



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA
Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione

Corso di Laurea in Ingegneria Informatica

Relazione per la prova finale

Modelli traslazionali e rotazionali per la link prediction

Relatore: Prof.Stefano Marchesin

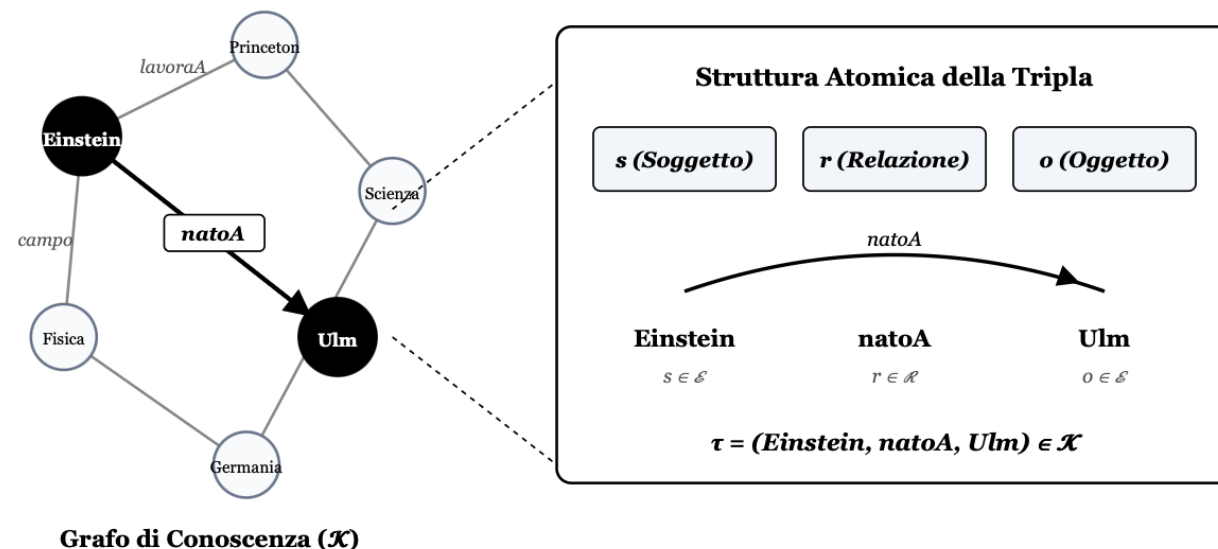
Laureando: Emanuele Conton
Matricola n.: 2101778

ANNO ACCADEMICO 2025/2026



Introduzione ai Knowledge Graph nel mondo reale

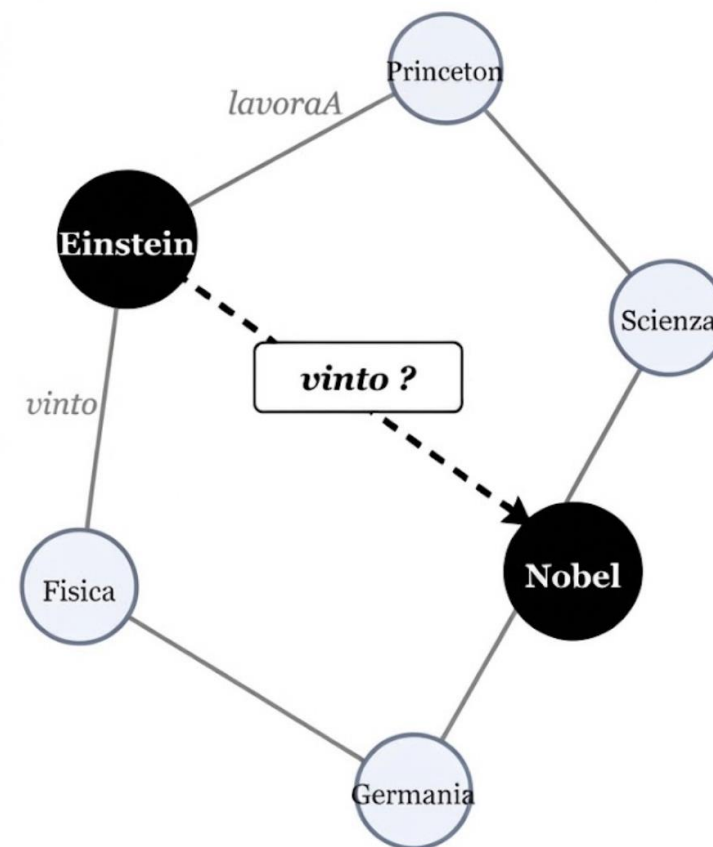
- Contesto: I Knowledge Graph organizzano enormi moli di dati interconnessi.
- Il problema: I KG sono intrinsecamente incompleti.
- Il limite operativo: L'inserimento manuale o basato su regole rigide è lento, costoso e non scalabile.





