

Sistemi Operativi per LT Informatica

Gestione della memoria

Docente: Salvatore Sorce

Copyright © 2002-2005 Renzo Davoli, Alberto Montresor

Permission is granted to copy, distribute and/or modify this document under the terms of the GNU Free Documentation License, Version 1.2 or any later version published by the Free Software Foundation; with no Invariant Sections, no Front-Cover Texts, and no Back-Cover Texts. A copy of the license can be found at:

<http://www.gnu.org/licenses/fdl.html#TOC1>

Sommario



- ◆ **Binding, loading, linking**
- ◆ **Allocazione contigua**
- ◆ **Paginazione**
- ◆ **Segmentazione**
- ◆ **Memoria virtuale**

Introduzione



- ♦ **Memory manager**
 - ♦ la parte del sistema operativo che gestisce la memoria principale si chiama *memory manager*
 - ♦ in alcuni casi, il memory manager può gestire anche parte della memoria secondaria, al fine di emulare memoria principale
- ♦ **Compiti di un memory manager**
 - ♦ tenere traccia della memoria libera e occupata
 - ♦ allocare memoria ai processi e deallocarla quando non più necessaria

Introduzione



- ♦ **Prospettiva storica**
 - ♦ partiremo vedendo i meccanismi di gestione della memoria più semplici;
 - ♦ a volte possono sempre banali, ma...
- ♦ **... ma nell'informatica, la storia ripete se stessa:**
 - ♦ alcuni di questi meccanismi vengono ancora utilizzati in sistemi operativi speciali per palmari, sistemi embedded (microcontrollori), smart-card

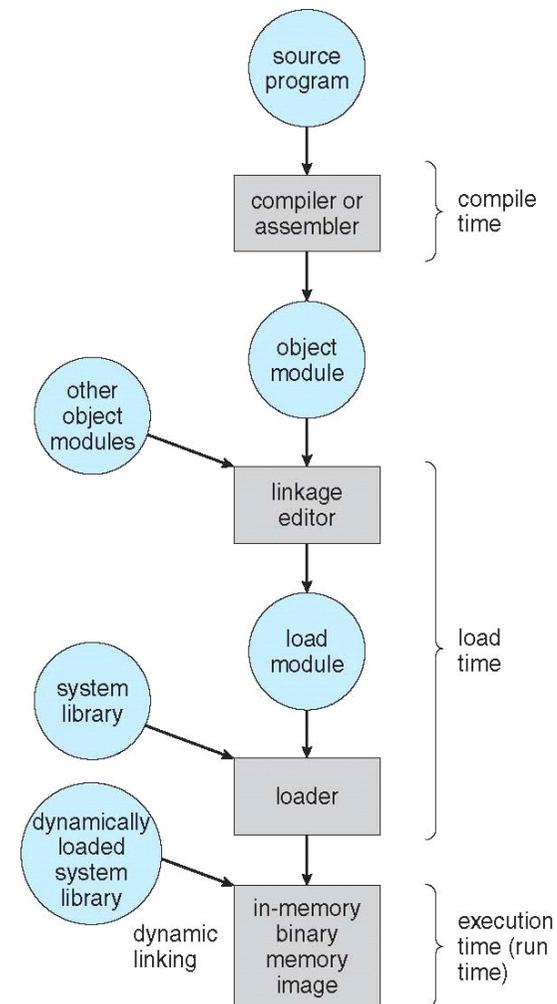
Binding

◆ Definizione

- ◆ con il termine *binding* si indica l'associazione di indirizzi di memoria ai dati e alle istruzioni di un programma

◆ Il binding può avvenire

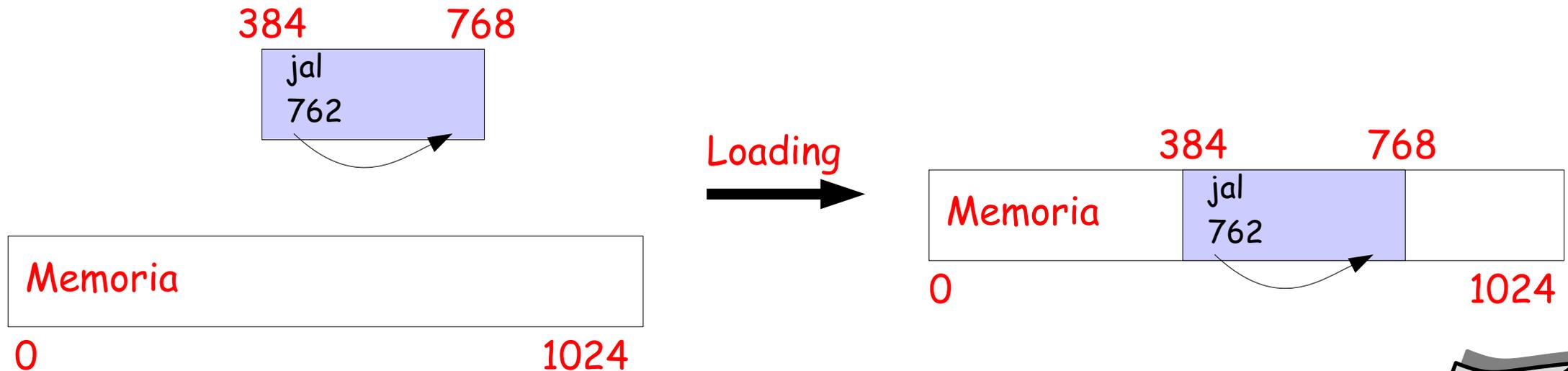
- ◆ durante la compilazione
- ◆ durante il caricamento
- ◆ durante l'esecuzione



Binding

- ◆ **Binding durante la compilazione**

- ◆ gli indirizzi vengono calcolati al momento della compilazione e resteranno gli stessi ad ogni esecuzione del programma
- ◆ il codice generato viene detto codice *assoluto*
- ◆ Esempi:
 - ◆ codice per microcontrollori, per il kernel, file COM in MS-DOS



Binding



- ♦ **Binding durante la compilazione**
 - ♦ vantaggi
 - ♦ non richiede hardware speciale
 - ♦ semplice
 - ♦ molto veloce
 - ♦ svantaggi
 - ♦ non funziona con la multiprogrammazione

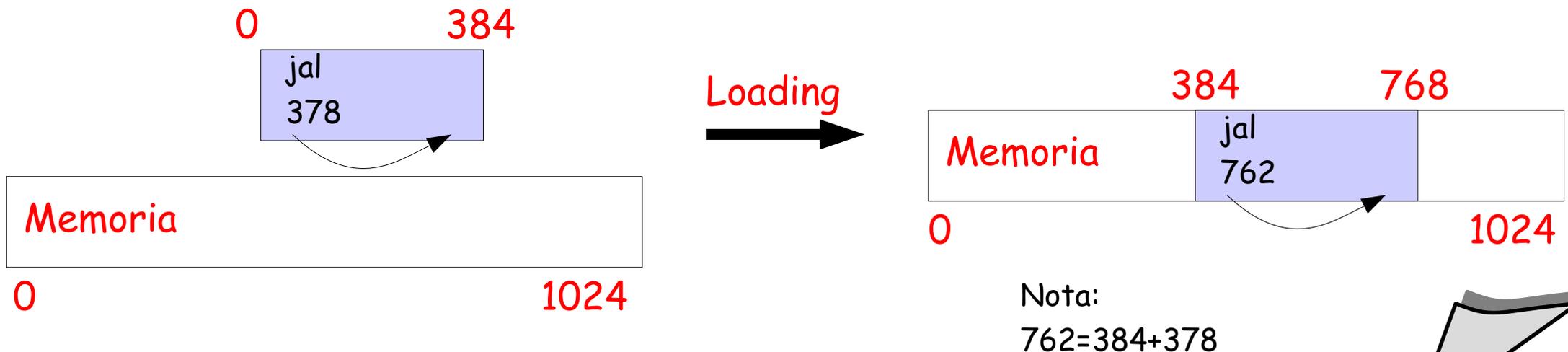
Binding

- ◆ **Binding durante il caricamento**

- ◆ il codice generato dal compilatore non contiene indirizzi assoluti ma relativi (al PC oppure ad un indirizzo base)
- ◆ questo tipo di codice viene detto *rilocabile*

- ◆ **Durante il caricamento**

- ◆ il loader si preoccupa di aggiornare tutti i riferimenti agli indirizzi di memoria coerentemente al punto iniziale di caricamento



Binding

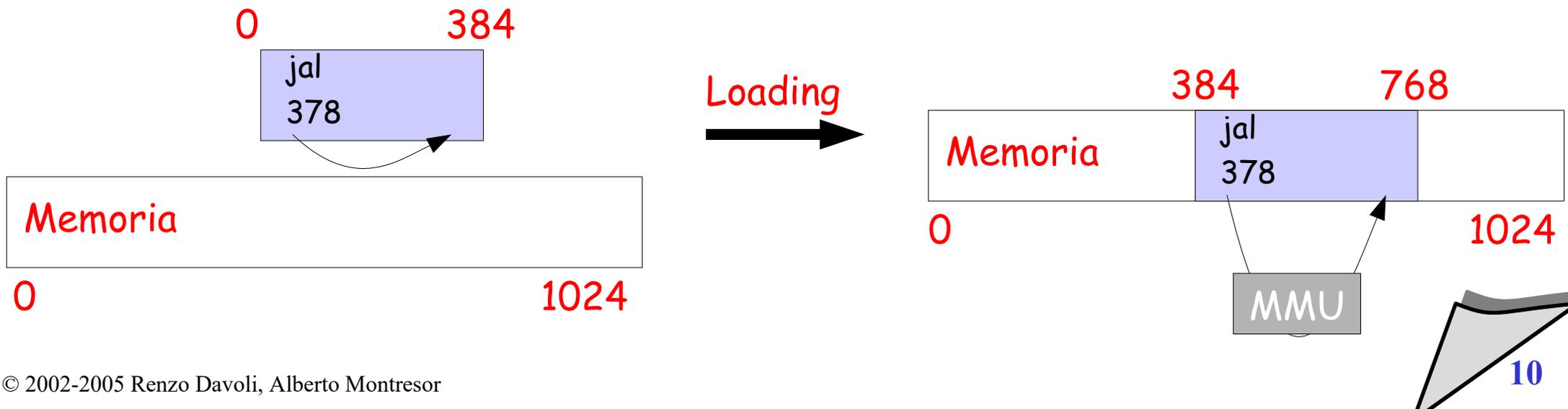


- ♦ **Binding durante il caricamento**
 - ♦ vantaggi
 - ♦ permette di gestire multiprogrammazione
 - ♦ non richiede uso di hardware particolare
 - ♦ svantaggi
 - ♦ richiede una traduzione degli indirizzi da parte del loader, e quindi formati particolare dei file eseguibili

Binding

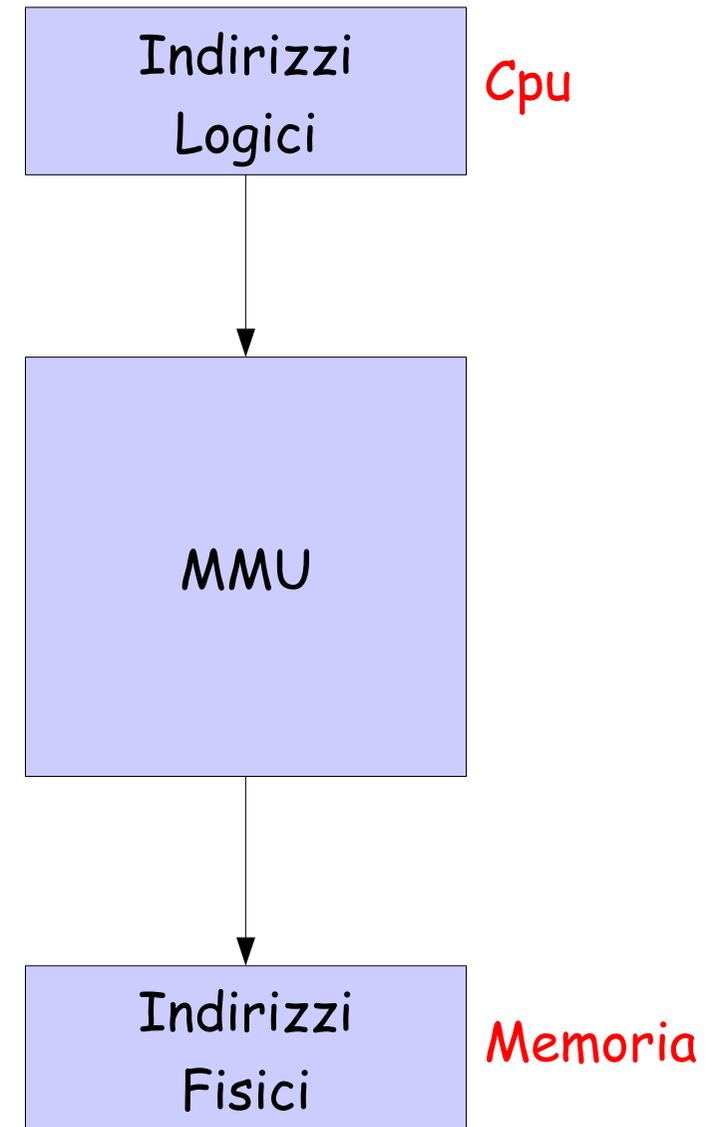
♦ Binding durante l'esecuzione

- ♦ l'individuazione dell'indirizzo di memoria effettivo viene effettuata durante l'esecuzione da un componente hardware apposito: la *memory management unit* (MMU - hardware)
- ♦ da non confondere con il memory manager (MM - software)



Indirizzi logici e indirizzi fisici

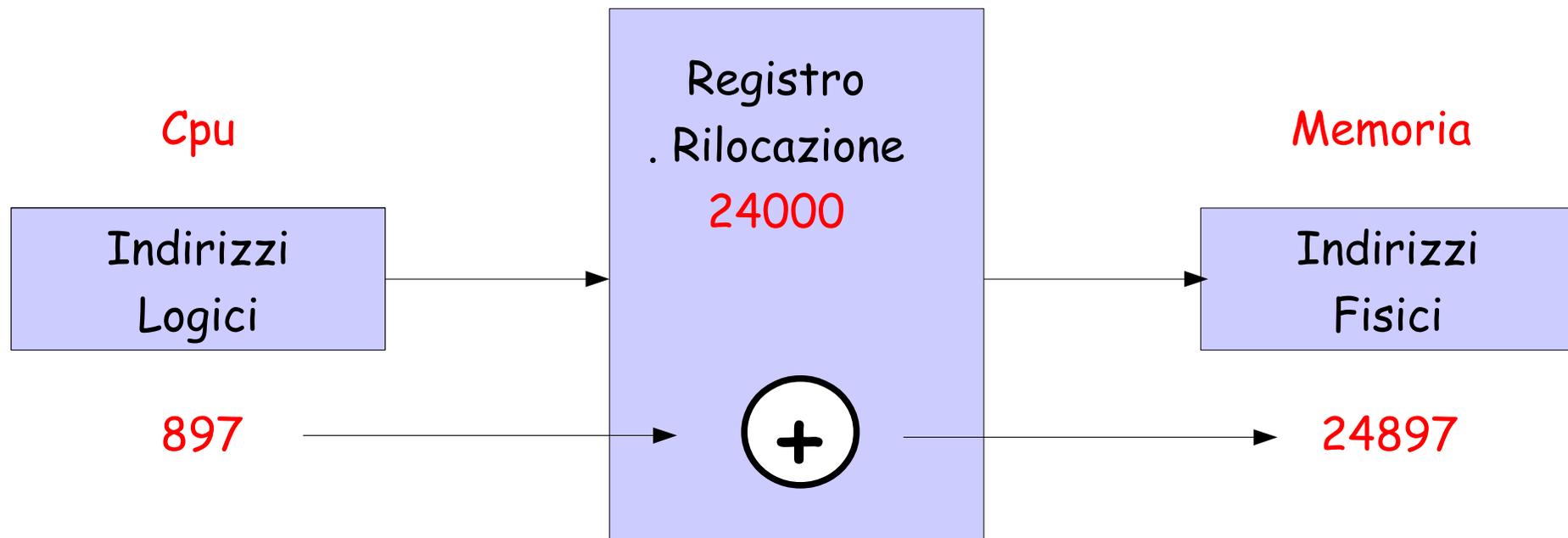
- ◆ **Spazio di indirizzamento logico**
 - ◆ ogni processo è associato ad uno spazio di indirizzamento logico
 - ◆ gli indirizzi usati in un processo sono indirizzi logici, ovvero riferimenti a questo spazio di indirizzamento
- ◆ **Spazio di indirizzamento fisico**
 - ◆ ad ogni indirizzo logico corrisponde un indirizzo fisico
 - ◆ la MMU opera come una funzione di traduzione da indirizzi logici a indirizzi fisici



Esempi di MMU - Registro di rilocazione

♦ Descrizione

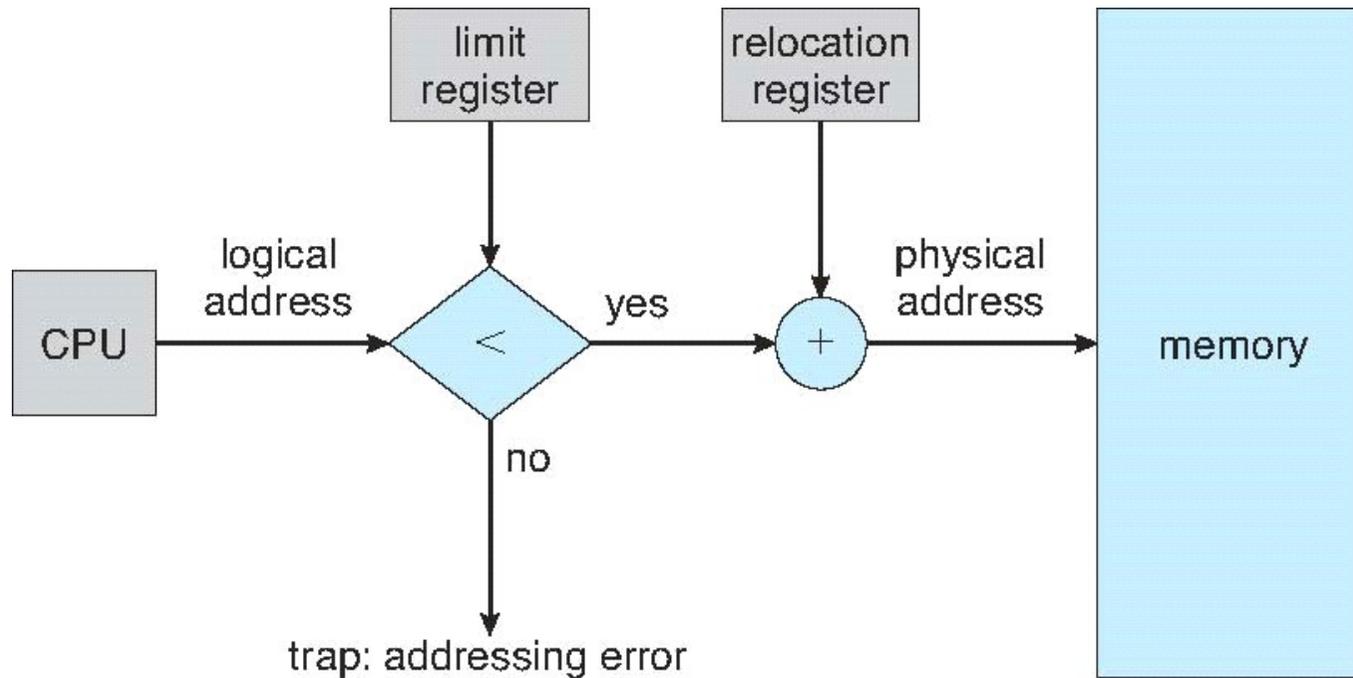
- ♦ se il valore del registro di rilocazione è R, uno spazio logico 0...Max viene tradotto in uno spazio fisico R...R+MAX
- ♦ esempio: nei processori Intel 80x86, esistono 4 registri base per il calcolo degli indirizzi (CS, DS, SS, ES)



Esempi di MMU- Registro di rilocalazione e limite

◆ Descrizione

- ◆ il registro limite viene utilizzato per implementare meccanismi di protezione della memoria



Prestazioni speciali 1 - Loading dinamico

- ◆ **Cosa significa?**

- ◆ consente di poter caricare alcune routine di libreria solo quando vengono richiamate

- ◆ **Come viene implementato?**

- ◆ tutte le routine a caricamento dinamico risiedono su un disco (codice rilocabile), quando servono vengono caricate
- ◆ le routine poco utili (e.g., casi di errore rari...) non vengono caricate in memoria al caricamento dell'applicazione

- ◆ **Nota**

- ◆ spetta al programmatore sfruttare questa possibilità
- ◆ il sistema operativo fornisce semplicemente una libreria che implementa le funzioni di caricamento dinamico

Prestazioni speciali 2 - Linking dinamico

- ◆ **Linking statico**

- ◆ se il linker collega e risolve tutti i riferimenti dei programmi...
- ◆ le routine di libreria vengono copiate in ogni programma che le usa (e.g. printf in tutti i programmi C)

- ◆ **Linking dinamico**

- ◆ è possibile posticipare il linking delle routine di libreria al momento del primo riferimento durante l'esecuzione
- ◆ consente di avere eseguibili più compatti
- ◆ le librerie vengono implementate come codice reentrant:
 - ◆ esiste una sola istanza della libreria in memoria e tutti i programmi eseguono il codice di questa istanza

Prestazioni speciali 2 - Linking dinamico

- ♦ **Vantaggi**

- ♦ risparmio di memoria
- ♦ consente l'aggiornamento automatico delle versioni delle librerie
 - ♦ le librerie aggiornate sono caricate alla successiva attivazione dei programmi

