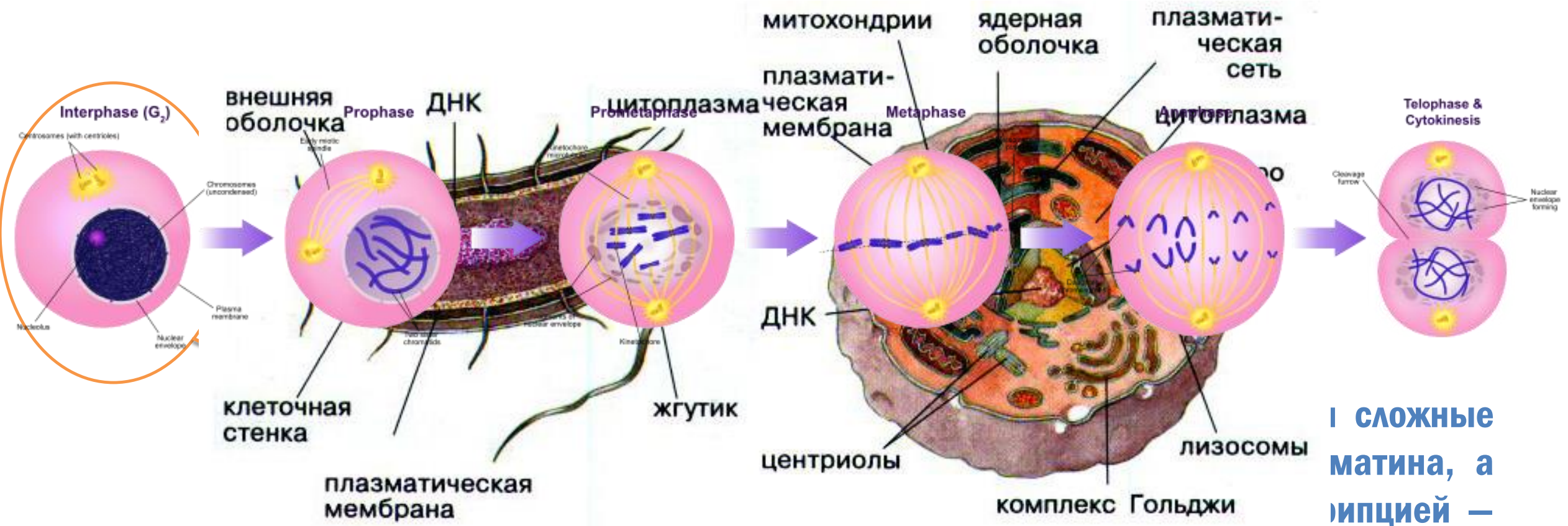


**АДДИТИВНЫЙ ЗАКОН МАСШТАБИРОВАНИЯ
СТРУКТУРНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ ХРОМАТИНА В ЯДРАХ
КУРИНЫХ ЭРИТРОЦИТОВ**

Е.Г.ЯШИНА , С.В. ГРИГОРЬЕВ



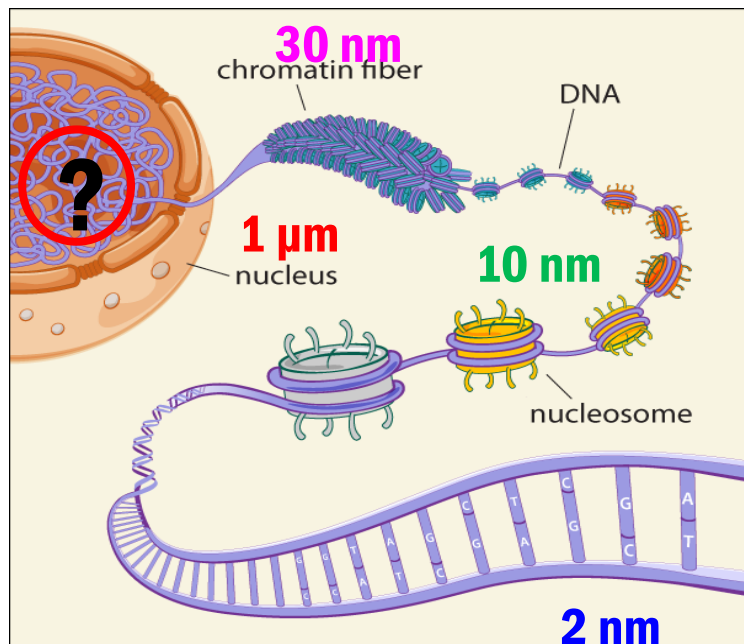
ЯДРО ИНТЕРФАЗНОЙ ЭУКАРИОТИЧЕСКОЙ КЛЕТКИ



считывание информации о структуре белка.

