Параллельные вычисления

Введение

Якобовский Михаил Владимирович

МФТИ, г. Долгопрудный

весна, 2023

Институт прикладной математики
им. М.В. Келдыша РАН



Якобовский Михаил Владимирович

mail: lira@imamod.ru

https://lira.imamod.ru/mipt202302/

Некоторые рассматриваемые вопросы

- Введение, области применения многопроцессорных систем
- Виды систем, топологии интерконнекта
- Модель Фон-Неймана, архитектура процессора
- Базовые параллельные алгоритмы
- Режимы обмена сообщениями, семафоры
- Оценка времени выполнения алгоритмов
- Декомпозиция расчётных сеток
- Динамическая балансировка загрузки
- Адаптивные расчётные сетки
- Параллельные алгоритмы сортировки
- Псевдослучайные числа для параллельных приложений
- Вычислительный эксперимент, визуализация результатов
- Отказоустойчивые параллельные алгоритмы

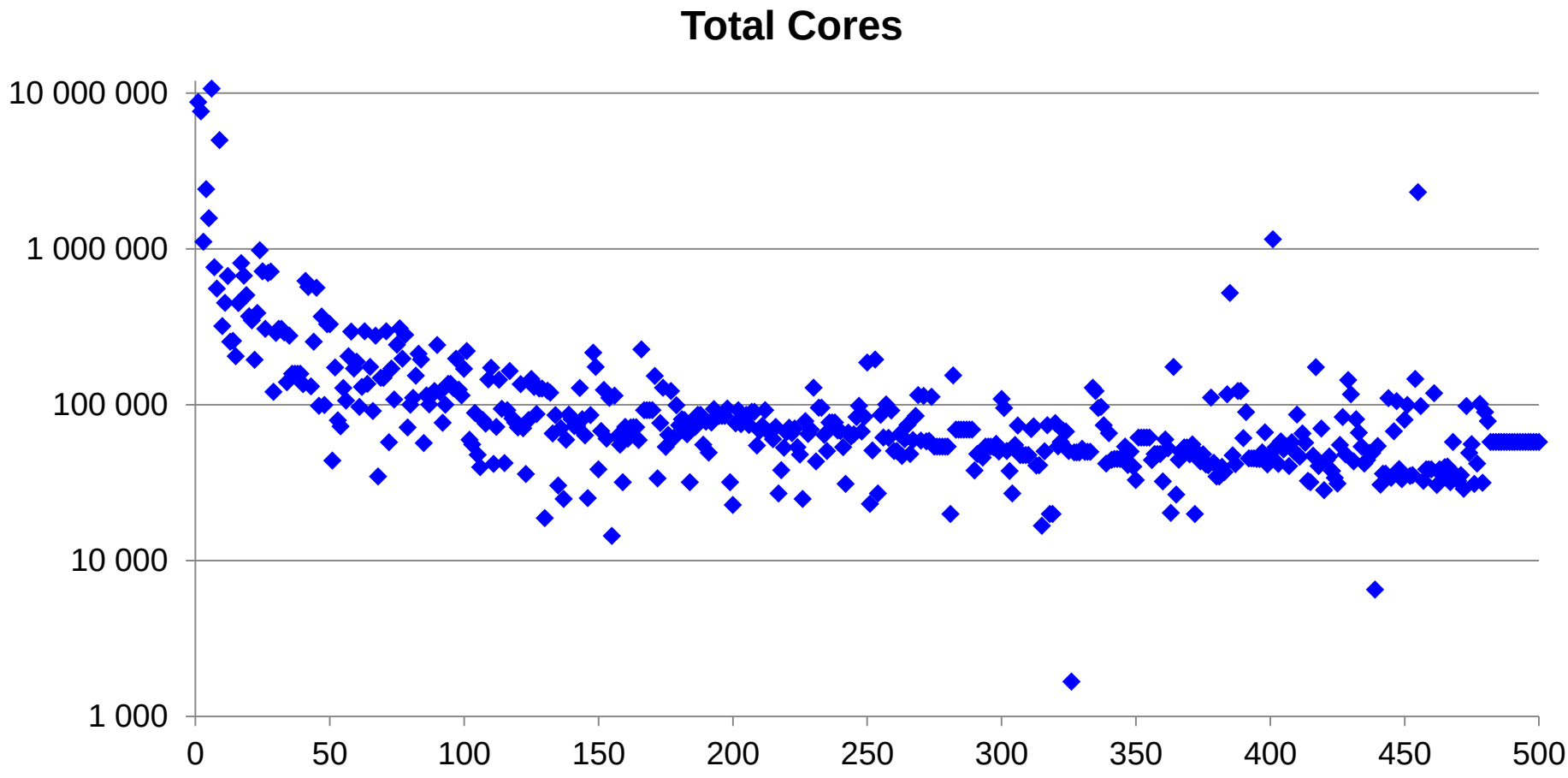
Что в центре внимания курса

- Изучение общих принципов построения параллельных алгоритмов
- Оценка основных свойств параллельных алгоритмов:
  - Число выполняемых операций
  - Время выполнения
  - Объём обрабатываемых данных
  - Ускорение
  - Эффективность
  - Масштабируемость
  - …

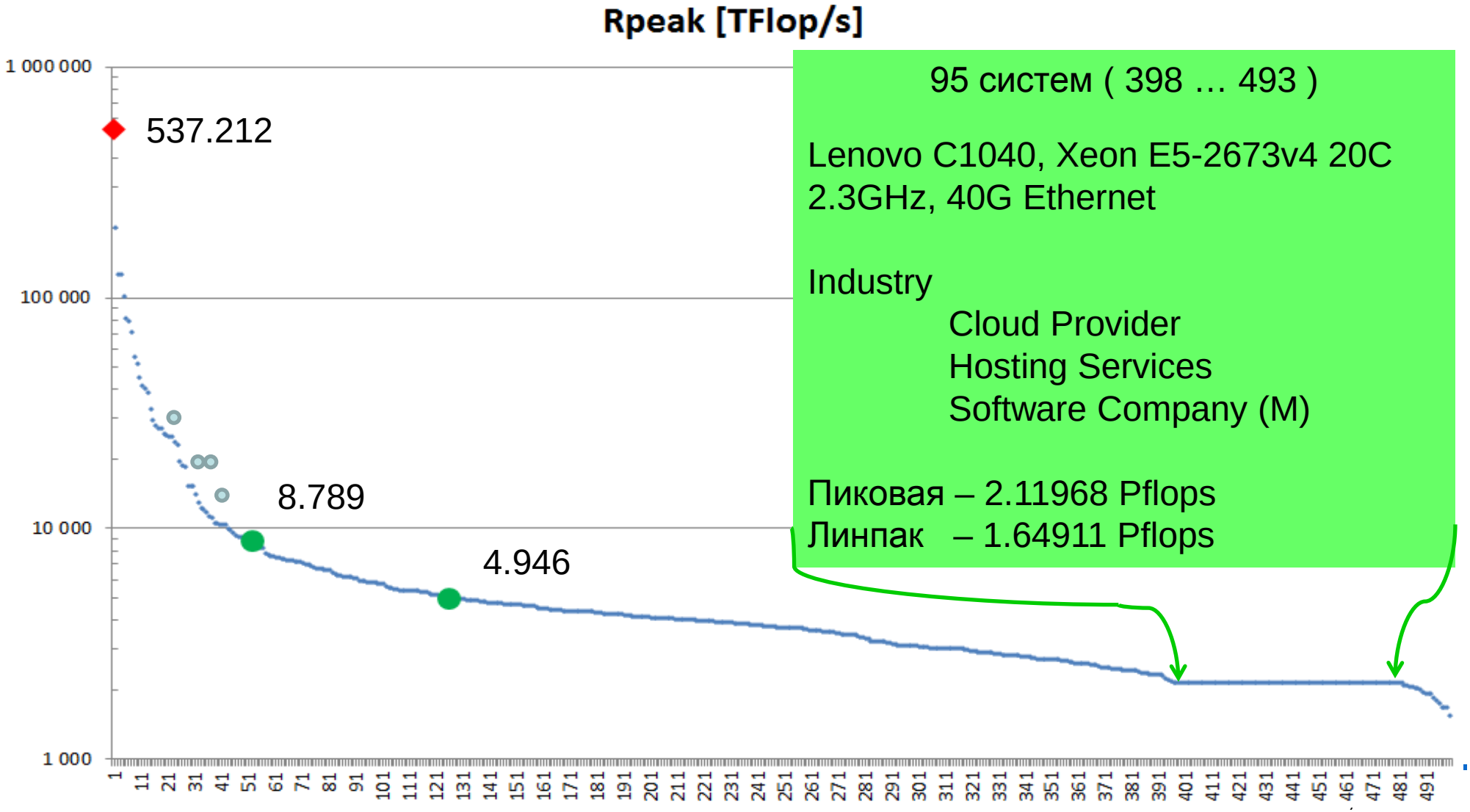
Суперкомпьютеры 2022.11 (https://www.top500.org/)

№	Название системы	Страна, год	Пиковая Пфлопс	Линпак Пфлопс – Эффект. %	Cores: общее число, в ускорителях	Потребляемая мощность, МВт
1	Frontier	США 2022	1 685	1 102 – 65 %	8 730 112 – 8 138 240	21.1
2	Supercomputer Fugaku A64FX 48C	Япония 2020	537	442 – 82 %	7 630 848 – 0	29.9
3	LUMI	Финляндия 2022	214	152 – 71 %	1 110 144 – 1 034 880	2.9
4	Summit	США 2018	201	149 – 74 %	2 414 592 – 2 211 840	10.1
5	Sierra	США 2018	125	94 – 74 %	1 572 480 – 1 382 400	7.4
6	Sunway TaihuLight SW26010 260C	Китай 2016	125	93 – 74 %	10 649 600 – 0	15.4
22 **40** **43**	Chervonenkis Galushkin Lyapunov	Россия 2021 2021	29 21 20	22 – 76 % 16 – 76 % 13 – 65 %	193 440 – 168 480 134 912 – 117 504 130 944 – 114 048	н/д
46	Christofari Neo	2021	15	12 – 80 %	98 208 – 85 536	н/д
80	Christofari	2020	9	6.7 – 76 %	99 600 – 96 000	н/д
262	Lomonosov 2	2018	5	2.5 – 48 %	64 384 – 40 960	н/д
318	MTS GROM	2021	3	2.3 – 76 %	19 840 – 17280	(США Франция)
326	MN-3	Япония 2020	3.3	2.1 – 65 %	1 664 – 128	0.053
482 (447)-500	Lenovo C1040 Xeon E5-2673v4 20C 2.3GHz, 40G Ethernet	Австралия, Канада, США, Нидерланды 2018	2.1	1.7 – 81 %	57 600 – 0	н/д

