

# *Sistemi Operativi*

## *Modulo 5: Gestione della memoria* *A.A. 2021-2022*

Renzo Davoli  
Alberto Montresor

Copyright © 2002-2022 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
- ♦ **NB: memory manager è software (componente del S.O)**
- ♦ **NB: la Memory Management Unit (MMU) è hardware**

# 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 logici di memoria (e.g. nomi di variabili, label) ai corrispondenti indirizzi fisici

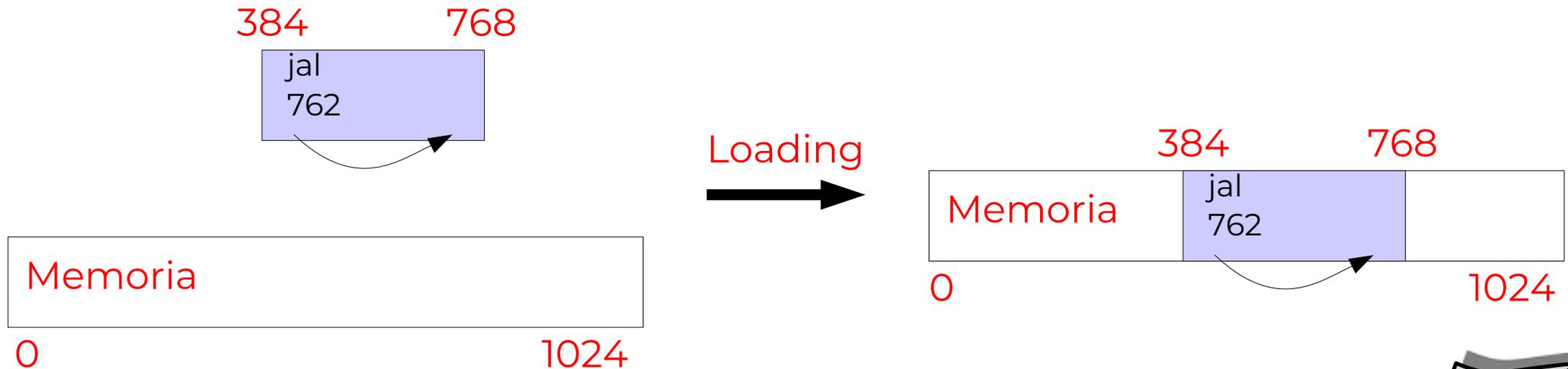
- ◆ **Il binding può avvenire**

- ◆ 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

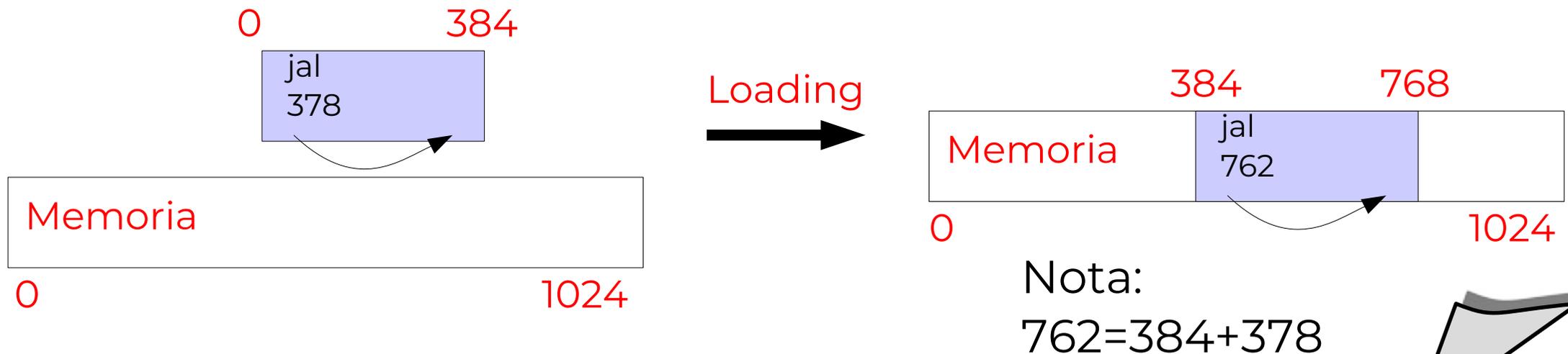
# Binding

- ◆ **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

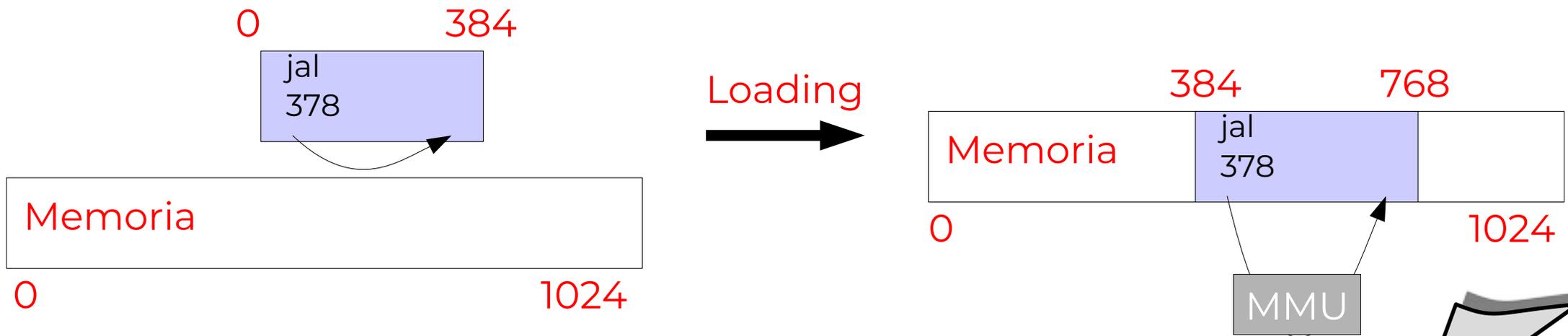
---

- ♦ **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

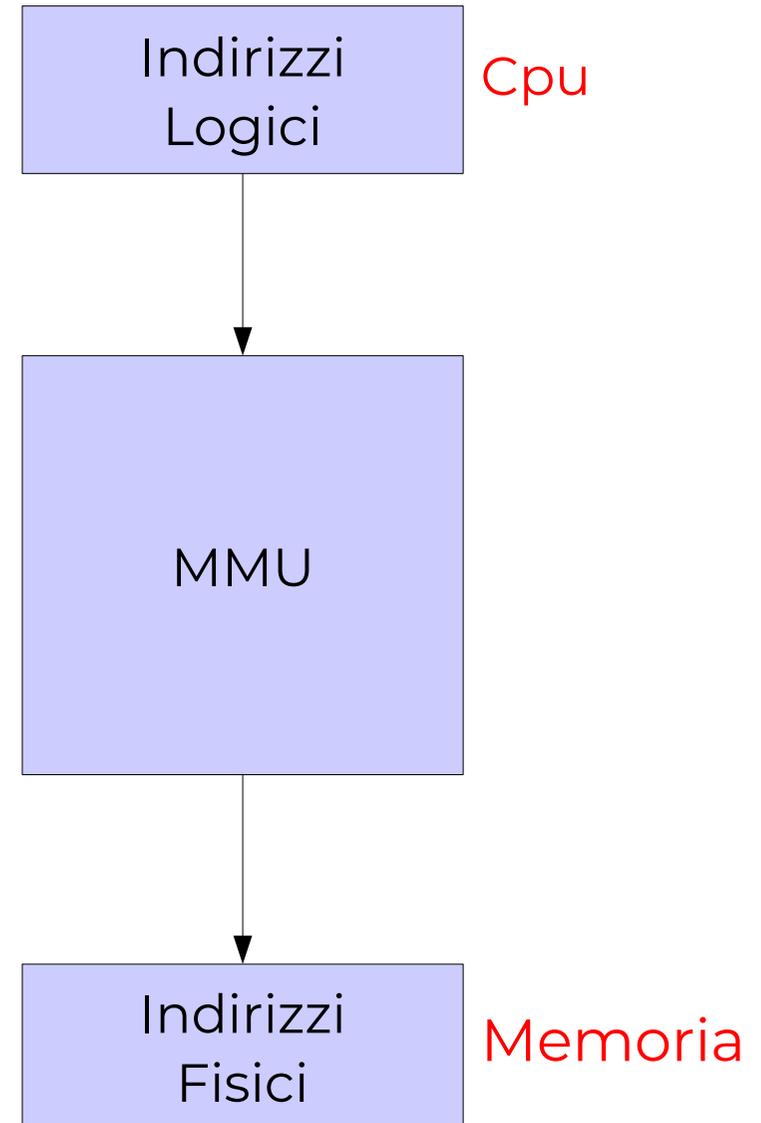
- ◆ **Binding durante l'esecuzione**

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



# Indirizzi logici e indirizzi fisici

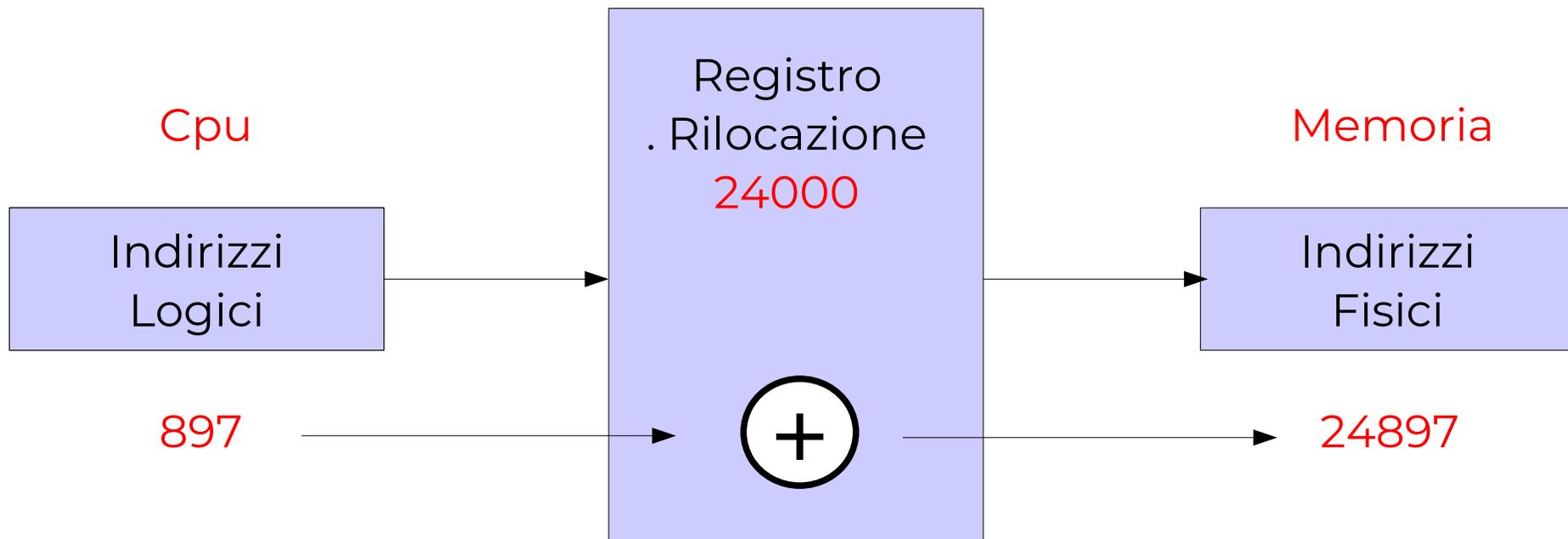
- ♦ **Spazio di indirizzamento logico**
  - ♦ ogni processo è associato ad uno spazio di indirizzamento logico
  - ♦ gli indirizzi usati in un processo sono indirizzi logici, ovvero riferimenti a questo spazio di indirizzamento
- ♦ **Spazio di indirizzamento fisico**
  - ♦ ad ogni indirizzo logico corrisponde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



