ОТО. Тя е на порядък по-голяма от тази оценена от звездите, газ и прах, съдържащи се в купа.

$$\Omega_{DM} \approx 0.2$$



Гравитационното линзиране, предсказано от ОТО, позволява да се измери масата на обекта (галактика, куп,) , който играе ролята на гравитационна леща за обектите от фона. Ъгъла на отклонение е пропорционален на пълната маса на системата.

Дава указание и за разпределението на ТВ.

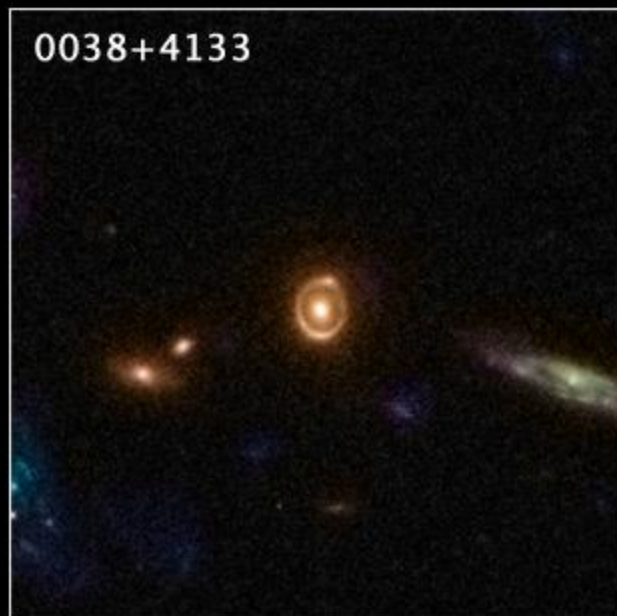


COSMOS : Hubble Space Telescope, Spitzer Space Telescope, XMM-Newton spacecraft, Chandra X-ray Observatory, Very Large Telescope (VLT), Subaru Telescope, Canada-France-Hawaii Telescope.

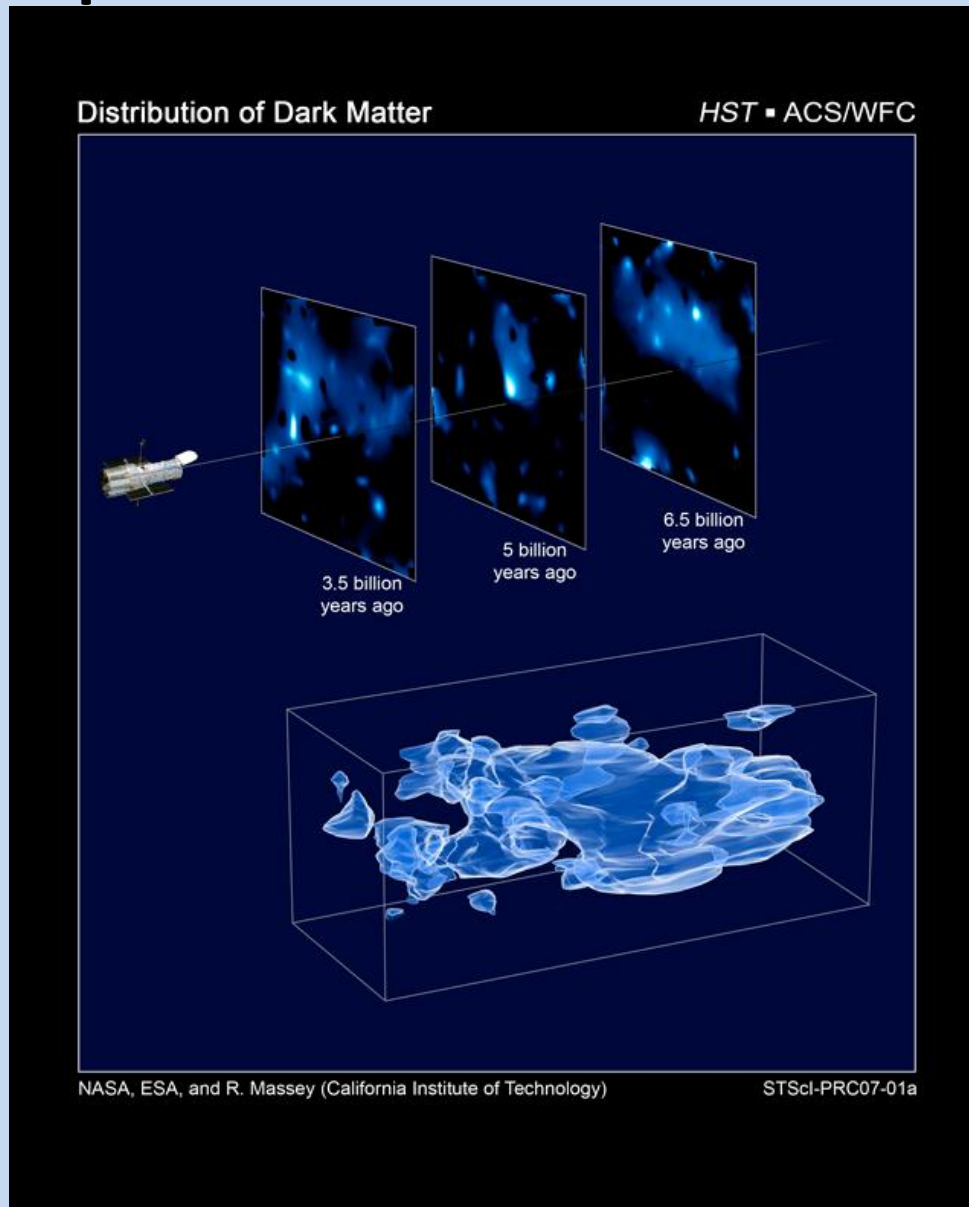
На базата на данни от Hubble Space Telescope и наземни телескопи 67 нови гравитационни лещи са открити около масивни елиптични или сфероидални галактики. Ако това е представителна извадка се очакват половин милион гравитационни лещи общо.

