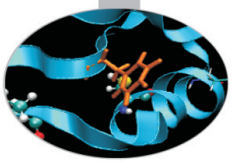
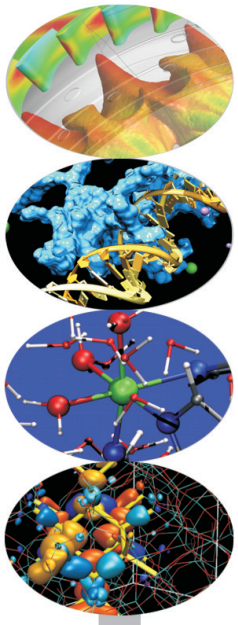
CINECA SCAI
SuperComputing Applications and Innovation



HPC Scientific programming: tools and techniques

G. Amati P. Lanucara
V. Ruggiero

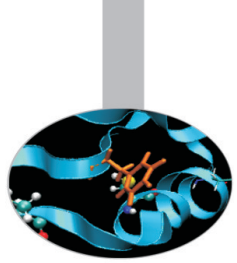
CINECA Roma - SCAI Department



Roma, 9-11 April 2014

CINECA

AGENDA DEL CORSO



9 aprile 2014

9.30-10.30 Architetture
10.30-13.00 La cache ed il sistema di memoria + esercitazioni
14.00-15.00 Pipeline + esercitazioni
15.00-17.00 Profilers + esercitazioni

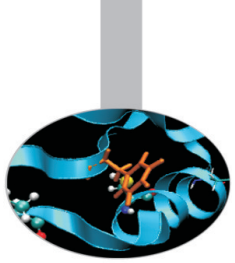
10 aprile 2014

9.30-13.00 Compilatori+esercitazioni
14.00-15.30 Librerie + esercitazioni
15.00-17.00 Floating-point +esercitazioni

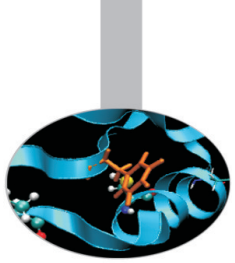
11 aprile 2014

9.30-11.00 Makefile + esercitazioni
11.00-13.00 Debugging+esercitazioni
14.00-17.00 Debugging+esercitazioni

Outline



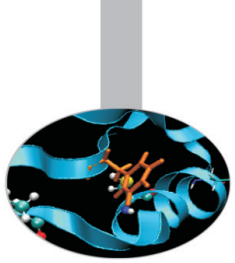
Quanto possono variare le prestazioni?



Prodotto matrice-matrice (misurato in secondi)

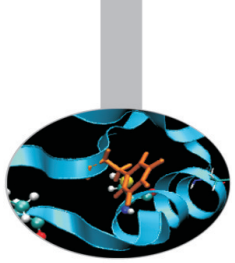
Precisione	singola	doppia
Loop incorretto	7500	7300
senza ottimizzazione	206	246
con ottimizzazione (-fast)	84	181
codice ottimizzato	23	44
Libreria ACML (seriale)	6.7	13.2
Libreria ACML (2 threads)	3.3	6.7
Libreria ACML (4 threads)	1.7	3.5
Libreria ACML (8 threads)	0.9	1.8
Pgi accelerator	3	5
CUBLAS	1.6	3.2

Sporchiamoci le mani



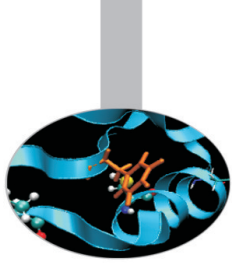
- Completare il loop principale del codice e verificare le prestazioni ottenute
- Usando il Fortran e/o il C
  - Che prestazioni sono state ottenute?
  - C'è differenza tra Fortran e C?
  - Cambiano le prestazioni cambiando compilatore?
  - E le opzioni di compilazione?
  - Cambiano le prestazioni se cambio l'ordine dei loop?
  - Posso riscrivere il loop in maniera efficiente?

Prodotto matrice-matrice



- Fortran o C
- Prodotto riga per colonna $C_{i,j} = A_{i,k} B_{k,j}$
- Temporizzazione:
  - Fortran: date_and_time (> 0.001")
  - C: clock (>0.05")
- Per matrici quadrate di dimensione n
  - Memoria richiesta (doppia precisione) $\approx (3 * n * n) * 8$
  - Operazioni totali $\approx 2 * n * n * n$
    - Bisogna accedere a n elementi delle due matrici origine per ogni elemento della matrice destinazione
    - n prodotti ed n somme per ogni elemento della matrice destinazione
  - Flops totali = $2 * n^3 / tempo$
- Verificare sempre i risultati :-)

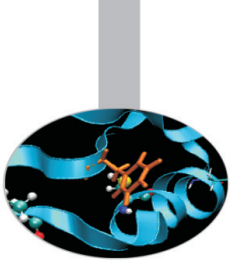
Misura delle prestazioni



- Stimare il numero di operazioni necessarie per l'esecuzione N_{Flop}
  - 1 FLOP equivale ad un'operazione di somma o moltiplicazione floating-point
  - Operazioni più complicate(divisione, radice quadrata, funzioni trigonometriche) vengono eseguite in modo più complesso e più lento
- Stimare il tempo necessario per l'esecuzione T_{es}
- Le prestazioni sono misurate contando il numero di operazioni floating-point eseguite per unità di tempo:

  $Perf = \frac{N_{Flop}}{T_{es}}$
  - l'unità di misura minima è 1 Floating-pointing Operation per secondo (FLOPS)
  - Normalmente si usano i multipli:
    - 1 MFLOPS= 10^6 FLOPS
    - 1 GFLOPS= 10^9 FLOPS
    - 1 TFLOPS= 10^{12} FLOPS

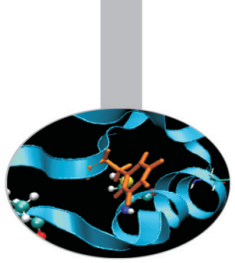
Esercitazioni



```
https://hpc-forge.cineca.it/files/CoursesDev/public/2014/
Introduction_to_HPC_Scientific_Programming:_tools_and_techniques/Rome/Intro_esercizi.tar


tar xvf Intro_esercizi.tar
```

- Struttura
  - src/eser_?/fortran
  - src/eser_?/c

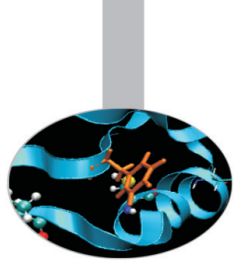
Prodotto Matrice-matrice



- Andare nella directory src/eser_1
- Completare il loop principale (prodotto righe per colonne) per il codice in Fortran(mm.f90) o il codice in C(mm.c)
- Misurare i tempi per eseguire il prodotto matrice-matrice per N=1024

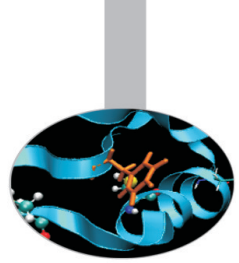
Linguaggio	tempo	Mflops
Fortran		
C		

Makefile



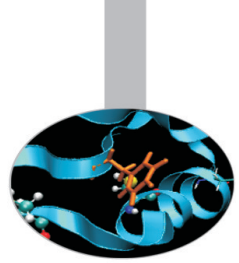
- Per compilare
  - make
- Per pulire
  - make clean
- Per cambiare opzioni
  - make "FC=ifort"
  - make "CC=icc"
  - make "OPT=fast"
- Per compilare in singola precisione
  - make "FC=ifort -DSINGLEPRECISION"
- Per compilare in doppia precisione
  - make "FC=ifort"

cat /proc/cpuinfo



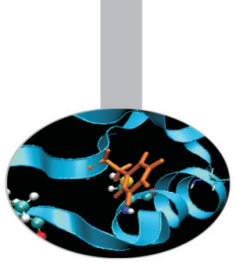
```
processor       : 0
vendor_id       : GenuineIntel
cpu family      : 6
model           : 37
model name      : Intel(R) Core(TM) i3 CPU       M 330  @ 2.13GHz
stepping        : 2
cpu MHz         : 933.000
cache size      : 3072 KB
physical id     : 0
siblings        : 4
core id         : 0
cpu cores       : 2
apicid          : 0
initial apicid  : 0
fpu             : yes
fpu_exception   : yes
cpuid level     : 11
wp              : yes
wp              : yes
flags           : fpu vme de pse tsc msr pae mce cx8
bogomips        : 4256.27
clflush size    : 64
cache_alignment : 64
address sizes   : 36 bits physical, 48 bits virtual
...
```

lscpu



```
Architecture:          x86_64
CPU op-mode(s):        32-bit, 64-bit
Byte Order:            Little Endian
CPU(s):                4
On-line CPU(s) list:   0-3
Thread(s) per core:    2
Core(s) per socket:    2
CPU socket(s):         1
NUMA node(s):          1
Vendor ID:             GenuineIntel
CPU family:            6
Model:                 37
Stepping:              2
CPU MHz:               933.000
BogoMIPS:              4255.78
Virtualization:        VT-x
L1d cache:             32K
L1i cache:             32K
L2 cache:              256K
L3 cache:              3072K
NUMA node0 CPU(s):     0-3
```

Hands-on: cluster PLX



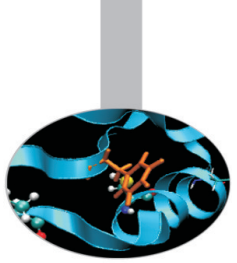
- Accedere al cluster PLX con le proprie credenziali

```
ssh -X <user_name>@login.plx.cineca.it
```

  - in questo modo si accede al cosiddetto nodo di front-end
  - il front-end guida l'utente per operare sui nodi di calcolo attraverso un sistema di code

```
Model: IBM iDataPlex DX360M3
Architecture: Linux Infiniband Cluster
Processors Type:
-Intel Xeon (Esa-Core Westmere) E5645 2.4 GHz (Compute)
-Intel Xeon (Quad-Core Nehalem) E5530 2.66 GHz (Service & Login)
Number of nodes: 274 Compute + 1 Login + 1 Service + 8 Fat +
                 6 RVN + 8 Storage  + 2 Management
Number of cores: 3288 (Compute)
Number of GPUs:528 nVIDIA Tesla M2070 + 20 nVIDIA Tesla M2070Q
RAM: 14 TB (48 GB/Compute node + 128GB/Fat node)
```

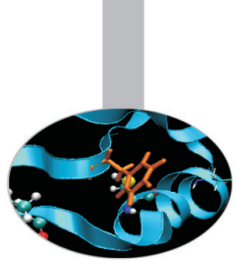
Hands-on: PLX e code



- Per testare le performance nei casi reali occorre usare i nodi calcolo (diversi da quelli di front-end!)
  - occorre lanciare il comando

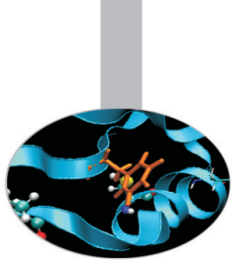
```
qsub -I -A train_cspR2014 -W group_list="train_cspR2014"
-l walltime=00:30:00 -lselect=1:ncpus=1 -q private
```

Hands-on: PLX e moduli



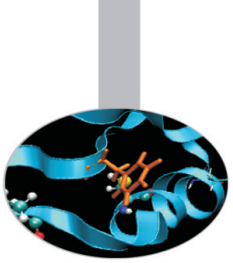
- Il software installato é organizzato in moduli
  - per poter usare i moduli della lista completa advanced (farlo come prima cosa!): **`module load profile/advanced`**
  - per avere la lista dei moduli disponibili: **`module av`**
  - per avere la lista dei moduli caricati: **`module li`**
  - per caricare un modulo, e.g: **`module load gnu/4.7.2`**
  - per scaricare un modulo, e.g: **`module unload gnu/4.7.2`**
  - per scaricare tutti i moduli caricati, e.g: **`module purge`**

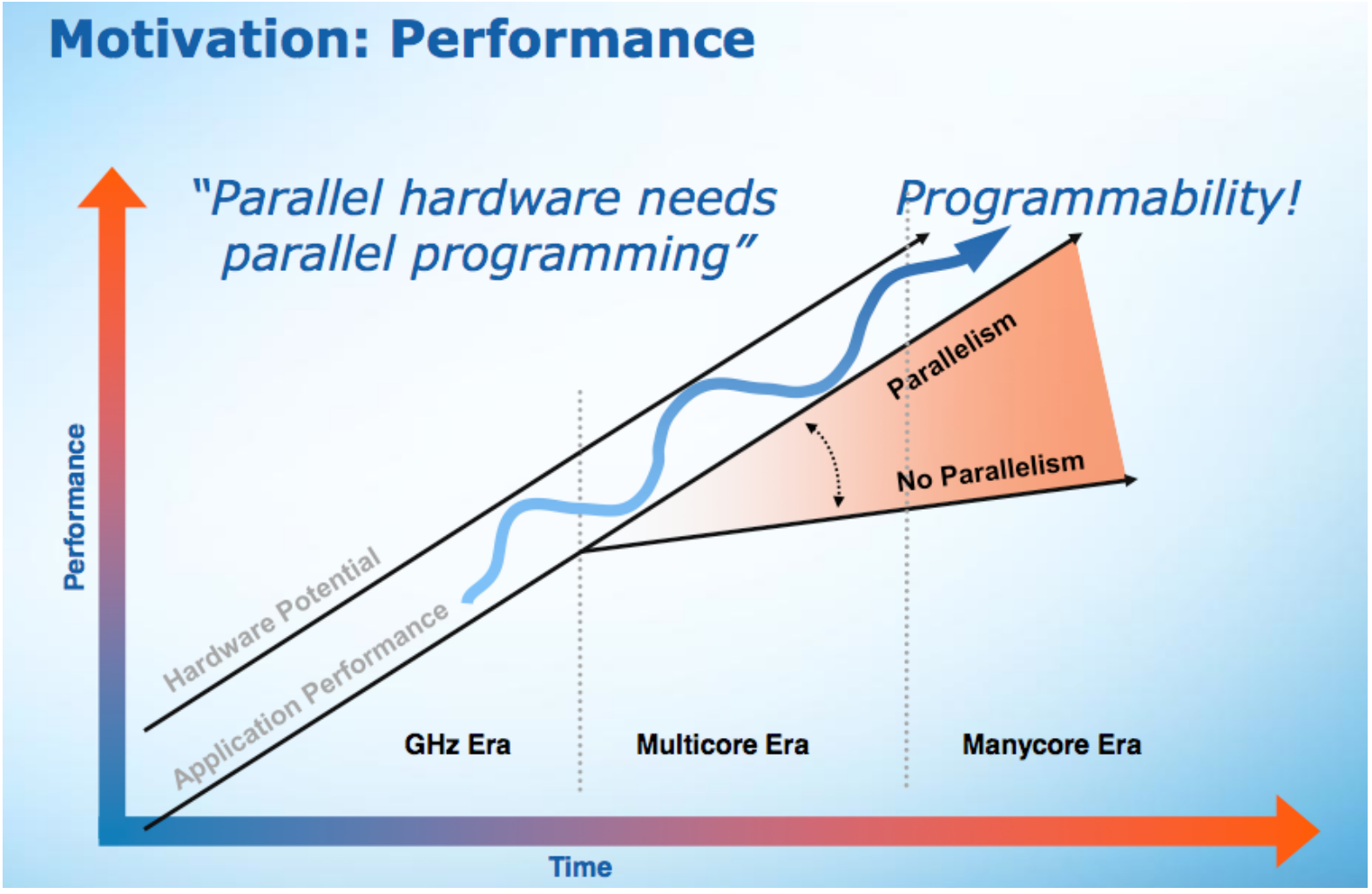
Prodotto matrice-matrice



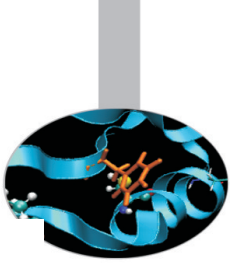
Qualche considerazione sui risultati ottenuti?

Qual è il margine di manovra?





Software development



Problem

Solution method

Algorithms

Programming

Source code

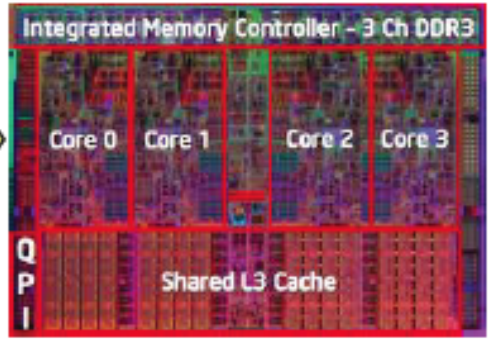
```
#include <stdio.h>
#define SIZE 1000
main(int argc, char** argv) {
  int A[SIZE], B[SIZE], C[SIZE];
  int i;

  for (i=0; i<SIZE; i++) {
    B[i] = i;
    C[i] = SIZE-i;
  }

  /* Add B and C */
  for (i=0; i<SIZE; i++) {
    A[i] = B[i]*C[i];
  }
```

Compiling

Compiled and optimized code

```
.globl main
        .type   main,@function
main:
        pushl %ebp
        movl %esp,%ebp
        subl $12004,%esp
        pushl %edi
        pushl %esi
        pushl %ebx
        nop
        movl $0,-12004(%ebp)
.L2:
        cmpl $999,-12004(%ebp)
        jle .L6
        jmp .L3
        .align 4
.L6:
        movl -12004(%ebp),%eax
        movl %eax,%edx
        leal 0(,%edx,4),%eax
        leal -4000(%ebp),%edx
        movl -12004(%ebp),%ecx
        movl %ecx,%ebx
        leal 0(,%ebx,4),%ecx
        leal -8000(%ebp),%ebx
        movl -12004(%ebp),%esi
        movl %esi,%edi
        leal 0(,%edi,4),%esi
        leal -12000(%ebp),%edi
        movl (%ecx,%ebx),%ecx
        imull (%esi,%edi),%ecx
        movl %ecx,(%eax,%edx)
.L4:
        incl -12004(%ebp)
        jmp .L2
        .align 4
.L3:
        leal -12016(%ebp),%esp
        popl %ebx

.Lfe1:
        .size   main,.Lfe1-main
        .ident  "GCC: (GNU) 2.8.1"
```

Execution

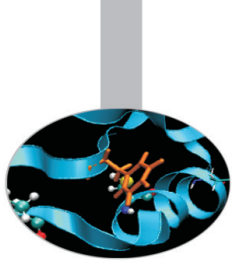


Result

Output

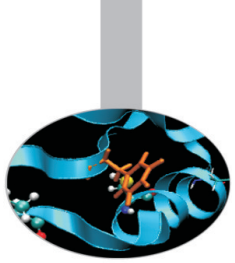
```
Hierarchical code: Plummer model

nbody      dtime       eps       theta     usequad     dtout       tstop
 1024    0.03125    0.0250       1.00       false    0.2500      2.0000

 tnow        Te+U        T/U       nttot      nbavg      ncavg     cputime
0.000     -0.2627     -0.4943      203185         84        114        0.00

          cm pos      0.0000     -0.0000      0.0000
          cm vel     -0.0000      0.0000      0.0000
          am vec      0.0057      0.0156     -0.0222

 tnow        Te+U        T/U       nttot      nbavg      ncavg     cputime
0.031     -0.2627     -0.4940      202260         81        116        0.01

          cm pos      0.0000     -0.0000      0.0000
          cm vel      0.0000     -0.0000      0.0000
          am vec      0.0057      0.0156     -0.0222

Time is:    3.5 seconds
```

Algoritmi



- Fondamentale è la scelta dell'algoritmo
  - algoritmo efficiente $\rightarrow$ buone prestazioni
  - algoritmo inefficiente $\rightarrow$ cattive prestazioni
- Se l'algortimo non è efficiente non ha senso tutto il discorso sulle prestazioni
- Regola d'oro
  - Curare quanto possibile la scelta dell'algoritmo prima della codifica, altrimenti c'è la possibilità di dover riscrivere!!!

Outline



Introduzione

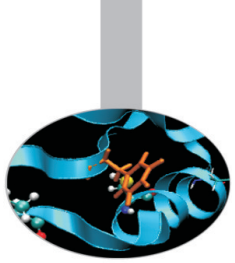
Architetture

La cache e il sistema di memoria

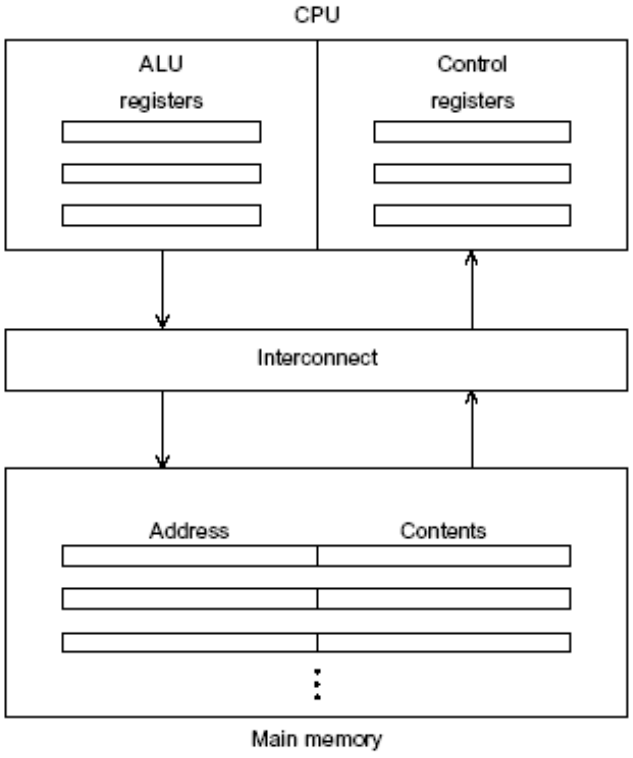
Pipeline

Profilers

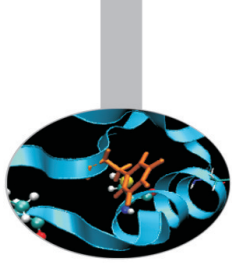
Architettura di Von Neuman



- Central processing unit (CPU)
  - Unità Logica Aritmetica (esegue le istruzioni)
  - Unità di controllo
  - Registri (memoria veloce)
- Interconnessione CPU RAM (Bus)
- Random Access Memory (RAM)
  - Indirizzo per accedere alla locazione di memoria
  - Contenuto della locazione (istruzione, dato)

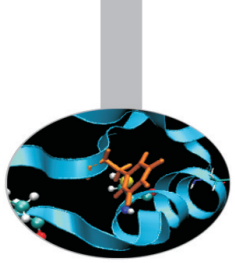


Architettura di Von Neuman



- I dati sono trasferiti dalla memoria alla CPU (fetch o read)
- I dati sono trasferiti dalla CPU alla memoria (written to memory o stored)
- La separazione di CPU e memoria è conosciuta come la «von Neumann bottleneck» perché è il bus di interconnessione che determina a che velocità si può accedere ai dati e alle istruzioni.
- Le moderne CPU sono in grado di eseguire istruzioni almeno cento volte più velocemente rispetto al tempo richiesto per recuperare (fetch) i dati nella RAM

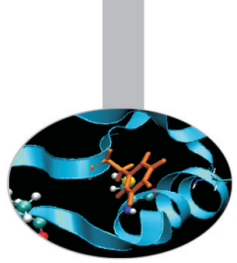
Evoluzione dei sistemi



Il «von Neumann bottleneck» è stato affrontato seguendo tre percorsi paralleli:

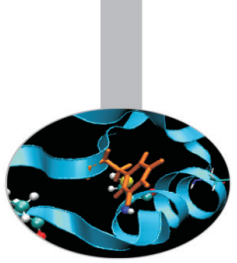
- Caching
  Memorie molto veloci presenti sul chip del processore.
  Esistono cache di primo, secondo e terzo livello.
- Virtual memory
  Sistema sviluppato per fare in modo che la RAM funzioni come una cache per lo storage di grosse moli di dati.
- Instruction level parallelism
  Tecnica utilizzata per avere più unitá funzionali nella CPU che eseguono istruzioni in parallelo (pipelining ,multiple issue)

Classificazione di Flynn

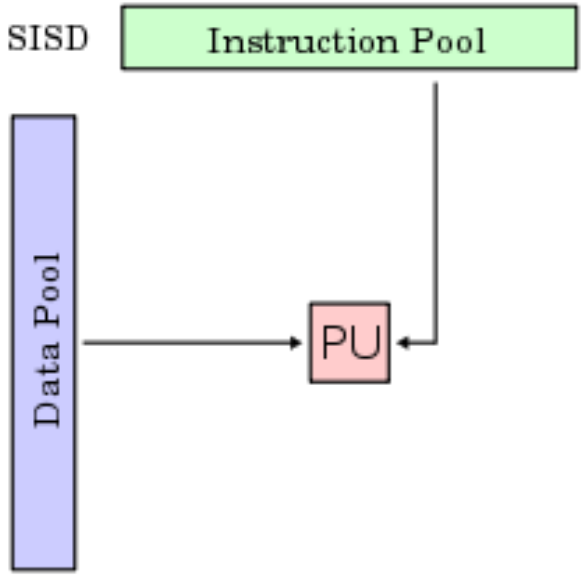


- Racchiude le architetture dei computer in base alla molteplicitá dell'hardware usato per manipolare lo stream di istruzioni e dati
  - SISD:single instruction, single data. Corrisponde alla classica achitettura di von Neumann, sistema scalare monoprocessore.
  - SIMD:single instruction, multiple data. Architetture vettoriali, processori vettoriali, GPU.
  - MISD:multiple instruction, single data. Non esistono soluzioni hardware che sfruttino questa architettura.
  - MIMD:multiple instruction, multiple data. Più processori/cores interpretano istruzioni diverse e operano su dati diversi.
- Le moderne soluzioni di calcolo sono date da una combinazione delle categorie previste da Flynn.

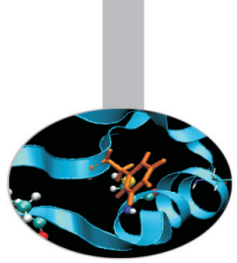
SISD



- Il classico sistema di von Neumann. Calcolatori con una sola unitá esecutiva ed una sola memoria. Il singolo processore obbedisce ad un singolo flusso di istruzioni (programma sequenziale) ed esegue queste istruzioni ogni volta su un singolo flusso di dati.
- I limiti di prestazione di questa architettura vengono ovviati aumentando il bus dati ed i livelli di memoria ed introducendo un parallelismo attraverso le tecniche di pipelining e multiple issue.

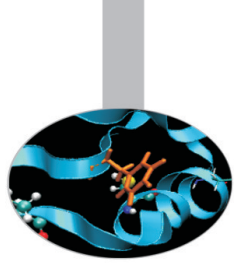


SIMD



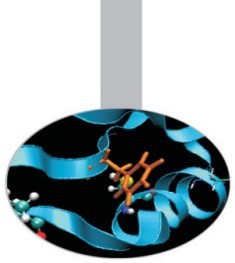
- La stessa istruzione viene eseguita in parallelo su dati differenti.
  - modello computazionale generalmente sincrono
- Processori vettoriali
  - molte ALU
  - registri vettoriali
  - Unitá Load/Store vettoriali
  - Istruzioni vettoriali
  - Memoria interleaved
  - OpenMP, MPI
- Graphical Processing Unit
  - GPU completamente programmabili
  - molte ALU
  - molte unitá Load/Store
  - molte SFU
  - migliaia di threads lavorano in parallelo
  - CUDA

MIMD



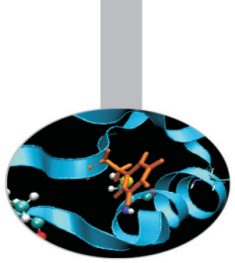
- Molteplici streams di istruzioni eseguiti simultaneamente su molteplici streams di dati
  - modello computazionale asincrono
- Cluster
  - molti nodi di calcolo (centinaia/migliaia)
  - più processori multicore per nodo
  - RAM condivisa sul nodo
  - RAM distribuita fra i nodi
  - livelli di memoria gerarchici
  - OpenMP, MPI, MPI+OpenMP

MIMD:Fermi Blue Gene/Q



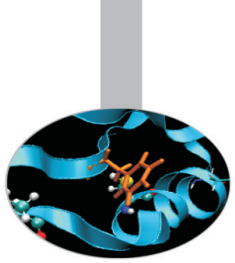
IBM-BlueGene /Q
Architecture: 10 BGQ Frame with 2 MidPlanes each
Front-end Nodes OS: Red-Hat EL 6.2
Compute Node Kernel: lightweight Linux-like kernel
Processor Type: IBM PowerA2, 16 cores, 1.6 GHz
Computing Nodes: 10.240
Computing Cores: 163.840
RAM: 16GB / node
Internal Network: Network interface
with 11 links ->5D Torus
Disk Space: more than 2PB of scratch space
Peak Performance: 2.1 PFlop/s

Cluster CPU GPU

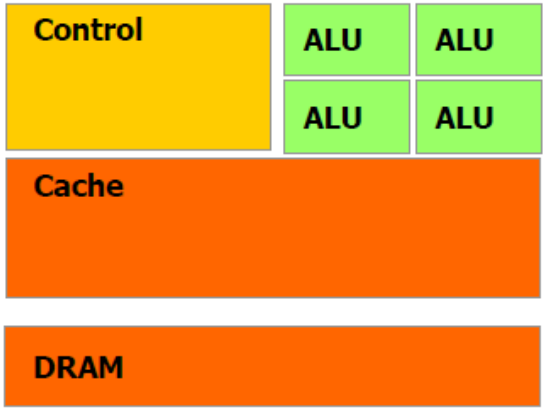


- Soluzioni ibride CPU multi-core + GPU many-core:
  - ogni nodo di calcolo è dotato di processori multicore e schede grafiche con processori dedicati per il GPU computing
  - notevole potenza di calcolo teorica sul singolo nodo
  - ulteriore strato di memoria dato dalla memoria delle GPU
  - OpenMP, MPI, CUDA e soluzioni ibride MPI+OpenMP, MPI+CUDA, OpenMP+CUDA, OpenMP+MPI+CUDA

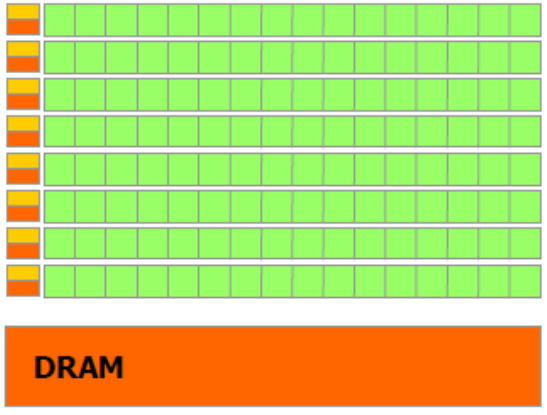
CPU vs GPU



- Le CPU sono processori general purpose in grado di risolvere qualsiasi algoritmo
  - threads in grado di gestire qualsiasi operazione ma pesanti, al massimo 1 thread per core computazionale.
- Le GPU sono processori specializzati per problemi che possono essere classificati come «intense data-parallel computations»
  - controllo di flusso molto semplice (control unit ridotta)
  - molti threads leggeri che lavorano in parallelo

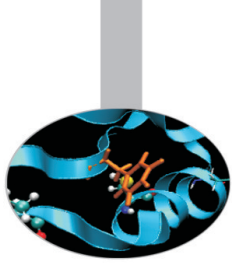


CPU

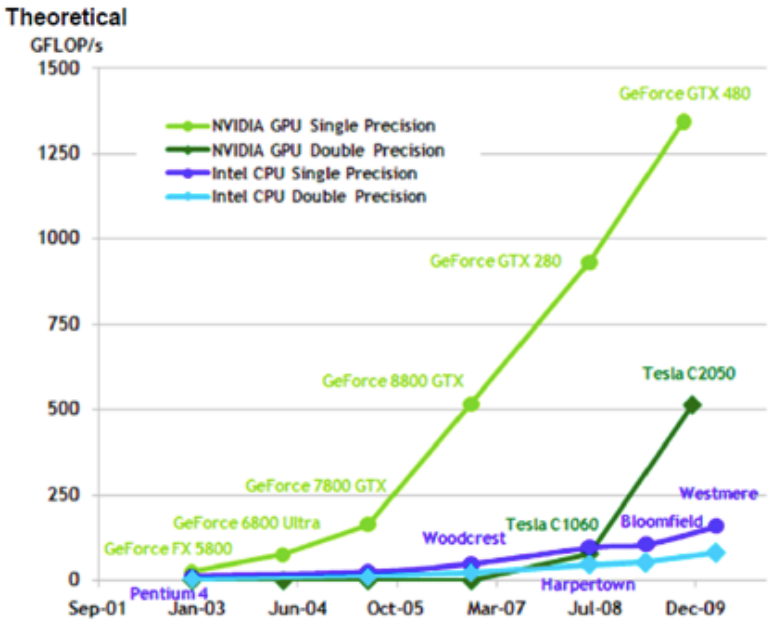


GPU

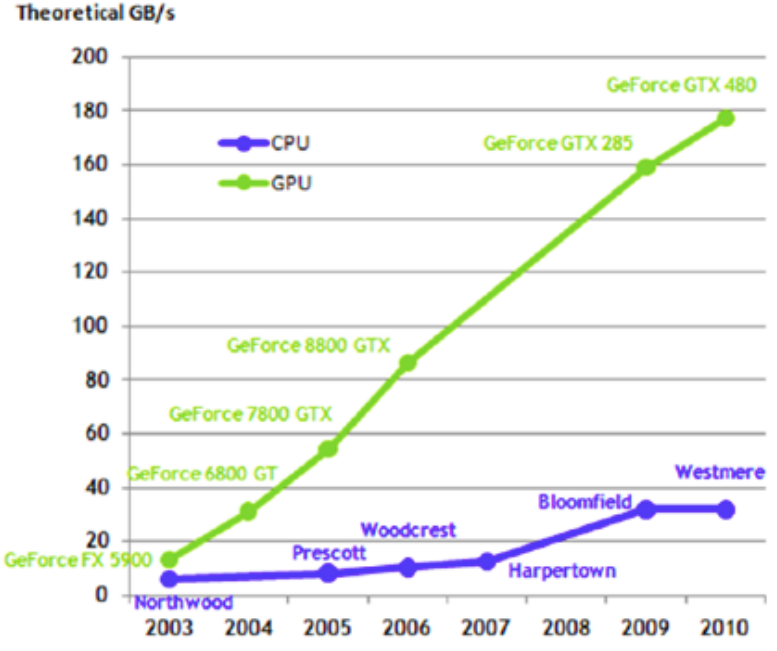
Multicore vs Manycore



- Una nuova direzione di sviluppo per l'architettura dei microprocessori:
  - incrementare la potenza di calcolo complessiva tramite l'aumento del numero di unitá di elaborazione piuttosto che della loro potenza
  - la potenza di calcolo e la larghezza di banda delle GPU ha sorpassato quella delle CPU di un fattore 10.

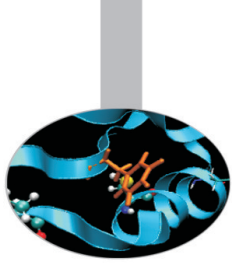


Numero di operazioni in virgola mobile al secondo per la CPU e la GPU



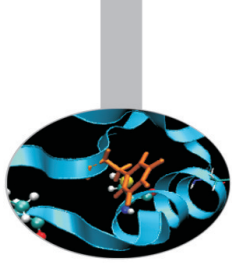
Larghezza di banda della memoria

INTEL MIC



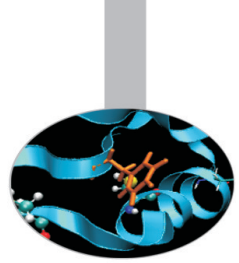
- Coprocessore Intel Xeon Phy
  - Basato su architettura Intel Many Integrated Core (MIC)
  - 60 core/1,053 GHz/240 thread
  - 8 GB di memoria e larghezza di banda di 320 GB/s
  - 1 TFLOPS di prestazioni di picco a doppia precisione
  - Istruzioni SIMD a 512 bit
  - Approcci tradizionali come MPI, OpenMP

Bandwidth



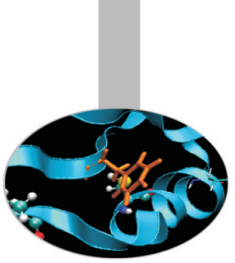
- La velocità con la quale è possibile trasferire i dati tra la memoria e il processore
- Si misura in numero di bytes che si possono traferire al secondo (Mb/s, Gb/s, etc..)
- A = B * C
  - leggere dalla memoria il dato B
  - leggere dalla memoria il dato C
  - calcolare il prodotto B * C
  - salvare il risultato in memoria, nella posizione della variabile A
- 1 operazione floating-point $\rightarrow$ 3 accessi in memoria

Stream

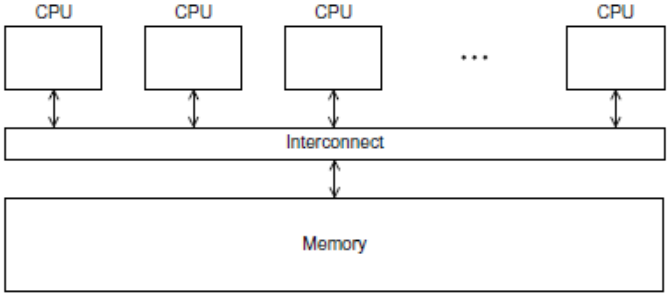


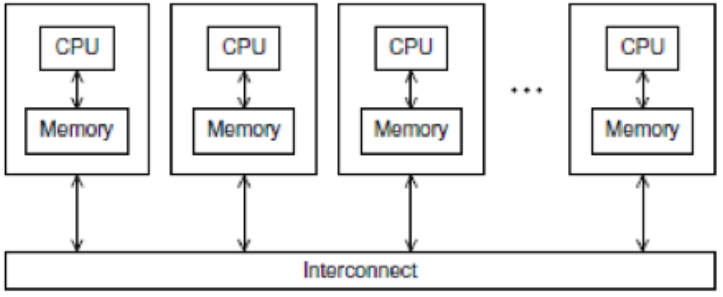
- Benchmark per la misura della bandwidth da e per la CPU
- Misura il tempo per
  - Copia a $\rightarrow$ c (copy)
  - Copia a*b $\rightarrow$ c (scale)
  - Somma a+b $\rightarrow$ c (add)
  - Somma a+b*c $\rightarrow$ d (triad)
- Misura della massima bandwith
- http://www.cs.virginia.edu/stream/ref.html

Condivisa Distibuita



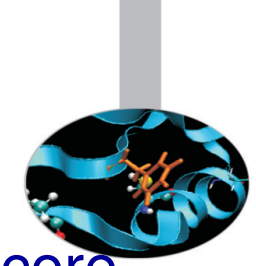
- Le architetture MIMD classiche e quelle miste CPU GPU sono suddivise in due categorie
  - Sistemi a memoria condivisa dove ogni singolo core ha accesso a tutta la memoria
  - Sistemi a memoria distribuita dove ogni processore ha la sua memoria privata e comunica con gli altri tramite scambio di messaggi.





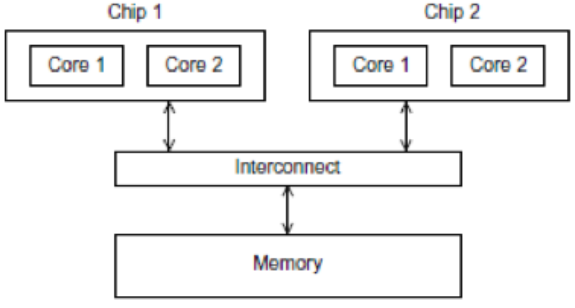
- I moderni sistemi multicore hanno memoria condivisa sul nodo e distribuita fra i nodi.

Memoria condivisa

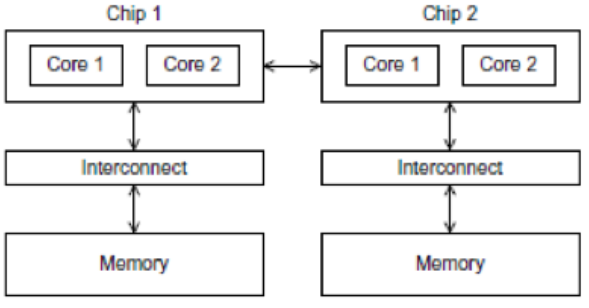


Nelle architetture a memoria condivisa con processori multicore vi sono generalmente due tipologie di accesso alla memoria principale

- Uniform Memory Access dove tutti i cores sono direttamente collegati con la stessa priorità alla memoria principale tramite il sistema di interconnessione
- Non Uniform Memory Access dove ogni processore multicore può avere accesso privilegiato ad un blocco di memoria e accesso secondario agli altri blocchi.

