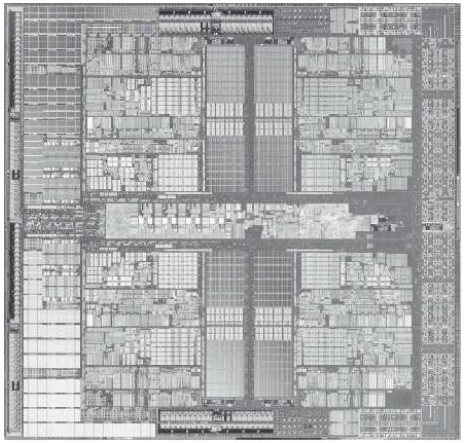
Università degli Studi di Cassino e del Lazio Meridionale



Corso di Calcolatori Elettronici

Misura delle prestazioni

Anno Accademico 2011/2012

Francesco Tortorella

Misura delle prestazioni

E' fondamentale definire una metrica corretta per misurare le prestazioni di un sistema di elaborazione.

- Prospettiva dell'acquirente
  - dato un insieme di macchine, quale ha
    - le migliori prestazioni ?
    - il minor costo ?
    - Il miglior rapporto prestazioni/costo ?

- Prospettiva del progettista
  - di fronte a possibili soluzioni progettuali alternative, quale presenta
    - il miglior incremento delle prestazioni ?
    - il minor costo ?
    - il miglior rapporto prestazioni/costo ?

Come si misurano le prestazioni ?

- Quali sono le grandezze tipicamente usate ?
  - frequenza di clock
  - dimensione della RAM
  - dimensione dei dischi

- Qual è il parametro che ci interessa realmente ?

Due concetti di prestazioni

Aereo	Capacità	Autonomia	Velocità di crociera	Portata
Boeing 777	375	4630	610	228750
Boeing 747	470	4150	610	286700
Douglas DC8	146	8720	544	79424

- Quale aereo ha le migliori prestazioni ?
- **Prospettiva del passeggero**
  - ***Tempo impiegato per un singolo viaggio***
- **Prospettiva della compagnia aerea**
  - ***Numero di passeggeri trasferiti in un dato intervallo di tempo***

Due misure possibili

- Tempo di risposta (o di esecuzione)
  - Quanto tempo devo aspettare per l'uscita del mio programma?
  - Quanto tempo per lanciare il mio programma ?
  - Quanto tempo per eseguire il mio programma ?
- Throughput
  - Quanto lavoro viene svolto?
  - Quanti programmi possono essere eseguiti insieme?
  - Qual è il rate di esecuzione medio ?

Prestazione = f(tempo di esecuzione)

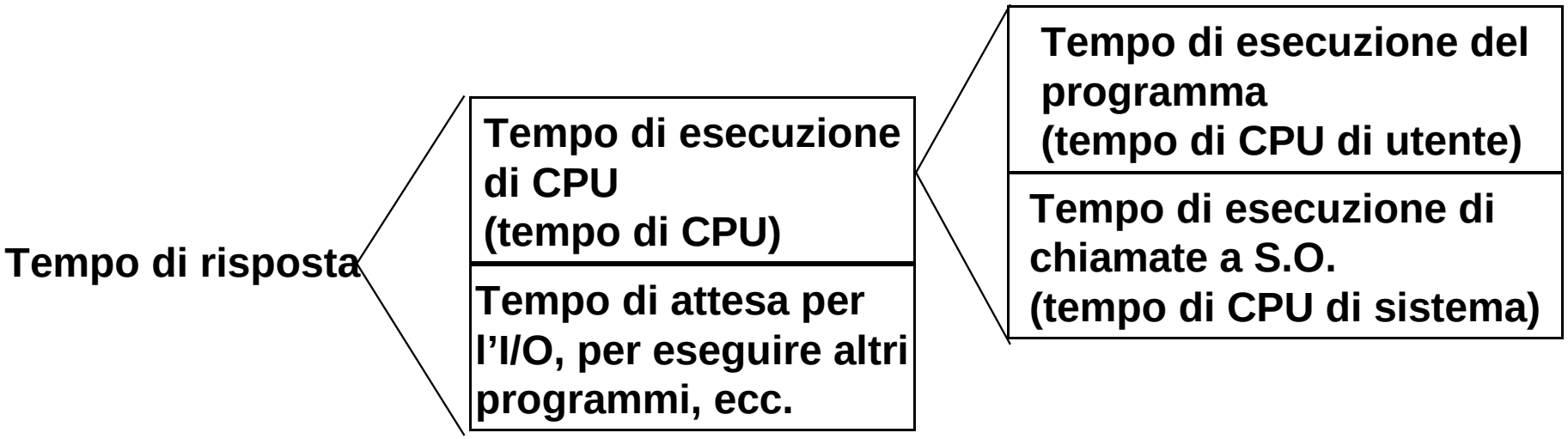
- Per un dato programma eseguito sulla macchina X,

  Prestazione(X) = 1 / tempo di esecuzione(X)

- “X è n volte più veloce di Y” se:

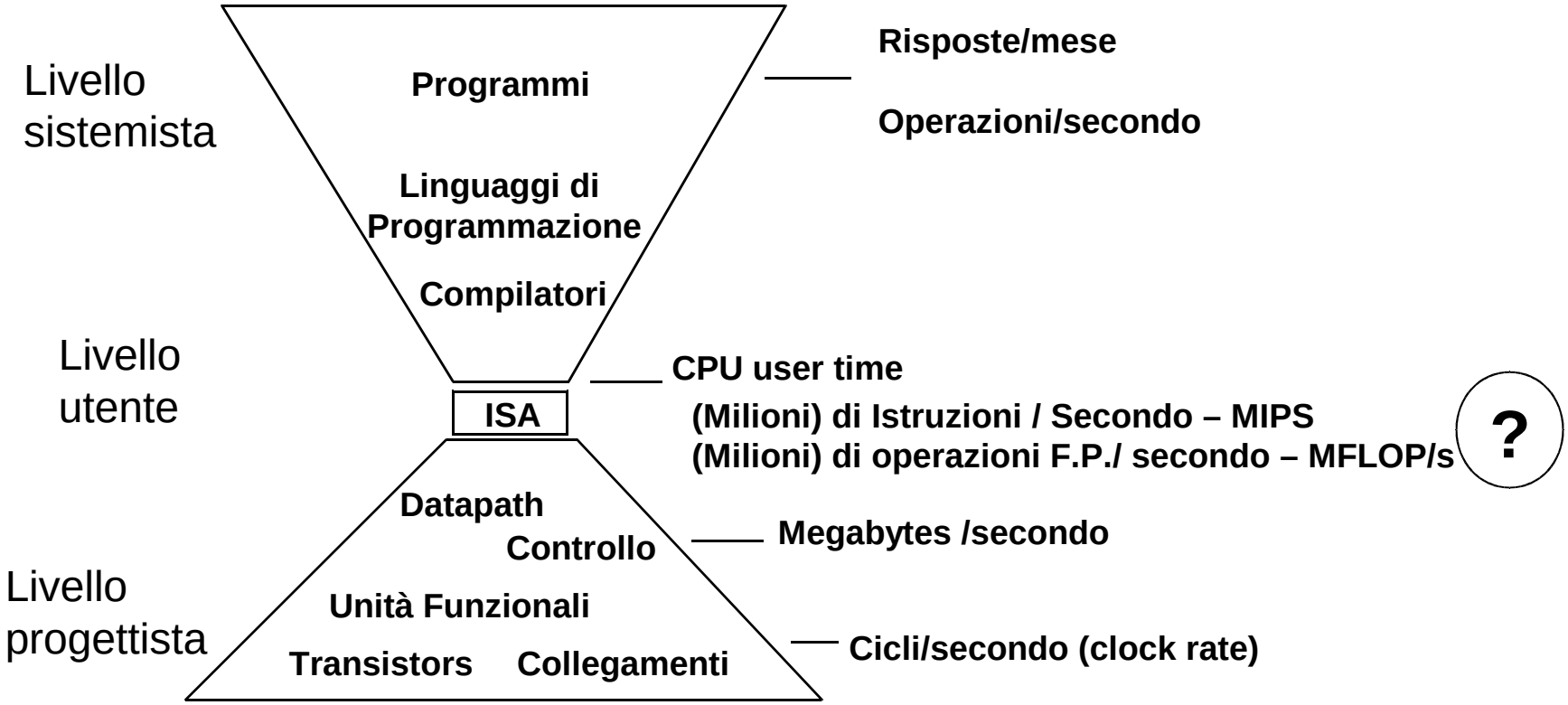
  Prestazione(X) / Prestazione(Y) = n

Che tempo fa ?



Parametro di riferimento:
tempo di CPU di utente (*user CPU time*)

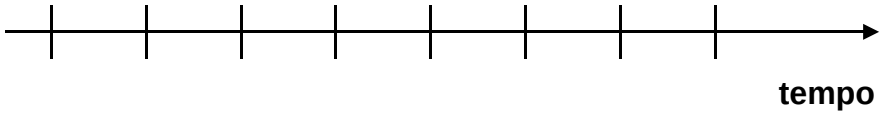
Metriche per misurare le prestazioni



Diverse metriche per diversi aspetti (e per diversi abusi)
Come si relazionano le diverse metriche ?

Clock

- Nel valutare le prestazioni di un sistema di calcolo, è necessario tenere presente che la CPU è sincronizzata da un orologio interno (clock), segnale periodico definito da una propria frequenza f=1/T
- I “clock ticks” definiscono gli istanti possibili per la realizzazione di eventi in hardware (evoluzione dello stato della macchina) :



- tempo di ciclo= intervallo tra due ticks = secondi per ciclo
- clock rate (frequenza) = cicli al secondo (1 Hz. = 1 ciclo/sec)

Un clock da 1 Ghz ha un tempo di ciclo di $\frac{1}{10^9} = 1\text{nanosecondo}$

Da che cosa dipendono le prestazioni ?

- E' possibile esprimere il tempo di esecuzione in termini di cicli di clock

$$\frac{\text{secondi}}{\text{programma}} = \frac{\text{cicli}}{\text{programma}} \times \frac{\text{secondi}}{\text{ciclo}}$$

- A parità di altre condizioni, si ottiene un aumento delle prestazioni se
  - diminuisce il numero di cicli/programma, oppure
  - diminuisce il tempo di ciclo del clock o, equivalentemente,
  - aumenta il clock rate.
- Bisogna però tenere conto che, nelle architetture reali, i diversi parametri possono essere correlati

Esempio

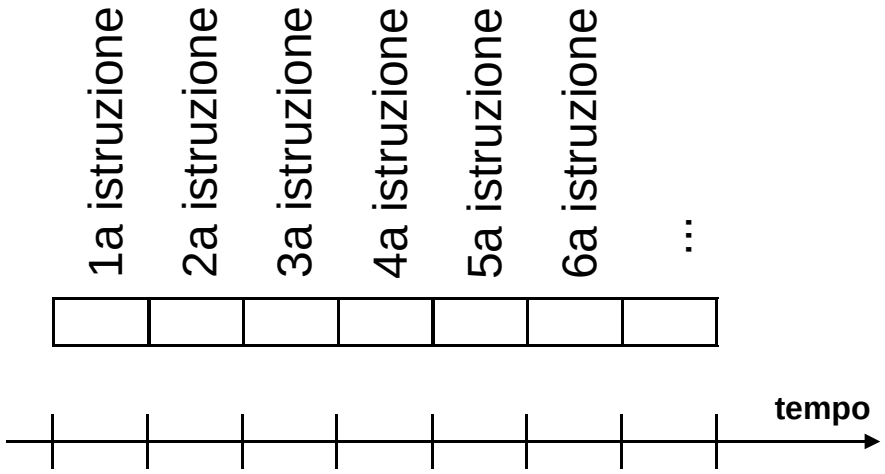
Un programma viene eseguito in 10 secondi sul computer A, che ha un clock da 4 Ghz. E' però necessario che venga eseguito in 6 secondi e per questo motivo si intende costruire una nuova macchina B con una nuova tecnologia di realizzazione della CPU che permette un incremento notevole della frequenza di clock, ma a spese del numero di cicli per istruzione che porterebbe ad un aumento del 20% del numero di cicli richiesti per l'esecuzione del programma. Quale frequenza di clock deve assicurare la macchina B ?

