

Sistemas Distribuidos y Paralelos

Ingeniería en Computación



Arquitecturas Paralelas Evolución y tendencias

Universidad Nacional de La Plata



Facultad de Informática

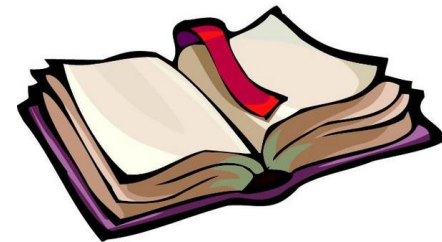
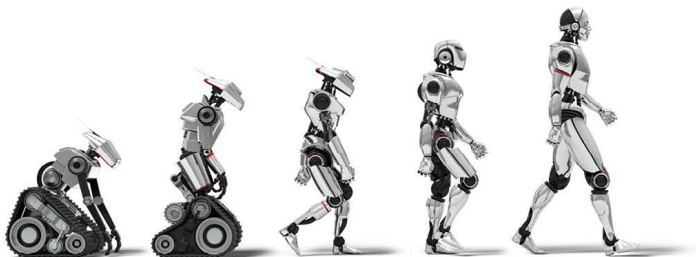


Agenda

2

I. Evolución de las arquitecturas paralelas

- i. Paralelismo en monoprocesadores
- ii. Multiprocesadores
- iii. Clusters/Multiclusters
- iv. Multicores
 - i. Evolución Intel
 - ii. Asimétricos
- v. Grid
- vi. Manycores
- vii. Cloud
- viii. Computación Cuántica



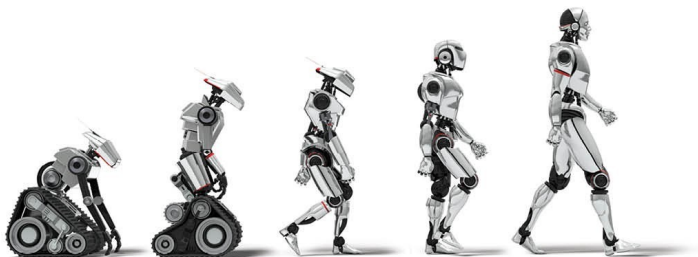
II. Rankings

Agenda

3

I. Evolución de las arquitecturas paralelas

- i. Paralelismo en monoprocesadores
- ii. Multiprocesadores
- iii. Clusters/Multiclusters
- iv. Multicores
 - i. Evolución Intel
 - ii. Asimétricos
- v. Grid
- vi. Manycores
- vii. Cloud
- viii. Computación Cuántica



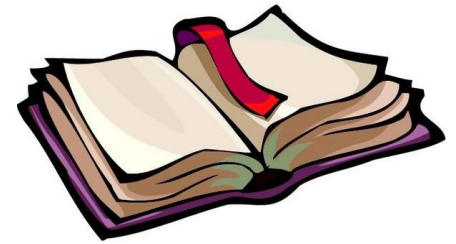
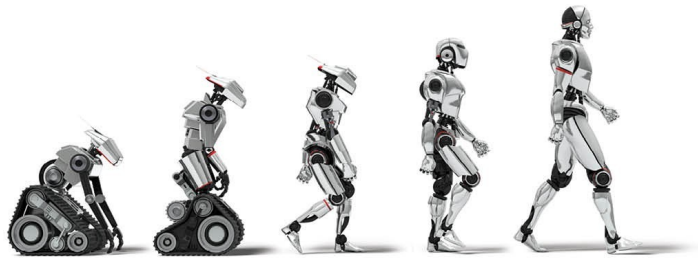
II. Rankings

Agenda

4

I. Evolución de las arquitecturas paralelas

- i. Paralelismo en monoprocesadores
- ii. Multiprocesadores
- iii. Clusters/Multiclusters
- iv. Multicores
 - i. Evolución Intel
 - ii. Asimétricos
- v. Grid
- vi. Manycores
- vii. Cloud
- viii. Computación Cuántica



II. Rankings

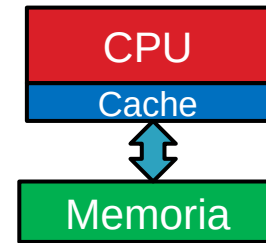
Paralelismo en monoprocesadores

5

Procesador o CPU (siglas en inglés de unidad de procesamiento central): **en términos modernos**, hardware con capacidad de procesamiento alojado en un único circuito integrado.

Monoprocesador: procesador o CPU que posee una única unidad de procesamiento.

- Técnicas para mejorar el rendimiento:
 - Usos de caché para acelerar los acceso a memoria
 - Paralelismo a nivel de instrucción (ILP) - Segmentación
 - Multiplicidad de unidades funcionales
 - Desenrollado de bucles
 - Ejecución fuera de orden
 - Predicción y especulación condicional
 - Planificación dinámica
 - Tomasulo **1967** implementado en IBM360/91 de **1964**

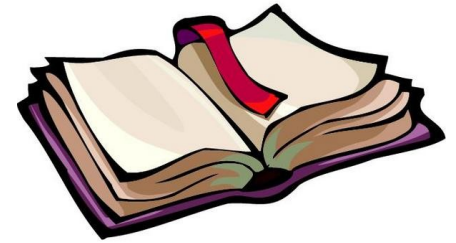
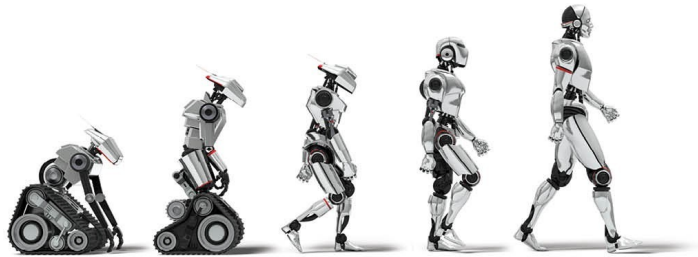


Agenda

6

I. Evolución de las arquitecturas paralelas

- i. Paralelismo en monoprocesadores
- ii. Multiprocesadores
- iii. Clusters/Multiclusters
- iv. Multicores
 - i. Evolución Intel
 - ii. Asimétricos
- v. Grid
- vi. Manycores
- vii. Cloud
- viii. Computación Cuántica

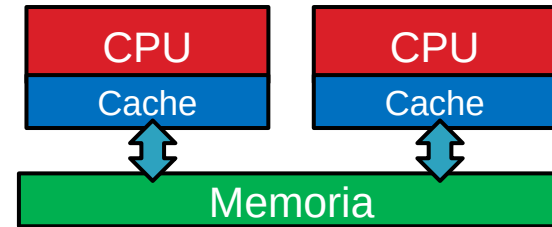


II. Rankings

Multiprocesadores

7

- La posibilidad de agregar más de una unidad de procesamiento:
- Sistema de memoria:
 - Acceso compartido a memoria
 - Memoria cache por procesador
 - Problemas de coherencia
- Al principio equipos muy costosos
- En la actualidad, más accesibles económicamente



Arquitectura Multiprocesador: máquina con 2 o más CPUs o Procesadores.
(Hasta 4 actualmente)

Multiprocesadores

8 Primeros multiprocesadores

1957 – Gamma 60

Compañía Bull SAS (París - Francia)

- Primera computadora Multihilo diseñada específicamente para paralelismo
- 25 unidades de procesamiento a 100Khz
- 96KB de memoria central
- Modelo Fork-Join
- Distribuidor de programas que envía y recopila datos hacia y desde unidades de procesamiento independientes conectadas a una memoria central.

Otros ...

- 1958:
 - Gill discutió la Programación Paralela y la espera
 - Cocke y Slotnick discutieron por primera vez el uso del paralelismo en cálculo numérico
- 1962 – D825: Primer máquina con Crossbar Switch:
 - 4 Unidades de procesamiento a 16 módulos de memoria
- 1967 – Ley de Amdhal:
Conferencia de la Federación Estadounidense de Sociedades de Procesamiento de Información
- 1969 – Sistema Multics de HoneyWell con 8 procesadores

Paper de Tumlin

Paper de Bataille

Sitio WEB de Smotherman



Multiprocesadores

Primeros multiprocesadores

9

1971 - C.mmp (Multi-Mini-Processor)

Carnegie Mellon University (CMU)

- MIMD
- 16 procesadores (PDP-11)
 - 8KB de memoria por procesador
- Un único espacio de direcciones
- Un bus de control
- Crossbar switch para conectar procesadores y memoria
- Sistema operativo Hydra
 - Implementado en Bliss (Carnegie Mellon University - 1970)
 - Microkernel orientado a objetos (POO tiene su origen en Simula62)

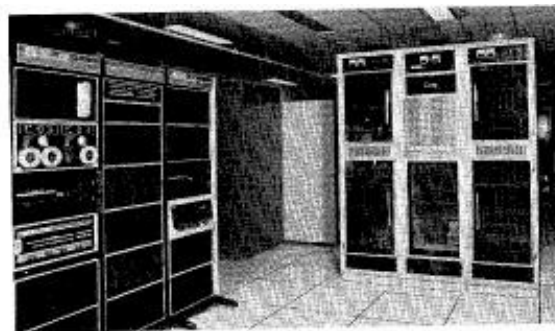


Fig. 1. The C.mmp multiprocessor.