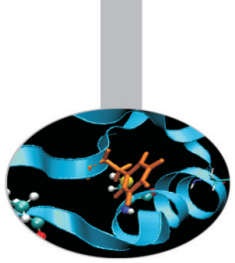


UMA



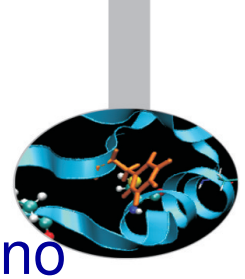
NUMA

UMA NUMA



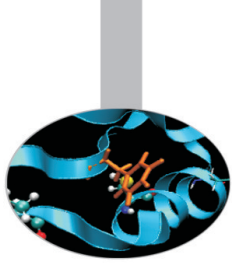
- Problemi principali:
  - se un processo o thread viene trasferito da una CPU ad un'altra, va perso tutto il lavoro speso per usare bene la cache
  - macchine UMA: processi "memory intensive" su più CPU contendono per il bus, rallentandosi a vicenda
  - macchine NUMA: codice eseguito da una CPU con i dati nella memoria di un'altra portano a rallentamenti
- Soluzioni:
  - binding di processi o thread alle CPU
  - memory affinity
  - su AIX, variabile di ambiente MEMORY_AFFINITY
  - su kernel che lo supportano: numactl

RETI



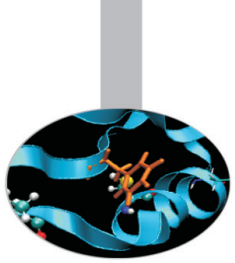
- Tutti i sistemi caratterizzati da elevate potenze di calcolo sono composti da diversi nodi, a memoria condivisa sul singolo nodo e distribuita fra i nodi
  - i nodi sono collegati fra di loro da topologie di interconnessione più o meno complesse e costose
- Le reti di interconnessione commerciali maggiormente utilizzate sono
  - Gigabit Ethernet : la più diffusa, basso costo, basse prestazioni
  - Infiniband : molto diffusa, elevate prestazioni, costo elevato (50% del costo di un cluster)
  - Myrinet : sempre meno diffusa dopo l'avvento di infiniband, vi sono comunque ancora sistemi HPC molto importanti che la utilizzano
- Reti di interconnessione di nicchia
  - Quadrics
  - Cray

www.top500.org



Rank	Site	System	Cores	Rmax (TFlop/s)	Rpeak (TFlop/s)	Power (kW)
1	National Super Computer Center in Guangzhou China	**Tianhe-2 (MilkyWay-2)** - TH-IVB-FEP Cluster, Intel Xeon E5-2692 12C 2.200GHz, TH Express-2, Intel Xeon Phi 31S1P NUDT	3,120,000	33,862.7	54,902.4	17,808
2	DOE/SC/Oak Ridge National Laboratory United States	**Titan** - Cray XK7 , Opteron 6274 16C 2.200GHz, Cray Gemini interconnect, NVIDIA K20x Cray Inc.	560,640	17,590.0	27,112.5	8,209
3	DOE/NNSA/LLNL United States	**Sequoia** - BlueGene/Q, Power BQC 16C 1.60 GHz, Custom IBM	1,572,864	17,173.2	20,132.7	7,890
4	RIKEN Advanced Institute for Computational Science (AICS) Japan	K computer, SPARC64 VIIIfx 2.0GHz, Tofu interconnect Fujitsu	705,024	10,510.0	11,280.4	12,660
5	DOE/SC/Argonne National Laboratory United States	**Mira** - BlueGene/Q, Power BQC 16C 1.60GHz, Custom IBM	786,432	8,586.6	10,066.3	3,945
6	Swiss National Supercomputing Centre (CSCS) Switzerland	**Piz Daint** - Cray XC30, Xeon E5-2670 8C 2.600GHz, Aries interconnect , NVIDIA K20x Cray Inc.	115,984	6,271.0	7,788.9	2,325
15	CINECA Italy	**Fermi** - BlueGene/Q, Power BQC 16C 1.60GHz, Custom IBM	163840	1788.9	2097.2	822

Outline



Introduzione

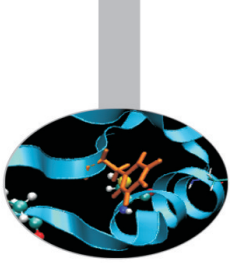
Architetture

La cache e il sistema di memoria

Pipeline

Profilers

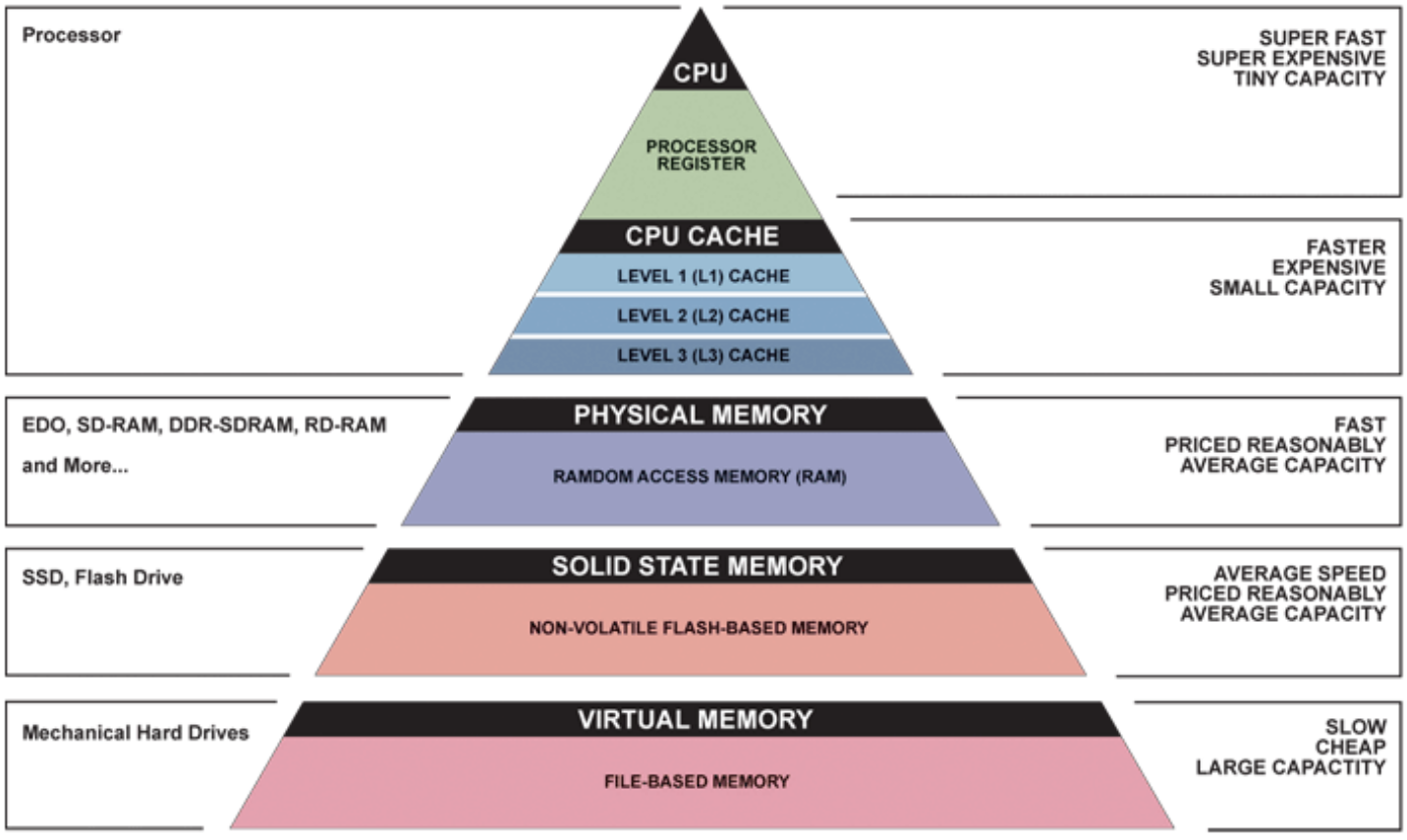
Il sistema di memoria



- Capacità di calcolo delle CPU 2× ogni 18 mesi
- Velocità di accesso alla RAM 2× ogni 120 mesi
- Inutile ridurre numero e costo delle operazioni se i dati non arrivano dalla memoria

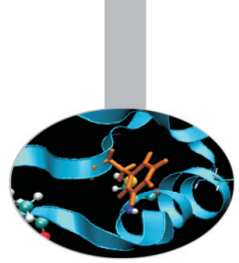
- Soluzione: memorie intermedie veloci
- Il sistema di memoria è una struttura profondamente gerarchica
- La gerarchia è trasparente all'applicazione, i suoi effetti no

La gerachia di memoria



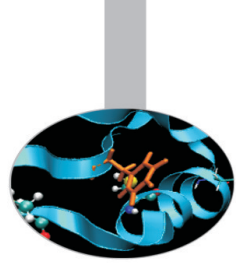
▲ Simplified Computer Memory Hierarchy
Illustration: Ryan J. Leng

La Cache



Perché questa gerarchia?

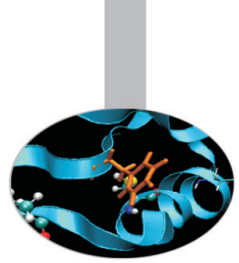
La Cache



Perché questa gerarchia?

Non servono tutti i dati disponibili subito

La Cache

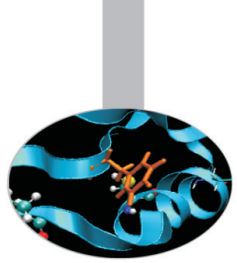


Perché questa gerarchia?

Non servono tutti i dati disponibili subito

La soluzione?

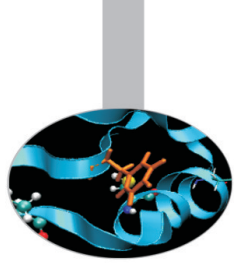
La Cache



Perché questa gerarchia?
Non servono tutti i dati disponibili subito
La soluzione?

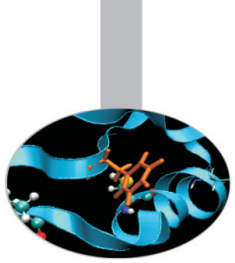
- La cache è composta di uno (o più livelli) di memoria intermedia, abbastanza veloce ma piccola (kB $\div$ MB)
- Principio fondamentale: si lavora sempre su un sottoinsieme ristretto dei dati
  - dati che servono $\rightarrow$ nella memoria ad accesso veloce
  - dati che (per ora) non servono $\rightarrow$ nei livelli più lenti
- Regola del pollice:
  - il 10% del codice impiega il 90% del tempo
- Limitazioni
  - accesso casuale senza riutilizzo
  - non è mai abbastanza grande . . .
  - più è veloce, più scalda e . . . costa $\rightarrow$ gerachia di livelli intermedi.

La Cache



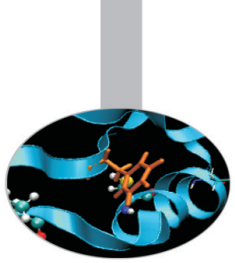
- La CPU accede al (più alto) livello di cache:
- Il controllore della cache determina se l'elemento richiesto è effettivamente presente in cache:
  - Si: trasferimento fra cache e CPU
  - No: Carica il nuovo dato in cache; se la cache è piena, applica la politica di rimpiazzamento per caricare il nuovo dato al posto di uno di quelli esistenti
- Lo spostamento di dati tra memoria principale e cache non avviene per parole singole ma per blocchi denominati linee di cache
- blocco = minima quantità d'informazione trasferibile fra due livelli di memoria (fra due livelli di cache, o fra RAM e cache)

Rimpiazzamento:principi di località



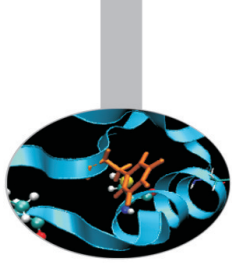
- Località spaziale dei dati
  - vi è alta la probabilità di accedere, entro un breve intervallo di tempo, a celle di memoria con indirizzo vicino (es.: istruzioni in sequenza; dati organizzati in vettori o matrici a cui si accede sequenzialmente, etc.).

Rimpiazzamento:principi di località



- Località spaziale dei dati
  - vi è alta la probabilità di accedere, entro un breve intervallo di tempo, a celle di memoria con indirizzo vicino (es.: istruzioni in sequenza; dati organizzati in vettori o matrici a cui si accede sequenzialmente, etc.).
  - Viene sfruttata leggendo normalmente più dati di quelli necessari (un intero blocco) con la speranza che questi vengano in seguito richiesti.

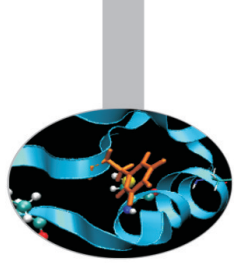
Rimpiazzamento:principi di località



- Località spaziale dei dati
  - vi è alta la probabilità di accedere, entro un breve intervallo di tempo, a celle di memoria con indirizzo vicino (es.: istruzioni in sequenza; dati organizzati in vettori o matrici a cui si accede sequenzialmente, etc.).
  - Viene sfruttata leggendo normalmente più dati di quelli necessari (un intero blocco) con la speranza che questi vengano in seguito richiesti.

- Località temporale dei dati
  - vi è alta probabilità di accedere nuovamente, entro un breve intervallo di tempo, ad una cella di memoria alla quale si è appena avuto accesso (es: ripetuto accesso alle istruzioni del corpo di un ciclo sequenzialmente, etc.)

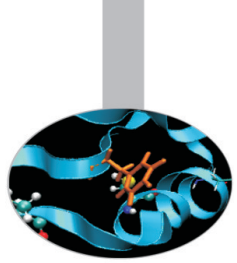
Rimpiazzamento:principi di località



- Località spaziale dei dati
  - vi è alta la probabilità di accedere, entro un breve intervallo di tempo, a celle di memoria con indirizzo vicino (es.: istruzioni in sequenza; dati organizzati in vettori o matrici a cui si accede sequenzialmente, etc.).
  - Viene sfruttata leggendo normalmente più dati di quelli necessari (un intero blocco) con la speranza che questi vengano in seguito richiesti.

- Località temporale dei dati
  - vi è alta probabilità di accedere nuovamente, entro un breve intervallo di tempo, ad una cella di memoria alla quale si è appena avuto accesso (es: ripetuto accesso alle istruzioni del corpo di un ciclo sequenzialmente, etc.)
  - viene sfruttata decidendo di rimpiazzare il blocco utilizzato meno recentemente.

Rimpiazzamento:principi di località

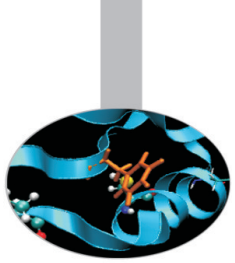


- Località spaziale dei dati
  - vi è alta la probabilità di accedere, entro un breve intervallo di tempo, a celle di memoria con indirizzo vicino (es.: istruzioni in sequenza; dati organizzati in vettori o matrici a cui si accede sequenzialmente, etc.).
  - Viene sfruttata leggendo normalmente più dati di quelli necessari (un intero blocco) con la speranza che questi vengano in seguito richiesti.

- Località temporale dei dati
  - vi è alta probabilità di accedere nuovamente, entro un breve intervallo di tempo, ad una cella di memoria alla quale si è appena avuto accesso (es: ripetuto accesso alle istruzioni del corpo di un ciclo sequenzialmente, etc.)
  - viene sfruttata decidendo di rimpiazzare il blocco utilizzato meno recentemente.

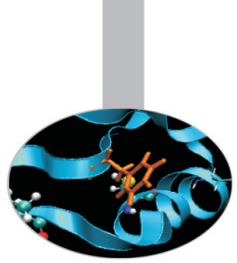
Dato richiesto dalla CPU viene mantenuto in cache insieme a celle di memoria contigue il più a lungo possibile.

Cache: qualche definizione



- Hit: l'elemento richiesto dalla CPU è presente in cache
- Miss: l'elemento richiesto dalla CPU non è presente in cache
- Hit rate: frazione degli accessi a memoria ricompensati da uno hit (cifra di merito per le prestazioni della cache)
- Miss rate: frazione degli accessi a memoria cui risponde un miss (miss rate = 1-hit rate)
- Hit time: tempo di accesso alla cache in caso di successo (include il tempo per determinare se l'accesso si conclude con hit o miss)
- Miss penalty: tempo necessario per sostituire un blocco in cache con un altro blocco dalla memoria di livello inferiore (si usa un valore medio)
- Miss time: = miss penalty + hit time, tempo necessario per ottenere l'elemento richiesto in caso di miss.

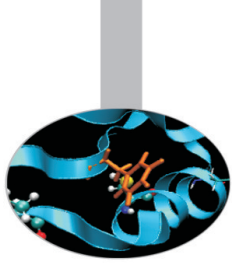
Cache:qualche stima quantitativa



Livello	costo di accesso
L1	1 ciclo di clock
L2	7 cicli di clock
RAM	36 cicli di clock

- 100 accessi con 100% cache hit: $\rightarrow$ t=100
- 100 accessi con 5% cache miss in L1: $\rightarrow$ t=130
- 100 accessi con 10% cache miss:in L1 $\rightarrow$ t=160
- 100 accessi con 10% cache miss:in L2 $\rightarrow$ t=450
- 100 accessi con 100% cache miss:in L2 $\rightarrow$ t=3600

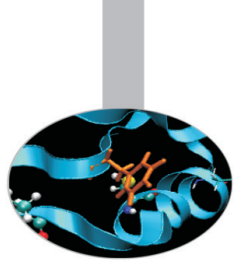
Cache miss in tutti i livelli



1. cerco due dati, A e B
2. cerco A nella cache di primo livello (L1) O(1) cicli
3. cerco A nella cache di secondo livello (L2) O(10) cicli
4. copio A dalla RAM alla L2 alla L1 ai registri O(10) cicli
5. cerco B nella cache di primo livello (L1) O(1) cicli
6. cerco B nella cache di secondo livello (L2) O(10) cicli
7. copio B dalla RAM alla L2 alla L1 ai registri O(10) cicli
8. eseguo l'operazione richiesta

O(100) cicli di overhead!!!

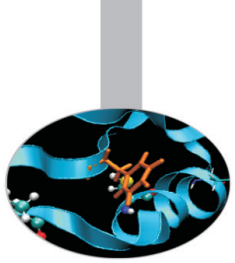
Cache hit in tutti i livelli



- cerco i due dati, A e B
- cerco A nella cache di primo livello(L1) O(1) cicli
- cerco B nella cache di primo livello(L1) O(1) cicli
- eseguo l'operazione richiesta

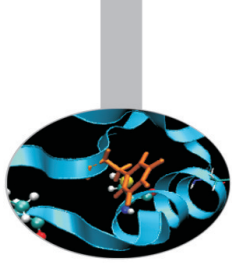
O(1) cicli di overhead

SRAM vs. DRAM



- Dynamic RAM (DRAM) memoria centrale
  - Una cella di memoria è composta da 1 transistor
  - Economica
  - Ha bisogno di essere "ricaricata"
    - I dati non sono accessibili nella fase di ricarica
- Static RAM (SRAM) memoria cache
  - Una cella di memoria è composta da 6-7 transistor
  - Costosa
  - Non ha bisogno di "ricarica"
    - I dati sono sempre accessibili

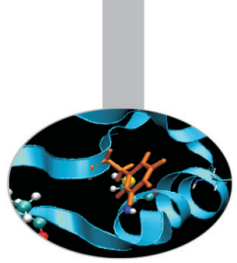
Misura prestazioni:esempio



```
float sum = 0.0f;
  for (i = 0; i < n; i++)
    sum = sum + x[i]*y[i];
```

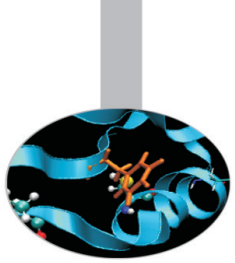
- Ad ogni iterazione viene eseguita una somma ed una moltiplicazione floating-point
- Il numero di operazioni è $2 \times n$

Tempo di esecuzione T_{es}



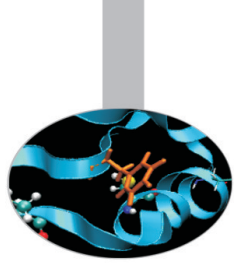
- $T_{es} = N_{flop} * t_{flop}$
- $N_{flop} \rightarrow$ Algoritmo

Tempo di esecuzione T_{es}



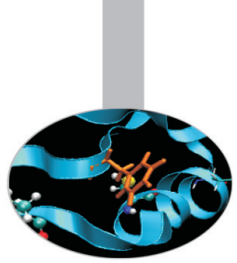
- $T_{es} = N_{flop} * t_{flop}$
- $N_{flop} \rightarrow$ Algoritmo
- $t_{flop} \rightarrow$ Hardware

Tempo di esecuzione T_{es}



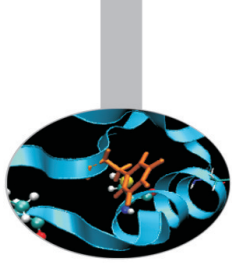
- $T_{es} = N_{flop} * t_{flop}$
- $N_{flop} \rightarrow$ Algoritmo
- $t_{flop} \rightarrow$ Hardware
- Considera solamente il tempo di esecuzione in memoria
- Trascuro qualcosa?

Tempo di esecuzione T_{es}



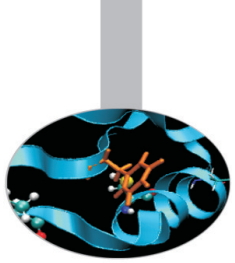
- $T_{es} = N_{flop} * t_{flop}$
- $N_{flop} \rightarrow$ Algoritmo
- $t_{flop} \rightarrow$ Hardware
- Considera solamente il tempo di esecuzione in memoria
- Trascuro qualcosa?
- t_{mem} il tempo di accesso in memoria.

Per cui . . .



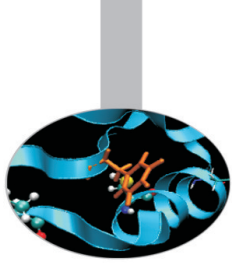
- $T_{es} = N_{flop} * t_{flop} + N_{mem} * t_{mem}$
- $t_{mem} \rightarrow$ Hardware
- Qual è l'impatto di N_{mem} sulle performance?

Impatto di N_{mem}



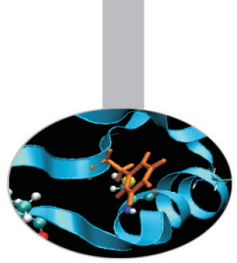
- $Perf = \frac{N_{Flop}}{T_{es}}$
- per $N_{mem} = 0 \rightarrow Perf^* = \frac{1}{t_{flop}}$
- per $N_{mem} > 0 \rightarrow Perf = \frac{Perf^*}{1 + \frac{N_{mem} * t_{mem}}{N_{flop} * t_{flop}}}$
- Fattore di decadimento delle performance
- $\frac{N_{mem}}{N_{flop}} * \frac{t_{mem}}{t_{flop}}$
- Come posso avvicinarmi alle prestazioni di picco della macchina?

Impatto di N_{mem}



- $Perf = \frac{N_{Flop}}{T_{es}}$
- per $N_{mem} = 0 \rightarrow Perf^* = \frac{1}{t_{flop}}$
- per $N_{mem} > 0 \rightarrow Perf = \frac{Perf^*}{1 + \frac{N_{mem} * t_{mem}}{N_{flop} * t_{flop}}}$
- Fattore di decadimento delle performance
- $\frac{N_{mem}}{N_{flop}} * \frac{t_{mem}}{t_{flop}}$
- Come posso avvicinarmi alle prestazioni di picco della macchina?
- Riducendo gli accesssi alla memoria.

Località spaziale: ordine di accesso

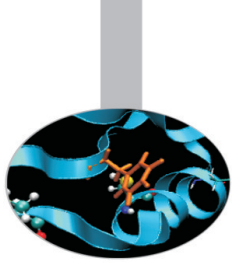


- Prodotto di matrici in doppia precisione 1024X1024
- MFlops misurati su eurora (Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2658 0 @ 2.10GHz)
- compilatore gfortran (4.4.6) con ottimizzazione -O0

Ordine indici	Fortran	C
i,j,k	234	262
i,k,j	186	357
j,k,i	234	195
j,i,k	347	260
k,j,i	340	195
k,i,j	186	357

L'ordine di accesso più efficiente dipende dalla disposizione dei dati in memoria e non dall'astrazione operata dal linguaggio.

Layout degli array in memoria

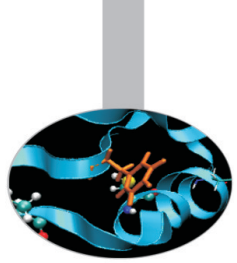


- Memoria $\rightarrow$ sequenza lineare di locazioni elementari
- Matrice A, elemento a_{ij}: i indice di riga, j indice di colonna
- Le matrici sono rappresentate con array

- Come sono memorizzati gli elementi di un array?

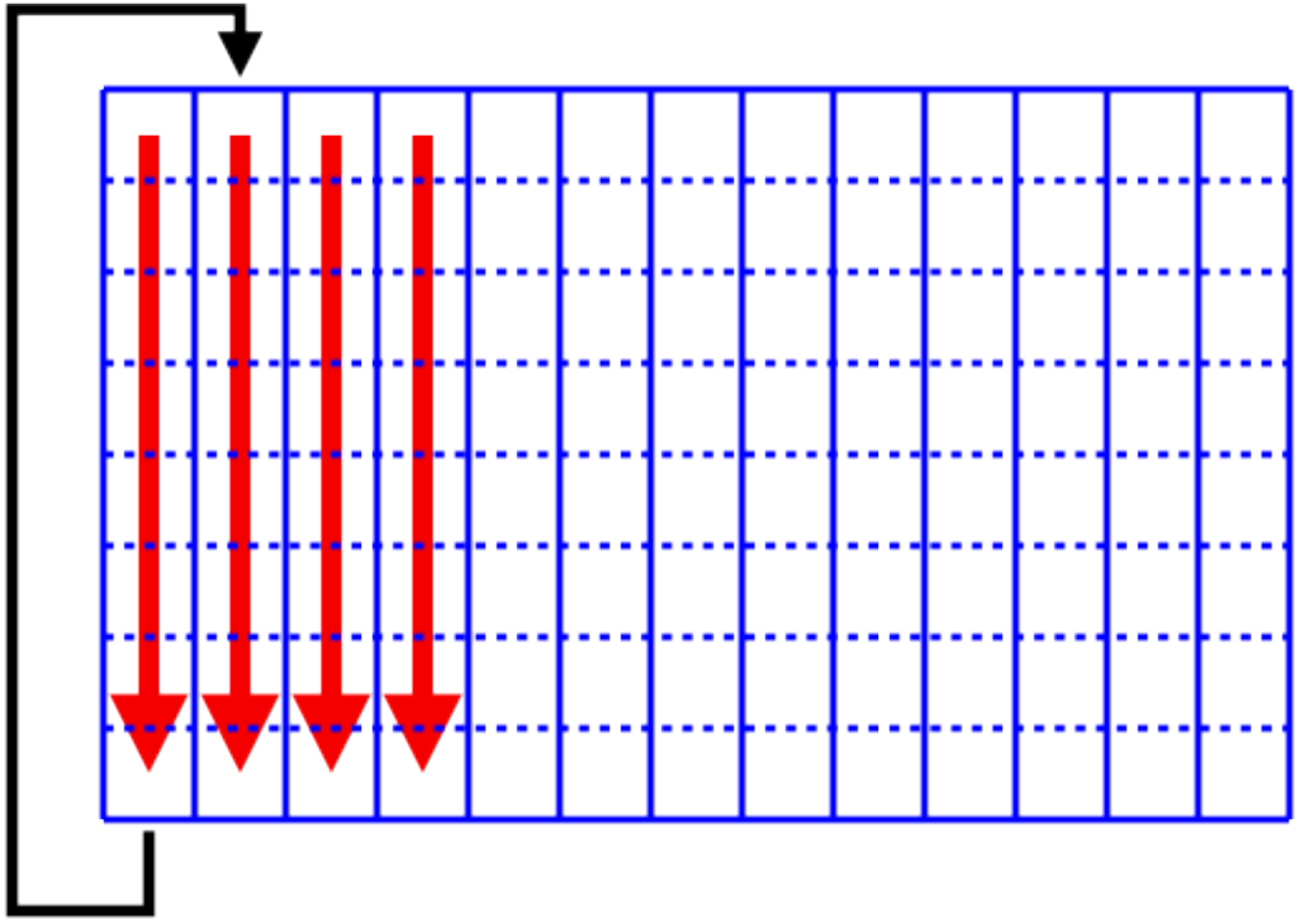
- C: in successione seguendo l'ultimo indice, poi il precedente . . .
  a[1][1] a[1][2] a[1][3] a[1][4] . . .
  a[1][n] a[2][1] . . . a[n][n]
- Fortran: in successione seguendo il primo indice, poi il secondo . . .
  a(1,1) a(2,1) a(3,1) a(4,1) . . .
  a(n,1) a(1,2) . . . a(n,n)

Lo stride

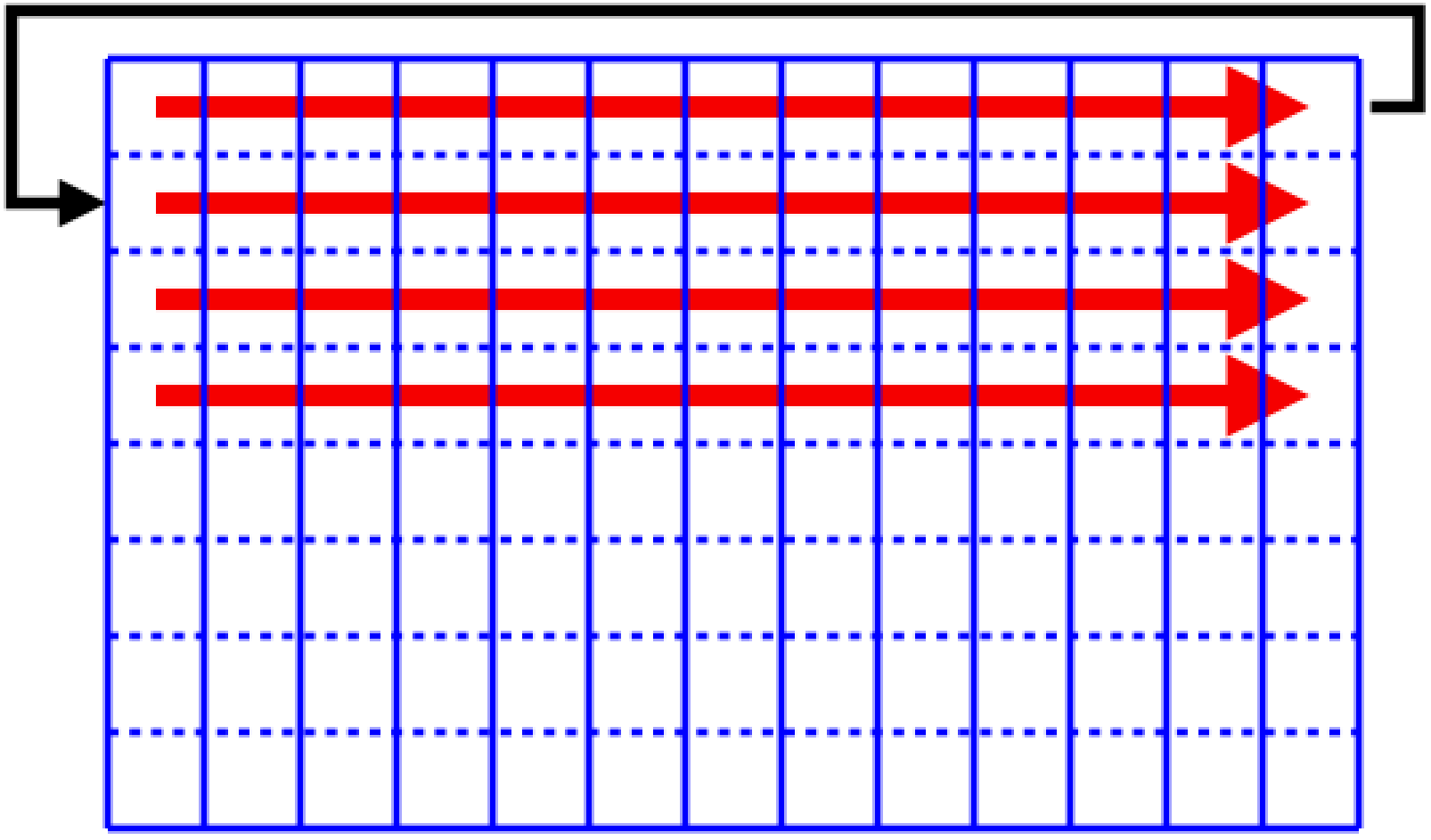


- È la distanza tra due dati successivamente acceduti
  - stride=1 $\rightarrow$ sfrutto la località spaziale
  - stride » 1 $\rightarrow$ non sfrutto la località spaziale
- Regola d'oro
  - Accedere sempre, se possibile, a stride unitario

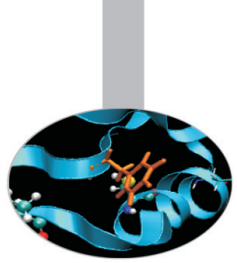
Ordine di memorizzazione:Fortran



Ordine di memorizzazione: C

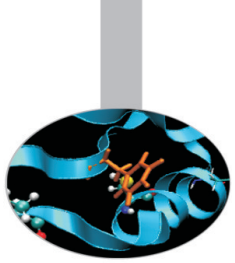


Ordine ottimale di accesso



- Calcolare il prodotto matrice-vettore:
  - Fortran: d(i) = a(i) + b(i,j)*c(j)
  - C: d[i] = a[i] + b [i][j]*c[j];
- Fortran
  - do j=1,n
    do i=1,n
    d(i) = a(i) + b(i,j)*c(j)
    end do
    end do
- C
  - for(i=0;i<n,i+++1)
    for(j=0;i<n,j+++1)
    d[i] = a[i] + b [i][j]*c[j];

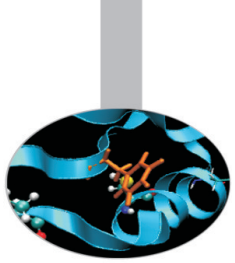
Località spaziale:sistema lineare



Soluzione sistema triangolare

- $Lx = b$
- Dove:
  - L è una matrice $n \times n$ triangolare inferiore
  - x è un vettore di n incognite
  - b è un vettore di n termini noti
- Questo sistema è risolvibile tramite:
  - forward substitution
  - partizionamento della matrice

Località spaziale:sistema lineare

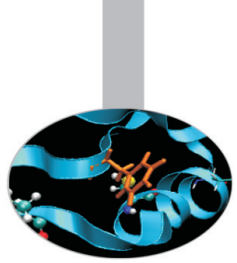


Soluzione sistema triangolare

- $Lx = b$
- Dove:
  - L è una matrice $n \times n$ triangolare inferiore
  - x è un vettore di n incognite
  - b è un vettore di n termini noti
- Questo sistema è risolvibile tramite:
  - forward substitution
  - partizionamento della matrice

Qual è più veloce?
Perché?

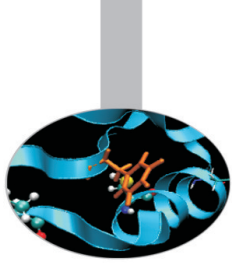
Forward substitution



Soluzione:

```
. . .
do i = 1, n
     do j = 1, i-1
        b(i) = b(i) - L(i,j) b(j)
    enddo
    b(i) = b(i)/L(i,i)
enddo
. . .
```

Forward substitution



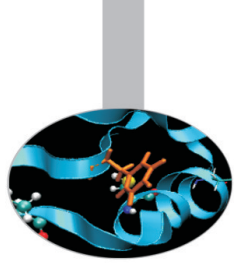
Soluzione:

```
...
do i = 1, n
     do j = 1, i-1
        b(i) = b(i) - L(i,j) b(j)
    enddo
    b(i) = b(i)/L(i,i)
enddo
...
```

```
[~@fen07 TRI]$ ./a.out
```

```
Calcolo sistema L * y = b
time for solution   8.0586
```

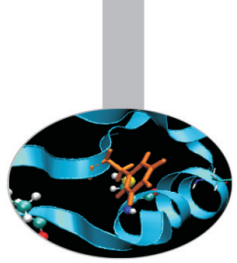
Partizionamento della matrice



Soluzione:

```
. . .
do j = 1, n
    b(j) = b(j)/L(j,j)
     do i = j+1,n
        b(i) = b(i) - L(i,j)*b(j)
    enddo
enddo
. . .
```

Partizionamento della matrice



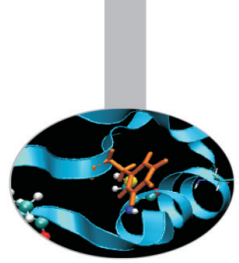
Soluzione:

```
...
do j = 1, n
    b(j) = b(j)/L(j,j)
     do i = j+1,n
        b(i) = b(i) - L(i,j)*b(j)
    enddo
enddo
...
```

```
[~@fen07 TRI]$ ./a.out
```

```
Calcolo sistema L * y = b
time for solution   2.5586
```

Cosa è cambiato



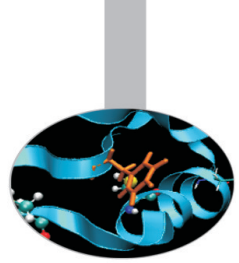
- Forward substitution

```
do i = 1, n
     do j = 1, i-1
        b(i) = b(i) - L(i,j) b(j)
     enddo
     b(i) = b(i)/L(i,i)
enddo
```

- Partizionamento della matrice

```
do j = 1, n
     b(j) = b(j)/L(j,j)
     do i = j+1,n
        b(i) = b(i) - L(i,j)*b(j)
     enddo
enddo
```

Cosa è cambiato



- Forward substitution

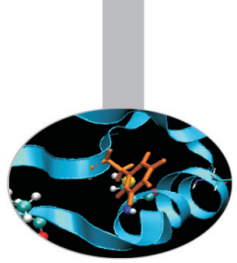
```
do i = 1, n
     do j = 1, i-1
        b(i) = b(i) - L(i,j) b(j)
    enddo
    b(i) = b(i)/L(i,i)
enddo
```

- Partizionamento della matrice

```
do j = 1, n
    b(j) = b(j)/L(j,j)
     do i = j+1,n
        b(i) = b(i) - L(i,j)*b(j)
    enddo
enddo
```

- Stesso numero di operazioni, ma tempi molto differenti (più di un fattore 3). Perché?

Vediamo se il concetto è chiaro . . .



Questa matrice:

A	D	G	L
B	E	H	M
C	F	I	N

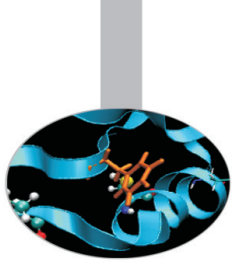
In C è memorizzata:

A	D	G	L	B	E	H	M	C	F	I	N

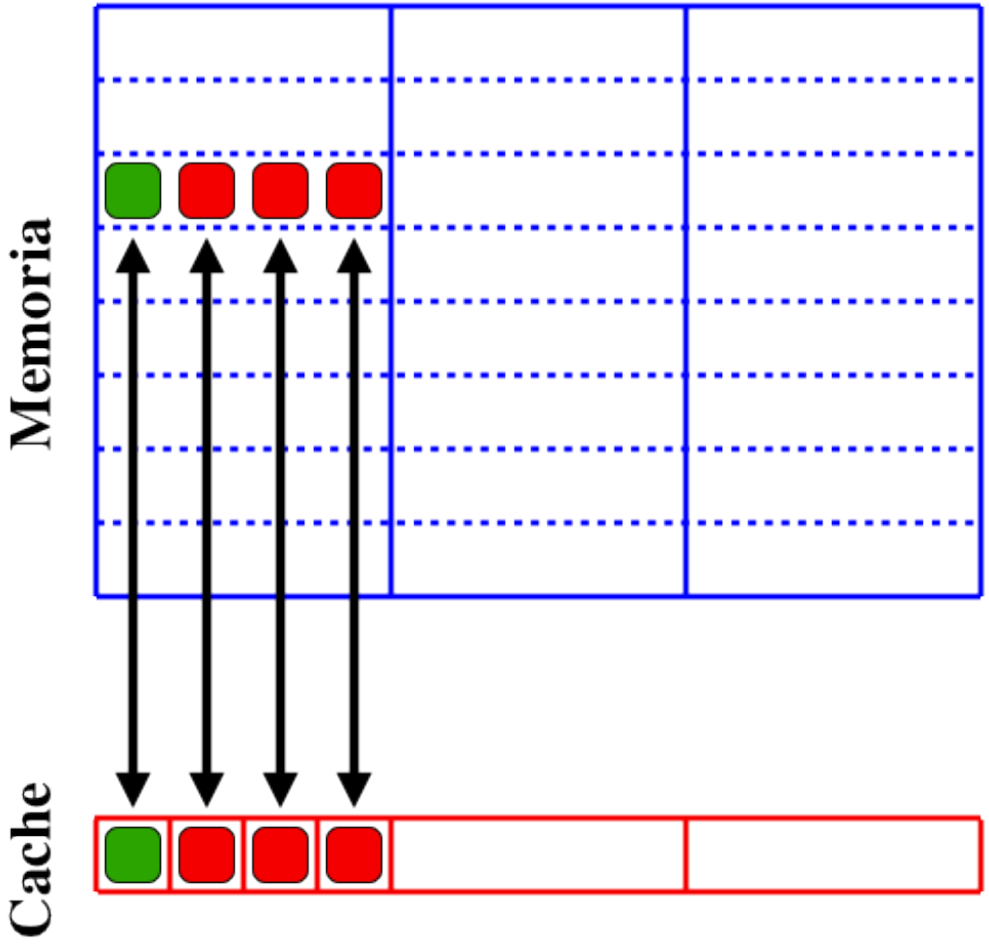
In Fortran è memorizzata:

A	B	C	D	E	F	G	H	I	L	M	N

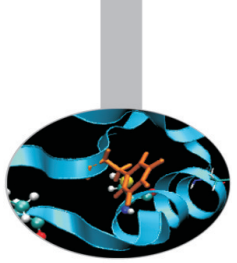
Località spaziale: righe di cache



- La cache è organizzata in blocchi (righe)
- La memoria è suddivsa in blocchi grandi quanto una riga
- Richiedendo un dato si copia in cache il blocco che lo contiene



Dimensione e riutilizzo dei dati

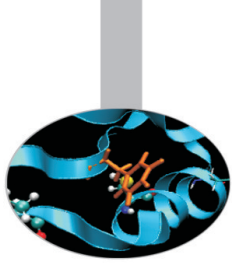


- Prodotto matrice-matrice in doppia precisione
- Versioni alternative, differenti chiamate della libreria BLAS
- Prestazioni in MFlops su Intel(R) Xeon(R) CPU X5660 2.80GHz

Dimensioni	1 DGEMM	*N* DGEMV	N^2 DDOT
500	5820	3400	217
1000	8420	5330	227
2000	12150	2960	136
3000	12160	2930	186

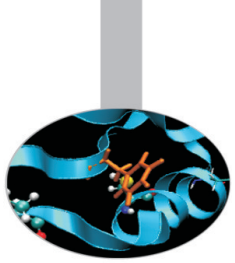
Stesso numero di operazioni, l'uso della cache cambia!!!

Riuso della cache



```
...
d=0.0
do I=1,n
j=index(I)
d = d + sqrt(x(j)*x(j) + y(j)*y(j) + z(j)*z(j))
...
```

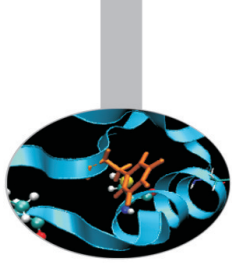
Riuso della cache



```
...
d=0.0
do I=1,n
j=index(I)
d = d + sqrt(x(j)*x(j) + y(j)*y(j) + z(j)*z(j))
...
```

Cosa succede alla cache ad ogni passo del ciclo?

