

Системная биология – сети

М.Гельфанд
«Сравнительная геномика»

БиБи 4 курс

разные сети

- белок-белковые взаимодействия
- регуляторные сети (фактор-ген)
- метаболические

свойства сетей

- N = количество вершин
- распределение степеней вершин
 $P(k)$ = вероятность того, что у случайно взятой вершины будет k ребер
- средняя длина пути между вершинами L

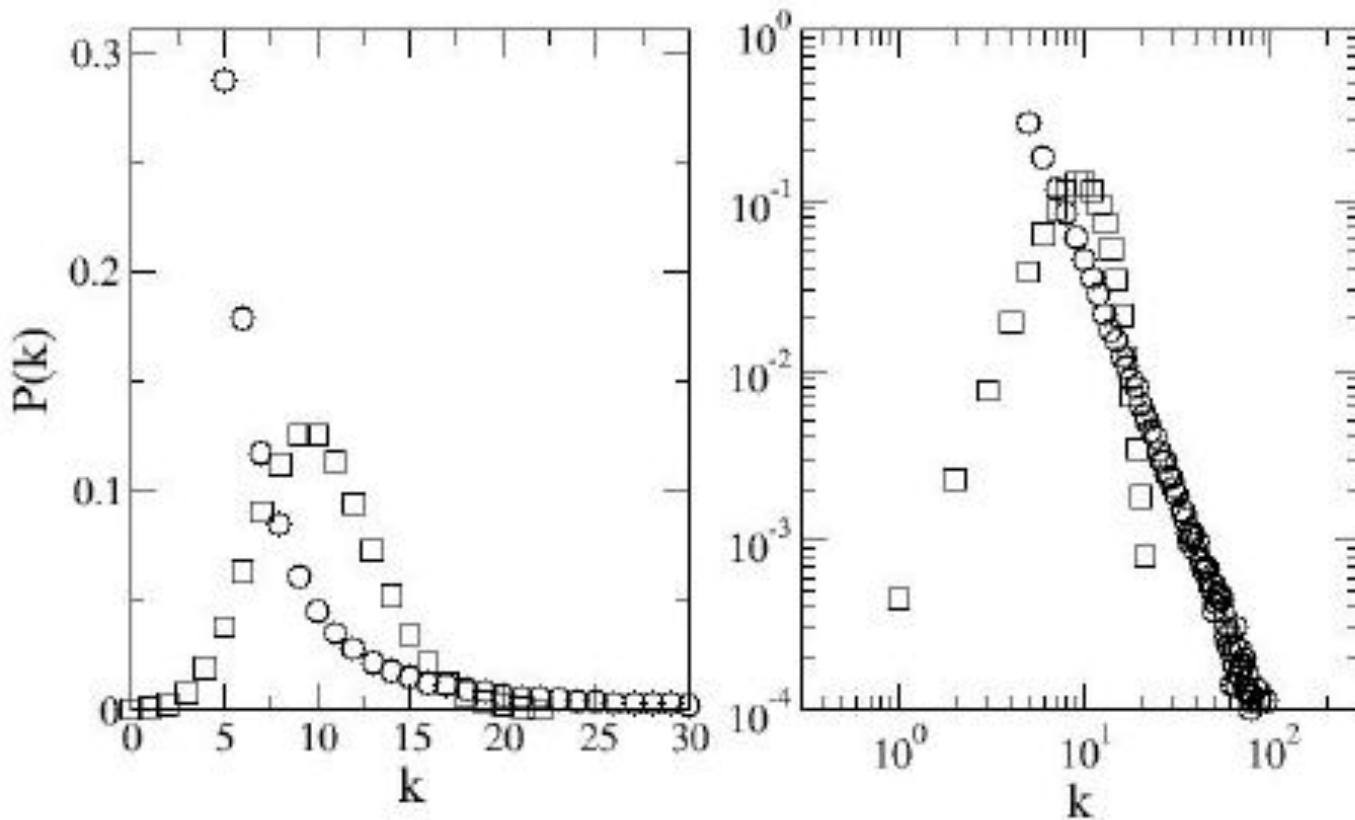
случайная сеть

- пуассоновское распределение
 $P(k) = \exp(-\lambda) \lambda^k / k!$
- Теорема Эрдеша-Реньи: фазовый переход – возникновение гигантской компоненты
- средняя длина пути $\sim \log N$

scale-free network

- $P(k) \sim k^{-\gamma}$
- $\gamma > 3$ – ничего особенного
- $2 < \gamma < 3$ – hubs, иерархия
- $\gamma = 2$ большой hub, соединенный с большой долей вершин
- При $\gamma < 3$ удаление случайной вершины не разрушает сеть, удаление hub'a – разрушает
- средняя длина пути (при $2 < \gamma < 3$) $\sim \log \log N$

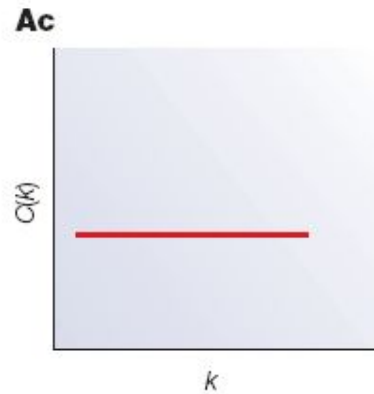
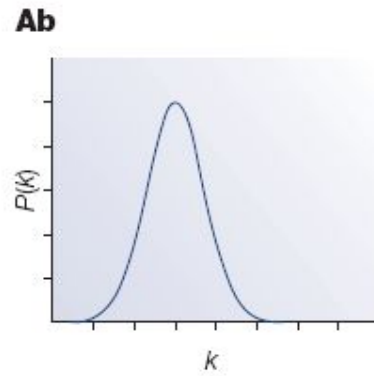
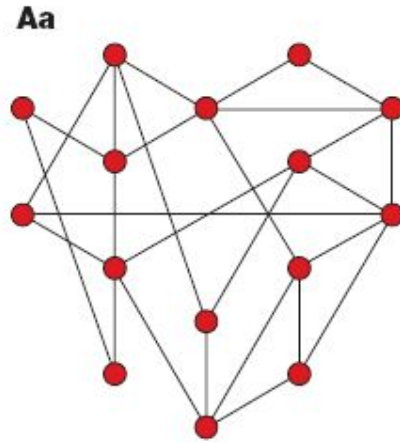
Random and scale-free $P(k)$ (linear and log scales)



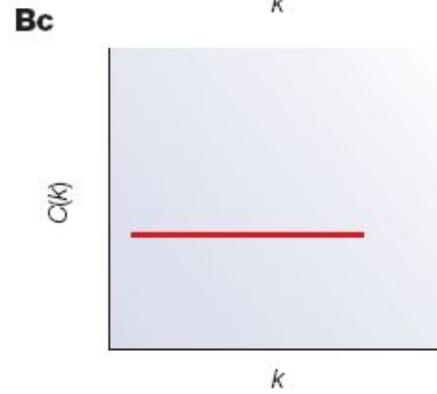
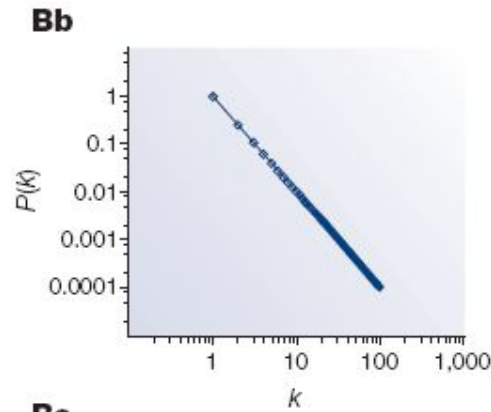
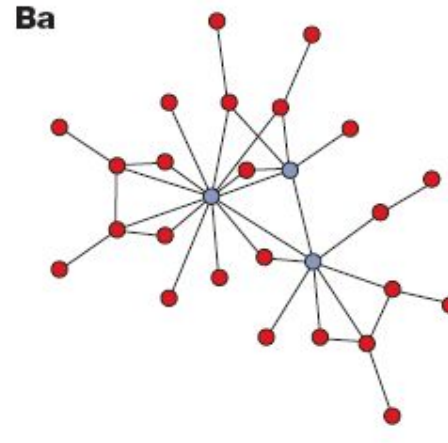
Коэффициент кластеризации

- Мера связи между соседями данной вершины

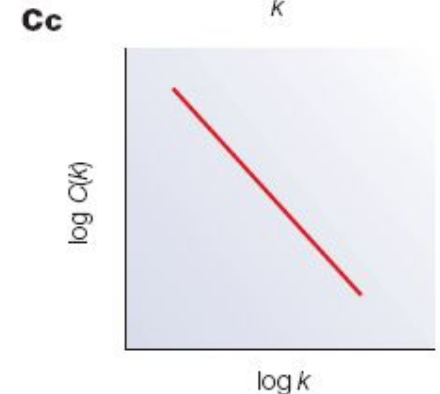
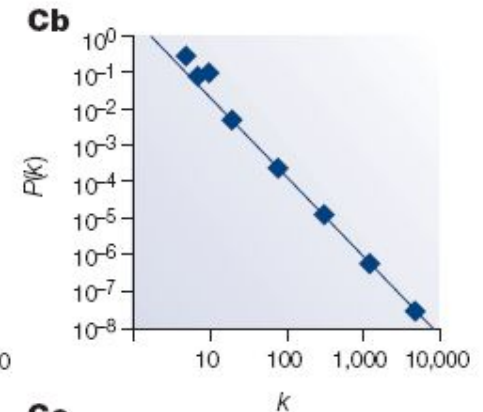
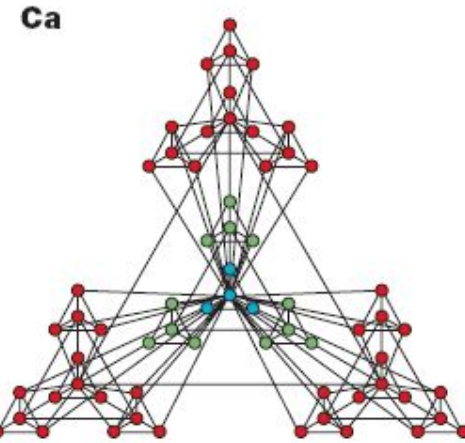
A Random network



