PROGRAMMAZIONE 2
20. Funzioni e procedure

Breve storia dei sotto-programmi

- **Astrazione di una sequenza di istruzioni**
  - un frammento di programma (sequenza di istruzioni) risulta utile in diversi punti del programma
  - riduce il "costo della programmazione" se si può dare un nome al frammento e viene inserito automaticamente il codice del frammento ogni qualvolta nel "programma principale" c'è un'occorrenza del nome
    - ✓ **macro** e **macro-espansione**

Macro in C

```
#define MULT(x, y) x * y
```

```
int z = MULT(3 + 2, 4 + 2);
```

```
int z = 3 + 2 * 4 + 2;
// 2 * 4 valutato prima
```

Cosa viene assegnato a z?

13!!!

Code in-lining

Breve storia dei sotto-programmi

- **Astrazione sul controllo**: si riduce anche l'occupazione di memoria se esiste un meccanismo che permette al programma principale
  - di trasferire il controllo a una unica copia del sotto-programma memorizzata separatamente
  - di riprendere il controllo quando l'esecuzione del frammento è terminata
  - ed è un meccanismo supportato direttamente dall'hardware (**codice rientrante**)

Breve storia dei sotto-programmi

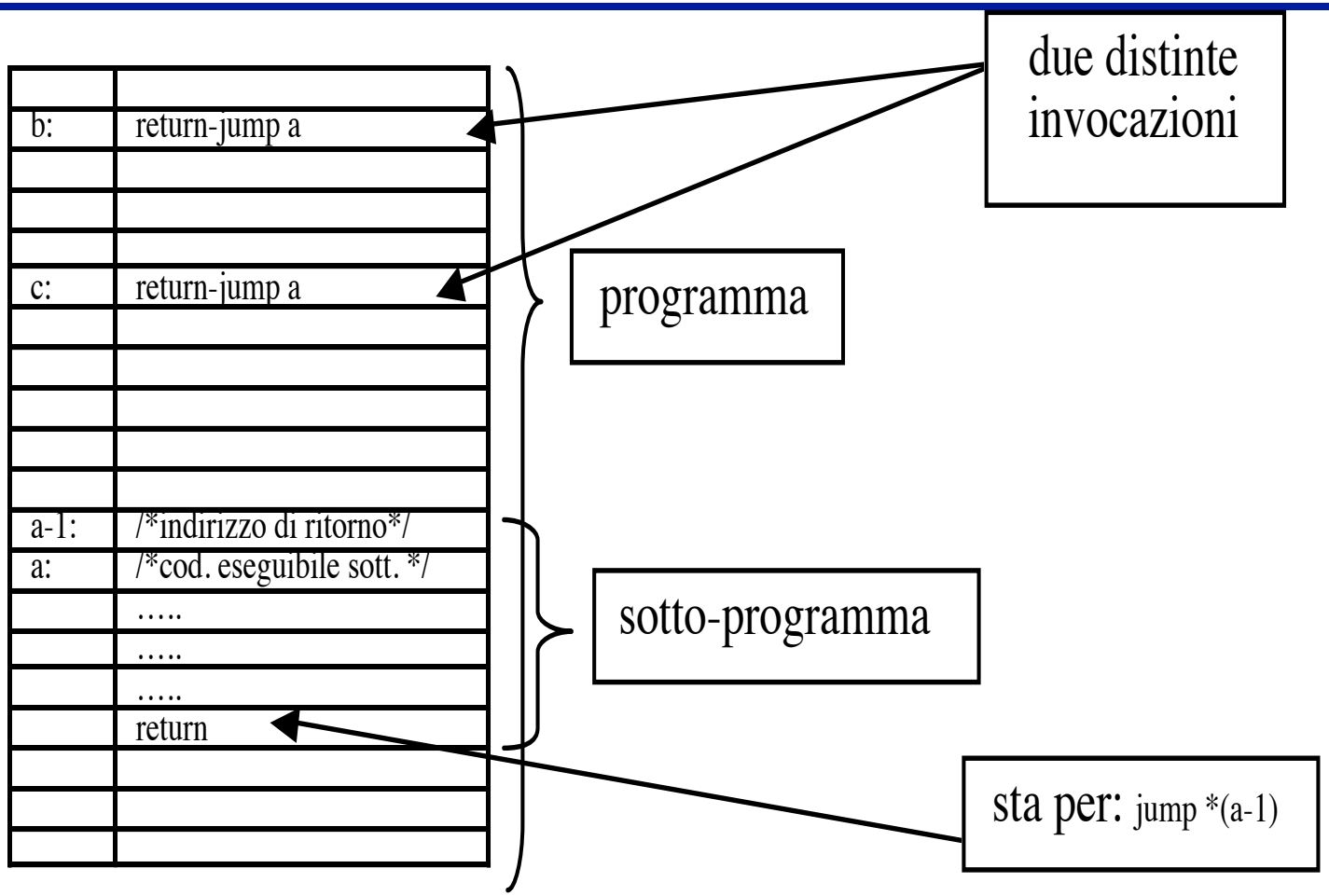
- Ancora meglio se permettiamo **astrazione via parametrizzazione**
  - astraendo dall'identità di alcuni dati
  - la cosa è possibile anche con le macro e il codice rientrante
    - ✓macro-espansione con rimpiazzamento di entità diverse
    - ✓associazione di informazioni variabili al codice rientrante

Cosa fornisce l'hardware?

- Primitiva di **return jump** con opportune strutture ausiliarie
- Viene eseguita (nel programma chiamante) l'istruzione

  return jump a

  memorizzata nella cella **b**
  - il controllo è trasferito alla cella **a** (entry point della sub-routine)
  - l'indirizzo dell'istruzione successiva del chiamante (**b + 1**) viene memorizzato in qualche posto noto, per esempio nella cella (**a - 1**) (**punto di ritorno**)
- quando nella sub-routine si esegue una operazione di return
  - il controllo ritorna all'istruzione (del programma chiamante) memorizzata nel punto di ritorno


b: return-jump a
c: return-jump a
a-1: /*indirizzo di ritorno*/
a: /*cod. eseguibile sott. */
…..
…..
…..
return
due distinte invocazioni
programma
sotto-programma
sta per: jump *(a-1)

Archeologia: FORTRAN

- Una **sub-routine** è un pezzo di codice compilato, al quale sono associati
  - una cella destinata a contenere (a tempo di esecuzione) i punti di ritorno relativi alle chiamate
  - alcune celle destinate a contenere i valori degli eventuali parametri
  - l'ambiente locale è statico

Semantica della sub-routine *à la* FORTRAN

- Si può definire facilmente attraverso la ***copy rule statica*** ("**macro-espansione**")
  - ogni chiamata di sotto-programma è *testualmente rimpiazzata* da una copia del codice
    - ✓facendo qualcosa per i parametri
    - ✓ricordandosi di eseguire le dichiarazioni una sola volta
- Il sotto-programma non è semanticamente qualcosa di nuovo: è solo un (importante) strumento metodologico (astrazione!)

Semantica della sub-routine *à la* FORTRAN

- Osservazione: non è compatibile con la ricorsione
  - la macro-espansione darebbe origine ad un programma infinito
  - l'implementazione *à la* FORTRAN (con un solo punto di ritorno) non permetterebbe di gestire più attivazioni presenti allo stesso tempo
- Il fatto che le sub-routine FORTRAN siano concettualmente statiche fa sì che
  - non esista di fatto il concetto di attivazione
  - l'**ambiente locale** sia necessariamente **statico**

Attivazione

- Se ragioniamo in termini di attivazioni, la semantica può essere definita da una ***copy rule***, ma ***dinamica***
  - ogni chiamata di sotto-programma è ***rimpiazzata a tempo di esecuzione*** da una copia del codice
- Il sotto-programma è ora semanticamente qualcosa di nuovo
- Ragionare in termini di attivazioni
  - rende naturale la ricorsione
  - porta ad adottare la regola dell'**ambiente locale dinamico**

Le strutture di implementazione

- Invece delle informazioni **staticamente** associate al codice compilato di FORTRAN
  - punto di ritorno, parametri, ambiente e memoria locale

  si usano i **record di attivazione (frame)**
  - contenenti le stesse informazioni

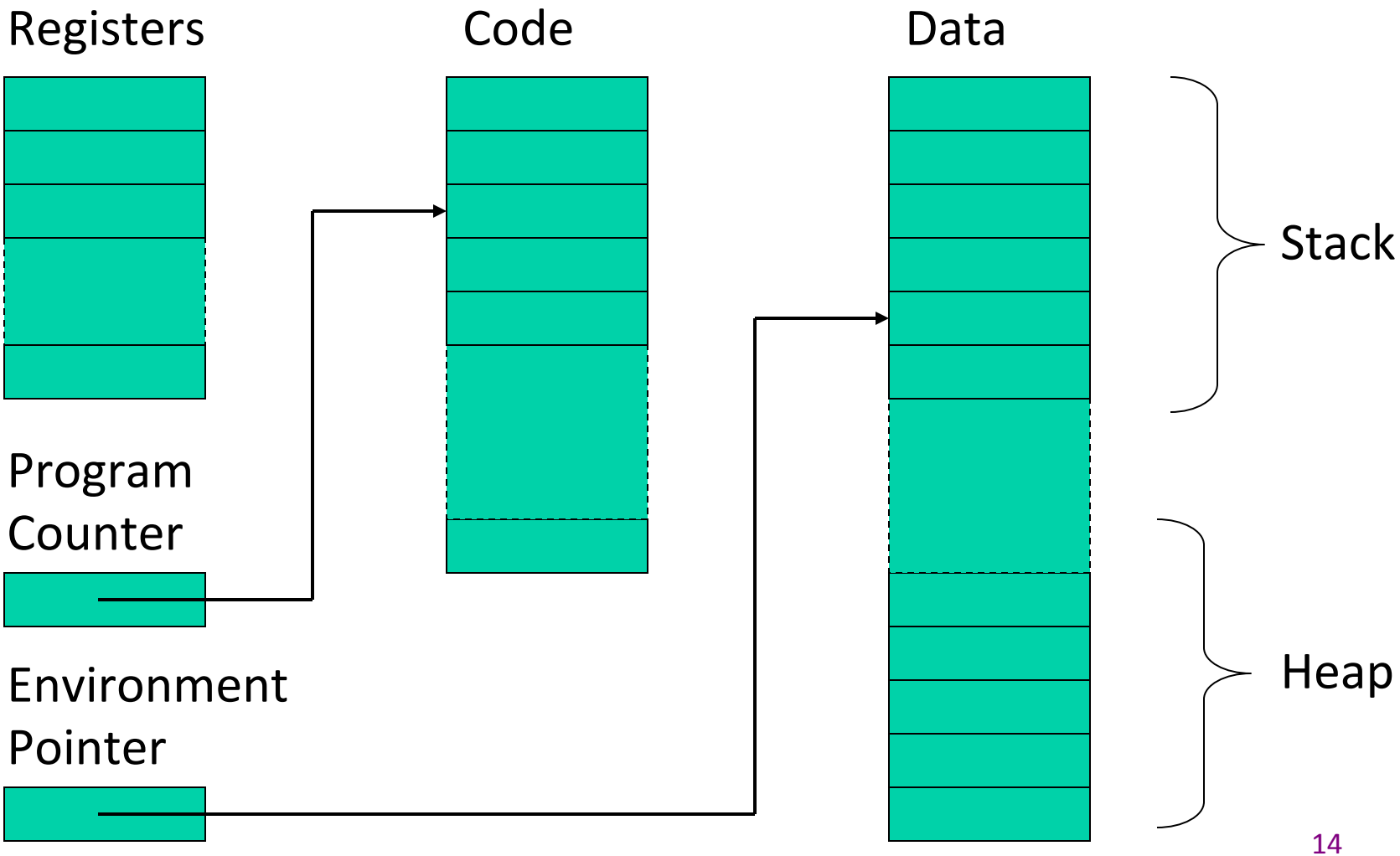
  ma associati dinamicamente alle varie chiamate di sotto-programmi
- Dato che l'accesso ai sotto-programmi segue una politica LIFO
  - l'ultima attivazione creata nel tempo è la prima che ritorna

  possiamo organizzare i record di attivazione in una pila

Cosa è un vero sotto-programma

- ***Astrazione procedurale*** (operazioni)
  - astrazione di una sequenza di istruzioni
  - astrazione via parametrizzazione
- ***Luogo di controllo*** per la gestione dell'ambiente e della memoria
  - aspetto interessante dei linguaggi, intorno al quale ruotano decisioni semantiche importanti
  - binding: statico o dinamico

Modello di macchina hw



Meccanismo call/return di sotto-programma

- Chiamante
  - crea una istanza del record di attivazione
  - salva lo stato dell'unità corrente di esecuzione
  - effettua il passaggio dei parametri
  - inserisce il punto di ritorno
  - trasferisce il controllo al chiamato
- Chiamato (prologo)
  - salva il valore corrente di Environment Pointer (EP) e lo memorizza nel link dinamico
  - definisce il nuovo valore di EP
  - alloca le variabili locali

Meccanismo call/return di sottoprogramma

- Chiamato (epilogo)
  - eventuale passaggio di valori (dipende dalla modalità di passaggio dei parametri - lo vedremo dopo)
  - il valore calcolato dalla funzione viene trasferito al chiamante
  - ripristina le informazioni di controllo (il vecchio valore di EP salvato come link dinamico)
  - ripristina lo stato di esecuzione del chiamante
  - trasferisce il controllo al chiamante

Come si realizza?

