

Calcolo Parallelo e Distribuito

9cfu

Docente: Prof. L. Marcellino

Tutor: Prof. P. De Luca

MODALITA' DI SVOLGIMENTO DEL CORSO ed ESAMI

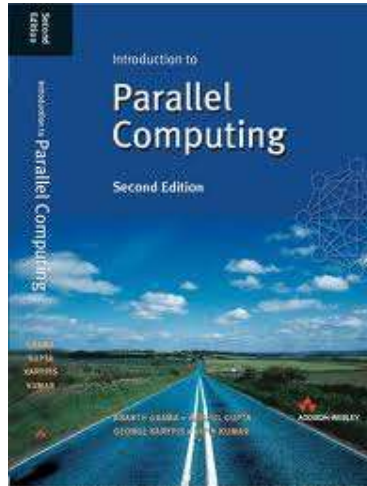
CORSO

⇒ Lezioni - Esercitazioni - Laboratorio (in presenza)

Lunedì	16:00-18:00 aula 17
Giovedì	14:00-16:00 aula 17
Venerdì	14:00-16:00 aula 2

ESAME: prova orale
+
prova di laboratorio preliminare
implementazione codice parallelo in ambiente multicore

Riferimenti Bibliografici



Introduction to Parallel Computing (2nd Edition)
A. Grama, G. Karypis, V. Kumar, A. Gupta
Addison Wesley

Calcolo Parallelo e Distribuito

Docente: Prof. L. Marcellino

Slide del corso

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI
"PARthenope"



Richiami di Calcolo Parallelo 1

Dispensa in italiano

Piattaforma e-learning di Ateneo

- materiale didattico
- avvisi - eventi

Ricevimento e Contatti:

... su appuntamento

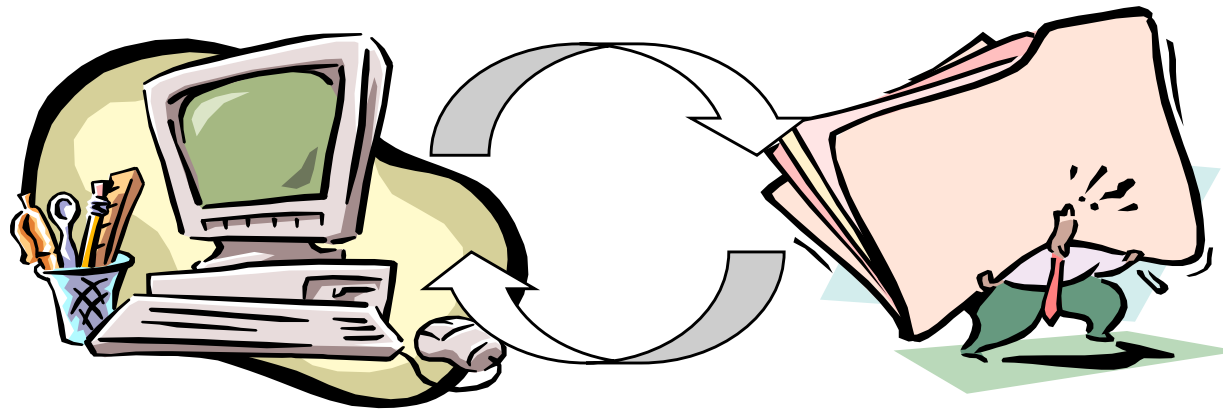
livia.marcellino@uniparthenope.it

pasquale.deluca@uniparthenope.it

Obiettivo del corso

Fornire metodologie, idee e strumenti
software alla base della
risoluzione computazionale
di un problema
mediante **calcolatore parallelo**

Attività di
laboratorio



Lezioni
in aula



L'attività di laboratorio ...

Progetto, sviluppo, analisi e
implementazione
di algoritmi
in ambiente ad
“alte prestazioni”



Calcolo ad alte prestazioni

Da molti anni, il calcolo ad alte prestazioni ha contribuito a migliorare la qualità della vita modellando e prevedendo con velocità e precisione un'ampia gamma di proprietà e fenomeni fisici.



Il calcolo ad alte prestazioni (HPC – High Performance Computing) è la versione recente di quello che veniva chiamato supercalcolo, cioè uno strumento di calcolo scientifico che impiega algoritmi, software e soprattutto hardware (supercomputer), per fornire soluzioni in tempo reale a **problemi su larga scala**.

Problemi su larga scala

- Ricerca su internet
- Trasporto
- Pubblicità e Marketing
- Servizi bancari e finanziari
- Media e intrattenimento
- Meteorologia
- Assistenza sanitaria
- Sicurezza informatica
- Formazione



Problemi caratterizzati dalla necessità di ottenere una
soluzione in tempo reale (o in tempo utile!)

Super Computer = Super Calcolatore

Lo scopo di usare un **super computer**
è quello di risolvere problemi
facendogli fare i calcoli al nostro posto
...
più velocemente possibile

Il termine “supercalcolatore” si riferisce ad un sistema che fornisce le prestazioni più elevate, in quel dato momento (**'80s**)

Le prestazioni sono misurate dal tempo necessario per risolvere una particolare applicazione
(**application-dependent**)

Qual è il Super Computer più veloce al mondo?

Dal 1993 ...

ogni anno (due volte l'anno) viene creata la
lista dei calcolatori più veloci nel mondo

TOP 500

le performance sono misurate
utilizzando **Rmax** :

benchmark di LINPACK per la risoluzione di un
sistema di equazioni lineari ($Ax=b$)

Qual è il Super Computer più veloce al mondo?

