



# Lezione R9

## Controllo d'accesso alle risorse condivise – I

Sistemi embedded e real-time

4 dicembre 2012

Marco Cesati

Dipartimento di Ingegneria Civile e Ingegneria Informatica  
Università degli Studi di Roma Tor Vergata

Schema della lezione

Modellare le risorse

Protocollo NPCS

Protocollo  
priority-inheritance

Protocollo  
priority-ceiling

# Di cosa parliamo in questa lezione?



In questa lezione parleremo di protocolli di controllo d'accesso alle risorse condivise

- 1 Modello di sistema con risorse
- 2 Il controllo d'accesso
- 3 Il protocollo NPCS
- 4 Il protocollo priority-inheritance
- 5 Il protocollo priority-ceiling

## Schema della lezione

Modellare le risorse

Protocollo NPCS

Protocollo  
priority-inheritance

Protocollo  
priority-ceiling

## Modello di sistema con risorse

- Singolo processore
- Risorse riciclabili seriali di tipo  $R_1, \dots, R_p$
- Ciascun tipo di risorsa  $R_i$  ha  $\nu_i$  unità di risorsa indistinguibili
- Ogni unità di risorsa è assegnabile ad un solo job alla volta
- Se  $R_i$  ha  $\infty$  unità di risorsa non vale la pena considerarla nel modello  $\Rightarrow \nu_i$  è sempre finito
- Esempi tipici: semafori, mutex, spin lock, stampanti, ...

*Come modellare una risorsa  $R$  che può essere utilizzata contemporaneamente da un numero finito  $n > 1$  di job?*

$R$  ha  $\nu = n$  unità *esclusive* (nessun job possiede più di 1 unità)

*Come modellare una risorsa  $R$  che ha una intrinseca dimensione finita (es.: memoria) ?*

$R$  ha  $\nu$  unità di risorsa, e una unità rappresenta il più piccolo blocco di risorsa assegnabile



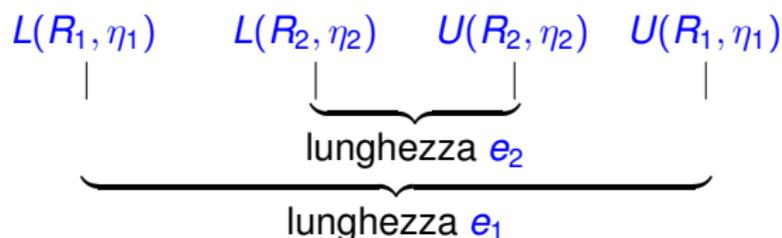
## Richieste e rilasci di risorse

- Un job che deve acquisire  $\eta$  unità della risorsa  $R_i$  per procedere nell'esecuzione effettua una *richiesta*  $L(R_i, \eta)$
- Se la richiesta è soddisfatta, il job continua l'esecuzione
- Altrimenti il job è **bloccato** (la sua esecuzione è sospesa)
- Quando il job non ha più necessità della risorsa, esegue un **rilascio**  $U(R_i, \eta)$
- Spesso (ma non sempre!) il controllo di accesso alle risorse è affidato a primitive di *lock/unlock* (tipicamente semafori e mutex del sistema operativo)
- Spesso una risorsa  $R_i$  ha una sola unità disponibile ( $\nu_i = 1$ ); abbreviamo  $L(R_i, 1) = L(R_i)$  e  $U(R_i, 1) = U(R_i)$
- Due job hanno un *conflitto di risorse* se entrambi richiedono una risorsa dello stesso tipo
- Due job *si contendono* una risorsa se uno dei due richiede una risorsa che è già posseduta dall'altro job



## Sezioni critiche

- Si definisce *sezione critica* un segmento di esecuzione di job che inizia con  $L(R_i, \eta)$  e termina con  $U(R_i, \eta)$
- Le richieste di risorse di un job possono essere annidate, ma assumiamo che i rilasci sono sempre LIFO
- Una *sezione critica* non contenuta in alcun'altra sezione critica è detta *esterna*
- La notazione  $[R_1, \eta_1; e_1 [R_2, \eta_2; e_2]]$  corrisponde a:



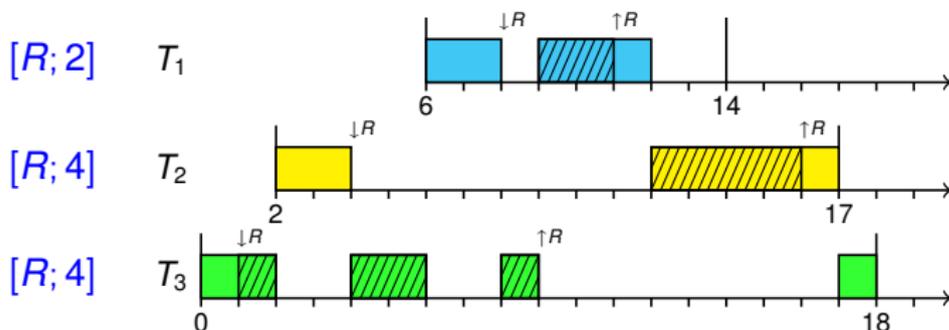
Nella notazione non sono indicati gli istanti iniziali delle sezioni critiche, ma solo il loro annidamento