B Scale-free network



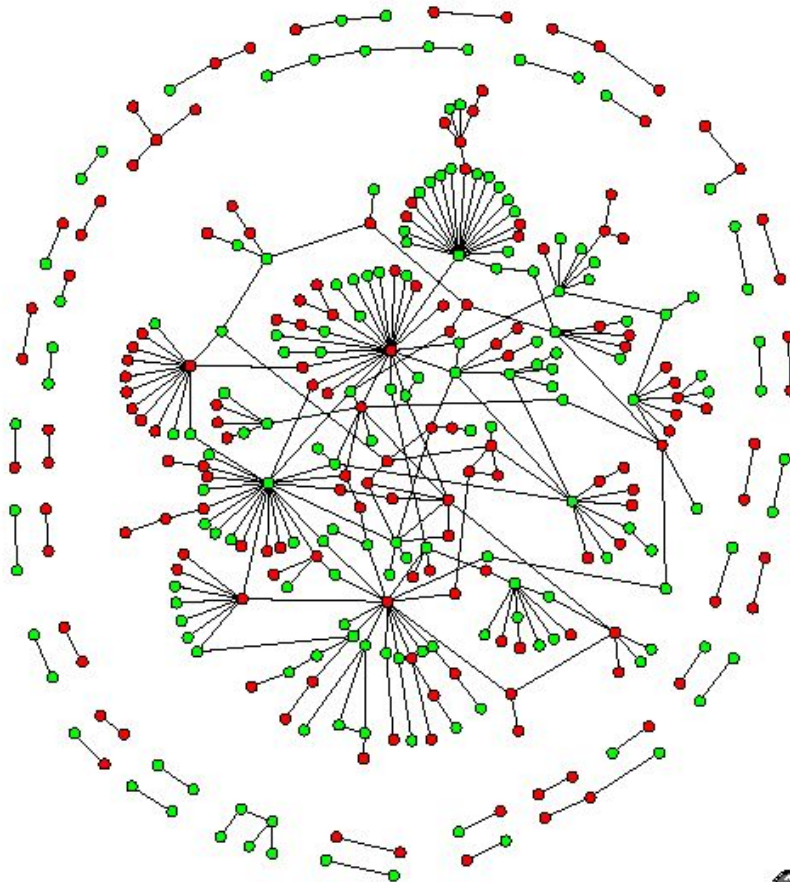
C Hierarchical network



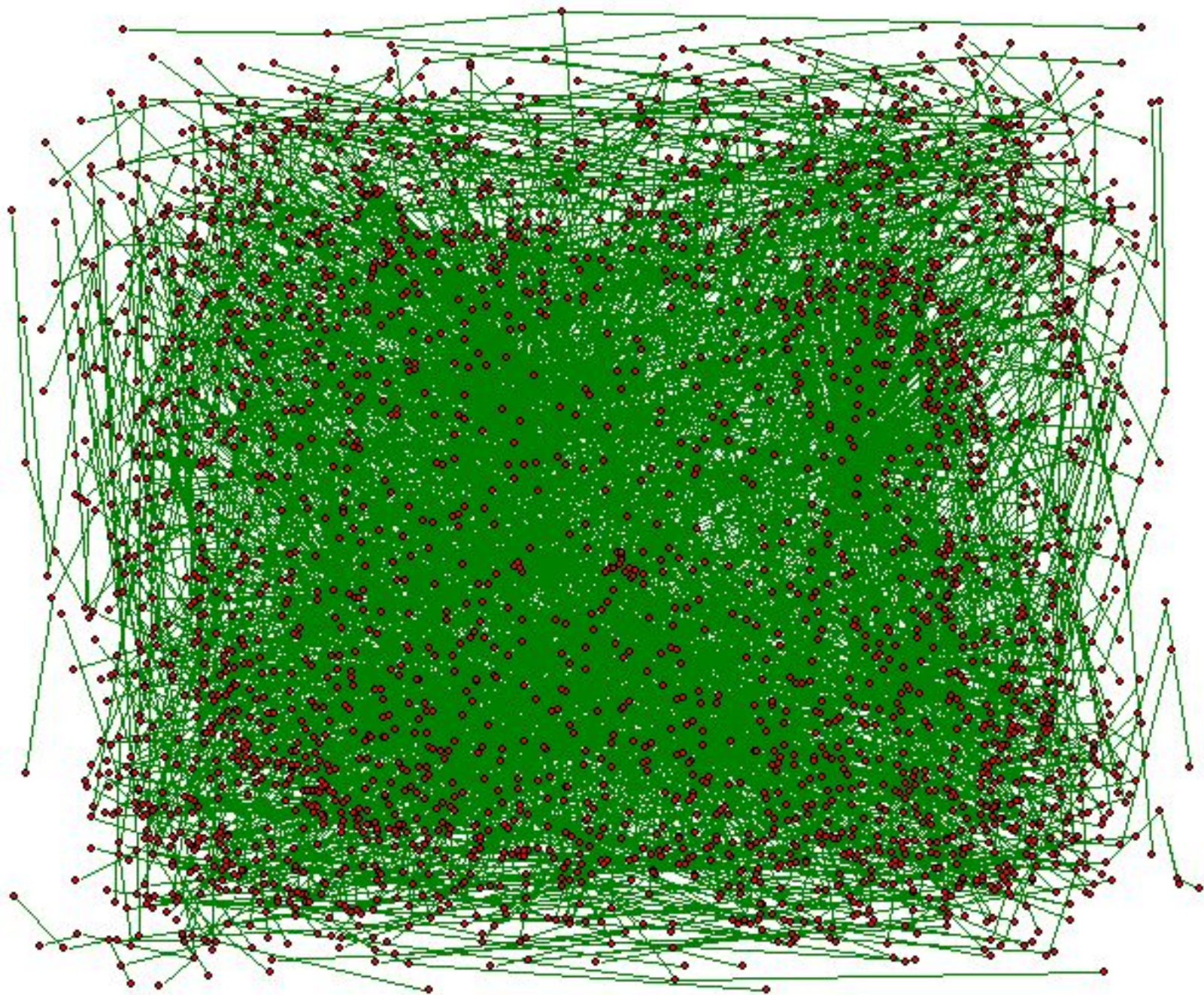
примеры

- белок-белковые взаимодействия
- синтетические летали
- регуляция транскрипции
- метаболические сети

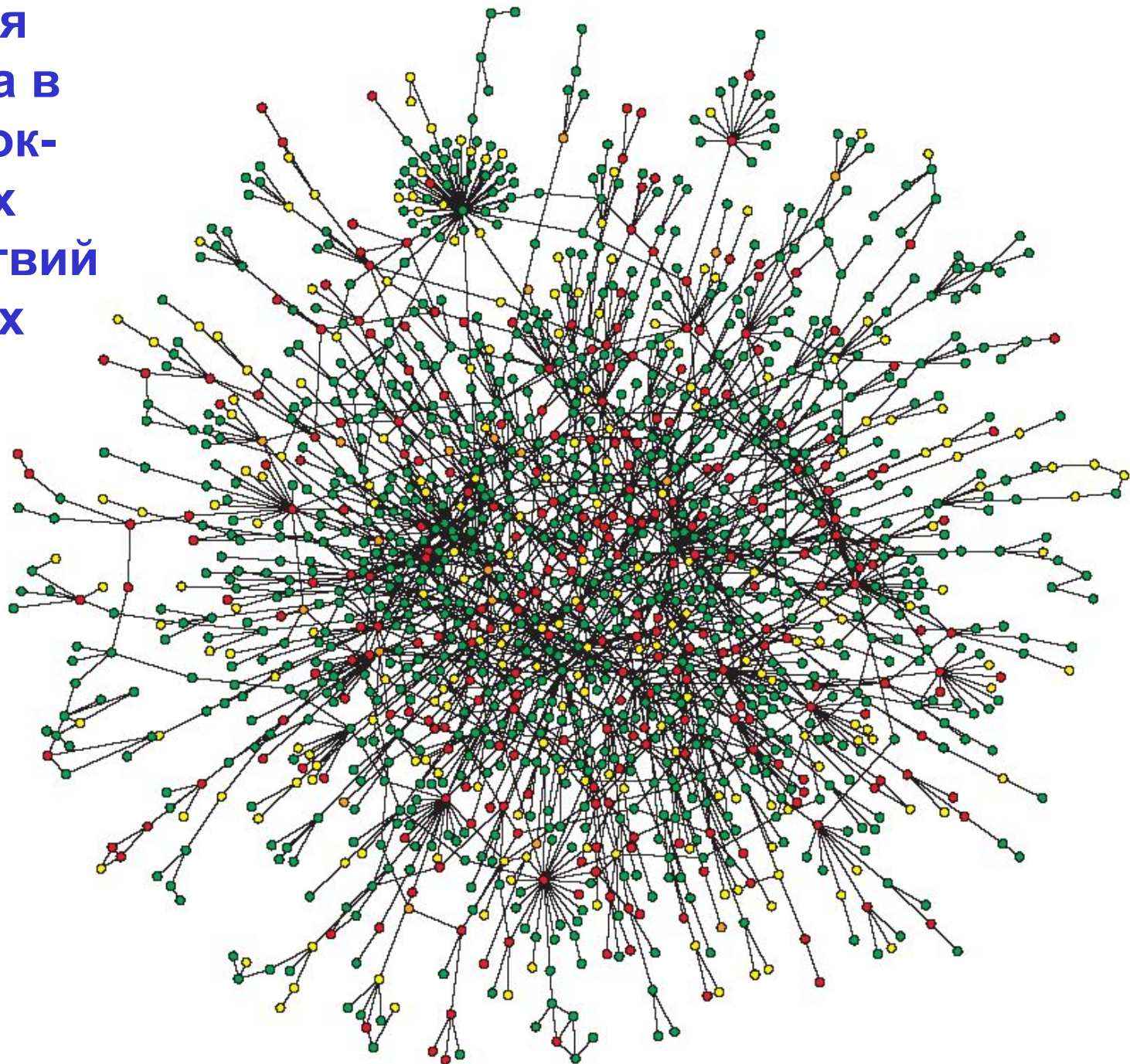
Yeast protein interaction network



- Data from the high-throughput two-hybrid experiment (T. Ito, *et al.* PNAS (2001))
- The full set containing 4549 interactions among 3278 yeast proteins
- 87% nodes in the largest component
- The highest connected protein interacts with 285 others!
- Figure shows only nuclear proteins