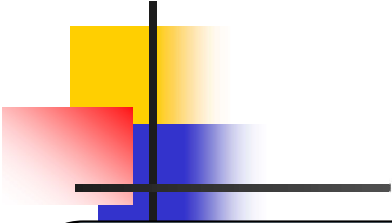
Rank	System	Cores	Rmax (PFlop/s)	Rpeak (PFlop/s)	Power (kW)
1	Frontier - HPE Cray EX235a, AMD Optimized 3rd Generation EPYC 64C 26Hz, AMD Instinct MI250X, Slingshot-11, HPE DOE/SC/Oak Ridge National Laboratory United States	8,699,904	1,194.00	1,679.82	22,703
2	Aurora - HPE Cray EX - Intel Exascale Compute Blade, Xeon CPU Max 9470 52C 2.4GHz, Intel Data Center GPU Max, Slingshot-11, Intel DOE/SC/Argonne National Laboratory United States	4,742,808	585.34	1,059.33	24,687
3	Eagle - Microsoft NDv5, Xeon Platinum 8480C 48C 26Hz, NVIDIA H100, NVIDIA Infiniband NDR, Microsoft Microsoft Azure United States	1,123,200	561.20	846.84	
4	Supercomputer Fugaku - Supercomputer Fugaku, A64FX 48C 2.26Hz, Tofu interconnect D, Fujitsu RIKEN Center for Computational Science Japan	7,630,848	442.01	537.21	29,899
5	LUMI - HPE Cray EX235a, AMD Optimized 3rd Generation EPYC 64C 26Hz, AMD Instinct MI250X, Slingshot-11, HPE EuroHPC/CSC Finland	2,752,704	379.70	531.51	7,107
6	Leonardo - BullSequana XH2000, Xeon Platinum 8358 32C 2.6GHz, NVIDIA A100 SXM4 64 GB, Quad-rail NVIDIA HDR100 Infiniband, EVIDEN EuroHPC/CINECA Italy	1,824,768	238.70	304.47	7,404
7	Summit - IBM Power System AC922, IBM POWER9 22C 3.07GHz, NVIDIA Volta GV100, Dual-rail Mellanox EDR Infiniband, IBM DOE/SC/Oak Ridge National Laboratory United States	2,414,592	148.60	200.79	10,096
8	MareNostrum 5 ACC - BullSequana XH3000, Xeon Platinum 8460Y+ 40C 2.3GHz, NVIDIA H100 64GB, Infiniband NDR200, EVIDEN EuroHPC/BSC Spain	680,960	138.20	265.57	2,560
9	Eos NVIDIA DGX SuperPOD - NVIDIA DGX H100, Xeon Platinum 8480C 56C 3.8GHz, NVIDIA H100, Infiniband NDR400, Nvidia NVIDIA Corporation United States	485,888	121.40	188.65	
10	Sierra - IBM Power System AC922, IBM POWER9 22C 3.1GHz, NVIDIA Volta GV100, Dual-rail Mellanox EDR Infiniband, IBM / NVIDIA / Mellanox DOE/NNSA/LLNL United States	1,572,480	94.64	125.71	7,438

www.top500.org

nel mondo: top-500 list
novembre **2023**

**Il podio resta
invariato - Frontier
per il secondo anno
di seguito è al primo
posto**

**prossimo test a
giugno 2023**

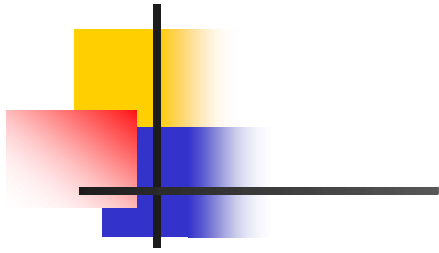


Rank	System	Cores	Rmax (PFlop/s)	Rpeak (PFlop/s)	Power (kW)
1	Frontier - HPE Cray EX235a, AMD Optimized 3rd Generation EPYC 64C 2GHz, AMD Instinct MI250X, Slingshot-11, HPE DOE/SC/Oak Ridge National Laboratory United States	8,699,904	1,679.82	1,679.82	22,703
2	Aurora - HPE Cray EX - Intel Exascale Compute Blade, Xeon CPU Max 9470 52C 2.4GHz, Intel Data Center GPU	4,742,816			

Rmax è la performance massima di un computer ottenuta con il pacchetto software HPL, ovvero una versione (parallela) portabile e disponibile gratuitamente dell' High Performance Computing Linpack Benchmark

(<http://www.netlib.org/benchmark/hpl/>)

	EuroHPC/CSC Finland				
6	Leonardo - BullSequana XH2000, Xeon Platinum 8358 32C 2.6GHz, NVIDIA A100 SXM4 64 GB, Quad-rail NVIDIA HDR100 Infiniband, EVIDEN EuroHPC/CINECA Italy	1,824,768	238.70	304.47	7,404
7	Summit - IBM Power System AC922, IBM POWER9 22C 3.07GHz, NVIDIA Volta GV100, Dual-rail Mellanox EDR Infiniband, IBM DOE/SC/Oak Ridge National Laboratory United States	2,414,592	148.60	200.79	10,096
8	MareNostrum 5 ACC - BullSequana XH3000, Xeon Platinum 8460Y+ 40C 2.3GHz, NVIDIA H100 64GB, Infiniband NDR200, EVIDEN EuroHPC/BSC Spain	680,960	138.20	265.57	2,560
9	Eos NVIDIA DGX SuperPOD - NVIDIA DGX H100, Xeon Platinum 8480C 56C 3.8GHz, NVIDIA H100, Infiniband NDR400, Nvidia NVIDIA Corporation United States	485,888	121.40	188.65	
10	Sierra - IBM Power System AC922, IBM POWER9 22C 3.1GHz, NVIDIA Volta GV100, Dual-rail Mellanox EDR Infiniband, IBM / NVIDIA / Mellanox DOE/NNSA/LLNL United States	1,572,480	94.64	125.71	7,438



