

Sistemi Operativi 1

AA 2018/2019

Gestione della Memoria

Introduzione

- Introduzione
- Spazi di indirizzamento
- Allocazione contigua
- Paginazione
- Segmentazione
- Segmentazione con paginazione

Introduzione

- La condivisione della memoria da parte di più processi è essenziale per l'efficienza del sistema
- Problematiche:
 - Allocazione della memoria ai singoli job
 - Protezione dello spazio di indirizzamento
 - Condivisione dello spazio di indirizzamento
 - Gestione della memoria virtuale (swap)
- Nei sistemi moderni:
 - Gestione della memoria inseparabile dal concetto di memoria virtuale

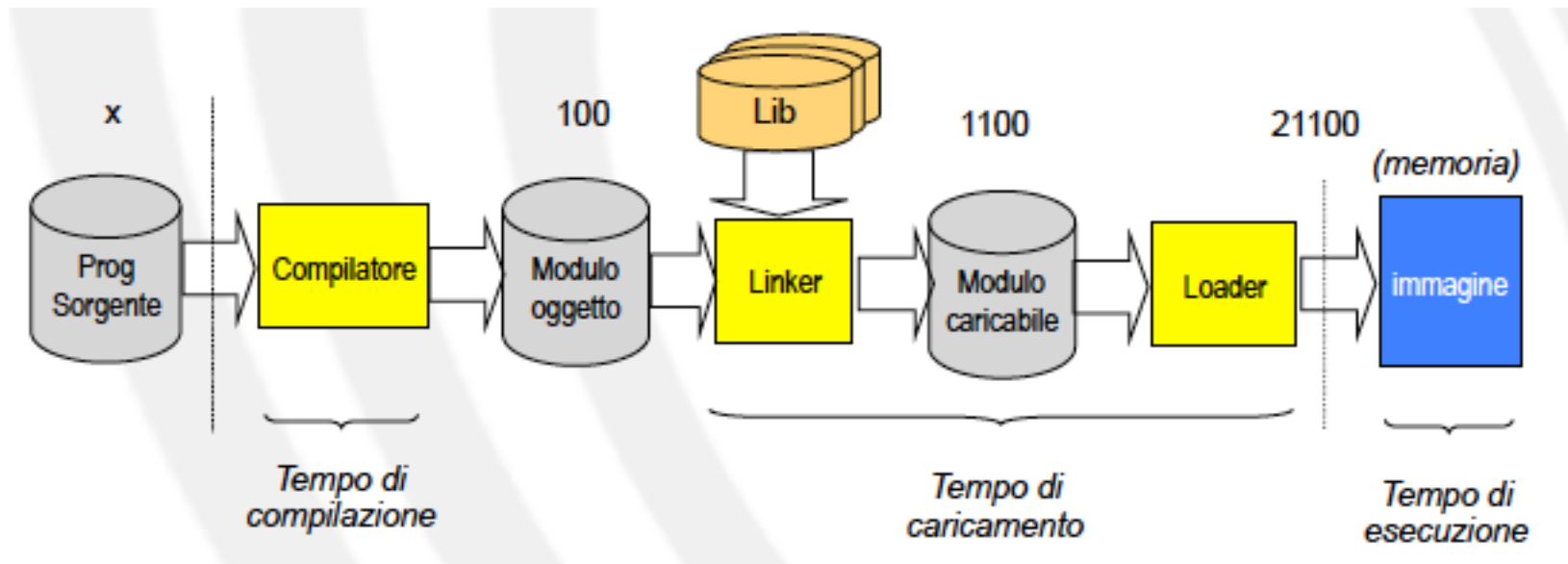
Introduzione

- Vincolo: ogni programma deve essere portato in memoria e trasformato in processo per essere eseguito
 - La CPU preleva le istruzioni da eseguire dalla memoria in base al valore del program counter
 - L'istruzione viene codificata e può prevedere il prelievo di operandi dalla memoria
 - Al termine dell'esecuzione dell'istruzione, il risultato può essere scritto in memoria
 - Quando il processo termina, la sua memoria viene rilasciata

Introduzione

- La trasformazione da programma a processo avviene attraverso varie fasi precedenti all'esecuzione
 - In ogni fase si ha una diversa semantica degli indirizzi
 - Spazio logico vs. spazio fisico
 - Gli indirizzi del programma sorgente sono simbolici
 - Come diventano indirizzi fisici?
 - Il compilatore associa agli indirizzi simbolici indirizzi rilocabili
 - Il linker o il loader associano agli indirizzi rilocabili indirizzi assoluti

Fasi della traduzione



- Gli indirizzi hanno diverse rappresentazioni nelle varie fasi di costruzione di un programma
- Il collegamento tra indirizzi simbolici e indirizzi fisici viene detto *binding*

Binding & indirizzi

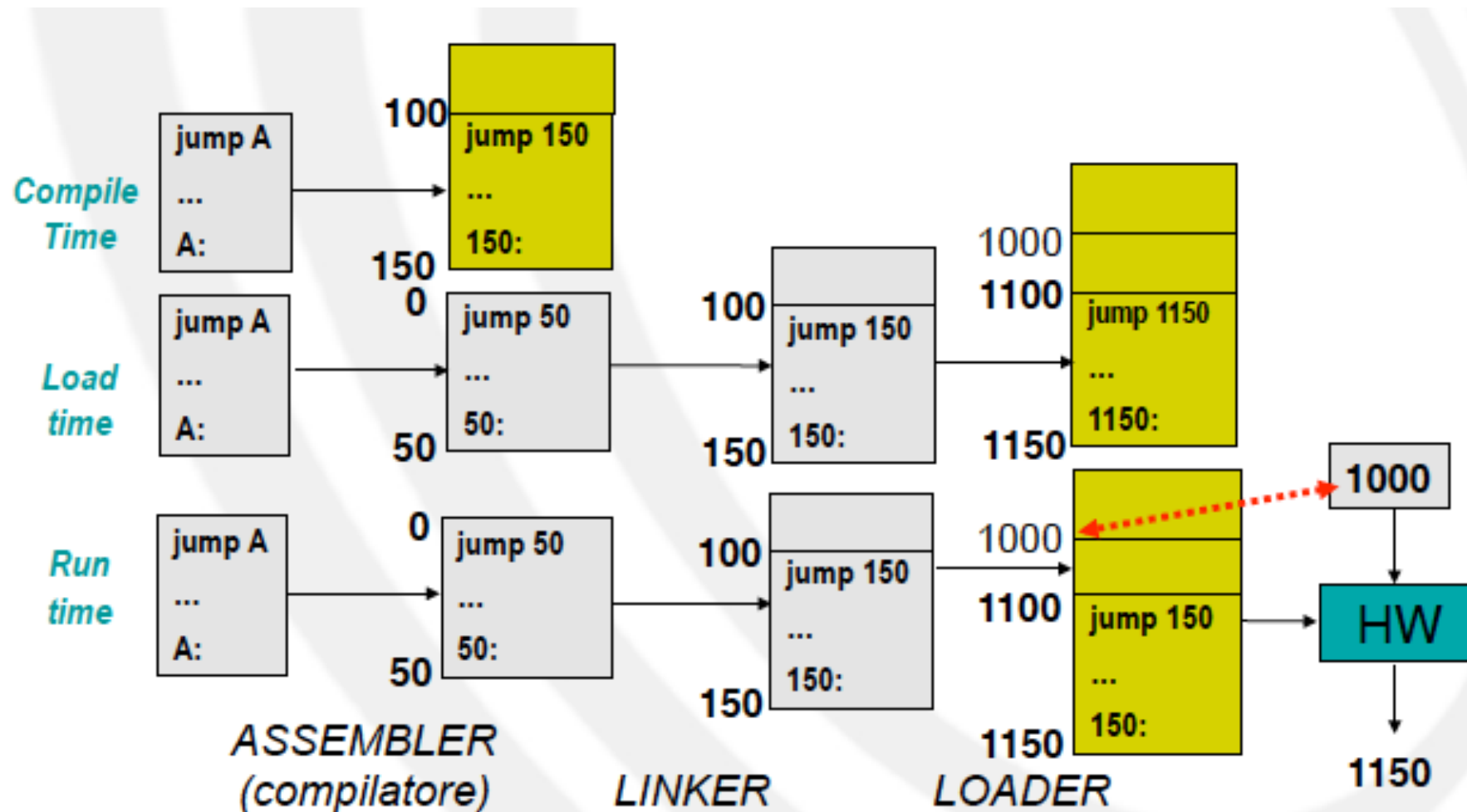
- Il binding di dati e istruzioni a indirizzi di memoria può avvenire in tre momenti distinti
 - Al tempo di compilazione (compile time)
 - Se è noto a priori in quale parte della memoria risiederà il processo, è possibile generare codice assoluto
 - Se la locazione di partenza cambia, necessario (ri)compilare
 - Al tempo di caricamento (load time)
 - Necessario generare codice rilocabile (=riposizionabile)
 - Indirizzi relativi (es. 128 byte dall'inizio del programma)
 - Se cambia l'indirizzo di riferimento, devo (ri)caricare
 - Al tempo di esecuzione (run time)
 - Binding posticipato se il processo può essere spostato durante l'esecuzione in posizioni diverse della memoria
 - Richiesto supporto hardware (per efficienza)

statico

dinamico



Binding - esempio



Collegamento (linking)

- Statico
 - Tradizionale: tutti i riferimenti sono definiti prima dell'esecuzione
 - L'immagine del processo contiene una copia delle librerie usate
- Dinamico
 - Link posticipato al tempo di esecuzione
 - Il codice del programma non contiene il codice delle librerie ma solo un riferimento (stub) per poterle recuperare (es. Windows DLL)

Caricamento (loading)

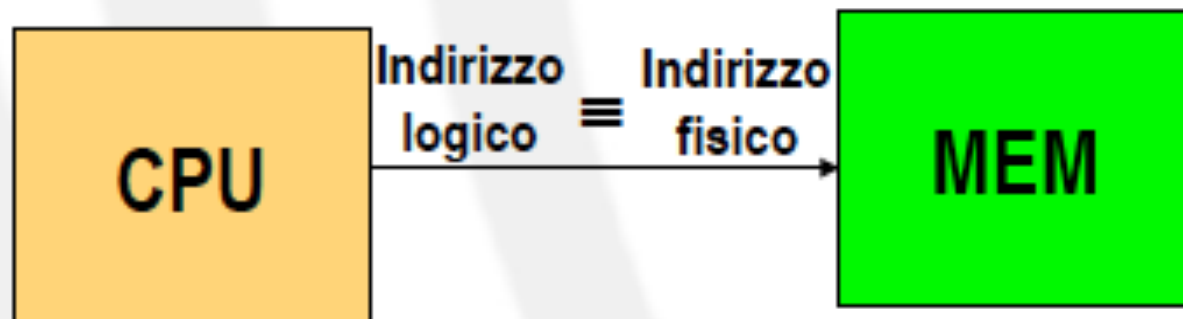
- Statico
 - Tradizionale: tutto il codice è caricato in memoria al tempo dell'esecuzione
- Dinamico
 - Caricamento posticipato dei moduli in corrispondenza del primo utilizzo
 - Codice non utilizzato, non caricato
 - Utile per codice con molti casi “speciali”

Spazi di indirizzamento

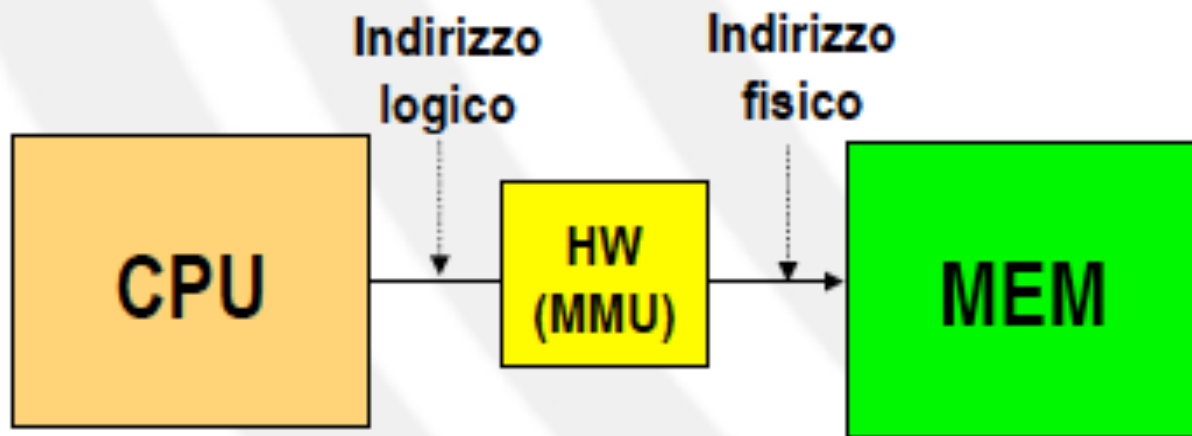
- Lo spazio di indirizzamento logico è legato a uno spazio di indirizzamento fisico
 - indirizzo logico:
 - generato dalla CPU
 - detto anche indirizzo virtuale
 - indirizzo fisico:
 - visto dalla memoria
- Nel binding a compile o load-time
 - indirizzo fisico e logico coincidono
- Nel binding a run-time
 - indirizzo fisico e logico sono generalmente diversi



Binding statico vs dinamico



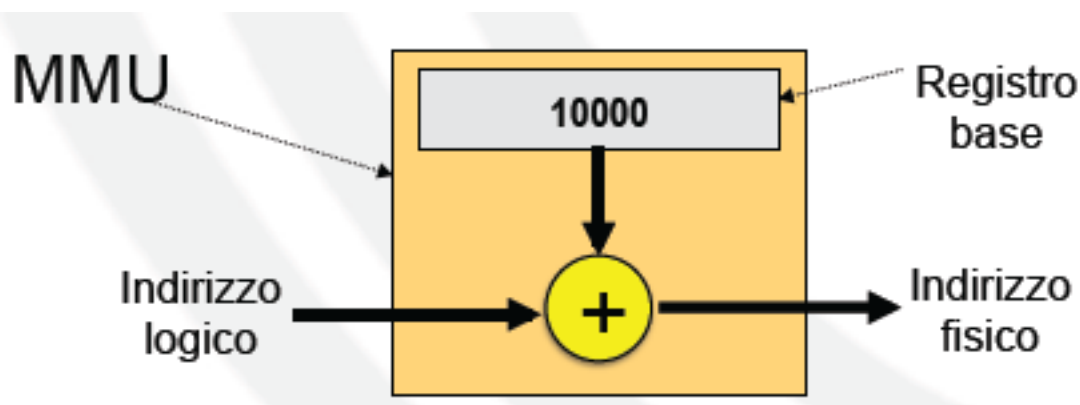
STATICO:
Compile time
& load time



DINAMICO:
Run time
(tempo di esecuzione)

Memory Management Unit (MMU)

- Dispositivo hardware che mappa indirizzi virtuali (logici) in indirizzi fisici
- Schema base:
 - Il valore del registro di rilocazione è aggiunto ad ogni indirizzo generato da un processo, e inviato alla memoria



Considerazioni

- In un sistema multiprogrammato non è possibile conoscere in anticipo dove un processo può essere posizionato in memoria
 - Binding a tempo di compilazione non possibile
- L'esigenza di avere lo swap impedisce di poter utilizzare indirizzi rilocati in modo statico
 - Binding a tempo di caricamento non possibile
- Conseguenze:
 - Rilocalizzazione dinamica:
 - Usata per sistemi “complessi”
 - Gestione della memoria nel S.O.
 - Rilocalizzazione statica:
 - Possibile in sistemi per applicazioni specifiche
 - Limitata gestione della memoria nel S.O.



