

LOWER BOUND DELL'ORDINAMENTO PER CONFRONTI  
ORDINAMENTO IN TEMPO LINEARE  
COUNTING SORT  
RADIX SORT

---

**INFORMATICA**

---

# LOWER BOUND ALL'ORDINAMENTO PER CONFRONTI

# LIMITI DELL'ORDINAMENTO

- ▶ Sia mergesort che heapsort richiedono tempo  $O(n \log n)$
- ▶ Sappiamo di non poter andare al di sotto del tempo lineare: dobbiamo *almeno* leggere l'input
- ▶ Possiamo migliorare e avere, per esempio, un algoritmo di ordinamento che richiede tempo lineare?
- ▶ Mostriamo che gli algoritmi di ordinamento che usano la comparazione sono in  $\Omega(n \log n)$

# ALBERO DI DECISIONE

# ALBERO DI DECISIONE

- ▶ Dato un array  $A$  di  $n$  elementi

# ALBERO DI DECISIONE

- ▶ Dato un array  $A$  di  $n$  elementi
- ▶ Consideriamo un albero binario in cui ogni nodo interno ha associata una comparazione  $i : j$ , che indica che compariamo l'elemento  $i$ -esimo con l'elemento  $j$ -esimo

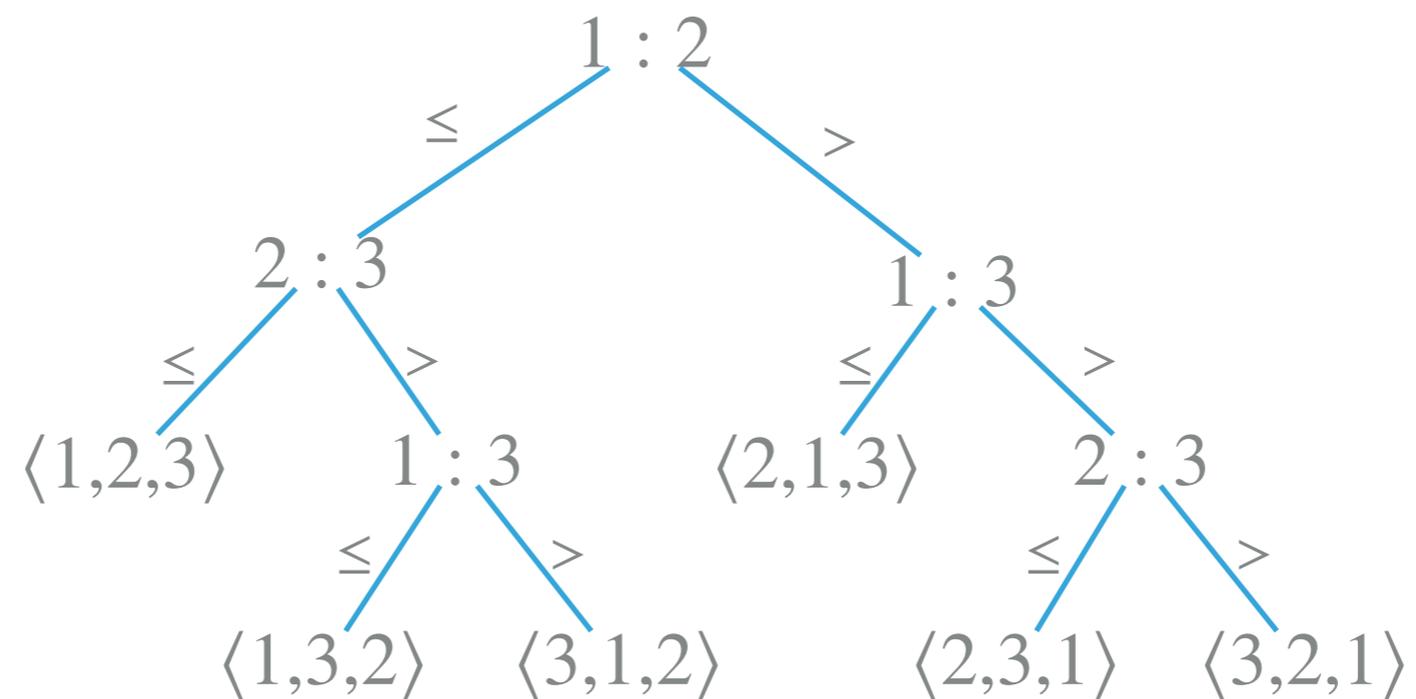
# ALBERO DI DECISIONE

- ▶ Dato un array  $A$  di  $n$  elementi
- ▶ Consideriamo un albero binario in cui ogni nodo interno ha associata una comparazione  $i : j$ , che indica che compariamo l'elemento  $i$ -esimo con l'elemento  $j$ -esimo
- ▶ Ci spostiamo a sinistra se  $A[i] \leq A[j]$  e a destra se  $A[i] > A[j]$

# ALBERO DI DECISIONE

- ▶ Dato un array  $A$  di  $n$  elementi
- ▶ Consideriamo un albero binario in cui ogni nodo interno ha associata una comparazione  $i : j$ , che indica che compariamo l'elemento  $i$ -esimo con l'elemento  $j$ -esimo
- ▶ Ci spostiamo a sinistra se  $A[i] \leq A[j]$  e a destra se  $A[i] > A[j]$
- ▶ Ogni foglia è una permutazione  $\pi$  di  $0 \dots n - 1$ , gli indici di  $A$

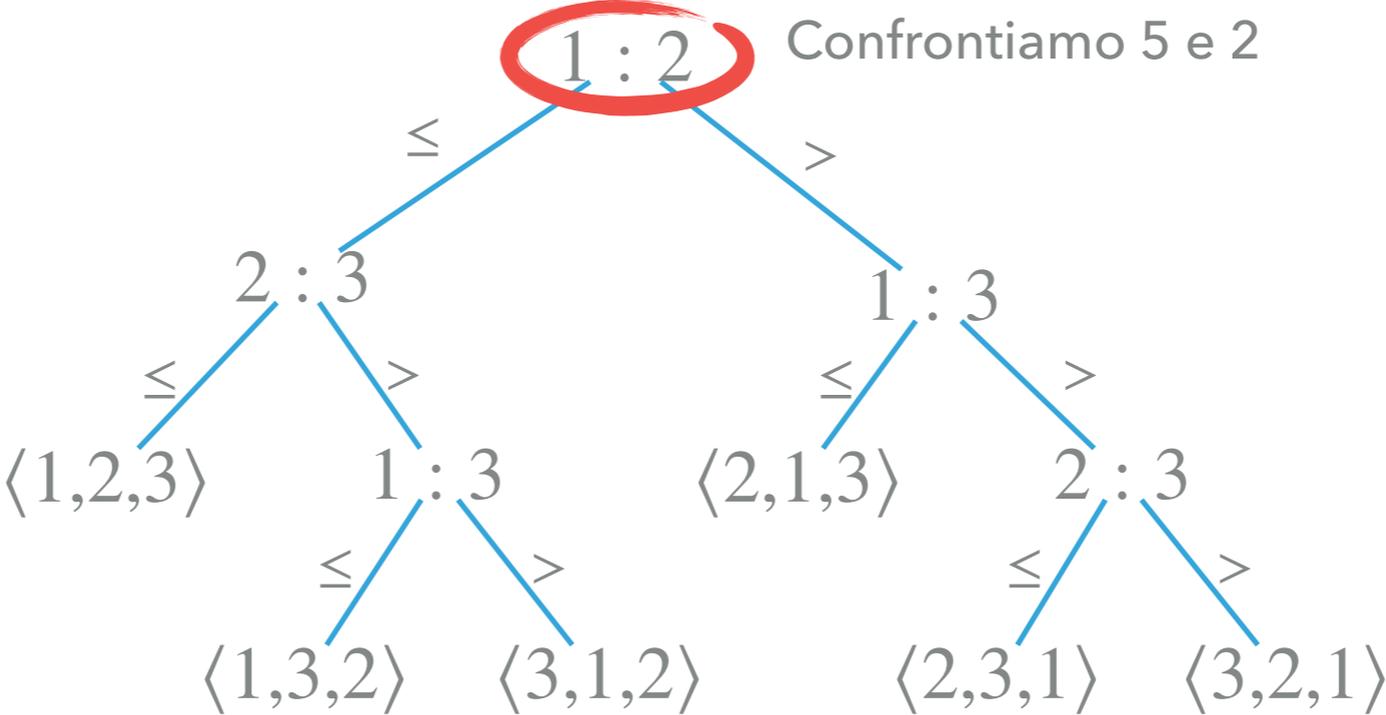
# ALBERO DI DECISIONE



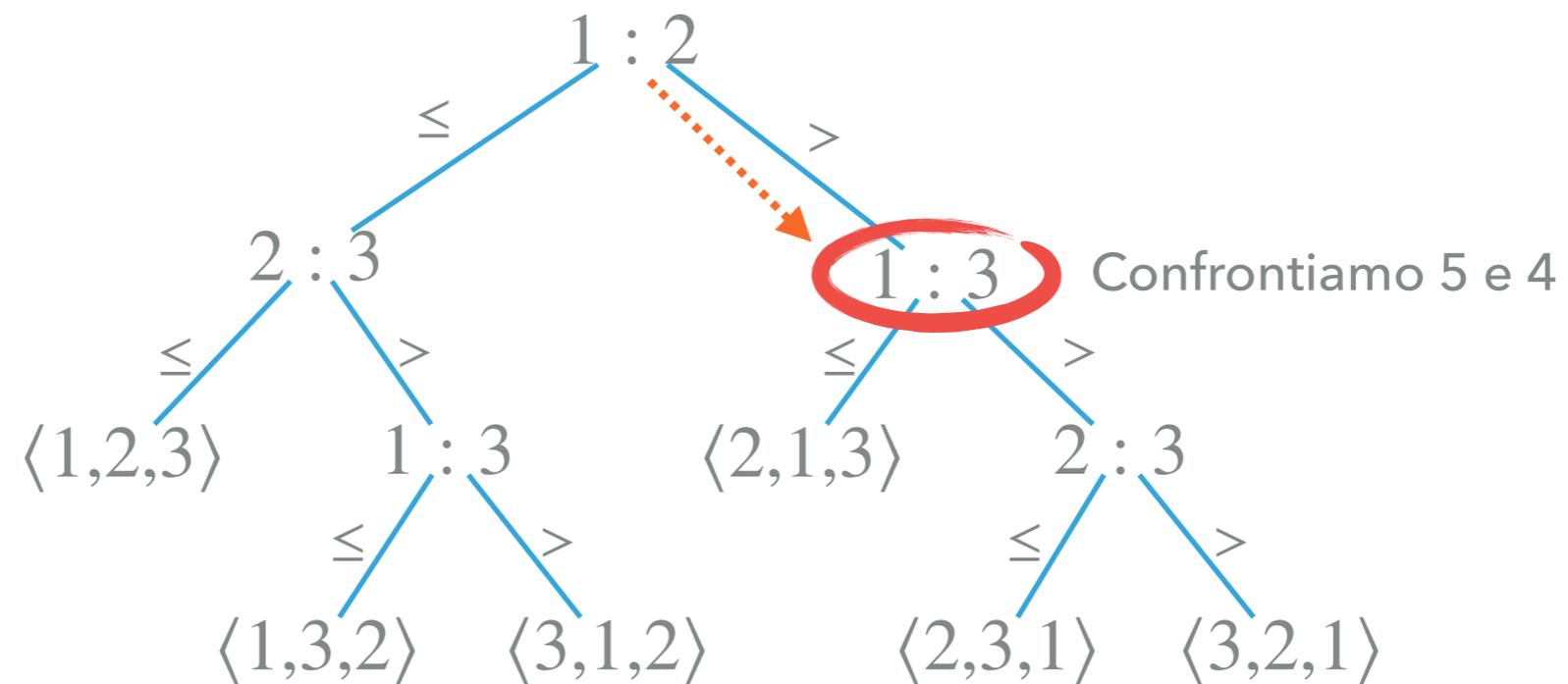
In questo esempio gli indici dell'array partono da 1, come sul libro di testo