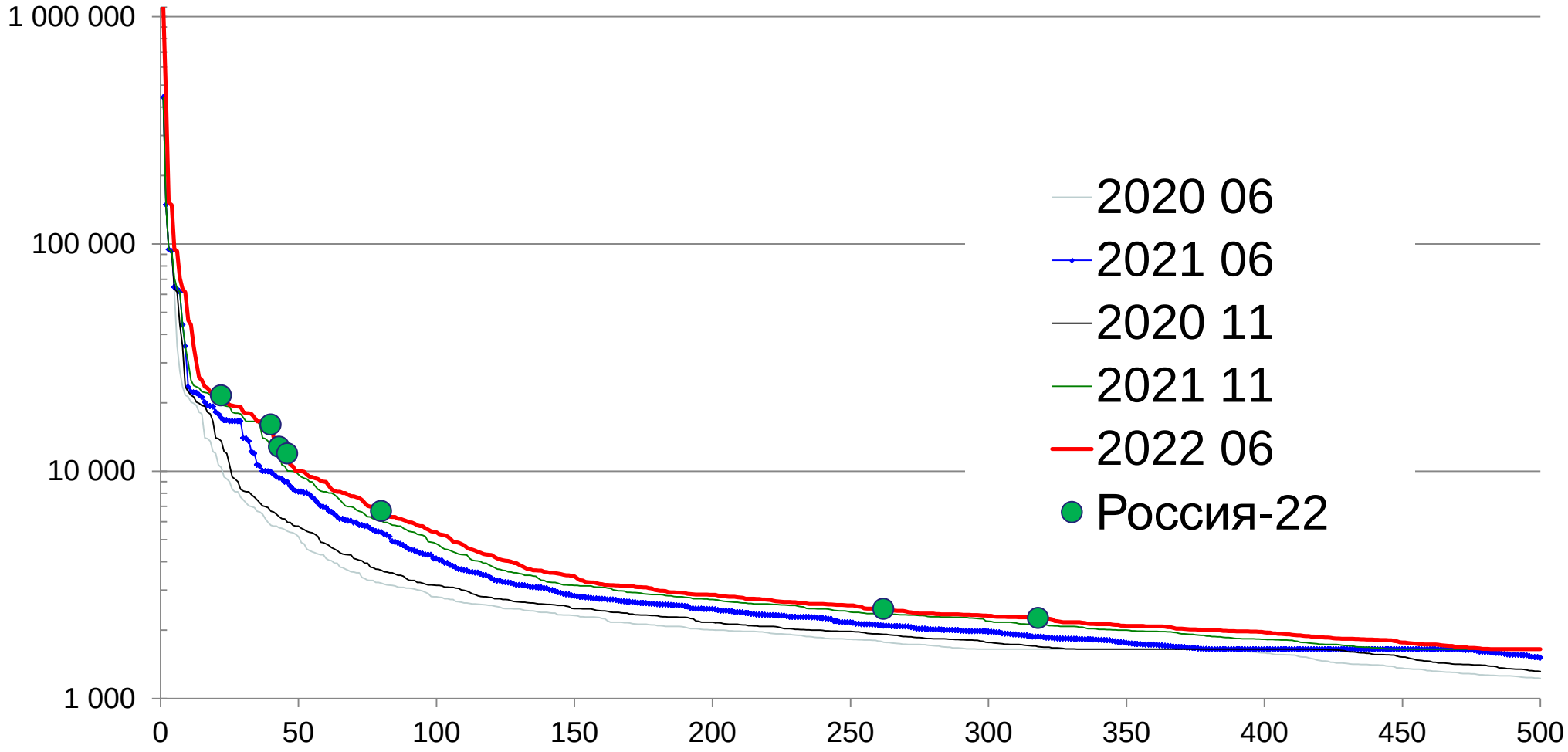
Число вычислительных ядер суперкомпьютеров top-500



Производительность систем top500 (2020)

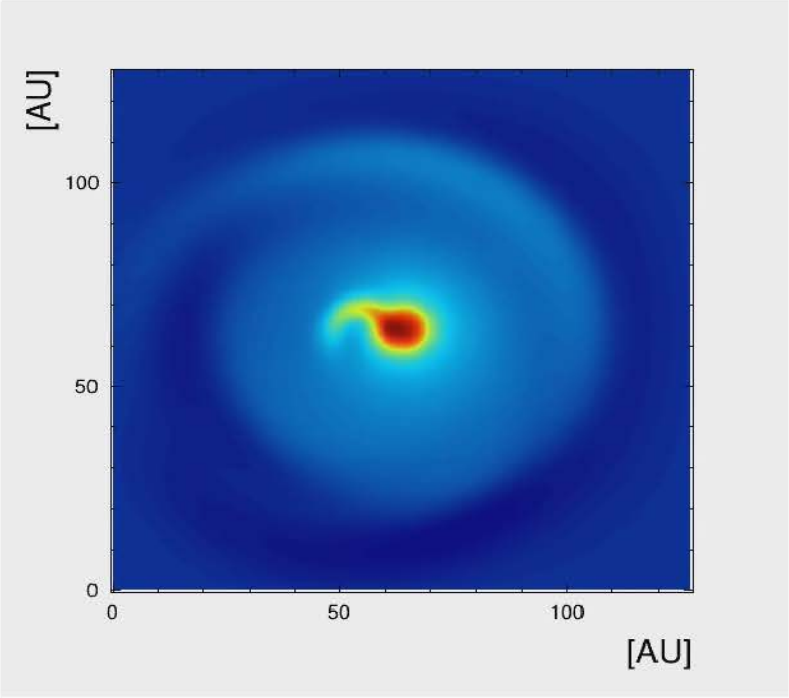


Производительность систем top500 (2020-2022)

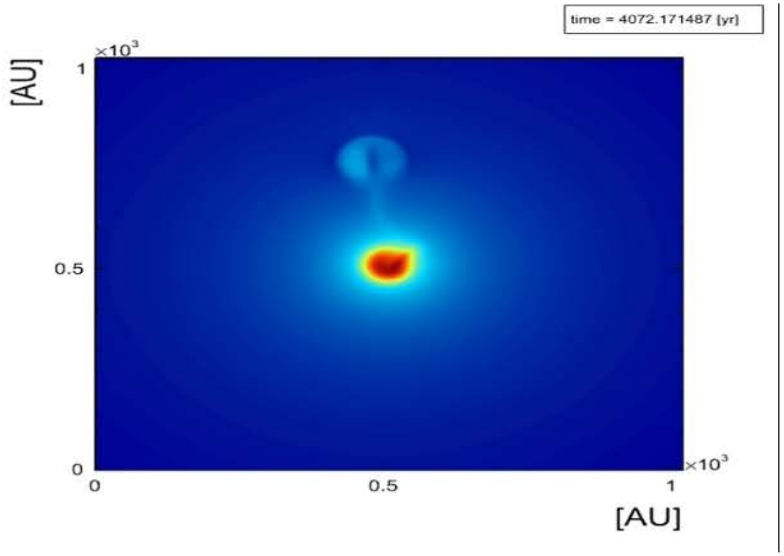


Аккреция облака межзвездного газа на компактном астрономическом объекте

Low resolution



High resolution



- Межзвездное облако 5 AU
- Плотность 0.8 x 10^{-11} кг/m^3
- Скорость облака 300 m/s
- Импакт параметер 4-10 AU

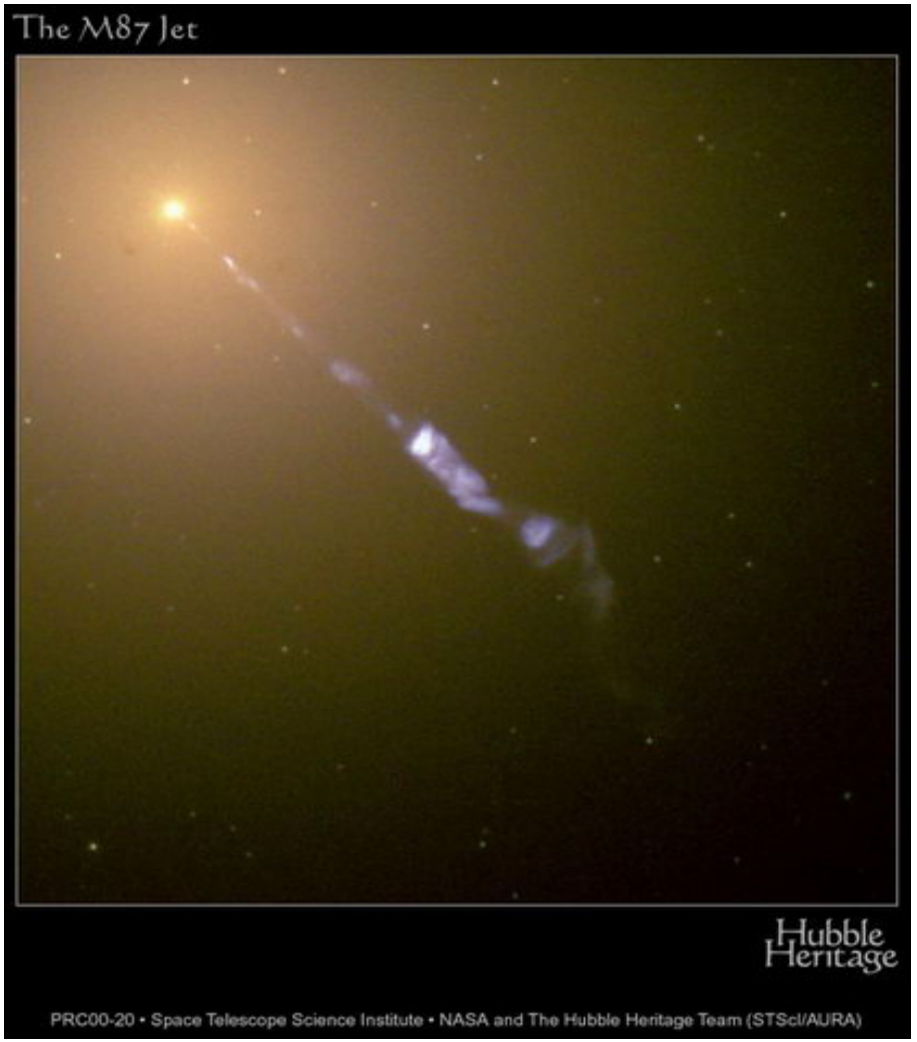
- Компактный объект:
  - масса 10^{30} Kg
  - радиус 0.5 AU
- Температура пространства T = 20 K