Dal grafo incompleto alla Link Prediction

- Obiettivo: Prevedere le connessioni mancanti
- Open World Assumption (OWA)
- Utilità pratica: Arricchimento scalabile di basi di conoscenza per sistemi intelligenti



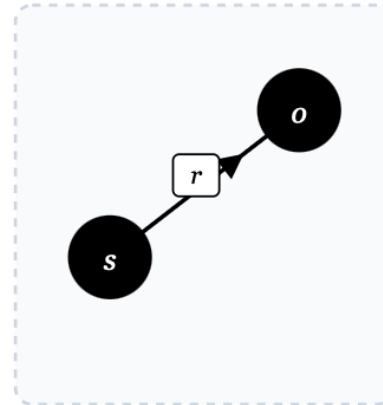
Grafo Incompleto ($\mathcal{K}$)



Knowledge Graph Embeddings

- Proiezione di entità e relazioni dal dominio discreto a uno spazio continuo a bassa dimensione
- Scoring function
- Modelli traslazionali e rotazionali

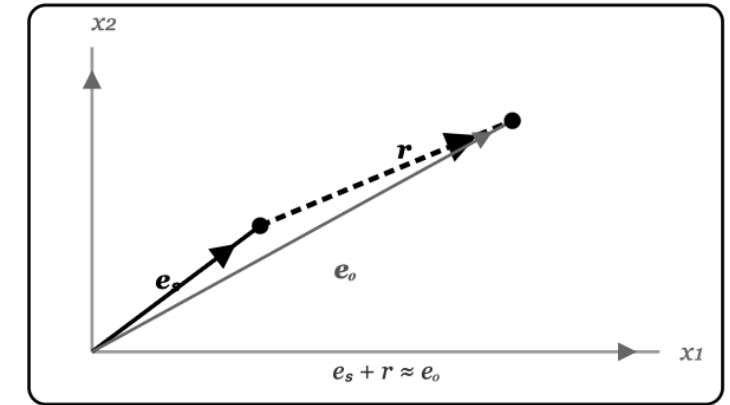
Dominio Discreto (Grafo)



Graph Embedding

$$f: E, R \rightarrow \mathbb{R}^d$$

Spazio Latente Continuo ($\mathbb{R}^d$)





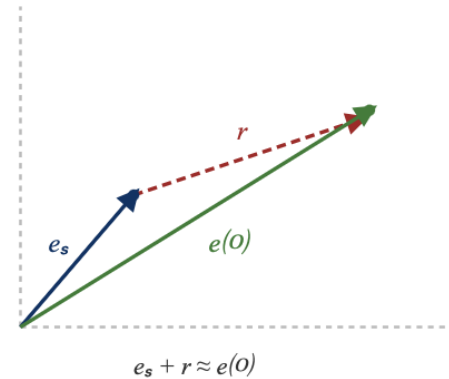
Modelli traslazionali – TransE

- Principio geometrico: $e_s + r \approx e_o$
- Scoring function: $f(s, r, o) = -||e_s + r - e_o||_p$
- Vincolo sferico sulle entità $||e||_2 \leq 1$

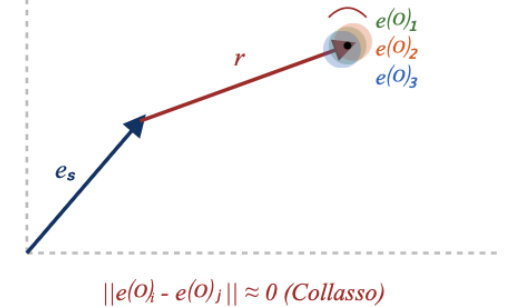
Principali criticità:

- Relazioni simmetriche
- Relazioni complesse (1-N, N-1, N-N)

Traslazione Vettoriale nello Spazio $\mathbb{R}^2$



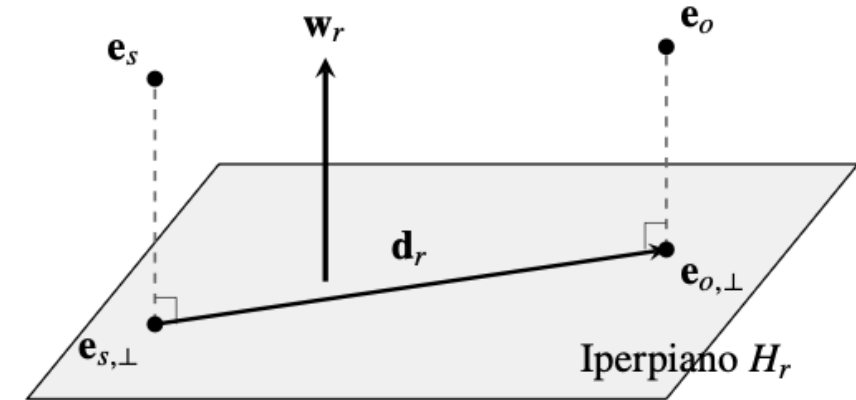
Collasso Topologico nelle Relazioni 1-N





Modelli traslazionali – TransH

- Proiezione delle entità su un iperpiano specifico della relazione
- Scoring Function: $f(s,r,o) = - ||e_{s,\perp} + d_r - e_{o,\perp}||_p$
- Gestisce relazioni simmetriche e complesse
- Problemi nelle catene multi-hop

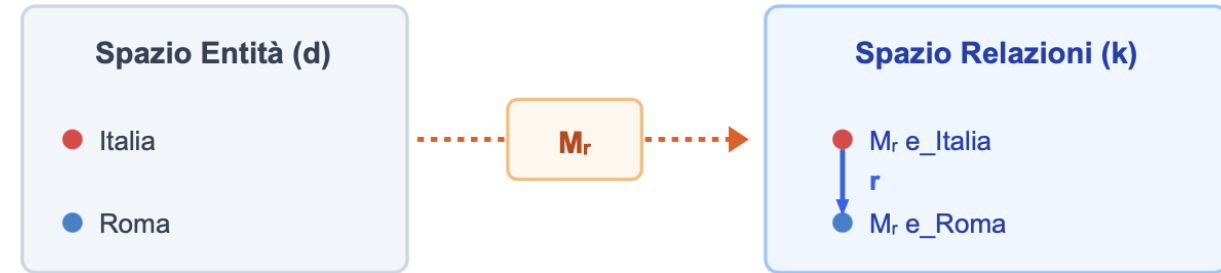




Modelli traslazionali –TransR e CTransR

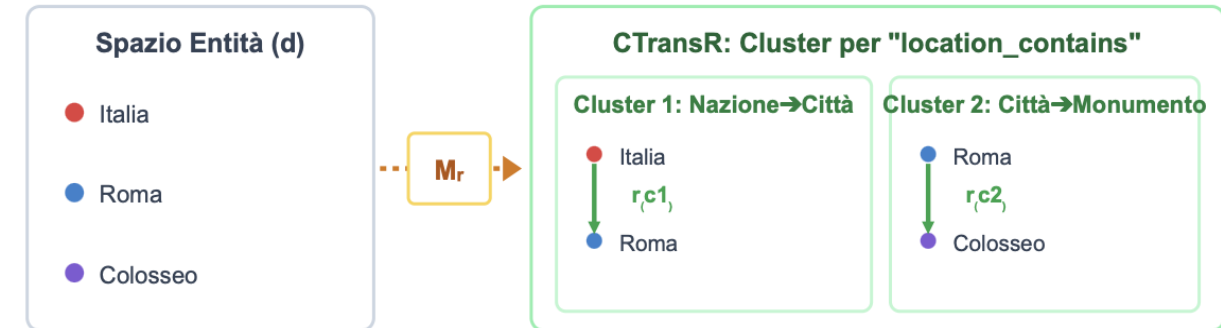
TransR:

- Matrice di Proiezione: Matrice $M_r \in \mathbb{R}^{k \times d}$
- Scoring Function: $f(s, r, o) = - \|M_r e_s + r - M_r e_o\|_p$



CTransR:

- Evoluzione: Estende TransR raggruppando le coppie di entità in cluster distinti.





