

ORDINAMENTO
QUICKSORT

INFORMATICA

QUICKSORT

QUICKSORT

QUICKSORT

- ▶ Abbiamo visto due algoritmi di ordinamento per comparazione che sono ottimali in termini di tempo:
 $\Theta(n \log n)$

QUICKSORT

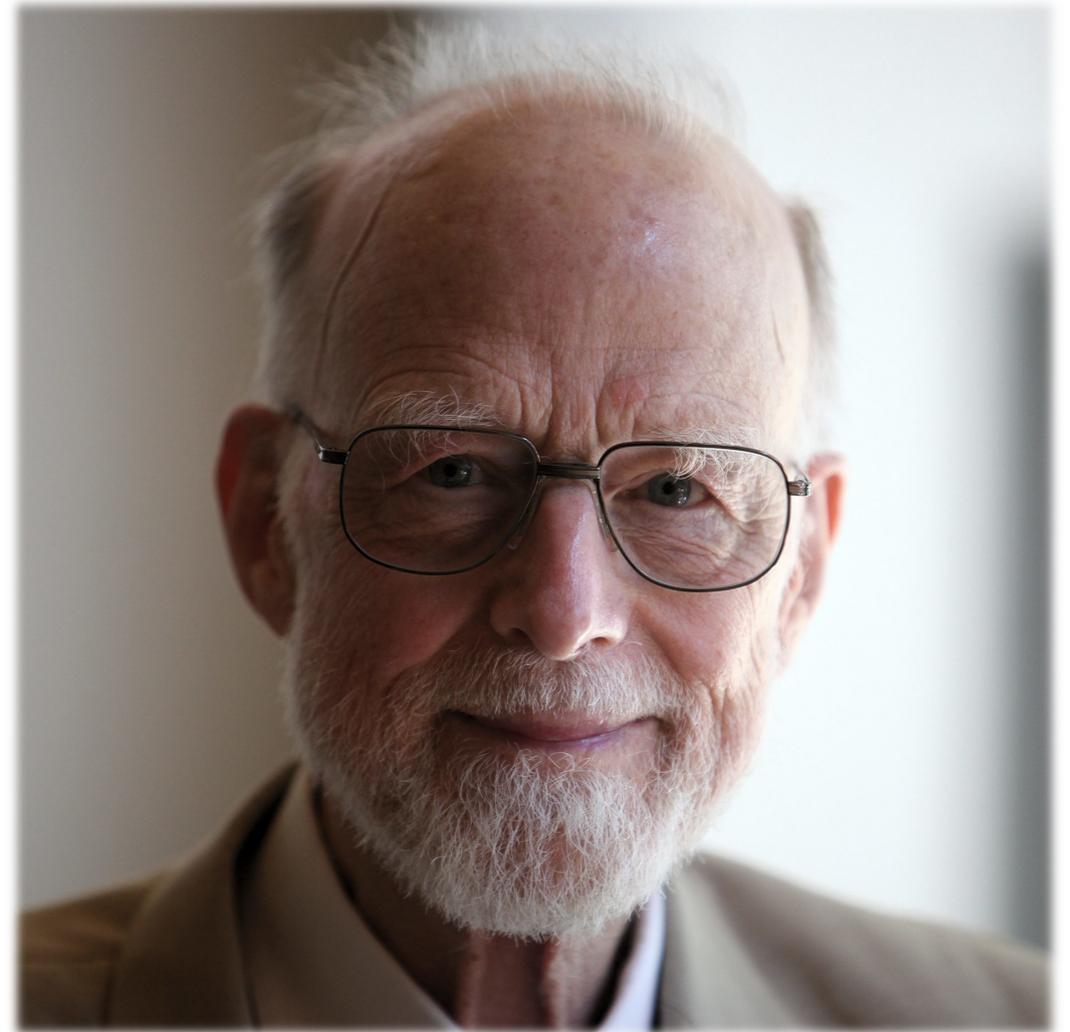
- ▶ Abbiamo visto due algoritmi di ordinamento per comparazione che sono ottimali in termini di tempo:
 $\Theta(n \log n)$
- ▶ Ora vedremo un algoritmo che nel caso peggiore richiede tempo quadratico...
- ▶ ...ma nel caso medio richiede tempo $O(n \log n)$

QUICKSORT

- ▶ Abbiamo visto due algoritmi di ordinamento per comparazione che sono ottimali in termini di tempo:
 $\Theta(n \log n)$
- ▶ Ora vedremo un algoritmo che nel caso peggiore richiede tempo quadratico...
- ▶ ...ma nel caso medio richiede tempo $O(n \log n)$
- ▶ Domanda: perché potrebbe avere senso studiare questo algoritmo?

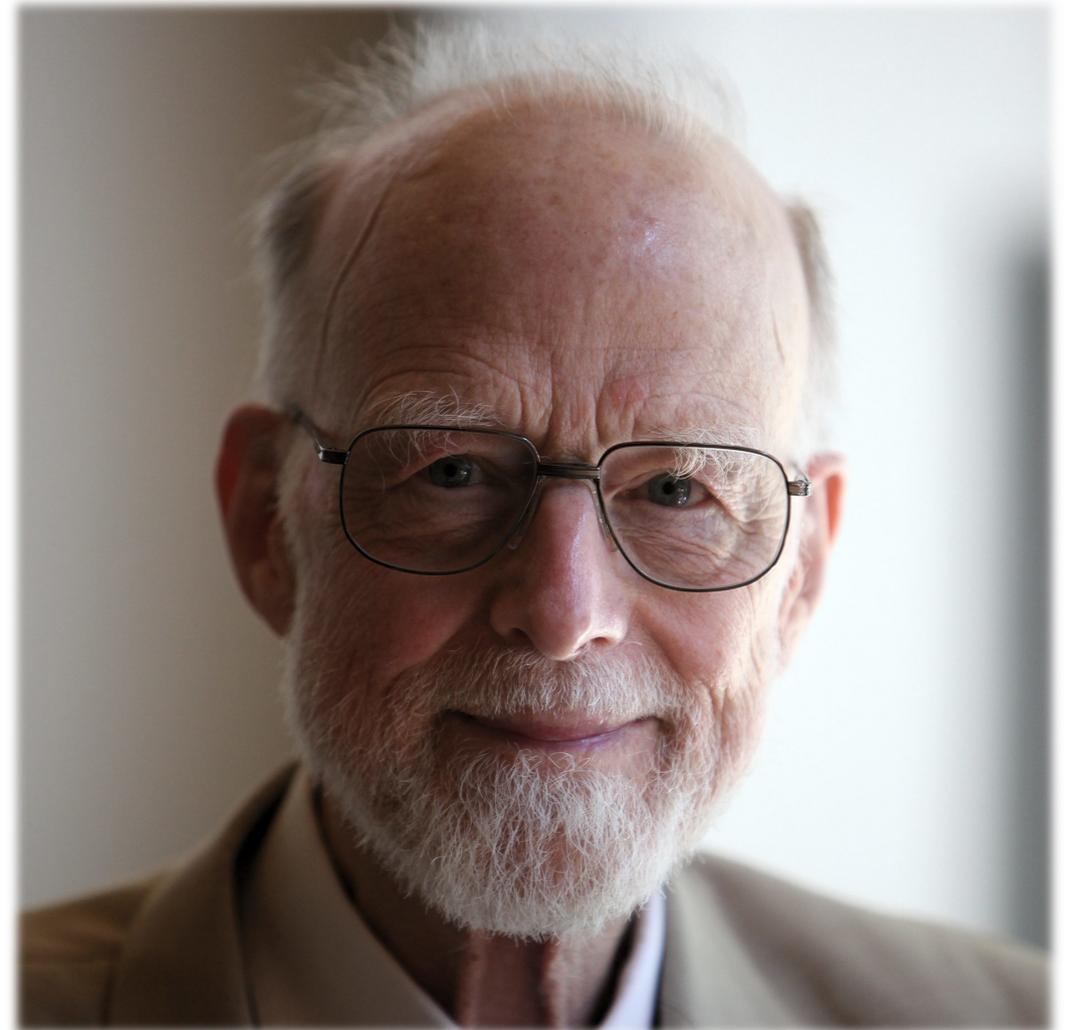
QUICKSORT

QUICKSORT: STORIA



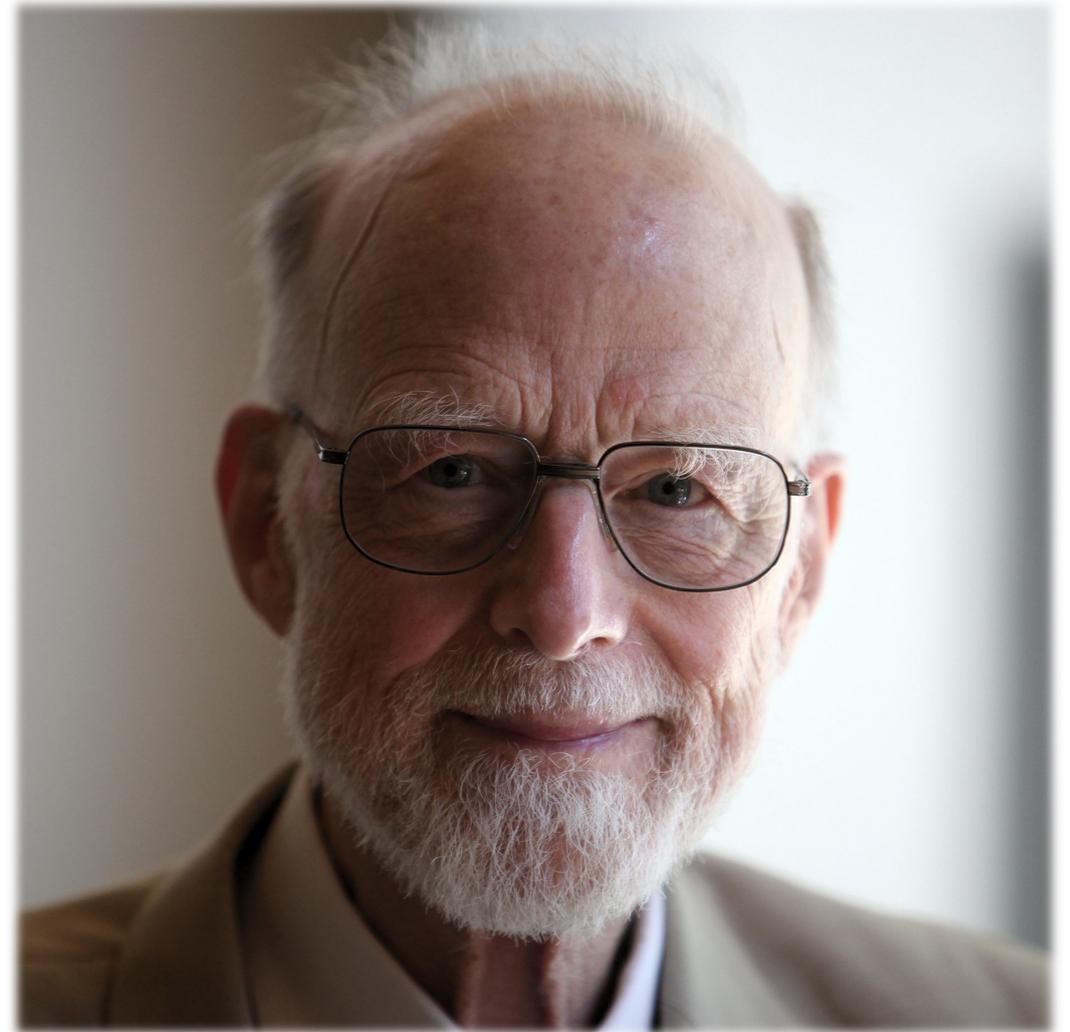
QUICKSORT: STORIA

- ▶ Ideato da Tony Hoare (vincitore del premio Turing nel 1980) nel 1959-60



QUICKSORT: STORIA

- ▶ Ideato da Tony Hoare (vincitore del premio Turing nel 1980) nel 1959-60
- ▶ Quando ben implementato il Quicksort è, nella pratica, più veloce di mergesort e heapsort
- ▶ Questo nonostante abbia un caso peggiore quadratico...