Gravitational Lenses in the COSMOS Survey

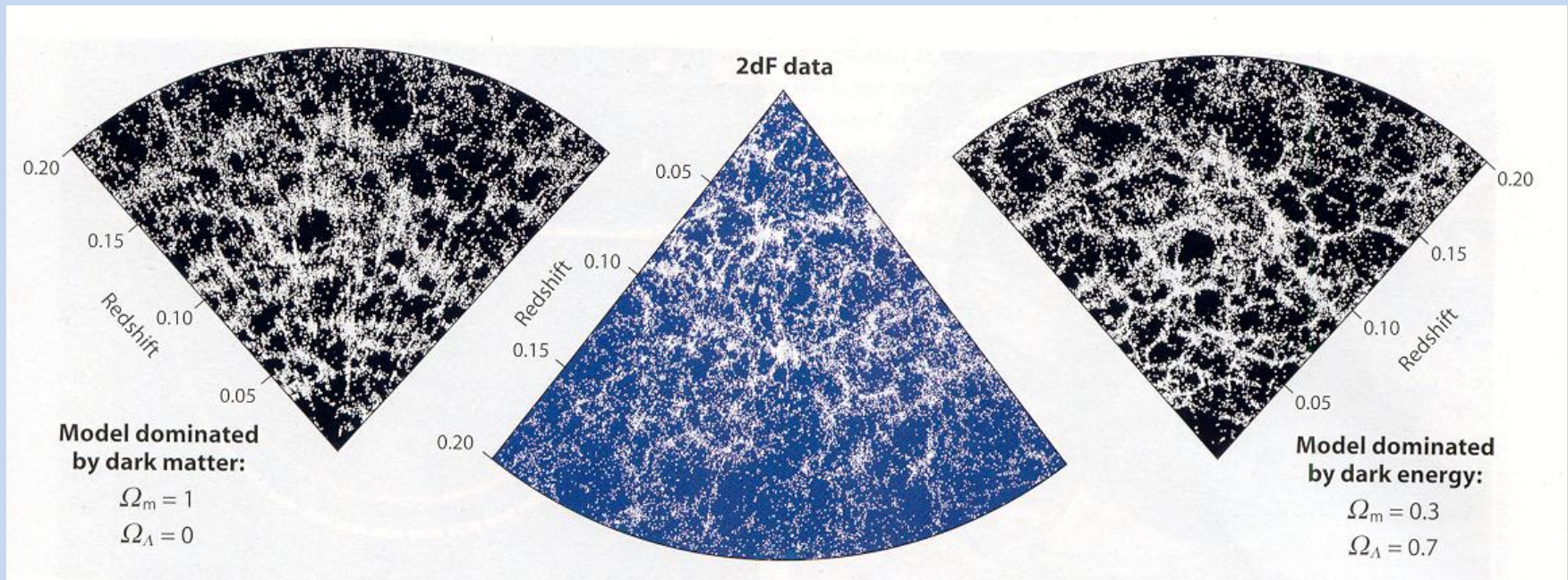
Hubble Space Telescope ■ ACS/WF



3D карта на Тъмното Вещество

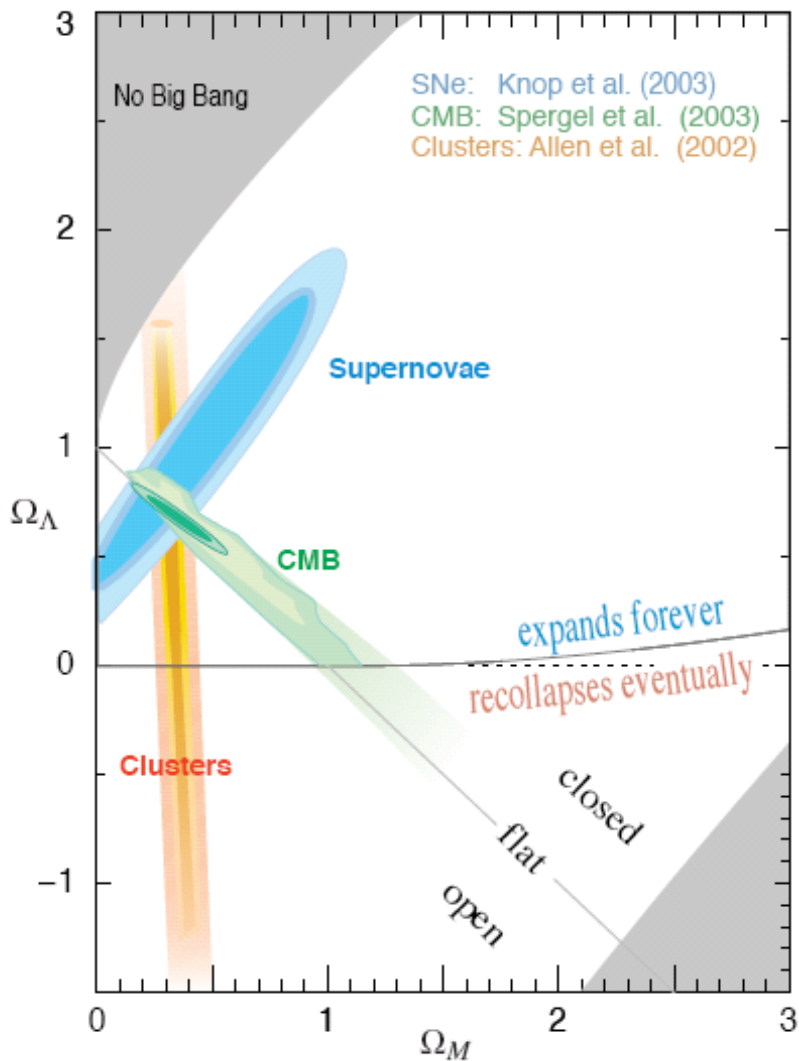


Съпоставка на наблюдателните данни с теоретичните симулации



Тъмно студено вещество е необходимо за да може гравитацията да усилва малките флуктуации, наблюдавани в КМФ, достатъчно за да се формира крупномащабната структура наблюдаема днес.

Комбинираните резултати
от свръхнови (Hubble ST), КМФ (WMAP) и галактични купове
указват на съществуването на ТВ и ТЕ:



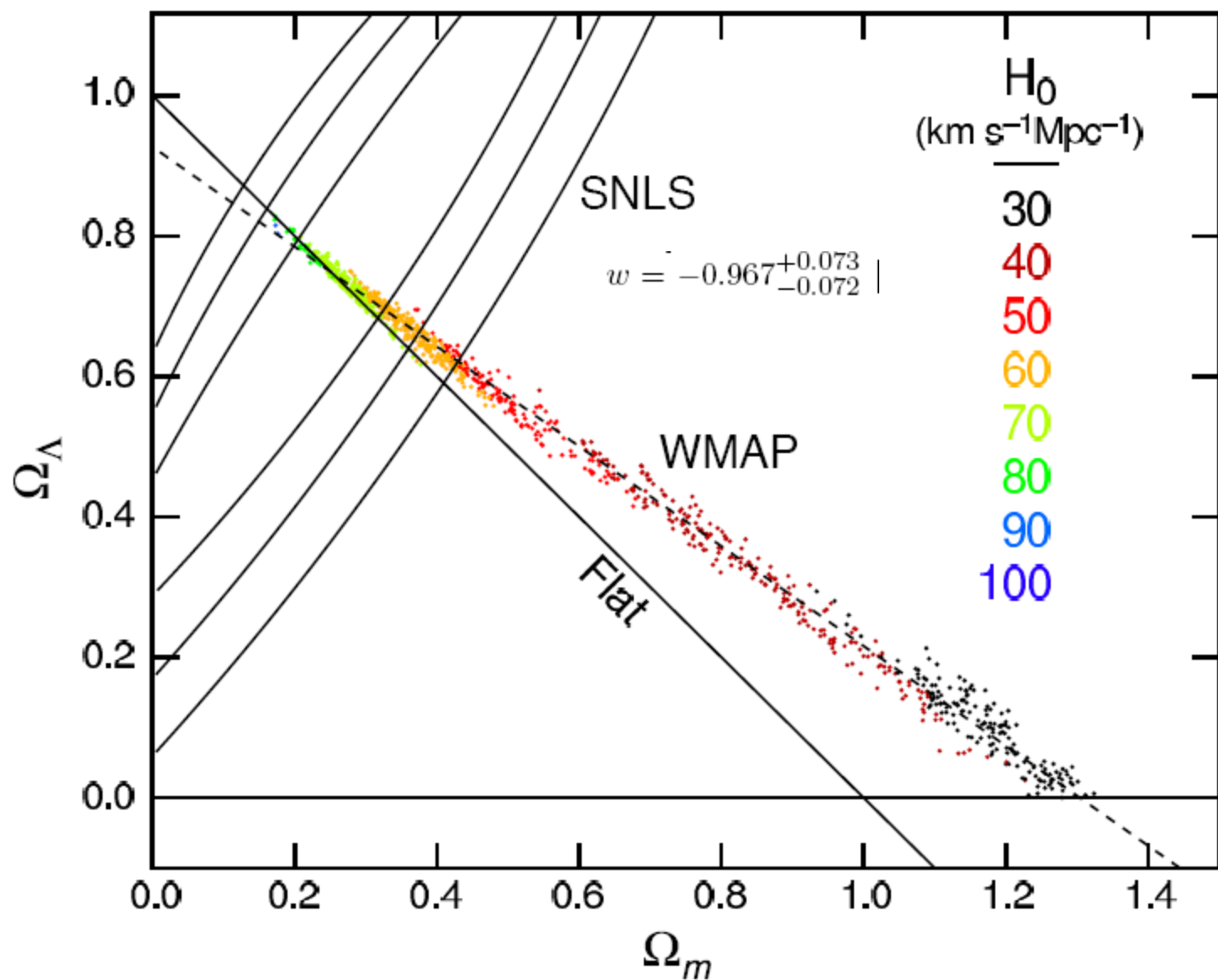


Figure 19.2: Likelihood-based probability densities on the plane Ω_Λ (*i.e.*, Ω_v assuming $w = -1$) vs Ω_m . The colored Monte-Carlo points derive from WMAP [22] and show that the CMB alone requires a flat universe $\Omega_v + \Omega_m \simeq 1$ if the Hubble

Форми и кандидати

Барионна

Масивни компактни обекти MACHOS (MAssive Compact Halo Objects)

Звезди с малка маса ($<1/20 M_{\odot}$) и недостатъчно горещи ядра за горене на H или D, които светят само благодарение