Rank	System	Cores	Rmax (PFlop/s)	Rpeak (PFlop/s)	Power (kW)
1	Frontier - HPE Cray EX235a, AMD Optimized 3rd Generation EPYC 64C 2GHz, AMD Instinct MI250X, Slingshot-11, HPE DOE/SC/Oak Ridge National Laboratory United States	8,699,904	1,194.00	1,679.82	22,703
2	Aurora - HPE Cray EX - Intel Exascale Compute Blade, Xeon CPU Max 9470 52C 2.4GHz, Intel Data Center GPU Max, Slingshot-11, Intel DOE/SC/Argonne National Laboratory United States			1,059.33	24,687

Rmax è la performance massima di un computer ottenuta con il pacchetto software HPL, ovvero una versione (parallela) portabile e disponibile gratuitamente dell' High Performance Computing Linpack Benchmark

(<http://www.netlib.org/benchmark/hpl/>)

32C 2.6GHz, NVIDIA A100 SXM4 64 GB, Quad-rail NVIDIA
HDR100 Infiniband, EVIDEN
EuroHPC/CINECA
Italy

Benchmark: un insieme di test software utilizzati per misurare le prestazioni di un sistema

Linpack benchmark: introdotto da Jack Dongarra, risolve un sistema denso di equazioni lineari

(per approfondimenti: <http://www.top500.org/project/linpack>)

Platinum 8480C 56C 3.8GHz, NVIDIA H100, Infiniband
NDR400, Nvidia
NVIDIA Corporation
United States

10 **Sierra** - IBM Power System AC922, IBM POWER9 22C
3.1GHz, NVIDIA Volta GV100, Dual-rail Mellanox EDR
Infiniband, IBM / NVIDIA / Mellanox
DOE/NNSA/LLNL
United States

Qual è il Super Computer più veloce al mondo?

www.top500.org

Rank	System	Cores	Rmax (PFlop/s)	Rpeak (PFlop/s)	Power (kW)
1	Frontier - HPE Cray EX235a, AMD Optimized 3rd Generation EPYC 64C 2GHz, AMD Instinct MI250X, Slingshot-11, HPE DOE/SC/Oak Ridge National Laboratory United States	8,699,904	1,194.00	1,679.82	22,703
2	Aurora - HPE Cray EX - Intel Exascale Compute Blade, Xeon CPU Max 9470 52C 2.4GHz, Intel Data Center GPU Max, Slingshot-11, Intel DOE/SC/Argonne National Laboratory United States	4,742,808	585.34	1,059.33	24,687
3	Eagle - Microsoft NDv5, Xeon Platinum 8480C 48C 2GHz, NVIDIA H100, NVIDIA Infiniband NDR, Microsoft Microsoft Azure United States	1,123,200	561.20	846.84	
4	Supercomputer Fugaku - Supercomputer Fugaku, A64FX 48C 2.2GHz, Tofu interconnect D, Fujitsu RIKEN Center for Computational Science Japan	7,630,848	442.01	537.21	29,899
5	LUMI - HPE Cray EX235a, AMD Optimized 3rd Generation EPYC 64C 2GHz, AMD Instinct MI250X, Slingshot-11, HPE EuroHPC/CSC Finland	2,752,704	379.70	531.51	7,107
6	Leonardo - BullSequana XH2000, Xeon Platinum 8358 32C 2.6GHz, NVIDIA A100 SXM4 64 GB, Quad-rail NVIDIA HDR100 Infiniband, EVIDEN EuroHPC/CINECA Italy	1,824,768	238.70	304.47	7,404
7	Summit - IBM Power System AC922, IBM POWER9 22C 3.07GHz, NVIDIA Volta GV100, Dual-rail Mellanox EDR Infiniband, IBM DOE/SC/Oak Ridge National Laboratory United States	2,414,592	148.60	200.79	10,096
8	MareNostrum 5 ACC - BullSequana XH3000, Xeon Platinum 8460Y+ 40C 2.3GHz, NVIDIA H100 64GB, Infiniband NDR200, EVIDEN EuroHPC/BSC Spain	680,960	138.20	265.57	2,560
9	Eos NVIDIA DGX SuperPOD - NVIDIA DGX H100, Xeon Platinum 8480C 56C 3.8GHz, NVIDIA H100, Infiniband NDR400, Nvidia NVIDIA Corporation United States	485,888	121.40	188.65	
10	Sierra - IBM Power System AC922, IBM POWER9 22C 3.1GHz, NVIDIA Volta GV100, Dual-rail Mellanox EDR Infiniband, IBM / NVIDIA / Mellanox DOE/NNSA/LLNL United States	1,572,480	94.64	125.71	7,438

**Qui ci siamo
noi**



... in Italia?

www.top500.org

Rank	System	Cores	Rmax (PFlop/s)	Rpeak (PFlop/s)	Power (kW)
6	Leonardo - BullSequana XH2000, Xeon Platinum 8358 32C 2.6GHz, NVIDIA A100 SXM4 64 GB, Quad-rail NVIDIA HDR100 Infiniband, Atos EuroHPC/CINECA Italy	1,463,616	174.70	255.75	5,610

<https://leonardo-supercomputer.cineca.eu/>



Poco fuori **Bologna**, il supercomputer capace di eseguire milioni di miliardi di operazioni al secondo



Ma ... il calcolo ad alte prestazioni
è davvero necessario?

ovvero
è necessario usare un supercomputer?

- Ricerca su internet
- Trasporto
- Pubblicità e Marketing
- Servizi bancari e finanziari
- Media e intrattenimento
- Meteorologia
- Assistenza sanitaria
- Sicurezza informatica
- Formazione



Problemi caratterizzati dalla necessità di ottenere una **soluzione in tempo reale (o in tempo utile!)**



Ma ... il calcolo ad alte prestazioni
è davvero necessario?

ovvero
è necessario usare un supercomputer?



