



# La gerarchia delle memorie

Prof. Alberto Borghese  
Dipartimento di Scienze dell'Informazione  
[alberto.borghese@unimi.it](mailto:alberto.borghese@unimi.it)

Università degli Studi di Milano

Riferimento Patterson: Sezioni 5.1, 5.2



## Sommario

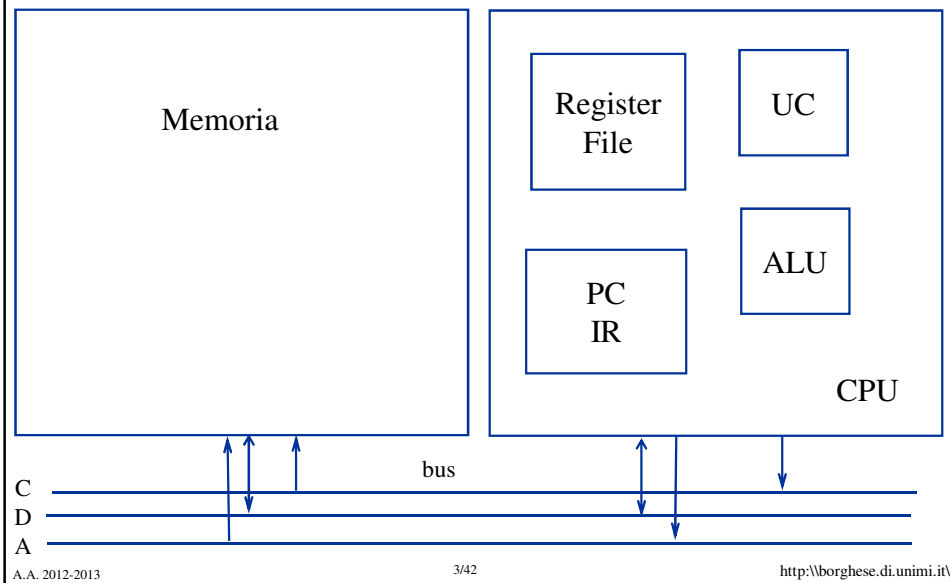
**Struttura di un sistema di memoria**

Cache a mappatura diretta

Il campo tag di una cache



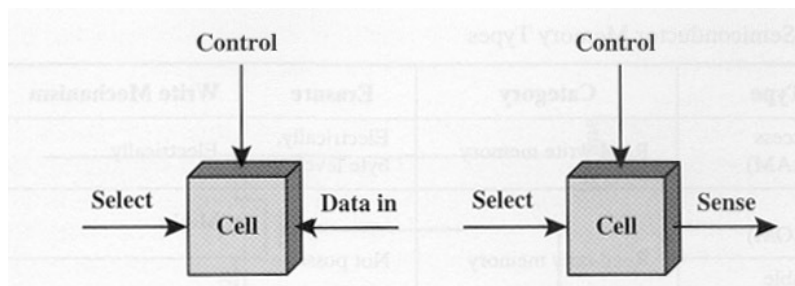
## Gli attori principali di un'architettura



## Cella di memoria



La memoria è suddivisa in celle, ciascuna delle quali assume un valore binario stabile.  
Si può scrivere il valore 0/1 in una cella.  
Si può leggere il valore di ciascuna cella.

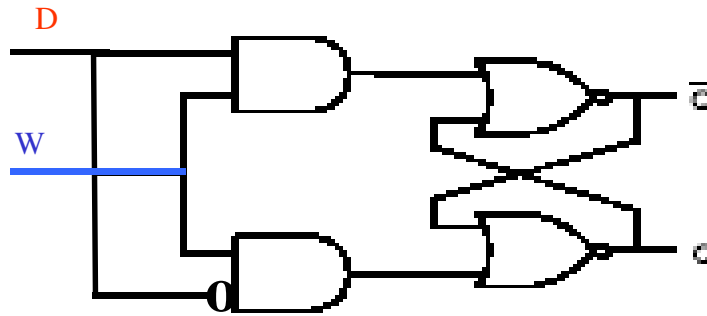


Quale struttura di memoria abbiamo già incontrato?

Control (lettura – abilitazione; scrittura)  
Select (cf. dataport)  
Data in & Sense (Data in & Data out).



# Cella SRAM



Selezione (porta di lettura e porta di scrittura)  
 Lettura - sempre disponibile in uscita  
 Scrittura - segnale esplicito (in AND con il clock in caso di cella sincrona).



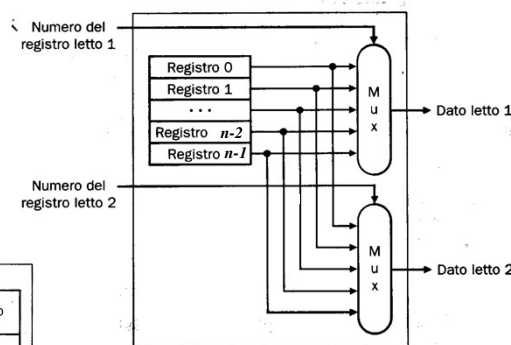
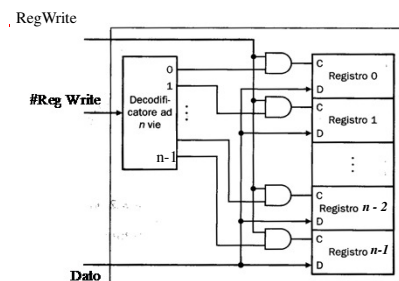
# Register file



Il tempo di lettura dipende dal cammino critico dei Mux.