QUICKSORT: STORIA

- ▶ Ideato da Tony Hoare (vincitore del premio Turing nel 1980) nel 1959-60
- ▶ Quando ben implementato il Quicksort è, nella pratica, più veloce di mergesort e heapsort
- ▶ Questo nonostante abbia un caso peggiore quadratico...
- ▶ ... perché il caso **medio** è $O(n \log n)$



QUICKSORT: IDEA DI BASE

QUICKSORT: IDEA DI BASE

- ▶ Il quick sort è un algoritmo "divide et impera"

QUICKSORT: IDEA DI BASE

- ▶ Il quick sort è un algoritmo “divide et impera”
- ▶ L'idea di base è quella di scegliere in un array di n elementi un **pivot**, spostare gli elementi più piccoli prima del pivot e quelli più grandi dopo il pivot.

QUICKSORT: IDEA DI BASE

- ▶ Il quick sort è un algoritmo “divide et impera”
- ▶ L’idea di base è quella di scegliere in un array di n elementi un **pivot**, spostare gli elementi più piccoli prima del pivot e quelli più grandi dopo il pivot.
- ▶ Se applichiamo ricorsivamente lo stesso algoritmo ai due sotto-array risultanti (elementi minori e maggiori del pivot) otteniamo un array ordinato

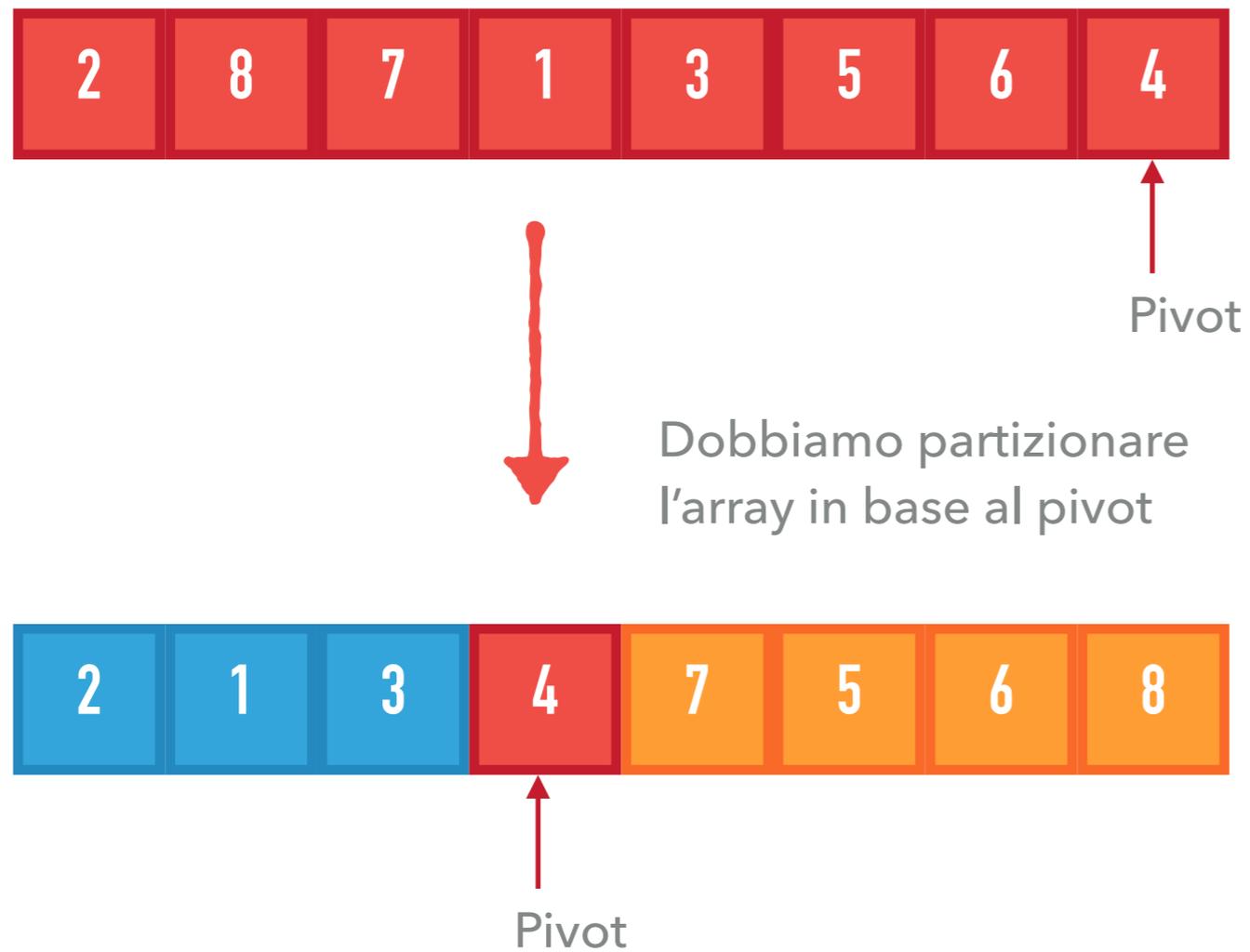
PROCEDURA DI PARTIZIONAMENTO



Pivot

Dobbiamo partizionare
l'array in base al pivot

PROCEDURA DI PARTIZIONAMENTO



PROCEDURA DI PARTIZIONAMENTO



Pivot



Dobbiamo partizionare l'array in base al pivot



Pivot

Il Pivot adesso è già nella posizione corretta!

Tutti gli elementi minori lo precedono e quelli maggiori lo seguono

PROCEDURA DI PARTIZIONAMENTO



Pivot



Dobbiamo partizionare l'array in base al pivot



Pivot

Il Pivot adesso è già nella posizione corretta!

Tutti gli elementi minori lo precedono e quelli maggiori lo seguono

Ora dobbiamo fare la stessa operazione sui due sottoarray

PROCEDURA DI PARTIZIONAMENTO

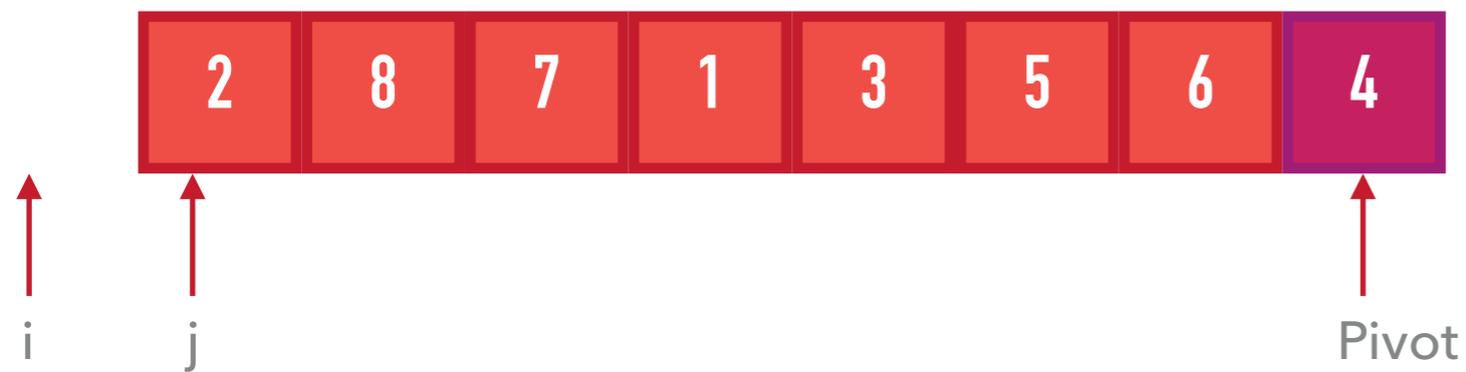
PROCEDURA DI PARTIZIONAMENTO

- ▶ Dobbiamo definire la procedura di partizionamento in modo efficiente
- ▶ Ne esistono diverse, noi vediamo lo schema di partizionamento di Hoare

PROCEDURA DI PARTIZIONAMENTO

- ▶ Dobbiamo definire la procedura di partizionamento in modo efficiente
- ▶ Ne esistono diverse, noi vediamo lo schema di partizionamento di Hoare
- ▶ Idea di base: teniamo due indici:
 - ▶ i indica l'ultimo degli elementi minori del pivot
 - ▶ j viene utilizzato per scorrere l'array