SCHEMI DI GESTIONE DELLA MEMORIA

Schemi di gestione della memoria

- Allocazione contigua
- Paginazione
- Segmentazione
- Segmentazione paginata



Prevedono che il programma sia interamente caricato in memoria

- NOTA
 - Soluzioni realistiche utilizzano memoria virtuale

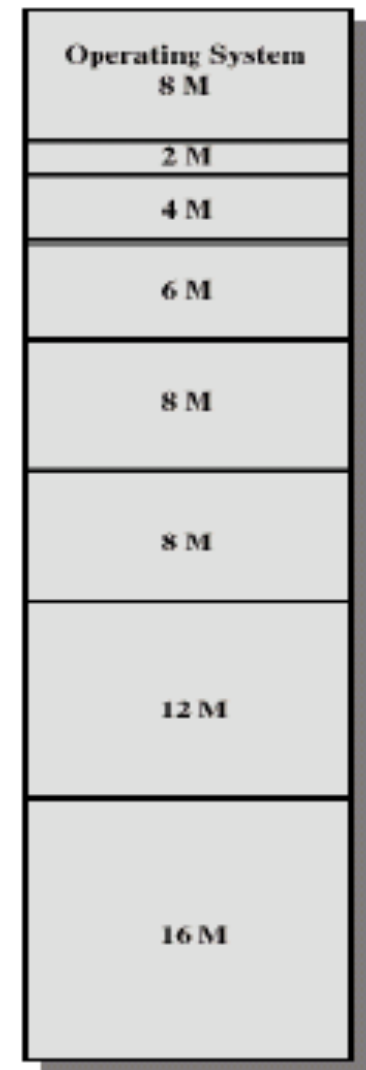
ALLOCAZIONE CONTIGUA

Allocazione contigua

- Processi allocati in memoria in posizioni contigue all'interno di una partizione
- La memoria è suddivisa in partizioni:
 - Partizioni fisse
 - Partizioni variabili
- Esempio:
 - Processo con dimensione dell'immagine di 10K
 - Occupa 10K consecutivi

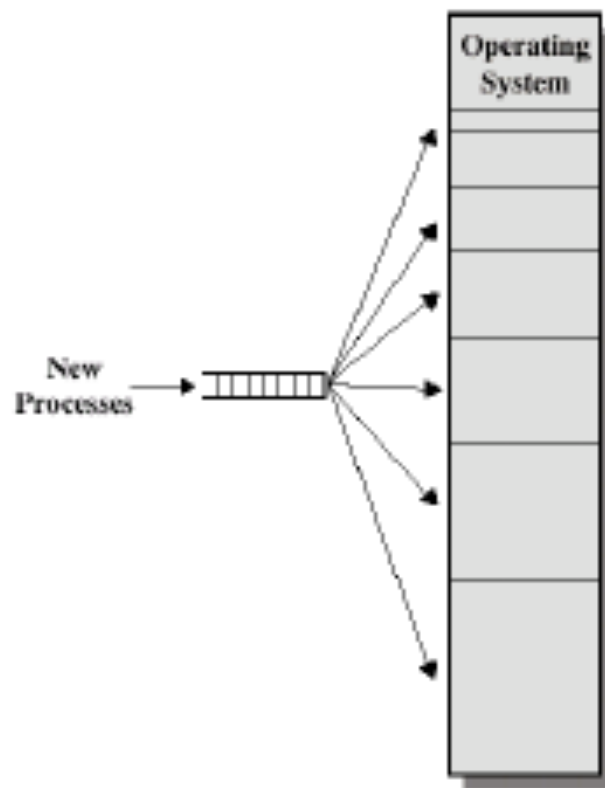
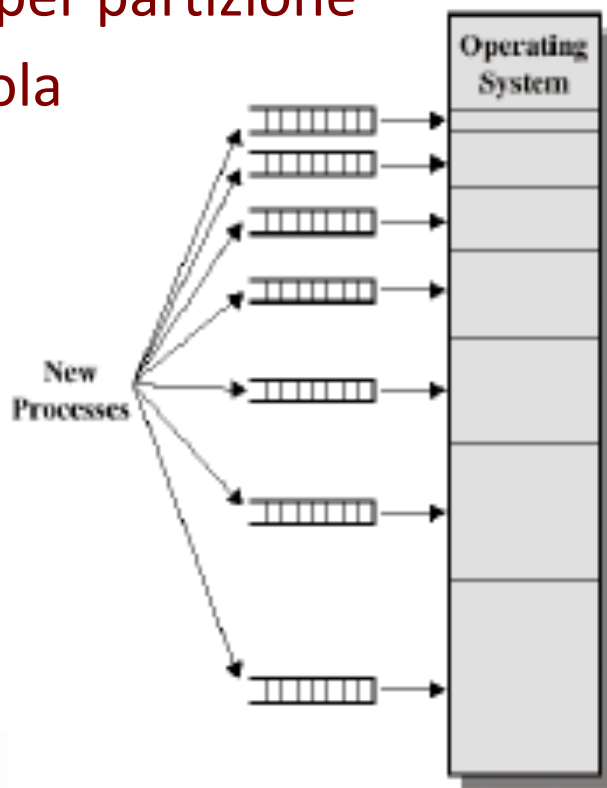
Tecnica delle partizioni fisse

- La memoria è:
 - insieme di partizioni di dimensioni predefinite (tipicamente diverse)
- Problematiche:
 - Assegnazione di memoria ai job
 - Supporto per la rilocalizzazione dinamica



Assegnazione della memoria

- Effettuata dallo scheduling a lungo termine
- Due opzioni:
 - Una coda per partizione
 - Coda singola



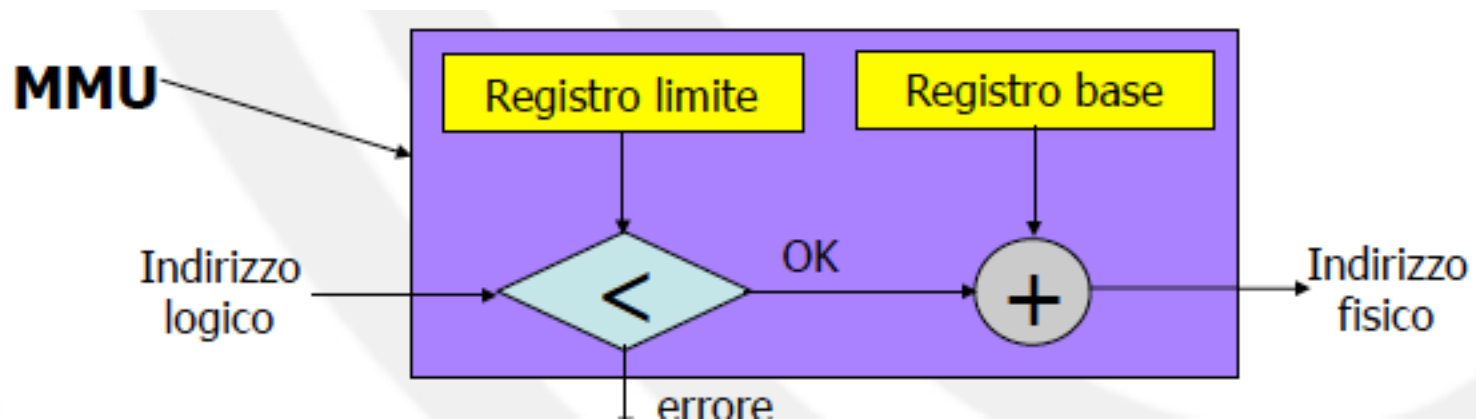
Assegnazione della memoria

- Una coda per partizione:
 - Il processo viene assegnato alla partizione più piccola in grado di contenerlo
 - Poco flessibile
 - Possono esserci partizioni vuote e job nelle altre code
- Coda unica gestita con politica:
 - FCFS
 - Facile, ma vi è un basso utilizzo della memoria
 - Scansione della coda
 - Best-fit-only
 - Scelta del job con dimensioni più simili alla partizione
 - First-available-fit
 - Scelta del primo job che può stare nella partizione



Supporto per la rilocalizzazione

- MMU consiste di *registri di rilocalizzazione* per proteggere lo spazio dei vari processi (attivamente e passivamente)
 - Contengono:
 - Valore dell'indirizzo più basso (registro base o di rilocalizzazione)
 - Limite superiore dello spazio logico (registro limite)
 - Ogni indirizzo logico deve risultare $<$ del limite



Considerazioni

- Vantaggi
 - Relativa semplicità
- Svantaggi
 - Grado di multiprogrammazione limitato dal n° di partizioni
 - Frammentazione → spreco di memoria
 - Frammentazione interna
 - Interna alla partizione
 - Se la dimensione della partizione è più grande dell dimensione del job
 - Frammentazione esterna
 - Se vi sono partizioni non utilizzate che non soddisfano le esigenze dei processi in attesa

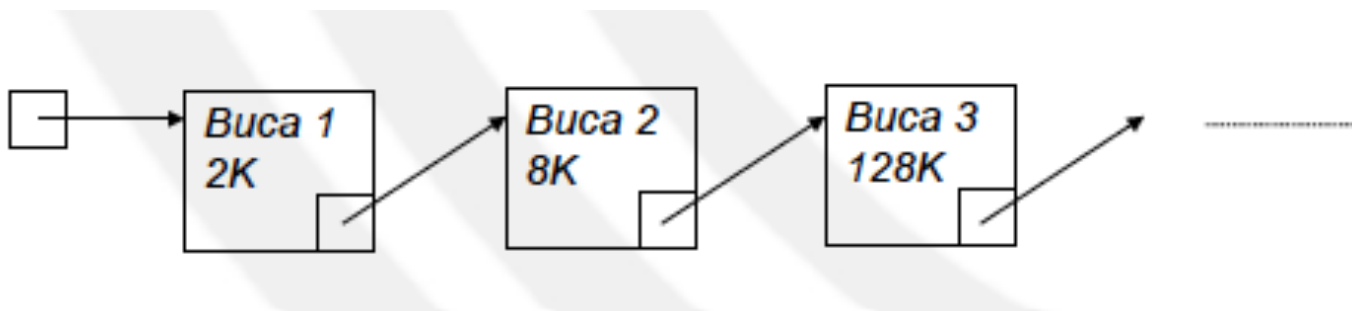


Tecnica delle partizioni variabili

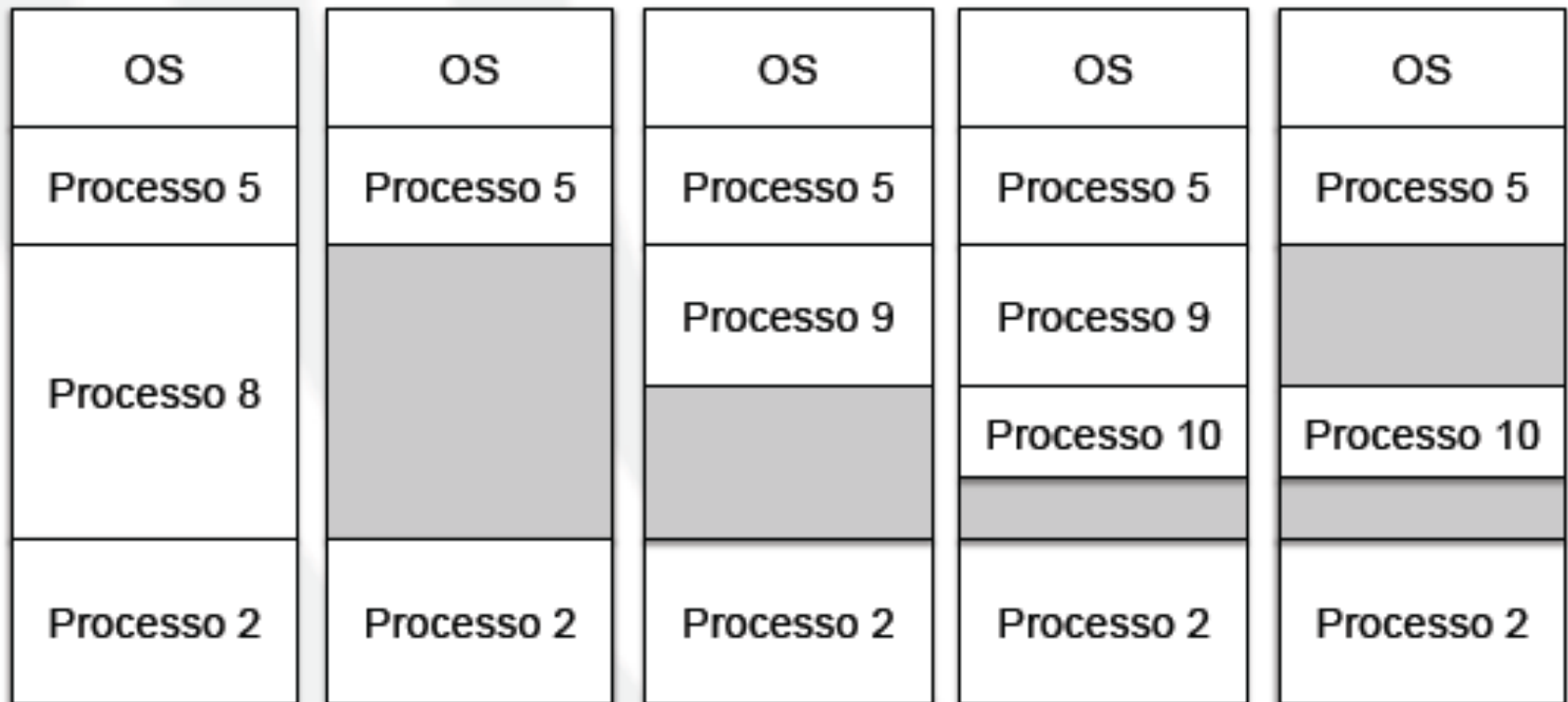
- Spazio utente diviso in partizioni di dimensioni variabili
 - di dimensioni identiche alla dimensione dei processi
- Motivazione:
 - Eliminare la frammentazione interna
- Problematiche:
 - Assegnazione di memoria ai job
 - Supporto per la rilocalizzazione dinamica

