

Стан та перспективи встановлення природи темної енергії на основі наземних і космічних експериментів

Б. Новосядлий, В. Пелих, О. Сергієнко,
Ю. Кулініч, С. Апуневич

Астрономічна обсерваторія ЛНУ ім. І. Франка
ІППММ НАН України

Космомікрофізика, ІЯД НАНУ, 21-22 листопада 2012

1. Скалярно-польові моделі темної енергії: космологічні прояви, узгоджуваність із даними спостережень та проблема розрізнення.
2. Лінія поглинання нейтрального водню 21 см в епоху Темних Віків – як тест для природи прихованих компонент Всесвіту.
3. Модель гало формування структури на масштабах груп і скупчень галактик: функція мас та нелінійний спектр збурень густини темної і світної матерії.

1. Скалярно-польові моделі темної енергії

$$\mathcal{L}(X, U(\phi)), \quad X \equiv \frac{1}{2} \phi_{;i} \phi^{;i}$$

$$T_{ij} = \mathcal{L}_{,X} \phi_{,i} \phi_{,j} - g_{ij} \mathcal{L}$$

$$T_{ij} = (\rho + p) u_i u_j - p g_{ij}$$

$$p = \mathcal{L}$$

$$\rho = 2X \mathcal{L}_{,X} - \mathcal{L}$$

$$w \equiv \frac{p}{\rho} = \frac{\mathcal{L}}{2X \mathcal{L}_{,X} - \mathcal{L}}$$

$$c_s^2 \equiv \frac{\delta p}{\delta \rho} = \frac{p_{,X}}{\rho_{,X}} = \frac{\mathcal{L}_{,X}}{\mathcal{L}_{,X} + 2X \mathcal{L}_{,XX}}$$

Однорідний Всесвіт: динаміка розширення

$$R_{ij} - \frac{1}{2}g_{ij}R = \frac{8\pi G}{c^4} \left(T_{ij}^{(m)} + T_{ij}^{(de)} + T_{ij}^{(r)} \right),$$

$$ds^2 = g_{ij}dx^i dx^j = a^2(\eta) \left(d\eta^2 - \delta_{\alpha\beta} dx^\alpha dx^\beta \right),$$

$$H \equiv \frac{\dot{a}}{a}, \quad q \equiv -\frac{\ddot{a}}{aH^2}$$

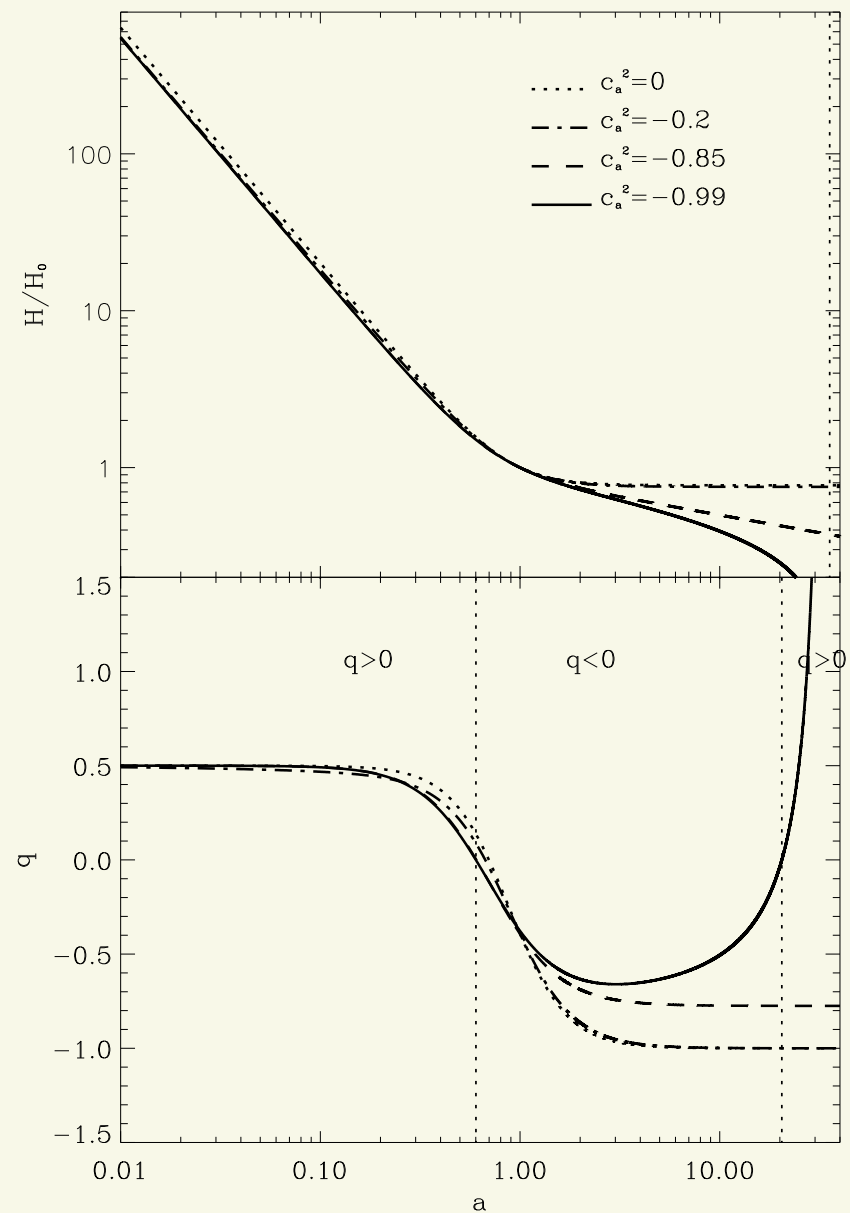
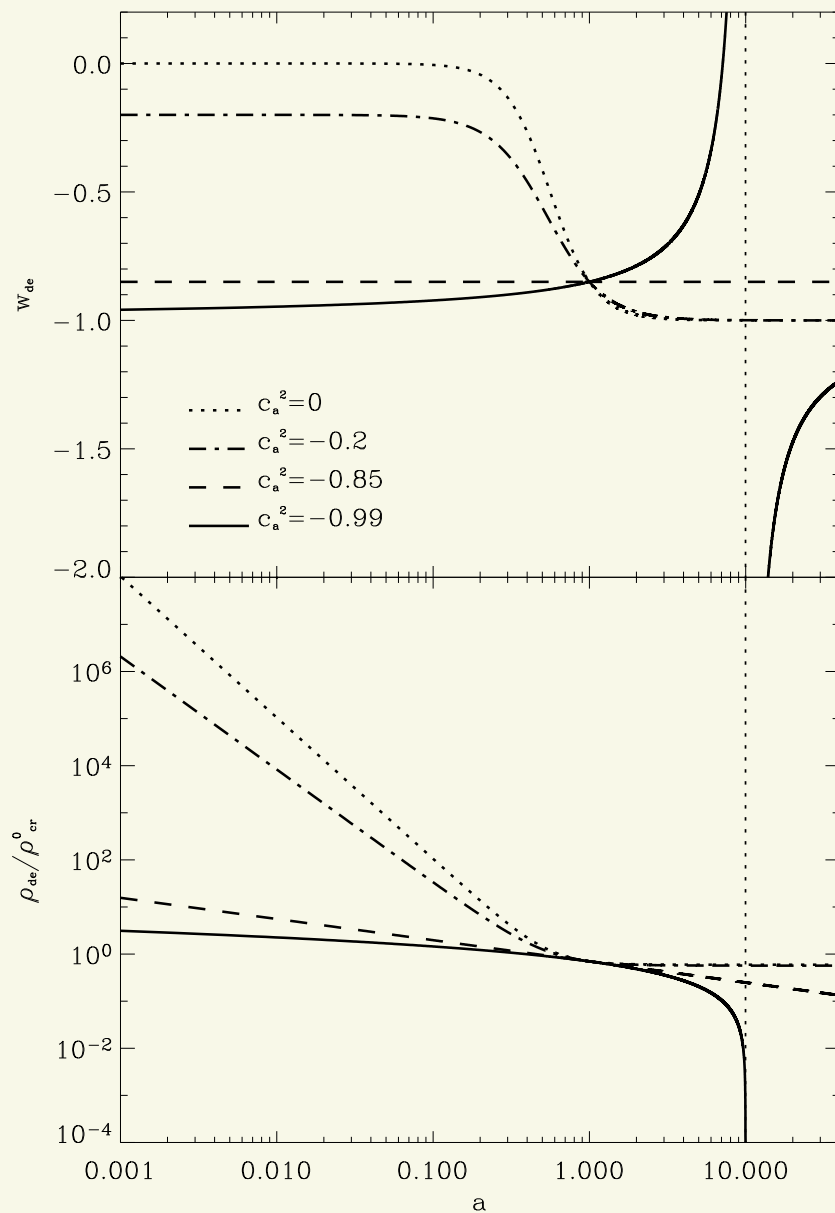
$$\frac{H^2}{H_0^2} = \Omega_m a^{-3} + \Omega_r a^{-4} + \Omega_k a^{-2} + \Omega_{de} f(a)$$

$$q = \frac{1}{2} \frac{\Omega_m a^{-3} + 2\Omega_r a^{-4} + (1 + 3w)\Omega_{de} f(a)}{\Omega_m a^{-3} + \Omega_r a^{-4} + \Omega_k a^{-2} + \Omega_{de} f(a)}$$

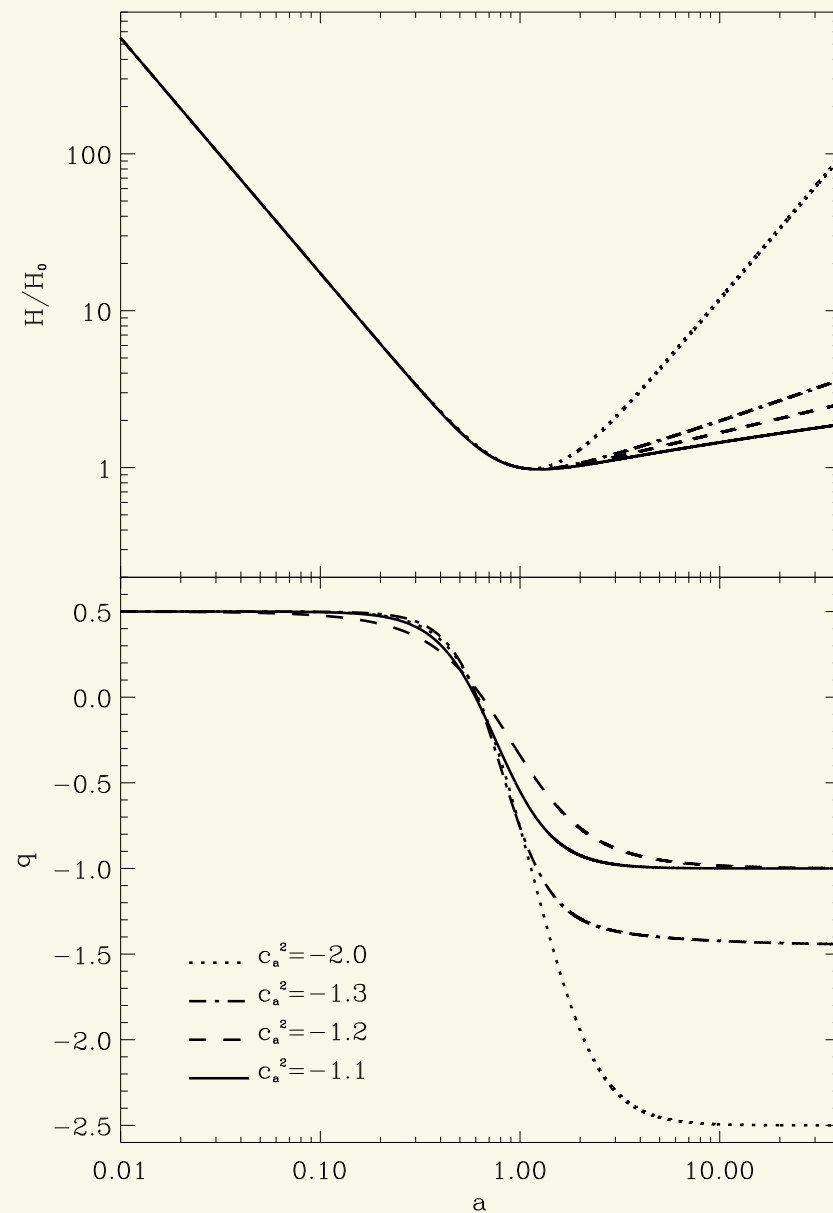
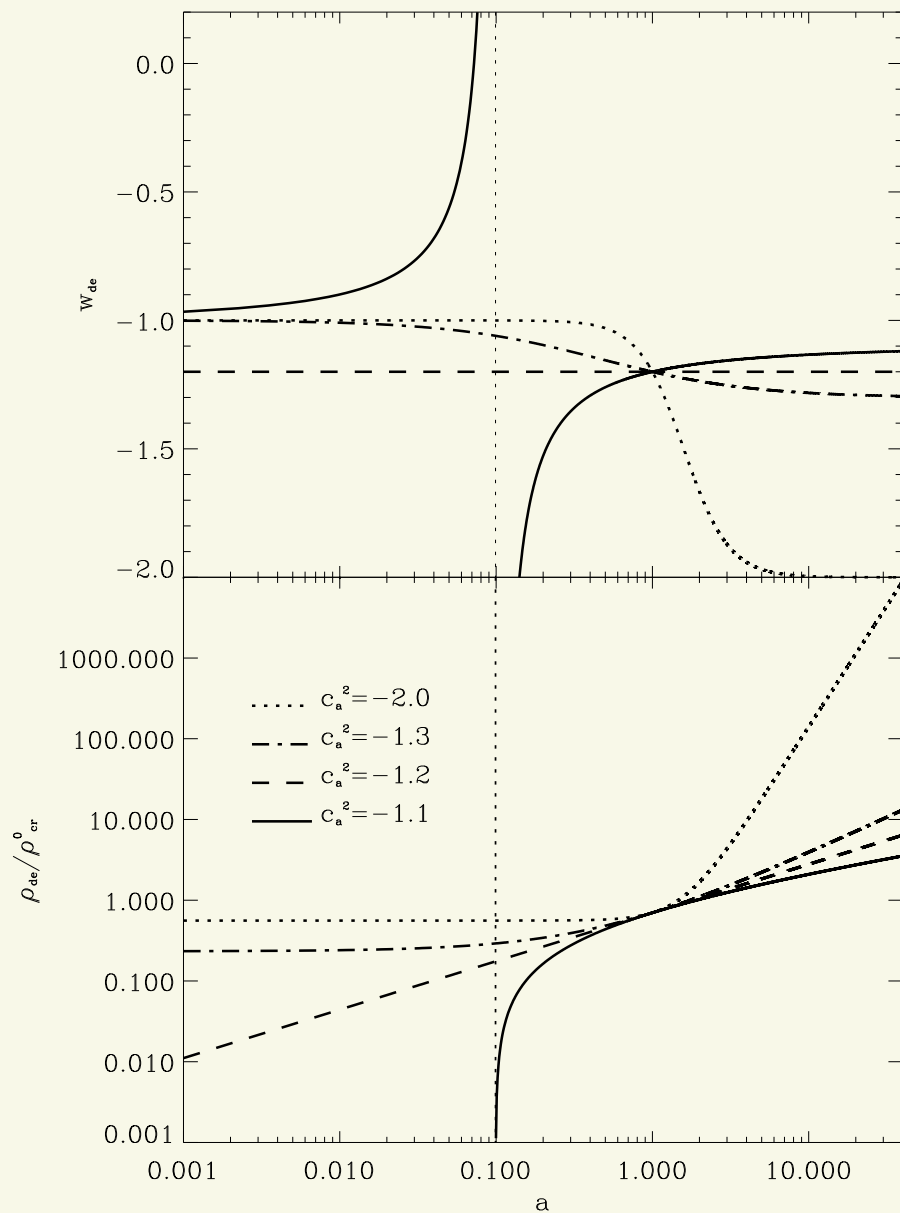
де