# ALBERO DI DECISIONE

5	2	4
---	---	---

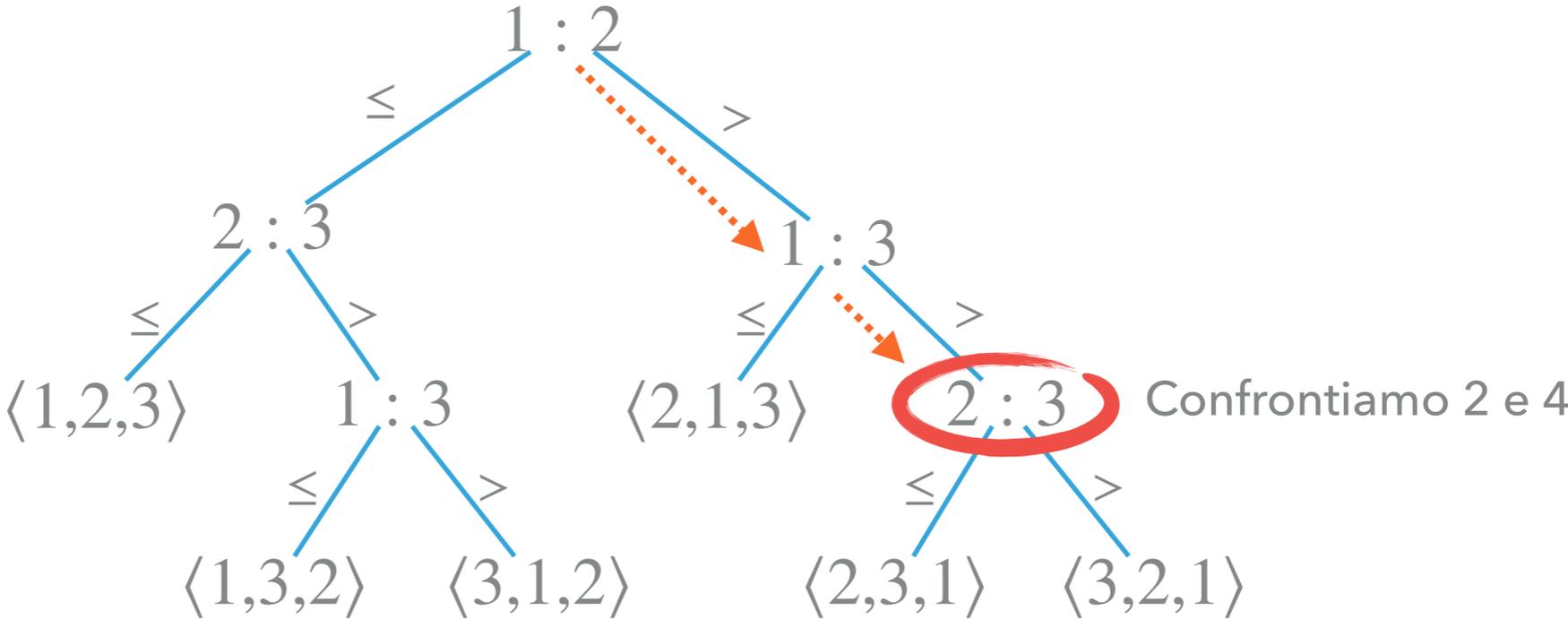


# ALBERO DI DECISIONE



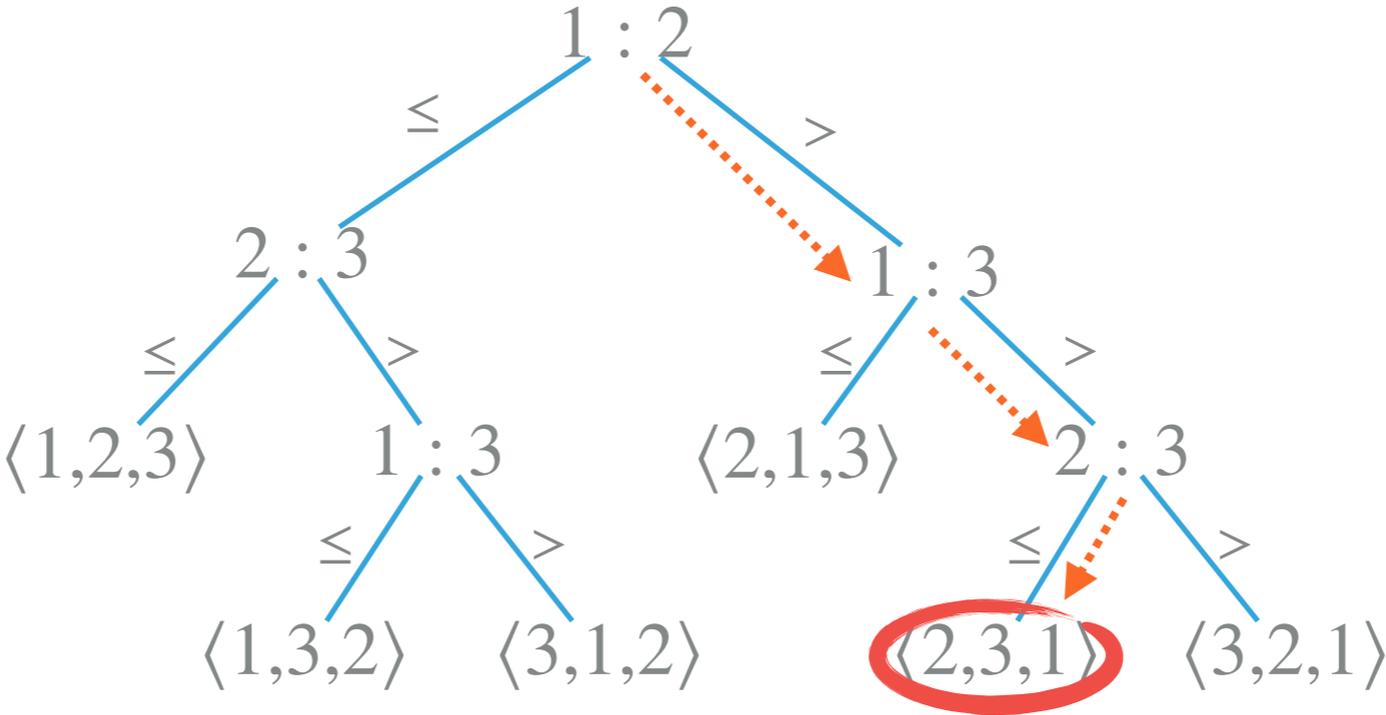
# ALBERO DI DECISIONE

5	2	4
---	---	---



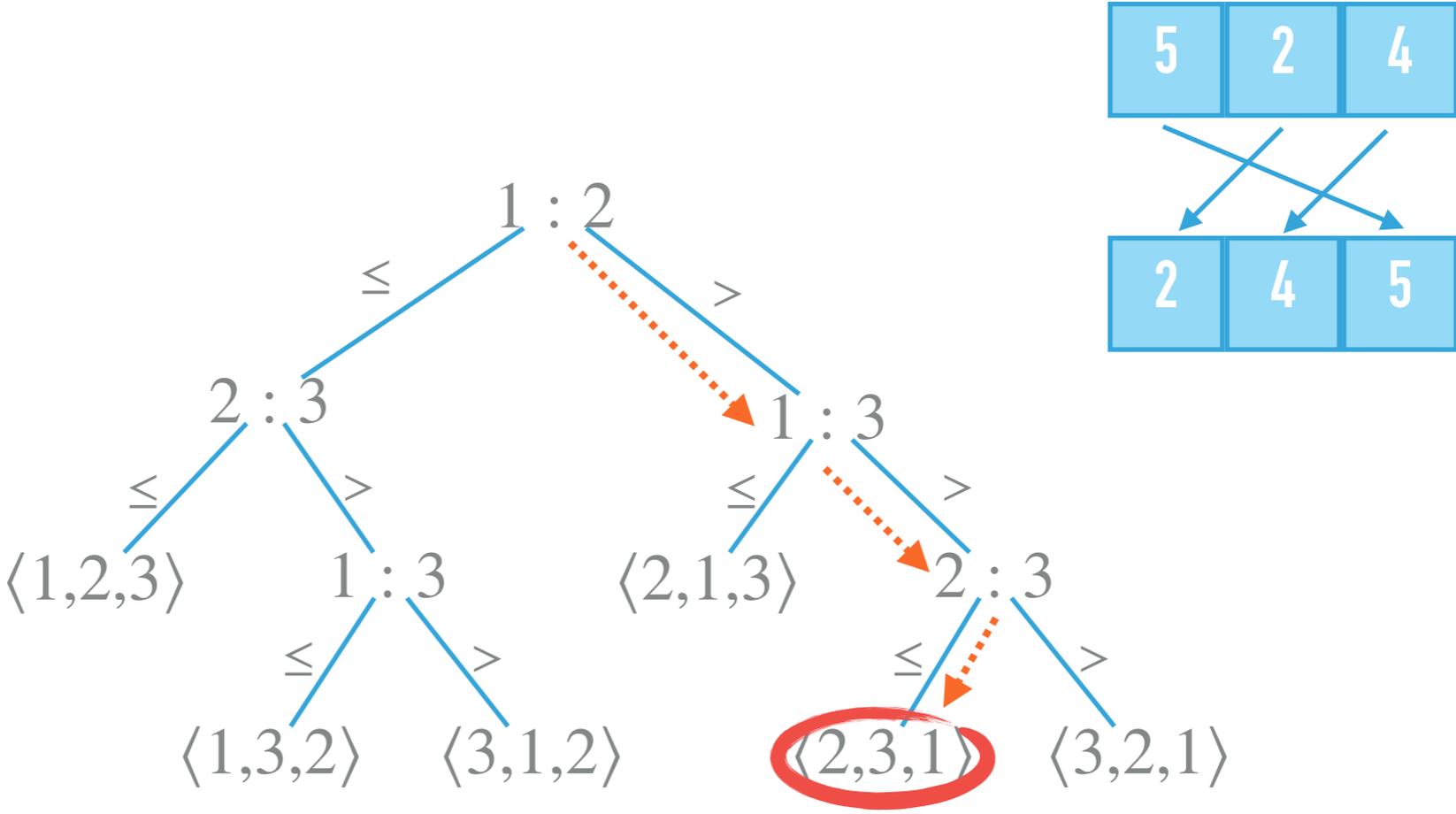
# ALBERO DI DECISIONE

5	2	4
---	---	---



Permutazione da applicare all'array

# ALBERO DI DECISIONE



Permutazione da applicare all'array

# ALBERO DI DECISIONE

- ▶ Dato un qualsiasi algoritmo di ordinamento che usa la comparazione di elementi dell'array per compiere le scelte, possiamo rappresentarlo come un albero di decisione
- ▶ Algoritmi diversi corrispondono ad alberi diversi
- ▶ Dato un array in input la sua esecuzione individuerà un percorso dalla radice ad una delle permutazioni nelle foglie

# ALBERO DI DECISIONE

# ALBERO DI DECISIONE

- ▶ Come conseguenza **ogni** permutazione deve essere presente nelle foglie!

# ALBERO DI DECISIONE

- ▶ Come conseguenza **ogni** permutazione deve essere presente nelle foglie!
- ▶ Le permutazioni di  $n$  elementi sono  $n!$
- ▶ Quale è l'altezza minima  $h$  di un albero con  $\ell \geq n!$  foglie?

# ALBERO DI DECISIONE

- ▶ Come conseguenza **ogni** permutazione deve essere presente nelle foglie!
- ▶ Le permutazioni di  $n$  elementi sono  $n!$
- ▶ Quale è l'altezza minima  $h$  di un albero con  $\ell \geq n!$  foglie?
- ▶ Questa altezza minima ci indica il numero di comparazioni minimo nel caso peggiore che siamo costretti a fare in un algoritmo di ordinamento basato sulla comparazione

# ALBERO DI DECISIONE

# ALBERO DI DECISIONE

- ▶ Ricordiamo che un albero di profondità  $h$  ha al più  $2^h$  foglie
- ▶ Ne segue  $n! \leq \ell \leq 2^h$

# ALBERO DI DECISIONE

- ▶ Ricordiamo che un albero di profondità  $h$  ha al più  $2^h$  foglie
- ▶ Ne segue  $n! \leq \ell \leq 2^h$
- ▶ Prendiamo il logaritmo:  $h \geq \log_2(n!)$
- ▶ Mostriamo ora che  $\log_2(n!)$  è  $\Theta(n \log n)$

# ALBERO DI DECISIONE

# ALBERO DI DECISIONE

- ▶ Per approssimazione di Stirling:

$$n! = \sqrt{2\pi n} \left(\frac{n}{e}\right)^n \left(1 + \Theta\left(\frac{1}{n}\right)\right)$$

# ALBERO DI DECISIONE

- ▶ Per approssimazione di Stirling:

$$n! = \sqrt{2\pi n} \left(\frac{n}{e}\right)^n \left(1 + \Theta\left(\frac{1}{n}\right)\right)$$

- ▶ Prendendo il logaritmo dell'approssimazione passiamo da prodotti a somme:

$$\log_2 \sqrt{2\pi n} + \log_2 n^n + \log_2 e^{-n} + \log_2(1 + \Theta(n^{-1}))$$

# ALBERO DI DECISIONE

- ▶ Per approssimazione di Stirling:

$$n! = \sqrt{2\pi n} \left(\frac{n}{e}\right)^n \left(1 + \Theta\left(\frac{1}{n}\right)\right)$$

- ▶ Prendendo il logaritmo dell'approssimazione passiamo da prodotti a somme:

$$\log_2 \sqrt{2\pi n} + \log_2 n^n + \log_2 e^{-n} + \log_2(1 + \Theta(n^{-1}))$$

- ▶ Il termine che domina asintoticamente è  $\log_2 n^n = n \log_2 n$ ,  
quindi  $\log n! = \Theta(n \log n)$

# ALBERO DI DECISIONE

# ALBERO DI DECISIONE

- ▶ Abbiamo quindi che  $h = \Omega(n \log n)$   
(non usiamo  $\Theta(n \log n)$  perché  $h$  è  $\geq$  di  $\log_2 n!$ )

# ALBERO DI DECISIONE

- ▶ Abbiamo quindi che  $h = \Omega(n \log n)$   
(non usiamo  $\Theta(n \log n)$  perché  $h$  è  $\geq$  di  $\log_2 n!$ )
- ▶ **Teorema.** Ogni algoritmo di ordinamento basato sulla comparazione richiede almeno  $\Omega(n \log n)$  comparazioni nel caso peggiore
- ▶ Come conseguenza sia heapsort che mergesort sono ottimali tra gli algoritmi di ordinamento basati sulla comparazione

---

# ORDINAMENTO LINEARE

ORDINAMENTO IN TEMPO LINEARE

---

**ORDINARE SENZA COMPARARE**

## ORDINARE SENZA COMPARARE

- ▶ Abbiamo visto che ogni algoritmo di ordinamento basato sulla comparazione richiede tempo  $\Omega(n \log n)$

# ORDINARE SENZA COMPARARE

- ▶ Abbiamo visto che ogni algoritmo di ordinamento basato sulla comparazione richiede tempo  $\Omega(n \log n)$
- ▶ Il punto chiave è "basato sulla comparazione"
- ▶ Possiamo scrivere algoritmo di ordinamento che non comparano gli elementi tra di loro

# ORDINARE SENZA COMPARARE

- ▶ Abbiamo visto che ogni algoritmo di ordinamento basato sulla comparazione richiede tempo  $\Omega(n \log n)$
- ▶ Il punto chiave è "basato sulla comparazione"
- ▶ Possiamo scrivere algoritmo di ordinamento che non comparano gli elementi tra di loro
- ▶ Questi algoritmi non sono totalmente generici, ma richiedono delle assunzioni aggiuntive

ORDINAMENTO IN TEMPO LINEARE

---

**ORDINARE SENZA COMPARARE**

## ORDINARE SENZA COMPARARE

- ▶ Che tipo di assunzioni sono?

