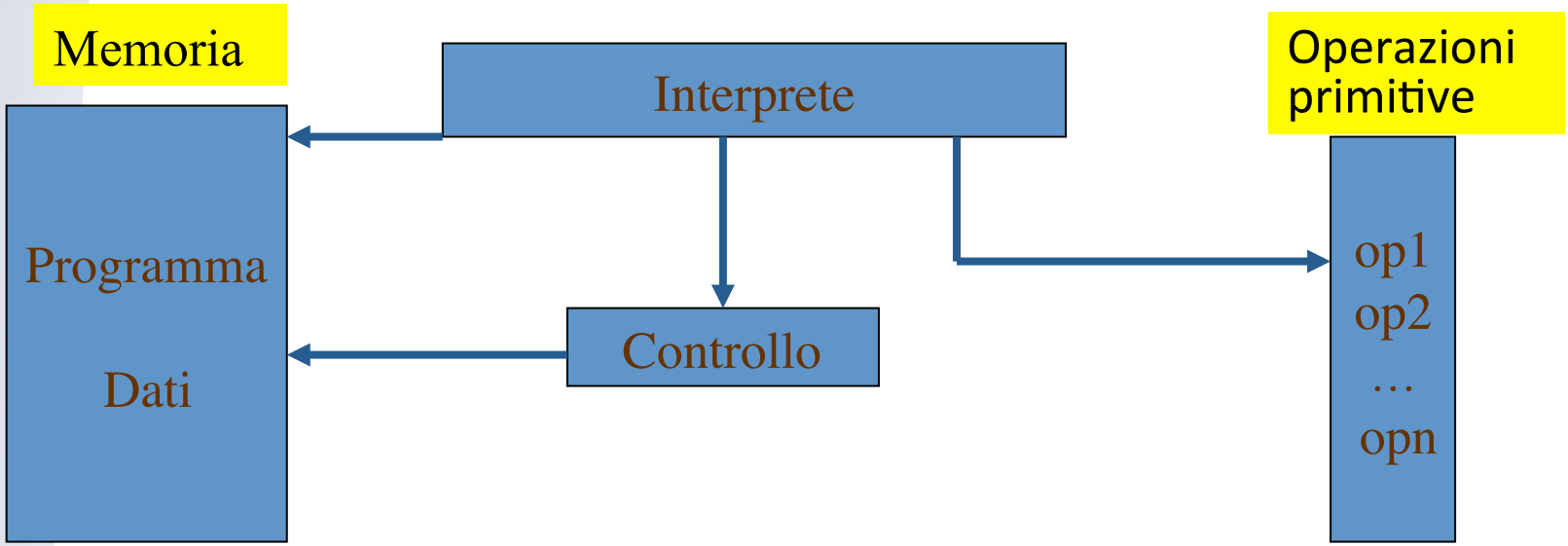

AA 2014-2015

# 16. Macchine astratte, linguaggi, interpretazione, compilazione

# Macchine astratte

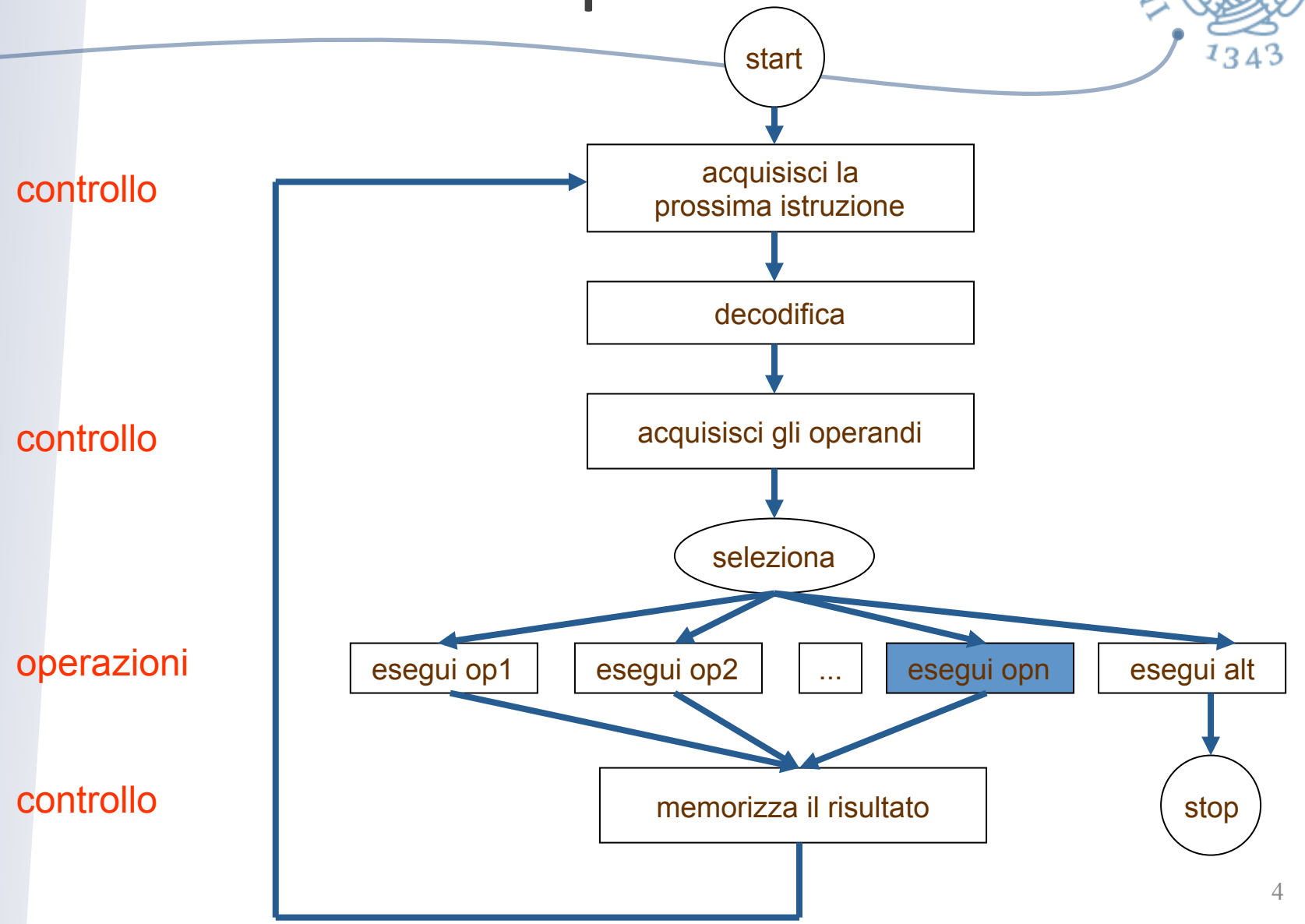

- Una collezione di strutture dati ed algoritmi in grado di **memorizzare** ed **eseguire** programmi
- Componenti della macchina astratta
  - interprete
  - memoria (dati e programmi)
  - controllo
  - operazioni "primitive"