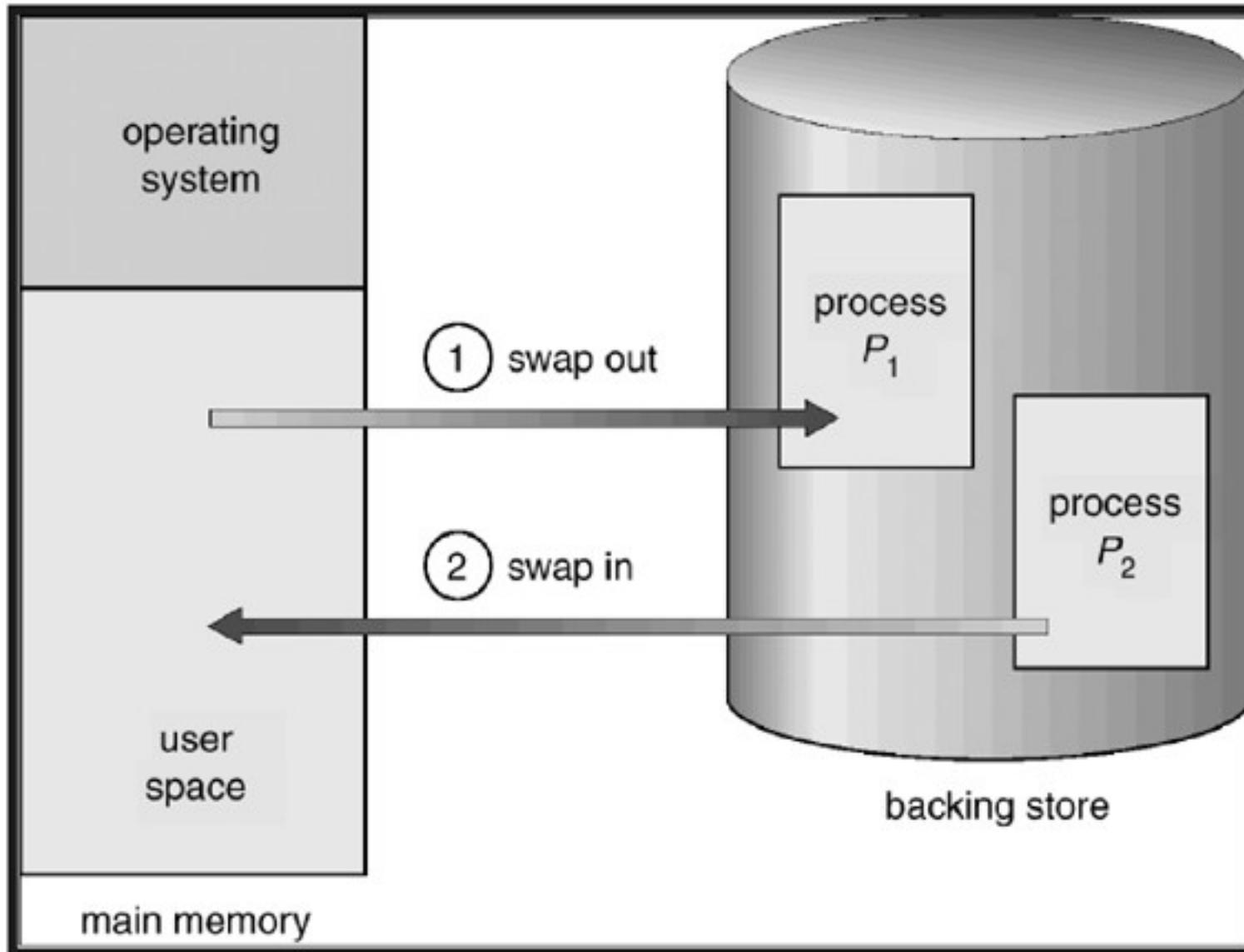
- ♦ **Svantaggi**

- ♦ può causare problemi di "versioning"
 - ♦ occorre aggiornare le versioni solo se non sono incompatibili
 - ♦ cambiamento numero di revisione e non di release

Swapping

- Un processo può essere temporaneamente riportato (*swapped*) su disco (*backing store*) e quindi riportato in memoria al momento di riprendere l'esecuzione.
- *Roll out, roll in* : indicano le operazioni di swapping usate per algoritmi di scheduling basati su priorità quando un processo a più bassa priorità viene rimosso dalla memoria per far posto al processo con alta priorità.
- La maggior parte del tempo di swap è tempo di trasferimento e il tempo totale è proporzionale alla dimensione dell'area di memoria sottoposta a swap.
- Versioni modificate di tecniche di swapping sono disponibili su molti sistemi operativi: UNIX, Linux, and Windows.

Swapping



$$ms = 1\text{MB}$$

$$V = 4\text{MBs}$$

$$t = 1\text{MB} / 4\text{MBs}$$

$$= 1/4\text{ sec}$$

$$= 250\text{ msec}$$

$$T = 2t = 500\text{ msec}$$

Allocazione



- ♦ **E' una delle funzioni principali del gestore di memoria**
- ♦ **Consiste nel reperire ed assegnare uno spazio di memoria fisica**
 - ♦ a un programma che viene attivato
 - ♦ oppure per soddisfare ulteriori richieste effettuate dai programmi durante la loro esecuzione

Allocazione: definizioni



- ◆ **Allocazione contigua**

- ◆ tutto lo spazio assegnato ad un programma deve essere formato da celle consecutive

- ◆ **Allocazione non contigua**

- ◆ è possibile assegnare a un programma aree di memorie separate

- ◆ **Nota**

- ◆ la MMU deve essere in grado di gestire la conversione degli indirizzi in modo coerente
- ◆ esempio: la MMU basata su rilocazione gestisce solo allocazione contigua

Allocazione: statica o dinamica



- ♦ **Statica**

- ♦ un programma deve mantenere la propria area di memoria dal caricamento alla terminazione
- ♦ non è possibile rilocare il programma durante l'esecuzione

- ♦ **Dinamica**

- ♦ durante l'esecuzione, un programma può essere spostato all'interno della memoria

Allocazione a partizioni fisse

• Descrizione

- la memoria disponibile (quella non occupata dal s.o.) viene suddivisa in partizioni
- ogni processo viene caricato in una delle partizioni libere che ha dimensione sufficiente a contenerlo

• Caratteristiche

- statica e contigua
- vantaggi: molto semplice
- svantaggi: spreco di memoria, grado di parallelismo limitato dal numero di partizioni



Allocazione a partizioni fisse

- ◆ **Gestione memoria**
 - ◆ è possibile utilizzare una coda per partizione, oppure una coda comune per tutte le partizioni
- ◆ **Sistemi monoprogrammati**
 - ◆ esiste una sola partizione, dove viene caricato un unico programma utente
 - ◆ esempio:
 - ◆ MS-DOS
 - ◆ sistemi embedded



Frammentazione interna

- ◆ **Nell'allocazione a partizione fisse**

- ◆ se un processo occupa una dimensione inferiore a quella della partizione che lo contiene, lo spazio non utilizzato è sprecato
- ◆ la presenza di spazio inutilizzato all'interno di un'unità di allocazione si chiama *frammentazione interna*

- ◆ **Nota:**

- ◆ il fenomeno della frammentazione interna non è limitata all'allocazione a partizioni fisse, ma è generale a tutti gli approcci in cui è possibile allocare più memoria di quanto richiesto (per motivi di organizzazione)



Allocazione a partizioni dinamiche

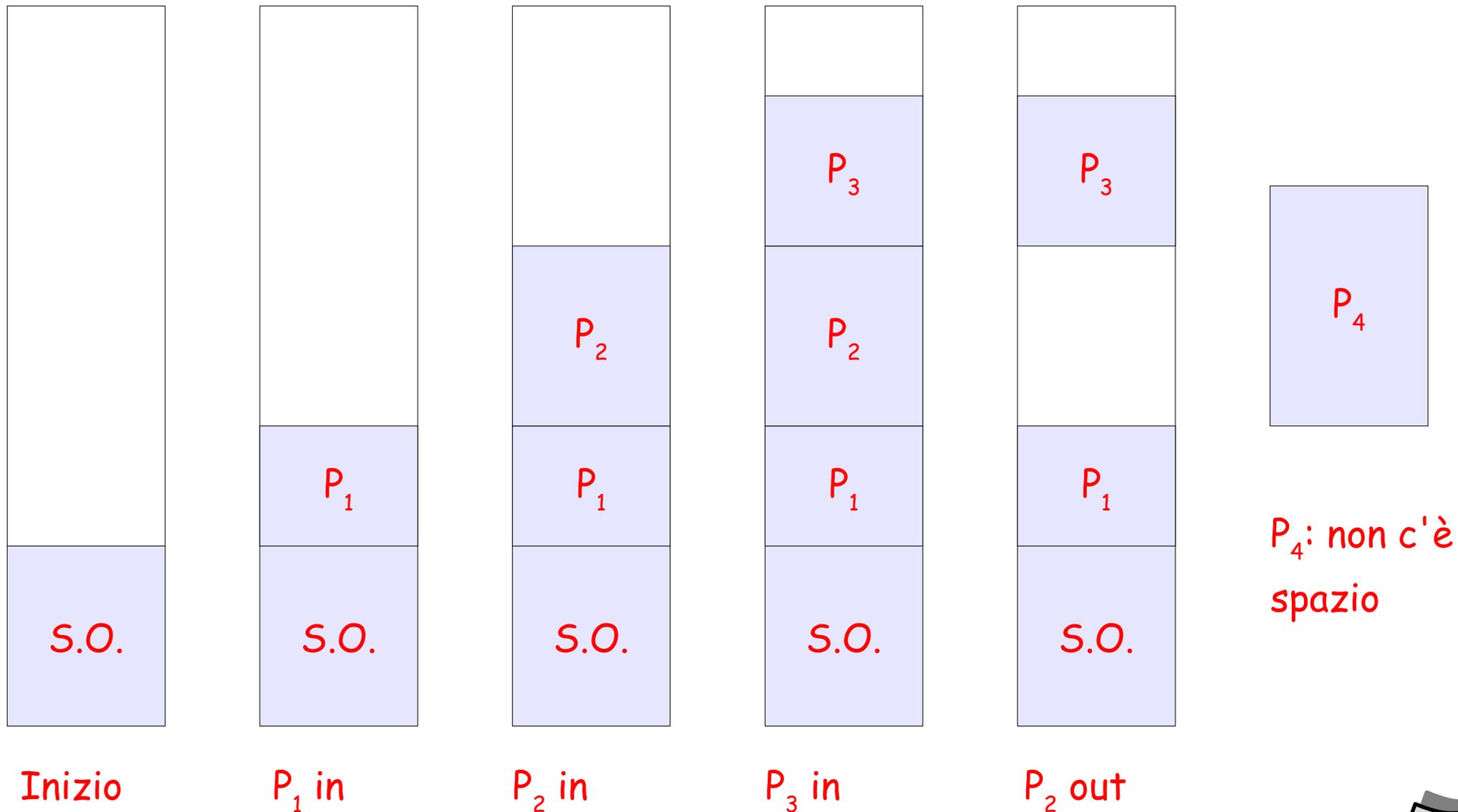
- ◆ **Descrizione**

- ◆ la memoria disponibile (nella quantità richiesta) viene assegnata ai processi che ne fanno richiesta
- ◆ nella memoria possono essere presenti diverse zone inutilizzate
 - ◆ per effetto della terminazione di processi
 - ◆ oppure per non completo utilizzo dell'area disponibile da parte dei processi attivi

- ◆ **Caratteristiche**

- ◆ statica e contigua
- ◆ esistono diverse politiche per la scelta dell'area da utilizzare

Allocazione a partizioni dinamiche



Frammentazione esterna



- ◆ **Problema**

- ◆ dopo un certo numero di allocazioni e deallocazioni di memoria dovute all'attivazione e alla terminazione dei processi lo spazio libero appare suddiviso in piccole aree
- ◆ è il fenomeno della *frammentazione esterna*

- ◆ **Nota**

- ◆ la frammentazione *interna* dipende dall'uso di unità di allocazione di dimensione diversa da quella richiesta
- ◆ la frammentazione *esterna* deriva dal susseguirsi di allocazioni e deallocazioni

Compattazione

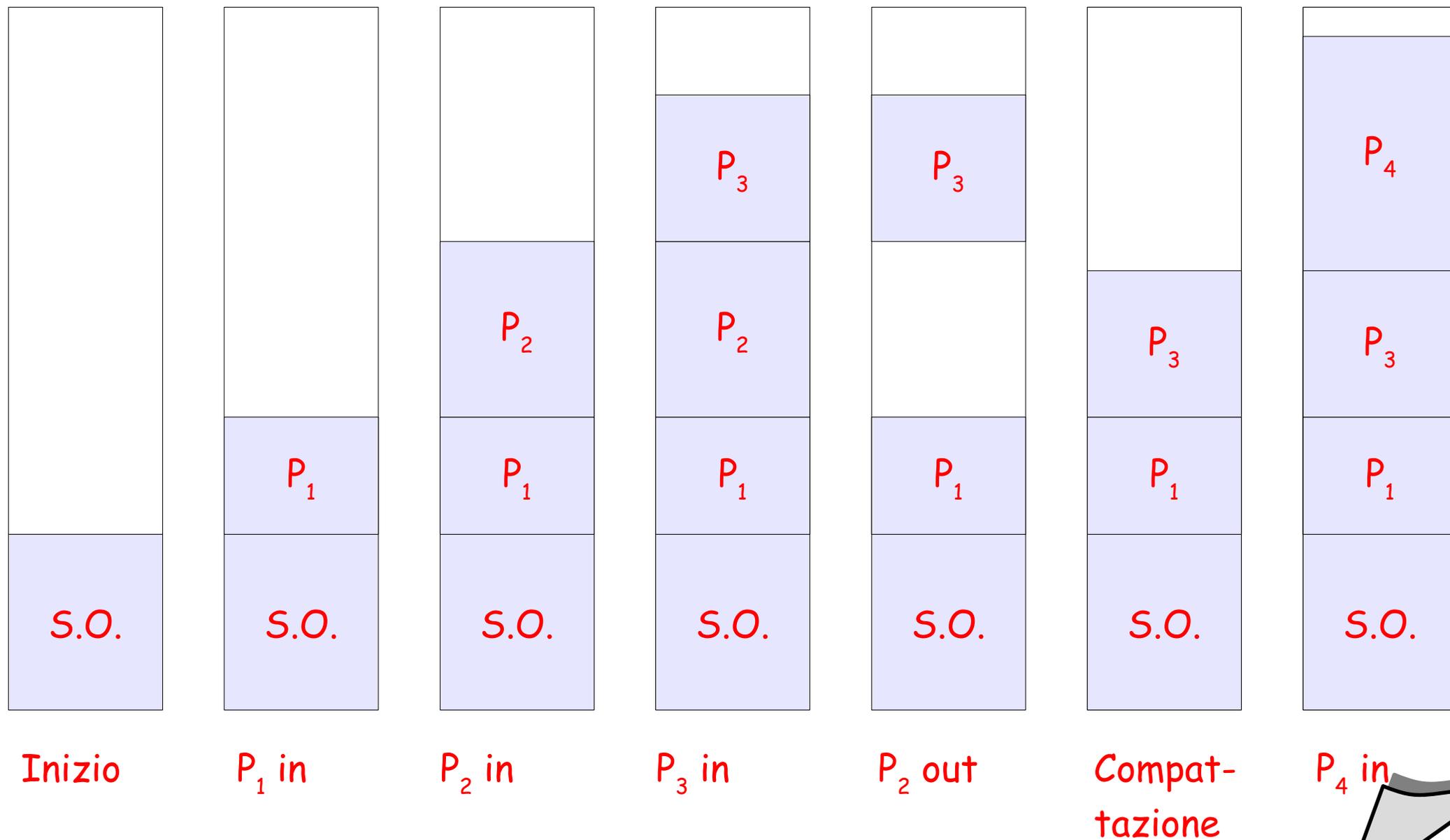
- ◆ **Compattazione**

- ◆ se è possibile rilocare i programmi durante la loro esecuzione, è allora possibile procedere alla *compattazione* della memoria
- ◆ compattare la memoria significa spostare in memoria tutti i programmi in modo da riunire tutte le aree inutilizzate
- ◆ è un'operazione volta a risolvere il problema della frammentazione esterna

- ◆ **Problemi**

- ◆ è un'operazione molto onerosa
 - ◆ occorre copiare (fisicamente) in memoria grandi quantità di dati
- ◆ non può essere utilizzata in sistemi interattivi
 - ◆ i processi devono essere fermi durante la compattazione

Compattazione



Allocazione dinamica - Strutture dati

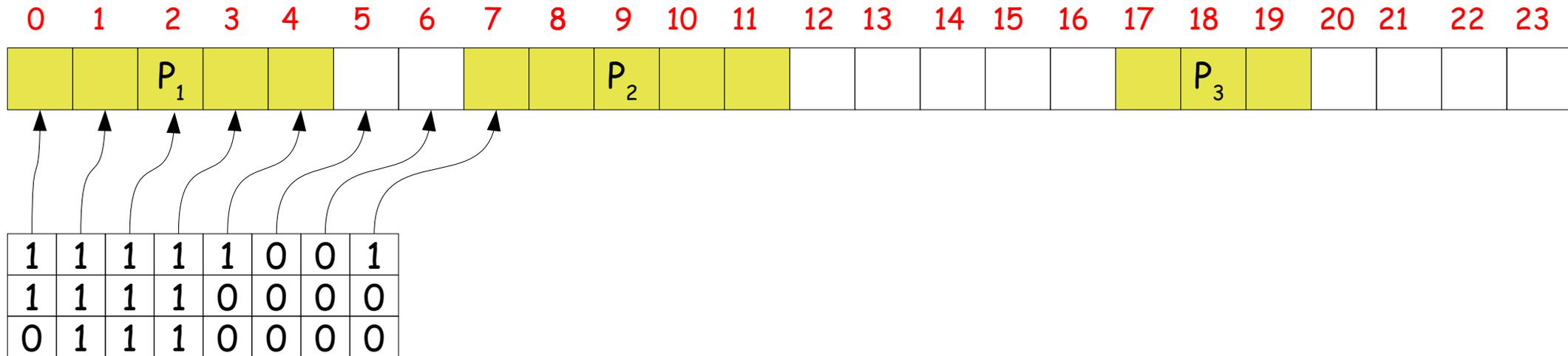


- ◆ **Quando la memoria è assegnata dinamicamente**
 - ◆ abbiamo bisogno di una struttura dati per mantenere informazioni sulle zone libere e sulle zone occupate
- ◆ **Strutture dati possibili**
 - ◆ mappe di bit
 - ◆ liste con puntatori
 - ◆ ...

Allocazione Dinamica - Mappa di bit

♦ Mappa di bit

- ♦ la memoria viene suddivisa in unità di allocazione
- ♦ ad ogni unità di allocazione corrisponde un bit in una bitmap
- ♦ le unità libere sono associate ad un bit di valore 0, le unità occupate sono associate ad un bit di valore 1



Allocazione Dinamica - Mappa di bit



- ◆ **Note**

- ◆ la dimensione dell'unità di allocazione è un parametro importante dell'algoritmo
- ◆ trade-off fra dimensione della bitmap e frammentazione interna

- ◆ **Vantaggi**

- ◆ la struttura dati ha una dimensione fissa e calcolabile a priori

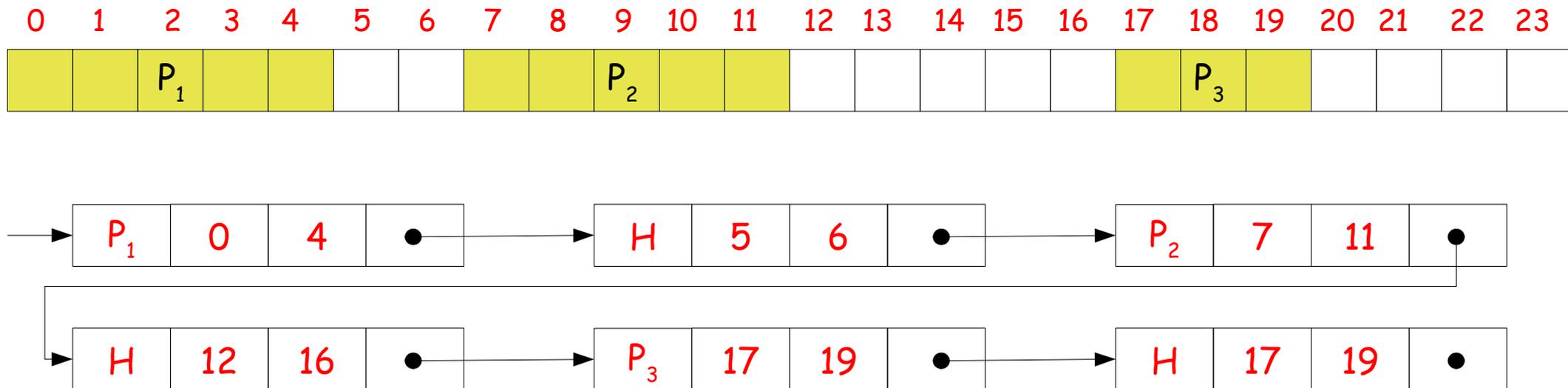
- ◆ **Svantaggi**

- ◆ per individuare uno spazio di memoria di dimensione **k** unità, è necessario cercare una sequenza di **k** bit 0 consecutivi
- ◆ in generale, tale operazione è **O(m)**, dove **m** rappresenta il numero di unità di allocazione