Релятивистская струя галактики M87

Снимок космического телескопа им. Хаббла

Astronomy Picture of the Day, July 6, 2000

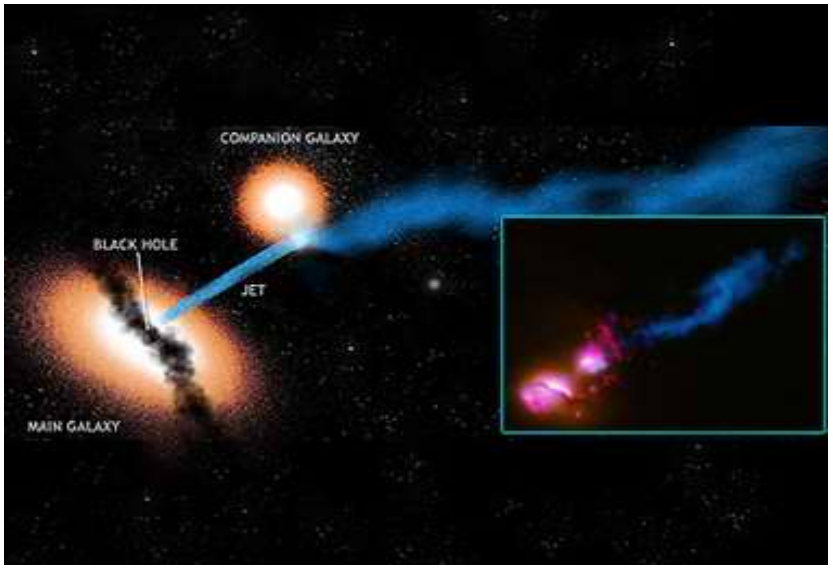
https://apod.nasa.gov/apod/ap000706.html



http://planetarium-kharkov.org/?q=galaxy-CGCG049-033

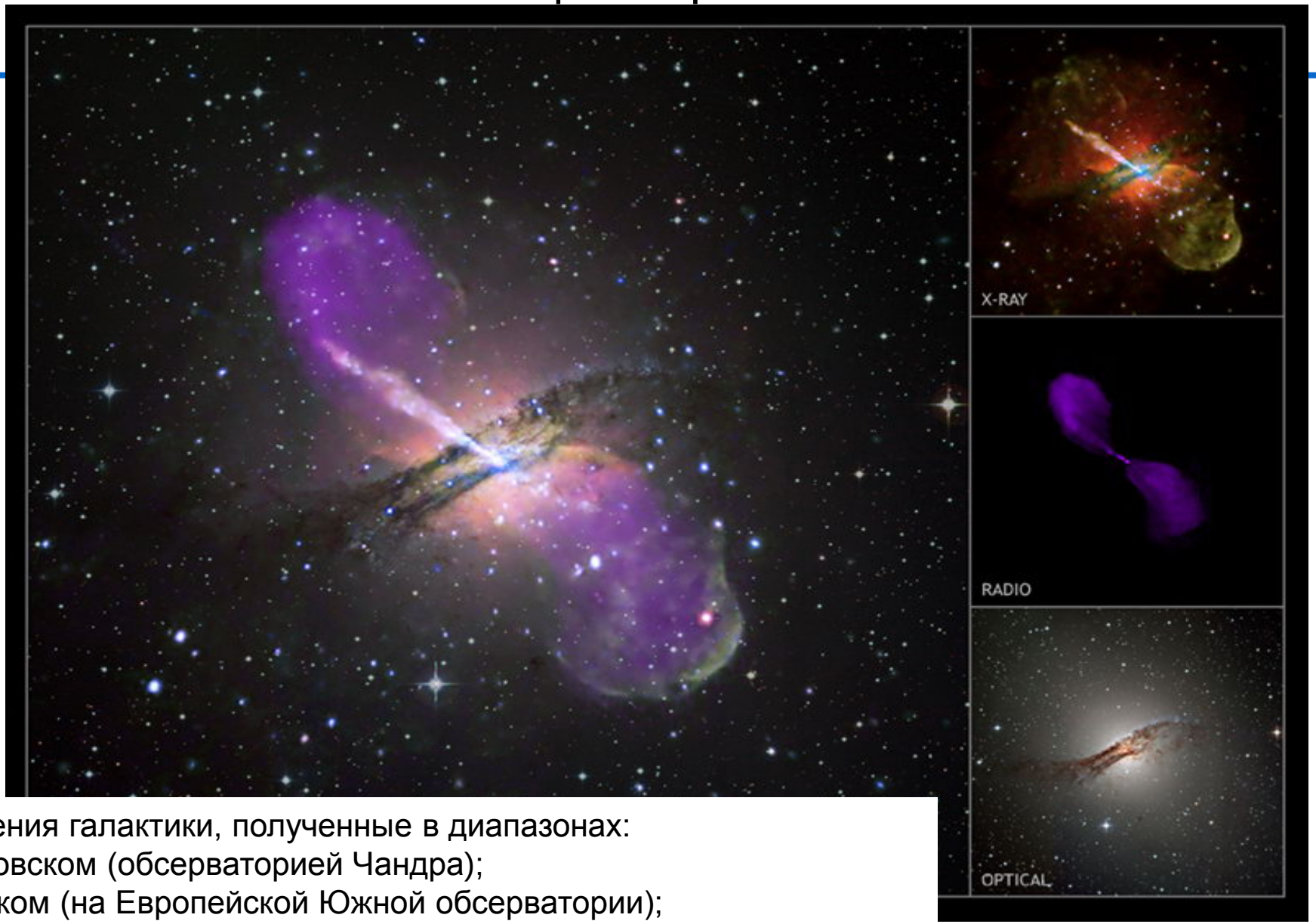
Струя из одной галактики направлена на соседнюю галактику и оказывает воздействие на ее межзвездную среду

Система двух галактик C321



http://planetarium-kharkov.org/?q=galaxy-CGCG049-033

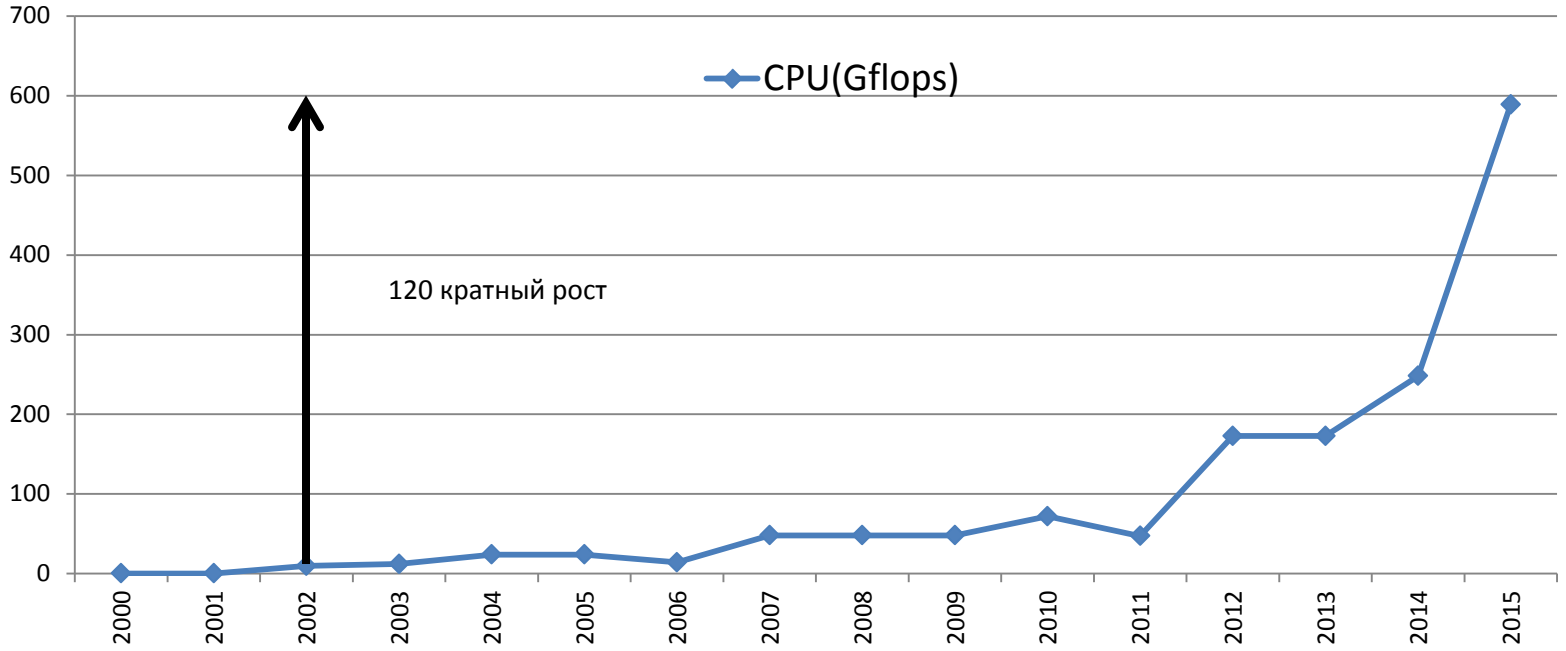
Эллиптическая галактика Центавр А



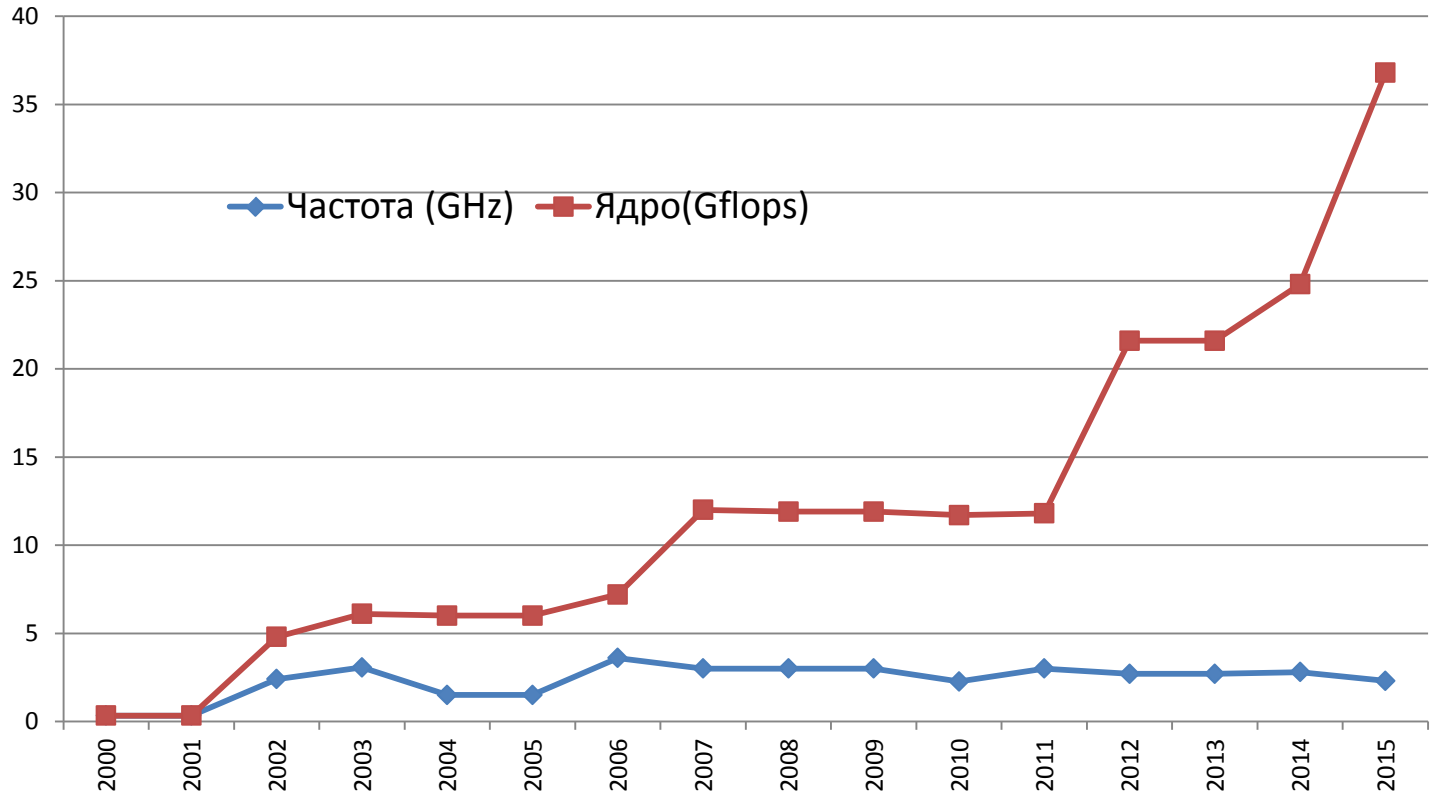
Изображения галактики, полученные в диапазонах:
- рентгеновском (обсерваторией Чандра);
- оптическом (на Европейской Южной обсерватории);
- радио (Очень большим массивом радиотелескопов).