## ORDINARE SENZA COMPARARE

- ▶ Che tipo di assunzioni sono?
  - ▶ Sappiamo esattamente il range degli numeri da ordinare,  $[0, k - 1]$  e  $k = O(n)$ . **Counting sort**

## ORDINARE SENZA COMPARARE

- ▶ Che tipo di assunzioni sono?
  - ▶ Sappiamo esattamente il range degli numeri da ordinare,  $[0, k - 1]$  e  $k = O(n)$ . **Counting sort**
  - ▶ Sappiamo il numero di cifre necessarie a rappresentare i numeri da ordinare. **Radix sort**

## ORDINARE SENZA COMPARARE

- ▶ Che tipo di assunzioni sono?
  - ▶ Sappiamo esattamente il range degli numeri da ordinare,  $[0, k - 1]$  e  $k = O(n)$ . **Counting sort**
  - ▶ Sappiamo il numero di cifre necessarie a rappresentare i numeri da ordinare. **Radix sort**
  - ▶ I numeri da ordinare sono estratti da una distribuzione uniforme. **Bucket sort**

---

# COUNTING SORT

COUNTING SORT

---

# COUNTING SORT

# COUNTING SORT

- ▶ Se sappiamo quali sono i valori possibili da ordinare, possiamo contare per ogni valore quanti sono quelli più piccoli e quindi stabilire la posizione finale
- ▶ Se, per esempio abbiamo i numeri da 0 a 10 e sappiamo che ci sono 5 numeri più piccoli di 7, sappiamo che se incontriamo 7 dovremo metterlo in sesta posizione

# COUNTING SORT

- ▶ Se sappiamo quali sono i valori possibili da ordinare, possiamo contare per ogni valore quanti sono quelli più piccoli e quindi stabilire la posizione finale
- ▶ Se, per esempio abbiamo i numeri da 0 a 10 e sappiamo che ci sono 5 numeri più piccoli di 7, sappiamo che se incontriamo 7 dovremo metterlo in sesta posizione
- ▶ Questo non richiede di confrontare direttamente i numeri

# CONTEGGIO DEI VALORI



Supponiamo tutti i valori siano in  $[0,4]$

## CONTEGGIO DEI VALORI

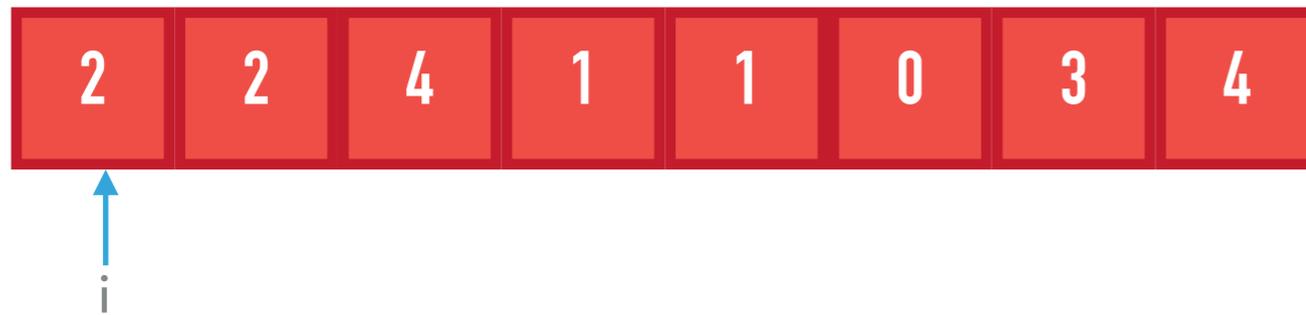


Supponiamo tutti i valori siano in  $[0,4]$



Allochiamo un array di  $k=5$  elementi

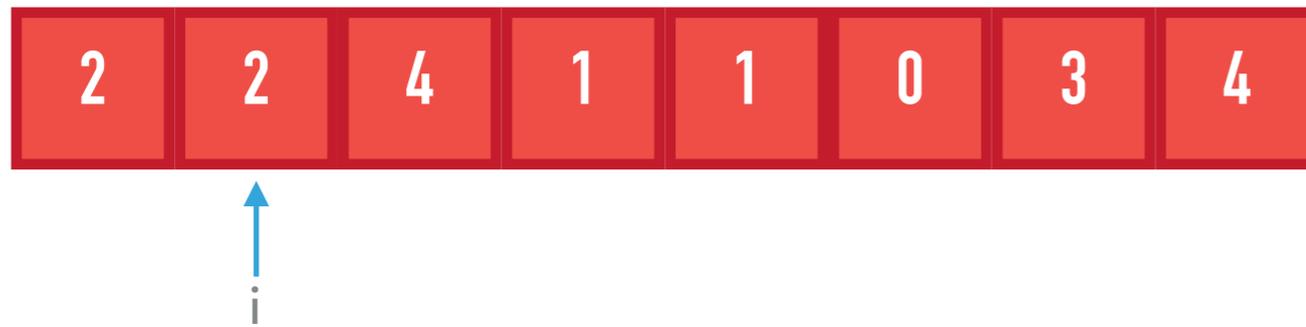
## CONTEGGIO DEI VALORI



Supponiamo tutti i valori siano in  $[0,4]$



## CONTEGGIO DEI VALORI



Supponiamo tutti i valori siano in  $[0,4]$



## CONTEGGIO DEI VALORI



Supponiamo tutti i valori siano in  $[0,4]$

↑  
i

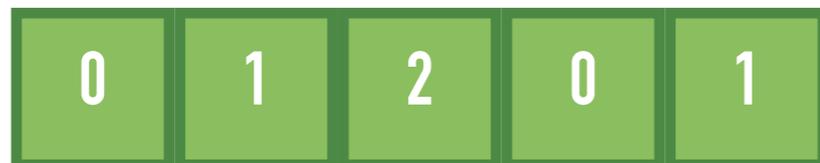


## CONTEGGIO DEI VALORI



Supponiamo tutti i valori siano in  $[0,4]$

↑  
i



## CONTEGGIO DEI VALORI



Supponiamo tutti i valori siano in  $[0,4]$

↑  
i



## CONTEGGIO DEI VALORI



Supponiamo tutti i valori siano in  $[0,4]$

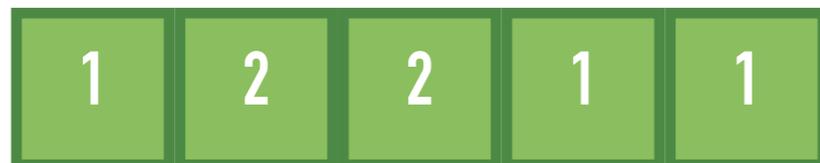
i



## CONTEGGIO DEI VALORI



Supponiamo tutti i valori siano in  $[0,4]$



## CONTEGGIO DEI VALORI



Supponiamo tutti i valori siano in  $[0,4]$



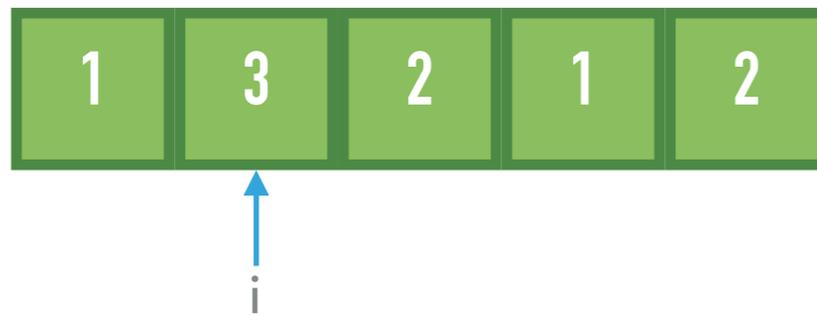
Ora abbiamo a disposizione per ogni valore in  $[0,k]$  il numero di occorrenze

Vogliamo contare per ogni valore il numero di elementi **minori o uguali** a quel valore che sono presenti nell'array di partenza

## CONTEGGIO DEI VALORI



Supponiamo tutti i valori siano in  $[0,4]$

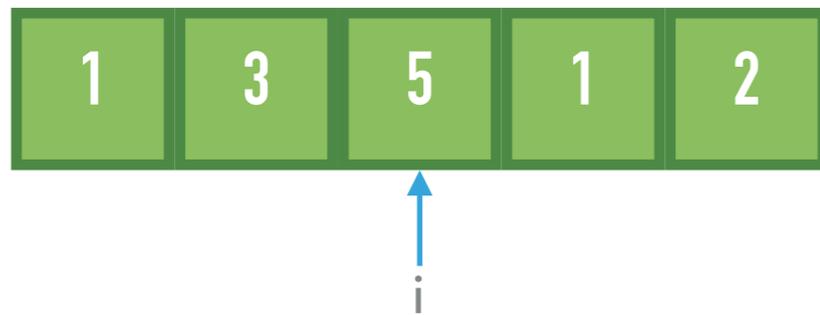


$$B[i] = B[i] + B[i-1]$$

## CONTEGGIO DEI VALORI



Supponiamo tutti i valori siano in  $[0,4]$



$$B[i] = B[i] + B[i-1]$$

## CONTEGGIO DEI VALORI



Supponiamo tutti i valori siano in  $[0,4]$



$$B[i] = B[i] + B[i-1]$$

## CONTEGGIO DEI VALORI



Supponiamo tutti i valori siano in  $[0,4]$



$$B[i] = B[i] + B[i-1]$$

Ora abbiamo in  $B[i]$  l'ultima posizione in cui il valore "i" deve apparire

## ORDINAMENTO



Supponiamo tutti i valori siano in  $[0,4]$

Scorriamo dal fondo

$i$

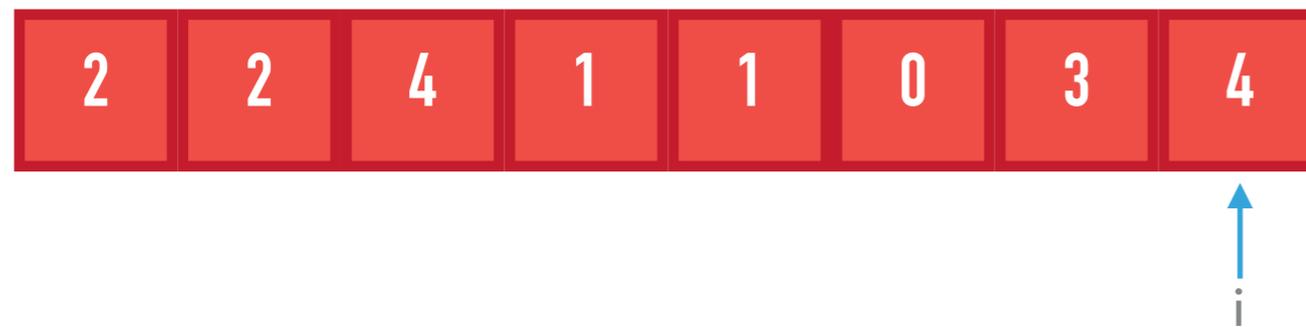


$$B[A[i]] = B[A[i]] - 1$$



$$C[B[A[i]]-1] = A[i]$$

## ORDINAMENTO



Supponiamo tutti i valori siano in  $[0,4]$

Scorriamo dal fondo



$$B[A[i]] = B[A[i]] - 1$$



**QUESTA OPERAZIONE  
RICHIEDE UNA SPIEGAZIONE**

$$C[B[A[i]]-1] = A[i]$$

# ORDINAMENTO

$$C[B[A[i]]-1] = A[i]$$



# ORDINAMENTO

Elemento da ordinare

$$C[B[A[i]]-1] = A[i]$$



## ORDINAMENTO



Elemento da ordinare

$$C[B[A[i]]-1] = A[i]$$

Posizione in cui mettere l'elemento  
(indicizzata dall'elemento stesso)

## ORDINAMENTO



Supponiamo tutti i valori siano in  $[0,4]$

Scorriamo dal fondo

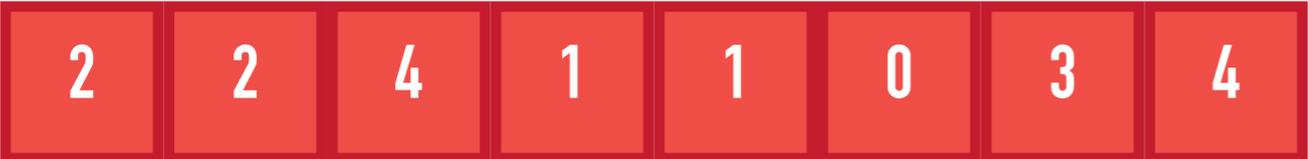


$$B[A[i]] = B[A[i]] - 1$$



$$C[B[A[i]]-1] = A[i]$$

# ORDINAMENTO



Supponiamo tutti i valori siano in  $[0,4]$

Scorriamo dal fondo

$i$



$$B[A[i]] = B[A[i]] - 1$$



$$C[B[A[i]]-1] = A[i]$$

## ORDINAMENTO



Supponiamo tutti i valori siano in  $[0,4]$

Scorriamo dal fondo



$$B[A[i]] = B[A[i]] - 1$$



$$C[B[A[i]]-1] = A[i]$$

## ORDINAMENTO



Supponiamo tutti i valori siano in  $[0,4]$

Scorriamo dal fondo



$$B[A[i]] = B[A[i]] - 1$$



$$C[B[A[i]]-1] = A[i]$$

## ORDINAMENTO



Supponiamo tutti i valori siano in  $[0,4]$

Scorriamo dal fondo



$$B[A[i]] = B[A[i]] - 1$$



$$C[B[A[i]]-1] = A[i]$$

# ORDINAMENTO



Supponiamo tutti i valori siano in  $[0,4]$

Scorriamo dal fondo



$$B[A[i]] = B[A[i]] - 1$$



$$C[B[A[i]]-1] = A[i]$$

## ORDINAMENTO



Supponiamo tutti i valori siano in  $[0,4]$

Scorriamo dal fondo



$$B[A[i]] = B[A[i]] - 1$$



$$C[B[A[i]]-1] = A[i]$$

## ORDINAMENTO



Supponiamo tutti i valori siano in  $[0,4]$

Scorriamo dal fondo



$$B[A[i]] = B[A[i]] - 1$$



$$C[B[A[i]]-1] = A[i]$$

# COUNTING SORT: PSEUDOCODICE

# COUNTING SORT: PSEUDOCODICE

Argomenti: A (array), k (valore massimo)

# COUNTING SORT: PSEUDOCODICE

Argomenti: A (array), k (valore massimo)

B = array di k elementi inizialmente zero

# COUNTING SORT: PSEUDOCODICE

Argomenti: A (array), k (valore massimo)

B = array di k elementi inizialmente zero

C = array di len(A) elementi

# COUNTING SORT: PSEUDOCODICE

Argomenti: A (array), k (valore massimo)

B = array di k elementi inizialmente zero

C = array di len(A) elementi

for i in range(0, len(A))

# COUNTING SORT: PSEUDOCODICE

Argomenti: A (array), k (valore massimo)

B = array di k elementi inizialmente zero

C = array di len(A) elementi

for i in range(0, len(A))

    B[A[i]] = B[A[i]] + 1 # incrementa il numero di valori A[i] trovati

# COUNTING SORT: PSEUDOCODICE

Argomenti: A (array), k (valore massimo)

B = array di k elementi inizialmente zero

C = array di len(A) elementi

for i in range(0, len(A))

    B[A[i]] = B[A[i]] + 1 # incrementa il numero di valori A[i] trovati

for i in range(1,k)

# COUNTING SORT: PSEUDOCODICE

Argomenti: A (array), k (valore massimo)

B = array di k elementi inizialmente zero

C = array di len(A) elementi

for i in range(0, len(A))

    B[A[i]] = B[A[i]] + 1 # incrementa il numero di valori A[i] trovati

for i in range(1,k)

    B[i] = B[i] + B[i-1] # in modo da avere in B[i] il numero di elementi  $\leq i$

# COUNTING SORT: PSEUDOCODICE

Argomenti: A (array), k (valore massimo)

B = array di k elementi inizialmente zero

C = array di len(A) elementi

```
for i in range(0, len(A))
```

```
    B[A[i]] = B[A[i]] + 1 # incrementa il numero di valori A[i] trovati
```

```
for i in range(1,k)
```

```
    B[i] = B[i] + B[i-1] # in modo da avere in B[i] il numero di elementi ≤ i
```

```
for i in range(len(A), -1, -1) # contiamo dalla fine all'inizio
```

# COUNTING SORT: PSEUDOCODICE

Argomenti: A (array), k (valore massimo)

B = array di k elementi inizialmente zero

C = array di len(A) elementi

```
for i in range(0, len(A))
```

```
    B[A[i]] = B[A[i]] + 1 # incrementa il numero di valori A[i] trovati
```

```
for i in range(1,k)
```

```
    B[i] = B[i] + B[i-1] # in modo da avere in B[i] il numero di elementi ≤ i
```

```
for i in range(len(A), -1, -1) # contiamo dalla fine all'inizio
```

```
    C[B[A[i]]-1] = A[i] # trasferiamo A[i] nella sua posizione in C
```

# COUNTING SORT: PSEUDOCODICE

Argomenti: A (array), k (valore massimo)