на гравитационното свиване, слаби обекти, трудно се наблюдават - кафяви джуджета и подобни.

Сврѣхмасивни черни дупки to power distant [quasars](#).

Детектират се посредством гравитационно линзиране.

Небарионна

горещо тъмно вещество

студено тъмно вещество

в зависимост от скоростите и масите им.

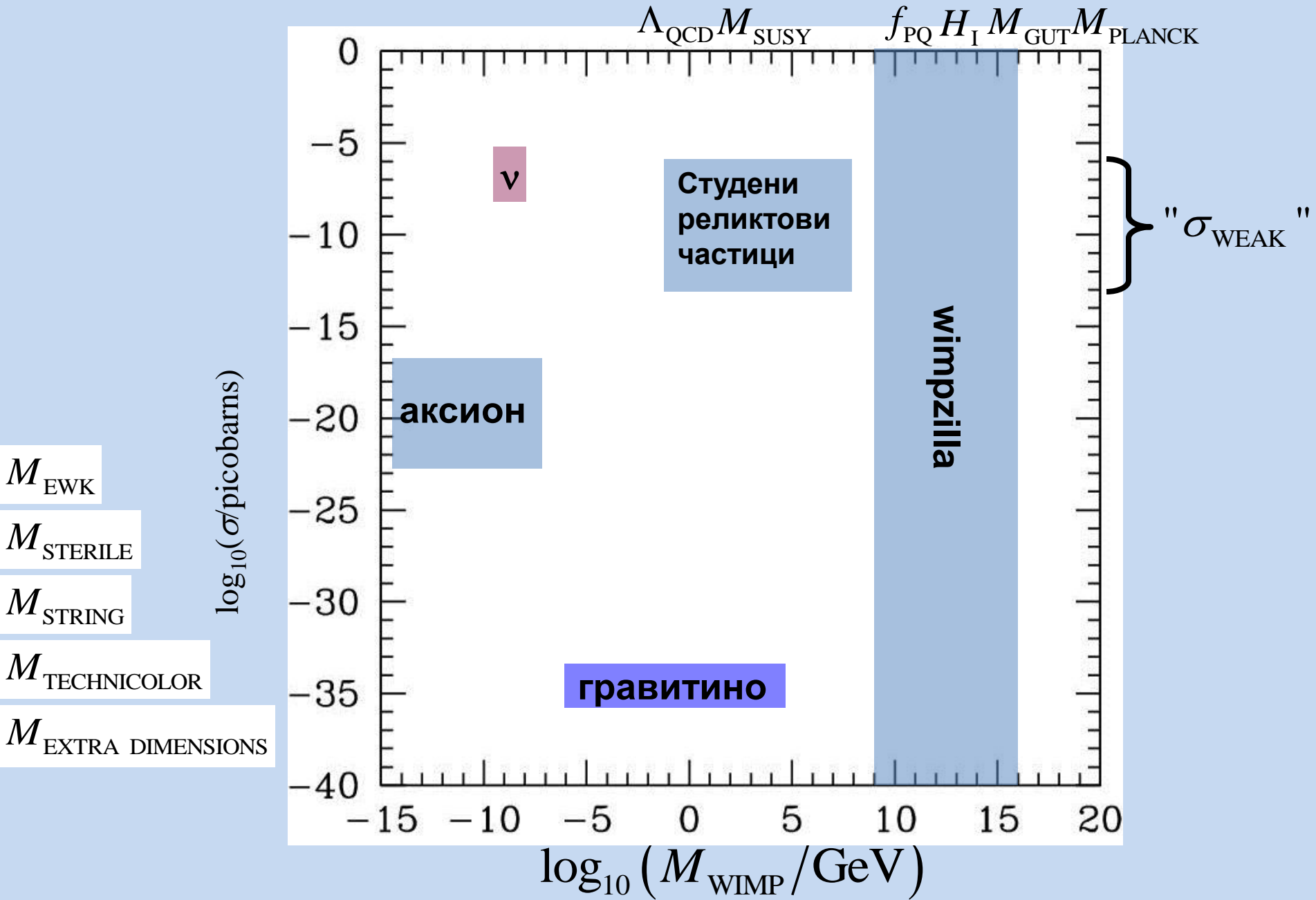
Нови неутрални частици слабо взаимодействащи с обичайните ни WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles), небариони, произведени след Големия Взрив
неутрино HDM