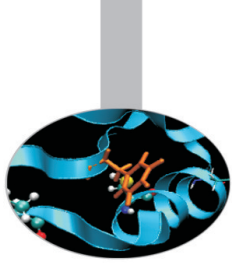
Riuso della cache



```
...
d=0.0
do I=1,n
j=index(I)
d = d + sqrt(x(j)*x(j) + y(j)*y(j) + z(j)*z(j))
...
```

Cosa succede alla cache ad ogni passo del ciclo?
Posso modificare il codice per ottenere migliori prestazioni?

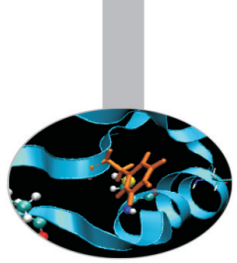
Riuso della cache



```
...
d=0.0
do I=1,n
j=index(I)
d = d + sqrt(x(j)*x(j) + y(j)*y(j) + z(j)*z(j))
...
```

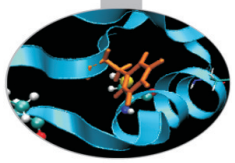
Cosa succede alla cache ad ogni passo del ciclo?
Posso modificare il codice per ottenere migliori prestazioni?

I registri



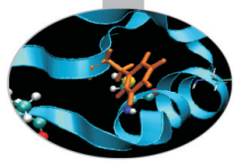
- I registri sono locazioni di memoria interne alla CPU
- poche (tipicamente < 128), ma con latenza nulla
- Tutte le operazioni delle unità di calcolo:
  - prendono i loro operandi dai registri
  - riportano i risultati in registri
- i trasferimenti memoria $\leftrightarrow$ registri sono fasi separate
- il compilatore utilizza i registri:
  - per valori intermedi durante il calcolo delle espressioni
  - espressioni troppo complesse o corpi di loop troppo lunghi forzano lo "spilling" di registri in memoria.
  - per tenere "a portata di CPU" i valori acceduti di frequente
  - ma solo per variabili scalari, non per elementi di array

Elementi di vettori . . .



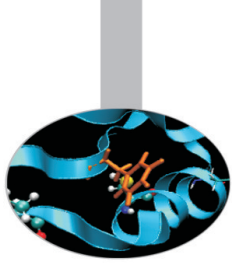
```
do 3000 z=1,nz
        k3=beta(z)
        do 3000 y=1,ny
             k2=eta(y)
             do 3000 x=1,nx/2
                  hr(x,y,z,1)=hr(x,y,z,1)*norm
                  hi(x,y,z,1)=hi(x,y,z,1)*norm
                  hr(x,y,z,2)=hr(x,y,z,2)*norm
                  hi(x,y,z,2)=hi(x,y,z,2)*norm
                  hr(x,y,z,3)=hr(x,y,z,3)*norm
                  hi(x,y,z,3)=hi(x,y,z,3)*norm
.....................
                  k1=alfa(x,1)
                  k_quad=k1*k1+k2*k2+k3*k3+k_quad_cfr
                  k_quad=1./k_quad
                  sr=k1*hr(x,y,z,1)+k2*hr(x,y,z,2)+k3*hr(x,y,z,3)
                  si=k1*hi(x,y,z,1)+k2*hi(x,y,z,2)+k3*hi(x,y,z,3)
                  hr(x,y,z,1)=hr(x,y,z,1)-sr*k1*k_quad
                  hr(x,y,z,2)=hr(x,y,z,2)-sr*k2*k_quad
                  hr(x,y,z,3)=hr(x,y,z,3)-sr*k3*k_quad
                  hi(x,y,z,1)=hi(x,y,z,1)-si*k1*k_quad
                  hi(x,y,z,2)=hi(x,y,z,2)-si*k2*k_quad
                  hi(x,y,z,3)=hi(x,y,z,3)-si*k3*k_quad
                  k_quad_cfr=0.
3000  continue
```

scalari di appoggio



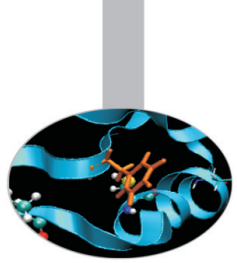
```
do 3000 z=1,nz
         k3=beta(z)
         do 3000 y=1,ny
              k2=eta(y)
              do 3000 x=1,nx/2
                   br1=hr(x,y,z,1)*norm
                   bi1=hi(x,y,z,1)*norm
                   br2=hr(x,y,z,2)*norm
                   bi2=hi(x,y,z,2)*norm
                   br3=hr(x,y,z,3)*norm
                   bi3=hi(x,y,z,3)*norm
.................
                   k1=alfa(x,1)
                   k_quad=k1*k1+k2*k2+k3*k3+k_quad_cfr
                   k_quad=1./k_quad
                   sr=k1*br1+k2*br2+k3*br3
                   si=k1*bi1+k2*bi2+k3*bi3
                   hr(x,y,z,1)=br1-sr*k1*k_quad
                   hr(x,y,z,2)=br2-sr*k2*k_quad
                   hr(x,y,z,3)=br3-sr*k3*k_quad
                   hi(x,y,z,1)=bi1-si*k1*k_quad
                   hi(x,y,z,2)=bi2-si*k2*k_quad
                   hi(x,y,z,3)=bi3-si*k3*k_quad
                   k_quad_cfr=0.
3000  Continue
```

scalari di appoggio (durata -25%)



```
do 3000 z=1,nz
         k3=beta(z)
         do 3000 y=1,ny
              k2=eta(y)
              do 3000 x=1,nx/2
                   br1=hr(x,y,z,1)*norm
                   bi1=hi(x,y,z,1)*norm
                   br2=hr(x,y,z,2)*norm
                   bi2=hi(x,y,z,2)*norm
                   br3=hr(x,y,z,3)*norm
                   bi3=hi(x,y,z,3)*norm
.................
                   k1=alfa(x,1)
                   k_quad=k1*k1+k2*k2+k3*k3+k_quad_cfr
                   k_quad=1./k_quad
                   sr=k1*br1+k2*br2+k3*br3
                   si=k1*bi1+k2*bi2+k3*bi3
                   hr(x,y,z,1)=br1-sr*k1*k_quad
                   hr(x,y,z,2)=br2-sr*k2*k_quad
                   hr(x,y,z,3)=br3-sr*k3*k_quad
                   hi(x,y,z,1)=bi1-si*k1*k_quad
                   hi(x,y,z,2)=bi2-si*k2*k_quad
                   hi(x,y,z,3)=bi3-si*k3*k_quad
                   k_quad_cfr=0.
3000  Continue
```

Località spaziale e temporale

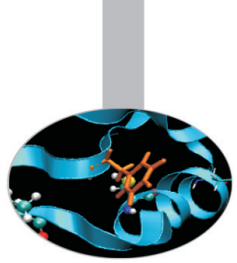


- Trasposizione di matrice

```
do j = 1, n
   do i = 1, n
      a(i,j) = b(j,i)
   end do
end do
```

- Qual è l'ordine del loop con stride minimo?
- Per dati all'interno della cache non c'è dipendenza dallo stride
  - se dividessi l'operazione in blocchi abbastanza piccoli da entrare in cache?
  - posso bilanciare tra località spaziale e temporale.

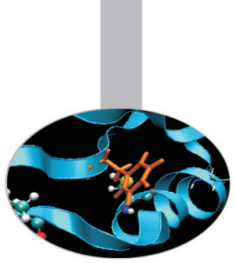
Cache blocking



- I dati elaborati in blocchi di dimensione adeguata alla cache
- All'interno di ogni blocco c'è il riuso delle righe caricate
- Lo può fare il compilatore, se il loop è semplice, ma a livelli di ottimizzazione elevati
- Esempio della tecnica: trasposizione della matrice

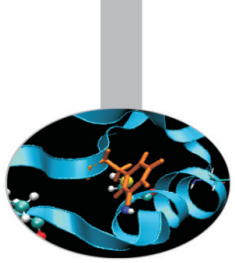
```
do jj = 1, n , step
  do ii = 1, n, step
    do j= jj,jj+step-1,1
      do i=ii,ii+step-1,1
        a(i,j)=b(j,i)
      end do
    end do
  end do
end do
```

Cache: capacity miss e trashing

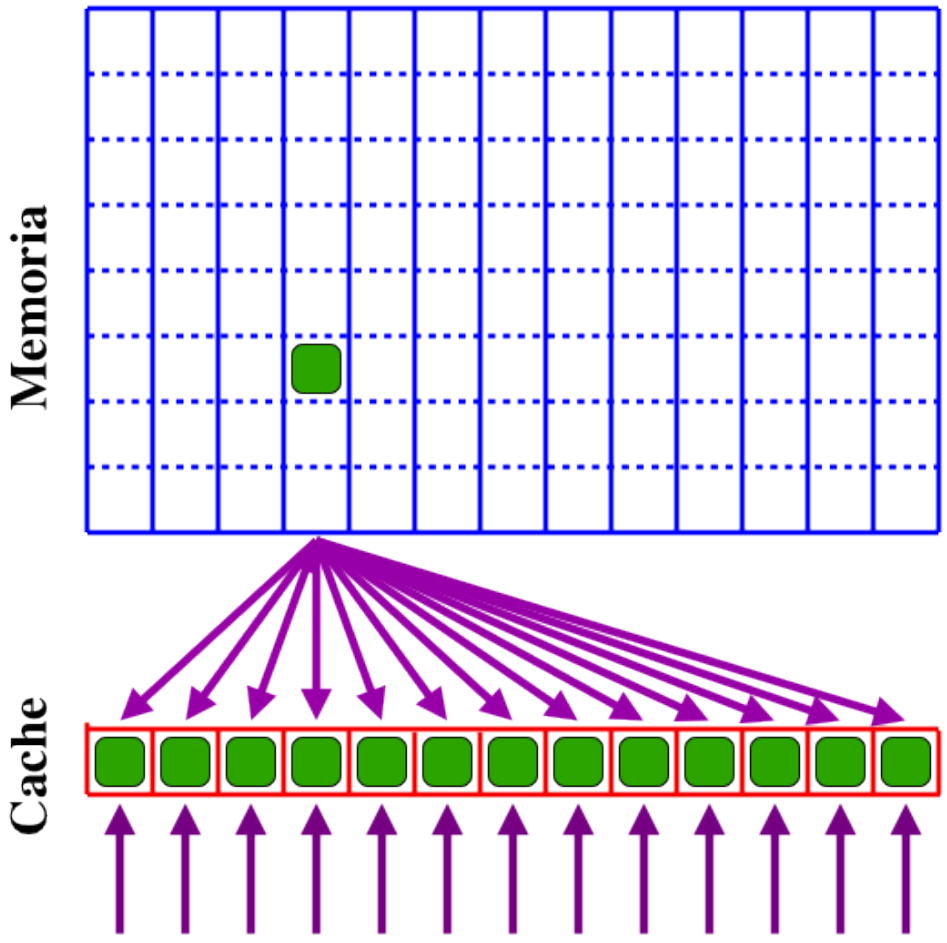


- La cache può soffrire di capacity miss:
  - si utilizza un insieme ristretto di righe (reduced effective cache size)
  - si riduce la velocità di elaborazione
- La cache può soffrire di trashing:
  - per caricare nuovi dati si getta via una riga prima che sia stata completamente utilizzata
  - è più lento di non avere cache
- Capita quando più flussi di dati/istruzioni insistono sulle stesse righe di cache
- Dipende dal mapping memoria $\leftrightarrow$ cache
  - fully associative cache
  - direct mapped cache
  - N-way set associative cache

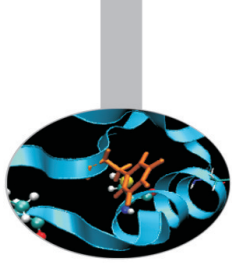
Fully associative cache



- Ogni blocco di memoria può essere mappato in una riga qualsiasi di cache

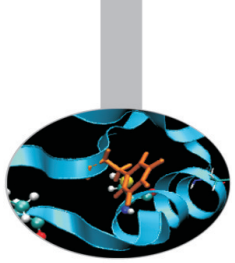


Fully associative cache

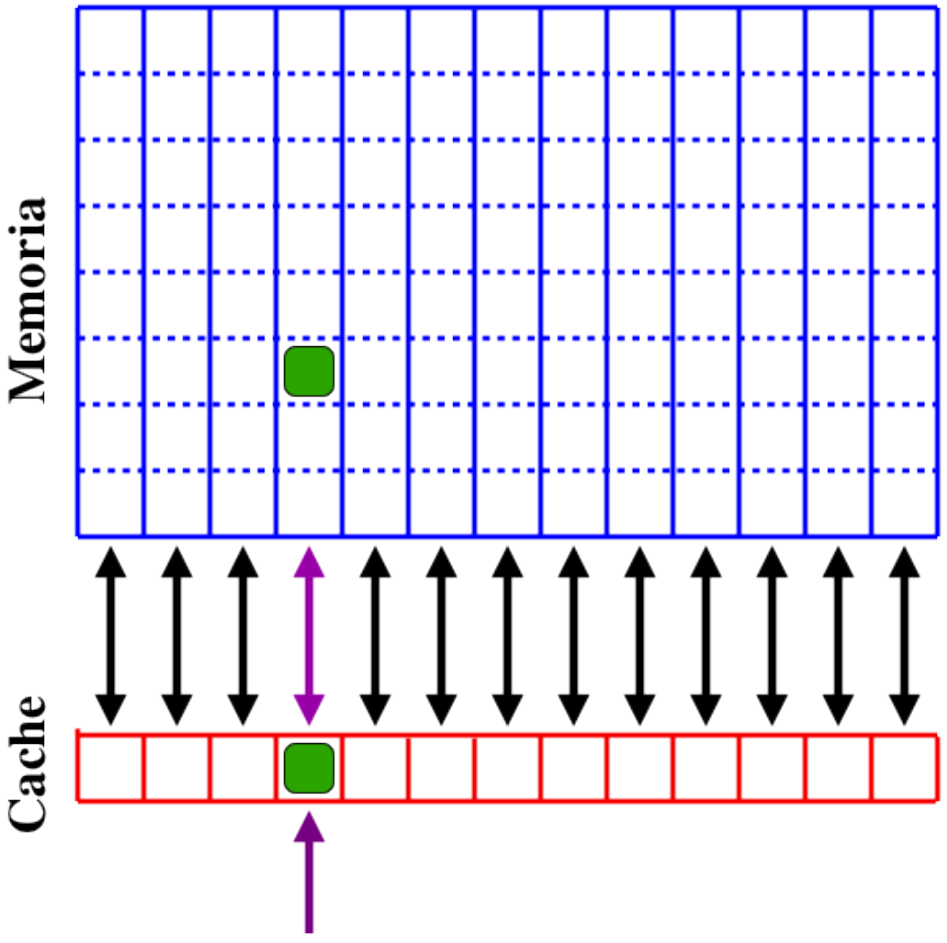


- Pro:
  - sfruttamento completo della cache
  - relativamente "insensibile" ai pattern di accesso alla memoria
- Contro:
  - strutture circuitali molto complesse per identificare molto rapidamente un hit
  - algoritmo di sostituzione oneroso Least Recently Used (LRU) o limitatamente efficiente First In First Out (FIFO)
  - costosa e di dimensioni limitate

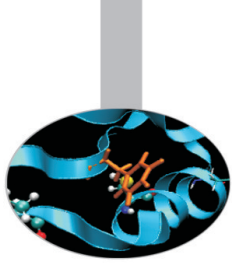
Direct mapped cache



- Ogni blocco di memoria può essere mappato in una sola riga di cache (congruenza lineare)

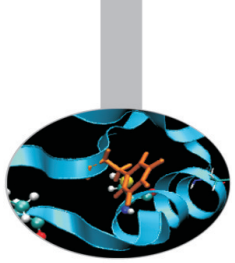


Direct mapped cache

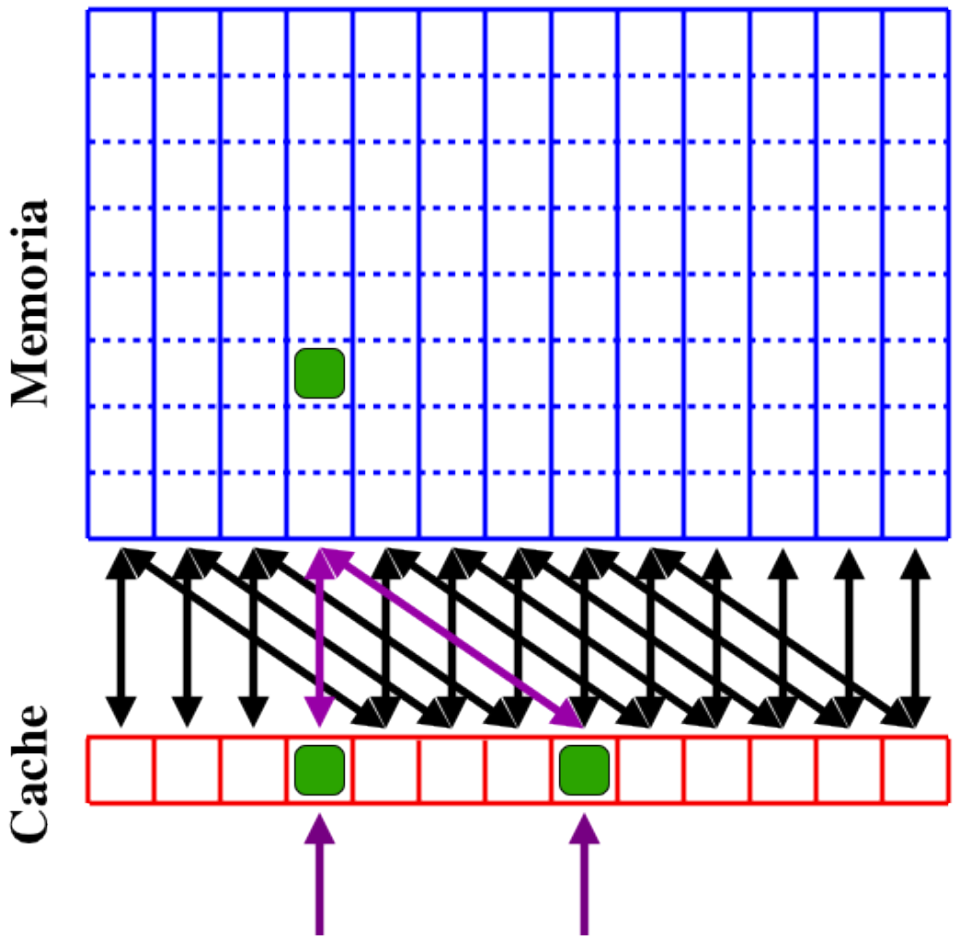


- Pro:
  - identificazione di un hit facilisima (alcuni bit dell'indirizzo identificano la riga da controllare)
  - algoritmo di sostituzione banale
  - cache di dimensione "arbitraria"
- Contro:
  - molto "sensibile" ai pattern di accesso alla memoria
  - soggetta a capacity miss
  - soggetta a cache trashing

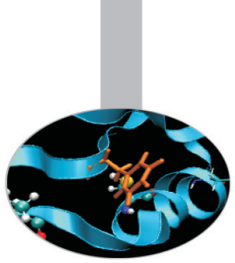
N-way set associative cache



- Ogni blocco di memoria può essere mappato in una qualsiasi riga tra N possibili righe di cache

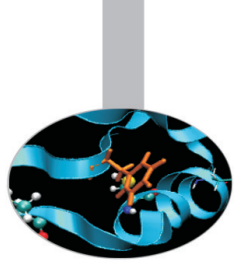


N-way set associative cache



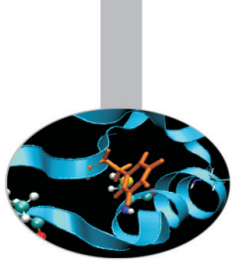
- Pro:
  - è un punto di bilanciamento intermedio
    - N=1 $\rightarrow$ direct mapped
    - N= numero di righe di cache $\rightarrow$ fully associative
  - consente di scegliere il bilanciamento tra complessità circuitale e prestazioni (i.e. costo del sistema e difficoltà di programmazione)
  - consente di realizzare cache di dimensione "soddisfacente"
- Contro:
  - molto "sensibile" ai pattern di accesso alla memoria
  - parzialmente soggetta a capacity miss
  - parzialmente soggetta a cache trashing

Cache: la situazione tipica



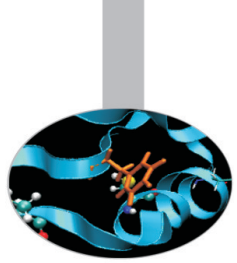
- Cache L1: 4÷8 way set associative
- Cache L2÷3: 2÷4 way set associative o direct mapped
- Capacity miss e trashing vanno affrontati
  - le tecniche sono le stesse
  - controllo della disposizione dei dati in memoria
  - controllo delle sequenze di accessi in memoria
- La cache L1 lavora su indirizzi virtuali
  - pieno controllo da parte del programmatore
- le cache L2÷3 lavorano su indirizzi fisici
  - le prestazioni dipendono dalla memoria fisica allocata
  - le prestazioni possono variare da esecuzione a esecuzione
  - si controllano a livello di sistema operativo

Cache Trashing



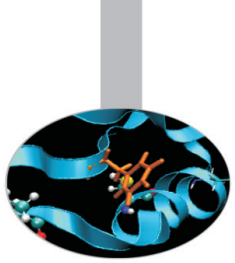
- Problemi di accesso ai dati in memoria
- Provoca la sostituzione di una riga di cache il cui contenuto verrà richiesto subito dopo
- Si presenta quando due o più flussi di dati insistono su un insieme ristretto di righe di cache
- NON aumenta il numero di load e store
- Aumenta il numero di transazioni sul bus di memoria
- In genere si presenta per flussi il cui stride relativo è una potenza di 2

No trashing: C(i)= A(i)+B(i)



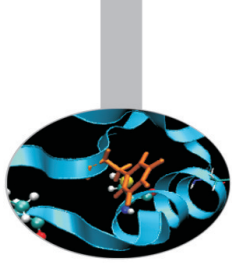
- Iterazione i=1
  1. Cerco A(1) nella cache di primo livello (L1) → cache miss
  2. Recupero A(1) nella memoria RAM
  3. Copio da A(1) a A(8) nella L1
  4. Copio A(1) in un registro
  5. Cerco B(1) nella cache di primo livello (L1) → cache miss
  6. Recupero B(1) nella memoria RAM
  7. Copio da B(1) a B(8) nella L1
  8. Copio B(1) in un registro
  9. Eseguo somma
- Iterazione i=2
  1. Cerco A(2) nella cache di primo livello(L1) → cache hit
  2. Copio A(2) in un registro
  3. Cerco B(2) nella cache di primo livello(L1) → cache hit
  4. Copio B(2) in un registro
  5. Eseguo somma
- Iterazione i=3

Trashing: C(i)= A(i)+B(i)



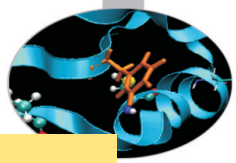
- Iterazione i=1
  1. Cerco A(1) nella cache di primo livello (L1) $\rightarrow$ cache miss
  2. Recupero A(1) nella memoria RAM
  3. Copio da A(1) a A(8) nella L1
  4. Copio A(1) in un registro
  5. Cerco B(1) nella cache di primo livello (L1) $\rightarrow$ cache miss
  6. Recupero B(1) nella memoria RAM
  7. Scarico la riga di cache che contiene A(1)-A(8)
  8. Copio da B(1) a B(8) nella L1
  9. Copio B(1) in un registro
  10. Eseguo somma

Trashing: C(i)= A(i)+B(i)



- Iterazione i=2
  1. Cerco A(2) nella cache di primo livello(L1) $\rightarrow$ cache miss
  2. Recupero A(2) nella memoria RAM
  3. Scarico la riga di cache che contiene B(1)-B(8)
  4. Copio da A(1) a A(8) nella L1
  5. Copio A(2) in un registro
  6. Cerco B(2) nella cache di primo livello (L1) $\rightarrow$ cache miss
  7. Recupero B(2) nella memoria RAM
  8. Scarico la riga di cache che contiene A(1)-A(8)
  9. Copio da B(1) a B(8) nella L1
  10. Copio B(2) in un registro
  11. Eseguo somma
- Iterazione i=3

Come identificarlo?



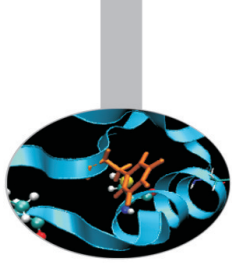
- Effetto variabile in funzione della dimensione del data set

```
...
integer,parameter  :: offset=..
integer,parameter  :: N1=6400
integer,parameter  :: N=N1+offset
....
real(8)     :: x(N,N),y(N,N),z(N,N)
...
do j=1,N1
    do i=1,N1
      z(i,j)=x(i,j)+y(i,j)
    end do
end do
...
```

offset	tempo
0	0.361
3	0.250
400	0.252
403	0.253

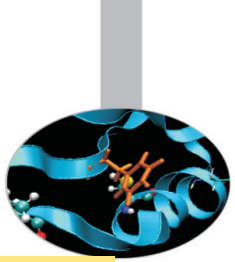
La soluzione é il padding.

Accessi Disallineati



- Raddoppiano le transazioni sul bus
- Su alcune architetture:
  - causano errori a runtime
  - sono emulati in software
- Sono un problema
  - con tipi dati strutturati(TYPE e struct)
  - con le variabili locali alla routine
  - con i common
- Soluzioni
  - ordinare le variabili per dimensione decrescente
  - opzioni di compilazione (quando disponibili . . .)
  - common diversi/separati
  - inserimento di variabili "dummy" nei common

Accessi disallineati



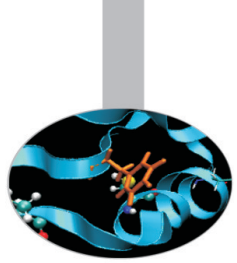
```
      parameter (nd=1000000)
      real*8 a(1:nd), b(1:nd)
      integer c
      common /data1/ a,c,b
....
      do j = 1, 300
         do i = 1, nd
            somma1 = somma1 + (a(i)-b(i))
         enddo
      enddo
```

Diverse performance per:

```
      common /data1/ a,c,b
      common /data1/ b,c,a
      common /data1/ a,b,c
```

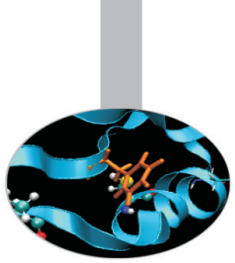
Dipende dall'architettura e dal compilatore che in genere segnala e cerca di sanare con opzione di align common

Come accertare qual è il problema?



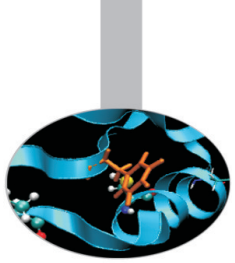
- Tutti i processori hanno contatori hardware di eventi
- Introdotti dai progettisti per CPU ad alti clock
  - indispensabili per debuggare i processori
  - utili per misurare le prestazioni
  - fondamentali per capire comportamenti anomali
- Ogni architettura misura eventi diversi
- Sono ovviamente proprietari
  - IBM:HPCT
  - INTEL:Vtune
- Esistono strumenti di misura multipiattaforma
  - Valgrind,Oprofile
  - PAPI
  - Likwid
  - . . .

La cache è una memoria



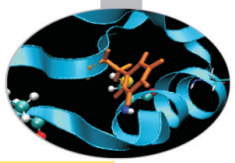
- Mantiene il suo stato finché un cache-miss non ne causa la modifica
- È uno stato nascosto al programmatore:
  - non influenza la semantica del codice (ossia i risultati)
  - influenza le prestazioni
- La stessa routine chiamate in due contesti diversi del codice può avere prestazioni del tutto diverse a seconda dello stato che “trova” nella cache
- La modularizzazione del codice tende a farci ignorare questo problema
- Può essere necessario inquadrare il problema in un contesto più ampio della singola routine

Valgrind



- Software Open Source utile per il Debugging/Profiling di programmi Linux, di cui non richiede i sorgenti (black-box analysis), ed è composto da diversi tool:
  - Memcheck (detect memory leaks, . . .)
  - Cachegrind (cache profiler)
  - Callgrind (callgraph)
  - Massif (heap profiler)
  - Etc.
- http://valgrind.org

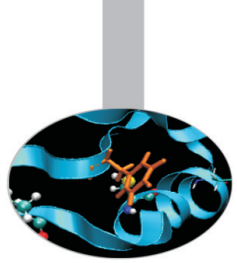
Cachegrind



```
valgrind --tool=cachegrind <nome_eseguibile>
```

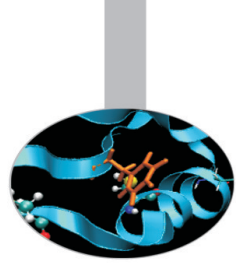
- Simula come il vostro programma interagisce con la gerarchia di cache
  - due cache indipendenti di primo livello (L1)
    - per istruzioni (I1)
    - per dati (D1)
  - una cache di ultimo livello, L2 o L3(LL)
- Riporta diverse statistiche
  - I cache reads (Ir numero di istruzioni eseguite), I1 cache read misses(I1mr),LL cache instrunction read misses (ILmr)
  - D cache reads, Dr,D1mr,DLlmr
  - D cache writes, Dw,D1mw,DLlmw
- Riporta (opzionale) il numero di branch e quelli mispredicted

Cachegrind:esempio I



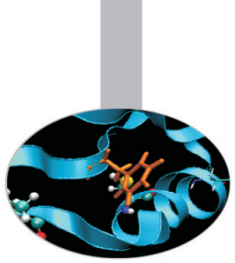
```
==14924== I   refs:      7,562,066,817
==14924== I1  misses:            2,288
==14924== LLi misses:            1,913
==14924== I1  miss rate:          0.00%
==14924== LLi miss rate:          0.00%
==14924==
==14924== D   refs:      2,027,086,734  (1,752,826,448 rd   + 274,260,286 wr)
==14924== D1  misses:       16,946,127  (   16,846,652 rd   +      99,475 wr)
==14924== LLd misses:          101,362  (        2,116 rd   +      99,246 wr)
==14924== D1  miss rate:           0.8% (          0.9%     +         0.0%  )
==14924== LLd miss rate:           0.0% (          0.0%     +         0.0%  )
==14924==
==14924== LL refs:          16,948,415  (   16,848,940 rd   +      99,475 wr)
==14924== LL misses:           103,275  (        4,029 rd   +      99,246 wr)
==14924== LL miss rate:            0.0% (          0.0%     +         0.0%  )
```

Cachegrind:esempio II



```
==15572== I   refs:      7,562,066,871
==15572== I1  misses:            2,288
==15572== LLi misses:            1,913
==15572== I1  miss rate:          0.00%
==15572== LLi miss rate:          0.00%
==15572==
==15572== D   refs:      2,027,086,744  (1,752,826,453 rd   + 274,260,291 wr)
==15572== D1  misses:      151,360,463  (  151,260,988 rd   +      99,475 wr)
==15572== LLd misses:          101,362  (        2,116 rd   +      99,246 wr)
==15572== D1  miss rate:           7.4% (          8.6%     +         0.0%  )
==15572== LLd miss rate:           0.0% (          0.0%     +         0.0%  )
==15572==
==15572== LL refs:         151,362,751  (  151,263,276 rd   +      99,475 wr)
==15572== LL misses:           103,275  (        4,029 rd   +      99,246 wr)
==15572== LL miss rate:            0.0% (          0.0%     +         0.0%  )
```

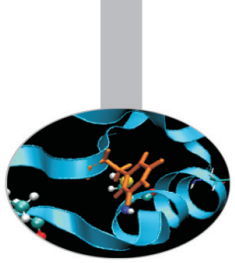
Cachegrind:cg_annotate



- Cachegrind genera automaticamente un file cachegrind.out.<pid>
- Oltre alle precedenti informazioni vengono generate anche statistiche funzione per funzione

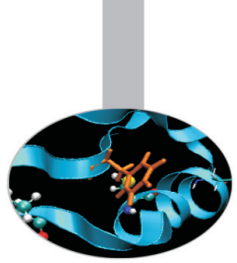
```
cg_annotate cachegrind.out.<pid>
```

Cachegrind:opzioni



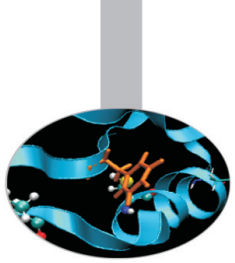
- —I1=<size>,<associativity>,<line size>
- —D1=<size>,<associativity>,<line size>
- —LL=<size>,<associativity>,<line size>
- —cache-sim=no|yes [yes]
- —branch-sim=no|yes [no]
- —cachegrind-out-file=<file>

Esercitazione: sommario



- Prodotto matrice matrice:ordine dei loop
- Prodotto matrice matrice:blocking
- Prodotto matrice matrice:blocking e padding
- Misura delle prestazioni delle cache

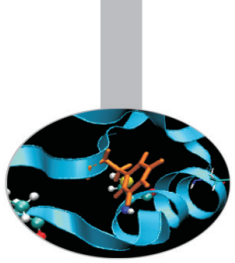
Ordine dei loop



- Andare su *eser*_2 (fortran/mm.f90 o c/mm.c)
- Misurare i tempi per N=512 al variare dell'ordine del loop
- Usare fortran e/o c
- Usare compilatori gnu senza ottimizzazioni(-O0)

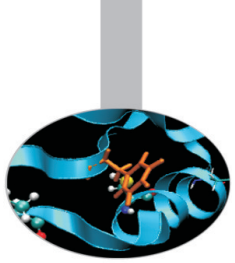
Indici	Tempi	C
i,j,k		
i,k,j		
j,k,i		
j,i,k		
k,i,j,k		
k,j,i,k		

src/eser_3/fortran/mm.f90



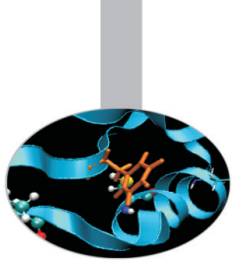
```
1   ...
2       integer, parameter :: n=1024  ! size of the matrix
3       integer, parameter :: step=4
4       integer, parameter :: npad=0
5   ...
6       real(my_kind) a(1:n+npad,1:n) ! matrix
7       real(my_kind) b(1:n+npad,1:n) ! matrix
8       real(my_kind) c(1:n+npad,1:n) ! matrix (destination)
9
10          do jj = 1, n, step
11            do kk = 1, n, step
12               do ii = 1, n, step
13                  do j = jj, jj+step-1
14                     do k = kk, kk+step-1
15                        do i = ii, ii+step-1
16                           c(i,j) = c(i,j) + a(i,k)*b(k,j)
17                        enddo
18  ...
```

src/eser_3/c/mm.c



```
1  #define nn (1024)
2  #define step (4)
3  #define npad (0)
4
5  double a[nn+npad][nn+npad];        /** matrici**/
6  double b[nn+npad][nn+npad];
7  double c[nn+npad][nn+npad];
8  ...
9   for (ii = 0; ii < nn; ii= ii+step)
10    for (kk = 0; kk < nn; kk = kk+step)
11       for (jj = 0; jj < nn; jj = jj+step)
12          for ( i = ii; i < ii+step; i++ )
13             for ( k = kk; k < kk+step; k++ )
14                for ( j = jj; j < jj+step; j++ )
15                   c[i][j] = c[i][j] + a[i][k]*b[k][j];
16 ...
```

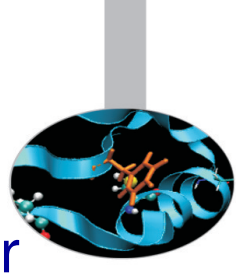
Blocking



- Andate su *eser*_3 (fortran/mm.f90 o c/mm.c)
- Misurare i tempi al variare della dimensione del blocking per matrici con N=1024
- Usare Fortran e/o c
- Usare i compilatori gnu con livello di ottimizzazione -O3

Step	Fortran	C
4		
8		
16		
32		
64		
128		
256		

Blocking e Padding



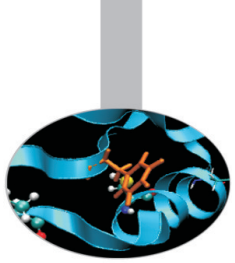
- Andate su *eser*_3 (fortran/mm.f90 o c/mm.c)
- Misurare i tempi al variare della dimensione del blocking per matrici con N=1024 e npad=9
- Usare Fortran e/o c
- Usare i compilatori gnu con livello di ottimizzazione -O3

Step	Fortran	C
4		
8		
16		
32		
64		
128		
256		

Misura delle prestazioni delle cache

- valgrind
  - Utilizzare il tool cachegrind per "scoprire" come variano le prestazioni misurate modificando l'ordine dei loop

Outline



Introduzione

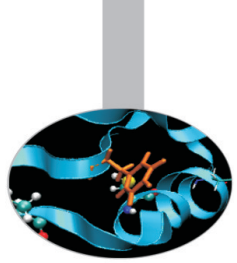
Architetture

La cache e il sistema di memoria

Pipeline

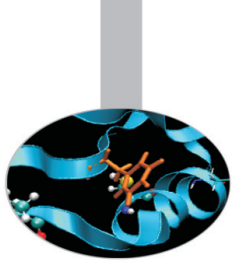
Profilers

CPU: parallelismo interno?



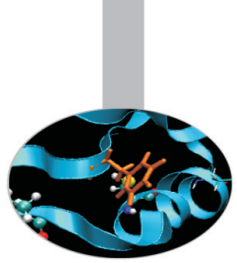
- Le CPU sono internamente parallele
  - pipelining
  - esecuzione superscalare
  - unità SIMD MMX, SSE, SSE2, SSE3, SSE4, AVX
- Per ottenere performance paragonabili con quelle sbandierate dal produttore:
  - fornire istruzioni in quantità
  - fornire gli operandi delle istruzioni

Pipeline



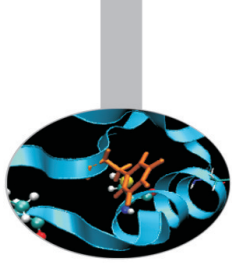
- Pipeline=tubazione, catena di montaggio
- Un'operazione è divisa in più passi indipendenti (stage) e differenti passi di differenti operazioni vengono eseguiti contemporaneamente
- Parallelismo sulle diverse fasi delle operazioni
- I processori sfruttano intensivamente il pipelining per aumentare la capacità di elaborazione

Esempio



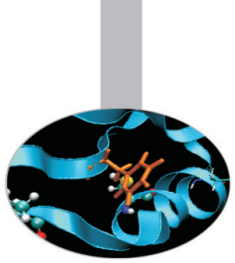
- Somma di reali
  1. Allineare esponente
  2. Sommare mantissa
  3. normalizzare il risultato
  4. arrotondamento
- Esempio: $9.752 \cdot 10^4 + 4.876 \cdot 10^3$
  - $(1) \rightarrow 9.752 \cdot 10^4 + 0.4876 \cdot 10^4$
  - $(2) \rightarrow 10.2396 \cdot 10^4$
  - $(3) \rightarrow 1.02396 \cdot 10^5$
  - $(4) \rightarrow 1.024 \cdot 10^5$

Pipeline funzionale



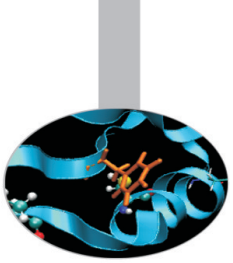
- I passi da fare per eseguire un'istruzione:
  1. Prendere l'istruzione dalla memoria
  2. Decodificare l'istruzione
  3. Inizializzare registri e prendere dati dalla memoria
  4. Eseguire l'istruzione (per esempio: somma di reali)
  5. Scrivere i risultati nella memoria.
- Come sfruttare la sequenzialità delle operazioni?
  - Perché non eseguire le singole sotto-operazioni di più operazioni differenti insieme (purché sfalsate di un passo)?

