Суперкомпьютеры и параллельная обработка данных

Бахтин Владимир Александрович
к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник
Института прикладной математики им М.В.Келдыша РАН
кафедра системного программирования
факультет вычислительной математики и кибернетики
Московского университета им. М.В. Ломоносова

Тематический план учебной дисциплины

- Введение в предмет
- Архитектура параллельных вычислительных систем
- Методы оценки производительности параллельных вычислительных систем
- Технологии параллельного программирования
- Введение в теорию анализа структуры программ и алгоритмов
- Введение в параллельные методы решения задач

Литература

- Лацис А.О. Параллельная обработка данных: учеб. пособие для студ. вузов. Издательский центр «Академия». 2010. Издательство: Академия
- Якобовский М.В. Введение в параллельные методы решения задач. Учебное пособие. Серия: «Суперкомпьютерное образование». Издательство МГУ. 2013.
- Вл. В. Воеводин, В. В. Воеводин. Параллельные вычисления — СПб., БХВ-Петербург, 2002, 608 с.
- Антонов А.С. Технологии параллельного программирования MPI и OpenMP: Учеб. пособие. Предисл.: В.А.Садовничий. - Серия «Суперкомпьютерное образование». М.: Издательство Московского университета, 2012.-344 с.

Литература

- OpenMP Application Programming Interface. Version 5.2. November, 202. URL: https://www.openmp.org/wp-content/uploads/OpenMP-API-Specification-5-1.pdf
- MPI: A Message-Passing Interface Standard. Version 4.0. June 9, 2021. URL: https://www.mpi-forum.org/docs/mpi-4.0/mpi40-report.pdf
- The OpenACC Application Programming Interface. Version 3.2. November, 2021. URL: https://www.openacc.org/sites/default/files/inline-images/Specification/OpenACC-3.2-final.pdf
- Э. Таненбаум, М. ван Стеен. Распределенные системы. Принципы и парадигмы - М.: Питер, 2003 - 876 с. - Классика computer science; ISBN 5-272-00053-6

Суперкомпьютерные системы (Top500)

PRESENTED BY

TOP 500 The List.

ICL INNOVATIVE COMPUTING LABORATORY

BERKELEY LAB Lawrence Berkeley National Laboratory

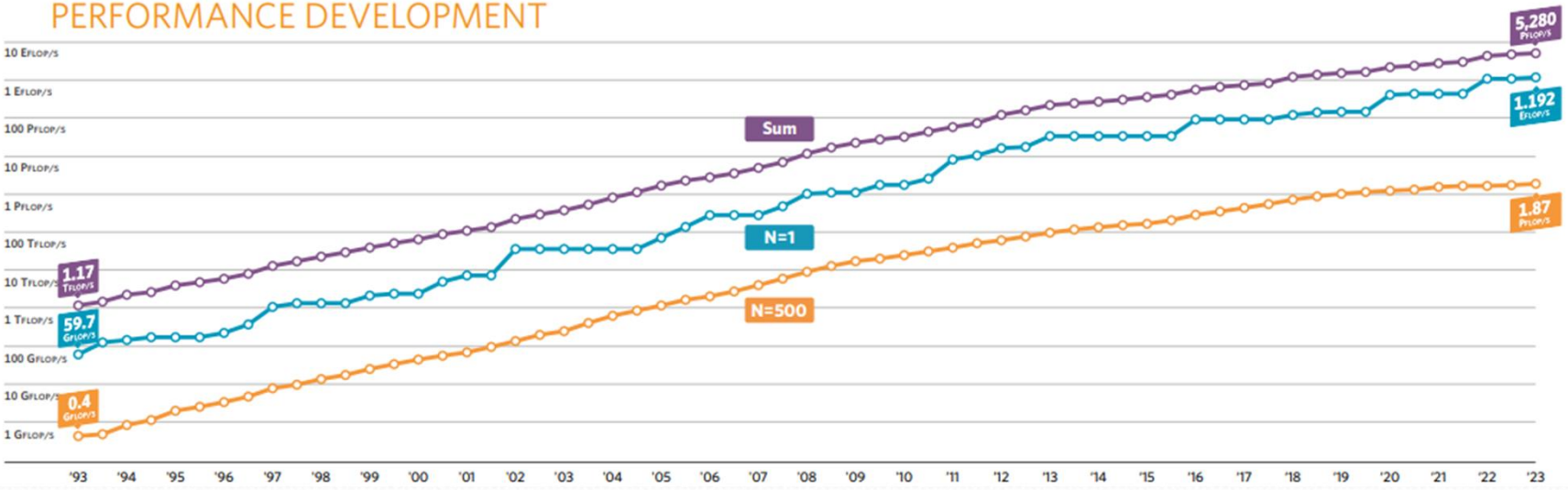
ISC GROUP Moving Forward.

FIND OUT MORE AT top500.org

JUNE 2023

			SITE	COUNTRY	CORES	RMAX PFLOP/S	POWER MW
1	**Frontier**	HPE Cray EX235a, AMD Opt 3rd Gen EPYC (64C 2GHz), AMD Instinct MI250X, Slingshot-11	DOE/SC/ORNL	USA	8,699,904	1,194.0	22.7
2	**Fugaku**	Fujitsu A64FX (48C, 2.2GHz), Tofu Interconnect D	RIKEN R-CCS	Japan	7,630,848	442.0	29.9
3	**LUMI**	HPE Cray EX235a, AMD Opt 3rd Gen EPYC (64C 2GHz), AMD Instinct MI250X, Slingshot-11	EuroHPC/CSC	Finland	2,220,288	309.0	6.01
4	**Leonardo**	Atos Bullsequana intelXeon (32C, 2.6 GHz), NVIDIA A100 quad-rail NVIDIA HDR100 Infiniband	EuroHPC/CINEC	Italy	1,824,768	238.7	7.40
5	**Summit**	IBM POWER9 (22C, 3.07GHz), NVIDIA Volta GV100 (80C), Dual-Rail Mellanox EDR Infiniband	DOE/SC/ORNL	USA	2,414,592	148.6	10.1

PERFORMANCE DEVELOPMENT



K computer

- Японский суперкомпьютер производства компании Fujitsu, запущенный в 2011 году в Институте физико-химических исследований в городе Кобе.
- В июне 2011 года K computer возглавил список самых производительных суперкомпьютеров мира с результатом в тесте LINPACK в 8,162 петафлопс.
- По состоянию на июнь 2011 года система имела 68 544 8-ядерных процессора SPARC64 VIIIfx, что составляло 548 352 вычислительных ядра, произведенных компанией Fujitsu по 45-нанометровому техпроцессу.
- В ноябре 2011 года K Computer был достроен, количество процессоров достигло 88 128, а производительность системы на тесте Linpack достигла 10,51 Пфлопс. Таким образом, K Computer стал первым в истории суперкомпьютером, преодолевшим рубеж в 10 Пфлопс.
- Стоимость 140 миллиардов йен, или 1,2 миллиарда долларов.

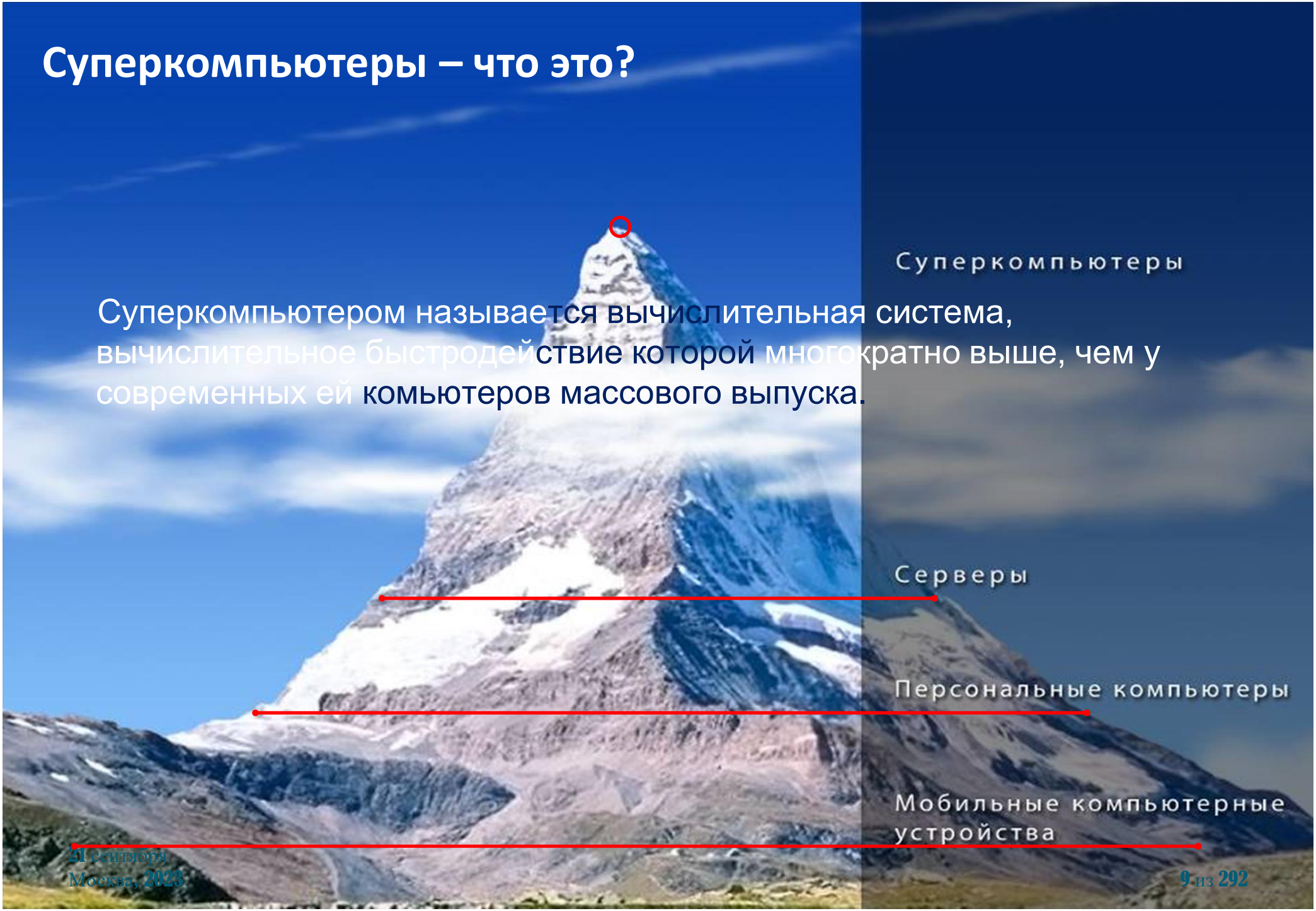
Gyoukou Supercomputer

https://youtu.be/_-z8ErBlBSo

Суперкомпьютеры – что это?

- Суперкомпьютеры – это компьютеры, которые работают значительно быстрее остальной массы современных компьютеров
- Суперкомпьютеры – это компьютеры, которые занимают большой зал
- Суперкомпьютеры – это компьютеры, которые весят больше 1 тонны
- Суперкомпьютеры – это компьютеры, которые стоят больше 1 млн.долл.
- Суперкомпьютеры – это компьютеры, которые сводят проблему вычислений к проблеме ввода/вывода
- Суперкомпьютеры – это компьютеры, мощности которых лишь немного не хватает для решения актуальных вычислительно сложных задач

Суперкомпьютеры – что это?



Суперкомпьютером называется вычислительная система, вычислительное быстродействие которой многократно выше, чем у современных ей комьютеров массового выпуска.

Суперкомпьютерные системы (Top500)

PRESENTED BY

TOP 500 The List.

ICL INNOVATIVE COMPUTING LABORATORY

BERKELEY LAB Lawrence Berkeley National Laboratory

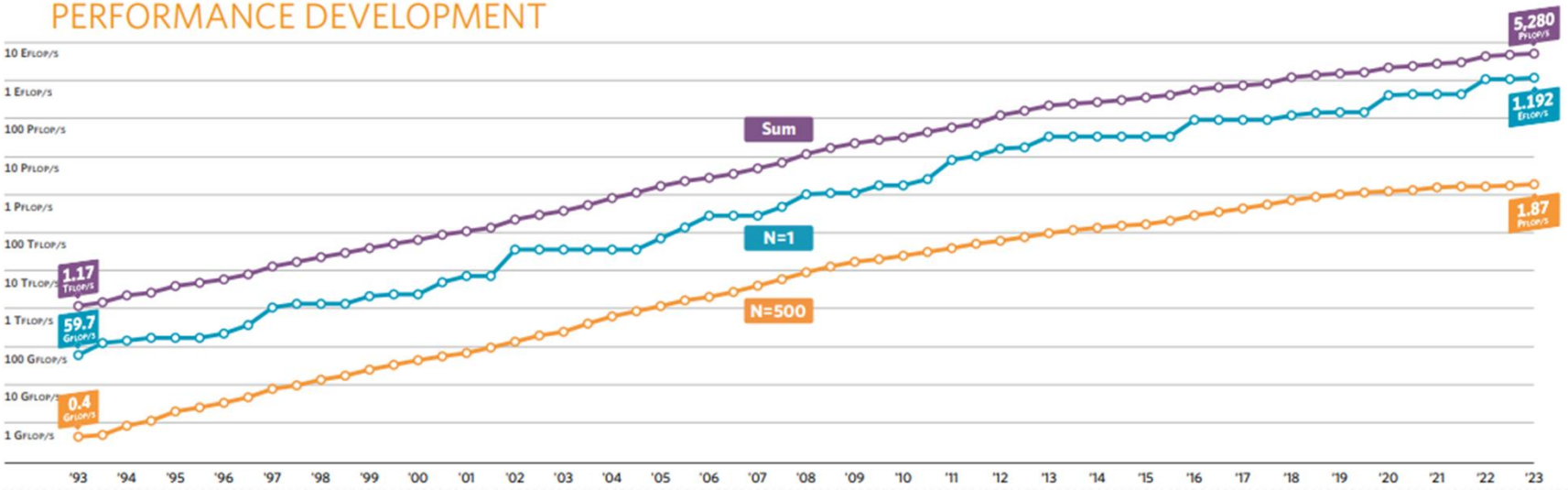
ISC GROUP Moving Forward.