# Esempi di MMU - Registro di rilocazione

## ♦ Descrizione

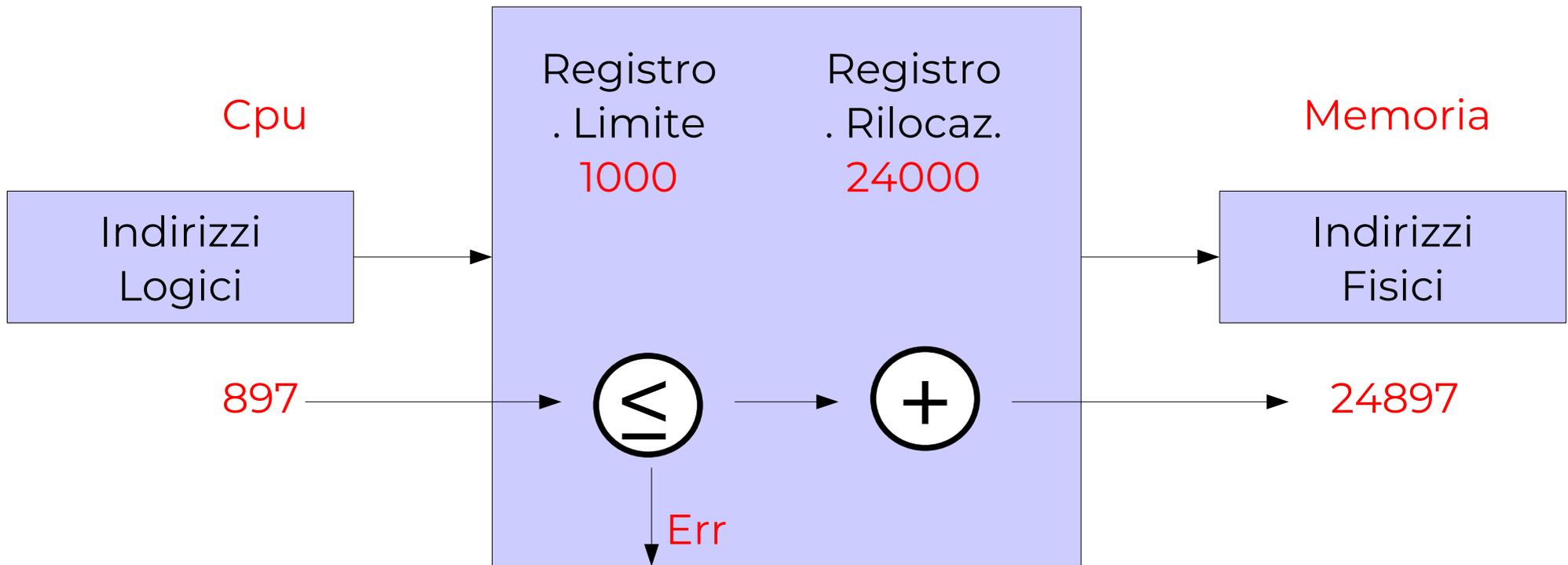
- ♦ se il valore del registro di rilocazione è  $R$ , uno spazio logico  $0 \dots \text{Max}$  viene tradotto in uno spazio fisico  $R \dots R + \text{MAX}$
- ♦ esempio: nei processori Intel 80x86, esistono 4 registri base per il calcolo degli indirizzi (CS, DS, SS, ES)



# Esempi di MMU- Registro di rilocazione 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 processi 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

## Prestazioni speciali 3 - Loading dinamico tramite Linking dinamico

---

- ◆ **Dlopen: consente di caricare librerie dinamiche a run time**
- ◆ **E' il metodo per implementare plug-in**

# 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 processa deve essere formato da celle consecutive

- ◆ **Allocazione non contigua**

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

- ♦ **Dinamica**

- ♦ durante l'esecuzione, un processo 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 free-DOS
    - ◆ sistemi embedded



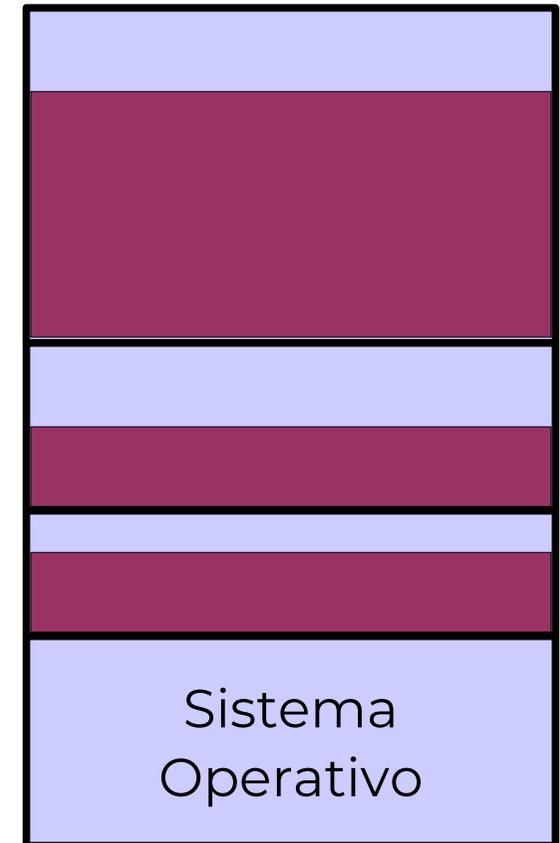
# Frammentazione interna

- ◆ **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

---

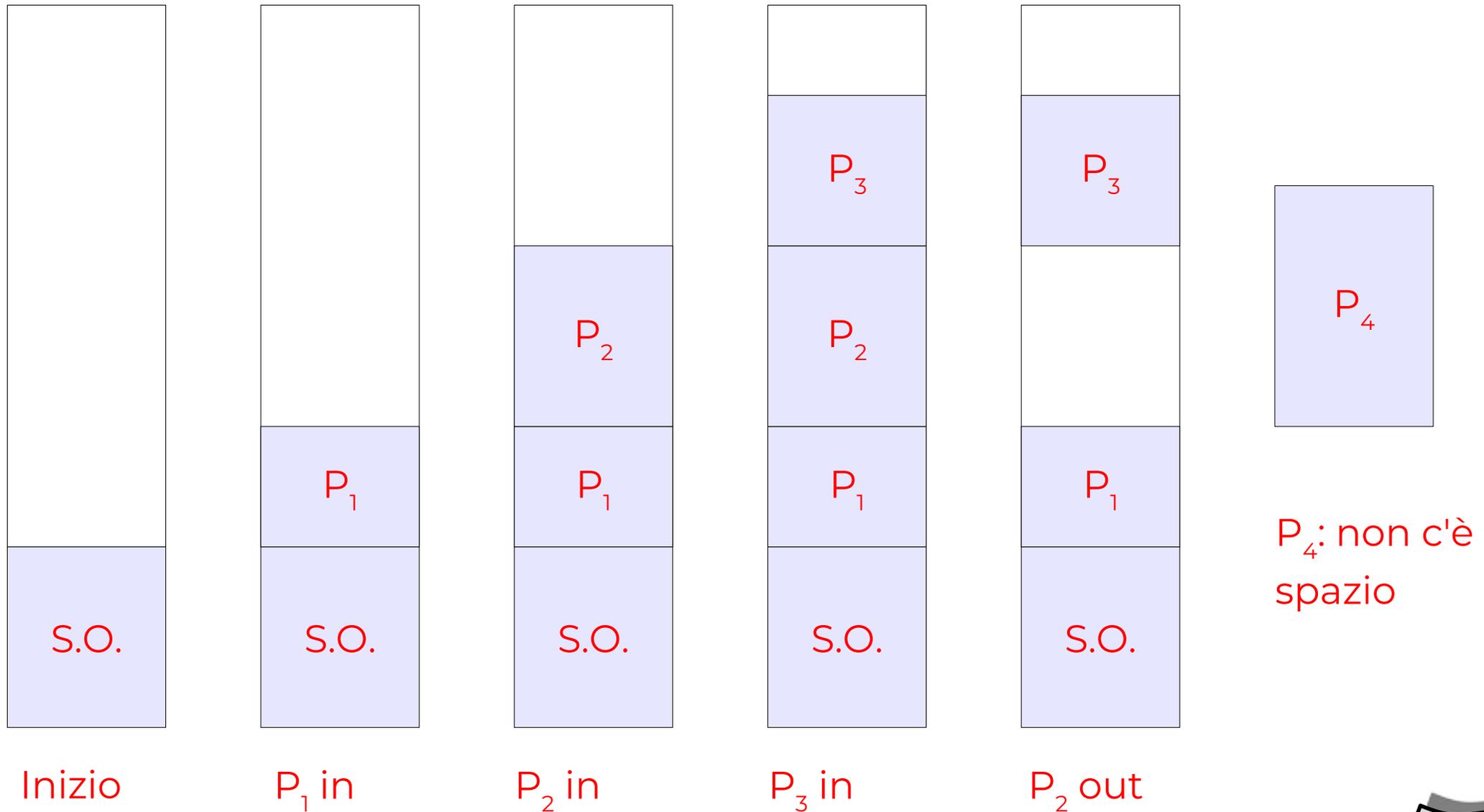
- ◆ **Descrizione**

- ◆ 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

---

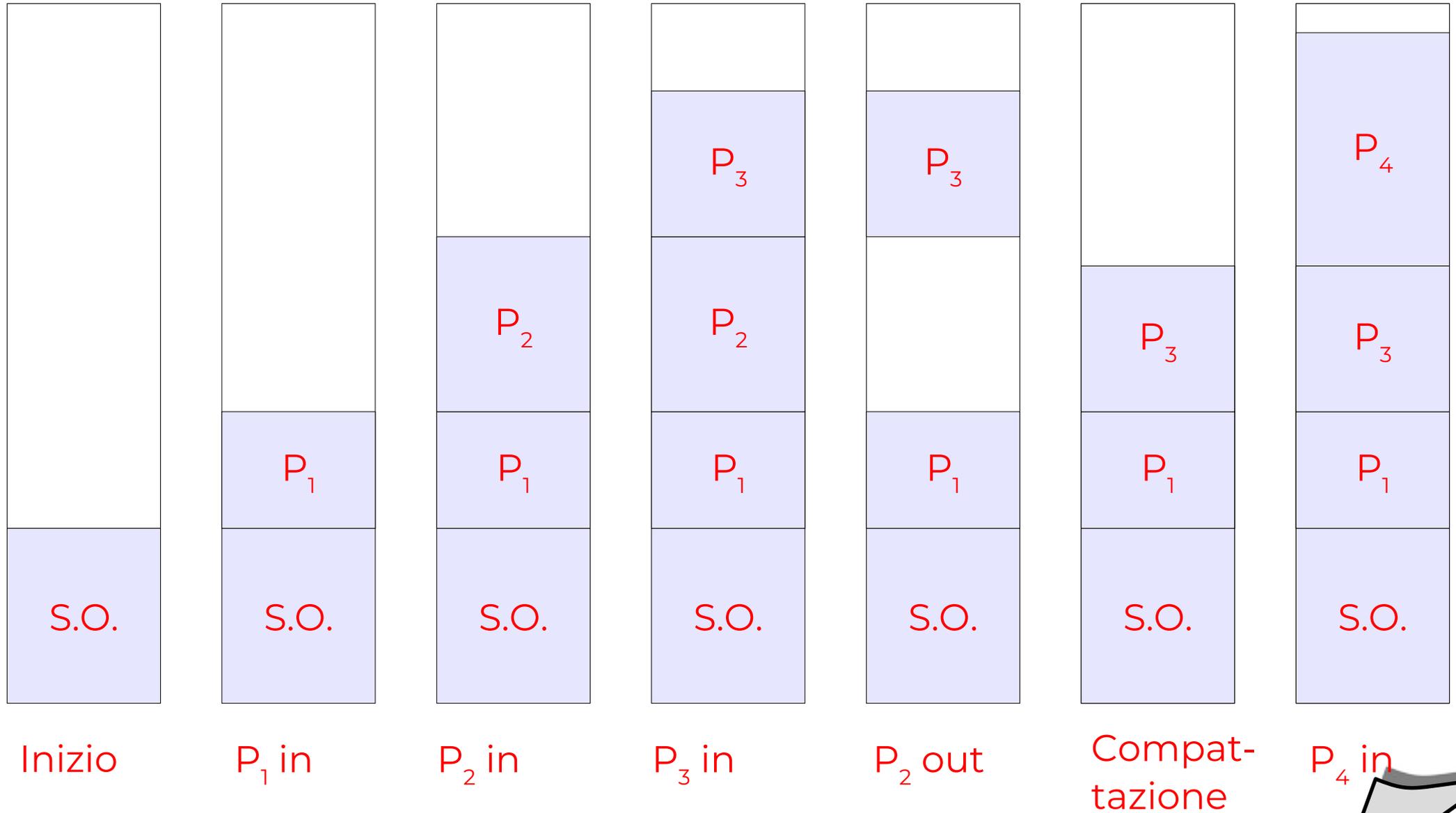
- ◆ **Compattazione**

- ◆ se è possibile rilocare i processi durante la loro esecuzione, è allora possibile procedere alla *compattazione* della memoria
- ◆ compattare la memoria significa spostare in memoria tutti i processi 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