- Partiamo dalla cosa più semplice: i blocchi
  - sostanzialmente, procedure senza nome e senza parametri

In-line block

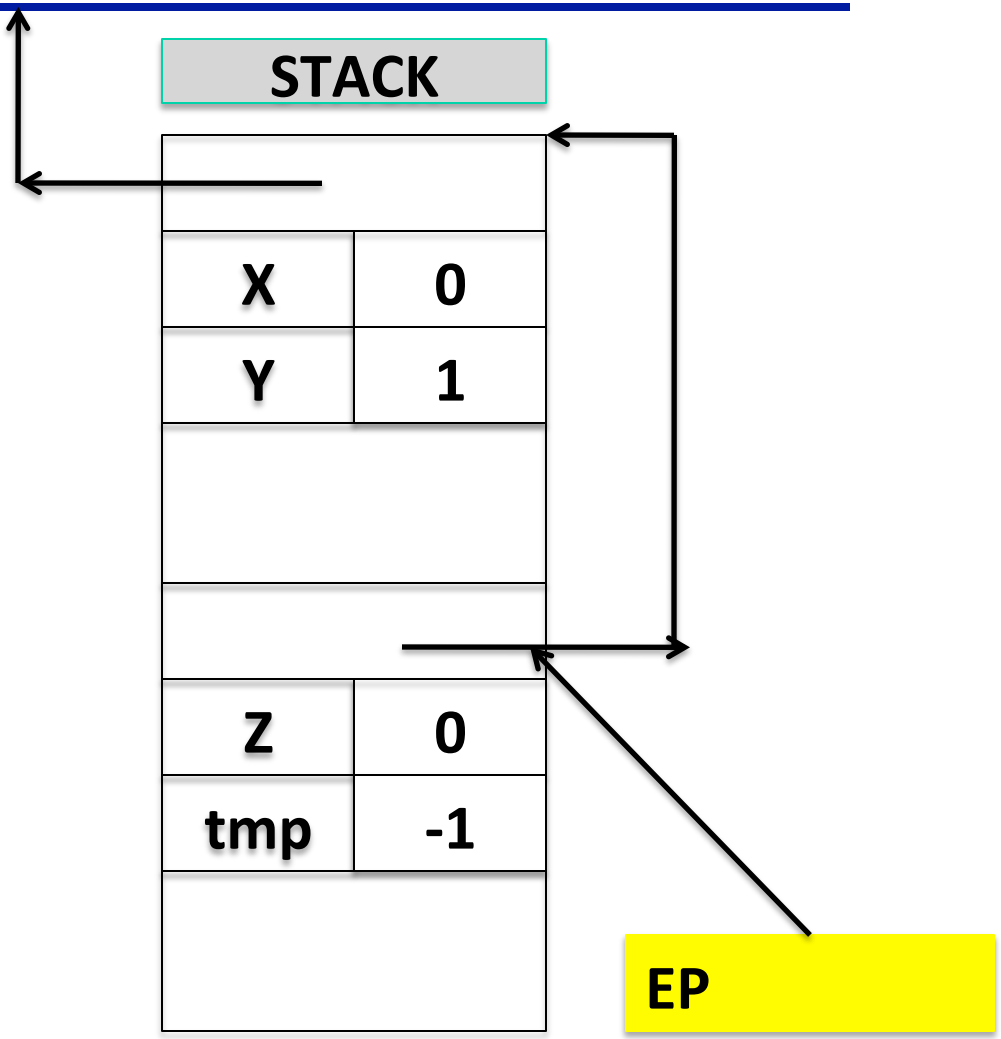
- Record di attivazione – Activation Record
  - tipo di dati di sistema memorizzato nello stack
  - gestisce l'ambiente locale
- Esempio

```
{ int x = 0;
  int y = x+1;
    {  int z = (x+y)*(x-y);
    };
};
```

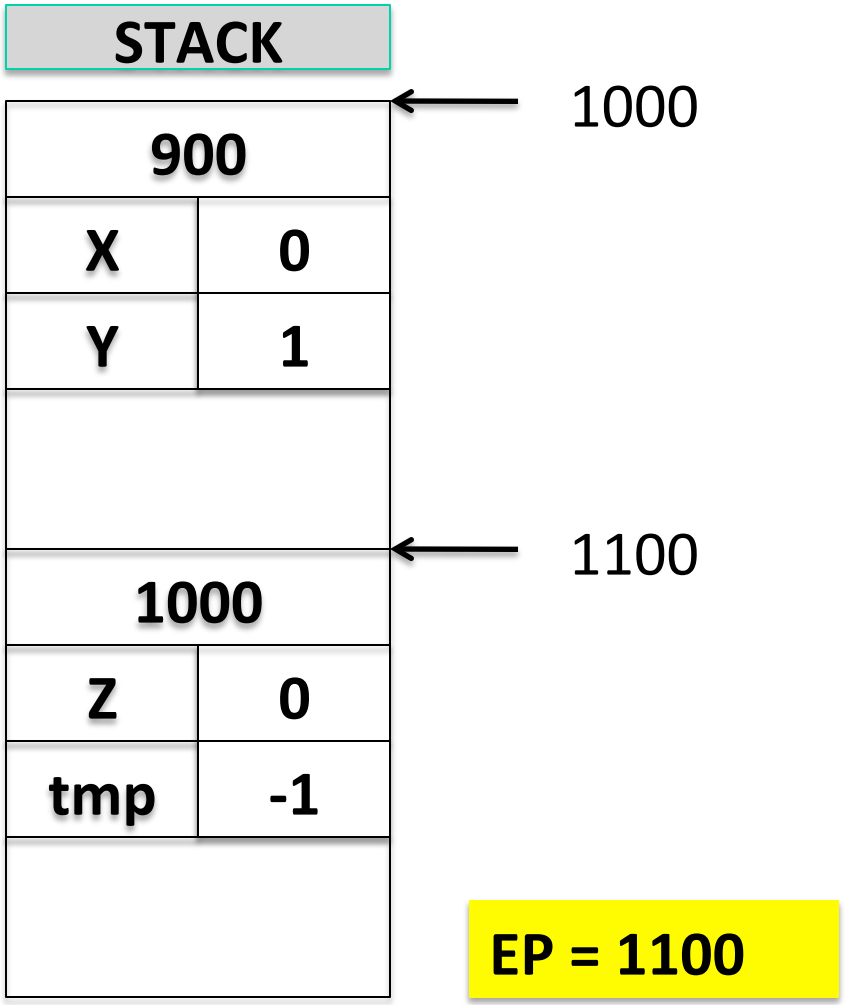
Push AR con spazio per x, y
Assegna i valori a x, y
  Push AR per blocco interno
    con spazio per z
  Assegna valore a z
  Pop AR per blocco interno
Pop AR per blocco esterno

Occorre prevedere spazio per memorizzare i risultati intermedi

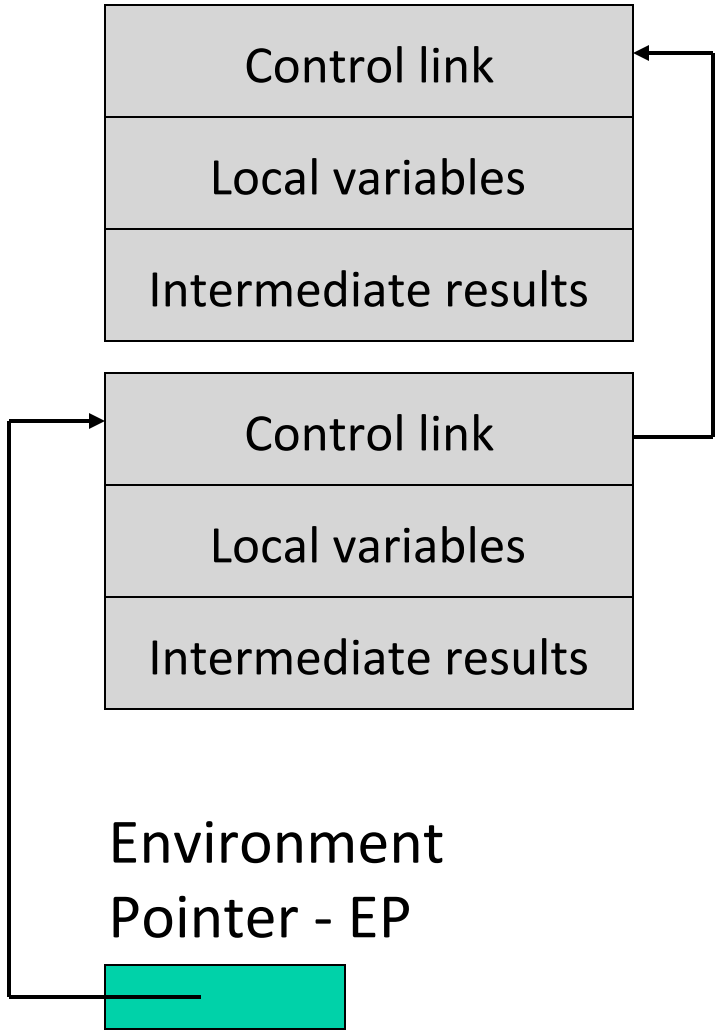
```
{ int x = 0;
    int y = x+1;
        {  int z = (x+y)*(x-y);
        };
};
```



```
{ int x = 0;
    int y = x+1;
        {  int z = (x+y)*(x-y);
        };
};
```



Record di attivazione per in-line block

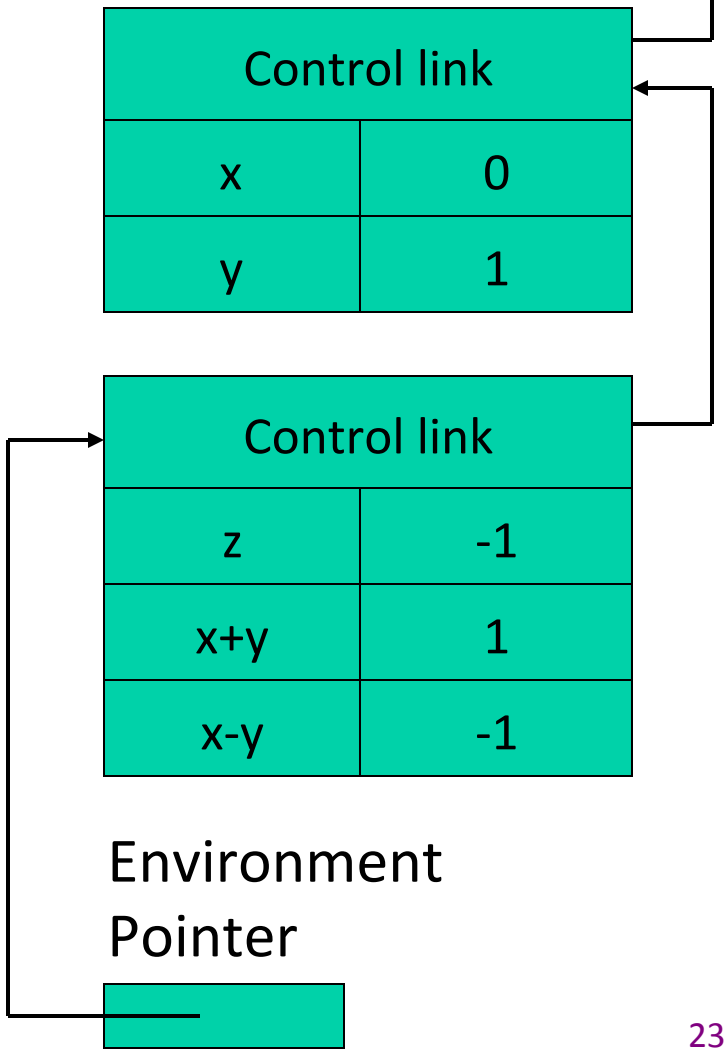


- Control link
  - puntatore (indirizzo base) a AR precedente nello stack
- Push AR
  - il valore di EP diviene il valore del control link del nuovo AR
  - modifica EP a puntare al nuovo AR
- Pop record off stack
  - il valore del nuovo EP viene ottenuto seguendo il control link

Record di attivazione

Esempio completo

```
{ int x = 0;
    int y = x+1;
        {  int z = (x+y)*(x-y);
        };
};
```



E le regole di scope?