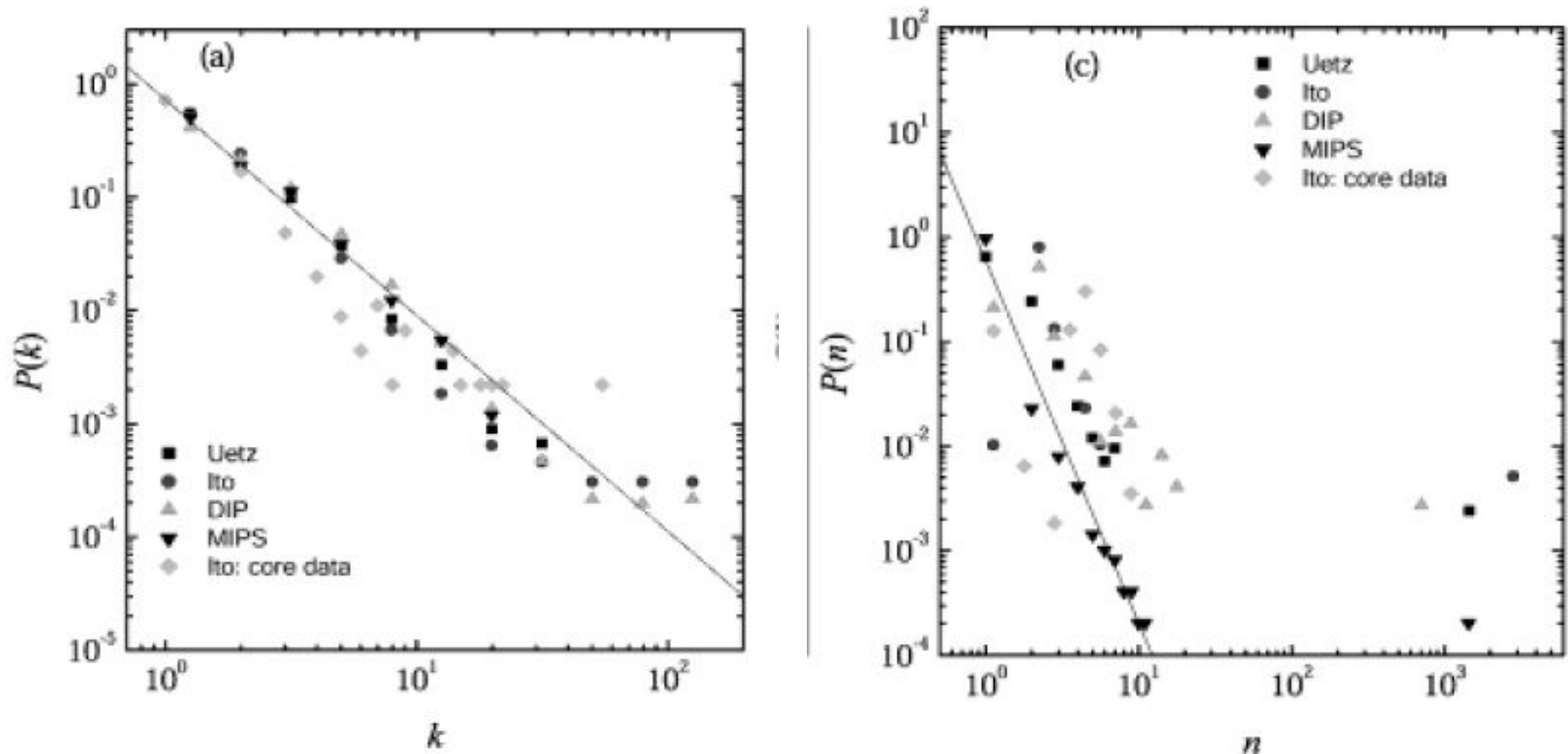


Гигантская компонента в графе белок- белковых взаимодействий в дрожжах

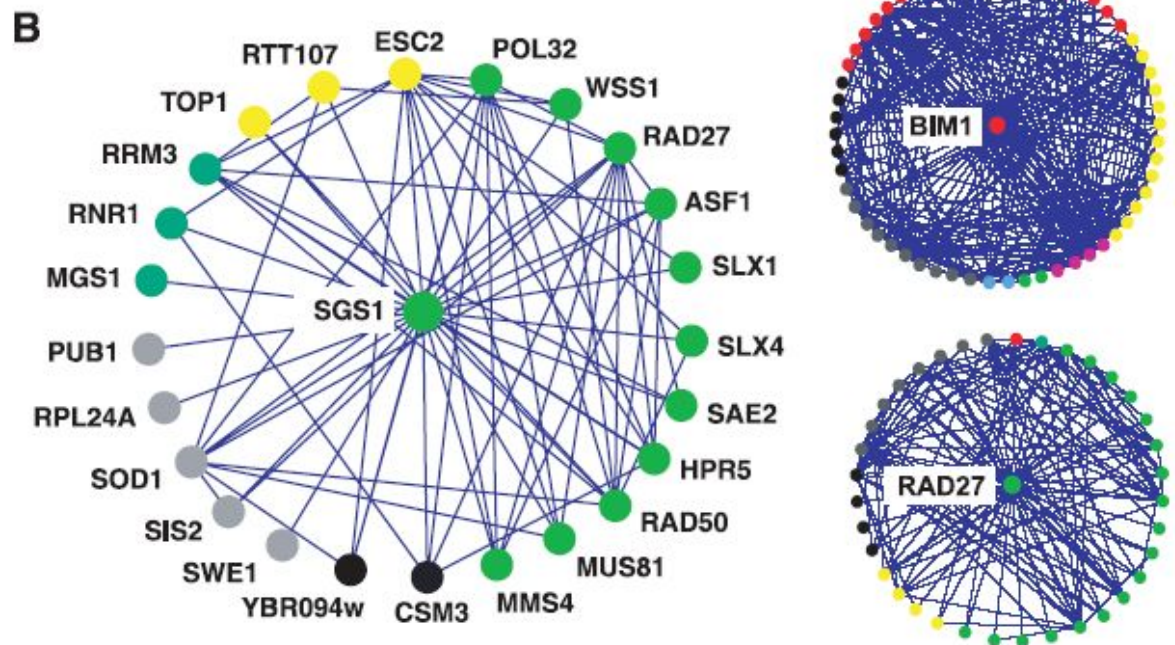
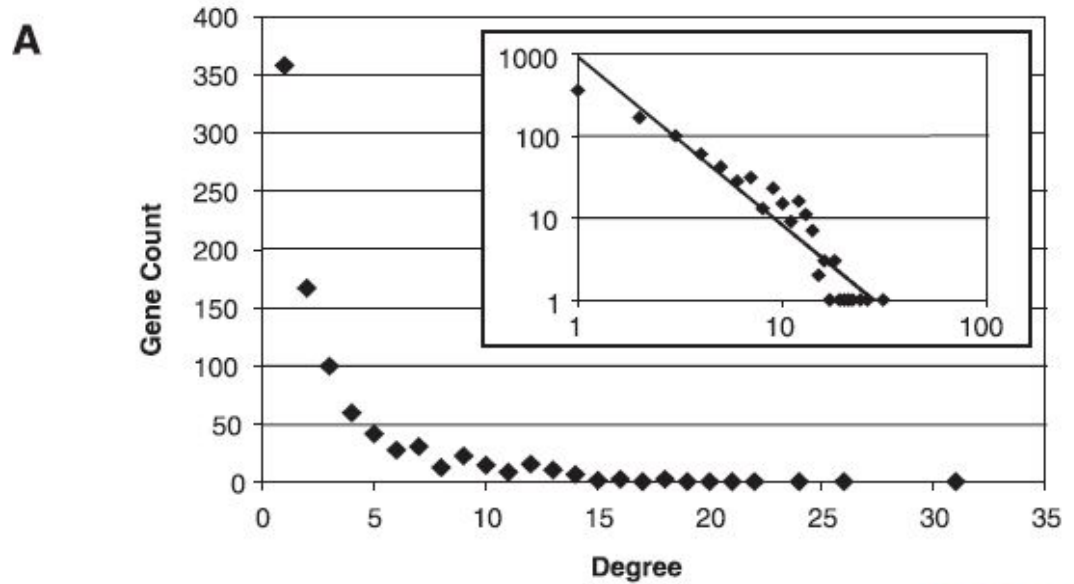