Allocazione dinamica - Lista con puntatori

◆ Liste di puntatori

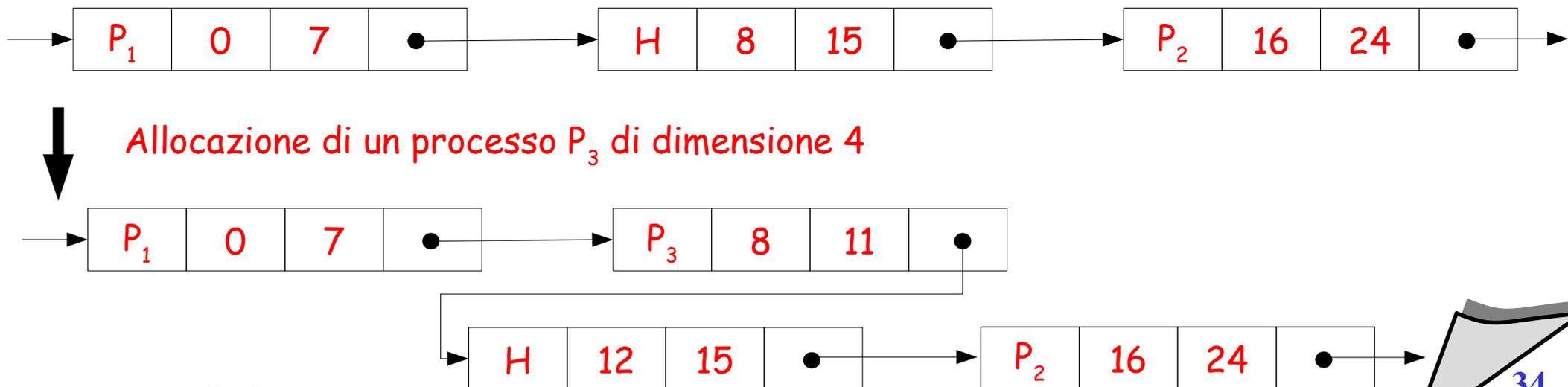
- ◆ si mantiene una lista dei blocchi allocati e liberi di memoria
- ◆ ogni elemento della lista specifica
 - ◆ se si tratta di un processo (P) o di un blocco libero (hole, H)
 - ◆ la dimensione (inizio/fine) del segmento



Allocazione dinamica - Lista con puntatori

♦ Allocazione di memoria

- ♦ un blocco libero viene selezionato (vedi slide successive)
- ♦ viene suddiviso in due parti:
 - ♦ un blocco processo della dimensione desiderata
 - ♦ un blocco libero con quanto rimane del blocco iniziale
- ♦ se la dimensione del processo è uguale a quella del blocco scelto, si crea solo un nuovo blocco processo

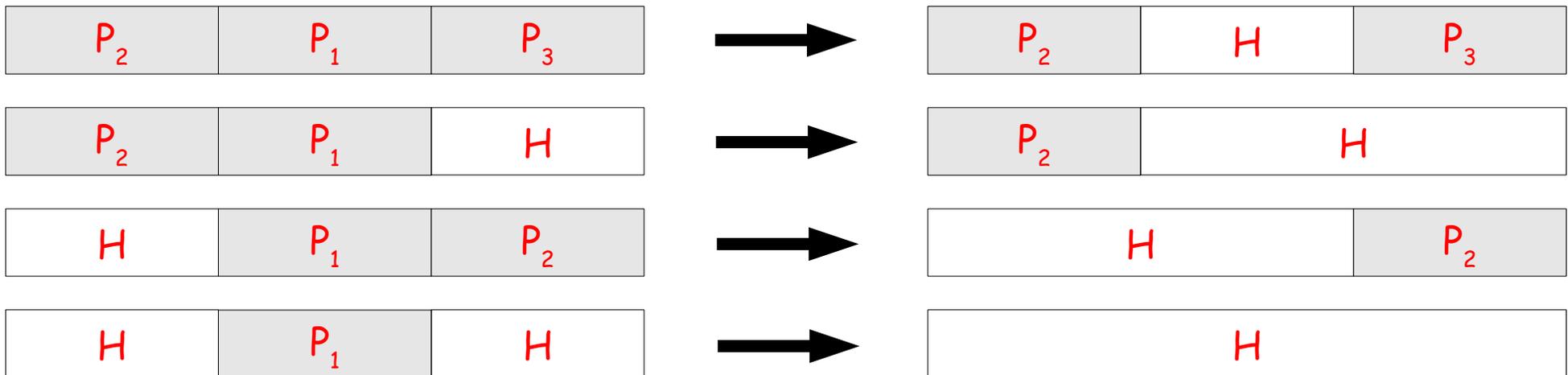


Allocazione dinamica - Lista puntatori

◆ Deallocazione memoria

- ◆ a seconda dei blocchi vicini, lo spazio liberato può creare un nuovo blocco libero, oppure essere accorpato ai blocchi vicini
- ◆ l'operazione può essere fatta in tempo $O(1)$

Rimozione P_1 , quattro casi possibili:



Allocazione dinamica - Selezione blocco libero

- ♦ **L'operazione di selezione di un blocco libero è concettualmente indipendente dalla struttura dati**
- ♦ **First Fit**
 - ♦ scorre la lista dei blocchi liberi fino a quando non trova il primo segmento vuoto grande abbastanza da contenere il processo
- ♦ **Next Fit**
 - ♦ come First Fit, ma invece di ripartire sempre dall'inizio, parte dal punto dove si era fermato all'ultima allocazione
- ♦ **Commenti**
 - ♦ Next Fit è stato progettato per evitare di frammentare continuamente l'inizio della memoria
 - ♦ ma sorprendentemente, ha performance peggiori di First Fit

Allocazione dinamica - Selezione blocco libero

- ♦ **Best Fit**
 - ♦ seleziona il più piccolo fra i blocchi liberi presenti in memoria
- ♦ **Commenti**
 - ♦ più lento di First Fit, in quanto richiede di esaminare tutti i blocchi liberi presenti in memoria
 - ♦ genera più frammentazione di First Fit, in quanto tende a riempire la memoria di blocchi liberi troppo piccoli
- ♦ **Worst fit**
 - ♦ seleziona il più grande fra i blocchi liberi presenti in memoria
- ♦ **Commenti**
 - ♦ proposto per evitare i problemi di frammentazione di First/Best Fit
 - ♦ rende difficile l'allocazione di processi di grosse dimensioni

Allocazione dinamica - Strutture dati (ancora)

- ♦ **Trade-off tra costi di allocazione e deallocazione**
 - ♦ nella struttura proposta in precedenza, il costo della deallocazione è $O(1)$
 - ♦ è possibile ottimizzare il costo di allocazione
 - ♦ mantenendo una lista di blocchi liberi separata
 - ♦ eventualmente, ordinando tale lista per dimensione
- ♦ **Dove mantenere queste informazioni**
 - ♦ per i blocchi occupati
 - ♦ ad esempio, nella tabella dei processi
 - ♦ per i blocchi liberi
 - ♦ nei blocchi stessi!
 - ♦ è richiesta un'unità minima di allocazione

Paginazione



- ◆ **Problema**

- ◆ i meccanismi visti (partizioni fisse, partizioni dinamiche) non sono efficienti nell'uso della memoria
 - ◆ frammentazione interna
 - ◆ frammentazione esterna

- ◆ **Paginazione**

- ◆ è l'approccio attuale
 - ◆ riduce il fenomeno di frammentazione interna
 - ◆ minimizza (elimina) il fenomeno della frammentazione esterna
- ◆ attenzione però: necessita di hardware adeguato

Paginazione



- ◆ **Lo spazio di indirizzamento logico di un processo**
 - ◆ viene suddiviso in un insieme di blocchi di dimensione fissa chiamati *pagine*
- ◆ **La memoria fisica**
 - ◆ viene suddivisa in un insieme di blocchi della stessa dimensione delle pagine, chiamati *frame*
- ◆ **Quando un processo viene allocato in memoria:**
 - ◆ vengono reperiti ovunque in memoria un numero sufficiente di frame per contenere le pagine del processo

Paginazione

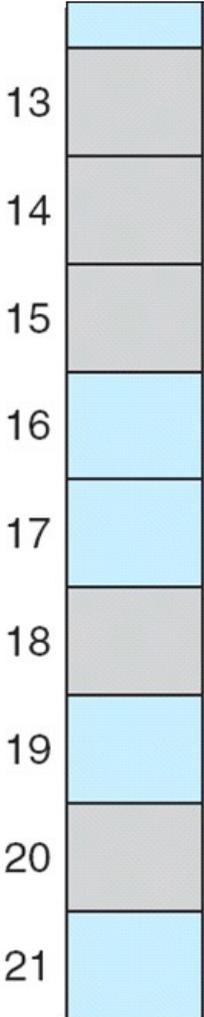
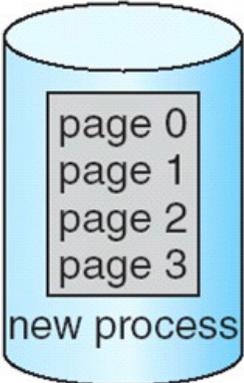


- Si tiene traccia di tutti frame liberi.
- Per eseguire un programma che richiede n pagine, bisogna trovare n frame liberi.
- Esiste una tabella delle pagine che contiene l'indirizzo iniziale di ogni pagina nella memoria fisica.
- Si evita la frammentazione esterna.
- Si può avere frammentazione interna.

Paginazione

free-frame list

- 14
- 13
- 18
- 20
- 15

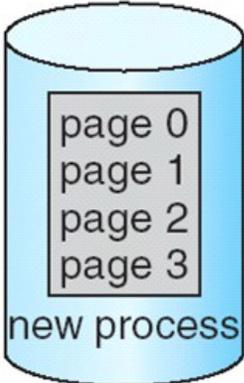


(a)

a) Prima dell'allocazione

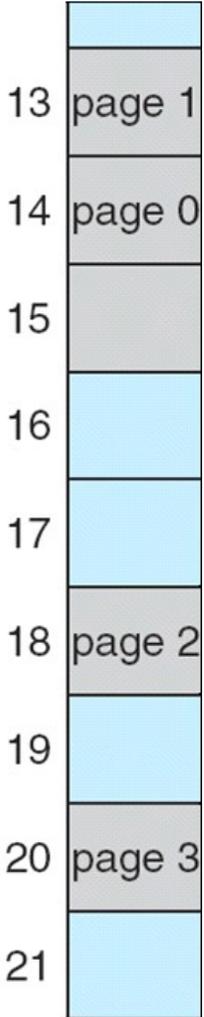
free-frame list

15



0	14
1	13
2	18
3	20

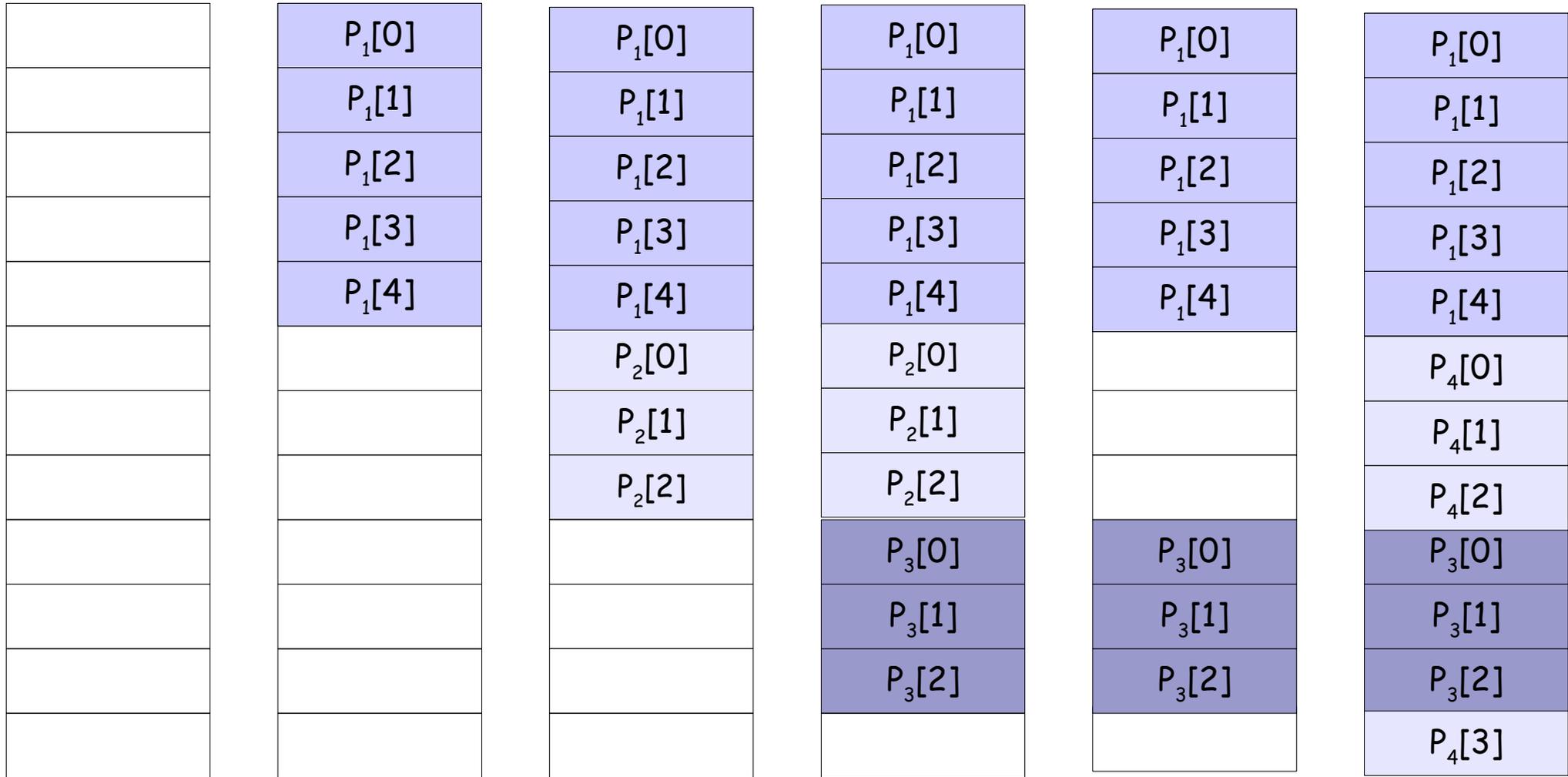
new-process page table



(b)

b) Dopo l'allocazione

Paginazione - Esempio



Tutto
libero

P₁ in

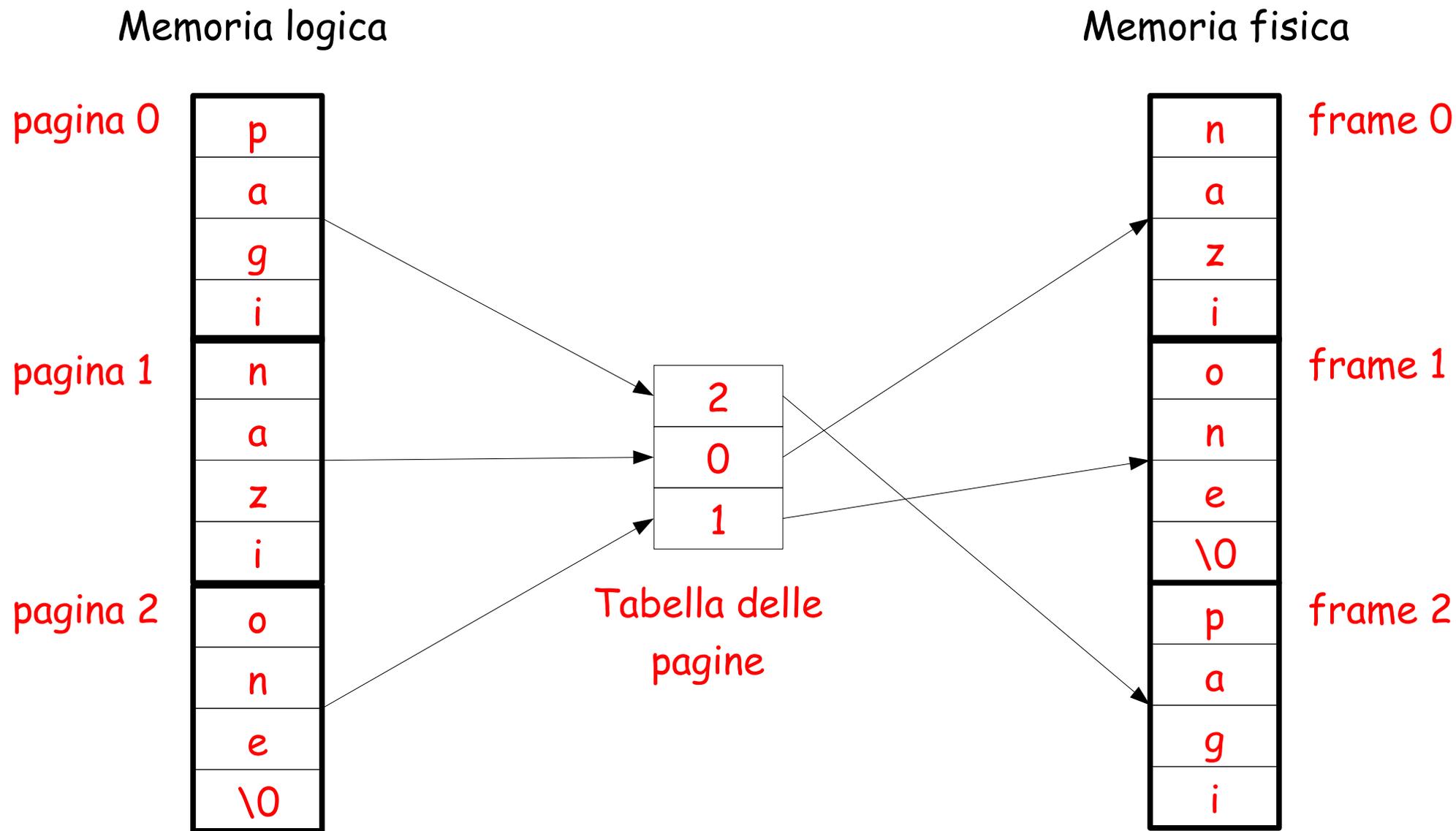
P₂ in

P₃ in

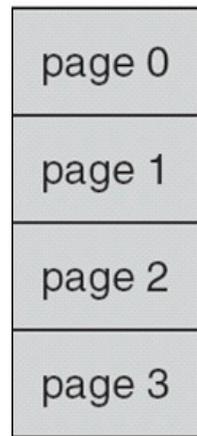
P₂ out

P₄ in

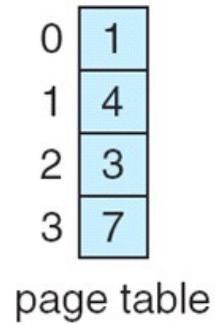
Paginazione - Esempio



Paginazione - Esempio

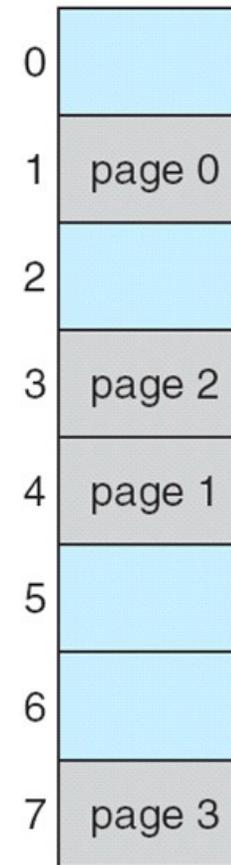


logical
memory



page table

frame
number



physical
memory

Paginazione - Esempio

0	a
1	b
2	c
3	d
4	e
5	f
6	g
7	h
8	i
9	j
10	k
11	l
12	m
13	n
14	o
15	p

logical memory

0	5
1	6
2	1
3	2

page table

0	
4	i j k l
8	m n o p
12	
16	
20	a b c d
24	e f g h
28	

physical memory

$n=2$ and $m=5$ 32-byte memory and 4-byte pages

Paginazione – frammentazione interna

Sia F la dimensione di una pagina/frame in byte, P la dimensione totale del processo in byte, n un numero intero.