Una Ferrari o una
Panda ?



EURO 2.000.000,00



**EURO
18.000,00**



...dipende dall'uso!



In città':
traffico,
parcheggi,
consumo...

In autostrada:
velocita', affidabilita',
sicurezza,....



Ricerca su INTERNET



Google

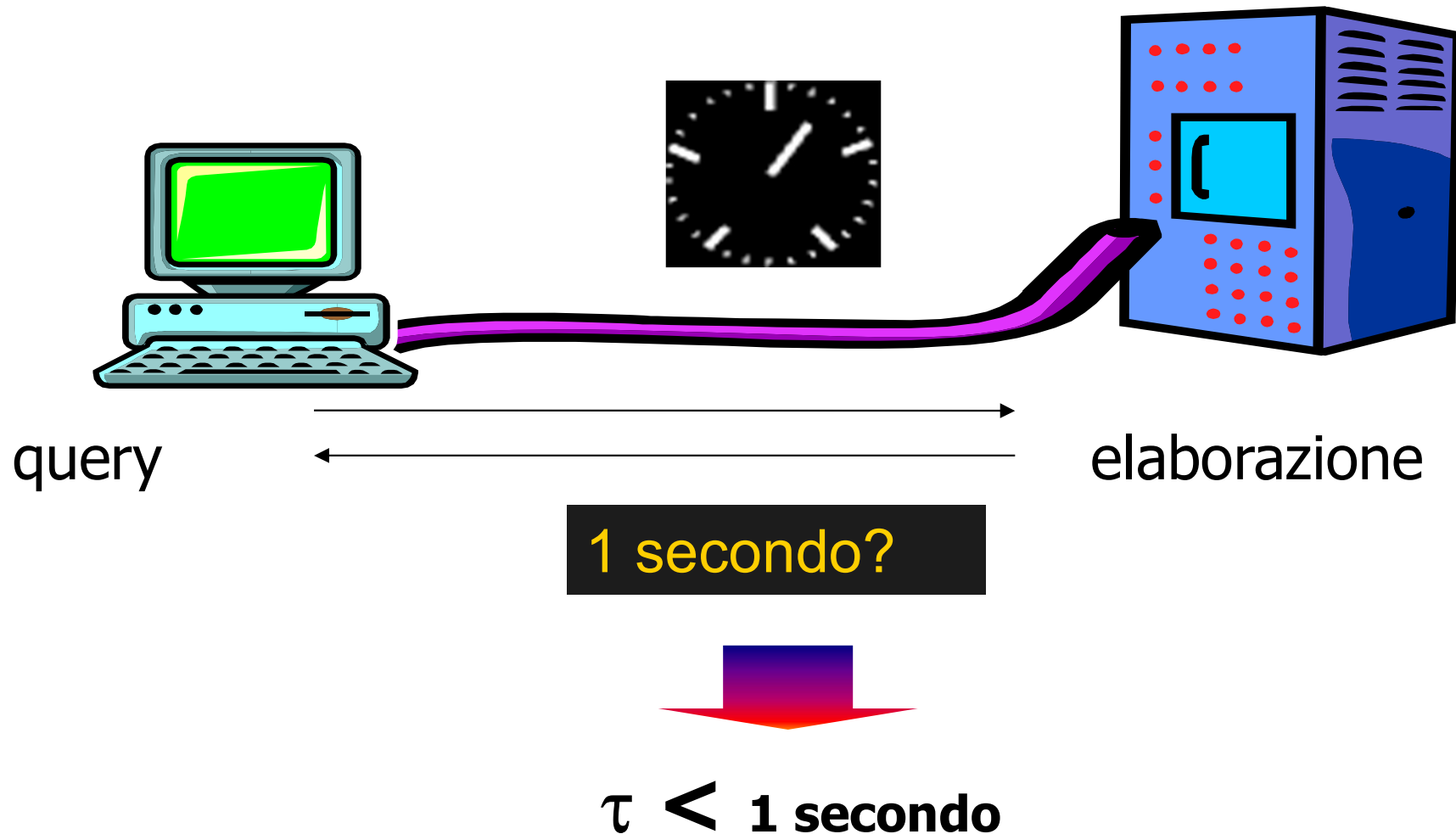
Google Search

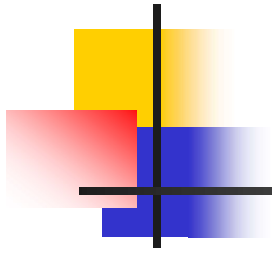
I'm Feeling Lucky

Google offered in: [Italiano](#)

Ogni giorno **circa un milione** di **persone**
interroga su Internet un **motore di ricerca**

Quanto si e' disposti ad aspettare?