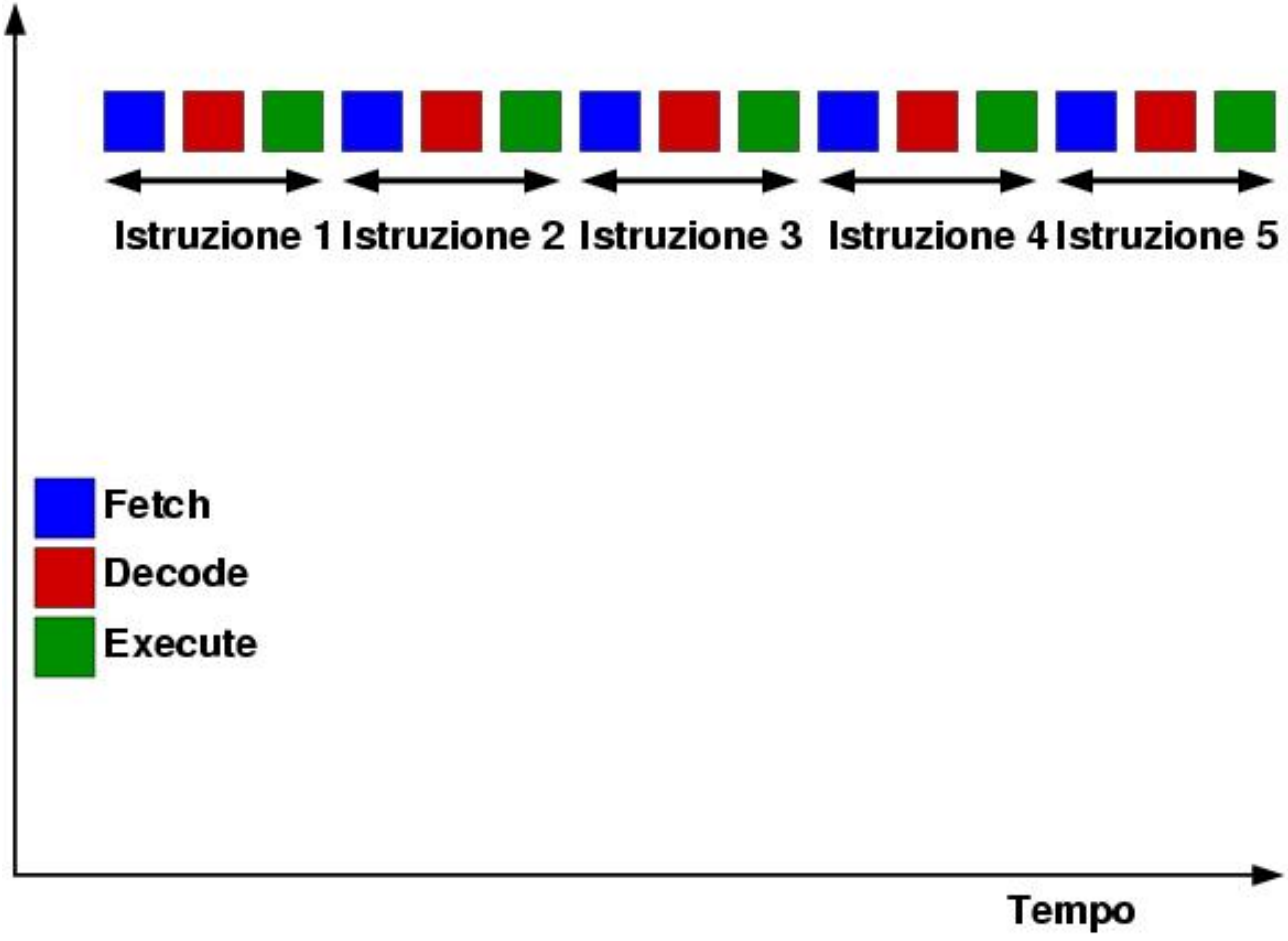
Pipeline funzionale



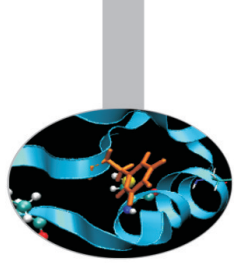
- Nell'ipotesi che:
  1. un'operazione si possa dividere in più sotto-operazioni;
  2. le singole sotto-operazioni siano tra di loro logicamente indipendenti;
  3. le singole sotto-operazioni impieghino (più o meno) lo stesso tempo;

CPU sequenziale



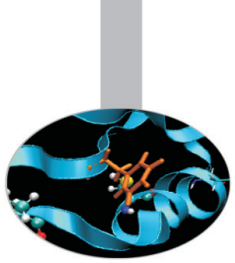


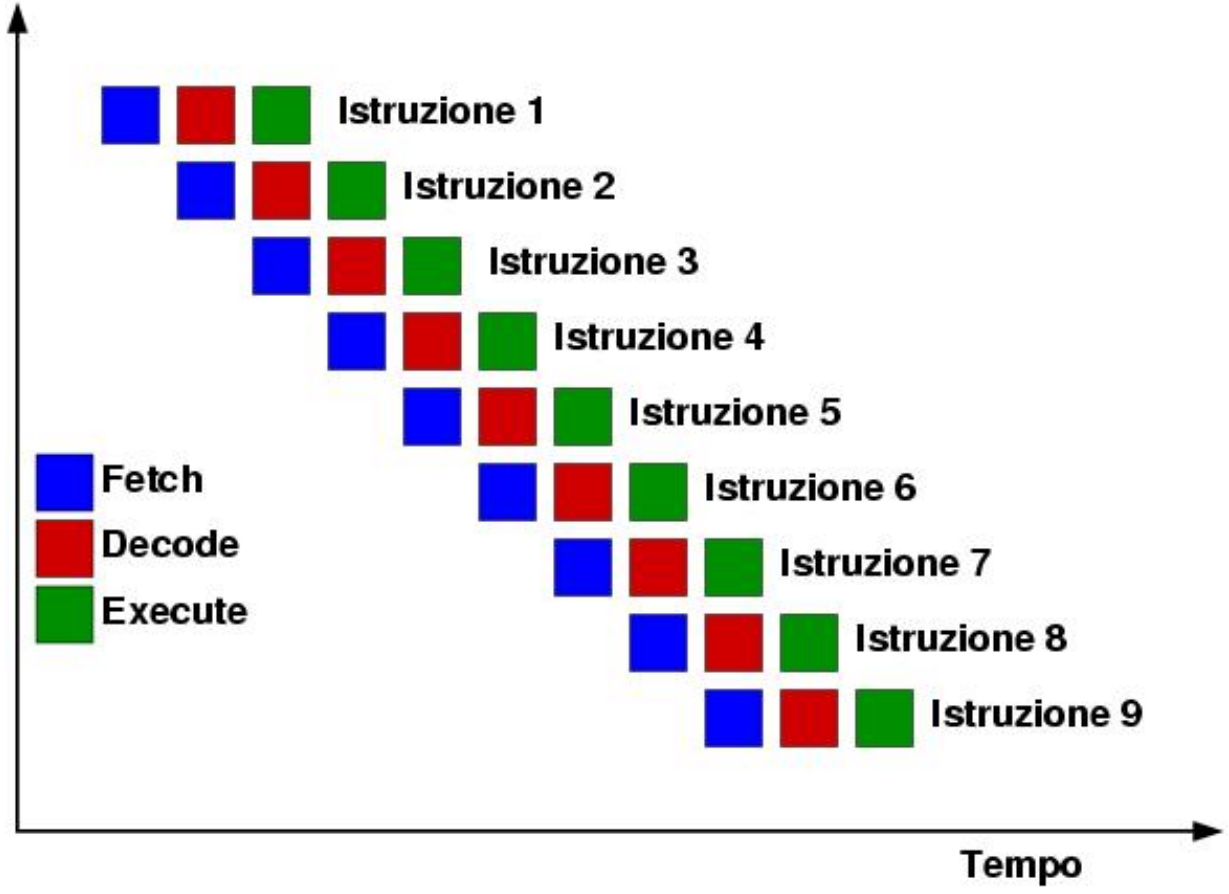
CPU sequenziale: esempio



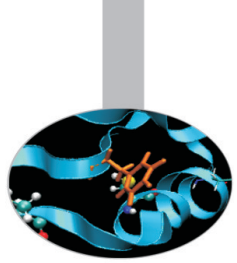
- ATTENZIONE: è solo un esempio indicativo!!!!
- Ogni quadrato $\rightarrow$ 1 ciclo di clock.
- Un'istruzione è composta da tre passi;
- Nell'ipotesi che un passo venga completato in un ciclo:
  - Esegue 1 istruzione ogni tre cicli;
- Esempio (istruzione = calcolo floating point)
  - Clock = 100 Mhz
  - Mflops = 33
  - Bandwidth = 8*33 $\rightarrow$ 264 MB/s

CPU pipelined



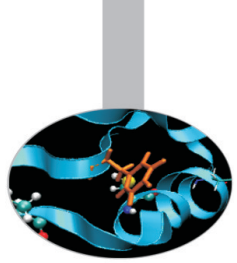


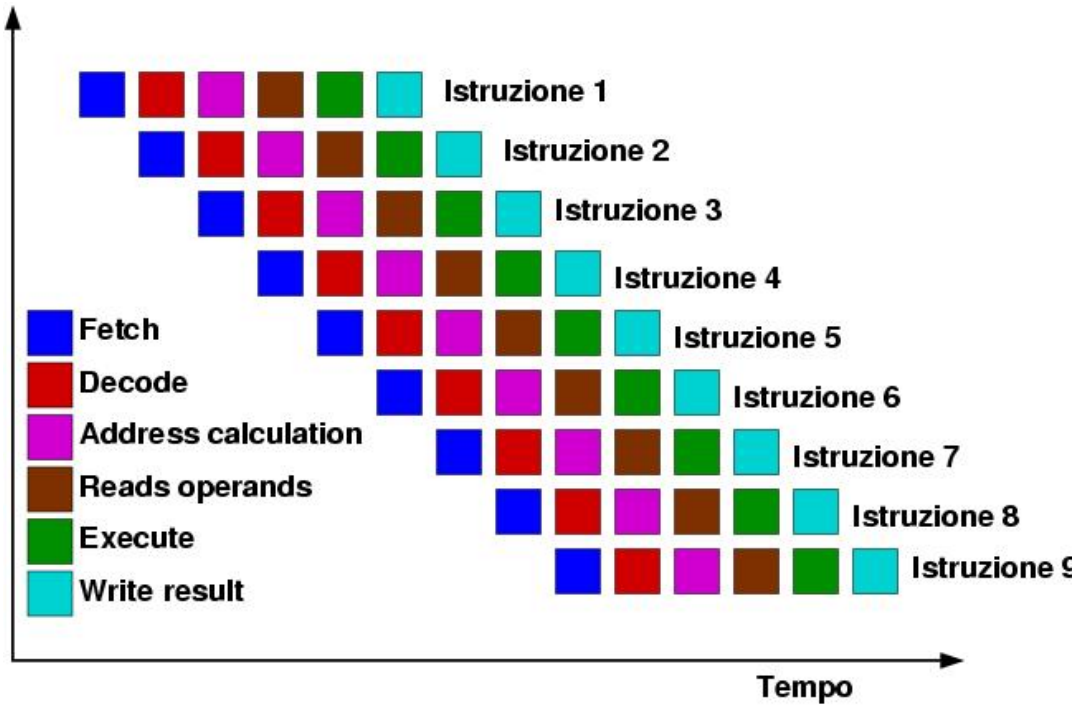
CPU pipelined: esempio



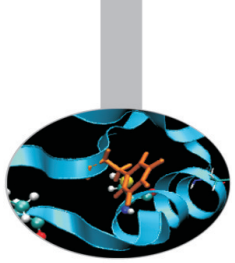
- Un'istruzione è composta da tre passi;
- Nell'ipotesi che un passo venga completato in un ciclo:
  - \+ Esegue 1 istruzione ogni ciclo (a pipeline piena)
  - \- Esegue 1 istruzione ogni 3 cicli (a pipeline vuota)
  - \- Più complessa da realizzare
  - \- Richiede una bandwidth maggiore
- Esempio (istruzione = calcolo floating point)
  - Clock = 100 Mhz
  - Mflops = 100/33 (pipeline piena/in stallo)
  - Bandwidth = 8*100 $\rightarrow$ 800 MB/s a pipeline piena

CPU superpipelined



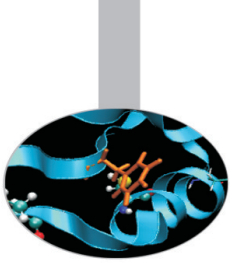


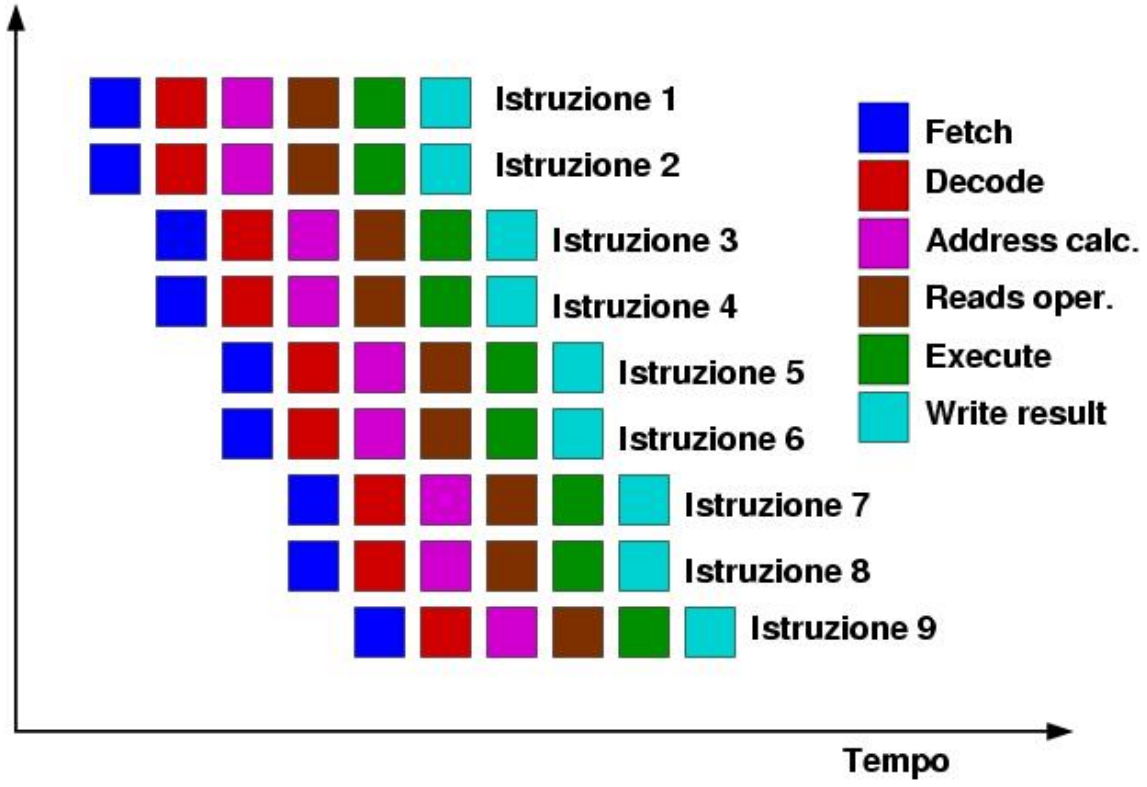
CPU superpipelined: esempio



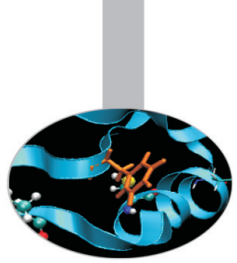
- Un'istruzione è composta da sei passi
- Nell'ipotesi che un passo venga completato in un ciclo:
  - \+ Esegue 1 istruzione ogni ciclo (a pipeline piena)
  - \+ Permette di aumentare il clock
  - \- Esegue 1 istruzione ogni 6 cicli (a pipeline vuota)
  - \- Più complessa da realizzare
  - \- Richiede una bandwidth maggiore
- Esempio (istruzione = calcolo floating point)
  - Clock = 200 Mhz
  - Mflops = 200/33 (pipeline piena/in stallo)
  - Bandwidth = 8*200 $\rightarrow$ 1.6 GB/s

CPU superscalare



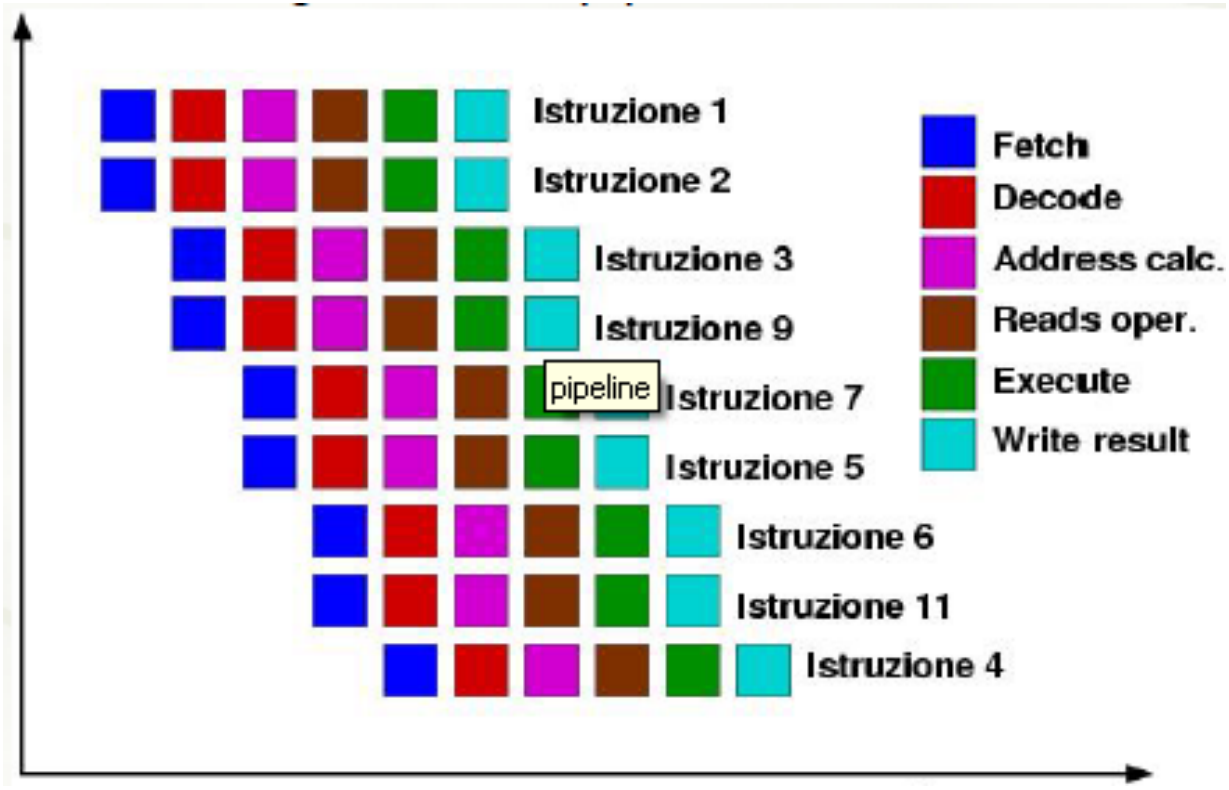


CPU superscalare: esempio

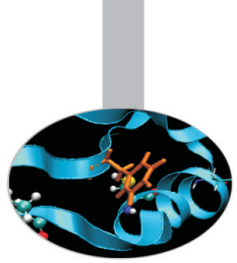


- Un'istruzione è composta da sei passi;
- Nell'ipotesi che un passo venga completato in un ciclo:
  - \+ Esegue 2 istruzioni ogni ciclo (a pipeline piena)
  - \- Esegue 1 istruzione ogni 6 cicli (a pipeline vuota)
  - \- Più complessa da realizzare
  - \- Richiede una bandwidth maggiore ed indipendenza tra le istruzioni
- Esempio (istruzione = calcolo floating point)
  - Clock = 200 Mhz
  - Mflops = 400/33 (pipeline piena/in stallo)
  - Bandwidth = 8*2*200 $\rightarrow$ 3.2 GB/s

Out of Order execution CPU



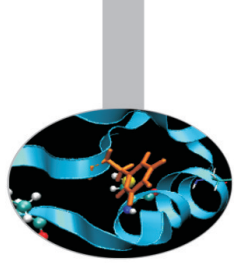
OoO CPU: esempio



- Riordina dinamicamente le istruzioni
- anticipa istruzioni i cui operandi sono già disponibili
- postpone istruzioni i cui operandi non sono ancora disponibili
- riordina letture e scritture in memoria
- il tutto dipendentemente dalle unità funzionali libere

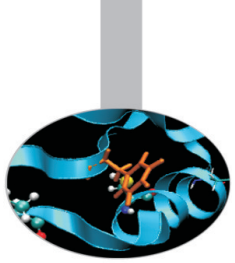
- Un'istruzione è composta da sei passi;
- Nell'ipotesi che un passo venga completato in un ciclo:
  - \+ Esegue 2 istruzioni ogni ciclo (a pipeline piena)
  - \+ Può ridurre lo stallo della pipeline
  - \- Esegue 1 istruzione ogni 6 cicli (a pipeline vuota)
  - \- Estremamente complessa da realizzare
- Esempio (istruzione = calcolo floating point)
  - Clock = 200 Mhz
  - Mflops = 400/ 33 (pipeline piena/in stallo)
  - Bandwidth = 8*2*200 $\rightarrow$ 3.2 GB/s

Pipeline



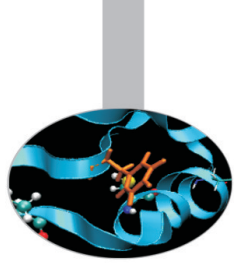
- Vantaggi:
  - Aumento potenza (di picco): da 33 a 400 Mflops.
  - Possibilità di diminuire il clock: da 100 a 200 Mhz.
- Problemi:
  - dipendenza tra i dati (Pipeline di calcolo)
  - dipendenza tra le istruzioni (Pipeline funzionale)
  - Bandwidth necessaria: da 264 MB/s a 3200 MB/s
- Da evitare assolutamente:
  - DO WHILE, dipendenze inutili, procedure ricorsive

Pipeline Funzionale



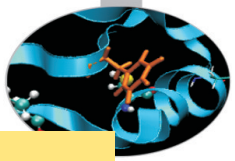
- L'esecuzione di un'istruzione presenta una pipeline (funzionale).
  1. Prendere l'istruzione dalla memoria
  2. Decodificare l'istruzione
  3. Inizializzare registri e prendere dati dalla memoria
  4. Eseguire l'istruzione (per esempio: somma di reali)
  5. Scrivere i risultati nella memoria.
- In questo caso limitano il riempimento della pipeline:
  - salti nel programma (function, subroutine, goto)
  - clausole IF-THEN-ELSE (eccezioni)
- Cosa fare:
  - inlining esplicito o automatico, test negli IF quasi sempre **`false`**

Riempimento pipeline



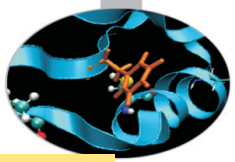
- I problemi principali sono:
  - come rimuovere la dipendenza tra le istruzioni?
  - come fornire abbastanza istruzioni indipendenti?
  - come fare in presenza di salti condizionali (if e loop)?
  - come fornire tutti i dati necessari?
- Chi deve modificare il codice?
  - la CPU? $\rightarrow$ sì per quel che può, OOO e branch prediction
  - il compilatore? $\rightarrow$ sì per quel che può, se lo evince dal codice
  - l'utente? $\rightarrow$ sì, nei casi più complessi
- Tecniche
  - loop unrolling $\rightarrow$ srotolo il loop
  - loop merging $\rightarrow$ fondo più loop insieme
  - loop splitting $\rightarrow$ decompongo loop complessi
  - inlining di funzioni $\rightarrow$ evito interruzioni di flusso di istruzioni

Esempio ..



```
      do 1000 z=1,nz
         do 1000 y=1,ny
            do 1000 x=1,nx/2
               hr(x,y,z,1)=hr(x,y,z,1)*norm      !! primo loop
               hi(x,y,z,1)=hi(x,y,z,1)*norm
               hr(x,y,z,2)=hr(x,y,z,2)*norm
               hi(x,y,z,2)=hi(x,y,z,2)*norm
               hr(x,y,z,3)=hr(x,y,z,3)*norm
               hi(x,y,z,3)=hi(x,y,z,3)*norm
1000  continue
      do 2000 z=1,nz
         do 2000 y=1,ny
            do 2000 x=1,nx/2
               ur(x,y,z,1)=ur(x,y,z,1)*norm      !! secondo loop
               ur(x,y,z,1)=ur(x,y,z,1)*norm
               ur(x,y,z,2)=ur(x,y,z,2)*norm
               ui(x,y,z,2)=ui(x,y,z,2)*norm
               ui(x,y,z,3)=ui(x,y,z,3)*norm
               ui(x,y,z,3)=ui(x,y,z,3)*norm
2000  continue
```

Esempio

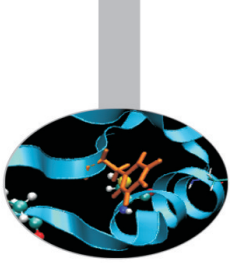


```
      do 3000 z=1,nz
          k3=beta(z)
          do 3000 y=1,ny
             k2=eta(y)
             do 3000 x=1,nx/2
                k1=alfa(x,1)                          !! terzo loop
                k_quad=k1*k1+k2*k2+k3*k3+k_quad_cfr
                k_quad=1./k_quad
                sr=k1*hr(x,y,z,1)+k2*hr(x,y,z,2)+k3*hr(x,y,z,3)
                si=k1*hi(x,y,z,1)+k2*hi(x,y,z,2)+k3*hi(x,y,z,3)
                hr(x,y,z,1)=hr(x,y,z,1)-sr*k1*k_quad
                hr(x,y,z,2)=hr(x,y,z,2)-sr*k2*k_quad
                hr(x,y,z,3)=hr(x,y,z,3)-sr*k3*k_quad
                hi(x,y,z,1)=hi(x,y,z,1)-si*k1*k_quad
                hi(x,y,z,2)=hi(x,y,z,2)-si*k2*k_quad
                hi(x,y,z,3)=hi(x,y,z,3)-si*k3*k_quad
                k_quad_cfr=0.
3000  continue
 usertime   1+2+3 = 1.646515
```

Esempio: loop merging

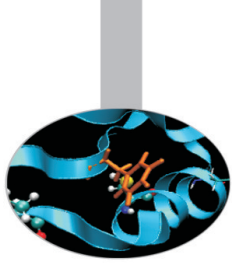
```
      do 3000 z=1,nz
         k3=beta(z)
         do 3000 y=1,ny
            k2=eta(y)
            do 3000 x=1,nx/2
               hr(x,y,z,1)=hr(x,y,z,1)*norm            !! primo loop
               hi(x,y,z,1)=hi(x,y,z,1)*norm
               hr(x,y,z,2)=hr(x,y,z,2)*norm
               hi(x,y,z,2)=hi(x,y,z,2)*norm
               hr(x,y,z,3)=hr(x,y,z,3)*norm
               hi(x,y,z,3)=hi(x,y,z,3)*norm
               ur(x,y,z,1)=ur(x,y,z,1)*norm          !! secondo loop
               ur(x,y,z,1)=ur(x,y,z,1)*norm
               ur(x,y,z,2)=ur(x,y,z,2)*norm
               ui(x,y,z,2)=ui(x,y,z,2)*norm
               ui(x,y,z,3)=ui(x,y,z,3)*norm
               ui(x,y,z,3)=ui(x,y,z,3)*norm
               k1=alfa(x,1)                          !! terzo loop
               k_quad=k1*k1+k2*k2+k3*k3+k_quad_cfr
               k_quad=1./k_quad
               sr=k1*hr(x,y,z,1)+k2*hr(x,y,z,2)+k3*hr(x,y,z,3)
               si=k1*hi(x,y,z,1)+k2*hi(x,y,z,2)+k3*hi(x,y,z,3)
               hr(x,y,z,1)=hr(x,y,z,1)-sr*k1*k_quad
               hr(x,y,z,2)=hr(x,y,z,2)-sr*k2*k_quad
               hr(x,y,z,3)=hr(x,y,z,3)-sr*k3*k_quad
               hi(x,y,z,1)=hi(x,y,z,1)-si*k1*k_quad
               hi(x,y,z,2)=hi(x,y,z,2)-si*k2*k_quad
               hi(x,y,z,3)=hi(x,y,z,3)-si*k3*k_quad
               k_quad_cfr=0.
3000   continue

 usertime   0.983780  (1+2+3 = totale: 1.646515)
```

Loop splitting



- L'operazione inversa al loop merging è il loop splitting
  - si separa un singolo loop con molte istruzioni con più loop con meno istruzioni
  - Può favorire il lavoro del compilatore consentendogli di fare unrolling e/o blocking (operazione fattibile con loop semplici);
  - Semplifica il flusso delle istruzioni;
  - Il vantaggio/svantaggio è difficilmente quantificabile a priori.

Loop unrolling

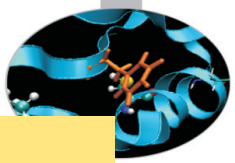


- All'interno di un loop, si sviluppa parzialmente il ciclo.

```
do j = 1, nj                    -> do j = 1, nj
do i = 1, ni                    -> do i = 1, ni, 2
 a(i,j)=a(i,j)+c*b(i,j)         ->  a(i  ,j)=a(i  ,j)+c*b(i  ,j)
                                ->  a(i+1,j)=a(i+1,j)+c*b(i+1,j)
```

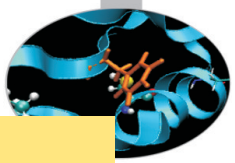
  - Maggiore riempimento della pipeline;
  - Riduce le strutture di controllo;
  - Non usabile quando c'è dipendenza tra i dati;
  - In genere è gestito dal compilatore;
  - Esiste un unrolling ideale (dipende da problema, macchina, etc...);
  - Implica un movimento più veloce di dati da e per la memoria (richiede maggiore bandwidth);

Esempio



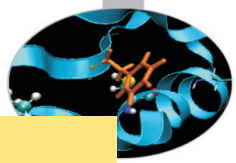
```
      do 2000 z=1,nzp
         do 2000 y=1,nyp
            do 2000 x=1,nxp/2
              do 3000 i=1,3
                 ar(i)=ur(x,y,z,i)
                 ai(i)=ui(x,y,z,i)
                 br(i)=hr(x,y,z,i)
                 bi(i)=hi(x,y,z,i)
3000 continue
               hr(x,y,z,1)=ar(2)*br(3)-ar(3)*br(2)
               hr(x,y,z,2)=ar(3)*br(1)-ar(1)*br(3)
               hr(x,y,z,3)=ar(1)*br(2)-ar(2)*br(1)
               hi(x,y,z,1)=ai(2)*bi(3)-ai(3)*bi(2)
               hi(x,y,z,2)=ai(3)*bi(1)-ai(1)*bi(3)
               hi(x,y,z,3)=ai(1)*bi(2)-ai(2)*bi(1)
2000  continue

usertime    2.01301
```

Esempio: unrolling



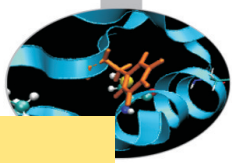
```
      do 2000 z=1,nzp
         do 2000 y=1,nyp
            do 2000 x=1,nxp/2
               ar(1)=ur(x,y,z,1)
               ai(1)=ui(x,y,z,1)
               br(1)=hr(x,y,z,1)
               bi(1)=hi(x,y,z,1)
               ar(2)=ur(x,y,z,2)
               ai(2)=ui(x,y,z,2)
               ...
               hr(x,y,z,1)=ar(2)*br(3)-ar(3)*br(2)
               hr(x,y,z,2)=ar(3)*br(1)-ar(1)*br(3)
               hr(x,y,z,3)=ar(1)*br(2)-ar(2)*br(1)
               hi(x,y,z,1)=ai(2)*bi(3)-ai(3)*bi(2)
               ...
2000  continue

usertime    1.41762
```

Unroll loop esterno



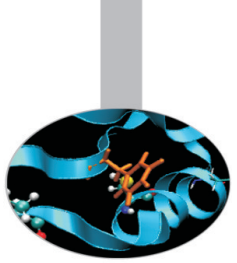
```
        do j= 1, n      !caso 1
           do i= 1, n
              y(j) = y(j) + x(i)*a(i,j)
           enddo
        enddo
.......
        do j= 1, n, 4   !caso 2
           do i= 1, n
              y(j+0) = y(j+0) + x(i)*a(i,j+0)
              y(j+1) = y(j+1) + x(i)*a(i,j+1)
              y(j+2) = y(j+2) + x(i)*a(i,j+2)
              y(j+3) = y(j+3) + x(i)*a(i,j+3)
           enddo
        enddo
Tempi (f77 -O2 (-O5)):
caso 1: 0.8488270  (0.3282020)
caso 2: 0.3540250  (0.3215380) -> unrolling di 4
caso 2: 0.3248700  (0.2915500) -> unrolling di 8
```

Reduction & Unroll



```
    do j = i, nj ! caso normale 1)
       do i = i, ni
          somma = somma + a(i,j)
       end do
    end do
.....
    do j = i, nj !reduction a 4 elementi.. 2)
       do i = i, ni, 4
          somma_1 = somma_1 + a(i+0,j)
          somma_2 = somma_2 + a(i+1,j)
          somma_3 = somma_3 + a(i+2,j)
          somma_4 = somma_4 + a(i+3,j)
       end do
    end do
    somma = somma_1 + somma_2 + somma_3 + somma_4
f77 -native -O2 (-O4)
tempo 1) ---> 4.49785 (2.94240)
tempo 2) ---> 3.54803 (2.75964)
```

Unrolling: commenti I

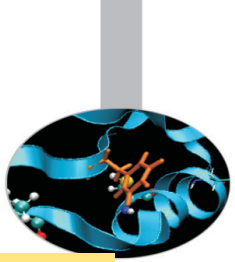


- In genere l'unrolling è gestito dal compilatore
- Si può pure inibire il compilatore non facendogli capire quando le istruzioni sono indipendenti.
- Cosa può fare qui il compilatore?

```
do j = 1, nj
   do i = 1, ni
      a(low(i),up(j)) = a(low(i),up(j)) + b(i,j) * c(i,j)
   enddo
enddo
```

- Se non c'è dipendenza tra `low(i),up(j)` allora si può fare l'unrolling (a mano ...)

Unrolling: commenti (II)



- e qui?

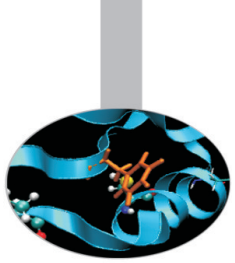
```
void accumulate(int n, double *a, double *s) {
   int i;
   for(i=0; i < n; i++)
      a[i] += s[i];
}
```

- Il compilatore non fa unrolling, nel timore di un possibile aliasing di **a** e **s** in chiamate tipo:
  accumulate(10, b+1, b); che succede con unrolling?
- Dichiarando che non vi sarà aliasing:

```
void accumulate(int n, double* restrict a, double* restrict s) {
   int i;
   for(i=0; i < n; ++i)
      a[i] += s[i];
}
```

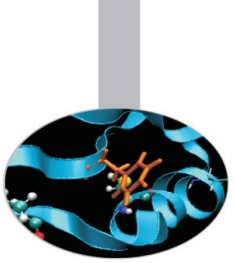
- Il compilatore ora potrà fare unrolling fiducioso che il programmatore non verrà meno alla parola data

Unrolling: commenti (III)



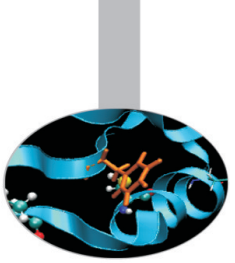
- Inibisce inoltre l'unrolling (ed in genere il riempimento della pipeline):
  - Salti condizionali (`if` ...)
  - Chiamate a funzioni anche intrinseche o di libreria (sin, exp, ...)
  - Chiamate a procedure all'interno di un loop
  - Operazioni di I/0 all'interno di un loop

Opzioni del compilatore



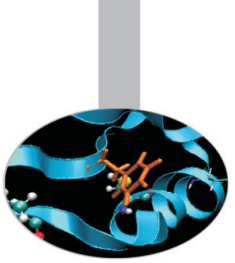
- Come posso sapere cosa può fare il compilatore?
- Come posso sapere cosa effettivamente ha fatto il compilatore?

Opzioni del compilatore



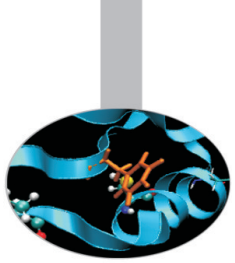
- Come posso sapere cosa può fare il compilatore?
- Come posso sapere cosa effettivamente ha fatto il compilatore?
- Consulto il manuale.

Opzioni del compilatore



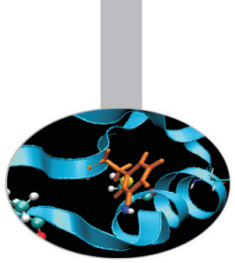
- Come posso sapere cosa può fare il compilatore?
- Come posso sapere cosa effettivamente ha fatto il compilatore?
- Consulto il manuale.
- Provate, ad esempio, il compilatore intel con la flag **-opt-report**.

Esercitazione:sommario



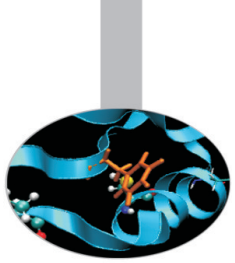
- Prodotto matrice matrice:unrolling
- Prodotto matrice matrice:unrolling e padding

src/eser_4/fortran/mm.f90



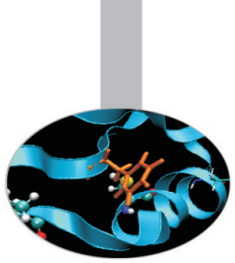
```
1   ...
2       integer, parameter :: n=1024  ! size of the matrix
3       integer, parameter :: step=4
4       integer, parameter :: npad=0
5   ...
6       real(my_kind) a(1:n+npad,1:n) ! matrix
7       real(my_kind) b(1:n+npad,1:n) ! matrix
8       real(my_kind) c(1:n+npad,1:n) ! matrix (destination)
9
10       do j = 1, n, 2
11            do k = 1, n
12               do i = 1, n
13                  c(i,j+0) = c(i,j+0) + a(i,k)*b(k,j+0)
14                  c(i,j+1) = c(i,j+1) + a(i,k)*b(k,j+1)
15               enddo
16            enddo
17       enddo
18  ...
```

src/eser_4/c/mm.c



```
1  #define nn (1024)
2  #define step (4)
3  #define npad (0)
4
5  double a[nn+npad][nn+npad];        /** matrici**/
6  double b[nn+npad][nn+npad];
7  double c[nn+npad][nn+npad];
8  ...
9  for (i = 0; i < nn; i+=2)
10    for (k = 0; k < nn; k++)
11       for (j = 0; j < nn; j++) {
12           c[i+0][j] = c[i+0][j] + a[i+0][k]*b[k][j];
13           c[i+1][j] = c[i+1][j] + a[i+1][k]*b[k][j];
14 }
15 ...
```

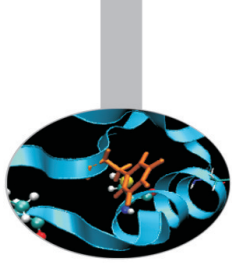
Unrolling loop esterno



- Andate su *eser*_4 (fortran/mm.f90 o c/mm.c)
- Misurare i tempi per matrici con N=1024 al variare dell'unrolling del loop esterno
- Usare Fortran e/o c
- Usare i compilatori gnu con livello di ottimizzazione -O3

Unrolling	Fortran	C
2		
4		
8		
16		

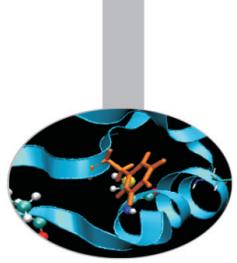
Unrolling loop esterno e padding



- Andate su *eser*_4 (fortran/mm.f90 o c/mm.c)
- Misurare i tempi per matrici con N=1024 al variare dell'unrolling del loop esterno con padding npad=9
- Usare Fortran e/o c
- Usare i compilatori gnu con livello di ottimizzazione -O3

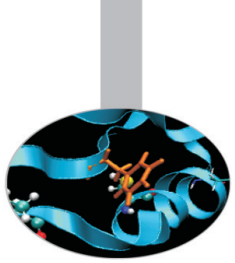
Unrolling	Fortran	C
2		
4		
8		
16		

Ultimo sforzo ...



- Qual é la massima prestazione ottenibile facendo uso di:
  - blocking
  - unrolling loop esterno
  - padding
  - . . . quant'altro
- per N=2048?