- Caso migliore: processo con dimensione multipla della dimensione delle pagine/frame, $P = nF$
 - Riempie esattamente tutti i frames assegnati
 - Frames assegnati = n ; Frammentazione interna = 0 byte
- Caso peggiore: processo con dimensione pari a un multiplo della dimensione delle pagine/frames + 1 byte, $P = (nF+1)$
 - Per il byte in più, gli viene comunque assegnato un frame intero
 - Frames assegnati = $n+1$; Frammentazione interna = $(F - 1)$ byte

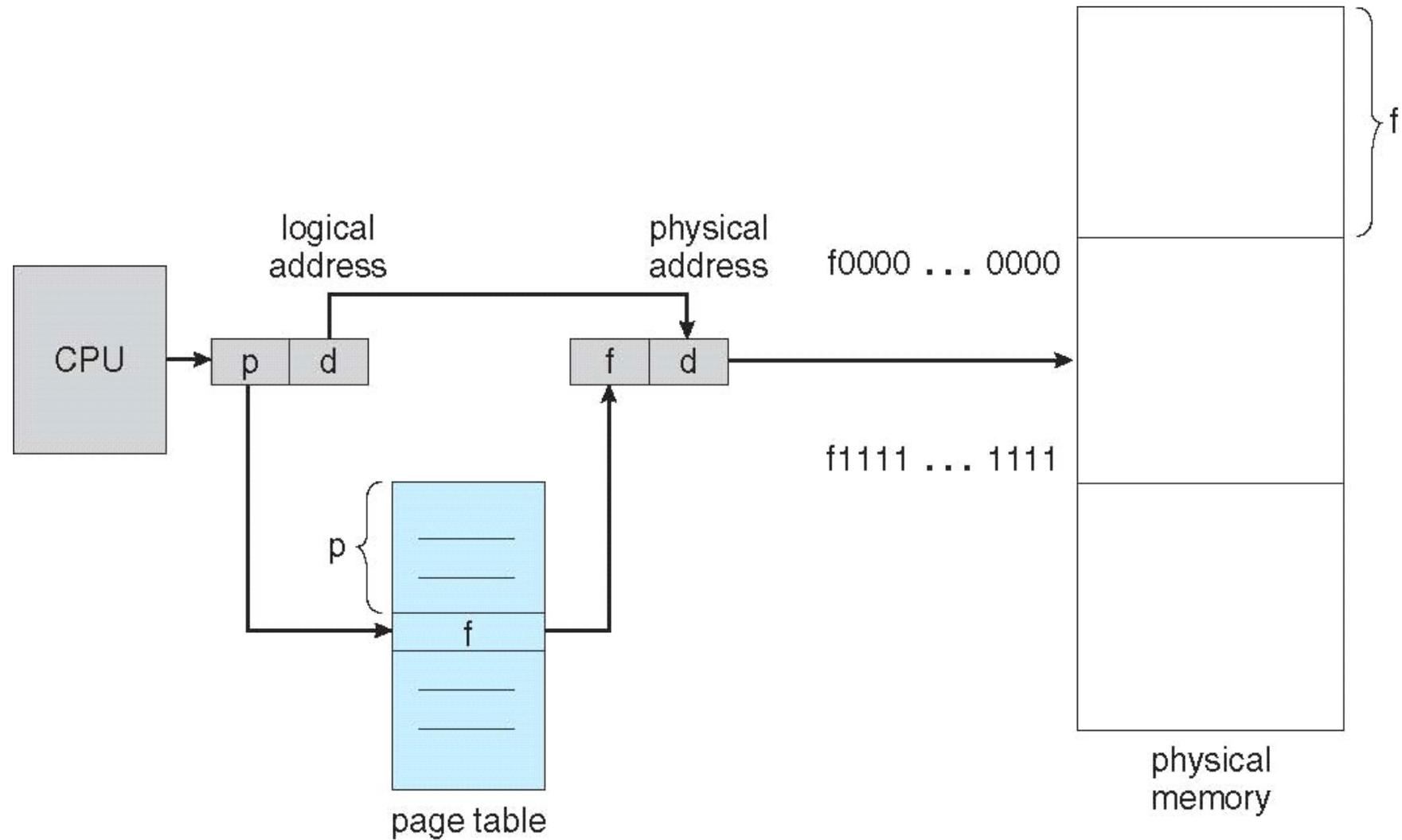
Supponendo una distribuzione uniforme delle dimensioni possibili P , si avrà una frammentazione interna media pari a $0,5 * F$ (in byte, per processo)

Dimensione delle pagine



- ◆ **Come scegliere la dimensione delle pagine?**
 - ◆ la dimensione delle pagine deve essere una potenza di due, per semplificare la trasformazione da indirizzi logici a indirizzi fisici
 - ◆ la scelta della dimensione deriva da un trade-off
 - ◆ con pagine troppo piccole, la tabella delle pagine cresce di dimensioni
 - ◆ con pagine troppo grandi, lo spazio di memoria perso per frammentazione interna può essere considerevole
 - ◆ valori tipici: 1KB, 2KB, 4KB

Architettura per paginazione



Implementazione della page table

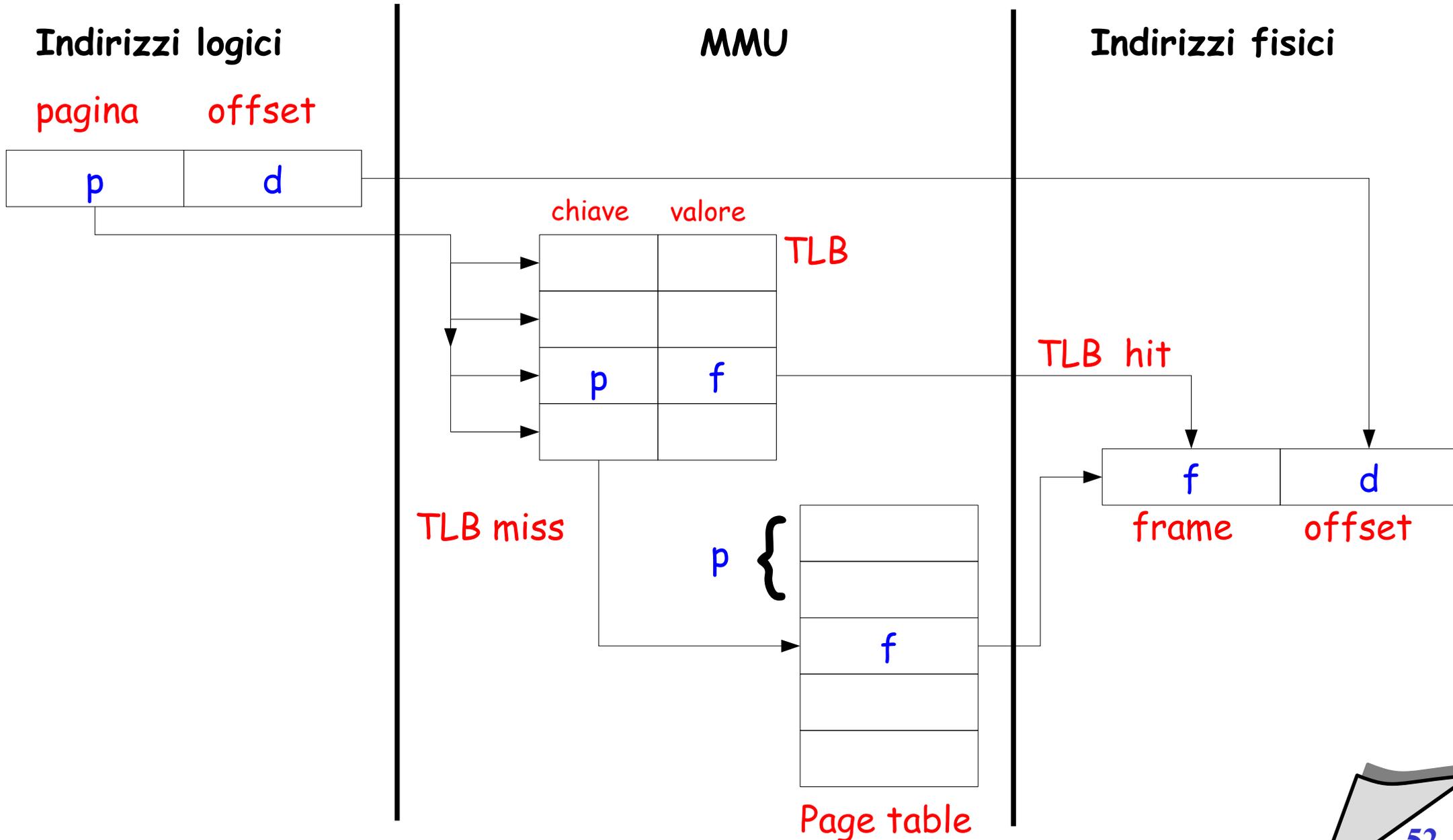
- ◆ **Dove mettere la tabella delle pagine?**
- ◆ **Soluzione 1: registri dedicati**
 - ◆ la tabella può essere contenuta in un insieme di registri ad alta velocità all'interno del modulo MMU (o della CPU)
 - ◆ problema: troppo costoso
 - ◆ esempio:
 - ◆ pagine di 4K, processore a 32 bit
 - ◆ numero di pagine nella page table: 1M (1.048.576)
- ◆ **Soluzione 2: totalmente in memoria**
 - ◆ **Page-table base register (PTBR)** punta all'indirizzo base della tabella
 - ◆ **Page-table length register (PTLR)** indica la lunghezza della tabella
 - ◆ problema: il numero di accessi in memoria è raddoppiato; ad ogni riferimento, bisognerebbe prima accedere alla tabella delle pagine, poi al dato

Translation lookaside buffer (TLB)

♦ Descrizione

- ♦ un TLB è costituito da un insieme di registri associativi ad alta velocità
- ♦ ogni registro è suddiviso in due parti, una chiave e un valore
- ♦ operazione di lookup
 - ♦ viene richiesta la ricerca di una chiave
 - ♦ la chiave viene confrontata simultaneamente con tutte le chiavi presenti nel buffer
 - ♦ se la chiave è presente (TLB hit), si ritorna il valore corrispondente
 - ♦ se la chiave non è presente (TLB miss), si utilizza la tabella in memoria

Translation lookaside buffer (TLB)



Translation lookaside buffer (TLB)

- Tempo di lookup = μ unità di tempo
 - Tipicamente $\mu < 10\%$ del tempo di accesso alla memoria principale t_a
- Hit ratio = π
 - Quante volte (in percentuale) una pagina viene trovata nel TLB
 - π legato alla dimensione del TLB

- Tempo di accesso effettivo (Effective Access Time – EAT)

$$EAT = \pi(\mu + t_a) + (1 - \pi)(\mu + 2t_a)$$

- Esempio: sia $\pi = 80\%$, $\mu = 20\text{ns}$, $t_a = 100\text{ns}$

$$EAT = 0.80 \times (20 + 100) + 0.20 \times (20 + 200) = 120\text{ns}$$

- Caso più realistico -> $\pi = 99\%$, $\mu = 10\text{ns}$, accesso in memoria = 100ns

$$EAT = 0.99 \times 110 + 0.01 \times 210 = 111\text{ns}$$

Translation lookaside buffer (TLB)



- ◆ **Note**

- ◆ il TLB agisce come memoria cache per le tabelle delle pagine
- ◆ il meccanismo del TLB (come tutti i meccanismi di caching) si basa sul principio di località
- ◆ l'hardware per TLB è costoso
- ◆ dimensioni dell'ordine 8-2048 registri

Principio di località (IMPORTANTE)

- ♦ **Enunciato (uno dei tanti):**
 - ♦ Durante l'esecuzione di un processo, è molto probabile che le istruzioni da eseguire si trovino in zone di memoria “vicine” a quella occupata dall'istruzione in esecuzione. Inoltre, è molto probabile che il processo faccia più volte riferimento alle stesse istruzioni.
- ♦ **“Principio” empirico, basato sulle osservazioni storiche**
- ♦ **Principio di località...**
 - ♦ ...temporale: quando un programma accede ad un dato o istruzione, c'è un'alta probabilità che nell'immediato futuro acceda alla stesso dato o istruzione.
 - ♦ ...spaziale: quando un programma accede ad un dato o istruzione in memoria, c'è un'alta probabilità che nell'immediato futuro acceda anche ai dati o istruzioni vicini in memoria a quelli appena letti.

Principio di località (IMPORTANTE)

- ◆ **Esempio (località spaziale):**

```
int a[10]={0,1,2,3,4,5,6,7,8,9};
int somma = 0;
for (i=0 ; i<10 < i++){
    somma += a[i]; //accesso ad array
}
```

- ◆ Supponendo di avere una memoria cache/TLB da 5 elementi, al primo accesso al vettore a[0] si avrà un “miss”, quindi il memory manager caricherà a[0] e i suoi 4 vicini.
- ◆ Quando si farà accesso ad a[5] si avrà un altro “miss”, e il MM caricherà a[5] e i suoi 4 vicini.
- ◆ Su 10 accessi in memoria, avremo avuto 2 “miss” e 8 “hit” (hit ratio = 80%).

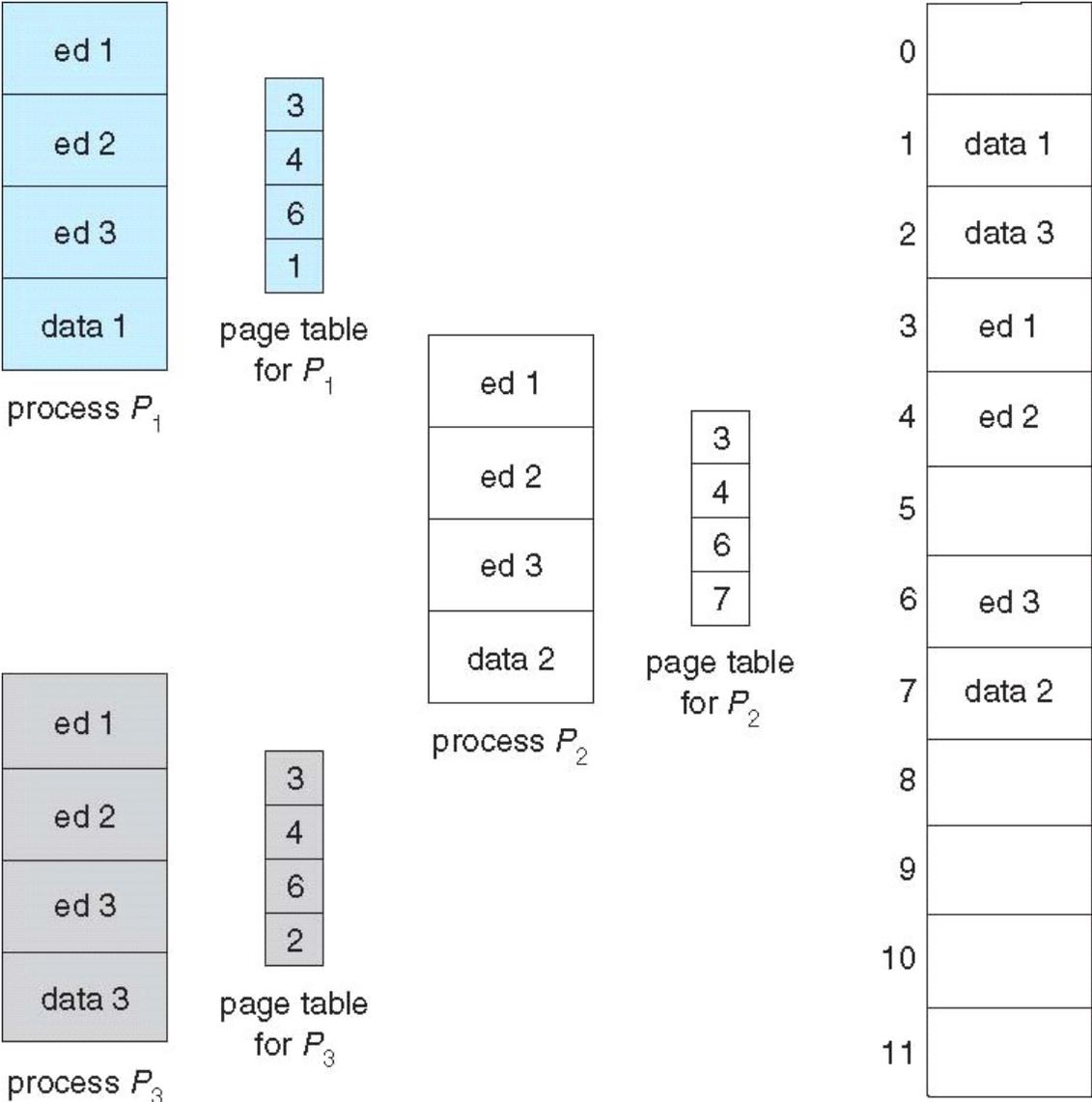
Principio di località (IMPORTANTE)

- ♦ **Esempio (località temporale):**
- ♦ In genere viene realmente eseguita solo una piccola gran parte del codice che un programma carica in memoria.
 - ♦ es.: errori, condizioni anomale, eccezioni, ecc.
- ♦ La località temporale si basa sull'osservazione che nella normale esecuzione di un programma, si accede molto spesso sempre alle stesse istruzioni.
- ♦ Su questa base, si sceglie di mantenere una copia di tali dati in memoria cache (o i loro indirizzi in un TLB) durante l'esecuzione del programma.
 - ♦ Es: strutture dati, variabili particolari o routines usate spesso.
- ♦ Obiettivo: aumentare il numero di “hit” rispetto al numero di “miss” (cioè **aumentare l'hit-ratio**)

Condivisione di pagine

- Usando la paginazione si può condividere codice comune.
- Codice condiviso
 - Una singola copia di codice a sola lettura (rientrante) code condivisa tra i processi (i.e., text editor, compilatore, browser).
 - Il codice condiviso deve apparire nella stessa locazione nello spazio degli indirizzi logici di tutti i processi.
- Codice privato e dati
 - Ogni processo mantiene una copia del codice privato e dei dati.
 - Le pagine possono stare in uno qualunque degli indirizzi logici.

Condivisione di pagine

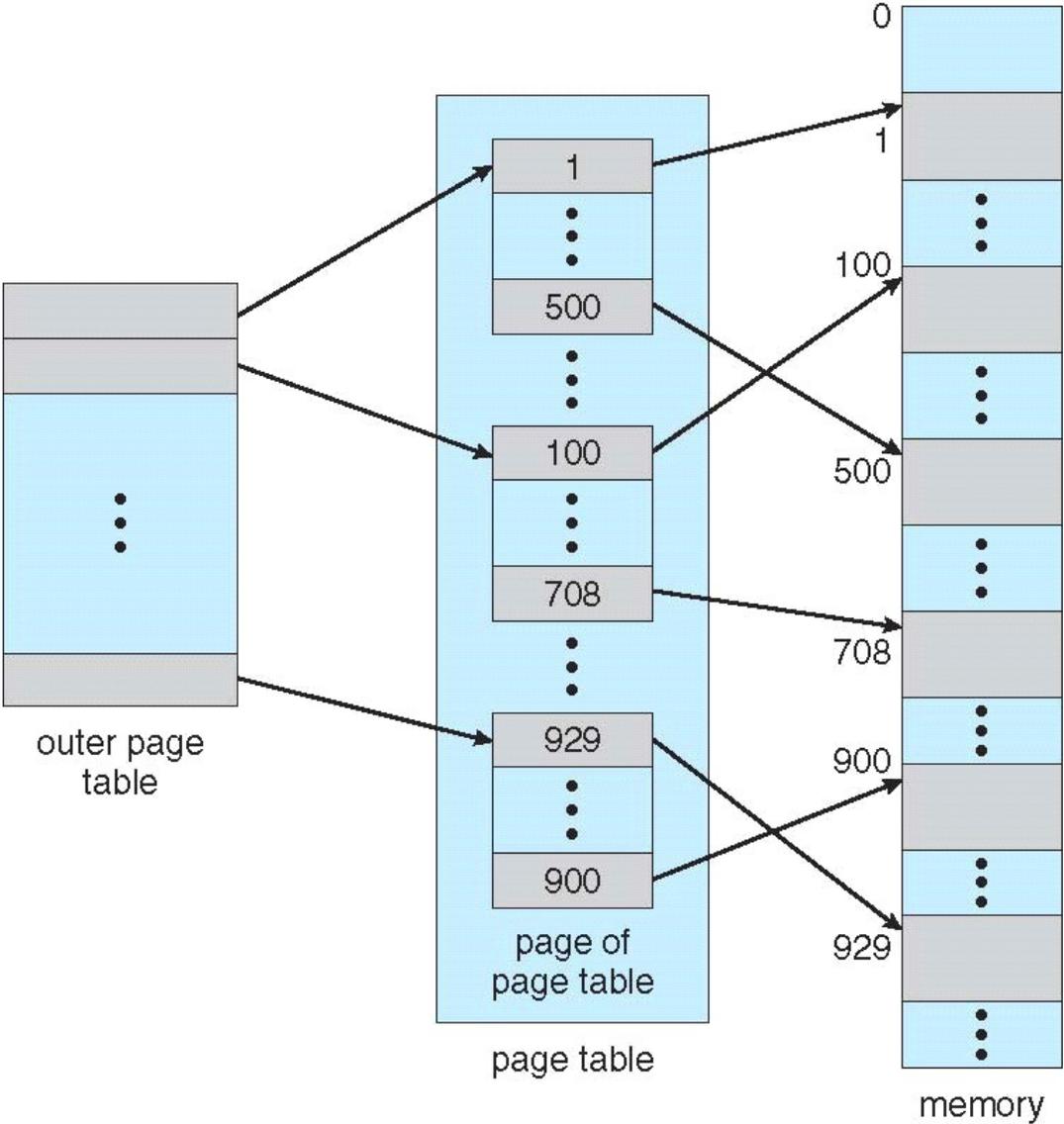


Struttura della tabella delle pagine



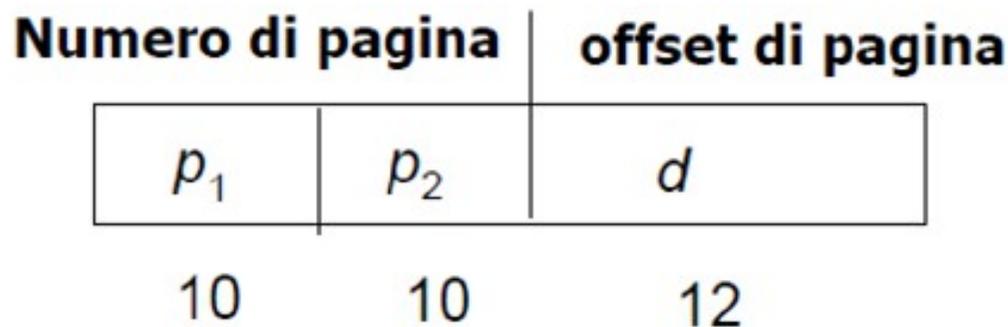
- La tabella delle pagine risiede in memoria
- Per sistemi a 32 bit con pagine da 4kB (2^{12}), la tabella delle pagine ha 2^{20} elementi (1.048.576)
 - Se ogni elemento è da 4 Byte → la tabella richiede 4MB
 - ...per processo!
 - Serve spazio contiguo per ogni tabella
- Soluzioni:
 - paginare la tabella delle pagine → **paginazione multilivello o gerarchica**
 - **Hash table**
 - **Tabella delle pagine invertita**

Paginazione multilivello



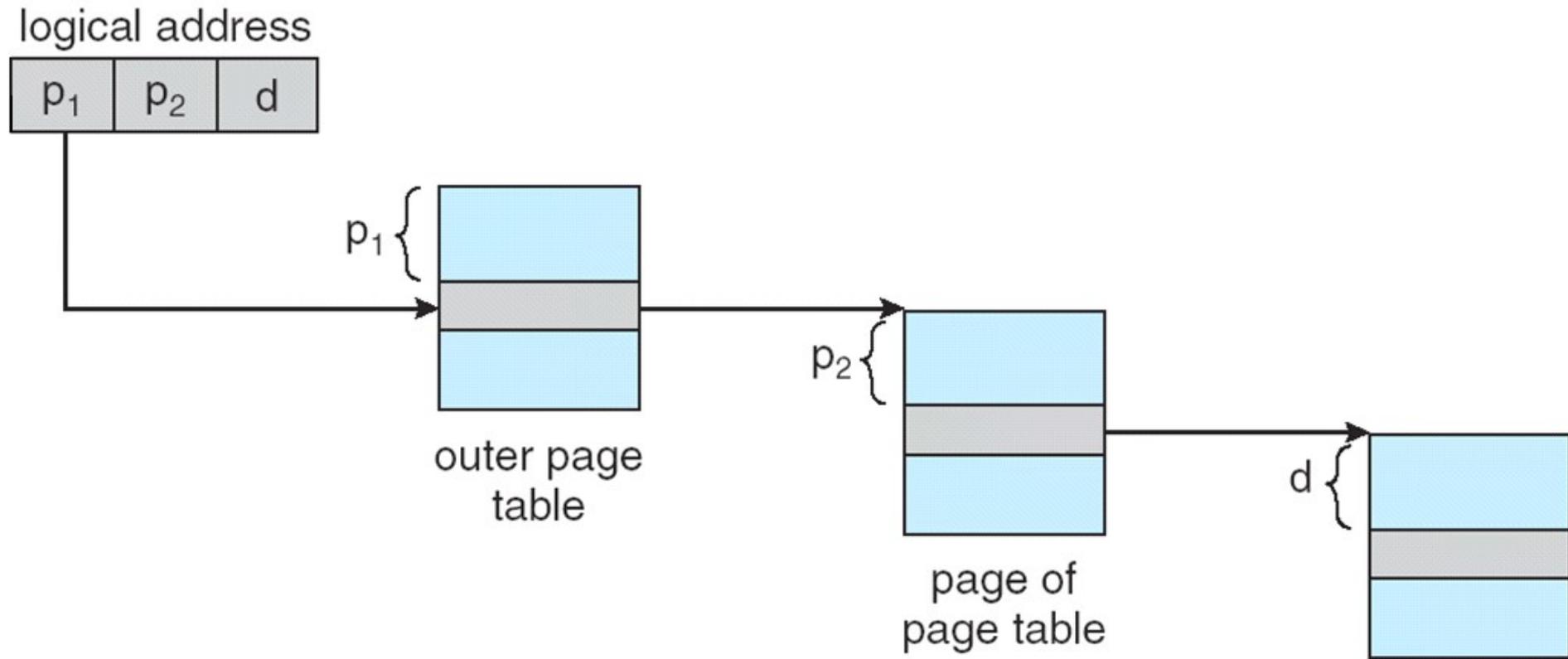
Paginazione multilivello

- Un indirizzo logico (su una macchina a 32 bit con pagine di 4KB) è divisa in:
 - un numero di pagina di 20 bit.
 - un offset di pagina di 12 bit.
- Poiché la tabella delle pagine è composta a sua volta da più pagine, il numero di pagina è diviso da:
 - ❖ un numero di pagina di 10 bit.
 - ❖ un offset di pagina di 10 bit.
- Così un indirizzo logico sarà composto come :

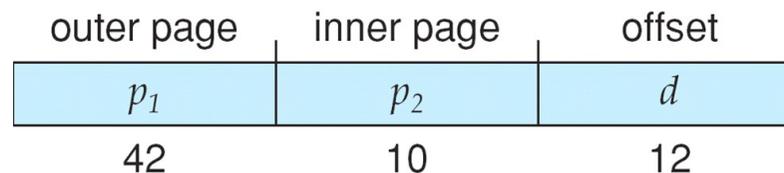


dove p_1 è un indice nella tabella esterna, e p_2 è lo spiazzamento nella tabella interna.

