

Sistemi Operativi

C.d.L. in Informatica (laurea triennale)
Anno Accademico 2024-2025

Canale A-L

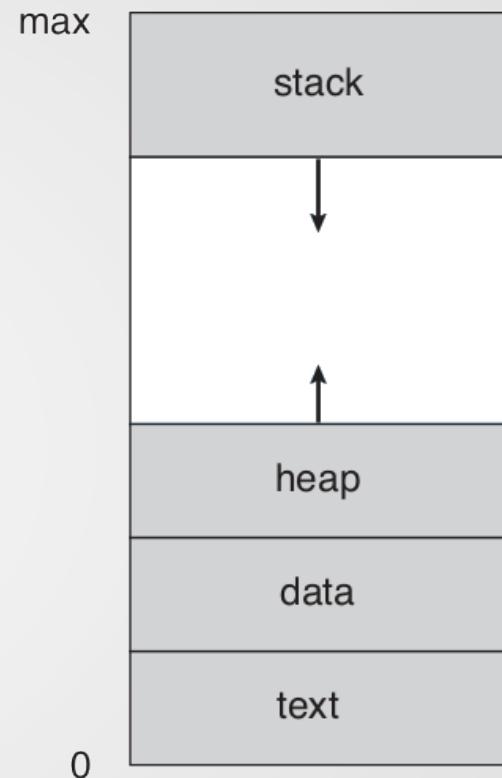
Dipartimento di Matematica e Informatica – Catania

Processi, Thread, IPC e Scheduling

Prof. Mario Di Raimondo

Processo

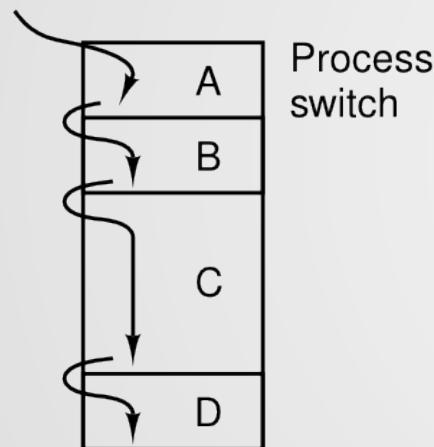
- **Definizione:** una istanza di esecuzione di un programma.
- Si associano ad esso:
 - **spazio degli indirizzi:**
 - codice;
 - dati;
 - stack;
 - copia dei **registri** della CPU;
 - **file aperti;**
 - **allarmi** pendenti;
 - processi imparentati.
- **Tabella dei processi** con un **Process Control Block (PCB)** per ogni processo.



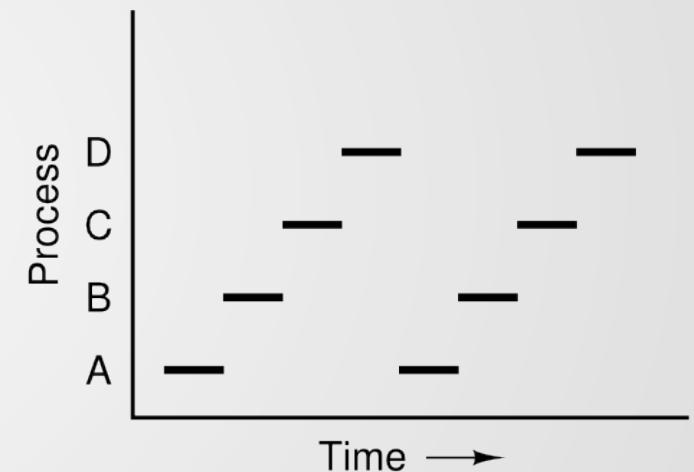
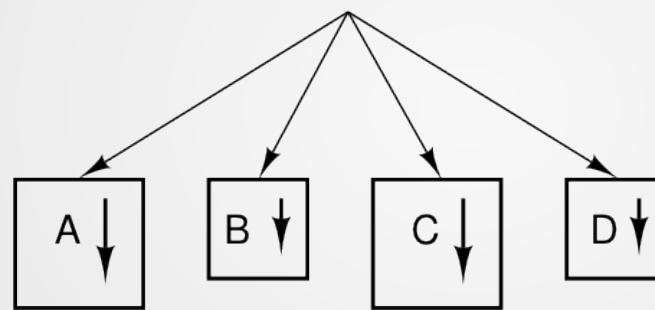
Modello dei processi

- **Multiprogrammazione e pseudo-parallelismo.**
- E' più semplice ragionare pensando a **processi sequenziali** con una **CPU virtuale** dedicata.

One program counter



Four program counters



Creazione e terminazione dei processi

- **Creazione** di un processo:
 - in fase di inizializzazione del sistema;
 - da parte di un altro processo (padre) o per un'azione dell'utente;
 - metodologie:
 - **sdoppiamento del padre:** fork e exec (UNIX);
 - **nuovo processo per nuovo programma:** CreateProcess (Win).
- **Terminazione:**
 - uscita normale (volontario): exit (UNIX), ExitProcess (Win);
 - uscita su errore (volontario);
 - errore critico (involontario);
 - terminato da un altro processo (involontario): kill (UNIX), TerminateProcess (Win).

Stato di un processo

- 3 stati principali (+ 2 addizionali);
- transizioni.

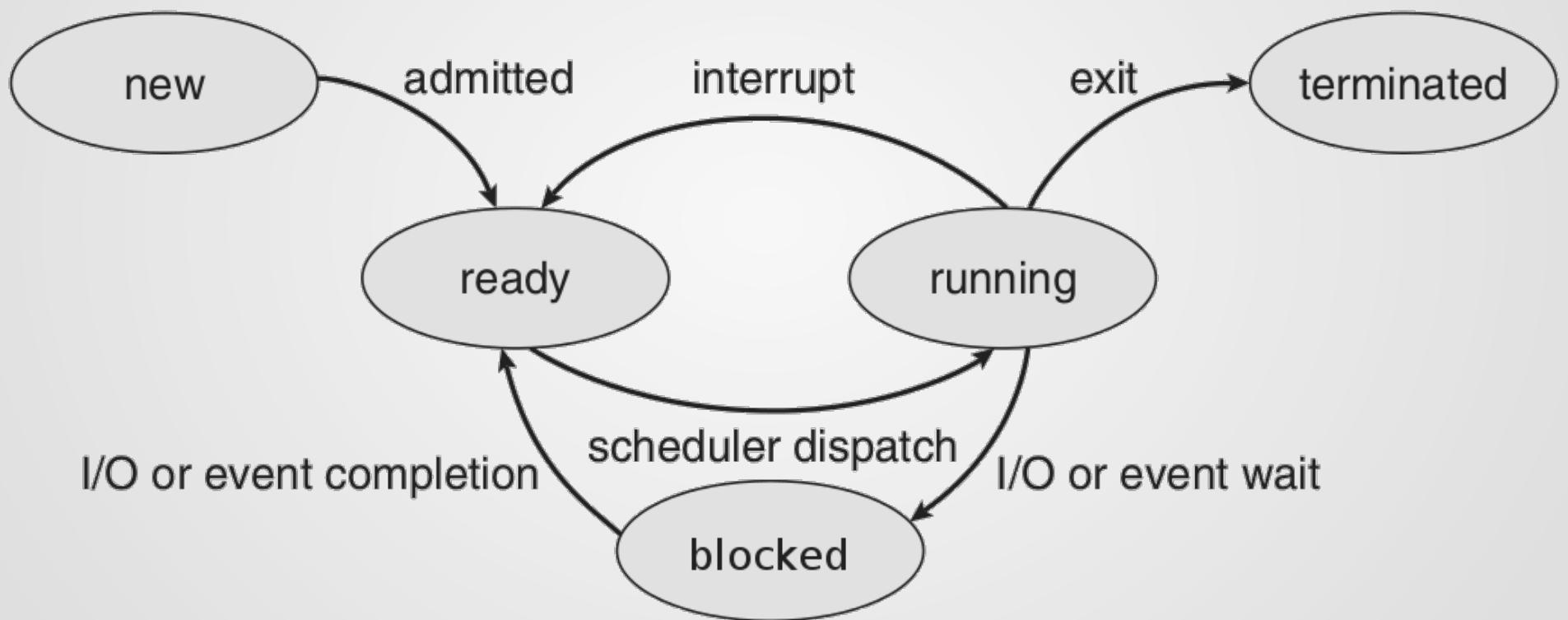
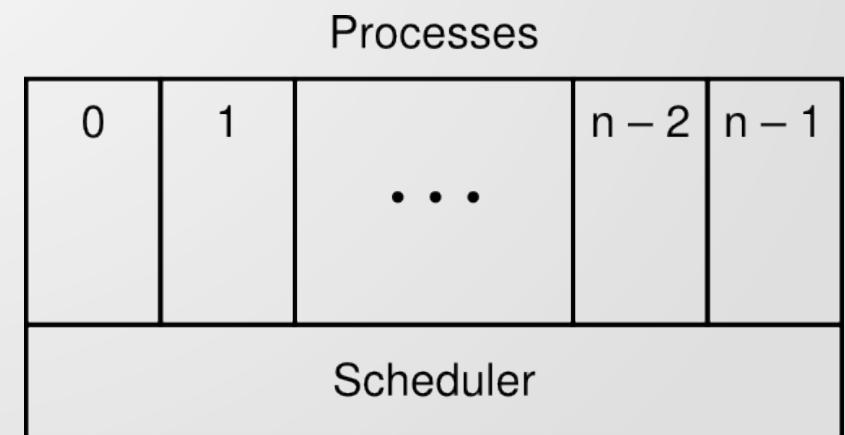