Assegnazione della memoria

- Vista della memoria: insieme di buche (holes)
 - Buca = blocco di memoria disponibile
- Il S.O. mantiene informazioni su:
 - partizioni allocate
 - Buche
- Quando arriva un processo, gli viene allocata memoria usando la buca che lo può contenere



Assegnazione della memoria

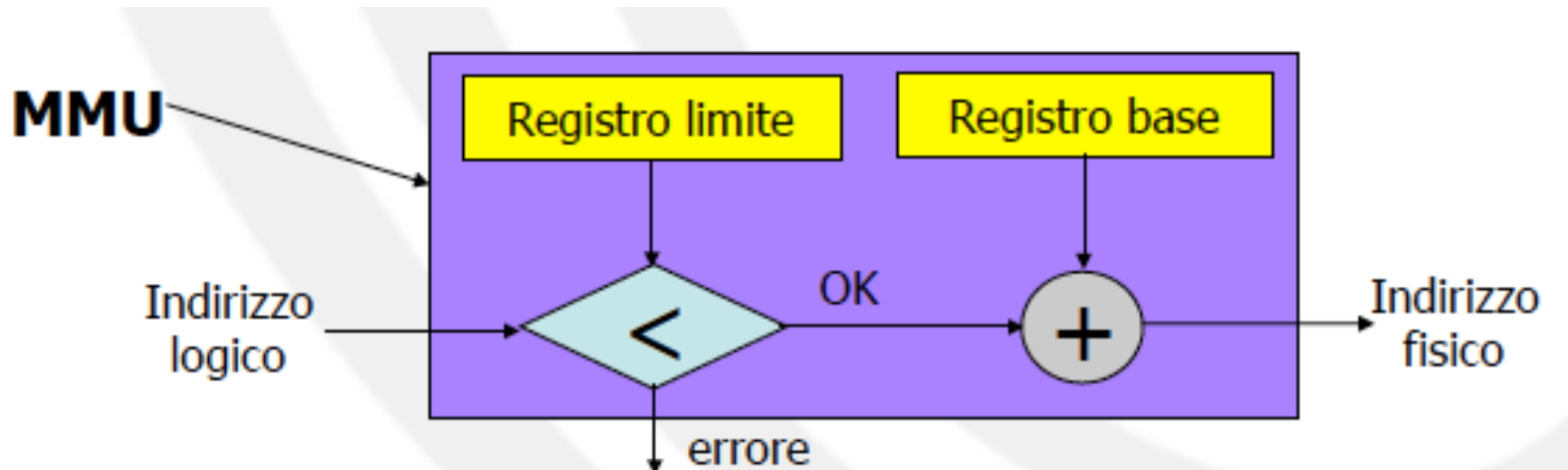


Assegnazione della memoria

- Come soddisfare la richiesta di n celle di memoria data una lista di buche libere?
- Strategie:
 - *First-fit*: alloca la prima buca grande a sufficienza
 - *Best-fit*: alloca la più piccola buca grande a sufficienza
 - richiede la scansione della lista
 - minimo spreco
 - *Worst-fit*: alloca la buca più grande
 - richiede la scansione della lista
 - lascia la buca di dimensioni più grandi
- *First fit* è tipicamente la migliore

Supporto per la rilocalizzazione

- Come per partizioni fisse
 - Registri di rilocalizzazione per proteggere lo spazio dei vari processi (attivamente e passivamente)



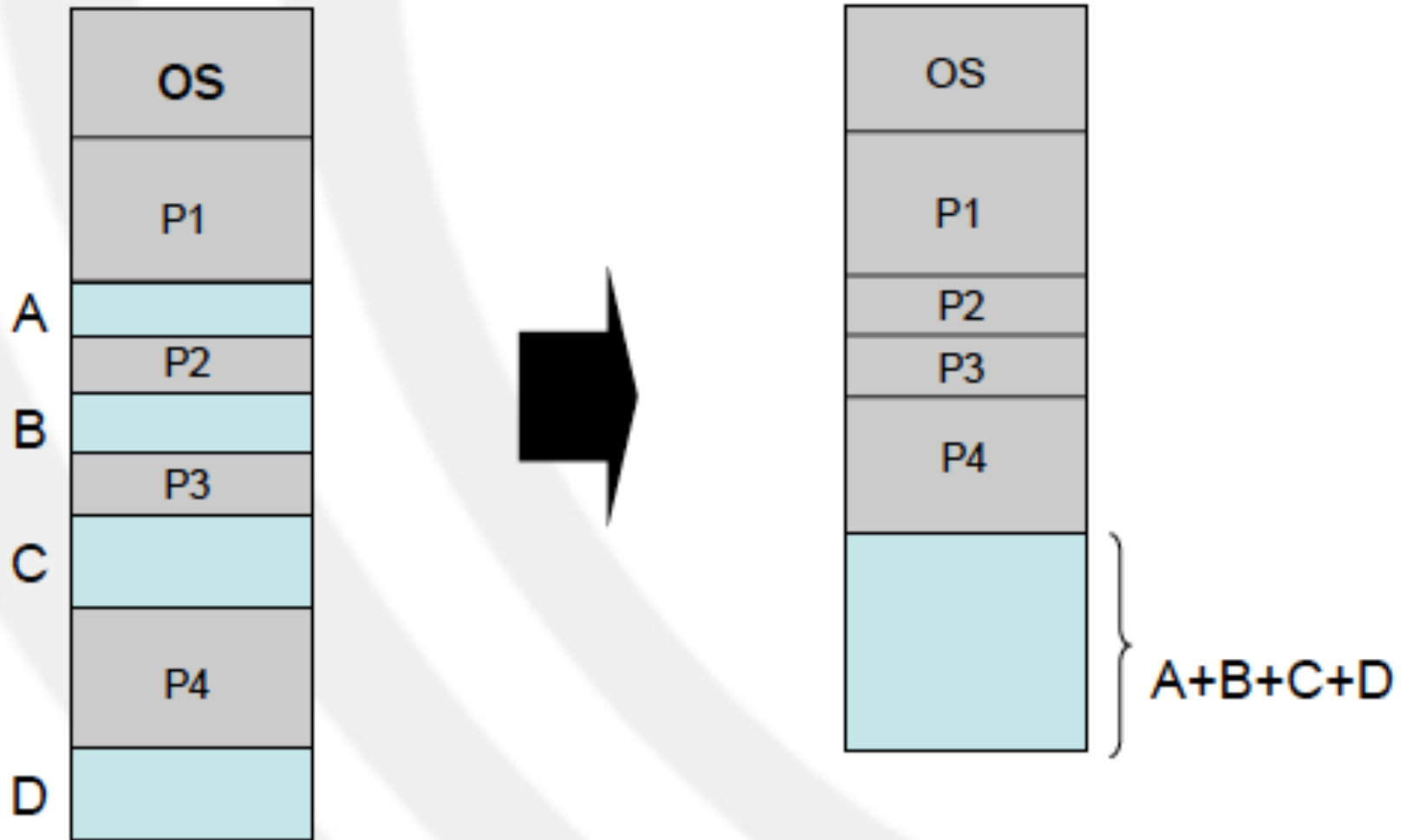
Considerazioni

- Vantaggi
 - No frammentazione interna per costruzione
- Svantaggi
 - Frammentazione esterna: esiste lo spazio disponibile in memoria, ma non è contiguo
 - Con first fit, dati N blocchi allocati, $0.5 * N$ blocchi vanno persi

Riduzione della frammentazione

- Soluzione intuitiva: compattazione
 - Contenuto della memoria spostato in modo da rendere contigue tutte le partizioni
 - Possibile solo se la rilocalizzazione è dinamica
 - Richiede modifica del registro base
 - Costosa: quanta memoria spostato?

Compattazione - esempio



Tecnica del *buddy system*

- Compromesso tra partizioni fisse e variabili
 - La memoria è vista come una serie di liste di blocchi di dimensione 2^k , con $L < k < U$
 - 2^L = più piccolo blocco allocato (es. 4K)
 - 2^U = più grande blocco allocato (es. tutta la memoria)
 - La memoria è disponibile sotto forma di blocchi di dimensione 2^k
 - All'inizio tutta la memoria è disponibile
 - La lista di blocchi di dimensione 2^U contiene un solo blocco che rappresenta tutta la memoria
 - Le altre liste sono vuote

Tecnica del *buddy system*

- Quando arriva una richiesta di dimensione s , si cerca un blocco libero con dimensione “adatta” purché sia pari a una potenza del 2
 - Se $2^{U-1} < s \leq 2^U$ l'intero blocco di dimensione 2^U viene allocato
 - Altrimenti il blocco 2^U è diviso in due blocchi di dimensione 2^{U-1} . Se $2^{U-2} < s \leq 2^{U-1}$ l'intero blocco di dimensione 2^{U-1} viene allocato
 - Altrimenti il blocco 2^{U-1} è diviso in due blocchi di dimensione 2^{U-2}
 - e così via fino ad arrivare (al limite) al blocco di dimensione 2^L

