

# Indice

|   |              |
|---|--------------|
| <b>Introduzione . . . . .</b>                           | <b>3</b>     |
| Agente intelligente . . . . .                           | 3            |
| <br><b>Intelligenza artificiale simbolica . . . . .</b> | <br><b>9</b> |
| Knowledge representation and reasoning . . . . .        | 9            |
| Knowledge Graphs . . . . .                              | 9            |
| Resource Description Framework . . . . .                | 10           |
| Termini . . . . .                                       | 10           |
| Sintassi: N-triples e Turtle . . . . .                  | 12           |
| SPARQL Protocol And RDF Query Language . . . . .        | 13           |
| RDFS . . . . .  | 15           |
| OWL . . . . .   | 18           |



# Capitolo 1

## Introduzione

### 1.1 Agente intelligente

Si definisce **agente intelligente**, o semplicemente **agente**, qualsiasi entità in grado di percepire l'ambiente in cui si trova mediante sensori e modificando tale ambiente compiendo delle azioni, mappando percezioni ad azioni. Con **ambiente** si intende la parte di universo a disposizione delle percezioni dell'agente e da questa influenzabile. L'intelligenza artificiale è definibile come lo studio degli agenti.

Un essere umano può essere modellato come un agente, potendo percepire l'ambiente tramite occhi, orecchie e altri organi e agendo su di esso per mezzo dei suoi arti. Allo stesso modo, un robot può essere modellato come un agente, percependo l'ambiente attraverso telecamere o sensori infrarossi e agendo su di esso mediante appendici e/o motori elettrici. Infine, anche un programma per computer può essere modellato come un agente, se si considera l'input umano (tramite tastiera, mouse, touchscreen o voce) come percezione ed il suo output (scrivere su un file, mostrare un contenuto a schermo, generare un suono, eccetera) come azione compiuta sull'ambiente.

La sequenza di percezioni di un agente è la storia completa di tutto ciò che l'agente ha percepito. In generale, la scelta dell'azione compiuta da un agente in un certo istante dipende dalla sua conoscenza a priori e/o dall'intera sequenza di percezioni precedente. Formalmente, il comportamento di un agente è descritto da una funzione agente che mappa sequenze di percezioni in azioni:  $f : \text{Pow}(P) \rightarrow A$ . Tale funzione è un concetto astratto, una caratterizzazione *esterna* di un agente: *internamente*, la funzione agente di un agente intelligente è implementata da un **programma agente**; tale funzione viene eseguita da un dispositivo elettronico dotato di sensori di sorta, chiamato **architettura**.

Un **agente razionale** è un agente che "fa la scelta giusta". La nozione di "scelta giusta" comunemente adottata nel campo dell'intelligenza artificiale è il **conseguenzialismo**: il comportamento dell'agente è valutato sulla base delle conseguenze delle sue azioni. Se un agente, in relazione ad una certa percezione, compie una azione desiderabile dal punto di vista dell'utilizzatore, allora tale agente ha compiuto la "scelta giusta", ed è definibile agente razionale. La nozione di desiderabilità viene descritta da una **misura di prestazione** che valuta ogni sequenza di stati in cui l'ambiente si trova. In genere, è preferibile definire una misura di prestazione rispetto a ciò che si vuole accada all'ambiente piuttosto che rispetto al modo in cui ci si aspetta che funzioni.

È allora possibile fornire una definizione operativa di agente razionale: per ogni possibile sequenza di percezioni, un agente razionale sceglierà di compiere l'azione che, sulla base delle percezioni precedenti e sulla base della conoscenza che possiede a priori, restituisce il massimo valore possibile in termini di misura di prestazione. Si noti come "razionale" non significhi "onnisciente", ovvero in grado di prevedere con assoluta certezza ciò che accadrà in futuro, dato che questo è realisticamente impossibile; un agente razionale deve limitarsi a compiere azioni che massimizzano la prestazione *attesa*.

La definizione di agente razionale sopra presentata prevede che questo possieda anche una qualche nozione di **apprendimento**: per quanto la sua configurazione iniziale possa essere fissata, questa può venire modificata e potenziata con l'esperienza. Nel caso in cui l'ambiente sia interamente conosciuto a priori, l'agente non ha alcuna forma di apprendimento, limitandosi a compiere le azioni preimpostate.

Un agente che compie azioni esclusivamente sulla base della sua conoscenza a priori e non fa uso di apprendimento si dice che non è **autonomo**. Un agente razionale dovrebbe invece essere autonomo, ovvero partire sì da una base di conoscenza pregressa ma, attraverso l'apprendimento, colmarne le lacune. Dopo abbastanza esperienza, ci si aspetta che un agente razionale diventi di fatto indipendente dalla sua conoscenza a priori. È possibile classificare gli ambienti rispetto a cinque metriche informali, utili a ragionare sulla difficoltà del problema e sulla modalità risolutiva da adottare:

- **Accessibile o inaccessibile.** Un ambiente è tanto accessibile quanto un agente è in grado di ottenere le informazioni sul suo stato di cui necessita con completa accuratezza. Un ambiente può essere inaccessibile perché i sensori dell'agente non sono precisi oppure perché parte dell'ambiente è del tutto preclusa ai sensori dell'agente. Gli ambienti nel mondo reale hanno necessariamente un certo grado di inaccessibilità;
- **Deterministico o non deterministico.** Un ambiente è deterministico (in riferimento alle azioni dell'agente) se la sua evoluzione è completamente determinata dal suo stato attuale e dalle azioni dell'agente. Un ambiente è non deterministico se la sua evoluzione è anche influenzata da forze al di là dell'agente. Il mondo fisico da modellare ha sempre un certo grado di non determinismo;
- **Episodico o sequenziale.** In un ambiente episodico l'esperienza di un agente può essere divisa in step atomici dove la scelta di un'azione dipende esclusivamente dalla percezione attuale. In un ambiente sequenziale le azioni che un agente compie possono dipendere del tutto o in parte da quali azioni sono state prese in precedenza;
- **Statico o dinamico.** Un ambiente è statico se non subisce modifiche mentre l'agente sta deliberando, altrimenti è dinamico;
- **Discreto o continuo.** Un ambiente è discreto se il numero di stati in cui questo può trovarsi è finito, ovvero se è possibile (almeno in linea teorica) enumerare tutti i suoi possibili stati, altrimenti è continuo. Essendo i computer discreti per definizione, modellare un ambiente continuo attraverso un sistema automatico richiederà sempre un certo grado di approssimazione.

- Si consideri come ambiente il gioco degli scacchi e come agenti i giocatori umani (si assuma che le mosse non abbiano alcun limite di tempo). Tale ambiente é:
  1. Accessibile, perché ciascun giocatore ha completa conoscenza dello stato della partita;
  2. Deterministico, perché l'evoluzione degli stati dipende esclusivamente da quali mosse scelgono di compiere i giocatori;
  3. Sequenziale, perché le mosse di un giocatore possono anche dipendere da quali mosse ha compiuto in precedenza;
  4. Statico, perché durante l'esecuzione di una mossa e durante la scelta della stessa lo stato della partita rimane invariato;
  5. Discreto, perché il numero di possibili stati in cui la partita può trovarsi é finito.
- Si consideri come ambiente le strade di una città e come agente un sistema di guida automatico per automobili. Tale ambiente é:
  1. Inaccessibile, perché non é possibile conoscere l'intero stato del traffico di tutta la città in ciascun istante;
  2. Non deterministico, perché l'evoluzione del traffico non dipende esclusivamente dalle scelte dell'agente;
  3. Sequenziale, perché la scelta di quale strada percorrere può dipendere anche da quali strade ha percorso in precedenza;
  4. Dinamico, perché lo stato della città e del traffico cambiano anche mentre l'agente é in movimento;
  5. Continuo, perché lo stato della città e del traffico si modificano costantemente.

Gli agenti intelligenti possono essere informalmente classificati in quattro categorie, di crescente ordine di complessità.

### 1.1.1 Agenti con riflessi semplici

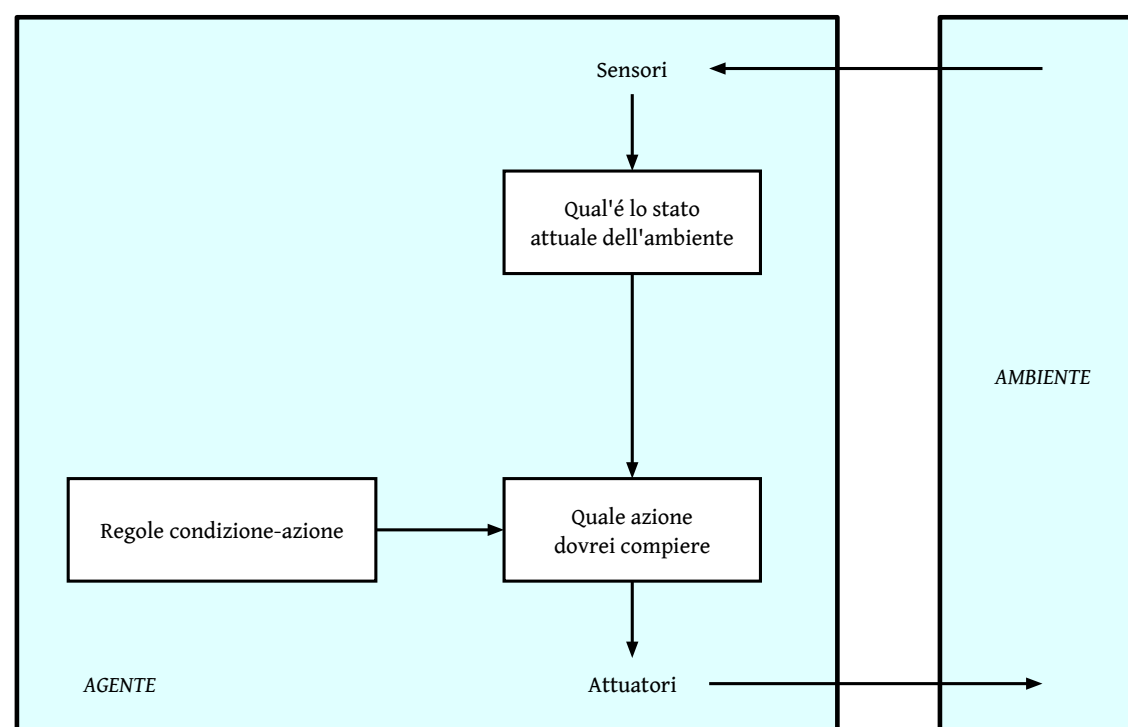
Gli agenti più facili da realizzare sono gli **agenti con riflessi semplici**. Questi agenti non hanno alcun modello dell'ambiente: scelgono che azione compiere esclusivamente sulla base della percezione attuale e non hanno cognizione delle percezioni precedenti.

Agenti di questo tipo scelgono che azioni compiere seguendo **regole condizione-azione**: se si verifica una certa condizione, allora viene compiuta l'azione associata a tale condizione.

Una rappresentazione schematica di un agente con riflessi semplici é presentata in basso. La funzione **INTERPRET-INPUT** genera una descrizione astratta della percezione ricevuta dall'agente, mentre la funzione **RULE-MATCH** restituisce la prima azione associata a tale rappresentazione di percezione nel set di regole **rules**.

```
rules <= set of condition-action rules
```

```
function SIMPLE-REFLEX-AGENT(percept)
state <= INTERPRETER-INPUT(percept)
rule <= RULE-MATCH(state, rules)
action <= rule.action
return action
```



Gli agenti con riflessi semplici hanno una intelligenza limitata. Infatti, agenti di questo tipo operano correttamente solamente se l'azione da compiere che massimizza la funzione di prestazione può essere determinata solo sulla base delle proprie percezioni, ovvero se l'ambiente é completamente accessibile. Se nella propria conoscenza a priori sono presenti errori o se l'ambiente é accessibile solo in parte, l'agente sarà destinato ad operare in maniera non razionale.

Ancora più problematica è la situazione in cui agenti con riflessi semplici entrano in loop infiniti, dato che non sono in grado di determinarli. L'unica contromisura che possono adottare è randomizzare le proprie azioni, dato che in questo modo si riduce la probabilità che l'agente compia le stesse azioni più volte di fila. Tuttavia, sebbene questo approccio possa mettere una pezza al problema del loop infinito in maniera semplice, in genere comporta uno spreco di risorse, e pertanto risulta difficilmente in un comportamento razionale da parte dell'agente.