инертно неутрино с KeV маса WDM, аксион CDM

неутралино, гравитино, аксино

Моделите на модифицирана гравитация, макар и обясняващи динамиката на големите структури без ТВ не са в съгласие с тестовете в Слънчевата система

Кандидати за ТВ от ФЕЧ



ТЪМНА ЕНЕРГИЯ

Ускорено разширение

LSS $\Omega_M = 0.3$

Плоскостност

$$\begin{aligned}\Omega_0 &= 1 \\ \Omega_M &= 0.3 \\ 1 - 0.3 &= 0.7\end{aligned}$$

Плътност на ТЕ

$$\rho \propto 10^{-30} \text{ g cm}^{-3}$$

Е. Колб: *The unbearable lightness of nothing!*
Непоносимата лекота на нищото!

Тъмна енергия

SN I данни – ускорено разширение.

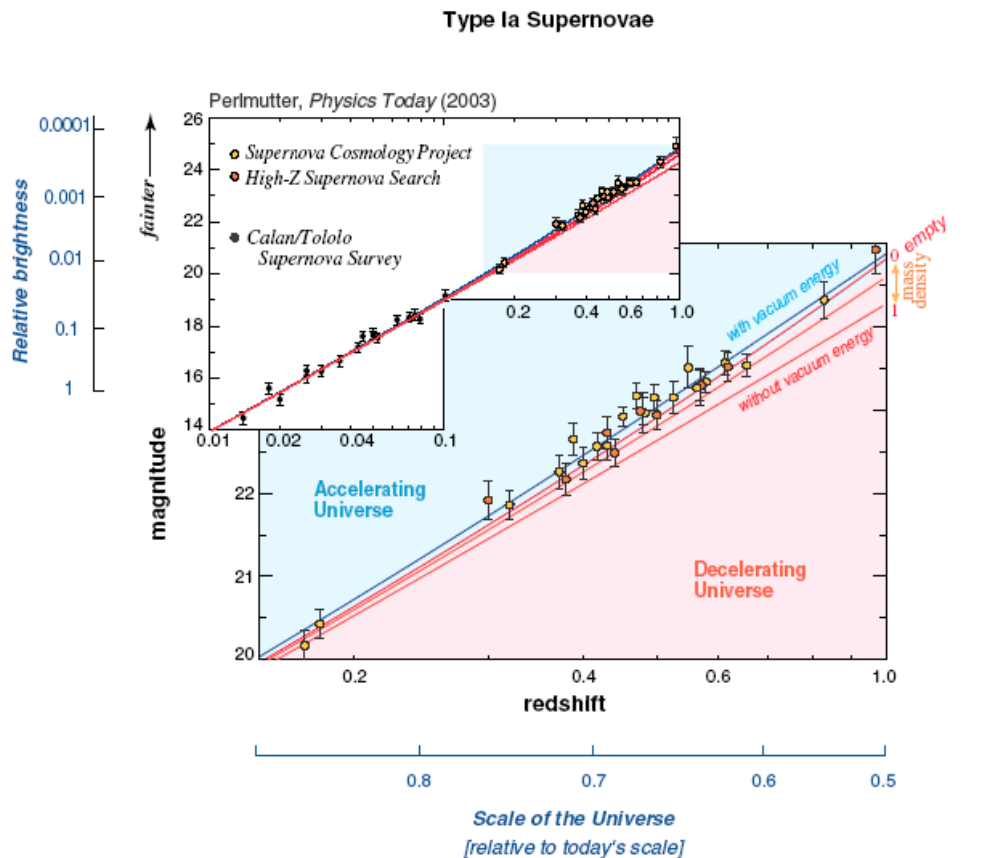
Причината за това ускорено разширение е още неясна.

Наричаме я тъмна енергия.

73% от плътността на Вселената е във форма неизвестна на съвременната физика.

