



---

# **Macchine astratte, linguaggi, interpretazione, compilazione**



# Von Neumann

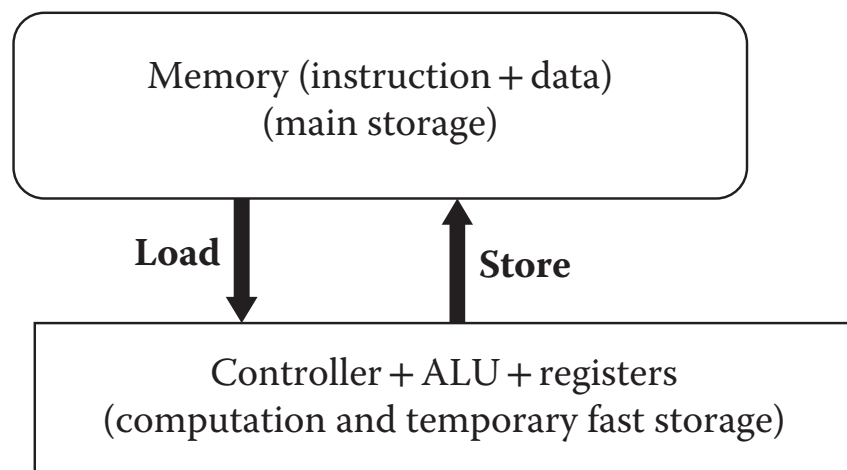
---

- Il modello di **Von Neumann** è alla base della struttura dei computer attuali
- Due componenti principali
  - **Memoria**, dove sono memorizzati i programmi e i dati
  - **Unità centrale di elaborazione**, che ha il compito di eseguire i programmi immagazzinati in memoria prelevando le istruzioni (e i dati relativi), interpretandole ed eseguendole una dopo l'altra



# La macchina di Von Neumann

---





# Ciclo Fetch-Execute

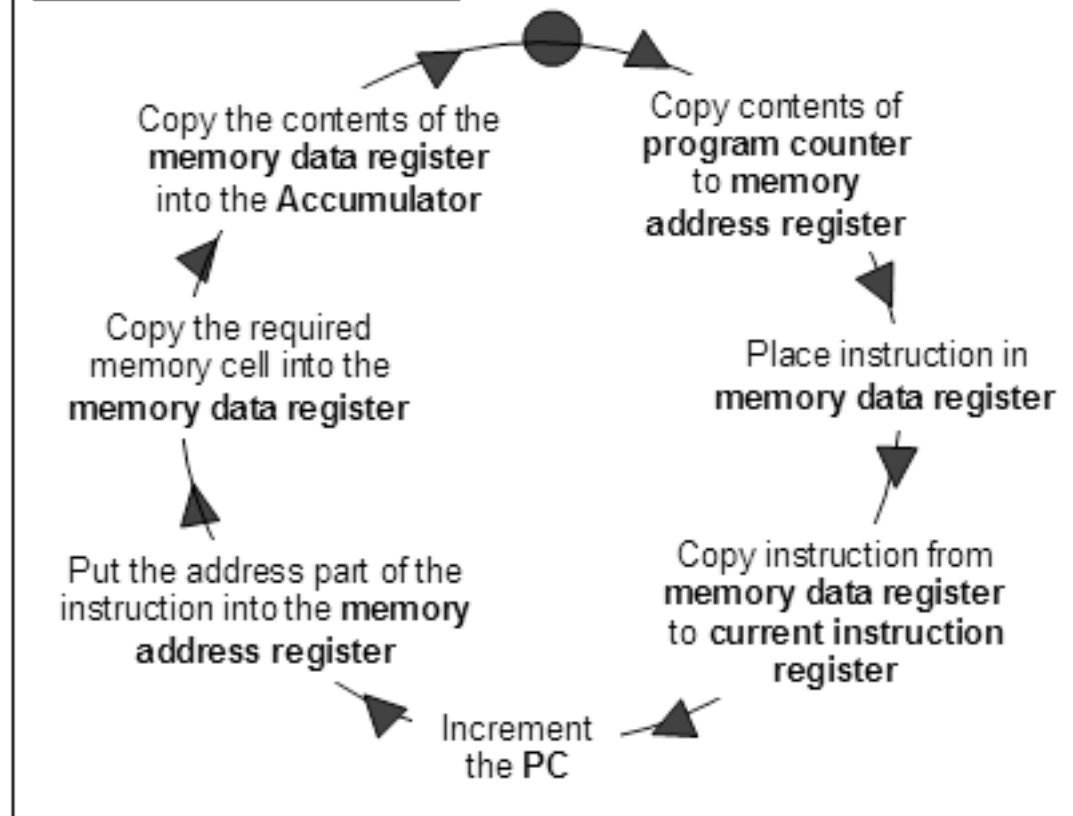
---

- **Fetch:** L'istruzione da eseguire viene prelevata dalla memoria e trasferita all'interno della CPU
- **Decode:** L'istruzione viene interpretata e vengono avviate le azioni interne necessarie per la sua esecuzione
- **Data Fetch:** Sono prelevati dalla memoria i dati sui quali eseguire l'operazione prevista dalla istruzione
- **Execute:** È portata a termine l'esecuzione dell'operazione prevista dall'istruzione
- **Store:** È memorizzato il risultato dell'operazione prevista dall'istruzione

## Fetch/Execute Cycle

1. Instruction Fetch (IF)
2. Instruction Decode (ID)
3. Data Fetch (DF)
4. Instruction Execution (EX)
5. Return Result (RR)