# Componente di controllo


- Una collezione di strutture dati ed algoritmi per
  - acquisire la prossima istruzione
  - gestire le chiamate e i ritorni dai sottoprogrammi
  - acquisire gli operandi e memorizzare i risultati delle operazioni
  - mantenere le associazioni fra nomi e valori denotati
  - gestire dinamicamente la memoria
  - …

# L'interprete



# Il linguaggio macchina


- **M** macchina astratta
- $\mathbf{L_M}$ linguaggio macchina di **M**
  - è il linguaggio che ha come stringhe legali tutti i programmi interpretabili dall'interprete di **M**
- I programmi sono particolari dati su cui opera l'interprete
- Alle componenti di **M** corrispondono componenti di $\mathbf{L_M}$
  - tipi di dato primitivi
  - costrutti di controllo
    - ✓per controllare l'ordine di esecuzione
    - ✓per controllare acquisizione e trasferimento dati

# Implementare macchine astratte


- **M** macchina astratta
- I componenti di **M** sono realizzati mediante strutture dati ed algoritmi implementati nel linguaggio macchina di una **macchina ospite $M_o$**, già esistente (implementata)
- È importante la realizzazione dell'interprete di **M**
  - può coincidere con l'interprete di $M_o$
    - ✓ **M** è realizzata come **estensione** di $M_o$
    - ✓ altri componenti della macchina possono essere diversi
  - può essere diverso dall'interprete di $M_o$
    - ✓ **M** è realizzata su $M_o$ in modo **interpretativo**
    - ✓ altri componenti della macchina possono essere uguali

# Da linguaggio a macchina astratta

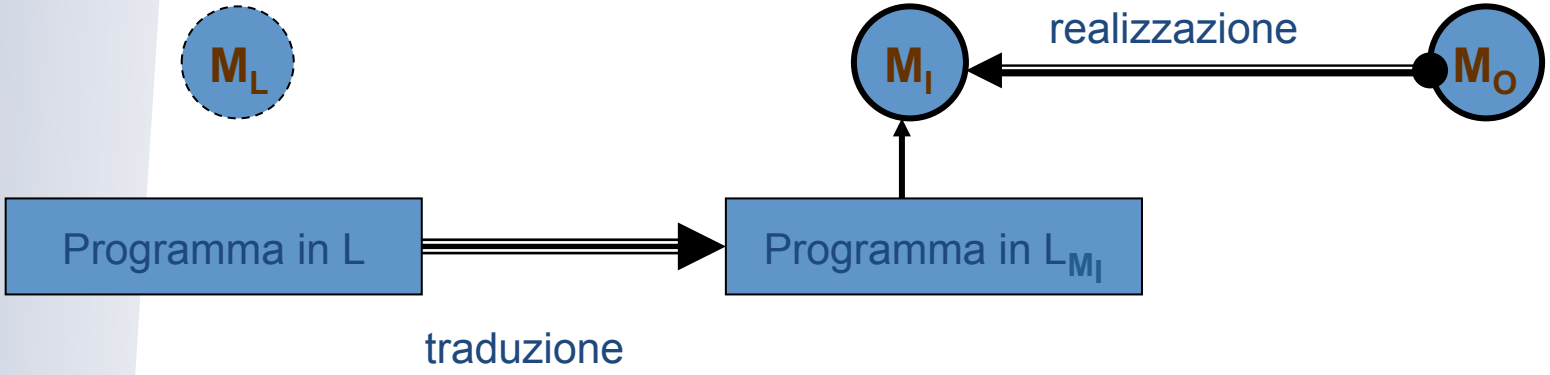

- **M** macchina astratta — $\mathbf{L_M}$ linguaggio macchina di **M**
- **L** linguaggio — $\mathbf{M_L}$ macchina astratta di **L**
- Implementazione di **L** =

  realizzazione di $\mathbf{M_L}$ su una macchina ospite $\mathbf{M_O}$
- Se **L** è un linguaggio ad alto livello e $\mathbf{M_O}$ una macchina "fisica"
  - l'interprete di $\mathbf{M_L}$ è necessariamente diverso dall'interprete di $\mathbf{M_O}$
    - ✓ $\mathbf{M_L}$ è realizzata su $\mathbf{M_O}$ in modo interpretativo
    - ✓ l'implementazione di **L** si chiama **interprete**
    - ✓ esiste una soluzione alternativa basata su tecniche di traduzione (**compilatore**?)