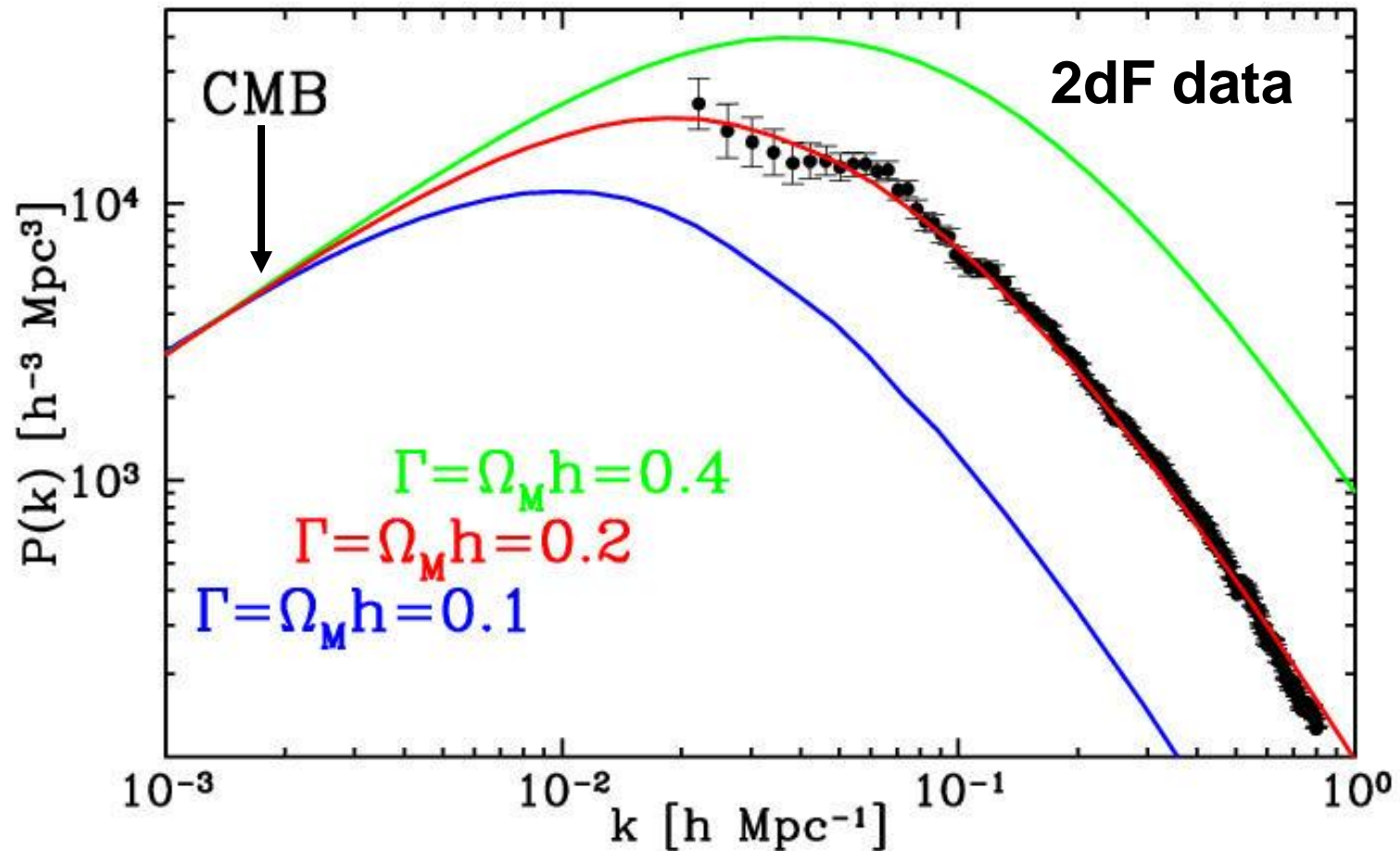
КМФ - предпочита “космологична константа”, не “квинтесценция”.

Доминиращата част от Вселената се намира в мистериозна форма на енергията, чиято природа е абсолютно неизвестна