[Paper de Bell \(CMU\)](#)

[Sitio WEB de Bosworth](#)



1976 – ILLIAC IV

Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL)

- Primer SIMD.
- Proceso de fabricación muy demorado (11 años) que llevo a que ILLIAC IV fuera superado por las primeras computadoras comerciales (Cray-1)

1976 – CRAY-1

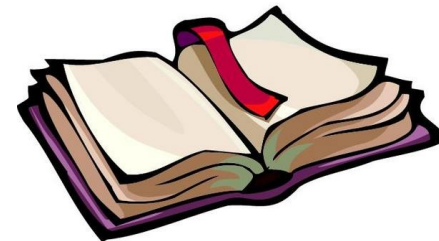
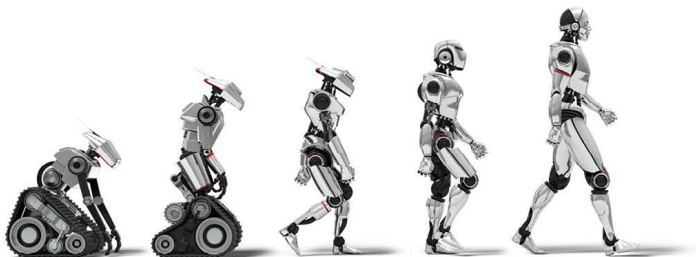
Cray Research (EEUU)

- Primer procesador secuencial Vectorial
- Procesador de 64-bit a 80 MHz
- 8MB de memoria



I. Evolución de las arquitecturas paralelas

- i. Paralelismo en monoprocesadores
- ii. Multiprocesadores
- iii. Clusters/Multiclusters
- iv. Multicores
 - i. Evolución Intel
 - ii. Asimétricos
- v. Grid
- vi. Manycores
- vii. Cloud
- viii. Computación Cuántica



II. Rankings

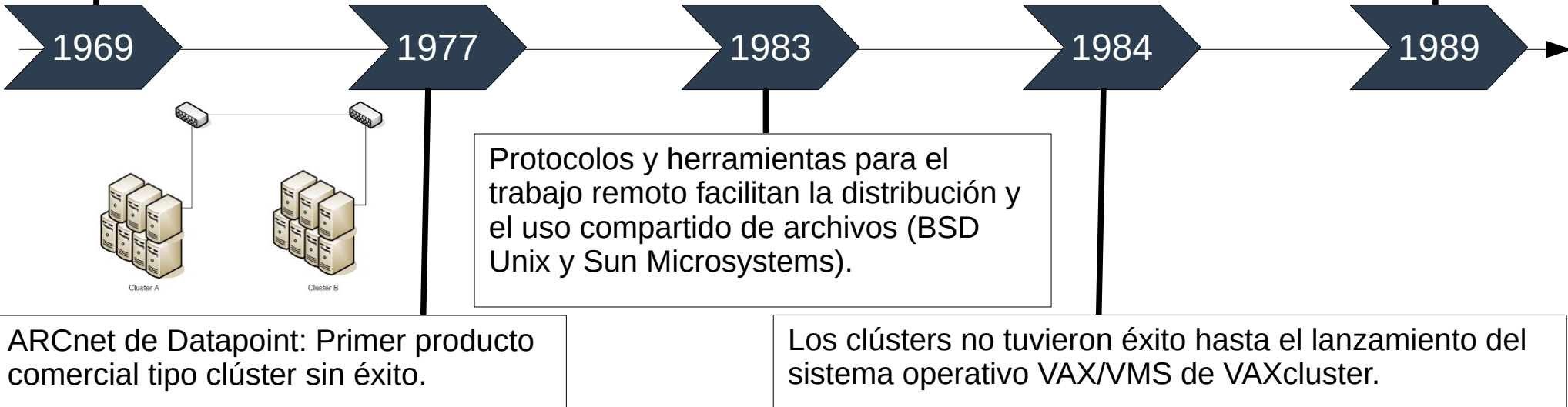
Clusters

11

Cluster: varias máquinas interconectadas mediante una red de comunicación que se comportan como si fuesen una única máquina permitiendo mayor potencia de cómputo.

El proyecto ARPANET crea la primera red entre cuatro centros informáticos. La evolución de las redes de comunicación permitieron crear clusters de mayor potencia de cómputo y menor costo que un supercomputador.

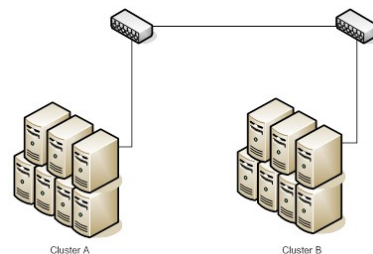
El mayor impulso para el uso de clusters lo dió la biblioteca PVM que funcionaba sobre TCP/IP.



Clusters

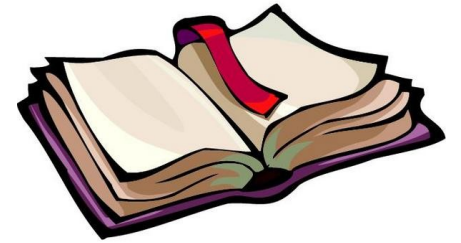
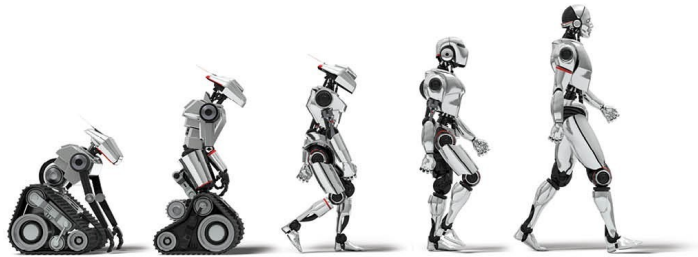
Algunas características

- Es posible conectar varios clusters formando una arquitectura **multiclust**er.
- Requiere de **programación distribuida**.
- Tipos de clusters:
 - Alto rendimiento (Orientado a HPC)
 - Alta disponibilidad (Orientado a servicio)
 - Homogéneos: todas las máquinas iguales
 - Heterogéneos: complejidad en varios niveles (HW, SO, compiladores, aplicaciones, red etc.)
- Algunas **desventajas**:
 - Mayor posibilidad de **fallas**.
 - **Latencia** en las comunicaciones: debido a capas de protocolo en entornos LAN. Puede reducirse utilizando redes de alta velocidad (infiniband, myrinet).
 - **Gestión** y administración **compleja**.



I. Evolución de las arquitecturas paralelas

- i. Paralelismo en monoprocesadores
- ii. Multiprocesadores
- iii. Clusters/Multiclusters
- iv. Multicores
 - i. Evolución Intel
 - ii. Asimétricos
- v. Grid
- vi. Manycores
- vii. Cloud
- viii. Computación Cuántica



II. Rankings

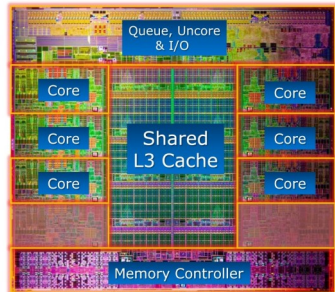
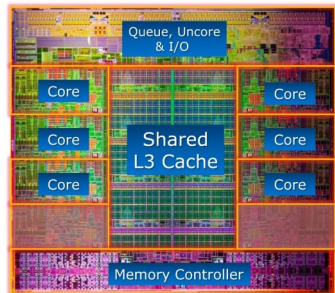
- Los procesadores fueron evolucionando año a año incrementando su frecuencia.
- A principios del siglo *XXI* incrementar la frecuencia de los procesadores impacta negativamente:
 - Aumento de la temperatura y el consumo energético.
 - Último monoprocesador de Intel: Pentium IV a aprox. 4Ghz.
- Esto pone fin a la era monoprocesadores y comienza la era multicore.

Arquitectura Multicore: un procesador o CPU que en un mismo circuito integrado incorpora dos o más unidades de procesamiento/ejecución independientes conocidos como cores o núcleos.

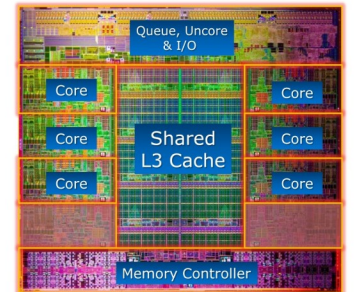
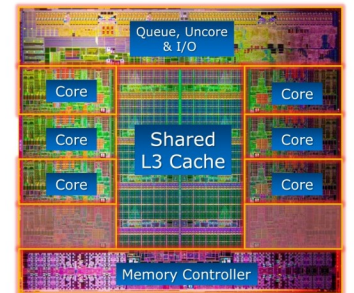
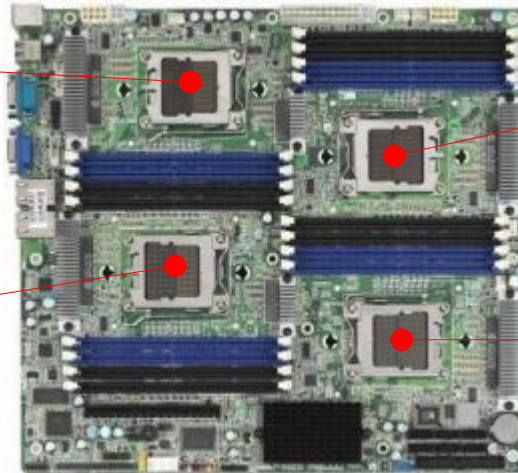
Multicores

15

- En la actualidad, las máquinas pueden tener hasta 4 CPUs o Procesadores (**Arquitectura Multiprocesador**).
- Cada CPU o Procesador puede tener varios cores (**Arquitectura Multicore**).