## A LOAD INSTRUCTION

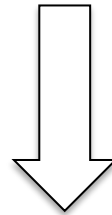


# Implementazione Linguaggi di Programmazione

---



**PROGRAMMATORE**  
**LINGUAGGIO SORGENTE**



- 1. Compilazione**
- 2. Interpretazione**
- 3. Miste**

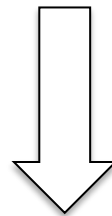
**COMPUTER**  
**CODICE MACCHINA**

# Implementazione Linguaggi di Programmazione

---



**PROGRAMMATORE**  
**LINGUAGGIO SORGENTE**



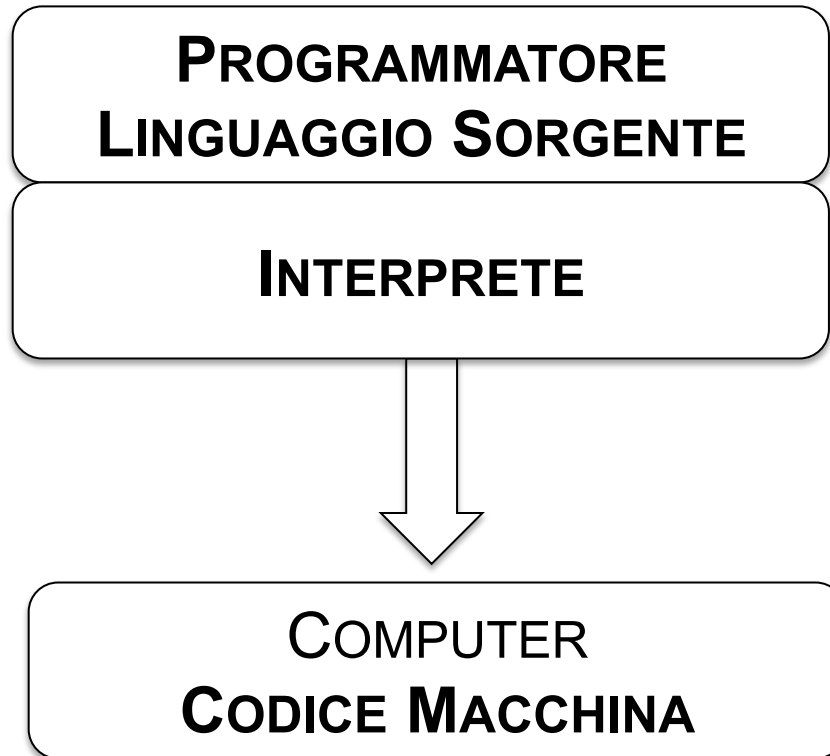
**Compilazione**  
**Traduce il codice sorgente**  
**nel codice macchina**

**COMPUTER**  
**CODICE MACCHINA**



# Implementazione Linguaggi di Programmazione

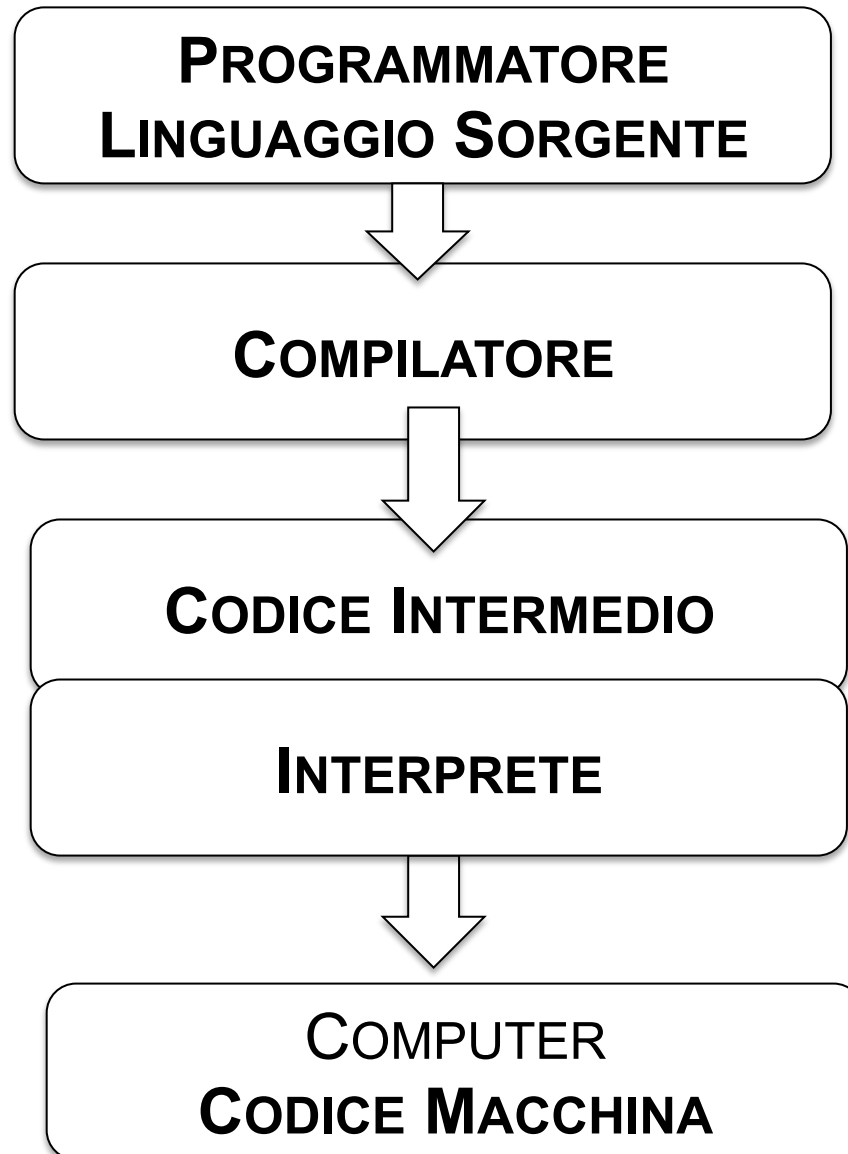
---



**Interprete:**  
**Macchina virtuale**  
**implementata sulla**  
**macchina fisica che**  
**esegue le istruzioni**  
**del linguaggio**