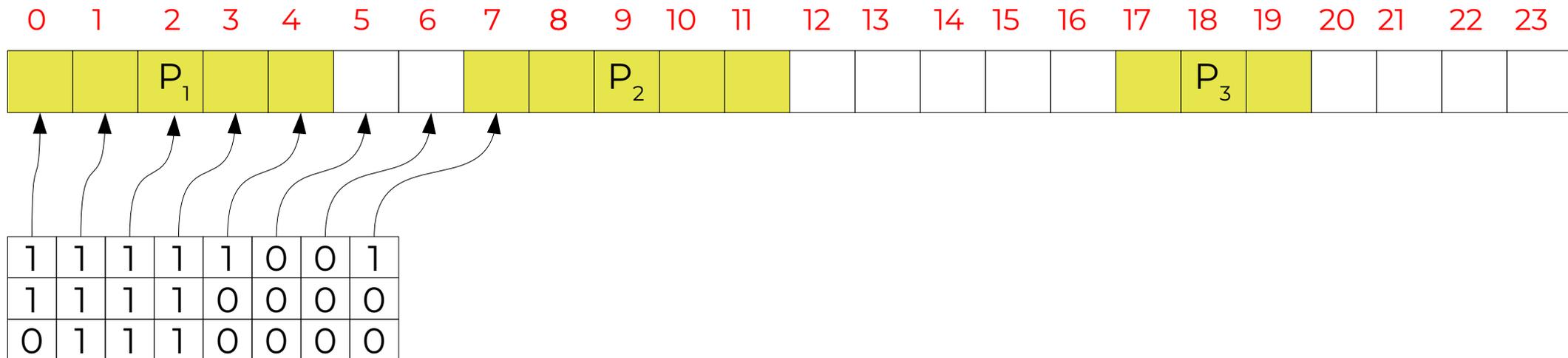
---

- ◆ **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

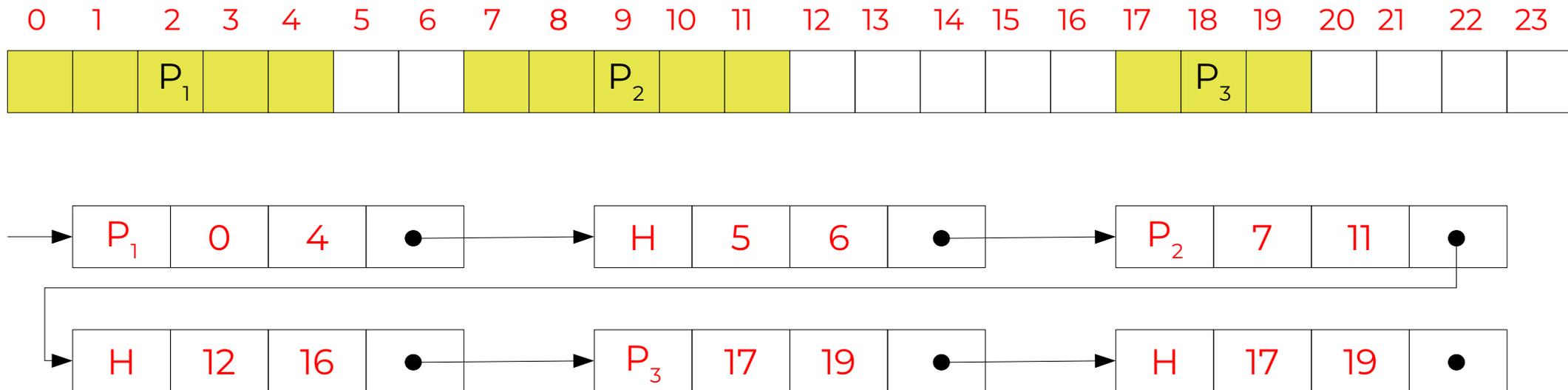
- ◆ **Svantaggi**

- ◆ 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

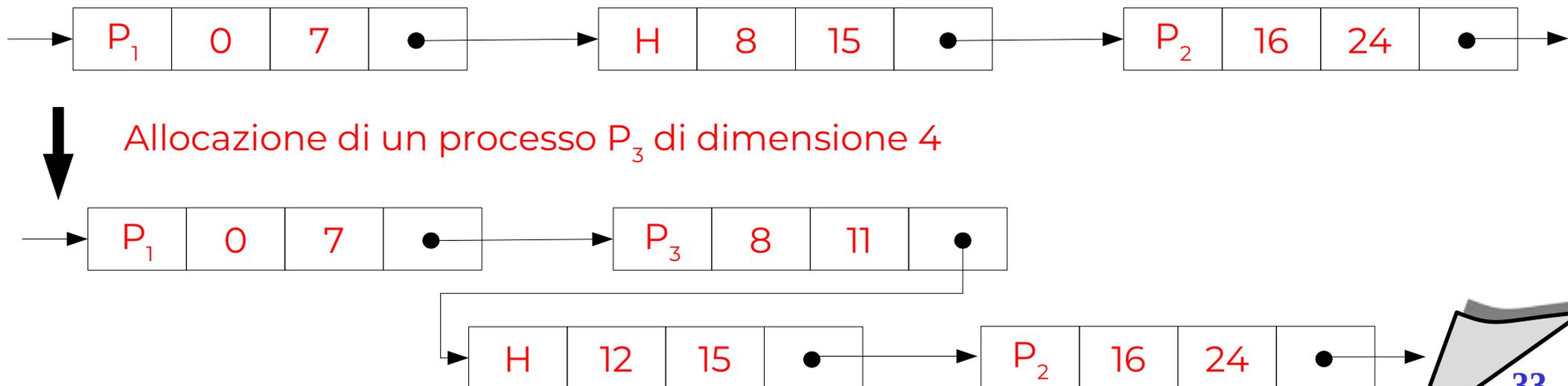
- ◆ si mantiene una lista dei blocchi allocati e liberi di memoria
- ◆ ogni elemento della lista specifica
  - ◆ se si tratta di un processo (P) o di un blocco libero (hole, H)
  - ◆ la dimensione (inizio/fine) del segmento



# 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

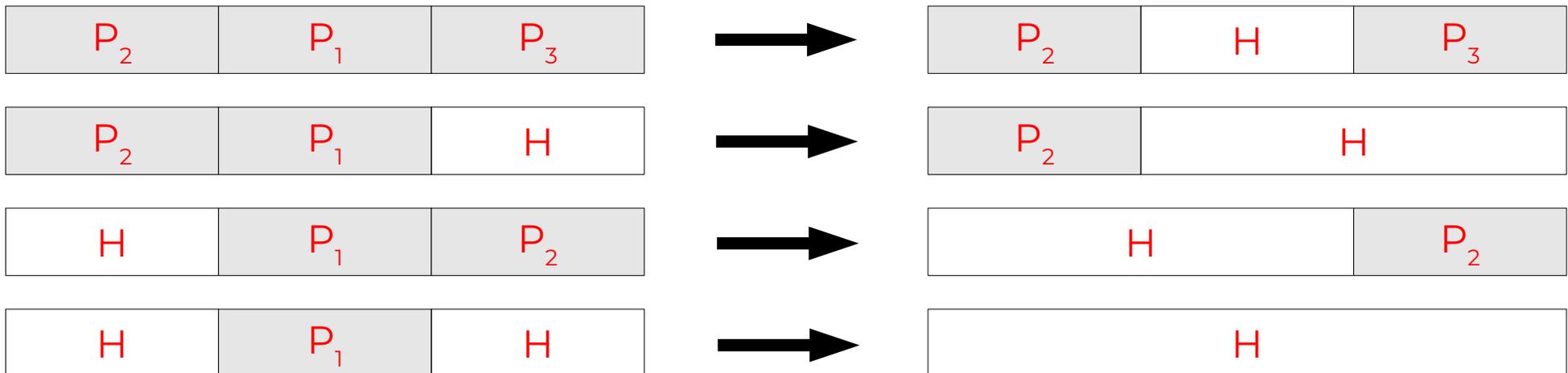


# Allocazione dinamica - Lista puntatori

## ◆ 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**

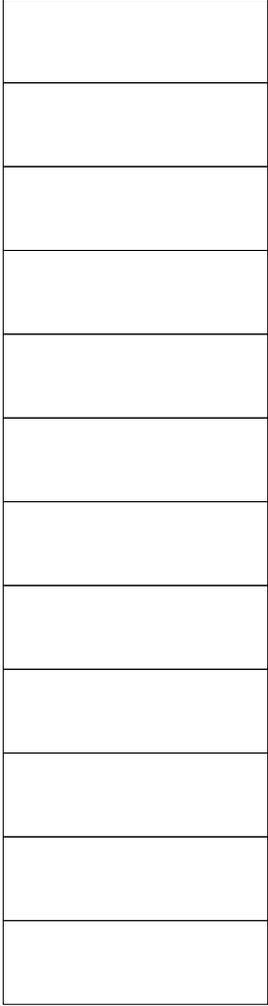
- ♦ è l'approccio contemporaneo
  - ♦ riduce il fenomeno di frammentazione interna
  - ♦ minimizza (elimina) il fenomeno della frammentazione esterna
- ♦ attenzione però: necessita di hardware adeguato