- Variabili e ambiente
  - x, y locali al blocco esterno
  - z locale al blocco interno
  - x, y non locali per il blocco interno

```
{ int x = 0;
  int y = x+1;
    { int z = (x+y)*(x-y);
    };
};
```

- **Static scope**
  - riferimenti non locali si risolvono nel più vicino blocco esterno
- **Dynamic scope**
  - riferimenti non locali si risolvono nell'AR precedente sullo stack

Nel caso di in-line block le due nozioni coincidono

Analisi

- Il meccanismo dello stack dei record di attivazione è un meccanismo efficiente
  - Per risolvere un riferimento locale basta accedere al record di attivazione in testa allo stack (tramite EP) e poi cercare il nome nell'ambiente locale memorizzato nel record di attivazione
  - Maggiore efficienza se potessimo eliminare i nomi dal codice in esecuzione (dettagli in seguito)

Funzioni e procedure

Procedure (Algol)

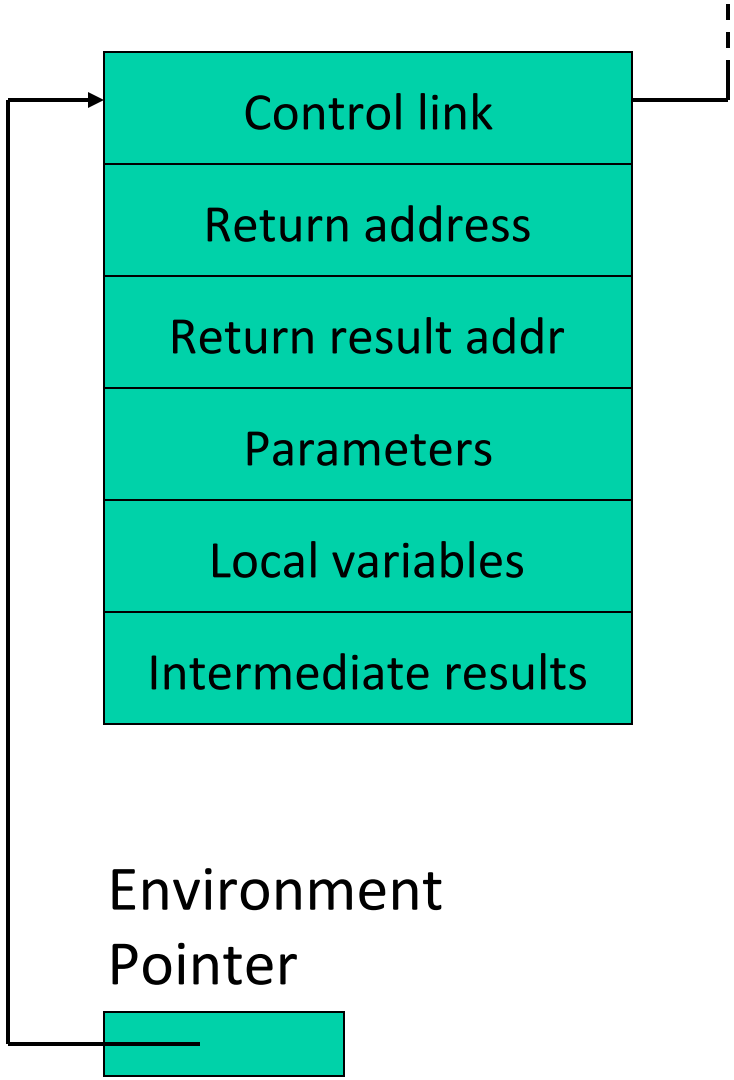
```
procedure P (<pars>)
    begin
        <local vars>
        <proc body>
    end;
```

Funzioni (C)

```
<type> function f(<pars>)
  {
    <local vars>
    <function body>
  }
```

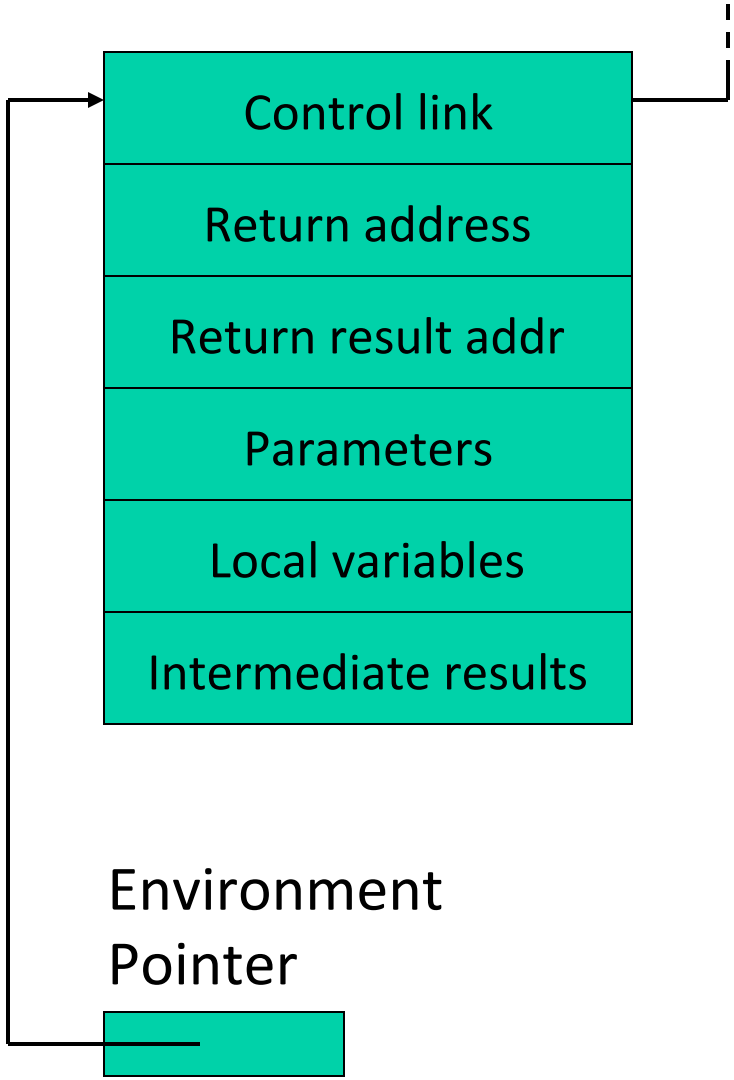
- Cosa ci deve stare nel record di attivazione?
  - parametri
  - indirizzo di ritorno
  - variabili locali, risultati intermedi
  - valore restituito (caso part. di risultato intermedio)
  - spazio per il valore restituito al momento del ritorno

Funzioni: struttura AR



- Return address
  - indirizzo della istruzione da eseguire quando viene restituito il controllo al chiamante
- Return result address
  - indirizzo nell'AR del chiamante dove memorizzare il risultato
- Parameters
  - parametri della funzione

Esempio

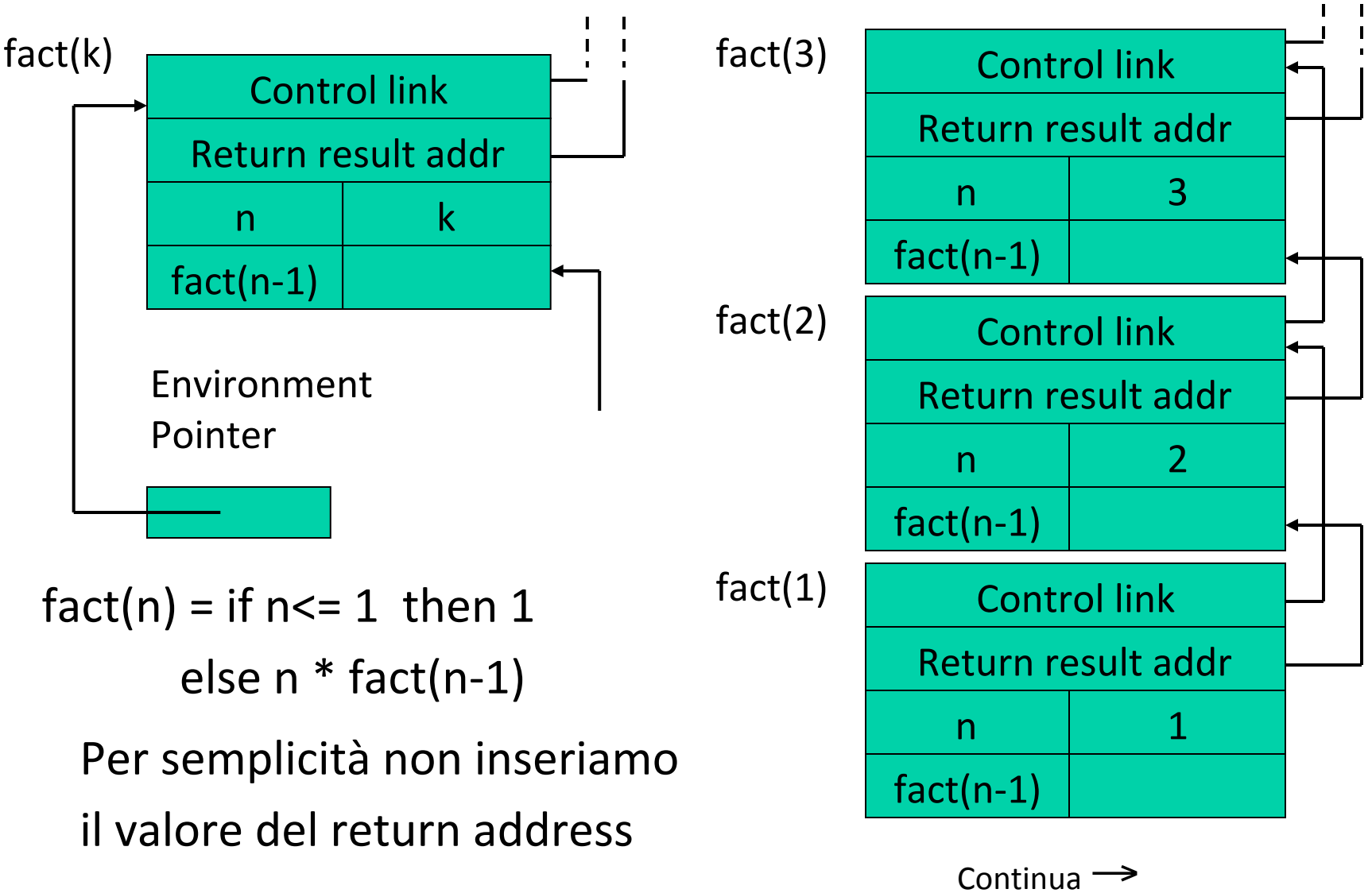


- Il solito fattoriale

  fact(n) = if n <= 1 then 1

  else n * fact(n-1)
- Return result address
  - indirizzo dove memorizzare fact(n)
- Parameters
  - associazione tra n e il valore del parametro attuale
- Intermediate results
  - spazio per memorizzare il valore di fact(n-1)