Il tempo di scrittura dipende dal cammino critico del Decoder.

Numero\_registro = selettore.



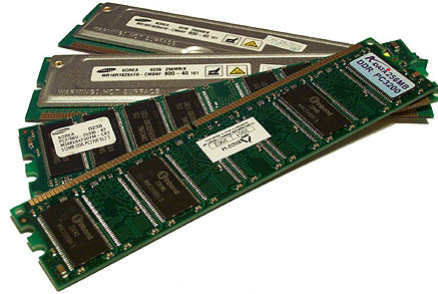
Selezione - #registro  
 Lettura - sempre disponibile in uscita (dopo tempo di commutazione del MUX)  
 Scrittura - segnale esplicito (in AND con il clock in caso di cella sincrona).



## Altre memorie della gerarchia



RAM



Dischi



## Principio di progettazione di una memoria

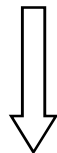


Quanta memoria?  
Quanto deve essere veloce?  
Quanto deve costare?

Maggiore è la velocità di accesso, maggiore il costo per bit.

Maggiore è la capacità, minore il costo per bit.

Maggiore è la capacità, maggiore è il tempo di accesso.



Memorie piccole e veloci.  
Memorie grandi e lente.

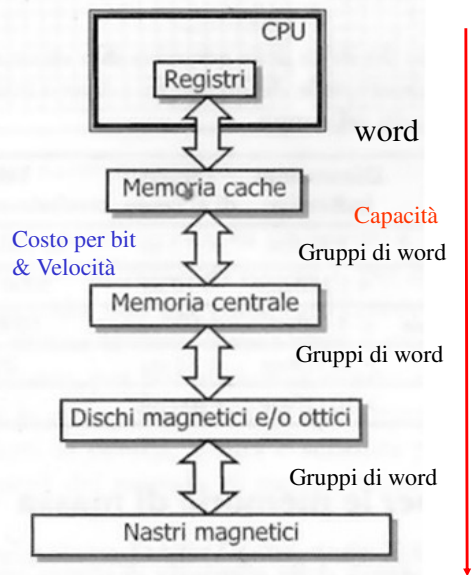
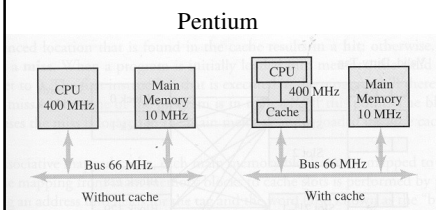


## Gerarchia di memorie

Livelli multipli di memorie con diverse dimensioni e velocità.

Nel livello superiore troviamo un sottoinsieme dei dati del livello inferiore.

*Ciascun livello vede il livello inferiore e viceversa.*



## Gerarchie di cache

L – Livelli di cache

L1

L2

L3

Characteristic	Intel Nehalem	AMD Opteron X4 (Barcelona)
L1 cache organization	Split instruction and data caches	Split instruction and data caches
L1 cache size	32 KB each for instructions/data per core	64 KB each for instructions/data per core
L1 cache associativity	4-way (I), 8-way (D) set associative	2-way set associative
L1 replacement	Approximated LRU replacement	LRU replacement
L1 block size	64 bytes	64 bytes
L1 write policy	Write-back, Write-allocate	Write-back, Write-allocate
L1 hit time (load-use)	Not Available	3 clock cycles
L2 cache organization	Unified (instruction and data) per core	Unified (instruction and data) per core
L2 cache size	256 KB (0.25 MB)	512 KB (0.5 MB)
L2 cache associativity	8-way set associative	16-way set associative
L2 replacement	Approximated LRU replacement	Approximated LRU replacement
L2 block size	64 bytes	64 bytes
L2 write policy	Write-back, Write-allocate	Write-back, Write-allocate
L2 hit time	Not Available	9 clock cycles
L3 cache organization	Unified (instruction and data)	Unified (instruction and data)
L3 cache size	8192 KB (8 MB), shared	2048 KB (2 MB), shared
L3 cache associativity	16-way set associative	32-way set associative
L3 replacement	Not Available	Evict block shared by fewest cores
L3 block size	64 bytes	64 bytes
L3 write policy	Write-back, Write-allocate	Write-back, Write-allocate
L3 hit time	Not Available	38 (?)clock cycles

interna

interna

esterna



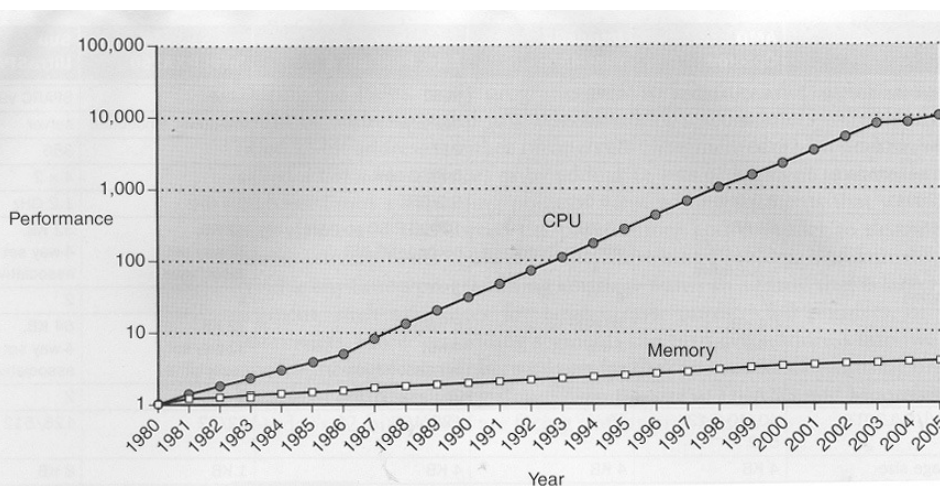
## Gerarchia di memorie - caratteristiche