- Красный – летальная мутация
- Оранжевый – медленный рост
- Желтый – неизвестно
- Зеленый – нелетальная мутация

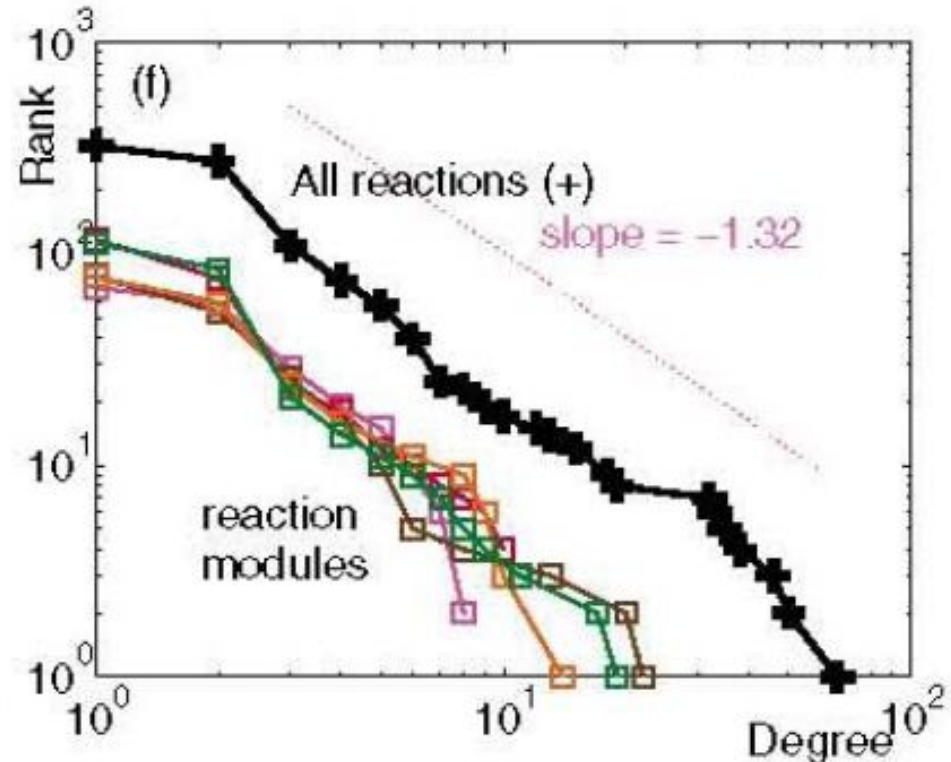
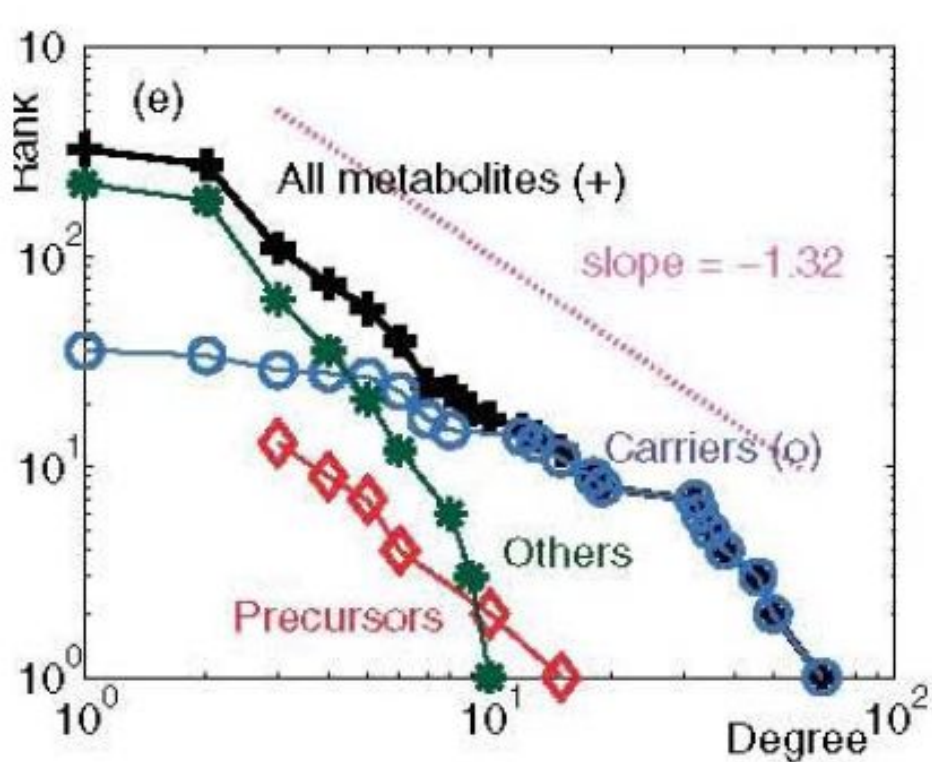
Белок-белковые взаимодействия в дрожжах: $P(k)$ и размеры связных компонент