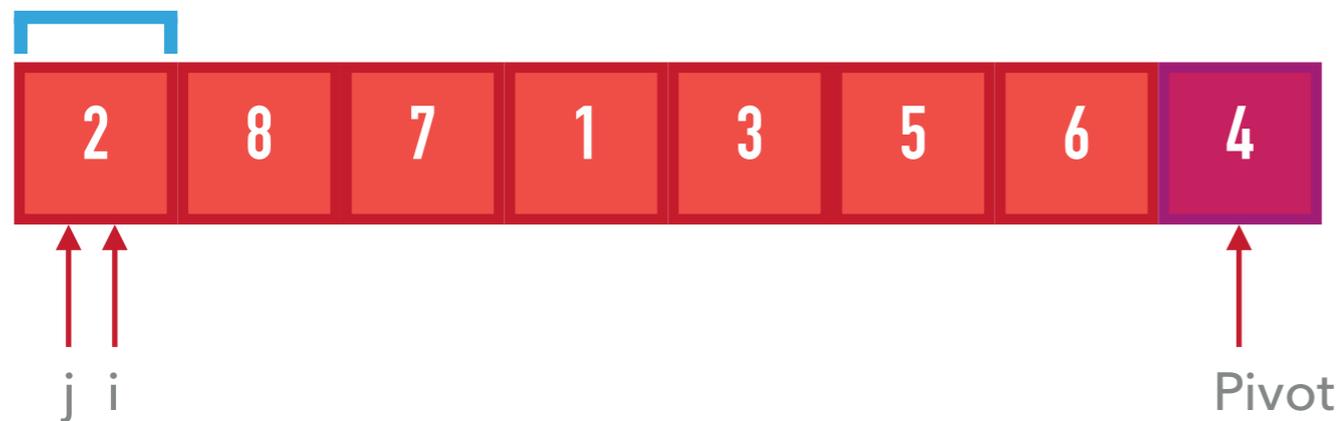
PROCEDURA DI PARTIZIONAMENTO



Se $A[j]$ è minore del pivot
incrementiamo i e scambiamo $A[i]$ e $A[j]$

PROCEDURA DI PARTIZIONAMENTO

Elementi minori del pivot

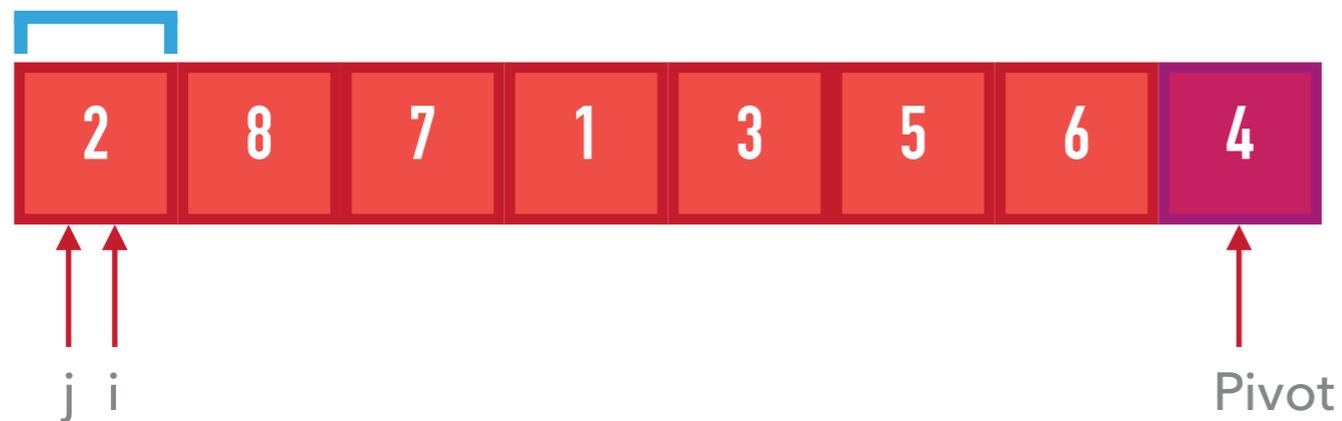


Se $A[j]$ è minore del pivot
incrementiamo i e scambiamo $A[i]$ e $A[j]$

In questo caso non cambia nulla (i è uguale a j)

PROCEDURA DI PARTIZIONAMENTO

Elementi minori (o uguali) del pivot



Se $A[j]$ è minore (o uguale) del pivot incrementiamo i e scambiamo $A[i]$ e $A[j]$

In questo caso non cambia nulla (i è uguale a j)

PROCEDURA DI PARTIZIONAMENTO



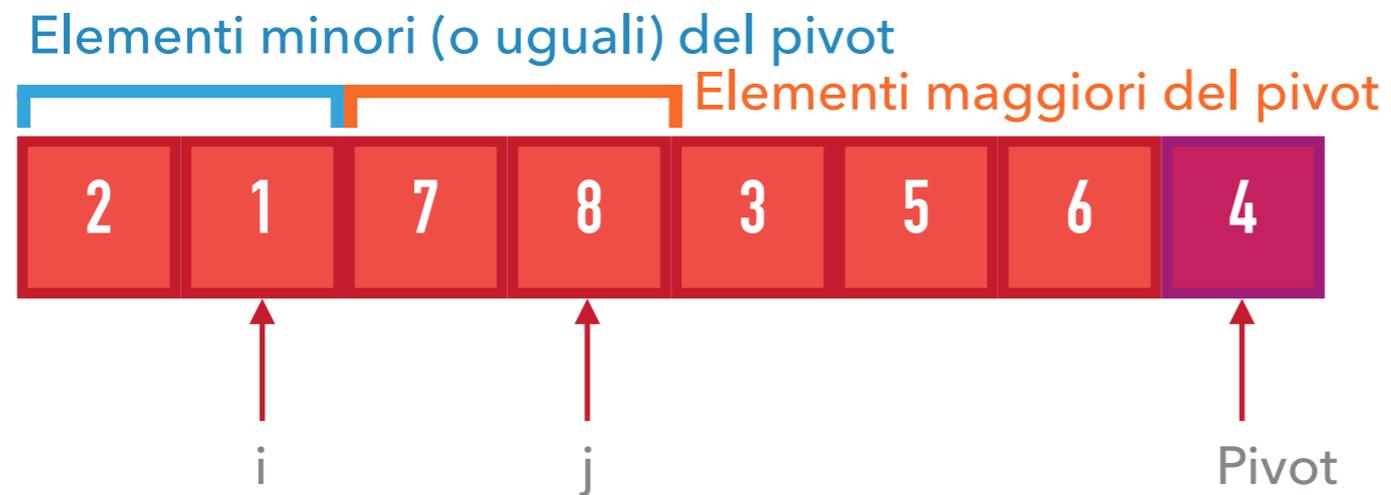
Se $A[j]$ è maggiore del pivot
non facciamo nulla

PROCEDURA DI PARTIZIONAMENTO



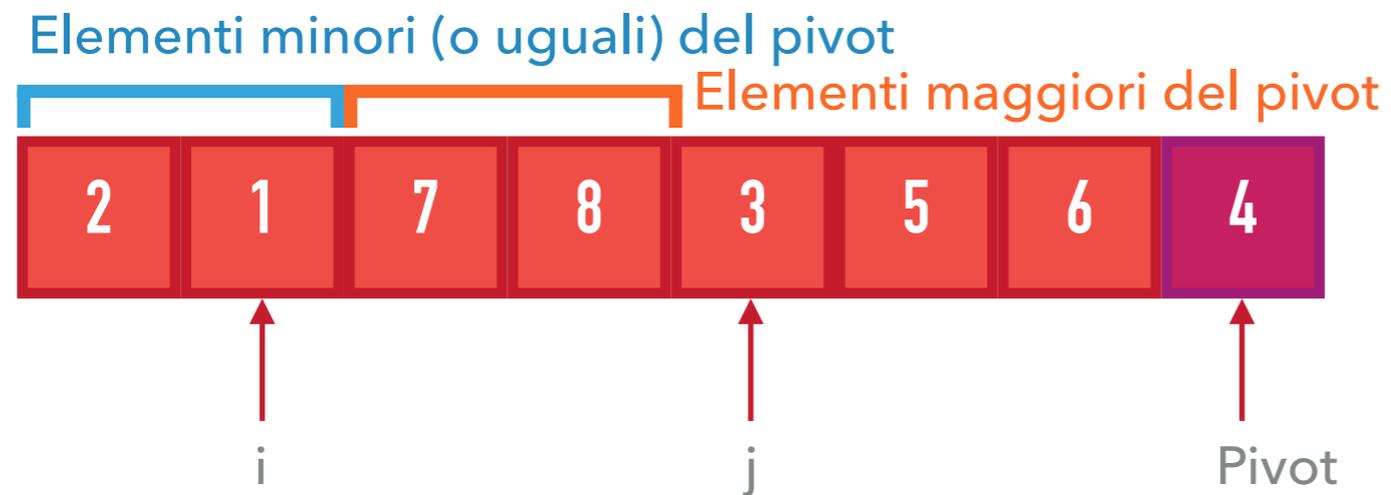
Se $A[j]$ è minore del pivot
incrementiamo i e scambiamo $A[i]$ e $A[j]$

PROCEDURA DI PARTIZIONAMENTO



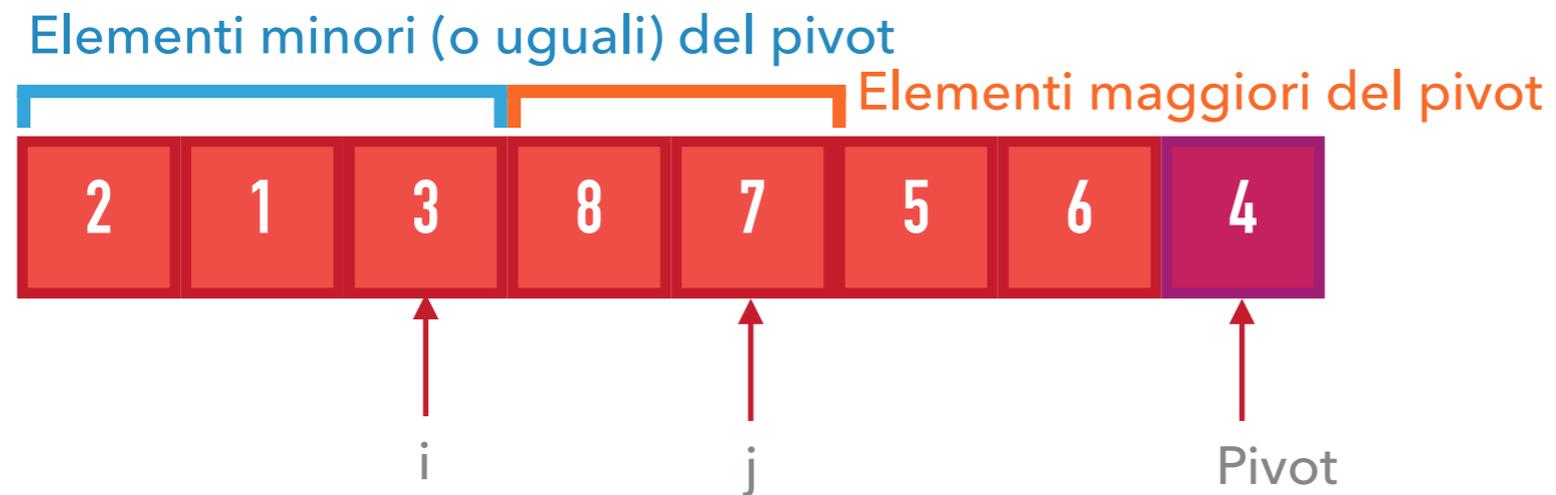
Se $A[j]$ è minore del pivot
incrementiamo i e scambiamo $A[i]$ e $A[j]$