Sintesi comparativa: complessità e trade-off

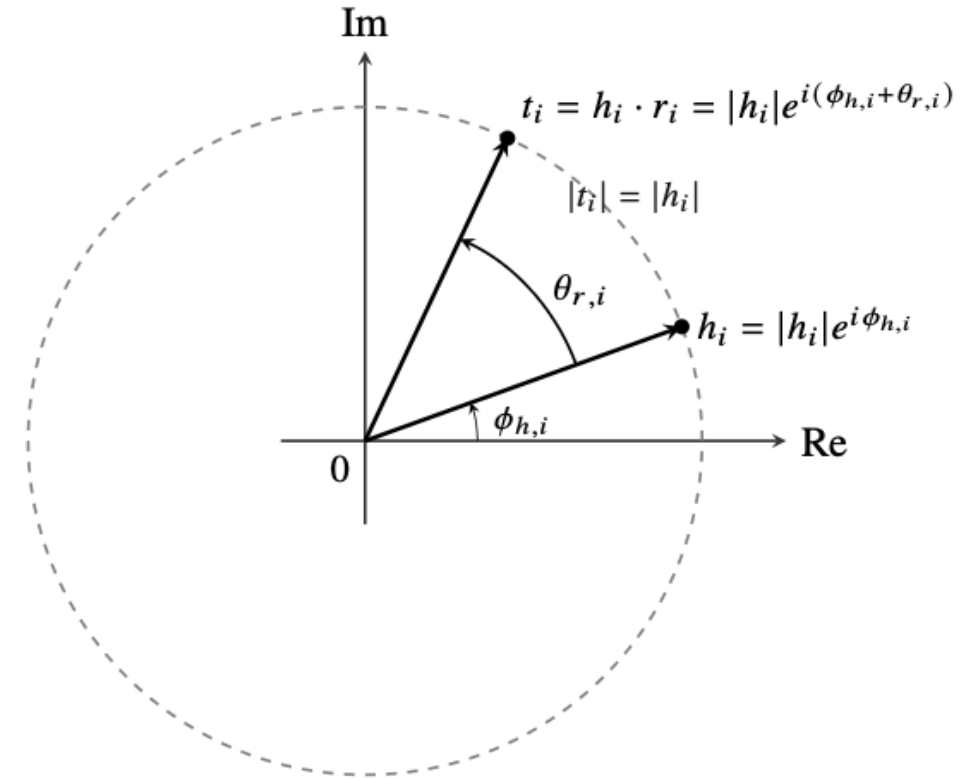
- TransE : Massima velocità, ottimi per relazioni semplici, ma incapaci di gestire complessità strutturali.
- Modelli avanzati (TransH, TransR, CTransR): Crescita dell'espressività e capacità di catturare cluster semantici multipli, a discapito di una maggiore complessità spaziale e del rischio di *overfitting*.



Modelli rotazionali – RotatE

- Relazioni modellate come operazioni di rotazione nello spazio complesso
- Operatore di Rotazione: prodotto di Hadamard ($t = h \circ r$)
- Scoring Function: $f(h, r, t) = -\|h \circ r - t\|_p$