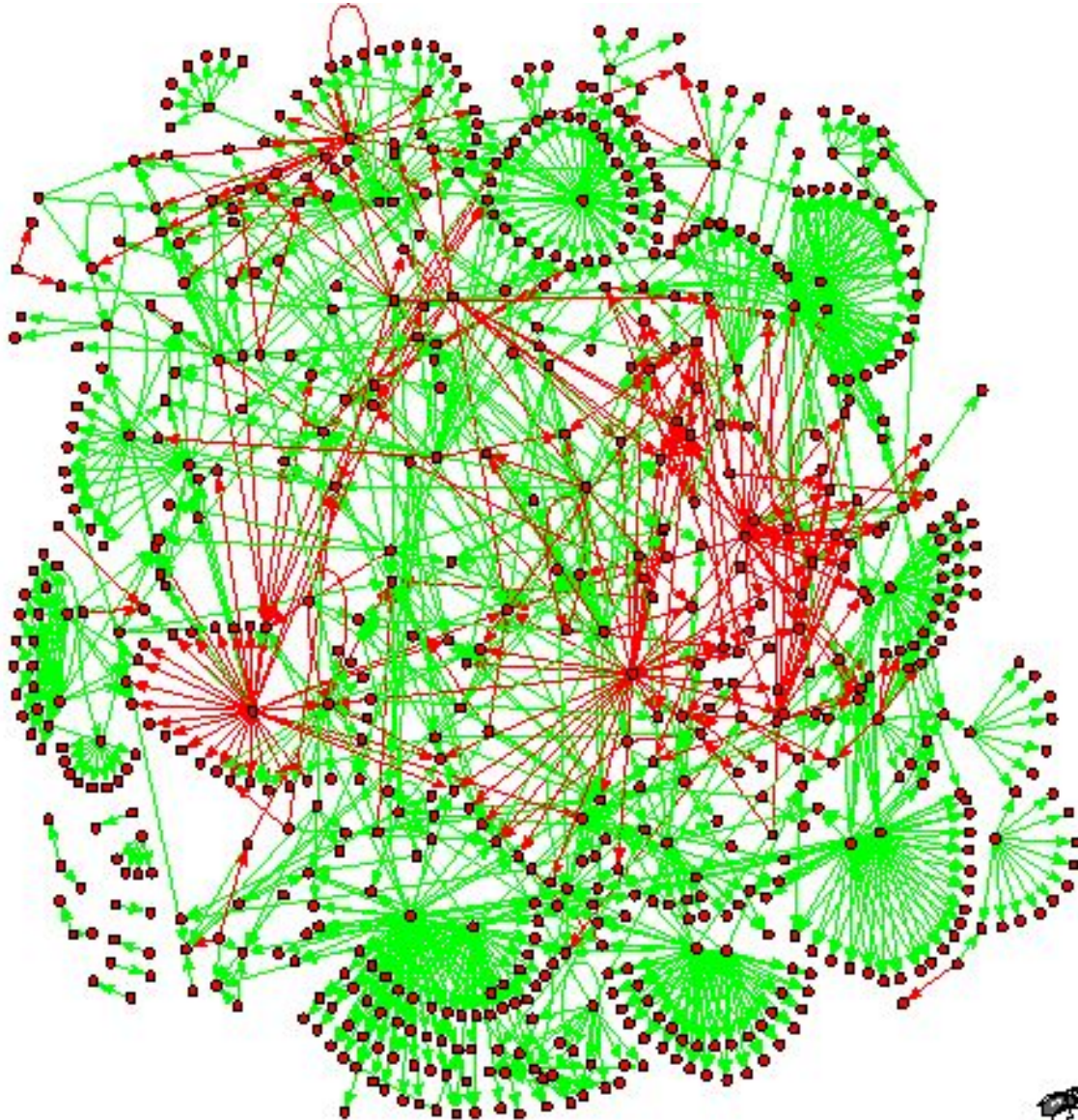
Synthetic lethals in yeast



Rank vs. degree for metabolites and reactions in *Helicobacter pylori*

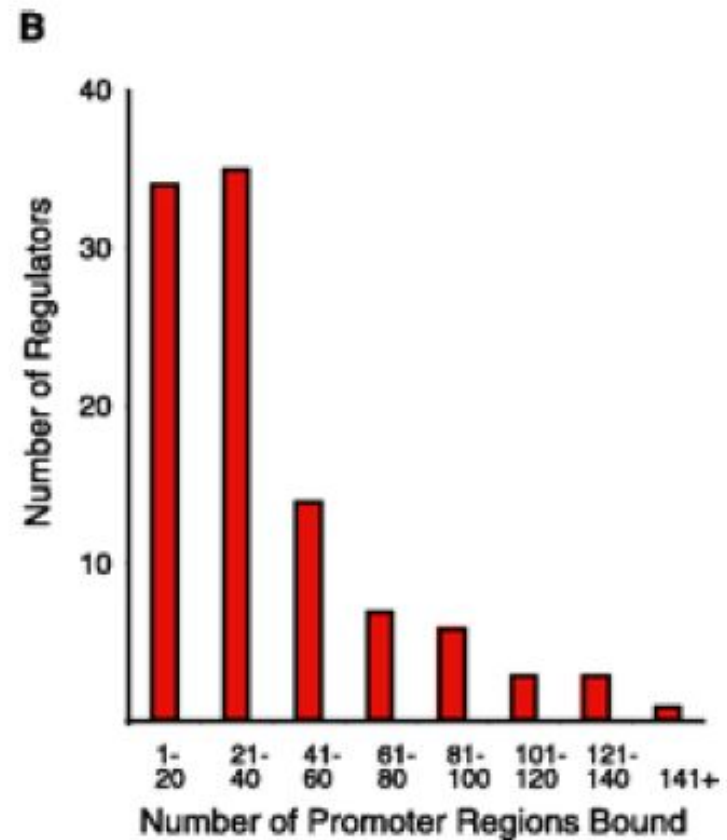
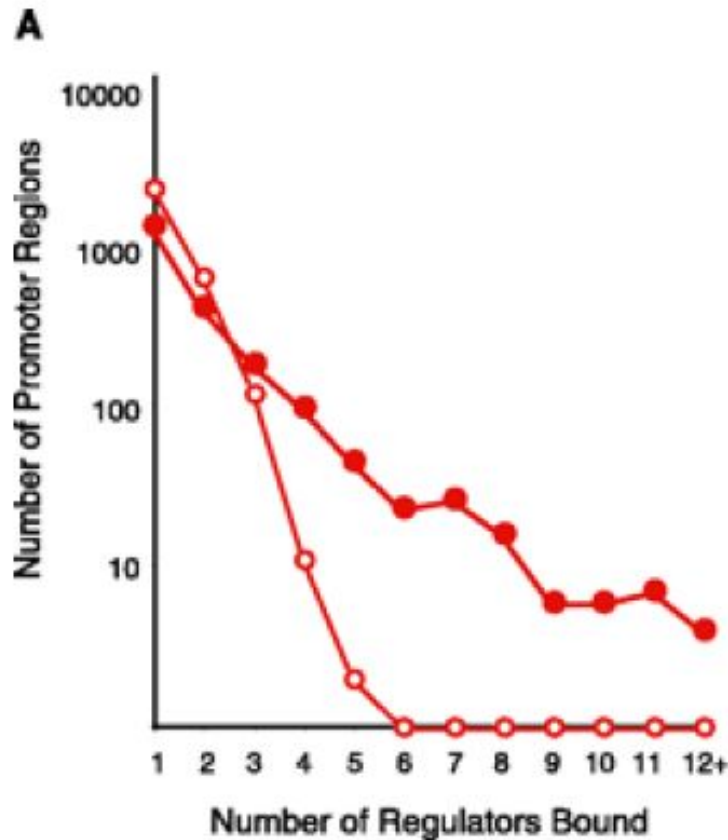


Transcription regulatory network in baker's yeast



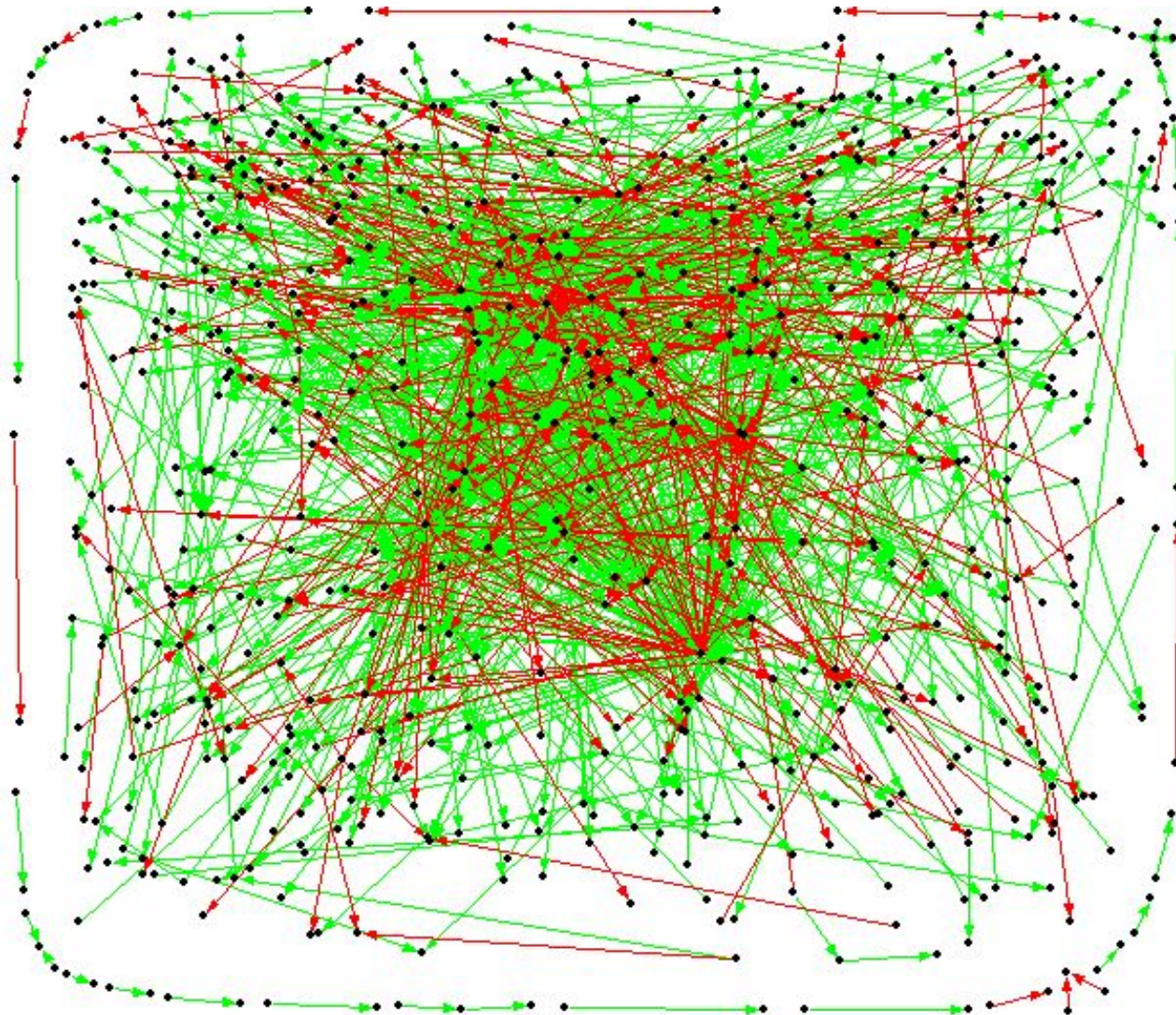
- Downloaded from the YPD database: 1276 regulations among 682 proteins by 125 transcription factors (10 regulated genes per TF)
- Part of a bigger genetic regulatory network of 1772 regulations among 908 proteins
- Positive to negative ratio 3:1
- Broader distribution of out-degrees (up to 72) and more narrow of in-degrees (up to 21)

регуляция транскрипции (дрожжи, ChIP-chip)



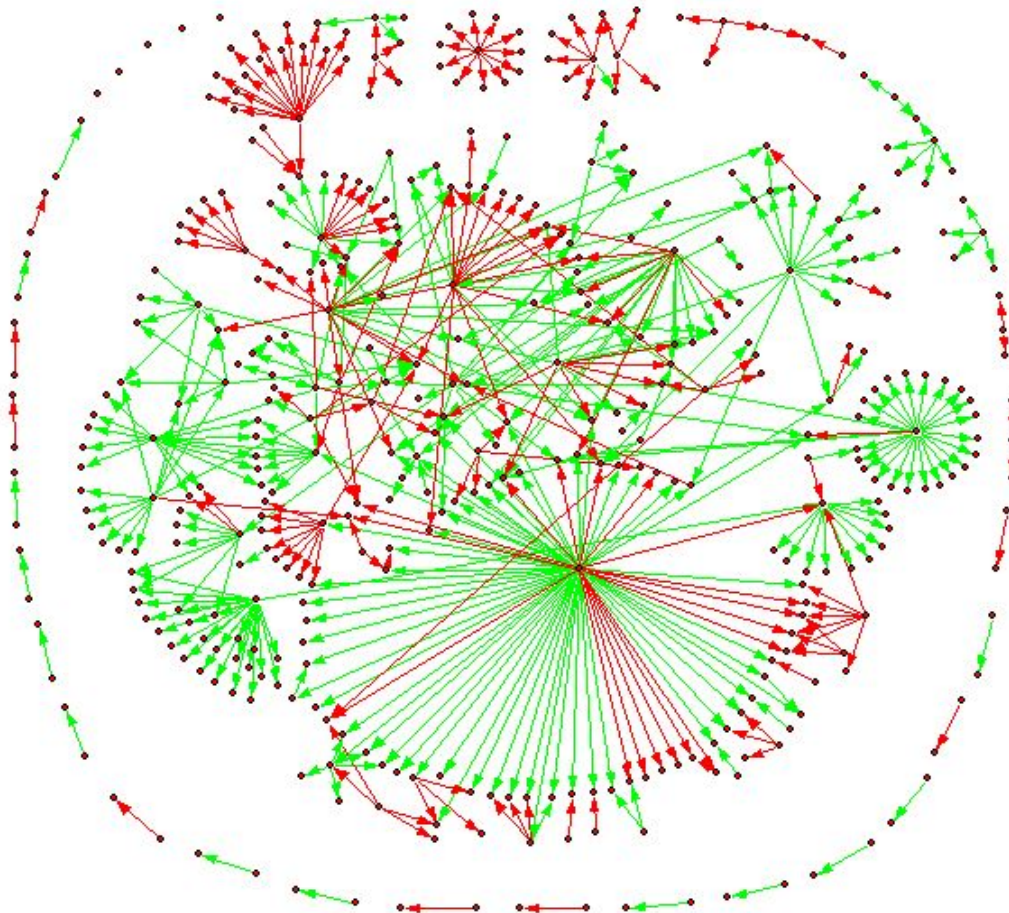
- A: in-degree (относительно регулируемых генов): гистограмма (в полулогарифмических координатах) количества промоторов с заданным числом регуляторов – экспоненциальное распределение (у большинства генов мало регуляторов). Пустые кружки – случайный граф
- B: out-degree (относительно факторов): гистограмма количества факторов, связывающих заданное количество промоторов – scale-free

