



OCaml: un veloce ripasso



Lo stile funzionale

- In Java (ma anche in C) l'effetto osservabile di un programma è la **modifica** dello stato

```
temp =  
pair.x;  
pair.x =
```

- In OCaml il risultato della computazione è la **produzione** di un nuovo valore
temp;

```
let x = 5 in  
(x,x)
```



Value-oriented programming

- Programmazione funzionale: “value-oriented programming”
 - un programma Ocaml è una espressione
 - una espressione Ocaml denota un valore
- L’esecuzione di un programma OCaml può essere vista come una sequenza di passi di calcolo (semplificazioni di espressioni) che alla fine produce un valore



Espressioni

- Sintassi: regole di buona formazione
- Semantica
 - regole di **type checking** (tipo o errore)
 - **regole di esecuzione** che garantiscono che espressioni tipate producono un valore



Valori

- Un **valore** è una espressione che non deve essere valutata ulteriormente
 - **34** è un valore di tipo **int**
 - **34+17** è un'espressione di tipo int ma non è un valore



Valori

- La notazione **<exp> ⇒ <val>** indica che la espressione **<exp>** quando valutata calcola il valore **<val>**

$3 \Rightarrow 3$ (valori di base)

$3+4 \Rightarrow 7$

$2*(4+5) \Rightarrow 18$

eval(e) = v metanotazione per **e ⇒ v**



let

- **Sintassi: let x = e1 in e2**
 - **x** *identifier*
 - **e1, e2** *espressioni*
 - **let x = e1 in e2** *espressione*
 - **x = e1** *binding*
- **let x = 2 in x + x**
- **let inc x = x + 1 in inc 10**
- **let y = "programmazione" in (let z = " 2" in y^z)**



let

- **let $x = e1$ in $e2$**
- **Regola di valutazione**
 - **$\text{eval}(e1) = v1$**
 - sostituire il valore $v1$ per tutte le occorrenze di x in $e2$ ottenendo l'espressione $e2'$
 - **$\text{subst}(e2, x, v1) = e2'$**
 - **$\text{eval}(e2') = v$**
 - **$\text{eval}(\text{let } x = e1 \text{ in } e2) = v$**



let

$$\frac{\text{eval}(e1) = v1 \quad \text{subst}(e2, x, v1) = e2' \quad \text{eval}(e2') = v}{\text{eval}(\text{let } x = e1 \text{ in } e2) = v}$$



Esempio

- **eval(let x = 1 + 4 in x * 3)**
 - $\text{eval}(1 + 4) = 5$
- **eval(let x = 5 in x*3)**
 - $\text{subst}(x * 3, x, 5) = 5 * 3$
- **eval(5 * 3) = 15**
- **eval(let x = 1 + 4 in x * 3) = 15**



let binding = scope

```
let x = 42 in  
  (* y non è visibile *)  
x + (let y = "3110" in  
  (* y è visibile *)  
  int_of_string y)
```



scope: overlapping

```
let x = 5 in ((let x = 6 in x) + x)
```

Due casi

```
((let x = 6 in x) + 5)
```

```
((let x = 6 in 5) + 5)
```



scope: overlapping

```
let x = 5 in ((let x = 6 in x) + x)
```

Due casi

```
((let x = 6 in x) + 5)
```

```
((let x = 6 in 5) + 5)
```



scope: overlapping

```
let x = 5 in ((let x = 6 in x) + x)
```

Due casi

```
((let x = 6 in x) + 5)
```

```
((let x = 6 in 5) + 5)
```



Alpha conversione

- L'identità puntuale delle variabili legate non ha alcun senso!!
- In matematica
 - $f(x) = x * x$
 - $f(y) = y * y$sono la medesima funzione!!
- In informatica
 - **let** $x = 5$ **in** ((**let** $x = 6$ **in** x) + x)
 - **let** $x = 5$ **in** ((**let** $y = 6$ **in** y) + x)



Dichiarazione di funzioni

```
let f (x : int) : int =  
  let y = x * 10 in  
  y * y;;
```




Funzioni ricorsive

```
let rec pow x y =  
  if y = 0 then 1  
  else x * pow x (y - 1);;
```



Applicazione di funzioni

```
let f (x : int) : int =  
  let y = x * 10 in  
  y * y;;
```

```
f 5;;
```

```
- : int = 2500
```



Applicazione di funzioni

```
let rec pow x y =  
  if y = 0 then 1  
  else x * pow x (y - 1);;
```

```
pow 2 3;;  
-: int 8
```



Dichiarazione

- La valutazione di una dichiarazione di una funzione è la funzione stessa
 - le funzioni sono valori



Applicazione

- $\text{eval}(e_0 e_1 \dots e_n) = v'$ se
 - $\text{eval}(e_0) = \text{let } f x_1 \dots x_n = e$
 - $\text{eval}(e_1) = v_1 \dots \text{eval}(e_n) = v_n$
 - $\text{subst}(e, x_1, \dots, x_n, v_1, \dots, v_n) = e'$
 - $\text{eval}(e') = v'$



Esempi

- `let double (x : int) : int = 2 * x;;`
- `let square (x : int) : int = x * x;;`
- `let quad (x : int) : int = double (double x);;`
- `let fourth (x : int) : int = square (square x)`



Esempi

- `let twice ((f : int -> int), (x : int)) : int = f (f x)`
- `let quad (x : int) : int = twice (double, x)`
- `let fourth (x : int) : int = twice (square, x)`
- *twice*
 - *higher-order function*: una funzione da funzioni ad altri valori



Funzioni higher-order

- let compose ((f, g) : (int -> int) *
 (int -> int)) (x : int) : int = f (g x)

- let rec ntimes ((f, n) : (int -> int) * int) =
 if n = 0 then (fun (x : int) -> x)
 else compose (f, ntimes (f, n - 1))



OCaml List

- **let** lst = [1; 2; 3];;
- **let** empty = [];
- **let** longer = 5::lst;;
- **let** another = 5::1::2::3::[]



List: sintassi

- `[]` la lista vuota (nil derivato dal LISP)
- `e1::e2` inserisce l'elemento `e1` in testa alla lista `e2` (`::` = LISP cons)
- `[e1; e2; ...; en]` notazione sintattica per la lista `e1::e2::...::en::[]`