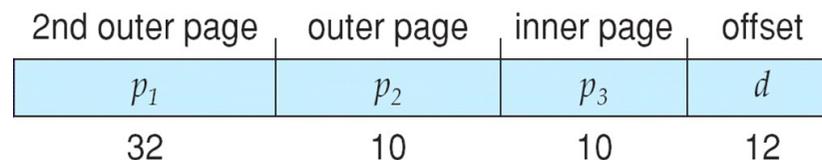
Paginazione multilivello



Paginazione multilivello in sistemi a 64 bit



- In sistemi a 64 bit la lunghezza della tabella esterna rimane ingestibile anche con tre livelli di paginazione



- Si usano 4 livelli
 - Nei sistemi moderni, nonostante questa complicazione, si riescono ad ottenere buone prestazioni mantenendo la flessibilità offerta dalla soluzione
 - Principio di località

Tabella delle pagine invertita

- Usando questo schema la tabella delle pagine contiene una entry per ogni pagina reale in memoria.
- Ogni entry consiste dell'indirizzo virtuale della pagina e dell'identificatore del processo che possiede quella pagina.
- Diminuisce la memoria necessaria per memorizzare le tabelle delle pagine, **ma** aumenta il tempo per cercare la tabella quando viene fatto un riferimento ad una pagina.
- Si può usare una tabella *hash* per limitare la ricerca a poche entry della tabella delle pagine.

Tabella delle pagine invertita

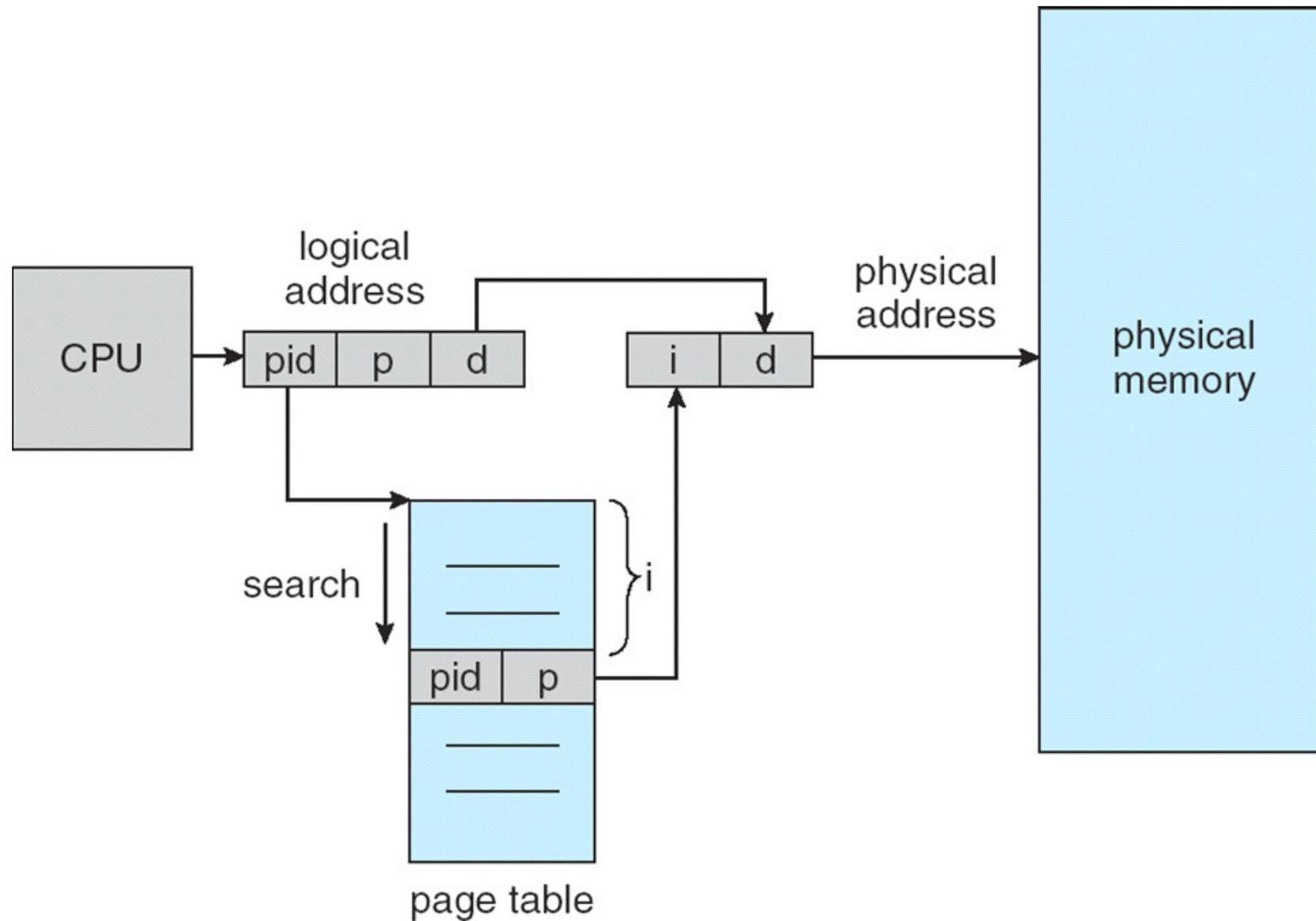
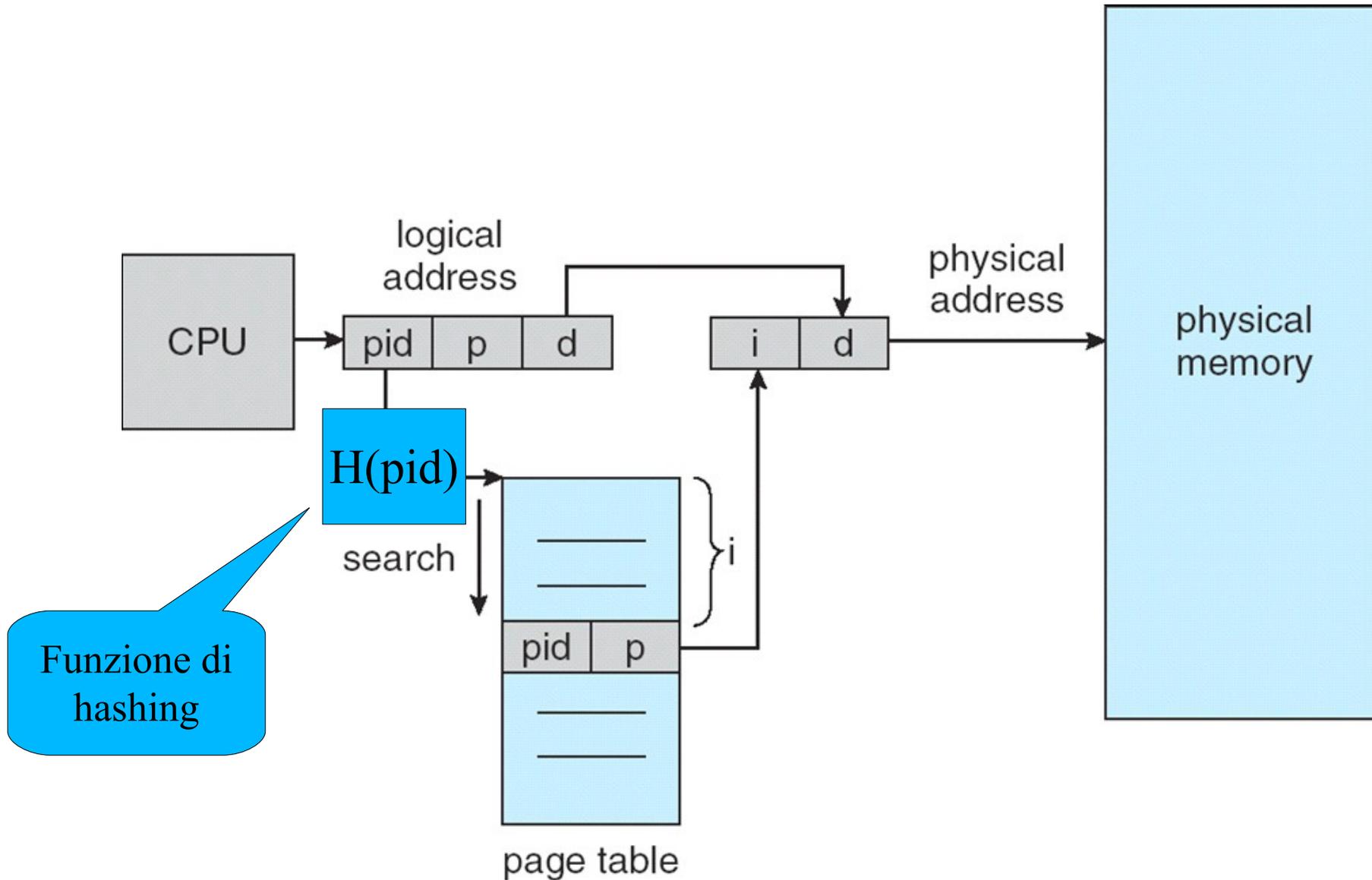


Tabella delle pagine invertita con hashing



Segmentazione



- ◆ **In un sistema con segmentazione**
 - ◆ la memoria associata ad un programma è suddivisa in aree differenti dal punto di vista funzionale
- ◆ **Esempio**
 - ◆ aree text:
 - ◆ contengono il codice eseguibile
 - ◆ sono normalmente in sola lettura
 - ◆ possono essere condivise tra più processi (codice reentrant)
 - ◆ aree dati
 - ◆ possono essere condivise oppure no
 - ◆ area stack
 - ◆ read/write, non può assolutamente essere condivisa

Segmentazione



- ◆ **In un sistema basato su segmentazione**
 - ◆ uno spazio di indirizzamento logico è dato da un insieme di segmenti
 - ◆ un segmento è un'area di memoria (logicamente contigua) contenente elementi tra loro affini
 - ◆ ogni segmento è caratterizzato da un *nome* (normalmente un indice) e da una *lunghezza*
 - ◆ ogni riferimento di memoria è dato da una coppia *<nome segmento, offset>*
- ◆ **Spetta al programmatore o al compilatore la suddivisione di un programma in segmenti**

Segmentazione vs Paginazione

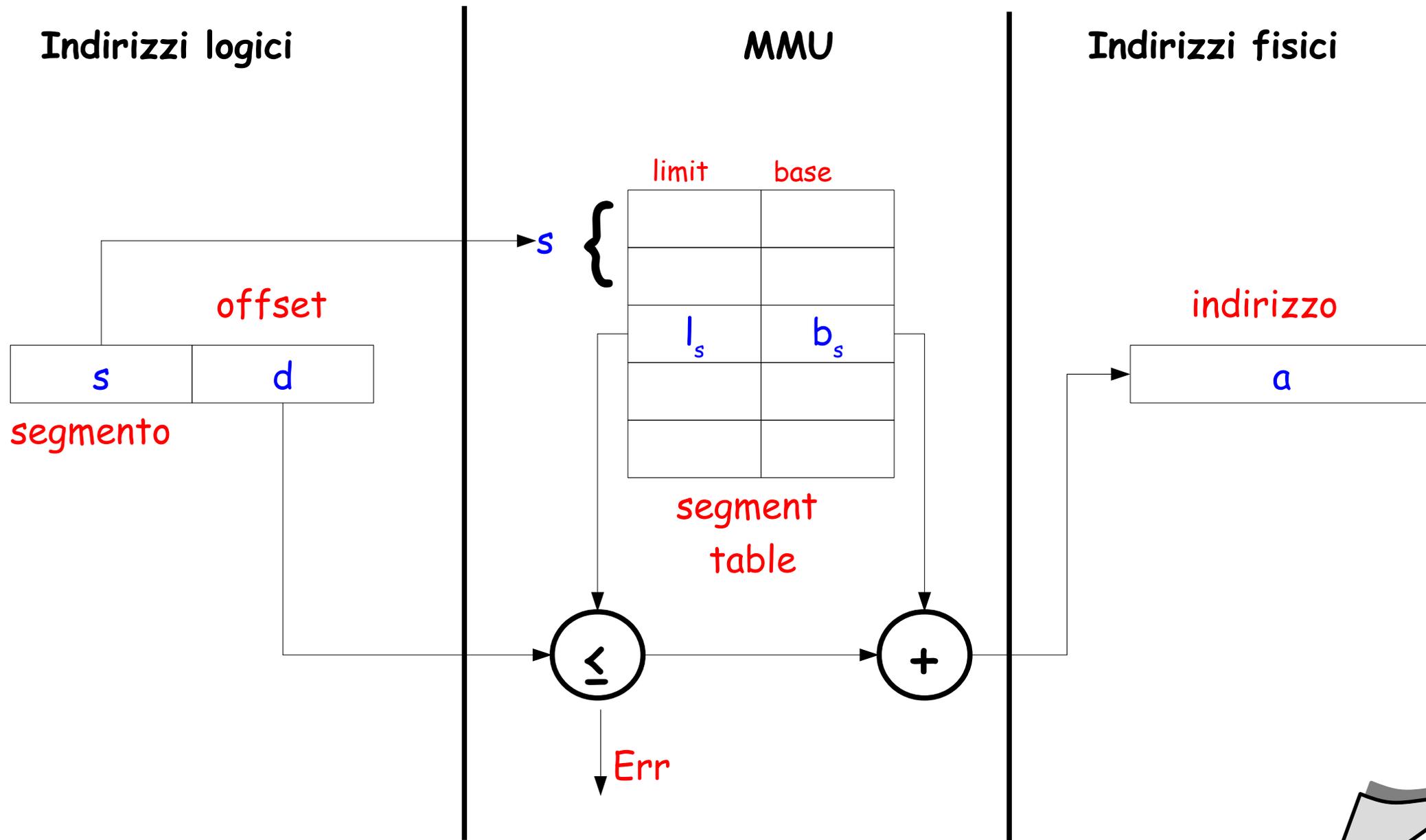
♦ Paginazione

- ♦ la divisione in pagine è automatica.
- ♦ le pagine hanno dimensione fissa
- ♦ le pagine possono contenere informazioni disomogenee (ad es. sia codice sia dati)
- ♦ una pagina ha un indirizzo
- ♦ dimensione tipica della pagina: 1-4 KB

♦ Segmentazione

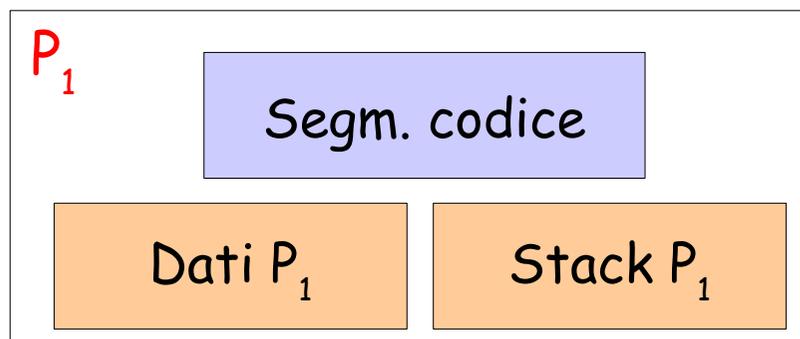
- ♦ la divisione in segmenti spetta al programmatore.
- ♦ i segmenti hanno dimensione variabile
- ♦ un segmento contiene informazioni omogenee per tipo di accesso e permessi di condivisione
- ♦ un segmento ha un nome.
- ♦ dimensione tipica di un segmento: 64KB - 1MB

Supporto hardware per segmentazione

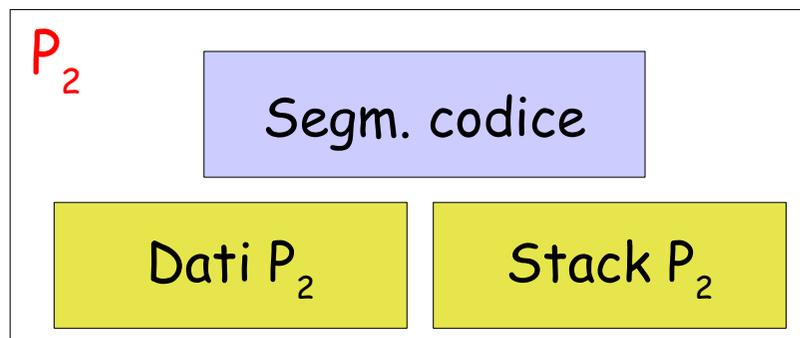


Segmentazione e condivisione

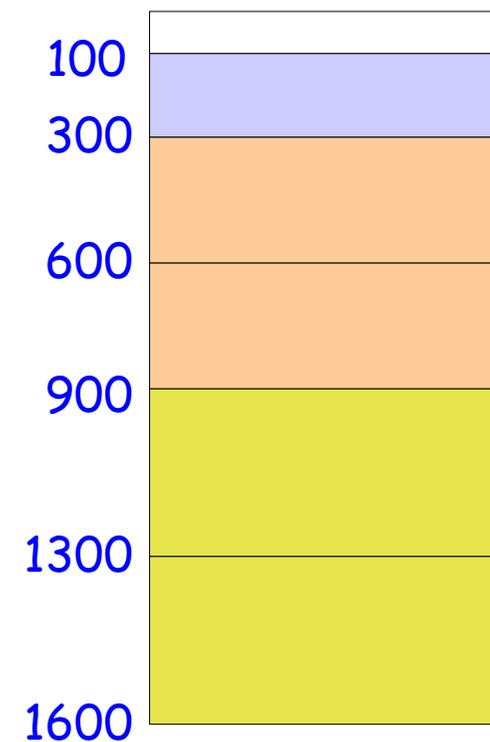
- La segmentazione consente la condivisione di codice e dati
- Esempio: editor condiviso



Code	100	200
Data	300	300
Stack	600	300



Code	100	200
Data	900	400
Stack	1300	400



Segmentazione e frammentazione



- ◆ **Problema**
 - ◆ allocare segmenti di dimensione variabile è del tutto equivalente al problema di allocare in modo contiguo la memoria dei processi
 - ◆ è possibile utilizzare
 - ◆ tecniche di allocazione dinamica (e.g., First Fit)
 - ◆ compattazione
- ◆ **ma così torniamo ai problemi precedenti!**

Segmentazione e paginazione

- ◆ **Segmentazione + paginazione**

- ◆ è possibile utilizzare il metodo della paginazione combinato al metodo della segmentazione
- ◆ ogni segmento viene suddiviso in pagine che vengono allocate in frame liberi della memoria (non necessariamente contigui)

- ◆ **Requisiti hardware**

- ◆ la MMU deve avere sia il supporto per la segmentazione sia il supporto per la paginazione

- ◆ **Benefici**

- ◆ sia quelli della segmentazione (condivisione, protezione)
- ◆ sia quelli della paginazione (no frammentazione esterna)