PROCEDURA DI PARTIZIONAMENTO



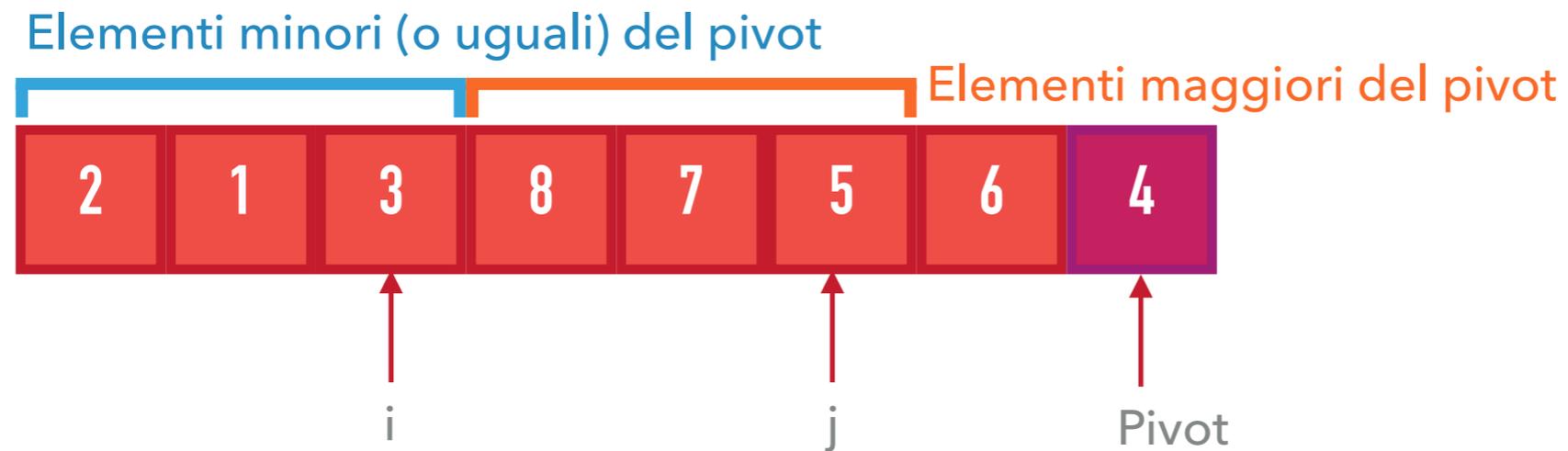
Se $A[j]$ è minore del pivot
incrementiamo i e scambiamo $A[i]$ e $A[j]$

PROCEDURA DI PARTIZIONAMENTO



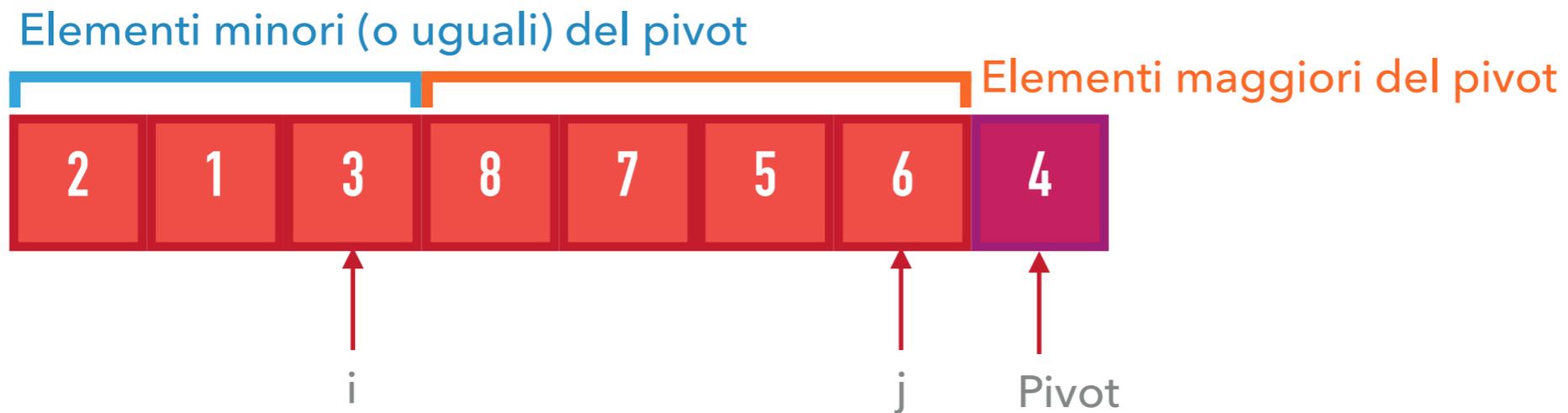
Se $A[j]$ è minore del pivot
incrementiamo i e scambiamo $A[i]$ e $A[j]$

PROCEDURA DI PARTIZIONAMENTO



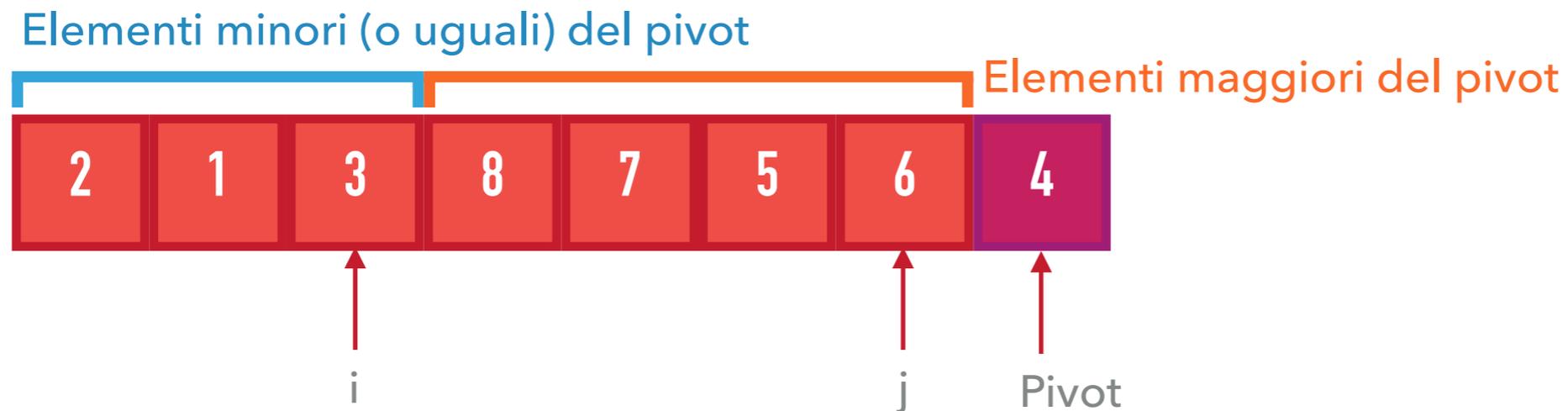
Se $A[j]$ è maggiore del pivot
non facciamo nulla

PROCEDURA DI PARTIZIONAMENTO



Se $A[j]$ è maggiore del pivot
non facciamo nulla

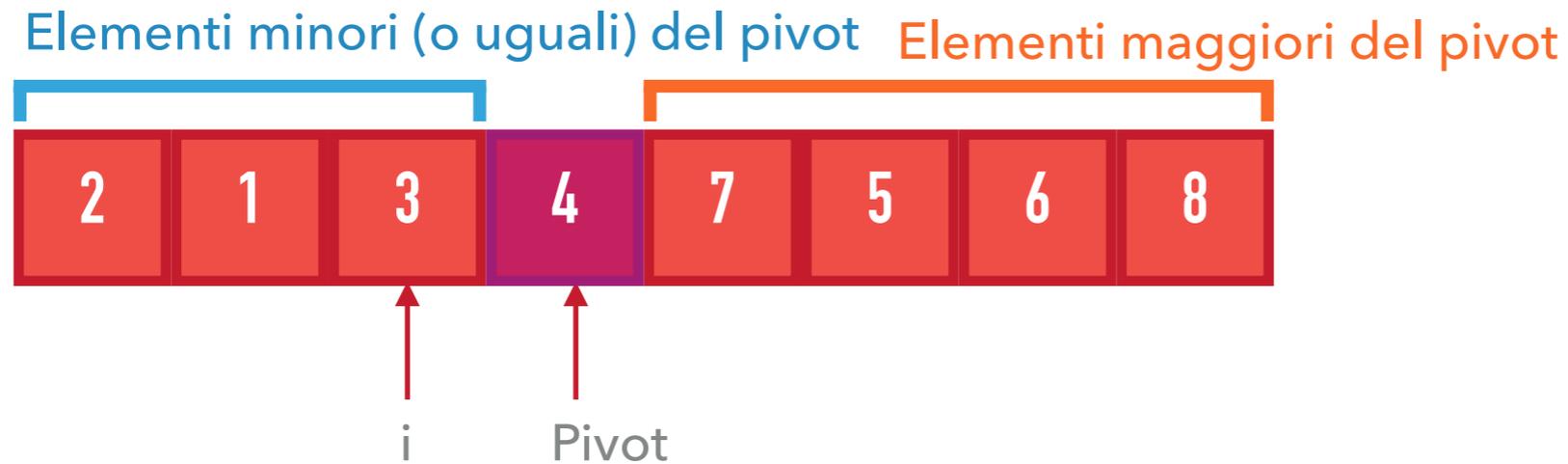
PROCEDURA DI PARTIZIONAMENTO



Abbiamo effettuato una scansione di tutto l'array e abbiamo raccolto tutti gli elementi minori o uguali del pivot negli indici $[0, i]$.

Dobbiamo solo posizionare il pivot tra le due partizioni

PROCEDURA DI PARTIZIONAMENTO



Ci basta scambiare l'elemento in posizione $i + 1$ (che è necessariamente maggiore del pivot o il pivot stesso) con il pivot

PARTIZIONAMENTO: PSEUDOCODICE

PARTIZIONAMENTO: PSEUDOCODICE

Parametri: A (un array)

PARTIZIONAMENTO: PSEUDOCODICE

Parametri: A (un array)

`x = A[n-1]` # il pivot è l'ultimo elemento dell'array

PARTIZIONAMENTO: PSEUDOCODICE

Parametri: A (un array)

$x = A[n-1]$ # il pivot è l'ultimo elemento dell'array

$i = -1$ # posizione iniziale degli elementi minori del pivot

PARTIZIONAMENTO: PSEUDOCODICE

Parametri: A (un array)

`x = A[n-1]` # il pivot è l'ultimo elemento dell'array

`i = -1` # posizione iniziale degli elementi minori del pivot

`for j in range(0, n-1)` # per tutti gli elementi dell'array tranne l'ultimo

PARTIZIONAMENTO: PSEUDOCODICE

Parametri: A (un array)

`x = A[n-1]` # il pivot è l'ultimo elemento dell'array

`i = -1` # posizione iniziale degli elementi minori del pivot

`for j in range(0, n-1)` # per tutti gli elementi dell'array tranne l'ultimo

`if A[j] ≤ x` # se troviamo un elemento minore del pivot...