Accedere a una lista

- Strutturalmente una lista può essere
 - `nil`, `[]`
 - la lista ottenuta mediante una operazione di `cons` di un elemento a una lista
- **Idea:** usare il **pattern matching** per accedere agli elementi della lista
- **let** empty lst = **match** lst **with**
 - | `[]` -> **true**
 - | `h::t` -> **false**



Esempi

- **let rec** sum xs = **match** xs **with**
 - | [] -> 0
 - | h::t -> h + sum t
- **let rec** concat ss = **match** ss **with**
 - | [] -> ""
 - | s::ss' -> s ^ (concat ss')
- **let rec** append lst1 lst2 = **match** lst1 **with**
 - | [] -> lst2
 - | h::t -> h::(append t lst2)



Pattern Matching

- match e with
 - | $p_1 \rightarrow e_1$
 - | $p_2 \rightarrow e_2$
 - | ...
 - | $p_n \rightarrow e_n$
- Le espressioni p_i si chiamano *pattern*



Pattern matching

- Il pattern [] “match” solamente il valore []
- **match [] with**
 - | [] -> 0
 - | h::t -> 1(* restituisce il valore 0 *)
- **match [] with**
 - | h::t -> 0
 - | [] -> 1(* restituisce il valore 1 *)

Pattern matching

- Il pattern **$h::t$** “match” una qualsiasi lista con almeno un elemento, e inoltre ha l’effetto di legare quell’elemento alla variabile **h** e la lista rimanente alla variabile **t**
- **match** [1; 2; 3] **with**
 - | [] -> 0
 - | $h::t$ -> h (* restituisce il valore 1 *)
- **match** [1; 2; 3] **with**
 - | [] -> []
 - | $h::t$ -> t (* restituisce il valore [2; 3] *)



Altri esempi

- Il pattern **a::[]** “match” tutte le liste con esattamente un elemento
- Il pattern **a::b** “match” tutte le liste con almeno un elemento
- Il pattern **a::b::[]** “match” tutte le liste con esattamente due elementi
- Il pattern **a::b::c::d** “match” tutte le liste con almeno tre elementi



Un esempio più complicato

- **let rec** drop_val v lst = **match** lst **with**
 | [] -> []
 | h::t -> **let** t' = drop_val v t **in**
 if h = v **then** t' **else** h::t'



Un altro esempio

- **let rec** max_list = **function**
 - | [] -> ???
 - | h::t -> max h (max_list t)
- Cosa mettiamo al posto di ??? ?
- **min_int** è una scelta possibile ...
- O sollevare una exception ...
- In Java, avremmo potuto restituire **null**...
- ...ma siamo in Ocaml, che ci fornisce una altra soluzione



Option type

- **let rec max_list = function**
 - | [] -> None**
 - | h::t -> match max_list t with**
 - | None -> Some h**
 - | Some x -> Some (max h x)**

(* max_list : 'a list -> 'a option *)



Iteratori

- **let rec** map f = **function**
| [] -> []
| x::xs -> (f x)::(map f xs)
- **map : ('a -> 'b) -> 'a list -> 'b list**
- **let is_even x = (x mod 2 = 0);;**
- **let lst = map is_even [1; 2; 3; 4];;**

