

LA RICORSIONE

- Una funzione matematica è definita ***ricorsivamente*** quando nella sua definizione compare un riferimento a se stessa
- La ricorsione consiste nella possibilità di ***definire una funzione in termini di se stessa***
- È basata sul *principio di induzione* matematica:
 - se una proprietà P vale per $n=n_0$  CASO BASE
 - e si può provare che, ***assumendola valida per n***, allora vale per $n+1$allora P vale per ogni $n \geq n_0$

LA RICORSIONE

Operativamente, risolvere un problema con un **approccio ricorsivo** comporta

- di **identificare un “caso base”**, con soluzione nota
- di riuscire a **esprimere la soluzione al caso generico n in termini dello stesso problema in uno o più casi più semplici** ($n-1$, $n-2$, etc.)

LA RICORSIONE: ESEMPIO

Esempio: il fattoriale di un numero

fact(n) = n!

n! : Z → N

n! vale 1 **se n ≤ 0**

n! vale n*(n-1) ! **se n > 0**

Codifica:

```
int fact(int n) {  
    if (n<=0) return 1;  
    else return n*fact(n-1);  
}
```

LA RICORSIONE: ESEMPIO

Servitore & Cliente:

```
int fact(int n) {  
    if (n<=0) return 1;  
    else return n*fact(n-1);  
}  
  
int main() {  
    int fz,z = 5;  
    fz = fact(z-2);  
}
```

Si valuta l'espressione che costituisce il parametro attuale (nell'environment del main) e si trasmette alla funzione fact() una copia del valore così ottenuto (3)

fact(3) effettuerà poi analogamente una nuova chiamata di funzione fact(2)

LA RICORSIONE: ESEMPIO

Servitore & Cliente:

```
int fact(int n) {  
    if (n<=0) return 1;  
    else return n*fact(n-1);  
}  
  
int main() {  
    int fz,z = 5;  
    fz = fact(z-2);  
}
```

Analogamente, `fact(2)` effettua una nuova chiamata di funzione. *n-1 nell'environment di fact() vale 1 quindi viene chiamata fact(1)*

E ancora, analogamente, per `fact(0)`

LA RICORSIONE: ESEMPIO

Servitore & Cliente:

```
int fact(int n) {  
    if (n<=0) return 1;  
    else return n*fact(n-1);  
}  
  
int main() {  
    int fz,z = 5;  
    fz = fact(z-2);  
}
```

Il nuovo servitore lega il parametro n a 0. *La condizione $n \leq 0$ è vera e la funzione fact(0) torna come risultato 1 e termina*

LA RICORSIONE: ESEMPIO

Servitore & Cliente:

```
int fact(int n) {  
    if (n<=0) return 1;  
    else return n*fact(n-1);  
}  
  
int main() {  
    int fz,z = 5;  
    fz = fact(z-2);  
}
```

*Il controllo torna al servitore precedente fact(1) che può valutare l'espressione $n * 1$ ottenendo come risultato 1 e terminando*

E analogamente per fact(2) e fact(3)