Tabella dei processi

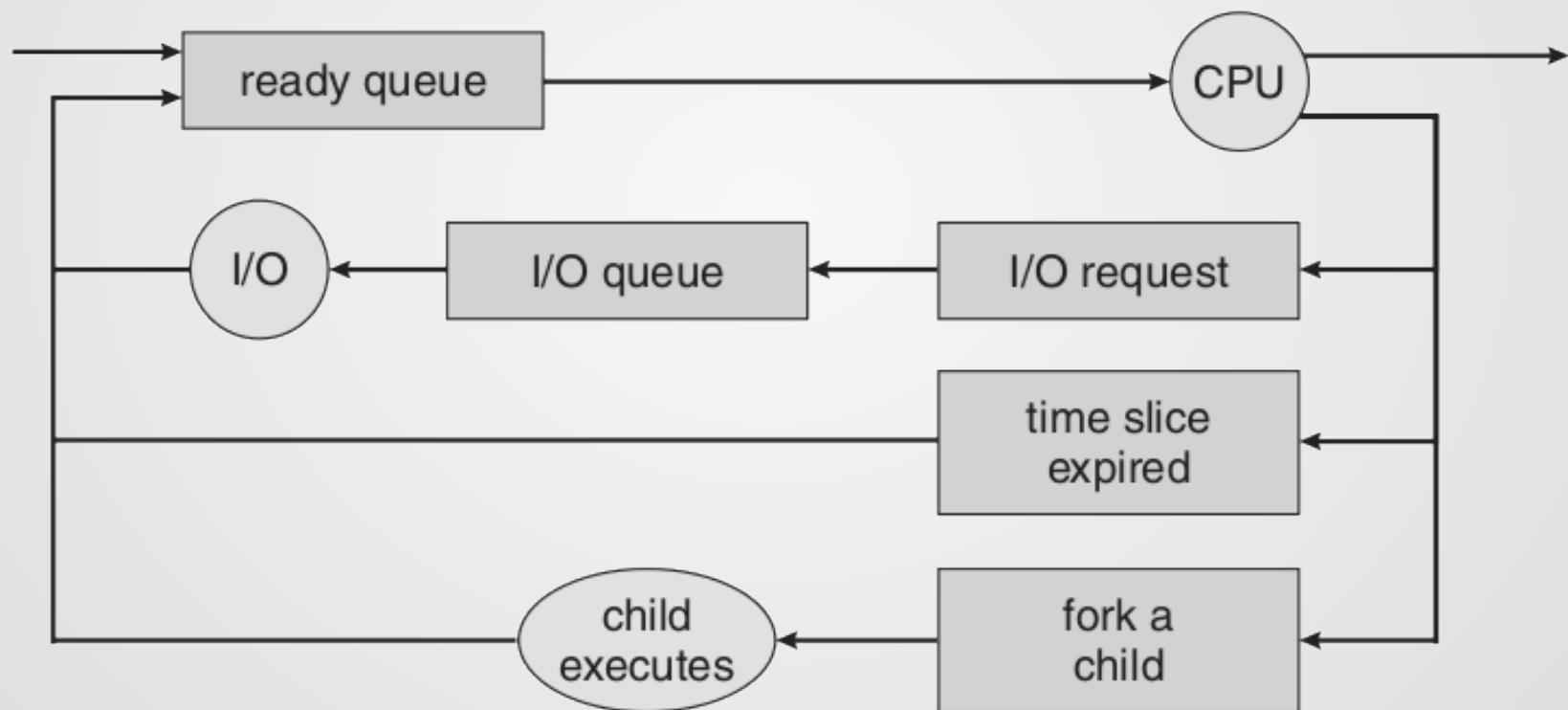
- **Tabella dei processi;**
- **Process Control Block (PCB);**
- **Scheduler;**
- **Gestione degli interrupt per il passaggio di processo:**
 - salvataggio nello stack del PC e del PSW nello stack attuale;
 - caricamento dal vettore degli interrupt l'indirizzo della procedura associata;
 - salvataggio registri e impostazione di un nuovo stack;
 - esecuzione procedura di servizio per l'interrupt;
 - interrogazione dello scheduler per sapere con quale processo proseguire;
 - ripristino dal PCB dello stato di tale processo (registri, mappa memoria);
 - ripresa nel processo corrente.

process state
process number
program counter
registers
memory limits
list of open files
• • •



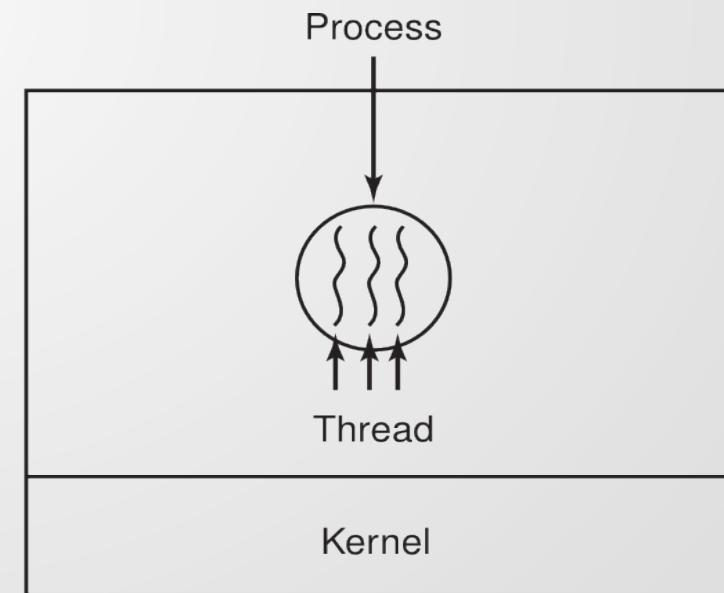
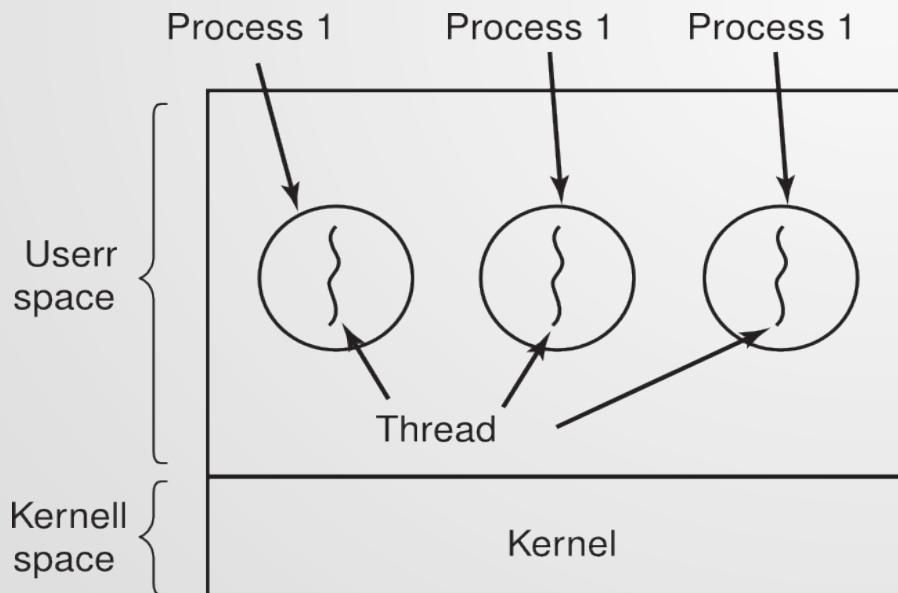
Code e accodamento