FIND OUT MORE AT top500.org

JUNE 2023

			SITE	COUNTRY	CORES	RMAX PFLOP/S	POWER MW
1	**Frontier**	HPE Cray EX235a, AMD Opt 3rd Gen EPYC (64C 2GHz), AMD Instinct MI250X, Slingshot-11	DOE/SC/ORNL	USA	8,699,904	1,194.0	22.7
2	**Fugaku**	Fujitsu A64FX (48C, 2.2GHz), Tofu Interconnect D	RIKEN R-CCS	Japan	7,630,848	442.0	29.9
3	**LUMI**	HPE Cray EX235a, AMD Opt 3rd Gen EPYC (64C 2GHz), AMD Instinct MI250X, Slingshot-11	EuroHPC/CSC	Finland	2,220,288	309.0	6.01
4	**Leonardo**	Atos Bullsequana intelXeon (32C, 2.6 GHz), NVIDIA A100 quad-rail NVIDIA HDR100 Infiniband	EuroHPC/CINEC	Italy	1,824,768	238.7	7.40
5	**Summit**	IBM POWER9 (22C, 3.07GHz), NVIDIA Volta GV100 (80C), Dual-Rail Mellanox EDR Infiniband	DOE/SC/ORNL	USA	2,414,592	148.6	10.1

PERFORMANCE DEVELOPMENT



Производительность компьютеров. Тест Linpack

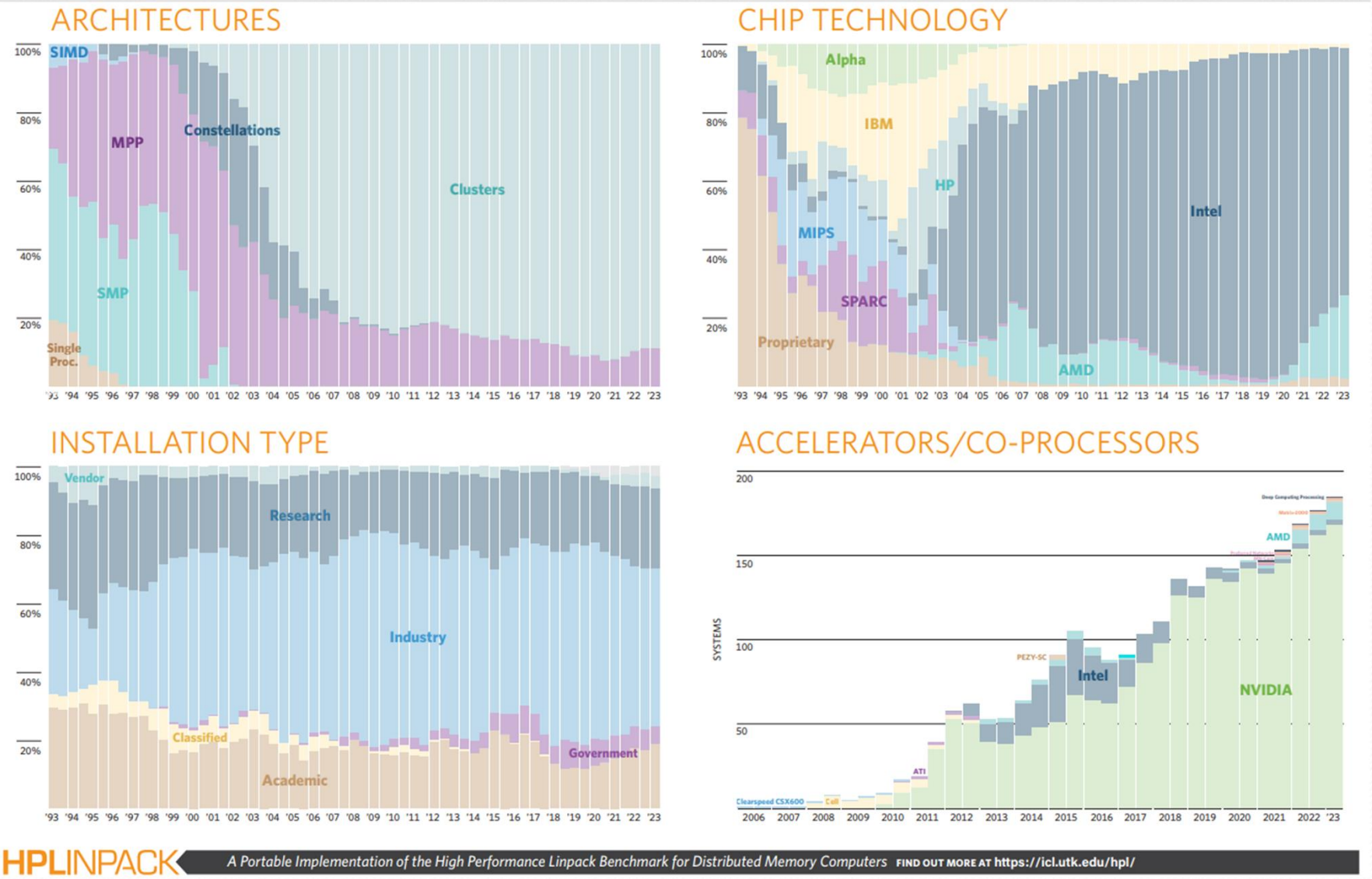
Тест Linpack - решение системы линейных алгебраических уравнений с плотной матрицей.

1. Матрица 100*100, фиксированный текст программы.

2. Linpack TPP: матрица 1000*1000, можно менять метод и текст программы. Сложность : 2n3/3+2n2.

3. High Performance Linpack: матрица любого размера, множество дополнительных параметров.

Суперкомпьютерные системы (Top500)



HPLINPACK A Portable Implementation of the High Performance Linpack Benchmark for Distributed Memory Computers FIND OUT MORE AT https://icl.utk.edu/hpl/

Поколения архитектур и парадигмы программирования

Середина 70-х годов.

Векторно-конвейерные компьютеры

Особенности архитектуры: векторные функциональные устройства, зацепление функциональных устройств, векторные команды в системе команд, векторные регистры. Программирование: векторизация самых внутренних циклов.

Cray Fortran первый компилятор с Fortran векторизацией

Суперкомпьютер Cray-1
Пиковая производительность машины — 133 Мфлопса.

Поколения архитектур и парадигмы программирования

Начало 80-х годов.
Векторно-параллельные компьютеры

Особенности архитектуры: векторные функциональные устройства, зацепление функциональных устройств, векторные команды в системе команд, векторные регистры.
Небольшое число процессоров объединяются
над общей памятью.
Программирование: векторизация самых внутренних циклов и распараллеливание на внешнем уровне, единое адресное пространство, локальные и глобальные переменные.

Суперкомпьютеры Cray X-MP, Cray Y-MP

Поколения архитектур и парадигмы программирования

Начало 90-х годов.
Массивно-параллельные компьютеры

Особенности архитектуры: тысячи процессоров объединяются с помощью коммуникационной сети по некоторой топологии, распределенная память.

Программирование: обмен сообщениями, отсутствие единого адресного пространства,
PVM, Message Passing Interface.
Необходимость выделения массового параллелизма, явного распределения данных и согласования параллелизма с распределением.

Суперкомпьютер Cray T3D, 307 Гфлопс

Поколения архитектур и парадигмы программирования

Середина 90-х годов.
Параллельные компьютеры с общей памятью

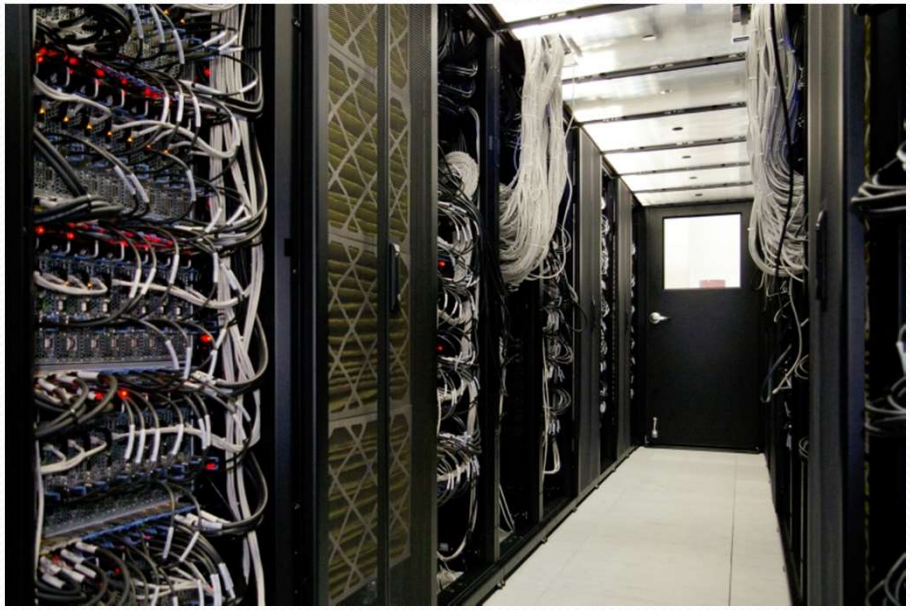
Особенности архитектуры: сотни процессоров объединяются над общей памятью.

Программирование: единое адресное пространство, локальные и глобальные переменные, OpenMP.

Dec AlphaServer

Поколения архитектур и парадигмы программирования

Начало 2000-х.
Кластеры из узлов с общей памятью
Особенности архитектуры: большое число многопроцессорных узлов объединяются вместе с помощью коммуникационной сети по некоторой топологии, распределенная память; в рамках каждого узла несколько (многоядерных) процессоров объединяются над общей памятью.



СКИФ МГУ «Чебышев»,
60 Тфлопс

Программирование: неоднородная схема MPI+OpenMP; необходимость выделения массового параллелизма, явное распределение данных,
обмен сообщениями на внешнем уровне; распараллеливание в едином адресном пространстве, локальные и глобальные переменные на уровне узла с общей памятью.

Поколения архитектур и парадигмы программирования

Середина 2000-х.
Кластеры из узлов с общей памятью и ускорителями
Особенности архитектуры: большое число многопроцессорных узлов объединяются вместе с помощью коммуникационной сети по некоторой топологии, распределенная память; в рамках каждого узла несколько (многоядерных) процессоров объединяются над общей памятью; на каждом узле несколько ускорителей (GPU, PHI).

Программирование:
MPI+OpenMP+CUDA/OpenCL

МГУ «Ломоносов», 1.7 Пфлопс

Поколения архитектур и парадигмы программирования

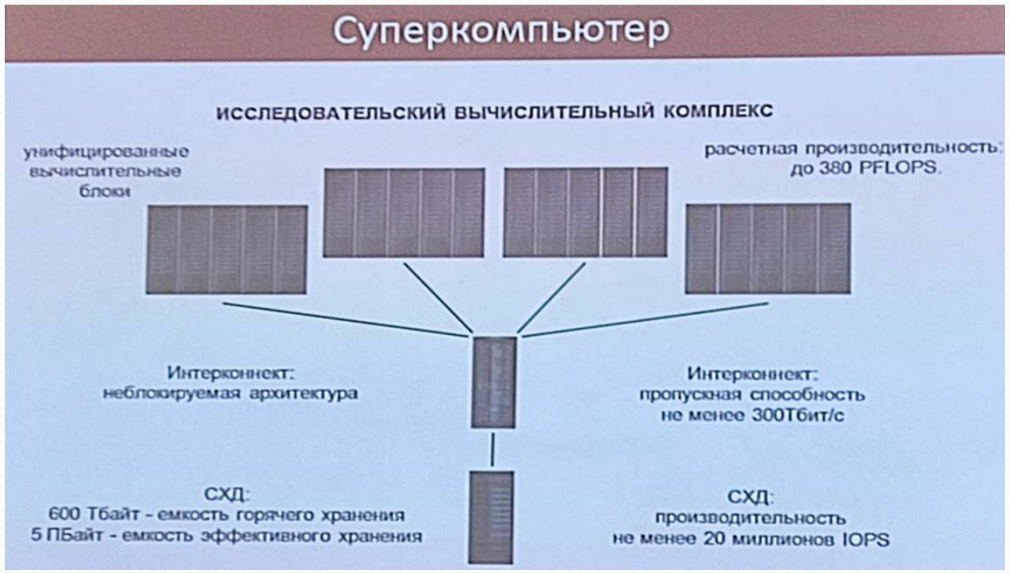
С 1976 года до наших дней:

- 70-е – Векторизация циклов
- 80-е – Распараллеливание циклов (внешних) + Векторизация (внутренних)
- 90-е – MPI
- середина 90-х – OpenMP
- середина 2000-х – MPI+OpenMP
- 2010-е – CUDA, OpenCL, MPI+OpenMP + ускорители (GPU, Xeon Phi)
- ...

50 самых мощных компьютеров СНГ (top50.supercomputers.ru)

№	Название Место установки	Узлов Проц. Ускор.	Архитектура: кол-во узлов: конфигурация узла сеть: вычислительная / сервисная / транспортная	Rmax Rpeak (Тфлоп/с)	Разработчик *Область применения*
1 new	«Червоненкис» Яндекс, Москва	199 398 1592	199: CPU: 2x AMD EPYC 7702 , 1024 GB RAM Acc: 8x NVIDIA A100 HDR InfiniBand / нд / 100 Gigabit Ethernet	21530.0 29415.17	Яндекс NVIDIA *IT Services*
2 new	«Галушкин» Яндекс, Москва	136 272 1088	136: CPU: 2x AMD EPYC 7702 , 1024 GB RAM Acc: 8x NVIDIA A100 HDR InfiniBand / нд / 100 Gigabit Ethernet	16020.0 20636.1	Яндекс NVIDIA *IT Services*
3 new	«Ляпунов» Яндекс, Москва	137 274 1096	137: CPU: 2x AMD Epyc 7662, 512 GB RAM Acc: 8x NVIDIA A100 HDR InfiniBand / нд / 100 Gigabit Ethernet	12810.0 20029.19	NVIDIA Inspur *IT Services*
4 new	«Кристофари Нео» SberCloud (ООО «Облачные технологии») , СберБанк, Москва	99 198 792	99: CPU: 2x AMD EPYC 7742, 2048 GB RAM Acc: 8x NVIDIA A100 HDR InfiniBand / 10 Gigabit Ethernet / 200 Gigabit Ethernet	11950.0 14908.6	NVIDIA SberCloud (ООО «Облачные технологии») *Облачный провайдер*
5 ▽	«Кристофари» SberCloud (ООО «Облачные технологии») , СберБанк, Москва	75 150 1200	75: NVIDIA DGX-2 CPU: 2x Intel Xeon Platinum 8168 24C 2.7GHz, 1536 GB RAM Acc: 16x NVIDIA Tesla V100 EDR Infiniband / 100 Gigabit Ethernet / 10 Gigabit Ethernet	6669.0 8789.76	SberCloud (ООО «Облачные технологии») NVIDIA *Облачный провайдер*
6 ▽	«Ломоносов-2» Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва	1696 1696 1856	1536: CPU: 1x Intel Xeon E5-2697v3, 64 GB RAM Acc: 1x NVIDIA Tesla K40M 160: CPU: 1x Intel Xeon Gold 6126, 96 GB RAM Acc: 2x NVIDIA Tesla P100	2478.0 4946.79	T-Платформы *Наука и образование*

Новый суперкомпьютер МГУ



Применение суперкомпьютеров

- Сокращение времени решения вычислительно сложных задач
- Сокращение времени обработки больших объемов данных
- Решение задач реального времени
- Создание систем высокой надежности

Суперкомпьютеры… Зачем?