# Implementazione Linguaggi di Programmazione

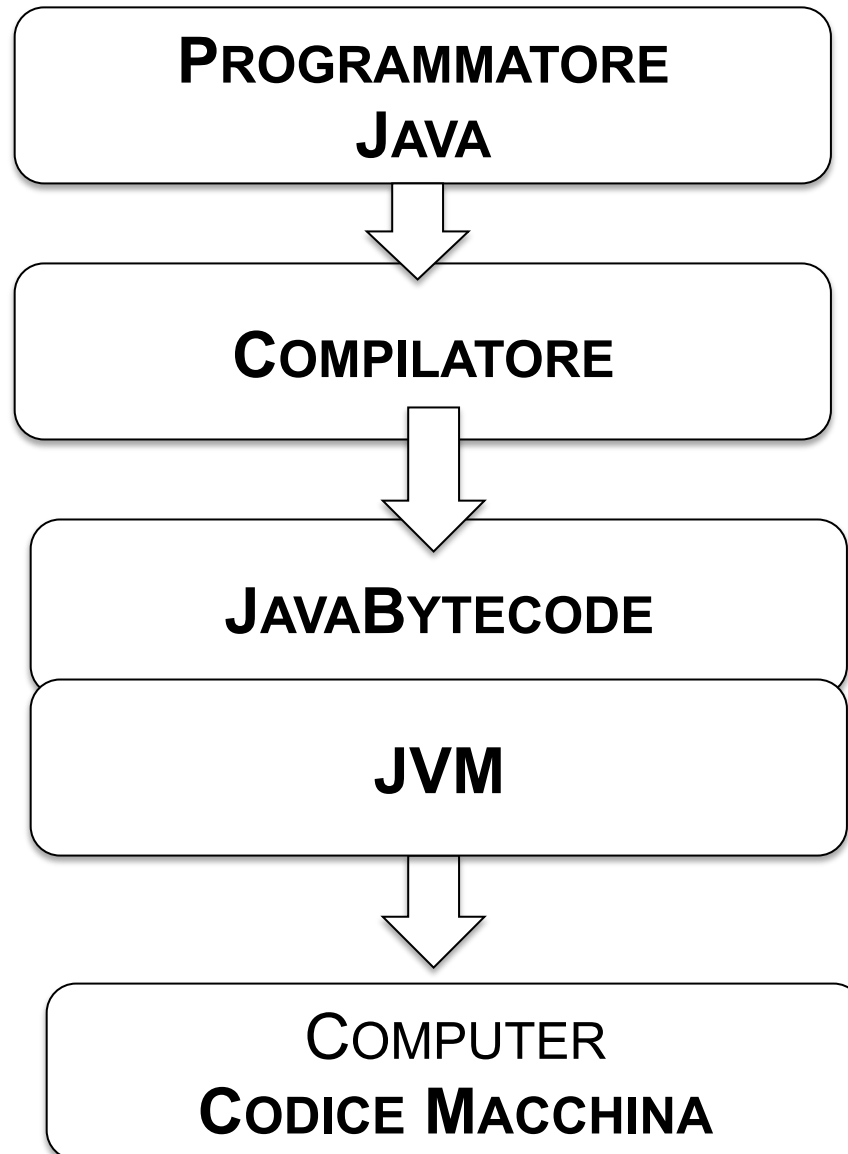
---



**Compilazione**  
+  
**Interpretazione**

# Implementazione Linguaggi di Programmazione

---



**Compilazione**  
+  
**Interpretazione**



# Macchine Astratte

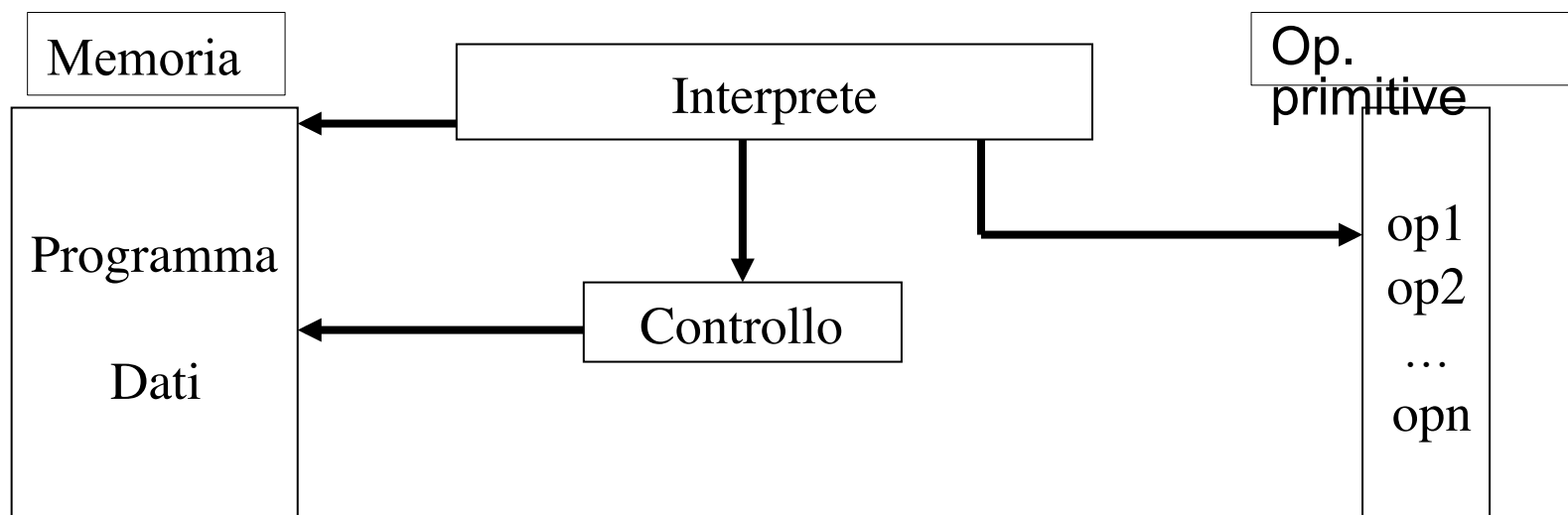
---

- **Macchina Astratta:** un **sistema virtuale** che rappresenta il comportamento di una macchina fisica individuando precisamente l'insieme delle risorse necessarie per l'esecuzione di programmi