Memoria virtuale



- ◆ **Definizione**

- ◆ è la tecnica che permette l'esecuzione di processi che non sono completamente in memoria

- ◆ **Considerazioni**

- ◆ permette di eseguire in concorrenza processi che nel loro complesso (o anche singolarmente) hanno necessità di memoria maggiore di quella disponibile
- ◆ la memoria virtuale può diminuire le prestazioni di un sistema se implementata (e usata) nel modo sbagliato

Memoria virtuale



- ♦ **Requisiti di un'architettura di Von Neumann**
 - ♦ le istruzioni da eseguire e i dati su cui operano devono essere in memoria
- ♦ **ma....**
 - ♦ non è necessario che l'intero spazio di indirizzamento logico di un processo sia in memoria
 - ♦ i processi non utilizzano tutto il loro spazio di indirizzamento *contemporaneamente*
 - ♦ routine di gestione errore
 - ♦ strutture dati allocate con dimensioni massime ma utilizzate solo parzialmente
 - ♦ passi di avanzamento di un programma (e.g. compilatore a due fasi)

Memoria virtuale



♦ Implementazione

- ♦ ogni processo ha accesso ad uno *spazio di indirizzamento virtuale* che può essere più grande di quello fisico
- ♦ gli indirizzi virtuali
 - ♦ possono essere mappati su indirizzi fisici della memoria principale
 - ♦ oppure, possono essere mappati su memoria secondaria
- ♦ in caso di accesso ad indirizzi virtuali mappati in memoria secondaria:
 - ♦ i dati associati vengono trasferiti in memoria principale
 - ♦ se la memoria è piena, si sposta in memoria secondaria i dati contenuti in memoria principale che sono considerati meno utili

Memoria virtuale



- ♦ **Paginazione a richiesta (*demand paging*)**
 - ♦ si utilizza la tecnica della paginazione, ammettendo però che alcune pagine possano essere in memoria secondaria
- ♦ **Nella tabella delle pagine**
 - ♦ si utilizza un bit (*v*, per valid) che indica se la pagina è presente in memoria centrale oppure no
- ♦ **Quando un processo tenta di accedere ad un pagina non in memoria**
 - ♦ il processore genera un trap (*page fault*)
 - ♦ un componente del s.o. (*pager*) si occupa di caricare la pagina mancante in memoria, e di aggiornare di conseguenza la tabella delle pagine

Memoria virtuale - Esempio

0	A
1	B
2	C
3	D
4	E
5	F
6	G
7	H

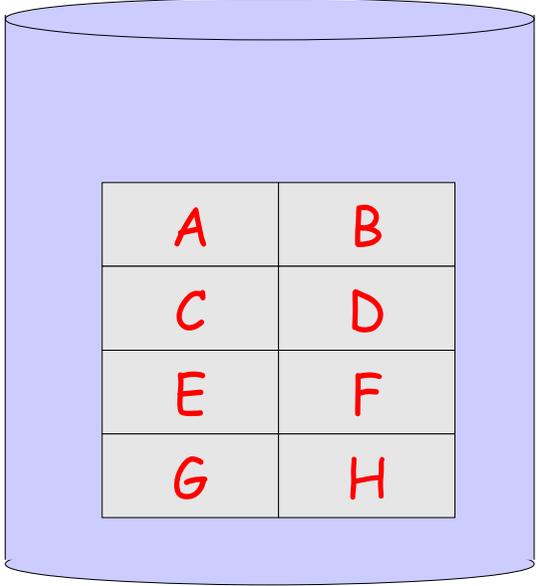
Memoria Logica

	frame	bit valid/ invalid
0	4	v
1		i
2	6	v
3		i
4		i
5	1	v
6		i
7		i

Page Table

0	
1	F
2	
3	
4	A
5	
6	C
7	
8	
9	
10	
11	

Memoria principale



Memoria secondaria

Pager/swapper



- ◆ **Swap**

- ◆ con questo termine si intende l'azione di copiare l'intera area di memoria usata da un processo
 - ◆ dalla memoria secondaria alla memoria principale (*swap-in*)
 - ◆ dalla memoria principale alla memoria secondaria (*swap-out*)
- ◆ era una tecnica utilizzata nel passato quando demand paging non esisteva

- ◆ **Paginazione su richiesta**

- ◆ può essere vista come una tecnica di swap di tipo lazy (pigro)
- ◆ viene caricato solo ciò che serve

Pager/swapper



- ◆ **Per questo motivo**

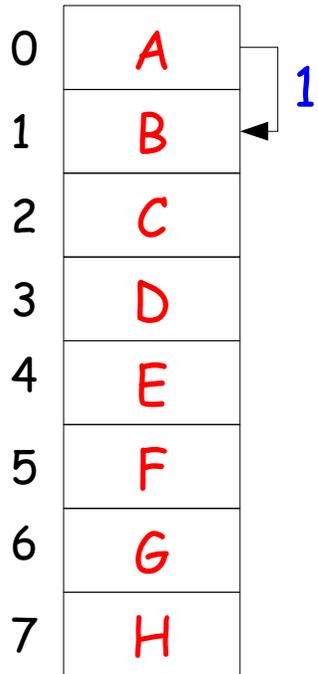
- ◆ alcuni sistemi operativi indicano il pager con il nome di *swapper*
- ◆ è da considerarsi una terminologia obsoleta

- ◆ **Nota**

- ◆ però utilizziamo il termine *swap area* per indicare l'area del disco utilizzata per ospitare le pagine in memoria secondaria

Gestione dei page fault

- Supponiamo che il codice in pagina 0 faccia riferimento alla pagina 1

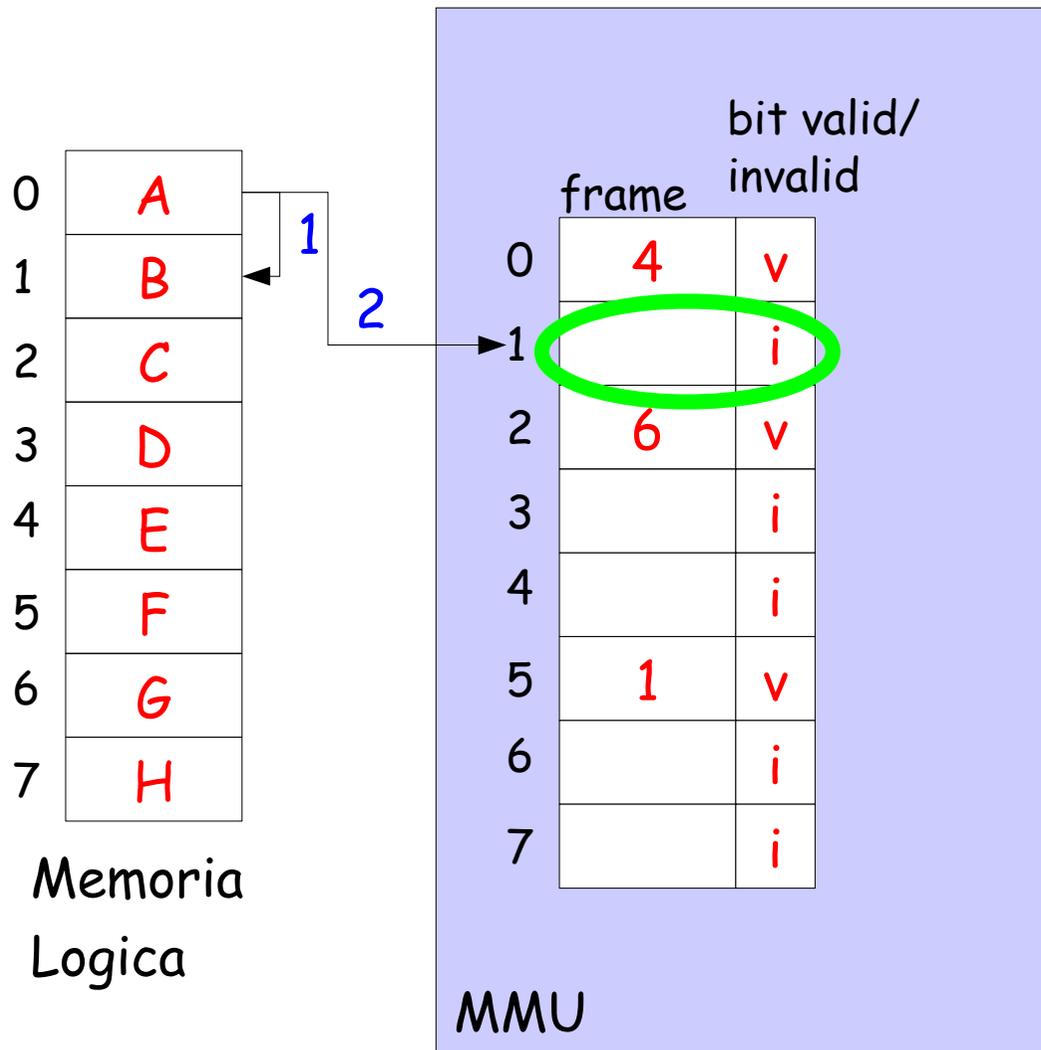


Memoria

Logica

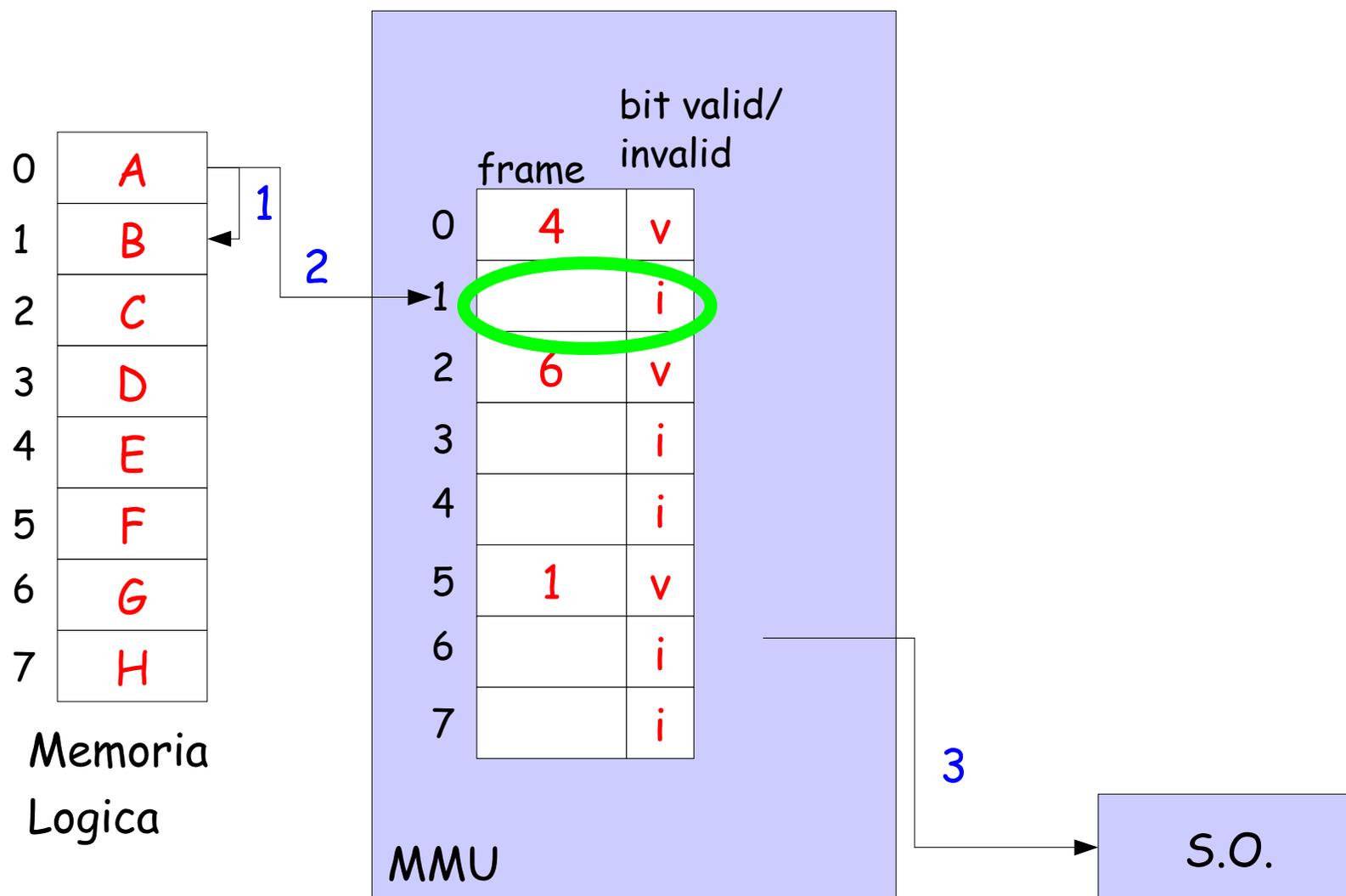
Gestione dei page fault

- La MMU scopre che la pagina 1 non è in memoria principale



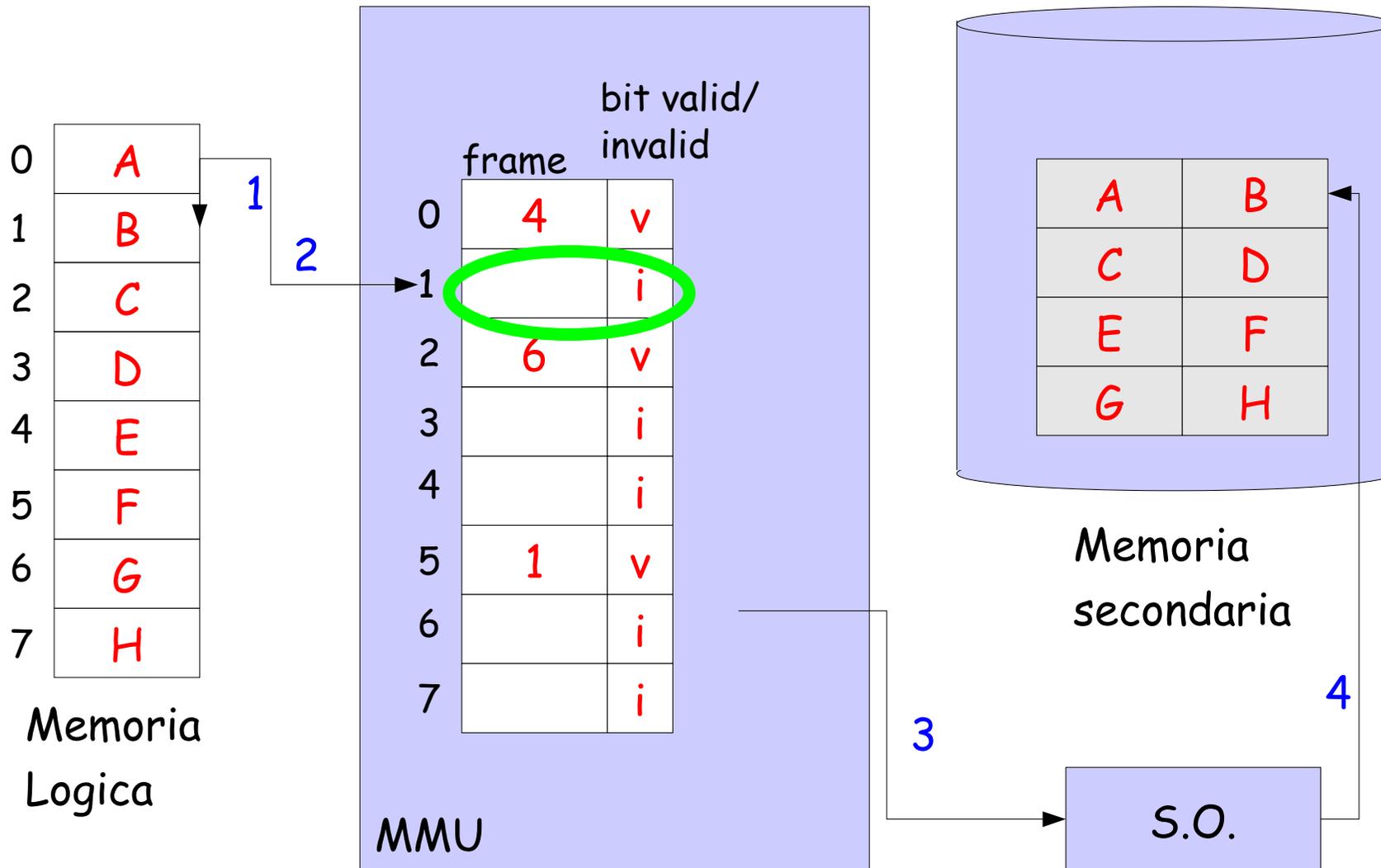
Gestione dei page fault

- Viene generato un trap "page fault", che viene catturato dal s.o.



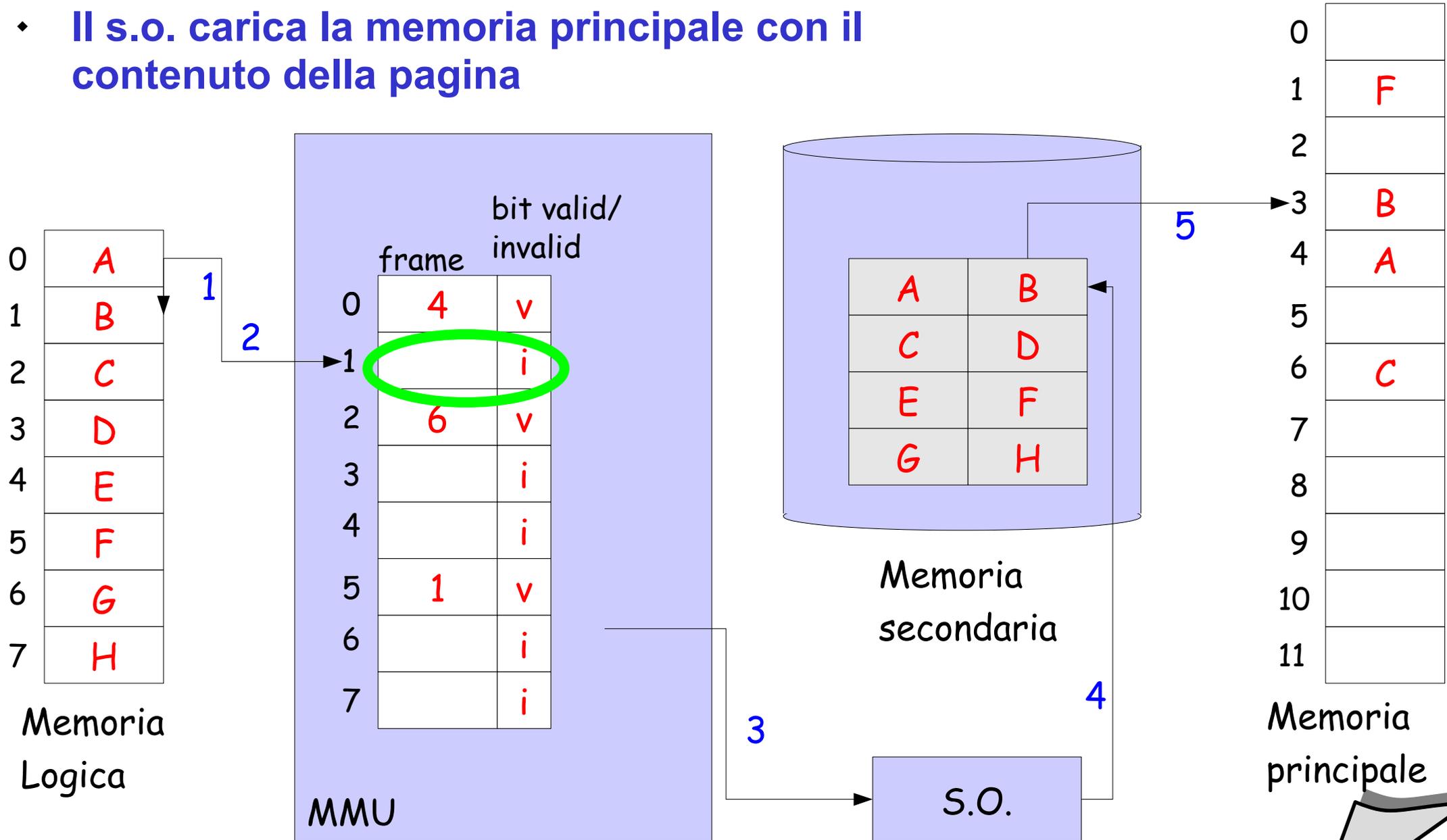
Gestione dei page fault

- Il s.o. cerca in memoria secondaria la pagina da caricare



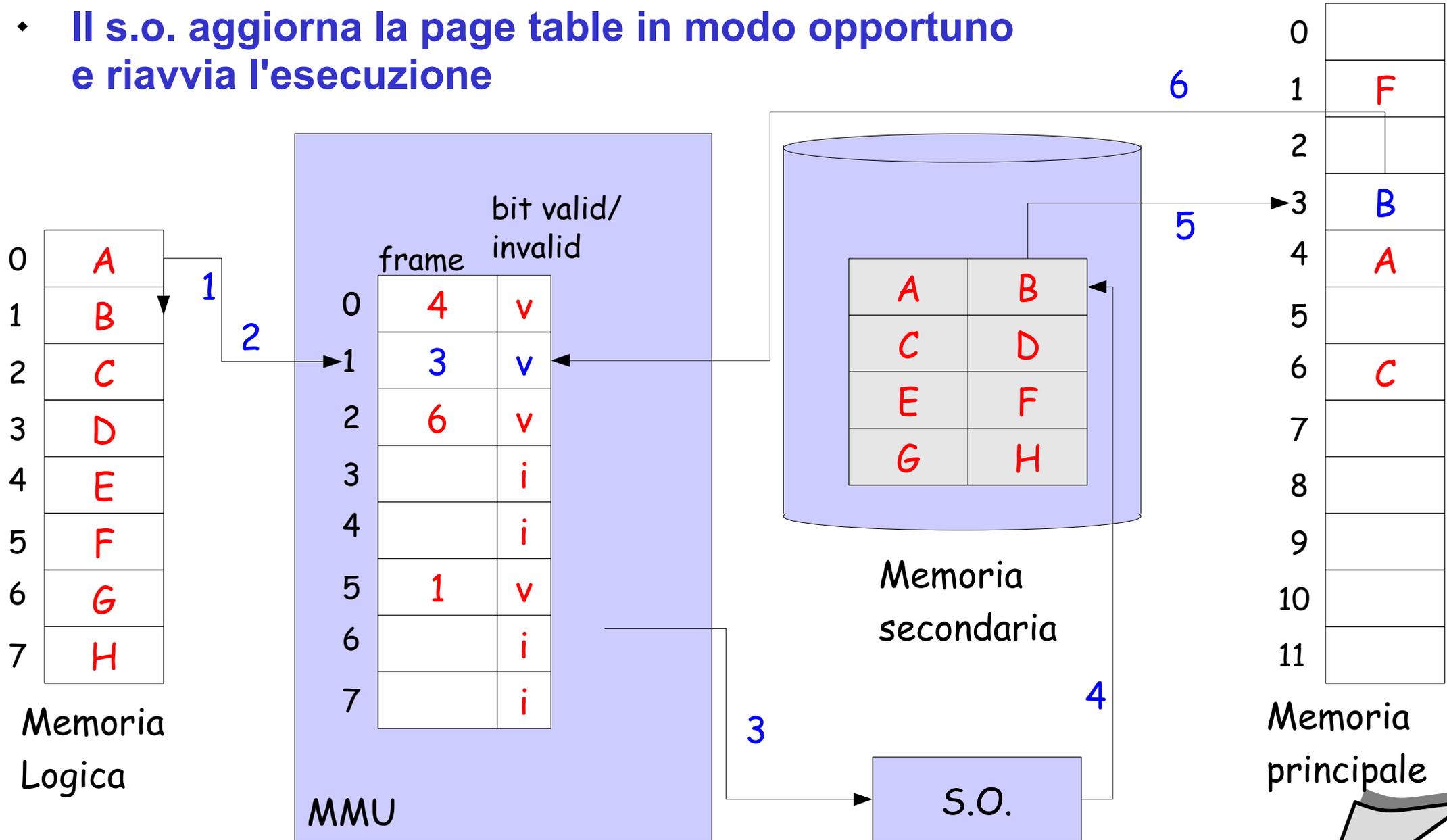
Gestione dei page fault

- Il s.o. carica la memoria principale con il contenuto della pagina



Gestione dei page fault

- Il s.o. aggiorna la page table in modo opportuno e riavvia l'esecuzione



Gestione dei page fault



- ♦ **Cosa succede in mancanza di frame liberi?**
 - ♦ occorre "liberarne" uno
 - ♦ la pagina vittima deve essere la meno "utile"
- ♦ **Algoritmi di sostituzione o rimpiazzamento**
 - ♦ la classe di algoritmi utilizzati per selezionare la pagina da sostituire