Livello	Dimensioni indicative	Tempo di Accesso	Velocità di Trasferimento (Mbyte/s)
Registri	< 1 Kbyte	< 0,01 ns	400,000 (32 byte)
Cache Primaria (Pentium 4, 3Ghz) ExecTrace cache	8kbyte 12kbyte	0.16ns	192,000 (32/64 byte)
Cache Secondaria (Pentium 4, 3Ghz)	256-512 kbyte	0.3ns	96,000 (32 byte in parallelo)
Memoria centrale (RAM, DRAM)	< 4 Gbyte	< 3-5 ns (233Mhz / 320Mhz)	1,600 – 3,000 di picco (DDSRAM – doppia lettura)
Bus PCI Bus PCI 64	8 byte 64 byte	133 Mhz 100 Mhz	133 (8 byte) 1064 (64 byte)
Dischi	> 100 Gbyte	< 10ms	< 200 (Seagate Cheetah SCSI)
Nastri	> 1 Tbyte (Pbyte)	> 100ms	1



## Prestazioni processore vs memoria





## Principi di località



I programmi riutilizzano dati e istruzioni che hanno usato di recente.

**Regola pratica:** un programma spende circa il **90%** del suo tempo di esecuzione per solo il **10%** del suo codice.

Basandosi sul passato recente del programma, è possibile predire con ragionevole accuratezza quali dati e istruzioni userà nel prossimo futuro.

**Località temporale:** elementi ai quali si è fatto riferimento di recente saranno utilizzati ancora nel prossimo futuro.

**Località spaziale:** elementi i cui indirizzi sono vicini, tendono ad essere referenziati in tempi molto ravvicinati.

Si possono organizzare programmi e dati in modo da sfruttare al massimo il principio di località (e.g. scrittura di blocchi di dati nei dischi, salti locali...).



## Principio di località in pratica



Operazione di prodotto su 2 matrici 500x500, risultato sommato a x.  
Le matrici sono memorizzate in memoria principale per colonne.

```
for (i=0; i<500; i++)
{
  for (j=0; j<500; j++)
  {
    for (k=0; k<500; k++)
      x[i][j]=x[i][j]+y[i][k]*z[k][j];
  }
}

for (k=0; k<500; k++)
{
  for (j=0; j<500; j++)
  {
    for (i=0; i<500; i++)
      x[i][j]=x[i][j]+y[i][k]*z[k][j];
  }
}
```

Devo continuare a caricare i nuovi valori di  $y[i][k]$  dalla memoria principale.

Raddoppio la velocità di esecuzione.  
Percorro x e y per colonne,  $z[.]$ , cambia ogni 500 valori, assieme a y e x, ho tempo di caricare i nuovi blocchi.



## Caratteristiche della memoria



### Posizione della memoria:

- Processore
- Interna (cache)
- Esterna (cache + Memoria Principale)
- Disco

### Metodo di accesso:

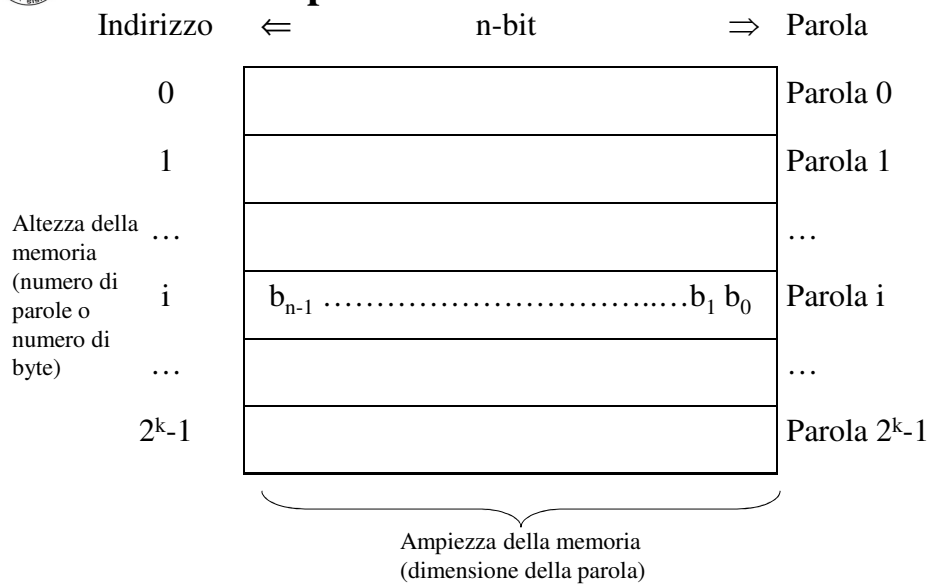
- Sequenziale (e.g. Nastri).
- Diretto (posizionamento + attesa, e.g. Dischi).
- Random Access (circuiti di lettura / scrittura HW, tempo indipendente dalla posizione e dalla storia, e.g. Cache e Memoria principale).
- Associativa (Random Access, il contenuto viene recuperato a partire da un sottoinsieme incompleto dello stesso).