$$f(a) = \frac{(1 + w_0)a^{-3(1+c_a^2)} + c_a^2 - w_0}{1 + c_a^2}, \quad c_a^2 \equiv \frac{\dot{p}}{\dot{\rho}}$$

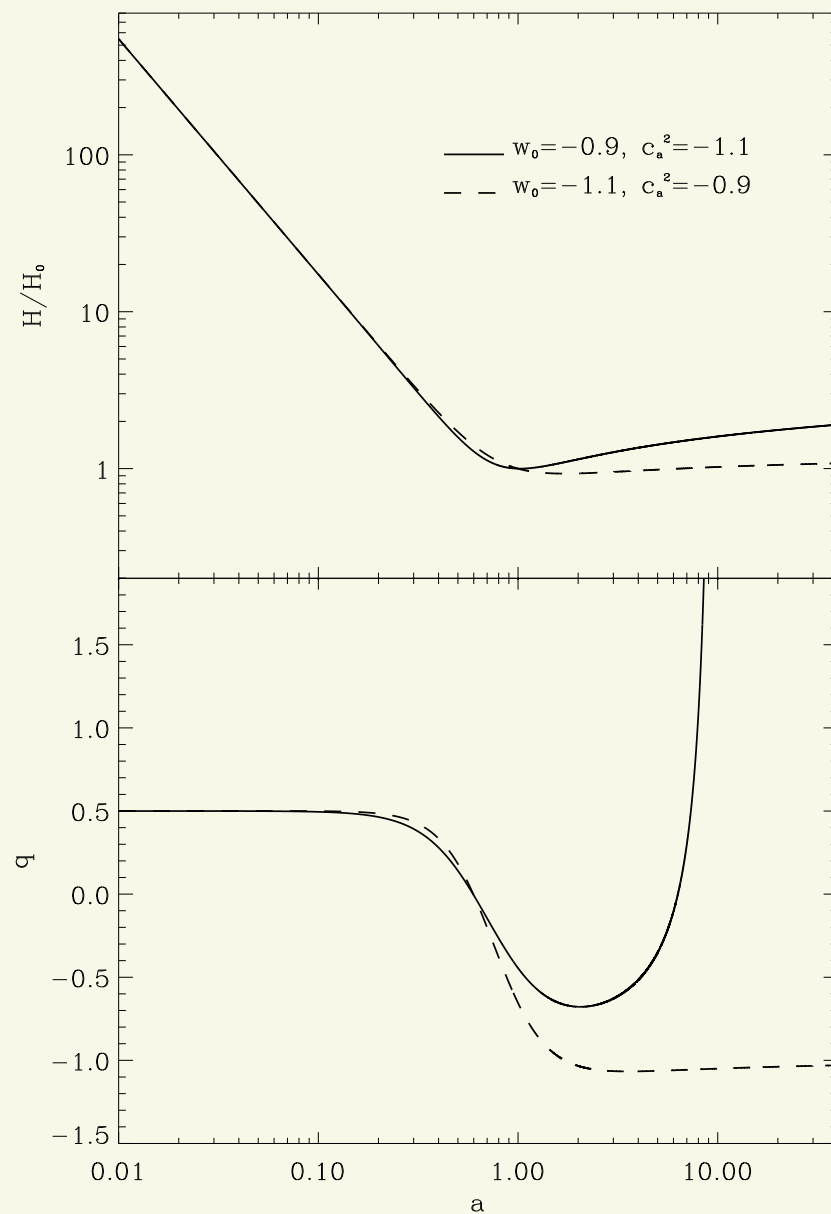
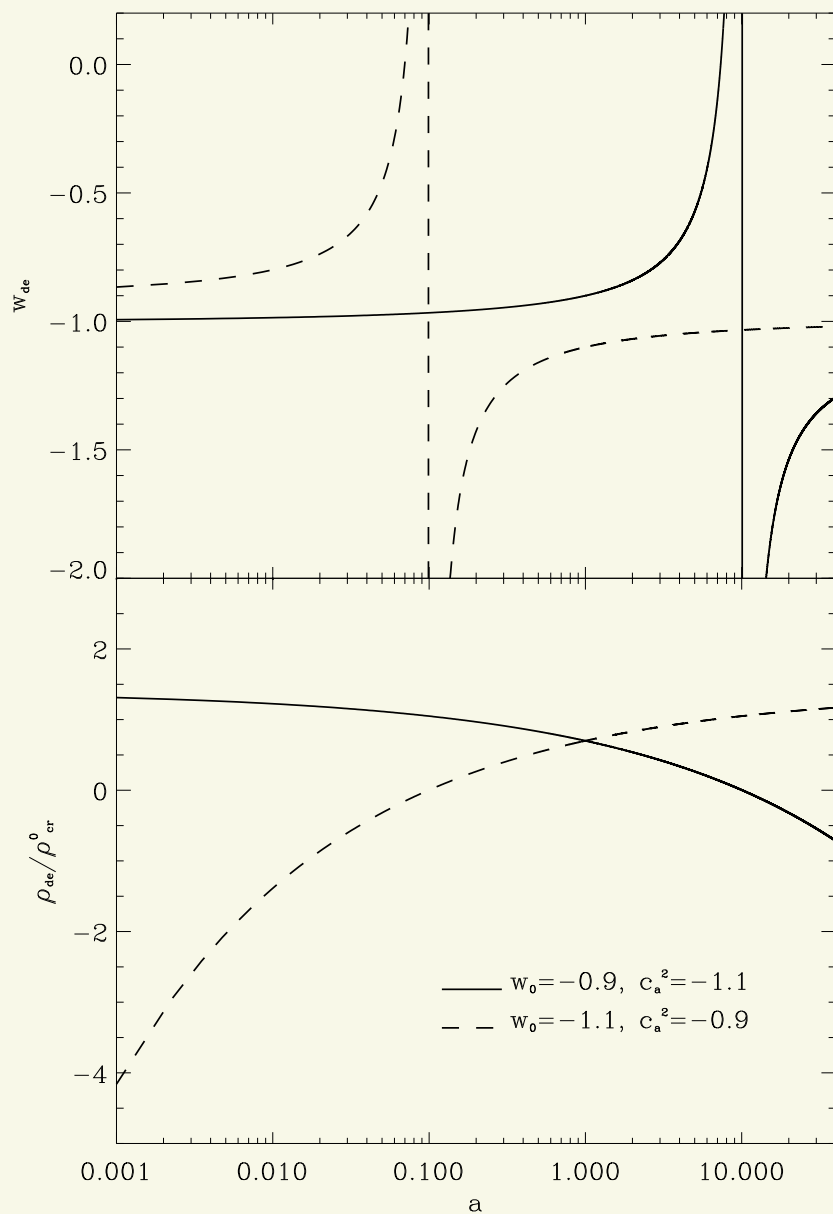
Динаміка розширення Всесвіту (квінтесенційне СП)



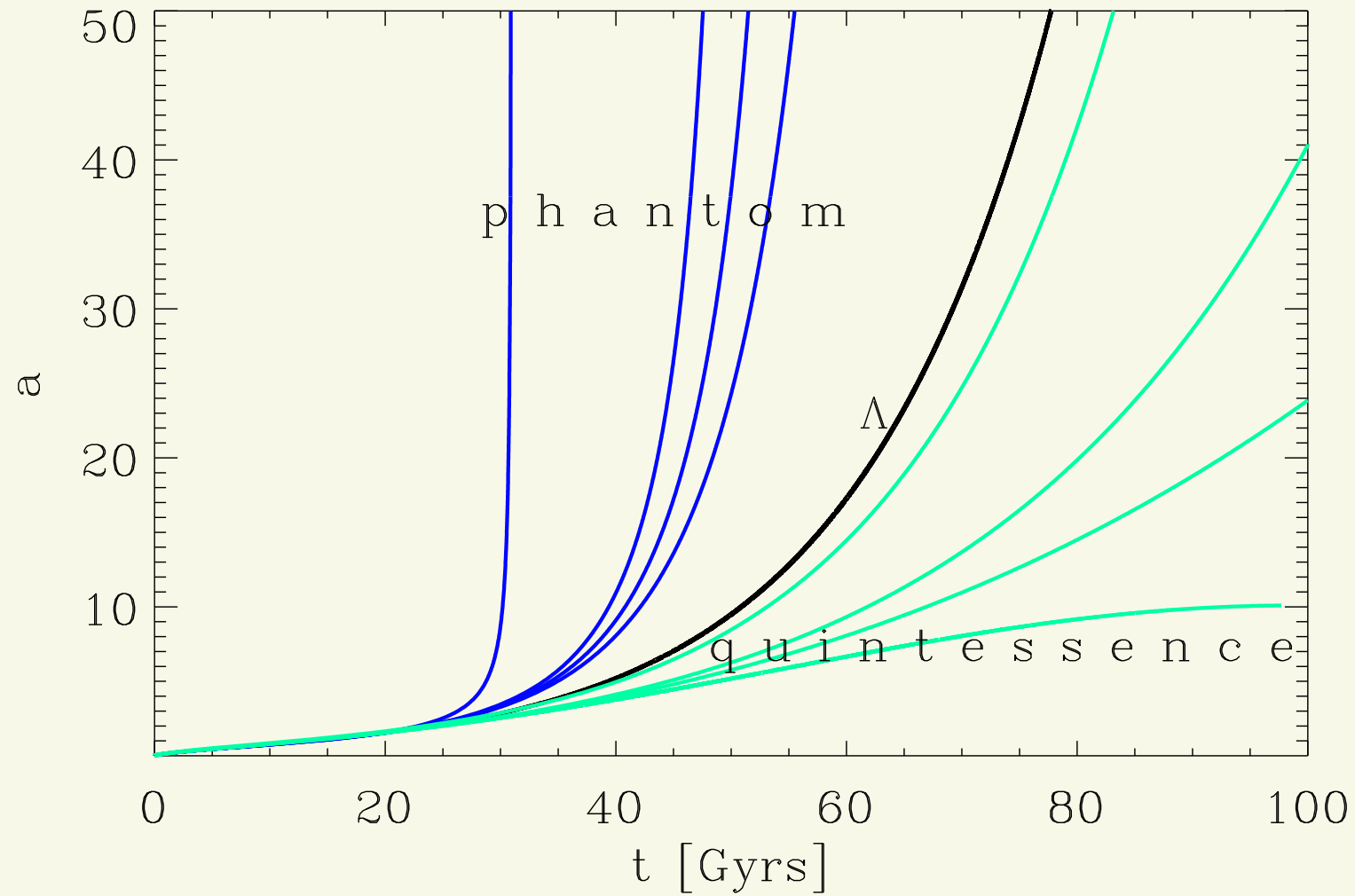
Динаміка розширення Всесвіту (фантомне СП)