- Неужели есть настолько сложные задачи, что для их решения хорошего сервера не хватает?
- Неужели есть настолько важные задачи, которые оправдывают крайне высокую стоимость суперкомпьютеров?

А далеко ли вычислительно сложные задачи?

Задача о числе счастливых билетиков :

```
count = 0;
for ( i1 = 0;                    +i1)
  for ( i2 = (                   ++i2)
    for ( i3 =                    ++i3)
      for ( i4                   ); ++i4)
        for ( i5                 10; ++i5)
          for (                   10; ++i6) {
            if(                  = i4+i5+i6 )
                                 ount+1;
          }
```

Intel Core Duo 2.6 ГГц:

8 цифр – **0.1** с

10 цифр – **10** с

12 цифр – **1780** с

А далеко ли вычислительно сложные задачи?

Задача о числе счастливых билетиков :

```
count = 0;
for ( i1 = 0; i1 < 10; ++i1)
  for ( i2 = 0; i2 < 10; ++i2)
    for ( i3 = 0; i3 < 10; ++i3)
      for ( i4 = 0; i4 < 10; ++i4)
        for ( i5 = 0; i5 < 10; ++i5)
          for ( i6 = 0; i6 < 10; ++i6) {
              if( i1+i2+i3 == i4+i5+i6 )
                  count = count+1;
          }
```

Поможет ли оптимизация программы?

Поможет ли использование суперкомпьютера?

Вычислительная сложность -10^{11} *операций !*

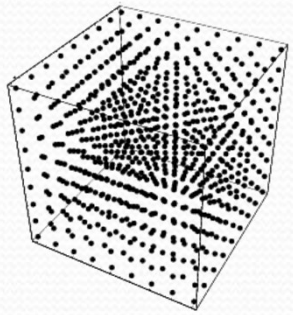
Сверхвысокая производительность - зачем?

Моделирование нефтяных резервуаров:

- *Нефтеносная область – 100*100*100 точек*
- *в каждой точке вычисляется от 5 до 20 функций (скорость, давление, концентрация, температура, …)*
- *200-1000 операций для вычисления каждой функции в каждой точке*
- *100-1000 шагов по времени*

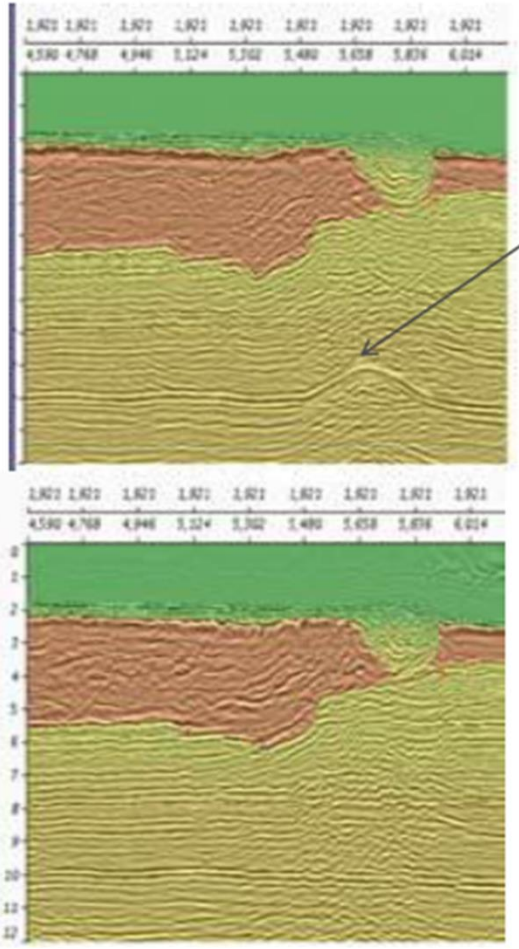
- *Итого: 10^6 (точек сетки) * 10 (функций) * * 500 (операций) * 500 (шагов) =*

  = 2500 млрд. операций



Сверхвысокая производительность - зачем?

Ex: Increasing efficiçency in Oil & Gas



Seismic profiles of a region of the Gulf of Mexico.

The top image, in 2003 , on **64 processors,**
At the bottom right-hand side , a structure shaped like a bowler hat, typical of a petroleum zone.

Based on this image, ready to install boring equipment on this site.

Fresh data analysis, on a **13 000 cores** supercomputer revealed that the structure was an artefact.

Thanks to HPC, 80 M$ saved

In the **mid-90's, only 40%** of deposits fulfilled their promises. Numerical simulations that analyse data obtained by seismic echography have radically changed the playing field. Armed with the new supercomputer … , the Total engineers are **now** hitting the bull's eye **in 60-70% of cases."**

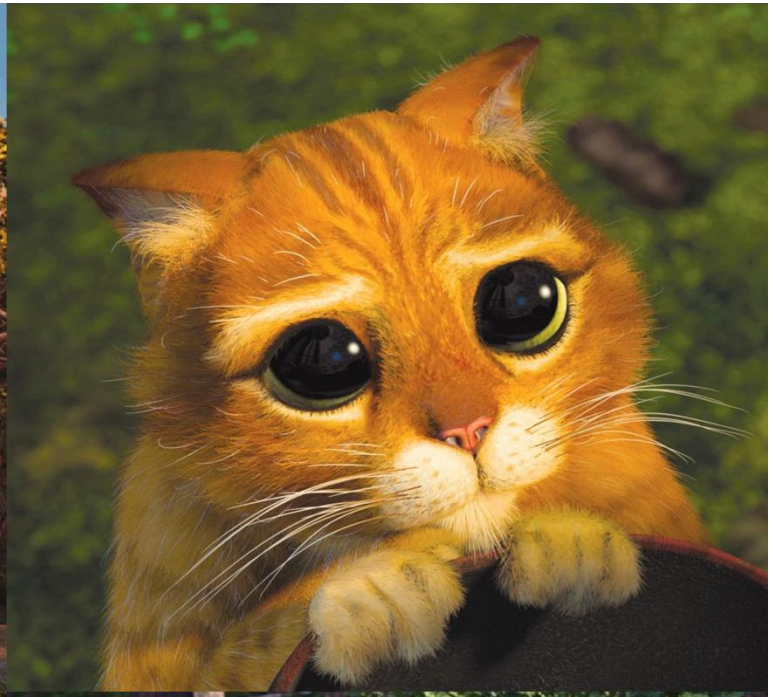
Journal La Recherche, special HPC, July 2009,

Acknowledgements: H. Calandra, Ph. Ricoux (TOTAL)

TOTAL

Courtesy of P.Ricoux, Total, France


JUST
MARRIED



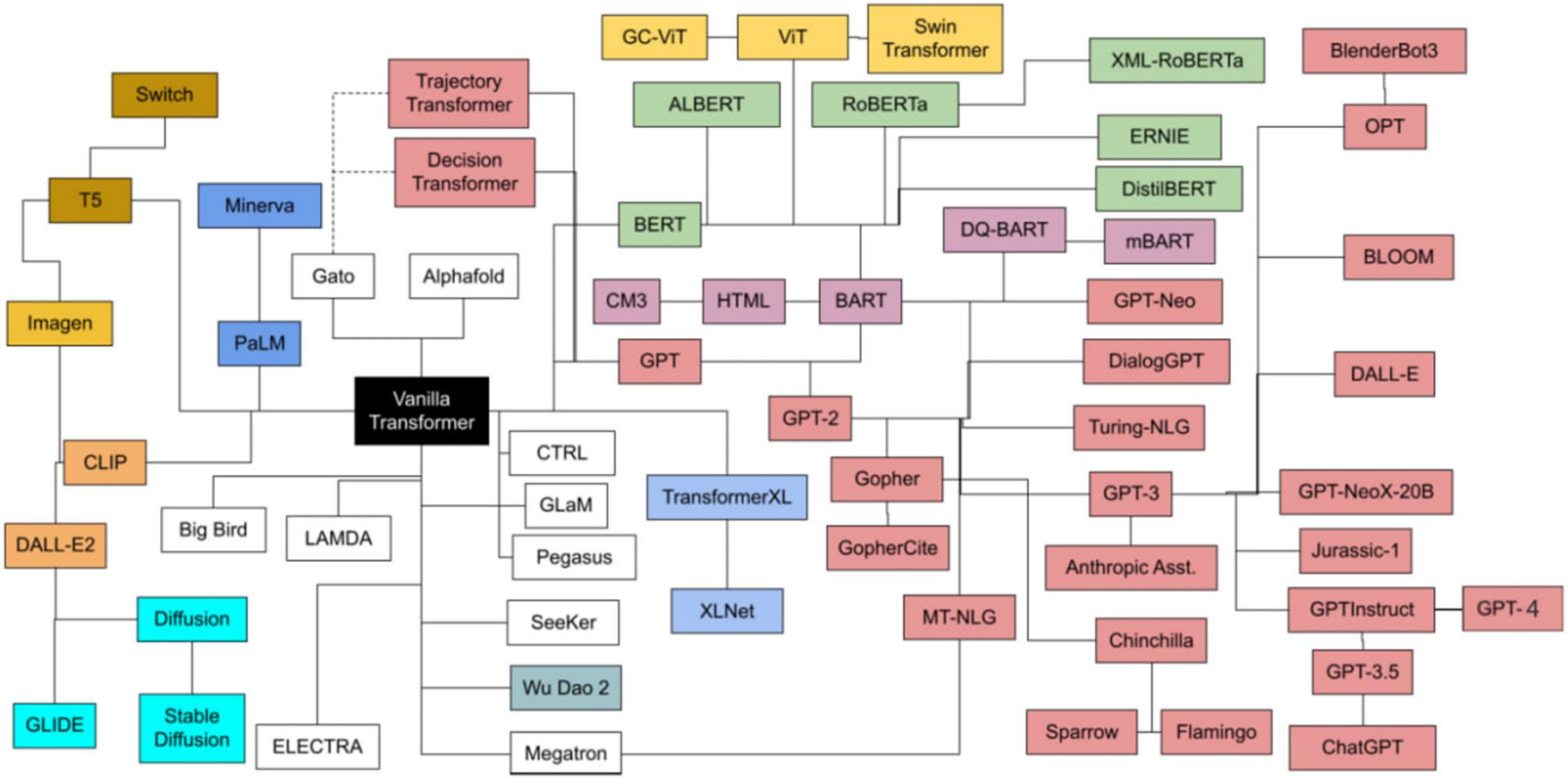

DreamWorks

ШРЕК ТРЕТИЙ. Суперкомпьютерный…

- **24** кадра в секунду
- более **120 000** кадров в фильме
- обработка кадров независимо друг от друга
- кадр обрабатывается одним процессором
- в среднем **2** часа на один вариант одного кадра
- всего: более **20** млн. процессорочасов
- всего: более **30** Тбайт данных
- использованный суперкомпьютер: более **8000** процессорных ядер

CGF — студия визуальных эффектов и анимации в России

Сверхвысокая производительность - зачем?



Transformer models: an introduction and catalog

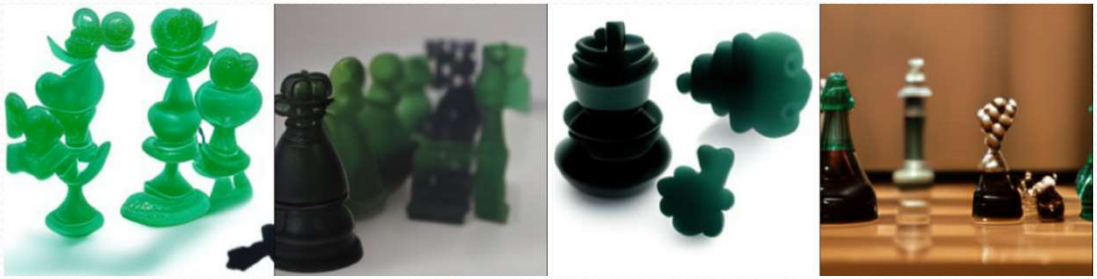
Xavier Amatriain, Ananth Sankar, Jie Bing, Praveen Kumar Bodigutla, Timothy J. Hazen, Michaeel Kazi

https://doi.org/10.48550/arXiv.2302.07730

Сверхвысокая производительность - зачем?

ruDALL-E - сеть для создания изображения на основе текстового описания на русском языке (https://rudalle.ru/)

«шахматная ладья из изумрудного материала»



«кошка, одетая в корону»

Сверхвысокая производительность - зачем?

ruDALL-E - сеть для создания изображения на основе текстового описания на русском языке (https://rudalle.ru/)

Создание изображений происходит в три этапа: сначала одна нейросеть принимает текст на вход и генерирует заданное число картинок, затем следующая выбирает наиболее удачные из них и соответствующие описанию, а третья увеличивает их в размере без потери качества.

Два варианта модели:

- ruDALL-E XL, которая содержит 1,3 миллиарда параметров;

- ruDALL-E 12B с 12 миллиардами параметров.