Parametro implicito di
tipo lista



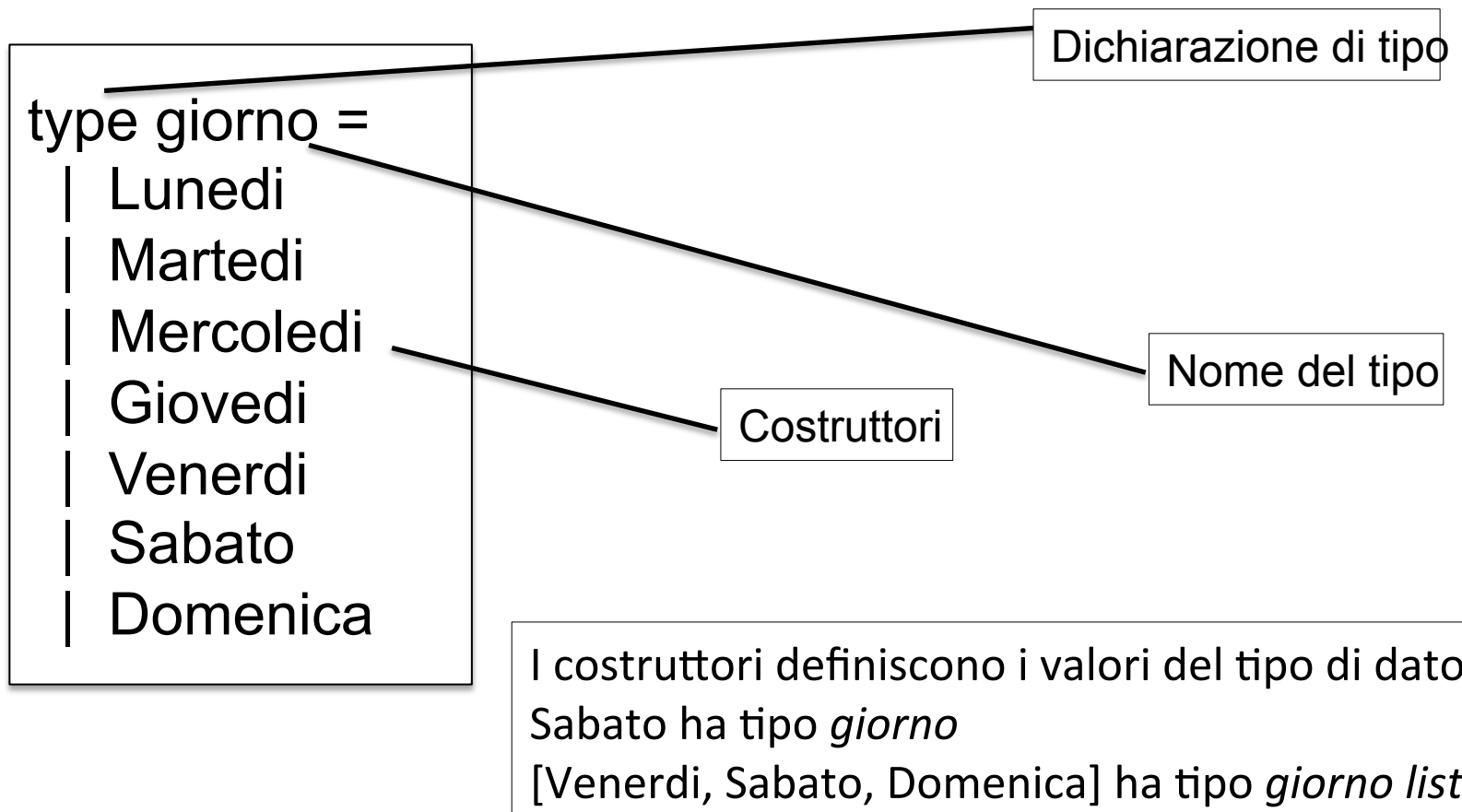
Iteratori

- **let rec map f = function**
 - | [] -> []
 - | x::xs -> (f x)::(map f xs)
- **map : ('a -> 'b) -> 'a list -> 'b list**
- **let is_even x = (x mod 2 = 0);;**
- **let lst = map is_even [1; 2; 3; 4];;**
- Risultato **[false; true; false; true]**



Definire tipi di dato in OCaml

Ocaml permette al programmatore di definire *nuovi* tipi di dato





Pattern matching

Il pattern matching fornisce un modo efficiente per accedere ai valori di un tipo di dato

```
let string_of_g (g : giorno) : string =  
  begin match g with  
    | Lunedì -> "Lunedì"  
    | Martedì -> "Martedì"  
    | :  
    | :  
    | Domenica -> "Domenica"  
  end
```

Il pattern matching **segue** la struttura sintattica dei valori del tipo di dato: i costruttori



Astrazioni sui dati

- Avremmo potuto rappresentare il tipo di dato *giorno* tramite dei semplici valori interi
 - Lunedì = 1, Martedì = 2, ..., Domenica = 7
- Ma...
 - il tipo di dato primitivo *int* fornisce un insieme di operazioni differenti da quelle significative sul tipo di dato *giorno*, Mercoledì – Domenica *non* avrebbe alcun senso
 - esistono un numero maggiore di valori interi che di valori del tipo *giorno*
- Morale: I linguaggi di programmazione moderni (Java, C#, C++, Ocaml, ...) forniscono strumenti per definire tipi di dato



Ocaml Type

- I costruttori possono trasportare “valori”

```
# type foo =
```

```
| Nothing
```

```
| Int of int
```

```
| Pair of int * int
```

```
| String of string;;
```

Dichiarazione da valutare

Risultato

```
type foo = Nothing | Int of int | Pair of int * int | String of  
string
```

Valori del tipo *foo*

Nothing

Int 3

Pair (4, 5)

String "hello"...



Pattern matching

```
let get_count (f : foo) : int
=
  begin match f with
    | Nothing -> 0
    | Int(n) -> n
    | Pair(n,m) -> n + m
    | String(s) -> 0
  end
```



Tipi di dato ricorsivi

```
# type tree =  
  | Leaf of int  
  | Node of tree * int * tree;;  
  
type tree = Leaf of int | Node of tree * int * tree
```

```
let t1 = Leaf 3  
let t2 = Node(Leaf 3, 2, Leaf 4)  
let t3 = Node (Leaf 3, 2, Node (Leaf 5, 4,  
Leaf 6))
```



Tipi di dato ricorsivi

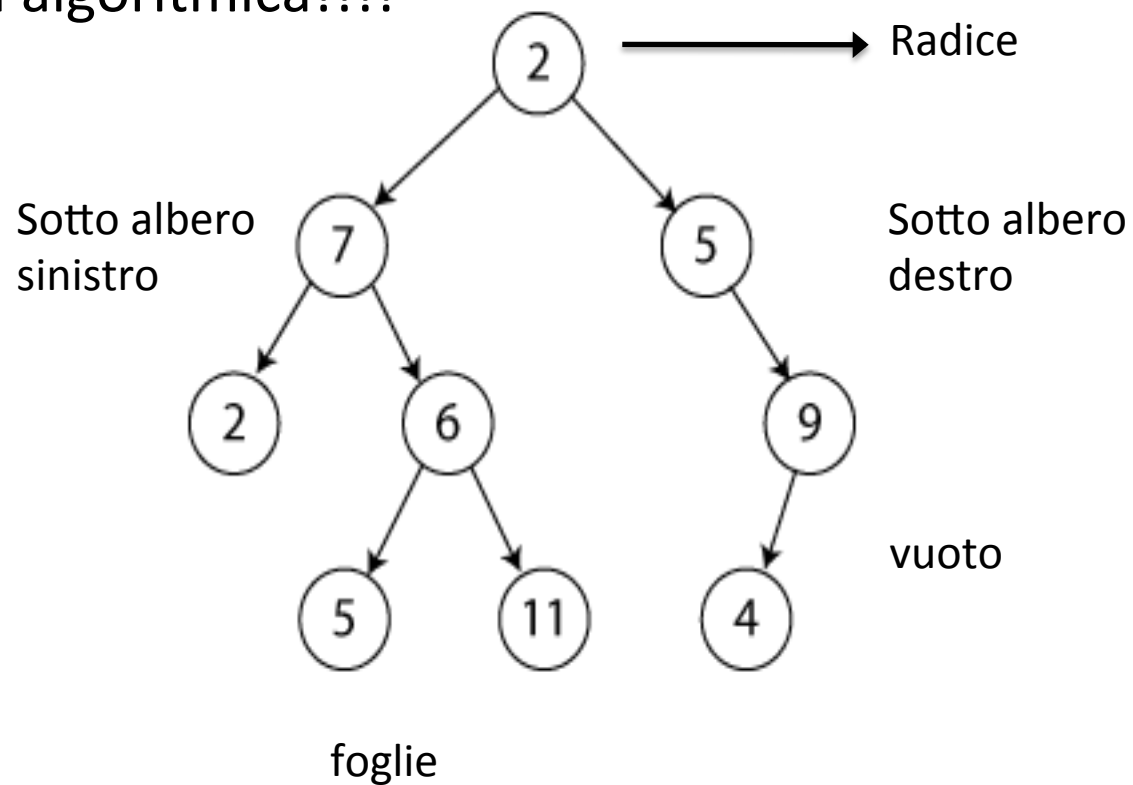
```
# type tree =  
  | Leaf of int  
  | Node of tree * int * tree;;
```

```
type tree = Leaf of int | Node of tree * int * tree
```

Quanti di voi hanno programmato con
strutture dati del tipo *tree*?