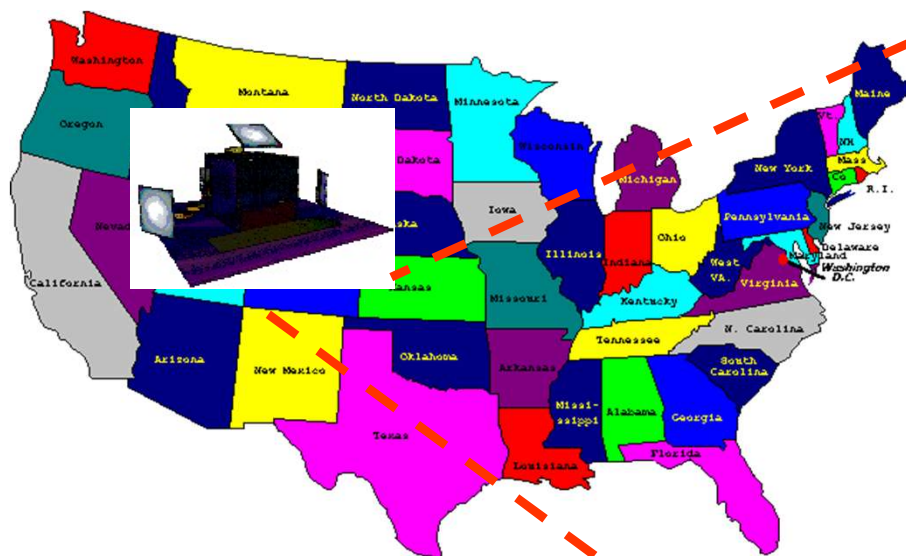


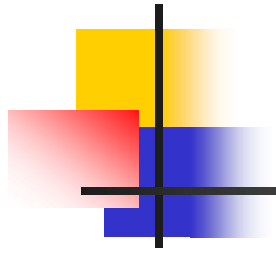


Come tutte le altre
tecnologie il
supercomputing nasce per
rispondere a esigenze
economiche inizialmente
connesse a scopi bellici

Difesa del Territorio

Nella Guerra del Golfo il Calcolo ad Alte Prestazioni ha guidato Patriot contro gli Scud Iracheni





Quanto si e' disposti ad aspettare?

Il missile deve essere distrutto **prima** che arrivi
sull'obiettivo



Entro 2 minuti dal lancio del missile nemico!

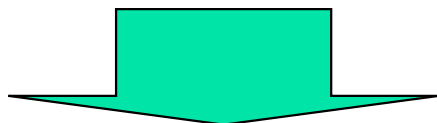
$$\tau < 2 \text{ minuti}$$

Previsioni meteo

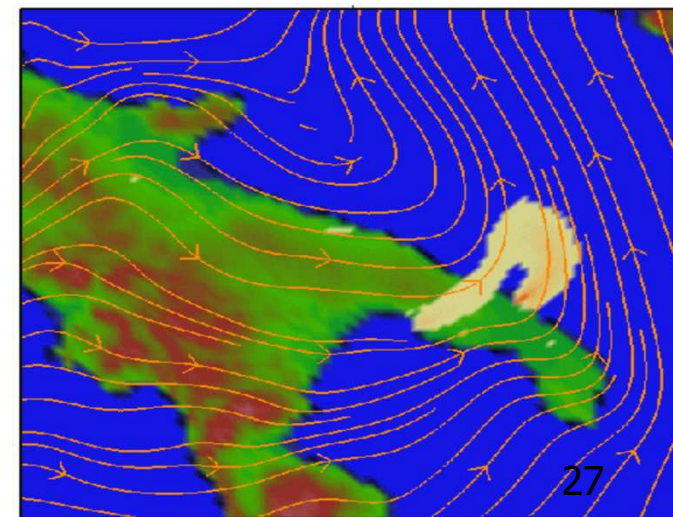
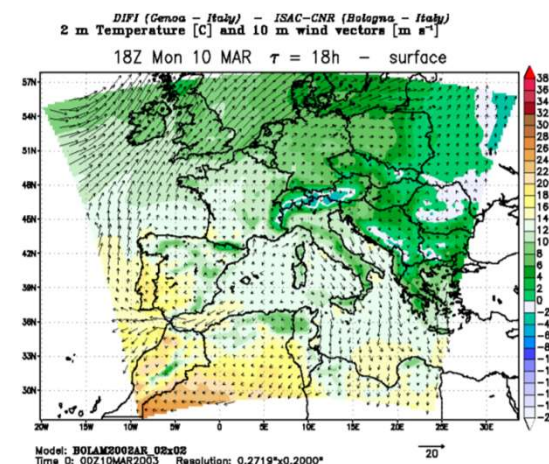


Laboratorio di Modellistica
Numerica e Calcolo Parallelo
labMNCP

- la superficie da monitorare è di **20 milioni di Km²**
per un'altezza sul livello del mare di **20 Km**
 $(20 \times 10^6 \text{ km}^2) \times 20 \text{ km} = 4 \times 10^8 \text{ km}^3$
- la risoluzione numerica prevede la discretizzazione
dello spazio 3D mediante cubi di lato 100 m:
in 1 km³ ci vogliono
 $10 \times 10 \times 10 = 10^3$ cubi



**$(4 \times 10^8) \times 10^3 = 4 \times 10^{11}$ cubi
da calcolare**

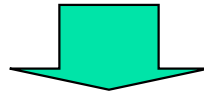




Previsioni meteorologiche

Una previsione effettiva deve fornire una risposta in al più mezz'ora

$$30 \text{ minuti} = 1.8 \times 10^3 \text{ sec}$$



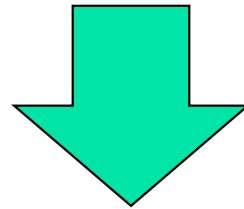
Che potenza di calcolo mi occorre per ottenere questo obiettivo?

$$\frac{2 \times 10^{17} \text{ flop}}{? \text{ flop/s}} = 1.8 \times 10^3 \text{ sec}$$



Previsioni meteorologiche

Il modello deve fornire le previsioni per i prossimi 2 giorni.



circa 2×10^{17} operazioni (flop)

Se volessimo eseguire la simulazione utilizzando
un laptop quad-core (10^{11} flop/s):

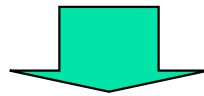
$$\frac{2 \times 10^{17} \text{ flop}}{10^{11} \text{ flop/s}} = \frac{2 \times 10^{17} \text{ flop}}{1 \times 10^{11} \text{ flop/s}} = 2 \times 10^6 \text{ sec} = 24 \text{ giorni!}$$



Previsioni meteorologiche

Una previsione effettiva deve fornire una risposta in al più mezz'ora

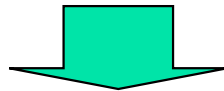
$$30 \text{ minuti} = 1.8 \times 10^3 \text{ sec}$$



