

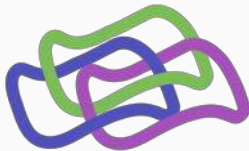
Analogie in fisica: un equilibrio tra intuizioni, sfide e apprendimento

Annapaola Ginammi
Domenico Brunetto
Giovanni Valente



POLITECNICO
MILANO 1863

DIPARTIMENTO
DI MATEMATICA

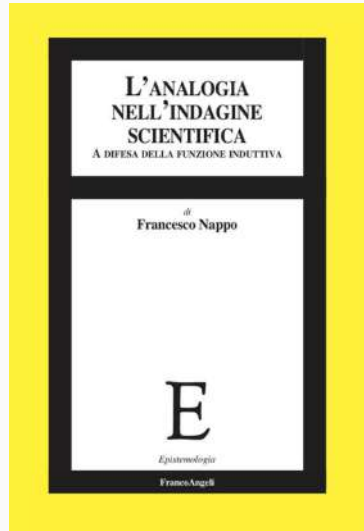


Laboratorio FDS

Analogical Reasoning in Contemporary Physical Theories

Finanziato nell'ambito del PRIN 2022, questo progetto mira a determinare le condizioni sotto le quali è possibile trarre inferenze analogiche plausibili nella fisica contemporanea.

Periodo di finanziamento:
dicembre 2023 – dicembre 2025
Responsabile scientifico nazionale:
Giovanni Valente.



Obiettivo dell'incontro

Vi offriamo una panoramica sull'uso delle analogie nell'insegnamento della fisica:

Parte 1: Introduzione alle analogie;

Parte 2: Usare le analogie nell'insegnamento;

Parte 3: Proposta pratica sui circuiti elettrici.

Arriviamo a una lezione in 8 passi per insegnare i concetti di base dei circuiti elettrici, in particolare il voltaggio (la tensione, la differenza di potenziale elettrico).

Una proposta per voi

Basandovi sul materiale presentato oggi, preparate una lezione introduttiva sui circuiti elettrici usando l'analogia gravitazionale.

Fateci sapere:

- Come avete usato il materiale?
- Avete apportato modifiche rispetto alla lezione proposta?
- Quali difficoltà avete incontrato?
- Avete fatto dei test di verifica? Come sono andati?
- Avete notato differenze rispetto agli anni precedenti?
- Come ci consigliate di modificare il materiale?

Inviateci le vostre risposte via email a: lab-fds@polimi.it.

Introduzione alle analogie

- Cosa sono e a cosa servono?
- Il problema dell'invalidità logica.
- Teorie note sull'analogia.

- Un'**analogia** è un confronto tra due oggetti o sistemi di oggetti che mette in evidenza gli aspetti in cui si ritiene che siano simili;
- Il **ragionamento analogico** è qualsiasi tipo di pensiero che si basa su un'analogia;
- Un **argomento analogico** è una rappresentazione esplicita del ragionamento analogico, che cita somiglianze accettate tra due sistemi a sostegno della conclusione che esista un'ulteriore somiglianza.

Il pensare analogico ...

è percepire intuitivamente il simile nel dissimile (Aristotele)

è vedere due cose in una (W. Wundt, 1880)

è presentare qualcosa sotto il segno di qualcos'altro che già conosciamo (Fontanier, 1821)

è proiettare mentalmente l'essenza di una situazione su un'altra (M. Mitchell, 2021)

è il nucleo della cognizione (D. Hofstadter, 2001)

Chi ragiona per analogia **attinge alle conoscenze pregresse** in un dominio familiare **per comprendere meglio** un dominio sconosciuto.

Il fatto principale del genio di ognuno ordine

William James:

... alcune persone sono molto più sensibili alle somiglianze, e molto di più pronti a sottolineare in cosa consistono, rispetto ad altri. Sono i gli ingegni, i poeti, gli inventori, gli scienziati, i geni pratici. Un talento innato nel percepire le analogie è riconosciuto [...] come il fatto principale del genio di ognuno ordine.

The Principles of Psychology (1890)

Leonardo: vortici, trecce, riccioli



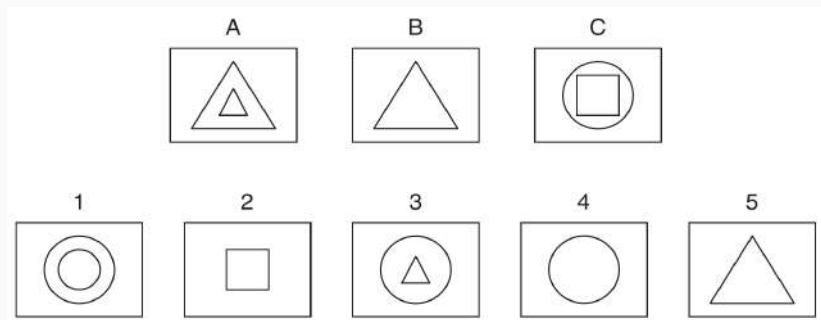
Leonardo coglie delle "invarianti" di queste strutture e del loro movimento; i suoi gesti grafici producono ciò che tra di esse vi è in comune. Dirà che i suoi soggetti, che si tratti di turbolenze dell'acqua o dell'aria, dei capelli di una donna, dei movimenti di una pianta [...] sono analoghi, poiché, per disegnarli, ha dovuto compiere gli stessi gesti.

Giuseppe e Sara Longo, *Reinventare il corpo e lo spazio* (2021)

Test di intelligenza

Per questo motivo, il ragionamento per analogia è una parte centrale dei test di intelligenza sia per i bambini che per gli adulti.

Un esempio famoso sono le Matrici Progressive di Raven, un test di intelligenza non verbale:



Analogie nell'uso quotidiano della lingua



- Il ponte;
- Il fluire/ scorrere del tempo;
- Il leone è il re degli animali;
- Il capo dello stato;
- “Oggi code sull’autostrada!”
- “Mi è successa la stessa cosa!”

Dal conosciuto al sconosciuto



Tutto l'apprendimento avviene attraverso l'**estensione** delle capacità nella zona di sviluppo prossimale.

“Un gatto è come un cane . . .”

“Usare la forchetta è come usare il cucchiaio . . .”

L'analogia nella scienza

Quando Galileo Galilei osservò la Luna nel 1609, vide delle forme nere in movimento sulla sua superficie. Per **analogia con le ombre sulla Terra**, congetturò che dovessero esserci montagne sulla Luna.