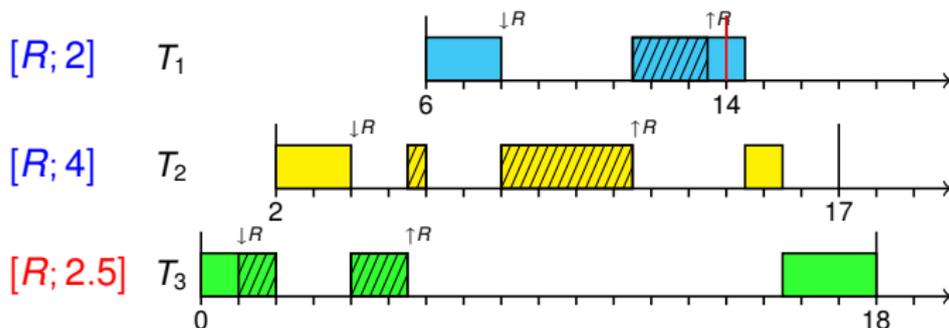
## Esempi di schedulazione EDF con una unità di risorsa

Task:  $T_1=(6, 8, 5, 8)$ ,  $T_2=(2, 15, 7, 15)$ ,  $T_3=(18, 6)$

Per  $T_1$  e  $T_2$ :  $L(R)$  a inizio esec. +2. Per  $T_3$ :  $L(R)$  a +1



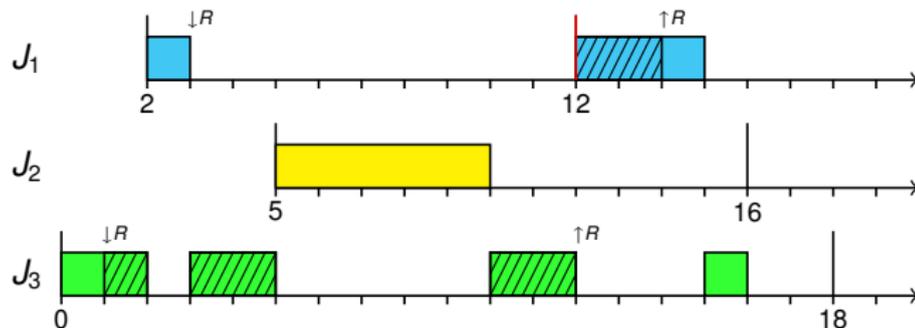
Le inversioni di priorità causano anomalie di schedulazione!



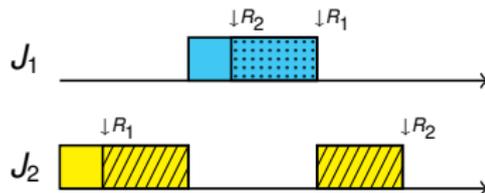
## Controllo d'accesso alle risorse

Nei sistemi real-time è sempre necessario implementare un algoritmo per il **controllo d'accesso alle risorse condivise**, altrimenti:

- le **inversioni di priorità** sono *non controllate*, cioè arbitrariamente lunghe (Sha, Rajkumar, Lehoczky 1990)



- sono possibili *deadlock*

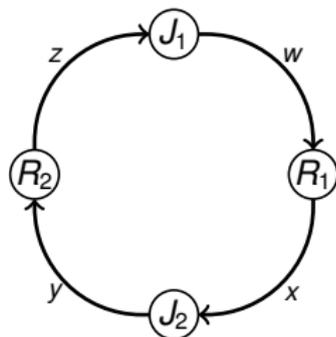


## Grafi d'attesa

È possibile rappresentare la mutua relazione tra job e risorse tramite *grafi d'attesa*:

- I nodi del grafo sono i job ed i tipi di risorse
- Un arco orientato con etichetta  $x$  da una risorsa ad un job indica che il job ha allocato  $x$  unità della risorsa
- Un arco orientato con etichetta  $x$  da un job ad una risorsa indica che il job ha richiesto  $x$  unità della risorsa e la richiesta non può essere soddisfatta

*Cosa rappresenta un ciclo nel grafo d'attesa?*



Un **deadlock!**



# Protocollo NPCS

Il più semplice protocollo di controllo d'accesso alle risorse è **NPCS** (Nonpreemptive Critical Section, Mok 1983)

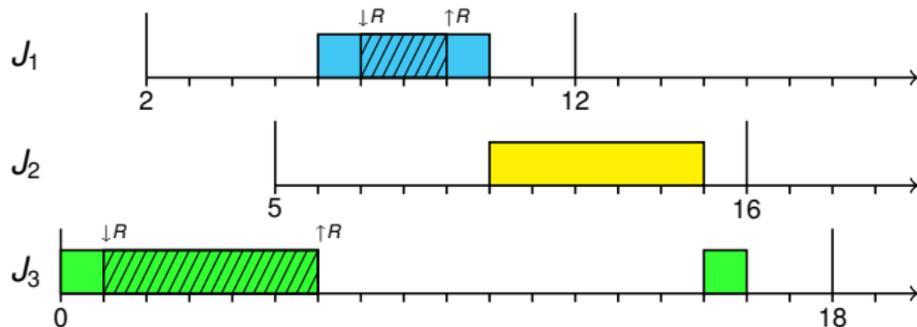
## Protocollo NPCS

Un job avente una risorsa assegnata non può essere interrotto

*È possibile avere deadlock utilizzando NPCS?*

No, ma solo a condizione che il job non si auto-sospenda all'interno di una sezione critica