http://planetarium-kharkov.org/?q=cent-A-foto&size=_original

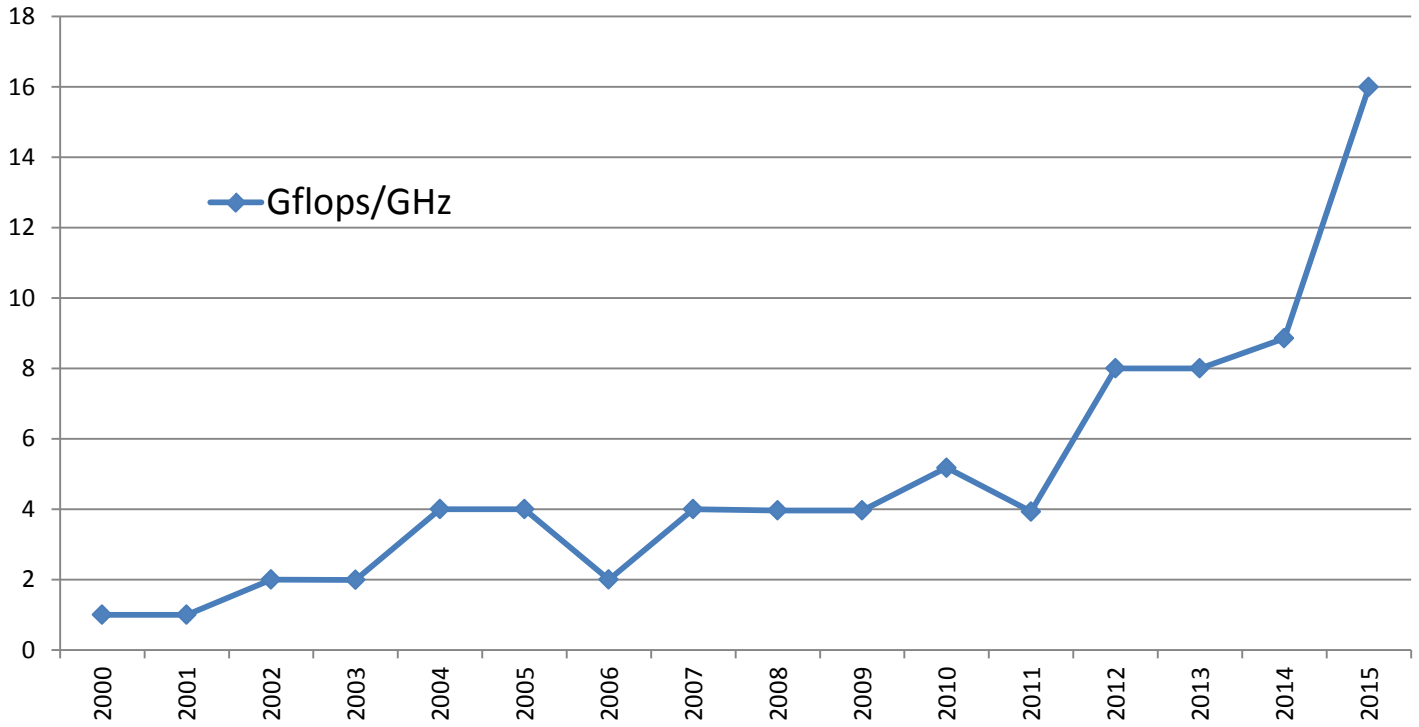
Производительность процессора



Производительность и тактовая частота процессорного ядра



Число операций, выполняемых **процессорным ядром** за один такт



Суперкомпьютеры 2022.11 (https://www.top500.org/)

№	Название системы	Страна, год	Пиковая Пфлопс	Линпак Пфлопс – Эффект. %	Cores: общее число, в ускорителях	Потребляемая мощность, МВт
1	Frontier	США 2022	1 685	1 102 – 65 %	8 730 112 – 8 138 240	21.1
2	Supercomputer Fugaku A64FX 48C	Япония 2020	537	442 – 82 %	7 630 848 – 0	29.9
3	LUMI	Финляндия 2022	214	152 – 71 %	1 110 144 – 1 034 880	2.9
4	Summit	США 2018	201	149 – 74 %	2 414 592 – 2 211 840	10.1
5	Sierra	США 2018	125	94 – 74 %	1 572 480 – 1 382 400	7.4
6	Sunway TaihuLight SW26010 260C	Китай 2016	125	93 – 74 %	10 649 600 – 0	15.4
22	Chervonenkis	Россия 2021	29	22 – 76 %	193 440 – 168 480	н/д
40	Galushkin	2021	21	16 – 76 %	134 912 – 117 504	
43	Lyapunov		20	13 – 65 %	130 944 – 114 048	
46	Christofari Neo	2021	15	12 – 80 %	98 208 – 85 536	н/д
80	Christofari	2020	9	6.7 – 76 %	99 600 – 96 000	н/д
262	Lomonosov 2	2018	5	2.5 – 48 %	64 384 – 40 960	н/д (2-3 ?)
318	MTS GROM	2021	3	2.3 – 76 %	19 840 – 17280	(США Франция)
326	MN-3	Япония 2020	3.3	2.1 – 65 %	1 664 – 128	0.053
482 (447)-500	Lenovo C1040 Xeon E5-2673v4 20C 2.3GHz, 40G Ethernet	Австралия, Канада, США, Нидерланды 2018	2.1	1.7 – 81 %	57 600 – 0	н/д

Цена производительности – сложность использования

- Вычислительная мощность суперкомпьютеров огромна, но:
  - ***Она образована суммой мощностей множества исполнительных устройств***
- Увеличение производительность компьютера **архитектуры фон-Неймана** автоматически означало снижение времени работы программ. Для параллельных архитектур это не так:
  - ***Последовательные программы не могут работать на суперкомпьютерах быстрее, чем на однопроцессорных (одноядерных) компьютерах***

Области применения многопроцессорных систем

1) сокращение времени решения вычислительно сложных задач

2) сокращение времени обработки больших объемов данных

3) решение задач реального времени

4) создание систем высокой надежности

Задачи большого вызова

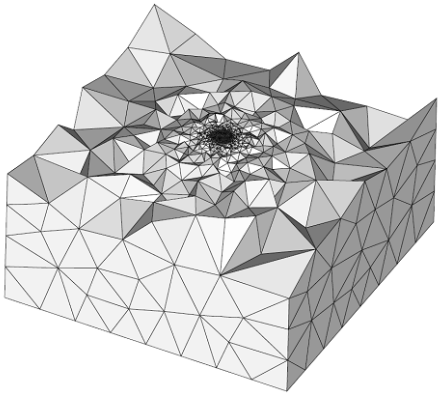
(Kenneth G. Wilson, Cornell University, 1987) This page was last edited on 27 December 2022

- A Strategic Plan for Bridge Engineering, - связность территорий
- Вычислительная газовая динамика:
  - the design of hypersonic aircraft, efficient automobile bodies, and extremely quiet submarines
  - Предсказания погоды, и глобальных климатических изменений
  - Оптимизация нефтедобычи и множество других приложений
- Молекулярная динамика:
  - Создание материалов с заданными свойствами
  - Разработка новых лекарственных соединений
  - Сверхпроводимость, Свойства веществ в экстремальных состояниях, …
- Медицина и здоровье
- Символьные вычисления
  - Распознавание речи
  - Компьютерное зрение
  - Изучение сложных систем
  - Автономные системы управления
- Квантовая хромодинамика и теория конденсированных сред
- Управляемый термоядерный синтез, Геном человека, …

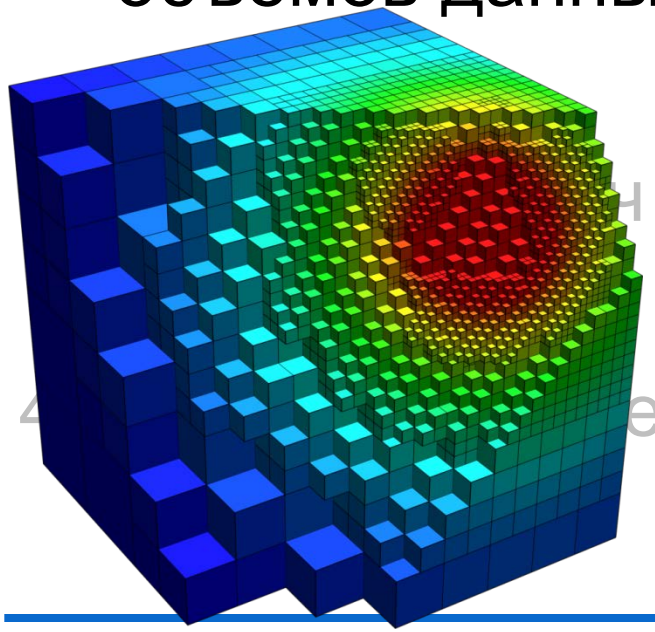
http://en.wikipedia.org/wiki/Grand_Challenge

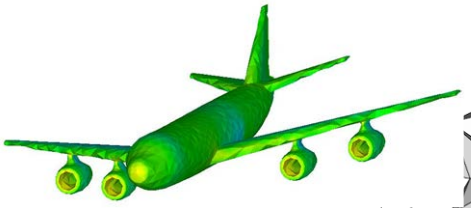
Области применения многопроцессорных систем

