



Поиск возможной квазипериодической структуры на основе данных SDSS LRG DR7 и LOWZ DR12

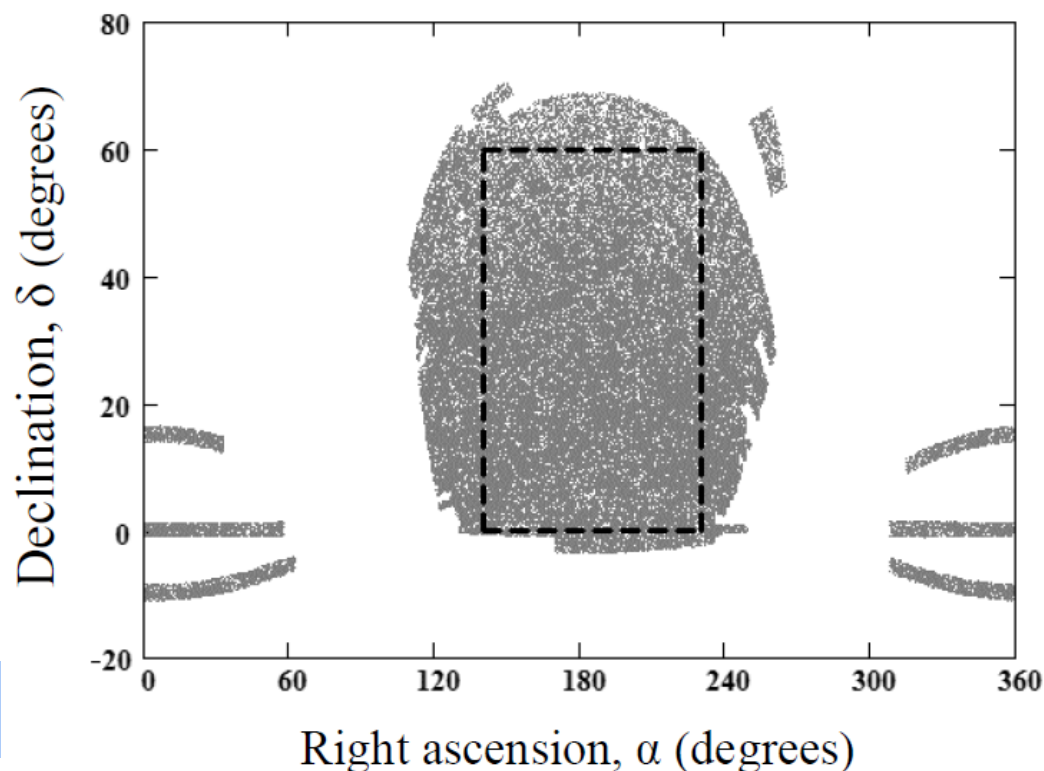
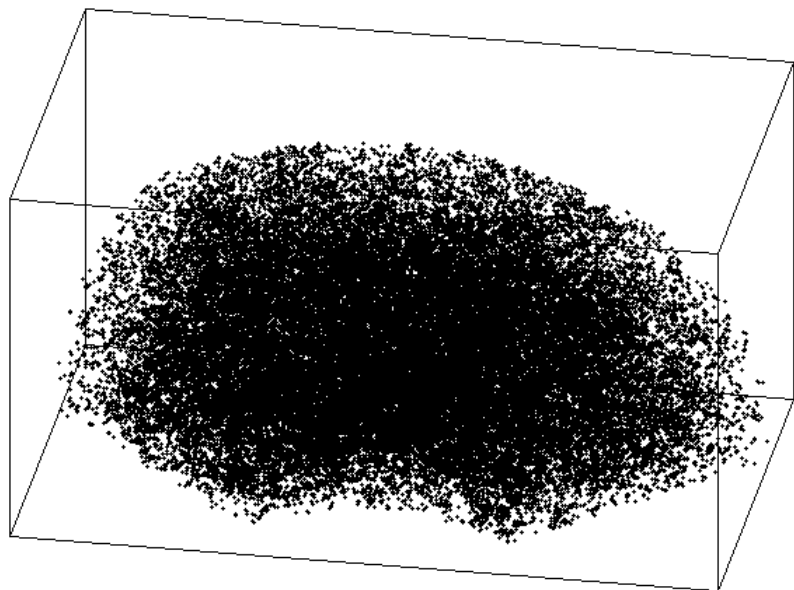
Каминкер А.Д., Рябинков А.И.

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе

«Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра», ИКИ, 21 - 24.12. 2021

Методами статистического анализа проведен поиск крупномасштабной квазипериодической структуры в пространственном распределении галактик SDSS на космологических красных смещениях $0.16 \leq z \leq 0.47$. Были рассмотрены статистические выборки т.н. ярких красных галактик (LRGs) из каталога SDSS DR7 и галактик LOWS из каталога SDSS DR12. Для построения распределений галактик использовались различные геометрические методы: радиальные распределения в сферической системе координат и распределения проекций декартовых координат галактик на различные оси (направления) в пространстве. Особое внимание было уделено рассмотрению полноты и однородности используемых выборок, а также методам оценки значимости полученных результатов. Обнаружены выделенные направления, вдоль которых распределения проекций координат галактик содержат квазипериодические компоненты. Эти компоненты проявляются как пики в спектрах мощности, лежащие в узком интервале волновых чисел $0.05 < k < 0.07 \text{ h} / \text{Мпк}$. Уровни значимости этих пиков для разных выборок превышают $(4 - 5) \sigma$. Мы предполагаем существование анизотропной космологической квазипериодической структуры с характерным масштабом $116 \pm 10 \text{ h}^{-1} \text{ Мпк}$.

SSDS DR7: Яркие красные галактики (LRG). Распределения LRG в выделенных областях на небесной сфере



Анализируемая область:

$\alpha = 140^\circ \div 230^\circ$; **прямое восхождение**
 $\delta = 0^\circ \div 60^\circ$; **склонение**
 $z = 0.16 \div 0.47$; **красное смещение**
 $D_c = (464 \div 1274) h^{-1} \text{Mpc}$;

**Сопутствующее расстояние
вдоль луча зрения:**

$$D_c(z) = \frac{c}{H_0} \cdot \int_0^z \frac{dz'}{\sqrt{\Omega_m(1+z')^3 + \Omega_\Lambda}}$$

Параметры Λ CDM модели

$$H_0 = 100 h \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1} \quad \text{постоянная Хаббла в настоящее время}$$

$$\Omega_m = \rho_m / \rho_{\text{cr}}^{(0)} = \frac{8\pi G \rho_m}{3H_0^2} = 0.25, \quad \text{относительная плотность материи}$$

$$\Omega_\Lambda = \frac{\Lambda c^2}{3H_0^2} = 1 - \Omega_m = 0.75, \quad \text{нормированная космологическая постоянная}$$

Сферические (экваториальные) координаты. Радиальные распределения LRG

$N_R[D_c(z_i)]$ — **радиальная (оболочечная) функция распределения, интегральная по углам α и δ ;**

$D_c(z_i)$ — **сопутствующие расстояния вдоль лучей зрения между наблюдателем и галактиками, входящими в выборку**
($i = 1, 2, 3, \dots$)

$N_R(D)dD$ — **число объектов внутри интервала dD , ограниченное выбранной областью на небе (интервалы α и δ)**

$NN(D_c^l) = \frac{N_R(D_c^l) - S}{\sqrt{S}}$ — **нормированная функция радиального распределения, ширина бина:**

D_c^l — **радиусы центров сферических бинов,** $\Delta_D = 10 h^{-1} \text{ Mpc}$