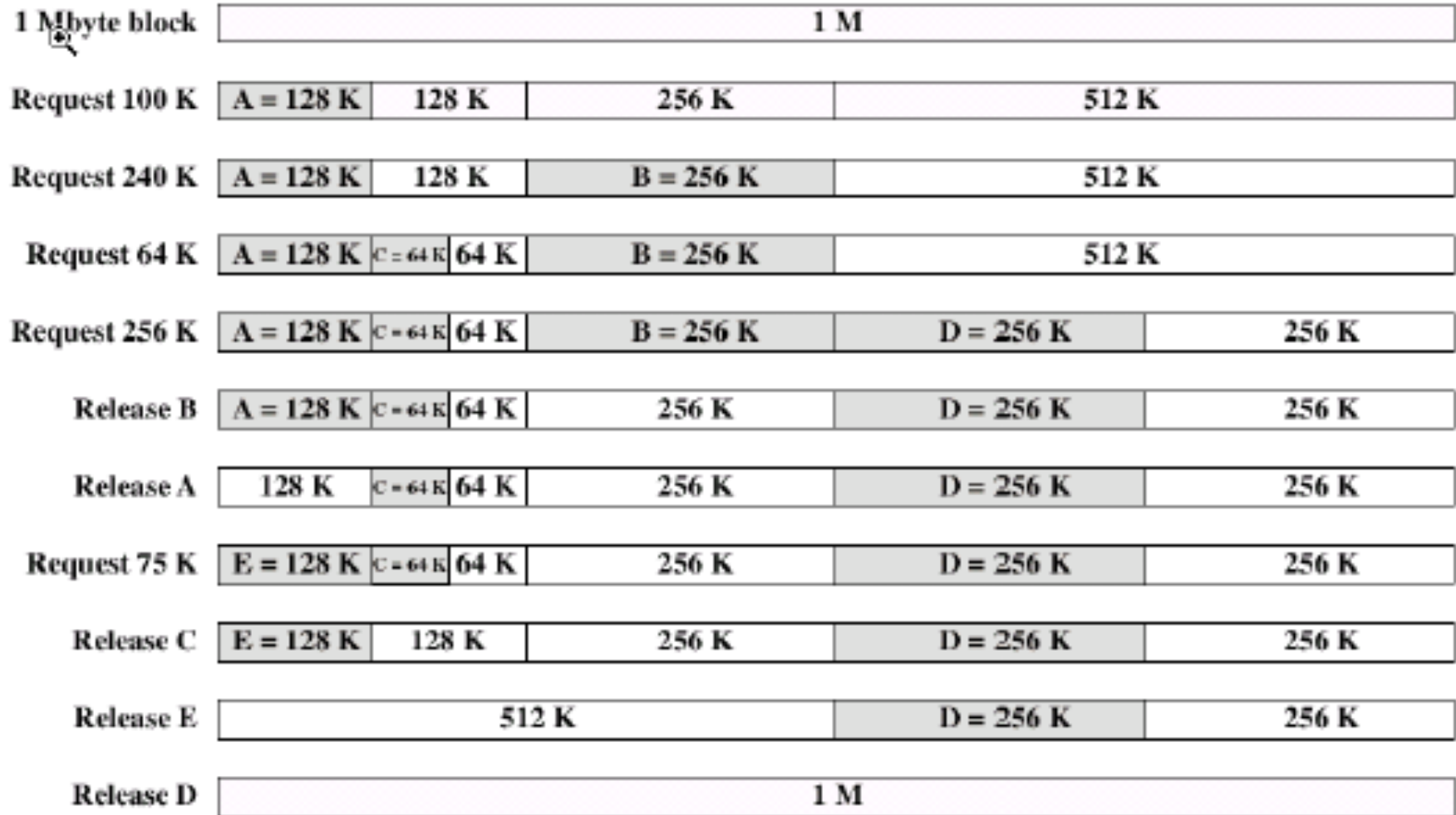


Tecnica del *buddy system*

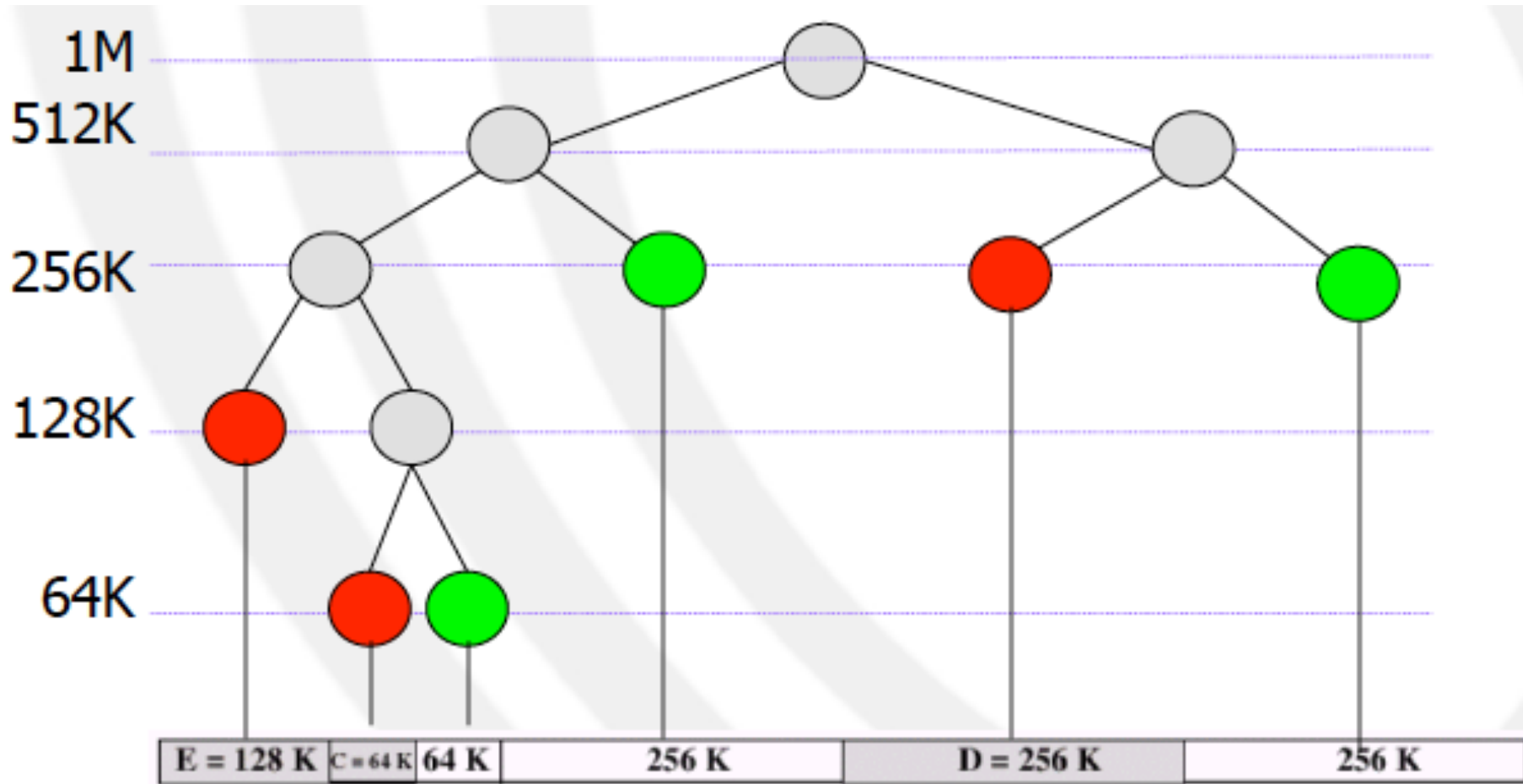
- Quando un processo rilascia la memoria, il suo blocco torna a far parte della lista dei blocchi di dimensione corrispondente
 - Se si formano 2 blocchi adiacenti di dimensione 2^K , è possibile compattarli ottenendo un unico blocco libero di dimensione 2^{K+1}
- Vantaggio
 - La compattazione richiede solo di scorrere la lista dei blocchi di dimensione 2^K , quindi è veloce
- Svantaggio
 - Frammentazione interna dovuta solo ai blocchi di dimensione 2^L



Buddy system - esempio



Buddy system - esempio



PAGINAZIONE

Paginazione

- Tecnica per eliminare la frammentazione esterna
- Idea:
 - Permettere che lo spazio di indirizzamento fisico di un processo sia non-contiguo
 - Si alloca memoria fisica dove essa è disponibile
- Memoria fisica:
 - divisa in blocchi di dimensione fissa detti *frame*
 - Tipico 512 byte ... 8K byte
- Memoria logica:
 - divisa in blocchi della stessa dimensione detti *pagine*

Paginazione

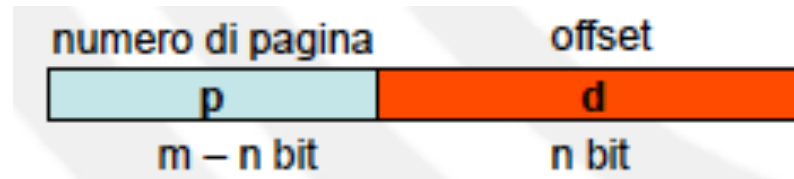
- Per eseguire un programma avente dimensione n pagine, bisogna trovare n frame liberi
- Si utilizza una tabella delle pagine (*page table*) per mantenere traccia di quale frame corrisponde a quale pagina
 - Una tabella delle pagine per ogni processo
 - viene usata per tradurre un indirizzo logico in un indirizzo fisico

Paginazione - esempio

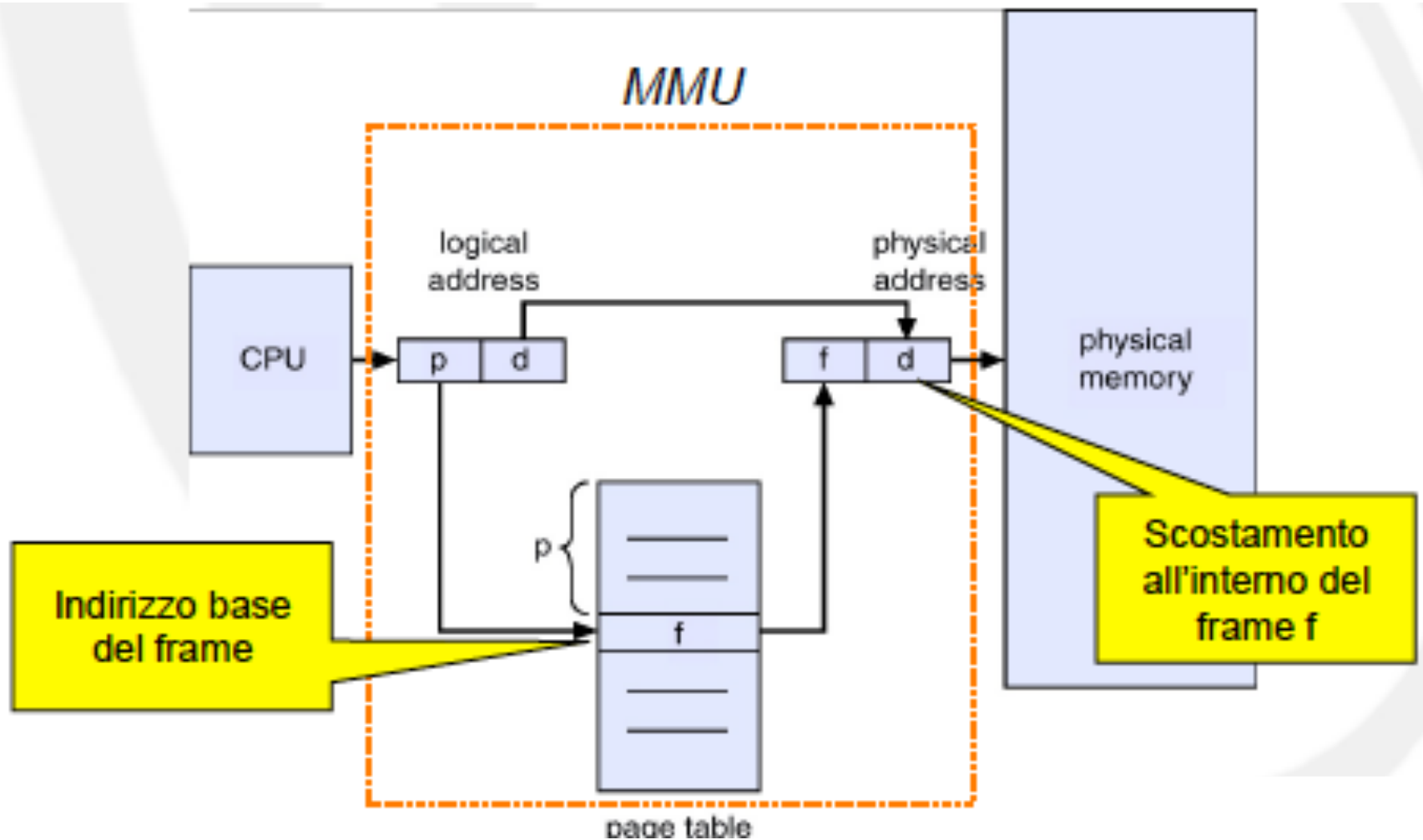
- Dimensione della pagina = 1KB
- Dimensione del programma = 2.3KB
- Necessarie 3 pagine
 - dell'ultima pagina si userà solo 0.3KB
- E' ancora possibile della frammentazione interna, ma solo nell'ultima pagina

Traduzione degli indirizzi

- L'indirizzo generato dalla CPU viene diviso in due parti:
 - numero di pagina (p)
 - Usato come indice nella tabella delle pagine che contiene l'indirizzo di base di ogni frame
 - offset (d)
 - Combinato con l'indirizzo base definisce l'indirizzo fisico che viene inviato alla memoria
 - Se la dimensione della memoria è 2^m e quella di una pagina è 2^n (parole/byte), l'indirizzo è suddiviso così:

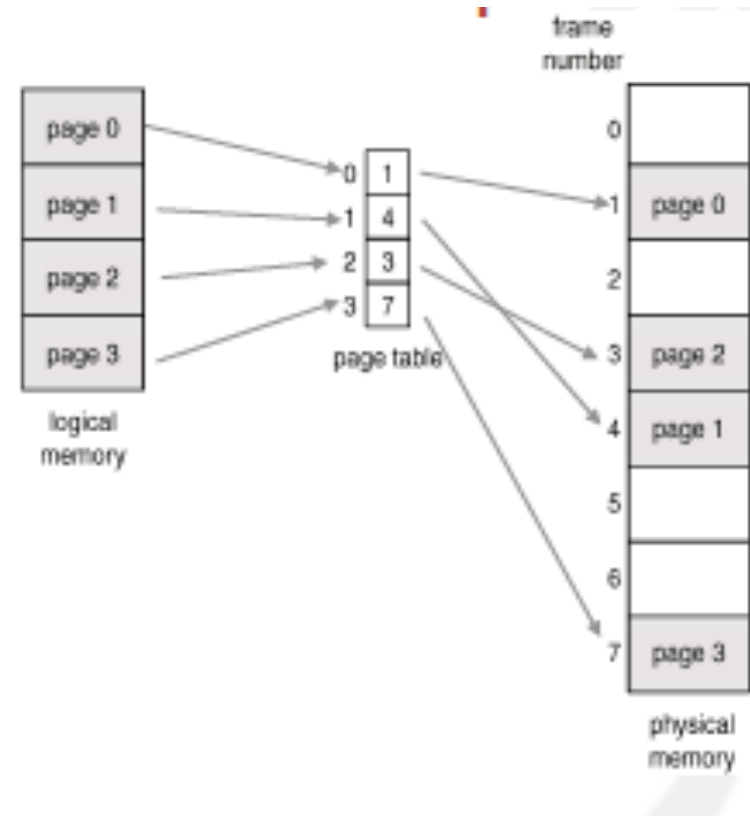


Traduzione degli indirizzi - architettura



Traduzione degli indirizzi - esempio

- Memoria da 8KB
- Pagine di 1KB
 - L'indirizzo logico 936 diventa l'indirizzo fisico 1960
 - pagina 0 (0...1023)
 - (inizio pagina = 0)
 - offset = 936
 - pagina 0 → frame 1 (1024...2047)
 - indirizzo fisico = 1024 + offset = 1024+936 = 1960
 - L'indirizzo logico 2049 diventa l'indirizzo fisico 3073
 - pagina 2 (2048...3071)
 - inizio pagina = 2048
 - offset = 1
 - pagina 2 → frame 3 (3072...4095)
 - indirizzo fisico = 3072 + 1 = 3073



Implementazione della tabella delle pagine

- L'efficienza è fondamentale
- Soluzioni:
 - Implementazione tramite registri
 - Implementazione in memoria
 - Tabella delle pagine multilivello
 - Tabella delle pagine invertita

Implementazione tramite registri

- Le entry (righe) della tabella delle pagine sono mantenute nei registri
 - Soluzione efficiente ma...
 - ... fattibile se il numero di entry è limitato (perché ci sono pochi registri)
 - ... allunga i tempi di contex switch perché richiede salvataggio dei registri