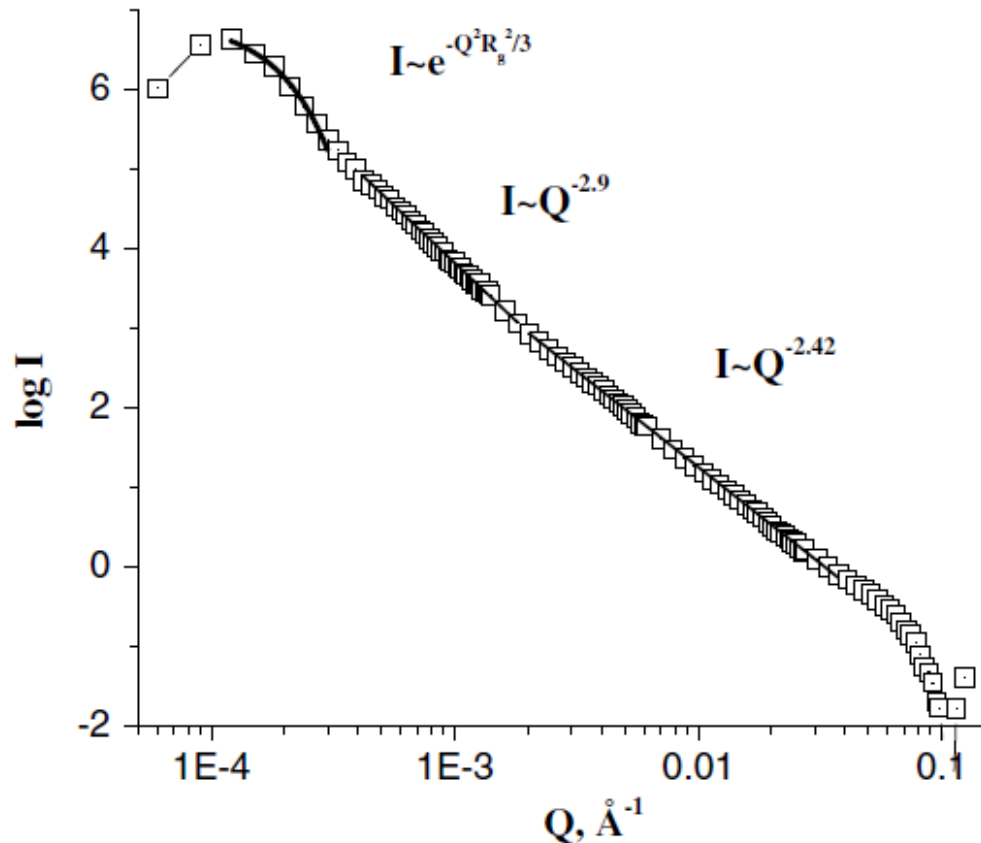
сложные
матина, а
липцией —

УРОВНИ ОРГАНИЗАЦИИ ХРОМАТИНА В ИНТЕРФАЗНОМ ЯДРЕ



1. Молекула ДНК представляет собой двойную левую спираль диаметром 2nm.
2. ДНК, накрученна на нуклеосомы диаметром $\sim 11\text{nm}$ (компактизация в 6-7 раз). Нуклеосома образована четырьмя белками - гистонами.
3. Нуклеосомы тоже упаковываются в более плотные структуры (фибриллы) диаметром 30nm (уплотнение в 40 раз). ?
4. Фракталы? – Да. – Но какие?

БИ-ФРАКТАЛЬНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ХРОМАТИНА

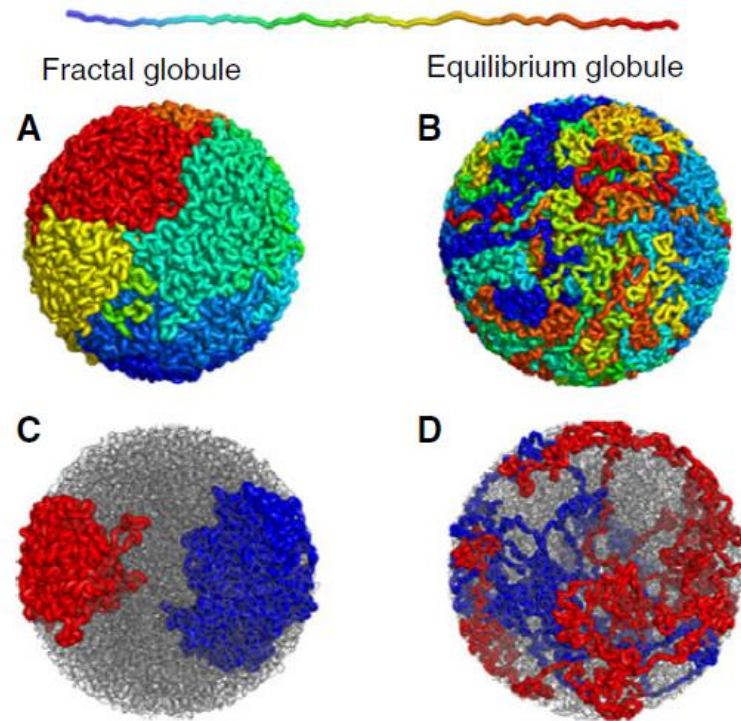


For the lower scattering angles, where the values of Q lie between 3×10^{-4} and $1.5 \times 10^{-3} \text{\AA}^{-1}$, the scattering curve plotted on a double-logarithmic scale is also linear, but the power law exponent changes, so that the slope of the linear fit becomes $D \sim 2.9$. If we stay with the notion that chromatin arrangement possesses mass fractal properties, its fractal dimension approaching the value of 3 implies that increase in the size of the scatterer is no longer accompanied by an increase in the size of the internal density variations in the mass fractal [9]. This range of Q corresponds to the linear dimensions between 400 nm and 1.5–2 μm .

FRACTAL GLOBULE

The fractal globule as a model of chromatin architecture in the cell

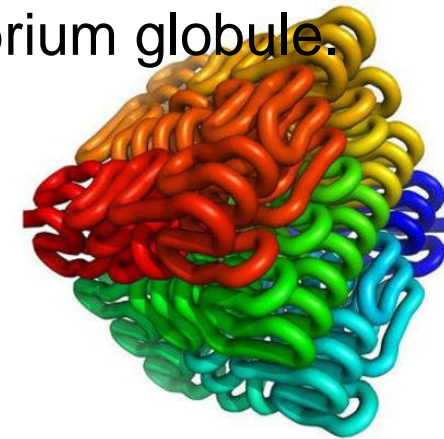
Leonid A. Mirny



The fractal globule is a compact polymer state that emerges during polymer condensation as a result of topological constraints which prevent one region of the chain from passing across another one.

Hi-C method that is capable of identifying long-range interactions in an unbiased genome-wide fashion.