Alberi binari

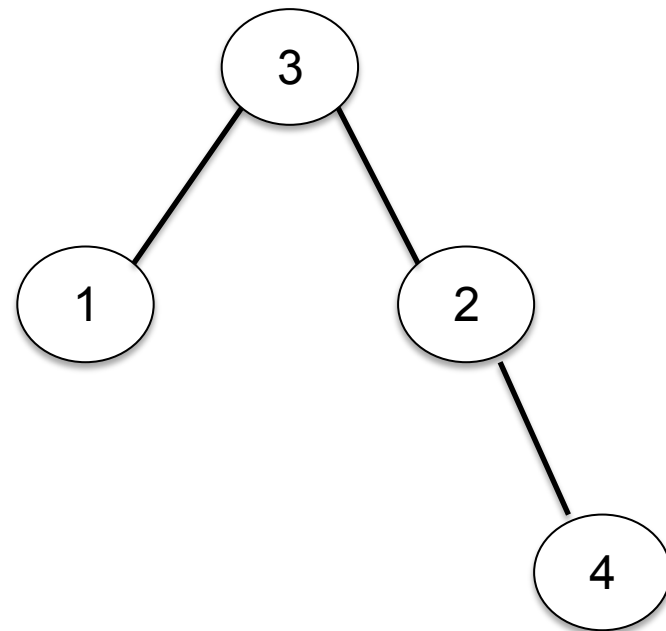
Li avete visti a algoritmica!!!!



Alberi binari in OCaml

```
type tree =  
  | Empty  
  | Node of tree * int *  
tree
```

```
let t : tree =  
  Node(Node(Node(Empty, 1, Empty), 3  
    Node(Empty, 2,  
      Node(Empty, 4,  
Empty))))
```





Ricerca in un albero

```
let rec contains (t : tree) (n : int) : bool =  
  begin match t with  
    | Empty -> false  
    | Node(lt, x, rt) -> x = n ||  
                        (contains lt n) ||  
                        (contains rt n)  
  end
```

La funzione contains effettua una ricerca del valore n sull'albero t
Caso peggiore: deve visitare tutto l'albero



Alberi binari di ricerca

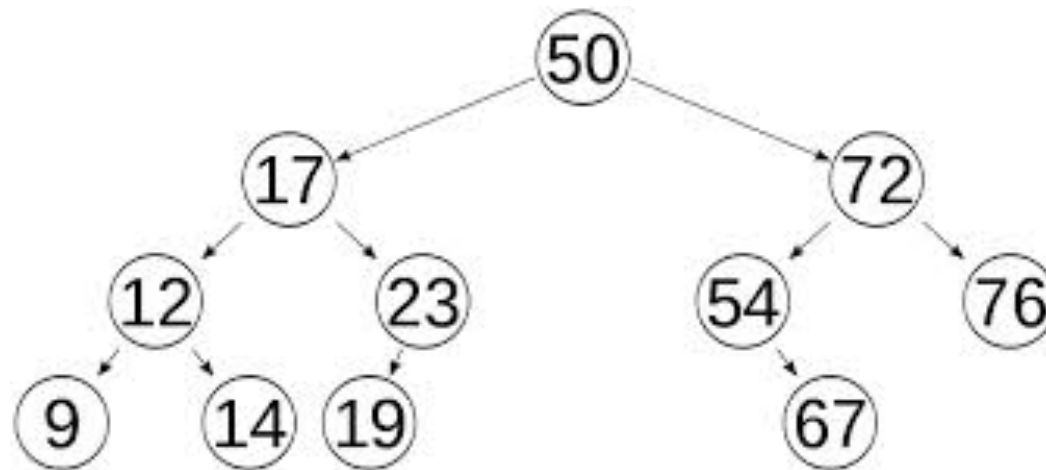
Idea: ordinare i dati sui quali viene fatta la ricerca

Un albero binario di ricerca (BST) è un albero binario che deve soddisfare alcune proprietà invarianti aggiuntive

INVARIANTE DI RAPPRESENTAZIONE

- $\text{Node}(l_t, x, r_t)$ è un BST se
 - l_t e r_t sono BST
 - tutti i nodi di l_t contengono valori $< x$
 - tutti i nodi di r_t contengono valori $> x$
- Empty (l'albero vuoto) è un BST

Esempio



L'invariante di rappresentazione dei BST è soddisfatto
Come si dimostra?
Ricordate le tecniche che avete imparato a LPP!!!