Transcription regulatory network in *Homo Sapiens*



- Data courtesy of **Ariadne Genomics** obtained from the literature search: **1449** regulations among **689** proteins
- Positive to negative ratio is **3:1 (again!)**
- Broader distribution of out-degrees (up to **95**) and more narrow of in-degrees (up to **40**)

Transcription regulatory network in *E. coli*



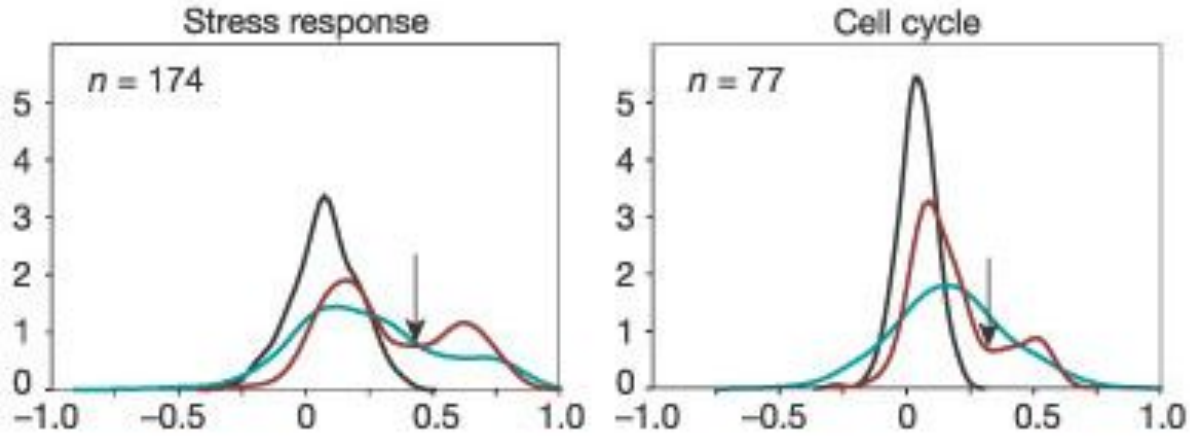
- Data (courtesy of **Uri Alon**) was curated from the Regulon database: **606** interactions between **424** operons (by 116 TFs)
- Positive to negative ratio is **3:2** (**different from eukaryots!**)
- Broader distribution of out-degrees (up to **85**) and more narrow of in-degrees (only up to **6** !)

зависимость физиологических и геномных свойств от топологии

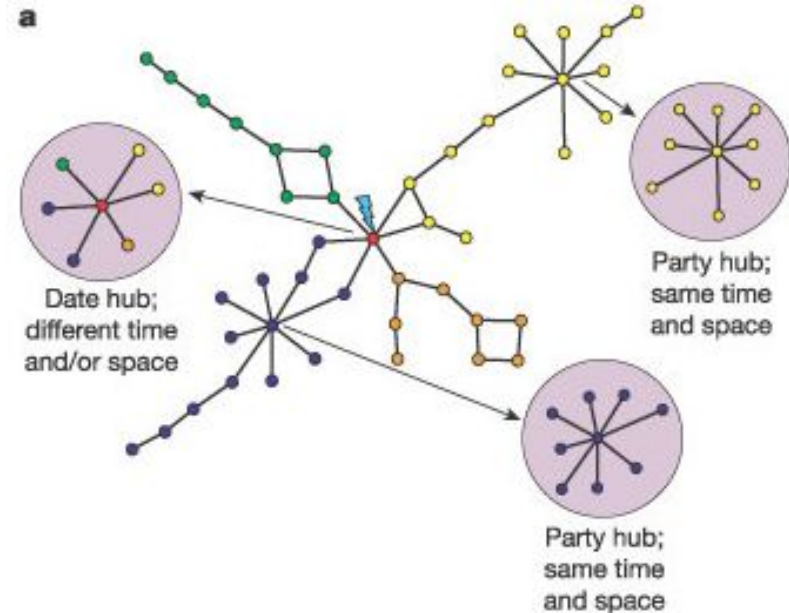
- дрожжи:
 - ~10% genes with <5 links are essential
 - >60% genes with >15 links are essential
- гены с большим числом связей
 - с большей вероятностью имеют ортологов в многоклеточных эукариотах
 - ближе к ортологам из *C. elegans*

party hubs и date hubs

- Бимодальное распределение корреляций уровня экспрессии
 - Красный: hubs
 - Голубой: non-hubs
 - Черный: случайный граф

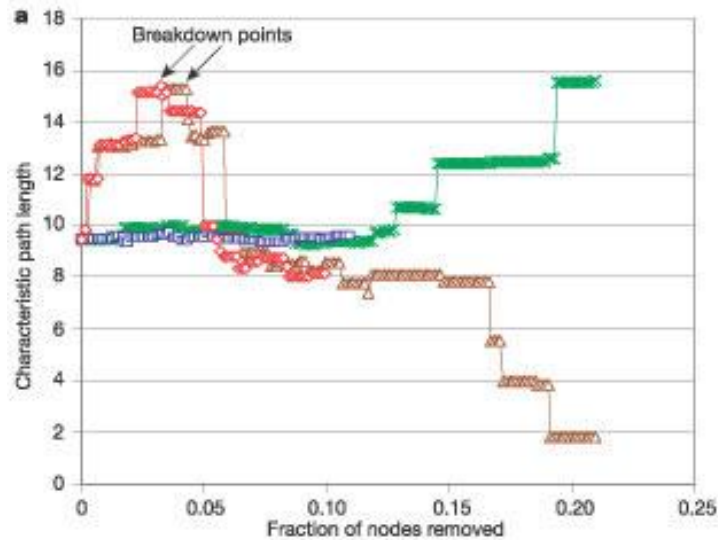


- Party hubs: сам и соседи ко-экспрессируются (комплексы)
- Date hub: нет корреляции в уровнях экспрессии (сигнальные пути)

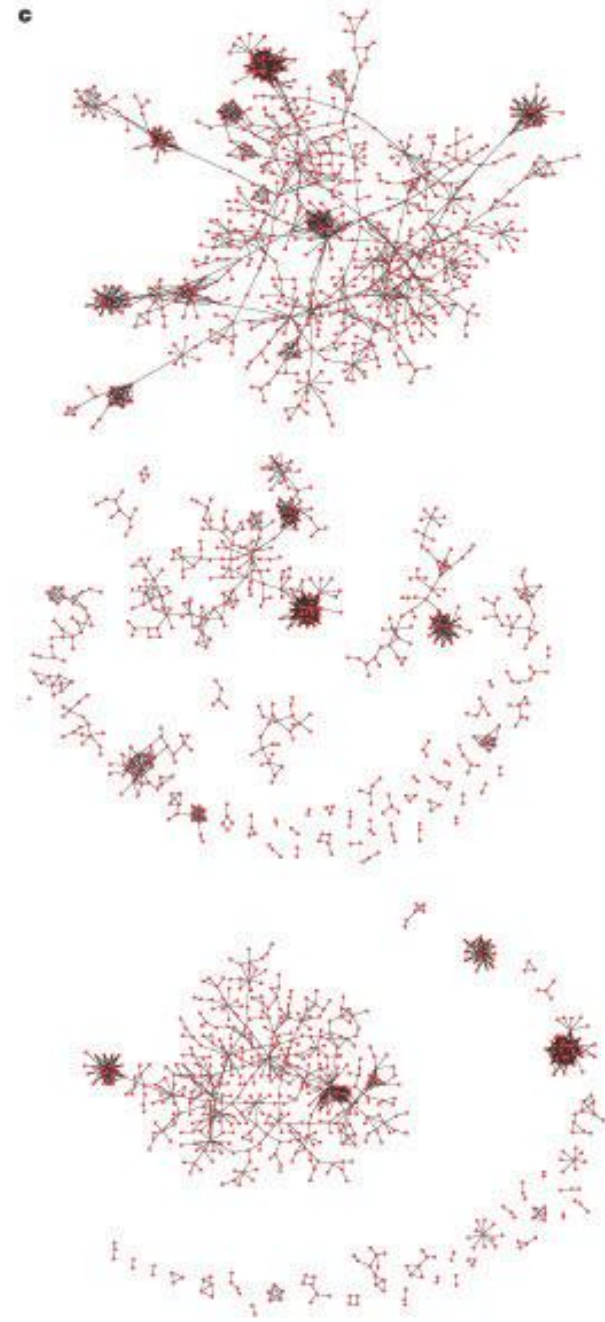


Устойчивость к атаке (распадение гигантской компоненты)