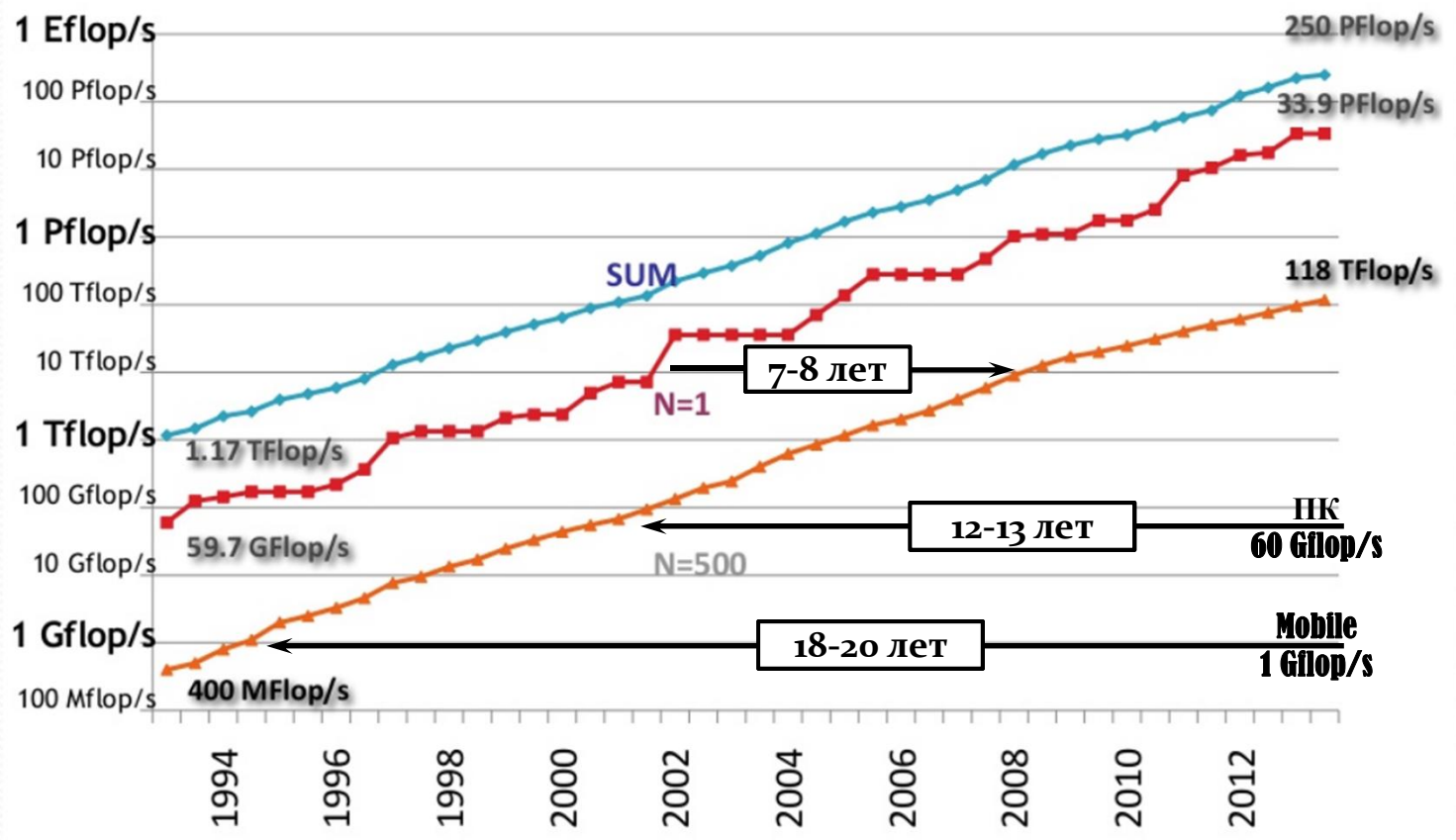
Обучение заняло 23 тысячи GPU-часов на массиве данных из 120 миллионов пар «текст-изображение»

Сверхвысокая производительность - зачем?

Model	Total train compute (PF-days)	Total train compute (flops)	Params (M)	Training tokens (billions)	Flops per param per token	Mult for bwd pass	Fwd-pass flops per active param per token	Frac of params active for each token
T5-Small	2.08E+00	1.80E+20	60	1,000	3	3	1	0.5
T5-Base	7.64E+00	6.60E+20	220	1,000	3	3	1	0.5
T5-Large	2.67E+01	2.31E+21	770	1,000	3	3	1	0.5
T5-3B	1.04E[illegible]2	9.00E+21	3,000	1,000	3	3	1	0.5
T5-11B	3.82[illegible]02	3.30E+22	11,000	1,000	3	3	1	0.5
BERT-Base	1.8[illegible]+00	1.64E+20	109	250	6	3	2	1.0
BERT-Large	[illegible]6E+00	5.33E+20	355	250	6	3	2	1.0
RoBERTa-Bas	.74E+01	1.50E+21	125	2,000	6	3	2	1.0
RoBERTa-Lar	[illegible]+01	4.26E+21	355	2,000	6	3	2	1.0
GPT-3 Small	.60E+00	2.25E+20	125	300	6	3	2	1.0
GPT-3 Mediu	7.42E+00	6.41E+20	356	300	6	3	2	1.0
GPT-3 Large	1.58E+01	1.37E+21	760	300	6	3	2	1.0
GPT-3 XL	2.75E+01	2.38E+21	1,320	300	6	3	2	1.0
GPT-3 2.7B	5.52E+01	4.77E+21	2,650	300	6	3	2	1.0
GPT-3 6.7B	1.39E+02	1.20E+22	6,660	300	6	3	2	1.0
GPT-3 13B	2.68E+02	2.31E+22	12,850	300	6	3	2	1.0
GPT-3 175B	3.64E+03	3.14E+23	174,600	300	6	3	2	1.0

AI-модель для русского языка,
https://developers.sber.ru/portal/products/rugpt-3

Рост производительности



http://linpack.hpc.msu.ru/

Важные сокращения

Мега (Mega) – 10^6 (миллион)
Гига (Giga) – 10^9 (биллион / миллиард)
Тера (Tera) – 10^{12} (триллион)
Пета (Peta) – 10^{15} (квадриллион)
Экза (Exa) – 10^{18} (квинтиллион)

Флоп/с, Flop/s – Floating point operations per second

*15 Tflop/s = 15 * 10^{12} арифметических операций в секунду над вещественными данными, представленными в форме с плавающей точкой.*

Важные сокращения

Мега (Mega) – 10^6 (миллион)
Гига (Giga) – 10^9 (биллион / миллиард)
Тера (Tera) – 10^{12} (триллион)
Пета (Peta) – 10^{15} (квадриллион)
Экза (Exa) – 10^{18} (квинтиллион)

Флоп/с, Flop/s – Floating point operations per second

*15 Tflop/s = 15 * 10^{12} арифметических операций в секунду над вещественными данными, представленными в форме с плавающей точкой.*

Годы, флопсы и степень параллелизма (когда и как был достигнут очередной 'X'flops)

10^6	Mflops	1964 г.	CDC 6600	10 MHz 1 CPUs
10^9	Gflops	1985 г.	Cray 2	125 MHz 8 CPUs
10^{12}	Tflops	1997 г.	ASCI Red	200 MHz 9152 CPUs
10^{15}	Pflops	2008 г.	Roadrunner	3,2 GHz 122400 Cores
10^{18}	Eflops	2022 г.	Frontier	2 GHz CPUs (606,208 cores) and 37,888 GPUs (8,335,360 cores)

Увеличение производительности компьютеров: за счет чего?

	EDSAC, 1949 год год	изменение	Cray Titan, 2012
такт:	$2*10^{-6}$ с	$\approx 4.4*10^{3}$	$4.5*10^{-10}$ с (2.2 GHz)
произв.:	10^{2} оп/с	$\approx 1.7*10^{14}$	$1.7*10^{16}$ оп/с

Время такта **= 1/(***тактовая частота***)**

Увеличение производительности компьютеров: за счет чего?

	EDSAC, 1949 год год	изменение	Cray Titan, 2012
такт:	$2*10^{-6}$ с	$\approx 4.4*10^{3}$	$4.5*10^{-10}$ с (2.2 GHz)
произв.:	10^{2} оп/с	$\approx 1.7*10^{14}$	$1.7*10^{16}$ оп/с

Два вывода.

1. Безусловно, без развития элементной базы не было бы такого прогресса в развитии компьютеров.

2. Но основной вклад в увеличении производительности компьютеров – это развитие архитектуры, и прежде всего, за счет глубокого внедрения идей параллелизма

Тенденции развития современных процессоров

В течение нескольких десятилетий развитие ЭВМ сопровождалось удвоением их быстродействия каждые 1.5-2 года. Это обеспечивалось и повышением тактовой частоты и совершенствованием архитектуры (параллельное и конвейерное выполнение команд).

Узким местом стала оперативная память. Знаменитый закон Мура, так хорошо работающий для процессоров, совершенно не применим для памяти, где скорости доступа удваиваются в лучшем случае каждые 5-6 лет.

Совершенствовались системы кэш-памяти, увеличивался объем, усложнялись алгоритмы ее использования.

Для процессора Intel Itanium:

Latency to L1: 1-2 cycles

Latency to L2: 5 - 7 cycles

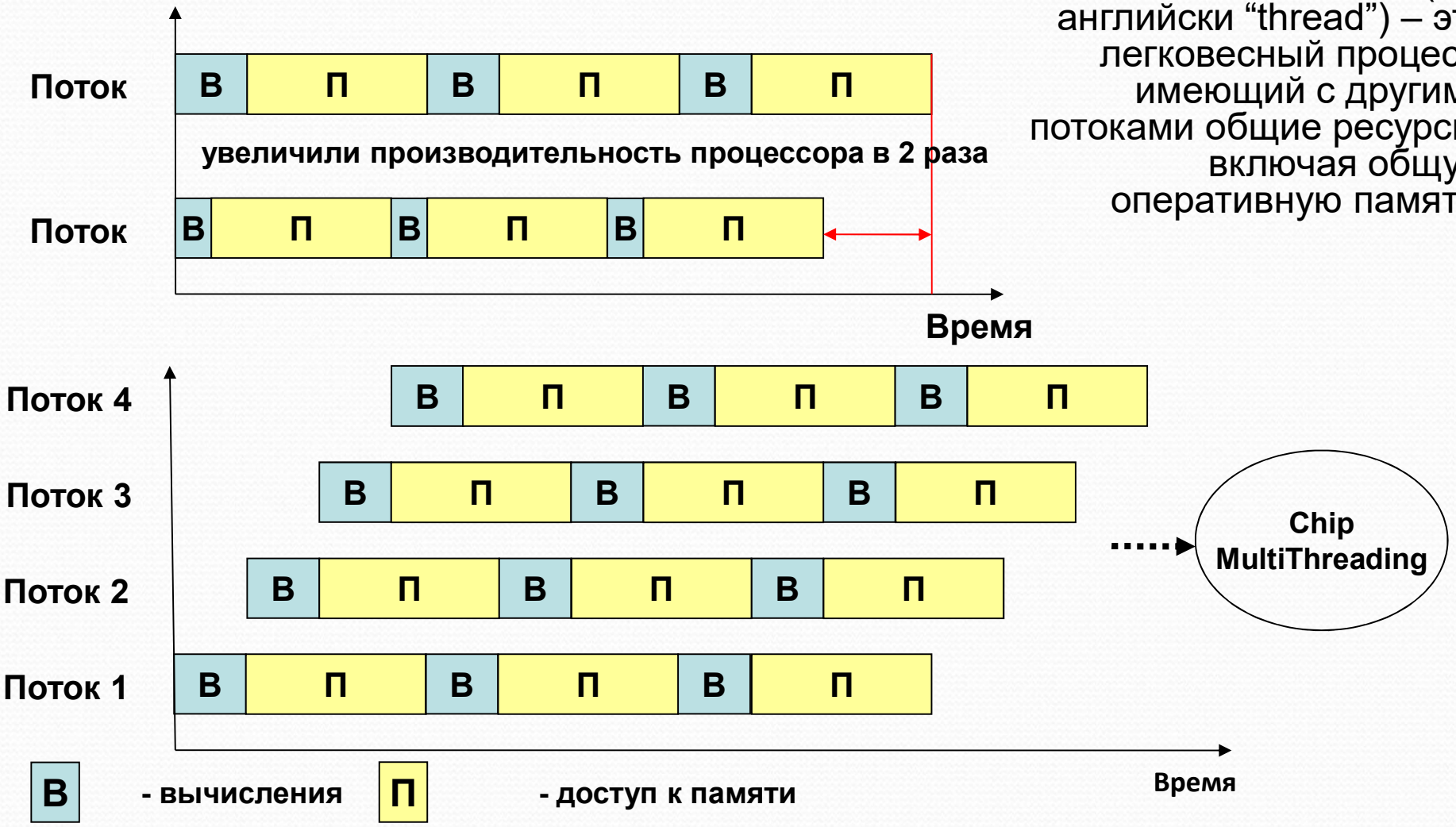
Latency to L3: 12 - 21 cycles

Latency to memory: 180 – 225 cycles

Важным параметром становится - **GUPS** (Giga Updates Per Second)

Тенденции развития современных процессоров

Поток или **нить** (по-английски “thread”) – это легковесный процесс, имеющий с другими потоками общие ресурсы, включая общую оперативную память.



Суперкомпьютерные системы (Top500)

PRESENTED BY

TOP 500 The List.