Динаміка розширення Всесвіту (q-ph СП, ph-q СП)



Майбутнє Всесвіту визначає TE



Збурення метрики, густини і швидкості

$$ds^2 = (\bar{g}_{ik} + \delta g_{ik}) dx^i dx^k = a^2(\eta) \left[(1 + 2\Psi) d\eta^2 - \gamma_{\alpha\beta} (1 + 2\Phi) dx^\alpha dx^\beta \right]$$

$$R_{ij} = \bar{R}_{ij} + \delta R_{ij}$$

$$T_{ij} = \bar{T}_{ij} + \delta T_{ij}$$

$$\rho = \bar{\rho}(1 + \delta), \quad p = \bar{p}(1 + \pi), \quad u^i = \bar{u}^i + \delta u^i,$$

$$\bar{u}^0 = a^{-1}, \quad \bar{u}^\alpha = 0, \quad \delta u^0 = -a^{-1}\Psi, \quad \delta u^\alpha = a^{-1}V^\alpha$$

$$\phi = \bar{\phi} + \delta\phi, \quad \xi = \bar{\xi} + \delta\xi$$

Рівняння еволюції збурень

$$\delta T_{k;i}^{i(de)} = 0:$$

$$\dot{\delta}^{(de)} + 3(c_a^2 - w)aH\delta^{(de)} + k(1+w) \left[k + 9\frac{\dot{a}^2}{a^2} \frac{c_s^2 - c_a^2}{k} \right] V^{(de)} + 3(1+w)\dot{\Phi} = 0$$

$$\dot{V}^{(de)} + aH(1 - 3c_a^2)V^{(de)} - \frac{c_s^2 k}{1+w}\delta^{(de)} - k\Psi = 0$$

$$\delta T_{k;i}^{i(dm)} = 0:$$

$$\dot{\delta}^{(dm)} + kV^{(dm)} + 3\dot{\Phi} = 0$$

$$\dot{V}^{(dm)} + aHV^{(dm)} - k\Psi = 0$$

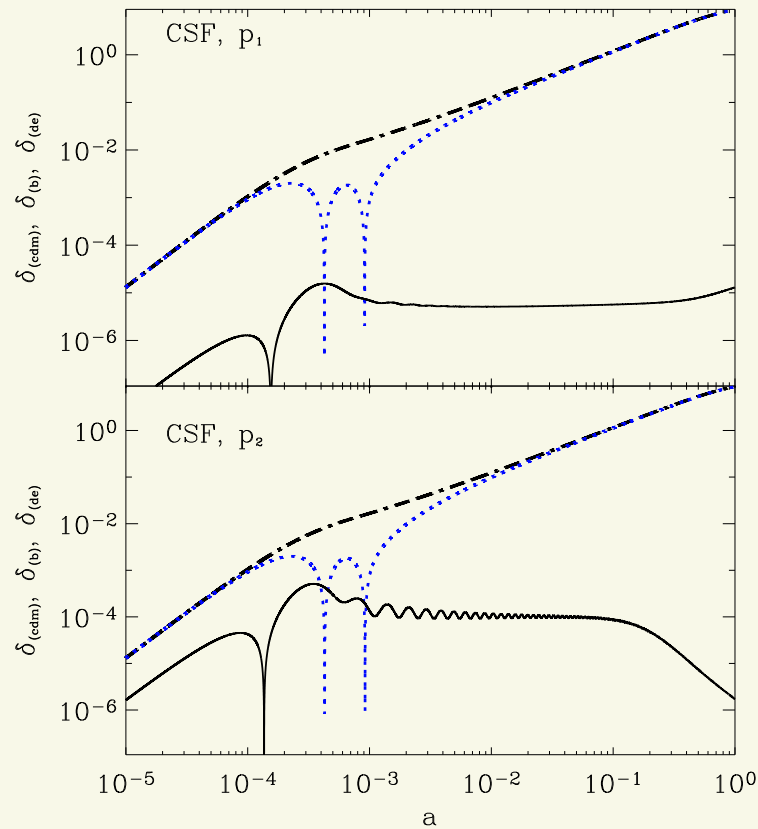
$$\delta R_i^k - \frac{1}{2}\delta_k^i \delta R = 4\pi G \delta T_k^i:$$

$$k^2\Phi + 3\frac{\dot{a}}{a} \left(\dot{\Phi} - \frac{\dot{a}}{a}\Psi \right) = 4\pi G a^2 \sum \rho_{(i)} \delta^{(i)}$$

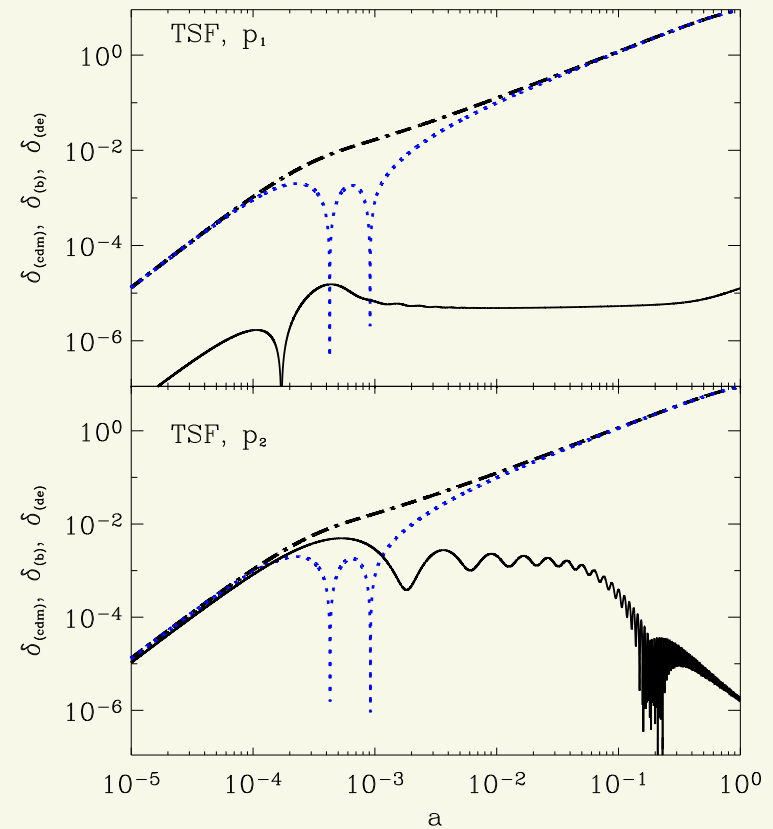
$$k \left(\frac{\dot{a}}{a}\Psi - \dot{\Phi} \right) = 4\pi G a^2 \sum (\rho + p)_{(i)} V^{(i)}$$

Збурення густини темної енергії, темної матерії та баріонної речовини ($k = 0.1 \text{ Mpc}^{-1}$) (CAMB)

КСП: $\mathcal{L} = X - U(\phi)$



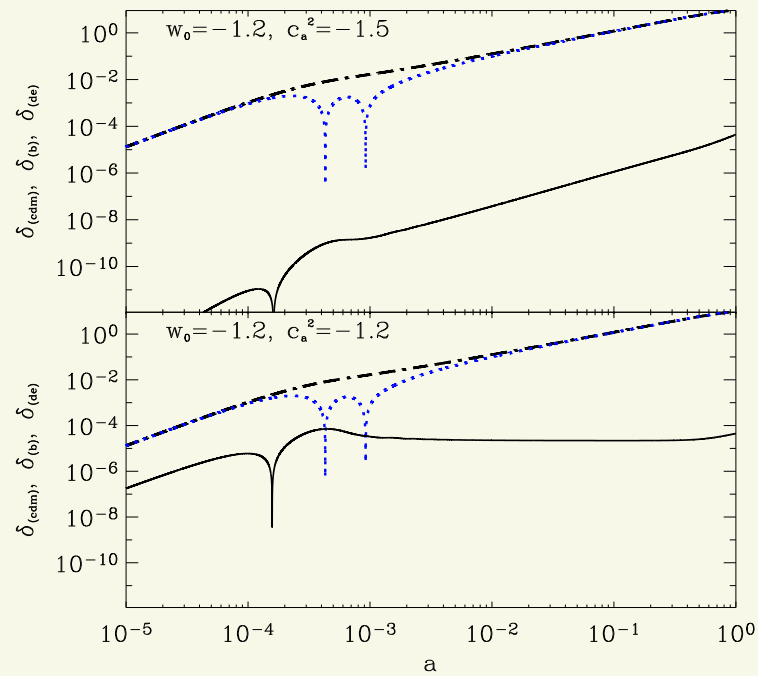
ТСП: $\mathcal{L} = -U(\phi)\sqrt{1 - 2X}$



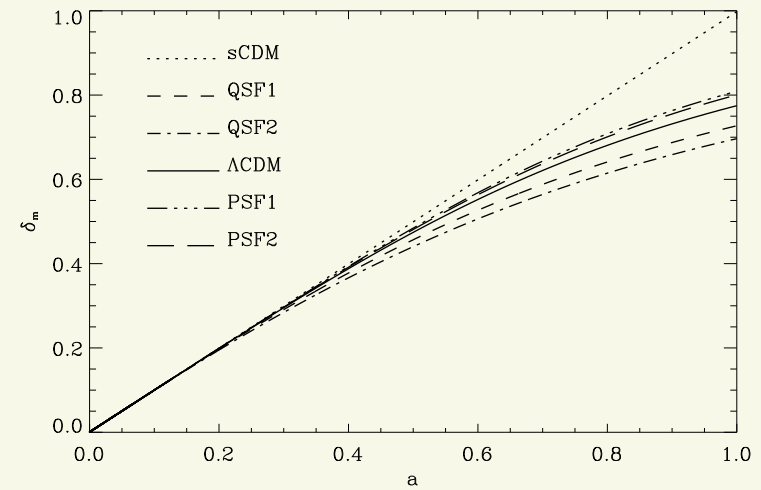
$$\Omega_{de} = 0.7, \quad \Omega_{cdm} = 0.25, \quad \Omega_b = 0.05, \quad \Omega_r = 2.5 \cdot 10^{-5}$$

Збурення густини темної енергії, темної матерії та баріонної речовини ($k = 0.1 \text{ Mpc}^{-1}$) (CAMB)