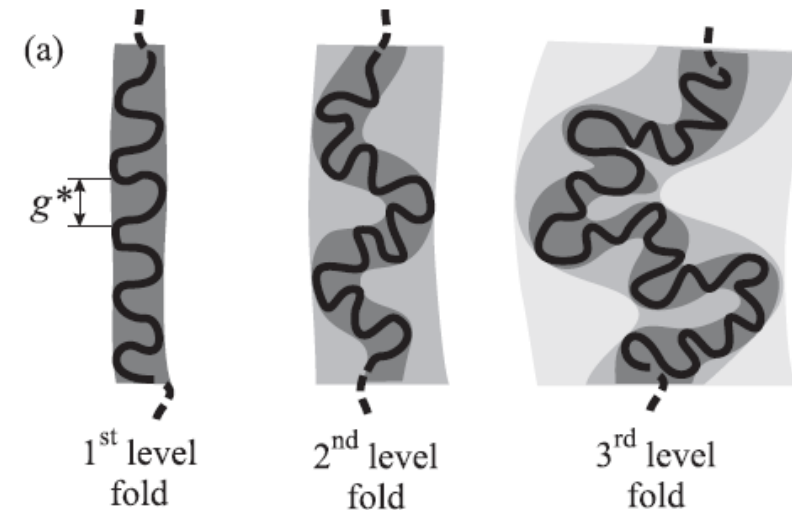
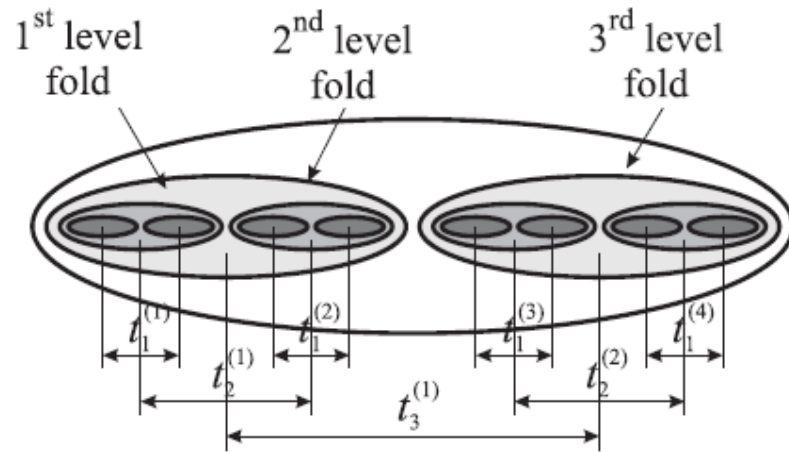
The fractal globule has a striking territorial organization, which strongly contrasts with the mixing observed in the equilibrium globule.



3D Peano curve

ФРАКТАЛЬНАЯ ГЛОБУЛА КАК МОЛЕКУЛЯРНАЯ МАШИНА

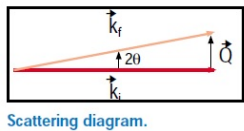
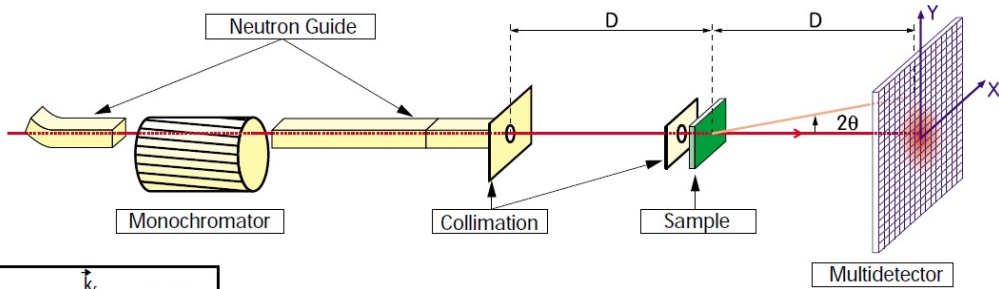
Фрактальная (складчатая) полимерная глобула, которая является необычным равновесным состоянием конденсированной незаузленной макромолекулы, экспериментально обнаруженным в укладке ДНК в хромосомах человека, сформирована путем иерархического коллапса полимерной цепи. Исследована релаксационная динамика эластичной сети, построенной по матрице контактов фрактальной глобулы. Обнаружено, что по своим динамическим свойствам фрактальная глобула подобна молекулярной машине.



[*] В. А. Аветисов, В.А. Иванов, Д.А. Мешков, С.К. Нечаев,
Письма в ЖЭТФ, том 98, вып. 4, с. 270-274, 2013

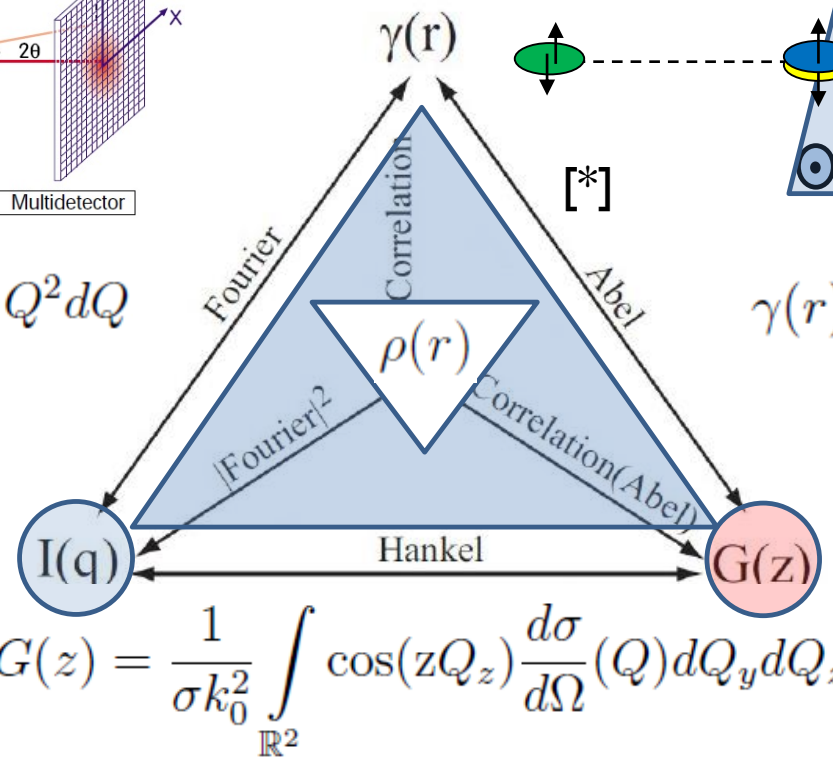
МАЛОУГЛОВОЕ РАССЕЯНИЕ НЕЙТРОНОВ (МУРН) И СПИН-ЭХО МУРН

$$\gamma(\vec{r}) = \left\langle \iiint_V \rho(\vec{r}') \rho(\vec{r}' + \vec{r}) d^3\vec{r}' \right\rangle$$