Fisica: Priestley sulla forza elettrostatica (1769)

Priestley suggerì che l'assenza di influenza elettrica in una sfera carica cava dimostrasse che le cariche si attraggono e respingono con una forza inversamente proporzionale al quadrato della distanza.

Priestley supportò la sua ipotesi facendo riferimento alla situazione analoga di zero forza gravitazionale all'interno di una sfera cava a densità uniforme.

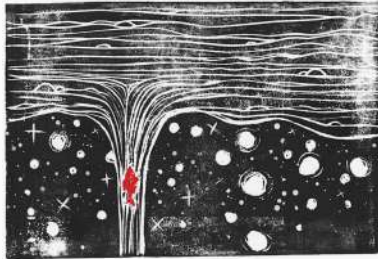
Secondo Priestley (1769/1966, 14),

“l'analogia è la nostra migliore guida in tutte le indagini filosofiche; e tutte le scoperte, che non sono state fatte per pura casualità, sono state fatte grazie ad essa.”

Astrofisica: Buchi neri e buchi stupidi (Unruh 1972)

I buchi neri sono stati portati in primo piano nella fisica grazie a un'analogia con un cosiddetto "buco stupido":

Un pesce urla mentre cade su una cascata; a un certo punto cade più velocemente della velocità del suono, così i suoi amici nel fiume sopra non riescono più a sentirlo.



Source: Olena Shmahalo/Quanta Magazine

Astrofisica: Buchi neri e buchi stupidi (Unruh 1972)

Questo è **simile** a ciò che accade nei buchi neri: al loro orizzonte degli eventi, la curvatura dello spazio-tempo impedisce a qualsiasi segnale, compresa la luce, di sfuggire.

Nel 1981, Unruh mostrò che le **equazioni** degli orizzonti degli eventi nei buchi neri e degli orizzonti sonici nei “buchi stupid” sono **identiche**.

Secondo Unruh, queste sorprendenti somiglianze matematiche fanno sì che

“si ha la sensazione che, se si comprende davvero un sistema, questo darà intuizioni sull’altro.”

Rettangoli e parallelepipedi: Supponiamo di aver stabilito che, tra tutti i rettangoli con perimetro fissato, il quadrato ha l'area massima.

Per **analogia**, si può **congetturare** che, tra tutti i parallelepipedi con area superficiale fissata, il cubo abbia il volume massimo.



Forma semplice di un argomento analogico

S è simile a T sotto certi aspetti (noti).

S possiede una certa caratteristica Q.

Pertanto, T possiede anche una caratteristica Q* simile a Q.

S e T sono rispettivamente indicati come **dominio di origine** (*source*; anche “dominio sorgente” o “fonte”) e **dominio di destinazione** (*target*; anche “bersaglio”).

Un dominio è un insieme di cose, con le loro proprietà, relazioni e funzioni, e di affermazioni considerate valide su di esse.

Un'ipotesi da verificare

In un argomento analogico, la conclusione non segue formalmente dalle premesse.

Va invece considerata un'**ipotesi da verificare**.

Dunque, più appropriato:

S è simile a T sotto certi aspetti (noti).

S possiede una certa caratteristica Q.

Pertanto, T *potrebbe* possedere anche una caratteristica Q* simile a Q.

Un'esempio famoso

Un esempio famoso è l'argomento di Thomas Reid (1785) a favore della vita su altri pianeti:

Terra		Marte
orbita attorno al Sole	⇔	orbita attorno al Sole
ha una luna	⇔	ha lune
ruota sul proprio asse	⇔	ruota sul proprio asse
soggetto alla gravità	⇔	soggetto alla gravità
sostiene la vita	⇒	<i>potrebbe</i> sostenere la vita

Il problema dell'invalidità logica

Il problema dell'invalidità logica è: dato che non esistono regole di inferenza per le analogie, **come distinguere le buone analogie** dalle cattive?

Possiamo porre questa domanda in molti contesti diversi, ad esempio:

- nella scoperta scientifica;
- nella giustificazione delle teorie scientifiche;
- nell'insegnamento della scienza.

L'analogia nell'insegnamento

L'uso delle analogie nell'insegnamento è ampiamente studiato nella **scienza cognitiva**.

Concezione predominante (Gentner): *Structure-mapping theory* (**Teoria della Mappatura Strutturale**).



Derdre Gentner



Una nozione chiave per l'analogia è la **somiglianza**.

Un giudizio di somiglianza è un giudizio secondo cui due cose sono uguali sotto un certo aspetto. Viene comunemente espresso **applicando lo stesso predicato** a entrambe le cose.

La somiglianza è **difficile da definire con precisione**, poiché è legata all'enumerazione delle proprietà degli oggetti confrontati.

Tra ogni paio di cose, c'è un'infinità di somiglianze!

Due tipi di somiglianze

Secondo la teoria della mappatura strutturale, le buone analogie si distinguono dalle cattive in base alle somiglianze tra il sistema sorgente e il bersaglio.

Ci sono due tipi di aspetti che possono essere simili tra sorgente e bersaglio:

- a. **Somiglianze di mera apparenza**: proprietà semplici o caratteristiche superficiali, come l'aspetto geometrico o il colore;
- b. **Somiglianze strutturali**: caratteristiche profonde o proprietà strutturali.

In realtà, questi due tipi di somiglianza costituiscono uno spettro e sono relativi al contesto.

Somiglianze di mera apparenza



Somiglianze strutturali



Un spettro



Structure Mapping Theory (Gentner)

Secondo la teoria della mappatura strutturale di Gentner, una buona analogia si basa su **somiglianze strutturali** tra i domini, cioè sulla corrispondenza tra relazioni della sorgente e del bersaglio, in particolare quelle che svolgono ruoli simili all'interno del sistema.

Principio della sistematicità: le analogie più forti emergono quando le relazioni corrispondenti sono **relazioni di ordine superiore**, collegate in strutture coerenti.

Principio della connettività parallela: se due relazioni vengono messe in corrispondenza, anche gli oggetti coinvolti devono essere mappati tra loro.

Esempio di somiglianze strutturali

“Una batteria elettrica è come un serbatoio” è una buona analogia secondo Gentner, perché:

- Non vi è alcuna somiglianza tra gli attributi superficiali degli oggetti (ad esempio, forma, dimensione, colore);
- Invece, l’analogia si fonda su una somiglianza strutturale;
- Le relazioni in corrispondenza sono di ordine superiore: immagazzinare energia.