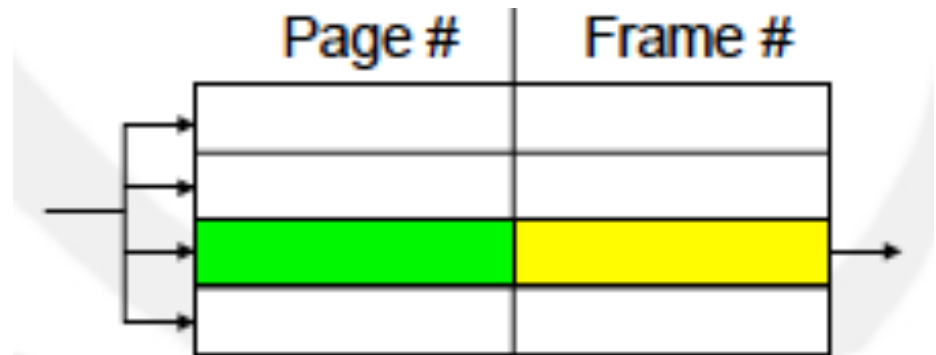
Implementazione in memoria

- La tabella risiede in memoria
- Vengono utilizzati due registri:
 - Page-table base register (PTBR)
 - punta alla tabella delle pagine
 - Page-table length register (PTLR) [opzionale]
 - contiene la dimensione della tabella delle pagine
- Il context switch è più breve perché richiede solo modifica del PTBR (PTLR)
- Problema:
 - ogni accesso a dati/istruzioni richiede due accessi in memoria (tabella delle pagine + dato/istruzione)

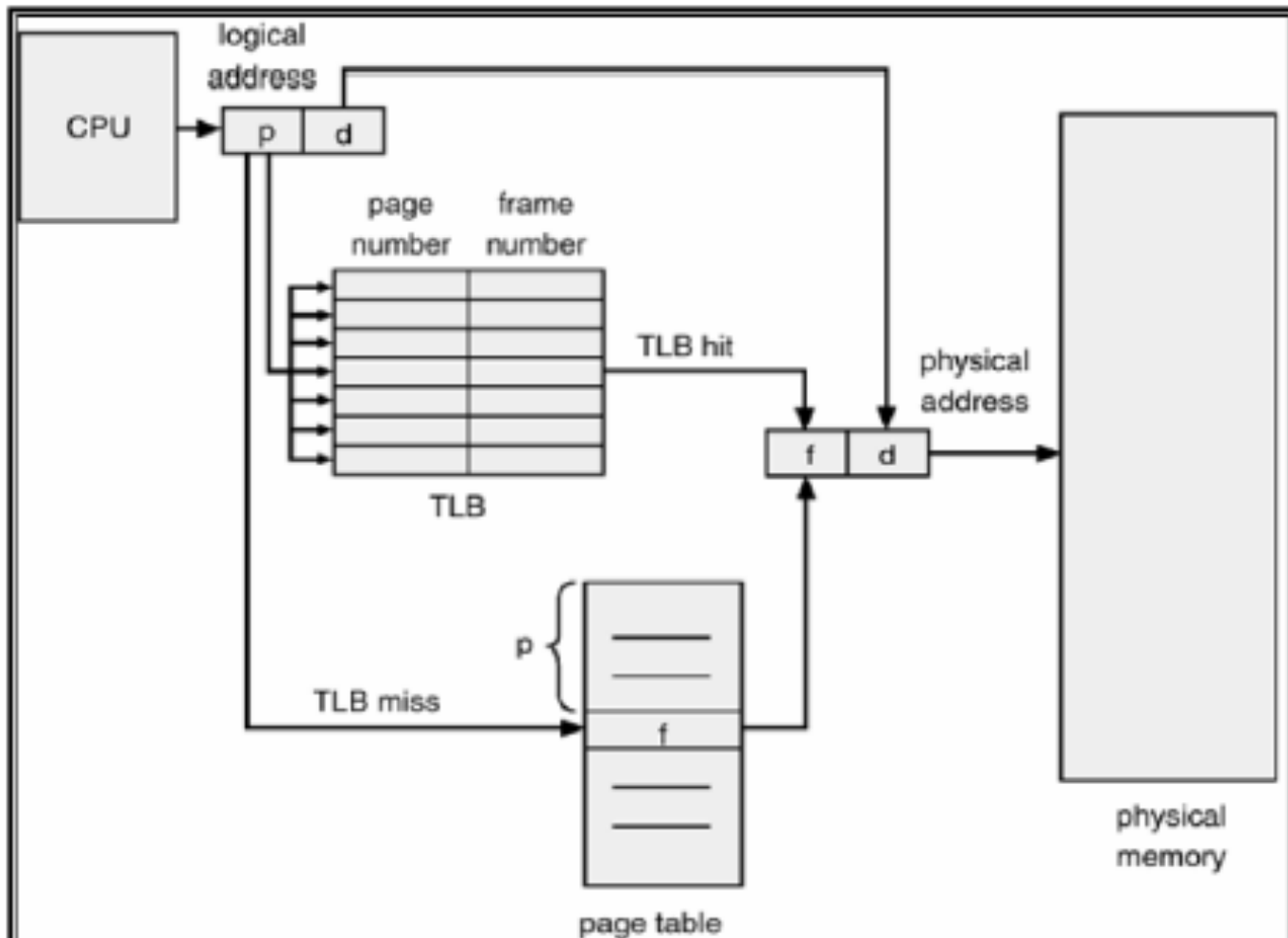


Implementazione in memoria

- Il problema del doppio accesso può essere risolto tramite una cache veloce detta *translation look-aside buffers* (TLB)
- Funzionamento:
 - Confronto dell'elemento fornito con il campo chiave di tutte le entry (contemporaneamente)
 - Tabella delle pagine
 - Chiave = n° di pagina
 - Valore = n° di frame



Traduzione degli indirizzi con TLB



Implementazione in memoria

- Il TLB è molto costoso
 - quindi nel TLB viene memorizzato solo un piccolo sottoinsieme delle entry della tabella delle pagine
 - ad ogni context switch il TLB viene ripulito per evitare mapping di indirizzi errati
- Durante un accesso alla memoria:
 - se la pagina cercata è nel TLB, il TLB restituisce il numero di frame con un singolo accesso
 - tempo richiesto < 10% tempo richiesto in assenza di TLB
 - altrimenti è necessario accedere alla tabella delle pagine in memoria
 - hit ratio α = % delle volte in cui una pagina si trova nel TLB
- Necessario definire il concetto di tempo di accesso effettivo

Tempo di accesso effettivo

- Tempo di accesso effettivo (EAT)
 - $EAT = (T_{MEM} + T_{TLB}) * \alpha + (2 * T_{MEM} + T_{TLB}) * (1 - \alpha)$
 - dove:
 - T_{TLB} = tempo di accesso a TLB
 - T_{MEM} = tempo di accesso a memoria
- Esempio:
 - $T_{MEM} = 90ns$
 - $T_{TLB} = 10ns$
 - $\alpha = 90\%$
 - $EAT = 100 * 0.9 + 190 * 0.1 = 109 \sim 1.2 T_{MEM}$

Protezione

- Realizzata associando bit di protezione ad ogni frame
- Esempio:
 - Bit di validità (valid-invalid bit) per ogni entry della tabella delle pagine
 - “valid”: la pagina associata è nello spazio di indirizzamento logico del processo
 - “invalid”: la pagina associata NON è nello spazio di indirizzamento logico del processo
 - Bit di accesso
 - Per marcare una pagina modificabile o meno (read-only)
 - Per marcare una pagina eseguibile o meno

Utile per
memoria
virtuale

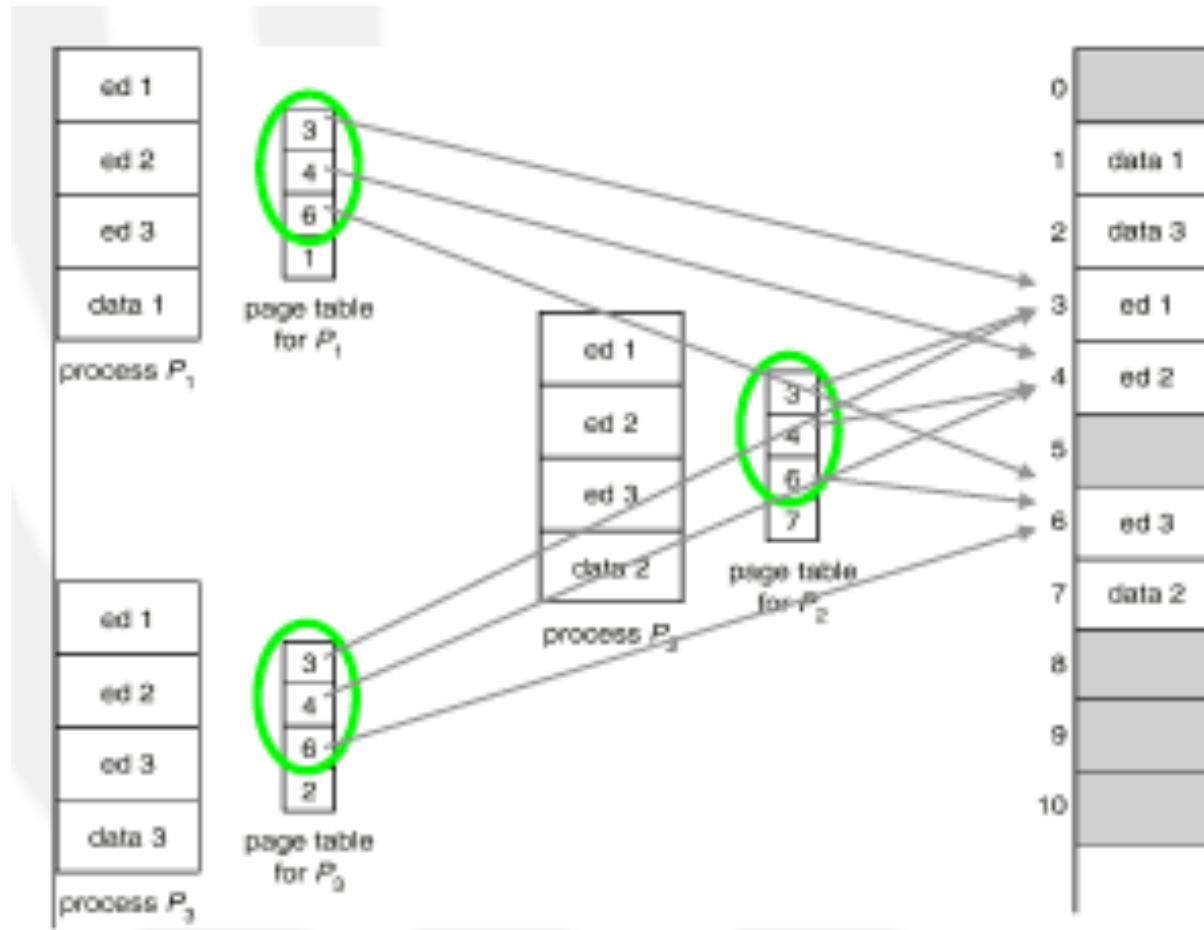


Pagine condivise

- Codice condiviso
 - Vi è un'unica copia fisica, ma più copie logiche (una per processo)
 - Il codice read-only (rientrante) può essere condiviso tra processi
 - es.: text editor, compilatori, window manager
- I dati in generale saranno diversi da processo a processo (più copie fisiche e logiche)

Non cambia mai
durante l'esecuzione

Pagine condivise - esempio

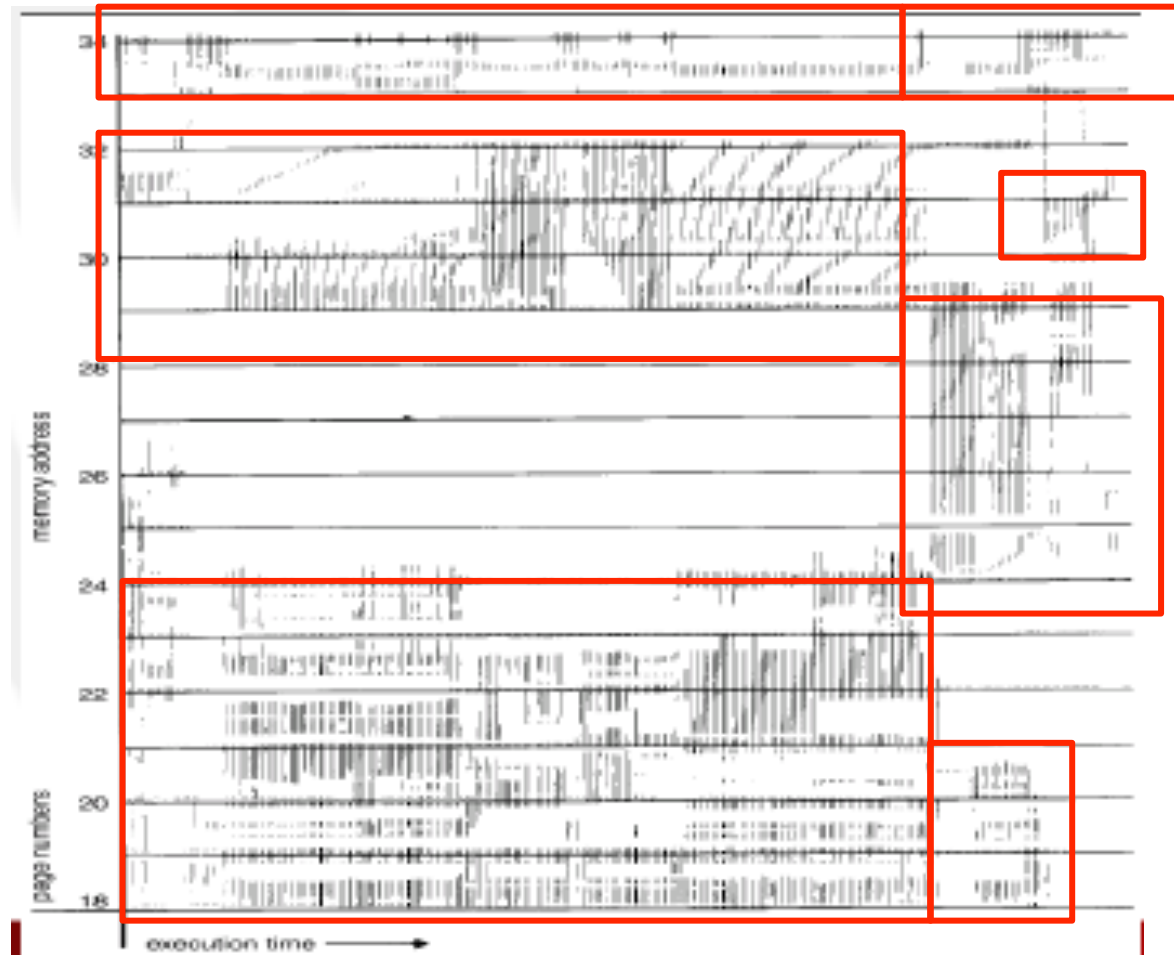


Spazio di indirizzamento

- Nelle architetture moderne con 32 (o 64) bit di indirizzo, lo spazio di indirizzamento virtuale è 2^{32} (o 2^{64}), ovvero molto maggiore dello spazio fisico!
 - Es.: se $|\text{frame}| = 4\text{K} = 2^{12} \rightarrow 2^{32}/2^{12} = 2^{20} \approx 1.000.000$ entry nella tabella delle pagine (per processo!)
- Sono necessari meccanismi per gestire il problema della dimensione della tabella delle pagine:
 - Paginazione della tabella delle pagine
 - Tabella delle pagine multilivello
 - Tabella delle pagine invertita