ФСП: $\mathcal{L} = -X - U(\phi)$

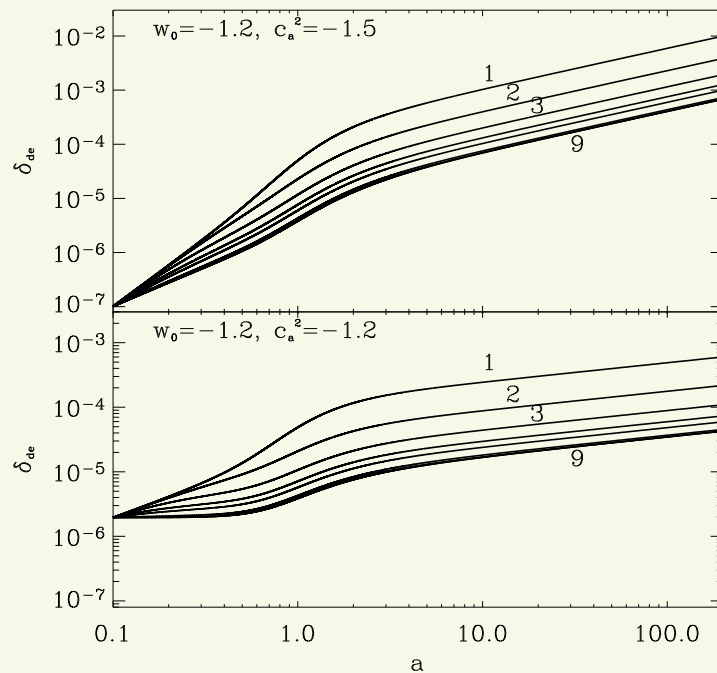


Збурення густини ТМ

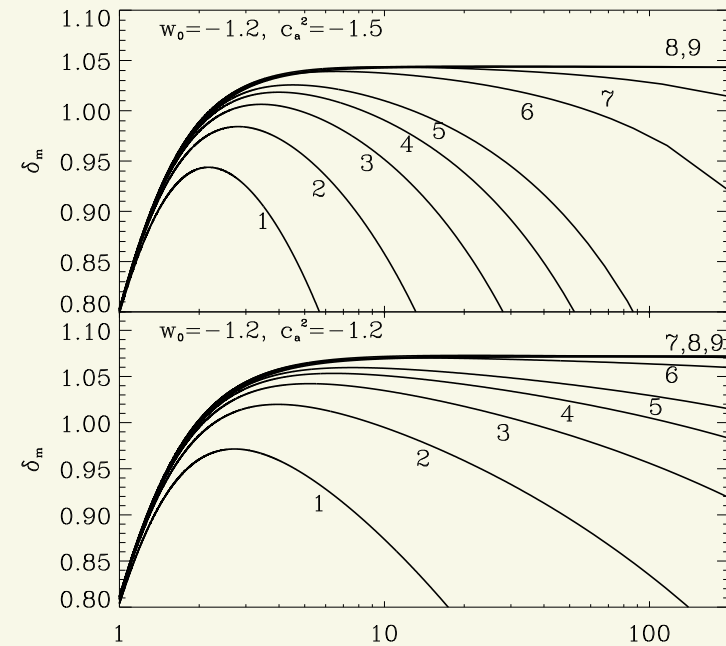


Майбутня еволюція збурень густини темної енергії і темної матерії (CAMB)

Темна енергія



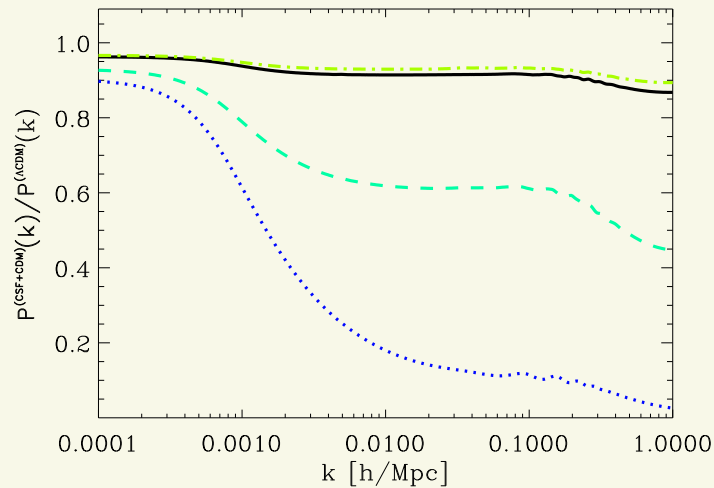
Темна матерія



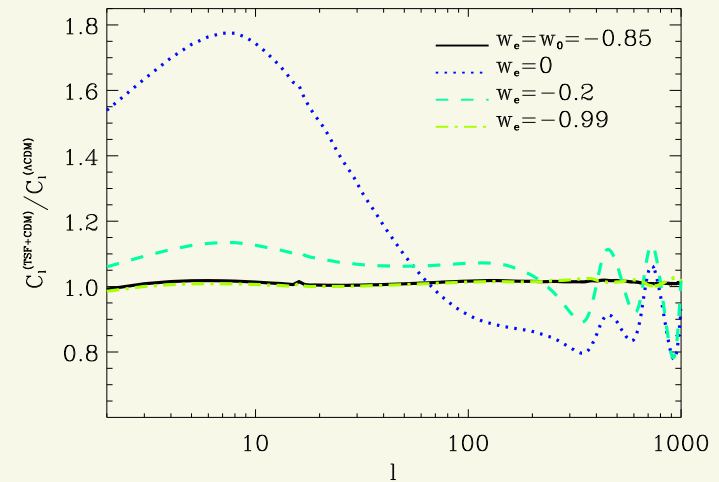
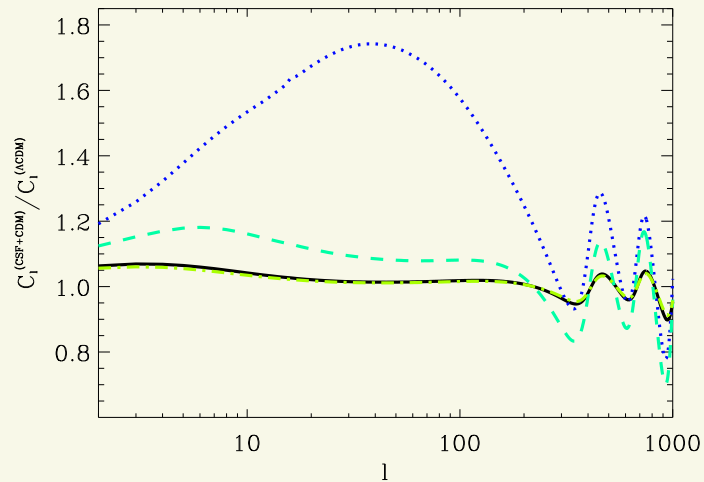
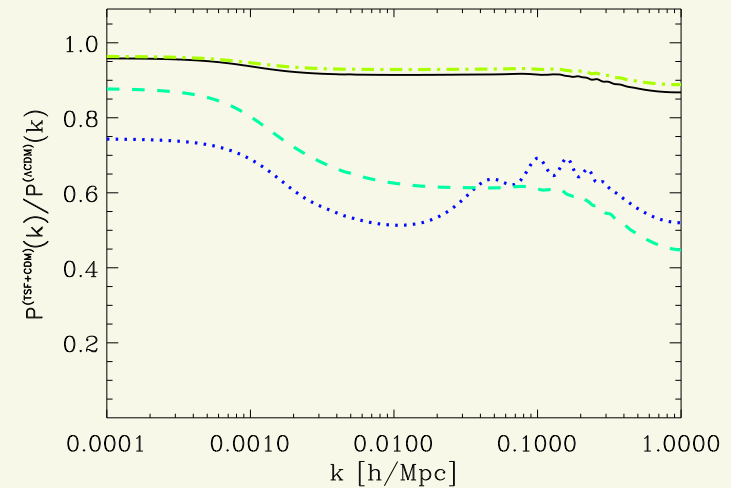
Novosyadlyj B., Sergijenko O., Durrer R., Pelykh V. Phys.Rev.D 86, 083008 (2012)

“Сліди” темної енергії у великомасштабній структурі Всесвіту

Класичне СП



Тахіонне СП



Novosyadlyj B., Sergijenko O., Apunevych C., Pelykh V. Phys. Rev. D 82, 103008 (2010)

Спостережувані дані і метод визначення космологічних параметрів

Спостережувані дані

WMAP7	Jarosik et al. (2010)
Measurements of H_0 by HST	Riess et al. (2009)
BBN	Steigman et al. (2007)
BAO	Percival et al. (2010)
SN SDSS SALT2 compilation	Kessler et al. (2009)
SN SDSS MLCS2 compilation	Kessler et al. (2009)

Метод

Markov Chain Monte Carlo	CosmoMC; Lewis & Bridle, (2002)
--------------------------	---------------------------------

Теорія і спостереження:

$$(m - M) = 5 \log d_L + 25 + \alpha(s - 1) - \beta\mathcal{C},$$
$$d_L = \frac{c(1+z)}{H_0} \int_0^z \frac{dz'}{\sqrt{\Omega_m(1+z')^3 + \Omega_{de}f(\frac{1}{1+z'})}}.$$

1) Spectral Adaptive Light Curve Template: **SALT2**

Guy J. et al. (24 coauthors) (A&A, 2007, 466, 11)

2) Multicolor Light Curve Shape: **MLCS2k2**:

Jha, Riess & Kirshner (ApJ, 2007, 659, 122)

$$R(z) \equiv \frac{r_s(z_{drag})}{D_V(z)}, \quad P(k) \equiv \langle \delta(k) \delta^*(k) \rangle = A_s k^{n_s} T^2(k; \Omega_i, w_0, c_a^2)$$

$$\frac{\ell(\ell+1)}{2\pi} C_\ell^{TT} = \langle (\Delta T)^2 \rangle_{\theta \approx \pi/\ell}, \quad \frac{(\ell+1)}{2\pi} C_\ell^{TE} = \langle \Delta T \cdot E \rangle_{\theta \approx \pi/\ell}$$

Теорія і спостереження:

Функція правдоподібності:

$$L(\mathbf{x}; \theta_k) = \exp \left(-\frac{1}{2} (x_i - x_i^{th}) C_{ij} (x_j - x_j^{th}) \right) \approx \exp \left(-\frac{1}{2} \sum_i \frac{(x_i - x_i^{th})^2}{\sigma_i^2} \right)$$

Апостеріорна функція:

$$P(\theta_k; \mathbf{x}) = \frac{L(\mathbf{x}; \theta_k) p(\theta_k)}{g(\mathbf{x})}$$

Параметри:

$$\theta_k : \Omega_{de}, w, c_a^2, \Omega_b, \Omega_{cdm}, H_0, A_s, n_s, \tau_{rei}$$

Найбільш оптимальні параметри моделей з квінтесенційним (**q**) і фантомним (**p**) скалярним полем

Набір даних 1: **WMAP7+HST+BBN+BAO+SN SDSS (SALT2)**

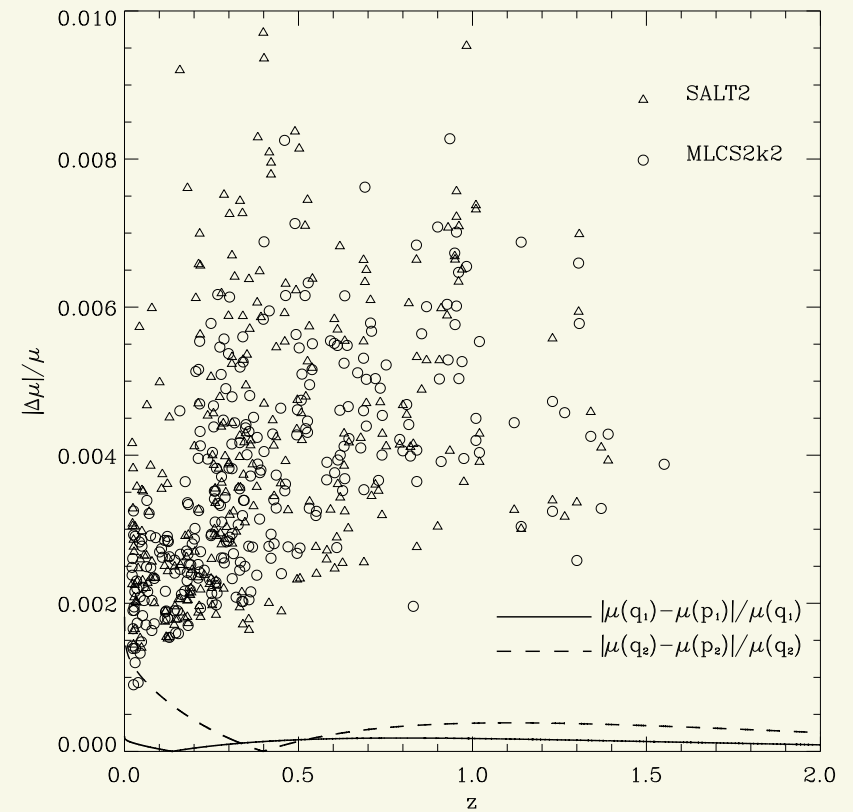
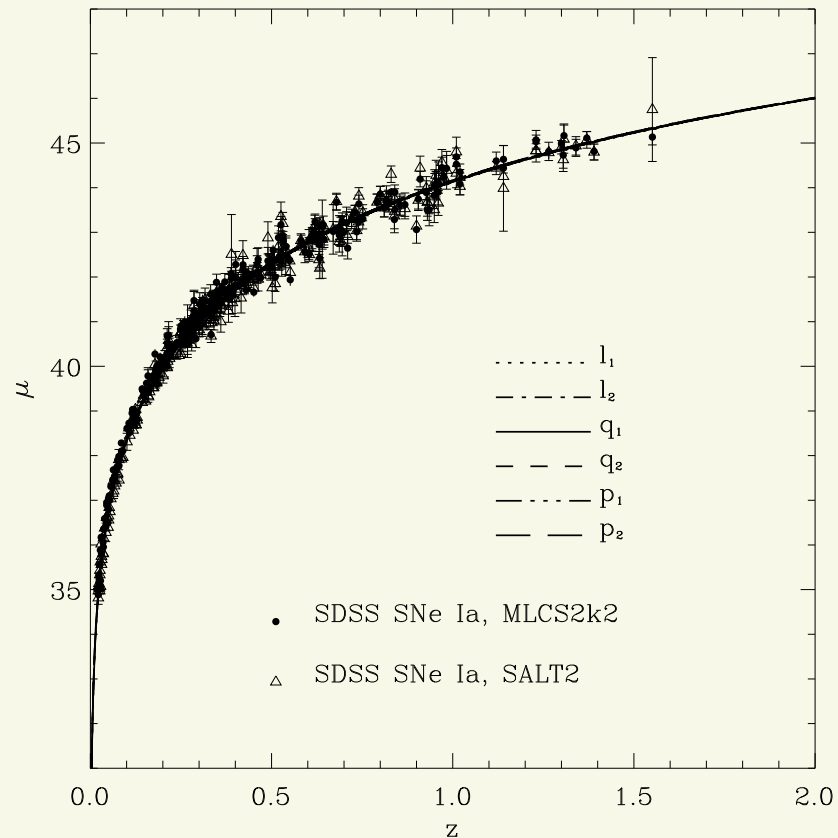
Набір даних 2: **WMAP7+HST+BBN+BAO+SN SDSS (MLCS2k2)**