# Implementare un linguaggio

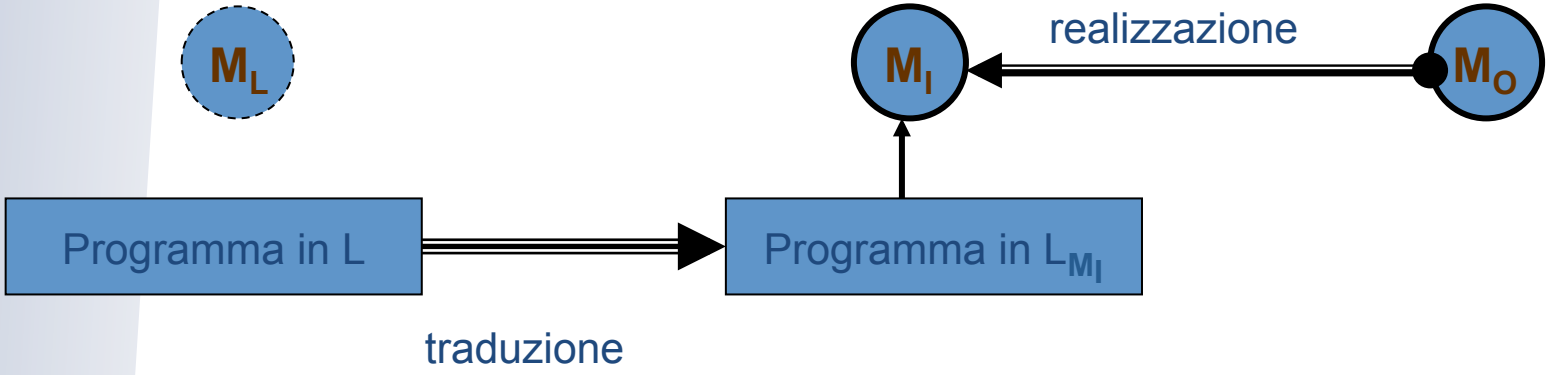

- **L** linguaggio ad alto livello
- $\mathbf{M_L}$ macchina astratta di **L**
- $\mathbf{M_O}$ macchina ospite
- **interprete** (puro)
  - $\mathbf{M_L}$ è realizzata su $\mathbf{M_O}$ in modo interpretativo
  - scarsa efficienza, soprattutto per colpa dell'interprete (ciclo di decodifica)
- **compilatore** (puro)
  - i programmi di **L** sono tradotti in programmi funzionalmente equivalenti nel linguaggio macchina di $\mathbf{M_O}$
  - i programmi tradotti sono eseguiti direttamente su $\mathbf{M_O}$
    - ✓ $\mathbf{M_L}$ non viene realizzata
  - il problema è quello della dimensione del codice prodotto
- Casi limite che nella realtà non esistono quasi mai

# La macchina intermedia




- **L** linguaggio ad alto livello
- $\mathbf{M_L}$ macchina astratta di **L**
- $\mathbf{M_I}$ macchina intermedia
- $\mathbf{L_{M_I}}$ linguaggio intermedio
- $\mathbf{M_O}$ macchina ospite
  - traduzione dei programmi da **L** al linguaggio intermedio $\mathbf{L_{M_I}}$
  - realizzazione della macchina intermedia $\mathbf{M_I}$ su $\mathbf{M_O}$

# Intepretazione e traduzione pure




- $M_L = M_I$ interpretazione pura
- $M_O = M_I$ traduzione pura
  - possibile solo se la differenza fra $M_O$ e $M_L$ è molto limitata
    - ✓ L linguaggio assembler di $M_O$
  - in tutti gli altri casi, c'è sempre una macchina intermedia che estende eventualmente la macchina ospite in alcuni componenti

# Il compilatore


- Quando l'interprete della macchina intermedia $\mathbf{M_I}$ coincide con quello della macchina ospite $\mathbf{M_O}$
- Che differenza esiste tra $\mathbf{M_I}$ e $\mathbf{M_O}$?
  - il **supporto a tempo di esecuzione (rts)**
    - ✓collezione di strutture dati e sottoprogrammi che devono essere caricati su $\mathbf{M_O}$ (estensione) per permettere l'esecuzione del codice prodotto dal traduttore (compilatore)
  - $\mathbf{M_I} = \mathbf{M_O}$ + rts
- Il linguaggio $L_{M_I}$ è il linguaggio macchina di $\mathbf{M_O}$ esteso con chiamate al supporto a tempo di esecuzione

# A cosa serve il rts?


- Un esempio da un linguaggio antico (**FORTRAN**): in linea di principio, è possibile tradurre completamente un programma FORTRAN in un linguaggio macchina puro, senza chiamate al rts, ma...
  - la traduzione di alcune primitive FORTRAN (per esempio, relative all'ingresso uscita) produrrebbe centinaia di istruzioni in linguaggio macchina
    - ✓ se le inserissimo nel codice compilato, la sua dimensione crescerebbe a dismisura
    - ✓ in alternativa, possiamo inserire nel codice una chiamata a una routine (indipendente dal particolare programma)
    - ✓ tale routine deve essere caricata su $\mathbf{M_0}$ ed entra a far parte del rts
- Nei veri linguaggi ad alto livello, questa situazione si presenta per quasi tutti i costrutti del linguaggio
  - meccanismi di controllo
  - non solo routine ma anche strutture dati

# Il compilatore C


- Il supporto a tempo di esecuzione contiene
  - varie strutture dati
    - ✓lo stack
      - ambiente, memoria, sottoprogrammi, …
    - ✓la memoria a heap
      - puntatori, ...
  - i sottoprogrammi che realizzano le operazioni necessarie su tali strutture dati
- Il codice prodotto è scritto in linguaggio macchina esteso con chiamate al rts

# Implementazioni miste


- Quando l'interprete della macchina intermedia $\mathbf{M_I}$ è diverso da quello della macchina ospite $\mathbf{M_O}$
- Esiste un ciclo di interpretazione del linguaggio intermedio $L_{M_I}$ realizzato su $\mathbf{M_O}$
  - per ottenere un codice tradotto più compatto
  - per facilitare la portabilità su più macchine ospiti
  - si deve reimplementare l'interprete del linguaggio intermedio
  - non è necessario reimplementare il traduttore

# Compilatore o implementazione mista?


- Nel compilatore non c'è di mezzo un livello di interpretazione del linguaggio intermedio
  - sorgente di inefficienza
    - ✓ la decodifica di una istruzione nel linguaggio intermedio (e la sua trasformazione nelle azioni semantiche corrispondenti) viene effettuata ogni volta che si incontra l'istruzione
- Se il linguaggio intermedio è progettato bene, il codice prodotto da una implementazione mista ha dimensioni inferiori a quelle del codice prodotto da un compilatore
- Un'implementazione mista è più portabile di un compilatore
- Il supporto a tempo di esecuzione di un compilatore si ritrova quasi uguale nelle strutture dati e routine utilizzate dall'interprete del linguaggio intermedio

# L'implementazione di Java


- È un'implementazione mista
  - traduzione dei programmi da Java a byte-code, linguaggio macchina di una macchina intermedia chiamata **Java Virtual Machine**
  - i programmi byte-code sono interpretati
  - l'interprete della Java Virtual Machine opera su strutture dati (stack, heap) simili a quelle del rts del compilatore C
    - ✓ la differenza fondamentale è la presenza di una gestione automatica del recupero della memoria a heap (garbage collector)
  - su una tipica macchina ospite, è più semplice realizzare l'interprete di byte-code che l'interprete di Java
    - ✓ il byte-code è più "vicino" al tipico linguaggio macchina

# Tre famiglie di implementazioni


- Interprete puro
  - $\mathbf{M_L} = \mathbf{M_I}$
  - interprete di **L** realizzato su $\mathbf{M_O}$
  - alcune implementazioni (vecchie!) di linguaggi logici e funzionali (LISP, PROLOG)
- Compilatore
  - macchina intermedia $\mathbf{M_I}$ realizzata per estensione sulla macchina ospite $\mathbf{M_O}$ (rts, nessun interprete) (C, C++, PASCAL)
- Implementazione mista
  - traduzione dei programmi da **L** a $\mathbf{L_{M_I}}$
  - i programmi $\mathbf{L_{M_I}}$ sono interpretati su $\mathbf{M_O}$
    - ✓ Java
    - ✓ i "compilatori" per linguaggi funzionali e logici (LISP, PROLOG, ML)
    - ✓ alcune (vecchie!) implementazioni di Pascal (Pcode)