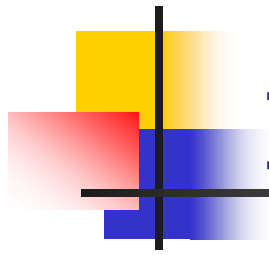
Che potenza di calcolo mi occorre per ottenere questo obiettivo?

$$\frac{2 \times 10^{17} \text{ flop}}{1 \times 10^{14} \text{ flop/s}} = 1.8 \times 10^3 \text{ sec}$$

>900 Tflops/s



Ci occorre un calcolatore che lavori a circa 1 Pflop/s



In sintesi

aumentare le prestazioni consente di:

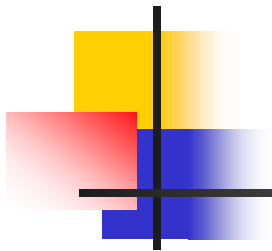
- Risolvere problemi in “tempo reale (utile)”
- Risolvere problemi di grandi dimensioni (larga scala)

Problemi su larga scala

- Ricerca su internet
- Trasporto
- Pubblicità e Marketing
- Servizi bancari e finanziari
- Media e intrattenimento
- Meteorologia
- Assistenza sanitaria
- Sicurezza informatica
- Formazione



Problemi caratterizzati dalla necessità di ottenere una
soluzione in tempo reale (o in tempo utile!)



Come ridurre i tempi di risposta
(turnaround time)
di una simulazione computazionale

?

Tempo di esecuzione di un software

Da centinaia di anni è nota la modalità per scrivere **software** (un codice in linguaggio macchina eseguibile dal computer) ovvero un programma che codifica una procedura seriale in una serie discreta di istruzioni eseguite in successione (**algoritmo**).



$$\tau = k \cdot T(N) \cdot \mu$$

$T(N)$ = complessità
computazionale dell'algoritmo

dipende dal metodo
risolutivo scelto

μ = tempo d'esecuzione di un'operazione f.p.

dipende dall'ambiente di calcolo

K è una costante moltiplicativa aleatoria che rappresenta ad esempio i tempi di I/O o i ritardi relativi alla scrittura in memoria

Come ridurre il tempo di esecuzione di un software?

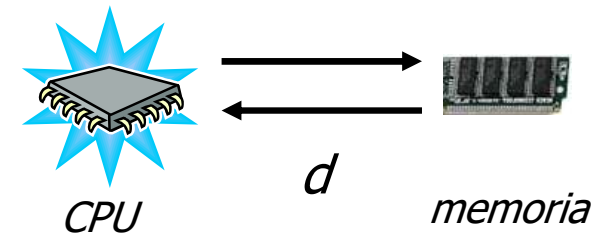
Negli ultimi anni la più grande sfida è stata ridurre questa quantità!



$$\tau = k \cdot T(N) \cdot \mu$$



riducendo μ
migliorando la tecnologia
(miniaturizzazione)



problemi di
surriscaldamento!!!

limiti
tecnologici

Come ridurre il tempo di esecuzione di un software?

Negli ultimi anni la più grande sfida è stata ridurre questa quantità!



$$\tau = k \cdot T(N) \cdot \mu$$



riducendo $T(N)$
ottimizzando l'algoritmo

risoluzione di un sistema diagonale

$$\begin{pmatrix} a_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & a_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & a_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix}$$

Algoritmo "immediato"

$$x_i = y_i / a_i \quad i = 1, \dots, n$$

$T(n)=n$

Non esiste un algoritmo
con complessità inferiore

E' possibile dimostrare
(teoria della complessità degli algoritmi)
che per alcune classi di problemi
esistono algoritmi con complessità
computazionale minima
(algoritmi ottimali)

limiti
teorici

Come ridurre il tempo di esecuzione di un software?

Negli ultimi anni la più grande sfida è stata ridurre questa quantità!



$$\tau = k \cdot T(N) \cdot \mu$$



riducendo K
modificando la tecnologia
(quantum computing)

computer con una diversa
rappresentazione numerica nella
memorizzazione dei dati
(accesso più rapido alla memoria).
Algoritmi quantistici:
importanti cambiamenti concettuali
degli algoritmi standard.



ancora
in fase
embrionale

Come ridurre il tempo di esecuzione di un software?

Negli ultimi anni la più grande sfida è stata ridurre questa quantità!



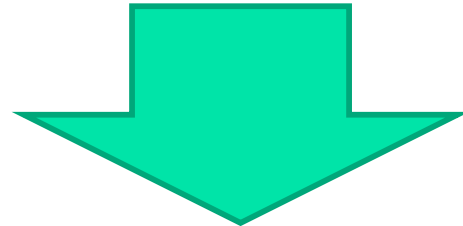
$$\tau = k \cdot T_{np}(N) \cdot \mu$$



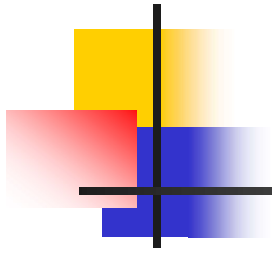
Calcolo Parallelo usando **np** unità processanti

Calcolo Parallelo

Il **calcolo parallelo** è una evoluzione del calcolo seriale che tenta di emulare ciò che spesso avviene nel mondo naturale: molteplici eventi complessi e inter-correlati che avvengono nello stesso tempo.