1.1.2 Agenti con riflessi, ma basati su un modello

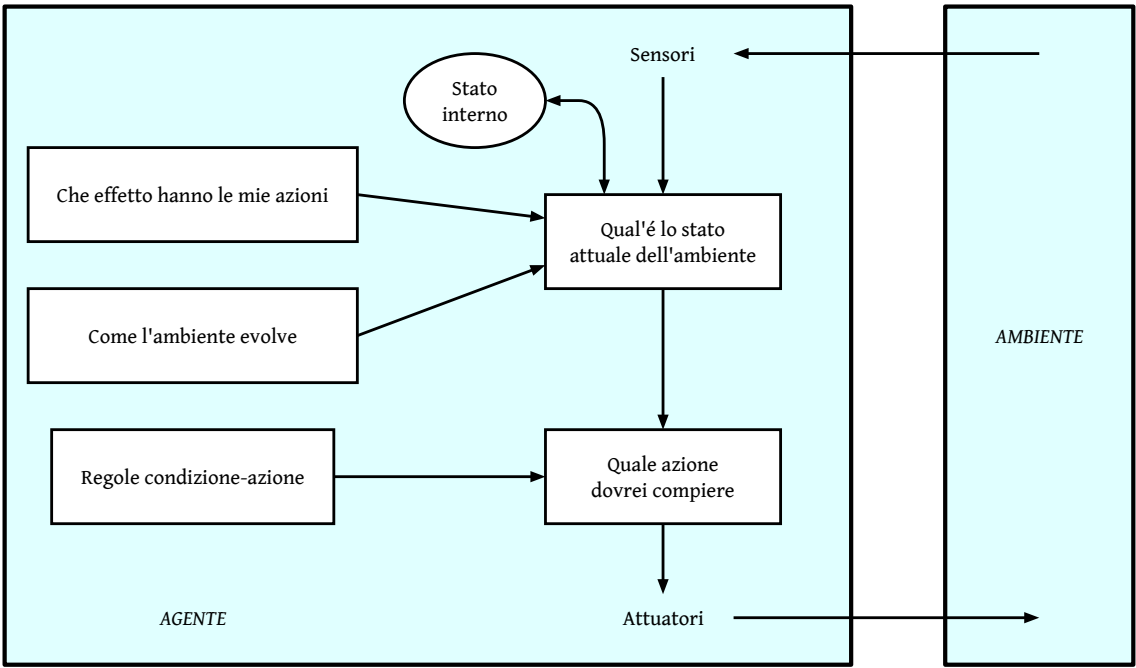
Il modo più efficiente per risolvere il problema dell'avere a che fare con un agente parzialmente accessibile è tenere traccia della parte di ambiente di cui questo non ha conoscenza. Ovvero, l'agente dovrebbe avere una qualche sorta di **stato interno** che dipende dalle percezioni che questo ha captato in precedenza, di modo da avere informazioni su alcuni degli stati diversi da quello corrente. Agenti di questo tipo sono detti **agenti con riflessi ma basati su un modello**.

Aggiornare periodicamente tale stato interno richiede che l'agente possieda due forme di conoscenza. Innanzitutto, è necessario avere informazioni relative al modo in cui l'ambiente si evolve nel tempo, sia in termini di come le azioni dell'agente influenzano l'ambiente che in termini di come l'ambiente si evolve in maniera indipendente dall'agente. Questo corpo di informazioni prende il nome di **modello di transizione**. Inoltre, è necessario avere informazioni relative a come l'evoluzione dell'ambiente si riflette sulle percezioni dell'agente, nel complesso chiamate **modello sensoriale**.

Una rappresentazione schematica di un agente con riflessi ma basati su un modello è presentata in basso, dove la funzione UPDATE-STATE aggiorna lo stato interno dell'agente prima di restituire l'azione da compiere.

```
state <= the agent's current conception of the environment state
transition_model <= a description on how the next state depends on the current state and action
sensor_model <= a description on how the current world state is reflected in the agent's percepts
rules <= set of condition-action rules
action <= the most recent action (starts NULL)

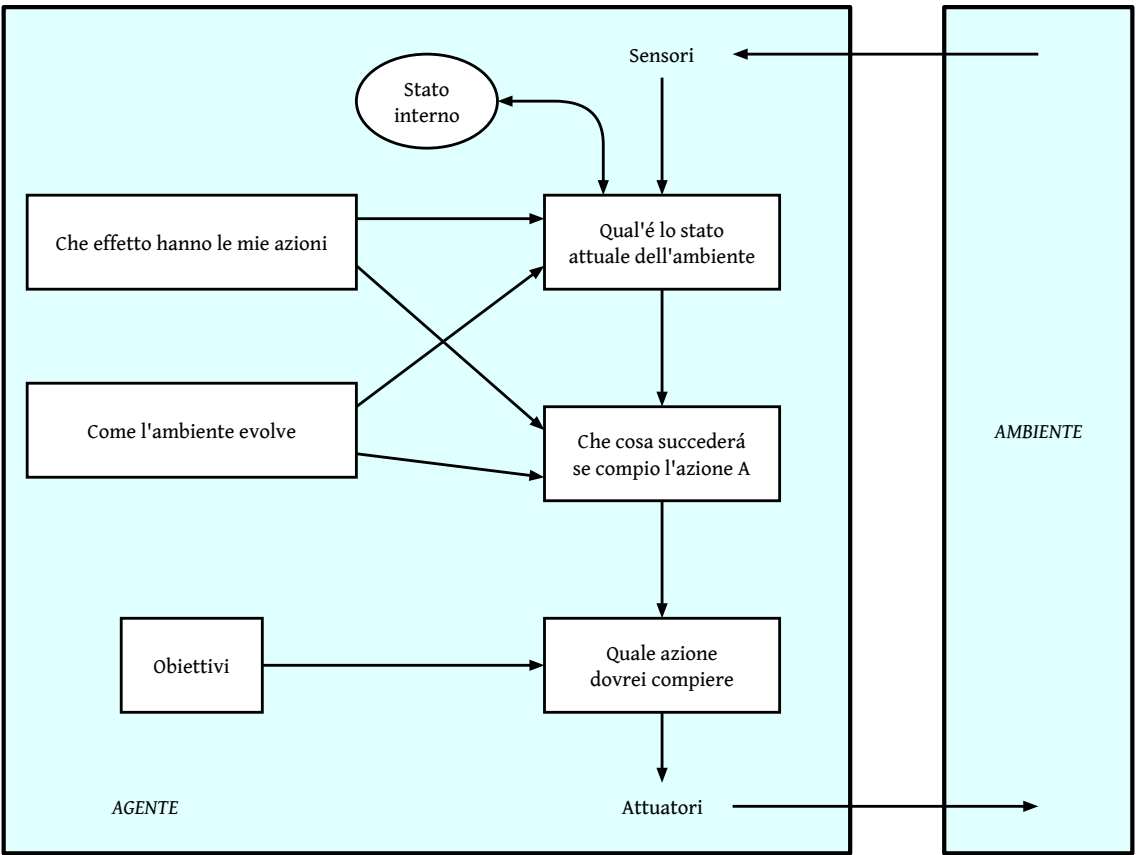
function MODEL-BASED-REFLEX-AGENT(percept)
state <= UPDATE-STATE(state, action, percept, transition_model, sensor_model)
rule <= RULE-MATCH(state, rules)
action <= rule.action
return action
```



Si noti come difficilmente un agente con riflesso basato su un modello può determinare con certezza lo stato attuale dell'ambiente. In genere, un agente può limitarsi ad averne una descrizione parziale.

1.1.3 Agenti basati su un modello, ma basati su obiettivi

Vi sono situazioni in cui la scelta di quale sia l'azione migliore da compiere da parte di un agente dipenda anche da un qualche tipo di obiettivo a lungo termine. Non sempre questo obiettivo viene raggiunto nell'operare una sola azione, ma può richiedere diverse azioni intermedie. In agenti di questo tipo, la medesima azione ed il medesimo stato interno possono risultare in azioni diverse se è diverso l'obiettivo.

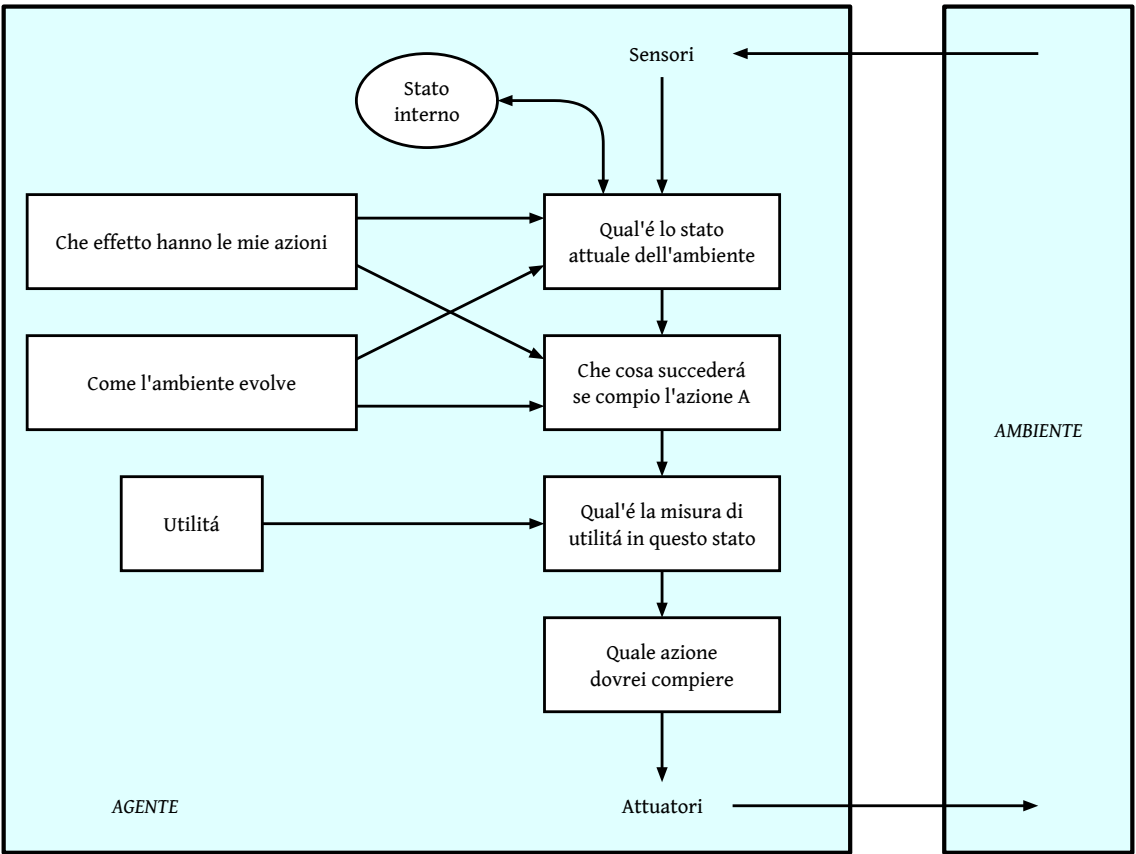


1.1.4 Agenti basati su un modello e guidati da utilità

Non sempre é possibile costruire un agente razionale semplicemente spingendolo a raggiungere un obiettivo. Infatti, se tale obiettivo può essere raggiunto tramite diverse sequenze di azioni, una potrebbe essere preferibile ad un'altra. Inoltre, un agente potrebbe dover perseguire più obiettivi contemporaneamente fra di loro incompatibili, ovvero compiere azioni che lo "avvicinano" ad un obiettivo ma al contempo "allontanarlo" da un altro.

Un obiettivo permette di discriminare gli stati dell'ambiente esclusivamente come "favorevoli" e "sfavorevoli", senza alcuna sfumatura nel mezzo. Un migliore approccio prevede invece di introdurre una misura di **utilità**, che influenza la scelta dell'agente nello scegliere quale azione compiere (insieme alla misura di prestazione, all'obiettivo da seguire e dal proprio stato interno).

La misura di utilità permette all'agente di, nel dover perseguire più obiettivi fra di loro incompatibili, scegliere l'azione che comporta il miglior compromesso nell'avanzamento di tutti loro. Inoltre, non sempre la struttura dell'ambiente garantisce che sia possibile raggiungere con assoluta certezza un obiettivo semplicemente eseguendo le azioni appropriate; anche in questo caso, la misura di utilità permette di valutare quanto sia "conveniente" per l'agente compiere una certa azione in vista di un determinato obiettivo sulla base di quanto sia ragionevole che tale obiettivo venga effettivamente raggiunto.