# Paginazione

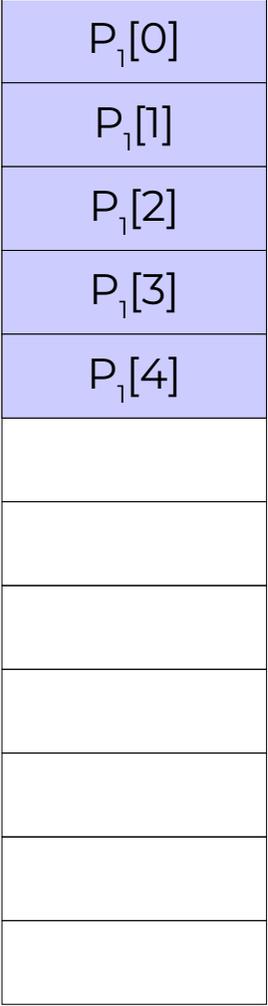
---

- ♦ **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

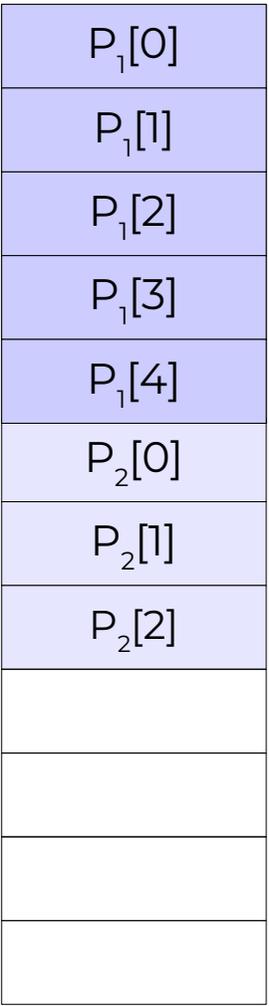
# Paginazione - Esempio



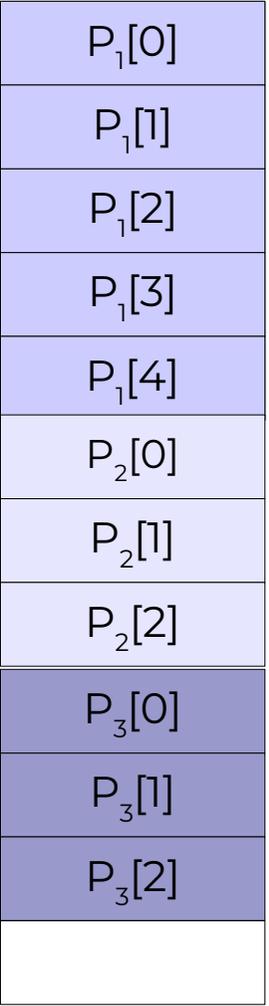
Tutto libero



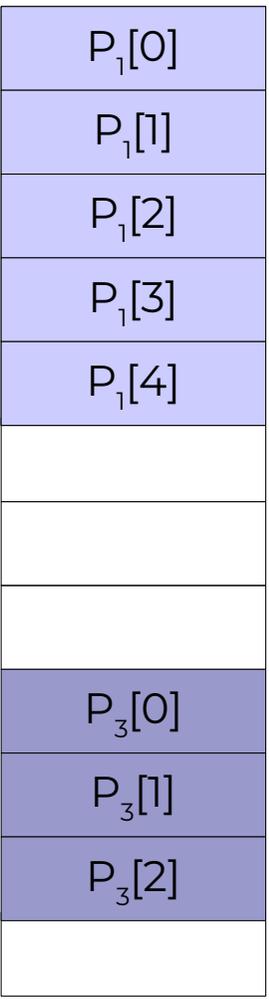
$P_1$  in



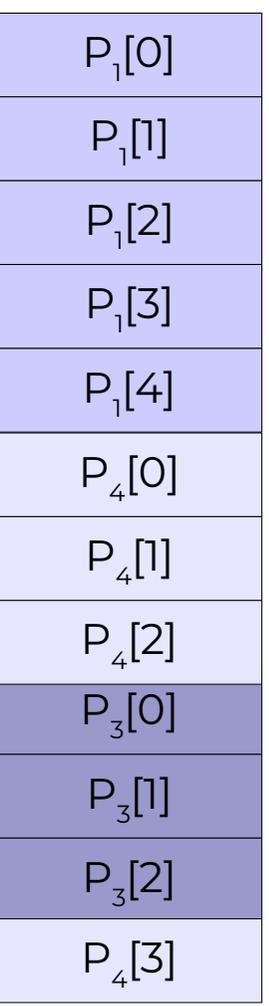
$P_2$  in



$P_3$  in

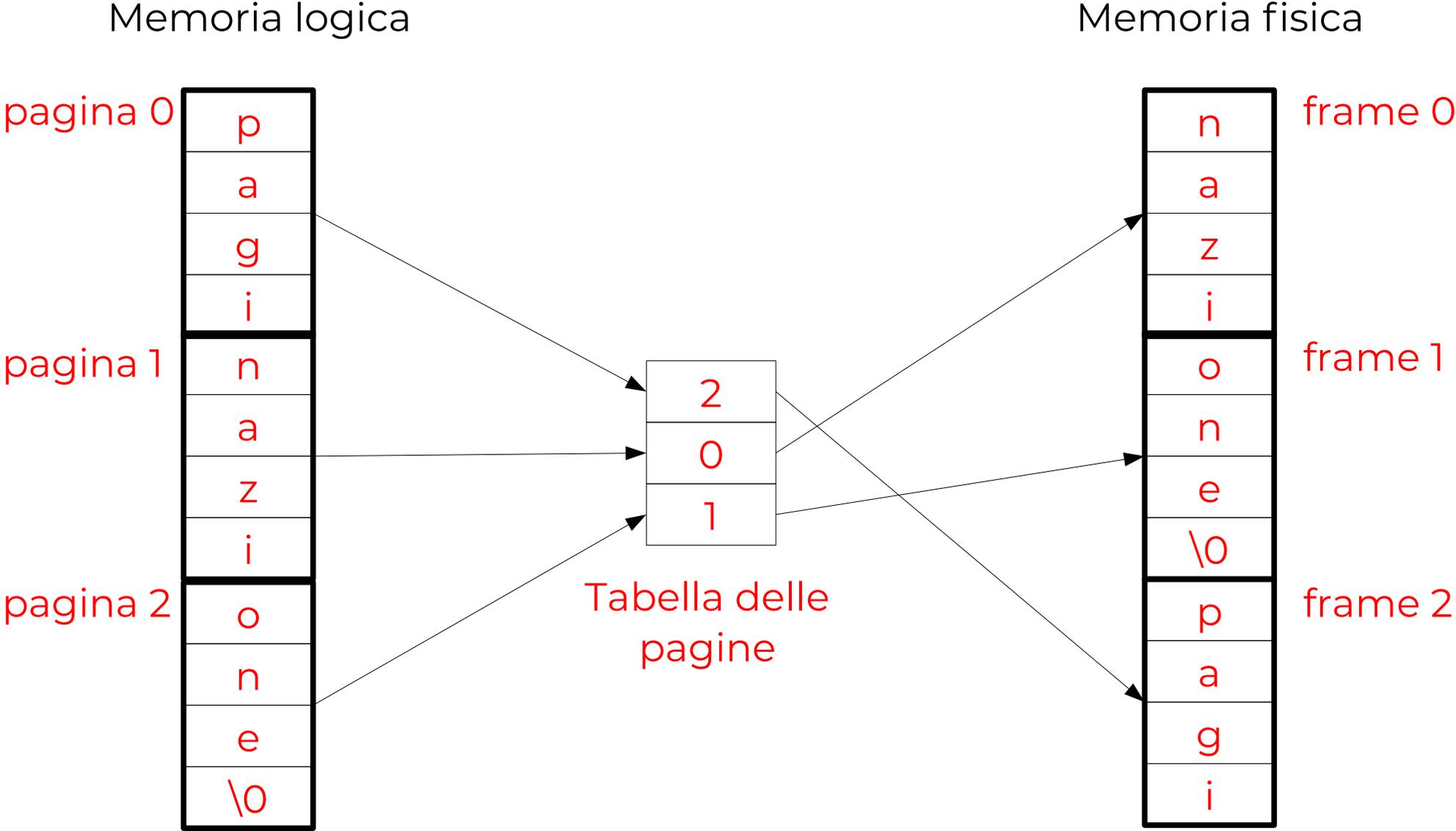


$P_2$  out



$P_4$  in

# Paginazione - Esempio

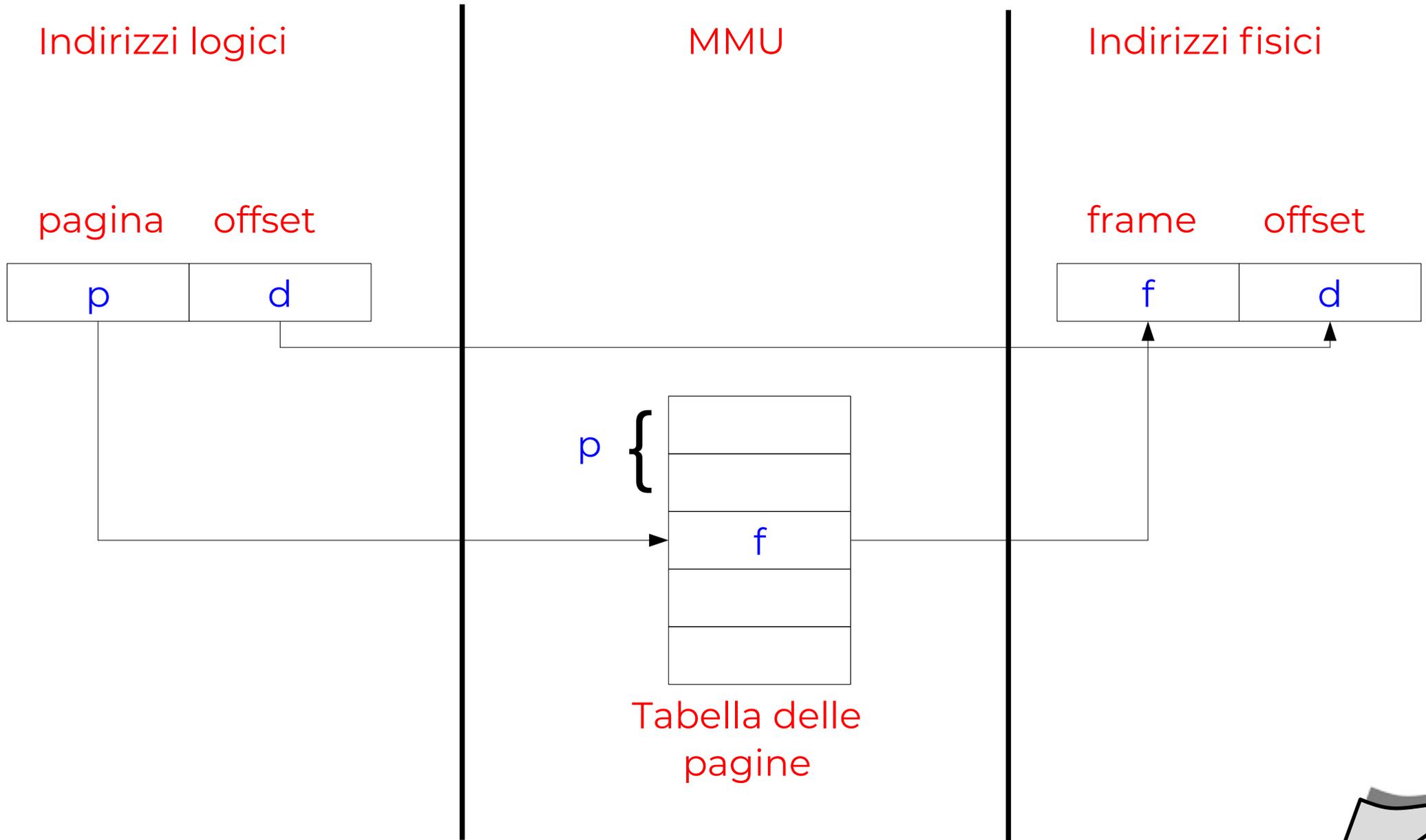


# Dimensione delle pagine

---

- ♦ **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

# Supporto hardware (MMU) 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**
  - ◆ problema: il numero di accessi in memoria verrebbe raddoppiato; ad ogni riferimento, bisognerebbe prima accedere alla tabella delle pagine, poi al dato

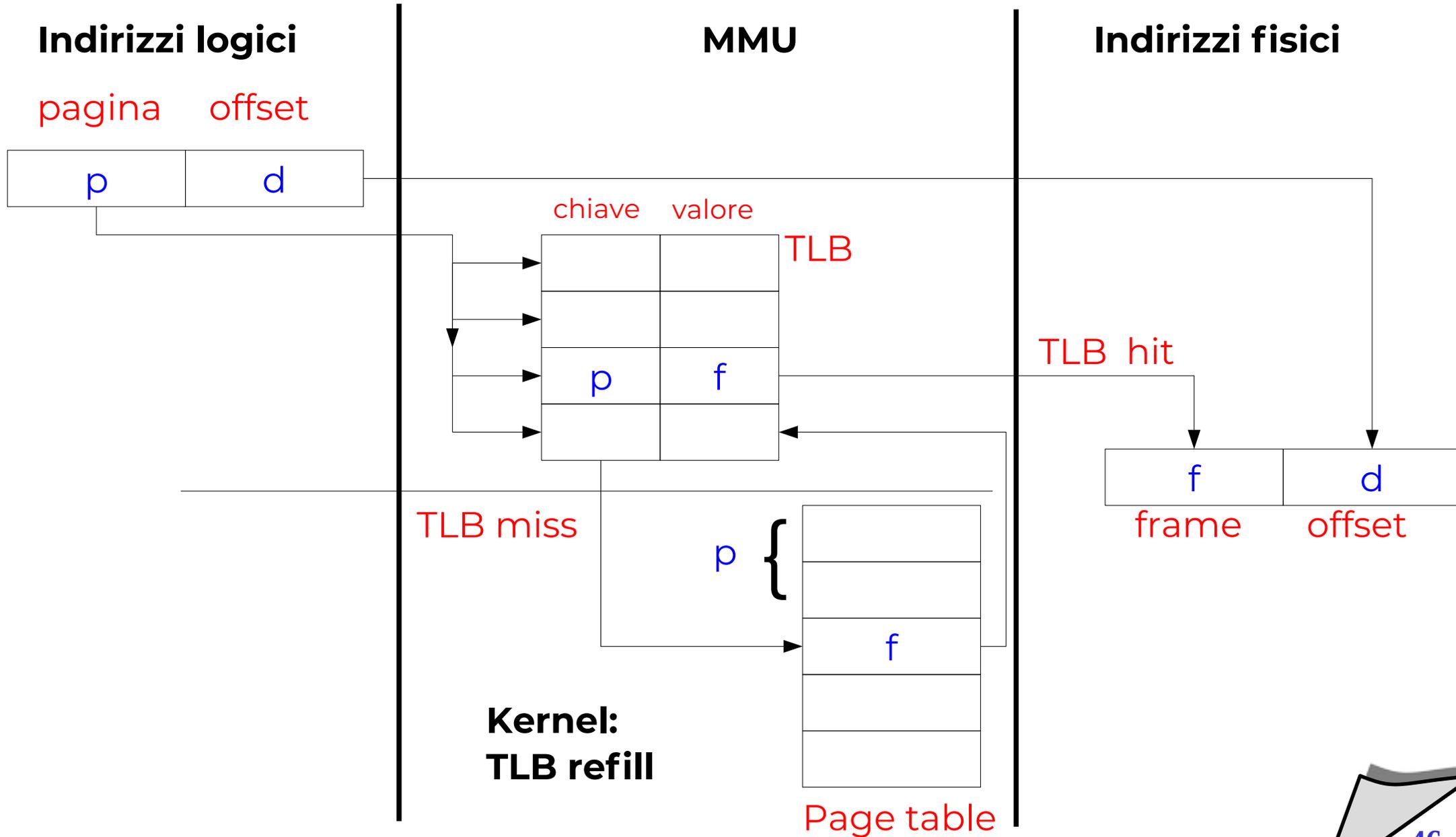
# Translation lookaside buffer (TLB)

---

- ◆ **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)

---

- ◆ **Note**

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

# Segmentazione

---

- ◆ **In un sistema con segmentazione**

- ◆ la memoria associata ad un processo è suddivisa in aree differenti dal punto di vista funzionale

- ◆ **Esempio**

- ◆ aree text:
  - ◆ contengono il codice eseguibile
  - ◆ sono normalmente in sola lettura (solo i virus cambiano il codice)
  - ◆ 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 continua) 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**

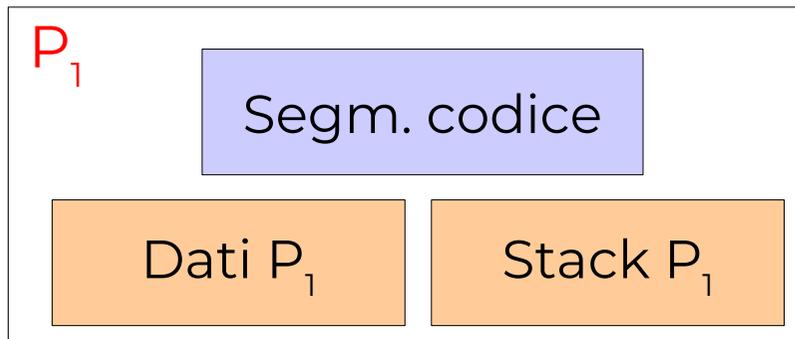
- ♦ la divisione in pagine è automatica.
- ♦ le pagine hanno dimensione fissa
- ♦ le pagine possono contenere informazioni disomogenee (ad es. sia codice sia dati)
- ♦ una pagina ha un indirizzo
- ♦ dimensione tipica della pagina: 1-4 KB