$S = \langle N_R(D_c^l) \rangle$ — **среднее значение по всем бинам $l = 1, 2, 3, \dots$** **2**

Радиальные распределения. Спектры мощности (СМ)

$$P_R(k_m) = \frac{1}{\mathcal{N}_b} \left| \sum_{l=1}^{\mathcal{N}_b} N N(D_c^l) e^{-ik_m D_c^l} \right|^2$$

нумерация бинов:
 $l = 1, 2, \dots, \mathcal{N}_b$

$$= \frac{1}{\mathcal{N}_b} \left\{ \left[\sum_{l=1}^{\mathcal{N}_b} N N(D_c^l) \cos(k_m D_c^l) \right]^2 + \left[\sum_{l=1}^{\mathcal{N}_b} N N(D_c^l) \sin(k_m D_c^l) \right]^2 \right\}$$

$$k_m = 2\pi m / L_R -$$

волновое число, соответствующее целым гармоникам: $m = 1, 2, \dots, \mathcal{M}$;

$$L_R = 810 \ h^{-1} \text{ Мpc}$$

$$\mathcal{M} = \lfloor \mathcal{N}_b / 2 \rfloor -$$

число Найквиста, максимальное число независимых гармоник

Кумулятивная вероятность амплитуды случайного пика

Ryabinkov, Kaminker (2019, 2021) $\mathcal{P}_k^* \geq 0$, при любом $k = k_{max}$

$$\mathcal{F}(P_k < \mathcal{P}_k^*, \lambda) = 1 - \exp(-\lambda \mathcal{P}_k^*), \text{ параметр } \lambda = \lambda(k)$$

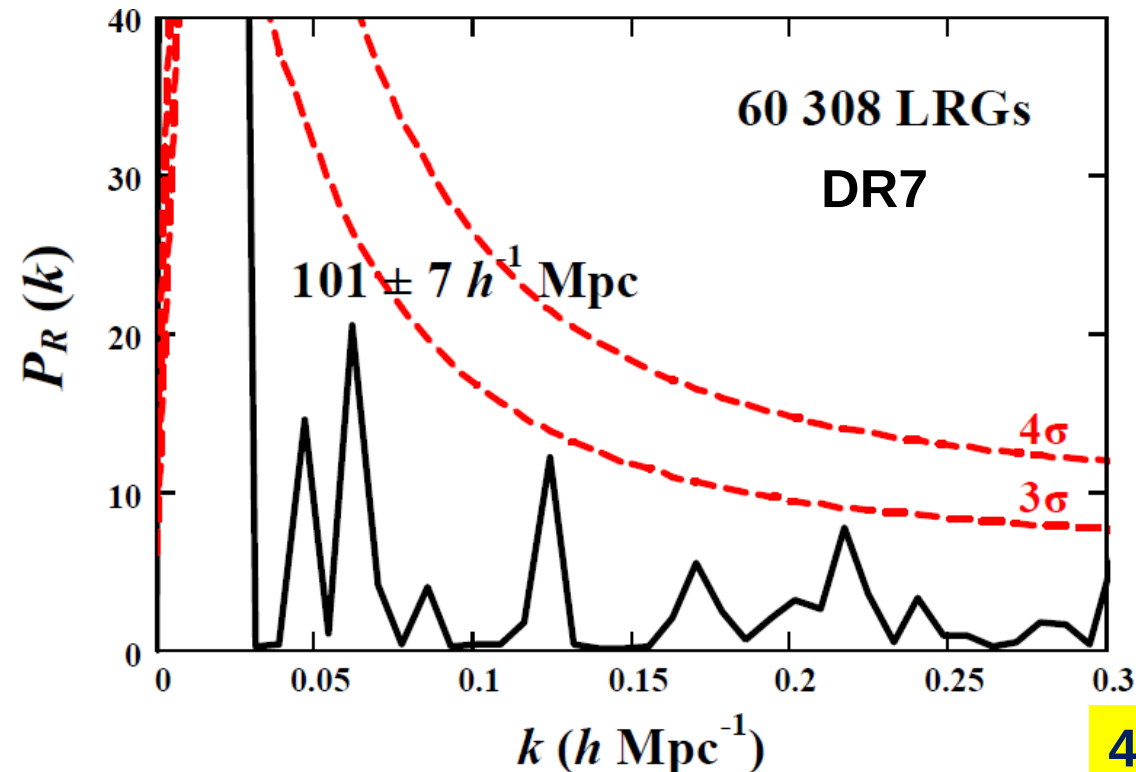
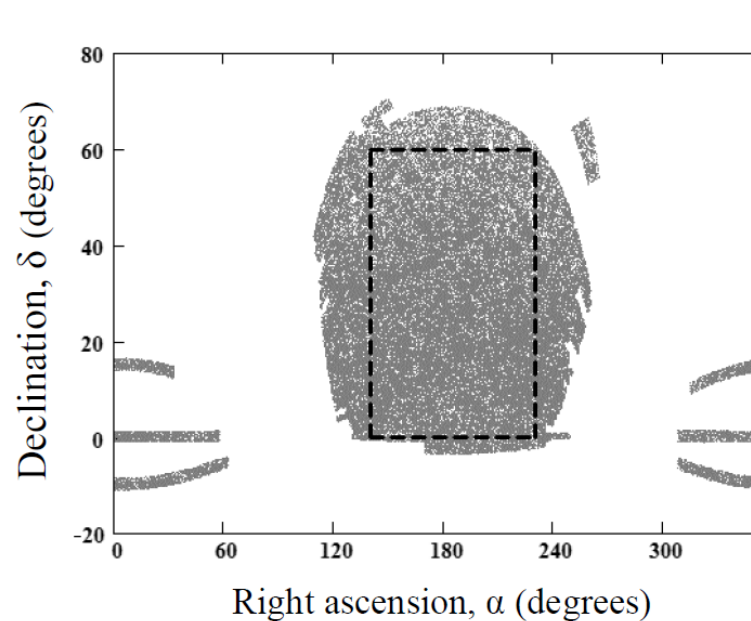
$$\lambda(k) = \langle P_R(k) \rangle^{-1}$$

обратное среднее амплитуды случайных (симулированных) пиков при данных k

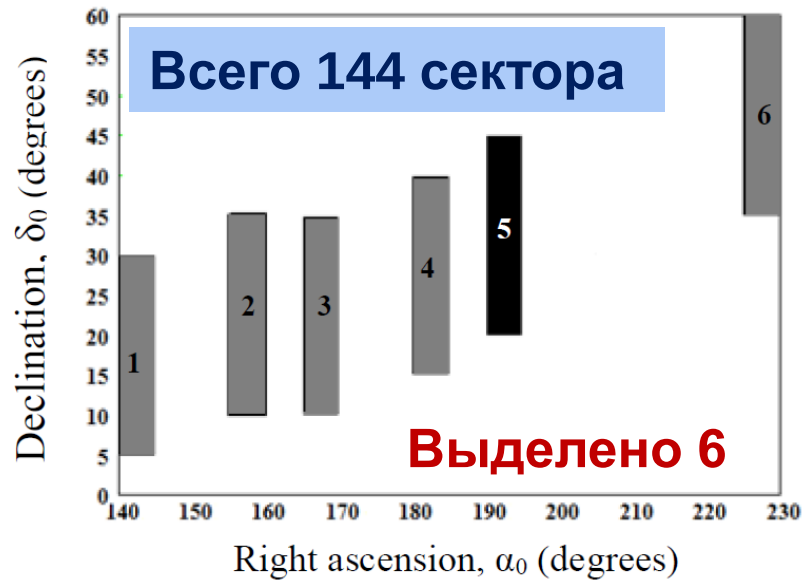
Оценки уровней значимости

Формула для $\mathcal{F}[P_k < \mathcal{P}_k^*, \lambda(k)]; \quad \lambda(k) = \langle P_R(k) \rangle^{-1}$ позволяет определять уровни значимости пиков, полученных для смоделированных случайных каталогов. Для оценки значимости пиков в СМ **радиальных** распределений LRG SDSS DR7 использовался модельный каталог LasDamas. Приведен СМ (справа) выборки 60 308 LRGs из рассматриваемой области (слева). Пунктирные линии – уровни значимости, полученные с помощью каталога LasDamas.