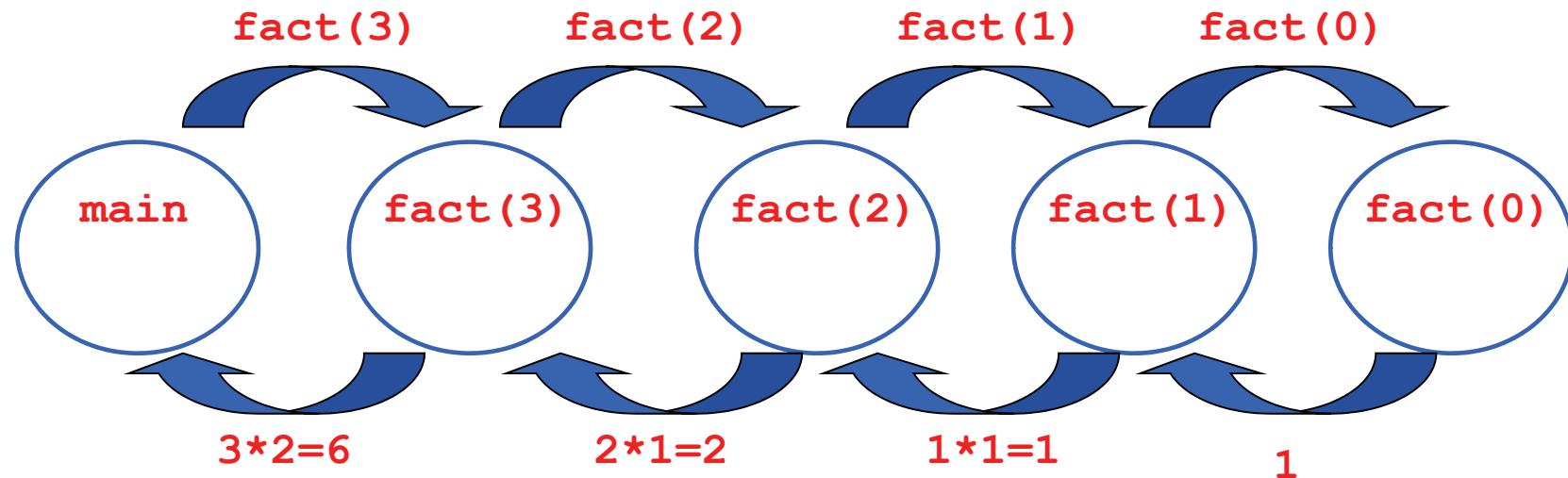
LA RICORSIONE: ESEMPIO

Servitore & Cliente:

```
int fact(int n) {  
    if (n<=0) return 1;  
    else return n*fact(n-1);  
}  
  
int main() {  
    int fz,z = 5;  
    fz = fact(z-2);  
}
```

il controllo passa infine al main che assegna a fz il valore 6

LA RICORSIONE: ESEMPIO



main

$\text{fact}(3) = 3 * \text{fact}(2) = 2 * \text{fact}(1) = 1 * \text{fact}(0)$

Cliente di
fact(3)

Cliente di
fact(2)
Servitore
del main

Cliente di
fact(1)
Servitore
di fact(3)

Cliente di
fact(0)
Servitore
di fact(2)

Servitore
di fact(1)

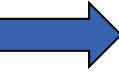
LA RICORSIONE: ESEMPIO

Problema:

calcolare la somma dei primi N interi

Specifica:

Considera la somma $1+2+3+\dots+(N-1)+N$ come
composta di due termini:

- $(1+2+3+\dots+(N-1))$ 
- N  **Valore noto**

Il primo termine non è altro che lo stesso problema in un caso più semplice: calcolare la somma dei primi N-1 interi

Esiste un caso banale ovvio: CASO BASE

- la somma fino a 1 vale 1

LA RICORSIONE: ESEMPIO

Problema:
calcolare la somma dei primi N interi

Algoritmo ricorsivo

Se N vale 1 allora la somma vale 1

altrimenti la somma vale $N +$ il risultato della somma dei primi $N-1$ interi

LA RICORSIONE: ESEMPIO

Problema:

calcolare la somma dei primi N interi

Codifica:

```
int sommaFinoA(int n) {  
    if (n==1) return 1;  
    else return sommaFinoA(n-1)+n;  
}
```

LA RICORSIONE: ESEMPIO

Problema:

calcolare l'N-esimo numero di Fibonacci

$$\text{fib}(n) = \begin{cases} 0, & \text{se } n=0 \\ 1, & \text{se } n=1 \\ \text{fib}(n-1) + \text{fib}(n-2), & \text{altrimenti} \end{cases}$$