Outline



Introduzione

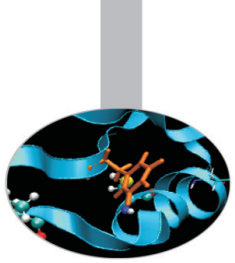
Architetture

La cache e il sistema di memoria

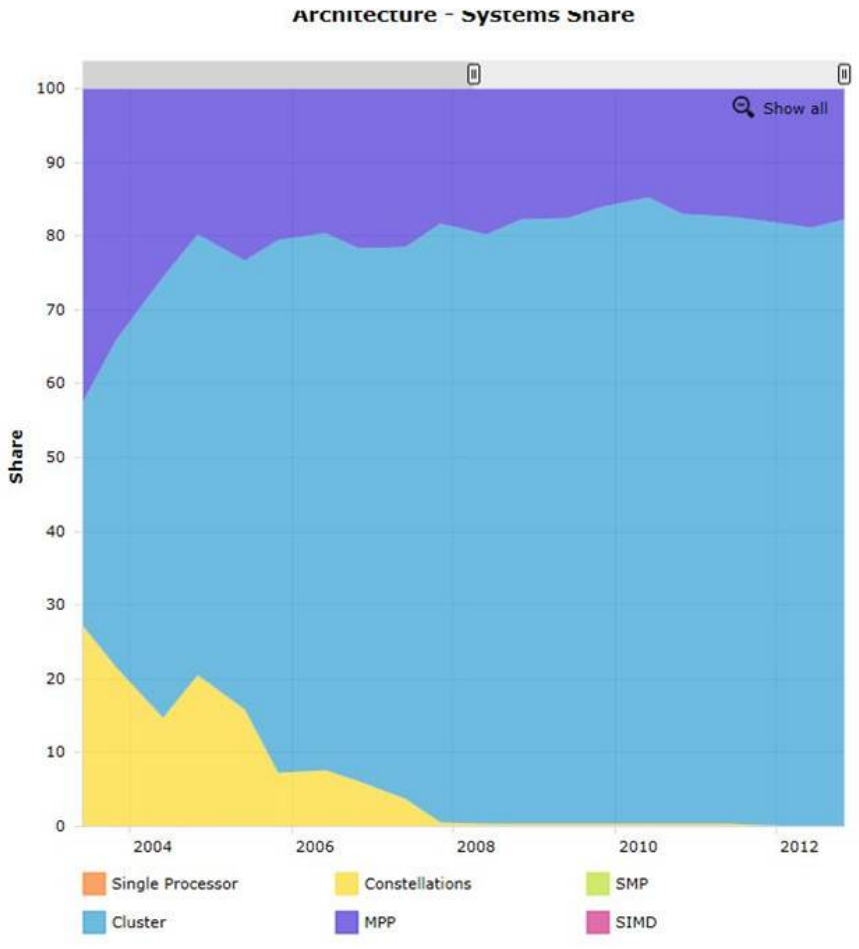
Pipeline

Profilers
- Motivazioni
- time
- top
- gprof
- Papi
- Scalasca
- Consigli finali

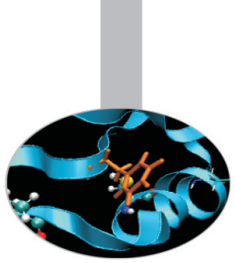
Outline

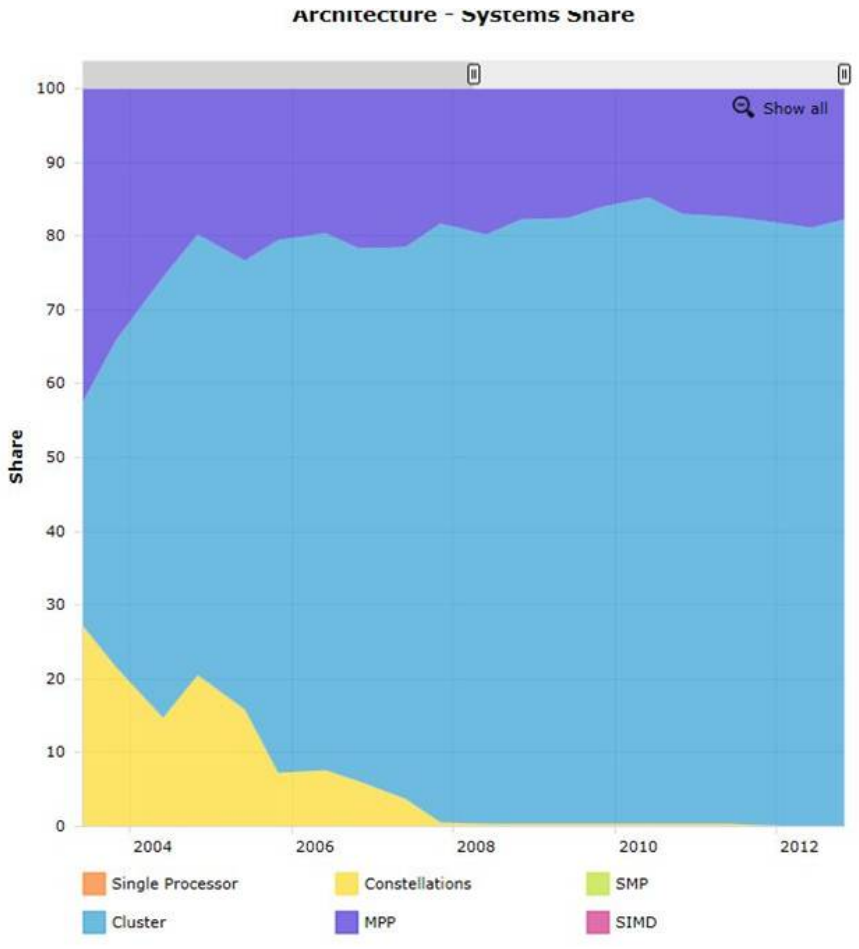


Il trend architetturale (Top500 list)



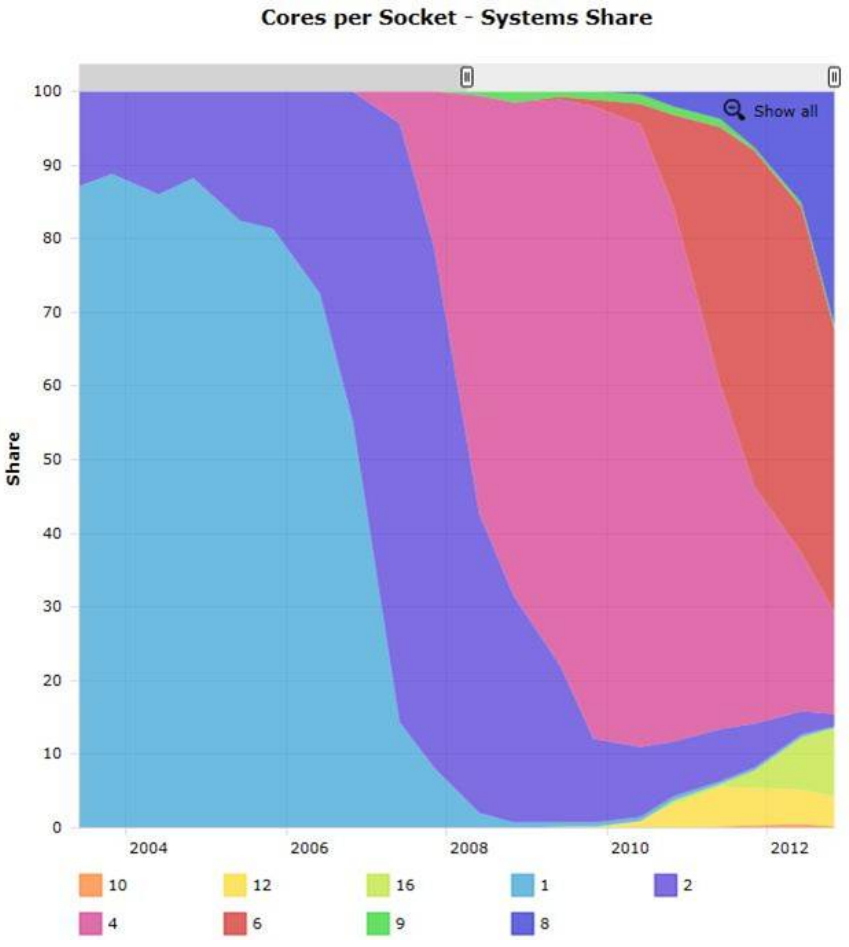
Il trend architetturale (Top500 list)



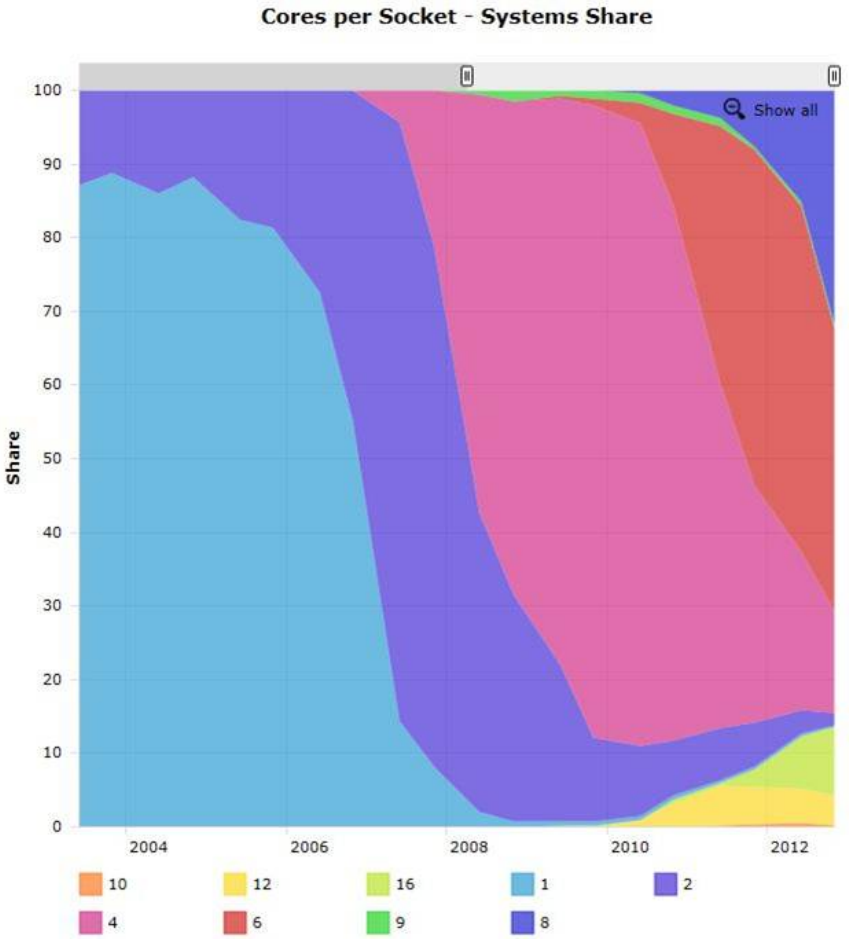


I cluster dominano il mercato dell'High Performance Computing

Il trend dei processori

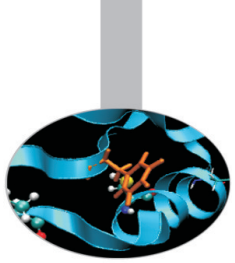


Il trend dei processori



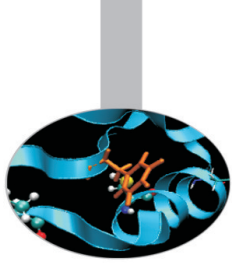
sempre piu processori "multicore" per "socket"

Perché misurare le prestazioni?



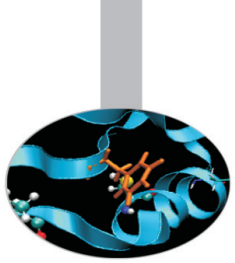
- Architetture sempre più "parallele" ed "ibride" il che implica:

Perché misurare le prestazioni?



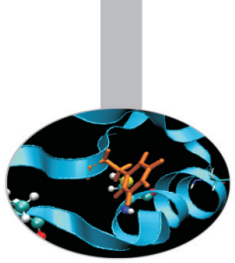
- Architetture sempre più "parallele" ed "ibride" il che implica:
  - "bandwidth" verso la memoria ridotta

Perché misurare le prestazioni?



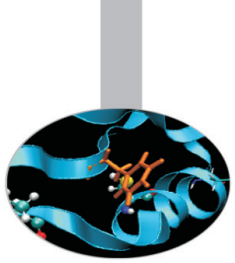
- Architetture sempre più "parallele" ed "ibride" il che implica:
  - "bandwidth" verso la memoria ridotta
  - quantità di memoria per "core" ridotta

Perché misurare le prestazioni?



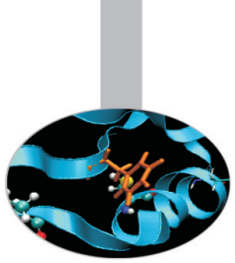
- Architetture sempre più "parallele" ed "ibride" il che implica:
  - "bandwidth" verso la memoria ridotta
  - quantità di memoria per "core" ridotta
  - gerarchia di memoria sempre più complessa

Perché misurare le prestazioni?



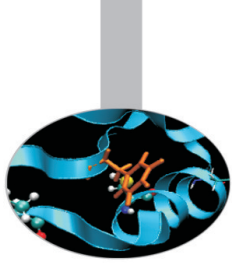
- Architetture sempre più "parallele" ed "ibride" il che implica:
  - "bandwidth" verso la memoria ridotta
  - quantità di memoria per "core" ridotta
  - gerarchia di memoria sempre più complessa
- La programmazione su queste macchine non è semplice

Perché misurare le prestazioni?



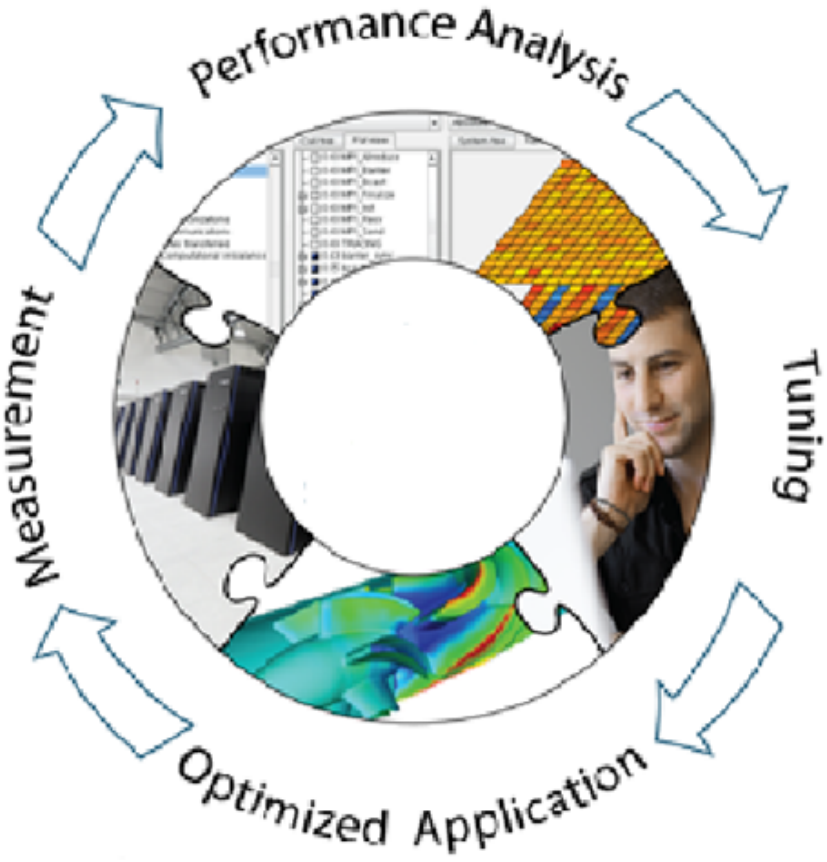
- Architetture sempre più "parallele" ed "ibride" il che implica:
  - "bandwidth" verso la memoria ridotta
  - quantità di memoria per "core" ridotta
  - gerarchia di memoria sempre più complessa
- La programmazione su queste macchine non è semplice
- "Spremere" le prestazioni dei codici di calcolo non è semplice

Perché misurare le prestazioni?

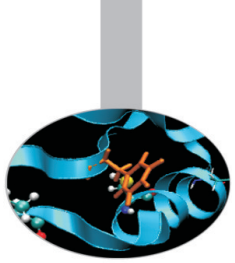


- Architetture sempre più "parallele" ed "ibride" il che implica:
  - "bandwidth" verso la memoria ridotta
  - quantità di memoria per "core" ridotta
  - gerarchia di memoria sempre più complessa
- La programmazione su queste macchine non è semplice
- "Spremere" le prestazioni dei codici di calcolo non è semplice
- Risulta pertanto fondamentale conoscere ed utilizzare strumenti di "Profiling" di supporto ad una successiva ottimizzazione, parallelizzazione, etc della nostra applicazione

Il ciclo vita delle prestazioni

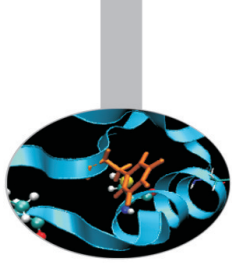


Profiling



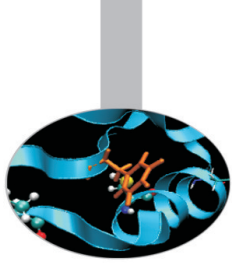
- Una tipica applicazione seriale o parallela è composta da una serie di procedure.
- Per ottimizzare o parallelizzare un codice (che può essere anche molto complesso) è fondamentale:

Profiling



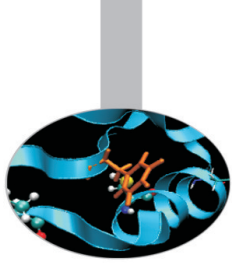
- Una tipica applicazione seriale o parallela è composta da una serie di procedure.
- Per ottimizzare o parallelizzare un codice (che può essere anche molto complesso) è fondamentale:
  - trovare quelle parti dove viene speso gran parte del tempo

Profiling



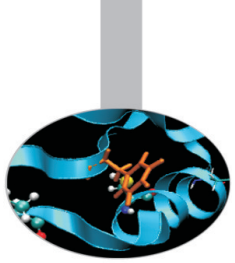
- Una tipica applicazione seriale o parallela è composta da una serie di procedure.
- Per ottimizzare o parallelizzare un codice (che può essere anche molto complesso) è fondamentale:
  - trovare quelle parti dove viene speso gran parte del tempo
  - trovare il "grafo" e le dipendenze delle varie parti del codice

Profiling



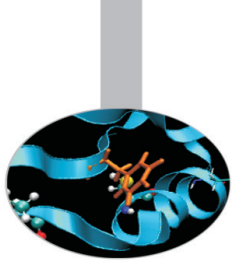
- Una tipica applicazione seriale o parallela è composta da una serie di procedure.
- Per ottimizzare o parallelizzare un codice (che può essere anche molto complesso) è fondamentale:
  - trovare quelle parti dove viene speso gran parte del tempo
  - trovare il "grafo" e le dipendenze delle varie parti del codice
  - trovare i punti "critici" e i "colli-di-bottiglia" del nostro codice

Profiling



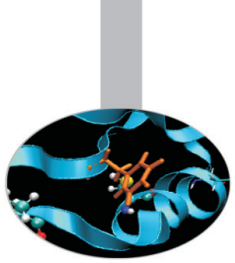
- Una tipica applicazione seriale o parallela è composta da una serie di procedure.
- Per ottimizzare o parallelizzare un codice (che può essere anche molto complesso) è fondamentale:
  - trovare quelle parti dove viene speso gran parte del tempo
  - trovare il "grafo" e le dipendenze delle varie parti del codice
  - trovare i punti "critici" e i "colli-di-bottiglia" del nostro codice
- Non è sempre semplice (specie in codici scientifici o di comunità) avere una misura precisa dei punti di cui sopra.

Profiling



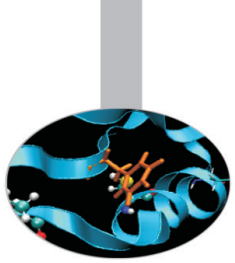
- Una tipica applicazione seriale o parallela è composta da una serie di procedure.
- Per ottimizzare o parallelizzare un codice (che può essere anche molto complesso) è fondamentale:
  - trovare quelle parti dove viene speso gran parte del tempo
  - trovare il "grafo" e le dipendenze delle varie parti del codice
  - trovare i punti "critici" e i "colli-di-bottiglia" del nostro codice
- Non è sempre semplice (specie in codici scientifici o di comunità) avere una misura precisa dei punti di cui sopra.
- L'idea è dunque quella di iniziare da un "Profiling" della nostra applicazione che essenzialmente consiste nel monitoraggio del nostro codice nel momento stesso in cui viene eseguito.

Profiling



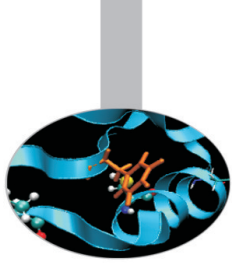
- Esistono una gran varietà di strumenti di "Profiling" che si differenziano, essenzialmente, per:

Profiling



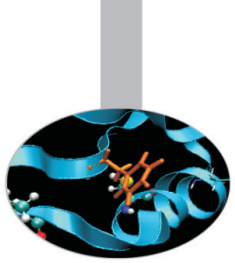
- Esistono una gran varietà di strumenti di "Profiling" che si differenziano, essenzialmente, per:
  - semplicità o meno di utilizzo

Profiling



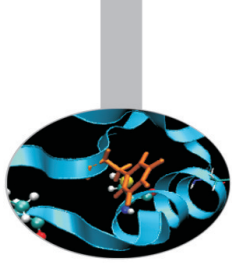
- Esistono una gran varietà di strumenti di "Profiling" che si differenziano, essenzialmente, per:
  - semplicità o meno di utilizzo
  - proprietari o di pubblico dominio

Profiling



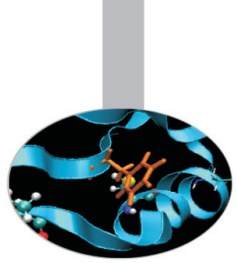
- Esistono una gran varietà di strumenti di "Profiling" che si differenziano, essenzialmente, per:
  - semplicità o meno di utilizzo
  - proprietari o di pubblico dominio
  - intrusivi o no

Profiling



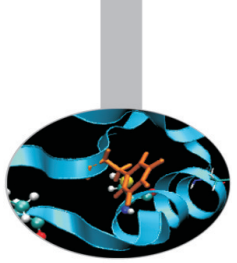
- Esistono una gran varietà di strumenti di "Profiling" che si differenziano, essenzialmente, per:
  - semplicità o meno di utilizzo
  - proprietari o di pubblico dominio
  - intrusivi o no
  - etc, etc

Profiling

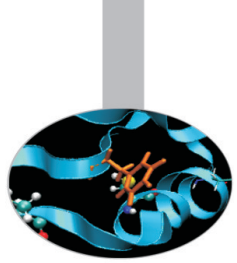


- Esistono una gran varietà di strumenti di "Profiling" che si differenziano, essenzialmente, per:
  - semplicità o meno di utilizzo
  - proprietari o di pubblico dominio
  - intrusivi o no
  - etc, etc
- Partiamo dai più semplici per arrivare a quelli più complessi, con l'idea che tutte le informazioni che raccogliamo possano essere utilizzate complessivamente per migliorare le prestazioni della nostra applicazione.

Outline

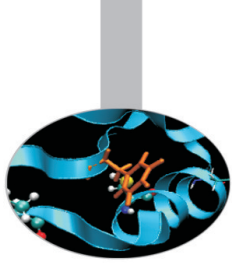


time: caratteristiche



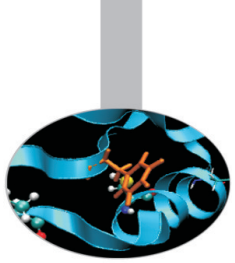
- Presente in tutte le architetture *Unix /Linux*.

time: caratteristiche



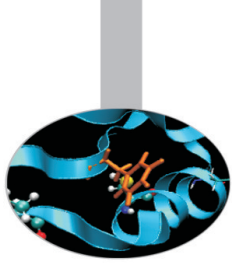
- Presente in tutte le architetture *Unix /Linux*.
- Fornisce il tempo totale di esecuzione di un programma ed altre utili informazioni.

time: caratteristiche



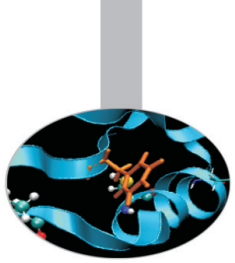
- Presente in tutte le architetture *Unix /Linux*.
- Fornisce il tempo totale di esecuzione di un programma ed altre utili informazioni.
- Non ha bisogno che il programma sia compilato con particolari opzioni di compilazione (assolutamente non intrusivo).

time: caratteristiche



- Presente in tutte le architetture *Unix /Linux*.
- Fornisce il tempo totale di esecuzione di un programma ed altre utili informazioni.
- Non ha bisogno che il programma sia compilato con particolari opzioni di compilazione (assolutamente non intrusivo).
- time <nome_eseguibile>

time: caratteristiche

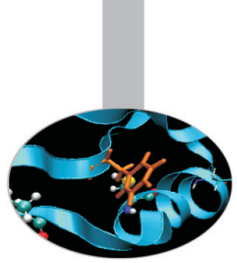


- Presente in tutte le architetture *Unix /Linux*.
- Fornisce il tempo totale di esecuzione di un programma ed altre utili informazioni.
- Non ha bisogno che il programma sia compilato con particolari opzioni di compilazione (assolutamente non intrusivo).
- time <nome_eseguibile>

un tipico output:

```
[lanucara@louis ~/CORSO2013]$ /usr/bin/time ./a.out<realloc.in
9.29user 6.19system 0:15.52elapsed 99%CPU (0avgtext+0avgdata 18753424maxresident)k
0inputs+0outputs (0major+78809minor)pagefaults 0swaps
```

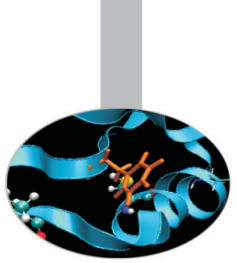
time: output



9.29u

1. (*User time*) Il tempo di CPU (in secondi) impiegato dall'eseguibile a girare.

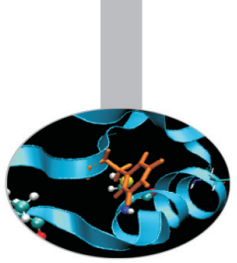
time: output



9.29u 6.19s

1. (*User time*) Il tempo di CPU (in secondi) impiegato dall'eseguibile a girare.
2. (*System time*) Il tempo di CPU (in secondi) impiegato dal processo in chiamate di sistema durante l'esecuzione dell programma.

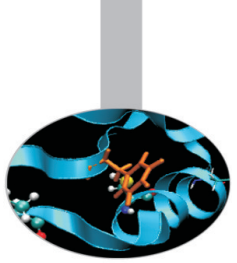
time: output



9.29u 6.19s 0:15.52

1. (*User time*) Il tempo di CPU (in secondi) impiegato dall'eseguibile a girare.
2. (*System time*) Il tempo di CPU (in secondi) impiegato dal processo in chiamate di sistema durante l'esecuzione dell programma.
3. (*Elapsed time*) Il tempo (ore:minuti:secondi) effettivamente impiegato ("elapsed time").

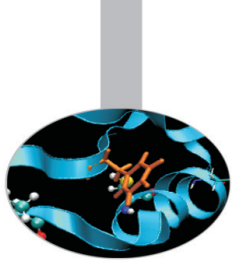
time: output



9.29u 6.19s 0:15.52 99%

1. (*User time*) Il tempo di CPU (in secondi) impiegato dall'eseguibile a girare.
2. (*System time*) Il tempo di CPU (in secondi) impiegato dal processo in chiamate di sistema durante l'esecuzione dell programma.
3. (*Elapsed time*) Il tempo (ore:minuti:secondi) effettivamente impiegato ("elapsed time").
4. La percentuale di CPU impiegata nel processo.

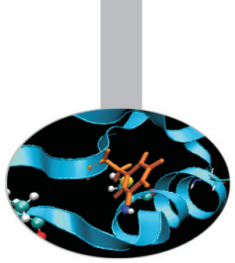
time: output



```
9.29u 6.19s 0:15.52 99% 0avgtext+0avgdata
18753424maxresident)k
```

1. (*User time*) Il tempo di CPU (in secondi) impiegato dall'eseguibile a girare.
2. (*System time*) Il tempo di CPU (in secondi) impiegato dal processo in chiamate di sistema durante l'esecuzione dell programma.
3. (*Elapsed time*) Il tempo (ore:minuti:secondi) effettivamente impiegato ("elapsed time").
4. La percentuale di CPU impiegata nel processo.
5. parametri relativi all' area dati (complessiva) del processo eseguibile (in Kbytes).

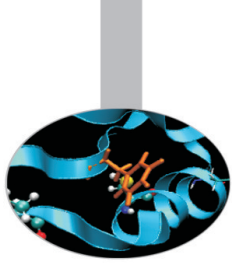
time: output



```
9.29u 6.19s 0:15.52 99% 0avgtext+0avgdata
18753424maxresident)k 0inputs+0outputs
```

1. (*User time*) Il tempo di CPU (in secondi) impiegato dall'eseguibile a girare.
2. (*System time*) Il tempo di CPU (in secondi) impiegato dal processo in chiamate di sistema durante l'esecuzione dell programma.
3. (*Elapsed time*) Il tempo (ore:minuti:secondi) effettivamente impiegato ("elapsed time").
4. La percentuale di CPU impiegata nel processo.
5. parametri relativi all' area dati (complessiva) del processo eseguibile (in Kbytes).
6. parametri relativi all'input/output (interi).

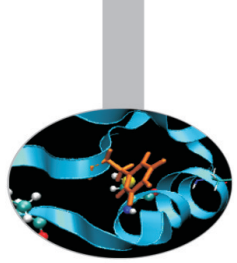
time: output



```
9.29u 6.19s 0:15.52 99% 0avgtext+0avgdata
18753424maxresident)k 0inputs+0outputs 0major+78809minor
```

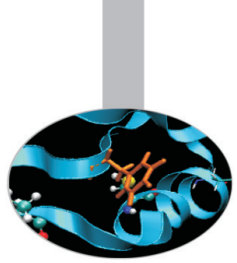
1. (*User time*) Il tempo di CPU (in secondi) impiegato dall'eseguibile a girare.
2. (*System time*) Il tempo di CPU (in secondi) impiegato dal processo in chiamate di sistema durante l'esecuzione dell programma.
3. (*Elapsed time*) Il tempo (ore:minuti:secondi) effettivamente impiegato ("elapsed time").
4. La percentuale di CPU impiegata nel processo.
5. parametri relativi all' area dati (complessiva) del processo eseguibile (in Kbytes).
6. parametri relativi all'input/output (interi).
7. L'uso di page-faults (interi).

time-output



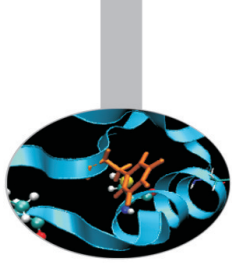
- L'uso di time su questo eseguibile ci ha dato alcune informazioni interessanti:

time-output



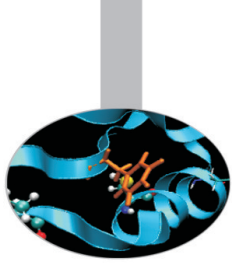
- L'uso di time su questo eseguibile ci ha dato alcune informazioni interessanti:
  - (*Lo "user" time è confrontabile con il "sys" time*)

time-output



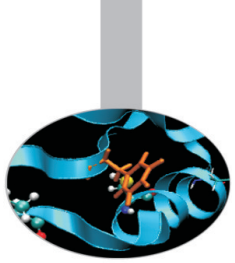
- L'uso di time su questo eseguibile ci ha dato alcune informazioni interessanti:
  - (*Lo "user" time è confrontabile con il "sys" time*)
  - (*La percentuale di utilizzo della CPU è quasi del 100%*)

time-output



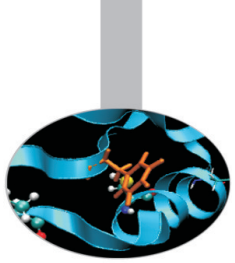
- L'uso di time su questo eseguibile ci ha dato alcune informazioni interessanti:
  - (*Lo "user" time è confrontabile con il "sys" time*)
  - (*La percentuale di utilizzo della CPU è quasi del 100%*)
  - (*Non è presente I/O*)

time-output



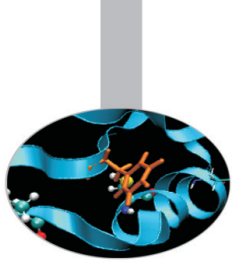
- L'uso di time su questo eseguibile ci ha dato alcune informazioni interessanti:
  - (*Lo "user" time è confrontabile con il "sys" time*)
  - (*La percentuale di utilizzo della CPU è quasi del 100%*)
  - (*Non è presente I/O*)
  - (*Non vi sono quasi per nulla "page-faults"*)

time-output



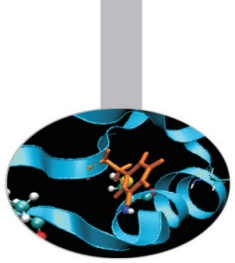
- L'uso di time su questo eseguibile ci ha dato alcune informazioni interessanti:
  - (*Lo "user" time è confrontabile con il "sys" time*)
  - (*La percentuale di utilizzo della CPU è quasi del 100%*)
  - (*Non è presente I/O*)
  - (*Non vi sono quasi per nulla "page-faults"*)
  - (*L'area dati (massima) durante l'esecuzione è di circa* 18*Gbytes*)

time-output



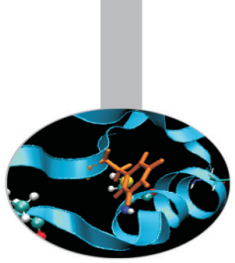
- L'uso di time su questo eseguibile ci ha dato alcune informazioni interessanti:
  - (*Lo "user" time è confrontabile con il "sys" time*)
  - (*La percentuale di utilizzo della CPU è quasi del 100%*)
  - (*Non è presente I/O*)
  - (*Non vi sono quasi per nulla "page-faults"*)
  - (*L'area dati (massima) durante l'esecuzione è di circa* 18*Gbytes*)
  - in realtà questo numero deve essere diviso per 4!
- è un ben noto "bug" della versione "standard" del comando time (GNU). È dovuto al fatto che "time" converte erroneamente da "pages" a Kbytes anche se il dato è gia in "Kbytes".
- Il valore corretto per il nostro eseguibile è dunque circa 4 Gbytes.

Page-faults



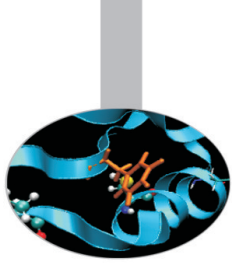
- se aumentiamo il numero di iterazioni della nostra simulazione il numero di "page-faults" è molto piu grande (circa 8 milioni). Cosa sta succedendo?

Page-faults



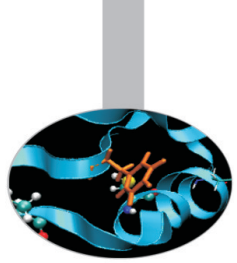
- se aumentiamo il numero di iterazioni della nostra simulazione il numero di "page-faults" è molto piu grande (circa 8 milioni). Cosa sta succedendo?
- Un "page-fault" è un segnale generato dalla CPU, con conseguente reazione del sistema operativo, quando un programma tenta di accedere ad una pagina di memoria virtuale non presente, al momento, in memoria RAM.

Page-faults



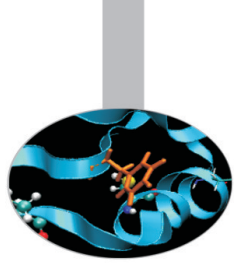
- se aumentiamo il numero di iterazioni della nostra simulazione il numero di "page-faults" è molto piu grande (circa 8 milioni). Cosa sta succedendo?
- Un "page-fault" è un segnale generato dalla CPU, con conseguente reazione del sistema operativo, quando un programma tenta di accedere ad una pagina di memoria virtuale non presente, al momento, in memoria RAM.
- La risposta del sistema operativo consiste nel caricare in memoria la pagina richiesta, facendo spazio spostando su disco altre parti non immediatamente necessarie.

Page-faults



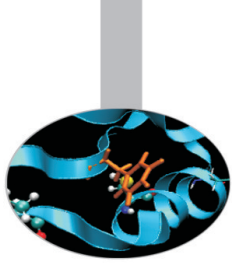
- se aumentiamo il numero di iterazioni della nostra simulazione il numero di "page-faults" è molto piu grande (circa 8 milioni). Cosa sta succedendo?
- Un "page-fault" è un segnale generato dalla CPU, con conseguente reazione del sistema operativo, quando un programma tenta di accedere ad una pagina di memoria virtuale non presente, al momento, in memoria RAM.
- La risposta del sistema operativo consiste nel caricare in memoria la pagina richiesta, facendo spazio spostando su disco altre parti non immediatamente necessarie.
- Operazione che richiede un gran dispendio di risorse e che rallenta l'esecuzione del nostro eseguibile.

time: Analisi output



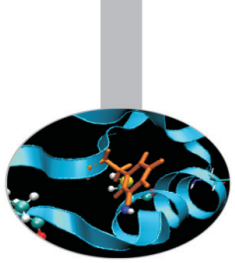
- Per questo codice *System time* $\sim$ *User time*.

time: Analisi output



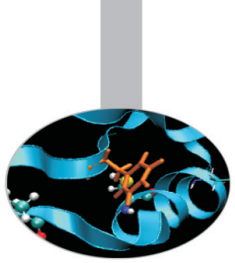
- Per questo codice *System time* $\sim$ *User time*.
- è indice di molti page-faults o di cattivo uso della memoria e, nel caso specifico, di molte chiamate a sistema.

time: Analisi output



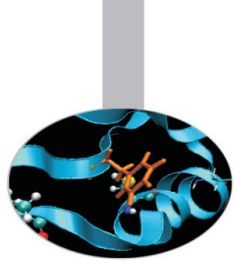
- Per questo codice *System time* $\sim$ *User time*.
- è indice di molti page-faults o di cattivo uso della memoria e, nel caso specifico, di molte chiamate a sistema.
  il programma "alloca" e "dealloca" nel corso dell'esecuzione una serie di matrici: questa cosa è altamente sconsigliata.

time: Analisi output



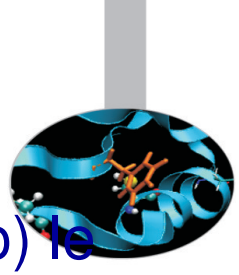
- Per questo codice *System time* $\sim$ *User time*.
- è indice di molti page-faults o di cattivo uso della memoria e, nel caso specifico, di molte chiamate a sistema.
  il programma "alloca" e "dealloca" nel corso dell'esecuzione una serie di matrici: questa cosa è altamente sconsigliata.
- *System time* + *User time* $\sim$ *Elapsed time*

time: Analisi output



- Per questo codice *System time* $\sim$ *User time*.
- è indice di molti page-faults o di cattivo uso della memoria e, nel caso specifico, di molte chiamate a sistema.
  il programma "alloca" e "dealloca" nel corso dell'esecuzione una serie di matrici: questa cosa è altamente sconsigliata.
- *System time* + *User time* $\sim$ *Elapsed time*
  non era presente alcun altro processo a contendere l'uso delle risorse.

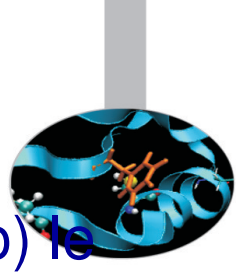
time: Analisi output



Cambiando la struttura del programma (eliminando le allocazioni e deallocazioni durante l'esecuzione dello stesso) le cose migliorano drasticamente:

```
[lanucara@louis ~/CORSO2013]$ /usr/bin/time ./a.out<realloc.in
2.28user 0.38system 0:02.67elapsed 99%CPU (0avgtext+0avgdata 9378352maxresident)k
0inputs+0outputs (0major+3153minor)pagefaults 0swaps
```

time: Analisi output

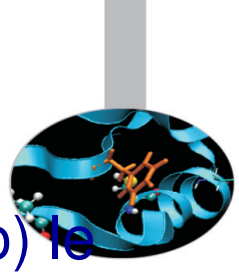


Cambiando la struttura del programma (eliminando le allocazioni e deallocazioni durante l'esecuzione dello stesso) le cose migliorano drasticamente:

```
[lanucara@louis ~/CORSO2013]$ /usr/bin/time ./a.out<realloc.in
2.28user 0.38system 0:02.67elapsed 99%CPU (0avgtext+0avgdata 9378352maxresident)k
0inputs+0outputs (0major+3153minor)pagefaults 0swaps
```

e ora correttamente *System time* $<<$ *User time*.

time: Analisi output



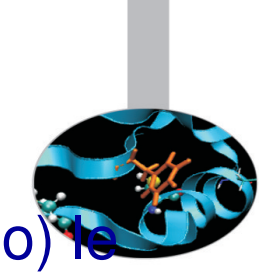
Cambiando la struttura del programma (eliminando le allocazioni e deallocazioni durante l'esecuzione dello stesso) le cose migliorano drasticamente:

```
[lanucara@louis ~/CORSO2013]$ /usr/bin/time ./a.out<realloc.in
2.28user 0.38system 0:02.67elapsed 99%CPU (0avgtext+0avgdata 9378352maxresident)k
0inputs+0outputs (0major+3153minor)pagefaults 0swaps
```

e ora correttamente *System time* $<<$ *User time*.

time è uno strumento che ci fornisce informazioni utili in modo non intrusivo.

time: Analisi output



Cambiando la struttura del programma (eliminando le allocazioni e deallocazioni durante l'esecuzione dello stesso) le cose migliorano drasticamente:

```
[lanucara@louis ~/CORSO2013]$ /usr/bin/time ./a.out<realloc.in
2.28user 0.38system 0:02.67elapsed 99%CPU (0avgtext+0avgdata 9378352maxresident)k
0inputs+0outputs (0major+3153minor)pagefaults 0swaps
```

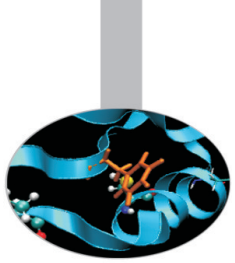
e ora correttamente *System time* << *User time*.

time è uno strumento che ci fornisce informazioni utili in modo non intrusivo.

Il problema è che risulta difficile, se non impossibile, estrarre qualcosa di interessante da simulazioni "reali". Vediamo un esempio di output di una versione operativa del codice di meteorologia COSMO, un'ora di simulazione su 48 processori ("cores") di PLX:

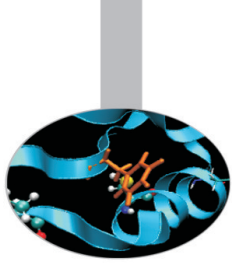
```
12973.38user 1915.82system 20:55.80elapsed 1185%CPU (0avgtext+0avgdata 2597648maxresident)k
19608inputs+10649880outputs (147major+223489935minor)pagefaults 0swaps
```

time:Analisi output



Il run relativo a COSMO ci da una prima informazione (*1185 %CPU*):

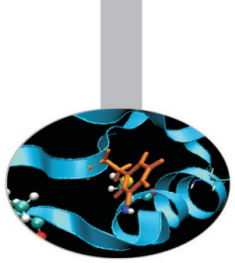
time:Analisi output



Il run relativo a COSMO ci da una prima informazione (*1185 %CPU*):

- La percentuale di utilizzo della CPU è molto maggiore del 100% (la cosa non dovrebbe soprenderci, dato che stiamo utilizzando 48 cores di PLX).

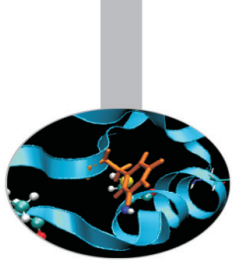
time:Analisi output



Il run relativo a COSMO ci da una prima informazione (*1185 %CPU*):

- La percentuale di utilizzo della CPU è molto maggiore del 100% (la cosa non dovrebbe soprenderci, dato che stiamo utilizzando 48 cores di PLX).
- Per questo codice parallelo dunque, tralasciando il *System time*, lo *User time* risulta pari allo *elapsed time* moltiplicato per un fattore che dipende dalla percentuale di utilizzo della CPU.

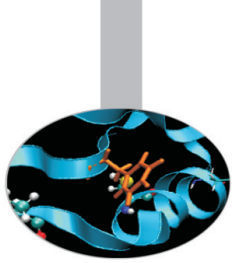
time:Analisi output



Il run relativo a COSMO ci da una prima informazione (*1185 %CPU*):

- La percentuale di utilizzo della CPU è molto maggiore del 100% (la cosa non dovrebbe soprenderci, dato che stiamo utilizzando 48 cores di PLX).
- Per questo codice parallelo dunque, tralasciando il *System time*, lo *User time* risulta pari allo *elapsed time* moltiplicato per un fattore che dipende dalla percentuale di utilizzo della CPU.
- complessivamente questo fattore è molto al di sotto del numero di processori utilizzati

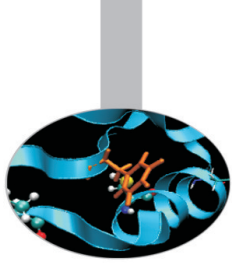
time:Analisi output



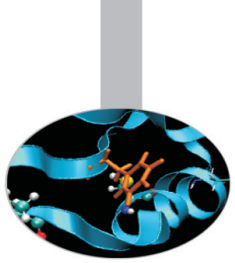
Il run relativo a COSMO ci da una prima informazione (*1185 %CPU*):

- La percentuale di utilizzo della CPU è molto maggiore del 100% (la cosa non dovrebbe soprenderci, dato che stiamo utilizzando 48 cores di PLX).
- Per questo codice parallelo dunque, tralasciando il *System time*, lo *User time* risulta pari allo *elapsed time* moltiplicato per un fattore che dipende dalla percentuale di utilizzo della CPU.
- complessivamente questo fattore è molto al di sotto del numero di processori utilizzati
- L'efficienza complessiva del codice parallelo non è dunque buona.