Equazione fondamentale:

$$\frac{\text{secondi}}{\text{programma}} = \frac{\text{cicli}}{\text{programma}} \times \frac{\text{secondi}}{\text{ciclo}}$$

Quanti cicli per eseguire un programma ?

- Si può assumere numero di cicli = numero di istruzioni ?



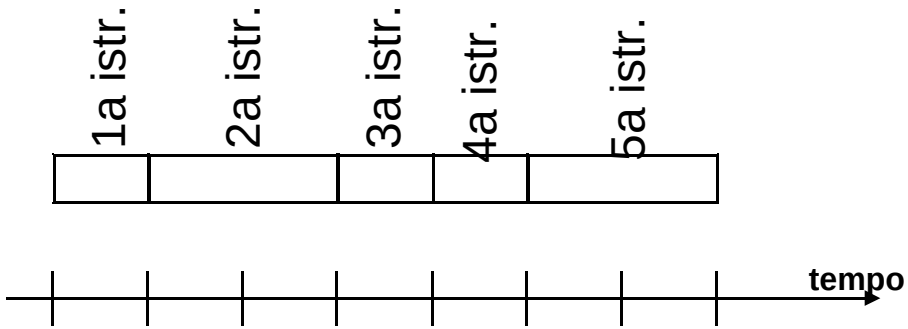
No !

Istruzioni differenti comportano tempi diversi su macchine differenti.

Perché ?

Istruzioni differenti richiedono numeri differenti di cicli

- Un’operazione di moltiplicazione richiede un tempo maggiore rispetto ad un’addizione



- Un’operazione tra floating point richiede un tempo maggiore rispetto ad una tra interi

- Un accesso in memoria richiede un tempo maggiore rispetto ad un accesso a registri interni

Dove sono le istruzioni ?

$$\frac{\text{secondi}}{\text{programma}} = \frac{\text{cicli}}{\text{programma}} \times \frac{\text{secondi}}{\text{ciclo}}$$

- Nell'equazione considerata non c'è riferimento (esplicito) al numero di istruzioni che formano il programma; chiaramente, questo è un parametro che influisce sul tempo di esecuzione.
- Come si può esplicitare il rapporto con il numero di istruzioni ? Definiamo il numero medio di cicli per istruzione: CPI (*clock cycles per instruction*).

$$\text{CPI} = \frac{\text{Numero di cicli di clock del programma}}{\text{Numero di istruzioni del programma}}$$

Dove sono le istruzioni ?

- In questo modo diventa chiaro la dipendenza del tempo di esecuzione dal numero di istruzioni:

$$\frac{\text{secondi}}{\text{programma}} = \text{numero istruzioni} \times \text{CPI} \times \frac{\text{secondi}}{\text{ciclo}}$$

- Quali sono gli aspetti che influenzano i parametri evidenziati ?

Come si dividono le responsabilità ?

	Numero istruzioni	CPI	Clock rate
Algoritmo	X		
Compilatore	X	X	
ISA	X	X	X
Organizzazione		X	X
Tecnologia			X

Istruzioni e CPI

- Le istruzioni che contribuiscono a formare il parametro CPI sono di diverso tipo e caratterizzate da differenti numeri di cicli per l'esecuzione.
- E' quindi possibile raggruppare le diverse istruzioni in classi caratterizzate dallo stesso numero di cicli di clock, rendendo esplicito il contributo di ciascuna classe al valore di CPI

$$\text{cicli totali} = \sum_{i=1}^{n} \text{CPI}_i \times n_i$$

  - CPI_i = CPI per le istruzioni della classe i-ma
  - n_i = numero di istruzioni della classe i-ma

Istruzioni e CPI

- Alla fine il CPI è

$$CPI = \frac{\sum_{i=1}^{n} CPI_i \times n_i}{N} = \sum_{i=1}^{n} CPI_i \times \frac{n_i}{N} = \sum_{i=1}^{n} CPI_i \times f_i$$

  - f_i=frequenza della classe i-ma
  - N= numero totale istruzioni

- In quale direzione andare per migliorare il CPI ?

Esempio

- Una macchina è caratterizzata dalla seguente distribuzione di CPI su tre classi:

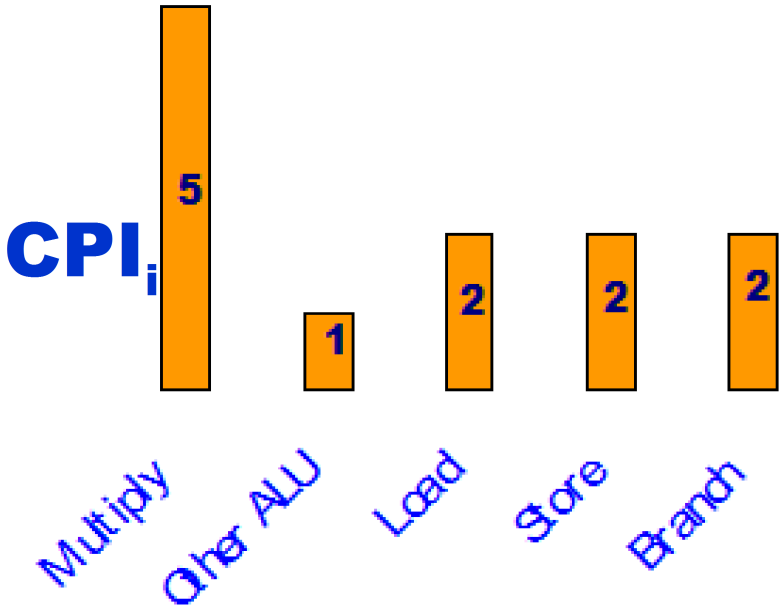
Classe	CPI
A	1
B	2
C	3

- Una particolare istruzione in HLL può essere tradotta da un compilatore tramite due sequenze possibili, che usano combinazioni diverse di istruzioni delle tre classi, secondo la tabella seguente:

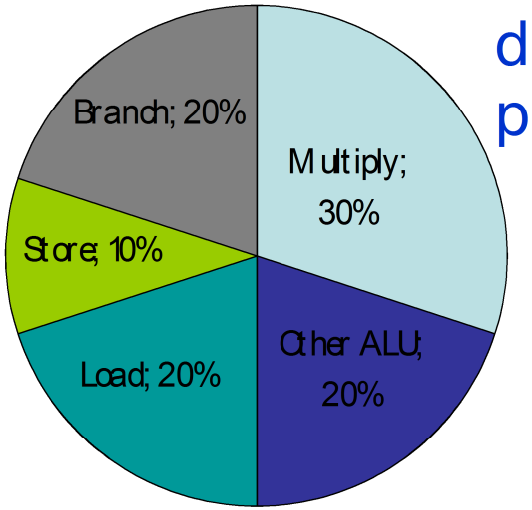
	A	B	C
S1	2	1	2
S2	4	1	1

- Qual è la soluzione migliore ?

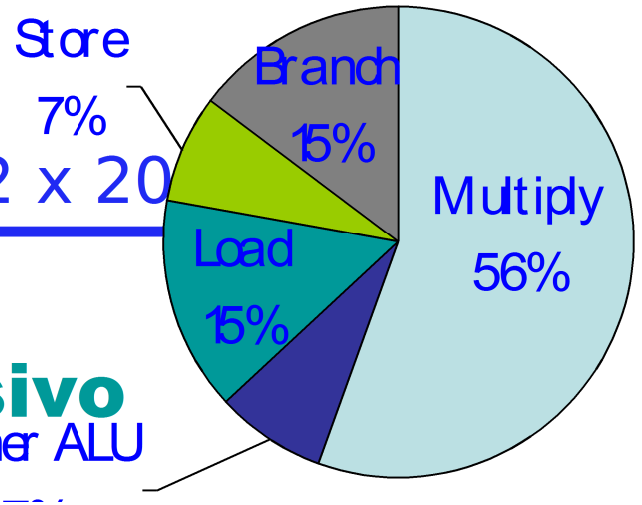
Esempio (processore RISC)



Mix di istruzioni del programma



Tempo speso per istruzione



$$\frac{5 \times 30 + 1 \times 20 + 2 \times 20 + 2 \times 10 + 2 \times 20}{100} = 2.7 \text{ cicli/istruzione}$$

CPI complessivo

La legge di Amdahl

- Il miglioramento di prestazione (accelerazione o speedup) ottenibile mediante l'uso di alcune modalità di esecuzione più veloci è limitato dalla frazione di tempo in cui queste modalità possono essere impiegate.
- Supponiamo di aver apportato una modifica E ad una certa macchina. Lo speedup che si ottiene si valuta come:

$$\text{Speedup(E)} = \frac{\text{Prestazione(dopo di E)}}{\text{Prestazione(prima di E)}} = \frac{\text{Tempo(prima di E)}}{\text{Tempo(dopo di E)}}$$