- **Coda dei processi pronti e code dei dispositivi;**
 - strutture collegate sui PCB;
- **Diagramma di accodamento:**



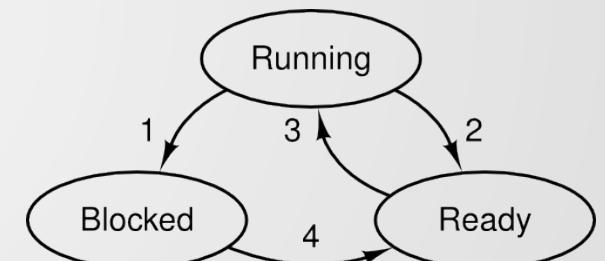
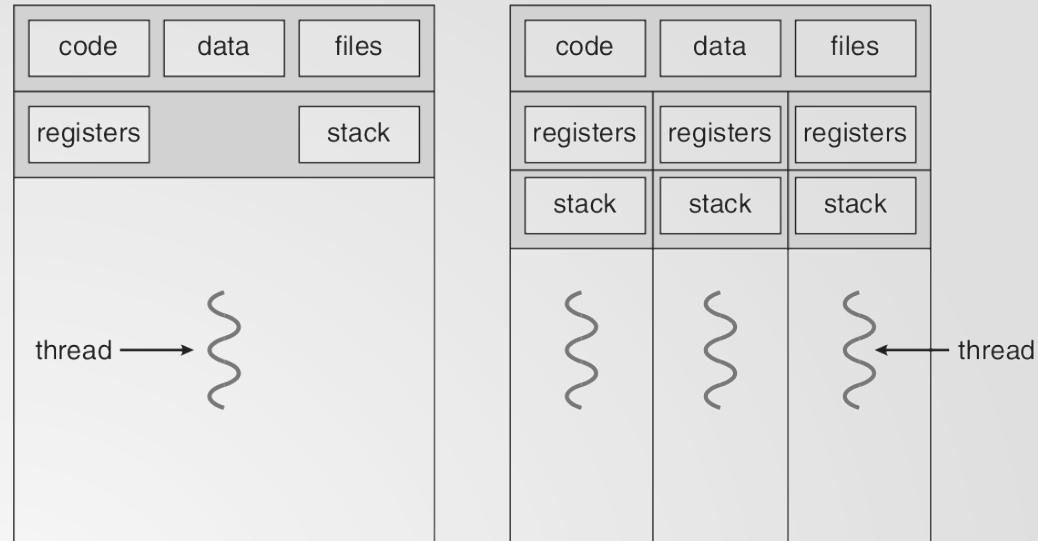
Thread

- Modello dei processi: entità indipendenti che **raggruppano risorse e con un flusso di esecuzione**;
- può essere utile far condividere a più flussi di esecuzione lo stesso spazio di indirizzi: **thread**;
- quando può essere utile?
 - esempi: web-browser, videoscrittura, web-server, ...



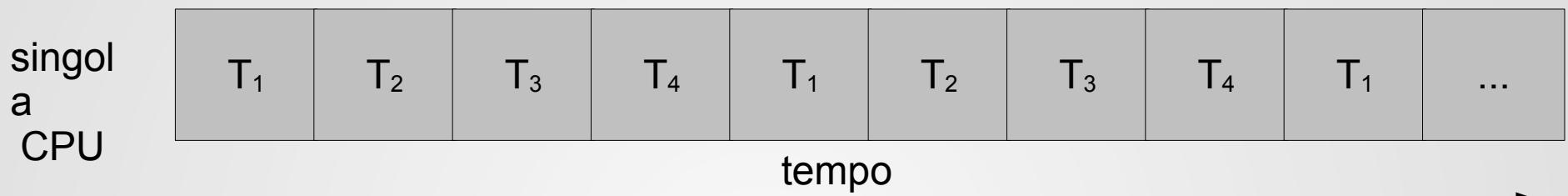
Thread

- Un thread è **caratterizzato** da:
 - PC, registri, stack, stato;
 - condivide tutto il resto;
 - non protezione di memoria.
- **scheduling** dei thread;
- **cambio di contesto** più veloce;
- **cambiamenti di stato** dei thread;
- **operazioni** tipiche sui thread:
 - `thread_create`: un thread ne crea un altro;
 - `thread_exit`: il thread chiamante termina;
 - `thread_join`: un thread si sincronizza con la fine di un altro thread;
 - `thread_yield`: il thread chiamante rilascia volontariamente la CPU.



Programmazione multicore

- I thread permettono una **migliore scalabilità** con core con hypertreading e soprattutto con sistemi multicore;
- con un sistema single-core abbiamo una esecuzione interleaved;



- su un sistema multi-core abbiamo parallelismo puro.

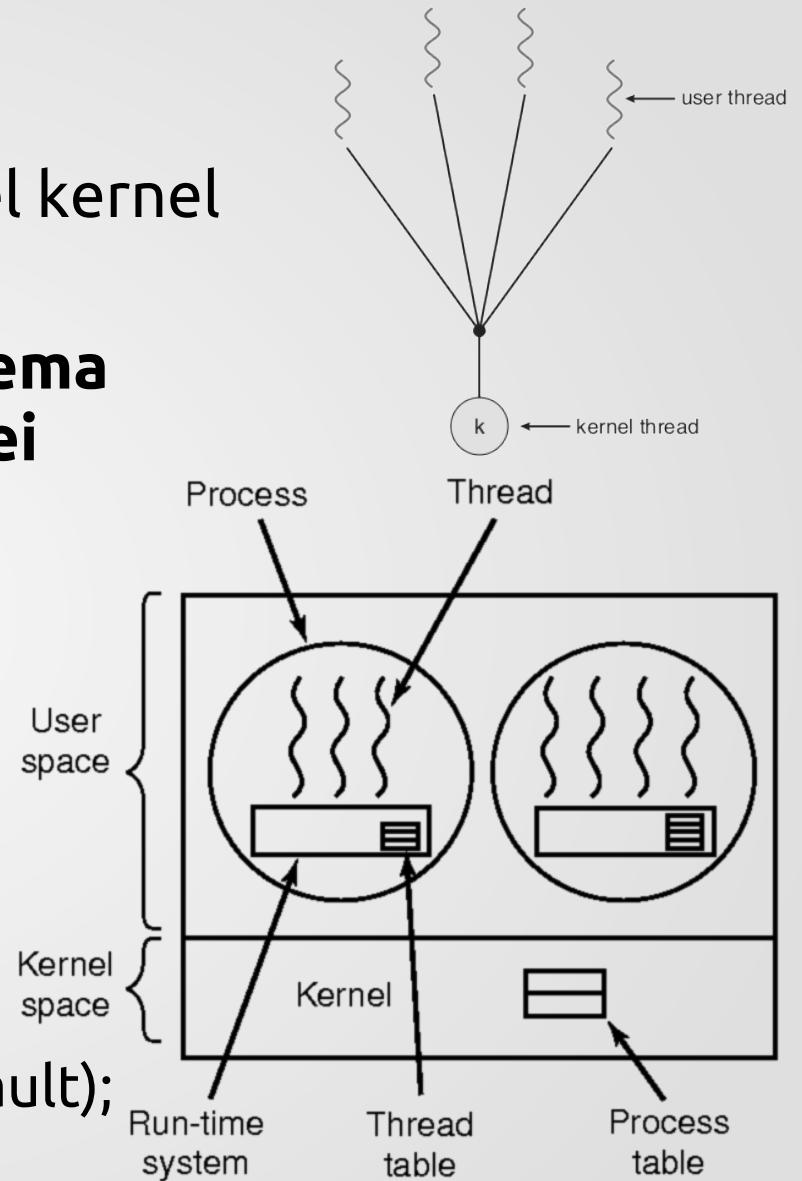


Programmazione multicore

- Progettare programmi che sfruttino le moderne architetture multicore non è banale;
- principi base:
 - **separazione dei task;**
 - **bilanciamento;**
 - **suddivisione dei dati;**
 - **dipendenze dei dati;**
 - **test e debugging.**