I due principi

Principio della sistematicità: le relazioni nelle proposizioni “una batteria **immagazzina** energia” e “un serbatoio **immagazzina** energia” sono uniti da un argomento in comune (**energia**) è dunque la corrispondenza è tra relazioni di secondo ordine (**immagazzina energia**).

Principio della connettività parallela:

immagazzina	↔	immagazzina
energia	↔	energia
<hr/>		
batteria	↔	serbatoio

Inferenze analogiche

La corrispondenza strutturale consente le **inferenze analogiche**: una volta allineati i sistemi nei due domini, le affermazioni collegate al dominio di origine possono essere proiettate nel dominio di destinazione.

Ad esempio:

Serbatoio:

immagazzina energia

↔

Batteria elettrica:

immagazzina energia

Può essere utilizzato per
compiere lavoro

⇒

Può essere utilizzata per
compiere lavoro

Queste inferenze candidate sono **solo ipotesi**: la loro correttezza fattuale deve essere verificata separatamente!

Nelle buone analogie, le relazioni chiave coinvolgono **cause ed effetti**.

In particolare, un'inferenza analogica è **più probabile** quando l'affermazione inferita è connessa, attraverso cause ed effetti, alle somiglianze già note tra i due sistemi.

S è simile a T sotto **certi aspetti (noti)**.

S possiede **una certa caratteristica Q**.

Pertanto, T *potrebbe* possedere anche **una caratteristica Q*** simile a Q.

Cause ed effetti

Nell'argomento Reid, l'affermazione inferita è connessa, attraverso cause ed effetti, alle somiglianze già note?

Terra		Marte
orbita attorno al Sole	⇔	orbita attorno al Sole
ha una luna	⇔	ha lune
ruota sul proprio asse	⇔	ruota sul proprio asse
soggetto alla gravità	⇔	soggetto alla gravità
sostiene la vita	⇒	<i>potrebbe</i> sostenere la vita

Gli scienziati usano ancora il ragionamento analogico per sostenere la congettura che, anche se Marte è ora privo di vita, potrebbe averla ospitata in passato.

Apprendimento da un'analogia didattica

Nelle buone analogie, le relazioni chiave sono di causa-effetto.

Per apprendere da un'analogia didattica, servono due passaggi:

- Capire **perché** la fonte si comporta in un certo modo;
- **Trasferire** questa conoscenza al bersaglio.

Questa valorizzazione delle relazioni sugli oggetti rende l'analogia uno **strumento cognitivo utile**.

Si può argomentare che l'obiettivo finale dell'educazione sia **favorire lo sviluppo di schemi relazionali** che possano essere applicati in vari contesti.

Ad esempio, se uno studente impara a analizzare un argomento in filosofia ma non riesce ad applicare questa conoscenza alla politica, l'educazione non ha avuto successo.

Le analogie forniscono un mezzo per **acquisire schemi relazionali**.

Usare le analogie nell'insegnamento

1. In quali casi è utile utilizzare le analogie nell'insegnamento?
2. Il problema delle analogie inappropriate: come guidare l'attenzione?
3. Il problema del carico cognitivo: come presentare le analogie?
4. Il problema delle disanalogie: come usarle per miglior comprensione?

In che modo l'analogia può essere d'aiuto nell'insegnamento?

- Chi ragiona per analogia attinge alle conoscenze pregresse in un dominio familiare per comprendere meglio un dominio sconosciuto;
- Le analogie aiutano gli studenti a costruire un modello mentale del dominio sconosciuto;
- Ridurre il carico cognitivo: collegare il dominio sconosciuto a esperienze familiari rende i concetti astratti più accessibili e più facili da ricordare;
- Aumentare il coinvolgimento: analoghe familiari o interattive rendono l'apprendimento più intuitivo e stimolante.

In quali casi è utile utilizzare le analogie nell'insegnamento?

L'insegnamento per analogia è utile quando:

- esiste uno squilibrio di conoscenze tra il dominio di origine e il dominio di destinazione;
- gli studenti hanno un alto livello di conoscenze pregresse sul dominio di origine;
- esiste una corrispondenza strutturale tra i due domini.

Utilizzare l'analogia nell'insegnamento può anche essere svantaggioso quando:

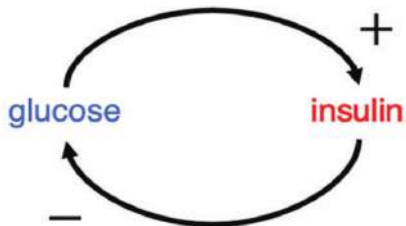
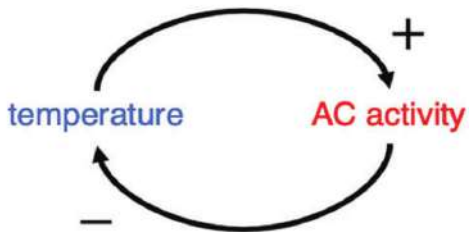
- Il dominio di origine non è familiare abbastanza;
- Gli studenti si concentrano sulle corrispondenze sbagliate;
- L'analogia è presentato nel modo di aumentare il carico cognitivo;
- Gli studenti no si rendono conto dei limiti dell'analogia.

Dal conosciuto al sconosciuto: bisogna conoscere bene la fonte!

Domini sorgente efficaci sono:

- Già familiari agli studenti;
- Visibili;
- Preferibilmente un **oggetto di esperienza fisica diretta**: qualcosa che deriva dalle nostre attività quotidiane e può essere compreso in modo diretto;
- Queste proprietà sono associate a rappresentazioni neurali più ricche e distribuite.

Esempio: Cicli di feedback negativo



Esempio: Cicli di feedback negativo



Esempio: Le onde sonore come onde d'acqua



- È importante tenere presente che **non tutti gli studenti potrebbero avere le conoscenze pregresse necessarie** per comprendere appieno un'analogia presentata in classe;
- Se possibile, è vantaggioso valutare le conoscenze della fonte tramite test preliminari, che a loro volta possono contribuire a migliorare i risultati dell'apprendimento;
- L'insegnamento per analogia dovrebbe partire da una spiegazione chiara e completa della fonte, concentrandosi sugli elementi rilevanti per l'analogia.