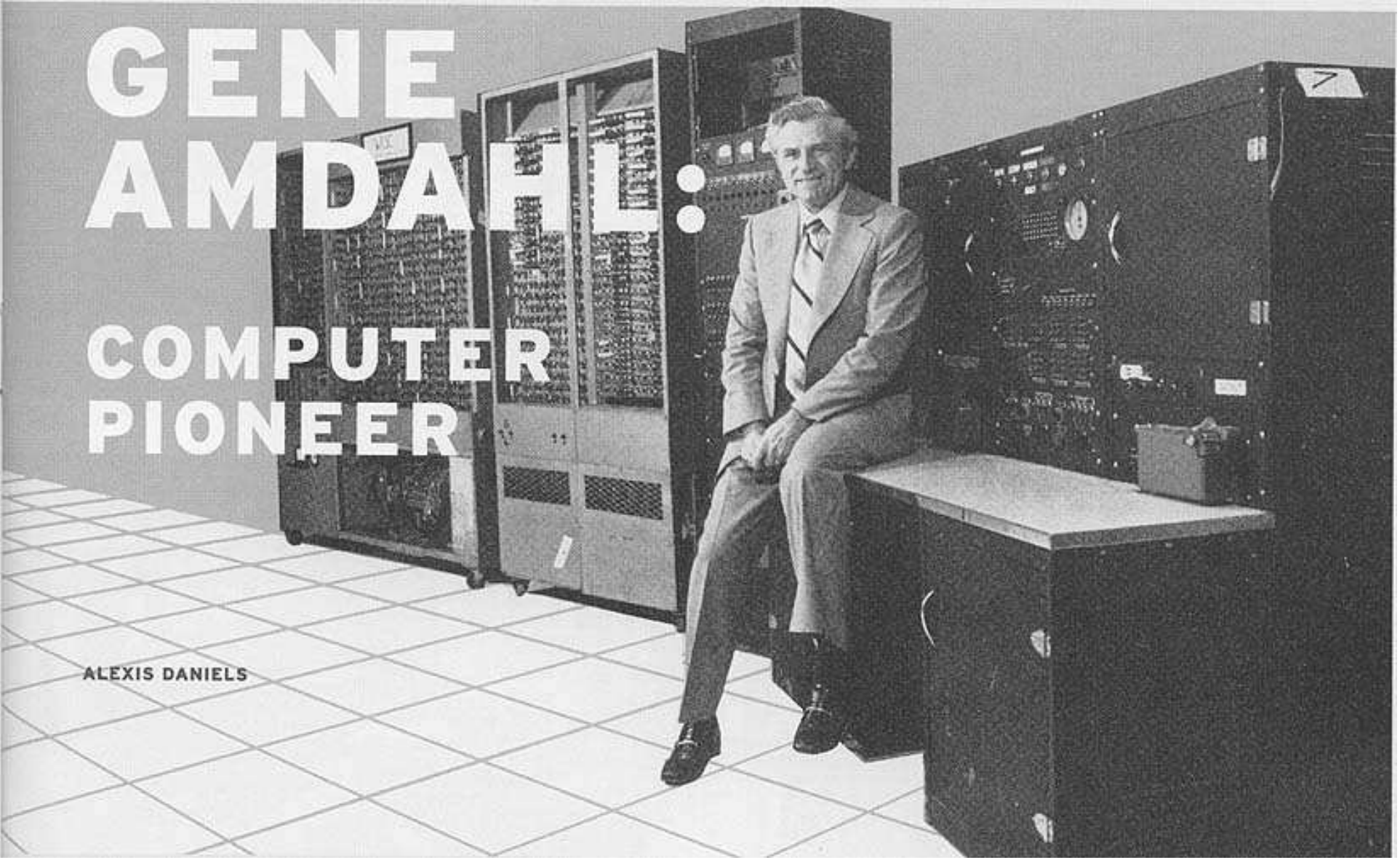
La legge di Amdahl

- Supponiamo che la modifica E porti ad un'accelerazione pari ad un fattore S di una frazione F dell'intero task, mentre il resto rimane inalterato:

ExTime(dopo di E) = ((1-F) + F/S) × ExTime(prima di E)

- Per cui lo speedup è

$$\text{Speedup(E)} = \frac{1}{(1-\text{F})+\text{F/S}}$$

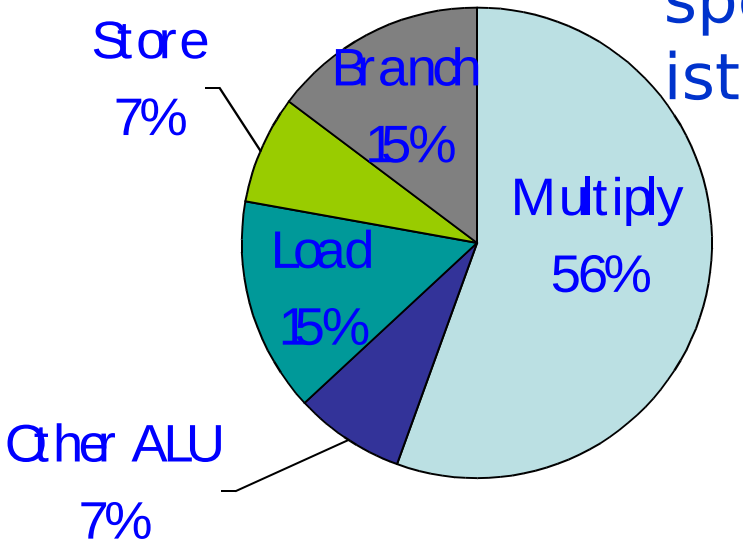


F.Tortorella

Calcolatori Elettronici
2011/2012

Università degli Studi
di Cassino e del L.M.

La legge di Amdahl



Tempo speso per istruzione

Che cosa succede se si rende il Multiply infinitamente veloce lasciando inalterate le altre istruzioni ?