### Caratteristiche fisiche:

- Nelle memorie volatili (E.g. Cache), l'informazione sparisce quando si toglie l'alimentatore (memorie a semiconduttore).
- Nelle memorie non-volatili, l'informazione è duratura (un esempio di memoria volatile è la memoria magnetica dei dischi e dei nastri). Esistono memorie a semiconduttore non-volatili (ROM).



## Capacità della memoria







## Misura della capacità di una memoria



**Ampiezza della memoria.** Minimo numero di bit consecutivi che possono essere indirizzati (Memoria Principale 1 byte; Register file: 1 word); cache: K word).

**Altezza della memoria.** Numero di elementi base della memoria.

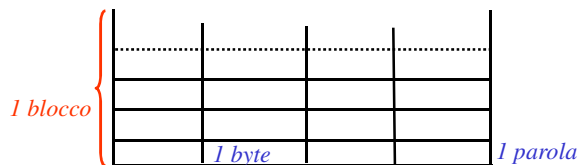
**Parola di memoria.** E' l'unità naturale in cui la memoria viene organizzata (e.g. 32 bit in MIPS).

**Unità indirizzabile.** E' il minimo numero di *unità contigue* indirizzabili. In quasi tutti i sistemi si tratta del byte.

Spazio dell'indirizzamento della memoria è:  $N = \log_2 \text{Capacità}$

**Unità di trasferimento:**

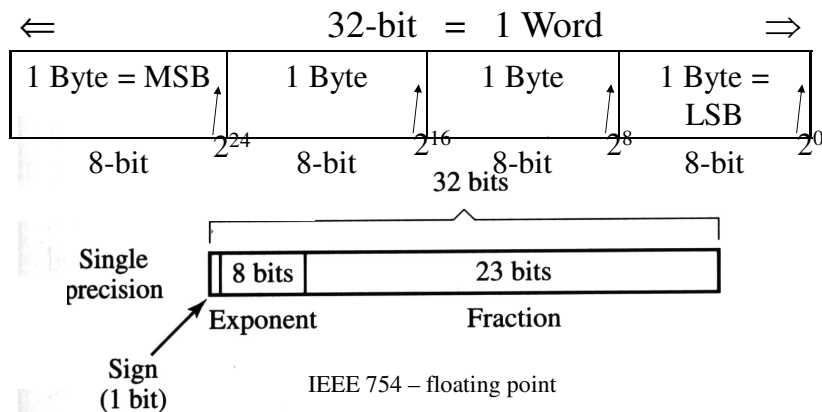
- Blocco
- Parola



## Indirizzamento dei byte all'interno della parola



MIPS utilizza un **indirizzamento al byte**, cioè l'indice punta ad un byte di memoria, byte consecutivi hanno indirizzi consecutivi indirizzi di parole consecutive (adiacenti) differiscono di un fattore 4 (8-bit x 4 = 32-bit): ad ogni indirizzo è associato un byte.

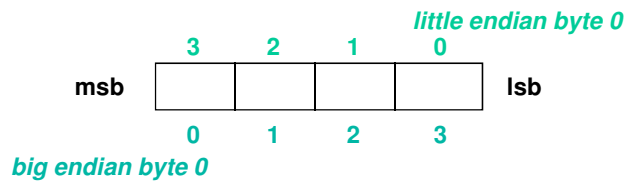




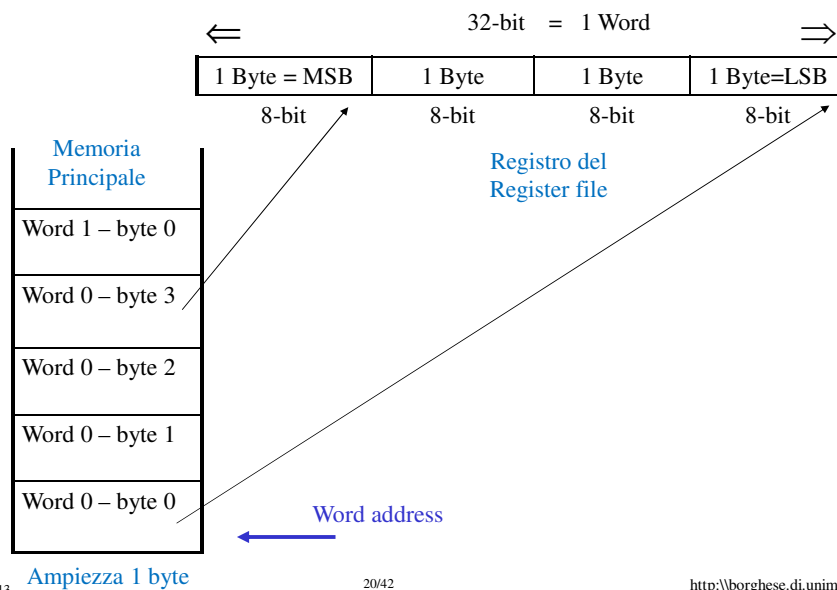
## Addressing Objects: Endianess



- **Big Endian:** address of most significant byte = word address  
(xx00 = Big End of word)
  - IBM 360/370, Motorola 68k, MIPS, Sparc, HP
- **Little Endian:** address of least significant byte = word address  
(xx00 = Little End of word)
  - Intel 80x86, DEC Vax, DEC Alpha (Windows NT)