Ricerca su un BST

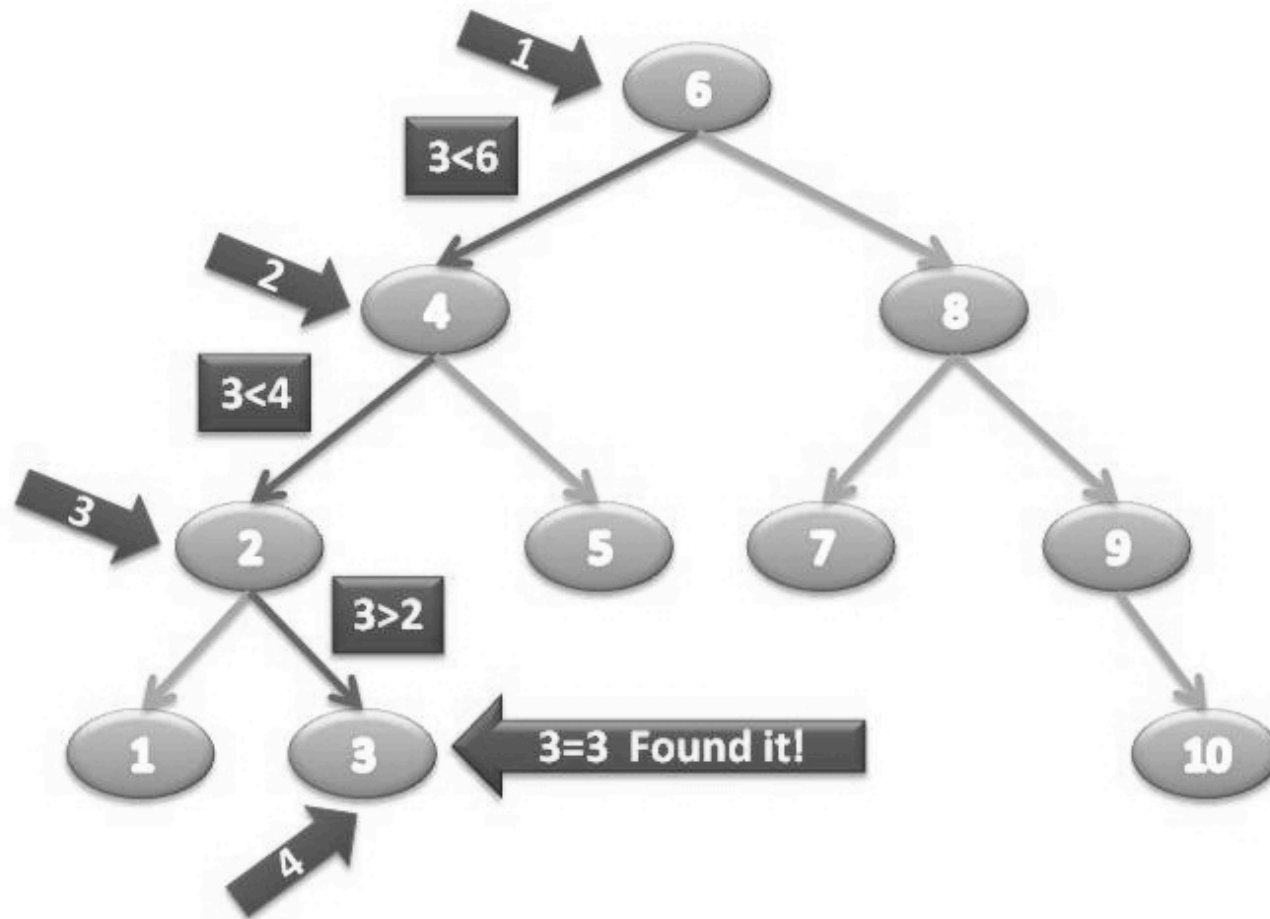
```
(* Ipotesi: t è un BST *)
let rec lookup (t : tree) (n : int) : bool =
  begin match t with
  | Empty -> false
  | Node(lt, x, rt) ->
    if x = n then true
    else if n < x then (lookup lt n)
    else (lookup rt n)
  end
```

Osservazione 1: L'invariante di rappresentazione guida la ricerca

Osservazione2: La ricerca può restituire valori non corretti se applicata a un albero che non soddisfa l'invariante di rappresentazione



lookup(t, 3)