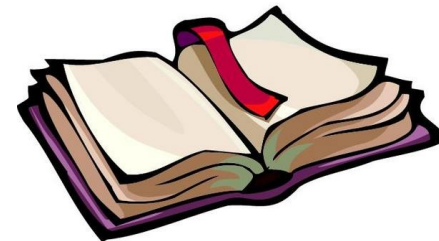
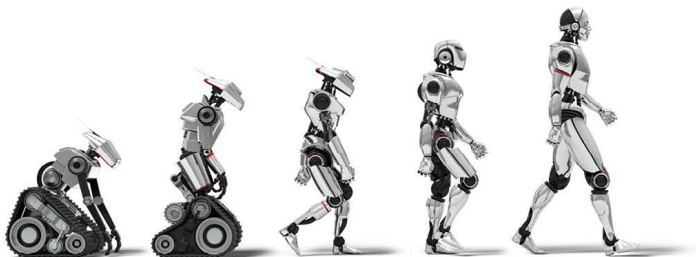


Motherboard con soporte para 4 CPUs o Procesadores
Cada CPU o Procesador tiene 6 cores



I. Evolución de las arquitecturas paralelas

- i. Paralelismo en monoprocesadores
- ii. Multiprocesadores
- iii. Clusters/Multiclusters
- iv. Multicores
 - i. Evolución Intel
 - ii. Asimétricos
- v. Grid
- vi. Manycores
- vii. Cloud
- viii. Computación Cuántica



II. Rankings

Multicores

Primeros multicores de Intel

17

Año	Microarquitectura	Nombre comercial	Características
2005	NetBurst	Pentium D	Dos chips Pentium IV encapsulados
2006	Dual Core	Dual Core	Dos cores de 32 bits en un único chip
2007	Core 2	Core 2 Duo (2 cores) Core 2 Quad (4 cores)	Evolución de Dual Core Tecnología 64 bits

- La estrategia de Intel 2007-2016 se basaba en el modelo Tick – Tock:
 - Tick: “Contracción” de la arquitectura del proceso de microarquitectura anterior.
 - Tock: Creación de una nueva microarquitectura.
- Además, incorpora tecnologías adicionales:
 - Hyperthreading
 - TurboBoost
 - Varios niveles de memoria cache



Multicores

Evolución Intel

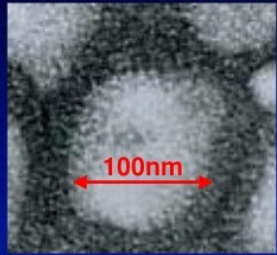
18

Nanotecnología: manipulación de la materia a escala nanométrica.

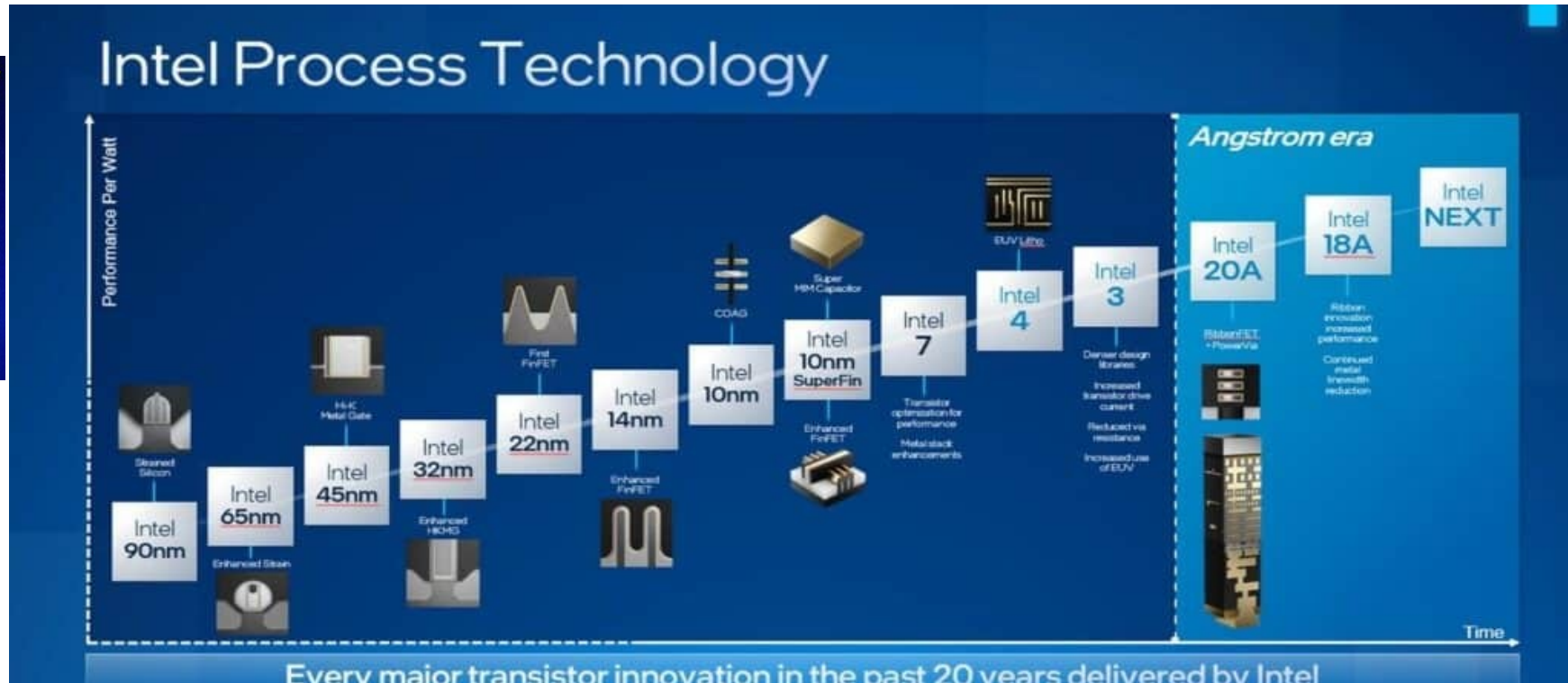
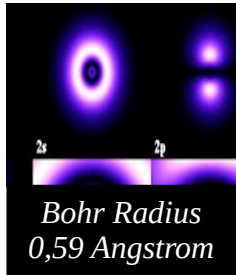
$1 \text{ nanómetro} = 10^{-9} \text{ metros}$

$1 \text{ Angstrom} = 0,1 \text{ nanómetro} = 10^{-10} \text{ metros}$

Nanotechnology



Influenza virus

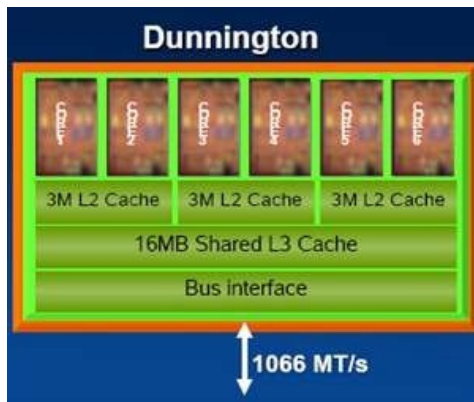
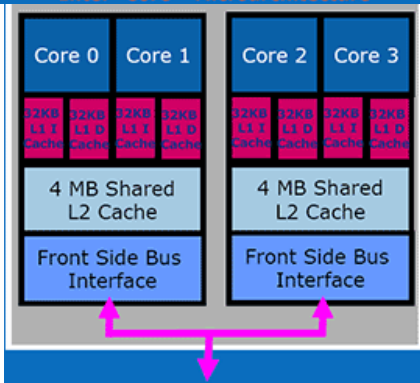


Multicores Evolución Intel

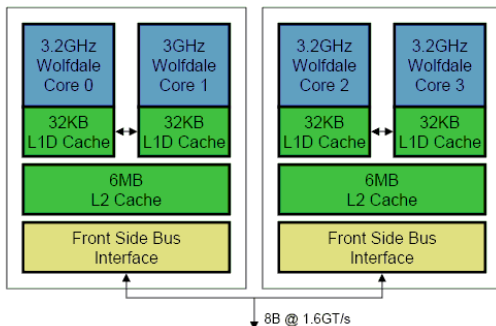
19

Basados en BUS

Intel® Xeon® Processor 5300 Series Intel® Core™ Microarchitecture

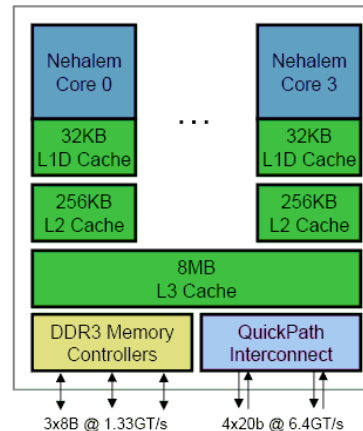


Harpertown

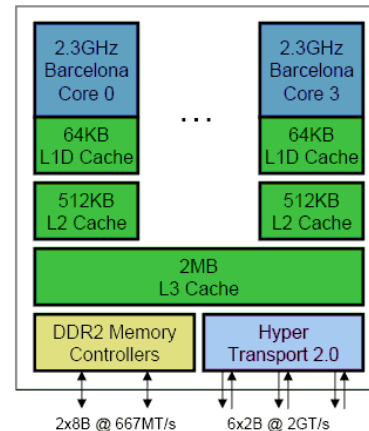


Basados en Crossbar

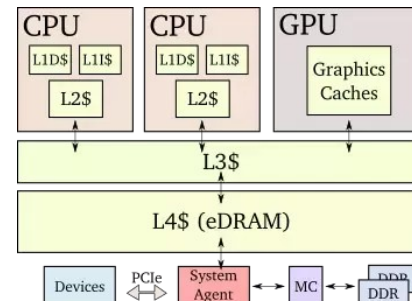
Nehalem



Barcelona (AMD)



Skylake-Broadwell (Cache L4 - 64MB/128MB)