LA RICORSIONE: ESEMPIO

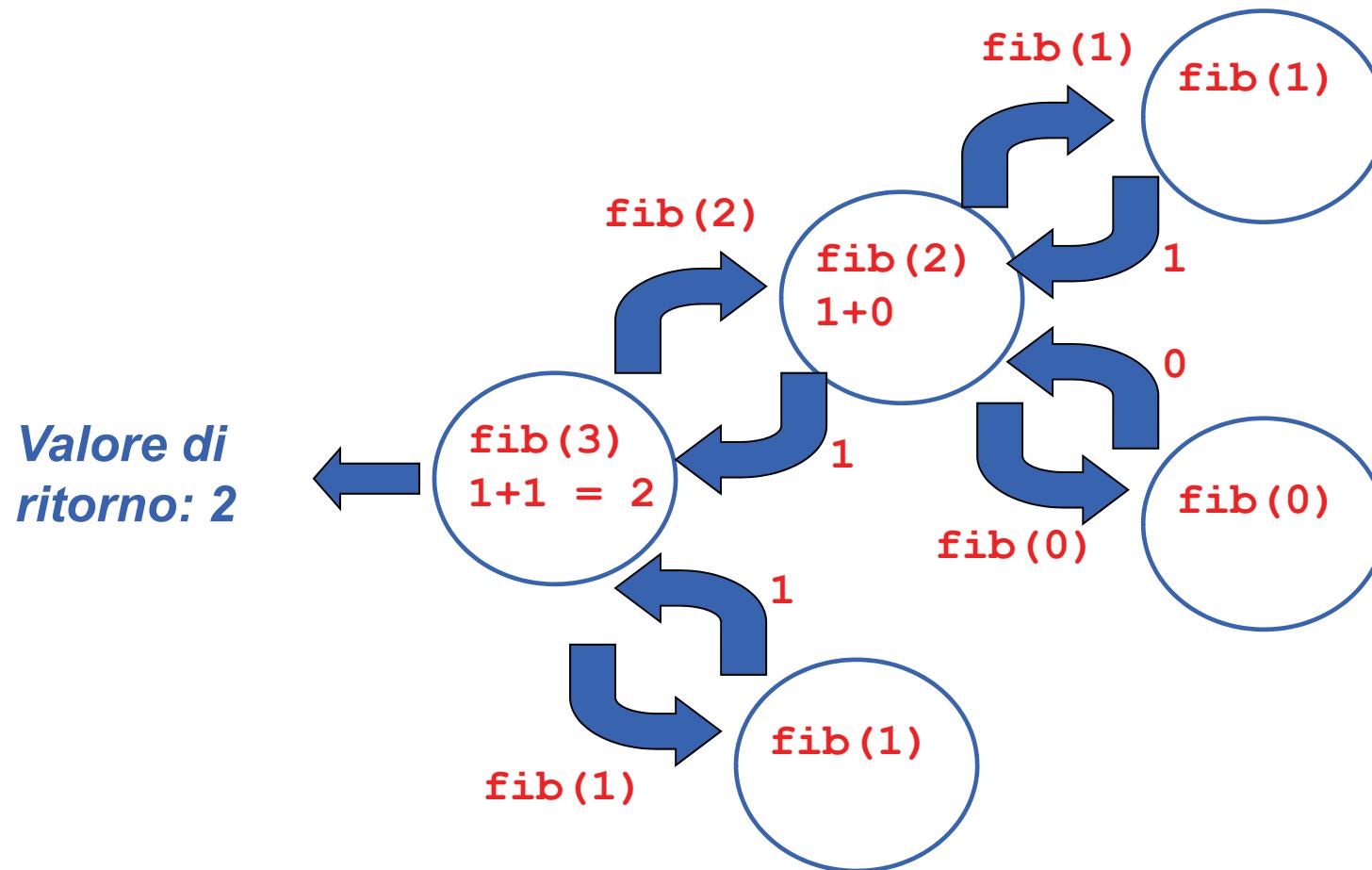
Problema:
calcolare l'N-esimo numero di Fibonacci

Codifica:

```
unsigned fibonacci(unsigned n) {  
    if (n<2) return n;  
    else return fibonacci(n-1)+fibonacci(n-2);  
}
```

*Ricorsione non lineare: ogni invocazione
del servitore causa due nuove chiamate al
servitore medesimo*

RICORSIONE NON LINEARE: ESEMPIO



UNA RIFLESSIONE

Negli esempi visti finora si inizia a sintetizzare il risultato
SOLO DOPO che si sono aperte tutte le chiamate, “*a ritroso*”, mentre le chiamate si chiudono

Le chiamate ricorsive decompongono via via il problema, ma non calcolano nulla

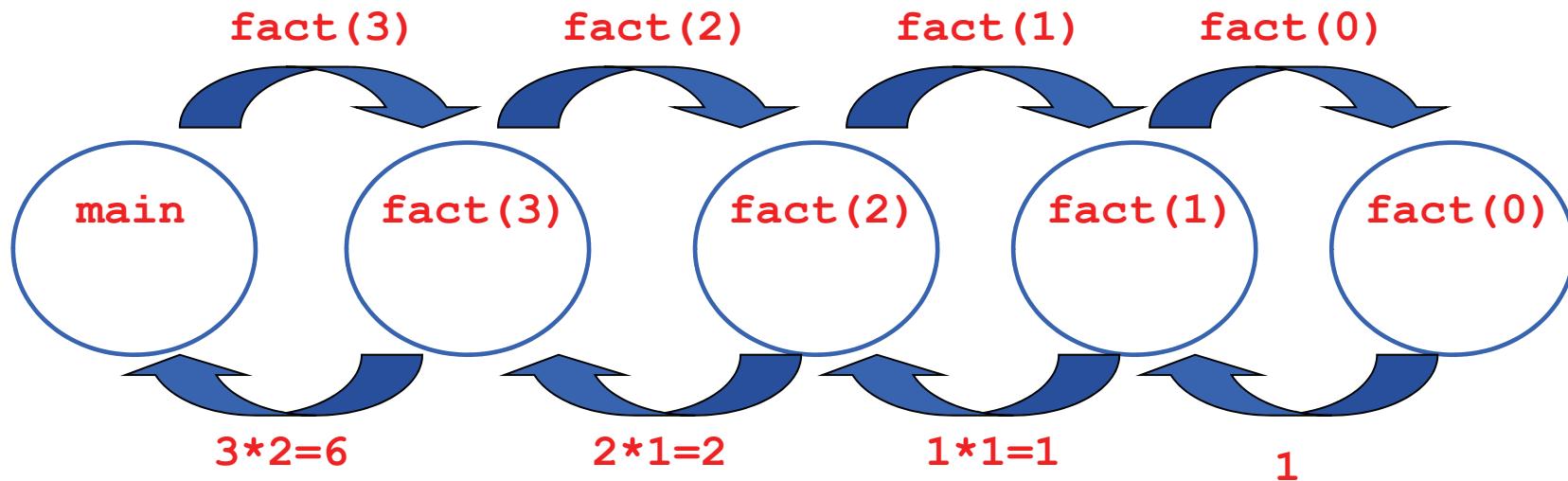
Il risultato viene sintetizzato *a partire dalla fine*, perché prima occorre arrivare al caso “banale”:

- il caso “banale” fornisce il valore di partenza
- poi si sintetizzano, “a ritroso”, i successivi risultati parziali



Processo computazionale effettivamente ricorsivo

LA RICORSIONE



PASSI:

- 1) **fact(3)** chiama **fact(2)** passandogli il controllo
- 2) **fact(2)** calcola il fattoriale di 2 e termina restituendo 2
- 3) **fact(3)** riprende il controllo ed effettua la moltiplicazione $3*2$
- 4) termina anche **fact(3)** e torna il controllo al **main**

PROCESSO COMPUTAZIONALE ITERATIVO

- In questo caso il risultato viene sintetizzato “*in avanti*”
- Ogni processo computazionale che computi “in avanti”, per accumulo, costituisce una **ITERAZIONE**, ossia è un *processo computazionale iterativo*
- La caratteristica fondamentale di un **processo computazionale ITERATIVO** è che ***a ogni passo è disponibile un risultato parziale***
 - dopo k passi, si ha a disposizione il risultato parziale relativo al caso k
 - questo ***non è vero nei processi computazionali ricorsivi***, in cui nulla è disponibile fino al caso elementare

FATTORIALE ITERATIVO

Definizione:

$$n! = 1 * 2 * 3 * \dots * n$$

Detto $v_k = 1 * 2 * 3 * \dots * k$:

$$1! = v_1 = 1$$

$$(k+1)! = v_{k+1} = (k+1) * v_k \quad \text{per } k \geq 1$$

$$n! = v_n \quad \text{per } k=n$$

FATTORIALE ITERATIVO

Costruiamo ora una funzione che calcola il fattoriale in modo iterativo

```
int fact(int n) {  
    int i=1;  
    int F=1; /*inizializzazione del fattoriale*/  
    while (i <= n)  
    { F=F*i;  
        i=i+1; }  
    return F;  
}
```

DIFFERENZA CON LA VERSIONE RICORSIVA: ad ogni passo viene accumulato un risultato intermedio

La variabile F accumula risultati intermedi: se n = 3 inizialmente F=1, poi al primo ciclo F=1, poi al secondo ciclo F assume il valore 2. Infine all'ultimo ciclo i=3 e F assume il valore 6

- Al primo passo F accumula il fattoriale di 1
- Al secondo passo F accumula il fattoriale di 2
- Al passo i-esimo F accumula il fattoriale di i

FUNZIONI: IL MODELLO A RUN-TIME

Ogni volta che viene invocata una funzione:

- si crea una ***nuova attivazione (istanza)*** del servitore
- viene ***allocata la memoria*** per i parametri e per le variabili locali
- si effettua il passaggio dei parametri
- si trasferisce il controllo al servitore
- si esegue il codice della funzione