# Macchine astratte

---

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



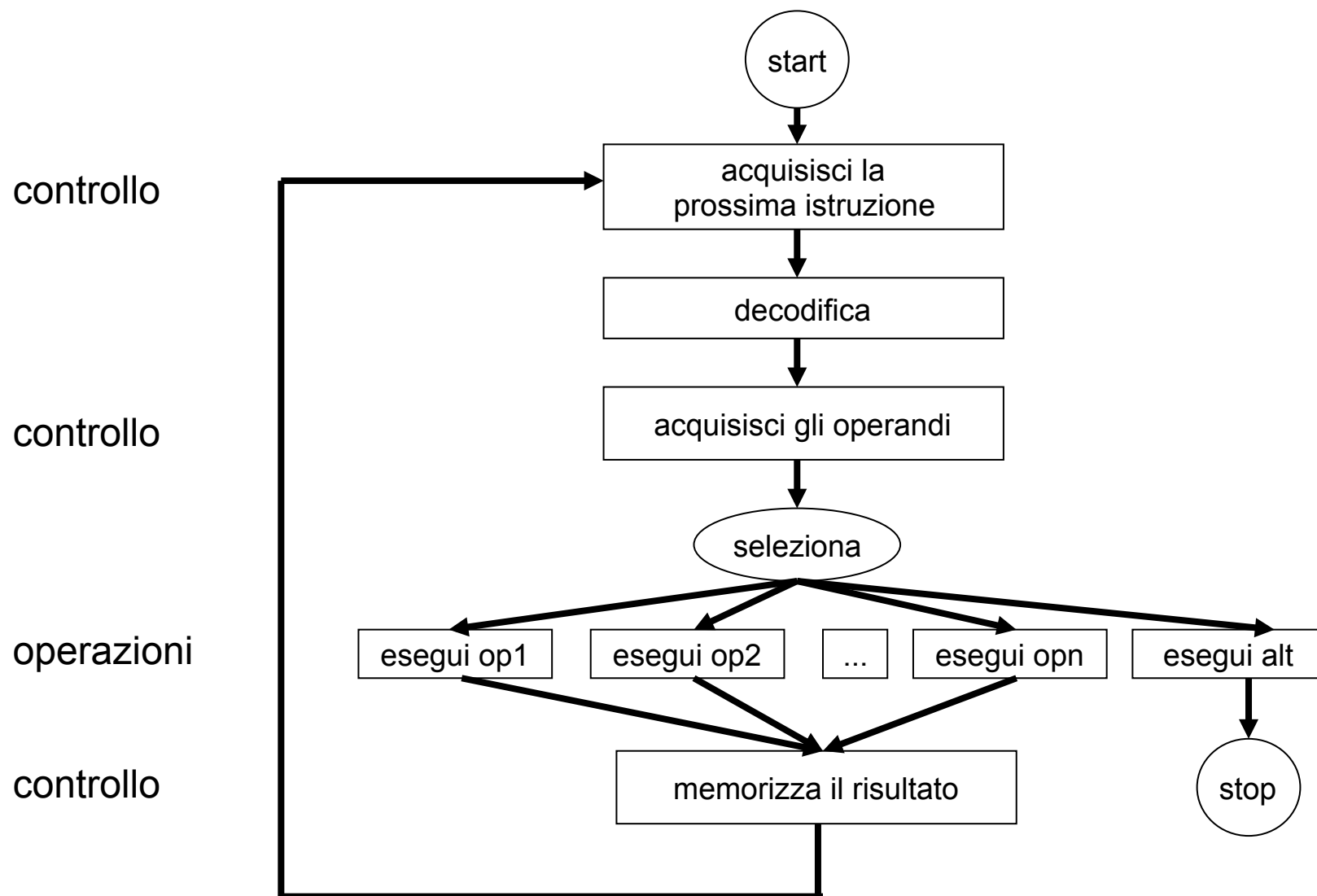


# Componente di controllo

---

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

# L'interprete





# Il linguaggio macchina

---

- **M** macchina astratta
- **L<sub>M</sub>** 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 **L<sub>M</sub>**
  - 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 e algoritmi implementati nel linguaggio macchina di una **macchina ospite  $M_0$** , già esistente (implementata)
- È importante la realizzazione dell'interprete di **M**
  - può coincidere con l'interprete di  **$M_0$** 
    - ✓ **M** è realizzata come **estensione** di  **$M_0$**
    - ✓ altri componenti della macchina possono essere diversi
  - può essere diverso dall'interprete di  **$M_0$** 
    - ✓ **M** è realizzata su  **$M_0$**  in modo **interpretativo**
    - ✓ altri componenti della macchina possono essere uguali



# Da linguaggio a macchina astratta

---

- **M** macchina astratta      **L<sub>M</sub>** linguaggio macchina di **M**
- **L** linguaggio      **M<sub>L</sub>** macchina astratta di **L**
- Implementazione di **L** =  
realizzazione di **M<sub>L</sub>** su una macchina ospite **M<sub>O</sub>**
- Se **L** è un linguaggio ad alto livello e **M<sub>O</sub>** una macchina “fisica”
  - l’interprete di **M<sub>L</sub>** è necessariamente diverso dall’interprete di **M<sub>O</sub>**
    - ✓ **M<sub>L</sub>** è realizzata su **M<sub>O</sub>** in modo interpretativo
    - ✓ l’implementazione di **L** si chiama **interprete**
    - ✓ esiste una soluzione alternativa basata su tecniche di traduzione (**compilatore?**)