Parameters	q ₁	p ₁	q ₂	p ₂
Ω_{de}	$0.73^{+0.03}_{-0.05}$	$0.72^{+0.04}_{-0.04}$	$0.70^{+0.04}_{-0.05}$	$0.69^{+0.05}_{-0.04}$
w_0	$-0.996^{+0.16}_{-0.004}$	$-1.043^{+0.043}_{-0.24}$	$-0.83^{+0.22}_{-0.17}$	$-1.002^{+0.002}_{-0.14}$
c_a^2	$-0.022^{+0.022}_{-0.978}$	$-1.12^{+0.12}_{-0.50}$	$-0.88^{+0.88}_{-0.12}$	$-1.19^{+0.19}_{-0.42}$
$10\omega_b$	$0.226^{+0.015}_{-0.015}$	$0.223^{+0.016}_{-0.013}$	$0.226^{+0.016}_{-0.014}$	$0.223^{+0.014}_{-0.013}$
ω_{cdm}	$0.110^{+0.011}_{-0.013}$	$0.115^{+0.011}_{-0.010}$	$0.108^{+0.016}_{-0.012}$	$0.119^{+0.009}_{-0.010}$
h	$0.702^{+0.035}_{-0.043}$	$0.704^{+0.04}_{-0.032}$	$0.663^{+0.043}_{-0.037}$	$0.678^{+0.042}_{-0.029}$
n_s	$0.97^{+0.04}_{-0.04}$	$0.96^{+0.04}_{-0.03}$	$0.97^{+0.04}_{-0.03}$	$0.96^{+0.03}_{-0.04}$
$\log(10^{10} A_s)$	$3.09^{+0.10}_{-0.10}$	$3.09^{+0.09}_{-0.09}$	$3.07^{+0.11}_{-0.08}$	$3.11^{+0.08}_{-0.11}$
τ_{rei}	$0.091^{+0.040}_{-0.041}$	$0.085^{+0.041}_{-0.031}$	$0.089^{+0.044}_{-0.037}$	$0.086^{+0.036}_{-0.038}$
$-\log L$	3865.01	3864.86	3857.21	3859.30

Novosyadlyj B., Sergijenko O., Durrer R., Pelykh V. Phys.Rev.D 86, 083008 (2012)

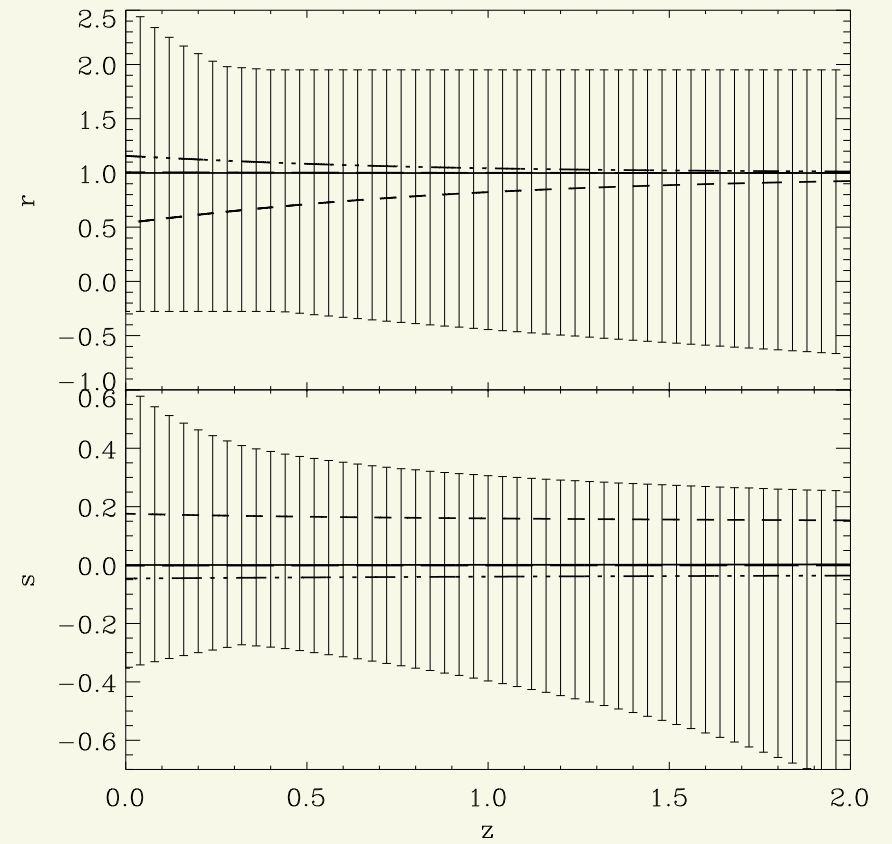
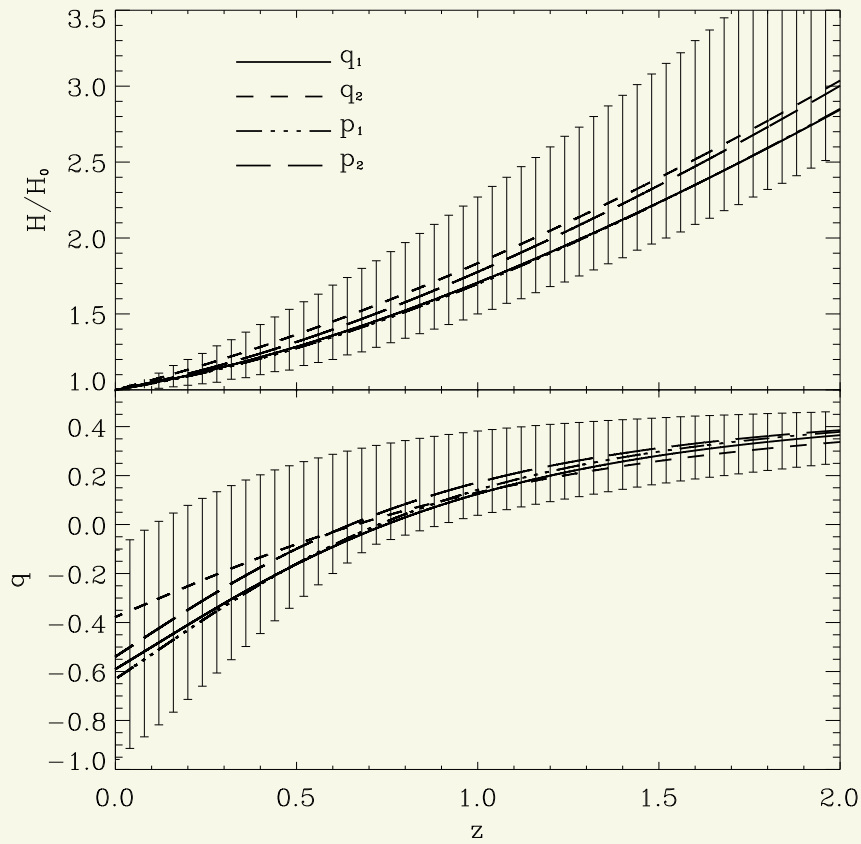
Розрізняюваність моделей ТЕ за Надновими Ia

$$\mu \equiv m - M = 5 \log d_L + 25, \quad d_L = (1 + z) \int_0^z \frac{dz'}{H(z')}$$



Розрізняюваність моделей ТЕ за $H(z)$, dH/dz і d^2H/dz^2

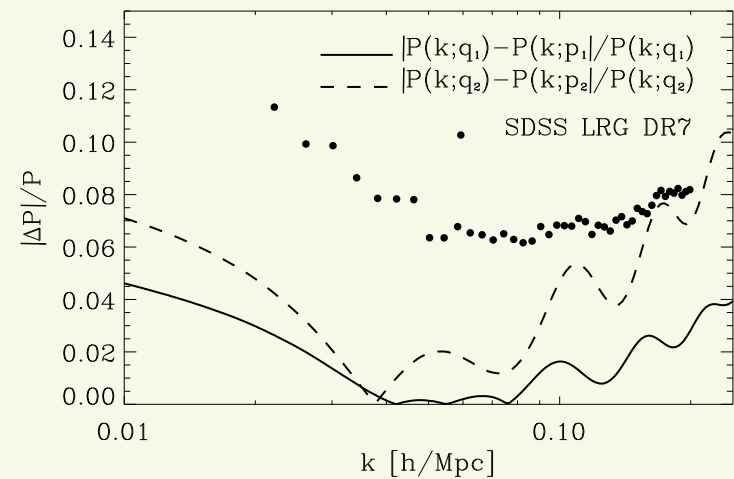
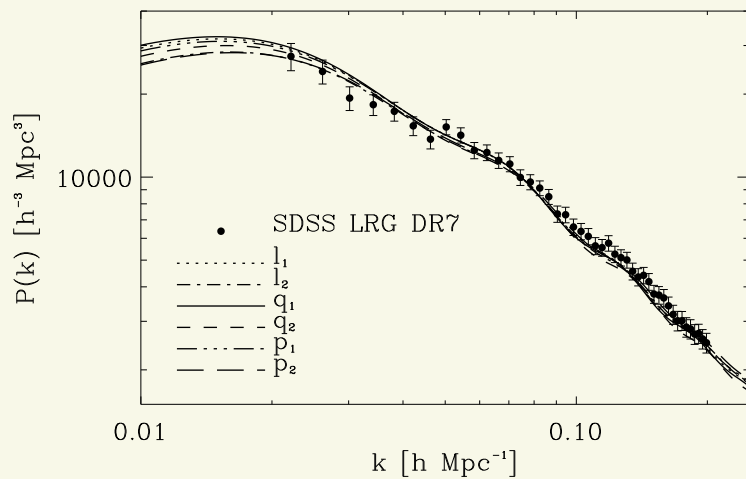
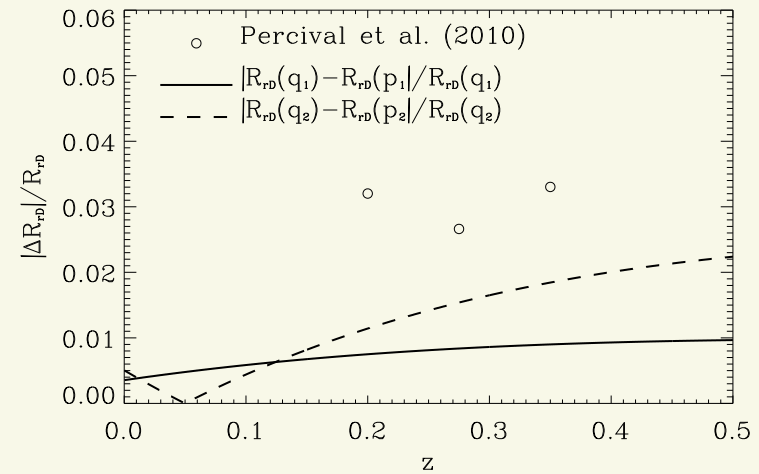
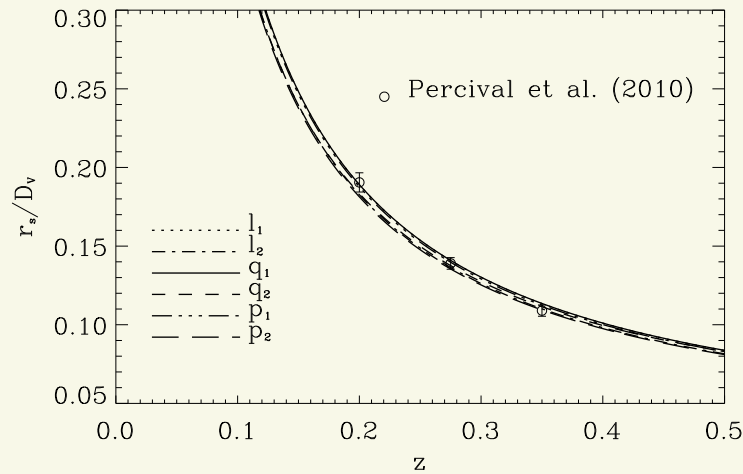
$$q(z) = (z + 1) \frac{H'}{H} - 1, \quad r(z) = q^2(z) + (z + 1)^2 \frac{H''}{H}, \quad s \equiv \frac{r - 1}{3(q - 1/2)}$$



$$r = 1 + 4.5(1 + w_{de})c_a^2\Omega_{de}f(a), \quad s = (1 + w_{de})c_a^2/w_{de},$$