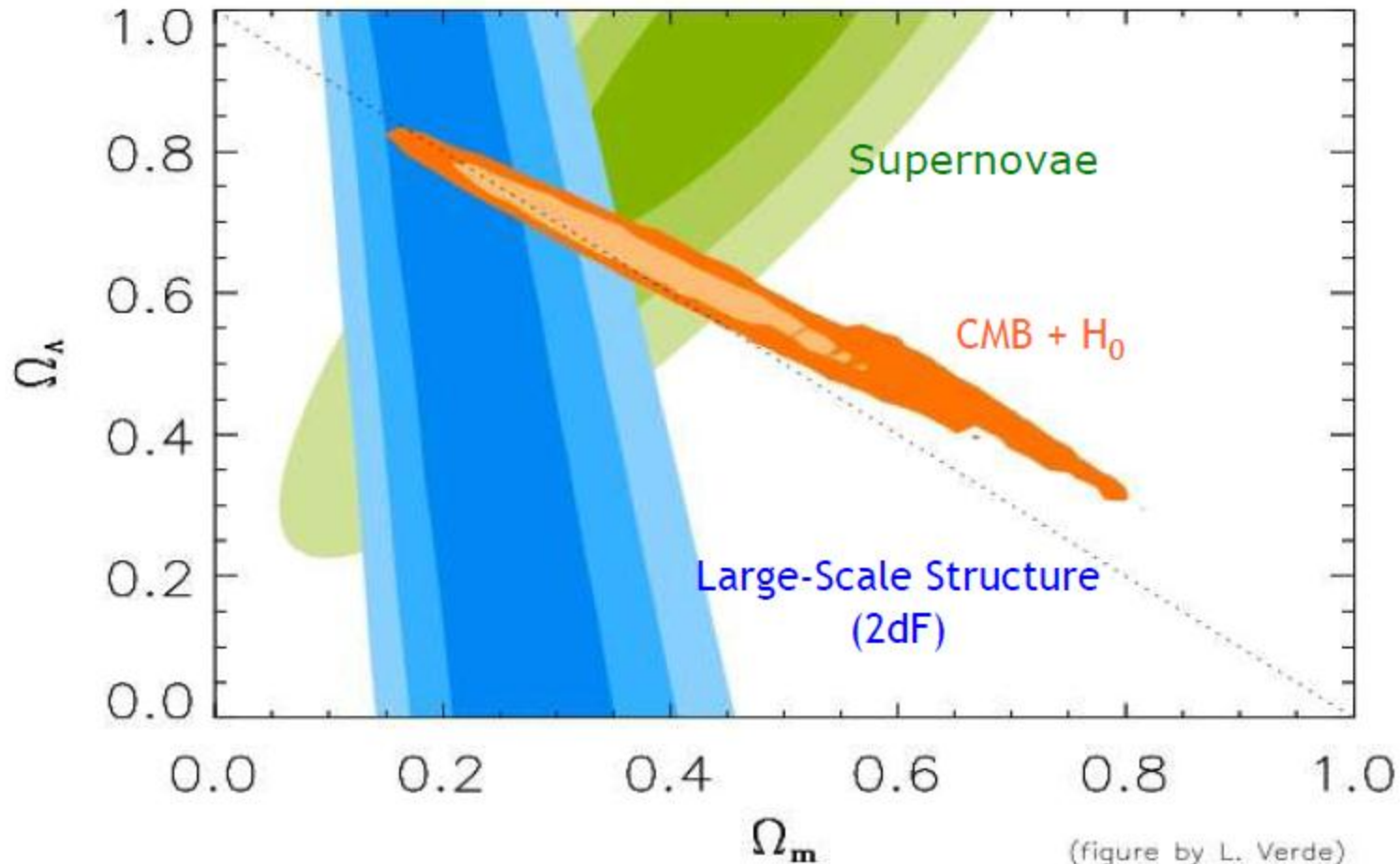
$$\Gamma \propto \Omega_M h \propto 0.25 \pm 0.05$$

$\Omega_M h$	Ω_M	h
0.25	1	0.25
0.25	0.35	0.70



Съгласие на независими данни

$$\Omega_M \sim 0.3, \Omega_\Lambda \sim 0.7$$



Природа на ТЕ

- ✓ Космологична константа $R(t) \propto e^{\sqrt{\Lambda/3}t}$

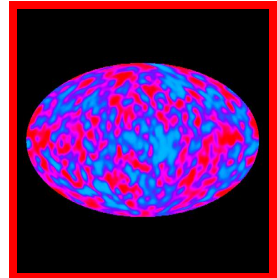
$$H^2 \equiv \left(\frac{\dot{R}}{R} \right)^2 = \frac{8\pi G_N \rho}{3} - \frac{k}{R^2} + \frac{\Lambda}{3},$$

$$\frac{\ddot{R}}{R} = \frac{\Lambda}{3} - \frac{4\pi G_N}{3} (\rho + 3p),$$

Защо пространството съдържа определено количество енергия, а не друго?

$$\rho_{\text{vac}} = E_{\text{Pl}}/L_{\text{Pl}}^3 = 10^{120} \rho_{\text{vac}}^{\text{(obs)}}$$

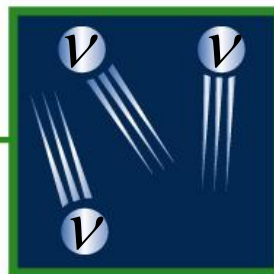
- ✓ **квинтесценция** (променяща се космологична константа резултат от еволюцията на скаларно поле)
- ✓ **Ускоряващата се Вселена всъщност указва на нов аспект на гравитационните закони – модифицирана гравитация**
- ✓ **Ефект от допълнителни пространствени размерности**