# Implementazioni miste e interpreti puri


- La traduzione genera codice in un linguaggio più facile da interpretare su una tipica macchina ospite
- Ma soprattutto può effettuare una volta per tutte (a tempo di traduzione, staticamente) analisi, verifiche e ottimizzazioni che migliorano
  - l'affidabilità dei programmi
  - l'efficienza dell'esecuzione
- Varie proprietà interessate
  - inferenza e controllo dei tipi
  - controllo sull'uso dei nomi e loro risoluzione "statica"
  - …

# Analisi statica


- Dipende dalla semantica del linguaggio
- Certi linguaggi (LISP) non permettono praticamente nessun tipo di analisi statica
  - a causa della regola di scoping dinamico nella gestione dell'ambiente non locale
- Altri linguaggi funzionali più moderni (ML) permettono di inferire e verificare molte proprietà (tipi, nomi, …) durante la traduzione, permettendo di
  - localizzare errori
  - eliminare controlli a tempo di esecuzione
    - ✓ type-checking dinamico nelle operazioni
  - semplificare certe operazioni a tempo di esecuzione
    - ✓ come trovare il valore denotato da un nome

# Analisi statica in Java


- Java è fortemente tipato
  - il type checking può essere in gran parte effettuato dal traduttore e sparire quindi dal byte-code generato
- Le relazioni di subtyping permettono che una entità abbia un tipo vero (actual type) diverso da quello apparente (apparent type)
  - tipo apparente noto a tempo di traduzione
  - tipo vero noto solo a tempo di esecuzione
  - è garantito che il tipo apparente sia un supertype di quello vero
- Di conseguenza, alcune questioni legate ai tipi possono essere risolte solo a tempo di esecuzione
  - scelta del più specifico fra diversi metodi overloaded
  - casting (tentativo di forzare il tipo apparente ad un suo possibile sottotipo)
  - dispatching dei metodi (scelta del metodo secondo il tipo vero)
- Controlli e simulazioni a tempo di esecuzione

# Semantica formale e rts


- Due aspetti essenziali nella nostra visione (intendendo quella del corso) dei linguaggi di programmazione
  - semantica formale
    - ✓ eseguibile, implementazione ad altissimo livello
  - implementazioni o macchine astratte
    - ✓interpreti e supporto a tempo di esecuzione

# Perché?


- Perché la semantica formale?
  - definizione precisa del linguaggio indipendente dall'implementazione
    - ✓il progettista la definisce
    - ✓l'implementatore la utilizza come specifica
    - ✓il programmatore la utilizza per ragionare sul significato dei propri programmi
- Perché le macchine astratte?
    - ✓il progettista deve tener conto delle caratteristche possibili dell'implementazione
    - ✓l'implementatore la realizza
    - ✓il programmatore la deve conoscere per utilizzare al meglio il linguaggio

# Perché?


- Diventare un programmatore consapevole
  - migliore comprensione delle caratteristiche dei linguaggi di programmazione
  - comprendere le tecniche di implementazione
  - migliore intuizione del comportamento del proprio codice

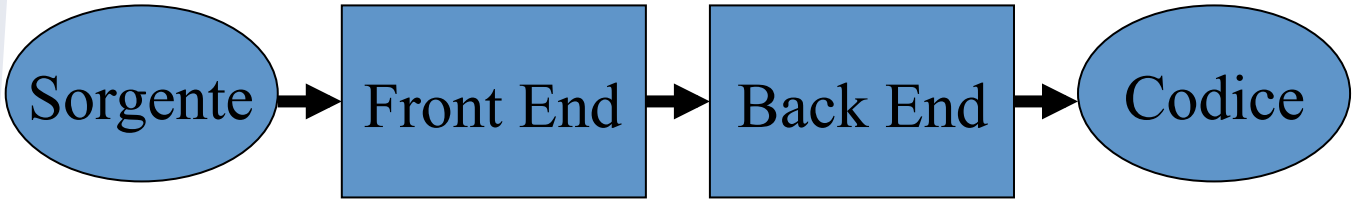
# Perché?


- Miscela affascinante di teoria e pratica
  - applicazione immediata e diretta della teoria
    - ✓Tecniche di analisi statica: inferenza dei tipi
  - tecniche algoritmiche (problemi NP-hard)
    - ✓Allocazione delle risorse a run-time

# E il compilatore?


- La maggior parte dei corsi e dei libri sui linguaggi si occupano di compilatori
- Perché noi no?
  - il punto di vista dei compilatori verrà mostrato in un corso fondamentale della laurea magistrale
  - delle cose tradizionalmente trattate con il punto di vista del compilatore, poche sono quelle che realmente ci interessano
- Guardiamo la struttura di un tipico compilatore

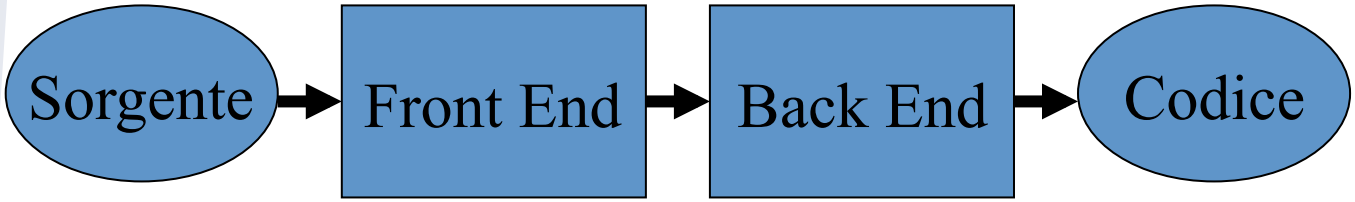
# Compilatore




**Front end: fasi di analisi**
Legge il programma sorgente e determina la sua struttura sia sintattica che semantica

**Back end: sintesi**
Genera il codice nel linguaggio macchina, programma equivalente al programma sorgente

# Compilatore



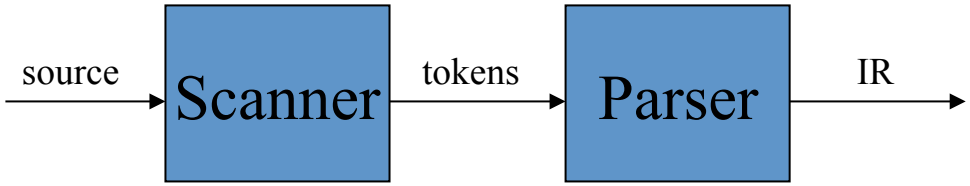

**Aspetti critici**

Riconoscere i programmi legali (sintatticamente corretti)