Outline

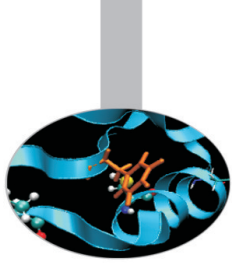


Top



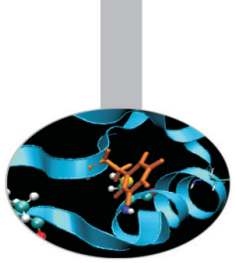
L’informazione che ritorna dal comando time è utile ma non descrive dinamicamente (nel tempo) e con una buona approssimazione il "comportamento " della nostra applicazione.

Top



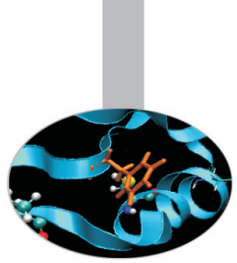
L’informazione che ritorna dal comando time è utile ma non descrive dinamicamente (nel tempo) e con una buona approssimazione il "comportamento " della nostra applicazione. Inoltre, time non ci fornisce alcuna informazione dello stato della macchina (o insieme di macchine) su cui stiamo in esecuzione e se altri utenti stanno contendendo le nostre stesse risorse (cores, I/O, rete, etc).

Top



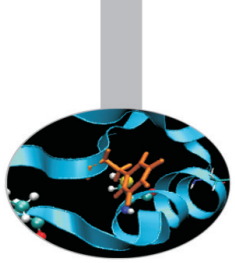
L'informazione che ritorna dal comando time è utile ma non descrive dinamicamente (nel tempo) e con una buona approssimazione il "comportamento " della nostra applicazione.
Inoltre, time non ci fornisce alcuna informazione dello stato della macchina (o insieme di macchine) su cui stiamo in esecuzione e se altri utenti stanno contendendo le nostre stesse risorse (cores, I/O, rete, etc).
Top è un semplice comando Unix che ci fornisce queste e altre informazioni.
Sintassi:
top [options ...]

Esempio di output di top

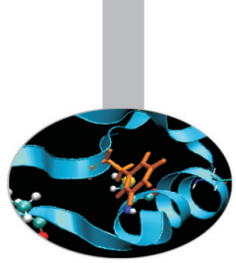


```
top - 14:57:46 up 19 days, 23:19, 38 users,  load average: 4.38, 1.68, 0.73
Tasks: 449 total,   3 running, 442 sleeping,   3 stopped,   1 zombie
Cpu(s): 39.3%us,  0.9%sy,  0.0%ni, 59.7%id,  0.0%wa,  0.0%hi,  0.1%si,  0.0%st
Mem:  24725848k total, 11623572k used, 13102276k free,   124732k buffers
Swap: 15999960k total,    96420k used, 15903540k free,  8921564k cached

  PID USER      PR  NI  VIRT  RES  SHR S %CPU %MEM    TIME+  COMMAND
21524 lanucara  20   0 2407m 1.5g 4880 R 860.9  6.3   0:26.85 mm_mkl
21450 fferre    20   0  115m 6752 1640 R 99.0  0.0   0:27.21 parseBlastout.p
21485 lanucara  20   0 17400 1572  976 R  0.7  0.0   0:00.04 top
  416 root      20   0     0    0    0 S  0.3  0.0  14:55.00 rpciod/0
  424 root      20   0     0    0    0 S  0.3  0.0   0:27.90 rpciod/8
  442 root      15  -5     0    0    0 S  0.3  0.0   2:59.49 kslowd001
  450 root      20   0     0    0    0 S  0.3  0.0  22:58.02 nfsiod
 8430 paoletti  20   0  114m 2116 1040 S  0.3  0.0   0:01.43 sshd
 9522 nobody    20   0  167m  13m 1020 S  0.3  0.1  14:54.15 gmond
20338 tbiagini  20   0  114m 1920  872 S  0.3  0.0   0:00.04 sshd
26365 lanucara  20   0  149m 3384 2088 S  0.3  0.0   0:01.82 xterm
26395 lanucara  20   0 17396 1568  972 S  0.3  0.0   0:29.53 top
    1 root      20   0 21444 1112  932 S  0.0  0.0   0:05.37 init
    2 root      20   0     0    0    0 S  0.0  0.0   0:00.45 kthreadd
    3 root      RT   0     0    0    0 S  0.0  0.0   0:08.27 migration/0
    4 root      20   0     0    0    0 S  0.0  0.0   0:05.73 ksoftirqd/0
```

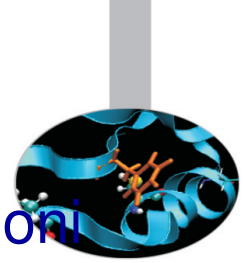
Outline



gprof: caratteristiche principali

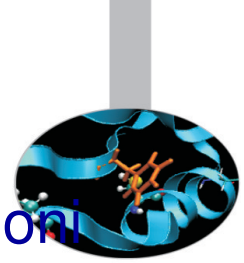


gprof: caratteristiche principali



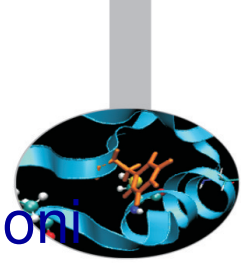
- time è uno strumento anche efficace per ottenere informazioni "complessive" e "a grana grossa" sull'esecuzione della nostra applicazione.

gprof: caratteristiche principali



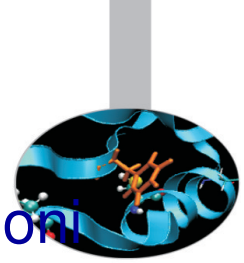
- time è uno strumento anche efficace per ottenere informazioni "complessive" e "a grana grossa" sull'esecuzione della nostra applicazione.
- chiaramente non risponde a tutte le esigenze, soprattutto per codici realistici (come COSMO ad esempio).

gprof: caratteristiche principali



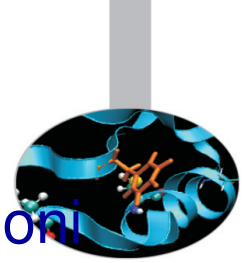
- time è uno strumento anche efficace per ottenere informazioni "complessive" e "a grana grossa" sull'esecuzione della nostra applicazione.
- chiaramente non risponde a tutte le esigenze, soprattutto per codici realistici (come COSMO ad esempio).
- in prima battuta può servire uno strumento che ci dia delle informazioni maggiormente connesse con il nostro codice e che sia "portabile" attraverso piattaforme differenti.

gprof: caratteristiche principali



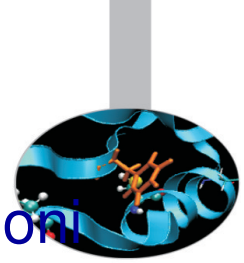
- time è uno strumento anche efficace per ottenere informazioni "complessive" e "a grana grossa" sull'esecuzione della nostra applicazione.
- chiaramente non risponde a tutte le esigenze, soprattutto per codici realistici (come COSMO ad esempio).
- in prima battuta può servire uno strumento che ci dia delle informazioni maggiormente connesse con il nostro codice e che sia "portabile" attraverso piattaforme differenti.
- gprof, che fa parte del pacchetto GNU, soddisfa ovviamente il requisito di portabilità.
- Caratteristiche principali:

gprof: caratteristiche principali



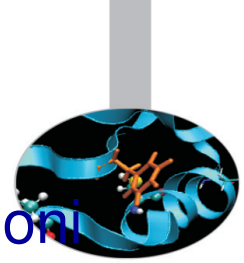
- time è uno strumento anche efficace per ottenere informazioni "complessive" e "a grana grossa" sull'esecuzione della nostra applicazione.
- chiaramente non risponde a tutte le esigenze, soprattutto per codici realistici (come COSMO ad esempio).
- in prima battuta può servire uno strumento che ci dia delle informazioni maggiormente connesse con il nostro codice e che sia "portabile" attraverso piattaforme differenti.
- gprof, che fa parte del pacchetto GNU, soddisfa ovviamente il requisito di portabilità.
- Caratteristiche principali:
  - limitatamente intrusivo

gprof: caratteristiche principali



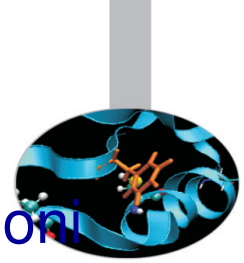
- time è uno strumento anche efficace per ottenere informazioni "complessive" e "a grana grossa" sull'esecuzione della nostra applicazione.
- chiaramente non risponde a tutte le esigenze, soprattutto per codici realistici (come COSMO ad esempio).
- in prima battuta può servire uno strumento che ci dia delle informazioni maggiormente connesse con il nostro codice e che sia "portabile" attraverso piattaforme differenti.
- gprof, che fa parte del pacchetto GNU, soddisfa ovviamente il requisito di portabilità.
- Caratteristiche principali:
  - limitatamente intrusivo
  - fornisce informazioni a livello di "subroutine" e/o funzioni

gprof: caratteristiche principali



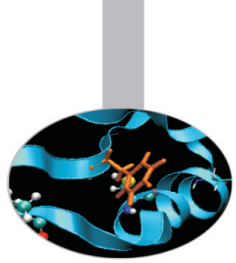
- time è uno strumento anche efficace per ottenere informazioni "complessive" e "a grana grossa" sull'esecuzione della nostra applicazione.
- chiaramente non risponde a tutte le esigenze, soprattutto per codici realistici (come COSMO ad esempio).
- in prima battuta può servire uno strumento che ci dia delle informazioni maggiormente connesse con il nostro codice e che sia "portabile" attraverso piattaforme differenti.
- gprof, che fa parte del pacchetto GNU, soddisfa ovviamente il requisito di portabilità.
- Caratteristiche principali:
  - limitatamente intrusivo
  - fornisce informazioni a livello di "subroutine" e/o funzioni
  - fornisce informazioni sul "grafo" e sulle dipendenze della nostra applicazione

gprof: caratteristiche principali

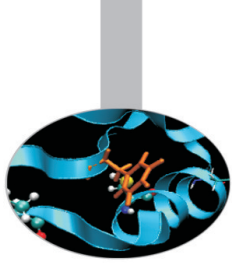


- time è uno strumento anche efficace per ottenere informazioni "complessive" e "a grana grossa" sull'esecuzione della nostra applicazione.
- chiaramente non risponde a tutte le esigenze, soprattutto per codici realistici (come COSMO ad esempio).
- in prima battuta può servire uno strumento che ci dia delle informazioni maggiormente connesse con il nostro codice e che sia "portabile" attraverso piattaforme differenti.
- gprof, che fa parte del pacchetto GNU, soddisfa ovviamente il requisito di portabilità.
- Caratteristiche principali:
  - limitatamente intrusivo
  - fornisce informazioni a livello di "subroutine" e/o funzioni
  - fornisce informazioni sul "grafo" e sulle dipendenze della nostra applicazione
  - basato sia sul concetto di "Sampling" che di "Instrumentation"

Gprof "Sampling"

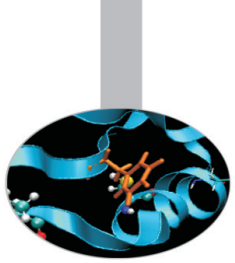


Gprof "Sampling"



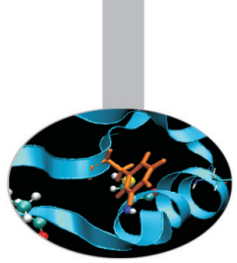
- La tecnica del "Sampling" viene utilizzata da Gprof (e in generale da strumenti di Profiling) per raccogliere informazioni relative al "timing" della nostra applicazione durante la sua esecuzione.

Gprof "Sampling"



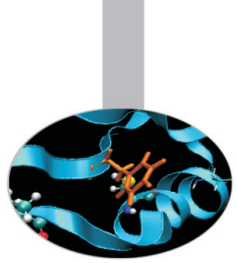
- La tecnica del "Sampling" viene utilizzata da Gprof (e in generale da strumenti di Profiling) per raccogliere informazioni relative al "timing" della nostra applicazione durante la sua esecuzione.
- Gprof si basa su un Time Based Sampling : ad intervalli di tempo fissati si interroga il "program counter" per individuare a quale punto del codice è arrivata l'esecuzione

Gprof "Sampling"



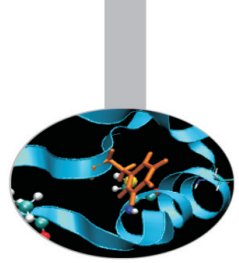
- La tecnica del "Sampling" viene utilizzata da Gprof (e in generale da strumenti di Profiling) per raccogliere informazioni relative al "timing" della nostra applicazione durante la sua esecuzione.
- Gprof si basa su un Time Based Sampling : ad intervalli di tempo fissati si interroga il "program counter" per individuare a quale punto del codice è arrivata l'esecuzione
- Tipicamente, il "program counter" viene interrogato un certo numero di volte (supponiamo 100 per fissare le idee) per secondo di "run-time", ma questo numero cambia da macchina a macchina.

Gprof "Sampling"



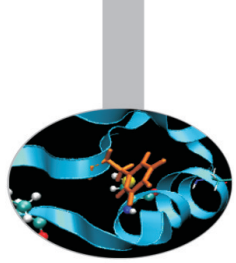
- La tecnica del "Sampling" viene utilizzata da Gprof (e in generale da strumenti di Profiling) per raccogliere informazioni relative al "timing" della nostra applicazione durante la sua esecuzione.
- Gprof si basa su un Time Based Sampling : ad intervalli di tempo fissati si interroga il "program counter" per individuare a quale punto del codice è arrivata l'esecuzione
- Tipicamente, il "program counter" viene interrogato un certo numero di volte (supponiamo 100 per fissare le idee) per secondo di "run-time", ma questo numero cambia da macchina a macchina.
- Il "Sampling", essendo di fatto una approssimazione statistica, dipende fortemente dal "sampling period"

Gprof "Sampling"

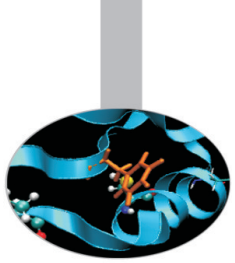


- La tecnica del "Sampling" viene utilizzata da Gprof (e in generale da strumenti di Profiling) per raccogliere informazioni relative al "timing" della nostra applicazione durante la sua esecuzione.
- Gprof si basa su un Time Based Sampling : ad intervalli di tempo fissati si interroga il "program counter" per individuare a quale punto del codice è arrivata l'esecuzione
- Tipicamente, il "program counter" viene interrogato un certo numero di volte (supponiamo 100 per fissare le idee) per secondo di "run-time", ma questo numero cambia da macchina a macchina.
- Il "Sampling", essendo di fatto una approssimazione statistica, dipende fortemente dal "sampling period"
- Il vantaggio è che essendo meno intrusivo, l'esecuzione non dovrebbe risentire eccessivamente dell'uso del profiling.

Gprof "Instrumentation"

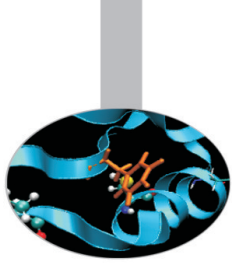


Gprof "Instrumentation"



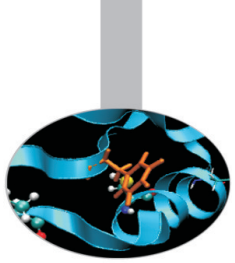
- Di fatto Gprof "Instrumenta" il nostro codice, il che vuol dire aggiungere istruzioni vere e proprie (dunque in modo intrusivo) che servono a raccogliere le informazioni richieste.

Gprof "Instrumentation"



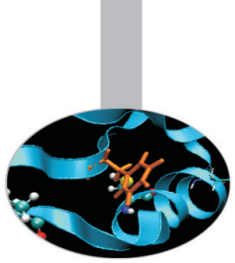
- Di fatto Gprof "Instrumenta" il nostro codice, il che vuol dire aggiungere istruzioni vere e proprie (dunque in modo intrusivo) che servono a raccogliere le informazioni richieste.
- Questa tecnica può risultare, come detto, invasiva e pertanto inficiare le prestazioni del nostro eseguibile di partenza.

Gprof "Instrumentation"



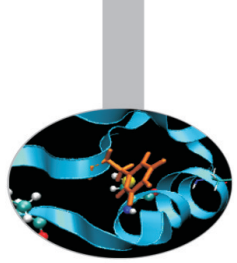
- Di fatto Gprof "Instrumenta" il nostro codice, il che vuol dire aggiungere istruzioni vere e proprie (dunque in modo intrusivo) che servono a raccogliere le informazioni richieste.
- Questa tecnica può risultare, come detto, invasiva e pertanto inficiare le prestazioni del nostro eseguibile di partenza.
- per quanto riguarda Gprof, il tutto è guidato dal compilatore e questo dovrebbe garantire una certa efficienza.

Gprof "Instrumentation"



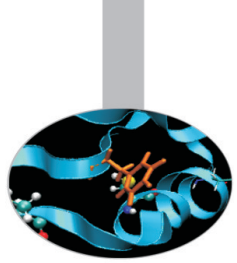
- Di fatto Gprof "Instrumenta" il nostro codice, il che vuol dire aggiungere istruzioni vere e proprie (dunque in modo intrusivo) che servono a raccogliere le informazioni richieste.
- Questa tecnica può risultare, come detto, invasiva e pertanto inficiare le prestazioni del nostro eseguibile di partenza.
- per quanto riguarda Gprof, il tutto è guidato dal compilatore e questo dovrebbe garantire una certa efficienza.
- Questa metodologia viene usata da Gprof per tutto quello che concerne le "chiamate a funzioni" all'interno del nostro codice.

Gprof:how-to



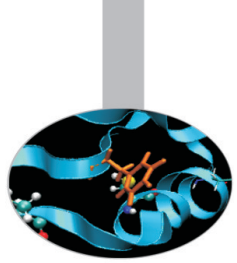
- Per "attivare" Gprof, occorre compilare e linkare il codice (scritto in Fortran, C, C++) con l'opzione -pg
- Utilizzo
  <compiler> -pg programma.f -o nome_eseguibile
  ./nome_eseguibile
  gprof nome_eseguibile

Gprof:how-to



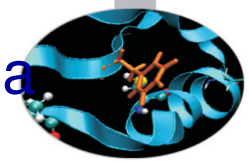
- Per "attivare" Gprof, occorre compilare e linkare il codice (scritto in Fortran, C, C++) con l'opzione -pg
- Utilizzo
  <compiler> -pg programma.f -o nome_eseguibile
  ./nome_eseguibile
  gprof nome_eseguibile
- dopo un run andato a buon fine (da non sottovalutare!!!), viene generato il file gmon.out

Gprof:how-to



- Per "attivare" Gprof, occorre compilare e linkare il codice (scritto in Fortran, C, C++) con l'opzione -pg
- Utilizzo
  <compiler> -pg programma.f -o nome_eseguibile
  ./nome_eseguibile
  gprof nome_eseguibile
- dopo un run andato a buon fine (da non sottovalutare!!!), viene generato il file gmon.out
- Attenzione, i "vecchi" files gmon.out sono sovrascritti in esecuzioni successive.

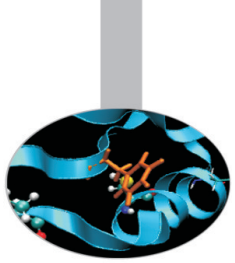
gprof: Flat profile



- Flat profile: mostra il tempo totale che il programma impiega nell'eseguire ogni subroutine/funzione, che viene ordinata rispetto alla percentuale del tempo totale speso.
- Vediamolo per un semplice programma C:

```
#include <stdio.h>
int a(void) {
  int i=0,g=0;
  while(i++<100000)
  {
     g+=i;
  }
  return g;
}
int b(void) {
  int i=0,g=0;
  while(i++<400000)
  {
    g+=i;
  }
  return g;
}
int main(int argc, char** argv)
{
   int iterations;

   if(argc != 2)
   {
      printf("Usage %s <No of Iterations>\n", argv[0]);
      exit(-1);
   }
```

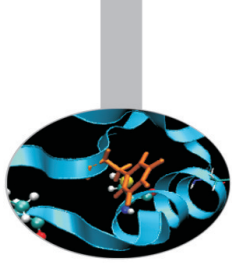
gprof: Flat profile



- Flat profile: continua....

```
   else
      iterations = atoi(argv[1]);
 printf("No of iterations = %d\n", iterations);

   while(iterations--)
   {
      a();
      b();
   }
}
```

gprof: Flat profile

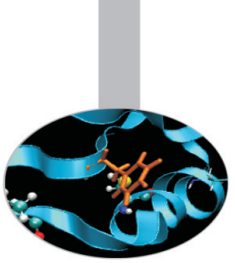


- Flat profile: continua....

```
   else
      iterations = atoi(argv[1]);
 printf("No of iterations = %d\n", iterations);

   while(iterations--)
   {
      a();
      b();
   }
}
```

- compiliamo e linkiamo il sorgente C con Gprof e analizziamo il Flat profile.

gprof: Flat profile

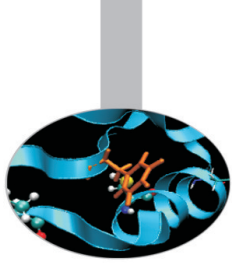


- Flat profile: continua....

```
   else
      iterations = atoi(argv[1]);
 printf("No of iterations = %d\n", iterations);

   while(iterations--)
   {
      a();
      b();
   }
}
```

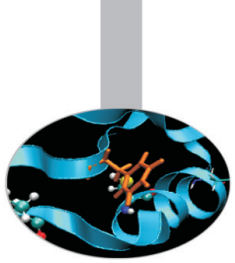
- compiliamo e linkiamo il sorgente C con Gprof e analizziamo il Flat profile.
- ci aspettiamo che la routine b() pesi circa 4 volte la routine a():

gprof: flat profile



```
/usr/bin/time ./Main\ example.exe 10000
No of iterations = 10000
3.22user 0.00system 0:03.23elapsed 99%CPU (0avgtext+0avgdata 1760maxresident)k
0inputs+0outputs (0major+131minor)pagefaults 0swaps

 gcc -O Main\ example.c -o Main\ example_gprof.exe -pg
[lanucara@louis ~]$ /usr/bin/time ./Main\ example_gprof.exe 10000
No of iterations = 10000
3.33user 0.00system 0:03.34elapsed 99%CPU (0avgtext+0avgdata 2064maxresident)k
0inputs+8outputs (0major+150minor)pagefaults 0swaps

gprof ./Main\ example_gprof.exe > Main\ example.gprof

Flat profile:

Each sample counts as 0.01 seconds.
  %   cumulative   self              self     total
 time   seconds   seconds    calls  us/call  us/call  name
 81.43      2.73     2.73    10000   272.78   272.78  b
 19.60      3.38     0.66    10000    65.67    65.67  a
```

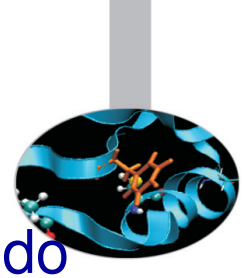
Flat profile:descrizione



1. Il tempo percentuale (rispetto al totale) impiegato dalla subroutine.
2. Il tempo cumulativo impiegato nella subroutine e precedenti.
3. Il tempo in secondi impiegato nella subroutine.
4. Il numero delle volte in cui la subroutine viene chiamata.
5. Il tempo medio di ogni singola chiamata della subroutine (in msec).
6. Il tempo medio totale per chiamata (include anche il tempo impiegato da tutte le subroutine "figlie") in msec.
7. Il nome della subroutine.

Per questo esempio non sono presenti subroutine "figlie" per cui "self" e "total" coincidono.

gprof: flat profile



Complichiamo leggermente il codice precedente introducendo una semplice function:

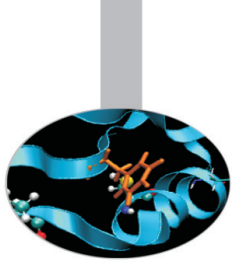
```
int cinsideb(int d) {
  {
  }
  return d;
}
```

che collochiamo all'interno della routine b() al posto del calcolo di g:

```
int b(void) {
  int i=0,g=0;
  while(i++<400000)
  {
    g+=cinsideb(i);
  }
  return g;
}
```

Mandiamo in esecuzione il nuovo eseguibile abilitando Gprof e analizziamo il nuovo Flat profile

gprof: flat profile

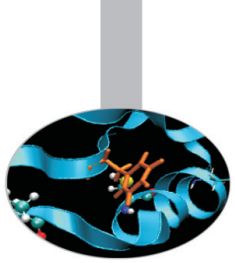


Nuovo Flaf profile:

```
Flat profile:

Each sample counts as 0.01 seconds.
  %   cumulative   self              self     total
 time   seconds   seconds    calls  us/call  us/call  name
 44.72      3.28     3.28    10000   327.78   604.55  b
 37.76      6.05     2.77 4000000000     0.00     0.00  cinsideb
 18.53      7.40     1.36    10000   135.86   135.86  a
```

Commenti:

gprof: flat profile



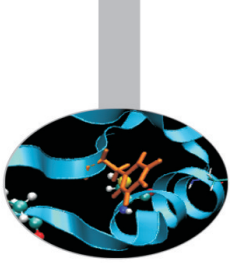
Nuovo Flaf profile:

```
Flat profile:

Each sample counts as 0.01 seconds.
  %   cumulative   self              self     total
 time   seconds   seconds    calls  us/call  us/call  name
 44.72      3.28     3.28    10000   327.78   604.55  b
 37.76      6.05     2.77 4000000000     0.00     0.00  cinsideb
 18.53      7.40     1.36    10000   135.86   135.86  a
```

Commenti:

- insieme le routines b() e cinsideb() "pesano" per l'80% del totale.

gprof: flat profile



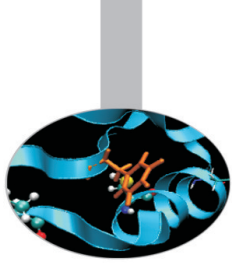
Nuovo Flaf profile:

```
Flat profile:

Each sample counts as 0.01 seconds.
  %   cumulative   self              self     total
 time   seconds   seconds    calls  us/call  us/call  name
 44.72      3.28     3.28    10000   327.78   604.55  b
 37.76      6.05     2.77 4000000000     0.00     0.00  cinsideb
 18.53      7.40     1.36    10000   135.86   135.86  a
```

Commenti:

- insieme le routines b() e cinsideb() "pesano" per l'80% del totale.
- questa volta il contributo della function "figlia" cinsideb() di b() va ad accrescere il tempo "total" di b()

gprof: flat profile



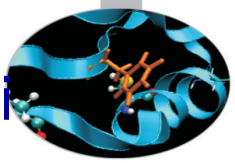
Nuovo Flaf profile:

```
Flat profile:

Each sample counts as 0.01 seconds.
  %   cumulative   self              self     total
 time   seconds   seconds    calls  us/call  us/call  name
 44.72      3.28     3.28    10000   327.78   604.55  b
 37.76      6.05     2.77 4000000000     0.00     0.00  cinsideb
 18.53      7.40     1.36    10000   135.86   135.86  a
```

Commenti:

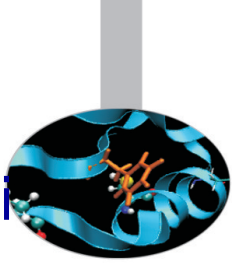
- insieme le routines b() e cinsideb() "pesano" per l'80% del totale.
- questa volta il contributo della function "figlia" cinsideb() di b() va ad accrescere il tempo "total" di b()
- Per questo codice Gprof risulta molto piu intrusivo dato che la function cinsideb() viene chiamata un numero enorme di volte.

gprof: call tree profile



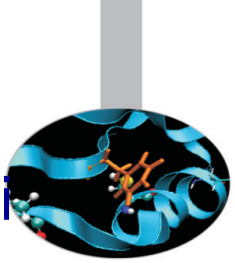
Mostra il tempo che il programma impiega nell'eseguire ogni subroutine/funzione e quelle da esse chiamate.

gprof: call tree profile



Mostra il tempo che il programma impiega nell'eseguire ogni subroutine/funzione e quelle da esse chiamate.
Le subroutine/funzioni sono ordinate in base al tempo totale speso in esse ed in quelle chiamate.

gprof: call tree profile



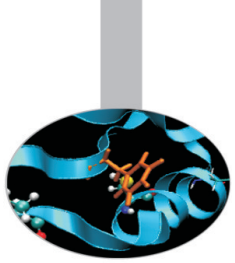
Mostra il tempo che il programma impiega nell'eseguire ogni subroutine/funzione e quelle da esse chiamate.

Le subroutine/funzioni sono ordinate in base al tempo totale speso in esse ed in quelle chiamate.

Vediamo il call tree profile sull'ultima versione del codice:

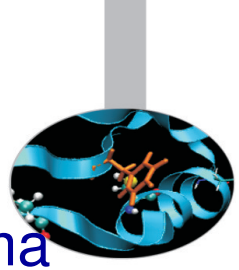
```
                     Call graph (explanation follows)

granularity: each sample hit covers 2 byte(s) for 0.14% of 7.40 seconds

index % time    self  children    called     name
                                                 <spontaneous>
[1]    100.0    0.00    7.40                 main [1]
                3.28    2.77   10000/10000       b [2]
                1.36    0.00   10000/10000       a [4]
-----------------------------------------------
                3.28    2.77   10000/10000       main [1]
[2]     81.7    3.28    2.77   10000         b [2]
                2.77    0.00 4000000000/4000000000     cinsideb [3]
-----------------------------------------------
                2.77    0.00 4000000000/4000000000     b [2]
[3]     37.4    2.77    0.00 4000000000         cinsideb [3]
-----------------------------------------------
                1.36    0.00   10000/10000       main [1]
[4]     18.3    1.36    0.00   10000         a [4]
-----------------------------------------------
...
```

Call tree profile:descrizione



1. Un indice che definisce univocamente ogni elemento del "Call graph" precedente.
2. Il peso percentuale della subroutine e delle sue "figlie" rispetto al totale.
3. Il tempo totale impiegato nella subroutine.
4. Il tempo totale impiegato nelle "figlie" della subroutine.
5. Il numero delle volte che la subroutine è stata chiamata, comprendente le chiamate come "parente" e quelle come "figlia" rispetto al numero delle volte che viene chiamata nell'intero codice.
6. Il nome della subroutine.

gprof: limitazioni



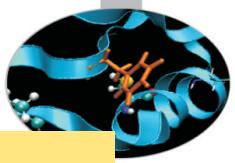
Consideriamo a titolo esemplificativo un semplice programma che realizza il classico prodotto matrice-matrice in due modi:

1. linka una chiamate alle librerie MKL di sistema (ottimizzate per l'architettura e parallele)
2. oppure utilizza una libreria costruita compilando e linkando le BLAS sulla macchina target

Vediamo il risultato, in termini di "Flat Profile", ottenuto con il profiling delle due versioni del codice:
versione con le MKL:

```
Flat profile:

Each sample counts as 0.01 seconds.
  %   cumulative   self              self     total
 time   seconds   seconds    calls  ms/call  ms/call  name
 71.43      0.10     0.10                             for_simd_random_number
 14.29      0.12     0.02        1    20.00    20.00  MAIN__
 14.29      0.14     0.02                             __intel_memset
  0.00      0.14     0.00        4     0.00     0.00  timing_module_mp_timing_
```

gprof: limitazioni



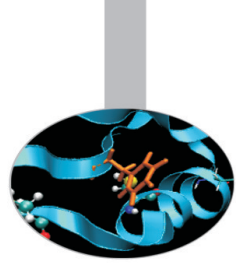
versione con le BLAS:

```
Flat profile:

Each sample counts as 0.01 seconds.
  %   cumulative   self              self     total
 time   seconds   seconds    calls  ms/call  ms/call  name
 97.76      6.10     6.10                             dgemm_
  1.60      6.20     0.10                             for_simd_random_number
  0.32      6.22     0.02        1    20.00    20.00  MAIN__
  0.32      6.24     0.02                             __intel_memset
  0.00      6.24     0.00        4     0.00     0.00  timing_module_mp_timing_
```

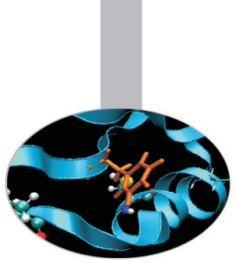
Commenti:

- Per la versione MKL Gprof non ci fornisce alcuna informazione utile, se non chiamate a funzioni di libreria ausiliarie.
- La versione BLAS correttamente riporta la chiamata alla funzione *dgemm_* che è responsabile della quasi totalità del tempo.
- Fortunatamente possiamo ritenere che le funzioni di libreria come le MKL siano gia ottimizzate e pertanto l'uso di Gprof è assolutamente superfluo.

gprof: altre limitazioni

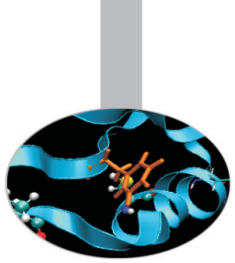


gprof: altre limitazioni



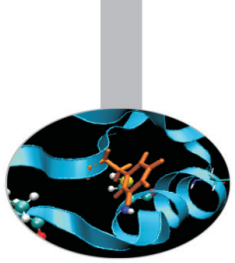
- Gprof ha "granularità" abbastanza grande. Per codici complessi non è semplice capire, anche partendo da una data routine/function, dove mettere le mani per migliorare le prestazioni del codice.

gprof: altre limitazioni



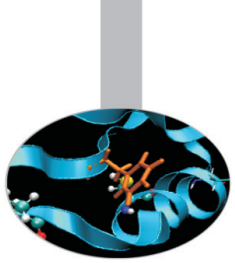
- Gprof ha "granularità" abbastanza grande. Per codici complessi non è semplice capire, anche partendo da una data routine/function, dove mettere le mani per migliorare le prestazioni del codice.
- Gprof puo risultare molto intrusivo. Verificare, sperimentalmente, che l'esecuzione del codice senza Gprof sia "confrontabile" con quella con Gprof.

gprof: altre limitazioni



- Gprof ha "granularità" abbastanza grande. Per codici complessi non è semplice capire, anche partendo da una data routine/function, dove mettere le mani per migliorare le prestazioni del codice.
- Gprof puo risultare molto intrusivo. Verificare, sperimentalmente, che l'esecuzione del codice senza Gprof sia "confrontabile" con quella con Gprof.
- Tutti i tempi che sono confrontabili con il "sampling period" non dovrebbero essere tenuti in considerazione.

Gprof: Esercitazione

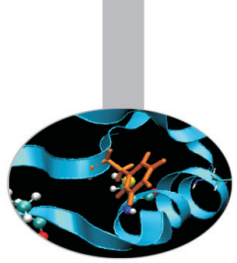


- Profiling di un codice seriale per la risoluzione di un'Equazione alle Derivate Parziali.
  - Utilizzare il tool Gprof per effettuare un Profiling del codice al variare della taglia del problema.
  - Andare al link del Corso sotto hpcforge:

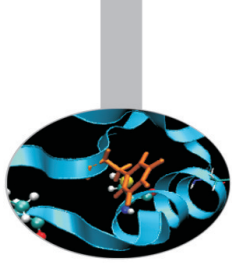
```
https://hpcforge.cineca.it/files/CoursesDev/public/2014/...
...Introduction_to_HPC_Scientific_Programming:_tools_and_techniques/Rome/
tar xvfz Gprof_Profiling_exercise.tgz
cd GPROF/JACOBI
```

  - leggere il file README
  - eseguire i test
  - commentare i risultati del Profiling

Funzioni per misurare il tempo

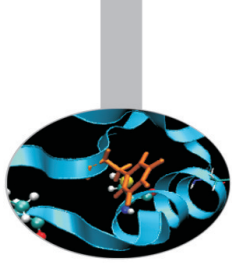


Funzioni per misurare il tempo



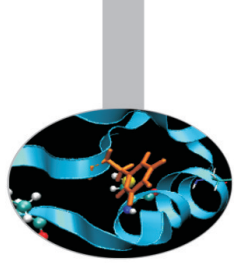
- dopo aver utilizzato Gprof e verificato che una determinata routine è computazionalmente onerosa, può risultare utile "instrumentare" manualmente la nostra routine con funzioni per misurare il tempo.

Funzioni per misurare il tempo



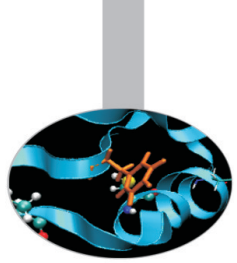
- dopo aver utilizzato Gprof e verificato che una determinata routine è computazionalmente onerosa, può risultare utile "instrumentare" manualmente la nostra routine con funzioni per misurare il tempo.
- è una tecnica che ci consente di raffinare la nostra analisi e senza l'utilizzo di ulteriori strumenti.

Funzioni per misurare il tempo



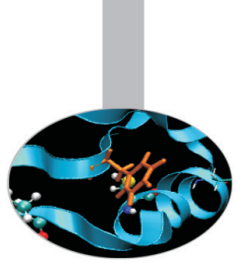
- dopo aver utilizzato Gprof e verificato che una determinata routine è computazionalmente onerosa, può risultare utile "instrumentare" manualmente la nostra routine con funzioni per misurare il tempo.
- è una tecnica che ci consente di raffinare la nostra analisi e senza l'utilizzo di ulteriori strumenti.
- ovviamente la "portabilità e la generalità possono lasciare a desiderare (specie per codici complessi o "terze parti". Qualche esempio:

Funzioni per misurare il tempo



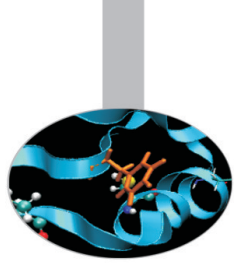
- dopo aver utilizzato Gprof e verificato che una determinata routine è computazionalmente onerosa, può risultare utile "instrumentare" manualmente la nostra routine con funzioni per misurare il tempo.
- è una tecnica che ci consente di raffinare la nostra analisi e senza l'utilizzo di ulteriori strumenti.
- ovviamente la "portabilità e la generalità possono lasciare a desiderare (specie per codici complessi o "terze parti". Qualche esempio:
  - etime(),dtime() (Fortran 77)

Funzioni per misurare il tempo



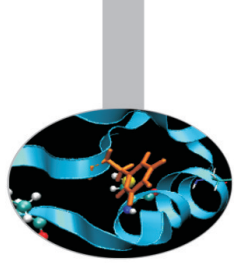
- dopo aver utilizzato Gprof e verificato che una determinata routine è computazionalmente onerosa, può risultare utile "instrumentare" manualmente la nostra routine con funzioni per misurare il tempo.
- è una tecnica che ci consente di raffinare la nostra analisi e senza l'utilizzo di ulteriori strumenti.
- ovviamente la "portabilità e la generalità possono lasciare a desiderare (specie per codici complessi o "terze parti". Qualche esempio:
  - etime(),dtime() (Fortran 77)
  - cputime(),system_clock(), date_and_time() (Fortran 90)

Funzioni per misurare il tempo



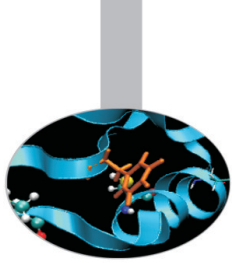
- dopo aver utilizzato Gprof e verificato che una determinata routine è computazionalmente onerosa, può risultare utile "instrumentare" manualmente la nostra routine con funzioni per misurare il tempo.
- è una tecnica che ci consente di raffinare la nostra analisi e senza l'utilizzo di ulteriori strumenti.
- ovviamente la "portabilità e la generalità possono lasciare a desiderare (specie per codici complessi o "terze parti". Qualche esempio:
  - etime(),dtime() (Fortran 77)
  - cputime(),system_clock(), date_and_time() (Fortran 90)
  - clock() (C/C++)
  - ...

Un esempio C/C++



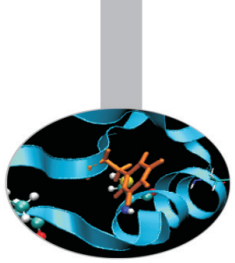
```
#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include <stdlib.h>
#include <time.h>
clock_t time1, time2;
double dub_time;
int main(){
int i,j,k,nn=1000;
double c[nn][nn],a[nn][nn],b[nn][nn];
...
time1 = clock();
for (i = 0; i < nn; i++)
for (k = 0; k < nn; k++)
for (j = 0; j < nn; j ++)
c[i][j] = c[i][j] + a[i][k]*b[k][j];
time2 = clock();
dub_time = (time2 - time1)/(double) CLOCKS_PER_SEC;
printf("Time ----------------> %lf \n", dub_time);
...
return 0;
}
```

Un esempio Fortran

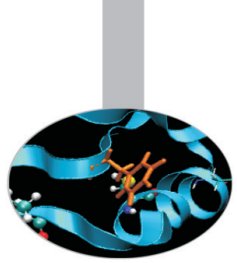


```
real(8)::a(1000,1000),b(1000,1000),c(1000,1000)
real(8) ::t1,t2
integer :: time_array(8)
a=0;b=0;c=0;n=1000
...
...
call date_and_time(values=time_array)
t1 = 3600.*time_array(5)+60.*time_array(6)+time_array(7)+time_array(8)/1000.
do j = 1,n
do k = 1,n
do i = 1,n
c(i,j) = c(i,j) + a(i,k)*b(k,j)
enddo
enddo
enddo
call date_and_time(values=time_array)
t2 = 3600.*time_array(5)+60.*time_array(6)+time_array(7)+time_array(8)/1000.
write(6,*) t2-t1
...
...
end
```

Outline

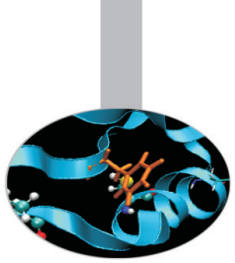


Papi



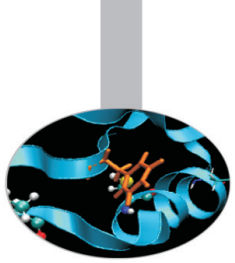
- Strumenti come Gprof, etc hanno il loro punto di forza nella semplicità di utilizzo e nella scarsa se non nulla intrusività.

Papi



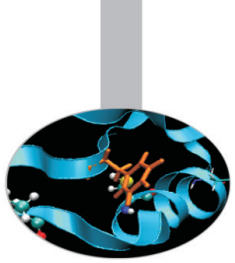
- Strumenti come Gprof, etc hanno il loro punto di forza nella semplicità di utilizzo e nella scarsa se non nulla intrusività.
- Ovviamente se si vuole andare più a fondo nell'ottimizzazione del nostro codice, soprattutto in relazione a quelle che sono le caratteristiche peculiari dell'hardware a disposizione, occorrono altri strumenti.