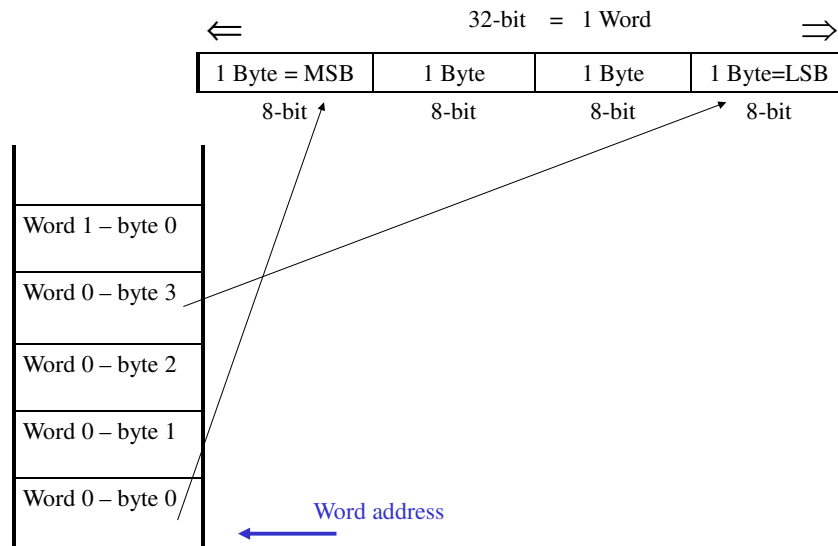


## Disposizione in memoria::little endian





## Disposizione in memoria::big endian



## Tassonomia del funzionamento



Porta nella cache primaria i dati richiesti mentre il binomio processore-memoria sta lavorando.

- 1) Controlla se una parola è in cache (Hit).
- 2) Porta una parola (e quelle vicine) in cache, prelevandole dal livello inferiore (Miss):

**HIT** Successo nel tentativo di accesso ad un dato: è presente al livello superiore della gerarchia.

**MISS** Fallimento del tentativo di accesso al livello superiore della gerarchia => il dato o l'indirizzo devono essere cercati al livello inferiore.

**HIT TIME** Tempo richiesto per verificare se il blocco è presente al livello attuale della memoria.

**MISS\_PENALTY** Tempo richiesto per sostituire il blocco di memoria mancante al livello superiore + tempo necessario per inviarlo al processore.



## Sommario



Struttura di un sistema di memoria

Cache a mappatura diretta

Il campo tag di una cache



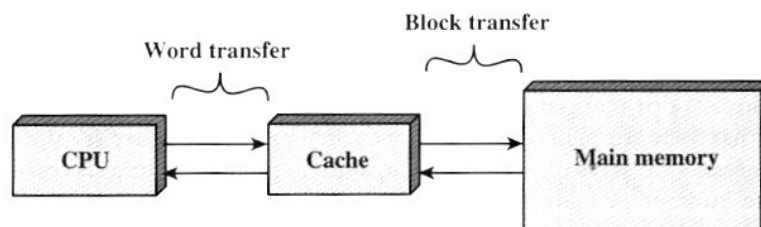
## Principio di funzionamento di una cache



**Scopo:** fornire alla CPU una velocità di trasferimento pari a quella della memoria più veloce con una capacità pari a quella della memoria più grande.

La memoria è un sottosistema a sé che cerca di mantenere in cache i dati di cui ha bisogno il processore. Meccanismi di speculazione analoghi a quelli utilizzati dalla CPU. Per speculazioni errate, il MISS\_PENALTY può essere elevato e la CPU può andare in stallo per un tempo considerevole.

Una cache “disaccoppia” i dati utilizzati dal processore da quelli memorizzati nella Memoria Principale.



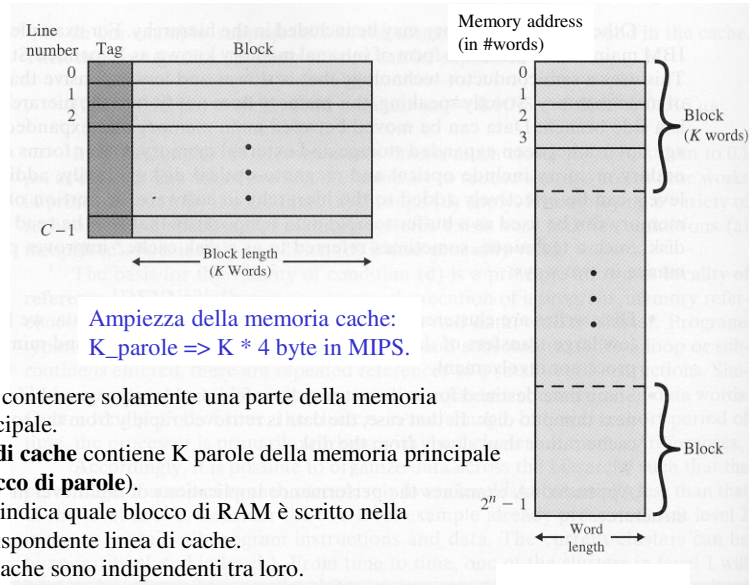
Word transfer: Data transfer or Instruction transfer. In MIPS = 1 parola.

La cache contiene una copia di parte del contenuto della memoria principale. Di che cosa?