Esempio di schedulazione con **NPCS**:



## Tempo di blocco per conflitto di risorse

Sia  $b_i(rc)$  il *tempo di blocco dovuto ad un conflitto di risorse*

Con task a priorità fissa  $T_1, \dots, T_n$  e NPCS vale

$$b_i(rc) = \max_{i+1 \leq k \leq n} (c_k)$$

( $c_k$  = tempo di esecuzione della più lunga sezione critica di  $T_k$ )

*Qual è la formula per  $b_i(rc)$  con schedulazione EDF?*

- Teorema di Baker: un job  $J_i$  può essere bloccato da  $J_j$  solo se  $d_i < d_j$  e  $r_i > r_j$ , ossia  $D_i < D_j$
- $b_i(rc) = \max\{c_k : k \text{ tale che } D_k > D_i\}$

*Qual è il limite del protocollo NPCS?*

Un job può essere bloccato da un job di priorità inferiore anche quando non esiste contesa su alcuna risorsa

NPCS è comunque diffuso perché è semplice, non richiede dati sull'uso delle risorse dei job, è facile da implementare e può essere usato sia in sistemi a priorità fissa che dinamica



# Protocollo priority-inheritance

Proposto da Sha, Rajkumar, Lehoczky (1990):

- Adatto ad ogni scheduler priority-driven
- Non basato sui tempi di esecuzione dei job
- Evita il fenomeno della inversione di priorità incontrollata

**Versione base:** Una sola unità per ogni tipo di risorsa

Idea: cambiare le priorità se esistono conflitti sulle risorse per evitare che un job che blocca un altro job di priorità più alta sia rallentato da job di priorità intermedia tra i due



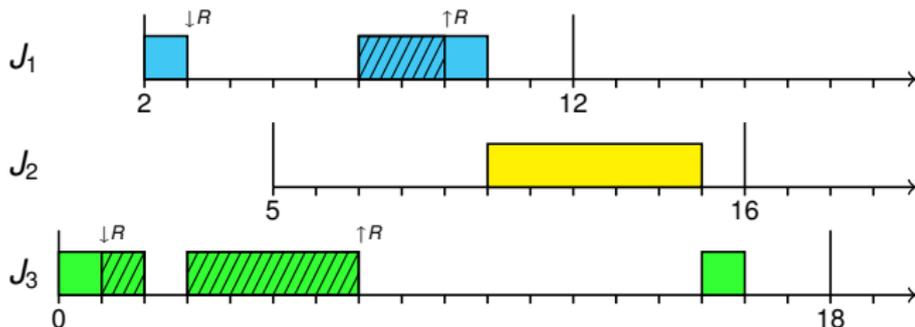
Schema della lezione

Modellare le risorse

Protocollo NPCS

Protocollo  
priority-inheritance

Protocollo  
priority-ceiling



## Protocollo priority-inheritance (2)

### Regola di schedulazione

I job sono schedulati in modo interrompibile secondo la loro **priorità corrente**. Inizialmente la priorità corrente  $\pi(t)$  di un job  $J$  rilasciato al tempo  $t$  è quella assegnata dall'algoritmo di schedulazione

### Regola di allocazione

Quando un job  $J$  richiede una risorsa  $R$  al tempo  $t$ :

- (a) Se  $R$  è disponibile,  $R$  è assegnata a  $J$
- (b) Se  $R$  non è disponibile,  $J$  è sospeso (bloccato)

### Regola di trasferimento della priorità

Quando un job  $J$  viene bloccato a causa di un conflitto di risorsa  $R$ , il job  $J_\ell$  che blocca  $J$  eredita la **priorità corrente**  $\pi(t)$  di  $J$  finché non rilascia  $R$ ; a quel punto, la **priorità corrente** di  $J_\ell$  torna ad essere la priorità  $\pi_\ell(t')$  che aveva al momento  $t'$  in cui aveva acquisito la risorsa  $R$