ICL INNOVATIVE COMPUTING LABORATORY

BERKELEY LAB Lawrence Berkeley National Laboratory

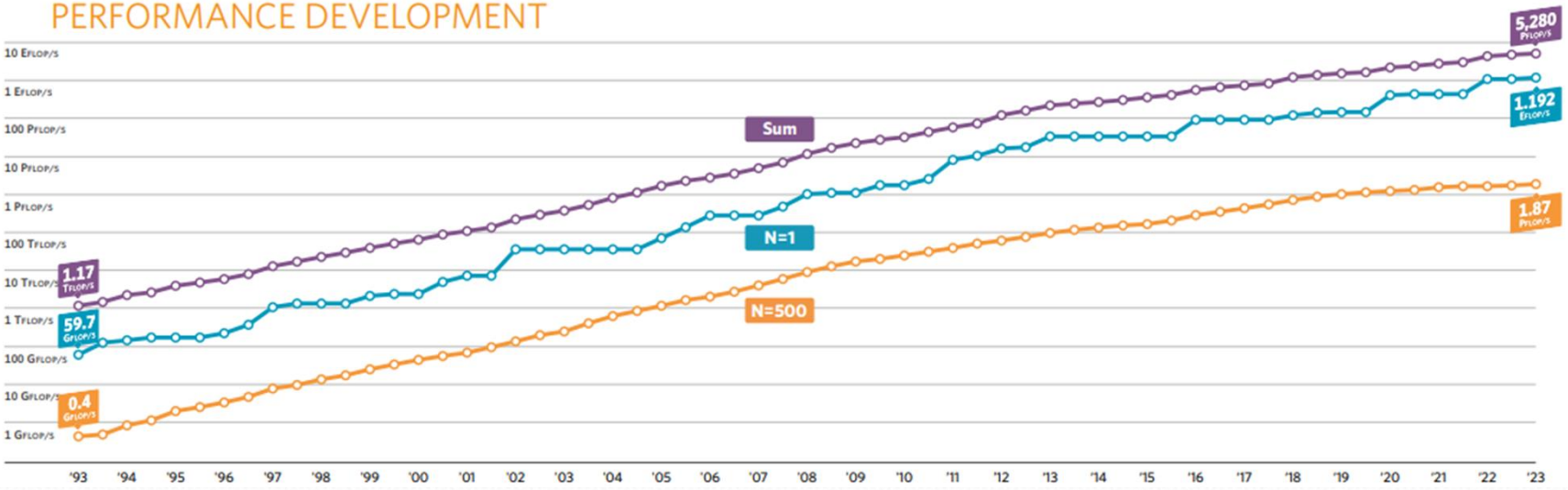
ISC GROUP Moving Forward.

FIND OUT MORE AT top500.org

JUNE 2023

			SITE	COUNTRY	CORES	RMAX PFLOP/S	POWER MW
1	**Frontier**	HPE Cray EX235a, AMD Opt 3rd Gen EPYC (64C 2GHz), AMD Instinct MI250X, Slingshot-11	DOE/SC/ORNL	USA	8,699,904	1,194.0	22.7
2	**Fugaku**	Fujitsu A64FX (48C, 2.2GHz), Tofu Interconnect D	RIKEN R-CCS	Japan	7,630,848	442.0	29.9
3	**LUMI**	HPE Cray EX235a, AMD Opt 3rd Gen EPYC (64C 2GHz), AMD Instinct MI250X, Slingshot-11	EuroHPC/CSC	Finland	2,220,288	309.0	6.01
4	**Leonardo**	Atos Bullsequana intelXeon (32C, 2.6 GHz), NVIDIA A100 quad-rail NVIDIA HDR100 Infiniband	EuroHPC/CINEC	Italy	1,824,768	238.7	7.40
5	**Summit**	IBM POWER9 (22C, 3.07GHz), NVIDIA Volta GV100 (80C), Dual-Rail Mellanox EDR Infiniband	DOE/SC/ORNL	USA	2,414,592	148.6	10.1

PERFORMANCE DEVELOPMENT



Суперкомпьютерные системы (Top500)

№ 38 в Top 500

Суперкомпьютер MARU, ThinkSystem SD650 V2, Xeon Platinum 8368Q 38C 2.6GHz, Infiniband HDR

- Пиковая производительность – 25495,14 TFlop/s
- Число ядер в системе — 306 432
- Производительность на Linpack - 16753 TFlop/s (65.71 % от пиковой)
- Энергопотребление комплекса - **15414 кВт**

Суперкомпьютерные системы (Top500)

№ 7 в Top 500

Суперкомпьютер Sunway TaihuLight, Sunway MPP, SW26010 260C 1.45GHz, Custom interconnect

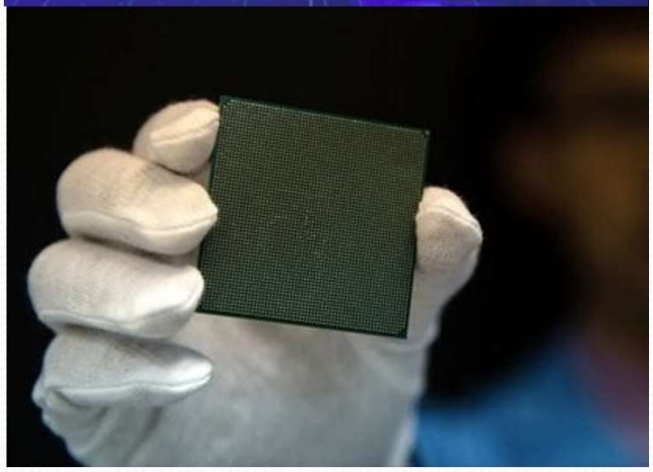
- Пиковая производительность – 125435.9 TFlop/s
- Число ядер в системе — 10 649 600
- Производительность на Linpack – 93014.5 TFlop/s (74.15 % от пиковой)
- Энергопотребление комплекса - **15371 кВт**

Важным параметром становится – **Power Efficency (GFflops/watt)**

6,05 VS 1,09

Как добиться максимальной производительности на Ватт => Chip MultiProcessing, многоядерность.

Тенденции развития современных процессоров



ShenWei SW26010

64-разрядный RISC-процессор с поддержкой SIMD-инструкций и внеочередным исполнением команд

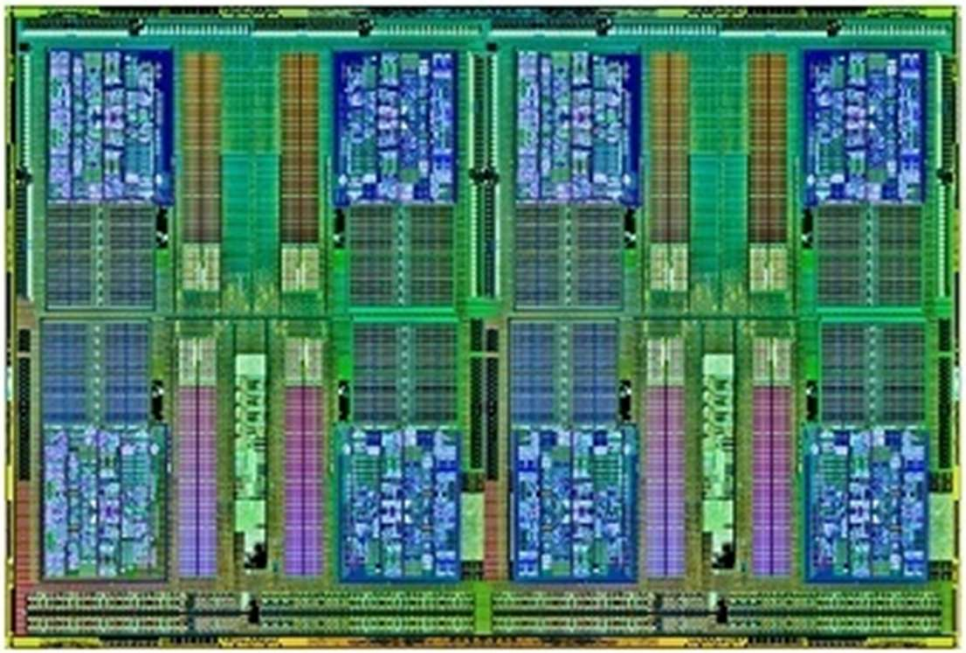
Изготовлен по схеме, предусматривающей использование четырех кластеров с 64 вычислительными ядрами (CPE) и одним управляющим ядром (MPE) в каждом.

В каждом кластере также имеется собственный контроллер памяти, суммарная пропускная способность на один процессорный разъем достигает 136,5 ГБ/с.

На каждое ядро выделено 12 КБ кэш-памяти инструкций и 64 КБ кэш-памяти данных.

Рабочая частота процессора - 1,45 ГГц.

Тенденции развития современных процессоров



AMD Opteron серии 6300

6380 SE 16 ядер @ 2,5 ГГц, 16 МБ L3 Cache

6348 12 ядер @ 2,8 ГГц, 16 МБ L3 Cache

6328 8 ядер @ 3,2 ГГц, 16 МБ L3 Cache

6308 4 ядра @ 3,5 ГГц, 16 МБ L3 Cache

технология AMD Turbo CORE

встроенный контроллер памяти (4 канала памяти DDR3)

4 канала «точка-точка» с использованием HyperTransort 3.0

AMD EPYC 7003 Series Processors

AMD EPYC™ 7763
# of CPU Cores 64
# of Threads 128
Max Boost Clock Up to 3.5GHz
Base Clock 2.45GHz
Default TDP / TDP 280W

AMD EPYC™ 75F3
# of CPU Cores 32
# of Threads 64
Max Boost Clock Up to 4.0GHz
Base Clock 2.95GHz
Default TDP / TDP 280W

AMD EPYC™ 7713
# of CPU Cores 64
# of Threads 128
Max Boost Clock Up to 3.6GHz
Base Clock 2.0GHz
Default TDP / TDP 225W

AMD EPYC™ 7643
# of CPU Cores 48
# of Threads 96
Max Boost Clock Up to 3.6GHz
Base Clock 2.3GHz
Default TDP / TDP 225W

AMD EPYC™ 7543
# of CPU Cores 32
# of Threads 64
Max Boost Clock Up to 3.7GHz
Base Clock 2.8GHz
Default TDP / TDP 225W

https://www.amd.com/en/processors/epyc-7003-series

Процессоры AMD EPYC серии Milan-X

Процессор	Ядер/Потоков	Базовая частота	Турбо	TDP	Кэш L3 (L3 + 3D V-Cache)
EPYC 7773X	64/128	2,2 ГГц	3,5 ГГц	280 Вт	768 МБ
EPYC 7573X	32/64	2,8 ГГц	3,6 ГГц	280 Вт	768 МБ
EPYC 7473X	24/48	2,8 ГГц	3,7 ГГц	240 Вт	768 МБ
EPYC 7373X	16/32	3,05 ГГц	3,8 ГГц	240 Вт	768 МБ

Тенденции развития современных процессоров

Intel Xeon Processor серии E5

E5-2699 v4 (55M Cache, 2.20 GHz) 22 ядра, 44 нити

E5-2698 v4 (50M Cache, 2.20 GHz) 20 ядер, 40 нитей

E5-2697 v4 (45M Cache, 2.30 GHz) 18 ядер, 36 нитей

E5-2697A v4 (40M Cache, 2.60 GHz) 16 ядер, 32 нити

E5-2667 v4 (25M Cache, 3.20 GHz) 8 ядер, 16 нитей

Intel® Turbo Boost

Intel® Hyper-Threading

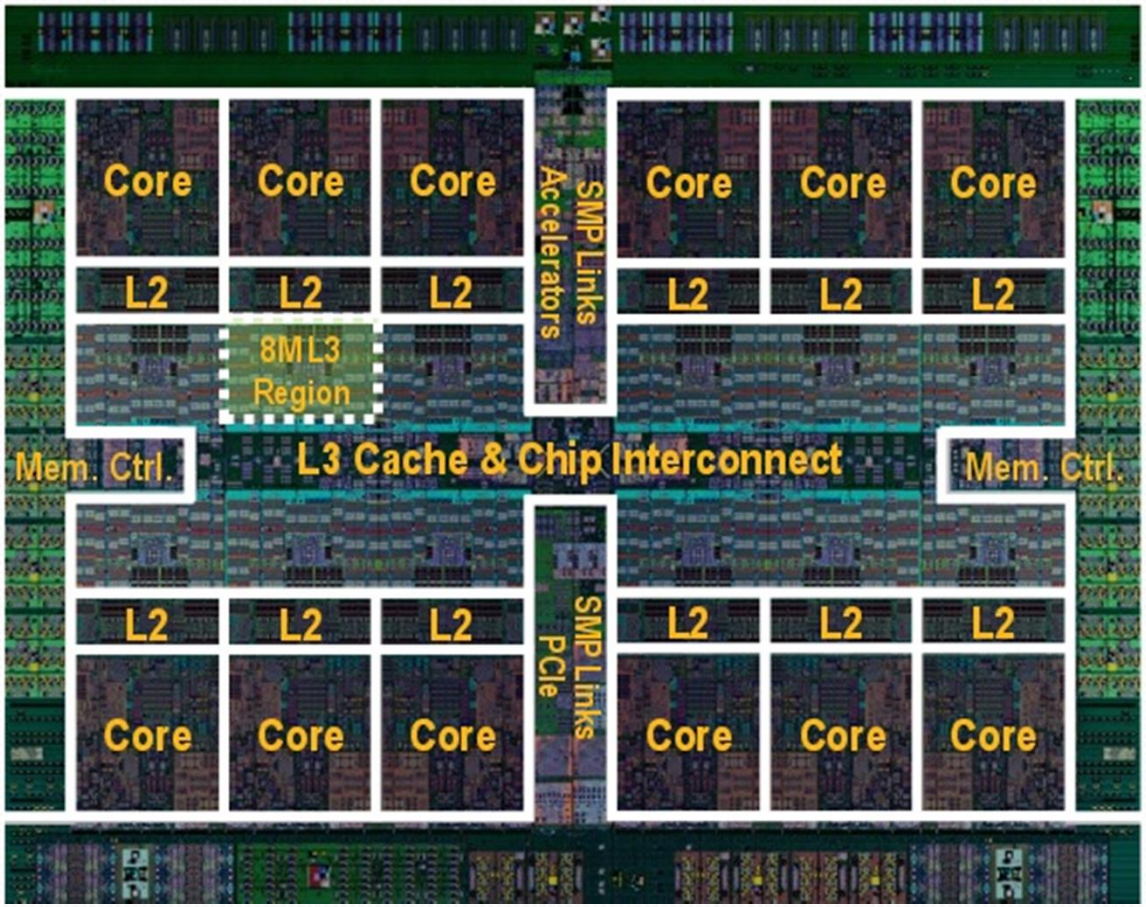
Intel® Intelligent Power

Intel® QuickPath

3nd Generation Intel Xeon Scalable Processors

Processor	Launch Date	# of cores	Max Turbo Frequency	Processor Base Frequency	Cache	TDP
Intel Xeon Platinum 8368	Q2'21	38	3.40 GHz	2.40 GHz	57 MB	270 W
Intel Xeon Platinum 8368Q	Q2'21	38	3.70 GHz	2.60 GHz	57 MB	270 W
Intel Xeon Platinum 8380	Q2'21	40	3.40 GHz	2.30 GHz	60 MB	270 W
Intel Xeon Platinum 8360Y	Q2'21	36	3.50 GHz	2.40 GHz	54 MB	250 W
Intel Xeon Platinum 8358	Q2'21	32	3.40 GHz	2.60 GHz	48 MB	250 W
Intel Xeon Platinum 8380H	Q2'20	28	4.30 GHz	2.90 GHz	38.5 MB	250 W