IL MODELLO A RUN-TIME: ENVIRONMENT

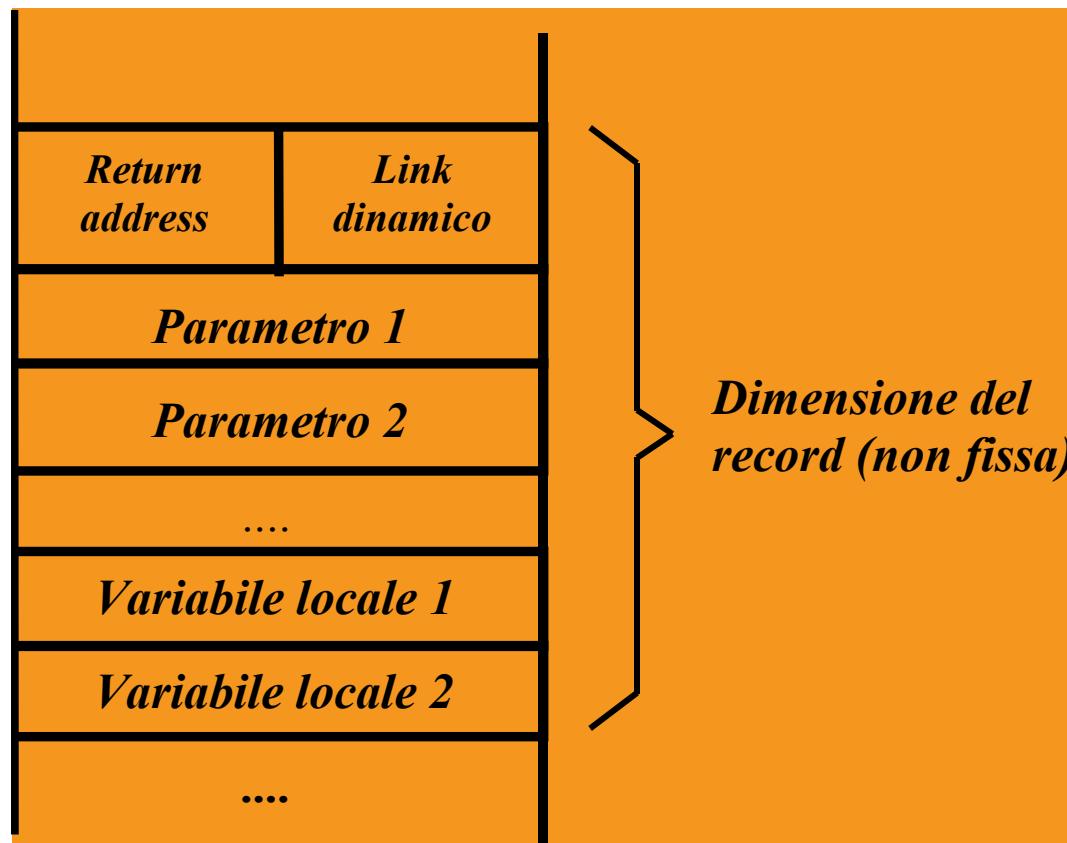
- La definizione di una funzione introduce un ***nuovo binding*** nell'environment in cui la funzione è definita
- Al momento dell'*invocazione*, viene creata una **struttura dati che contiene i *binding* dei parametri e degli identificatori definiti localmente alla funzione detta *RECORD DI ATTIVAZIONE***

RECORD DI ATTIVAZIONE

È il “*mondo della funzione*”: **contiene tutto ciò che ne caratterizza l'esistenza**

- i **parametri ricevuti**
- le **variabili locali**
- l'**indirizzo di ritorno (Return Address RA)** che indica il punto a cui tornare (nel codice del cliente) al termine della funzione, per permettere al cliente di proseguire una volta che la funzione termina
- un **collegamento al record di attivazione del cliente (Dynamic Link DL)**

RECORD DI ATTIVAZIONE



RECORD DI ATTIVAZIONE

- Rappresenta il “*mondo della funzione*”: *nasce e muore con essa*
 - è **creato** al momento della **invocazione** di una funzione
 - **permane** per tutto il tempo in cui la funzione è in **esecuzione**
 - è distrutto (**deallocato**) al termine dell'esecuzione della funzione stessa
- Ad **ogni chiamata** di funzione viene **creato un nuovo record**, specifico per *quella chiamata di quella funzione*
- La dimensione del record di attivazione
 - varia da una funzione all'altra
 - *per una data funzione, è fissa e calcolabile a priori*

RECORD DI ATTIVAZIONE

Funzioni che chiamano altre funzioni danno luogo a una ***sequenza di record di attivazione***