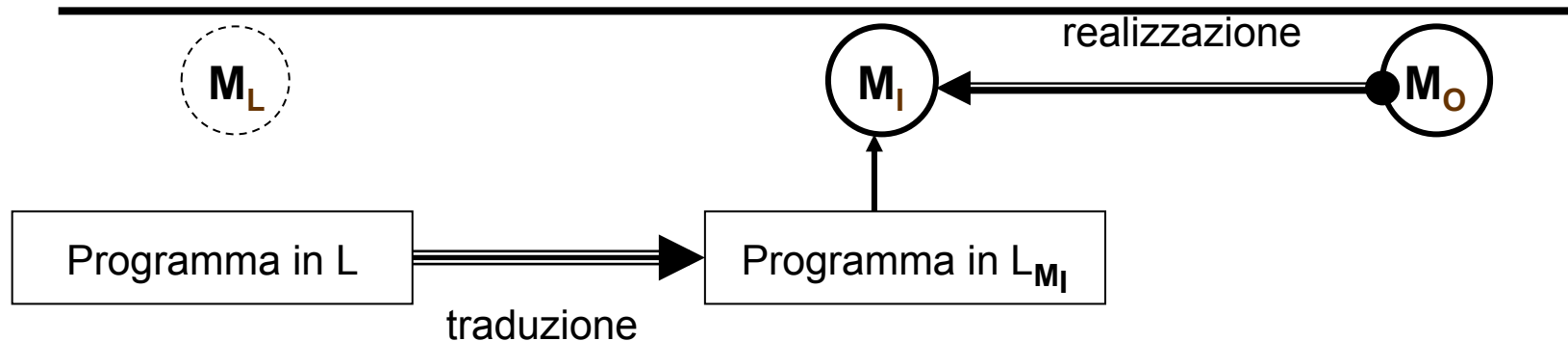


# Implementare un linguaggio

---

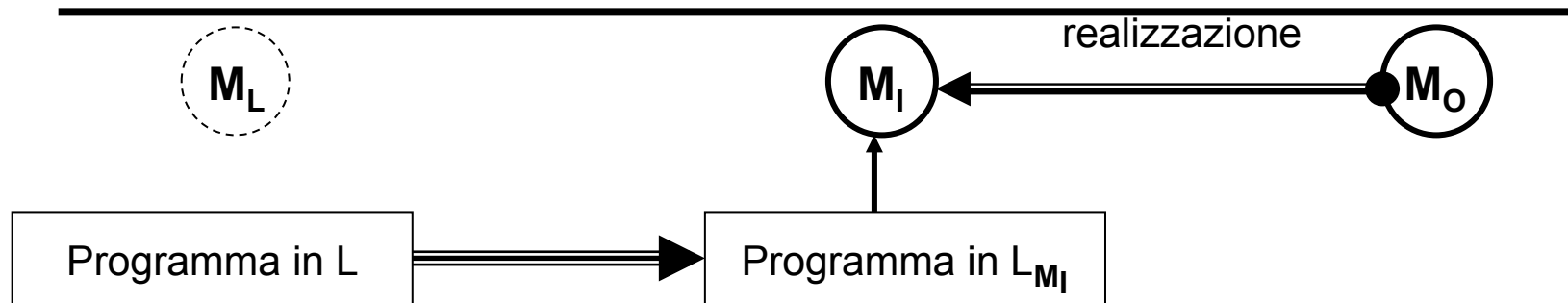
- **L** linguaggio ad alto livello
- **M<sub>L</sub>** macchina astratta di **L**
- **M<sub>O</sub>** macchina ospite
- **interprete** (puro)
  - **M<sub>L</sub>** è realizzata su **M<sub>O</sub>** in modo interpretativo
  - scarsa efficienza, soprattutto per colpa dell'interprete (ciclo di decodifica)
- **compilatore** (puro)
  - i programmi di **L** sono tradotti in programmi funzionalmente equivalenti nel linguaggio macchina di **M<sub>O</sub>**
  - i programmi tradotti sono eseguiti direttamente su **M<sub>O</sub>**
    - **M<sub>L</sub>** 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
- **$M_L$**  macchina astratta di **L**
- **$M_I$**  macchina intermedia
- **$L_{M_I}$**  linguaggio intermedio
- **$M_O$**  macchina ospite
  - traduzione dei programmi da **L** al linguaggio intermedio  **$L_{M_I}$**
  - realizzazione della macchina intermedia  **$M_I$**  su  **$M_O$**

# 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  $M_I$  coincide con quello della macchina ospite  $M_O$
- Che differenza esiste tra  $M_I$  e  $M_O$ ?
  - il **supporto a tempo di esecuzione (rts)**
    - collezione di strutture dati e sottoprogrammi che devono essere caricati su  $M_O$  (estensione) per permettere l'esecuzione del codice prodotto dal traduttore (compilatore)
  - $M_I = M_O + \text{rts}$
- Il linguaggio  $L_{M_I}$  è il linguaggio macchina di  $M_O$  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 totalmente 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  $M_0$  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  $M_I$  è diverso da quello della macchina ospite  $M_O$
- Esiste un ciclo di interpretazione del linguaggio intermedio  $L_{M_I}$  realizzato su  $M_O$ 
  - 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 una 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 tutto il linguaggio
    - il byte-code è più “vicino” al tipico linguaggio macchina



# Tre famiglie di implementazioni

---

- Interprete puro
  - $M_L = M_I$
  - interprete di  $L$  realizzato su  $M_O$
  - alcune implementazioni (vecchie!) di linguaggi logici e funzionali (LISP, PROLOG)
- Compilatore
  - macchina intermedia  $M_I$  realizzata per estensione sulla macchina ospite  $M_O$  (rts, nessun interprete) (C, C++, PASCAL)
- Implementazione mista
  - traduzione dei programmi da  $L$  a  $L_{M_I}$
  - i programmi  $L_{M_I}$  sono interpretati su  $M_O$ 
    - 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
- 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 a 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 caratteristiche 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
  - comprensione delle tecniche di implementazione
  - migliore intuizione sul 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



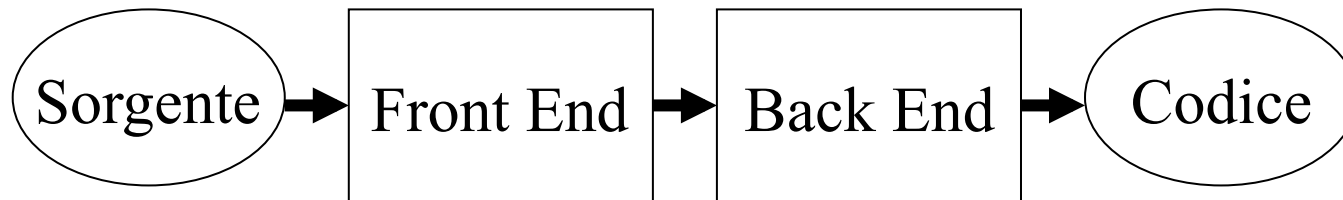
# E il compilatore?

---

- 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**

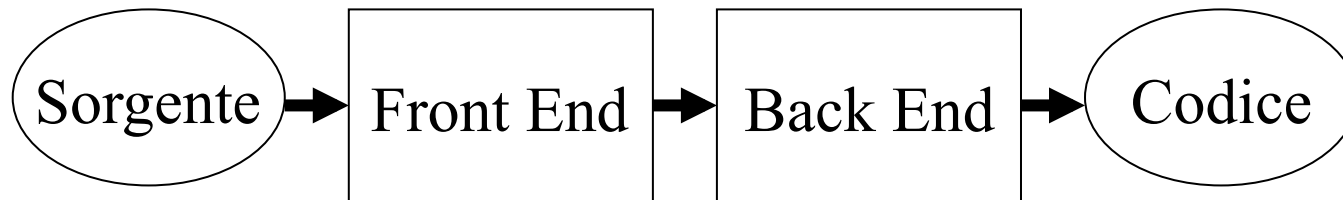
Legge il programma sorgente e determina la sua struttura sia sintattica che semantica

## **Back end: sintesi**

Genera il codice nel linguaggio macchina, programma equivalente al programma sorgente

# Compilatore

---



## **Aspetti critici**

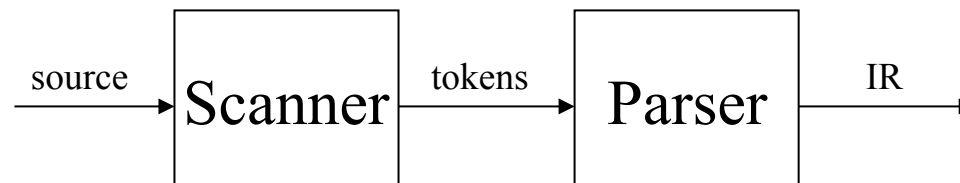
Riconoscere i programmi legali (sintatticamente corretti)

Gestire la struttura dei tipi

Generare codice compatibile con il SO della macchina ospite

# Front End

---



- Due fasi principali
  - scanner: trasforma il programma 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
  - operatori & punteggiatura: {}[]!+-=\*;: ...
  - parole chiave: if, while, return, class, ...
  - identificatori: ...
  - costanti: int, floating-point character, string, ...