Gestire la struttura dei tipi

Genererare codice compatibile con il SO della macchina ospite

# Front End




- Due fasi principali
  - scanner: compito di trasformare il programmma sorgente nel lessico (token)
  - parser: legge i token e genera il codice intermedio (IR)
- La teoria aiuta
  - la teoria dei linguaggi formali: automi, grammatiche
  - strumenti automatici per generare scanner e parser

# Token


- Token: la costituente lessicale del linguaggio
  - pperatori & punteggiatura: {}[]!+-=*;: …
  - parole chiave: if while return class …
  - identificatori: …
  - costanti:  int, floating-point character, string, …

# Scanner: un esempio


- Input

```
// codice stupido
if (x >= y) y = 42;
```

- Token

| IF | LPAREN | ID(x) | GEQ | ID(y) |
|---|---|---|---|---|

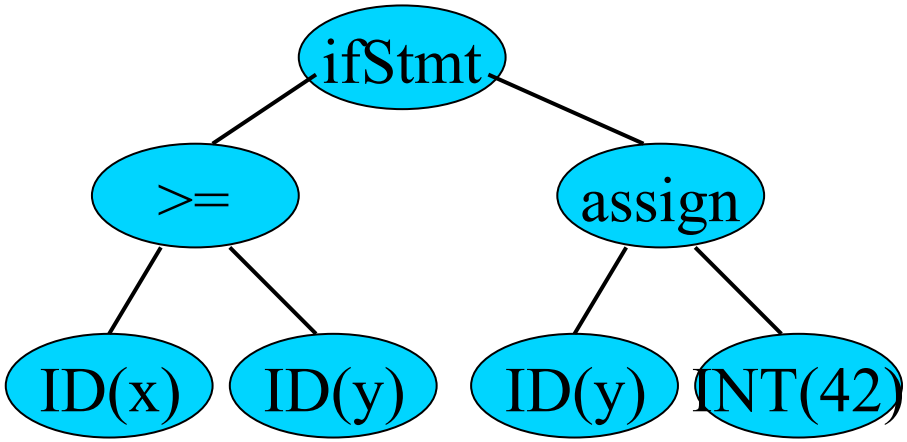
| RPAREN | ID(y) | BECOMES | INT(42) | SCOLON |
|---|---|---|---|---|

# Parser: output (IR)


- Formati differenti
- Formato tipico riconosciuto: albero di sintassi astratta (abstract syntax tree)
  - la struttura sintattica essenziale del programma senza gli aspetti di zucchero sintattico
  - ne parliamo anche nel seguito

# Parser: AST


- Abstract Syntax Tree (AST)

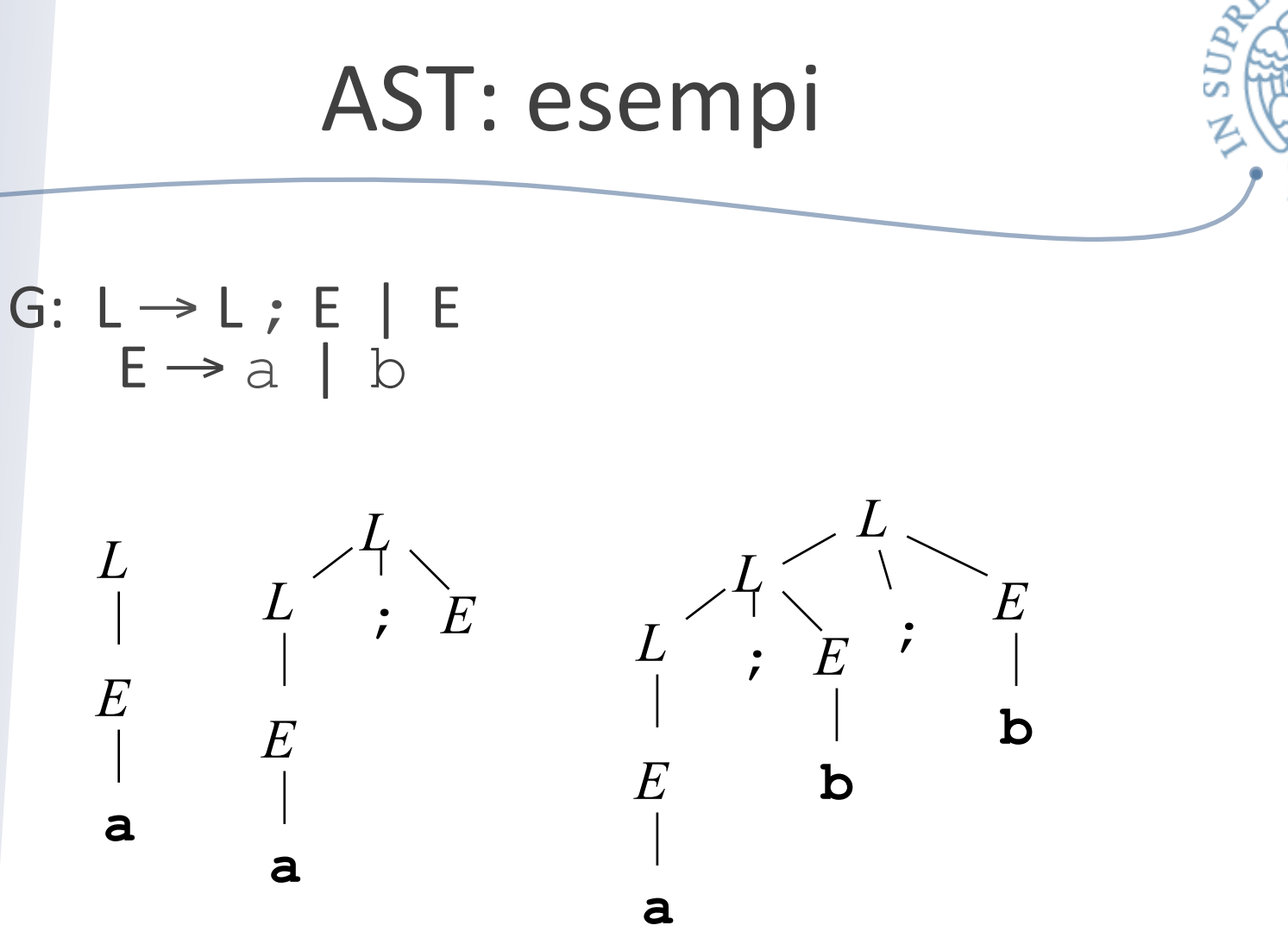



| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| IF | LPAREN | ID(x) | GEQ | ID(y) |
| RPAREN | ID(y) | BECOMES | INT(42) | SCOLON |