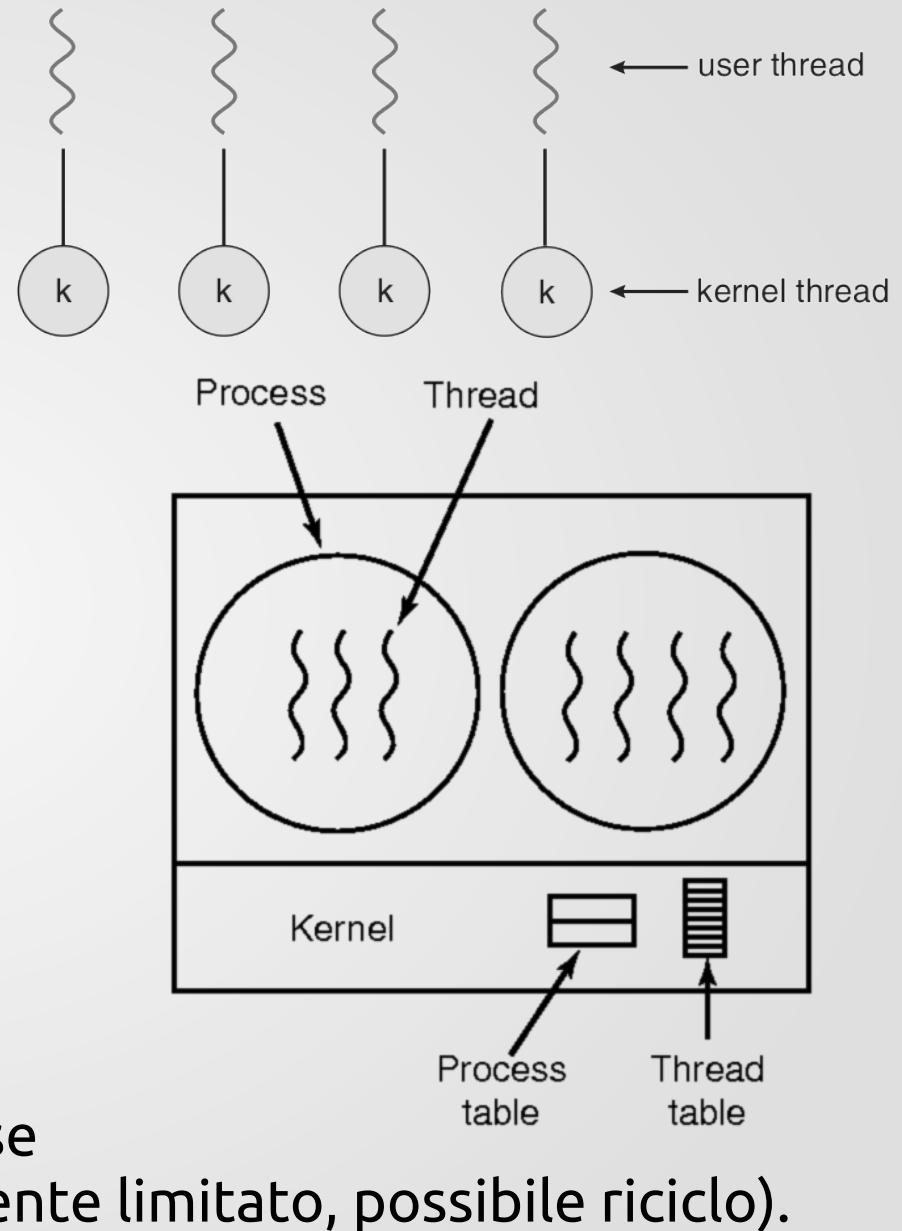
Thread a livello utente

- Detto anche “**modello 1-a-molti**”;
- utile se non c'è supporto da parte del kernel ai thread;
- una **libreria** che implementa un **sistema run-time** che gestisce una **tabella dei thread** del processo.
- **Pro:**
 - il dispatching non richiede trap nel kernel;
 - scheduling personalizzato;
- **Contro:**
 - chiamate bloccanti (select, page-fault);
 - possibilità di non rilascio della CPU.



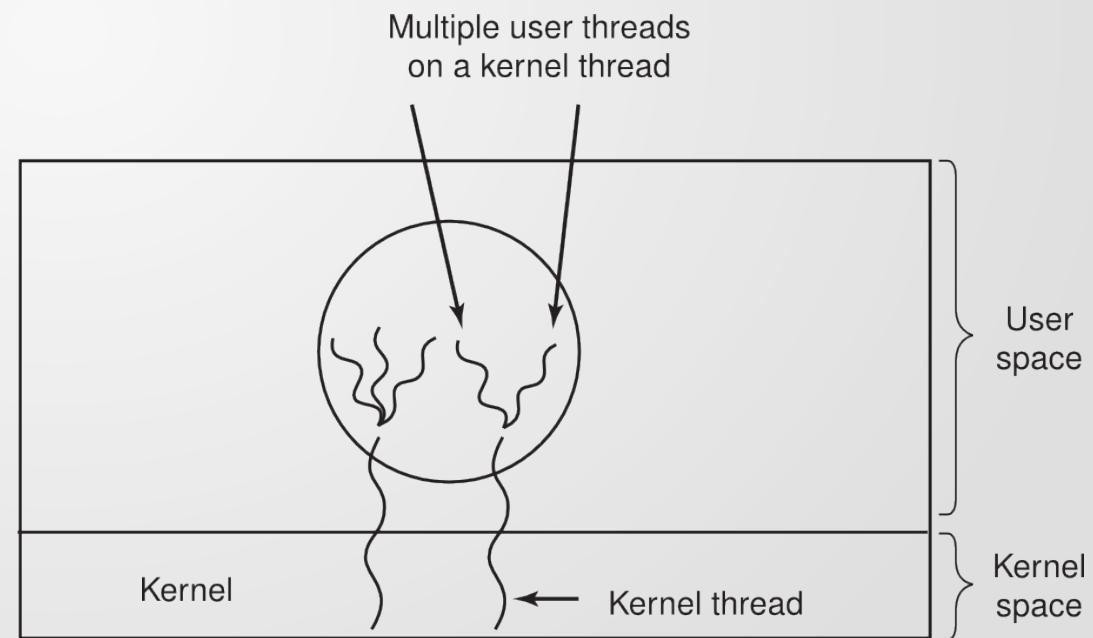
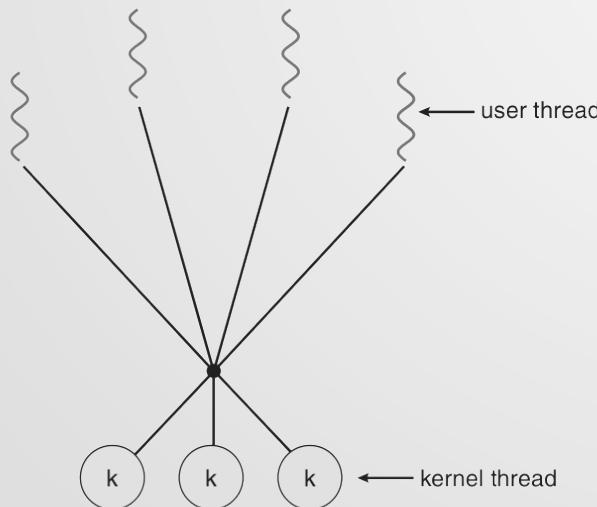
Thread a livello kernel

- Detto anche “**modello 1-a-1**”;
- richiede il supporto specifico dal kernel (praticamente tutti i moderni SO);
- **unica tabella dei thread** del kernel;
- **Pro:**
 - un thread su chiamata bloccante non intralcia gli altri;
- **Contro:**
 - cambio di contesto più lento (richiede trap);
 - creazione e distruzione più costose (numero di thread kernel tipicamente limitato, possibile riciclo).



Modello ibrido

- Detto anche “**molti-a-molti**”;
- prende il meglio degli altri due;
- prevede un certo numero di **thread del kernel**;
- ognuno di essi viene assegnato ad un certo numero di **thread utente** (eventualmente uno);
- **assegnazione** decisa dal programmatore.



I thread nei nostri sistemi operativi

- Quasi tutti i sistemi operativi supportano i **thread a livello kernel**;
 - Windows, Linux, Solaris, Mac OS,...
- Supporto ai **thread utente** attraverso apposite librerie:
 - *green threads* su Solaris;
 - *GNU portable thread* su UNIX;
 - *fiber* su Windows.
- **Librerie di accesso ai thread** (a prescindere dal modello):
 - *Pthreads* di POSIX (Solaris, Linux, Mac OS, anche Windows);
 - una specifica da implementare sui vari sistemi;
 - threads Windows;
 - thread in Java;
 - wrapper sulle API sottostanti.