ОСНОВА СЕТИ
– party hubs



- Красный: атака на party hubs
- Коричневый: атака на все хабы
- Голубой: атака на date hubs
- Зеленый: атака на случайные белки

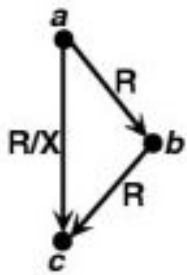


МОТИВЫ

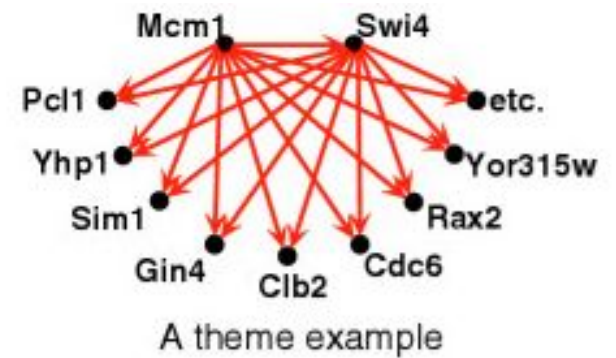
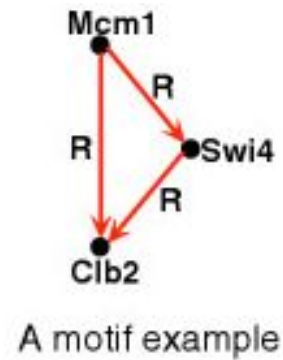
- КЛИКИ
 - много в графах белок-белковых взаимодействий (масс-спек. анализ комплексов – по определению)
- подграфы фиксированной структуры, встречающиеся существенно чаще, чем в случайном графе (с теми же свойствами)

Регуляторный каскад

Motif set A

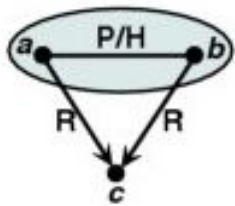


N_{real}	4.7×10^2	3.0×10^1
N_{rand}	$(2.6 \pm 0.5) \times 10^2$	5.4 ± 3.2

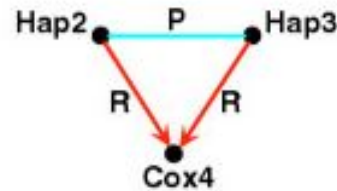


- R – транскрипционная регуляция
- X – ко-экспрессия

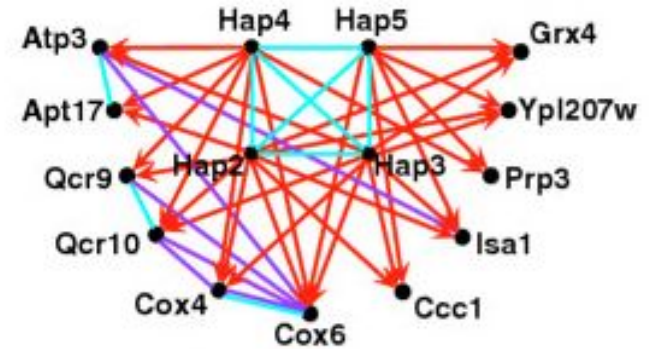
Motif set B



N_{real}	1.3×10^2	6.1×10^2
N_{rand}	3.3 ± 3.7	$(8.0 \pm 2.3) \times 10^1$



A motif example

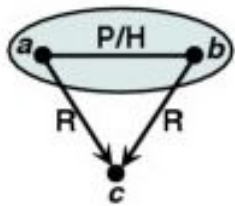


A theme example

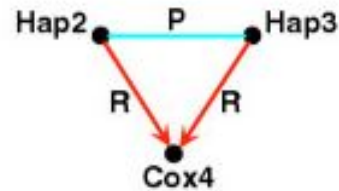
- R – транскрипционная регуляция
- P – белок-белковое взаимодействие
- H – гомология

Субъединицы факторов транскрипции

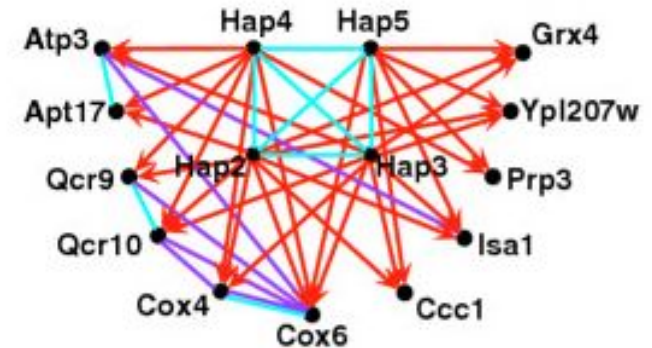
Motif set B



N_{real}	1.3×10^2	6.1×10^2
N_{rand}	3.3 ± 3.7	$(8.0 \pm 2.3) \times 10^1$



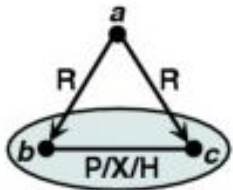
A motif example



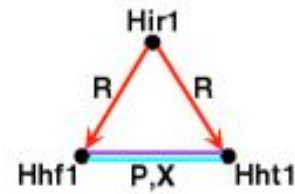
A theme example

- R – транскрипционная регуляция
- P – белок-белковое взаимодействие
- H – гомология

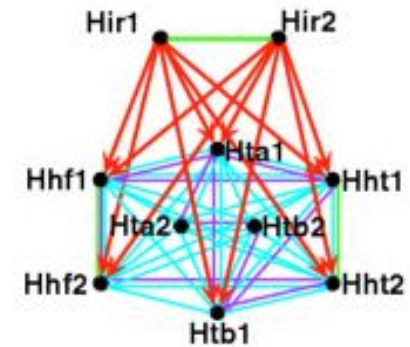
Motif set C



	C1	C2	C3
N_{real}	5.9×10^3	3.5×10^3	1.9×10^3
N_{rand}	$(5.4 \pm 0.5) \times 10^2$	$(2.7 \pm 0.3) \times 10^2$	$(5.3 \pm 0.5) \times 10^2$



A motif example

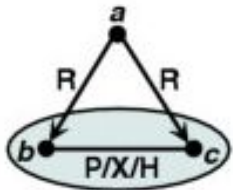


A theme example

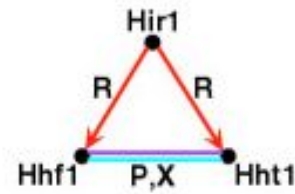
- R – транскрипционная регуляция
- P – белок-белковое взаимодействие
- X – ко-экспрессия
- H – гомология

Регулоны

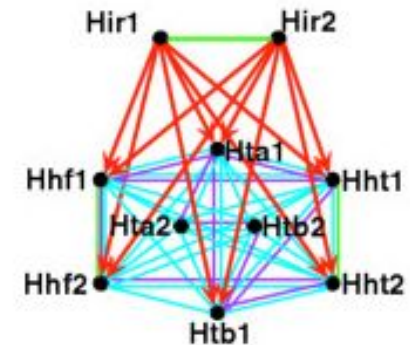
Motif set C



	C1	C2	C3
N_{real}	5.9×10^3	3.5×10^3	1.9×10^3
N_{rand}	$(5.4 \pm 0.5) \times 10^2$	$(2.7 \pm 0.3) \times 10^2$	$(5.3 \pm 0.5) \times 10^2$



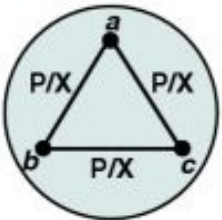
A motif example



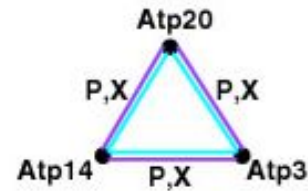
A theme example

- R – транскрипционная регуляция
- P – белок-белковое взаимодействие
- X – ко-экспрессия
- H – гомология

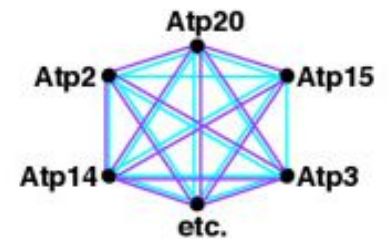
Motif set D



	D1	D2	D3	D4
N_{real}	5.7×10^5	9.9×10^4	6.7×10^4	1.2×10^6
N_{rand}	$(1.1 \pm 0.0) \times 10^5$	$(8.2 \pm 0.3) \times 10^3$	$(5.2 \pm 0.2) \times 10^3$	$(2.7 \pm 0.1) \times 10^4$



A motif example

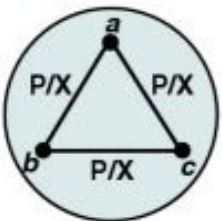


A theme example

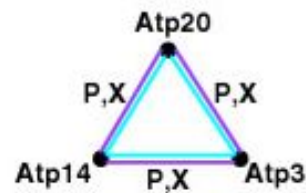
- P – белок-белковое взаимодействие
- X – ко-экспрессия

Ко-экспрессия в комплексах

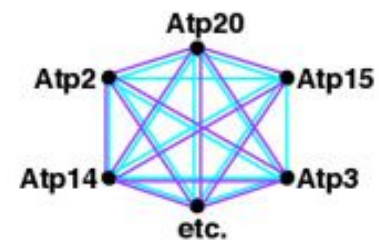
Motif set D



	D1	D2	D3	D4
N_{real}	5.7×10^5	9.9×10^4	6.7×10^4	1.2×10^6
N_{rand}	$(1.1 \pm 0.0) \times 10^5$	$(8.2 \pm 0.3) \times 10^3$	$(5.2 \pm 0.2) \times 10^3$	$(2.7 \pm 0.1) \times 10^4$



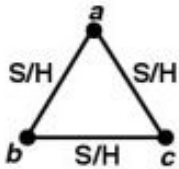
A motif example



A theme example

- P – белок-белковое взаимодействие
- X – ко-экспрессия

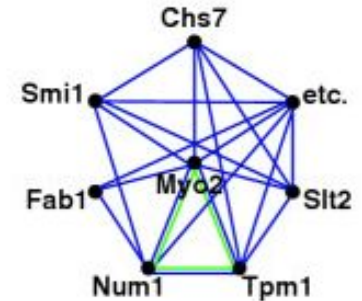
Motif set E



	E1	E2	E3	E4
N_{real}	2.7×10^3	9.8×10^2	3.2×10^3	5.6×10^5
N_{rand}	$(1.7 \pm 0.1) \times 10^3$	$(3.8 \pm 0.4) \times 10^2$	$(1.3 \pm 0.1) \times 10^3$	$(1.0 \pm 0.2) \times 10^5$



A motif example

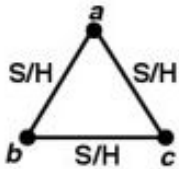


A theme example

- S – синтетические летали (слабость)
- H – гомология

Взаимозаменяемость паралогов (?)