## ♦ **Segmentazione**

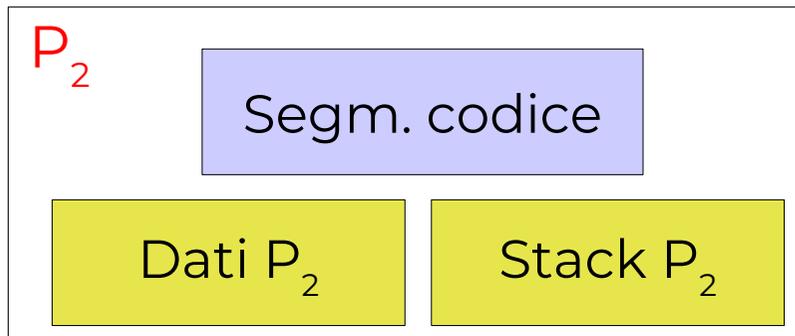
- ♦ la divisione in segmenti spetta al programmatore.
- ♦ i segmenti hanno dimensione variabile
- ♦ un segmento contiene informazioni omogenee per tipo di accesso e permessi di condivisione
- ♦ un segmento ha un nome.
- ♦ dimensione tipica di un segmento: 64KB – molti MB

# Segmentazione e condivisione

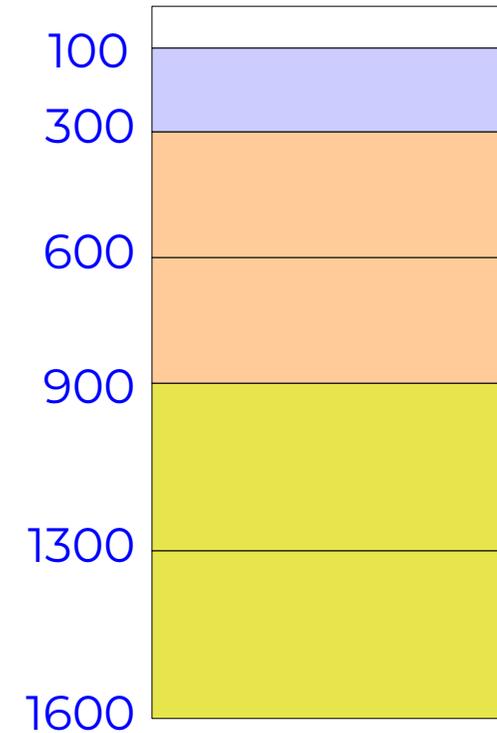
- **La segmentazione consente la condivisione di codice e dati**
- **Esempio: editor condiviso**



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 (logici)
  - ◆ 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*) (o diventa un caso particolare del TLB refill)
  - ♦ 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

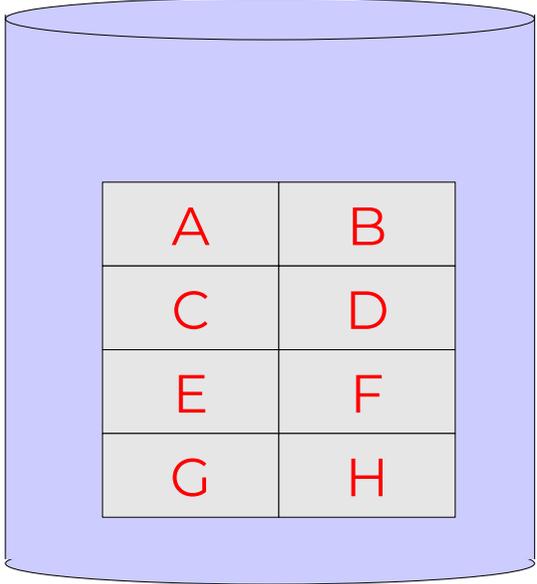
Memoria Logica

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**

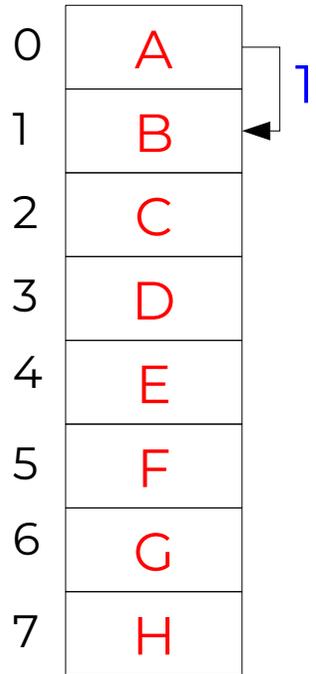
- ◆ alcuni sistemi operativi indicano il pager con il nome di *swapper*
- ◆ è da considerarsi una terminologia obsoleta

- ◆ **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

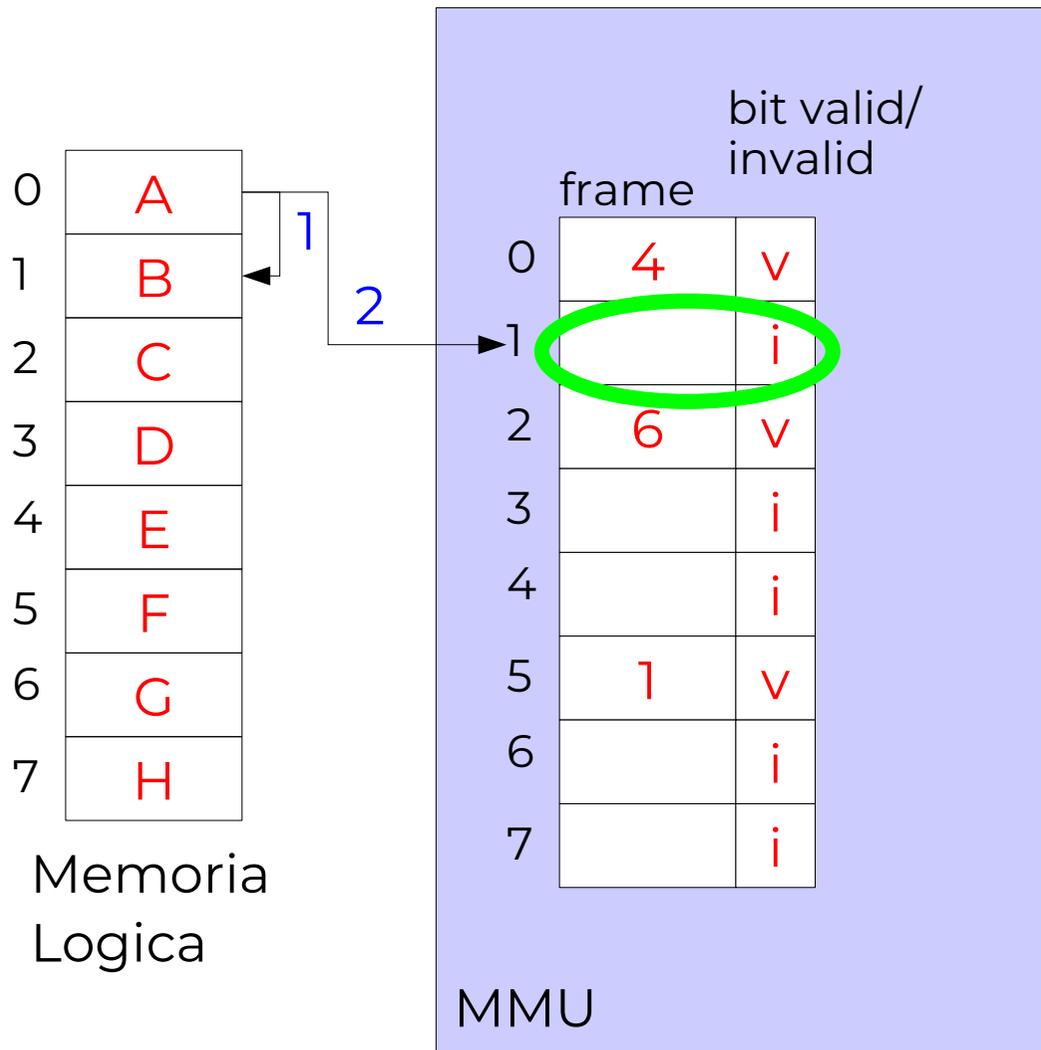
- **Supponiamo che il codice in pagina 0 faccia riferimento alla pagina 1**