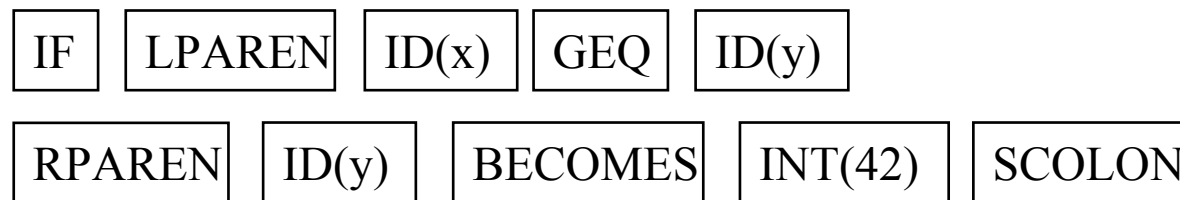
# Scanner: un esempio

---

- Input

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

- Token





# Parser: output (IR)

---

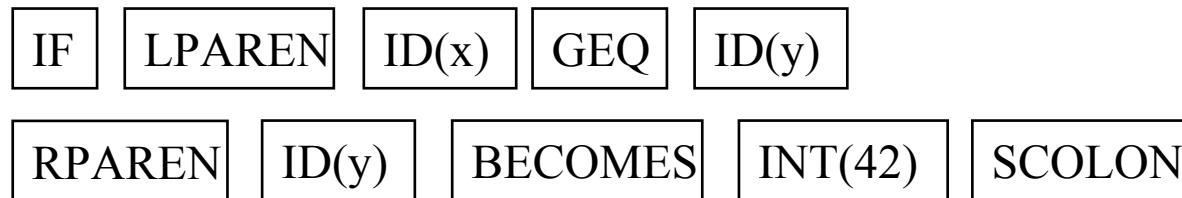
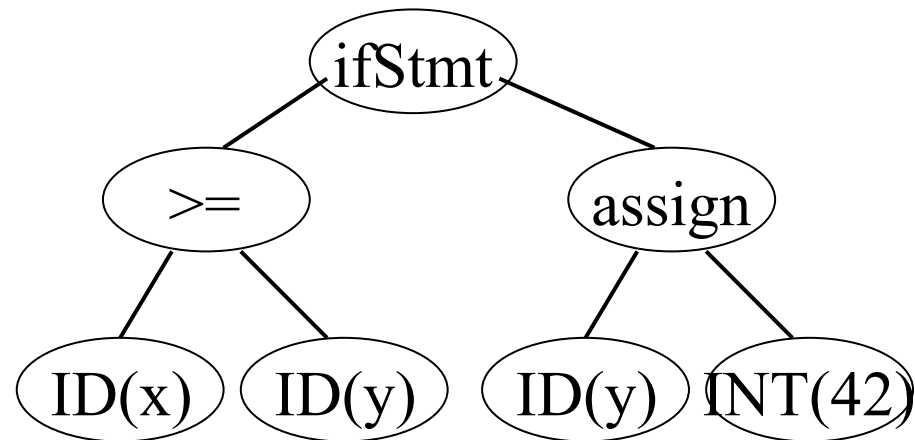
- Formati differenti
- Formato tipico riconosciuto: albero di sintassi astratta (abstract syntax tree)
  - la struttura sintattica essenziale del programma senza gli aspetti di zucchero sintattico
  - ne parleremo anche nel seguito



# Parser: AST

---

- Abstract Syntax Tree (AST)



# AST

---

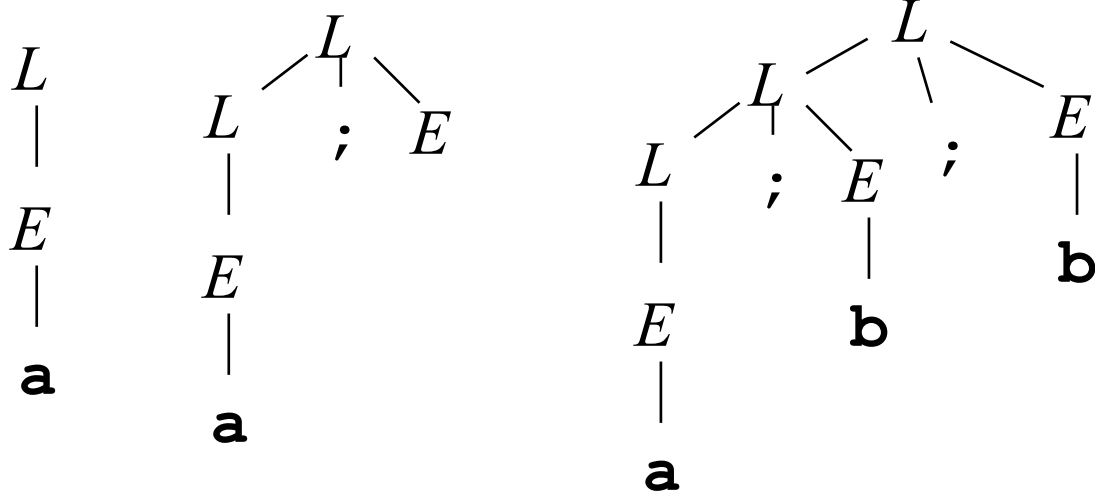


- Gli alberi di sintassi astratta sono particolarmente rilevanti perché mostrano la struttura semantica significativa dei programmi
- Noi nel seguito considereremo sempre la sintassi astratta!!
  - senza considerare gli aspetti di dettaglio quali precedenza operatori, ambiguità, etc.