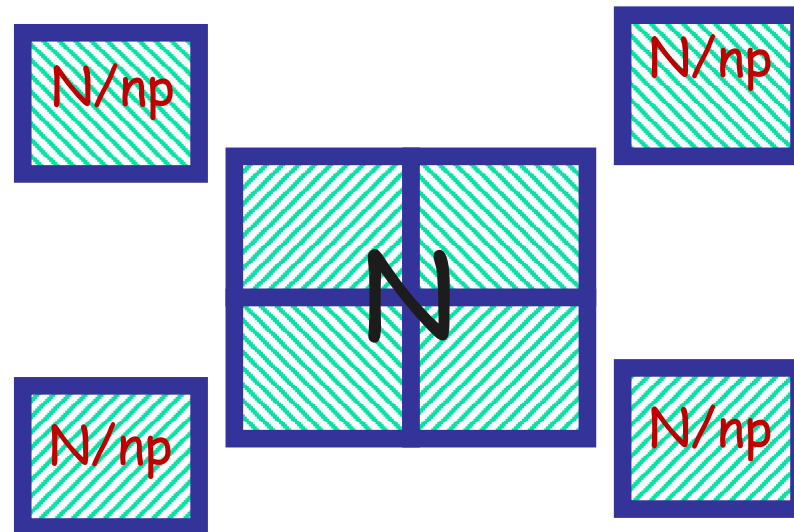


L'idea del **calcolo parallelo** si basa sull'impiego simultaneo di risorse di calcolo multiple per risolvere un unico problema, spezzandolo in parti discrete elaborabili contemporaneamente, ovvero che possono essere eseguite in modo seriale su **differenti CPU**.



Calcolo Parallelo

Decomporre un problema di dimensione N
in **np** sottoproblemi di dimensione N/\mathbf{np}
e risolverli **contemporaneamente**
usando **np** CPU



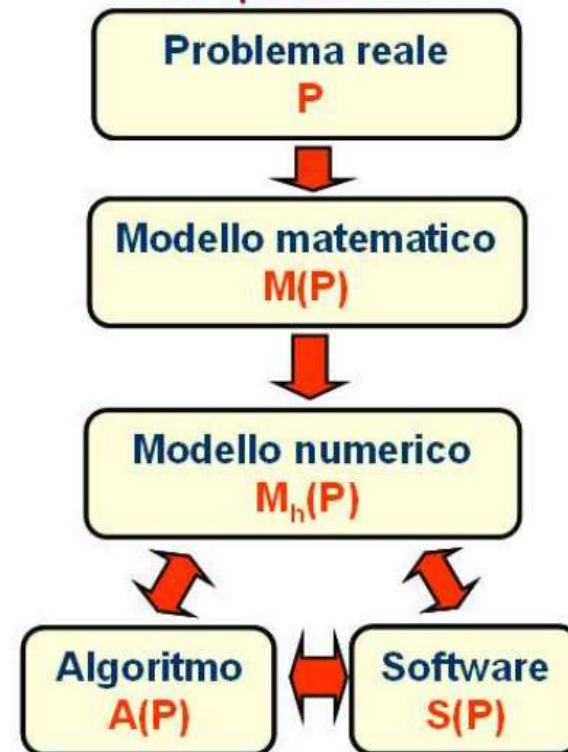
Sviluppo di appositi strumenti computazionali
hardware – software - algoritmi