B = array di k elementi inizialmente zero

C = array di len(A) elementi

```
for i in range(0, len(A))
```

```
    B[A[i]] = B[A[i]] + 1 # incrementa il numero di valori A[i] trovati
```

```
for i in range(1,k)
```

```
    B[i] = B[i] + B[i-1] # in modo da avere in B[i] il numero di elementi ≤ i
```

```
for i in range(len(A), -1, -1) # contiamo dalla fine all'inizio
```

```
    C[B[A[i]]-1] = A[i] # trasferiamo A[i] nella sua posizione in C
```

```
    B[A[i]] = B[A[i]] - 1
```

# COUNTING SORT: PSEUDOCODICE

Argomenti: A (array), k (valore massimo)

B = array di k elementi inizialmente zero

C = array di len(A) elementi

```
for i in range(0, len(A))
```

```
    B[A[i]] = B[A[i]] + 1 # incrementa il numero di valori A[i] trovati
```

```
for i in range(1,k)
```

```
    B[i] = B[i] + B[i-1] # in modo da avere in B[i] il numero di elementi ≤ i
```

```
for i in range(len(A), -1, -1) # contiamo dalla fine all'inizio
```

```
    C[B[A[i]]-1] = A[i] # trasferiamo A[i] nella sua posizione in C
```

```
    B[A[i]] = B[A[i]] - 1
```

```
return C
```

# COUNTING SORT: COMPLESSITÀ

# COUNTING SORT: COMPLESSITÀ

- ▶ Questa volta la complessità è funzione di **due** parametri:  $n$  (la dimensione dell'array) e  $k$  (il numero di valori distinti)

# COUNTING SORT: COMPLESSITÀ

- ▶ Questa volta la complessità è funzione di **due** parametri:  $n$  (la dimensione dell'array) e  $k$  (il numero di valori distinti)
- ▶ Due cicli for che sono lunghi  $n$  cicli
- ▶ Un ciclo for che è lungo  $k - 1$  cicli

# COUNTING SORT: COMPLESSITÀ

- ▶ Questa volta la complessità è funzione di **due** parametri:  $n$  (la dimensione dell'array) e  $k$  (il numero di valori distinti)
- ▶ Due cicli for che sono lunghi  $n$  cicli
- ▶ Un ciclo for che è lungo  $k - 1$  cicli
- ▶ Risultato:  $\Theta(n + k)$
- ▶ Se abbiamo che  $k = O(n)$  otteniamo che l'algoritmo richiede tempo  $\Theta(n)$

# ORDINAMENTO STABILE

# ORDINAMENTO STABILE

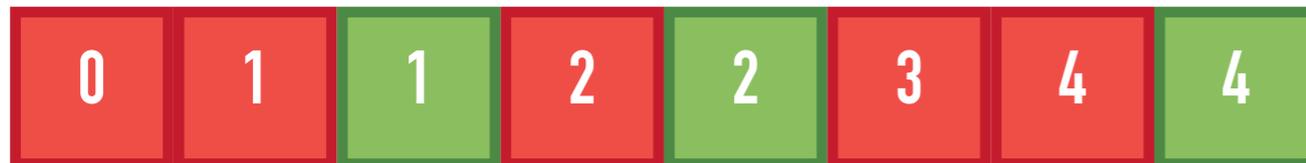
- ▶ Possiamo fare una distinzione aggiuntiva tra ordinamenti stabili e non stabili
- ▶ Un ordinamento stabile preserva l'ordine relativo di elementi con lo stesso valore

# ORDINAMENTO STABILE

- ▶ Possiamo fare una distinzione aggiuntiva tra ordinamenti stabili e non stabili
- ▶ Un ordinamento stabile preserva l'ordine relativo di elementi con lo stesso valore



Ordiniamo solo guardando i numeri ma le celle verdi vengono sempre dopo le celle rosse con lo stesso valore



Un ordinamento stabile preserva questa proprietà



Un ordinamento non stabile potrebbe non preservarla

# ORDINAMENTO STABILE

# ORDINAMENTO STABILE

- ▶ In diversi casi la stabilità dipende da dettagli implementativi, in particolare da come sono trattati i valori identici
- ▶ In particolare a noi servirà avere il counting sort stabile

# ORDINAMENTO STABILE

- ▶ In diversi casi la stabilità dipende da dettagli implementativi, in particolare da come sono trattati i valori identici
- ▶ In particolare a noi servirà avere il counting sort stabile
- ▶ La nostra implementazione lo è...
- ▶ ...perché inseriamo i valori a partire dal fondo
- ▶ Se avessi cambiato l'ordine di inserimento non sarebbe stato stabile

---

# RADIX SORT

RADIX SORT

---

# RADIX SORT

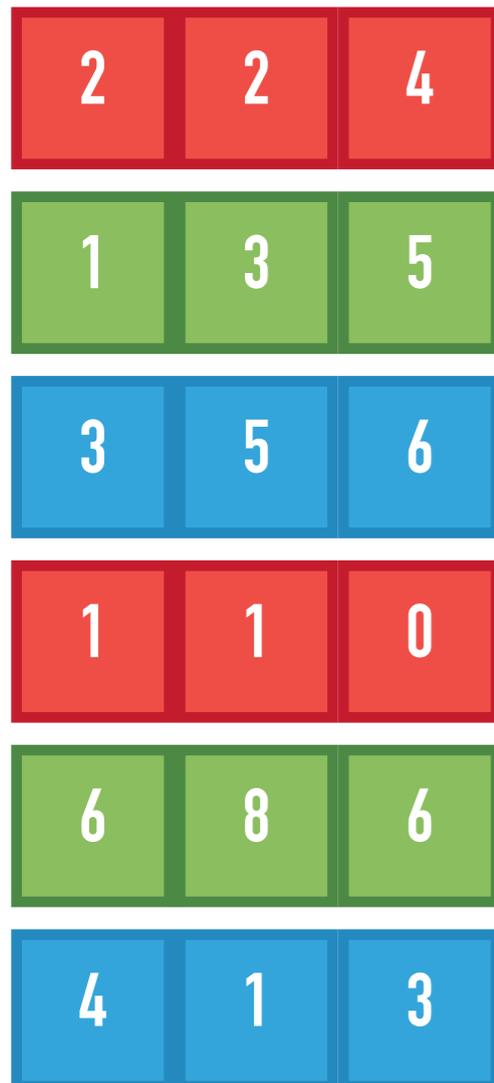
# RADIX SORT

- ▶ Il radix sort richiede un ordinamento stabile
- ▶ È nato per ordinare le schede perforate, quindi le prime implementazioni di radix sort non erano con il codice, ma con strumenti meccanici!

# RADIX SORT

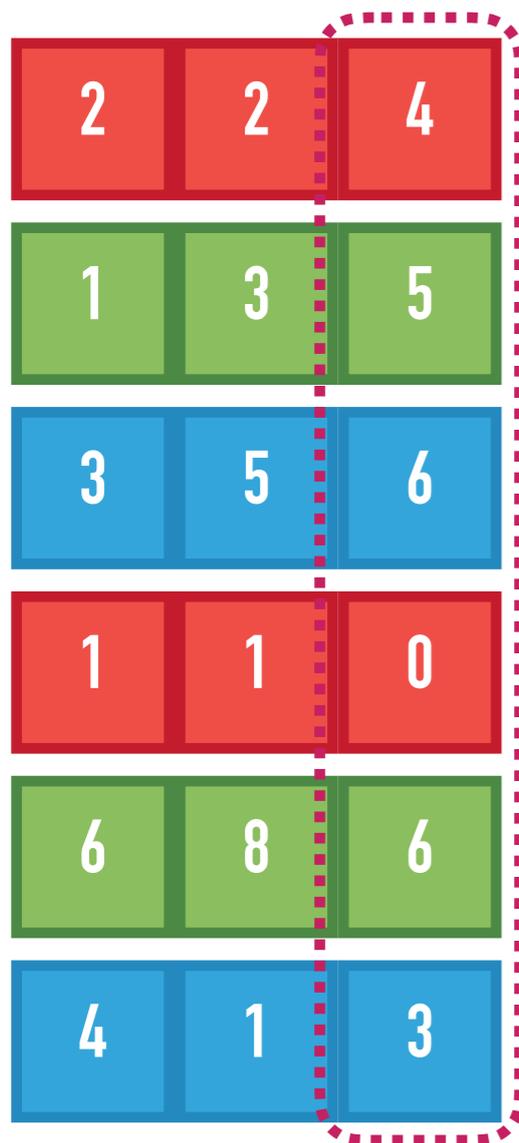
- ▶ Il radix sort richiede un ordinamento stabile
- ▶ È nato per ordinare le schede perforate, quindi le prime implementazioni di radix sort non erano con il codice, ma con strumenti meccanici!
- ▶ Idea di base: se abbiamo numeri di  $d$  cifre possiamo ordinarli una cifra alla volta usando un algoritmo di ordinamento stabile