Call & …



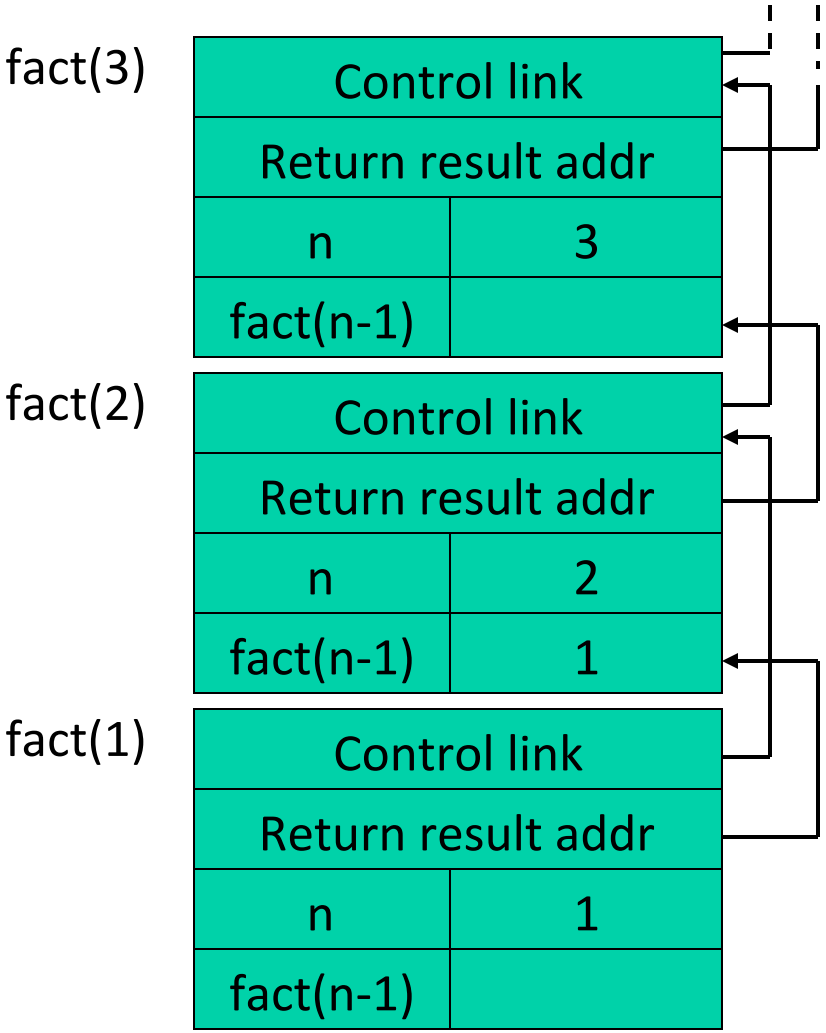
fact(n) = if n<= 1 then 1

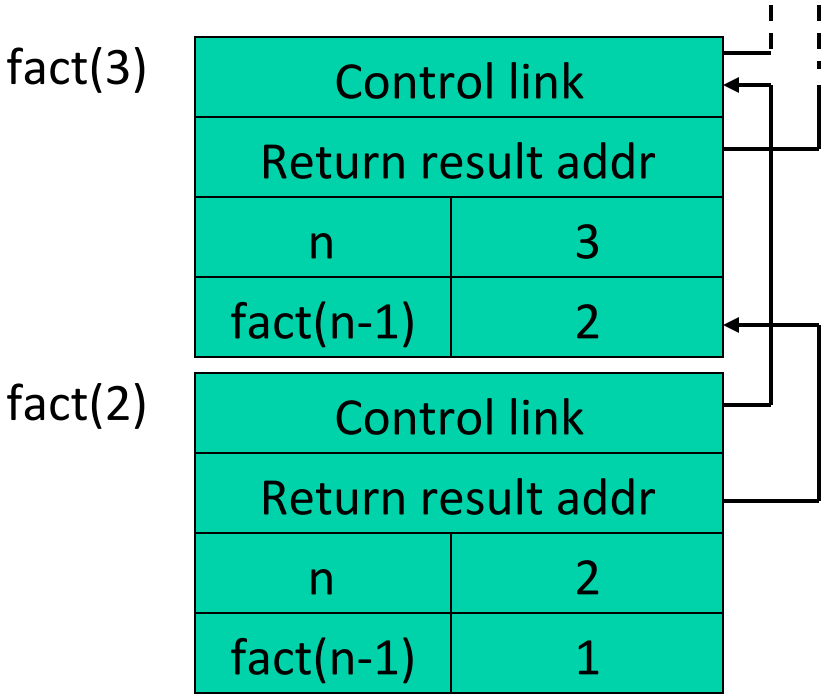
else n * fact(n-1)

Per semplicità non inseriamo il valore del return address

Continua →

….. & return





fact(n) = if n <= 1 then 1

else n * fact(n-1)

Altri aspetti

- Passaggio dei parametri
  - per valore: copiare il valore del parametro attuale nello spazio previsto nel record di attivazione
  - per riferimento: copiare il valore del puntatore nel record di attivazione
- Variabili globali
  - le var. globali sono memorizzate nel record di attivazione che sta in fondo allo stack (il primo a essere creato)
- Esaminate questi aspetti con un semplice debugger!!

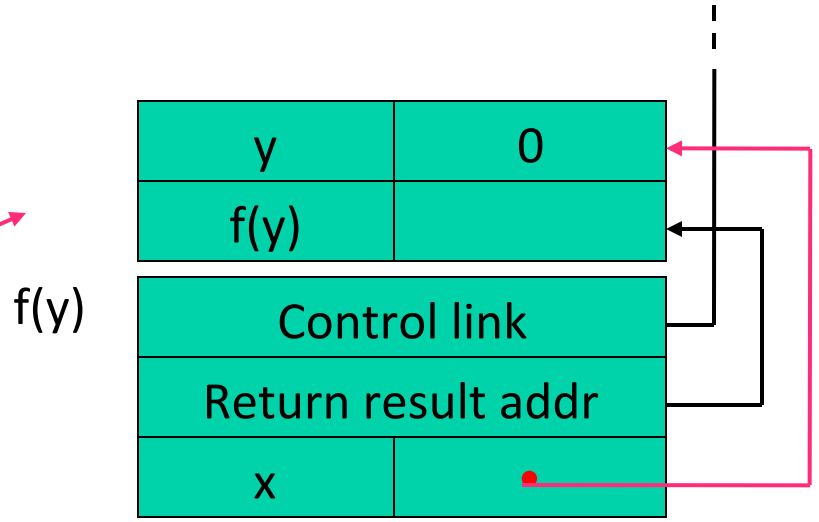
Passaggio dei parametri

- L-value & R-value: Assegnamento y := x
  - identificatore sulla sinistra dell'assegnamento denota la locazione e viene solitamente chiamato L-value
  - identificatore sulla destra fa riferimento al contenuto della locazione e viene chiamato R-value
- Per riferimento
  - memorizzare L-value (indirizzo di x) nel record di attivazione
  - il corpo della funzione può modificare il parametro attuale
  - aliasing: parametro formale e parametro attuale
- Per valore
  - memorizzare R-value (contenuto di x) nel record di attivazione
  - il corpo della funzione non può modificare il valore del parametro attuale
  - non abbiamo aliasing

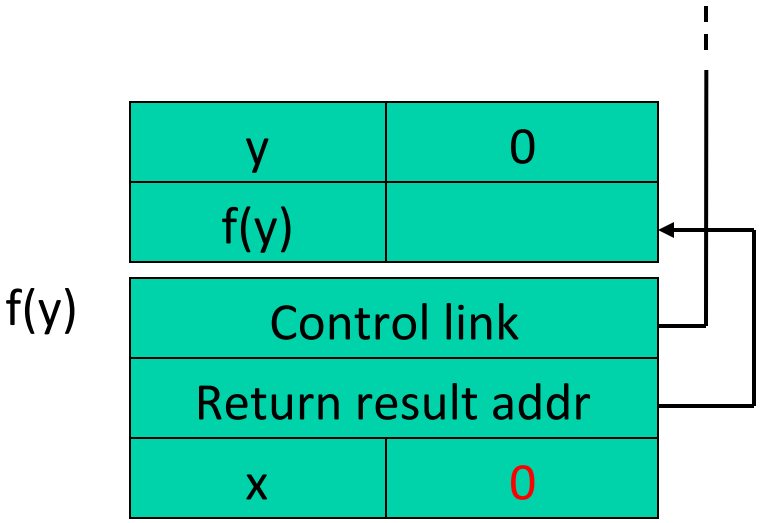
Esempio

```
function f (x) =
   { x = x+1; return x; }
var y = 0;
println (f(y)+y);
```

pass-per-ref



pass-per-val

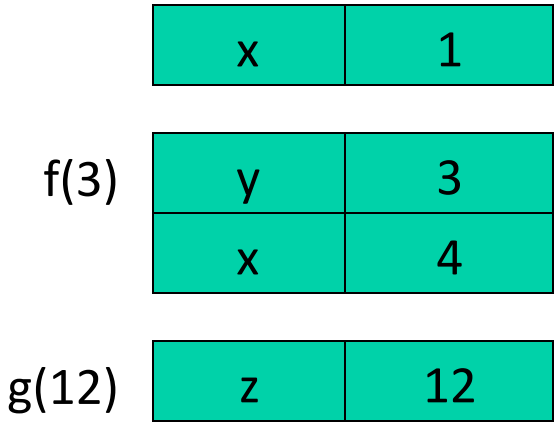


Cosa stampa nei due casi?

Variabili non locali

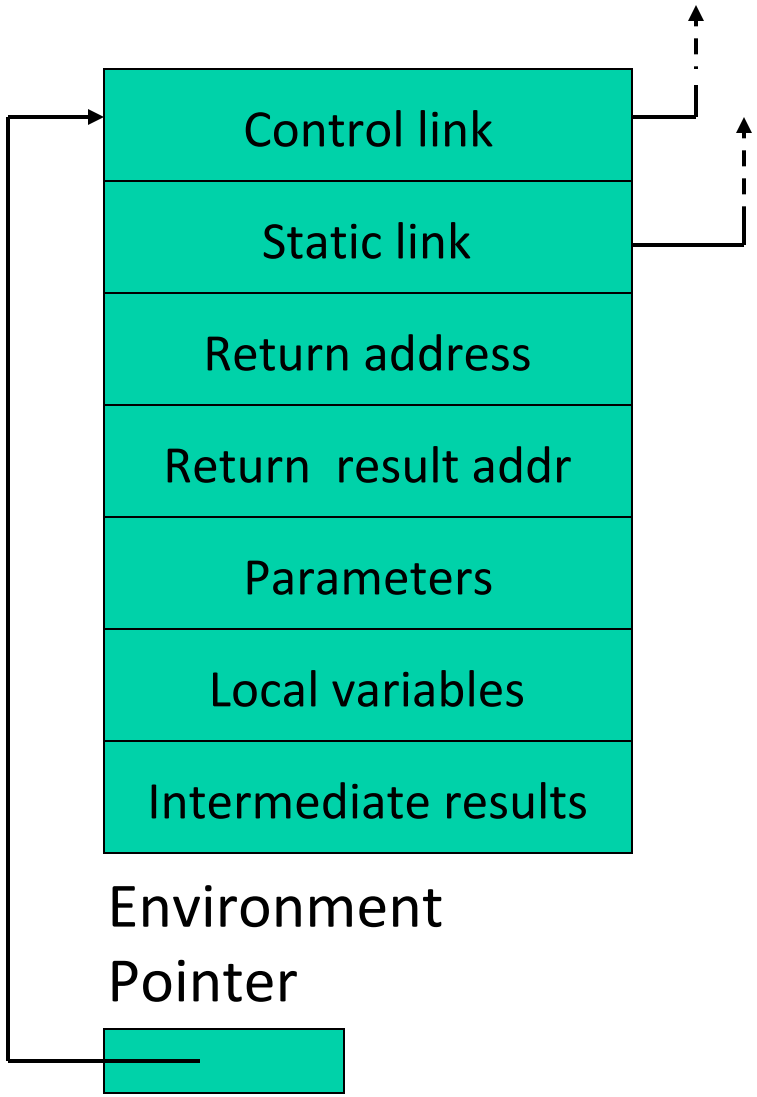
- Due alternative
  - static scope (scoping statico)
  - dynamic scope (scoping dinamico)
- Esempio

```
var x = 1;
function g(z) {
    return x+z; }
function f(y) {
    var x = y+1;
    return g(y*x); }
f(3);
```



Quale è il riferimento corretto di x nel valutare x+z ?