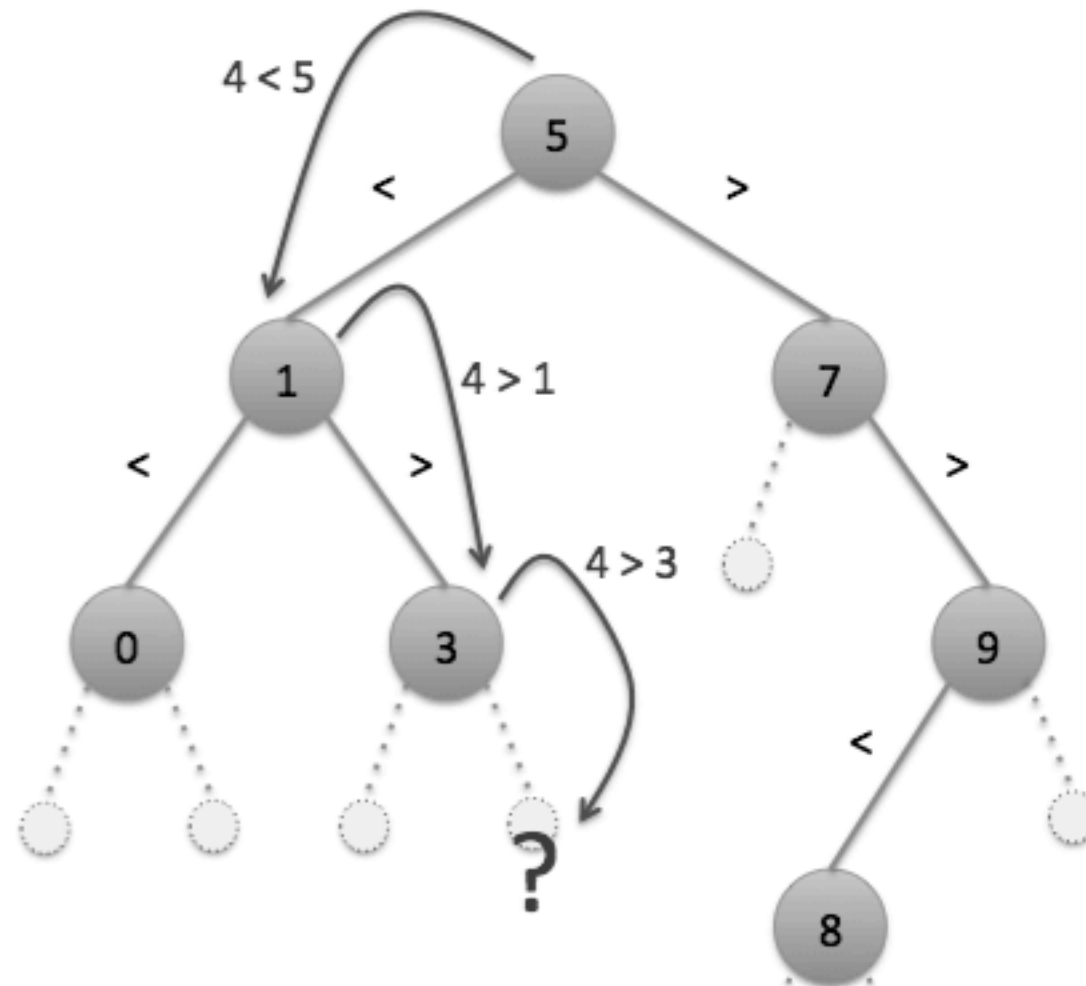




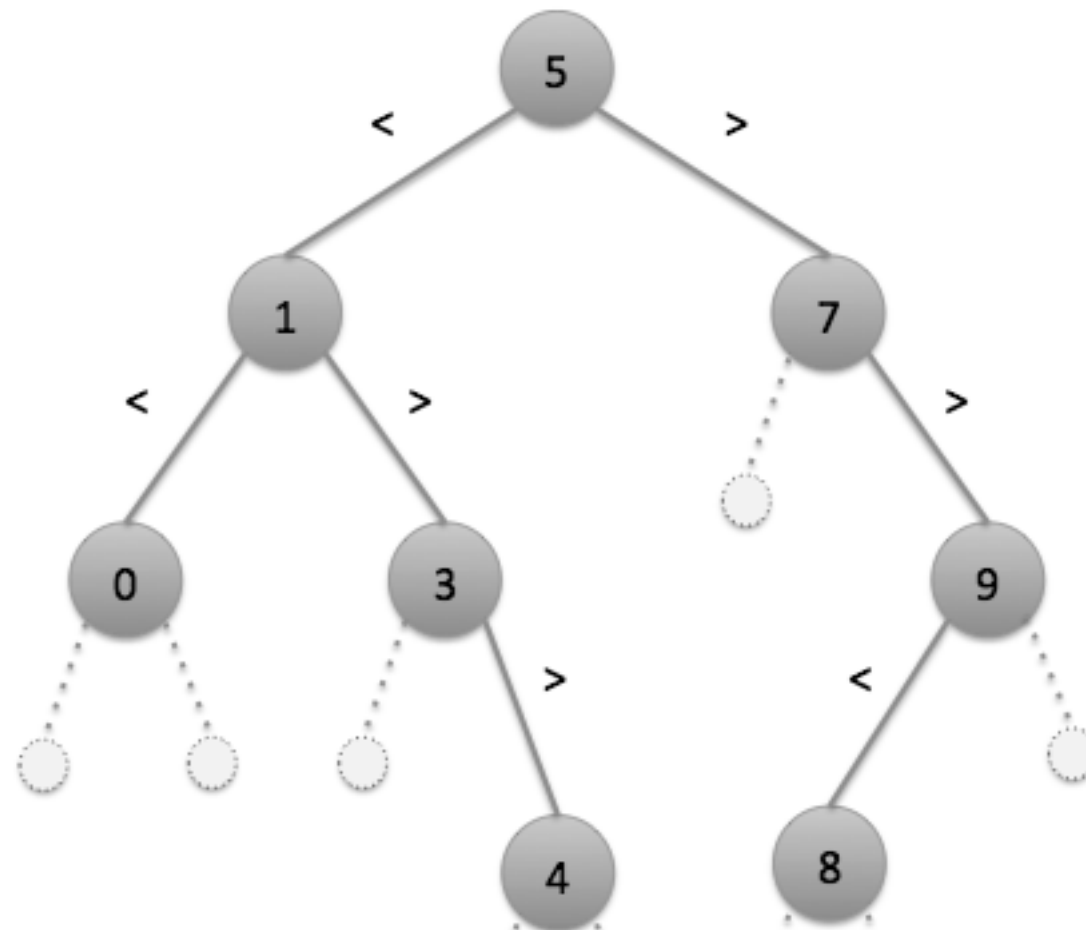
Come costruiamo un BST

- Opzione 1
 - costruiamo un albero e poi controlliamo (check) se vale l'invariante di rappresentazione
- Opzione 2
 - definire le funzioni che costruiscono BST a partire da BST (ad esempio, la funzione che inserisce un elemento in un BST e restituisce un BST)
 - definire una funzione che costruisce il BST vuoto
 - tutte queste funzioni soddisfano l'invariante di rappresentazione, pertanto “per costruzione” otteniamo un BST
 - non si deve effettuare nessun controllo a posteriori!!
 - questo passo mette in evidenza il ruolo della teoria in informatica (tipi algebrici): ne parleremo nel seguito del corso

insert(t, 4)



insert(t, 4)



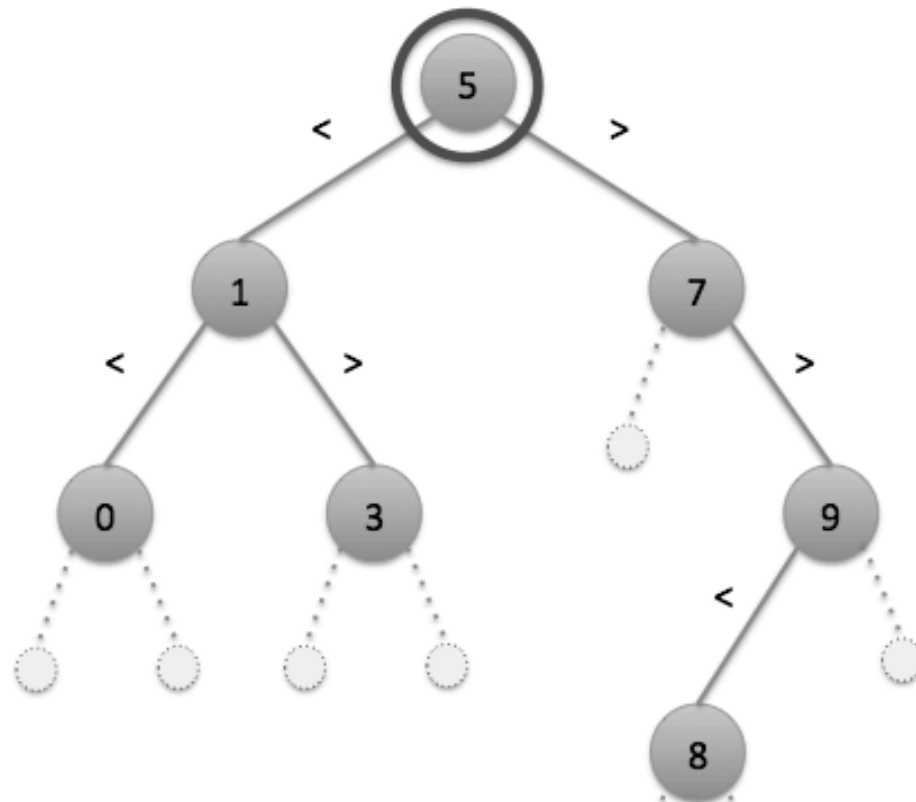


insert

```
(* Insert n nel BST t *)
let rec insert (t : tree) (n : int) : tree =
  begin match t with
    | Empty -> Node(Empty, n, Empty)
    | Node(lt, x, rt) ->
      if x = n then t
      else if n < x then Node(insert lt n, x, rt)
      else Node(lt, x, insert rt n)
  end
```

Per quale motivo l'albero costruito
dalla funzione insert è un BST?

delete(t,5)



L'operazione di rimozione è più complicata: si deve promuovere la foglia 3 a radice dell'albero!!!