## ESEMPIO DI RADIX SORT



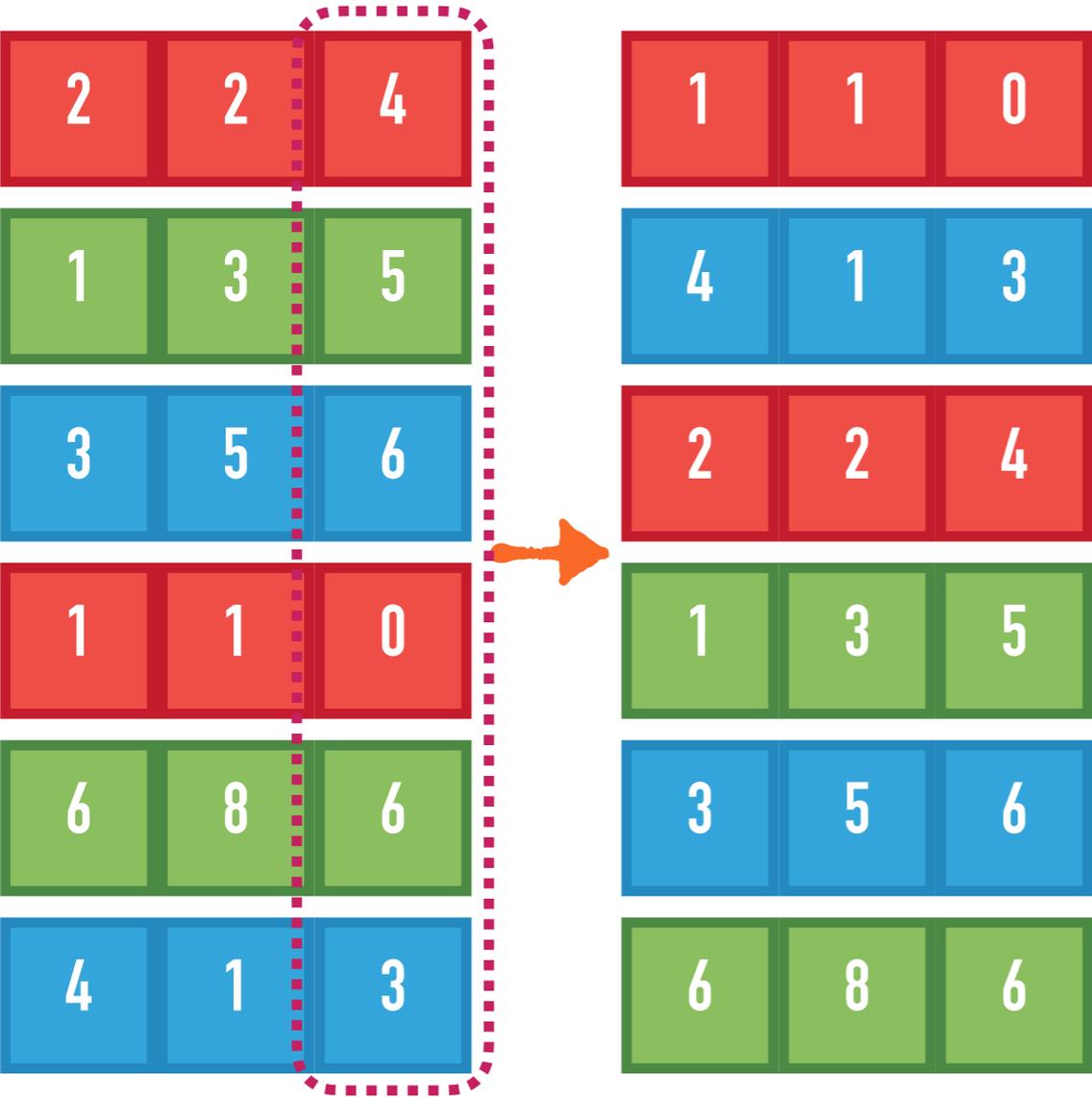
## ESEMPIO DI RADIX SORT

Ordiniamo rispetto  
all'ultima cifra



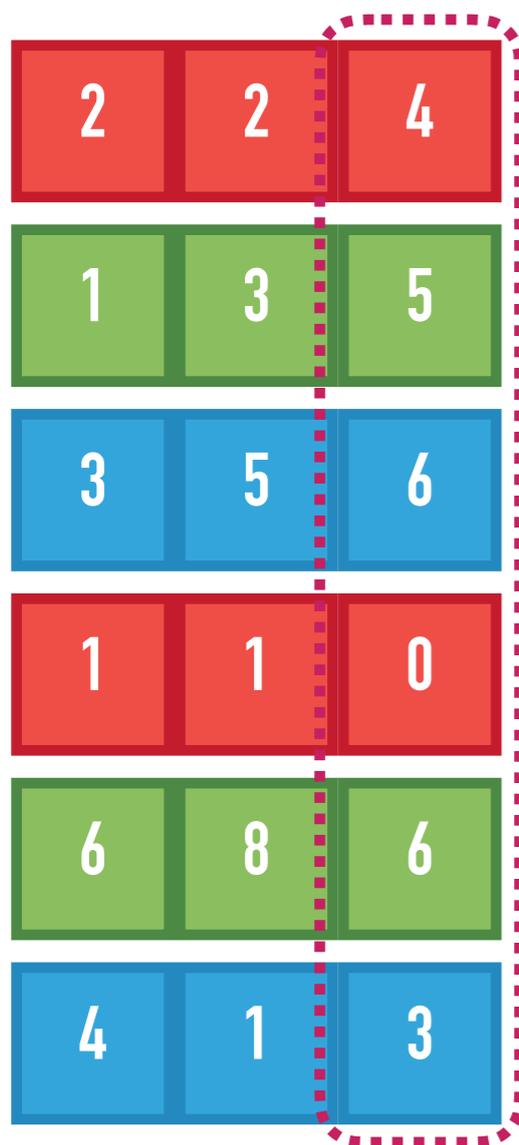
# ESEMPIO DI RADIX SORT

Ordiniamo rispetto all'ultima cifra

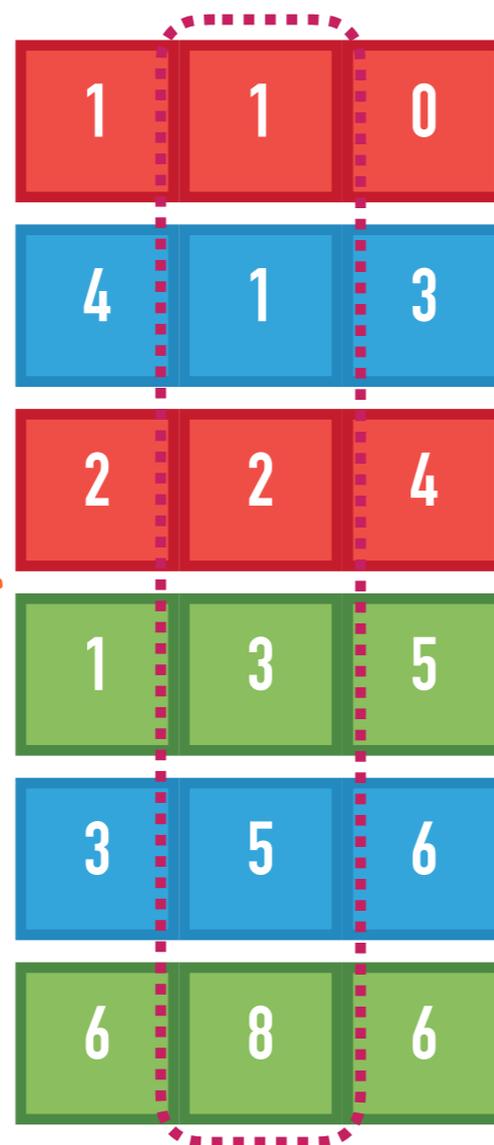


## ESEMPIO DI RADIX SORT

Ordiniamo rispetto all'ultima cifra

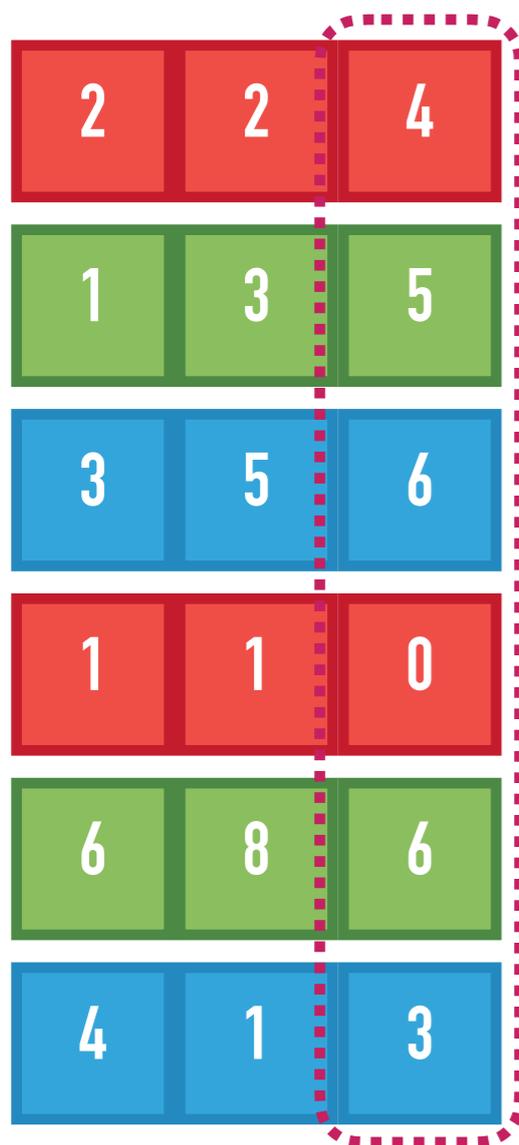


Ordiniamo rispetto alla penultima cifra

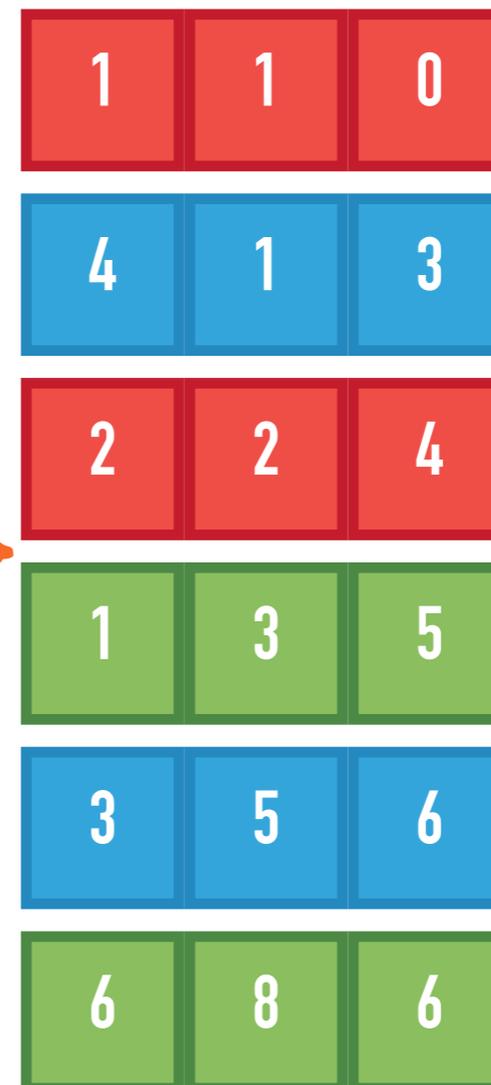
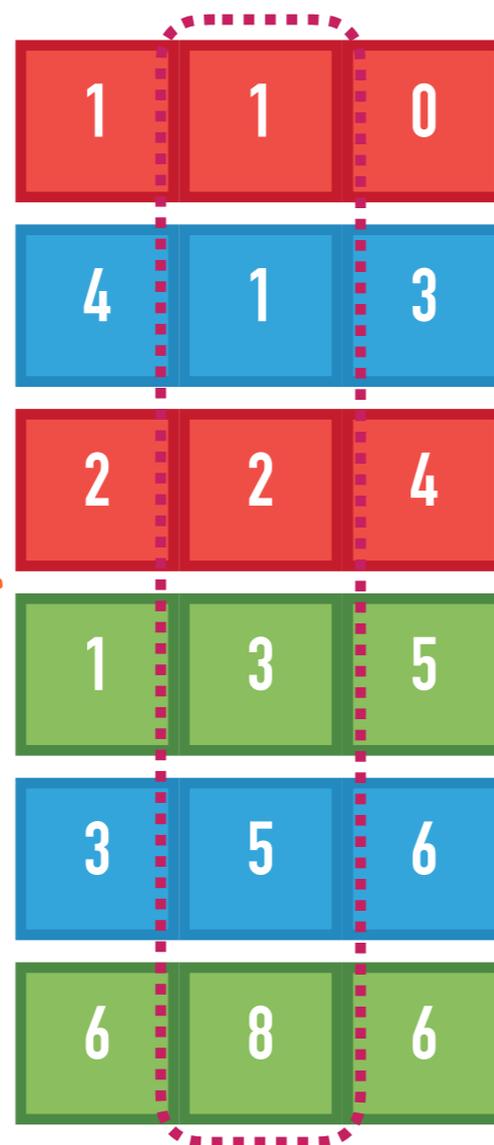