Видно, что значимого эффекта нет!



Поиск секторов со значимостью пиков в СМ $> 3\sigma$



$$\Delta\alpha_s \simeq 5^\circ$$

$$\Delta\delta_s \simeq 25^\circ$$

5-ый сектор:

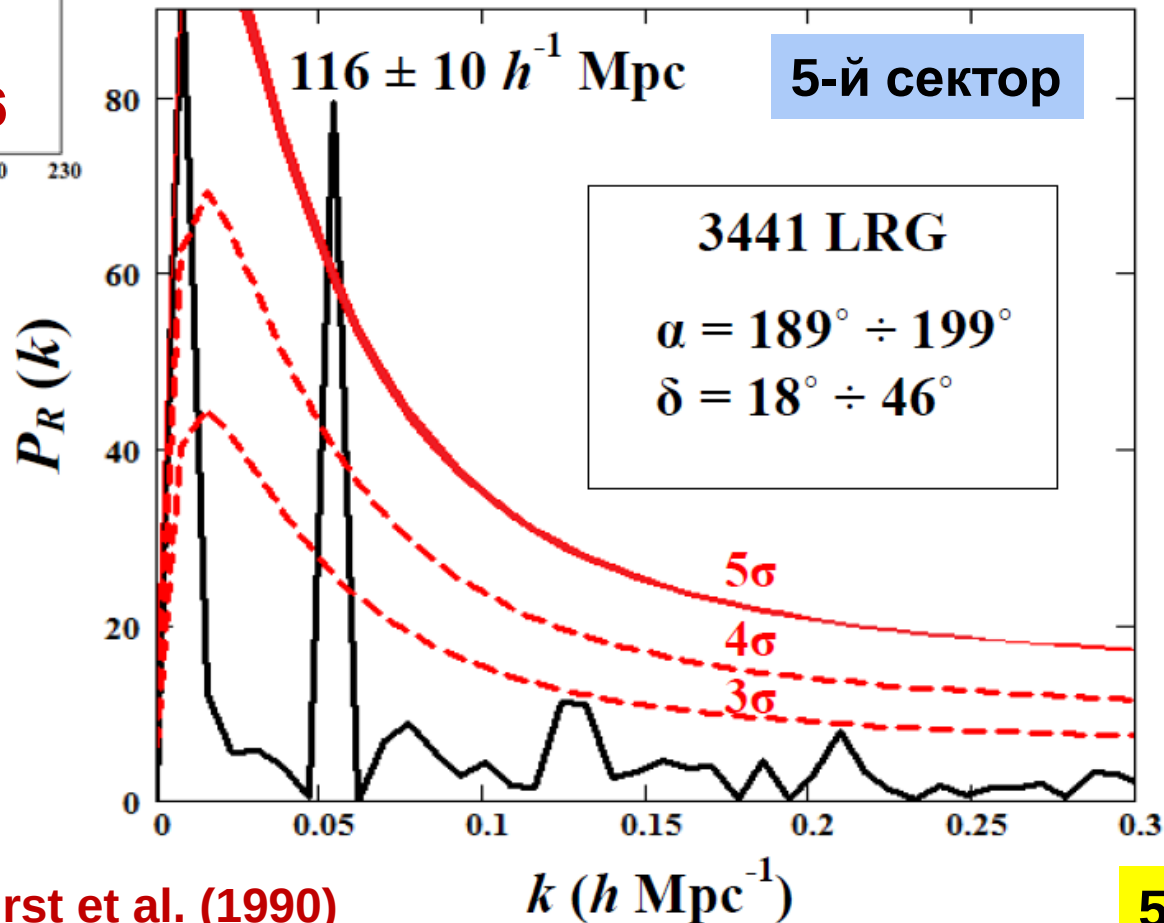
значимость $> 5\sigma$;
включает направление
На Галактический полюс:

$$\alpha_{\text{NP}} = 192.86^\circ$$

$$\delta_{\text{NP}} = 27.13^\circ$$

Broadhurst et al. (1990)

No	α	δ	Number LRGs	Periods Mpc/h	Sign
1	140°–146°	5°–31°	2098	101 ± 7	$>3\sigma$
2	154°–160°	8°–39°	2434	116 ± 10	$>3\sigma$
3	162°–174°	10°–35°	3629	116 ± 10	$>5\sigma$
4	182°–185°	15°–41°	1121	116 ± 10	$>3\sigma$
5	189°–199°	18°–46°	3441	116 ± 10	$>5\sigma$
6	222°–230°	36°–60°	1634	116 ± 10	$>3\sigma$



Переход к декартовой системе координат (ДСК).

$$X_i = D_c(z_i) \sin(90^\circ - \delta) \cos \alpha,$$

$$Y_i = D_c(z_i) \sin(90^\circ - \delta) \sin \alpha,$$

$$Z_i = D_c(z_i) \cos(90^\circ - \delta);$$

$D_c(z_i)$ – **сопутствующие расстояния до LRG с красным смещением z_i**

Повороты ДСК в пространстве: 1D – распределения проекций координат LRG на повернутые оси X

$N_X(X)$ – **функция 1D – распределений проекций координат объектов z_i на произвольно ориентированные оси X;**

Для всех направлений оси X в пространстве фиксируется интервал:

$$464 \leq X \leq 1274 \ h^{-1} \text{ Мpc}$$

$$N N_X(X_c^l) = \frac{N_X(X_c^l) - S_X}{\sqrt{S_X}} \quad \text{— нормированная функция распределения}$$