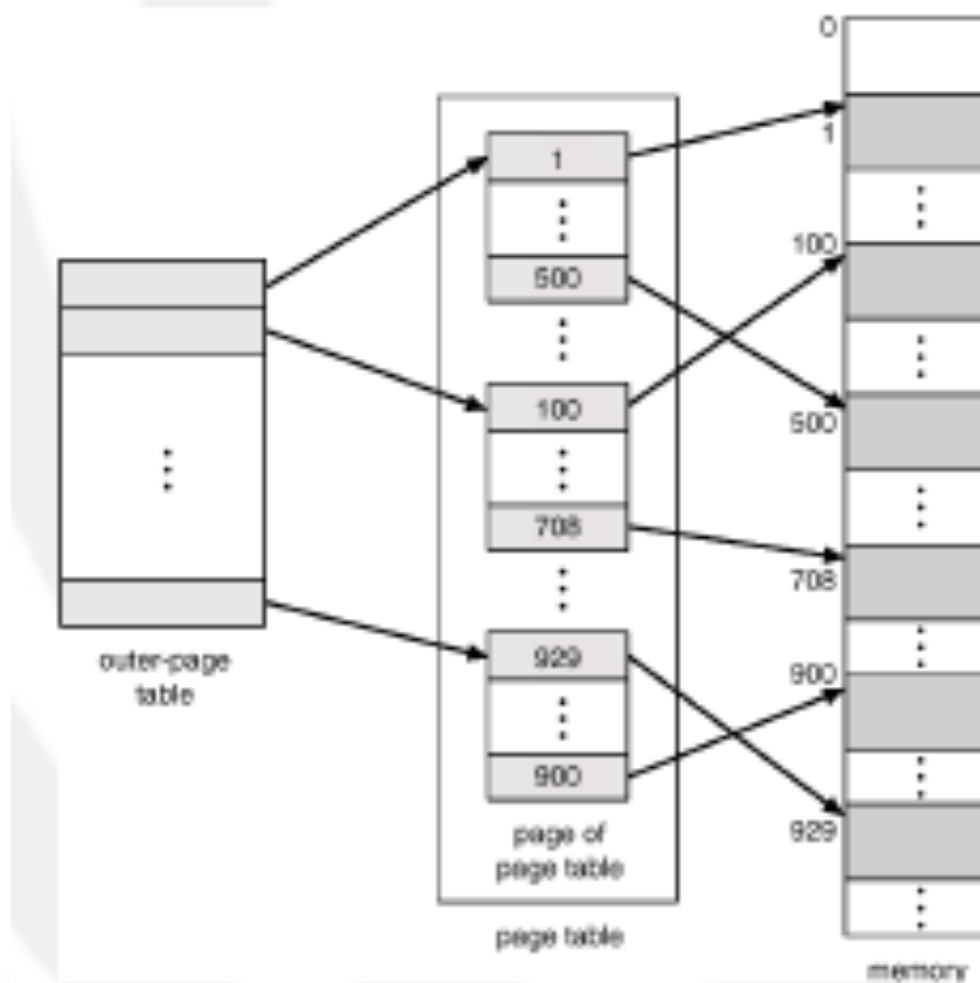
Località di esecuzione - esempio



Paginazione multilivello

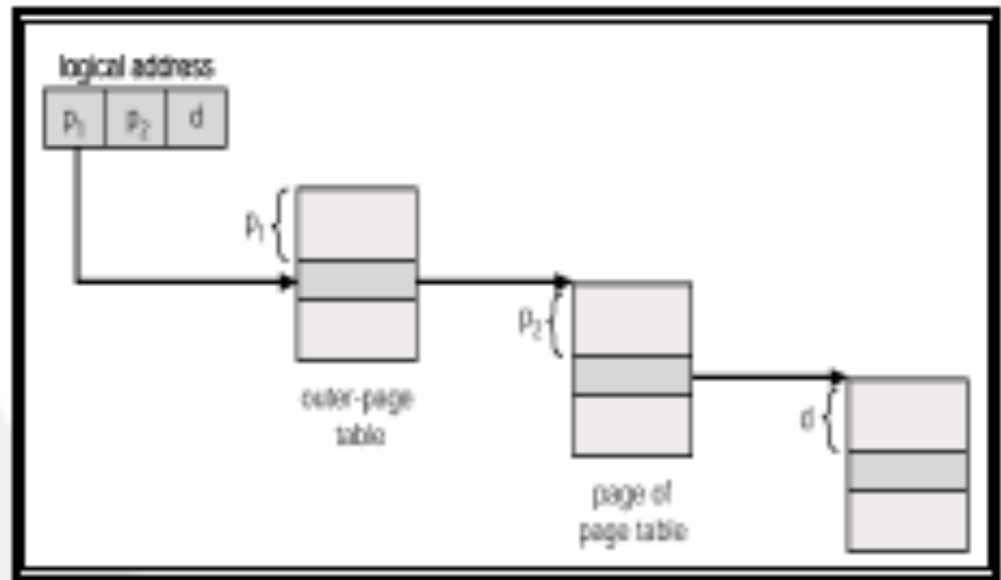
- Equivalente a “paginare” la tabella delle pagine
- In pratica, solo alcune parti della tabella delle pagine sono memorizzate esplicitamente in memoria, le altre sono su disco
- Possibili versioni a 2,3,4 livelli

Paginazione a due livelli



Esempio

- Indirizzo logico a 32-bit
- Dimensione pagina = 4K = 2^{12}
- 12 bit per offset (d)
- 20 bit per numero di pagina
 - p1: indice della tabella delle pagine esterna (10 bit)
 - p2: offset all'interno della pagina della page table interna (10 bit – 1024 righe)



Esempio (continua)

p1	p2	offset
0000000001	0000000011	000000000100

- $p1 = 1$
 - recuperare la tabella di 2° livello corrispondente all'indirizzo indicato dalla seconda riga (si inizia da zero)
- $p2 = 3$
 - recuperare l'indirizzo indicato nella quarta riga della tabella di 2° livello
- $offset = 4$
 - da sommare al valore fornito nella quarta riga della tabella di 2° livello

Paginazione multilivello e prestazioni

- Ogni livello è memorizzato come una tabella separata in memoria, la conversione dell'indirizzo logico in quello fisico può richiedere 4 accessi a memoria (per paginazione a 3 livelli)
- Il TLB mantiene comunque le prestazioni a livelli ragionevoli
- Esempio:
 - $T_{MEM} = 90ns$
 - $T_{TLB} = 10ns$
 - $\alpha = 90\%$
 - $EAT = (10+90) * 0.9 + (10 + 360) * 0.1 = 127ns \sim 1.4 T_{MEM}$

Tabella delle pagine invertita

- Tabella unica nel sistema (non per processo!) avente una entry per ogni frame (pagina fisica), contenente la coppia **<process-id, page-number>** dove:
 - process-id = identificativo del processo che possiede la pagina
 - page-number = indirizzo logico della pagina contenuta nel frame corrispondente a quella entry
- Ogni indirizzo logico generato dalla CPU e' una tripla:coppia **<process-id, page-number, offset>**
- Problema:
 - E' necessario cercare il valore desiderato
- Conseguenza:
 - Vi è un aumento del tempo necessario per cercare un riferimento ad una pagina



Tabella pagine invertita - traduzione

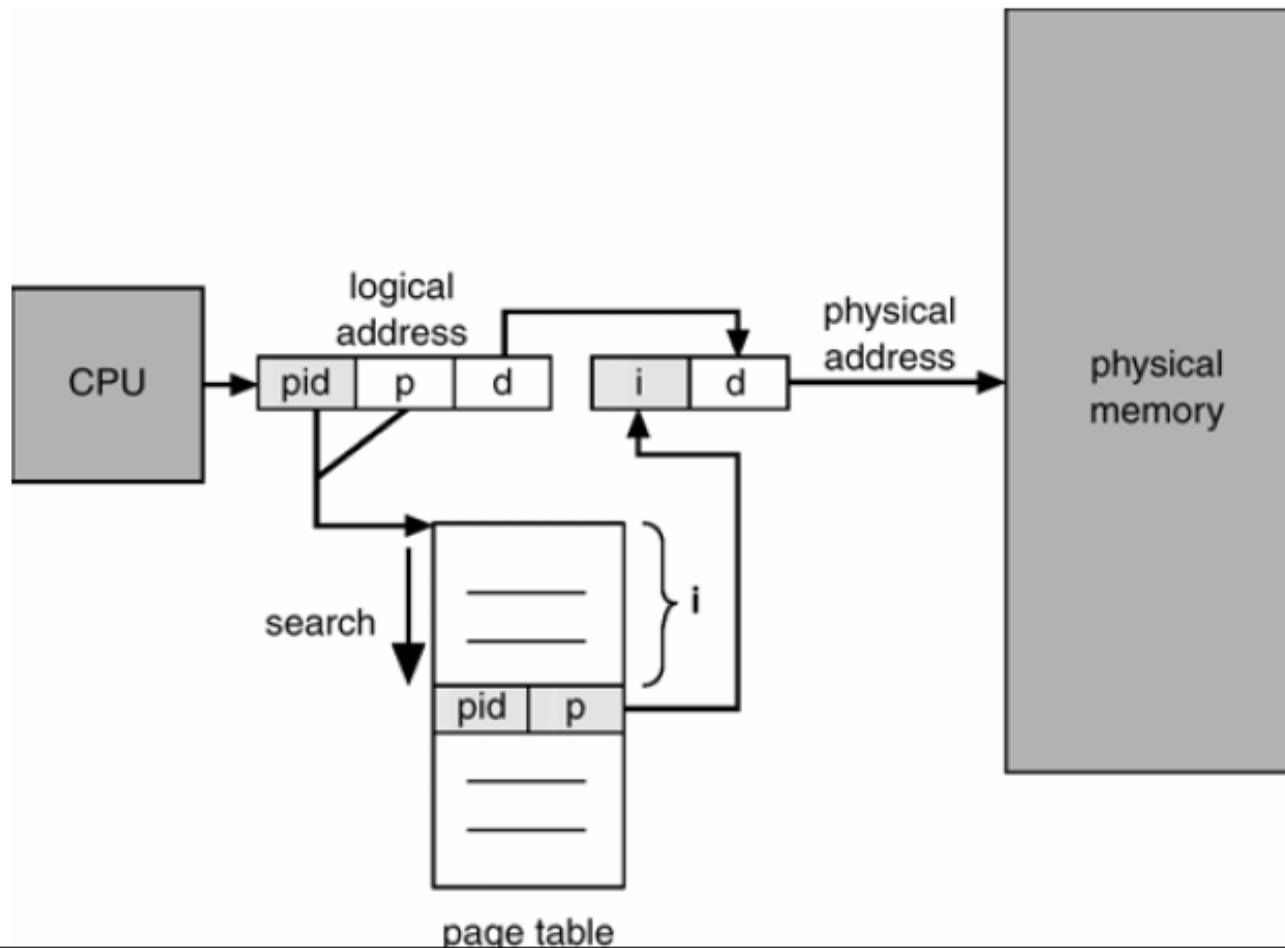


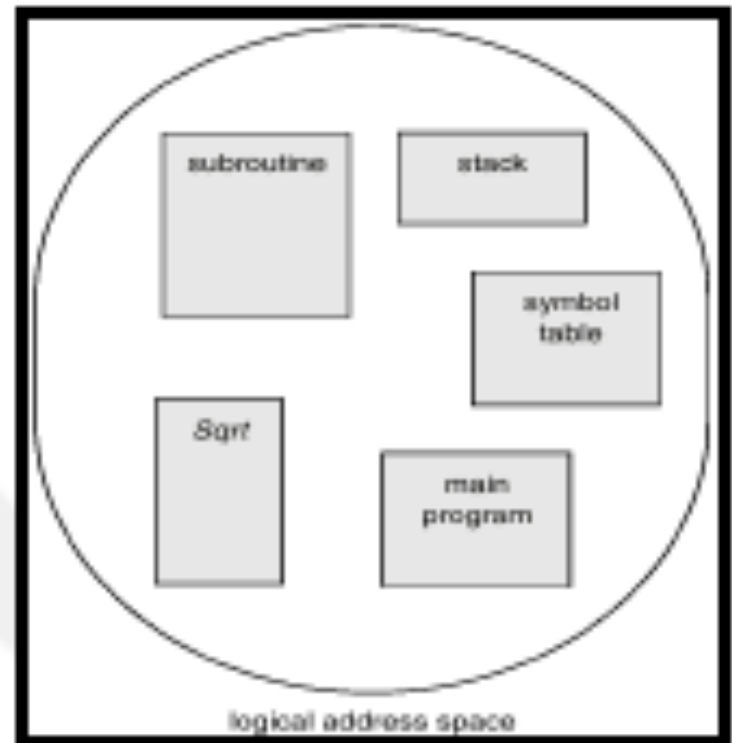
Tabella delle pagine invertita

- La ricerca non può essere sequenziale (efficienza)!
 - Soluzione
 - Usiamo l'equivalente di una tabella hash
 - Riduzione del tempo di ricerca da $O(n)$ a $O(1)$
- In pratica, è necessario un meccanismo per gestire le collisioni quando diversi indirizzi virtuali corrispondono allo stesso frame