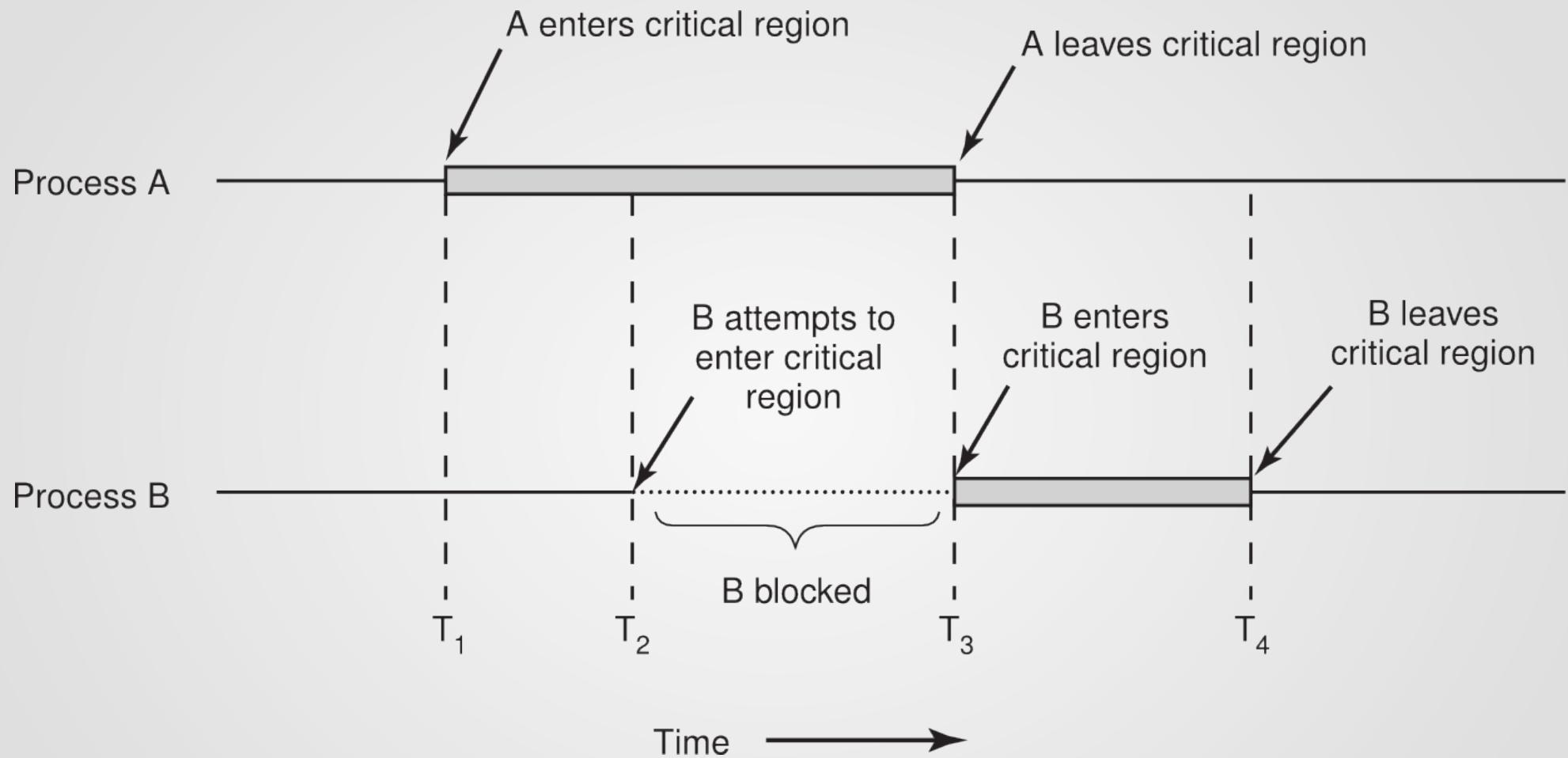
Comunicazione fra processi

- Spesso i processi hanno bisogno di **cooperare**:
 - collegamento I/O tra processi (**pipe**);
 - **InterProcess Communication (IPC)**;
 - possibili **problematiche**:
 - come scambiarsi i dati;
 - accavallamento delle operazioni su dati comuni;
 - coordinamento tra le operazioni (o sincronizzazione).
- **Corse critiche** (race conditions);
 - esempio: versamenti su conto-corrente;
 - corse critiche nel codice del **kernel**;
 - soluzione: **mutua esclusione** nell'accesso ai dati condivisi.

Sezioni critiche

- Astrazione del problema: **sezioni critiche** e **sezioni non critiche**.
- **Quattro condizioni** per avere una buona soluzione:
 1. mutua esclusione nell'accesso alle rispettive sezioni critiche;
 2. nessuna assunzione sulla velocità di esecuzione o sul numero di CPU;
 3. nessun processo fuori dalla propria sezione critica può bloccare un altro processo;
 4. nessun processo dovrebbe restare all'infinito in attesa di entrare nella propria sezione critica.

Sezioni critiche



Come realizzare la mutua esclusione

- **Disabilitare gli interrupt.**
- **Variabili di lock.**
- **Alternanza stretta:**

```
int N=2
int turn

function enter_region(int process)
    while (turn != process) do
        nothing

function leave_region(int process)
    turn = 1 - process
```

- può essere facilmente generalizzato al caso N;
- fa **busy waiting** (si parla di **spin lock**);
- implica **rigidi turni** tra le parti (viola condizione 3).

Soluzione di Peterson

```
int N=2
int turn
int interested[N]

function enter_region(int process)
    other = 1 - process
    interested[process] = true
    turn = process
    while (interested[other] = true and turn = process) do
        nothing

function leave_region(int process)
    interested[process] = false
```

- ancora busy waiting;
- può essere generalizzato al caso N;
- può avere problemi sui moderni multi-processori a causa del riordino degli accessi alla memoria centrale.

Istruzioni TSL e XCHG

- Molte architetture (soprattutto multi-processore) offrono specifiche istruzioni:
 - **TSL (Test and Set Lock);**
 - uso: **TSL registro, lock**
 - operazione atomica e blocca il bus di memoria;

```
enter_region:  
    TSL REGISTER,LOCK  
    CMP REGISTER,#0  
    JNE enter_region  
    RET
```

```
leave_region:  
    MOVE LOCK,#0  
    RET
```

- **XCHG (eXCHanGe);**
 - disponibile in tutte le CPU Intel X86;
- ancora busy waiting.

Sleep e wakeup

- Tutte le soluzioni viste fino ad ora fanno **spin lock**;
 - **problema dell'inversione di priorità.**
- **Soluzione:** dare la possibilità al processo di bloccarsi in modo passivo (rimozione dai processi pronti);
 - primitive: **sleep** e **wakeup**.
- **Problema del produttore-consutatore (buffer limitato – N):**
 - variabile condivisa count inizialmente posta a 0;

```
function producer()
    while (true) do
        item = produce_item()
        if (count = N) sleep()
        insert_item(item)
        count = count + 1
        if (count = 1)
            wakeup(consumer)
```

```
function consumer()
    while (true) do
        if (count = 0) sleep()
        item = remove_item()
        count = count - 1
        if (count = N - 1)
            wakeup(producer)
        consume_item(item)
```

- questa soluzione **non funziona bene**: usiamo un **bit di attesa** wakeup.

Semafori

- Generalizziamo il concetto di sleep e wakeup – **semaforo**:
 - variabile intera condivisa S;
 - operazioni: **down** e **up** (dette anche **wait** e **signal**);
 - **operazioni atomiche**:
 - disabilitazione interrupt o spin lock TSL/XCHG;
 - tipicamente implementato **senza busy waiting** con una **lista di processi bloccati**.
- Due tipi di utilizzo:
 - **semaforo mutex** (mutua esclusione);
 - **conteggio risorse** (sincronizzazione).

Produttore-consumatore con i semafori

```
int N=100
semaphore mutex = 1
semaphore empty = N
semaphore full = 0
```

```
function producer()
while (true) do
    item = produce_item()
    down(empty)
    down(mutex)
    insert_item(item)
    up(mutex)
    up(full)
```

```
function consumer()
while (true) do
    down(full)
    down(mutex)
    item = remove_item()
    up(mutex)
    up(empty)
    consume_item(item)
```

- L'ordine delle operazioni sui semafori è fondamentale...