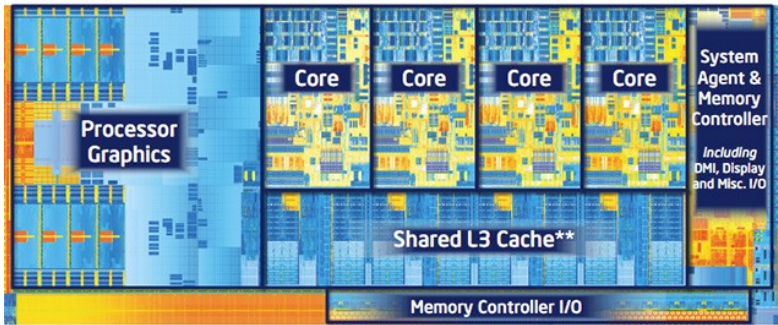
Multicores

Evolución Intel

20

Microarquitectura Ivy bridge 22nm Placa gráfica On-Chip

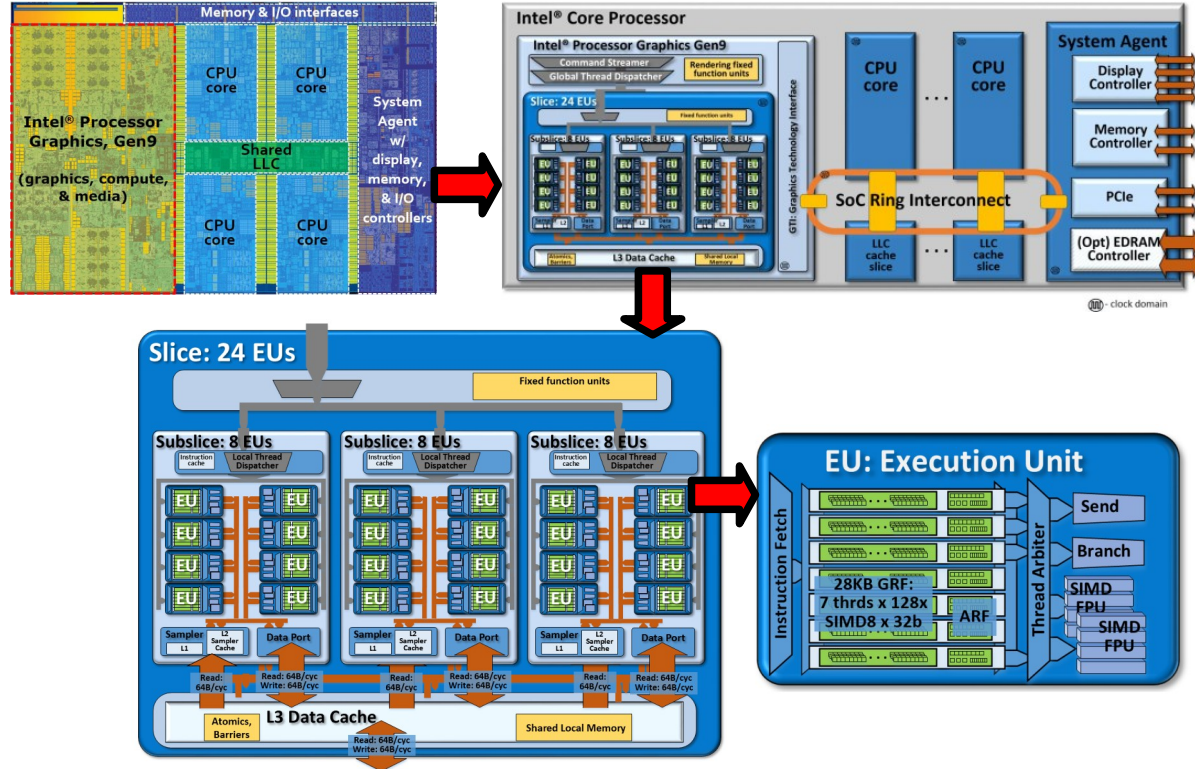
3rd Generation Intel® Core™ Processor: 22nm Process



New architecture with shared cache delivering more performance and energy efficiency

Quad Core die with Intel® HD Graphics 4000 shown above
Transistor count: 1.4Billion Die size: 160mm²
** Cache is shared across all 4 cores and processor graphics

Microarquitectura Skylake 14nm Procesador gráfico avanzado

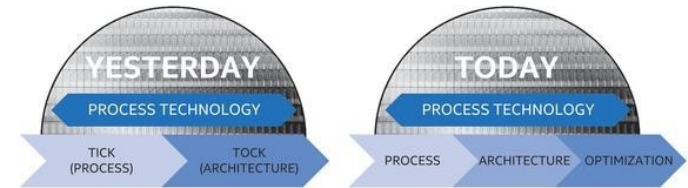


Multicores

Evolución Intel

21

- El proceso Tick-Tock finaliza en 14nm.
- 2016 Nuevo proceso de fabricación **(PAO)**: Tres generaciones en un sólo proceso de manufactura. Tres pasos:
 - **Process:** Igual Tick
 - **Architecture:** Igual Tock
 - **Optimization:** Optimización de la arquitectura
- Dos líneas:
 - Pentium/Core
 - Atom



Multicores

Evolución Intel

22

Línea (Pentium/Core)	Proceso	Microarquitectura	Código	Generación	Año
Tock	14nm	Sky Lake		6, 7, 8 y 9	2015-2019
P rocess	10nm	Palm Cove	Cannon Lake	8	2018
A rchitecture		Sunny Cove	Ice Lake	10	2019
O ptimization		Willow Cove	Tiger Lake	11	2020
		Golden Cove	Alder Lake	12	2021
	7nm Intel 7	Raptor Cove	Raptor Lake	13	2022
P rocess		Redwood Cove	Meteor Lake	14	2023
A rchitecture	5nm Intel 4	?	?		
O ptimization		?	?		
P rocess	2nm Intel 20A	Lion Cove	Arrow Cake	15	2024
A rchitecture		?	Lunar Lake	16	2024
O ptimization		?	?		
P rocess	Intel 18A	TBA	Phanter Lake		2025
A rchitecture		?	Diamond Rapids		2026
O ptimization	TSMC	?	Nova Lake		2026

Multicores

Evolución Intel

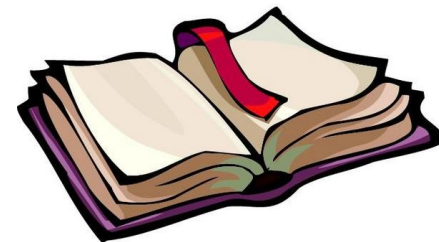
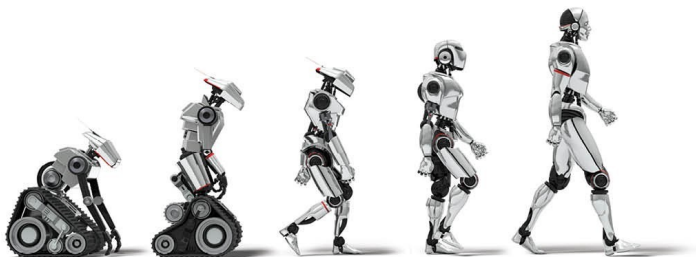
23

Línea (Atom)	Proceso	Microarquitectura	Año
Tock	14nm	Goldmont	2016
P rocess	10nm	Tremont	2020
A rchitecture	7nm Intel 7	Gracemont	2021
O ptimization	Intel 3	Crestmont	2023/2024
P rocess	TSMC N3B	Skymont	2024
A rchitecture	Intel 18A	Darkmont	2026

Tremont: Primer Procesador Híbrido de Intel

I. Evolución de las arquitecturas paralelas

- i. Paralelismo en monoprocesadores
- ii. Multiprocesadores
- iii. Clusters/Multiclusters
- iv. Multicores
 - i. Evolución Intel
 - ii. Asimétricos
- v. Grid
- vi. Manycores
- vii. Cloud
- viii. Computación Cuántica



II. Rankings

Multicores asimétricos

25

- Podemos clasificar a los multicores como:

Homogéneos / Simétricos

- Cores idénticos

Heterogéneos

- Cores diferentes

Heterogéneos pp

- Compilar código para cada tipo de core

Asimétricos

- Misma ISA (Instruction Set Architecture)
- Una única compilación de código

- Los multicores **asimétricos** fueron propuestos en 2003 y consisten en:
 - Unos pocos **Big** (o Fast) **cores** complejos muy potentes de alto consumo de energía.
 - Varios **Small** (o Slow) **cores** simples poco potentes de bajo consumo de energía.
- La idea es tener diferentes tipos de cores y usarlos de acuerdo a las distintas demandas computacionales de las aplicaciones, con el objetivo de lograr mayor rendimiento por watt.