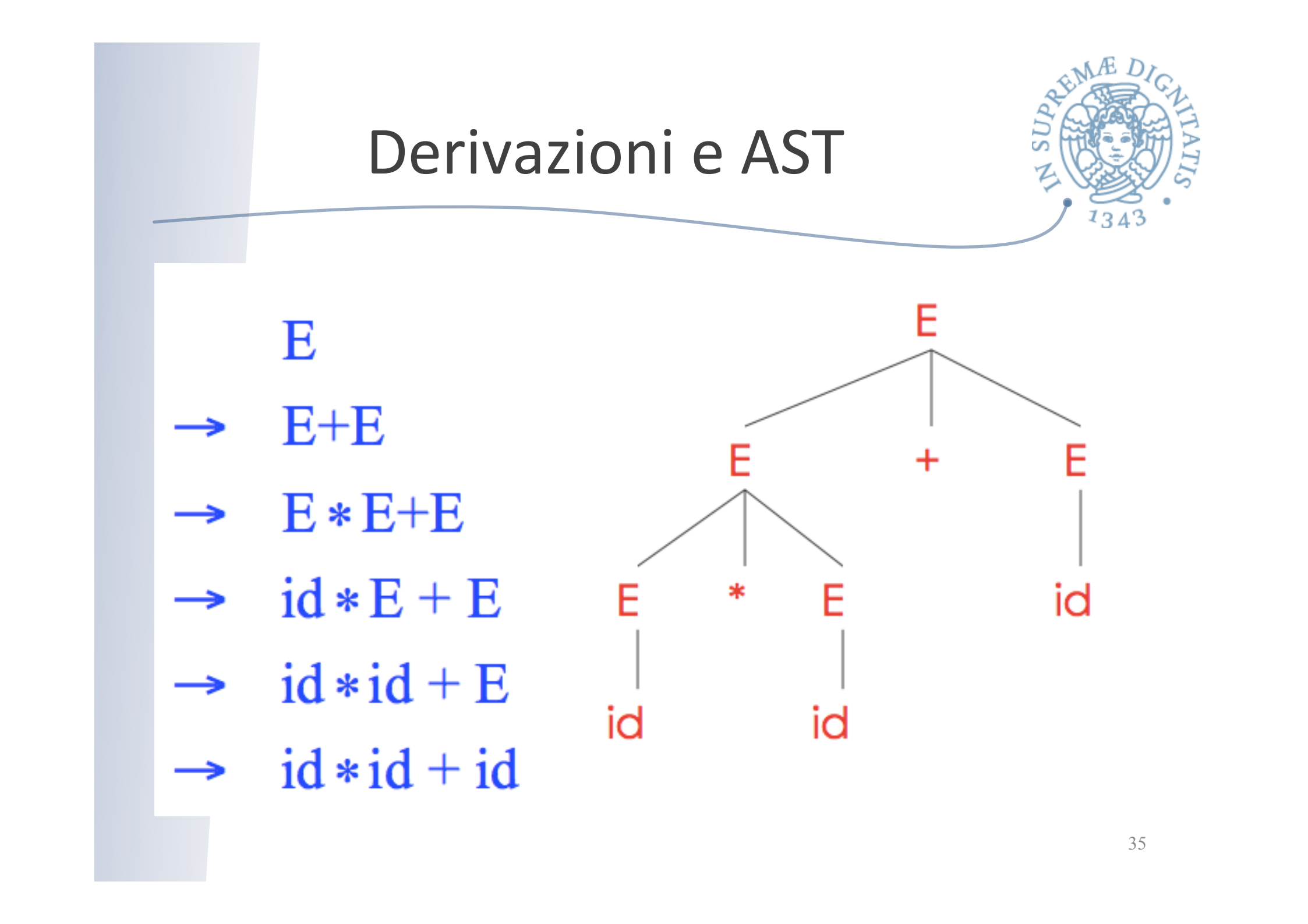
# AST


- Gli alberi di sintassi astratta sono particolarmente rilevanti perché mostrano la struttura semantica significativa dei programmi.
- Noi nel seguito consideremo sempre la sintassi astratta!!
  - senza considerare gli aspetti di dettaglio quali precedenza operatori, ambiguità, etc.

# AST: esempi



# Derivazioni e AST

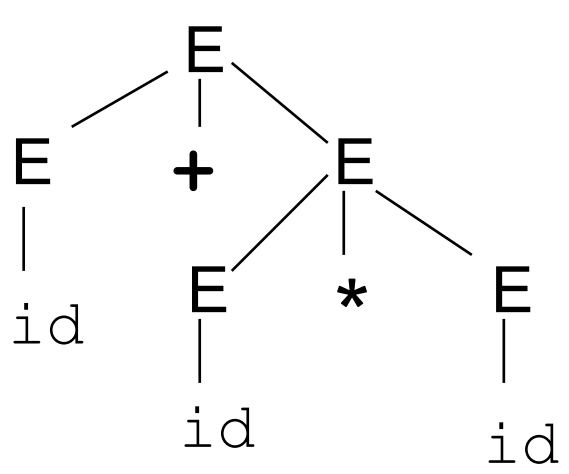


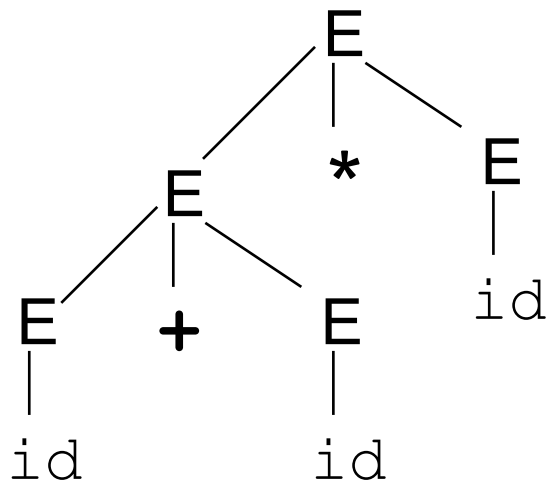
$$
\begin{aligned}
& E \\
\rightarrow\ & E+E \\
\rightarrow\ & E*E+E \\
\rightarrow\ & id*E+E \\
\rightarrow\ & id*id+E \\
\rightarrow\ & id*id+id
\end{aligned}
$$