2. Il problema delle analogie inappropriate: come guidare l'attenzione?

In generale, le analogie fornite nelle situazioni didattiche hanno un significato chiaro e fisso **dalla prospettiva di chi le propone**.

Questi significati spesso non sono condivisi dagli studenti.

Perciò, nell' insegnamento per analogia, è necessario **considerare due prospettive diversi**:

- quella di chi fornisce le analogie (insegnanti, autori di libri di testo),
- e quella degli studenti.

Il quadro interpretativo

“Vedere” un’analogia tra due oggetti richiede di selezionare le proprietà su cui focalizzare l’attenzione.

L’attenzione a specifiche somiglianze piuttosto che altre dipende dal **quadro interpretativo**, influenzato dall’esperienza, dalle conoscenze teoriche e dal contesto locale.

I modelli scientifici si basano su proprietà causali, esplicative, logiche e statistiche, che costituiscono il fondamento delle analogie scientifiche.

Queste **conoscenze implicite**, condivise all’interno della comunità scientifica, evidenziano somiglianze specifiche tra la fonte e il bersaglio.

Gli studenti non avranno lo stesso quadro interpretativo degli insegnanti o degli autori dei libri di testo.

La scienza cognitiva ha mostrato che **gli studenti spesso percepiscono cose diverse rispetto ai loro insegnanti**, anche quando osservano lo 'stesso' oggetto, perché:

- la loro esperienza visiva è diversa da quella dell'insegnante;
- tendono a concentrarsi su caratteristiche superficiali anziché strutturali.

Pertanto, gli studenti potrebbero non “vedere” affatto l'analogia.

Se l'insegnamento e l'apprendimento per analogia devono essere efficaci, deve esistere **intersoggettività** tra insegnanti (fornitori di analogie) e studenti.

Pertanto, insegnanti e studenti devono investigare la comprensione dell'altro per poter trovare una base per la comunicazione.

Bisogna:

- capire cosa vedono gli studenti guardano la fonte e il bersaglio;
- guidare l'attenzione degli studenti verso le somiglianze rilevanti per l'analogia.

Un modo per evitare di presupporre troppa teoria durante la spiegazione della fonte è utilizzare gli *enunciati osservativi* (Quine, 1993).

Nel senso di Quine, gli enunciati osservativi sono frasi che sono **direttamente collegati alle osservazioni empiriche** e che possono essere verificati o falsificati attraverso l'osservazione.

Questi enunciati sono **indipendenti da teorie o interpretazioni** e sono legati strettamente all'esperienza immediata.

Per esempio:

- “Il cielo è blu.”
- “L’acqua scorre.”
- “C’è un oggetto rosso sulla tavola.”
- “La luce è accesa.”

Gli enunciati osservativi vanno selezionati in funzione dell’obiettivo:

- scegliere quelli che si riferiscono alle corrispondenze rilevanti tra fonte e bersaglio;
- scegliere quelli che successivamente portano alla costruzione di enunciati teorici scientificamente corretti.

3. Il problema del carico cognitivo: come presentare le analogie?

La *Teoria del Carico Cognitivo* dallo psicologo dell'educazione John Sweller (1988), suggerisce che la nostra memoria di lavoro può contenere solo una quantità limitata di informazioni alla volta. I metodi didattici dovrebbero **evitare di sovraccaricarla** per massimizzare l'apprendimento.

L'insegnamento per analogia può **ridurre o aumentare** il carico cognitivo, a seconda di come viene presentato.



La prima considerazione è che, se la fonte e il bersaglio vengono presentati insieme, **gli studenti tendono a concentrarsi spontaneamente sul bersaglio**, poiché il loro obiettivo è comprenderlo.

Ma, come abbiamo visto, per l'apprendimento per analogia **è essenziale procedere dalla fonte**, più coerente e ben compresa, verso il bersaglio meno chiaro.

Per usare al meglio le conoscenze pregresse, è utile spiegare a fondo la fonte, evidenziandone la struttura causale, prima di introdurre il sistema bersaglio.

Un'altra considerazione è che **la presentazione consecutiva aumenta il carico cognitivo**, poiché gli studenti devono mantenere in memoria la fonte mentre elaborano il bersaglio.

Studenti con risorse cognitive limitate possono persino trarre svantaggio dalle analogie educative quando vengono presentate in modo consecutivo.

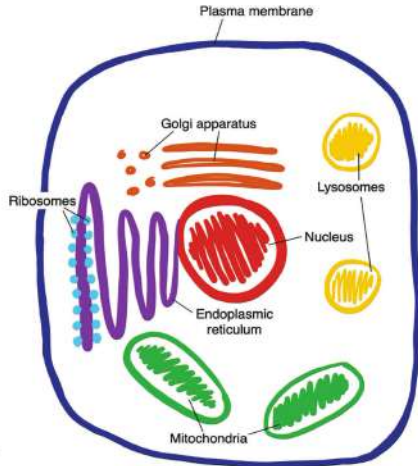
La soluzione sembra essere quella di **presentare prima la fonte** in modo completo, **quindi introdurre il bersaglio in parallelo** ad essa.

Gli indizi visivi possono svolgere un ruolo cruciale nell'evidenziare le somiglianze e nel guidare l'attenzione verso le relazioni chiave.

Alcune strategie visive efficaci sono:

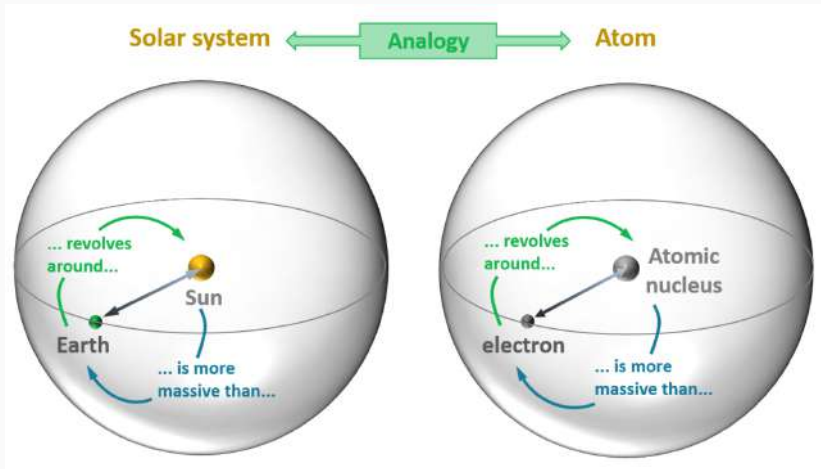
- usare **colori coerenti** per evidenziare gli elementi corrispondenti;
- **allineare spazialmente** gli elementi comparabili;
- **etichettare** le caratteristiche cruciali per enfatizzare le somiglianze strutturali;
- usare le **frecche** per indicare relazioni di causa ed effetto in entrambi i domini.