BC

BC

SC

SC

SC

SC

SC

SC

Multicores asimétricos

ARM big.LITTLE

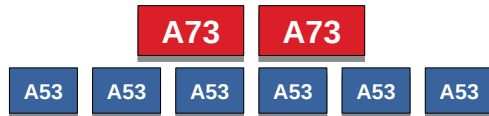
26

- Las arquitecturas asimétricas no fueron comercializadas hasta el surgimiento en 2014 de la microarquitectura ARM big-LITTLE (ARM Holding - Cambridge – Inglaterra).
- Tiene dos tipos de procesadores:
 - BIG Cores: mayor rendimiento y mayor consumo (Ej: ARM Cortex A15, A55, A73)
 - Little Cores: menor rendimiento y menor consumo (Ej: ARM Cortex A7, A53)
- big.LITTLE en dispositivos móviles System-on-Chips (SoCs) ARM desarrollados por Samsung Electronics:



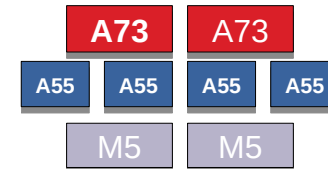
2018 - Samsung Exynos serie 7885

- Procesador ARM Cortex-A73 (2 cores 2.2GHz)
- Procesador ARM Cortex-A53 (6 cores 1.6GHz)



2020 - Samsung Exynos serie 900

- Procesador Samsung Exynos M5 (2 cores 2.73GHz)
- Procesador ARM Cortex-A76 (2 cores 2.5GHz)
- Procesador ARM Cortex-A55 (4 cores 2GHz)



Multicores asimétricos

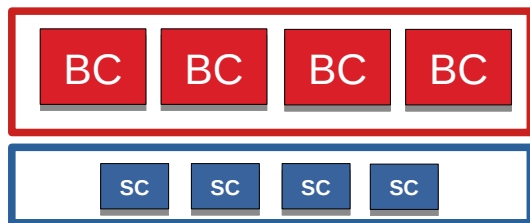
ARM big.LITTLE

27

Disposiciones de cores ARM big.LITTLE

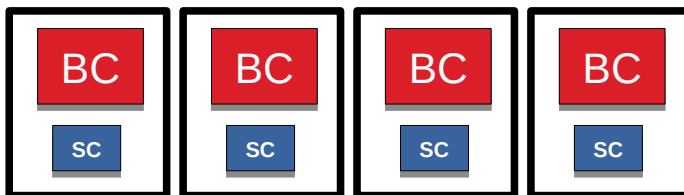
Cluster

- Cluster de cores.
- Uso simultáneo sólo de 4 cores.
- Los cores se activan de acuerdo a los requerimientos: de mayor potencia activa el cluster de Big cores y de menor potencia activa el cluster de Small cores.
- No se utilizan Big y Small cores al mismo tiempo.



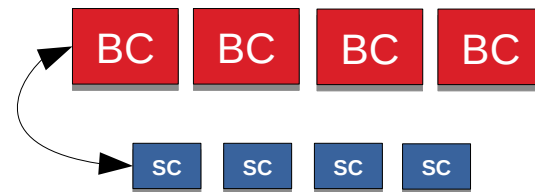
In Kernel switcher

- Virtual core: un Big y un Small.
- Uso simultáneo sólo de 4 cores.
- Los cores en un virtual core se activan de acuerdo a los requerimientos: de mayor potencia activa el Big core y de menor potencia activa el Small cores.
- Es posible utilizar Big y Small cores al mismo tiempo pero en virtual cores distintos.



Heterogeneous multi-processing

- Uso de cores individuales.
- Uso simultáneo de 8 cores.
- Se requieren migraciones de procesos/hilos asignándolos al core más adecuado de acuerdo a los requerimientos.



Multicores asimétricos

Intel

28

- En 2020 Intel comercializa un penta-core, para dispositivos móviles, llamado Lakefield de microarquitectura Tremont.
- Dos tipos de procesadores:
 - **E-Cores** (Efficient cores): simil Little Cores. Se enfocan en maximizar el rendimiento por watt.
 - Microarquitectura Tremont (0.8Ghz – 2.8Ghz).
 - **P-Cores** (Performance cores): simil BIG Core. Se enfocan en cómputo de alto rendimiento.
 - Microarquitectura Sunny Cove – Alder Lake (1.4Ghz – 3.0Ghz).
- En 2021 comercializa distintos asimétricos de microarquitectura Sunny Cove – Alder Lake para equipos de escritorio que varían en número de cores y rango de frecuencias:

Procesador	E-Cores	P-Cores
Core i9 (12900K)	8 (2.4Ghz – 3.9Ghz)	8 (3.2Ghz – 5.1Ghz)
Core i7 (12700T)	4 (1.0Ghz – 3.4Ghz)	8 (1.4Ghz – 4.6Ghz)

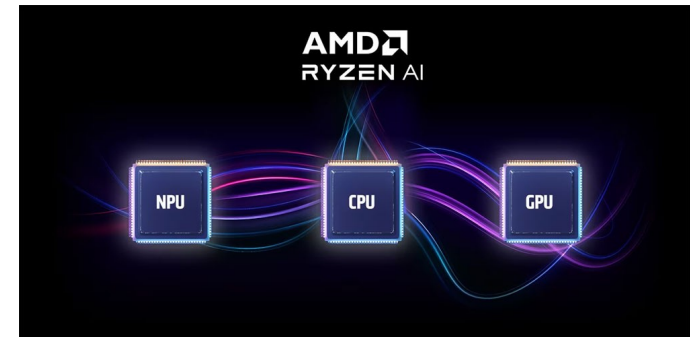
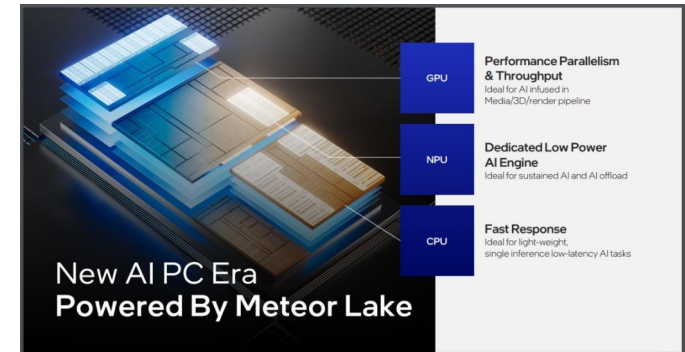


Multicores asimétricos

CPU + GPU + NPU

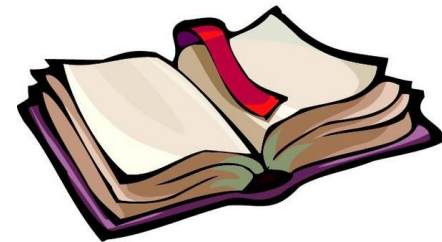
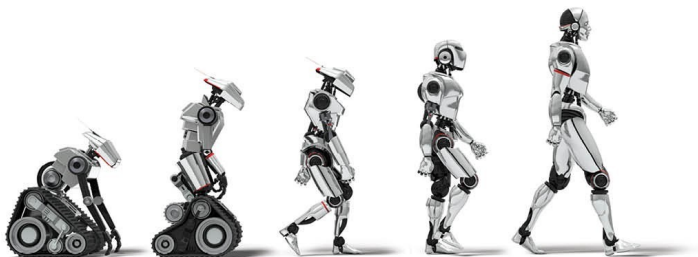
29

- En 2023 Intel comercializa procesadores de arquitectura Meteor Lake (generación 14) con un diseño más complejo que incorporan tres tipos de capacidades de cómputo:
 - CPU: multicore
 - GPU: Placa gráfica
 - NPU (Neural Processing Unit): para redes neuronales (IA)
- AMD comercializa un procesador similar, Ryzen serie 7040 (Zen 4), que incluyen la llamada Ryzen AI.



I. Evolución de las arquitecturas paralelas

- i. Paralelismo en monoprocesadores
- ii. Multiprocesadores
- iii. Clusters/Multiclusters
- iv. Multicores
 - i. Evolución Intel
 - ii. Asimétricos
- v. Grid
- vi. Manycores
- vii. Cloud
- viii. Computación Cuántica



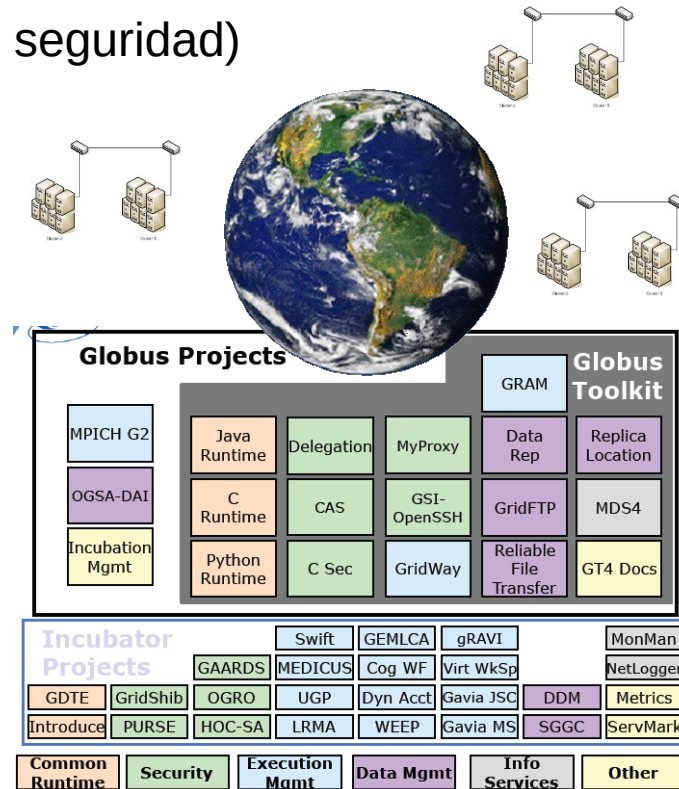
II. Rankings

Grid

31

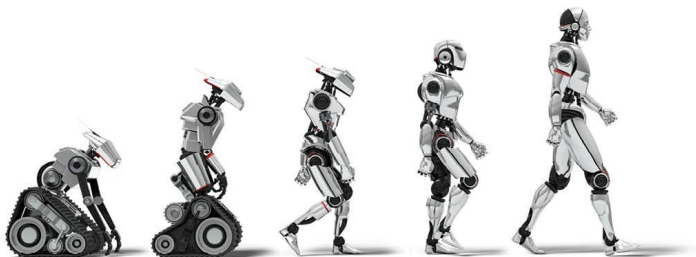
Grid: sistema que permite compartir recursos distribuidos geográficamente.