## ESEMPIO DI RADIX SORT

Ordiniamo rispetto all'ultima cifra

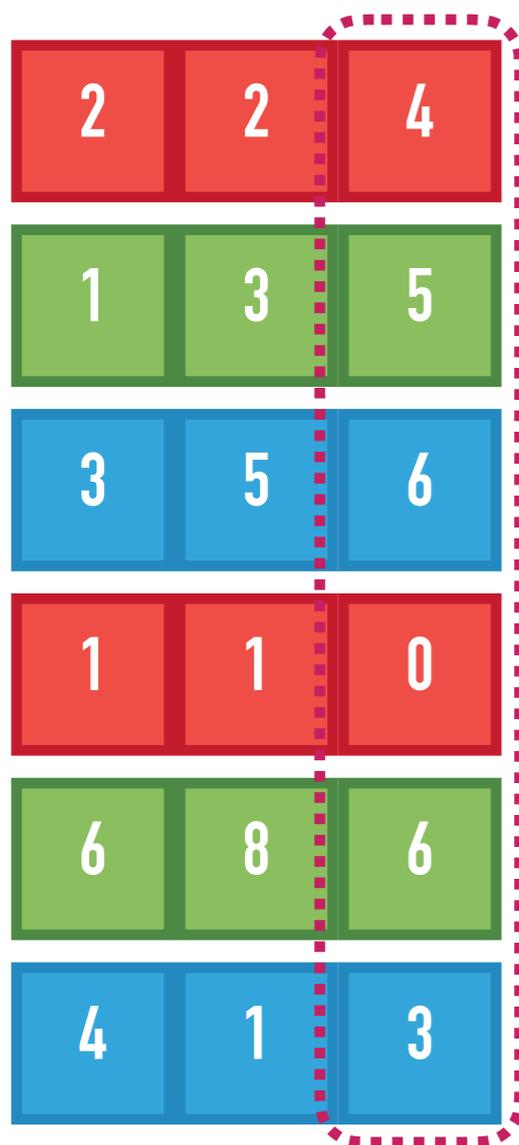


Ordiniamo rispetto alla penultima cifra

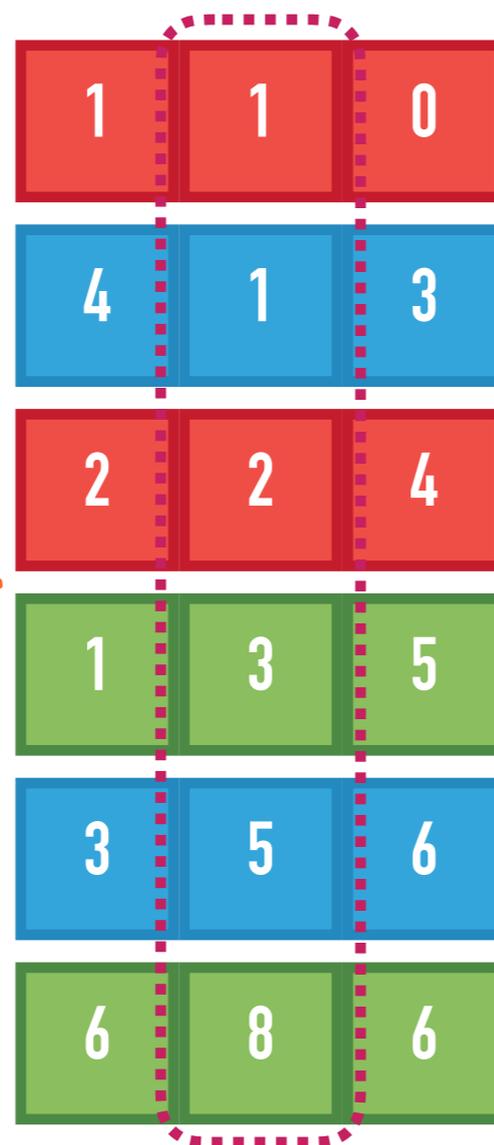


## ESEMPIO DI RADIX SORT

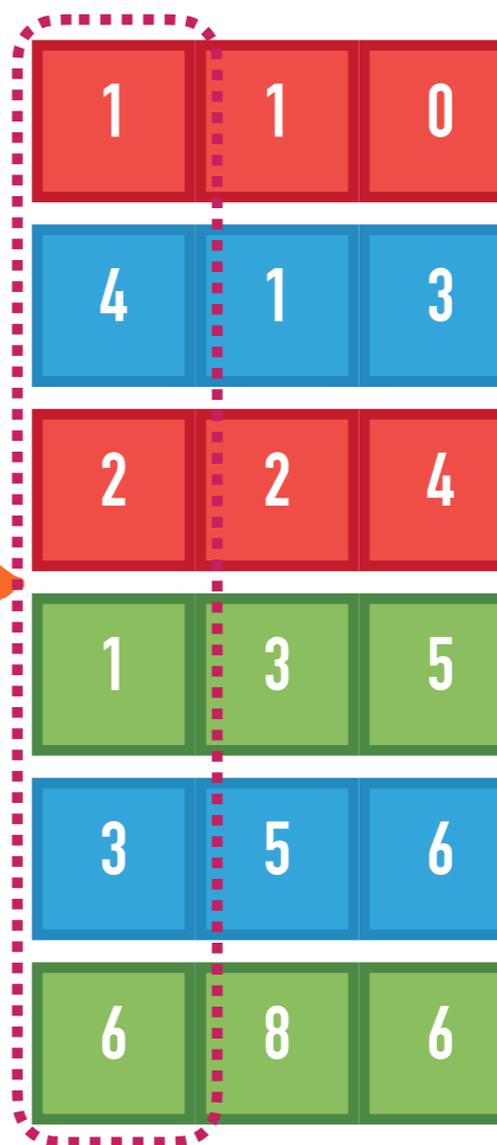
Ordiniamo rispetto all'ultima cifra



Ordiniamo rispetto alla penultima cifra

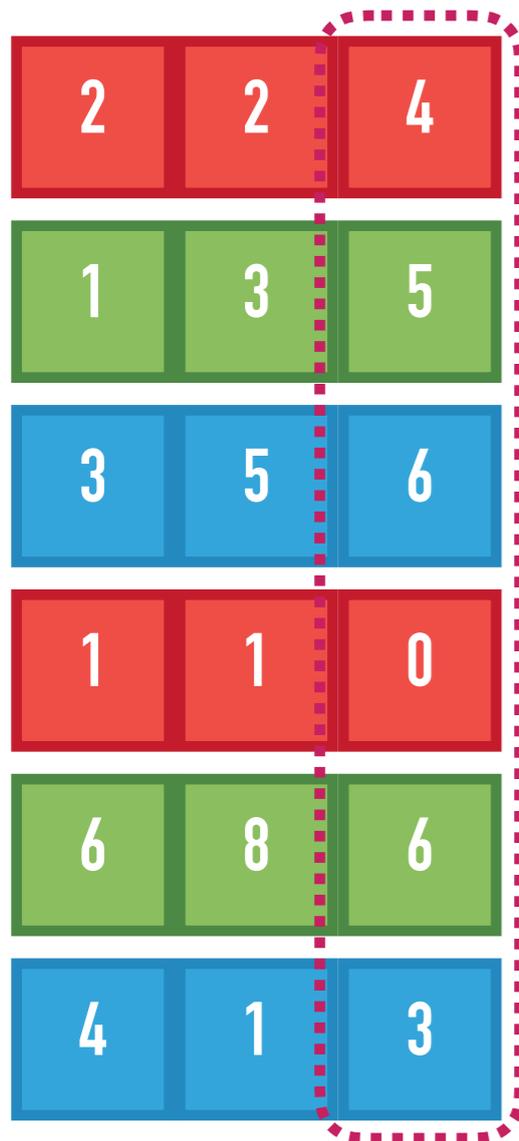


Ordiniamo rispetto alla prima cifra

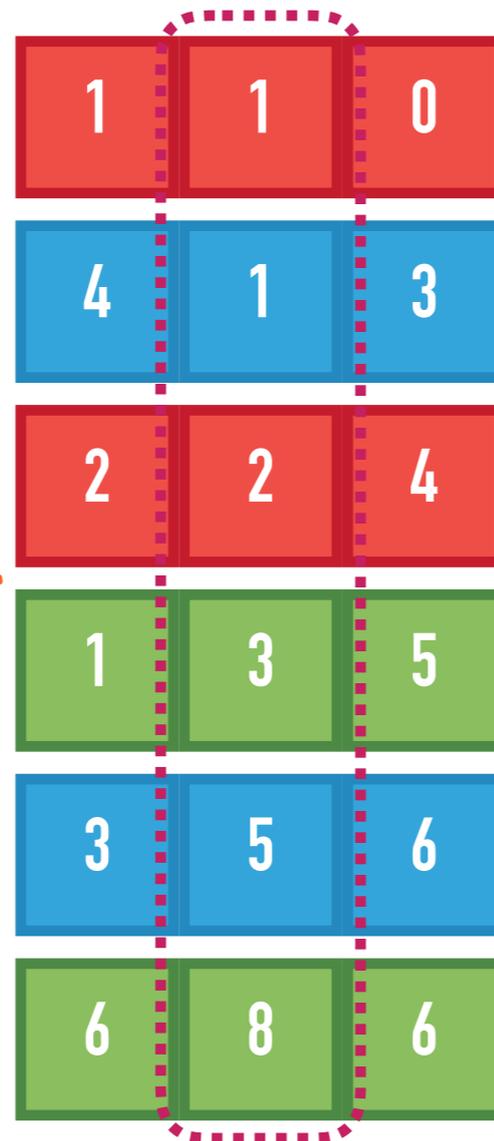


## ESEMPIO DI RADIX SORT

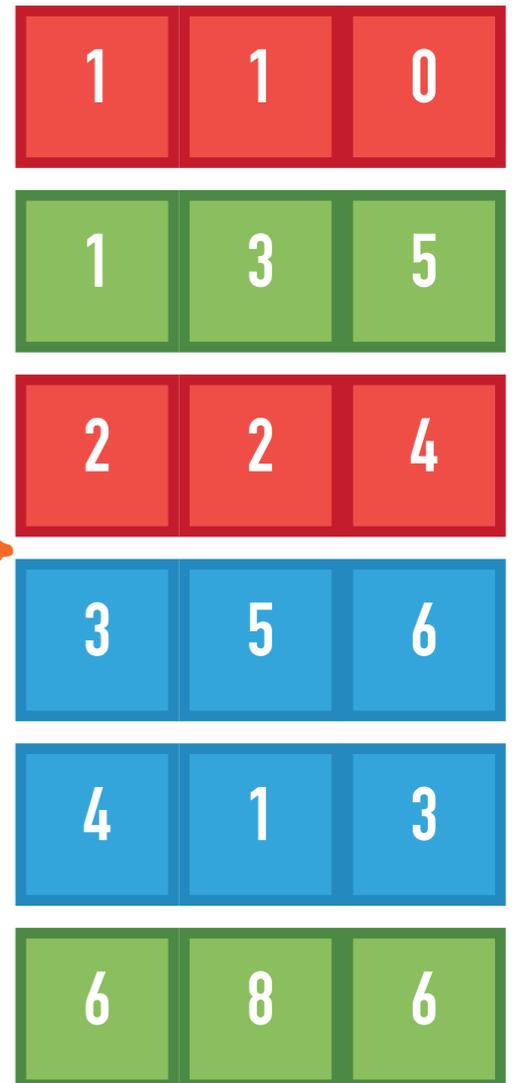
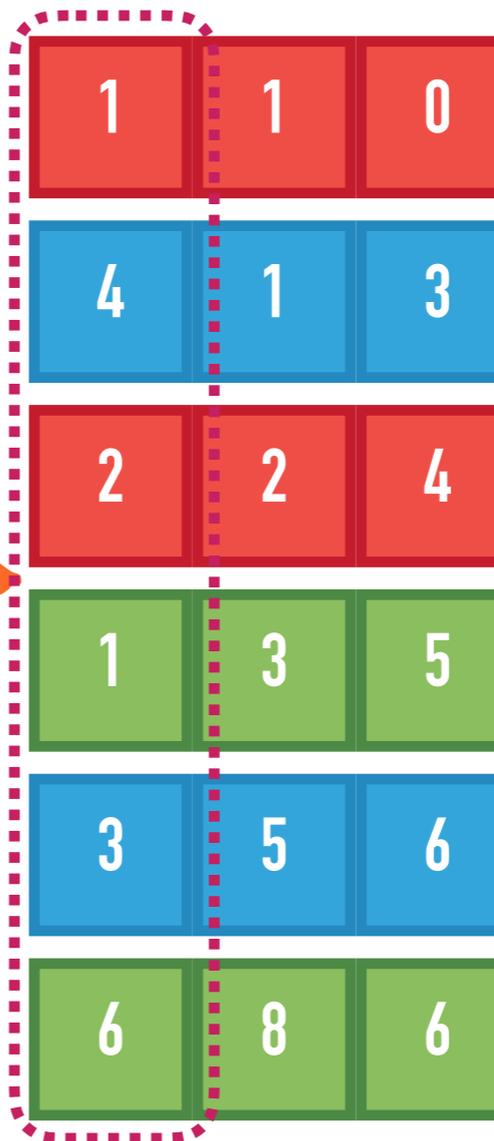
Ordiniamo rispetto all'ultima cifra



Ordiniamo rispetto alla penultima cifra



Ordiniamo rispetto alla prima cifra



# RADIX SORT: PSEUDOCODICE

# RADIX SORT: PSEUDOCODICE

Argomenti: A (array), k (cifre), d (numero di cifre)

# RADIX SORT: PSEUDOCODICE

Argomenti: A (array), k (cifre), d (numero di cifre)

for i in range(d-1,-1,-1) # dall'ultima alla prima cifra

# RADIX SORT: PSEUDOCODICE

```
Argomenti: A (array), k (cifre), d (numero di cifre)
for i in range(d-1,-1,-1) # dall'ultima alla prima cifra
    ordina stabilmente rispetto alla cifra i-esima
```

# RADIX SORT: PSEUDOCODICE

```
Argomenti: A (array), k (cifre), d (numero di cifre)
for i in range(d-1,-1,-1) # dall'ultima alla prima cifra
    ordina stabilmente rispetto alla cifra i-esima
```

- ▶ Dato che le possibili cifre sono limitate, la scelta dell'ordinamento stabile è solitamente il **counting sort**

# RADIX SORT: PERCHÉ FUNZIONA?

# RADIX SORT: PERCHÉ FUNZIONA?

- ▶ Dopo aver ordinato per la cifra meno significativa abbiamo tutti i numeri che terminano con 0 che precedono quelli che terminano con 1, etc.

# RADIX SORT: PERCHÉ FUNZIONA?

- ▶ Dopo aver ordinato per la cifra meno significativa abbiamo tutti i numeri che terminano con 0 che precedono quelli che terminano con 1, etc.
- ▶ Dopo aver ordinato rispetto alla penultima cifra abbiamo tutti i numeri che terminano con 00 che precedono quelli che terminano con 01, ..., 10, 11, ..., 99

# RADIX SORT: PERCHÉ FUNZIONA?

- ▶ Dopo aver ordinato per la cifra meno significativa abbiamo tutti i numeri che terminano con 0 che precedono quelli che terminano con 1, etc.
- ▶ Dopo aver ordinato rispetto alla penultima cifra abbiamo tutti i numeri che terminano con 00 che precedono quelli che terminano con 01, ..., 10, 11, ..., 99
- ▶ In questo punto è importante che l'ordinamento sia stabile, altrimenti non è detto che sia preservato l'ordine relativo sull'ultima cifra!
- ▶ Finito di ordinare su tutte le  $d$  cifre abbiamo che gli elementi risultano ordinati

# RADIX SORT: COMPLESSITÀ

# RADIX SORT: COMPLESSITÀ

- ▶ Questa volta abbiamo tre parametri:  $n$ ,  $k$  e  $d$

# RADIX SORT: COMPLESSITÀ

- ▶ Questa volta abbiamo tre parametri:  $n$ ,  $k$  e  $d$
- ▶ Se usiamo counting sort all'interno del ciclo for, ogni ordinamento stabile rispetto ad una cifra ha costo  $\Theta(n + k)$
- ▶ Dato che dobbiamo ripetere questa procedura per  $d$  cifre, la complessità temporale risultante è  $\Theta(d(n + k))$
- ▶ Quando  $k$  è  $O(n)$  – o addirittura costante, abbiamo  $\Theta(dn)$
- ▶ Quindi dipende tutto da quante cifre abbiamo, per esempio se  $d$  è costante, radix sort richiede tempo  $\Theta(n)$

---

# BUCKET SORT

BUCKET SORT

---

# BUCKET SORT

# BUCKET SORT

- ▶ Bucket sort richiede che l'input sia distribuito uniformemente in un intervallo. Noi useremo  $[0,1)$

# BUCKET SORT

- ▶ Bucket sort richiede che l'input sia distribuito uniformemente in un intervallo. Noi useremo  $[0,1)$
- ▶ Sotto questa ipotesi il tempo medio richiesto da bucket sort è  $\Theta(n)$

# BUCKET SORT

- ▶ Bucket sort richiede che l'input sia distribuito uniformemente in un intervallo. Noi useremo  $[0,1)$
- ▶ Sotto questa ipotesi il tempo medio richiesto da bucket sort è  $\Theta(n)$
- ▶ L'idea è di usare, per un array di  $n$  elementi,  $n$  "secchi" distinti in cui inserire i valori

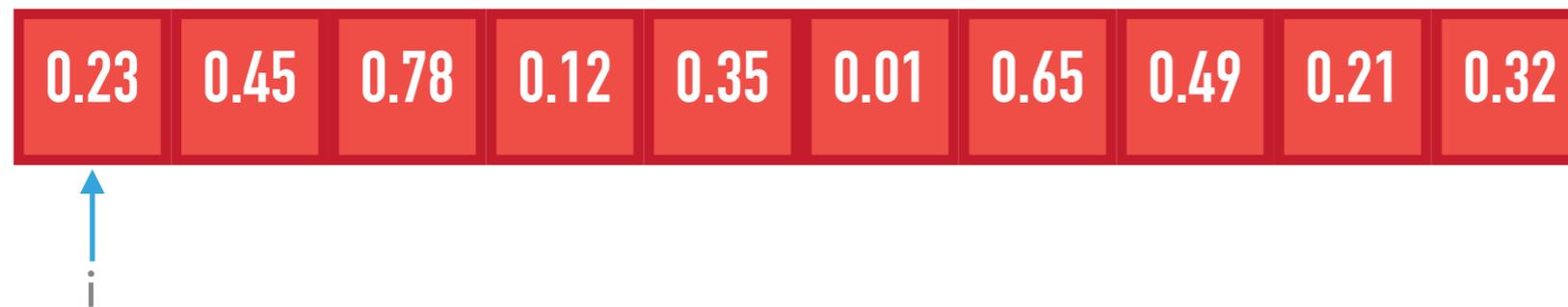
# BUCKET SORT

- ▶ Bucket sort richiede che l'input sia distribuito uniformemente in un intervallo. Noi useremo  $[0,1)$
- ▶ Sotto questa ipotesi il tempo medio richiesto da bucket sort è  $\Theta(n)$
- ▶ L'idea è di usare, per un array di  $n$  elementi,  $n$  "secchi" distinti in cui inserire i valori
- ▶ Ordiniamo ciascuno dei "secchi" con insertion sort

# BUCKET SORT

- ▶ Bucket sort richiede che l'input sia distribuito uniformemente in un intervallo. Noi useremo  $[0,1)$
- ▶ Sotto questa ipotesi il tempo medio richiesto da bucket sort è  $\Theta(n)$
- ▶ L'idea è di usare, per un array di  $n$  elementi,  $n$  "secchi" distinti in cui inserire i valori
- ▶ Ordiniamo ciascuno dei "secchi" con insertion sort
- ▶ Concateniamo ciascuno dei "secchi" in ordine

## ORDINAMENTO



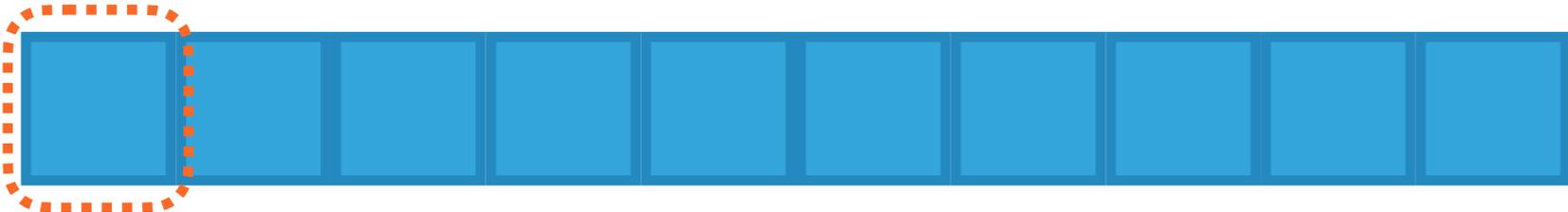
Array di  $n$  liste vuote

# ORDINAMENTO



i

Conterrà i numeri tra 0 (incluso) e 0.1 (escluso)



Array di  $n$  liste vuote

# ORDINAMENTO



i

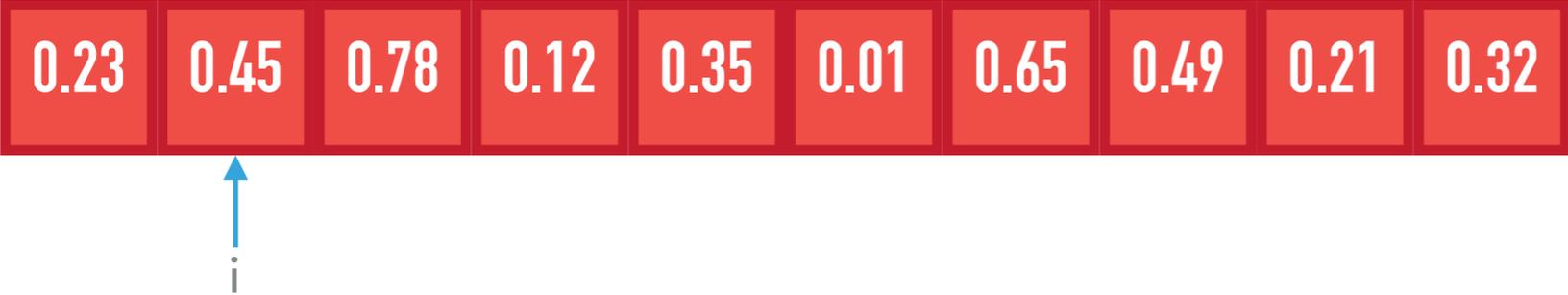
Conterrà i numeri tra 0 (incluso) e 0.1 (escluso)



Array di  $n$  liste vuote

Conterrà i numeri tra 0.7 (incluso) e 0.8 (escluso)