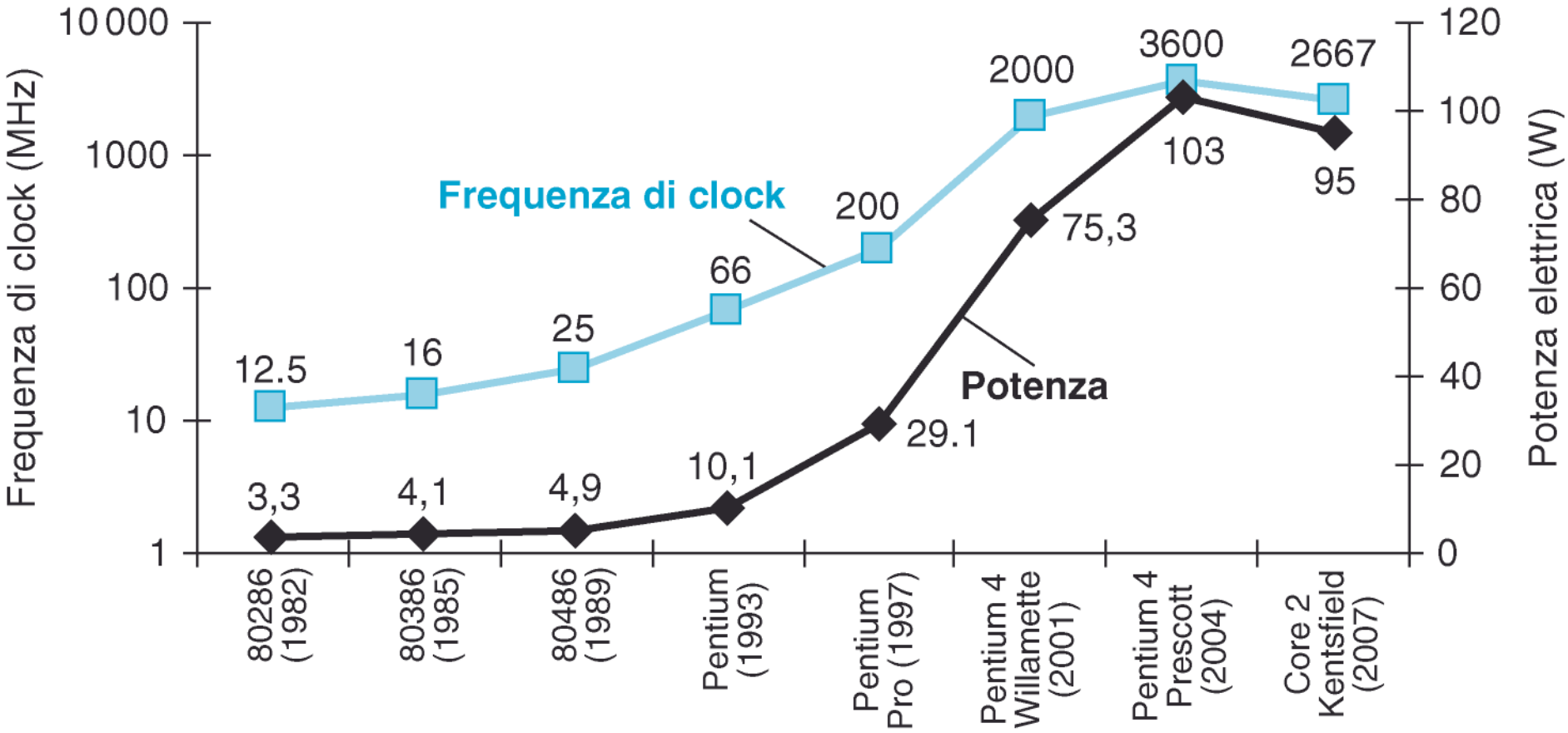
Speedup = 100% / 44% = 2.3

Lezione ?
Necessario migliorare in modo bilanciato

Ed i consumi ?

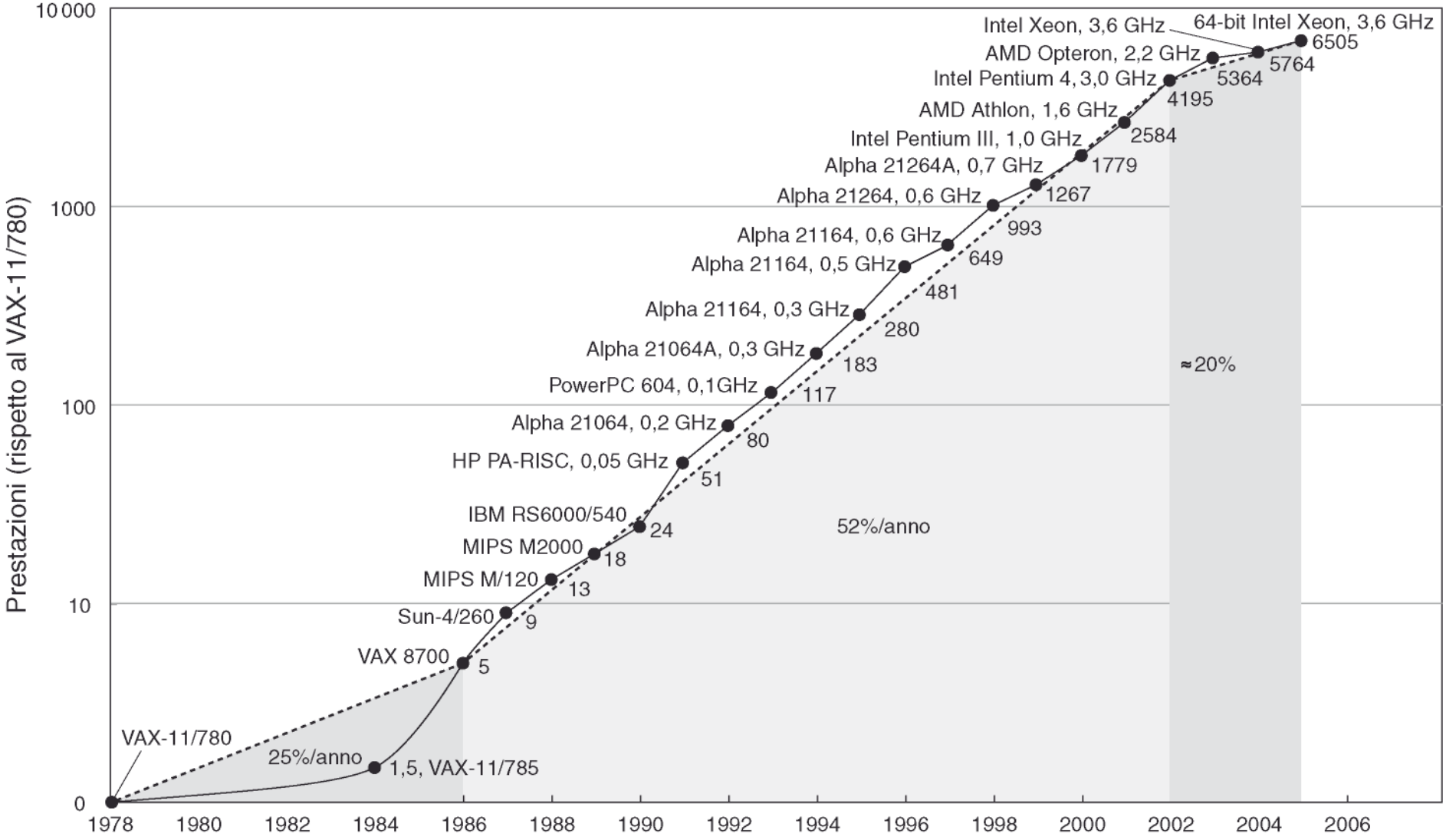
- L’incremento delle prestazioni ha richiesto un aumento della potenza assorbita dal processore
- Ovviamente questo ha portato a problemi di dissipazione notevoli che hanno influito sugli sviluppi delle architetture