Memoria  
Logica

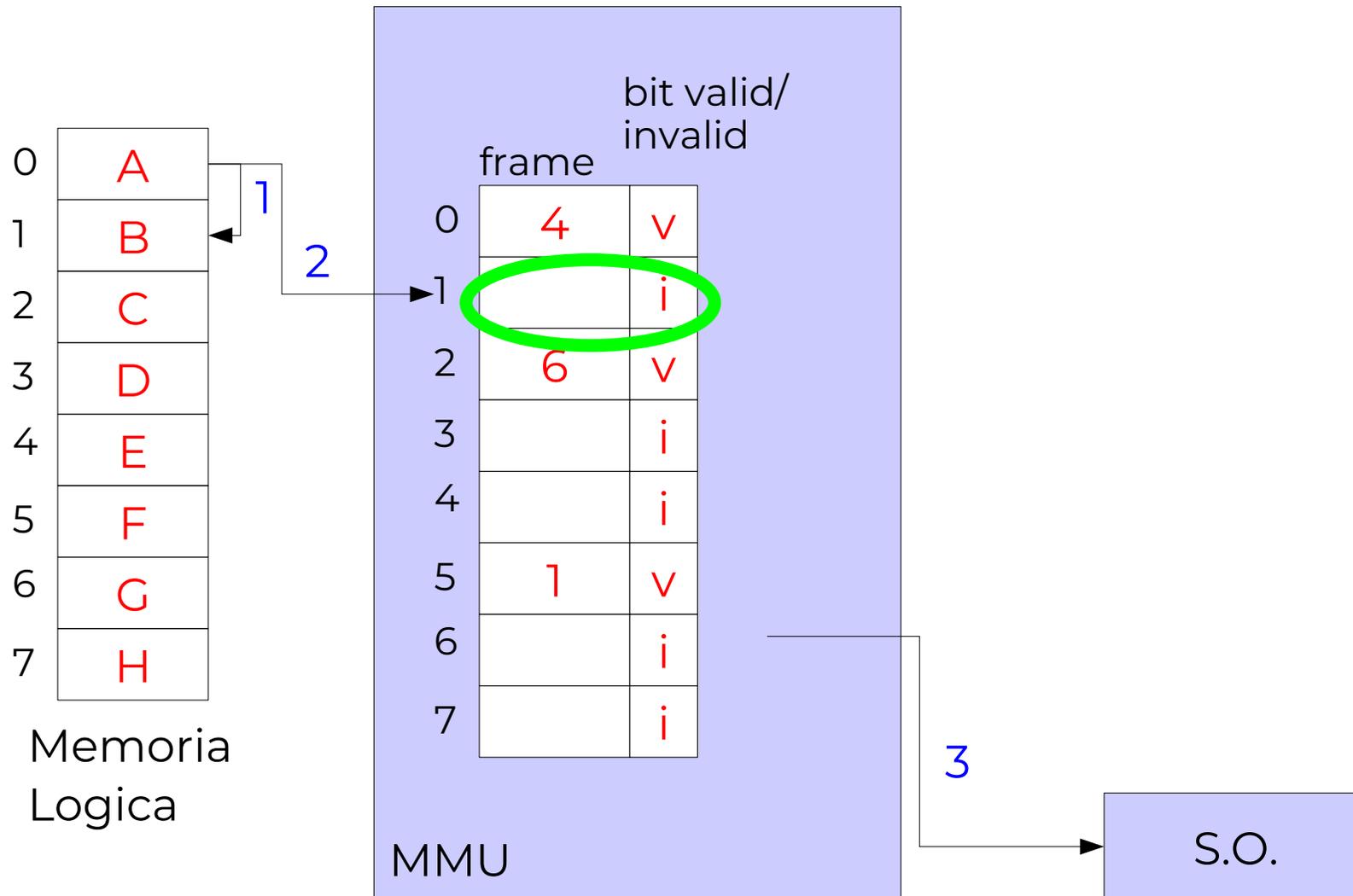
# Gestione dei page fault

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



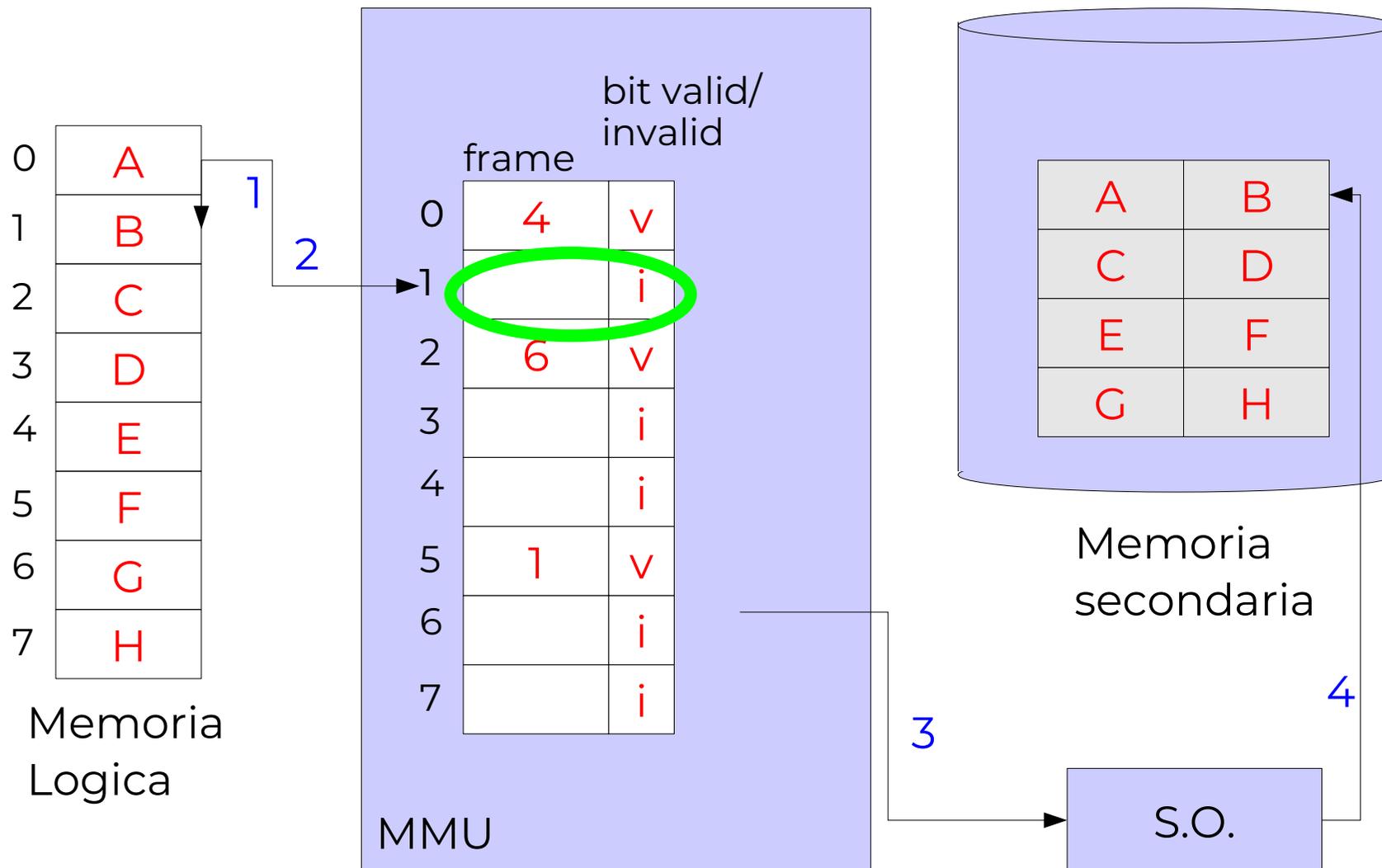
# Gestione dei page fault

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



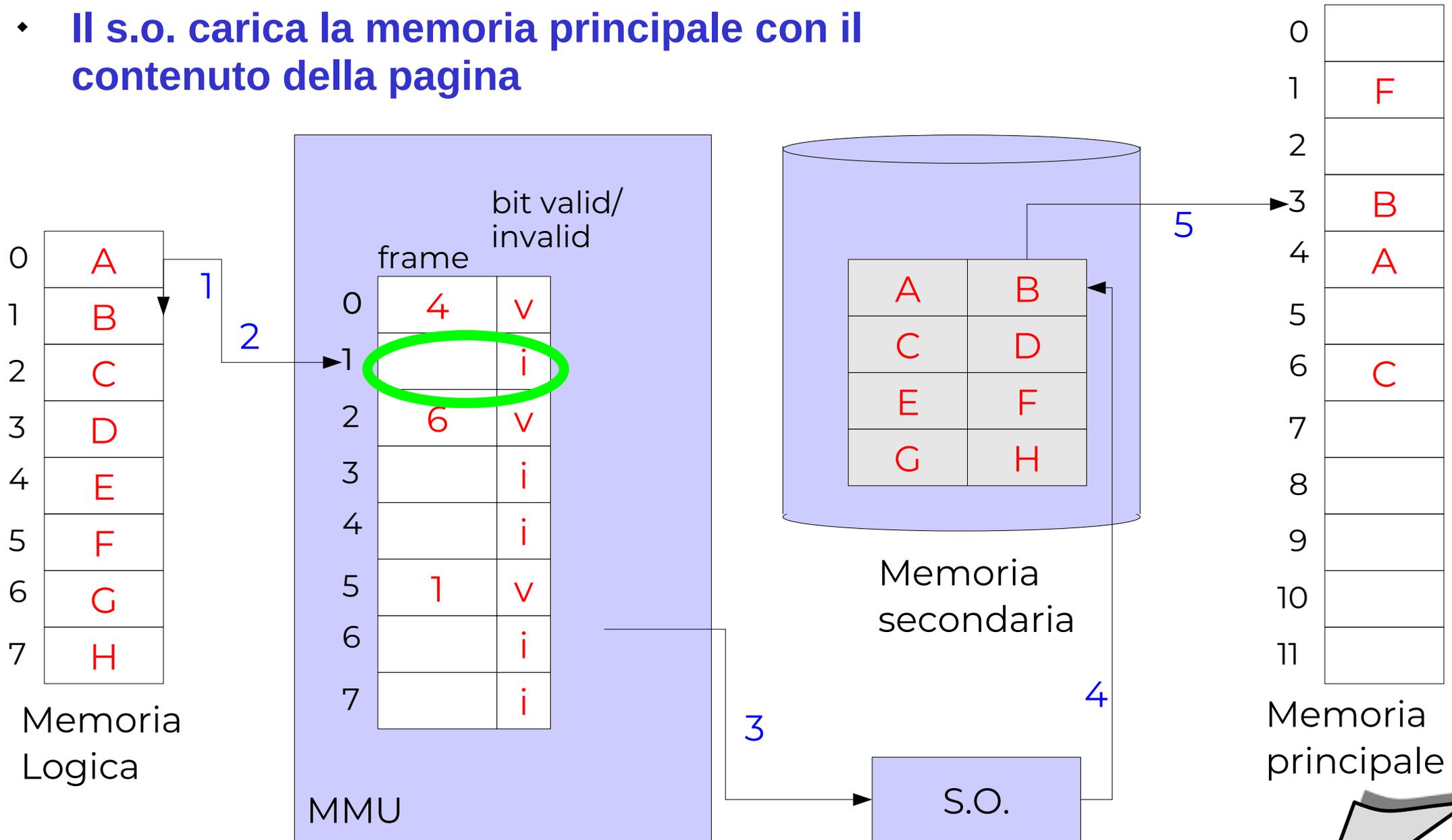
# Gestione dei page fault

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



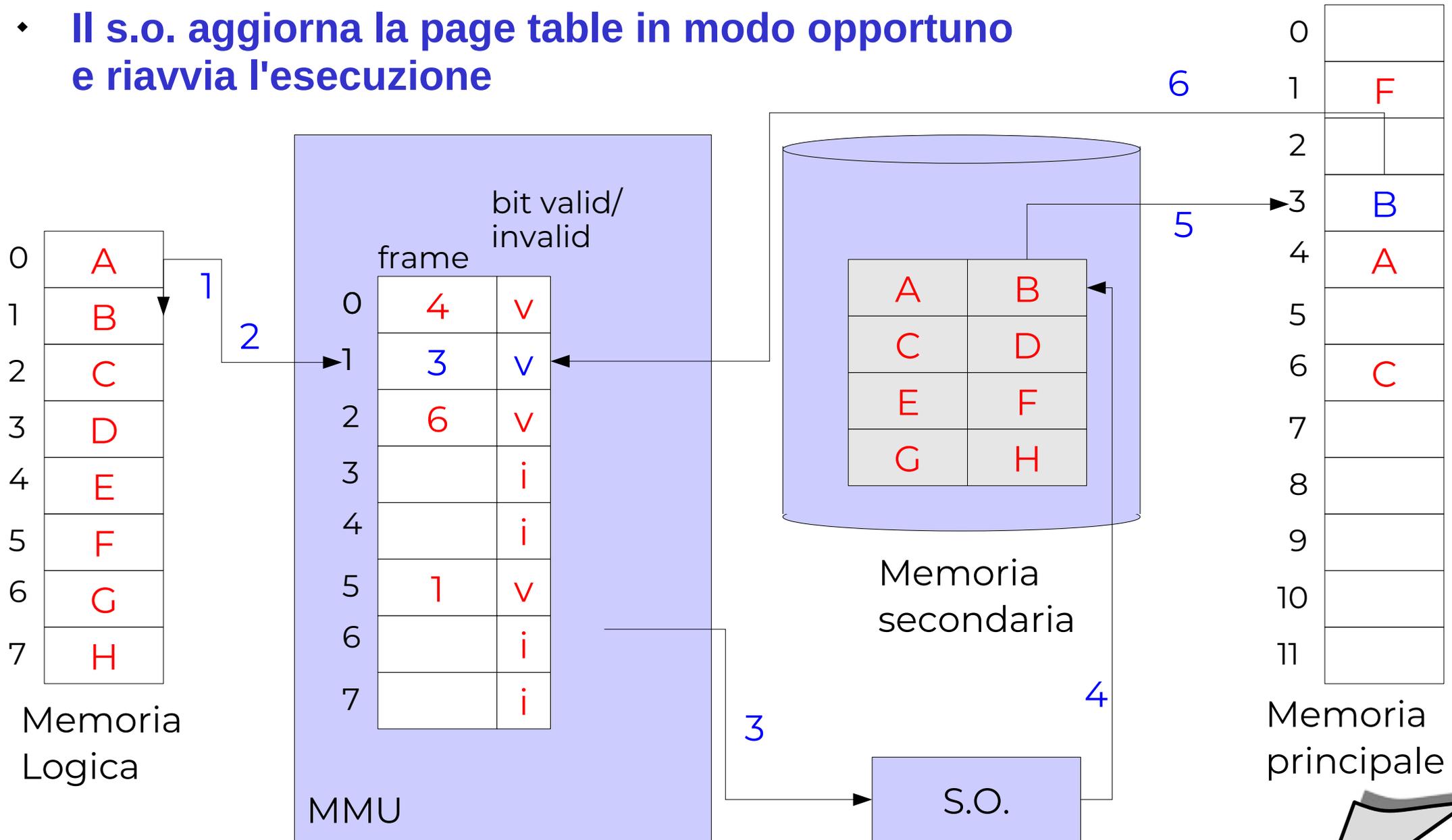
# Gestione dei page fault

- 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 (caricato il TLB)
- ♦ Riattiva il processo

# Algoritmi di rimpiazzamento

---

- ♦ **Obiettivi**

- ♦ minimizzare il numero di page fault

- ♦ **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:**

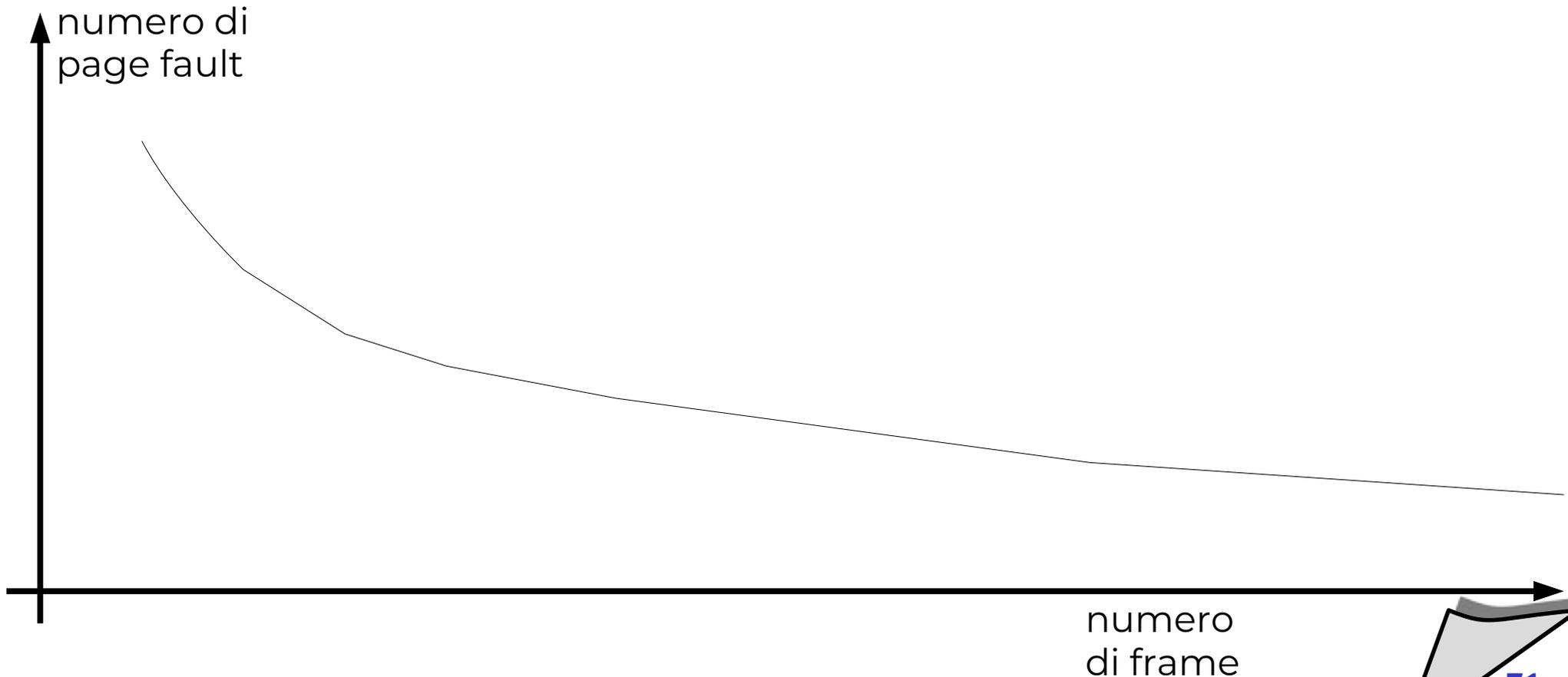
- ♦ la stringa di riferimenti può essere limitata ai numeri di pagina, in quanto non siamo interessati agli offset