Schema della lezione

Modellare le risorse

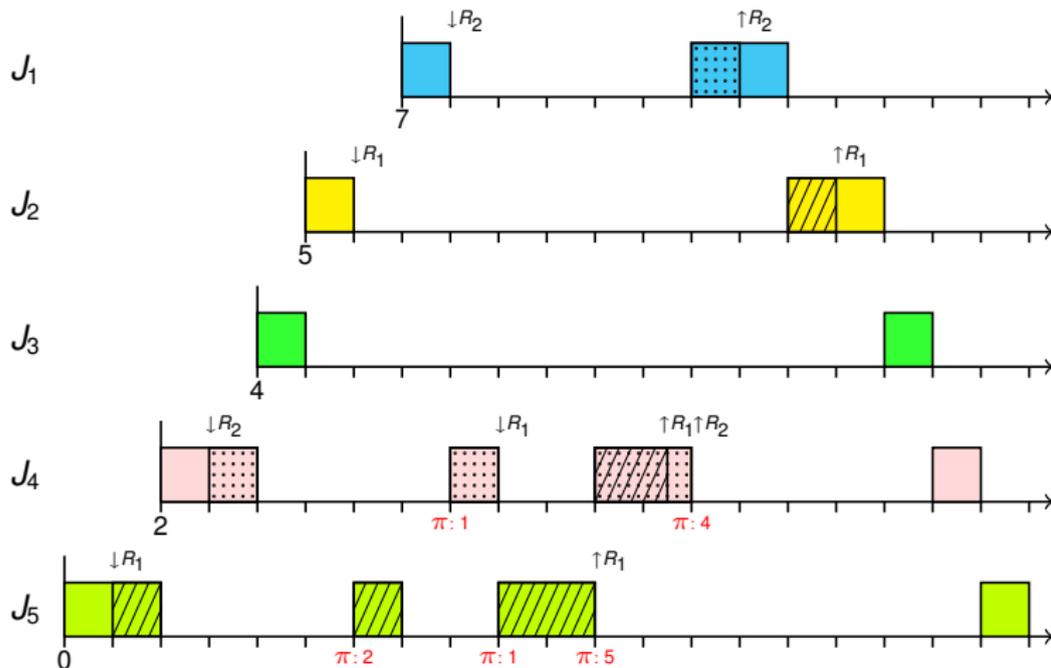
Protocollo NPCS

Protocollo  
priority-inheritance

Protocollo  
priority-ceiling

# Schedulazione a priorità fissa e priority-inheritance

	$J_1$	$J_2$	$J_3$	$J_4$	$J_5$	$J_1: [R_2; 1]$	$J_2: [R_1; 1]$
$r$	7	5	4	2	0		
$e$	3	3	2	6	6	$J_4: [R_2; 4 [R_1; 1.5]]$	$J_5: [R_1; 4]$



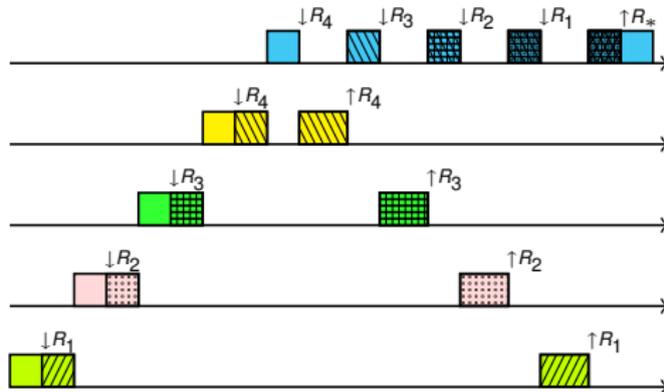
# Limiti del protocollo priority-inheritance



*Quali sono le limitazioni del protocollo priority-inheritance?*

- Non evita i deadlock
- Introduce nuovi casi di blocco: un job con priorità corrente  $\pi(t)$  può bloccare ogni job con priorità assegnata minore di  $\pi(t)$
- Non riduce i tempi di blocco dovuti ai conflitti sulle risorse al minimo teoricamente possibile

Un job che accede a  $v$  risorse ed ha conflitti di risorse con  $k$  job di priorità assegnata minore può bloccare  $\min(v, k)$  volte



## Protocollo priority-ceiling

Proposto da Sha, Rajkumar, Lehoczky (1988, 1990):

- Adatto a scheduler con priorità fissa
- Basato sulle richieste di risorse dei job (prefissate)
- Evita l'inversione di priorità incontrollata e i deadlock

**Versione base:** Una sola unità per ogni tipo di risorsa

Idea: associare ad ogni risorsa  $R$  il valore *priority ceiling*  $\Pi(R)$  pari alla massima (\*) priorità dei job che fanno uso di  $R$

Ad ogni istante  $t$  il valore *current priority ceiling*  $\hat{\Pi}(t)$  è pari a:

- la massima (\*) priorità  $\Pi(R)$  fra tutte le risorse del sistema correntemente in uso al tempo  $t$
- al valore convenzionale  $\Omega$  di priorità inferiore a quella di qualunque task se nessuna risorsa è in uso

(\*)

Confrontando le priorità,  $\pi(t) > \pi'(t)$  significa che  $\pi(t)$  ha maggiore priorità di  $\pi'(t)$ ; così se a valore inferiore corrisponde priorità superiore,  $\pi(t) = 1$  e  $\pi'(t) = 2$  implica che  $\pi(t) > \pi'(t)$



Schema della lezione

Modellare le risorse

Protocollo NPCS

Protocollo  
priority-inheritance

Protocollo  
priority-ceiling

## Protocollo priority-ceiling (2)

### Regola di schedulazione

I job sono schedulati in modo interrompibile secondo la loro **priorità corrente**. Inizialmente la priorità corrente  $\pi(t)$  di un job  $J$  rilasciato al tempo  $t$  è quella prefissata