Scoping statico



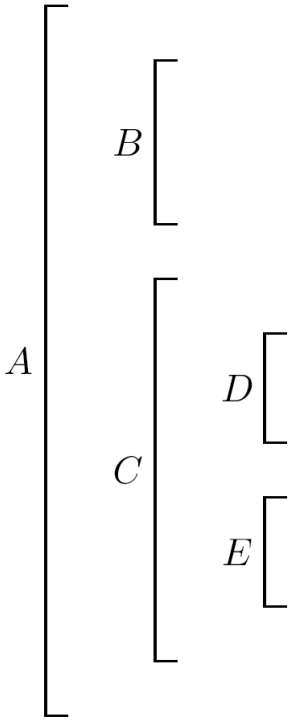
- Control link
  - puntatore all'AR che era in testa alla pila
- Static link
  - puntatore all'AR che contiene il blocco più vicino che racchiude la dichiarazione del codice in esecuzione
- Analisi
  - control link memorizza il flusso dinamico di esecuzione
  - static link dipende dalla struttura sintattica del programma

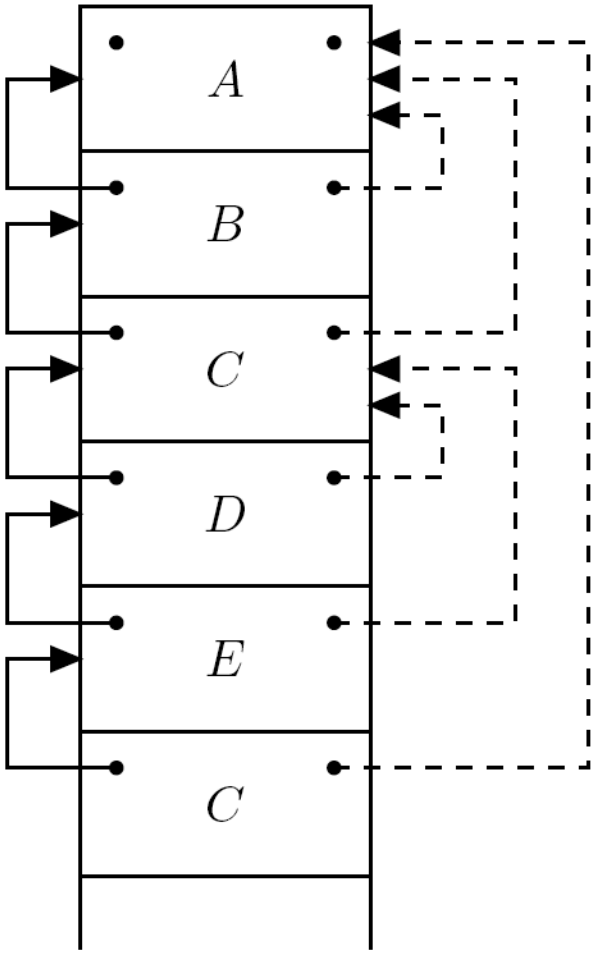
Static link

- Lo static link dell'AR di una funzione A è il puntatore al record di attivazione del blocco dove A è stata dichiarata
- La catena statica di un AR implementa la struttura sintattica dell'AR sulla catena dinamica
- *Risolvere un riferimento non locale significa trovare l'istanza del record di attivazione dove il riferimento non locale è stato dichiarato*

Sequenza di chiamate: A;B;C;D;E;C

A, B, C, D,

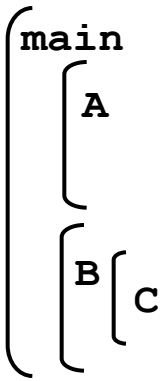


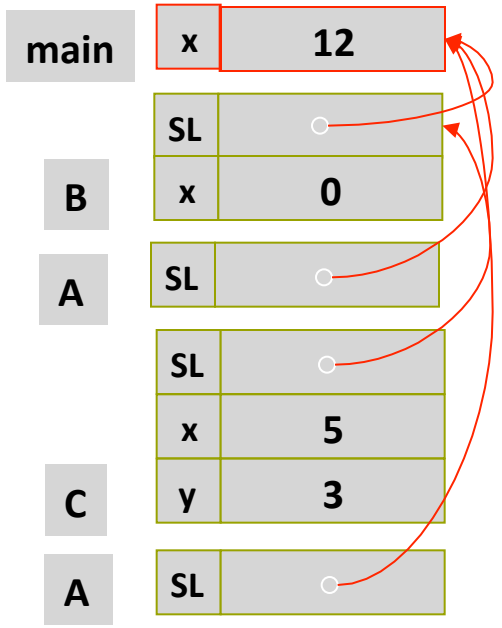


Static link

Esempio

```
{ int x;
  void A( ){
    x = x+1;
  }
  void B( ){
    int x;
    void C(int y){
      int x;
      x = y+2; A( );
    }
    x = 0; A( ); C(3);
  }
  x = 10;
  B( );
}
```





Determinare la catena statica a runtime

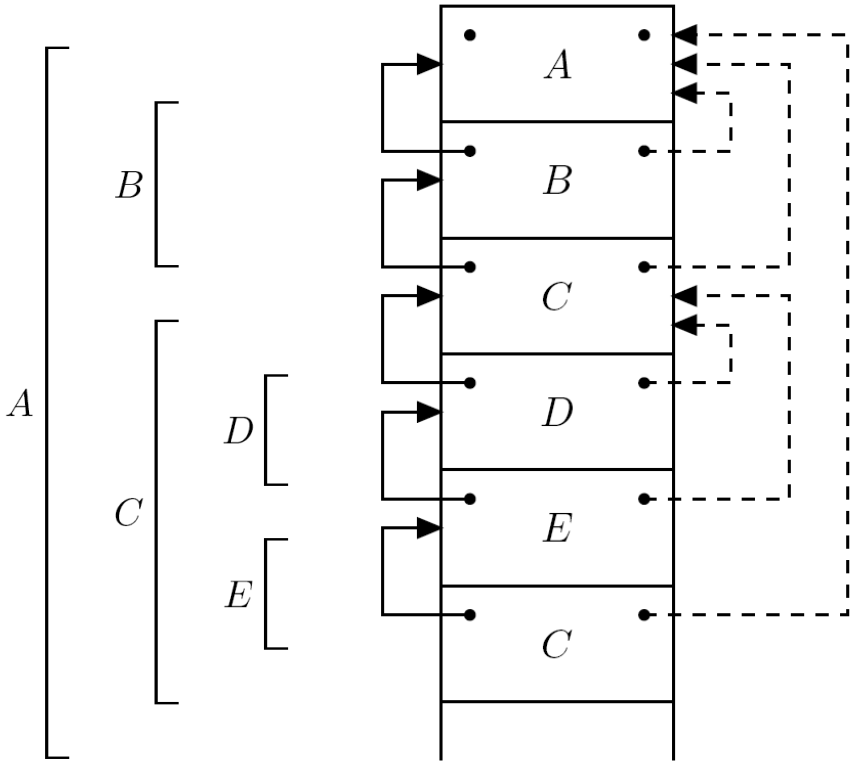
- Quali operazioni deve effettuare il supporto a tempo di esecuzione per determinare il link statico del chiamato?
  - è il chiamante a determinare il link statico del chiamato
- Info a disposizione del chiamante
  - annidamento statico dei blocchi (determinata dal compilatore staticamente)
  - proprio AR

C "conosce" l'annidamento dei blocchi

– quando ***C*** chiama ***P,*** sa se la definizione di ***P*** è
  - immediatamente inclusa in ***C*** (k=0);
  - in un blocco esterno k passi fuori ***C***
  - nessun altro caso possibile (perché)?

– nel caso a destra
  - chiamate: **A, B, C, D, E, C**

– con i dati di catena statica
  - **A; (B,0); (C,1); (D,0); (E,1); (C,2)**



Se k = 0

– ***C*** passa a ***P*** un puntatore al proprio AR

Se k > 0

– ***C*** risale la propria catena statica di **k** passi e passa a ***P*** il puntatore all'AR così determinato

Static depth

- Si può determinare staticamente il valore dell'annidamento delle procedure
- Esempio

```
Main {
    A {
        B {
        } B
    } A

    C {
    } C
} Main
```

Static depth

- **Static depth (SD)** = profondità statica della dichiarazione
- SD può essere determinato staticamente: dipende solo dalla struttura sintattica del programma

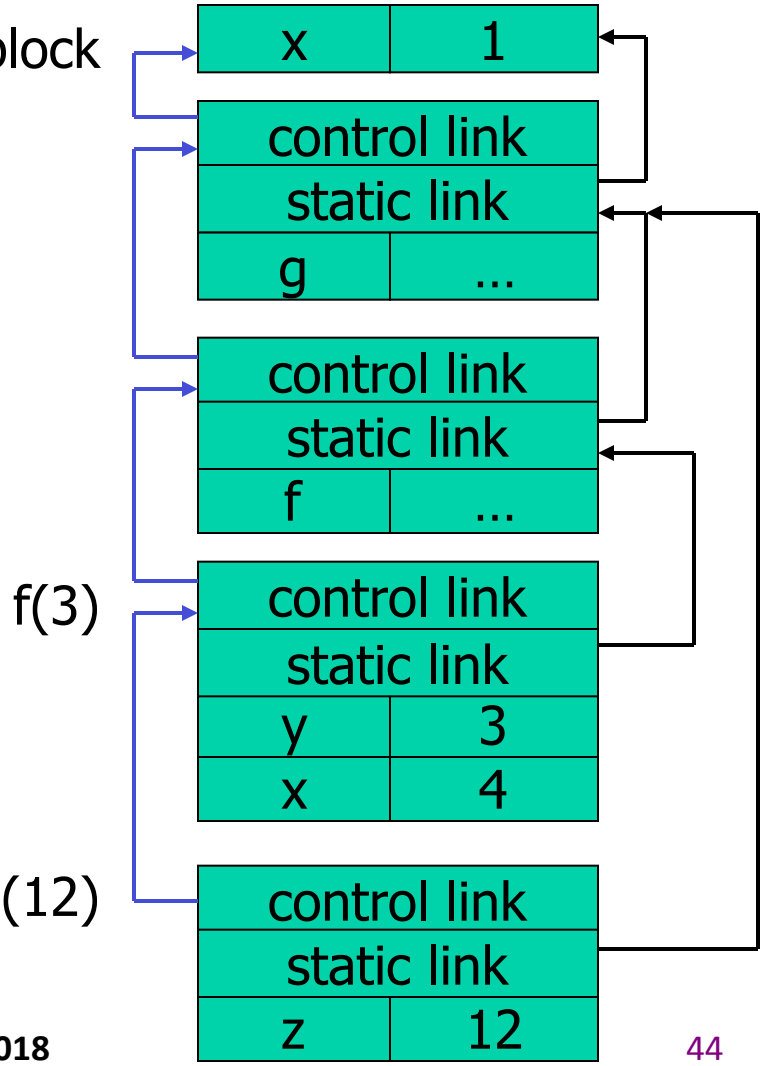
```
Main {                      -- SD = 0
    A {                     -- SD = 1
        B {                 -- SD = 2
        } B
    } A

   C {                      -- SD = 1
   } C
} Main
```

Chiamato esterno al chiamante

- Le regole dello scoping statico assicurano che affinché il chiamato sia visibile si deve trovare in un blocco esterno che includa il blocco del chiamante: *il chiamato deve essere dichiarato prima del chiamante*.
- Questo implica che l'AR che contiene la dichiarazione del chiamato è già presente sullo stack
- Assumiano che
  - **SD(Chiamante) = n**
  - **SD(Chiamato) = m**
  - distanza statica tra chiamante e chiamato **n-m**
  - il chiamante deve fare **n-m** passi lungo la sua catena statica per definire il valore del puntatore della catena statica del chiamato

Static scope: catena statica

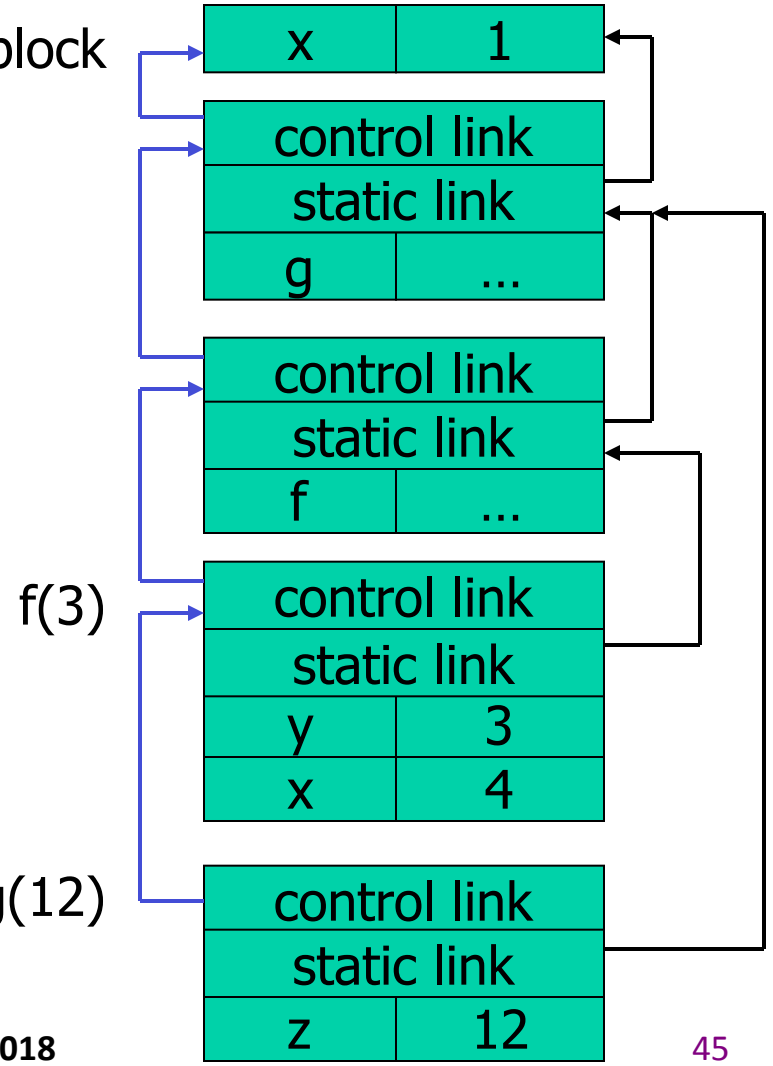
```
var x = 1;
function g(z) = { return x+z; }
    function f(y) =
        { var x = y+1;
          return g(y*x); }
    f(3);
```