Presentazione parallela & corrispondenza visiva



Source: Gray & Holyoak (2021)

Frecce per indicare relazioni di causa ed effetto



Source: sciencebydegrees.com

Anche se presentati con i giusti indizi visivi, gli studenti potrebbero non cogliere l'analogia.

È utile:

- **spiegare verbalmente** la fonte e le sue somiglianze con il bersaglio;
- utilizzare **enunciati osservativi sugli indizi visivi** per indirizzare l'attenzione verso le caratteristiche chiave.

Enunciati osservativi che possano aiutare a indirizzare l'attenzione verso le caratteristiche chiave sono ad esempio:

- “Il colore di questa parte della fonte corrisponde a quello di questa parte del bersaglio.”
- “Queste parti della fonte e del bersaglio sono allineate.”
- “Questi elementi sono collegati da frecce.”
- ...

4. Il problema delle disanalogie: come usarle per miglior comprensione?

Infine, nella quasi totalità dei casi, l'analogia non sarà perfetta.

Alcuni aspetti della fonte potrebbero non avere elementi corrispondenti nel bersaglio e, di conseguenza, non dovrebbero essere trasferiti ad esso.

Per evitare concezioni errate, è consigliato **indicare chiaramente i limiti dell'analogia**, ossia gli aspetti irrilevanti della fonte.

È inoltre consigliabile **incoraggiare il confronto attivo** tra la fonte e il bersaglio.

Incoraggiare il confronto attivo

Si può incoraggiare il confronto attivo tramite **domande sulla corrispondenza** tra la fonte e il bersaglio, ad esempio:

- “Quali differenze noti e perché sono importanti?”
- “Quali elementi sono allineati e quali non corrispondono del tutto?”
- “Nota come questa parte della fonte non corrisponde completamente al bersaglio — cosa potrebbe implicare?”
- “Se questa parte della fonte non si applica, possiamo adattare l’analogia per renderla più accurata?”

Inoltre, si possono presentare **diverse analogie** per un dominio di destinazione e chiedere agli studenti di confrontarle. Ad esempio:

- “Il cervello è più simile a un computer o a un muscolo? Perché?”

- Domini sorgente efficaci sono: familiari, visibili, e preferibilmente un oggetto di esperienza fisica diretta;
- Nella didattica, le analogie hanno un significato fisso per chi le propone, ma questo significato non è sempre condiviso dagli studenti;
- Un modo per evitare di presupporre troppa teoria durante la spiegazione della fonte è utilizzare gli enunciati osservativi;
- È importante presentare le analogie in modo di ridurre il carico cognitivo degli studenti.

In conclusione: come usare le analogie nell'insegnamento?

Come procedere passo dopo passo?

1. Richiamo delle conoscenze pregresse;
2. Descrivere la fonte tramite enunciati osservativi selezionati;
3. Spiegare la fonte connettendo gli enunciati osservativi ai termini teorici;
4. Presentare fonte e bersaglio in parallelo;
5. Descrivere il bersaglio tramite enunciati osservativi selezionati;
6. Spiegare il bersaglio connettendo gli enunciati osservativi ai concetti tecnici;
7. Sottolineare le corrispondenze rilevanti;
8. Sfruttare le disanalogie.

Proposta pratica sui circuiti elettrici

- Un caso pratico: insegnare il circuito elettrico tramite analogia;
- I problemi con l'analogia idraulica;
- Un'alternativa: l'analogia gravitazionale.

Perché usare l'analogia per insegnare i circuiti elettrici?

- L'elettricità è (di solito) invisibile;
- I processi elettrici sono difficili da dimostrare;
- In generale, gli studenti hanno poca esperienza diretta con l'elettricità;
- In particolare, il concetto di voltaggio (tensione, differenza di potenziale elettrico) è difficile da comprendere.

In che modo l'analogia può essere d'aiuto?

- Le analogie aiutano gli studenti a usare conoscenze familiari per capire i circuiti;
- Poiché l'elettricità non si vede, le analogie aiutano a creare un modello visibile;
- Collegare i circuiti a esperienze conosciute li rende più facili da capire e ricordare;
- Le analogie basate su esperienze familiari rendono l'apprendimento più coinvolgente.

Condizioni per una buona analogia per insegnare i circuiti elettrici

- Il sistema sorgente dovrebbe essere già familiare agli studenti;
- Preferibilmente, gli studenti dovrebbero avere esperienze concrete e fisiche con il sistema sorgente;
- Per aiutare gli studenti a costruire un modello mentale, è fondamentale una corrispondenza strutturale e causale adeguata con i circuiti elettrici;
- Deve rendere comprensibile, in particolare, il concetto di voltaggio (tensione, differenza di potenziale elettrico).

Condizioni per una buona analogia per insegnare i circuiti elettrici

- Il sistema sorgente dovrebbe essere già familiare agli studenti;
- Preferibilmente, gli studenti dovrebbero avere esperienze concrete e fisiche con il sistema sorgente;
- Per aiutare gli studenti a costruire un modello mentale, è fondamentale una corrispondenza strutturale e causale adeguata con i circuiti elettrici;
- Deve rendere comprensibile, in particolare, il concetto di voltaggio (tensione, differenza di potenziale elettrico).