Mutex e thread utente

- Tra i **thread utente** che fanno riferimento ad un unico processo (**modello 1-a-molti**) si possono implementare efficientemente i **mutex** facendo uso di TSL (o XCHG):

```
mutex_lock:
```

```
    TSL REGISTER,MUTEX  
    CMP REGISTER,#0  
    JZE ok  
    CALL thread_yield  
    JMP mutex_lock
```

```
ok:RET
```

```
mutex_unlock:
```

```
    MOVE MUTEX,#0  
    RET
```

- **simili** a enter_region/leave_region ma:
 - senza **spin lock**;
 - il busy waiting sarebbe problematico con i thread utente;
- molto efficienti.

Futex

- Osservazione: i mutex in user-space sono molto efficienti ma lo spin lock può essere lungo!
→ **futex** = fast user space mutex (Linux)
- due componenti:
 - **servizio kernel**
 - coda di thread bloccati
 - **libreria utente**
 - variabile di **lock**
 - contesa in modalità utente (tipo con TSL/XCHG)
 - richiamo kernel solo in caso di bloccaggio

I Monitor

- Costrutto ad alto-livello disponibile su alcuni linguaggi;
- un **tipo astratto di dato** (variabili + procedure) con:
 - garanzia di **mutua esclusione**;
 - esiste una coda di attesa interna;
 - vincolo di accesso ai dati (interni ed esterni).
- Meccanismo di sincronizzazione: **variabili condizione**
 - operazioni **wait** e **signal**;
 - esiste una coda di attesa per ogni variabile;
 - la signal può avere **diverse semantiche**:
 - monitor **Hoare** (teorico): **signal & wait**;
 - monitor **Mesa** (Java): **signal & continue**;
 - compromesso (concurrent Pascal): **signal & return**.
- Vantaggi e svantaggi.

Produttore-consumatore con i monitor

```
monitor pc_monitor
  condition full, empty;
  integer count = 0;
```

```
function insert(item)
  if count = N then wait(full);
  insert_item(item);
  count = count + 1;
  if count = 1 then signal(empty)
```

```
function remove()
  if count = 0 then
    wait(empty);
  remove = remove_item();
  count = count - 1;
  if count = N-1 then signal(full)
```

```
function producer()
  while (true) do
    item = produce_item()
    pc_monitor.insert(item)
```

```
function consumer()
  while (true) do
    item = pc_monitor.remove()
    consume_item(item)
```

Scambio messaggi tra processi

- Primitive più ad alto livello:
 - `send(destinazione, messaggio)`
 - `receive(sorgente, messaggio)`
 - bloccante per il chiamante (o può restituire un errore);
 - estendibile al caso di più macchine (es., libreria MPI);
 - metodi di indirizzamento: **diretto** o tramite **mailbox**;
 - assumendo realisticamente l'esistenza di un **buffer** per i messaggi:
 - capienza finita N ;
 - la send può essere bloccante;

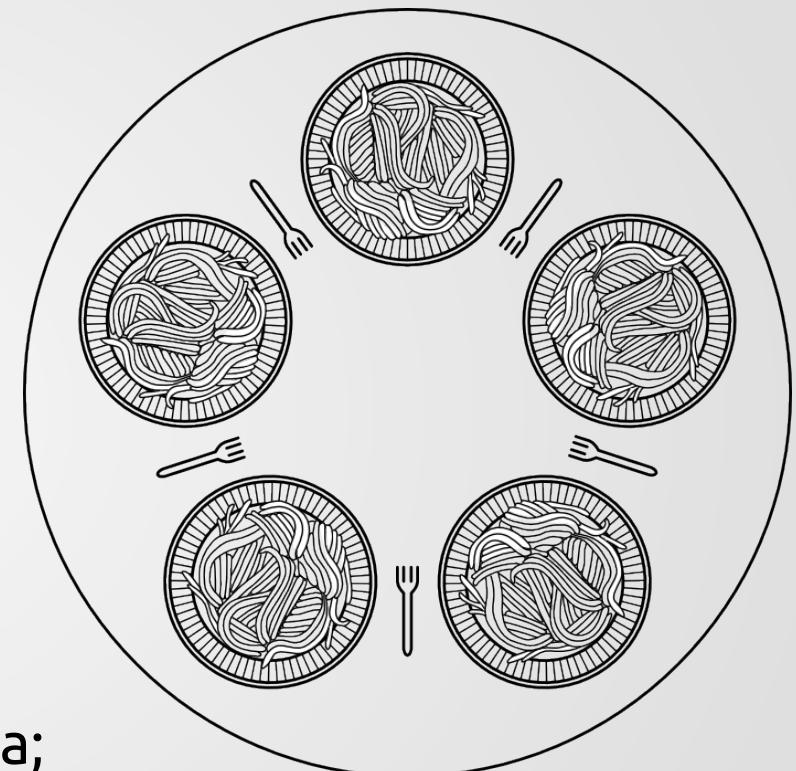
```
function producer()
  while (true) do
    item = produce_item()
    build_msg(m,item)
    send(consumer, msg)
```

```
function consumer()
  while (true) do
    receive(producer, msg)
    item=extract_msg(msg)
    consum_item(item)
```

Problema dei 5 filosofi

- Problema classico che modella l'**accesso esclusivo** ad un **numero limitato di risorse** da parte di **processi in concorrenza**.
- **soluzione 1:**

```
int N=5
function philosopher(int i)
    think()
    take_fork(i)
    take_fork((i+1) mod N)
    eat()
    put_fork(i)
    put_fork((i+1) mod N)
```



- **soluzione 2:** controlla con rilascio, riprova;
- **soluzione 3:** controlla con rilascio e riprova aspettando un tempo random.
- **soluzione 4:** utilizzo di un semaforo mutex.

Problema dei 5 filosofi: soluzione basata sui semafori

```
int N=5; int THINKING=0  
int HUNGRY=1; int EATING=2  
int state[N]  
semaphore mutex=1  
semaphore s[N]={0,...,0}
```

```
function philosopher(int i)  
    while (true) do  
        think()  
        take_forks(i)  
        eat()  
        put_forks(i)
```

```
function take_forks(int i)  
    down(mutex)  
    state[i]=HUNGRY  
    test(i)  
    up(mutex)  
    down(s[i])
```

```
function put_forks(int i)  
    down(mutex)  
    state[i]=THINKING  
    test(left(i))  
    test(right(i))  
    up(mutex)
```

```
function left(int i) = i-1 mod N  
function right(int i) = i+1 mod N
```

```
function test(int i)  
    if state[i]=HUNGRY and state[left(i)]!=EATING and state[right(i)]!=EATING  
        state[i]=EATING  
        up(s[i])
```

Problema dei 5 filosofi: soluzione basata sui monitor

```
int N=5; int THINKING=0; int HUNGRY=1; int EATING=2
```

```
monitor dp_monitor
    int state[N]
    condition self[N]

    function take_forks(int i)
        state[i] = HUNGRY
        test(i)
        if state[i] != EATING
            wait(self[i])

    function put_forks(int i)
        state[i] = THINKING;
        test(left(i));
        test(right(i));

    function test(int i)
        if ( state[left(i)] != EATING and state[i] = HUNGRY
        and state[right(i)] != EATING )
            state[i] = EATING
            signal(self[i])
```

```
function philosopher(int i)
    while (true) do
        think()
        dp_monitor.take_forks(i)
        eat()
        dp_monitor.put_forks(i)
```

Problema dei lettori e scrittori: soluzione basata sui semafori

- Problema classico che modella l'accesso ad un data-base;

```
function reader()
  while true do
    down(mutex)
    rc = rc+1
    if (rc = 1) down(db)
    up(mutex)
    read_database()
    down(mutex)
    rc = rc-1
    if (rc = 0) up(db)
    up(mutex)
    use_data_read()
```

```
semaphore mutex = 1
semaphore db = 1
int rc = 0
```

```
function writer()
  while true do
    think_up_data()
    down(db)
    write_database()
    up(db)
```

- **problema:** lo scrittore potrebbe attendere per un tempo indefinito.