# AST: esempi

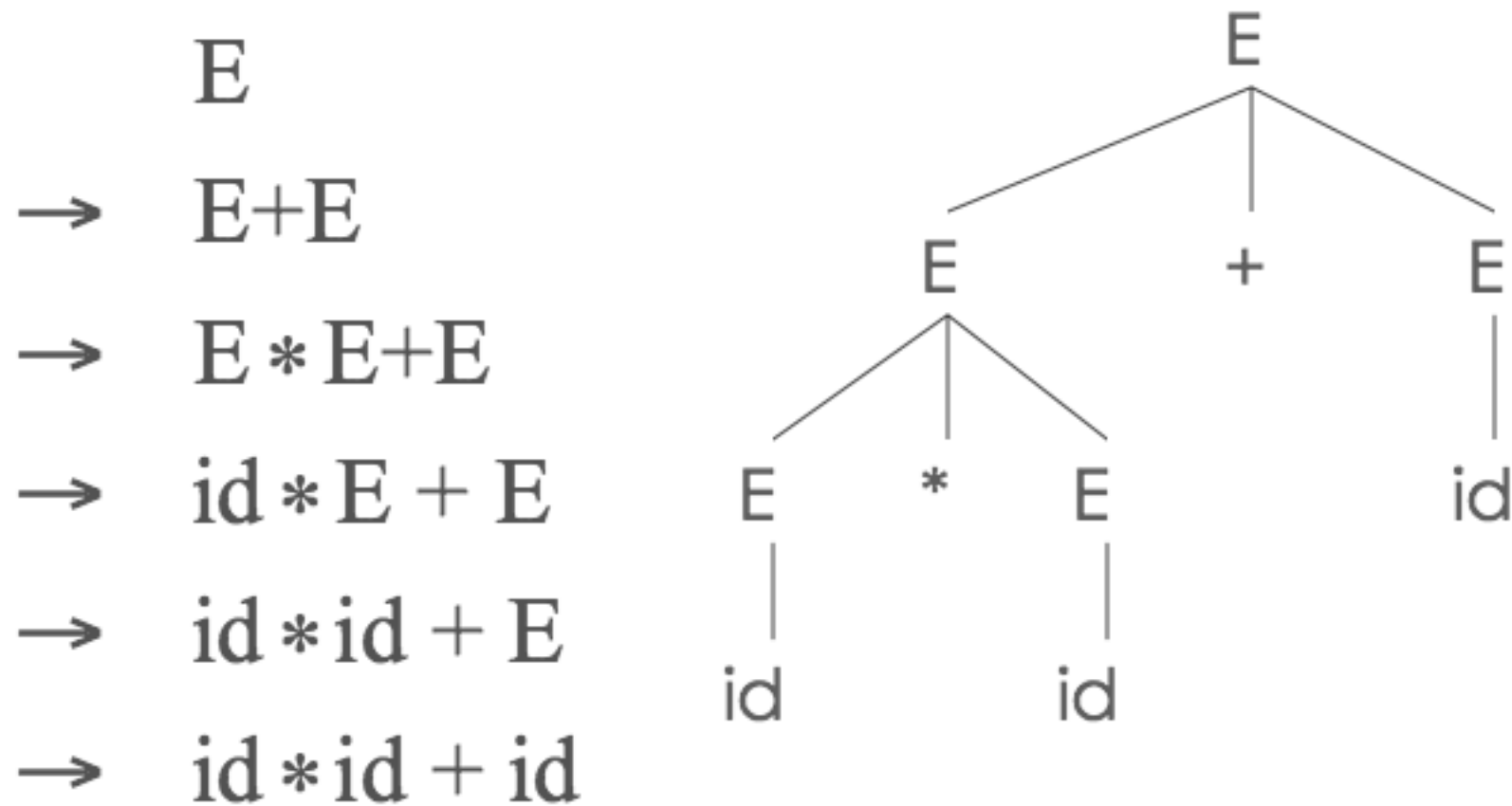
---

G:  $L \rightarrow L ; E \mid E$   
 $E \rightarrow a \mid b$



# Derivazioni e AST

---

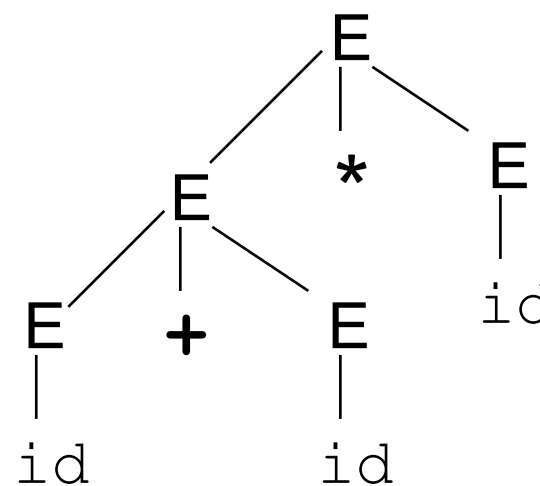
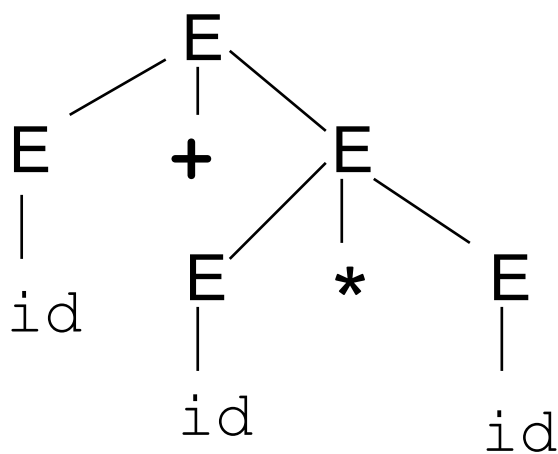


# Ambiguità

---

- Programma corretto con AST diversi
- Esempio

–  $E \rightarrow E+E \mid E^*E \mid id$



# Come si risolve?

---

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

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

$$E' \rightarrow \text{id} * E' \mid \text{id} \mid (E) * E' \mid (E)$$





# Morale

---

- La teoria (grammatiche e linguaggi formali) aiuta a strutturare le grammatiche in modo tale da evitare problemi come quello dell'ambiguità
  - ... e 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