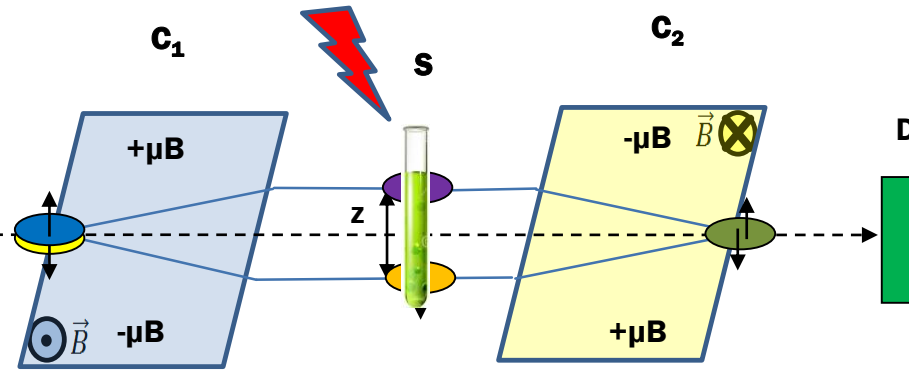


$$\gamma(r) = \int_0^\infty \frac{\sin(Qr)}{Qr} I(Q) Q^2 dQ$$

1 nm - 1 mkm
МУРН



$$G(z) = \frac{1}{\sigma k_0^2} \int_{\mathbb{R}^2} \cos(zQ_z) \frac{d\sigma}{d\Omega}(Q) dQ_y dQ_z$$