Problema dei lettori e scrittori: soluzione n.1 basata sui monitor

```
monitor rw_monitor
    int rc = 0; boolean busy_on_write = false
    condition read,write

    function start_read()
        if (busy_on_write) wait(read)
        rc = rc+1
        signal(read)

    function end_read()
        rc = rc-1
        if (rc = 0) signal(write)

    function start_write()
        if (rc > 0 OR busy_on_write) wait(write)
        busy_on_write = true

    function end_write()
        busy_on_write = false
        if (in_queue(read))
            signal(read)
        else
            signal(write)
```

```
function reader()
    while true do
        rw_monitor.start_read()
        read_database()
        rw_monitor.end_read()
        use_data_read()
```

```
function writer()
    while true do
        think_up_data()
        rw_monitor.start_write()
        write_database()
        rw_monitor.end_write()
```

Problema dei lettori e scrittori: soluzione n.2 basata sui monitor

```
monitor rw_monitor
    int rc = 0; boolean busy_on_write = false
    condition read,write

    function start_read()
        if (busy_on_write OR in_queue(write)) wait(read)
        rc = rc+1
        signal(read)

    function end_read()
        rc = rc-1
        if (rc = 0) signal(write)

    function start_write()
        if (rc > 0 OR busy_on_write) wait(write)
        busy_on_write = true

    function end_write()
        busy_on_write = false
        if (in_queue(read))
            signal(read)
        else
            signal(write)
```

```
function reader()
    while true do
        rw_monitor.start_read()
        read_database()
        rw_monitor.end_read()
        use_data_read()
```

```
function writer()
    while true do
        think_up_data()
        rw_monitor.start_write()
        write_database()
        rw_monitor.end_write()
```

Problema dei lettori e scrittori: soluzione n.3 basata sui monitor

```
monitor rw_monitor
int rc = 0; boolean busy_on_write = false
condition read,write
```

```
function start_read()
    if (busy_on_write OR in_queue(write)) wait(read)
    rc = rc+1
    signal(read)
```

```
function end_read()
    rc = rc-1
    if (rc = 0) signal(write)
```

```
function start_write()
    if (rc > 0 OR busy_on_write) wait(write)
    busy_on_write = true
```

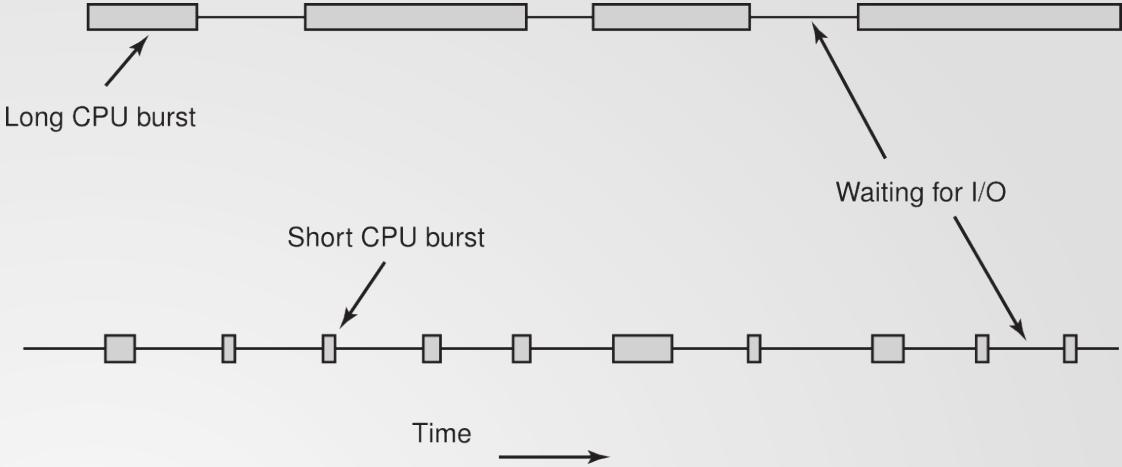
```
function end_write()
    busy_on_write = false
    if (in_queue(write))
        signal(write)
    else
        signal(read)
```

```
function reader()
while true do
    rw_monitor.start_read()
    read_database()
    rw_monitor.end_read()
    use_data_read()
```

```
function writer()
while true do
    think_up_data()
    rw_monitor.start_write()
    write_database()
    rw_monitor.end_write()
```

Scheduling

- **Scheduler;**
- **algoritmo di scheduling;**
- **tipologie di processi:**
 - **CPU-bounded;**
 - **I/O-bounded;**
- **quando viene attivato lo scheduler:**
 - terminazione (e creazione) di processi;
 - chiamata bloccante (es., I/O) e arrivo del relativo interrupt;
 - interrupt periodici:
 - sistemi **non-preemptive** (senza prelazione);
 - sistemi **preemptive** (con prelazione);
- collabora con il **dispatcher**: **latenza di dispatch.**



Obiettivi degli algoritmi di scheduling

- Ambienti differenti: **batch, interattivi e real-time.**
- **Obiettivi comuni:**
 - **equità** nell'assegnazione della CPU;
 - **bilanciamento** nell'uso delle risorse;
- Obiettivi tipici dei sistemi batch:
 - massimizzare il **throughput** (o produttività);
 - minimizzare il **tempo di turnaround** (o tempo di completamento);
 - minimizzare il **tempo di attesa**;
- Obiettivi tipici dei sistemi interattivi:
 - minimizzare il **tempo di risposta**;
- Obiettivi tipici dei sistemi real-time:
 - **rispetto delle scadenze**;
 - **prevedibilità**.

Scheduling nei sistemi batch

- **First-Come First-Served (FCFS)** o per ordine di arrivo;
 - non-preemptive;
 - semplice coda FIFO.
- **Shortest Job First (SJF)** o per brevità:
 - non-preemptive;
 - presuppone la conoscenza del tempo impiegato da ogni lavoro;
 - ottimale solo se i lavori sono tutti subito disponibili.
- **Shortest Remaining Time Next (SRTN):**
 - versione preemptive dello SJF.

Esempio

Processo	Durata
P ₁	24
P ₂	3
P ₃	3

$$\text{t.m.a.: } (0+24+27)/3 = 17$$
$$\text{t.m.c.: } (24+27+30)/3 = 27$$

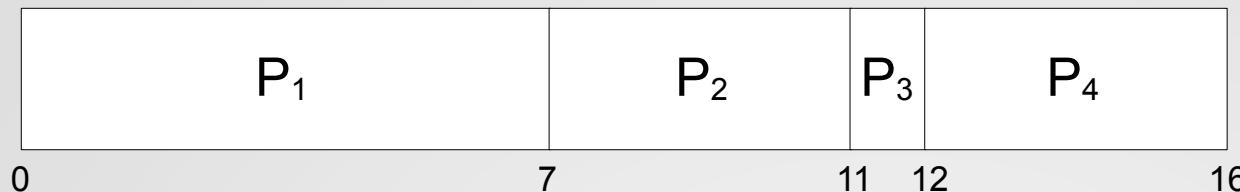
Esempio
SJF non è ottimale

Processo	Arrivo	Durata
P ₁	0	2
P ₂	0	4
P ₃	3	1
P ₄	3	1
P ₅	3	1

t.m.a.
SJF $(0+2+3+4+5)/5 = 2.8$
altern. $(7+0+1+2+3)/5 = 2.6$

Scheduling nei sistemi batch

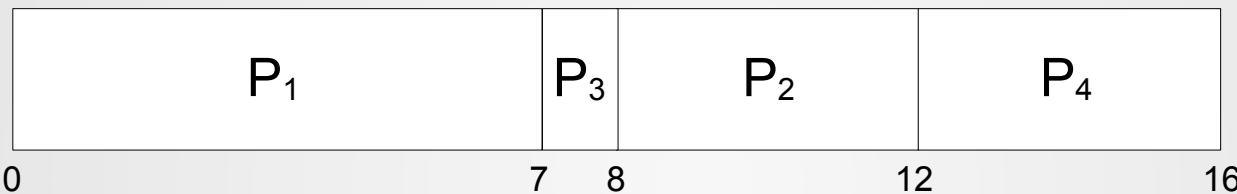
- **FCFS:**



Processo	Arrivo	Durata
P ₁	0	7
P ₂	2	4
P ₃	4	1
P ₄	5	4

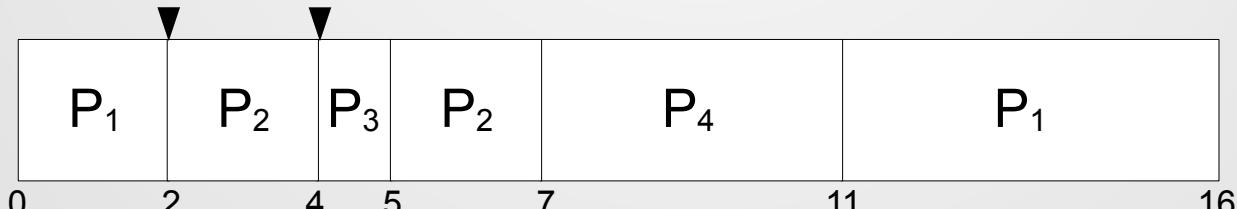
- tempi di attesa: P₁=0; P₂=5; P₃=7; P₄=7 (media 4.75);
- tempi di completamento: P₁=7; P₂=9; P₃=8; P₄=11 (media 8.75);