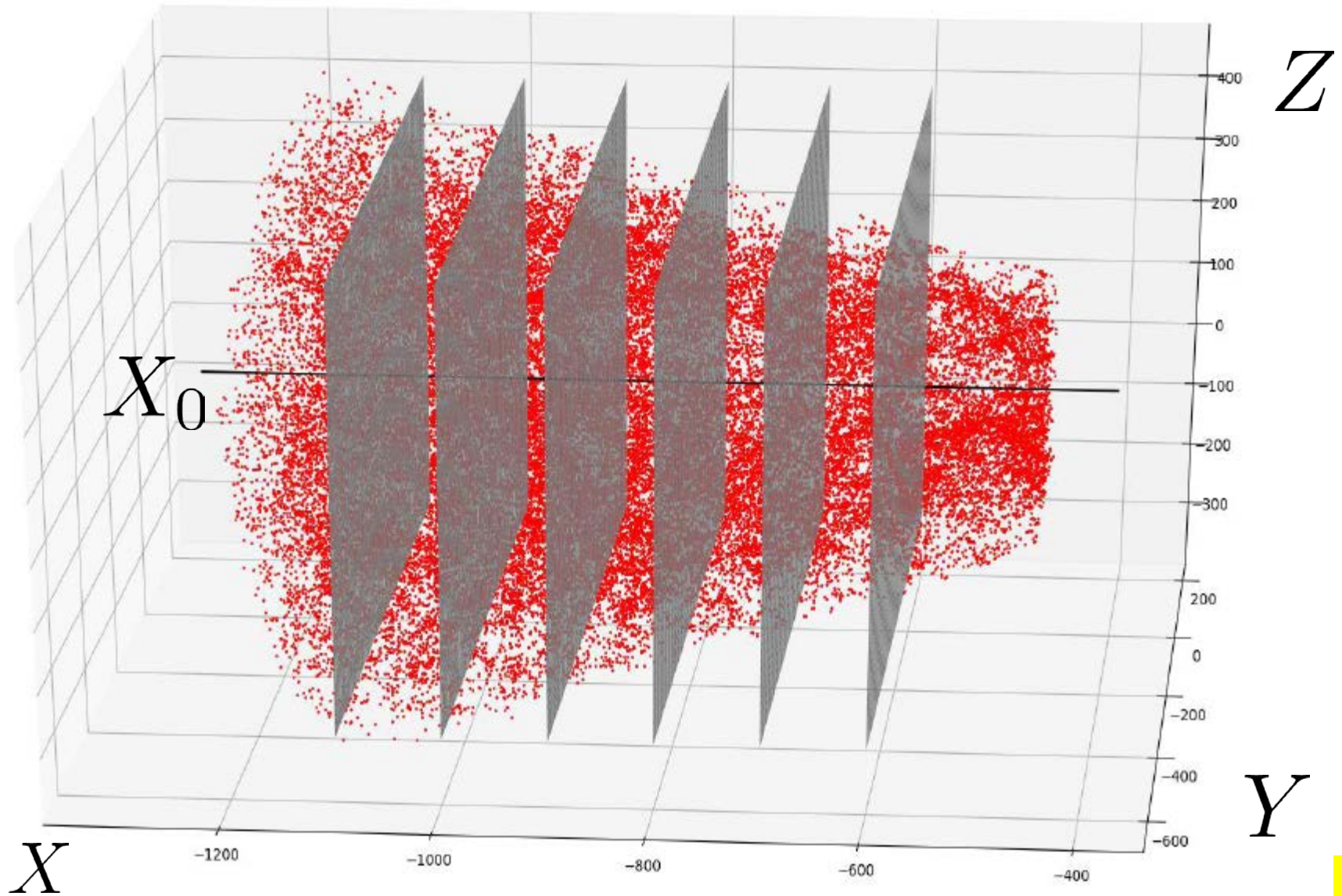
X_c^l – **центры бинов вдоль выделенных осей X**

$l = 1, 2, 3, \dots \mathcal{N}_b$ – **нумерация бинов; ширина бина: $\Delta X = 10 \ h^{-1} \text{ Мpc}$**

$S_X = \langle N_X(X_c^l) \rangle$ – **среднее по всем бином значение $N_X(X)$**

Проекции координат LRG на выделенную ось X

Конус наблюдательных данных задается интервалами α и δ
Поперечные плоскости – границы условных бинов:



Спектры мощности 1D-распределений вдоль осей X

$$P_X(k_m) = \frac{1}{\mathcal{N}_b} \left\{ \left[\sum_{l=1}^{\mathcal{N}_b} N N_X(X_c^l) \cos(k_m X_c^l) \right]^2 + \left[\sum_{l=1}^{\mathcal{N}_b} N N_X(X_c^l) \sin(k_m X_c^l) \right]^2 \right\};$$

$$k_m = \frac{2\pi m}{L_X} \quad \text{— волновое число, соответствующее целым гармоникам: } m = 1, 2, \dots, \mathcal{M}, \quad \mathcal{M} = \lfloor \mathcal{N}_b/2 \rfloor$$

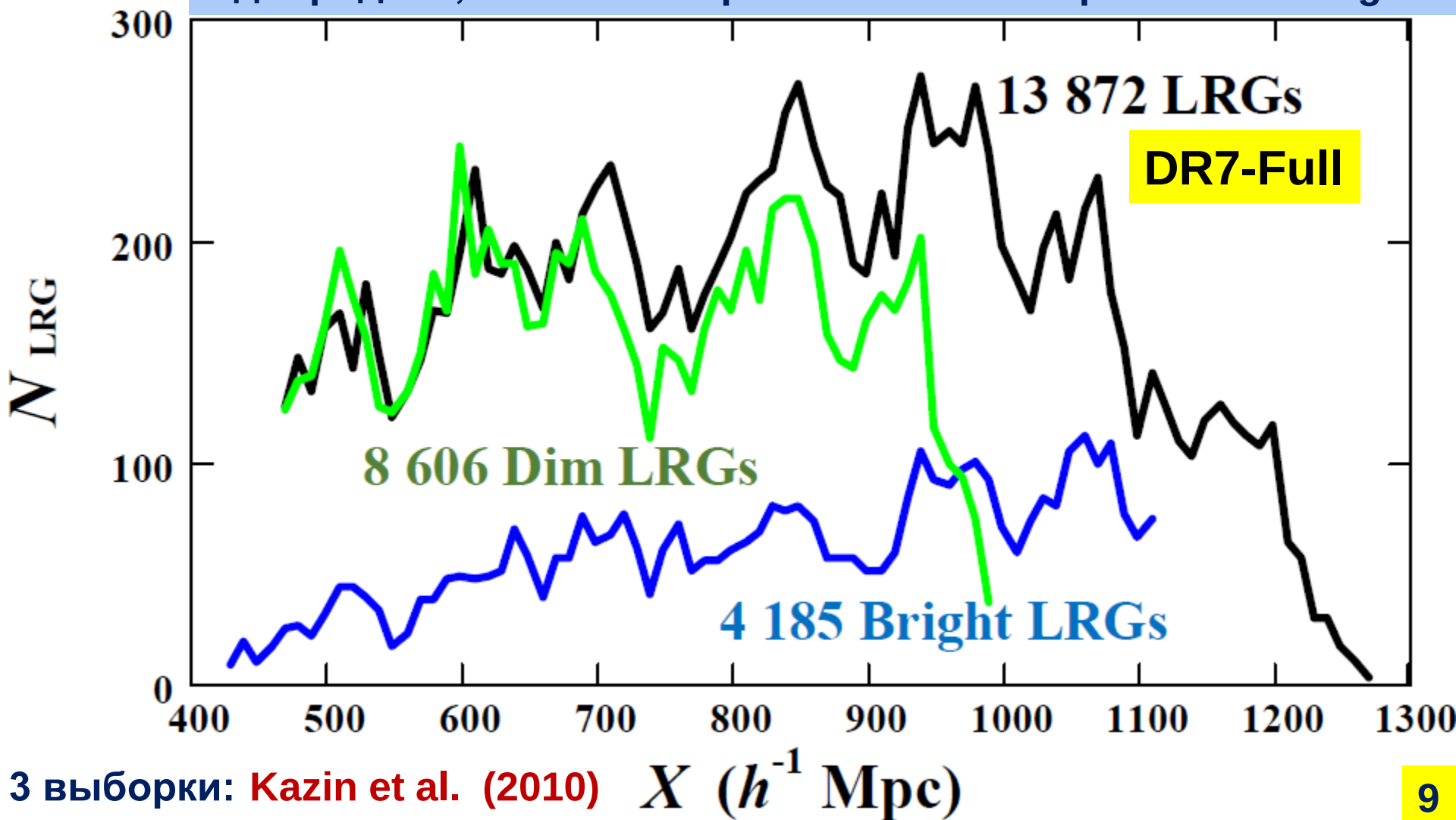
$$L_X \text{ — длина интервала вдоль оси } X \Rightarrow (L_X = 810 \, h^{-1} \text{ Мpc})$$