Funzione ausiliaria

```
let rec tree_max (t : tree) : int =  
  begin match t with  
    | Node(_, x, Empty) -> x  
    | Node(_, _, rt) -> tree_max rt  
    | _ -> failwith "tree_max called on Empty"  
  end
```

L'invariante di rappresentazione garantisce che il valore max si trova nella parte più a destra dell'albero



delete

```
let rec delete (t : tree) (n : int) : tree =
  begin match t with
  | Empty -> Empty
  | Node(lt, x, rt) ->
    if x = n then
      begin match (lt, rt) with
      | (Empty, Empty) -> Empty
      | (Node _, Empty) -> lt
      | (Empty, Node _) -> rt
      | _ -> let m = tree_max lt in
              Node(delete lt m, m, rt)
      end
    else if n < x then Node(delete lt n, x, rt)
      else Node(lt, x, delete rt n)
  end
end
```



Funzioni generiche

Analizziamo la funzione *length* applicata a *int list* e *string list*

```
let rec length (l : int list) : int =  
  begin match l with  
    | [] -> 0  
    | _::tl -> 1 + length tl  
  end
```

Le funzioni sono identiche,
eccettuata l'annotazione
di tipo

```
let rec length (l : string list) : int =  
  begin match l with  
    | [] -> 0  
    | _::tl -> 1 + length tl  
  end
```



Generici in OCaml

```
let rec length (l : 'a list) : int =  
  begin match l with  
    | [] -> 0  
    | _::tl -> 1 + (length tl)  
  end
```

La notazione 'a list indica una lista generica

length [1; 2; 3] applica la funzione a *int list*

length ["a"; "b"; "c"] applica la funzione a *string list*



Append generico

```
let rec append (l1 : 'a list) (l2 : 'a list) : 'a list =  
  begin match l1 with  
    | [] -> l2  
    | h::tl -> h::(append tl l2)  
  end
```

Pattern matching permette di operare su tipi generici

h ha tipo 'a

tl ha tipo 'a list



Generic zip

```
let rec zip (l1 : 'a list) (l2 : 'b list) : ('a * 'b) list =  
  begin match (l1,l2) with  
    | (h1::t1, h2::t2) -> (h1, h2)::(zip t1 t2)  
    | _ -> []  
  end
```

La funzione opera su tipi generici multipli
(da 'a list e 'b list verso ('a * 'b) list)

```
zip [1;2;3] ["a";"b";"c"] = [(1,"a");(2,"b");(3,"c")] : (int * string) list
```



Generic tree

```
type 'a tree =  
  | Empty  
  | Node of 'a tree * 'a * 'a tree
```

Si noti l'uso del parametro di tipo 'a



Generic BST

```
let rec insert (t : 'a tree) (n : 'a) : 'a tree =  
  begin match t with  
    | Empty -> Node(Empty, n, Empty)  
    | Node(lt, x, rt) ->  
      if x = n then t  
      else if n < x then Node(insert lt n, x, rt)  
      else Node(lt, x, insert rt n)  
  end
```

Gli operatori di relazione = e < operano su ogni tipo di dato



Collection (Set)

- Un insieme è una collezione di dati omogenei con operazioni di unione, intersezione, etc.
- Un Set è sostanzialmente una lista nella quale
 - la struttura d'ordine non è importante
 - non sono presenti duplicati

ma non è un tipo primitivo in Ocaml

- Strutture dati come Set sono usate frequentemente in molte applicazioni
 - interrogazioni SQL (insieme degli studenti iscritti a Informatica, insieme dei risultati di una ricerca sul web con Google, insieme dei dati di un esperimento al CERN, ...)
- Diversi modi per implementare Set



Set

- Un BST definisce una implementazione della struttura Set
 - *l'insieme vuoto (**bst empty**)*
 - *determinare tutti gli elementi che appartengono all'insieme (**visita dell'albero**)*
 - *definire una operazione per testare l'appartenenza di un elemento a un insieme (**lookup**)*
 - *definire unione e intersezione (tramite le operazioni di **insert e delete**)*



OCaml: Set Interface

```
module type Set = sig  
  type 'a set  
  val empty : 'a set  
  val add : 'a -> 'a set -> 'a set  
  val remove : 'a -> 'a set -> 'a set  
  val list_to_set : 'a list -> 'a set  
  val member : 'a -> 'a set -> bool  
  val elements : 'a set -> 'a list  
end
```

Idea (solita): fornire diverse funzionalità nascondendo la loro implementazione

Module type (in un file .mli) per dichiarare un TdA
sig ... end racchiudono una segnatura, che definisce il TdA e le operazioni
val: nome dei valori che devono essere definiti e dei loro tipi



Moduli in OCaml

Nome del modulo

Signature che deve
essere implementata

```
module Myset : Set = struct ...  
  (* implementations of all the operations *)  
  :  
end
```



“dot notation”

```
let s1 = Myset.add 3 Myset.empty
let s2 = Myset.add 4 Myset.empty
let s3 = Myset.add 4 s1
let test() : bool = (Myset.member 3 s1) = true
;; run_test "Myset.member 3 s1" test
let test() : bool = (Myset.member 4 s3) = true
;; run_test "Myset.member 4 s3" test
```



Open module

Alternativa: aprire lo scope del modulo (**open**) per portare i nomi nell'ambiente del programma in esecuzione

```
;; open Myset
let s1 = add 3 empty
let s2 = add 4 empty
let s3 = add 4 s1
let test() : bool = (member 3 s1) = true
;; run_test "Myset.member 3 s1" test
let test() : bool = (member 4 s3) = true
;; run_test "Myset.member 4 s3" test
```



Implementazione basata su list

```
module MySet2 : Set =  
struct  
  type 'a set = 'a list  
  let empty : 'a set = []  
  ...  
end
```

Una definizione
concreta
per il tipo Set



Domande

```
open MySet  
let s1 : int set = Empty
```

Supera la fase di controllo dei tipi?