PARTIZIONAMENTO: PSEUDOCODICE

Parametri: A (un array)

`x = A[n-1]` # il pivot è l'ultimo elemento dell'array

`i = -1` # posizione iniziale degli elementi minori del pivot

`for j in range(0, n-1)` # per tutti gli elementi dell'array tranne l'ultimo

`if A[j] ≤ x` # se troviamo un elemento minore del pivot...

`i = i + 1`

PARTIZIONAMENTO: PSEUDOCODICE

Parametri: A (un array)

`x = A[n-1]` # il pivot è l'ultimo elemento dell'array

`i = -1` # posizione iniziale degli elementi minori del pivot

`for j in range(0, n-1)` # per tutti gli elementi dell'array tranne l'ultimo

`if A[j] ≤ x` # se troviamo un elemento minore del pivot...

`i = i + 1`

 scambia A[i] e A[j] # ...lo spostiamo nella prima parte dell'array

PARTIZIONAMENTO: PSEUDOCODICE

Parametri: A (un array)

`x = A[n-1]` # il pivot è l'ultimo elemento dell'array

`i = -1` # posizione iniziale degli elementi minori del pivot

`for j in range(0, n-1)` # per tutti gli elementi dell'array tranne l'ultimo

`if A[j] ≤ x` # se troviamo un elemento minore del pivot...

`i = i + 1`

`scambia A[i] e A[j]` # ...lo spostiamo nella prima parte dell'array

`Scambia A[i+1] con A[n-1]` # mettiamo il pivot nella sua posizione finale

`return i+1`

PARTIZIONAMENTO: PSEUDOCODICE

Parametri: A (un array)

`x = A[n-1]` # il pivot è l'ultimo elemento dell'array

`i = -1` # posizione iniziale degli elementi minori del pivot

`for j in range(0, n-1)` # per tutti gli elementi dell'array tranne l'ultimo

`if A[j] ≤ x` # se troviamo un elemento minore del pivot...

`i = i + 1`

 scambia A[i] e A[j] # ...lo spostiamo nella prima parte dell'array

Scambia A[i+1] con A[n-1] # mettiamo il pivot nella sua posizione finale

`return i+1`

Ma a noi servirà partizionare segmenti arbitrari di un array, quindi possiamo usare un'altra versione della procedura di partizionamento che lo applica solo tra due indici

PARTIZIONAMENTO: PSEUDOCODICE

Vediamo una procedura più generale che effettua il partizionamento tra gli indici p e r

PARTIZIONAMENTO: PSEUDOCODICE

Vediamo una procedura più generale che effettua il partizionamento tra gli indici p e r

Parametri: A (un array), p , r (indice di inizio e fine)

PARTIZIONAMENTO: PSEUDOCODICE

Vediamo una procedura più generale che effettua il partizionamento tra gli indici p e r

Parametri: A (un array), p , r (indice di inizio e fine)

$x = A[r]$ # il pivot è l'ultimo elemento dell'array (tra gli indici p e r)

PARTIZIONAMENTO: PSEUDOCODICE

Vediamo una procedura più generale che effettua il partizionamento tra gli indici p e r

Parametri: A (un array), p , r (indice di inizio e fine)

$x = A[r]$ # il pivot è l'ultimo elemento dell'array (tra gli indici p e r)

$i = p-1$ # posizione iniziale degli elementi minori del pivot

PARTIZIONAMENTO: PSEUDOCODICE

Vediamo una procedura più generale che effettua il partizionamento tra gli indici p e r

Parametri: A (un array), p , r (indice di inizio e fine)

$x = A[r]$ # il pivot è l'ultimo elemento dell'array (tra gli indici p e r)

$i = p-1$ # posizione iniziale degli elementi minori del pivot

for j in range(p, r) # per tutti gli elementi dell'array tranne il pivot

PARTIZIONAMENTO: PSEUDOCODICE

Vediamo una procedura più generale che effettua il partizionamento tra gli indici p e r

Parametri: A (un array), p , r (indice di inizio e fine)

$x = A[r]$ # il pivot è l'ultimo elemento dell'array (tra gli indici p e r)

$i = p-1$ # posizione iniziale degli elementi minori del pivot

for j in range(p, r) # per tutti gli elementi dell'array tranne il pivot

if $A[j] \leq x$ # se troviamo un elemento minore del pivot...

PARTIZIONAMENTO: PSEUDOCODICE

Vediamo una procedura più generale che effettua il partizionamento tra gli indici p e r

Parametri: A (un array), p , r (indice di inizio e fine)

$x = A[r]$ # il pivot è l'ultimo elemento dell'array (tra gli indici p e r)

$i = p-1$ # posizione iniziale degli elementi minori del pivot

for j in range(p, r) # per tutti gli elementi dell'array tranne il pivot

if $A[j] \leq x$ # se troviamo un elemento minore del pivot...

$i = i + 1$

PARTIZIONAMENTO: PSEUDOCODICE

Vediamo una procedura più generale che effettua il partizionamento tra gli indici p e r

Parametri: A (un array), p , r (indice di inizio e fine)

$x = A[r]$ # il pivot è l'ultimo elemento dell'array (tra gli indici p e r)

$i = p-1$ # posizione iniziale degli elementi minori del pivot

for j in range(p, r) # per tutti gli elementi dell'array tranne il pivot

if $A[j] \leq x$ # se troviamo un elemento minore del pivot...

$i = i + 1$

 scambia $A[i]$ e $A[j]$ # ...lo spostiamo nella prima parte dell'array

PARTIZIONAMENTO: PSEUDOCODICE

Vediamo una procedura più generale che effettua il partizionamento tra gli indici p e r

Parametri: A (un array), p , r (indice di inizio e fine)

$x = A[r]$ # il pivot è l'ultimo elemento dell'array (tra gli indici p e r)

$i = p-1$ # posizione iniziale degli elementi minori del pivot

for j in range(p, r) # per tutti gli elementi dell'array tranne il pivot

if $A[j] \leq x$ # se troviamo un elemento minore del pivot...

$i = i + 1$

 scambia $A[i]$ e $A[j]$ # ...lo spostiamo nella prima parte dell'array

Scambia $A[i+1]$ con $A[r]$ # mettiamo il pivot nella sua posizione finale

PARTIZIONAMENTO: PSEUDOCODICE

Vediamo una procedura più generale che effettua il partizionamento tra gli indici p e r

Parametri: A (un array), p , r (indice di inizio e fine)

$x = A[r]$ # il pivot è l'ultimo elemento dell'array (tra gli indici p e r)

$i = p-1$ # posizione iniziale degli elementi minori del pivot

for j in range(p, r) # per tutti gli elementi dell'array tranne il pivot

if $A[j] \leq x$ # se troviamo un elemento minore del pivot...

$i = i + 1$

 scambia $A[i]$ e $A[j]$ # ...lo spostiamo nella prima parte dell'array

Scambia $A[i+1]$ con $A[r]$ # mettiamo il pivot nella sua posizione finale

return $i+1$

PARTIZIONAMENTO: PERCHÉ FUNZIONA?

PARTIZIONAMENTO: PERCHÉ FUNZIONA?

- ▶ Invariante (condizione che rimane vera ad ogni ciclo):
 - ▶ Gli elementi tra l'inizio dell'array e i sono tutti minori o uguali del pivot
 - ▶ Gli elementi tra $i + 1$ e j sono tutti maggiori del pivot

PARTIZIONAMENTO: PERCHÉ FUNZIONA?

- ▶ Invariante (condizione che rimane vera ad ogni ciclo):
 - ▶ Gli elementi tra l'inizio dell'array e i sono tutti minori o uguali del pivot
 - ▶ Gli elementi tra $i + 1$ e j sono tutti maggiori del pivot
- ▶ Ogni iterazione continua a far rispettare questa condizione:

PARTIZIONAMENTO: PERCHÉ FUNZIONA?

- ▶ Invariante (condizione che rimane vera ad ogni ciclo):
 - ▶ Gli elementi tra l'inizio dell'array e i sono tutti minori o uguali del pivot
 - ▶ Gli elementi tra $i + 1$ e j sono tutti maggiori del pivot
- ▶ Ogni iterazione continua a far rispettare questa condizione:
 - ▶ Se il nuovo elemento è maggiore del pivot viene mantenuto nella sua posizione, rispettando quindi la condizione

PARTIZIONAMENTO: PERCHÉ FUNZIONA?

- ▶ Invariante (condizione che rimane vera ad ogni ciclo):
 - ▶ Gli elementi tra l'inizio dell'array e i sono tutti minori o uguali del pivot
 - ▶ Gli elementi tra $i + 1$ e j sono tutti maggiori del pivot
- ▶ Ogni iterazione continua a far rispettare questa condizione:
 - ▶ Se il nuovo elemento è maggiore del pivot viene mantenuto nella sua posizione, rispettando quindi la condizione
 - ▶ Se il nuovo elemento è minore o uguale del pivot, i viene incrementato l'elemento in posizione j viene scambiato con quello in posizione i (che, dato che i è stato incrementato, è maggiore del pivot)

PARTIZIONAMENTO: COMPLESSITÀ

- ▶ Il partizionamento viene fatto con una singola “passata” dell’array (il ciclo for esterno)
- ▶ Tutte le operazioni all’interno e all’esterno del ciclo for hanno un costo costante
- ▶ Ne segue che il partizionamento viene fatto in tempo $\Theta(n)$

QUICKSORT

QUICKSORT: PSEUDOCODICE

QUICKSORT: PSEUDOCODICE

Parametri: A (un array), p , r (indice di inizio e fine)

QUICKSORT: PSEUDOCODICE

Parametri: A (un array), p, r (indice di inizio e fine)

if $p \geq r$:

QUICKSORT: PSEUDOCODICE

Parametri: A (un array), p, r (indice di inizio e fine)

if $p \geq r$:

 return

QUICKSORT: PSEUDOCODICE

Parametri: A (un array), p, r (indice di inizio e fine)

if $p \geq r$:

 return

q = partiziona(A, p, r) # indice del pivot dopo il partizionamento

QUICKSORT: PSEUDOCODICE

Parametri: A (un array), p, r (indice di inizio e fine)

if $p \geq r$:

 return

q = partiziona(A, p, r) # indice del pivot dopo il partizionamento

quicksort(A, p, q-1) # chiamata ricorsiva sugli elementi minori o uguali

QUICKSORT: PSEUDOCODICE

Parametri: A (un array), p, r (indice di inizio e fine)

if $p \geq r$:

 return

q = partiziona(A, p, r) # indice del pivot dopo il partizionamento

quicksort(A, p, q-1) # chiamata ricorsiva sugli elementi minori o uguali

quicksort(A, q+1, r) # chiamata ricorsiva sugli elementi maggiori

QUICKSORT: PERCHÉ FUNZIONA?