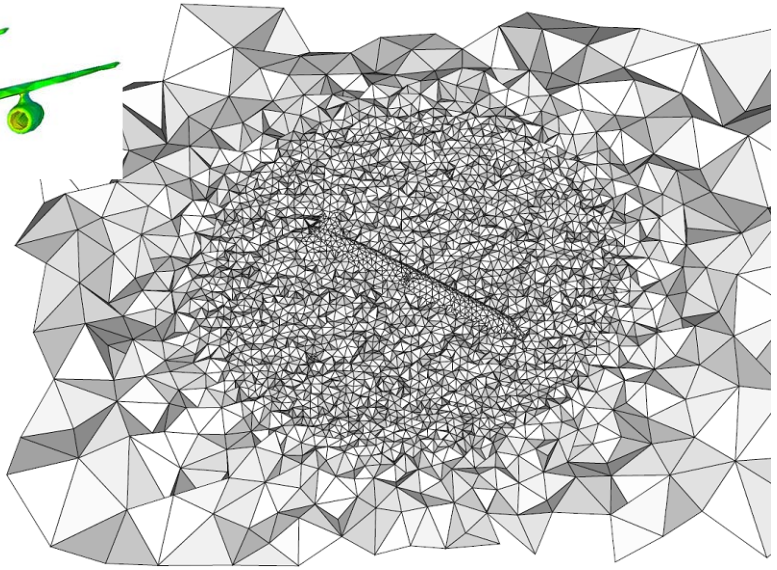
1) сокращение времени решения выч
сложных задач



2) сокращение времени обработки больших объемов данных



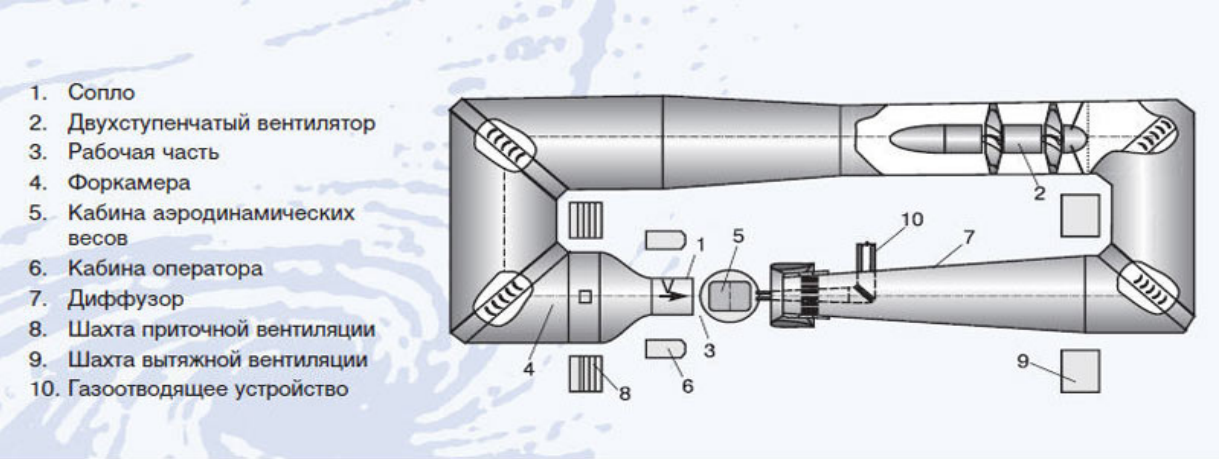




Дозвуковая аэродинамическая труба Т-104, ЦАГИ

- Скорость потока 10–120 м/с
- Диаметр сопла 7 м
- Длина рабочей части 13 м
- Мощность вентилятора **28.4 МВт**

http://www.tsagi.ru/rus/base/t104



Суперкомпьютер СКИФ МГУ «ЧЕБЫШЁВ»

- Пиковая производительность 60 TFlop/s
- Мощность комплекса **0.72 МВт**

http://parallel.ru/cluster/skif_msu.html





Области применения многопроцессорных систем



1) с… …ительно с…

2) с… …их о…

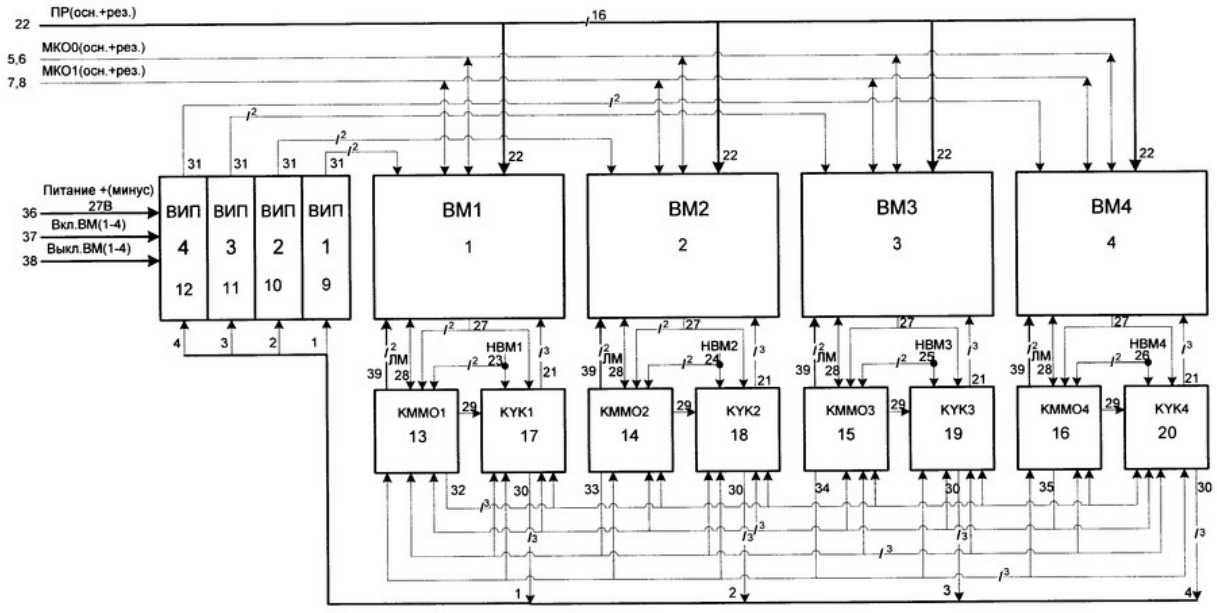
3) решение задач реального времени

https://pikabu.ru/story/sortirovochnaya_yasinovataya_661713

4) создание систем высокой надежности

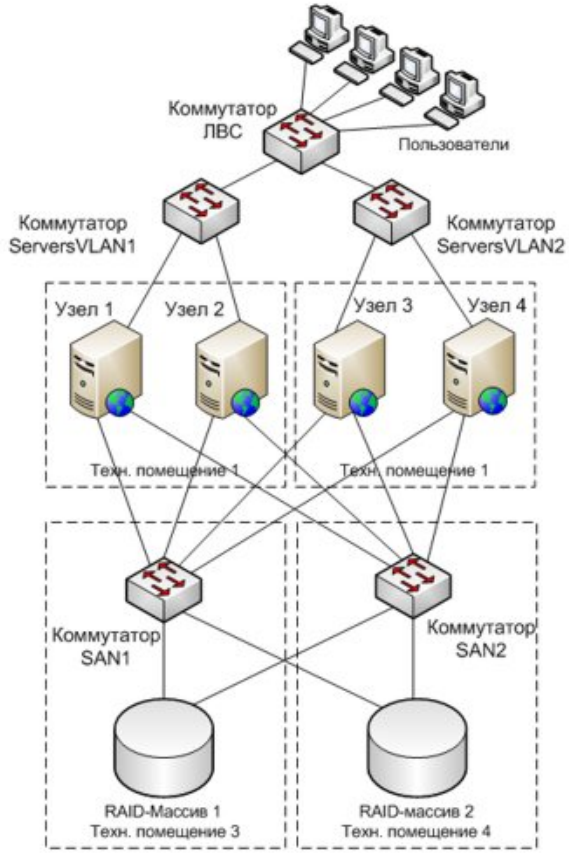
Области применения многопроцессорных систем

http://www.freepatent.ru/patents/2455681



Структурная схема отказоустойчивой вычислительной системы с аппаратно-программной реализацией функций отказоустойчивости и динамической реконфигурации.