# ORDINAMENTO



# ORDINAMENTO



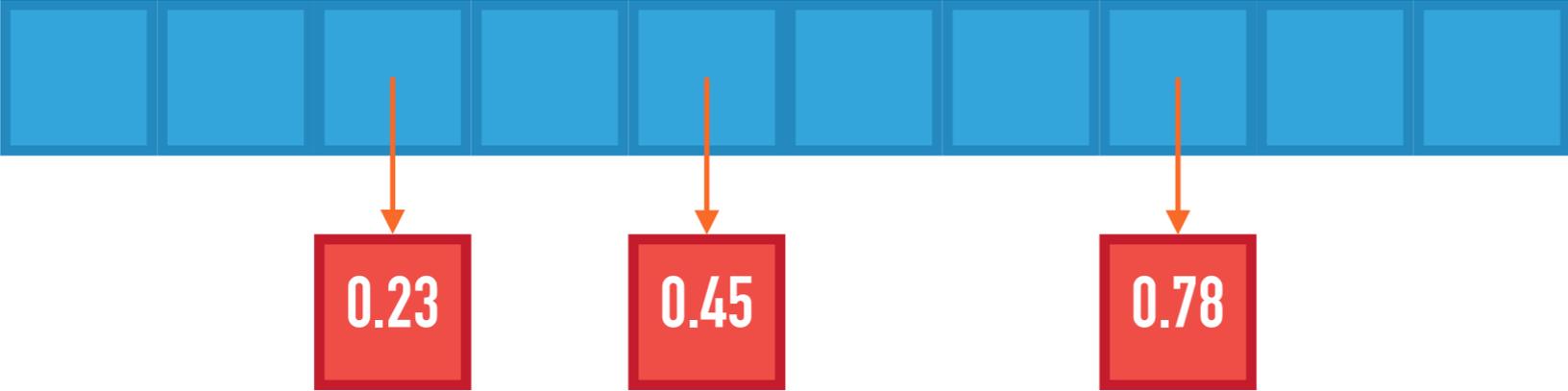
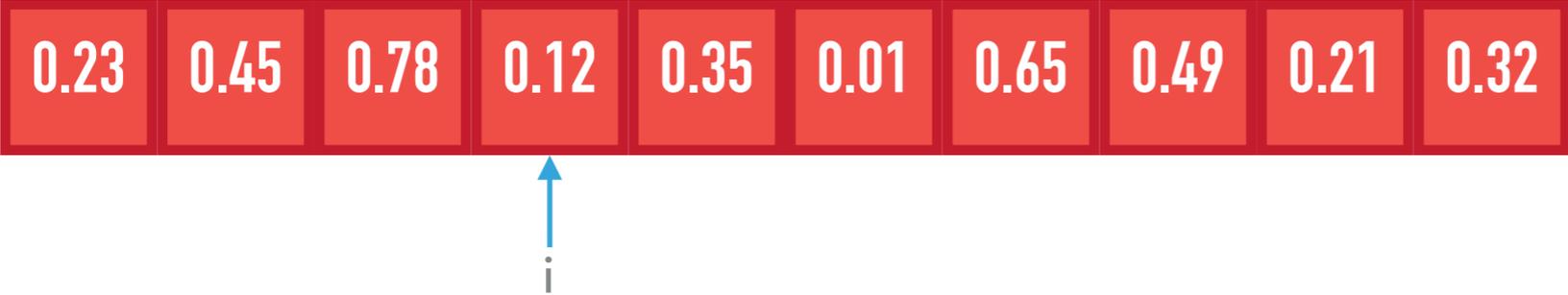
i



Array di  $n$  liste vuote

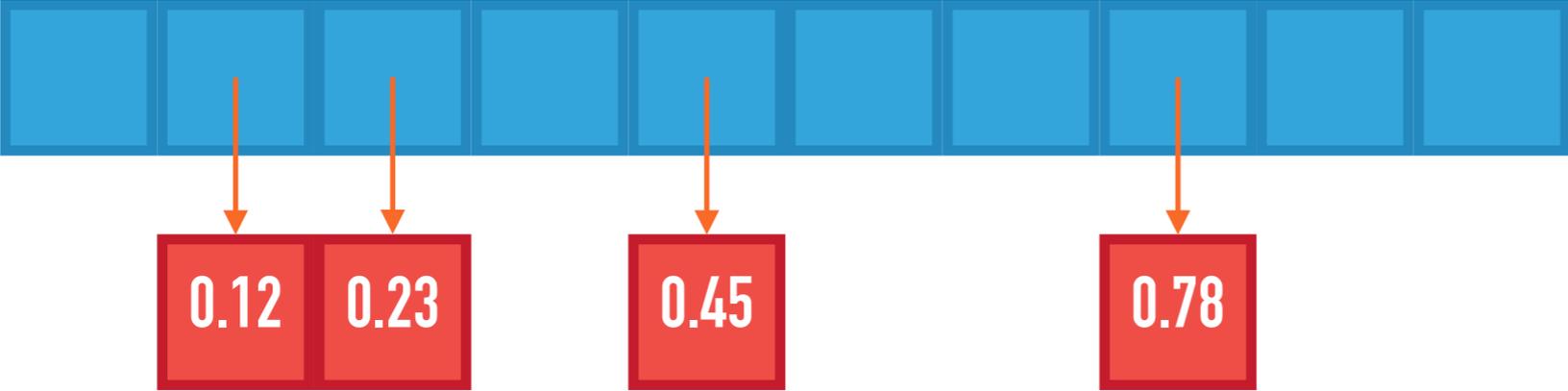


# ORDINAMENTO



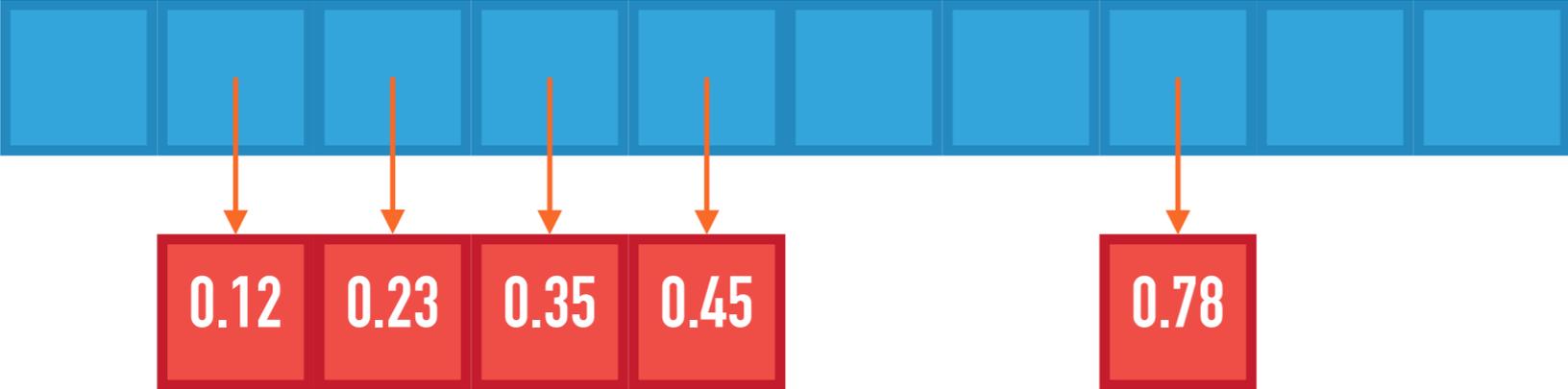
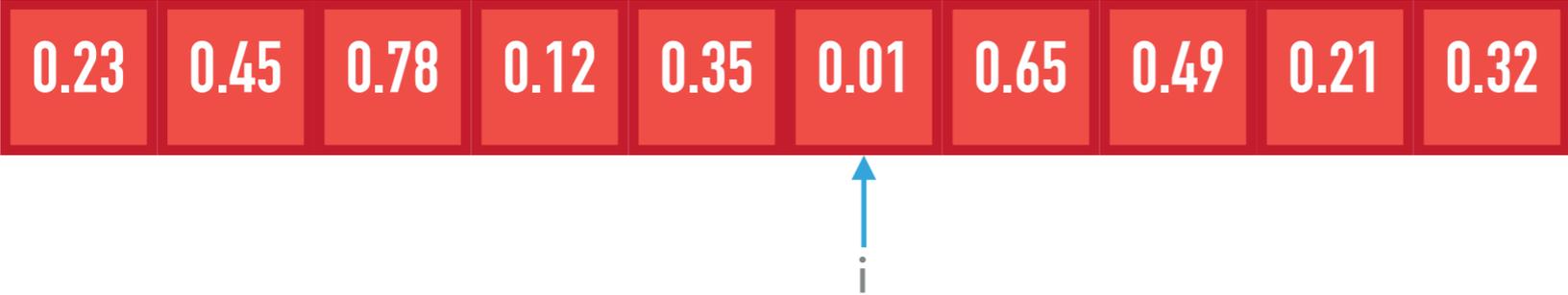
Array di  $n$  liste vuote

# ORDINAMENTO



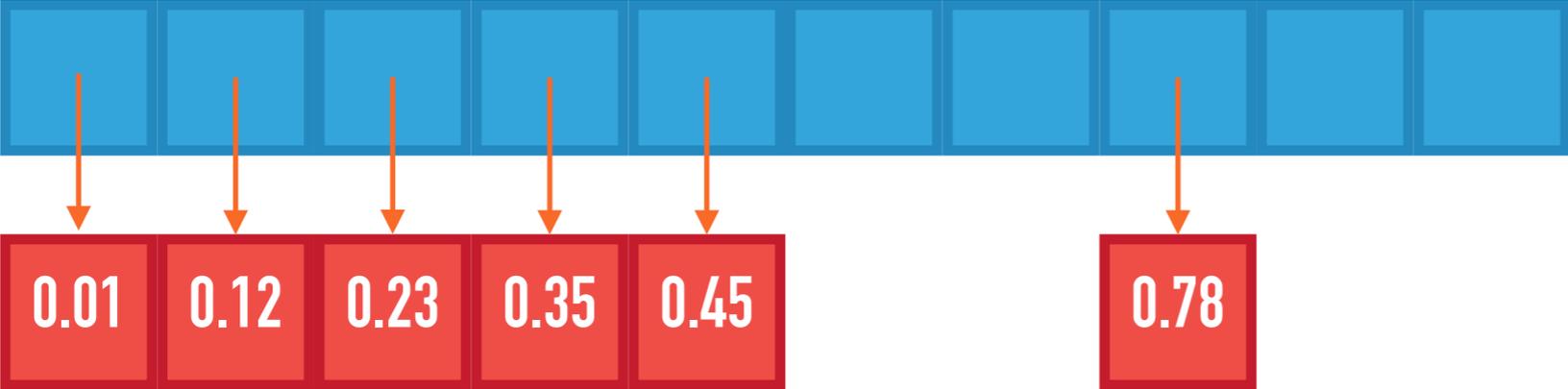
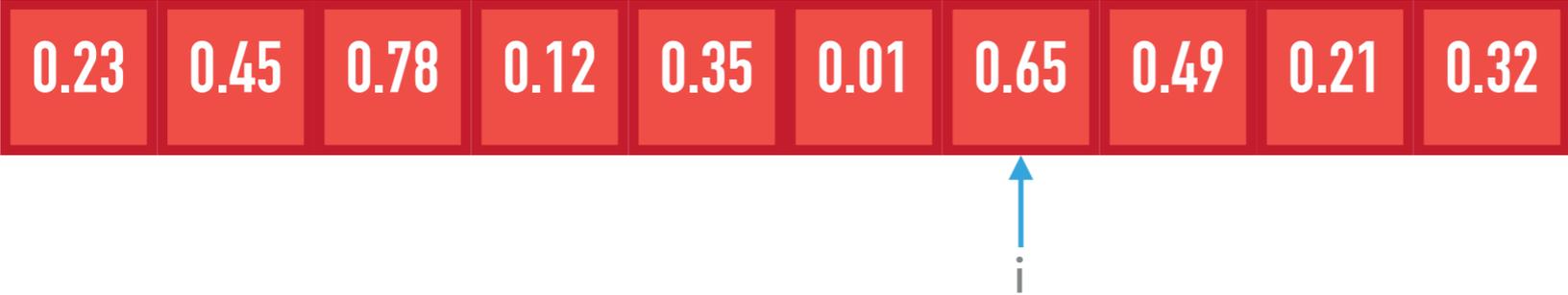
Array di  $n$  liste vuote

# ORDINAMENTO



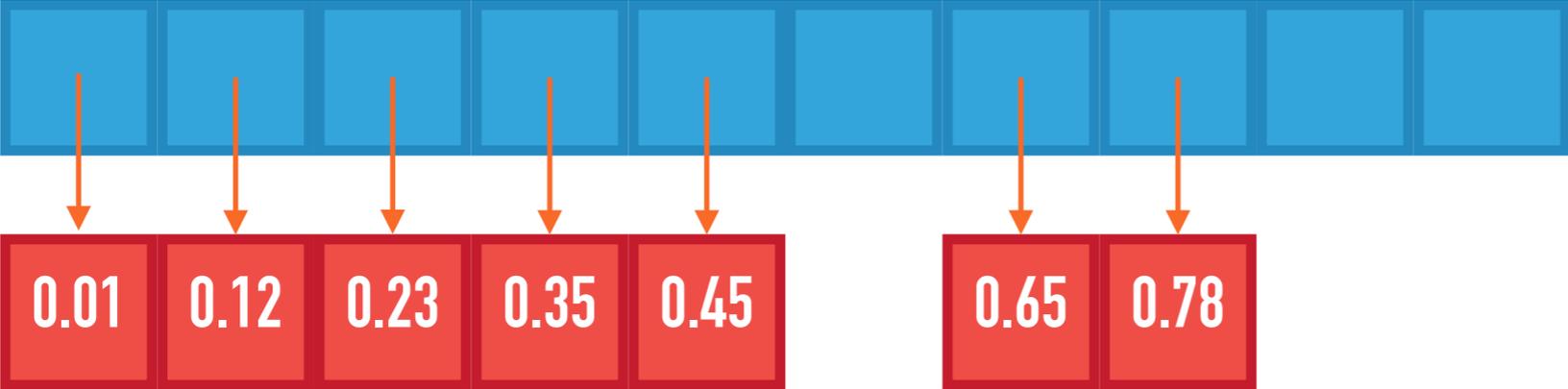
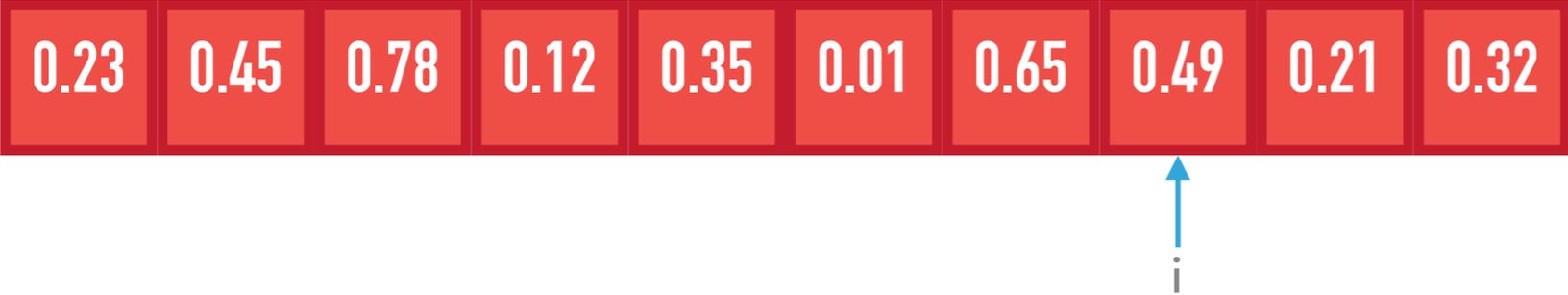
Array di  $n$  liste vuote