Confrontiamo due analogie:

1. L'analogia idraulica;
2. L'analogia gravitazionale.

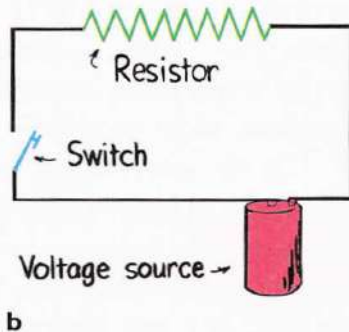
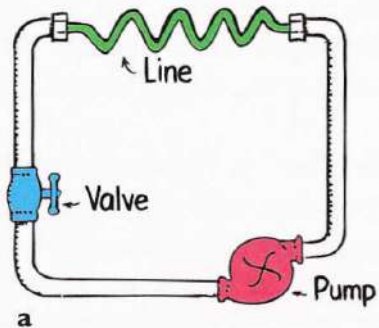
L'analogia idraulica

- Le analogie elettro-idrauliche sono la rappresentazione dei circuiti elettrici tramite circuiti idraulici.
- L'analogia più ampiamente utilizzata per i circuiti elettrici.
- Ragione storica: l'elettricità (così come il calore) era originariamente intesa come una sorta di fluido, e i nomi di alcune grandezze elettriche (come la *corrente*) derivano da equivalenti idraulici.
- Due versioni:
 - ✗ Nella versione con pressione indotta dalla gravità, grandi serbatoi d'acqua sono sollevati in alto o riempiti a livelli d'acqua differenti, e l'energia potenziale della colonna d'acqua è la fonte di pressione.
 - ✓ Nella seconda versione la gravità è assente, il sistema è completamente chiuso e la pressione viene fornita da una pompa.

L'analogia idraulica (senza gravità)

- Un sistema chiuso di tubi disposto nel piano orizzontale (in modo da poter ignorare la gravità).
- Componenti (possibili):
 - Una batteria (fonte di tensione) corrisponde a una pompa che crea una differenza di pressione.
 - Un resistore corrisponde a una sezione stretta di un tubo che limita il flusso.
 - Un interruttore corrisponde a una valvola nel tubo che può consentire o bloccare il flusso di fluido, a seconda che sia aperta o chiusa.
 - Opzionale: Un condensatore corrisponde a una membrana elastica che immagazzina temporaneamente la pressione.
 - Opzionale: Un induttore corrisponde a un pistone pesante nel tubo che resiste ai cambiamenti nel tasso di flusso, immagazzinando energia in movimento e opponendosi a variazioni improvvise nel flusso.

L'analogia idraulica



Source: Hewitt, *Conceptual Physics*

Analizziamo l'analogia idraulica

Esempi di **enunciati osservativi (selezionati)** sul sistema idraulico:

“Il sistema di tubi è completamente orizzontale.”

“Nessun fluido viene aggiunto o rimosso dal sistema.”

“L'acqua scorre nel tubo in una direzione unica.”

“Quando la valvola viene chiusa, il flusso d'acqua si interrompe.”

“Quando la pompa smette di funzionare, il flusso d'acqua si arresta.”

“Il flusso d'acqua può mettere in movimento una ruota idraulica.”

“La portata dell'acqua aumenta all'aumentare della potenza della pompa.”

“La portata dell'acqua diminuisce quando il diametro del tubo diminuisce.”

Analizziamo l'analogia idraulica

Connettere gli enunciati osservativi ai **termini teorici**:

“Nessun fluido viene aggiunto o rimosso dal sistema.” \Rightarrow “Il sistema è *chiuso*.”

“L'acqua scorre nel tubo in una direzione unica.” \Rightarrow “L'acqua fluisce dalla zona di alta *pressione* a quella di bassa *pressione*.”

“Il flusso d'acqua può mettere in movimento una ruota idraulica.” \Rightarrow “L'energia può essere estratta d'acqua per compiere *lavoro*.”

“La portata dell'acqua aumenta all'aumentare della potenza della pompa.” \Rightarrow “La corrente dipende dalle *differenza di pressione*.”

“La portata dell'acqua diminuisce quando il diametro del tubo diminuisce.” \Rightarrow “La corrente dipende dalla *resistenza*.”

Introdurre la legge di Ohm

Stabilito che il flusso è proporzionale alla forza che lo genera e inversamente proporzionale alla resistenza, possiamo **introdurre la legge di Ohm** (eventualmente in analogia con la legge di Poiseuille).

Legge di Poiseuille: $Q = \frac{\Delta P}{R}$

Legge di Ohm: $I = \frac{V}{R}$



Corrispondenze concettuali

Sistema idraulico		Sistema elettrico
Differenza di pressione	~	Voltaggio (differenza di potenziale elettrico)
Corrente (flusso d'acqua)	~	Corrente (flusso di carica)
Resistenza (diametro o lunghezza del tubo, attrito, ostruzioni, ruota idraulica)	~	Resistenza (carico resistivo, lampadina)

Corrispondenze strutturali

Sistema idraulico		Sistema elettrico
l'acqua scorre perché una pompa mantiene una differenza di pressione	~	la carica scorre perché una batteria mantiene una differenza di potenziale elettrico
la corrente dipende sia dalla differenza di pressione che dalla resistenza complessiva al flusso nei tubi	~	la corrente dipende sia dalla differenza di potenziale che dalla resistenza complessiva al flusso nel circuito
l'energia può essere estratta dal flusso di fluido per compiere lavoro	~	l'energia può essere estratta dal flusso di cariche per compiere lavoro

Altre corrispondenze strutturali

Sistema idraulico

Conservazione del fluido: la portata volumetrica deve essere costante in ogni sezione trasversale del sistema

Variazione netta di pressione uguale a zero lungo qualsiasi percorso chiuso: ogni aumento di pressione generato da una pompa deve essere seguito da una diminuzione della pressione fino al valore originale quando l'acqua rientra nella pompa

Sistema elettrico

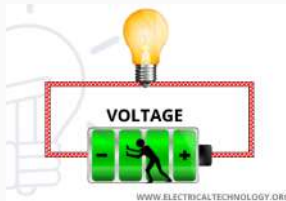
Conservazione della carica: la portata di carica deve essere costante in ogni sezione trasversale del circuito

Variazione netta di tensione uguale a zero lungo qualsiasi percorso chiuso: ogni aumento di tensione generato da una batteria deve essere seguito da una diminuzione della tensione fino al valore originale quando la corrente ritorna alla batteria

Voltaggio come “pressione elettrica”

La corrispondenza strutturale tra i sistemi idraulici e i circuiti elettrici è buona, ma l’analogia idraulica presenta i seguenti svantaggi:

- La fluidodinamica spesso non è molto familiare agli studenti;
- Gli studenti spesso non hanno esperienza fisica diretta con la pressione dell’acqua;
- Il concetto di pressione dell’acqua risulta poco intuitivo;
- La pressione dell’acqua non è visibile;
- Perciò, il concetto di voltaggio rimane oscuro.