Фиг.2

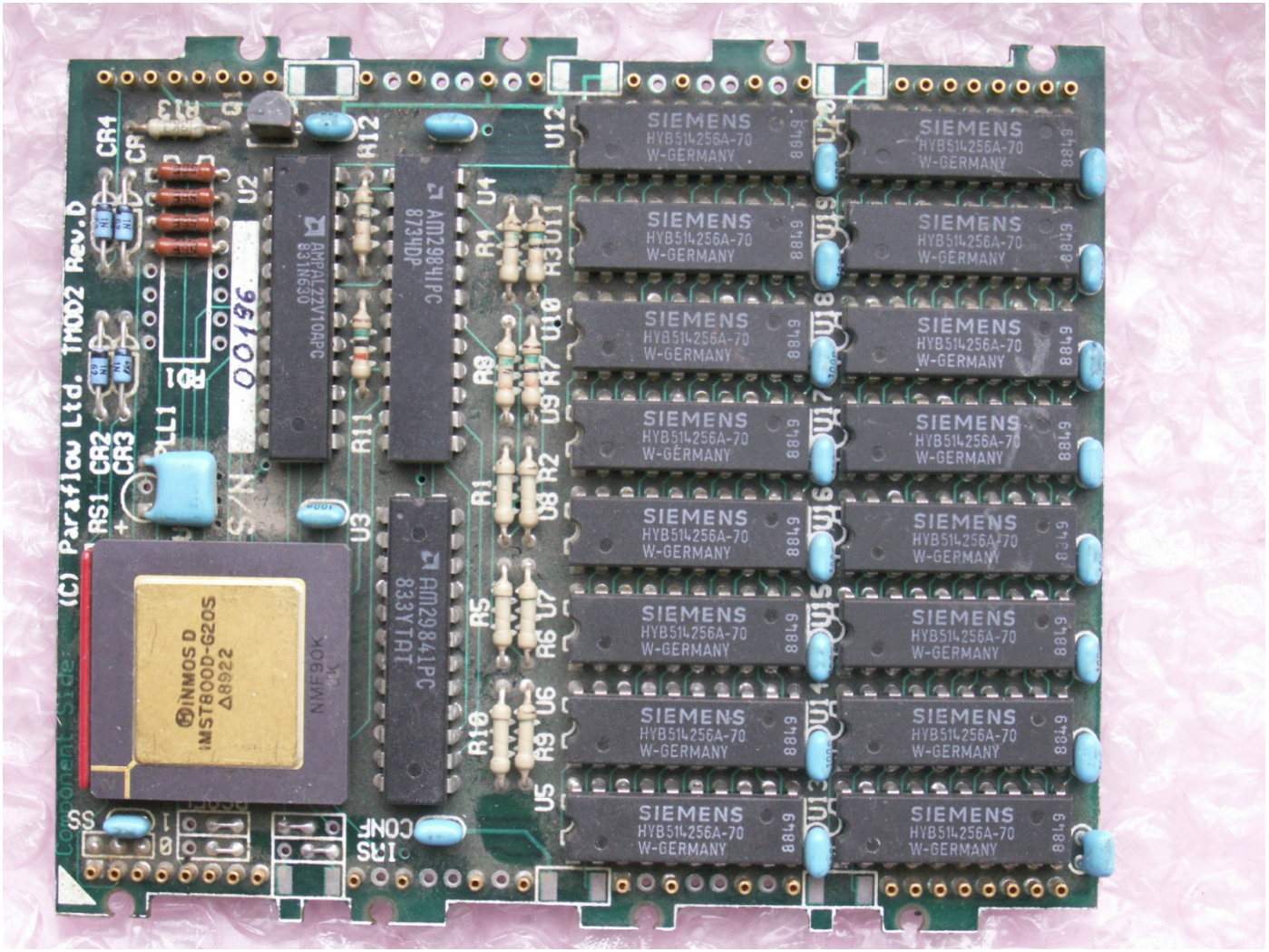


4) создание систем высокой надежности

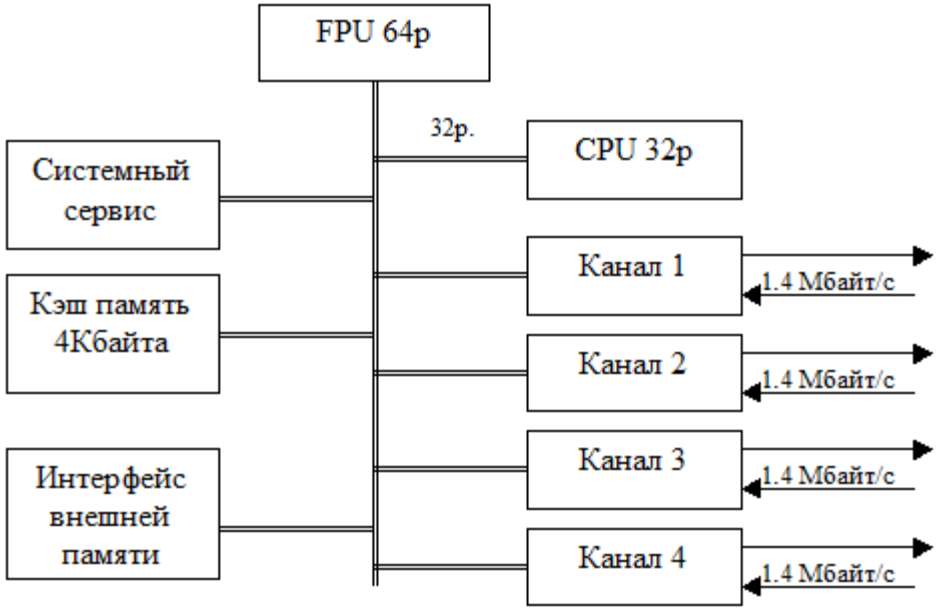
http://www.aspectspb.ru/solutions/it/highavailability/failover.html