- allocati secondo l'ordine delle chiamate
- deallocati in ordine inverso

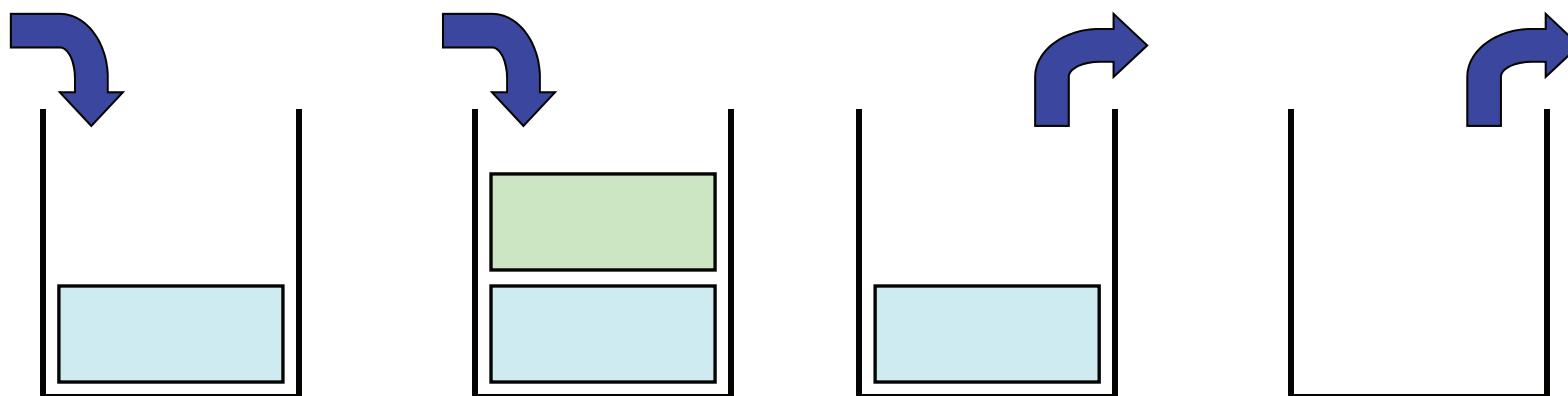
La sequenza dei link dinamici costituisce la cosiddetta *catena dinamica*, che rappresenta *la storia delle attivazioni (“chi ha chiamato chi”)*

RECORD DI ATTIVAZIONE

Per catturare la semantica delle chiamate annidate (una funzione che chiama un'altra funzione che...), l'area di memoria in cui vengono allocati i record di attivazione deve essere gestita come una pila

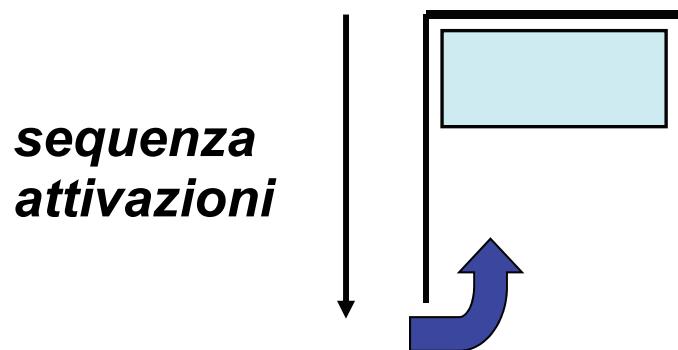
STACK

Una struttura dati gestita con politica LIFO (Last In, First Out - l'ultimo a entrare è il primo a uscire)

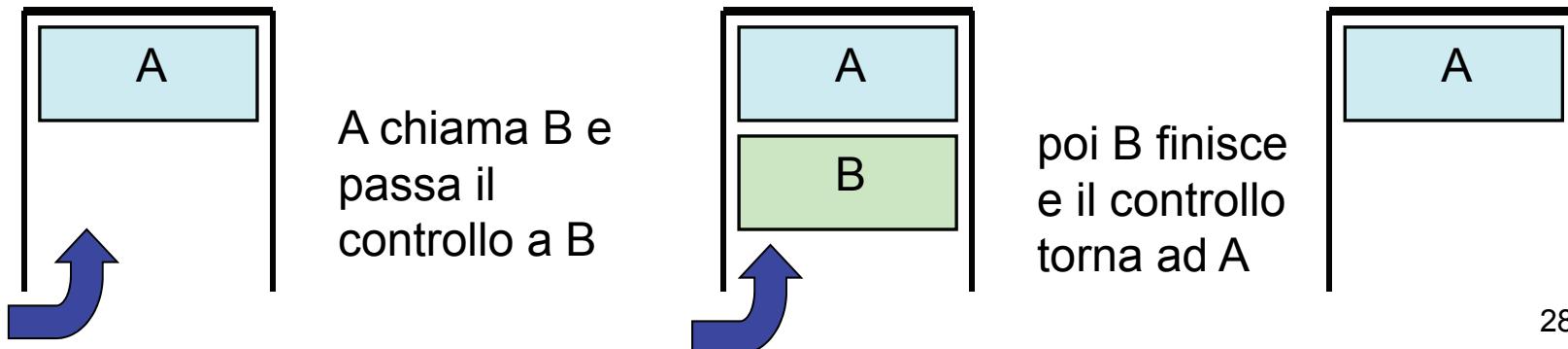


RECORD DI ATTIVAZIONE

Normalmente lo STACK dei record di attivazione si disegna nel modo seguente



Quindi, se la funzione A chiama la funzione B lo stack evolve nel modo seguente



ESEMPIO DI CHIAMATE ANNIDATE

Programma:

```
int R(int A) { return A+1; }  
int Q(int x) { return R(x); }  
int P(void) { int a=10; return Q(a); }  
int main() { int x = P(); }
```