Тенденции развития современных процессоров

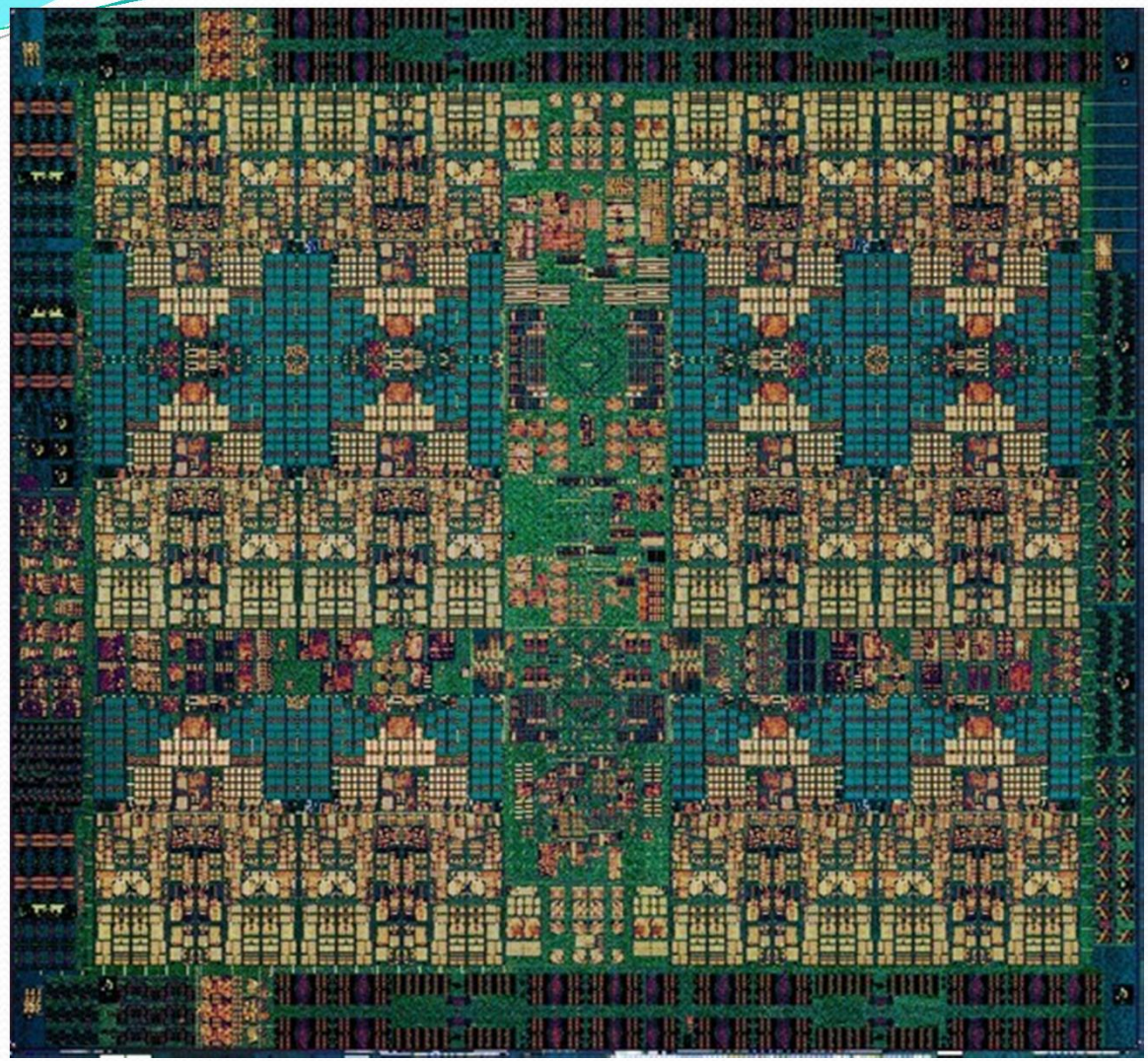


IBM Power8

- 2,75 – 4,2 ГГц
- 12 ядер x 8 нитей Simultaneuos MultiThreading
- 64 КБ Data Cache + 32КБ instruction Cache
- L2 512 КБ
- L3 96 МБ

www.idh.ch/IBM_TU_2013/Power8.pdf

Тенденции развития современных процессоров

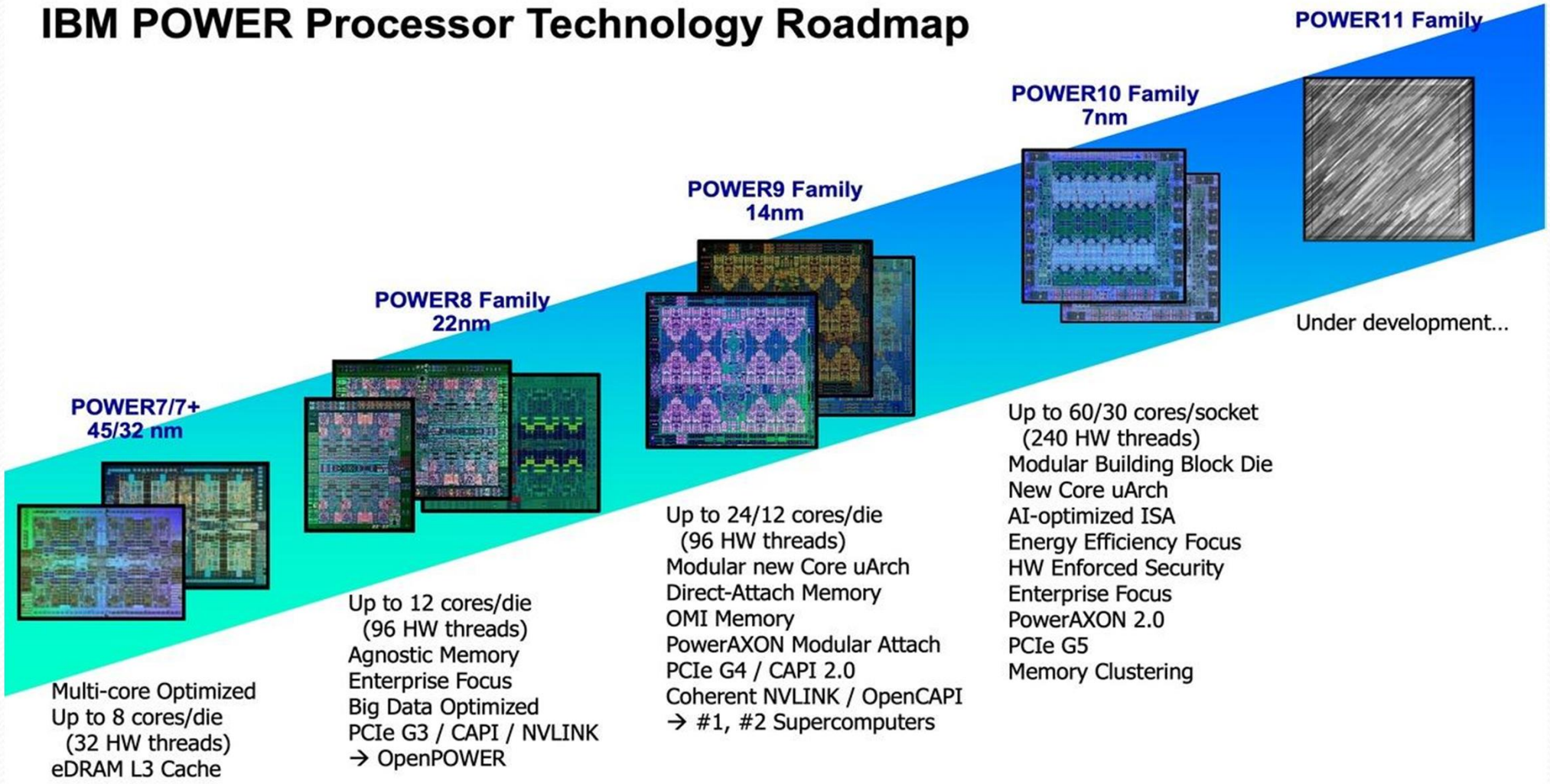


IBM Power9

- 2,75 – 4,2 ГГц
- 12 ядер x 8 нитей

  24 ядра x 4 нити
- L2 512 КБ
- L3 120 МБ (10 МБ на 2 ядра)

Тенденции развития современных процессоров



Тенденции развития современных процессоров

POWER10 Processor Chip

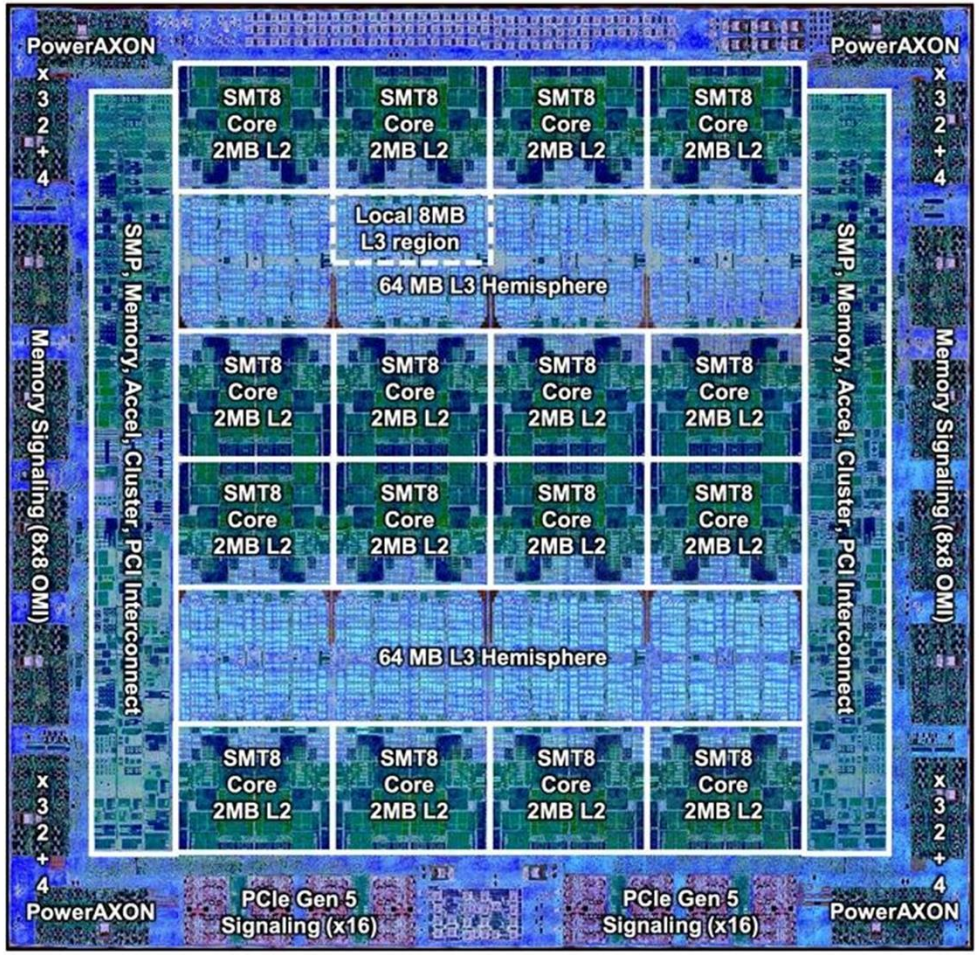
Technology and Packaging:
- 602mm^2 7nm Samsung (18B devices)
- 18 layer metal stack, enhanced device
- Single-chip or Dual-chip sockets

Computational Capabilities:
- Up to 15 SMT8 Cores (2 MB L2 Cache / core)
  (Up to 120 simultaneous hardware threads)
- Up to 120 MB L3 cache (low latency NUCA mgmt)
- 3x energy efficiency relative to POWER9
- Enterprise thread strength optimizations
- AI and security focused ISA additions
- 2x general, 4x matrix SIMD relative to POWER9
- EA-tagged L1 cache, 4x MMU relative to POWER9

Open Memory Interface:
- 16 x8 at up to 32 GT/s (1 TB/s)
- Technology agnostic support: near/main/storage tiers
- Minimal (< 10ns latency) add vs DDR direct attach

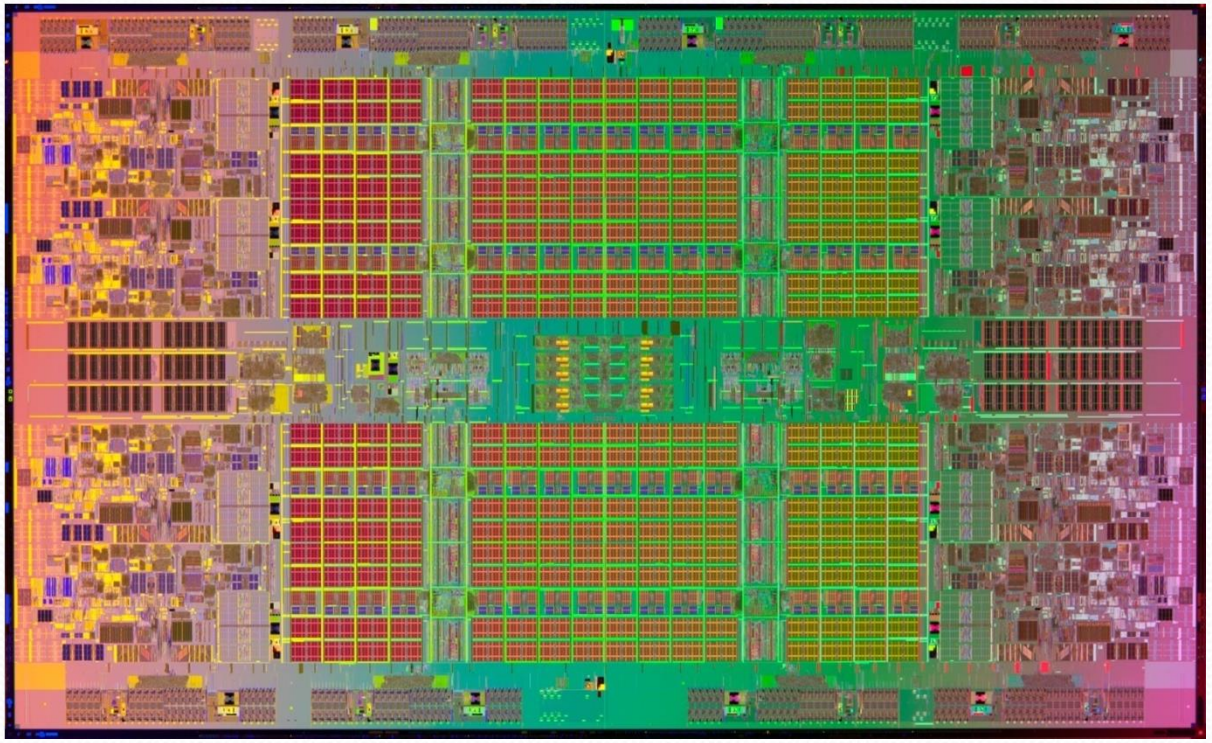
PowerAXON Interface:
- 16 x8 at up to 32 GT/s (1 TB/s)
- SMP interconnect for up to 16 sockets
- OpenCAPI attach for memory, accelerators, I/O
- Integrated clustering (memory semantics)

PCIe Gen 5 Interface:
- x64 / DCM at up to 32 GT/s



Die Photo courtesy of Samsung Foundry

Тенденции развития современных процессоров



Intel Itanium серии 9500

9560 8 ядер @ 2,53 ГГц, 16 нитей, 32 МБ L3 Cache

9550 4 ядра @ 2,40 ГГц, 8 нитей, 32 МБ L3 Cache

Тенденции развития современных процессоров

«Huawei Kunpeng 920 is the industry's leading-edge Arm-based server CPU».