- ♦ **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
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

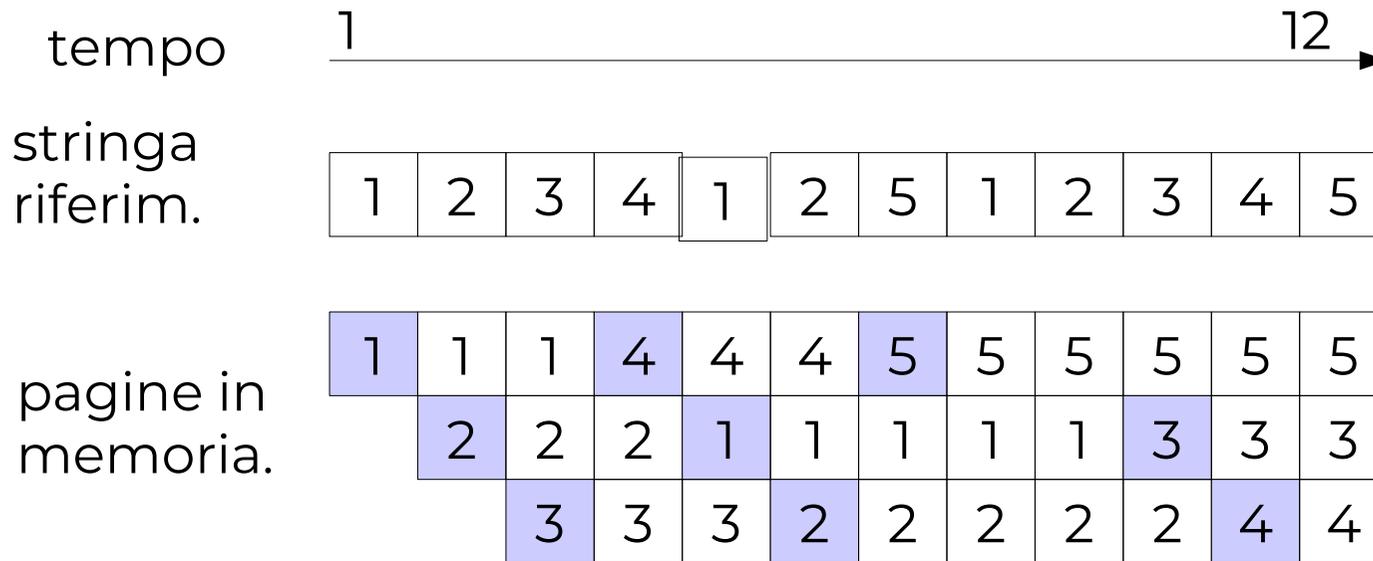
pagine in memoria.

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	1	1	1	1	1	0	0
		1	1	1	1	0	0	0	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	1

# Algoritmo FIFO - Esempio 2

- ♦ **Caratteristiche**

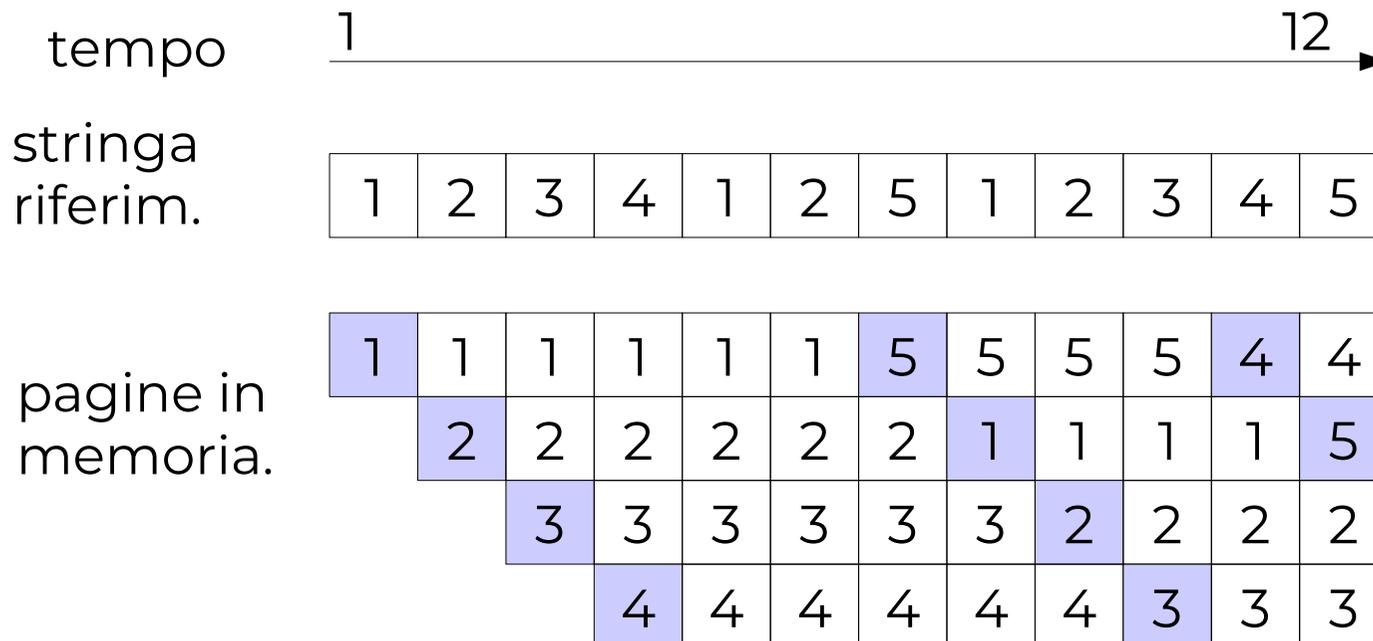
- ♦ numero di frame in memoria: 3
- ♦ numero di page fault: 9 (su 12 accessi in memoria)



# Algoritmo FIFO - Esempio 3

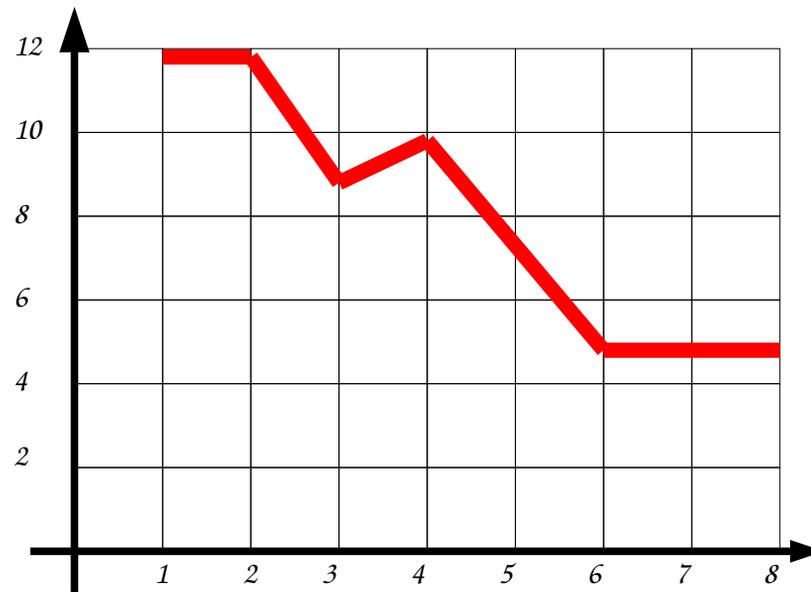
## ♦ Caratteristiche

- ♦ 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

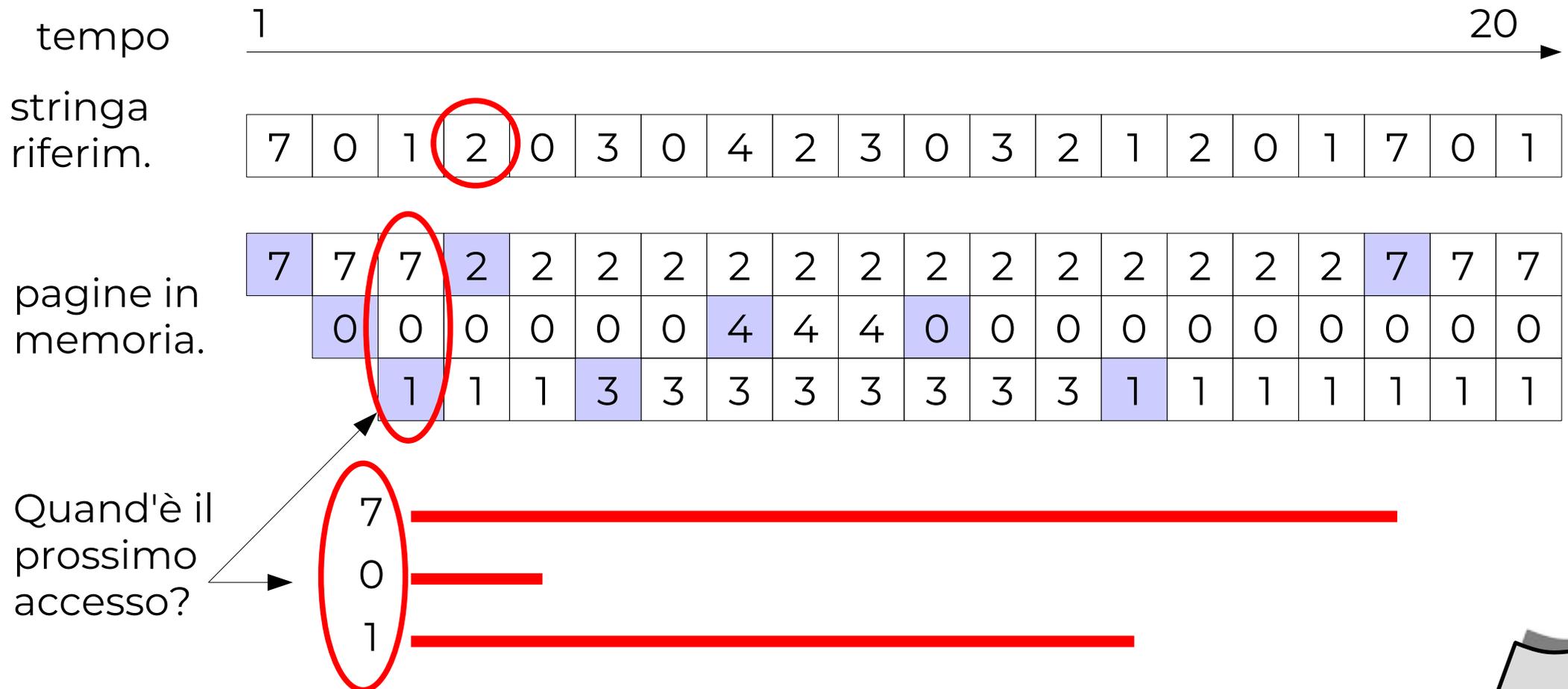
- ♦ **Considerazioni**

- ♦ 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)

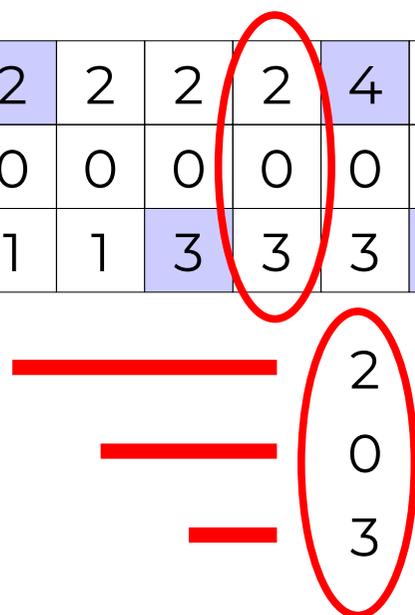
tempo 1 20

stringa referim.