1. Производятся повороты ДСК, при которых направление оси X сдвигается с шагом 1° по координатам α или δ , ограниченных заданными интервалами этих координат.
2. Вдоль каждого из направлений X находится функция $NN_X(X_c^l)$ и вычисляется СМ.
3. С помощью функции $\mathcal{F}(P_m < \mathcal{P}_k^*, \lambda)$ и модельного каталога LasDamas вычисляются уровни значимости амплитуд пиков в СМ
4. Находится направление на небесной сфере X_0 , вдоль которого значимость пика в интервале $0.05 \leq k \leq 0.07 \, h \text{ Мpc}^{-1}$ максимальна

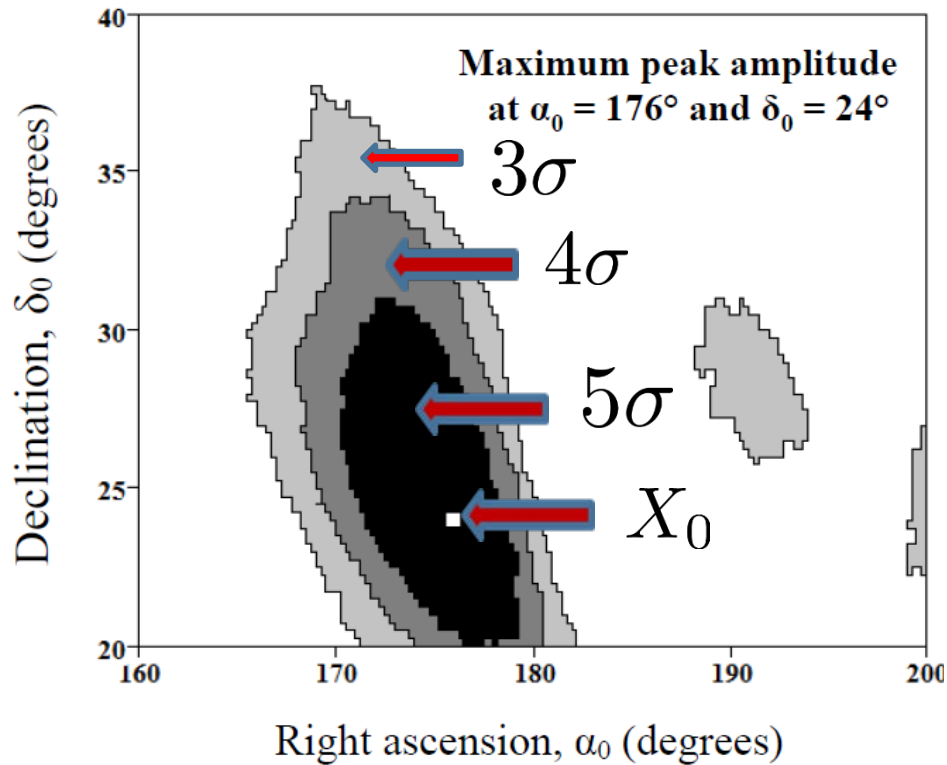
Распределения проекций координат LRG на оси максимальных амплитуд пиков X_0 для трех выборок

3 выборки LRG из DR7, просуммированных по 6-ти угловым секторам

Однородная, объемно ограниченная выборка -- DR7-Bright



Направление максимального пика X_0 для DR7-Full



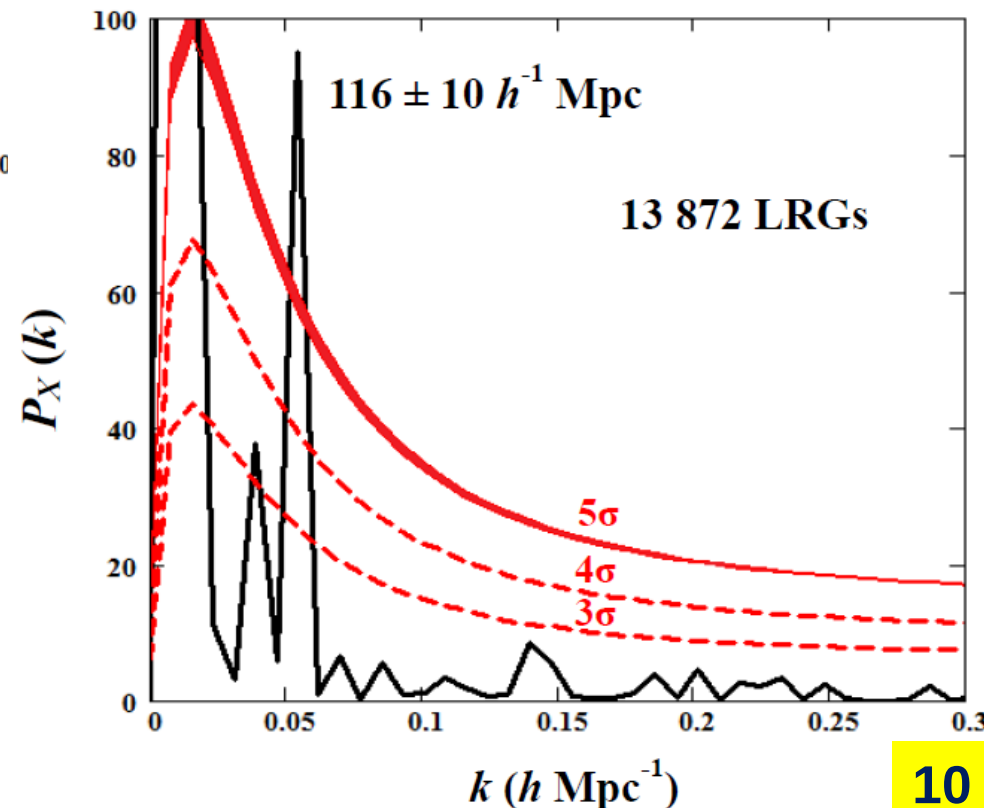
Уровни значимости: LasDamas

Максимальный пик в СМ:



Направление X_0 : $\alpha_0 = 176^\circ$
 $\delta_0 = 24^\circ$

Значимость пика: $> 5\sigma$



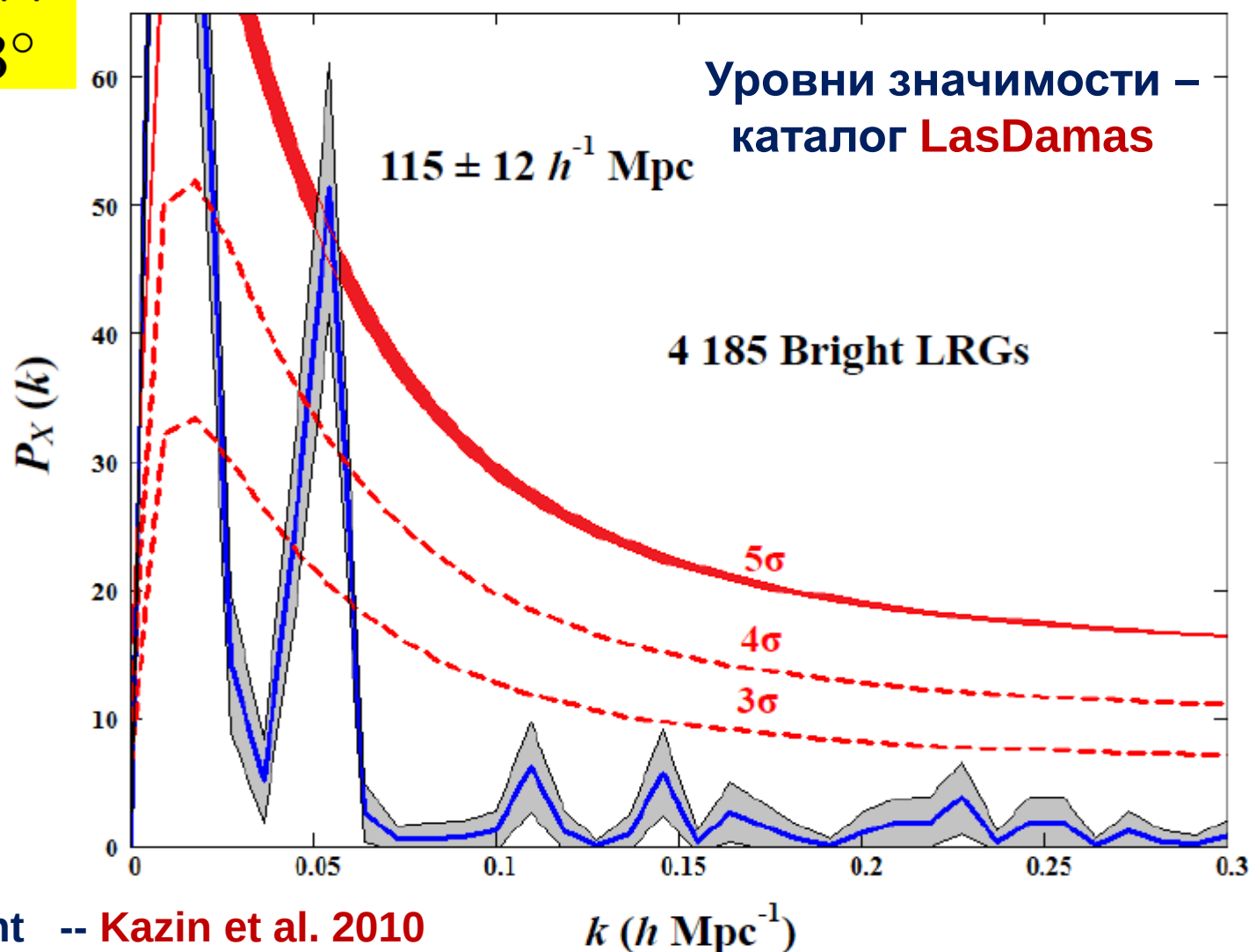
Однородная (объемно-ограниченная) выборка DR7-Bright

Направление оси X_0 :

$$\alpha_0 = 177^\circ$$

$$\delta_0 = 23^\circ$$

Серая полоса около СМ -- использование процедуры “jackknife”



Анализ данных каталога галактик SDSS LOWZ DR12

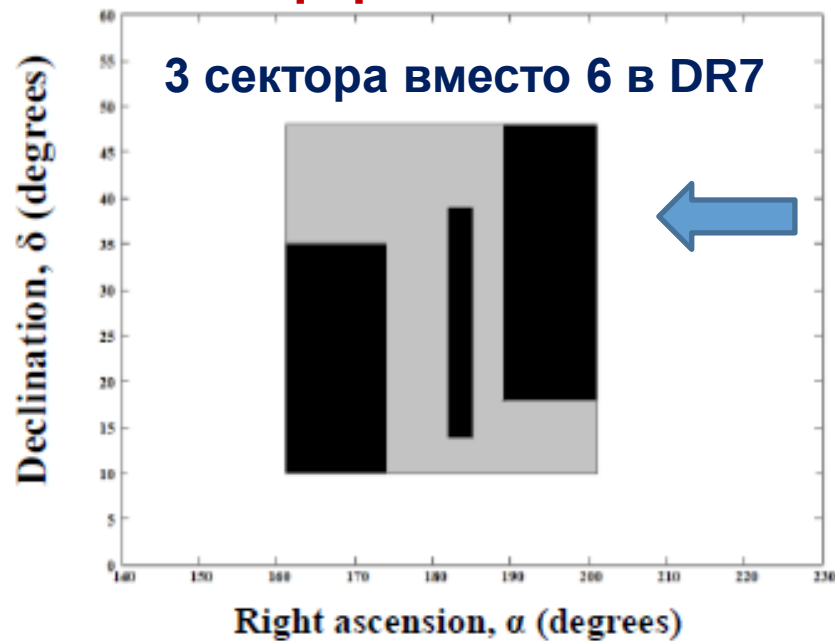
Рассматривается та же область на небе, что и для DR7, т.е.

Сферическая СК

$$0.16 \leq z \leq 0.47$$

$$\alpha = 140^\circ \div 230^\circ$$

$$\delta = 0 \div 60^\circ$$



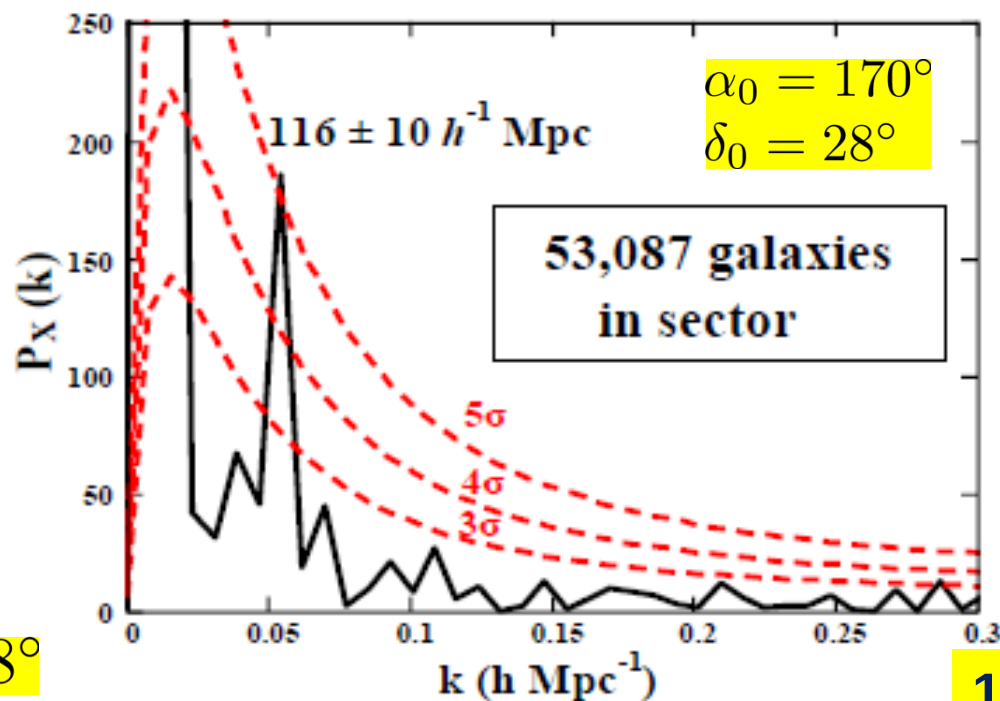
Внутри этой области были найдены 3 сектора, в которых **СМ радиальных** распределений проявляют значимые пики в том же интервале k

$$0.05 \leq k \leq 0.07 \, h \, \text{Mpc}^{-1}$$

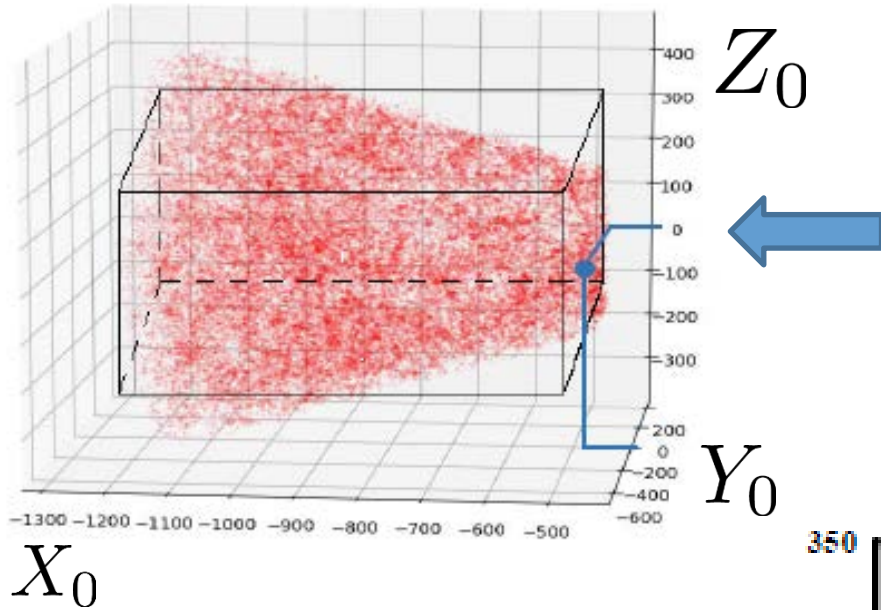
Центральный сектор -- почти совпадает с 5-м сектором DR7