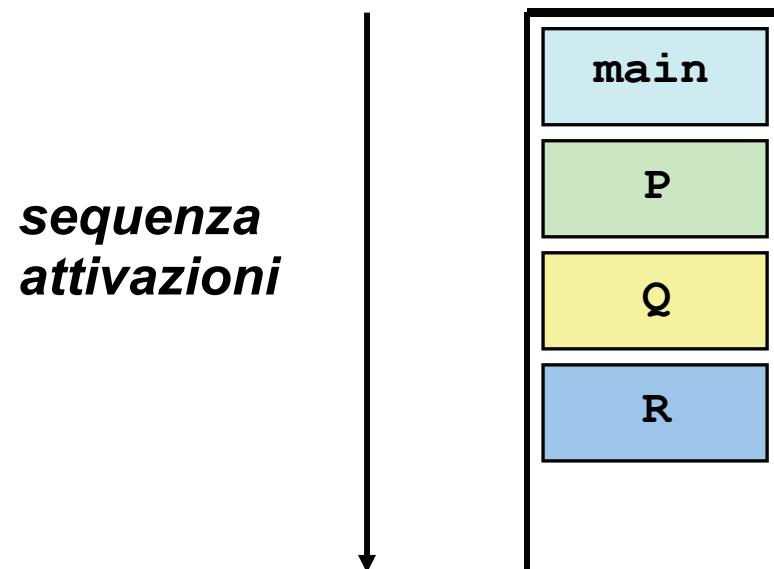
Sequenza chiamate:

SO → **main** → **P()** → **Q()** → **R()**

ESEMPIO DI CHIAMATE ANNIDATE

Sequenza chiamate:

SO → **main** → P() → Q() → R()



ESEMPIO: FATTORIALE

```
int fact(int n) {  
    if (n<=0) return 1  
    else return n*fact(n-1);  
}  
  
int main(){  
    int x, y;  
    x = 2;  
    y = fact(x);  
}
```