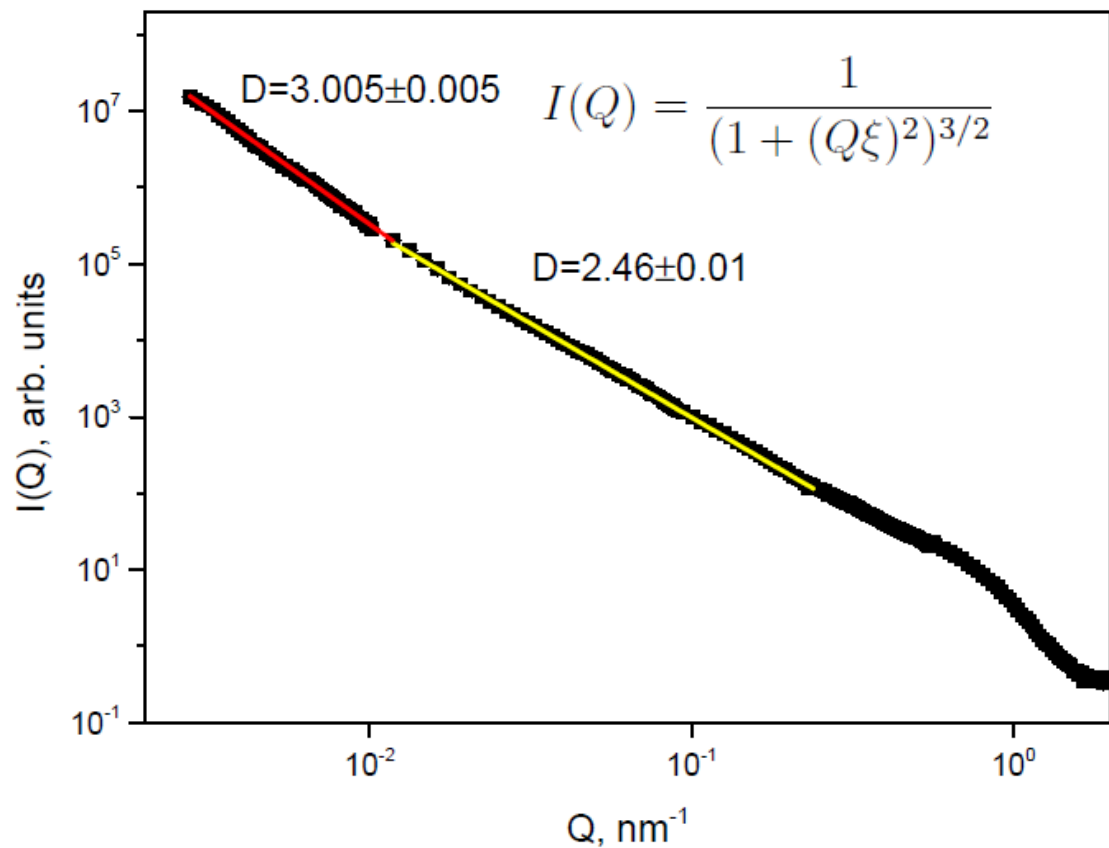


$$\gamma(r) = -\frac{\xi}{\pi} \int_r^\infty \frac{G'(z)}{\sqrt{z^2 - r^2}} dz$$

0.1 mkm - 20 mkm
Спин-эхо МУРН

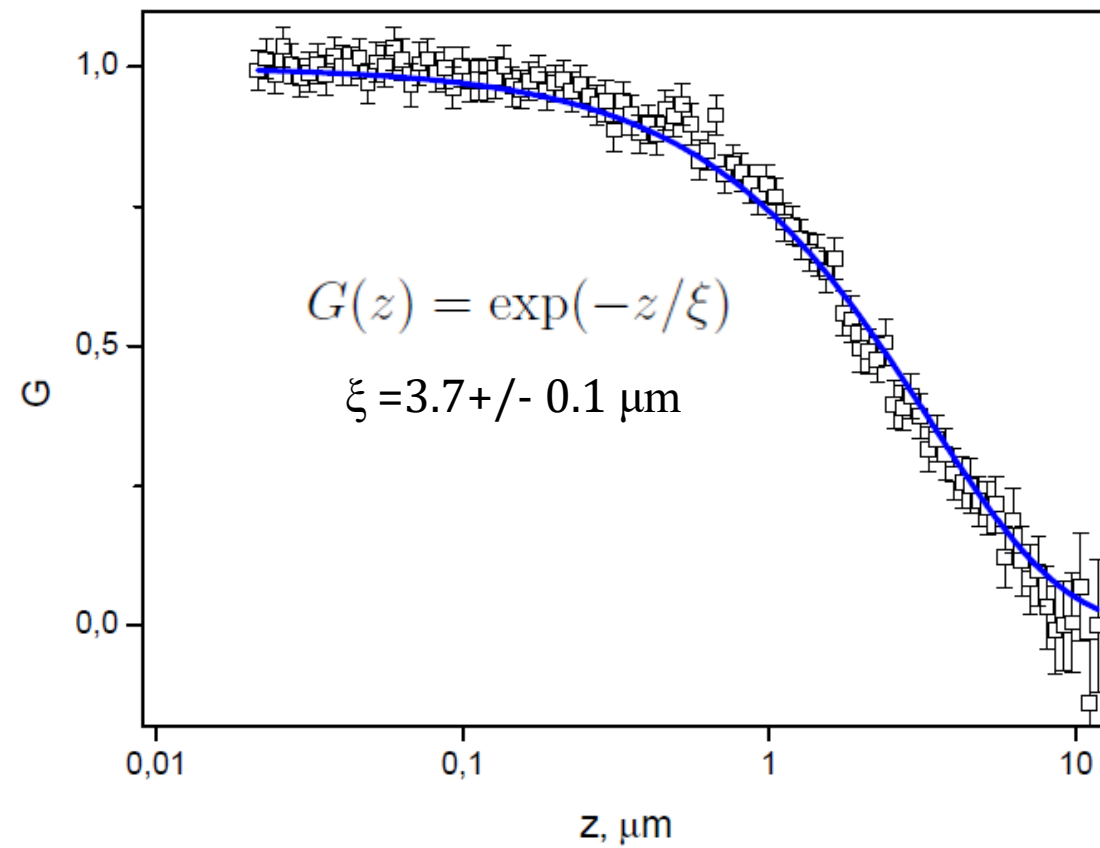
[*] Krouglov, T., de Schepper, I. M., Bouwman, W. G. & Rekveldt, M. Th.(2003a). J. Appl. Cryst. 36, 117-124

МУРН



TPA, RA20 LLB, Сакле, Франция

СЭМУРН



SESANS, Делфт, Нидерланды

КОРРЕЛЯЦИОННАЯ ФУНКЦИЯ

$$I(Q) = \frac{1}{(1 + (Q\xi)^2)^{3/2}} \longleftrightarrow G(z) = \exp(-z/\xi)$$

$$\gamma(r) = \frac{1}{\pi} K_0(r/\xi)$$

При $r/\xi < 1$ $\gamma(r) \sim \ln(\xi/r)$

Масштабное свойство корреляционной функции

$$\gamma(r/a) = \gamma(r) + \ln(a)$$

Уменьшение масштаба дает аддитивную добавку к корреляционной функции, а не мультипликативную, как в случае объемного фрактала.

$$\gamma(r/a) = \frac{\gamma(r)}{a^{D_m}}$$

$$V(r) = 4\pi \int_0^r r'^2 \gamma(r') dr' \longrightarrow V(r) = r^3 \ln(1/r)$$

9. СУБРАЗМЕРНОСТНАЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ

Если внутренняя пробная функция множества S имеет вид $h_S(\rho) = \gamma(D)\rho^D$, свойства фрактала полностью описываются его размерностью D . Если же

$$[*] \quad h_S(\rho) = \rho^D [\ln(1/\rho)]^{\Delta_1} [\ln \ln(1/\rho)]^{\Delta_2},$$

то описание фрактальных свойств множества S оказывается более громоздким. Одной размерностью в этом случае не обойтись, требуется последовательность D, Δ_1, Δ_2 . Величины Δ_m можно назвать *субординатными размерностями* или *субразмерностями*.

[*] Б. Мандельброт, Фрактальная геометрия природы, 1983

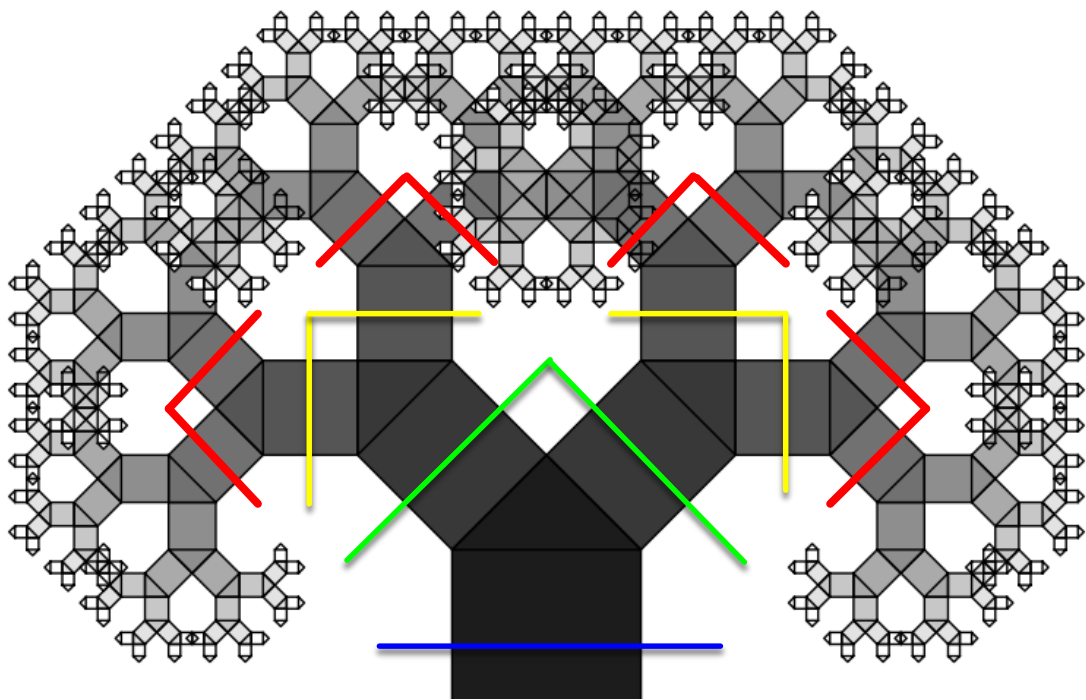
$$\mu(r) = r^{D_f} \ln^{-\Delta}(1/r)$$

Δ - **подразмерность**

ЗАКОН РОСТА ДЕРЕВА

“All the branches of a tree at every stage of its height when put together are equal in thickness to the trunk (below them)”.