# Ambiguità




- Programma corretto con AST diversi
- Esempio
  - $E \rightarrow E{+}E \mid E{*}E \mid \text{id}$



# Come si risolve?


- Esistono più metodi
- Ad esempio, codificare nelle regole della grammatica la precedenza degli operatori

$$E \rightarrow E' + E \mid E'$$

$$E' \rightarrow id * E' \mid id \mid (E) * E' \mid (E)$$

# Morale


- La teoria (grammatiche e linguaggi formali) aiuta a strutturare le grammatiche in modo tale da evitare i problemi come quello dell'ambiguità
  - Tanti altri ancora…
- Tutte queste problematiche le vedrete nella magistrale…

# Sintassi astratta


- La sintassi astratta di un linguaggio è espressa facilmente coi tipi di dato algebrici di Ocaml
  - ogni categoria sintattica diventa un tipo di dato algebrico di Ocaml

BNF

```
BoolExp =
  | True
  | False
  | NOT BoolExp
  | BoolExp AND BoolExp
```

Algebraic Data Type

```
Type BoolExp =
  | True
  | False
  | Not of BoolExp
  | And of BoolExp * BoolExp
```

# Esempio


| Nome. | Produzione grammaticale | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| EAdd. | Exp | ::= | Exp | "+" | Exp1 | ; |
| ESub. | Exp | ::= | Exp | "-" | Exp1 | ; |
| EMul. | Exp1 | ::= | Exp1 | ”*" | Exp2 | ; |
| EDiv. | Exp1 | ::= | Exp1 | "/" | Exp2 | ; |
| EInt. | Exp2 | ::= | Integer | | | ; |

```
type exp =
   EAdd of exp * exp
 | ESub of exp * exp
 | EMul of exp * exp
 | EDiv of exp * exp
 | EInt of int
```

# AST in Java


- Potremmo codificare la sintassi astratta di un linguaggio anche in Java
- In che modo?
  - ogni categoria sintattica è una classe astratta
  - ogni costruttore sintattico è una sottoclasse che estende la classe astratta

# AST in Java (esempio)


- public abstract class Exp { … }

- public class ESub extends Exp {
  public final Exp exp_1, exp_2;
  public ESub(Exp p1, Exp p2) {
  exp_1 = p1; exp_2 = p2;
  }
  :
  }

# Analisi semantica (statica)


- Tipicamente dopo la fase di parsing
  - type checking
  - uso e allocazione delle risorse
  - ottimizzazione del codice

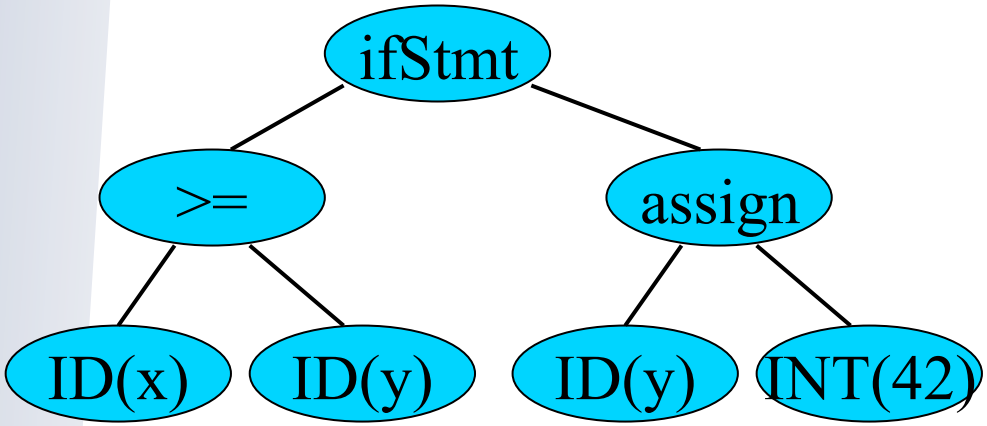
# Back End


- Cosa fa?
  - traduce il codice intermedio nel linguaggio della macchina ospite
  - usa le risorse della macchina ospite in modo effettivo