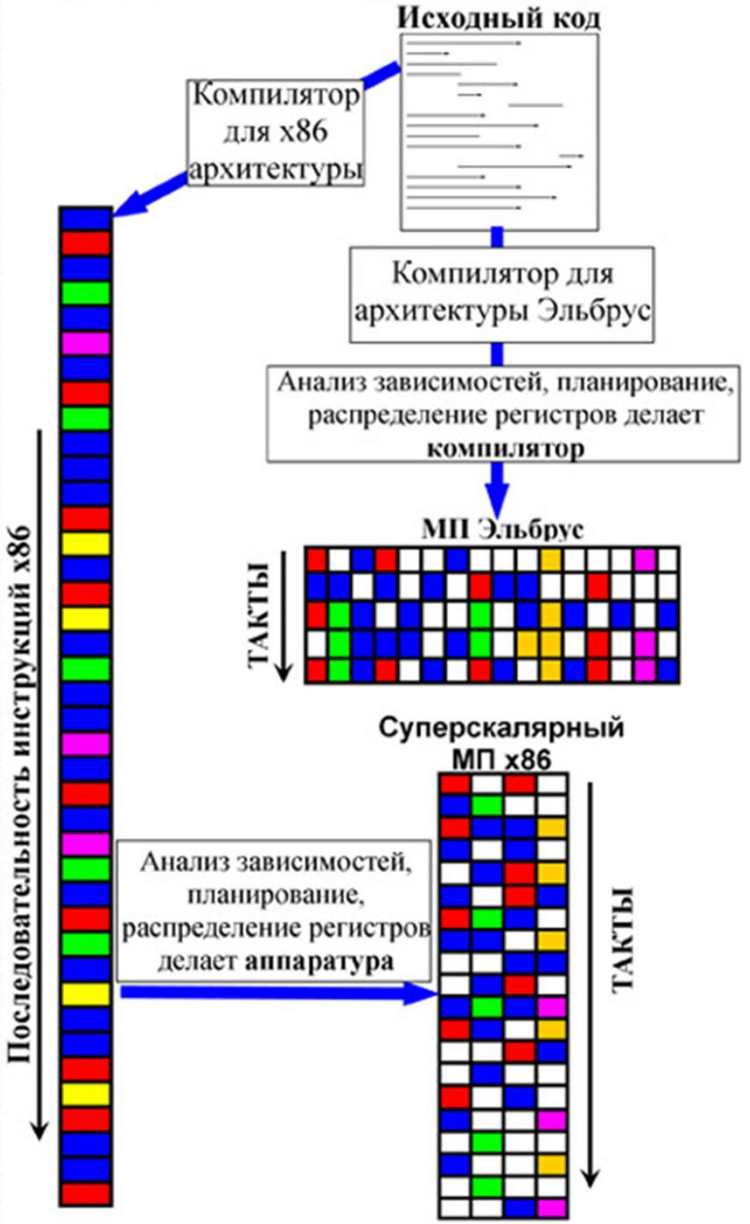
Key Features

Architecture	ARMv8.2
Core	Up to 64
Typical Frequency	2.6 GHz / 3.0 GHz
Memory	8 DDR4 channels
I/O	PCIe 4.0, CCIX, 100G, SAS/SATA 3.0
Max Power	180 W
Process	7 nm

Отечественный процессор «Эльбрус-8С»

Количество ядер	8
Кэш-память 2го уровня	8 * 512 КБ
Кэш-память 3го уровня	16 МБ
Рабочая частота	1.3 ГГц
Производительность	~250 ГФлопс
Тип контроллеров памяти	DDR3-1600
Кол-во контроллеров памяти	4
Поддержка многопроцессорных систем	До 4 процессоров
Каналы межпроцессорного обмена (пропускная способность)	3 (16 ГБ/с)
Технологический процесс	28 нм
Площадь кристалла	350 кв. мм
Рассеиваемая мощность на уровне	60 – 90 Вт

Отечественный процессор «Эльбрус-8С»



Отечественный процессор «Эльбрус-16С»

Количество ядер	16
Рабочая частота	2 ГГц
Производительность	~1500 Тфлопс одинарная точность ~750 Тфлопс двойная точность
Тип контроллеров памяти	DDR4-3200
Кол-во контроллеров памяти	8
Поддержка многопроцессорных систем	До 4 процессоров
Технологический процесс	16 нм
Число транзисторов	12 млрд.

Суперкомпьютерные системы (Top500)

PRESENTED BY

TOP 500 The List.

ICL INNOVATIVE COMPUTING LABORATORY

BERKELEY LAB Lawrence Berkeley National Laboratory

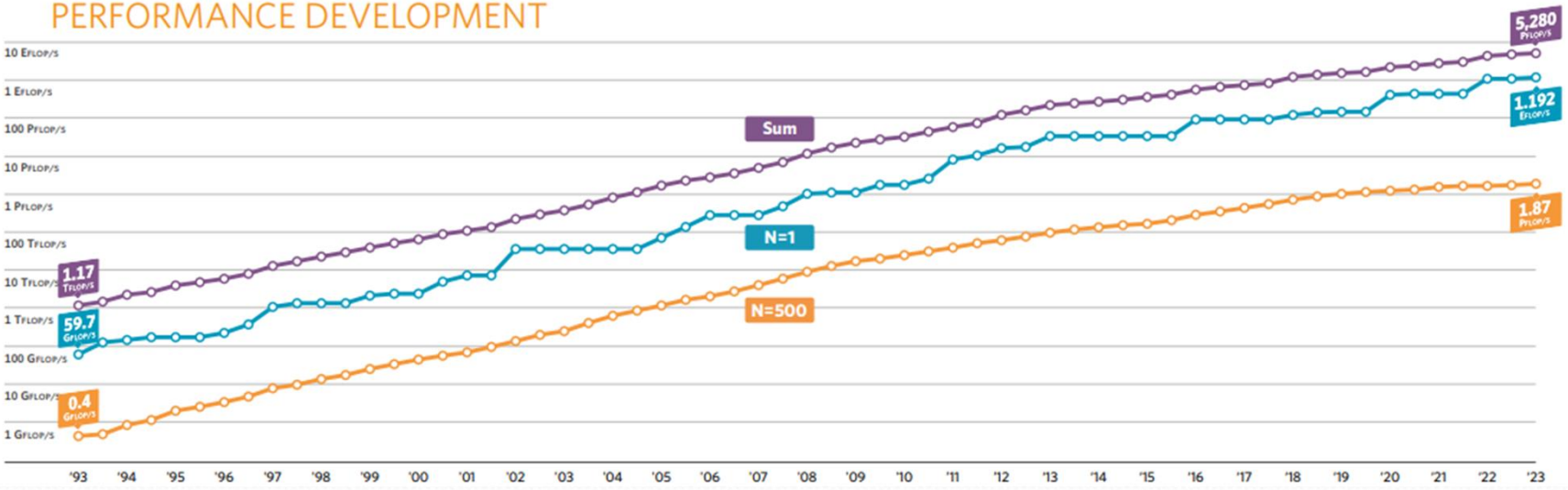
ISC GROUP Moving Forward.

FIND OUT MORE AT top500.org

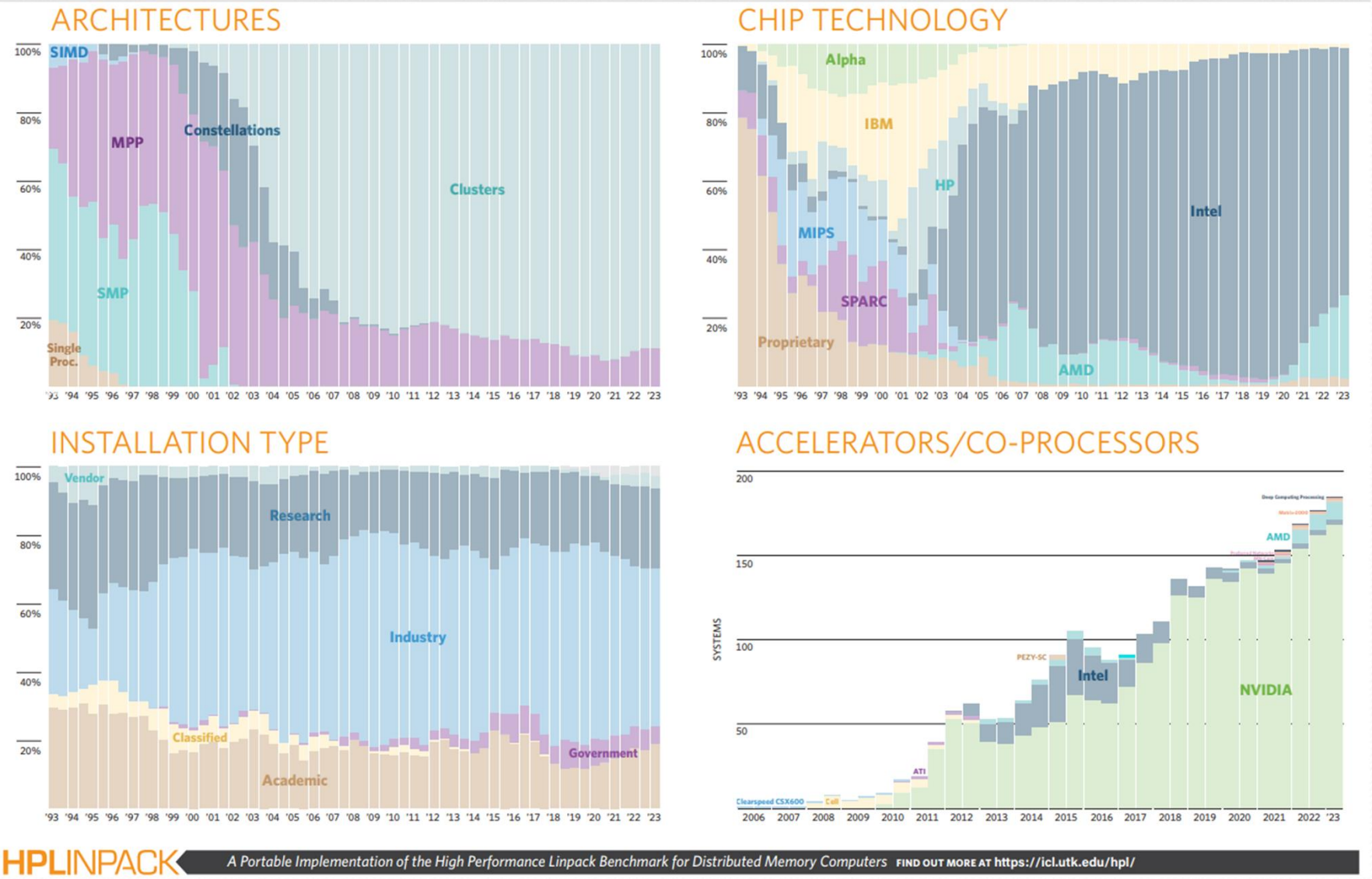
JUNE 2023

			SITE	COUNTRY	CORES	RMAX PFLOP/S	POWER MW
1	**Frontier**	HPE Cray EX235a, AMD Opt 3rd Gen EPYC (64C 2GHz), AMD Instinct MI250X, Slingshot-11	DOE/SC/ORNL	USA	8,699,904	1,194.0	22.7
2	**Fugaku**	Fujitsu A64FX (48C, 2.2GHz), Tofu Interconnect D	RIKEN R-CCS	Japan	7,630,848	442.0	29.9
3	**LUMI**	HPE Cray EX235a, AMD Opt 3rd Gen EPYC (64C 2GHz), AMD Instinct MI250X, Slingshot-11	EuroHPC/CSC	Finland	2,220,288	309.0	6.01
4	**Leonardo**	Atos Bullsequana intelXeon (32C, 2.6 GHz), NVIDIA A100 quad-rail NVIDIA HDR100 Infiniband	EuroHPC/CINEC	Italy	1,824,768	238.7	7.40
5	**Summit**	IBM POWER9 (22C, 3.07GHz), NVIDIA Volta GV100 (80C), Dual-Rail Mellanox EDR Infiniband	DOE/SC/ORNL	USA	2,414,592	148.6	10.1