Static scope: catena statica

```
var x = 1;
function g(z) = { return x+z; }
    function f(y) =
        { var x = y+1;
          return g(y*x); }
    f(3);
```

SD(g) = 1
SD(f(3)) = 3



Funzioni come valori

- Nei **linguaggi funzionali** le funzioni tipicamente sono **valori esprimibili** (possono essere risultato della valutazione di espressioni)
- Consideriamo i seguenti due casi
  - funzione passata come parametro attuale (semplice)
  - funzione restituita come risultato di un'altra funzione: può essere utilizzata nel seguito della computazione (più complicato)

Parametri funzionali

Haskell

```
int x = 4;
  fun f(y) = x*y;
    fun g(h) = let
                 int x = 7
               in
                 h(3) + x;
    g(f);
```

Pseudo-JavaScript

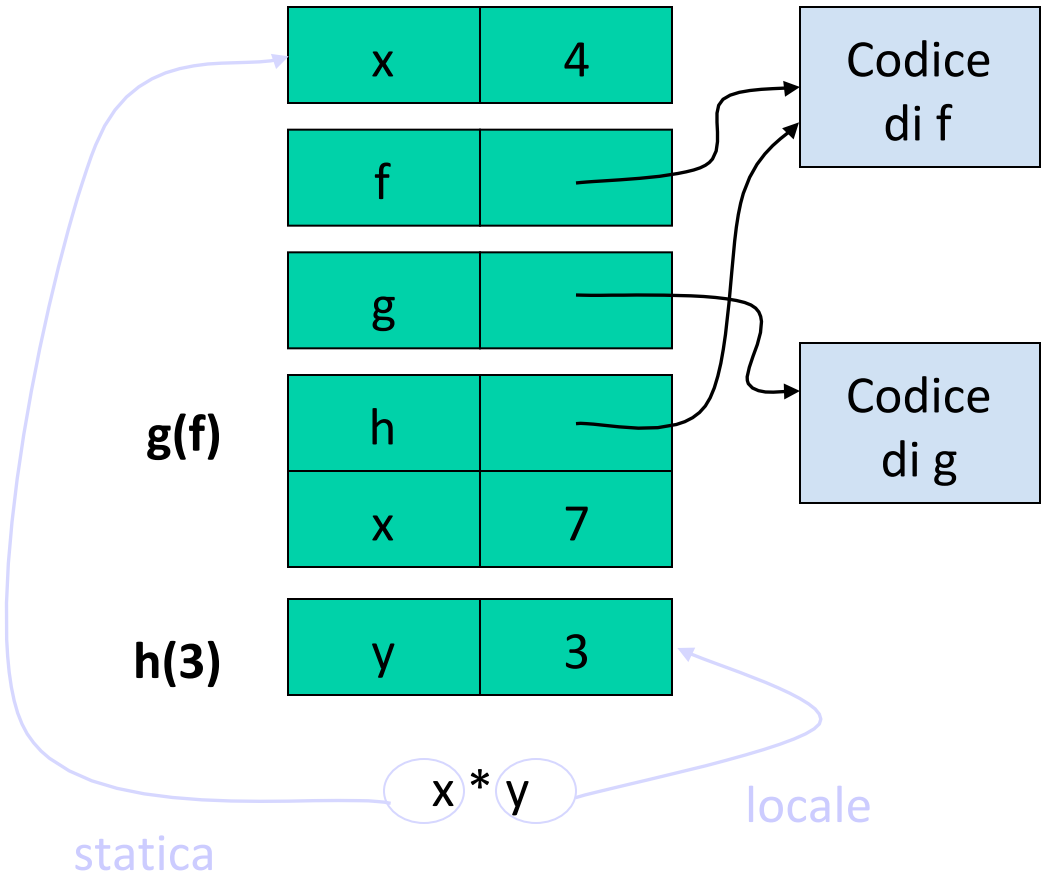
```
{ var x = 4;
  { function f(y) {return x*y};
    { function g(h) {
        var x = 7;
        return h(3) + x;
      };
      g(f);
} } }
```

Due dichiarazioni per la variabile **x**

Quale deve essere usata nella chiamata **g(f)**?

Parametri funzionali: static scope

```
int x = 4;
  fun f(y) = x*y;
    fun g(h) =
      let
        int x = 7
      in
        h(3) + x;
    g(f);
```



Come si determina?

It does happen!

```
{   var x = 4;
    {   function f(y) { return x*y; }
        {   function g(h) {
                var x = 7;
                return h(3) + x;
            }
            g(f);
        }
    }
}
```

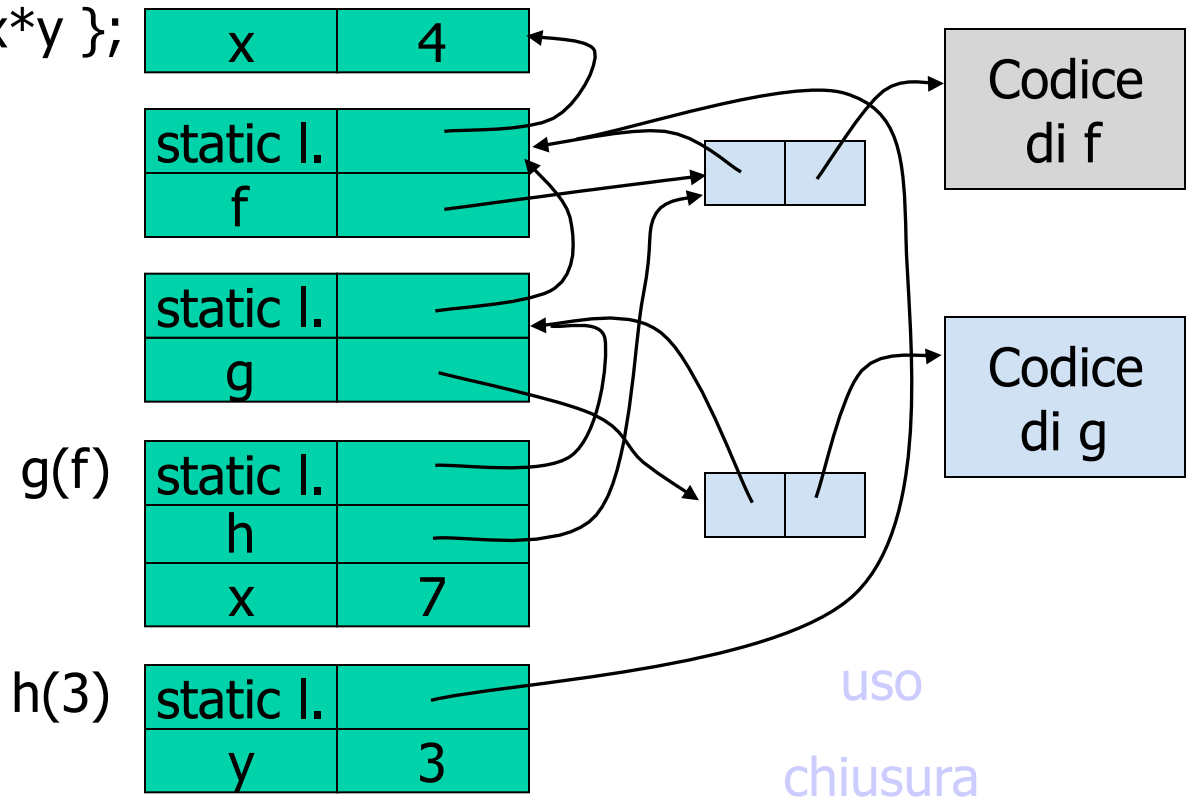
Valutate questo codice JavaScript su repl.it

Chiusure

- Il valore di una funzione trasmessa come parametro è una coppia denominata **chiusura**
  - *closure* = ⟨*env_dichiarazione*, *codice_funzione*⟩
- Quando il parametro formale (funzionale) viene invocato
  - si alloca sullo stack l'AR della funzione
  - si mette come valore del **puntatore di catena statica** il puntatore a *env_dichiarazione*

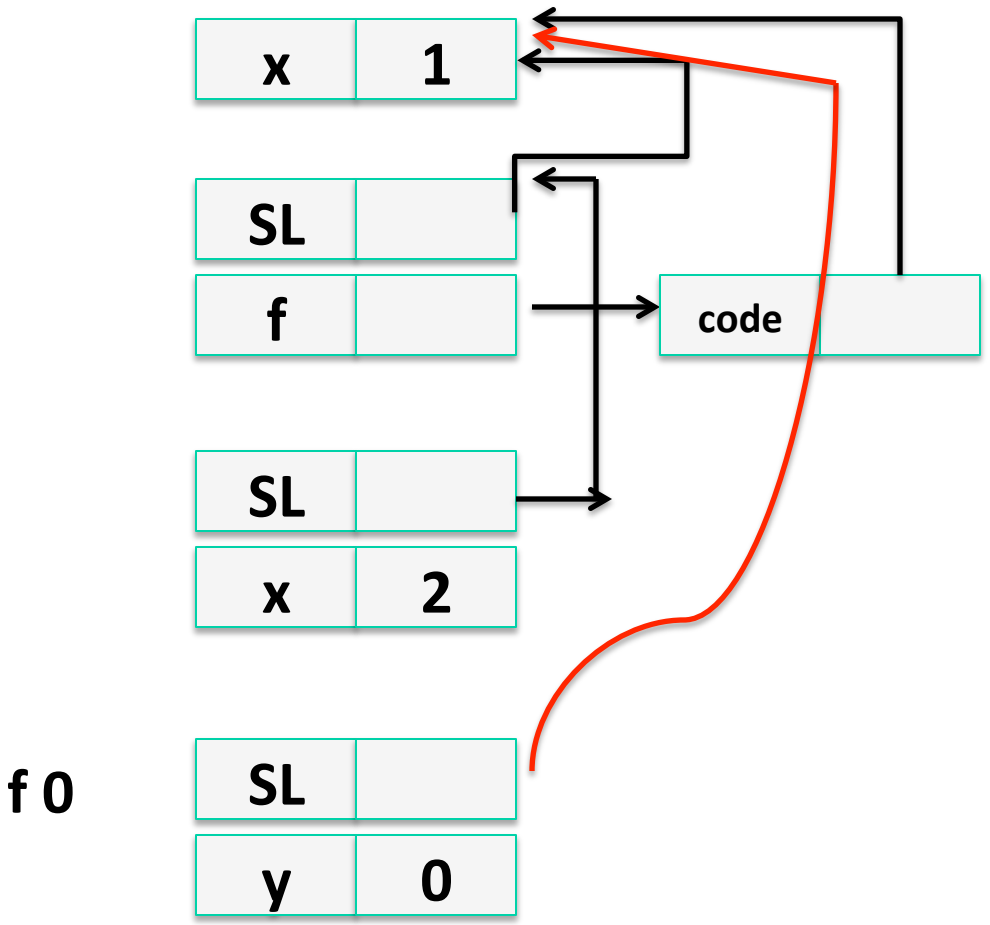
Struttura del run time

```
{ var x = 4;
  { function f(y) { return x*y };
    { function g(h) {
          int x = 7;
          return h(3) + x;
      };
      g(f);
} } }
```