Efficienza Parametrica: complessità spaziale lineare

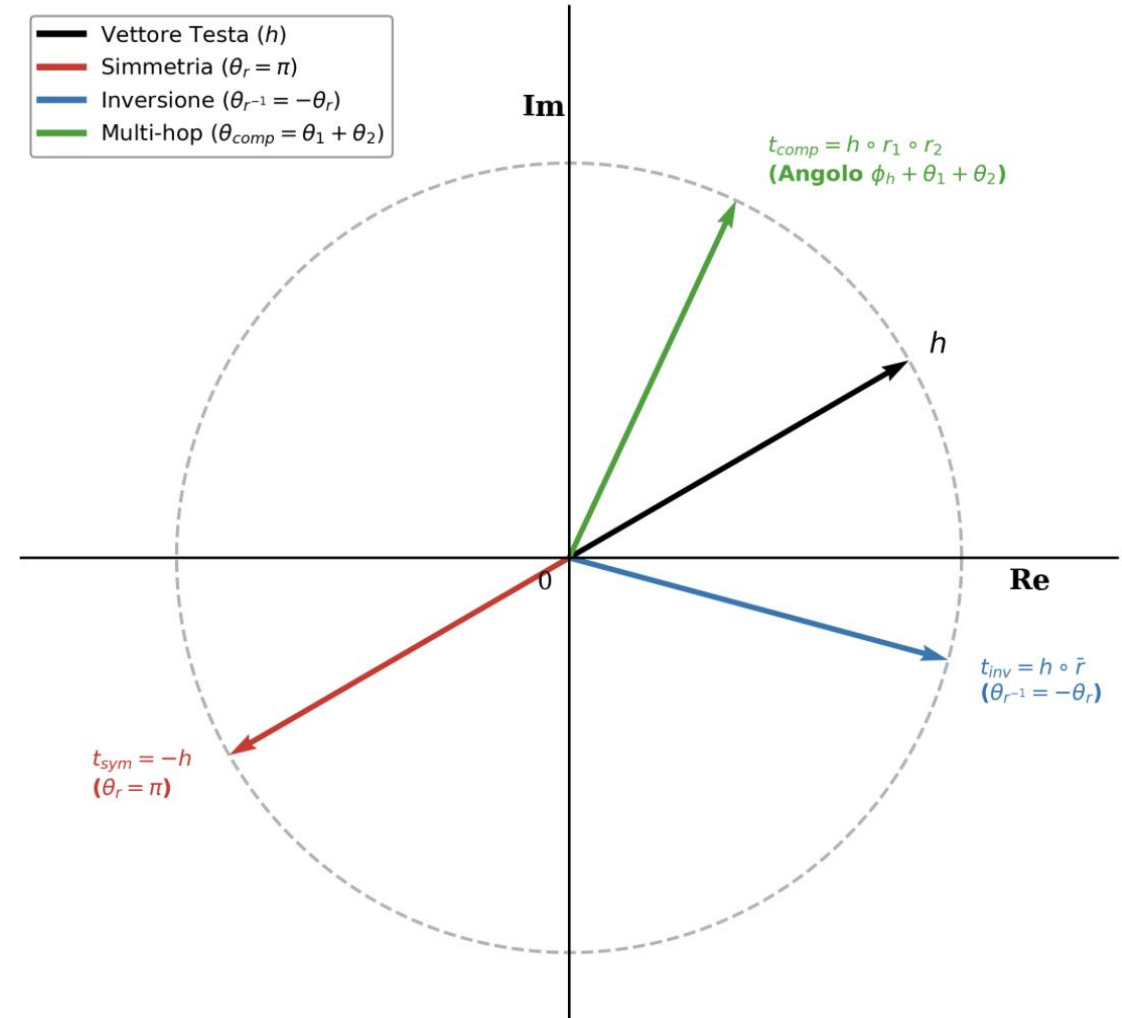




RotatE – Pattern Relazionali

- Relazioni Simmetriche: fase angolare a π ($r=-1$).
- Relazioni di Inversione: fase angolare opposta ($\theta_r = -\theta$).
- Composizione Multi-hop: si traduce nella somma algebrica diretta delle componenti angolari.

Interpretazione Geometrica dei Pattern in RotatE





Superamento dei limiti dei modelli proiettivi

Limite dei Modelli Proiettivi

Le proiezioni alterano lo stato dell'entità intermedia, spezzando la continuità geometrica lungo cammini relazionali multi-hop.

Soluzione RotatE

Rotazioni isometriche, garantendo continuità e consentendo la composizione esatta delle fasi angolari.



Conclusioni e prospettive future

Sintesi

- Obiettivo dello studio: Analisi dei modelli di Knowledge Graph Embedding sviluppati per risolvere l'incompletezza tramite *link prediction*
- Evoluzione e superamento dei limiti: dai modelli proiettivi a quelli rotazionali complessi

Prospettive e sviluppi futuri

- Spazi non euclidei per rappresentare meglio strutture gerarchiche
- Knowledge Graph temporali
- Integrazione multimodale e modelli ibridi