Schema della lezione

Modellare le risorse

Protocollo NPCS

Protocollo  
priority-inheritance

Protocollo  
priority-ceiling

### Regola di allocazione

Se al tempo  $t$  un job  $J$  con priorità corrente  $\pi(t)$  richiede una risorsa  $R$ ,  $R$  è allocata a  $J$  solo se è disponibile e se inoltre:

- (a)  $\pi(t) > \hat{\Pi}(t)$ , oppure
- (b)  $J$  possiede una risorsa il cui **priority ceiling** è uguale a  $\hat{\Pi}(t)$

Altrimenti  $J$  è sospeso (bloccato)

### Regola di trasferimento della priorità

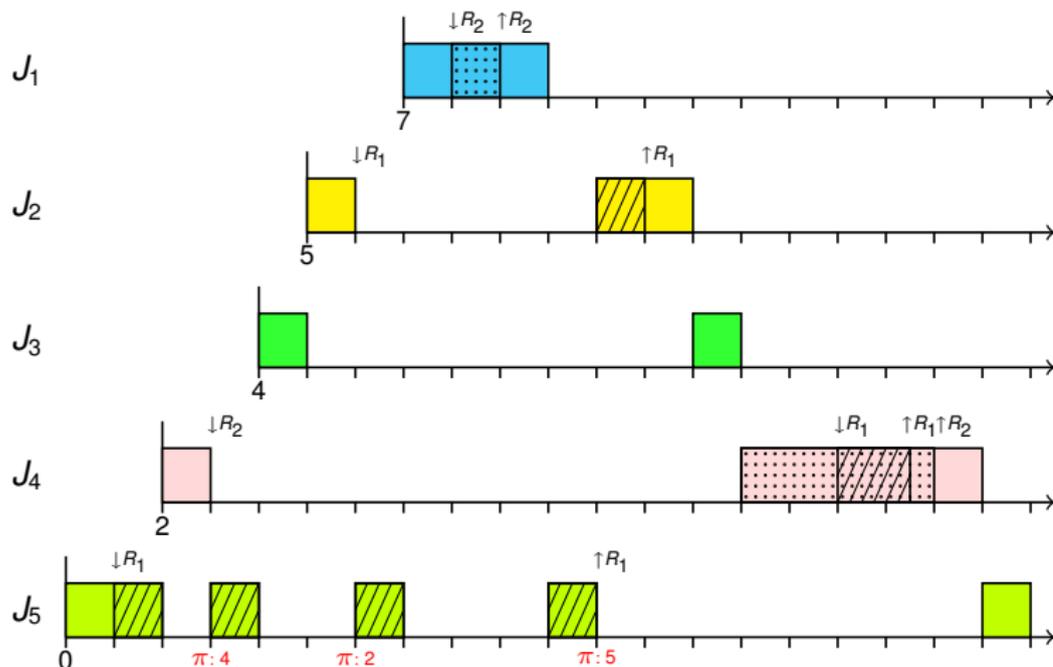
Se  $J_\ell$  blocca  $J$ ,  $J_\ell$  eredita la priorità corrente  $\pi(t)$  di  $J$  finché  $J_\ell$  non rilascia l'ultima risorsa  $R$  tale che  $\Pi(R) \geq \pi(t)$ ; a quel punto la priorità corrente di  $J_\ell$  torna ad essere la priorità  $\pi_\ell(t')$  che aveva al momento  $t'$  in cui aveva acquisito la risorsa  $R$

# Esempio di schedulazione con priority-ceiling

	$J_1$	$J_2$	$J_3$	$J_4$	$J_5$	$J_1:[R_2; 1]$	$J_2:[R_1; 1]$	$\Pi(R_1)=2$
$r$	7	5	4	2	0			
$e$	3	3	2	6	6	$J_4:[R_2; 4 [R_1; 1.5]]$	$J_5:[R_1; 4]$	$\Pi(R_2)=1$

$\hat{\Pi}(t): \Omega \ 2$

1 2  $\Omega 2 \ \Omega$  1  $\Omega$



## Tipi di blocco nel protocollo priority-ceiling



*Nel protocollo priority-ceiling, in quali diversi casi un job  $J_\ell$  può bloccare un job  $J_h$  con priorità assegnate  $\pi_\ell < \pi_h$ ?*

- **Blocco diretto:**  $J_h$  richiede una risorsa  $R$  assegnata a  $J_\ell$
- **Blocco dovuto a priority-inheritance:** la priorità corrente di  $J_\ell$  è maggiore di quella di  $J_h$  perché  $J_\ell$  blocca direttamente un job di priorità maggiore di  $J_h$
- **Blocco dovuto a priority-ceiling** (o *avoidance blocking*):  $J_h$  ha richiesto una risorsa  $R$  ma  $J_\ell$  possiede un'altra risorsa  $R'$  tale che  $\Pi(R') = \hat{\Pi}(t)$