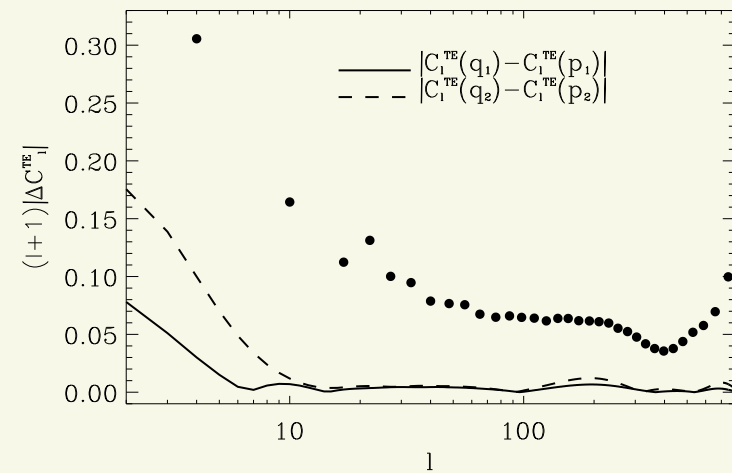
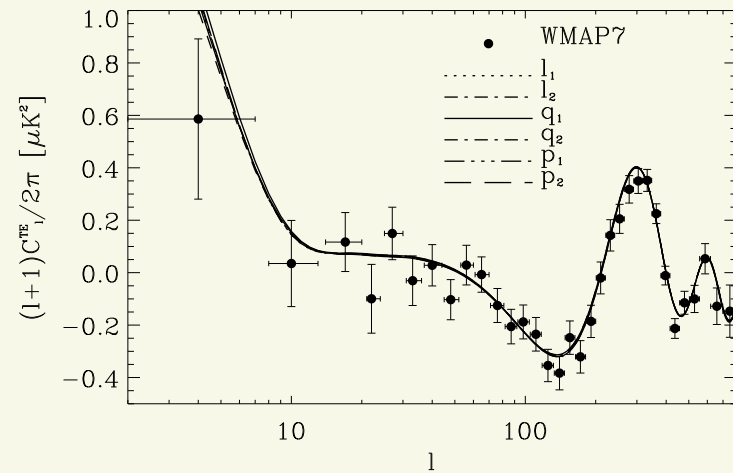
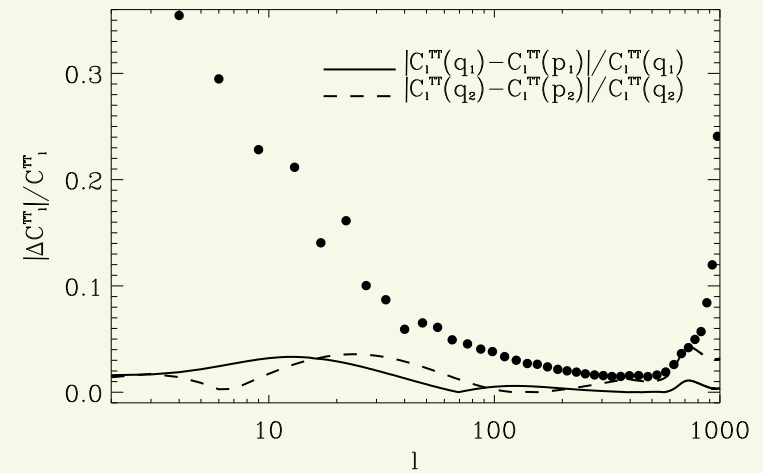
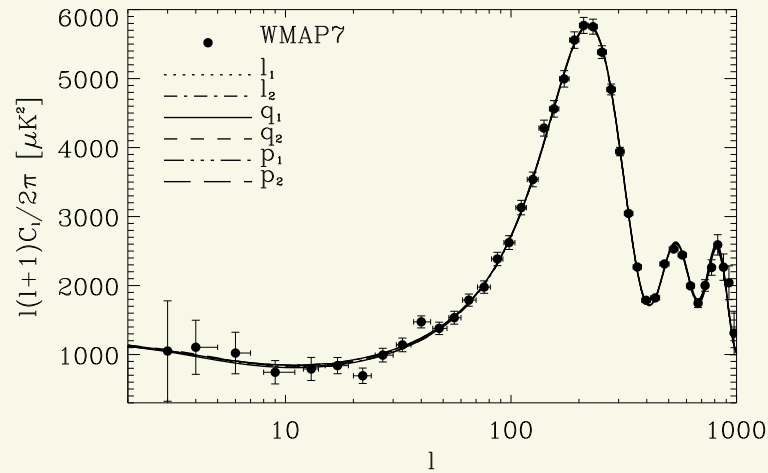
Розрізняюваність моделей ТЕ за великомасштабною структурою

$$D_V(z) = \left[(1+z)^2 d_A^2(z) \frac{cz}{H(z)} \right]^{1/3}, \quad \mathcal{P}_m(k) \equiv \langle \delta_m(k) \delta_m^*(k) \rangle = A k^{n_s} T_m^2(k)$$



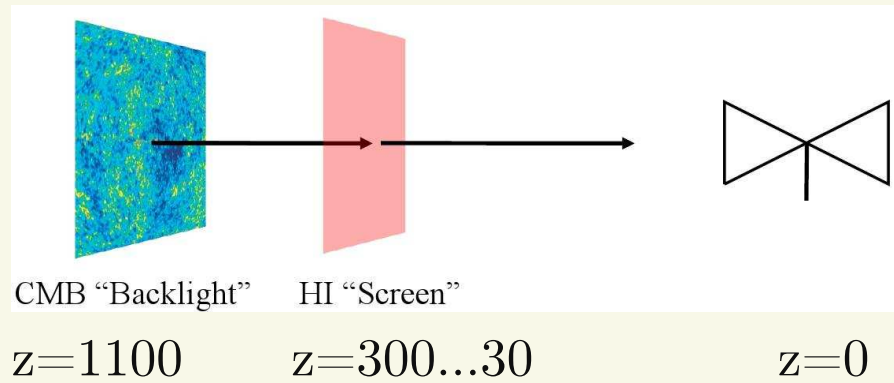
Розрізняюваність моделей ТЕ за анізотропією РВ

$$\frac{\ell(\ell+1)}{2\pi}C_\ell^{TT} = \langle (\Delta T)^2 \rangle_{\theta \approx \pi/\ell}, \quad \frac{(\ell+1)}{2\pi}C_\ell^{TE} = \langle \Delta T \cdot E \rangle_{\theta \approx \pi/\ell}$$



- Сучасні спостережувані дані надійно виділяють клас моделей з домінантною за густиною в сучасну епоху TE з $\Omega_{de} = 0.72 \pm 0.04$;
- На їх основі встановлено обмеження на значення параметра рівняння стану $-1.2 \leq w_0 \leq -0.8$;
- Набір даних **WMAP7+HST+BBN+BAO+SN SDSS (SALT2)** виділяє **фантомну TE** як найбільш оптимальну з $\Omega_{de} = 0.72^{+0.04}_{-0.04}$, $w_0 = -1.04^{+0.04}_{-0.2}$;
- Набір даних **WMAP7+HST+BBN+BAO+SN SDSS (MLCS2k2)** виділяє **квінтесенційну TE** як найбільш оптимальну з $\Omega_{de} = 0.70^{+0.04}_{-0.05}$, $w_0 = -0.83^{+0.22}_{-0.17}$;
- Однак, статистична значимість цього розрізнення кожним набором даних є малою ($50\%+\epsilon$);
- Для встановлення типу темної енергії необхідні на порядок точніші значення модулів відстані до SNe Ia, втричі більша точність визначення спектра потужності галактик, вдвічі більша точність визначення $\Delta T/T$ реліктового випромінювання (очікується за даними Planck).

2. Лінія 21 см в епоху Темних Віків



Лінія нейтрального водню 21 см:
 $\lambda_0 = 21 \text{ cm}$ (власна система відліку),

$\nu_0 = 1420 \text{ MHz}$

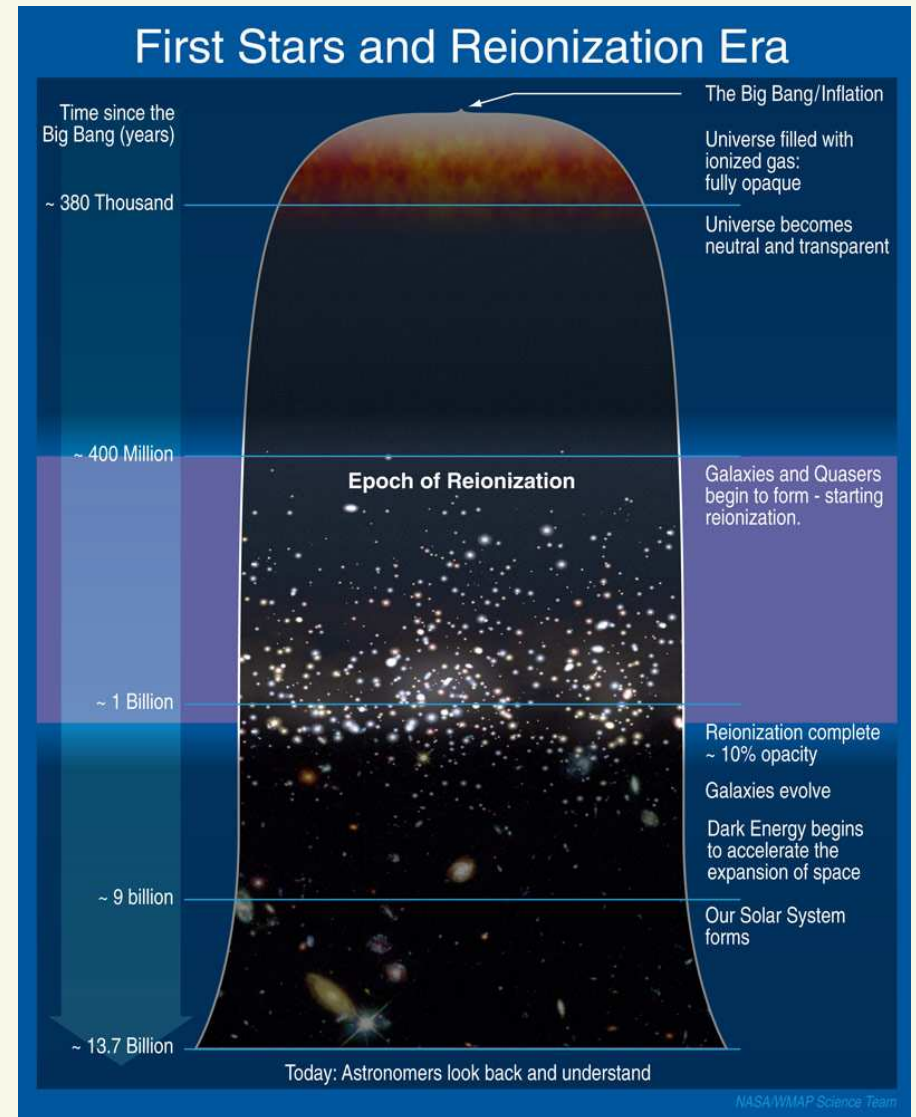
$$\lambda_z = \lambda_0(1 + z), \quad \nu_z = \nu_0/(1 + z)$$