NOTA: anche `main()`
è una funzione

ESEMPIO: FATTORIALE

Situazione all'inizio
dell'esecuzione del
`main()`



`main()`
chiama
`fact(2)`



`fact(2)`
chiama
`fact(1)`

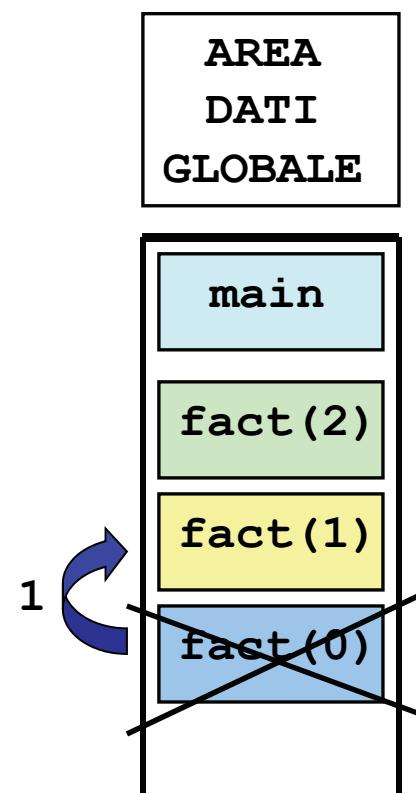


`fact(1)`
chiama
`fact(0)`

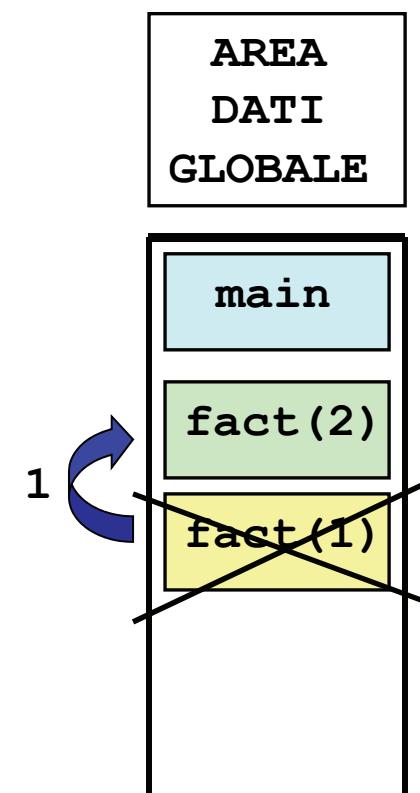


ESEMPIO: FATTORIALE

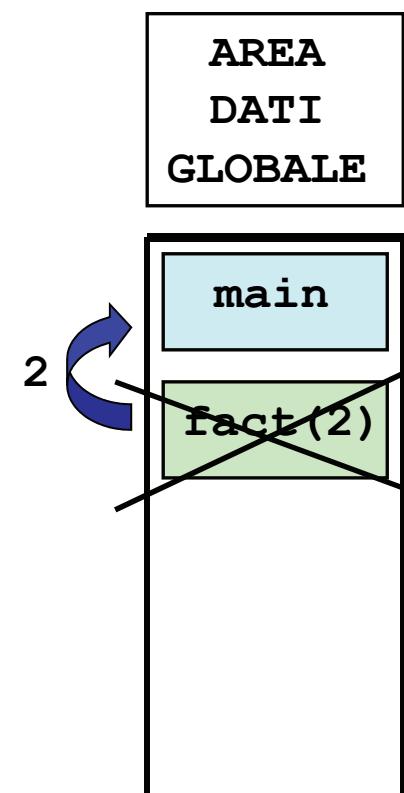
`fact(0)` termina restituendo il valore 1. Il controllo torna a `fact(1)`



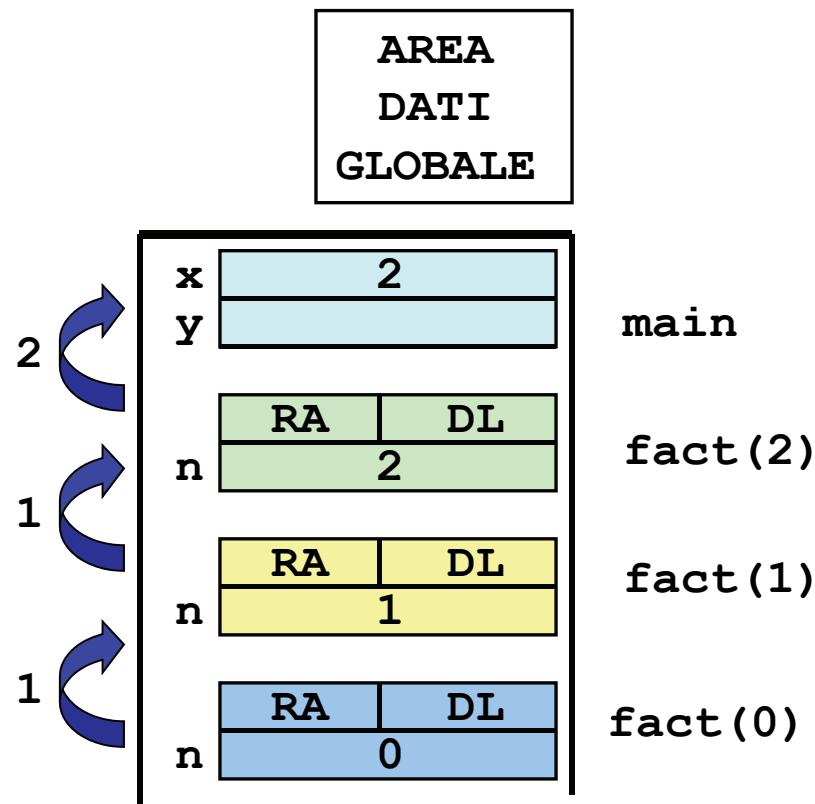
`fact(1)` effettua la moltiplicazione e termina restituendo il valore 1. Il controllo torna a `fact(2)`



`fact(1)` effettua la moltiplicazione e termina restituendo il valore 2. Il controllo torna al `main()`



RECORD DI ATTIVAZIONE IN DETTAGLIO



RICORSIONE vs. ITERAZIONE

A volte processi computazionali *ricorsivi* rispecchiano meglio il problema e/o la **soluzione del problema** (ad es. *strutture dati ricorsive* quali liste - le vedremo nel dettaglio più avanti...)

MA:

nei processi computazionali *ricorsivi* ogni funzione che effettua una chiamata ricorsiva deve **aspettare il risultato del servitore** per **effettuare operazioni su questo**; solo **in seguito può terminare**

→ **Maggiore occupazione di memoria per record attivazione** a meno di “ottimizzazioni” da parte del compilatore (*tail recursion optimization* non presente in C e Java, ma utilizzata in Prolog)