Schema della lezione

Modellare le risorse

Protocollo NPCS

Protocollo  
priority-inheritance

Protocollo  
priority-ceiling

*Perché il protocollo priority-ceiling evita i deadlock?*

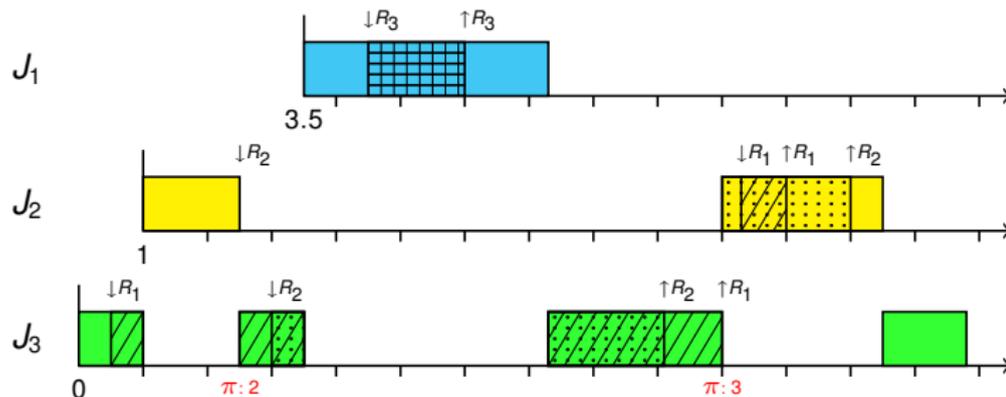
- I deadlock possono essere evitati se tutti i job acquisiscono le risorse annidate rispettando un unico ordinamento globale delle risorse (Havender, 1968)
- I **priority ceiling**  $\Pi(R)$  delle risorse e la regola di allocazione vietano le assegnazioni di risorse “fuori ordine”

# Come si evitano i deadlock nel protocollo priority ceiling



	$J_1$	$J_2$	$J_3$	$J_1: [R_3; 1.5]$	$J_2: [R_2; 2 [R_1; 0.7]]$	$J_3: [R_1; 4.2 [R_2; 2.3]]$
$r$	3.5	1	0			
$e$	3.8	4	6	$\Pi(R_1)=2$	$\Pi(R_2)=2$	$\Pi(R_3)=1$

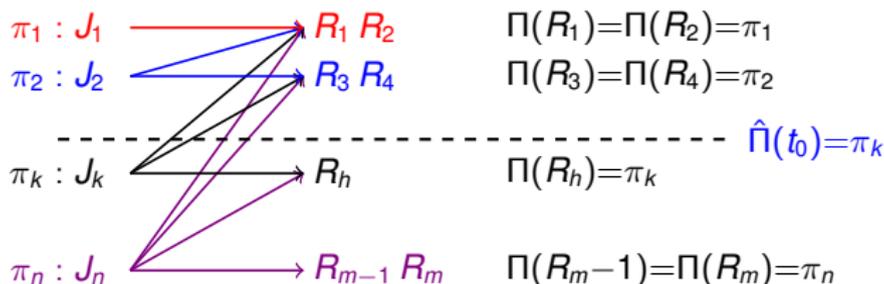
$\hat{\Pi}(t): \Omega 2 \quad 2 \quad 1 \quad 2 \quad 2 \quad \Omega 2 \quad 2 \quad \Omega$



Al tempo 2.5  $J_2$  richiede  $R_2$ , ma la richiesta viene rifiutata anche se  $R_2$  è libera  $\Rightarrow$  si evita un possibile deadlock con  $J_3$

I job con priorità corrente maggiore di  $\hat{\Pi}(t)$  possono acquisire risorse senza rischiare deadlock con le risorse già assegnate

## Come si evitano i deadlock nel protocollo priority-ceiling (2)



Se al tempo  $t_0$  un job  $J$  richiede una risorsa  $R$  e  $\pi(t_0) > \hat{\Pi}(t_0)$ :

- $J$  non chiederà mai alcuna risorsa già assegnata al tempo  $t_0$   
⇒ nessun deadlock con risorse già assegnate
- Nessun job con priorità maggiore di  $\pi(t_0)$  chiederà alcuna risorsa già assegnata al tempo  $t_0$   
⇒ nessun job che già possiede una risorsa al tempo  $t_0$  potrà interrompere  $J$  e richiedere  $R$

⇒ Il protocollo **priority-ceiling** evita i deadlock

## Proprietà del protocollo priority-ceiling

- Assegna ad ogni risorsa il valore **priority-ceiling** che indica la massima priorità tra i job che usano la risorsa
- Mantiene aggiornato il **current priority ceiling** del sistema  $\hat{\pi}(t)$  che indica il massimo valore associato a tutte le risorse assegnate
- Job bloccanti ereditano la priorità dinamica dei job bloccati
- Al tempo  $t$  un solo job possiede tutte le risorse assegnate aventi **priority ceiling** uguale a  $\hat{\pi}(t)$
- Se un job ottiene una risorsa e  $\pi(t) > \hat{\pi}(t)$ , nessun job di priorità uguale o superiore (compreso il job stesso) utilizza risorse già assegnate
- Se un job ottiene una risorsa e  $\pi(t) \leq \hat{\pi}(t)$ , il job è il possessore di tutte le risorse assegnate con **priority ceiling** uguale a  $\hat{\pi}(t)$
- I deadlock sono evitati





## Teorema

Utilizzando il protocollo priority-ceiling un job può essere bloccato al massimo per la durata di una sezione critica

Il teorema è conseguenza di due proprietà:

- 1 Se un job viene bloccato, è bloccato da un solo job
- 2 Non esiste *blocco transitivo*: non si verifica mai il caso  $J_3$  blocca  $J_2$  e  $J_2$  blocca  $J_1$

[Schema della lezione](#)

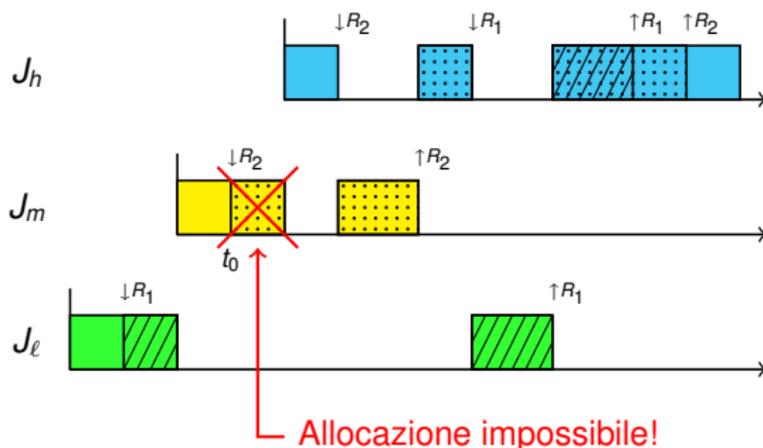
[Modellare le risorse](#)

[Protocollo NPCS](#)

[Protocollo  
priority-inheritance](#)

[Protocollo  
priority-ceiling](#)

# Unicità del job bloccante

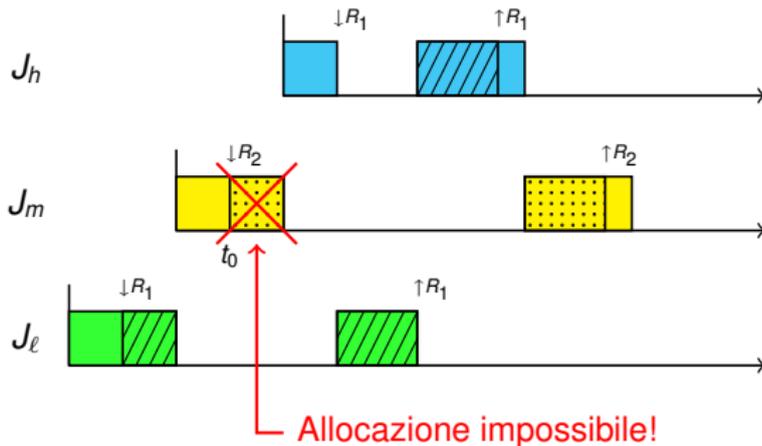


- $\pi_h > \pi_m > \pi_\ell \Rightarrow \Pi(R_1) \geq \pi_h$  e  $\Pi(R_2) \geq \pi_h$
- $\hat{\Pi}(t_0) \geq \Pi(R_1) \geq \pi_h$
- Requisito per allocazione a  $t_0$ :  $\pi_m > \hat{\Pi}(t_0) \geq \pi_h$

Se  $J_m$  acquisisce una risorsa a  $t_0$ , nessun job con priorità maggiore o uguale può richiedere una risorsa già in uso a  $t_0$



## Unicità del job bloccante (2)

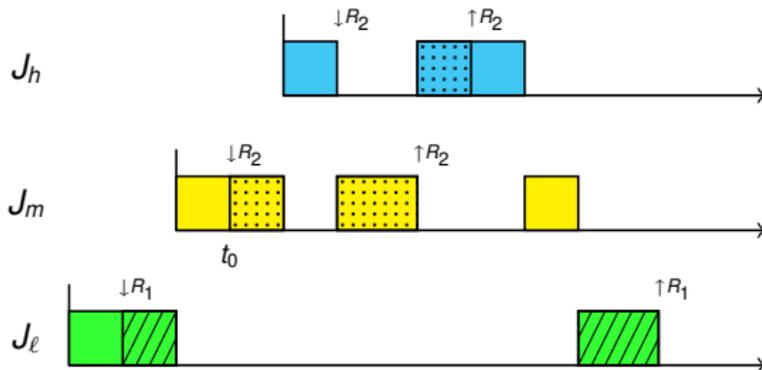


- $\pi_h > \pi_m > \pi_\ell \Rightarrow \Pi(R_1) \geq \pi_h$  e  $\Pi(R_2) \geq \pi_m$
- $\hat{\Pi}(t_0) \geq \Pi(R_1) \geq \pi_h$
- Requisito per allocazione a  $t_0$ :  $\pi_m > \hat{\Pi}(t_0) \geq \pi_h$

$J_h$  non può essere bloccato da  $J_\ell$  se  $J_\ell$  è stato interrotto da  $J_m$  e  $J_m$  ha acquisito una risorsa