- Sumar equipos no utilizados al 100% para procesar aplicaciones con alta demanda computacional y gran carga de datos.
- Pensada para ambientes WAN (expuestos a problemas de seguridad)
- Proyectos:
 - CETI (1999 – California University, Berkeley)
 - EELA (2006 – CERN - Comisión Europea – América Latina)
 - CYTED (2006 – Iberoamérica)
 - Rosetta@home (2020 - BOINC)
- Gestión de recursos compleja que requiere middleware:
 - Globus toolkit (2004 - 2018)
 - Glite (Branch de Globus Toolkit version 2 – 2005 – 2013)
 - BOINC (California University, Berkeley - 2002)
- Las capas en middlewares introducen overhead.



I. Evolución de las arquitecturas paralelas

- i. Paralelismo en monoprocesadores
- ii. Multiprocesadores
- iii. Clusters/Multiclusters
- iv. Multicores
 - i. Evolución Intel
 - ii. Asimétricos
- v. Grid
- vi. Manycores
- vii. Cloud
- viii. Computación Cuántica



II. Rankings

Manycore: arquitectura que posee un gran número de cores simples.

- La era manycore surge a partir de las placas gráficas o **GPUs** (Graphics Processing Units)
- Las GPUs surgen y evolucionan a partir de la industria de los videojuegos.
- A partir de 2006, incorporan un gran número de procesadores simples (**SIMD**) programables y se demostró que alcanzaban un alto rendimiento al resolver problemas de propósito general (no sólo para procesamiento gráfico). Surge entonces el concepto **GPGPU**:

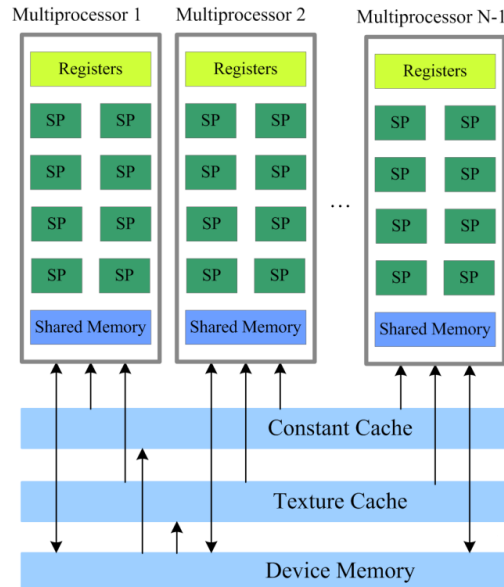
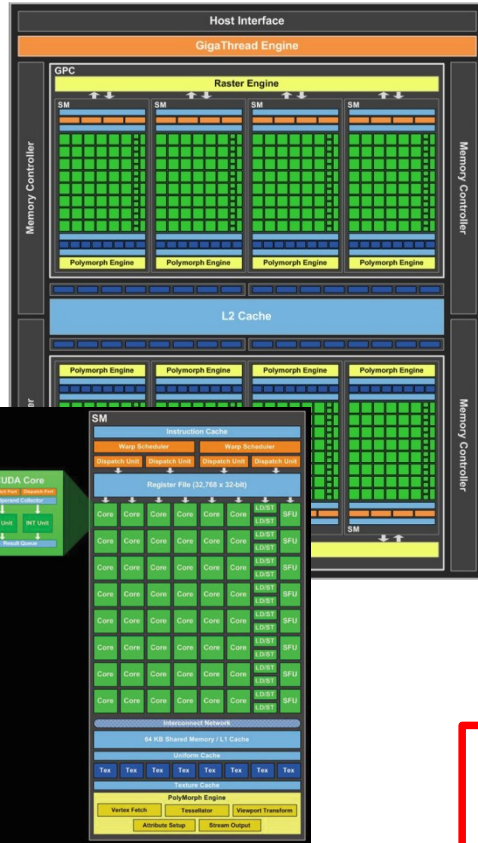
General-Purpose Computing on Graphics Processing Units

- Dos empresas lideran el mercado:
 - Nvidia
 - AMD – ATI
- Generalmente, las GPUs se utilizan como co-procesador conectado al puerto PCI express.
- Otros fabricantes han producido manycores similares (Intel Xeon PHI, Fujitsu, Sunway etc.)

Manycores GPUs

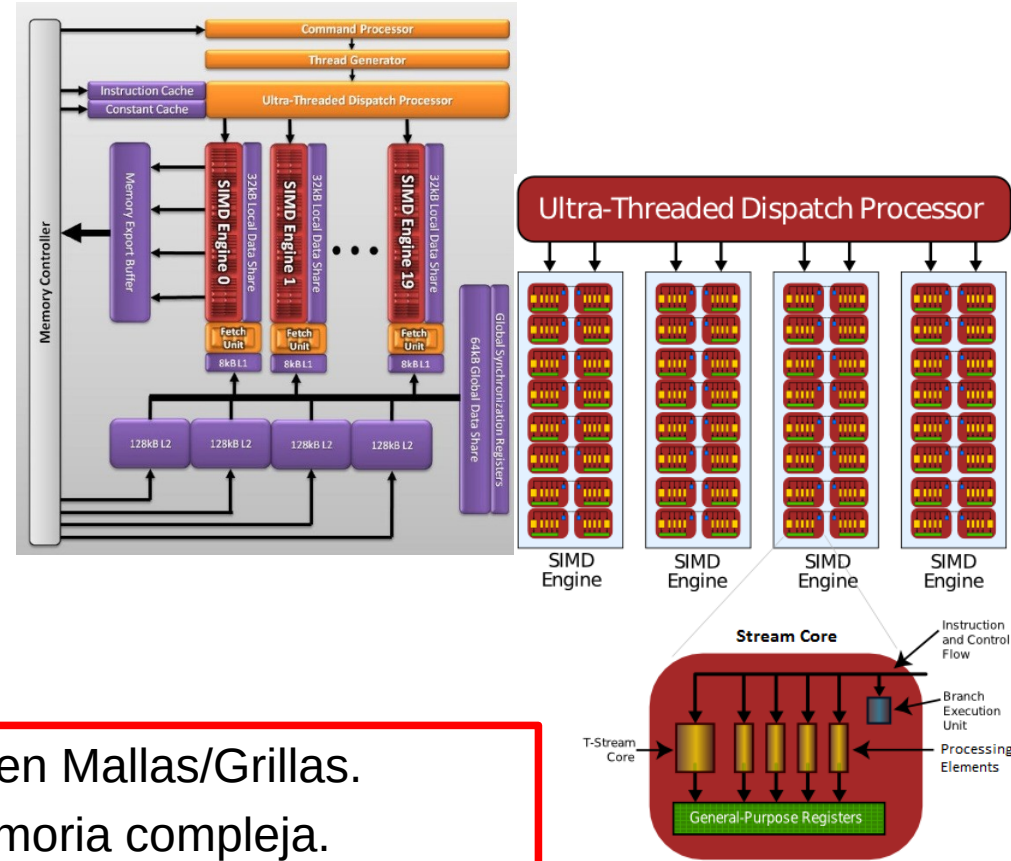
34

Arquitectura NVidia



Cores dispuestos en Mallas/Grillas.
Jerarquía de memoria compleja.

Arquitectura AMD ATI

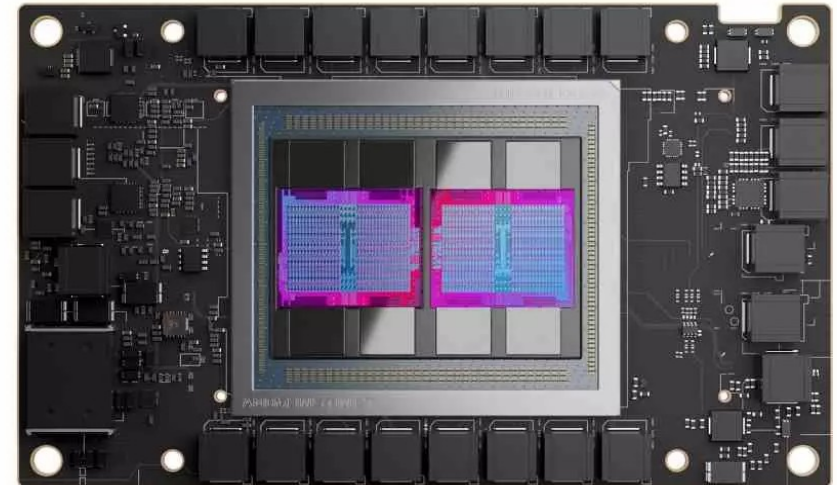


Manycores

AMD-ATI Instinct MI200

35

- Dos modelos:
 - OCP Accelerator Module (OAM)
 - PCI express versión 5
- High Band Memory 128 GB
- 200.000 unidades de cómputo (CUs) por GPU

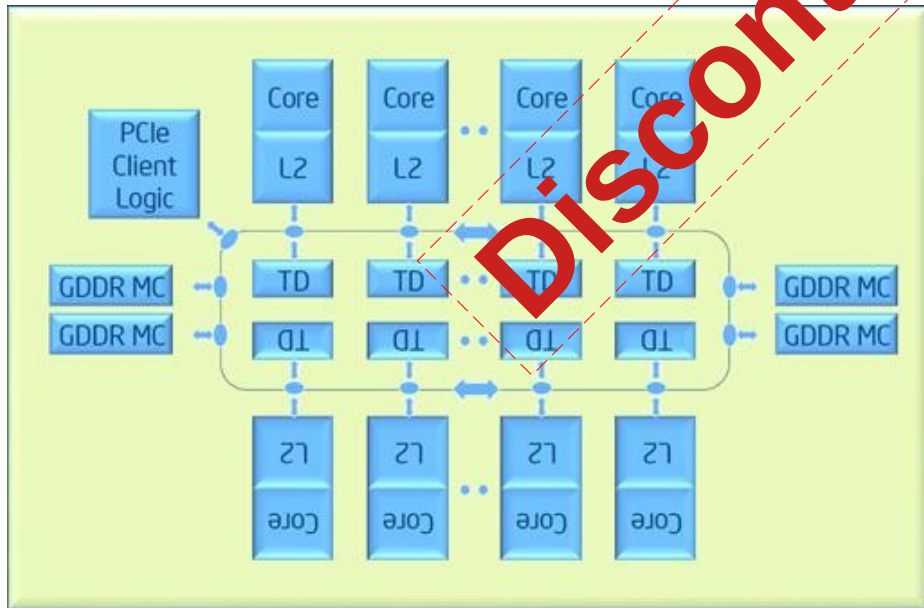


Manycores Intel Xeon Phi

36

Primera Generación

- Basado en Cores X86 in-order (4 hilos)
- Conexión en anillo bi-direccional
- Conectividad vía bus PCIe
- Hasta 60 cores