Potenza vs. Frequenza di clock



La barriera della potenza

- La potenza assorbita è proporzionale a $C V^2 f$ dove:
  - C: carico capacitivo
  - V: tensione di alimentazione
  - f: frequenza di commutazione
- Nel passato si è riusciti ad abbassare la tensione di alimentazione (da 5V a 1V in 20 anni)
- Attualmente l'assorbimento di potenza è una barriera insormontabile


Prestazioni (rispetto al VAX-11/780)
10 000
1000
100
10
0
1978
1980
1982
1984
1986
1988
1990
1992
1994
1996
1998
2000
2002
2004
2006
Intel Xeon, 3,6 GHz
64-bit Intel Xeon, 3,6 GHz
6505
AMD Opteron, 2,2 GHz
5764
Intel Pentium 4, 3,0 GHz
5364
AMD Athlon, 1,6 GHz
4195
Intel Pentium III, 1,0 GHz
2584
Alpha 21264A, 0,7 GHz
1779
Alpha 21264, 0,6 GHz
1267
Alpha 21164, 0,6 GHz
993
Alpha 21164, 0,5 GHz
649
Alpha 21164, 0,3 GHz
481
Alpha 21064A, 0,3 GHz
280
PowerPC 604, 0,1GHz
183
Alpha 21064, 0,2 GHz
117
HP PA-RISC, 0,05 GHz
80
IBM RS6000/540
51
MIPS M2000
24
MIPS M/120
18
Sun-4/260
13
VAX 8700
9
VAX-11/780
5
1,5, VAX-11/785
25%/anno
52%/anno
≈20%

Soluzioni ?

- Non è possibile aumentare la frequenza
- Si aumenta il numero di elementi di elaborazione (cores):
  - Aumenta il throughput
  - Necessità di adottare un paradigma di programmazione parallelo

Programmi per valutare le prestazioni

- Quale programma usare per valutare le prestazioni?
- L'ideale sarebbe di usare l'insieme di programmi che si sa di dover eseguire sulla macchina (***workload***), ma non è sempre possibile.
- In alternativa, si potrebbero usare dei programmi campione (***benchmark***).
- Difficoltà:
  - le caratteristiche del benchmark devono essere simili a quelle del workload
  - il benchmark deve essere standard
- Soluzioni:
  - benchmark sintetici (Whetstone, Dhrystone, kernel benchmark)
  - mix di applicazioni reali (SPEC ***System Performance Evaluation Cooperative***)

SPEC CPU2006 Benchmark Descriptions

The benchmarks are described in order by category - first the integer benchmarks, then the floating point benchmarks.

Part 1: Integer Benchmarks

- 400.perlbench
- 401.bzip2
- 403.gcc
- 429.mcf
- 445.gobmk
- 456.hmmer
- 458.sjeng
- 462.libquantum
- 464.h264ref
- 471.omnetpp
- 473.astar
- 483.xalancbmk

Part 2: Floating Point Benchmarks

- 410.bwaves
- 416.gamess
- 433.milc
- 434.zeusmp
- 435.gromacs
- 436.cactusADM
- 437.leslie3d
- 444.namd
- 447.dealII
- 450.soplex
- 453.povray
- 454.calculix
- 459.GemsFDTD
- 465.tonto
- 470.lbm
- 481.wrf
- 482.sphinx3
- 999.specrand

"An ounce of honest data is worth a pound of marketing hype"

CINT2006 (Integer Component of SPEC CPU2006):

Benchmark	Language	Application Area	Brief Description
400.perlbench	C	Programming Language	Derived from Perl V5.8.7. The workload includes SpamAssassin, MHonArc (an email indexer), and specdiff (SPEC's tool that checks benchmark outputs).
401.bzip2	C	Compression	Julian Seward's bzip2 version 1.0.3, modified to do most work in memory, rather than doing I/O.
403.gcc	C	C Compiler	Based on gcc Version 3.2, generates code for Opteron.
429.mcf	C	Combinatorial Optimization	Vehicle scheduling. Uses a network simplex algorithm (which is also used in commercial products) to schedule public transport.
445.gobmk	C	Artificial Intelligence: Go	Plays the game of Go, a simply described but deeply complex game.
456.hmmer	C	Search Gene Sequence	Protein sequence analysis using profile hidden Markov models (profile HMMs)
458.sjeng	C	Artificial Intelligence: chess	A highly-ranked chess program that also plays several chess variants.
462.libquantum	C	Physics / Quantum Computing	Simulates a quantum computer, running Shor's polynomial-time factorization algorithm.
464.h264ref	C	Video Compression	A reference implementation of H.264/AVC, encodes a videostream using 2 parameter sets. The H.264/AVC standard is expected to replace MPEG2
471.omnetpp	C++	Discrete Event Simulation	Uses the OMNet++ discrete event simulator to model a large Ethernet campus network.
473.astar	C++	Path-finding Algorithms	Pathfinding library for 2D maps, including the well known A* algorithm.
483.xalancbmk	C++	XML Processing	A modified version of Xalan-C++, which transforms XML documents to other document types.