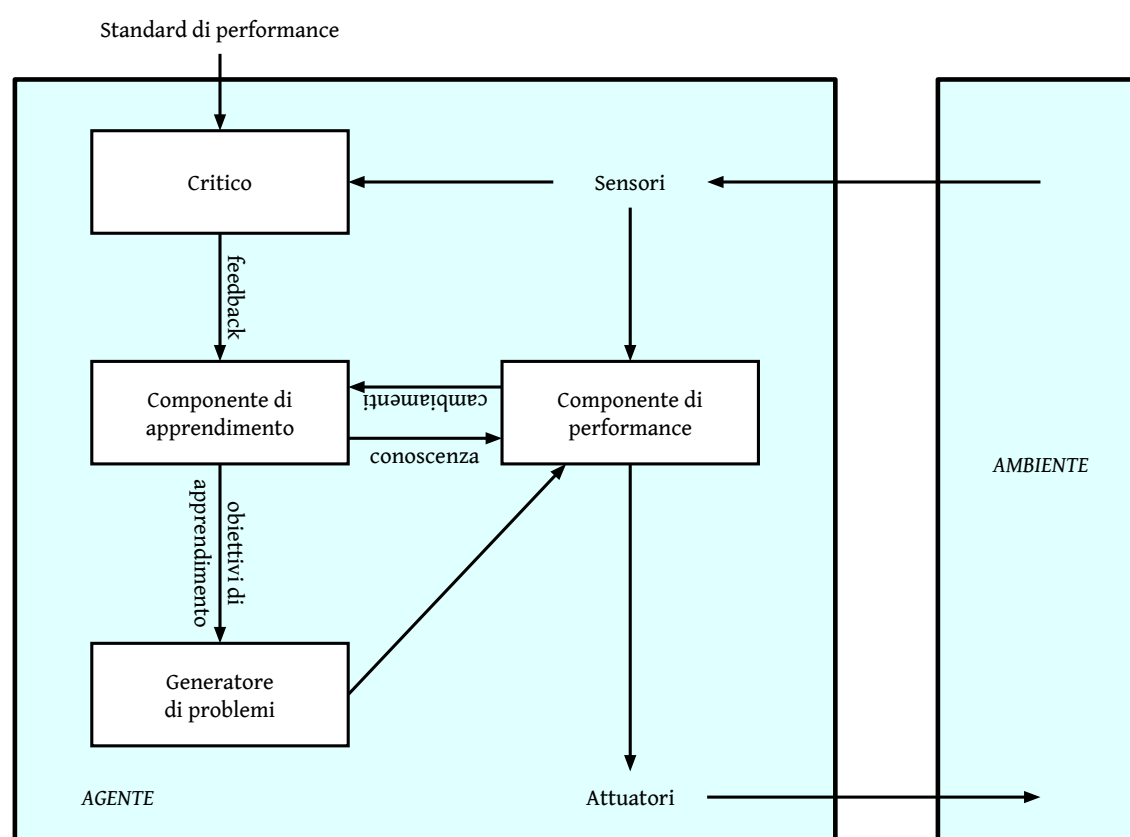


### 1.1.5 Agenti che apprendono

Gli agenti più interessanti sono indubbiamente quelli in grado di **apprendere**; tutti i tipi di agenti presentati finora possono essere costruiti come agenti che apprendono. Il notevole vantaggio che presentano è che possono operare in un ambiente del tutto sconosciuto apprendendo da questo, di modo da compiere le azioni migliori anche in situazioni dove lo stesso designer non ha modo di poter prevedere quali queste possano essere.

Un agente in grado di apprendere può essere concettualmente suddiviso in quattro componenti:

- La **componente di apprendimento**, che si occupa di migliorare la performance dell'agente;
- La **componente di performance**, che sceglie quale azione compiere sulla base delle percezioni e dello stato di conoscenza interno. Di fatto, questa componente costituiva l'intero agente dei modelli precedenti;
- Il **critico**, che informa la componente di apprendimento di quanto l'agente si sta comportando in maniera ottimale (razionale) sulla base di uno standard di performance prestabilito. Questa componente è necessaria perché le percezioni, di per loro, non sono in grado di informare l'agente sull'ottimalità del proprio comportamento;
- Il **generatore di problemi**, che suggerisce azioni all'agente che possono comportare nuove ed informative esperienze. Questa componente è necessaria perché se l'agente si affidasse esclusivamente alla componente di performance sceglierebbe sempre le azioni migliori sulla base della sua conoscenza attuale, che non sono necessariamente complete. Il generatore di problemi può portare l'agente a compiere azioni che possono potenzialmente essere localmente subottimali ma che sul lungo termine possono portare a compiere azioni ancora migliori.







# Capitolo 2

## Intelligenza artificiale simbolica

### 2.1 Knowledge representation and reasoning

Gli esseri umani sono in grado di compiere azioni anche sulla base del fatto che possiedono delle **conoscenze** utilizzate per operare dei **ragionamenti** su una **rappresentazione** interna della conoscenza. Nel campo della AI questo si traduce nella costruzione di **agenti basati sulla conoscenza**.

Il componente principale di un agente basato sulla conoscenza é la **base di conoscenza**, o KB. Una KB é composta da un insieme di **fatti**, che rappresentano delle asserzioni sul mondo. Un agente basato sulla conoscenza deve essere in grado di fare **inferenze**, ovvero essere in grado di aggiungere dei nuovi fatti alla KB sulla base di quelli presenti applicando delle **regole**. Affinché questo sia possibile, é necessario che alcuni fatti siano presenti nella KB fin da subito. Questi vengono detti **assiomi**; l'unione di tutti gli assiomi prende il nome di **conoscenza pregressa** (**background knowledge**).

Sia i fatti (le asserzioni sul mondo) che le regole (le trasformazioni che aggiungono nuovi fatti alla KB sulla base di quelli presenti) vengono espressi in genere espressi in linguaggi specifici. Tali linguaggi sono detti **linguaggi di Knowledge Representation and Reasoning**, o **linguaggi KRR (linguaggi di rappresentazione della conoscenza)**. Un linguaggio KRR deve necessariamente basarsi su una qualche formalizzazione della logica, e ci si chiede allora quale formalizzazione della logica potrebbe ben adattarsi ad essere quella utilizzata dagli agenti basati sulla conoscenza. La logica proposizionale (logica di ordine zero) può venire scartata subito: nonostante abbia il pregio di essere decidibile, é troppo semplicistica, dato che non supporta i quantificatori universali "per ogni" e "esiste". Un miglior candidato potrebbe allora essere la logica proposizionale (logica del primo ordine), ma anche questa presenta dei problemi:

- *Decidibilità*. Come mostrato dai Teoremi di Incompletezza di Godel, la logica proposizionale é **indecidibile**, ovvero non tutte le formule possono essere provate vere o false all'interno della logica stessa <sup>1</sup>. Questo significa che un sistema di deduzione automatico, essendo limitato dall'Halting Problem, potrebbe rimanere eternamente bloccato nel computare se una data proposizione segua dalle premesse senza essere in grado di fornire una risposta;
- *Complessità*. La logica proposizionale é estremamente espressiva, pertanto alcune inferenze possono richiedere molto tempo computazionale (per quanto finito) per essere completate;
- *Approssimazione*. Per lo stesso motivo, non tutte le proprietà della logica proposizionale sono strettamente necessarie nel campo della IA. Cercare di implementarle tutte risulterebbe in uno spreco di risorse e nella costruzione di un sistema di deduzione inefficiente.

La scelta di un formalismo logico adatto al campo delle IA sembrerebbe allora ricadere in una logica che si trovi "nel mezzo" fra la logica proposizionale e la logica predicativa.

### 2.2 Knowledge Graphs

Un **Knowledge Graph (KG)** é un grafo diretto ed etichettato il cui scopo é riportare e trasmettere conoscenze sul mondo reale. I nodi del grafo rappresentano delle **entità**, ovvero degli oggetti che appartengono al mondo di interesse, mentre gli archi del grafo rappresentano delle **relazioni** che intercorrono fra queste entità.

Con "conoscenza" si intende genericamente qualsiasi cosa sia *nota*: tale conoscenza può essere ricavata da dal mondo che il grafo vuole modellare oppure estratta dal grafo stesso. La conoscenza può essere composta sia da semplici asserzioni che coinvolgono due entità ("A possiede/fa uso di/fa parte di/... B") oppure asserzioni che coinvolgono gruppi di entità ("tutti i membri di A possiedono/fanno uso/fanno parte di/... B"). Le asserzioni semplici sono riportate come etichette degli archi del grafo: se esiste un arco fra i nodi A e B, significa che A e B sono legati dalla relazione che etichetta l'arco che li unisce.

Formalmente, un Knowledge Graph é definito a partire dalla quintupla  $\langle E, L, T, P, A \rangle$ :

- Un insieme  $E$  di simboli, che rappresentano gli identificativi associati alle entità;
- Un insieme  $L$  di **letterali**, che rappresentano tutti i dati "grezzi" che il modello necessita di rappresentare (stringhe, numeri, eccettera);
- Un insieme  $T$  di tipi;
- Un insieme  $P$  di simboli di relazione;
- Un insieme  $A$  di assiomi.

A loro volta, gli assiomi vengono distinti in due sottogruppi:

- I fatti, ovvero assiomi che riguardano le singole entita. Indicano:

- ☐ Se una certa entità appartiene ad un certo tipo, ovvero  $t(e) \mid t(l)$  con  $e \in E$  e  $l \in L$ ;
- ☐ Se due entità sono legate da una certa relazione, ovvero  $r(e_1, e_2) \mid r(e, l)$  con  $e_i \in E$  e  $l \in L$ .

1. Più correttamente, si dice che la logica proposizionale é **semidecidibile**, in quanto é sempre possibile dimostrare se una proposizione é vera sulla base delle premesse ma non é sempre possibile dimostrare se sia falsa.

- Gli assiomi generali, ovvero assiomi che non riguardano singole entità ma riguardano classi. La loro espressività dipende dal linguaggio logico a cui il KG fa riferimento, ma in genere sono nella forma  $\forall x(t_1(x) \rightarrow t_2(x))$ , ovvero che specificano una relazione di ordine parziale rispetto ai tipi.

Nei modelli di database relazionale, i dati sono rigidamente strutturati; la struttura è data dallo schema del database (che definisce le relazioni, le entità, gli attributi, ecc ...). I dati e lo schema sono *fortemente accoppiati*, dato che lo schema deve necessariamente venire definito prima di poter inserire i dati. Inoltre, lo schema è prescrittivo, dato che i dati non conformi allo schema non possono venire inseriti nel database.

Nei modelli di database a grafo, i dati sono parzialmente strutturati, dato che lo schema "emerge" in maniera implicita dal modo in cui sono scritte le triple. I dati e lo schema sono *debolmente accoppiati*, dato che i dati possono venire inseriti prima ancora di definire lo schema <sup>2</sup>. Inoltre, lo schema non è prescrittivo, dato che i dati non conformi alla forma attuale dello schema possono venire inseriti comunque (e modificano lo schema).

Lo schema di un grafo RDF può essere visto sotto due aspetti. Il primo aspetto è lo schema come "patto sociale", dove i costruttori di grafi si impegnano a seguire degli standard (non obbligatori) per fare in modo che diversi grafi siano fra loro compatibili. Il secondo aspetto è lo schema è uno schema deduttivo, dato che fornisce solamente il significato dei termini e permette di fare inferenze (anche false).

Un primo approccio al fare in modo che i grafi siano compatibili è quello di costruire dei vocabolari standard che vengono impiegati per modellare domini diversi. Questo approccio funziona se esistono degli enti autorevoli che forniscono tali vocabolari; fra questi figurano **FOAF (friend of a friend)** e [schema.org](http://schema.org).

Modellare i dati sotto forma di grafo offre maggior flessibilità per integrare nuovi dataset rispetto ai modelli relazionali standard, dove uno schema deve essere definito prima che i dati possano essere inseriti. Nonostante anche modelli di dato ad albero (XML, JSON, ecc ...) offrano questa flessibilità, i modelli a grafo non necessitano di dover organizzare i dati in una gerarchia. Inoltre, i modelli a grafo permettono facilmente di rappresentare relazioni cicliche.