$$z = 10 : \lambda = 2.3 \text{ m}, \quad \nu = 129 \text{ MHz}$$

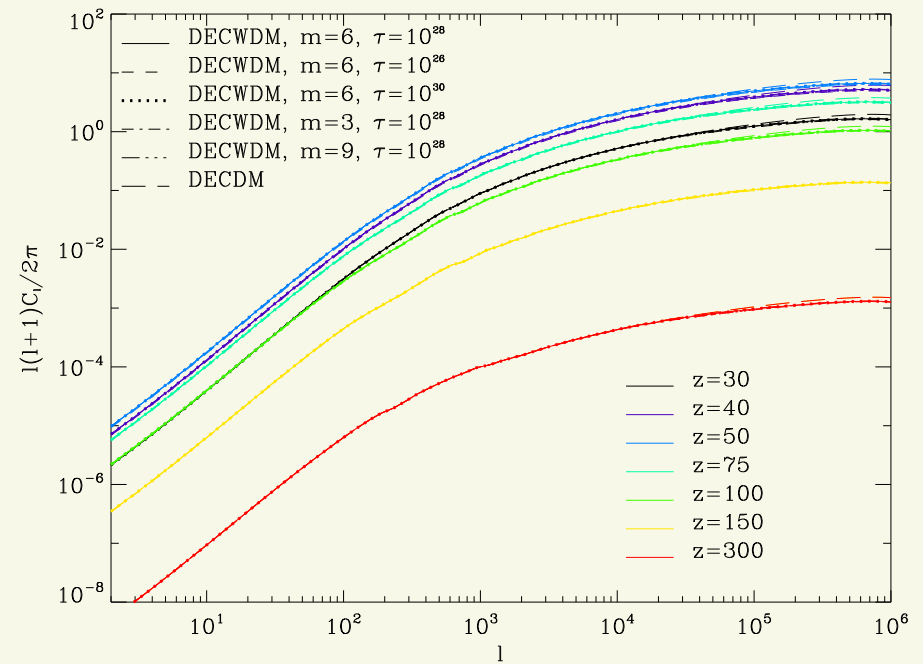
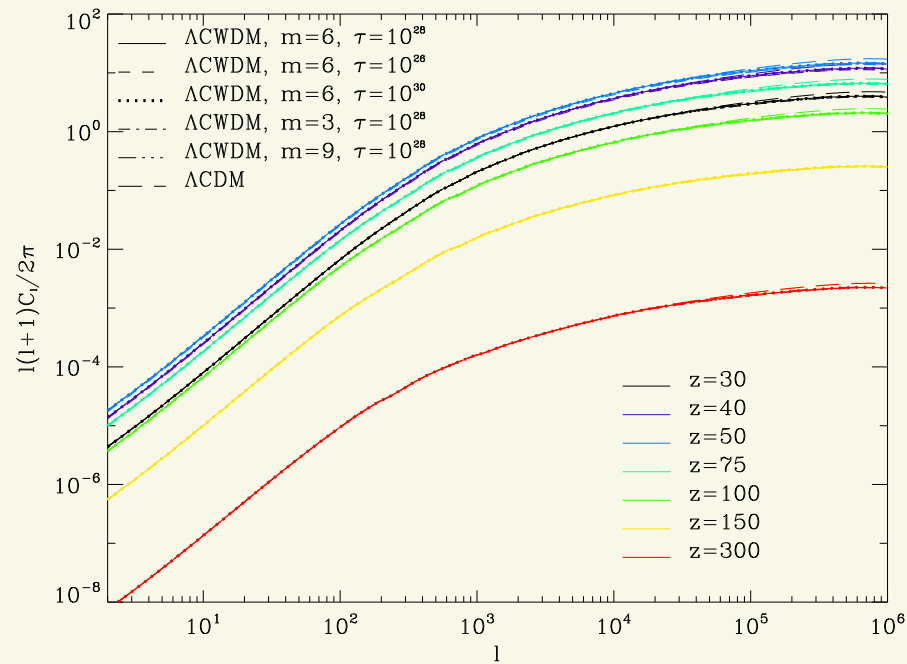
$$z = 30 : \lambda = 6.5 \text{ m}, \quad \nu = 45.8 \text{ MHz}$$

$$z = 50 : \lambda = 10.7 \text{ m}, \quad \nu = 27.8 \text{ MHz}$$

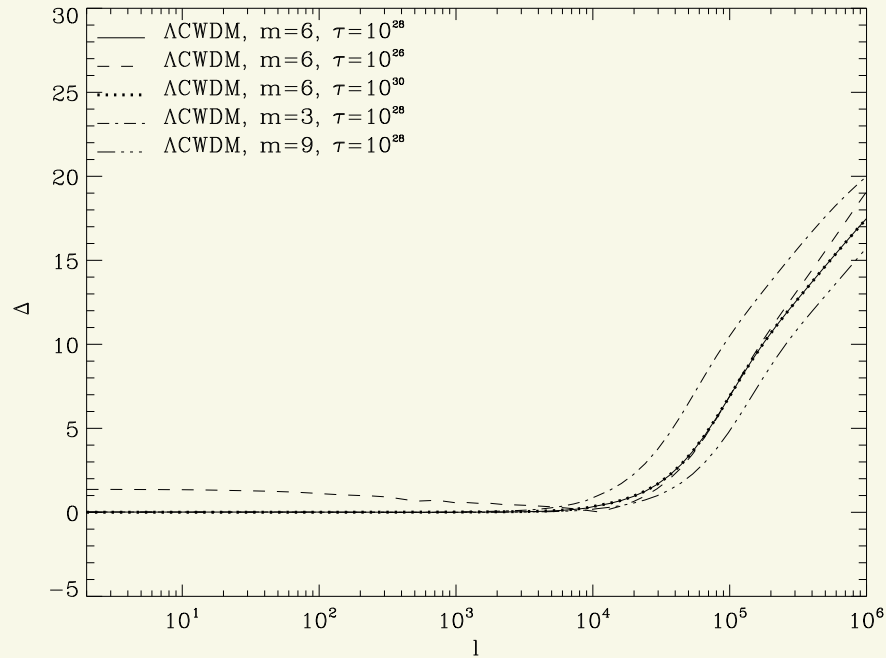
$$z = 75 : \lambda = 16 \text{ m}, \quad \nu = 18.7 \text{ MHz}$$



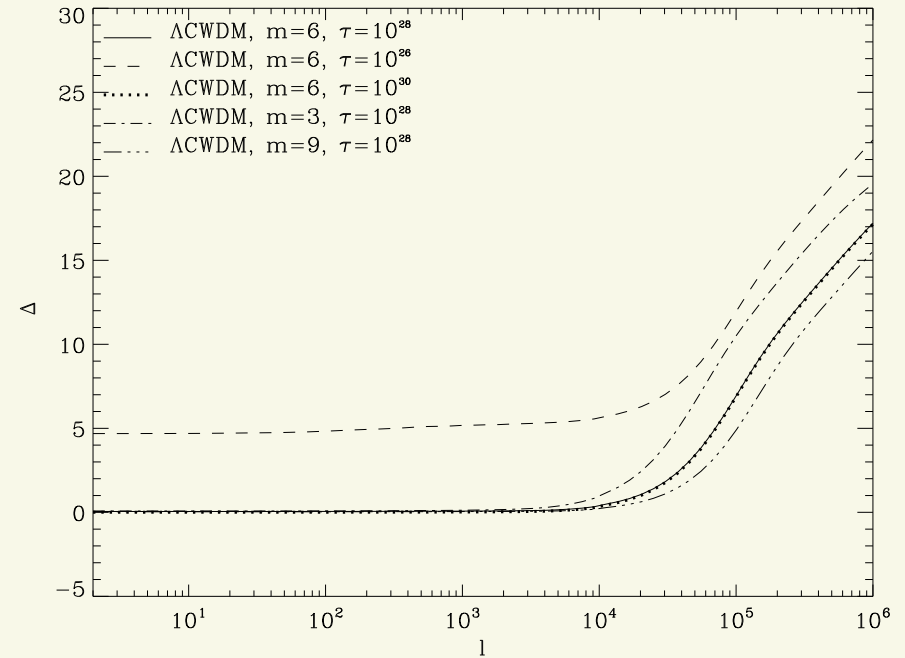
Спектр потужності лінії 21 см: томографія за червоним зміщенням



Спектр потужності лінії 21 см: томографія за червоним зміщенням та розрізняюваність моделей ТМ

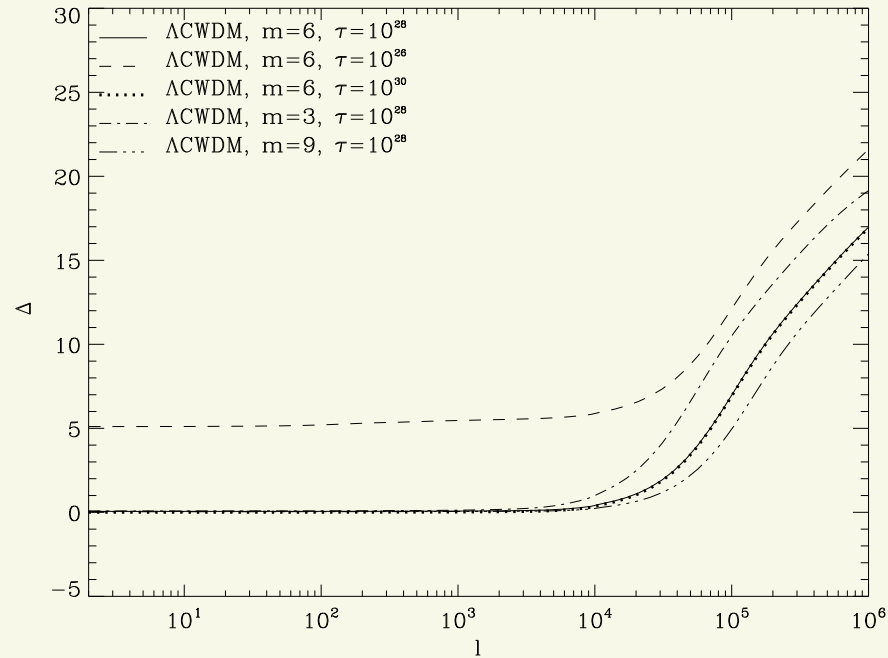


$z=30$ ($\lambda = 6.54 m$)

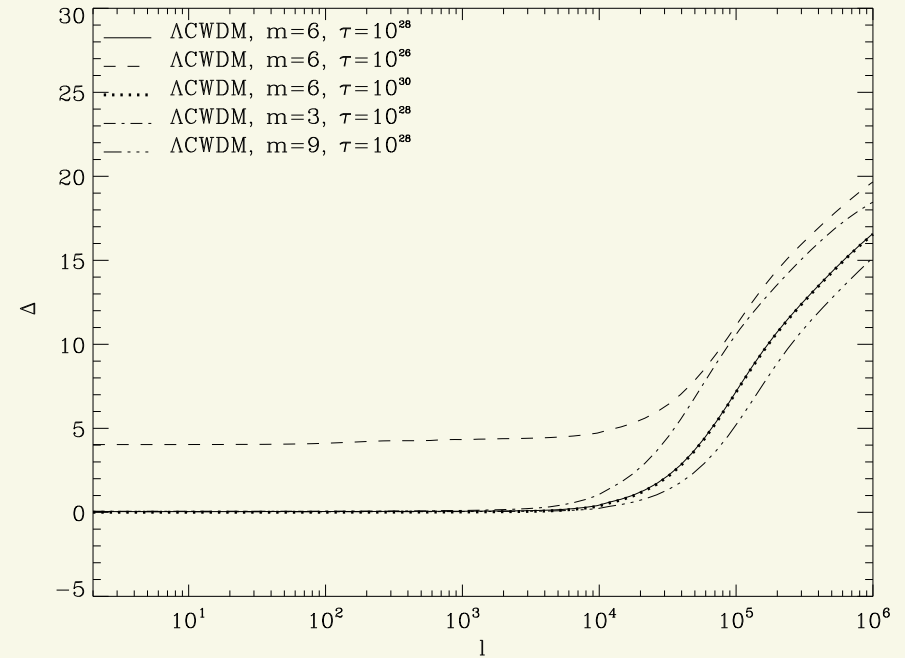


$z=40$ ($\lambda = 8.65 m$)

Спектр потужності лінії 21 см: томографія за червоним зміщенням та розрізняюваність моделей ТМ



$z=50$ ($\lambda = 10.76 m$)



$z=75$ ($\lambda = 16.04 m$)