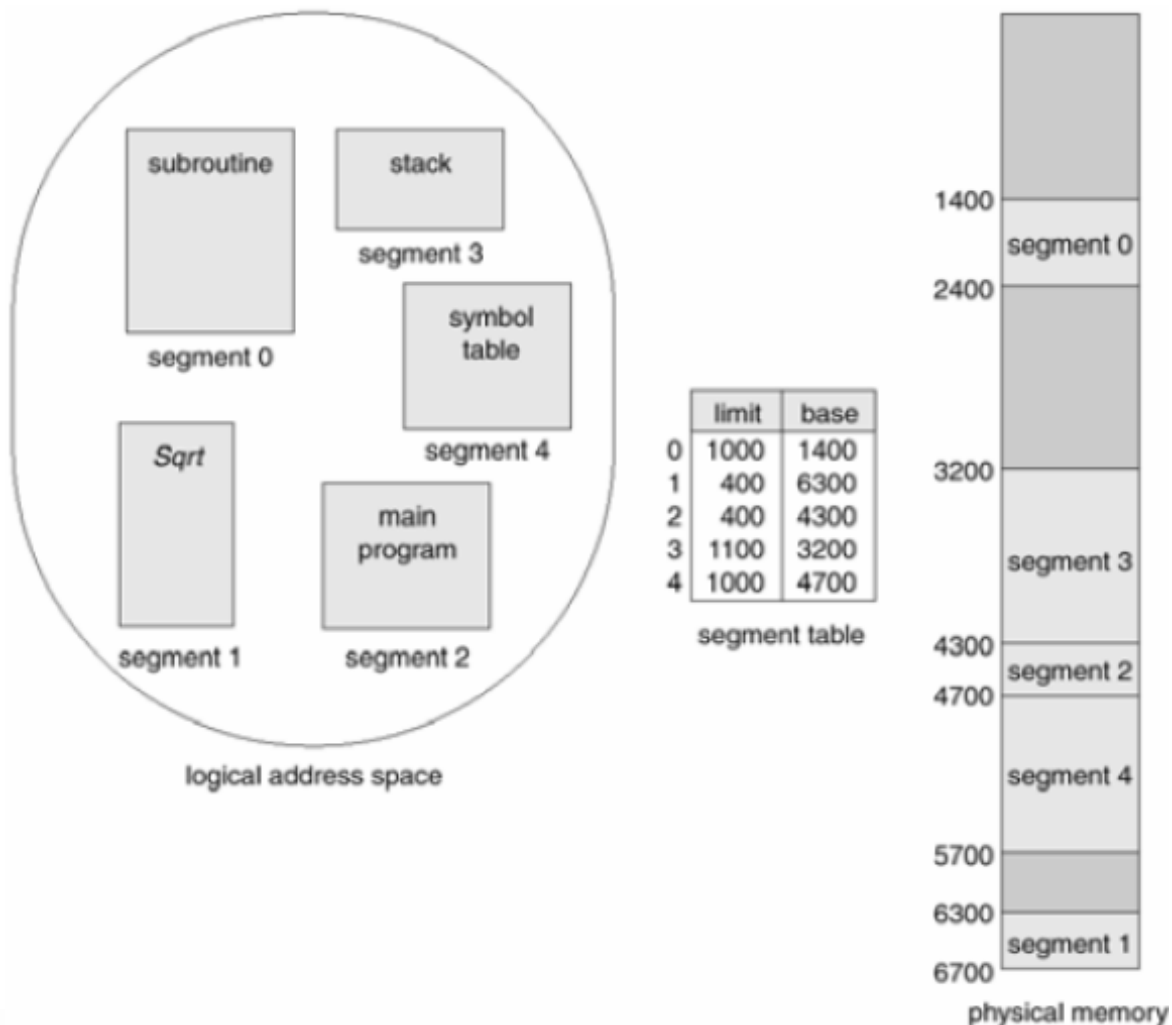
SEGMENTAZIONE

Segmentazione - motivazioni

- Schema di gestione della memoria che supporta la vista che l'utente ha della memoria
- Programma:
 - collezione di segmenti
- Segmento:
 - unità logica quale:
 - Main
 - Procedure
 - Funzioni
 - variabili locali e globali
 - Stack
 - symbol table
 - vettori



Segmentazione – vista logica



Segmentazione - architettura

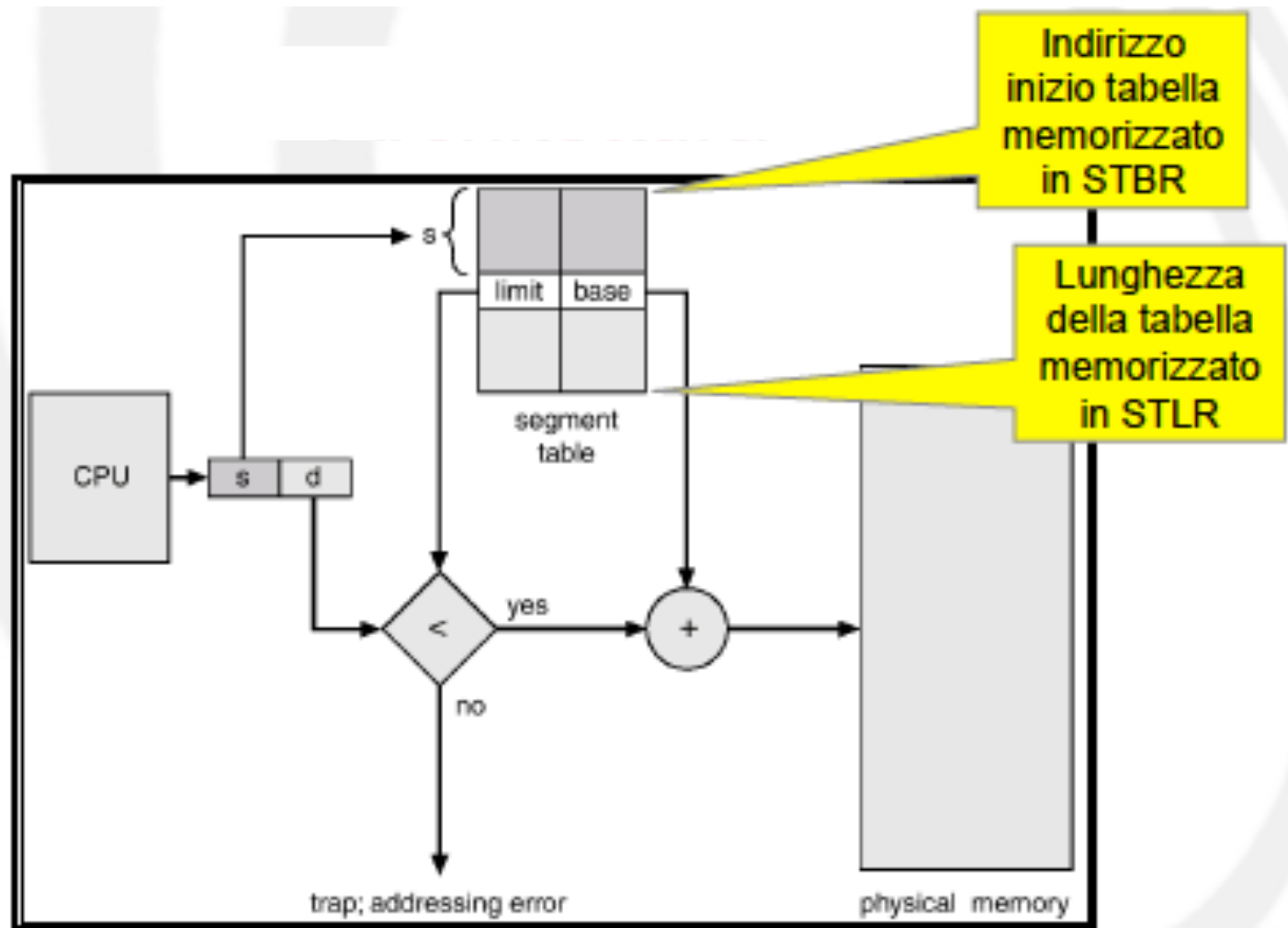
- Indirizzo logico
 - <numero di segmento, offset>
- Tabella dei segmenti (*segment table*)
 - mappa indirizzi logici bidimensionali in indirizzi fisici unidimensionali
 - Ogni entry contiene:
 - Base
 - l'indirizzo fisico di partenza del segmento in memoria
 - Limite
 - la lunghezza del segmento

Tabella dei segmenti

- Simile a tabella delle pagine
- In memoria:
 - Segment-table base register (STBR)
 - punta alla locazione della tabella dei segmenti in memoria
 - Segment-table length register (STLR)
 - indica il numero di segmenti usati da un programma
 - un indirizzo logico $\langle s, d \rangle$ è valido se $s < \text{STLR}$
 - $\text{STBR} + s =$ indirizzo dell'elemento della tabella dei segmenti da recuperare
- TLB usato per memorizzare le entry maggiormente usate (come per paginazione)



Traduzione indirizzi nella Segmentazione



Traduzione indirizzi - esempio

Tabella dei segmenti

Segmento	Limite	Base
0	600	219
1	14	2300
2	100	90
3	580	1327

- Indirizzi logici

- $\langle 0, 430 \rangle$

- segmento 0, offset 430
 - $430 < 600$? OK
 - indirizzo fisico = $430 +$
base di 0 = $430 + 219 =$
649

- $\langle 1, 20 \rangle$

- segmento 1, offset 20
 - $20 < 14$ NO !indirizzo
non valido!

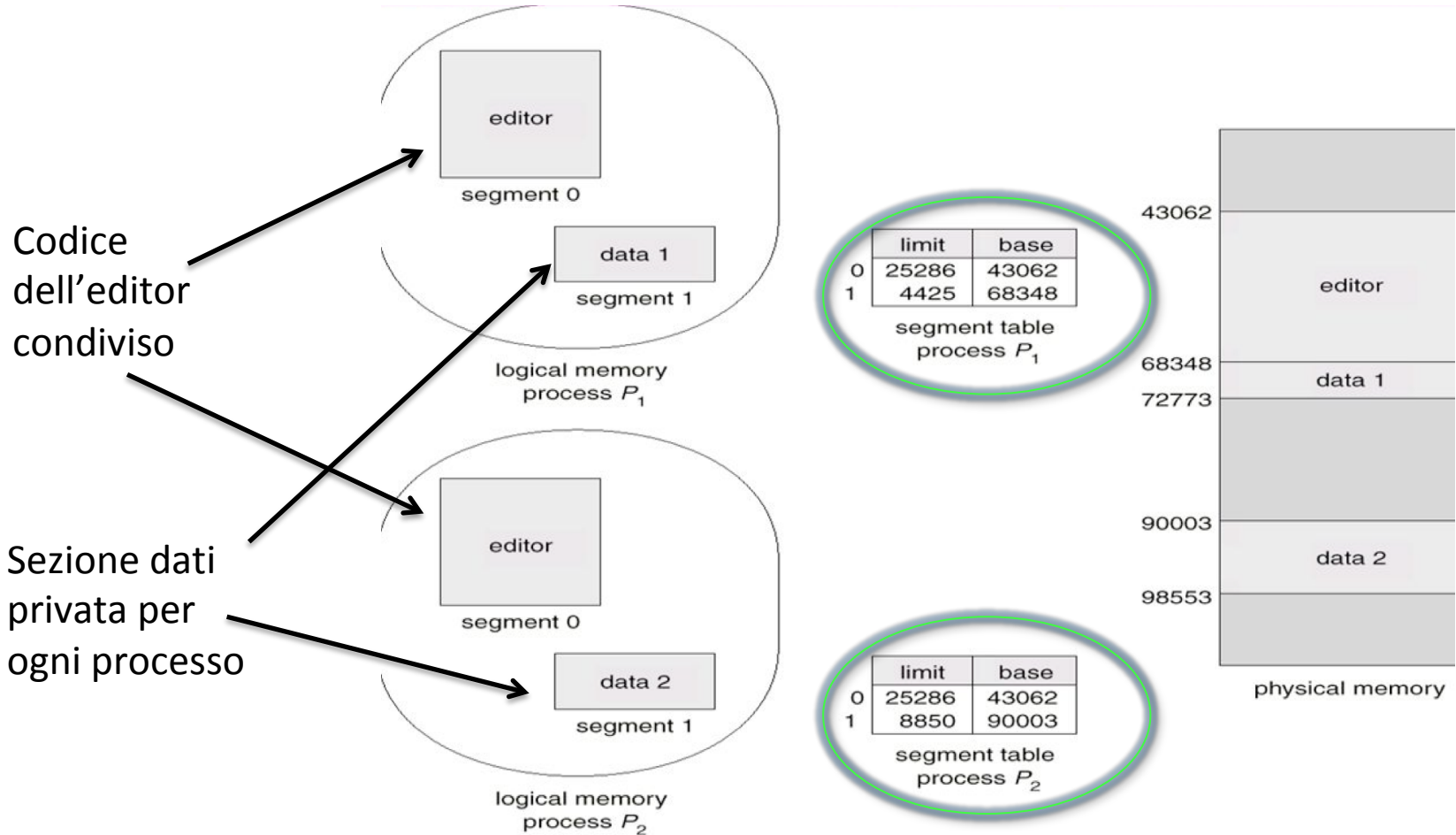
Protezione

- Segmentazione supporta naturalmente la protezione (e la condivisione) di porzioni di codice
 - Segmento = entità con semantica ben definita (es. dati, istruzioni, ...)
- Protezione
 - ad ogni segmento sono associati
 - bit di modalità (read/write/execute)
 - valid bit (0 \Rightarrow segmento non legale)
 - Es: scrittura su segmento read-only è facilmente riconosciuta e bloccata