Essendo un KG un grafo, è possibile studiarne le proprietà tipiche dei grafi (simmetria, antisimmetria, transitività, eccetera) e metterle in relazione con il significato che hanno nel modello che questi rappresentano. È inoltre possibile *visitare* il grafo per ricavare informazioni più elaborate di quelle riportate nei soli archi.

## 2.3 Resource Description Framework

**Resource Description Framework (RDF)** è un esempio di modello di dati a grafo; sebbene inizialmente concepito per il web (è infatti parte di un insieme di protocolli più grande noto come **Semantic Web Stack**), trova uso anche come formato per la rappresentazione della conoscenza.

## 2.4 Termini

RDF è un modello di dati pensato per descrivere risorse. Con **risorsa** si intende qualsiasi entità a cui sia possibile associare un'identità, che siano entità virtuali (pagine web, siti web, file, ...), entità concrete (libri, persone, luoghi, ...) o entità astratte (specie animali, categorie, ere geologiche, ...). Ad una risorsa RDF viene fatto riferimento attraverso un **termine**; RDF ammette l'esistenza di tre tipi di termini: **IRI**, **letterali** e **nodi blank**. Un IRI (**International Resource Identifier**) è una stringa di caratteri Unicode che identifica univocamente una qualsiasi risorsa; se due risorse hanno lo stesso IRI, allora sono in realtà la stessa risorsa. Gli IRI sono un superset degli **URI (Unique Resource Identifier)**, che hanno la medesima funzione ma sono limitati ai soli caratteri ASCII.

Gli URI costituiscono a loro volta un soprainsieme sia degli **URL (Universal Resource Locator)** sia degli **URN (Uniform Resource Name)**. Il primo serve ad indicare la locazione di una risorsa (sul web), mentre il secondo il nome proprio della risorsa, scritto con una sintassi specifica. Pertanto, ad una risorsa è possibile riferirsi indifferentemente per locazione (URL) o per nome (URN). <sup>3</sup>.

Le seguenti stringhe alfanumeriche sono degli IRI validi:

`https://www.example.org/alice`    `https://en.wikipedia.org/wiki/Ice_cream`    `https://www.nyc.org`

I letterali forniscono informazioni relative a descrizioni, date, valori numerici, ecc ... . In RDF, un letterale è costituito dalle seguenti tre componenti:

- Una **forma lessicale**, ovvero una stringa di caratteri Unicode;
- Un **datatype IRI** che indica il tipo di dato del letterale, definendo un dominio di possibili valori che questo può assumere. Viene preceduto da "^^";
- Un **language tag** che indica la lingua in cui il termine viene espresso. Viene preceduto da "@"

2. Questa non è comunque una buona pratica, dato che è comunque preferibile definire lo schema prima dei dati.

3. Si noti come gli IRI risolvono il problema di avere a che fare con risorse diverse aventi lo stesso nome, ma non risolvono il problema inverso, ovvero dove IRI distinti si riferiscono alla stessa risorsa. RDF permette che una situazione di questo tipo si verifichi, ma in genere è preferibile risolvere questo tipo di conflitti adottando uno degli IRI che si riferiscono alla stessa risorsa a discapito degli altri.

I letterali più semplici sono quelli composti dalla sola forma lessicale; il datatype ed il language tag sono opzionali, ma spesso utili a dare l'interpretazione corretta del letterale a cui si riferiscono. I tipi di dato definiti da RDF sono un sottoinsieme dallo standard XSD, a cui si aggiungono i tipi di dato `rdf:XML` e `rdf:XMLLiteral` propri di RDF. Questi possono essere raggruppati in quattro categorie:

- **Booleani**, (`xsd:boolean`);
- **Numerici**, sia interi (`xsd:decimal`, `xsd:byte`, `xsd:unsignedInt`, ecc ...) che razionali (`xsd:float` e `xsd:double`);
- **Temporal**, che siano istanti di tempo (`xsd:time`, ...), lassi di tempo (`xsd:duration`, ...) o una data specifica (`xsd:gDay`, `xsd:gMonth`, `xsd:gYear`, ...);
- **Testuali**, sequenze di caratteri generiche (`xsd:string`) oppure conformi rispetto ad una certa sintassi (`rdf:XML`, `rdf:XMLLiteral`, `xsd:anyURI`, ecc ...).

Alcuni tipi di dato sono derivati da altri tipi di dato, ovvero restringono i valori ammissibili dal dato da cui derivano ad un sottoinsieme più piccolo (e più specifico); i tipi di dato che non derivano da altri sono detti **primitivi**. Inoltre, mentre alcuni tipi di dato (come `xsd:decimal`) hanno una cardinalità infinita numerabile, altri (come `xsd:unsignedLong`) hanno un numero finito di valori ammissibili.

Se ad un letterale non è associato un tipo di dato, si assume che sia di tipo `xsd:string`; l'unica eccezione sono i letterali che presentano un language tag, a cui viene implicitamente assegnato il tipo `rdf:langString`. Sebbene RDF ammetta la possibilità di definire dei tipi di dato custom, non fornisce un meccanismo standard per riportare esplicitamente che tale tipo di dato derivi da un altro, o per definire un dominio di valori ammissibili.

Vi sono situazioni in cui è preferibile che una certa risorsa non venga identificata per mezzo di un IRI, ad esempio perché un'informazione è mancante oppure perché non è rilevante. RDF gestisce tali casistiche per mezzo dei **blank nodes**, che per convenzione hanno come prefisso il carattere "\_". Se una risorsa è identificata da un blank node, significa che tale risorsa esiste, ma non si ha modo o interesse di assegnarle un nome. I blank node operano come variabili esistenziali locali al loro dataset; due blank node di due dataset distinti si riferiscono a due risorse distinte.

### 2.4.1 Triple

I dati in formato RDF non possono riportare risorse singole, ma solo ed esclusivamente **triple**. Una tripla RDF è nella forma soggetto-predicato-oggetto<sup>4</sup>, dove tutti e tre gli elementi sono termini RDF. Nello specifico, il soggetto deve essere un IRI o un blank node, il predicato deve essere un IRI e l'oggetto può essere di qualsiasi tipo di termine.

ex:Boston
ex:hasPopulation
"646000"^^xsd:integer

ex:VoynichManuscript
ex:hasAuthor
\_:b

Queste restrizioni sono in linea con lo scopo che RDF si prefissa. Ai predicati deve necessariamente venire fornito un nome, dato che l'informazione "un soggetto ed un oggetto sono legati da un predicato ignoto" non è particolarmente rilevante. Inoltre, tale nome deve essere unico, perché i predicati devono poter essere univocamente identificati in qualsiasi dataset. Infine, per RDF, i letterali sono risorse di minore importanza rispetto agli IRI, pertanto sarebbe poco sensato averli come soggetto di una tripla.

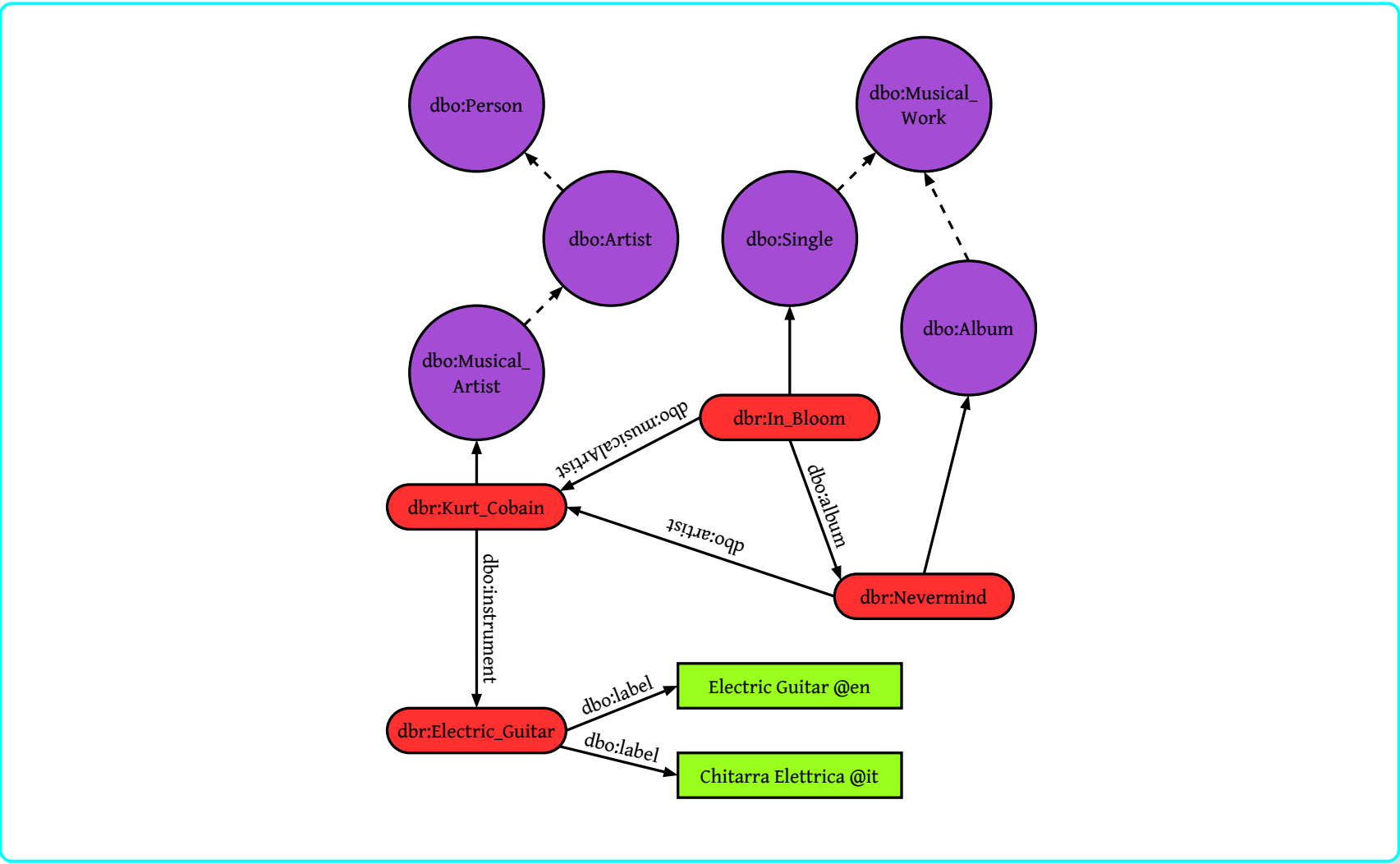
Sebbene le triple RDF non abbiano di per loro una semantica, le restrizioni sui tipi di termini che possono comparire in ciascuna tripla porta portano a due tipi di interpretazioni. Se il primo elemento è un IRI o un blank node ed terzo elemento è un letterale, la tripla è da interpretarsi come una descrizione: la tripla ( $A, B, C$ ) è da intendersi come "All'entità  $A$  è associata la proprietà  $C$ ". Se il primo elemento è un IRI o un blank node ed terzo elemento è un IRI, la tripla è da interpretarsi come una relazione: la tripla ( $A, B, C$ ) è da intendersi come "L'entità  $A$  è legata per mezzo di  $B$  all'entità  $C$ "<sup>5</sup>.

Un insieme di triple RDF costituisce un **grafo RDF**. Il nome grafo deriva dall'osservazione che ciascuna tripla RDF può essere rappresentata in maniera equivalente come una coppia di nodi di un grafo uniti da un arco: l'etichetta di tale arco è il predicato della tripla, il soggetto è il nodo di partenza dell'arco e l'oggetto è il nodo di arrivo. Più triple RDF danno allora vita ad un grafo diretto ed etichettato. Tale grafo è un esempio di knowledge graph.

Il fatto che RDF sia un modello di dati strutturato a grafo lo rende molto flessibile. Infatti, per introdurre nuovi predicati in un grafo RDF è sufficiente aggiungere un arco che ha tale predicato come etichetta, così come per introdurre nuovi soggetti o oggetti è sufficiente aggiungere dei nodi. Similmente, due grafi diversi (che corrispondono a due dataset diversi) possono essere unificati in maniera diretta mediante l'operazione di unione sui due insiemi di triple; l'unica eccezione sono i grafi che contengono dei blank node, perché il loro significato dipende dal grafo in cui si trovano, ed è quindi necessario prendere misure aggiuntive.