АСПЕКТ СПб, **2020**

Транспьютер и оперативная память

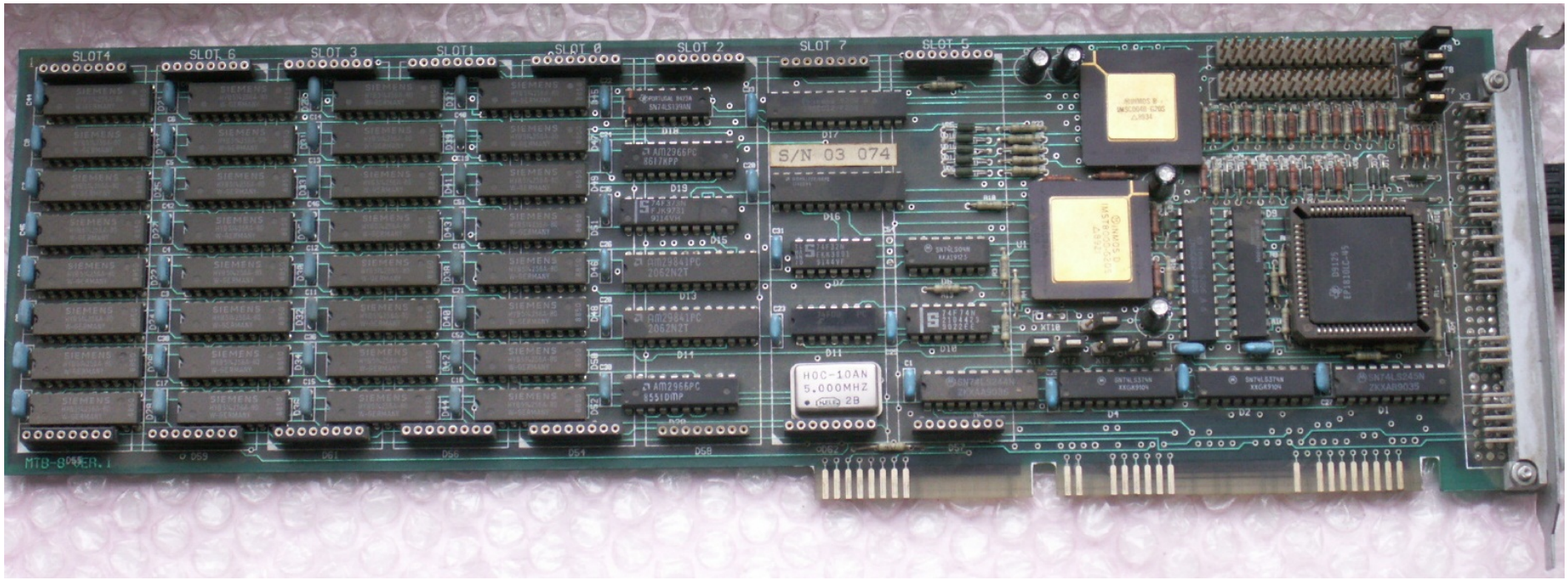


Структура транспьютера Т-800

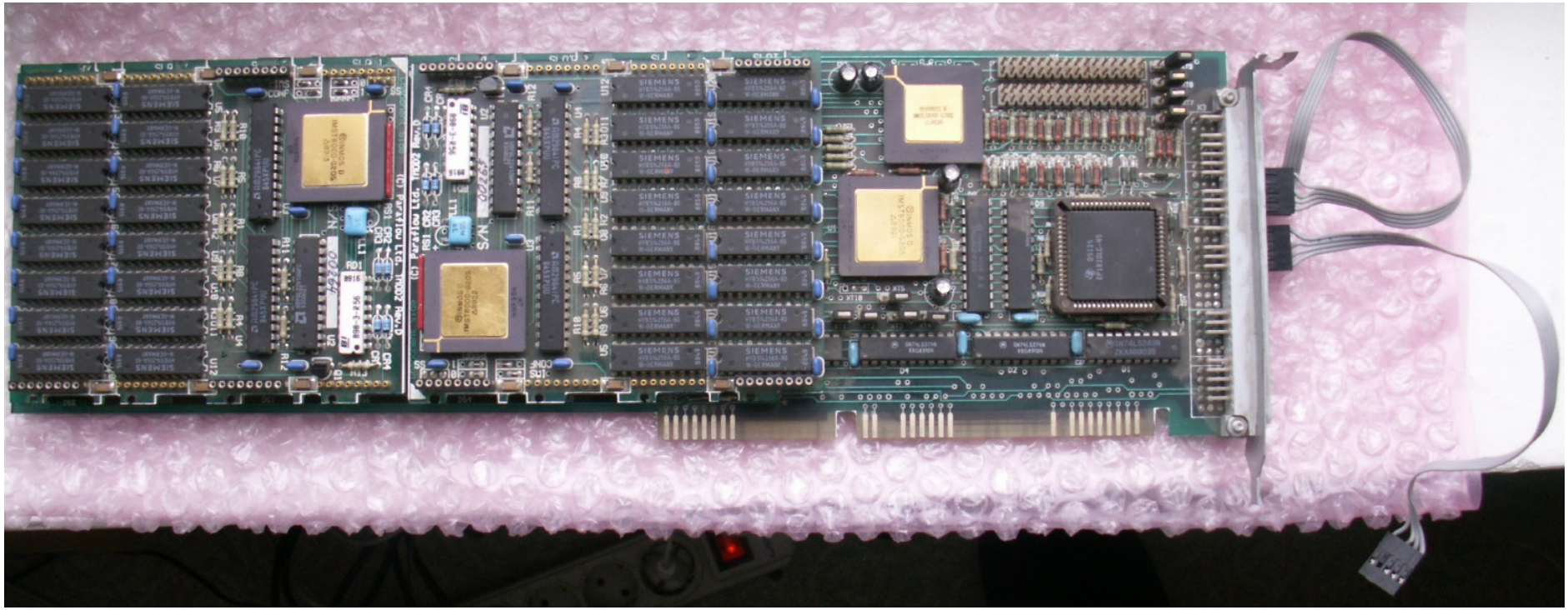


Структура транспьютера Т-800

Транспьютерная материнская плата МТБ-8

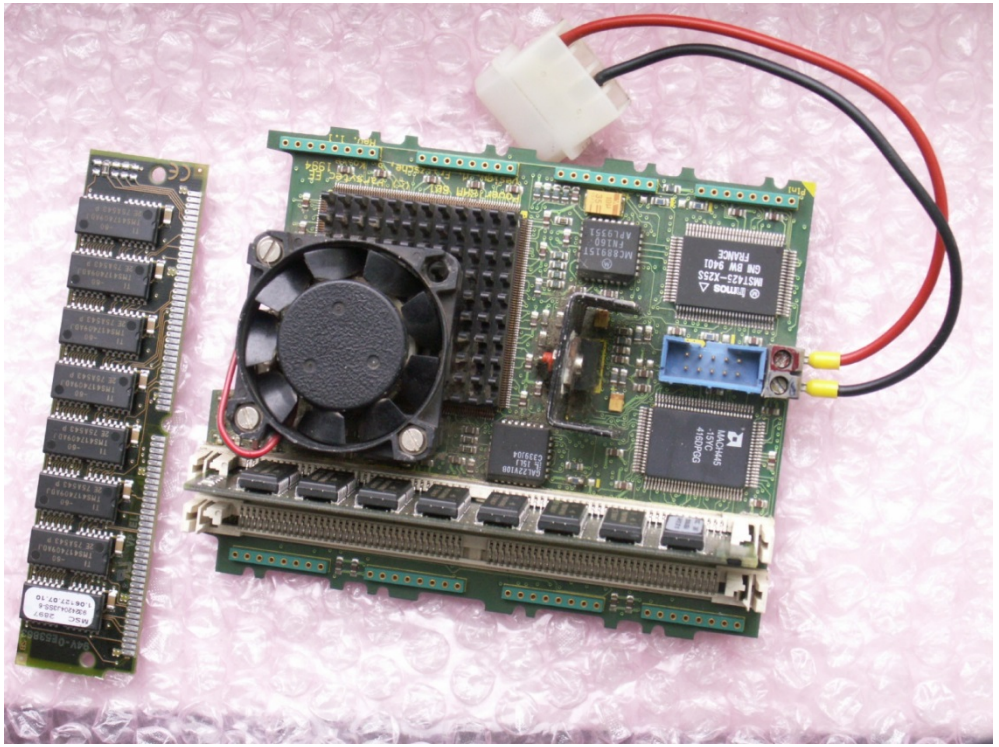


Три транспьютера на плате МТБ-8

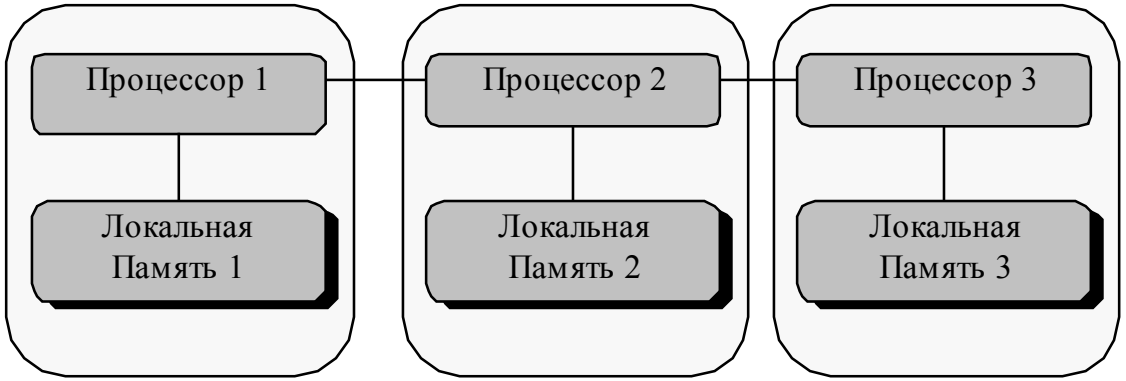


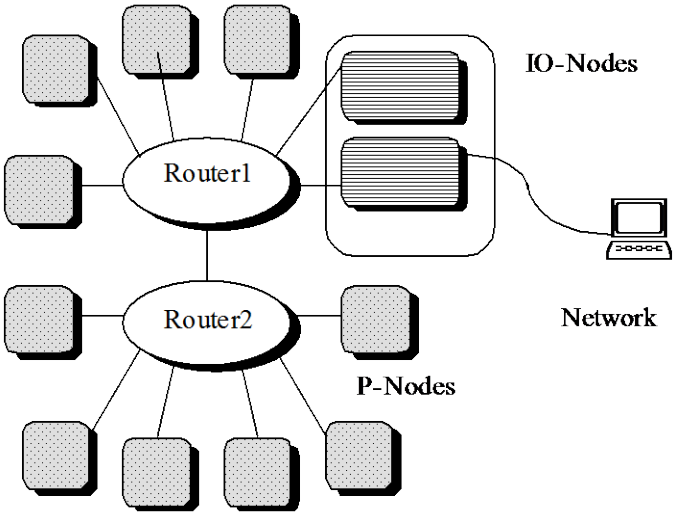
Многопроцессорные системы с общей памятью

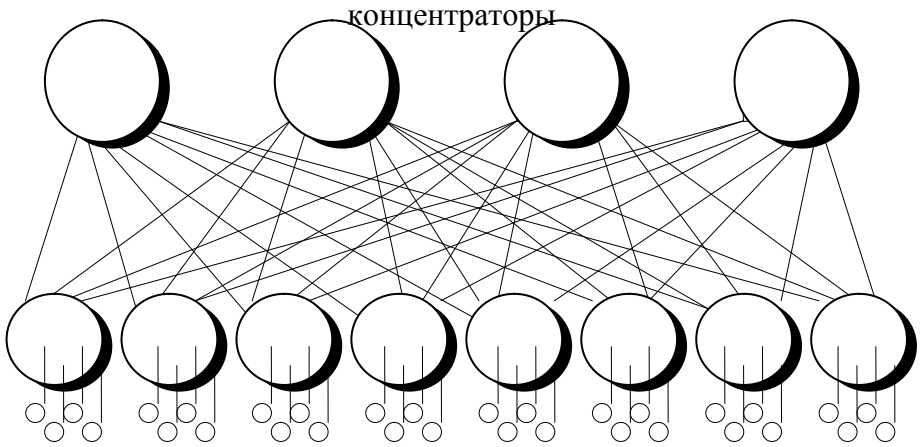




Многопроцессорные системы с распределенной памятью







Основные характеристики параллельной программы

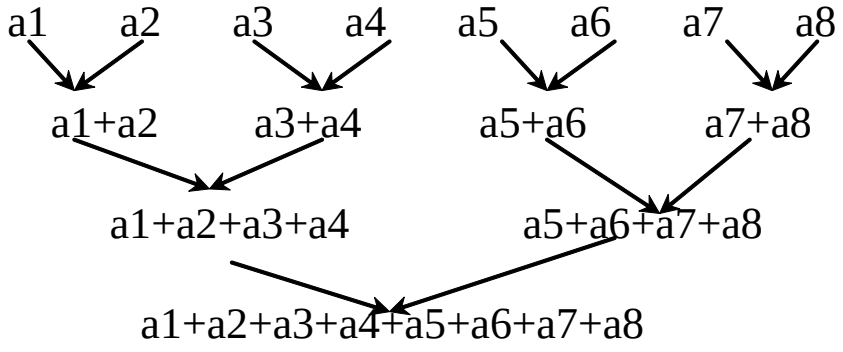
- Ускорение
- Эффективность
- Масштабируемость

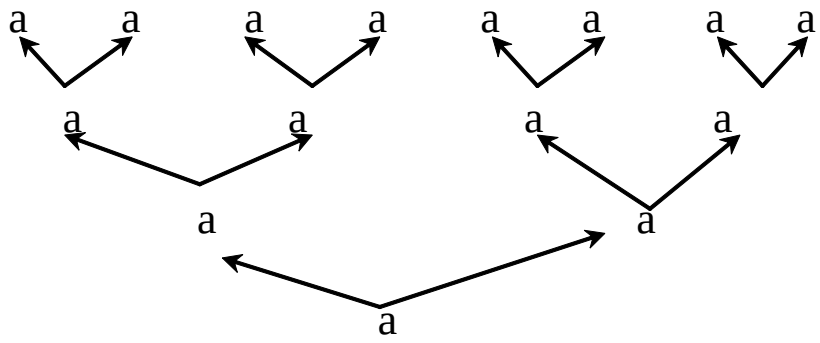
  – Число выполняемых операций
  – Время выполнения
  – Объём обрабатываемых данных

Метод сдваивания

Выполнение редукционных и им подобных операций

- Определение суммы элементов массива
- Определение минимального элемента массива
- Широковещательная рассылка данных
- …





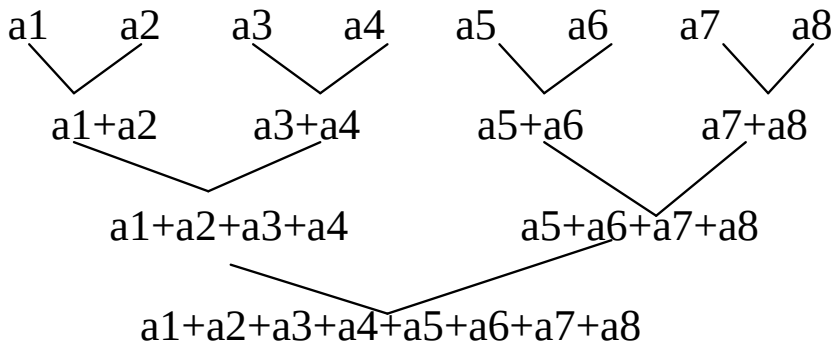
Основные характеристики параллельной программы

- ***Ускорение*** $S_p = \frac{T_1}{T_p}$
- ***Эффективность*** $E_p = \frac{S_p}{p}$
- ***Предел масштабируемости*** – минимальное число процессоров, при котором достигается максимальное ускорение
  - Число выполняемых операций
  - Время выполнения
  - Объём обрабатываемых данных

Метод сдваивания

n – *размер массива*
p – *число процессов*

Каскадная схема



$$T_1(n) = \tau_c(n-1)$$

$$T_{p=n/2}(n) = (\tau_c + \tau_s)\log_2 n$$

$$S_{p=n/2}(n) \approx \frac{n\tau_c}{(\tau_c+\tau_s)\log_2 n} = \frac{n}{\left(1+\frac{\tau_s}{\tau_c}\right)\log_2 n}$$

$$E_{p=n/2}(n) = \frac{s_p}{p} = \frac{2}{\left(1+\frac{\tau_s}{\tau_c}\right)\log_2 n}$$