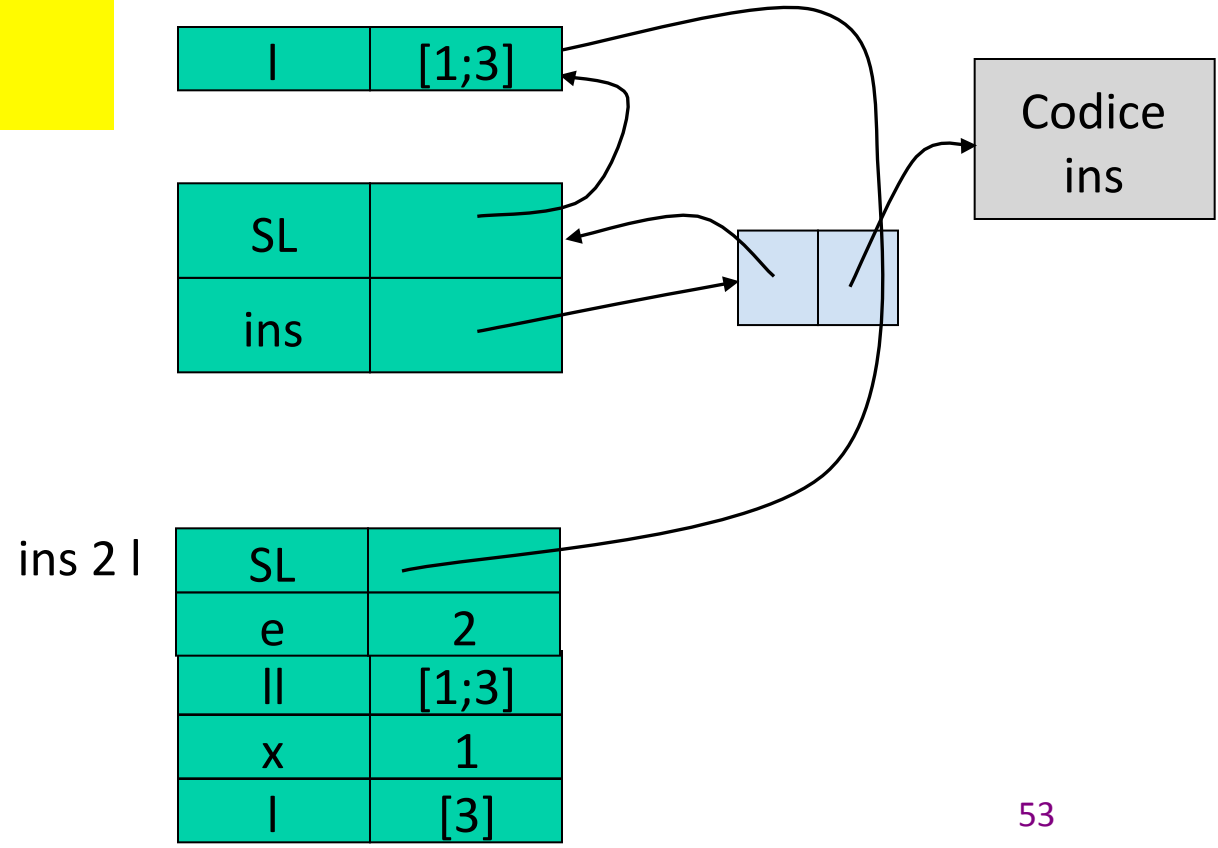
OCaML: funzioni e chiusure

```
let x = 1 ;;
let f y = y + x;;
let x = 2;;
let z = f 0;;
```



OCaML: ricorsione

```
let l = [1;3];;
let rec ins e ll = match ll with
    | [] -> [e]
    | x :: l -> if e < x then el :: x :: l
                else x :: ins e l;;
let l1 = ins 2 l
```



Argomenti funzionali

- Si usano le **chiusure** per mantenere l'informazione sull'ambiente presente al momento della dichiarazione
- Si usa la chiusura per determinare **il puntatore di catena statica**

Funzioni come risultato

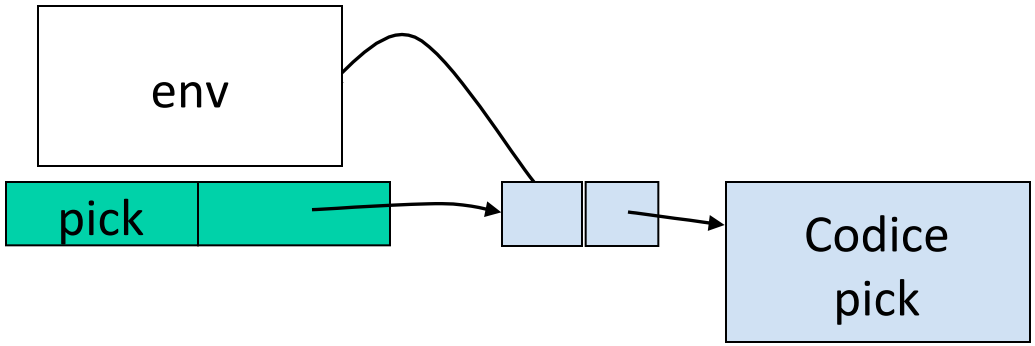
- Funzione che restituisce come valore una nuova funzione
  - bisogna congelare l'ambiente dove la funzione è "dichiarata"
- Esempio

```
function compose(f, g)
        { return  function(x) { return g(f(x)) } };
```

- Funzione "dichiarata" dinamicamente
  - la funzione può avere variabili non locali
  - valore restituito è una chiusura ⟨**env, code**⟩
  - **attenzione:** l'AR cui punta **env** non può essere distrutto finché la funzione può essere usata (**retention**)

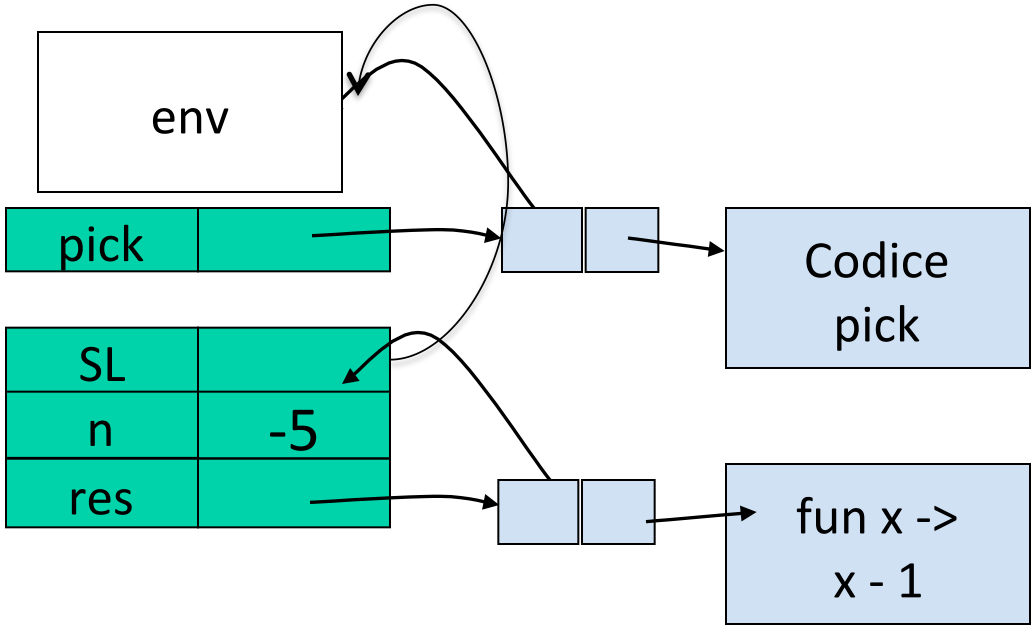
Esempio

```
::
let pick n =
if n > 0 then (fun x -> x + 1)
         else (fun x -> x - 1)
let g = (pick -5);;
g 6;;
```



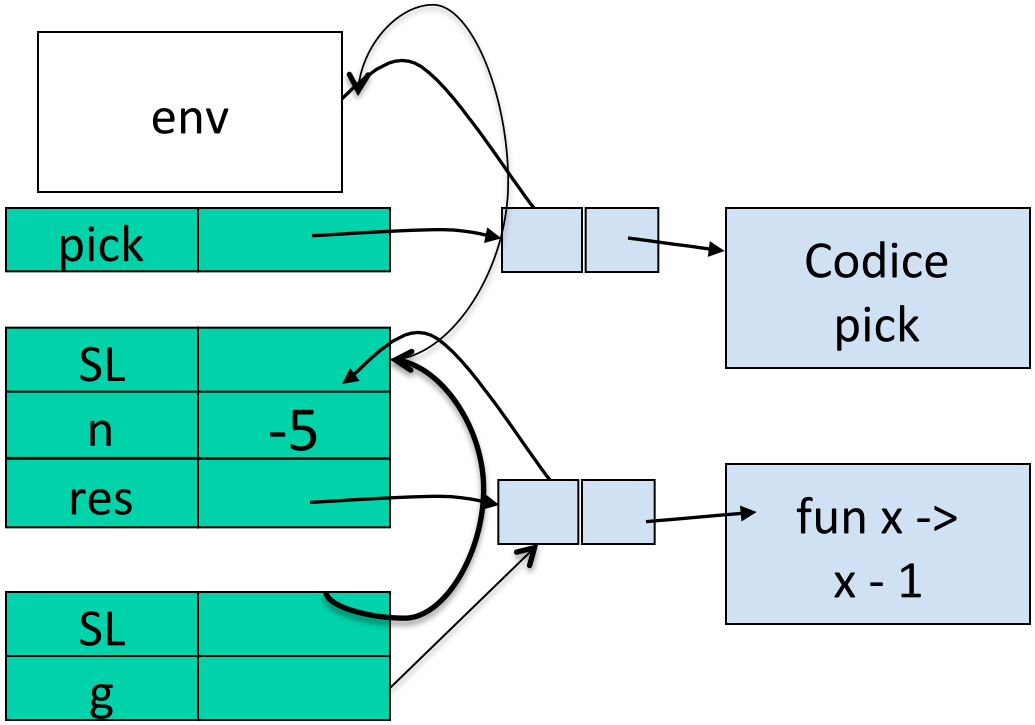
Esempio

```
::
let pick n =
if n > 0 then (fun x -> x + 1)
         else (fun x -> x - 1)
let g = (pick -5);;
g 6;;
```



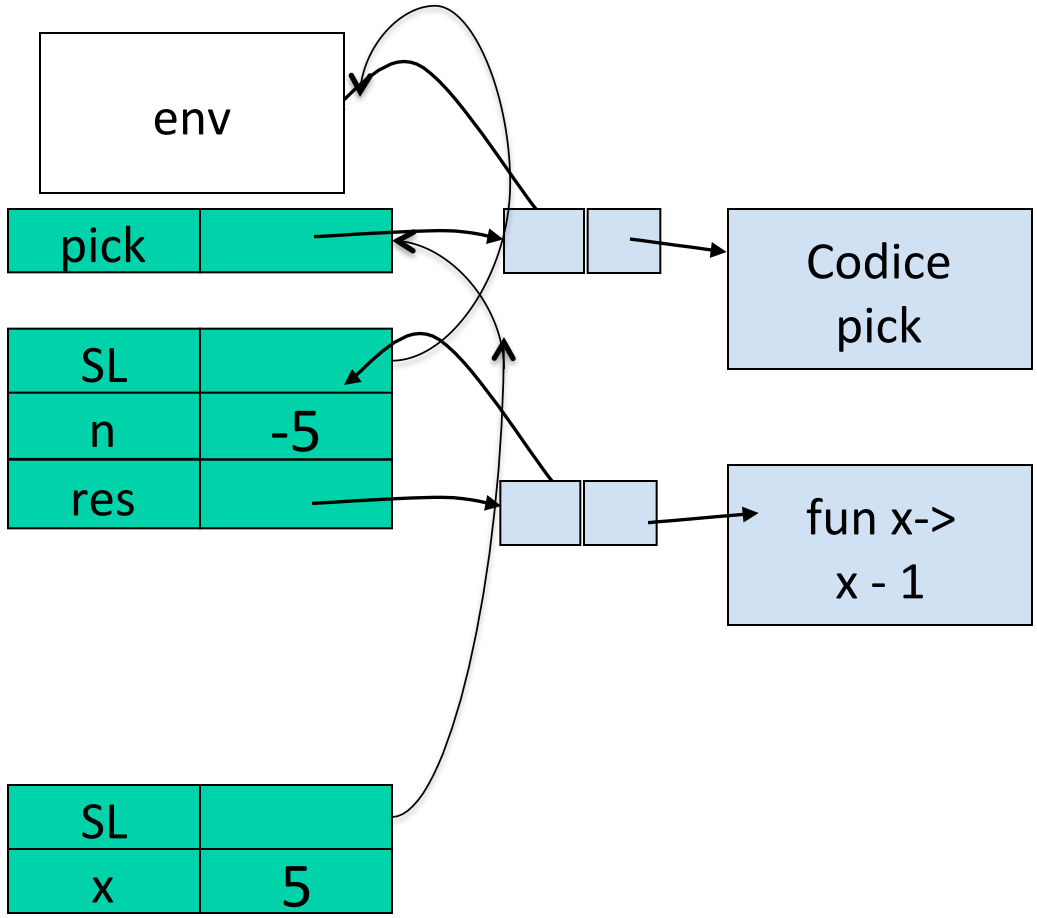
Esempio

```
::
let pick n =
if n > 0 then (fun x -> x + 1)
         else (fun x -> x - 1)
let g = (pick -5);;
g 6;;
```