4. La struttura segue quella delle lingue anglosassoni.

5. Sebbene, per convenzione, il soggetto di una tripla sia la "risorsa primaria" che viene descritta dalla tripla stessa, la distinzione è del tutto arbitraria, in quanto è possibile invertire l'ordine del soggetto e dell'oggetto di una tripla per ottenerne una che descrive la stessa cosa.



## 2.5 Sintassi: N-triples e Turtle

Le uniche forme di sintassi specificate da RDF sono il vincolo di tripla ed i tipi di termine che possono comparire nelle tre posizioni delle triple. A parte queste restrizioni, RDF non fornisce alcun formalismo su come, ad esempio, riportare gli IRI ed i letterali. A tal scopo, sono stati definiti diversi formalismi per le triple RDF.

Una rappresentazione testuale estremamente semplice è **N-triples**; questa prevede di riportare per intero ciascun elemento di ogni tripla, una tripla per riga, terminandole con un punto. Le tre componenti di ciascuna tripla ed il punto alla fine della tripla sono separate da uno o più caratteri di spaziatura (spazi, tab, a capo, ecc ...). Se un elemento è un IRI, viene riportato fra parentesi angolate, mentre se è un letterale viene riportato fra doppi apici. I blank node, i language tag ed i datatype IRI vengono riportati come di consueto. Una riga che inizia con il carattere "#" viene interpretata come un commento.

Le tre triple riportate di seguito sono sintatticamente valide per N-triples.

```
<http://www.example.org/alice>      <http://schema.org/knows>      <http://www.example.org/bob> .
_:dave                               <http://xmlns.com/foaf/0.1/name>  "Dave Beckett"^^xsd:string .
<http://www.w3.org/2001/sw/RDFCore/ntriples/> <http://purl.org/dc/terms/title> "N-Triples"@en-US .
```

N-triples è tanto intuitivo quanto poco leggibile, perché gli IRI sono sempre riportati per intero, e gli IRI tendono ad essere molto lunghi. Una rappresentazione testuale leggermente più complessa è **Turtle**, che eredita la sintassi di N-triples estendendola ed aggiungendovi delle abbreviazioni per migliorarne la leggibilità.

Ai prefissi può essere associata una parola chiave mediante la direttiva `@prefix:`. Se due triple consecutive hanno in comune il soggetto, è possibile terminare la prima con un punto e virgola e non riportare il soggetto nella seconda. Se due triple consecutive hanno in comune sia il soggetto che il predicato, è possibile terminare la prima con una virgola e non riportare soggetto e predicato nella seconda.

Turtle permette di definire triple RDF molto più facilmente rispetto a N-triples.

```
@prefix dbr: <http://dbpedia.org/resource/> .
@prefix dbo: <http://dbpedia.org/ontology/> .

dbr:Kurt_Cobain    dbo:instrument    dbr:Electric_guitar .
dbr:In_Bloom      dbo:musicalArtist  dbr:Kurt_Cobain    ;
dbr:Nevermind     dbo:album          dbr:Nevermind       .
dbr:Nevermind     dbo:artist         dbr:Kurt_Cobain     .
```

## 2.6 SPARQL Protocol And RDF Query Language

Avendo a disposizione un grafo RDF, ci si chiede come sia possibile formulare domande sullo stesso, ad esempio determinare se esiste una tripla in cui figura un certo IRI. Dato che porre questo tipo di domande in linguaggio naturale è di difficile interpretazione per una macchina, queste vanno riformulate in un **linguaggio di query**. In particolare, un linguaggio di query appositamente pensato per estrarre informazioni da grafi RDF è **SPARQL (SPARQL Protocol And RDF Query Language)** <sup>6</sup>.

La nozione più importante nel linguaggio SPARQL è il **pattern di tripla RDF**. Questa è di fatto analoga ad una tripla RDF, ma oltre ad ammettere IRI, letterali e nodi blank può contenere anche **variabili di query**, che ha il carattere "?" come prefisso. Tale pattern viene riportato nel quarto campo di una query SPARQL dopo la direttiva **WHERE**.

Un pattern di tripla viene valutato mappando le variabili/costanti del pattern alle costanti del grafo, di modo che l'immagine del pattern rispetto alla mappa (dove le variabili del pattern sono sostituite con le rispettive costanti del grafo) sia un sottografo del grafo. Nello specifico, gli IRI ed i letterali hanno un match solamente con, rispettivamente, un IRI ed un letterale a loro identico, mentre i blank node e le variabili di query hanno un match con qualsiasi termine. La differenza fra i due sta nel fatto che i termini che hanno un match con una variabile di query possono venire restituiti come parte della soluzione, mentre quelli che hanno un match con un blank node non possono.

Sia  $Con$  un insieme infinito numerabile di costanti, e sia invece  $Var$  un insieme infinito numerabile di variabili: i due insiemi sono disgiunti. L'insieme dei termini  $Term$  è formulato come  $Term = Con \cup Var$ . Un grafo diretto ed etichettato è definito come una tupla  $G = (V, E, L)$ , dove  $V \subseteq Con$  è un insieme di nodi,  $L \subseteq Con$  è un insieme di etichette e  $E \subseteq V \times L \times V$  è un insieme di archi.

Un pattern di tripla è formalmente definito come una tupla  $Q = (V, E, L)$ , dove  $V \subseteq Term$  è un insieme di termini assegnabili ai nodi (IRI e blank nodes),  $L \subseteq Term$  è un insieme di termini assegnabili agli archi (IRI) e  $E \subseteq V \times L \times V$  è un insieme di archi (triple pattern).

Sia  $\mu : Var \mapsto Con$  una mappa, il cui dominio è indicato con  $Dom(\mu)$ . Dato un pattern di tripla  $Q$ , sia  $Var(Q)$  l'insieme di tutte le variabili che compaiono in  $Q$ . Sia poi  $\mu(Q)$  l'immagine di  $Q$  rispetto ad  $\mu$ , ovvero il sottografo indotto da  $Q$  dove tutte le variabili  $v \in Var(Q) \cap Dom(\mu)$  vengono sostituite con  $\mu(v)$ .

Dati due grafi diretti ed etichettati  $G_1 = (V_1, E_1, L_1)$  e  $G_2 = (V_2, E_2, L_2)$ , si dice che  $G_1$  è sottografo di  $G_2$  se  $V_1 \subseteq V_2, E_1 \subseteq E_2, L_1 \subseteq L_2$ .

Formalmente, sia  $Q$  un pattern di tripla e sia  $G$  un grafo diretto ed etichettato. La valutazione del pattern  $Q$  sul grafo  $G$ , indicato con  $Q(G)$ , viene definito dall'insieme  $Q(G) = \{\mu \mid \mu(Q) \subseteq G \wedge Dom(\mu) = Var(Q)\}$ .

Un pattern di tripla restituisce una tabella. Per questo motivo, un pattern di tripla può venire poi esteso con gli operatori propri dell'algebra relazionale per creare **pattern complessi**. Gli operatori elementari dell'algebra relazionale sono i seguenti:

- $\pi$ , che restituisce la tabella con una o più colonne rimosse;
- $\sigma$ , che restituisce solo le righe della tabella che rispettano una determinata condizione;
- $\rho$ , che restituisce la tabella con una o più colonne cambiate di nome;
- $\cup$ , che unisce le righe di due tabelle in un'unica tabella;
- $-$ , che rimuove le righe della prima tabella che compaiono nella seconda;
- $\bowtie$ , che estendono le righe della prima tabella con le righe della seconda tabella che rispettano una determinata condizione;

I pattern complessi sono definiti in maniera ricorsiva come segue:

- Se  $Q$  è un pattern semplice, allora  $Q$  è un pattern complesso;
- Se  $Q$  è un pattern complesso e  $V \subseteq Var(Q)$ , allora  $\pi_V(Q)$  è un pattern complesso;
- Se  $Q$  è un pattern complesso e  $R$  è una condizione di selezione espressa per mezzo di operatori booleani ( $\wedge, \vee, \neg, =$ ), allora  $\sigma_R(Q)$  è un pattern complesso;
- Se  $Q_1$  e  $Q_2$  sono due pattern complessi, allora  $Q_1 \bowtie Q_2$ ,  $Q_1 \cup Q_2$  e  $Q_1 - Q_2$  sono pattern complessi.

Data una mappa  $\mu$ , per un insieme di variabili  $V \subseteq Var$  sia  $\mu[V]$  la proiezione delle variabili  $V$  da  $\mu$ , ovvero la mappatura  $\mu'$  tale per cui  $Dom(\mu') = Dom(\mu) \cap V$  e  $\mu'(v) = \mu(v)$  per ogni  $v \in Dom(\mu')$ . Data la condizione di selezione  $R$  ed una mappa  $\mu$ , si indica con  $\mu \models R$  che la mappa  $\mu$  soddisfa  $R$ . Infine, due mappe  $\mu_1$  e  $\mu_2$  vengono dette *compatibili* se  $\mu_1(v) = \mu_2(v)$  per ogni  $v \in Dom(\mu_1) \cap Dom(\mu_2)$ , ovvero se mappano le variabili che hanno in comune alle medesime costanti. Due mappe compatibili  $\mu_1$  e  $\mu_2$  si indicano con  $\mu_1 \sim \mu_2$ .

Le operazioni sui pattern semplici, che restituiscono pattern complessi, si indicano allora come segue:

6. Sia il nome che la struttura delle query di SPARQL hanno molto in comune con **SQL**, che è invece un linguaggio di query per database relazionali.

- $\pi_V(Q)(G) = \{\mu \mid \mu \in Q(G)\}$
- $\sigma_R(Q)(G) = \{\mu \mid \mu \in Q(G) \wedge \mu \vdash R\}$
- $Q_1 \bowtie Q_2(G) = \{\mu_1 \cup \mu_2 \mid \mu_1 \in Q_2(G) \wedge \mu_2 \in Q_1(G) \wedge \mu_1 \sim \mu_2\}$
- $Q_1 \cup Q_2(G) = \{\mu \mid \mu \in Q_1(G) \vee \mu \in Q_2(G)\}$
- $Q_1 - Q_2(G) = \{\mu \mid \mu \in Q_1(G) \wedge \mu \notin Q_2(G)\}$

Una funzionalità che distingue i linguaggi di query é la possibilità di includere le **path expression** nelle query. Una path expression é una espressione regolare che permette di avere un match su percorsi di lunghezza variabile fra due nodi mediante una **path query**  $(x, r, y)$ , dove  $x$  e  $y$  possono essere sia variabili che costanti. Le path expression *semplici* sono quelle dove  $r$  é una costante, ovvero l'etichetta di un arco; si noti come le path expression siano sempre invertibili. É poi possibile costruire path expression *complesse* mediante i noti operatori delle espressioni regolari oppure mediante inversione:

- Se  $r$  é una path expression (l'etichetta di un arco), allora  $r^*$  é una path expression (un certo numero di archi etichettati  $r$  o anche nessuno);
- Se  $r$  é una path expression, allora  $r^-$  é una path expression (l'etichetta  $r$  letta a rovescio);
- Se  $r_1$  e  $r_2$  sono due path expression, allora  $r_1 \mid r_2$  é una path expression (é presente l'etichetta  $r_1$  di un arco oppure é presente l'etichetta  $r_2$  di un arco);
- Se  $r_1$  e  $r_2$  sono due path expression, allora  $r_1 \cdot r_2$  é una path expression (é presente l'etichetta  $r_1$  di un arco seguita dall'etichetta  $r_2$  di un arco).

Dato un grafo diretto ed etichettato  $G = (V, E, L)$  ed una path expression  $r$ , si definisce l'applicazione di  $r$  su  $G$ , ovvero  $r[G]$ , come segue:

- $r[G] = \{(u, v) \mid (u, r, v) \in E\} (r \in Con)$
- $r^-[G] = \{(u, v) \mid (v, u) \in r[G]\}$
- $r_1 \mid r_2[G] = r_1[G] \cup r_2[G]$
- $r_1 \cdot r_2[G] = \{(u, v) \mid \exists w \in V : (u, w) \in r_1[G] \wedge (w, v) \in r_2[G]\}$
- $r^*[G] = \{(u, u) \mid u \in V\} \bigcup_{n \in \mathbb{N}^+} r^n[G]$

Dato un grafo diretto ed etichettato  $G$ , delle costanti  $c_i \in Con$  e delle variabili  $z_i \in Var$ , una **path query** semplice é una tripla  $(x, y, z)$  dove  $x, y \in Con \cup Var$  e  $r$  é una path expression. La valutazione di una path query é definita come segue:

- $(c_1, r, c_2)(G) = \{\mu_\emptyset \mid (c_1, c_2) \in r[G]\}$
- $(c, r, z)(G) = \{\mu \mid \text{Dom}(\mu) = \{z\} \wedge (c, \mu(z)) \in r[G]\}$
- $(z, r, c)(G) = \{\mu \mid \text{Dom}(\mu) = \{z\} \wedge (\mu(z), c) \in r[G]\}$
- $(z_1, r, z_2)(G) = \{\mu \mid \text{Dom}(\mu) = \{z_1, z_2\} \wedge (\mu(z_1), \mu(z_2)) \in r[G]\}$

Dove  $\mu_\emptyset$  indica la mappatura vuota, ovvero  $\text{Dom}(\mu_\emptyset) = \emptyset$ .