WWW.ELECTRICALTECHNOLOGY.ORG

L'analogia gravitazionale

- L'analogia elettro-gravitazionale rappresenta il voltaggio (la tensione, la differenza di potenziale elettrico) come differenza di altezza in un campo gravitazionale;
- I nomi di alcuni concetti elettrici derivano da equivalenti gravitazionali (come *caduta* di tensione);
- L'origine nei lavori di matematici e fisici (ad esempio, Poisson, Gauss, Laplace), che dimostrarono che i campi gravitazionali ed elettrostatici condividono somiglianze matematiche, successivamente sviluppate da Faraday e Maxwell.

Componenti (possibili):

- Una collina fornisce una differenza di altezza;
- Una palla rotola giù dalla collina;
- Opzionale: la rugosità della superficie della collina o gli ostacoli che la palla incontra lungo la discesa la rallentano;
- Opzionale: una turbina viene messa in movimento dalla palla che scende, generando energia;
- Opzionale: piani intermedi dove l'energia potenziale gravitazionale è stata solo parzialmente convertita in energia cinetica.

L'analogia gravitazionale



Source: spinningnumbers.org

Enunciati osservativi (selezionati) sul sistema gravitazionale:

“La palla scende lungo la collina.”

“La cima della collina è più alta rispetto al fondo.”

“La velocità con cui la palla scende aumenta all’aumentare dell’altezza della collina.”

“Il movimento della palla può essere utilizzato per mettere in movimento una turbina.”

“La rugosità della superficie della collina rallenta la palla.”

“Gli ostacoli lungo la discesa rallentano la palla.”

Introdurre i termini teorici

Connettere gli enunciati osservativi ai **termini teorici**:

“La palla scende lungo la collina.” \Rightarrow “La palla si muove dalla zona di alta *energia potenziale gravitazionale* a quella di bassa *energia potenziale gravitazionale*.”

“La cima della collina è più alta rispetto al fondo.” \Rightarrow “La cima della collina è il punto di *energia potenziale gravitazionale* più alta rispetto al fondo.”

“La velocità con cui la palla scende aumenta all’aumentare dell’altezza della collina.” \Rightarrow “Più ripida è la collina, maggiore è la *forza* che agisce sulla palla.”

“Il movimento della palla può essere utilizzato per mettere in movimento una turbina.” \Rightarrow “L’energia può essere estratta dal movimento della palla per compiere del *lavoro*.”

“La rugosità della superficie della collina rallenta la palla.” \Rightarrow “L’accelerazione della palla dipende dalla *resistenza*.”

Corrispondenze concettuali

Sistema gravitazionale		Sistema elettrico
Differenza di altezza (differenza di potenziale gravitazionale)	~	Voltaggio (differenza di potenziale elettrico)
Movimento della massa (palla)	≈	Corrente (flusso di carica)
Resistenza (attrito, ostruzioni, turbina)	~	Resistenza (carico resistivo, lampadina)

Corrispondenze strutturali

Sistema gravitazionale		Sistema elettrico
la palla scende perché la collina fornisce una differenza di altezza	~	la carica scorre perché una batteria fornisce una differenza di potenziale elettrico
quanto velocemente la palla scende dipende sia dalla differenza di altezza che dalla resistenza complessiva lungo la discesa	≈	la corrente dipende sia dalla differenza di potenziale che dalla resistenza complessiva al flusso nel circuito
l'energia può essere estratta dal moto della palla per compiere lavoro	~	l'energia può essere estratta dal flusso di cariche per compiere lavoro

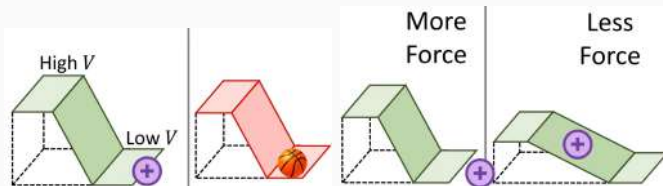
Altre corrispondenze strutturali

Sistema gravitazionale

Più ripida è la collina (cioè maggiore è la differenza di potenziale gravitazionale), maggiore è l'**accelerazione**

Sistema elettrico

Più alto è il voltaggio (cioè maggiore è la differenza di potenziale elettrico), maggiore è la **corrente**



Source: EigenChris

Le somiglianze strutturali

L'analogia gravitazionale riguarda le **forze** che causano il movimento:

- la differenza di altezza corrisponde a un campo gravitazionale che esercita una forza sulla palla;
- il voltaggio è associato a un campo elettrico che esercita una forza sulle cariche.

C'è una somiglianza formale tra le due leggi che descrivono queste forze (la legge di Newton e la legge di Coulomb):

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

$$F = k_e \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

La **somiglianza strutturale**: la differenza di potenziale (gravitazionale, elettrico), crea le condizioni per il movimento (della palla, delle cariche).

L'accelerazione della palla a causa della forza gravitazionale può essere considerata una **disanalogia** con il flusso di cariche in un sistema elettrico.

Questa disanalogia può essere utilizzata per **sottolineare il punto dell'analogia**: *non* stiamo collegando i movimenti (della palla e delle cariche), ma i punti nello spazio (in un campo gravitazionale e in un campo elettrico) in relazione alle forze che agiscono sugli oggetti (palla, cariche) in quei punti.

Ulteriori somiglianze

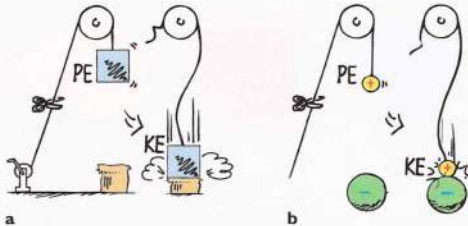
Sottolineando la somiglianza tra i punti nello spazio in un campo gravitazionale e in un campo elettrico, si rivelano altre somiglianze:

Differenza di potenziale gravitazionale		Differenza di potenziale elettrico (vtaggio)
Dipende solo dalla posizione della palla	~	Dipende solo dalla posizione delle cariche
Ignoriamo la massa	~	Ignoriamo la carica

Ciò chiarisce anche perché il vtaggio (come la differenza di potenziale gravitazionale) sia **essenzialmente una differenza** e perché sia **per unità di carica**.

Voltaggio come punti alti e bassi

L'analogia gravitazionale, dunque, presenta il voltaggio (la tensione, la differenza di potenziale elettrico) semplicemente come il modo in cui descriviamo i **punti alti e bassi** in un sistema elettrico.