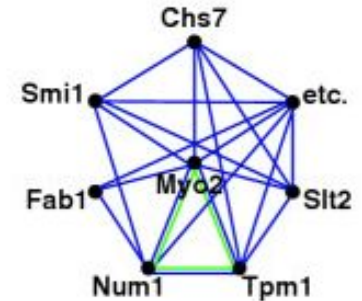
Motif set E



	E1	E2	E3	E4
N_{real}	2.7×10^3	9.8×10^2	3.2×10^3	5.6×10^5
N_{rand}	$(1.7 \pm 0.1) \times 10^3$	$(3.8 \pm 0.4) \times 10^2$	$(1.3 \pm 0.1) \times 10^3$	$(1.0 \pm 0.2) \times 10^5$



A motif example



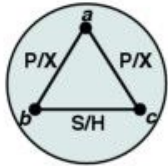
A theme example

- S – синтетические летали (слабость)
- H – гомология

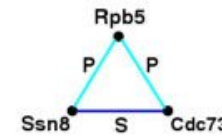
Компенсаторные комплексы (?)

(f)

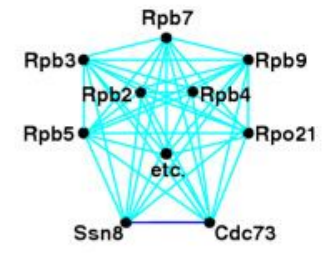
Motif set F



	F1	F2	F3	F4	F5	F6
N_{real}	1.2×10^3	2.7×10^2	2.8×10^2	4.1×10^4	1.1×10^4	4.4×10^4
N_{rand}	$(7.6 \pm 0.7) \times 10^2$	$(1.5 \pm 0.3) \times 10^2$	$(1.3 \pm 0.2) \times 10^2$	$(1.1 \pm 0.0) \times 10^4$	$(2.0 \pm 0.1) \times 10^3$	$(2.4 \pm 0.1) \times 10^3$



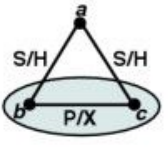
A motif example



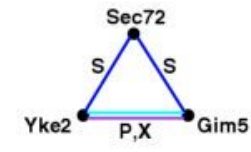
A theme example

(g)

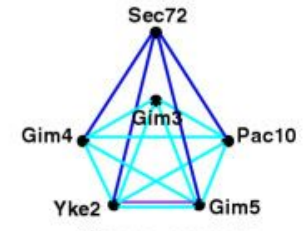
Motif set G



	G1	G2	G3	G4	G5	G6
N_{real}	2.0×10^3	7.2×10^2	3.0×10^4	2.8×10^2	2.5×10^2	4.3×10^4
N_{rand}	$(2.4 \pm 0.3) \times 10^2$	$(3.5 \pm 0.3) \times 10^2$	$(1.2 \pm 0.1) \times 10^4$	$(7.0 \pm 1.5) \times 10^1$	$(1.2 \pm 0.2) \times 10^2$	$(4.0 \pm 0.2) \times 10^3$



A motif example

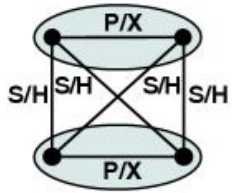


A theme example

- S – синтетические летали (слабость)
- H – гомология
- P – белок-белковое взаимодействие
- X – ко-экспрессия

Четверные мотивы: взаимозаменяемость

(a)



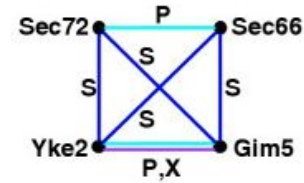
(b)

					etc.
N_{real}	3.5×10^2	6.7×10^1	1.6×10^1	3.8×10^1	
N_{rand}	0.16 ± 0.50	0.13 ± 0.39	1.1 ± 1.4	5.9 ± 4.1	

Key

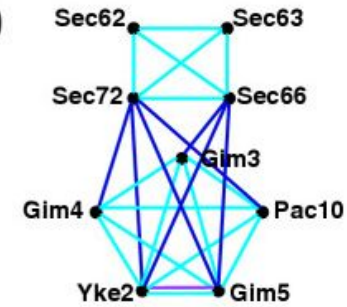
- S: synthetic sickness or lethality
- H: sequence homology
- X: correlated expression
- P: stable physical interaction

(c)



A motif example

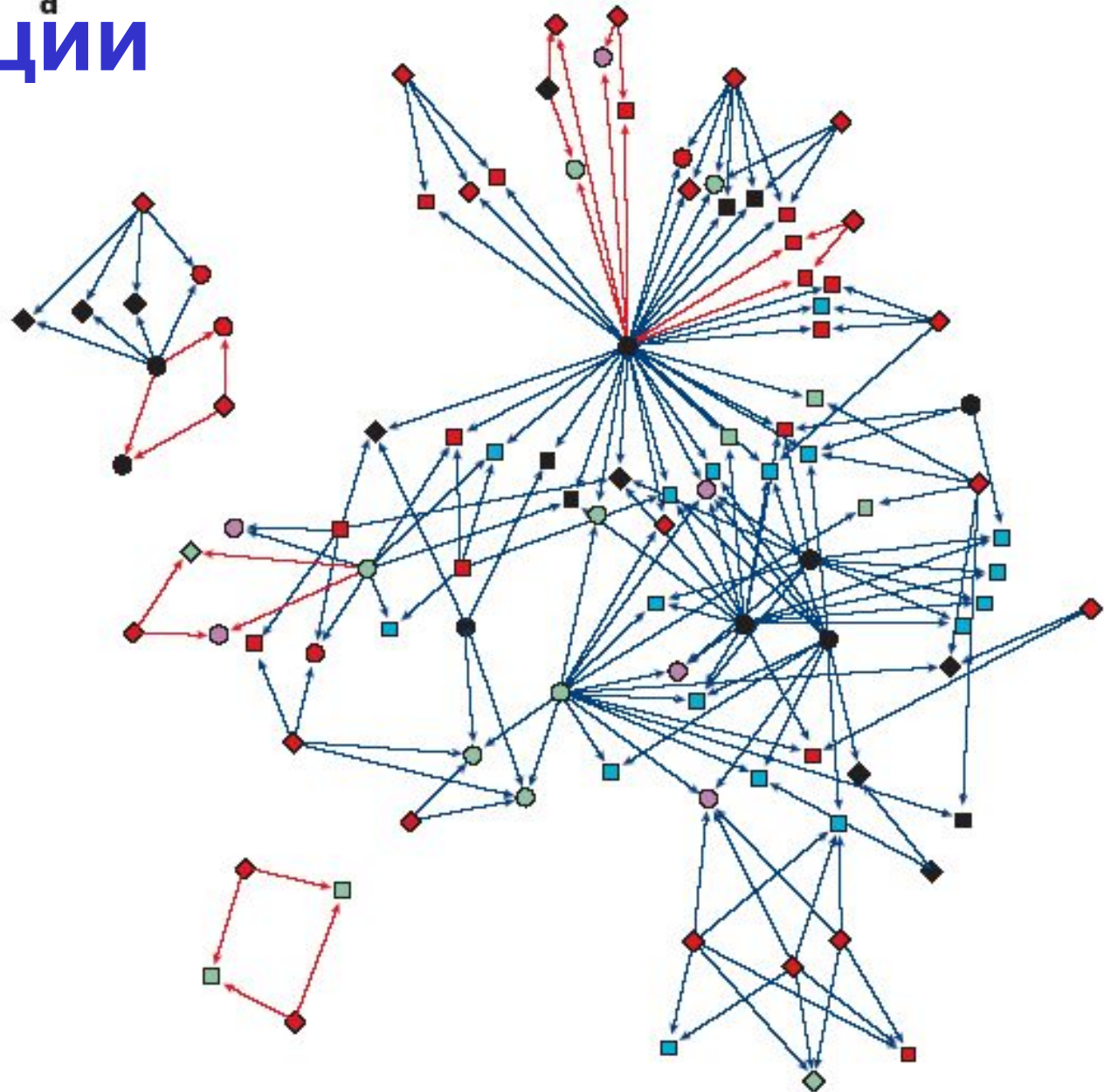
(d)



A theme example

Регуляция транскрипции^d в *E.coli*

- Почти все
“bi-fan”
МОТИВЫ
СВЯЗАНЫ
друг с
другом



ЭВОЛЮЦИЯ

- rich get richer
- дубликации
- случайные рождения/исчезновение ребер