Da Vinci



Logarithmic fractals and hierarchical deposition
of debris

Joseph O. Indekeu*, Gunther Fleerackers

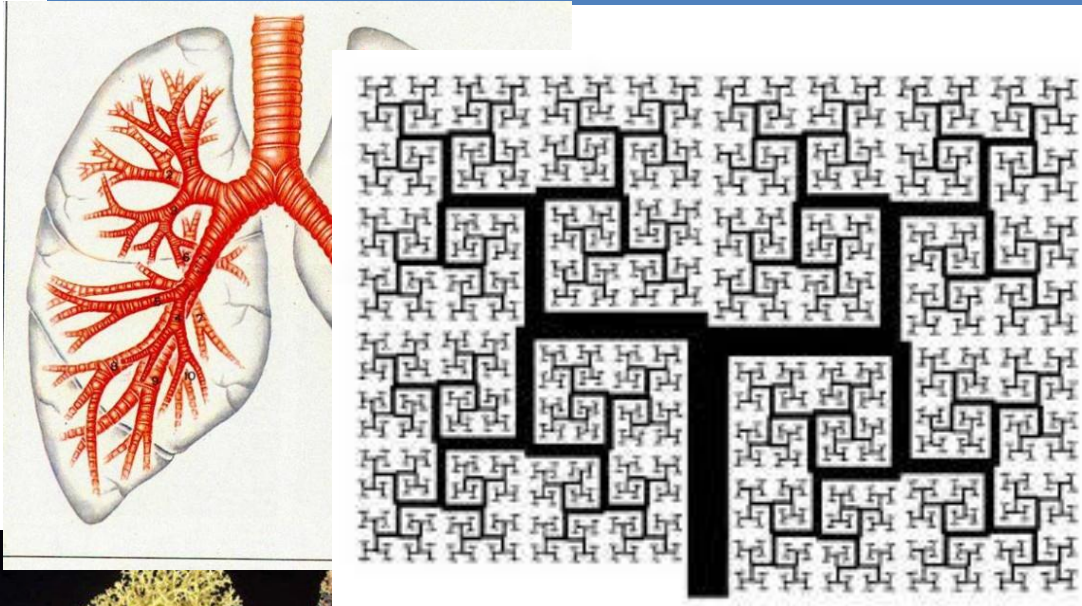
Laboratorium voor Vaste-Stoffysica en Magnetisme, Katholieke Universiteit Leuven, Celestijnenlaan
200D, B-3001 Leuven, Belgium

Received 15 September 1998

$$\mu(\mathbf{r}) = S(\mathbf{r}) = r^2 \ln^{-1}(1/r)$$

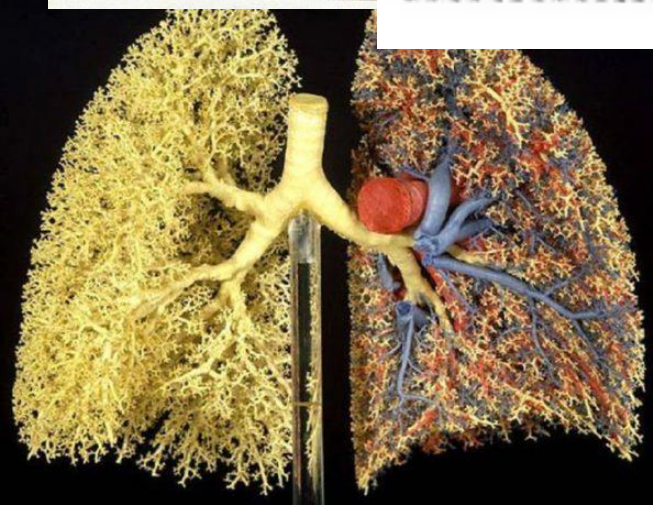
The resulting fractal is self-similar but non-uniform. The object can be “dated” locally, since the size of the sections is indicative of their age. Covering the object with squares of linear size $\rho = 1, 1/2, 1/4, \dots$ one finds that the number of squares times $\rho^2 / \log(1/\rho)$ tends to the value $1/\log 2$ in the limit $\rho \rightarrow 0$. In conclusion, this fractal is characterized by $D_F = 2$ and $\Delta_1 = -1$. We furthermore propose the term *fractal*

ЗАПОЛНЕНИЕ БРОНХАМИ ТРЕХМЕРНОГО ПРОСТРАНСТВА



Разветвления бронхов в легких описываются логарифмическим фракталом с $D_F = 3$ и $\Delta = -1$. Строится он аналогичным образом, как и предыдущий, только вместо двумерных сечений берутся трехмерные цилиндры, которые характеризуются объемом. Такое строение обеспечивает наименьшее сопротивление воздуха в легких. При этом выполняется условие постоянства отношения сопротивления к поперечному сечению на всех участках системы, как до, так и после разветвления [35].