Низькочастотні експерименти

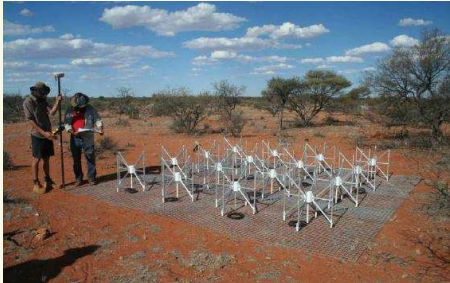
21CMA (PaST) – Частота: 50-200 MHz



LOFAR – Частота: 10-250 MHz



MWA – Частота: 80-300 MHz



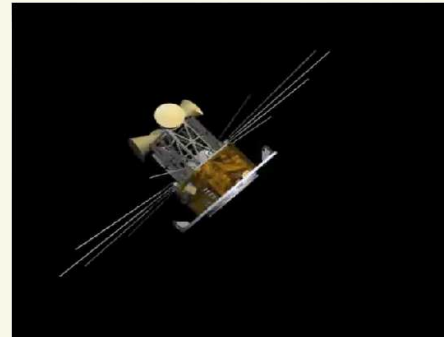
GMRT – Частота: 50-1500 MHz



SKA-low array – Частота: 70 - 200 MHz

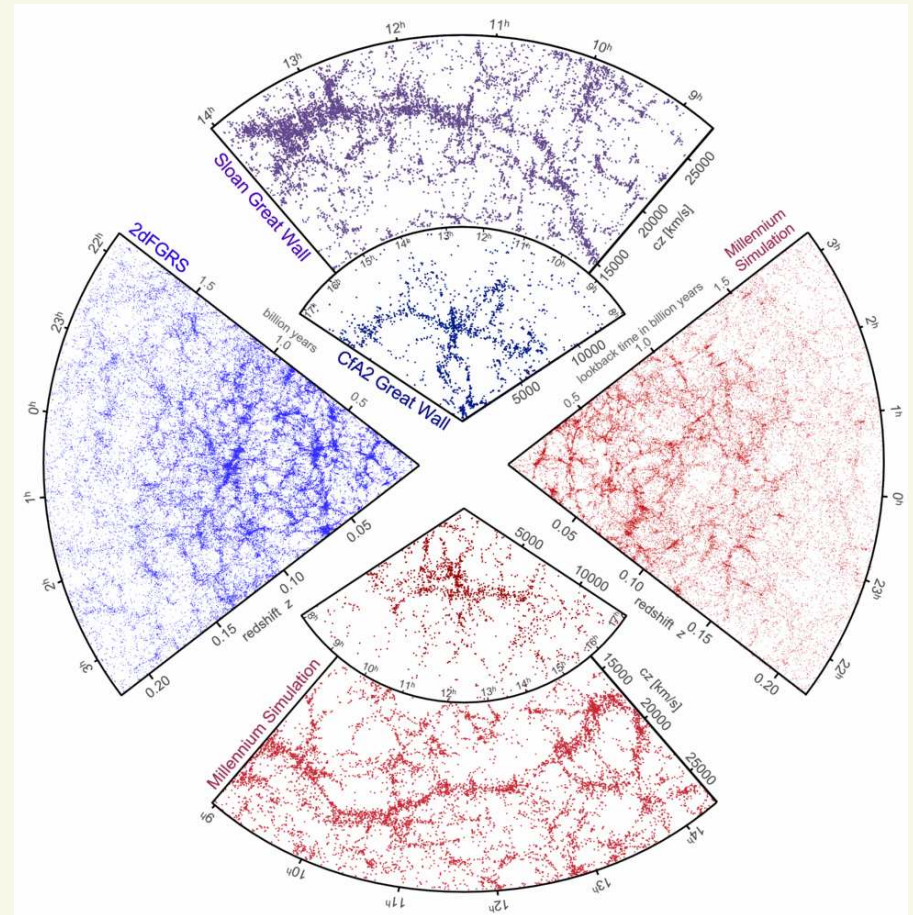


DARE – Частота: 40 - 120 MHz

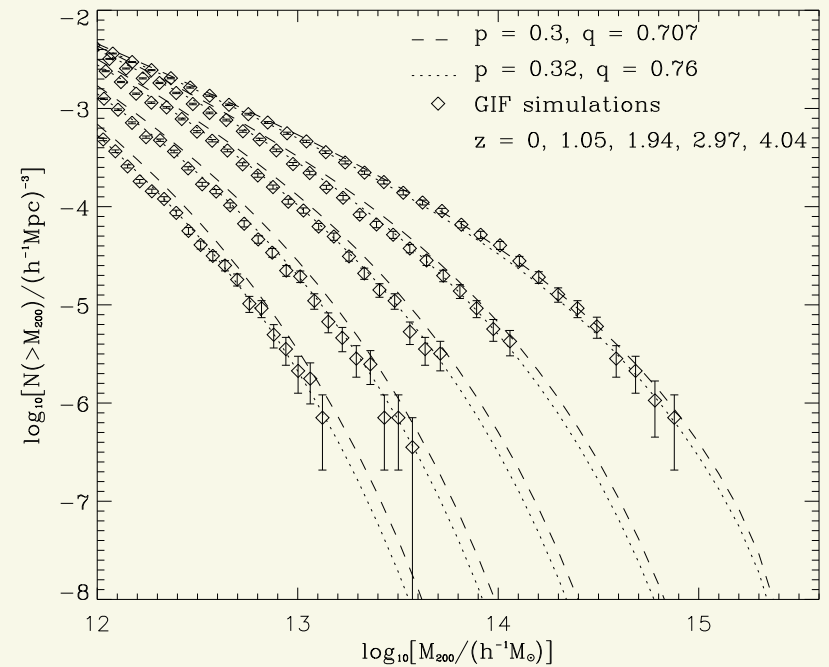
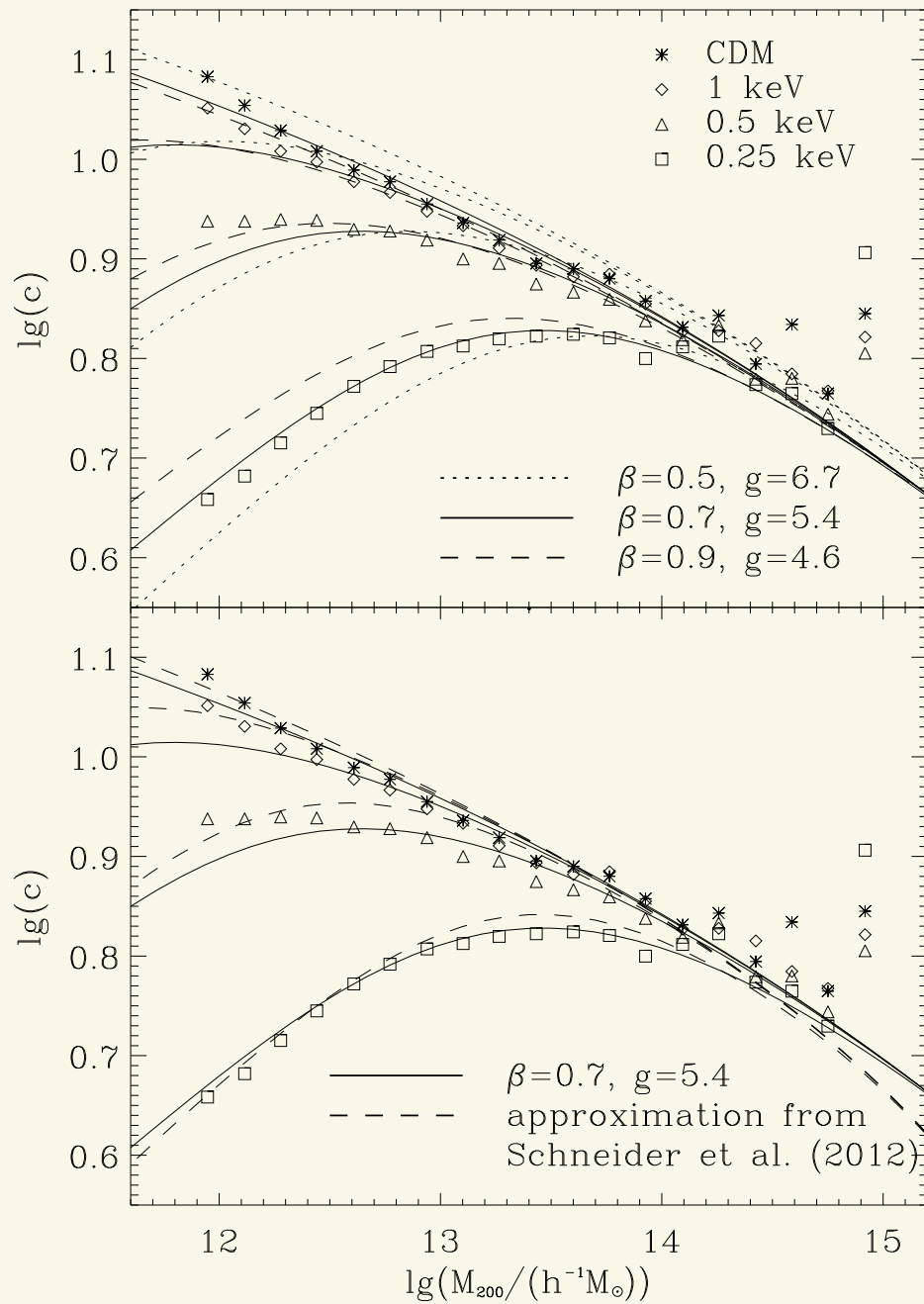


3. Модель гало формування структури на масштабах груп і скупчень галактик

- Модель Толмена
- Теорія піків гаусівського випадкового поля збурень
- Наближення Шеца-Тормена
- Числові моделювання динаміки N тіл

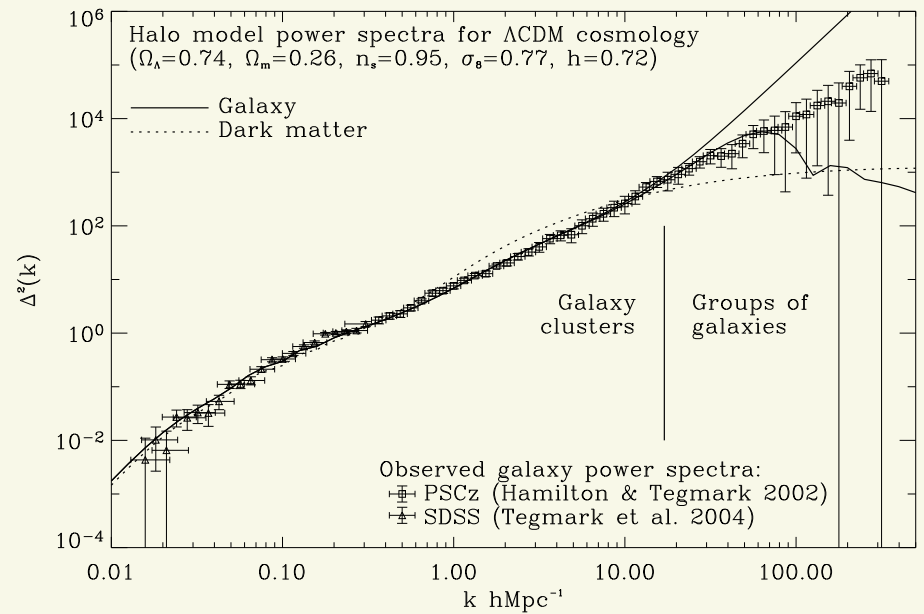
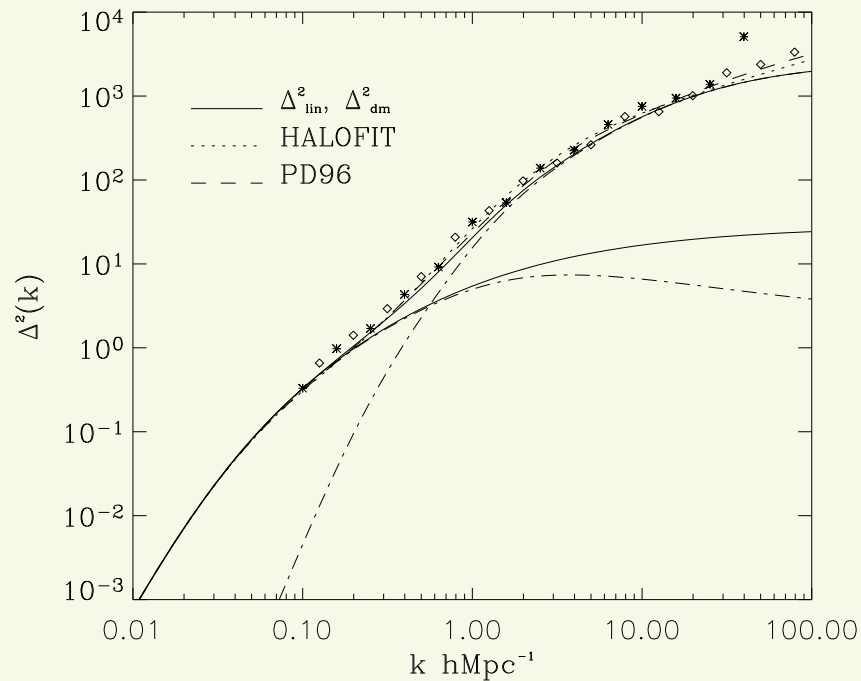


Параметр концентрації і функція мас гало



Kulinich Yu., Apunevych C.,
Novosyadlyj B. [arXiv:1203.5297](https://arxiv.org/abs/1203.5297)

Спектри потужності темної і світної матерії



Kulinich Yu., Apunevych C., Novosyadlyj B. arXiv:1203.5297)

Дякую
за увагу!