# Il risultato complessivo


- Input

```
if (x >= y)
   y = 42;
```

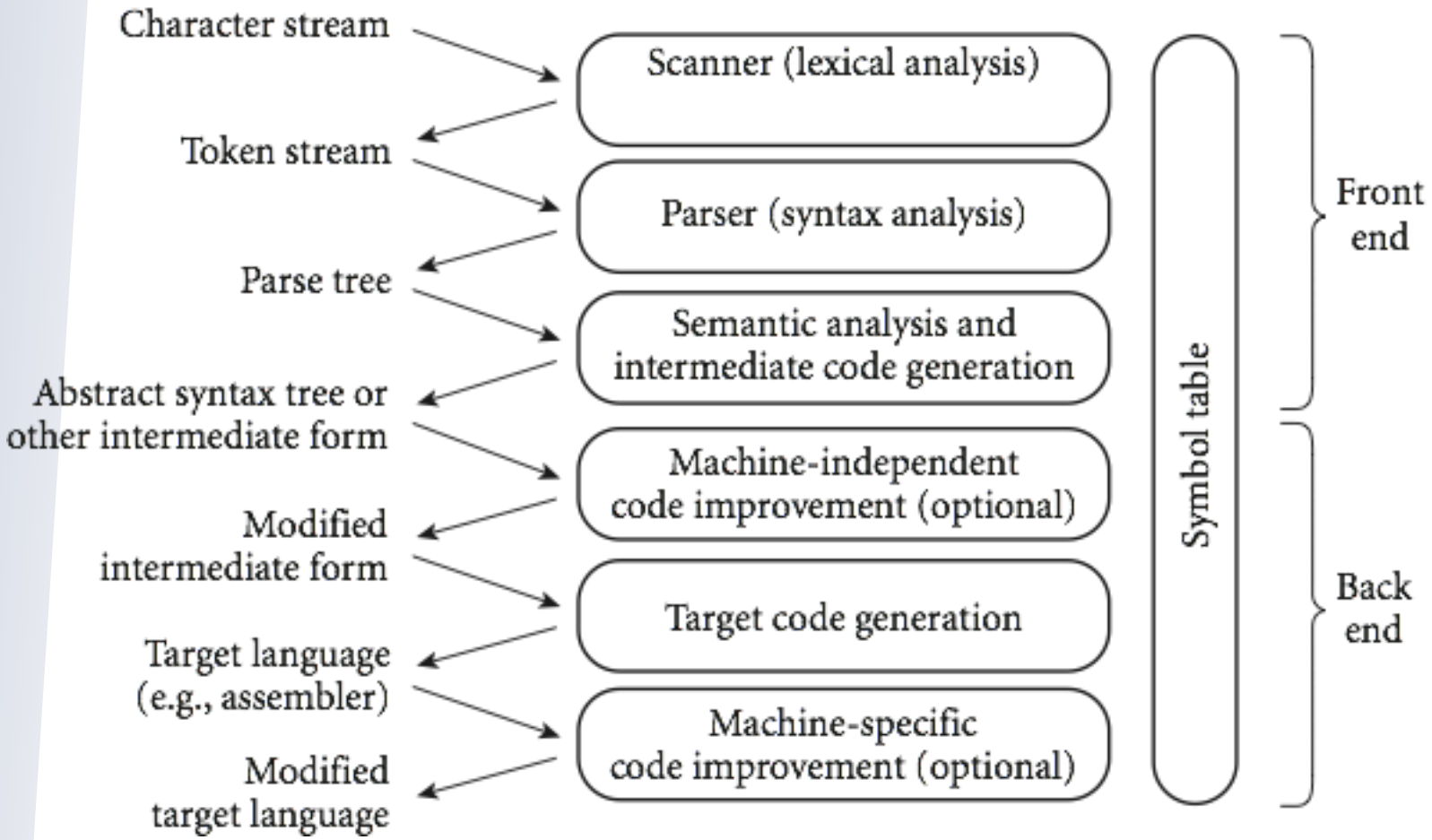



- Output

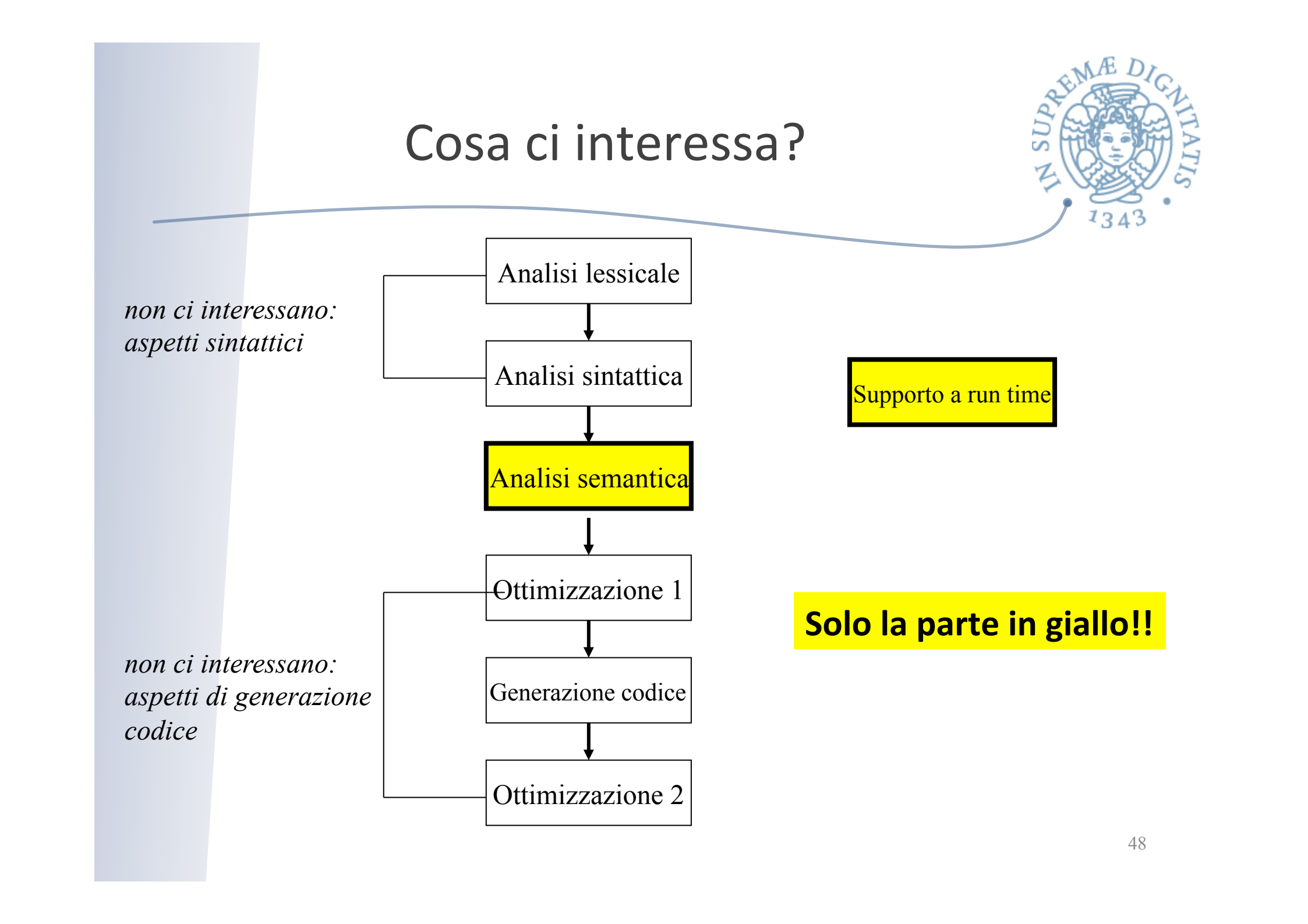
```
  mov   eax,[ebp+16]
  cmp   eax,[ebp-8]
  jl       L17
  mov    [ebp-8],42
L17:
```


# Mettiamo insieme le cose

# Struttura di un compilatore



# Cosa ci interessa?




*non ci interessano: aspetti sintattici*

*non ci interessano: aspetti di generazione codice*

**Solo la parte in giallo!!**

# JIT compiler


- *Idea*: compilare il byte-code nel codice nativo durante l'esecuzione
- *Vantaggi*
  - programma continua a essere portatile;
  - esecuzioni "ottimizzate" (code inlining)
- *Svantaggi*
  - rts molto complicato (ottimizzare long-running activation)
  - costo della compilazioni JIT
- Noi non ne parliamo!