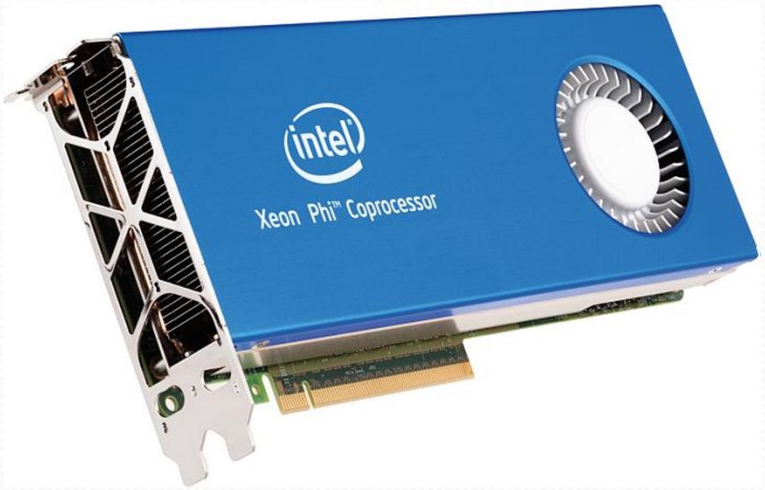
PERFORMANCE DEVELOPMENT

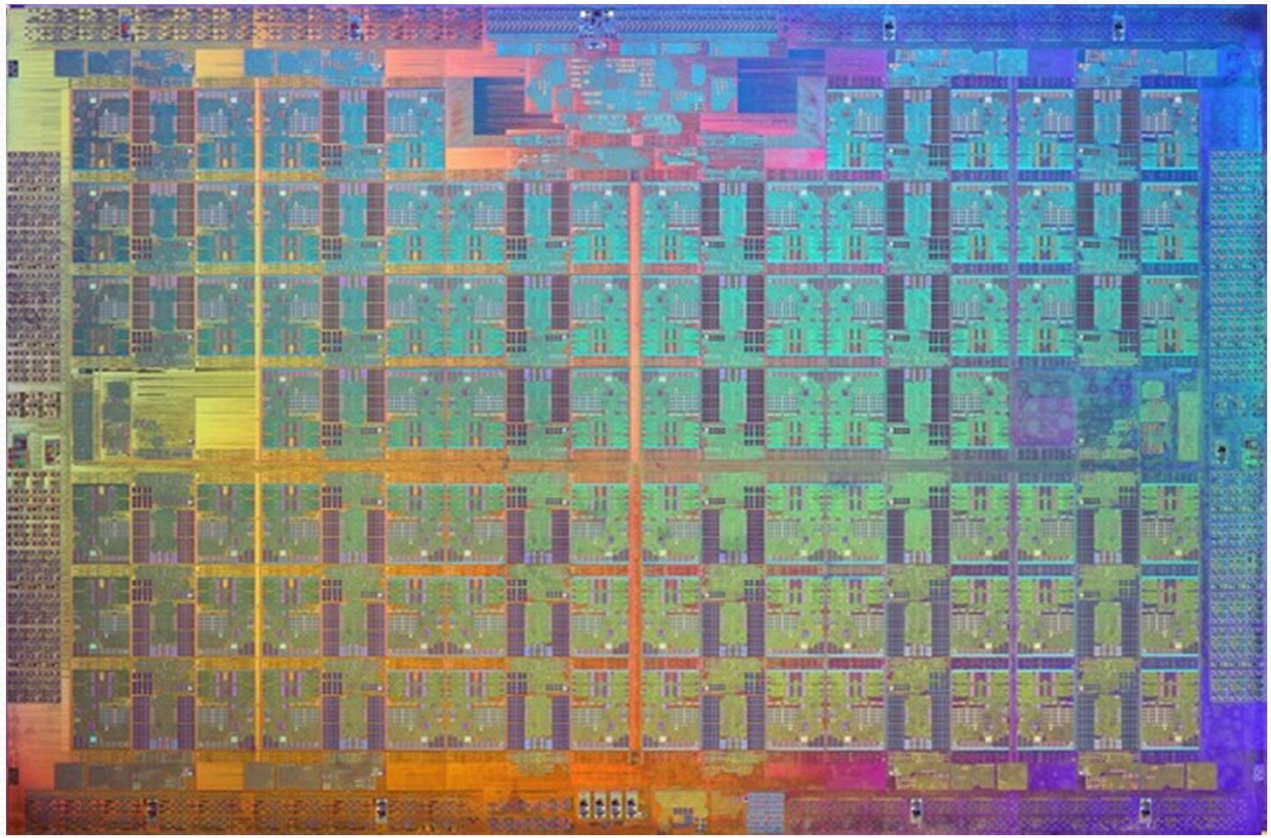


Суперкомпьютерные системы (Top500)



Intel Xeon Phi Coprocessor / Processor





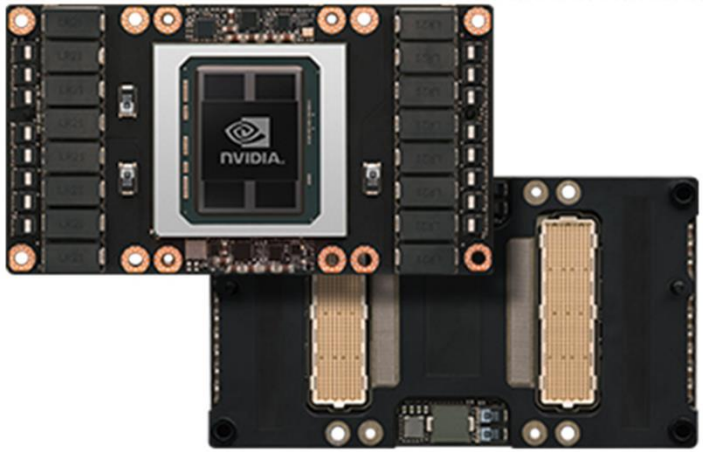
Pezy-SC Many Core Processor

Logic Cores(PE)	1,024
Core Frequency	733MHz
Peak Performance	Floating Point Single 3.0TFlops / Double 1.5TFlops
Host Interface	PCI Express GEN3.0 x 8Lane x 4Port (x16 bifurcation available) JESD204B Protocol support
DRAM Interface	DDR4, DDR3 combo 64bit x 8Port Max B/W 1533.6GB/s +Ultra WIDE IO SDRAM (2,048bit) x 2Port Max B/W 102.4GB/s
Control CPU	ARM926 2core
Process Node	28nm
Package	FCBGA 47.5mm x 47.5mm, Ball Pitch 1mm, 2,112pin

Pezy-SC2 Many Core Processor

Logic Cores(PE)	2,048
Core Frequency	1,000MHz
Peak Performance	Half precision 16.2TFlops / Floating Point Single 8.2TFlops / Double 4.1TFlops
Host Interface	PCIe Gen3/4 x16 * 2CH (x8 * 4CH)
DRAM Interface	DDR4 64bit (ECC) * 4CH / 3,200Mbps BW=100GB/sec
CPU	MIPS64R6 (P6600) L1 I:64KB+D:64KB (each core) L2 2MB
Process Node	16 nm FinFET
Power	130 W

Графический ускоритель Nvidia P100



	Tesla P100 для PCIe серверов	Tesla P100 для серверов с NVLink
Производительность операций двойной точности с плавающей точкой	4,7 Терафлопс	5,3 Терафлопс
Производительность операций одинарной точности с плавающей точкой	9,3 Терафлопс	10,6 Терафлопс
Производительность операций половинной точности с плавающей точкой	18,7 Терафлопс	21,2 Терафлопс
Пропускная способность шины NVIDIA NVLink™	-	160 ГБ/с
Пропускная способность шины PCIe x16	32 ГБ/сс	32 ГБ/с
Полоса пропускания стековой памяти CoWoS с HBM2	16 ГБ или 12 ГБ	16 ГБ
Полоса пропускания стековой памяти CoWoS с HBM2	732 ГБ/с или 549 ГБ/с	732 ГБ/с
Улучшенная программируемость с технологией Page Migration Engine	✓	✓
Защита ECC для повышенной надежности	✓	✓
Оптимизация под сервер для развертывания в дата-центре	✓	✓

Графический ускоритель AMD Instinct™ MI250X

Литография	TSMC 6nm FinFET
Кол-во потоковых процессоров	14,080
Вычислительные блоки	220
Peak Engine Clock	1700 MHz

Пиковая производительность в режиме с половинной точностью (FP16)
383 TFLOPs

Peak Single Precision Matrix (FP32) Performance
95.7 TFLOPs

Peak Double Precision Matrix (FP64) Performance
95.7 TFLOPs

Пиковая производительность в режиме с одинарной точностью (FP32)
47.9 TFLOPs

Пиковая производительность в режиме с двойной точностью (FP64)
47.9 TFLOPs

Peak INT4 Performance	383 TOPs
Peak INT8 Performance	383 TOPs
Total Board Power (TBP)	500Вт | 560W Peak
Dedicated Memory Size	128 ГБ
Интерфейс памяти	8192-bit
Memory Clock	1.6 GHz
Пропускная способность памяти	До 3276.8 GB/s
Память с поддержкой ECC	Да (Full-Chip)

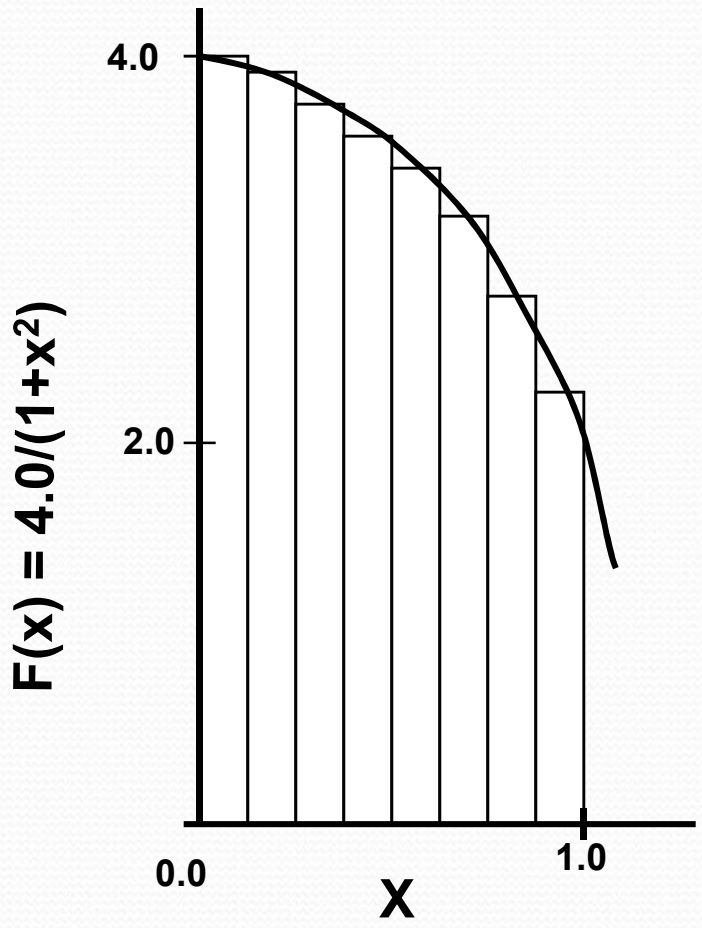
Тенденции развития современных вычислительных систем

- Темпы уменьшения латентности памяти гораздо ниже темпов ускорения процессоров + прогресс в технологии изготовления кристаллов => CMT (Chip MultiThreading)
- Опережающий рост потребления энергии при росте тактовой частоты + прогресс в технологии изготовления кристаллов => CMP (Chip MultiProcessing, многоядерность)
- И то и другое требует более глубокого распараллеливания для эффективного использования аппаратуры

Существующие подходы для создания параллельных программ для современных процессоров/систем

- Автоматическое / автоматизированное распараллеливание
- Библиотеки нитей
  - Win32 API
  - POSIX
- Библиотеки передачи сообщений
  - MPI
  - SHMEM
- OpenMP
- CUDA
- OpenACC
- DVMH

Вычисление числа π



$$\int_0^1 \frac{4.0}{(1+x^2)} dx = \pi$$

Мы можем аппроксимировать интеграл как сумму прямоугольников:

$$\sum_{i=0}^{N} F(x_i)\Delta x \approx \pi$$

Где каждый прямоугольник имеет ширину Δx и высоту $F(x_i)$ в середине интервала

Вычисление числа π. Последовательная программа

```
#include <stdio.h>
int main ()
{
    int n =100000, i;
    double pi, h, sum, x;
    h   = 1.0 / (double) n;
    sum = 0.0;
    for (i = 1; i <= n; i ++)
    {
            x = h * ((double)i - 0.5);
            sum += (4.0 / (1.0 + x*x));
     }
     pi = h * sum;
     printf("pi is approximately %.16f”, pi);
     return 0;
}
```

Автоматическое распараллеливание

Polaris, CAPO, WPP, SUIF, VAST/Parallel, OSCAR, Intel/OpenMP, ParaWise

```
icc -parallel pi.c
pi.c(8): (col. 5) remark: LOOP WAS AUTO-PARALLELIZED.
pi.c(8): (col. 5) remark: LOOP WAS VECTORIZED.
pi.c(8): (col. 5) remark: LOOP WAS VECTORIZED.
```

В общем случае, автоматическое распараллеливание затруднено:

- косвенная индексация (A[B[i]]);
- указатели (ассоциация по памяти);
- сложный межпроцедурный анализ.

Автоматизированное распараллеливание

Intel/GAP (Guided Auto-Parallel), CAPTools/ParaWise, BERT77, FORGE Magic/DM, ДВОР (Диалоговый Высокоуровневый Оптимизирующий Распараллеливатель), САПФОР (Система Автоматизации Параллелизации ФОРтран программ)

```
for (i=0; i<n; i++) {
    if (A[i] > 0) {b=A[i]; A[i] = 1 / A[i]; }
    if (A[i] > 1) {A[i] += b;}
}
```

```
icc -guide -parallel test.cpp
```

Автоматизированное распараллеливание

test.cpp(49): remark #30521: (PAR) Loop at line 49 cannot be parallelized due to conditional assignment(s) into the following variable(s): b. This loop will be parallelized if the variable(s) become unconditionally initialized at the top of every iteration. [VERIFY] Make sure that the value(s) of the variable(s) read in any iteration of the loop must have been written earlier in the same iteration.

test.cpp(49): remark #30525: (PAR) If the trip count of the loop at line 49 is greater than 188, then use "#pragma loop count min(188)" to parallelize this loop. [VERIFY] Make sure that the loop has a minimum of 188 iterations.

```
#pragma loop count min (188)
for (i=0; i<n; i++) {
    b = A[i];
    if (A[i] > 0) {A[i] = 1 / A[i];}
    if (A[i] > 1) {A[i] += b;}
}
```