$$\mu(r) = r^{D_f} \ln^\Delta (1/r)$$

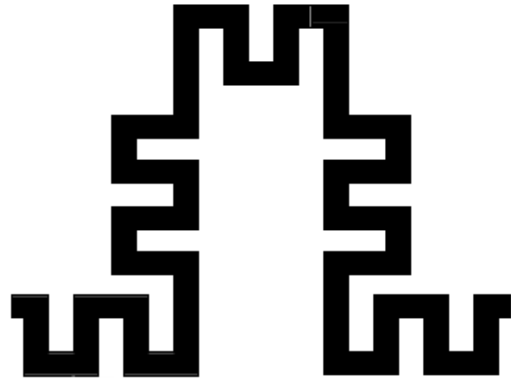


МОДЕЛЬ УКЛАДКИ ХРОМАТИНА В ИНТЕРФАЗНОМ ЯДРЕ

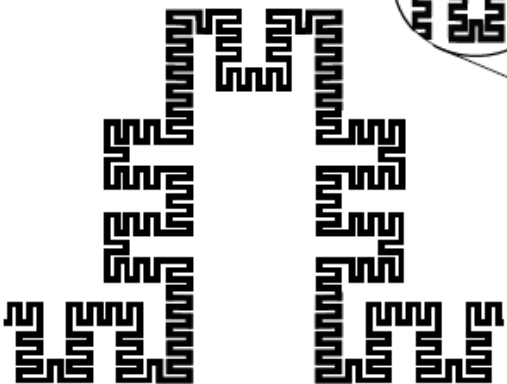
I generation



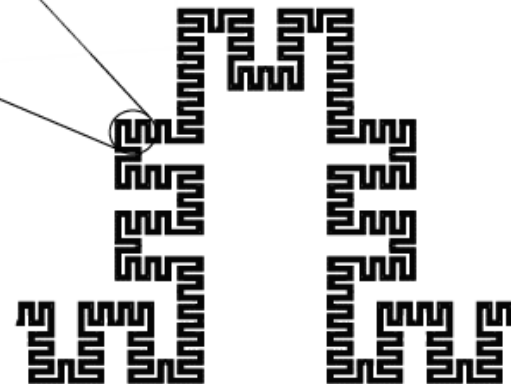
II generation



III generation



IV generation



Структурная организация хроматина в ядрах куриных эритроцитов является логарифмическим фракталом с

$$V(r)=r^3 \ln(1/r)$$

$D_f=3$ и $\Delta=1$ на масштабах от сотен до тысячи нанометров. Стартуя с трехмерного плотного пространства, мы с каждой итерацией вычитаем объем, так что выполняется следующее условие на каждой итерации $V_n=V_{n+1}/n$.

Так на первой итерации из плотного пространства вычитается площадь, формируя первичную складку, так что объем уменьшается вдвое.

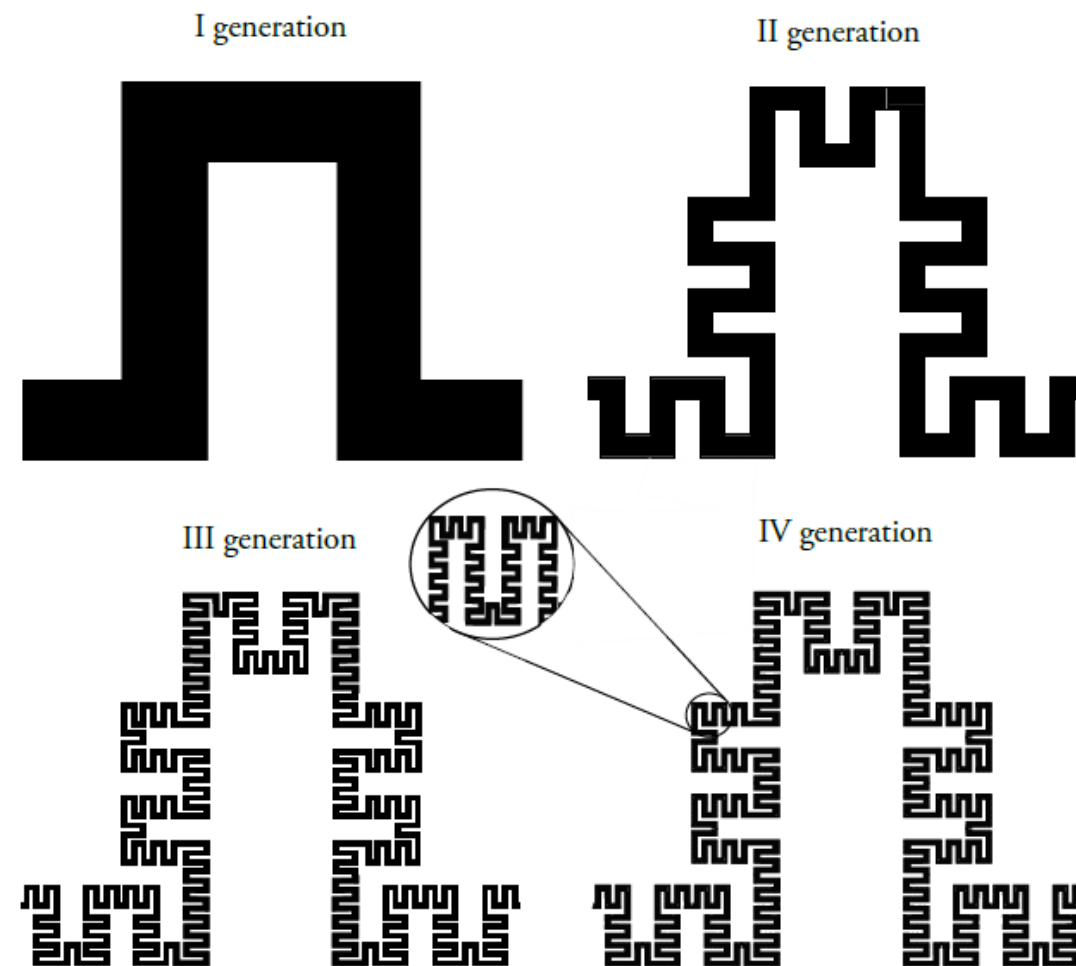
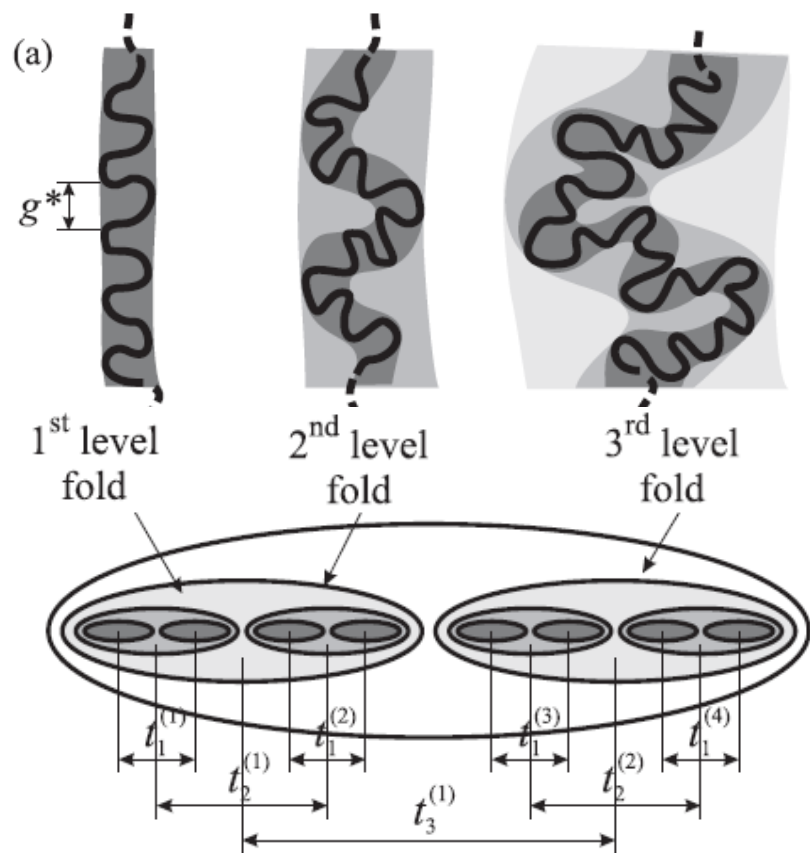
Далее, в том месте, где складка однородна вычитается площадь, формируя складки второго поколения и объем, занимаемый фракталом равен трети от первоначального. Число и густота складок на каждом следующем поколении увеличивается.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!