I numeri di SPEC

- Con riferimento a SPECint2006, come viene valutata la misura ?
  - I benchmark vengono eseguiti sul sistema in esame (SUT: *system under test*) e si misura il tempo per ognuno di essi;
  - I tempi vengono normalizzati rispetto ad un sistema elaborativo di riferimento (Sun *Ultra Enterprise 2*, con processore UltraSPARC II a 296 MHz);
  - Si calcola la media geometrica dei 12 valori normalizzati, ottenendo così l'indice per il SUT
- Sono possibili due misure:
  - *Base metrics*
  - *Peak metrics*

http://www.spec.org/cpu2006/results/res2006q3/cpu2006-20060904-00085.html

SPEC® CINT2006 Result

Intel Corporation

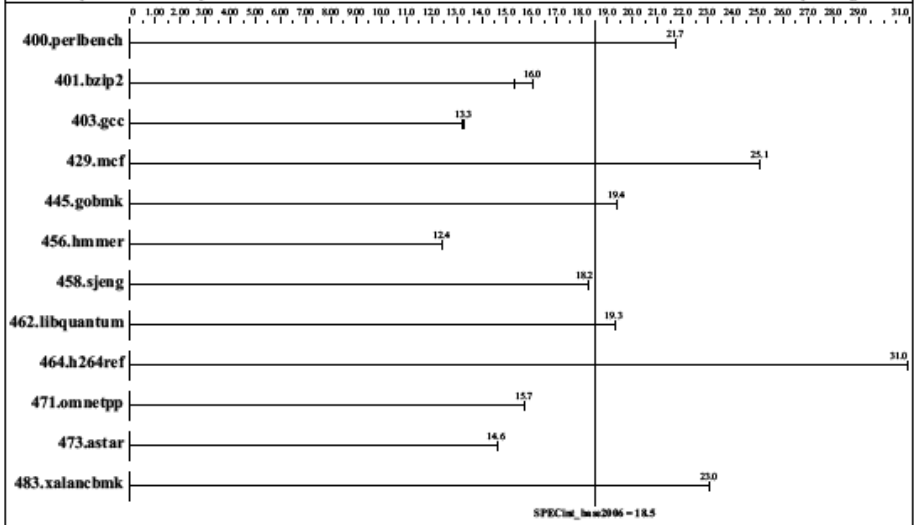
Intel DG965WH motherboard
(2.93 GHz, Intel Core 2 Extreme processor X6800)

SPECint®2006 = Not Run

SPECint_base2006 = 18.5

CPU2006 license: 13
Test sponsor: Intel Corporation
Tested by: Intel Corporation

Test date: Aug-2006
Hardware Availability: Jul-2006
Software Availability: Aug-2006



Hardware

CPU Name:	Intel Core 2 Extreme X6800
CPU Characteristics:	2.93 GHz, 1066 MHz bus
CPU MHz:	2933
FPU:	Integrated
CPU(s) enabled:	2 cores, 1 chip, 2 cores/chip
CPU(s) orderable:	1 chip
Primary Cache:	32 KB I+ 32 KB D on chip per core
Secondary Cache:	4 MB I+D on chip per chip
L3 Cache:	None
Other Cache:	None
Memory:	2 GB (2 1GB Corsair TWIN2X2048-8500C5 DDR2 1066 CL5-5-5)
Disk Subsystem:	Maxtor DiamondMax 10 6B300S0 300GB NCQ Serial ATA (7200 RPM, 16MB cache)
Other Hardware:	None

Software

Operating System:	Windows XP Professional SP2 32-bit
Compiler:	Intel C++ Compiler 9.1 for IA32 Build 20060816Z Microsoft Visual Studio .Net 2003 (for libraries) SmartHeap Library Version 8.0 from http://www.microquill.com/
Auto Parallel:	No
File System:	NTFS
System State:	Default
Base Pointers:	32-bit
Peak Pointers:	32-bit
Other Software:	None

http://www.spec.org/cpu2006/results/res2006q3/cpu2006-20060904-00085.html

SPEC CINT2006 Result

Intel Corporation

Intel DG965WH motherboard
(2.93 GHz, Intel Core 2 Extreme processor X6800)

SPECint2006 = Not Run

SPECint_base2006 = 18.5

CPU2006 license: 13
Test sponsor: Intel Corporation
Tested by: Intel Corporation

Test date: Aug-2006
Hardware Availability: Jul-2006
Software Availability: Aug-2006

Results Table

Benchmark	Base						Peak					
	Seconds	Ratio	Seconds	Ratio	Seconds	Ratio	Seconds	Ratio	Seconds	Ratio	Seconds	Ratio
400.perlbench	450	21.7	**450**	**21.7**	450	21.7						
401.bzip2	632	15.3	602	16.0	**602**	**16.0**						
403.gcc	610	13.2	606	13.3	**606**	**13.3**						
429.mcf	363	25.1	**363**	**25.1**	364	25.1						
445.gobmk	**541**	**19.4**	542	19.4	541	19.4						
456.hmmer	752	12.4	752	12.4	**752**	**12.4**						
458.sjeng	663	18.2	663	18.2	**663**	**18.2**						
462.libquantum	1075	19.3	**1075**	**19.3**	1074	19.3						
464.h264ref	**715**	**31.0**	715	30.9	715	31.0						
471.omnetpp	398	15.7	398	15.7	**398**	**15.7**						
473.astar	481	14.6	**481**	**14.6**	481	14.6						
483.xalancbmk	299	23.1	**299**	**23.0**	299	23.0						

Results appear in the order in which they were run. Bold underlined text indicates a median measurement.

General Notes

```
Memory timings set manually to DDR2-800 5-5-5-15 in the bios
```

Base Compiler Invocation

C benchmarks:
```
icl -Qvc7.1 -Qc99
```

C++ benchmarks:
```
icl -Qvc7.1
```

Base Portability Flags

403.gcc: -DSPEC_CPU_WIN32
464.h264ref: -DSPEC_CPU_NO_INTTYPES -DWIN32
473.astar: -DSPEC_CPU_LITTLE_ENDIAN

Base Optimization Flags

C benchmarks:
```
-fast /F512000000 shlw32m.lib          -link /FORCE:MULTIPLE
```

Continued on next page