Справа $\rightarrow$ **СМ** $P_X(k)$ 1D распределения для всего выделенного (серым) сектора:

$$\alpha = 161^\circ \div 201^\circ, \delta = 10^\circ \div 48^\circ$$



Анализ данных каталога SDSS LOWZ DR12. Кубоид



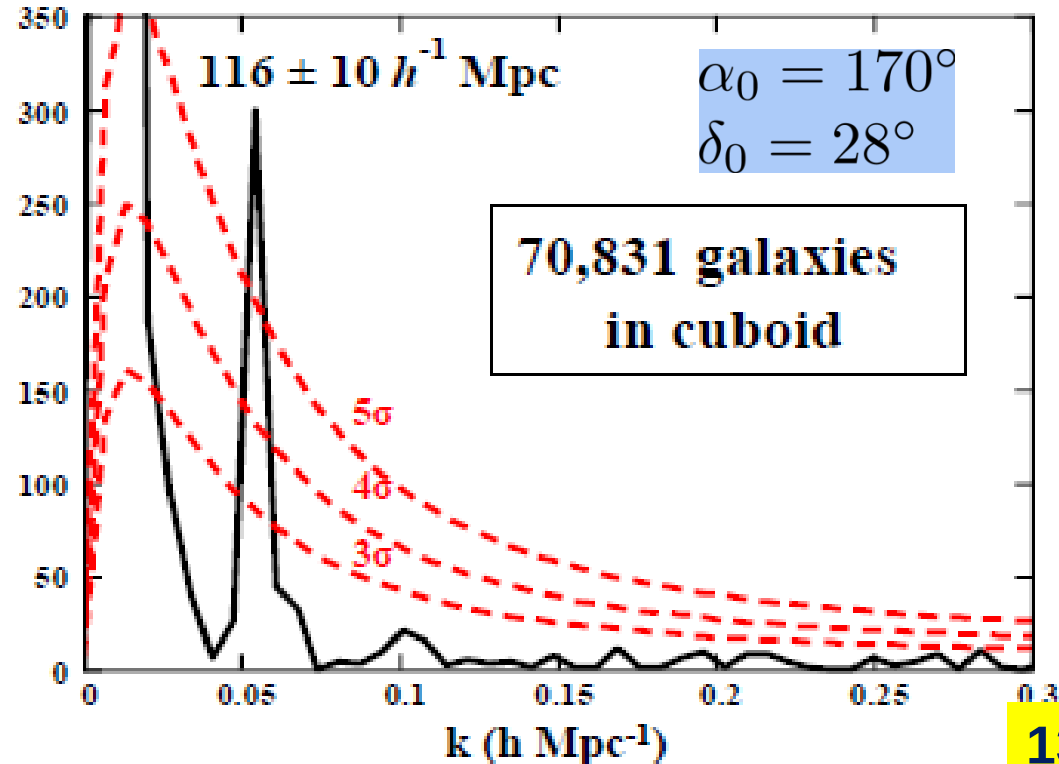
Кубоид вписан в выделенный (стр. 12) сферический сектор :

$$\begin{aligned} -1274 &\leq X \leq -344 \, h^{-1} \text{ Мpc} \\ -390 &\leq Y \leq 90 \, h^{-1} \text{ Мpc} \\ -300 &\leq Z \leq 320 \, h^{-1} \text{ Мpc} \end{aligned}$$

(грубая локализация особенности)

Наиболее мощный пик

$P_X(k)$



Для оценок значимости пиков в СМ при анализе данных LOWZ DR12 использовались средние значения пиков $\langle P_X(k) \rangle$, полученные по множеству направлений X

Моделирование однородной выборки (LOWZ DR12). Случайное наполнение бинов

Модельная однородная выборка
(черная горизонтальная линия)

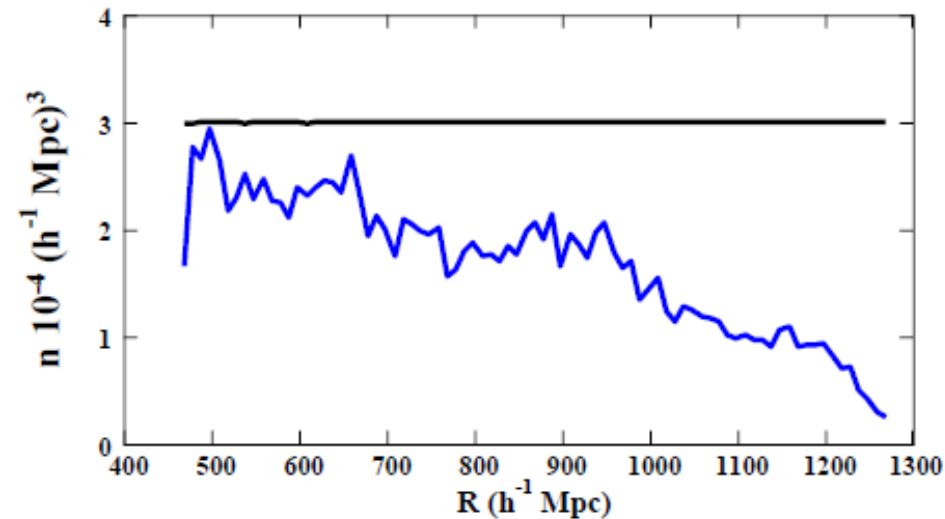
В каждый бин радиального
распределения добавляется
столько случайных объектов
чтобы совместное значение
концентрации было:

$$n \times 10^{-4} (h^{-1} \text{Mpc})^{-3} = \text{const}_{\text{max}} ;$$

две угловые координаты и радиальная переменная (в пределах бина) соответствуют равномерному распределению.

Ниже (стр. 15) рассматривается CM $P_X(k)$ 1D-распределений DR12 LOWZ галактик (нижняя левая панель) и модельной выборки (нижняя правая панель).

Для модельной выборки вместо использования среднего S_X
в формуле для $NN_X(X)$ введен линейный тренд.