## Unicità del job bloccante (3)

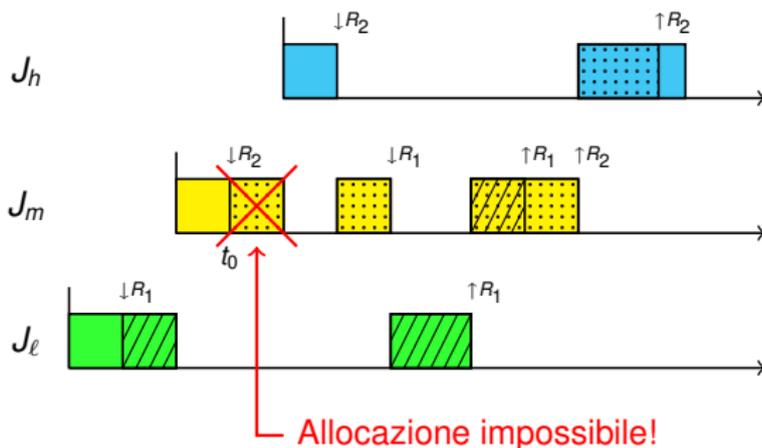


- $\pi_h > \pi_m > \pi_\ell \Rightarrow \Pi(R_1) \geq \pi_\ell$  e  $\Pi(R_2) \geq \pi_h$
- $\hat{\Pi}(t_0) \geq \Pi(R_1) \geq \pi_\ell$
- Requisito per allocazione a  $t_0$ :  $\pi_m > \hat{\Pi}(t_0) \geq \pi_\ell$

$J_h$  può essere bloccato da  $J_m$  solo se  $J_m$  possiede la risorsa che ha il massimo priority ceiling tra tutte quelle in uso ( $= \hat{\Pi}(t)$ )



# Impossibilità del blocco transitivo



- $\pi_h > \pi_m > \pi_l \Rightarrow \Pi(R_1) \geq \pi_m$  e  $\Pi(R_2) \geq \pi_h$
- $\hat{\Pi}(t_0) \geq \Pi(R_1) \geq \pi_m$
- Requisito per allocazione a  $t_0$ :  $\pi_m > \hat{\Pi}(t_0) \geq \pi_m$

Se  $J_m$  blocca  $J_h$ ,  $J_m$  non può essere bloccato da  $J_l$



## Tempo di blocco per conflitto di risorse

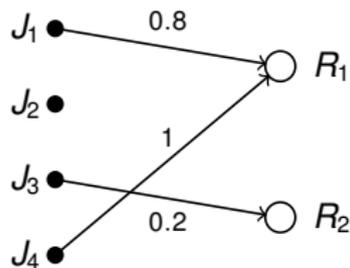
Il *tempo di blocco per conflitto di risorse*  $b_i(rc)$  è il massimo ritardo di un job del task  $T_i$  causato da un conflitto di risorse

*Come calcolare  $b_i(rc)$  per il protocollo priority-ceiling?*

Con **priority ceiling** esistono 3 tipi di blocco: blocco diretto, blocco per **priority inheritance** e blocco per **priority ceiling**

Poiché ogni job è bloccato al massimo per la durata di una sola sezione critica, è sufficiente per ciascun task determinare i valori massimi dei ritardi introdotti da ciascun tipo di blocco

Esempio:  $J_1:[R_1; 0.8]$ ,  $J_2, J_3:[R_2; 0.2]$ ,  $J_4:[R_1; 1]$



- $J_4$  può bloccare direttamente  $J_1$  per 1 unità di tempo  $\Rightarrow b_1(rc) = 1$
- $J_4$  può bloccare  $J_2$  e  $J_3$  quando eredita  $\pi_1 \Rightarrow b_2(rc) = b_3(rc) = 1$
- Ovviamente  $b_4(rc) = 0$





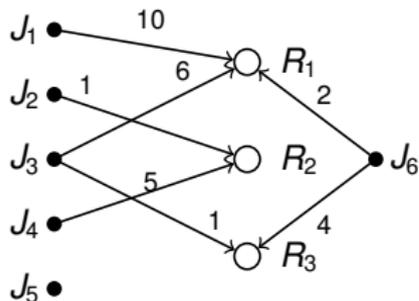
Schema della lezione

Modellare le risorse

Protocollo NPCS

Protocollo  
priority-inheritanceProtocollo  
priority-ceiling

## Tempo di blocco per conflitto di risorse (2)



Blocco diretto:

$B_d$	$J_2$	$J_3$	$J_4$	$J_5$	$J_6$
$J_1$		6			2
$J_2$	*		5		
$J_3$		*			4
$J_4$			*		
$J_5$				*	

Blocco per inheritance:

$B_i$	$J_2$	$J_3$	$J_4$	$J_5$	$J_6$
$J_1$					
$J_2$	*	6			2
$J_3$		*	5		2
$J_4$			*		4
$J_5$				*	4

Blocco per ceiling:

$B_c$	$J_2$	$J_3$	$J_4$	$J_5$	$J_6$
$J_1$					
$J_2$	*	6			2
$J_3$		*	5		2
$J_4$			*		4
$J_5$				*	

- $B_i(r, c) = \max\{B_d(j, c) : 1 \leq j \leq r - 1\}$
- Se le priorità dei job sono tutte diverse,  $B_c = B_i$  tranne che per i job che non utilizzano risorse (non bloccano)
- $b_i(rc) = \max_k\{B_d(i, k), B_i(i, k), B_c(i, k)\}$