Papi



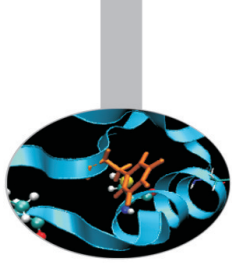
- Strumenti come Gprof, etc hanno il loro punto di forza nella semplicità di utilizzo e nella scarsa se non nulla intrusività.
- Ovviamente se si vuole andare più a fondo nell'ottimizzazione del nostro codice, soprattutto in relazione a quelle che sono le caratteristiche peculiari dell'hardware a disposizione, occorrono altri strumenti.
- PAPI (Performance Application Programming Interface) nasce esattamente con questo scopo. Caratteristiche principali:

Papi



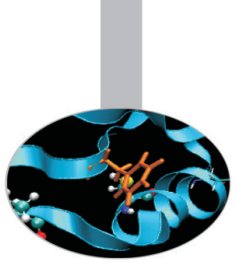
- Strumenti come Gprof, etc hanno il loro punto di forza nella semplicità di utilizzo e nella scarsa se non nulla intrusività.
- Ovviamente se si vuole andare più a fondo nell'ottimizzazione del nostro codice, soprattutto in relazione a quelle che sono le caratteristiche peculiari dell'hardware a disposizione, occorrono altri strumenti.
- PAPI (Performance Application Programming Interface) nasce esattamente con questo scopo. Caratteristiche principali:
  - portabilità sulla maggior parte delle architetture Linux, Windows, etc inclusi moderni "acceleratori" (GPU NVIDIA, Intel MIC, etc)

Papi



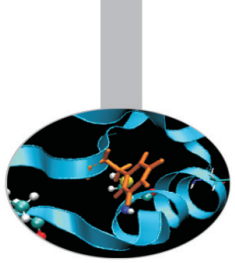
- Strumenti come Gprof, etc hanno il loro punto di forza nella semplicità di utilizzo e nella scarsa se non nulla intrusività.
- Ovviamente se si vuole andare più a fondo nell'ottimizzazione del nostro codice, soprattutto in relazione a quelle che sono le caratteristiche peculiari dell'hardware a disposizione, occorrono altri strumenti.
- PAPI (Performance Application Programming Interface) nasce esattamente con questo scopo. Caratteristiche principali:
  - portabilità sulla maggior parte delle architetture Linux, Windows, etc inclusi moderni "acceleratori" (GPU NVIDIA, Intel MIC, etc)
  - si basa sull'utilizzo dei cosiddetti *Hardware Counters*: un insieme di registri "special-purpose" che misurano determinati eventi durante l'esecuzione del nostro programma.

Papi-cont.



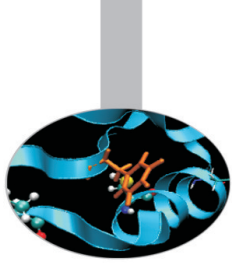
- PAPI fornisce un'interfaccia agli *Hardware Counters* essenzialmente di due tipi:

Papi-cont.



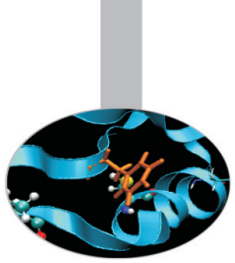
- PAPI fornisce un'interfaccia agli *Hardware Counters* essenzialmente di due tipi:
  - *High level interface*, un insieme di routines per accedere ad una lista predefinita di eventi (*PAPI Preset Events*)

Papi-cont.



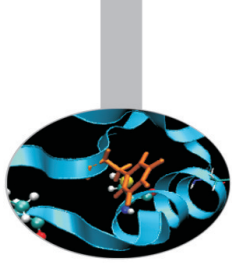
- PAPI fornisce un'interfaccia agli *Hardware Counters* essenzialmente di due tipi:
  - *High level interface*, un insieme di routines per accedere ad una lista predefinita di eventi (*PAPI Preset Events*)
  - *Low level interface*, che fornisce informazioni specifiche dell'hardware a disposizione per indagini maggiormente sofisticate. Molto più complessa da usare.

Papi-cont.



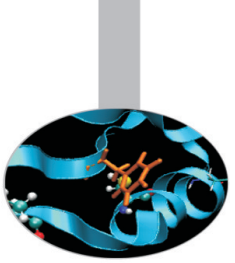
- PAPI fornisce un'interfaccia agli *Hardware Counters* essenzialmente di due tipi:
  - *High level interface*, un insieme di routines per accedere ad una lista predefinita di eventi (*PAPI Preset Events*)
  - *Low level interface*, che fornisce informazioni specifiche dell'hardware a disposizione per indagini maggiormente sofisticate. Molto più complessa da usare.
- Occorre verificare il numero di *Hardware Counters* disponibili sulla macchina. Questo numero ci fornisce la misura del numero di eventi che possono essere monitorati in contemporanea.

PAPI Preset Events



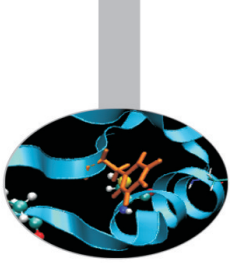
- Un insieme di eventi di particolare interesse per un "tuning" delle prestazioni

PAPI Preset Events



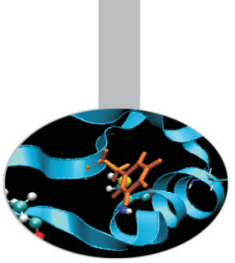
- Un insieme di eventi di particolare interesse per un "tuning" delle prestazioni
- PAPI definisce circa un centinaio di *Preset Events* per una data CPU che, generalmente, ne implementerà un sottoinsieme. Vediamone qualcuno dei più importanti:

PAPI Preset Events



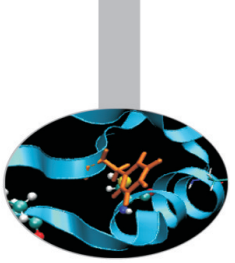
- Un insieme di eventi di particolare interesse per un "tuning" delle prestazioni
- PAPI definisce circa un centinaio di *Preset Events* per una data CPU che, generalmente, ne implementerà un sottoinsieme. Vediamone qualcuno dei più importanti:
  - PAPI_TOT_CYC - numero di cicli totali

PAPI Preset Events



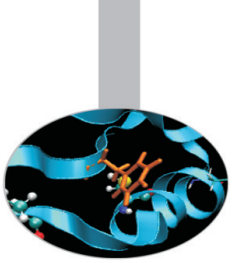
- Un insieme di eventi di particolare interesse per un "tuning" delle prestazioni
- PAPI definisce circa un centinaio di *Preset Events* per una data CPU che, generalmente, ne implementerà un sottoinsieme. Vediamone qualcuno dei più importanti:
  - PAPI_TOT_CYC - numero di cicli totali
  - PAPI_TOT_INS - numero di istruzioni completate

PAPI Preset Events



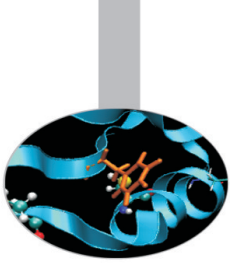
- Un insieme di eventi di particolare interesse per un "tuning" delle prestazioni
- PAPI definisce circa un centinaio di *Preset Events* per una data CPU che, generalmente, ne implementerà un sottoinsieme. Vediamone qualcuno dei più importanti:
  - PAPI_TOT_CYC - numero di cicli totali
  - PAPI_TOT_INS - numero di istruzioni completate
  - PAPI_FP_INS - istruzioni floating-point

PAPI Preset Events



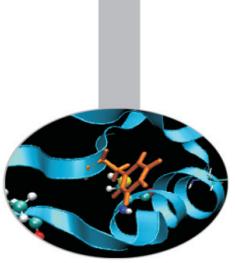
- Un insieme di eventi di particolare interesse per un "tuning" delle prestazioni
- PAPI definisce circa un centinaio di *Preset Events* per una data CPU che, generalmente, ne implementerà un sottoinsieme. Vediamone qualcuno dei più importanti:
  - PAPI_TOT_CYC - numero di cicli totali
  - PAPI_TOT_INS - numero di istruzioni completate
  - PAPI_FP_INS - istruzioni floating-point
  - PAPI_L1_DCA - accessi in cache L1

PAPI Preset Events



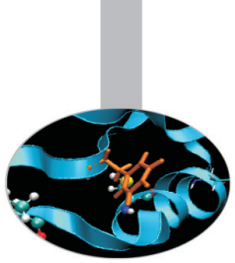
- Un insieme di eventi di particolare interesse per un "tuning" delle prestazioni
- PAPI definisce circa un centinaio di *Preset Events* per una data CPU che, generalmente, ne implementerà un sottoinsieme. Vediamone qualcuno dei più importanti:
  - PAPI_TOT_CYC - numero di cicli totali
  - PAPI_TOT_INS - numero di istruzioni completate
  - PAPI_FP_INS - istruzioni floating-point
  - PAPI_L1_DCA - accessi in cache L1
  - PAPI_L1_DCM - cache misses L1

PAPI Preset Events



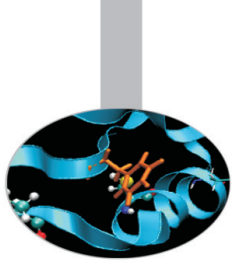
- Un insieme di eventi di particolare interesse per un "tuning" delle prestazioni
- PAPI definisce circa un centinaio di *Preset Events* per una data CPU che, generalmente, ne implementerà un sottoinsieme. Vediamone qualcuno dei più importanti:
  - PAPI_TOT_CYC - numero di cicli totali
  - PAPI_TOT_INS - numero di istruzioni completate
  - PAPI_FP_INS - istruzioni floating-point
  - PAPI_L1_DCA - accessi in cache L1
  - PAPI_L1_DCM - cache misses L1
  - PAPI_SR_INS - istruzioni di store

PAPI Preset Events



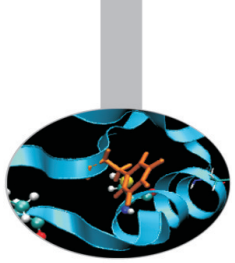
- Un insieme di eventi di particolare interesse per un "tuning" delle prestazioni
- PAPI definisce circa un centinaio di *Preset Events* per una data CPU che, generalmente, ne implementerà un sottoinsieme. Vediamone qualcuno dei più importanti:
  - PAPI_TOT_CYC - numero di cicli totali
  - PAPI_TOT_INS - numero di istruzioni completate
  - PAPI_FP_INS - istruzioni floating-point
  - PAPI_L1_DCA - accessi in cache L1
  - PAPI_L1_DCM - cache misses L1
  - PAPI_SR_INS - istruzioni di store
  - PAPI_TLB_DM - TLB misses

PAPI Preset Events



- Un insieme di eventi di particolare interesse per un "tuning" delle prestazioni
- PAPI definisce circa un centinaio di *Preset Events* per una data CPU che, generalmente, ne implementerà un sottoinsieme. Vediamone qualcuno dei più importanti:
  - PAPI_TOT_CYC - numero di cicli totali
  - PAPI_TOT_INS - numero di istruzioni completate
  - PAPI_FP_INS - istruzioni floating-point
  - PAPI_L1_DCA - accessi in cache L1
  - PAPI_L1_DCM - cache misses L1
  - PAPI_SR_INS - istruzioni di store
  - PAPI_TLB_DM - TLB misses
  - PAPI_BR_MSP - conditional branch mispredicted

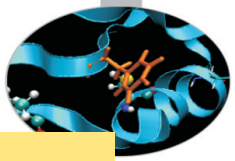
Papi: interfaccia C e Fortran



Le chiamate alla libreria di alto livello sono piuttosto intuitive.
Sebbene PAPI sia scritto in C è possibile chiamare le funzioni di libreria anche da codici Fortran.
un esempio in Fortran:

```
#include "fpapi_test.h"
...  ; integer events(2), retval   ;   integer*8 values(2)
...  ;
events(1) = PAPI_FP_INS     ;   events(2) = PAPI_L1_DCM
...
        call PAPIf_start_counters(events, 2, retval)
        call PAPIf_read_counters(values, 2, retval)  ! Clear values
             [sezione di codice da monitorare]
        call PAPIfstop_counters(values, 2, retval)
           print*,'Floating point instructions:  ',values(1)
           print*,' L1 Data Cache Misses:   ',values(2)
...
```

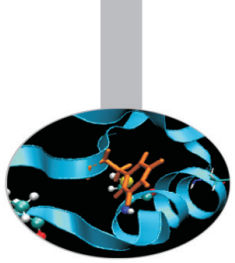
Papi: interfaccia C e Fortran



un esempio in C:

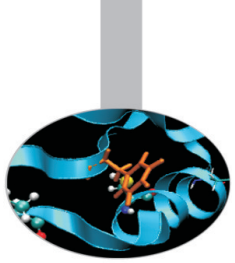
```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include "papi.h"

#define NUM_EVENTS 2
#define THRESHOLD 10000
#define ERROR_RETURN(retval) { fprintf(stderr, "Error %d %s:line %d: \n",
retval,__FILE__,__LINE__);  exit(retval); }
...
/* stupid codes to be monitored */
void computation_add()
   ....
int main()
{
   int Events[2] = {PAPI_TOT_INS, PAPI_TOT_CYC};
   long long values[NUM_EVENTS];
...
if ( (retval = PAPI_start_counters(Events, NUM_EVENTS)) != PAPI_OK)
       ERROR_RETURN(retval);
   printf("\nCounter Started: \n");
if ( (retval=PAPI_read_counters(values, NUM_EVENTS)) != PAPI_OK)
      ERROR_RETURN(retval);
   printf("Read successfully\n");
   computation_add();
if ( (retval=PAPI_stop_counters(values, NUM_EVENTS)) != PAPI_OK)
      ERROR_RETURN(retval);
   printf("Stop successfully\n");
   printf("The total instructions executed for addition are %lld \n",values[0]);
   printf("The total cycles used are %lld \n", values[1] );
}
```

PAPI: tutte le funzioni di alto livello



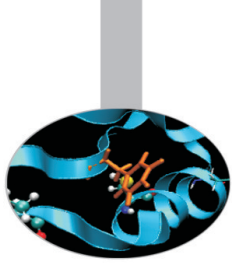
- Un piccolo insieme di routines che servono a "instrumentare" un codice. Le funzioni sono:

PAPI: tutte le funzioni di alto livello



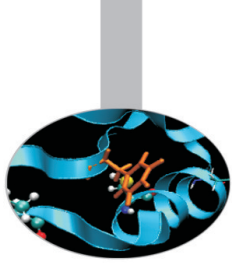
- Un piccolo insieme di routines che servono a "instrumentare" un codice. Le funzioni sono:
  - PAPI_num_counters - ritorna il numero di hw counters disponibili

PAPI: tutte le funzioni di alto livello



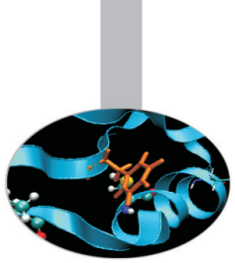
- Un piccolo insieme di routines che servono a "instrumentare" un codice. Le funzioni sono:
  - PAPI_num_counters - ritorna il numero di hw counters disponibili
  - PAPI_flips - floating point instruction rate

PAPI: tutte le funzioni di alto livello



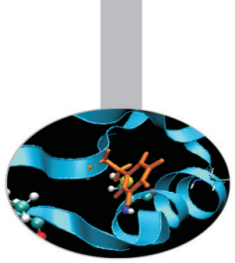
- Un piccolo insieme di routines che servono a "instrumentare" un codice. Le funzioni sono:
  - PAPI_num_counters - ritorna il numero di hw counters disponibili
  - PAPI_flips - floating point instruction rate
  - PAPI_flops - floating point operation rate

PAPI: tutte le funzioni di alto livello



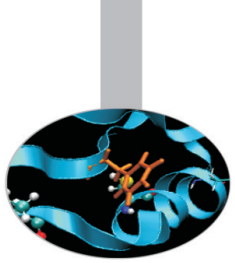
- Un piccolo insieme di routines che servono a "instrumentare" un codice. Le funzioni sono:
  - PAPI_num_counters - ritorna il numero di hw counters disponibili
  - PAPI_flips - floating point instruction rate
  - PAPI_flops - floating point operation rate
  - PAPI_ipc - instructions per cycle e time

PAPI: tutte le funzioni di alto livello



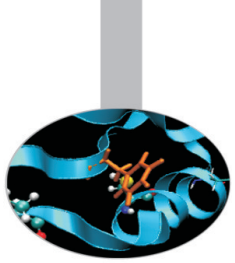
- Un piccolo insieme di routines che servono a "instrumentare" un codice. Le funzioni sono:
  - PAPI_num_counters - ritorna il numero di hw counters disponibili
  - PAPI_flips - floating point instruction rate
  - PAPI_flops - floating point operation rate
  - PAPI_ipc - instructions per cycle e time
  - PAPI_accum_counters

PAPI: tutte le funzioni di alto livello



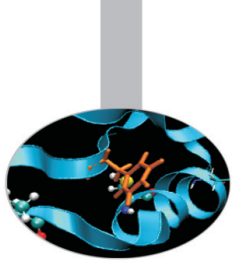
- Un piccolo insieme di routines che servono a "instrumentare" un codice. Le funzioni sono:
  - PAPI_num_counters - ritorna il numero di hw counters disponibili
  - PAPI_flips - floating point instruction rate
  - PAPI_flops - floating point operation rate
  - PAPI_ipc - instructions per cycle e time
  - PAPI_accum_counters
  - PAPI_read_counters - read and reset counters

PAPI: tutte le funzioni di alto livello



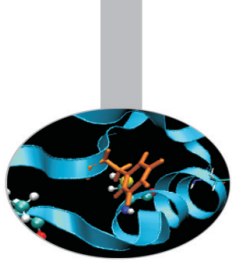
- Un piccolo insieme di routines che servono a "instrumentare" un codice. Le funzioni sono:
  - PAPI_num_counters - ritorna il numero di hw counters disponibili
  - PAPI_flips - floating point instruction rate
  - PAPI_flops - floating point operation rate
  - PAPI_ipc - instructions per cycle e time
  - PAPI_accum_counters
  - PAPI_read_counters - read and reset counters
  - PAPI_start_counters - start counting hw events

PAPI: tutte le funzioni di alto livello



- Un piccolo insieme di routines che servono a "instrumentare" un codice. Le funzioni sono:
  - PAPI_num_counters - ritorna il numero di hw counters disponibili
  - PAPI_flips - floating point instruction rate
  - PAPI_flops - floating point operation rate
  - PAPI_ipc - instructions per cycle e time
  - PAPI_accum_counters
  - PAPI_read_counters - read and reset counters
  - PAPI_start_counters - start counting hw events
  - PAPI_stop_counters - stop counters return current counts

PAPI: Esercitazione

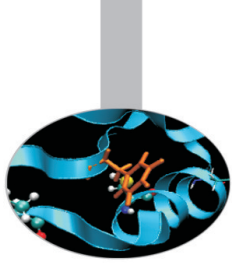


- Profiling con PAPI del codice seriale che utilizza chiamate alle BLAS per alcune operazioni fondamentali di "linear algebra".
  - Eseguire i seguenti comandi:
  - Andare al link del Corso sotto hpcforge:

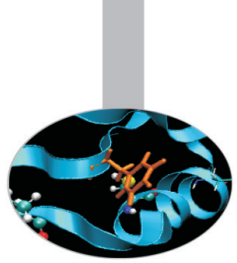
```
https://hpcforge.cineca.it/files/CoursesDev/public/2014/...
...Introduction_to_HPC_Scientific_Programming:_tools_and_techniques/Rome/
tar xvfz PAPI_Profiling_exercise.tgz
cd PAPI
```

  - leggere il file README
  - eseguire i test
  - commentare i risultati del Profiling con PAPI
  - se rimane del tempo instrumentare il codice per valutare le prestazioni degli altri nuclei computazionali presenti nel test e commentare i risultati.

Outline

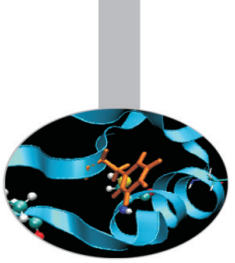


Scalasca: caratteristiche



- Tool sviluppato da Felix Wolf del Juelich Supercomputing Centre e collaboratori.

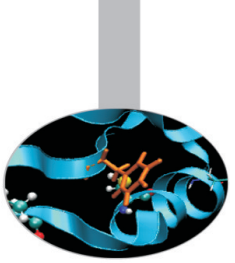
Scalasca: caratteristiche



- Tool sviluppato da Felix Wolf del Juelich Supercomputing Centre e collaboratori.
- In realtà nasce come il successore di un altro tool di successo (KOJAK)

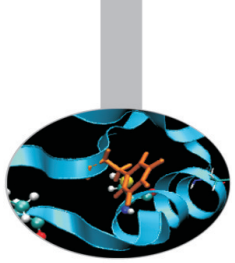
- È il Toolset di riferimento for la "scalable" "performance analysis" di large-scale parallel applications (MPI & OpenMP).

Scalasca: caratteristiche



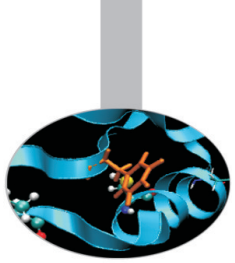
- Tool sviluppato da Felix Wolf del Juelich Supercomputing Centre e collaboratori.
- In realtà nasce come il successore di un altro tool di successo (KOJAK)
- È il Toolset di riferimento for la "scalable" "performance analysis" di large-scale parallel applications (MPI & OpenMP).
- Utilizzabile sulla maggior parte dei sistemi High Performance Computing (HPC) con decine di migliaia di "cores"....

Scalasca: caratteristiche



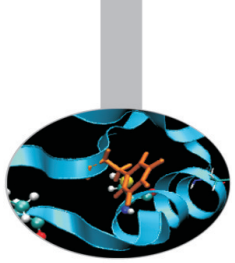
- Tool sviluppato da Felix Wolf del Juelich Supercomputing Centre e collaboratori.
- In realtà nasce come il successore di un altro tool di successo (KOJAK)
- È il Toolset di riferimento for la "scalable" "performance analysis" di large-scale parallel applications (MPI & OpenMP).
- Utilizzabile sulla maggior parte dei sistemi High Performance Computing (HPC) con decine di migliaia di "cores"....
- ...ma anche su architetture parallele "medium-size"
- È un prodotto "open-source", continuamente aggiornato e mantenuto da Juelich.
- Il sito: www.scalasca.org

Scalasca: caratteristiche



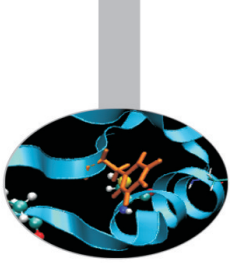
- Supporta applicazioni scritte in Fortran, C e C++.

Scalasca: caratteristiche



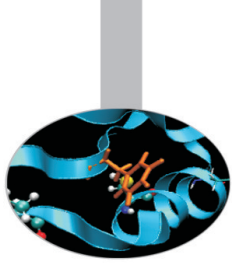
- Supporta applicazioni scritte in Fortran, C e C++.
- In pratica, Scalasca consente due tipi di analisi:

Scalasca: caratteristiche



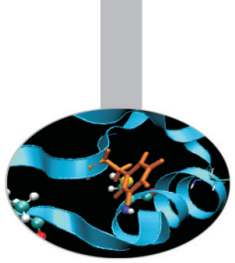
- Supporta applicazioni scritte in Fortran, C e C++.
- In pratica, Scalasca consente due tipi di analisi:
  - una modalità "summary" che consente di ottenere informazioni aggregate per la nostra applicazione (ma sempre dettagliate a livello di singola istruzione)

Scalasca: caratteristiche



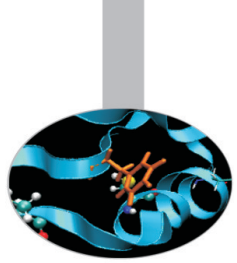
- Supporta applicazioni scritte in Fortran, C e C++.
- In pratica, Scalasca consente due tipi di analisi:
  - una modalità "summary" che consente di ottenere informazioni aggregate per la nostra applicazione (ma sempre dettagliate a livello di singola istruzione)
  - una "tracing" che è "process–local" e che consente di raccogliere molte più informazioni qualitativamente differenti dalla modalità precedente ma che può risultare particolarmente onerosa dal punto di vista dell'uso di risorse di "storage"

Scalasca: caratteristiche



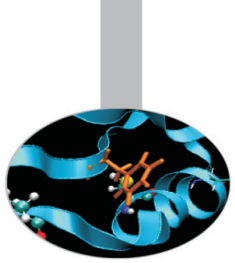
- Supporta applicazioni scritte in Fortran, C e C++.
- In pratica, Scalasca consente due tipi di analisi:
  - una modalità "summary" che consente di ottenere informazioni aggregate per la nostra applicazione (ma sempre dettagliate a livello di singola istruzione)
  - una "tracing" che è "process–local" e che consente di raccogliere molte più informazioni qualitativamente differenti dalla modalità precedente ma che può risultare particolarmente onerosa dal punto di vista dell'uso di risorse di "storage"
- Dopo l'esecuzione dell'eseguibile (instrumentato) Scalasca è in grado di caricare i files in memoria ed analizzarli in parallelo usando lo stesso numero di "cores" della nostra applicazione.

Scalasca: istruzioni pratiche per l'uso



L'intero processo avviene in tre passi:

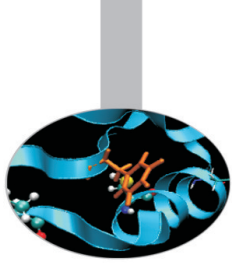
Scalasca: istruzioni pratiche per l'uso



L'intero processo avviene in tre passi:

- Compilazione (il codice sorgente viene "instrumentato"):

Scalasca: istruzioni pratiche per l'uso

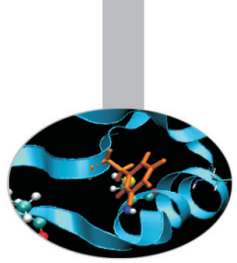


L'intero processo avviene in tre passi:

- Compilazione (il codice sorgente viene "instrumentato"):

  ifort -openmp [altre_opzioni] <codice_sorgente>

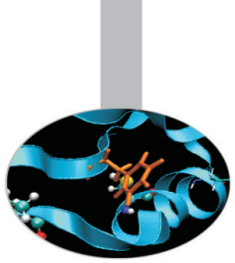
Scalasca: istruzioni pratiche per l'uso



L'intero processo avviene in tre passi:

- Compilazione (il codice sorgente viene "instrumentato"):
  scalasca -instrument [opzioni_scalasca] ifort -openmp [altre_opzioni] <codice_sorgente>

Scalasca: istruzioni pratiche per l'uso

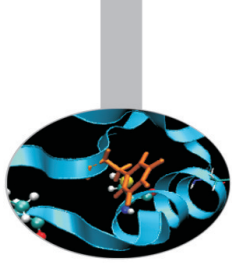


L'intero processo avviene in tre passi:

- Compilazione (il codice sorgente viene "instrumentato"):
  scalasca -instrument [opzioni_scalasca] ifort -openmp [altre_opzioni] <codice_sorgente>

  mpif90 [opzioni] <codice_sorgente>

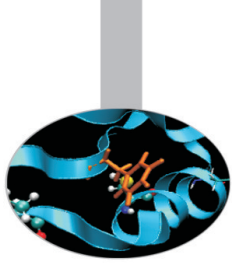
Scalasca: istruzioni pratiche per l'uso



L'intero processo avviene in tre passi:

- Compilazione (il codice sorgente viene "instrumentato"):
  scalasca -instrument [opzioni_scalasca] ifort -openmp [altre_opzioni] <codice_sorgente>
  scalasca -instrument [opzioni_scalasca] mpif90 [opzioni] <codice_sorgente>

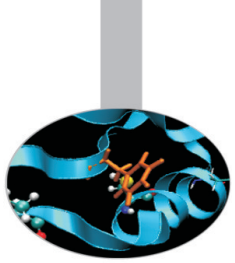
Scalasca: istruzioni pratiche per l'uso



L'intero processo avviene in tre passi:

- Compilazione (il codice sorgente viene "instrumentato"):
  scalasca -instrument [opzioni_scalasca] ifort -openmp [altre_opzioni] <codice_sorgente>
  scalasca -instrument [opzioni_scalasca] mpif90 [opzioni] <codice_sorgente>
- Esecuzione:

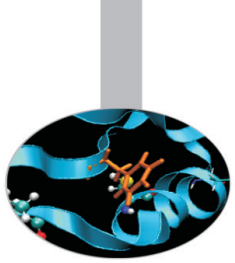
Scalasca: istruzioni pratiche per l'uso



L'intero processo avviene in tre passi:

- Compilazione (il codice sorgente viene "instrumentato"):
  scalasca -instrument [opzioni_scalasca] ifort -openmp [altre_opzioni] <codice_sorgente>
  scalasca -instrument [opzioni_scalasca] mpif90 [opzioni] <codice_sorgente>
- Esecuzione:
  <codice_eseguibile>

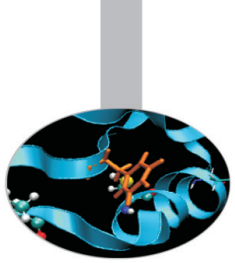
Scalasca: istruzioni pratiche per l'uso



L'intero processo avviene in tre passi:

- Compilazione (il codice sorgente viene "instrumentato"):
  scalasca -instrument [opzioni_scalasca] ifort -openmp [altre_opzioni] <codice_sorgente>
  scalasca -instrument [opzioni_scalasca] mpif90 [opzioni] <codice_sorgente>
- Esecuzione:
  scalasca -analyze [opzioni_scalasca] <codice_eseguibile>

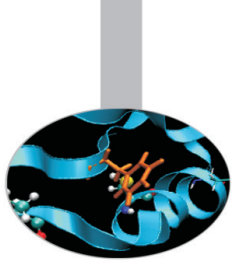
Scalasca: istruzioni pratiche per l'uso



L'intero processo avviene in tre passi:

- Compilazione (il codice sorgente viene "instrumentato"):
  scalasca -instrument [opzioni_scalasca] ifort -openmp [altre_opzioni] <codice_sorgente>
  scalasca -instrument [opzioni_scalasca] mpif90 [opzioni] <codice_sorgente>
- Esecuzione:
  scalasca -analyze [opzioni_scalasca] <codice_eseguibile>
  mpirun [opzioni] <codice_eseguibile>

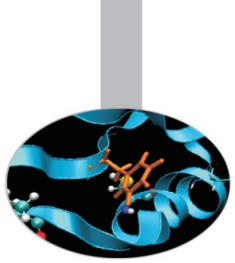
Scalasca: istruzioni pratiche per l'uso



L'intero processo avviene in tre passi:

- Compilazione (il codice sorgente viene "instrumentato"):
  scalasca -instrument [opzioni_scalasca] ifort -openmp [altre_opzioni] <codice_sorgente>
  scalasca -instrument [opzioni_scalasca] mpif90 [opzioni] <codice_sorgente>
- Esecuzione:
  scalasca -analyze [opzioni_scalasca] <codice_eseguibile>
  scalasca -analyze [opzioni_scalasca] mpirun [opzioni] <codice_eseguibile>

Scalasca: istruzioni pratiche per l'uso

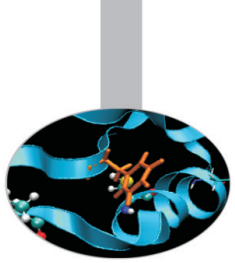


L'intero processo avviene in tre passi:

- Compilazione (il codice sorgente viene "instrumentato"):
  scalasca -instrument [opzioni_scalasca] ifort -openmp [altre_opzioni] <codice_sorgente>
  scalasca -instrument [opzioni_scalasca] mpif90 [opzioni] <codice_sorgente>
- Esecuzione:
  scalasca -analyze [opzioni_scalasca] <codice_eseguibile>
  scalasca -analyze [opzioni_scalasca] mpirun [opzioni] <codice_eseguibile>

  Viene creata una directory epik_[caratteristiche]

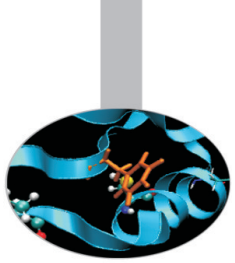
Scalasca: istruzioni pratiche per l'uso



L'intero processo avviene in tre passi:

- Compilazione (il codice sorgente viene "instrumentato"):
  scalasca -instrument [opzioni_scalasca] ifort -openmp [altre_opzioni] <codice_sorgente>
  scalasca -instrument [opzioni_scalasca] mpif90 [opzioni] <codice_sorgente>
- Esecuzione:
  scalasca -analyze [opzioni_scalasca] <codice_eseguibile>
  scalasca -analyze [opzioni_scalasca] mpirun [opzioni] <codice_eseguibile>
  Viene creata una directory epik_[caratteristiche]
- Analisi risultati:

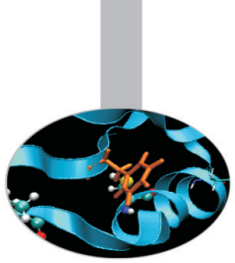
Scalasca: istruzioni pratiche per l'uso



L'intero processo avviene in tre passi:

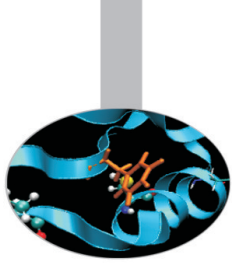
- Compilazione (il codice sorgente viene "instrumentato"):
  scalasca -instrument [opzioni_scalasca] ifort -openmp [altre_opzioni] <codice_sorgente>
  scalasca -instrument [opzioni_scalasca] mpif90 [opzioni] <codice_sorgente>
- Esecuzione:
  scalasca -analyze [opzioni_scalasca] <codice_eseguibile>
  scalasca -analyze [opzioni_scalasca] mpirun [opzioni] <codice_eseguibile>
  Viene creata una directory epik_[caratteristiche]
- Analisi risultati:
  scalasca -examine [opzioni_scalasca] epik_[caratteristiche]

Scalasca: un esempio



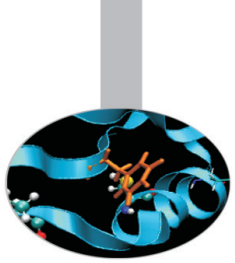
- Codice sismologia elementi finiti (fem.F).

Scalasca: un esempio



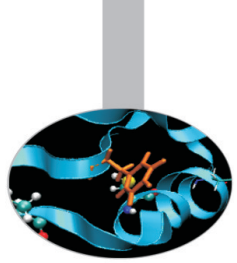
- Codice sismologia elementi finiti (fem.F).
- Parallelizzato utilizzando il tool OpenMP.

Scalasca: un esempio



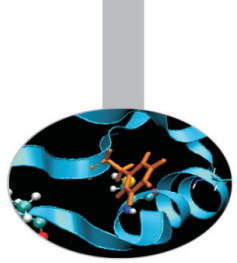
- Codice sismologia elementi finiti (fem.F).
- Parallelizzato utilizzando il tool OpenMP.
- Eseguito su 8 processori (parallelismo "moderato") su singolo nodo

Scalasca: un esempio



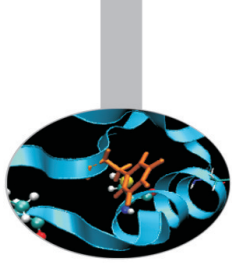
- Codice sismologia elementi finiti (fem.F).
- Parallelizzato utilizzando il tool OpenMP.
- Eseguito su 8 processori (parallelismo "moderato") su singolo nodo
- Compilatore intel (comando ifort -O3 -free -openmp...)

Scalasca: un esempio



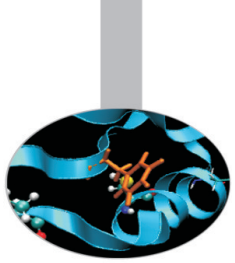
- Codice sismologia elementi finiti (fem.F).
- Parallelizzato utilizzando il tool OpenMP.
- Eseguito su 8 processori (parallelismo "moderato") su singolo nodo
- Compilatore intel (comando ifort -O3 -free -openmp...)
- Alcuni numeri:

Scalasca: un esempio



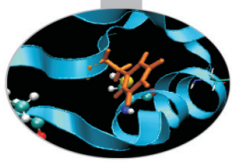
- Codice sismologia elementi finiti (fem.F).
- Parallelizzato utilizzando il tool OpenMP.
- Eseguito su 8 processori (parallelismo "moderato") su singolo nodo
- Compilatore intel (comando ifort -O3 -free -openmp...)
- Alcuni numeri:
  - Numeri dei nodi della griglia 2060198.

Scalasca: un esempio



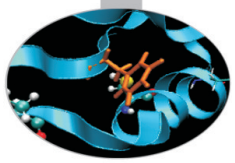
- Codice sismologia elementi finiti (fem.F).
- Parallelizzato utilizzando il tool OpenMP.
- Eseguito su 8 processori (parallelismo "moderato") su singolo nodo
- Compilatore intel (comando ifort -O3 -free -openmp...)
- Alcuni numeri:
  - Numeri dei nodi della griglia 2060198.
  - Numeri degli elementi non nulli della matrice 57638104.

Scalasca: compilazione ed esecuzione



```
[ruggiero@neo258 SRC]$ scalasca -instrument -user ifort -O3 -free -openmp  *.F
```

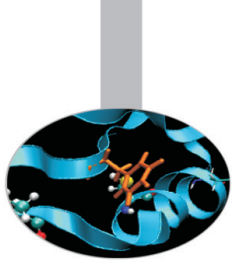
Scalasca: compilazione ed esecuzione



```
[ruggiero@neo258 SRC]$ scalasca -instrument -user ifort -O3 -free -openmp  *.F
```

```
[ruggiero@neo258 EXE]$ scalasca -analyze ./fem.x
```

Scalasca: compilazione ed esecuzione

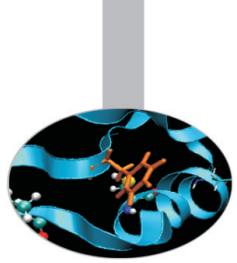


```
[ruggiero@neo258 SRC]$ scalasca -instrument -user ifort -O3 -free -openmp  *.F
```

```
[ruggiero@neo258 EXE]$ scalasca -analyze ./fem.x
```

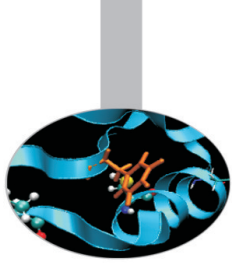
```
S=C=A=N: Scalasca 1.2.2 runtime summarization
S=C=A=N: Abort: measurement blocked by existing archive ./epik_fem_Ox8_sum
[ruggiero@neo258 EXE]$ rm -r epik_fem_Ox8_sum/
[ruggiero@neo258 EXE]$ scalasca -analyze ./fem.x
S=C=A=N: Scalasca 1.2.2 runtime summarization
S=C=A=N: ./epik_fem_Ox8_sum experiment archive
S=C=A=N: Thu Jan  7 16:03:56 2010: Collect start
./fem.x
[.0]EPIK: Closing experiment ./epik_fem_Ox8_sum
[.0]EPIK: Largest definitions buffer 5358 bytes
[.0]EPIK: 19 unique paths (21 max paths, 4 max frames, 0 unknowns)
[.0]EPIK: Unifying... done (0.001s)
[.0]EPIK: Collating... done (0.000s)
[.0]EPIK: Closed experiment ./epik_fem_Ox8_sum (0.002s) maxHeap(0)=1813.852/1813.852MB
S=C=A=N: Fri Apr  4 14:05:29 2014: Collect done (status=0) 41s
S=C=A=N: ./epik_fem_Ox8_sum complete.
```

Scalasca: analisi dei risultati



```
[ruggiero@neo258 EXE]$ scalasca -examine -s ./epik_fem_Ox8_sum/
```

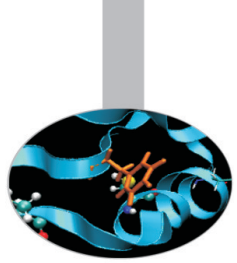
Scalasca: analisi dei risultati



```
[ruggiero@neo258 EXE]$ scalasca -examine -s ./epik_fem_Ox8_sum/
```

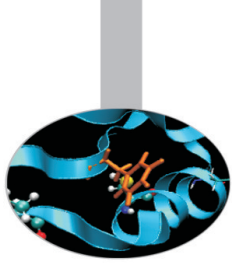
```
cube3_score ./epik_fem_Ox8_sum/epitome.cube
Reading epik_fem_Ox8_sum/epitome.cube... done.
              .....
Estimated aggregate size of event trace (total_tbc): 1102182744 bytes
Estimated size of largest process trace (max_tbc):   1090211280 bytes
(Hint: When tracing set ELG_BUFFER_SIZE > max_tbc to avoid intermediate flushes
 or reduce requirements using file listing names of USR regions to be filtered.)

flt  type     max_tbc        time       % region
      ANY  1090211280     6142.73  100.00 (summary) ALL
      OMP     1684464     4324.02   70.39 (summary) OMP
      COM       17184      385.86    6.28 (summary) COM
      USR  1088536224     1432.86   23.33 (summary) USR
```

Scalasca output: breve descrizione



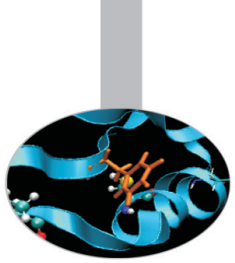
1. Per tipologia:

Scalasca output: breve descrizione



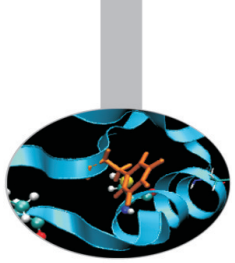
1. Per tipologia:
   - ANY: aggregato di tutte le regioni o "chiamate a funzione" che compongono il programma

Scalasca output: breve descrizione



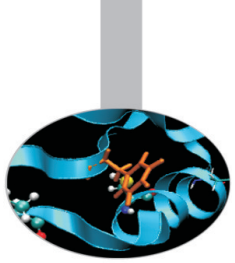
1. Per tipologia:
   - ANY: aggregato di tutte le regioni o "chiamate a funzione" che compongono il programma
   - OMP: quelle che contengono costrutti di parallelizzazione (OpenMP in questo caso, altrimenti MPI o anche entrambi).