лъчение:
0.005%



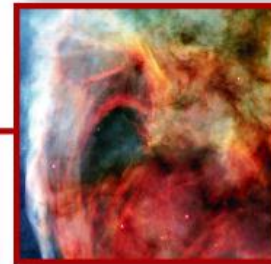
тежки елементи:
0.025%



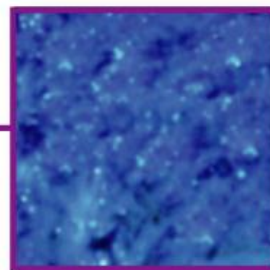
неутрино:
0.1%- 0.02%



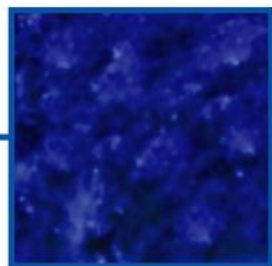
звезди:
0.5%



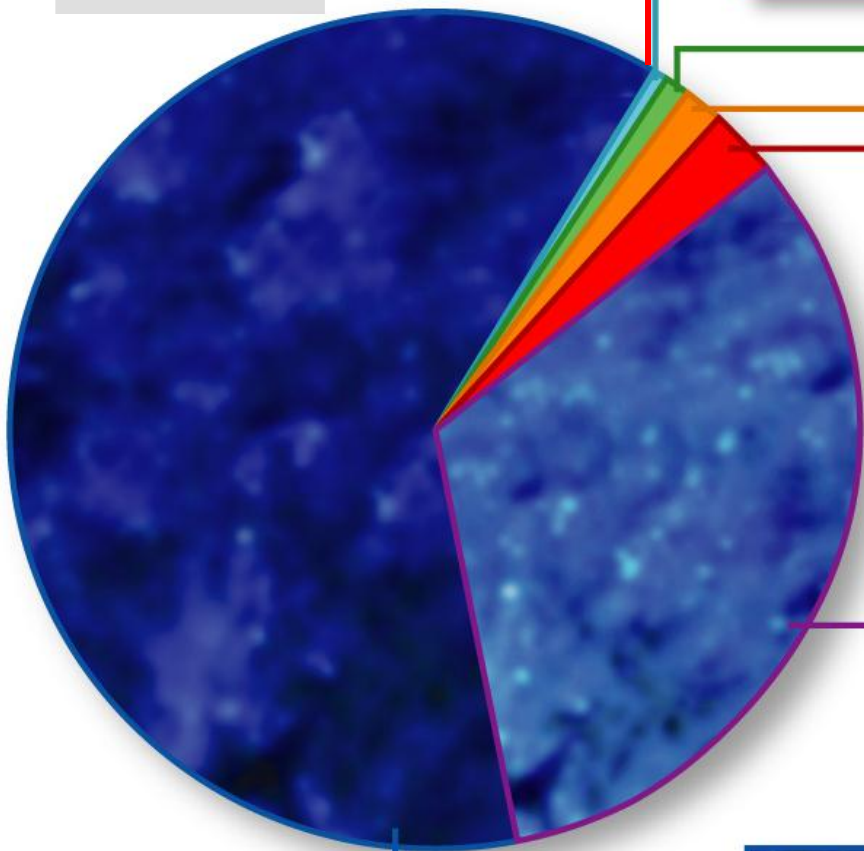
H & He:
газ 4%



студено ТВ:
22%



тъмна енергия (Λ):
73%



Наблюдателните свидетелства от различни епохи на еволюцията на Вселената: обилието на леките елементи от първите минути на Големия Взрив, КМФ от 380 000 г-ни от началото, структурите от първите милиард години предоставят допълваща се информация за характеристиките на Вселената. В частност указват на съществуването на небарионно вещество, многократно превишаващо барионната компонента и на тъмна енергия.

Наред с безпрецедентната точност при определяне на редица характеристики на Вселената, следващи от данните относно КН и КМФ и структурите във Вселената, съвременната космология се сблъсква със сериозни загадки:

Каква е природата на 96% от материята на Вселената?

Дали съществува космологична константа или поле отговорни за тъмната енергия, дали нови екзотични физични теории, като суперсиметрията например, ще предложат кандидата за тъмното вещество или тъмното вещество и енергия са сигнатури за необходимост от алтернативна гравитационна теория ?

Защо барионната компонента е незначителна - 5% от пълната плътност?

Глобална ли е наблюдаваната локално асиметрия на вещество-антивещество? Какъв е механизмът на генерация?

Защо пълната плътност е равна на критичната ?

Защо Вселената е в толкова висока степен еднородна и изотропна?

Бъдещите космични мисии и наземни наблюдения и експерименти на ускорители и колайдери да прецизират знанията за нашата Вселената и изяснят космологичните загадки - природата на ТВ и ТЕ, барионната асиметрия, лептонната асиметрия и др.

Благодаря за вниманието!



Някои научни пособия за по-детайлно изучаване на темата

Particle orientation:

The Early Universe, Kolb & Turner

Structure formation, closer to astronomy:

Cosmological Physics, Peacock

Inflation and structure formation:

Cosmological Inflation and large-Scale Structure, Liddle & Lyth

Cosmic Background Radiation:

Modern Cosmology, Dodelson

Neutrinos in cosmology

Julien Lesgourgues & Sergio Pastor

Phys.Rept.429,2006.