Modellizzazione di problemi su larga scala

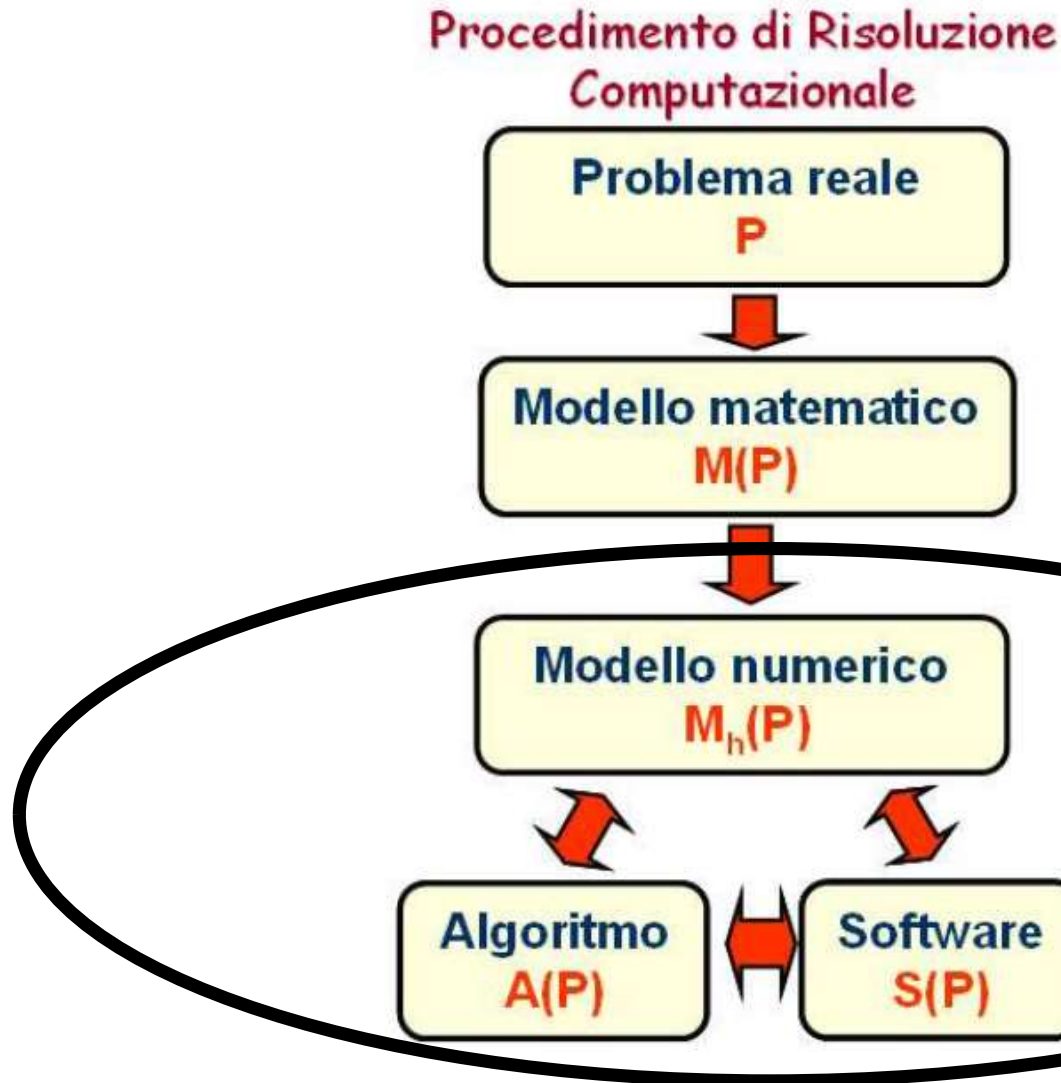


- Ricerca su internet
- Trasporto
- Pubblicità e Marketing
- Servizi bancari e finanziari
- Media e intrattenimento
- Meteorologia
- Assistenza sanitaria
- Sicurezza informatica
- Formazione

Procedimento di Risoluzione Computazionale

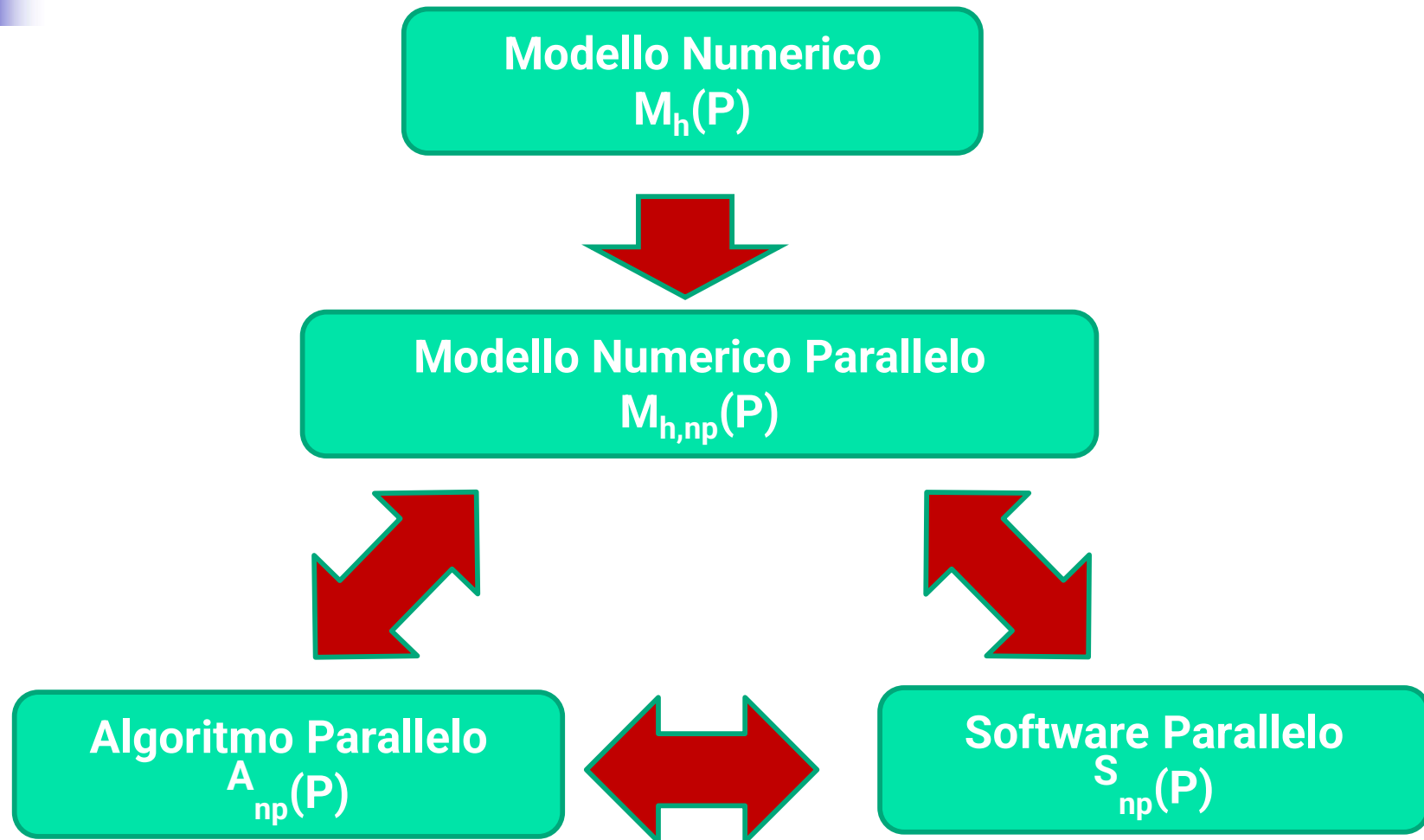


Modellizzazione di problemi su larga scala



Quando si progetta un algoritmo sequenziale oltre a concentrarsi sul problema è importante tenere conto dell'**esecutore**. Lo **sviluppo del software** deve essere ricondotto ad un insieme di passi elementari, per lo specifico ambiente di calcolo.

algoritmi e software paralleli



Anche in questo caso, per progettare un algoritmo parallelo, è fondamentale non perdere mai di vista quali siano le capacità intrinseche dell'architettura parallela a disposizione o necessaria.

Hardware per il Calcolo Parallelo

Per approcciarsi al calcolo parallelo è necessario, innanzitutto, avere una visione chiara di come è fatto l'hardware delle moderne architetture di calcolo avanzato.