Algoritmo del meccanismo di demand paging



- ♦ Individua la pagina in memoria secondaria
- ♦ Individua un frame libero
- ♦ Se non esiste un frame libero
 - ♦ richiama algoritmo di rimpiazzamento
 - ♦ aggiorna la tabella delle pagine (invalida pagina "vittima")
 - ♦ se la pagina "vittima" è stata variata, scrive la pagina sul disco
 - ♦ aggiorna la tabella dei frame (frame libero)
- ♦ Aggiorna la tabella dei frame (frame occupato)
- ♦ Leggi la pagina da disco (quella che ha provocato il fault)
- ♦ Aggiorna la tabella delle pagine
- ♦ Riattiva il processo

Algoritmi di rimpiazzamento



- ◆ **Obiettivi**

- ◆ minimizzare il numero di page fault (→ perché?)

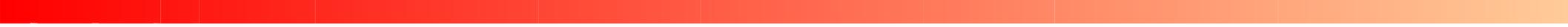
- ◆ **Valutazione**

- ◆ gli algoritmi vengono valutati esaminando come si comportano quando applicati ad una *stringa di riferimenti* in memoria

- ◆ **Stringhe di riferimenti**

- ◆ possono essere generate esaminando il funzionamento di programmi reali o con un generatore di numeri random

Algoritmi di rimpiazzamento



- ◆ **Nota:**

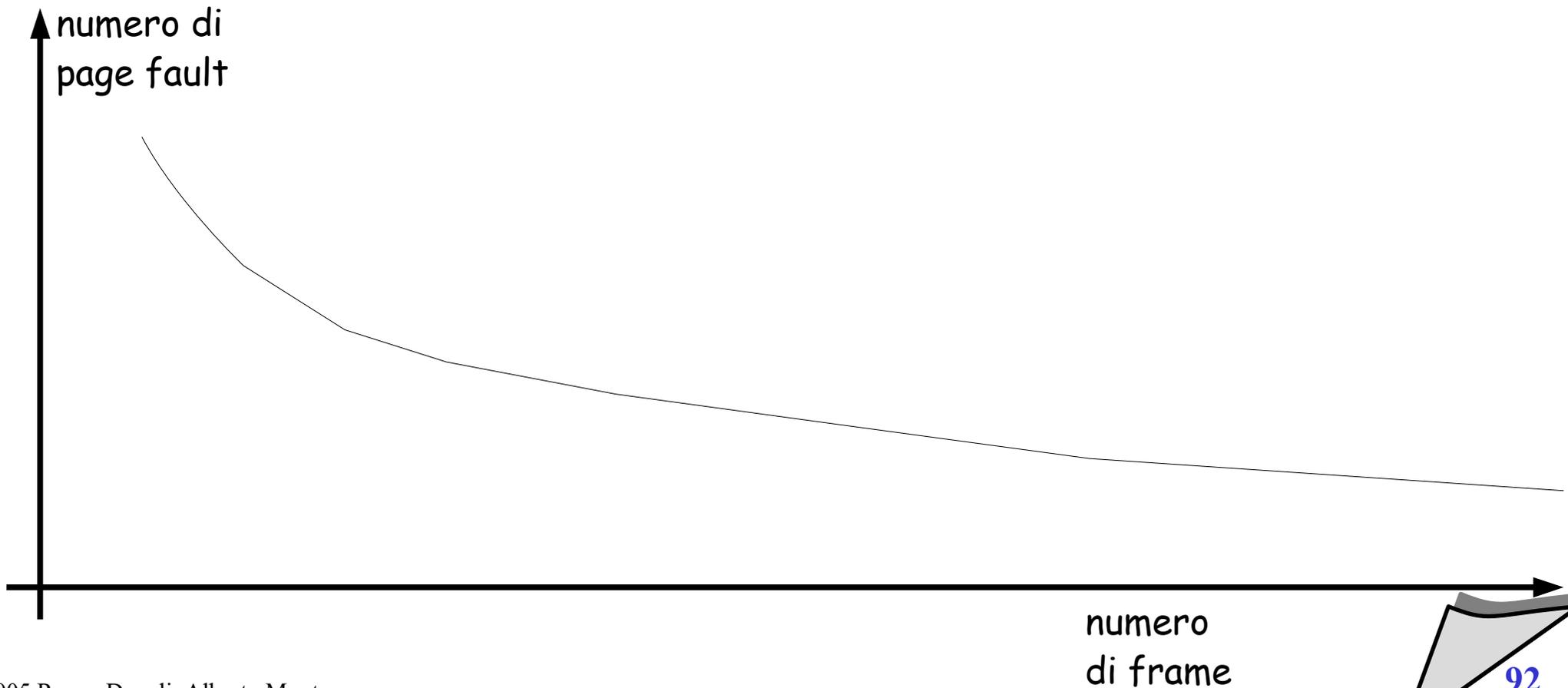
- ◆ la stringa di riferimenti può essere limitata ai numeri di pagina, in quanto non siamo interessati agli offset

- ◆ **Esempio**

- ◆ stringa di riferimento completa (in esadecimale):
 - ◆ 71,0a,13,25,0a,3f,0c,4f,21,30,00,31,21,1a,2b,03,1a,77,11
- ◆ stringa di riferimento delle pagine (in esadecimale, con pagine di 16 byte)
 - ◆ 7,0,1,2,0,3,0,4,2,3,0,3,2,1,2,0,1,7,1

Algoritmi di rimpiazzamento

- ♦ **Andamento dei page fault in funzione del numero di frame**
 - ♦ ci si aspetta un grafo monotono decrescente...
 - ♦ ma non sempre è così



Algoritmo FIFO



- ◆ **Descrizione**

- ◆ quando c'è necessità di liberare un frame viene individuato come “vittima” il frame che per primo fu caricato in memoria

- ◆ **Vantaggi**

- ◆ semplice, non richiede particolari supporti hardware

- ◆ **Svantaggi**

- ◆ vengono talvolta scaricate pagine che sono sempre utilizzate

Algoritmo FIFO - Esempio 1

Caratteristiche

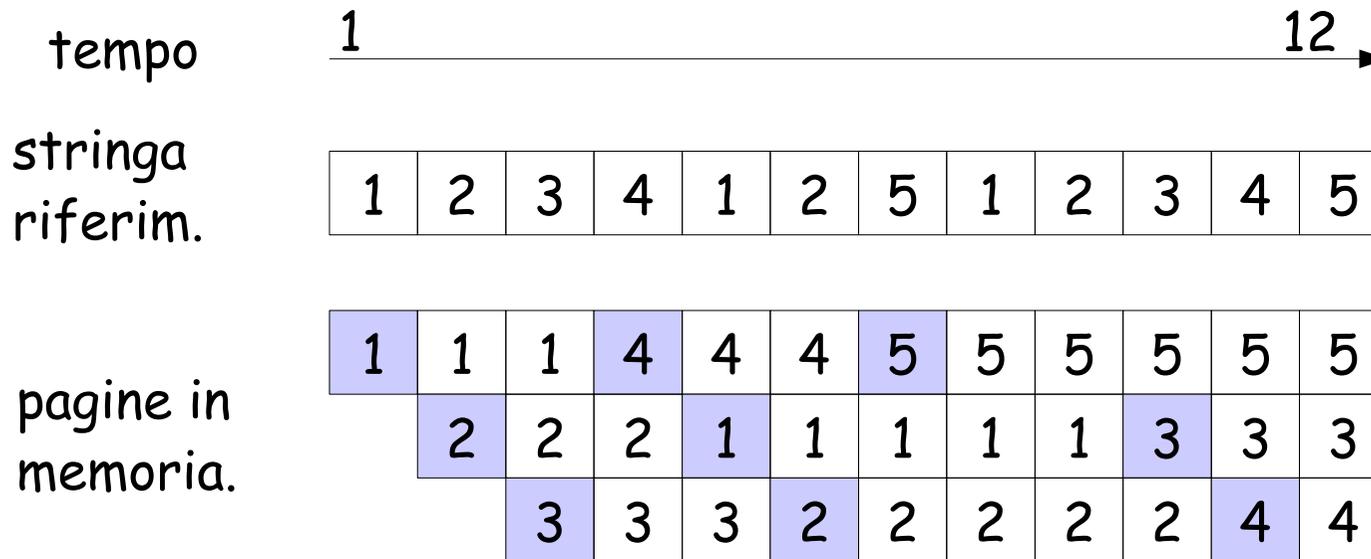
- numero di frame in memoria: 3
- numero di page fault: 15 (su 20 accessi in memoria)

tempo	1 20																				
stringa riferim.	7	0	1	2	0	3	0	4	2	3	0	3	2	1	2	0	1	7	0	1	
pagine in memoria.	7	7	7	2	2	2	2	4	4	4	0	0	0	0	0	0	0	7	7	7	
		0	0	0	0	3	3	3	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	0	0
			1	1	1	1	0	0	0	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2

Algoritmo FIFO - Esempio 2

- **Caratteristiche**

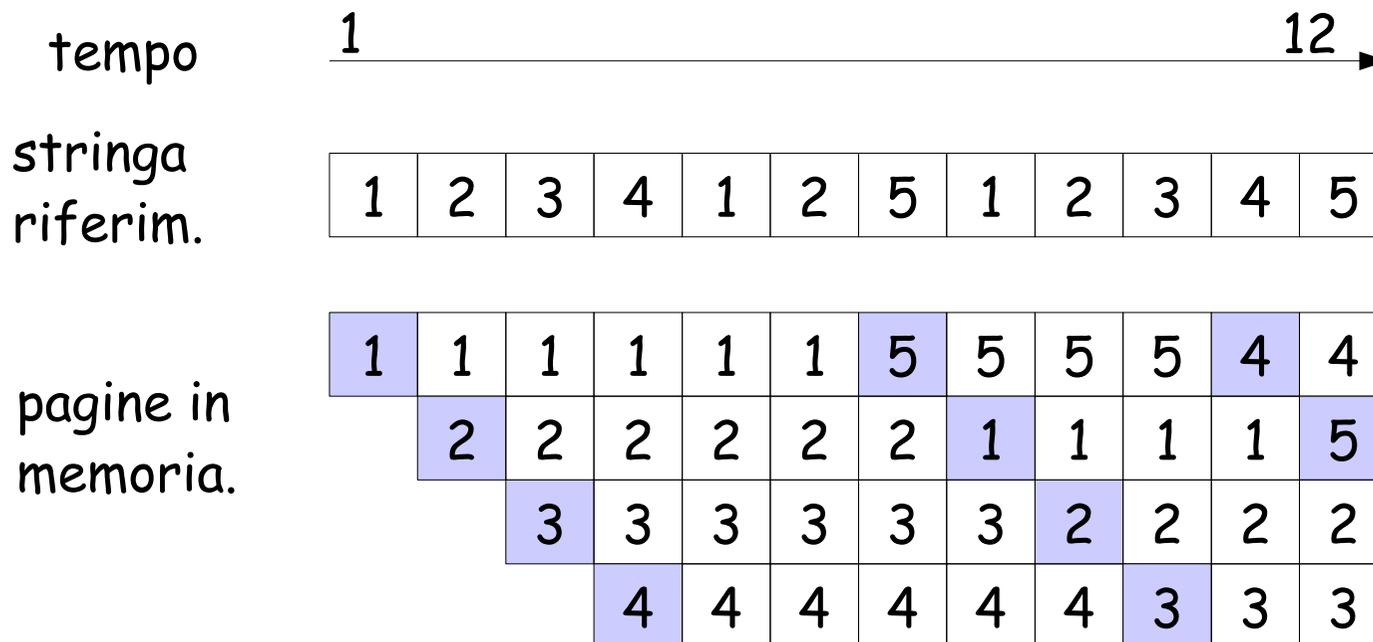
- numero di frame in memoria: 3
- numero di page fault: 9 (su 12 accessi in memoria)



Algoritmo FIFO - Esempio 3

♦ Caratteristiche

- ♦ numero di frame in memoria: 4
- ♦ numero di page fault: 10! (su 12 accessi in memoria)
- ♦ il numero di page fault è aumentato!



Anomalia di Belady

- ◆ In alcuni algoritmi di rimpiazzamento:
 - ◆ non è detto che aumentando il numero di frame il numero di page fault diminuisca (e.g., FIFO)
- ◆ Questo fenomeno indesiderato si chiama **Anomalia di Belady**



Algoritmo MIN - Ottimale

- ◆ **Descrizione**

- ◆ seleziona come pagina vittima una pagina che non sarà più acceduta o la pagina che verrà acceduta nel futuro più lontano

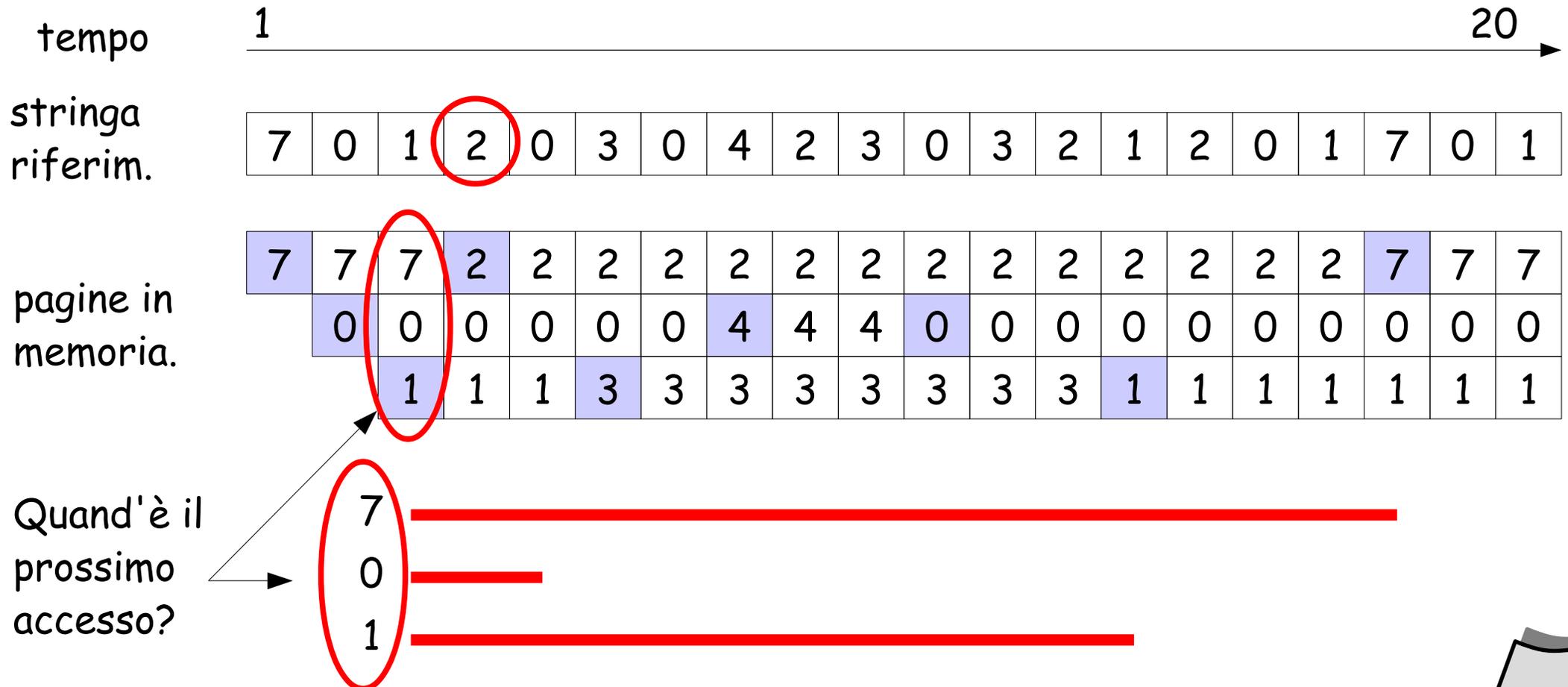
- ◆ **Considerazioni**

- ◆ è ottimale perché fornisce il minimo numero di page fault
- ◆ è un algoritmo teorico perché richiederebbe la conoscenza a priori della stringa dei riferimenti futuri del programma
- ◆ viene utilizzato a posteriori come paragone per verificare le performance degli algoritmi di rimpiazzamento reali

Algoritmo MIN - Esempio

Caratteristiche

- numero di frame in memoria: 3
- numero di page fault: 9 (su 20 accessi in memoria)



Algoritmo LRU (Least Recently Used)



- ◆ **Descrizione**

- ◆ seleziona come pagina vittima la pagina che è stata usata meno recentemente nel passato

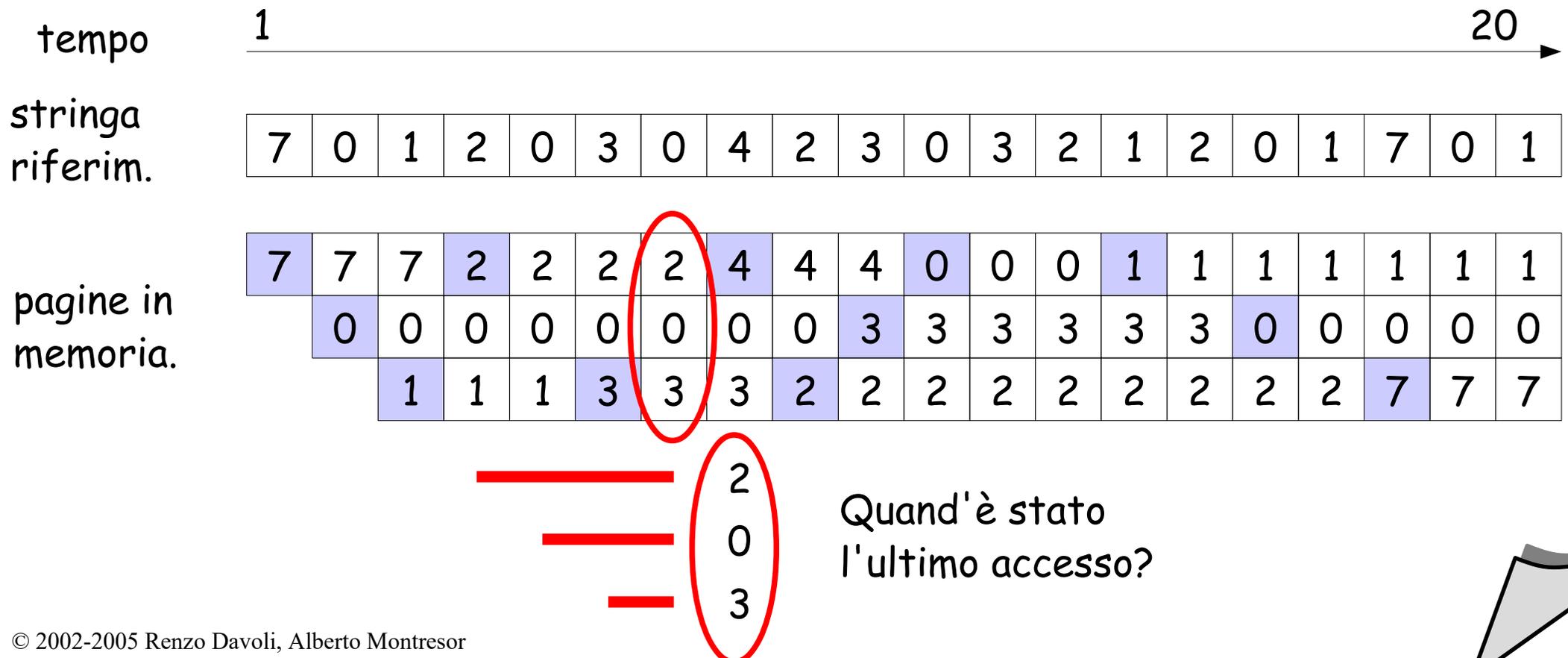
- ◆ **Considerazioni**

- ◆ è basato sul presupposto che la distanza tra due riferimenti successivi alla stessa pagina non vari eccessivamente
- ◆ stima la distanza nel futuro utilizzando la distanza nel passato