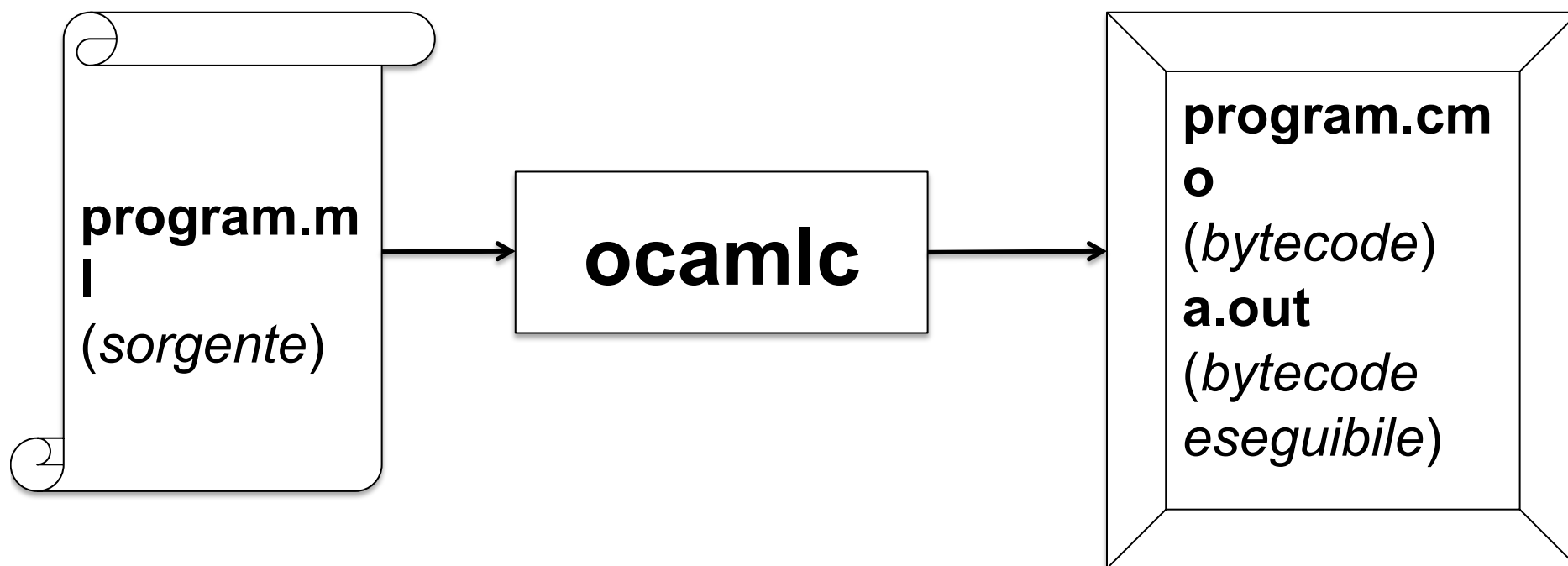
Domande

```
open MySet  
let s1 : int set = Empty
```

Supera la fase di controllo dei tipi?

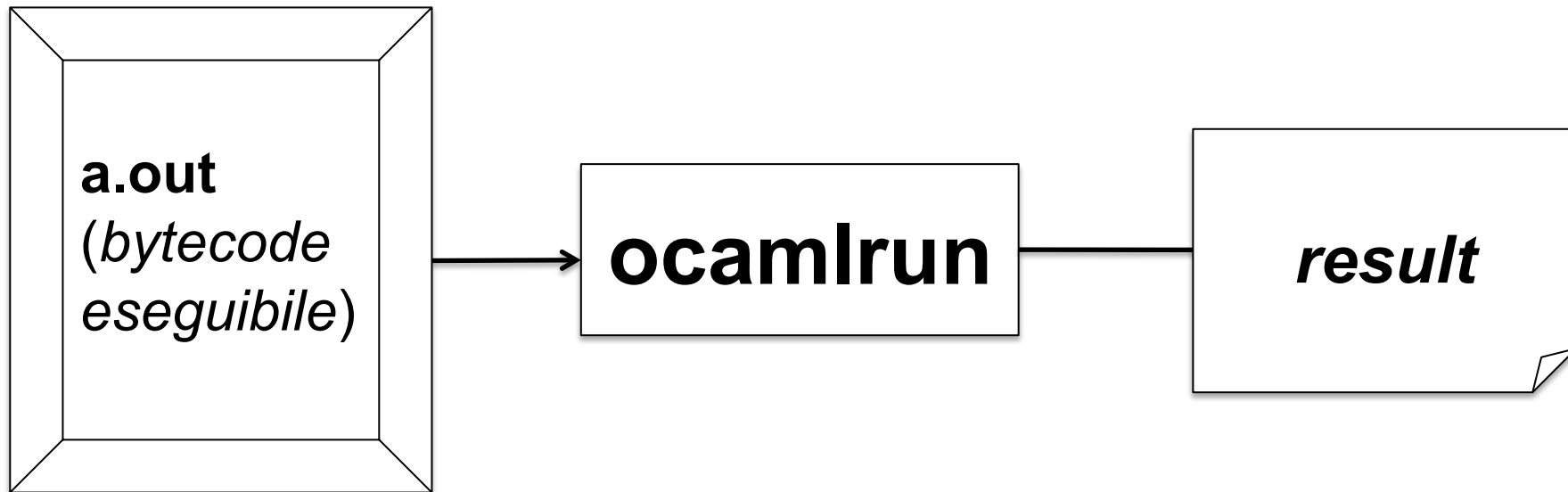
No: il costruttore `Empty` non è visibile esternamente al modulo!!!

Compilare programmi OCaml



<http://caml.inria.fr/pub/docs/manual-ocaml/comp.html>

Eseguire bytecode OCaml



<http://caml.inria.fr/pub/docs/manual-ocaml-400/manual024.html>