Segunda Generación

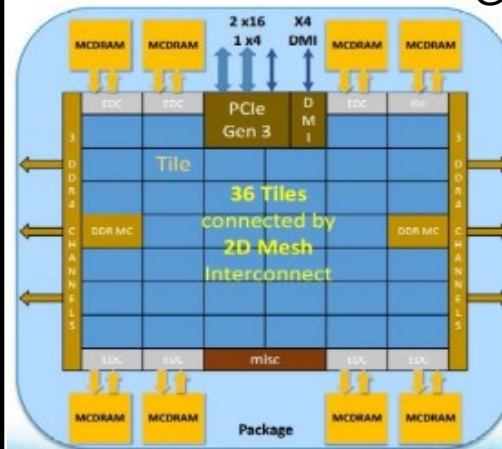
- Basado en Atom
- Conexión en grilla
- Conectividad Processor Host
- Hasta 72 cores (278 Hilos)
- MCDRAM configurable
- Unidades Vectoriales 512bits (VPU)

- Grilla configurable:

All-to-All (UMA)

Quadrant/Hemisphere (UMA)

SNC-2/SNC-4 (NUMA)

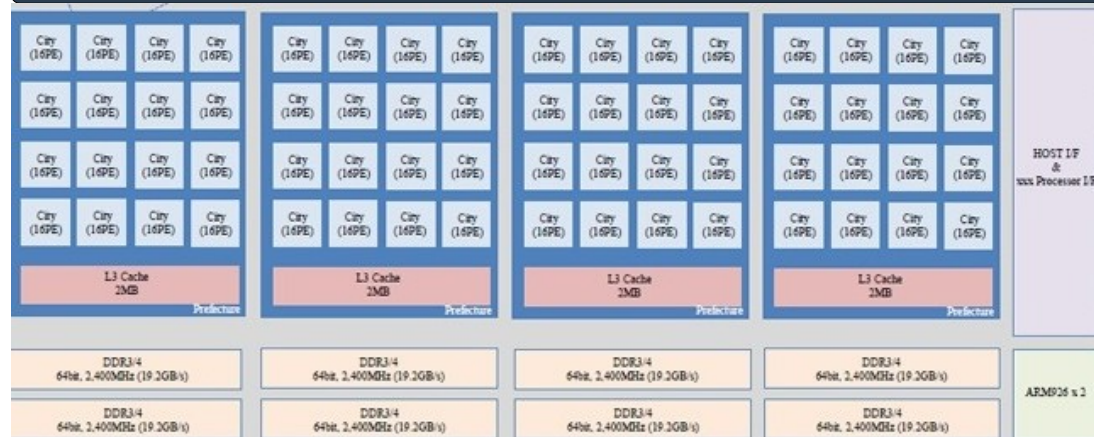


Manycores

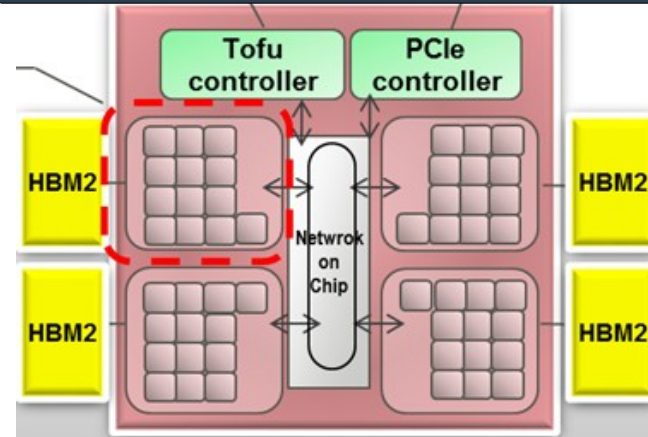
Otros manycores

37

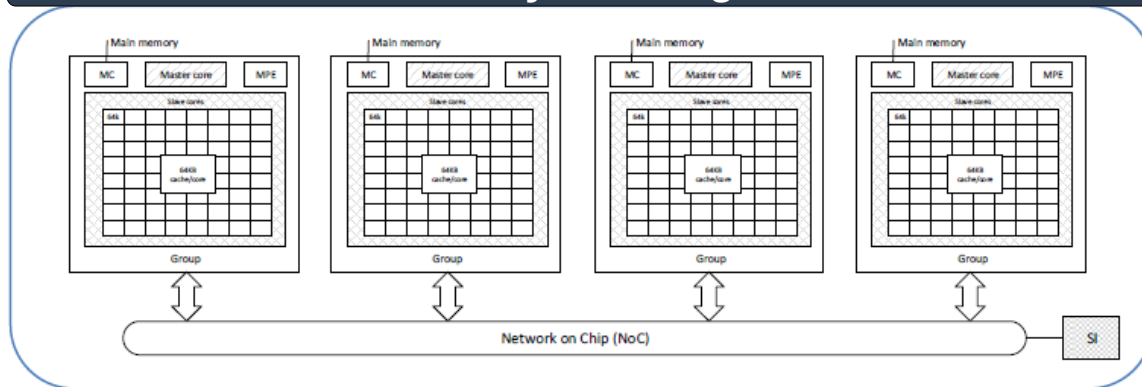
Pezy



Fujitsu A64FX

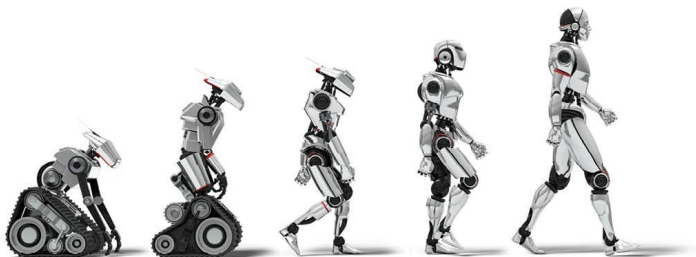


Sunway TaihuLight



I. Evolución de las arquitecturas paralelas

- i. Paralelismo en monoprocesadores
- ii. Multiprocesadores
- iii. Clusters/Multiclusters
- iv. Multicores
 - i. Evolución Intel
 - ii. Asimétricos
- v. Grid
- vi. Manycores
- vii. Cloud
- viii. Computación Cuántica



II. Rankings

Cloud Computing: paradigma, basado en el concepto de virtualización, que ofrece servicios (**orientado a servicio**) a través de Internet con un alto grado de transparencia.

- **No confundir con Grid** asociado a la computación distribuida y paralela, donde varios nodos débilmente acoplados actúan en conjunto para resolver una tarea muy grande.
- Un Cloud provee aplicaciones comunes de negocio *on-line* accesibles desde un navegador web, mientras el software y los datos se almacenan en los servidores.

Cloud Público

Empresas proveedoras de servicios Cloud:

Amazon

Google

IBM

Microsoft Azure

Cloud Privado

Infraestructura de cloud propia.
Software para montar un Cloud:

OpenStack

Eucalyptus

Proxmox

Cloud Híbrido

Cloud Privado que utiliza servicios de Cloud Público ante picos de demanda (elasticidad).

Cloud

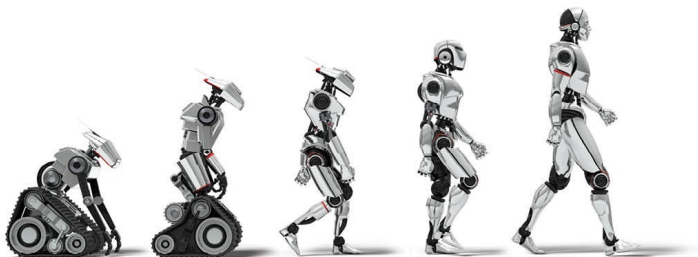
Como Arquitectura Paralela

40

- Uso de cloud como arquitectura paralela:
 - **Mantenimiento de los sistemas de cómputo:** relacionado a los costos de mantener clusters y el costo de alquilar hardware.
 - **Costo:** monetario y de energía.
 - **Actualización del hardware:** renovar hardware paralelo obsoleto tiende a ser costoso. Los proveedores de cloud eventualmente proveerían de hardware actualizado.
 - **Hardware dedicado:** ¿Cómo asegurar que el hardware contratado al Cloud es dedicado y que no hay elementos de procesamiento virtuales (Hyperthreading)?
 - Conceptos de **QoS** o **SLA**.
 - **Google TPU (Tensor Processing Unit):** acelerador IA accedido vía Cloud para ejecutar modelos de aprendizaje automático. (HPDA = HPC + IA)
 - **Quantum cloud:** acceso a computadoras cuánticas (Amazon Braket)

I. Evolución de las arquitecturas paralelas

- i. Paralelismo en monoprocesadores
- ii. Multiprocesadores
- iii. Clusters/Multiclusters
- iv. Multicores
 - i. Evolución Intel
 - ii. Asimétricos
- v. Grid
- vi. Manycores
- vii. Cloud
- viii. Computación Cuántica



II. Rankings

Computación cuántica

Surgimiento

42

- En 1981, **Paul Benioff**, propuso la idea de una computadora que aproveche algunos principios de la mecánica cuántica.
- En 1982, el premio nobel en física **Richard Feynman**, dió una conferencia llamada “Simulación de la física con computadoras”. Proponía el uso de fenómenos cuánticos para realizar cálculos computacionales y suponía que algunos cálculos complejos se realizarían más rápidamente en una máquina cuántica.
- Nace la idea de computación cuántica, un nuevo paradigma que propone el uso de computadoras cuánticas para resolver problemas.
 - Una computadora cuántica aprovecha fenómenos de la mecánica cuántica, como la **superposición** y el **entrelazamiento**, utilizando hardware especializado para manipular estados cuánticos.