Path query semplici possono essere usate come pattern di tripla per ottenere **graph pattern di navigazione**. Se  $Q$  é un pattern di tripla, allora é anche un graph pattern di navigazione. Se  $Q$  é un graph pattern di navigazione e  $(x, r, y)$  é una path query, allora  $Q \bowtie (x, r, y)$  é un graph pattern di navigazione.

Una query SPARQL é costituita dalle seguenti sei componenti, non tutte strettamente obbligatorie:

1. *Dichiarazione dei prefissi*. Similmente a Turtle, é possibile dichiarare dei prefissi mediante la direttiva `PREFIX`, seguita dal nome scelto per il prefisso e dall'URI a cui il prefisso é associato;
2. *Tipo di query*. SPARQL supporta quattro tipi di query:
  - `SELECT`, che restituisce il risultato della query sotto forma di tabella. Questa supporta l'eliminazione delle soluzioni duplicate per mezzo delle direttive `REDUCED` (possono essere rimosse) e `DISTINCT` (devono essere rimosse). É possibile restituire l'intera tabella con tutte le colonne con "\*" oppure specificando solo parte delle colonne mediante proiezione;
  - `ASK`, che restituisce true se la query ha un risultato non nullo e false altrimenti;
  - `CONSTRUCT`, che restituisce il risultato della query sotto forma di (sotto) grafo;
  - `DESCRIBE`, che restituisce il risultato della query sotto forma di grafo che descrive termini e soluzioni.
3. *Costruzione del dataset*. mediante la direttiva `FROM` é possibile specificare su quale/i grafo/i si vuole operare la query. Se vengono specificati più grafi, la query verrà operata sulla loro unione;
4. *Pattern*. La direttiva `WHERE` specifica il pattern che discrimina un elemento del grafo che é parte della soluzione da uno che non lo é. Le condizioni sono riportate in un blocco di parentesi graffe seguendo la sintassi Turtle;
5. *Aggregazione*. Le direttive `GROUP BY` e `HAVING`, analoghe alle direttive omonime di SQL permettono di raggruppare o di filtrare gli elementi della soluzione secondo specifiche regole. I valori possono venire aggregati sulla base di diverse direttive quali `COUNT`, `SUM`, `MIN`, `MAX`, `AVG`;
6. *Modificatori della soluzione*. Alcune direttive permettono di modificare gli elementi della soluzione disponendoli secondo un certo ordine (`ORDER BY`) oppure restituendone solo una parte.



```

PREFIX dbpedia: <http://dbpedia.org/resource/>
PREFIX foaf: <http://xmlns.com/foaf/0.1/>
PREFIX dc: <http://purl.org/dc/elements/1.1/>
PREFIX mo: <http://purl.org/ontology/mo/>

SELECT ?album_name ?track_title
WHERE
  dbpedia:The_Beatles foaf:made ?album .
  ?album              dc:title  ?album_name ;
  ?album              mo:track  ?track .
  ?track              dc:title  ?track_title .

```

I modificatori di soluzione sono diversi, fra cui figurano:

- **OPTIONAL** quando una parte del grafo non é obbligatoria;
- **UNION** quando si vuole ricavare l'unione di due o piú sottografi risultanti;
- **MINUS** quando si vuole eliminare i risultati che hanno una corrispondenza con un pattern;
- **VALUES** quando parte del match é predefinito;
- **BIND** quando parte del match é precalcolato;
- **FILTER** quando occorre rimuovere i risultati che rispecchiano un certo pattern espresso sottoforma di espressione booleana;

Le espressioni booleane ammesse in SPARQL possono contenere i seguenti elementi:

- Variabili e costanti;
- Operatori di uguaglianza e disuguaglianza: = , <= , >= , != ;
- Connettori: && , || , ( , ) , ! ;
- Espressioni regolari: `regex(?x, "A.*")`;
- Test sulla natura delle variabili: `isURI(?x)` , `isBlank(?x)` , `isLiteral(?x)` , `bound(?x)` .
- Inclusione di una stringa  
`CONTAINS(literal1, literal2)` , `STRSTARTS(literal1, literal2)` , `STRENDS(literal1, literal2)`
- Crea un letterale con un tipo di dato associato  
`STRDT(value, type)`
- Crea un letterale con un language tag associato  
`STRLANG(value, lang)`
- Concatena piú stringhe  
`CONCAT(literal1, literal2, ..., literaln)`
- Estrai una sottostringa  
`SUBSTR(literal, start [, length])`

## 2.7 RDFS

Come già detto, il terzo membro di una tripla RDF può essere un IRI o un letterale. Nel primo caso, é possibile vedere tale tripla come la descrizione di una relazione fra l'entità primo membro della tripla e l'entità terzo membro della tripla, mentre nel secondo caso la tripla riporta che il primo membro della tripla ha come attributo il terzo membro. Si noti però come RDF non fornisca esplicitamente un'interpretazione di questo tipo, ma é piú una assunzione implicita.

La semantica definita da RDF si limita soltanto al vincolo di tripla (tutte le risorse devono essere nella forma soggetto-predicato-oggetto) ed il tipo di ciascun termine (il predicato non può essere un blank node, il soggetto non può essere un letterale, ecc ... ). Al di lá di questo, RDF non permette la costruzione di una vera e propria **ontologia**.

L'ontologia é una branca della filosofia che si occupa di comprendere la natura delle cose e come categorizzarle. Nel contesto dell'informatica, con ontologia si intende una rappresentazione formale della conoscenza rispetto ad un determinato dominio; si occupa quindi di determinare quali sono le entità che appartengono a tale dominio, come possono essere categorizzate, quali sono le loro proprietà, quali di queste proprietà sono rilevanti e quali no, ecc ...

L'obiettivo di una ontologia informatica non é quello di trovare la modellazione "corretta" (qualunque cosa questo significhi) per un determinato dominio, quanto piú trovare una rappresentazione che sia funzionale per tutte le parti interessate. Nel contesto di un sistema distribuito, costruire ontologie dettagliate le cui definizioni sono state prese di comune accordo da tutti i nodi fornisce loro una concettualizzazione comune, sulla base della quale potersi scambiare informazioni.

**Resource Description Framework Schema (RDFS)** é un semplice linguaggio che permette di associare uno schema ad un insieme di dati scritti in formato RDF. Questo permette di descrivere le risorse RDF in termini di classi e di proprietà. Queste hanno `rdfs:` come prefisso.

RDFS si compone di due elementi concettuali ad alto livello: le **proprietá** e le **classi**. Le proprietá sono le relazioni che sussistono fra coppie di risorse: sono i termini in genere presenti come predicati nelle triple. Le classi sono gruppi di risorse che hanno caratteristiche in comune. Una risorsa può essere membro di piú classi. Un membro di una classe é detto **istanza** di tale classe. La classe di una risorsa viene anche chiamata il suo **tipo**. Per convenzione, le classi hanno un nome con la prima lettera maiuscola, mentre le proprietá hanno un nome con la prima lettera minuscola.

RDFS permette inoltre di fare **inferenze** a partire dalle informazioni a disposizione. Nello specifico, a partire da una certa semantica, é possibile definire una nozione di **entailment** tra due grafi RDF di modo che se il primo grafo contiene triple vere, allora anche il secondo conterrá triple vere (rispetto alla medesima semantica). In questo caso, il secondo grafo non aggiunge alcuna informazione che non sia già presente, eventualmente implicitamente, nel primo grafo. RDFS mette a disposizione 13 regole di inferenza:

| Regola    | Se vale ...  | ... allora si deduce                 |
|-----------|--|--------------------------------------|
| Regola 1  | xxx aaa yyy .  | aaa rdf:type rdfs:Property .         |
| Regola 2  | aaa rdfs:domain xxx .<br>yyy aaa zzz .                       | yyy rdf:type xxx .                   |
| Regola 3  | aaa rdfs:range xxx .<br>yyy aaa zzz .                        | zzz rdf:type xxx .                   |
| Regola 4a | xxx aaa yyy .  | xxx rdf:type rdfs:Resource .         |
| Regola 4b | xxx aaa yyy .  | yyy rdf:type rdfs:Resource .         |
| Regola 5  | xxx rdfs:subPropertyOf yyy .<br>yyy rdfs:subPropertyOf zzz . | xxx rdfs:subPropertyOf zzz .         |
| Regola 6  | xxx rdf:type rdf:Property .                                  | xxx rdfs:subPropertyOf xxx .         |
| Regola 7  | aaa rdfs:subPropertyOf bbb .<br>xxx aaa yyy .                | xxx bbb yyy .                        |
| Regola 8  | xxx rdf:type rdfs:Class .                                    | xxx rdfs:subClassOf rdfs:Resource .  |
| Regola 9  | xxx rdfs:subClassOf yyy .<br>zzz rdf:type xxx .              | zzz rdf:type yyy .                   |
| Regola 10 | xxx rdf:type rdfs:Class .                                    | xxx rdfs:subClassOf xxx .            |
| Regola 11 | xxx rdfs:subClassOf yyy .<br>yyy rdfs:subClassOf zzz .       | xxx rdfs:subClassOf zzz .            |
| Regola 12 | xxx rdf:type rdfs:ContainerMembershipProperty .              | xxx rdfs:subPropertyOf rdfs:member . |
| Regola 13 | xxx rdf:type rdfs:DataType .                                 | xxx rdfs:subClassOf rdfs:Literal .   |

La proprietá `rdf:type` permette di istanziare una classe. La tripla `A rdf:type B` indica che l'entitá `A` é una istanza della classe `B`. Spesso `rdf:type` viene abbreviato con `a`. Diverse entitá in RDFS sono istanze di metaclassi predefinite:

- Ogni risorsa (classi, entitá, proprietá, letterali, ecc ...) é implicitamente istanza della metaclassa `rdfs:Resource` ;
- Tutte le proprietá sono istanza di `rdf:Property` ;
- Le classi sono istanza di `rdfs:Class` ;
- I letterali sono istanza di `rdfs:Literal` ;
- I tipi di dato (`xsd:string` , `xsd:integer` , ecc ...) sono istanza di `rdfs:Datatype` .

|                    |             |                  |
|--------------------|-------------|------------------|
| ex:LemonCheesecake | ex:contains | ex:Lemon         |
| ex:LemonCheesecake | ex:contains | ex:Cheese        |
| ex:LemonCheesecake | rdf:type    | ex:DessertRecipe |
| ex:Lemon           | rdf:type    | ex:Ingredient    |
| ex:Lemon           | rdf:type    | ex:Fruit         |
| ex:Cheese          | rdf:type    | ex:Ingredient    |
| ex:Cheese          | rdf:type    | ex:Dairy         |

`rdfs:subClassOf` mette due classi nella relazione di sottoclasse. La tripla `C rdfs:subClassOf D` indica che la classe `C` é una sottoclasse della classe `D`, ovvero che tutte le istanze di `C` sono automaticamente anche istanze di `D`. Questa relazione é sia riflessiva (ogni classe é sottoclasse di sé stessa) che transitiva (se `C` é sottoclasse di `D` e `D` é sottoclasse di `E`, allora `C` é sottoclasse di `E`).