ЭДВАРД
РУКИ-ЭДВАРДЫ

ФРАКТАЛЬНАЯ ГЛОБУЛА



[*] Мешков Д.А., Аветисов В.А., Наноструктуры. математическая физика и моделирование, том 13, №1, 5-98, (2015)

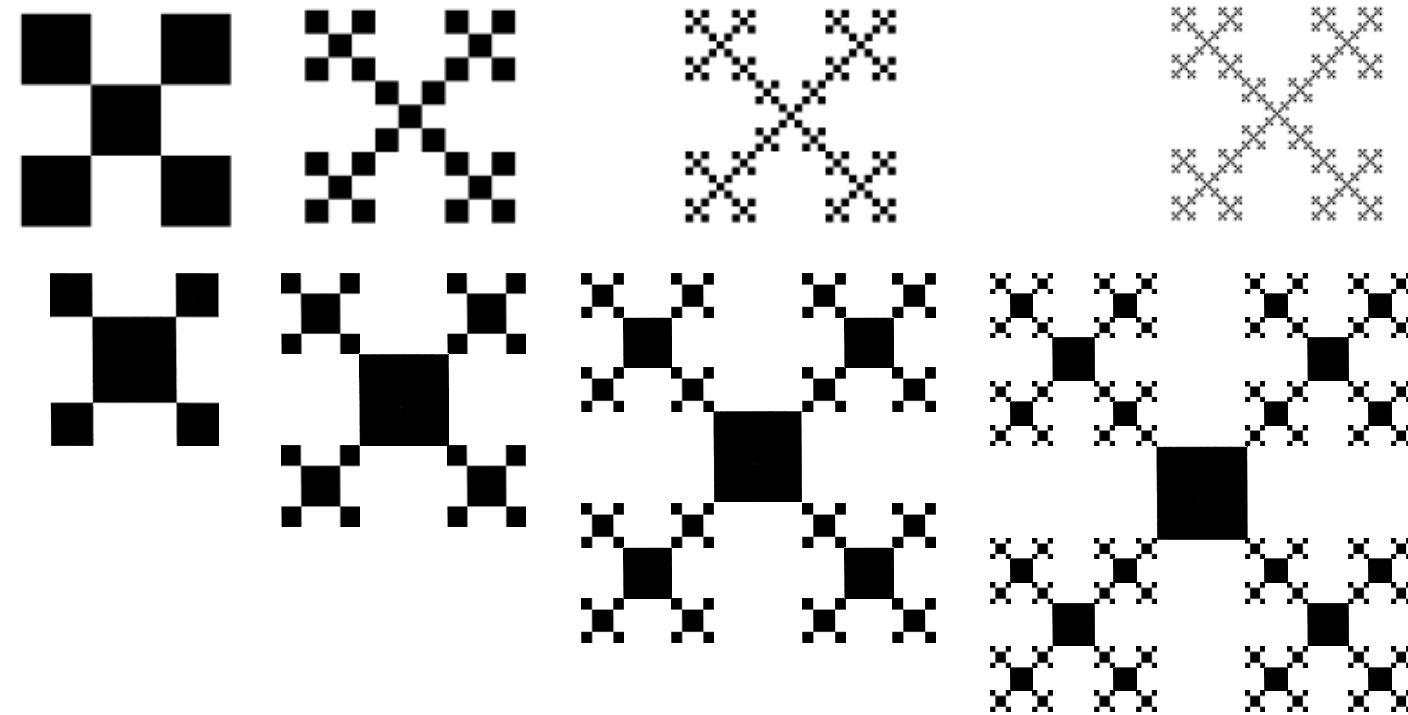
СРАВНЕНИЕ ОБЫЧНОГО ФРАКТАЛА С ЛОГАРИФМИЧЕСКИМ

Depth 1

Depth 2

Depth 3

Depth 4



Построение обычного фрактала

$$D_f \approx 1.46497, \mu(r) = r^{D_f}$$

Логарифмический фрактал,
описывающий закон роста дерева

$$\mu(r) = r^2 / \ln(1/r), \quad D_F = 2, \Delta = -1$$