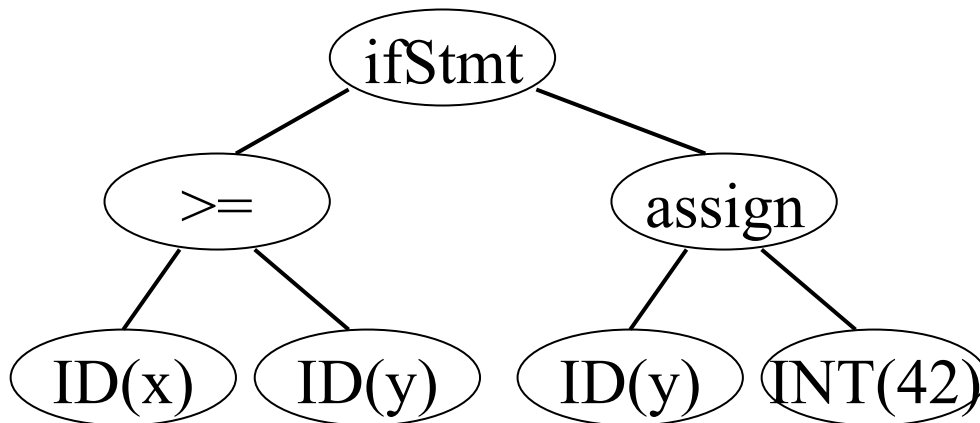
---

- 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:
```

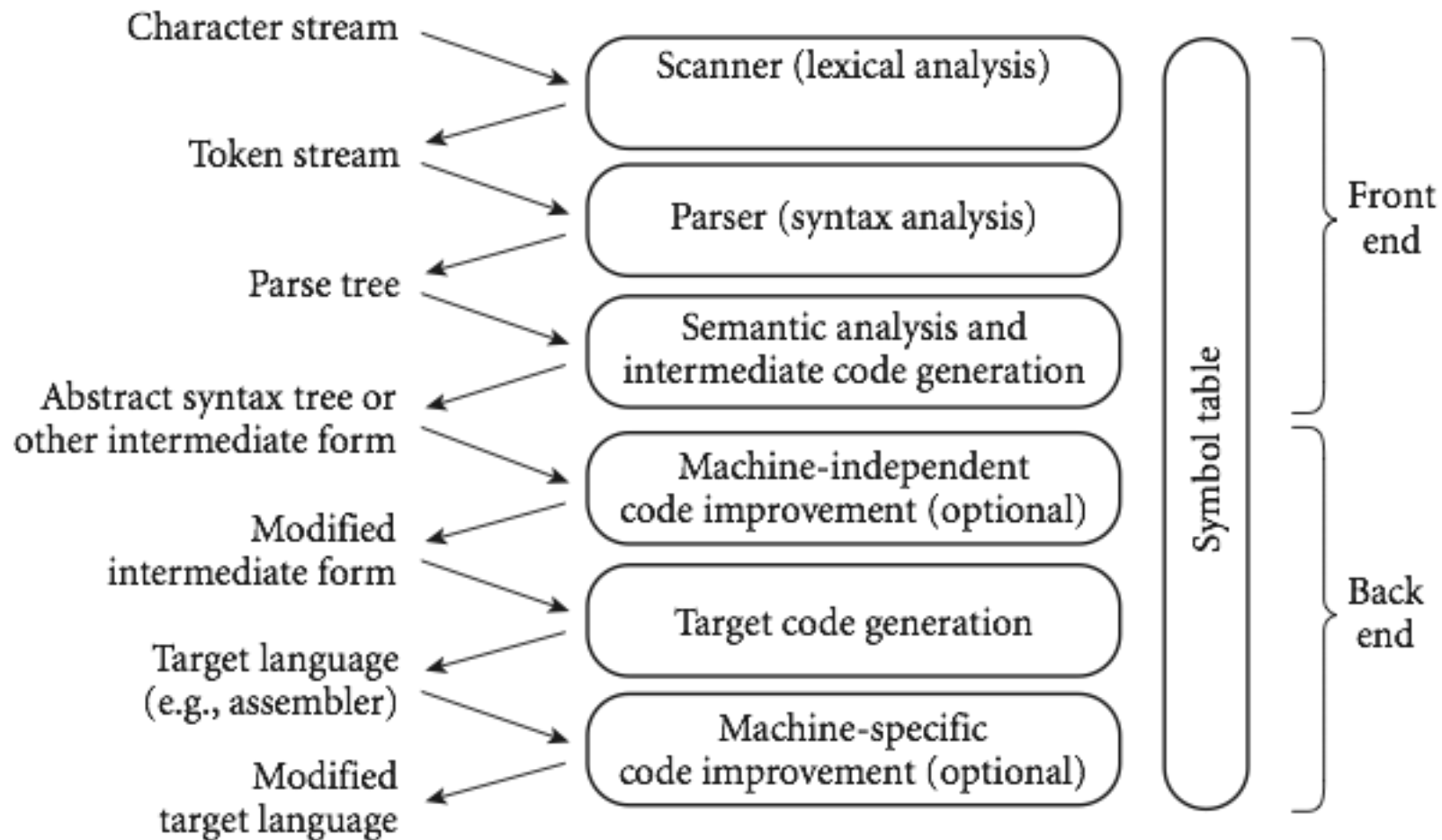




---

**Mettiamo insieme le cose**

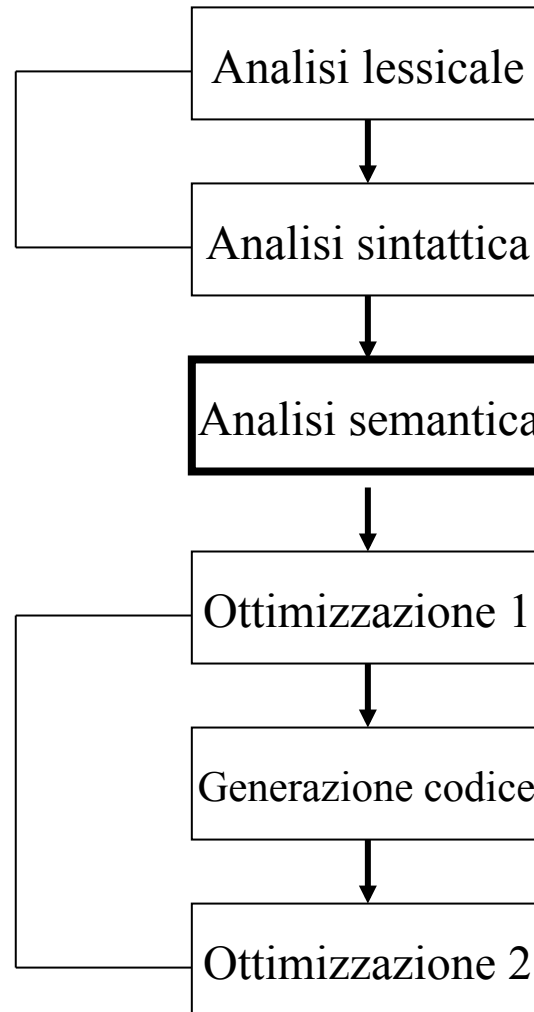
# Struttura di un compilatore



# Cosa ci interessa?

---

*non ci interessano:  
aspetti sintattici*



Supporto a run time

**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 complesso (ottimizza long-running activation)
  - costo della compilazioni JIT
- Noi non ne parliamo!