Si consideri il seguente insieme di triple:

|                     |                 |                     |
|---------------------|-----------------|---------------------|
| ex:DessertRecipe    | rdfs:subClassOf | ex:Recipe           |
| ex:VeganRecipe      | rdfs:subClassOf | ex:VegetarianRecipe |
| ex:VegetarianRecipe | rdfs:subClassOf | ex:Recipe           |
| ex:LemonPie         | rdfs:subClassOf | ex:DessertRecipe    |
| ex:LemonPie         | rdfs:subClassOf | ex:VeganRecipe      |

Per simmetrit  , sono automaticamente vere anche le seguenti triple:

|                     |                 |                     |
|---------------------|-----------------|---------------------|
| ex:DessertRecipe    | rdfs:subClassOf | ex:Recipe           |
| ex:Recipe           | rdfs:subClassOf | ex:Recipe           |
| ex:VeganRecipe      | rdfs:subClassOf | ex:VeganRecipe      |
| ex:VegetarianRecipe | rdfs:subClassOf | ex:VegetarianRecipe |
| ex:LemonPie         | rdfs:subClassOf | ex:LemonPie         |

Inoltre, per transitivit  , vale:

|                |                 |                     |
|----------------|-----------------|---------------------|
| ex:VeganRecipe | rdfs:subClassOf | ex:Recipe           |
| ex:LemonPie    | rdfs:subClassOf | ex:VegetarianRecipe |
| ex:LemonPie    | rdfs:subClassOf | ex:Recipe           |

rdfs:subPropertyOf mette due propriet   nella relazione di sottopropriet  . La tripla C rdfs:subPropertyOf D indica che la propriet   P    una sottopropriet   della propriet   Q , ovvero che tutte le coppie di entit   legate da P sono automaticamente legate anche da Q . Cos   come la relazione di sottoclasse, la relazione di sottopropriet      sia riflessiva che transitiva.

A partire dalle triple:

|                  |                    |                  |
|------------------|--------------------|------------------|
| ex:hasTopping    | rdfs:subPropertyOf | ex:hasIngredient |
| ex:hasIngredient | rdfs:subPropertyOf | ex:contains      |

   possibile inferire:

|                  |                    |                  |
|------------------|--------------------|------------------|
| ex:hasTopping    | rdfs:subPropertyOf | ex:hasTopping    |
| ex:hasIngredient | rdfs:subPropertyOf | ex:hasIngredient |
| ex:contains      | rdfs:subPropertyOf | ex:contains      |
| ex:hasTopping    | rdfs:subPropertyOf | ex:contains      |

rdfs:domain mette in relazione una propriet   P ed una classe C . La tripla P rdfs:domain C indica che se due elementi x e y sono messi in relazione dalla propriet   P , allora x    una istanza di C .

A partire dalle triple:

|                  |                  |           |
|------------------|------------------|-----------|
| ex:hasIngredient | rdfs:domain      | ex:Recipe |
| ex:LemonPie      | ex:hasIngredient | ex:Lemon  |

   possibile inferire:

|             |          |           |
|-------------|----------|-----------|
| ex:LemonPie | rdf:type | ex:Recipe |
|-------------|----------|-----------|

rdfs:range mette in relazione una propriet   P ed una classe C . La tripla P rdfs:range C indica che se due elementi x e y sono messi in relazione dalla propriet   P , allora y    una istanza di C .

A partire dalle triple:

```
ex:hasIngredient    rdfs:range    ex:Ingredient
ex:LemonPie        ex:hasIngredient    ex:Lemon
```

É possibile inferire:

```
ex:Lemon    rdf:type    ex:Ingredient
```

Le classi e le proprietà forniscono un **vocabolario**, ovvero un insieme di termini RDF per descrizioni generali. Una singola proprietà o una classe può essere usata per descrivere un numero arbitrario di istanze. É facile riutilizzare uno stesso vocabolario in diversi grafi RDF. RDFS permette di fare query SPARQL su grafi RDF ed ottenere informazioni che non sono esplicitamente contenute nel grafo, applicando le regole di inferenza.

Si consideri il seguente grafo RDF (espresso in notazione Turtle):

```
@prefix dbr:  https://dbpedia.org/resource/
@prefix dbo:  https://dbpedia.org/ontology/
@prefix rdfs: https://www.w3.org/2000/01/rdfs-schema#

dbo:Singer      rdfs:subClassOf    dbo:MusicalArtist .
dbr:Come_As_You_Are_(Nirvana_Song)  dbo:Singer      dbr:Kurt_Cobain .
dbr:Come_As_You_Are_(Nirvana_Song)  dbo:MusicalArtist dbr:Dave_Grohl .
dbr:Come_As_You_Are_(Nirvana_Song)  dbo:MusicalArtist dbr:Krist_Novoselic .
```

É possibile derivare che le entità `dbr:Kurt_Cobain` e `dbr:Come_As_You_Are_(Nirvana_Song)` sono legate da `dbo:MusicalArtist` applicando le regole di entailment RDFS. Questo perché le due entità sono legate da `dbo:Singer` e tale classe é una sottoclasse di `dbo:MusicalArtist`. Infatti, tale tripla é presente nel risultato dalla seguente query SPARQL nonostante nel grafo non sia riportata esplicitamente:

```
SELECT ?name
WHERE {
  dbr:Come_As_You_Are_(Nirvana_Song)  dbo:MusicalArtist  ?name .
}
```

| ?name               |
|---------------------|
| dbr:Kurt_Cobain     |
| dbr:Dave_Grohl      |
| dbr:Krist_Novoselic |

Esistono due approcci in merito al combinare le inferenze e le query. Il primo prevede di applicare le regole di inferenza su tutte le triple del grafo prima che questo venga pubblicato e salvare tutte le triple inferite all'interno dello stesso. In questo modo, quando viene effettuata una query, tutte le triple sono già presenti nel grafo ed é sufficiente restituirle. Questo comporta però che ogni volta che il grafo viene modificato, ad esempio perché viene introdotta o rimossa una tripla, occorre riapplicare le regole di inferenza per aggiornarlo. Il secondo approccio prevede di applicare le regole di inferenza quando viene effettuata una query che le richiede. In questo modo non é necessario aggiornare il grafo ogni volta che questo viene modificato, ma d'altra parte ogni query sarà piú lenta perché é necessario spendere ulteriore tempo per il calcolo delle inferenze.

2.8 OWL

Le ontologie che RDFS permette di costruire non sono particolarmente espressive. Ad esempio, RDFS presenta le seguenti limitazioni:

- Non é possibile modellare le **classi disgiunte**, ovvero non é possibile definire delle classi a cui sia impedito avere istanze in comune;
- Non é possibile specificare che una proprietà sia transitiva, inversa e/o simmetrica;
- Non é possibile specificare un vincolo di **cardinalità**, ad esempio che l'istanza di una classe possa essere in relazione con al massimo *n* istanze di un'altra classe;
- Non é possibile costruire classi applicando gli operatori dell'insiemistica (unione, intersezione, complemento) sulle classi esistenti;
- Non é possibile definire un range/dominio che vari in base a quale entità si riferisce.

Si consideri il grafo RDF presentato di seguito, che contiene informazioni relative a città, regioni e paesi:

```
@prefix rdf: https://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#
@prefix rdfs: https://www.w3.org/2000/01/rdfs-schema#
@prefix dbr: https://dbpedia.org/resource/
@prefix dbo: https://dbpedia.org/ontology/

capitalOf      rdfs:domain  dbo:Capital .
capitalOf      rdfs:range   dbo:Country .
cityOf         rdfs:range   dbo:Country .
cityOf         rdfs:range   dbo:Region .

dbr:Milan      cityOf      dbr:Lombardy .
dbr:Milan      cityOf      dbr:Italy .
dbr:Rome       capitalOf   dbr:Italy .
dbr:Italy      rdf:type     dbo:Country .
dbr:Lombardy   rdf:type     dbo:Region .
```

Nonostante le triple siano tutte logicamente valide, é comunque possibile applicare le regole di inferenza di RDFS per derivare delle triple che non lo sono.

Ad esempio, `dbr:Milan` é legato sia a `dbr:Italy` che a `dbr:Lombardy` per mezzo del predicato `cityOf`. Tuttavia, l'esistenza della tripla `cityOf rdfs:range dbo:Country .` permette di applicare la regola di inferenza 3, a partire dalla quale si deriva che `dbr:Lombardy` é una istanza della classe `dbo:Country`.

Per sopperirvi é necessario utilizzare un linguaggio piú ricco. A tal scopo é stato definito **Ontology Web Language (OWL)**, che opera come RDFS su triple conformi allo standard RDF ma permettendo una modellazione piú fine.

A differenza di RDFS, che si compone di "sole" 13 regole di inferenza, OWL si prefigge di modellare una ontologia molto complessa, ed un insieme di regole di inferenza dedicate non sarebbe sufficiente. Per questo motivo, OWL utilizza un linguaggio logico vero e proprio, ispirato ad una famiglia di linguaggi chiamati **Description Logic (DL)**. Tali linguaggi non sono altro che restrizioni della logica del primo ordine. Nel caso specifico di OWL2, la versione attuale<sup>7</sup>, la DL di riferimento é chiamata **SROIQ**; sebbene SROIQ e OWL siano intimamente collegati, i due hanno terminologie distinte, ma mappabili uno-ad-uno.

A partire dalla specifica completa di OWL sono stati definiti tre **profili**. Questi sono dei "dialetti" di OWL 2, ovvero delle restrizioni al linguaggio pensati per distinti casi d'uso. Ogni profilo ha una propria ricchezza espressiva ed una propria capacità computazionale. <sup>8</sup>. I profili sono tre:

- **OWL 2 EL** permette di modellare classificazioni semplici (comunque piú sofisticate di quanto possa fare RDFS), ma viene garantito il calcolo delle inferenze in tempo polinomiale;
- **OWL 2 QL** é costruito di modo che le inferenze siano automaticamente traducibili come query su database relazionali;
- **OWL 2 RL** é pensato per essere implementato in maniera efficiente in sistemi a regole.

Se RDFS metteva a disposizione la relazione di sottoclasse, OWL fornisce il predicato `owl:equivalentClass`, che indica che le due classi che mette in relazione hanno gli stessi membri. Tale predicato é piú ricco di `rdfs:subClassOf`, perché oltre allo specificare che una classe é sottoclasse di un'altra é anche possibile introdurre dei vincoli aggiuntivi. Inoltre, il predicato `owl:disjointWith` indica che due classi non possono avere una istanza in comune.

L'inconsistenza nell'esempio precedente viene risolta introducendo la tripla `dbo:Region owl:disjointWith dbo:Country .`, perché in questo modo si impedisce che `dbr:Lombardy` possa essere istanza di `dbo:Country`.

L'istanza di una classe in OWL prende il nome di **individuo**. Un individuo é legato alla propria classe per mezzo di `rdfs:type`. OWL permette di specificare che due individui sono in realtà lo stesso individuo (nonostante abbiano due IRI distinti) per mezzo del predicato `owl:sameAs`. Inoltre, é possibile specificare che due individui sono distinti per mezzo del predicato `owl:differentFrom`. OWL, infatti, non adotta la politica *UniqueNameAssumption (UNA)*, ovvero l'idea che due entità a cui sono stati assegnati due nomi diversi (due URI diversi, in questo caso) siano necessariamente distinte esse stesse.

7. Per comodità, da ora in poi con "OWL" si intenderá la specifica completa della seconda versione del linguaggio (se non diversamente specificato).  
8. In genere, i reasoner commerciali utilizzano una intersezione di questi dialetti di modo da bilanciare efficienza ed espressività.

```
@prefix dbr:  https://dbpedia.org/resource/
@prefix msb:  https://musicbrainz.org/artist/
@prefix owl: https://www.w3.org/2002/07/owl#
```

```
msb:5b11f4ce-a62d-471e-81fc-a69a8278c7da    owl:sameAs      dbr:Nirvana_(band) .
dbr:Nirvana                                owl:differentFrom dbr:Nirvana_(band) .
```

Sebbene le proprietà in RDF(S) siano in genere modellate come attributi di una entità o come relazione fra due entità, non esiste un costrutto che permetta di fare esplicitamente questa distinzione. In OWL si distingue invece fra `owl:ObjectProperty`, ovvero proprietà i cui valori sono risorse, e `owl:DatatypeProperty`, ovvero proprietà i cui valori sono letterali.

Così come per le classi, OWL permette di stabilire che due proprietà (con diverso IRI) si riferiscono alla medesima proprietà per mezzo del predicato `owl:equivalentProperty`, e stabilire che due proprietà sono distinte per mezzo di `owl:propertyDisjointWith`.