## Contenuto della cache

Altezza della memoria cache: # di linee



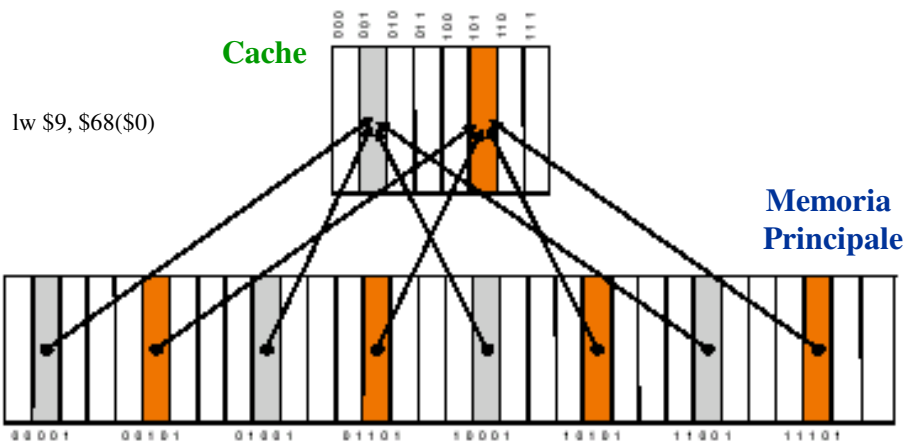
Ampiezza della memoria cache:  
 $K\_parole \Rightarrow K * 4 \text{ byte in MIPS.}$

- La cache può contenere solamente una parte della memoria principale.
- Ogni **parola di cache** contiene K parole della memoria principale (**blocco di parole**).
- Il campo Tag indica quale blocco di RAM è scritto nella corrispondente linea di cache.
- Le parole di cache sono indipendenti tra loro.



## Corrispondenza diretta (direct mapped)

Ad ogni indirizzo di Memoria Principale corrisponde un indirizzo di cache.



lw \$9, \$68(\$0)

Indirizzi diversi di Memoria Principale corrispondono allo stesso indirizzo di cache.  
 Quali indirizzi della memoria principale si considerano?



## Corrispondenza diretta



lw \$9, \$68(\$0)

Supponiamo di avere una cache con 8 linee di un byte => Capacità\_Cache = 8

$$\text{Indirizzo} = N_{\text{blocchi}} * \text{Capacità\_Cache} + \text{offset\_linea}$$

$$68 = ?? * 8 + ??$$

$$\text{Indirizzo} / \text{Capacità\_Cache} = N_{\text{blocchi}}$$

$$\text{Resto} = N_{\text{linea}}$$

$68 / 8 = 8$  occorre "saltare"  $N_{\text{blocchi}}$ , il dato appartiene al blocco 9 della memoria principale

$R = 4$  occorre "saltare" 4 posizioni all'interno della cache, il dato si trova nel 5° byte della cache.



## Determinazione della legge di corrispondenza

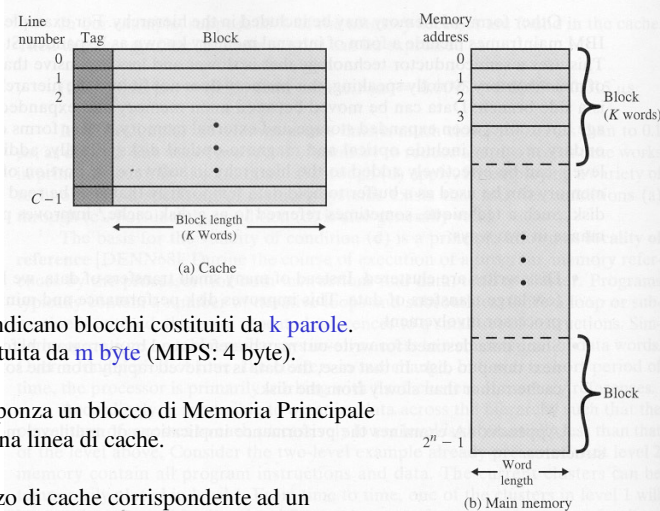


3 unità di misura:

Blocco di cache.

Parola.

Byte.



Le **linee** di una cache indicano blocchi costituiti da **k parole**.

Ciascuna **parola** è costituita da **m byte** (MIPS: 4 byte).

Posso mettere in corrispondenza un blocco di Memoria Principale di  $n = k * m$  byte con una linea di cache.

Come ottengo l'indirizzo di cache corrispondente ad un indirizzo di memoria principale?



## Come si ottiene l'indirizzo di cache? (Metodo delle divisioni successive)



lw \$t0, 14(\$t1) - carico in cache tutto il blocco associato all'indirizzo \$t1 + 14.

Identifico il blocco di Memoria principale a cui appartiene il byte da leggere / scrivere.  
Associo il blocco di Memoria principale ad una linea di cache mediante operazione di modulo.

Posizione\_byte\_cache = indirizzo\_Memoria principale (in #byte) *modulo* #byte\_cache.

Utilizzo come range di conteggio in RAM, il blocco di cache.

### Note:

L'operazione di modulo se la dimensione del blocco è multiplo della base di conteggio si ottiene **scartando** alcune delle cifre meno significative.

La divisione per un multiplo di 2 si ottiene come **shift a sx**, le cifre che "escono" rappresentano il **resto**.



## Esempio



La cache con linee di ampiezza pari a 4 parole (blocco = 4 parole) ed altezza di 8 linee:

Il blocco di dati della memoria principale che può essere contenuto in ogni linea di cache, ha dimensioni:

$n\_byte\_x\_linea = 4 \text{ parole} * 4 \text{ byte} = 16 \text{ byte}$ .

La capacità della cache sarà  $C = 8 \text{ linee} * n = 8 * 16 = 128 \text{ byte}$ .

•lw \$t0, 72(\$zero) – 72 è il 9° byte della 5ª linea (72 / 16) = 4, **€ 5ª linea della cache**.