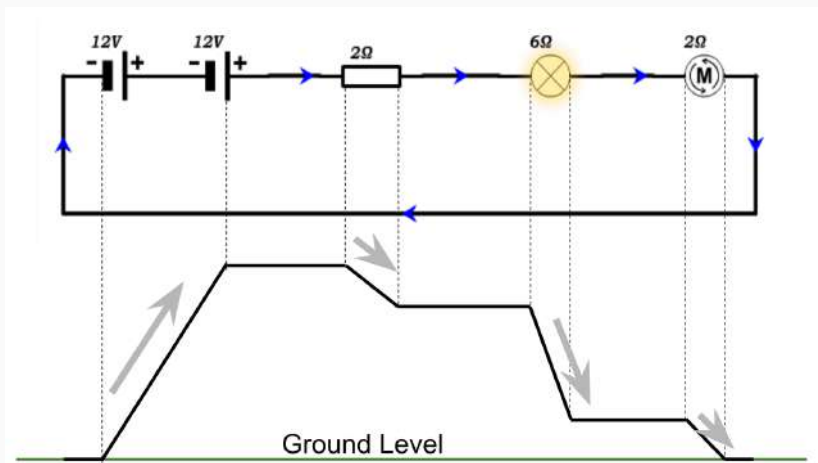


Source: Hewitt, *Conceptual physics*

L'analogia gravitazionale rende intuitiva anche la caduta di tensione:

- Ogni resistore sottrae una porzione della tensione, proprio come ogni inclinazione della collina sottrae parte dell'altezza alla palla;
- In un circuito parallelo, la caduta di tensione è la stessa in tutti i rami (perché tutti iniziano e finiscono alla stessa altezza);
- Caduta di tensione totale = somma delle cadute di tensione individuali lungo il percorso.

Caduta di tensione



Source: <http://www.alevelphysicsnotes.com/>

Vantaggi dell'analogia idraulica

- Si tratta di un sistema chiuso, proprio come un circuito elettrico;
- Può incorporare elementi più complessi (condensatore, induttore);
- Funziona sia per circuiti in corrente continua (DC) che alternata (AC), poiché l'acqua può fluire in entrambe le direzioni;
- Fornisce un modo naturale per introdurre la legge di Ohm.

Limiti dell'analogia idraulica

- La pressione dell'acqua può variare, ma non è né 'positiva' né 'negativa', a differenza delle cariche.
- Il movimento degli elettroni in un filo sotto tensione è molto più irregolare di quello dell'acqua che scorre.
- Gli elettroni possono spingere o attrarre altri elettroni a distanza tramite i loro campi, mentre le molecole d'acqua sperimentano forze solo attraverso il contatto diretto con altre molecole.
- Un tubo per l'acqua può essere vuoto, ma non esiste un filo privo di elettroni.

Vantaggi dell'analogia gravitazionale

- Si concentra direttamente sulle trasformazioni energetiche (da potenziale a cinetica, elettrica) e sull'idea del movimento guidato dalle differenze di potenziale;
- Dipinge il voltaggio come la forza motrice del flusso di cariche in modo molto intuitivo, familiare agli studenti, e visibile;
- È particolarmente intuitiva per gli studenti che stanno appena iniziando a comprendere questi concetti.

I limiti dell'analogia gravitazionale

- Non è un sistema chiuso;
- La gravità è una forza attrattiva, mentre l'elettricità può anche essere repulsiva;
- La corrente elettrica non accelera come una palla che rotola giù da una collina;
- Gli elettroni non esibiscono un movimento rotazionale come parte del loro movimento traslazionale;
- È più efficace per spiegare i circuiti in corrente continua (DC), dove c'è un chiaro flusso unidirezionale di energia; è meno utile per spiegare i circuiti in corrente alternata (AC);
- Non si estende facilmente a comportamenti elettrici più complessi come l'induttanza o la capacità.

Per la maggior parte degli studenti, la pressione dell'acqua non è oggetto di esperienza fisica diretta, il che rende l'analogia idraulica meno efficace.

L'analogia gravitazionale dipinge il voltaggio come la forza motrice del flusso di cariche in modo molto intuitivo, familiare agli studenti, e visibile.

In sintesi, entrambe le analogie sono utili, ma l'analogia gravitazionale è più adatta ai concetti di base (in particolare il voltaggio), mentre l'analogia idraulica è più versatile e utile per concetti più avanzati.

Analogie in fisica: un equilibrio tra intuizioni, sfide e apprendimento

Materiale didattico

Arsnapolo Giannini
Domenico Brunetto
Giovanni Valente

18 Marzo 2025

Indice

Introduzione: perché analogie	3
Capitolo 1: Analogie in fisica classica e meccanica quantistica	4
1.1 Analogie in meccanica classica	4
1.2 Analogie in meccanica quantistica	5
1.3 Analogie in ottica e acustica	6
1.4 Analogie in elettromagnetismo	7
1.5 Analogie in fisica relativistica e cosmologia	7
Capitolo 2: Analogie in fisica e chimica	9
2.1 Analogie in chimica e fisica atomica	9
2.2 Analogie in chimica e fisica nucleare	10
2.3 Analogie in chimica e fisica dei materiali	11
2.4 Analogie in chimica e fisica delle particelle	12
2.5 Analogie in chimica e fisica dei plasmi	12
2.6 Analogie in chimica e fisica dei sistemi complessi	13
2.7 Analogie in chimica e fisica dei sistemi biologici	13
2.8 Analogie in chimica e fisica dei sistemi geologici	14
2.9 Analogie in chimica e fisica dei sistemi ambientali	14
2.10 Analogie in chimica e fisica dei sistemi sociali	15

Una proposta per voi

Basandovi sul materiale presentato oggi, preparate una lezione introduttiva sui circuiti elettrici usando l'analogia gravitazionale.

Fateci sapere:

- Come avete usato il materiale?
- Avete apportato modifiche rispetto alla lezione proposta?
- Quali difficoltà avete incontrato?
- Avete fatto dei test di verifica? Come sono andati?
- Avete notato differenze rispetto agli anni precedenti?
- Come ci consigliate di modificare il materiale?

Inviateci le vostre risposte via email a: lab-fds@polimi.it.

Compilare il seguente form entro oggi ore 23:59.

Analogie in fisica: un equilibrio tra
intuizioni, sfide e apprendimento



Ω