Algoritmo LRU - Esempio

Caratteristiche

- numero di frame in memoria: 3
- numero di page fault: 12 (su 20 accessi in memoria)



Algoritmo LRU - Implementazione

- ◆ **E' necessario uno specifico supporto hardware**
- ◆ **La MMU**
 - ◆ deve registrare nella tabella delle pagine un time-stamp quando accede ad una pagina
 - ◆ il time-stamp può essere implementato come un contatore che viene incrementato ad ogni accesso in memoria
- ◆ **Nota**
 - ◆ bisogna gestire l'overflow dei contatori (wraparound)
 - ◆ i contatori devono essere memorizzati in memoria e questo richiede accessi addizionali alla memoria
 - ◆ la tabella deve essere scandita totalmente per trovare la pagina LRU

Algoritmo LRU - Implementazione

- ◆ **Implementazione basata su stack**

- ◆ si mantiene uno stack di pagine
- ◆ tutte le volte che una pagina viene acceduta, viene rimossa dallo stack (se presente) e posta in cima allo stack stesso
- ◆ in questo modo:
 - ◆ in cima si trova la pagina utilizzata più di recente
 - ◆ in fondo si trova la pagina utilizzata meno di recente

- ◆ **Nota**

- ◆ l'aggiornamento di uno stack organizzato come double-linked list richiede l'aggiornamento di 6 puntatori
- ◆ la pagina LRU viene individuata con un accesso alla memoria
- ◆ esistono implementazioni hardware di questo meccanismo

Algoritmi a stack

♦ Definizione

- ♦ si indichi con $S_t(\mathbf{A},m)$ l'insieme delle pagine mantenute in memoria centrale al tempo t dell'algoritmo \mathbf{A} , data una memoria di m frame
- ♦ un algoritmo di rimpiazzamento viene detto "*a stack*" (*stack algorithm*) se per ogni istante t si ha:

$$S_t(\mathbf{A},m) \subseteq S_t(\mathbf{A},m+1)$$

♦ In altre parole

- ♦ Un algoritmo si dice "a stack" se l'insieme delle pagine in memoria con m frame è sempre un sottoinsieme delle pagine in memoria con $m+1$ frame

Algoritmi a stack



- ♦ **Teorema:**
 - ♦ un algoritmo a stack non genera casi di Anomalia di Belady
- ♦ **Teorema**
 - ♦ l'algoritmo di LRU è a stack

Algoritmo LRU - Implementazione

- ◆ **In entrambi i casi (contatori, stack), mantenere le informazioni per LRU è troppo costoso**
- ◆ **In realtà**
 - ◆ poche MMU forniscono il supporto hardware per l'algoritmo LRU
 - ◆ alcuni sistemi non forniscono alcun tipo di supporto, e in tal caso l'algoritmo FIFO deve essere utilizzato
- ◆ **Reference bit**
 - ◆ alcuni sistemi forniscono supporto sotto forma di reference bit
 - ◆ tutte le volte che una pagina è acceduta, il reference bit associato alla pagina viene aggiornato a 1

Approssimare LRU



- ◆ **Come utilizzare il reference bit**

- ◆ inizialmente, tutti i bit sono posti a zero dal s.o.
- ◆ durante l'esecuzione dei processi, le pagine in memoria vengono accedute e i reference bit vengono posti a 1
- ◆ periodicamente, è possibile osservare quali pagine sono state accedute e quali no, osservando i reference bit

- ◆ **Tramite questi bit**

- ◆ non conosciamo l'ordine in cui sono state usate
- ◆ ma possiamo utilizzare queste informazioni per *approssimare l'algoritmo LRU*

Approssimare LRU

◆ Additional-Reference-Bit-Algorithm

- ◆ possiamo aumentare le informazioni di ordine "salvando" i reference bit ad intervalli regolari (ad es., ogni 100 ms)
- ◆ esempio: manteniamo 8 bit di "storia" per ogni pagina
- ◆ il nuovo valore del reference bit viene salvato tramite shift a destra della storia ed inserimento del bit come most significant bit
- ◆ la pagina vittima è quella con valore minore; in caso di parità, si utilizza una disciplina FIFO

Storia pagina x

0	1	1	1	0	0	0	1
---	---	---	---	---	---	---	---

Nuovo valore ref. bit

1



Storia pagina x

1	0	1	1	1	0	0	0
---	---	---	---	---	---	---	---

Approssimare LRU



- ♦ **Second-chance algorithm**

- ♦ conosciuto anche come algoritmo dell'orologio
- ♦ corrisponde ad un caso particolare dell'algoritmo precedente, dove la dimensione della storia è uguale a 1

- ♦ **Descrizione**

- ♦ le pagine in memoria vengono gestite come una lista circolare
- ♦ a partire dalla posizione successiva all'ultima pagina caricata, si scandisce la lista con la seguente regola
 - ♦ se la pagina è stata acceduta (reference bit a 1)
 - il reference bit viene messo a 0
 - ♦ se la pagina non è stata acceduta (reference bit a 0)
 - la pagina selezionata è la vittima

Approssimare LRU



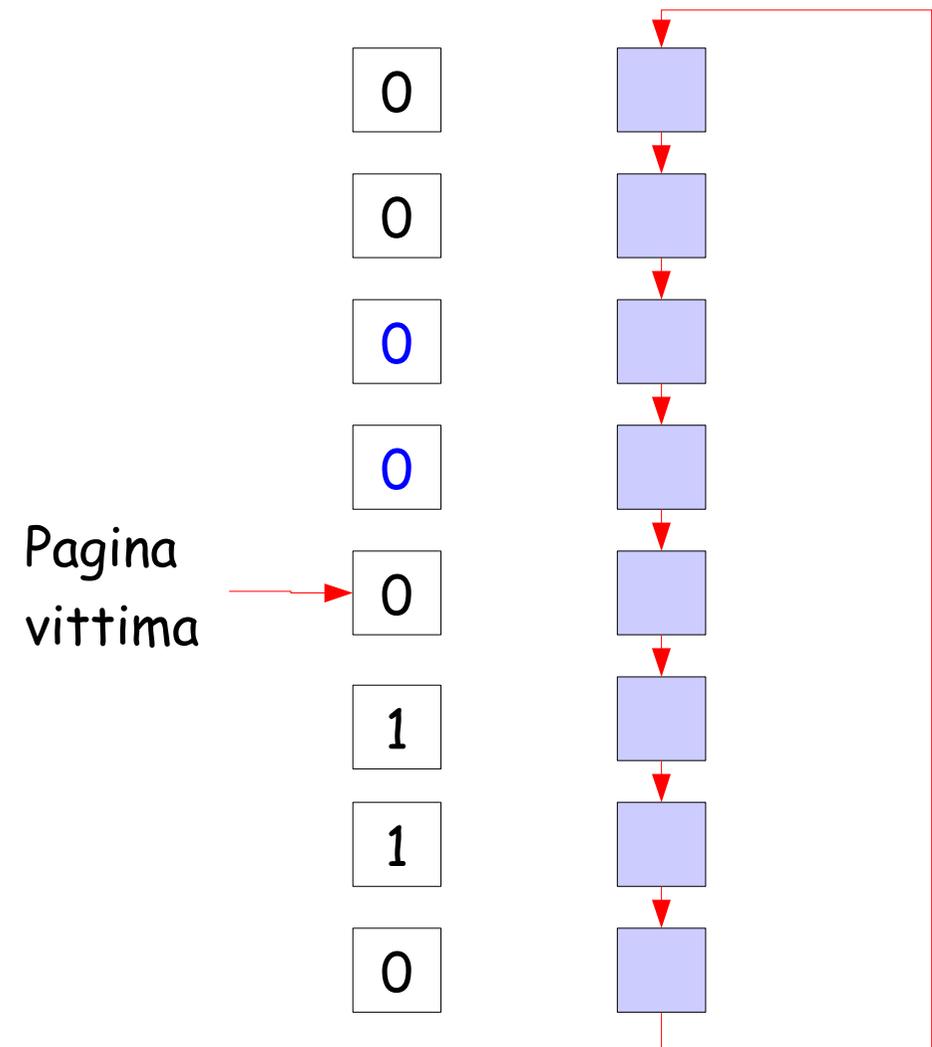
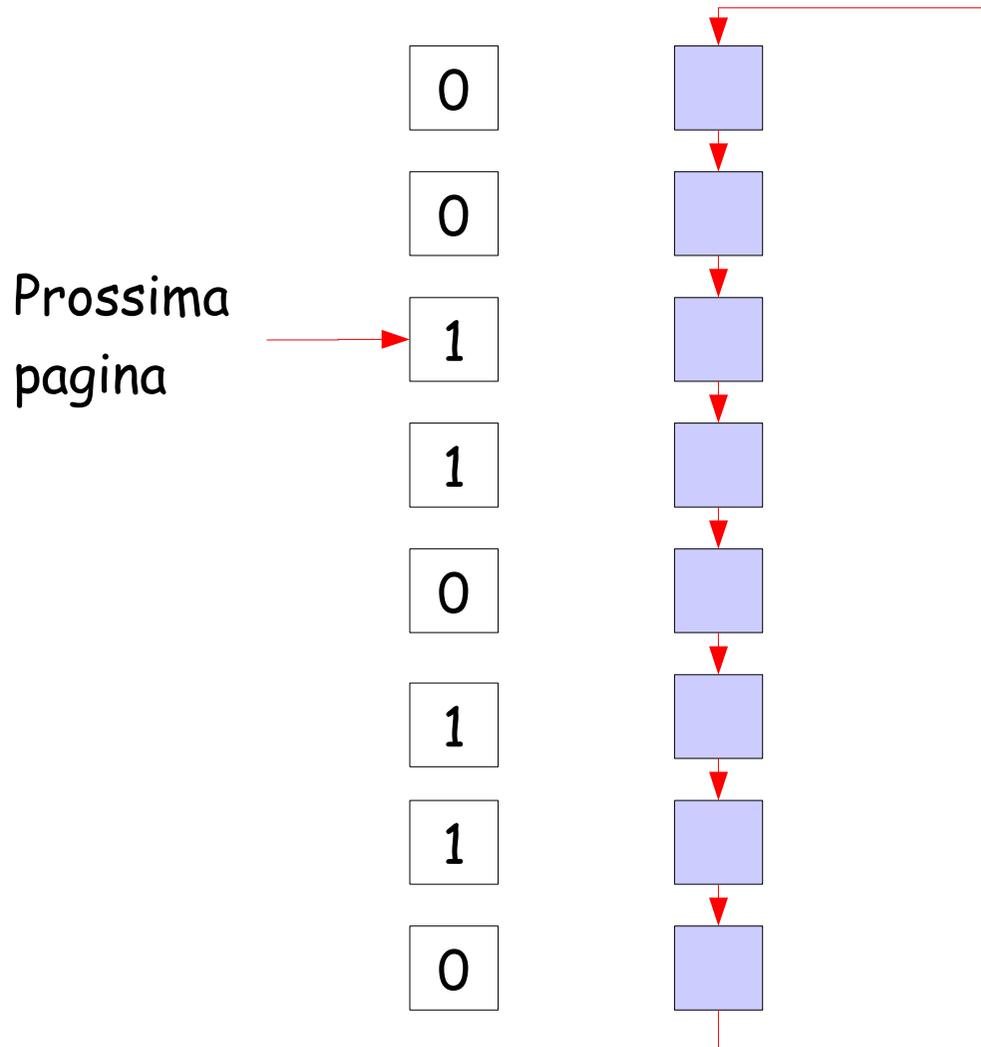
- ◆ **Considerazioni**

- ◆ l'idea è semplice:
 - ◆ l'algoritmo seleziona le pagine in modo FIFO
 - ◆ se però la pagina è stata acceduta, gli si dà una "seconda possibilità" (second chance);
 - ◆ si cercano pagine successive che non sono state accedute
- ◆ se tutte le pagine sono state accedute, degenera nel meccanismo FIFO

- ◆ **Implementazione**

- ◆ è semplice da implementare
- ◆ non richiede capacità complesse da parte della MMU

Second chance - Esempio



Altri algoritmi di rimpiazzamento

- ◆ **Least frequently used (LFU)**

- ◆ si mantiene un contatore del numero di accessi ad una pagina
- ◆ La frequenza e' il valore del contatore diviso per il "tempo" di permanenza in memoria (i.e. Il numero di accessi con quella pagina presente)
- ◆ la pagina con il valore minore viene scelta come vittima

- ◆ **Motivazione**

- ◆ una pagina utilizzata spesso dovrebbe avere un contatore molto alto

- ◆ **Implementazione**

- ◆ può essere approssimato tramite reference bit

- ◆ **Problemi**

- ◆ se una pagina viene utilizzata frequentemente all'inizio, e poi non viene più usata, non viene rimossa per lunghi periodi

Altri algoritmi di rimpiazzamento

- ♦ **Most frequently used (MFU)**
 - ♦ si mantiene un contatore del numero di accessi ad una pagina
 - ♦ la pagina con il valore maggiore viene scelta come vittima
- ♦ **Motivazione**
 - ♦ pagine appena caricate hanno un valore molto basso, e non dovrebbero essere rimosse
- ♦ **Implementazione**
 - ♦ può essere approssimato tramite reference bit
- ♦ **Problemi**
 - ♦ problemi di performance

Allocazione



- ♦ **Algoritmo di allocazione (per memoria virtuale)**
 - ♦ si intende l'algoritmo utilizzato per scegliere quanti frame assegnare ad ogni singolo processo
- ♦ **Allocazione locale**
 - ♦ ogni processo ha un insieme proprio di frame
 - ♦ poco flessibile
- ♦ **Allocazione globale**
 - ♦ tutti i processi possono allocare tutti i frame presenti nel sistema (sono in competizione)
 - ♦ può portare a *trashing*

Trashing



- ◆ **Definizione**

- ◆ un processo (o un sistema) si dice che è in trashing quando spende più tempo per la paginazione che per l'esecuzione

- ◆ **Possibili cause**

- ◆ in un sistema con allocazione globale, si ha trashing se i processi tendono a "rubarsi i frame a vicenda",
- ◆ i.e. non riescono a tenere in memoria i frame utili a breve termine (perché altri processi chiedono frame liberi) e quindi generano page fault ogni pochi passi di avanzamento

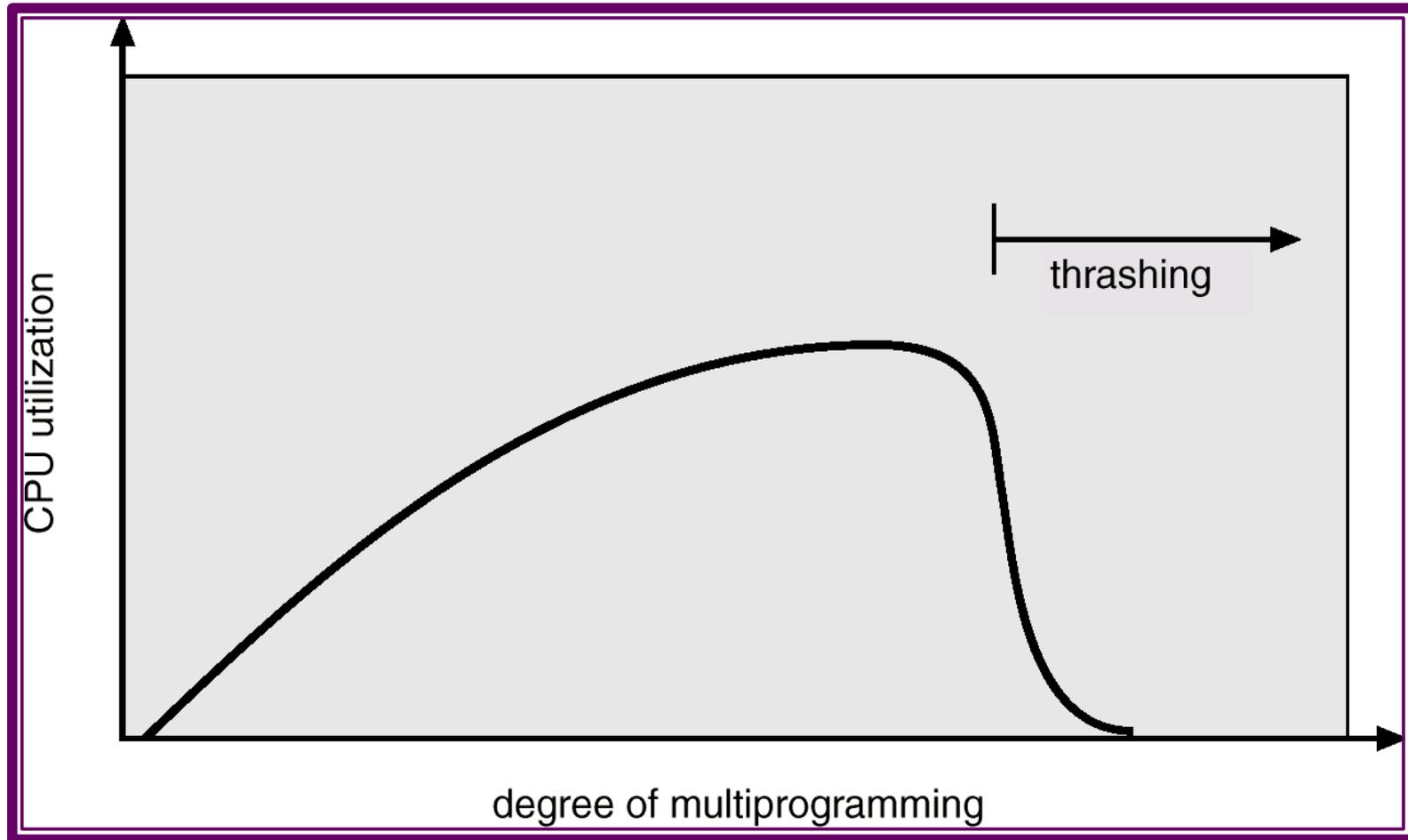
Trashing



♦ Esempio

- ♦ esaminiamo un sistema che accetti nuovi processi quando il grado di utilizzazione della CPU è basso
- ♦ se per qualche motivo gran parte dei processi entrano in page fault:
 - ♦ la ready queue si riduce
 - ♦ il sistema sarebbe indotto ad accettare nuovi processi....
 - ♦ E' UN ERRORE!
- ♦ statisticamente, il sistema:
 - ♦ genererà un maggior numero di page fault
 - ♦ di conseguenza diminuirà il livello della multiprogrammazione

Trashing



Working Set

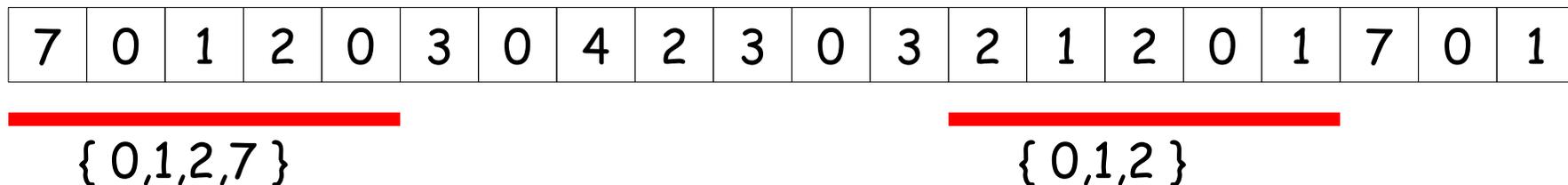
- ◆ **Definizione**

- ◆ si definisce *working set di finestra Δ* l'insieme delle pagine accedute nei più recenti Δ riferimenti

- ◆ **Considerazione**

- ◆ è una rappresentazione approssimata del concetto di località
- ◆ se una pagina non compare in Δ riferimenti successivi in memoria, allora esce dal working set perché non è più una pagina su cui si lavora attivamente

- ◆ **Esempio: $\Delta = 5$**



Working Set



- ♦ **A cosa serve il Working Set?**

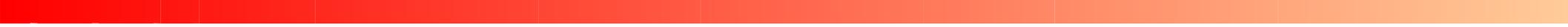
- ♦ Se l'ampiezza della finestra è ben calcolata, il working set è una buona approssimazione dell'insieme delle pagine "utili"...
- ♦ sommando quindi l'ampiezza di tutti i working set dei processi attivi, questo valore deve essere sempre minore del numero di frame disponibili
- ♦ altrimenti il sistema è in trashing

Working Set



- ♦ **Se si sceglie Δ troppo piccolo**
 - ♦ si considera non più utile ciò che in realtà serve
 - ♦ Si sottovaluta il numero di frame necessari per il processo
 - ♦ Falsi negativi di trashing
- ♦ **Se si sceglie Δ troppo grande**
 - ♦ si considera utile anche ciò che non serve più
 - ♦ Si sopravvaluta il numero di frame necessari
 - ♦ Falsi positivi di trashing

Working Set



- ◆ **Come si usa il Working Set**

- ◆ serve per controllare l'allocazione dei frame ai singoli processi
- ◆ quando ci sono sufficienti frame disponibili non occupati dai working set dei processi attivi, allora si può attivare un nuovo processo
- ◆ se al contrario la somma totale dei working set supera il numero totale dei frame, si può decidere di sospendere l'esecuzione di un processo