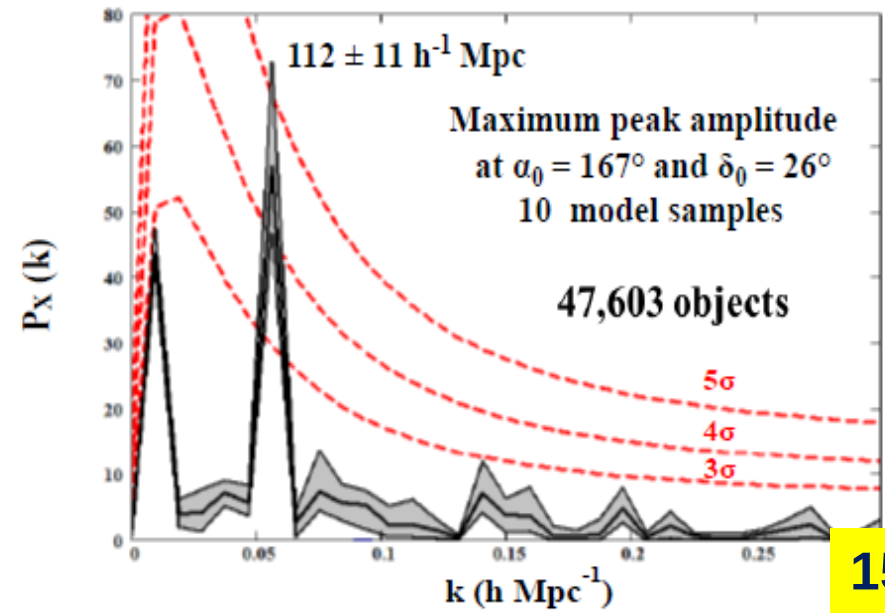
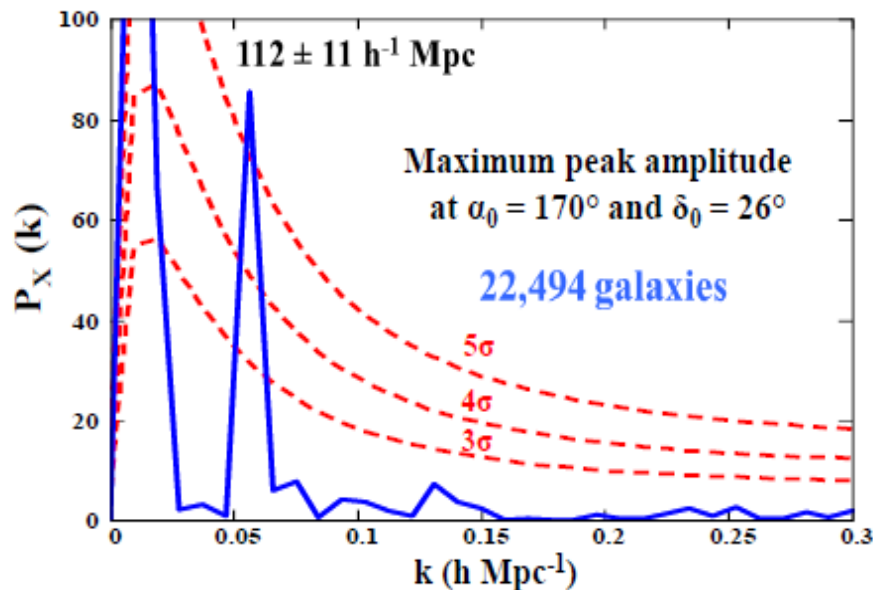
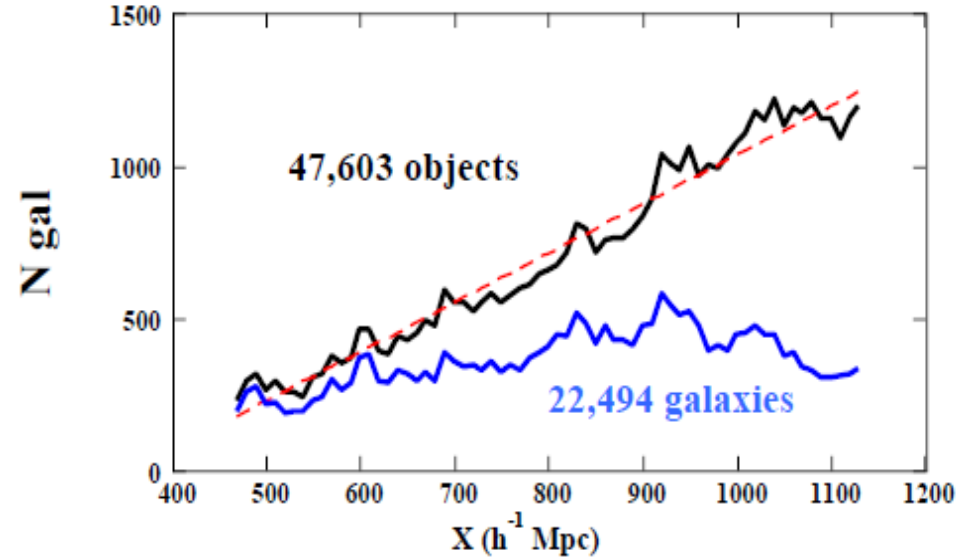
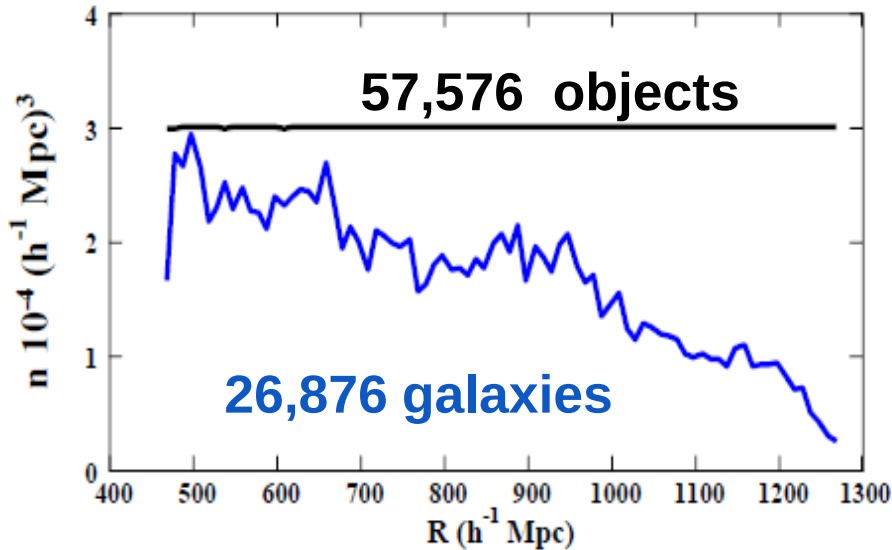


Моделирование однородной выборки LOWZ DR12

Черные сплошные – модельная
(однородная) выборка



Линейный тренд:



Выводы

1. Проведен статистический анализ галактик с космологическими красными смещениями $0.16 \leq z \leq 0.47$, представленных в двух выпусках SDSS: DR7 и DR12.
2. Обнаружены значимые пики в спектрах мощности радиальных распределений галактик в определенных направлениях (узких секторах) на небесной сфере. Пики соответствуют пространственным масштабам $116 \pm 10 h^{-1} \text{ Мpc}$ и имеют высокий уровень значимости, превышающий $(4 \div 5)\sigma$
3. Ещё более значимыми являются пики в спектрах мощности распределений проекций декартовых координат галактик на выделенные направления в пространстве. Для всех рассмотренных выборок направления максимальной значимости X_0 в пределах ошибок оказались близкими:
 $\alpha_0 = 175^\circ \div 177^\circ, \delta = 22^\circ \div 26^\circ$ для DR7 и
 $\alpha_0 = 167^\circ \div 171^\circ, \delta_0 = 26^\circ \div 28^\circ$ для DR12
4. Суммируя результаты мы предполагаем существование анизотропной квази-периодической структуры в эпоху $0.16 \leq z \leq 0.47$ с максимальным масштабом вдоль некоторой оси X_0 (ограниченной интервалом направлений) $\sim 800 h^{-1} \text{ Мpc}$