Scalasca output: breve descrizione



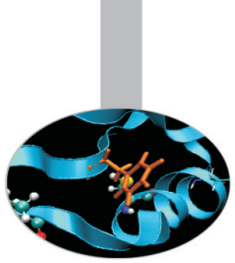
1. Per tipologia:
   - ANY: aggregato di tutte le regioni o "chiamate a funzione" che compongono il programma
   - OMP: quelle che contengono costrutti di parallelizzazione (OpenMP in questo caso, altrimenti MPI o anche entrambi).
   - USR: quelle che sono coinvolte in operazioni puramente locali al processo.

Scalasca output: breve descrizione



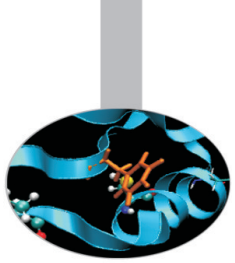
1. Per tipologia:
   - ANY: aggregato di tutte le regioni o "chiamate a funzione" che compongono il programma
   - OMP: quelle che contengono costrutti di parallelizzazione (OpenMP in questo caso, altrimenti MPI o anche entrambi).
   - USR: quelle che sono coinvolte in operazioni puramente locali al processo.
   - COM:USR+OMP (o MPI).

Scalasca output: breve descrizione



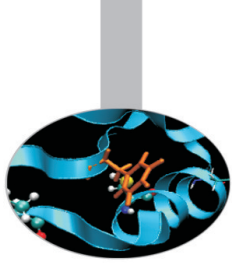
1. Per tipologia:
   - ANY: aggregato di tutte le regioni o "chiamate a funzione" che compongono il programma
   - OMP: quelle che contengono costrutti di parallelizzazione (OpenMP in questo caso, altrimenti MPI o anche entrambi).
   - USR: quelle che sono coinvolte in operazioni puramente locali al processo.
   - COM:USR+OMP (o MPI).
2. La massima capacità del trace-buffer richiesta (misurata in in bytes).

Scalasca output: breve descrizione



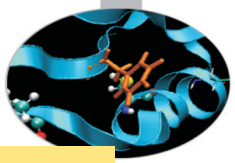
1. Per tipologia:
   - ANY: aggregato di tutte le regioni o "chiamate a funzione" che compongono il programma
   - OMP: quelle che contengono costrutti di parallelizzazione (OpenMP in questo caso, altrimenti MPI o anche entrambi).
   - USR: quelle che sono coinvolte in operazioni puramente locali al processo.
   - COM:USR+OMP (o MPI).
2. La massima capacità del trace-buffer richiesta (misurata in in bytes).
3. Il tempo impiegato (in secondi) per l'esecuzione di quella parte di codice.

Scalasca output: breve descrizione



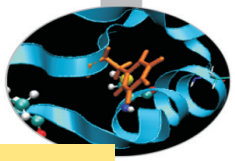
1. Per tipologia:
   - ANY: aggregato di tutte le regioni o "chiamate a funzione" che compongono il programma
   - OMP: quelle che contengono costrutti di parallelizzazione (OpenMP in questo caso, altrimenti MPI o anche entrambi).
   - USR: quelle che sono coinvolte in operazioni puramente locali al processo.
   - COM:USR+OMP (o MPI).
2. La massima capacità del trace-buffer richiesta (misurata in in bytes).
3. Il tempo impiegato (in secondi) per l'esecuzione di quella parte di codice.
4. La percentuale del tempo impiegato, rispetto a quello totale, per la sua esecuzione.

Scalasca output: maggior dettaglio



```
[ruggiero@neo258 EXE]$ cube3_score -r epik_fem_0x8_sum/summary.cube.gz
```

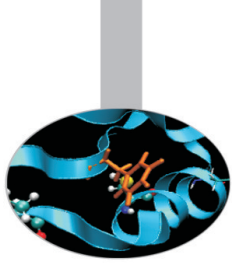
Scalasca output: maggior dettaglio



```
[ruggiero@neo258 EXE]$ cube3_score -r epik_fem_0x8_sum/summary.cube.gz
```

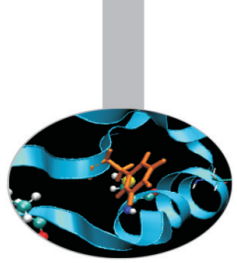
```
...
      USR   889293768        68.51     1.12 expand_
      USR    98889504         9.96     0.16 ordinamento_
      USR    98747208        12.60     0.21 elem2d_
      USR      730224         0.05     0.00 elem_ij_
      OMP      349200         0.48     0.01 !$omp do @solutore_parallelo.F:157
      OMP      349200         0.34     0.01 !$omp ibarrier @solutore_parallelo.F:163
      USR      171840         0.03     0.00 dwalltime00_
      USR      171840         0.05     0.00 dwalltime00
      USR      142224         0.01     0.00 abc03_bis_
      USR      142224         0.01     0.00 abc03_ter_
      USR       85896         1.39     0.02 printtime_
      USR       85896         0.02     0.00 inittime_
      OMP       51480        19.53     0.32 !$omp ibarrier @fem.F:2554
      OMP       51480       196.73     3.20 !$omp do @fem.F:2548
      OMP       51480        88.14     1.43 !$omp ibarrier @fem.F:2540
      OMP       51480      1555.91    25.33 !$omp do @fem.F:2532
      OMP       34320        18.10     0.29 !$omp ibarrier @fem.F:2742
      OMP       31460         0.27     0.00 !$omp parallel @fem.F:2511
      OMP       31460         0.17     0.00 !$omp parallel @fem.F:2725
      OMP       31460         0.41     0.01 !$omp parallel @fem.F:2589
      OMP       31460         0.38     0.01 !$omp parallel @solutore_parallelo.F:40
      ....
```

Aggiunta di "instrumentazione" manuale



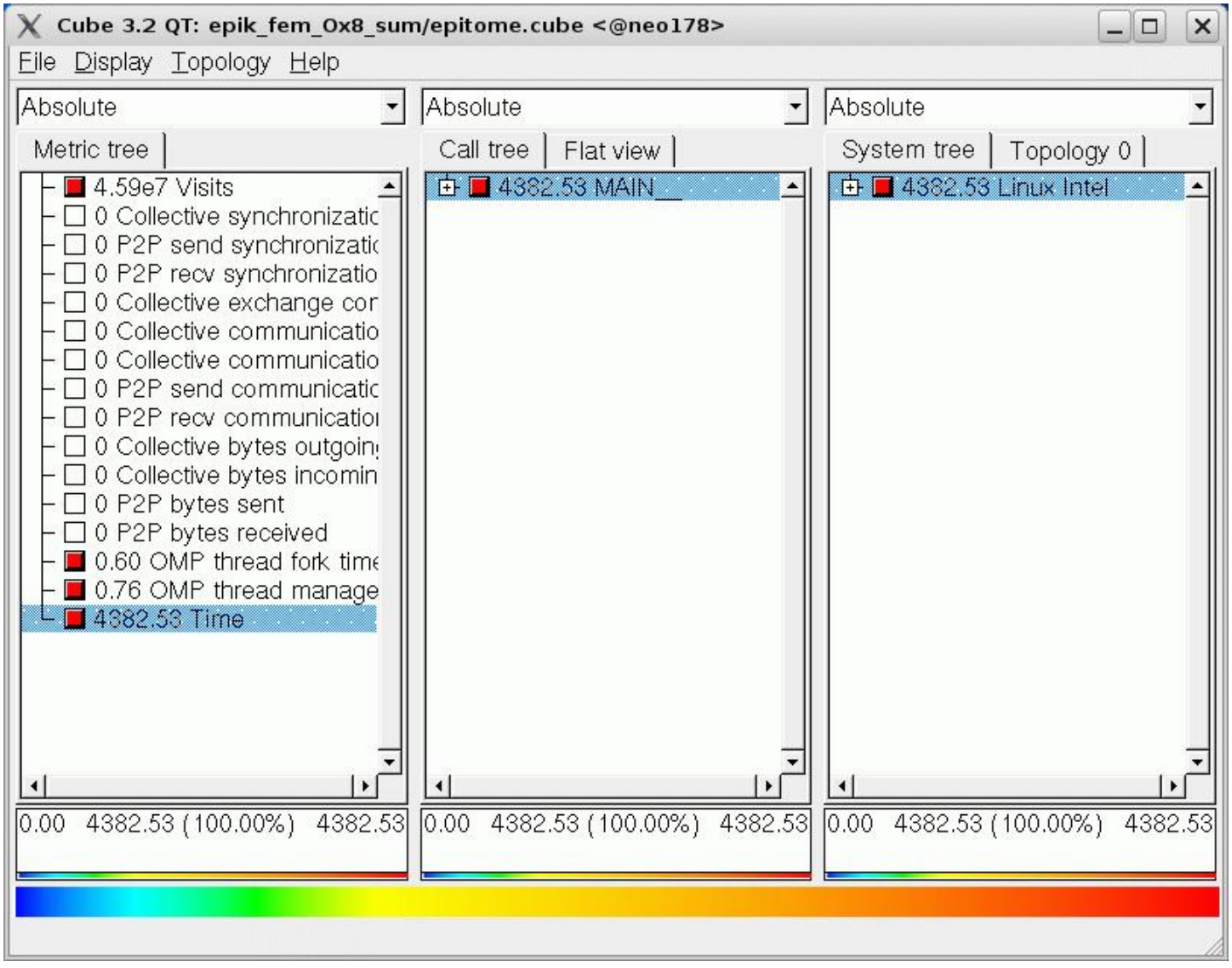
```
        program fem
        implicit none
#include "epik_user.inc"
...
...
...
EPIK_USER_REG(r_write, "<<write>>")
        real*8,allocatable :: csi(:),eta(:)
...
...
EPIK_USER_START(r_write)
         do i=1,13
            write(i+5000,*) t,csi(2*p(i)-1),eta(2*p(i)-1)
            write(i+6000,*) t,csi(2*p(i)),eta(2*p(i))
         end do
EPIK_USER_END(r_write)
...
...
...
         end
```

Scalasca output: maggior dettaglio - 2

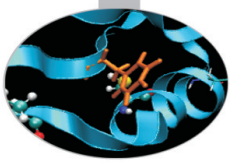


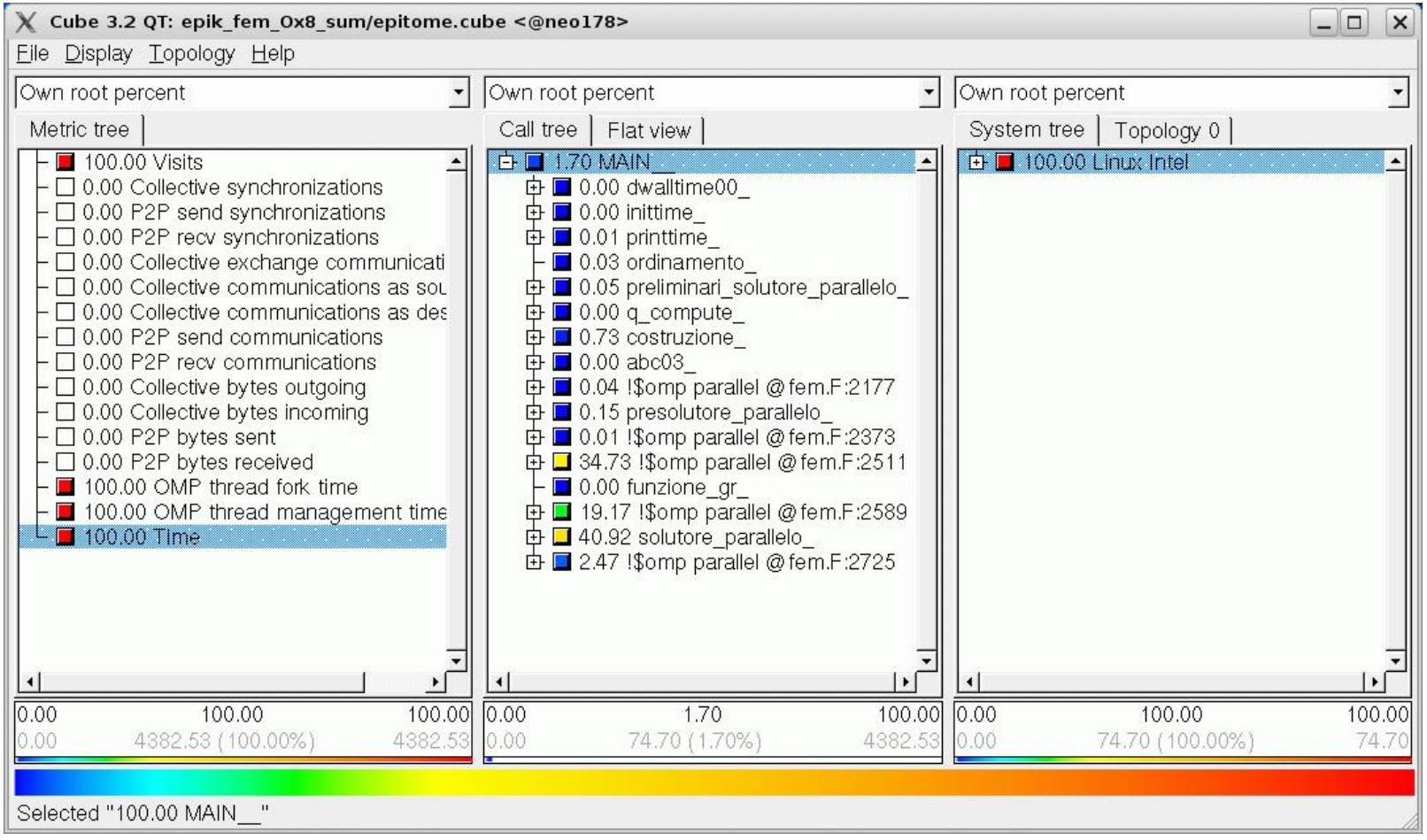
```
OMP     23280      0.21    0.00 !$omp ibarrier @solutore_parallelo.F:86
OMP     23280      0.04    0.00 !$omp single @solutore_parallelo.F:84
OMP     23280     53.29    0.87 !$omp do @solutore_parallelo.F:89
OMP     23280      4.37    0.07 !$omp ibarrier @solutore_parallelo.F:99
OMP     23280    899.44   14.64 !$omp do @solutore_parallelo.F:104
USR     23280    931.42   15.16 sol_
OMP     23280    106.11    1.73 !$omp ibarrier @solutore_parallelo.F:133
OMP     23280     41.25    0.67 !$omp do @solutore_parallelo.F:142
OMP     23280      2.67    0.04 !$omp ibarrier @solutore_parallelo.F:150
OMP     23280      0.05    0.00 !$omp single @solutore_parallelo.F:172
OMP     23280      0.73    0.01 !$omp ibarrier @solutore_parallelo.F:174
USR     17160      3.89    0.06 <<sint>>
OMP     17160      1.43    0.02 !$omp do @solutore_parallelo.F:42
OMP     17160     64.71    1.05 !$omp do @solutore_parallelo.F:47
OMP     17160      7.68    0.12 !$omp ibarrier @solutore_parallelo.F:55
OMP     17160     36.40    0.59 !$omp do @solutore_parallelo.F:56
OMP     17160      6.45    0.11 !$omp ibarrier @solutore_parallelo.F:66
OMP     17160     15.30    0.25 !$omp do @solutore_parallelo.F:67
USR     17160      3.08    0.05 <<write>>
OMP     17160      3.18    0.05 !$omp ibarrier @solutore_parallelo.F:81
OMP     17160     95.11    1.55 !$omp do @fem.F:2726
OMP     17160      0.03    0.00 !$omp ibarrier @solutore_parallelo.F:182
OMP     17160      0.84    0.01 !$omp ibarrier @solutore_parallelo.F:180
OMP     17160      0.01    0.00 !$omp single @solutore_parallelo.F:178
```

Scalasca: output grafico

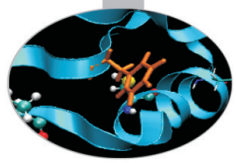


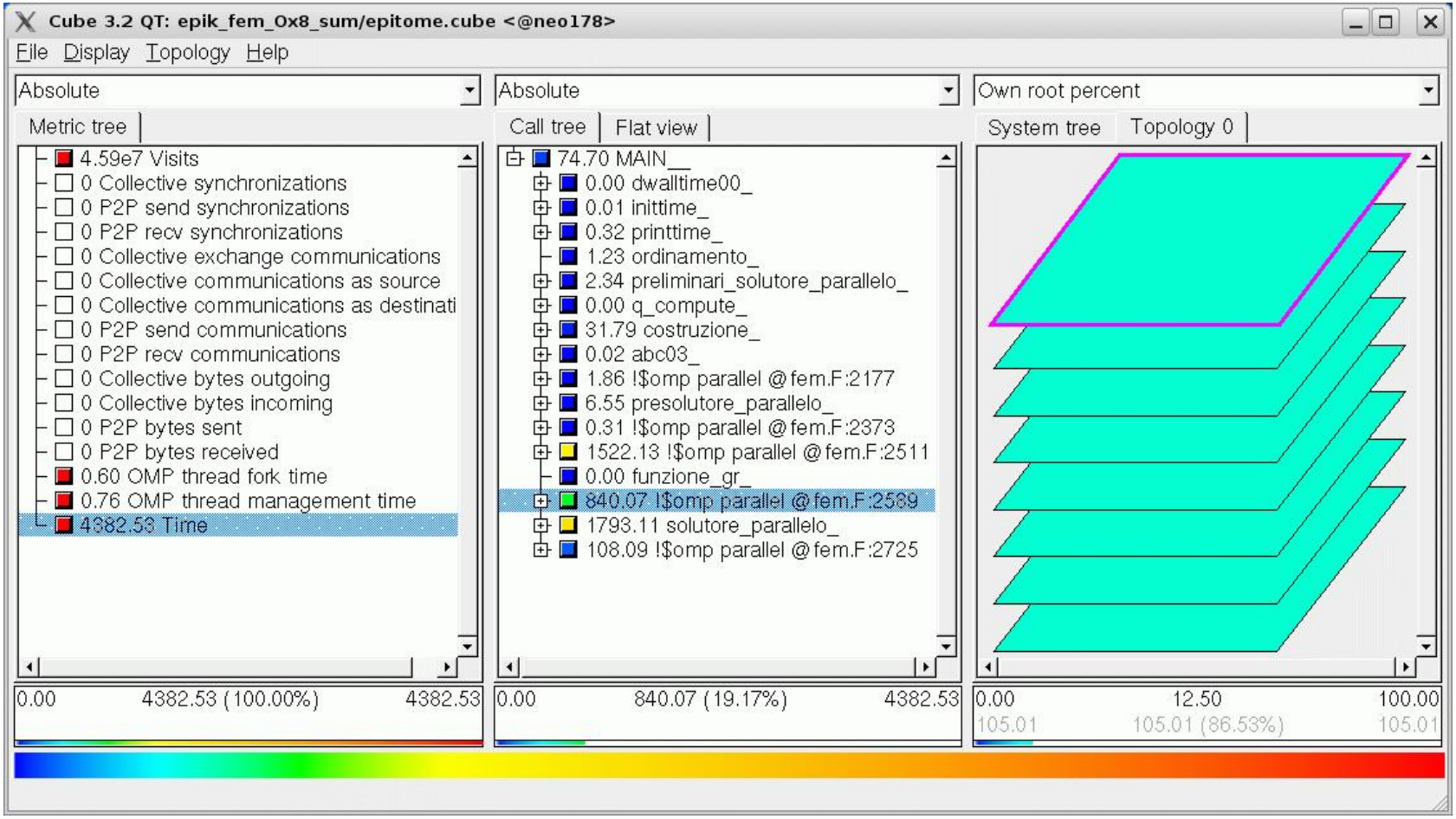
Scalasca: output grafico



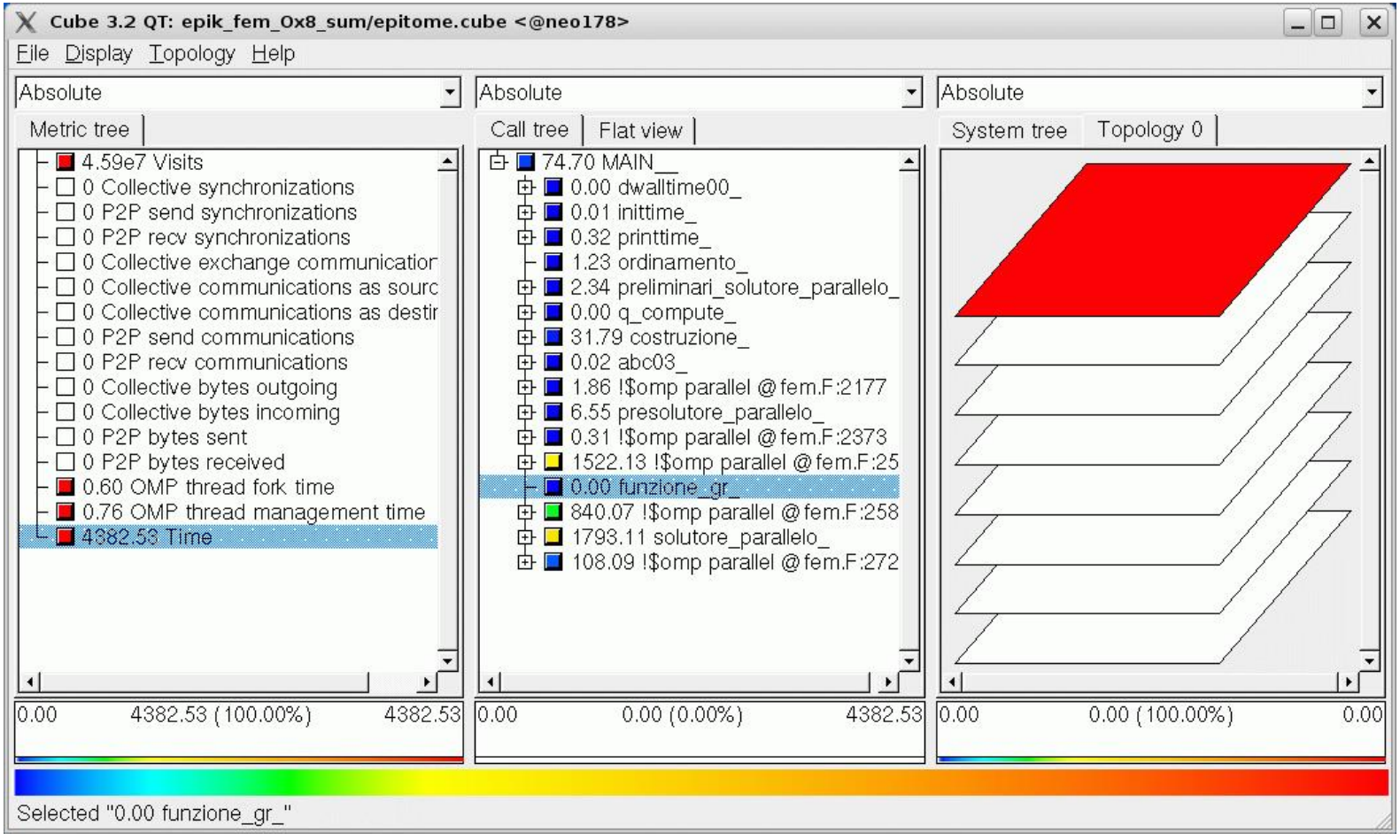


Scalasca: output grafico

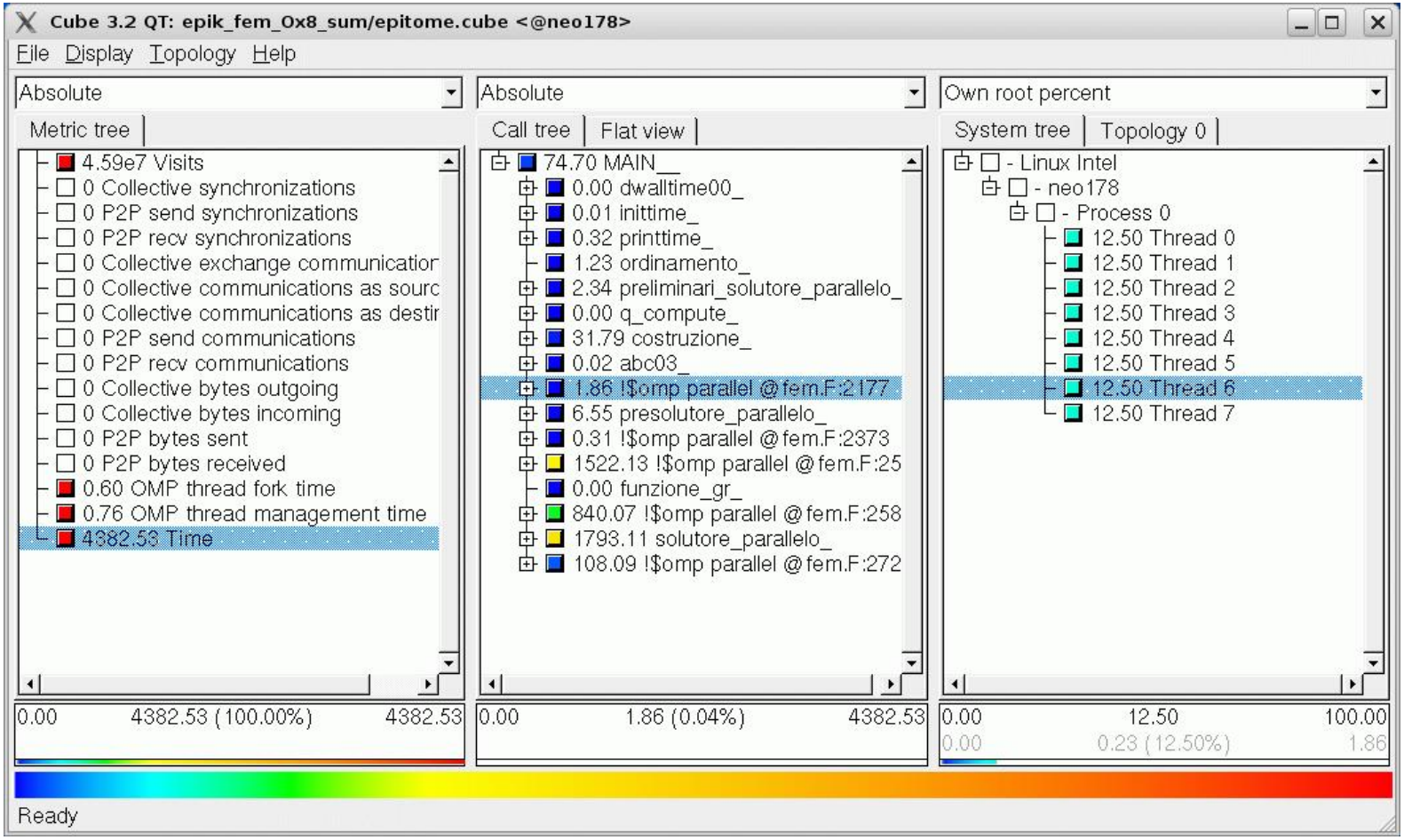




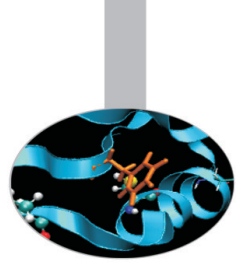
Scalasca: output grafico



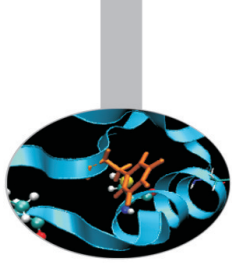
Scalasca: output grafico



Scalasca: summary vs tracing

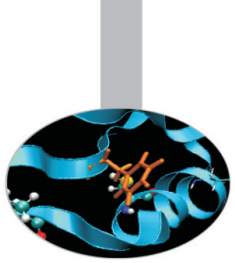


Scalasca: summary vs tracing



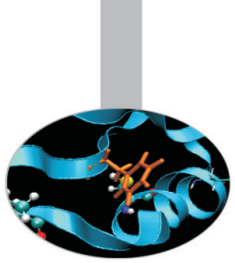
- Abbiamo visto come Scalasca consenta due tipi di analisi:

Scalasca: summary vs tracing



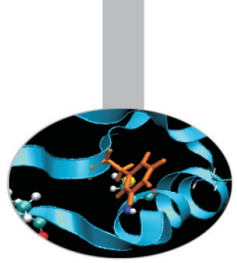
- Abbiamo visto come Scalasca consenta due tipi di analisi:
  - una modalità "summary" che consente di ottenere informazioni aggregate per la nostra applicazione (ma sempre dettagliate a livello di singola istruzione)

Scalasca: summary vs tracing



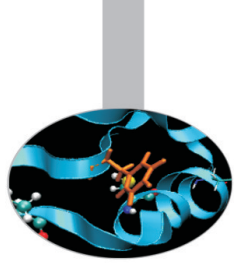
- Abbiamo visto come Scalasca consenta due tipi di analisi:
  - una modalità "summary" che consente di ottenere informazioni aggregate per la nostra applicazione (ma sempre dettagliate a livello di singola istruzione)
  - una "tracing" che è "process–local" e che consente di raccogliere molte più informazioni qualitativamente differenti rispetto alla modalità precedente ma che può risultare particolarmente onerosa dal punto di vista dell'uso di risorse di "storage"

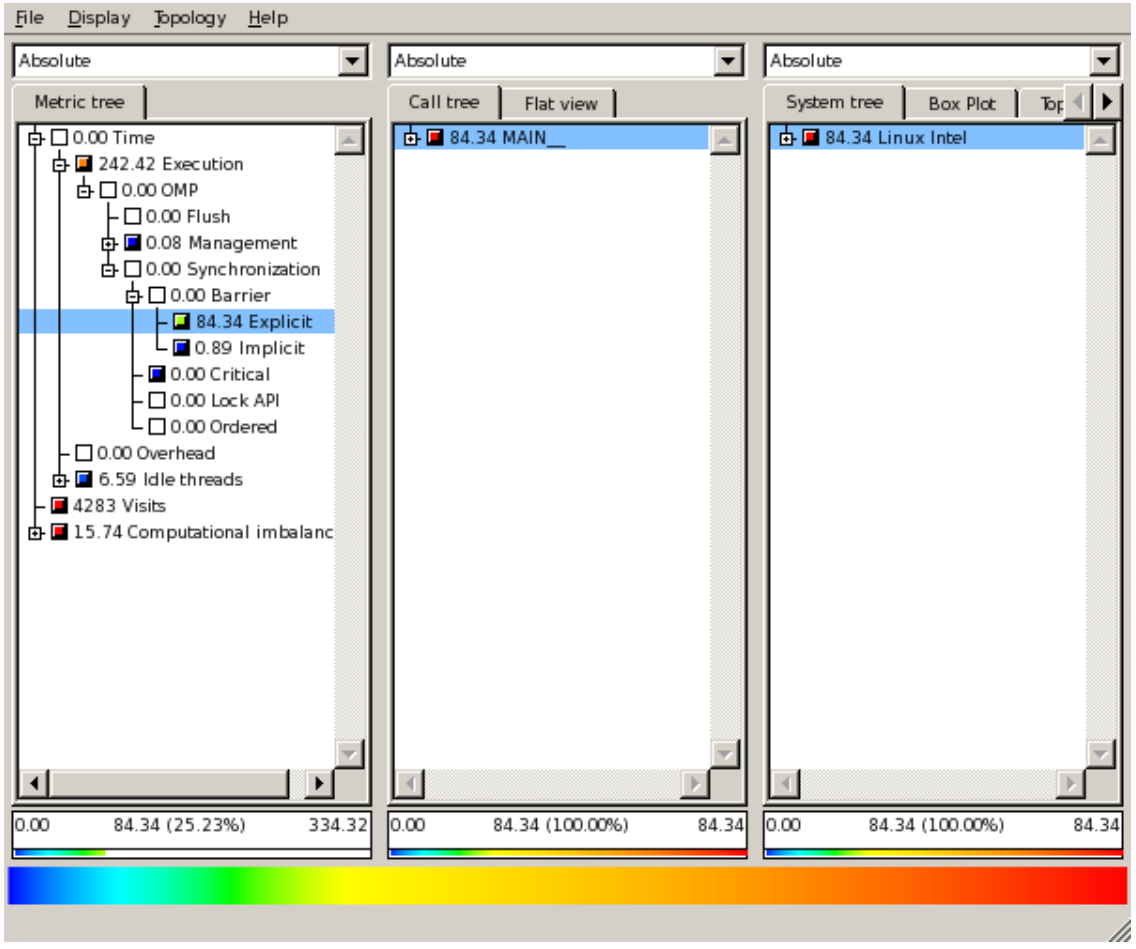
Scalasca: summary vs tracing



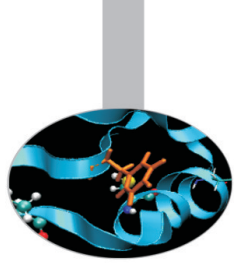
- Abbiamo visto come Scalasca consenta due tipi di analisi:
  - una modalità "summary" che consente di ottenere informazioni aggregate per la nostra applicazione (ma sempre dettagliate a livello di singola istruzione)
  - una "tracing" che è "process–local" e che consente di raccogliere molte più informazioni qualitativamente differenti rispetto alla modalità precedente ma che può risultare particolarmente onerosa dal punto di vista dell'uso di risorse di "storage"
- Sebbene maggiormente onerosa la modalità "tracing" consente di accedere a "metriche" non fruibili nella modalità "summary". Un esempio:

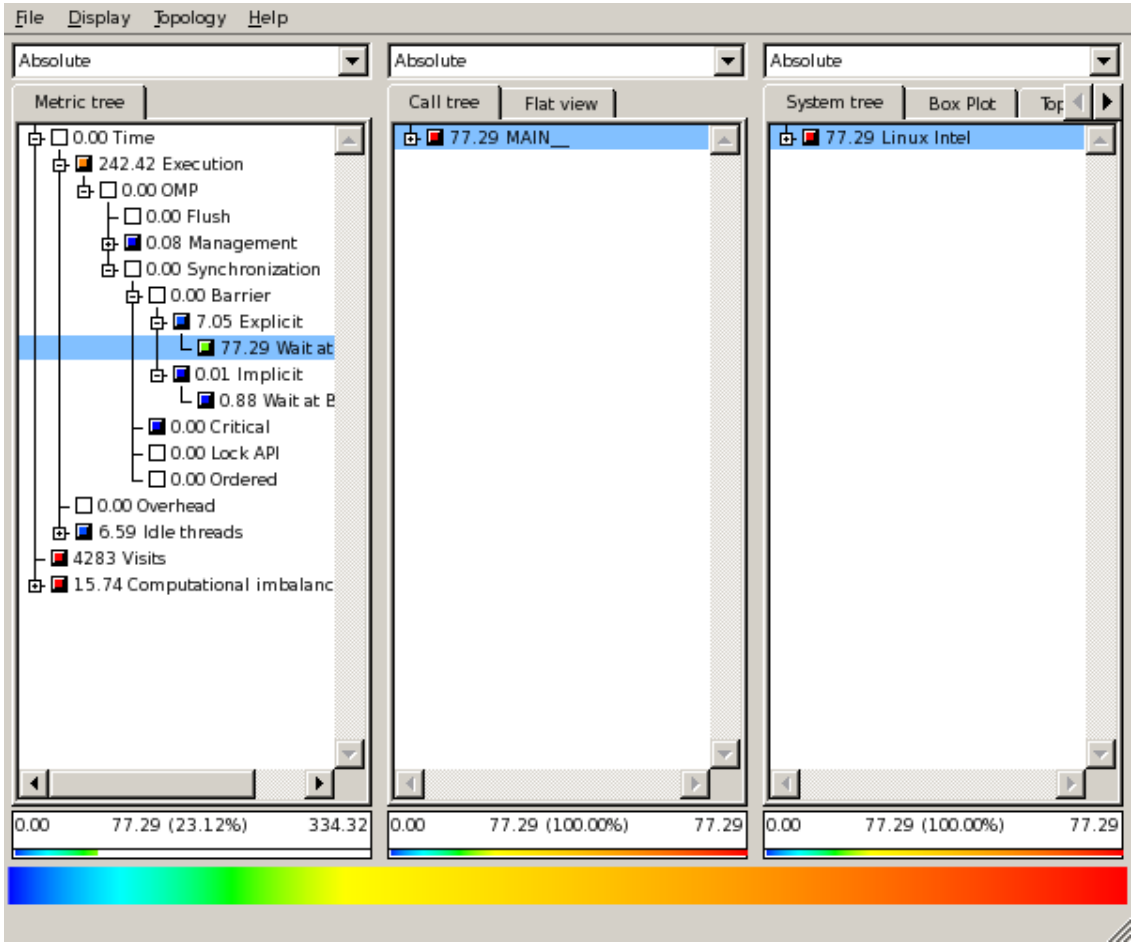
Scalasca: modalità "summary"



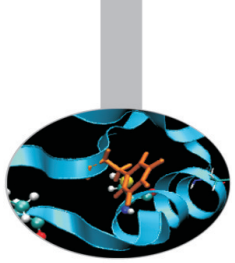


Scalasca: modalità "tracing"

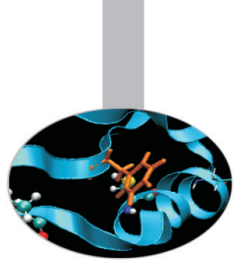




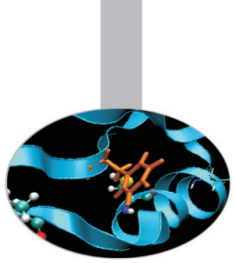
Outline



Profiling...

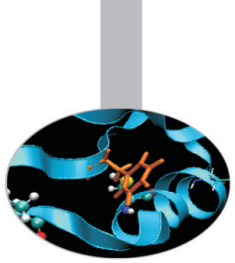


Profiling...



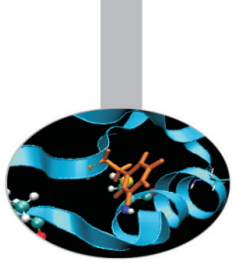
- la lezione non pretendeva di essere esaustiva sugli strumenti di Profiling mostrati...

Profiling...



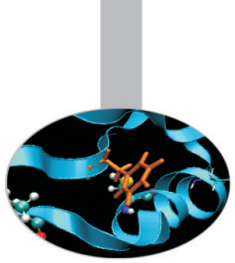
- la lezione non pretendeva di essere esaustiva sugli strumenti di Profiling mostrati...
- ..e non pretendeva di essere esaustiva su tutti i possibili strumenti di Profiling!

Profiling...



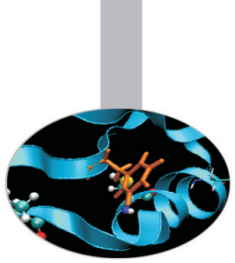
- la lezione non pretendeva di essere esaustiva sugli strumenti di Profiling mostrati...
- ..e non pretendeva di essere esaustiva su tutti i possibili strumenti di Profiling!
- alcune considerazioni "pratiche":

Profiling...



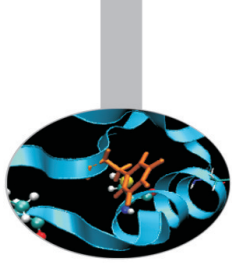
- la lezione non pretendeva di essere esaustiva sugli strumenti di Profiling mostrati...
- ..e non pretendeva di essere esaustiva su tutti i possibili strumenti di Profiling!
- alcune considerazioni "pratiche":
  - usare più casi test cercando di attivare tutte le parti del codice

Profiling...



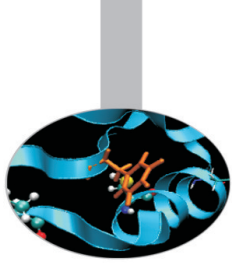
- la lezione non pretendeva di essere esaustiva sugli strumenti di Profiling mostrati...
- ..e non pretendeva di essere esaustiva su tutti i possibili strumenti di Profiling!
- alcune considerazioni "pratiche":
  - usare più casi test cercando di attivare tutte le parti del codice
  - scegliere casi test il più possibile realistici

Profiling...



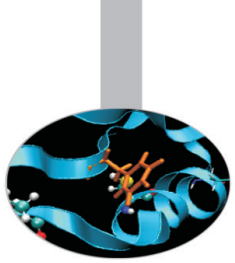
- la lezione non pretendeva di essere esaustiva sugli strumenti di Profiling mostrati...
- ..e non pretendeva di essere esaustiva su tutti i possibili strumenti di Profiling!
- alcune considerazioni "pratiche":
  - usare più casi test cercando di attivare tutte le parti del codice
  - scegliere casi test il più possibile realistici
  - usare casi test caratterizzati da diverse "dimensioni" del problema

Profiling...



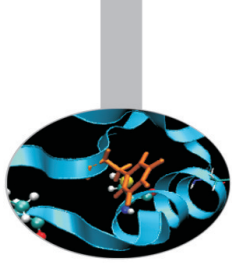
- la lezione non pretendeva di essere esaustiva sugli strumenti di Profiling mostrati...
- ..e non pretendeva di essere esaustiva su tutti i possibili strumenti di Profiling!
- alcune considerazioni "pratiche":
  - usare più casi test cercando di attivare tutte le parti del codice
  - scegliere casi test il più possibile realistici
  - usare casi test caratterizzati da diverse "dimensioni" del problema
  - attenzione alla fase di input/output

Profiling...



- la lezione non pretendeva di essere esaustiva sugli strumenti di Profiling mostrati...
- ..e non pretendeva di essere esaustiva su tutti i possibili strumenti di Profiling!
- alcune considerazioni "pratiche":
  - usare più casi test cercando di attivare tutte le parti del codice
  - scegliere casi test il più possibile realistici
  - usare casi test caratterizzati da diverse "dimensioni" del problema
  - attenzione alla fase di input/output
  - usare più strumenti di Profiling (magari raffinando una analisi iniziale)

Profiling...



- la lezione non pretendeva di essere esaustiva sugli strumenti di Profiling mostrati...
- ..e non pretendeva di essere esaustiva su tutti i possibili strumenti di Profiling!
- alcune considerazioni "pratiche":
  - usare più casi test cercando di attivare tutte le parti del codice
  - scegliere casi test il più possibile realistici
  - usare casi test caratterizzati da diverse "dimensioni" del problema
  - attenzione alla fase di input/output
  - usare più strumenti di Profiling (magari raffinando una analisi iniziale)
  - usare, se possibile, architetture differenti.