QUICKSORT: PERCHÉ FUNZIONA?

- ▶ Per un array di dimensione 0 o 1 il quicksort funziona per motivi banali

QUICKSORT: PERCHÉ FUNZIONA?

- ▶ Per un array di dimensione 0 o 1 il quicksort funziona per motivi banali
- ▶ Supponiamo di avere provato che il quicksort funziona per ogni dimensione minore di n , vediamo che funziona per la dimensione n

QUICKSORT: PERCHÉ FUNZIONA?

- ▶ Per un array di dimensione 0 o 1 il quicksort funziona per motivi banali
- ▶ Supponiamo di avere provato che il quicksort funziona per ogni dimensione minore di n , vediamo che funziona per la dimensione n
- ▶ Dopo la procedura di partizionamento il pivot è nella posizione corretta e otteniamo due sotto-array uno che precedete il pivot con tutti gli elementi minori o uguali al pivot e uno con tutti gli elementi maggiori

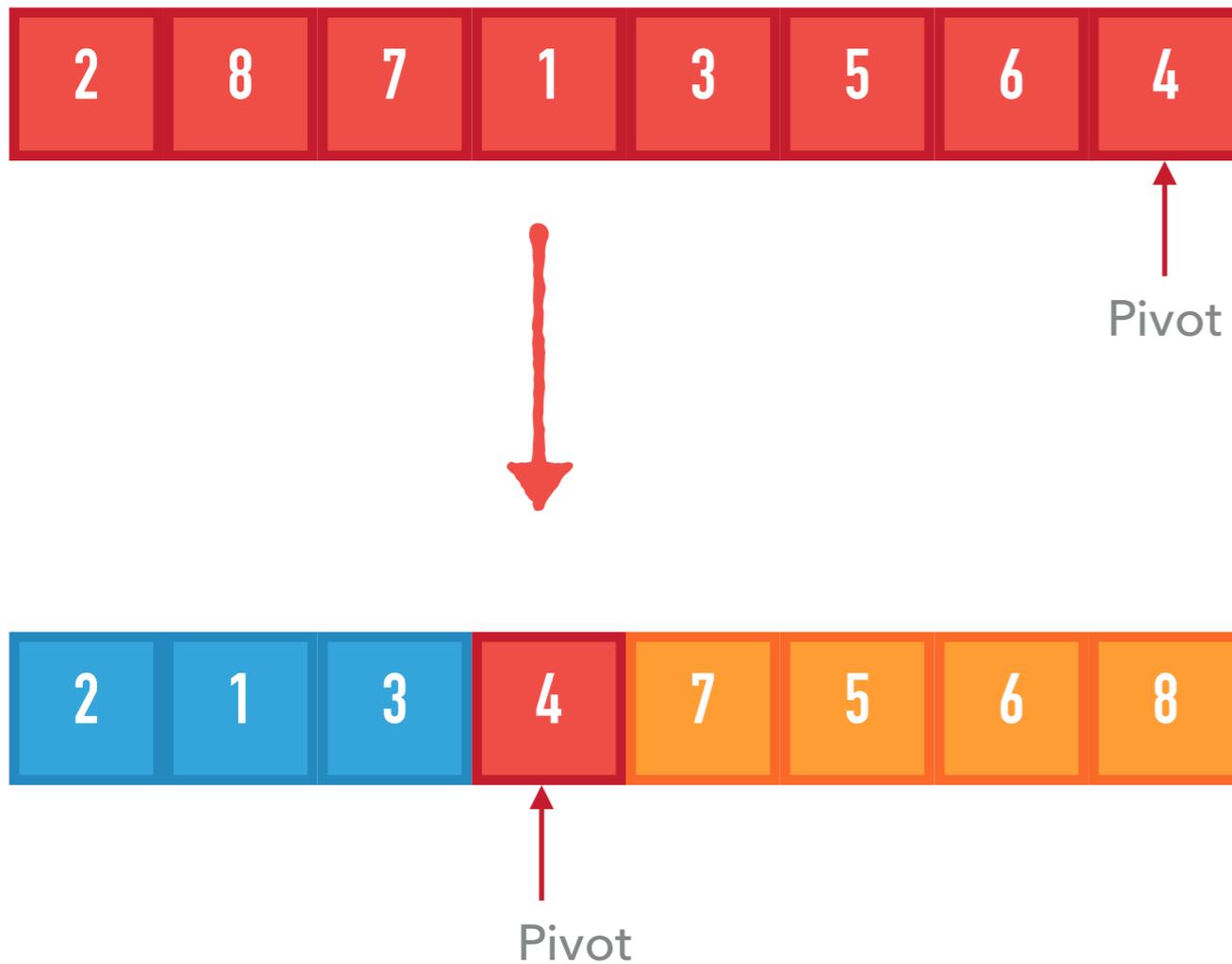
QUICKSORT: PERCHÉ FUNZIONA?

- ▶ Per un array di dimensione 0 o 1 il quicksort funziona per motivi banali
- ▶ Supponiamo di avere provato che il quicksort funziona per ogni dimensione minore di n , vediamo che funziona per la dimensione n
- ▶ Dopo la procedura di partizionamento il pivot è nella posizione corretta e otteniamo due sotto-array uno che precedete il pivot con tutti gli elementi minori o uguali al pivot e uno con tutti gli elementi maggiori
- ▶ Richiamiamo quicksort sui due sotto-array di dimensione minore di n , che per ipotesi ci restituiranno gli array ordinati
- ▶ Otteniamo tutti gli elementi minori o uguali al pivot ordinati, seguiti dal pivot e da tutti gli elementi maggiori del pivot ordinati. Quindi l'array di n elementi è ordinato.

ANALISI DELLA COMPLESSITÀ

- ▶ L'analisi della complessità del quicksort è più delicata di mergesort e heapsort
- ▶ La dimensione degli array nelle chiamate ricorsive dipende dalla procedura di partizionamento
- ▶ La procedura di partizionamento dipende, a sua volta dai dati che abbiamo

POSSIBILI PARTIZIONAMENTI



Un "buon" partizionamento: i due sottoarray risultanti sono ognuno circa la metà dell'array di partenza

POSSIBILI PARTIZIONAMENTI



Pivot



Pivot

Un "cattivo" partizionamento: uno dei sotto-array risultanti contiene tutti gli elementi tranne uno e l'altro è vuoto!

QUIZ

In **quali** dei seguenti casi il partizionamento è maggiormente sbilanciato?

1) [1, 2, 3, 4, 5]

2) [2, 6, 5, 3, 4]

3) [1, 2, 5, 4, 3]

4) [5, 4, 3, 2, 1]

QUIZ

In **quali** dei seguenti casi il partizionamento è maggiormente sbilanciato?

1) [1, 2, 3, 4, 5]

2) [2, 6, 5, 3, 4]

3) [1, 2, 5, 4, 3]

4) [5, 4, 3, 2, 1]

QUIZ

In **quali** dei seguenti casi il partizionamento è maggiormente sbilanciato?

1) [1, 2, 3, 4, 5]

2) [2, 6, 5, 3, 4]

3) [1, 2, 5, 4, 3]

4) [5, 4, 3, 2, 1]

“BUON PARTIZIONAMENTO”: ANALISI

“BUON PARTIZIONAMENTO”: ANALISI

- ▶ Assumiamo che ogni partizionamento crei due sottoarray di dimensioni approssimativamente $n/2$
- ▶ L'equazione di ricorrenza diventa quindi:

$$T(n) = 2T\left(\frac{n}{2}\right) + \Theta(n)$$

“BUON PARTIZIONAMENTO”: ANALISI

- ▶ Assumiamo che ogni partizionamento crei due sottoarray di dimensioni approssimativamente $n/2$
- ▶ L'equazione di ricorrenza diventa quindi:
$$T(n) = 2T\left(\frac{n}{2}\right) + \Theta(n)$$
- ▶ Per il teorema dell'esperto il tempo di calcolo del quicksort è $\Theta(n \log n)$
- ▶ Ma questo risultato vale solo per un “buon” partizionamento

“CATTIVO PARTIZIONAMENTO”: ANALISI

“CATTIVO PARTIZIONAMENTO”: ANALISI

- ▶ Assumiamo che ogni partizionamento crei un sottoarray vuoto ed uno di dimensione $n - 1$
- ▶ L'equazione di ricorrenza diventa quindi:

$$T(n) = T(n - 1) + T(0) + \Theta(n) = T(n - 1) + \Theta(n)$$

“CATTIVO PARTIZIONAMENTO”: ANALISI

- ▶ Assumiamo che ogni partizionamento crei un sottoarray vuoto ed uno di dimensione $n - 1$
- ▶ L'equazione di ricorrenza diventa quindi:
$$T(n) = T(n - 1) + T(0) + \Theta(n) = T(n - 1) + \Theta(n)$$
- ▶ Se espandiamo $T(n)$ vediamo che abbiamo n “passi ricorsivi”, ognuno dei quali esegue un lavoro lineare rispetto alla dimensione dell'array da ordinare
- ▶ Come risultato otteniamo $\Theta(n^2)$

ANALISI DELLA COMPLESSITÀ

ANALISI DELLA COMPLESSITÀ

- ▶ Nel caso peggiore quindi otteniamo $\Theta(n^2)$
- ▶ Ma quanto è frequente il caso peggiore?

ANALISI DELLA COMPLESSITÀ

- ▶ Nel caso peggiore quindi otteniamo $\Theta(n^2)$
- ▶ Ma quanto è frequente il caso peggiore?
- ▶ Supponiamo che le nostre partizioni siano molto sbilanciate: la prima metà include $1/10$ dell'array e la seconda ne include $9/10$
- ▶ Lo stesso ragionamento vale anche per $1/100$ e $99/100$, etc.