OWL permette di assegnare delle caratteristiche alle proprietà che permettono di inferire nuovi fatti sulla base delle stesse:

- Se una proprietà `p` appartiene alla classe `owl:SymmetricProperty`, allora tale proprietà è simmetrica. Ovvero:

Se in un grafo sono presenti le triple `p rdf:type owl:SymmetricProperty .` Allora è possibile inferire `y p x .`  
`x p y .`

- Se due proprietà `p` e `q` sono messe in relazione dal predicato `owl:inverseOf`, allora tali proprietà sono l'una l'inversa dell'altra. Ovvero:

Se in un grafo sono presenti le triple `p owl:inverseOf q .` Allora è possibile inferire `y q x .`  
`x p y .`

- Se una proprietà `p` appartiene alla classe `owl:TransitiveProperty`, allora tale proprietà è transitiva. Ovvero:

Se in un grafo sono presenti le triple `p rdf:type owl:TransitiveProperty .` Allora è possibile inferire `x p z .`  
`x p y .`  
`y p z .`

- Se una proprietà `p` appartiene alla classe `owl:FunctionalProperty`, allora tale proprietà è una relazione funzionale, ovvero una relazione il cui argomento è associato ad al più un valore. Ovvero:

Se in un grafo sono presenti le triple `p rdf:type owl:FunctionalProperty .` Allora è possibile inferire `y owl:sameAs z .`  
`x p y .`  
`x p z .`

- Se una proprietà `p` appartiene alla classe `owl:InverseFunctionalProperty`, allora l'inverso di tale proprietà è una relazione funzionale. Ovvero:

Se in un grafo sono presenti le triple `p rdf:type owl:InverseFunctionalProperty .` Allora è possibile inferire `x owl:sameAs y .`  
`x p z .`  
`y p z .`

Si consideri il grafo RDF presentato di seguito:

```
@prefix rdf: https://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#
@prefix rdfs: https://www.w3.org/2000/01/rdfs-schema#
@prefix dbr: https://dbpedia.org/resource/
@prefix dc: https://purl.org/dc/elements/1.1/
@prefix foaf: https://xmlns.org/foaf/0.1/
```

```
foaf:knows    rdfs:domain    foaf:Person    ;
              rdfs:range    foaf:Person    .
foaf:made     rdfs:domain    foaf:Agent     .
```

```
dbr:Kurt_Cobain    foaf:made    dbr:Heart-Shaped_Box    ;
                  foaf:knows    dbr:Dave_Grohl         .
```

Sia in RDFS che in OWL é possibile inferire:

```
dbr:Kurt_Cobain    a    foaf:Agent    ;
                  a    foaf:Person    .
dbr:Dave_Grohl     a    foaf:Person    .
```

OWL permette però di derivare molte più informazioni. Aggiungendo al grafo le triple:

```
dc:creator    owl:inverseOf    foaf:Made    .
foaf:knows    a                  owl:SymmetricProperty    .
```

É possibile inferire anche:

```
dbr:Heart-Shaped_Box    dc:creator    dbr:Kurt_Cobain    .
dbr:Dave_Grohl          foaf:knows    dbr:Kurt_Cobain    .
```

Per poter costruire classi mediante operatori booleani é necessario che queste siano organizzate in una struttura a **reticolo**, con un top ed un bottom. A tal scopo, ogni entità in OWL (classi, proprietà, letterali, ecc ...) é implicitamente istanza della classe `owl:Thing`, mentre la classe `owl:Nothing` é la classe che non ha istanze. Similmente, ogni proprietà é implicitamente istanza della classe `owl:TopObjectProperty`, mentre nessuna proprietà é istanza della classe `owl:BottomObjectProperty`. Le classi possono avere più superclassi dirette; le proprietà possono avere più superproprietà dirette.

La sintassi di SROIQ é composta da tre elementi: **concetti**, **ruoli** e **asserzioni**. Un concetto SROIQ corrisponde ad una classe OWL, un ruolo SROIQ ad una proprietà OWL ed una asserzione SROIQ ad un individuo. Si distinguono poi le **definizioni** dagli **assiomi**: le definizioni permettono di fare riferimento ad un concetto/ruolo/asserzione o di definirne di nuovi, mentre gli assiomi specificano una proprietà di un certo concetto/ruolo/asserzione.

Le asserzioni che si riferiscono ai concetti e ai ruoli costituiscono la **Terminological Box (T-box)**, mentre le asserzioni che si riferiscono agli assiomi costituiscono la **Assertional Box (A-box)**. La A-box riporta le informazioni relative agli individui OWL; a tutti gli individui é necessario associare un nome univoco (non sono ammessi blank node come in RDF(S)). La T-box definisce la semantica relativa alle classi OWL.

La semantica di una Description Logic, e quindi anche di SROIQ, é definita a partire da una **teoria dei modelli**. Una interpretazione  $I$  di una Description Logic é tipicamente definita come una coppia  $(\Delta^I, \cdot^I)$ , dove  $\Delta^I$  é il **dominio di interpretazione** e  $\cdot^I$  é la **funzione di interpretazione**. Il dominio di interpretazione contiene un insieme di individui. La funzione di interpretazione mappa la definizione di un individuo, di un concetto o di un ruolo e li mappa, rispettivamente, ad un elemento del dominio, ad un sottoinsieme del dominio o ad un insieme di coppie ordinate estratte dal dominio. D'altra parte, gli assiomi sono interpretati come condizioni semantiche. Dalla semantica di una Description Logic discende una "classica" nozione di entailment, ovvero dove per due ontologie  $O_1$  e  $O_2$  vale  $O_1 \models O_2$  se e solo se ogni interpretazione che soddisfa  $O_1$  soddisfa anche  $O_2$ .

Vi sono diverse possibili tecniche per costruire inferenze sulla base di una DL. Fra queste, figura la **tecnica a tableau**, una tecnica generale utilizzata in diverse logiche per testare la soddisfacibilità di una o più formule. L'idea alla base della tecnica consiste nell'esplorare lo spazio delle possibilità che possono soddisfare tali formule: le possibilità che conducono ad una contraddizione vengono scartate, e se tutte le possibilità vengono scartate la formula é considerata una contraddizione. Nel caso specifico delle Description Logic, ad esempio, la tecnica a tableau prevede di esplorare tutte le possibilità che possono condurre ad un modello per l'ontologia in esame; questa é allora soddisfacibile se (almeno) un modello esiste ed una contraddizione in caso contrario.

Si noti come non sia sempre possibile *chiudere* un tableau, ovvero esaurire tutte le possibilità ed ottenere una risposta. Questo perché, essendo SROIQ una logica **indecidibile**, possono presentarsi dei cicli infiniti in cui vengono continuamente eseguite le stesse sostituzioni senza poter proseguire oltre. Un ciclo di questo tipo può essere facilmente individuabile da un umano, ma un risolutore automatico fatica a distinguere una computazione molto onerosa (ma che giungerá a termine) da un ciclo infinito.

|                         | Nome                     | Espr.                   | Semantica  | Equivalente in OWL   |
|-------------------------|--------------------------|-------------------------|--|--|
| Simboli di base         | Individuo                | $a$                     | $a^I \in \Delta^I$                                       |  |
|                         | Concetto                 | $C$                     | $C^I \subseteq \Delta^I$                                 | Classe   |
|                         | Ruolo                    | $R$                     | $R^I \subseteq \Delta^I \times \Delta^I$                 | Proprietá  |
| Assiomi della Abox      | Asserzione di concetto   | $C(a)$                  | $a^I \in C^I$  | <code>:a :rdfType :C</code>  |
|                         | Asserzione di ruolo      | $R(a,b)$                | $(a^I, b^I) \in R^I$                                     | <code>:a :R :b</code>  |
| Assiomi della Tbox      | Inclusione di concetto   | $C \sqsubset D$         | $C^I \subseteq D^I$                                      | <code>:C :rdfsSubclassOf :D</code>   |
|                         | Equivalenza di concetto  | $C = D$                 | $C^I = D^I$  | <code>:C owl:EquivalentClass :D</code>   |
| Costruttori di ruolo    | Inversione di ruolo      | $R^-$                   | $(R^-)^I = \{(y, x) \mid (x, y) \in R^I\}$               |  |
| Costruttori di concetto | Top                      | $\top$                  | $\Delta^I$   | <code>owl:Thing</code>   |
|                         | Bottom                   | $\perp$                 | $\emptyset$  | <code>owl:Nothing</code>   |
|                         | Negazione                | $\neg C$                | $\Delta^I - C^I$   | <code>[ rdf:type owl:Class ; owl:complementOf :C ]</code>  |
|                         | Intersezione             | $C \sqcap D$            | $C^I \cap D^I$   | <code>[ rdf:type owl:Class ; owl:intersectionOf ( :C :D ) ]</code>   |
|                         | Unione                   | $C \sqcup D$            | $C^I \cup D^I$   | <code>[ rdf:type owl:Class ; owl:unionOf ( :C :D ) ]</code>  |
|                         | Nominale                 | $\{a\}$                 | $\{a^I\}$  | <code>[ a owl:Class ; owl:oneOf ( :a ) ]</code>  |
|                         | Restrizione esistenziale | $\exists R.C$           | $\{x \in \Delta^I \mid R^I(x) \cap C^I \neq \emptyset\}$ | <code>[ rdf:type owl:Restriction ; owl:onProperty :R ; owl:someValuesFrom :C ]</code>  |
|                         | Restrizione universale   | $\forall R.C$           | $\{x \in \Delta^I \mid R^I(x) \subseteq C^I\}$           | <code>[ rdf:type owl:Restriction ; owl:onProperty :R ; owl:allValuesFrom :C ]</code>   |
|                         | Restrizione 'al piú'     | $\leq n R.C$            | $\{x \in \Delta^I \mid  R^I(x) \cap C^I  \leq n\}$       | <code>[ rdf:type owl:Restriction ; owl:minQualifiedCardinality "n"^^xsd:nonNegativeInteger ; owl:onProperty :R ; owl:onClass :C ]</code> |
|                         | Restrizione 'almeno'     | $\geq n R.C$            | $\{x \in \Delta^I \mid  R^I(x) \cap C^I  \geq n\}$       | <code>[ rdf:type owl:Restriction ; owl:maxQualifiedCardinality "n"^^xsd:nonNegativeInteger ; owl:onProperty :R ; owl:onClass :C ]</code> |
|                         | Restrizione esatta       | $= n R.C$               | $\{x \in \Delta^I \mid  R^I(x) \cap C^I  = n\}$          | <code>[ rdf:type owl:Restriction ; owl:qualifiedCardinality "n"^^xsd:nonNegativeInteger ; owl:onProperty :R ; owl:onClass :C ]</code>    |
|                         | Riflessività locale      | $\exists R.\text{Self}$ | $\{x \in \Delta^I \mid (x, x) \in R^I\}$                 | <code>[ rdf:type owl:Restriction ; owl:onProperty :R ; owl:hasSelf "true"^^xsd:boolean ]</code>  |

A-box

T-box

GenitoreEquinoMaschio(Zia, Marty)  
GenitoreEquinoMaschio(Zach, Marty)  
GenitoreEquinoFemmina(Zia, Lea)  
GenitoreEquinoFemmina(Zach, Lea)  
Zebroide(Zach)

GenitoreEquinoMaschio  $\sqsubseteq$  Genitore  
GenitoreEquinoFemmina  $\sqsubseteq$  Genitore  
CavalloMaschio  $\sqsubseteq$  EquinoMaschio  
CavalloFemmina  $\sqsubseteq$  EquinoFemmina  
Equino  $\equiv$  EquinoMaschio  $\sqcup$  EquinoFemmina  
EquinoMaschio  $\sqcap$  EquinoFemmina  $\sqsubseteq \perp$   
 $\top \sqsubseteq \forall \text{GenitoreEquinoMaschio}^-. \text{Equino}$   
 $\top \sqsubseteq \forall \text{GenitoreEquinoFemmina}^-. \text{Equino}$   
 $\top \sqsubseteq \forall \text{GenitoreEquinoMaschio}. \text{CavalloMaschio}$   
 $\top \sqsubseteq \forall \text{GenitoreEquinoFemmina}. \text{CavalloFemmina}$   
Equino  $\sqsubseteq$  =2Genitore  
NonZebraEquino  $\equiv$  Equino  $\sqcap$  ¬Zebra  
Zebroide  $\equiv \exists \text{Genitore}. \text{Zebra} \sqcap \exists \text{Genitore}. \text{NonZebraEquino}$

Si noti come OWL e le Description Logic adottino la politica **Open World Semantic**, ovvero tutto ciò che non é esplicitamente contenuto nella Knowledge Base e non é deducibile dagli assiomi (ovvero, tutto ciò su cui non si ha informazione) viene assunto come vero.