Computación cuántica

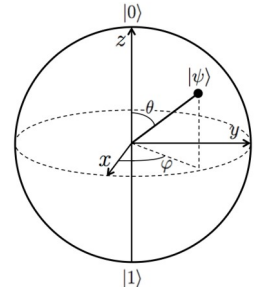
Unidad de información

43

- En computación tradicional o clásica la unidad de información es el bit mientras que en computación cuántica la unidad de información es el **cúbit (quantum bit)**:
 - Los **bits clásicos** pueden ser 0 o 1, pero **solo un estado a la vez**.
 - Los **cúbits cuánticos** pueden ser 0, 1 y estar en **superposición** (0 y 1 a la vez).
- El número de cúbits indica los estados que pueden estar en superposición:
 - Un registro con 8 bits clásicos tiene 256 valores posibles pero solo puede tomar uno de esos valores.
 - Con un vector de 8 cúbits, la partícula puede tomar 256 valores distintos a la vez, permitiendo 256 operaciones paralelas. El número de operaciones es exponencial con respecto al número de cúbits.

Esfera de Bloch

Representación geométrica del espacio de estados puros de un sistema cuántico de dos niveles.



Computación cuántica

Algo de historia hasta la actualidad

44

- 1998: primera máquina de 2 cúbits - Universidad de Berkeley
- 1999: primera máquina de 3 cúbits - Laboratorios de IBM-Almaden. Se ejecutó por primera vez un algoritmo propuesto previamente, el algoritmo de Grover.
- A partir de entonces, fueron evolucionando lentamente en la búsqueda de procesadores cuánticos eficientes, es decir con un número de cúbits razonable.
- 2019: IBM Q System One - Primer computadora cuántica de 20 cúbits. Para uso comercial que combina computación cuántica con computación clásica. El mismo año IBM anunció una máquina con 53 cúbits.
- 2019: Google afirma haber alcanzado la supremacía cuántica (o ventaja cuántica): capacidad de resolver problemas en máquinas cuánticas que las máquinas clásicas no pueden resolver.
- 2022: IBM Osprey - Procesador cuántico de 433 cúbits.

Computación cuántica

Estado actual del Hardware

45

- Máquinas muy costosas mantenidas a temperaturas muy bajas y accedidas por colas.

Soporte físico para representar cúbits

Trampa de iones
Espines nucleares
Puntos cuánticos
Uniones de Josephson: fase, carga, flujo
Defectos cristalinos en diamante
Ordenador de Kane

Proveedores (acceso directo o por Amazon Brakets)

IBM Quantum
IONQ
Rigetti
Dwave
Xanadu



Computación cuántica

Estado actual del Software

- Algunos algoritmos (Shor, Grover...) fueron propuestos previo a la primer máquina cuántica. Hoy pueden ejecutarse sobre simuladores o máquinas cuánticas reales.

Simuladores

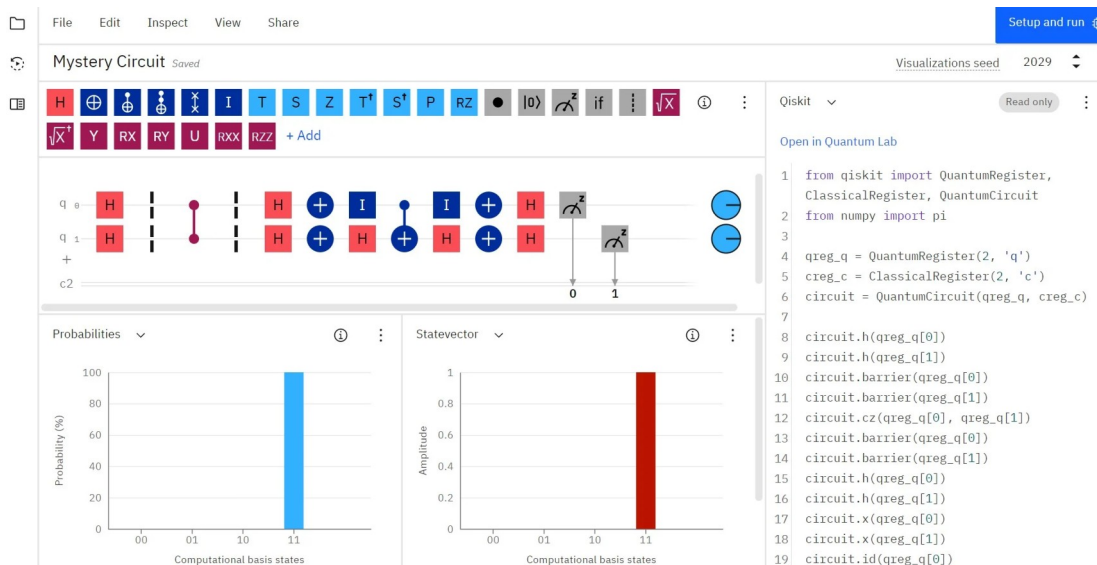
- IBM Quantum Composer
- Open Qir Quantum Circuit Simulator

Tipos de programación

- Circuitos cuánticos
- Quantum annealing

Lenguajes

- OpenQASM
- Qiskit
- Q#
- Otros...



Computación cuántica

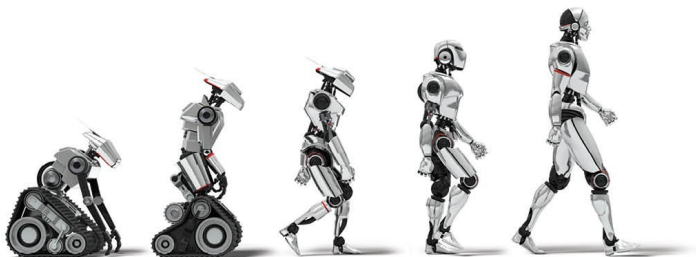
Expectativas

47

- Existe mucha expectativa dado que algunos problemas intratables pasan a ser tratables.
- Problemas a resolver mas eficiente que en máquinas clásicas:
 - Factorización de números enteros
 - Criptografía cuántica
 - Teleportación cuántica de la información
 - Logaritmo discreto
 - Simulación de sistemas cuánticos (Físicos y Químicos)
 - Inteligencia Artificial y Aprendizaje automático
 - Biología
 - Medicina
 - Industria Farmacológica
 - Etc...

I. Evolución de las arquitecturas paralelas

- i. Paralelismo en monoprocesadores
- ii. Multiprocesadores
- iii. Clusters/Multiclusters
- iv. Multicores
 - i. Evolución Intel
 - ii. Asimétricos
- v. Grid
- vi. Manycores
- vii. Cloud
- viii. Computación Cuántica



II. Rankings



- Existen dos rankings, que se elaboran en junio y noviembre de cada año, que evalúan distintos aspectos de las arquitecturas paralelas:



- ¹**Top 500:** proyecto que elabora un ranking de las computadores más rápidas. Utiliza como unidad de medida el Gflops.



- ²**Green 500:** proyecto que elabora un ranking basado en el Top 500 pero considerando la eficiencia energética. Utiliza como unidad de medida el GFlop por Watt.

¹ <http://www.top500.org>

² <http://www.green500.org> - <https://www.top500.org/lists/green500/2020/11/>

Rankings



50

Noviembre 2024	Top 500	Green 500
1	El Capitan - HPE Cray EX255a, AMD 4th Gen EPYC 24C 1.8GHz, AMD Instinct MI300A	JEDI - BullSequana XH3000, Grace Hopper Superchip 72C 3GHz, NVIDIA GH200
2	Frontier - HPE Cray EX235a, AMD Optimized 3rd Generation EPYC 64C 2GHz, AMD Instinct MI250X	ROMEO-2025 - BullSequana XH3000, Grace Hopper Superchip 72C 3GHz, NVIDIA GH200
3	Aurora - HPE Cray EX - Intel Exascale Compute Blade, Xeon CPU Max 9470 52C 2.4GHz, Intel Data Center GPU	Adastra 2 - HPE Cray EX255a, AMD 4th Gen EPYC 24C 1.8GHz, AMD Instinct MI300A
4	Eagle - Microsoft NDv5, Xeon Platinum 8480C 48C 2GHz, NVIDIA H100	Isambard-AI phase 1 - HPE Cray EX254n, NVIDIA Grace 72C 3.1GHz, NVIDIA GH200
5	HPC6 - HPE Cray EX235a, AMD Optimized 3rd Generation EPYC 64C 2GHz, AMD Instinct MI250X	Capella - Lenovo ThinkSystem SD665-N V3, AMD EPYC 9334 32C 2.7GHz, Nvidia H100 SXM5 94Gb
6	Supercomputer Fugaku - Supercomputer Fugaku, A64FX 48C 2.2GHz	JETI - JUPITER Exascale Transition Instrument - BullSequana XH3000, Grace Hopper Superchip 72C 3GHz, NVIDIA GH200 Superchip
7	Alps - HPE Cray EX254n, NVIDIA Grace 72C 3.1GHz, NVIDIA GH200	Helios GPU - HPE Cray EX254n, NVIDIA Grace 72C 3.1GHz, NVIDIA GH200