ANALISI DELLA COMPLESSITÀ

ANALISI DELLA COMPLESSITÀ

▶
$$T(n) = T\left(\frac{9}{10}n\right) + T\left(\frac{1}{10}n\right) + \Theta(n)$$

ANALISI DELLA COMPLESSITÀ

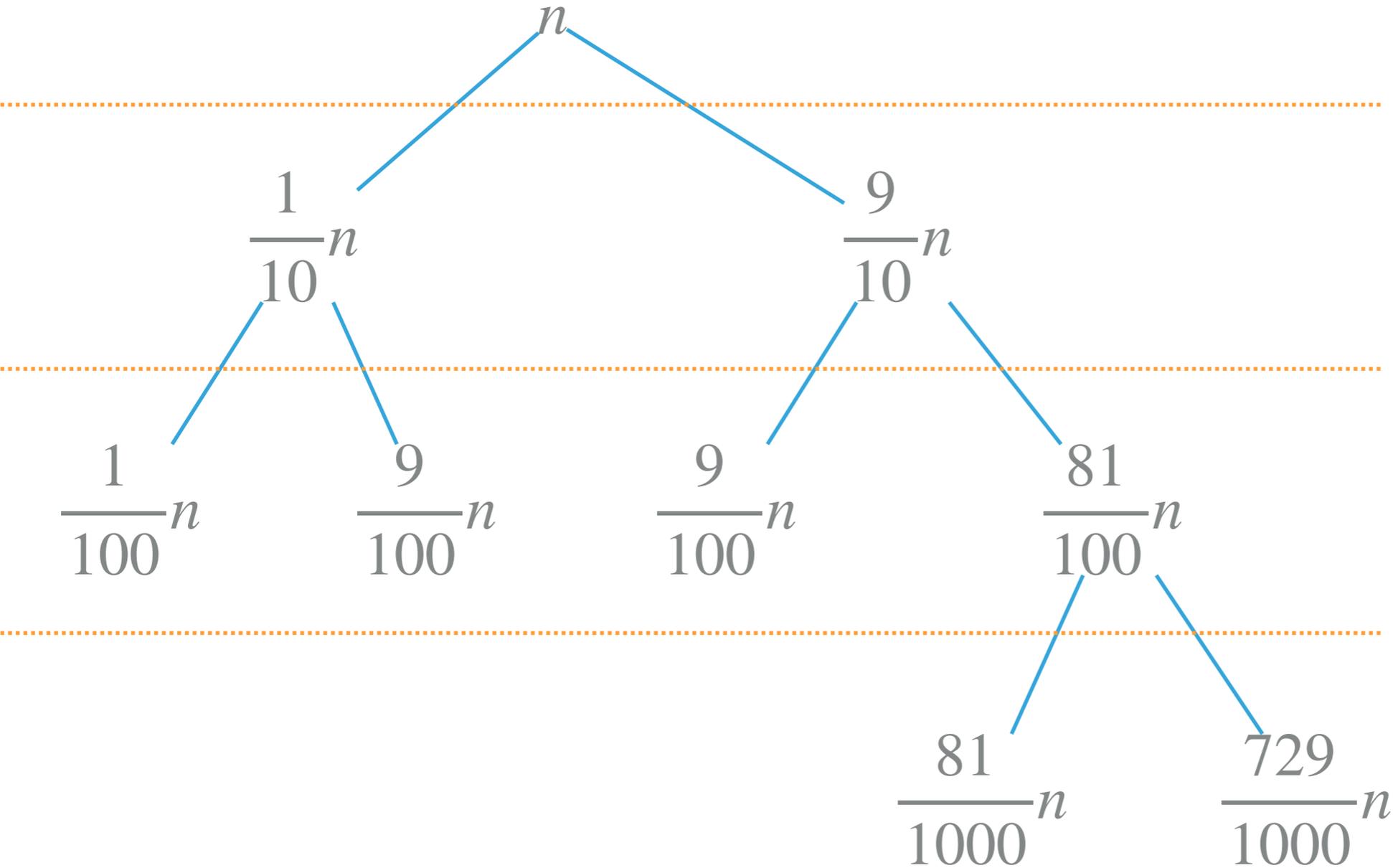
▶ $T(n) = T\left(\frac{9}{10}n\right) + T\left(\frac{1}{10}n\right) + \Theta(n)$

- ▶ Esplicitiamo la costante nascosta c nell' $\Theta(n)$:

$$T(n) = T\left(\frac{9}{10}n\right) + T\left(\frac{1}{10}n\right) + cn$$

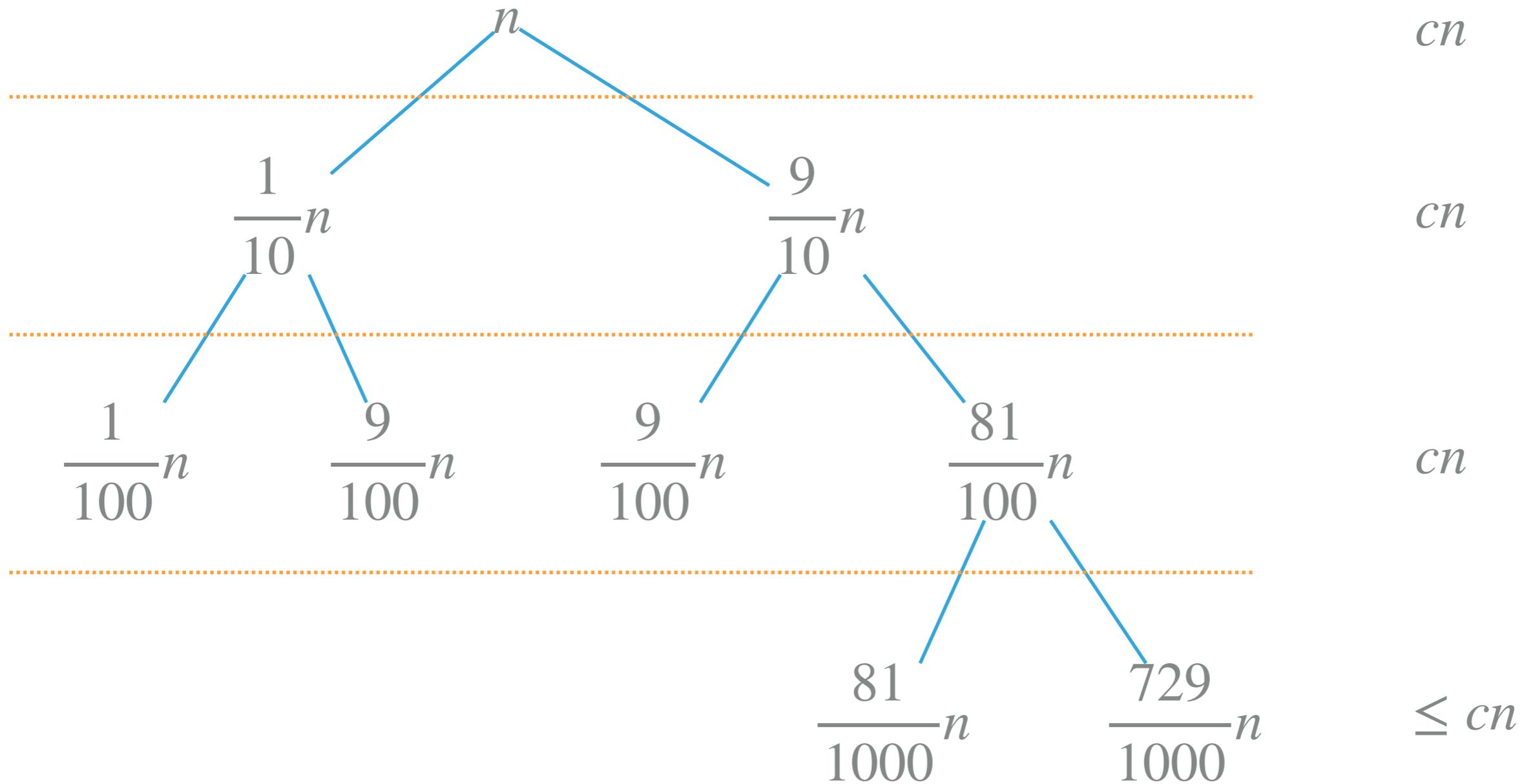
- ▶ Costruiamo l'albero delle chiamate ricorsive