Condivisione

- A livello di segmento
 - Se si vuole condividere qualcosa basta inserirlo in un segmento
- Possibilità di condividere anche parti di un programma (es. funzioni di libreria)

Esempio di condivisione



Segmentazione e frammentazione

- S.O. deve allocare spazio in memoria per (tutti) i segmenti di un programma
 - Segmenti hanno lunghezza variabile
 - Allocazione dei segmenti
 - problema di allocazione dinamica risolto con first-fit o best-fit
- Possibilità di frammentazione esterna (specie per segmenti di dimensione significativa)

Paginazione vs Segmentazione

- Paginazione

- Vantaggi

- Non esiste frammentazione (minima interna)
 - Allocazione dei frame non richiede algoritmi specifici

- Svantaggi

- Separazione tra vista utente e vista fisica della memoria

- Segmentazione

- Vantaggi

- Consistenza tra vista utente e vista fisica della memoria
 - Associazione di protezioni/ condivisione di segmenti

- Svantaggi

- Richiesta allocazione (dinamica) dei segmenti
 - Potenziale frammentazione esterna

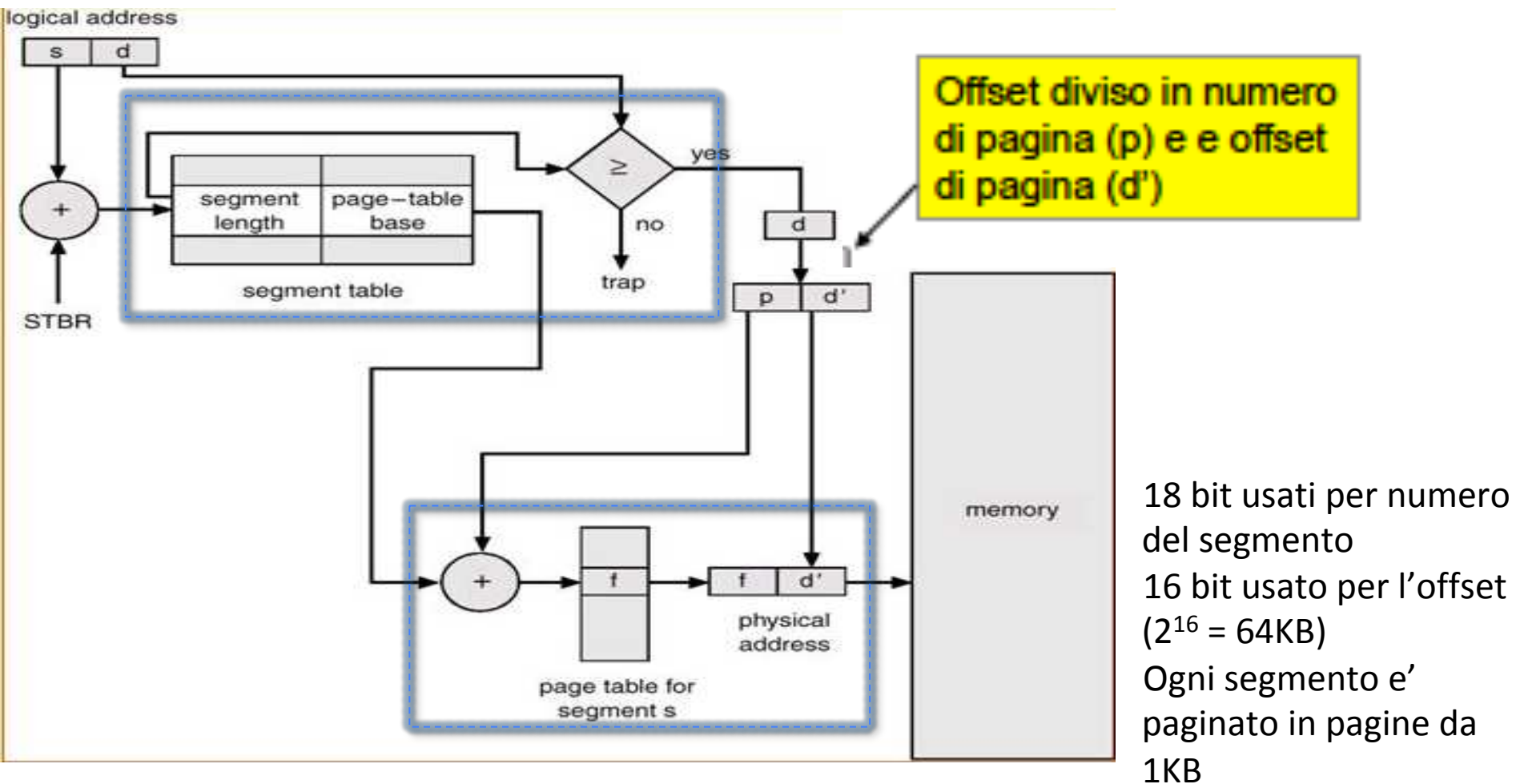
SEGMENTAZIONE PAGINATA

Segmentazione paginata

- E' possibile combinare i due schemi per migliorarli entrambi
- La soluzione utilizzata consiste nel “paginare” i segmenti
 - Ogni segmento è suddiviso in pagine
 - Ogni segmento possiede la sua tabella delle pagine
 - La tabella dei segmenti non contiene l'indirizzo base di ogni segmento, ma l'indirizzo base delle tabelle delle pagine per ogni segmento
- Elimina il problema dell'allocazione dei segmenti e della frammentazione esterna!

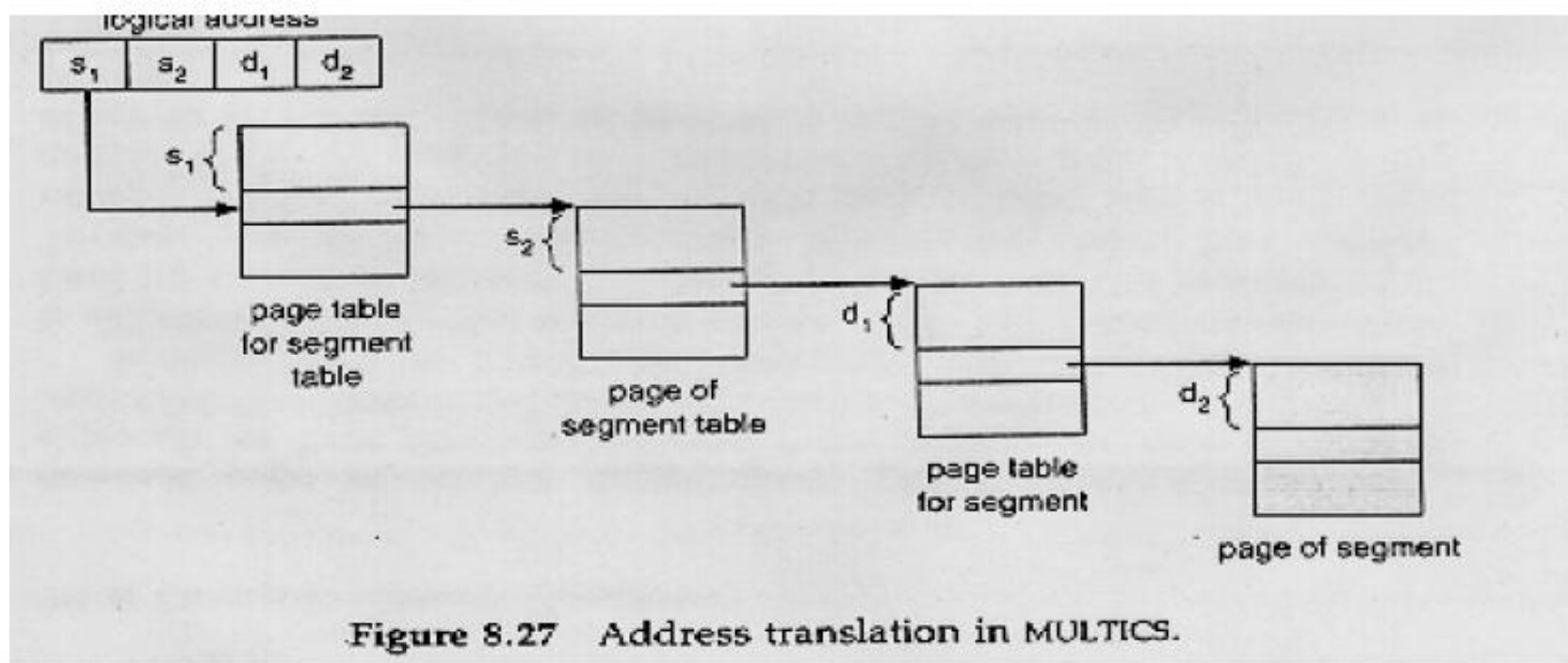


Esempio (MULTICS)



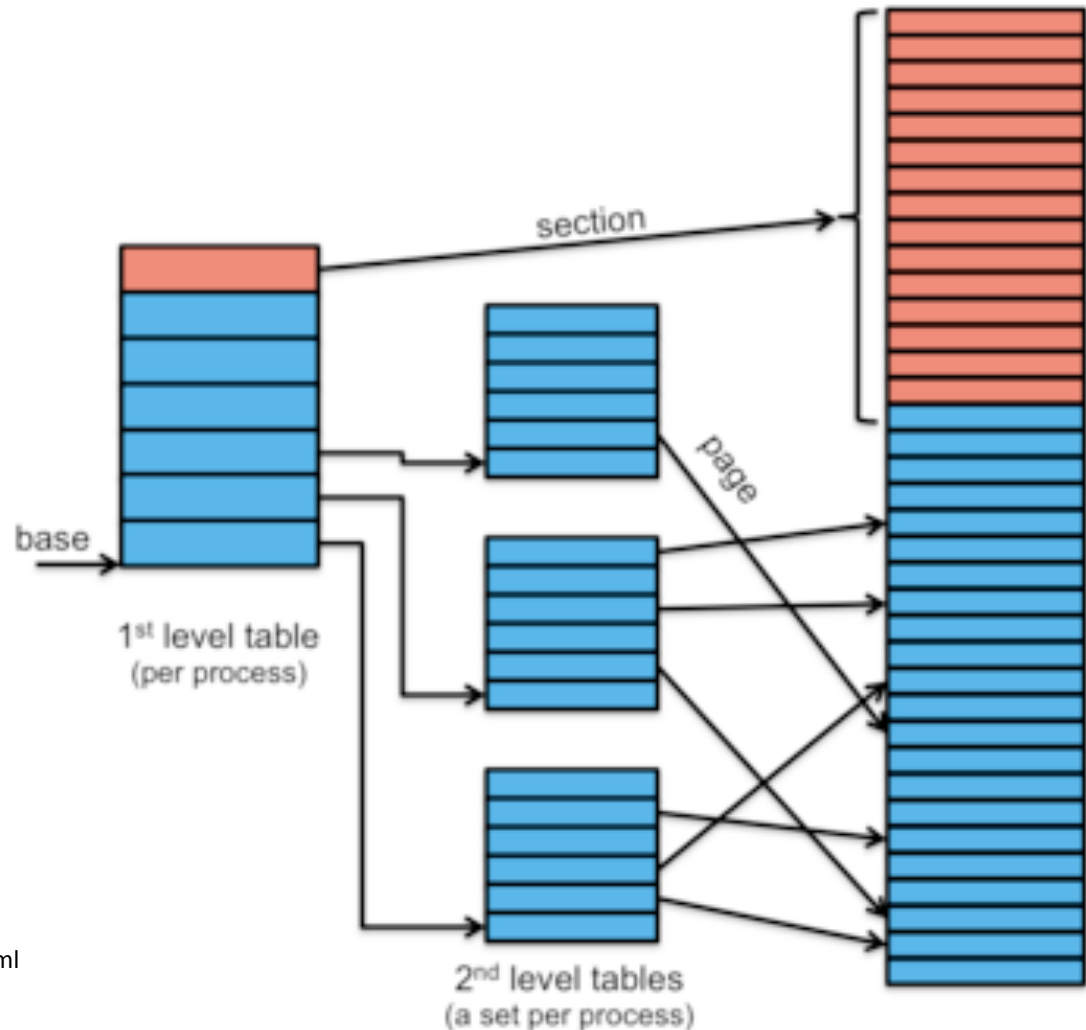
Traduzione indirizzi MULTICS

- In realtà, la ST è troppo grande (2^{18} = fino a più di 256 mila segmenti...), per cui viene paginata anch'essa, scomponendo il segment number in due parti...



Esempio - ARMv7-A (32bit)

- **Pagine di 4 dimensioni diverse**
 - **Supersections:** 16 MB memory blocks (24-bit offsets)
 - **Sections:** 1 MB memory blocks (20-bit offsets)
 - **Large pages:** 64 KB pages (16-bit offsets)
 - **Small pages:** 4 KB pages (12-bit offsets)



Source: <https://www.cs.rutgers.edu/~pxk/416/notes/10-paging.html>

ARMv7-A - TLBs

- The ARM has two levels of TLBs.
 - The smallest and fastest is the **MicroTLB** (32 entries)
 - The second-level TLB is called the **Main TLB** (8+64 entries)