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	1	1	1	1	1	1	1
	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	3	3	3	3	0	0	0	0	0
		1	1	1	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	7	7	7



Quand'è stato l'ultimo accesso?

# 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

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

$$S_t(s, A, m) \subseteq S_t(s, A, m+1)$$

## ♦ In altre parole

- ♦ se l'insieme delle pagine in memoria con  $m$  frame è sempre un sottoinsieme delle pagine in memoria con  $m+1$  frame
- ♦ Per ogni stringa per ogni tempo per ogni ampiezza di memoria

# 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 non 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 signif. bit
- ◆ la pagina vittima è quella con valore minore; in caso di parità, si utilizza una disciplina FIFO

Storia pagina x



Storia pagina x



Nuovo valore ref. bit



# 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

---

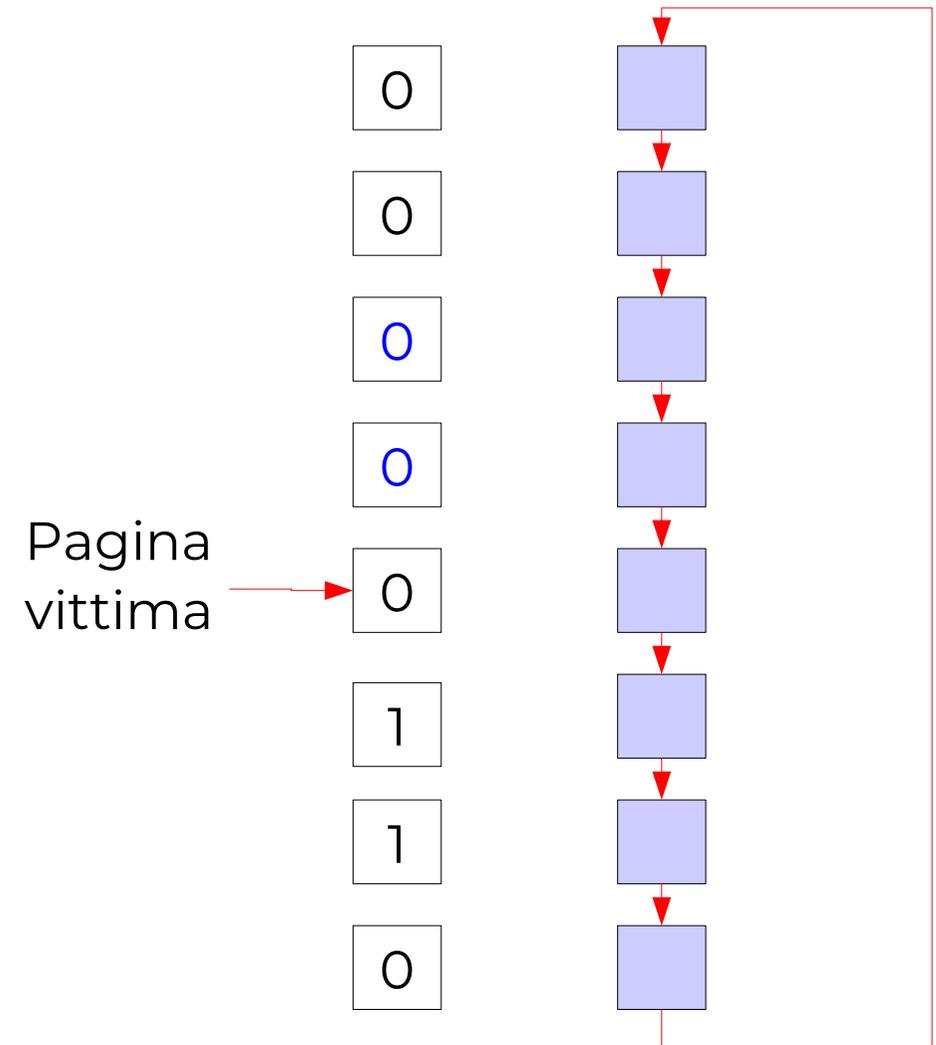
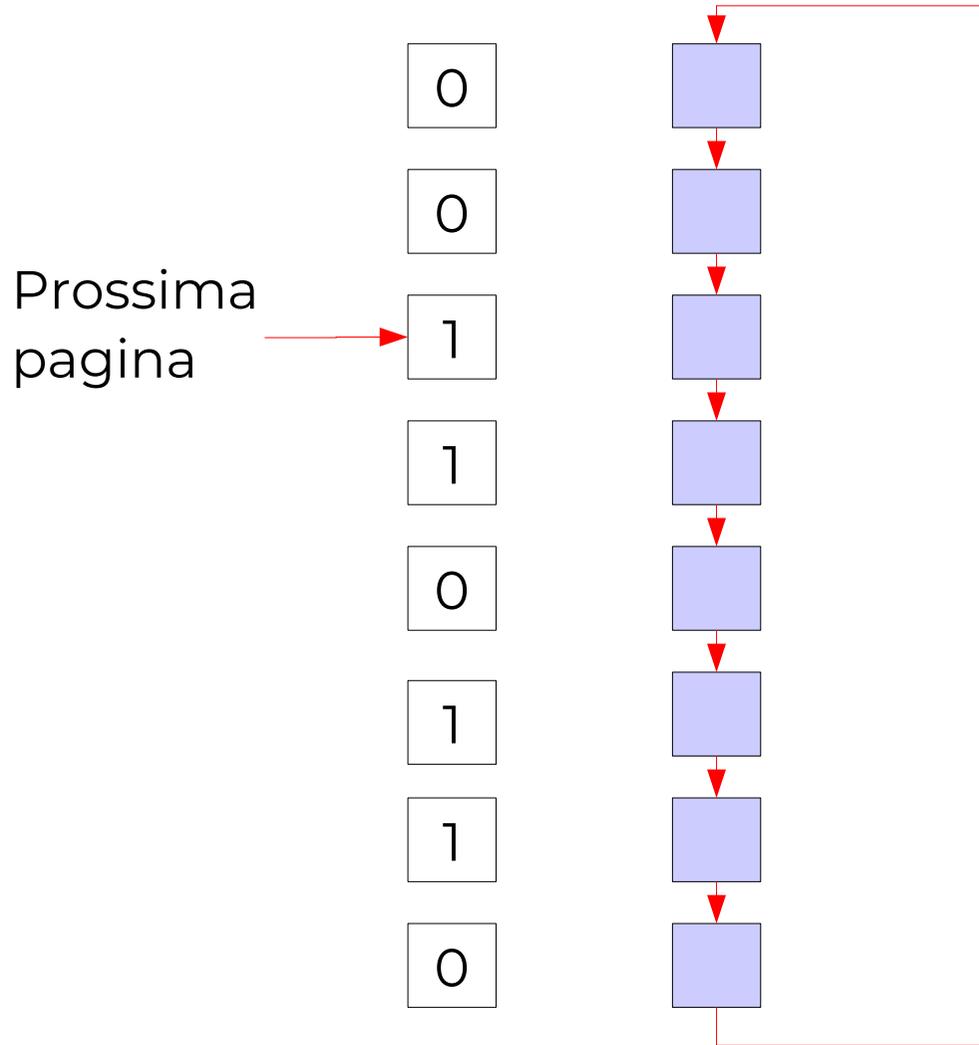
- ♦ **Considerazioni**

- ♦ 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

# 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

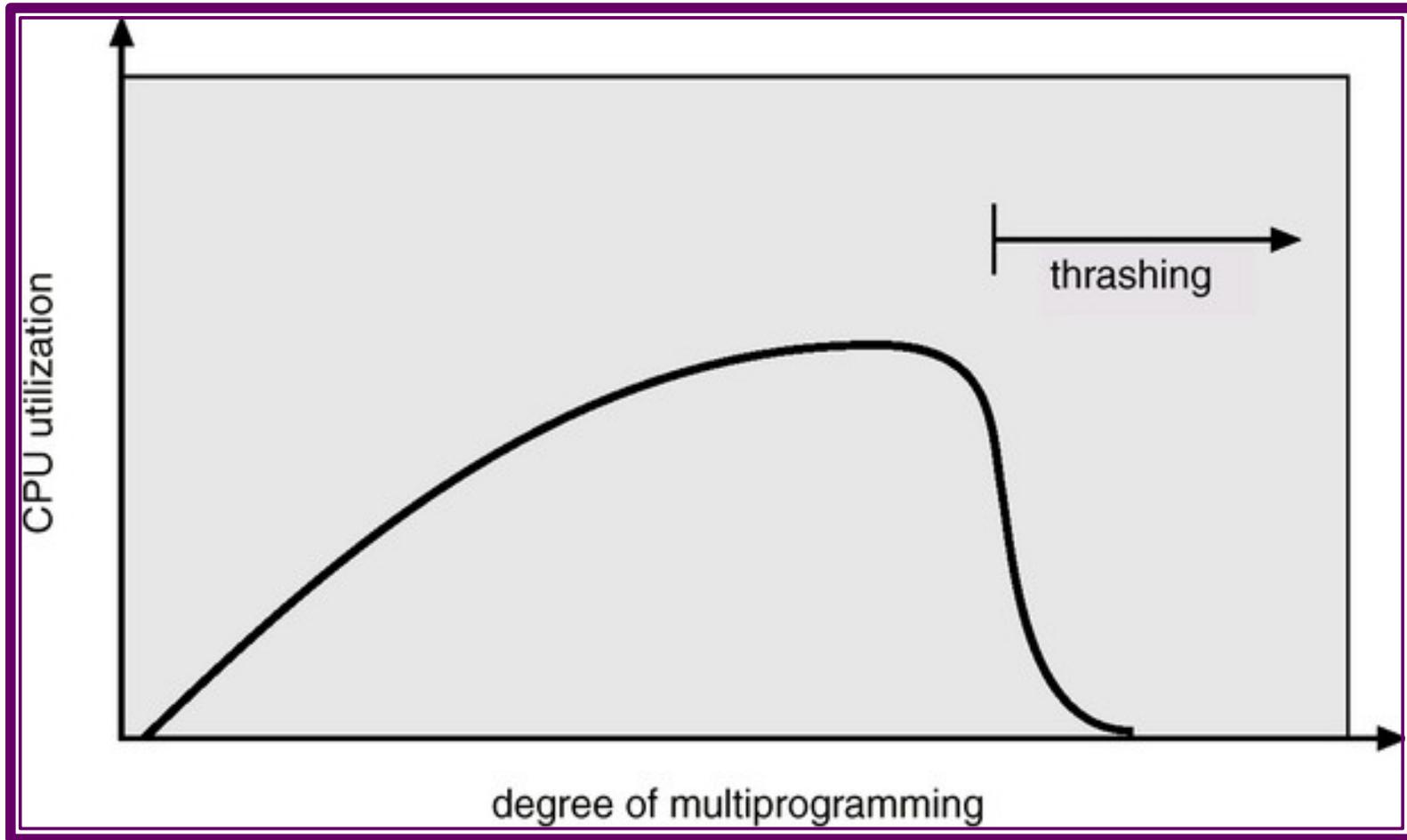
# Trashing

---

- ◆ **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

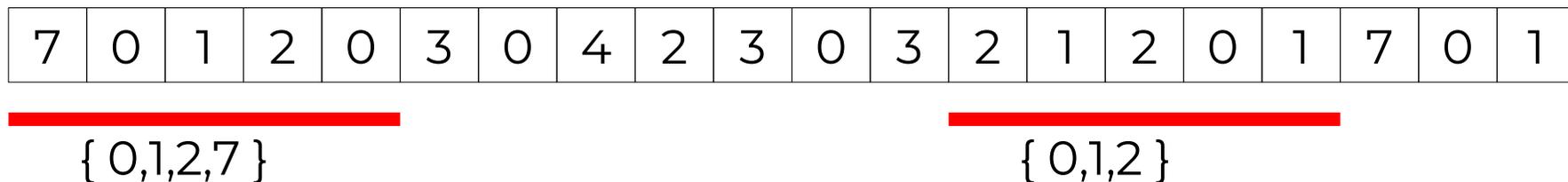
- ◆ **Definizione**

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

- ◆ **Considerazione**

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

- ◆ **Esempio:  $\Delta = 5$**



# Working Set

---

- ♦ **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  $\Delta$  troppo piccolo**
  - ♦ si considera non più utile ciò che in realtà serve
  - ♦ Si sottovaluta il numero di pagine necessarie per il processo
  - ♦ Falsi negativi di trashing
- ♦ **Se si sceglie  $\Delta$  troppo grande**
  - ♦ si considera utile anche ciò che non serve più
  - ♦ Si sopravvaluta il numero di pagine necessarie
  - ♦ 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