Indirizzo\_cache = Indirizzo\_Memoria principale *modulo* blocco\_cache

Indirizzo\_cache = 72 / 16 = 4 → resto 8. {Il resto indica la posizione del primo byte della parola all'interno della linea di cache (blocco) → **9° byte = 1° byte della 3ª parola.**}

La word letta è costituita dal byte 72, e dai byte 73, 74, 75, contenuti nella 3ª parola della 5ª linea della cache.

•lw \$t0, 204(\$zero) – 204 / 128 byte = 1 (resto = 76) => **mappiamo il 2° blocco di RAM sulla cache.**

204 è il 13° byte della 13ª linea (204 / 16) = 12, **€ 13ª linea (8 + 5)**. La memoria cache ha solo 8 linee.

Indirizzo\_cache = Indirizzo\_memoria principale (**relativo all'inizio del blocco**) *modulo* capacità\_blocco  
→ 76 / 16 = 4 → resto 12. {Il resto indica la posizione del primo byte della parola all'interno della linea di cache → **13° byte.**}

Il dato viene letto (trasferito nella CPU) assieme ai byte 205, 206, 207) nella stessa linea 5ª della cache.

Il dato viene recuperato (dalla RAM) assieme alle word di indirizzo 200, 196, 192) nella stessa linea 5ª della cache.



## Indirizzamento scartando i bit più significativi



Indirizzo cache	Indirizzo decimale RAM	Indirizzo binario RAM
111	112-127, 240-255, 368-383,...	00 0111 0000 - 00 0111 1111
110	96, 224, 352	00 0110 0000 - 00 0110 1111
101	80-95, 208, 336...	00 0101 0000 - 00 0101 1111
100	64-79, 192-207, 320-335, 448, 461,...	00 0100 0000 - 00 0100 1111
011	48-63, 176, 304...	00 0011 0000 - 00 0011 1111
010	32-47, 160, 288...	00 0010 0000 - 00 0010 1111
001	16-31, 44, 272...	00 0001 0000 - 00 0001 1111
000	0-15, 128, 256, 384,...	00 0000 0000 - 00 0000 1111

NB: La capacità della cache è di:  $8 * 16 \text{ byte} = 128 \text{ byte} = x000\ 0000 - x111\ 1111$



## Indirizzamento scartando i bit più significativi (2° blocco di RAM)



Indirizzo cache	Indirizzo decimale RAM	Indirizzo binario RAM
111	112-127, 240-255, 368-383,...	00 1111 0000 - 00 1111 1111
110	96, 224, 352	00 1110 0000 - 00 1110 1111
101	80-95, 208, 336...	00 1101 0000 - 00 1101 1111
100	64-79, 192-207, 320-335, 448, 461,...	00 1100 0000 - 00 1100 1111
011	48-63, 176, 304...	00 1011 0000 - 00 1011 1111
010	32-47, 160, 288...	00 1010 0000 - 00 1010 1111
001	16-31, 44, 272...	00 1001 0000 - 00 1001 1111
000	0-15, 128, 256, 384,...	00 1000 0000 - 00 1000 1111

NB: La capacità della cache è di:  $8 * 16 \text{ byte} = 128 \text{ byte} = x1000\ 0000 - x1111\ 1111$





## Indirizzamento scartando i bit più significativi (3° blocco di RAM)



Indirizzo cache	Indirizzo decimale RAM	Indirizzo binario RAM
111	112-127, 240-255, 368-383,...	01 0111 0000 - 01 0111 1111
110	96, 224, 352	01 0110 0000 - 01 0110 1111
101	80-95, 208, 336...	01 0101 0000 - 01 0101 1111
100	64-79, 192-207, 320-335, 448, 461,...	01 0100 0000 - 01 0100 1111
011	48-63, 176, 304...	01 0011 0000 - 01 0011 1111
010	32-47, 160, 288...	01 0010 0000 - 01 0010 1111
001	16-31, 44, 272...	01 0001 0000 - 01 0001 1111
000	0-15, 128, 256, 384,...	01 0000 0000 - 01 0000 1111

NB: La capacità della cache è di:  $8 * 16 \text{ byte} = 128 \text{ byte} = x1\ 0000\ 0000 - x1\ 0111\ 1111$



## Parsing dell'indirizzo



0000 0000 0000 00(00)  $\Rightarrow$  0000 0000 0111 11(11)      128 indirizzi diversi di RAM (32 parole sequenziali di 4 byte)

- Questi 128 byte vengono messi in corrispondenza con i 128 byte di una cache che è organizzata come  $8 \times 16$ : 4 parole per linea.
- Gli ultimi 2 bit a destra indicano i byte interni alla parola. Non vengono considerati nei trasferimenti da / per la memoria. Viene considerata la *Word*.
- I 2 bit seguenti indicano la posizione della parola ricercata all'interno della linea della cache.
- I 3 bit seguenti indicano la linea della cache nella / dalla quale si scrive / legge.
- I bit seguenti indicano il numero del blocco della memoria principale messo in corrispondenza con la cache.



## Metodo di parsing dell'indirizzo



0000 0000 0000 00(00)

0000 0000 0111 11(11)

128 indirizzi diversi di RAM (32 parole sequenziali di 4 byte)

Questo vale per:

- Cache di 8 linee.
- Linee di 4 parole.
- Parole di 4 byte.

Prendiamo un indirizzo ed operiamo per divisioni successive nel caso più generale:

Capacità della cache

$M / [ (\#byte / parola) * (\#parole / linea) * \#linee ] = \text{Numero\_blocco di RAM.}$

Il resto,  $R_1$ , rappresenta l'offset in byte all'interno della cache a partire dal byte 0 di cache.