τ_c - *время выполнения элементарной операции*

τ_s - *время передачи данных между процессами*

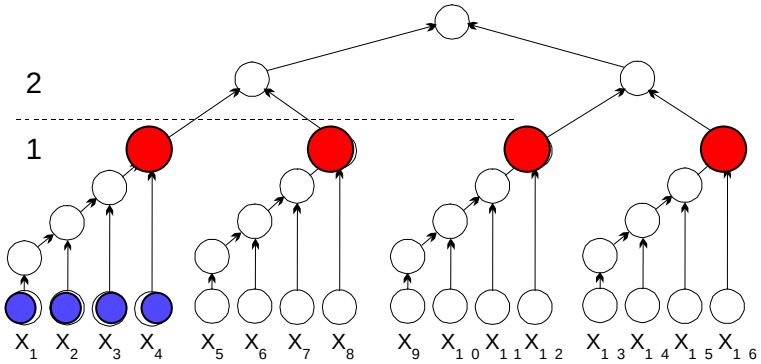
Метод сдваивания

n – *размер массива*
p – *число процессов*

Модифицированная каскадная схема

$$T_p = \frac{n}{p}\tau_c + (\tau_c + \tau_s)\log p$$

$$S_p = p\frac{1}{1 + \left(1 + \frac{\tau_s}{\tau_c}\right)\frac{p}{n}\log p}$$

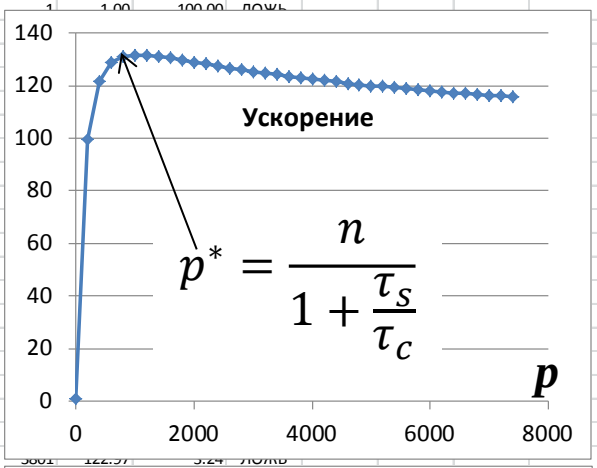


τ_c - *время выполнения элементарной операции*

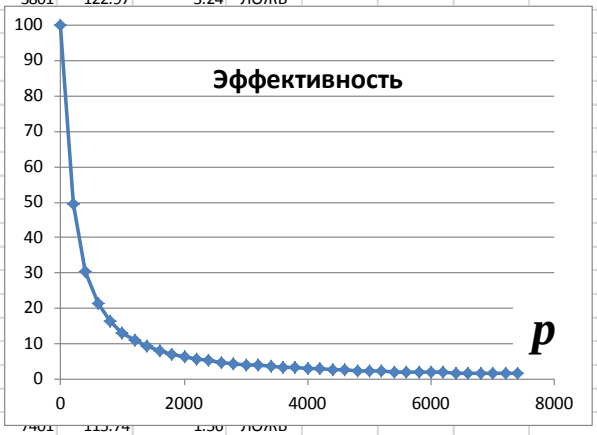
τ_s - *время передачи данных между процессами*

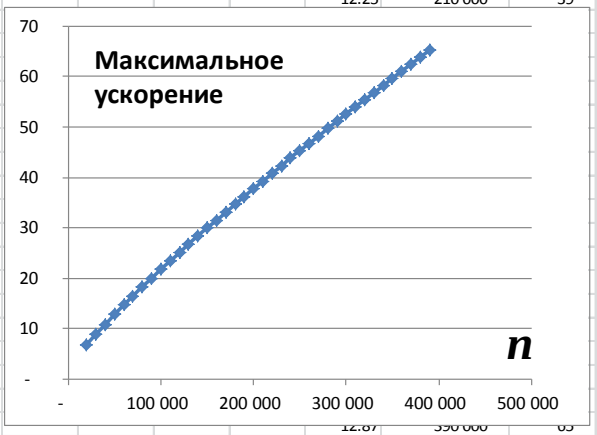
Масштабируемость

ts/tc	1 000															
n=2^c	1 048 576	20														
step	200													10 000		
p*	1 047.53															
log(p)	p	S	E										log(n)	n	S*	p*
0.00																20
5.30																30
5.99																40
6.40																50
6.69																60
6.91																70
7.09																80
7.24																90
7.38																100
7.50																110
7.60																120
7.70																130
7.78																140
7.86																150
7.94																160
8.01																170
8.07																180
8.13																190
8.19																200
8.24																210
8.29																220
8.34																230
8.39																240
8.43																250
8.48																260
8.52																270
8.56																280
8.59																290
8.63																300
8.67																310
8.70																320
8.73																330
8.76																340
8.79																350
8.82																360
8.85																370
8.88																380
8.91																390









Сверхлинейное ускорение

ускорение параллельного алгоритма

$$S_p = \frac{T_1}{T_p}$$

эффективность использования вычислительной мощности

$$E_p = \frac{S_p}{p}$$

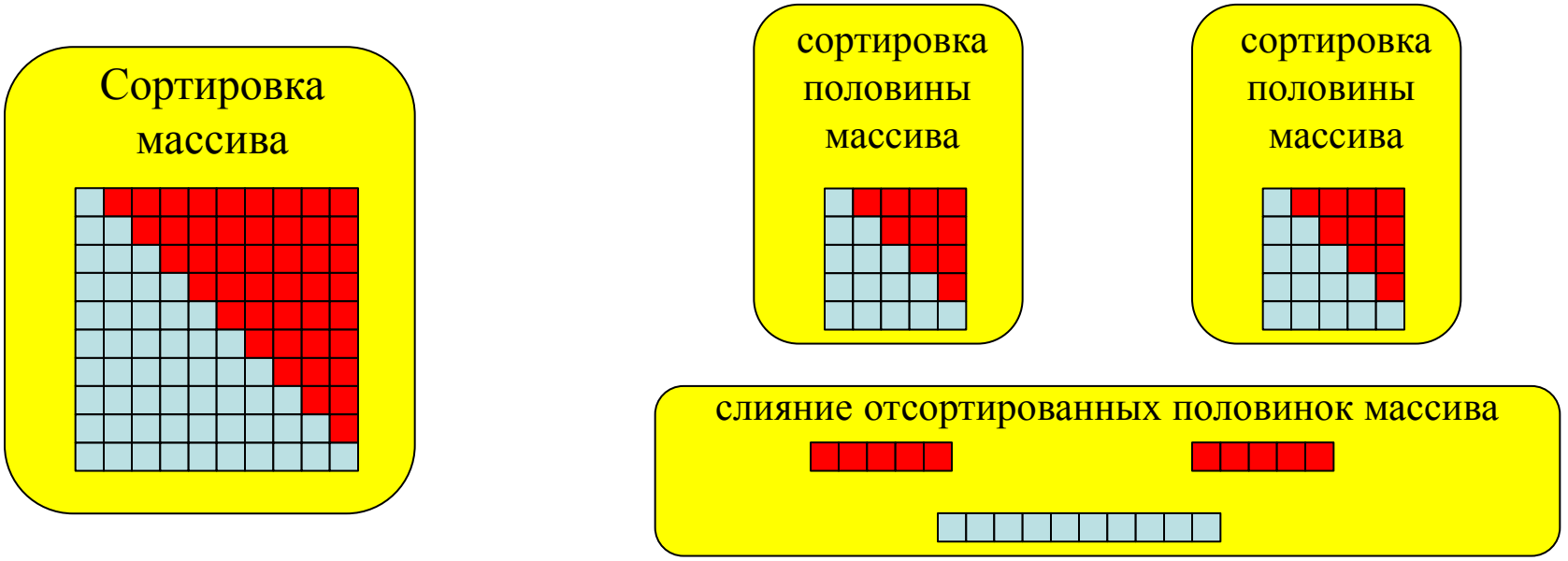
Может ли ускорение превышать число процессоров?

$$S_p = \frac{T_1}{T_p} > p \quad ?$$

$$E_p = \frac{S_p}{p} > 1$$

Может ли быть $S_p > p$?

– Пример неудачного последовательного алгоритма



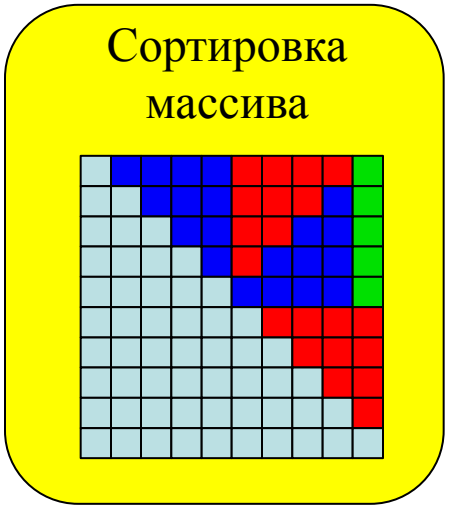
$$\frac{n(n-1)}{2} \sim \frac{n^2}{2}$$

$$\frac{\left(\frac{n}{2}\right)^2}{2} + n \sim \frac{1}{4}\frac{n^2}{2}$$

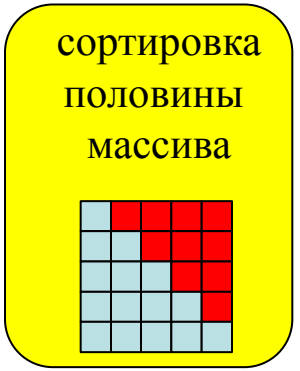
$$\boldsymbol{S_p = 4} \qquad \boldsymbol{E_p = \frac{4}{2} = 200\%}$$

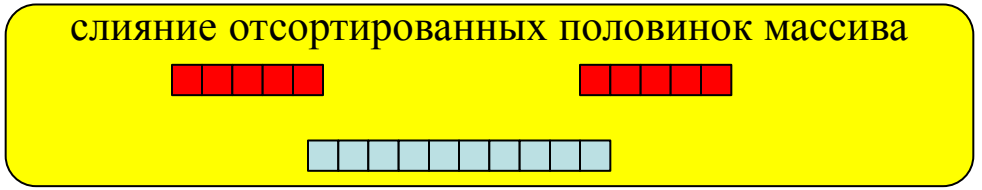
Почему $S_p > p$?

– В последовательном алгоритме выполняется больше операций, чем в параллельном









$$\frac{n(n-1)}{2} \sim \frac{n^2}{2}$$

$$\frac{\left(\frac{n}{2}\right)^2}{2} + n \sim \frac{1}{4}\frac{n^2}{2}$$

$$\boldsymbol{S_p = 4} \qquad \boldsymbol{E_p = \frac{4}{2} = 200\%}$$

Сверхлинейное ускорение

ускорение параллельного алгоритма

$$S_p = \frac{T_1}{T_p}$$

эффективность использования вычислительной мощности

$$E_p = \frac{S_p}{p}$$

Ускорение параллельного алгоритма относительно наилучшего последовательного

$$S_p^* = \frac{T_1^*}{T_p} \qquad E_p^* = \frac{S_p^*}{p}$$

Сверхлинейное ускорение

ускорение параллельного алгоритма

$$S_p = \frac{T_1}{T_p}$$

эффективность использования вычислительной мощности

$$E_p = \frac{S_p}{p}$$

Может ли ускорение превышать число процессоров?

$$S_p = \frac{T_1}{T_p} > p$$

$$E_p = \frac{S_p}{p} > 1$$

?

Да, если выбран неудачный последовательный алгоритм

Сверхлинейное ускорение

ускорение параллельного алгоритма

$$S_p = \frac{T_1}{T_p}$$

эффективность использования вычислительной мощности

$$E_p = \frac{S_p}{p}$$

Может ли ускорение превышать число процессоров?

$$S_p = \frac{T_1}{T_p} > p$$

$$E_p = \frac{S_p}{p} > 1$$

?

Да, если на скорость выполнения влияют аппаратные особенности вычислительной системы

Контакты

Якобовский М.В.

чл.-корр. РАН, проф., д.ф.-м.н.

Заместитель директора по научной работе
Института прикладной математики
им. М.В. Келдыша Российской академии наук

mail: lira@imamod.ru

web: http://lira.imamod.ru