# ORDINAMENTO

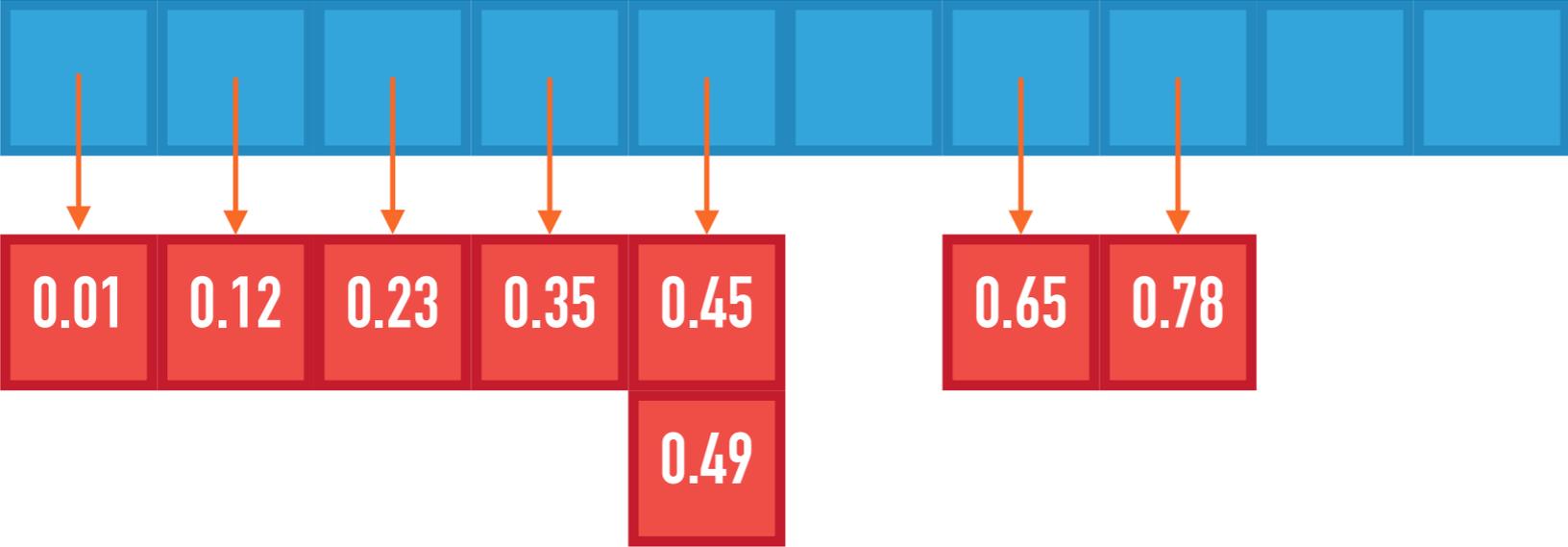
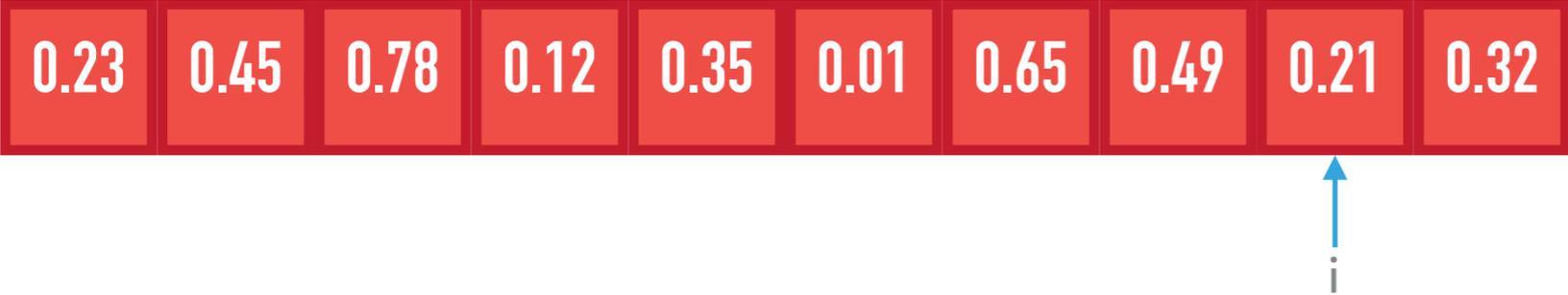


Array di  $n$  liste vuote

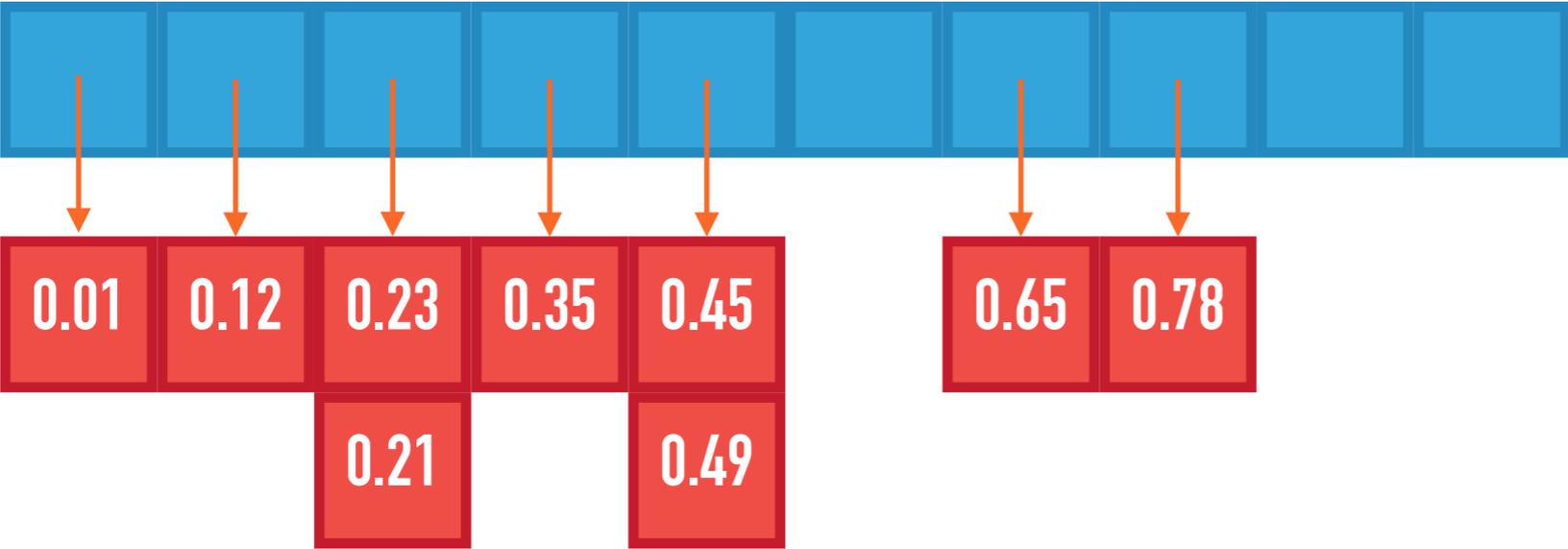
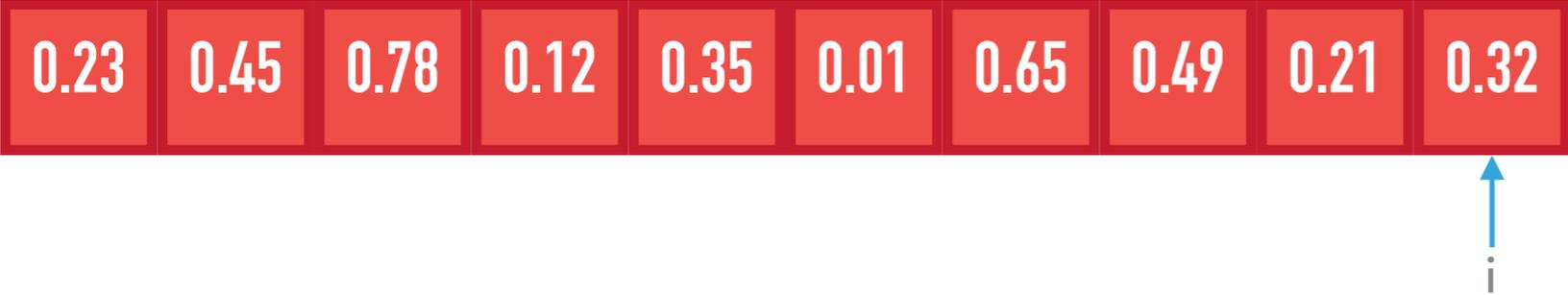
# ORDINAMENTO



# ORDINAMENTO



# ORDINAMENTO



## ORDINAMENTO



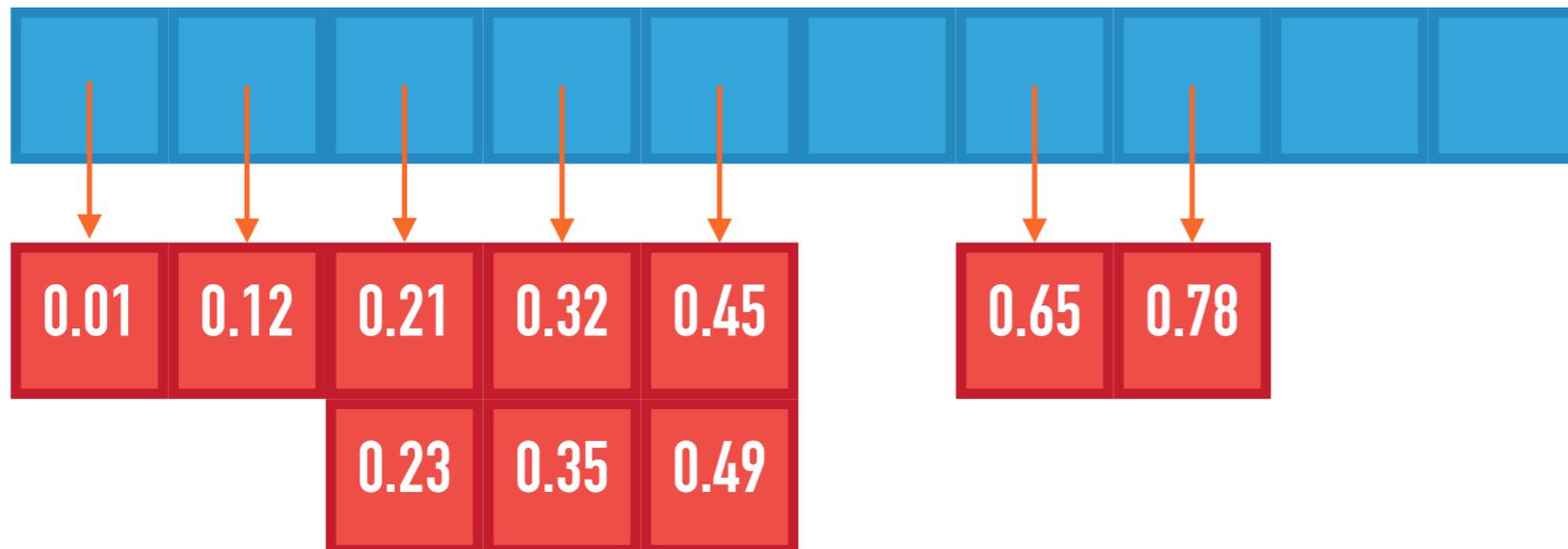
Ora dobbiamo ordinare i singoli bucket usando, per esempio, insertion sort



## ORDINAMENTO



L'ordinamento è rapido perché nella maggior parte dei casi i bucket contengono pochi elementi



Array di  $n$  liste vuote

## ORDINAMENTO



L'ordinamento è rapido perché nella maggior parte dei casi i bucket contengono pochi elementi



Ora passando i bucket da sinistra a destra e in ordine all'interno degli stessi otteniamo l'array ordinato

BUCKET SORT

---

# BUCKET SORT: PSEUDOCODICE

# BUCKET SORT: PSEUDOCODICE

- ▶ Argomenti: A (array)

# BUCKET SORT: PSEUDOCODICE

- ▶ Argomenti: `A` (array)
- ▶ Alloca un array `B` di  $n$  liste vuote

# BUCKET SORT: PSEUDOCODICE

- ▶ Argomenti: `A` (array)
- ▶ Alloca un array `B` di  $n$  liste vuote
- ▶ `for i in range(0, len(A))`

# BUCKET SORT: PSEUDOCODICE

- ▶ Argomenti: `A` (array)
- ▶ Alloca un array `B` di  $n$  liste vuote
- ▶ `for i in range(0, len(A))`
  - ▶ Aggiungi `A[i]` a `B[ $[n \times A[i]]$ ]`

# BUCKET SORT: PSEUDOCODICE

- ▶ Argomenti:  $A$  (array)
- ▶ Alloca un array  $B$  di  $n$  liste vuote
- ▶ for  $i$  in range( $0, \text{len}(A)$ )
  - ▶ Aggiungi  $A[i]$  a  $B[\lfloor n \times A[i] \rfloor]$
- ▶ for  $i$  in range( $0, \text{len}(B)$ )

# BUCKET SORT: PSEUDOCODICE

- ▶ Argomenti: `A` (array)
- ▶ Alloca un array `B` di  $n$  liste vuote
- ▶ `for i in range(0, len(A))`
  - ▶ Aggiungi `A[i]` a `B[ $n \times A[i]$ ]`
- ▶ `for i in range(0, len(B))`
  - ▶ Ordina `B[i]` con insertion sort

# BUCKET SORT: PSEUDOCODICE

- ▶ Argomenti: `A` (array)
- ▶ Alloca un array `B` di  $n$  liste vuote
- ▶ `for i in range(0, len(A))`
  - ▶ Aggiungi `A[i]` a `B[ $n \times A[i]$ ]`
- ▶ `for i in range(0, len(B))`
  - ▶ Ordina `B[i]` con insertion sort
- ▶ Concatena `B[0]`, `B[1]`, ... `B[n-1]`

# BUCKET SORT: PSEUDOCODICE

- ▶ Argomenti: `A` (array)
  - ▶ Alloca un array `B` di  $n$  liste vuote
  - ▶ `for i in range(0, len(A))`
    - ▶ Aggiungi `A[i]` a `B[ $\lfloor n \times A[i] \rfloor$ ]`
  - ▶ `for i in range(0, len(B))`
    - ▶ Ordina `B[i]` con insertion sort
  - ▶ Concatena `B[0], B[1], ... B[n-1]`
- 
- ▶ Senza andare troppo nei dettagli del tempo di calcolo, se la distribuzione è uniforme, il contenuto della maggior parte dei bucket sarà ridotto e quindi l'ordinamento rapido.
  - ▶ In particolare si trova che il tempo atteso è  $\Theta(n)$