- **SJF:**



- tempi di attesa: P₁=0; P₂=6; P₃=3; P₄=7 (media 4);
- tempi di completamento: P₁=7; P₂=10; P₃=4; P₄=11 (media 8);

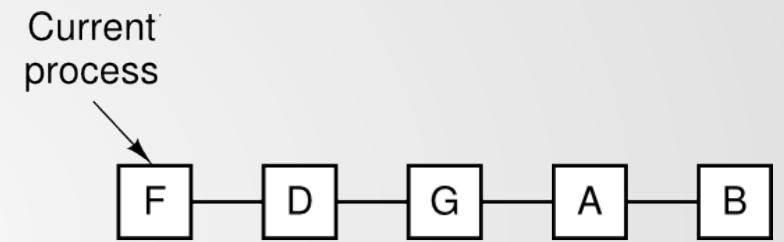
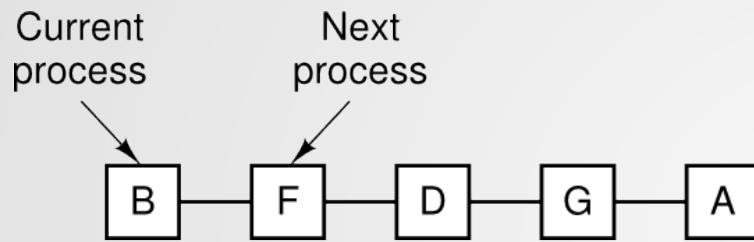
- **SRTN:**



- tempi di attesa: P₁=9; P₂=1; P₃=0; P₄=2 (media 3);
- tempi di completamento: P₁=16; P₂=5; P₃=1; P₄=6 (media 7).

Scheduling nei sistemi interattivi

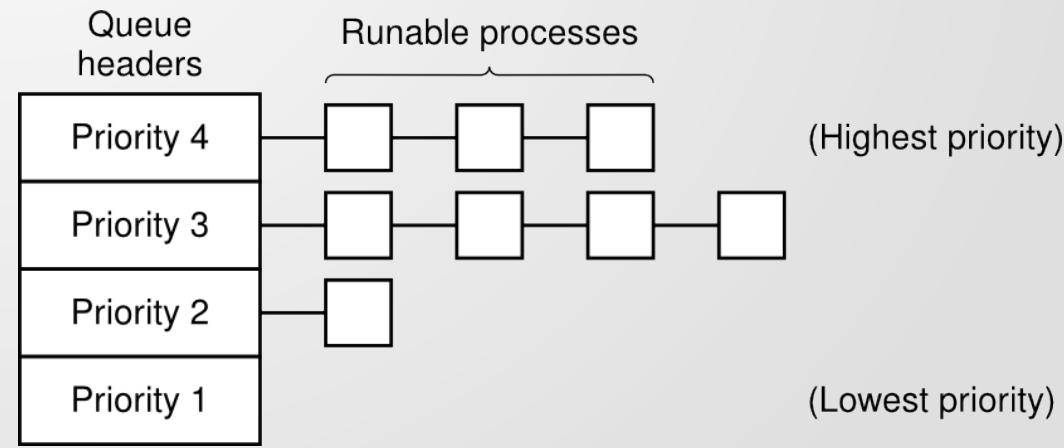
- **Scheduling Round-Robin (RR):**
 - versione con prelazione del FCFS;
 - preemptive e basato su un quanto di tempo (timeslice);



- quanto deve essere lungo il timeslice?
 - valori tipici sono 20-50ms;
 - con n processi e un quanto di q ms, ogni processo avrà diritto a circa $1/n$ della CPU e attenderà al più $(n-1)q$ ms.

Scheduling nei sistemi interattivi

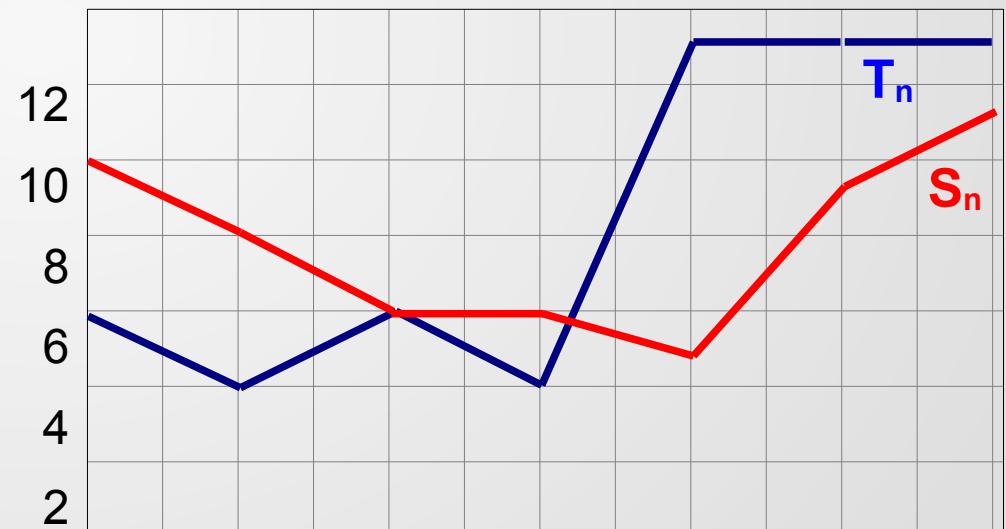
- **Scheduling a priorità:**
 - **regola di base:** si assegna la CPU al processo con più alta priorità;
 - **assegnamento delle priorità:**
 - statiche, dinamiche;
 - favorire processi I/O bounded;
 - SJF come sistema a priorità;
 - **prelazione vs. non-prelazione;**
 - **starvation, aging;**
- Variante: **scheduling a code multiple (classi di priorità);**
 - priorità fisse;
 - con feedback (o retroazione).



Scheduling nei sistemi interattivi

- **Shortest Process Next (SPN):**
 - idea: applicare lo SJF ai processi interattivi;
 - problema: identificare la durata del prossimo burst di CPU;
 - soluzione: stime basate sui burst precedenti;
- esempio: $a=1/2$

T _n	6	4	6	4	13	13	13
S _n	10	8	6	6	5	9	11



Scheduling nei sistemi interattivi

- **Scheduling garantito:**
 - viene stabilita una percentuale di utilizzo e viene fatta rispettare.
- **Scheduling a lotteria:**
 - biglietti con estrazioni a random;
 - criterio semplice e chiaro;
 - possibilità di avere processi cooperanti.
- **Scheduling fair-share:**
 - realizza un equo uso tra gli utenti del sistema.

Scheduling dei thread

- **Thread utente:**
 - ignorati dallo scheduler del kernel;
 - per lo scheduler del sistema run-time vanno bene tutti gli algoritmi non-preemptive visti;
 - possibilità di utilizzo di scheduling personalizzato.
- **Thread del kernel:**
 - o si considerano tutti i thread uguali, oppure;
 - si pesa l'appartenenza al processo;
 - lo switch su un thread di un processo diverso implica anche la riprogrammazione della MMU e, in alcuni casi, l'azzeramento della cache della CPU.

Scheduling su sistemi multiprocessore

- Possibili approcci:
 - **multielaborazione asimmetrica**;
 - uno dei processori assume il ruolo di **master server**;
 - **multielaborazione simmetrica (SMP)**;
 - **coda unificata** dei processi pronti o **code separate** per ogni processore/core.
- Politiche di scheduling:
 - presenza o assenza di **predilezione per i processori**:
 - **predilezione debole** o **predilezione forte**;
 - **bilanciamento del carico**:
 - necessaria solo in presenza di code distinte per i processi pronti;
 - **migrazione guidata** o **migrazione spontanea**;
 - possibili **approcci misti** (Linux e FreeBSD);
 - bilanciamento del carico *vs.* predilezione del processore.

Cosa usano i nostri Sistemi Operativi?

- elementi comuni:
 - thread, SMP, gestione priorità, predilezione per i processi IO-bounded
- **Windows:**
 - scheduler basato su code di priorità;
 - euristiche per migliorare il servizio dei processi interattivi e in particolare di foreground;
 - euristiche per evitare il problema dell'inversione di priorità.
- **Linux:**
 - scheduling basato su task (generalizzazione di processi e thread);
 - Completely Fair Scheduler (CFS): moderno scheduler garantito;
- **MacOS:**
 - Mach scheduler basato su code di priorità con euristiche.