$R_1 / [ (\#byte / parola) * (\#parole / linea) ] = \text{Numero di linea (di blocco) di cache.}$

Il resto,  $R_2$ , rappresenta l'offset in byte all'interno della linea di cache.

$R_2 / [ (\#byte / parola) ] = \text{Numero di parola all'interno della linea di cache.}$

Il resto,  $R_3$ , rappresenta l'offset in byte all'interno della parola.



## Esempio di parsing dell'indirizzo



0000 0000 0000 00(00)

0000 0000 0111 11(11)

128 indirizzi diversi (32 parole di 4 byte)

La cache con linee di 4 parole (ampiezza) ed altezza di 8 linee:

Il blocco di dati contenuto in ogni linea di cache è di dimensioni:  $n = 4 * 4 \text{ byte} = 16 \text{ byte.}$

La capacità della cache è di  $8 * 16 \text{ byte} = 128 \text{ byte.}$

`lw $t0, 196($zero)`

$196 / [ 4 * 4 * 8 ] = 1$  (2° blocco di RAM) con resto  $R_1 = 196 - 1 * 128 = 68.$

Il resto,  $R_1$ , rappresenta l'offset in byte all'interno della cache.

$68 / [ 4 * 4 ] = 4$  (5ª linea della cache) con resto  $R_2 = 68 - 4 * 16 = 4.$

Il resto,  $R_2$ , rappresenta l'offset in byte all'interno della linea di cache.

$4 / 4 = 1$  (2ª parola della cache) con resto  $R_3 = 4 - 1 * 4 = 0.$

Il resto,  $R_3$ , rappresenta l'offset in byte all'interno della parola.



## Esempio di parsing dell'indirizzo



0000 0000 0000 00(00)  $\Rightarrow$  0000 0001 1111 11(11) 512 indirizzi diversi (128 parole, 4 byte)

La cache con linee di **8 parole** (ampiezza) ed altezza di **16 linee**:

Il blocco di dati contenuto in ogni **linea di cache** è di dimensioni:  $n = 8 * 4 \text{ byte} = 32 \text{ byte}$ .

La **capacità della cache** è di  $16 * 32 \text{ byte} = 512 \text{ byte}$ .

$lw \$t0, 600(\$zero)$

$600 / [16 * 8 * 4] = 1$  (2° blocco di RAM) con resto  $R_1 = 600 - 1 * 512 = 88$ .

Il resto,  $R_1$ , rappresenta l'offset in byte all'interno della cache.

$88 / [8 * 4] = 2$  (3ª linea della cache) con resto  $R_2 = 88 - 2 * 32 = 24$ .

Il resto,  $R_2$ , rappresenta l'offset in byte all'interno della linea di cache.

$24 / 4 = 6$  (7ª parola della linea di cache) con resto  $R_3 = 24 - 6 * 4 = 0$ .

Il resto,  $R_3$ , rappresenta l'offset in byte all'interno della parola.



## Sommario



Struttura di un sistema di memoria

Cache a mappatura diretta

**Il campo tag di una cache**



## Come si può sapere se un dato è presente in cache?



Aggiungiamo a ciascuna delle linee della cache un campo **tag**.

Il tag contiene i bit che costituiscono la parte più significativa dell'indirizzo e rappresenta il numero di blocco di RAM in cui il dato di cache è contenuto.

Esso è costituito da K bit:

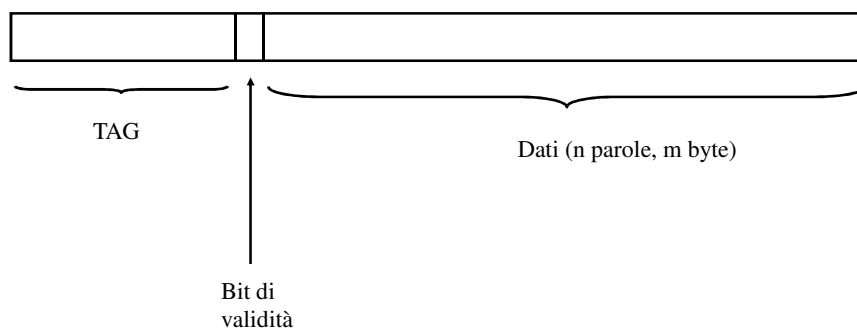
$$K = M - \text{sup}(\log_2 \text{Capacità\_cache (byte)})$$

Nell'esempio precedente:  $K = 32 - \text{sup}(\log_2 512) = 23$  bit.

Occorre inoltre l'informazione data\_valid / data\_not\_valid: **bit di validità**.



## Struttura di un blocco di cache



Quanti blocchi di RAM avremo delle dimensioni della cache?

Nel caso precedente, avremo linee di cache di lunghezza:

$$25 (\text{lunghezza\_campo\_TAG}) + 1 + 4 (\text{parole}) * 4 (\text{byte/parola}) * 8(\text{bit/byte}) = 154\text{bit.}$$



## Come leggere / scrivere su cache



Individuare la linea della cache dalla quale leggere / scrivere (operazione analoga all'indirizzamento del register file).

Confrontare il campo tag con il blocco RAM in cui risiede il dato.

Controllare il bit di validità.

Leggere (scrivere) il dato.

Per blocchi più ampi di una parola, occorre individuare una parola tra le k presenti nella linea di cache.



## Sommario



Caratteristiche di un sistema di memoria

Struttura di una memoria

Principio di funzionamento di una memoria cache

Cache a mappatura diretta

Il campo tag di una cache