ANALISI DELLA COMPLESSITÀ

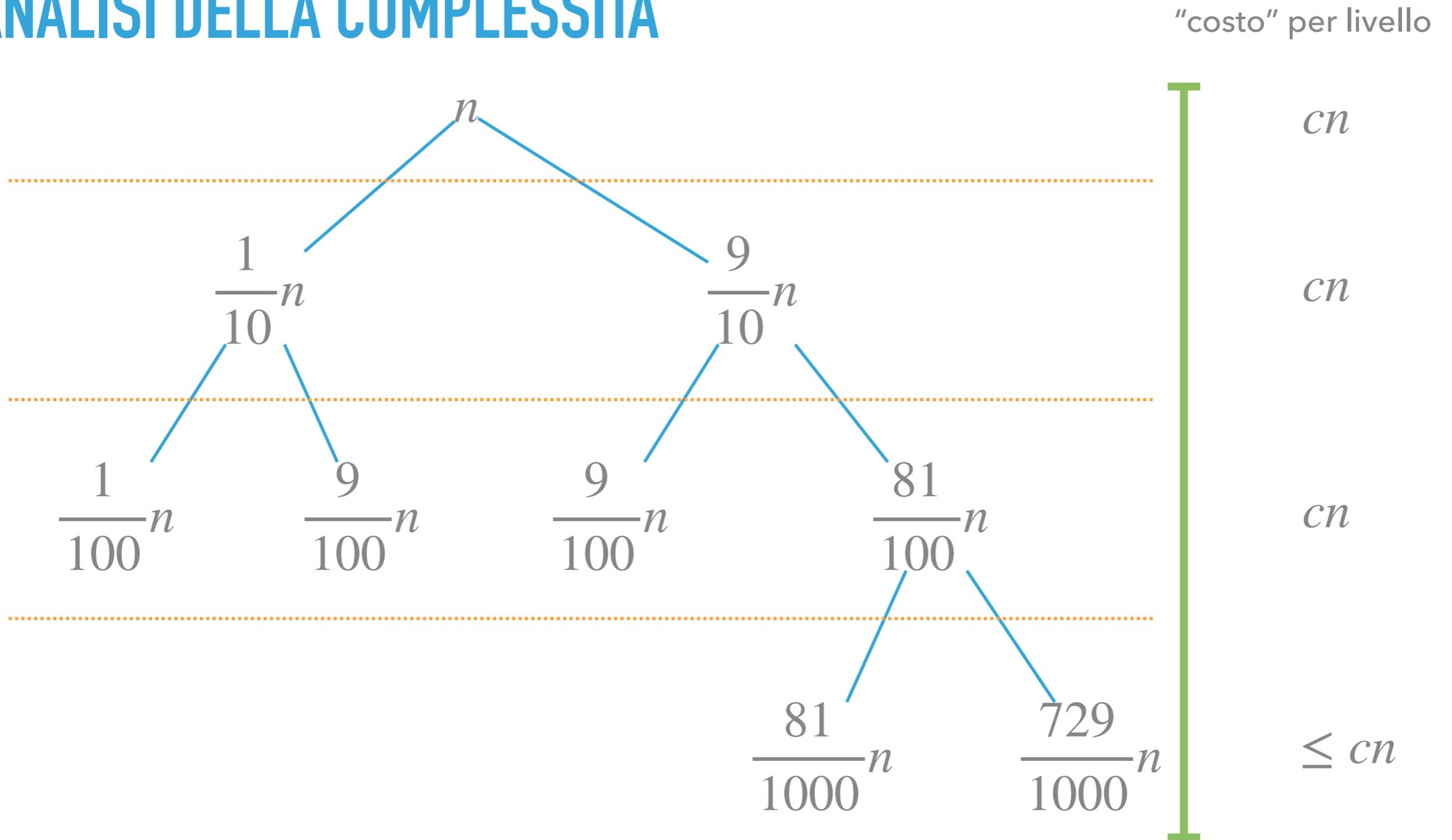


ANALISI DELLA COMPLESSITÀ

"costo" per livello

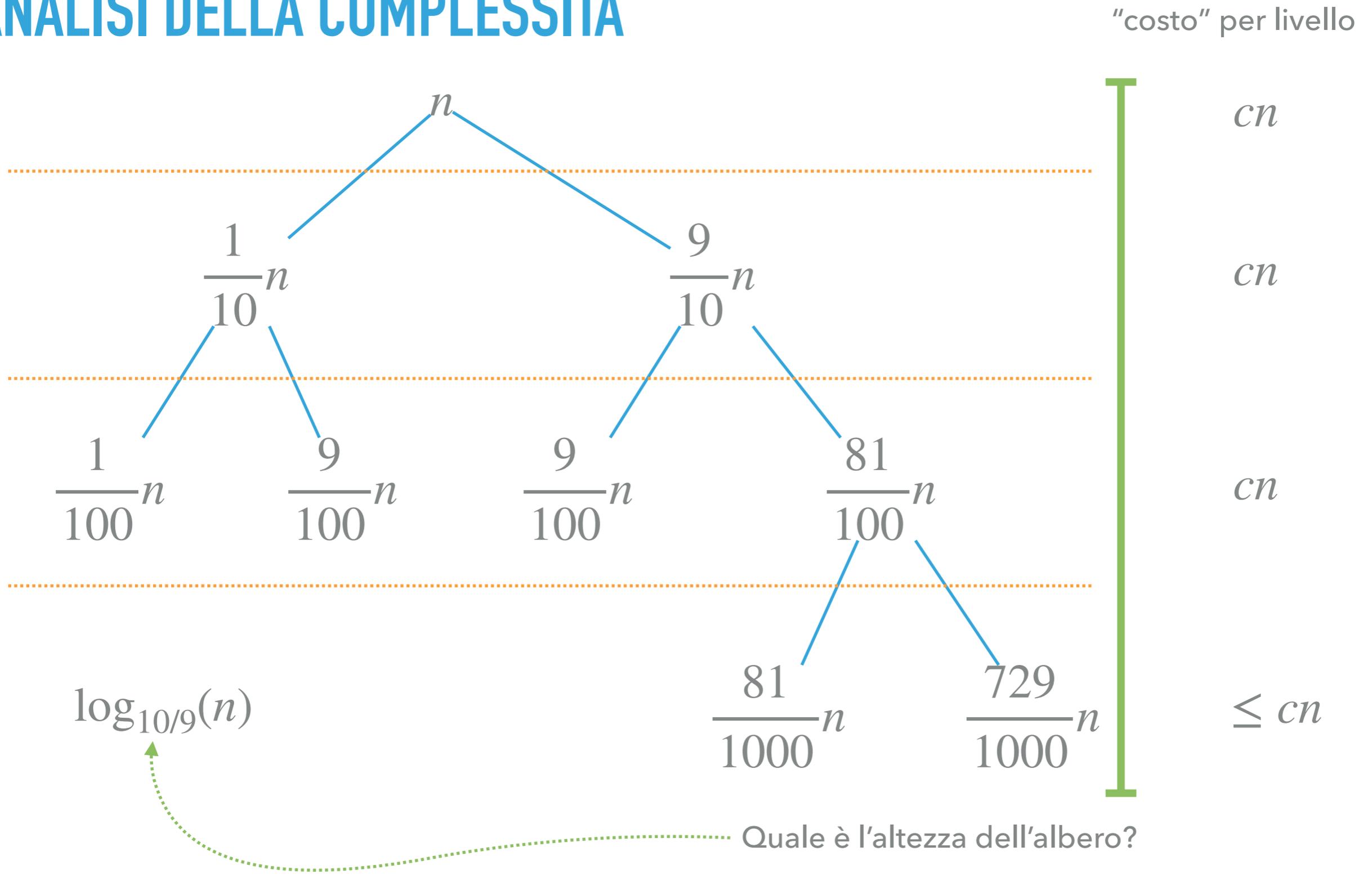


ANALISI DELLA COMPLESSITÀ

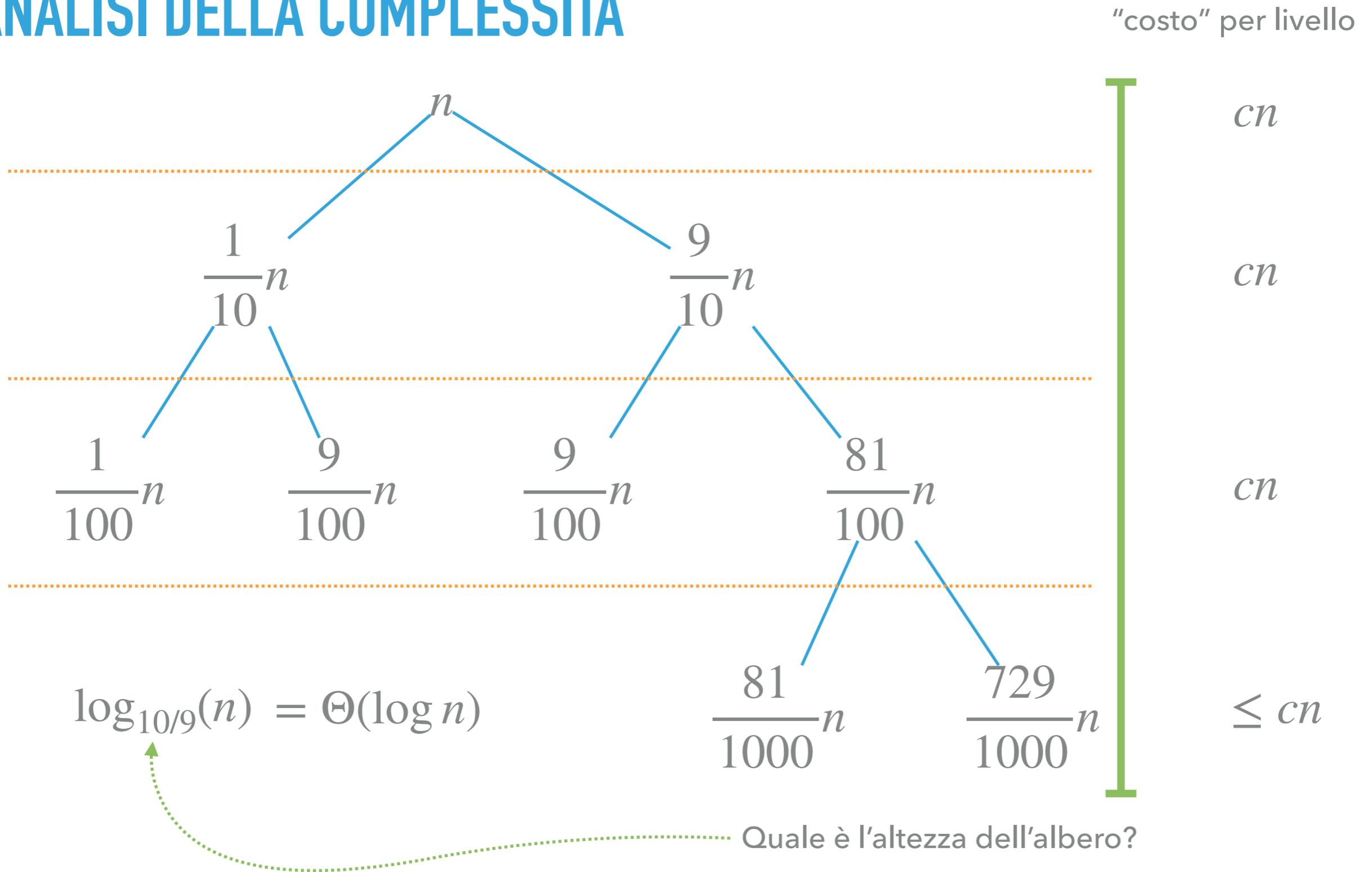


Quale è l'altezza dell'albero?

ANALISI DELLA COMPLESSITÀ



ANALISI DELLA COMPLESSITÀ



ANALISI DELLA COMPLESSITÀ

ANALISI DELLA COMPLESSITÀ

- ▶ Stiamo eseguendo al più cn passi per ognuno degli $\Theta(\log n)$ livelli dell'albero
- ▶ Di conseguenza il tempo di esecuzione è ancora $\Theta(n \log n)$

ANALISI DELLA COMPLESSITÀ

- ▶ Stiamo eseguendo al più cn passi per ognuno degli $\Theta(\log n)$ livelli dell'albero
- ▶ Di conseguenza il tempo di esecuzione è ancora $\Theta(n \log n)$
- ▶ Cosa succede nel "caso medio"?
- ▶ È possibile provare che, se la scelta del pivot viene effettuata in modo casuale, il **tempo atteso** di esecuzione è $\Theta(n \log n)$

ANALISI DELLA COMPLESSITÀ NEL CASO MEDIO

QUICKSORT: POSSIBILI VARIANTI

QUICKSORT: POSSIBILI VARIANTI

- ▶ Esistono molte varianti del quicksort per minimizzare il rischio di cadere nel caso peggiore

QUICKSORT: POSSIBILI VARIANTI

- ▶ Esistono molte varianti del quicksort per minimizzare il rischio di cadere nel caso peggiore
- ▶ Invece di scegliere l'ultimo elemento come pivot, viene scelto un elemento a caso che viene spostato in ultima posizione

QUICKSORT: POSSIBILI VARIANTI

- ▶ Esistono molte varianti del quicksort per minimizzare il rischio di cadere nel caso peggiore
- ▶ Invece di scegliere l'ultimo elemento come pivot, viene scelto un elemento a caso che viene spostato in ultima posizione
- ▶ Vengono presi tre elementi e la mediana dei tre viene usata come pivot

QUICKSORT: POSSIBILI VARIANTI

- ▶ Esistono molte varianti del quicksort per minimizzare il rischio di cadere nel caso peggiore
- ▶ Invece di scegliere l'ultimo elemento come pivot, viene scelto un elemento a caso che viene spostato in ultima posizione
- ▶ Vengono presi tre elementi e la mediana dei tre viene usata come pivot
- ▶ I libri "algorithms in C", "algorithms in Java" di Robert Sedgwick trattano molti di questi miglioramenti