Esempio

```
::
let pick n =
if n > 0 then (fun x -> x + 1)
         else (fun x -> x - 1)
let g = (pick -5);;
g 6;;
```



Risultato 5

Scope dinamico

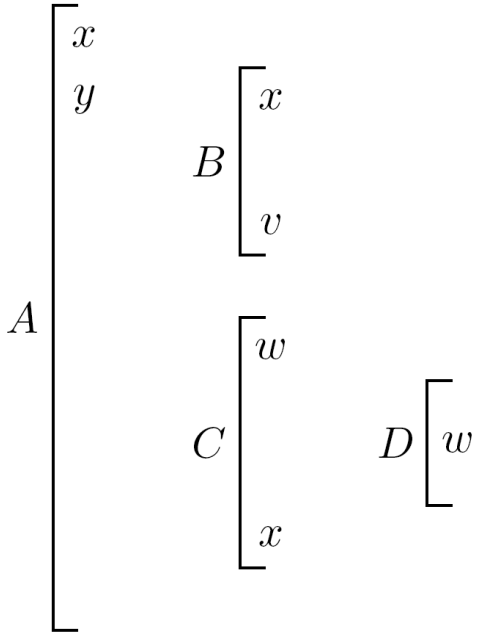
Regole scope dinamico

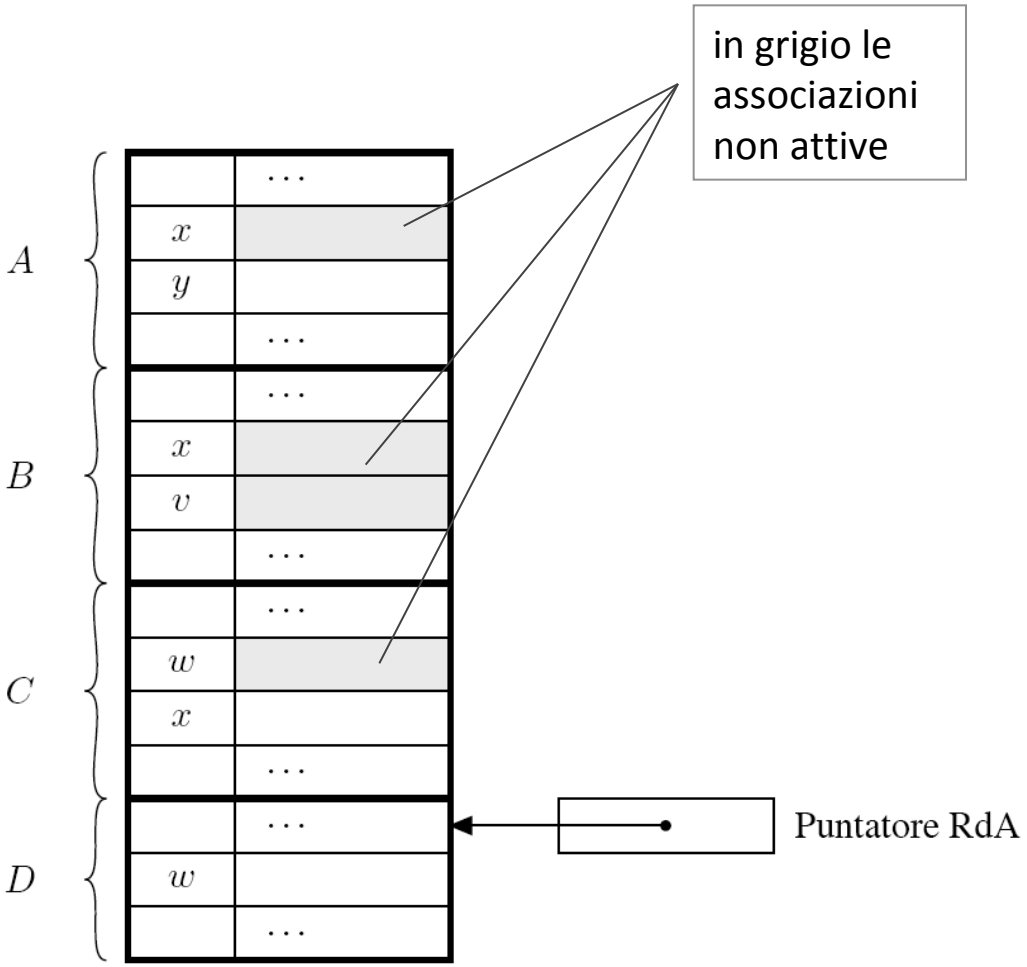
- Con scope dinamico l'associazione nomi-oggetti denotabili dipende
  - dal flusso del controllo a runtime
  - dall'ordine con il quale i sotto-programmi sono chiamati

- La regola generale è semplice: l'associazione corrente per un nome è quella determinata per ultima nell'esecuzione (non ancora distrutta)

Implementazione ovvia

- Ricerca per nome risalendo la pila
- Esempio
  - chiamate A, B, C, D





Record di attivazione: implementazione

Record di attivazione

- La strutturazione dei vari campi del record di attivazione cambia a seconda del linguaggio e dell'implementazione
- Gli identificatori generalmente non vengono memorizzati nell'AR (se il linguaggio ha controllo statico dei tipi) ma sono sostituiti dal compilatore con un indirizzo relativo (offset) rispetto a una posizione fissa dell'AR

Esempio

```
{   int x;
    int arr[2];
    char * s;
    x = 4;
    arr[0] = 10;
    arr[1] = 11;
    s = "bb";
}
```

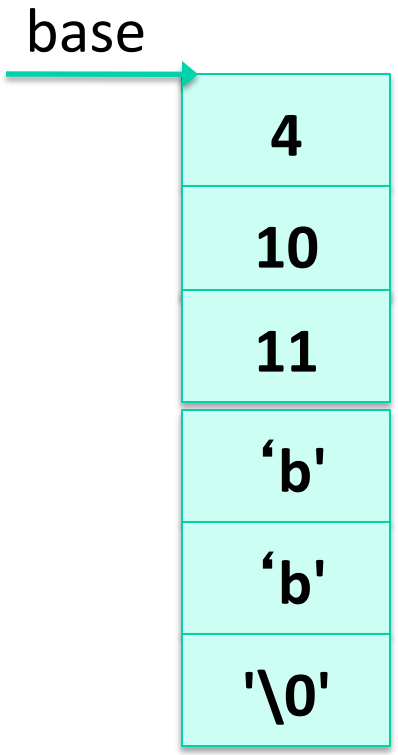
x	4
arr[0]	10
arr[1]	11
s[0]	'b'
s[1]	'b'
s[2]	'\0'

C-Standard: A C-string consists of an array of characters terminated by the null character '\0'

Calcolo offset

x	4
arr[0]	10
arr[1]	11
s[0]	‘b'
s[1]	'b'
s[2]	'\0'

compilation
int = 2 byte

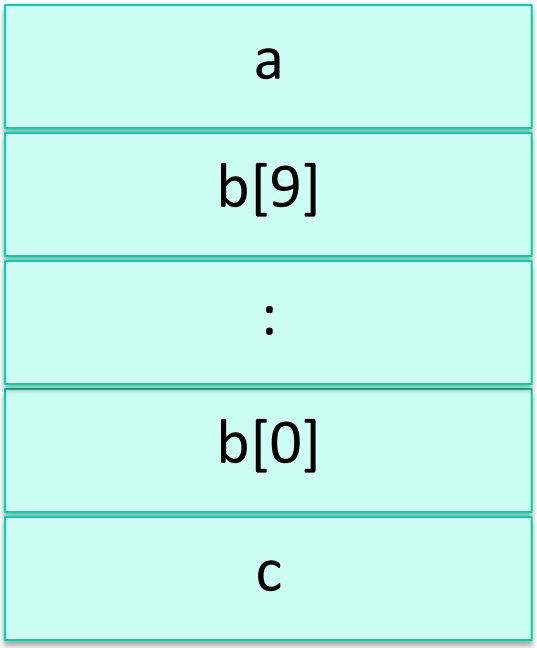


access(x) = base
access(arr[1]) = base + 4byte

Allocazione di array

- Array di dimensione fissa: facile!!
  - calcolo offset immediato a tempo di compilazione

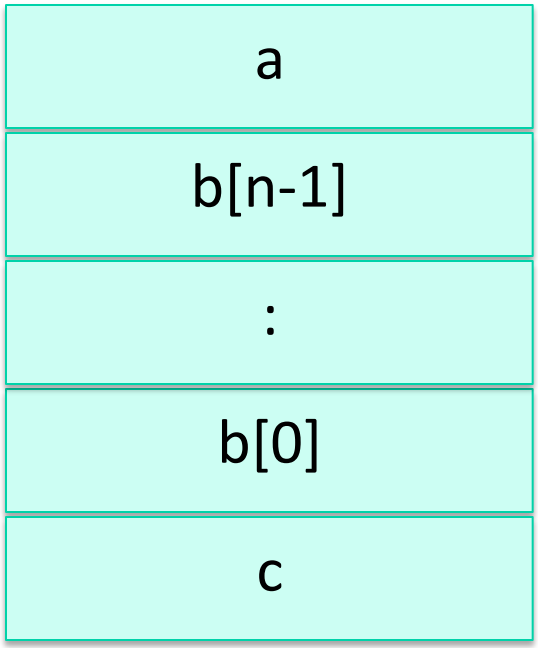
```
void foo( ) {
   int a;
   int b[10];
   int c;
}
```



Allocazione di array

- Array di dimensione variabile: più difficile!!
  - calcolo offset a tempo di compilazione?

```
void foo(int n) {
  int a;
  int b[n];
  int c;
}
```

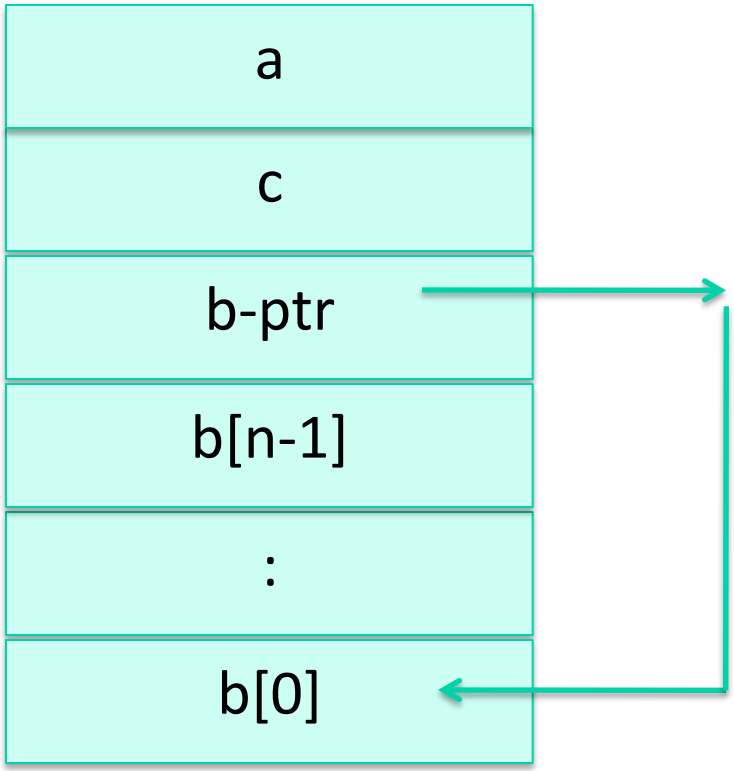


Allocazione di array

- Array di dimensione variabile: più difficile!!
  - calcolo offset a tempo di compilazione…

```
void foo(int n) {
  int a;
  int b[n];
  int c;
}
```

  - …ponendo una dimensione limite



Scope statico e analisi statica

In brevissimo

- Ambiente non locale con scope statico
  - il numero di passi che a tempo di esecuzione vanno fatti lungo la catena statica per trovare l'associazione (non locale) per l'identificatore "x" è uguale alla differenza fra le profondità di annidamento del blocco nel quale "x" è dichiarato e quello in cui è usato
- Ogni *riferimento* a un identificatore *ide* nel codice è staticamente tradotto in una coppia (m,n) di interi
  - m è la differenza fra le profondità di nesting dei blocchi (0 se *ide* si trova nell'ambiente locale)
  - n è la posizione relativa – offset – (partendo da 0) della dichiarazione di *ide* fra quelle contenute nel blocco

Valutazione

- Efficienza nella rappresentazione
  - l'accesso diventa efficiente (non c'è più ricerca per nome)
- Si può economizzare nella rappresentazione degli ambienti locali che non necessitano più di memorizzare i nomi